平成28年度

地層処分技術調査等事業

直接処分等代替処分技術開発

報告書

平成 29 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は,経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として,国立 研究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施した平成28年度地層処分 技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」の成果を取りまとめたも のである。

目	次

目次	••••	i
1.はじめに		1-1
1.1 背景と目的		1-1
1.2本事業の全体計画		1-1
1.3 平成 28 年度の実施内容		1-10
2. 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および		
閉じ込め性能評価手法の高度	化	2-1
2.1 先進的な材料の開発	•••••	2-1
2.2 閉じ込め性能評価手法の高度化	•••••	2-56
2.2.1 人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究	•••••	2-56
2.2.2 使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究	•••••	2-127
2.2.3 多重バリアによる閉じ込め性能評価手法に関する研究	•••••	2-166
2.3まとめ	, 	2-200
3. 直接処分施設の設計検討	••••	3-1
3.1 直接処分方策に関する調査・検討	•••••	3-1
3.2 人工バリアの設計	, 	3-62
3.2.1 処分容器の設計	, 	3-62
3.2.2 処分容器の設計における臨界安全に関する検討	· • • • • •	3-92
3.2.3 緩衝材の設計	· • • • • •	3-111
3.3 地下施設の概念設計		3-154
3.4 搬送・定置設備の概念設計		3-208
3.5まとめ		3-240
4. 処分施設の設計支援システムの構築		4-1
5.その他の代替処分オプションについての調査・検討		5-1
6.おわりに		6-1
6.1 成果の総括		6-1
6.2 今後の計画		6-4

図目次

図 2.1-1	900 ℃における Ni-Ti-Nb 三元系合金の状態図の計算結果	2-3
図 2.1-2	三元系アモルファス合金に対するδパラメータとγパラメータの相関関	
	係	2-8
図 2.1-3	γパラメータ、δパラメータおよびΩパラメータと金属ガラス生成のた	
	めの臨界直径(d _e)との相関	2-9
図 2.1-4	急冷フレーム溶射に用いる急冷遷移制御溶射ガンの模式図	2-10
図 2.1-5	3 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の外観(左: 表面、右:鳥瞰)	2-11
図 2.1-6	3mm厚のNi-Cr-Nb-P-B金属ガラス溶射材の断面(微分干渉観察にて撮影)	
		2-11
図 2.1-7	3 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の DSC 曲線(比較として、0.5 mm	
	厚の溶射膜、溶射前の粉末(粒径 38 μm以下)の DSC 曲線も併せてプ	
	ロット)	2-12
図 2.1-8	すきま腐食試験片の寸法と溶射施工部(黄色部分)	2-14
図 2.1-9	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験片」の外観	2-14
図 2.1-10	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験片」断面の微分干	
	渉観察による光学顕微鏡像	2-15
図 2.1-11	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験片」表面および内	
	部のX線回折図形	2-15
図 2.1-12	連続して Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験片」の	
	中で剥離を起こした試験片の X 線回折図形	2-16
図 2.1-13	走査速度を増加させ Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食	
	試験片」および各種形状の溶射膜の DSC 曲線	2-16
図 2.1-14	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った外径約 14 mm の鋼管	2-17
図 2.1-15	Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った外径約 14 mm の鋼管の断面	2-17
図 2.1-16	1.0 mm 厚に Ni-Cr-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の顕微鏡	
	観察像	2-18
図 2.1-17	1.0 mm 厚に Ni-Cr-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の実体顕	
	微鏡像	2-18
図 2.1-18	1.0 mm 厚に Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の顕	
	微鏡像	2-18
図 2.1-19	1.0 mm 厚に Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の実	
	体顕微鏡	2-19
図 2.1-20	浸出試験概要	2-23
図 2.1-21	浸出試験後の Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の SEM 画像(表 2.1-11(b)の試料)	2-28
⊠ 2.1-22	浸出試験後の Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-11 (b)の試料).	2-28

図 2.1-23	浸出試験後のZr ₅₇ Cu _{15.4} Ni _{12.6} Al ₁₀ Nb ₅ 粉末のSEM画像(表 2.1-12 (b)の試料)	
		2-29
⊠ 2.1-24	浸出試験後の Zr ₅₇ Cu _{15.4} Ni _{12.6} Al ₁₀ Nb ₅ 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-12(b)	
	の試料)	2-29
⊠ 2.1-25	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の SEM 画像(表 2.1-16 (b))の試料)	2-38
⊠ 2.1-26	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-17 (b))の試料)	2-38
⊠ 2.1-27	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の SEM 画像(表 2.1-20 (b))の試料)	2-39
図 2.1-28	浸出試験後の Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の EDS 分析(表 2.1-20 (b))の試料)	2-39
図 2.1-29	浸出試験後の Cu ₆₀ Zr ₃₀ Ti ₁₀ 粉末の SEM 画像(表 2.1-23 (b)の試料)	2-42
⊠ 2.1-30	浸出試験後の Cu ₆₀ Zr ₃₀ Ti ₁₀ 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-23 (b)の試料)	2-42
⊠ 2.1-31	浸出試験後の SUS316L 粉末の SEM 画像(表 2.1-25 の 60 ℃の試料)	2-46
⊠ 2.1-32	浸出試験後の SUS316L 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-25 の 60 ℃の試料)	2-46
⊠ 2.1-33	浸出試験後のハステロイC276粉末のSEM画像(表2.1-26の60 ℃の試料)	
		2-47
⊠ 2.1-34	浸出試験後のハステロイ C276 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-26の 60 ℃の	
	試料)	2-47
図 2.1-35	SUS316L およびハステロイ C276 の浸出試験における液相の観察(5,515	
	時間後)	2-48
図 2.1-36	溶射後の腐食試験片(右が先に溶射した面、左が後に溶射した面)	2-51
⊠ 2.1-37	すきま付き試験片の模式図	2-51
⊠ 2.1-38	すきまなし試験片のアノード分極測定結果	2-52
⊠ 2.1-39	すきま付き試験片のアノード分極測定結果	2-52
⊠ 2.1-40	すきま付き試験片のアノード分極試験後の試験片外観(左:先に溶射し	
	た面、右:後に溶射した面)	2-53
⊠ 2.1-41	アノード分極後の溶射膜断面の2次電子像	2-54
⊠ 2.1-42	溶射膜亀裂部分の反射電子像と面分析による元素マッピング結果	2-54
⊠ 2.1-43	亀裂のない溶射膜断面の反射電子像と面分析による元素マッピング結果	
	XRD プロファイル	2-55
⊠ 2.2.1-1	D20 浸透試験の模式図	2-59
⊠ 2.2.1-2	373~413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~259.2 ks 浸	
	漬した試料の表面	2-60
⊠ 2.2.1-3	373 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~259.2 ks 浸漬した	
	試料の XRD プロファイル	2-60
⊠ 2.2.1-4	393 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~172.8 ks 浸漬した	
	試料の XRD プロファイル	2-61
⊠ 2.2.1-5	413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~172.8 ks 浸漬した	
	試料の XRD プロファイル	2-61

図 2.2.1-6	424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬し	
	た試料の表面観察結果	2-62
図 2.2.1-7	424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬し	
	た試料から得られた XRD 試験結果	2-63
図 2.2.1-8	424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬し	
	た試料の断面観察結果	2-63
図 2.2.1-9	424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬し	
	た試料の断面観察結果から得られた皮膜厚さの経時変化	2-64
図 2.2.1-10	酸化剤含有 NaOH 水溶液に 1.2 ks 浸漬して試料に形成した皮膜に所定	
	の時間 D20 浸透試験を行って得られた、試料温度の上昇に伴う D20 脱	
	離速度の変化	2-65
図 2.2.1-11	酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D ₂ O	
	浸透試験を行った結果得られた D20 浸透量の経時変化	2-65
⊠ 2.2.1-12	酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D ₂ O	
	浸透試験を行った結果得られた H20 含有量の経時変化	2-66
⊠ 2.2.1-13	2 種類に想定された皮膜内の D ₂ 0 濃度分布	2-67
⊠ 2.2.1-14	酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D ₂ O	
	浸透試験を行った結果得られた D20 浸透量の経時変化	2-68
⊠ 2.2.1-15	ベントナイト中の交流インピーダンス測定セル(a)と炭素鋼電極の	
	模式図 (b)	2-70
⊠ 2.2.1-16	炭素鋼の電気化学インピーダンス(かぶり厚:5 mm)	2-72
⊠ 2.2.1-17	炭素鋼の電気化学インピーダンス(かぶり厚:3 mm)	2-73
⊠ 2.2.1-18	炭素鋼の電気化学インピーダンス(かぶり厚:1 mm)	2-74
⊠ 2.2.1-19	ベントナイト中での炭素鋼表面の等価回路	2-75
⊠ 2.2.1-20	試験セル上部からの写真	2-76
⊠ 2.2.1-21	1mHz のインピーダンスの逆数(1/Z _{1mHz})の経時変化	2-76
⊠ 2.2.1-22	(左)本研究で使用した膨潤ベントナイト埋没試験用セル (右)Cu 箔	
	試料	2-78
⊠ 2.2.1-23	真空グローブボックスを使用した実験装置の概略図(上段)およびグ	
	ローブボックスの外観(下段)	2-78
⊠ 2.2.1-24	milli-Qフィルタ水中のCu箔の腐食挙動	2-80
⊠ 2.2.1-25	milli-Qフィルタ水で膨潤させたベントナイト中のCu箔の腐食挙動	2-81
⊠ 2.2.1-26	1M NH4Cl 水溶液で膨潤させたベントナイト中の Cu 箔の腐食挙動	2-82
⊠ 2.2.1-27	応力腐食割れ用平板引張試験片	2-84
⊠ 2.2.1-28	定ひずみ速度試験機に設置する環境セルの模式図	2-85
⊠ 2.2.1-29	U-ベント試験片の形状と、曲げ時の形態と試験片領域	2-85
⊠ 2.2.1-30	U-ベント試験片の組み立て手順	2-86
⊠ 2.2.1-31	純水膨潤ベントナイト中での SSRT 試験後の試験片断面 SEM 写真	2-87

⊠ 2.2.1-32	純水膨潤ベントナイト中での割れ発生数と深さとの関係	2-87
図 2.2.1-33	10 mM NH ₃ 水溶液を膨潤したベントナイト中での SSRT 後の試料表面 SEM	
	像	2-87
⊠ 2.2.1-34	50 ℃の膨潤したベントナイト中での7日間の単軸引張定ひずみ試験	
	後の試料表面の SEM 像(膨潤ベントナイト中で 10 %引張)	2-88
⊠ 2.2.1-35	50 ℃の膨潤したベントナイト中での7日間の単軸引張定ひずみ試験	
	後の試料表面の SEM 像(大気中で 10 %引張後、膨潤ベントナイト中で	
	保持)	2-89
図 2.2.1-36	膨潤ベントナイト中で低ひずみ速度(SSRT)試験後の試料表面の光学顕	
	微鏡写真とラマン分析結果	2-90
図 2.2.1-37	種々の応力負荷状態での試料表面の光学顕微鏡写真とラマン分析結果	
		2-90
⊠ 2.2.1-38	純水膨潤ベントナイト中での 14 日間の SCC 試験前後の試験体の外観	
	写真	2-92
⊠ 2.2.1-39	純水膨潤ベントナイト中での14日間のU-ベント試験後の試験片表面	
	の SEM 写真	2-92
⊠ 2.2.1-40	測定系の概略	2-95
⊠ 2. 2. 1-41	ガンマ線照射下での予備浸清期間中における純チタン電極の腐食電位	
	変化	2-97
図 2, 2, 1-42	ガンマ線非昭射下での予備浸清期間中における純チタン電極の腐食電	2 0.
	位変化	2-97
⊠ 2. 2. 1-43	ガンマ線昭射下での純チタン電極の分極特性	2-98
⊠ 2 2 1-44	非昭射下での純チタン電極の分極特性	2-98
⊠ 2. 2. 1 11	nH8 および nH13 の試験 滚液中での昭射からびに 非昭射下での分極特	2 00
	性と質量減少測定の結果から推定した腐食電流密度の比較	2-99
図 2 2 1-46	nH8 茨海山でのガンマ線昭射下における冬種雪極の予備浸清期間中	2 00
	の庭食雪位変化	2-100
図 2 2 1-47	○腐反電位反に・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2 100
	かかれているのがある「住宅」の「備役債効同手の協议电	2-101
図 2 2 1-48	世友に	2 101
区 2.2.1 40 区 2 2 1-40	非昭射下における名種雪極の分極性性	2 102
区 2.2.1 49 区 2.2.1 -50	↑ 照初 にわける 行催 电 極の 力 極付 圧 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2 102
⊠ 2.2.1-30	pho 俗似中てのカンマ 脉原剂 Fにおける 各種 电極の F 備 反 (1) 別 同 中	9 109
<u>₩ 9 9 1 5 1</u>		2-103
⊠ 2.2.1-51	ph8 俗似中での非思知下にわける谷裡电極の丁傭反俱期间中の腐良	0 100
	电位发化	2-103
区 2.2.1-52	ルイ× 「「「「いけっ合性 - 「「」」の - 「」の - 」の -	2-104
⊠ 2. 2. 1-53	非照射下におりる谷裡電極の分極特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2-104
図 2.2.1-54	処分谷岙に及はす	2-105

⊠ 2.2.1-55	地層処分システムの人工バリア性能における微生物影響の可能性に関	
	するディシジョンツリー(King, 2009 を改変)	2-106
⊠ 2.2.1-56	カラム解放後のベントナイト(30°C)	2-110
⊠ 2.2.1-57	炭素鋼片の重量減損(30°C 試験)	2-110
⊠ 2.2.1-58	浸漬試験1年後の炭素鋼片(1.0 g cm ⁻³)	2-111
⊠ 2.2.1-59	浸漬試験1年後の炭素鋼片表面の SEM 観察像(1.0 g cm ⁻³)	2-111
⊠ 2.2.1-60	浸漬液に含まれる成分の分析(30 ℃試験)	2-112
⊠ 2.2.1-61	浸漬液に含まれるガス成分の分析(30 ℃試験)	2-113
⊠ 2.2.1-62	30 ℃の温度条件下における炭素鋼およびベントナイトの EPMA 分析結	
	果	2-113
図 2.2.1-63	カラム開封後のベントナイト(50 ℃)	2-114
図 2.2.1-64	炭素鋼片の重量減損(50 ℃試験)	2-115
図 2.2.1-65	炭素鋼表面のSEM観察(50 ℃試験)	2-115
図 2.2.1-66	50 ℃の温度条件下における炭素鋼およびベントナイトの EPMA 分析結	
	果	2-116
図 2.2.1-67	ベントナイト中の生菌数	2-117
図 2.2.1-68	低濃度側溶液へ透過したヨウ化物イオンおよび酢酸イオンのフラック	
	スの時間変化(乾燥密度 0.8 Mg m ⁻³ 、NaCl 濃度 0.5 mol l ⁻¹)	2-120
図 2.2.1-69	銅-ベントナイト変質試験カラム概略図	2-123
図 2.2.1-70	銅試験片との接触面を含む圧縮ベントナイト試料の EPMA 観察結果	2-124
⊠ 2.2.1-71	接触面近傍領域(300 μm×300 μm)のCu,S,O,Si,Al,Na,Cl マッピ	
	ング分析結果	2-124
⊠ 2.2.1-72	接触面近傍領域(30 μm×30 μm)のCu,Sマッピング分析結果と点	
	分析による元素存在比の分析結果	2-125
⊠ 2.2.2-1	使用済燃料中の核種分布および核種放出の概念	2-128
⊠ 2.2.2-2	C-14 に関する試験研究の枠組み	2-131
⊠ 2.2.2-3	ジルカロイ-4におけるステージ位置と酸化膜厚さの関係	2-133
⊠ 2.2.2-4	ジルカロイ-4 における燃焼度と酸化膜厚さの関係	2-133
⊠ 2.2.2-5	PWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒平均燃焼度の関係	2-142
⊠ 2.2.2-6	BWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒平均燃焼度の関係	2-142
⊠ 2.2.2-7	PWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒経験最高出力の関係	2-143
図 2.2.2-8	BWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒経験最高出力の関係	2-144
図 2.2.2-9	BWR 使用済燃料集合体の発生体数推計結果(2015年時点)	2-145
⊠ 2.2.2-10	FEMAXIの解析体系	2-152
⊠ 2.2.2-11	FGR 計算モデルのフロー	2-153
⊠ 2.2.2-12	FP ガス放出率の試験値と FEMAXI6.1 の解析値の比較結果	2-155
⊠ 2.2.2-13	FP ガス放出率の試験値と FEMAXI-Ⅲの解析値の比較結果	2-156

図 2.2.2-14 岩盤下流側 100 m 地点における被ばく線量評価値 2-163 図 2.2.3-1 処分場施設およびその周辺のイメージ 2-167 図 2.2.3-2 人工バリア・坑道における設計項目のイメージ 2-167 図 2.2.3-3 広域スケールにおける考慮すべき処分場位置の概念図 2-171 図2.2.3-4 広域密度流解析によって推定された塩分濃度分布の時間変化(白点は処 分場位置)......2-173 図 2.2.3-5 処分場位置のオプションに応じた地下水水質(塩分濃度)および地下 水流速・流向変遷のパターンの比較 2-175 密度流解析によって得られた処分場位置 b-1 での塩分濃度および地下 図 2.2.3-6 水流向・流速時間変化の例 2-176 図 2.2.3-7 処分場位置 a-1、a-2の想定での母岩からの C-14の最大移行率の比較 . 2-177 図 2.2.3-8 処分場位置 a-2、b-1の想定での母岩からの C-14の最大移行率の比較 . 2-178 図 2.2.3-9 処分場位置 b-1、b-2の想定での母岩からの C-14 の最大移行率の比較 . 2-178 図 2.2.3-10 開口時期、処分場位置、収着性の違いに応じた移行経路の抽出結果(1/2) 図2.2.3-10 開口時期、処分場位置、収着性の違いに応じた移行経路の抽出結果(2/2) 図 2.2.3-11 各定置方式において比較する粒子の移行経路 2-183 図2.2.3-12 坑道に沿って連続した透水性が高い領域の影響に着目した粒子の移行 図2.2.3-14 定置方式の違いによる最大移行率の差が最大となったリアライゼーシ ョン No. 49の移行率の比較 2-187 図2.2.3-15 定置方式の違いによる最大移行率の差が最小となったリアライゼーシ ョン No.20の移行率の比較......2-188 図 2.2.3-16 堅置きの坑道近傍における粒子の移行軌跡(リアライゼーション 図 2.2.3-17 坑道中心からの距離別で比較した、粒子の最大移行率 2-189 図 2.2.3-18 定置方式の違いによる粒子の最大移行率の比較 2-190 図 2.2.3-19 定置方式の違いによる粒子の移行経路の比較(リアライゼーション 図 2.2.3-20 主流動方向の違いによる移行率の比較 2-192 図 2.2.3-21 主流動方向が異なる場合の定置方式の違いによる最大移行率の比較 .. 2-192 図 2.2.3-22 地下水の主流動方向が処分坑道と平行する場合の粒子の移行経路 2-193 図2.2.3-23 地質環境や設計オプションの多様性に着目した閉じ込め性能に関する 検討課題の再整理の手順......2-195

図 3.1-1	溶接ビードの形状・模様	3-8
⊠ 3.1-2	溶接スパッターの形状・分布	3-8
図 3.1-3	溶接欠陥の種類	3-9
図 3.1-4	電子顕微鏡による母材または溶接金属組織の形状	3-9
図 3.1-5	電子顕微鏡観察、超音波測定による溶接境界部の測定例	3-10
図 3.1-6	超音波探傷での金属組織に起因するノイズ信号の例	3-11
⊠ 3.1-7	実測値とフェーズドアレイ超音波計測による計測値比較	3-11
⊠ 3.1-8	処分容器および人工バリアのレファレンス仕様	3-16
⊠ 3.1-9	処分容器の蓋部形状	3-16
図 3.1-10	人工特徴の配置検討	3-18
図 3.1-11	オーバーパックにおける限界き裂寸法と残留応力の関係	3-21
図 3.1-12	き裂の進展方向	3-22
図 3.1-13	軸方向応力の最大値	3-22
図 3.1-14	オーバーパックと処分容器の応力拡大係数比較	3-24
図 3.1-15	並列な複数個の内部欠陥の取り扱い	3-25
図 3.1-16	超音波シミュレーションの解析モデル	3-28
図 3.1-17	人工特徴を模擬した特徴の位置	3-29
図 3.1-18	超音波の発信条件による弾性波波線	3-29
図 3.1-19	探触子位置のズレの影響を評価した解析モデル	3-30
図 3.1-20	表面の「うねり」の影響を評価した解析モデル	3-30
図 3.1-21	減肉および傾斜の影響を評価する解析モデル	3-31
図 3.1-22	基準ケースの解析結果	3-32
図 3.1-23	特徴位置の評定と測定誤差	3-32
⊠ 3.1-24	波線の刻みによる影響	3-33
⊠ 3.1-25	探触子位置(測定位置)のズレの場合の解析結果	3-33
図 3.1-26	減肉と傾きの場合の解析結果	3-34
⊠ 3.1-27	測定面のうねりの場合の解析結果	3-35
図 3.1-28	処分容器温度(弾性波速度)の変化の場合の解析結果	3-36
⊠ 3.1-29	電子タグの構成	3-39
図 3.1-30	電子タグの電池用途による分類	3-40
図 3.1-31	低エネルギーガンマ線による電子タグへの影響評価試験結果	3-43
⊠ 3.1-32	高エネルギーガンマ線による電子タグへの影響評価試験結果	3-43
図 3.1-33	IAEA 核セキュリティシリーズ文書体系	3-45
図 3.1-34	DBT 策定フロー	3-47
図 3.1-35	仮想施設の立地(地上・地下)	3-48
図 3.1-36	使用済燃料の取扱フロー	3-49
図 3.1-37	アクティブ型の車両バリアの例	3-52
図 3.1-38	パッシブ型の車両バリアの例	3-52

図 3.1-39	防護区域内にある建物に対するスタンドオフ距離の考え方	3-53
図 3.1-40	警備施設のゾーン	3-55
図 3.1-41	大型車両検査装置の例	3-56
図 3.1-42	屋外設置用の代表的な検知システム	3-57
図 3.1-43	モーション検知システム	3-57
図 3.1-44	検知・分類・同定シークエンス	3-58
図 3.1-45	地中レーダシステムの基本構成	3-59
⊠ 3.1-46	振動センサー設置例	3-60
⊠ 3.2.1-1	臨界計算モデル	3-65
⊠ 3.2.1-2	直接処分体系での実効増倍率計算結果	3-66
⊠ 3.2.1-3	遮へい解析計算モデル概念図	3-69
⊠ 3.2.1-4	処分容器表面での吸収線量率評価点位置	3-70
⊠ 3.2.1-5	処分容器表面での吸収線量率[TOTAL 値]	3-70
⊠ 3.2.1-6	緩衝材中での吸収線量率評価位置	3-71
⊠ 3.2.1-7	緩衝材中での吸収線量率	3-71
図 3.2.1-8	伝熱解析体系図	3-75
⊠ 3.2.1-9	処分容器のモデル図	3-75
図 3.2.1-10	燃料集合体領域断面の形状図	3-76
⊠ 3.2.1-11	燃料集合体領域断面の要素分割図	3-76
⊠ 3.2.1-12	加熱領域	3-77
⊠ 3.2.1-13	溶接後熱処理時の温度履歴	3-77
⊠ 3.2.1-14	加熱前の温度分布	3-81
⊠ 3.2.1-15	昇温時(425 ℃)の温度分布	3-81
⊠ 3.2.1-16	昇温時(600 ℃)の温度分布	3-81
⊠ 3.2.1-17	600 ℃保持最終時の温度分布	3-81
⊠ 3.2.1-18	降温時(425 ℃)の温度分布	3-82
⊠ 3.2.1-19	放置(100 時間後)の温度分布	3-82
⊠ 3.2.1-20	燃料集合体の各領域の最高温度時刻歴	3-82
⊠ 3.2.1-21	構造解析体系	3-86
⊠ 3.2.1-22	発生 Tresca 応力のコンター図(蓋部拡大)	3-89
⊠ 3.2.1-23	相当塑性ひずみの経時変化(蓋部拡大)	3-90
⊠ 3.2.1-24	相当クリープひずみの経時変化(蓋部拡大)	3-91
⊠ 3.2.2-1	PWR 燃料 4 体収容の処分容器設計	3-94
⊠ 3.2.2-2	PWR 燃料処分体系における相関係数の再評価結果	3-95
⊠ 3.2.2-3	PWR 使用済燃料の臨界安全評価で使用する推定臨界下限増倍率の評価	
	結果	3-99

図 3.2.2-4	BWR使用済燃料の臨界安全評価で使用する推定臨界下限増倍率の評価	
	結果	3-100
図 3.2.2-5	ZPPR-20/E 臨界実験の中性子スペクトル分布図	3-103
図 3.2.2-6	燃料粒子の規則的立方格子配列モデルとランダム配列モデル	3-105
図 3.2.2-7	使用済燃料粒子再配置時の臨界性計算モデル概念図(球体系)	3-106
図 3.2.2-8	中性子吸収材を考慮した PWR 燃料 4 体体系の実効増倍率	3-107
図 3.2.2-9	中性子吸収材を考慮した PWR 燃料 2 体体系の実効増倍率	3-108
図 3.2.2-10	PWR 燃料 21 体収納容器の健全状態および破損状態の模式図	3-110
図 3.2.3-1	PEM 容器仕様	3-115
⊠ 3.2.3-2	処分坑道の配置とモデル化した範囲の模式図	3-124
図 3.2.3-3	解析モデル全体(軟岩系岩盤)(単位:mm)	3-124
⊠ 3.2.3-4	解析モデル人工バリア周辺(軟岩系岩盤)(単位:mm)	3-125
図 3.2.3-5	境界条件	3-127
図 3.2.3-6	銅の腐食膨張量の計算の模式図(5万年まで)	3-127
図 3.2.3-7	炭素鋼の腐食膨張量の計算の模式図(5万年以降)	3-128
図 3.2.3-8	経過年数に対する腐食膨張量	3-129
⊠ 3.2.3-9	経過年数に対する処分容器の等価剛性	3-130
⊠ 3.2.3-10	変形図(変形量の表示倍率:1 倍、ケース i)	3-131
⊠ 3.2.3-11	緩衝材の厚さおよび応力経路の計測位置	3-132
⊠ 3.2.3-12	緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース i)	3-133
⊠ 3.2.3-13	解析モデル(単位:mm)(軟岩系岩盤)	3-135
⊠ 3.2.3-14	先行圧密降伏応力の設定方法	3-136
⊠ 3.2.3-15	修正 Cam-Clay モデルによるシミュレーション(間隙比-載荷応力) .	3-136
⊠ 3.2.3-16	ケース ii の境界条件(硬岩系岩盤)	3-138
⊠ 3.2.3-17	経過年数に対する処分容器半径の増加量	3-139
⊠ 3.2.3-18	経過年数に対する処分容器の等価ヤング率	3-139
⊠ 3.2.3-19	変形図(変形量の表示倍率:1 倍、ケース ii)	3-141
⊠ 3.2.3-20	最大主塑性ひずみ分布図(ケース ii)	3-142
⊠ 3.2.3-21	応力比・緩衝材厚さの計測位置	3-143
⊠ 3.2.3-22	緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース ii)(1/2)	3-144
⊠ 3.2.3-22	緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース ii)(2/2)	3-145
⊠ 3.2.3-23	破壊接近度(ケース i i、軟岩系岩盤)	3-145
⊠ 3.2.3-24	解析モデル図(単位:mm)(竪置き PEM 方式、 硬岩)	3-147
⊠ 3.2.3-25	評価開始時点の緩衝材の応力の設定(ケース iii)	3-148
⊠ 3.2.3-26	境界条件(硬岩系岩盤)	3-149
⊠ 3.2.3-27	変形図(変形量の表示倍率:1 倍、ケース iii)	3-150
⊠ 3.2.3-28	応力比・緩衝材厚さの計測位置	3-150

図 3.2.3-29 緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース iii)	3-151
図 3.2.3-30 膨潤圧の経時変化	3-153
図 3.3-1 検討フロー	3-156
図 3.3-2 荷重分布概念図(Case1~Case2)	3-159
図 3.3-3 荷重分布概念図(Case3~Case4)	3-160
図 3.3-4 荷重分布面積 (タイヤ)	3-164
図 3.3-5 荷重分布面積(レール)	3-164
図 3.3-6 Casel 廃棄体(主要・連絡坑道)	3-166
図 3.3-7 Case3 廃棄体(処分坑道)	3-166
図 3.3-8 Case2 PEM(主要・連絡坑道)	3-166
図 3.3-9 Case4 PEM(処分坑道)	3-166
図 3.3-10 配置鉄筋概略図	3-167
図 3.3-11 主要・連絡坑道 二次元モデル	3-171
図 3.3-12 処分坑道 三次元モデル	3-172
図 3.3-13 鉄筋コンクリートの設計断面耐力曲線の一例 (f'ck=18 N mm ⁻²)	3-173
図 3.3-14 Case1-3 レール方式 解析ケース図 横断方向 補助車輪設置断面	3-175
図 3.3-15 Case1-5 レール方式 解析ケース図 縦断方向	3-176
図 3.3-16 曲げモーメントおよび軸力耐力照査結果(Case1-3 レール方式 横	断方
向 補助車輪設置断面)	3-177
図 3.3-17 曲げ耐力照査結果(Case1-5 レール方式 縦断方向)	3-177
図 3.3-18 Case2-1 タイヤ方式 横断方向	3-181
図 3.3-19 Case2-2 タイヤ方式 縦断方向	3-182
図 3.3-20 曲げ耐力照査結果(Case2-1 タイヤ方式 横断方向)	3-183
図 3.3-21 曲げ耐力照査結果(Case2-2 タイヤ方式 縦断方向)	3-183
図 3.3-22 Case4-1 タイヤ方式 荷重載荷位置	3-186
図 3.3-23 Case4-1 タイヤ方式 変形図	3-186
図 3.3-24 Case4-1 タイヤ方式 曲げモーメント (Y 軸まわり)	3-187
図 3.3-25 Case4-1 タイヤ方式 せん断力 (横断方向)	3-187
図 3.3-26 曲げ耐力照査結果 (Case4-1 タイヤ方式 Mx)	3-188
図 3.3-27 曲げ耐力照査結果 (Case4-1 タイヤ方式 My)	3-188
図 3.3-28 廃棄体 レール方式 (Case1)	3-190
図 3.3-29 PEM タイヤ方式 (Case2)	3-190
図 3.3-30 廃棄体 レール方式 (Case3)	3-191
図 3.3-31 PEM タイヤ方式 (Case4)	3-191
図 3. 3-32 孔壁の安定検討概念図	3-192
図 3.3-33 評価モデル	3-192
図 3.3-34 Case4 タイヤ すべり形状図	3-193

义	3.3-3	5 地下施設の設計フロー	3-195
义	3.3-3	6 坑道の設計の流れ	3-196
义	3.3-3	7 坑道の設計フローの例示	3-200
义	3.3-38	3 練混ぜ手順	3-203
义	3.3-39	9 材齢と圧縮強度の関係	3-204
义	3.3-4) 材齢と引張強度の関係	3-205
义	3.3-4	1 圧縮強度と引張強度の関係	3-206
义	3.3-42	2 圧縮強度と静弾性係数の関係	3-206
义	3.3-43	3 ポアソン比の測定結果	3-207
义	3.3-4	4 単位容積質量の測定結果	3-207
义	3.4-1	搬送・定置設備の設計と人工バリアの設計などとの関連図	3-213
义	3.4-2	搬送定置設備を中心とした設計フロー	3-220
义	3.4-3	設計フローにおける搬送・定置設備と地下坑道の関係	3-221
义	3.4-4	地上施設の設計と人工バリアの設計などとの関連図	3-226
义	3.4-5	封入設備の設計と廃棄体の設計などとの関連図	3-228
义	3.4-6	封入設備を中心とした設計フロー	3-232
义	3.4-7	概念設計の例示対象とした坑道	3-233
义	3.4-8	処分坑道(竪置き方式)	3-234
义	3.4-9	定置イメージ(竪置き・ブロック方式)	3-234
义	3.4-1) 人工バリアのレファレンス仕様	3-234
义	3.4-1	1 搬送・定置設備の先行事例	3-235
义	3.4-12	2 地上施設及び搬送・定置設備のハンドリングフローの例	3-239
义	4-1	地層処分エンジニアリング統合支援システム(iSRE)の概念図	4-1
义	4-2	開発環境の構築イメージ	4-3
义	4-3	本研究の実施範囲	4-5
义	4-4	iSRE の機能構成	4-7
义	4-5	解析データ画面	4-8
义	4-6	iSRE の機能構成(積算 DB)	4-10
义	4-7	「積算データベース」の基本設計の概要	4-10
义	4-8	iSRE の機能構成(維持管理補修履歴 DB)	4-11
义	4-9	iSRE の機能構成(統合 DB)	4-13
义	4-10	文書管理/レポート画面	4-14
义	4-11	iSRE の機能構成 (設計 DB)	4-16
义	4-12	解析データの ER 図	4-17
义	4-13	解析データ画面 (試作)	4-17
汊	4-14	iSRE の全体機能および試運用の適用範囲	4-19

図 4-15	試運用における検討ステップ	4-19
図 4-16	登録データのイメージ(例)	4-21
図 4-17	「地形・地質/地形環境モデル」画面における地質構造モデルの検索イメ	
	ージ	4-24
図 4-18	「地形・地質/地形・地質データ」画面におけるボーリングデータの検索	
	イメージ	4-25
図 4-19	建設段階のシナリオで想定する作業の流れと必要な確認事項	4-26
図 4-20	対策オプションの例	4-26
図 4-21	操業段階のシナリオで想定する作業の流れと必要な確認事項	4-28
図 4-22	ひび割れ補修方法の選定例	4-29
図 4-23	イベント機能のリンクのイメージ(例)	4-30
図 4-24	イベント機能の画面イメージ	4-31
図 4-25	サムネイル画像のイメージ(例)	4-32
図 4-26	3D モデルからの関連情報の参照イメージ	4-33
図 5-1	温度分布(温度-深度プロット)	5-9
図 5-2	自然密度の深度分布	5-11
図 5-3	乾燥密度の深度分布	5-12
図 5-4	湿潤密度の深度分布	5-13
図 5-5	有効間隙率の深度分布	5-14
図 5-6	深度 1,000 m 以上の有効間隙率(新第三紀砂質岩)の頻度分布	5-15
図 5-7	深度 1,000 m 以上の有効間隙率(新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布.	5-15
図 5-8	深度 1,000 m 以上の有効間隙率(先新第三紀砂質岩)の頻度分布	5-16
図 5-9	深度 1,000 m 以上の有効間隙率(先新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分	
	布	5-16
図 5-10	主として深度 1,000 m以浅の有効間隙率のヒストグラム	5-17
図 5-11	熱伝導率の深度分布	5-18
図 5-12	深度 1,000 m 以上の熱伝導率(新第三紀砂質岩)の頻度分布	5-19
図 5-13	深度 1,000 m 以上の熱伝導率(新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布	5-19
図 5-14	深度 1,000 m以上の熱伝導率(先新第三紀砂質岩)の頻度分布	5-20
図 5-15	深度 1,000 m以上の熱伝導率(先新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布	
		5-20
図 5-16	熱伝導率(結晶質岩)の頻度分布	5-20
図 5-17	主として深度 1,000 m以浅の熱伝導率のヒストグラム	5-21
図 5-18	一軸圧縮強度の深度分布	5-22
図 5-19	粘着力(C)の深度分布	5-24
図 5-20	内部摩擦角(φ)の深度分布	5-24
図 5-21	浸透率(透水係数換算)の深度分布	5-26

図 5-22	注水試験による透水係数の深度分布	5-27
図 5-23	塩化物イオン濃度の深度分布	5-29
図 5-24	水質型の頻度分布	5-30
図 5-25	新第三紀層の層厚分布	5-32
図 5-26	新第三紀層の層厚分布(層厚 2,000m 以上)	5-32
図 5-27	処分体系および評価シナリオの概念図	5-44
図 5-28	シナリオ 1+2 における核種移行の概念モデル	5-48
図 5-29	シナリオ3における核種移行の概念モデル	5-48
図 5-30	シナリオ 1+2 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路①)	
		5-53
図 5-31	シナリオ 1+2 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路②)	
		5-53
図 5-32	シナリオ3 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路①)	
		5-54
図 5-33	シナリオ 3 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路②)	
		5-54

表目次

表 1-1 本事業で利用・引用する主な過去の研究開発成果

表 2.1-1	代表的な金属ガラスの VFT パラメータ(η₀, B, T₀), ガラス遷移温度(Tg)	
	および D*ならびに m 値(1/2)	2-5
表 2.1-1	代表的な金属ガラスの VFT パラメータ(η₀, B, T₀), ガラス遷移温度(Tg)	
	および D*ならびに m 値(2/2)	2-6
表 2.1-2	Zr 基、Fe 基、Cu 基および Ni 基の各合金のγパラメータ、δパラメータ、	
	ボルツマン定数で規格化したミスマッチエントロピー(Sσ/kB)およ	
	び混合エンタルピー(ΔHmix)、Ωパラメータの計算値ならびにバルク	
	金属ガラス生成のための臨界直径(dc)	2-9
表 2.1-3	金属ガラス Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の組成(元素比率より計算)	2-20
表 2.1-4	金属ガラス Zr ₅₇ Cu _{15.4} Ni _{12.6} Al ₁₀ Nb ₅ 粉末の組成(元素比率より計算)	2-21
表 2.1-5	金属ガラス Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の組成(元素比率より計算)	2-21
表 2.1-6	金属ガラス Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の組成(元素比率より計算)	2-21
表 2.1-7	金属ガラス Cu ₆₀ Zr ₃₀ Ti ₁₀ 粉末の組成(元素比率より計算)	2-21
表 2.1-8	SUS316L 粉末の組成(元素比率より計算)	2-22
表 2.1-9	ハステロイ C276 粉末の組成(元素比率より計算)	2-22
表 2.1-10	Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-25
表 2.1-11	Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-26
表 2.1-12	Zr57Cu15.4Ni12.6Al10Nb5粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	
		2-27
表 2.1-13	EDS 分析による Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀ 粉末の元素比(「試験後」は表 2.1-11 (b)の	
	試料)	2-29
表 2.1-14	EDS 分析による Zr ₅₇ Cu _{15.4} Ni _{12.6} Al ₁₀ Nb ₅ 粉末の元素比(表 2.1-12 (b)の試料)	
		2-30
表 2.1-15	Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)(原子力機構, 2016)	2-32
表 2.1-16	Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-33
表 2.1-17	Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-34
表 2.1-18	Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)(原子力機構, 2016)	2-35
表 2.1-19	Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)	2-36
表 2.1-20	Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)	2-37
表 2.1-21	EDS 分析による Ni ₆₅ Cr ₁₅ P ₁₆ B ₄ 粉末の元素比(表 2.1-17(b))の試料)	2-39
表 2.1-22	EDS 分析による Ni ₆₅ Cr ₁₃ Nb ₂ P ₁₆ B ₄ 粉末の元素比(表 2.1-20 (b))の試料)	2-40
表 2.1-23	Cu ₆₀ Zr ₃₀ Ti ₁₀ 粉末の浸出試験結果	2-41
表 2.1-24	EDS 分析による Cu ₆₀ Zr ₃₀ Ti ₁₀ 粉末の元素比(表 2.1-23 (b)の試料)	2-42
表 2.1-25	SUS316L 粉末の浸出試験結果	2-44

表 2.1-26	ハステロイ C276 粉末の浸出試験結果 2-45
表 2.1-27	EDS 分析による SUS316L 粉末の元素比(表 4.3.4-1 の 60 ℃試料) 2-47
表 2.1-28	EDS 分析によるハステロイ C276 粉末の元素比(表 2.1-26 の 60 ℃試料).2-48
表 2.2.1-1	試料として用いた無酸素銅の化学組成(Cu以外の成分の単位:ppm) 2-84
表 2.2.1-2	測定に使用した UNS N10276(C276)の化学組成 2-94
表 2.2.1-3	浸漬試験における試料リスト 2-108
表 2.2.1-4	実効拡散係数、形状因子の実測値 2-121
表 2.2.1-5	試験に使用した人工海水の組成 2−123
表 2.2.2-1	平成 27 年度に提案したソースタームパラメータ 2-129
表 2.2.2-2	調査対象とした文献類の一覧表 2-131
表 2.2.2-3	CAST で集約されたジルカロイ被覆管酸化膜の C-14 インベントリ 2-135
表 2.2.2-4	被覆管から放出される C-14 の化学形態の割合 2-136
表 2.2.2-5	日本における PWR 燃料の設計の変遷(概要) 2-138
表 2.2.2-6	日本における BWR 燃料の設計の変遷(概要) 2-139
表 2.2.2-7	国内 PIE の調査範囲および確認項目 2-140
表 2.2.2-8	PWR 使用済燃料集合体の発生体数(2009 年 9 月時点) 2-146
表 2.2.2-9	BWR 使用済燃料集合体の設計世代別の FGR 2-147
表 2.2.2-10) 国内と欧州各国における FGR 設定 2-148
表 2.2.2-11	燃料挙動解析コード(FEMAXI)を使用した解析事例 2-149
表 2.2.2-12	2 FEMAXI-7 で取り扱うことが可能な現象 2-150
表 2.2.2-13	3 追加調査の対象としたプロジェクトなどの一覧表 2-158
表 2.2.2-14	4 欧州各国におけるソースタームパラメータの幅設定の比較(PWR) 2-159
表 2.2.2-15	5 55 GWd tIHM ⁻¹ の PWR 燃料における照射後の IRF 変化の試算結果 2-160
表 2.2.2-16	5 感度解析のための条件一覧表 2-161
表 2.2.2-17	7 ソースタームパラメータの追加検討結果 2-165
表 2.2.3-1	考慮すべき処分場の位置 2-171
表 2.2.3-2	核種移行に与える影響を比較・評価するための処分場位置 2-171
表 2.2.3-3	密度流解析結果に基づく処分場位置 b-1 のニアフィールドの三次元水
	理・物質移行解析パラメータ設定例2-176
表 2.2.3-4	三次元水理・物質移行解析に用いた母岩の透水性に関する設定値 2-184
表 2.2.3-5	検討課題の候補の優先度の判断基準 2-195
表 2.2.3-6	再整理により抽出された検討課題の候補および検討課題 2-196
表 3.1-1 月	用語の定義
表 3.1-2	自然特徴を用いた固有性確認の適用性評価結果(1/3) 3-13

表 3.1-2	自然特徴を用いた固有性確認の適用性評価結果(2/3)	3-14
表 3.1-2	自然特徴を用いた固有性確認の適用性評価結果(3/3)	3-15
表 3.1-3	人工特徴の付与の技術的可能性	3-17
表 3.1-4	人工特徴の付与方法に関する検討観点	3-18
表 3.1-5	人工特徴の配置位置における固有性確認への適用性検討結果	3-20
表 3.1-6	溶接部における破壊靭性値の値	3-23
表 3.1-7	オーバーパックと処分容器の比較	3-24
表 3.1-8	偽造防止方法の検討	3-26
表 3.1-9	測定の再現性に影響する環境条件の整理結果	3-27
表 3.1-10	鋼およびポリエーテルイミドの弾性波速度の設定	3-31
表 3.1-11	基準ケースでの特徴①~④の測定座標	3-32
表 3.1-12	端子位置 75 mm での特徴①~④の測定座標	3-33
表 3.1-13	端子位置 85 mm での特徴①~④の測定座標	3-34
表 3.1-14	測定面の減肉 5 mm と傾き-1 ° での特徴①~④の測定座標	3-34
表 3.1-15	測定面の減肉 5 mm と傾き+1 ° での特徴①~④の測定座標	3-35
表 3.1-16	測定面の中央部に凹 0.2 mm がある場合での特徴①~④の測定座標	3-35
表 3.1-17	測定面の中央部に凸 0.2 mm がある場合での特徴①~④の測定座標	3-35
表 3.1-18	処分容器の温度が 40 ℃の場合での特徴①~④の測定座標	3-36
表 3.1-19	処分容器の温度が 70 ℃の場合での特徴①~④の測定座標	3-37
表 3.1-20	処分容器の温度が 100 ℃の場合での特徴①~④の測定座標	3-37
表 3.1-21	各解析条件における絶対座標の誤差	3-37
表 3.1-22	各解析条件における相対座標の誤差	3-38
表 3.1-23	刻印と電子タグのメリット・デメリット	3-39
表 3.1-24	仮想施設に対する脅威評価の例	3-50
表 3.1-25	動電型速度出力振動センサー GS-20DHの主な仕様	3-60
表 3.2.1-1	1 使用済燃料の基本仕様(PWR 燃料)	3-63
表 3.2.1-2	2 PWR 使用済燃料の処分容器の基本仕様	3-63
表 3.2.1-3	3 燃料仕様	3-64
表 3.2.1-4	4 収納可能な最低燃焼度	3-66
表 3.2.1-5	5 遮へい解析条件	3-68
表 3.2.1-6	6 緩衝材中での吸収線量率	3-72
表 3.2.1-7	7 伝熱解析条件	3-74
表 3.2.1-8	8 胴、蓋(炭素鋼)の物性値	3-78
表 3.2.1-9	9 二酸化ウランの物性値	3-78
表 3.2.1-1	10 ジルカロイの物性値	3-78
表 3.2.1-1	11 ヘリウムの物性値	3-79
表 3.2.1-1	12 空気の物性値	3-79

表 3.2.1-13	燃料棒領域の最高温度	3-80
表 3.2.1-14	構造解析条件(1/2)	3-84
表 3.2.1-14	構造解析条件(2/2)	3-85
表 3.2.1-15	内蓋および内層胴(炭素鋼:SFVC1)の材料特性	3-86
表 3.2.1-16	銅(外蓋および外層胴)の評価の目安値	3-88
表 3.2.1-17	全ひずみ(最大値)の評価結果	3-91
表 3.2.2-1	評価対象とした臨界実験シリーズの概要	3-94
表 3.2.2-2	MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験の精度評価結果 (1/3)	3-97
表 3.2.2-2	MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験の精度評価結果 (2/3)	3-98
表 3.2.2-2	MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験の精度評価結果 (3/3)	3-99
表 3.2.2-3	Si02反射体を使用した臨界実験ケース概要	3-102
表 3.2.2-4	Si02反射体を使用した臨界実験の実効増倍率の解析結果	3-102
表 3.2.2-5	ZPPR-20/E 臨界実験の反応率の解析結果(全核種の反応率の和)	3-104
表 3.2.2-6	処分容器に使用済燃料を4体収納する場合の未臨界維持に必要な毒物	
	の量	3-108
表 3.2.2-7	処分容器に使用済燃料を2体収納する場合の未臨界維持に必要な毒物	
	の量	3-108
表 3.2.3-1	緩衝材の設計要件	3-113
表 3.2.3-2	考慮したシナリオの特徴と力学的なモデル・手法	3-114
表 3.2.3-3	各ケースで使用した物性値	3-119
表 3.2.3-4	処分容器(炭素鋼)の物性値	3-119
表 3.2.3-5	複合容器(銅外層)の物性値	3-119
表 3.2.3-6	支保工(高強度吹付けコンクリート)の物性値	3-120
表 3.2.3-7	硬岩系岩盤の物性値(処分深度 1,000 m)	3-120
表 3.2.3-8	軟岩系岩盤の物性値(処分深度 500 m)	3-121
表 3.2.3-9	緩衝材の物性値(乾燥密度 1.6 Mg m ⁻³ 、ケイ砂 30 wt%配合)	3-121
表 3.2.3-10	緩衝材の物性値(乾燥密度 1.8 Mg m ⁻³ 、ケイ砂 30 wt%配合)	3-122
表 3.2.3-11	ケース iii 評価開始時点の緩衝材の物性値	3-122
表 3.2.3-12	腐食した PEM 容器(炭素鋼)の物性値	3-122
表 3.2.3-13	間隙流体の物性値	3-123
表 3.2.3-14	ケース i の初期条件	3-126
主 2 2 2 1 5		
衣 5. 2. 5-15	緩衝材厚さの経時変化	3-132
表 3. 2. 3-15 表 3. 2. 3-16	緩衝材厚さの経時変化 ケース ii の初期条件	3-132 3-137
表 3. 2. 3-15 表 3. 2. 3-16 表 3. 2. 3-17	緩衝材厚さの経時変化 ケース ii の初期条件 緩衝材厚さの経時変化(硬岩系岩盤)	3-132 3-137 3-143
表 3. 2. 3-13 表 3. 2. 3-16 表 3. 2. 3-17 表 3. 2. 3-18	緩衝材厚さの経時変化 ケース ii の初期条件	3-132 3-137 3-143 3-144

表 3.2.3-2	20 緩衝材厚さの経時変化(ケース iii)	3-150
表 3.2.3-2	21 膨潤圧試験に使用する供試体の仕様	3-152
表 3.3-1	検討ケース一覧表	3-155
表 3.3-2	連絡・主要坑道 搬送・定置装置重量 (Case1、Case2)	3-157
表 3.3-3	処分坑道 搬送・定置装置重量 (Case3、Case4)	3-158
表 3.3-4	解析ケース (Case1、Case2)	3-161
表 3.3-5	解析ケース (Case3)	3-162
表 3.3-6	解析ケース (Case4)	3-163
表 3.3-7	設計荷重一覧表	3-165
表 3.3-8	鉄筋かぶり設定値(設定例)	3-168
表 3.3-9	軟岩系岩盤データセットにおける静的力学特性値	3-168
表 3.3-10	解析に用いる岩盤特性値	3-169
表 3.3-11	地盤ばね計算結果一覧表	3-169
表 3.3-12	本設計に用いる鉄筋コンクリートの安全係数(曲げ・軸力)	3-170
表 3.3-13	本設計に用いる鉄筋コンクリートの安全係数(せん断)	3-170
表 3.3-14	断面力一覧(f'ck=18 N mm ⁻²)	3-174
表 3.3-15	せん断耐力照査結果(設計基準強度変更 f'ck=18Nmm ⁻² 合成断面力)	
		3-178
表 3.3-16	せん断耐力照査結果(設計基準強度変更 f'ck=18Nmm ⁻² 合成断面力)	
		3-179
表 3.3-17	断面力一覧(f'ck=24 N mm ⁻²)	3-180
表 3.3-18	せん断耐力照査結果(設計基準強度変更 f'ck=24Nmm ⁻² 合成断面力)	
		3-184
表 3.3-19	断面力一覧(f'ck=18 N mm ⁻²)	3-185
表 3.3-20	せん断耐力照査結果(合成断面力)	3-189
表 3.3-21	孔壁安定検討結果	3-193
表 3.3-22	孔壁安定検討結果 Case4 タイヤ	3-194
表 3.3-23	坑道の設計要件と要件充足の確認方法	3-197
表 3.3-24	坑道の設計要件における各設計間の連携の必要性	3-199
表 3.3-25	使用材料の一覧	3-201
表 3.3-26	HFSC 結合材料構成比および水結合材比	3-202
表 3.3-27	その他の供試体作製に関する条件	3-202
表 3.3-28	物性試験用供試体作製に関する規格	3-202
表 3.3-29	試験配合およびフレッシュコンクリートの性状	3-203
表 3.3-30	試験項目および試験材齢	3-204
表 3.4-1	地下施設の分類と搬送・定置装置	3-209

表 3.4-2 技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容	. 3-210
表 3.4-3 保障措置システムの要求事項	. 3-214
表 3.4-4 要件を踏まえた核セキュリティシステム概念	. 3-214
表 3.4-5 保障措置システムから地上施設、地下施設への要求事項	. 3-215
表 3.4-6 核セキュリティシステムから地上施設、地下施設への要求事項	. 3-215
表 3.4-7 保障措置システムからの要求事項に対する地下施設での対応	. 3-216
表 3.4-8 核セキュリティからの要求事項に対する地下施設での対応	. 3-216
表 3.4-9 保障措置システムに対する搬送・定置設備での具体的な対応例	. 3-217
表 3.4-10 核セキュリティシステムに対する搬送・定置設備での具体的な対応例.	. 3-217
表 3.4-11 技術オプションの特徴比較の視点の整理(搬送・定置設備)	. 3-219
表 3. 4-12 地上施設の一覧	. 3-223
表 3.4-13 封入設備の技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容	. 3-224
表 3.4-14 地上施設の設計と人工バリアなどとの関連性	. 3-225
表 3.4-15 地上施設の設計との関連性まとめ	. 3-226
表 3.4-16 保障措置システムからの要求事項に対する地上施設での対応	. 3-229
表 3.4-17 核セキュリティからの要求事項に対する地上施設での対応	. 3-229
表 3.4-18 保障措置に対する封入設備での具体的な対応例	. 3-230
表 3.4-19 核セキュリティに対する封入設備での具体的な対応例	. 3-230
表 3.4-20 技術オプションの特徴比較の視点の整理(封入設備)	. 3-231
表 3.4-21 搬送・定置設備の概略仕様	. 3-236
表 3.4-22 作業工程に応じた保障措置・核セキュリティ方策の例	. 3-238
表 4-1 インターフェースの設計および試作項目	. 4-2
表 4-2 データベースの設計および試作項目	. 4-2
表 4-3 システムに採用したオープンソフトウェア	. 4-4
表 4-4 ユーザーPC(iSRE 開発用 PC)環境	. 4-4
表 4-5 CIM ツールおよび関連ソフトウェア	. 4-4
表 4-6 iSRE の機能の概要	. 4-6
表 4-7 解析データの画面における機能	. 4-8
表 4-8 「解析データの参照」のインターフェースの検証手順	. 4-9
表 4−9 積算の項目(例)	. 4-10
表 4-10 モニタリング項目の例(操上ほか, 2010)	. 4-11
表 4-11 点検項目の例	. 4-12
表 4-12 文書管理/レポートの画面における機能	. 4-15
表 4-13 各ステップにおける作業の例	. 4-20
表 4-14 iSRE に登録したデータ(1/2)	. 4-22
表 4-14 iSRE に登録したデータ(2/2)	. 4-23
表 4-15 iSRE 登録データから検索したデータ(建設段階のシナリオ)	. 4-27

表	4-16	ひび割れに対する評価の例	4-28
表	4-17	iSRE 登録データから検索したデータ(操業段階のシナリオ)	4-29
表	5-1	地質環境の基本要件およびサイト選定条件に関する文献リスト	5-3
表	5-2	我が国の掘進長 1,000 mを超える坑井情報	5-7
表	5-3	温度特性に係る統計処理結果	5-9
表	5-4	自然密度の統計処理結果	5-10
表	5-5	乾燥密度の統計処理結果	5-12
表	5-6	湿潤密度の統計処理結果	5-13
表	5-7	有効間隙率の統計処理結果	5-14
表	5-8	熱伝導率の統計処理結果	5-18
表	5-9	一軸圧縮強度の統計処理結果	5-22
表	5-10	粘着力(C)の統計処理結果	5-23
表	5-11	内部摩擦角(φ)の統計処理結果	5-23
表	5-12	浸透率(透水係数換算)の統計処理結果	5-25
表	5-13	産出試験による透水係数の統計処理結果	5-27
表	5-14	超深孔掘削などに関する文献リスト	5-34
表	5-15	国内における各種坑井の掘削深度と孔径	5-39
表	5-16	本解析におけるインベントリ	5-49
表	5-17	シナリオ 1+2 のレファレンスケースにおけるパラメータ設定	5-50
表	5-18	シナリオ 1+2 の変動ケースにおける設定値	5-52
表	5-19	シナリオ3の変動ケースにおける設定値	5-52
表	5-20	被ばく線量ピーク値のまとめ	5-55

第1章

はじめに

1章詳細目次

1.	はじ	めに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-1
	1.1 킽	皆景と目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-1
	1.2 才	▶事業の全体計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-1
	(1)	直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発	
		および閉じ込め性能評価手法の高度化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-2
	1)先進的な材料の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-2
	2)閉じ込め性能評価手法の高度化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-3
	(2)	直接処分施設の設計検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-4
	1) 直接処分方策に関する調査・検討	1-4
	2)人工バリアの設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-5
		 処分容器の設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-5
		② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討 ・・・・・・・・・	1-5
		③ 緩衝材の設計	1-6
	3)地下施設の概念設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-7
	4)搬送・定置設備の概念設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-8
	(3)	直接処分施設の設計支援システムの構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・	1-8
	(4)	その他の代替処分オプションについての調査・検討 ・・・・・・・・・	1-9
	(5)	情報収集および評価委員会の設置と運営 ・・・・・・・・・・・・・・・	1-10
	1.3 平	平成 28 年度の実施内容 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-10
	(1)	直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発	
		および閉じ込め性能評価手法の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-10
	1) 先進的な材料の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-10
	2)閉じ込め性能評価手法の高度化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-10
	(2)	直接処分施設の設計検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-11
	1)直接処分方策に関する調査・検討	1-11
	2)人工バリアの設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-11
		① 処分容器の設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-11
		② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討 ・・・・・・・・・	1-11
		③ 緩衝材の設計	1-11
	3)地下施設の概念設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-12
	4)搬送・定置設備の概念設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-12
	(3)	直接処分施設の設計支援システムの構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・	1-12
	(4)	その他の代替処分オプションについての調査・検討 ・・・・・・・・・	1-12
	(5)	情報収集および評価委員会の設置と運営 ・・・・・・・・・・・・・・・	1-12
	参考文	て献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-13

1. はじめに

1.1 背景と目的

東北地方太平洋沖地震やこれに起因する原子力事故を契機として、今後の日本のエネルギ ーシステムをより安全性とセキュリティ性の高いものとしていくことが国家的な重要課題で ある。長期的に安定なエネルギーシステムを構築していく上で、原子力の利用にあたっては、 シビアアクシデント対策など、より高い安全性と核セキュリティの確保を図るとともに、将 来のエネルギー政策や世界のエネルギー情勢などに柔軟に対応可能な技術基盤を整備してお くことが不可欠となっている。従来わが国では資源の有効利用を目的として全量を再処理し、 発生する高レベル放射性廃液をガラス固化体として最終処分することを基本方針として研究 開発を実施してきた。しかしながら、原子力利用における柔軟性を確保しつつ今後のバック エンド対策を着実に進めていくために、これまでに蓄積されてきたガラス固化体の処分に関 する技術的知見および諸外国における直接処分に関する技術的知見ならびにその他の考えら れる代替処分オプションに関する調査・検討事例を利用し、わが国における使用済燃料の直 接処分についての技術的な検討および代替処分オプションの実現可能性の検討を行っておく ことが必要である。そのため、本事業ではわが国における使用済核燃料の直接処分の実現可 能性についての検討およびそれを実現するために必要な技術開発ならびに代替処分オプショ ンの実現可能性についての検討を行うことを目的とする。

なお、本事業の実施においては、高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の地層処分,TRU 廃棄物の地層処分,及び使用済核燃料の直接処分に関する過去の研究開発成果を適宜活用・ 引用する(表 1-1 参照)。

過去の研究開発成果	略称
わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-	H12 レポート
地層処分研究開発第2次取りまとめー,核燃料サイクル開発機構,	
JNC TN1400 99-020 (総論レポート),-021 (分冊1 わが国の地	
質環境),-022(分冊2 地層処分の工学技術),-023(分冊3 地	
層処分システムの安全評価)	
TDU 成棄枷如公共海栓計畫一帶9次 TDU 成棄枷如公研空閉惑而り	
INU	第2次TRU レホート
まとめー,電気事業連合会,核燃料サイクル開発機構, JNC TY1400	第2次TRU レホート
TKU 廃果初処分役納検討音-第2次 TKU 廃果初処分研充開発取り まとめー, 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005)	第2次1RUレホート
1K0 廃棄初処分役柄検討書=第2次 1K0 廃棄初処分研充開発取り まとめー, 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005) わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評	第2次1RUレホート 直接処分第1次取
INU 廃棄初処分役柄復討書 第2次 INU 廃棄初処分研究開発取り まとめー, 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005) わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 価 -第1 次取りまとめー, 日本原子力研究開発機構,	第2次TRUレホート 直接処分第1次取 りまとめ

表 1-1 本事業で利用・引用する主な過去の研究開発成果

1.2 本事業の全体計画

本事業では、わが国において使用済燃料の処分が技術的な合理性をもって実現できることを示すためおよびその処分方法について幅広い選択肢を確保するために、わが国の地質環境

条件や使用済燃料の特性を踏まえ、直接処分等代替処分技術についての調査、検討、技術開 発を実施する。代替処分技術のうち、直接処分技術については、わが国において使用済燃料 の直接処分が技術的な信頼性をもって実現できることを例示するために、考えられる処分場 施設の設計・性能評価技術の開発を実施する。超深孔処分など、現在検討段階にあるその他 の代替処分オプションについては、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え方、 特徴、検討の背景、技術的課題などを明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合の有効な 代替処分オプションについて検討する。技術開発は、国内外の専門家などのレビューなどを 通じて技術的な信頼性を確認しつつ進め、処分場施設の設計・性能評価技術に関する開発成 果を体系的に取りまとめることによって、わが国における使用済燃料の直接処分等代替処分 オプションの適用性についての技術的基盤を提供することを目標とする。

上記に基づき、使用済燃料の直接処分に関する技術開発およびその他の代替処分オプションについての調査と有効性の検討を、わが国の諸条件を考慮して検討を行っておくことが重要と考えられる課題に注力しつつ進めるために、以下の事業項目を設定した。

- 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性 能評価手法の高度化
- 直接処分施設の設計検討
- 直接処分施設の設計支援システムの構築
- その他の代替処分オプションについての調査・検討
- 情報収集および評価委員会の設置と運営

(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性 能評価手法の高度化

本技術開発項目については、2つの技術開発項目(「先進的な材料の開発」、「閉じ込め性能 評価手法の高度化」)に分けて実施する。

1) 先進的な材料の開発

処分容器材料、緩衝材、埋め戻し材について、わが国の地下水水質などの地質環境条件を 考慮しても長期の閉じ込め性能を担保できるか否かを確認するとともに、より有効な新材料 の開発・適用性についても検討を進める必要がある。また、廃棄体が発する高い放射線や発 熱が、処分システムの安全性に与える影響や設計に対する制約条件を緩和するという観点か ら、処分容器や緩衝材、埋め戻し材として使用可能な新材料の有効性について検討・確認す ることが必要である。

そこで、本技術開発項目については、以下に示すような新材料に期待する性能に着目し、 人工バリアである処分容器や緩衝材、埋め戻し材に関し、わが国および諸外国における研究 開発動向の調査を行う。この結果を踏まえて、安全性、経済性、技術的実現性などに関する 検討を基礎試験も含めて実施することにより、新材料の開発や新たな候補材料となりうる材 料選定を行い、人工バリア材料としての適合性に関する知見の総合的な整備と次段階の研究 計画の策定に資する。 ・ 処分容器: 耐食性向上など

・緩衝材、埋め戻し材:高吸着性、高熱伝導性など

平成27年度までに、処分容器材料への適用を考慮して平成25年度に提示された金属ガラス の候補材料を中心に、物理化学的な基本特性や耐食性などの知見の整備を進めるとともに、 容器材料としての適用性、容器材料としての適用に必要な技術開発課題を検討した。緩衝材、 埋め戻し材など他のバリア材料については、機能や性能向上に関し、収着性、熱伝導性に着 目して既往の研究開発事例や国内外における検討状況と適用にあたっての課題を整理して取 りまとめた。

2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

人工バリア材料や燃料集合体などのニアフィールド構成要素の劣化およびそれに起因して 生じる核種の放出・移行に関わる現象や、それらに及ぼす諸因子の影響などに対してわが国 の幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた現象理解やメカニズム解明により不 確実性を低減し、より現実的な閉じ込め性能評価手法を構築することによって、これまで保 守的に見積もってきた閉じ込め性能をより適正に評価し、より高度なバリア機能を期待でき る可能性がある。例えば、処分容器材料の腐食機構を解明、モデル化することにより、経時 的な腐食速度の低下を考慮した腐食量評価に基づいて寿命を推定できる可能性がある。また、 燃料集合体に対して溶解や劣化挙動の理解に基づき閉じ込め性能を適正に評価することによ って、燃料中や金属中の放射性核種の放出速度などに関するモデル/パラメータについて、 より現実的な安全評価上の設定が可能となることが期待できる。

そこで、人工バリア材料や燃料集合体などのニアフィールド構成要素の材料を対象に腐食、 劣化や変質に関する現象、メカニズム、影響因子の作用などを解明するとともに、わが国の 幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた様々なシナリオに対応可能な多重バリ アシステムや構成要素に対する、新たな長期挙動の評価手法の検討や従来の評価手法の高度 化などに資するための知見の整備を行う。

平成27年度までに、人工バリアの閉じ込め性能評価手法に関する研究として、処分容器な ど人工バリアを構成する金属材料を対象に、使用済燃料の直接処分を想定した深部地下環境 における腐食現象の理解、メカニズムの解明、耐食性向上のための試験および文献調査など を実施した。人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす環境因子の影響のうち、微生物の影響につ いては、直接処分を想定した条件での閉じ込め機能への影響評価、影響緩和のための工学的 対策などの観点から知見を整備した。使用済燃料集合体からの瞬時放出および長期溶解につ いては、先進諸外国における評価モデルおよびパラメータに関して不確実性を含めて調査し、 それらの結果をデータベース化するとともに、燃料特性や処分環境の代表的な条件に対する 暫定パラメータを設定した。多重バリアの閉じ込め性能の定量的な比較・評価を行うための 方法論については、地質環境条件や使用済燃料の多様性とそれらに対応した設計オプション のうちの代表的な組合せに着目して例示し、多重バリアの閉じ込め性能に対して重要な因子 や現象を抽出できる見通しを得た。

(2) 直接処分施設の設計検討

本技術開発項目においては、使用済燃料の直接処分のための処分施設の概念設計を行う。 概念設計の対象とする施設・設備は、使用済燃料に適用する人工バリアを構成する廃棄体お よび緩衝材など、それら人工バリアを搬送・定置するための設備、搬送・定置設備の外形や 必要空間と整合するアクセス坑道や処分坑道からなる地下施設とする。また、使用済燃料の 処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えられる様々な方策(操業 中および閉鎖後管理段階の保障措置ならびに核セキュリティ対策、回収可能性の維持など) についても調査・検討を行う。

1) 直接処分方策に関する調査・検討

使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えられる 様々なオプションとしては、多様な使用済燃料集合体を考慮した操業中および閉鎖後管理段 階の保障措置ならびに核セキュリティ対策、回収可能性、モニタリング、モラトリアムの考 え方、処分までの貯蔵場所、貯蔵方法、貯蔵(冷却)期間の維持などが考えられ、これらに 対する方策について事前に検討しておくことは現段階における重要な課題である。したがっ て、処分施設の概念設計を行う現段階において、上記オプションの考え方や方策などについ て、直接処分で先行しているスウェーデン、フィンランドなど諸外国の事例を調査・分析し、 得られた成果・情報をセーフティケースの概念を念頭に置き体系的に整理するとともに、将 来の処分施設の実施設計に反映できるように知識ベースとして整備する。知識ベースとして の整備にあたっては、日本原子力研究開発機構が資源エネルギー庁から平成19年度から平成 24年度にかけて受託した委託事業「先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発」におい て開発し、国内外の処分概念の概要、構成要素(人工バリアなど)の詳細、研究の進展によ る変遷過程などについて調査・分析した結果を取りまとめた「処分概念データベース」を活 用する。また、上記の保障措置および核セキュリティ対策の調査検討の結果抽出された技術 課題を踏まえ、保障措置・核セキュリティシステムの具体化検討および適用候補技術の適用 性確認を実施する。

平成27年度までに、保障措置および核セキュリティについて、まずIAEAでの検討状況、直接処分に関して先行しているスウェーデン、フィンランドにおける処分場施設に関する対応 状況についての事例調査を実施し、必要な保障措置、核セキュリティ上の要件、処分場設計 に反映すべき項目の整理、処分場に適用可能な技術の調査などの保障措置実施方策、核セキ ュリティ確保のための実施方策について予備的な検討を行った。処分施設への適用候補とし て抽出した保障措置技術のうち、廃棄体の固有性確認技術について、適用性を検討した。核 セキュリティ対策については、IAEAの核セキュリティ勧告文書および関連国内法規の要求事 項を処分施設に適用する際の考え方、課題などを整理した。また、各年度の国際会議などを 通じて、IAEAおよび諸外国の関係者から使用済燃料の直接処分に適用する保障措置および核 セキュリティシステムの概念検討の現状についてヒアリングを行った。これにより、操業ま での保障措置、核セキュリティ大の要件が明らかになるとともに、処分場閉鎖後における超 長期の保障措置、核セキュリティ対策は、今後処分場閉鎖までに検討を進めていくことが国 際的なコンセンサスであることが明らかになった。その他、使用済燃料の処分施設の設計段 階において考慮しておくことが必要になると考えられる様々なオプションについて検討・整 備するためのフレームについて調査・検討し、その結果を「処分概念データベース」の拡充 整備に反映した。

2) 人エバリアの設計

①処分容器の設計

使用済燃料集合体を収容する処分容器は人工バリア構成要素の一つであり、その設計においては、バリア機能を発揮するために設定された設計要件を満足させることが必要である。 また、使用済燃料として代表的なものとしてはPWR燃料集合体とBWR燃料集合体があり、それらの燃焼度や濃縮度なども燃料集合体毎に異なるものが存在するため、処分容器にはこれら 多様な使用済燃料を包括して収容可能とすることが求められる。さらに、この多様性に加え て人工バリアの定置方式(横置きあるいは竪置き)に応じた臨界安全性、銅や炭素鋼などの 処分容器材料や容器構造とそれらに応じた製作性(処分容器への使用済燃料集合体の封入技 術や検査技術も含む)、さらには操業時の容器のハンドリング性や処分容器と容器に収容し た燃料集合体の健全性などにも考慮し、これらの観点も踏まえて処分容器の設計を進める必 要がある。

そこで、人工バリアの設計のうち、構成要素の一つとして、多様性のある使用済燃料に対応する処分容器の設計を行い、レファレンスとなる処分容器仕様を提示する。対象とする使用済燃料はPWR燃料集合体およびBWR燃料集合体とする。また、設計を通じて抽出した開発課題とその課題解決策についても併せて示すものとする。

平成27年度までに、炭素鋼処分容器およびそのオプションとなる銅と炭素鋼からなる複合 容器を設計対象とし、また、PWRおよびBWRのレファレンスとする代表的な使用済燃料集合体 を処分対象として、横置きおよび竪置き定置方式に対応する処分容器の設計を実施した。具 体的には、臨界安全解析、放射線遮へい解析および構造解析を実施し、解析結果を基に処分 容器の基本構造、使用済燃料集合体の収容体数や処分容器内での配置、処分容器の肉厚など の基本仕様を示した。その基本仕様の処分容器を前提に、さらに製作性や操業時の閉じ込め 性などの観点から検討と評価を行い、適用する封入・検査技術に関する基盤情報の整備、封 入後の使用済燃料集合体や処分容器の構造健全性に係る評価などを実施し、処分容器仕様の 成立性を確認した。また、これら設計を通じて処分容器の開発課題を抽出し、その課題解決 策についても併せて提示した。

②処分容器の設計における臨界安全に関する検討

使用済燃料の直接処分を行う際には、超長期の時間経過に伴う処分容器の劣化による形状 などの変化を無視することはできない。その場合、燃料やその周辺の条件は想定以上に変わ らないという、通常の臨界安全管理では担保されている要件を満たすことができなくなる。

そこで、未臨界性を担保するための処分容器の設計を行うことを目的とし、以下の項目に ついて検討を進める。

- ・ 臨界安全評価において、燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮する燃焼度クレジット (BUC)の導入が必要と判断される場合、BUCを考慮した基本設計燃料収容容器の設計 に基づく臨界安全評価モデルの構築に必要な、最適減速モデルの作成、および中性子 増倍率を低減するために中性子毒物を使用する場合にはその仕様の検討などを行う。
- 臨界安全ベンチマーク実験データICSBEPの調査によって、処分容器設計時に利用する
 臨界計算コードの精度評価に使用する事が適切な実験データの抽出と代表性評価を
 行い、未臨界を判断するための中性子増倍率の基準値の設定に関する検討を行う。
- BUC導入時に使用する燃焼計算コードの計算精度の確認と、その計算誤差が臨界安全 評価に与える影響の評価を行う。この中では、燃焼計算における詳細な照射履歴によ る影響、燃焼度の軸方向分布の影響なども調査し、特に、BWR燃料の燃焼計算におい て考慮が必要となるボイド率の影響を検討する。わが国のBUC導入ガイド原案では、 通常の再処理、輸送、貯蔵時に考慮して良い核種が選定されているが、直接処分にお いて考慮して良い核種の選定は改めて行う必要があるため、特に、上記の燃焼度クレ ジット導入ガイド原案で考慮して良い核種には含まれていないNp-237に着目して検 討を行う。
- 処分容器の一部に中性子毒物を適用する可能性を検討し、超長期にわたって燃料と共存することが担保できる吸収体として使用可能な材料があるかを検討する。
- 通常の臨界安全評価では、反射体として水を想定する場合が多いが、直接処分の場合、
 廃棄体周辺には緩衝材や岩盤が存在することから、ここでは、これらを構成する物質
 を対象として、反射体効果の検証を行う。
- 設計を超える事態の影響評価を行う必要性について検討を行う。

平成27年度までに、臨界安全ベンチマーク実験データICSBEPに内蔵される実験データを対 象とした代表性評価や未臨界を判断するための中性子増倍率の基準値の設定に関する調査・ 検討を行った。燃焼度クレジット導入時に必要なパラメータの調査・検討については、PWR およびBWR燃料の燃焼計算の誤差、燃焼計算時のパラメータの設定値、燃焼度分布の考慮の有 無による臨界安全評価への影響を検討した。中性子吸収材については、超長期にわたり燃料 と共存することが担保できる材料として、耐水性の高さが期待できる材料や核的な観点から 未臨界担保のための最小必要量などの検討を行った。緩衝材や岩盤を構成する物質の中性子 反射体効果に関して、直接処分の臨界安全の観点で必要とされる計算コード・核データの比 較・検証を進めるために国際ベンチマーク問題を提起・実施し、計算コード・核データの比 較・検証を行った。

③緩衝材の設計

緩衝材は、処分容器とともに、使用済燃料を直接処分する際の人工バリアを構成する要素 の一つであり、処分容器と同様に設計要件が設定されている。緩衝材においても、設計要件 を満足し、使用済燃料の放射線量、形状、寸法、重量などの特徴に加えて、定置方式も考慮 した上で設計することが必要となる。

そこで、設計で示される処分容器に使用済燃料を封入した廃棄体を対象とした緩衝材の設

計を行う。具体的には、ベントナイトとケイ砂の混合体を材料とした緩衝材を対象として、 廃棄体の沈下量を数値解析から求めることにより、緩衝材による処分容器の支持性能を確認 する。また、処分容器の腐食による膨張を考慮した数値解析(腐食膨張解析)により、処分 容器の全量が腐食した場合においても緩衝材の緩衝機能により廃棄体および岩盤が破壊しな いような適切な緩衝材厚さを確認する。緩衝材の設計にあたっては、各解析の入力データを 整備する必要があることから、整備が必要となる緩衝材の力学的および水理学的な物性値な どを取得する。

平成27年度までに、炭素鋼処分容器を対象として、硬岩系岩盤および軟岩系岩盤に、横置 き定置方式および竪置き定置方式に対応する緩衝材の設計を行った。緩衝材の設計に必要と なる緩衝材の力学的および水理学的な物性値を取得するために、緩衝材の乾燥密度およびケ イ砂混合率を変えた条件下での圧密試験、三軸圧縮試験、および透水試験を開始した。銅と 炭素鋼からなる複合容器を想定した緩衝材の設計に必要となる銅の腐食生成物の力学特性な どを取得した。

3) 地下施設の概念設計

わが国を代表する地質環境条件(岩盤の力学特性、初期地圧、水理・地質特性など)を設 定し、使用済燃料の直接処分のための概念設計を行う。人工バリアを地下に適切に構築する ための定置方式や搬送・定置設備の仕様によって、必要となる地下空間の大きさが異なるこ とから、人工バリアのレイアウトに対応する地下施設の概念を設計する。また、地下施設は 使用目的の異なる坑道(アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、処分坑道など)からなる坑道 群で構成され、多くの坑道交差部が存在することから、これらの坑道および坑道交差部の空 洞安定性について解析し、最新の知見に基づく力学的安定性評価指標による評価を行い、概 念設計に反映する。なお、地下施設の概念設計においては、現実的な施工方法と整合を図る ため、施工方法を再現する掘削手順や支保工打設の工程などを考慮する。これにより、より 現実的な地下施設の概念設計を可能とする。さらに、地下施設の建設時においては突発的な 湧水なども考えられることから、地下施設の建設に必要となる対策工についても検討を行う。 これらの設計行為においては、日本原子力研究開発機構が瑞浪および幌延において実施した 地下施設(立坑、水平坑道など)の設計/施工についての実績も踏まえることにより、その 信頼性を向上させる。また、適切な支保工を選定することで掘削土量を抑えるなど、地下施 設の空間設計の合理化を図るため、地下施設の設計に使用する支保工の配合選定のための基 礎物性を取得する。

平成27年度までに、搬送・定置設備の仕様を規定する最大空間を提示することを目的とし、 横置き定置方式、堅置き定置方式およびPEM方式(横置き)を対象として、最新の知見に基づ いた力学的安定性評価指標を用いた地下施設の概念設計を実施した。併せて、処分場の概念 に応じて許容される湧水量が異なるため、湧水対策工を抽出・整理し、湧水対策工の概念設 計を実施した。また、岩盤、処分パネルの形状に対して廃棄体、緩衝材、搬送・定置設備な どから決まる各坑道の内空断面寸法と坑道延長の関係と、適用できる掘削工法を合わせて検 討し処分坑道擦り付け部の概念設計を実施した。さらに、地下施設の空間設計の合理化を図 るため、地下施設の設計に使用する吹付けコンクリートおよび場所打ちコンクリートの配合 選定のための基礎物性の取得を行った。

4) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置設備の概念設計は処分場の地質環境条件や処分場概念、また、これらを前提と して設計された処分容器および緩衝材から成る人工バリア仕様を上位条件として実施される。 この搬送・定置設備の概念設計においては、その成果として、設備の実現可能性を評価し、 開発課題を明確にすることが求められる。このため、代表的な処分場概念や人工バリア仕様 を条件として設備の概念設計を実施することが必要である。代表的な条件としては人工バリ アの横置きおよび堅置き定置方式、緩衝材ブロック定置方式およびPEM定置方式、炭素鋼処分 容器および銅と炭素鋼からなる複合処分容器などを設定する。なお、概念設計の実施におい ては、使用済燃料廃棄体がガラス固化体に比べて長尺化し、かつ、重量も増加することなど の直接処分における特徴および設備の異常・故障やメンテナンスなどの操業に関わる技術と 安全性についても十分考慮するものとする。また、概念設計の最初の段階において、処分場 概念や人工バリアなどの様々な上位条件に対応可能な搬送・定置設備に関わる技術選択肢を 技術オプションとして体系的に整理しておくことが有効である。この技術オプションは構成 技術や機能の全容の把握、さらには上位条件が示された際に適用候補技術の絞込みや着目す べき技術課題の明確化を可能とするための設計ツールとして取りまとめ、概念設計に活用す る。

平成 27 年度までに、代表的な人工バリア仕様および定置方式として、炭素鋼処分容器およ び銅と炭素鋼からなる複合容器、横置きおよび堅置き定置方式、PEM 定置方式などを対象と し、処分坑道の搬送・定置設備の概念設計を行った。この概念設計では、それぞれの設備の 構成や概略の寸法などの仕様を具体化したうえで、それぞれの実現可能性の評価を行い、課 題を抽出した。これらの概念設計を進める前提として、搬送・定置設備へ適用候補技術全般 の調査と整理を行い、技術オプションとして体系的な取りまとめを行った。以上の取組みで 得られた成果を総合的に評価し、有望な技術の信頼性についての課題や開発の難易度などの 技術的な観点に、必要となる坑道の掘削土量などを指標にした経済的な観点を加えて、今後 の搬送・定置設備の開発の方向付けを行った。

(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築

地層処分事業は、長期にわたる事業であり、数世代の技術者が関わる事業であることから、 事業の知識情報を確実に管理し、次世代に継承することが重要となる。また、多様な使用済 燃料を対象とした処分場の設計を効率的に行うためには、設計に関するデータや判断根拠の 一元管理など、設計を支援する工学技術のための知識化ツールが必要となる。このため、本 技術開発項目では処分場の工学技術に関する知識化ツールとして「設計支援システム」の開 発を行う。この設計支援システムは、長期にわたる事業期間における調査・建設・操業・閉 鎖の各プロセスでの設計・施工・維持管理に関わる情報の管理・継承を支援し、設計や施工 の透明性、追跡可能性を確保できるシステムとする。また、設計に用いるデータを共有し、 一元的に管理することで、処分容器・緩衝材・搬送定置設備・地下施設・地上施設の整合的 な設計を支援するとともに、事業期間における情報の増大、技術の進歩に応じて繰り返し行 われる設計を支援するシステムとする。

本システムの構築にあたっては、計画-設計-施工-維持管理までの建設事業全体につい て、IT技術を用いて一括で管理する概念であるCIM (Construction Information Modeling) の考え方を参考として、三次元CADモデルに属性情報を関連付けたデータモデルを用いて情報 の管理を行う。また、データモデルを用いてCAE (Computer Aided Engineering) 技術を利用 することにより、処分施設の設計、建設、維持管理計画および操業計画の策定などを可能と する。本システムを効率的に開発するために、使用済燃料の直接処分に対応した搬送定置設 備と地下施設の概念設計結果を事例として用い、本システム上でデータモデルを試作し、シ ステム開発上の課題を抽出する。また、本システムの開発においては、設計や安全評価の前 提となる地質環境調査評価技術に関する知識化ツールである「次世代型サイト特性調査情報 統合システム(ISIS)」(原子力機構, 2013a)や知識工学的手法を用いた性能評価支援シス テム(たとえば、「電子性能評価レポート(e-PAR)」(原子力機構, 2013b))との連携を 図る。また、これにより、処分施設の設計検討や安全評価、処分施設を設置する地質環境の 見える化を図り、社会・国民に対しても地層処分を分かりやすく説明するための有効なツー ルになり得るよう開発を進める。

平成27年度までに、設計支援システムの要件や具備すべき機能を整理し、それらに基づき 本システムの概念設計を行い、中核となるデータベースとインターフェースの機能の設定を 行った。それに基づき、データベースとインターフェースの基本設計および詳細設計を行い、 一部の機能について試作を進めた。具体的には、統合データベースと設計データベースにつ いて基本設計を行い、地形・地質データベースと図面管理データベースを試作した。また、 モニタリングシステムとのインターフェースと外部解析システムとのインターフェースにつ いて詳細設計を行い、データ作成・更新のためのインターフェースと既存のデータベースに アクセスするためのインターフェースを試作した。

(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討

放射性廃棄物の最終処分方式としては、国際的共通認識としてもっとも有望な方法とされ た地層処分の研究が進められてきている。総合資源エネルギー調査会の放射性廃棄物WGが示 した「放射性廃棄物WG中間とりまとめ(平成26年5月)」(放射性廃棄物WG,2014)では、放 射性廃棄物の最終処分方式として、現在各国が取り組んでいる地層処分のほかに、海洋投棄、 海洋底下処分、沈み込み帯への処分(以上はロンドン条約により禁止)、氷床処分(南極条 約により禁止)や、超深孔処分、岩石溶解処分、井戸注入処分、宇宙処分について国際的な 評価が示された。ここで、地層処分の安全性に未だ不確実性があることから、その不確実性 を今後の研究開発などにより低減することと並行して、今後の技術の進捗により潜在的な課 題が克服されることで検討の対象となりえる方式については、その可能性を模索する、とい う国際的な認識を示している。

このような背景を踏まえ、本技術開発項目においては、代替処分オプションについての調

査・検討を行う。具体的には、超深孔処分など、現在検討段階にあるその他の代替処分オプションについて、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え方、特徴、検討の背景、技術的課題などを明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合の有効な代替処分オプションについて検討する。

平成27年度は、検討の初年度として、全体の調査研究計画を策定した。その他の代替処分 オプション(長期貯蔵などを含む)について調査を開始し、それぞれの処分概念オプション が現在の取り扱いに至った技術情報を取りまとめた。超深孔処分に関しては、検討が進んで いる米国の検討内容に関する情報を、国際ワークショップへの参加を通じて入手、分析した。

(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学などとの間で必要に応じて情報交換など を実施し、関連技術などについての最新情報を入手するとともに、成果の普及などを積極的 に行う。また、本事業に係る専門家・有識者などで構成される委員会を設置し、研究計画、 実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行い、成果報告書を取りまとめる。

1.3 平成 28 年度の実施内容

(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能 評価手法の高度化

1) 先進的な材料の開発

処分容器材料については、金属ガラスについて、平成27年度までの成果に基づき、引き続き耐食性を含む基本特性に関するデータ取得などの知見の整備を行うとともに、従来の処分容器候補材料との耐食性の比較検討に着手する。また、溶射によるコーティングなど施工技術に関する適用性を引き続き検討し、適用にあたっての課題を抽出する。

2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

人工バリアの閉じ込め性能評価手法の構築に資するため、平成27年度に引き続き、金属材 料の腐食現象の理解、メカニズムの解明、腐食による緩衝材特性への影響評価のための試験 および文献調査を行うことにより腐食モデルの高度化を行う。また、微生物の活動に着目し、 直接処分システムにおける多様な影響を考慮した評価に必要なデータの拡充を行うとともに、 人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす影響を評価する。さらに、緩衝材によるC-14などの移行 遅延機能に着目し、拡散係数などの核種移行パラメータの整備を行う。使用済燃料のソース ターム評価では、関連する最新知見の調査を継続し、暫定パラメータについて、これをより 現実的なものとするための精査を行うとともに、整備した瞬時放出および長期溶解のデータ ベースを活用して、直接処分の基本条件以外に、高燃焼度化燃料や MOX 燃料を処分対象とす る変動条件についてもパラメータ設定が行えるように、不確実性の評価を行う。多重バリア による閉じ込め性能を比較・評価するための方法論については、より広範囲な環境条件や設 計に適用できるように高度化するとともに、使用済燃料固有の現象に起因するニアフィール ド環境変遷や代替設計オプションなどを対象として、多重バリアの閉じ込め性能の違いや変
化を具体的に把握するための試解析を行い、多重バリアの閉じ込め性能を向上させるための 性能評価上あるいは設計上の対策に関する知見を拡充する。

(2) 直接処分施設の設計検討

1) 直接処分方策に関する調査・検討

保障措置技術については、平成27年度に実施した廃棄体の固有性確認技術の適用性検討に 基づき、超音波探傷技術を用いた手法に関する技術的な適用性確認をシミュレーション解析 の活用により実施する他、その他の手法(電子タグなど)の開発状況についてのさらなる調 査および適用性検討を行う。核セキュリティ対策については、平成27年度に整理した処分施 設に適用する核セキュリティ対策の考え方などに基づき、IAEAガイドラインなどを参考に仮 想施設の脅威を考察し、核セキュリティシステム検討を行い、施設設計に資する。また、国 際会議などを通じて IAEA および諸外国の使用済燃料の直接処分に適用する保障措置および 核セキュリティの検討状況について、情報を継続して入手する。

2) 人工バリアの設計

①処分容器の設計

処分容器について、平成27年度までの成果を基に、燃料の多様性に着目し、臨界安全解析、 放射線遮へい解析を実施し、使用済燃料集合体の収容体数、肉厚などの基本仕様への影響を 評価する。また、製作や操業に起因する不確かさや制約条件などが処分容器の仕様や健全性 に及ぼす影響についての解析的な評価を行う。

②処分容器の設計における臨界安全に関する検討

処分容器の設計における臨界安全について、平成27年度までの成果を基に、未臨界を判断 するための中性子増倍率の基準値の設定に必要となるデータなどの拡充を行い、臨界安全評 価モデルの構築を進める。また、処分場閉鎖後における設計を超える事態による臨界発生時 の影響評価の必要性について調査・検討を行う。中性子吸収材については、種々の燃料など によって収容する装荷本数が異なることを想定した処分容器の装荷状態についての検討を行 う。緩衝材や岩盤を構成する物質の反射体効果については、計算コード・核データの妥当性 の確認を行う。

③緩衝材の設計

緩衝材について、堅置き定置方式の人工バリアを対象として乾燥密度、ケイ砂混合率を変 化させた緩衝材の設計を行うとともに、横置き定置方式の人工バリアを対象とした複合容器 における設計を行う。また、人工バリアを PEM とした場合について、処分容器に加えて PEM 容器の腐食膨張を考慮した緩衝材の設計を行う。さらに、設計に必要となる緩衝材の物性値 の取得を継続し、データの拡充を図る。

3) 地下施設の概念設計

地下施設について、人工バリア、搬送・定置設備とのインターフェースを考慮した地下施 設の設計フローについて検討する。また、操業を考慮した坑道の底盤コンクリートの設計を 行う。さらに、平成27年度に引き続き、場所打ちコンクリートを対象として配合選定のため の基礎物性を取得する。

4) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置設備について、平成27年度までの成果および上記の1)から3)の関連技術や 他施設の設計検討の成果を基に、人工バリアや地下坑道など他の処分施設設計、また、核セ キュリティ・保障措置を考慮した技術やシステムとのインターフェースとなる設計項目およ び設計フローを明確にし、これら他施設の設計と整合する仕様の搬送・定置設備および地上 施設の概念を例示する。

(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築

設計支援システムについて、平成27年度までの成果に加え、維持管理補修履歴データベー スと積算データベースの基本設計、統合データベースと設計データベースの試作、外部解析 システムとのインターフェースの試作を行う。なお、本システムの開発にあたっては、本シ ステムの機能や役割が利用者のニーズに合うように、常に関係者で情報や課題を共有しなが ら進めることとする。

(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討

超深孔処分について、平成27年度までの成果に加え、社会・経済を含む全般的な課題、地 質環境に関する課題、処分技術および他の工学技術に関する課題、安全評価に関する課題の 観点などから、わが国への超深孔処分の概念の適用に関する検討を進める。

(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学などとの間で必要に応じて情報交換など を実施し、関連技術などについての最新情報を入手するとともに、成果の普及などを積極的 に行う。また、本事業に係る専門家・有識者などで構成される委員会を設置し、研究計画、 実施方法、結果の評価などに関する審議・検討を行い、成果報告書を取りまとめる。

【参考文献】

- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2013a):平成24年度 地層処分技術調査等事業 地 層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2013b):平成24 年度 地層処分技術調査等事業 高 レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発 6 カ年と りまとめ報告書
- 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物 WG(放射 性廃棄物 WG)(2014):放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ、平成 26 年 5 月

第2章

直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発

および閉じ込め性能評価手法の高度化

2章詳細目次

2.	直	接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および
		閉じ込め性能評価手法の高度化 2-1
2	2.1	先進的な材料の開発
	(1)	本項目の背景と目的 2-1
	(2)	金属ガラスの物理化学的特性に関する検討2-3
	1)	検討項目
	2)	Ni 基データベース(TCNI8)を用いた熱力学計算による新規合金系の探査 2-3
	3)	金属ガラスの平衡論の観点からの時間的安定性の調査2-4
	4)	ガラス(アモルファス)形成能の評価因子の計算2-7
	(3)	金属ガラスの溶射コーティングへの適用性2-10
	1)	溶射膜の厚膜化の検討2-10
	2)	異形状基材への溶射の検討2-12
	3)	Ni 基金属ガラス溶射被膜の耐食性に関する予備的調査 2-17
	(4)	金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験2-19
	1)	実施概要
	2)	金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた浸出試験2-20
	(])金属ガラス試料および合金試料 2-20
		〕浸出試験
	3)	結果および考察2-23
	(]	〕Zr 基金属ガラス 2−23
	2	② Ni 基金属ガラス 2-30
	Ċ	D Cu 基金属ガラス
	(4	② 従来の高耐食性金属材料 2-43
	(5)	Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験 2-49
	1)	試験の概要2-49
	2)	実験方法
	(]	〕試験庁
	(2	2) 試験溶液
		3) 試験手順
-	3)	実験結果と考察
2	2.2	閉じ込め性能評価手法の高度化
	2.2	-1 人工ハリア材料の闭し込め性能の評価に関する研究2-56
	(1)
	(2) 処7谷奋材科の機長争期
	1	/ 灰系쾟腐食生成物形成訊駛と皮膜の性冻評価2-57
		(1) 夫阙 刀伝

2)実験結果と考察	. 2-59
2)	交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング	. 2-69
1)実験方法	. 2-69
2)実験結果と考察	. 2-70
3)	レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の	
	腐食速度のモニタリング	. 2-77
1)実験方法	. 2-77
2)実験結果と考察	. 2-79
4)	ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動	. 2-83
1)実験方法	. 2-83
2)実験結果と考察	. 2-86
5)	代替処分容器候補材料(Cu, Ti, Ni 基合金等)の	
	ガンマ線照射下での電気化学特性	. 2-94
1)実験方法	. 2-94
2)実験結果と考察	. 2-96
(3)	人工バリア性能への微生物影響評価	2-105
1)	試験方法	2-107
2)	温度条件 30°C における腐食試験結果	2-108
3)	温度条件 50°C での腐食試験と炭素鋼の腐食	2-113
4)	ベントナイト内に含まれる微生物量の推定	2-116
(4)	緩衝材中の C-14 移行挙動試験	2-118
1)	試験手法	2-118
2)	解析手法	2-119
3)	試験結果	2-119
(5)	銅とベントナイトの相互作用に関する調査	2-122
1)	試験方法	2-122
2)	試験結果と考察	2-123
2.2.2	2 使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究	2-127
(1)	本項目の背景と目的	2-127
(2)	被覆管からの C-14 の放出量および化学形態の調査	2-130
1)	調查対象	2-130
2)	燃料集合体における C-14 生成の起源とインベントリ	2-131
3)	被覆管の腐食挙動	2-132
(1)) 被覆管の外周面に生成する酸化膜	2-132
2) 被覆管の内周面に生成する酸化膜	2-133
3)ジルカロイおよびジルコニウム酸化物の腐食	2-134
4)	被覆管からの C-14 の放出挙動	2-134
5)	被覆管から放出される C−14 の化学形態	2-135

6) C-14 ソースタームに関するまとめとわが国の直接処分評価への適用性	2-135
(3) 国内の使用済燃料の FGR の検討	2-137
 国内 PIE 結果に基づく FGR の検討 	2-137
 国内の燃料集合体設計の変遷 	2-137
② 国内 PIE 結果	2-139
③ 使用済燃料の発生体数	2-144
 国内向け FGR の設定手法 	2-145
2)シミュレーション手法の適用性検討	2-149
① FEMAXI コードにおける FGR 計算の取扱い	2-149
 国内外における FEMXI 活用事例の調査 	2-154
③ FGR 検討における FEMAXI コードの適用性	2-156
(4) 不確実性および燃料多様性に対応するための継続調査	2-158
1) 欧州諸国におけるソースタームパラメータの幅などの設定	2-158
2) ソースタームパラメータの不確実性についての感度解析	2-160
 3)不確実性のパラメータの暫定値への反映方針 	2-163
2.2.3 多重バリアによる閉じ込め性能評価手法に関する研究	2-166
(1) 本項目の背景と目的	2-166
(2) 広域的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備	2-169
1)検討対象とする地質環境条件と処分場位置	2-170
2)処分場位置に応じた水理および化学場の変化	2-171
① 前提条件	2-171
② 広域密度流解析結果	2-172
③ 処分場位置のオプションに応じた塩分濃度および	
地下水流速・流行変遷のパターン	2-174
3) 処分場位置に応じた地質環境条件とその変遷に対する解析結果と比較	2-176
①初期深度の差異による地下水流動およびその変化	2-176
②水平方向の位置の差異(海水準変動の影響、大規模断層の上流/下流の影響)	
による地下水流動および地下水化学の変化	2-177
4) 広域的な閉じ込め性能評価に関する考察	2-178
 (3)局所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備 	2-183
1) 定置方式と坑道周辺の亀裂の状態に着目した局所的な	
	2-185
 ① 核種移行の二次元水埋・物質移行モデルの作成および解析データ ② なにな出 	2-185
② 解析結果	2-187
2) 正直万式と地下水の王流動万向の違いに看目した局所的	0.151
	2-191
 	

作成および解析データ 2-191

191
193
194
197
200
200
201
203
204
206

直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能 評価手法の高度化

直接処分では、使用済燃料の多様性や不確実性、使用済燃料の処分に伴い生じる挙動や影響の複雑性、総線量の最大値の増加等により、ガラス固化体処分に比して核種の閉じ込め性能がより重要となる。このことを踏まえ、わが国において使用済燃料の直接処分が技術的な 合理性を持って実現できることを示すためには、人工バリアである処分容器材料および緩衝 材、ならびに処分容器内部充填材、埋め戻し材について、必要となる閉じ込め性能を確保す ることが可能かを確認することが重要である。

これらを踏まえ、本技術開発項目では、以下について検討する:

- ・直接処分を行う場合の処分容器材料、緩衝材、埋め戻し材に適用可能な先進的な材料の開発を通じて、閉じ込め性能の向上の可能性を検討する。
- ・人工バリアの閉じ込め性能評価における不確実性を低減させることを目的とし、使用 済燃料の特性および人工バリア材料の腐食、劣化および変質などに係る知見の拡充を 行うとともに、閉じ込め性能の評価手法について検討する。

上記に関する検討内容を、次節以降に「先進的な材料の開発(2.1 節)」および「閉じ込め性能評価手法の高度化(2.2 節)」として示す。また、本章のまとめを 2.3 節に示す。

2.1 先進的な材料の開発

(1) 本項目の背景と目的

使用済燃料のインベントリや廃棄物の形状・寸法および廃棄体から発せられる放射線や発 熱がガラス固化体とは異なることに留意し、より有効な新材料の開発・適用性についても検 討を進める必要がある。また、それらが、処分システムの安全性に与える影響や設計に対す る制約条件を緩和するという観点から、処分容器や緩衝材等として使用可能な新材料の有効 性について検討・確認することが必要となる。

そこで、本研究では、処分場設計に資する技術オプションとして提示することを目的とし て、従来から提案されている候補材料(以下、「従来材料」という)だけでなく、より有効 と考えられる新材料も視野に入れ、わが国における使用済燃料の直接処分に適用可能な人工 バリア材料について幅広い検討を行うこととした。この検討にあたっては、新材料に期待す る性能について、わが国および諸外国における調査結果を踏まえて、安全性、経済性、技術 的実現性等に関する検討を基礎試験も含めて実施することにより、人工バリア材料としての 適合性に関する知見の総合的な整備と次段階の研究計画の策定に資することとした。新材料 に期待する性能の例としては、以下が挙げられる。

· 処分容器: 耐食性向上等

- · 処分容器内部充填材: 放射線遮蔽、中性子吸収等
- ·緩衝材:高吸着性、高熱伝導性等
- ・ 埋め戻し材:止水性向上等

平成27年度までに、処分容器を対象に、既往の研究成果を調査することにより、先進的な

新材料開発にあたっての留意事項・課題を整理した。この調査結果に基づき、処分容器新材 料としてバルク金属ガラスを対象に開発候補材料を提示した。また、提示された候補材料を 対象に、物理化学的な基本特性を整理し、既存の材料との比較を行うとともに、容器材料と しての適用性、容器材料としての適用に必要な技術開発課題を検討した。また、緩衝材につ いては、収着性向上と熱伝導性向上の観点から文献調査を実施し、性能を向上させる可能性 のある材料を抽出するとともに、適用上の課題を整理した。

平成28年度は、平成27年度までの成果に基づき、金属ガラスについての検討を継続した。 具体的には、検討対象とする合金の見直しや改良を行うとともに、引き続き耐食性を含めて 基本特性に関するデータ取得等知見の整備を行った。また、溶射によるコーティング等施工 技術に関する適用性の確認を行った。平成28年度の実施概要項目は以下のとおり。

・金属ガラスの物理化学的特性に関する検討

候補となる新合金はいずれも非晶質であることから、その熱力学安定性等の物理化 学的な基本特性を整理する。平成 28 年度は平成 27 年度までの検討結果等を参考に対 象とする合金組成を選定し、それに対して引き続き状態図、自由エネルギー解析等の 熱力学的な検討を行った。また、ガラス形成能を評価するパラメータについて、平成 27 年度適用可能性が見出されたΩパラメータなど新たな指標を含めて選定された合金 に対する適用性を検討した。

・金属ガラスの溶射コーティングへの適用性

処分容器への施工を考慮して溶射コーティングの適用を検討した。平成27年度まで の研究により良好なコーティングが可能であることが確認されたNi合金については、 より厚い溶射膜形成を試みるとともに、その性状評価を進め、溶射条件の最適化を図 った。さらに、円筒形状の処分容器への溶射を想定し、曲面をもった基材への溶射技 術の適用性を検討した。

・金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験

平成27年度に引き続き薄帯や板材よりも比表面積の大きい粉末粒子を用いて、淡水 系地下水および塩水系地下水を考慮した条件での合金の耐食性評価試験を行い、元素 浸出量の経時変化などデータの拡充を行った。比較のため、ステンレス鋼、ニッケル 基合金等の従来の高耐食性金属試料を用いた試験も継続して実施し、浸出量等の評価 を行った。

・Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験

平成 27 年度までの溶射コーティングへの適用およびアトマイズ粉末による耐食性 評価試験より、処分容器材料として最も有望と考えられる Ni 基合金を対象として、高 耐食性金属において問題となる孔食、すきま腐食といった局部腐食に対して従来の高 耐食性金属との耐食性の比較を試みた。

これらの実施内容について、以下の構成で後述の(2)~(5)で報告する。また、そのまとめ を 2.3 項に示す。

・金属ガラスの物理化学的特性に関する検討(後述の(2)参照)

・金属ガラスの溶射コーティングへの適用性(後述の(3)参照)

- ・金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験(後述の(4)参照)
- ・Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験(後述の(5)参照)

(2) 金属ガラスの物理化学的特性に関する検討

金属ガラスの物理化学的特性に関する検討の内容を、以下の1)~4)の構成で報告する。 1)検討項目

2)Ni 基データベース(TCNI8)を用いた熱力学計算による新規合金系の探査

3) 金属ガラスの平衡論の観点からの時間的安定性の調査

4) ガラス(アモルファス) 形成能の評価因子の計算

1) 検討項目

平成 27 年度までに、基礎物性データが比較的充実している Fe 基金属ガラスを中心に状態 図等の熱力学的検討、時間-温度-変態図によるアモルファス構造の長期的安定性評価、ガラ ス形成能の評価因子の検討を実施してきた。一方、溶射による施工性、耐食性の観点から処 分容器材料として Ni 基合金が最も有望であることが示されており、Ni 基合金に対する物理 化学的特性の評価が必要である。よって、平成 28 年度は Ni 基合金に対するこれらの特性評 価を実施した。

2) Ni 基データベース (TCN18) を用いた熱力学計算による新規合金系の探査

Ni-Ti-Nb 系に対する熱力学計算を行い、平成 27 年度度に導入した Ni 基データベース (TCNI8)の状態図作成への適用性を検証した。その一例として、Ni-Ti-Nb 三元系合金の 900 ℃ における結果を図 2.1-1 に示す。この結果を実験で得られた状態図 (Yang and Hao, 2000)お よび既往の計算結果事例 (Matsumoto, et al., 2005)と比較すると、本計算結果は、Ni-Ti-Nb 系に対して Ni リッチ側を中心として、既往の計算結果よりも実験結果を正確に再現すること が明らかになった。よって、Ni 基データベース (TCNI8)を用いた状態図計算は概ね妥当と判 断できることから今後本データベースを利用して新規合金組成の探査が可能と考えられる。



図 2.1-1 900 ℃における Ni-Ti-Nb 三元系合金の状態図の計算結果

3) 金属ガラスの平衡論の観点からの時間的安定性の調査

平成27年度までに、いわゆる、時間-温度-変態(Time-Temperature-Transformation)図 および連続冷却-変態(Continuous-Cooling Transformation)図の考え方に立脚して金属ガ ラスの安定性を評価した。その際に、加熱雰囲気中における金属ガラスの安定性を決定する 重要な因子として、金属ガラスの粘性、特に、粘性の温度依存性が重要であることを指摘し た。金属ガラスの粘性の温度依存性を表現する近似式としては、複数のモデル式が提唱され ているが、その中で、式 2-1の Vogel-Fulcher-Tammann(VFT)式が最も汎用的に用いられてい る。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{B}{T - T_0}\right) \quad \text{if } 2.1-1$$

ここで、 7.6 は理想ガラス遷移温度であり、冷却速度もしくは昇温速度が無限小に遅い場合に 検出されるガラス遷移温度である。一般的に、VFT 式はガラス遷移温度(*P=T*_g)における粘性 値、すなわち、 *n*=10¹² Pa·s を拘束条件として課して実験データのフィッティングがなされ る。VFT 式は、実験結果をフィッティングする際に必要なパラメータが *n*₀、*B*および 7.6 の 3 つのみであり、最も簡便であり汎用的に用いられている。ここで、VFT 式に関連するパラメ ータとして、フラジリティーインデックス(*D**)および *m*値を式 2-3 および式 2-4 で定義する。

$$B = D^* T_0$$
 $\exists 2.1-2$

$$m = \frac{BT_g}{\left(T_g - T_0\right)^2 \ln 10} \quad \dots \quad \exists 2.1-3$$

竹内らは、2010年に金属ガラスを含むガラス物質全般の粘性の温度依存性を総合的に取り 扱った総説を報告している(Takeuchi, et al., 2010)。しかしながら、この報告以降、総説 的な文献報告がなされた例は文献調査で見当たらないのが現状である。個別のデータについ ては、本調査で対象としている Fe 基、Ni 基、Zr 基および Cu 基金属ガラスの一部について、 粘性の温度依存性の新規データが散見される。例えば、Parthiban, et al. (2015) は 4 種類 の Fe 基 金 属 ガ ラ ス 、 す な わ ち 、 [(Feo. 5Coo. 5) 0. 75B0. 2Si 0. 05] 96Nb4 、 ([(Feo. 5Coo. 5) 0. 75B0. 2Si 0. 05] 0. 96Nb0. 04) 99. 5Cu 0. 5 、 Fer4Mo4P10C7. 5B2. 5Si 2 お よ び (Feo. 9Ni 0. 1) 77Mo5P9C7. 5B1. 5 合金の粘性式を報告しており、Cu 基では Cu₆₀Zr₃₄Ti₅In1 および Cu₅₈Zr₃₄Ti₅In3 合金の報告が新たになされている(Wu, et al., 2014)。平成 25 年度報告書の 中で報告したデータに *D*および *m*の値を追加した上で、上述の Fe 基および Cu 基のデータを 表 2. 1-1 に示す。

No.	Alloy	<i>η</i> ₀/ 10 ⁻⁵ Pa·s	<i>B</i> /K	T_0/K	$T_{ m g}/{ m K}$	<i>D*</i>	т
1	Fe83B17	3.3	4630	638	760	7.26	103
2	$Fe_{41.5}Ni_{41.5}B_{17}$	3.78	4500	601	720	7.49	99
3	$\mathrm{Co}_{75}\mathrm{Si}_{15}\mathrm{B}_{10}$	2.87	4190	675	785	6.21	118
4	$\mathrm{Fe}_{79}\mathrm{Si}_{10}\mathrm{B}_{11}$	1.9	4505	701	818	6.43	117
5	$\mathrm{Ni}_{75}\mathrm{Si}_{8}\mathrm{B}_{17}$	2.53	4280	670	782	6.39	116
6	$\mathrm{Fe}_{80}\mathrm{P}_{13}\mathrm{C}_{7}$	2.25	4600	616	736	7.47	102
7	$\mathrm{Pt}_{60}\mathrm{Ni}_{15}\mathrm{P}_{25}$	5.31	3560	405	500	8.79	86
8	$Pd_{82}Si_{18}$	6.32	3730	557	657	6.70	106
9	$Ni_{62.4}Nb_{37.6}$	0.49	5380	810	945	6.64	121
10	$Pd_{77.5}Cu_6Si_{16.5}$	2.57	3820	553	653	6.91	108
11	$\mathrm{Pd}_{40}\mathrm{Ni}_{40}\mathrm{P}_{20}$	1.5	3600	509	602	7.07	109
12	$Pt_{60}Ni_{15}P_{25}$	0.45	(4761)	345	464	13.80	68
13	$\mathrm{Cu}_{47}\mathrm{Ti}_{34}\mathrm{Zr}_{11}\mathrm{Ni}_8$	4	(6000)	500	(659)	12.00	68
14	$\mathrm{Pd}_{40}\mathrm{Ni}_{40}\mathrm{P}_{20}$	0.53	(7868)	356	554	22.10	48
15	$\mathrm{Mg}_{65}\mathrm{Cu}_{25}\mathrm{Y}_{10}$	3	(5746)	260	(411)	22.10	45
16	$ m Zr_{46.75}Ti_{8.25}Cu_{7.5}Ni_{10}Be_{27.5}$	4	(8444)	372	(595)	22.70	44
17	${\rm Zr}_{41.2}{\rm Ti}_{13.8}{\rm Cu}_{12.5}{\rm Ni}_{10}{\rm Be}_{22.5}$	4	(7631)	412.5	(614)	18.50	50
18	$Pd_{42.5} Ni_{7.5}Cu_{30}P_{20}$	3.5	(6254)	379	544	16.50	54
19	$\mathrm{La}_{55}\mathrm{Al}_{25}\mathrm{Ni}_{20}$	$258^{*ar{ au}}$	(5517)	306.5	470.3	18.00	42
20	La55Al25Ni15Cu5	$254^{*ar{ au}}$	(5762)	273.1	449.3	21.10	36
21	$\mathrm{La}_{55}\mathrm{Al}_{25}\mathrm{Ni}_{10}\mathrm{Cu}_{10}$	248^{* ^注	(6240)	254.7	440.6	24.50	35
22	La ₅₅ Al ₂₅ Ni ₅ Cu ₁₅	$266^{*\pm}$	(5027)	285.6	435.5	17.60	42
23	La ₅₅ Al ₂₅ Ni ₅ Cu ₁₀ Co ₅	$251^{st imes}$	(6657)	241.2	439.1	27.60	32
24	Au _{77.8} Ge _{13.8} Si _{8.4}	5200	(1359)	241	285	5.64	87
25	$Ni_{59.35}Nb_{34.45}Sn_{6.2}$	_	(7370)	670	887	11.00	60
26	Ni57Fe3Nb35Sn5	_	(9692)	591	876	16.40	45
27	$Ni_{60}(Nb_{0.4}Ta_{0.6})_{34}Sn_6$	_	(11039)	581	906.5	19.00	41
28	$Mg_{61}Cu_{28}Gd_{11}$	(100)	(5734)	256	422	22.40	38
29	$Mg_{59.5}Cu_{22.9}Ag_{6.6}Gd_{11}$	(44)	(6225)	249	425	25.00	37
30	$\mathrm{Pd}_{79.5}\mathrm{Au}_{4}\mathrm{Si}_{18.5}$	$15000^{*\pm}$	(3193)	515	622	6.20	75
31	Ce60Ni10Al10Cu20	_	(252)	331	373	0.76	23
32	$\mathrm{Pd}_{40}\mathrm{Cu}_{30}\mathrm{Ni}_{10}\mathrm{P}_{20}$	934	4135	447	575	9.25	63
33	Pd43Cu27Ni10P20	_	_	_	568.3	_	_

表 2.1-1 代表的な金属ガラスの VFT パラメータ(η_0 , *B*, T_0), ガラス遷移温度(T_g)および *D**ならびに m値(1/2)

No.	Alloy	η₀/ 10 ⁻⁵ Pa·s	<i>B</i> /K	$T_0/{ m K}$	$T_{ m g}/{ m K}$	D*	т		
34	$[(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{0.75}B_{0.2}Si_{0.05}]_{96}Nb_4$	$6.34^{* ext{theta}}$	20455 ± 250	273 ± 3	825	74.93	24		
35	$([(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{0.75}B_{0.2}Si_{0.05}]_{0.96}$ - Nb _{0.04}) _{99.5} Cu _{0.5}	$63.6^{*\pm}$	19083 ± 250	260 ± 3	793	73.40	23		
36	${ m Fe_{74}Mo_4P_{10}C_{7.5}B_{2.5}Si_2}$	$5.93^{*\pm}$	21062 ± 250	173 ± 3	733	121.75	21		
37	$(Fe_{0.9}Ni_{0.1})_{77}Mo_5P_9C_{7.5}B_{1.5}$	$0.585^{st imes}$	14945 ± 250	320 ± 3	698	46.70	32		
38	$\mathrm{Cu}_{60}\mathrm{Zr}_{34}\mathrm{Ti}_5\mathrm{In}_1$		694.2	641 ± 2	680 ± 1.2	1.08	135		
39	$\mathrm{Cu}_{58}\mathrm{Zr}_{34}\mathrm{Ti}_5\mathrm{In}_3$		2008.8	586 ± 5	674 ± 1.2	3.43	76		

表 2.1-1 代表的な金属ガラスの VFT パラメータ(η_0 , *B*, T_0), ガラス遷移温度(T_g)および *D**ならびに m 値(2/2)

*^注: $T=T_g$ で $\eta=10^{12}$ Pars を満たすよう、オリジナル文献の値を補正している。

表 2.1-1 より、Parthiban, et al. (2015)が報告した Fe 基金属ガラス(No.34~37)の 7.温 度は室温近傍であり、これらの金属ガラスのガラス形成能は他の Zr 基金属ガラス等と比較し て必ずしも高くはないことを意味している。しかしながら、Fe 基金属ガラス(No.34~37)の D*の値は他の金属ガラスと比較して大きな値をもっており、逆に、mの値は相対的に小さな 値をもっている。このことからこれらの Fe 基金属ガラスでは内部の局所原子構造として疑似 的なネットワーク構造が発達していると示唆される。Fe 基金属ガラス(No.34~37)は、Pd-Si 金属ガラスに見られる三角柱プリズム連結構造(Gaskell, 1979)が発達していると考えられ、 このネットワーク的な構造が熱的な活性に対して強固であることから、人工バリア材として 金属ガラスを利用することは、熱的安定性の観点から有利であることを示唆している。

一方、Wu らが示した Cu 基金属ガラス(No. 38、39)のデータは、他の金属ガラスとほぼ同等 であるが、In の微少添加により D^{*}値の増加(m値の減少)が認められ、ネットワーク構造の 発達によりガラス系性能が向上していると理解される。現時点では、Ni 基金属ガラスについ て有用な粘性の温度依存性のデータは見当たらないが、今後、引き続き調査を進め、本研究 で研究対象とする合金組成もしくは合金組成に限りなく近い合金を対象として、金属ガラス の平衡論の観点からの時間的安定性の調査を行う予定である。

従来、金属ガラスは局所原子構造に基づき、以下のような分類がなされている(Inoue and Takeuchi, 2011)。

- ・Mg 基や Zr 基金属ガラスなどの金属原子のみで構成される金属-金属系金属ガラスの 20 面体的配列
- ・半金属元素を含有する金属-半金属系金属ガラス、特に、Pd 基やPt 基などの貴金属系 で見られる複数多面体配列

・同じ金属-半金属系金属ガラスでも Fe 族基金属ガラスに見られる三角柱連結配列

今後は処分容器材料として有力な Ni 基を中心とする Fe 族基金属ガラスに対し、三角柱が 連結したネットワーク構造を制御することにより、耐熱性に優れた金属ガラスの開発も可能 と考えられる。

4) ガラス(アモルファス)形成能の評価因子の計算

従来、混合エンタルピー(ΔHmix)とともに、原子寸法差の効果として例えば δ パラメータ (Zhang, et al., 2008)を利用してアモルファス形成能の評価因子の計算がなされているが、 最近、これらの補正を行う研究が展開されつつある。このような状況を鑑み、平成 27 年度は、 Ωパラメータ(Yang and Zhang, 2012; Zhang, et al., 2014)に着目してガラス形成能評価へ の適用性を検討した。平成28年度は、原子寸法差の効果を定量的に評価するパラメータとし て新規に提唱されたγパラメータ(Wang, et al., 2015)による評価を試みた。γパラメータが 従来のパラメータと異なる点は、γパラメータが Hume-Rothery の固溶体則(原子容積効果によ る固溶限に関する法則)(Hume-Rothery and Raynor, 1962)との厳密な理論的関係が成立する 点である。ここで、Hume-Rotheryの固溶体則とは、主成分金属の原子半径を r₀、合金成分元 素の原子半径を $r_{\rm A}$ とするとき、 $|r_0-r_{\rm A}|$ $r_0^{-1}の値が 15 %$ 以内であれば一般的に一次固溶体の 固溶度は大きく、 | r₀-r_A | r₀⁻¹の値が 15 %を超えると固溶度は非常に低くなる法則である。つ まり、置換型固溶体について、大きさの近い原子同士の溶解度は大きく、大きさの相違が大 きい原子同士ほど溶解度が小さいことを示している。ここで、本研究の対象である金属ガラ スを考えると、溶質元素を概ね10原子%以上含有し、状態図の観点からは合金組成は一次固 溶体の固溶体以上の溶質原子濃度を有する合金である。したがって、Hume-Rotheryの固溶体 則で示される | r₀-r₄ | r₀-1≥15 %を評価因子として導入することにより、金属ガラス生成にお ける原子寸法差の効果を検討することは重要な意味を持つ。換言すれば、従来のパラメータ とγパラメータを併用することにより、より包括的に原子寸法差の効果を評価することが可能 となる。

γパラメータは式 2-4 で定義される。

$$\gamma = \frac{\omega_{\rm s}}{\omega_{\rm L}} = \left(1 - \sqrt{\frac{\left(r_{\rm s} + \overline{r}\right)^2 - \overline{r}^2}{\left(r_{\rm s} + \overline{r}\right)^2}}\right) / \left(1 - \sqrt{\frac{\left(r_{\rm L} + \overline{r}\right)^2 - \overline{r}^2}{\left(r_{\rm L} + \overline{r}\right)^2}}\right) \dots \qquad \vec{x} \ 2.1 - 4$$

ここで、式 2-4 で示される γ パラメータは構成元素の原子寸法の最小値(S)と最大値(L)に関す る項(ω)の比、すなわち、 $\omega_s \omega_{-1}$ で定義され、 ω_s および ω_L は式 2-4 の最右辺項の分子および 分母で表示されるように、構成元素の最小、最大および平均原子半径(r_s , r_L および \bar{r})の関数 である。なお、 \bar{r} は式 2-5 で表されるように、合金組成 c_i に関する加算平均である。

Wang, et al (2015)によれば、 $|r_0-r_A|$ $r_0^{-1}=15$ %で与えられる Hume-Rotheryの固溶体則の閾値は、 γ パラメータで評価した場合、 $\gamma=1.17$ に相当する(Wang et al., 2015)。なお、比較のために δ パラメータの定義式を式 2-6 に示す。 γ パラメータと δ パラメータの定義式、すなわち、式 2-4 と式 2-6 を比較した場合、式 2-6 で与えられる δ パラメータの方が平易な式構成であり、また、原子寸法差の効果を表現する物理的な意味も δ パラメータの方が理解し易い特徴をもっている。式 2-4 で定義される γ パラメータは、特に、構成元素の中の最小値(S)と最大値(L)に注目して、評価を行う合金系における原子寸法差の効果を表現するパラメータであると理解できる。

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_i \left(1 - \frac{r_i}{\overline{r}}\right)^2} \times 100 \quad \dots \quad \exists 2. \ 1-6$$

本研究では、式(2-4)で定義されるγパラメータと昨年度に調査を行ったδパラメータの相関を調査した。方法は、1997年に発表された三元系アモルファス合金に関するデータブック (Kawazoe et. Al., 1997)から351の合金系および6500超の合金組成を引用して、統計調査 を行った。図2.1-2にその結果を示す。



図 2.1-2 三元系アモルファス合金に対するδパラメータとγパラメータの相関関係

この図から、 δ パラメータと γ パラメータは一次関数的な比例関係が認められ、正の相関 があることが分かる。また、三元系アモルファス合金のほとんどが2つの一点鎖線で挟まれ た一次関数の領域にプロットされること、さらに、プロットの平均値は領域の中央を示す点 線で表現されることが分かった。図2.1-2の縦軸には γ =1.17を破線で表示しているが、三 元系アモルファス合金のプロットは、概ね、 $\gamma \ge 1.17$ であり、Hume-Rotheryが提唱した結晶 系固溶体の原子寸法差以上の効果が認められることが分かった。

次に、本検討で対象としている Zr 基、Fe 基、Cu 基および Ni 基の金属ガラスに γ パラメ ータを適用した結果を表 2.1-2 に示す。 γ パラメータと δ パラメータは、表 2.1.-2 に示し た金属ガラスの中で、Fe₇₆Si₉B₁₀P₅合金を除いて概ね比例関係が成立している。この結果をも とに、 γ パラメータ、 δ パラメータおよび Ω パラメータと金属ガラス生成のための臨界直径 (*d*.) との相関を図 2.1-3 に示す。なお、図 2.1-3(c)は平成 27 年度報告した Ω パラメータと *d* の結果である。図 2.1-3(a)および(b)より、 Ω ~10 および γ ~1.3 付近で特異的に *d* が大 きなバルク金属ガラスが生成する傾向が分かった。また、 γ と結晶合金の固溶体生成に関す る Hume-Rothery 則の関係 ($\gamma \leq 1.17$)から、この特異点は、結晶の固溶限よりもわずかに原子 寸法差が大きな条件を満たす合金系でセンチメートル級のバルク金属ガラスが生成する傾向 があることを意味している。このような、 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ および $Cu_{36}Zr_{48}Al_8Ag_8$ バルク金属ガ ラスの d_c に関する特異性の存在については、 Ω パラメータに着目するのみでは見出すことが できなかったものである。

表 2.1-2 Zr 基、Fe 基、Cu 基および Ni 基の各合金の γ パラメータ、 δ パラメータ、ボルツ マン定数で規格化したミスマッチエントロピー(S_{σ}/k_{B})および混合エンタルピー(ΔH_{aix})、 Ω

パラメータの計算値ならびにバルク金属ガラス生成のための臨界直径(d)

	γ	δ	$S_{\sigma}/k_{\rm B}$	$\Delta {\it H}_{\rm mix}/~{\rm kJmol}^{-1}$	<i>T</i> m,ave∕ K	Ω	$d_{ m c}/$ mm
Zr ₅₅ Cu ₃₀ Ni ₅ Al ₁₀	1.30	10.3	0.22	-30.6	1756.97	0.51	30
Zr ₅₇ Cu _{15.4} Al ₁₀ Ni _{12.6} Nb	5 1.30	9.5	0.19	-33.2	1872.32	0.59	6.3
$Fe_{76}Si_9B_{10}P_5$	1.33	5.1	0.05	-17.9	1807.48	0.68	2.5
$Fe_{43}Cr_{16}Mo_{16}C_{15}B_{10}$	1.84	17.4	0.54	-35.2	2439.93	0.84	2.5
$Cu_{36}Zr_{48}Al_8Ag_8$	1.27	10.0	0.21	-25.7	1683.14	0.61	25
Cu ₆₀ Zr ₃₀ Ti ₁₀	1.27	10.4	0.24	-18.7	1647.57	0.66	2
Ni _{59.35} Nb _{34.45} Sn _{6.2}	1.13	8.8	0.18	-25.2	2017.97	0.57	3



図 2.1-3 γパラメータ、δパラメータおよびΩパラメータと金属ガラス生成のための臨界 直径(*d*,)との相関

(3) 金属ガラスの溶射コーティングへの適用性

金属ガラスの溶射コーティングへの適用性の内容を、以下の1)~2)の構成で報告する。 1)溶射膜の厚膜化の検討

2) 異形状基材への溶射の検討

1) 溶射膜の厚膜化の検討

金属ガラスの溶射方法として、可燃性物質と酸化剤から生成する火炎(フレーム)に原料 粉末を投入し基材に投射するフレーム溶射法の適用をこれまでに試みてきた。フレーム溶射 には高速フレーム溶射や図 2.1-4 に示すような急冷遷移制御溶射ガンを用いた急冷フレーム 溶射などがあるが、HVOF では金属ガラス粉末を完全に溶融せずに過冷却液体状態で基材に噴 霧する方法であり、過冷却液体領域の広い金属ガラスでなければ溶射ができないという条件 があるため、本検討では、急冷フレーム溶射を対象としてきた。

平成27年度までに、処分容器へのコーティングをした場合の容器のハンドリングなども想 定して、Ni 基金属ガラスを厚膜化した際の問題点などを抽出することを目的に、多数回の溶 射膜の積層を試み、問題点の抽出を行った。その結果、2mm厚までは厚膜化しても、0.1mm 程度の膜を単純に積層した状態であり、内部の気泡等も変化せず、かつ金属ガラスからなる 厚膜が作製できることが確認された。しかし、断面に溶射ガン内部に付着した破片が溶射膜 内に観察された。これは長時間連続しての溶射した場合に特有の問題と考えられ、処分容器 への適用における操業上の問題として挙げられた。また、長寿命の処分容器材料としての適 用を考慮すると溶射可能な厚さについても把握しておく必要がある。そこで、平成28年度は、 溶射ガン内部の清浄処理を含めた操業ルーチンに変更してさらに厚い溶射膜の作製を試みた。



図 2.1-4 急冷フレーム溶射に用いる急冷遷移制御溶射ガンの模式図

図 2.1-5 に 3 mm 厚に Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄金属ガラスを溶射コーティングした溶射材の外観を 示す。基材は 50 mm 角の SS400 の板材である。外観は、これまでの溶射材の表面と相違がな い。図 2.1-6 にこの溶射膜の断面を示す。この断面像は、結晶の存在を明瞭にするため凹凸 に高いコントラストが得られる微分干渉観察を行っているため、空孔が強調されている。こ れまで報告してきた Ni 基金属ガラス溶射材と同様に、3 mm 厚であっても薄膜を積層した状況に留まっており、粗大な結晶も存在していない。平成 27 年度に報告したように、厚膜を作製する場合には、溶射途中で溶射ガン内部の清掃をするという操業上の注意を払うことにより、問題なく 3 mm の溶射膜を作製することができた。



図 2.1-5 3 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の外観(左:表面、右:鳥瞰)



図 2.1-6 3 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の断面 (微分干渉観察にて撮影)

図 2.1-7 に作製した溶射膜の示差走査熱量 (DSC) 測定を行なった結果を示す。3 mm 厚の 溶射膜の DSC 曲線の形状は、0.5 mm 厚溶射膜と大きな相違がなく、また結晶化に伴う発熱量 も、ガラス相であった 38 μ m 以下粉末、0.5 mm 厚の溶射膜、3 mm 厚の溶射膜のいずれも大 きな差がなく熱的性質も同等であるといえる。

以上の結果、溶射コーティングについては、溶射ガンの清掃など操業上の注意を払うこと により、厚さ方向を増やして積層することは十分可能であることが明らかとなった。



図 2.1-7 3 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射材の DSC 曲線(比較として、0.5 mm 厚の 溶射膜、溶射前の粉末(粒径 38 μm以下)の DSC 曲線も併せてプロット)

2) 異形状基材への溶射の検討

これまでの溶射コーティングへの適用についての検討においては、平面基材上への溶射を 行ってきた。容器への溶射を考慮した場合、底部等の平面および側面等の大きな曲率の表面 以外への溶射コーティングも必要になることが考えられる。また、把持部等のより複雑な形 状への溶射コーティングも必要となる可能性がある。そこで、平成28年度は、単純平板以外 の形状への溶射コーティングを試みた。その形状として、後述の局部腐食試験に使用する比 較的薄い形状となる「すきま腐食試験片」および外径約14 mmの大きな曲率を持つ円筒形状 への溶射を行い、問題点の抽出を行った。

図 2.1-8 に「すきま腐食試験片」の寸法図および溶射部位を示す。基材材質は JIS SM400, 厚さは 2 mm であり、30 mm×30 mm の表面を有する試験部と、断面が 2 mm×2 mm の細い試験 片保持部を有していることが特徴となる。この「すきま腐食試験片」の試験部の両面と試験

片保持部の一部および端面部について 0.5 mm 厚の Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射コーティ ングの形成を試みることとした。炭素鋼表面はアルミナグリッド#60 にてブラスト処理を行 い、360~380 ℃の余熱後に溶射を行った。両面についてはロボットによる溶射を実施した。 5 回積層後に 340~360 ℃で再余熱を行い、これを 11 回繰り返すことにより(両面とも 55 回の積層)、約500 µm程度の溶射膜を形成させた。端面については、溶射ガンをロボット に設置した状態では実施ができないため、溶射ガンを手持ちしての手動による溶射とした。 図 2.1-9 に溶射後の外観を、図 2.1-10 に溶射コーティングを施した後の断面の微分干渉によ る光学顕微鏡像を示す。外観については、両面ともに通常の平面と同様の膜を形成している ことが分かる。また、断面においては、手動で溶射を行った端面部分も平面部分と変わりな く、角の部分においてもスムーズに膜が連続して形成していた。図 2.1-11 に溶射コーティン グを行った平面部分の X 線回折図形 (XRD)を示す。図中には薄板材での加熱の影響も考慮し て予熱を 300 ℃および 350 ℃にした 2 条件の試料のそれぞれについて、表面の XRD 図形と表 面から 0.1 mm 研磨して膜内部の組織に対応する XRD 図形を示している。予熱温度が 300 ℃ および 350 ℃の場合において、その XRD 図形には表面から内部まで結晶性の鋭いピークが存 在せずブロードな回折図形であることから、いずれの試料においてもガラス相の溶射コーテ ィングが形成されていることが判明した。以上の結果から、基材が薄い部位や端部等の部分 についてもNi 基金属ガラスの溶射コーティングが可能であることが確認された。

一方、上記の基材に連続して溶射した場合についても検討を行った。その結果、図 2.1-12 の XRD 測定結果に示すように結晶性の鋭いピークが存在し、膜の結晶化が進行していること が判明した。また結晶化に伴い膜の剥がれも観察されている。これは、基材が比較的小さく 溶射中にフレームによる加熱が連続的に生じ、かつ基材が薄いために短時間に急激な温度上 昇が生じたものと考えられる。そこで、連続的に溶射する場合においてはガンの走査速度を これまでの 2,100 mm s⁻¹から 4,200 mm s⁻¹ と 2 倍の走査速度として集中的に加熱がなされな いような改善を行った。図 2.1-13 に各種基材へ溶射を行った Ni 基金属ガラス溶射膜の示差 走査熱量(DSC)曲線を示す。また、結晶化のピークの発熱量も図中に示した。いずれのすき ま腐食試験片においても、単純平板の板材と同等の DSC 形状を呈しており、また、結晶化の 発熱量も同等の値を示しており、同等の性状の溶射膜が形成できていると考えられる。



図 2.1-8 すきま腐食試験片の寸法と溶射施工部(黄色部分)



図 2.1-9 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験片」の外観



図 2.1-10 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験 片」断面の微分干渉観察による光学顕微鏡像



図 2.1-11 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食 試験片」表面および内部の X 線回折図形



図 2.1-12 連続して Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した「すきま腐食試験 片」の中で剥離を起こした試験片の X 線回折図形



図 2.1-13 走査速度を増加させ Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスを溶射した 「すきま腐食試験片」および各種形状の溶射膜の DSC 曲線

次に、板状のみだけではなく曲率が大きいパイプ形状への溶射コーティングを試みた。溶 射基材は、JIS STPG370(圧力配管用炭素鋼鋼管継目無)、サイズは 8A-SCH80(外径 13.8 mm、 肉厚 3.0 mm)を用い、パイプを回転させると同時に長手方向にガンを走査して溶射を実施し た。図 2.1-14 に上記基材へNi 基金属ガラスを溶射コーティングした試料の外観を示す。外 観では、平面への溶射と同様の光沢であり剥離等も観察されていない。また、図 2.1-13 に示 している DSC 曲線でも板材や「すきま試験片」の溶射膜と同様な曲線を示し、結晶化の発熱 量も同等であることから金属ガラスの溶射膜が曲率が高い状態でも形成できることが分かっ た。



図 2.1-14 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った外径約 14 mm の鋼管

図 2.1-15 に上記基材へ Ni 基金属ガラスを溶射コーティングした試料の断面の微分干渉観察による光学顕微鏡像を示す。一部、溶射膜に基材と平行な亀裂も観察されており、鋼管の回速速度も含めた溶射ガンの走査速度を中心に溶射条件の検討がさらに必要である。



図 2.1-15 Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラスの溶射を行った外径約 14 mm の鋼管の断面

3) Ni 基金属ガラス溶射被膜の耐食性に関する予備的調査

処分環境における溶射被膜の耐食性については後述の(5)にて検討を行うが、ここでは比較 的腐食性の厳しいと考えられる条件にて予備的な耐食性の検討を行った。平成27年度に作製 したNi-Cr-P-BおよびNi-Cr-Nb-P-B金属ガラス溶射膜について、40gL⁻¹のNaClを酢酸にて pH3に調整した腐食液に浸漬し、耐食性を評価した。この液は、塩水噴霧試験で使われるCASS 液から塩化第二銅を抜いた組成の腐食液である。図2.1-16および図2.1-17に1.0mm厚に Ni-Cr-P-B金属ガラスの溶射を行った表面の顕微鏡観察像および実体顕微鏡像を示す。また、 図2.1-18および図2.1-19には、1.0mm厚にNi-Cr-P-B金属ガラスの溶射を行った表面の顕 微鏡観察像および実体顕微鏡像を示す。いずれも浸漬液中での表面変化が認められず塩水中 での耐腐食性は良好であると考えられる。



1 m m

図 2.1-16 1.0 mm 厚に Ni-Cr-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の顕微鏡観察像



図 2.1-17 1.0 mm 厚に Ni-Cr-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の実体顕微鏡像



図 2.1-18 1.0 mm 厚に Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の顕微鏡像



図 2.1-19 1.0 mm 厚に Ni-Cr-Nb-P-B 金属ガラス溶射を行った表面の浸漬前後の実体顕微鏡像

(4) 金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験

金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験について、以下の1)~3)の構成で報告する。

1) 実施概要

2) 金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた浸出試験

①金属ガラス試料および合金試料

②浸出試験

3)結果および考察

①Zr 基金属ガラス

②Ni 基金属ガラス

③Cu 基金属ガラス

④従来の高耐食性金属材料

1) 実施概要

金属材料の耐食試験には様々な手法があるが、金属ガラス材料においては高耐食性を担保 するガラス形成能の保持が重要な観点であることを考慮して、本検討では金属ガラス粉末を 所定の溶液に浸漬して液相に溶け出す元素量を調べる浸出試験を選択した。試験条件として は、直接処分に想定される地下深部の環境を想定して、セメント系材料使用に起因する高ア ルカリ条件、および埋め戻しまでの酸化雰囲気から深地下における酸素消費に伴う還元雰囲 気を考慮した酸化還元条件、地下水として想定される淡水系・海水系条件といった項目につ いて設定した。さらに温度条件として、常温(25℃)におよび 60 ℃にて試験を実施した。

平成 27 年度までに Ni 基、Zr 基、Cu 基、Fe 基の金属ガラス材料について、物理化学的特 性検討や溶射コーティングの適用性等を考慮して選択された各基 1~2 種類の金属ガラス粉 末を使用して浸出試験を実施した。その結果、Zr 基金属ガラス材料である Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ と Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅および Cu 基金属ガラス材料である Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀について、高い耐食性能 を期待できる結果が示されつつあった(各元素に付記されている値は元素比率を示す)。また、 Ni 基金属ガラス材料である Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄および Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄についても、Cr、P、B の浸出 が確認されたものの使用した試料量から考えれば微少量とみなされる程度であることが確認 された。一方、Fe 基金属ガラス材料である Fe₇₆Si₉B₁₀P₅ は、酸化雰囲気下で高アルカリかつ 塩水条件としたところ著しい腐食進展が生じることが示された。 平成 28 年度は、種々の金属ガラス粉末を用いた浸出試験を継続実施した。高耐食性が期待 される Zr 基および Cu 基については、より長期間にわたる耐食性を確認することとした。一 部元素の浸出が確認された Ni 基については、経時変化取得により浸出傾向を調べた。また、 金属ガラス材料に加え、平成 27 年度に開始した一般的に高耐食性を示すとされている従来の 合金材料 (SUS316L およびハステロイ C276)の粉末試料を用いた浸出試験を継続し、金属ガラ ス材料の耐食性について比較検討を行った。

2) 金属ガラスのアトマイズ粉末を用いた浸出試験

本検討では、処分環境条件における金属ガラスの耐食性に関する試験として、金属ガラス のアトマイズ粉末を用いた浸出試験を前年度より継続実施している。淡水および塩水条件を 設定した高アルカリ溶液に金属ガラス粉末を浸漬し、浸出する元素の測定、ならびに浸出試 験前後の金属ガラス粉末を SEM-EDS で観察することで、金属ガラスの耐食性について基礎的 知見を得ることを目的とした。

① 金属ガラス試料および合金試料

本検討の浸出試験には、ガスアトマイズ法により作製された金属ガラスの粉末を使用した。 ガスアトマイズ法は、合金溶湯に高速のガス(アルゴンや窒素、ヘリウム等の不活性ガス)を 吹き付けることで飛散および急冷凝固させて合金粉末を得る方法である(井上, 2009)。

表 2.1-3~表 2.1-9 は、各金属ガラス粉末および合金試料について含有する各元素の物質 量(mol)を計算したものである。後述する浸出試験では1サンプルあたり8gの金属粉末を使 用したため、表中では8gあたりの物質量(mol)を示した。後述の浸出試験結果においては、 これら試料中の物質量に対して浸出した元素の物質量を浸出率として整理する。

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Zr	91.2	55	67.02	5.36	5.87×10^{-2}
Cu	63.5	30	25.45	2.04	3.21×10^{-2}
Ni	58.7	5	3.92	0.31	5.34×10^{-3}
AI	27.0	10	3.61	0.29	1.07×10^{-2}

表 2.1-3 金属ガラス Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ 粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Zr	91.2	57	67.95	5.44	5.96×10^{-2}
Cu	63.5	15.4	12.78	1.02	1.61×10^{-2}
Ni	58.7	12.6	9.67	0.77	1.32×10^{-2}
AI	27.0	10	3.53	0.28	1.05×10^{-2}
Nb	92.9	5	6.07	0.49	5.22×10^{-3}

表 2.1-4 金属ガラス Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅ 粉末の組成(元素比率より計算)

表 2.1-5 金属ガラス Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Ni	58.7	65	74.31	5.94	0.101
Cr	52.0	15	15.19	1.22	2.34×10^{-2}
Р	31.0	16	9.66	0.77	2.49×10^{-2}
В	10.8	4	0.84	0.07	6.23×10^{-3}

表 2.1-6 金属ガラス Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Ni	58.7	65	73.14	5.85	9.97×10^{-2}
Cr	52.0	13	12.96	1.04	1.99×10^{-2}
Nb	92.9	2	3.56	0.28	3.07×10^{-3}
Р	31.0	16	9.51	0.76	2.45×10^{-2}
В	10.8	4	0.83	0.07	6.13×10^{-3}

表 2.1-7 金属ガラス Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Cu	63.5	60	54.23	4.34	6.83×10^{-2}
Zr	91.2	30	38.95	3.12	3.42×10^{-2}
Ti	47.9	10	6.82	0.55	1.14×10^{-2}

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Fe	55.8	67.35	68.00	5.44	9.75×10^{-2}
Ni	58.7	13.55	13.00	1.04	1.77×10^{-2}
Cr	52.0	15.69	17.00	1.36	2.62×10^{-2}
Мо	96	3.41	2.00	0.16	1.67×10^{-3}

表 2.1-8 SUS316L 粉末の組成(元素比率より計算)

表 2.1-9 ハステロイ C276 粉末の組成(元素比率より計算)

元素	原子量	モル比[%]	重量比[%]	8g中の重量[g]	8g中の物質量[mol]
Ni	58.7	52.41	60.00	4.80	8.18×10^{-2}
Cr	52.0	12.38	16.00	1.28	2.46×10^{-2}
Мо	96.0	22.86	16.00	1.28	1.33×10^{-2}
Fe	55.8	4.15	5.00	0.40	7.17×10^{-3}
W	183.8	8.20	3.00	0.24	1.31×10^{-3}

2 浸出試験

図 2.1-20 に試験概要を示す。液相 16 mL に対し、固相として金属粉末 8 g を加え、液固比 を 2 mL g⁻¹とした。液相は、淡水条件として 0.1 M NaOH 溶液を、塩水条件として 0.6 M NaCl in 0.1 M NaOH 溶液を使用しており、全ての試験において pH 13 とした。酸化・還元条件設 定としては、とくに雰囲気制御を行わず実験室の大気環境下で試薬調整、混合、容器密封を 行った試料を酸化条件と定義した。一方、極低酸素条件となる処分環境条件を考慮して、浸 漬溶液を窒素ガスで脱気するとともに窒素ガスを充填したグローブバック内で混合、容器密 封を行い、酸化還元電位が-400 mV 以下になるように還元剤として Na₂S₂O₄溶液を適宜混合し た試料を還元条件とした。容器にはシーリングキャップ付き PPCO (polypropylene copolymer)製ナルゲン梨型沈澱管 (容量 42 mL)を使用した。浸出試験中は、恒温振とう器 (EYELA 社製 MMS-1)にて装置内温度を 25 ℃および 60 ℃に保ちつつ、100 strokes min⁻¹で振 とうした。所定時間振とう後、孔径 0.45 µm のメンブレンフィルター(ADVANTEC 社製)で固液 を分離した。液相については ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry、Seiko Instrument 社製 SPS7800)を用いて各金属粉末の構成元素について濃度 を測定した。固相については、超純水で洗浄およびシリカゲル入り真空デシケーター内で乾 燥させた後、SEM-EDS による観察を行った。



図 2.1-20 浸出試験概要

3) 結果および考察

本節では、Zr 基、Ni 基、Cu 基、従来合金に分類して浸出試験結果を整理するとともに元素浸出挙動について議論する。

Zr 基金属ガラス

表2.1-10および表2.1-11は、Zr55Cu30Ni5Al10粉末を使用した浸出試験結果、そして表2.1-12はZr57Cu15.4Ni12.6Al10Nb5粉末を使用した浸出試験結果である。浸出試験条件は、pH 13、酸化雰囲気、NaCl濃度0Mあるいは0.6Mとした。表中の「ND」は液相中の元素をICP-AES測定で検出できなかった場合に付されており、使用装置の検出限界は元素によって若干異なるものの1~10ppb程度である。表中では、液相分析より得た浸出元素濃度から、浸出した各原子の物質量を示すとともに(各表の(a)および(b))、金属ガラス粉末試料8gに含有する各元素の物質量に対する、液相に浸出した元素の物質量の割合(%)をmol浸出率として示した(各表の(a')および(b'))。表 2.1-10および表 2.1-11からわかるように、Zr55Cu30Ni5Al10粉末は高温かつ高塩濃度条件下にて400日以上浸漬した場合においても、Al以外の元素はほとんど浸出しないことが確認された。表 2.1-12に示したZr57Cu15.4Ni12.6Al10Nb5粉末に関しても、約600日の浸漬期間において同様にAl以外の元素浸出はほぼ見られなかった。Alについても、浸出試験開始直後に一定量の浸出が確認されるものの、その後浸出量が増加することは無く、数百日に亘って浸出率 0.05%を超えない程度に留まっている。また、これらの元素浸出挙動

は、温度変化およびNaClの有無による顕著な変化は確認されなかった。図2.1-21~図2.1-24、 表 2.1-13 と表 2.1-14 に示した SEM 観察結果、および EDS 分析結果においても、浸出試験前 後の比較から形状変化や局所的な元素量減少などは確認できなかった。これは、平成27年度 報告書(原子力機構, 2016)においても述べたように、一般的に高耐食性を示す Zr や Cu、Ni が、高アルカリ条件下で速やかに不動態皮膜を形成したためと考えられる。A1は、低アルカ リ条件下では水酸化アルミニウムの皮膜を生成し耐食性に寄与するが、本検討のような高ア ルカリ条件下ではアルミン酸塩 $[A1(0H)_4(H_2O)_2]^-$ を生成し溶解反応が激しく進行する。その ため、高アルカリ溶液とA1が接触し続ける場合には、液相にアルミン酸塩としてA1が浸出 し続ける。そのため、表 2.1-10~表 2.1-12 に見られるような高アルカリ条件下における A1 の浸出抑制はA1 自体の特性ではなく、他成分に拠るところが大きいと考えられる。すなわち、 高アルカリ条件下において Zr 等によって安定に形成された不動態皮膜によって溶液との接 触が防がれるために、A1の浸出が抑制されたものと推測される。また、表 2.1-10~表 2.1-12 に示すように NaCl 濃度によって元素浸出に違いが生じなかったことから、ここで形成されて いると考えられる不動態皮膜は 0.6 M NaCl のような高塩分環境下でも長期に亘って安定に保 たれ得る。例えば、コンクリート中の鉄筋(ステンレス鋼)は、塩分によって不動態皮膜が破 壊されて腐食が進行する(岩瀬, 2010)。高塩分環境においても耐食性を示す Zr 基金属ガラス はこの点に関しても優位性があると言える。さらに、A1の浸出が極微量で抑えられたことに 加え、他元素の浸出もほとんど無かったことから、本検討の試験条件において Zr 基金属ガラ スはそのガラス形成能を失わず、アモルファス状態を保っていると考えられる。Zr 基金属ガ ラスについては、本検討で着目している処分環境条件において高耐食性を期待できることか ら、今後もデータ取得を継続する。

(a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0 M		
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	AI [mol]
	1414	ND	1.83×10^{-8}	1.66×10^{-8}	1.51×10^{-6}
	3721	ND	ND	ND	7.04×10^{-7}
	10609	ND	ND	ND	7.19×10^{-7}

表 2.1-10 Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCI 0 M	mol浸出率(%)	
_	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	AI (%)
	1414	ND	5.70×10^{-5}	3.11×10^{-4}	0.0141
	3721	ND	ND	ND	6.59×10^{-3}
_	10609	ND	ND	ND	6.73×10^{-3}

(b)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0 M		
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]
_	1414	ND	1.23×10^{-8}	2.64×10^{-8}	1.77×10^{-6}
	3721	ND	ND	ND	6.29×10^{-7}
	10609	ND	3.33×10^{-8}	1.02×10^{-8}	9.12×10^{-7}

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	AI (%)
_	1414	ND	3.85×10^{-5}	4.94×10^{-4}	0.0166
	3721	ND	ND	ND	5.88×10^{-3}
-	10609	ND	1.04×10^{-4}	1.90×10^{-4}	8.54×10^{-3}

(a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M		
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	AI [mol]
	1414	ND	1.14×10^{-8}	2.80×10^{-8}	1.73×10^{-6}
	3721	ND	ND	ND	6.32×10^{-7}
	10609	ND	ND	ND	6.15×10^{-7}

表 2.1-11 Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M)

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
_	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	AI (%)
_	1414	ND	3.56×10^{-5}	5.24×10^{-4}	0.0162
	3721	ND	ND	ND	5.92×10^{-3}
_	10609	ND	ND	ND	5.75×10^{-3}

(b)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M		
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]
_	1414	ND	2.02×10^{-8}	2.21×10^{-8}	1.94×10^{-6}
	3721	ND	ND	ND	7.85×10^{-7}
	10609	ND	1.61×10^{-8}	1.69×10^{-8}	7.71×10^{-7}

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	AI (%)
_	1414	ND	6.30×10^{-5}	4.14×10^{-4}	0.0181
	3721	ND	ND	ND	7.35×10^{-3}
_	10609	ND	5.02×10^{-5}	3.17×10^{-5}	7.22×10^{-3}
表 2.1-12	Zr57Cu15.4Ni12.6Al10Nb5粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気、	NaC1 濃度 0.6 M)			
----------	---	----------------			

(a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M			
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	AI [mol]	Nb [mol]
	112	ND	ND	ND	1.04×10^{-6}	ND
	3282	ND	1.31×10^{-8}	ND	3.43×10^{-6}	ND
	7342	ND	ND	ND	1.38×10^{-6}	ND
	14230	ND	ND	ND	1.29×10^{-6}	ND

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)			
	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	AI (%)	Nb (%)	
	112	ND	ND	ND	9.96×10^{-3}	ND	
	3282	ND	8.12×10^{-5}	ND	0.0328	ND	
	7342	ND	ND	ND	0.0132	ND	
	14230	ND	ND	ND	0.0124	ND	

(b)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M			
	時間[h]	Zr [mol]	Cu [mol]	Ni [mol]	Al [mol]	Nb [mol]
	112	ND	ND	ND	1.26×10^{-6}	ND
	3282	ND	4.74×10^{-9}	ND	4.23×10^{-6}	ND
	7342	ND	ND	ND	1.78×10^{-6}	ND
	14230	ND	2.53×10^{-9}	7.68×10^{-9}	1.86×10^{-6}	5.66×10^{-8}

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Zr (%)	Cu (%)	Ni (%)	AI (%)	Nb (%)
	112	ND	ND	ND	0.0120	ND
	3282	ND	2.94×10^{-5}	ND	0.0404	ND
	7342	ND	ND	ND	0.0170	ND
	14230	ND	1.57×10^{-5}	5.83×10^{-5}	0.0178	1.08×10^{-3}



図 2.1-21 浸出試験後の Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀粉末の SEM 画像(表 2.1-11 (b)の試料)



図 2.1-22 浸出試験後の Zr₅₅Cu₃₀Ni₅Al₁₀ 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-11 (b)の試料)

Zr₅₅Cu₃₀Ni₀Al₁₀ -	記馬	负前	記馬	倹後
	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Zirconium	67.51	55.71	66.97	54.96
Copper	27.00	32.00	25.56	30.12
Nickel	2.03	2.61	3.87	4.94
Aluminium	3.46	9.67	3.60	9.98

表 2.1-13 EDS 分析による Zr55Cu30Ni5Al10 粉末の元素比(「試験後」は表 2.1-11(b)の試料)



図 2.1-23 浸出試験後の Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅ 粉末の SEM 画像(表 2.1-12(b)の試料)



図 2.1-24 浸出試験後の Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅粉末の EDS 分析結果(表 2.1-12(b)の試料)

Zr ₅₇ Cu _{15.4} Ni _{12.6}	試験前		試験後	
Al ₁₀ Nb ₅	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]
Zirconium	75.19	63.09	72.92	60.79
Copper	10.84	13.05	13.18	15.77
Nickel	10.30	13.43	10.34	13.39
Aluminium	3.68	10.43	3.57	10.06

表 2.1-14 EDS 分析による Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅粉末の元素比(表 2.1-12(b)の試料)

(Nbは使用装置にて禁止元素となっているため測定不可)

Ni 基金属ガラス

表 2. 1-15~表 2. 1-17 は Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄ 粉末を用いた浸出試験結果、表 2. 1-18~表 2. 1-20 は Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末を使用した浸出試験の結果である。Ni 基については、酸化還元条件とし て酸化雰囲気と還元雰囲気の両方の条件による浸出試験を実施している。なお、酸化雰囲気 条件の試験結果である表 2. 1-15 および表 2. 1-18 は、平成 28 年度はデータ取得を行っていな いため平成 27 年度までの試験結果を再掲している(原子力機構, 2016)。表 2. 1-15~表 2. 1-20 から分かるように、Ni および Nb はほとんど浸出が確認されなかった一方で、Cr、P、B の有 意な浸出が確認された。特に、P は時間の経過に対してほぼ線形に浸出しており、60 ℃条件 の場合には 400 日以上の浸漬期間において浸出率 1 %を超えているものもある。一方でB は、 浸出試験開始以降 P と同様に浸出量が大きかったものの、時間の経過とともに浸出が緩やか になりつつあり、浸出率 0.1 %程度となっている。Cr については、酸化雰囲気に比べて還元 雰囲気では浸出が緩やかになる傾向がある。これは、平成 27 年度報告書(原子力機構, 2016)で考察したように、還元雰囲気において Cr は Cr (0H)₄-として 10⁻⁵ M (25 ℃)程度の溶解度 となることが予想され、本試験の Cr 濃度はこの近傍に達していることから浸出が抑制されて いると推測される。なお、Ni はほぼ浸出しておらず、Ni 基金属ガラスでは Ni の不動態被膜 が形成され元素浸出の抑制に寄与していると考えられる。

Zr 基金属ガラス、および後述の Cu 基金属ガラスと比較して特徴的なこととして、Ni 基金 属ガラスからの Cr、P、B の元素浸出は温度に大きく依存しており、高温ほど浸出率が高い。 Zr 基および Cu 基の金属ガラスでは、浸出試験初期に極微量の元素浸出が確認されるものの、 これらに温度依存性は認められず、長時間が経過した後も有意な浸出率増加は生じない。浸 出が温度に依存するということは、これらの元素が温度依存性のある溶解反応を伴って浸出 できるような液相との接触箇所があることを意味する。金属ガラスの構成元素から考えると、 Zr 基では Zr、Cu、Ni が、Cu 基では Cu、Zr、Ti が高アルカリ条件下において高耐食性の不動 態被膜を形成するのに対し、Ni 基では Ni のみである。このため Ni 基金属ガラスでは不動態 被膜が Zr 基や Cu 基金属ガラスと比べて粗く、可溶な元素の浸出を制限する効果がやや小さ い可能性がある。しかしながら、後述する SUS316L やハステロイ C276 のような従来の耐食合 金と比較すると、Ni 基金属ガラスは有意に高い耐食性を示している。

図 2.1-25~図 2.1-28 に浸出試験後の Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄および Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄の SEM 観察と EDS

2 - 30

分析結果を、表 2.1-21 と表 2.1-22 に浸出試験前後の EDS 分析による元素定量結果を示す。 図 2.1-25~図 2.1-28 からは、浸出試験前後で外観に大きな変化は見られず球面も平滑なま まであり、局所的な元素の増加や減少、凝集なども確認できない。また、表 2.1-21 と表 2.1-22 からは、浸出試験前後で元素割合にとくに変化は生じていない。これらの分析から、Ni 基金 属ガラス試料の耐腐食性は浸漬期間一年以上が経過した後においても、比較的安定に保たれ ていると考えられる。加えて、浸出試験においても浸出率は最大で P の 1 %程度であり、こ れら一部元素の微量浸出もガラス形成能に影響するような浸出割合ではないと推測される。

(a)	25°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	330	ND	1.51×10^{-7}	1.54×10^{-7}	2.38×10^{-6}
	1034	ND	2.54×10^{-7}	3.55×10^{-7}	2.59×10^{-6}
_	9936	ND	8.99×10^{-7}	1.55×10^{-5}	5.86×10^{-6}
	2				
(a')	25°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
	330	ND	6.48×10^{-4}	6.19×10^{-4}	0.0382
	1034	ND	1.09×10^{-3}	1.42×10^{-3}	0.0415
-	9936	ND	3.85×10^{-3}	0.0620	0.0940
(b)	60°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	330	ND	9.75×10^{-7}	2.17×10^{-6}	2.49×10^{-6}
	1034	ND	1.95×10^{-6}	6.47×10^{-6}	5.56×10^{-6}
(b')	60°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)	
_	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	В (%)
	330	ND	4.17×10^{-3}	9.64×10^{-3}	0.0578
	1034	ND	8.33×10^{-3}	0.0345	0.105
(c)	25°C	NaCl 0.6 M	酸化雰囲気		
(c)	25℃ 時間[h]	NaCl 0.6 M Ni [mol]	酸化雰囲気 Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
(c)	25℃ 時間[h] 330	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05 × 10 ⁻⁷	P [mol] 2.10 × 10 ⁻⁷	B [mol] 2.22 × 10 ⁻⁶
(c) _	25°C 時間[h] 330 1034	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷	P [mol] 2.10 × 10^{-7} 4.50 × 10^{-7}	$\frac{\text{B [mol]}}{2.22 \times 10^{-6}}$ 2.40×10^{-6}
(c)	25°C 時間[h] 330 1034 9936	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶	P [mol] 2.10 × 10 ⁻⁷ 4.50 × 10 ⁻⁷ 1.69 × 10 ⁻⁵	$\begin{array}{c} \text{B [mol]} \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \end{array}$
(c) (c')	25℃ 時間[h] 330 1034 9936 25℃	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%)	$\begin{array}{c} \text{B [mol]} \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \end{array}$
(c) (c')	25℃ 時間[h] 330 1034 9936 25℃ 時間[h]	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M Ni (%)	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%)	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) P (%)	B [mol] 2.22 × 10^{-6} 2.40 × 10^{-6} 5.67 × 10^{-6} B (%)
(c) (c')	25℃ 時間[h] 330 1034 9936 25℃ 時間[h] 330	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M Ni (%) ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) P (%) 8.42×10 ⁻⁴	$\begin{array}{c} \text{B [mol]} \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{B (\%)} \\ 0.0356 \end{array}$
(c) (c')	25℃ 時間[h] 330 1034 9936 25℃ 時間[h] 330 1034	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M Ni (%) ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) P (%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³	$\frac{B [mol]}{2.22 \times 10^{-6}}$ 2.40 × 10 ⁻⁶ 5.67 × 10 ⁻⁶ B (%) 0.0356 0.0386
(c) (c')	25℃ 時間[h] 330 1034 9936 25℃ 時間[h] 330 1034 9936	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NACl 0.6 M Ni (%) ND ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677	$\begin{array}{c} \text{B [mol]} \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} \text{B (\%)} \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \end{array}$
(c) 	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND ND NACl 0.6 M ND ND ND ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677	$\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \hline \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \end{array}$
(c) 	25℃ 時間[h] 330 1034 9936 25℃ 時間[h] 330 1034 9936 60℃ 時間[h]	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M ND ND ND ND ND ND ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 酸化雰囲気 Cr [mol]	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) P (%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677	B [mol] 2.22 × 10 ⁻⁶ 2.40 × 10 ⁻⁶ 5.67 × 10 ⁻⁶ B (%) 0.0356 0.0386 0.0909 B [mol]
(c) 	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND ND NaCl 0.6 M Ni (%) ND ND NaCl 0.6 M ND NACl 0.6 M Ni [mol] ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 酸化雰囲気 Cr [mol] 1.07×10 ⁻⁶	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶	$\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ (\%) \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.49 \times 10^{-6} \end{array}$
(c) (c') (d)	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330 1034	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND ND NaCl 0.6 M ND ND ND NaCl 0.6 M ND NI [mol] ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 酸化雰囲気 Cr [mol] 1.07×10 ⁻⁶ 2.66×10 ⁻⁶	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶ 6.47×10 ⁻⁶	$\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ (\%) \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.49 \times 10^{-6} \\ 5.56 \times 10^{-6} \\ \end{array}$
(c) 	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330 1034 9936	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND ND NaCl 0.6 M Ni (%) ND ND ND NI (%) ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10^{-7} 3.74×10^{-7} 1.17×10^{-6} 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10^{-4} 1.60×10^{-3} 5.01×10^{-3} 酸化雰囲気 Cr [mol] 1.07×10^{-6} 2.66×10^{-6} 5.56×10^{-6}	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶ 6.47×10 ⁻⁶ 1.31×10 ⁻⁴	$\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ (\%) \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.49 \times 10^{-6} \\ 5.56 \times 10^{-6} \\ 1.34 \times 10^{-5} \end{array}$
(c) (c) (d) (d)	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330 1034 9936	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻⁶ 2.66×10 ⁻⁶ 5.56×10 ⁻⁶	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) P (%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶ 6.47×10 ⁻⁶ 1.31×10 ⁻⁴	$\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ (\%) \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.49 \times 10^{-6} \\ 5.56 \times 10^{-6} \\ 1.34 \times 10^{-5} \\ \hline \end{array}$
(c) (c) (d) (d)	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330 1034 9936	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 酸化雰囲気 Cr [mol] 1.07×10 ⁻⁶ 2.66×10 ⁻⁶ 5.56×10 ⁻⁶	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶ 6.47×10 ⁻⁶ 1.31×10 ⁻⁴	B [mol] 2.22 × 10 ⁻⁶ 2.40 × 10 ⁻⁶ 5.67 × 10 ⁻⁶ B (%) 0.0356 0.0386 0.0909 B [mol] 2.49 × 10 ⁻⁶ 5.56 × 10 ⁻⁶ 1.34 × 10 ⁻⁵ B (%)
(c) (d) (d)	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330 1034 9936 時間[h]	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND ND NaCl 0.6 M Ni (%) ND NaCl 0.6 M Ni (%) ND ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 酸化雰囲気 Cr [mol] 1.07×10 ⁻⁶ 2.66×10 ⁻⁶ 5.56×10 ⁻⁶ 5.56×10 ⁻⁶	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶ 6.47×10 ⁻⁶ 1.31×10 ⁻⁴ mol浸出率(%) P (%)	B [mol] 2.22 × 10 ⁻⁶ 2.40 × 10 ⁻⁶ 5.67 × 10 ⁻⁶ B (%) 0.0356 0.0386 0.0909 B [mol] 2.49 × 10 ⁻⁶ 5.56 × 10 ⁻⁶ 1.34 × 10 ⁻⁵ B (%) 0.0400
(c) (c') (d) (d)	25°C 時間[h] 330 1034 9936 25°C 時間[h] 330 1034 9936 60°C 時間[h] 330 1034 9936 時間[h] 330	NaCl 0.6 M Ni [mol] ND ND ND NaCl 0.6 M ND ND ND NaCl 0.6 M NI [mol] NACL 0.6 M NI [mol] NACL 0.6 M ND	酸化雰囲気 Cr [mol] 2.05×10 ⁻⁷ 3.74×10 ⁻⁷ 1.17×10 ⁻⁶ 酸化雰囲気 Cr (%) 8.79×10 ⁻⁴ 1.60×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 5.01×10 ⁻³ 酸化雰囲気 Cr [mol] 1.07×10 ⁻⁶ 2.66×10 ⁻⁶ 5.56×10 ⁻⁶ 5.56×10 ⁻⁶ 8.79×10 ⁻³ 0.0114	P [mol] 2.10×10 ⁻⁷ 4.50×10 ⁻⁷ 1.69×10 ⁻⁵ mol浸出率(%) 8.42×10 ⁻⁴ 1.81×10 ⁻³ 0.0677 P [mol] 2.17×10 ⁻⁶ 6.47×10 ⁻⁶ 1.31×10 ⁻⁴ mol浸出率(%) P (%) 8.71×10 ⁻³	$\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.22 \times 10^{-6} \\ 2.40 \times 10^{-6} \\ 5.67 \times 10^{-6} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ (\%) \\ 0.0356 \\ 0.0386 \\ 0.0909 \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ [mol] \\ 2.49 \times 10^{-6} \\ 5.56 \times 10^{-6} \\ 1.34 \times 10^{-5} \\ \end{array}$ $\begin{array}{c} B \ (\%) \\ 0.0400 \\ 0.0893 \\ \end{array}$

表 2.1-15 Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)(原子力機構, 2016)

(a)	還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	1369	1.36×10^{-7}	3.39×10^{-7}	2.44×10^{-6}	4.13×10^{-6}
	4705	ND	4.26×10^{-7}	5.44×10^{-6}	4.27×10^{-6}
	10585	1.22×10^{-8}	8.16×10^{-7}	1.55×10^{-5}	5.66×10^{-6}

表 2.1-16 Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a')	還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
	1369	1.34×10^{-4}	1.45×10^{-3}	9.81×10^{-3}	0.0663
	4705	ND	1.82×10^{-3}	0.0218	0.0684
	10585	1.20×10^{-5}	3.49×10^{-3}	0.0620	0.0908

(b)	還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	1369	1.43×10^{-7}	1.83×10^{-6}	3.02×10^{-5}	8.00×10^{-6}
	4705	ND	3.43×10^{-6}	1.37×10^{-4}	9.90×10^{-6}
	10585	1.35×10^{-8}	5.54×10^{-6}	3.01×10^{-4}	1.23×10^{-5}

(b')	還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
	1369	1.41×10^{-4}	7.82×10^{-3}	0.121	0.128
	4705	ND	0.0147	0.551	0.159
	10585	1.33×10^{-5}	0.0237	1.21	0.197

表 2.1-17	NissCrisPisBa粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、	NaC1 濃度 0.6 M)
X 0.1 11		

(a)	還元雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]	
	1392	1.49×10^{-7}	4.34×10^{-7}	3.10×10^{-6}	4.22×10^{-6}	
	4728	ND	1.58×10^{-7}	2.34×10^{-6}	4.81×10^{-6}	
	10608	9.67×10^{-9}	6.74×10^{-7}	8.84×10^{-6}	4.40×10^{-6}	

(a')	還元雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)	
	1392	1.47×10^{-4}	1.86×10^{-3}	0.0124	0.0676	
	4728	ND	6.74×10^{-4}	9.38×10^{-3}	0.0772	
	10608	9.55×10^{-6}	2.89×10^{-3}	0.0354	0.0706	

(b)	還元雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M		
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	P [mol]	B [mol]
	1392	1.36×10^{-7}	2.98×10^{-6}	3.57×10^{-5}	8.75×10^{-6}
	4728	ND	2.08×10^{-6}	8.81×10^{-5}	5.14×10^{-6}
	10608	9.35×10^{-9}	6.05×10^{-6}	1.46×10^{-4}	1.60×10^{-5}

(b')	還元雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	P (%)	B (%)
	1392	1.34×10^{-4}	0.0128	0.143	0.140
	4728	ND	8.89×10^{-3}	0.353	0.0824
	10608	9.23×10^{-6}	0.0259	0.585	0.256

(a)	25°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	333	ND	4.31×10^{-9}	ND	9.79×10^{-8}	3.11×10^{-6}
	811	ND	8.91×10^{-8}	1.35×10^{-8}	3.15×10^{-7}	3.57×10^{-6}
	8905	ND	5.23×10^{-7}	ND	1.04×10^{-6}	5.04×10^{-6}
(a')	25°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
	333	ND	2.16×10^{-5}	ND	3.99×10^{-4}	0.0506
	811	ND	4.47×10^{-4}	4.40×10^{-4}	1.29×10^{-3}	0.0582
_	8905	ND	2.62×10^{-3}	ND	4.22×10^{-3}	0.0822
(b)	0°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	333	ND	3.25×10^{-7}	ND	2.69×10^{-7}	3.86×10^{-6}
	811	ND	7.98×10^{-7}	1.37×10^{-8}	8.71 × 10 ⁻⁷	4.42×10^{-6}
_	8905	ND	2.21×10^{-6}	ND	3.41 × 10 ^{−5}	4.90×10^{-6}
4. 0	0 -					
(b')	60°C	NaCl 0 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)	- (4)	
_	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
	333	ND	1.63×10^{-3}	ND	1.10 × 10 ⁻³	0.0628
	811	ND	4.00×10^{-3}	4.46×10^{-4}	3.55×10^{-3}	0.0721
	8905	ND	0.0111	ND	0.139	0.0799
(c)	25°C	NaCl 0.6 M	酸化雰囲気			
_	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	333	ND	1.21×10^{-7}	ND	1.81×10^{-7}	2.97×10^{-6}
	811	ND	2.49×10^{-7}	1.36×10^{-8}	3.44×10^{-7}	3.25×10^{-6}
_	8905	ND	1.03×10^{-6}	ND	9.60×10^{-7}	4.65×10^{-6}
(c')	25°C	NaCl 0.6 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)		
_	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	В (%)
	333	ND	6.06×10^{-4}	ND	7.39×10^{-4}	0.0485
	811		1.25×10^{-3}	4.45 × 10	1.40×10^{-3}	0.053
_	0900	ND	5.18 ~ 10	ND	3.91 × 10	0.0733
(d)	60°C	NaCl 0.6 M	酸化雰囲気			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	333	ND	2.46×10^{-7}	ND	4.86×10^{-7}	1.56×10^{-6}
	811	ND	1.48×10^{-6}	1.39 × 10 ⁻⁸	2.93×10^{-6}	4.69×10^{-6}
_	8905	ND	3.46×10^{-6}	ND	2.93×10^{-5}	5.33×10^{-6}
(ď)	60°C	NaCl 0.6 M	酸化雰囲気	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	В (%)
	333	ND	1.24×10^{-3}	ND	1.98×10^{-3}	0.0254
	811	ND	7.40×10^{-3}	4.53×10^{-4}	0.0119	0.0765
	8905	ND	0.0173	ND	0.120	0.0868

表 2.1-18 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(酸化雰囲気)(原子力機構, 2016)

表 2.1-19 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaCl 濃度 0 M)

(a)	還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	1370	1.46×10^{-7}	2.46×10^{-7}	7.97×10^{-8}	1.40×10^{-6}	5.21×10^{-6}
	4705	ND	2.95×10^{-7}	ND	1.60×10^{-6}	4.86×10^{-6}
	10585	1.06×10^{-8}	6.87×10^{-7}	1.10×10^{-8}	1.57×10^{-6}	4.88×10^{-6}

(a')	還元雰囲気	25°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
	1370	1.47×10^{-4}	1.23×10^{-3}	2.60×10^{-3}	5.71 × 10 ⁻³	0.0850
	4705	ND	1.48×10^{-3}	ND	6.53×10^{-3}	0.0792
	10585	1.07×10^{-5}	3.44×10^{-3}	3.58×10^{-4}	6.41×10^{-3}	0.0796

(b)	還元雰囲気	60°C	NaCI 0 M				
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]	
	1370	1.41×10^{-7}	9.16×10^{-7}	7.42 × 10 ^{−8}	1.74 × 10 ^{−5}	6.15×10^{-6}	
	4705	ND	1.56×10^{-6}	ND	7.13×10^{-5}	5.77×10^{-6}	
	10585	7.93×10^{-9}	2.91×10^{-6}	4.04×10^{-9}	2.19×10^{-4}	5.19×10^{-6}	

(b')	還元雰囲気	60°C	NaCl 0 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	В (%)
	1370	1.42×10^{-4}	4.60×10^{-3}	2.42×10^{-3}	0.0709	0.100
	4705	ND	7.81×10^{-3}	ND	0.291	0.0940
	10585	7.95×10^{-6}	0.0146	1.32×10^{-4}	0.893	0.0847

表 2.1-20 Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄粉末の浸出試験結果(還元雰囲気、NaC1 濃度 0.6 M)

(a)	還元雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	1370	1.38×10^{-7}	1.93×10^{-7}	8.55×10^{-8}	1.82×10^{-6}	5.50×10^{-6}
	4705	ND	4.04×10^{-7}	ND	6.33×10^{-6}	4.08×10^{-6}
	10608	4.61×10^{-9}	2.33×10^{-7}	3.24×10^{-9}	2.63×10^{-6}	4.60×10^{-6}

(a')	還元雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
	1370	1.38×10^{-4}	9.68×10^{-4}	2.79×10^{-3}	7.44×10^{-3}	0.0896
	4705	ND	2.03×10^{-3}	ND	0.0258	0.0664
	10608	4.62×10^{-6}	1.17×10^{-3}	1.06×10^{-4}	0.0107	0.0750

(b)	還元雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M			
	時間[h]	Ni [mol]	Cr [mol]	Nb [mol]	P [mol]	B [mol]
	1370	1.28×10^{-7}	1.63×10^{-6}	7.34×10^{-8}	2.50×10^{-5}	6.40×10^{-6}
	4705	ND	3.80×10^{-6}	ND	1.07×10^{-4}	1.37×10^{-5}
	10608	6.00×10^{-9}	3.85×10^{-6}	ND	2.26×10^{-4}	5.01×10^{-6}

(b')	還元雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni (%)	Cr (%)	Nb (%)	P (%)	B (%)
	1370	1.29×10^{-4}	8.16×10^{-3}	2.39×10^{-3}	0.102	0.104
	4705	ND	0.0190	ND	0.437	0.223
	10608	6.02×10^{-6}	0.0193	ND	0.920	0.0817



図 2.1-25 浸出試験後の Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の SEM 画像(表 2.1-16 (b))の試料)



図 2.1-26 浸出試験後の Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄粉末の EDS 分析結果(表 2.1-17(b))の試料)

	記馬	検前	試験後		
$N_{65}Or_{15}P_{16}D_4$	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]	
Iron	75.33	68.37	73.85	67.06	
Silicon	15.52	15.89	17.34	17.77	
Phosphorus	9.15	15.73	8.82	15.17	

表 2.1-21 EDS 分析による Ni₆₅Cr₁₅P₁₆B₄ 粉末の元素比(表 2.1-17(b))の試料)

(BoronはEDS定量分析において誤差が大きいため除外した)



図 2.1-27 浸出試験後の Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の SEM 画像(表 2.1-20(b))の試料)



図 2.1-28 浸出試験後の Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の EDS 分析(表 2.1-20(b))の試料)

	言式馬	検前	試験後		
NI65CF13ND2P16D4	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]	
Iron	75.43	68.33	76.58	69.47	
Silicon	15.15	15.49	14.44	15.10	
Phosphorus	9.42	16.18	8.98	15.43	

表 2.1-22 EDS 分析による Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄ 粉末の元素比(表 2.1-20(b))の試料)

(BoronはEDS定量分析において誤差が大きいため除外した)

(Nbは使用装置にて禁止元素となっているため測定不可)

Cu 基金属ガラス

表 2.1-23 は、Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀粉末を使用した浸出試験の結果である。Cu 基金属ガラス粉末の 浸出試験は、pH 13、酸化雰囲気かつ NaCl 濃度 0.6 M の条件でのみ実施している。Cu、Zr、 Ti の浸出が検出されたがいずれも極微量であり、Zr 基金属ガラスと同様に温度依存性や時間 経過に伴う顕著な浸出量増加も見られない。図 2.1-29 と図 2.1-30、および表 2.1-24 からも、 浸出試験前後で外観や元素分布に変化は見られず、EDS による定量比較においても有意な差 は生じていない。これらの結果に見られる高耐食性は、Cu、Zr、Ti のいずれも不動態皮膜形 成を期待できる元素であることが大きく、これらを含有する従来の金属材料にも高い耐食性 をもたらしていると考えられる。さらに金属ガラスにおいては(Cu 基以外の金属ガラスも同 様に)、非晶質状態であるために一様かつ速やかに不動態皮膜が形成されるとともに、結晶質 に見られる孔食などの発生が抑制される効果が付与されるため、これらの元素を含有する従 来合金と比べても、耐食性がより高まることが期待される。

(a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	
	時間[h]	Cu [mol]	Zr [mol]	Ti [mol]
	112	1.06×10^{-7}	1.55×10^{-8}	ND
	3282	1.67×10^{-7}	1.68×10^{-7}	2.21×10^{-7}
	7342	7.76×10^{-9}	2.68×10^{-7}	2.91×10^{-7}
	14227	2.88×10^{-8}	3.50×10^{-7}	3.54×10^{-7}

表 2.1-23 Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀粉末の浸出試験結果

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)
	時間[h]	Cu (%)	Zr (%)	Ti (%)
	112	1.55×10^{-4}	4.54×10^{-5}	ND
	3282	2.44×10^{-4}	4.93×10^{-4}	1.94×10^{-3}
	7342	1.14×10^{-5}	7.83×10^{-4}	2.55×10^{-3}
	14227	4.21×10^{-5}	1.02×10^{-3}	3.11×10^{-3}

(b)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	
	時間[h]	Cu [mol]	Zr [mol]	Ti [mol]
	112	4.61×10^{-8}	1.42×10^{-8}	ND
	3282	1.24×10^{-7}	1.63×10^{-7}	2.12×10^{-7}
	7342	2.61×10^{-8}	2.16×10^{-7}	2.34×10^{-7}
	14227	4.65×10^{-8}	1.09×10^{-7}	1.05×10^{-7}

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)
	時間[h]	Cu (%)	Zr (%)	Ti (%)
	112	6.75×10^{-5}	4.16×10^{-5}	ND
	3282	1.82×10^{-4}	4.76×10^{-4}	1.86×10^{-3}
	7342	3.82×10^{-5}	6.33×10^{-4}	2.06×10^{-3}
	14227	6.80×10^{-5}	3.19×10^{-4}	9.26×10^{-4}



図 2.1-29 浸出試験後の Cu60Zr30Ti10 粉末の SEM 画像(表 2.1-23 (b)の試料)



図 2.1-30 浸出試験後の Cu60Zr30Ti10 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-23 (b)の試料)

表 2.1-24 EDS 分析による Cub0Zr301110 粉木の元素比(表 2.1-23 (b)の評	2.1-24 EDS 分析に。	分析による Cu60Zr30Ti1	0 粉末の元素比(表 2.1-23)	(b)の試料)
---	-----------------	-------------------	--------------------	---------

0 7× Ti	記馬	検前	試験後		
Gu ₆₀ Zr ₃₀ Tr ₁₀	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]	
Copper	55.71	60.93	54.71	60.28	
Zirconium	36.55	27.84	38.14	29.27	
Titanium	7.74	11.23	7.15	10.46	

④ 従来の高耐食性金属材料

表 2.1-25 と表 2.1-26 は、SUS316L 粉末およびハステロイ C276 粉末を用いた浸出試験の結 果である。これらについては、pH 13、酸化雰囲気かつ NaCl 濃度 0.6 M の条件でのみ実施し ている。SUS316L およびハステロイ C276 ともに Cr の浸出が顕著であり、高温において浸出 率が大きくなっている。特に SUS316L では、同様に Cr を含む Ni 基金属ガラスの Cr 浸出率と 比較して、浸漬期間が半分であるにも関わらず既に数十倍の Cr 浸出量となっている。SUS 鋼 において Cr の浸出は粒界腐食を引き起こすとされており(杉本, 2009)、今後も継続する本試 験においてさらに腐食が進展し、元素浸出量が顕著に増加する可能性がある。ハステロイ C276 は SUS316L よりも Cr 浸出率が小さいものの、Ni 基金属ガラスの 2 倍くらいの速さで Cr が浸出している。これらのことは、Ni 基金属ガラスでは SUS316L およびハステロイ C276 と 比べて Cr 浸出が大幅に制限されており、耐食性の根拠となる合金組成がこれら従来合金より も長く保持されると言える。

図 2.1-31~図 2.1-34、および表 2.1-27 と表 2.1-28 は、浸出試験後の SUS316L およびハス テロイ C276 の SEM 観察と EDS 元素分析結果である。EDS 元素分析からは浸出試験前後で元素 組成に大きな違いは確認できない。一方 SEM 観察では、SUS316L に関して、浸出試験前と試 験後に変化が見られた。平成 27 年度に観察した浸出試験前と比べ、図 2.1-31 の試験後では 形状の崩れや付着物らしきものが目立っている。さらに、図 2.1-35 に示した浸出試験時の液 相の目視観察から、SUS316L の液相は茶褐色に濁っている。これらは、水酸化鉄(III)の生成 によるものと考えられる。高アルカリ条件において鉄を主成分とした金属材料は、コンクリ ート中の鉄筋に見られるように、表面に不動態皮膜を形成するため耐食性が高いとされてい る。しかし、今回の試験条件のように塩分濃度が高く酸素も溶存する場合には、塩化物イオ ンによって不動態皮膜が侵されるために鉄の腐食が大きく進行することが予想され、これは コンクリート中の鉄筋腐食に係る塩害と同様の事象と言える(岩瀬ら, 2010).表 2.1-25 の浸 出元素分析においては Fe の浸出が確認されていないが、0.45 µm 孔径のフィルター濾過によ ってコロイドあるいは沈殿物の状態にある水酸化鉄(III)が除去されているためと考えられる。 ハステロイ C276 に関しては、Fe を 5 %含むものの SEM-EDS 分析や浸出試験時の液相等に大き な変化は確認されておらず、Ni 起因の不動態被膜が耐食性を保っていると言える。

また、純 Ni 粉末および純 Cu 粉末についても pH 13、酸化雰囲気、NaCl 濃度 0.6 M、60 ℃の条件で浸出試験を行っているが、250 日の時点ではいずれも有意な元素浸出は確認されていない。

2-43

a)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M		
-	時間[h]	Fe	Ni	Cr	Мо
	315	1.78 × 10 ^{−8}	ND	3.86×10^{-6}	2.80×10^{-7}
	5515	ND	ND	3.27×10^{-5}	3.94×10^{-6}
-					
)	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Fe	Ni	Cr	Мо
-	315	1.82×10^{-5}	ND	0.0148	0.0168
	5515	ND	ND	0.125	0.236
-					
)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M		
_	時間[h]	Fe	Ni	Cr	Мо
-	315	6.10×10^{-9}	ND	8.21 × 10 ⁻⁶	8.26×10^{-7}
	5515	ND	ND	1.80×10^{-4}	2 09 x 10 ⁻⁵

表 2.1-25 SUS316L 粉末の浸出試験結果

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)	
	時間[h]	Fe	Ni	Cr	Мо
	315	6.26×10^{-6}	ND	0.0313	0.0496
	5515	ND	ND	0.690	1.26

表 2.1-26 ハステロイ C276 粉末の浸出試験結果

(a)	酸化雰囲気	≿雰囲気 25℃ NaCl 0.6 M				
	時間[h]	Ni	Cr	Мо	Fe	W
	315	ND	1.83×10^{-7}	5.68×10^{-7}	ND	6.15×10^{-8}
	5515	ND	9.23×10^{-7}	3.45×10^{-5}	ND	7.32×10^{-8}

(a')	酸化雰囲気	25°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni	Cr	Мо	Fe	W
	315	ND	7.42×10^{-4}	4.26×10^{-3}	ND	4.71×10^{-3}
	5515	ND	3.75×10^{-3}	0.0259	ND	5.61×10^{-3}

(b)	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M			
	時間[h]	Ni	Cr	Мо	Fe	W
	315	ND	1.01×10^{-6}	3.20×10^{-6}	ND	2.37×10^{-7}
	5515	ND	3.86×10^{-6}	1.24×10^{-5}	ND	4.17×10^{-7}

(b')	酸化雰囲気	60°C	NaCl 0.6 M	mol浸出率(%)		
	時間[h]	Ni	Cr	Мо	Fe	W
	315	ND	4.08×10^{-3}	0.0240	ND	0.0182
	5515	ND	0.0157	0.0930	ND	0.0319



図 2.1-31 浸出試験後の SUS316L 粉末の SEM 画像(表 2.1-25 の 60 ℃の試料)



図 2.1-32 浸出試験後の SUS316L 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-25 の 60 ℃の試料)

SUS2161	記馬	検前	試験後		
303310L	重量割合[%]	元素割合[%]	重量割合[%]	元素割合[%]	
Iron	67.49	67.49	66.84	66.89	
Chromium	18.88	20.28	19.57	21.03	
Nickel	11.64	11.08	11.25	10.71	
Molybdenum	1.98	1.15	2.34	1.36	

表 2.1-27 EDS 分析による SUS316L 粉末の元素比(表 4.3.4-1 の 60 ℃試料)



図 2.1-33 浸出試験後のハステロイ C276 粉末の SEM 画像(表 2.1-26 の 60 ℃の試料)



図 2.1-34 浸出試験後のハステロイ C276 粉末の EDS 分析結果(表 2.1-26 の 60 ℃の試料)

	言式馬	検前	試験後		
	重量割合[%] 元素割合[%]		重量割合[%]	元素割合[%]	
Nickel	60.32	63.12	61.15	63.36	
Chromium	16.34	19.30	16.46	19.25	
Molybdenum	15.72	10.06	14.86	9.42	
Iron	6.49	7.14	7.23	7.87	
Tungsten	1.13	0.38	0.31	0.10	

表 2.1-28 EDS 分析によるハステロイ C276 粉末の元素比(表 2.1-26 の 60 ℃試料)



図 2.1-35 SUS316L およびハステロイ C276 の浸出試験における液相の観察(5,515 時間後)

(5) Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験

Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験について、以下の1)~3)の構成で報告する。

- 1)試験の概要
- 2)実験方法
 - ①試験片
 - ②試験溶液
 - ③試験手順
- 3)実験結果と考察

1) 試験の概要

チタン、低合金チタンやニッケル基合金に代表される高耐食性金属は、金属表面に保護性 の高い不動態皮膜を形成し、皮膜が健全なかぎり腐食速度は極めて小さいという特徴を有す る。しかし、処分後初期の比較的酸化性雰囲気では、塩化物イオンなど不動態破壊型の化学 種の存在下において孔食、すきま腐食などの局部腐食が問題となり、これらの腐食が生じな い環境で材料を適用することが基本的な考え方となっている(核燃料サイクル開発機構, 1999b)。本検討において耐食性や施工性の観点から最も有望な処分容器材料として選定され た Ni 基の金属ガラスについても、これまでの金属ガラス粉末を用いた耐食性評価試験より、 従来の高耐食性金属と同様に不動態皮膜によって高い耐食性を維持すると考えられる。よっ て、孔食、すきま腐食に着目してこれら局部腐食に対する耐食性を従来の高耐食性金属と比 較することによって、処分容器材料としての性能を相対的に評価することとした。

孔食、すきま腐食には温度、塩化物イオン濃度など環境条件に応じて臨界電位が存在し、 その電位を超える条件でこれらの腐食が生じるといわれている(腐食防食協会,1993)。よって、その臨界電位を測定し、材料間での比較を行うことによって対局部腐食性を評価した。 孔食については、金属の電位を十分遅い速度でアノード分極し、電流値が急激に上昇すると きの電位をもって臨界電位(孔食電位)と見なすことができるといわれている(腐食防食協 会,1993)。一方、すきま腐食については、すきま付きの試験片を用いてアノード分極によ ってすきま腐食を発生・成長させたのち、電位を徐々に低下させ、すきま腐食の進展が停止 して再不動態化するときの電位(すきま腐食再不動態化電位)を臨界電位として評価する手 法が用いられている(腐食防食協会,1993)。

平成28年度はこれらの臨界電位の評価に向けた予備的な検討として、炭素鋼上にNi基合金の溶射膜を形成させた試料およびそれにすきま形成材を付与した試料を用いてアノード分極測定を実施した。

2) 実験方法

試験片

金属ガラスには Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄を用い、(2)-2)にて溶射処理を行ったすきま腐食試験片を 用いた。試験前の試験片の外観例を図 2.1-36 に示す。すきまなしの試験については、この試 料の中央の穴を避けた位置から約 10×10 mm の部分を切出し、一方の面にリード線を取り付 けた後、エポキシ樹脂に埋め込んだ。リード線を取り付けた面と反対側の面を電極面として 研磨を行い、エメリー#800 にて仕上げた。すきま付き試験片については、試験片側面および 柄の部分をエポキシ樹脂で被覆したのち、図 2.1-37 に示すようにポリサルフォン製のすきま 形成材を取り付け、ボルト/ナットで固定した。すきま付き試験片を用いた試験では、表面 を溶射時のままの場合と研磨してエメリー#800 にて仕上げた場合の両方について行った。

2 試験溶液

試験溶液には 0.5 M, 1.0 M および 3.0 M の NaCl 水溶液を用いた。試験温度は 90 ℃とした。

③ 試験手順

試験片を試験溶液とともに電解セルに入れ、参照電極(飽和カロメル)対極を設置したの ち、試験溶液を窒素ガスにて3時間以上脱気した。次に各電極をポテンシオスタットに接続 し、試験片の自然電位を測定したのち、JIS G0577 に準じて自然電位から20 mV min⁻¹の速度 でアノード分極を行った。

3)実験結果と考察

すきまなし試験片のアノード分極測定結果を図 2.1-38 に示す。自然電位からアノード分極 すると-0.4 V(vs. SCE)付近で活性態のピークを示したのちに不動態化して電流値が減少した。 0.5 M および 1.0 M では 0.3 V (vs. SCE)付近から電位とともに電流値が増加の傾向を示し、 3.0 M では約-0.3 V 以降電位とともに電流値が増加する傾向を示した。また、いずれの条件 でも 0.9~1 V (vs. SCE)付近で電流値の急激な上昇が認められた。一般的に孔食電位は電流 値の急激な立ち上がりが認められるときの電位として求められるが、今回の試験では約 0.9 ~1 V (vs. SCE)まではそのような挙動は見られなかった。また、この電位付近は水の安定領 域を超えており、電極面からガス発生も認められたことから、電流値の上昇は酸素発生に伴 うものと考えられる。したがって、水の安定な電位領域では孔食は発生しない可能性がある。 幅広い分野で適用されている高耐食性金属のひとつであるステンレス鋼の孔食電位として、 例えば 80 ℃の1 M NaC1水溶液中において同様のアノード分極試験で SUS316Lに対して 0.04 V (vs. SCE)と報告されている(磯本・松尾, 2012)。今回の試験条件である 90 ℃の条件では より卑な値になると考えられる。したがって、孔食電位を指標とした場合には金属ガラス Nie5Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄は SUS316L よりも高い耐食性を有すると推察される。

次に、すきま付き試験片のアノード分極測定結果を図 2.1-39 に示す。研磨した場合には -0.5V (vs.SCE) 付近でわずかに活性態のピークが認められ、1.0V 付近で急激な電流値の上 昇が観察された。溶射ままの場合には研磨した場合よりも全体的に電流値が大きく、活性態 のピークは観察されなかった。また、1V 付近で急激な電流値の上昇が観察された。電流密 度は実測の電流値を溶液に接した電極面の寸法から算出した表面積で除したみかけの値であ り、表面仕上げによる電流値の違いは、実際の表面積の違いを反映していると考えられる。 また、研磨した試料について電流値が比較的停滞している-0.2~0.8 V(vs. SCE)の領域です きまなしの結果と比較すると 1~2 桁程度大きな電流密度となった。試験後試験片を観察する と、図 2.1-40 に示すようにすきま形成材内部には腐食の痕跡が認められなかった。しかし、 試験片の片方の面にすきま形成材の外側で着色と一部亀裂が観察された。また、亀裂周辺に も腐食進展の痕跡が観察された。このような腐食の進展によって電流値が大きくなったもの と推察される。



図 2.1-36 溶射後の腐食試験片(右が先に溶射した面、左が後に溶射した面)



図 2.1-37 すきま付き試験片の模式図



図 2.1-38 すきまなし試験片のアノード分極測定結果



図 2.1-39 すきま付き試験片のアノード分極測定結果



図 2.1-40 すきま付き試験片のアノード分極試験後の試験片外観 (左:先に溶射した面、右:後に溶射した面)

ここで、亀裂の状況をより詳細に観察するために、図 2.1-40の点線部分の断面を観察、分 析した。断面の 2 次電子像を図 2.1-41 に示す。先に溶射した面の亀裂は溶射膜を貫通してお り、基材に達していた。亀裂部分 A の反射電子像と EPMA による元素マッピング結果を図 2.1-42 に示す。亀裂内部および基材と溶射膜の界面には Fe と 0 が分布しており、亀裂を通 じて浸入した試験溶液と基材である炭素鋼が接触して基材が腐食したものと考えられる。一 方、図 2.1-43 に示すように、後に溶射した部分には亀裂は観察されず、基材と溶射膜の界面 にも腐食の形跡は認められなかった。また、元素分布を見ると、亀裂の生じなかった側(後 に溶射)には気孔を除いて成分の不均一な濃度分布や偏析は認められず、ほぼ均一な状態で あるが、亀裂が生じた側(先に溶射)では亀裂と直角方向に濃度の低い部分が生じており、や や不均一に見える。亀裂の生じた側は図 2.1-36 に示す外観からも呈色が認められており、反 対面の溶射の際に受けた過剰の熱サイクルの影響やヒュームの付着などの影響を受けた可能 性がある。実際の処分容器への施工では片面のみの溶射となるため、今後は片面のみ溶射し た試料または先に溶射した面をマスキングした試料等、より実際の施工に近い状態の試料で 耐食性を評価する必要がある。



図 2.1-41 アノード分極後の溶射膜断面の 2 次電子像





図 2.1-42 溶射膜亀裂部分の反射電子像と面分析による元素マッピング結果



図 2.1-43 亀裂のない溶射膜断面の反射電子像と面分析による元素マッピング結果

2.2 閉じ込め性能評価手法の高度化

直接処分システムにおける放射性核種の閉じ込め性能を評価するための手法を高度化する には、人工バリア材料や燃料集合体等のニアフィールド構成要素の劣化およびそれに起因し て生じる核種の放出・移行に関わる現象や、それらに及ぼす諸因子の影響等に対してわが国 の幅広い地質環境条件やその長期的変遷も考慮に入れた現象理解やメカニズム解明による不 確実性を低減し、これまで保守的に見積もってきた閉じ込め性能をより適正に評価すること が必要である。この高度化を行うことで、例えば処分容器材料の腐食機構のモデル化により、 経時的な腐食速度の低下を考慮した腐食量評価に基づいて過度な保守性を除いた寿命を推定 できるなど、より高度なバリア機能を構築することが可能となる。また、燃料集合体の腐食 挙動の理解に基づいて閉じ込め性能を適正に評価することで、燃料中や金属中の放射性核種 の放出速度等に関するモデルおよびパラメータをより現実的な値に設定することがが可能と なる。以上を踏まえ、人工バリア材料や燃料集合体等のニアフィールド構成要素の材料を対 象に、腐食、劣化、変質に関する現象やメカニズム、それらへの影響因子の作用等を解明す るとともに、多重バリアシステムや構成要素に対して、わが国の幅広い地質環境条件やその 長期的変遷も考慮に入れた様々なシナリオに対応可能な新たな長期挙動の評価手法の検討や 従来の評価手法の高度化等に資するための知見の整備を行うこととした。

2.2.1 人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究

(1) 本項目の背景と目的

前述のとおり人工バリア材料の劣化現象や、それらに及ぼす諸因子の影響等に対して現象 理解やメカニズム解明による不確実性を低減し、これまで保守的に見積もってきた閉じ込め 性能をより適正に評価することが必要である。処分容器の閉じ込め期間は主に耐食性によっ て決定されると考えられる。ここでは処分容器の閉じ込め性能評価手法を高度化することを 目的として、炭素鋼、銅、チタン等の従来の処分容器候補材料を対象として地下水による腐 食現象とそのメカニズムを理解するための実験的検討を行った。また、処分容器の腐食挙動 評価における不確実性のひとつとして考えられる微生物による影響に着目してベントナイト 中における微生物の挙動や微生物共存下における腐食挙動に関する検討を行った。

緩衝材による閉じ込め性能については、安全評価における初期の支配核種である C-14 の閉 じ込めに着目してベントナイト中における C-14 の移行挙動に関する検討を行った。また、処 分容器として銅を用い、これが腐食した場合の銅腐食生成物が緩衝材の特性に与える影響を 調査した。平成 28 年度の実施概要項目は以下のとおり。

- ・処分容器材料の腐食挙動
- ・人工バリア性能への微生物影響評価
- ・緩衝材中の C-14 移行挙動試験
- ・銅とベントナイトの相互作用に関する調査

上記に関する検討内容を「(2)処分容器材料の腐食挙動」、「(3)人工バリア性能への微生 物影響評価」、「(4)緩衝材中の C-14 移行挙動試験」および「(5)銅とベントナイトの相互作 用に関する調査」として示す。また、それらのまとめを 2.3 項に示す。

(2) 処分容器材料の腐食挙動

平成27年度までに、低酸素濃度下における炭素鋼の腐食モデル、ベントナイト中における 純銅の腐食速度と応力腐食割れ挙動、放射線環境におけるチタンの腐食挙動等に関する検討 を実施した。その結果に基づくと、炭素鋼については、低酸素濃度下における腐食速度の低 下現象をモデル化するうえで腐食生成物皮膜の性状を把握するとともに、より高度なモデル を構築する上で腐食生成物形成等の界面の状態や腐食速度のモニタリングが必要と考えられ た。純銅については、ベントナイト中における腐食速度に及ぼす環境因子の影響、応力腐食 割れに及ぼす環境因子や応力因子の影響等などについて更に現象理解を進める必要がある。 チタンの腐食に及ぼす放射線の影響についても、腐食量の測定に加えて電気化学的特性など、 より詳細な現象の理解が必要である。更に、放射線による影響についてはチタン以外の材料 についても知見が乏しく、より広範な材料に対して評価を行う必要がある。

以上のことから、平成28年度は処分容器候補材料の腐食メカニズムの解明および腐食メカ ニズムに基づく評価手法の構築、耐食性向上に資する知見を整備することを目的として、以 下に示す項目の検討を行った。

- 1) 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価
- 2) 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング
- 3) レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング
- 4) ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動

5)代替処分容器候補材料(Cu, Ti, Ni 基合金等)のガンマ線照射下での電気化学特性 以下にこれらの試験研究の結果を示す。

1) 炭素鋼腐食生成物形成試験と皮膜の性状評価

平成27年度までの検討(原子力機構,2016)において、地層処分で想定される低酸素濃 度環境における炭素鋼の腐食進展挙動を予測するモデルの調査を行い、柴田ほか(2013) により提案された腐食生成物皮膜の成長・溶解と皮膜内の物質移行に基づくモデルによっ て概ね妥当な予測が可能であることが示された。一方、このモデルによる予測では、腐食 生成物皮膜中の物質移行特性の評価が不可欠であり、実際に皮膜を形成させて腐食に寄与 する化学種の移行特性を実測する必要がある。そこで実際の環境で生じる皮膜に近い皮膜 の迅速な形成方法を検討するとともに、形成した皮膜中の物質移行特性評価を試みた。

① 実験方法

低酸素濃度下で代表的な炭素鋼の腐食生成物としてマグネタイト(Fe₃0₄)およびシデライト(FeCO₃)が挙げられる。平成28年度はマグネタイト皮膜の形成を試みた。また、低酸素 濃度下では水の還元による腐食が支配的となることから、皮膜中の水の移行特性評価に資す るため重水を用いて拡散係数の測定を行った。

供試材には、厚さ2mmの純Fe板(ニラコ製:純度99.5mass%)を用いた。この供試材を マイクロカッターによって10mm×10mmの板状試料に加工した。次に試料表面にエメリー 紙(~#6/0)で乾式研磨を行い、エタノール中で超音波洗浄を600s行った。 試験溶液は、脱イオン水および試薬特級の NaOH(和光純薬工業製)で調製した 45 mass% NaOH 水溶液(以降,酸化剤未含有 NaOH 水溶液と称する)および脱イオン水および試薬特級の NaOH、 NaNO₃、NaNO₂、Na₃PO₄(和光純薬工業製)で調整した 45 mass% NaOH + 7 mass% NaNO₃ + 3.5 mass% NaNO₂ + 3.5 mass% Na₃PO₄ 水溶液(以降,酸化剤含有 NaOH 水溶液と称する)である。前者の試 験溶液の温度は 373、393、413 K とし、後者の試験溶液の温度は 424 K(沸点)とした。後者 の試験溶液条件は、一般的に鉄鋼材料表面にマグネタイト皮膜を形成させる「黒染皮膜形成 処理」の条件(稲垣, 1971)を参考にした。

皮膜形成として、研磨を行った試料を試験溶液中に所定の時間保持して、試料表面への緻密な皮膜の形成を試みた。三角フラスコに試料と試験溶液を入れた後にフラスコ入口にコンデンサーを取り付け、ホットスターラーで所定の温度に保持しながら、所定の時間皮膜の形成を行った。酸化剤未含有 NaOH 水溶液を使用した場合の皮膜形成処理時間は 86.4~259.2 ks とし、酸化剤含有 NaOH 水溶液を使用した場合の処理時間は 0.6~21.6 ks とした。

皮膜形成処理後、CCD カメラ型光学顕微鏡(Moritex 製 MS-804)を使用して、皮膜形成試験 が終了した試料表面を観察した。また、X 線回折試験装置(Rigaku 製 RINT-2550)を使用して、 皮膜形成試験が終了した試料表面に形成した皮膜を構成する物質の同定を行った。Cu-K α 線 (波長 $\lambda = 0.154060$ nm)を X 線源に用い、 $\theta/2\theta$ 法により測定した。測定条件は、サンプリ ング幅を 0.020°、スキャンスピードを 2.00°s⁻¹、管電圧を 40 kV、管電流を 300 mA とし、 30~80°を回折角の範囲として測定した。さらに、皮膜形成試験が終了した試料を樹脂に埋 設した後、マイクロカッターを使用して表面に垂直な方向に切断した。試料断面にエメリー 紙(~# 1000)で湿式回転研磨、0.3 µm のアルミナ粒子でバフ研磨を行った。その試料断面を 走査型電子顕微鏡 (JEOL 製, JSM - 6060LV)を用いて観察した。

次に、D₂0 浸透試験は次のように行った。PTFE(polytetrafluoroethylene) テープに直径 6 mm の穴を開け、皮膜形成試験が終了した試料の中央にテープの穴がくるように被覆し、 接液面積を限定した。次に図 2.2.1-1 に示すように密閉可能な容器に設置したアクリル台の上に PTFE テープで被覆された試料を設置し、試料の被覆していない部分に D₂0(和光純薬工業製)を 0.05 mL 滴下した。アクリル台の下にも D₂0 を設置し、密閉容器内における D₂0 の相 対湿度を 100 %にして、試料に接触させた D₂0 の乾燥を防止した。この状態で容器を密閉し、 室温(約 298 K)で 3974.4 ks までの種々の時間試料を保持して、D₂0 を皮膜に浸透させた。次 に、皮膜中の D₂0 浸透量を昇温脱離ガス分析装置(ULVAC 製 TDS-200-L STANDAM)を用いて測 定した。D₂0 浸透試験後の試料の表面に吸着した D₂0 または H₂0 成分を取り除くため、TDS 装 置の高真空(10⁻⁷~10⁻⁶ Pa) 測定室に室温で 54 ks 程度保持した。その後、昇温速度 5.5×10⁻² K s⁻¹にて室温から 973 K まで加熱し、各温度で試料から脱離する D₂0(m/z =20、m:式量、z: 価数)または H₂0(m/z =18)の脱離速度を 20 s 間隔で測定した。



実験結果と考察

・酸化剤未含有 NaOH 水溶液中における皮膜の生成挙動

373~413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~259.2 ks 浸漬した試料の表面 を図 2.2.1-2 に示す。373 K の試験溶液に 86.4 ks 浸漬した試料の表面は薄い黒色を示し たが、金属光沢はそれほど失われていなかった。同じ温度の試験溶液に試料を長時間浸漬 すると、浸漬時間の増加とともに試料表面の黒色の色合いが強くなり、皮膜の成長が示唆 された。試験溶液の温度を上昇させると、同じ時間浸漬した試料の表面の黒色の色合いが 強くなったことから、温度の上昇は皮膜の成長を促進させることが予想された。373 K の 試験溶液に 259.2 ks 浸漬した試料と 413 K の試験溶液に 172.8 ks 浸漬した試料とを比較 すると、後者の試料の方が表面の黒色の色合いが強かったが、完全に金属光沢が失われる わけではなかった。

373 K、393 K、413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~172.8 ks 浸漬した 試料の XRD 試験結果を図 2.2.1-3、図 2.2.1-4、図 2.2.1-5 にそれぞれ示す。いずれの図 においても、Fe に帰属するピークと NaOH に帰属するピークが明瞭に認められた。本試料 は皮膜形成処理後の蒸留水による洗浄が不十分であり、その後の乾燥によって皮膜内に NaOH が結晶化したために、XRD 試験によって NaOH が検出されたと考えられる。また、Fe 表面に皮膜が形成されても、X 線の貫入深さである約 10 µm より薄い皮膜であることが示 唆された。Fe 酸化物に帰属するピークを探索したが、Fe₃0₄ や Fe₂0₃ などの Fe 酸化物に帰 属する明瞭なピークを見出すことはできなかった。したがって、373 K、393 K もしくは 413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液中に Fe を 259.2 ks 浸漬しても、XRD 試験によ って明確に Fe₃0₄ と同定される皮膜を形成することができないことがわかった。



図 2.2.1-2 373~413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~259.2 ks 浸漬した試料の表面



図 2.2.1-3 373 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~259.2 ks 浸漬した試料の XRD プロファイル



図 2.2.1-4 393 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~172.8 ks 浸漬した試料の XRD プロファイル



図 2.2.1-5 413 K に保持した酸化剤未含有 NaOH 水溶液に 86.4~172.8 ks 浸漬した試料の XRD プロファイル

・酸化剤含有 NaOH 水溶液における皮膜の生成挙動

424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料の表面観察 結果を図 2.2.1-6 に示す。0.6 ks 浸漬した試料の表面はいずれの条件の酸化剤未含有 NaOH 水溶液中に浸漬した試料の表面よりも強くむらのない黒色を示した。また、浸漬時間の経 過とともに黒色の色合いが強くなった。ただし、3.6 ks 以上浸漬すると表面がわずかに赤 色を示した。

424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料から得られた XRD 試験結果を図 2.2.1-7 に示す。また、この図には高温酸化によって Fe 上に形成された Fe₃0₄皮膜の XRD 試験結果も重ねて示す。いずれの試料においても Fe に帰属するピークが最大の強度を示したので、試料に形成された皮膜は 10 µm 程度かそれより薄い皮膜であることが推察された。また、いずれの試料においても Fe₃0₄ に帰属するピークが観測された。

424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料の断面観察 結果を図 2.2.1-8 に示す。いずれの試料に形成された皮膜も 10 µm 程度かそれより薄いこ とが確認された。21.6 ks 浸漬した試料に形成した皮膜の断面観察から、皮膜は均一な単 相皮膜であることが推察された。皮膜の断面観察からそれぞれの試料に形成した皮膜厚さ を計測した。皮膜厚さの経時変化を図 2.2.1-9 に示す。図の横軸は浸漬時間の平方根とし た。試料を浸漬して約 20 s^{1/2}(約 0.4 ks)後に皮膜が形成し始め、その後、皮膜厚さは浸 漬時間の平方根に対して直線的に増加することが確認された。このことから、皮膜は放物 線則に従う拡散律速に基づいて成長していることがわかり、皮膜にはき裂などの大きな貫 通欠陥が存在しないことが示唆された。



図 2.2.1-6 424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料の 表面観察結果


図 2.2.1-7 424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料か ら得られた XRD 試験結果



図 2.2.1-8 424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料の 断面観察結果



図 2.2.1-9 424 K(沸点)に保持した酸化剤含有 NaOH 水溶液中に所定の時間浸漬した試料の 断面観察結果から得られた皮膜厚さの経時変化

・酸化剤含有 NaOH 水溶液において生成した皮膜に対する D₂O 浸透挙動

皮膜は大きな貫通欠陥を伴わずに拡散律速で成長することが明らかになったので、酸化 剤含有 NaOH 水溶液に 1.2 ks 浸漬して試料に形成した皮膜に D₂O 浸透試験を行った。D₂O を種々の時間接触させた試料に TDS 試験を行った結果得られた、試料温度の上昇に伴う D₂O 脱離速度の変化を図 2.2.1-10 に示す。いずれの時間 D₂0 を浸透させた試料においても D₂0 の脱離速度は 450 K 付近で単一のピークを示した。一方、700 K 以上の温度領域では D₂O の脱離は認められなかった。また、D20の浸透時間を増加させるとD20の脱離速度のピーク 値は増大した。これらの挙動は、高温酸化で Fe 表面に形成した Fe₃0₄ 皮膜に D₂0 浸透試験 を行った際に得られた D₂0 脱離挙動(春名ほか, 2015)ときわめて類似した。図 2.2.1-10 に示した D₂0 脱離速度を TDS 試験時間で積分し、TDS 試験装置のバックグラウンドで補正 すると、皮膜内に浸透した全 D₂O 量が算出される。そこで、酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試 料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D20 浸透試験を行った結果得られた D20 浸透量の経時 変化を図2.2.1-11に示す。図の縦軸に示したD₂0浸透量はD₂0接触面積で除した値である。 浸透時間が約 1000 ks までは浸透時間の経過とともに D₂0 浸透量は増加し、それ以上の時 間浸透させると約13 ng・mm⁻²程度で飽和する挙動が得られた。この挙動もFeに高温酸化 を行って形成した Fe₃04 皮膜に D₂0 を浸透させたときの挙動(春名ほか, 2015)と類似した。 本皮膜は水溶液中で形成させたため、軽水(H20)が含有していると考えられる。そのため、 H₂0の全含有量を TDS 試験により求め、D₂0 浸透時間に対してプロットした。その結果を図 2.2.1-12 に示す。皮膜に含有する H₂0 量は D₂0 浸透時間に関わらずほぼ一定値を示したこ とから、H20 は皮膜形成時に皮膜に含有されており、D20 浸透試験中には浸透しなかったこ とがわかった。

以上に示した D₂0 浸透量の経時変化に基づいて、本皮膜に対する D₂0 の拡散係数の推定 を試みた。



図 2.2.1-10 酸化剤含有 NaOH 水溶液に 1.2 ks 浸漬して試料に形成した皮膜に所定の時間 D₂0 浸透試験を行って得られた、試料温度の上昇に伴う D₂0 脱離速度の変化



図 2.2.1-11 酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D₂0 浸透 試験を行った結果得られた D₂0 浸透量の経時変化



図 2.2.1-12 酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D₂0 浸透 試験を行った結果得られた H₂0 含有量の経時変化

・本皮膜に対する D₂0 の拡散係数の算出方法

試料に形成させた皮膜への D₂0 の浸透挙動を半無限厚さの皮膜に対する一次元の物質拡 散現象であると仮定し、式 2.2.1−1 に示す Fick の第二法則に付随して式 2.2.1−2 に示す初 期条件、式 2.2.1−3 に示す境界条件を適用した。

 $dC/dt = Dd^2C/dx^2 \cdots \vec{x} 2.2.1-1$

ここで、C を皮膜内の D₂0 濃度、D を見かけの拡散係数、t を浸透時間、x を皮膜の D₂0 接触表面からの厚さ方向の位置とする。また、初期条件を、皮膜表面以外に D₂0 が存在しないこと(式 2.2.1-2)、境界条件を、皮膜表面の D₂0 濃度は常に C₀(一定値)であること(式 2.2.1-3)とした。

t=0, $x \ge 0$, C=0..... 式 2. 2. 1-2 $t \ge 0$, x=0, $C=C_0$ 式 2. 2. 1-3

これらの条件を考慮して式 2.2.1-1 を変形すると、任意の時間 t における D₂0 浸透量 Q を式 2.2.1-4 で表現することができる。

 $Q = 2C_0 (Dt/\pi)^{1/2} = St^{1/2} \cdots t^{1/2} = St^{1/2} \cdots t^{1/2}$

 $S = 2C_0 (D/\pi)^{1/2} \cdots \vec{z} 2.2.1 - 5$

 $C_0 \ge D$ がtに依存しない値とすると、式 2.2.1-4 は Q が t^{1/2}に比例することを示す。したがって、 D_20 浸透量 Q を浸透時間 t の平方根に対して図示すると比例関係が得られることになる。この関係が成立し、 C_0 が既知の場合には、図から算出される直線の傾き S $\ge C_0$ から D を以下のように算出することができる。

 $D = (S/2C_0)^2 \pi$ $\exists 2. 2. 1-6$

 C_0 の推定は以下のように行った。図 2.2.1-11 に示したように、皮膜への D₂0 浸透量は 浸透時間とともに増加し、やがて定常値を示した。D₂0 浸透量が定常値を示した場合、皮 膜内の D₂0 濃度分布には図 2.2.1-13 に示す 2 種類の分布が考えられる。一つ目は、拡散 によって Fe 表面に供給される D₂0 の速度より腐食によって消費される速度の方が大きな 値をとりながら定常状態になる場合であり、このときの皮膜中の D₂0 濃度分布は図 2. 2.1-13 (a) に示す直線状 (x=0 で C=C₀、x=L で C=0、L:皮膜厚さ) になることが想定さ れる。D₂0 濃度分布が図 2.2.1-13 (a) であるとき、測定された Q は斜線部の三角形の部分 に相当するので、C₀ は Q を 2 倍にして皮膜厚さで除することで算出することができる。二 つ目は、拡散によって Fe 表面に供給される D₂0 の速度より腐食によって消費される速度 の方が小さな値をとりながら定常状態になる場合であり、このときの皮膜中の D₂0 濃度分 布は図 2.2.1-13 (b) に示すように皮膜の位置によらず一定値 (x=x で C=C₀)を示すことが 想定される。D₂0 濃度分布が図 2.2.1-13 (b) であるとき、測定された Q は斜線部の四角形 の部分に相当するので、C₀ は Q を皮膜厚さで除することで算出することができる。



(a) Fe 表面への D₂0 供給速度 < Fe 表面での D₂0 消費速度の場合
(b) Fe 表面への D₂0 供給速度 > Fe 表面での D₂0 消費速度の場合

図 2.2.1-13 2 種類に想定された皮膜内の D₂0 濃度分布

・酸化剤含有 NaOH 水溶液において生成した皮膜に対する D₂O の拡散係数

酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D₂O 浸透試験を行っ た結果得られた D₂0 浸透量の経時変化を図 2.2.1-14 に示す。この図の横軸は浸透時間の平 方根で示した。D₂0 浸透量は浸透時間の平方根に対してほぼ直線的に増加し、約 1000 s^{1/2}(約 1000 ks)で定常値を示した。したがって、1000 s^{1/2}の浸透時間までは式 2.2.1-4 に従う過 渡的な D₂0 の拡散浸透が考えられ、この図から算出された傾き S は 1.23×10⁻² ng・mm⁻²・ s^{-1/2}であった。一方、皮膜内の D₂0 分布が図 2.2.1-13(a)に従うとすると、C₀は図 2.2.1-11 確認された1468.8 ksのプロットを除いた1000ks以降のデータの平均値である単位面積当 たりの D₂0 の定常浸透量 13.2 ng・mm⁻²の 2 倍を本皮膜の平均厚さである 1.7 μm で除した 値である 1.56×10⁴ ng・mm⁻³と算出される。したがって、式 2.2.1-6 に基づいて算出され た本皮膜に対する D₂0 の D は 5.6×10⁻¹⁵ cm⁻²・s⁻¹と推定された。一方、皮膜内の D₂0 分布 が図 2.2.1-13(b)に従うとすると、Coは図 2.2.1-14 で確認された 1468.8 ks のプロットを 除いた 1000 ks 以降のデータの平均値である単位面積当たりの D₂0 の定常浸透量 13.2 ng・ mm⁻²を本皮膜の平均厚さである 1.7 μm で除した値である 7.76×10³ ng·mm⁻³と算出される。 したがって、式 2.2.1-6 に基づいて算出された本皮膜に対する D₂0 の D は 2.0×10⁻¹⁴ cm⁻²・ s⁻¹と推定された。すなわち、本皮膜に対する D₂0の拡散係数は 5.6×10⁻¹⁵~2.0×10⁻¹⁴ cm⁻²・ s⁻¹の範囲に存在すると考えられた。高温酸化によって Fe に形成された Fe₃0₄ 皮膜に対する D₂0の拡散係数 9.5×10⁻¹³ cm² s⁻¹ (春名ほか, 2015)と比較すると約 1/170~1/50 小さな値 を示すことがわかった。



図 2.2.1-14 酸化剤含有 NaOH 水溶液中に試料を 1.2 ks 浸漬して形成した皮膜に D₂0 浸透試 験を行った結果得られた D₂0 浸透量の経時変化

2) 交流インピーダンス法による炭素鋼の腐食モニタリング

交流インピーダンス法は、自然状態をほとんど乱すことなく緩衝材中における炭素鋼の腐 食速度やベントナイト/炭素鋼界面状態をモニタリングすることが可能であり、腐食メカニ ズムの解明や腐食速度の経時変化を追跡するうえで有力な手法と考えられる。交流インピー ダンス法を用いて緩衝材を模擬した圧縮ベントナイト中の炭素鋼の腐食挙動を調査した例は あり(西方,2014;谷口ほか,2014)、酸素の消費または腐食生成物皮膜形成によると思わ れる腐食速度の時間的な低下などが確認されている。しかしベントナイトのかぶり厚さにつ いては任意に設定されており、測定結果に及ぼす厚さによる影響などを実験的に検討した例 はほとんど見当たらない。そこで本検討ではベントナイト厚さをパラメータとして交流イン ピーダンス測定を行い、腐食速度や界面状態とその経時的な挙動の違いを調査した。

実験方法

試験片とプローブ電極

試験片は炭素鋼板(SM400B, 10 mm×5 mm×3 mm)を用いた。この試験片にリード線を半 田づけして電極とした。同一の電極2枚を2 mmの間隔でエポキシ樹脂に平行に埋め込み、 腐食モニタリング用のプローブ電極とした。

・試験環境

ベントナイト (70 wt%) と SiO₂ (30 wt%) を混合したものを超純水と混合し、図 2.2.1-15 に示すセルに挿入した。ベントナイト (SiO₂を含む) と水の混合比はベントナイト 10 g に 対して蒸留水を 50 mL とした。今後、ベントナイト、シリカおよび超純水を混合したもの を単にベントナイトと呼ぶ。試験温度はすべて室温 (25 °C) とした。

・実験セル

プローブ電極上に間隔1mm~5mmのすき間を形成するようにアクリル板を固定し、その すき間にベントナイトを挿入した。すき間はニトリルゴム製ガスケットをプローブ電極と アクリル板の間にスペーサとして挿入することにより形成した。このすきま部にベントナ イトを挿入することにより密閉系でのセルを実現した。

・腐食モニタリング

電気化学インピーダンス計測により行った。インピーダンス測定条件は交流振幅 10 mV、 周波数範囲は 10 kHz~1 mHz とした。



図 2.2.1-15 ベントナイト中の交流インピーダンス測定セル(a)と炭素鋼電極の模式図(b)

実験結果と考察

電気化学インピーダンス(EIS)を図 2.2.1-16~図 2.2.1-18 に示す。かぶり厚 5mm(図 2.2.1-16)では、高周波数の溶液抵抗 R_{sol}は約 100 Ω cm²で一定である。一方、位相差の変 化はわずかに低周波数側に移行した。これは錆層が徐々に成長していることを反映している。 また、位相差のピークの低周波数側への移行は、電荷移動抵抗 Ret が時間とともに大きくな り、腐食速度が確実に減少していることを意味する。このことは低周波数のインピーダンス (1 mHz)の増加からもわかる。かぶり厚さ3 mm(図 2.2.1-17)では、高周波数のインピーダン スは初期には約100Ω cm²を少々超える程度であるが、その後時間とともに増加する。これ はかぶり厚5mmのものと大きく異なる。また、100Hz~10Hzの位相差の低周波数側への移 行は、かぶり厚5mmと比べてより顕著である。これらの結果から、錆の増加がかぶり厚5mm のものより顕著であることが予想される。一方、低周波数のインピーダンスが時間とともに 増加することから、かぶり厚 3 mm の場合にも腐食速度が確実に減少している。かぶり厚 1 mm(図 2.2.1-18)では、高周波数のインピーダンスは初期には約 200 cm²で溶液抵抗 R_{sol}に相 当する値を示すが、その後時間とともに増加した。この増加はかぶり厚3mmのものより顕著 である。104 日後の高周波数のインピーダンスは 2 kΩ cm²となり、初期の R_{sol}の 10 倍の値 となる。この増加の原因については後述する。位相差を見ると、100 Hz~10 Hz の位相差の 低周波数側への大きな移行が、かぶり厚3mmと同様に観察された。また、高周波数のインピ ーダンスの増加に伴い、1 Hz 以上の周波数領域で不均一な電流分布により生じる伝送線回路 タイプの挙動があらわれる。特に、104日のデータで顕著である。かぶり厚1mmでも低周波 数のインピーダンスが時間とともに増加することから、腐食速度が確実に減少している。

炭素鋼とベントナイト界面の等価回路は、溶液抵抗 R_{sol}、電荷移動抵抗 R_{ct}および電気二重 層容量 C_{dl}からなる単純な等価回路 (a) かそれに拡散のワールブルグインピーダンス W_sを加え た回路 (b) のいずれかにより表されることが多い (図 2.2.1-19 参照)。ただし、Curve-fitting の際には C_{dl} の代わりに CPE (Constant Phase Element) が使われる。今回得られた EIS を見る 限りでは、明確な拡散のインピーダンスは観察されない。したがって、等価回路(a)により代 表できる。ただし、前述したように、3 mm、1 mm のかぶり厚の暴露後半の EIS では、1 Hz 以上の周波数領域では電流分布を考慮した伝送線回路を導入する必要がある。特に、104 日 の EIS は 10 kHz~1 Hz までそれが顕著である。したがって、全周波数領域での完全な Curve-fitting には伝送線回路を導入する必要がある。しかしながら、位相差が-60 °程度 まで下がっていることから、低周波数では均一な電流分布をとる。したがって、低周波数で 得られる電荷移動抵抗の値は電流線分布を考慮する必要はない。

等価回路から高周波数では溶液抵抗、すなわち水を含むベントナイトの抵抗が得られる。5 mmのかぶり厚では溶液抵抗 R_{sol} はほぼ 100 cm²と一定であるのに対し、3 mm、1 mmのかぶり 厚では時間の経過とともに増加していることがわかる。この増加はベントナイトと炭素鋼の 接触状態の変化に起因すると考えられる。図 2.2.1-20 には試験後のセル上部からの写真を示 す。オレンジ色に見えるものは鉄の 3 価の腐食生成物であり、グレーの部分がベントナイト、周囲の黒い部分はガスケットである。それぞれ上から試験開始食後、30 日経過後、そして 119 日経過後の写真である。5 mm のかぶり厚のものは試験開始直後と同様形態を保っているが、 かぶり厚 3 mm では試験途中でベントナイトに割れが生じ、それが時間とともに成長している 様子がわかる。さらにかぶり厚 1 mm ではその割れが顕著であり、腐食開始直後から存在する。 したがって、3 mm、1 mmの高周波数側の R_{sol} の増加はベントナイトの割れに起因している可能性がある。

腐食速度については、本来は Curve-fitting をして電荷移動抵抗 R_{ct}を求め、その値から 腐食速度を推定するべきであるが、ここでは簡易的に 1 mHz でのインピーダンス 1/Z_{1mHz} を腐 食速度の指標とした。1/Z_{1mHz} の経時変化を図 2.2.1-21 に示す。ここでは腐食速度は初期 1 週間程度で急激に減少し、その後一定値を示す。またこの値はすべてのかぶり厚で同じ値を 示していた。このことから、酸素が消費され腐食は水との腐食に移行したものと思われる。 この一定になった値 1×10⁻⁵ Ω cm²を R_{ct} と仮定して、腐食速度に換算すると *i*_{corr=}2×10⁻⁷ A cm⁻² (約 2 μ m y⁻¹) となり、低酸素濃度条件での炭素鋼の腐食速度として妥当な値と考えら れる。

2-71



図 2.2.1-16 炭素鋼の電気化学インピーダンス(かぶり厚:5 mm)



図 2.2.1-17 炭素鋼の電気化学インピーダンス(かぶり厚:3 mm)



図 2.2.1-18 炭素鋼の電気化学インピーダンス(かぶり厚:1 mm)



図 2.2.1-19 ベントナイト中での炭素鋼表面の等価回路



図 2.2.1-20 試験セル上部からの写真



図 2.2.1-21 1 mHz のインピーダンスの逆数(1/Z_{1mHz})の経時変化

3) レジストメトリー法によるベントナイト中における銅の腐食速度のモニタリング

2) で述べたとおり、交流インピーダンス法はベントナイト中における腐食モニタリング手 法として有効と考えられ、平成27年度には純銅についても腐食モニタリングが試みられ適用 性が確認された(原子力機構,2016)。純銅は、溶存酸素濃度の低い環境では一般的に、熱 力学的な安定性からほとんど腐食が進展せず、処分環境においても初期には酸素による腐食 が進展しうるものの、長期的には極めて小さな腐食速度が期待できる可能性がある。腐食速 度の低下や腐食生成物成長等に伴い、交流インピーダンス法によるモニタリングでは腐食速 度の定量的な把握が困難となる可能性もあり、環境条件や腐食特性に応じて種々のモニタリ ング手法を構築することが重要である。

そこで、平成28年度は、微小の腐食速度をモニタリングする手法としてレジストメトリー 法を用いた測定を試みた。

実験方法

銅試験片には Nilaco 製純度 99.99 %の銅箔(厚さ 5 μm)を用いた。試験溶液には純水 (Milli-Q 水)および純銅の腐食に影響を及ぼす化学種のひとつであるアンモニウムイオン に着目して NH₄Cl (1 M)を添加した水溶液を用いた。

測定セルの模式図を図2.2.1-22に示す。セル本体はダイフロン製で、セル内部の下半分に はベントナイト粉末(クニゲル)を、上半分には試験溶液を入れ、セルの底面からラミネー ト封止した厚さ5µmのCu箔(Nilaco社製、純度99.99%)と加熱用ヒーターを固定した。 試験溶液は上室から下室のベントナイトに浸透させた。Cu箔の幅は2mm、長さ90mm、腐食 部の長さは55mmである。このセルを真空グローブボックス(アズワン社製 VG400型、以下 GB)中に設置した(図2.2.1-23)。試験溶液中に含まれる溶存酸素を除去するため、セル内 に乾燥ベントナイト粉末のみを入れた状態でGBに設置し、GB内部の酸素を除去した後に脱 気した水溶液をセル内に導入した。また、真空GBと真空ポンプを使用してセル内の気体を強 制的に排気してからN2ガスを導入することで、セル内の02除去を行った。GB内には水溶液 タンクも配置し、GB内の真空排気およびN2置換により水溶液内のD0も除去することとした。 また、セルへの水溶液供給および水溶液タンクのバブリングのためにチューブポンプを設置 した。腐食試験中は常に微量のN2をGB内に流し、トラップを介して排気した。

レジストメトリーによる Cu 箔減肉量のほか、Cu 箔間のカップリング電流 Ag/AgC1/Ag-wire による浸漬電位、GB 内および測定セルに組み込んだ蛍光式溶存酸素センサー(Hach 社製 HQ-40d型LDOセンサー)による溶存酸素(DO)濃度の測定も行い、通常計測時におけるセル 内のDO値は、センサーの検出下限 0.01 mg L⁻¹以下であることを確認した。

2-77



図 2.2.1-22 (左)本研究で使用した膨潤ベントナイト埋没試験用セル (右)Cu 箔試料



a. 実験装置の概略図



b. グローブボックスの外観

図 2.2.1-23 真空グローブボックスを使用した実験装置の概略図(上段)およびグローブボ ックスの外観(下段)

実験結果と考察

図 2.2.1-24 に milli-Q 水中ので Cu 箔の腐食挙動を示す。浸漬後 700 ks 付近までは腐食は 明瞭ではなく、またこの間電極電位 E(ラミネートフィルムに埋め込んだ Ag/AgCl 電極の電位 の符合を変えたもの)の計測も不能であった。これは milli-Q フィルタ水の電気抵抗が非常に 高いことによる。約 700 ks 以降腐食が顕在化し、4.1 µm y⁻¹程度の速度で Cu 箔厚さが減少 した。このとき電極電位のノイズが減少したが、電位の計測は困難であった。また 2 つの曝 露 Cu 箔試料間のカップリング電流 iCP もほぼノイズのみが観察された。これらの結果は、水 中に微量のイオンが溶解することで電気伝導度が若干増加したが、それでも高い抵抗が維持 されたためと推定される。2700 ks 以降腐食速度はほぼ 0 となった。これは、系内の残留 02 の枯渇や表面に生成した Cu₂0 による腐食抑制効果と推定される。

図 2.2.1-25 に、milli-Q 水で膨潤させたベントナイト中での Cu 箔の腐食挙動を示す。セルへの水導入後 500 ks 付近からベントナイト湿潤の影響が現れ、1200 ks 付近で Cu 箔表面 に水が到達し腐食が開始した。初期の腐食速度は 4.51 µm y⁻¹程度であり、2,000 ks 以降は 0.66 µm y⁻¹程度まで低下した。電極電位はノイズが小さく、ベントナイト接触水中に微量に 溶出するイオン種による電気電導度の上昇によると思われる。カップリング電流に関しては、 腐食初期に有意の電流が見られた以外はノイズ様のシグナルのみであった。

図 2.2.1-26 に、1M NH₄C1 水溶液で膨潤させたベントナイト中での Cu 箔の腐食挙動を示す。 D0 を含む水溶液中ではアンモニウムイオンは溶解した Cu イオンと錯体を形成して腐食皮膜 の成長を妨げるため、溶解速度を著しく増加させる。しかし図 2.2.1-26 の結果では、腐食速 度は図 2.2.1-24 および図 2.2.1-25 の系と比較しても極めて小さく、0.29 µm y⁻¹程度であっ た。だたし 6,000 ks 付近より腐食速度の増加傾向が見られるとともに、電位やカップリング 電流が大きく変動したことから、計測を中断した。

以上のように、本試験では以下の腐食速度が得られ、10⁻¹ μm y⁻¹オーダー程度の腐食速度 に対して本手法によるモニタリングの適用可能性が示された。

・milli-Q水中: 4.1 µm y⁻¹→ほぼゼロ (2,700 ks 以降)

・milli-Q水で膨潤させたベントナイト中:4.51 µm y⁻¹→0.66 µm y⁻¹ (2,000 ks 以降)

・1M NH₄C1 水溶液で膨潤させたベントナイト中:0.29 μm y⁻¹

今後、本手法により得られる腐食速度の妥当性を確認するとともに、より長期的に安定な 計測が可能な方法を検討する必要がある。



図 2.2.1-24 milli-Q フィルタ水中の Cu 箔の腐食挙動



図 2.2.1-25 milli-Q フィルタ水で膨潤させたベントナイト中の Cu 箔の腐食挙動



図 2.2.1-26 1M NH4C1 水溶液で膨潤させたベントナイト中の Cu 箔の腐食挙動

4) ベントナイト中における銅の応力腐食割れ挙動

銅はアンモニアの存在する環境にて応力腐食割れを生じることが知られており(Suzuki, 1981; Pugh et al., 1966; Uhlig and Duqette, 1969))、生成した酸化物皮膜(変色皮膜)が 応力の作用で脆性破壊して下地銅が露出されるとその部位での酸化物生成が優先されて酸化 物が局部的に生成し、その割れと皮膜再生とが繰り返し進行する変色被膜破壊型応力腐食割 れとして亀裂が進展する。平成27年度までに実施した、水を膨潤させたベントナイト中で銅 の応力腐食割れ感受性を低ひずみ速度試験法(SSRT)による評価(原子力機構, 2016)では、 銅に典型的な変色皮膜型応力腐食割れを生じ、ベントナイトを膨潤する水溶液中にアンモニ アが含まれると亀裂の進展が加速される可能性も示唆された。しかし、これまでの SSRT によ る評価は試験片を強制的に破断まで変形させる試験であり比較的厳しい荷重が付与されてい る。一方、実際の処分容器でこのような荷重条件がもたらされることは考えにくい。

そこで、平成28年度は、所定のひずみで引張を打ち切るSSRT 試験を実施し、引張停止ひ ずみ量を変化させたときのき裂発生状況の変化を検討するとともに、静的なひずみを付与し た単軸引張定ひずみ試験および、一般的な定ひずみ試験であるUベント試験を実施した。さ らに、加工の状況と表面に生成する酸化物の状況についても検討した。

実験方法

試料は市販の厚さ2 mmの純銅板(99.99 %)を用いた。この化学組成を表 2.2.1-1 に示す。 これを、Ar 雰囲気中で 550 ℃、60 min のひずみ除去焼鈍を行った後に、図 2.2.1-27 に示す 形状の平板引張試験片を放電加工によって切り出した。さらに、SiC 紙 #1000 乾式研磨仕上 げ、水洗の後応力腐食割れ試験に供した。一方、表面皮膜検討用として、同じ銅版より 10× 10 mm²の試片を切り出し、SiC 紙 #1000 乾式研磨仕上げ、水洗の後、浸漬用試料とした。

純水ならびに特級試薬と純水から調製した膨潤ベントナイトを試験環境とした。純水膨潤 ベントナイトは以下のように混合して作成した。

ベントナイト(クニミネ工業製クニゲル V1) 140 g

純水

1,200 g

アンモニウムを含む場合は、あらかじめ表記濃度のアンモニア水を調製し、上記と同様に 膨潤ベントナイトを調製した。

本検討では、低ひずみ速度試験(SSRT)、単軸引張定ひずみ試験、および U-ベント試験を 実施した。

低ひずみ速度試験(SSRT)は、試験環境に暴露した試験片を通常の引張試験よりもはるかに 小さな伸び速度で引っ張る試験法で、応力腐食割れの感受性の評価に広く用いられている。 本試験では、図 2.2.1-28 に模式的に示す環境セルを作成し、純銅試験片を低ひずみ速度試験 法によって応力腐食割れ発生試験を行った。環境セル中には、環境セル中には、純水および 0.01 M NH₃を膨潤したベントナイトを充てんした。SSRT は環境セルを 50 ℃に保ち、ひずみ 速度を 1.67×10⁻⁷ s⁻¹とし、引張伸びが 2.5%、5%および 10%に達した時点で試験を停止し、 ただちに試料を取り出して観察した。

単軸引張定ひずみ試験として、SSRT 装置を用いて同様の試験片に膨潤ベントナイト中でひ

ずみ速度 1.67×10⁻⁴ s⁻¹で伸びひずみ 10%を与えた時点で停止し、ひずみを加えた状態で 7 日間保持した。さらに、膨潤ベントナイトなしで同様にひずみ速度 1.67×10⁻⁴ s⁻¹にて伸びひずみ 10%まで引っ張り、次いでひずみを加えた状態で膨潤ベントナイト環境として、ひきつづき 7 日間保持した。

U-ベント試験については、SSRT に用いたのと同じ板材より図 2.2.1-29 に示す試験片を切 り出した。この試料を SiC 研磨と 0.3 µm アルミナペーストを用いての鏡面仕上げの後に、定 ひずみ維持のためのボルトを締結し、50 ℃に保持した膨潤ベントナイト中に埋設して 14 日 間保持した。U-ベント試験片の組み立ての手順を図 2.2.1-30 に示す。

上記の各種応力腐食割れ試験と同様の環境に晒した試料の腐食生成物をラマン分光法に て分析した。

表 2.2.1-1 試料として用いた無酸素銅の化学組成(Cu以外の成分の単位:ppm)

Cu (%)	Ag	Pb	Sn	Fe	Ni	Bi	As	Sb	Se	Те	Zn	Ρ	Cd	0
≧99.99	9	≦1	≦1	3	≦1	0.2	≦1	≦1	≦5	≦5	≦5	≦5	≦5	≦2



図 2.2.1-27 応力腐食割れ用平板引張試験片



図 2.2.1-28 定ひずみ速度試験機に設置する環境セルの模式図



図 2.2.1-29 U-ベント試験片の形状と、曲げ時の形態と試験片領域



図 2.2.1-30 U-ベント試験片の組み立て手順

実験結果と考察

・SSRT 試験結果

50 ℃の純水膨潤ベントナイト中で、伸びひずみ 2.5 %、5 %さらに 10 %まで SSRT を実施 し後、ただちに停止して取り出した試料のゲージ部を引張軸方向の中心線に沿って切断し、 SCC き裂の発生状況を観察した。断面の SEM 像を図 2.2.1-31 に示す。これらから明らかな ように、10 %引張では典型的な変色皮膜破壊型応力腐食割れがみられるが、5%引張では割 れ数はかなり減少し、2.5 %ではき裂は観察できなかった。き裂発生数とき裂深さとを定量 的に評価するために、試験片の引張軸方向の中心線に沿った切断面のゲージ部中央付近の 2 mm に観察されるき裂の数と深さを測定し、断面 1 mm あたりのき裂深さに対するき裂数のヒ ストグラムとして図 2.2.1-32 に示す。これより、き裂数は 5 %引張では 10 %引張のときと 比べてかなり減少しているが、最大き裂深さに関しては、5 %引張と 10 %引張とでは同等で あった。一方、2.5 %引張ではき裂は観察されなかった。

次に、10 mM NH₃ 水溶液を膨潤したベントナイト中での同様の SSRT の結果を以下に示す。 図 2.2.1-33 に試料表面の SEM 像を示すが、純水膨潤ベントナイトのときと同様に、5%引張 でき裂が発生しているのに対し、2.5 %引張ではき裂は観察されない。なお、断面を観察し たが、割れを明確に観察・計数することができなかったのでヒストグラムを作成すること ができなかった。







図 2.2.1-32 純水膨潤ベントナイト中での割れ発生数と深さとの関係



図 2.2.1-33 10 mM NH₃ 水溶液を膨潤したベントナイト中での SSRT 後の試料表面 SEM 像

・単軸引張での定ひずみ試験結果

50 ℃の純水または 10mM NH₃ 水溶液を膨潤したベントナイト中で、10 %までひずみ速度 1.67×10⁻⁴ s⁻¹で引っ張った後、7 日間保持した。さらに、大気中でひずみ速度 1.67×10⁻⁴ s⁻¹ で 10 %まで引っ張った後、50 ℃の純水または 10mM NH₃ 水溶液を膨潤したベントナイトを 環境セルに充てんし、7 日間保持した。試験後表面を SEM 観察した。図 2.2.1-34 に膨潤ベ ントナイト中で 10 %引っ張り、その後 7 日間保持した試料、図 2.2.1-35 に大気中で 10 % 引っ張り、その後膨潤ベントナイト中で 7 日間保持した試料の表面と断面の SEM 写真を示 す。いずれも SCC き裂は観察されなかった。しかし、表面は粒状の Cu0 で覆われており、 その粒子形状は膨潤ベントナイト中で 10 %引っ張った方が細かい粒子が覆っているに対し、 大気中で 10 %引っ張った方は Cu0 粒子が大きいことがわかる。なお、ラマン分析の結果粒 子状 Cu0 以外は均一な Cu₂0 皮膜が生成している。なお、10 mM NH₃ 水溶液を膨潤した方が、 粒状 Cu0 の生成がやや少ないようであった。



図 2.2.1-34 50 ℃の膨潤したベントナイト中での7日間の単軸引張定ひずみ試験後の試料 表面の SEM 像(膨潤ベントナイト中で 10 %引張)



図 2.2.1-35 50 ℃の膨潤したベントナイト中での7日間の単軸引張定ひずみ試験後の試料 表面の SEM 像(大気中で 10 %引張後、膨潤ベントナイト中で保持)

各種応力負荷条件での腐食生成物

各種応力負荷状態で 50 ℃の純水または 10 mM NH₃ 水溶液を膨潤したベントナイト中で生成した表面被膜を光学顕微鏡にて観察ならびにラマン分光によって解析した。

SSRT で 2.5 %、5 %および 10 %まで伸びひずみを与えた試験片について、光学顕微鏡像 と顕微ラマン分析で確認された主な酸化物をまとめて図 2.2.1-36 に示す。割れが生じなか った 2.5 %引張では NH₃ 有り・無しともに、Cu₂0 のみが検出された。しかし、伸びひずみ が 5 %、10 %となると表面酸化物は Cu0 主体となった。また、NH₃ が有った方がより Cu0 が 多い傾向であった。

つぎに、膨潤ベントナイト中での10%までのSSRT試験、膨潤ベントナイト中での10% まで伸びひずみを与えた後の7日間単軸定ひずみ試験、さらに応力なし試料を7日間膨潤 ベントナイト中で浸漬した浸漬試験を実施した後の試験片の光学顕微鏡像と顕微ラマン分 析結果を図2.2.1-37にまとめて示す。応力負荷がない浸漬試験ではCu₂0のみが生成する が、定ひずみ試験およびSSRT試験ではCu0が生成する。なお、NH₃の効果は不明確であっ た。

	NH ₃ なし		10 mM NH ₃ (10 %)	
10 %まで		CuO		
5 %まで		Cu ₂ O		Cu₂O CuO??
2.5 %まで		Cu ₂ O		Cu ₂ O

1 µm

図 2.2.1-36 膨潤ベントナイト中で低ひずみ速度(SSRT)試験後の試料表面の光学顕微鏡写 真とラマン分析結果

	NH3なし		10 mM NH ₃ (10 %)	
SSRT (10 %まで)		CuO		
定ひずみ 試験 (10 %)		CuO		Cu ₂ O弱 CuO
浸漬試験 (7日間)		Cu ₂ O		Cu ₂ O CuO

1 µm

図 2.2.1-37 種々の応力負荷状態での試料表面の光学顕微鏡写真とラマン分析結果

・U-ベント試験

U-ベント試験前後の試料外観写真を図 2.2.1-38 に示す。膨潤ベントナイト中での 14 日間の浸漬後に試験片は灰褐色の腐食生成物に覆われており、Cu0 と CuS の生成が示唆される。図 2.2.1-29 で示した、試料の①、②、③領域の典型的な SEM 像を図 2.2.1-39 に示す。 塑性変形に伴うすべりステップが観察されるが、割れは観察されなかった。一方、ラマン分析の結果、試料の大部分は Cu₂0 にて覆われているが、②領域では Cu₂0 とともに少量のCu0 の生成が確認された。



図 2.2.1-38 純水膨潤ベントナイト中での 14 日間の SCC 試験前後の試験体の外観写真



図 2.2.1-39 純水膨潤ベントナイト中での 14 日間の U-ベント試験後の試験片表面の SEM 写真

・ベントナイト中の純銅の応力腐食割れ挙動

これまでの検討で、水膨潤ベントナイト中では伸びひずみ 10 %までの SSRT により容易に 変色皮膜型応力腐食割れが生じることが明らかとなっている。このとき表面を均一に覆って いる Cu₂0 皮膜が塑性変形によって破壊すると、すべりステップにて露出した局所的な新生面 にて Cu0 が急速に生成し、その持続的成長と破壊の繰り返しによって変色皮膜破壊型応力腐 食割れが生じると考えられる。一方、伸びひずみを 2.5 %まで低下させると割れは検出され ず、変形が少ないときには応力腐食割れが発生しないことが明らかとなった。SSRT 試験装置 のひずみ測定については過大に評価していることが多くあり、弾性変形内あるいは塑性変形 開始直後では変色皮膜の破壊には至らないものと思われる。一方、単軸引張定ひずみ試験な らびに U-ベント試験では応力腐食割れの発生は確認されなかった。SSRT は 10⁻⁷ s⁻¹程度の非 常に遅いひずみ速度であっても常にひずみが加わるクリープ変形、すなわち、動的な荷重が 与えられており、クリープ変形程度しか生じない定ひずみ速度試験を比べると、動的ひずみ と静的ひずみとの大きな違いがある。SSRT 法は、応力腐食割れ試験としては加速試験と位置 づけられ、短時間で応力腐食割れを発生させる場合があり、厳しい加速試験法とされるので、 短期間での応力腐食割れ発生が起きたと思われる。一方、定ひずみ法で現時点ではき裂の発 生は認められていない。しかし、表面を観察すると粒子状の Cu0 の生成が認められた。Cu0 は塑性変形等で出現した新生面で急速に銅が酸化した際に生成される。定ひずみ試験で一部 Cu0 の生成が認められており、特に U-ベント試験では塑性変形が最も大きい肩部にのみ Cu0 が検出したことより、クリープ変形等の非常に遅い変形で Cu₂0 皮膜の破壊と新生面での Cu0 の生成があったことを意味しており、静的荷重において応力腐食割れが生じる可能性を否定 できないと考えられる。

5) 代替処分容器候補材料(Cu, Ti, Ni 基合金等)のガンマ線照射下での電気化学特性

処分後初期には使用済燃料からの放射線の線量率が比較的大きく、地下水の放射線分解等 によって生じた化学種によって処分容器の腐食挙動が影響を受ける可能性がある。平成 27 年度は、代替処分容器候補材料であるチタンを対象として、pH の異なる微量(50 mM)の塩化 物イオンを含む模擬地下水(炭酸水素塩/炭酸塩水溶液)中で、ガンマ線照射下で純チタン 試料の浸漬試験を行い、試験後の溶液中のTi の分析結果から純チタンの腐食速度を測定した (原子力機構, 2016)。

平成28年度は、チタンのほか、純銅、Ni基合金を対象としてガンマ線照射下での電気化学 試験を行い、ガンマ線によるこれらの材料の腐食挙動への影響を調査した。

① 実験方法

純チタンならびに純銅、UNS N10276(Hastelloy[®] C-276)の直径 1.0 mm の線材をコイル状に 加工したもの(表面積:6~7cm²)を試料電極(WE)に用いた。以下、各電極を、"Ti"なら びに"Cu"、"C276"と表記する。Ti ならびに Cu の純度はそれぞれ 99.5%と 99.99%以上で ある。また、C276の成分を表 2.2.1-2 に示す。

С	Si	Mn	Р	S	Ni
0.007	0.055	0.34	0.002	<0.001	bal.
Cr	Mo	Со	Fe	W	V
15.21	15.3	0.95	4.71	3.68	<0.01

表 2.2.1-2 測定に使用した UNS N10276 (C276)の化学組成

いずれの電極もエメリー紙での乾式研磨で180番まで仕上げした後、同じく120番で研磨し、エタノール中で超音波洗浄してから使用した。

試験溶液には以下3種類の水溶液を用いた。

- 50 mM NaCl + 1 M Na₂CO₃ (pH 8)
- 50 mM NaCl + 1 M NaHCO₃ (pH 12)
- 50 mM NaCl + 1 M Na₂CO₃ + 0.1M NaOH (pH 13)

ガンマ線照射は、水深 5 m のプール底の ⁶⁰Co 線源に装置全体を差し込み行った。試験片を 浸漬した溶液に対し、吸収線量率が 7.7 kGy h⁻¹ のガンマ線を連続照射した。今回は放射線 による腐食への影響が発現しやすくなるよう、実際の線量率よりも高い線量率にて実施した。 試験開始後、自然電位を安定な値となるまで(22~23 時間)測定後、アノード/カソード分 極測定を行った。

図 2.2.1-40 に測定系の概略を示す。参照電極(RE)には内部溶液は飽和 KC1 水溶液とする Ag/AgC1 電極を用いた。Ag/AgC1 電極は比較的吸収線量率が高いガンマ線下でも照射による有 意な電位の変化は生じないことが確認されている(Danielson, 1995)。対極(CE)は白金とした。 試験セルには外形 30 mm、長さ 200 mm のホウ珪酸ガラス製の試験管を用いた。試験溶液は Ar ガスを吹き込んで脱気した後に試験セルに入れた。試験セルをステンレス容器に収めた後、 速やかに、容器を水深5mのプール底の⁶⁰Co線源に容器を差し込みガンマ線照射の照射を開始した。本試験期間中における試験セル位置の吸収線量率は、7~8 kGy h⁻¹であった。

分極測定は、ガンマ線照射で自然状態において、22から23時間、WEを予備浸漬したのち、 そのまま照射下でおこなった。予備浸漬ならびに分極測定の全測定期間を通して容器内にAr ガスを流通した。予備浸漬の期間中、RE で WE の腐食電位の経時変化を測定した。また分極 測定は動電位法で実施した。ポテンショスタットを用い、電位を0.33 mV s⁻¹で卑側から貴 側へ掃引し、試料のカソードならびにアノード分極特性を測定した。非照射下での分極測定 は、試験セルを収めたステンレス容器を照射プール内の⁶⁰Co線源から十分に離れた場所に置 き同様の手順で行った。



図 2.2.1-40 測定系の概略

実験結果と考察

ここでは、以下の構成で実験結果と考察を示す。

- ・純チタン
- ・銅ならびにニッケル基合金
- ・高pH溶液中での銅の挙動

・純チタン

図 2.2.1-41 と図 2.2.1-42 に照射下ならびに非照射下における pH 8 ならびに pH 12、pH 13 の試験液中での予備浸漬期間中の腐食電位の経時変化それぞれ示す。ガンマ線照射下では、 非照射下と比較し、いずれの試験溶液中でも速やかに貴化している。また、同じ試験溶液 で比較すると、図 2.2.1-41 ならびに図 2.2.1-42 に示した浸漬時間の範囲内では、腐食電 位は照射下の方が貴となっている。

図 2.2.1-43 と図 2.2.1-44 に分極測定の結果を示す。両図を比較すると、照射下と非照射下ではカソード分極に大きな相違が認められる。分極測定時の自然電位から 120 mV 以上卑な電位域での電流密度を比較すると、同じ過電圧でのカソード電流密度は照射下の方が、 概ね1桁から2桁大きい。

図 2.2.1-45 に、図 2.2.1-43 と図 2.2.1-44 に示した、pH 8 および pH 13 の試験溶液中での照射ならびに非照射下での分極曲線に、昨年度測定された質量減少に基づく腐食速度を記入した図を示す(原子力機構, 2016)。各分極曲線の自然電位近傍に横線で記入した。

電流密度は、昨年度測定した腐食速度からチタンの溶解が式 2.2.1-7 の4 電子反応で進行したと仮定して計算した。

 $Ti \rightarrow Ti^{4+} + 4e^{-} \cdots \overrightarrow{x} 2.2.1-7$

平成 27 年度は、純チタン試料を、今回と同様の強度の照射あるいは非照射環境において 約3日間それぞれの溶液中に浸漬した。試験後の試験溶液中の Ti を ICP で分析し、試料の 質量減少ならびに腐食速度を算出した。図2.2.1-45 の結果から推定されるとおり、照射下 および非照射下のいずれの溶液中においても、質量減少に相当する腐食電流は、自然電位 近傍でのアノードならびにカソード分極曲線のターフェル外挿線の交点と概ね良く一致を 示している。つまり、照射下および非照射下のいずれにおいても、腐食反応は電荷移動律 速下で進行していると推測される。



図 2.2.1-41 ガンマ線照射下での予備浸漬期間中における純チタン電極の腐食電位変化



図 2.2.1-42 ガンマ線非照射下での予備浸漬期間中における純チタン電極の腐食電位変化



図 2.2.1-43 ガンマ線照射下での純チタン電極の分極特性



図 2.2.1-44 非照射下での純チタン電極の分極特性


図 2.2.1-45 pH 8 および pH 13 の試験溶液中での照射ならびに非照射下での分極特性と質 量減少測定の結果から推定した腐食電流密度の比較

・銅ならびにニッケル基合金

図 2.2.1-46 と図 2.2.1-47 に、照射下ならびに非照射下における、pH8 の試験液中での Cu および C276 の予備浸漬期間中の腐食電位の経時変化をそれぞれ示す。比較のため、図 2.2.1-41 および図 2.2.1-42 に示した Ti の pH 8 の結果もそれぞれ再掲した。Cu および C276 のいずれもガンマ線照射下の方が、非照射下と比較し腐食電位は貴となっている。

図 2.2.1-48 と図 2.2.1-49 に分極測定の結果を示す。比較のため、図 2.2.1-43 および図 2.2.1-44 に示した Ti の pH8 の結果も再掲した。図 2.2.1-48 と図 2.2.1-49 の結果を比較す ると、いずれの材料も照射によってカソード電流が増加している。Cu は照射によって腐食電 流が顕著に増加している。また、C276 での増加は比較的軽微である。



図 2.2.1-46 pH8 溶液中でのガンマ線照射下における各種電極の予備浸漬期間中の腐食電 位変化



図 2.2.1-47 pH8 溶液中での非照射下における各種電極の予備浸漬期間中の腐食電位変化



図 2.2.1-48 ガンマ線照射下における各種電極の分極特性



図 2.2.1-49 非照射下における各種電極の分極特性

・高 pH 溶液中での銅の挙動

図 2.2.1-50 と図 2.2.1-51 に、照射下ならびに非照射下における、pH12の試験液中での Cu の予備浸漬期間中の腐食電位の経時変化をそれぞれ示す。比較のため図 2.2.1-41 および図 2.2.1-42 に示した Ti の pH12 の結果も再掲した。Cu 腐食電位はガンマ線照射下の方が非照射 下よりも腐食電位は貴となっている。ただし定常状態での電位は、照射下ならびに非照射下 のいずれも、概ね pH 8 における水準と同等であった。



図 2.2.1-50 pH 8 溶液中でのガンマ線照射下における各種電極の予備浸漬期間中の腐食電 位変化



図 2.2.1-51 pH 8 溶液中での非照射下における各種電極の予備浸漬期間中の腐食電位変化

図 2.2.1-52 と図 2.2.1-53 に分極測定の結果を示す。比較のため、図 2.2.1-43 および図 2.2.1-44 に示した Ti の pH12 の結果も再掲した。図 2.2.1-52 と図 2.2.1-53 の結果を比較す ると、Cu の腐食電流は、ガンマ線の照射によって顕著に増加したことが推定される。



図 2.2.1-52 ガンマ線照射下における各種電極の分極特性



図 2.2.1-53 非照射下における各種電極の分極特性

(3) 人工バリア性能への微生物影響評価

人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす影響事象の一つとして、微生物による処分容器の腐食 が挙げられる(図 2.2.1-54、図 2.2.1-55 参照; Kim et al., 2004; Little and Lee, 2007; King, 2009; 原子力機構, 2014)。国内においても、処分容器の微生物腐食影響について知見 が集積されてきたが(核燃料サイクル開発機構, 1999;和田ほか, 1998;西村ほか, 1999)、 それらの研究は、主に硫酸還元反応を主体とした評価に限定されている。しかしながら、近 年の知見により、処分環境と同様の環境と想定される還元的環境下において、メタン生成菌 (Daniels et al., 1987; Dinh et al., 2004; Mori et al., 2010; Uchiyama et al., 2010)、

酢酸生成菌(Mand et al., 2014; Kato et al., 2015)、硝酸還元菌(Till et al., 1998; Xu, 2013; Iino et al., 2015)、それらを含有する複合微生物(Mand et al., 2014)などの金属腐食への関与が指摘されている(図 2.2.1-54)。そのため、微生物反応が処分システムの安全機能に及ぼす影響の不確実性を低減させるためには、硫酸還元反応だけでなく人工バリア内に存在しうる様々な微生物種を対象とした微生物影響について検討する必要がある。



図 2.2.1-54 処分容器に及ぼす微生物腐食反応の概念図



King (2009)を改変

図 2.2.1-55 地層処分システムの人工バリア性能における微生物影響の可能性に関する ディシジョンツリー (King, 2009 を改変)

平成 27 年度までに、人工バリア性能に及ぼす微生物影響を評価するために、一般的な嫌気 的環境である湖沼堆積物などの試料を採取し、鉄腐食性菌の探索を行うとともに、炭素鋼試 験片を用いた腐食試験を行った。その結果、環境中には硫酸還元菌以外にも鉄腐食能を有す るメタン生成菌や酢酸生成菌などが普遍的に存在することを明らかにした(平野ほか,2015)。 また、ベントナイト中における微生物による鉄腐食活性に関する知見を拡充し、その微生物 腐食活性を支配する要因とメカニズムを明らかにするために、ベントナイト中での鉄腐食性 メタン生成菌及び微生物群集を対象とした炭素鋼の腐食評価試験を実施するとともに、30 ℃ および 50 ℃における異なる 2 種の圧縮密度条件下において炭素鋼片を埋設した圧縮ベント ナイトカラムを用いた長期腐食評価試験を開始した。ベントナイト中の DNA 量に基づく評価 結果から、30 日間の浸漬試験におけるベントナイト中の微生物量は非常に低密度であり、実 施した試験条件においては圧縮ベントナイト中の微生物活性は抑制されていることを示した。 一方で、様々な反応系における腐食メカニズムの解明や、より処分環境に近い条件における 腐食試験の実施を課題として挙げた。

平成28年度は、処分環境を想定した条件下における微生物腐食活性を支配する要因および メカニズムを明らかにすることを目的とし、平成27年度に引き続き、30℃および50℃に おける異なる2種の圧縮密度条件下において炭素鋼片を埋設した圧縮ベントナイトカラムを 用いた長期腐食評価試験を実施し、数ヶ月~年に渡るより長期的な腐食挙動評価を行うとと もに、ベントナイト内部における微生物の現存量と生菌数に関する評価を行った。

試験方法および試験結果について、以下に示す。

1) 試験方法

本研究では、複数の圧縮ベントナイト密度や温度条件下において、人工バリア外の微生物 の圧縮ベントナイト内部への移行や、金属材料に影響を与えることを想定した腐食試験を実 施した。平成 26 年度に実施した圧縮ベントナイト中の微生物増殖に関する予察的評価では、 腐食試験に用いた浸漬液中の微生物密度が非常に低い状態であったことから、平成 27 年度か ら引き続いて、処分環境を想定して試験溶液中の微生物密度を高めた試験を実施した。処分 環境は嫌気的であると想定されることから、試験には汽水湖沼底泥試料を植菌源として集積 した金属腐食能力を有する微生物集積試料 VMC (VM-I Medium enriched Community, 以下 VMC と記す、平野ほか、2015)を用いた。また、処分環境では、処分場建設工事に伴う種々の無 機および有機物の流入や急激な酸化環境への変動、閉鎖後の長期にわたる還元環境への大幅 な移行に伴って微生物が増殖することが予測され、埋め戻し材中の間隙水量に換算すると 10¹⁰ cells ml⁻¹ オーダーの微生物増殖の可能性が指摘されている(井上ほか, 2004)。そこ で、培地などの培養条件には VMC の増殖に適した条件を設定し、地下環境を想定した 30 ℃ および 50 ℃において1年間の試験を実施した。腐食試験には、PEEK 製およびチタン製カラ ムを用いた。PEEK 製カラムについては、乾燥密度 1.0 g cm⁻³ もしくは 1.6 g cm⁻³に調整され た緩衝材(現時点の想定される緩衝材、ベントナイト(クニゲル V1、クニミネ工業)-ケイ 砂(5号)の7:3混合体)中に炭素鋼片(8×8×t0.5 mm,表面積1.44 cm²)1枚を設置し、 油圧ジャッキで圧縮成型後、カラム内に充填した。また、チタン製カラムについては、同様 の作業工程で炭素鋼片(10×10×t2 mm, 表面積 2.8 cm²)4枚を圧縮ベントナイト中に設置 した。カラム部分に圧縮ベントナイトを充填後、シリコンスペーサーおよびベントナイト漏 出抑制のためのパールコーンフィルタ(孔径 100 µm)を挟み上板、下板でねじ止めすること で密閉した。PEEK 製カラムは温度条件 30 ℃、チタン製カラムは 50 ℃の試験に使用し、そ れぞれのカラムについて、次のようにセッティングを行った。密閉したカラム内の酸素を除 去するため、真空引きと窒素置換を行い、さらに 12 時間以上 0.1 Torr 程度の減圧下に静置 した。次に、嫌気チャンバー内でガラス密閉瓶に入れた VM-I 培地 500 ml に試験カラムを浸 漬後、VMC(菌体密度 4.2×10º copies-16S rRNA gene ml⁻¹)を 3 ml 植菌し、温度 30 ℃も しくは 50 ℃で浸漬培養試験を開始した。炭素鋼片を設置した圧縮ベントナイトカラムの作 製後、表 2.2.1-3 の試験条件に従い、無酸素条件下にて、12 x 2 セット(30 ℃、50 ℃)の カラム試験を開始した(30日、90日、180日、365日)。30 ℃試験においては、培養期間1 週間ごとにガラス密閉瓶上部に設置したシリコン栓部分からガスを採取し、ガスクロマトグ ラフィーによりガス組成の測定を行った。2 つの温度条件(30, 50 ℃)で 1 ヶ月の浸漬後、 密閉瓶を開放し、浸漬培養液の成分分析(HPLC, IC, 鉄濃度)を行うと共に、カラムを開封 し、緩衝材の水分活性を測定した後、緩衝材内の炭素鋼片を取り出し、重量減少測定を行っ た。

解体した圧縮ベントナイトについて浸漬液と接触していた表面 2 mm 程度を削り、内部にあたる部分を採取した。採取したベントナイト 1 g を PBS 10 ml に懸濁し、懸濁液を DNA 抽出および培養試験に供した。DNA 抽出は、試験終了後に採取した浸漬液およびベントナイトから、PowerMax Soil DNA Isolation Kit (MO BIO 社)を用いて行った。ベントナイトを含む試

料については DNA がベントナイトに吸着し、抽出効率が低下するためベントナイト1gあた り 40 mg のスキムミルクを添加し、浸漬液同様に抽出を行った。抽出 DNA 溶液は蛍光光度計 (Qubit 1.0, 測定キット:ds DNA HS assay kit, Thermo Fisher Scientific 社) により 濃度を測定した。浸漬液中に含まれる微生物数の推定を行うために、抽出 DNA 溶液中の 16S rRNA 遺伝子を対象とし、Real-time PCR により浸漬液 1 ml 中のコピー数の定量を行った。 Real-time PCR は、LightCycler ST300 (Roche Diagnostic 社)を用いて行った。16S rRNA 遺 伝子については、真正細菌の共通配列をもとに設計したプライマーを用い、TaqMan probe 法 により原核生物全般の遺伝子コピー数を推定した。プライマー濃度は 0.5 μM、PCR 反応は初 期変性(95°C 10分)、PCR 反応(95°C 10秒, 50°C 45秒, 72°C 1秒):40 サイクルの条 件で行った。 プライマーは Uni340F(5´-CCTACGGGRBGCASCAG-3´)、 プ ____ Uni806R(5 -GGACTACNNGGGTATCTAAT -3) ブ は Uni516F(5 -TGYCAGCMGCCGCGGTAAHACVNRS-3)を用いた(Takai and Horikoshi, d2000)。 培養試験は、ベントナイト懸濁液 100 µ1 を R2A 寒天培地(Wako)に塗布し、好気条件下

で1週間もしくは嫌気チャンバー内で1カ月培養を行い、培養終了後に形成されたコロニー 数を計測した。試験はベントナイト懸濁液を原液とし、10倍、100倍希釈の溶液を調製し、 それぞれ3連で実施した。対照として、圧縮前のベントナイトを同様に培養に供し、形成さ れたコロニー数を初期値とした。

	乾燥密度		
	1.0 g cm^{-3}	1.6 g cm^{-3}	
30 ℃	培養日数(30日,90日,180日,365日)	培養日数(30日,90日,180日,365日)	
PEEK 製カラム	植菌、非植菌 (各条件 n=3)	植菌、非植菌 (各条件 n=3)	
50 ℃	培養日数(30日,90日,180日,365日)	培養日数(30日,90日,180日,365日)	
チタン製カラム	植菌、非植菌 (各条件 n=3)	植菌、非植菌 (各条件 n=3)	

表 2.2.1-3 浸漬試験における試料リスト

2) 温度条件 30 ℃における腐食試験結果

表 2.2.1-3 に示す各設定期間の培養終了後、密閉容器上部からガスを採取後、容器を開封 し、浸漬液からカラムを取り出した。カラム開封後の圧縮ベントナイトについて代表的なも のの写真を図 2.2.1-56 に示す。30°Cの培養試験において、培養期間1カ月では、VMCを添 加していない非植菌条件下のベントナイト試料は、試験開始前のベントナイトと比較して外 見上ほぼ変化がなく、内部の炭素鋼片および近傍のベントナイトに関しても変化は認められ なかった。一方で、VMC を添加した試験区では浸漬液と接触している圧縮ベントナイト表面 において黒色への変化が見られた。また、試験期間3カ月以降の圧縮ベントナイトでは VMC の添加の有無に関わらず、圧縮ベントナイト表面及びベントナイト内部において炭素鋼周辺 を中心として黒色への変化が見られた。それぞれの試験で回収した圧縮ベントナイトを解体

し、取り出した炭素鋼片の酸洗浄後、重量を測定した。試験後の炭素鋼片の重量と初期の炭 素鋼片の重量の差分(重量減損)を算出し、腐食量として取りまとめた(図2.2.1-57)。圧 縮密度 1.0 g cm⁻³において、試験期間 3 カ月までは植菌の有無に関係なく 10 mg foil⁻¹程度 まで腐食が進行し、その後 6 カ月までは腐食の進行は見られなかった。しかし、試験期間 1 年後の VMC を添加した試料では、顕著に腐食が進行し(74.9 mg foil⁻¹)、炭素鋼表面には多 数の腐食孔ならびに、腐食孔が 0.5 mm 厚の炭素鋼片を貫通している部分が観察された(図 2.2.1-56、57)。VMCを植菌していない試験区では腐食の進行は認められなかったことから、 浸漬液中で増殖した金属腐食微生物群集によって誘引される腐食が6カ月以降急速に進行し たと考えられた。圧縮密度1.6g cm⁻³の試験区においては、試験期間を通して継続的に腐食 が緩やかに進行し、1年で10 mg foil⁻¹程度の腐食量に到達した(図 2.2.1-57 (b))。試験 後の炭素鋼片の外観および SEM 観察像より、試験期間1年の試験条件では、1.0 g cm⁻³で見 られたような VBC 植菌区における顕著な腐食は観察されず、植菌区より非植菌区において僅 かに高い腐食活性が見られた(図 2.2.1-58, 59)。Wyoming-80 (100 %)を用いて実施した 試験報告によると、1.6 g cm⁻³では圧縮ベントナイト内部の微生物の移行は抑制されると考 えられており(Stores-Gascoyne et al., 2010)、本試験においても同様の作用により腐食 が抑制されたことが推定された。一方で、圧縮密度が低い場合では、圧縮密度が高い場合と 比較して、腐食活性を有する微生物もしくは代謝産物がベントナイト中を移行しやすくなり、 炭素鋼近傍へ到達することによって、炭素鋼の腐食減損が促進されると考えられた。ただし、 現段階では腐食の進行挙動の要因については詳細にわかっておらず、今後メカニズムも含め て評価を行う必要がある。

炭素鋼腐食に関与する微生物反応を推定するため、浸漬液成分、気相部のガス組成を分析 し、微生物の代謝活動を評価した。その結果、30°C試験においては、浸漬液中の初期値 53.5 mMの乳酸が植菌区では1カ月後に完全に消費されるとともに、酢酸が検出され、それ以降大 きな変化は見られなかった(図 2.2.1-60(a))。一方、非植菌区においても浸漬液中の乳酸 の減少が見られ、ベントナイトカラム表面に付着した微生物もしくはベントナイト内部に潜 在する微生物により乳酸が分解されたことが推定された。しかし、その消費速度は植菌区と 比較して遅く、培養期間1カ月では乳酸の残存が検出された。各試料における浸漬液中の硫 酸イオン(初期値 3,000 ppm)はいずれの条件下でも経時的に減少する傾向が確認され、硫 化物イオンも検出されていることから(図 2.2.1-60(b), (c))、植菌区および非植菌区にお いて微生物による硫酸還元反応が生じていることが示された。ベントナイトの圧縮密度 1.0 g cm⁻³の条件下では、6ヶ月から1年後にかけて著しく炭素鋼腐食が進行したことが確認され たが、浸漬液のヘッドスペースのガス濃度分析結果からは、1 年後の試験試料においてメタ ンガスはほとんど検出されておらず(図 2.2.1-61)、EPMA の分析結果からもベントナイト内 部や炭素鋼近傍に硫黄の濃集が確認(図 2.2.1-62)されていることから、腐食が進行した要 因は微生物による硫酸還元反応である可能性が高いと推定される。一方で、反応試験期間中 酢酸イオンが高濃度で検出されており、金属腐食に関与する酢酸生成菌も報告されているこ とから、現段階では本試験において酢酸生成菌が金属腐食に関与した可能性も否定できない。





(a). 非植菌区 1.0 g cm⁻³, 1年,
(b). 植菌区 1.0 g cm⁻³, 1年
(d). 非植菌区 1.6 g cm⁻³, 1年,
(d). 植菌区 1.6 g cm⁻³, 1年
図 2.2.1-56 カラム解放後のベントナイト(30°C)





(a) 植菌区 (b)非植菌区 図 2.2.1-58 浸漬試験1年後の炭素鋼片(1.0 g cm⁻³)

(a).

(b).



図 2.2.1-59 浸漬試験1年後の炭素鋼片表面の SEM 観察像(1.0 g cm⁻³)







(b)硫酸イオン



図 2.2.1-60 浸漬液に含まれる成分の分析(30 ℃試験)



図 2.2.1-61 浸漬液に含まれるガス成分の分析(30℃試験)



図 2.2.1-62 30 ℃の温度条件下における炭素鋼およびベントナイトの EPMA 分析結果

3) 温度条件 50°C での腐食試験と炭素鋼の腐食

50°Cの試験条件下では、1.0g cm⁻³、1.6g cm⁻³のいずれの圧縮密度条件においても、圧 縮ベントナイトの表面に黒色の付着物が確認されるものの、30°C の試料ほど顕著な変化は 観察されなかった(図 2.2.1-63)。ベントナイト内部についても、炭素鋼片とベントナイト 接触部において黒色への変色が観察されるのみで、30°C の試料のように全体が黒色に変化 する試料は観察されなかった。1.0g cm⁻³、1.6g cm⁻³それぞれの圧縮ベントナイトより炭素 鋼片を取り出し、炭素鋼片の試験開始前との重量変化を測定した。その結果、1.0g cm⁻³の 圧縮条件では植菌区、非植菌区ともに緩やかに腐食が進行し、培養初期(~6 カ月)におい て VMC 植菌区は非植菌区と比較して高い腐食速度を示したが、試験開始後1年では同程度の 腐食量となった(図 2.2.1-64)。1.6g cm⁻³の圧縮密度条件では、植菌、非植菌に関わらず、 1年間の試験期間を通じて同様に緩やかに腐食が進行した。その1年間での腐食量としては 1.0g cm⁻³では18 mg foil⁻¹、1.6g cm⁻³では15 mg foil⁻¹程度であり、圧縮密度が高い1.6 g cm⁻³の試料では腐食が抑制される傾向が 50°C の試験条件においても確認された。炭素鋼 表面の SEM 観察からも 30°C 試験と比較して、凹凸は少なく、顕著な腐食が進んでいないこ とが確認された(図2.2.1-65)。環境中から採取した VMC は培養温度 30°C で集積したもの であるため、50°Cの試験条件下では微生物活性が抑制された可能性も考えられるが、一般 的に高温環境下では微生物活性が低下するため、腐食への影響も抑制されることが要因であ ると推定される。

浸漬液の成分分析結果から、50°Cの試験条件においては、30°Cでの試験と比較してベン トナイト圧縮条件によらず浸漬液中での乳酸分解は遅く、植菌区・非植菌区ともに試験期間 1年を経過しても残存していた。硫酸イオンは試験期間1カ月から1年の間において全ての 試料において大きな変化は見られず、硫化物の発生も検出されなかった。したがって、50℃ の試験区においては、30°Cと比べ、浸漬液中での微生物の増殖・活性が抑制されているこ とが示唆された。一方で、EPMA による化学組成分析の結果から、50 ℃の試験条件下におい ても炭素鋼表面周辺に硫黄の濃集が検出されたことから、腐食の要因は微生物による硫酸還 元反応が寄与していることが示された(図 2.2.1-66)。



- (c). 非植菌区 1.6 g cm⁻³, 1 年、
 - 図 2.2.1-63 カラム開封後のベントナイト(50 ℃)







(a). 1.0g cm⁻³試験、植菌区、(b). 1.0g cm⁻³試験、非植菌区
 (c). 1.6g cm⁻³試験、植菌区、(d). 1.6g cm⁻³試験、非植菌区
 図 2.2.1-65 炭素鋼表面のSEM観察(50 ℃試験)



図 2.2.1-66 50 ℃の温度条件下における炭素鋼およびベントナイトの EPMA 分析結果

4) ベントナイト内に含まれる微生物量の推定

試験を実施した圧縮ベントナイト内での微生物量を推定するため、ベントナイト試料から DNA を抽出し、微生物量の推定を行った。その結果、圧縮ベントナイトカラムの浸漬液から は 0.1~1.6 µg mL⁻¹程度の DNA(細胞数では 10⁹~10¹⁰ cells mL⁻¹に相当)が抽出されてい る一方で、炭素鋼近傍のベントナイトより抽出された DNA は定量限界未満であった。ベント ナイト内での微生物の増殖・生存を評価するために、反応試験後のベントナイトの一部を R2A 寒天培地に塗布し、好気・嫌気条件下で培養試験を実施し、寒天培地上に形成されたコロニ ーの数(CFU)を生菌数として評価した(図2.2.1-67)。その結果、培養開始前のベントナイ トに含まれる初期生菌数は好気・嫌気性菌ともに 3.3 \times 10¹ colonies g⁻¹であったのに対し て、30°C 試験においては好気性菌の生菌数の変化は見られなかったが、嫌気性菌は 10⁴~10⁵ colonies g⁻¹の高い生菌数が観察された。この嫌気性菌の高い生菌数は、外部から微生物の 移行が困難であるベントナイト圧縮密度の高い条件(1.6 g cm⁻³)や非植菌区においても見 られたことから、浸漬液から増殖菌体が侵入しただけでではなく、ベントナイト内部にもと もと存在した嫌気性菌が栄養成分の侵入により増加したことが反映されていると考えられる。 この結果はベントナイト中の DNA 濃度の分析結果と一致しておらず、ベントナイトを対象と した DNA 抽出手法の改善や培養法による生菌数結果の信頼性について今後検討する必要性が あると考える。これら R2A 培地を用いてコロニー形成が確認された嫌気性菌については、そ の特性やベントナイト内における腐食反応への寄与は未解明であるが、温度 30 ℃・圧縮密 度 1.0 g cm⁻³の条件下にて嫌気性菌の生菌数が顕著に増加していることから、これらの菌は 6ヶ月から1年間の間に著しく進行した腐食反応に関与している可能性がある。一方、50°C 試験では大きな生菌数の増加は認められず(最大で 10² colonies g⁻¹程度)、1 年の試験後 では生菌数が減少していることが示された。この結果は、上述の炭素鋼腐食量や代謝産物の 試験結果から推測された微生物活性の低さと一致するものである。地下水を用いた Stroes-Gascoyne ら (2010)の類似試験では圧縮密度に関わらず嫌気性微生物は検出されず、 好気条件においても1.6 g cm⁻³の圧縮密度条件ではほぼ増殖が観察されないという結果が示 されている。これら既報と本報告での結果の差異が生じた要因として、珪砂の含有量の違い

(すなわち緩衝材中のモンモリロナイト密度の含有量)が挙げられるが、詳細については今 後検討が必要である。



図 2.2.1-67 ベントナイト中の生菌数

(4) 緩衝材中の C-14 移行挙動試験

使用済燃料や放射化された金属材料中に含まれる C-14 は、人工バリアや岩盤への収着性が 低いと予測されることから、使用済燃料の直接処分においては、安全評価上の被ばく線量に 大きく寄与する重要な核種となることが考えられる。これまでの研究より、使用済燃料や金 属材料から放出される C-14 は、無機および有機の両形態として存在することが確認されてお り、有機形態で存在する C-14 は、分子量の小さいアルデヒド類、カルボン酸、アルコール類 などと報告されている(Kaneko et al., 2003)。また、処分場環境においては、放出された C-14 を含む有機化合物が微生物の関与により分子量のより小さい有機化合物へ変化する可 能性や、メタンへ還元または CO₂ へ酸化される可能性もある。そのため、有機、無機化合物 に関する収着拡散データを拡充し、化学形態や分子量の違いによる C-14 の人工バリアや岩盤 中での収着拡散挙動の変化について把握する必要がある。

本研究では、拡散係数がほとんど報告されていない分子量の小さい有機化合物について、 圧縮ベントナイトに対する透過拡散試験を実施して実効拡散係数を取得する。平成27年度は、 乾燥密度1.4 Mg m⁻³の圧縮ベントナイトに対し、酢酸イオンの実効拡散係数の実測値を取得 するとともに、この酢酸イオンの実効拡散係数は、ヨウ化物イオンの同条件での実効拡散係 数を両イオンの自由水中の拡散係数の比によって補正することにより推測可能であることを 示した。

平成 28 年度は、乾燥密度 0.8 Mg m⁻³の圧縮ベントナイトに対して、酢酸イオンの実効拡 散係数を取得し、乾燥密度の違いによる拡散挙動の違いについて検討を行った。

試験方法および試験結果について、以下に示す構成で報告する。

- 試驗手法
- 2) 解析手法
- 3) 試験結果

1) 試験手法

拡散試験には、有機化合物のトレーサーとして、C-14 で標識された酢酸ナトリウムを使用 し、試験溶液は、0.5 mol 1⁻¹の NaCl 溶液とした。試験溶液の pH は、圧縮ベントナイト間隙 水の pH として想定される pH 8 付近とした。pH 8 付近においては、酢酸ナトリウムはほぼ酢 酸イオンとナトリウムイオンに解離しており、得られる実効拡散係数は酢酸イオンのものと なる。試験には、精製モンモリロナイトであるクニピアFを使用し、乾燥密度は、0.8 Mg m⁻³ とした。試験は、同条件の 2 試料(試料 1、試料 2)を作製して実施した。試験には、平成 27 年度の試験に使用したものと同様の循環型透過拡散試験装置を用いて実施した(原子力機 構, 2016)。

試験では、まずクニピアFを所定の乾燥密度で拡散セルに充填し、雰囲気制御グローブボ ックス内で拡散セルを 0.5 mol 1⁻¹の NaCl 溶液中に浸漬した後、拡散セルに試験溶液を循環 させ、ベントナイトを含水飽和させた。その後、高濃度側容器に約 1,000 ml、低濃度側容器 には 30 ml の試験溶液を添加して循環装置を組み立て、酢酸イオンと拡散挙動を比較するた め、高濃度側容器に NaI 溶液を添加し、ヨウ化物イオン(I⁻)の拡散試験を実施した。NaI 溶液の濃度は、5×10⁻³ mol 1⁻¹とした。NaI 溶液を添加して試験を開始した後、高濃度側容 器中の溶液を定期的に採取し、ヨウ素濃度を測定した。低濃度側溶液については、拡散セル に接続している容器を、試験溶液を添加した別の容器と定期的に交換し、交換した溶液中の ヨウ素濃度を測定した。ヨウ化物イオンの拡散試験後、C-14 で標識された酢酸ナトリウム溶 液を高濃度側容器に添加し、酢酸イオン(CH₃COO⁻)の拡散試験を実施した。試験開始後、ヨ ウ化物イオン拡散試験と同様に、高濃度側容器中の溶液は定期的に採取、低濃度側容器中の 溶液は別の容器と定期的に交換して C-14 の放射能濃度を測定し、C-14 の濃度変化より酢酸 イオンの実効拡散係数を算出した。

2) 解析手法

実効拡散係数は、フィックの第一法則に基づいて、低濃度側溶液の濃度変化より算出した 定常状態におけるトレーサーのフラックスと高濃度側溶液中のトレーサー濃度より式 2.2.1-8に従って算出した。(原子力機構, 2016)

$$D_e = -J \cdot \frac{L}{C_H} \quad \text{if } 2.2.1-8$$

ここで、*D*_eは実効拡散係数、*J*はトレーサーのフラックス、*L*はベントナイト厚さ、*C*_Hは高濃 度側溶液中のトレーサー濃度である。また、実効拡散係数は、トレーサーの自由水中の拡散 係数と式 2.2.1-9の関係で表される。

ここで、*D*₀はトレーサーの自由水中の拡散係数、*FF*は形状因子である。形状因子は、圧縮ベ ントナイト中でのトレーサーの拡散に関与する間隙率や拡散経路などの情報を含むパラメー タである。2種類のトレーサー間において形状因子が一致する場合、両トレーサーの拡散に 関与する間隙率や拡散経路が同じであることを示唆しているとともに、自由水中の拡散係数 の違いを元に、両トレーサー間の実効拡散係数の関係を記述できることを示している。例と して、形状因子が一致する場合の、酢酸イオンの実効拡散係数とヨウ化物イオンの実効拡散 係数の関係式を式 2.2.1-10 に示す。

$$D_{e}^{CH_{3}COO^{-}} = \frac{D_{0}^{CH_{3}COO^{-}}}{D_{0}^{I^{-}}} \cdot D_{e}^{I^{-}} \cdots \cdots \cdots \overrightarrow{\mathbb{R}} 2.2.1 - 10$$

ここで、*De^{CH3C00-}*は圧縮ベントナイト中の酢酸イオンの実効拡散係数、*De^T*は圧縮ベントナイト 中のヨウ化物イオンの実効拡散係数、*De^{CH3C00-}*は自由水中の酢酸イオンの拡散係数、*De^T*は自 由水中のヨウ化物イオンの拡散係数である。

3) 試験結果

図 2.2.1-68 に、低濃度側溶液へ透過したヨウ化物イオン、酢酸イオンのフラックスの時間 変化を示す。トレーサーのフラックスは、高濃度側溶液中のトレーサー濃度により規格化し た値を示す。試験期間中に、高濃度側溶液中の各トレーサー濃度の低下は観察されなかった。 図 2.2.1-68 より、両トレーサーのフラックスは概ね 10 日程度で一定の値となり、定常に達 していることがわかる。定常状態におけるフラックスと高濃度側溶液中のトレーサー濃度より、式 2.2.1-8 に従って各トレーサーの実効拡散係数を算出し、算出した実効拡散係数より、 式 2.2.1-9 に基づいて形状因子を算出した。それぞれの値を、平成 27 年度に圧縮ベントナイトの乾燥密度 1.4 Mg m⁻³の条件で取得した値とともに、表 2.2.1-4 に示す。



(b) 試料 2

図 2.2.1-68 低濃度側溶液へ透過したヨウ化物イオンおよび酢酸イオンのフラックスの時 間変化(乾燥密度 0.8 Mg m⁻³、NaCl 濃度 0.5 mol 1⁻¹)

乾燥密度	NaCl 濃度	ヨウ化物イオン		酢酸イオン	
$[Mg m^{-3}]$	$[mol \ 1^{-1}]$	$D_e \ [\mathrm{m}^2 \ \mathrm{s}^{-1}]$	FF	$D_e \ [\mathrm{m}^2 \ \mathrm{s}^{-1}]$	FF
0.8	0.5	8. 5×10^{-11}	4. 1×10^{-2}	5. 1×10^{-11}	4. 7×10^{-2}
		8.8×10 ⁻¹¹	4. 3×10^{-2}	4. 9×10^{-11}	4.5 $\times 10^{-2}$
1.4	0.5	4. 0×10^{-12}	2.0×10 ⁻³	2. 3×10^{-12}	2. 1×10^{-3}
		4. 4×10^{-12}	2. 1×10^{-3}	2. 6×10^{-12}	2. 4×10^{-3}

表 2.2.1-4 実効拡散係数、形状因子の実測値

表 2.2.1-4 に示すように、平成 27 年度に実施した試験においては、圧縮ベントナイトの乾燥密度が 1.4 Mg m⁻³の条件において、ヨウ化物イオンと酢酸イオンの形状因子がほぼ同一の 値であることを示した。すなわち、酢酸イオンの実効拡散係数が、同条件で取得したヨウ化 物イオンの実効拡散係数より式 2.2.1-10 により算出できることを示した。

平成 28 年度に取得した圧縮ベントナイト乾燥密度 0.8 Mg m⁻³におけるヨウ化物イオンお よび酢酸イオンの実効拡散係数は、乾燥密度 1.4 Mg m⁻³における値と比べて、両トレーサー とも 20 倍程度大きな値が得られた。しかしながら、取得した乾燥密度 0.8 Mg m⁻³における ヨウ化物イオンと酢酸イオンの形状因子を比較すると、乾燥密度 1.4 Mg m⁻³の場合と同様に、 両トレーサー間で概ね同じ値を示している。この結果は、乾燥密度が異なる場合においても、 式 2.2.1-10 が成立することを示唆しており、ヨウ化物イオンなどの他の陰イオンの実効拡散 係数の報告値を利用し、酢酸イオンの実効拡散係数を設定できることを示している。

(5) 銅とベントナイトの相互作用に関する調査

処分容器材料として長寿命化が期待される銅については、これまでに腐食速度の検討等に より、処分への適用性の評価を行ってきている(原子力機構,2016)。一方で、処分場環境 においては、処分容器の周囲に圧縮ベントナイトが配置されることから、銅処分容器の腐食 反応に伴うベントナイトの変質や、圧縮ベントナイト中へ移行した銅腐食生成物の溶解等に よる放射性核種の収着への影響についても検討が必要である。銅は、酸素が存在しない環境 では一般的に熱力学的に安定であるため、ほとんど腐食を起こさないという特性を有してい るが、硫化水素イオン等が存在する場合には銅が硫化銅等に変化し腐食することが報告され ている(原子力機構,2007)。銅の腐食量が大きい場合、銅の腐食反応がベントナイトに及 ぼす影響が顕著になる可能性がある。しかしながら、圧縮状態のベントナイトと銅との相互 作用に関して、硫化物存在下での研究はほとんど報告されていない。

本調査では、硫化水素イオン共存下で圧縮ベントナイトと銅試験片を接触させ、試験片と の接触面付近のベントナイト中に生成する鉱物やベントナイト中への銅の移行挙動を観察す ることにより、ベントナイトの変質や試験片の腐食挙動について実験的に評価する。

平成 28 年度は、銅との接触界面における圧縮ベントナイトについて EPMA 観察を行い、ベントナイト中の鉱物の変質状況や圧縮ベントナイト中に移行した銅の存在形態について調査した。

1) 試験方法

試験では、図 2.2.1-69 に示すテフロン製の試験カラムを用いて圧縮ベントナイトを接触さ せた状態で銅試験片を腐食させた。試験カラム内の圧縮ベントナイトの形状は直径 20 mm、 長さ 20 mm であり、圧縮ベントナイトの片側を銅試験片に接触させ、反対側の端面にはフィ ルターを設置し、試験溶液と接触させた。試験に用いた人工海水の組成を、表 2.2.1-5 に示 す。試験溶液は、標準的な海水の組成から微量元素を除いた人工海水に、0.01 mol 1⁻¹ とな るように Na₂S を添加したものを使用した。銅試験片は無酸素銅 C1020P-1/2H を用い、ベント ナイトの乾燥密度は 0.8 Mg m⁻³、試験温度は 80 ℃とした。試験期間は 30 日とし、試験期間 経過後、圧縮ベントナイトを取り出して 10 mm 角程度に切断、乾燥させた後、樹脂包埋した ものを EPMA 観察試料とした。



図 2.2.1-69 銅ーベントナイト変質試験カラム概略図

元素	濃度 [mol 1 ⁻¹]	元素	濃度 [mol 1 ⁻¹]
C1-	0.56	K ⁺	0.010
Na ⁺	0.48	S04 ²⁻	0.029
Mg^{2+}	0.055	HCO_3^-	0.0028
Ca ²⁺	0.011		

表 2.2.1-5 試験に使用した人工海水の組成

2) 試験結果と考察

図 2.2.1-70 に、銅試験片との接触面を含む圧縮ベントナイト試料(クニピア F)の EPMA 観察結果を示す。図 2.2.1-70 は、2 mm×2 mm の領域の反射電子像(BEI)と Cu のマッピン グ分析結果を示しており、図の右側が銅試験片との接触面である。図より、銅試験片と圧縮 ベントナイトの接触面付近で Cu の濃度が上昇しており、また、接触面から数百・m 程度ベン トナイト中に Cu が分布していることがわかる。このことは、銅試験片の腐食に伴って銅がベ ントナイト中に移行し、ベントナイト中で析出したことを示していると考えられる。圧縮ベ ントナイトが存在する場合には、ベントナイトが共存しない溶液中で腐食させた場合に比べ て、銅試験片の表面に観察される皮膜が薄くなることが報告されている(原子力機構,2004)。 この観察結果は、圧縮ベントナイトが共存する状態での銅の腐食は、銅の腐食生成物の一部 がベントナイト内部へ移行することにより、銅表面での皮膜の形成速度が遅くなることを示 していると考えられる。



図 2.2.1-70 銅試験片との接触面を含む圧縮ベントナイト試料の EPMA 観察結果

観察された Cu について詳細に検討するため、図 2.2.1-70 に示す 2 mm×2 mmの領域の反射 電子像中に示す枠内(300 µm×300 µm)の Cu, S, 0, Si, Al, Na, Cl のマッピング分析を行った 結果を図 2.2.1-71 に示す。この領域は、図 2.2.1-70 で観察した領域中で、銅試験片と圧縮 ベントナイトの接触界面に存在する Cu の濃度が比較的高かった部分である。図 2.2.1-71 よ り、Cu の濃度が高い部分はSの濃度が高く、両元素の分布に相関があることがわかる。これ に対し、0 の濃度は銅試験片と圧縮ベントナイトの接触界面で上昇する傾向がなく、Cu と S の濃度分布と相関が見られていない。このことから、S は硫酸塩ではなく硫化物として存在 しており、Cu と S の濃度が高い部分で硫化銅が生成していると推測される。また、銅試験片 と圧縮ベントナイトの接触界面には、これらの元素に加えて Na と C1 の濃度が高い部分が確 認される。Na と C1 の分布には相関が見られ、銅試験片と圧縮ベントナイトの接触界面に塩 化ナトリウムが析出していると考えられる。塩化ナトリウムの析出の原因は明確ではないも のの、硫化銅と塩化ナトリウムの分布には相関が見られず、硫化銅の生成には影響を及ぼし ていないと推測される。



図 2.2.1-71 接触面近傍領域(300 μm×300 μm)の Cu, S, O, Si, A1, Na, C1 マッピング分析 結果

図 2.2.1-72 に、図 2.2.1-71 の反射電子像中に示す枠内(30 μ m×30 μ m)について、Cu とSのマッピング分析結果と、図中に示す4カ所についての点分析による元素存在比の分析 結果を示す。点分析の結果、銅試験片に近接している Spot1 と Spot3 の Cu とS の原子数比は 2:1 に近いのに対し、接触面から少し離れた Spot2 と Spot4 の Cu とS の原子数比は、S の比 率が上昇し1:1 に近づいている。このような傾向は、銅試験片と圧縮ベントナイトの接触界 面の他の部分においても観察された。S の比率の上昇は、Cu が銅試験片付近では Cu₂S の形態 で存在しているのに対し、試験片から離れるに従って CuS の形態に変化している可能性が示 唆される結果である。これまでの銅試験片の腐食に関する報告においては、銅試験片表面に おいて Cu₂S が皮膜として生成することが XRD 分析により確認されている(原子力機構,2007)。 本調査の結果は、主に 2 価の Cu が圧縮ベントナイト中に移行しており、銅試験片表面に存在 する 1 価の腐食生成物とは化学形態が異なることを示唆している可能性がある。



図 2.2.1-72 接触面近傍領域(30 μm×30 μm)の Cu,Sマッピング分析結果と点分析によ る元素存在比の分析結果

銅試験片の腐食に伴うベントナイト中の鉱物の変質については、銅試験片と圧縮ベントナ イト接触界面付近において、点分析により化学組成を取得し、化学組成の変化を観察するこ とにより評価を行った。しかしながら、本調査で用いた試料中には、圧縮ベントナイトが明 確に変質していると考えられる部分は確認されなかった。

本調査においては、銅試験片の腐食に伴い銅が圧縮ベントナイト中に移行していることが 確認され、圧縮ベントナイト中に移行した銅は CuS の形態で存在している可能性が示唆され た。しかしながら、圧縮ベントナイト中への Cu の移行量が少なく移行距離が短いことから、 銅試験片表面付近に Cu がとどまっており、圧縮ベントナイト内部に移行している Cu の存在 形態について明確にすることが難しかった。今後、より長期の試験を実施して圧縮ベントナ イト中により深く Cu を移行させ、圧縮ベントナイト中での銅の存在形態について調査にする とともに、ベントナイト中の鉱物の変質挙動についても調査し、より長期間での変質挙動に ついて検討を行う予定である。

2.2.2 使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究

(1) 本項目の背景と目的

直接処分システムの安全性を評価する上で、ガラス固化体の地層処分と大きく異なる特徴 の一つとして、処分容器による閉じ込め機能が喪失した場合に放射性核種が使用済燃料から 地下環境へ放出される際の挙動が挙げられる。具体的には、放出される放射性核種の種類、 放出量、放出時期、放出速度、化学形態などであり、以下ではこれらを評価することを総称 して「ソースターム評価」と呼ぶ。

使用済燃料のソースターム評価は、直接処分の安全評価上の重要な項目であるが、わが国 における直接処分を対象としたソースターム評価の事例としては、使用済燃料の地層処分シ ステムに関する概括的評価第1次取りまとめ(原子力機構,2015a)(以下、「直接処分第1 次取りまとめ」という)において安全評価を試行した際の設定が該当するが、そこではスイ スで検討されたソースタームパラメータをそのまま採用したのみであり、各々のパラメータ の設定値および設定根拠などについての詳細な検討は行われていない。

そこで、本技術開発項目では、直接処分を検討している諸外国におけるソースターム評価 の考え方や、それらの根拠となっている文献情報(試験データ)を調査・整理するとともに、 最近行われた、あるいは現在も進行中のソースタームに関する試験研究の成果なども参考と して、わが国向けのソースタームパラメータを、これまでよりも精度良く設定することを試 みている(原子力機構, 2015b, 2016)。

平成27年度までに、諸外国における直接処分の安全評価レポートを対象とする調査・整理 を概ね終了し、国内外の試験研究の成果の調査にも着手した。これらの調査結果を基に、わ が国向けのソースタームパラメータの暫定値(以後、パラメータの暫定値という)を設定し た。また、国内の使用済燃料の特性についても予備的に調査した。

ソースターム評価の考え方は、概ね共通の概念が各国で認識されている。これまでの調査 結果を整理した使用済燃料中の核種分布および核種放出の概念を図 2.2.2-1 に示す。燃焼・ 照射によって燃料中に生じる超ウラン元素、核分裂生成物などの多様な放射性核種の一部は、 UO₂の結晶粒界に遍在化し、さらに、燃料ペレット内部に生じるガス気泡やひび割れなどの気 相を介して、燃料と被覆管とのギャップ(隙間)にまで移行する。これらは、燃料と地下水 が接触した場合に比較的速やかに放出される(瞬時放出)と考えられている。その他の核種 は、燃料マトリクス中に分散して存在し、燃料マトリクスが地下水へ長期にわたってゆっく りと溶解することと調和して放出される(長期溶解)と考えられている。加えて、ジルカロ イ被覆管が放射化されることで生成する核種(主に C-14)は、酸化膜中に存在する場合は比 較的速やかに放出され(瞬時放出)、母材中に存在する場合は母材の腐食溶解にともなって 比較的緩慢に放出される(長期溶解)と考えられている。

瞬時放出の程度を示すパラメータは、使用済燃料中の核種毎の総インベントリのうちの瞬時放出されるインベントリの割合である瞬時放出率(IRF)が用いられる。また、長期溶解の 程度を示すパラメータは、UO₂ペレットあるいはジルカロイ被覆管が溶解や腐食によって消失 するまでの年数の逆数である溶解速度が用いられる。



図 2.2.2-1 使用済燃料中の核種分布および核種放出の概念

また、ソースターム評価に付随する主要な不確実性についても、次に示すように整理した (原子力機構, 2015a, 2016)。

- ・処分対象使用済燃料の多様性
- ・ギャップおよび結晶粒界インベントリ評価手法
- ・リム領域(燃料ペレット外周部の局所的な高燃焼度領域)の寄与
- ・放射線(燃料集合体からの放射線)の影響
- ・わが国特有の地質環境条件(地下水中の全炭酸濃度など)
- ・燃料ペレットの比表面積
- ・構造材金属からの C-14 放出挙動および化学形態(特に、有機か無機か)
- ・使用済燃料の性状や地質環境条件などの経時変化

さらに、わが国向けの瞬時放出および長期溶解に関するパラメータの暫定値を、諸外国に おけるソースターム評価の考え方の最新動向を踏まえた次に示す考え方で、表 2.2.2-1 に示 すとおり設定した。

·瞬時放出

UO2ペレットから放出される元素として C, Cl, Se, I, Cs, Sr, Tc, Pd および Sn の 9 元素が、燃料集合体構造材から放出される元素として C が諸外国で共通的に取り扱われ ていることから、これらの延べ 9 元素(10 核種)を選定した。

また、結晶粒界、ギャップおよび被覆管の酸化物層に存在する核種が瞬時放出に寄与 するという考え方(図 2.2.2-1 参照)を支持し、この考え方に基づいて設定された諸外 国の IRF 値や、その設定根拠である部位毎の核種インベントリ測定データを比較・検討 することでパラメータを暫定的に設定した。

ただし、照射状況下で揮発性となる元素(C1, Se, I, Cs)は、核分裂生成ガスと同じ ような挙動を示すとの考えから、核分裂生成ガス放出率(以後、「FGR」という)を指標 として、FGR との相関性から IRF を決定することとした。なお、国内使用済燃料燃料の FGR を設定することが困難であったため、IRF は FGR との相関式で示した。

·長期溶解

使用済燃料マトリクス(UO₂)の他、ジルカロイと SUS を包含させた構造材金属に対し、 諸外国の設定値を参考として溶解速度を設定した。

なお、構造材金属の溶解速度は、有効数字が3桁である必要性が低いことから、有効 数字1桁の値に見直した。

1				
パラメータの暫定値 直接処分		直接処分第1次取りまとめ		
		(原子力機構, 2016)	(原子力機構, 2015a)	
2	想定炉型	PWR および BWR	PWR	
想	見定燃焼度	$45~{ m GWd}~{ m tHM}^{-1}$	$45~{ m GWd}~{ m MTU}^{-1}$	
	FGR 設定	[未設定]	—	
	使用済燃料	• I $[IRF(I) = FGR \times 1]$	• I 4 %	
		• Cs [IRF(Cs)=FGR× $(1/\sqrt{3})$]	• Cs 4 %	
瞬時放出率(IRF)		• C1 $[IRF(C1) = FGR \times 3]$	• C1 10 %	
		• Se 1.0 %	• Se 4 %	
		• Sr 1.0 %	• Sr 1 %	
		• Tc 1.0 %	• Tc 2 %	
		• Pd 1.0 %	• Pd 2 %	
		• Sn 0.1 %	• Sn 4 %	
		• C 10.0 %	• C 10 %	
	構造材金属	・C 20% (有機形態)	・C 20 % (有機形態)	
長期溶解	使用済燃料	$1 \times 10^{-7} y^{-1}$	$1 \times 10^{-7} y^{-1}$	
	構造材金属	・全種類 1x10 ⁻⁴ y ⁻¹	・ジ゙ルカロイ 8.77x10 ⁻⁵ y ⁻¹ ・SUS など 1.18x10 ⁻⁴ y ⁻¹	

表 2.2.2-1 平成 27 年度に提案したソースタームパラメータ

平成28年度は、より現実的なソースタームパラメータを設定することを目的として、諸外国の安全評価事例および国内外の試験研究成果について、特にC-14の放出に関する最新事例の調査・整理を継続するとともに、国内の使用済燃料の特性評価(特に、前述したFGRの設定)の手法検討を進めることとした。また、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構,2015a)において想定した使用済燃料の基本仕様(PWR、U濃縮度4.5wt%、燃焼度45,000 MWD MTU⁻¹、

比出力 38.0 MW MTU⁻¹、処分までの貯蔵期間 50 年)以外の高燃焼度化燃料や MOX 燃料などに対してパラメータを設定する必要性や、パラメータの幅を検討した。

具体的な調査項目は以下のとおりである。

(i) 被覆管からの C-14 の放出量および化学形態の調査

C-14 に係るパラメータをより現実的に設定することを目的とし、国内外で実施されている C-14 のソースタームに関する試験研究の最新情報を収集した。

(ii) 国内の使用済燃料の FGR の検討

平成27年度の調査結果では、国内の照射後試験の情報が限られていたため、国内 使用済燃料のFGRを設定することが困難であった。平成28年度は、照射後試験デー タを補完し、将来の高燃焼度化なども含めた幅広い燃料の多様性に対応できる知見 を得ることを目的とし、燃料挙動に関するシミュレーション計算の適用性などを検 討した。

(iii) 不確実性および燃料多様性に対応するための継続調査

パラメータ(表 2.2.2-1 参照)の不確実性を検討するため、諸外国ですでに実施 された安全評価におけるパラメータ設定値の幅などの設定(不確実性を考慮する手 法)に着目し、調査および情報整理を行う。

上記の項目についての調査および検討の結果を、それぞれ「(2)C-14の放出量および化学 形態の調査」、「(3)国内の使用済燃料のFGRの検討」および「(4)不確実性および燃料多様 性に対応するための継続調査」として示す。また、そのまとめを 2.3 節に示す。

(2) 被覆管からの C-14 の放出量および化学形態の調査

放射化生成物のうち、C-14 は安全評価上重要な核種である。その理由は、半減期が5,730 年とやや長いこと、バリア材への吸着性が乏しい有機形態や炭酸水素イオンなどの陰イオン 化学種となり、人工バリアによる核種移行遅延効果があまり期待できないためである。しか しながら、C-14 の放出挙動および化学形態に関する試験研究の例は限られており(たとえば Yamaguchi, et al., 1999)、特に、C-14 を含む化学形態(有機もしくは無機)についての諸 外国の見解は必ずしも一致していない。このため、諸外国では C-14 のソースタームに関する 試験研究のプロジェクトが現在も進行している。C-14 は、わが国においても TRU 廃棄物処分 の安全評価では重要な核種となっており、第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ(電気 事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)(以下、「第2次 TRU レポート」という)以 後も、TRU 廃棄物処理処分の高度化開発プロジェクトにおいて、C-14 の移行挙動評価に関す る試験研究が実施されている。

ここでは、これら試験研究の最新の情報を収集した。その内容を、以下に示す。

1) 調査対象

TRU 廃棄物の地層処分に関連する研究開発プロジェクトの各種文献を調査対象として、 C-14の放出量および化学形態に関する最新知見について調査を行った。調査対象とした文献 を表 2.2.2-2 に示す。

著者/実施機関	レポート名称/文献名称	文献
(公財)原子力環境整 備促進・資金管理セン ター (RWMC)	平成 27 年度 地層処分技術調査 等事業 TRU 廃棄物処理・処分技 術高度化開発 報告書 (第 2 分冊) - 炭素 14 長期放出挙 動評価-	原環センター, 2016
Gras / European Commission	CAST (CArbon-14 Source Term) D3.1: State of the art of 14C in Zircaloy and Zr alloys-14C release from zirconium alloy hulls.	GRAS, 2014

表 2.2.2-2 調査対象とした文献類の一覧表

原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)で実施されている「TRU 廃棄物処 理・処分技術高度化開発」のうち C-14 に関する部分、および国際共同研究プロジェクト 「CAST (Carbon-14 Source Term)」の実施内容の枠組みを図 2.2.2-2 に示す。本調査では、こ れらの 2 つの試験研究のなかから C-14 ソースタームに関する新たな知見(図 2.2.2-2 中に赤 枠で示した項目より)を抽出・整理した。



図 2.2.2-2 C-14 に関する試験研究の枠組み

C-14のパラメータを適切に見直していくために有用と考えられた調査結果を、以下に示す。

2) 燃料集合体における C-14 生成の起源とインベントリ

燃料集合体中に生成する C-14 は、主に燃料ペレットや金属部材中に不純物として含まれる ¹⁴N が中性子によって放射化されることで生じる。その他にも、酸素および炭素の安定同位体 である ¹⁷O および ¹³C が微量ながら存在しており、これらも生成起源となることが知られてい る。CAST では、殆どの C-14 の起源元素は ¹⁴N であるが、UO₂ペレットや被覆管表面の酸化膜 中の 0 の同位体から生成する C-14 も有意量となり得え、¹⁴N (n, p) ¹⁴C および ¹⁷O (n, α) ¹⁴C が 2 つの主要な C-14 生成反応であると述べている(GRAS, 2014)。 インベントリの評価においては、ORIGEN などの核種崩壊生成計算コードを用いて C-14 の 総インベントリを計算していることが多く、その際の窒素不純物濃度の条件は、ジルカロイ に係る工業規格である ASTM B 811 あるいは JIS H4751 で規定される上限値 80 ppm が用いら れていた(たとえば、Yamaguchi et al., 1999)。これに対し、原環センターでは、TRU 廃棄 物処理・処分技術高度化開発を継続するなかで C-14 インベントリの合理的設定方法を検討し ており、窒素不純物濃度を、実測データ(20~45 ppm)に基づいて 40 ppm とすることが現実 的であるとしている(原環センター, 2016)。CAST においても、フランス原子力・代替エネ ルギー省(CEA)、フランス電力(EDF)および Areva 社が 100,000 体以上の燃焼集合体を対 象として N, C, 0 の濃度を分析した結果に基づき、ジルカロイ-2 および-4 における窒素不純物 の濃度として 40 ppm を推奨している(GRAS, 2014)。

これらより、今後 C-14 の総インベントリを計算する場合、初期の窒素不純物濃度を 40 ppm とすることが適切であると考えられる。

3) 被覆管の腐食挙動

① 被覆管の外周面に生成する酸化膜

前述のとおり、被覆管表面には、一次冷却水や水蒸気との反応により酸化物層が生成する。 また、この酸化膜中に存在する C-14 は不安定な状態であるとされ、地下水と接触した場合、 比較的速やかに環境中へ放出されると考えられている(たとえば、Nagra, 2002)。

酸化膜の厚さは、国内の例では、Yamaguchi et al., (1999) によって 47.9 GWd tU⁻¹ の PWR 使用済燃料において酸化膜厚さを約 55 μ m と想定し、第 2 次 TRU レポートにおいては一 律 80 μ m と設定された(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)。また、その後 の TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発のなかで、BWR について 9 μ m、PWR について 49 μ m と設定される(原環センター, 2013)など、様々なケースがみられる。

CAST では、燃料棒のステージ(軸方向の位置)および平均燃焼度が酸化膜厚さへ与える影響を検討した結果を引用している(GRAS, 2014)。引用された、燃焼サイクルおよびステージ位置とピーク酸化膜厚さの関係を図 2.2.2-3 に、燃焼度と酸化膜厚さの関係を図 2.2.2-4 にそれぞれ示す。これらより、最も多くの燃焼サイクルを経たケース、あるいは最も高い燃焼度のケースにおいて、酸化膜の厚さは 100 μmを超えないとしている。

また、酸化膜厚さと燃焼度の経験式を下記のように提案している(GRAS, 2014)。

t=1.935×10⁻²×(BU)^{2.1}式 2.2.2-1 ここで、*t*:最も腐食するステージの方位角方向の酸化膜の厚さ *BU*:燃焼度

これらの知見を、直接処分で想定している使用済燃料の燃焼度(45,000 MWd MTU⁻¹)に適 用すれば、図 2.2.2-4 における 40~50 MWd kgU⁻¹ における酸化膜厚さは 40~50 µm となり、 式 2.2.2-1 に燃焼度を代入すると約 57.3µm と計算される。このことから、PWR に限れば、 第 2 次 TRU レポートやその後の TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発における PWR 被覆管の 酸化膜厚さの想定(49 µm)は、諸外国における認識と大きな違いはないことが確認できた。 直接処分の安全評価では、前述した燃料の基本条件(炉型;PWR、燃焼度;45 GWd tU⁻¹)に 対するパラメータが、BWR などの他の炉型や異なる燃焼度の使用済燃料に対する値にも適用 可能であると考えている。その根拠は、ジルカロイ-2 とジルカロイ-4 の耐食性がほぼ同等で あり、かつ、BWR 炉内温度が PWR よりも若干低いため、ジルカロイ-2 の酸化膜厚さはジルカ ロイ-4 に比べて薄い傾向があるとの評価結果(Videm, 1975;Garzarolli et al., 1979;原 環センター, 2013))である。加えて、燃料棒の底部と上部では、酸化膜が比較的成長し難 い(図 2.2.2-3) ことを考慮すると、燃料棒1本あたりの酸化膜に含まれる C-14 インベント リは、ピーク酸化膜厚さを用いた想定より小さい可能性があり、すでに保守的な値になって いると考えられる。



図 2.2.2-3 ジルカロイ-4におけるステージ位置と酸化膜厚さの関係(Dehaudt et al., 2000)



図 2.2.2-4 ジルカロイ-4 における燃焼度と酸化膜厚さの関係 (Bossis et al., 2004)

② 被覆管の内周面に生成する酸化膜

酸化膜からの C-14 放出の寄与については、これまでは被覆管の外周面に生成する酸化膜の

みを想定していた考えられる。実際に、PWR 使用済燃料のハルにおける酸化膜中の C-14 イン ベントリを評価した例 (Yamaguchi et al., 1999)を見ても、被覆管内側に生成する酸化膜 には言及していない。

CAST では、ジルカロイー4 について、燃焼度が低い条件において被覆管内面に局所的な酸化 物層が生成し、燃焼度が高まるにつれて全面腐食へと進展するとの評価例が取り上げられて いる (Dehaudt et al., 2000)。これによれば、全面腐食後の燃焼度と酸化膜厚さの関係か ら、被覆管内面の酸化膜厚さは 9±2 μ m で安定するとされる。

CAST の中では、この被覆管内面の酸化膜と瞬時放出との関連性には言及されていない。しかしながら、現状のわが国の安全評価上のシナリオでは、処分容器の閉じ込め機能が喪失した時点で、被覆管や燃料ペレットの全ての表面が地下水と接液することを想定しており、このような酸化膜の影響も考慮しなければならない可能性がある。

③ ジルカロイおよびジルコニウム酸化物の腐食

ジルカロイの腐食については、原環センターにおいて、ガス蓄積型腐食試験手法を用いた 長期的な腐食試験が現在も継続中である。本事業の平成26年度報告書(原環センター,2014) において、その長期的な腐食試験から得られた速度データ以降、新たな進展は報告されてい ない。

ジルコニウム酸化物 (ZrO₂)の腐食については、CAST で種々のアルカリ溶液中 (NaOH, KOH+NaOH) の溶解速度データが集約されている (Guipponi, 2009; Nishino et al., 1997; Poulard, 2001; Poulard et al., 2001) 。これらより、ZrO₂の腐食速度は、中性領域およびセメント系材料に起因するようなアルカリ性領域では約1nm であるとされ、非常に安定であることがわかる。

4) 被覆管からの C-14 の放出挙動

CAST において引用された、母材および酸化膜の C-14 存在割合を集計して表 2.2.2-3 に示 す。表中の最上段の Yamaguchi et al., (1999)の結果は、欧州諸国における使用済燃料集合 体からの C-14 の瞬時放出率の設定 (20 %)のための主要な根拠データとなっている。それ 以後の研究では、酸化膜中の C-14 存在割合、即ち瞬時放出率が、PWR の場合において最小で 12 %以下と評価されている例があり、従前の認識 (20 %)よりも下方修正できる可能性があ るものの、これまでとの顕著な違いは無いことが分かった。一方で、BWR (ジルカロイ-2)に ついては、酸化膜中のインベントリ割合が 4~6 %程度と評価されており、ほとんどの C-14 は母材中に存在する可能性が示されている。仮に、PWR と BWR を分類して安全評価を行う場 合には、BWR に対する C-14 の瞬時放出率 (IRF)を、PWR の場合より小さい個別値として現実 的に見積もることが出来る可能性がある。
対象燃料	部材ご	との核種存在割合	文献
	母材	外側酸化膜	
PWR 45 GWd tU ⁻¹	約83%	約 17 % (膜厚~55 μm)	Yamaguchi et al., 1999
PWR 45 GWd tU ⁻¹	約 80 %	約 20 % (膜厚 100 μm)	Hélie et al.,2004, ANDRA, 2005
BWR 39.4 GWd tU ⁻¹	96 %	4 % (膜厚 20 μm)	Tanabe et al., 2007
$\frac{\text{PWR}}{31 \sim 51 \text{ GWd } \text{t}^{-1}}$	> 88 %	< 12 % (膜厚 34~58 µm)	Solupogi et el 2012
$\frac{\text{BWR}}{29 \sim 45 \text{ GWd } \text{t}^{-1}}$	> 94 %	< 6 % (膜厚 6~66 μm)	sakuragi et al., 2013

表 2.2.2-3 CAST で集約されたジルカロイ被覆管酸化膜の C-14 インベントリ

5) 被覆管から放出される C-14 の化学形態

ジルコニウム被覆管から放出される C-14 を含む化学形態の比率を表 2.2.2-4 に示す。ジル カロイ-4 (PWR) は燃焼度 47.9 GWd t⁻¹、ジルカロイ-2 は燃焼度 39.7 GWd t⁻¹の使用済燃料 からのサンプルである。C-14 を含む化学形態についても、Yamaguchi et al., (1999)の結果 は欧州諸国が引用する主要な根拠データとなっている。

それ以後の進展として記載されている試験研究としては、BWR STEP3 使用済燃料(燃焼度 39.7 GWd t⁻¹)の被覆管(ジルカロイ-2)について、最終的に10年間試験試料を浸漬させる 試験の2年間経過後までの試験結果を報告しているものがある(Yamashita et al., 2013)。 この試験の分析には、微量の有機炭素を精度よく定量することを目的として、湿式酸化処理 法(wet oxidation method)と液体シンチレーション(LSC)の組合せを基本とする開発中の 手法(Takahashi et al., 2014)が用いられている。この手法によって分析した結果、6ヶ 月後(0.5 y)と9ヶ月後(0.75 y)では気相中のCが検出されたがその後は検出されず、ま た、1年後と2年後では、有機炭素と無機炭素の割合に乖離が見られた。これらの理由は示 されていない。なお、前述のとおりC-14の定量方法の開発を浸漬試験と並行して進めている ため、C-14の定量結果が今後見直される可能性がある。

6) C-14 ソースタームに関するまとめとわが国の直接処分評価への適用性

被覆管中の C-14 インベントリの合理的設定方法については、ジルカロイ材料中の初期の窒素不純物濃度の設定を、従前の 80 ppm から 40 ppm に変更することが現実的であると考えられた。このことにより、同様の燃焼履歴であれば C-14 生成量(インベントリ)は減少する。

被覆管表面の酸化膜厚さは、現在のレファレンスとなる使用済燃料に対する想定は、第2次TRUレポートにおいてPWR使用済燃料のハルに対して設定されている49μmを踏襲することで問題はなく、この設定にBWR使用済燃料の特性を包含させることも可能と考えられた。 そのうえで、表2.2.2-3に示した、酸化膜の厚さと酸化膜中に存在するC-14の放出割合の測定結果も含め、総じて判断すると、被覆管からのC-14の放出割合を20%としている従前の設定を下方修正できる可能性は見出せる。しかしながら、被覆管内面の酸化膜の寄与などの 新たな不確実性も見出されたことから、C-14の放出割合は20%のままとすることが望ましいと考えられる。

被覆管	材質	浸出期間 [y]	有機形態および無機形態の比率			出典		
		0.25		10	0 %			
	with oxide	0.46	21.1%	21.1% 78.9 %				
Zircaloy -4		0.92	100 %			Yamaguchi et al., 1999		
	without oxide	0.46	21%	79 %				
		0.92	100 %					
		0.5	20%	30 %	~	-50 %		
Zircaloy	without	0.75	18 %	32 %	~	-50 %	Yamashita	
-2	oxide	1.0		72 %	72 % 28 %		et al., 2013	
		2.0	20 %		80 %			

表 2.2.2-4 被覆管から放出される C-14 の化学形態の割合



liquid phase: inorganic carbon liquid phase: organic carbon gaseous phase

ただし、BWR 使用済燃料における酸化膜とその中のインベントリについては、酸化膜の厚 さが PWR の場合より薄く、これに伴って瞬時放出率も低いとする認識が国内外において大勢 であると見受けられる。このことから、今後、PWR と BWR を切り分けて個別の瞬時放出率を 設定することで、より現実的な安全評価が行える可能性が示唆された。

C-14を含む化学形態については、液相へ放出される C の一部が無機形態であるとするデー タは増えてきているものの、有機形態が多くを占める傾向は変わっておらず、CAST レポート では、化学形態に関するデータがなおも不足している点を指摘している(GRAS, 2014)。こ れらより、放出される C-14 の化学形態についても、これまで通り全量が有機形態とする設定 を踏襲するべきであると考えられる。

なお、本項で得られた知見の一部は、後述する C-14 の放出挙動の感度解析(「(4)ソース タームパラメータ設定における不確実性反映方法の検討」の「2)感度解析」)に反映させて いる。

(3) 国内の使用済燃料の FGR の検討

平成 27 年度に実施したパラメータの暫定値の検討において、照射下で揮発性となる一部の 放射性核種(C1, I, Cs)の瞬時放出率である IRF [%]を設定する際、同使用済燃料における 核分裂生成ガス放出率である FGR [%]を指標とし、これに係数を乗じる形で IRF を設定する こととした。この場合、処分対象とするレファレンスとなる使用済燃料に対応する FGR を定 める必要がある。そのため、平成 27 年度に国内における照射後試験(以下、「PIE 試験」と 呼ぶ)を予備的に調査したが、照射が正常に終了した燃料と破損燃料のデータなどが混在し ていたことや、予備調査の範囲が各照射後試験試料の特性把握までに及ばなかったことから、 我が国向けの FGR を設定するには至らなかった(原子力機構, 2016)。

平成 28 年度は、測定された FGR とその背景情報(同サンプルの燃料種類、照射条件といった特性)との関係性に着目して、国内 PIE の情報を詳細に調査した。また、国内における燃料の設計仕様の変遷を整理するとともに、様々な使用済燃料の発生体数の予測例についても調査し、それらの結果を総合的に判断することで、モデル使用済燃料(燃料タイプ:PWR 燃料、濃縮度:4.5%、比出力:38.0 MW MTU⁻¹、燃焼度 45,000 MWD MTU⁻¹)に対して、FGR の値を検討した。また、将来の高燃焼度化なども含めた幅広い燃料の多様性に対応できる知見を得ることを目指し、シミュレーション計算によって FGR を推定する手法に着目し、軽水炉燃料の照射時ふるまいの解析コードである「FEMAXI」(鈴木ほか,2011)の適用可能性について調査を行った。

これらの検討結果を、以下に示す。

1) 国内 PIE 結果に基づく FGR の検討

国内 PIE の結果を調査・整理するにあたり、それらの試験に供された使用済燃料のサンプ ルの特性を把握するための情報として、国内における PWR および BWR の燃料設計の仕様の変 遷の整理を行い、次に、国内における使用済燃料を用いた PIE の結果と、使用済燃料の発生 状況についても調査し、それらの結果を総合的に判断することで、直接処分におけるモデル 使用済燃料に対する FGR を検討した。実際に事業段階で FGR を評価する場合には、国内 PIE データの代表性に留意する必要がある。

① 国内の燃料集合体設計の変遷

国内における PWR 燃料の設計の変遷を表 2.2.2-5 に示す。図中の分類(例)については、 後段「③使用済燃料の発生体数」で後述する。PWR は、美浜原子力発電所1号機が1970年に 運転開始したのが最初である。その装荷された燃料集合体は、海外の先行プラントにおいて 改良が重ねられた結果である第4世代と呼ばれる設計世代に属し、燃料棒の配列は14×14 (本)型であり、最高燃焼度は39,000MWd t⁻¹であった。

第4世代の設計では、燃料被覆管としてジルカロイが用いられ、燃料棒内部をヘリウムで 加圧することで、外圧による被覆管の内側へのクリープの軽減や、FP ガスの放出による熱伝 達性の低下の軽減を図る対策がなされている。 その後、国内では、1980年代後半から高燃焼度化ステップ1として最高燃焼度が48,000 MWd t⁻¹(以後、STEP1)へ、2000年代前半から高燃焼度化ステップ2として55,000 MWd t⁻¹(以後、STEP2)へと徐々に引き上げられており、燃料集合体に対しても、高燃焼度化へ対応するための漸進的な改良および大型化がなされてきている。現在のPWR 燃料の主流は、第4世代 燃料の延長上にある、17×17型のものである。

これらの経緯から、わが国が保有する PWR の使用済燃料集合体は、燃焼度の違いに応じて、 従来型燃料(14×14型と改良15×15型を含む)、STEP1 燃料(17×17型)および STEP2 燃料(17×17型)の3タイプに大別できる(佐治ほか,2009)。

開発7⊤−ズ	19	70	1980	1990	2000	2010	
区分	開発期	信頼性向上	経済性 向上	高性能/高度化			
		14×14					*1
燃料形式			15 × 15	·····			- *1
				17×17		(現行型)	
燃焼度							
(平均/最大) [GWd /+]		31	/39	43/48		50/55	
[dwu/t]	(++++++++++++++++++++++++++++++++++++						 伯山 -
線出力 [kW/m]	(一部情報なし)				· 取 密 (近の完電用軽水空原ナ炉における取入さ 度は約44kW/mで、PWRとBWRではほぼ同 高度情報科学技術研究機構,2017a)	線曲力 じ
分類(例)		(1)	2		3	
(佐治ほか, 2015)		7×	。 7型	(高燃焼度化)	STEP1	(高燃焼度化)STEP2	

表 2.2.2-5 日本における PWR 燃料の設計の変遷(概要)

*1:全ての燃料が炉から取出されているかは不明

(原子力安全研究協会,2013;高度情報科学技術研究機構,2000a;佐治ほか,2009の情報を 整理して作成)

国内における BWR 燃料の設計の変遷を表 2.2.2-6 に示す。図中の分類(例) については、 後段の「③使用済燃料の発生体数」で後述する。BWR 燃料は、商用としては敦賀 1 号炉が 1970 年に運開した。その装荷燃料は 7×7 型であり、平均燃焼度は 22,000 MWd t⁻¹であった。

運転開始後は、1970~1980年にかけて BWR 燃料の信頼性向上のための技術開発が行われ、 この間に 7×7 改良型を経て 8×8 型への改良が進められた(初期の 7×7 型では被覆管の破損 が発生したため)。その後、1980~1990年代にかけて利用率向上のための、1990年代~現在 までに高性能化および高燃焼度化のための設計の高度化が進行し、現行は、9×9 型となって いる。

これらの経緯から、わが国で保有する BWR の使用済燃料集合体は、7×7型(改良型を含む)、 8×8型、新型 8×8、新型 8×8 ジルコニウムライナ付(STEP1)、高燃焼度 8×8(STEP2)、9 ×9A(STEP3A)および 9×9B(STEP3B)が存在する(6×6型は商用でないため除く)。燃料タイ プ毎の最大線出力密度は、7×7型の改良型使用時において 61 kW m⁻¹まで増加し、それ以後 は、許容設計最大線出力密度として 44 kW m⁻¹が設定されている。

表 2.2.2-6 日本における BWR 燃料の設計の変遷(概要)

開発フェーズ	1970			1980			1990		2000 2010	
区分	開発期·初期 性能向上期	信頼性向上					高性能化/高燃焼度化			
				[
燃料形式	6×6 7×7原型	7×7	7×7 改良型	8	× 8	新型 8×8	新型8×8 Zrライナ	高燃焼度 8×8	9×9A 9×9B (現行型)	
燃焼度 (平均/最大) 「GWd/t]	12/—	22~28/—		27.5/40		29.5 /40	33/40	39.5/50	45/55	
[<u>.</u>				1		
線出力 [kW/m]	50	57	61					44		
分類(例) 〔石谷ほか, 2015〕		① 7×7型		(I⊟8	2) ×8型	③ 新 8×8 型	④ (高燃焼度化) STEP1 8×8型	⑤ (高燃焼度化) STEP2 8×8型	⑥ (高燃焼度化) STEP3 9 × 9型	

(原子力安全研究協会,2013;高度情報科学技術研究機構,2000b;石谷ほか,2015の情報 を整理して作成)

② 国内 PIE 結果

原子力安全基盤機構(2001)では、国内で実施された一連の燃料性能確証試験を、表 2.2.2-7 に示すように集約している。

これらは、必ずしも代表的な試料を分析したものとは言えず、試料の特殊性が強調されて いる可能性があるが、少なくとも、それぞれの試験が検証対象としている照射条件を正常理 に終えた燃料であることから、有用な情報源であると判断した。したがって、表 2.2.2-7 に 示した試験の内容が記載されている公開文献として、以下の7件を対象として調査した。

- ・(財)原子力発電技術機構:昭和61年度燃料集合体信頼性実証試験に関する調査報告書
 (原子力発電技術機構,1987)
- ・(財)原子力発電技術機構:平成10年度軽水炉改良技術確証試験(高燃焼度等燃料に関 するもの)に関する報告書(原子力発電技術機構,1999a)
- (独)原子力発電技術機構 平成13年度高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書(原子 力発電技術機構,2002)
- ・(財)原子力発電技術機構 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書(BWR 高燃焼度燃料 総合評価編)(原子力発電技術機構, 1999b)
- (独)原子力安全基盤機構 平成18年度 高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書(総合評価編) (原子力安全基盤機構, 2007)
- (独)原子力安全基盤機構 平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書付録1 (9×9A 型燃料照射後試験結果) (原子力安全基盤機構, 2007)
- ·(独)原子力安全基盤機構 平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書付

録 2 (9×9B 型燃料照射後試験結果) (原子力安全基盤機構, 2007)

炉型	試験名	実施期間	原子炉名	燃料型式および燃料体数
	高燃焼度等燃料確証試験 現行燃料照射試験	S56~S62	美浜 2 号	8体
	高燃焼度等燃料確証試験 高性能燃料照射試験	S58∼H5	大飯2号	A 型高性能燃料 4 体 B 型高性能燃料 2 体
PWR	高燃焼度等燃料確証試験 高燃焼度燃料(48 GWd t ⁻¹)照射試験	S62∼H11	高浜3号	A 型高性能燃料 2 体 B 型高性能燃料 2 体
	高燃焼度等燃料確証試験 高燃焼度燃料(55 GWd t ⁻¹)照射試験	H4~H12	スペイン炉 大飯 4 号 ハルデン炉	A型セグメント燃料4体 A/B型高燃焼度燃料4体 B型短尺燃料10本
	高燃焼度等燃料確証試験 現行照射試験	\$62~\$63	福島第1 3号	8×8燃料 1 体
DWD	高燃焼度等燃料確証試験 現行燃料照射試験	S62∼H1	島根1号	8×8 燃料 2 体
BWR	高燃焼度等燃料確証試験 高性能燃料照射試験	S57∼H5	福島第1 3号	高性能燃料 4 体
	高燃焼度等燃料確証試験 高燃焼度確証用燃料照射試験	S62∼H12	福島第1 2号	高性能燃料 8 体

表 2.2.2-7 国内 PIE の調査範囲および確認項目

国内使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒の平均燃焼度との関係を、PWR と BWR について、それぞれ図 2.2.2-5 および 6 に示す。

図 2.2.2-5 より、PWR 使用済燃料の FGR は、燃料集合体の平均燃焼度が 10~40 GWd t⁻¹の 範囲で1%以内であり、40~60 GWd t⁻¹の範囲で3%以内であることが分かる。また、これら の全体を通して見ると、平均燃焼度が 40 GWd t⁻¹よりも高い領域では、PWR 使用済燃料の FGR は、燃焼度の増加に応じて徐々に増加している。この結果は、フランスの PWR 使用済燃料(U 濃縮度;4.5%燃料)や燃料設計や照射条件を適正化した ABB 社製の PWR 燃料における FGR と燃料棒平均燃焼度の関係性(Guerin et al., 1999; Vesteelund and Corsetti, 1994) と ほぼ合致している。一方で、スウェーデンにおいて PWR を最大 70 MWd kgU⁻¹まで高燃焼度化 することを想定して設定された FGR の代表値である 4.3±3.11% (SKB, 2011) や、フィンラ ンドにおいて自国の PWR 使用済燃料を用いて測定された FGR の最大値である約10%(at 55 MWd kgU⁻¹)(Holcombe. et al., 2009)と比べると低い。

図 2.2.2-6 より、BWR 使用済燃料の FGR は、PWR の場合と比べて複雑な分布を示めすととも に、最大 25 %程度までの高い値を示している。海外では、BWR 使用済燃料について、燃焼度 が 40~50 GWd tHM⁻¹において FGR が 3~6%であったとの報告例があり(Hallstadius and Grapengiesser, 1990; Scherire et al., 1997)、国内の結果は、それらを超えるデータが 多い。

国内で測定された PWR と BWR における FGR 分布の違いは、それぞれの燃料が照射中に経験 する最高温度の違い(BWR 燃料の方が PWR 燃料よりも高い)に起因しており、さらのその要 因として、以下に示す項目があげられている(原子力安全研究協会, 2013)。

・照射時における BWR の線出力密度は、PWR の線出力密度と比べて高い。

- ・PWR は1次冷却系の圧力が高いため、これによるクリープコラプスやクリープダウン を防ぐため、燃料棒にはヘリウムが3 MPaの高圧で充填されている。ヘリウムの熱伝 導性は高いため、熱伝導性が低い核分裂生成ガスが混入しても気相全体の熱伝導性は 顕著に低下しない。このため、PWR では燃料ペレットの放熱性が低下し難い。
- ・PWR の場合、ヘリウムの高圧充填があってもなおクリープダウンが起きやすく、それ によって燃料ペレットと被覆管内面のギャップが消失し、燃料ペレットの熱が直接被 覆管へ伝達され、燃料棒全体としての放熱性が高まる。

燃料の設計世代とFGR との関係に着目すると(以後、設計世代に応じたグラフ中点綴の色 を付記する)、PWR の場合、古い世代(灰色)と高燃焼度化 STEP1(青および緑色)の燃料の FGR は低く、現行燃料である高燃焼度化 STEP2(赤色)の燃料では、反応度の平坦化や核分裂 生成ガスの発生抑制などの目的で設計の最適化がなされているものの、高燃焼度化にともな って FGR は高くなっている(図 2.2.2-5)。これに対し、BWR の場合、最も古い世代の燃料(灰 色)と現行燃料である高燃焼度化 STEP3(赤色)を比べると、現行燃料の方が、燃焼度が高 く FGR が低いという最良の傾向がみられるものの、その間の STEP1 および STEP2 の段階的な 高燃焼度化に際しての確証試験結果(青色)は、概ね 10%以下に分布しているが、一部で 20% 前後のデータが存在するなど、データのばらつきは大きい(図 2.2.2-6)。



図 2.2.2-5 PWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒平均燃焼度の関係



図 2.2.2-6 BWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒平均燃焼度の関係

FP ガス放出率へ影響を与える因子として、前述の燃焼度の他に、燃料棒が経験する最高線 出力がある。FP ガス放出率と経験最高線出力との関係については、スイスで実施された直接 処分の安全評価(Nagra, 2002)において、両者に相関性があることが認識されている。また、 EC が主導して近年実施された使用済燃料ソースタームに関する試験研究である FIRST-Nuclides (Kienzler et al., 2014) では、PWR の場合は両者に明瞭な相関性があり、 BWR の場合は相関性がないとし、相関性がある理由として、「核分裂生成ガスが燃料マトリ クスからギャップ等に移行するための照射過程を、線出力値がより良く反映している」と記 載されている。この記載の意味は、線出力の増加にともなって燃料ペレットが経験する最高 温度も高くなり、その最高温度が核分裂生成ガスの放出(拡散挙動)に寄与するという考え であると思われる。

国内の軽水炉における通常運転時の線出力密度は、30~35 kW m⁻¹であるが、最大線出力密度は、PWR および BWR ともに約44 kW m⁻¹とされている(高度情報科学技術研究機構, 2000c)。 ここで、旧型の燃料は今後発生することもなく現状の PIE 結果に立脚せざるを得ないが、現行型燃料については、将来、最高線出力が高まる場合の FGR の変動傾向を把握する必要がある。現行の国内使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒の経験最高線出力との関係を、PWR と BWR について、それぞれ図 2.2.2-7 および図 2.2.2-8 に示す。

図 2.2.2-7 および図 2.2.2-8 より、データ量が少なく明瞭とは言えないものの、PWR およびBWRの両者について、FPガス放出率と経験最高線出力との間に相関性があることが伺える。 ただし、これらの相関性を線形近似した結果、BWR における 9×9A と 9×9B では、その傾き に顕著な違いがみられた。また、これらの相関性(近似線)に 44 kW m⁻¹を外挿すると、PWR の場合、現在測定されている FGR 最大値の 1.3 倍程度、BWR の場合、2~3 倍程度まで高まる ことが分かる。



図 2.2.2-7 PWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒経験最高出力の関係



図 2.2.4-8 BWR 使用済燃料における FP ガス放出率と燃料棒経験最高出力の関係

④使用済燃料の発生体数

国内使用済燃料の FGR を検討するためには、PIE データの他に、①で述べた多種多様な燃料の発生体数を把握する必要がある。しかしながら、これらについて公開されている情報の限りでは、将来を見越した発生体数のみならず、現状の発生体数も集約することはできない。

そのため、PWR および BWR について、ある時点での使用済燃料の発生体数を集約あるいは 推計した情報を例にとり、後述する国内 FGR の検討に資することとした。

・PWR; 佐治悦郎ほか, "PWR 燃料・炉心の更なる信頼性向上・高度化に向けた取組み",

三菱重工技報, Vol. 46 (佐治ほか, 2009)

・BWR;石谷和己ほか, "直接処分研究のための使用済燃料の多様性を考慮したモデルインベントリ評価",日本原子力学会,2015秋(石谷ほか,2015)

PWR については、佐治ほか(2009)によって、2009年9月時点までに自社(三菱原子燃料 (株)が供給した燃料集合体について、使用後の集合体平均燃焼度を評価したうえで、集合体 平均燃焼度と集合体設計世代毎の使用済燃料の発生体数が集計されている。これによれば、 燃料の形式を、従来型(39 GWd t⁻¹)、STEP1(48 GWd t⁻¹)および STEP2(55 GWd t⁻¹)の3タ イプに大別している(表 2.2.2-5 参照)。各々のタイプの集合体平均燃焼度は、それぞれ6 ~40 GWd t⁻¹,4~48 GWd t⁻¹および6~54 GWd t⁻¹となっており、同一の設計仕様であっても、 炉内装荷時のロケーションや燃焼サイクルの違いによって様々な燃焼度になることが示され ている。

石谷ほか(2015)は、PWR および BWR について、2015 年時点までに国内の全ての商用炉か ら発生しているであろう使用済燃料体数を推計し、BWR の場合の推計結果を、図 2.2.2-9 の ように示している。これによれば、燃料の形式を、7×7型以前、初期の8×8型、新型の8 ×8型、高燃焼度化STEP1の8×8型、高燃焼度化STEP2の8×8型および高燃焼度化STEP3 の9×9型(A型とB型を含める)の6タイプに分類し(表2.2.2-6参照)、各々のタイプの 発生体数および集合体平均燃焼度を計算している。図2.2.2-9より、BWRの場合、集合体設 計仕様の種類が多く、集合体平均燃焼度の分布はPWRの場合と比べて煩雑である。



図 2.2.2-9 BWR 使用済燃料集合体の発生体数推計結果(2015 年時点)

なお、直接処分の安全評価を行う場合、処分場閉鎖時期までに進展する事が想定される設 計仕様や、さらなる高燃焼度領域までを網羅した使用済燃料集合体の発生体数を評価する必 要があるが、それに類する評価事例はまだない。

④ 国内向け FGR の設定手法

モデル使用済燃料燃料に対する FGR を最も単純に設定するならば、PWR の高燃焼度化 STEP1 が平均燃焼度の面で最も近く(通常 43 GWd tU⁻¹,最大 48 GWd tU⁻¹)、そのサンプルから得 られた FGR 測定値(図 2.2.2-5 中、青および緑色)を参照し、1 %となる。しかしながら、 STEP1 よりも高燃焼度化した使用済燃料や、BWR の使用済燃料がすでに発生している実情を踏 まえると、予備的検討とは言え、1 %では過度に楽観的且つ非現実的な設定となる。

そこで、本検討では、PWR と BWR 燃料の両者について、設計仕様毎に個別の FGR を定め、 次に、それぞれの設計仕様毎の発生体数(推計結果も含む)を用いて加重平均をとることで FGR を設定する手法を提言する。すなわち、従来型、STEP1、STEP2 といった設計仕様毎の FGR を、それぞれ F_1 , F_2 , F_3 … F_n とし、設計仕様毎の推定発生体数を、それぞれ W_1 , W_2 , W_3 … W_n とした場合の加重平均として F_{mean} を計算する(式 2.2.2-2) こととした。

PWR の場合を例にとり、Fmeanを計算する過程を以下に述べる。

PWR における FP ガス放出率と燃料棒の平均燃焼度との関係(図 2.2.2-5)で示される FGR の分布は、スウェーデンの FGR 設定値(SKB, 2011)よりも低い領域であるが、これは、スウ ェーデンの設定が高燃焼度までを考慮したためと解釈できる。一方で、海外における同様の 燃焼度範囲での PIE 結果(Guerin et al., 1999; Vesteelund and Corsetti, 1994)とは合 致していることから、図 2.2.2-5 の結果は信頼性が高いと判断した。これらの結果に基づき、 従来型および STEP1 の FGR を 1%(図 2.2.2-5 中、灰色,青色,緑色)とする。STEP2 につい ては、線出力密度が 19~26 kW m⁻¹のデータが取得されている(図 2.2.2-5)が、現行型であ る本仕様の燃料集合体が今後も発生し続けるなかで線出力密度が高くなる可能性があるため、 FP ガス放出率と線出力密度の相関性に最大線出力密度である 44 kW m⁻¹を外挿して得られる 値を保守側に丸めた 4%を推奨値とする(図 2.2.2-7)。ただし、データ数が少なく、いくつ かの突出データを含むことから、なお不確実性を含んでいると考えられるため、近似線の切 片と最も高い FGR 測定値を結ぶ線に 44 kW m⁻¹を外挿して得られる値である 11 %を最大値と して追加設定する(図 2.2.2-5)。したがって、式 2.2.2-2 で計算される F_{mean} にも推奨値と 最大値が設定されることになる。

次いで、前述した PWR 使用済燃料の発生体数の評価結果のグラフ(佐治ほか,2009)より、 設計世代毎の発生体数をおおよそで読み取り、上記で判断した個別の FGR とともに表 2.2.2-8 に示す。

設計世代	設計燃焼度 [GWd t ⁻¹]	FGR ()内は最大値 [%]	集合体発生体数 [体]	集合体平均燃焼度 分布範囲 [GWd t ⁻¹]
従来型	39	1	約 8,000	$6 \sim 40$
STEP1	48	1	約 8,400	4~48
STEP2	55	4 (11)	約 700	$6 \sim 54$

表 2.2.2-8 PWR 使用済燃料集合体の発生体数(2009 年 9 月時点)

注 1) 集合体発生体数は、出典中のグラフから読み取った数値であるため、目安値で ある。

注 2) 特定の原子燃料製造メーカの出荷数に基づいているため、全ての PWR 商用炉からの発生体数とは異なる。

表 2.2.2-8 に示した数値から Fmean を計算すると約 1.1%となり、最大値は約 1.4%となる。 ここで、これらの計算結果は、現行型(STEP2)の使用済燃料の発生が殆ど考慮されていな い。本来は、処分場閉鎖時期までを想定して表 2.2.2-8 にあたる情報を整備するべきである が、現在は、直接処分方策の予備的検討段階であり、処分場閉鎖時期などが想定されていな いため、暫定的に全ての設計世代における集合体発生体数を同数として Fmean を計算し、その 結果を踏まえて、現時点における国内 FGR を設定することとした。 BWR についても同様に、前述した BWR における FP ガス放出率と燃料棒の平均燃焼度および 経験最高線出力との関係 (図 2.2.2-6 および図 2.2.2-8) から設計仕様毎の FGR を検討した。 その結果を、表 2.2.2-9 に示す。なお、設計仕様毎の発生体数は、全ての仕様について同数 と仮定する。BWR の場合、現行型燃料である 9×9A 型と 9×9B 型で核分裂生成ガスの放出挙 動に大きな違いがみられる。9×9A 型については、設計上および従来データから想定される FGR の範囲を超えていると評価され、その原因は、燃焼が進んでもペレットー被覆管ギャッ プが比較的残存したことなどとされている(原子力安全基盤機構, 2007)。それ以後、9×9A 型の FGR が改善されたことを示すデータは公開されていない。このため、図 2.2.2-6 および 図 2.2.2-8 に示した 9×9A 型の FGR は、今現在用いられている集合体の個体の場合とは乖離 している可能性があるものの、FGR の設定根拠に含めざるを得ない。そこで、9×9A 型および 9×9B 型に個別の FGR は設定せず、それらを含む STEP3 世代に対してひとつの FGR を設定す ることとし、その推奨値は 9×9B 型の全 FGR データと経験最高線出力との相関性に基づき、 最大値は 9×9A 型の全 FGR データと経験最高線出力との相関性に基づき設定した。

設計世代	設計燃焼度 [GWd t ⁻¹]	FGR 推奨値 (最大値) [%]	集合体 発生体数 [体]
7×7 型	27.5	25	
8×8 型	27.5	25	
新 8×8 型	29.5	25	全ての型で
新 8×8Zr ライナ型(STEP1)	33	25	発生体致が 同数と仮定
高燃焼度 8×8 型(STEP2)	39.5	10	
9×9A, 9×9B型(STEP3)*1	45	8 (45)	

表 2.2.2-9 BWR 使用済燃料集合体の設計世代別の FGR

*1: 推奨値は 9×9B 型全データと経験最高線出力との相関性に、最大値は 9×9A 全データと経験最高線出力との相関性に基づき設定した。

提言した FGR 設定手法に従って計算した FGR 値を以下に示す。なお、各 FGR 値は、各々の 燃料仕様の集合体発生体数が全て同数であるとする仮定を含むため、仮定値である。

・PWR 使用済燃料の FGR 推奨値 ; 2.0 %

(F_{mean}=[FGR 計; 6]÷[設計仕様数;3]= 2.0(表 2.2.2-8 参照))

・ PWR 使用済燃料の FGR 最大値 ; 4.5 %

(*F_{mean}*=[FGR 計; 12]÷[設計仕様数;3]≒ 4.3 (表 2.2.2-8 参照))

・BWR 使用済燃料の FGR 推奨値 ; 20.0 %

(*F_{mean}*=[FGR 計;118]÷[設計仕様数;6]≒19.7(表 2.2.2-9 参照))

・BWR 使用済燃料の FGR 最大値 ; 26.0 %

(*F_{mean}*=[FGR 計;155]÷[設計仕様数;6]≒25.8(表 2.2.2-9 参照))

これらの結果、PWR および BWR に対する FGR 設定値(仮定値)は大きく異なった。これは、 図 2.2.2-9 で示されるように、BWR 使用済燃料の発生体数は、概ね設計仕様が新しくなるほ ど増えている傾向であるのに対し、計算上は全ての設計仕様の発生体数を同数としているこ とが一因と考えられる。しかしながら、将来、各々の使用済燃料の発生体数を実態に合わせ たとしても、これらの乖離が完全に解消するとは考えにくい。従って、PWRのFGR(推奨値;2.0%, 最大値;4.5%)を用いて、全ての使用済燃料燃料を包含した安全評価を行うことは現実的で はない可能性がある。国内 FGR の炉型による違いについては、諸外国における同様の検討事 例や PIE 結果以外の知見を参考として、今後、引き続き調査する必要がある。

国内向けの FGR 設定と、スウェーデン、フィンランドおよびスイスにおける FGR 設定の対 比を表 2.2.2-10 に示す。これらを比較した結果、国内 PWR の FGR 設定(仮定値)は、概ね諸 外国の設定値の幅のなかに含まれているが、BWR の FGR は、諸外国の設定値よりも明らかに 高い設定値となった。

-								
国名		日本 (仮定値)	スウェーデ`ン (SR-Site)	フィンラント゛ (TURVA-2012)	スイス (EN2002)	スイス (SGT-E2)		
FGR 🖡	設定根拠	PIE	計算	PIE	PIE	計算		
	想定 燃焼度	45	44.8 (Max 60)	39~47	48	48		
PWR	推奨値	2.0	$\begin{array}{c} 4.3 \\ (\pm 3.11) \end{array}$	_	1	1.8(Beznau) 14.0(Gösgen)		
	最大値	1.5 7.41		11	2	14.0(Gösgen)		
	想定 40.4 燃焼度 (Max 60)		40.4 (Max 60)	38~39	48	48		
BWR	推奨値	20.0	1.9 (±1.13)		5	4.5(Leibstadt) 4.5(Mühleberg)		
	最大値	26.0	3.03	11	10	4.5		
	想定 燃焼度	未検討			60	60		
MOX	推奨値	未検討	_	_	8	3.4(PWR) 16.0(BWR)		
	最大値	未検討	—		15	16.0(BWR)		

表 2.2.2-10 国内と欧州各国における FGR 設定

以上のように、限られた情報といくつかの仮定を交えて FGR を設定したが、特に BWR については、現行燃料(9×9A および 9×9B)の確証試験の結果に大きなばらつきがある点など、

未だ不確実性が高いと考えられる。また、PWR と BWR の FGR 値の乖離が大きいことから、モ デル使用済燃料に相当する FGR を、様々な使用済燃料の代表値とすることの妥当性について も課題が残った。しかしながら、平成 27 年度に暫定的に設定したパラメータ(原子力機構, 2016)は、概ね PWR に関する試験データなどに基づいて考えられており、それらとの整合性 の観点では、PWR の FGR を用いることが必要となる。

今後は、後述するシミュレーション手法を用いるなど、PIE 試験でカバーされていない燃焼度および線出力密度などに対応する FGR を想定・補完し、今回示した FGR 設定手法の考え 方の妥当性を引き続き検討する必要がある。また、処分対象とする使用済燃料の想定発生量 について確度を高めていく必要があると考えられる。

2) シミュレーション手法の適用性検討

シミュレーションコードの選定においては、将来にわたって長期間使用可能なこと、計算 モデルなどの進展があった場合のサポートが速やかに受けられること、利用者からコード開 発者へのフィードバックが容易なことなどの利便性を考慮し、原子力機構が開発した燃料挙 動解析コード「FEMAXI」を活用することとした。

本検討項目では、最新版の FEMAXI-7 について、コードの概要と FGR の解析モデルを確認するとともに、FEMAXI を用いた FGR 計算と実際の試験結果を比較した文献情報を調査することを通して、わが国向けの FGR 評価への適用可能性を検討した。

調査した文献のリストを表 2.2.2-11 に示す。

標題	文献
Estimate of Instant Release Fractions Using ORIGEN-S and FEMAXI	Iglesias, et al. (2011)
照射後試験データによる長期燃料棒の内圧増加に関す る解析評価と FEMAXI-Ⅲ計算	柳澤(1984)
KWU/CE 燃料棒の PCI/SCC 挙動(オーバーランプ計画研 究成果)	菊池(1983)
インターランプ計画の研究成果	菊池ほか(1981)

表 2.2.2-11 燃料挙動解析コード(FEMAXI)を使用した解析事例

① FEMAXI コードにおける FGR 計算の取扱い

最新版の「FEMAXI-7」で取り扱うことが可能な現象を表 2.2.2-12 に示す。これらの現象を 表現するための物性値は、「FEMAXI-7」において UO₂燃料棒の関連材料のみならず MOX 燃料 や Gd 入り UO₂燃料を含めて公開されている文献を最大限利用してモデルやパラメータ値の拡 充が図られている。また、FEMAXI の開発は(燃料棒の)熱的および力学的ふるまいを開発の スタートとしており、燃焼棒の燃焼現象の再現は含まれていない。これらの情報は入力ファ イルに与えるか、燃焼解析コード「RODBURN」や「PULTON」の解析結果から与えることができ る(鈴木ほか, 2011)。

	熱的変化(温度に依存)	力学的変化
ペレット	熱伝導(径方向発熱密度分布) FP ガス放出(温度と燃焼度に依存) スエリング(固体 FP、ガスパブル)	熱膨張、弾性・塑性、クリープ クラック、初期リロケーション やきしまり、ホットプレス スウェリング(固体 FP、ガスバブル)
被覆管	熱伝導、酸化膜成長	熱膨張、弾性・塑性、クリープ 軸方向照射成長、酸化膜成長
燃料棒	ギャップ熱伝達、ギャップガス流 動、被覆管表面熱伝達	PCMI、ペレット・被覆管の摩擦

表 2.2.2-12 FEMAXI-7 で取り扱うことが可能な現象

本検討項目では、表 2.2.2-12 中の熱的変化の欄に示されている FP ガス放出に着目する。 解析体系を、図 2.2.2-10 に示す。FEMAXI の解析体系は燃料棒1本を対象とした軸対象モ デルである。解析フローは、主に熱的解析部と全長力学的解析部および局所 PCMI 解析部に分 かれる。熱的解析部と全長力学的解析部は連成しており、1 つのタイムステップ内において 反復繰り返し計算を実施し、温度と変形の収束値を求める。熱的解析部は、燃料棒の全長の 各セグメントにおいて温度分布やガス圧力を径方向1次元軸対称問題として取扱い、ペレッ トと被覆管のギャップ幅の変化、FP ガス放出モデル、軸方向ガス流動およびこれらのギャッ プ熱伝達へのフィードバックを考慮して解析する。軸方向出力分布を考慮するため燃料棒発 熱部の軸方向は最大 40 領域に分割可能である(鈴木ほか, 2011)。

全長力学的解析部は軸対称有限要素法(FEM)を燃料棒全長の各セグメントに適用し、ペレットと被覆管の力学解析を実施する。ここでは、熱膨張、やきしまり、スウェリングおよび、 ペレットのリロケーションによる初期ひずみを計算し、ペレットの割れ、弾塑性およびクリ ープを考慮して剛性方程式を作成し、接触モードに対応する境界条件を仮定して剛性方程式 を解き、応力やひずみを得る(鈴木ほか, 2011)。

ペレットと被覆管に非接触⇔接触、弾性⇔塑性の状態変化が1タイムステップ中に生じる 場合には、タイムステップ終了時の計算結果を状態変化が起こった時刻に戻し、その時刻以 降について状態を改めて再計算するようになっている(鈴木ほか,2011)。

FP ガスの生成、拡散、バブル形成、放出の計算モデルのフローを図 2.2.2-11 に示す。放 出機構のモデル概要は以下のように記載されている。

「U0₂粒内で生成された FP ガス原子は、ガス原子の粒内拡散および粒成長による粒界への 掃き出しの2つの機構により粒界へ移動し、そこにガスバブルを形成し、蓄積すると仮定す る。照射が進むにつれ、粒界でバブル密度が高くなり、かつバブルが成長すると、バブルは 広範囲にわたって連結する。そして連結バブルの一点がクラックや自由空間に通じる通路に 接触すると、即ちペレット自由表面へのトンネルが形成されると、そのバブルは開気孔とな り、バブル内のガスは燃料棒内の自由空間に放出されると仮定する(鈴木ほか、2011)」

当然ながら、このモデルは、先に述べた揮発性元素(C1, I, Cs)の瞬時放出の機構とも合致している。

FP ガス原子の生成速度は、ペレット形状、径方向発熱密度分布、軸方向の平均発熱密度分 布、核分裂収率および1つの核分裂当りの発生エネルギーよって決定し、生成した核分裂生 成ガスは、下記の各種モデルによってシミュレーションされる(鈴木ほか,2011)。

- トラッピングを伴う熱拡散モデル;粒内ガス気泡と粒界ガス気泡の状態を、理想化された円形結晶モデルを仮定して計算
- ・粒内バブル半径と数密度の計算(White+Tucker)モデル
- ・粒内バブル半径と数密度の照射溶解モデル;気泡核の生成後、気泡が成長するか
 Fission fragmentによって破壊されるかをシミュレート
- ・粒内バブルの成長の計算 (Pekka Lösönen) モデル
- 結晶粒と粒界;隣接する結晶粒の考慮
- ・粒界へ移動する FP ガス原子の量
- ・粒界に留まる FP ガス量(気相を想定)
- ・放出されるガス量
- ・粒成長に伴う粒界へのガスの掃き出し
- F P ガスの再溶解
- ・粒界 FP ガス原子濃度の飽和値; FP ガス原子数が粒界面積濃度の規定値を超えると粒 界バブルが連結し自由空間へのトンネルが形成され、それ以後に追加されるガス 原子は自由空間へ放出されるモデル。レンズ状粒界ガスバブルの考慮を含む
- ・FP ガス原子の粒内拡散定数(温度特性フィッティング機能あり)
- その他; Recoil, knock-out などによるペレット(片)表面からの自由空間への直接 放出は、defaultとして FP ガス原子生成量の 0.5%と仮定。ただし、入力による 変更可能



図 2.2.2-10 FEMAXIの解析体系

さらに、高燃焼度リム組織モデルが組み込まれている。このモデルでは、リム組織固相に おける FP ガス原子の濃度減少、リム組織の FP ガスの放出がシミュレーションできる(鈴木 ほか, 2011)。



図 2.2.2-11 FGR 計算モデルのフロー(鈴木ほか, 2011)

一方、海外では、直近のFGR シミュレーションコードに関する記述として FIRST Nuclides があげられる(Pekala et al., 2013)。ここでは、様々なコードにおけるモデル化の実績を 整理し、核分裂生成ガスの発生と燃料マトリクス内の移行のプロセスが、以下の9つの要因 に支配されるとしている。

・U-235の分裂によるガス発生 (Xe, Kr)

- ・粒子の recoil (反跳) や knock-out
- (結晶粒界内側の)格子拡散

- ・結晶粒界での拡散
- トラッピング(ガスバブルによるガス原子の吸収)
- ・照射に起因する分解
- ・結晶粒内のバブルの挙動
- ・結晶の成長
- ・結晶粒界におけるバブルの成長

これらのモデルを組み込んだ計算モデルによる計算値は、燃料の種類(UO₂、Gd₂O₃添加、 MOX)に関わらず実測値と良い対応を示している。ただし、多くの解析モデルでは結晶成長を 考慮していないなどから、なお潜在的な不確実性が含まれるとも指摘されている(Pekala et al., 2013)。

FEMAXI と FIRST Nuclides で用いられている計算モデルを比較すると、FEMAXI における計 算モデルは、少なくとも再現する現象の範囲の点で、諸外国の同様のコードと遜色はないも のと考えられた。ただし、FIRST Nuclides が燃料ふるまいに関する解析コードに特化したレ ポートではないため、詳細な内容は未確認である。

② 国内外における FEMAXI 活用事例の調査

海外では、Iglesias ほか(2011)が、カナダ NUMO で実施されている APM プロジェクトに おける Fourth Case Study 安全評価の基盤データとして、FGR の説明および Cs と I の IRF の 設定などに FEMAXI-6 が使用されている。

カナダの使用済 CANDU 燃料の IRF は、カナダ原子力エネルギー公社(AECL)の Whiteshell 研究所で測定された事例(Stroes-Gascoyne, 1996)があるが、さらなる IRF の測定試験はコ ストが高く、得られるデータも限定的であることから、燃料性能計算を利用したモデル研究 を実施したようである。

モデル研究は、2つのタスクに分けられているが、FEMAXI適用性判断の観点から、Task1 に 絞り、その検討結果の概要を以下に示す。

Stroes-Gascoyne (1996) は、CANDU 炉で使用された使用済燃料から採取したペレットを粉 末化し、これを 0.1 mol L⁻¹の HC1 に溶解させ、液相の Cs-137、I-129、Tc-99、Sr-90 の濃 度から結晶粒界中の核種インベントリを直接的に取得している。この手法では、いずれかの 核種が粒界中に不溶性化合物として存在する場合、IRF を過小評価する可能性がある。従っ て、モデル解析を活用し、それらの放射性核種 (Cs-137、I-129、Tc-99、Sr-90)の放出計算 (即ち、ギャップと結晶粒界における核種の存在割合の計算)を実施し、溶解試験結果の検 証を行った。用いられた FEMAXI は ver. 6.1 である。

対象燃料は、Bruce 原子力発電所で使用された燃料要素である。これは、「Fourth Case Study」 安全評価のためのソースターム評価 (Garisto et. al., 2012) において標準仕様となっている。 CANDO 炉の燃料は、U-235 の濃縮を経ない天然ウランの UO₂ペレットであり、U-235 濃度は 0.72 %と低い事が特徴である。本文献では、ペレットの寸法や燃焼棒の長さなどの情報が抜 けているが、一般的に、ペレット形状は LWR 用のものより若干太い円筒形状であり、燃料棒 の長さは約45 cmと短い(高度情報科学研究機構, 1998)。

燃料要素の燃焼度は 131~328 MWh kgU⁻¹ (5.46~13.67 GWd tU⁻¹)、平均線出力は 33~50 kW m⁻¹ である (Iglesias et al., 2011)。直接処分の基本条件と比べ平均燃焼度は低いが、線 出力は、我が国で考えられている燃料棒最大線出力密度 (44 kW m⁻¹)を超えるものもある。

Iglesias ほか(2011)による Xe 放出率の計算結果と、Stroes-Gascoyne(1996)が測定した実験値の比較結果を図 2.2.2-12に示す。これらより、"Inner(燃料バンドルの中心部の燃料棒)"、"Intermediate(中心と外周の間の燃料棒)"サンプルにおける FGR は、どれも極めて小さく、"Outer(外周部の燃料棒)"サンプルにおける FGR は総じて高く計算されており、全体として実測値の分布傾向と概ね合致している。しかしながら、「F21271C(outer)」と「G13374S(outer)」のケースでは、計算値と実験値の差が大きい。この原因として、「個々の燃料バンドルの出力における不確実性の幅が約 5%である(COG, 2001)ことを挙げ、「F21271C(outer)」の出力を 5%低下させたケースの解析を実施している。その結果、実験値は、当初解析値と、出力を 5%低下させた場合の解析値の間に包含されたため、この差は説明可能な範囲内であるとしている。



図 2.2.2-12 FP ガス放出率の試験値と FEMAXI6.1 の解析値の比較結果 (Data take from Iglesias et al., 2011; Stroes-Gascoyne, 1996)

次に、わが国における FEMAXI 活用事例を以下に述べる。NUPEC や JNES では、軽水炉燃料の出力急昇時の PCI/SCC (ペレット・被覆相互作用/応力腐食割れ)破損挙動を評価するため、PWR および BWR の実燃料の実証試験や出力急昇試験を、以下の 2 つの国際共同研究としてスウェーデンで実施した。柳澤(1984)は、これらの試験データを FEMAXI-IIIによって再現することを試みた。

インターランプ計画では BWR 燃料の挙動を調べており、圧粉焼結法で製造されたディッシュ型の UO₂ペレットが使用された。ペレット密度は 1 本の燃料棒 (DR1:93 %TD) を除き、全て 95 %TD である。濃縮度は 2.8 %および 3.5 %であり、それぞれ燃焼度 10 GWd tU⁻¹および 20 GWd tU⁻¹に対応している(菊池・市川, 1981)。一方、オーバーランプ計画では PWR 燃料

の挙動を調べており、KWU/CE 社製とウェスティングハウス社製の全 40 本の試験を実施して いる菊池(1983)が、柳澤(1984)は、そのなかの KWU/CE 社製の A10, E10, A20, G20, F20 および F30 と呼ばれる燃料棒 24本(各4本)を対象としている。これらの U 濃縮度などの主要特性 に関するデータは明記されていない。出力履歴は、急昇として 100 W cm⁻¹ min としている他、 一部のサンプルにたいしては、比較的緩慢な出力上昇(0.49~4.7100 W cm⁻¹ min) としてい るケースも含まれる。

FGR の計算値と実測値を比較した結果を、図 2.2.2-13 に示す。FP ガス放出率は、BWR 燃料 の場合は、FP ガス放出率が 10 %を越える領域では過大評価、10 %以下では過小評価となり、 PWR 燃料の場合は、全般的に解析値が試験値よりも小さい傾向であった。しかしながら、照 射後試験から得たデータの精度、製造データ、照射データの精度を考慮すれば、この誤差範 囲内であれば十分に満足できる結果であるとされている(柳澤, 1984)。



図 2.2.2-13 FP ガス放出率の試験値と FEMAXI-Ⅲの解析値の比較結果(柳澤, 1984)

③ FGR 検討における FEMAXI コードの適用性

FEMAXI-7 と FIRST Nuclides で用いられている計算モデルを比較すると、FEMAXI における 計算モデルは、少なくとも再現する現象の範囲の点で、諸外国の同様のコードと遜色はない ものと考えられる。FEMAXI-7 におけるモデルが明確に進展している点として、リム領域の生 成と、その気泡からの核分裂生成ガスの放出モデルが上げられる。

FGR 計算に FEMAXI コードを用いた 2 件の文献情報からは、FEMAXI-Ⅲおよび 6 を用いて FGR を計算した結果では、それぞれが検証用とした実際の FGR 測定結果と総じて良好な対応が得 られている。また、当時のバージョンから現在のバージョンまでに、コードの改良や高燃焼 度化への対応が行われていることから(鈴木ほか,2011)、精度はさらに向上していると推 測される。

これらより、FEMAXIコードを、わが国向けのFGR設定のためのデータ補完ツールとして活用することが可能であると考えられ、EMAXIコードを実際に用いて計算を行い、前段の1)で

調査した PIE 試験の結果との対比を行うなどし、適用性の確認を継続する必要がある。また、 FGR 計算の精度は、PWR および BWR の両者に対してほぼ同様と考えられることから(図 2.2.2-13)、炉型毎に将来予定されている高燃焼度あるいは高出力運転における FGR データ を補完できれば、わが国向けの FGR 設定の確度を上げて行くために、非常に有効であると考 えられる。

(4) 不確実性および燃料多様性に対応するための継続調査

本検討項目では、平成27年度に検討したパラメータの暫定値(表2.2.2-1参照)について、 推奨値だけの単一の値だけではなく幅や最大値などを設定するべきかを検討するため、平成 27年度までの過去3ヶ年(平成25~27年度)にわたって諸外国のソースターム評価の考え 方などを調査した結果(原子力機構,2015b,2016)から、IRF 値へ付与された幅や最大値な どに係る情報を整理した。調査対象は、表2.2.2-13に示すとおり、ソースターム評価が比較 的詳細に行われているスウェーデン、フィンランドおよびスイスにおける直接処分の安全評 価事例、および不確実性に関する国際共同プロジェクトとした。

平成 28 年度は、瞬時放出核種(C, C1, Se, I, Cs, Sr, Tc, Pd および Sn の 9 元素)を対象とし、ソースターム評価における不確実性を、どのようにパラメータ値の幅などとして表現ているかや、それらを設定した根拠などについて整理した。

また、パラメータが変化した場合の性能評価(被ばく線量)への影響を予察的に確認する ため、主要なパラメータを変化させた感度解析を行った。

国・地域	機関	安全評価書・プロジェクトの名称
スウェーデン	SKB	 SR-can//プロジェクト(2006) (SKB, 2006) SR-Site プロジェクト(2011) (SKB, 2011)
フィンランド	POSIVA	 Safety Case 「TURVA-2012」 (2012) (Posiva Oy, 2013)
スイス	Nagra	 Opalinus Clay (EN2002) プロジェクト (Nagra, 2002) 第 2 段階サイト選定計画 (SGT-E2) のための予備的 安全評価 (Johnson, 2014)
欧州	EC	 Spent Fuel Stability プロジェクト(2004) (Poinssot, C., 2005) FIRST Nuclides プロジェクト(2014) (Kienzler, B., 2014)

表 2.2.2-13 追加調査の対象としたプロジェクトなどの一覧表

1) 欧州諸国におけるソースタームパラメータの幅などの設定

整理した結果を表 2.2.2-14 に示す。なお、国際プロジェクトや、前段(1)で調査した内容 のうち、幅の設定に資せる可能性がある知見も同表に記載した。

調査対象とした欧州諸国は、各々の国で規定されている安全評価のための指針(スウェー デン;SSM規則、フィンランド;Guide YVL D.5、スイス;ENSI-GO3)に従って安全評価を実 施している。各指針では概ね同様に、レファレンスシナリオの他、変動シナリオ(あるいは What if ケース)の評価までを行うこととしており、評価の不確実性の取り入れ方について 確率論的手法あるいは感度解析手法を用いるべきとしている。

スウェーデン(SKB, 2011)では、揮発性元素(C1,IおよびCs)のIRFに対して正規分布 を、その他の瞬時放出核種に対しては三角分布を与えている。しかしながら、同安全評価書 における IRF 設定の根拠データは、同一条件に対してデータの頻度分布をとれる程の点数は 無く、正規分布や三角分布である根拠は明確ではない。

	スウェーデン		フィンランド		スイン	K(EN2002)	スイス (SGT-E2)	
	推奨値	PDFs / 上下限値	推奨値	PDFs / 上下限値	推奨値	PDFs / 上下限值	Beznau 炉	Gösgen 炉
1.100	4.3	正規分布 標準偏差 [3.1 %]	5.0	対数一様分布 上下限値 [1.5 %、15.0 %]	4.0	対数一様分布 上限値[25 %]	5.8	18.0
1-129	・IRF(I-129 試験結果に (First-Nucl)=0.3×FGR+1. は、瞬時放出率7 lides)。	2 という分析 が FGR の 1 (結果に基づく相関性 倍に比例する従来の	を取り上げて 安全評価に	いるが、高燃焼度 おける設定値を支	燃料を対象。 持している	とした浸出
Cl-36	13.0	正規分布 標準偏差 [9.3 %]	7.5	対数一様分布 上下限値 [1.5 %、14.9 %]	10.0	対数一様分布 上限値[25 %]	5.8	42.0
	4.3	正規分布 標準偏差 [3.1 %]	5.0	対数一様分 上下限値 [1.0%、10.0%]	4.0	対数一様分布 上限値[25 %]	5.0	11.5
Cs-135 Cs-137	 ・高燃焼度、 する関係式 ・Cs-135と 評価やスウ 高燃焼度敷 ては Cs-13 (FIRST-Nu 	燃料の浸漬試 添支持している Cs-137 は同位 エーデンの SR- な料の浸漬試験 5 の放出率は (検の結果から (FIRST-Nuc :体であり、化 Site 安全評f 結果では、B Cs-137 の 1.	、IRF(Cs)はFGRの lides)。 学的特性が類似して 価の設定値のように、 WR についてはCs- 7 倍となり、Cs-135 6	1/√3倍の範 Cいることから IRFはCs-1 135とCs-13 の方が多量に	5回内に入っており 、例えばフィンラン 135とCs-137に同 7の放出率は同程 こ放出していることか	、Lassman,(2 ドの TURVA じ値が設定さ 度であるが、 バ確認されてい	004)が提案 -2012 安全 されている。 PWR につい いる
	0.65	正規分布 標準偏差 [0.47 %]	0.40	対数一様分布 上下限値 [0.2 %、2.0 %]	4.00	対数一様分布 上限値[25 %]	0.	20
Se-79	・Studsvikの いることが確 ・Leibstadt 様に2価で ・浸出試験 大きく、結界	D使用済燃料に ŧ認された。これ とOskershamn- [*] あった。 のIRF(Se)は1 県が整合しない♪	おいて、ペレ は、Se の移行 3の使用済弊 年間で1%で 点がある。	√ット中心からリム領域 「ケノ拡散プロセスが∮ *** *** *** *** *** *** *** *	&に向かって 影響している 麦荷位置や焼 た試験結果(Se 濃度が上昇し、 と考えられる(FIRS ⁻ ************************************	Se がリム領域 T–Nuclides)。 違っても、Se Í、IRF(Se)<0.	なに濃集して の価数は一 22 %)よりも
Sr-90	0.25	三角分布 上下限値 [0%、1%]	1.0	対数一様分布 上下限値 [0.1%、1.0.%]	1.0	対数一様分布 上限値[1%]	1	.0
Tc-99	0.2	三角分布 上下限値 [0%、1%]	1.0	対数一様分布 上下限値 [0.1%、1.0.%]	2.0	対数一様分布 上限値[17 %]	1	.0
Pd-107	0.2	三角分布 上下限値 [0 %、1 %]	1.0	対数一様分布 上下限値 [0.1 %、1.0.%]	2.0	対数一様分布 上限値[17 %]	1	.0
Sn-126	0.03	三角分布 上下限値 [0%、0.1%]	0.01	対数一様分布 上下限値 [0.0 %、1.0 %]	4.0	対数一様分布 上限値[25 %]	0	.1
	11.0	三角分布 上下限値 [11 %、11 %]	5.3	対数一様分布 上下限値 [0.5 %、88.9 %]		Total は ^ス (燃料;10 %、被:	不明 覆管 20 %)	
C-14 [11 %, 11 %] [0.5 %, 88.9 %] (燃料;10 %, 被覆管 20 %) •KIT, PSI, Studsvik が C-14 の定量分析方法の検討、SCK・CEN が浸漬試験を実施した。被覆管付きおよび 管なし試料の浸漬試験の結果、C-14 のIRF は 1~2 %であり、時間に伴い変化しない結果が得られた。浸漬前 覆管の窒素濃度は 4.11 ppm であり、2.1×10 ⁻⁴ mol に相当する。放出した C-14 のインベントリは 4.3×10 ⁻⁶ mc 定される。放出した C-14 の IRF は C-14 インベントリの 0.2 %に相当する(FIRST-Nuclides)。 •BWR 使用済燃料(燃焼度 39.4 GWd tU ⁻¹)を分析した結果、酸化物層の厚さは PWR よりも薄い 20 μm でお C-14 インベントリの 96 %が未酸化金属中に存在することが確認された(CAST)。 •被覆管から放出する C-14 の化学形態は、カルボン酸、低級アルコール、アルデヒドが浸漬試験の結果から得 れている。炭化水素のうちギブスの自由エネルギーが小さいものとしてメタンがあるが、メタンが支配化学種とし 認されていない。この要因を探るため、金属中の炭素の分解反応が完全な化学平衡になっていない条件(アル 類が化学的に未平衡)で化学形態計算を実施した結果、カルボン酸と低級アルコールが支配化学種となる結 確認された。しかし、炭化物の分解反応は複雑であり、個々の反応経路が平衡に達しているか否かという新た: 確実性があり、結論には至っていない(CAST)。							および被覆 ま し で m で あ り 、 き か ら 確 准 と て で あ り 、 き た な 確 た て 本 れ い ら で あ り 、 き か ら ら 在 確 れ に て あ り 、 き か ら ら 在 確 た し て ル カ ら て あ り 、 き か ら ら て あ り 、 き か ら ら 在 確 た し て ル カ ン ら て 本 れ ら 、 こ さ 確 た し て ル カ ン ら て で あ り 、 こ さ 作 確 た し て ル カ ン ン ち て の れ か ら 、 こ さ 作 確 た し て で ル カ ン ン ち て か し て で ル カ ン ン ち て ん て の た た て ん て か し て ん れ か 、 こ さ で ん こ て 和 た ろ て の た か ろ た て 本 か ン こ て れ た か ン こ ち て れ た か こ て 本 た た て れ た か こ て 本 た た て れ た な 不 の う 、 う 、 ち て の た か ン こ ち た て か し て か ン か こ ち て の た っ た ち て の た ち た て た ち て か う し て か う 、 ち っ て の た っ て ろ こ ち つ こ ろ ち っ て ん ち て つ し て て う う 、 つ ち つ こ て う つ し て の ち っ こ て ろ っ つ こ っ つ て ろ つ こ つ っ つ こ つ つ て つ つ つ つ こ つ つ つ つ こ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ	

表 2.2.2-14 欧州各国におけるソースタームパラメータの幅設定の比較 (PWR)

フィンランド(Posiva 0y, 2013)は、全ての瞬時放出率に対して対数一様分布を与え、その上下限値を設定している。同国は、IRFの設定においてスウェーデンの「SR-Can」(SKB, 2006)の考え方を多く踏襲しており、一様分布の上下限値は、スウェーデンにおける確率密度関数の分布を参考にしていると思われる。

スイス(Nagra, 2002)では、フィンランドと同様に瞬時放出率に対して対数一様分布を与 えているが、その下限値は燃焼度 48 GWd tIHM⁻¹の使用済燃料に対する IRF 設定を用い、上 限値は 75 GWd tIHM⁻¹に対する IRF 設定を用いている。その後に行われた第 2 段階の特別計 画「地層処分場」(SGT-E2)における予備的安全評価のためのパラメータ設定では、商用プ ラント毎の IRF 設定を行っている(Johnson, 2014)。これは、炉心設計の多様性にともなう 不確実性の低減を図っていると思われるが、それらの IRF に対して、今後、確率密度関数な どが付与されるかは現状不明である。

Spent Fuel Stability プロジェクト (Poinssot, C., 2005) では、処分後の燃料内の核種 分布が時間とともに変遷する (IRF が変化する) 評価モデルが取り上げられている (Matzke, 1983; Ferry et al., 2004) 。これによれば、1,000℃未満の炉内において、拡散係数が核分 裂率に比例することが観察された結果をもとに、核分裂率を単位体積あたりのα放射能へ変 換するとともに、格子欠陥を考慮した補正などを行い、αSIED (α粒子の自己照射を考慮し た拡散係数、α Self-Irradiation Enhanced Coefficient)を導出している。さらに、これ を 55 GWd tIHM⁻¹の PWR に適用し、照射終了後の IRF の経時変化をシミュレーションした結 果、主要 (揮発性) 核種の瞬時放出率は、処分後 1,000 年において約 3 %、10,000 年後で約 4 %増加するとしている (Ferry et al., 2004)。

	Bounding IRF values (%)				
Nucride	After	Container failure time			
	irradiation	1,000y	10,000y	100,000y	
¹⁴ C	10	13	14	16	
³⁶ Cl	11	14	15	17	
⁷⁹ Se	11	14	15	17	
¹²⁹	11	14	15	17	
¹³⁵ Cs	11	14	15	17	

表 2.2.2-15 55 GWd tIHM⁻¹の PWR 燃料における照射後の IRF 変化の試算結果

2) ソースタームパラメータの不確実性についての感度解析

パラメータ設定に不確実性を考慮することと並行して、パラメータの変化が性能評価へ与 える影響についても予め把握しておく必要がある。そのため、平成27年度より、パラメータ の変化が性能評価結果(被ばく線量)へ与える影響を、感度解析によって確認している(原 子力機構,2016)。なお、この感度解析の入力条件は、パラメータの暫定値を定める前に設 定したため、レファレンスケースは、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構,2015a)で仮 定されたパラメータセットを用いている。これらは、瞬時放出率はスイスの安全評価レポー ト(Nagra, 2002)を、溶解速度は、高レベル放射性廃棄物に関する第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999a)(総論、第2分冊、第3分冊をそれぞれ1999a、1999b、1999cとし、以下、総称して「H12レポート」という)や、第2次TRUレポート(電気事業連合会・ 核燃料サイクル開発機構, 2005)の成果を基に設定されている(原子力機構, 2015a)。平成 27年度までに、燃料ペレットから放出される重要核種としてIおよびCsの放出割合を高め、 さらに、燃料ペレットの溶解速度を速めたケースの感度解析を実施し、IのIRF(リファレン スは4%)が数倍以上になると総線量の最大値(人工バリアを経て岩盤中を100m移行した後) に影響を与える可能性があり、燃料の溶解速度が1×10⁻⁷~1×10⁻⁵の範囲では、同地点の総 線量の最大値に大きな影響を与えないことを確認した。

平成28年度は、構造材からのC-14の瞬時放出率および構造材のマトリクス溶解速度に着目し、これらが変化した場合の感度解析を実施した。感度解析のための条件を表2.2.2-16 に示す。Case1 は平成27年度と同様に、直接処分第1次取りまとめで仮定したパラメータセットとした。

	瞬時放出率 [IRF]		マトリクス溶解 [DR]		
No.	燃料から	構造材から	燃料	構造材 (ジルカロイで代表)	備考
Casel (基本条件)	C :10 % *1 C1:10 % Se: 4 % I : 4 % Cs: 4 %	C :20 % *2	10 ⁻⁷	8.77 $\times 10^{-5}$	直接処分第 1 次取りまと めにおける提案値
Case2		C :10 % *2			構造材からの C 放出割合 を変更
Case3		C :40 % *2			
Case4		C :20 % *2		1×10^{-5}	ジルカロイの溶解速度を 変更
Case5				1×10^{-3}	
Case6				1×10^{-2}	
Case7		C :40 % *2		1×10^{-2}	高い瞬時放出率と溶解速 度の組合せ
Case8		C :100 % *2		_	有機Cが全量瞬時放出(最 悪ケース)

表 2.2.2-16 感度解析のための条件一覧表

*1;放出分は全て無機形態とする

*2;放出分は全て有機形態とする

各ケースの条件設定根拠を以下に示す。

・Cases 2,3:構造材からの C-14の IRF の変化を考慮

レファレンスケースの C-14 の IRF は、PWR ハル試料中の全 C-14 インベントリに対 する酸化膜中の C-14 の存在割合が約 16.7%と測定されたこと(Yamaguchi et al., 1999) を根拠として、20%としている。最近の研究によって、金属から液相中へ放出される 炭素の化学形態が全量有機形態ではない可能性が見られること(たとえば、原環セン ター,2016; GRAS,2014) や、燃料付着クラッド(一次冷却水中の成分がジルカロイ 表面に付着したもの)に含まれる C-14 の放射能が被覆管の酸化膜中のそれと同等程度 になるとの試算例(原環センター,2013)があることから、前者の可能性を考慮して Cの IRF を半分の 10 %,後者の可能性を考慮して Cの IRF を 2 倍の 40 %と設定した。 ・ Cases 4,5,6:構造材のマトリクス溶解速度の変化を考慮

レファレンスケースのジルカロイの腐食速度は、第2次TRUレポート(電気事業連 合会・核燃料サイクル開発機構,2005)の設定を踏襲している。しかし、現在実施中 である最長10年間を想定したジルカロイ4の溶解試験の結果より、ジルカロイの腐食 速度は経時的に低下している(原環センター,2014)。一方で、地下水(緩衝材間隙 水)の炭酸濃度、比α放射能、水素を吸蔵することによる易溶化などによる腐食促進 の可能性も完全に排除できない。これらより、レファレンス設定(8.77×10⁻⁵)を1 ×10⁻⁴と見なし、ジルカロイ腐食速度が1オーダー遅くなるケース(1×10⁻⁵)、ジル カロイの腐食速度が速くなることを想定し、現状よりも1~2桁速い腐食速度(1×10⁻³ および1×10⁻²)を設定した。

- Case 7: Case 1~6 までの組合せのうち最も過酷な組合せの想定 IRF(C)=40 %, DR(ジルカロイ)=1×10⁻²を想定した。
- ・Case 8 : C-14 のソースタームとして最も過酷な条件を想定

インベントリ全量が、有機形態として瞬時放出されるケースを想定した。

これらのケースについて、人工バリアを経て岩盤中を100 m移行することを想定した場合の被ばく線量を評価した結果を図 2.2.2-14 に示す。

瞬時放出率が最も小さい10%(赤破線)から、20%(レファレンス;黒点線)および40% (赤一点鎖線)を経て100%(赤実線)へと変化すると、最大線量は、予想通りIRFの増加 にともなって高くなった。また、その挙動と同時に、最大線量になるまでの期間も、処分容 器破損後の約5,000年から約1,500年まで短くなったが、IRFが40%以上において約1,500 年まで短くなった後は、IRFが100%まで増加しても、より短期間とはならなかった。

構造材マトリクスの溶解速度が、最も遅い 1×10⁻⁵ y⁻¹(青波線)から 8.77×10⁻⁵ y⁻¹(レフ アレンス;黒波線)、1×10⁻³ y⁻¹(青一点鎖線)を経て 1×10⁻² y⁻¹(青実線)へと速くなる 場合も、最大線量は増加した。また、溶解速度が 1×10⁻³ y⁻¹よりも速い条件では、最大線量 は、処分容器破損後約 1,500~2,000 年後の間に著しく高くなることが分かった。さらに、溶 解速度が 1×10⁻² y⁻¹まで速くなると、最大線量-経過時間のカーブは、IRF を高くするなどの より過酷な条件を付加しても、ほぼ変化しなかった。これは、瞬時放出と、構造材マトリク スが 100 年間で溶けきる場合の調和的放出とがほぼ同義となり、その後の核種移行挙動のみ によって最大線量-経過時間のカーブ形状が規定されるためと考えられた。



図 2.2.2-14 岩盤下流側 100 m 地点における被ばく線量評価値

3) 不確実性のパラメータの暫定値への反映方針

平成 27 年度の本検討では、国内向けのパラメータの暫定値を設定したが、今後は、変動シ ナリオの評価などに備え、パラメータのさらなる整備を進めるべきである。しかしながら、 現段階では、わが国における処分オプションとして直接処分を行う場合の詳細な安全評価手 法は定まっていない。また、欧州諸国(スイスを除く)において IRF に付与されている確率 密度関数については、その確たる必要性あるいは必然性が確認できていない。

従って、本検討においては、現実的設定として設定したパラメータの暫定値に対し、確率 密度関数の付与といった幅の設定は行わず、暫定値よりも保守側の最大値のみを与えること とした。

ここで、揮発性元素(C1,IおよびCs)のIRFは、FGRとの相関式で設定しており(原子力 機構,2016)、前段(2)で設定したFGRの推奨値と最大値を用いて計算することで、IRFと しての推奨値と最大値が得られる。この最大値は、現状において、国内外におけるソースタ ーム評価の考え方や根拠(ソースターム評価モデル、FGR測定データ、瞬時放出率と核分裂 生成ガス放出率との相関性データなど)を示すことができる範囲での最も保守側の値になり 得ると判断した。また、同様の位置付けとなる非揮発性元素ついての保守側の値は、諸外国 のIRF 推奨値のうちの最大の値であると考えられる。本検討では、これらの値を参考とし、 さらに、平成28年度に新たに重要であると判断した不確実性因子(処分完了後の長期間にお けるIRFの経時変化)を考慮することで、パラメータの暫定値に対する最大値を設定した。 揮発性元素については、表 2.2.2-1 で示した FGR との相関式に表 2.2.2-10 で示した FGR 推奨値(仮定値)を代入し、下記のように計算される。

I : $IRF(I) = FGR \times 1$ = 2.0 [%] (推奨値)

Cs : IRF(Cs) = FGR×(1/ $\sqrt{3}$) = 2.0×(1/ $\sqrt{3}$) = 1.2 [%] (推奨値)

C1 : IRF(C1) = FGR×3 = 2.0×3 = 6.0 [%](推奨値)

また、IRFの最大値はFGRとの相関式およびFGRの最大値(仮定値)を用いて下記のように計算される。

I: IRF(I) = FGR × 1= 4.5 × 1= 4.5 [%] (最大値)Cs: IRF(Cs) = FGR × (1/ $\sqrt{3}$)= 4.5 × (1/ $\sqrt{3}$) = 2.3 [%] (最大値)C1: IRF(C1) = FGR × 3= 4.5 × 3= 13.5 [%] (最大値)

ここで、本項の序文で示したように、瞬時放出核種は主に結晶粒界およびギャップから放 出される。そのため、表 2.2.2-15 に示した、処分後の長期間における結晶粒からの核種放出 によって、結晶粒界あるいは結晶粒界を介してギャップへ移行する核種の割合が増加する可 能性を不確実性として考慮すべきと判断した。この評価結果では、処分後の 1,000 年で IRF は約 3%増加する可能性が示唆されていることから、上記で計算した IRF の最大値に対して 3% を加味することとした。その結果、I, Cs および C1 の IRF の最大値を、それぞれ 7.5%, 5.3% および 17.5 %とした。

非揮発性元素については、諸外国で実施された安全評価においてレファレンスケースとし て設定された IRF 値(表 2.2.2-14)のうちの最大の値を選択し、これらに 3 %を加味するこ ととし、Se, Sr, Tc, Pd, Sn および Cの IRF の最大値を、それぞれ 7.0 %, 4.0 %, 5.0 %, 5.0 %, 7.0 %および 14.0 %とした。

本検討で検討したような、処分完了時期から処分容器破損時期までの長期(数千~数万年) に起因する不確実性の加味例として、SGT-E2ににおける評価があげられる。ここでは、根拠 データである浸出試験の期間が短く、キャニスタ破損後(10,000年後)のIRFを外挿して予 測することが不確実性を含むとし、重要核種であるIとCsについて4%を加味している

(Johnson, 2014)。この4 %は、燃焼度 60 MWd tHM⁻¹(リム燃料度 80 MWd tHM⁻¹)における リム領域のインベントリ割合として評価されたものである。しかし、同評価のなかで、リム 領域の寄与を含めることは悲観的すぎると言及したうえで、それをあえて加味していること から、この4 %は暗に IRF の経時変化を考慮した値とも受けとれる。

構造材からの C については、前段 2) で述べたとおり、燃料付着クラッドに含まれる C-14 の放射能を考慮するか否かが大きな不確実性であると考えられる。この C-14 は、もともとジ ルカロイ中に存在する N 不純物由来のものではなく、原子炉の一次冷却系統から持込まれる C であり、C の総インベントリにも影響を与えるものである。しかしながら、そのインベント リ増加は試算に止まっている(原環センター,2013)ため、ここでは便宜上、CのIRFを推 奨値の2倍の40%として最大値とする。

以上をまとめた結果を表 2.2.2-17 に示す。なお、先に述べたとおり、FGR の値は公開され ている PIE データを基に算出したものであり、事業段階においては PIE データの代表性に留 意する必要がある。

今後の課題として、平成27年度に暫定的に設定した長期溶解速度に対して、わが国の燃料 特性や地質環境特性を考慮した不確実性をどのように評価するか検討することが挙げられる。 また、本報告で得られたパラメータの推奨値と最大値の組合せについて感度解析を実施し、 どのような組み合わせが、性能評価(被ばく線量)へ大きな影響を及ぼすのかを評価するこ とも重要であると考えられる。

		平成 27 年度 (原子力機構, 2016)	平成 28 年度 検討結果			
想定炉型		PWR				
想定燃焼度		$45~{ m GWd~tHM^{-1}}$				
FGR 設定		[未設定]	推奨値;2.0 % * ¹ 最大値;4.5 % * ¹			
瞬時放出率(IRF)	使用済燃料	 I [IRF (I) =FGR × 1] Cs [IRF (Cs) =FGR × (1/√3)] C1 [IRF (C1) =FGR × 3] Se 1.0 % Sr 1.0 % Tc 1.0 % Pd 1.0 % Sn 0.1 % C 10.0 % 	 · I 2.0% (最大 7.0%)*² · Cs 1.2% (最大 5.3%)*² · C1 6.0% (最大 15.0%)*² · Se 1.0% (最大 7.0%) · Sr 1.0% (最大 4.0%) · Tc 1.0% (最大 5.0%) · Pd 1.0% (最大 5.0%) · Sn 0.1% (最大 7.0%) · C 10.0% (最大 14.0%) 			
	構造材金属	・C 20 % (有機形態)	・C 20 % (最大 40 %) (有機形態)			
長期溶解	使用済燃料	$1 \times 10^{-7} y^{-1}$	$1 \times 10^{-7} y^{-1}$			
	構造材金属	・全種類 1x10 ⁻⁴ y ⁻¹	・全種類 1x10 ⁻⁴ y ⁻¹			

表 2.2.2-17 ソースタームパラメータの追加検討結果 (太字部分が本報告で新たに導出した値を示す)

*1: FGR 設定手法の提言にともない、使用済燃料の発生体数が、従来型、STEP1 および STEP2 について同数であると仮定して計算した値

*2:揮発性元素(I, Cs, Cl)の IRF は FGR の仮定値を用いて計算しているため、事業段階 においては、想定される使用済燃料集合体の発生体数や、今後公開される PIE 結果な どに基づき、FGR 値を再評価したうえで IRF を再計算する必要がある

2.2.3 多重バリアによる閉じ込め性能評価手法に関する研究

(1) 本項目の背景と目的

処分場の設計に当たっては、「人工バリア」、「坑道」、「処分施設」などの複数の設計の対象 (以下、「設計項目」という)があり、それぞれに複数の選択肢(以下、「設計オプション」 という)が存在する。ここで、どの設計項目に対してどの設計オプションを選択するかによ り、多重バリアの特定のバリアの閉じ込め性能が異なってくる場合があると考えられる。ま た、そのような差異が生じるかどうかやその差異が顕在化するかどうかなどは、対象とする 地質環境条件やその時間変遷に応じて変わってくると考えられる。

- 処分施設
 - ▶ 設計オプション

処分場の地理的配置(処分場を設置する母岩、深度、汀線からの距離、大規模断 層からの距離など)、パネルレイアウト(単層、多段、比較的透水性の高い領域を 避けた分割配置など)など。

▶ 想定されるバリア性能の差異

上記の設計オプションの違いによっては、処分場を含む大きな領域での核種移行 (例えば、地下深部から地表への核種の移行経路や移行特性)に着目することに なり、それらは広域での地下水の流れや地下水の分布、さらにはそれらの時間変 遷の影響を直接受けることになる(図2.2.3-1)。時間変遷としては、海水準変動 に起因する塩淡境界の変化や隆起・侵食による深度や地形の変化等の寄与が重要 になると考えられる。ここで、直接処分においては非収着性である C-14 などの核 種が支配的になることが想定されるため、ファーフィールド岩盤などのニアフィ ールド以外のバリア性能の効果、最大線量の発生時期と地質環境条件の時間変遷 による影響発生のタイミングとの関係などが、Cs-135 などが支配的となるガラス 固化体の場合と異なる可能性がある。

ここで着目する処分施設の設計オプションは処分場規模のスケールのものであり、 それらと関係するバリア性能の差異は、同様あるいはそれ以上のスケールに関係 するとともに、それらのスケールの変化が、より狭い領域でのバリア性能にも影 響を与えることになると考えられる。そのため、ここではまず、処分施設の設計 オプションと広い領域での影響の関係に着目して検討する。また、それが核種移 行に与える影響を定量的に検討する際には、広い領域での影響を狭い領域での核 種移行解析の条件に反映し、そこでの核種移行解析を行うこととした。なお、こ の場合の狭い領域での核種移行解析では人工バリアや坑道については代表的な設 定のみを考慮することとし、それらの設計オプションの選択の影響は後述する「局 所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備」として検討することとし た。

本研究では、上記検討を「広域的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整 備」として実施することとした。



図 2.2.3-1 処分場施設およびその周辺のイメージ

- ・ 人工バリアや坑道
 - 設計オプション 処分容器材料(炭素鋼、銅など)、廃棄体定置方式(処分孔竪置き、処分坑道横置 き)、緩衝材設置方式(ブロック、ペレット、吹きつけ、PEM など)など。
 - ▶ 想定されるバリア性能の差異

備」として実施することとした。

上記の設計オプションの違いによって、廃棄体からの核種の放出時期、廃棄体か らその周りの人工バリア、坑道、周辺岩盤といった坑道近傍における核種の移行 経路が異なり(図2.2.3-2)、それぞれの移行経路での地下水の流れや物質移行特 性の違いにより移行率が異なることになる。特に廃棄体定置方式については、定 置方式の違いにより、坑道断面や埋め戻し状況の違い、あるいは支保工や掘削影 響領域の厚さの違いなどが生じ、それにより移行経路になる部分や、移行経路と なる部分での核種移行に関する特性が異なることなどが想定される。また、直接 処分においては廃棄体形状がガラス固化体と比べ長尺なため、堅置き方式の場合 に大きくなる坑道の直径などの影響が顕在化する可能性もある。ここで、着目す る設計オプションは坑道近傍の比較的狭い領域に関係するものであり、それらが 核種移行に与える影響も同様な比較的狭い領域に限定されると考えられる。 本研究では、上記検討を「局所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整



図 2.2.3-2 人工バリア・坑道における設計項目のイメージ

上記の観点での検討を進めることで、どの設計項目のどの設計オプションの選択により、 どのような性能の差異が生じうるか、そのような差異が発生するあるいは顕在化する地質環 境条件やその時間変遷は何かなどをより現実的に評価できるようにしておくことは、様々な 地質環境条件に応じた適切な設計オプションの選択を、工学技術的な観点に安全性の観点も 加えた総合的な判断としていくための基盤情報として重要となる。

本研究では、以上の点を踏まえ、設計オプションに応じた閉じ込め性能の違いなどを詳細 に把握する手法を整備することを目的とする。さらには、その手法を用いた定量的評価を通 じて、閉じ込め性能の設計オプションや地質環境条件に応じた閉じ込め性能の違いと、それ らの違いが生じる条件などに関する定量的な知見などを蓄積することで、直接処分における 設計オプションの選定や改良課題の設定などに資する具体的情報の整備を目指す。

これらの観点から、平成28年度は、以下の内容について検討を行った。

・広域的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備((2)項参照)

平成 27 年度は、隆起・侵食および海水準変動を考慮した広域的なスケールでの広域 密度流解析を実施し、地質環境条件(水理、地下水化学)の変化を評価した。さらにそ の変化を核種移行解析に反映するために、広域的な変化をより小さなスケールに受け渡 す手法(たとえば、坑道近傍の境界条件への反映)を構築した。

平成 28 年度は、広域的な設計オプションのうち処分場の配置に着目し、処分場と塩 淡境界あるいは処分場と高透水性構造との位置関係の違いにより処分場領域や周辺で の水理や地下水化学にどのような差異が生じえるか、さらにそれらが隆起・侵食および 海水準変動によりどのように変わりえるかなどに着目した評価を行った。

・局所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備((3)項参照)

平成 27 年度は、処分孔竪置きと処分坑道横置きの定置方式に応じた坑道断面や埋め 戻し状況の違い、あるいは支保工や掘削影響領域の厚さの違いなどをモデル化し、核 種の移行経路や移行率などの差異を定量的に検討することが可能な三次元水理・物質 移行モデルを構築し、限定された亀裂の状態に対する試解析を実施した。

平成28年度は、定置方式の違いによる核種の移行経路や移行率などの差が発生する あるいは顕著化する条件などを把握するためのより詳しい検討として、上記の定置方 式に応じた違いに加え、亀裂の状態や地下水の流動方向等の地質環境条件の不均質性 や不確実性を考慮した場合の三次元水理・物質移行解析とその分析を実施した。

 ・設計オプションの増加や仕様の明確化などを踏まえた検討課題の再整理((4)項参照) 前述の「広域的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備」と「局所的な設計 オプションの閉じ込め性能評価手法の整備」についての平成27年度までの検討では、 事業開始当初に想定した限定的な設計オプションを対象に検討を進めてきた。他方、 本事業において、設計オプションの充実および具体化が進められてきており、事業開 始当初に比べて、検討の候補となる設計オプションの種類が増加している。さらに、 それら設計オプションの仕様についての定量的な情報なども増加してきており、それ らを考慮することにより新たな検討課題や既存の検討課題への修正が生じる可能性が 考えられる。

そのため、平成 28 年度は、これら充実および具体化されてきた設計オプションを対象に、設計オプションの違いにより生じる可能性のある閉じ込め性能の差異の探索と それに伴う検討課題の再整理を行った。

(2) 広域的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備

広域的な設計オプションの選択の違いが閉じ込め性能にどのような影響を及ぼす可能性が あるかについて評価することは、処分場をどの位置・深度に配置するか、処分場の中で人工 バリアや坑道をどのようにレイアウトするかを安全評価の観点から選択するための基盤情報 として重要である。広域的な設計オプションの影響を評価するためには、閉じ込め性能への 影響が大きい地下水流動(流速や流向)および地下水化学の変化に着目する必要がある。そ のためには地下水流動および地下水化学の変化の駆動力となる隆起・侵食や海水準変動に起 因する塩淡境界の変化の長期変遷、および大規模断層などの地質環境条件とその変遷の影響 を適切に取り扱うことが必要である。さらに、この広域的な地質環境条件とその変遷はより 狭いスケールの評価にも影響が及ぶ可能性がある。その解決方法として、平成 27 年度に広域 的なスケールでの地質環境条件とその変遷(隆起・侵食および海水準変動)および大規模断 層を設定した広域密度流解析を実施するとともに、広域的な水理および地球化学の変化に基 づいた坑道近傍の境界条件を設定し、核種移行解析を実施する手法を整備した。

平成28年度は、広域的な設計オプションである処分場の配置として、初期深度および水平 方向の位置の差異に着目し、平成27年度に整備した手法を適用し、以下に示す2つの広域的 な設計オプションの違いと、地質環境条件とその変遷との組合せによって、地下水流動や地 下水化学の変化が核種移行に与える影響を比較・評価した。

- 初期深度の差異による地下水流動およびその変化
- 水平方向の位置の差異(海水準変動の影響、大規模断層の上流/下流の影響)による地下水流動と地下水化学およびその変化

上述した検討を実現するため、以下の手順に沿って実施した。

- 上述した2つの広域的な設計オプションの違いによる地下水流動や地下水化学の 変化を評価するための検討対象とする処分場位置を、塩淡境界からの距離の違い、 および広域的な高透水性構造との位置関係の違いに着目して設定
- 海水準変動による塩淡境界の変化を想定した広域密度流解析による塩分濃度分布 および地下水流向・流速の時間変化を推定
- 広域密度流解析結果から、各処分場位置での塩分濃度および地下水流向・流速の
 時間変化と切替り時期を抽出
- 各処分場位置でのニアフィールド三次元水理・物質移行解析の各時期における境
 界条件および核種移行パラメータの設定

各処分場位置においてニアフィールド三次元水理・物質移行解析を実施し、母岩からの最大移行率により比較・評価

1) 検討対象とする地質環境条件と処分場位置

水理地質構造モデルや核種移行解析モデルなどの基本的な条件は平成27年度の設定(原子 力機構,2016)を踏襲した。しかしながら、平成28年度は海水準変動パターンの設定として、 海底下における侵食は考えにくいなど、蓋然性の観点から隆起により徐々に陸化することと し、隆起速度0.3 mm y⁻¹、侵食速度を0.1 mm y⁻¹と設定した。これを踏まえ、本検討におい て、設定する処分場の位置については以下の考えに基づいて合理化を行った。

- 今回の前提条件である隆起速度(0.3 mm y⁻¹)>侵食速度(0.1 mm y⁻¹)の場では、将来的に 海域の処分場も陸化する。
- 上記の前提条件において隆起・侵食の影響が顕著になるのは処分場近傍が陸化し、さらに地表接近・廃棄体露出削剥が生じる超長期の場合であるため、初期深度の影響は陸域の処分場位置で包含する。
- ・ 処分場深度の違いにより地表接近時期が異なり影響に差異が生じる可能性があるため、 陸域の処分場で 500 m と 1,000 m の深度を考慮した。
- 海水準変動の影響については内陸、汀線近傍といった位置を設定する。
- ・ 上記により、海水準変動の影響が無いと予想される位置、海水準変動の影響が生じる ことが予想される位置という違いを考慮することとした。
- 海水準変動の影響に加えて大規模断層を設定し、陸域の処分場を上流側、海域の処分場を下流側とすることで影響を把握する。

また 1,000 m の深度において、予察的に汀線からさらに 5 km 海側で、かつ大規模断層の 下流側といった位置に処分場を設定し、海水準変動の影響と大規模断層の影響を評価するこ ととした。

以上のように合理化を行った上で、検討対象とすべき処分場の位置として、表 2.2.3-1 に 示す位置を想定し、表 2.2.3-2 に着目した広域的な設計オプションに対する核種移行に与え る影響を比較・評価するための処分場位置を設定した。それにより、地理的条件、断層との 位置関係および深度によって広域的な設計オプションと地質環境条件とその変遷との組合せ による地下水流動および地下水化学の変化の影響がどのように異なるかを比較・評価するこ ととした。また、図 2.2.3-3 に本検討で考慮する処分場位置の概念図を示す。
表 2.2.3-1 考慮すべき処分場の位置

処分場	地理的条件	断層との位置関係	深度
a-1	内陸の山地	上流側で十分な離隔	500 m
a-2	内陸の山地	上流側で十分な離隔	1,000 m
b-1	海域(現汀線直近)	上流側	1,000 m
b-2	海域 (現汀線から5 km)	下流側	1,000 m

*処分場位置 a-1, a-2 については等間隔で並ぶ断層間の中間地点に位置するため、断層からは最も離隔を取った位置になる。

着目した広域的な設計オプション	評価・比較する 処分場位置	核種移行への影響
①初期深度の差異の比較	a-1 2 a-2	流速の違い
		流速の変化の違い
の水亚支向の位置の美毘(海水準	a-2 b h-1	流速およびその変化の違い
の小十万円の位直の左乗 (海小平 亦動の影響 断屋の上法/丁法の影		(海水準変動、断層)
変動の影響、断層の上流/下流の影	1 1 1 1 0	化学およびその変化の違い
響)の比較	b-1 2 b-2	

(海水準変動)

表 2.2.3-2 核種移行に与える影響を比較・評価するための処分場位置



図 2.2.3-3 広域スケールにおける考慮すべき処分場位置の概念図

2) 処分場位置に応じた水理および化学場の変化

①前提条件

ここで対象とする設計オプションは地理的条件、大規模断層との位置関係および深度に関 するものであることから、その他の仕様に関しては共通のものを想定することとした。具体 的には、使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価第1次取りまとめ(原子力機構, 2015a)(以下、「直接処分第1次取りまとめ」という)でレファレンスとしている処分坑道横 置きの処分概念を全ての処分場位置において仮定した。また、昨年度と同様に、直接処分第 1次取りまとめと同じ割れ目統計データを用いて割れ目ネットワークの統計的リアライゼー ションを作成し(原子力機構, 2016)、上述した第1次取りまとめのレファレンスである処分 坑道横置きの処分概念に対応した人工バリアやEDZ等を挿入した三次元モデルを用いニアフ ィールドにおける地下水流動/核種移行解析を実施した。本検討を実施するにあたっては、 上述の通り、平成27年度に整備した異なる空間スケールにまたがる地下水流動解析および核 種移行解析の連携手法(原子力機構, 2016)を本検討に適用し、時間変遷や不均質性を考慮し た地下水流動解析および核種移行解析に関する空間モデルオプションならびにプロセスモデ ルオプションの一般的な選択フロー、およびオプションの整理と調査情報等に基づくオプシ ョン間の選択に関する判断基準を適用した。

②広域密度流解析結果

広域の密度流解析によって得られた塩分濃度の時間変化を図 2.2.3-4 に示す(白点は処分 場位置を表す)。周期的な海水準変動に対応して汀線が左右に往復しており、また、地下の塩 淡境界も若干の位相のずれを持ちつつこれに追従しているが、母岩透水係数の深度依存性の ために浅部と深部では塩淡境界の位置が異なり、さらに、断層による地下水流速の影響も時 期によっては顕著なものとなることがわかる。このことは、前述した4種類の処分場位置の それぞれにおいて塩淡境界切り替えの時期や地下水流動への影響が異なることを示唆するも のであり、各処分場位置における環境変遷のパターンはそれぞれ異なるものと考えられる。



図 2.2.3-4 広域密度流解析によって推定された塩分濃度分布の時間変化(白点は各処分場位置)

③ 処分場位置のオプションに応じた塩分濃度および地下水流速・流向変遷のパターン

処分場位置毎の環境変遷パターンの差異の主たるものとして、塩淡境界切り替え時期が挙 げられる。処分場位置のオプションに応じた地下水水質(塩分濃度)および地下水流速・流 向変遷のパターンの比較を図2.2.3-5に示す。内陸の処分場位置a-1、a-2では海水準変動の 影響は見られないが、海域の処分場位置b-1、b-2では海水準変動の影響が見られる。現江線 直近の処分場位置b-1では最初期の海退期の影響が最も顕著であり、約10万年後の海進・海 退の影響もわずかながら存在する。現江線より5km海側の処分場位置b-2では海進・海退の 影響が更に長期まで継続し、約30万年までは海進・海退の影響が顕著に継続しており、36 万年時点でもわずかに海進・海退の影響が見られる。また深度の違いでみると、地表面から の初期深度が1,000mの処分場位置a-2に対して、初期深度500mの処分場位置a-1では間 隙流速が概ね10倍程度速い。その他、全ての処分場位置において共通して見られる変化は隆 起・侵食による間隙流速の増大であるが、100万年間を通じて1.5倍程度である。

また、沿岸部を想定した処分場位置における核種移行解析では、各処分場位置において予 想される塩淡境界切り替えのタイミングで核種の分配係数および地下水流向・流速をステッ プ的に変化させることとした。図2.2.3-5のステップ的に変化する期間に絞り、各処分場位 置における密度流解析によって得られた塩分濃度および地下水流向・流速の時間変化を抽出 し、各処分場位置でのニアフィールド三次元水理・物質移行解析の各時期における境界条件 および核種移行パラメータを設定する。図2.2.3-6に処分場位置 b-1 における密度流解析に よって得られた処分場位置での塩分濃度および地下水流向・流速の時間変化の例を示す。ま た、密度流解析結果に基づく処分場位置 b-1のニアフィールド三次元水理・物質移行解析の 各時期における境界条件および核種移行パラメータの設定の例を表 2.2.3-3 に示す。なお、 三次元物質移行解析を実施するにあたって、塩水環境と淡水環境の切り替わりを考慮する必 要があるため、地下水水質に応じた物質移行特性(緩衝材および母岩中の実効拡散係数と分 配係数)としては塩水・淡水の両環境のデータが存在する H12 レポート(核燃料サイクル開 発機構,1999c)を参考に降水系および海水系地下水を設定した。



図 2.2.3-5 処分場位置のオプションに応じた地下水水質(塩分濃度)および 地下水流速・流向変遷のパターンの比較



図 2.2.3-6 密度流解析によって得られた処分場位置 b-1 での 塩分濃度および地下水流向・流速時間変化の例

表 2.2.3-3 密度流解析結果に基づく処分場位置 b-1 のニアフィールドの

時期	2 万年以前	2万~12万年	12 万年以後
動水勾配の大きさ	0.001	0.01	0.01
流向	海域→陸域(180°)	陸域→海域(0°)	陸域→海域(0°)
地下水設定	塩水	塩水	淡水

三次元水理・物質移行解析パラメータ設定例

3) 処分場位置に応じた地質環境条件とその変遷に対する解析結果と比較

① 初期深度の差異による地下水流動およびその変化

初期深度の差異による地下水流動および地下水化学の変化に対する広域的設計オプション毎の核種移行解析結果については、処分場位置として a-1 と a-2 の C-14 の母岩からの規格化された移行率(1 万粒子を対象とした移行率を平均して算出)の最大値を比較した結果を図2.2.3-7 に示す。母岩からの移行率について差異が生じているが、深度の違いに起因する透水性の差異が直接の要因となり a-1 が a-2 の 4 倍高い値を示した。



図 2.2.3-7 処分場位置 a-1、a-2の想定での母岩からの C-14 の最大移行率の比較

② 水平方向の位置の差異(海水準変動の影響、大規模断層の上流/下流の影響)による地下 水流動および地下水化学の変化

海水準変動に起因する塩淡境界の移動および大規模断層の上流/下流の影響による地下水 流動および地下水化学の変化に対する広域的設計オプション毎の核種移行解析結果について、 深度1,000mでの処分場位置としてa-2とb-1のC-14の母岩からの規格化された移行率の最 大値を比較した結果を図2.2.3-8に示す。内陸では海水準変動の影響は全く生じず、流向は 一定でかつ流速は同一深度の海域の処分場よりも大きい。そのため処分場位置a-2における 移行率の最大値はb-1よりも5倍程度高い値を示している。また、予察的に実施した1,000m の深度における、汀線からさらに5km海側で、かつ大規模断層の下流側といった位置に処分 場を設定し、海水準変動の影響と大規模断層の影響を評価した結果を図2.2.3-9に示す。深 度1,000mでは地下水流速が遅く、大規模断層の上/下流といった差異は顕著ではなくなる。 なおこれらの結果は、処分場が沿岸域や、海水準変動影響により沿岸域から内陸の処分場へ 遷移する状態に対する差異である。大規模断層の上/下流といった差異によって動水勾配が異 なるといった地下水流動の差異や、地下水化学の変化の仕方に差異が生じている可能性があ るものの影響はほとんどない結果となった。



図 2.2.3-8 処分場位置 a-2、b-1の想定での母岩からの C-14 の最大移行率の比較



図 2.2.3-9 処分場位置 b-1、b-2の想定での母岩からの C-14の最大移行率の比較

4) 広域的な閉じ込め性能評価に関する考察

以上により、想定した処分場位置 a-1 と a-2 による初期深度の差異による移行率の最大値 の違いは、母岩透水係数の深度依存性による地下水流速の違いが要因であることが考えられ る。また、海水準変動影響や断層の上/下流の差異による移行率の最大値の違いは、本検討で 想定した処分場位置 a-2 と b-1 の比較では a-2 が b-1 よりも高い値を示した。一方で、想定 した処分場位置 b-1 と b-2 の比較では移行率の最大値にほとんど変化がなかった。これは、 初期深度の差異(母岩透水係数の深度依存性による地下水流速の違い)や海水準変動に伴う 地下水流動の影響が想定した処分場の位置に及ぶか否かの違い(影響の及ばない内陸か影響 の及ぶ海域近傍かの違い)に起因すると考えられる。今後は、処分場の配置に着目した検討 の拡充(たとえば、初期深度の差異、海水準変動の影響の位置による違い、現在に海域の海 水準変動による将来的な陸化の有無(地形等に依存)などの複数の要因の組合せ等を考慮) などを通じて、広域的な設計オプションの違いによる影響の有無や発生条件等の知見を取り まとめることが必要である。

なお、本項(2)では広域的な設計オプションの閉じ込め性能に対する影響について広域的な スケールに着目して検討してきたが、本項(4)の設計オプションの拡充や具体化などを踏まえ た検討課題の再整理において、局所的な設計オプションである処分容器に関係した検討課題 として「処分容器の開口時期の違いによる移行経路などの差異の影響」が挙げられている。 この検討課題では、銅などの高耐食性材料を用いた複合型処分容器を考えた場合には容器開 ロ時期が遅くなり、このことと地質環境条件の時間変遷(たとえば、海水準変動による塩淡 環境の移動に伴う処分場周辺の流向の変化)が組み合わされることで、広域的な領域での核 種移行経路や GBI 位置の変化が生じる可能性が示唆されている。したがって、局所的な設計 オプションである処分容器の影響が広域的な核種移行に影響を及ぼす可能性についても、必 要に応じて広域的なスケールでの検討を進めることが有用になると考えられる。

これらを踏まえると、「処分容器の開口時期の違いによる移行経路などの差異の影響」についての広域的なスケールでの検討としては、処分容器の開口時期の違い、すなわち核種放出開始時期の違いを考慮した核種移行解析を、本検討で実施した密度流解析結果で得られた海水準変動による塩淡環境の移動に伴う処分場周辺の流向の変化を考慮して実施することにより、移行経路にどのような差異が生じるかを検討することが考えられる。ここでは予察的に、上記を考慮した場合の移行経路が、処分場の位置によって変わるかどうかを確認するために、複数の処分場位置を想定した解析を行った。さらに、核種の収着性の違いが移行時間に影響することから、収着による遅延が期待できる低収着性核種(Cs-135等)、収着性核種(C-14 等)、ある程度の収着による遅延が期待できる低収着性核種(Cs-135 等)、収着による遅延が大きい収着性核種(U-238等)のそれぞれについて解析を行った。なお、収着性核種については、本試解析の条件では母岩からの移行が生じていないことから、以降の考察からは割愛した。

上記を考慮した物質移行解析から得られた移行経路の結果を図 2.2.3-10 に、主な傾向を以下に示す。

- 内陸を想定した場合(図 2.2.3-10(1/2))には、開口時期、処分場位置、収着性によらず、処分場位置の下流に存在する直近の断層を経由して地表(陸域)へ移行する
- 海域を想定した場合(図 2.2.3-10 (2/2))には、開口時期、処分場位置、収着性の違いにより移行経路や地表での流出点の違いが見られる。
 まず、低収着性の核種については、開口時期によらず、処分場位置 b-1 の場合には約30万年を経て断層を経由して地表へ流出、処分場位置 b-2 の場合には100万年までの評価期間では地表に到達しなかった。

一方、非収着性の核種については、開口時期に依存して移行経路に大きな違いが見られる。処分場位置 b-1 の場合には、開口時期で想定される汀線の移動に追随して地表での流出点が変化することで、開口時期により異なる移行経路となっており、そこで

の移行時間は短く100年~400年程度である。一方、処分場位置 b-2 の場合には、開 ロ時期により移行経路およびそこでの移行時間も大きく異なっており、これは海水準 変動に伴う流向の時間変化等の影響が顕在化しているものと推定される。

- 以上の試解析の結果より、「処分容器の開口時期の違いによる移行経路などの差異の影響」は、内陸部での処分場位置よりも海域での処分場位置を対象にする場合に顕在化する可能性があることが示唆された。さらに、海水準変動に伴う流向の時間変化等と開口時期や処分場位置の違いの組み合わせによる移行経路と移行時間の違いは、低収着性の核種よりも非収着性の核種のほうが顕在化する可能性が示唆された。
- ただし、上記の考察は本試解析での限定された条件での解析結果に基づくものであり、 より一般性のある知見にしていくためには、たとえば以下のような検討を拡充するこ とが考えられる:
 - 海水準変動に伴う流向の時間変化等が移行経路やそこでの移行時間に与える影響のメカニズムをより詳しく把握するために、本検討で考慮した海水準変動の影響の想定、さらには本試行で考慮した開口時期や処分場位置の想定に加えて、異なる想定での解析事例等を蓄積し分析する。
 - 海水準変動に伴う流向の変化に加えて、それによる地下水化学の変化の影響も考慮した解析事例等を蓄積し分析することで、海水準変動に伴う地質環境条件の時間変遷の影響を総合的に把握できるようにする。

(a) 処分場位置 a-1, 非収着性

(b) 処分場位置 a-1, 低収着性



(c)処分場位置 a-2, 非収着性

(d) 処分場位置 a-2, 低収着性



図 2.2.3-10 開口時期、処分場位置、収着性の違いに応じた移行経路の抽出結果(1/2)





(h)処分場位置 b-2, 低収着性



図 2.2.3-10 開口時期、処分場位置、収着性の違いに応じた移行経路の抽出結果(2/2)

(3) 局所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備

本検討では、(1)に示したように局所的な設計オプションとして、廃棄体の定置方式の違い と亀裂の状態に着目し、定置方式の違いと亀裂の状態の組合せの違いが坑道近傍における核 種の移行経路や移行率にどのような影響を与えるのか分析を実施した。具体的には、定置方 式の違いについては図 2.2.3-11 に示すように、竪置きの場合には上部坑道に支保工や埋め戻 し材を用いるため、支保工の劣化などによりそれらの領域が周辺岩盤よりも透水性が高くな る場合には、緩衝材を出た核種が支保工や埋め戻し材を移行経路とする可能性がある(図 2.2.3-11 の①)。この場合、母岩への移行率が処分坑道横置きと比べ高くなる可能性がある 一方、上部坑道の埋め戻し材への核種の収着や移行経路が長くなる事によって、移行率が低 くなるなどの影響が考えられる。



図 2.2.3-11 各定置方式において比較する粒子の移行経路

一方、母岩の不均質性によって、坑道と亀裂の接触頻度の差異、坑道近傍の母岩における 亀裂同士の接触頻度の差異により、高透水性の移行経路を形成し母岩への移行率が上昇する 場合や、坑道や亀裂同士の接触頻度が低く、有意な移行経路が形成されず母岩への移行率が 抑制される場合など、さまざまな移行経路や移行率とそれによる閉じ込め性能への影響が考 えられる。このように、坑道近傍における核種の移行経路や移行率は、廃棄体定置方式の違 い(処分孔竪置き・処分坑道横置き)に伴う設計オプションの違いによって大きく異なる可 能性があることから、本研究では局所的な設計オプションとして処分孔竪置き、処分坑道横 置きの定置方式の違いによる坑道近傍における核種の移行挙動に着目し、これらの局所的な 設計オプションと母岩の不均質性の影響が処分場の閉じ込め性能に与える影響を評価する。

ここで、母岩の不均質性の特徴を考慮するためには、様々な亀裂の状態について、亀裂と

処分礼や処分坑道との交差頻度や交差の仕方、亀裂同士の交差頻度の違いによる粒子の移行 経路や移行率の違いを分析し、定置方式と亀裂の不均質性の組合せによる移行率の変動範囲 を統計的に示す必要がある。この際、領域内に発生させる亀裂は表 2.2.3-4 に示すパラメー タを用いて、全体的な亀裂の頻度や走向、平均的透水性などのパラメータを一定として与え た上で、統計量に基づいて確率論的に亀裂群を生成させ設定(以下、リアライゼーションと いう)する。平成 27 年度は定置方式の違いがどの程度移行特性や移行率に影響を与えるのか 考慮可能な三次元水理・物質移行解析モデルの作成を行い、物質移行の試解析を実施し坑道 近傍における移行経路や移行率の分析を行った。平成 28 年度は処分孔竪置き・処分坑道横置 きの各定置方式について、どのような亀裂の状態や設計オプションを組合せた場合に、定置 方式の違いによって移行経路や移行率に違いが出るのか把握するため、より多くのリアライ ゼーションについて解析を実施し、粒子の移行経路や移行率について分析を行った。

パラメータ	設定値
一次元亀裂密度[本 m ⁻¹]	0.3
透水量係数分布の平均	対数正規分布
透水量係数分布の対数平均値	-9.99
透水量係数分布の対数標準偏差	1.07
亀裂の半径分布	べき乗分布
べき指数	3.0
べき乗分布における最小亀裂半径[m]	1.0
モデル化する亀裂の最小半径[m]	7.0
モデル化する亀裂の最大半径[m]	300.0
亀裂の方向性	Fisher 分布
分布(走向、傾斜、パラメータ)比率	(0, 90, 10) 0.5
	(90、90、10) 0.5
母岩マトリクスの透水係数[m s ⁻¹]	不透水

表 2.2.3-4 三次元水理・物質移行解析に用いた母岩の透水性に関する設定値

ここで、平成27年度に対象とした解析条件は、坑道軸方向と地下水の主流動方向が直交し 長期に渡り主流動方向が変化しないと仮定しているが、処分場領域の力学的安定性の観点や、 長期的な時間変遷の中で地質環境が変化する場合、主流動方向が坑道と平行し、掘削影響領 域(以下、EDZという)や劣化した支保工など処分坑道周辺や上部坑道周辺の比較的透水性 が高く連続した領域が卓越した流動経路となる可能性がある(図2.2.3-12)。このような条 件下では、処分孔竪置き定置方式ではこれらの領域から廃棄体が隔離されているため、処分 坑道横置きとは異なった移行経路となる可能性が考えられる。このことから、地下水の主流 動方向が横置きの場合の処分坑道や竪置きの場合の上部坑道と平行する設計オプションを想 定し、これらの坑道周辺の比較的透水性が高い領域が移行経路となり、定置方式の違いによ って坑道近傍における移行経路や移行率に差異を生じるのか検討を行うことにした。



b. 処分孔竪置き

図 2.2.3-12 坑道に沿って連続した透水性が高い領域の影響に着目した粒子の移行経路

1) 定置方式と坑道周辺の亀裂の状態に着目した局所的な移行経路や移行率の評価

① 核種移行の三次元水理・物質移行モデルの作成および解析データ

平成 27 年度に作成した処分孔竪置きのモデル(原子力機構, 2016)については、設計仕様 が決まっていないため、SKBの KBS-3Vの設計を参考に物質移行モデルを作成した。平成 28 年度は、坑道近傍の亀裂の状態と定置方式の違いによる移行経路の差異を詳細に分析するた めに、処分孔竪置きのモデルについて処分坑道横置きのモデルと緩衝材厚さなどの幾何形状 を統一した。解析については、平成 27 年度同様、三次元不均質場核種移行解析ツール Partridge(原環機構, 2011)を用いて処分孔竪置き・処分坑道横置きの定置方式に応じた三次 元有限要素メッシュデータの作成と解析パラメータの設定を行い、定常状態での三次元地下 水流動解析ならびに物質移行解析を実施した。この際、地下水流動解析については、H12 レ ポート(核燃料サイクル機構, 1999c)の亀裂ネットワークモデルにおける母岩の透水性に関 する設定値を、物質移行解析については、直接処分第1次取りまとめにおける核種移行解析 の設定値を参考に設定した。解析に用いた三次元メッシュデータを図 2.2.3-13 に示す。

また、三次元地下水流動解析においては、亀裂の不均質性に伴う坑道近傍の移行経路の違いを比較するため、表 2.2.3-4 に示したパラメータを用いて亀裂ネットワークモデルにおい

て割れ目特性の組合せをランダムに発生させるための乱数を変更し、発生される亀裂を変化 させた 50 リアライゼーションによる解析を実施し、定置方式と統計的に発生させた亀裂の組 合せを変化させた。さらに得られた地下水流動解析の結果を用いて、三次元の物質移行解析 を試行した。三次元物質移行解析においては、各リアライゼーションで 15,000 個程度の粒子 を廃棄体から瞬時放出し、各領域から単位時間に放出される粒子個数を総粒子数で除すこと で、粒子の平均的な移行率を算出した。



a. 処分坑道横置きの解析に用いた三次元メッシュデータ



b. 処分坑道横置きの解析に用いた三次元メッシュデータ

図 2.2.3-13 三次元物質移行解析に用いたメッシュデータ

2 解析結果

まず、定置方式の違いにより亀裂と坑道の交差頻度などが異なるため、亀裂の状態を変化 させた場合、各定置方式で人工バリアから母岩への移行率が異なる可能性がある。このため、 各定置方式における人工バリアから母岩への最大移行率をリアライゼーション別に比較した。 この結果、人工バリアから母岩への最大移行率の違いは最大でも1.96 倍程度、最小で1.02 倍、平均では1.36 倍程度となった。定置方式の違いによる人工バリアから母岩への最大移行 率の差が最大となったリアライゼーション No.49 における、人工バリアから母岩への移行率 (竪置きについては図2.2.3-11 の各領域からの移行率①~④を合計した値)の経時変化グラ フを図2.2.3-14 に、最小となったリアライゼーション No.20 の粒子の移行率の経時変化グラ フを図2.2.3-15 に示す。(原子力機構, 2016)においても、人工バリアから母岩への核種の 移行は、拡散による移行が支配的である事が示されている。同じリアライゼーションでも定 置方式の違いにより、坑道と亀裂の交差頻度が異なるため、人工バリアから母岩への亀裂を 会した移行経路は異なるものの、人工バリアから母岩への粒子の移行率は拡散による移行が 支配的であり、亀裂による移行率は拡散の移行率と比べて相対的に小さいため、定置方式の 違いによる坑道と亀裂との交差頻度などの差が大きくならなかったと考えられる。



図 2.2.3-14 定置方式の違いによる最大移行率の差が最大となったリアライゼーション No.49の移行率の比較



図 2.2.3-15 定置方式の違いによる最大移行率の差が最小となったリアライゼーション No.20の移行率の比較

一方、初期の移行率についてはどちらも緩衝材から母岩(または EDZ)への移行経路が支配 的であるが、250年以降では、処分孔竪置きにおける②の処分孔上部埋め戻し材から EDZ へ の移行率が支配的となり、④の緩衝材から母岩への移行率よりも高い移行率を示している。 図 2.2.3-16に処分孔竪置きの坑道近傍における粒子の移行経路を示す。



図 2.2.3-16 竪置きの坑道近傍における粒子の移行軌跡(リアライゼーション No.49)

図 2.2.3-16 から、竪置きにおいてはより透水性の高い埋戻材や上部坑道周辺の EDZ を経由 して母岩に移行する経路も坑道から母岩への移行に寄与している事がわかる。

次に、人工バリアから母岩への移行率では定置方式の違いによる最大移行率の差は顕著で はなかったものの、坑道と接していた亀裂が母岩内において他の亀裂との接触する頻度など が各リアライゼーションで異なることにより、定置方式の違いによる母岩内での移行率の差 が顕著になる可能性がある。このため、母岩中の様々な位置における粒子の移行経路を把握 するため、坑道から垂直方向のさまざま距離断面における最大移行率をリアライゼーション 別に比較を行った。坑道中心から主流動方向と垂直な断面を通過する非収着性粒子の最大移 行率を距離別で比較した結果を図 2.2.3-17 に示す。リアライゼーション間の最大移行率の差 は、処分れ堅置き・処分坑道横置きどちらの場合でも最大で1桁未満に収まっており、また 処分坑道中心からの距離によってその差が大きく異なる事はなかった。なお、他のリアライ ゼーションと比較して移行率が高い No.29 については、坑道から主流動方向の 100 m 下流ま で1本の高透水性亀裂が通過しているケースであり、この亀裂が粒子の主要な移行経路とな るため、坑道中心からのどの距離断面においても移行率はほぼ変わらない結果となった。



図 2.2.3-17 坑道中心からの距離別で比較した、粒子の最大移行率

さらに、各定置方式の違いによる母岩内での移行率の差を比較するために、リアライゼー ション No. 29 の大規模透水性亀裂が交差するケースと、このケースを除いたケース内で坑道 から主流動方向の 100 m 下流端での移行率が最大となるケース、最小となるケースの移行率 を図 2.2.3-18 に示す。定置方式の違いによる母岩中の最大移行率の誤差は最大で 3.11 倍程 度、最小で 1.0 倍程度、平均で 1.28 倍となり、亀裂の性状(リアライゼーション)の差異に 比べればわずかな誤差となった。ここで、各定置方式の違いによって移行率が変わらない原 因を分析するため、定置方式の違いによって母岩内での粒子の移行経路がどのように異なる のか分析した。定置方式の違いによる人工バリアからの移行率の誤差が最大となったリアラ イゼーション No.49について、各定置方式の母岩中での粒子の移行軌跡を図 2.2.3-19に示す。 図 2.2.3-19 を見ると、坑道から母岩への粒子の移行経路は異なるものの、坑道から 100 m 下流までの母岩内においては定置方式の違いによらず、粒子は母岩内に同じように広がって いる様子がわかる。また粒子の移行速度にも大きな違いが見られないため、定置方式の違い による母岩内での粒子の移行挙動に大きな差が出ないことが、最大移行率にも大きな差異が 出なかった原因と考える。



図 2.2.3-18 定置方式の違いによる粒子の最大移行率の比較



a. 処分坑道横置き

b. 処分孔竪置き

図 2.2.3-19 定置方式の違いによる粒子の移行経路の比較(リアライゼーション No.49)

これらの結果から、処分孔竪置き・処分坑道横置きといった定置方式の違いによる人工バ リア、母岩からの最大移行率の差は数倍程度となった。一方、母岩内の亀裂の性状(リアラ イゼーション)の違いによる母岩内での最大移行率の変動範囲は1桁程度となり、亀裂の性 状の違いによる移行率の差異と比べると定置方式の違いによる移行率の差が小さい結果とな った。

2) 定置方式と地下水の主流動方向の違いに着目した局所的な移行経路や移行率の評価

① 核種移行の概念モデルと三次元水理・物質移行モデルの作成および解析データ

坑道の建設に当たっては、処分場領域の岩盤中の主応力方向と直交する方向に処分坑道や 上部坑道を掘削することが力学的安定性の観点から求められる場合や、処分後の長期的な時 間変遷の中で地質環境が変化し主流動方向が変化するような場合、処分坑道(または上部坑 道)周辺における EDZ などの比較的透水性が高い領域が核種の移行経路となる可能性がある。 定置方式の違いによってこのような比較的透水性の高い領域の構造が異なると考えられるこ とから、核種の移行経路や移行率の差異が顕著になる可能性がある(図 2.2.3-12)。この事か ら、主流動方向が処分坑道または堅置きの上部坑道と平行する場合について、坑道近傍にお ける粒子の移行経路や移行率が変化するか分析を行った。なお、こうした坑道周辺の比較的 透水性が高い領域の下流端をどう扱うかによって移行挙動は異なる事が推測されるが、本検 討においては直接処分第1次取りまとめを参考に主流動方向の下流側に主要坑道を配置し、 主要坑道周辺の支保工が劣化し高透水性となっていると仮定した。このため、横置きの処分 坑道および堅置きにおける処分孔の上部坑道周辺における EDZ などの比較的透水性が高い領 域は、主要坑道周辺まで連続するモデルを作成した。

図 2.2.3-12 に示すように、処分孔堅置き、処分坑道横置きどちらのモデルでも廃棄体から 放出された核種はまず緩衝材に至り、主に拡散で緩衝材中を移行する。処分坑道横置きの場 合には、その後 EDZ へ移行するが、主流動方向が EDZ と平行しているため、処分坑道の下流 端まで EDZ 内を移行し、主要坑道周辺の EDZ と交差する亀裂から母岩へ移行すると想定され るが、処分孔堅置き方式の場合はほとんどの粒子は緩衝材から直接堅孔周辺の母岩へ移行し、 上部坑道周辺の EDZ や支保工劣化部を通らないため、定置方式の違いによる移行経路の違い が顕在化すると考えた。これらの想定に基づき、三次元水理・物質移行解析モデルを作成し た。なお、母岩については 1)と同様に結晶質岩(花崗岩)を想定し、また、地質環境条件の 時間的変遷に伴う地下水の主流動方向の変化は考慮しない。主要坑道の幾何形状については、 処分坑道横置きにおける主要坑道の幾何形状は直接処分第1次取りまとめの1方向通行の設 定を、処分孔堅置きにおける主要坑道の幾何形状は参考となるデータが無かったため、(原子 力機構, 2016)の地下施設の概念設計で検討された坑道擦り付け部の仕様を用い、それ以外 の坑道などの幾何形状は 1)と同じとした。解析コードについても 1)と同様、ランダムウォー ク法による三次元核種移行解析コード Partridge を用い、非収着性粒子を廃棄体から瞬時放 出した移行率を 1)の結果と比較した。

2 解析結果

各定置方式において、1)で実施した坑道と主流動方向が直交する場合と、主流動方向が平 行する場合の移行率の比較を図 2.2.3-20 に示す。1)の主流動方向が坑道と直交する場合の解 析結果は、50 リアライゼーションの平均移行率を示しており、母岩からの平均移行率は高透 水性亀裂を含むリアライゼーション No.29 の影響を大きく受けているため、主流動方向が坑 道と平行する場合と比べ、早い時間に粒子が母岩に到達し高い移行率を示しているものの、 人工バリアから母岩、坑道から 100 m 下流側からの天然バリアからの移行率は主流動方向の 違いでは、ほぼ変わらない結果となった。そこで、これら4ケースについて最大移行率を比較したが(図 2.2.3-21)、主流動方向、定置方式の違いによる最大移行率に顕著な差が出ない結果となった。



図 2.2.3-20 主流動方向の違いによる移行率の比較



図 2.2.3-21 主流動方向が異なる場合の定置方式の違いによる最大移行率の比較

処分坑道横置きにおいては、坑道が主流動方向と平行する場合、処分坑道周辺の EDZ が粒 子の移行経路となり、処分孔竪置きとは異なった移行率になると想定していたものの、定置 方式の違いによる最大移行率にはほとんど差が見られなかった。この原因を調べるため、処 分坑道横置きにおいて主流動方向が坑道と平行する場合の、廃棄体からの粒子の移行軌跡を 分析した。図 2.2.3-22 に処分坑道内で地下水の最下流側の廃棄体から放出される粒子を緑色 で、最上流側からの粒子を紫色で示す。図 2.2.3-22 を見ると、地下水の上流側の廃棄体から の粒子は処分坑道周辺の EDZ を直線的に通らず母岩内に移行していることがわかる。また地 下水の下流側の廃棄体においては直接 EDZ 内を移行せず EDZ に沿って移行している粒子も見 られる。さらに、主要坑道から下流側では直線的な移行経路とならず、母岩内で様々な移行 経路を通っていることがわかる。このように、地下水の主流動方向が坑道と平行する場合で も処分坑道周辺の EDZ が主要な移行経路にならなかったことが、定置方式の違いによる移行率の差異が顕在化しなかった要因であると考えられる。



図 2.2.3-22 地下水の主流動方向が処分坑道と平行する場合の粒子の移行経路

これらの結果から、地下水の主流動方向と坑道周辺の比較的透水性が高い領域が平行する ようなケースにおいても、廃棄体定置方式の違いによって最大移行率がほとんど変わらない 事がわかった。

なお、平成28年度の検討では亀裂の状態や流動方向の違いのみに着目したが、そのほかに も EDZ 内の流量、埋め戻し材や母岩の平均的透水性の設定などが、定置方式の違いによる核 種の移行経路や移行率などの差を発生させる可能性も考えられるため、これらを含めた三次 元水理・物質移行解析の拡充などを通じて、局所的な設計オプションの違いによる影響の有 無や発生条件等の知見を取りまとめることが必要である。

(4) 設計オプションの増加や仕様の明確化などを踏まえた検討課題の再整理

本項目では、設計オプションの差異を閉じ込め性能評価上取り入れるために考慮すべき現 象を「検討課題の候補」、検討課題の候補に対して考察を加え、本検討で取り扱う優先度が高 いと考えられた課題を「検討課題」とし、また本事業当初からの進展を踏まえたこのような 検討課題の整理を「再整理」とする。

本事業における処分場の設計検討の中では、直接処分第1次取りまとめから設計オプショ ンの充実やそれらの仕様の具体化が行われており、事業開始当初に比べて、検討の候補とな る設計オプションの種類が増加している。さらに、それら設計オプションの仕様についての 定量的な情報なども増加してきていることから、それらを考慮することにより新たな検討課 題や既往の検討への修正が生じる可能性が考えられる。

上記の考えから、本検討では設計オプションに応じた閉じ込め性能評価を実施するに当た

っての検討課題を抽出することを目的とした。平成27年度までの設計検討の成果を踏まえ、 検討の対象となる設計オプションを整理した上で、設計オプションの違いが閉じ込め性能に 与える可能性のある影響の定性的な分析を既往の閉じ込め性能評価に関する知見なども参考 にしながら行うとともに、検討課題の再整理を行う。再整理された検討課題は、今後の研究 における具体的な検討候補となるとともに、これまでの検討に対して妥当性を与え、あるい は必要に応じた方針修正を行う上での参考となるものと考えられる。

本検討では、まず再整理に当たっての検討の進め方を示すとともに、検討対象とする設計 オプション、安全機能、地表・地質環境を整理する。次いで、設計オプションによる閉じ込 め性能の差異を考察する観点として、それらが安全機能に及ぼす影響を検討することとする。 また、特定の地表・地質環境条件によって設計オプションの差異による影響が新規に発生、 あるいは顕著化することが考えうることから、地質環境条件の違いに基づく設計オプション の閉じ込め性能への影響を検討する。これらの検討より抽出された検討課題の候補に対し、 閉じ込め性能への影響や既存の知見の有無、他の研究においてに検討が実施されているかな どを整理し、検討課題として取り扱う優先度を考察する。

以下、1)に検討の進め方の、2)に本検討で抽出された検討課題の考察を示す。再整理の詳細は付録1に記載する。

1)検討の手順と結果

設計オプションの違いに由来する閉じ込め性能上の検討課題を整理するにあたっては、詳細な定量的解析を行う前に、まずは検討対象とする設計オプションおよび地質環境の組み合わせに対して定性的な分析を行い、検討課題の候補を絞り込むことが効率的と考えられる。 この様な観点からの閉じ込め性能に関する検討課題の再整理の手順を図 2.2.3-23 に示す。

ここでは、まず、諸外国における使用済燃料直接処分に関する設計オプションおよび直接 処分第1次取りまとめ以降、主として本事業で検討を行ってきた種々のオプションについて 整理を行う。また、これらのオプション間の比較に際しては、設計オプションの違いによる 閉じ込め性能への影響の差異を安全機能の観点から考察するとともに、特定の地表環境や地 質環境において設計オプションの違いによる閉じ込め性能への影響の差異が顕著化する可能 性があるため、着目すべき

安全機能

地表環境および地質環境の多様性

を整理する。

具体的には、まず、検討の対象とする設計オプションを、本事業の過去の報告書などから 整理する。また、設計オプションの違いによる閉じ込め性能への影響を検討する際の着目点 として、上記に挙げた安全機能および地表・地質環境の多様性を整理する(付録1の1.検 討の前提の整理)。ここで、各安全機能はそれに関連する様々な THMCR (Thermal-Hydrological- Mechanical-Chemical-Radiological)の条件により規定されるも のと考え、このような条件を安全機能に影響を及ぼす状態変数として定義し、安全機能ごと に整理した状態変数に関して設計オプション間で差異を生ずる可能性のある影響を網羅的に 抽出し、検討課題の候補とする(付録1の2.1安全機能の観点から見た設計オプションの差 異による検討課題候補の抽出)。この整理では、直接処分第1次取りまとめの基本シナリオに おける地質環境を基本仕様として想定する。また、我が国において考慮すべき地表および地 質環境の多様性に関しても整理を行い、安全機能の観点から抽出された検討課題の候補を踏 まえ、地表・地質環境条件によって顕著化する可能性のある影響を検討し、検討課題の候補 を抽出する(付録1の2.2地表・地質環境条件の多様性の観点から見た設計オプションの差 異による検討課題候補の抽出)。

その上で、影響の大きさや現状での知見の充足度などを勘案しつつ(表 2.2.3-5)、検討課題の候補を考察し、検討する優先度の高いと考えられる検討課題を提示する(付録1の(2)3) 既存の知見に基づく検討課題候補の優先度の検討)。



題の再整理の手順

指標	区分	優先度の取扱い
既往の研究	〇:影響が大きい可能性がある	⇒検討の優先度は高い
による影響	△:影響は顕著でないと考えられる	⇒検討の優先度は低い
の大きさ	不明:影響を論じている文献が	⇒影響が小さいと言い切れな
	見当たらない	いため、優先度は高いとする
知見の	〇:定量的評価を行うための情報あり、評	⇒既往の知見を利用できる
充足度	価事例あり	ため、検討の優先度は低い
	△:定性的情報のみ、または定量性に	⇒検討の優先度は高い
	不確実性あり	
	×:情報なし	⇒検討の優先度は高い

表 2.2.3-5 検討課題の候補の優先度の判断基準

以上の再整理により、安全機能の観点からの検討課題の候補が20、地表・地質環境条件の 観点からの検討課題の候補が14抽出された(表2.2.3-6)。また、これらに対して優先度の 判断を行い、優先度が高いと考えられた検討課題を安全機能の観点から8、地表・地質環境 条件の観点から11抽出した。これらの検討課題の中から以下に数例挙げる。

	検討課題の候補/検討課題		検討課題の候補/検討課題
安①	燃料タイプによる発熱量及び放射線強度の差異の影響	地①	寿命が異なる処分容器オプション間での塩淡環境変遷の影響 程度の差異の影響
安②	中間貯蔵中の燃料棒の破損による処分後の核種溶出抑制機能低下の影響	地②	長寿命処分容器の場合の隆起・侵食による処分場露出時の影響の差異
安3	処分容器の寿命の相違による開口時の燃料近傍の環境条件の差異の影 響	地③	廃棄体定置方法による低頻度の透水性割れ目との交差回避可 能性の差異の影響
安④	ベントナイト密度の高い緩衝材を用いることによる安全機能の向上の影響	地④	廃棄体竪置き方式の場合の緩衝材から上部坑道埋め戻し材への拡散による核種移行の影響
安⑤	緩衝材定置方式による施工時の不具合の可能性や安全機能への影響程 度の差異の影響	地⑤	廃棄体多段配置による処分場露出時の影響低減の影響
安⑥	坑道掘削方法による卓越移行経路形成の可能性の差異の影響	地⑥	廃棄体多段配置・パネル小型化による断層等との交差回避の 影響
安⑦	廃棄体定置方法によって生じ得る緩衝材施工不良に起因する安全機能の 差異の影響	地⑦	袋小路の坑道レイアウトによる断層等との交差の回避の影響
安⑧	廃棄体定置方法による水平坑道周辺の連続した高透水性領域の核種移行 に与える差異の影響	地⑧	坑道支保材質による海水系地下水の影響の差異
安⑨	処分孔内多段配置の場合の緩衝材施工不良の影響	地⑨	処分場の汀線との位置関係による塩淡環境変遷の差異の影響
安⑪	処分孔内多段配置の場合のEDZからの離隔確保による安全性向上の影響	地10	処分場深度による地表露出時期の差異の影響
安⑪	袋小路の坑道形状による卓越流路形成の回避の影響	地①	処分場深度による地温勾配の差異の影響
安⑫	支保材質として低アルカリセメントを用いることによる緩衝材変質の抑制の 影響	地12	処分パネル多層化による処分場露出時の影響低減の影響
安⑬	支保材質として低アルカリセメントを用いた場合の坑道周辺の高透水性領 域形成の可能性の変化の影響	地(13)	処分パネル多層化による断層等との交差の回避の影響
安14	支保材質として低アルカリセメントを用いた場合の坑道周辺の岩盤への化学的影響の抑制の影響	地14	地下水流向と坑道が平行の場合の塩淡境界移動へのEDZ等の 影響
安⑮	アクセス坑道の方式による坑道短絡シナリオの影響の差異の影響		
安⑯	処分場位置による塩淡境界移動の差異の影響		
安⑪	処分場の汀線との位置関係による地下水流動状況の差異の影響		
安18	処分場深度による温度の差異の影響		
安19	処分場深度による岩盤割れ目分布や性状の差異の影響		
安20	地下水流向と坑道が平行の場合のEDZ等の影響		

表 2.2.3-6 再整理により抽出された検討課題の候補および検討課題

※優先度が高いと考えられる検討課題を青でハッチングしている。

- 安⑳ 「地下水流向と坑道が平行の場合の EDZ 等の影響」
 - ・設計オプション:地下水流向に対する坑道配置(直交、平行)
 - ・安全機能:坑道に沿った卓越移行経路形成の回避
 - ・状態変数:EDZ に沿った地下水流動
 - ・概要:坑道力学的安定性等の観点から地下水主流動方向と平行に坑道を掘削する設計 オプションでは、坑道周辺の EDZ および劣化後の支保等の連続した比較的透水 性が高い領域が卓越した流路となる可能性があるが、坑道が流れと直交するオ プションではこのような状況は生じにくい。
 - ・坑道近傍スケールの検討内容:坑道周辺の EDZ や劣化支保等の連続した比較的透水性 が高い領域に沿って顕著な地下水流動が生ずる場合の

処分場スケール地下水流動

・広域スケールの検討内容:地形や海水準変動によって規定される将来の広域地下水流 動場における処分場付近での地下水流動方向

- ・影響の大きさ:不明(具体的検討事例なし)
- ・知見の充足度:△(定性的な情報のみ、あるいは定量的な評価に大きな不確実性が含まれる)
- ・他研究での取り組み:×
- ・検討課題として取り扱う優先度:高い
- 地⑭ 「地下水流向と坑道が平行の場合の塩淡境界移動への EDZ 等の影響」
 - ・設計オプション:地下水流向に対する坑道配置(直交、平行)
 - ・地表・地質環境:地理、岩種、母岩透水性、地下水水質
 - ・概要:地下水主流動方向が坑道に平行な場合 EDZ に沿って連続した流路が形成されるが直交する場合には回避される。このため、処分場領域を塩淡境界が横断する際の影響の進展が異なる可能性がある(後者の場合には坑道毎に塩淡環境が切り替わるのに対して、前者の場合は EDZ 等を介して塩淡境界が速やかに移動するなど。このような影響は、母岩中の塩淡境界の移動速度との差異によって生ずるため、母岩の透水性や割れ目頻度に依存するものと考えられる)。
 - ・坑道近傍スケールの検討内容:坑道周辺の比較的透水性が高い領域に沿った塩淡境界の速やかな移動およびそれがバリア材料劣化や核種移行挙動に及ぼす影響
 - ・広域スケールの検討内容:広域の密度流における処分場周辺の塩淡環境の切り替わり 時期や環境条件の変遷挙動等
 - ・影響の大きさ:不明(具体的検討事例なし)
 - ・知見の充足度:△(定性的な情報のみ、あるいは定量的な評価に大きな不確実性が含まれる)
 - ・他研究での取り組み:×
 - ・検討課題として取り扱う優先度:高い

2)本検討で抽出された検討課題の考察

本検討では詳細化・具体化された直接処分の設計オプションと安全機能および地表・地質 環境条件の観点から、今後検討対象となりうる検討課題を抽出した。

これらの再整理を踏まえると、平成28年度の実施内容における(2) 広域的な設計オプショ ンの閉じ込め性能評価手法の整備での実施内容は、安⑮、安⑰、安⑲、および地⑨の検討に 含まれているものと考えられ、安⑯以外は優先度の高いと考えられる検討課題である。また、 (3)局所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備での実施内容は、安⑧、安⑳、地 ③、および地④の坑道近傍スケールで検討すべき事項に含まれているものと考えられ、安⑧ と安⑳は優先度の高い検討課題である。

再整理で抽出された、新規の(直接は平成28年度の実施内容に対応しない)検討課題は、 大きく以下のように区分されるものと考えられる。

- ・緩衝材の定置方式や廃棄体の定置方法による緩衝材施工不良の可能性およびそれによる 緩衝材性能の低下の影響(安⑤、安⑦、安⑨)…これらの施工不良においてどの程度緩 衝材密度が低下するかを検討した上で、その緩衝材密度に基づく透水性の差異を三次元 核種移行解析に反映することにより、これらの影響による人工バリア内の移行経路や移 行速度を検討できると考えられる。
- ・処分孔内多段配置の場合の EDZ からの離隔距離確保による安全性向上の影響(安⑩)…
 処分孔竪置きの場合、EDZ との離隔が大きくなるが周辺母岩への移行が増加することで
 移行率に大きな差はないことが本年度の(3)で示されている。廃棄体の処分孔内多段配置の場合についても、処分孔を長くし、廃棄体を縦に複数置いた体系で解析を行うことで
 考察できるものと考えられる。
- ・袋小路の坑道形状による卓越流路形成の回避の影響(安⑪)…処分坑道を袋小路とすることで、連続した EDZ の形成を避けることが出来る可能性がある。これについても、(3)と同様に袋小路の坑道と貫通坑道の三次元核種移行解析における粒子の移行経路の違いを見ることで、定量的に議論が可能と考えられる。
- ・処分容器の開口時期の違いによる移行経路などの差異(地①)…広域的な密度流解析の時間軸において、処分容器材料に応じた容器開口時期を設定し、流線を解析して核種移行モデルに反映することで検討が可能と考えられる。本検討課題は、先行的に(2)の考察で検討を試みた。
- ・設計オプションによる地表接近・露出時の影響の差異(地②、地⑤、地⑩、地⑫)…直接処分第1次取りまとめにおいても評価期間を超える補完的な検討として地表接近・露出時を検討しており、その検討の延長線上で検討する価値があるものと考えられる。他方、基本シナリオにおける地下水シナリオと異なること、深度や隆起・侵食速度の大きさによっては評価期間(直接処分第1次取りまとめでは100万年)中に有意な影響が生じるかが異なることを踏まえて検討の要否を判断する必要がある。
- ・廃棄体の定置方式・多段化等による亀裂や断層との交差頻度の変化の影響(地③、地⑥)
 …廃棄体の多段配置やパネルを小型化することで高透水性構造と坑道の離隔を取ることによる移行抑制効果を検討する。このような検討は、平成28年度実施した坑道近傍の検討を利用し、坑道との亀裂交差頻度の低い場合と高い場合の比較を行うことで考察できる可能性がある。
- ・ 坑道レイアウトやパネルの多層化等によって坑道と断層との距離が違うことによる天然 バリア性能の差異(地⑦、地⑬)…坑道と断層の距離という観点は、平成28年度に(2) で実施した処分場の断層との距離の結果に包含される可能性がある。
- ・塩淡境界の変化への応答速度が異なることによる坑道内の環境条件が、坑道と地下水流 動方向が同じ向きか異なる向きか(最も異なるのは垂直の場合)によって坑道周辺の比 較的透水性が高い領域の形状や連続性が異なることによる差異(地⑭)…平成28年度に
 (2)で実施した塩淡境界の変化を、坑道内の化学環境の変化の境界条件として利用できる と考えられる。

以上より、平成28年度に(2)や(3)で実施した検討は、再整理により抽出された検討課題に 対応している。今後、(2)や(3)と関連性のある、あるいは部分的に同様の技術を用いること のできる検討課題については平成28年度に実施した(2)、(3)での内容や技術を活用して検 討を進める。また、これらに含まれない新規の検討課題検討についても、取り組みの必要性 や優先度についての検討を進める。

2.3まとめ

(1) 先進的な材料の開発(2.1 節参照)

・金属ガラスの物理化学的特性に関する検討

Ni-Ti-Nb系を対象として状態図計算を行いNi 基合金データベース(TCNI8)の検証を行っ た。その結果、本計算結果は、特にNi リッチ側を中心として、総合的に実験状態図を正 しく再現することが可能であることが分かった。時間 - 温度 - 変態図の計算とその結果に 基づく金属ガラスの平衡論の観点から、金属ガラスの粘性の温度依存性データの調査を行 い、Fe 基および Cu 基合金について新規粘性データを整理した。また、局所原子構造とし てネットワーク構造が発達した金属ガラスは、熱的に安定であるため、人工バリア材とし て適していることが示された。ガラス形成能の評価因子として、従来のδパラメータ、平 成 27 年度に評価を行ったΩパラメータに加えて、新規にγパラメータの有用性を評価し た。その結果、γパラメータとδパラメータの正の相関を確認し、γパラメータを利用し た評価が妥当であることが示された。

今後は、溶射に適用する Ni 基合金や新規 Ni 基アモルファス合金の Ni 基合金データベー ス(TCNI8)を用いて熱力学計算による、ガラス形成能の高い合金組成の予測等が課題であ る。また、時間 - 温度 - 変態図によるアモルファス相の安定性の評価については、粘性の 温度依存性データの収集とデータベース化に向けた調査を引き続き行う必要がある。原子 寸法差、混合エンタルピー等の評価については、従来のδパラメータおよび混合エンタル ピーに加え、γパラメータ等の新規パラメータによる評価を実施し、ガラス形成能を評価 するための合理的なパラメータを検討することが課題である。

・金属ガラスの溶射コーティングへの適用性

厚さ3.0mmまでの厚膜のNi-Cr-Nb-P-B金属ガラスの溶射コーティングを急冷フレーム溶 射により実施し、ガン内部のクリーニング等を実施する等の施工パターンの調整により、 良好な溶射膜の形成が可能であることがわかった。また、異形状として、30mm 角 2mm 厚 のすきま腐食試験片および外径 14mm φ の鋼管への溶射を試み、手動による溶射を組み合 わせた施工では溶射が可能であることを確認した。さらに、平成 27 年度に作製した膜厚 1mmのNi-Cr-Nb-P-B金属ガラス溶射コーティングについて、pH3 に調整した 40g/L の NaCl 水溶液での浸漬試験を行い、浸漬後 6 ヵ月でも、表面プロファイル測定、光学顕微鏡によ る表面観察および浸漬液分析に腐食の形跡はなく、高い耐食性を有していることが確認さ れた。

今後は、超長寿命の処分容器への適用に向けての更に厚い溶射膜の形成のための溶射条件の最適化等の検討を行うとともに、曲面への対応など処分容器形状の特徴を考慮した施 工への適用性を引き続き検討することが課題である。

・金属ガラスアトマイズ粉末による耐食性評価試験

平成 26 年度より実施している金属ガラス粉末(Zr 基、Ni 基、Cu 基)を用いた元素浸出 に関する腐食試験を継続した。また、平成 27 年度より開始した、耐食性が高いとされて いる従来の合金材料(SUS316L およびハステロイ C276)を用いた試験についても継続実施 した。これまでの試験結果からは、いずれの金属ガラス材料もガラス形成能を損なうよう な元素浸出は生じておらず、各々の材料特性が安定に保たれていると考えられる。また、 SUS316L とハステロイ C276 についてはいずれも Cr が有意に浸出しており、Ni 基金属ガラ スと比べると Cr の浸出が比較的速いと言えることから、微量の構成元素浸出が認められ る Ni 基金属ガラスも、SUS316L やハステロイ C276 と比較すると、同等以上の高い耐食性 を有していることが示唆された。また、試験後の各金属材料について行った SEM による外 観観察および EDS による元素比率分析では、金属ガラスについては目立った変化は確認さ れなかった。

今後は、より長期の元素浸出に関する腐食試験を継続して実施し、元素の浸出挙動や表 面状態の変化を確認する必要がある。

・Ni 基金属ガラス溶射膜の局部腐食試験

炭素鋼試験片に金属ガラス Ni₆₅Cr₁₃Nb₂P₁₆B₄を溶射した試料を用いて 0.5~3 M の NaCl 水溶液中で動電位アノード分極測定を行った。すきまなしの試験片では水が安定な電位領 域で孔食発生は認められなかった。孔食電位を指標とした場合にはステンレス鋼 SUS316L よりも高い耐食性を有すると考えられる。試験片の両面に溶射したすきま付きの試験片を 用いた動電位アノード分極試験ではすきま腐食の発生は認められなかったものの、片方の 面の溶射膜に亀裂と腐食が観察され、両面に溶射(実際の施工では片面溶射)したことに よる過剰の熱サイクルやヒューム付着による影響の可能性が考えられた。

今後は、より実際の施工に近い条件(片面溶射)で溶射した試料等を用いた耐食性評価が必要である。

(2) 閉じ込め性能評価手法の高度化:人工バリア材料の閉じ込め性能の評価に関する研究 (2.2.1項参照)

・処分容器材料の腐食挙動

炭素鋼表面皮膜中の酸化性物質の物質移行に基づく炭素鋼の腐食モデルによる腐食挙動の予測のためには、実際に皮膜を形成させて腐食に寄与する化学種の移行特性を実測する必要があるため、実際の環境で生じる皮膜に近い皮膜の迅速な形成方法を検討するとともに、形成した皮膜中の物質移行特性評価を試みた。その結果、424K(沸点)の酸化剤含有NaOH 水溶液中に浸漬することによって低酸素濃度下で代表的な Fe₃O₄が Fe 表面に形成可能であることがわかった。この水溶液中に浸漬して形成した皮膜に対する D₂O 浸透試験を行い、D₂O の浸透時間と浸透量の関係を拡散に関する理論に基づいて解析した結果、本皮膜に対する D₂O の拡散係数が 5.6×10⁻¹⁵~2.0×10⁻¹⁴ cm⁻² s⁻¹の範囲に存在すると推定された。

緩衝材を模擬した圧縮ベントナイト中の炭素鋼の腐食挙動の調査として、緩衝材中に おける炭素鋼の腐食速度やベントナイト/炭素鋼界面状態をモニタリングするうえで有 力な手法である交流インピーダンス法を用いて、ベントナイトのかぶり厚さ(量)による腐 食速度の違いや界面状態とその経時的な挙動の違いを調査した。その結果、腐食速度は初 期の約1週間は減少し続けたが、その後は約2×10⁻⁷A cm⁻²(約2m y⁻¹)で一定となった。 これは低酸素濃度条件での炭素鋼の腐食速度として妥当な値と考えられ、また、ベントナ イトのかぶり厚さ(量)には依存しなかった。

純銅の微小の腐食速度をモニタリングする手法として、レジストメトリー法を用いた 測定を試みた。milli-Q水中、milli-Q水で膨潤させたベントナイト中および 1M NH4C1水 溶液で膨潤させたベントナイト中で測定を行った結果、0.29~4.1µm y⁻¹の腐食速度が得 られ、10⁻¹µm y⁻¹オーダー程度の腐食速度に対して本手法によるモニタリングの適用可能 性が示された。

これまでの低ひずみ速度試験法(SSRT)による評価ではベントナイト中で典型的な変色 皮膜型応力腐食割れを生じたが、実際の処分容器でこのような荷重条件がもたらされるこ とは考えにくいことから、所定のひずみで引張を打ち切る SSRT 試験および静的なひずみ を付与した試験を実施した。その結果、静的ひずみ下で応力腐食割れの発生は観察されな かったが、局部的 Cu0 の生成が確認され、静的ひずみ下での応力腐食割れ発生の可能性は 否定できないことがわかった。

純チタン、Ni 基合金(C276)、純銅を対象に、耐食性への放射線の影響を電気化学測定 により調査した。いずれの材料もガンマ線照射下の方が貴となった。また、いずれの材料 も照射によってカソード電流が増加し、純銅は特に高 pH の水溶液中でのガンマ線照射に よるカソード電流の増加が顕著であった。一方、Ni 基合金は、他の材料と比較してガン マ線照射によるカソード電流の増加が比較的軽微であった。

今後、処分容器候補材料の腐食挙動について引き続きメカニズム解明などを進めると ともに、閉じ込め期間の長期化について評価を行う必要がある。

・人工バリア性能への微生物影響評価

処分容器の腐食における微生物影響評価手法の技術開発に資するため、より処分環境 に近い条件として緩衝材(ベントナイト/ケイ砂圧縮体 1.0 g cm⁻³, 1.6 g cm⁻³)内に設 置した炭素鋼片の腐食試験を、腐食微生物群集 VMC 存在下と非存在下で行い、下記の結果 を得た。

1年の長期試験結果より、圧縮密度 1.0 g cm⁻³、培養温度 30°C の条件では圧縮ベント ナイト内の炭素鋼片の腐食が 6ヶ月から 1年の間で急速に進行した一方で、圧縮密度の高 い条件(1.6 g cm⁻³)や温度の高い条件(50°C)では 10 mg y⁻¹程度に腐食が抑制され、 腐食反応は緩やかに進行することが明らかとなった。本試験から、圧縮密度の低い試料の 方が腐食が進んでいる傾向が見られたことから、処分環境において圧縮密度が低下した場 合には微生物による腐食影響を考慮することが必要となる可能性が示唆された。今後、こ のような腐食速度が促進される要因とメカニズムについてのより詳しい評価を進める必 要がある。

また、浸漬液や気相の分析から硫酸還元菌、酢酸生成菌やメタン菌が浸漬液中で増殖 していることや、ベントナイト内で嫌気性微生物が生存していることが培養試験から示さ れたが、炭素鋼近傍の化学組成分析の結果からは、本試験で生じた腐食は、微生物による 硫酸還元反応が主要な反応であったと推定される。一方で、酢酸生成菌やメタン菌の腐食 への関与の解明は十分になされていない。そのため、引き続き、これらの微生物群集が関 与する腐食メカニズムの理解を進める必要がある。

・緩衝材中の C-14 移行挙動試験

C-14 の化学形態の違いによる人工バリアや岩盤中での収着拡散挙動の変化について把握するため、酢酸イオンの拡散挙動の乾燥密度による違いを検討するために実効拡散係数の取得を行うとともに、既報値のあるイオンの例としてヨウ化物イオンの実効拡散係数との比較を行った。その結果、酢酸イオンとヨウ化物イオンの実効拡散係数の絶対値には違いがあるものの、両イオンの形状因子はほぼ同一の値を示すことがわかった。このことから、酢酸イオンの実効拡散係数は、同じ乾燥密度で取得されたヨウ化物イオンの実効拡散係数の既報値から推算できることが示唆された。

今後は、エタノールや酪酸による拡散試験を実施し、C-14の拡散挙動に対する化学形態 および分子量の影響についての評価を行う。

・銅とベントナイトの相互作用に関する調査

E縮ベントナイト試料と銅試験片を接触させ、その状態のまま、微量の Na₂S を含む人工 海水によって銅を 30 日間腐食させた結果、銅との接触面付近で圧縮ベントナイト中の Cu の濃度が上昇した。上昇が見られた範囲は、接触面から数百 m 程度であり、Cu の一部が ベントナイト中に移行したと考えられた。表面分析による接触面近傍の元素マッピングお よび元素存在比の結果から、Cu を含む化学形態は、接触界面では Cu₂S であり、界面から 少し離れた圧縮ベントナイト中では CuS であることが示唆された。

今後は、より長期の試験を実施して圧縮ベントナイト中での銅の存在形態についてより 詳細に調査にするとともに、ベントナイトを構成する鉱物の変質挙動についても調査する。

(3) 閉じ込め性能評価手法の高度化:使用済燃料の閉じ込め性能に関する研究(2.2.2 項参 照)

・被覆管からの C-14 の放出量および化学形態の調査

被覆管中の C-14 インベントリの評価については、ジルカロイ材料中の初期の窒素不純物 濃度の設定を、従前の 80 ppm (H12 レポート, 第 2 次 RTU レポートおよび直接処分第 1 次 取りまとめでの採用値)から 40 ppm に変更することが現実的であると判断した。これによ り、閉じ込め性能評価で対象とすべき被覆管中の C-14 インベントリは減少する。

被覆管からの C-14 の瞬時放出割合の設定については、酸化膜の厚さや酸化膜中の C-14 インベントリの測定結果を根拠に、直接処分第1次取りまとめにおいて設定した 20 %を 下方修正できる可能性が見いだされた。しかしながら、被覆管内面の酸化膜の生成が確認 されるなど瞬時放出割合が高くなる要因も新たに見出されており、これらを総合し、現在 の設定値のままとすることが妥当であると判断した。

BWR 使用済燃料については、被覆管の酸化膜の厚さが PWR の場合より薄く、酸化膜中の C-14インベントリも小さいとする認識が国内外にあり、将来的に C-14の瞬時放出割合を、 PWR および BWR について個別に設定することが必要になることも考えられる。

今後は、国内で現在継続中のジルカロイの長期溶解試験の結果や、C-14の化学形態に関 する新たな知見について調査を継続する。

・国内の使用済燃料の FGR の検討

瞬時放出割合の設定において重要なパラメータ値である FGR(Fission Gas Release rate) については、国内向け FGR を、PIE (Post Irradiation Examination)の結果に基づき、PWR 燃料と BWR 燃料の設計仕様毎に個別の FGR を定め、それぞれの設計仕様毎の発生体数(推 計結果も含む)を用いて加重平均をとることで設定する手法を提案した。また、各々の燃 料仕様の集合体発生体数を仮定し、FGR の仮定値を算定した。その結果、国内 FGR は PWR と BWR で大きく異なる可能性があることが分かった。これらの違いの要因については、今 後調査する必要がある。

FGR 設定への燃料挙動に関するシミュレーション計算の適用性を検討するため、 FEMAXI-7 で用いられている計算モデルなどを諸外国の同様のコードと比較した結果、性能 は同等と考えられ、同コード(旧バージョン;FEMAXI-3 および 6)を用いて FGR を計算し た事例では、実際の FGR 測定結果と良好な対応が得られている。また、当時のバージョン から現在のバージョンまでに、コードの改良や高燃焼度への対応が行われており、FGR の 計算精度がさらに向上していることが期待されることからも、国内向け FGR 設定のための データ補完ツールとして活用することが可能であると考えられる。今後は、シミュレーシ ョン手法を活用することで、PIE でカバーされていない燃焼度および線出力密度などに対 応する FGR を補完することを試みる。

不確実性および燃料多様性に対応するための継続調査

ソースタームバラメータの暫定値の幅などの設定については、欧州諸国において瞬時放 出割合に対して与えられている確率密度関数や最大値に確たる根拠が少なく有用性に欠け ることから、平成27年度に設定した瞬時放出割合のパラメータの暫定値に対し、保守側の 最大値のみを付加することとした。たとえば、揮発性元素であるI,CsおよびC1の瞬時放 出割合については、FGRとの相関式に、上記「国内の使用済燃料のFGRの検討」で検討し たFGRの推奨値および最大値を代入して計算した。また、被覆管からのC-14の瞬時放出割 合については、燃料付着クラッドに含まれるC-14(一次冷却系統から持込まれるC-14)を 考慮して最大値を設定するなどを行った。

今後は、長期溶解速度のパラメータの暫定値(平成27年度に設定)に対して、不確実性 を反映した最大値の設定などの検討を行う。また、複数のソースタームパラメータが最大 値をとる場合の性能評価(被ばく線量)に与える影響など、不確実性の影響についての感 度解析等による分析を進める。

(4) 閉じ込め性能評価手法の高度化:多重バリアによる閉じ込め性能評価手法の構築(2.2.3 項参照)

・広域的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備

広域的な設計オプションのうち処分場の配置に着目し、処分場と塩淡境界あるいは処分 場と高透水性構造との位置関係の違いにより処分場領域や周辺での水理や地下水化学にど のような差異が生じえるか、さらにそれらが隆起・侵食および海水準変動によりどのよう に変わりえるかなどに着目した評価を行った。その結果、本検討による前提条件において は、移行率の最大値の違いは数倍程度であり、その違いは初期深度の差異(母岩透水係数 の深度依存性による地下水流速の違い)や海水準変動に伴う地下水流動の影響が想定した 処分場の位置に及ぶか否かの違い(影響の及ばない内陸か影響の及ぶ海域近傍かの違い) に起因すると考えられる。

今後は、処分場の配置に着目した検討の拡充(たとえば、初期深度の差異、海水準変動 の影響の位置による違い、現在に海域の海水準変動による将来的な陸化の有無(地形等に 依存)などの複数の要因の組合せ等を考慮)などを通じて、広域的な設計オプションの違 いによる影響の有無や発生条件等の知見を取りまとめることが必要である。

・局所的な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備

定置方式の違いによる核種の移行経路や移行率などの差が発生するあるいは顕著化する 条件などを把握するために、定置方式の違いによる影響が移行経路となり得る坑道周辺の 亀裂の状態(母岩の不均質性に着目し、統計に基づく複数リアライゼーションで表現)と どのように関係するか、また、定置方式による違いの影響が地下水の流動方向の違でどの ように変わりえるか(主流動方向が坑道に直交する場合と平行する場合での坑道周りの EDZ や支保工劣化部などの比較的透水性が高い領域の移行経路としての寄与が異なる可能 性)に着目し、三次元水理・物質移行解析を実施した。亀裂の状態については、定置方式 と不均質性の組合せにより移行経路に詳細な違いは生じるものの、人工バリアおよび母岩 外側からの最大移行率に顕著な差は生じなかった。また、地下水の流動方向についても、 EDZ や支保工劣化部などの移行経路としての寄与はそれほど大きくなく、最大移行率に顕 著な差は生じなかった。なお、平成 28 年度の検討では亀裂の状態や流動方向の違いのみ に着目したが、そのほかにも EDZ 内の流量、埋め戻し材や母岩の平均的透水性の設定など が、定置方式の違いによる核種の移行経路や移行率などの差を発生させる可能性も考えら れるため、これらを含めた三次元水理・物質移行解析の拡充などを通じて、局所的な設計 オプションの違いによる影響の有無や発生条件等の知見を取りまとめることが必要であ る。

・設計オプションの増加や仕様の明確化などを踏まえた検討課題の再整理

平成 27 年度までに充実および具体化されてきた設計オプションを対象に、設計オプショ ンの違いにより生じる可能性のある閉じ込め性能の差異の探索とそれに伴う検討課題の再 整理を、安全機能の観点および地表・地質環境条件の観点から行った。

その結果、抽出された検討課題の多くは、上記の広域的な設計オプションおよび局所的 な設計オプションの閉じ込め性能評価手法の整備での取り組みに包含される、あるいは関 連付けられることを確認した。また、それ以外の検討課題については、上記の取り組みへ の反映あるいは新たな研究課題としての取り組みの必要性や優先度の検討を進める。

- Andra (2005) : Référentiel de comportement des colis de déchets à haute activité et à vie longue, Andra Technical Report Dossier 2005, Réf. C. RP. ASCM. 04. 0017. A, p. 105 (in French).
- Bossis, Ph., Pecheur, D., Hanifi, K., Thomazet, J., Blat, M. (2004) : Comparison of the high burn-up corrosion on M5TM and low tin Zircaloy-4 alloy, 14th Int. Symposium Zirconium in the Nuclear Industry, Stockholm, 13-17 June 2004, ASTM STP 1467 (2006) pp. 494-525.
- C. Ferry, P. Lovera, C. Poinssot, and L. Johnson (2004): Quantitative Assessment of the Instant Release Fraction (IRF) for Fission Gases and under Geological Disposal Conditions. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 807, 35-40.
- CANDO Owner Group (COG) (2001): ELESTRES-IST 1.0: Theory Manual., COG Report COG-00-191. Toronto, Ontario.
- Daniels, L., Belay, N., Rajagopal, B.S., and Weimer, P.J. (1987): Bacterial methanogenesis and growth from CO2 with elemental iron as the sole source of electrons. Science, 237, 509-511.
- Danielson, M. J. (1995) : Effect of Gamma Radiation on Stability of Silver-Silver Chloride and Mercury-Calomel Commercial Reference Electrodes, Corrosion, Vol. 51, No. 6, pp. 450-455.
- Dehaudt, P., Dubois, S., Maguin, J.C., Huet, F., Pelletier, M., Lacroix, B., Pasquet,B., Guerin, Y., Hourdequin, N., Salot, R., Desgranges, L., Delette, G., Struzik,C. (2000) : Le combustible nucleaire et son etat physicohimique a la sortie des reacteurs. Rapport CEA-R-5923 (in French).
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.
- Dinh, H.T., Kuever, J., Mussmann, M. Hassel, A.W. Stratmann, M. and Widdel, F. (2004): Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. Nature, 427, 829-32.
- 腐食防食協会編(1993):材料環境学入門,丸善.
- Garisto, F., Gobien, M., Kremer, E. and Medri, C. (2012) : Fourth Case Study: Reference Data and Codes. TR-2012-08, NWMO.
- Garzarolli, F., von Jan R., Stehle, H. (1979) : The main causes of fuel element failure in water-cooled power reactors, IAEA-Atomic Energy Review, Vol. 17, n° 1, 31-128.
- Gaskell, P.H. (1979): New Structural Model for Amorphous Transition-Metal Silicides, Borides, Phosphides and Carbides, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 32, pp. 207-224.
- 原環機構 (原子力発電環境整備機構) (2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.
- 原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011):地層処分事業のための安全評価技術の開発(Ⅱ) -核種移行解析モデルの高度化-, NUMO-TR-10-10.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2013):平成24年度地層処分技術調 査等事業 TR 廃棄物処分技術ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発報告書(第3分冊) 一放射化金属廃棄物中のC-14の放出挙動評価一.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2014):平成25年度地層処分技術調 査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書(第2分冊)一炭素14長期放出挙 動評価—
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2016):平成27年度地層処分技術調 査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書(第2分冊) —炭素14長期放出挙 動評価—
- 原子力安全基盤機構(2001):平成12年度高燃焼度等燃料確証試験に関する報告書.
- 原子力安全基盤機構(2007):平成18年度 高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書(総合評価編),付録1および2を含む
- 原子力安全研究協会(1998):軽水炉燃料のふるまい(第4版)
- 原子力安全研究協会(2013):実務テキストシリーズ No.3 軽水炉燃料のふるまい(改訂第5版)
- 原子力発電技術機構(1987):昭和61年度燃料集合体信頼性実証試験に関する調査報告書
- 原子力発電技術機構(1999a):平成10年度 軽水炉改良技術確証試験(高燃焼度等燃料に関 するもの)に関する報告書.
- 原子力発電技術機構(1999b):高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書(BWR 高燃焼度燃料 総 合評価編)
- 原子力発電技術機構(2002):平成13年度 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2004):硫化物を含む人工海水中における純銅の腐 食挙動評価, JNC TN8400 2004-027.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2007):低酸素濃度環境における純銅の腐食挙動に 及ぼす硫化物の影響と銅オーバーパック寿命の超長期化の可能性, JAEA-Research 2007-022.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2014): 平成 25 年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」報告書
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015a):わが国における使用済燃料の地層処分シス テムに 関する概括的評価 -直接処分第1次取りまとめ -, JAEA-Research-2015-016.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015b): 平成 26 年度地層処分技術調査等事業 使用 済燃料直接処分技術開発 報告書
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2016):平成27年度地層処分技術調査等事業「直接 処分等代替処分技術開発」報告書
- GRAS, J.M. (2014) : State of the art 14C in Zircaloy and Zr alloys 14C release from zirconium ally hulls (D 3.1), EC, CArbon-14 Source Teem(CAST)

- Guerin, Y., D. Lespiaux, C. Struzik & L. 77 Caillot. (1999) : Behaviour of MOX fuel as compared to UO2 fuel. 78 Physics and Fuel Performance of Reactor-Based 79 Plutonium Disposition, NEA Workshop Proc., pp. 28-30, 80
- Guipponi, C. (2009) : Effets de la radiolyse de l'air humide et de l'eau sur la corrosion de la couche d'oxyde du Zircaloy-4 oxydé, Thesis, Lyon, December 2009 (in French).
- Hallstadius L. and B. Grapengiesser(1990) : Progress in understanding high burnup phenomena. n IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Performance at High Burnup for Water Reactors., IAEA, IWGEPRT-36, pp. 52-57
- 春名匠,山本達也,宮入洋志,柴田俊夫,谷口直樹,坂巻景子,立川博一(2015):大気中で Fe を高温酸化させた皮膜中への D20 の拡散浸透挙動,材料と環境, Vol.64, No.5, pp.201-205.
- Helie, M. (2004):Dossiers de synthese sur le comportement a long terme des colis:dossier de reference phenomenologique CSD-C 2004, CEA Technical Report, Ref. DPC/SCCME 04-685-A. (in French).
- 平野伸一,長岡亨,伊勢孝太郎,天野由記,松本伯夫(2015)土壌微生物群集によって誘引され る炭素鋼腐食とそのメカニズムの解析.材料と環境,64,535-539.
- Holcombe, S., Willman, C., Knuutila, A. and Ranta-Puska, K. (2009):Experimental fission gas release determination at high burnup by means of gamma measurements on fuel rods in OL2., Proceedings of Top Fuel 2009., pp. 135-143.
- Hume-Rothery, W., and Raynor, G.V. (1962): The structure of metals and alloys, Institute of Metals, pp. 1-380.
- Iglesias, F., Kaye, M., Lewis, B. (2011) : Estimate of instant Release Fractions Using ORIGEN-S and FEMAXI. NWMO, TR-2011-19.
- Iino, T., Ito, K., Wakai, S., Tsurumaru, H., Ohkuma, M. (2015): Iron corrosion induced by non-hydrogenotrophic nitrate-reducing Prolixibacter sp. MIC1-1. Appl. Environ. Microbiol., 81, 1839-1846.
- 稲垣伸夫(1971):アルカリ化成処理による鉄鋼の黒染皮膜の諸特性、金属表面技術, Vol. 29, pp. 251-255.
- Inoue, A., and Takeuchi, A. (2011): Recent development and application products of bulk
 glassy alloys, Acta Materialia, Vol. 59, pp. 2243-2267.
- 井上厚行,河野元治,桑原義博,小崎完,小峯秀雄,佐藤努,月村勝広(2004):高レベル放 射性廃棄物地層処分におけるベントナイト緩衝材変質現象に関する最近の研究と今後の 研究展開,粘土化学.
- 井上明久監修(2009):新機能材料 金属ガラスの基礎と産業への応用,テクノシステム, pp. 41-48.
- 石谷和己,柴田雅博,江橋健,若杉圭一郎,牧野仁史,蛯名貴憲(2015):直接処分研究のた めの使用済燃料の多様性を考慮したモデルインベントリ評価,日本原子力学会,2015秋, 予稿集 H46.

- 磯本良則, 松尾慎也(2012): SUS316L ステンレス鋼の孔食電位および孔食成長挙動に及ぼす 金属イオンの影響, 材料と環境, Vol. 61, No. 5, pp. 213-218.
- 岩瀬泰己, 岩瀬文夫(2010): コンクリートの基本と仕組み[第2版],株式会社秀和システム.
- Johnson, L. (2014) : A model for radionuclide release from spent UO2 and MOX fuel, Nagra NAB 13-37.
- 核燃料サイクル開発機構(1999a):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的 信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 核燃料サイクル開発機構(1999b):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的 信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.
- 核燃料サイクル開発機構(1999c):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的 信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- Kaneko, S., Tanabe, H., Sasoh, M., Takahashi, R., Shibano, T. and Tateyama, S. (2003): A study on the chemical forms and migration behavior of Carbon-14 leached from the simulated hull waste in the underground condition., Mat. Res. Soc. Proc., 757, 621-626.
- Kato, S., Yumoto, I., Kamagata, Y. (2015): Isolation of acetogenic bacteria that induce biocorrosion by utilizing metallic iron as the sole electron donor. Appl. Environ. Microbiol., 81(1):67-73.
- Kawazoe, Y.M., T.; Suzuki, K.; Inoue, A.; Tsai, A.-P.; J.-Z, Yu.; Aihara, T. Jr.,; Nakanomo, T. (1997): Phase Diagrams and Physical Properties of Nonequilibrium Alloys, Group III Condensed Matter., Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-295.
- Kienzler, B., Metz, V. and Valls, A. (2014): Fast/Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel FIRST-Nuclides, EUROPEAN COMMOSSION D-N° :5.13.
- 菊池 章 (1983): KWU/CE 燃料棒の PCI/SCC 挙動 (オーバーランプ計画研究成果), 旧;日本 原子力研究所 現;日本原子力研究開発機構, JAERI-M-83-173
- 菊池 章, 市川達生 (1981): インターランプ計画の研究成果, 日本原子力学会誌, Vol.23, No.7, pp.507-516.
- Kim, J., Dong, H., Seabaugh, J., Newell, S.W., Eberl, D.D. (2004): Role of microbes in the smectite to illite reaction. Science, 303, 830.
- King, F. (2009): Microbially influenced corrosion of nuclear waste containers. Corrosion, 65, 223-251.
- 高度情報科学技術研究機構,(1998);原子力百科事典ATOMICA,原子炉型別ウラン燃料 http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=04-06-01-03 (最終閲覧日:2017年1月31日)
- 高度情報科学技術研究機構,(2000a);原子力百科事典 ATOMICA,原子力発電技術の開発経緯

(PWR) http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=02-04-01-01 (最終閲覧日:2017年1月31日)

高度情報科学技術研究機構,(2000b);原子力百科事典 ATOMICA,原子力発電技術の開発経緯 (BWR) http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_Key=02-03-01-01 (最終閲覧日:2017年1月31日)

高度情報科学技術研究機構,(2000c);原子力百科事典 ATOMICA,最大線出力密度 http://www.rist.or.jp/atomica/dic/dic_detail.php?Dic_Key=1465

(最終閲覧日:2017年1月31日)

- Lassmann, K., Schubert, A., Van de Laar, J., & Walker, C.T. (2002). On the diffusion coefficient of caesium in UO2 fuel. Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA): Organisation for Economic Co-Operation and Development - Nuclear Energy Agency.
- Little, B.J., and Lee, J.S. (2007): Microbiologically influenced corrosion. Wiley series in Corrosion, R. Winston Revie, Series Editor, Wiley-Interscience.
- Mand, J., Park, S.H., Jack, R.T., Voordouw, G. (2014): The role of acetogens in microbial influenced corrosion of steel, Frontiers in Microbiology, 5,268.
- Matsumoto, S., Tokunaga, T., Ohtani, H., and Hasebe, M. (2005): Thermodynamic analysis of the phase equilibria of the Nb-Ni-Ti system, Materials Transactions, Vol. 46, pp. 2920-2930.
- Matzke, H. J. (1983) : Radiation enhanced diffusion in UO2 and (U, Pu)O2, Radiat. Eff. 75(1-4), 317-325
- Mori, K., Tsurumaru, H., and Harayama, S. (2010): Iron corrosion activity of anaerobic hydrogen-consuming microorganisms isolated from oil facilities. J. Biosci. Bioeng., 110, 426-430.
- Nagra (2002): Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra Technical report NTB 02-05.
- 西方篤 (2014): 電気化学インピーダンス法を用いたベントナイト中における炭素鋼の腐食モ ニタリング,材料と環境 2014 講演集, pp. 199-200.
- 西村務,和田隆太郎,西本英敏,藤原和雄,谷口直樹,本田明(1999):ベントナイト中に おける炭素鋼の腐食挙動に及ぼす微生物の影響.核燃料サイクル開発機構 技術報告書 JNC TN8400 99-077.
- Nishino, Y., Endo, M., Ibe, E., Yasuda, T. (1997) : Formation and dissolution of oxide film on zirconium alloys in 288° C pure water under γ -ray irradiation, J. of Nuclear Materials 248 pp292-298.

Parthiban, R., Stoica, M., Kaban, I., Kumar, R., and Eckert, J. (2015): Viscosity and fragility of the supercooled liquids and melts from the Fe-Co-B-Si-Nb and Fe-Mo-P-C-B-Si glass-forming alloy systems, Intermetallics, Vol. 66, pp. 48-55.

Pekala, M., Riba, O. and Duro, I. (eds) (2013) : FIRST Nuclides DELIVARABLE (D-N $^{\circ}$:4.2),

Model forfission products release from spent nuclear fuel and their applicability to the FIRST Nuclides project, European Commission.

- Poinssot, C., (2005) : FINAL REPORT OF THE EUROPEAN PROJECT SPENT FUEL STABILITY UNDER REPOSITORY CONDITIONS, CEA-R-6093
- Posiva Oy : Safety Case for the Disoposal of Spent Fuel at Olkiluoto Performance assessment 2012. WR 2012-07, Posiva Oy (2013)
- Poulard, K., Chevarier, A., Moncoffre, N., Trocellier, P., Crusset, D. (2001) : Study of zircaloy-4 fuel cladding using ion beams. Application to long-term disposal of nuclear wastes, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 181 (2001) 640-643.
- Poulard, K., (2001) : Étude de l'influence de la corrosion en milieu basique sur le relâchement d'activité par la zircone : application au stockage des coques, Thesis, University Claude Bernard-Lyon 1, n° 151-2001, 27 September 2001 (in French).
- Pugh, E. N., Montague, W. G. and Westwood, A. R. C. (1966): Stress-corrosion cracking of copper, Corrosion Science, Vol.6, pp. 345-347.
- 佐治悦郎,井田俊一,若松明弘,河越稔之,清水純太郎,堀元俊明(2009): PWR 燃料・炉心の更なる信頼性向上・高度化に向けた取組み,三菱重工技報,vol.46,No.4, pp.28-32
- Sakuragi, T., Tanabe, H., Hirose, E., Sakashita, A., Nishimura, T. (2013) : Estimation of carbon 14 inventory in hull and end piece wastes from Japanese commercial eprocessing operation, Proceedings of the ASME 2013 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2013, 8-13 September 2013, Brussels, Belgium, Paper n° 96110.
- Scherire D., I. Matsson and B. Grapengiesser(1997) : Fission gas release in ABB SVEA 10×10 BWR fuel., Proc. Int. Top. Mtg., LWR Fuel Performance, pp. 104-117.
- 柴田俊夫,渡邊正敏,谷口直樹,清水亮彦(2013):酸素欠乏環境における炭素鋼腐食モデリ ング,材料と環境, Vol. 62, No. 2, 70-77.
- SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar a first evaluation Main Report of the SR-Can project Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. TR-06-09.
- SKB (2011) : Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01.
- Stroes-Gascoyne, S. (1987) : Mesurement of instant-release source terms for 137Cs, 90Sr, 99Tc, 129I and 14C in used CANDU fuels. J. Nucl. Mater. 238, 264-277.
- Stroes-Gascoyne, S. and Hamon, C. J. (2010) : The effects of elevated temperatures on the viability and culturability of bacteria indigenous to Wyoming MX-80 bentonite. Nuclear Waste Management Organization Report TR-2010-08.
- 杉本克久(2009):金属腐食工学(材料工学シリーズ),内田老鶴圃.
- Suzuki, Y. (1981): Stress Corrosion Cracking of pure Copper in Dilute Ammonical

Solutions, Corrosion Science, 21, pp. 353-368.

鈴木元衛,斎藤裕明,宇田川豊(2011):軽水炉燃料解析コード FEMAXI-7 のモデルと構造, JAEA-DATA/Code 2010-035

- Takahashi, R., Ymashita, Y., Tanabe, H. and Sakuragi, T. (2014): Improvement of Inventory and Leaching Rate Measurements of C-14 in Hull Waste, and Separation of Organic Compounds for Chemical Species Identification, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1665, pp. 139-148.
- Takai, K. and Horikoshi, K., (2000) Rapid detection and quantification of members of the archaeal community by quantitative PCR using fluorogenic probes. Appl. Environ. Microbiol. 66, 5066-5072.
- Takeuchi, A., Kato, H., and Inoue, A. (2010): Vogel-Fulcher-Tammann plot for viscosity scaled with temperature interval between actual and ideal glass transitions for metallic glasses in liquid and supercooled liquid states, Intermetallics, Vol. 18, pp. 406-411.
- Tanabe, H., Nishimura, T., Kaneko, M., Sakuragi, T., Nasu, Y., Asano, H. (2007); Characterization of hull waste in underground condition, Proceedings of the Iternational Workshop on Mobile Fission and Activation Products in Nuclear Waste Disposal, L'Hermitage, La Baule, France, January 16-19.
- 谷口直樹,川崎学,杉田裕,柴田雅博,本田明(2014):ベントナイト再冠水過程における炭 素鋼の腐食モニタリング,第61回材料と環境討論会講演集,B209.
- Till, B.A., Lenly, J. Weathers, Pedro J.J. Alvarez, J.J. (1998): Fe(0)-Supported Autotrophic Denitrification. Environ. Sci. Technol., 32, 634-639.
- 土屋義浩,石島清見,山原健(1998):高燃焼度 PWR 燃料の照射後試験データ[燃料棒:B15(燃料集合体:N01G13)],(旧)日本原子力研究所,JAERI-Data/Code 98-002.
- Uchiyama, T., Ito, K., Mori, K., Tsurumaru, H., Harayama, S. (2010): Iron-Corroding Methanogen Isolated from a Crude-Oil Storage Tank. Appl. Environ. Microbiol. March 15, 2010 76:6 1783-1788.
- Uhlig, H. H. and Duqette, D. J. (1969): "Alleged stress-corrosion cracking of pure Cu", Corrosion Science, 9, pp.557-560.
- Vesteelund, G. and Corsetti, L.V. (1994) : Recent ABB fuel design and performance experience, Proc. of the 1994 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, P62, ANS.
- Videm, K. (1975) : Uniform corrosion and hydrogen pickup of zirconium-base cladding materials in boiling water reactors, Nuclear Engineering and Design 33 170.
- 和田隆太郎, 西村務, 下郡一利, 泊里治夫, 舛形剛, 下田秀明, 藤原和雄, 西本英敏, 小田 正彦(1998): 還元条件下におけるチタンオーバーパックの耐食性に関する研究(II). 動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書. PNC TJ 1058 98-001.

Wang, Z. J., Huang, Y. H., Yang, Y., Wang, J. C., and Liu, C. T. (2015): Atomic-size effect

and solid solubility of multicomponent alloys, Scripta Materialia, Vol. 94, pp. 28-31.

- Wu, J., Pan, Y., Liu, H., and Pi, J. (2014): Activation energy, viscosity and fragility of Cu-Zr-Ti-In bulk metallic glasses, Materials Science and Technology, Vol. 30, pp. 670-675.
- Xu, D., Li, Y., Song, F., Gu, T. (2013): Laboratory investigation of microbiologically influenced corrosion of C1018 carbon steel by nitrate reducing bacterium Bacillus licheniformis. Corrosion Science, 77, 385-90.
- Yamaguchi, I., Tanuma, S., Yasutomi, I., Nakayama, T., Tanabe, H., Katsurai, K., Kawamura, W., Maeda, K., Katao, H. and Saigusa, M., (1999) : A study on chemical forms and migration behaviour of radionuclides in hull wastes., Proc. of the 7th ASME-ICEM, 99, Nagoya, Japan, September 1999.
- Yamashita, Y., Tanabe, H., Sakuragi, T., Takahashi, R. and Sasoh, M. (2013):C-14 Release Behavior and Chemical Species from Irradiated Hull Waste under Geological Disposal Conditions, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1665, pp. 187-194.
- 柳澤 和章(1984):照射後試験データによる長期燃料棒の内圧増加に関する解析評価と FEMAXI-Ⅲ計算、旧;日本原子力研究所現;日本原子力研究開発機構, JAERI-M-84-021
- Yang, G.J., and Hao, S.M. (2000): Study on the phase equilibria of the Ti-Ni-Nb ternary system at 900 degrees C, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 297, pp. 226-230.
- Yang, X., and Zhang, Y. (2012): Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys, Materials Chemistry and Physics, Vol. 132, pp. 233-238.
- Zhang, Y., Lu, Z.P., Ma, S.G., Liaw, P.K., Tang, Z., Cheng, Y.Q., and Gao, M.C. (2014): Guidelines in predicting phase formation of high-entropy alloys, Mrs Communications, Vol. 4, pp. 57-62.
- Zhang, Y., Zhou, Y.J., Lin, J.P., Chen, G.L., and Liaw, P.K. (2008): Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys, Advanced Engineering Materials, Vol. 10, pp. 534-538.

第3章

直接処分施設の設計検討

3 章詳細目次

3.	I接処分施設の設計検討	3-1
3.1	直接処分方策に関する調査・検討	3-1
(1))背景と目的	3-1
(2))海外情報の調査	3-1
1))ASTOR の概況	3-2
2)) ASTOR における主要参加国・機関の報告概要	3-2
(① IAEA のアプローチ	3-2
	a. 燃料詰替施設	3-3
	b. 地下処分場	3-3
(② フィンランド	3-3
	a. 処分計画の現状	3-3
	b. 保障措置に関する最近の動向	3-4
(③ スウェーデン	3-4
(④ 米国	3-4
(⑤ フランス	3-4
3)) ASTOR 技術報告書の作成に向けての議論での技術的なトピックス	3-5
(① C/S および容器 ID	3-5
(② 法的/概念枠組み	3-5
(③ 地球物理学的手法および衛星情報	3-5
(④ 長期データ管理	3-6
4))ASTOR の今後	3-6
(3))保障措置技術開発	3-6
1))処分容器溶接部の識別技術に関する適用可能性評価	3-6
(① 条件整理	3-7
	a. 用語の定義	3-7
	b. 検認方法	3-7
(自然特徴の固有性確認への適用性の検討 	3-7
	a. 自然特徴の種類	3-7
	b. 自然特徴の適用性評価 : : : : : : : : : : : : : : : :	3-10
	c. 自然特徴の適用性に関する考察 : : : : : : : : : : : : : : : : :	8-12
(③ 人工特徴の固有性確認への適用性の検討	3-16
	a. 検討方法	3-16
	(a) 検討対象	8-16
	(b) 処分容器の性能に影響を及ぼす要因の検討	8-17
	b. 人工特徴の付与方法の検討 3	8-18
	(a)人工特徴配置に対する固有性確認への適用性検討	3-18

(b) 処分容器に付与可能な人工特徴の寸法	3-21
(c) 人工特徴の付与間隔	3-24
c. 人工特徴の偽造防止方法の検討	3-25
d. 人工特徴の適用性評価に関する考察	3-26
④ 超音波シミュレーションによる環境変化の影響評価	3-26
a. 測定の再現性に影響する環境条件の整理	3-26
b. 解析方法および解析ケース	3-28
(a) 解析方法と解析モデル	3-28
(b) 探触子位置(測定位置)のズレのモデル化化	3-29
(c) 処分容器表面の不陸、減肉のモデル化	3-30
(d) 処分容器温度(弾性波速度)の変化のモデル化	3-31
c. シミュレーション解析結果	3-31
(a) 基準ケースの解析結果	3-31
(b) 探触子位置(測定位置)のズレのケースにおける解析結果	3-33
(c) 処分容器表面の不陸、減肉(減肉と傾きの影響)のケースにおける解析結果	3-34
(d) 処分容器表面の不陸、減肉(不陸の影響)のケースにおける解析結果	3-35
(e) 処分容器温度(弾性波速度)の変化のケースにおける解析結果	3-36
d. シミュレーション解析結果に係る考察	3-37
(a) 各解析条件における誤差	3-37
(b) 測定の再現性に関する考察	3-38
 電子タグ等の適用可能性に関する検討 	3-38
① 電子タグと刻印の比較	3-39
② 電子タグの仕様	3-39
③ 使用済燃料の直接処分において使用する電子タグの選定	3-40
④ パッシブ方式・UHF 帯の電子タグの性能	3-41
a. 通信距離	3-41
b. 耐熱性	3-42
c. 耐水性	3-42
d. 耐改ざん性	3-42
e. 耐放射線性	3-42
⑤ 電子タグの保障措置への適用におけるメリット	3-43
⑥ 電子タグの保障措置への適用における課題	3-44
a. 電子タグの付与方法	3-44
b. 電子ダグ情報の読み取りエラー	3-44
4) 核セキュリティ対策に係る検討	3-45
1) IAEA 核セキュリティシリーズ No. 10「設計基礎脅威の策定、使用および	
維持」の概要	3-46
① DBT の定義	3-46

② 脅威評価	3-47
2)仮想施設の設定	3-48
3)仮想施設の DBT 策定	3-49
 仮想施設における脅威 	3-49
② 仮想施設における DBT 評価	3-51
4) 仮想施設の核セキュリティシステムの検討	3-51
① 地上施設に適用する核セキュリティシステム・機器	3-51
a. 物理的障壁	3-51
b. 入出管理	3-53
c. 警備施設	3-54
d. 侵入検知	3-56
e. 非常用電源に対する要求仕様	3-58
② 地下施設に適用する核セキュリティシステム・機器	3-59
a. 地中レーダ測定技術	3-59
(a) 基本原理	3-59
(b) 性能	3-59
b. 地震波観測技術	3-60
(a) 基本原理	3-60
(b) 性能	3-60
5) 今後検討すべき核セキュリティ対策の課題	3-61
3.2 人工バリアの設計	3-62
3.2.1 処分容器の設計	3-62
(1) 本項目の背景と目的	3-62
(2) PWR 使用済燃料集合体および処分容器の基本仕様	3-62
(3) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全性評価	3-63
1) 解析手法	3-64
① 燃焼計算	3-64
② 臨界計算	3-64
2) 解析結果	3-65
(4) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収線量率評価	3-66
1) 解析条件	3-67
① 解析コード	3-67
 遮へい解析体系および遮へい解析条件 	3-67
2) 解析結果	3-67
① 吸収線量率	3-67
 ② 放射線分解による処分容器の腐食への影響 	3-72
(5) 廃棄体への入熱を考慮した伝熱解析による廃棄体温度の評価	3-72
1) 解析条件	3-73
	 ② 脅威評価

(1)	,解析コード	3-73
2	- 伝熱解析体系および伝熱解析条件	3-73
2)	解析結果	3-80
(6)	複合容器の銅外層のクリープ挙動を考慮した構造解析による	
	処分容器の健全性の評価	3-83
1)	解析条件	3-83
1	「解析コード	3-83
2	構造解析体系および構造解析条件:	3-83
3	材料特性	3-86
а	. 基本特性	3-86
b	. 応力-ひずみ特性	3-87
с	. クリープ特性	3-87
4	評価基準	3-87
2)	解析結果	3-88
3.2.2	処分容器の設計における臨界安全に関する検討	3-92
(1)	本項目の背景と目的	3-92
(2)	未臨界を判定する基準値の設定に関する検討	3-92
1)	類似性評価による臨界実験データの抽出:	3-92
2)	推定臨界下限増倍率の設定	3-95
(3)	岩盤や緩衝材を構成する物質の反射体効果に関する検討3-	-100
1)	計算対象とした実験3-	-101
2)	計算結果	-101
(4)	中性子吸収材に関する検討 3-	-104
1)	計算条件	-105
2)	計算結果	-106
(5)	臨界発生時における影響評価の必要性の検討3-	-109
1)	米国における評価例	-109
2)	我が国における臨界発生時の影響の取り扱いについて3-	-110
3.2.3	緩衝材の設計	-111
(1)	本項目の背景と目的 3-	-111
(2)	緩衝材の設計	-111
1)	緩衝材の設計要件	-112
2)	緩衝材の設計にあたってのシナリオ3-	-113
1	· ブロック方式の場合(ケース i、ケース ii)に考慮したシナリオ 3-	-113
2	PEM 方式の場合(ケース iii)に考慮したシナリオ3-	-114
3)	設計に用いる解析コードおよび力学モデル3-	-115
1	解析コード	-115
2	・力学モデル	-116

a. コンプライアンス可変型モデル	3-116
b. 修正 Cam-Clay モデル	3-117
4)物性值	3-118
5) ケース i 複合容器をブロック・横置き方式で定置する場合の緩衝材の設計	3-123
① 解析モデル	3-123
② 物性值	3-125
③ 解析条件	3-125
a. 初期条件	3-125
b. 境界条件	3-126
c. 外力条件	3-126
④ 解析結果	3-130
6) ケース ii 炭素鋼容器をブロック・竪置き方式で定置する場合の緩衝材の設計	3-133
① 解析モデル	3-134
② 物性值	3-134
③ 解析条件	3-137
a. 初期条件	3-137
b. 境界条件	3-137
c. 外力条件	3-138
④ 解析結果	3-139
7)ケース iii 人工バリアを PEM 方式とした場合の緩衝材の設計	3-146
① 解析モデルの検討	3-146
② 物性值	3-147
③ 解析条件	3-148
a. 初期条件	3-148
b. 境界条件	3-149
④ 解析結果	3-150
(3) 緩衝材の力学特性取得試験	3-151
1) 概要	3-151
2) 供試体の仕様	3-151
3) 試験内容	3-152
4) 試験結果	3-152
3.3 地下施設の概念設計	3-154
(1) 本項目の背景と目的	3-154
(2) 地下施設の設計	3-155
1) 坑道内に発生する荷重の設定および底盤の安全性・健全性評価	3-155
① 坑道内に発生する荷重の設定	3-156
a. 坑道内に作用する搬送・定置装置重量	3-156
b. 解析ケースの設定	3-159

c. 設計荷重の算定	3-164
② 形状図寸法	3-166
③ 底盤コンクリートの安全性評価	3-167
a. 設計条件	3-167
b. 設計手法	3-171
c. 構造解析	3-174
a)主要・連絡坑道(二次元解析:設計基準強度 f'ck=18 N mm ⁻²)	3-174
b)主要・連絡坑道(二次元解析:設計基準強度 f'ck=24 N mm ⁻²)	3-180
c)処分坑道(三次元解析:設計基準強度 f'ck=18 N mm ⁻²)	3-185
d. 仕様の設定	3-190
④ 処分孔の孔壁の健全性評価	3-192
2) 地下施設の設計間における連携を考慮した坑道の設計フローの構築	3-195
① 地下施設の設計フローにおける坑道の設計の位置づけ	3-196
② 各設計間の連携の整理と設計フローの例示	3-196
(3) 支保工施工合理化のための基本特性の取得	3-201
1) 使用材料	3-201
2) 供試体の作製条件	3-201
3)物性試験用供試体の作製	3-202
4) 試験配合およびフレッシュコンクリートの性状	3-203
5)物性試験項目および試験材齢	3-203
6)物性試験結果	3-204
① 圧縮強度試験結果	3-204
② 割裂引張強度試驗結果	3-205
③ 静弹性係数試験結果	3-206
④ ポアソン比の測定結果	3-206
 単位容積質量の測定結果 	3-207
3.4 搬送・定置設備の概念設計	3-208
(1) 本項目の背景と目的	3-208
(2) 他との連携を考慮した設計フローの整備および概念設計の例示	3-208
1) 搬送・定置設備	3-208
① 人工バリアや地下坑道など他の処分施設設計との関連性の整理	3-208
② 核セキュリティ・保障措置を考慮した技術やシステムとの関連性の整理	3-213
a. 保障措置・核セキュリティの地下施設への要求事項	3-215
b. 保障措置・核セキュリティに対する地下施設での対応の検討	3-215
c. 保障措置・核セキュリティに対する搬送・定置設備での具体的な対応内容	3-216
③ 設計フローへの反映	3-217
2) 地上施設	3-221
① 対象とする地上施設	3-221

② 人工バリアや地下坑道など他の処分施設設計との関連性の整理 3-22	23
a. 地上施設の設計と人工バリアなどとの関連性	25
b. 封入設備の設計と人工バリア・操業・処分概念の関連性の整理 3-22	26
③ 核セキュリティ・保障措置を考慮した技術やシステムとの関連性の整理 3-22	28
④ 設計フローへの反映 3-23	60
3) 概念設計の例示	\$2
① 例示の条件	3
② 搬送・定置設備の概略仕様 3-23	\$4
③ ハンドリングフローによる例示 3-23	6
3.5 まとめ	t0
(1) 直接処分方策に関する調査検討 3-24	t0
(2) 人工バリアの設計 3-24	t0
(3) 地下施設の概念設計 3-24	2
(4) 搬送・定置設備の概念設計 3-24	3
参考文献	4

3. 直接処分施設の設計検討

本技術開発項目においては、使用済燃料の直接処分のための処分施設の概念設計を行った。 概念設計の対象とする施設・設備は、使用済燃料に適用する人工バリア(廃棄体および緩衝 材など)、アクセス坑道や処分坑道からなる地下施設、人工バリアを搬送・定置するための設 備とし、地下施設については、搬送・定置設備の外形や必要空間との整合等にも留意するこ ととした。

また、使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておくことが必要になると考えら れる様々な方策(操業中および閉鎖後管理段階の保障措置並びに核セキュリティ対策、回収 可能性の維持など)についても調査・検討を行った。

上記に関する検討内容を、次節以降に「直接処分方策に関する調査・検討(3.1節)」、「人 エバリアの設計(3.2節)」、「地下施設の概念設計(3.3節)」および「搬送・定置設備の概念 設計(3.4節)」として示す。また、本章のまとめを3.5節に示す。

3.1 直接処分方策に関する調査・検討

(1) 背景と目的

保障措置および核セキュリティは使用済燃料の処分施設の設計段階において考慮しておく ことが必要な対策のひとつであり、国際約束を満足させる設計および適用が要求される。そ のため、まず、IAEA や諸外国における保障措置技術や核セキュリティ技術に係る検討の経緯 や要件の整理状況、使用済燃料の処分施設の設計・建設、操業、閉鎖の各段階に応じた適用 方法などを検討する必要がある。

平成 27 年度までは、海外における検討状況を調査するため、IAEA や諸外国における検討 経緯、およびスウェーデン、フィンランドにおける処分施設の状況や事例を整理した。保障 措置技術については、IAEA の保障措置要件をもとに適用可能性のある技術を調査するととも に使用済燃料を収容した処分容器の固有性および未開封確認技術の適用可能性に関する検討 を行った。核セキュリティ技術に関しては、IAEA の核セキュリティ勧告文書および関連国内 法規の要求事項を適用する際の考え方を整理した。

平成28年度は、IAEAや諸外国における関連情報をIAEAが主催する地層処分への保障措置 適用に関する第12回専門家会合に参加して入手した。保障措置技術については、平成27年 度に実施した使用済燃料を収容した処分容器の固有性確認技術の適用性検討に基づいて、超 音波探傷技術を用いた固有性確認および未開封確認技術の適用可能性についてさらなる検討 を行った。加えて、処分容器を同定する手段としての電子タグの適用可能性に関する検討も 行った。核セキュリティ技術に関しては、平成27年度までに整理した IAEA の核セキュリティ 物告文書の要件に基づいて仮想の処分施設に対する脅威を考察し、その脅威に対応するた めの物理的な核セキュリティ対策を検討した。

上記検討結果について、それぞれ「(2) 海外情報の調査」、「(3)保障措置技術開発」、「(4) 核セキュリティ対策に係る検討」で示す。また、そのまとめを 3.5 節に示す。

(2) 海外情報の調査

IAEA では地層処分への保障措置適用に関する専門家会合 (ASTOR: Application of

Safeguards T0 geological Repositories)を2006年から毎年開催し、使用済燃料の直接処 分施設に対する保障措置アプローチの検討状況や参加国による状況報告などが行われている。 平成28年度も例年同様、IAEAや諸外国による検討状況についての発表が行われたが、ASTOR の最終年にあたることから、作成する技術報告書のドラフトについての議論が主な目的であった。平成28年度に実施されたASTORの概要を以下の構成で示す。

- 1) ASTOR の概況
- 2) ASTOR における主要参加国・機関の報告概要
 - ① IAEA のアプローチ
 - ② フィンランド
 - ③ スウェーデン
 - ④ 米国
 - ⑤ フランス
- 3) ASTOR 技術報告書の作成に向けての議論での技術的なトピックス
 - C/S および容器 ID
 - ② 法的/概念枠組み
 - ③ 地球物理学的手法および衛星情報
 - ④ 長期データ管理
- 4) ASTOR の今後

1) ASTOR の概況

IAEA が主催する地層処分への保障措置適用に関する第12回専門家会合(12th ASTOR、2016 年4月、米国メリーランド州ロックビル)では、使用済燃料の直接処分の保障措置アプロー チと技術に関する現在までの検討状況および政策と技術の今後の動向と課題について議論さ れた。

ASTOR には、日本を含む 14 カ国と EU に加え、英国およびスイスがオブザーバーとして参加している。本専門家会合は年1回開催されてきたが、今回は当初のタスク期間 10 年目を迎えることから、最終回として主に平成 28 年末を目途にまとめる予定の報告書の内容について議論が行われた。また、報告書の議論に加え、従来どおり、各国の処分計画の状況、保障措置技術の開発状況、IAEA の保障措置アプローチ検討状況などが報告された。主要な報告は次のとおりである。

2) ASTOR における主要参加国・機関の報告概要

① IAEA のアプローチ

処分施設に対する保障措置アプローチの検討状況について紹介があった。

将来設営される燃料詰替施設と地下処分場の何れの施設においても保障措置は国家による 効率的かつ効果的な転用・取得に関するパス解析の結果に基づいて決定され、国レベルアプ ローチの一部となるものと見込んでいる。

Safeguards by Design と呼ばれる施設設計段階から保障措置を考慮する方法論を確立する には、国、事業者、IAEA など、全ての関係者による継続的な対話を通じて、何れの施設にお いても設計の初期段階からあらゆる保障措置要件を統合しておくことが必要である。また、 技術と保障措置戦略が将来的に変更された場合でも対応可能であるように技術要件はフレキ シブルとすることも必要である。

主な課題として、処分施設の操業が非常に長期間にわたること、使用済燃料の測定方法(場合によっては燃料詰替施設への移送前から)、地上施設と地下施設間の知識の連続性(CoK: Continuity of Knowledge)の維持、回収可能性を考慮した操業期間(約100年間)における 処分容器の同定についての信頼性確保などが挙げられる。

燃料詰替施設と地下処分場の保障措置概念は次のように考えられている。

- a. 燃料詰替施設
 - ・使用済燃料は処分容器に封入する前に"最良の方法で"検認。
 - CoK は封じ込め/監視(C/S: Containment/Surveillance)によって、検認時から地下
 処分場への移送まで維持。
 - ・封じ込め/監視システムの不具合を最小限にするため、高信頼性かつ冗長なシステムの採用。
 - ・定期的な設計情報検認(DIV: Design Information Verification)活動の導入による、
 国の設計情報の正確性・完全性の検証。
- b. 地下処分場
 - ・核物質に対する直接検認は不可能。
 - ・施設のごく一部(地上にあるもの)のみが視認可能。
 - ・申告されたトンネルの背後に未申告の領域が "隠される"可能性。
 - ・地下処分場へのアプローチルートが操業期間の前後で掘削される可能性。
 - トンネル埋戻し、または地下処分場閉鎖の後は処分した廃棄体にアクセス不可能。
 - ・施設設計は地下処分場の状況如何によっては変更される。

② フィンランド

a. 処分計画の現状

- ・2015年11月12日、使用済燃料の詰替施設および地下処分場の建設許可(ウラン 6,500 トン分、敷地面積1.5 km²、2年間有効)。
- ・2016年夏、燃料詰替施設の基礎工事を開始予定。
- ・保障措置については、IAEA および EURATOM の要求事項、特に封じ込め/監視とゲート モニタについて検討中で、2016年中に合意したいとの意向。
- ・操業許可の申請に際して必要な書類。
 - 更新された環境影響評価報告書。
 - 処分容器の回収可能性に係る計画の更新版。
 - 使用済燃料の輸送に係るリスク評価。
 - プロジェクトの変更に係る報告。
- ・ASTOR 会合以降の動向であるが、2016 年 11 月に使用済燃料処分施設建設で最初のトン ネル掘削契約を締結したとの報告がされている。処分施設は 2023 年の操業開始を見込 んでいる。

b. 保障措置に関する最近の動向

- ・処分容器の識別については、刻印によるものが現状のオプション。
- ・地下処分場へのアプローチとして、ブラックボックスの境界をどこに設定するかは施設特有の課題(予測される全ての出入管理)。
- ・地下処分場のレーザースキャンを基本技術とした設計情報検認。
- ・封じ込め範囲の設定(地下処分場の地下全体か、または埋設階に限定か)。
- ・当該地層の特質の理解(3S(Safety, Safeguards, Security)の観点からの要件を満 たしているか、環境データベースの更新により将来的な決定に資する)。

③ スウェーデン

- ・スウェーデンの処分プログラム(KBS-3)は、燃料詰替施設プロジェクト(Clink)と核 燃料処分場プロジェクト(SFK)の2大プロジェクトに分かれている。
- ・Clink については、2017~2019年に基本設計、2019~2021年に詳細設計、2020年に安全解析報告書を完成、2022年に施設の建設を開始、2030年頃に操業を開始の予定。
- ・SFK については、2015 年にシステムの基本設計を完了、2016~2018 年に追加の安全評価を行って詳細設計の準備を開始、2018 年に詳細設計を開始、2019 年に安全解析報告書を完成、2020 年にトンネルとシャフトの建設を開始、2030 年頃に操業を開始の予定。
- ・オスカーシャムにある集中中間貯蔵施設 Clab(現在 6,000 トン貯蔵)の容量を 11,000 トンに増やす計画である。
- ・保障措置関連の研究開発をスウェーデン国内、および米国や JRC の研究機関と共同で 実施している。
- ・検討課題として、換気シャフトのモニタリングの必要性、検認・測定ステーションの
 無人化、将来に向けて保存すべきデータの取捨選択、などが挙げられている。

④ 米国

- ・使用済燃料中間貯蔵施設について、現在ニューメキシコ州(Holtec 社)とテキサス州(WCS 社)の2カ所の申請が出されている。
- ・地下処分場であるヤッカマウンテンについては 2015 年 1 月に安全評価報告書が完成。 しかし、NRC はこの報告書が部分的に規制要件を満足していないと認識(土地の所有権 と水利権の条件について)し、現時点での建設認可は行わない方向。
- ・DOE の補正環境影響評価に対するパブリックコメントを 2015 年 8 月から同年 11 月ま で募集し 2016 年前半にこれを完了させるべく審査を実施中。

⑤ フランス

- ・放射性廃棄物の地層処分プロジェクトを以下のスケジュールで実施予定。
 2015年3月~6月 処分施設の初期定義に関する産業界のレビューを実施。
 2015年11月 処分施設の初期設計が完了、12月から詳細設計に入る(24カ月を要する見込み)。
 - 2016 年~2017 年 操業に係るマスタープランについて情報交換と協議。

2018年 許可申請。

- 2025 年 パイロット運転の開始。
- 2030年 地下処分場へ最初の放射性廃棄物を搬入。

3) ASTOR 技術報告書の作成に向けての議論での技術的なトピックス

10年間続いた ASTOR の最終年にあたり技術報告書を作成することが前回の会合で決定され ており、その骨子について各技術分野(使用済燃料検認、C/S および容器 ID、法的/概念枠組 み、レーダや地震計など地球物理学的手法による検知および衛星情報、設計情報検認、長期 データ管理)に分かれて議論を行った。このうち、日本が参加した①C/S および容器 ID、② 法的/概念枠組み、③地球物理学的手法および衛星情報、④長期データ管理についての概要は 以下のとおりである。

① C/S および容器 ID

- ・C/S の役割は使用済燃料の最終検認から処分までの CoK を維持することである旨を確認し、複数の独立した C/S 手段をアクセスポイントに設置するとのコンセンサスを得た。C/S を適用する範囲としてブラックボックスの境界設定との関連が重要である。
- ・安全上の観点から閉鎖後に設定すると想定される"restricted zone"(掘削などの禁止)については、各国が設定するがどの時点まで C/S を維持するか、および閉鎖後の C/S との関連性が深い。
- ・輸送中の C/S、放射線検出に関し、遮へい体に収容された場合または減衰した時の実行 性などについて、検討課題として抽出した。
- ・IDの付与方法については、技術的なコンセンサスは得られなかったが、どの程度の期間維持する必要があるかを IAEAの要件として決める必要があるとの意見で一致した。

② 法的/概念枠組み

 モデル保障措置アプローチなどの現在の概念的枠組みの整理と、今後解決すべき地層 処分の保障措置に関わる課題を抽出することを目的に、概念的枠組み、転用経路の解 析およびそれに対する潜在的な技術的手段について議論を実施した。その結果、処分 施設の保障措置アプローチ策定のために解決すべき課題として、どこまで処分容器を 追随する必要があるか(埋設位置を報告する必要性)、回収可能性の保障措置への影響、 使用済燃料測定に必要な精度などについて今後の詳細な検討が必要であることが挙げ られた。

③ 地球物理学的手法および衛星情報

- ・処分施設周辺での掘削を検知するための地震計およびレーダ(固定型、可搬型)について、技術的可能性を評価するための検討項目(性能限界、コスト、持続性、使用者に要求されるスキルなど)の議論を行い、評価リストを作成した。
- ・各評価項目については、地震計ではフィンランド、レーダではカナダの先行事例を踏 まえ、具体的な評価軸を抽出するとともに、保障措置としての適用性を検討していく

ことが必要との意見で一致した。

・衛星情報については、未申告活動の監視のために部分的に利用されているものを念頭に、処分施設における不正なアクセス監視のための技術的成立性について検討課題を抽出した。技術的な困難性の例として、監視地域の気象条件により常時監視が不可能となる懸念が指摘された。

④ 長期データ管理

- ・処分施設閉鎖後の保障措置に関するデータの確実な保存方法について議論した。データの保存期間の定義が現状では各国の規制ごとに異なっているため大まかな共通認識が必要であること(例として少なくとも数世紀とする)、確実なデータ保存のためには、保存技術および記録の冗長性を事業者/国/地域/IAEAのそれぞれのレベルで確保することが重要であることが指摘された。
- ・数千年にわたって確実に情報を継承してきたエジプトのパピルスを例に挙げて、視認性・保存性に優れるアナログ媒体と、大容量・高速処理性に優れる電子媒体をミックスさせた保存技術の最適化の必要性も指摘された。

4) ASTOR の今後

今後の ASTOR の存続などについて議論し、基本的に継続することで参加国間の合意がなさ れた。今回各作業グループの議論で出された解決すべき課題や適用する技術など固有のテー マに絞って議論すべきなどの意見が出され、IAEA で Terms of Reference の改定案を検討す ることとなった。なお、今後の取り組みも各国の IAEA 支援プログラムの枠組みで実施される。

(3) 保障措置技術開発

1) 処分容器溶接部の識別技術に関する適用可能性評価

使用済燃料の処分施設では基本的に地下処分場に廃棄体を定置するまで CoK が維持されて いる必要(ある地点(例えば、地下処分場の搬入口)以降はブラックボックスとするという 考えも議論されている)があり、そのためには廃棄体の同定・識別や未開封確認を行うこと が求められる。そのための技術として、平成27年度は、処分容器の溶接部に自然に発生する 特徴(以下、「自然特徴」という)、または人工的に付与する特徴(以下、「人工特徴」という) を読み取る超音波計測技術の適用可能性を、既存の超音波計測結果の解析、および超音波計 測シミュレーションを用いた解析によって検討した。

平成28年度は、超音波計測技術の適用可能性に関するさらなる検討を行うため、自然特徴 のみの利用で処分容器の同定・識別、未開封確認を行うことができる技術を検討し、それら の適用可能性を評価した。人工特徴を利用するケースにおいては、処分容器の性能に影響を 与えない人工特徴の付与方法の検討、および固有性維持のための偽造防止方法を検討し、人 工特徴を使用した超音波探傷技術の適用可能性を評価した。さらに、環境条件が超音波測定 の精度や再現性に与える影響を明らかにするため、シミュレーション解析を実施した。

これらの内容を、以下の処分容器溶接部の識別技術に関する適用可能性に係る評価手順に沿って示す。

- ① 条件整理
- ② 自然特徴の固有性確認への適用性の検討
- ③ 人工特徴の固有性確認への適用性の検討
- ④ 超音波シミュレーションによる環境変化の影響評価

① 条件整理

a. 用語の定義

本節で使用する用語の定義を表 3.1-1 に示す。

用語	定義
	同定とは廃棄体(処分容器に使用済燃料を収容後に蓋を溶接閉止したもの)
同定・識別	が同一であることを見きわめること、識別とは異なる廃棄体を見分けるこ
	とと定義する。この定義によると、同定・識別の対象は廃棄体となる。
	未開封確認とは、廃棄体の蓋溶接部が開封されていないことを確認するこ
土明土地动	とと定義する。本検討では、蓋溶接部を切断して開封し、外観で異常を認
不用到唯認	識できないよう復旧された場合を想定し、同定・識別を応用した未開封確
	認について検討した。
田士州	固有性とは廃棄体において、そのものだけに備わる性質のことと定義する。
回有1生	本検討では、蓋溶接部の特徴を対象として、固有性の有無を検討した。
	検認とは廃棄体を同定・識別、未開封確認の観点で検査し、廃棄体に関す
検認	る知識の連続性が維持されていることを認定すること、およびそのための
	活動と定義する。

表 3.1-1 用語の定義

b. 検認方法

期間や作業フローなどの検認に関する条件は平成27年度に検討したときの条件と同様とした。また、再検認などの実施を想定する期間は地下処分場の閉鎖までとし、操業開始から数 十年~100年程度と仮定した。溶接検査では許容される微小な超音波エコー指示を検認に利用 することも含め、溶接検査で必要なデータよりも詳細な計測データの取得・記録を前提とした。

② 自然特徴の固有性確認への適用性の検討

一般的に、溶接部は母材原質部と異なる金属組織を呈し、多様な特徴が生まれる。本項目 においては、これら溶接により自然に発生する特徴(自然特徴)を整理するとともに、同定・ 識別、未開封確認への適用性を評価した。

a. 自然特徴の種類

自然特徴は溶接表面に発生する特徴と溶接内部に発生する特徴に分けられる。

溶接表面に発生する主な特徴としては溶接ビードや溶接スパッターが挙げられる。

溶接ビードは、溶接部表面に発生する溶接部の形状や模様のことである。特徴として、溶 接方法によらず発生し、溶接方法、溶接条件(電流、電圧、溶接速度など)により大きさや形 状が変化し、大きさは1 mm~10 mm程度である。測定方法として、写真撮影、レプリカ法、レ ーザースキャンが挙げられる。溶接ビードの形状・模様の例を図 3.1-1 に示す。



図 3.1-1 溶接ビードの形状・模様(中小企業総合事業団, 2001)

溶接スパッターは、溶接時に飛散した金属粒などが母材表面に飛び散った痕跡である。特 徴として、MIG (Metal Inert Gas)、MAG (Metal Active Gas)、アーク溶接で発生しやすく、 TIG (Tungsten Inert Gas)、サブマージ溶接では発生しない。大きさは1 mm程度である。測 定方法として、写真撮影、レプリカ法、レーザースキャンが挙げられる。溶接スパッターの 形状・分布の例を図 3.1-2 に示す。



図 3.1-2 溶接スパッターの形状・分布(中小企業総合事業団, 2001)

溶接内部に発生する主な特徴としては、溶接欠陥、母材または溶接金属組織(結晶粒)、母 材と溶接の境界線が挙げられる。

溶接欠陥の種類は、図 3.1-3 に示すように溶込み不良、割れ、気孔、融合不良、スラグ巻 込みなどがある。特徴として、溶接方法によらず発生する可能性があり、材質(母材、溶材) や溶接条件(電流、電圧、溶接速度など)により大きさや形状、発生頻度が変化する。測定方 法として、超音波計測、放射線計測が挙げられるが、放射線計測は放射線のバックグラウン ドレベルが高い環境では実施できない可能性が高いため、超音波計測にて検討する。



母材または溶接金属組織(結晶粒)は溶接内部の模様であり、形状は様々である。図 3.1-4 にその形状の一例を示す。図中の白や灰色の模様が結晶粒である。特徴として、溶接方法によらず発生し、材質(母材、溶材)や溶接条件(電流、電圧、溶接速度など)により大きさが変化する(結晶粒の大きさは、炭素鋼の場合1 μm程度で、ステンレスやニッケルの場合、母材では1 μm程度、溶接部では1 mm程度である)。測定方法として、超音波計測が挙げられる。



図 3.1-4 電子顕微鏡による母材または溶接金属組織の形状(西川他, 2006(一部修正))

溶接部には溶接材と母材の間に境界が生じる。母材と溶接の境界線の形状と超音波測定結 果を図 3.1-5 に示す。特徴として、どの溶接方法でも発生し、材質(母材、溶材)や溶接条 件(電流、電圧、溶接速度など)により大きさが変化する。超音波を使った非破壊による溶接 部の形状測定方法は確立されていないが、林らによる方法(電力中央研究所, 2013)が提案 されている。



図 3.1-5 電子顕微鏡観察、超音波測定による溶接境界部の測定例(電力中央研究所,

2013)

b. 自然特徴の適用性評価

自然特徴の適用性を特徴の経時変化、固有性、計測性、同定・識別、未開封確認の観点で評価した。

図 3.1-1 に示すように、溶接ビード表面の形状・模様を捉えることは可能である。また、 溶接条件により形状や模様が変化するため、固有性を有し、捉えた画像を比較することによ り同定・識別、未開封確認が可能である。しかし、溶接表面の特徴であるため、腐食などによ り表面の形状が変化する可能性があり、適用可能性は低いと考える。

同様に、溶接スパッターも形状・分布を捉えることは図 3.1-2 に示すとおり可能である。 また、溶接スパッターはランダムに発生するため固有性を有し、溶接スパッターの形状や分 布を画像比較することにより同定・識別、未開封確認が可能である。しかし、溶接ビードと 同じく溶接表面の特徴であるため、腐食などにより表面の形状が変化する可能性があり、適 用可能性は低いと考える。

溶接内部に発生する溶接欠陥については、高感度超音波計測方法であるフェーズドアレイ 法や TOFD (Time of Flight Diffraction)法で画像を電子データとして保存することが可能 であることから計測性はある。固有性、同定・識別性についても、溶接欠陥は溶接時にラン ダムに発生し、溶接内部の欠陥は長期間経過しても変化しにくいため、固有性を有すると考 える。また、欠陥の相対位置を画像比較することで、同定・識別が可能である。未開封確認に ついても、再溶接時に欠陥を再現することは困難であることから可能である。これらのこと から、計測性、固有性、同定・識別、未開封確認の観点で溶接欠陥の利用は適用性が高いと考 える。

母材または溶接金属組織(結晶粒)に関しては、結晶粒がランダムに配置されるためそれ が固有性となり、結晶の配置を画像比較することにより同定・識別も可能である。また、再 溶接により結晶粒配置のランダム性を再現することは困難であるため、未開封確認も可能で ある。計測性については、図 3.1-6 に示すように、検出対象の特徴の周囲に金属組織に起因 する信号が検出される場合はあるが、結晶粒の大きさによっては計測できない場合もあり、 現在の超音波探傷技術では結晶粒の配置を測定することは難しいと考える。



図 3.1-6 超音波探傷での金属組織に起因するノイズ信号の例 (左:古村他,2010 右:石田,2007)

母材と溶接の境界線については、溶接部の境界は不均一に形成されるため、固有性はある。 また、境界面の形状を画像比較することにより同定・識別でき、再溶接時に特徴が変わるた め未開封確認も可能である。計測性については、図 3.1-5 に示すとおり、左側の断面マクロ 写真と右側の超音波計測画像における溶接部の形状がよく一致していることから、形状を捉 えることはできる。しかし、図 3.1-7 に示すように測定値に数mmの誤差が生じており、同定 という観点で課題が残る。

(A)	封驗休	※ ケ「]	溶接金属の幅 [mm]		
12.19 C C	武鞅伴		実際値	推定值	
		15	11.59	11.60	
1020 e 9	(A)	20	11.40	12.20	
1		25	10.80	12.60	
(溶接金属の種) 25.41 9 領		30	10.26	12.20	
18.23	(D)	15	21.59	21.60	
10.48		20	18.23	20. 20	
1 2	(D)	25	11.36	12.20	
(C) (溶接金属の幅)		30	10.48	12.00	
23.50		15	19.43	19.80	
10.20 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C		20	16.05	16.80	
= ⁴	(0)	25	10.91	9.80	
12		30	10.20	12.00	

図 3.1-7 実測値とフェーズドアレイ超音波計測による計測値比較(電力中央研究所, 2013)

c. 自然特徴の適用性に関する考察

b. 項で検討した結果を表 3.1-2 に示す。

溶接表面の特徴(溶接ビードの形状・模様、溶接スパッターの形状・分布)については、処 分容器表面の腐食などにより特徴が変化する可能性が高いため、適用可能性は低いと考える。 溶接内部の特徴として、母材または溶接金属の組織(結晶粒)については、特徴を捉える ことが難しいため適用性は低いと考える。また、母材と溶接の境界線については、現在の超 音波探傷技術では境界を精度よく捉えることは難しいが、測定精度の改善により適用できる 可能性はあると考える。溶接欠陥については、計測性、固有性、同定・識別、未開封確認の観 点で適用性が高いと考える。ただし、自然に発生する溶接欠陥は、発生の確実性を得ること は困難であるため、IDとして利用するには人工的に付与した特徴と併用することが望ましい と考える。

					因子			検認方法への
場	焅油	計測卡注	時御の					適用可能性
所	1寸1以	可侧刀仏	(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	固有性	計測性	同定・識別	未開封確認	(数十年~100 年間の
			一座时发忙					期間を想定)
	溶接ビードの形	写真撮影	溶接表面は腐	溶接方法、溶	溶接表面に腐	溶接ビードの	再溶接時に溶	適用可能性は低い
	状・模様	レプリカ法	食などにより	接条件(電流、	食などがな	形状や模様を	接ビード形状	
		レーザース	長期間経過す	電圧、溶接速	く、健全な状	画像比較する	や模様が変わ	腐食などにより特徴が
	どの溶接方法に	キャン	ると特徴が変	度)により形	態であれば計	ことにより同	るため未開封	変化するため、適用可
	対しても発生す		化する	状や模様が変	測可能である	定・識別でき	確認は可能で	能性は低い。ただし、
	る			化するため、		る	ある	特徴が変化しない期間
ملين				固有性はある				であれば適用可能性は
浴			×	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	ある。
接			~	0	0	0	0	
表	溶接スパッター	写真撮影	溶接表面は腐	溶接時に飛散	溶接表面に腐	溶接スパッタ	再溶接時に溶	適用可能性は低い
面	の形状・分布	レプリカ法	食などにより	する金属粒な	食などがな	ーの形状や分	接スパッター	
		レーザース	長期間経過す	どであり、ラ	く、健全な状	布を画像比較	の形状や分布	腐食などにより特徴が
	MIGやMAG溶接、	キャン	ると特徴が変	ンダムに発生	態であれば計	することによ	が変わるため	変化するため、適用可
	被覆アーク溶接		化する	するため、固	測可能である	り同定・識別	未開封確認は	能性は低い。ただし、
	で発生しやす			有性はある		できる	可能である	特徴が変化しない期間
	く、TIG やサブ							であれば適用可能性は
	マージ溶接では		~	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc	ある。
	発生しない						\cup	

表 3.1-2 自然特徴を用いた固有性確認の適用性評価結果(1/3)

				因子					
場	性油	計測卡注	時御の					適用可能性	
所	竹似	前側力伝	対似の	固有性	計測性	同定・識別	未開封確認	(数十年~100 年間の	
			胚时发化					期間を想定)	
	溶接欠陥	超音波探傷	溶接内部は長	溶接時に自然	計測性に問題	欠陥の相対位	再溶接時に溶	適用可能性は高い	
		(フェーズ	期間経過後も	に発生する溶	はないが、計	置を画像比較	接欠陥を再現		
	どの溶接方法に	ドアレイ)	特徴が変化す	接欠陥には固	測可能な溶接	することによ	することは困	現在の技術の延長で利	
	おいても発生す		る可能性は低	有性がある	欠陥が発生し	り同定・識別	難なため未開	用できる。課題として、	
	る		<i>د</i> ۲		ない場合、測	できる	封確認は可能	溶接欠陥の発生状態を	
					定できない可		である	確認する必要がある。	
					能性もある				
م بلي را م بلي را			\bigcirc	\bigcirc	$\land \sim \bigcirc$	\bigcirc	\bigcirc		
浴			0	0		0	0		
接	母材または	超音波探傷	溶接内部は長	材料により、	溶接部を切断	結晶の配置を	再溶接時に結	適用可能性は低い	
内	溶接金属の組織	(フェーズ	期間経過後も	結晶粒がラン	し、電子顕微	画像比較する	晶粒配置のラ		
部	(結晶粒)	ドアレイ)	特徴が変化す	ダムに配置さ	鏡などにて確	ことにより同	ンダム性を再	現在の超音波探傷技術	
94			る可能性は低	れるため、そ	認する方法が	定・識別でき	現することは	では結晶粒の配置を測	
	どの溶接方法に		<i>۷</i> ۲	れが固有性と	よく利用され	る	困難なため未	定することが難しい。	
	おいても発生す			なる	るため、非破		開封確認は可		
	る				壊による確認		能である		
					は非常に難し				
					い				
			0	0	×∼∆	0	0	1	

表 3.1-2 自然特徴を用いた固有性確認の適用性評価結果(2/3)

				検認方法への				
場	胜油	⇒上洞」七沙	桂海の					適用可能性
所	村田	司側刀伝	対取の	固有性	計測性	同定・識別	未開封確認	(数十年~100 年間の
			胚时 发化					期間を想定)
	母材と溶接の境	超音波探傷	溶接内部は長	溶接部の境界	現在の技術で	境界面の形状	再溶接時に境	適用可能性はある
	界線	(フェーズ	期間経過後も	は不均一に形	は境界を精度	を画像比較す	界線が変わる	
浴		ドアレイ)	特徴が変化す	成されるため	よく捉えるこ	ることにより	ため未開封確	現在の超音波探傷技術
接	どの溶接方法に		る可能性は低	固有性はある	とは難しい	同定・識別で	認は可能であ	では境界を精度よく捉
内	おいても発生す		<i>V</i> ۲			きる	る	えることは難しいが、
部	る							測定精度の改善により
			\bigcirc	\bigcirc	^	\bigcirc	\bigcirc	適用できる可能性はあ
					\sim			る。

表 3.1-2 自然特徴を用いた固有性確認の適用性評価結果(3/3)

③ 人工特徴の固有性確認への適用性の検討

前節において自然特徴を用いた検認方法について検討したが、超音波探傷技術により検知 可能な(検認に使用できる)大きさや数の自然特徴が発生するかは不確定であり、検認に必 要な自然特徴の大きさや数量に達しない可能性がある。ここでは、処分容器の性能に影響を 与えずに人工的な特徴(人工特徴)を付与する方法について検討した。

a. 検討方法

(a) 検討対象

検討対象とする処分容器の形状、溶接方法などは平成27年度までに検討した条件と同様とした。

つまり、処分容器の材料・形状は、図 3.1-8 に示すレファレンスケースの処分容器(厚さ 140 mm、炭素鋼製)とし、処分容器の蓋部の形状は、図 3.1-9 に示す平蓋形状と落し蓋形状 が検討されているが、本検討においては平蓋形状とした。また、処分容器本体と蓋部は平成 25 年度に示された封入設備の溶接装置概念(原子力機構, 2014)のとおり、TIG溶接を前提と した。



図 3.1-8 処分容器および人工バリアのレファレンス仕様(原子力機構, 2014)



図 3.1-9 処分容器の蓋部形状(原子力機構, 2016)

人工特徴の種類(付与方法)については、平成27年度に検討したとおり、スリットや穴を 放電加工などで加工する方法の技術的可能性が高いことから、本検討においても人工特徴を 放電加工によるスリットや穴として検討した。人工特徴の付与の技術的可能性を表3.1-3に 示す。

方 法	要領	技術的可能性*			
放電加工(EDM)な	溶接後にも残る寸法形状のスリ	0			
どによる加工	ットや穴を放電加工などで加工。	特徴の付与は従来の技術で基本的			
		に可能。			
		前提条件に応じた寸法形状の設計、			
		装置開発が課題。			
異材の埋め込み	溶接金属中に溶材と異なる材料	Δ			
	を埋め込み、密度差境界からの超	特徴の付与は従来の技術で基本的			
	音波の反射を利用。	に可能。			
	異材としては、タングステン小片	装置開発に加えて、機械強度などへ			
	や異材溶接などが候補。	の影響の検証が課題。			
溶接時の外乱	溶接パラメータ(溶接トーチの位	×			
	置・移動速度、電流・電圧、シー	溶接品質を確保する観点と矛盾し、			
	ルドガス供給流量など)の意図的	溶接部として有害な欠陥を生じる			
	な変動。	リスクが高く、課題の難度が高い。			

表 3.1-3 人工特徴の付与の技術的可能性(原子力機構, 2016)

*:課題の数、課題の難易度の高さから○△×を評価した。

なお、表中に示した放電加工(EDM: electrical discharge machining)とは、電極と被加 工物との間に短い周期で繰り返されるアーク放電によって被加工物表面の一部を除去する機 械加工の方法であり、主として、従来の機械加工技術では加工できなかった硬い金属に適用 される加工技術である。放電加工にて人工特徴を溶接内部に付与する手順の例を以下に示す。

②溶接を実施
 ②溶接を途中で中断
 ③放電加工にて、人工特徴付与
 ④再度溶接

(b) 処分容器の性能に影響を及ぼす要因の検討

処分容器の性能に影響を及ぼさずに人工特徴を付与する方法を表 3.1-4 に示す観点で検討 する。

表 3.1-4 人工特徴の付与方法に関する検討観点

検討観点	検討内容		
	平成 27 年度に検討した人工特徴配置に基づき、付与の容易性、寸法の		
人工特徴配置	制御性、人工特徴の経時変化、固有性、計測性、同定・識別、未開封		
	確認の観点で適用性を検討した。		
人工特徵寸法	平成 27 年度に原環センターにて、平蓋のガラス固化体オーバーパック		
	に関して溶接残留応力を考慮した限界き裂寸法に関する解析が実施さ		
	れ、許容残留応力と限界き裂寸法の関係が示された(原環センター,		
	2016)。この関係から処分容器溶接部の限界き裂寸法を検討する。		
	発電用原子力設備規格維持規格(日本機械学会,2012)において2個		
人工特徴間隔	の欠陥の大きさとその欠陥の間隔による合体条件(1 つの欠陥とみな		
	す条件)が示されており、合体条件以上の欠陥間隔であれば、各々の		
	欠陥は独立した欠陥であると見なせることが示されている。この条件		
	から、人工特徴を配置した場合についての合体条件を算出し、人工特		
	徴の付与間隔を検討する。		

b. 人工特徴の付与方法の検討

(a) 人工特徴配置に対する固有性確認への適用性検討

平成 27 年度に検討した人工特徴配置を図 3.1-10 に示す。この他に処分容器の外側に付与 する方法もあるが、処分容器の外側では偽装が可能になるため、図 3.1-10 の 3 つのケースに て検討した。



図 3.1-10 人工特徴の配置検討(原子力機構, 2016)

適用性の評価結果を表 3.1-5 に示す。この中で、人工特徴の経年変化、高い固有性、超音 波法による検出性の点から最も適用性が高いと考えられるのは、ケース 1 である。ただし、 ケース 1 は溶接途中で人工特徴を付与するため、溶接積層の次パスによる溶込みにより付与 した人工特徴の長さが変化することが考えられる。このため、予め予備試験などにより人工 特徴長さの変化の度合いを把握しておく必要がある。

ケース2については、境界部に近いため、境界部の反射波との識別が困難となる可能性が

あり、評価を低くした。また、ケース3については、開封時に人工特徴に変化が現れないこ とから、未開封確認に使用できないため、適用性はないと評価した。

人工特徴の	付与の容易性 寸法の制御性	人工特徴の経時変化			⇒L2nd bl.				適用	
付与位置		寸缶の制御性	短期(溶接直後)	長期 (操業期間中)	固有 恎	計測性	回 足・ 識別	木開封確認	課題	可能性
ケース1	既存技術によ	既存技術によ	・溶接の溶込みに	残留応力による影	固有性を考慮	フェーズドア	同定・識別に	未開封確認が	溶込みによる	0
	り付与可能。	り制御可能。	より付与した長さ	響なし。	に入れた付与	レイで特徴を	利用できると	可能であると	人工特徵寸法	
	溶接中に付与		より短くなる可能		が可能と考え	捉えることが	考えられる。	考えられる。	の変化に対応	
	する必要あ		性あり。		られる。	できると考え			した付与方法	
	り。		・残留応力による			られる。				
			影響なし。							
	△~○	0	\bigtriangleup	0	0	0	0	0		
ケース2	既存技術によ	既存技術によ	・溶接の溶込みに	残留応力による影	固有性を考慮	境界部に近い	同定・識別に	未開封確認が	・溶込みによ	\bigtriangleup
	り付与可能。	り制御可能。	より付与した長さ	響なし。	に入れた付与	ため、エコー	利用できると	可能であると	る人工特徴寸	
	溶接前に付与		より短くなる可能		が可能と考え	との識別が困	考えられる。	考えられる。	法の変化に対	
	するため作業		性あり。		られる。	難になる可能			応した付与方	
	への干渉な		・残留応力による			性あり。			法	
	L.		影響なし。						·処分容器表	
			^			^	0		面での反射	
	0	0		0	0		0	0	波の影響評価	
ケース3	既存技術によ	既存技術によ	・溶接の溶込みの	残留応力による影	固有性を考慮	境界部に近い	同定・識別に	溶接部開封	未開封確認に	×
	り付与可能。	り制御可能。	影響なし。	響なし。	に入れた付与	ため、エコー	利用できると	時、当該箇所	は適用不可	
	溶接前に付与		・残留応力による		が可能と考え	との識別が困	考えられる。	は変化しない		
	するため作業		影響なし。		られる。	難になる可能		ため、未開封		
	への干渉な					性あり。		確認には適用		
	L.							不可。		
	0	0	0	0	0	\bigtriangleup	0	×		

表 3.1-5 人工特徴の配置位置における固有性確認への適用性検討結果
(b) 処分容器に付与可能な人工特徴の寸法

処分容器溶接部の構造健全性に影響を与えない人工特徴の寸法について、以下の方法で評価した。

最初に、原環センターが実施した平蓋のオーバーパックの許容残留応力と限界き裂寸法についての評価結果(原環センター,2016)を参考にその関係を再整理し、平蓋のオーバーパックにおける限界き裂寸法を求めた。平蓋のオーバーパックの許容残留応力と限界き裂寸法の関係を再整理した結果を図 3.1-11 に示す。K_{IC}は破壊靭性値を、横軸は限界き裂寸法を、縦軸は許容残留応力を示す。この図より破壊靭性値(K_{IC})と残留応力の値が得られれば、限界き裂寸法を推定することができることが分かる。

ここで、オーバーパックの残留応力を推定するにあたり、残留応力の方向を処分容器溶接 部に生じる最大応力の方向と一致させる必要があることから、処分容器溶接部にかかる応力 の方向を検討した。図3.1-10のケース1に該当する場所に人工特徴を付与した場合、き裂の進 展が処分容器の半径方向となることから、図3.1-12に示すように、き裂の進展に影響する応 力は軸方向応力になる。このことから、評価するオーバーパックの残留応力も軸方向応力と し、オーバーパックの限界き裂寸法に関する検討(原環センター,2016)における軸方向応 力の解析結果(図3.1-13)から、オーバーパックの残留応力は軸方向応力の最大値である250 MPaとした。

次に、オーバーパックの破壊靭性値については、表3.1-6より、炭素鋼に対する溶接部の破 壊靭性値の最小値である100 MPa m^{0.5}とした。

これらの結果を図3.1-11に適用し、オーバーパックの限界き裂寸法を55 mm以上とした。



図 3.1-11 オーバーパックにおける限界き裂寸法と残留応力の関係



図 3.1-12 き裂の進展方向(原子力機構, 2016(一部加筆))



		温度		言式馬	负片形状(mm)			注1)		注2)		
対象	部位	т (°С)	幅 w	厚さ	SG底厚さ Bn	き裂長さ	P _Q (kN)	Pmax (kN)	K _{Ic} (MPa√m)	J_{c}	J _{lc} (k.l/m²)	K _{to(J)} (MPa√m)	備考
		n	50.0	25.0	20.0	27.3	20.6	35.2	(46.3)	141	-	179	
SFVC1	母材	150	50.0	25.0	20.0	27.1	-	35.9	-		123	163	延性き裂成長
	溶着金属	0	50.0	25.0	20.0	26.3	27.0	35.0	(56.9)	46	-	102	<mark>脆性破壊発生</mark>
 電子ビーム		150	50.0	25.0	20.0	26.3	-	50.0			116	158	延性き裂成長
溶接継手	熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.4	29.6	51.9	(62.4)	199		212	脆性破壊発生
		150	50.0	25.0	20.0	26.8		47.3	-	-	119	160	延性き裂成長
	溶着金属	0	50.0	25.0	20.0	26.4	-	67.2	-	-	378	293	延性き裂成長
MAG		150	50.0	25.0	20.0	26.5	-	59.4	-	_	217	216	延性き裂成長
溶接維手	熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.7	30.4	51.5	(65.2)	246	-	236	脆性破壊発生
		150	50.0	25.0	20.0	26.9	-	47.2	-	-	123	163	延性き裂成長
	溶着金属	0	50.0	25.0	20.0	26.9	_	64.6	-	-	(878)	446	延性き裂成長
TIG		150	50.0	25.0	20.0	26.5		63.9	-	H	381	286	延性き裂成長
溶接継手	熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.8	29.1	49.1	(63.1)	119	-	164	脆性破壊発生
L		150	50.0	25.0	20.0	26.8	-	47.5	-	-	127	165	延性き裂成長

表 3.1-6 溶接部における破壊靭性値の値(核燃料サイクル開発機構, 2000)

注1) ()はASTM E399のvalid条件を満足しないKo値

注2) ()はASTM E1737のvalid条件を満足しないJo値

続いて、処分容器の限界き裂寸法を評価するため、処分容器とオーバーパックの違いを比較した。表 3.1-7 に示すとおり、板厚に 10 mm の差があるものの、材質も構造も同一である ことから、処分容器の限界き裂寸法もオーバーパックのときと同様の方法で検討することが できると考えられる。

っまり、処分容器の破壊靭性値はオーバーパックの検討と同様、100 MPa m^{0.5}で問題ないと 考えられる。しかし、残留応力については、板厚の違いにおける影響を考慮する必要がある。 図 3.1-14 に板厚 100 mm と 110 mm における応力分布の違いを示す。その結果、ほとんど差が 無いことから、オーバーパックと処分容器の限界き裂寸法も同等とみなすことができる。こ のことから、処分容器の限界き裂寸法についても、55 mm とした。

	処分容器	オーバーパック		
板厚	100 mm(腐食代を除く)	110 mm (解析に用いた値)		
材質	炭素鋼	炭素鋼		
構造	平蓋	平蓋		

表 3.1-7 オーバーパックと処分容器の比較



図 3.1-14 オーバーパックと処分容器の応力拡大係数比較

最後に、処分容器の限界き裂寸法から処分容器溶接部の構造健全性に影響を与えない人工 特徴の寸法を発電用原子力設備規格維持規格(日本機械学会,2012)の基準を準用して評価 した。処分容器溶接部において許容される人工特徴の寸法は限界き裂寸法に安全率を与える ことで求めることができる。この安全率を10とし、処分容器溶接部の構造健全性に影響を与 えない人工特徴の寸法を5.5 mmとした。

(c) 人工特徴の付与間隔

発電用原子力設備規格維持規格(日本機械学会,2012)では、複数の内部欠陥が厚さ方向 またはその直角方向に重なる並列の場合と、厚さおよびその直角方向に重ならない非並列の 場合のそれぞれについて、複数の内部欠陥を独立した欠陥とみなすことができる条件を示し ている。

本検討で付与するケース1の人工特徴は並列な場合に相当すると考えられることから、並 列に欠陥を配置した場合の条件を算出し、そこから互いに影響しない人工特徴の付与間隔を 検討する。

図 3.1-15 は発電用原子力設備規格維持規格(日本機械学会,2012)の抜粋であり、図中 d_i(i=1,2,...)が厚さ方向の欠陥の寸法、S_i(i=1,2,...)が欠陥の間隔となっている。この図に おいて、内部欠陥#4 がケース1に人工特徴を配置する場合に該当すると考えられ、この場合 にそれぞれの欠陥が独立した欠陥とみなすことができる条件は、欠陥の間隔が欠陥寸法の大 きい方の半分以上あればよいことになる。つまり、2 mmの人工特徴を付与する場合は、1 mm 以上の間隔で付与すれば人工特徴は互いに干渉せず、独立した特徴とみなすことができると 考えることができる。



図 3.1-15 並列な複数個の内部欠陥の取り扱い(日本機械学会, 2012(一部加筆))

c. 人工特徴の偽造防止方法の検討

表 3.1-8 に偽造防止方法の検討結果を示す。

偽造防止方法として、人工特徴を付与する際に発生する溶接の溶け込みを利用することが 考えられる。溶け込みを制御することは困難であり偽造防止への適用性はあると考えられる が、課題としては、ランダム性、測定性を確認する必要がある。

一方、再溶接時、意図せずに新たな自然特徴が発生する可能性がある。その自然特徴と人

工特徴を併用することは、偽造防止への適用性があると考えられる。課題としては、表 3.1-2 にも示したように、検認可能な自然特徴の発生数を確認する必要がある。

偽造防止方法	具体的内容	考察
溶接の溶け込み	溶接の溶け込みによる影響に	・溶け込みにより付与した人工特徴の
の利用	より付与した人工特徴の長さ	長さが1~2 mm 短くなる。溶け込み量
	が小さくなることが考えられ	にはランダム性があるため、偽造防止
	る。溶け込み量にはランダム	への適用性がある。
	性があり、偽造防止に利用で	・課題として、ランダム性、測定性を確
	きる可能性がある。	認する必要がある。
自然特徴の利用	再溶接時に新たに自然特徴が	・自然特徴のランダム性を利用するこ
	発生するため、偽造防止に利	とで、偽造防止に適用性できる。
	用できる可能性がある。	・検認可能な自然特徴の発生数を確認
		する必要がある。

表 3.1-8 偽造防止方法の検討

d. 人工特徴の適用性評価に関する考察

本項目において、溶接部に付与する人工特徴について、配置位置、処分容器の健全性に影響を与えない付与寸法及び間隔について検討した。検討結果を以下に示す。

- ・人工特徴は放電加工技術を用いて付与できる。
- ・配置については、固有性、計測性、同定・識別、未開封確認の観点から、溶接内部の中 間層に付与するケース1の適用性が高いと考える。
- ・許容される寸法については、平成27年度に検討されたオーバーパックの限界き裂寸法 に関する検討結果(原環センター,2016)に基づき、5.5 mm となる。
- ・許容される間隔は、発電用原子力設備規格維持規格(日本機械学会,2012)から、人工 特徴を溶接内部の中間層ケース1に付与する場合、寸法の大きい方の半分以上の間隔 があれば独立した欠陥と見なせることが示された。

④ 超音波シミュレーションによる環境変化の影響評価

フェーズドアレイなどの超音波探傷技術によって行われる処分容器の同定・識別のための 検認は、処分容器蓋の溶接直後での測定(1回目)の結果と、経年経過後の再測定(2回目以 降)の結果を比較することによって行われる。測定の再現性が課題となるため、測定対象物 である処分容器の表面状態などの環境条件の違いにより測定結果がどのような影響を受ける か、シミュレーション解析により評価した。

a. 測定の再現性に影響する環境条件の整理

表 3.1-9 に測定の再現性に影響する環境条件の整理結果を示す。今回は、以下の 3 つの環 境条件の変化が測定の再現性に及ぼす影響をシミュレーション解析にて確認した。なお、解 析対象は図 3.1-8 に示す処分容器とした。

- ・探触子位置(測定位置)のズレ
- ・処分容器表面の不陸、減肉
- ・処分容器温度(弾性波速度)の変化

超音波探傷測定の環境条件		考えられる影響 (可能性)	考察
探触子位置の	ズレ(溶接線方向、	特徴位置のズレ	影響程度の確認が必要
溶接線直交方	向、深さ方向)		
測定面の不	小さなうねり	特徴の識別性低下	影響程度の確認が必要
陸	大きなうねり	探触子の接触不良で	探触子が接触不良となる大き
		測定不可	なうねりは発生しないことを
			前提
測定面の錆	測定面の錆	探触子の接触不良で	測定面の錆は測定結果に及ぼ
		測定不可あるいは測	す影響が大きく、測定時には除
		定精度の低下	去することを前提
	錆の除去による測定	表面近傍の特徴の欠	影響程度の確認が必要
	部の厚さ変化(減肉)	落、特徴位置のズレ	
	錆の除去による測定	特徴の識別性低下	影響程度の確認が必要
	面の小さなうねり		
処分容器の	媒体の弾性波速度の	特徴位置のズレ	影響程度の確認が必要
温度	変化		
測定機器の	測定装置の劣化によ	特徴の識別性低下	感度、分解能の確認(校正)で
性能	る異常		検知し交換などで対応可能
	測定機器の更新によ	特徴の誤認識	従来の方法との整合性を確認
	る性能向上		し、従来法の仕様を維持するこ
			とで対応可能

表 3.1-9 測定の再現性に影響する環境条件の整理結果

測定位置のズレは、初回測定時と2回目以降の測定時の探触子位置の違いを想定し、3方 向(溶接線方向、溶接線直交方向、深さ方向)の探触子位置のズレによる測定値(特徴の位 置)に対する影響を整理した。

廃棄体表面に不陸や錆が発生することで、容器表面の形状変化(うねりや減肉)あるいは 探触子の接触不良が生じる可能性がある。そのうち、探触子の接触不良はカップリングチェ ック(探触子が測定物ときちんと接触し、超音波の受発信が適切に行われているかをチェッ クすること)により簡単に影響を除去できる。また、容器表面の減肉については、測定位置 のズレにおける深さ方向のズレで検討される。したがってここでは、表面のうねりの影響を 整理した。なお、容器表面の不陸は、容器製作時に発生する可能性以外に、機械研磨や発生 した錆の除去の影響により生じる表面のうねりや緩やかな凹凸も不陸として一括して扱うこととした。

温度の影響では、媒質(処分容器)の温度による音速変化の影響が及ぼす特徴の位置ズレ の程度を整理した。

b. 解析方法および解析ケース

(a) 解析方法と解析モデル

シミュレーション解析は炭素鋼を模擬した媒質中に長さ2mmの特徴を4カ所設け、探触子 で発信・受信する波動解析を行うものである。解析モデルを図3.1-16に示す。図中において、 探触子は超音波を発信するプローブを示し、ポリエーテルイミド製のくさびの上面に発信素 子が取付けられており、さらにその上が吸音材で覆われている。

使用した解析ソフトは ComWAVE8 (伊藤忠テクノソリューション社製)の陽解法による 3 次元 FEM コードである。解析領域は Y 方向 180 mm×Z 方向 150 mm×厚さ方向 0.05 mm で、要素の大きさは 50 μ m×50 μ m×50 μ m、要素数約 1260 万のボクセル要素で、解析の時間刻みは 6.78 nsec とした。



図 3.1-16 超音波シミュレーションの解析モデル

炭素鋼の弾性波速度は縦波 5,900 ms⁻¹、横波 3,200 ms⁻¹(ともに 20 ℃)とし、人工特徴を 模擬する特徴は、下端を基準とした長さ 2 mm、幅 0.2 mm で、付与可能な最小寸法を表現し た。人工特徴を模擬して設けた 4 カ所の特徴(特徴①~④)の位置を図 3.1-17 に示す。なお、 発信位置の Y 距離については 80 mm を基準ケースとした。



特徴	y 座標	z 座標
1	10.0	-52.0
2	-10.0	-52.0
3	10.0	-112.0
4	-10.0	-112.0

図 3.1-17 人工特徴を模擬した特徴の位置

また、超音波の送信条件は、周波数 2 MHz、縦波、屈折角 20 ° ~70 ° で1 ° 刻みとした。 図 3.1-18 に送信条件による弾性波波線を示す。発信された超音波はくさびを透過し、炭素鋼 内に伝播する。



図 3.1-18 超音波の発信条件による弾性波波線

(b) 探触子位置(測定位置)のズレのモデル化

図 3.1-19 に探触子位置の影響を評価する解析モデルを示す。フェーズドアレイ法を用いた 超音波探傷検査で通常想定される位置ズレは $\pm 2 \text{ mm}$ 程度と考えられる。それより大きい位置 ズレ $\pm 5 \text{ mm}$ を設定し、位置ズレが 5 mm 生じたとき、すなわち探触子の位置が 75 mm と 85 mm のときについて解析を行い、基準ケース(探触子位置 80 mm)との特徴位置の違いを評価し た。



図 3.1-19 探触子位置のズレの影響を評価した解析モデル (左:探触子が-5 mm ズレのケース 右:探触子が+5 mm ズレのケース)

(c) 処分容器表面の不陸、減肉のモデル化

図 3.1-20 に表面の不陸(うねり)の影響を評価する解析モデルを示す。機械加工による仕 上げ面の粗さは粗仕上げでも最大0.1 mm であり、錆を除去した後の測定面が、その2倍の大 きさ(0.2 mm)のうねりを生じると想定した。モデル化は測定面の表面に正弦波でうねりの 形状を模擬し、うねりの深さを0.2 mm とした。そしてくさびの長さ(80 mm)と同じ波長を 持つうねりを設定し、探触子の中央部にうねりの凹部がくる場合と凸部がくる場合について 解析し、うねりのない基準ケースとの特徴位置の違いを評価した。なお、隙間にはグリセリ ンペースト(縦波速度:1,847 ms⁻¹、密度1,193 kg m⁻²)を充填したとして、モデル化した。



図 3.1-20 表面の「うねり」の影響を評価した解析モデル (左:中央部にうねりの凹部がくるケース 右:中央部にうねりの凸部がくるケース)

図 3.1-21 に減肉(Z方向の位置ズレ)および傾斜の影響を評価する解析モデルを示す。錆 を除去したことを想定して表面を 5 mm 削り、さらに±1°の傾斜を表面につけた。減肉、傾 斜のない基準ケースとの特徴位置の違いを評価した。



図 3.1-21 減肉および傾斜の影響を評価する解析モデル

(左:測定面が5 mm 減肉、傾斜-1°のケース 右:測定面が5 mm 減肉、傾斜+1°のケース)

(d) 処分容器温度(弾性波速度)の変化のモデル化

ガラス固化体の地層処分において緩衝材の温度は100 ℃を下回るように計画されているが (核燃料サイクル開発機構,1999)、定置後のオーバーパックの外殻も緩衝材温度と同様と考 えられる。使用済燃料直接処分における処分容器の再検認時の温度については、ガラス固化 体のオーバーパックを参考に、40 ℃程度(坑内温度)~100 ℃程度の温度範囲と想定した。

処分容器の温度が 40 °C、70 °C、100 °Cの場合の鋼材、くさびを構成する材料(ポリエー テルイミド)の弾性波速度を表 3.1-10 に示す。解析では鋼材とくさびの温度を 40 °C、70 °C、 100 °Cとして、温度変化させたときの特徴位置を評価した。なお、鋼の音速は文献(中島ほ か,1992)より温度係数を縦波-0.5 ms⁻¹ °C⁻¹として算出し、くさびの音速は同文献よりポリ エーテルイミドの温度係数を縦波-1.5 ms⁻¹ °C⁻¹として算出した。

	弾性波速度[ms ⁻¹]				
	20 °C	40 °C	70 °C	100 °C	
錮	5900	5890	5875	5860	
ポリエーテルイミド	2450	2420	2375	2333	

表 3.1-10 鋼およびポリエーテルイミドの弾性波速度の設定

c. シミュレーション解析結果

(a) 基準ケースの解析結果

シミュレーション解析によって得られる情報は、発信点から図 3.1-18 の弾性波波線に沿っ て超音波パルス波を入力し、媒質内を伝播して発信点に帰ってくる受信波(反射、回折)の 波動である。それを集積し受信波の振幅の大きさを指標として図化している。シミュレーシ ョン解析の比較の元となる基準ケースの解析結果と特徴①~特徴④の位置座標を図 3.1-22 に示す。図中、黄緑色を中心とし、青色や赤色が濃くなるほど大きな受信波の振幅が得られ ていることを示している。また、それぞれの座標値と特徴①を原点にした相対座標での座標 値を表 3.1-11 に示す。 一方、特徴の位置は図 3.1-23 に示すように、特徴から反射・回折してくる受信波の振幅が 最大となる波形のピーク位置とした。解析で得られた特徴の位置座標は図 3.1-17 で示した解 析モデルでの特徴の設置位置と若干異なっており、超音波を用いることによる測定上の誤差 と考えられる。



図 3.1-22 基準ケースの解析結果

胜油	应 挿	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
村国	y 座係	y 座標 (深さ方向)		したェ、座標
1	11.4	-53.1	—	—
2	-9.4	-51.3	-20.8	1.8
3	10.3	-111.6	1.1	-58.5
4	-9.8	-111.2	-21.2	-58.1

表 3.1-11 基準ケースでの特徴①~④の測定座標



この測定上の誤差の要因として、波線の刻み角度や発信する超音波の周波数などが挙げられる。波線の刻みによる影響の例を図 3.1-24 に示すが、特徴の位置を屈折角 36 ° での受信 波形のピーク位置で捉えた場合と屈折角 37 ° で捉えた場合では相対距離で 2.3 mm の誤差が 生じている。また、波形のピーク位置は発信する周波数の 1 波長分の変動が考えられ、今回

のシミュレーション解析では周波数 2 MHz の波動を使用しており、媒質の弾性波速度を 6,000 ms⁻¹とすると、最大 3 mmの測定上の誤差が生じる可能性がある。



図 3.1-24 波線の刻みによる影響

(b) 探触子位置(測定位置)のズレのケースにおける解析結果

図 3.1-25 に Y 距離が 75 mm と 85 mm における解析結果を示す。また、それぞれの座標値と 特徴①を原点にした相対座標での座標値を表 3.1-12 と表 3.1-13 に示す。



y距離が75 mmの場合



y距離が85 mmの場合

図 3.1-25 探触子位置(測定位置)のズレの場合の解析結果

特徴	広博	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
	y 座標	(深さ方向)	したy、座標	した z '座標
1	9.4	-54.5	—	—
2	-11.0	-53.4	-20.4	1.1
3	9.7	-113.2	0.3	-58.7
4	-12.3	-112.1	-21.7	-57.6

表 3.1-12 端子位置 75 mm での特徴①~④の測定座標

炸油	亚应博	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
村似	y /主\宗	(深さ方向)	したy'座標	したz'座標
1	10.6	-51.9	_	_
2	-9.9	-50.6	-20.5	1.3
3	10.4	-111.1	-0.2	-59.2
4	-10.2	-110.3	-20.8	-58.4

表 3.1-13 端子位置 85 mm での特徴①~④の測定座標

(c) 処分容器表面の不陸、減肉(減肉と傾きの影響)のケースにおける解析結果

図 3.1-26 に測定表面の減厚を5 mm 行った後に、傾斜を-1 ° および+1 ° としたときの解 析結果を示す。また、それぞれの座標値と特徴①を原点にした相対座標での座標値を表 3.1-14 と表 3.1-15 に示す。



減肉5 mm、傾きが-1°の場合



減肉 5 mm、傾きが+1 ° の場合

図 3.1-26 減肉と傾きの場合の解析結果

唐 御		z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と			
将倒	y 座係	(深さ方向)) したy'座標	したz'座標			
1	14.0	-55.9	—	_			
2	-6.3	-56.5	-20.3	-0.6			
3	13.1	-112.2	-0.9	-56.3			
4	-7.4	-113.2	-21.4	-57.3			

表 3.1-14 測定面の減肉 5 mm と傾き-1° での特徴①~④の測定座標

胜油	一应一一	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
村国	y 座係	(深さ方向)	したy、座標	したz'座標
1	9.6	-50.2	_	_
2	-11.7	-47.5	-21.3	2.7
3	7.1	-109.2	-2.5	-59.0
4	-13.2	-108.7	-22.8	-58.5

表 3.1-15 測定面の減肉 5 mm と傾き+1 ° での特徴①~④の測定座標

(d) 処分容器表面の不陸、減肉(不陸の影響)のケースにおける解析結果

図 3.1-27 に凹凸が 0.2 mm の不陸(うねり)が表面に生じたときの解析結果を示す。また、 それぞれの座標値と特徴①を原点にした相対座標での座標値を表 3.1-16 と表 3.1-17 に示す。



中央部が凹 0.2mm の場合



中央部が凸 0.2mm の場合

図 3.1-27 測定面のうねりの場合の解析結果

HL 244	広语	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
村国	y 座標	(深さ方向)	したy'座標	したェ、座標
1	11.0	-53.4	—	—
2	-9.8	-51.6	-20.8	-1.8
3	10.1	-112.0	-0.9	-58.6
4	-9.9	-111.3	-20.9	-57.9

表 3.1-16	測定面の中央部に凹 0.2	mm がある場合での	り特徴①~④の測定座標
----------	---------------	------------	-------------

表 3.1-17 測定面の中央部に凸 0.2 mm がある場合での特徴①~④の測定座標

胜之神故	1 77 1	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
村餌	y 座標	(深さ方向)	したy、座標	したェ、座標
1	11.5	-53.0	—	_
2	-9.2	-51.3	-20.7	1.7
3	10.6	-111.1	-0.9	-58.1
4	-9.8	-111.2	-21.3	-58.2

(e)処分容器温度(弾性波速度)の変化のケースにおける解析結果

図 3.1-28 に媒質の温度が 40 ℃、70 ℃、100 ℃のときの解析結果を示す。また、それぞれ の座標値と特徴①を原点にした相対座標での座標値を表 3.1-18~表 3.1-20 に示す。



図 3.1-28 処分容器温度(弾性波速度)の変化の場合の解析結果

特徴	y 座標	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
		(深さ万回)	したy 座標	したz」座標
1	11.2	-53.3	—	—
2	-10.3	-51.9	-21.5	1.4
3	10.4	-111.5	-0.8	-58.2
4	-10.0	-111.5	-21.2	-58.2

表 3.1-18 処分容器の温度が 40 ℃の場合での特徴①~④の測定座標

特徴	y 座標	z 座標 (深さ方向)	特徴①を原点と した y '座標	特徴①を原点と した z '座標
1	10.1	-54.1	_	_
2	-9.8	-53.7	-19.9	0.4
3	9.9	-112.3	-0.2	-58.2
4	-10.9	-112.5	-21.0	-58.4

表 3.1-19 処分容器の温度が 70 ℃の場合での特徴①~④の測定座標

表 3.1-20 処分容器の温度が 100 ℃の場合での特徴①~④の測定座標

H土、汕4	1 77 1	z 座標	特徴①を原点と	特徴①を原点と
竹餌	y 座標	(深さ方向)	したy'座標	したz'座標
1	10.2	-55.5	_	—
2	-10.7	-54.3	-20.9	1.2
3	9.1	-113.6	-1.1	-58.1
4	-11.5	-113.4	-21.7	-57.9

d. シミュレーション解析結果に係る考察

(a) 各解析条件における誤差

表 3.1-21 と表 3.1-22 に、各解析条件における解析モデルの原点の座標系による特徴位置 (絶対座標)としたときの解析結果と、特徴①を局部座標の原点として整理したときの解析 結果を整理した。誤差については、式 3.1-1 にて導出した。

 $\sqrt{(Y_0 - Y_1)^2 + (Z_0 - Z_1)^2}$ \vec{x} 3.1-1

Y₀: Y座標の基準点、Y₁: 対象とするY座標、Z₀: Z座標の基準点、Z₁: 対象とするZ座標

	2001					
	тан	特徴①	特徵②	特徵③	特徵④	县土佑
	供日	の誤差	の誤差	の誤差	の誤差	取八恒
位置	Y=75 mm (基準 80 mm)	2.4 mm	2.6 mm	1.7 mm	2.7 mm	2.7 mm
ズレ	Y=85 mm (基準 80 mm)	1.4 mm	0.9 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.4 mm
	減肉 5 mm、傾き-1°	3.8 mm	6.1 mm	2.9 mm	3.1 mm	6.1 mm
不陸	減肉 5 mm、傾き+1°	3.4 mm	4.4 mm	4.0 mm	4.2 mm	4.4 mm
小座	凹 0.2 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.4 mm	0.1 mm	0.5 mm
	凸 0.2 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.6 mm	0.0 mm	0.6 mm
	40 ℃ (基準 20 ℃)	0.3 mm	1.1 mm	0.1 mm	0.4 mm	1.1 mm
温度	70℃(基準20℃)	1.6 mm	2.4 mm	0.8 mm	1.7 mm	2.4 mm
	100 ℃ (基準 20 ℃)	2.7 mm	3.3 mm	2.3 mm	2.8 mm	3.3 mm

表 3.1-21 各解析条件における絶対座標の誤差

	15 L	特徴②	特徴③	特徵④	目上店
	坦 坦 坦	の誤差	の誤差	の誤差	取入他
位置	Y=75 mm (基準 80 mm)	0.8 mm	1.4 mm	0.7 mm	1.4 mm
ズレ	Y=85 mm (基準 80 mm)	0.6 mm	1.1 mm	0.5 mm	1.1 mm
	減肉 5 mm、傾き-1°	2.5 mm	2.2 mm	0.8 mm	2.5 mm
了陆	減肉 5 mm、傾き+1°	1.0 mm	1.5 mm	1.6 mm	1.6 mm
小座	凹 0.2 mm	0.0 mm	0.2 mm	0.4 mm	0.4 mm
	凸 0.2 mm	0.1 mm	0.4 mm	0.1 mm	0.4 mm
	40 ℃ (基準 20 ℃)	0.8 mm	0.4 mm	0.1 mm	0.8 mm
温度	70 ℃(基準 20 ℃)	1.7 mm	0.9 mm	0.4 mm	1.7 mm
	100 ℃ (基準 20 ℃)	0.6 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.6 mm

表 3.1-22 各解析条件における相対座標の誤差

(b) 測定の再現性に関する考察

表 3.1-21 から、絶対座標にて位置を特定する場合、不陸の場合に 6 mm もの誤差が生じる。 また、温度変化においても、測定誤差 3 mm を超える誤差が発生している。これらの結果から、 絶対座標で測定する場合は、測定の再現性は環境条件の影響を受けると考えられる。

一方、相対座標で整理した場合は表 3.1-22 に示すように誤差は最大でも 2.5 mmである。2 MHzの超音波測定が有している測定誤差が 3 mm程度であり、本解析で得られた誤差よりも大きいため、相対座標で整理することにより、測定の再現性は環境条件の影響をほとんど受けなかったと考えられる。

以上から、超音波探傷技術を用いて処分容器の同定・識別のための検認では、相対位置で 整理した結果を用いる必要があると考えられる。

2) 電子タグ等の適用可能性に関する検討

1)項において溶接部の特徴を利用した超音波計測技術による廃棄体の固有性確認方法を検 討したが、超音波計測は検認に時間がかかることが予想される。

一方、既存の原子力施設では、固有性の確認を行うために燃料集合体または収納容器に刻 印または印字されている識別 ID を利用することが多いが、刻印や印字されている識別 ID は 耐環境性や耐改ざん性が高いという利点があるものの、識別 ID の確認にかかる精度が読み取 りに用いるカメラの性能に依存し、読み取りに要する時間も比較的長いという難点もある。

本項では、上記課題に対応するための手段として電子タグの適用可能性を検討するため、 電子タグの特徴、および保障措置技術として利用する場合のメリットと課題を、以下に示す 構成で整理した。

- ① 電子タグと刻印の比較
- ② 電子タグの仕様
- ③ 使用済燃料の直接処分において使用する電子タグの選定
- ④ パッシブ方式・UHF 帯の電子タグの性能

- ⑤ 電子タグの保障措置への適用におけるメリット
- ⑥ 電子タグの保障措置への適用における課題

① 電子タグと刻印の比較

固有性確認手段として電子タグと刻印を利用する場合における、それぞれのメリット、デ メリットを表 3.1-23 に示す。

項目 電子タグ 刻印 耐環境性 \bigcirc \bigcirc 利用可能期間 数年~十数年 半永久的 自動データ収集 \bigcirc \times データ保持 識別 ID+各種データ 識別 ID のみ △ (カメラの性能に依存) 遠隔読取 \bigcirc 一括読取 \bigcirc △ (カメラの性能に依存) 改ざん防止 \bigcirc \bigcirc

表 3.1-23 刻印と電子タグのメリット・デメリット(寺浦ほか, 2011)

② 電子タグの仕様

固有性確認手段として利用する電子タグの基本的な仕様を整理する。

電子タグは、用途によって様々な形状を有しているが、最小単位は半導体チップとアンテ ナである。半導体チップでは、情報の記憶(メモリー)、電波の送受信、電源の整流など、電 子タグの制御を行っている。アンテナは使用する搬送波周波数により異なるが、ループアン テナやダイポールアンテナが用いられることが多い。電子タグの基本的な構成を図 3.1-29 に 示す。

なお、電子タグに保存された情報を読み取るためには、リーダライタが必要である。リー ダライタは使用目的、場所などにより据置きタイプとハンディタイプがあるが、読み取った データを保存、加工するため、さらに上位のシステムに情報を送受信する機能を有している ものもある。



電子タグは電池の有無、電池電力の使用法によって、図 3.1-30 に示すように 4 つのカテゴ

リーに分類できる。

パッシブ電子タグは、電池を具備せず、動作電力がリーダライタからの無線送信によって 供給される。アクティブ電子タグでは、回路を構成する半導体が消費する電力および送信に 用いる電波電力の両方に電池の電力を用いる。さらに、セミパッシブ電子タグやセミアクテ ィブ電子タグと言われるものもある。現在、市販されている電子タグにおいては、パッシブ 電子タグが主流となっている。

一般的に、アクティブ電子タグでは数十メートルの通信が可能であるが、使用可能期間が 電池寿命に依存するため概ね1~2年程度で、高価格である。一方、パッシブ電子タグではア クティブ電子タグよりも通信可能距離は短いが、低価格であり、理論上は半永久的に使用可 能である。しかし、実際はメモリーの経年劣化により使用可能期間が決定し、多くのもので メモリー保持期間が約10年間程度となっている。



図 3.1-30 電子タグの電池用途による分類

③ 使用済燃料の直接処分において使用する電子タグの選定

使用済燃料は地上の燃料詰替施設に受入後、処分容器への収容など様々な工程を経て地下 処分場に定置されるが、定置後に移動する可能性は小さいことから、電子タグは使用済燃料 を地上の燃料詰替施設に受け入れてから廃棄体を地下処分場に定置するまでの期間に適用す るものとした。しかし、その期間を特定するのは困難であることから、電子タグの使用可能 期間はできるだけ長いことが望まれる。このことから、本目的にはアクティブ方式の電子タ グよりもパッシブ方式の電子タグの方が適していると考えられる。 さらに、燃料詰替施設や地下処分場における廃棄体の取り扱いを考えると通信距離も重要な要素となる。パッシブ方式で使用されている3種類の周波数帯のうち、通信距離が最も大きいのは920 MHz(UHF帯)の周波数帯であるため、UHF帯の周波数を使用する電子タグが有用と考えられる。

以上のことから、ここではパッシブ方式・UHF帯の電子タグを使用することを仮定して検討 した。

④ パッシブ方式・UHF 帯の電子タグの性能

本節ではパッシブ方式・UHF帯の電子タグの性能を通信距離、耐熱性、耐水性、耐改ざん性、 耐放射線性の観点で整理した。

a. 通信距離

通常の UHF 帯の電子タグシステムの通信距離は、1,000 mW のアンテナ出力で通常のアンテ ナを用いた場合で5 m とされている。しかし、以下のような要因で変動し、通信距離の短縮 を招くことがある。

- ・アンテナの大きさ
 - パッシブ方式・UHF 帯の電子タグに用いられるアンテナは 1/2 波長のロッドアンテ ナが多い。
 - 一電子タグ自体が小さい場合には 1/2 波長の長さを有するアンテナが実装できず、この場合には受信電力が低減し通信距離が短くなる。
- ・送信出力
 - ー電子タグの出力は電波法で規制されており、920 MHz 帯を利用する電子タグに関しては 250 mW と 1,000 mW の 2 種類の出力が認められている。
 - -出力が 250 mW のとき通信距離は 5 m よりも短くなる。
- ・水分の影響
 - 一水分の影響は、空間伝播における電波吸収と電子タグアンテナの周波数特性変化の
 2 つがある。
 - 一電波のエネルギーが水分子に吸収されることで電子タグに到達する電力は低減し、

 通信距離は短くなる。
 - -水分子の共振周波数は5 GHz 付近であることから 920 MHz における吸収効率はそれ ほど高くない。
 - 一周波数特性変化は電子タグが水分を含みやすい材料に挟まれているときに発生しやすい。
- ・反射波の影響
 - 一電波が壁面や地面、天井で反射することで反射波が発生し、この反射波の位相が搬送波に対し180度ずれた場合は搬送波と反射波で打ち消しあいが生じ、電波強度が大幅に低減する。
 - 一通常の用途では電子タグまたはリーダライタは移動するので、位相のずれが発生したとしても一時的なものと考えられる。

- ・周辺の金属の影響
 - 一電子タグが存在する場所の近傍に金属が存在すると、搬送波と周辺金属が相互作用 することで電波ノイズが発生し、搬送波に影響を及ぼす。

 - 一近年、金属の影響を低減した電子タグや、金属をアンテナの一部とする電子タグが
 開発されており、電子タグ内部に金属を配置した状態でアンテナを最適化すること
 により近傍の金属の影響を低減させている。

b. 耐熱性

電子タグの耐熱性は、電子タグに対して読み書きが実施可能な温度である「使用温度」と 電子タグの情報が保存可能な温度である「保存温度」の2つの観点から定義されている。通 常、使用温度の最大値は保存温度の最大値よりも低くなり、また、一般的に電子タグは常温 環境で読み書きを行うため、保存温度をもって耐熱温度とすることが多い。

また耐熱方式には断熱方式と放熱方式の2つの方式があり、耐熱電子タグの多くは断熱方 式を採用している。断熱方式は、電子タグも高温環境下に晒される場合に用いられる方式で ある。それに対して、放熱方式は貼付される対象の物品は高温になるが、電子タグそのもの は常温環境下に置かれる場合に用いられる方式である。

c. 耐水性

電子タグは電波を送受信することで通信するため、導電性のある物質で密封すると通信で きなくなるが、非導電性の物質であれば密封しても通信ができなくなることはない。このた め、耐水性の必要な電子タグについては、樹脂やプラスチックなどの水を透過しない非導電 性物質で密封することで耐水性を具備することが可能である。

d. 耐改ざん性

電子タグを管理対象物に貼付してそれらを特定する場合、EPC (Electronic Product Code) 領域のデータを用いる。EPC データは貼付される管理対象の特定の番号である。この番号は電 子タグが管理対象に貼付されて初めて確定するものであり、貼付後に書き込まれる。従って、 EPC 領域が書き込み後ロックされて再書き込み不可となる場合や、1回しか書込みが許されな いメモリーで構成されている場合は改ざんの可能性は否定される。

また、電子タグが工場で製造されたときに付与される TID (Tag IDentification) はユニー クであり、改変もできないことから、工程管理上の理由などにより再書き込みが可能な電子 タグを使用する場合は TID を EPC の代わりに使用することもできる。

e. 耐放射線性

低エネルギーガンマ線による電子タグへの影響を評価するため、平成22年度から平成27 年度にかけて、原子力機構再処理施設の放射性廃棄物を照射線源として用いた評価試験を実 施している。その結果によると、耐放射線性電子タグでは集積照射線量が約350 Gy を超えて も正常に読取ることができた。試験結果を図 3.1-31 に示す。



(小林ほか, 2015)

また、高エネルギーガンマ線の電子タグへの影響を評価するため、タングステン 95 %部 材(鉛相当)で遮へいを施した電子タグに対し、Co-60のガンマ線による照射試験を実施した ところ、4,000 Gyの照射に耐えられることが確認できた。試験結果を図 3.1-32 に示す。



図 3.1-32 高エネルギーガンマ線による電子タグへの影響評価試験結果(寺浦ほか, 2011)

⑤ 電子タグの保障措置への適用におけるメリット

保障措置の対象となる核物質などは識別のための ID が核物質や収納容器の形状に応じた 方法によって付されている。UF6 シリンダーではシリンダー外面に貼り付けられたラベルに 印字され、燃料集合体では部材に刻印されているが、直接処分される使用済燃料の場合は処 分容器に識別 ID を付すことになると考えられる。

この識別 ID として電子タグを利用することにより、廃棄体へのアクセスなしで識別 ID の 確認ができるようになり、また監視カメラによる確認が必要となるラベルや刻印と異なり、 検認対象の廃棄体が施設の構築物や他の廃棄体の影になっても確認できるというメリットが 考えられる。

また、処分容器に収容した使用済燃料の識別 ID、詰替作業の実施時間や作業担当者名など を電子タグに記録させることで工程管理や作業者の被ばく管理に利用することも可能である。 さらに、工程管理に利用することで作業の進捗状況や廃棄体の位置などをトレースすること ができるため、廃棄体の盗取の検知やインサイダーの早期発見など、核セキュリティ能力の 向上に資することも可能である。

⑥ 電子タグの保障措置への適用における課題

a. 電子タグの付与方法

電子タグの貼り付けにあたっては、一般産業分野では接着剤を用いることが多いが、その 他にネジ、マグネット、結束バンド、溶接を用いる場合や、対象物に直接埋め込む場合もあ る。しかし、保障措置の対象から除外されるまで CoK を維持しなければならないことから、 容易に取り外しができるネジ、マグネット、結束バンドによる付与は適切ではない。つまり、 接着剤、溶接、埋め込みによる付与が適切であると考えられる。

しかし、接着剤の場合、経年劣化や放射線、熱による接着能力の喪失の可能性、使用する 接着剤が処分容器の健全性に与える影響を評価する必要がある。さらに、接着剤や溶接の場 合、耐放射線性の電子タグは遮へい体を備えているため厚みがあり、貼付した電子タグが突 起物となってしまい処分容器の取扱設備への影響を検討する必要がある。

埋め込みの場合、電子タグのアンテナが処分容器に接していると処分容器がアースとなっ てしまい、リーダライタからの電波が電子タグの動作電力とならない。このため、樹脂やプ ラスチックなどの絶縁体によって電子タグを処分容器から電気的に浮かせて埋め込むことに なる。しかし、接着剤同様、絶縁体として使用する材料の劣化、処分容器の健全性に与える 影響の評価が必要である。加えて、電子タグを埋め込むために空ける凹部が処分容器の健全 性に与える影響も評価する必要がある。

さらに、接着方法の種類によらず、電子タグが外れた場合にそれを検知する方法や外れた ことを隠ぺいできないようにする方法、再貼付を防止する方法を検討する必要がある。

b. 電子ダグ情報の読み取りエラー

電子タグを処分容器の識別 ID として使用する場合、識別 ID が正確に読み取られなければ ならないが、読み取りエラーや放射線その他の影響によるデータ改変が生じると識別 ID とし ての信頼性が失われる。

識別 ID の読み取りエラーが発生するケースとして以下のケースが考えられる。

①リーダライタ、電子タグ間で電波が送受信されない

②リーダライタまたは電子タグの故障

③データ処理エラー

ケース①は、リーダライタと電子タグとの位置関係が最大の原因と考えられるが、その他 にも周辺の電波環境の異常、電波を吸収・散乱させる障害物の存在などの原因が考えられる。 しかし、いずれの場合であっても、リーダライタと電子タグの位置関係を変えることにより 不具合を解決できる可能性が高いと考えられる。なお、設計の段階で、電波伝搬を考慮した リーダライタと電子タグの設置位置の検討が行われるものと考えられることから、リーダラ イタ、電子タグ間で電波が送受信されない不具合が発生する可能性は小さいと考えられる。

ケース②については、リーダライタの故障であれば、リーダライタを交換することで対応 可能であるが、電子タグが故障した場合は処分容器の識別 ID が喪失することになるため、CoK が喪失したと見なされ、処分容器の再検認が必要になる。 ケース③のようにデータ処理エラーによって誤った識別 ID が認識された場合も、誤認識の 原因がデータ処理上のエラーであることが明確に同定できない限り識別 ID の喪失と見なさ れ、処分容器の再検認が必要になる。

このような事態を防止するためには、電子タグの故障やデータ処理エラーが発生しても処 分容器の識別 ID が識別可能な状態でなければならないため、処分容器自体に識別 ID を刻印 して光学カメラで監視するなどのバックアップシステムが必要になると考えられる。

(4) 核セキュリティ対策に係る検討

わが国の原子力施設の核セキュリティ対策は、IAEA が発行している核セキュリティシリー ズ文書に従って設計・構築されているが、核セキュリティシリーズ文書は、図 3.1-33 に示す ように、セキュリティ勧告の基礎となる「核セキュリティ基本文書」、核セキュリティ基本文 書を適用しようとする加盟国が採用すべきベストプラクティスを示している「勧告文書」、そ の実施に必要な方法を提示している「実施指針」、参照用マニュアル、訓練ガイド、サービス ガイドからなる「技術手引き」により体系化されている。



図 3.1-33 IAEA 核セキュリティシリーズ文書体系(原子力規制庁, 2014)

平成 28 年度は、平成 27 年度までに検討した核物質および原子力施設の物理的防護に関す る核セキュリティ勧告(INFCIRC/225/Rev.5)の要求事項に基づく核セキュリティシステムの 概念および課題を踏まえ、IAEA 核セキュリティシリーズ No. 10「設計基礎脅威の策定、使用 および維持」に基づいて仮想施設に対する仮想脅威を想定し、またその脅威を検知、遅延、 阻止するための核セキュリティシステムを検討した。

本検討に係る構成は次のとおりである。

- 1) IAEA 核セキュリティシリーズ No. 10「設計基礎脅威の策定、使用および維持」の概要
 - ① DBT の定義
 - ② 脅威評価
- 2) 仮想施設の設定
- 3) 仮想施設の DBT 策定
 - 仮想施設における脅威
 - ② 仮想施設における DBT 評価

- 4) 仮想施設の核セキュリティシステムの検討
 - ① 地上施設に適用する核セキュリティシステム・機器
 - ② 地下施設に適用する核セキュリティシステム・機器
- 5) 課題

1) IAEA 核セキュリティシリーズ No. 10「設計基礎脅威の策定、使用および維持」の概要

IAEA 核セキュリティシリーズ No. 10「設計基礎脅威の策定、使用および維持」は IAEA 核セキュリティシリーズ文書の実施指針のひとつで、設計基礎脅威(以下「DBT」という)の定義、 DBT の策定、使用、維持に関与すべき組織の役割および責任、DBT 評価の前提となる脅威評価の方法などを提供している。

① DBT の定義

この指針において、DBT は「核物質またはその他の放射性物質、あるいはそれらの関連施設 に対して、不法移転または妨害破壊行為といった悪意のある行為を企図するおそれのある潜 在的な内部脅威者および外部脅威者の属性および特性を記述したもの」と定義されており、 物理的防護システムを設計・評価するための性能要件を確立するためのツールとして用いる ものとしている。

DBTの策定にあたっては、その前段階として脅威評価を行うことが求められている。評価する脅威は、悪意のある行為につながる可能性のある既存または潜在的な情報を収集・分類し、物理的防護システムの設計要件の根拠とすることの妥当性に基づいて評価することで決定する。

DBTの策定、使用、維持に関するすべての責任は国にあるとされているが、国の指示の下、 所管当局、情報機関、核物質またはその他の放射性物質の取扱者、およびその他の関連組織

(警察当局、軍隊、国境警備隊、税関など)が DBT の策定、使用、維持に関与することが求められており、また DBT に対する必要な防護措置の策定・実施を行うことになっている。図 3.1-34 に指針で示されている DBT の策定フローを示す。



図 3.1-34 DBT 策定フロー (IAEA, 2009)¹

2 脅威評価

脅威評価とは、悪意のある行為に帰結するかまたは繋がる可能性のある既存または潜在的 な脅威に関する情報を収集・分類し、評価するプロセスである。

収集・分類する情報は、情報機関および法執行機関からの情報、政府の公式報告書、機密 または非機密のその他の情報、事業者による事故報告書、裏付けのあるメディアの報告、さ らには特定の物質または施設に関係する脅威情報、敵対者の特性に関する関連情報、および 深刻な被害をもたらす産業に関する関連情報とされている。ただし、情報の信頼性が重要で あり、正確であると判断された情報のみを使用すべきとしている。

脅威の評価については、収集した情報に基づいて、既存または潜在的な脅威者(テロリス

¹ 図中の表記は引用元文献の内容を仮訳したものであり、IAEA から認められた公式の訳語ではない。

ト、犯罪者、など)、動機(政治目的、金銭目的、など)、意図(盗取、妨害破壊行為、など)、 意欲(他人、自分の生命へのリスク)、能力(武器、資金力、など)を個々に判断して実施す ることが求められている。

2) 仮想施設の設定

使用済燃料の処分施設に対する DBT を策定するにあたり、具体的な脅威や脅威者を想定す る必要があるが、それらを想定するためには DBT を適用する施設や潜在的脅威者に関する具 体的な情報が必要である。しかし、現時点ではそれらに関する具体的な情報を特定できない ため、仮想の使用済燃料処分施設を設定することとした。

設定した仮想施設は、地上施設(燃料詰替施設)と地下施設(地下処分場)が同一の敷地に 立地されているものとし、地上施設は防護区域内に配置されているものとした。仮想施設に おける使用済燃料の取扱工程については、平成26年度報告書において設定した地上施設と地 下施設が同一の敷地に立地する場合の工程のとおりとした。また、仮想施設は日本国内に立 地する使用済燃料の処分施設とし、警備員の火器による武装など、国内法上許可されない核 セキュリティ体制は考慮しないものとした。

仮想施設の立地状況を図 3.1-35 に、地上施設における使用済燃料の取扱フローを図 3.1-36 に示す。



図 3.1-35 仮想施設の立地(地上・地下)(原子力機構, 2014)



図 3.1-36 使用済燃料の取扱フロー(原子力機構, 2015)

3) 仮想施設の DBT 策定

① 仮想施設における脅威

IAEA 核セキュリティ文書に従って行った脅威評価の例を表 3.1-24 に示す。想定した脅威 者は次のとおりとした。

- ・テロリスト:政治目的、金銭目的、イデオロギー目的を達成するために、妨害破壊行為、盗取、暴行・殺人を実行するグループ。殺人、または自爆テロなどにより、他人または自分の生命をリスクにさらすことを許容する。
- ・犯罪者:金銭目的、または個人的目的を達成するために、妨害破壊行為、盗取活動を実行するグループまたは個人。自身の生命に対するリスクは許容しないが、状況により他人の生命をリスクにさらすことは許容する。
- ・デモ隊:グループの主義・主張を表明する手段として合法的な手段を行使するグループ。基本的に違法行為は行わない。

商成 孝				和罪者	۲. ۲. K
省威伯				化非有	フモ隊
期機			政治日的、金銭日的、イ ビュージ 日始	金贱日旳、個人旳日旳	政治日的、イナオロキー
			テオロキー目的		日的
意図			奶害破壊行為(直接攻	妨害破壊行為(サイパー	政治的不安定の扇動、不
			撃、スタンドオフ攻撃、	攻撃)、盗取、社会的混	許可侵入
			サイバー攻撃)、盗取、社	乱、政治的不安定の扇動	
			会的混乱、政治的不安定		
			の扇動、暴行・殺人		
意欲	他人の生命	・財産に対するリスクを考慮するか	なし	なし	あり
	自分の生命	・財産に対するリスクを考慮するか	なし	あり	あり
能力	グループ	攻撃力はどの程度か	大	小	なし
	の大きさ	攻撃実行者数はどの程度か	~数十人	数人	~数千人
		組織全体の規模はどの程度か	~数万人以上	数人	~数万人
	計 界	種類は何か	后哭全般 (火哭 刃物	小水哭 刃物 爆弾	*]
	民由的	1里天凤14月177	本面主版(八面、万切、 市面 筋空機 爆弾 かど)	小八福、万物、原理	12 U
		教長はじの印度か	<u>車両、肌呈機、爆弾など</u> + 具	小昌	+> 1
		数単はとの性度が 1.5.の可能地は高いさ	六里	· 少里	なし
	100 700 47	人手の可能性は高いか	同		/r L
	爆免物	種類は何か	榴弾、ログット弾、時限	時限爆弾、単爆弾、ハイ	7£ L
			爆弾、車爆弾、バイフ爆	<u>フ爆弾</u>	
			<u>弾、自殺爆弾</u>		
		数量はどの程度か	大量	少量	なし
		入手の可能性は高いか	高	低	なし
		トリガーは精緻か	高	低	なし
		入手したものか、または即席に作られたものか	入手/自作	自作	なし
	工具・機	どのような工具を利用するか	軍事用工具・機材、一般	一般市販工具、自作工具	一般市販工具、自作工具
	材		市販工具、自作工具		
1		重機を利用する可能性けあろか	高	任	任
		上級とものの 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	声	任	/中·
		山丁未用で作用するり能性はのなか。 具新機関な利用する可能性はもでふ。	同		ith ith
		取初成帝を利用りつり能性はめるか	同	同	<u></u> (代
		核セキュリディ機器を無効化するための工具	同	低	仏
		を利用することが可能か			
		どのような通信機器が利用可能か	暗号化機能付き通信機	携帯電話	携帯電話
			器、携帯電話		
	移動・輸	どのような輸送・移動機器を使用するか	公共機関、自動車、バイ	公共機関、自動車、バイ	公共機関、自動車、バイ
	送手段		ク、船、航空機	ク、船	ク、船
		どのようなルートを使う可能性があるか	陸上、海上、海中、航空	陸上、海上、海中	陸上、海上
		脅威者の参集範囲はどの程度か	国内外	国内	国内外
		輸送・移動機器の数はどの程度か	大量	少量	少量
		輸送・移動機器の入手の可能性は高いか	吉	吉	高
	技術的翌	工学的表義は高いか	直		任
	敦市	土子の宗氏は同くが	同	5 N	12 1
	2687Z	風谷の使用経験はめるが	80 9 t h	80 V	40
		漆光初の使用経験はのるが	のり	120	77 L
		化字物質の使用経験はあるか	あり	なし	なし
		放射性物質の使用経験はあるか	あり	なし	なし
		軍事的な経験はあるか	あり	なし	なし
		コミュニケーション能力は高いか	高	高	高
	サイバー	攻撃対象はどこか	PP 機器、プロセス制御機	PP 機器、プロセス制御機	PP 機器
	技術		器、電力制御機器	器、電力制御機器	
		情報収集能力はどの程度か	青	青	低
		IT スキルは高いか	青	青	低
	知識	攻撃日標に関する情報は持っているか	あり	かし	なし
		サイトの運転計画お上び手続きに開する標準		かし.	tr1.
		ケキップいろか	4,7,7	·	1.4 0
		防護措置 安全対策かどに関する標想を告って	ъn	1 1	<i>to</i> 1
		的設治し、女王州来などに関うる情報を招うて	67.9	, a C	12 0
		技物所わじの利用士法に開小フは知た性 ~	もり	わ1	+a 1
		核物質などの利用力法に関する情報を持つし	<i>8</i> 0 9	1£ U	7£ L
	次人非主	マンシン	次众授助 百寸次人	白コ까^	百二次人 黄人
	貸金調達	財源は何か	<u>)</u> 貸金援切、日亡貸金	日亡貨金	目亡賞金、券金
		資金の量はどの程度か	大	小	小
		資金を入手できる可能性は高いか	大	小	中
	インサイ	外部脅威者と共謀しているか、または単独か	共謀/単独	共謀/単独	共謀/単独
	ダーの共	関与は受動的か、または能動的か	能動的/受動的	能動的/受動的	能動的
	謀	関与は暴力的行動を含むか	含 む	含 む	含まない
		機微情報・設備へのアクセス権限を有する可能	青	青	高
		性はあるか			
1		インサイダーの数はどの程度か	多粉	少数/な1.	少数/たし
	支援休制	支援組織はあるか			5 m/ .a U あり
	~ 100 114 110	物流上の支援けれるか			5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
1	HE AL	1701mLV入版はのなか 回应に動す。		し (よし) (感 空	のソ
1	年火 1/11	同位11 期か 後まてたたしていてみ。	井隠省/隠省	同省 セッ	开隠省
			あり	あり	7よし
		協衆工作をしているが		· ·	N
		事前に襲撃の訓練を行うか	あり	なし	なし
		■前に襲撃の訓練を行うか 実行後に隠蔽工作を施すか	あり なし	なし あり	なし なし
		国家工作をしているか。 事前に襲撃の訓練を行うか 実行後に隠蔽工作を施すか 盗取の場合、1SQを超える量を盗取するか	あり なし あり	なし あり なし	なし なし なし
		時級上FFをしているか 事前に襲撃の訓練を行うか 実行後に隠蔽工作を施すか 盗取の場合、ISQを超える量を盗取するか 脅威活動の実行時間は	あり なし あり 昼間/夜間	なし あり なし 夜間	なし なし なし 昼間
		時級上作をしているか 事前に襲撃の訓練を行うか 実行後に隠蔽工作を施すか 盗取の場合、ISQ を超える量を盗取するか 脅威活動の実行時間は 武力の使用を前提としているか	あり なし あり 昼間/夜間 状況に応じて使用	なし あり なし 夜間 状況に応じて使用	なし なし なし 昼間 なし

表 3.1-24	仮想施設に対する	る脅威評価の例
----------	----------	---------

※下線付きの事項は事業者による対応能力を超えるものであることから、国レベルで対応す るものとする。

仮想施設における DBT 評価

IAEA 核セキュリティ文書では脅威評価に基づいて DBT を策定することを求めているが、ここでは仮想施設や仮想潜在的脅威者を想定した考察であるため、脅威評価をもって DBT と見なすこととした。

ただし、事業者の責任範囲を超える脅威については DBT で考慮する必要はないことから、 表 3.1-23 において下線を付した脅威については考慮しない。

4) 仮想施設の核セキュリティシステムの検討

評価した仮想脅威に基づいて、最も強固な核セキュリティシステム・機器が要求されるテ ロリストによる脅威を想定し、仮想施設に設置すべき物理的な核セキュリティシステム・機 器を検討した。検討にあたっては、地上施設と地下施設では要求される核セキュリティシス テム・機器が異なることから、個別に整理した。

① 地上施設に適用する核セキュリティシステム・機器

国内外の既存の原子力施設では IAEA 核セキュリティ文書の要件に従って核セキュリティ システムを構築しているが、IAEA 核セキュリティ文書はテロリストによる脅威も評価した上 で作成されている文書であることから、仮想の地上施設に対する核セキュリティシステムを 調査するにあたっては、それらの情報を参照するのが妥当と考えられる。しかし、既存の原 子力施設における核セキュリティシステムに関する情報は基本的に非公開であるため、情報 を収集するのは困難である。このため、基本的には国内外の原子力施設における核セキュリ ティシステムを参照するものの、原子力施設と同等またはそれ以上のセキュリティ対策が要 求されていると想定される米国の軍事施設に対して米国国防総省が定めたセキュリティ基準 である UFC (Unified Facilities Criteria) も参照し、それらにおいて適用・検討されてい るセキュリティ設備・機器を地上施設に適用する核セキュリティシステム・機器として挙げ ることとした。ただし、警備員の武装など、日本の国内法に抵触する恐れのある仕様は除外 した。

a. 物理的障壁

- ・フェンスに対する要求項目例
 - -フェンスの網目部のワイヤーの太さ、開口部の幅
 - -網目部のワイヤー材(十分な強度を持つ素材として、亜鉛めっき鋼、PVC 被覆鋼、アルミ被覆鋼など)
 - -フェンスの固定(人力で容易に持ち上げられないようにアンカリング)
 - -フェンス柱部の材料(鋼製、それが困難な場合は鉄筋コンクリート製)
 - -フェンスの高さ(容易に乗り越えられない高さ)
 - -アウトリガーの角度、長さ
 - 有刺鉄線の接続
 - -フェンスを設置する場所の地面の硬さ(手工具を用いても容易に掘削できない)

- ・車両バリアに対する要求仕様
 - 車両バリアにはアクティブ型とパッシブ型があり、以下のように区分される。
 - ①アクティブ型:人または装置による起動が必要であり、可動部がある。バリケード、車止めポール、ビーム(梁)、ゲートなどが該当する。(図 3.1-37)
 - ②パッシブ型:エネルギーを吸収または地面に逃がすことによりバリアとして効果 を発揮する。高速道路の中央分離帯、車止めポール、タイヤバリア、ガードレー ル、溝、フェンスなどが該当する。(図 3.1-38)
 - -車両バリアは、爆発などが発生した場合であっても建物や警備施設への影響が最小限になるよう、可能な限りそれら施設から離して設置すること。
 - ーアクティブ型は操作ミスなどにより事故を誘発するおそれがあるため、警告標識、 ライト、警報音を設置し、また容易に認識できる色彩とすること。
 - -アクティブ型車両バリアのうちリモート操作するものやセキュリティ上重要な場所 に設置するものについては、不正操作防止対策と警備施設との接続対策を行うとと もに、連続モニタリングができるようにすること。
 - ーアクティブ型車両バリアは、故障や電源異常が発生しても操作ができるよう、非常用電源や手動操作システムを装備すること。



図 3.1-37 アクティブ型の車両バリアの例(USDoD, 2010)



図 3.1-38 パッシブ型の車両バリアの例 (USDoD, 2010)

・スタンドオフ距離(フェンスから建物までの距離)に対する要求仕様
 ー十分なスタンドオフ距離をとるのが最も簡単でコストがかからない方法である。

- 最適なスタンドオフ距離は、建物の構造材との関係性に基づいて決定すること。

- -スタンドオフ距離の考え方は図 3.1-39 に示すとおりである。²
- ースタンドオフ距離を検討する際に想定すべき爆発物は、自動車爆弾、水上輸送船に 積載された爆弾、手荷物爆弾、郵送物爆弾、火器による直接攻撃(攻撃目標が視認で きる地点からの攻撃)とすること。



CCSD_I:爆発物重量クラス1に 対するスタンドオフ距離³

CCSD_{II}:爆発物重量クラス2に 対するスタンドオフ距離³

- 図 3.1-39 防護区域内にある建物に対するスタンドオフ距離の考え方(USDoD, 2013)
- b. 入出管理
 - ・人員用ゲートに対する要求項目例
 - -人員用ゲートの通過可能人数。
 - ーゲートを閉じた際の地面とゲート下部までの間隙。
 - ーゲートの種類。(回転扉式ゲートが望ましい。それが困難な場合、または予備として スイング式(引き戸)ゲートを採用)
 - -スイング式のゲートの場合、通行可能(開口)部の幅。
 - ・車両用ゲートに対する要求項目例
 - ー車両用ゲートは、スライド式、スイング式、垂直回転式、オーバーヘッド式などが利 用可能。
 - -スライド式ゲートの場合、通行可能(開口)部の幅。
 - 両開きのスイング式ゲートの場合、通行可能(開口)部の幅。
 - ・アクセスコントロールに対する要求仕様
 - -以下の3つのもののうち2つ以上のものを提供するようアクセスする者に要求する

² 防護区域外にある建物に対するスタンドオフ距離も UFC 4-010-01 で規定されているが、原子力施設では検討対象外と考えることができるため省略する。

³ 爆発物重量クラスは UFC 4-010-02 で定義されているが、UFC 4-010-02 が非公開文献であ るため詳細は不明である。

こと。

①アクセスする者が保有する物(認証カードなど)

②アクセスする者が知っていること(PIN コードなど)

- ③アクセスする者の特性のうち測定可能なもの(バイオメトリクス認証など)
- -PIN コードの再入力の回数を制限し、制限回数を超えて入力に失敗した場合は警備 施設に通知し、アラームを発生させること。
- ーバイオメトリクス認証に使用する特性は、全ての人間が有するものであって、識別 が可能であり、長期間にわたって不変で、容易に収集できるものが望ましい。例と して、顔、指紋、掌形、静脈、虹彩、網膜、音声(声紋)、筆跡などがある。

c. 警備施設

- ・警備施設(一般的要求)に対する要求仕様
 - 警備施設はメンテナンスを考慮した設計とすること。
 - -警備施設は弾道弾による攻撃にも耐えられる強度を有すること。
 - -警備施設に設置する窓は、昼夜を問わず、外から警備施設の中が見えづらく、かつ 警備施設から外が見えやすいこと。
 - -警備施設の床面は通路よりも十分に高くするか、高台に設置すること。
 - -化学兵器または生物兵器による攻撃にも対処できるよう設計すること。
 - -警備施設で使用する電源は、通信機器、車両管理機器、識別機器、およびその他関連 する防護機器、並びに将来追加される可能性のある機器を稼働させるに十分な能力 を持つこと。
 - -警備施設で使用する電源は、主電源喪失時にも警備施設を継続して運用できるよう なバックアップ電源を有すること。
 - -発電機の不具合時にも安全機能が失われないようにするため、警備機能、フェンス、 主要な通信機器、通報システム、コンピュータ、CCTV システム、進入検知システム、 アナンシエータ(警報監視装置)、車両バリア、バリア駆動装置、進入遮断バー、交 通量センサー、バリア信号機、警報ランプ、その他アクセスコントロール機器に無 停電電源装置(UPS)を接続すること。
 - 警備施設には少なくとも2種類の通信機器を備えること。
 - -警備施設に設置する CCTV システムは 24 時間、365 日稼働し、デジタル録画機能を 備えること。
 - 敷地内に進入する車両の通行許可証および運転手を識別できる CCTV を設置すること。
 - ・警備員の詰所は如何なる方向から衝突されても警備員を保護できるような強度を有すること。
 - 一入域管理施設は訪問者、または職員に対して警備施設として適切な印象を与えるような外観やレイアウトとすること。
 - 警備施設はアプローチゾーン、アクセスコントロールゾーン、レスポンスゾーン、 セーフティゾーンの 4 つのゾーンに分け、(図 3.1-40) それぞれ以下の機能を与え

る。

- ◆アプローチゾーン
 - ①進入してくる車両を減速させる。
 - ②車両の種類で分類し、アクセスコントロールゾーンへの進入ルートを振り分け る。
 - ③車両間の距離を調整し、施設に接続している一般道への影響を緩和する。
 - ④潜在的な脅威車両を識別するための時間をかせぐ。
 - ⑤十分な光量を有するライトによって、歩行者、警備員、標識、その他の脅威が認 識可能になっている。
- ◆アクセスコントロールゾーン
 - ①警備員の詰所を設置する。
 - ②車両の通行を管理する装置・機器を設置する。
 - ③車両に貼られている許可証を確認する。(職員の車両であることの確認)
 - ④個人認証 ID を確認する。(職員であることの確認)
 - ⑤車両および積荷を検査する。
 - ⑥検査をパスしなかった車両を出口へ誘導する。
 - ⑦搭乗者および車両積載物の確認を容易にするため、車両の内外を照らし出すことができるライトが設置される。(アプローチゾーンよりも多い光量)
- ◆レスポンスゾーン
 - ①脅威への対応、防護バリアの起動のための時間を稼ぐ。
 - ②十分な光量を有するライトによって、歩行者、警備員、標識、その他の脅威が認 識可能になっている。
- ◆セーフティゾーン
 - ①爆発などの脅威が発生したとしても、付近にある建物や人員への被害を及ぼさないためのバッファーとする。
 - ②車両および積荷の検査に放射線機器を使用した場合に、周囲の被ばく量を低減 させる。



- ・警備施設(商用トラックや大型車両への対応)に対する要求仕様
 - 一商用トラックや大型車両の検査施設は中央警備施設と分け、専用の場所を設置する こと。
 - -大型車両検査場には、X線検査装置、ガンマカメラ、中性子分析装置などの大型車両 検査装置(積荷の検査も含む)(図 3.1-41)を備え、また車両上面や底部を検査する ための光学カメラを備えること。
 - 車両底部を検査するための光源を設置すること。



図 3.1-41 大型車両検査装置の例(USDoD, 2005)

- d. 侵入検知
 - ・センサーに対する要求仕様(図3.1-42,図3.1-43)
 - -通信するデータは暗号化すること。
 - ・警報ステーションの機能を喪失させる事象が発生した場合であっても、少なくとも
 1カ所の警報ステーションでは機能が維持されるようにすること。
 - -進入検知システムを稼働させるための電源が喪失した場合であっても、異常検知ア ラームの指示なしで動作するよう、バックアップ電源または非常用発電機を設置す ること。
 - ーセンサーのカバーエリアが切り替わる領域やセンサーの不感エリアについては、記録を保持すること。
 - 一検知システムは不正変更防止機能を具備し、不正アクセスの阻止、遅延、検知がで きるようにすること。
 - 一検知システムの設定や状態の変更は警報ステーションの警備員または許可された者 しか実施できないようにし、またシステムが設置されている場所以外からは変更で きないようにすること。
 - 検知センサーは設置する場所に応じて適切なものを適切な配置で設置すること。


図 3.1-42 屋外設置用の代表的な検知システム(原子力機構, 2015c)





モーション検知ビデオカメラ

モーション検知の例

図 3.1-43 モーション検知システム(左: USNRC, 2014 右: USNRC, 2011)

- ・監視カメラシステムに対する要求仕様
 - 監視カメラシステムは、その他のセンサーの位置が確認できるように設置すること。
 - ー監視カメラシステムは、アラームが発生した時にその原因を確認できるようになっていること。
 - -監視カメラシステムは、侵入者がその場所を離れる前に、侵入者の位置を特定できる程度の反応速度を有すること。
 - ー監視カメラシステムは太陽光などの自然条件、または照明などの人為条件の状態に かかわらず、取得する画像の品質低下が発生しないこと。

- 監視カメラシステムは、以下のサブシステムにより構成されること。

①画像データを電気信号に変換する機能を有するカメラシステム

②監視エリアを照明するためのライティングシステム

③画像データを警備施設へ送信するための通信システム

- ④モニターに表示させる画像を切り替えるスイッチングシステム
- ⑤画像データの記録システム
- ⑥画像およびアラームを表示させるモニターシステム
- ⑦アラーム発生時にアラームシステムと監視カメラシステムを相関させるシステム

- 監視カメラシステムの視界とセンサーの検知エリアは完全に一致すること。
- ー監視カメラシステムがカバーできないデッドエリアが発生しないように設計、設置 すること。
- ーアラームが発生した場合、以下の3ステップにより画像を評価する。(図 3.1-44)
 ①検知:視界に何かが存在していることを検知する(視認対象物の同定は不可)
 ②分類:視認したものが人間かどうかを判断する。
 ③同定:視認した人間を同定する。
- -屋外に設置する監視カメラシステムは電源、通信モジュールを含め、環境から保護 するための筐体に入れること。
- -屋外に設置する監視カメラシステムは、風雨などの環境条件が変化してもカメラの 動作や視界が阻害されないような安定性のあるものに設置すること。
- 一屋外に設置する監視カメラシステムは監視エリア面を十分監視できる高さに設置すること。
- -照明器具は、カメラが十分な照度を得られるよう、カメラよりも高い位置に設置すること。





②分類

③同定

図 3.1-44 検知・分類・同定シークエンス (USNRC, 2011)

e. 非常用電源に対する要求仕様

・非常用電源に対する要求仕様

- 外部電源喪失に備えて、以下のセキュリティ機器・システムには非常用電源または バックアップ電源を備えること。

①侵入検知装置

②監視装置(CCTV システム)

③照明装置

- ④自動アクセスコントロールシステム
- ⑤アラームシステム

⑥通信装置

- -非常用電源はセキュリティシステムの機能停止やデータの喪失なしで自動的に切り 替えができる機能を有すること。
- 外部電源喪失時、非常用電源起動時、非常用電源起動失敗時には自動的に警備施設

にアラームが発生するように設計すること。

② 地下施設に適用する核セキュリティシステム・機器

地下施設では使用済燃料が地下数百メートルに保管されていることから、岩盤自体が強固 な核物質防護上の障壁となっている。これを踏まえ、地下施設に対しては、坑道へのアクセ スコントロール、坑道内への監視カメラやセンサーの設置、さらには坑道以外からの侵入を 検知するための地中レーダによる測定や地震波観測、または人工衛星による監視が有効な核 セキュリティシステムと考えられる。

これらシステムのうち、アクセスコントロールや監視カメラ、センサーの設置については 地上設備に設置するものと同等と考えられるため、坑道以外からの侵入を検知するための技 術のうち施設者が設置可能な地中レーダによる測定、および地震波観測について検討した。 しかし、現時点においてこれら技術を核セキュリティシステムとして利用することは技術的、 経験的に確立されてはいないので、ここではこれら技術の原理、性能を整理することとした。

a. 地中レーダ測定技術

(a)基本原理

地中レーダは電磁波の直進性を利用するシステムであり、送信アンテナから地中に向かっ て発射した電磁波が比誘電率の異なる物質境界面で反射する性質を利用して、受信アンテナ で受信した反射波の特徴により地中の埋設物および地中構造を調査する物理探査法である。 地中レーダの基本システム構成を図 3.1-45 に示す。



図 3.1-45 地中レーダシステムの基本構成

(b) 性能

地中レーダの性能は「最大探査深度」と「分解能」で評価できる。

最大深度は様々な条件によって変化するが、送信電力、受信可能な最小電力、使用する周 波数、地下媒質が主な決定因子となる。通常、地中レーダでは数十 MHz から数 GHz までの周 波数が利用されているが、周波数が低いほど最大探査深度は深くなる。

一方、レーダ分解能は計測する対象物の大きさと使用するレーダの波長、つまり周波数と の関係によって決定される。使用する波長が対象物より長いと対象物からの反射波が互いに 重なり合って識別不能となるため、波長が短い、つまり周波数が高いレーダであれば分解能 は高くなる。

このように、「最大探査深度」と「分解能」は周波数に対して相反するため、周波数の選択が測定において最も重要となる。

b. 地震波観測技術

(a) 基本原理

地震波は地震計(速度センサー)を岩盤内に埋設または坑道壁面に取り付け、岩盤に与え られた振動によって生じる弾性波を捉えることで観測することができる。多くのセンサーに は振動軸が存在するため、1地点の受振器に3つの振動センサーをx、y、zの直交する3方 向(3成分)の波を捉えるように配置することにより、起振源から発振される弾性波を捕捉す ることが可能である。振動センサーの設置例を図3.1-46に示す。



図 3.1-46 振動センサー設置例(杉田ほか, 2012)

(b) 性能

代表的な地震計として、岩盤を対象とした振動センサーとして用いられた実積がある、米 国 Geospace Technologies 社製の動電型速度出力振動センサー(GS-20DH)の主な仕様を表 3.1-25 に示す。

この振動センサーは動電コイル型のため電源が不要であるという特長がある。振動の速度 出力は電圧出力で表示される。また、地震計として使われる低周波のものから機械振動の異 常を検知する高周波のものまで使用可能である。

項目	特性
固有周波数	28 Hz, 40 Hz (±5 %)
センサー感度(600 Ωコイル)	$0.354 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1} \pm 10 \%$
可動マス重量	7.1 g ±10 %
寸法	高さ 3.35 cm×直径 2.69 cm
重量	99 g

表 3.1-25 動電型速度出力振動センサー GS-20DH の主な仕様

(Geospace Technologies 社ホームページ)

5) 今後検討すべき核セキュリティ対策の課題

地上施設と地下施設が同一敷地内に立地されている仮想施設を設定し、仮想施設に係る脅 威に対応するためのハードウエアを検討した。しかし、核セキュリティ体制を確立するため には、ソフトウエアについての検討や、ハードウエアとソフトウエアのインターフェースに ついての検討、さらには、今後開発される新技術への対応方法も検討していく必要がある。

以下に検討が必要と考えられる核セキュリティにおける課題を挙げる。

- ・コンピュータセキュリティ対策
- ・インサイダー対策
- ・輸送時の対策(構内輸送時、地上施設と地下施設が同一敷地内に立地されていない場 合など)
- ・上空からの侵入に対する対策
- ・核セキュリティ対策組織の構築
- ・職員および対抗部隊に対する教育・訓練
- ・ステークホルダー間の連絡、情報共有
- ・3S(安全、保障措置、核セキュリティ)間、および施設操業とのインターフェース
- ・技術革新に対応した核セキュリティシステムのアップデート

3.2 人工バリアの設計

3.2.1 処分容器の設計

(1) 本項目の背景と目的

使用済燃料集合体はガラス固化体と比較して放射線量、発熱量、燃料組成、材質、廃棄体 の仕様(形状、寸法、重量)等が異なるため、処分容器についても使用済燃料集合体の仕様 や条件に適した設計を行う必要がある。また、処分容器の設計では、廃棄体の定置方向(横 置きあるいは堅置き)、処分容器材料や容器構造とそれらに応じた製作性、操業時の容器の ハンドリング性や処分容器と容器に収容した燃料集合体の健全性等も考慮する必要がある。

すでに、平成27年度までにレファレンスのPWRおよびBWRの使用済み燃料に対して上記の 観点に沿った設計を進め、処分容器の基本仕様を示すとともに、処分容器の製作時も含む操 業時や処分後の使用済燃料集合体や処分容器の健全性評価を実施してきた(原子力機構, 2015a; 2016)。

平成28年度は、これらの成果を基に、使用済燃料の濃縮度や燃焼度等の多様性に着目し、 臨界安全解析、放射線遮へい解析を実施し、平成27年度までに提示した基本仕様の処分容器 の成立性を評価した。また、製作や操業に起因する不確かさや制約条件等が処分容器の仕様 や健全性に及ぼす影響についての解析的な評価を行った。具体的には、PWR使用済燃料の多 様性を考慮した臨界安全性評価、PWR使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収 線量率評価・廃棄体への入熱を考慮した伝熱解析による廃棄体温度の評価、複合容器の銅外 層のクリープ挙動を考慮した構造解析による処分容器の健全性の評価を実施した。

以下に、(2)として「PWR 使用済燃料集合体および処分容器の基本仕様」を示し、それ以降 に上記に関する検討内容を「(3)PWR 使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全性評価」、

「(4)PWR 使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収線量率評価」、「(5)廃棄体 への入熱を考慮した伝熱解析による廃棄体温度の評価」、「(6)複合容器の銅外層のクリープ 挙動を考慮した構造解析による処分容器の健全性の評価」として示す。また、本章のまとめ を 3.5 節に示す。

(2) PWR 使用済燃料集合体および処分容器の基本仕様

PWR 燃料の場合の使用済燃料集合体や処分容器の基本仕様は、処分容器設計(原子力機構, 2014;2015b;2016)の成果を基に設定した。本検討で想定した使用済燃料集合体および処分 容器の基本仕様をそれぞれ表 3.2.1-1 および表 3.2.1-2 に示す。

	備考	
炉型	PWR	
濃縮度	3.4~4.8 %	
燃焼度	$39,000\sim 55,000$ MWD MTU ⁻¹	―――――――――――――――――――――――――――――――――――――
燃料配列	17×17	機構, 2015b)にお
ペレット密度	理論密度の 95 %	けるレファレンス 燃料仕様、および高
燃料有効長	3,600 mm	燃焼度化を想定し
ペレット直径	8.2 mm	た仕様
燃料棒の本数	264 本	

表 3.2.1-1 使用済燃料の基本仕様 (PWR 燃料)

表 3.2.1-2 PWR 使用済燃料の処分容器の基本仕様

		備考	
収	容体数設定範囲	4~1 体	
	燃料集合体収容 スペース	断面;230 mm×230 mm 長さ;4,500 mm	
	燃料集合体離間距離	50 mm	処分容器の径は収容体
処分容	腐食代厚さ	40 mm	数設定範囲における寸
奋让体	材質 (構造材)	炭素鋼*	法範囲を示す。
	材質 (腐食代)	炭素鋼または銅*	
	処分容器外形寸法	径;1,001~605 mm 長さ;4,780 mm	
処分容 器・構 造・重 量例	構造・寸法	839 559 140 230 50 40	 ・収納体数2体の場合 を例示。 ・図の寸法単位mm ・重量には使用済燃料を 含まない。
	重量	約 18 トン	

※臨界解析においては、鉄のみ考慮。

(3) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全性評価

平成 27 年度までは、レファレンスの PWR 使用済燃料(濃縮度 4.5%、燃焼度 45 GWd t⁻¹) を対象とする臨界解析を行っていたが、軽水炉から発生する使用済燃料には、種々の濃縮度 および燃焼度のものが存在することから、こうした使用済燃料の多様性を考慮した評価を行 うことが必要と考えられる。わが国では、PWR の UO₂燃料としては、従来型(濃縮度 約 3.4 wt% /最高燃焼度 39 GWd t⁻¹)、高燃焼度化ステップ1燃料(濃縮度 約 4.1 wt%/最高燃焼度 48 GWd t⁻¹)、高燃焼度化ステップ2燃料(濃縮度 約 4.8 wt%/最高燃焼度 55 GWd t⁻¹)の3タ イプが使用されていることから、これら3タイプの UO₂使用済燃料を、表 3.2.1-2 の処分容 器に収納して処分する場合を想定した臨界解析を行い、処分後の未臨界性を維持するために 必要な最低燃焼度を導出した。ここではこの検討の成果を示す。最低燃焼度が低いほど、よ り広範囲な燃焼度の使用済燃料に対して処分後の未臨界性が維持できることになる。なお、 本検討での未臨界性の判定においては、3.2.2 項で後述する、処分容器の設計における臨界 安全に関する個別課題のうち、未臨界判定基準値の設定に関する検討の成果を反映した。

評価対象とする燃料および処分容器の条件を表 3.2.1-3 に示す。炉取り出し後の冷却期間 については最も臨界になりやすい炉取り出し直後の燃料を想定した。なお、処分容器や燃料 集合体の金属材料の腐食の進展による形状の変化については考慮しなかった。

 初期濃縮度[wt%]
 3.4
 4.1
 4.8

 燃焼度[GWd t⁻¹]
 10,15,20,25,30
 20,25,30,35,40
 30,35,40,45,50

 炉取り出し後の冷却期間[年]
 0

表 3.2.1-3 燃料仕様

1) 解析手法

① 燃焼計算

燃焼計算には SWAT3.1 コード(須山ほか,2009)を使用し、表3.2.1-3 に示した初期濃縮 度について、単一燃料セル体系による計算を行った。その他の計算条件については、既往の 検討(山本ほか,2015)と同様とし、中性子スペクトルの計算には MVP-2.0 コードおよび JENDL-4.0 に基づく断面積ライブラリを使用した。

2 臨界計算

臨界計算には MVP-2.0 コードおよび JENDL-4.0 に基づく断面積ライブラリを使用した。臨 界計算モデルを図 3.2.1-1 に示す。処分容器内の燃料集合体収納スペースには水が満たされ ているものとし、燃料集合体の上部および下部の構造材については無視した。境界条件は完 全反射とした。燃料集合体の幾何形状および燃料セル、計装管およびガイド管等の幾何形状 については既往の文献(山本ほか, 2015)と同様とした。

未臨界を判定する基準値については、3.2.2 項で後述する、処分容器の設計における臨界 安全に関する技術的課題のうち、推定臨界下限増倍率の設定に関する検討結果を踏まえて設 定した。臨界安全ハンドブック(科学技術庁,1988)および臨界安全ハンドブック第2版(日 本原子力研究所,1999)では、推定臨界下限増倍率に対して任意の安全裕度を考慮した値を、 未臨界を判定する基準値として定義しているが、3.2.2 項では、任意の安全裕度を見込まず、 推定臨界下限増倍率そのものを、未臨界を判定する基準値として扱っているため、本項にお いても同様に、推定臨界下限増倍率を、未臨界を判定する基準値として定義した。

平成 27 年度までに実施した燃焼度クレジット適用時のパラメータの影響評価の結果(原子 力機構, 2015a;原子力機構, 2016:山本ほか, 2015)から、本解析モデルでの実効増倍率の 誤差を 0.05 Δk として、海外における既往の検討結果(Agrenius, 2002)と同様の手法によ り、3.2.2 項の検討結果を踏まえて、0.95 および 0.98 から 0.05 を差し引いた値である 0.90 および 0.93 の 2 種類を、未臨界を判定する基準値とした。



図 3.2.1-1 臨界計算モデル

2) 解析結果

上記1)に示した解析手法に従い、燃焼計算および臨界計算を実施した。臨界計算の結果を 図3.2.1-2に示す。さらに、未臨界判定基準値を0.93あるいは0.90とした場合に収納可能な最 低燃焼度を線形内挿により求めた結果を表3.2.1-4に示す。ここで求めた最低燃焼度は、それ を上回る燃焼度を持つ使用済燃料を4体まとめて処分容器に収納して処分しても、容器内部に おいては未臨界が維持されることを示している。本解析で求めた最低燃焼度は、前述の3タイ プの燃料の最高燃焼度を大幅に下回る結果となったことから、図3.2.1-1で示した容器に収納 して処分する場合を想定すると、処分後、容器内部において未臨界を維持できる使用済燃料 がわが国において広く存在する可能性があると考えられる。本検討では、燃料集合体の収容 体数を4体としたが、処分後のベントナイトの熱影響を抑制する観点からは収納体数を2体以 内に制限する必要がある可能性があり、この場合には、最低燃焼度はより低い値となると考 えられる。

なお、スウェーデンのSKB社においても、本項と同様の手法により、最低燃焼度をlimit curveとして評価し、結果を使用済燃料の集中中間貯蔵施設(CLAB)に保管されている使用済 燃料の燃焼度等のデータと比較することにより、現存する多様な使用済燃料を直接処分する 場合の処分容器内部での臨界安全性を議論している(Agrenius, 2002; 2010)。本項で求め られた最低燃焼度についても、わが国で実際に発生している使用済燃料の燃焼度等のデータ と比較することが重要であるが、個々の燃料の燃焼度や冷却期間の情報は基本的に公開され ていない。しかしながら、現存する限定された公開情報に基づき,軽水炉を対象として燃焼 度に応じた使用済燃料の発生量のモデル計算による推計を行う手法が検討されており(石谷 ほか, 2015)、今後、こうした検討結果等と、本項で算出した最低燃焼度を比較することに より、わが国で発生した使用済燃料の多様性を考慮しつつ処分後の臨界安全性を評価するこ とが重要と考えられる。



図 3.2.1-2 直接処分体系での実効増倍率計算結果

初期濃縮度[wt%]	未臨界判定基準値	最低燃焼度 ^{※1} [GWd t ⁻¹]			
3.4	0.93	18.1			
	0.90	22.9			
4.1	0.93	26.2			
	0.90	31.5			
4.8	0.93	34.0			
	0.90	39.7			

表 3.2.1-4 収納可能な最低燃焼度

※1 線形内挿により求めた値の小数第2位を切り上げた。

(4) PWR 使用済燃料の多様性を考慮した遮へい解析による吸収線量率評価

処分容器の厚さによっては、燃料集合体からの放射線が引き起こす水の放射線分解によっ て生成される酸化性化学種が処分容器の腐食に影響を及ぼす可能性がある。平成27年度まで は、使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価第1次取りまとめ(原子力機構,2015b)

(以下、「直接処分第1次取りまとめ」という)に示されたレファレンスの使用済燃料を対象とする遮へい解析を行っていたが、軽水炉から発生する使用済燃料には、種々の濃縮度および燃焼度のものが存在することから、こうした使用済燃料の多様性を考慮した評価を行うことが必要と考えられる。

そのため、平成28年度は、線源強度が大きく放射線遮へいの点でより厳しい結果となることが予想される高燃焼度の燃料集合体を対象とした遮へい解析を行い、処分容器表面および

その外部の緩衝材中における吸収線量率の算出し、放射線分解によって発生する酸化性化学 種の処分容器表面への供給速度を推定してそれをカソード電流密度に換算し、高レベル放射 性廃棄物に関する第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構,1999)(以下、「H12レポ ート」という)で設定された基準値を下回るか確認した。

1) 解析条件

解析コード

遮へい解析には、3 次元連続エネルギーモンテカルロ法に基づくコード MCNP5 を用い、核 データライブラリは ENDF/B-VI を使用した。

- ・解析コード; MCNP5 Ver.1.60
- ・データライブラリ
 - γ線:mcplib84(ENDF/B-VI)
 - 中性子: endf66 (ENDF/B-VI)

② 遮へい解析体系および遮へい解析条件

遮へい解析条件を表 3.2.1-5 に示す。また、図 3.2.1-3 に遮へい解析の解析体系を示す。 なお、吸収線量率の評価点は、最も線量率が高くなる点を予備解析にもとづき設定した。

2) 解析結果

処分容器表面における吸収線量率および緩衝材中での吸収線量率の解析結果、ならびに放 射線分解による処分容器の腐食への影響評価を以下に示す。

① 吸収線量率

処分容器表面の吸収線量率の評価点位置を図 3.2.1-4 に示す。評価は、X 軸から Y 軸にかけて、遮へい層の厚みが薄く容器表面で高い吸収線量率が想定される 10~30 ° までは 1 ° 間隔、それ以外は 5 ° 間隔で実施した。処分容器表面で最大の吸収線量率が算出された評価点は X 軸から 18 ° の方向で 0.12 Gy h⁻¹であった。なお、処分容器表面での吸収線量率はガンマ線による吸収線量率が支配的である。評価結果を図 3.2.1-5 に示す。この結果に基づき、緩衝材中での吸収線量率の評価は 18 ° の方向に対して実施した。

緩衝材中での吸収線量率の評価点位置を図 3.2.1-6 に、評価結果を図 3.2.1-7 および表 3.2.1-6 に示す。

項目	条件	備考
線源強度	ORIGEN2.2による解析	
	直接処分第1次取りまとめの条件から燃焼度および濃	
	縮度を下記の値に変更して算出	
燃料集合体	PWR 使用済燃料の処分容器の基本仕様(表 3.2.1−2 参	
	照)を基本とし、燃焼度および濃縮度については以下	
	を設定した。	
	・燃焼度 55,000 MWD MTU ⁻¹	
	・濃縮度 4.8 %	
対象とする放射線	中性子線、γ線を対象とする。(α、n)反応、自発	
	性核分裂による中性子線および核分裂生成物の崩壊	
	による γ線、中性子線と人工バリア材との相互作用で	
	発生する二次ア線を考慮する。	
処分容器材質	炭素鋼 (SFVC1)	直接処分第1次取
		りまとめで設定し
燃料集合体数	2体	たレファレンス処
		分容器とする。
処分容器形状・寸法	PWR 使用済燃料の処分容器の基本仕様(表 3.2.1−2 参	
燃料取出し後の冷却期	50 年	
間の限を批評価		
栓道牛奴評価	交入時点を評価	
甲性チスヘクトル	PU-239の核分裂スペクトル	
脌忉1本糸	・谷恭の断面ならひに長さ方回を考慮した3次元体系 した3、流、い知だけまた回2010にまた	
	と 9 る。 遮へい解析体 糸を凶 3.2.1−3 に 示 9 。 加八	
	・処分谷奋は健主な状態を想定する。	
	・腐良しろとなる谷岙の肉厚は悪視し、遮へい厚には	
	「呂のない。」	
	・ 吸収線景率の評価は、個別ならいに石皿とする。	
	・ 家哭の 怒ち向の 延価位置 は 処分 家哭 た ら び に 緩衝 材	(*)予備解析にも
		とづき評価点を設
	+2000 m o c c c m o c c c c c c c c c c c c c	定する。
	+10,00,700,00,700,00	
中性子線強度	実効増倍率 Kett (0.12) による増加を考慮し、ORIGEN	
	解析結果を /(I-KeTT) 倍した線源強度とする。KeTT	
	は処分谷益が健全時の臨界解析により昇出した個と	
	ア線;HUDDEII and Seltzer (2011) 中世プ・ICPU REDORT 62 (Molmor 2001)	
	中圧丁, IONU NEFONI 03 (Midililer, 2001) 来虐したい	
隣接処力谷奋からの放 射線宏互	「方心しない。	
ヘコ ヤル ロ プ ピーキングファクター	$1 \sim 3/24$ / - $5 \cdot 1.0$	
	$4 \sim 21/24$ $J = 13.10$	
	$27 \sim 24/24$ $J = 13 \cdot 10$	
	22 27/27 / 1.10	
에 오나티 이가 나도 이자		

表 3.2.1-5 遮へい解析条件



図 3.2.1-3 遮へい解析計算モデル概念図



(X 軸から Y 軸にかけて、容器表面に r=0.3 cmの球状体積タリーで評価) 図 3.2.1-4 処分容器表面での吸収線量率評価点位置



図 3.2.1-5 処分容器表面での吸収線量率[TOTAL 値]



(容器表面から0、20、40、60、70 cm位置で r=0.3 cmの球形状体積タリーで評価) 図 3.2.1-6 緩衝材中での吸収線量率評価位置



図 3.2.1-7 緩衝材中での吸収線量率

容器表面	ガンマ線		中性子		2 次ガンマ線		合計
からの 距離	①吸収 線量率	誤差	②吸収 線量率	誤差	③吸収 線量率	誤差	1+2+3
[cm]	$[Gy h^{-1}]$	[%]	$[Gy h^{-1}]$	[%]	[Gy h ⁻¹]	[%]	$[Gy h^{-1}]$
0	1.213×10^{-1}	0.17	5.834 $\times 10^{-4}$	0.25	1.575×10^{-4}	0.32	1.221×10^{-1}
20	5.361 \times 10 ⁻³	1.11	5. 425×10^{-6}	0.10	5.020 $\times 10^{-5}$	0.73	5. 417×10^{-3}
40	2.656 $\times 10^{-4}$	1.01	2.587 $\times 10^{-7}$	0.30	9. 121×10^{-6}	2.09	2.750×10 ⁻⁴
60	1.581×10^{-5}	1.14	1.903×10^{-8}	1.09	1.909×10^{-6}	3.29	$1.774 \times 1^{0-5}$
70	4. 260×10^{-6}	1.18	6. 448 $\times 10^{-9}$	4.62	9.764 $\times 10^{-7}$	4.76	5. 242 $\times 10^{-6}$

表 3.2.1-6 緩衝材中での吸収線量率

② 放射線分解による処分容器の腐食への影響

H12 レポート(核燃料サイクル開発機構,1999)の評価に準じ、上記の緩衝材中の吸収線 量率の評価にもとづき、放射線分解によって発生する酸化性化学種の処分容器表面への供給 速度を推定してそれをカソード電流密度に換算した。

放射線分解によって発生した酸化性化学種は、緩衝材に収着せず、すべて処分容器表面に 供給され腐食に寄与すると仮定すれば処分容器表面に供給されるカソード電流密度 I_{cath} [A m⁻²]は、以下のように表される。

$$I_{cath} = -nF \frac{pG'}{100 Av} \frac{p}{\lambda} \cdots \overrightarrow{x} 3.2.1 - 1$$

ここで、n:酸化性化学種の価数(=2)、F:ファラデー定数 (=9.65×10⁴ C mol⁻¹)、G': 100 eV のエネルギー吸収によって生成する酸化性化学種の分子数 2.13、E: 吸収線量率 [eV m⁻³ s⁻¹]、p: 緩衝材の間隙率 0.4、Av: アボガドロ数 6.02×10²³、λ: 緩衝材の吸収係数[m⁻¹] である。

図 3.2.1-7より E と λ を求めると、それぞれ 2.12×10¹⁷、14.40 となり、3.2.1-1 式により、 I_{cath}は 1.67×10⁻⁵ A m⁻² (1.93×10⁻² μ m y⁻¹) と求められる。これは H12 レポート (核燃料 サイクル開発機構, 1999) で設定された基準値である 1×10⁻⁴ A m⁻² を大きく下回っており、 100 mm の遮へい厚さによって高燃焼度の PWR 燃料に対しても十分対応可能であることが確認 された。

(5) 廃棄体への入熱を考慮した伝熱解析による廃棄体温度の評価

処分後の廃棄体の回収を前提とした場合、操業時において使用済燃料集合体の健全性が維持される必要がある。しかし、使用済燃焼集合体の処分容器への封入後に処分容器の蓋溶接 部に残存することが想定される残留応力を低減することを目的として封入後に溶接部周辺を 加熱処理(以降、「後熱処理」という)した場合には、廃棄体への入熱によって使用済燃料 集合体の温度が上昇し、燃料被覆管(ジルカロイ製)中の水素分布の再配向などによって燃料被覆管の機械的特性が低下し、健全性が損なわれる可能性がある。

本項目においては、PWRの使用済燃料集合体を封入した処分容器(炭素鋼)を対象として、 後熱処理時の入熱にともなう使用済燃料集合体の温度変化を伝熱解析により評価し、水素化 物再配向により被覆管の機械的特性が低下しない上限温度と比較した。

伝熱解析において、後熱処理の基本的な条件は、JISZ3700「溶接後熱処理方法」(日本規格協会,2009)および発電用原子力設備規格の溶接規格(日本機械学会,2011)を基に設定し、境界条件は、ガラス固化体の溶接後熱処理時評価条件(原環センター,2013)を参考にした。また、水素化物再配向により被覆管の機械的特性が低下しない上限温度は、日本原子力学会(2010)を基に設定した。

1) 解析条件

① 解析コード

解析プログラムには、汎用有限要素解析プログラム Abaqus Ver6.13 (米 Dassault Systems 社)を使用した。

② 伝熱解析体系および伝熱解析条件

伝熱解析条件について表 3.2.1-7 に示す。また、伝熱解析体系図を図 3.2.1-8 に示す。

収納する使用済燃料は、直接処分第1次取りまとめのPWRのレファレンスケースよりも高 燃焼度の使用済み燃料(燃料配列17X17、燃焼度55,000 MWD MTU⁻¹、濃縮度4.8%)とする。 処分容器に燃料集合体を2体収納し、使用済燃料の長手方向の発熱量分布を考慮して設定し た合計発熱量は約1.1 kWである。

本処分容器について、三次元 1/4 対称としてモデル化した。モデル図を図 3.2.1-9 に示す。 また、燃料部の断面を二次元モデルとして模擬した形状図と要素分割図を、図 3.2.1-10 及び 図 3.2.1-11 に示す。

ここで、燃料集合体領域については、使用済燃料と気体を考慮して均質化した物性を設定 した。均質化において、平均密度については領域内の体積存在比に基づいた均質化とした。 平均熱伝導率については、軸方向は領域内の体積存在比に基づいた均質化とし、径及び周方 向は燃料集合体モデルにおける中心部温度と容器内面温度の関係が再現できるような値を設 定した。平均比熱については、重量平均とした。燃料モデルについては、使用済燃料被覆管、 被覆管内部の気体(ヘリウム)、及びペレットを考慮して均質化した物性を設定した。平均 密度及び平均熱伝導率は領域内の体積存在比に基づいた均質化とし、平均比熱は重量平均と した。境界条件について、容器周囲の空気は温度 20 ℃とし、容器底部及び断熱材設置部は 断熱、それ以外の容器外表面は自然対流による熱交換を行うものとした。また、容器外表面 の放射及び燃料収容領域の対流熱伝達は考慮しない。溶接後熱処理の条件は、JIS Z 3700「溶 接後熱処理方法」を参照して、図 3.2.1-12 に赤く示される領域の表面に図 3.2.1-13 に示す 温度履歴を与えた。物性値(密度、比熱、熱伝達率)については、胴、蓋(炭素鋼)、二酸 化ウラン、ジルカロイ、ヘリウム、空気の順に表 3.2.1-8~表 3.2.1-12 に示す。

項目	条件	備考
燃料集合体発熱量	・燃料集合体の長手方向の発熱量分布を考慮する。	
燃料集合体	・PWR 燃料(17x17 型)	直接処分第1次取り
	・55,000 MWD MTU ⁻¹ , 濃縮度;4.8 %	まとめのレファレン
		スケースより高燃焼
		度
収容体数	2体	
処分容器材質	炭素鋼 (SFVC1)	
処分容器形状・寸法	・図 3.2.1-8 に記載の寸法と断面。	
	• 蓋構造; 平蓋構造	
燃料取出し後の冷却期 間	50 年	
経過年数評価	受入時点を評価	
解析コード	Abaqus	
解析体系	・伝熱解析体系のモデル図を図 3.2.1-9 に示す。容	
	器の断面ならびに長さ方向を考慮した3次元体系	
	(1/4対称)とする。	
	・処分容器は健全な状態を想定する。	
	・燃料集合体は直方体形状としてモデル化(詳細は	
	下の欄に記載)。	
	・使用済燃料は燃料収容部の中心に配置する。	
	・廃棄体は堅置きした姿勢とする(封入時の姿勢を	
	・処分容器の周囲は空気とする。	
燃料集合体のモテル化	・燃料集合体の各構造部を領域毎に分割し、各領域	
	は但力体形状としてモアル化する。	
	・ 燃料	
	貝1Lりる。 ・ 燃料右効率の径ち向熱伝道率け燃料集合体の軸ち	
	向中央新西の実形状(図391-10 参昭)を中国	
	同十大町面の天形状(因 5.2.1 10 多点)を心天 にモデル化した燃料集合休祥細モデルを用いた	
	解析により道出した等価執伝道率を設定する 要	
	素分割図を図3.2.1-11に示す。	
	・燃料有効部以外の構造材の径方向熱伝導率は均質	
	化により設定する。	
境界条件	・周囲温度;室温(20℃)	ガラス固化体の溶接
	・断熱材設置部および処分容器底部;断熱	後熱処理時評価条件
	・処分容器放熱;空気の対流熱伝達	(原環センター,
	・周囲への輻射および燃料収容スペースの対流熱伝	2013) を参考とする。
	達;考慮しない	
溶接後熱処理条件	・加熱範囲:図 3.2.1-12 参照	
	発電用原子力設備規格の溶接規格(日本機械学会,	
	2011)にもとづき、溶接部から長手方向に溶接部厚	
	さの3倍(420 mm)を設定する。	
	・溶接後熱処理の条件は、JIS Z 3700「溶接後熱処	
	理方法」を参照して図 3.2.1-12 に示す赤い領域	
	表面に図 3.2.1-13 に示す温度履歴を設定する。	

表 3.2.1-7 伝熱解析条件











図 3.2.1-11 燃料集合体領域断面の要素分割図





図 3.2.1-13 溶接後熱処理時の温度履歴

温度 [℃]	温度 [K]	密度 [kg mm ⁻³]	比熱 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	熱伝導率 [W mm ⁻¹ K ⁻¹]
26.85	300		465	4. 30×10^{-2}
226.85	500	7.850 $ imes$ 10 ⁻⁶	528	3. 86×10^{-2}
526.85	800		622	2. 77×10^{-2}

表 3.2.1-8 胴、蓋(炭素鋼)の物性値

表 3.2.1-9 二酸化ウランの物性値

温度	温度	密度 比熱		熱伝導率
[°C]	[K]	$[kg mm^{-3}]$	$[J kg^{-1} K^{-1}]$	$\begin{bmatrix} W & mm^{-1} & K^{-1} \end{bmatrix}$
26.85	300		237	
126.85	400		262	
226.85	500	$1.041 imes 10^{-5}$	286	2. 00×10^{-3}
326.85	600		291	
526.85	800		300	

表 3.2.1-10 ジルカロイの物性値

温度 [℃]	温度 [K]	密度 [kg mm ⁻³]	比熱 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	熱伝導率 [W mm ⁻¹ K ⁻¹]
26.85	300		281	1.27×10^{-2}
126.85	400		302	1. 40×10^{-2}
226.85	500	6.550 $ imes$ 10 ⁻⁶	314	1.53×10^{-2}
326.85	600		326	1.65×10^{-2}
526.85	800		346	1.91×10^{-2}

温度	温度	密度	比熱	熱伝導率	粘性係数
[°C]	ĹK」	[kg mm⁻³]	LJ kg ⁻¹ K ⁻¹	$[W mm^{-1} K^{-1}]$	∟μ Pa • s」
26.85	300	1. 6253×10^{-10}		1.527×10^{-4}	19.93
126.85	400	1. 2190×10^{-10}		1.882×10^{-4}	24.29
226.85	500	9. 753×10^{-11}	2 1 9 0	2. 212×10^{-4}	28.36
326.85	600	8. 128×10^{-11}	3,120	2.523 $\times 10^{-4}$	32.21
426.85	700	6.967×10^{-11}		2.780 $\times 10^{-4}$	35.89
526.85	800	6. 096×10^{-11}		3.040×10^{-4}	39.43

表 3.2.1-11 ヘリウムの物性値

表 3.2.1-12 空気の物性値

温度	温度	密度	比熱	熱伝導率
[°C]	[K]	$[kg mm^{-3}]$	$[J kg^{-1} K^{-1}]$	$\begin{bmatrix} W & mm^{-1} & K^{-1} \end{bmatrix}$
6.85	280	1.2606×10^{-9}	720	2. 461×10^{-5}
26.85	300	1.1763×10^{-9}	720	2.614 $\times 10^{-5}$
46.85	320	1.1026×10^{-9}	721	2.759 $\times 10^{-5}$
66.85	340	1.0376×10^{-9}	722	2.900×10^{-5}
86.85	360	9. 799×10^{-10}	724	3.039×10^{-5}
106.85	380	9. 282×10^{-10}	725	3.173×10^{-5}
126.85	400	8.818 $\times 10^{-10}$	728	3.305×10^{-5}
146.85	420	8. 398×10^{-10}	730	3.437×10^{-5}
166.85	440	8. 016×10^{-10}	733	3.568 $\times 10^{-5}$
186.85	460	7.667 $\times 10^{-10}$	736	3.697×10^{-5}
206.85	480	7. 347×10^{-10}	740	3.825×10^{-5}
226.85	500	7. 053×10^{-10}	744	3.951×10^{-5}
276.85	550	6. 412×10^{-10}	754	4.260 $\times 10^{-5}$
326.85	600	5.878 $\times 10^{-10}$	765	4.560 $\times 10^{-5}$
376.85	650	5. 425×10^{-10}	777	4.840 $\times 10^{-5}$
426.85	700	5. 038×10^{-10}	789	5. 130×10^{-5}
526.85	800	4. 408×10^{-10}	812	5.690 $\times 10^{-5}$
626.85	900	3.918×10^{-10}	835	6. 250×10^{-5}

2) 解析結果

溶接後熱処理を考慮した、本処分容器の伝熱解析結果を図 3.2.1-14 図 3.2.1-19 に示す。 また、燃料集合体領域における最高温度時刻歴を図 3.2.1-20 に、燃料棒領域の最高温度を表 3.2.1-13 に示す。この結果から、燃料有効部の最高温度は 341 ℃となることが分かる。水素 化物再配向により燃料被覆管の機械的特性が低下しない制限温度は、PWR 燃料集合体の場合 275 ℃(日本原子力学会,2010)とされており、燃料有効部の最高温度は制限温度を超えて いることから、被覆管に水素化物再配向が生じる可能性がある。一方、溶接後熱処理による 加熱前の燃料棒領域の最高温度は 127 ℃であり制限温度未満であることから、水素化物再配 向は生じない。したがって、後熱処理を行わなくても済む蓋構造とする(例えば、蓋と胴体 の接合部にクラッド溶接を施工する)などの対策を検討することが必要と考えられる。

	最高温度[℃]	発生時刻[hr]	備考		
上部ノズル	514	11	水素化物再配向により被		
上部プレナム	436	12	覆管の機械的特性が低下		
燃料有効部(上部)	341	13	しない制限温度 : 275 ℃		
燃料有効部(中部)	233	24	(日本原子力学会,2010)		
燃料有効部(下部)	123	77			
下部ギャップ	70	80			
下部ノズル	59	80			

表 3.2.1-13 燃料棒領域の最高温度





図 3.2.1-15 昇温時(425 ℃)の温度分布

図 3.2.1-14 加熱前の温度分布















図 3.2.1-18 降温時(425 ℃)の温度分布

図 3.2.1-19 放置(100時間後)の温度分布



図 3.2.1-20 燃料集合体の各領域の最高温度時刻歴

(6) 複合容器の銅外層のクリープ挙動を考慮した構造解析による処分容器の健全性の評価

複合容器全体の耐圧性は内層(たとえば炭素鋼)により担保することが基本的な考え方と なるが、長寿命化を考慮して銅を耐食層(外層)に用いた複合容器では、長期的な腐食減肉 と外圧の作用によってクリープによる外層の破損の可能性も考慮する必要がある。複合容器 では内層と外層に施工上必要なギャップが存在すると考えられ、焼きばめ等で密着した構造 とした場合でも熱膨張特性の違いにより処分容器の温度変化に伴ってギャップが生じる可能 性もあるため、このようなギャップを考慮したクリープ挙動の評価が必要である。

平成27年度は、複合容器の内外層間の隙間および銅材が有するクリープ特性などに着目し て大変形弾塑性解析を実施し、銅外層部で評価された弾塑性変形およびクリープ変形より銅 外層部に生じるひずみ量を基に、銅の外層部の構造健全性を評価した。ただし、ここでは内 外層間の隙間に空気の存在を考慮せず、処分容器の変形に伴う内圧上昇が考慮されなかった。 しかし、実際には処分容器の変形に伴って内圧が上昇して処分容器に作用する圧力も緩和さ れると想定されることから、平成28年度は内外層間の隙間に空気の存在を考慮した解析を実 施した。

処分容器は、直接処分第1次取りまとめにおいてレファレンスとして設定した PWR 燃料集 合体2 体収容の代表的な仕様の容器を対象にした。銅の外層は腐食代として40 mm の厚さ(原 子力機構, 2015a)を確保するものとした。蓋構造には平蓋と落し蓋があるが、ここでは平 蓋を対象とした。内外層の間については、胴部および蓋部に一律の幅のギャップを設けるも のとし、平成27年度において基準とした2 mm をギャップの幅に設定した。処分容器の温度 は、原子力機構(2015b)で得られた地層処分後の処分容器表面温度の時間変化の解析値に設定 した。地層処分後の腐食に伴う外層銅の減肉については、期間毎に腐食速度を定め、時間と 共に減肉が進展する条件を設定した。

1) 解析条件

解析コード

構造解析には解析プログラムには、汎用有限要素解析プログラム Abaqus Ver6.13 (米 Dassault Systems 社)を使用した。

② 構造解析体系および構造解析条件

構造解析条件を表 3.2.1-14 に示す。処分容器は、直接処分第1次取りまとめにおいてレフ アレンスとして設定した PWR 燃料集合体2 体収容の代表的な仕様を対象とした。構造解析体 系を図 3.2.1-21 に示す。処分容器の材料特性の詳細については、次の③項で示す。

項目	条件	備考
処分容器基本仕様	・PWR 燃料集合体	
	(直接処分第1次取りまとめのレファレンスケース)	
	・2 体収容	
処分容器構造·材質	・外層;銅(無酸素銅)	
	・内層;炭素鋼(SFVC1)	
	• 蓋構造;平蓋構造	
処分容器形状·寸法	・図 3.2.1-21 に示す蓋嵌め合い部やギャップを考慮した形状と	
	寸法とする。	
	・内外層のギャップ幅は2mmとする。	
	・平蓋構造;容器外径 843 mm、全長 4,802 mm	
温度	地層処分後の処分容器表面温度の時間変化解析値(原子力機構,	
	2015)に設定 解析条件 ・PWR 燃料 2 体収容処分容	
	110 器	
	100 · 坑道間距離 19 m	
	90 0 m ジャック厚さ 55 cm、	
	 2 80 すきま充填材厚さ 15 cm 	
	50	
	40	
外荷重値(外圧値)	・均一荷重(P); 10.7 MPa	半成 2/年度の
	・偏圧何里;偏圧係数K=I、盍部は②の(I+K)Pの何里とする。	解析の結果を基
		に最も相当クリ
	(1-K)P $(1+K)P$	ーノひすみか大
		さくなる余件に
	2(1+K)P	設定りる。
	(1+K)P $(1-K)P$ $(1-K)P$ $(1-K)P$	
	φ	
クリープ評価式	・原子力機構(2016)と同じクリープ評価式を用いる。	
評価内容·評価基準	・処分容器に生じる最大の相当クリープひずみおよび相当塑性ひ	
	ずみ、ならびにこれらを足し合せた全ひずみを評価	
	・健全性を維持可能な許容ひずみ量は、H27年度の経済産業省資	
	源エネルギー庁からの受託事業の実施と同じ基準に設定する。	

表 3.2.1-14 構造解析条件 (1/2)

項目		備考			
解析体系およ	・容器の断面ならびに長さ方向	・容器の断面ならびに長さ方向を考慮した 3 次元体系(対称性を			
び境界条件	考慮し、処分容器周方向に 1/4	4 対称、処分容器長=	手方向に 1/2 対		
	称)とする。内層の構造には	燃料集合体の収容ス	ペースを考慮す		
	る(収容する燃料集合体は解析	所体系には組み込まな	い。		
	・上記に記載のとおり、蓋部の	と処分容器胴部の内	層間のギャップ		
	および蓋と胴の接合箇所には	炭め合い部の隙間を考	き慮する。		
	・銅と炭素鋼の内外層のギャッ	ップ部の境界条件は接	8触条件として、		
	摩擦係数を次のように設定する	5.			
	 銅一炭素鋼部材間;0.4 				
	 ・銅ー銅部材間;1.4 				
	・内外層間のギャップの気体を	を大気圧の空気(初期	状態)とする。		
評価期間	10 万年				
	この期間の銅の外面腐食減	期間(在)	腐食速度		
	肉を考慮		$(mm y^{-1})$		
	・瞬時腐食は酸素および緩		2.0		
	衝材中の硫酸イオンによ	500-5000	0.0006		
	る短期間で生じる腐食量	5000-50000	0.0004		
	であり、解析においては、				
	銅の厚さ40mmからこの瞬				
	時腐食分を差し引いた板厚値				
	・瞬時腐食を除く腐食速度は				
	処分容器表面の温度の時間変				
	40				
	35	減肉カーブ 様は彩むティーのあい話のフィップ]		
	2 30				
	Ē 25				
	■ 20 				
	世 15				
	践 10				
	5				
	0 L 0 2×10 ⁴ 4×1				
	経				

表 3.2.1-14 構造解析条件(2/2)



図 3.2.1-21 構造解析体系

③ 材料特性

a. 基本特性

内蓋および内層胴の板厚(100 mm)は、H25 年度の検討(原子力機構,2014)において外 圧を25 MPaとした条件でも設計応力強さ(Sm)を満足するように設計されており、弾性範囲 内である。したがって、内蓋および内層胴は弾性体として表3.2.1-15 に示す炭素鋼の材料特 性を使用する。ポアソン比は0.3を用いる。また、外蓋および外層胴の材料である無酸素銅 の基本特性として、表3.2.1-16 に示す銅の特性を使用する。なお、無応力温度は20 ℃とし た。

温度	炭素鋼	(SFVC1)	銅(無酸素銅)		
	縦弾性係数	線膨張係数	縦弾性係数	線膨張係数	
	E[MPa]	$A[K^{-1}]$	E[MPa]	$A[K^{-1}]$	
-75	209000		121000	—	
20	— 1.15E-05			1.67E-05	
25	202000		117000	—	
40			—	—	
50		1.18E-05		1.70E-05	
75		1.19E-05		1.72E-05	
100	198000	1.21E-05	114000	1.73E-05	
(125)		1.23E-05		1.74E-05	
(150)	195000	1.24E-05	112000	1.75E-05	

表 3.2.1-15 内蓋および内層胴(炭素鋼:SFVC1)の材料特性(日本機械学会, 2013)

b. 応カーひずみ特性

外蓋および外層胴の材料である無酸素銅の応カーひずみ特性は、リン脱酸銅の引張試験結 果に基づき定式化された構成式 3.2.1-2 (Sandstrom et al., 2009)による真応カー真ひず みを用いる。なお、無酸素銅とリン脱酸銅は、JIS 規格での強度に差異はないため、無酸素 銅についても同じ特性を使用した。

ここで、 σ :応力[MPa]、 σ y:耐力[MPa]、m:定数(=3.06)、 α :定数(=0.19)、G:せん 断弾性率[MPa](温度に依存、Sandstrom et al. (2009)参照)、 ω :定数(=14.66)、cp:定 数(温度に依存、Sandstrom et al. (2009)参照)、 ϵ :ひずみ[-]である。

c. クリープ特性

無酸素銅の定常クリープ速度式としては、物理モデルに基づいた理論式(Sandstrom et al., 2008b)から定式化された次式(式 3.2.1-3)のクリープ速度を用いた。

クリープを考慮する場合には、クリープ特性として、クリープ曲線(クリープひずみー時間曲線)が必要となる。材料に荷重を作用させた瞬間に、初期変形が生じ、その後、クリー プ変形が開始する。クリープは一般的に三つの段階に分類され、第1期クリープ(遷移クリ ープ)、第2期クリープ(定常クリープ)、第3期クリープ(加速クリープ)と呼ばれる。

本構造解析における超長期間の評価において、遷移クリープの影響は小さいと考えられる ため、定常クリープのみを考慮することとした。

無酸素銅の定常クリープ速度式の候補としては、一般的にクリープ変形評価に用いられる Norton 則(第1案)、実験データを基に決定した材料定数を用いる速度式(Sandstrom et al., 2008a)(第2案)、物理モデルに基づいた理論式を基に定式化された方法(Sandstrom et al., 2008b)(第3案)が挙げられるが、クリープ変形量の保守性および応力依存性の考慮の観点 から第3案を使用した。

$$\dot{\varepsilon}_{OF} = \frac{2bc_L}{m} \frac{D_{s0}b\tau_L}{k_BT} \left(\frac{\sigma}{\alpha mGb}\right)^3 e^{\frac{\alpha b^3}{k_BT}} e^{-\frac{Q_{eff}}{RT} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{i\max}}\right)^2\right]} \dots \vec{x} 3.2.1-3$$

ここで、σ:応力[MPa]、T:温度[K]、R:ガス定数[J K⁻¹ mol⁻¹]、その他の記号:材料定数 ((Sandstrom et al., 2008b)参照)である。

④ 評価基準

健全性を維持可能な許容ひずみ量は、H27年度と同じ基準(表 3.2.1-16参照)に設定する。

処分容器の内蓋および内層胴は、ここで設定した使用条件下ではすでに弾性範囲内に設計 されていることから、本解析では外蓋および外層胴の強度評価を行う。

外蓋および外層胴の評価基準は、フィンランドの評価例を参考として、相当クリープひず みおよび全ひずみ(保守側に、相当クリープひずみ+相当塑性ひずみとする)に対して制限 値を仮定したものである。

外層材料	項目	評価の目安値 ^(※1)
無敵害相	全ひずみ	$< 10 \% ^{(lpha 2)}$
無酸糸婀	相当クリープひずみ	<1 % (**3)

表 3.2.1-16 銅(外蓋および外層胴)の評価の目安値

- ※1 無酸素銅の溶接部を含む引張特性データはないため、無酸素銅については、評価の目 安値として設定した。
- ※2 銅母材の破断伸びを JIS 規格ベースの 20 %とし、リン脱酸銅のデータ(HCM Andersson-Ostling, 2009)を基に溶接部の破断伸びの低下を考慮し、母材の 1/2 (安 全率:2)として設定した仮定値。
- ※3 溶接部を含む無酸素銅のクリープ試験結果(Andersson-Ostling, 2009)を基に、不確
 定性として 1/2(安全率:2)を考慮して設定した仮定値。

2) 解析結果

ギャップに空気が存在しない条件とギャップに空気が存在する条件のそれぞれについて、 埋設直後、5万年後および10万年後の複合容器の銅外層における応力(Tresca 応力)を評価 した結果をコンター図として図3.2.1-22に示す。同様に、相当塑性ひずみのコンター図を図 3.2.1-23に、相当クリープひずみのコンター図を図3.2.1-24に示す。また、相当塑性ひず みと相当クリープひずみからなる全ひずみの最大値を表3.2.1-17に示す。表から、ギャップ に空気が存在しない条件及び空気が存在する条件のいずれにおいても、相当クリープひずみ 及び全ひずみは強度評価の目安値を超えることが確認されたものの、ひずみのコンター図か ら、外蓋の不連続部に局所的に発生したものであり、一般部では目安値を超えていないこと が分かる。したがって、外蓋および外層胴は全体的に健全であると言える。

ギャップに空気が存在しない条件と空気が存在する条件の比較においては、空気が存在す る場合は処分容器に発生するひずみが小さくなる傾向が確認されたものの、その効果は小さ いことが分かった。



図 3.2.1-22 発生 Tresca 応力のコンター図(蓋部拡大)



図 3.2.1-23 相当塑性ひずみの経時変化(蓋部拡大)



図 3.2.1-24 相当クリープひずみの経時変化(蓋部拡大)

表 3.2.1-17	全ひずみ	(最大値)	の評価結果
------------	------	-------	-------

ギャップの 空気の 存在状況	苹	ギャップ	++ 死1	圧力 [MPa]		全ひずみ(最大値)[%]		
	鱼	[mm]	1/1 不计			埋設直後	5万年後	10 万年後
			無酸	胴:偏圧 (0~21.4)	相当塑性ひずみ	9.69	10.06	12.59
存在 しない 平 蓋 存在 する					相当クリープひずみ	_	2.12	8.75
	平	平。			全ひずみ	9.69	12.18	21.34
		素銅	蓋:一様 (21.4)	相当塑性ひずみ	9.68	10.05	12.35	
					相当クリープひずみ	—	2.11	8.70
					全ひずみ	9.68	12.16	21.05

※表 3.2.1-20 に示された無酸素銅における強度評価の目安値:相当クリープひずみ<1%、全ひずみ<10%

3.2.2 処分容器の設計における臨界安全に関する検討

(1) 本項目の背景と目的

本項では、臨界安全評価の重要な検討課題として、未臨界を判定する基準値の設定に関す る検討((2)にて後述)および臨界性の評価で必要となる緩衝材や岩盤を構成する物質の反射 体効果についての検討((3)にて後述)、未臨界を担保する方策の一つとなる中性子吸収材の 必要量の検討((4)にて後述)を行った。また、処分容器の長期変遷による形状等の変化や偶 発的な天災など不確実性による臨界事象のリスクについて検討する際に必要とされる、臨界 発生時における影響評価の必要性の検討も行った((5)にて後述)。なお、本項のまとめにつ いては 3.5 節にて後述する。

(2) 未臨界を判定する基準値の設定に関する検討

臨界安全評価において、計算により体系が未臨界であると判定される実効増倍率の基準値、 すなわち推定臨界下限増倍率は、使用する臨界計算コードおよび断面積ライブラリ毎に計算 誤差や臨界計算に係る不確かさを考慮したうえで設定する必要がある(注:臨界安全ハンド ブック(科学技術庁,1988)および臨界安全ハンドブック第2版(日本原子力研究所,1999) では、推定臨界下限増倍率に対して任意の安全裕度を考慮した値を、未臨界を判定する基準 値として定義しているが、ここでは任意の安全裕度を見込まず、推定臨界下限増倍率そのも のを、未臨界を判定する基準値とした)。本事業での使用済燃料の直接処分における臨界安全 評価では、通常の核燃料施設とは異なる条件で臨界安全評価を行うことから、新たに未臨界 を判定するための基準値を設定する必要があると考えられる。国内における核燃料取扱施設 や輸送容器などの臨界安全設計においては、臨界安全ハンドブック(科学技術庁,1988)や 臨界安全ハンドブック第2版(日本原子力研究所,1999)を参考にしている事例が多く、本 事業での平成27年度までの検討でも、PWR使用済燃料およびBWR使用済燃料を対象とした直 接処分における臨界安全の検討(原子力機構,2015a;原子力機構,2016)では臨界安全ハン ドブックの安全確保の考え方を踏襲し、推定臨界下限増倍率についての検討を実施し、PWR 燃料の直接処分体系における推定臨界下限増倍率が0.98であることを確認している。

本検討ではこれらの検討を踏まえ、推定臨界下限増倍率の信頼性向上を目的とし、PWR お よび BWR 使用済燃料の処分容器の推定臨界下限増倍率の評価を行った。以下の構成によって 報告する。

1) 類似性評価による臨界実験データの抽出

2) 推定臨界下限増倍率の設定

1)類似性評価による臨界実験データの抽出

臨界解析コードを使用して得られた実効増倍率がそれ以下であれば未臨界と判断される値 である推定臨界下限増倍率(原子力機構,2015a)は、燃料の種類、減速条件そして反射条件 などが解析対象と同等あるいは近いもので、結果として計算誤差が同傾向として現れる実験 データをもとに求める必要がある。この様な臨界実験体系を「類似体系」と呼ぶ。現在、臨 界安全評価の対象となる体系と臨界実験で使用された体系がどの程度似ているかを評価する
類似性評価は、SCALE コード (ORNL, 2011) の TSUNAMI-IP モジュールで得られる相関係数 C_k を用いた手法 (Broadhead et al., 2004) が広く利用されており、本事業で実施してきた PWR および BWR 使用済燃料を用いた直接処分体系を対象とした類似性評価 (原子力機構, 2015a; 原子力機構, 2016) においても採用されている。

平成 27 年度までに、BWR 使用済燃料を対象として 194 ケースの臨界実験データとの類似性 評価を行ってきたが、PWR 使用済燃料を対象とした場合については、38 ケースの臨界実験デ ータとの類似性評価に留まっており、信頼性向上のために対象データの拡充が必要であると 考えられる。そのため、平成 28 年度は、TSUNAMI-IP を使用し PWR 使用済燃料を対象とした 類似性評価の範囲を拡張した。

対象とする臨界実験ケースは、米国の PWR 使用済燃料プールや PWR 使用済燃料輸送容器な どを解析モデルとした類似性評価が行われている既往文献(Scaglione et al., 2012)を参 考に、臨界安全ベンチマーク実験データベース ICSBEP(OECD/NEA, 2013)より、BWR 使用済 燃料を対象とした類似性評価(原子力機構, 2016)と同様、MOX 燃料系臨界実験のうち15シ リーズ 194 ケースの臨界実験データを類似性評価の対象として選択した。評価対象とした臨 界実験シリーズの概要を表 3.2.2-1 に示す。

図 3.2.2-1 に示す PWR 燃料処分容器の健全状態および破損状態における相関係数の評価結 果を図 3.2.2-2 に示す。使用済燃料は、17×17型 PWR 燃料集合体とし、H12 レポート(核燃 料サイクル開発機構,1999)の PWR のレファレンスケース(U-235 濃縮度 4.5 wt%、燃焼度 45 GWd t⁻¹)の条件とした。なお、破損状態については BWR 燃料集合体の破損状態における 臨界解析モデル(原子力機構,2016)と同様に、図 3.2.2-1 で示した 4 体の燃料集合体が処 分容器中央に集まって大きな燃料領域を形成する保守的な体系とした。ORNL(Scaglione et al.,2012)によると、相関係数が 0.8 以上であれば精度検証に使用することは相応に適切で あり、それ以下の場合には不適切であるとしている。

この手法に基づき PWR 使用済燃料を対象とした類似性について評価した結果、健全状態に おける処分体系との相関係数が 0.8 以上となる臨界実験ケースは 155 ケースが適切と認めら れ、精度評価への使用は相応であると判断された。これは、BWR 使用済燃料の検討(原子力 機構, 2016)で認められた 158 ケースと同様の結果となった。このように、異なる燃料形式 でも同様の結果が得られた事から、燃料が健全な状態にある場合の類似性は、燃料の形式で はなく使用済燃料の燃料組成に依存して決まっている可能性が高いと考えられる。本検討で は 45 GWd t⁻¹というひとつの燃焼度を設定しているが、異なる燃焼度では燃料組成が異なる ため、どのような燃焼度であっても同様の類似性判断ができるかについての確認は今後の課 題である。

PWR 使用済燃料を対象とした燃料が破損した状態を模擬した場合の相関係数については、 本検討で対象とした臨界実験ケース全てにおいて 0.3 を下回る結果となった。この燃料破損 状態における相関係数については BWR 使用済燃料の検討においても同様にその殆どが 0.3 を 下回る結果となっており、健全状態の体系と異なった相関があるものと考えられる。燃料組 成の相関よりも燃料の均質・非均質性の違いや、周囲の反射体の影響の可能性も考えられる ことから、ICSBEP の臨界実験データなどの本検討で対象としなかった臨界実験を抽出し、そ

臨界実験シリーズ	Pu 富化度 [wt%]	減速材	反射体	ケース数
MIX-COMP-THERM-001	22	Water	Water	4
MIX-COMP-THERM-002	2	Water	Water	6
MIX-COMP-THERM-003	7	Water	Water	6
MIX-COMP-THERM-004	3	Water	Water	11
MIX-COMP-THERM-005	4	Water	Water	7
MIX-COMP-THERM-006	2	Water	Water	50
MIX-COMP-THERM-007	2	Water	Water	5
MIX-COMP-THERM-008	2	Water	Water	28
MIX-COMP-THERM-009	1	Water	Water	6
MIX-COMP-THERM-011	26	Water	Water	6
MIX-COMP-THERM-012	8, 15, 30	Polystyrene	Lucite/Plexiglas, None	33
MIX-SOL-THERM-001	22, 23, 96, 97,	Water	Water	13
MIX-SOL-THERM-002	23, 52	Water	Water	3
MIX-SOL-THERM-004	40, 41	Water	Water, Concrete, None	9
MIX-SOL-THERM-005	39, 40, 41	Water	Water, None	7

表 3.2.2-1 評価対象とした臨界実験シリーズの概要



図 3.2.2-1 PWR 燃料 4 体収容の処分容器設計



図 3.2.2-2 PWR 燃料処分体系における相関係数の再評価結果

2) 推定臨界下限増倍率の設定

本項では、臨界安全ハンドブックの考え方に基づき、類似性評価により処分体系と類似性 が高く、精度評価に用いることが適切であると判断された臨界実験データを使用して推定臨 界下限増倍率について検討を行った。

本事業において平成 26 年度に実施した PWR 使用済燃料を対象とした検討(原子力機構, 2015a)では、JENDL-4.0 に基づく MVP 用ライブラリの精度評価結果(奥村ほか,2011)のう ち23 ケースを用いて臨界計算の精度評価を行い、推定臨界下限増倍率を求めているが、標本 としては少なく対象データの拡充が必要である。また、平成 27 年度に実施した BWR 使用済燃 料を対象とした検討(原子力機構,2016)でも、既往の精度評価結果(奥村ほか,2011)の うち上記の23 ケースを含む 60 ケースを選択して臨界計算の精度評価を行い、推定臨界下限 増倍率を求めているが、処分体系との類似性が高いと判断された全データ数の半分以下に留 まっている。そこで、推定臨界下限増倍率の信頼性の向上のため、上記に示した、60 ケース 以外の76 ケースの臨界実験を含む合計136 ケースを対象として、MVP-2.0 (Nagaya et al., 2005)と JENDL-4.0 に基づく MVP 用ライブラリの組み合わせにより臨界実験解析を行った。 この136 ケースのうち134 ケースは、本項(2)の1)で PWR 使用済燃料の処分容器体系との類 似性があると判定された155 ケースにも含まれるものである。表 3.2.2-2 に MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験との比較による解析結果の精度評価結果を示す。なお、実効増倍 率の実験値については ICSBEP (0ECD/NEA, 2013)より引用した。

この全136ケースの臨界実験データ解析結果から、臨界安全ハンドブックの評価手順に示 された統計的手法により、PWR および BWR 使用済燃料の直接処分体系の臨界安全評価で使用 可能な推定臨界下限増倍率を評価した。評価結果を図3.2.2-3 および図3.2.2-4 に示す。精 度評価によって得られた暫定の推定臨界下限増倍率は PWR および BWR 使用済燃料ともに 0.9957 であり0.98 を上回ることから、PWR 及び BWR 燃料に対する推定臨界下限増倍率は0.98 と評価した。

本検討では推定臨界下限増倍率に必要となる類似性評価および精度評価においてデータ拡 充を行い、130以上の臨界実験を標本とした信頼性の高い推定臨界下限増倍率を導出した。 本検討から、臨界実験と処分体系の類似性は、受け入れる燃料の形式(PWR であるか BWR で あるか)には依存していないという結論を得た。このことは、燃料の同位体組成が処分容器 体系との類似性評価に大きな影響を与えている事を示唆している。燃料の組成の観点から見 た場合、本検討では燃焼燃料の組成を固定した解析を行っているものの、実際に収納する燃 料の燃焼度が同一でないことが想定されるため、燃料組成の差が類似性の評価結果に影響を 与える可能性を検討しておくことは重要であると考えられる。そのため、今後、燃焼パラメ ータなどの影響や燃焼度クレジット(原子力機構, 2015a; 原子力機構, 2016)の影響を考慮 した臨界に対する安全裕度の設定方法等について、さらに検討していく必要がある。

Cose ID	Experimen	t (ICSBEP)	Calculation (MV	P-2.0 + JENDL-4.0)	C/E
Case ID	Keff	Uncertainty	Keff	%error (1 σ)	C/E
MIX-COMP-THERM-001-001	1.0000	0.0025	1.0007	0.0188	1.0007
MIX-COMP-THERM-001-002	1.0000	0.0026	1.0000	0.0198	1.0000
MIX-COMP-THERM-001-003	1.0000	0.0032	0.9989	0.0199	0.9989
MIX-COMP-THERM-001-004	1.0000	0.0039	1.0007	0.0196	1.0007
MIX-COMP-THERM-002-001	1.0010	0.0059	1.0018	0.0171	1.0008
MIX-COMP-THERM-002-002	1.0009	0.0045	1.0037	0.0165	1.0028
MIX-COMP-THERM-002-003	1.0024	0.0029	1.0035	0.0179	1.0011
MIX-COMP-THERM-002-004	1.0024	0.0021	1.0080	0.0148	1.0056
MIX-COMP-THERM-002-005	1.0038	0.0022	1.0057	0.0177	1.0019
MIX-COMP-THERM-002-006	1.0029	0.0024	1.0073	0.0144	1.0044
MIX-COMP-THERM-003-001	1.0000	0.0071	1.0019	0.0183	1.0019
MIX-COMP-THERM-003-002	1.0000	0.0057	1.0024	0.0188	1.0024
MIX-COMP-THERM-003-003	1.0000	0.0052	1.0026	0.0186	1.0026
MIX-COMP-THERM-003-004	1.0000	0.0028	1.0021	0.0190	1.0021
MIX-COMP-THERM-003-005	1.0000	0.0024	1.0025	0.0190	1.0025
MIX-COMP-THERM-003-006	1.0000	0.0020	1.0027	0.0191	1.0027
MIX-COMP-THERM-004-001	1.0000	0.0046	0.9976	0.0174	0.9976
MIX-COMP-THERM-004-002	1.0000	0.0046	0.9981	0.0169	0.9981
MIX-COMP-THERM-004-003	1.0000	0.0046	0.9984	0.0172	0.9984
MIX-COMP-THERM-004-004	1.0000	0.0039	0.9981	0.0177	0.9981
MIX-COMP-THERM-004-005	1.0000	0.0039	0.9990	0.0172	0.9990
MIX-COMP-THERM-004-007	1.0000	0.0039	0.9994	0.0172	0.9994
MIX-COMP-THERM-004-007	1.0000	0.0040	0.9993	0.0171	0.9993
MIX-COMP-THERM-004-009	1.0000	0.0040	0.9998	0.0164	0.9998
MIX-COMP-THERM-004-010	1.0000	0.0040	0.9994	0.0157	0.9994
MIX-COMP-THERM-004-011	1.0000	0.0051	0.9993	0.0155	0.9993
MIX-COMP-THERM-005-001	1.0008	0.0022	1.0023	0.0175	1.0015
MIX-COMP-THERM-005-002	1.0011	0.0026	1.0001	0.0182	0.9990
MIX-COMP-THERM-005-003	1.0016	0.0029	1.0073	0.0174	1.0057
MIX-COMP-THERM-005-004	1.0021	0.0028	1.0035	0.0174	1.0014
MIX-COMP-THERM-005-005	1.0026	0.0036	1.0054	0.0169	1.0028
MIX-COMP-THERM-005-006	1.0033	0.0042	1.0036	0.0156	1.0003
MIX-COMP-THERM-005-007	1.0035	0.0042	1.0048	0.0153	1.0012
MIX-COMP-THERM-006-001	1.0016	0.0051	0.9986	0.0179	0.9970
MIX-COMP-THERM-006-002	1.0017	0.0036	1.0021	0.0181	1.0004
MIX-COMP-THERM-006-003	1.0026	0.0036	0.9986	0.0176	0.9960
MIX-COMP-THERM-006-004	1.0051	0.0044	1.0044	0.0177	0.9993
MIX-COMP-THERM-006-005	1.0040	0.0054	1.0038	0.0168	0.9998
MIX-COMP-THERM-006-006	1.0055	0.0051	1.0019	0.0163	0.9964
MIX-COMP-THERM-006-007	1.0024	0.0045	0.9961	0.0246	0.9937
MIX-COMP-THERM-006-008	1.0035	0.0044	0.9950	0.0247	0.9915
MIX-COMP-THERM-006-009	1.0035	0.0044	0.9942	0.0243	0.9907
MIX-COMP-THERM-006-010	1.0021	0.0044	0.9925	0.0238	0.9904
MIX-COMP-THERM-006-011	1.0032	0.0044	0.9925	0.0259	0.9893
MIX-COMP-THERM-006-012	1.0032	0.0044	0.9923	0.0257	0.9892
MIX-COMP-THERM-006-013	1.0021	0.0044	0.9937	0.0256	0.9916
MIX-COMP-THERM-006-014	1.0026	0.0044	0.9930	0.0251	0.9904
MIX-COMP-THERM-006-015	1.0033	0.0044	0.9934	0.0261	0.9901
MIX-COMP-THERM-006-016	1.0035	0.0045	0.9929	0.0258	0.9895
MIX-COMP-THERM-006-017	1.0026	0.0046	0.9922	0.0251	0.9896
MIX-COMP-THERM-006-010	1.0023	0.0045	0.9909	0.0262	0.9880
MIX-COMP-THERM-006-019	1.0032	0.0045	0.0017	0.0247	0.9880
MIX COMP THERM 006 021	1.0035	0.0045	0.9917	0.0244	0.9884
MIX COMP THEDM 006 022	1.0030	0.0045	0.9912	0.0255	0.9082
MIX-COMP-THEDM 006 022	1.0024	0.0045	0.9904	0.0202	0.9001
MIX-COMP-THERM 006 024	1.0030	0.0045	0.7910	0.0234	0.2002
MIX-COMP-THERM-006-024	1 0024	0.0045	0.9911	0.0244	0.9887
	1.0027	0.0010	0.7711	5.0200	0.2007

表 3.2.2-2 MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験の精度評価結果(1/3)

Crea ID	Experiment (ICSBEP)		Calculation (MVP-2.0 + JENDL-4.0)		C/E
Case ID	Keff	Uncertainty	Keff	%error (1 σ)	C/E
MIX-COMP-THERM-006-026	1.0021	0.0045	0.9908	0.0242	0.9887
MIX-COMP-THERM-006-027	1.0033	0.0045	0.9921	0.0262	0.9888
MIX-COMP-THERM-006-028	1.0033	0.0046	0.9921	0.0256	0.9888
MIX-COMP-THERM-006-029	1.0040	0.0087	0.9980	0.0224	0.9940
MIX-COMP-THERM-006-030	1.0043	0.0087	0.9966	0.0236	0.9924
MIX-COMP-THERM-006-031	1.0045	0.0087	0.9962	0.0231	0.9918
MIX-COMP-THERM-006-032	1.0037	0.0087	0.9954	0.0229	0.9918
MIX-COMP-THERM-006-033	1.0043	0.0087	0.9951	0.0252	0.9908
MIX-COMP-THERM-006-034	1.0037	0.0087	0.9943	0.0244	0.9906
MIX-COMP-THERM-006-035	1.0044	0.0087	0.9971	0.0240	0.9927
MIX-COMP-THERM-006-036	1.0036	0.0087	0.9958	0.0235	0.9922
MIX-COMP-THERM-006-037	1.0041	0.0087	0.9951	0.0244	0.9910
MIX-COMP-THERM-006-038	1.0044	0.0087	0.9942	0.0235	0.9898
MIX-COMP-THERM-006-039	1.0042	0.0088	0.9925	0.0246	0.9883
MIX-COMP-THERM-006-040	1.0038	0.0087	0.9926	0.0236	0.9888
MIX-COMP-THERM-006-041	1.0038	0.0087	0.9925	0.0232	0.9887
MIX-COMP-THERM-006-042	1.0036	0.0087	0.9920	0.0233	0.9884
MIX-COMP-THERM-006-043	1.0044	0.0087	0.9931	0.0243	0.9888
MIX-COMP-THERM-006-044	1.0044	0.0087	0.9927	0.0239	0.9883
MIX-COMP-THERM-006-045	1.0040	0.0087	0.9930	0.0223	0.9891
MIX-COMP-THERM-006-046	1.0040	0.0087	0.9930	0.0238	0.9890
MIX-COMP-THERM-006-047	1.0040	0.0087	0.9924	0.0222	0.9885
MIX-COMP-THERM-006-048	1.0038	0.0087	0.9922	0.0233	0.9885
MIX-COMP-THERM-006-049	1.0039	0.0087	0.9929	0.0235	0.9890
MIX-COMP-THERM-006-050	1.0044	0.0087	0.9932	0.0235	0.9888
MIX-COMP-THERM-007-001	1.0023	0.0035	1.0048	0.0169	1.0024
MIX-COMP-THERM-007-002	1.0024	0.0039	0.9999	0.0165	0.9975
MIX-COMP-THERM-007-003	1.0036	0.0046	1.0018	0.0167	0.9982
MIX-COMP-THERM-007-004	1.0037	0.0057	1.0008	0.0154	0.9971
MIX-COMP-THERM-007-005	1.0044	0.0061	0.9989	0.0150	0.9946
MIX-COMP-THERM-008-001	0.9997	0.0032	0.9992	0.0165	0.9995
MIX-COMP-THERM-008-002	1.0008	0.0030	1.0005	0.0165	0.9997
MIX-COMP-THERM-008-003	1.0023	0.0038	0.9999	0.0161	0.9976
MIX-COMP-THERM-008-004	1.0015	0.0047	1.0024	0.0154	1.0009
MIX-COMP-THERM-008-005	1.0022	0.0056	1.0026	0.0149	1.0003
MIX-COMP-THERM-008-006	1.0028	0.0065	1.0015	0.0143	0.9987
MIX-COMP-THERM-008-007	1.0023	0.0039	0.9985	0.0246	0.9962
MIX-COMP-THERM-008-008	1.0023	0.0039	0.9982	0.0225	0.9959
MIX-COMP-THERM-008-009	1.0023	0.0039	0.9986	0.0231	0.9963
MIX-COMP-THERM-008-010	1.0023	0.0039	0.9973	0.0230	0.9950
MIX-COMP-THERM-008-011	1.0023	0.0039	0.9961	0.0238	0.9938
MIX-COMP-THERM-008-012	1.0023	0.0039	0.9970	0.0227	0.9947
MIX-COMP-THERM-008-013	1.0023	0.0039	0.9980	0.0234	0.9957
MIX-COMP-THERM-008-014	1.0023	0.0039	0.9979	0.0228	0.9956
MIX-COMP-THERM-008-015	1.0023	0.0039	0.9974	0.0234	0.9951
MIX-COMP-THERM-008-016	1.0023	0.0039	0.9965	0.0234	0.9942
MIX-COMP-THERM-008-017	1.0023	0.0041	0.9974	0.0227	0.9951
MIX-COMP-THERM-008-018	1.0023	0.0041	0.9966	0.0229	0.9943
MIX-COMP-THERM-008-019	1.0023	0.0041	0.9968	0.0237	0.9945
MIX-COMP-THERM-008-020	1.0023	0.0041	0.9962	0.0234	0.9939
MIX-COMP-THERM-008-021	1.0023	0.0041	0.9958	0.0242	0.9935
MIX-COMP-THERM-008-022	1.0023	0.0041	0.9968	0.0236	0.9945
MIX-COMP-THERM-008-023	1.0023	0.0041	0.9959	0.0234	0.9936
MIX-COMP-THERM-008-024	1.0023	0.0041	0.9969	0.0226	0.9946
MIX-COMP-THERM-008-025	1.0023	0.0041	0.9970	0.0242	0.9948
MIX-COMP-THERM-008-026	1.0023	0.0041	0.9962	0.0238	0.9939
MIX-COMP-THERM-008-027	1.0023	0.0040	0.9961	0.0230	0.9938
MIX-COMP-THERM-000-001	1.0023	0.0040	0.9966	0.0228	0.9943
WIIA-COWIP-INEKM-009-001	1.0003	0.0054	1.0030	0.0155	1.0027

表 3.2.2-2 MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験の精度評価結果(2/3)

	Experimen	t (ICSBEP)	Calculation (MVP-2.0 + JENDL-4.0)		C/E
Case ID	Keff	Uncertainty	Keff	%error (1 σ)	C/E
MIX-COMP-THERM-009-002	1.0020	0.0049	0.9994	0.0158	0.9974
MIX-COMP-THERM-009-003	1.0035	0.0050	0.9999	0.0163	0.9964
MIX-COMP-THERM-009-004	1.0046	0.0062	0.9992	0.0159	0.9946
MIX-COMP-THERM-009-005	1.0059	0.0074	1.0009	0.0149	0.9950
MIX-COMP-THERM-009-006	1.0067	0.0080	1.0025	0.0142	0.9958
MIX-SOL-THERM-001-001	1.0000	0.0016	0.9945	0.0276	0.9945
MIX-SOL-THERM-001-002	1.0000	0.0016	0.9947	0.0267	0.9947
MIX-SOL-THERM-001-003	1.0000	0.0016	0.9884	0.0260	0.9884
MIX-SOL-THERM-001-004	1.0000	0.0016	0.9943	0.0274	0.9943
MIX-SOL-THERM-001-005	1.0000	0.0016	0.9983	0.0265	0.9983
MIX-SOL-THERM-001-010	1.0000	0.0016	1.0003	0.0261	1.0003
MIX-SOL-THERM-001-011	1.0000	0.0052	1.0053	0.0267	1.0053
MIX-SOL-THERM-001-012	1.0000	0.0052	1.0063	0.0273	1.0063
MIX-SOL-THERM-001-013	1.0000	0.0016	0.9971	0.0266	0.9971
MIX-SOL-THERM-002-001	1.0000	0.0024	1.0039	0.0117	1.0039
MIX-SOL-THERM-002-002	1.0000	0.0024	1.0040	0.0112	1.0040
MIX-SOL-THERM-002-003	1.0000	0.0024	1.0033	0.0116	1.0033
MIX-SOL-THERM-005-002	1.0000	0.0037	0.9994	0.0255	0.9994

表 3.2.2-2 MVP-2.0 および JENDL-4.0 による臨界実験の精度評価結果(3/3)



	値
標本数 n	134
平均 m	0.9957
標準偏差 s	0.0051
パラメータ μ*	2.283
m-µs	0.9841
推定臨界下限増倍率	0.98

* パラメータ µ: 非心 t 分布のパラメ ータ。臨界超過確率 2.5%、信頼度 97.5% として標本数 n より設定。

図 3.2.2-3 PWR 使用済燃料の臨界安全評価で使用する推定臨界下限増倍率の評価結果



	値
標本数 n	136
平均 m	0.9957
標準偏差 s	0.0051
パラメータ μ*	2.281
m-µs	0.9841
推定臨界下限増倍率	0.98
* パラメータ µ: 非心	t 分布のパラメ
ータ。臨界超過確率 2.5	%、信頼度 97.5%
として 檀木粉 n ト n 設?	눋

図 3.2.2-4 BWR 使用済燃料の臨界安全評価で使用する推定臨界下限増倍率の評価結果

(3) 岩盤や緩衝材を構成する物質の反射体効果に関する検討

直接処分時の臨界安全評価においては、人工バリアとして処分容器を覆うことが検討され ている緩衝材や、天然バリアとなる岩盤による中性子反射体効果が重要となる可能性が指摘 されている。この場合、岩盤や緩衝材を構成する物質の断面積データの精度が重要となるが、 そのような物質の反射体効果が測定された例は少ない。

平成 26 年度(原子力機構, 2015a)には、岩盤や緩衝材の主成分である二酸化ケイ素(SiO₂) に着目し、核燃料施設など通常の臨界安全評価で仮定されている水反射体との比較を行った。 この結果、反射体厚さが十分に厚い場合では水反射体よりもSiO₂反射体が実効増倍率を大き く評価することが確認された。この結果を受け、経済協力開発機構 原子力機関(OECD/NEA) 原子力科学委員会(NSC)臨界安全性ワーキングパーティー(WPNCS)使用済燃料臨界性専門 家会合(EGUNF)において、SiO₂反射体効果について異なる計算コードおよび核データでの計 算値を比較する国際ベンチマーク問題を提案し国際ベンチマーク計算が開始された。平成27 年度(原子力機構, 2016)に8か国10機関の参加を得て様々な計算コードおよび核データラ イブラリによってベンチマーク計算が行われた結果、全参加機関でよく一致する結果が得ら れ、直接処分の臨界安全評価におけるSiO₂反射体効果を検討する計算方法および計算システ ムの妥当性が確認されたと報告されている。

平成 28 年度は、上述の国際ベンチマーク問題において SiO₂反射体効果における計算手法 および計算システムの妥当性が確認されていることから、SiO₂または砂を用いた臨界実験を 対象に解析することによって、SiO₂反射体を使用した臨界計算の妥当性について検討を実施 した。以下の構成によって報告する。また,そのまとめを 3.5 節に示す。

- 1) 計算対象とした実験
- 2) 計算結果

1) 計算対象とした実験

対象となる臨界実験は、臨界安全ベンチマーク実験データベース ICSBEP (OECD/NEA, 2013) より、反射体に SiO2または砂を使用した臨界実験から 3 シリーズ 10 ケースを評価対象とし て選択した。評価対象とした SiO2 反射体を使用した臨界実験ケースの概要を表 3.2.2-3 に示 す。実験番号 BFS-79 および BFS-81 シリーズのデータは、ロシアの IPPE(Institute of Physics and Power Engineering) に設置されている BFS (Big Physical Stand) 臨界実験施設で取得 された臨界実験データである。BFS-79 シリーズでは高濃縮金属ウランを、BFS-81 シリーズで は金属プルトニウムをそれぞれ燃料に使用し、その他 SiO2ペレットも使って六角格子状に炉 心を構成して実施された臨界実験である。ZPPR-20/Eは、アメリカの ANL-W (Argonne National Laboratory-West) に設置されていた ZPPR (The Zero Power Physics Reactor) と呼ばれる 臨界実験施設での臨界実験であり、高濃縮ウランプレートを燃料ドロワーと SiO₂ プレートを 使用したドロワー等で構成した四角格子状の炉心を対象とした臨界実験である。これらの対 象臨界実験ケースについて、臨界計算コード MVP-2.0 および核データライブラリ JENDL-4.0 を使用し解析を行った。このうち、既に MVP 用ライブラリの精度評価(奥村ほか,2011)で 結果が提示されている実験ラベル BFS-81/3 および BFS-79/1、BFS-79/2、BFS-79/3 について は、JENDL-4.0 に基づくより計算結果を引用することとした。また、臨界実験の実験値等に ついては ICSBEP (OECD/NEA, 2013) より引用した。

2) 計算結果

表 3.2.2-4 に SiO₂ 反射体を使用した臨界実験の実効増倍率の解析結果を示す。また、 ZPPR-20/E では ICSBEP レポート内で中性子スペクトル分布図および反応率データの記載があ るため、これらについても比較を行った。図 3.2.2-5 に ZPPR-20/E の中性子スペクトル分布 図を、表 3.2.2-5 に ZPPR-20/E の反応率解析結果を示す。なお、中性子スペクトルについて は、ICSBEP と単位が異なるため、エネルギー群の総和で規格化した値とした。

実効増倍率の解析値と実験値の比較(C/E)では、プルトニウム燃料のBFS-81シリーズでは1.009から最大でも1.014、高濃縮ウラン燃料のBFS-79シリーズでも1.004から1.016、 また、ZPPR-20/Eでは1.017となった。このことから、SiO2を反射体として使用した臨界実験に対する体系的な再現性は高いことがわかる。

ZPPR-20/E の実験解析で評価された中性子スペクトルと今回の解析結果を比較すると、図 3.2.2-5 のとおり概ね一致した中性子スペクトル分布をみることができる。また反応率につ いても、コア領域での各反応率も(n,2n)反応を除けばほぼ一致し、反射体となる SiO₂からな る Sand 領域の捕獲反応率でも、軸方向および径方向領域ともによく一致している結果となっ た。このことから計算は SiO₂を含む ZPPR-20/E 実験をよく再現していることが確認できた。

MVP-2.0と JENDL-4 を使用する事は、本検討で対象とした SiO₂反射体を使用した臨界実験 をよく再現しており、直接処分の臨界安全評価における SiO₂反射体効果の計算の妥当性を確 認することができた。SiO₂は地層中に大量に存在する物質であるため、処分容器の破損時の 臨界安全評価において考慮することが想定される物質である。そのため、本検討で対象とし た SiO₂ 反射体を使用した臨界実験と直接処分における処分体系との類似性についても評価 を実施する必要があると考えられる。

臨界実験ケース	実験ラベル	燃料	減速材	反射体	燃料形状
PU-MET-INTER-001-001	BFS-81/1	Plutonium Metal	None	Silicon Dioxide	Pellet
PU-MET-INTER-001-002	BFS-81/1A	Plutonium Metal	None	Silicon Dioxide	Pellet
PU-MET-INTER-001-003	BFS-81/2	Plutonium Metal	Polyethylene	Silicon Dioxide	Pellet
PU-MET-THERM-001-004	BFS-81/3	Plutonium Metal	Polyethylene	Silicon Dioxide	Pellet
HEU-MET-MIXED-005-001	BFS-79/1	Uranium Metal	Polyethylene	Silicon Dioxide	Pellet
HEU-MET-MIXED-005-002	BFS-79/2	Uranium Metal	Polyethylene	Silicon Dioxide	Pellet
HEU-MET-THERM-005-003	BFS-79/3	Uranium Metal	Polyethylene	Silicon Dioxide	Pellet
HEU-MET-INTER-005-004	BFS-79/4	Uranium Metal	Polyethylene	Silicon Dioxide	Pellet
HEU-MET-INTER-005-005	BFS-79/5	Uranium Metal	None	Silicon Dioxide	Pellet
SUB-HEU-MET-FAST-001-001	ZPPR-20/E	Uranium Metal	Lithium	Silicon Dioxide	Cylinder

表 3.2.2-3 SiO2 反射体を使用した臨界実験ケース概要

表 3.2.2-4 Si02 反射体を使用した臨界実験の実効増倍率の解析結果

Label ID	Experiment		Calculation		C/E
Laber ID	Keff	Uncertainty	Keff	%error (1o)	C/E
BFS-81/1	1.0002	0.0037	1.0146	0.0241	1.014
BFS-81/1A	1.0002	0.0032	1.0091	0.0251	1.009
BFS-81/2	1.0005	0.0025	1.0111	0.0261	1.011
BFS-81/3	1.0000	0.0025	<u>1.0100</u>	<u>0.0195</u>	<u>1.010</u>
BFS-79/1	1.0007	0.0027	<u>1.0061</u>	<u>0.0238</u>	<u>1.005</u>
BFS-79/2	1.0003	0.0028	<u>1.0167</u>	<u>0.0231</u>	<u>1.016</u>
BFS-79/3	1.0012	0.0029	<u>1.0157</u>	<u>0.0210</u>	<u>1.015</u>
BFS-79/4	1.0016	0.0030	1.0134	0.0240	1.012
BFS-79/5	1.0005	0.0040	1.0046	0.0228	1.004
ZPPR-20/E	0.9127	0.0075	0.9283	0.0188	1.017

※斜字下線については文献値(奥村ほか,2011)を引用



図 3.2.2-5 ZPPR-20/E 臨界実験の中性子スペクトル分布図

	Total Fission	Total	Total	Total Absorption	Total
	Production	Fission	Capture	(Fission+Capture)	Production
Core					
Experiment	9.337E-01*	3.689E-01	1.206E-01	4.895E-01	9.497E-04
[ICSBEP]					
Calculation	9.283E-01	3.668E-01	1.237E-01	4.905E-01	1.415E-03
(%error)	(0.020 %)	(0.020 %)	(0.033 %)		(0.303 %)
C/E	0.99	0.99	1.03	1.00	1.49
Axial Sand					
Experiment	-	-	4.553E-03	4.553E-03	2.596E-07
[ICSBEP]					
Calculation	-	-	4.262E-03	4.262E-03	4.574E-07
(%error)			(0.223 %)		(6.940 %)
C/E	-	-	0.94	0.94	1.76
Radial Sand					
Experiment	-	-	7.738E-02	7.738E-02	1.311E-06
[ICSBEP]					
Calculation	-	-	7.542E-02	7.542E-02	1.725E-06
(%error)			(0.085 %)		(3.898 %)
C/E	-	-	0.97	0.97	1.32

表 3.2.2-5 ZPPR-20/E 臨界実験の反応率の解析結果(全核種の反応率の和)

*9.337×10⁻¹を示す。

(4) 中性子吸収材に関する検討

使用済燃料の直接処分における臨界安全評価の信頼性向上のためには、燃焼度クレジット の適用に伴う不確かさや未臨界を判定する基準値などを考慮する検討に加え、長期変遷など による収納容器破損などにより未臨界性が担保できない可能性も想定する必要がある。その ため、平成27年度においては、処分する燃料集合体に中性子吸収材(毒物)を挿入し未臨界 性を担保することが検討されている(原子力機構,2016)。なお、PWR燃料集合体1体には25 本の案内管があるため、毒物を含む棒状の物質(毒物棒)を挿入するスペースは十分確保で きると考えられる。

平成28年度は、燃料集合体の装荷本数を考慮した収納容器体系における毒物の必要量について検討し、保守的な収納容器の破損状態においても未臨界を担保する毒物の最低必要量について評価を実施した。以下の構成によって報告する。また、そのまとめを3.5節に示す。

1) 計算条件

2) 計算結果

1) 計算条件

本検討では、PWR 燃料集合体 2 体および 4 体収容の収納容器を想定し、U-235 濃縮度 4.5 wt%、 燃焼度 45,000 MWd t⁻¹の 17×17 型 PWR 燃料集合体について平成 27 年度の検討(原子力機構, 2016)の結果、処分後の臨界性が高くなることが確かめられている炉取出し後 18,000 年の時 点での燃料組成を使用して評価した。また、燃焼度クレジットを適用する際には、平成 27 年度の検討で行ったように、Np-237 の崩壊による生成を考慮し U-233 を含めた核種を設定し た。ただしこの冷却時間では U-233 の反応度効果は+0.03 % Δ k/k 程度であり、実効増倍率 への影響は殆どないといえる。

計算コードは MVP-2.0、核データライブラリは JENDL-4.0 を使用し、計算モデルには燃料 粒子と毒物粒子数比を自由に変更でき、粒子をランダムに配置することができる確率論的幾 何形状 (STG) モデルを適用した。ただし、STG モデルは減速や吸収が大きい軽水などの媒質 について計算精度が低下する可能性がある(Koide et at., 2014)。そのため、最初に STG モ デルのような数値計算精度低下のおそれがない計算モデルとして、図 3.2.2-6 のような燃料 粒子の規則的立方格子配置セルを用い、規則的配置セルと STG モデルのランダム配置セルを x、y、z 方向に無限に配列した無限大体系において、両者の実効増倍率を比較し、その差を STG モデルの補正係数として与えた。



図 3.2.2-6 燃料粒子の規則的立方格子配列モデルとランダム配列モデル

計算体系については、収納容器破損時に使用済 UO2 燃料粒子と水減速材が最も臨界になり やすい燃料/(燃料+水)体積割合である最適減速条件に再配置する仮想的な状態を想定し た。さらに PWR 燃料粒子、毒物粒子および水減速材がランダムに配置された領域全体が、中 性子のもれが少なく臨界に有利である球形となる体系とし、体系全体を反射体で囲み中性子 のもれも最小化した。計算体系全体の概念図を図 3.2.2-7 に示す。



図 3.2.2-7 使用済燃料粒子再配置時の臨界性計算モデル概念図(球体系)

燃料粒子および毒物粒子の半径についてはいずれも 0.41 cm とした。これらの粒子が分布 する球形領域を覆う反射体は、SRAC2006 システム(Okumura et al., 2007)と JENDL-4.0 核 データを用いた予備評価の結果、今回想定した燃料体積比と燃料集合体収容体数条件で平成 27 年度の検討と同様に実効増倍率が高くなった鉄反射体とした。その厚さは、反射体効果が 十分に飽和する 70 cm に設定した。

2) 計算結果

まず、毒物粒子を含まない計算体系で最適減速条件を確認し、燃料粒子の体積比を 0.24 とした。中性子吸収材となる毒物粒子の組成については、濃縮度 0.2 wt%の dep. U0₂に Gd₂0₃ (酸化ガドリニウム)を加えたものとし、この Gd₂0₃含有毒物粒子について、STG モデルを用 いた計算結果に規則的燃料配列モデルとの比較から得た補正を加えた、体系の実効増倍率+3 σが 0.95 および 0.98 以下となる燃料粒子数/毒物粒子数比 (f/p)を求め、毒物の必要量を 検討した。

毒物を考慮する場合の PWR 使用済燃料 4 体および 2 体の解析結果を図 3.2.2-8 および図 3.2.2-9 に示す。また、未臨界維持に必要な毒物の量を表 3.2.2-6 にまとめて示す。

図 3.2.2-8 に示す4体を収納するケースでは、Gd₂O₃ 濃度が5.0 wt%とすると、f/pが75または174で実効増倍率がそれぞれ0.95以下あるいは0.98以下となった。この毒物割合は、 PWR 燃料集合体1体あたりの燃料棒264本に対して、5.0 wt%のGd₂O₃を含む「毒物棒」(寸法は燃料棒と同一とする)を3.52本の割合、あるいは1.52本の割合に相当し、それぞれの割合で燃料棒と毒物棒を共存させることができれば、増倍率0.95以下あるいは0.98以下の未臨界を担保できる最小必要量となることを意味する。

Gd203 濃度の効果を調べるため、Gd203 濃度を 1.0、0.2 および 0.1 wt%と減少させた時に中 性子増倍率が 0.95 あるいは 0.98 以下になる毒物の割合を調べた。増倍率が 0.95 となる f/p はそれぞれの Gd203 濃度に対して 62、36 および 22 となり、0.98 となる f/p は 145、86、お よび 54 となった。 また、毒物を入れる方法として、PWR の場合には制御棒案内管があるためそこに毒物を含 んだ物質を挿入する事が考えられるため、PWR 燃料集合体の案内管に毒物棒を挿入するとし た場合の最低必要量を検討してみた。増倍率0.95以下とする場合には、毒物棒中の Gd203濃 度が1.0、0.2 および0.1 wt%であればそれぞれ4.26 本、7.33 本、および12 本が必要となり、 0.98 以下とする場合であれば、毒物棒中の Gd203 濃度が1.0、0.2 および0.1 wt%であれば1.82 本、3.07 本、および4.89 本が必要となった。さらに PWR 燃料集合体の25 本の案内管すべて に毒物棒を挿入する場合(f/p=10.56)には、0.046 wt%以上あるいは0.024 wt%以上の Gd203 濃度であれば、増倍率0.95 以下あるいは0.98 以下の未臨界が担保できる。

図 3.2.2-9 に示す PWR 使用済燃料 2 体の場合では、毒物なしで増倍率が 0.98 以下であった ため、実効増倍率 0.95 以下の場合に必要な Gd₂0₃量を検討した。その結果、Gd₂0₃濃度 5.0、 1.0、0.5、0.2、0.1 および 0.05 wt%それぞれに対して、f/p が 170 (PWR 燃料集合体の燃料棒 264 本あたり 1.55 本)、139 (同 1.90 本)、118 (同 2.24 本)、81 (同 3.26 本)、51 (同 5.18 本)、 および 26 (同 10.15 本)により未臨界を担保できる。また、すべての案内管に毒物棒を挿入す る場合は、0.025 wt% Gd₂0₃濃度以上とすることが必要である。

よって、現実的な直接処分収納容器において、毒物棒装荷可能量として、集合体あたりの 全案内管本数と同じ25本をひとつの目安とすると、図3.2.2-8から毒物棒中のGd203濃度が 0.1 wt%程度以上であれば、PWR使用済燃料4体の体系であっても増倍率0.95以下の未臨界 を十分に担保できる可能性が示された。今後はBWR使用済燃料を考慮した収納容器での中性 子吸収材の必要量について検討する必要がある。



図 3.2.2-8 中性子吸収材を考慮した PWR 燃料 4 体体系の実効増倍率



図 3.2.2-9 中性子吸収材を考慮した PWR 燃料 2 体体系の実効増倍率

表 3.2.2-6 処分容器に使用済燃料を 4 体収納する場合の未臨界維持に必要な毒物の量

Gd ₂ O ₃ 濃度(wt.%)	未臨界維持に必要となる毒物棒の本数(集合体1体あたり)
5.0	3.52
1.0	4.26
0.2	7.33
0.1	12
Gd ₂ O ₃ 濃度(wt.%)	未臨界維持に必要となる毒物棒の本数(集合体1体あたり)
5.0	1.52
1.0	1.82
0.2	3.07

(上・推定臨界下限増倍率を 0.95 とする場合)下・同 0.98 とする場合)

表 3.2.2-7 処分容器に使用済燃料を 2 体収納する場合の未臨界維持に必要な毒物の量

0.1

4.89

(推定臨界下限増倍率を 0.95 とする場合)

Gd ₂ O ₃ 濃度(wt.%)	未臨界維持に必要となる毒物棒の本数(集合体1体あたり)
5.0	1.55
1.0	1.9
0.5	2.24
0.2	3.26
0.1	5.18
0.05	10.15

(5) 臨界発生時における影響評価の必要性の検討

使用済燃料の直接処分における臨界安全評価においては、処分場操業中及び処分場閉鎖後 にわたって臨界に至らないように処分容器や処分施設の設計を行う必要がある。処分場閉鎖 後の臨界安全評価においては、超長期における燃料集合体、処分容器等の人工バリアの変遷 挙動や天災による偶発事象の発生などの不確実性が存在することから、米国や英国のように これらの複合的な因子による臨界事象の影響を評価する手法を採り入れている国もある (Hicks et al., 2015)。このような臨界発生による処分システムへの影響評価が、わが国の 直接処分時の臨界安全評価においても必要となるか否かの検討に資する事を目的として、本 検討では諸外国での評価事例について、既往の文献による調査を実施し、以下の構成によっ て報告する。また、そのまとめを3.5節に示す。

- 1)米国における評価例
- 2) 我が国における臨界発生時の影響の取り扱いについて

1)米国における評価例

我が国で参考と出来る詳細な解析例に、米国の直接処分時の臨界発生時挙動評価の事例 (CRWMS, 1997)が挙げられる。この事例は、処分場閉鎖後の臨界シナリオとして、処分容器 内の構造物が破損し燃料集合体の配列や構造物由来の酸化鉄の分布が変化することによって 臨界が発生するシナリオを考慮している。評価においては、最大の反応度となる破損状態を 考慮し、過渡計算には RELAP5/MOD3 コード(INEL, 1995)を使用して事象の進展を評価して いる。

この臨界発生時の影響評価では、使用済燃料としては B&W 社製の 15×15 型 PWR 燃料集合体 を対象としており、濃縮度 4.9 wt%、燃焼度 34 GWd t⁻¹、冷却年数 25,000 年の核種組成を設 定している。収納容器は PWR 燃料集合体 21 体収納容器としており、これを健全状態としてい る。この健全状態に対し、20 m³ 年⁻¹ の流速により地下水が浸入して処分容器内部が冠水し バスケットが腐食によって完全に崩落すると共に、ほう素が地下水に溶解することによって 処分システムから除去され、燃料集合体およびバスケットの腐食により生じた酸化鉄が処分 容器底部に蓄積している状態を最大の反応度となる破損状態としている。図 3.2.2-10 に処分 容器の健全状態および破損状態の模式図を示す。破損状態となる最大反応度が投入されるタ イムスケールは、即発臨界の状態を達成するため短いタイムスケールとし、反応度添加時間 としては 30 秒と 3,600 秒の 2 ケースを設定している。これらの反応度投入条件を元に RELAP5/MOD3 を使用し過渡解析を実施しており、その結果、燃料棒温度は燃料溶融温度未満 であり、処分容器内の圧力は隣接する処分容器に対して影響がない程度の増加に収まること が確認され、処分体系は未臨界状態に終息することが示されている。また、時間当たりの反 応度投入率が小さいほど臨界発生時の影響が小さくなることも示されている。さらに、 RELAP5/MOD3 の過渡計算結果から、核分裂に伴う放射性物質のインベントリ計算を ORIGEN-S にて実施しており、核分裂で生成される FP 等の放射性物質の増加量は無視できる程度である ことも示されている。したがってこれらの結果より、処分容器内の臨界事象は処分場全体に は影響を与えない局所的な事象に限定されており、隣接する処分容器への影響もないことか ら、処分システム性能に影響を及ぼすものではないとの判断が報告されている。

2) わが国における臨界発生時の影響の取り扱いについて

以上の米国の臨界発生時における影響評価事例においては、処分システムへの影響は及ぼ さないと判断されている。米国とわが国では処分システムや地質環境条件等の違いがあり、 さらに臨界となった時に発生するエネルギーは、評価モデルによって決まる投入反応度の大 きさやその時間当たりの添加率に依存する。よって、わが国の処分システムに米国の評価結 果をそのまま適用できるかどうかの判断は現時点では困難であるが、この結果はわが国の直 接処分システムにおいて仮に臨界が発生しても、処分システム全体に大きな影響を及ぼす可 能性は小さいことを示唆している。今後は、図 3.2.2-10 などの破損シナリオを例とした臨界 発生となりうる破損状態での反応度など、わが国の直接処分において臨界発生を想定するこ とが必要となる可能性のある状況や条件について調査し、影響評価の必要性についてさらに 検討を進める必要があると考えられる。



健全状態 図 3. 2. 2-10 PWR 燃料 21 体収納容器の健全状態および破損状態の模式図

3.2.3 緩衝材の設計

(1) 本項目の背景と目的

使用済燃料を直接処分する場合、対象となる廃棄物は燃料集合体であり、ガラス固化体と 比較すると、放射線量、発熱量、構成物質のほか、廃棄体の仕様(形状、寸法、重量)など が相違する。このため、廃棄体の特徴を考慮して、緩衝材の設計要件を抽出し、これらの設 計要件を満足するように適切に設計を行い、緩衝材の仕様を決定する必要がある。

平成 26 年度は、腐食代に銅を用いた複合処分容器を横置きで定置する場合について、使用 済燃料の地層処分システムに関する概括的評価第1次取りまとめ(原子力機構,2015)(以下、

「直接直接処分第1次取りまとめ」という)で設定したレファレンス仕様の緩衝材(乾燥密度 1.6 Mg m⁻³, ケイ砂混合率 30 wt%)が設計要件を満足することの確認を行なった。ただし、 ここでは銅の腐食膨張パラメータについて文献にもとづく暫定値を用いた。また、平成 27 年度は、炭素鋼処分容器を堅置き方式で定置する場合についてレファレンス仕様の緩衝材を 対象とした設計解析を行い、局所的に緩衝材が限界状態に近い状態になることが分かった。 これを受け、平成 28 年度は、複合処分容器を横置きで定置する場合について、実測値にもと づく銅の腐食膨張パラメータを設定した設計解析を行い、設計要件を満足するか確認を行な った。また、炭素鋼処分容器を堅置き方式で定置する場合については、乾燥密度またはケイ 砂混合率を変えた緩衝材が設計要件を満足するか確認を行なうこととし、より高い乾燥密度 の緩衝材の適用性を確認した。ここでは、設計解析において使用した解析モデルおよび物性 値の適切性確認の観点から、緩衝材の物性値取得試験結果とシミュレーションの比較も実施 した。さらに、これまで未実施である、人工バリアを PEM 方式とした場合について、岩盤中 に堅置き定置する条件を対象としてレファレンス仕様の緩衝材が設計要件を満足するか確認 を行なった。

直接処分における使用済燃料の廃棄体はガラス固化体に比べて重く、廃棄体下部の緩衝材 に作用する荷重が大きくなることから、廃棄体の沈下量がより大きくなる可能性がある。こ れに対しては、緩衝材のケイ砂の混合率を増加させる、あるいは乾燥密度を増加させること が対策の一つと考えられる。こうした直接処分に特有の事象に対し、適切な力学モデルによ る緩衝材の設計を実施するため、解析パラメータを取得にともなう力学特性取得試験を実施 した。平成28年度は、ケイ砂混合率を50 wt%、乾燥密度を1.8 Mg m⁻³の緩衝材に対する力 学の解析パラメータ取得に向けた膨潤圧試験を実施した。

以上の実施に関して、設計解析による緩衝材の仕様検討を「(2)緩衝材の設計」、試験によ る解析パラメータの取得を「(3)緩衝材の力学特性取得試験」として以下に示す。

本項目のまとめについては 3.5 節に示す。

(2) 緩衝材の設計

本項目においては、岩種(硬岩・軟岩)、定置方式(竪置き・横置き、ブロック方式・PEM 方式)、処分容器(炭素鋼容器・炭素鋼と銅外層による複合容器)の多様性を考慮し、それ らの組合せに対応する緩衝材の仕様検討を行ってきた。 複合容器を横置き定置した場合については、平成26年度において、直接処分第1次取りま とめ(原子力機構,2015b)に示されたレファレンス仕様の緩衝材が設計要件を満足すること を、岩盤のクリープ、廃棄体の沈下、処分容器の腐食膨張を考慮した解析(以降、複合解析) により確認した。ここで、銅の腐食膨張に関するパラメータ(ヤング率、腐食膨張率)につ いては文献にもとづく暫定値を用いた。そこで平成28年度は、銅の腐食膨張パラメータの実 測値にもとづく解析により、緩衝材が設計要件を満足するか確認を行なった(以降、「ケー スi」という)。

また、炭素鋼容器を堅置き方式で定置した場合については、平成27年度において、レファ レンス仕様の緩衝材が設計要件を満足するかどうかを、複合解析により確認した。その結果、 局所的に緩衝材が限界状態に近い状態になることがわかった。そこで平成28年度は、乾燥密 度、またはケイ砂混合率を変えた緩衝材が設計要件を満足するか確認することを目的とし、 レファレンス仕様より高い乾燥密度(1.8 Mg m⁻³)の緩衝材を対象とした複合解析を行なっ た(以降、「ケース ii」という)。ここでは、設計解析において使用した解析モデルおよび 物性値の適切性確認の観点から、緩衝材の圧密試験の結果と緩衝材に適用する構成側にもと づくシミュレーションの比較も実施した。

さらに、人工バリアを PEM 方式とした場合については、これまでに PEM 方式に対応する解 析モデルが検討されていないことから、まず解析モデルの検討を行った上で、レファレンス 仕様の緩衝材が設計要件を満足するか複合解析による確認を行なった(以降、「ケース iii」 という)。

本項目の実施に関して、以下、1)に緩衝材の設計要件を示した上で、設計要件が満足され ることの判断基準を設定し、次に2)~4)に、設計解析において考慮するシナリオ、設計解析 に用いる解析コードおよび力学モデル、解析において使用した物性値を示す。また5)~7)に、 ケース i からケース iii の設計解析および設計要件の確認をケース毎に順に示す。

1) 緩衝材の設計要件

緩衝材の設計要件については、原子力機構(2015b)にまとめられている。基本的な要件、 機能・役割、設計要件を抜粋して表 3.2.3-1 に示す。

ここでは、表 3.2.3-1 に示した設計要件のうち、所要の期間人工バリアの機能維持に対す る影響を抑制するための、処分容器の変形の緩和の機能を果たす応力緩衝性の要件と、処分 容器の力学的に安定な支持の機能を果たす強度特性の要件に着目して検討を行った。これら 二つの設計要件の内容は以下のとおりである。

- 応力緩衝性:廃棄体埋設後、処分容器の閉じ込め機能が維持される期間、処分容器の腐 食膨張と岩盤のクリープ変形による力学的影響を緩和すること。また、処 分容器の腐食膨張による岩盤に対する力学的影響を緩和すること。
- 強度特性 : 処分容器および緩衝材の機能が要求される期間、人工バリアの寸法・形状 を維持し、その機能に有害な影響を与えないこと。

本検討では、平成27年度に引き続き、力学的な数値解析手法を用いて、所要の期間にわた り、緩衝材が限界状態に至らない事の確認をもって、応力緩衝性および強度特性を確認する こととした。なお、緩衝材が局所的に限界状態に至った(破壊した)場合でも、他の領域が 破壊されなければ上記の要件から期待される機能が喪失するわけではないことから、緩衝材 の厚さを計測するとともに、限界状態の発生をコンター図により確認することとした。

基本的な要件		機能・役割	設計要件
		地下水の移動の抑制	低透水性
		溶解した核種の収着	収着性
故射州技活	の我行遅延のを	フロイドの移動の防止	コロイドフィルトレーシ
成別性修理	の移行建進のた	コロイトの移動の阿正	ョン機能
めの安住		地下水環境の変動の緩和	化学的緩衝性
		バリア姓能低下の防止	人工バリア材の性能発揮
		バリア性能低下の防止	に対する悪影響の抑制
	制作サインゴサインのゆったいた吟明へし	佐丁スの仙で牛じた险胆などの	自己シール性
	要作• 旭上// 可 能でなる > し	施工ての他で生した原间などの 素博に上て経衛 甘燃 能の確保	締固め特性
人工バリ	肥くめること	1.頃による 被関初 機能の 確床	強度特性
アが成立	所要の期間人	応力緩衝性による処分容器の変	古 海衛州
するため	エバリアの機	形の緩和	心刀板倒土
の要件	能維持に対す	処分容器の力学的に安定な支持	強度特性
る影響を抑制		擾乱に対する自己修復	自己修復性
	すること	緩衝材の変質の抑制	熱伝導性

表 3.2.3-1 緩衝材の設計要件(原子力機構(2015b)より一部抜粋)

2) 緩衝材の設計にあたってのシナリオ

ブロック方式の人工バリアは、原子力機構(2015b)のレファレンス仕様を参考として、PWR 使用済燃料集合体2体を封入した処分容器(炭素鋼処分容器または複合処分容器)の周囲を 緩衝材が覆うものとする。ブロック方式の場合の設計要件の確認において考慮すべき事象(以 降、シナリオ)については、原子力機構(2015b)で検討されており、竪置き定置方式を例と してその詳細を以下の①に示す。

一方、PEM 方式の人工バリアは、炭素鋼処分容器の周囲を緩衝材が覆い、その周囲をさら に炭素鋼(PEM 容器)で覆うものとする。PEM 方式において考慮すべきシナリオについてはこ れまでに未検討であることから、本検討ではブロック方式について考慮したシナリオを基本 として検討し、以下の②に示す。

① ブロック方式の場合(ケース i、ケース ii) に考慮したシナリオ

本シナリオでは、岩盤のクリープ、廃棄体の沈下、処分容器の腐食膨張を考慮した。竪置 きの場合を例として、表 3.2.3-2に各シナリオの特徴と、それを表現するための力学的モデ ル・手法を示した。

岩盤のクリープに対しては、長期的な3次クリープを考慮するため、岩盤にコンプライア

ンス可変型モデル(大久保ほか,1987;大久保・金,1993)を適用した。また、廃棄体の沈 下に対しては、緩衝材に、塑性理論に基づく粘性土の代表的な構成則である修正 Cam-Clay モデル(Schofield and Wroth, 1968; Roscoe and Burland, 1968)を適用した。さらには、 岩盤のクリープや処分容器の腐食膨張に起因した緩衝材への荷重の増加による緩衝材の圧密 変形についても修正 Cam-Clay モデルを適用した。また、処分容器の腐食膨張については、処 分容器の材料となる金属の線膨張係数で表現することとし、処分容器は弾性体としてモデル 化とした。

② PEM 方式の場合(ケース iii) に考慮したシナリオ

検討対象とする PEM 容器は、原子力機構(2015a)で示した仕様とした(図 3.2.3-1 参照)。 人工バリアの定置後における緩衝材の自己シール性の確保の観点から、PEM 容器には遮水 機能が期待されないと考えられるため、人工バリアの定置後、再冠水により PEM 容器は短期 間に完全腐食し、その後処分容器が腐食を開始すると仮定した。そこで本検討では、PEM 容 器が完全に腐食した時点を設計解析における評価開始時点とし、それ以降に考慮すべきシナ リオおよび力学的モデル・手法はブロック方式の場合と同様とした。

シナリオ	シナリオの	D特徴	力学的なモデル・手法
岩盤の クリープ	廃棄体 緩衝材 支保正 岩盤	坑道の掘削により岩 盤が弾性変形すると ともに、クリープ変 形が起こり、徐々に 緩み域が拡大する。	長期的な 3 次クリープ を考慮するため、岩盤に コンプライアンス可変 型モデルを適用する。
廃棄体 の沈下	廃棄体 緩衝材 支保工 岩盤	人工バリアを設置し た時点で、廃棄体の 自重により沈下し始 める。	緩衝材に、塑性理論に基 づく粘性土の代表的な 構成則である修正 Cam-Clay モデルを適用 する。
処分容器 の腐食膨張	一 定保工 岩盤	処分容器が酸素や硫 化物などにより腐食 され、腐食膨張変形 を起こす。	処分容器は弾性体モデ ルとする。(腐食膨張は 処分容器の材料となる 金属の線膨張係数で表 現する。)

表 3.2.3-2 考慮したシナリオの特徴と力学的なモデル・手法



3) 設計に用いる解析コードおよび力学モデル

① 解析コード

解析には汎用有限要素法解析コード ABAQUS6.14(米 Dassault Systems 社)を用い、人工バリアおよび天然バリアを含めて浸透と応力を考慮した連成解析を行った。

ABAQUS は米国の Rhode Island の HSK 社により開発され、自動車、航空宇宙、工業製品な どの産業で広く用いられている。ABAQUS のプロダクトは、ABAQUS/Standard、ABAQUS/Explicit、 ABAQUS/CFD の3つからなり、本解析では陰解法を用いて有限要素解析を行う ABAQUS/Standard を用いている。

ABAQUS における有限要素法の定式化は仮想仕事の原理に基づく。仮想仕事の原理は、物体 が平衡状態にあれば、そこに加えられる微小な仮想変位 $\hat{\alpha}$ または仮想速度 $\hat{\alpha}$ によって、物 体ならびに外力の各々がなす仕事、または一種の仕事率が等置されることを示しており、次 式で表わすことができる。

$$\int_{V_0} \Pi_{ij} \left\{ \frac{\partial (\partial u_j)}{\partial X_i} \right\} dV_0 = \int_{S_{0i}} \bar{t}_{0j} \partial u_j dS_0 + \int_{V_0} \bar{b}_j \partial u_i dV_0 \quad \dots \quad \forall 3.2.3-1$$

ここで、 Π は公称応力テンソル [Pa]、 δu は仮想変位 [m]、 \overline{t} は表面力 [Pa]および \overline{b} は物体力 [N m⁻³]を示す。

ABAQUS は広範囲の応力解析の問題を解析することができるが、本検討では静的応答問題の うち、非線形静的解析を実施している。なお、非線形性は、大変形効果、材料非線形性、接 触や摩擦などの境界非線形性によって生じる可能性があるが、本解析では大変形効果は考慮 していない。非線形つり合い方程式の解法には Newton 法を用いており、各変数の増分に対し てつり合い状態を得るために繰り返し計算が行われる。 ABAQUS では、解析で対象とする事象に応じて構成則のオプションが選択できるようになっ ており、粘性土の塑性変形に対しては修正 Cam-Clay モデルが標準で利用可能である。また、 浸透流についても、ダルシー則に基づいたモデルが標準で利用可能である。一方、岩盤の非 線形な粘弾性挙動を表現するためのコンプライアンス可変型モデルは、ABAQUS の構成則のオ プションにはないことから、ユーザーが作成したサブルーチンとして ABAQUS 中に組み込んだ。 ABAQUS では、選択した構成則に応じて自動で強連成を行い、解析を行う。

2) 力学モデル

a. コンプライアンス可変型モデル(核燃料サイクル開発機構(1999)に一部加筆)

坑道の長期力学的安定性を検討するためには、岩盤の時間依存性挙動、粘弾性的挙動を考 慮した検討が必要である。岩石は非線形粘弾性挙動を示す材料であるが、岩盤クリープ挙動 に関して提案されている多くの構成方程式は線形粘弾性モデルであり、非線形粘弾性挙動を 解析的に扱うことができるものはほとんどないのが現状である。さらに、岩種によってはク リープ変形による坑道周辺岩盤のひずみは数 10%になり、ひずみ強度破壊点を超える状態と なることも予想されるが、強度破壊点以降の範囲まで適用できるモデルも少ない。ここでは、 大久保らが提案した、非線形粘弾性挙動および強度破壊点以降の挙動を数値解析的に表現可 能なモデル(大久保ほか,1987;大久保・金,1993)を用いて、岩盤クリープ挙動を検討す る。本モデルは、非線形 Maxwell モデルに相当し、応力を受ける岩盤の各要素のコンプライ アンス(ひずみ/応力に相当)が、時間の経過とともに次第に増加してゆくと仮定したモデ ルである。このモデルを用いた解析は、有限要素法により、各要素のコンプライアンスを順 次増加させた繰り返し計算を行うことによって、比較的簡単に時間依存性挙動をシミュレー トすることができる。構成モデルの概略を以下に示す。

コンプライアンス ω [Pa⁻¹]の増加速度は、そのときの差応力 $\Delta \sigma$ (= $\sigma r \sigma_{3}$) [Pa]のn乗に比例し、コンプライアンスの増加速度は ω のm乗に比例して加速度的に大きくなると考え、 基礎方程式を次のように仮定する。

$d\omega^*/dt = a \cdot (\Delta\sigma^*)^n \cdot (\omega^*)^m \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots $	式3.2.3-2
$a = (m/n_0 + 1)^{\{m/(n_0 - m + 1)\}}/t_0$	式3.2.3-3
$\Delta \varepsilon^* = \omega^* \cdot \Delta \sigma^* \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots $	式3.2.3-4

 $\omega^*(=\omega/\omega_0)$ 、 $\Delta\sigma^*(=\Delta\sigma/\Delta\sigma_0)$ 、 $\Delta\varepsilon^*(=\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_0)$ は、それぞれ規格化したコンプライアンス、 差応力、差ひずみで、 ω_0 は初期コンプライアンス [Pa⁻¹]、 $\Delta\sigma_0$ は破壊差応力 [Pa]、また、 $\Delta\varepsilon_0 = \omega_0 \cdot \Delta\sigma_0$ である。 t_0 (s)は、定ひずみ速度試験でひずみが $\Delta\varepsilon_0$ となるまでの所要時間 を表す。

破壊条件は、Janach (1977)の式を用い、 σ_c を一軸圧縮強さ (Pa)、 σ_t を一軸引張強さ (Pa)、 σ_s を周圧 (Pa)とすれば次のように書ける。

nは、周圧の増加に伴い破壊強度 $\Delta \sigma_{\theta}$ (Pa)が増加すると、次式に従って増加する。

 $n = (\Delta \sigma_0 / \sigma_c) \cdot n_0 \quad \cdots \quad \exists 3. 2. 3-6$

 n_0 は、一軸応力下でのnの値である。

破壊の進行にともなうポアソン比 νの増加を次式で仮定する。

 $\nu = 0.5 - (0.5 - \nu_0)/\omega^*$... $\exists 3. 2. 3-7$

*ν*₀は、弾性領域で求めたポアソン比である。

b. 修正 Cam-Clay モデル(核燃料サイクル開発機構(1999)に一部加筆)

緩衝材の構成モデルとして、塑性理論に基づいた粘性土の代表的な構成式である修正 Cam-Clay モデル (Schofield and Wroth, 1968; Roscoe and Burland, 1968)を用いた。以 下にモデルの概要を示す。ここで、以下の式では、 λ は圧縮指数、 κ は膨潤指数、 e_0 は初期 間隙比、Gはせん断弾性係数 [Pa]、 S_{ij} は偏差応力 [Pa]、Mは限界状態パラメータ、 η は応 力比、 η_0 は初期応力比である。

材料のひずみを、弾性成分 ϵ_{if} と塑性成分 ϵ_{if} とに分けられるものと仮定する。そのうち、 弾性成分(速度型)については、次式により有効応力 p [Pa]と関係づけている。

また、塑性ひずみ成分は、降伏曲面が滑らかな場合、関連流れ則を適用することにより、 有効応力との関係において、次のように表せる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{P} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}'} \qquad (\Lambda > 0) \quad \cdots \quad \forall \exists 3. 2. 3-9$$

ここで、*f*は降伏関数 (Pa)、*A*は正のパラメータで、応力速度(あるいはひずみ速度)に 依存するスカラー量である。塑性変形に対する構成式は、降伏関数 *f*を与えることにより求 められる。

修正 Cam-Clay モデルでは、外力による消散エネルギーと内部摩擦による内部消散エネルギーの関係から、体積ひずみの塑性成分 *ε* √ を硬化パラメータとすると、一般の降伏関数は次のようになる。

最終的に、全体のひずみ(速度型) $\dot{\epsilon}_{ij}$ は、上記の弾性成分 $\dot{\epsilon}_{ij}^{E}$ と粘塑性成分 $\dot{\epsilon}_{ij}^{P}$ の和として、

以上の関係から、修正 Cam-Clay モデルにおける応力とひずみの関係が求まる。

4)物性值

各解析ケースで使用した物性値を表 3.2.3-4~表 3.2.3-13 にまとめ、これらの表と各ケースにおける地下構造物との対応を表 3.2.3-3 に示す。

処分容器について、ケースiは、銅外層と炭素鋼による複合容器を対象としており、炭素 鋼処分容器の物性値を表 3.2.3-4 に、銅外層の物性値を表 3.2.3-5 に示す。ケース ii および ケース iii は炭素鋼処分容器が対象である。炭素鋼処分容器および銅外層の物性値は過年度 の設計検討(原子力機構, 2015a;原子力機構, 2016)における設定と基本的に同じであるが、 銅の腐食膨張に関するパラメータは実測値にもとづき保守的に設定した値を用いた。

軟岩系岩盤の場合、坑道の力学的安定性の確保のために支保工が設置される。その物性値 については、過年度の設計検討と同様に吹付けコンクリートの物性値を設定した(表 3.2.3-6 参照)。

硬岩系岩盤および軟岩系岩盤の物性値は過年度の設計検討と同じであり、表 3.2.3-7 および表 3.2.3-8 に示す。

緩衝材について、ケースiでは過年度の設計検討と同様、直接処分第1次取りまとめ(原 子力機構, 2015)のレファレンス仕様(1.6 Mg M⁻³, ケイ砂混合率 30 wt%)を対象とした。 物性値を表 3.2.3-9に示す。ケース ii では、レファレンス仕様よりも高密度な仕様(1.8 Mg M⁻³,ケイ砂混合率 30 wt%)を対象とし、平成 27 年度の試験に基づき設定した。物性値を表 3.2.3-10に示す。ケース iii では、2)②で示したとおり PEM 容器が完全に腐食した時点を評 価開始時点とするため、レファレンス仕様(1.6 Mg M⁻³,ケイ砂混合率 30 wt%)の緩衝材が PEM 容器の腐食膨張によって圧密した状態を対象とした。物性値はレファレンス仕様を対象 とした試験結果に基づき設定した(表 3.2.3-11 参照)。

ケース iii で考慮する PEM 容器(炭素鋼の腐食生成物)の物性値について、機械的性質(ヤング率、ポアソン比)については処分容器(炭素鋼)の腐食生成物の設定と同じ(表 3.2.3-4 参照)とし、それ以外(密度、間隙比、透水性)については文献にもとづき設定した。物性値を表 3.2.3-12 に示す。

構造物	ケース i	ケース ii	ケース iii
処分容器	炭素鋼:表3.2.3-4 銅外層:表3.2.3-5	炭素鋼:表3.2.3-4	炭素鋼:表3.2.3-4
支保工	硬岩系岩盤の 軟岩系岩盤の場	_	
岩盤	硬岩系岩盤 軟岩系岩盤	硬岩:表3.2.3-7	
緩衝材	表 3.2.3-9	表 3.2.3-10	表 3.2.3-11
PEM 容器	_	_	表 3.2.3-12
間隙流体		表 3.2.3-3	

表 3.2.3-3 各ケースで使用した物性値

表 3.2.3-4 処分容器(炭素鋼)の物性値

	項目	記号	単位	値	備考
	密度	ρ	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	7.85	高治ほか(1999)より
	ヤング率	Е	GPa	210	高治ほか(1999)より
出主	ポアソン比	ν	_	0.30	高治ほか(1999)より
灰茶 一 鋼	腐食生成物	Fe	CDo	105	本間ほか(2002)より
	ヤング率	Ec	GPa		健全部に対して 50 %程度小さくなる
	腐食速度		$mm y^{-1}$	0.04	高治ほか(1999)より
	腐食膨張率		倍	3	須田ほか(1992)を参考

表 3.2.3-5 複合容器(銅外層)の物性値

	項目	記号	単位	値	備考
	密度	ρ	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	8.9	JIS C1020 無酸素銅より (理科年表平成 25 年より)
	ヤング率	Е	GPa	117	JIS C1020 無酸素銅より (理科年表平成 25 年より)
銅	ポアソン比	v	-	0.343	銅より (理科年表平成 25 年より)
	腐食生成物 ヤング率	Ec	GPa	80	原子力機構(2016)実測値にもとづき保守的に 設定
	腐食速度		$mm y^{-1}$	0.0008	高治ほか(1999)に準拠して、腐食代 40 mm が腐 食 寿命 50000 年で腐食されるとする。
	腐食膨張率		倍	7	原子力機構(2016)実測値にもとづき保守的に 設定

項目	記号	単位	値	備考
設計基準強度		MPa	36.0	支保工は弾性体と仮定するため解析では不使用
ヤング率	E	MPa	6,000	
ポアソン比	ν	-	0.20	
密度	ρ	Mg m ⁻³	2.35	電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005) より インバート(無筋コンクリート)
透水係数	K	$m s^{-1}$	1.80×10^{-10}	入矢ほか(2004)より HFSC424
間隙比	е	_	0.163	入矢ほか(2006)より HFSC424の総細孔率(間隙率)14 %より算出

表 3.2.3-6 支保工(高強度吹付けコンクリート)の物性値

表 3.2.3-7 硬岩系岩盤の物性値(処分深度 1,000 m)

	項目	記号	単位	値	備考
加田	飽和密度	ρ	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	2.67	H12 レポート* HR より
初珪 的特	真密度	$ ho_{ m R}$	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	2.7	H12 レポート* HR より
性	有効間隙率	n _e	%	2	H12 レポート* HR より
	一軸圧縮強さ	qu	MPa	115	H12 レポート* HR より
	ヤング率	Е	MPa	37,000	H12 レポート* HR より
	ポアソン比	ν	-	0.25	H12 レポート* HR より
	粘着力	с	MPa	15	H12 レポート* HR より
	内部摩擦角	φ	deg	45	H12 レポート* HR より
力学 特性	引張強度	σ t	MPa	8	H12 レポート※ HR より
	側圧係数	Ko	-	1.00	H12 レポート [※] HR 164/h+0.74 (h:深度[m])より ただし K ₀ <1.0 の場合は K ₀ =1.0
	初期鉛直応力	σν	MPa	26.7	H12 レポート [※] HR ρ h/100 (≒ ρ gh/1000)より
	初期水平応力	$\sigma_{ m h}$	MPa	26.7	H12 レポート※ HR K ₀ ・σ _v より
水理 特性	透水係数	k	$m s^{-1}$	1×10^{-8}	H12 レポート [※] 健岩部:10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁸ m s ⁻¹ より
カリ	大久保モデル	n _o	_	30	高治ほか(1999)より
ープ	3次クリープ	m	-	20	高治ほか(1999)より
行生	パラメータ	t _o	S	120	大久保ほか(1987)より

※H12 レポートは核燃料サイクル開発機構(1999)

	項目	記号	単位	値	備考
物理	飽和密度	ρ	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	2.20	H12 レポート* SR-Cより
的特	真密度	$ ho_{ m R}$	${\rm Mg}~{\rm m}^{-3}$	2.7	H12 レポート* SR-Cより
性	有効間隙率	n _e	%	30	H12 レポート* SR-Cより
	一軸圧縮強さ	qu	MPa	15	H12 レポート* SR-C より
	ヤング率	Е	MPa	3, 500	H12 レポート* SR-C より
	ポアソン比	ν	_	0.30	H12 レポート* SR-C より
	粘着力	с	MPa	3. 0	H12 レポート* SR-C より
	内部摩擦角	φ	deg	28	H12 レポート* SR-Cより
力学	引張強度	σ t	MPa	2.1	H12 レポート* SR-C より
特性	特性	Ko	-	1.07	H12 レポート* SR-C
	则仁际奴				164/h+0.74 (h:深度[m])より
	初期公古内力	σν	MPa	11	H12 レポート** SR-C
	初刻如臣応力				ρh/100 (≒ρgh/1000)より
	初期水亚広力	_	MD -	11 8	H12 レポート* SR-C
		0 h	mia	11.0	$K_0 \cdot \sigma_v \downarrow b$
水理	透水区数	k	m s ⁻¹	1×10^{-8}	H12 レポート**
特性	远水际数	K	ш з	1/10	健岩部:10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁸ m s ⁻¹ より
クリ	大久保モデル	n ₀	-	20	高治ほか(1999)より
ープ	3 次クリープ	m	_	5	高治ほか(1999)より
特性	パラメータ	t ₀	S	120	大久保ほか(1987)より

表 3.2.3-8 軟岩系岩盤の物性値(処分深度 500 m)

※H12 レポートは核燃料サイクル開発機構(1999)

表 3.2.3-9 緩衝材の物性値(乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂 30 wt%配合)

項目		記号	単位	値	備考
	乾燥密度	ho d	${\rm Mg}~{\rm m}^{-3}$	1.600	
	間隙比	e	_	0.676	高治・鈴木 (1999)より クニゲル V1 の $\rho_s=2.7 \text{ Mg m}^{-3}$ 、 ケイ砂の $\rho_s=2.64 \text{ Mg m}^{-3}$ とし、 混合体の $\rho_s=2.68 \text{ Mg m}^{-3}$ から 間隙比を算出
乾燥密度	圧縮指数	λ	—	0.117	西村ほか(2006)より
1.6 Mg m ^o (ケイ砂 30 wt%配合)	膨潤指数	κ	_	0.069	西村ほか(2006)より 再載荷時の値
	ポアソン比	ν	—	0.4	高治ほか(1999)より
	限界状態応力比	М	_	0.630	高治・鈴木(1999)より
	内部摩擦角	ϕ	deg	16.6	高治・鈴木(1999)より
	先行圧密降伏応力	P_0^*	MPa	0.800	H12 レポート*より
	透水係数	К	$m s^{-1}$	4. 5×10^{-13}	松本ほか(1997)より
	膨潤圧(初期応力)	P_{sw}	MPa	0.5	鈴木・藤田(1999)より

※H12 レポートは核燃料サイクル開発機構(1999)

項目		記号	単位	値	備考
	乾燥密度	ho d	${\rm Mg}~{\rm m}^{-3}$	1.800	
	間隙比	е		0.47	原子力機構(2016) 圧密試験
	圧縮指数	λ	_	0.090	原子力機構(2016)の値はΔ e/ΔlogPによる。左記はΔ
故偈密度	膨潤指数	κ		0.070	
乾燥省度 1 8 Ma m ⁻³	ポアソン比	ν		0.4	
1.8 mg m (ケイ砂30	限界状態応力比	М	_	0.38	原子力機構(2016)P3-150のデ
wt%配合)	内部摩擦角	φ	deg	10.3	ータを再整理して設定
	先行圧密降伏応力	P ₀ *	MPa	3. 7	原子力機構(2016)圧密試験に よる膨潤圧線と正規圧密線の 交点として設定
	透水係数	K	$m s^{-1}$	1. 9×10^{-13}	松本ほか(1997)より
	膨潤圧 (初期応力)	P_{sw}	MPa	1.7	原子力機構 (2016)

表 3.2.3-10 緩衝材の物性値(乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂 30 wt%配合)

表 3.2.3-11 ケース iii 評価開始時点の緩衝材の物性値

項目		記号	単位	値	備考
	乾燥密度	ho d	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	1.84	処分孔に定置した時点から評 価期始時点までの圧密変形(体
	間隙比	е	_	0.454	積減少)を基に設定
	圧縮指数	λ	—	0.117	
乾燥密度	膨潤指数	κ	_	0.069	
1.6 Mg m ^{-3}	ポアソン比	ν	_	0.4	
(ケイ砂30 wt%配合)※1	限界状態応力比	М	_	0.630	処分孔に定置した時点と同じ 値(表3.2.3-9参照)
	内部摩擦角	φ	deg	16.6	
	先行圧密降伏応力	P_0^*	MPa	0.800	
	透水係数	K	$m s^{-1}$	4. 5×10^{-13}	
	評価開始時点の応 力	P_{sw}	MPa	4.5	処分孔に定置した時点の載荷 応力-間隙比関係、および評価 開始時点の間隙比により設定

※1 PEM 容器を処分孔に定置した時点の緩衝材の仕様

表 3.2.3-12 腐食した PEM 容器(炭素鋼)の物性値

項目		記号	単位	値	備考
	ヤング率	Е	GPa	105	処分容器(炭素鋼)の腐食生成物の設定
出ま網の	ポアソン比	ν	-	0.30	より(表 3.2.3-4 参照)
炭素鋼の 腐食生成 物	密度	ρ	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	3.77	マグネタイト密度 5.2 g cm ⁻³ と、下記の 間隙比から算出
	間隙比		-	0.38	高谷ら(2013)にもとづき算出
	透水係数		$m s^{-1}$	8.1 \times 10 ⁻⁹	エネルギー総研(2002)より

表 3.2.3-13 間隙流体の物性値

項目	記号	単位	値	備考	
水の密度	ho w	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	1.0	高治ほか(1999)より	

5) ケース i 複合容器をブロック・横置き方式で定置する場合の緩衝材の設計

平成26年度において、軟岩系岩盤を対象に、レファレンス仕様の緩衝材が、所要期間破壊 に至らないことを複合解析により確認したが、銅の腐食膨張に関するパラメータについては 文献にもとづく暫定値を用いた。本検討では、平成27年度に取得した実測値にもとづく、よ り現実的な値を用いて再度確認を行なった。また、岩盤に関しては軟岩系岩盤に加え、硬岩 系岩盤も対象とした。

軟岩系岩盤を対象とした解析について、銅の腐食膨張に関するパラメータを実測値にもと づく値とするため外力条件が変更となることを除き、解析条件および解析モデルは平成26 年度と同じである。硬岩系岩盤の場合、外力条件は軟岩系岩盤の場合と同じであるが、岩盤 の物性値や境界条件が異なる。また支保工は設置しない。

以下に、解析モデルの検討、物性値、解析条件、解析結果を①~④に順に示す。

解析モデル

軟岩系岩盤の場合の解析モデルを例として以下に示す。

解析対象は、処分容器、緩衝材、支保工、および岩盤とする。図 3.2.3-2 に処分坑道の配置とモデル化した範囲の模式図を示す。処分坑道は、力学的な安定性や人工バリアの熱的影響を考慮して設定された処分坑道離間距離分の離隔で、平行して掘削される。そこで、本検討では対称性や連続性を考慮して、図 3.2.3-3 に示すように坑道部分を切り出して解析モデルを作成した。坑道断面および坑道奥行方向の対称性を考慮して 1/4 対称モデルとした。岩盤部分は、直接処分第1 次取りまとめ(原子力機構, 2015)の緩衝材の設計に関する解析モデルを参考として、外側境界に掘削等の影響が及ばないように処分坑道の5 倍程度までの範囲として、処分坑道から約 12 m の範囲までをモデル化した。

人工バリアの仕様は、レファレンス仕様(原子力機構,2015)を参考として、PWR 使用済 燃料集合体2体を封入した処分容器の周囲を厚さ0.7mの緩衝材が覆い、坑道横置き方式で 定置されるものとした。図3.2.3-4に人工バリア周辺を拡大した解析モデルを示す。処分容 器は、銅外層と炭素鋼からなる複合処分容器とした。支保工は厚さ100mmでモデル化する。



切り出した範囲



図 3.2.3-2 処分坑道の配置とモデル化した範囲の模式図

図 3.2.3-3 解析モデル全体(軟岩系岩盤)(単位:mm)



図 3.2.3-4 解析モデル人工バリア周辺(軟岩系岩盤)(単位:mm)

2 物性値

炭素鋼処分容器および銅外層については表 3.2.3-4 および表 3.2.3-5 に示す値を用いた。 炭素鋼処分容器および銅外層の物性値は過年度の設計検討(原子力機構, 2015;原子力機構, 2016) (以降、「過年度の設計検討という」)における設定と基本的に同じであるが、銅の 腐食膨張に関するパラメータ(ヤング率、腐食膨張率)は、原子力機構(2016)で取得した 実測値から、緩衝材の設計解析上保守的に実測範囲の最大値を参照して設定した。軟岩系岩 盤で考慮する支保工の物性値は過年度の設計検討における設定と同じである(表 3.2.3-6 参 照)。硬岩系岩盤および軟岩系岩盤の物性値は過年度の設計検討と同じである(表 3.2.3-7、 表 3.2.3-8 参照)。

③ 解析条件

a. 初期条件

緩衝材には膨潤圧 0.5 MPa を初期応力として考慮した。岩盤は深度(硬岩系岩盤の場合は 処分深度 1,000 m、軟岩系岩盤の場合は処分深度 500 m)に応じた初期地圧を解析モデルの要 素ごとに設定した。鉛直方向の初期地圧は ρ gh として算出した。なお、ここで用いる ρ は岩 盤の乾燥密度 [Mg mm⁻³]、g は重力加速度 [mm s⁻²]、h は深度 [mm]である。また、間隙水圧 も同様に ρ wgh として深度に応じた間隙水圧を解析モデルの要素ごとに設定した。軟岩系岩 盤におけるモデル上面の計算例を以下に示すとともに、同様に計算した軟岩系岩盤のモデル 下面、硬岩系岩盤のモデル上下面の初期地圧と間隙水圧を表 3.2.3-14 に示す。 軟岩系岩盤における解析モデルの上面位置を深度で表現すると、解析モデルの中心(深度 500 m)から-13.11973 m、解析モデルの下面位置は解析モデルの中心から+13.11973 m である。 ・初期地圧(モデル上面)

 $\sigma_{v_{top}} = \rho_{dry}gh = 1.9059 \times 10^{-9} \times 9806.65 \times (500000-13119.73) = 9.0999$ MPa ・間隙水圧(モデル上面)

 $p_{\text{top}} = \rho_w gh = 1.0 \times 10^{-9} \times 9806.65 \times (500000 - 13119.73) = 4.7747 \text{ MPa}$

硬岩系 岩盤	モデル 上面	深度[GL —m]	986.88	
		初期地圧[MPa]	25.6695	
		間隙水圧[MPa]	9.6780	
	モデル 下面	深度[GL —m]	1013.12	
		初期地圧[MPa]	26.3520	
		間隙水圧[MPa]	9.9353	
軟岩系 岩盤	モデル 上面	深度[GL —m]	586.88	
		初期地圧[MPa]	9.0999	
		間隙水圧[MPa]	4.7747	
	モデル 下面	深度[GL —m]	513.12	
		初期地圧[MPa]	9.5904	
		間隙水圧[MPa]	5.0320	

表 3.2.3-14 ケース i の初期条件

b. 境界条件

図 3.2.3-5 に境界条件を示す。モデルの各側面の節点には図中に示した変位固定の境界条件を設定した。また、間隙水圧については、地盤上面および下面に間隙水圧固定の境界条件を設定し、側面は図 3.2.3-2 に示したとおり処分坑道が平行して掘削されている処分場の一部分を切り出してモデル化していることから、空間の対称性を考慮し非排水条件とした。

c. 外力条件

外力条件として、処分容器の腐食膨張による緩衝材への荷重を設定した。

解析モデル上では、処分容器を腐食代の銅部分、その内部の炭素鋼部分、使用済燃料部分 に分けてモデル化しているが、ここでは使用済燃料部分も含めて腐食膨張するものと仮定し、 予め計算した膨張量に応じた等価な体積ひずみおよび等価剛性を銅、炭素鋼、使用済燃料の 区別なく全断面に均一に与えた。計算方法を次に示す。なお、腐食膨張量は、処分容器の材 料となる金属の線膨張係数と温度上昇量で表現した。

処分容器は、処分容器断面において腐食部の断面積が腐食膨張倍率(銅部分:7 倍、炭素 鋼部分:3 倍)となるように膨張すると仮定する。まず、5 万年間で腐食代の銅が腐食する。 その際の腐食膨張量の計算の模式図を図 3.2.3-6 に示す。



図 3.2.3-6 銅の腐食膨張量の計算の模式図(5万年まで)

次に、5万年以降は腐食代の内側部分の炭素鋼が腐食する。その際の腐食膨張量の計算の 模式図を図 3.2.3-7に示す。



図 3.2.3-7 炭素鋼の腐食膨張量の計算の模式図(5万年以降)
以上より、腐食膨張による処分容器の半径および等価剛性は以下のように計算される。

容器全断面積 $A'=a_s+7a_0+A_s+3A_0$ より

腐食膨張による処分容器半径 r'=√A'/π ………式 3.2.3-22 腐食膨張による処分容器の等価剛性

$$E_{eq} = \frac{a_s \cdot e_s + 7a_0 \cdot e + A_s \cdot E_s + 3A_0 \cdot E}{a_s + 7a_0 + A_s + 3A_0} \quad \dots \quad \exists 3.2.3 - 23$$

es: 銅健全部弾性係数、e: 銅腐食部弾性係数、

Es: 炭素鋼健全部弾性係数、E: 炭素鋼腐食部弾性係数

経過年数に対する腐食膨張量を図 3.2.3-8、処分容器の等価剛性を図 3.2.3-9 に示す。



図 3.2.3-8 経過年数に対する腐食膨張量



図 3.2.3-9 経過年数に対する処分容器の等価剛性

④ 解析結果

処分容器の定置後、5万年経過時点、10万年経過時点の変位図を図3.2.3-10に示す。また、 図3.2.3-11に示す位置で計測した緩衝材厚さ(厚さ1、厚さ2)を表3.2.3-15に示す。図お よび表から、処分容器の腐食膨張にともない緩衝材は圧密変形し、緩衝材の厚さについて、 硬岩系岩盤の場合は5万年経過時点で初期厚さから26%減少し、10万年経過時点では初期 厚さから55%減少した。軟岩系岩盤の場合、5万年経過時点で初期厚さから27%減少し、 硬岩系岩盤と比較すると4mm程度多く減少した。10万年経過時点では初期厚さから55%減 少し、硬岩系岩盤と比較すると2mm程度多く減少しており、時間の経過とともに軟岩系岩盤 と硬岩系岩盤の差は縮小する傾向が見られた。

応力経路について、平成 26 年度の検討から大きな応力が作用すると考えられる位置(図 3.2.3-11 の赤枠参照)で計測し、緩衝材の底部内側および底部外側の 2 点を例として図 3.2.3-12 に示す。硬岩系岩盤および軟岩岩盤いずれにおいても、緩衝材中の応力比(=せん 断応力/平均有効応力)は限界状態を下回ることから、緩衝材は限界状態(破壊)に至らない ことを確認した。



処分容器定置直後





5万年経過時点



10 万年経過時点 図 3.2.3-10 変形図 (変形量の表示倍率:1倍、ケースi)



図 3.2.3-11 緩衝材の厚さおよび応力経路の計測位置

岩盤条件	計測位置	処分容器 定置直後	5万年経過時点	10 万年経過時点
硬岩系岩盤	厚さ1	700 mm	517 mm (-26.1 %)	317 mm (-54.7 %)
	厚さ2		518 mm (-26.0 %)	318 mm (-54.6 %)
軟岩系岩盤	厚さ1		513 mm (-26.7 %)	315 mm (-55.0 %)
	厚さ2		514 mm (-26.6 %)	316 mm (-54.9 %)

表 3.2.3-15 緩衝材厚さの経時変化



図 3.2.3-12 緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース i)

6) ケース ii 炭素鋼容器をブロック・竪置き方式で定置する場合の緩衝材の設計

平成27年度においては、炭素鋼容器を竪置き方式で定置した場合について、レファレンス 仕様の緩衝材が設計要件を満足するか、複合解析により確認を行った。その結果、局所的に 緩衝材が限界状態に近い状態になることが確認された。そこで本年度は、乾燥密度、または ケイ砂混合率を変えた緩衝材が設計要件を満足するか確認することを目的とし、レファレン ス仕様より高い乾燥密度の緩衝材を対象として設計要件を満足するか、複合解析により確認 を行なった。以下に、解析モデル、物性値、解析条件、解析結果を①~④に順に示す。なお、 ②においては、緩衝材試験との比較により、物性値および解析モデルの適切性に関して確認 を行なった結果を示す。

① 解析モデル

軟岩系岩盤を例として解析モデルを図 3.2.3-13 に示す。解析対象は、処分容器、緩衝材、 支保工(軟岩系岩盤のみ)、および岩盤とする。人工バリアを堅置き定置した場合は、処分 容器を中心として緩衝材、支保工(軟岩系岩盤のみ)、および岩盤が同心円状に位置するこ ととなるため、軸対象問題として取り扱うことができる。人工バリアの仕様は、原子力機構 (2015b)のレファレンス仕様を参考として、PWR 使用済燃料集合体 2 体を封入した処分容器 の周囲を厚さ 0.7 mの緩衝材が覆い、堅置き方式で定置されるものとした。また、岩盤部分 は、原子力機構(2015b)の緩衝材の設計に関する解析モデルを参考として、外側境界に掘削 などの影響がおよばないように処分孔の直径の 5 倍程度までの範囲として、処分孔から約 12 mの範囲までをモデル化した。また、深さ方向についても、緩衝材の下端から約 12 mの範囲 までをモデル化した。

2 物性値

緩衝材以外の物性値は、過年度の検討で用いたものと同じである。炭素鋼処分容器、支保 工、硬岩系岩盤および軟岩系岩盤の物性値を、表 3.2.3-4、表 3.2.3-6、表 3.2.3-7、表 3.2.3-8 に示す。

緩衝材の物性値について、間隙比、圧縮指数、膨潤指数、内部摩擦角、膨潤圧(初期応力) については平成27年度の試験結果を参照した。透水係数は松本ほか(1997)を参照した。先行 圧密降伏応力について、降伏曲面の内側を完全な弾性領域とする古典的弾塑性モデル(修正 Cam-Clay モデル含む)を用いる場合、初期状態(初期圧力、初期間隙比)および正規圧密線 が与えられれば圧密降伏応力は図3.2.3-14のように自動的に決定され、図にもとづき先行圧 密降伏応力は3.7 MPa に設定した。ポアソン比については、H12 レポート(核燃料サイクル 開発機構,1999)でも使用された値0.3を用いた。

以上による物性値の設定および設計解析において使用した解析モデルの適切性の確認の観 点から、平成27年度の圧密試験(原子力機構,2016)により取得された間隙比-載荷応力関 係(e-logP曲線)と緩衝材に適用する構成則(修正 Cam-Clay モデル)にもとづくシミュレ ーションの比較を実施した。図3.2.3-15に結果を示す。図に赤線で示されたシミュレーショ ン結果は、試験による間隙比-載荷応力関係を概ね再現しており、この結果は、設定した物 性値および設計解析において使用した解析モデルの適切性を示していると考えられる。今後 は、間隙比-載荷応力関係以外の試験結果(三軸圧縮試験による有効応力経路など)との比 較により、物性値の設定および解析モデルの適切性の確認を進める必要があると考える。な お、処分容器の腐食膨張についても試験結果とシミュレーションの比較により解析モデルお よび物性値の適切性を確認することが理想的であるものの、使用済燃料集合体を封入した処 分容器を忠実に模擬した腐食膨張試験行なうことは現実的でないことから、処分容器内部を 全て腐食代と仮定した設定を適用しており、緩衝材の設計解析の観点からは保守的であり、 適切であると考えられる。岩盤クリープの評価に適用したモデルおよび物性値については、 過年度の設計検討との整合性を考慮し、H12レポート(核燃料サイクル開発機構,1999)に おいてガラス固化体を対象とした処分場の構造力学的安定性評価を行うために使用されたも



図 3.2.3-13 解析モデル(単位:mm)(軟岩系岩盤)



図 3.2.3-14 先行圧密降伏応力の設定方法



図 3.2.3-15 修正 Cam-Clay モデルによるシミュレーション(間隙比-載荷応力) (赤:シミュレーション、黄青緑:試験結果)

③ 解析条件

a. 初期条件

初期条件は平成27年度の設計検討と同じ設定である。緩衝材には膨潤圧0.5 MPaを初期応 カとして考慮した。岩盤は深度(硬岩系岩盤の場合は処分深度1,000 m、軟岩系岩盤の場合 は処分深度500 m)に応じた初期地圧および間隙水圧を解析モデルの要素ごとに設定した。 表3.2.3-16に設定値を示す。なお、設定方法は、5)③aに示した方法と同様である。

	モデル	深度[GL —m]	1000.00
		初期地圧[MPa]	26.0107
硬岩系	山山	間隙水圧[MPa]	9.8067
岩盤	モデル 下面	深度[GL —m]	1018.18
		初期地圧[MPa]	26.4836
		間隙水圧[MPa]	9.9849
軟岩系 岩盤	モデル -	深度[GL —m]	500.00
		初期地圧[MPa]	9.3452
	山山	間隙水圧[MPa]	4.9033
	モデル - 下面 -	深度[GL —m]	518.18
		初期地圧[MPa]	9.6850
		間隙水圧[MPa]	5.0816

表 3.2.3-16 ケース ii の初期条件

b. 境界条件

境界条件は平成 27 年度の設計検討と同じである。硬岩系岩盤の場合を例として、図 3.2.3-16 に境界条件を示す。モデルの上下面および側面の節点には図中に示した変位固定の 境界条件を設定した。また、間隙水圧については、モデル上面および下面に間隙水圧固定の 境界条件を設定し、側面は処分孔が平行して掘削されている処分場の一部分を切り出してモ デル化していることから、空間の対称性を考慮し非排水条件とした。なお、境界条件は初期 条件が設定された後に有効となり、例えば、初期応力場が設定された後に変位固定条件が有 効となる。



図 3.2.3-16 ケース ii の境界条件(硬岩系岩盤)

c. 外力条件

外力条件は平成27年度と同じである。

外力条件として、処分容器の腐食膨張による緩衝材への荷重を設定した。解析モデル上で は、炭素鋼部分と使用済燃料部分を合わせて処分容器としてモデル化しているが、ここでは 使用済燃料部分も含めて腐食膨張するものと仮定し、予め計算した膨張量に応じた等価な体 積ひずみおよび等価剛性を炭素鋼、使用済燃料の区別なく全断面に均一に与えた。計算方法 は、5)③cで示した計算方法において、銅外層を考慮しない場合と同様である。

経過年数に対する処分容器半径の増加量(腐食膨張量)を図 3.2.3-17、処分容器の等価ヤング率を図 3.2.3-18 に示す。



図 3.2.3-17 経過年数に対する処分容器半径の増加量



図 3.2.3-18 経過年数に対する処分容器の等価ヤング率

④ 解析結果

処分容器の定置後、3千年経過時点、7千年経過時点の変位図を図3.2.3-19に、最大主塑 性ひずみ分布を図3.2.3-20に示す。また、図3.2.3-21に示す位置(「厚さ1」、「厚さ2」) で計測した緩衝材厚さを表3.2.3-17および表3.2.3-18に示す。表には、平成27年度に検討 した仕様(レファレンス仕様)の緩衝材を対象とした解析結果も併せて示した。図および表 から、処分容器の腐食膨張にともない緩衝材は圧密変形し、緩衝材の厚さについて、硬岩系 岩盤の場合は3千年経過時点で初期厚さから24%減少し、10万年経過時点では初期厚さか ら40%減少した。軟岩系岩盤の場合、3千年経過時点で初期厚さから24%減少しており、 硬岩系岩盤とほぼ同じ減少幅であるが、軟岩系岩盤のほうが3mm~4mm程度減少幅が小さかった。7千年経過時点では初期厚さから39%減少しており、硬岩系岩盤と比較すると6mm~9mm程度減少幅は小さかった。

レファレンス仕様の緩衝材との比較において、硬岩系岩盤の場合、3 千年経過後では平成 28 年度検討した緩衝材仕様のほうが 0 mm~4 mm 程度大きな厚さを維持しており、7 千年後で は 1 mm~4 mm 程度大きな厚さを維持している。軟岩系岩盤の場合、3 千年経過後では本年度 検討した緩衝材仕様のほうが 4 mm~6 mm 程度大きな厚さを維持しており、7 千年後では 8 mm ~9 mm 程度大きな厚さを維持している。

応力経路については、平成27年度の検討から大きな応力が作用すると考えられる位置(図 3.2.3-21の「応力比1」、「応力比2」)で計測した。結果を図3.2.3-22に示す。図に示す ように、硬岩系岩盤および軟岩系岩盤のいずれにおいても約80年経過後、処分容器の下部隅 角部(応力比1)で緩衝材中の応力比(=せん断応力/平均有効応力)が限界状態を上回り、 緩衝材の破壊が確認された。ただし、処分容器の側部中央部(応力比1)においては、両岩 盤条件とも、緩衝材中の応力比は限界状態を下回ったことから破壊は確認されなかった。

緩衝材の破壊の様子を詳しく調べるため、軟岩系岩盤を例として、緩衝材中の応力比(= せん断応力/平均有効応力)を限界状態応力比(M=0.38)で除した値(破壊接近度)を算出し、 100年経過時点および7千年経過時点についてコンター図として示した(図3.2.3-23参照)。 破壊接近度が1に近い(破壊に近い)領域は、時間の経過とともに処分容器との接触面から 拡大するものの、7千年経過時点においても破壊に至っている領域は局所的であることが確 認された。

以上のことから、平成28年度に検討した、レファレンス仕様よりも、より高い乾燥密度の 緩衝材の仕様(1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率30 wt%)を用いた場合、局所的に限界状態に達す るものの、処分容器の最小設計寿命にわたり、全体的には限界状態に至らず健全に維持され ることが確認された。また、乾燥密度を高くすることは緩衝材の厚さの維持の観点からは効 果が小さいことを確認した。



図 3.2.3-19 変形図(変形量の表示倍率:1倍、ケース ii)



図 3.2.3-20 最大主塑性ひずみ分布図 (ケース ii)



(a) 硬岩系岩盤

(b) 軟岩系岩盤

図 3.2.3-21 応力比・緩衝材厚さの計測位置

乾燥密度	計測位置	処分容器 定置直後	3千年後	7千年後
1.8 Mg m ⁻³ (平成 28 年 度)	厚さ1		529 mm (-24.4 %)	422 mm (-39.7 %)
	厚さ2	700	530 mm (-24.3 %)	422 mm (-39.7 %)
1.6 Mg m ⁻³ (レファレン ス仕様) ※	厚さ1	100	525 mm (-25.0 %)	418 mm (-40.3 %)
	厚さ2		530 mm (-24.3 %)	421 mm (-39.9 %)

表 3.2.3-17 緩衝材厚さの経時変化(硬岩系岩盤)

(※)原子力機構(2016)の解析ではレファレンス仕様(乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂 30 wt% 配合)の緩衝材を検討したが、軸方向の線膨張係数が径方向の 1/2 として設定された解析で あったため、上記では再計算した緩衝材厚さを示した。

乾燥密度	計測位置	処分容器 定置直後	3千年後	7千年後
1.8 Mg m ⁻³ (本年度)	厚さ1		532 mm (-24.0 %)	428 mm (-38.9 %)
	厚さ2	700 mm	534 mm (-23.7 %)	431 mm (-38.4 %)
1.6 Mg m ⁻³ (レファレン ス仕様) ※	厚さ1		526 mm (-24.9 %)	419 mm (-40.1 %)
	厚さ2		530 mm (-24.3 %)	423 mm (-39.6 %)

表 3.2.3-18 緩衝材厚さの経時変化(軟岩系岩盤)

(※)原子力機構(2016)の解析ではレファレンス仕様(乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂 30 wt% 配合)の緩衝材を検討したが、軸方向の線膨張係数が径方向の 1/2 として設定された解析で あったため、上記では再計算した緩衝材厚さを示した。



(a) 硬岩系岩盤 図 3.2.3-22 緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース ii)(1/2)



(b) 軟岩系岩盤 図 3.2.3-22 緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース ii)(2/2)



図 3.2.3-23 破壊接近度(ケース ii、軟岩系岩盤)

7) ケース iii 人工バリアを PEM 方式とした場合の緩衝材の設計

人工バリアを PEM 方式とした場合に対応する解析モデルがこれまでに検討されていないこ とから、平成 27 年度の成果を参考に緩衝材の仕様を検討するとともに、解析モデルの検討を 行った。検討結果にもとづき複合解析を行い、設計要件を満足するか確認を行なった。

以下に、解析モデルの検討、物性値、解析条件、解析結果を①~④に順に示す。

解析モデルの検討

PEM 容器を竪置き定置した場合に対応する解析モデルを検討した。解析モデルを図 3.2.3-24 に示す。

解析対象は、処分容器、緩衝材、PEM 容器および岩盤とし、2)②における検討結果にもと づき、評価開始時点は PEM 容器が完全に腐食した時点とした。人工バリアを堅置き定置した 場合は、処分容器を中心として緩衝材、PEM 容器および岩盤が同心円状に位置することとな るため、軸対象問題として取り扱うことができる。人工バリアは、原子力機構(2015b)のレ ファレンス仕様を参考として、PWR 使用済燃料集合体 2 体を封入した処分容器の周囲を緩衝 材が覆い、さらにその周囲を PEM 容器が覆ったものとし、竪置き方式で定置されるものとし た。

人工バリアの定置後、腐食膨張により PEM 容器の内外面が共に変位すると考えられるが、 本解析では、PEM 容器の外面の位置は腐食前の位置に固定し、腐食膨張による PEM 容器の体 積増加分と等価となるよう PEM 容器内面のみを 58 mm 変位させ、腐食膨張後(評価開始時点) の PEM 容器の厚さを 86 mm とした。緩衝材の厚さは、処分孔に定置した時点で 0.7 m である が、PEM 容器内面の変位量に相当する圧密変形が緩衝材に生ずるものとし、評価開始時点の 厚さを 0.642 m とした。岩盤部分は、原子力機構(2015b)の緩衝材の設計に関する解析モデ ルを参考として、外側境界に掘削などの影響が及ばないと考えられる処分孔の直径の 5 倍程 度までの範囲として、処分孔から約 12 m の範囲までをモデル化した。また、深さ方向につ いても、緩衝材の下端から約 12 m の範囲までをモデル化した。



図 3.2.3-24 解析モデル図(単位:mm)(竪置き PEM 方式、 硬岩)

2 物性値

評価開始時点では炭素鋼処分容器は健全な状態であるものとし、表 3.2.3-4 に示す物性値 を用いた。軟岩系岩盤で考慮する支保工の物性値については表 3.2.3-6 の値を用いた。

緩衝材について、評価開始時点においてはレファレンス仕様の緩衝材が PEM 容器の腐食膨 張によって圧密した状態とし、レファレンス仕様にもとづき物性値を設定した(表 3.2.3-11 参照)。乾燥密度および間隙比については、処分孔に定置した時点の乾燥密度および評価開 始時点の緩衝材の体積を基に、PEM 容器の腐食膨張による体積増分が全て緩衝材の体積減少 に寄与するものと仮定して設定した。圧縮指数、膨潤指数、ポアソン比、限界状態応力比、 内部摩擦角、先行圧密降伏応力については、緩衝材の圧密にともなって変化するものではな いため、処分孔に定置した時点の値と同じとした。評価開始時点で緩衝材に作用する応力に ついては、レファレンス仕様の物性値にもとづき設定した正規圧密線を設定し、評価開始時 点の間隙比(0.454)に相当する載荷応力を図 3.2.3-25 から参照し、4.5 MPa に設定した。

PEM 容器(炭素鋼の腐食生成物)の物性値について、機械的性質(ヤング率、ポアソン比) については処分容器(炭素鋼)の腐食生成物の設定と同じ(表 3.2.3-4 参照)とし、それ以 外(密度、間隙比、透水性)については文献にもとづき設定した。物性値を表 3.2.3-12 に示 す。評価開始時点における PEM 容器は完全に腐食した状態と仮定するため、機械的性質(ヤング率、ポアソン比)については処分容器(炭素鋼)の腐食生成物の設定(表 3.2.3-5 参照) と同じとした。間隙比については、高谷ら(2013)に示された鉄(Fe)とマグネタイト(Fe₃0₄) の体積比から求められる体積膨張率 2.1 および一般環境で生成するマグネタイトの腐食膨張 率 2.9 にもとづき、これらの膨張率の差異を間隙と仮定して算出した。密度は、マグネタイ ト密度 5.2 g cm⁻³と間隙比から算出した。腐食した PEM 容器(炭素鋼)透水係数については、 多孔質体を仮定し、エネルギー総研(2002)において取得されたマグネタイト加圧成型試料 (成形圧力 10 MPa)の透水係数を使用した。



図 3.2.3-25 評価開始時点の緩衝材の応力の設定(ケース iii)

③ 解析条件

初期条件および境界条件を以下に示す。なお、外力条件は竪置き・ブロック方式であるケース ii と同様である。

a. 初期条件

処分深度は硬岩系岩盤の深度(1,000m)とし、深度に応じた初期地圧および間隙水圧を解

析モデルの要素ごとに設定した。表 3.2.3-19 に設定値を示す。なお、設定方法は、5)③a に 示した方法と同様である。

硬岩系	モデル 上面	深度(GL —m)	1000.00
		初期地圧(MPa)	26.0107
		間隙水圧 (MPa)	9.8067
岩盤	モゴン	深度(GL —m)	1018.24
	下面 -	初期地圧(MPa)	26.4851
		間隙水圧 (MPa)	9.9855

表 3.2.3-19 ケース iii の初期条件

b. 境界条件

図 3.2.3-26 に境界条件を示す。モデルの上下面および側面の節点には図中に示した変位固定の境界条件を設定した。また、間隙水圧については、モデル上面および下面に間隙水圧固定の境界条件を設定し、側面は処分孔が平行して掘削されている処分場の一部分を切り出してモデル化していることから、空間の対称性を考慮し非排水条件とした。なお、境界条件は初期条件が設定された後に有効となり、例えば、初期応力場が設定された後に変位固定条件が有効となる。



④ 解析結果

直接処分第1次取りまとめ(原子力機構, 2015)において、処分容器の最小寿命とされている1,000年までの設計解析の結果を示す。

評価開始時点、評価開始から千年経過時点の変位図を図3.2.3-27に示す。また、図3.2.3-28 に示す位置(「厚さ1」、「厚さ2」)で計測した緩衝材厚さを表3.2.3-20に示す。図およ び表から、処分容器の腐食膨張にともない緩衝材は圧密変形し、緩衝材の厚さは、処分孔へ の定置から千年経過時点で初期厚さから18%減少した。

応力経路については、ケース ii (堅置き・ブロック方式)を参考に、大きな応力が作用す ると考えられる位置(図 3.2.3-28の「応力比 1」、「応力比 2」)で計測した。結果を図 3.2.3-29 に示す。いずれの位置においても緩衝材中の応力比(=せん断応力/平均有効応力)は限界状 態を下回っており、緩衝材は破壊しない。





図 3.2.3-28 応力比・緩衝材厚さの計測位置

(変形量の表示倍率:1倍、ケースiii)

計測位置	処分容器 定置直後	評価開始時点	千年後(※)
厚さ1	700 mm	642 mm (-8.3 %)	572 mm (-18.3 %)
厚さ 2		642 mm (-8.3 %)	572 mm (-18.3 %)

表 3.2.3-20 緩衝材厚さの経時変化(ケース iii)

※評価開始時点からの経過時間



図 3.2.3-29 緩衝材の応力経路図(有効応力、ケース iii)

(3) 緩衝材の力学特性取得試験

カ学モデルにおける緩衝材の設計では、関ロー太田モデル(Sekiguchi and Ohta, 1977) や修正 Cam-Clay モデル(Schofield and Wroth, 1968)などの一般的な粘性土質材料の挙動 評価に用いられる構成モデルにより、処分容器の自重沈下や腐食膨張などの長期力学挙動評 価を行う。本項目では、前項の緩衝材の設計に必要な力学の解析パラメータである膨潤指数 (C_s)、圧縮指数(C_c)、限界状態パラメータ(M)、内部摩擦角(ϕ)を取得することを目 的とした力学特性取得試験を実施する。平成27年度までは、平成28年度に実施の緩衝材の 設計における解析条件であるケイ砂混合率を30 wt%、乾燥密度を1.8 Mg m⁻³とした力学特性 取得試験を実施した。平成28年度以降は、平成29年度に実施予定の緩衝材の設計における 解析条件であるケイ砂混合率を50 wt%、乾燥密度を1.8 Mg m⁻³とした力学特性 取得試験を実施した。平成28年度以降は、平成29年度に実施予定の緩衝材の設計における

1) 概要

解析パラメータの取得に伴い、力学特性である膨潤指数(C_s)および圧縮指数(C_c)の取 得を目的とし、ケイ砂混合率を 50 wt%、乾燥密度を 1.8 Mg m⁻³の緩衝材を対象とした圧密試 験における供試体の飽和確認および載荷条件決定のための膨潤圧試験を実施した。

2) 供試体の仕様

供試体の仕様は、地盤工学会基準 JGS 0411-2009 および高治・鈴木(1999) に準拠した。 仕様の一覧を表 3.2.3-21 に示す。試験には Na 型ベントナイトのクニゲル V1®(クニミネエ 業(製))とケイ砂(3号および5号ケイ砂を乾燥重量で等量混合)を所定の割合で混合し、 静的加圧法を用いて所定の乾燥密度になるように圧縮成型した。試験溶液には蒸留水を用い た。供試体の寸法は直径φ=60mm、高さh=20mmとし、同一条件で3試料を同時に実施した。

ベントナイト系材料	Na 型クニゲル Vl®
混合材料	3 号ケイ砂、5 号ケイ砂(1:1 混合)
ケイ砂混合率[wt%]	50
乾燥密度[Mg m ⁻³]	1.8
含水比[%]	自然含水比(7~8 %)
供試体寸法[mm]	直径 60 ×高さ 20
試験温度[℃]	室温 (22±1)
試験溶液	蒸留水

表 3.2.3-21 膨潤圧試験に使用する供試体の仕様

3) 試験内容

膨潤圧試験では、圧縮成型した供試体に給水を行い、ロードセルにより供試体の飽和過程 において膨潤応力が一定とみなせるまでの過程を測定し、膨潤応力(膨潤圧)が一定とみな せる状態になった時点で飽和が完了したと判断する。

4) 試験結果

各供試体に発生した膨潤圧の経時変化を図 3.2.3-30 に示す。各供試体とも給水直後から膨 潤圧は上昇していきピークに達した後、一旦低下し、再び上昇傾向にあった。No.2 供試体は 他に比べてやや低めの膨潤圧で推移した。このような膨潤圧のばらつきは載荷板と供試体の 接触具合や容器側面に発生する摩擦などが原因として考えられるが、これまでの膨潤圧測定 結果で確認されている傾向(高治・鈴木,1999;原子力機構,2016)と同様であることから、 問題ないと判断した。測定時間 1,000 時間経過時においてほぼ一定値に収束したと判断でき るため供試体は飽和したと判断し、膨潤圧測定を終了した。

それぞれの供試体の試験直前の膨潤圧(以後、膨潤圧とはこの値を指す)は、1,000~1,100 時間における測定値の平均から、供試体 No.1 で 0.858 MPa、供試体 No.2 で 0.816 MPa、供試 体 No.3 で 0.849 MPa と算定した。この結果は、これまでの膨潤圧測定で確認されている結果 (原子力機構,2016;高治・鈴木,1999)とほぼ同じ傾向を示しているが、原子力機構(2016) における、ケイ砂混合率を 30 wt%、乾燥密度を 1.8 Mg m⁻³ とした供試体における測定値の 1/2 程度であった。これは、ケイ砂の混合率を 30 wt%から 50 wt%に増やしたことによる有効 粘土密度の低下が原因と考えられる。



図 3.2.3-30 膨潤圧の経時変化

3.3 地下施設の概念設計

(1) 本項目の背景と目的

直接処分事業における地下施設の設計では、想定する使用済燃料の種類に対する形 状・重量・発熱量等の問題、ウランやプルトニウムを直接地中に処分することによる核 セキュリティの問題等の特有の課題を有する。本項目では、わが国の地質環境条件(岩 盤の力学特性、初期地圧、水理・地質特性等)や使用済燃料の特性を踏まえ、地下施設 の設計に影響の大きい使用済燃料の形状・重量・発熱量等の違いを特有の条件と捉えた 場合の地下施設の概念の成立性の提示および特有の課題の抽出を目的とし、地下施設の 設計技術の開発を実施する。平成27年度までは、人工バリアの仕様や定置方式に対応し た実現可能な建設方法を提示し、これに対する空洞の力学的安定性や評価指標について 検討を実施した。また、坑道における構造部材材料として使用するコンクリートは低ア ルカリ性を有する必要性があることから、吹付けコンクリートおよび場所打ちコンクリ ートに採用する HFSC コンクリートに対し、想定している配合において設計で必要とする 基本特性を有することをコンクリート試験により確認した。平成28年度は、以下の項目 に着目した検討を実施する。

- 使用済燃料の直接処分における操業時の坑道の仕様を提示するため、人工バリア(廃 棄体および緩衝材)の定置方式、人工バリアの搬送・定置設備等の形状・重量を考 慮した坑道の底盤の設計を行う。
- 廃棄体の形状や重量の増加により、人工バリアおよび搬送・定置設備の仕様が影響 を受け、坑道断面寸法に影響が生じることが想定される。こうした地下施設を構成 する各設計間において相互に生じる影響を考慮した坑道の設計フローを構築する。
- 引き続き場所打ちコンクリートに対して HFSC コンクリートを用いた場合に、岩盤条件等に応じて適切な設計強度の選定が可能となるよう、最もセメント量の少ない配合において基本特性を取得するためのコンクリート試験を実施し、適用性について考察する。

(2) 地下施設の設計

1) 坑道内に発生する荷重の設定および底盤の安全性・健全性評価

本検討では、廃棄体の定置方式を竪置き定置方式とした場合に考えうる人工バリア等 の搬送方式に対応して、坑道内に作用することが想定される操業時の荷重(廃棄体重量 や搬送・定置の重量等)を算定し、軟岩系岩盤を地盤条件とした場合の支保工底盤の安 全性および健全性の評価を以下のとおり実施した。

- ・安全性評価: 底盤コンクリートの耐力照査
- ・健全性評価: 底盤下部における処分孔の孔壁の直線すべりに対する安全率による評価

検討ケースを表 3.3-1 に示す。解析モデルは、主要連絡坑道は 2 次元モデルとし、坑 道処分坑道については処分孔を考慮したモデルとする必要から 3 次元モデルとする。支 保工底盤コンクリートの耐力照査および健全性評価の検討フローを図 3.3-1 に示す。

検討ケー ス	定置方式	岩種	廃棄体	坑道	解析モデル
Case1			廃棄体	・一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	2次デモデル
Case2	- 竪置き - 軟岩		PEM	工女、连桁机坦	2 仄几て / ル
Case3			廃棄体	加八古苦	2 をリトリン
Case4			PEM	処分別垣	3 次九モノル

表 3.3-1 検討ケース一覧表



図 3.3-1 検討フロー

① 坑道内に発生する荷重の設定

操業時の荷重を設定するため、坑道内に作用する搬送・定置装置重量を設定し、重量 の載荷状態に応じて設定した解析ケースに対する設計荷重を算定する。搬送・定置装置 重量および解析ケースを設定し、設計荷重を算定する。

a. 坑道内に作用する搬送・定置装置重量

本検討では、廃棄体および PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) に対応する搬送方式 (タイヤ方式、レール方式) について荷重を設定した。廃棄体/PEM の搬送方式は、主要・連絡坑道については横置き定置方式と同様 (原子力機構, 2013; 原子力機構, 2014;原子力機構, 2015a) とし、処分坑道については竪置き定置方式の仕 様 (核燃料サイクル開発機構, 1999;原子力機構, 2015a) とした。本検討における荷重 の設定を表 3.3-2~表 3.3-3 に示す。



表 3.3-2 連絡・主要坑道 搬送・定置装置重量(Case1、Case2)



表 3.3-3 処分坑道 搬送・定置装置重量 (Case3、Case4)

b. 解析ケースの設定

搬送・定置装置重量の荷重分布を設定し、設定した荷重分布が底盤コンクリートに作 用した際、断面力が最大となる載荷状態を抽出するための解析ケースを設定する。

・荷重分布の設定

荷重の作用位置と面積を示す分布図を、Case1~4について図 3.3-2~図 3.3-3に示す。



図 3.3-2 荷重分布概念図(Case1~Case2)



図 3.3-3 荷重分布概念図(Case3~Case4)

・解析ケースの設定

断面力の最大値を抽出するための解析ケースとして、載荷状態からケースを設定する。 2 次元解析 (Case1、Case2) について表 3.3.1-9、3 次元解析 (Case3、Case4) について 表 3.3-4~表 3.3-6 に示す。



表 3.3-4 解析ケース (Case1、Case2)



表 3.3-5 解析ケース (Case3)



表 3.3-6 解析ケース (Case4)

c. 設計荷重の算定

設計荷重の算定式および算定の結果を以下に示す。

·設計荷重算定式

タイヤ式およびレール式における設計荷重を式 3.3-1、式 3.3-2 により算定する。ここで、荷重の分散を考慮した分布面積を図 3.3-4~図 3.3-5 に示す。


·設計荷重算定結果

坑道内に作用する重量と荷重分布を考慮し、解析ケースに対応した設計荷重を算定した。以上による操業時の設計荷重算定結果一覧を表 3.3-7 に示す。

				断面	荷重載	成荷長	荷重分	担長さ	荷重分	共壬	衝撃	車輪	載荷	いいせき	1r	n当り
Case	搬 車	送装置 龠形式	計算 方向	高さ	横断	方向	横断	縦断	担面積	何里	係数	数	車輪	設訂何里	奥行き	設計 荷重
				h[m]	b[m]	ℓ[m]	B[m]	L[m]	[m ⁻²]	w[t]	i	n	Ν	[kN m ⁻²]	[m]	[kN m ⁻¹]
1-1	917		横断	0.4	0.5	0.2	0.90	0.60	0.54	142	0.3	4	1	854.6	0.60	1424.4
1-2	タイヤ		縦断	0.4	0.5	0.2	0.90	0.60	0.54	142	0.3	4	1	854.6	0.90	949.6
1-3	レール	単数	横断	0.4	0	0	0.40	0.40	0.16	162	0.3	19	1	692.8	0.40	1731.9
1-4	レール	複数	横断	0.4	0	2.64	0.40	3.04	1.22	162	0.3	19	4	364.6	1.00	364.6
1-5	L-1.		然 光 座丘	0.4	0	0	0.40	0.40	0.16	162	0.3	19	1	692.8	0.40	1731.9
			1946 125/1	0.4	0	2.64	0.40	3.04	1.22	162	0.3	19	4	364.6	0.40	911.5
2-1	タイヤ		横断	0.4	0.5	0.2	0.90	0.60	0.54	169	0.3	4	1	1017.1	0.60	1695.2
2-2	タイヤ		縦断	0.4	0.5	0.2	0.90	0.60	0.54	169	0.3	4	1	1017.1	0.60	1130.1
2-3	レール	単数	横断	0.4	0	0	0.40	0.40	0.16	190	0.3	18	1	857.6	0.40	2144.1
2-4	レール	複数	横断	0.4	0	2.65	0.40	3.05	1.22	190	0.3	18	4	449.9	1.00	449.9
2-5	1/-11/		縦胀	0.4	0	0	0.40	0.40	0.16	190	0.3	18	1	857.6	0 40	2144.1
2 0				0.4	0	2.65	0.40	3.05	1.22	190	0.3	18	4	449.9	0.40	1124.8
0.10	917	一般部		0.4	0.5	0.2	0.853	0.600	0.512	142	0.3	4	1	901.4	1	
3-1,2	タイヤ	開口部		0.4	0.5	0.2	0.789	0.600	0.459 [%]	142	0.3	4	1	1005.4		
2.245	レール	単独		0.4	0	1.9	0.40	2.30	0.920	157	0.3	12	4	739.5		
3-3,4,5	レール	複数		0.4	0	0	0.40	0.40	0.160	157	0.3	12	1	1063.0		
4 1 0	917	一般部		0.4	0.5	0.2	0.90	0.60	0.540	169	0.3	4	1	1017.1		
4-1,2	タイヤ	開口部		0.4	0.5	0.2	0.837	0.60	0.487*	169	0.3	4	1	1127.8		
4-3,4,5	レール			0.4	0	10.5	0.40	10.90	4.360	185	0.3	16	8	275.8		

表 3.3-7 設計荷重一覧表

※ CAD による測定値

② 形状図寸法

Case1~4 における坑道の断面形状、底盤コンクリートの寸法および搬送装置の構造寸 法を図 3.3-6~図 3.3-9 に示す。底盤コンクリート幅は、搬送・定置装置から両側にそ れぞれ 100 mm の張り出しを考慮した寸法とする。





図 3.3-6 Case1 廃棄体 (主要・連絡坑道)

10,000

1,600

4,600

4,800

10000

<u>定置装置</u> (4.5m×5.5m)

(14

100

500

400





図 3.3-8 Case2 PEM (主要·連絡坑道)

(処分坑道)

③ 底盤コンクリートの安全性評価

底盤コンクリートの安全性評価として、耐力照査を実施する。照査の結果、コンクリートの設計基準強度;f'ck=18 N mm⁻²において強度が不足するケースがあったため、 f'ck=24 N mm⁻²についてさらに検討を実施した。検討は、設計条件、設計手法について 述べ、構造解析および耐力照査を実施する。

a. 設計条件

設計条件として、材料特性、構造細目、地盤物性値および安全係数について示す。

・底盤コンクリートの材料特性

底盤コンクリートの材料であるコンクリートおよび鉄筋の材料特性を以下に示す(土 木学会, 2012a)

▶ コンクリート

設計基準強度 f'ck=18 N mm⁻²、ヤング率 $E_c= 2.2 \times 10^4$ N mm⁻² 設計基準強度 f'ck=24 N mm⁻²、ヤング率 $E_c= 2.5 \times 10^4$ N mm⁻²

▶ 鉄筋

降伏点 f_{vk} = 345 N mm⁻²、ヤング率 E_s = 2.0×10⁵ N mm⁻²

構造細目

鉄筋コンクリートの構造細目として、鉄筋の配置、鉄筋かぶりおよび主鉄筋の最小鉄筋量の規定を示す。

▶ 鉄筋の配置

主筋の最小鉄筋径は構造鉄筋としての最小径 D16 とし、基本間隔は 150 mm とする。せん断補強筋が必要な場合、その間隔は部材有効高さの 3/4 倍以下かつ 400 mm 以下を原則とする(土木学会, 2012a)。配置鉄筋概略図を図 3.3-10 に示す。



▶ 鉄筋かぶり

鉄筋コンクリートの最小かぶりについて、本設計における設定例(日本道路協会, 2012)を、表 3.3-8に示す。

環境条件	設計かぶり	必要鉄筋かぶり せん断補強筋:D22(仮定) 主筋:D32(仮定)
大気中	40 mm	$40+22+1.5 \times 32=110 \text{ mm}$
計算に用い	いるかぶり	110 mm

表 3.3-8 鉄筋かぶり設定値(設定例)

▶ 主鉄筋の最小鉄筋量

曲げモーメントの影響が支配的な場合の主鉄筋の最小鉄筋量は、以下の式 3.3-3(土 木学会, 2012a)から求める。

0.002b・d ≦ Ast ≦ 釣り合い鉄筋量の 75 %.....式 3.3-3 ここで、

Ast : 軸方向引張主鉄筋の断面積[mm²]

b : 部材幅[mm]

d : 部材断面の有効高[mm]

・ 地盤物性値の算定

地盤の物性値の算定にあたり、採用する岩種を設定し、解析条件となる地盤ばねを算 定する。

▶ 岩種の設定

地下施設を設置する軟岩系岩盤の物性の設定を表 3.3-9 に示す(核燃料サイクル開 発機構,1999)。本検討では、岩種区分 SR-C の物性と同様とする。また、本解析に用 いる解析地盤物性値を表 3.3-10 に示す。

	(核燃料サイ	クル開発	機構, 1999	のに一部追	記)	
パラメータスタラ	ディ用の岩種区分	SR-A	SR-B	SR-C	SR-D	SR-E
一軸圧縮強度	qu [MPa]	25	20	15	10	5
引張強度	σt [MPa]	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7
弹性係数	E [MPa]	5,000	4,000	3,500	2,500	1,500
粘着力	c [MPa]	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
内部摩擦角	φ[°]	30	29	28	27	25
ポアソン比	v [-]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
有効間隙率	n _e [%]	15	20	30	45	60
飽和密度	ρ [Mg m ⁻³]	2,45	2.35	2.20	1.95	1.70

表 3.3-9 軟岩系岩盤データセットにおける静的力学特性値

対	象岩盤	記号	単位	軟岩系岩盤 (略称:SR-C)
物理的特	飽和密度	ρ	${ m Mg}~{ m m}^{-3}$	2.20
	弾性係数	Е	MPa	3, 500
	ポアソン比	ν	_	0.30
力学性州	粘着力	С	MPa	3.0
刀子村住	内部摩擦角	φ	度	28
	一軸圧縮強	qu	MPa	15
	引張り強度	σt	MPa	2. 1

表 3.3-10 解析に用いる岩盤特性値

▶ 地盤ばねの算定

地盤反力係数より算定した地盤ばね(道路協会, 2012)の計算結果一覧を表 3.3-11 に示す。

C	車輪	廃棄	+ =	係数	変形係数		載荷面積		地盤反力係数	地盤ばね採用値
Case	形式	体	力回	α	[kN m ⁻²]	B[m]	L[m]	Bv[m]	[kN m ⁻³]	[kN m ⁻³]
1_1.2	5/4	処分	鉛直	1	2 500 000	10,600	1 700	7 050	1,092,097	1,092,000
1-1,2	711	容器	せん断	-	3,500,000	10.000	4.700	7.000	327,629	328,000
1-245	111.	DEM	鉛直	1	2 500 000	12 205	1 700	7 000	1,002,872	1,003,000
1-3,4,5	<u></u> <i>V</i> - <i>N</i>		せん断		3,500,000	13.300	4.700	7.900	300,862	301,000
0 1 0	5/4	処分	鉛直	1	2 500 000	10,600	1 000	7 1 2 2	1,083,509	1,084,000
2-1,2	717	容器	せん断	1	3,500,000	10.600	4.800	7.133	325,053	325,000
0.045			鉛直	1	2 500 000	15.075	4 900	0 500	949,458	949,000
2-3,4,5	D-11	PEIVI	せん断	1	3,500,000	15.075	4.800	8.506	284,837	285,000
2 1 0	5/4	処分	鉛直	1	2 500 000	10,600	4 000	6 5 1 0	1,160,180	1,160,000
3-1,2	717	容器	せん断	1	3,500,000	10.600	4.000	0.012	348,054	348,000
0 0 4 F			鉛直	1	2 500 000	6 400	4 000	E OGO	1,401,838	1,402,000
3-3,4,5	<i>D-1v</i>		せん断		3,500,000	0.400	4.000	5.000	420,551	421,000
4 1 2	5/4	処分	鉛直	1	2 500 000	10,600	E 400	7 566	1,036,693	1,037,000
4-1,2	211	容器	せん断		3,500,000	10.000	0.400	7.000	311,008	311,000
1 2 4 5	1. 11	DEM	鉛直	1	2 500 000	10,000	E 400	7670	1,025,900	1,026,000
4-3,4,5	<i>U</i> - <i>IV</i>	r" ⊑IVI	せん断	1	3,000,000	10.900	0.400	1.012	307,770	308,000

表 3.3-11 地盤ばね計算結果一覧表

·安全係数

曲げモーメントおよび軸力ならびにせん断に対する照査時の安全係数を示す。

▶ 曲げモーメントおよび軸力に対する照査時の安全係数

安全係数は、鉄道構造物等設計標準(鉄道総合技術研究所,2004)およびコンクリート標準示方書(土木学会,2012a)を参考に、以下の方針に従い設定する。

- ✓ 作用係数 (γ_t)は、作用の算定方法の不確実性等を現時点では明確にできないため 1.0 とする。
- ・ 部材係数(γ_b)は上記基準の解析に従い、軸圧縮のみを受持つ部材ではγ
 {b1}=1.3、軸圧縮と曲げモーメントを受持つ部材ではγ{b2}=1.1とする。
- ✓ 構造物係数(γ_i)は、上記基準の解説より一般に 1.1 以上とすると良いという記述に従い、γ_i=1.1とする。

本設計に用いる鉄筋コンクリートの安全係数を表 3.3-12 に示す。

表 3.3-12 本設計に用いる鉄筋コンクリートの安全係数(曲げ・軸力)

	作田	基ン研究	材料係	数			基达励
女主体级	係数	係数	コンクリー ト	鉄筋	部材	係数	係数
安水住能	γt	γa	γс	γs	γ _{b1} (圧縮)	γ _{b2} (曲げ)	γi
安全性(破壊)	1.0	1.0	1.3	1.0	1.3	1.1	1.1

▶ せん断に対する照査時の安全係数

本設計に用いる鉄筋コンクリートの安全係数を表 3.3-13 に示す(土木学会, 2012a)。

表 3.3-13 本設計に用いる鉄筋コンクリートの安全係数(せん断)

安全係数	部材	係数	構造物係数
要求性能	γ b1 (コンクリート)	γb2(鉄筋)	γi
安全性 (破壊)	1.3	1.1	1.1

b. 設計手法

モデル化の方法および部材の照査方法について示す。

・モデル化の方法

主要・連絡坑道(Case1、Case2)は、横断方向と縦断方向について2次元でモデル化 し解析を実施する。処分坑道(Case3、Case4)は、処分孔による開口部を考慮した3次元 モデルにより解析を実施する。モデルの詳細を図3.3-11~図3.3-12に示す。



図 3.3-11 主要・連絡坑道 二次元モデル



図 3.3-12 処分坑道 三次元モデル

・部材の照査方法・

部材の耐力照査方法として性能照査型設計法を採用する。性能照査における要求性能 には、耐久性、安全性、使用性、復旧性、環境性が挙げられるが、力学的挙動(破壊) に関する要求性能である安全性について照査を実施する。照査は、曲げモーメントおよ び軸力ならびにせん断に対して実施する。

▶ 曲げモーメントおよび軸力に対する照査

底盤コンクリートは、曲げモーメント、または曲げモーメントと軸力を受ける部材 とし、表 3.3.1-12 に示す安全係数を用いてコンクリートの設計断面耐力を求め、式 3.3.1-4 および設計断面耐力曲線(M-N曲線)(土木学会, 2012a)により照査を行う。

 $\gamma_i \cdot Sd / Rd \le 1.0$ 式 3.3.1-4 ここで、

γ_i:構造物係数(=1.1)

Sd :設計断面力(解析により求まる曲げモーメントおよび軸力)

Rd : 設計断面耐力 (土木学会, 2012a)

一例として、鉄筋コンクリート(f'ck=18 N mm⁻² D19ctc150(複))の設計断面耐 カ曲線(M-N曲線)を図 3.3-13 示す。底盤コンクリートの任意の点において作用する 力がこの曲線で囲まれた範囲の内側にあれば、底盤コンクリートは破壊されないこと となる。



図 3.3-13 鉄筋コンクリートの設計断面耐力曲線の一例 (f' ck=18 N mm⁻²)

▶ せん断に対する照査

表 3.3-13 に示す安全係数を用いて無筋コンクリートの設計断面耐力を求め、せん断 による断面破壊に対する照査を式 3.3-5、せん補強鉄筋の最大鉄筋量に対する上限値に 対する照査を式 3.3-6 により行う(土木学会, 2012a)。

 $\gamma_i \cdot Vd / Vyd \le 1.0$ 式 3.3-5 $pw \cdot fyd / f'cd \le 0.1$ 式 3.3-6 ここで、

γ_i:構造物係数(=1.1)

- vd :設計断面力(解析により求まるせん断力)
- Vyd :設計断面耐力
- pw : せん断補強筋の鋼材比
- fyd : せん断補強筋の設計降伏強度
- f'cd:コンクリートの設計圧縮強度

c. 構造解析

主要・連絡坑道(二次元モデル)および処分坑道(三次元モデル)について、底盤コンクリートの構造解析を実施する。主要・連絡坑道については、コンクリートの設計基準強度を f'ck=18 N mm⁻² と f'ck=24 N mm⁻²の2種類について実施する。

a) 主要·連絡坑道(二次元解析:設計基準強度 f'ck=18 N mm⁻²)

断面力の算定および部材の照査を実施する。

▶ 断面力の算定

二次元解析結果から得られた最大・最小断面力の一覧を表 3.3-14 に示す。また、算 定結果の例として、「Case1-3」、「Case1-5」における解析ケース図および断面力図・変 形図を図 3.3-14、図 3.3-15 に示す。

				5	心分容器 タ	イヤ	
t 中 王	Case1	e1-1		公光 厚门	Case1-2		合成せん断力 S[kN]※
傾断	M[kN m]	Sx[kN]		和此色川	M[kN m]	Sy[kN]	Case1-1,2
max	99.3	0171		max	77.8	100 F	267.0
min	-94.3	317.1		min	-22.9	100.0	307.9

表 3.3-14 断面力一覧(f' ck=18 N mm⁻²)

					処分容	器 レ-	ール			
1# N//	Case 1	-3	1++ N/m	Case 1	-4	101 blar	Case	e1-5	合成せん断	カS[kN]※
傾断	M[kN m]	Sx[kN]	傾断	M[kN m]	Sx[kN]	~称断	M[kN m]	Sy[kN]	Case1-3,5	Case1-4,5
max	169.0	2127	max	20.8	571	max	107.5	207 E	1010	202.1
min	-1.9	312.7	min	-12.3	57.1	min	-78.9	207.0	424.0	293.1

				PEM タイ	ヤ	
1# M/C	Case2	2-1		Case2	-2	Case2-1,2
傾断	M[kN m]	Sx[kN]		M[kN m]	Sy[kN]	合成せん断力 S[kN]※
max	130.2	2000	max	92.8	222.1	447.0
min	-111.8	300.9	min	-27.3	222.1	447.9

					PEM	レーノ	レ			
* 生 座 に	Case2	2-3	+ 井井 座 に	Case 2	2-4	公子 座丘	Case	e2-5	合成せん断	カ S[kN]※
傾断	M[kN m]	Sx[kN]	傾断	M[kN m]	Sx[kN]	和此些丌	M[kN m]	Sy[kN]	Case2-3,5	Case2-4,5
max	42.7	2010	ma>	8.8	625	max	141.9	222.0	1116	220 6
min	-72.1	294.0	mir	-15.4	02.0	min	-66.1	332.0	444.0	330.0

表 3.3-14 に示す照査に用いるせん断力(※を付した項目)は、坑道横断方向と坑道 縦断方向の発生せん断力の2乗和の平方により両方向の断面力を合成したものを用い る。計算式を式 3.3.1-7 に示す。

 $S = \sqrt{(Sx^2 + Sy^2)}$ $\ddagger 3.3.1-7$

ここで、S:部材照査用設計せん断力

Sx:坑道横断方向の発生せん断力 Sy:坑道縦断方向の発生せん断力







図 3.3-15 Case1-5 レール方式 解析ケース図 縦断方向

▶ 部材照查

曲げモーメントおよび軸力ならびにせん断に対し、部材の照査を実施する。

・曲げモーメントおよび軸力に対する照査

底盤の発生断面力と設計断面耐力との関係を示す設計断面耐力曲線(M-N曲線)により照査を行う。発生断面力(図中の◆)は設計断面耐力曲線内にあり、底盤構造として成立している。

照査結果の例(Case1-3、Case1-5)を図 3.3-16、図 3.3-17 に示す。



図 3.3-16 曲げモーメントおよび軸力耐力照査結果 (Case1-3 レール方式 横断方向 補助車輪設置断面)



図 3.3-17 曲げ耐力照査結果(Case1-5 レール方式 縦断方向)

・せん断に対する照査

せん断に対する照査結果を表 3.3-15~表 3.3-16 に示す。照査の結果、Case1-3,5、 Case2-1,2、Case2-3,5 において安全性を確保できない結果となった。

	+	+++		ж <i>Ц</i> .	処分容器タイヤ	処分容器	レール
	1	可里ケース		単位	CASE1-1,2	CASE1-3,5	CASE1-4,5
部材	係数		γb	-	1.3	1.3	1.3
設計	基準強度		f'ck	N/mm^2	18.0	18.0	18.0
材料	係数		γc	-	1.3	1.3	1.3
設計	圧縮強度		f'cd	N/mm^2	13.8	13.8	13.8
鉄筋	の降伏強度	F	fwyd	N/mm^2	345.0	345.0	345.0
		曲げモーメント	Md	kN · m	31.8	31.8	14.9
断	面力	軸力	N'd	kN	0.0	0.0	0.0
		せん断力	Vd	kN	367.9	424.8	293.1
	hier	部材幅	b	mm	1000	1000	1000
	断面	部材高	h	mm	400	400	400
	174	有効高さ	d	mm	290	290	290
		1段目かぶり	d1	mm	110	110	110
		100日分位号	Ac1		D16@150	D16@150	D16@150
	引張側	「扠日妖肋里	AST	cm ²	13.24	13.24	13.24
	鉄筋	2段目かぶり	d2	mm			
断面	上段日形式9 断面 諸元 2段目鉄筋量		A = 0				
諸元	断面 諸元		ASZ	cm ²			
	諸元 引張側鋼材の断面積		As	cm ²	13.24	13.24	13.24
	引張鋼	材比	pv		0.00457	0.00457	0.00457
	引張鋼材比		6				
	せん断補強筋 仕様-本数		D-n	-	D16 - 3本	リート 日本	D19 - 2本
	せん断補強筋 仕様-本数 せん断補強筋断面積		D-n A _w	cm ²	D16 - 3本 5.96	D16 - 4本 7.94	5.73
	せん断 せん断 せん断	「補強筋 仕禄-本致 「補強筋断面積 _{補強鉄筋の配置間隔}	D-n A _w s	cm ² mm	D16 - 3本 5.96 150	7.94 150	5.73 150
	せん断 せん断 せん断 d / 1.1	「補強筋 仕禄-本数 「補強筋断面積 ^{捕強鉄筋の配置間隔} 5	D-n A _w s z	cm ² mm mm	D16 - 3本 5.96 150 252	7.94 150 252	5.73 150 252
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄-本数 補強筋断面積 ^{補強鉄筋の配置間隔} 5 ·補強筋の鋼材比	D-n A _w s z pw	cm ² mm mm	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397	7.94 150 252 0.00530	5.73 5.73 150 252 0.00382
	せん断 せん断 せん断 d / 1.1 せん断	[•] 補強筋 仕禄-本数 [•] 補強筋断面積 _{補強鉄筋の配置間隔} 5 [•] 補強筋の鋼材比	D-n A _w s z pw	- cm ² mm mm	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48	7.94 150 252 0.00530 0.48	5.73 5.73 150 252 0.00382 0.48
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄-本数 補強筋断面積 ^甫 強鉄筋の配置間隔 5 補強筋の鋼材比	D-n A _w s z pw fvcd Mo	- cm ² mm mm N/mm ² kN · m	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0	7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄-本数 補強筋断面積 ^捕 強鉄筋の配置間隔 5 [:] 補強筋の鋼材比	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud	- cm ² mm mm <u>N/mm² kN · m</u> kN · m	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 100 100	7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断 せん断	補強筋 仕禄-本数 結議筋断面積 輸強鉄筋の配置間隔 5 :補強筋の鋼材比 	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud β d	- cm ² mm mm <u>N/mm²</u> <u>kN · m</u> <u>kN · m</u>	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363	D16 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断 せん断	補強筋 仕禄-本数 補強筋断面積 ^甫 強鉄筋の配置間隔 5 補強筋の鋼材比 つの検討	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud β d β p	- cm ² mm mm N/mm ² kN · m kN · m - -	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770	016 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770	D19 - 2本 5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断 せん断	 補強筋 仕禄-本数 補強筋断面積 構強鉄筋の配置間隔 5 補強筋の鋼材比 	$D-n$ A_w s z pw $fvcd$ Mo Mud βd βp βn	- cm ² mm mm <u>N/mm²</u> kN · m kN · m - -	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 1.000 1.000	D16 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断 せん断	補強筋 仕禄-本数 結補強筋断面積 痛強鉄筋の配置間隔 5 :補強筋の鋼材比 :カの検討	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud β d β p β n Vcd	- cm ² mm mm <u>N/mm² kN · m</u> - - - kN	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 112.4	D16 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 112.4 112.4	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄−本数 補強筋断面積 補強筋の配置間隔 5 ⁵ 補強筋の鋼材比	$D-n$ A_w s z pw $fvcd$ Mo Mud βd βp βn Vcd Vsd	- cm ² mm mm <u>N/mm² kN · m kN · m - - - kN kN kN</u>	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1	016 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄−本数 補強筋断面積 ^捕 強鉄筋の配置間隔 5 補強筋の鋼材比 力の検討	$D-n$ A_w s z pw $fvcd$ Mo Mud βd βp βn Vcd Vsd Vyd	- cm ² mm mm <u>N/mm²</u> kN · m kN · m - - kN kN kN kN	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1 426.6	7.94 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9 531.3	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1 414.5
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄−本数 補強筋断面積 補強筋の配置間隔 5 :補強筋の鋼材比 :カの検討	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud β d β p β n Vcd Vsd Vsd Vyd	- cm ² mm mm <u>N/mm² kN · m - - - kN kN kN kN kN</u>	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1 426.6	016 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9 531.3	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1 414.5
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断	補強筋 仕禄-本数 結議筋断面積 煮鉄筋の配置間隔 5 :補強筋の鋼材比 ・ 力の検討	D-n Aw s z pw fvcd Mo Mud β d β p β n Vcd Vsd Vsd Vyd Vwcd γ i	- cm ² mm mm <u>N/mm² kN · m kN · m - - - kN kN kN kN kN</u>	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1 426.6 1.1	016 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9 531.3 1.1	D19 - 2* 5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1 414.5 1.1
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断 せん断	補強筋 仕禄-本数 補強筋断面積 捕強鉄筋の配置間隔 5 ⁵ 補強筋の鋼材比	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud β d β p β n Vcd Vsd Vsd Vyd Vwcd γ i	- cm ² mm mm N/mm ² kN · m kN · m - - kN kN kN kN kN kN kN	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1 426.6 1.1 0.949	016 - 4本 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9 531.3 1.1 0.880	D19 - 2* 5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1 414.5 1.1 0.778
	せん断 せん断 はん断 はん断 せん断 せん断	 補強筋 仕禄-本数 補強筋 断面積 構強筋の配置間隔 5 補強筋の鋼材比 	D-n Aw s z pw fvcd Mo Mud βd βp βn Vcd Vsd Vsd Vyd Vvcd γi	- cm ² mm mm <u>N/mm²</u> <u>kN · m</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>kN</u> <u>kN</u> <u>kN</u> <u>kN</u> <u>kN</u> <u>kN</u> <u>kN</u> <u>c</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>-</u> <u>-</u>	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1 426.6 1.1 0.949 OK	7.94 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9 531.3 1.1 0.880 OK	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1 414.5 1.1 0.778 0K
	せん断 せん断 せん断 d /1.1 せん断 せん断 せん断	*補強筋 仕禄-本数 *補強筋断面積 #強鉄筋の配置間隔 5 *補強筋の鋼材比 *力の検討	D-n A _w s z pw fvcd Mo Mud β d β p β n Vcd Vsd Vsd Vyd Vvcd Yvd Yvcd ri γ i	- cm ² mm mm N/mm ² kN · m - - kN kN kN kN kN kN kN kN kN kN	D16 - 3本 5.96 150 252 0.00397 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 314.1 426.6 1.1 0.949 OK 0.099	7.94 7.94 150 252 0.00530 0.48 0.0 63.6 1.363 0.770 1.000 112.4 418.9 531.3 1.1 0.880 OK 0.132	5.73 150 252 0.00382 0.48 0.0 29.8 1.363 0.770 1.000 112.4 302.1 414.5 1.1 0.778 0K 0.095

表 3.3-15 せん断耐力照査結果(設計基準強度変更 f'ck=18 N mm⁻² 合成断面力)

		送 /上	PEMタイヤ	PEML	ノール			
	1	可里クース		● 単位	CASE2-1,2	CASE2-3,5	CASE2-4,5	
部材	系数		γb	-	1.3	1.3	1.3	
設計基準強度		f'ck	N/mm ²	18.0	18.0	18.0		
材料	系数		γc	-	1.3	1.3	1.3	
設計	王縮強度		f'cd	N/mm ²	13.8	13.8	13.8	
鉄筋	の降伏強度	F.	fwyd	N/mm ²	345.0	345.0	345.0	
		曲げモーメント	Md	kN · m	46.5	117.0	2.1	
断	面力	軸力	N'd	kN	0.0	0.0	0.0	
		せん断力	Vd	kN	447.9	444.6	338.6	
		部材幅	b	mm	1000	1000	1000	
	断面	部材高	h	mm	400	400	400	
	·) /Д	有効高さ	d	mm	290	290	290	
		1段目かぶり	d1	mm	110	110	110	
		1印디사상르	٨ - 1		D16@150	D16 @ 150	D16@150	
	引張側	段日鉄肋重	AST	cm ²	13.24	13.24	13.24	
	鉄筋	2段目かぶり	d2	mm				
断面 諸元		050.日外女星	200日姓姓曼	4 - 0				
		2段日鉄肋重	AS2	cm ²				
	引張側鋼材の断面積		As	cm ²	13.24	13.24	13.24	
	引張鎁	材比	рv		0.00457	0.00457	0.00457	
	せん断	補強筋 仕様−本数	D-n	-	D16 - 4本	D16 - 4本	D13 - 4本	
	せん断	補強筋断面積	A _w	cm ²	7.94	7.94	5.07	
	せん断れ	甫強鉄筋の配置間隔	S	mm	150	150	150	
	d / 1.1	5	Z	mm	252	252	252	
	せん断	補強筋の鋼材比	pw		0.00530	0.00530	0.00338	
			fvcd	N/mm ²	0.48	0.48	0.48	
			Мо	kN⋅m	0.0	0.0	0.0	
			Mud	kN ∙ m	93.0	234.0	4.2	
	せん断耐	力の検討	βd	-	1.363	1.363	1.363	
			βp	-	0.770	0.770	0.770	
			βn	_	1.000	1.000	1.000	
			Vcd	kN	112.4	112.4	112.4	
			Vsd	kN	418.9	418.9	267.2	
		Vyd	kN	531.3	531.3	379.6		
		Vwcd	kN					
F		γi		1.1	1.1	1.1		
			γ	i×Vd∕Vyd	0.927	0.921	0.981	
*		判定	γi×Vd/Vyd ≺1.0	OK	OK	OK		
	安全性	の検討	pw	×fwyd/f'cd	0.132	0.132	0.084	
			判定	pc×fwyd/f'cd <0.1	NG	NG	ОК	

表 3.3-16 せん断耐力照査結果(設計基準強度変更 f'ck=18 N mm⁻² 合成断面力)

b) 主要·連絡坑道(二次元解析:設計基準強度 f'ck=24 N mm⁻²)

前項において設計基準強度を f'ck=18 N mm⁻²として主要・連絡坑道における部材を照 査した結果、せん断の部材照査において「Case1-3、Case1-5」、「Case2-1、Case2-2」、 「Case2-3、Case2-5」については安全性が確保できなかったことから、上記のケースに ついて設計基準強度を f'ck=24 N mm⁻²にランクアップし、断面力の算定および部材の照 査を再度実施する。

▶ 断面力の算定

二次元解析結果から得られた最大・最小断面力の一覧を表 3.3-17 に示す。また、算 定結果の例として、「Case2-1」、「Case2-2」における解析ケース図および断面力図・変 形図を図 3.3-18~図 3.3-19 に示す。

処分容器 レール													
横断	Case1-3			縦断	Case1-5		合成せん断力 S[kN]※						
	M[kN m]	Sx[kN]		1,	M[kN m]	Sy[kN]	Case1-3,5						
max	182.8	0004		202.4	2024	2024	2024	2024	000 A	max	110.5	202.0	426.2
min	-1.5	J 3∠3.4		min	-84.3	292.8	430.3						

表 3.3-17 断面力一覧(f' ck=24 N mm⁻²)

PEM タイヤ								
★ 世际	Case2-1			经产产	Case2-2		合成せん断力 S[kN]※	
傾断	M[kN m]	Sx[kN]		前此四开	M[kN m]	Sy[kN]	Case2-1,2	
max	132.0	0074	max	97.1	005.0	456.0		
min	-120.6	397.4	397.4	min	-28.2	225.3	400.8	

	PEM レール									
枯新	Case2-3		縦新		Case2-5		合成せん断力 S[kN]※			
1 A DI	M[kN m]	Sx[kN]			M[kN m]	Sy[kN]	Case2-3,5			
max	41.9	0007		200.7		max	147.4	225.7	450.7	
min	-78.8	300.7		min	-72.2	335.7	450.7			

表 3.3-17 に示す照査に用いるせん断力(※を付した項目)は、坑道横断方向と坑道 縦断方向の発生せん断力の2乗和の平方により両方向の断面力を合成したものを用い る。計算式は式 3.3-7 で示したとおりである。





図 3.3-18 Case2-1 タイヤ方式 横断方向





図 3.3-19 Case2-2 タイヤ方式 縦断方向

▶ 部材照查

曲げモーメントおよび軸力ならびにせん断に対し、部材の照査を実施する。

・曲げモーメントおよび軸力に対する照査

底盤の発生断面力と設計断面耐力との関係を示す設計断面耐力曲線(M-N曲線)により照査を行う。発生断面力(図中の◆)は設計断面耐力曲線内にあり、底盤構造として成立している。

照査結果の例(Case2-1、Case2-2)を図 3.3-20、図 3.3-21 に示す。



図 3.3-20 曲げ耐力照査結果(Case2-1 タイヤ方式 横断方向)



図 3.3-21 曲げ耐力照査結果(Case2-2 タイヤ方式 縦断方向)

・せん断に対する照査

せん断に対する照査結果を表 3.3-18 に示す。照査の結果、底盤構造として成立している。

荷重ケース				単位	処分容器 レール	PEM タイヤ	PEM V-V
±0++/	7. ¥L				CASET-3,5	CASE2-1,2	CASE2-3,5
部材1	杀致 生类没在		γb	- 2	1.3	1.3	1.3
			ŤCK	N/mm²	24.0	24.0	24.0
1/1 木斗1	杀 <u>奴</u> 工 <u>炉</u> 沿 庄		γc	-	1.3	1.3	1.3
設計	土縮强度	-	ficd	N/mm ²	18.5	18.5	18.5
鉄肋(り)降伏強度 (1)	E	fwyd	N/mm²	345.0	345.0	345.0
blue	 .	曲げモーメント	Md	kN • m	31.8	46.5	117.0
迷口	面力	軸力	N′d	kN	0.0	0.0	0.0
		せん断力	Vd	kN	436.3	456.8	450.7
	新面	部材幅	b	mm	1000	1000	1000
	可法	部材高	h	mm	400	400	400
		有効高さ	d	mm	290	290	290
		1段目かぶり	d1	mm	110	110	110
引張(鉄節 断面 諸元 引引		1段日鉄筋量	As1	_	D16 @ 150	D16 @ 150	D16 @ 150
	引張側		,	cm ²	13.24	13.24	13.24
	鉄筋	2段目かぶり	d2	mm			
		2段日鉄筋量	As2				
		2段日政肋重	7102	cm ²			
	引張側	鋼材の断面積	As	cm ²	13.24	13.24	13.24
	引張鋼	材比	pv		0.00457	0.00457	0.00457
	せん断	補強筋 仕様−本数	D-n	-	D16 - 4本	D16 - 4本	D16 - 4本
	せん断	補強筋断面積	A _w	cm ²	7.94	7.94	7.94
	せん断補強鉄筋の配置間隔		S	mm	150	150	150
	d / 1.1	5	Z	mm	252	252	252
	せん断	補強筋の鋼材比	pw		0.00530	0.00530	0.00530
			fvcd	N/mm ²	0.53	0.53	0.53
			Мо	kN · m	0.0	0.0	0.0
			Mud	kN · m	63.6	93.0	234.0
	せん断耐	力の検討	βd	-	1.363	1.363	1.363
			βp	-	0.770	0.770	0.770
			βn	-	1.000	1.000	1.000
			Vcd	kN	123.7	123.7	123.7
			Vsd	kN	418.9	418.9	418.9
		Vyd	kN	542.6	542.6	542.6	
		Vwcd	kN				
		γi		1.1	1.1	1.1	
	安全性の検討			γ i×Vd/Vyd	0.885	0.926	0.914
			判定	γ i×Vd/Vyd<1.0	ОК	ОК	ОК
			p	w×fwyd/f'cd	0.099	0.099	0.099
			判定	pc×fwyd/f'cd<0.1	ОК	OK	OK

表 3.3-18 せん断耐力照査結果(設計基準強度変更 f'ck=24 N mm⁻² 合成断面力)

c) 処分坑道(三次元 FEM 解析:設計基準強度 f'ck=18 N mm⁻²)

断面力の算定および部材の照査を実施する。

▶ 断面力の算定

三次元解析 (FEM) の最大・最小断面力の一覧を表 3.3-19、断面力図・変形図の結果の例 (Case4-1) を図 3.3-22~図 3.3-25 に示す。

	加公交架 タイヤ									
			Case3-1					case3-2		
	曲げ[kN m]	せ	ん断力[kN]		曲げ[kN m] せん断力[kN]				N]
	MX	MY	Fzx	Fyz	F 🔆	MX	MY	Fzx	Fyz	F 🔆
max	81.7	12.8	0105	1.9	0105	64.4	13.0	011.0	1.9 21	011.0
min	-21.4	-18.4	216.5		216.5	-19.4	-18.3	211.0		211.0
						ール				<u> </u>
			Case3-3	}				case3-4		
	曲げ[kN m]	せ	ん断力[kN]		曲げ[k	Nm]	せ	ん断力[kl	N]
	MX	MY	Fzx	Fyz	F×	MX	MY	Fzx	Fyz	F₩
max	28.7	14.3	110.4	0.5	110.4	28.3	12.8	1007		100.0
min	-17.6	-15.8	110.4	3.5	110.4	-15.3	-20.7	103.7	5.7	103.9
	case3-5									
	曲げ[kN m] せん断力[kN]									
	MX	MY	Fzx	Fyz	F 🔆					
max	27.8	12.8	116.0	FO	116.9					
min	-14.8	-23.8	110.0	0.2						
				P	EM タイ・	4				
			Case4-1			case4-2				
	曲げ[kN m]	せ	ん断力[kN]		曲げ[k	Nm]	せ	ん断力[kl	N]
	MX	MY	Fzx	Fyz	F 💥	MX	MY	Fzx	Fyz	F×
max	87.1	44.4	0714	70 6	2025	61.1	44.2	166.6	21 5	160 5
min	-20.5	-17.1	-271.4	70.0	202.0	-15.8	-16.9	100.0	31.5	109.0
				PE	M レーノ	レ				
			Case4-3	}				case4-4		
	曲げ[kN m]	せん断力[kN]			曲げ[k	N m]	せ	ん断力[kl	N]
	MX	MY	Fzx	Fyz	F 💥	MX	MY	Fzx	Fyz	F 💥
max	13.0	17.8	8/1 3	923	8/3	13.4	17.9	86.3	39.6	950
min	-4.3	-11.8	04.0	92.3	84.3	-4.7	-11.8	00.0	39.6	30.0
					ートはっち	±			1	

表 3.3-19 断面力一覧(f' ck=18 N mm⁻²)

各ケースのせん断力の最大値の抽出								
処分容器 タイヤ	処分容器 レール	PEM タイヤ	PEM レール					
Case3-1,3-2	Case3-3,3-4,3-5	Case4-1,4-2	Case4-3,4-4					
最大せん断力	最大せん断力	最大せん断力	最大せん断力					
F[kN]	F[kN]	F[kN]	F[kN]					
216.5	116.9	282.5	95.0					

表 3.3-19 に示す照査に用いるせん断力(※を付した項目)は、坑道横断方向と坑道 縦断方向の発生せん断力の2乗和の平方により両方向の断面力を合成したものを用い る。計算式を式 3.3-8 に示す。

 $F = \sqrt{(Fzx^2 + Fzy^2)} \dots \qquad \exists 3.3-8$

ここで、F:部材照査用設計せん断力

Fzx:坑道横断方向の発生せん断力 Fzy:坑道縦断方向の発生せん断力



3.3-22 Case4-1 タイヤ方式 荷重載荷位置



図 3.3-23 Case4-1 タイヤ方式 変形図



▶ 部材照查

曲げモーメントおよび軸力ならびにせん断に対し、部材の照査を実施する。

・曲げモーメントおよび軸力に対する照査

底盤の発生断面力と設計断面耐力との関係を示す設計断面耐力曲線(M-N曲線)により照査を行う。発生断面力(図中の◆)は設計断面耐力曲線内にあり、底盤構造として成立している。

照査結果の例(Case4-1)を図 3.3-26、図 3.3-27 に示す。



図 3.3-26 曲げ耐力照査結果 (Case4-1 タイヤ方式 Mx)



図 3.3-27 曲げ耐力照査結果 (Case4-1 タイヤ方式 My)

・せん断に対する照査

せん断に対する照査結果を表 3.3-20 に示す。照査の結果、底盤構造として成立している。

		荷重ケース	-	単位	CASE3-1,2	CASE3-3,4,5	CASE4-1,2	CASE4-3,4
部材	係数		γb	-	1.3	1.3	1.3	1.3
設計	基準強度		f'ck	N/mm ²	18.0	18.0	18.0	18.0
材料	係数		γc	-	1.3	1.3	1.3	1.3
設計	設計圧縮強度		f'cd	N/mm ²	13.8	13.8	13.8	13.8
鉄筋	の降伏強度	E	fwyd	N/mm ²	345.0	345.0	345.0	345.0
		曲げモーメント	Md	kN · m	28.2	3.7	28.4	28.4
断	面力	軸力	N'd	kN	0.0	0.0	0.0	0.0
		せん断力	Vd	kN	216.5	116.9	282.5	95.0
	hir -	部材幅	b	mm	1000	1000	1000	1000
	断面 寸法	部材高	h	mm	400	400	400	400
	174	有効高さ	d	mm	290	290	290	290
		1段目かぶり	d1	mm	110	110	110	110
		100日針位昌	A c 1		D16 @ 150	D16 @ 150	D16 @ 150	D16 @ 150
	引張側	1段日	AST	cm ²	13.24	13.24	13.24	13.24
断面	鉄筋	2段目かぶり	d2	mm				
		2段日鉄筋量	4.0.2					
諸元		2段日鉄肋重	ASZ	cm ²				
	引張側	引張側鋼材の断面積		cm ²	13.24	13.24	13.24	13.24
	引張鋼	引張鋼材比			0.00457	0.00457	0.00457	0.00457
	せん断	せん断補強筋 仕様−本数		-	D13 - 4本	D13 - 2本	D16 - 4本	
	せん断補強筋断面積		Aw	cm ²	5.07	2.53	7.94	
	せん断補強鉄筋の配置間隔		s	mm	300	300	300	300
	d / 1.1	5	z	mm	252	252	252	252
	せん断	補強筋の鋼材比	pw		0.00169	0.00084	0.00265	0.00000
			fvcd	N/mm ²	0.48	0.48	0.48	0.48
			Mo	kN⋅m	0.0	0.0	0.0	0.0
			Mud	kN ∙ m	56.4	7.4	56.8	56.8
	せん断	f耐力の検討	βd	-	1.363	1.363	1.363	1.363
			βp	-	0.770	0.770	0.770	0.770
			βn	-	1.000	1.000	1.000	1.000
			Vcd	kN	112.4	112.4	112.4	112.4
			Vsd	kN	133.6	66.8	209.4	0.0
		Vyd	kN	246.0	179.2	321.8	112.4	
		Vwcd	kN					
		γi		1.1	1.1	1.1	1.1	
				γi×Vd∕Vyd	0.968	0.717	0.966	0.930
			判定	γi×Vd/Vyd<1.0	OK	OK	OK	OK
	安全	凹土の検討	p	w×fwyd/f'cd	0.042	0.021	0.066	0.000
			判定	pc×fwyd/f'cd<0.1	OK	OK	OK	OK

表 3.3-20 せん断耐力照査結果(合成断面力)

d. 仕様の設定

主要・連絡坑道および処分坑道について、部材の耐力照査により安全性が確認できた 仕様について以下に示す。

・主要・連絡坑道(二次元解析)

Case1~Case2 における鉄筋コンクリートの仕様例を図 3.3-28~図 3.3-29 に示す。



図 3.3-28 廃棄体 レール方式 (Case1)



図 3.3-29 PEM タイヤ方式 (Case2)

· 処分坑道(三次元解析)

Case3~Case4 における鉄筋コンクリートの仕様例を図 3.3-30~図 3.3-31 に示す。



図 3.3-30 廃棄体 レール方式 (Case3)



④ 処分孔の孔壁の健全性評価

本検討では、底盤の安全性の評価と同じ条件(廃棄体/PEMの定置方式を堅置き定置 方式とした場合に考えうる人工バリア等の搬送方式に対応して、坑道内に作用すること が想定される操業時の荷重(廃棄体/PEM 重量や搬送・定置の重量等)に対し、軟岩系 岩盤を対象とする)における支保工底盤の健全性評価を行った。

·設計手法

操業時に車両荷重等が底盤に作用するため、処分孔の孔壁安定性が懸念される。処分 孔の孔壁安定性については、図 3.3-32 に示す直線すべりを考慮した安全率により評価す る。また、必要安全率を満足しない場合は、円筒形鋼管等による補強検討を行う。



図 3.3-32 孔壁の安定検討概念図

・評価モデルと算定式

評価モデルを図 3.3-33 および算定式を式 3.3-9 に示す。

Fs=R/S.....式 3.3-9

: すべり安全率

: 掘削高さ[m]

:切羽前方土塊荷重[kN m-3]

:切羽前方のすべり土塊の幅[m]

:地山の粘着力[kN m⁻²]

:地山の内部摩擦角[°]

 $R=(W+P)\sin\theta \cdot \tan\phi + c \cdot h/\cos\theta$

 $S=(W+P)\cos\theta$



図 3.3-33 評価モデル

必要安全率

本検討に用いる必要安全率は、Fsp>1.2 に設定する (NEXC0, 2007;鉄道総合技術研 究所, 2000;日本道路協会, 2009)。

· 検討結果

全ケースにおいて必要安全率 Fsp>1.2 を満足するため、孔壁の安定性は確保出来る結果となった。検討結果を表 3.3-21 に示す。また、Case4 (タイヤ式) における検討概念の例 (すべり形状) を図 3.3-34、計算結果を表 3.3-22 に示す。

	Са	se3	Case4					
検討ケース	廃	棄体	PEM					
	タイヤ	レール	タイヤ	レール				
Fs	22.9 15.2		9.7	13.1				
判定	ОК	ОК	ОК	OK				
必要安全率 Fsp	1.2							

表 3.3-21 孔壁安定検討結果



図 3.3-34 Case4 タイヤ すべり形状図

岩盤特性値			単位	
単位体	積重量	γ	kN m⁻³	22.0
内部摩	擦角	φ	0	28.0
切羽土	層の土の粘着力	C	kN m ^{−2}	3000
コンクリー	ト物性値		単位	
単位体	積重量	γ	kN m ^{−3}	24.5
岩塊形状				
すべり	岩塊の幅	В	m	0.798
すべり	岩塊の奥行き	L	m	0.6
作用荷重				
搬送装	置重量	W	kN	1690
全車輪	韵数	n		4
衝撃係	数	i		0.3
一輪当	り荷重	P = W (1+i)/n	kN	549.25
設計荷	重	P/L	kN m	915.4

表 3.3-22	孔壁安定検討結果	Case4	タイ	7
----------	----------	-------	----	---

計算結果				
底盤重量		W 1	kN	19.6
底盤幅		В		0.798
滑り岩塊の角度		$\theta = 45^{\circ} - \phi/2$	0	31.0
すべり岩塊高さ		h	m	1.328
切羽前方の土塊重	皇	W2	kN	11.7
$\gamma \cdot B \cdot h/2$				
全重量		ΣW	kN	31.2
土塊荷重に作用す	る荷重	Р	kN	549.3
すべり面ABに作用			kN	497.6
$(\Sigma W+P)\cos\theta$				
すべり面ABに作用	する重量による抵抗力	R1	kN	159.0
$(\Sigma W+P)$ sin θ · tan ϕ	5			
すべり面ABに作用	する粘着力による抵抗力	R2	kN	4648.2
c·h/cos $ heta$				
全抵抗力(kN)		ΣR	kN	4807.2
切羽安全率 ΣR/	ΣS	Fs		9.7
計画安全率		Fsp		1.20
		判定	Fs <fsp< td=""><td>0.K</td></fsp<>	0.K

2) 地下施設の設計間における連携を考慮した坑道の設計フローの構築

直接処分では、廃棄体の形状や重量の増加により、人工バリアおよび搬送・定置設備の仕様が影響を受け、坑道断面寸法に影響が生じることが想定される。こうした地下施設を構成する各設計間において相互に生じる影響を考慮した坑道の設計フローを構築する。

地下施設を構成する人工バリア、坑道および搬送・定置設備は、それぞれにおいて専門性 の高い設計が行われるが、これらの設計のプロセスは一方向的に結果が得られるものではな く相互に影響することが想定される。本検討では、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構, 2015b)において示されている、地下施設の設計における各設計間の基本的な関係を示す設計 フロー(図3.3-35)をもとに、坑道の仕様(坑道断面寸法の設定、坑道離間距離等)を安全 性や合理性等の観点で最適な設計とするため、これまで検討されていない「各設計の結果で ある仕様」が「どの設計の条件となるのか」といった関係性に注目し、これを設計間の連携 として考慮した設計フローを構築する。

本項目では、地下施設の設計フローにおける坑道の設計の位置づけの確認、各設計間における連携の整理を行い、最後に設計フローを例示する。



図 3.3-35 地下施設の設計フロー(原子力機構, 2015b)

① 地下施設の設計フローにおける坑道の設計の位置づけ

これまでの成果である図 3.3-35 における設計フローより、地下施設の設計における坑道の 設計の位置づけを確認する。まず、坑道の設計における設計条件は、「使用済燃料の仕様」、 「地下施設の概念」および「設計の前提となる地質環境条件の抽出・整理」より設定される。 さらに、「人工バリアや処分施設に求められる機能に対応した設計要件の整理」において設計

要件を設定する。

以下に示す坑道の設計の流れ(図 3.3-36)では、点線で囲んだ範囲が坑道の設計の前提と なるが、人工バリアの設計および搬送・定置設備の設計に対しても同様に設計の前提となる ことから、各設計の前提と表現する。各設計において検討を開始するにあたり、設計間で連 携が発生する。つまり、各設計で設定された仕様が、必要とするタイミングで異なる設計の 前提(条件)となる。



- 処分パネル形状、規模、数、方向、配置等
- ▶ 換気・排水システム(設備)、安全対策設備

図 3.3-36 坑道の設計の流れ

② 各設計間の連携の整理と設計フローの例示

各設計により設定された仕様が、必要とするタイミングで異なる設計の前提(条件)とな り、各設計間において連携が発生する。そこで、坑道の設計における設計要件(原子力機構, 2015b)において要件の充足に必要な検討項目を抽出(表 3.3-23)する。要件充足の確認方法 において抽出された検討項目として坑道の設計とそれ以外の設計が挙がっている設計要件に おいて、連携が発生すると考えられる。

表 3.3-23	坑道の設計要件と	:要件充足の確認方法	(原子力機構,	2015a に一部追記)
----------	----------	------------	---------	--------------

基本 要	的な 件	機能・役割	設計要件	内容	設計要件の区分	要件充足の確認方法
之言	建設・	既存あるいは実現 性の高い技術で処 分施設の建設・操	安全に建設・操業・閉鎖が 実施できること。	既存あるいは実現可能性の高い技術により、地下施設の坑 道群が 安全に建設できる施設構造 、配置とすること。 適切な作業環境を維持できる施設構造、配置とすること。	建設・操業・閉	<u>坑道の設計</u> 搬送・定置設備の設計 施工方法 レイアウト設計
	探業・		事故災害時においても安全 を確保できること。	山はね、突発湧水、ガス突出、火災などの事故災害時に対 応できる施設構造、配置とすること。		レイアウト設計
	閉鎖が		<u>空洞の力学的安定性が確保</u> <u>されること。</u>	地下施設において作業が行われる期間を通じて <u>空洞のカ</u> 学的安定性が確保できる施設構造、配置とすること。		<u>坑道の設計</u> 搬送・定置設備の設計
可能	・闭頭を女生に行うことができ、事故 (%) 実時にた対応が	<u>操業に必要な空間が確保で</u> <u>きること。</u>	人工バリアの搬送・定置に <u>必要な空間が確保</u> されること。	頭かり起てめる こと。	<u>坑道の設計</u> <u>搬送・定置設備の設計</u>	
処分損	であること	次告時に 6 対応が できること。	物流経路が確保できるこ と。	人工バリアの搬送、掘削ずりの搬出、必要な資材および人 員の輸送、給水電などの物流経路が確保できる施設構造、 配置とすること。 建設・操業・閉鎖の手順を考慮した物流経路とすること。	-	坑道の設計 レイアウト設計
場 が 成	0		設計上の前提となる条件を 満たすこと。	敷地条件や廃棄体本数などの設計上の前提となる条件を 満たすこと。		レイアウト設計
立するた安	安	人工バリアの性能 発揮に優位な影響 を与えないこと。	<u>廃棄体の発熱に対して適切 な占有面積が設定されるこ と。</u>	廃棄体の発熱に対して <u>ニアフィールドの温度が適切</u> とな るように廃棄体が配置されること。	安全機能を損な わないための要 件	<u>坑道の設計</u> 人エバリアの設計
めの要	全評価		核種移行遅延性能に有意な 影響を与えないように配慮 がなされること。	人工バリアが安定するように坑道が埋め戻されること。	坑道の存在が安 全機能に対して 有害な影響を与 えないこと。	材料選定 施工(品質管理)
件	の 前 掲			既存あるいは実現可能性の高い技術により、埋め戻し材お よびプラグを製作・施工できること。		材料選定 施工性(工法選定)
延条件を損なわないこと。	条件			支保工などの残置物が人工バリア、埋め戻し材およびプラ グの性能に悪影響を及ぼさないこと。		材料選定、安全評価
	を損な	天然バリアの性能 発揮に有意な影響	坑道および坑道に沿った核 種移行経路の形成抑制	坑道周辺に発生する掘削影響領域の発生抑制を考慮した 坑道掘削を行うこと。	 坑道の存在が安 全機能に対して 东まね影響なり 	施工方法、安全評価
	5わないこ			空洞が長期にわたり健全であること。 坑道および坑道に沿った地下水の卓越した水みちの発生 を抑制すること。		施工方法、安全評価
	を与えないこと。	と。 核種移行遅延性能に有意な 影響を与えないように配慮 がなされること。	周辺岩盤に対する化学的な影響を抑制すること。 地下水の流向や流速に対して配慮がたされること	有者な影響を与えないこと。	安全評価 レイアウト設計、安全評	
			坑道が適切に埋め戻されること。		価 施工(品質管理)	

抽出した設計要件、坑道の設計と連携する設計および設計要件の内容を以下に示す。

- ・坑道の設計と搬送・定置設備の設計の連携
 - 「安全に建設・操業・閉鎖が実施できること」:適切な作業環境を維持できる施設構造
 - 「空洞の力学的安定性が確保されること」:空洞の力学的安定性が確保できる施設構造、設備の寸法と重量
- ▶ 「操業に必要な空間が確保できること」:必要な空間が確保される
- ・坑道の設計と人工バリアの設計の連携
 - 「廃棄体の発熱に対して適切な専有面積が設定されること」:ニアフィールドの温度 が適切となる

表 3.3-24 において、抽出した設計要件における各設計間の具体的な連携を整理した。ここでは、坑道の設計のあるステップにおいて安全性や合理性に問題が生じ、次のステップに進めない状態となった場合に発生する各設計間における連携を示している。

設計の前提を条件とした設計のスタート時においては、これまでのレファレンス仕様や概略設計から坑道の概念の設定を行う。坑道の設計では、概念の設定において坑道断面寸法・ 形状、坑道離間距離および支保工の仕様を設定する。以上の設定した条件において、建設・ 操業・閉鎖時の安定性評価および熱的影響を評価する。また、設定された坑道の概念は搬送・ 定置設備の設計の条件として連携する。以上の評価を経て、地震時の安定性評価、埋戻し後 の長期の人工バリア挙動評価を実施し、坑道の設計を終了する流れとする。図 3.3-37 に例示 した坑道の設計フローでは、表 3.3-24 に示した各設計間における連携が上記の流れの中で発 生することを示した。

なお、今回構築した設計フローでは、各設計間の連携に注目したフローとしたため、坑道 の設計の前提として設定した地下施設のレイアウトやユーティリティ(換気システム、排水 システム等)について、坑道仕様を設定した後に評価することとし、図 3.3-37 に示す設計フ ローには取り入れていないが、例えば、坑道断面寸法や坑道本数、系統を入力情報として換 気システムの評価を行った結果として換気設備が成り立たない場合は、坑道の設計において 仕様を再検討するといった連携が生じる可能性はある。

基本的な 要件	設計要件	設計要件の内容	設計に対する具体的な要求事項	連携の必要性の例
建設・操 業・閉鎖 が可能で あること	安全に建設・ 操業・閉鎖が 実施できるこ と	適切な作業環境を維持 できる施設構造	【坑道の設計】 適切な作業環境に必要な施設構造 ・底盤構造の安全性 【搬送・定置設備の設計】 操業に必要な設備の機能・構造 ・設備寸法・重量	坑道の設計による底盤の設計において安全性 や合理性を確保するためには、搬送・定置設 備の寸法や重量の低減等の連携が必要になる 可能性がある
	空洞の安定性 の確保	空洞の力学的安定性が 確保できる施設構造と 設備の寸法および重量	【坑道の設計】 操業に必要な設備空間の確保 ・支保構造の安全性 【搬送・定置設備の設計】 操業に必要な設備の機能・構造 ・設備寸法・重量	坑道の設計による支保構造において空洞の力 学的安定性や合理性を確保するためには、搬 送・定置設備の寸法や重量の低減等の連携が 必要になる可能性がある
	操業に必要な 空間の確保	必要な空間の確保	同上	同上
安全評価 の前提条 件を損な わないこ と	人工バリアの 安全機能の確 保	適切なニアフィールド の温度	【坑道の設計】 熱的影響の評価 ・坑道離間距離と廃棄体ピッチ 【人工バリアの設計】 熱的影響の評価 ・使用済燃料収容本数、処分容器の材料仕様	坑道の設計による熱的影響評価において設定 された坑道離間距離と廃棄体ピッチが合理性 を確保するためには、使用済燃料の収容本数 や処分容器の材料仕様等との連携が必要にな る可能性がある

表 3.3-24 坑道の設計要件における各設計間の連携の必要性

3 - 199




(3) 支保工施工合理化のための基本特性の取得

場所打ちコンクリートとしての用途を想定した HFSC コンクリートとして、最もセメント量が少なく、強度が低くなると想定される配合条件である「HFSC226」の基本特性を取得する。

1) 使用材料

供試体作製における使用材料の一覧を表 3.3-25 に示す。使用材料は同表の品名または 準拠基準に従うものとし、品名証明書類やカタログ等で品質の証明を行った。

材料名	品名または準拠基準等			
普通ポルトランドセメント(OPC)	JIS R 5210			
練混ぜ水	JIS A 5308附属書C			
骨材	JISA5308附属書A、ただしJISA1145またはJISA1146 で区分Aであること			
フライアッシュ(FA)	JIS A 6201 Ⅱ種			
シリカフューム(SF)	940-U(Elkem社製)(JIS A 6207相当)			
高性能AE減水剤	レオビルド SP8SV(BASF 社製)(JIS A 6204)			
その他混和剤*	2012制定コンクリート標準示方書[施工編] (土木学会, 2012b)			

表 3.3-25 使用材料の一覧

*空気量調整剤、消泡剤など。使用する場合のみ

2) 供試体の作製条件

本試験は、表 3.3-26 に示すように HFSC 結合材料構成比であるポルトランドセメント: シリカフューム:フライアッシュの重量比を 2:2:6(以下、HFSC226)、結合材料の重量 [kg]に対する水の重量[kg]割合(以下、水結合材比 W/B)を 40 %の一定とし、セメントの 種類を普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントとした 2 配合の HFSC コンクリートを製造した。また、HFSC コンクリートにおけるその他の供試体作製に関す る条件を表 3.3-27 のように設定した。

配合要因	指定内容	水準数		
HFSC 結合材料構成比*	226	1水準		
水結合材比[W/B] **	40 %	1水準		
ポルトランドセメントの種類	普通、早強	2水準		
 * HFSC 結合材料構成比:ポルトランドセメント(OPC または HPC):シリカフューム(SF): フライアッシュ(FA)の重量比を示す。 ** W/B:Bは OPC(HPC)、SF、FA の総量で W/Bは、結合材量に対する水量の質量比である。 				

表 3.3-26 HFSC 結合材料構成比および水結合材比

表 3.3-27 その他の供試体作製に関する条件(土木学会, 2012b)

項目	仕様書による規定	配合条件
粗骨材最大寸法	20 mm	20 mm または 25 mm
単位結合材量	最小 360 kg m ⁻³ 程度	$270~{ m kg~m^{-3}}$
単位水量	上限 175 kg m ⁻³ 程度	$175~\mathrm{kg}~\mathrm{m}^{-3}$
スランプ	18±2.5 cm	8∼18 cm
空気量	4.0~7.0 %	4.0~7.0 %

3)物性試験用供試体の作製

図 3.3-38 に示す練混ぜ手順および表 3.3-28 に示す規格に従い、配合設計を実施した。 本練り後、後述するフレッシュコンクリートの性状を確認し、物性試験用供試体を作製 した。物性試験用供試体は直径 10 cm、高さ 20 cm の円柱形とし、突き棒を用いて作製 した。本配合はセメント量が少なく、強度発現が遅いことを考慮して、成型から 2 日後 に脱型し、試験の当日まで 20 ℃の水中で養生した。

項目	準拠規格	
練混ぜ	JIS A 1138「試験室におけるコンクリートの作り方」	
スランプ	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」	
空気量	JISA1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」	
コンクリート温度	JIS A 1156「フレッシュコンクリートの温度測定」	
物性試験用供試体*	JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」	
* 試し練りでは物性試験用供試体は作製しない		

表 3.3-28 物性試験用供試体作製に関する規格



4) 試験配合およびフレッシュコンクリートの性状

試験配合およびフレッシュコンクリートの性状を表 3.3-29 に示す。物性試験用供試体 は単位水量を 144 kg m⁻³、細骨材率を 44.0%として配合設計し、スランプおよび空気量 は所定の範囲を満足するように高性能 AE 減水剤および AE 剤の添加量により調整した。

配合								, i	フレッシュ	<u>.</u>				
		,		単位量[kg m ⁻³]			化学混和剤		コンクリートの性状					
セメント	W/B Г«]	s∕a r«l	W	結	合材()	B)	G	0	SP	AE 剤	SL	空気量	温度	
	L /0 J	L /0]	w	С	SF	FA	5	G	$B \times \%$	$B \times \%$	[cm]	[%]	[°C]	
	10				72	72	216	750	0.00	1 50	0.010	10.0		
普通	40	44	144		360		753	53 982	1.50	0.016	19.0	5.5	22.0	
早強 40	10		44 144	72	72	216	753	982	1.50	0.016	18.0			
	40	44			360							5.5	22.0	

表 3.3-29 試験配合およびフレッシュコンクリートの性状

W/B:水結合材比 s/a:細骨材率 W:水 C:セメント SF:シリカフューム FA:フライアッシュ B:C+SF+FA S:細骨材(静岡県掛川市産山砂、絶乾密度2.53 g cm⁻³、表乾密度2.58 g cm⁻³)

G:粗骨材(茨城県桜川市産砕石、絶乾密度 2.61 g cm⁻³、表乾密度 2.63 g cm⁻³)

SP:高性能 AE 減水剤 SL:スランプ

5)物性試験項目および試験材齢

試験項目および試験材齢を表 3.3-30 に示す。圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、 単位容積質量は4材齢において測定し、ポアソン比のみ3材齢において測定した。

	試験材齢				offer lan inter over
試 願 塤 日	3 日	7日	28 日	91 日	·
圧縮強度試験	0	0	0	0	JISA1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」 に進じ、所定の材齢において測定した。
静弹性係数試験	0	0	0	0	JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じ、圧縮強度と同時に測定した。
ポアソン比の測定	_	0	0	0	圧縮強度および静弾性係数の測定時に、ひずみ ゲージによりポアソンひずみ(横ひずみ)を計 測し、JHS-307「コンクリートの静弾性係数試 験方法」により算出した。
割裂引張強度試験	0	0	0	0	JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験 方法」に準じ、所定の材齢において測定した。
単位容積質量の測定	0	0	0	0	圧縮強度試験に用いる供試体の寸法(直径、高 さ)および質量を測定し、硬化後コンクリート の所定材齢における単位容積質量を算出した。

表 3.3-30 試験項目および試験材齢

6)物性試験結果

① 圧縮強度試験結果

材齢と圧縮強度の関係を図 3.3-39 に示す。圧縮強度は、セメントの種類にかかわらず、 材齢の経過に伴い増大する傾向を示し、早強ポルトランドセメント(以下、早強セメント) の方が普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)より大きい結果を得た。また、 早強セメントは 91 日においても普通セメントと同程度の強度増加率を示した。

圧縮強度については、場所打ちコンクリートのレファレンスケース(核燃料サイクル 開発機構,2005)における設計基準強度(σ28=24~40 N mm⁻²)より低い結果となり、 場所打ちコンクリートの要求性能に対する実用性はやや低い結果となったが、91日強度 では、早強セメント、普通セメントともに設計基準強度を満たす結果を得た。しかし、 早強セメントでは現場養生の場合の強度低下を考慮しても要求水準の強度を保持できる 可能性があるが、普通セメントでは実用面における適用性は低いと考えられる。



3 - 204

② 割裂引張強度試験結果

材齢と引張強度の関係を図 3.3-40 に示す。引張強度は、圧縮強度と同様に材齢の経過 に伴い増大する傾向を示した。早強セメントの方が普通セメントよりやや大きな強度を 示したが、大きな差異は認められなかった。



図 3.3-40 材齢と引張強度の関係

圧縮強度と引張強度の関係を図 3.3-41 に示す。圧縮強度と引張強度の関係式(土木学 会,2012a)も図中に記載した。圧縮強度と引張強度の関係は、試験結果を用いて算出し た回帰式に高い相関係数が得られ、土木学会式に概ね近似する結果が得られた。したが って、HFSC コンクリートにおいても土木学会式を用いて圧縮強度から引張強度を推定で きる可能性がある。また、圧縮強度に対する引張強度の比を算出すると、強度比が最も 小さくなる材齢 91 日で 0.07~0.08 程度となった。一般的なコンクリートの引張強度は 圧縮強度の 1/10~1/13 程度であり、高強度になると 1/20 程度になる(日本コンクリー ト工学協会,1996)と言われており、HFSC コンクリートにおいても強度が高い早強セメ ントの方が普通セメントより強度比が小さい傾向にあり、一般的なコンクリートと同様 な性状を有していると考えられる。



図 3.3-41 圧縮強度と引張強度の関係

③ 静弾性係数試験結果

E縮強度と静弾性係数との関係を図 3.3-42 に示す。E縮強度と静弾性係数の関係式 (土木学会, 2012a;建築学会, 2015)も図中に記載した。E縮強度と静弾性係数の試験 結果を用いて算出した回帰式は高い相関係数を示し、建築学会式に近似する結果となっ たが、土木学会式とは差が生じる結果となった。HFSC コンクリートの構成材料であるフ ライアッシュやシリカフュームは静弾性係数に影響を及ぼす要因とされており、建築学 会式(建築学会, 2015)に定められている係数の実用性が高い結果が得られた。



図 3.3-42 圧縮強度と静弾性係数の関係

④ ポアソン比の測定結果

ポアソン比の測定結果を図 3.3-43 に示す。ポアソン比は、0.17~0.18 の範囲となった。普通コンクリートのポアソン比は、一般に 0.18~0.20(日本コンクリート工学協会, 1996)、もしくは、一律 0.20 でよいと定義されている(土木学会, 2012a)。したがって、

本試験における HFSC コンクリートのポアソン比は、一般的なコンクリートと同程度と考えられる結果が得られた。



図 3.3-43 ポアソン比の測定結果

⑤ 単位容積質量の測定結果

単位容積質量の測定結果を図 3.3-44 に示す。単位容積質量は、2.22~2.27 kg L⁻¹の 範囲となった。HFSC226 コンクリートはセメント量を抑えて、軽量であるフライアッシ ュを多く含む配合であるため、単位容積質量が小さくなる傾向が想定されたが、単位容 積質量が 2.2~2.4 kg L⁻¹とされている普通骨材を用いたコンクリートと(日本コンクリ ート工学協会,1996)同程度であり、一般的なコンクリートの範囲内と考えられる結果 であった。



図 3.3-44 単位容積質量の測定結果

3.4 搬送・定置設備の概念設計

(1) 本項目の背景と目的

搬送・定置設備の概念設計は処分場の地質環境条件や処分場概念、また、これらを前提と して設計された処分容器および緩衝材から成る人工バリア仕様を上位条件として実施される。 この搬送・定置設備の概念設計においては、その成果として、それぞれの設備の実現可能性 を評価し、開発課題を明確にすることが求められる。このため、代表的な処分場概念や人工 バリア仕様を条件として設備の概念設計を実施することが必要である。

平成 27 年度までに、代表的な人工バリア仕様および定置方式として、炭素鋼処分容器およ び銅と炭素鋼からなる複合容器、横置きおよび堅置き定置方式、PEM 定置方式などを対象と し、処分坑道の搬送・定置設備の概念設計を行った。この概念設計では、それぞれの設備の 構成や概略の寸法などの仕様を具体化したうえで、それぞれの実現可能性の評価を行い、課 題を抽出した。これらの概念設計を進める前提として、搬送・定置設備へ適用候補技術全般 の調査と整理を行い、技術オプションとして体系的な取りまとめを行った。

平成28年度は、搬送・定置設備の設計手順の具体化、詳細化の観点から、人工バリアや地 下坑道などの他の処分施設の設計との連携に加え、ガラス固化体の場合よりも留意が必要と なる核セキュリティ・保障措置を考慮した技術やシステムと連携を考慮すべき項目を明確に した上で設計フローを整備した。さらに、これら他施設の設計と整合する仕様の搬送・定置 設備の概念を例示した。また、廃棄体および緩衝材の製作や、搬送・定置設備への積載作業 などを行う地上施設についても、搬送・定置設備と同様に、人工バリアの設計や核セキュリ ティ・保障措置などとの関連性を整理して設計フローを明確にし、人工バリアの設計などと 整合する仕様の地上施設の概念を、搬送・定置設備の概念と併せて例示した。

以上の実施について、以下に「(2)他との連携を考慮した設計フローの整備および概念設計 の例示」として示す。

(2) 他との連携を考慮した設計フローの整備および概念設計の例示

他の設計などと連携する上で考慮すべき項目を抽出するため、平成26年度における搬送・ 定置設備および封入設備の技術オプションの体系的整理を利用した。また、核セキュリティ・ 保障措置を考慮した技術やシステムとの連携する上で考慮すべき項目を抽出するため、核セ キュリティとの連携に関しては、平成27年度に示された核セキュリティシステムの概念(原 子力機構,2016)を参考にした。保障措置との連携に関しては、平成26年度に示された保障 措置システムの要求事項を参考にした。

以下に1)および2)として、搬送・定置設備、および地上施設の設計フローの整備をそれぞ れ示し、3)において概念設計を例示する。また、そのまとめを3.5節に示す。

1) 搬送・定置設備

① 人工バリアや地下坑道など他の処分施設設計との関連性の整理

搬送・定置設備には、稼働する地下施設の場所に応じて表 3.4-1 に示すように多くの種類 がある。また、各装置には対象物(廃棄体、緩衝材など)を坑道内で移動させる走行機能、 対象物を装置内の特定位置に保持する把持機能、把持された対象物を定置するための定置機 能、あるいは廃棄体から装置外部へ放出される放射線の線量を低減させる遮へい機能などの 複数の機能で構成されている。各機能に採用できる技術には複数の候補があることから、人 エバリアの仕様など諸条件に適した技術を絞り込むため、平成26年度において、技術オプシ ョンの特徴比較の視点と具体的内容をとりまとめた(表3.4-2参照)。技術オプションの特 徴は、原環機構の処分概念・技術オプションの特徴比較の視点(原環機構,2011)の設計因 子とその考え方を参考とし、搬送・定置設備の利害得失の特徴比較の視点と具体的内容が整 理された。

本項目では、技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容をもとに、人工バリア、地下 坑道、処分概念や操業との関連性を整理する。なお、本項目で検討する地下坑道は、人工バ リアの仕様や搬送・定置作業と最も関連が深いと考えられる処分坑道とした。

	分類	技術区分 (装置)
地下施設	アクセス坑道 (立坑)	 ①アクセス坑道(立坑)廃棄体搬送装置 ②アクセス坑道(立坑)緩衝材搬送装置 ③アクセス坑道(立坑)隙間充填材搬送装置
	アクセス坑道 (斜坑)	 ④アクセス坑道(斜坑)廃棄体搬送装置 ⑤アクセス坑道(斜坑)緩衝材搬送装置 ⑥アクセス坑道(斜坑)隙間充填材搬送装置
	連絡・主要坑道 (アクセス坑道 -連絡・主要坑道)	 ⑦連絡・主要坑道廃棄体積替え装置 ⑧連絡・主要坑道廃棄体傾転装置 ⑨連絡・主要坑道緩衝材積替え装置 ⑩連絡・主要坑道緩衝材傾転装置 ⑪連絡・主要坑道隙間充填材積替え装置
	連絡・主要坑道 (連絡・主要坑道 - 処分坑道(処分孔))	 ⑩連絡・主要坑道廃棄体搬送装置 ⑬連絡・主要坑道緩衝材搬送装置 ⑭連絡・主要坑道隙間充填材搬送装置 ⑮処分坑道廃棄体積替え装置 ⑯処分坑道緩衝材積替え装置 ⑰処分坑道隙間充填材積替え装置
	処分坑道	 18処分坑道廃棄体搬送・定置装置(堅置き/横置き定置) 19処分坑道緩衝材搬送・定置装置(堅置き/横置き定置) 20処分坑道緩衝材原位置締固め装置(堅置き) 20処分坑道隙間充填材搬送装置・充填装置

表 3.4-1 地下施設の分類と搬送・定置装置(原子力機構, 2015a に加筆)

		設計因子	搬送・定置設備の 特徴比較の視点	特徴整理の視点の具体的内容
閉 後	鎖 長	放射性物質の 移行	_	_
期安性	の 定	人工バリアの 長期安定性	 ・ニアフィールドにおける 残置物と人工バリアとの 相互作用 	・発生する残置物の種類(コンクリート、金属など)、量
操	> 業	放射線安全	 ・ 遮へいの有無 ・ 放射線による装置への影響の可能性 	 ・廃棄体や装置の遮へいによる作業領域の非管理区域化の可否 (廃棄体表面で 2 mSv h⁻¹、表面から 1 m の位置で 100 µ Sv h⁻¹ の基準値への適合により判定) ・廃棄体からの放射線による影響とその大きさ(装置や材料の劣化、
安性	全			および故障、誤動作の発生)
		一般労働安全	 ・装置稼働時の作業環境 ・装置による災害の危険性 	 ・振動騒音、排気ガスの発生の有無 ・装置に起因する火災、爆発・衝突・積荷の落下などの災害発生の可能性
		工程	 ・装置の作業速度・作業時間 	 ・装置が役割を発揮するために必要となる速度や時間(搬送機能の場合は搬送速度、昇降・定置機能の場合は作業あたりの時間など)
				・定置方式(竪置き、横置きなど)への適応性
			,榔洋之栗壮栗の滋田松田	 ・緩衝材の形状や方式(ブロック方式、一体型方式など)への適応性
			 ・	・各坑道(立坑、斜坑、水平坑道)への適応性
			坑道種類、処分深度	 ・ ・ ム範囲の処分深度への適応性
		定置作業性	 ・定置装置稼動部の空間的 制約 ・緩衝材搬送・定置、廃棄 体搬送・定置装置の能力 能力、遠隔操作性、 作業精度、作業時の振動 	・装置の大きさ、および作業時の作業範囲の大きさ(それぞれ坑道断 面の大きさや形状への影響を含む)
工	学 1			 ・性能(必要とする機能を発揮するための能力) 例)対象物(形状、寸法、重量、材質)の搬送・定置能力/斜坑の登坂能力など
旳立	成性			・遠隔操作、自動運転に関する実績
/				・作業精度(定行機能では停止精度、昇降・正直機能では正直精度など)
質証	保			・作業時に対象物に発生する振動や衝撃の大きさ
рш.		技術開発の進 展	・技術レベルおよび課題の 難易度	 ・基準を設けて技術レベルと難易度を判定 は彼レベル・実用(他公野で土公実績がある)レベル(実証実験)
				ベル、基礎(要素)実験レベル、机上検討レベルで分類、
				課題の難易度:実現性に影響する重要課題の数および課題対策の方 ため世後の難見座な誕年
		効率性(物流)	・搬送・定置の作業量	広で投催の無多度を計価 ・ 上記の工程因子にて評価
				・坑道内付帯物の設置要否と設置内容(装置以外の空間確保の必要性)
		地下環境への 適応性	・想定される地下環境条件	・装置稼動に対し、坑道内温度や廃棄体の表面温度、処分容器表面温 度などの温度が及ぼす影響と制約
			 の への適用性 ・閉鎖狭隘空間、坑内温度・ 	・装置稼動に対し、坑道内湿度(ほぼ湿度100%)が及ぼす影響と制約
			湿度・湧水・路盤	・坑道上部からの湧水への適応性(適用可能な湧水量)
				・坑道内の路盤の段差や起伏に対する適応性
			 ・操業作業の地質環境条件の不確実性に対する柔軟 	・装置稼働に必要な坑道底部岩盤の地耐力
1			性 ・操業条件(1 日当たりの)	・様々な作業速度および作業時間設定に対する柔軟性
工学的信頼性		言賴性	 にていていていていていていていていていていていていていていていて	 ・動力停止時の事故・トラブルの発生可能性(装置の暴走や搬送物の 落下・転倒など)
サイト調査とモニタリ ング		調査とモニタリ	_	_
回	回収可能性		 ・搬送・定置後の再移動の しやすさ 	・搬送・定置作業の逆工程による廃棄体回収の成立性
環	竟影氡	野	-	-
社会	会経済	斉的側面	・ステークホルダーの受容 性	・技術レベルも設けて判定 技術レベル:実用レベル(他分野で十分実績がある)、実証実験レベ ル、基礎(要素)実験レベル、机上検討レベル)
<u> </u>			•	

表 3.4-2 技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容(原子力機構, 2015a)

表 3.4-2 に示した技術オプションの特徴比較の視点を用いて、視点の具体的内容ごとに搬送・定置設備の設計に影響する項目を抽出した。なお、搬送・定置設備の設計に影響する項目は、人工バリア、処分坑道、処分概念/地質条件、操業・その他に分類した。

閉鎖後長期の安定性

発生する残置物の種類や量が特徴比較の視点となる。残置物は搬送・定置設備の操 業終了時に撤去しないと地下坑道内に残る資機材を「残置物」と捉える。走行機能、 昇降・定置機能の技術オプションにはレール、台座などの残置物が発生する。そのた め、残置物の許容、種類や量に対する考え方は、走行機能、昇降・定置機能の技術オ プションの選定に影響を与える。

· 操業安全性(放射線安全)

放射線に対する遮へいや設備構成材料の劣化が特徴比較の視点となる。廃棄体表面 の放射線量が基準値以上の場合、放射線の非管理区域では搬送・定置設備に放射線の 遮へい構造が必要となり、その仕様は廃棄体表面の放射線量および管理区域の設定範 囲に影響を受ける。また、搬送・定置設備の構成材料は、耐放射線の材料を使用する などの影響を受ける。

· 操業安全性(一般労働安全)

作業環境や設備に起因する災害発生が特徴比較の視点となる。搬送・定置設備の作 業環境対策は処分場に適用される法規制を遵守する必要がある。特に設備の動力に内 燃機関を採用する場合には、排気ガスの量は地下施設内の換気能力に影響を受ける。 また、設備に起因する災害の防止対策は落下防止など設備自体で講じる対策のほか、 多重防護として斜坑(アクセス坑道)の衝突緩衝部のような災害の拡大防止などが考 えられる。

・工程

坑の場合)。

搬送・定置設備の作業速度が特徴比較の視点となる。必要とされる搬送速度や定置
 速度は、1日当たりの定置量や坑道内での搬送経路や搬送距離などにより設定される。
 ・ 定置作業性

定置方式、緩衝材種類、搬送・定置する坑道の種類や処分深度などの処分方式が特 徴比較の視点となる。また、設備の大きさ、性能、遠隔操作、定置精度や振動といっ た設備の能力に関連する特徴が視点となる。

昇降・定置機能の技術オプションには定置方式(竪置き、横置き)、緩衝材の形状 や方式に対する向き不向きがあり、定置方式や緩衝材の形状や方式は昇降・定置機能 の技術オプションの選定に影響する。また、走行機能の技術オプションには坑道種類 (立坑、斜坑、水平坑)や処分深度(地表から処分深度間のアクセス距離など)に対 する向き不向きがあり、走行機能の技術オプションの選定に影響する(特に立坑、斜

走行機能、昇降・定置機能、把持機能などの装置の大きさや性能は取り扱う対象物 の諸元(形状、寸法、重量、材質など)、対象物を取り扱うための把持部を、対象物 にどのように設置できるかに影響を受ける。また、定置作業時の作業エリアや曲率半 径を含む作業範囲の大きさは、坑道の広さや形状、坑道の交差部のレイアウトなどに 影響を受ける。

一方、遠地下坑道内の放射線管理区域では、設備の遠隔操作や自動運転が必要とな る。搬送誤差、定置誤差は人工バリアが求める定置精度、処分孔や処分坑道内面の仕 上がり状況(掘削誤差や底盤や側壁面の凸凹度)などに影響を受ける。また、搬送時、 定置時の振動・衝撃は、廃棄体、緩衝材、PEMが求める許容レベルに影響を受けて上 限が設定され、振動・衝撃の発生は坑道底盤の仕上がり状況(段差や凸凹度)に影響 を受ける。

・ 地下環境への適応性

搬送・定置作業に伴う付帯物の必要性および坑道内の温度、湿度、湧水、底盤状況 に対する適応性が視点となる。搬送・定置設備の坑道内付帯設備は坑道の形状や寸法、 レイアウトに影響を受ける。また、付帯設備は操業後に撤去作業を行わないと残るた め、残置物の取り扱いにも影響を受ける。

地下の温度、湿度環境では、装置が稼働できる温度範囲を超える場合、耐熱対策が 必要となる。廃棄体の発熱、坑内温度(周辺岩盤の地温、地下水温、坑道内の換気) などに影響を受ける。また、設備の制御部、電気系統の絶縁性は、坑道壁面からの湧 水状況、坑道の排水方法、換気に影響を受ける。さらに、搬送・定置の対象物を湧水、 流水から隔離し、搬送、定置する能力、人工バリアの湧水や流水に対する柔軟性によ り、技術オプションの選択や水からの隔離方法、および定置方法に影響を受ける。ま た、設備の制御部、電気系統の絶縁性・防水性に影響を受ける

一方、対象物の安定した搬送は、路盤の状態、仕上がりに影響を受ける。

• 工学的信頼性

走行機能の種類や接地仕様、定置時の装置のアウトリガーなどの固定方法は、坑道 路盤の地耐力に影響を受ける。走行機能や昇降・定置機能の作業速度は、走行機能、 昇降・定置機能が持つ能力の余裕代に影響を受ける。装置自体の設計で対応するため、 他の施設への影響はない。一方、装置に起因する災害の防止対策は落下防止など装置 自体で講じる防止対策以外に、多重防護として立坑や斜坑の搬入時のトラブル発生時 の拡大防止対策などにアクセス坑道のレイアウトを利用することも考えられる。

なお、地下坑道のレイアウトとは、パネルの配置、アクセス坑道、連絡坑道、主要 坑道、処分坑道の配置、縦断勾配のような全体に関わる坑道配置と、主要坑道から処 分坑道への分岐・合流部の線形形状のこととする。また、放射線管理区域について、 日本原燃では原子力規制委員会の規則(原子力規制委員会,2013)に基づき、放射線 業務従事者の作業性を考慮して、遮断、機器の配置、遠隔操作性、放射性物質の漏え い防止、換気などの所要の放射線防護上の措置を講じた設計がなされていることとし ている。

上記の検討にもとづき、搬送・定置設備の設計と他の項目との関連図として図 3.4-1 に示 した。人工バリアの設計との関連においては、処分容器表面の放射線量や温度、処分容器の 形状、大きさ、重量や材質などの諸元、人工バリアの品質に関わる把持場所、定置精度、振 動・衝撃や水に対する柔軟性が、搬送・定置設備の設計において考慮すべき項目として挙げ られる。また、地下坑道(処分坑道)の設計との関連において、坑道の形状や断面の大きさ などの規模、底盤の地耐力、段差、凹凸などの品質、換気、排水、湧水処理などの設備、レ イアウトや交差部などの坑道線形が挙げられる。一方、地質条件の力学特性や水理特性、岩 盤のき裂などは地下坑道の設計に影響を与えるが、搬送・定置設備に直接影響することはな いと考えられる。

なお、本項目において、地下坑道のレイアウトとは、パネルの配置、アクセス坑道、連絡 坑道、主要坑道、処分坑道の配置、縦断勾配のような全体に関わる坑道配置と、主要坑道か ら処分坑道への分岐・合流部の線形形状のこととした。



図 3.4-1 搬送・定置設備の設計と人工バリアの設計などとの関連図

② 核セキュリティ・保障措置を考慮した技術やシステムとの関連性の整理

地下処分場の保障措置概念は、IAEAでの検討にもとづき3.1節(直接処分方策に関する調 査・検討)に示したとおりであり、また、平成26年度において既に、IAEAでの検討にもとづ く保障措置システム(どの機器をどの場所に設置するか)の予備的検討が実施され、燃料詰 替施設と最終処分場が同一敷地に立地する場合について保障措置システムの要求事項が整理 されている(表3.4-3参照)。保障措置システムとの関連性を整理する上では、これを参考に する。

一方、核セキュリティシステムについては、IAEAの核物質および原子力施設に関する核セ キュリティ勧告(INFCIRC/225/rev.5)の要求事項を踏まえたて検討された核セキュリティシ ステムの概念(原子力機構,2016)を参考にする。検討された地上施設、地下施設の核セキ ュリティシステム概念の抜粋を表3.4-4に示す。

保障措置・核セキュリティは、技術オプションにおける特徴比較の視点(設計因子)とし て想定されていないため、搬送・定置設備の設計と連携すべき項目の抽出は、保障措置・核 セキュリティから搬送・定置設備に求める要件事項を設定した上で設計に影響するものを抽 出する。方法としては、表 3.4-3 に示した整理結果をスタートとし、保障措置システムの要 求事項に対する地下施設、そして搬送・定置設備での具体的対応例の検討を行い、その具体 的内容例と搬送・定置設備の設計との関連性を検討する。また、保障措置システムと同様に、 核セキュリティシステムの概念に対する地下施設、そして地上施設での具体的対応例の検討 を行い、その具体的内容例と地上施設の設計との関連性を検討する。

表 3.4-3 保障措置システムの要求事項(原子力機構, 2015a より抜粋)

保障措置システムの要求事項整理 (H26 年度、保障措置システムの予備検討)
 ・詰替え施設における処分容器への詰め替え時に使用済燃料の検認を実施する必要がある。
 ・処分容器の溶接後から処分容器の定置に至るまでデュアル C/S を用いて知識の連続性 (CoK)を確保する。 ・地下施設はブラックボックスとして扱い、詰替施設と地下施設間の使用済燃料の移動と 地下施設の設計情報検認(DIV)による未申告活動が無いことの確認を行う。
 ・デュアル C/S が故障などにより機能しなかった場合は、再検認の必要性が生じる。 ・再検認では大量欠損の検認が必要であり、検認手段としては、本来使用済燃料を取り出して測定する必要があるが、これは現実的では無いため、処分容器が開封されていないことを確認する手段として溶接ビードの健全性検査などが考えられる。
・詰替施設と地下施設間の使用済燃料の移動を確認するための C/S 機器が故障し CoK が途 切れた場合は、地下部分にある処分容器の再検認が必要と考えられるが、モデル保障措 置アプローチによると IAEA が承認した手段に従い再検認を行うこととしており、別途検

表 3.4-4 要件を踏まえた核セキュリティシステム概念(原子力機構, 2016 より抜粋)

要件を踏まえた核セキ	ュリティシステム概念
(H27年度、	要件を踏まえた核セキュリティシステム概念を簡素化表現)

地上施設

討が必要となる。

- ・立ち入り制限区域およびその内部に防護区域を設定し、防護区域内で核物質は使用又は 防護。
- ・防護区域の周囲は、無許可立入を探知できるように物理的障壁、侵入検知および評価の ための装置を装備。
- 防護区域に入域および出域する車両、人および荷物の必要に応じた検査。
- ・常時要員が詰める中央警報ステーションの設置、非常時対応
- ・中央警報ステーションの機能妨害に対する防止対策
- ・中央警報ステーションと対応部隊間の強靭な通信、連絡手段

地下施設

- ・処分坑道全体を防護区域、周辺の岩盤を物理的障壁と捉える。
- ・地上施設と同様に、防護区域への接近、侵入を検知
- ・地上施設と同様に、監視体制

a. 保障措置・核セキュリティの地下施設への要求事項

保障措置システムの要求事項(表 3.4-3)をもとに、地上施設、地下施設への要求事項を 表 3.4-5のように設定した。

一方、要件を踏まえた核セキュリティシステム概念(表 3.4-4)より核セキュリティから 地上施設、地下施設への要求事項を表 3.4-6のように設定した。なお、逸脱すると核セキュ リティに抵触する事象とは、許可された通路やエリア以外に核物質が移動されないこと、許 可された者や設備だけが許可された通路、出入り口だけを通過していること、許可された設 備で許可された者だけを取り扱っていることとした。

表 3.4-5 保障措置システムから地上施設、地下施設への要求事項

①詰替施設における処分容器への詰め替え時に使用済燃料の検認ができること
 ②処分容器の溶接後から処分容器の定置に至るまでデュアル C/S を用いた処分容器の知識の連続性(CoK)を確保できること。
 ③保障措置技術(デュアル C/S 含む)を適正に適用できること。

 (保障措置手法・技術と工程/設備が相互に干渉しない)
 ④デュアル C/S が故障などにより機能しなかった場合は、再検認が行えること。
 ⑤詰替施設と地下施設間の使用済燃料の移動と地下施設の設計情報検認(DIV)による未申告活動がないこと。

表 3.4-6 核セキュリティシステムから地上施設、地下施設への要求事項

核セキュリティシステムから地上施設、地下施設に対する要求事項 ①核セキュリティに抵触する事象が発生した時に自動的に検知できること ②核セキュリティに抵触する事象が発生した時に自動的に通報できること ③核セキュリティに抵触する事象が発生した時に発生した事象の進展や拡大を防止・遅延 できること

b. 保障措置・核セキュリティに対する地下施設での対応の検討

保障措置システム要件から地上施設、地下施設への要求事項

表 3.4-5 を参考に保障措置システム要件に対する地上施設、地下施設での対応を検討した。 要求事項①に対して、地上施設での対応はγ線トモグラフィなど(原子力機構, 2015a)の 検認方法をもちいて使用済燃料の検認を行うことした。一方、地下施設では使用済燃料の検 認は要求されていない。要求事項②に対しては、地上施設と地下施設ともに、監視カメラや 放射線モニタなど(原子力機構, 2015a)の2種類の方法を用いて監視や記録を行い、それら が設備や施設と互いに干渉しない(設備や施設が監視の邪魔にならない)こととした(これ は要求事項③への対応ともなる)。要求事項④に対しては、地下施設での廃棄体の検認には 超音波探傷技術を使った方法により再検認を行うとした。また、要求事項⑤に対しては、IAEA などによる査察活動を受けることとした。表 3.4-7 に保障措置システムからの要求事項に対 する地下施設での対応を示した。

保障措置と同様に、核セキュリティに関しても、核セキュリティシステムからの要求事項

に対する地下施設での対応を表 3.4-8 に示した。

保障措置システム要件から地上施設、地 下施設への要求事項	地下施設での対応
①地上施設における処分容器への詰め替 え時に使用済燃料の検認ができること	要求事項は地上施設に属するため、対象外
 ②処分容器の溶接後から処分容器の定置 に至るまでデュアル C/S を用いた処分 容器の知識の連続性(CoK)を確保で きること ③保障措置技術(デュアル C/S 含む)を適 正に適用できること 	 ・監視カメラ、放射線モニタなどの、異なる2種類の 方法により処分容器の所在を、監視・記録する ・上記の監視・記録に用いる技術と設備・施設が互い に干渉しない
④デュアル C/S が故障などにより機能し なかった場合は、再検認が行えること	 ・廃棄体封入後の処分容器では、処分容器検認のための超音波測定による溶接ビードなどの測定を実施し、記録と比較して再検認を行う
⑤未申告活動および未申告施設がないこ と	 ・査察活動(設計情報検認および補完アクセスなどを 含む)を受ける

表 3.4-7 保障措置システムからの要求事項に対する地下施設での対応

表 3.4-8 核セキュリティからの要求事項に対する地下施設での対応

核セキュリティシステムから地上施設、 地下施設への要求事項	地下施設での対応
 ①核セキュリティに抵触する事象が発生した時に、自動的に検知・通報できること ②核セキュリティに抵触する事象が発生した時に、事象の進展や拡大を防止・遅延できること 	地下施設周辺の岩盤を防護区域の物理的障壁と考える ・地下施設の出入り口でカメラなどによる侵入を検知 ・地震波測定や電磁波レーダなどのモニタリングによ り侵入活動の検知 ・カメラなどによる核物質の監視

c. 保障措置・核セキュリティに対する搬送・定置設備での具体的な対応内容

保障措置システムからの要求事項への対応から、搬送・定置設備で考慮すべき具体的な対応の容を検討した。

処分容器の所在の監視・記録に関する具体的な方法としては、搬送・定置装置に監視用の カメラあるいは放射線モニタなどを設置し、地上施設(処分容器払出室)から定置位置間の 処分容器が搬送・定置設備内に存在していることを確認することが挙げられる。このために は、監視装置の視野や解像度などの能力、処分容器を確認できる設置位置を設けることなど が搬送・定置設備の設計に関連する。処分容器の検認は、専用の設備で実施されるため、搬 送・定置設備の設計との関連はない。また、査察活動に関しては、査察活動を受け、承認さ れた装置、機材を使用することが具体的な対策となるが、設計に関わる項目はない。保障措 置システムに対する搬送・定置設備での具体的な対応例を表 3.4-9 に示す。

一方、核セキュリティシステムからの要求事項への対応では、保障措置と同様に搬送・定 置装置に監視用のカメラあるいは放射線モニタなどを設置し、処分容器が搬送・定置設備内 に存在していることを確認することが具体的な対策例となる。

表 3.4-10 に保障措置システムに対する具体的な対応例を、表 3.4-10 に核セキュリティシ

ステムに対する対応例を示した。

地下坑道の出入口などの要所に監視装置を設け、処分容器を搭載した搬送・定置装置の移 動や作業を監視することも考えられるが、これは搬送・定置設備の設計には影響しない。他 の地下施設での対応では搬送・定置設備の設計に影響する項目はないと考えられる。

表 3.4-9 保障措置システムに対する搬送・定置設備での具体的な対応例

地下拡張での対応	搬送・定置設備			
地下施設での対応	具体的な対応内容	設計に係る項目		
 ・監視カメラ、放射線モニタなどの、異なる2種類の方法により処分容器の所在を、監視・記録する ・上記の監視・記録に用いる技術と設備・施設が互いに干渉しない 	 ・搬送・定置装置に搭載した監視 カメラや放射線モニタなどにより、搬送・定置中の処分容器を 確認する **【地下坑道の出入口などの要所に おける監視カメラ、放射線モニタに より、処分容器を搭載した搬送・ 定置設備の位置を監視、管理する】 	 ・搬送・定置設備の監視カメラや 放射線モニタなどの能力や設置 位置 **【地下坑道の出入口などの要所に おける監視カメラや放射線モニタ の能力、設置位置】 		
 ・廃棄体封入後の処分容器では、処分容 器検認のための超音波測定による溶接 欠陥などの測定を実施し、記録と比較 して再検認を行う 	_	_		
 ・査察活動(設計情報検認および補完ア クセスなどを含む)を受ける 	 ・ 査察活動を受け、承認された装置、機材を使用する 	_		

表 3.4-10 核セキュリティシステムに対する搬送・定置設備での具体的な対応例

地下施設での対応	搬送・定置設備			
地下施設での対応	具体的な対応内容	設計に係る項目		
 地下施設周辺の岩盤を防護区域の物理的 障壁と考える ・地下施設の出入りロでカメラなどによる侵入を検知 ・地震波測定や電磁波レーダなどのモニタリングにより侵入活動の検知 ・カメラなどによる核物質の監視 (平成 27 年度) 	**【地下坑道の出入口などの要所に おける監視カメラ放射線モニタに より、処分容器を搭載した搬送・ 定置設備の位置を監視、管理する】	**【地下坑道の出入口などの要所に おける監視カメラや放射線モニタ の能力、設置位置】		

**【地下坑道の出入口】は、搬送・定置設備には関連しない

③ 設計フローへの反映

搬送・定置設備の設計においては、人工バリアや地下施設の設計、保障措置・核セキュリ ティシステムなど他との関連性を適切に考慮した上で候補技術の中から技術を絞り込み、ま たは抽出する必要があるため、他との関連性を、搬送・定置設備に適用可能な技術オプショ ンの比較の視点に反映することは重要である。そこで、①および②において整理した、人工 バリアや地下施設の設計、保障措置・核セキュリティシステムなどと連携する上で考慮すべ き項目を、技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容(表 3.4-2)に反映させた。具体 的には、処分概念、人工バリア、地下坑道、操業等から搬送・定置設備の設計に影響を与え る項目を加え、搬送・定置設備の設計因子との関連を整理するとともに、保障措置/核セキ ュリティを搬送・定置設備の設計の特徴比較の視点に追加した。これを表 3.4-11 に示す。

平成 26 年度に検討した搬送・定置設備の技術オプションの体系的整理では、技術オプションを比較するための項目が検討された。それに加え、平成 28 年度の検討により、人工バリア、

地下坑道や操業に加え、直接処分において特に留意する必要のある保障措置/核セキュリティとの関連が明確になり、これら他の設計などと整合的かつ包括的な観点から、搬送・定置 設備の技術オプションの絞り込み・抽出が可能となった。

搬送・定置設備の設計フローへの反映は、使用済燃料の地層処分システムに関する概括的 評価第1次取りまとめ(原子力機構,2015b)(以下、直接処分第1次取りまとめという)に おける地下施設の設計フロー、および処分施設の設計フロー(原子力機構,2015a)を参考と し、上記②および③で整理した処分坑道の設計などとの関連性を搬送・定置設備を中心とし た設計フローに反映した。これを図3.4-2に示す。搬送・定置設備と処分坑道とは特に関連 性が深いことが分かる。

搬送・定置設備の設計と地下坑道の設計との関連部分に着目したより詳しいフローを図 3.4-3 に示す。フロー図では機械設計における概念設計、基本設計、詳細設計の手順(海上 技術安全研究所 HP)と、地下坑道の概略設定、坑道設計(支保設計)、設備設計・坑道レイ アウトの手順を相対させる形で表現した。

地下坑道側では既往実績や検討事例に基づき坑道断面形状や内空断面の大きさが概略設定 され、坑道断面の最大寸法が搬送・定置側に与えられる。一方、搬送・定置設備側では処分 概念、人工バリアの緒元や操業方法から技術オプションを選定し、搬送・定置設備の概略形 状寸法や重量が概略設計され、地下坑道側に渡される。搬送・定置設備の基本設計では装置 の大きさ、装置の接地圧、走行性能仕様などの情報を地下坑道側と情報交換しながら、装置 の各機能の構成と仕様が設定され、詳細設計に移っていくことになる。

表 3.4-11 技術オプションの特徴比較の視点の整理(搬送・定置設備)

技術オプションの特徴比較の視点		搬送・	定置設備の設計に影響する	る項目	
設計	因子	特徴比較の視点における 具体的内容	人工バリア	人工バリア 処分坑道	
閉鎖後長 期の安定 性	人工バリアの長期安全性	発生する残置物の種類(コン クリート、金属など)、量	_	_	残置物の許容の可否、 種類や量への考え方
放射線3 全 操業安全	放射線安 全	廃棄体や装置の遮へいによる 作業領域の非管理区域化の可 否 廃棄体からの放射線による影 響とその大きさ	廃棄体表面の放射線量	_	管理区域の設定範囲
性	一 般 労 働 安全	振動騒音、排気ガスの発生の 有無 装置に起因する火災、爆発・ 衝突、積み荷の落下等の災害 発生の可能性	-	坑道内の換気による排 気ガスの制限 坑道レイアウト	法規制
	工程	装置が役割を発揮するために 必要となる速度や時間	_	_	1日当たりの定置量 搬送経路や搬送距離
		定置方式への適応性	_	_	定置方式
		緩衝材の形状や方式への適応 性	緩衝材の形状、寸法、 重量、材質	_	緩衝材種類
		各坑道への適応性	_	_	坑道種類
		広範囲の処分深度への適応性	_	_	処分深度
		装置の大きさ及び作業時の作 業範囲の大きさ	 搬送・定置する対象物 の形状、寸法、重量、 材質 	坑道の形状、寸法、坑 道交差部のレイアウト	_
定置作業性	定置作業 性	性能(取り扱い能力)	対象物の形状寸法、重 量、材質 対象物の把持部の設置 可能場所、把持方法	_	_
工学的成		遠隔操作、自動運転に関する 実績(管理区域での作業)	廃棄体表面の放射線量	_	管理区域の設定範囲
立性/品 質保証	作業精度(定置品質)	廃棄体、緩衝材、PEM が求める定置精度	処分孔や処分坑道内面 の仕上がり状況(掘削 誤差、底盤や側壁面の 凹凸度)	_	
		作業時に対象物に発生する振 動や衝撃の大きさ(定置品質)	廃棄体、緩衝材、PEM の許容振動・衝撃の大 きさ	坑道底盤の仕上がり状 況(段差や凹凸度)	_
		坑道内付帯物の接地要否と設 置内容	_	坑道の形状、寸法	残置物の許容の可否、 種類や量への考え方
		装置稼働に対し、坑内温度や 廃棄体の表面温度などが及ぼ す影響と制約	廃棄体表面の温度	坑内温度、換気、排水 方法	_
	地下環境 への適応	装置稼働に対し、坑内湿度が 及ぼす影響と制約	_	坑内湿度、換気、排水 方法	
	性	水に対する適応性	水に対する柔軟性	導水工、排水工、湧水 処理対策	_
		坑道内の段差や起伏に対する 適応性	_	路盤材質(岩盤面、敷 ジャリ、コンクリー ト)、仕上がり形状(段 差や凹凸度)	_
		装置稼働に必要な坑道底部の 地耐力	_	路盤の地耐力	_
上字的信頼(1王	動力停止時の事故・トラブル の発生可能性			施設レイウト
保障措置・ 核セキュ	リティ	廃棄体の所在を監視するカメ ラ、放射線モニタなどの設置 性 査察活動(設計情報検認や補 完アクセス等を含む)の受け やすさ	カメ 設置 や補 愛け		力や設置位置



図 3.4-2 搬送定置設備を中心とした設計フロー



図 3.4-3 設計フローにおける搬送・定置設備と地下坑道の関係

2) 地上施設

地上施設内に設置される施設は多種多様であるため、対象とする地上施設を選んだうえで、 上記で実施した搬送・定置設備の設計に関する検討と同様に、人工バリアの設計などと連携 すべき項目および核セキュリティ・保障措置の観点から考慮すべき項目を整理した。これに より整理される、人工バリアの設計などとの関連性を、地上施設の設計フローに反映した。

① 対象とする地上施設

地層処分場の地上施設を構成する施設は、廃棄体を受け入れ、地下に搬送して定置するための準備と事業管理に必要な施設、および地下施設で行われる作業を支援するための一群の施設である。例えば、原環機構(2011)によると、1,600 m×950 mの敷地内には以下に示す

施設が配置された概念が示されており、各種多様な地上施設のあることが分かる。

- ・高レベル放射性廃棄物受入・封入・検査施設
- ・地層処分低レベル放射性廃棄物受入・検査・廃棄体パッケージ製作施設
- ・地層処分低レベル放射性廃棄物廃棄体パッケージ容器製作施設
- ・緩衝材製作・検査施設
- ・プラグ製造施設
- ・埋め戻し材製作・検査施設
- ・掘削土置き場
- ・アクセス坑道出入管理施設
- 坑道換気施設
- · 排水処理施設
- · 廃棄物処理施設
- ・排気筒
- ・コンクリート供給施設
- ・ユーティリティ施設
- ・メンテナンス施設
- ・管理棟
- ・保安施設
- ·輸送車両専用門
- 港湾施設
- ・PR 施設

地上施設では一般的な施設の設計に加えて放射線防護対策と放射線被ばく管理が必要とな り、ガラス固化体の受入・検査・封入施設は、放射線安全上最も重要な施設となる。使用済 燃料の直接処分における地上施設は、ガラス固化体の処分と同様な施設群になると仮定する と、放射線管理上最も重要な使用済燃料の受入・検査・封入施設が重要な施設と考えられる。 平成26年度の検討(原子力機構,2015a)では、地上施設の燃料詰替施設と最終処分所が同 一敷地に立地した場合を対象に、使用済燃料の輸送や処分容器への封入、検認などに係る一 連の作業工程(以降、「ハンドリングフロー」という)を行なう場所としてキャスク受入室、 キャスク検査室、使用済燃料詰替室、処分容器溶接/検査室、処分容器払出検査室、処分容 器払出室が挙げられており、平成28年度の検討でも、キャスク検査室、使用済燃料詰替室、 処分容器溶接/検査室、処分容器払出検査室、処分容器払出室と対象とした。地上施設の一 覧を表 3.4-12に示す。

地上施設名	概略作業	
キャスク受入室	処分場外から運搬されたキャスク(使用済燃	
	料)を受入、仮置き	
キャスク検査室	キャスクの蓋を外し、キャスクの放射線を検	
	査、検査後に蓋を戻す	
使用済燃料詰替室	キャスクの蓋を外し、使用済燃料を取り出	
	し、使用済燃料集合体の検認 (γ線トモグラ	
	フィなど)した後に、処分容器に使用済燃料	
	集合体を挿入	
処分容器溶接/検査室	処分容器の蓋を溶接、必要に応じて後熱処理	
	を行い、溶接個所の検査	
処分容器払出検査室	処分容器の放射線量の測定(表面汚染)	
	処分容器の検認測定(超音波測定など)	
処分容器払出室	処分容器の搬送・定置装置への積み込み	
	最終処分場への払出	

表 3.4-12 地上施設の一覧

② 人工バリアや地下坑道など他の処分施設設計との関連性の整理

地上施設のうち、封入設備(溶接装置、検査装置)では技術オプションの体系的整理が実施された(原子力機構,2015a)。これは搬送・定置設備と同様に、封入設備の概念設計において、技術オプションの特徴比較の視点を用いて適用候補技術の絞り込みや開発課題を明確にする方法として検討された。封入設備の技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容の例を表 3.4-13 に示す。

①で示したとおり、本検討では、地上施設(キャスク受入室、キャスク検査室、使用済燃料詰替室、処分容器溶接/検査室、処分容器払出検査室、処分容器払出室)を対象として、 表 3.4-13 に示す技術オプションの特徴比較の視点の具体的内容にそって、廃棄体、処分概 念・操業や建屋/付帯設備との関連性を整理した。

表 3.4-13	封入設備の技術オプ	ションの	り特徴比較の	視点と見	具体的内容	(原子力機構,	2015a)
----------	-----------	------	--------	------	-------	---------	--------

設計因子		封入設備の 特徴整理の視点	特徴整理の視点の具体的内容
	人工バリアの長期安定性	・廃棄体への熱的・機械的な影響	・廃棄体の長期安定性に対する熱的・機械的な影響がない、 または小さい
	 ・遮へいの有無 ・放射線左全 ・放射線に上る装置への影響の可 		 ・廃棄体や装置の遮へいによる作業領域の非管理区域化の 可否
操業安		能性	・廃棄体からの放射線による影響とその大きさ(装置や材料の劣化、および故障、誤動作の発生)
土江	机光角力	壮男站倒吐力化光温运	・振動騒音、煙の発生の有無
	全般方側女	 ・装直体側時の作業環境 ・装置による災害の危険性 	 ・装置に起因する火災、爆発・衝突・廃棄体の転倒などの 災害発生の可能性
	工程	・装置の作業速度・作業時間	・封入工程、検査工程の1作業あたりの作業時間
			・蓋構造(落とし蓋方式、平蓋方式など)への適用性
		・溶接・検査装置の適用範囲	・処分容器の材質(炭素鋼、銅、チタンなど)への適用性
溶接・検: 作業性 工 学 的		蓋構造、材質、対放射線・熱	・廃棄体からの放射線、熱への適応性
	溶接・検査 作業性	 溶接・検査装置鵜の必要空間 溶接・検査装置の能力 作業能力、持続力、遠隔操作 性、監視・施工性 	・本体装置の大きさ、および付帯設備の大きさの有無と大 きさ
			・廃棄体の溶接・検査時の作業能力(品質)、持続力
成立性	立性		・遠隔操作、自動運転に関する実績
/品質			・監視、施工管理の容易さ
休証			・基準を設けて技術レベルと難易度を判定
	甘海関惑の		技術レベル:実用(他分野で十分実績がある)レベル、
	後 州 開 光 の 准 屈	・技術レベルおよび課題の難易度	実証実験レベル、基礎(要素)実験レベル、机上検討レベ
			ルで分類課題の難易度:課題対策の方法や技術の難易度 を評価
	施設環境維	・地上施設環境を維持	・施設内環境への温度、排気の影響に対する対策の有無と 容易性
	持への対応	施設内環境、2次廃棄物の発	・2 次廃棄物の発生の有無と量
	任	生、ユーティリティー確保	・必要ユーティリティーの確保の容易さ
工学的信頼性		 ・操業条件(1日あたりの定置廃棄 体数)の変化に対する矛軟性 	・1日当たりの溶接・検査の廃棄体数変更への対応性
		 ・故障時の重大災害に対する信頼 性 	・動力が停止した際に、装置の暴走などのトラブルが発生 する可能性
環境影響		-	_
社会経済	的側面	・ステークホルダーの受容性	 ・基準を設けて技術レベルを判定 技術レベル:実用(他分野で十分実績がある)レベル、 実証実験レベル、基礎(要素)実験レベル、机上検討レベルで分類

a. 地上施設の設計と人工バリアなどとの関連性

キャスク受入室、キャスク検査室、使用済燃料積替室、処分容器溶接/検査室、処分容器 払出検査室および処分容器払出室の地上施設について、各施設の設計と人工バリアなどとの 関連性を検討した。地上施設の各施設では、使用済燃料を収容したキャスク、使用済燃料集 合体、処分容器など取り扱う対象物が順次変わってくる。そのため、地上施設の設計とそれ に影響する項目については、処分概念、使用済燃料集合体・キャスク・処分容器、作業・そ の他に分けて、検討した。

地上施設の各施設での検討結果を表 3.4-14 に示す。また、各施設での関連性のまとめを表 3.4-15 に、関連図を図 3.4-4 に示す。

地上施設の設計項目		地上施設の設計に影響する項目			
施設名	作業概要	設計項目・設備	使用済燃料集合 体・キャスク・処 分容器	作業・その他	処分概念
キャスク 受入室	 ・処分場外から運搬されたキャスク(使用済燃料)を受入、仮置き ・カメラなどによる監視 	 入退扉、受入設備 (天井クレーン、 トレーラなど)、 建屋、カメラなどの装置、空調・防 災設備 	キャスクの形状、 寸法、重量、材質、 表面放射線量	仮置き数量 一日の取扱量 管理区域の範囲 と放射線防護上 の措置	法規制
キャスク 検査室	 キャスクの蓋を外し、 キャスクの放射線を検 査、検査後に蓋を戻す カメラなどによる監視 	 入退扉、天井クレ ーン・台車など)、 建屋、カメラなどの装置、空調・防災設備 および検査装置" 	キャスクの形状、 寸法、重量、材質、 表面放射線量	一日の取扱量 放射線防護上の 措置	法規制
使用済燃 料詰替室	 キャスクの蓋を外し、 使用済燃料を取り出す 使用済燃料集合体の検認(γ線トモグラフィなど) 処分容器に使用済燃料 集合体を挿入 カメラなどによる監視 	 入退扉、天井クレ ーン・台車など)、 建屋、カメラなどの装置、空調・防災設備 および検認装置 	キャスクの形状、 寸法、重量、材質、 表面放射線量 使用済燃料集合 体の形状、寸法、 重量、材質、表面 放射線量	一日の取扱量 放射線防護上の 措置	法規制
処 分容器 溶接/ 検査室	 ・処分容器の蓋の溶接 ・後熱処理、溶接個所の 検査 ・カメラなどによる監視 	 入退扉、天井クレ ーン・台車など)、 建屋、カメラなどの装置、空調・防災設備 および溶接装置、 後熱処理装置、検 査装置 	処分容器の形状、 寸法、重量、材質、 表面放射線量 溶接深さ、溶接線 長さ、検査深さ、 検査線長さ	一日の取扱量 放射線防護上の 措置	法規制
処 分 容 器 払 出 検 査 室	 ・処分容器の放射線量の 測定(表面汚染) ・処分容器の検認測定(超 音波測定など) ・カメラなどによる監視 	 入退扉、天井クレ ーン・台車など)、 建屋、カメラなどの装置、空調・防災設備 および検認装置 	処分容器の形状、 寸法、重量、材質、 表面放射線量	一日の取扱量 放射線防護上の 措置	法規制
処 分容器 払出室	 ・処分容器の搬送・定置 装置への積み込み ・遮へい装置設置 ・カメラなどによる監視 	 入退扉、積替設備 (天井クレーン、 搬送装置、建屋、 カメラなどの装置、空調・防災設備 	処分容器の形状、 寸法、重量、材質、 表面放射線量	一日の取扱量 放射線防護上の 措置	法規制

表 3.4-14 地上施設の設計と人工バリアなどとの関連性

地上施設の設計項目			地上加	施設の設計に影響する	5項目	
施設名	作業概要	設計項目・設備	使用済燃料集合 体・キャスク・処 分容器	作業・その他	処分概念	
キャスク 受入室	 (処分場の敷地内) ⇒キャスク受入・検査 ⇒使用済燃料詰替え ⇒廃棄体容器の溶接・検査 ⇒払出・検査 (アクセス坑道) 	 入退扉、運搬設備(天 井クレーン・トレー ラ・台車・搬送装置な ど)、建屋、カメラな どの監視装置、空調・ 防災設備 室によって、溶接装置、後熱処理装置、検査・検認装置 	対象物の形状、寸 法、重量、材質、 表面放射線量 (対象物:キャス ク、使用済燃料集 合体、処分容器) 溶接深さ、溶接線 長さ、検査深さ、 検査線長さ	ー日の取扱量 管理区域の範囲 と放射線防護上 の措置 室によって仮置 き数量	法規制	

表 3.4-15 地上施設の設計との関連性まとめ



図 3.4-4 地上施設の設計と人工バリアの設計などとの関連図

b. 封入設備の設計と人工バリア・操業・処分概念の関連性の整理

前出の表 3.4-14 に示した封入設備(溶接装置、検査装置)の技術オプションの特徴比較の 視点を用いて、視点の具体的内容ごとに封入設備の設計に影響する項目を抽出した。封入設 備が収容される処分容器溶接/検査室は、封入設備と建屋や付帯設備で構成されるが、技術 オプションの体系的整理が封入設備(溶接装置と検査装置)で実施されているため、封入設 備と建屋/付帯設備は分けて考えることとし、封入設備の設計に影響する項目は、廃棄体(処 分容器)、処分概念/操業・その他、建屋/付帯設備に分類した。

閉鎖後長期の安定性

廃棄体に与える熱的・機械的な影響が視点となる。建屋内の空調設備の能力や廃棄 体自体の熱的、機械的許容の大きさに影響を受ける。

· 操業安全性(放射線安全)

廃棄体や装置の遮へいによる作業領域の非管理区域化、廃棄体からの放射線による 装置や材料の劣化、および故障、誤動作の発生が視点となる。遮へい構造や装置の材 料、対策が廃棄体表面の放射線量や管理区域の範囲と放射線防護上の措置に影響を受 ける。 · 操業安全性(一般労働安全)

設備の振動騒音や煙などの排気ガスの発生などの作業環境、装置に起因する火災、 廃棄体の転倒などの災害発生の可能性が視点となる。作業環境は法規制とともに空調 設備の能力に影響を受け、設備に起因する災害の防止対策は、設備自体で実施すると ともに、災害の拡大は消火設備などの防災設備が挙げられる。

・ 工程

封入工程や検査工程の1作業当たりの作業時間が視点となる。装置の作業時間は、 対象物の材質、規模(溶接長さ、溶接深さ)や1日当たりの作業数に影響に影響を受 ける。

溶接・検査作業性

封入設備(創設装置、検査装置)の技術オプションには蓋構造(落し蓋、平蓋など)、 処分容器の材質に対する向き不向きがあり、蓋構造や処分容器の材質は封入設備の技 術オプションの選定に影響する。また、作業時の廃棄体表面の放射線や熱は、設備の 耐放射線性、耐熱性に影響する。

一方、遠隔操作や自動運転は廃棄体表面の放射線量、管理区域の設定と放射線防護 上の措置に影響を受ける。また、監視や施工管理の容易さは設備が配置される施設の 規模に影響される。

施設環境維持への対応性

施設内の温度や排気などの施設環境は、溶接装置、検査装置とは異なる対策装置を 配置することで実施する。排気温度が高く有毒ガスが多いと、対策設備も大掛かりと なる。

• 工学的信頼性

1日当たりの定置廃棄体数の変化に対する柔軟性は、1日当たりの処理数量と封入 設備の技術オプションに影響を受ける。

以上の整理結果にもとづく関連図を図 3.4-5 に示す。



図 3.4-5 封入設備の設計と廃棄体の設計などとの関連図

③ 核セキュリティ・保障措置を考慮した技術やシステムとの関連性の整理

保障措置システムに対する地上施設での対応について表 3.4-5 を参考に検討した。

要求事項①に対して、地上施設での対応はγ線トモグラフィなどの検認方法をもちいて使 用済燃料の検認を行うことした。要求事項②に対しては、地上施設と地下施設ともに、監視 カメラや放射線モニタなどの2種類の方法を用いて監視や記録を行い、それらが設備や施設 と互いに干渉しない(設備や施設が監視の邪魔にならない)こととした(要求事項③)。要 求事項④に対して、地上施設での使用済燃料の検認はγ線トモグラフィを、廃棄体の検認に は超音波探傷技術を使った方法により、再検認のための情報を採取するとした。また、要求 事項⑤に対しては IAEA などによる査察活動を受けることとした。表 3.4-16 に保障措置シス テムからの要求事項に対する地下施設での対応を示す。核セキュリティシステムからの要求 事項に対する地上施設での対応を表 3.4-17 に示す。

保障措置システムから、地上施設、地下 施設への要求事項	地上施設での対応
①地上施設における処分容器への詰め替 え時に使用済燃料の検認ができること	・使用済燃料の検認方法として、ガンマ線トモグラフ ィなどを実施し、記録する
②処分容器の溶接後から処分容器の定置 に至るまでデュアル C/S を用いた処分容 器の知識の連続性(CoK)を確保できる こと ③保障措置技術(デュアル C/S 含む)を適 正に適用できること	 ・監視カメラ、放射線モニタなどの、異なる2種類の 方法により処分容器の所在を、監視・記録する ・上記の監視・記録に用いる技術と設備・施設が互い に干渉しない
 ④デュアル C/S が故障などにより機能し なかった場合は、再検認が行えること 	 ・使用済燃料ではガンマ線トモグラフィなどを実施し、記録と比較して同定する ・廃棄体封入後の処分容器では、処分容器検認のための超音波測定による溶接欠陥などの測定を実施し、再検認に備える
⑤未申告活動および未申告施設がないこ と	 ・査察活動(設計情報検認および補完アクセスなどを 含む)を受ける

表 3.4-16 保障措置システムからの要求事項に対する地上施設での対応

表 3.4-17 核セキュリティからの要求事項に対する地上施設での対応

核セキュリティシステムから地上施設、 地下施設への要求事項	地上施設での対応
 ①核セキュリティに抵触する事象が発生した時に、自動的に検知・通報できること ②核セキュリティに抵触する事象が発生した時に、事象の進展や拡大を防止・遅延できること 	区分Ⅱ施設における原子力施設の対応と同様 ・防護区域の周辺に物理的障壁、侵入検知および評価 のための装置 ・入出の管理、警備員の防護区域巡視

保障措置システムからの要求事項への対応から、封入設備で対応すべき具体的な内容を検 討する。使用済燃料の検認は封入設備には関係がないため省いた。処分容器の所在の監視・ 記録に関する具体的な方法としては、処分容器の溶接、検査の一連の作業を処分容器溶接/ 検査室内に設置したカメラで監視する。また、処分容器溶接/検査室の出入口に放射線モニ タなどを設置し、処分容器の入退室を確認することが挙げられる。このためには、監視装置 の視野や解像度などの能力、処分容器を確認できる設置位置を設けることなど封入設備の設 計に関連する。また、査察活動に関しては、査察活動を受け、承認された装置、機材を使用 することが具体的な対策となるが、設計に関わる項目はない。保障措置システムに対する封 入設備での具体的な対応例を表 3.4-18 に示す。

一方、核セキュリティシステムからの要求事項への対応では、保障措置と同様に処分容器 溶接/検査室内にカメラを、出入口に放射線モニタなどを設置し、処分容器の存在や入退室 を確認することが、具体的な対策例になる。表 3.4-19に核セキュリティシステムに対する対 応例を示す。なお、処分容器の検認ための超音波測定は処分容器払出検査室での作業と考え られ、処分容器溶接/検査室とは関係しない。

表 3.4-18 保障措置に対する封入設備での具体的な対応例

地上拡張での対応	処分容器読節/検査室			
地上地設ての外心	具体的な対応内容	設計に係る項目		
・使用済燃料の検認方法として、ガ				
ンマ線トモグラフィなどを実施	_	-		
し、記録する				
 ・監視カメラ、放射線モニタなどの、異なる2種類の方法により処分容器の所在を、監視・記録する ・上記の監視・記録に用いる技術と設備・施設が互いに干渉しない 	 ・溶接、検査の一連作業を、封入 施設内に設置した監視カメラで 監視・記録する ・処分容器溶接/検査室の出入口 の放射線モニターにより、廃棄 体や廃棄体を封入した処分容器 の入退出を監視、管理する 	・監視カメラの能力、設置位置 ・放射線モニターの能力、設置位 置 ・施設の設計配置		
 ・廃棄体封入後の処分容器では、処分容 器検認のための超音波測定による溶接 欠陥などの測定を実施し、記録と比較 して再検認を行う ・査察活動(設計情報検認および補完ア クセスなどを含む)を受ける 	*【廃棄体封入後の処分容器では、 処分容器検認のための超音波測 定などの測定を実施し、測定結 果および特徴を記録する】 ・査察活動を受け、承認された装 置、機材を使用する	_		

表 3.4-19 核セキュリティに対する封入設備での具体的な対応例

地下拡張での対応	処分容器溶接/検査室			
地下施設での対応	具体的な対応内容	設計に係る項目		
 地下施設周辺の岩盤を防護区域の物理的 障壁と考える ・地下施設の出入りロでカメラなどによる侵入を検知 ・地震波測定や電磁波レーダなどのモニタリングにより侵入活動の検知 ・カメラなどによる核物質の監視 (平成 27 年度) 	 ・処分容器溶接/検査室や換気口 を含む出入口の放射線モニターに より、廃棄体や廃棄体を封入した 処分容器の入退出を監視、管理す る ・監視カメラなどにより、施設内 に関係者以外が侵入していないこ とを確認 	 ・監視カメラなどの能力、設置位置 ・放射線モニターなどの能力、設置 位置 		

*【処分容器の検認のための超音波測定】は、封入設備には関連しない

④ 設計フローへの反映

②および③の検討から得られた、人工バリアの設計や保障措置・核セキュリティシステム などと連携する上で考慮すべき項目を、技術オプションの特徴比較の視点と具体的内容(表 3.4-13)に反映させた。具体的には、廃棄体(処分容器)、処分方式、操業、建屋・付帯設 備などから封入設備の設計に影響を与える項目を加え、封入設備の特徴比較の視点との関連 を整理するとともに、保障措置・核セキュリティを封入設備の特徴比較の視点に追加した。 これを表 3.4-20に示す。

平成28年度の検討により、人工バリアの設計などと封入設備の設計との関連性が明確となり、また、直接処分で特に留意すべき保障措置・核セキュリティが特徴比較の視点に加わったことで、他の設計などと整合的かつ包括的な観点から封入設備の技術オプションの絞り込み・抽出が可能となった。

	封入設備の)技術オプションの特徴比較の視点	封入設備の設計に影響する項目		
設計因子		特徴比較の視点における 具体的内容	廃棄体 (処分容器)	処分方式 操業、その他	建屋/ 付帯設備
閉鎖後長 期の安定 性	人工バリアの長期安全性	 廃棄体の長期安定性に対する熱的・機械的な 影響がない、または小さい。 	 ・廃棄体の熱的、 機械的な許容 	_	 ・空調設備の能力
操業安全 性	放射線安 全	 ・廃棄体や装置の遮へいによる作業領域の非管理区域の可否 ・廃棄体からの放射線による影響とその大きさ(装置や材料の劣化、および故障、誤動作の発生) 	 ・廃棄体表面の 放射線量 	 ・管理区域の範 囲と放射線防 護上の措置 	_
	一 般 労 働 安全	 ・振動騒音、煙の発生の有無 ・装置に起因する火災、爆発・衝突・廃棄体の 転倒等の災害発生の可能性 	_	・法規制	 ・空調設備の能力 ・消火設備等の 防災設備
	工程	 ・封入工程、検査工程の1作業あたりの作業時間 	 ・廃棄体容器の 材質 ・溶接深さ、溶 接線長 	 ・1日の作業数 	_
		 ・蓋構造(落し蓋方式、平蓋方式など)への適用性 	 ・蓋構造の種類、 寸法等 	_	_
		 ・処分容器の材質(炭素鋼、鋼、チタンなど) への適用性 	 ・廃棄体容器の 材質 	_	_
	溶接・検 査作業性	・廃棄体からの放射線、熱への適応性	廃棄体容器表 面の放射線量や 温度	_	 ・空調設備の能力
工学的成 立性/品 質保証		 ・本体装置の大きさ、および付帯設備の有無と 大きさ 	 ・廃棄体容器の 大きさ 	_	・建屋の規模
		廃棄体の溶接・検査時の作業能力(品質)、 持続力	 ・溶接深さ、溶 接線長 検査深さ、検査 長 	_	_
		・遠隔操作、自動運転に関する実績	・廃棄体容器表 面の放射線量	 ・管理区域の範 囲と放射線防 護上の措置 	
		・監視、施工管理の容易さ 監視が容易とは、装置構造が簡素で一望して 作業状況が分かること、施工管理が容易とは、 作業工程が簡素で管理項目が明確であること。	-	_	・建屋の規模
	地下環境 への適応 性	・施設内環境への温度、排気の影響に対する対 策の有無と容易性			・建屋の規模
		・2 次廃棄物の発生の有無と量	-	-	-
		・必要ユーティリティーの確保の容易さ	_	_	 ・建屋の規模
工学的信頼性		 ・1日当たりの溶接・検査の廃棄体数変更への 対応性 			 ・1日の作業量
		・動力が停止した際に、装置の暴走などのトラ ブルが発生する可能性	_	_	-
保障措置/ 核セキュリティ		廃棄体の所在を監視するカメラ、放射線モニ タなどの設置性 査察活動(設計情報検認や補完アクセス等を 含む)の受けやすさ	監視カメラ等の能力、設置位置 放射線モニタ等の能力や設置位置		

表 3.4-20 技術オプションの特徴比較の視点の整理(封入設備)

封入設備の設計フローへの反映は、直接処分第1次取りまとめにおける地下施設の設計フ ロー(原子力機構,2015b)、および処分施設の設計フロー(原子力機構,2015a)を参考と した。封入設備を中心とした設計フローへ検討結果を反映した結果を図 3.4-6 に示した。図 に示されるとおり、封入設備の設計は、廃棄体表面の放射線量など種々の廃棄体の仕様や性 質、さらに封入設備の設置場所である処分容器の溶接・検査室における建屋/付帯設備と連 携して設計される。



図 3.4-6 封入設備を中心とした設計フロー

3) 概念設計の例示

人工バリアや地下施設の設計および保障措置・核セキュリティからの要求事項と整合する 仕様の搬送・定置設備及び地上施設の概念を、1)および2)の成果を踏まえて例示した。具体 的には、搬送・定置設備の概略仕様、地上施設と搬送・定置設備の作業工程およびハンドリ ングフローの例を示した。 例示の条件

概念設計の例示にあたり、平成28年度の検討においては、定置方式は竪置き・ブロック方 式とし、使用済燃料詰替施設と処分場が同一敷地内に立地する場合を対象とした。

例示の対象とする坑道については、海外で検討されている処分場の例(原子力機構,2014) を参考に、地上施設とアクセス坑道は直接繋がり、アクセス坑道から先は、坑底施設、連絡・ 主要坑道、処分坑道より構成されるものとした。なお、アクセス坑道について、本概念設計 の例示においては斜坑を対象とした。概念設計の例示対象を図 3.4-7 に黄色で示す。



図 3.4-7 概念設計の例示対象とした坑道(原子力機構(2014)に加筆)

原子力機構(2015a)で示されたとおり、ブロック方式に対応する搬送・定置設備には廃棄 体搬送・定置装置と緩衝材搬送・定置装置があるが、本概念設計の例示においては廃棄体搬 送・定置装置を対象とした。原子力機構(2016)で示された、定置方式が竪置き・ブロック 方式の場合の処分坑道および定置イメージを図 3.4-8、図 3.4-9 に示す。廃棄体は処分坑道 底部の処分孔に一体ずつ定置されることとした。





図 3.4-8 処分坑道(竪置き方式) 図 3.4-9 定置イメージ(竪置き・ブロック方式) (原子力機構, 2016) (原子力機構, 2016)

人工バリアについては、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構,2015b)で設定されたレ ファレンスケースとした。図3.4-10に人工バリアのレファレンス仕様を示す。人工バリアは、 PWR使用済燃料集合体2本を収容した処分容器とその周囲を0.7mの厚さで覆った緩衝材か ら構成される。処分容器の材質は炭素鋼であり、それぞれの重量は処分容器に使用済燃料集 合体を収容した廃棄体が約18 ton、緩衝材が約35 ton、人工バリアの総重量としては約53 ton である。



図 3.4-10 人工バリアのレファレンス仕様(原子力機構, 2015b)

2 搬送・定置設備の概略仕様

本概念設計の例示の条件にもとづき、廃棄体搬送・定置設備の概略仕様を検討した。

平成 27 年度の搬送・定置設備の概念設計(原子力機構, 2016)では、竪置き・ブロック方 式の定置方式に対応する技術オプションとして、廃棄体の把持機能については把持部吊り下 し、昇降・定置機能についてはワイヤ・ウィンチ方式が採用され、搬送・定置設備に備えら れた遮へい容器に廃棄体を収容し横積みで搬送した後、処分孔上部で縦向きに傾転させて定 置する装置が検討された。先行事例として、スウェーデンの SKB における MAGNE (SKB, 2015) があり、その技術的な特徴を参考として概念設計が実施された。MAGNE の概要を図 3.4-11 に 示す。MAGNE においては、円筒形の放射線遮へい容器(放射線遮へいチューブ)内に廃棄体 を収容し、搬送時は横向きに、定置時はそれを縦向きに傾転させて廃棄体を定置する。

平成 27 年度の検討では、搬送・定置設備の走行機能や駆動力については選定していないが、 図 3.4-2 に示された設計フローにもとづき設計される地下坑道内は十分な換気がなされ、底 盤性状も問題がないとすることから、本概念設計では MAGNE と同様に、走行機能はタイヤ方 式を、駆動力はディーゼル機関を採用することとした。また、表 3.4-9 に示された保障措置 システムに対する具体的対応例にもとづき、搬送・定置設備の運転席屋根に監視カメラを設 置し、廃棄体を収納した放射線遮へい容器を搬送・定置中に監視することとした。表 3.4-21 に搬送・定置設備の概略仕様を示す。本仕様の搬送・定置設備は、廃棄体を地上施設で受け 取り、アクセス坑道(斜坑)を経由し、積替え作業を行わずに処分坑道まで到達し、定置作 業までを一貫して行うことが可能である。しかし、アクセス坑道(斜坑)は距離が長く、ま た斜路での搬送となることから、アクセス坑道での搬送にはアクセス坑道での搬送用に設計 される専用の装置を利用し、アクセス坑道の坑底部において本仕様の搬送・定置設備に積替 えることとした。



Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 図 3.4-11 搬送・定置設備の先行事例 (SKB, 2015)

項目		概略仕様				
	寸法	幅約3 m×長さ約14 m×高さ約5.2 m				
装置概要	建築限界	幅約 3.4 m×高さ約 5.6 m				
	重量	約 100 ton (廃棄体および遮へい容器含む)				
	構造	レジン(100 mm 厚)を両側から鉄板(20 mm 厚)で挟ん				
進へい宏思		だ構造				
湿"、('谷谷	寸法	外径約1.2 m×長さ約5 m、容器の厚さ約14 cm				
	重量	約 6.7 ton (遮へい容器のみ)				
貝欧壮墨	構造 (例)	30 ton クラス ダブルレール式ホイストクレーン				
升阵表直	寸法	幅約 2.8 m×高さ約 1.8 m×高さ約 0.9 m				
把持装置		自動着脱式				
走行方式		タイヤ方式				
駆動力		粒子フィルタ付きディーゼルエンジン				
廃棄体の監視		運転席屋根に後ろ向きに監視カメラを設置				

表 3.4-21 搬送・定置設備の概略仕様(原子力機構, 2016 に加筆)

③ ハンドリングフローによる例示

地上施設および搬送・定置設備の作業工程及びハンドリングフローの検討においては、ガ ラス固化体の竪置き定置におけるオーバーパック搬送・定置のハンドリングフロー(原環セ ンター,2001)および使用済燃料処分容器の横置き定置におけるハンドリングフロー(原子 力機構,2015a)を参考とした。作業工程、および保障措置・核セキュリティ方策を各作業工 程に設定したハンドリングフローを以下に示す。

・ 地上施設の作業工程

地上施設は、表 3.4-12 にもとづきキャスク受入室、キャスク検査室、使用済燃料詰 替室、処分容器溶接/検査室、処分容器払出検査室および処分容器払出室で構成され るとし、表 3.4-18 にもとづき、作業工程において保障措置システムを考慮した。

各室の出入り口(各室の境界)に放射線モニタ、室内に監視カメラを設置し、キャ スク、使用済燃料集合体、処分容器の移動、所在が監視される。

キャスク受入室では運搬されたキャスクを受け入れ仮置きする。キャスク検査室で はキャスク表面の放射線量を測定する。使用済燃料詰替室では、キャスクに収納され ている使用済燃料集合体を抜き出し、γ線トモグラフィ等によって使用済燃料集合体 の検認を行う。

処分容器溶接/検査室では、使用済燃料集合体を収容した処分容器の蓋を溶接し、 後熱処理(JIS 規格 JIS3700)により溶接部の残留応力の低減を図る(原環センター, 2013)。さらに、フェーズドアレイ法等の超音波探傷技術を用いて溶接部を検査する とともに、処分容器の検認に必要となる特徴情報の取得を行う。なお、溶接部の検査 で適合しなかった処分容器は別途対策を検討し処置する。処分容器払出検査室では、 処分容器の放射線量を測定する。

最後に処分容器払出室では処分容器をアクセス坑道搬送装置に積み込み、搬送装置 をアクセス坑道へ送り出す。なお、キャスク検査室、処分容器払出検査室には放射線
量の測定によりキャスクや処分容器の表面汚染が確認された場合には、除染等の措置 を行う施設を併設する。

・搬送・定置設備を用いた作業工程

アクセス坑道(斜坑)廃棄体搬送装置により地上施設の処分容器払出室で廃棄体を 受け取り、アクセス坑道を搬送し、アクセス坑道底部の坑底施設で廃棄体を搬送・定 置設備に積み替える。廃棄体を搭載した搬送・定置装置は、連絡坑道、主要坑道、処 分坑道を移動し、処分坑道内の処分孔上で放射線遮へい容器を傾転させて、廃棄体を 処分孔内に定置する。

アクセス坑道(斜坑)廃棄体搬送装置および搬送・定置設備では設置している監視 カメラにより、搬送作業中、定置作業中の廃棄体の所在を監視する。また、各坑道の 出入口に設けた放射線モニタと監視カメラにより、処分容器(廃棄体)の移動、搬送・ 定置設備や人の移動を確認する。

・保障措置・核セキュリティ方策を設定したハンドリングフロー

地上施設及び搬送・定置設備の作業工程および保障措置・核セキュリティの方策の例 を表 3.4-22 に、ハンドリングフローの例を図 3.4-12 に示す。

表 3.4-22 作業工程に応じた保障措置・核セキュリティ方策の例

地上施設

工程	施設名	作業工程	保障措置・核セキュリティの方策
1	キャスク受入室	・キャスクを受取、仮置き	
2	キャスク検査室	 ・キャスクの検査 ・放射線管理区域 	(各室共通として)
3	使用済燃料詰替室	 ・使用済燃料集合体の抜き出し ・使用済燃料集合体の検認(γ線 トモグラフィ等) ・使用済燃料集合体の処分容器への詰替え ・放射線管理区域 	 ・各室出入口に設置した放射線モニタにより、作業中のキャスク、使用済燃料集合体、処分容器の所在を確認する ・各室内に設置した監視カメラにより、 作業中のキャスク、使用済燃料集合体、
4	処分容器溶接/検 査室	 ・処分容器の蓋の溶接 ・溶接後の後熱処理 ・超音波等による溶接個所の検査 ・処分容器の検認に必要となる特徴情報の取得 ・放射線管理区域 	 処分容器の状態や作業状況を確認する と装置や人の移動を確認する (個別として) ・使用済燃料詰替室では、γ線トモグラ
5	処分容器払出検査 室	 ・処分容器の払出検査 ・放射線管理区域 	フィ等により使用済燃料集合体の検認 を行い、記録する ・処分容器払出室では、処分容器溶接部
6	処分容器払出室	 ・処分容器の仮置き ・処分容器をアクセス坑道(斜坑) 廃棄体搬送装置へ積み込み ・搬送装置のアクセス坑道への送り出し ・放射線管理区域 	の超音波測定を行い、処分容器の検認のための情報を採取する

搬送・定置設備

工程	施設名	作業内容	保障措置・核セキュリティの方策
_	(地上施設)	・廃棄体を受け取り、放射線遮へ い容器内に搭載	
1	アクセス坑道	 ・アクセス坑道(斜坑)搬送装置 による廃棄体のアクセス坑道での搬送 	(各坑道共通として)
2	坑底積替え施設	 ・アクセス坑道(斜坑)搬送装置 から、搬送・定置装置に廃棄体 を積替え ・放射線管理区域 	・ 搬达・ 定直装直に 各載した 監視 カメラ により、 搬送作業中、 定置作業中の廃 棄体の所在を確認する
3	連絡坑道	・搬送・定置設備による廃棄体の 連絡坑道での搬送	 ・アクセス坑道、積替え施設、連絡坑道、 主要坑道、処分坑道の各坑道の出入口のゲートを設け、放射線モニタを設置
4	主要坑道	 ・搬送・定置設備による廃棄体の 主要坑道での搬送 	し、処分容器(廃棄体)の移動を確認 する。 ・アクセス坑道、連絡坑道、主要坑道、
5	処分坑道 (処分孔)	 ・搬送・定置設備による廃棄体の 処分坑道での搬送 ・廃棄体を定置する処分孔直上で 廃棄体を収容した放射線遮へい 容器を縦向きに傾転 ・廃棄体を処分孔に定置 ・放射線管理区域 	た方が追い石が追の山入口に監視ガメ ラを設置し、搬送・定置設備や人の移 動を確認する。



(a) 地上施設



(1) 预达 足直政備

図 3.4-12 地上施設及び搬送・定置設備のハンドリングフローの例

3.5 まとめ

(1) 直接処分方策に関する調査検討(3.1節参照)

・海外情報の調査

IAEA や諸外国における状況については、使用済燃料の地層処分に係る保障措置適用を技 術的に支援する IAEA の専門家会合(ASTOR)に参加し、各国の地層処分の状況および保障措 置に関する技術的トピックについて情報収集を行った。その結果、Safeguards by Design の概念に基づいて処分施設の設計の初期段階からあらゆる保障措置要件を統合しておくこ とが必要である一方、保障措置戦略が将来的に変更された場合でも対応可能であるように 技術要件をフレキシブルとすることが重要との見解が IAEA から示された。

今後とも、ASTOR を初めとした国際会議への参加等を通じて、IAEA および諸外国の使用 済燃料の直接処分に適用する保障措置及び核セキュリティの検討状況に関する最新の情報 を入手する必要がある。

·保障措置技術開発

超音波計測を用いた廃棄体の同定・識別および未開封確認技術の適用性を確認するため、 溶接時に自然に発生する特徴および人工的に付与する特徴の適用可能性を検討した。その 結果、炭素鋼の溶接においては超音波計測技術が適用できる可能性が確認できた。加えて、 測定環境の変化が超音波計測に与える影響をシミュレーション解析により評価し、計測結 果を相対的に分析することで測定環境の変化の影響を抑制できることが分かった。さらに、 廃棄体の同定・識別に使用する技術としての電子ダグの適用可能性を検討するため、電子 タグの特徴と適用に当たってのメリットと課題を整理した。その結果、パッシブ方式・UHF 帯の電子タグであれば適用できる可能性があることが分かった。

今後、今回検討した鋼製容器以外の複合容器に対する固有性確認技術を検討することも 課題のひとつである。また、将来的には処分容器の具体的な設計や溶接方法が決定した時 点で試験サンプルを用いた試験を実施し、シミュレーション解析結果の検証を行うことが 必要と考える。また、電子タグについては、処分容器に付与する方法やエラー発生時の対 応などが課題である。

・核セキュリティ対策に係る検討

核セキュリティ技術については、IAEA 核セキュリティシリーズ No. 10 の指針に従って仮 想施設に対する脅威を評価し、地上施設および地下施設それぞれに対し、脅威に対抗する ための物理的な核セキュリティシステムを検討し、公開文献を参照して必要な機器類をリ ストアップするとともに要求事項を整理した。

今後は、ソフトウェアに対する対策や技術革新に対応した核セキュリティシステムのア ップデートについて考慮しつつ、想定される具体的な脅威に基づいた核セキュリティシス テムの検討を実際の処分施設初期設計段階から盛り込み、その後の状況に応じて適宜改良 していくことが必要である。

(2) 人工バリアの設計

・処分容器の設計(3.2.1項参照)

3タイプの PWR の UO₂使用済燃料(従来型、高燃焼度化ステップ1燃料、高燃焼度化ステ ップ2燃料)に対して、処分容器に4体の使用済燃料を収納した場合の処分後の容器内部 での臨界解析を行い、未臨界性を維持するために必要な最低燃焼度を導出した。求められ た最低燃焼度は、いずれの燃料タイプにおいても、設計仕様の最高燃焼度を大きく下回る 結果となった。このことは、処分容器に4体の使用済燃料を収納する場合を想定すると、 処分後の容器内部において未臨界を維持できる使用済燃料がわが国において広く存在し得 ることを示していると考えられた。

吸収線量率が高くなる高燃焼度の燃料集合体を対象とした遮へい解析を実施し、求めら れた処分容器表面の吸収線量率を基に、遮へい容器の厚さが腐食防止の観点から十分であ ることを確認した。

処分容器封入後に実施される溶接部への溶接後熱処理にともなう入熱が使用済燃料集合 体へ及ぼす影響を伝熱解析により評価した。その結果から、溶接後熱処理により燃料集合 体に水素化物再配向による脆化が起こり得ることが示されたことから、溶接後熱処理の実 施方法や実施条件の更なる検討が必要である。

銅と炭素鋼からなる複合処分容器について、外圧を受けながら腐食により外層胴および 外蓋が減肉する条件下で、内外層の隙間に空気が存在することを考慮して構造健全性を評 価した。外蓋の不連続部において強度評価の目安値を超えるひずみが発生するものの、外 蓋および外層胴は全体的に健全に維持されることが分かった。内外層の隙間に空気の存在 を考慮する条件と考慮しない条件の比較においては、空気の存在を考慮する場合のほうが 処分容器に発生するひずみが小さくなる傾向が確認されたものの、その効果は小さいこと が分かった。

今後は、臨界安全性、遮へい性、構造健全性の観点から引き続き種々の設計因子や多様 性を考慮した解析を実施し、幅広い条件に対応した基本仕様の成立性を評価することが課 題である。

・処分容器の設計における臨界安全に関する検討(3.2.2項参照)

核データライブラリとして JENDL-4.0 を使用した MVP-2.0 による臨界実験解析の精度評価を行い、PWR および BWR 使用済燃料の直接処分体系の臨界安全評価で使用可能な推定臨界下限増倍率をともに 0.98 と評価した。

岩盤や緩衝材を反射体とする体系に対する臨界計算の手法の妥当性を確認する取り組みの一環として、これらの主要な成分である SiO₂ または砂を反射体とする臨界実験の再現解析を行い、実験結果をよく再現できることを確認した。

中性子を吸収する毒物を使用して臨界安全を担保する方法の適用性を検討するため、燃料集合体の装荷本数に応じた処分容器体系における中性子吸収材の必要量について検討した。PWR使用済燃料を4体収納する場合でも、Gd₂0₃濃度が0.1 wt%程度の中性子吸収材を 使用することで全案内管に中性子吸収材を装荷せずに未臨界を担保できる可能性を示した。

直接処分における臨界発生時の影響については、米国での臨界発生時挙動評価の事例を 調査し、処分容器内の臨界事象は処分場全体には影響を与えない局所的な事象に限定され、 処分システム性能に影響を及ぼすものではないと判断されていることを確認した。 今後は、本年度のSiO2の反射体効果の検証で対象とした臨界実験と直接処分体系の類似 性評価を行うと共に、BWR使用済燃料の未臨界を維持するために必要な中性子吸収材添加 量等について検討を行うことが必要である。また、臨界発生時の処分システムへの影響評 価において米国等で適用された手法の我が国への適用性等を検討することが必要である。 ・緩衝材の設計(3.2.3項参照)

乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%、厚さ 70 cm の緩衝材について、銅外層と炭 素鋼からなる複合処分容器を硬岩系あるいは軟岩系の岩盤環境下に横置き定置する条件に おいて、処分孔への定置から 10 万年までの期間で応力緩衝性と強度特性を満足することを、 銅の腐食膨張に関わるパラメータに文献値ではなく実測値を用いた解析により再確認した。

一方、乾燥密度 1.8 Mg m⁻³、ケイ砂混合率 30 wt%、厚さ 70 cm の緩衝材については、炭 素鋼処分容器を硬岩系あるいは軟岩系の岩盤環境下に竪置き定置する条件において、処分 容器の最小設計寿命(1千年)を越える期間において、応力緩衝性と強度特性を満足する ものの、局所的に限界状態に達することが分かった。また、乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケイ砂 混合率 30 wt%、厚さ 70 cm の緩衝材の場合との比較から、乾燥密度を高くすることは緩衝 材の厚さの維持の観点からは効果が小さいことを確認した。

また、これまで未検討であった人工バリアを PEM 方式とした場合について、対応する緩 衝材の設計解析モデルおよび物性値を設定した上で、設計解析を実施した。PEM 方式の人 エバリアを硬岩系の岩盤環境下に竪置き定置する条件において、乾燥密度 1.6 Mg m⁻³、ケ イ砂混合率 30 wt%、厚さ 70 cm の緩衝材は、処分容器の最小設計寿命である 1 千年間、応 力緩衝性と強度特性を満足することを確認した。

今後は、人工バリアの仕様、定置方式(竪置き・横置き)、岩盤条件などの多様性を考慮 した解析を引き続き実施し、幅広い条件に対応したレファレンス仕様の緩衝材の成立性を 評価することが課題である。

(3) 地下施設の概念設計(3.3 節参照)

・地下施設の設計

軟岩系岩盤において、搬送対象(廃棄体および PEM)を竪置き定置方式とした場合の主 要・連絡坑道および処分坑道に発生する操業時の荷重を設定し、支保工底盤の構造的な評 価を実施した。操業時における廃棄体および搬送・定置装置の重量として 140~190 t の大 きな重量が算定されたが、全ての荷重ケースにおいて、部材厚さ:40 cm、設計基準強度 f'ck=18~24 N mm⁻²、鉄筋の仕様:D16~22@150 mm の部材仕様で十分に安全であることが 確認された。これは、底盤コンクリート下部の軟岩系岩盤(SR-C)の支持力により大きな 断面力が発生しなかったことが大きな要因と考えられる。直接処分で想定している使用済 燃料を含む廃棄体は、様々な形状・寸法・重量となる可能性があることから、今後それら 多様な荷重ケースについて検討する必要があると考えられる。

坑道の設計、人工バリアの設計および搬送・定置設備の設計の各設計間において相互に 影響する事項を整理し、これを各設計間における具体的な連携として考慮することで、坑 道の仕様を安全性・合理性において最適なものとしていくための設計フローを構築した。 坑道の設計と人工バリアの設計との関係では、ガラス固化体と比べ発熱量が大きくなることが想定されるため、熱的影響の評価おいて連携が発生する可能性がある。坑道の設計と搬送・定置設備の設計との関係では、坑道の直接的な設計条件となる設備寸法・重量についての連携、および搬送・定置設備の直接的な設計条件となる坑道の断面形状の連携などが発生する。今後は、構築した設計フローなどについての知見を整理して取りまとめる。
 支保工施工合理化のための基本特性の取得

セメントの種類が異なる2種類のHFSC226コンクリートを製造し、圧縮強度などの基本 特性の取得試験を行った。試験の結果、コンクリートの一般的に知られている性状に対し て同様の傾向が確認できたため、コンクリート標準示方書の適用性は高いと考えられる。 セメント量の少ない配合であるため強度面に課題があり、標準仕様である28日強度におけ る場所打ちコンクリートとしての実用性はやや低いと考えられるが、早期の強度を必要と しない場面や、高い低アルカリ性能が要求される場面、またHFSCセメントのその他の用途 (グラウト材等)については適用の可能性がある。

今後の課題としては、HFSCではフライアッシュやシリカフュームを多量に用いることに なるが、これらの材料は静弾性係数に影響を及ぼすことが知られており、それらを多量に 用いたコンクリートの使用時の性状には不明な点も多いことから、性状や基本特性につい てのデータを取得する必要があると考えられる。

(4) 搬送·定置設備の概念設計(3.4 節参照)

搬送・定置設備の設計に関して、人工バリアの設計や地下坑道など処分施設の設計との 連携に加え、ガラス固化体の場合よりも留意が必要となる保障措置・核セキュリティを考 慮した技術やシステムとの連携も考慮し、これら他の設計などと連携すべき項目を明確に した上で設計フローを整備した。保障措置・核セキュリティとの連携においては、搬送・ 定置作業中に廃棄体の所在を確認するため、監視カメラを搬送・定置設備に搭載すること、 地下坑道の出入口に放射線モニタを設置することが具体例として挙げられた。

地上施設の設計についても、人工バリアの設計や保障措置・核セキュリティと連携すべ き項目を明確にした上で設計フローを整備した。保障措置・核セキュリティとの連携にお いては、使用済燃料集合体の検認および廃棄体の検認との連携に加え、監視カメラや放射 線モニタを各室に設置する事が具体例として挙げられた。また、処分容器溶接/検査室に おける封入設備の設計は、建屋の規模や付帯設備(空調設備・防災設備)と連携して実施 すべきであることが示された。

参考文献

- Agrenius, L. (2002) : Criticality safety calculations of storage canisters, SKB Technical Report TR-02-17.
- Agrenius, L. (2010) : Criticality safety calculations of disposal canisters, SKB Public Report 1193244.
- Andersson-Ostling, H. C. M. and Sandstrom, R. (2009) : Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal, SKB TR-09-32.
- Broadhead, B.L., Rearden, B.T., Hopper, C.M., Wagschal, J.J., Parks, C.V. (2004): Sensitivity- and Uncertainty-Based Criticality Safety Validation Techniques, Nucl. Sci. Eng. 146, 340-366.
- 中小企業総合事業団 情報・技術部 (2001):平成 12 年度ものづくり人材支援基盤整備事業 -技術・技能の客観化、マニュアル化等- 被覆アーク溶接 実技とそのポイント.
- CRWMS M&O (1997):Criticality Consequence Analysis Involving Intact PWR SNF in a Degraded 21 PWR Assembly Waste Package, BBA000000-01717-0200-00057 REV00.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005):TRU 廃棄物処分技術検討書-第2 次TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー,JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.
- 電力中央研究所(2013):溶接金属形状の推定方法、推定装置及び推定プログラム、公開特許 公報(特開放 2013-238510).
- Department of Defense (2005): Unified Facilities Criteria (UFC), Security engineering: entry control facilities/access control points, UFC 4-022-01.
- Department of Defense (2010): Unified Facilities Criteria (UFC), Selection and application of vehicle barriers, UFC 4-022-02.
- Department of Defense (Change 1) (2013) : Unified Facilities Criteria (UFC) , DoD minimum antiterrorism standards for buildings, UFC 4-010-01.
- 土木学会(2012a): 2012 年制定コンクリート標準示方書設計編, 2012 年 3 月.
- 土木学会(2012b): 2012 年制定コンクリート標準示方書施工編, 2012 年 3 月.
- エネルギー総研(エネルギー総合工学研究所)(2002): 平成13年地層処分場の高圧環境にお ける性能評価手法に関する技術開発.
- 原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011):地層処分事業の安全確保(2010 年度版) 確 かな技術による安全な地層処分の実現のために-, NUMO-TR-11-01, 2011 年 9 月.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2001):平成12年度高レベル放射 性廃棄物処分事業推進調査報告書(第2分冊)-遠隔調査技術高度化調査-(2/2)、 2001年3月.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2013):平成24年度地層処分技術調 査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第2分冊)-人工バリア品質評価技術の開発-.
- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2013):平成24年度地層処分技術

調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報 告書(第2分冊)-人工バリアの品質評価技術の開発-(1/2)、2013年3月.

- 原環センター(原子力環境整備促進・資金管理センター)(2016):平成 27 年度 地層処分シ ステム工学確証技術開発 報告書(第1分冊)一人工バリア品質/健全性評価手法の構 築一オーバーパック.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2013):平成24年度地層処分技術調査等事業使用 済燃料直接処分技術開発報告書,平成25年3月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2014):平成25年度地層処分技術調査等事業 使済 燃料直接処分技術開発報告書,平成26年3月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015a):平成26年度地層処分技術調査等事業使用 済燃料直接処分技術開発報告書,平成27年3月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015b):わが国における使用済燃料の地層処分シス テムに関する概括的評価-直接処分第1次取りまとめ-, JAEA-Research 2015-016.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015c):日本原子力研究開発機構核不拡散・核セキ ュリティ総合支援センター(ISCN)における活動について、原子力科学技術委員会核 不拡散・核セキュリティ作業部会(第4回).
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2016):平成27年度地層処分技術調査等事業 直接 処分等代替処分技術開発報告書,平成27年3月.
- 原子力規制委員会原子力規制庁(2014):核セキュリティの現状、第1回核セキュリティに関 する検討会資料4、平成25年3月4日.
- 原子力規制委員会(2013):原子力規制委員会規則第三十一号「廃棄物管理施設の一、構造及 び設備の基準に関する規則」、2013年12月.

Geospace Technologies:http://www.geospace.com/tag/gs-20dh/(2016年12月27日閲覧).

- Hicks, T., Baldwin, T. and Winsley, R. (2015), Analysis of The Likelihood of Post-Closure Criticality in a Geological Disposal Facility, International Conference on Nuclear Criticality Safety, ICNC2015, Charlotte, NC, USA, Sep. 13-17 2015.
- 本間信之,谷口直樹,川崎学,川上進(2002):オーバーパック腐食生成物の弾性係数の測定, JNC TN8400 2002-010.
- Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M. (2011): Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z =1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, NISTIR 5632 (Datalast updated 2011).
- IAEA (2009): Development, Use and Maintenance of the Design Basis Threat, IAEA Nuclear Security Series No. 10, pp. 23.
- (INEL)Idaho National Engineering Laboratory (1995):RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174.
- 入矢桂史郎,栗原雄二,藤島敦(2004):ポゾランを高含有した低アルカリ性吹付けコンクリ

ートの性状, 土木学会第 59 回年次学術講演会 (平成 16 年 9 月), CS1-029, pp. 57-58.

- 入矢桂史郎,中山雅,小西一寛,三原守弘(2006):ポゾラン高含有低アルカリ性吹付けコン クリートの施工性,コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 173-178.
- 石田仁志(2007):超音波フェーズドアレイ TOFD 法による厚肉ステンレス鋼配管溶接部の欠 陥深さ測定技術の開発、INSS ジャーナル Vol.13 pp.246.
- 石谷和己,柴田雅博,江橋健,若杉圭一郎,牧野仁史,蛯名貴憲(2015):直接処分研究のため の使用済燃料の多様性を考慮したモデルインベントリ評価,2015年原子力学会秋の大 会.

Janach, W. (1977): Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 104. p. 209-215. 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課(1988):臨界安全ハンドブック,にっかん書房日本. 海上技術安全研究所 HP:平田宏一、講義ノート:もの作りのための機械設計工学、

https://www.nmri.go.jp/eng/khirata/design/ch01/ch01_01.html(2017 年 1 月 5 日 閲覧)

- 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信 頼性,-地層処分研究開発第二次取りまとめ-分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.
- 核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の 構築-平成17年取りまとめ- - 分冊2 工学技術の開発-, 平成17年9月.
- 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信 頼性,地層処分研究開発第二次取りまとめ一総論レポート,JNC TN1400 99-020.
- 核燃料サイクル開発機構(2000):オーバーパック溶接部の設計手法に関する研究-溶接品質 定量化のための基礎データ JNC TJ 8400 2000-049.
- 核セキュリティに関する検討会(原子力規制委員会)(2014):核セキュリティの現状、第1回 核セキュリティに関する検討会資料 4.
- 建築学会(2015):建築工事標準仕様書・同解説,2015年7月.
- 小林大輔、加藤良幸、栗田勉、飯田正義、寺浦信之、伊藤邦雄、櫻井幸一(2014):耐放射線 RF タグの放射線照射による機能確認、日本原子力学会「2014 秋の大会」予稿集.
- Koide, T., Endo, T., Yamamoto, A. et al. (2014): Impact of Nearest Neighbor Distribution of Fuel Particle on Neutronics Characteristics in Statistical Geometry Model, "Proc. Int. Conf. on Physics of Reactors (PHYSOR 2014), Kyoto, Japan, Sep. 28-Oct. 3, 2014.
- 古村一朗、古川敬(2010):開口合成 3 次元超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の探傷 特性、発電技研技術レビュー Vol.6 pp.13.
- Malmer, C. J. (2001): ICRU Report 63. Nuclear Data for Neutron and Proton Radiotherapy and for Radiation Protection, Medical Physics, Volume 28, Issue 5, pp. 861.
- 松本一浩ほか(1997):緩衝材の飽和透水特性, PNC-TN8410 97-296.

- Nagaya, Y., Okumura, K., Mori, T., Nakagawa, M. (2005) : MVP/GMVP II : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAERI 1348.
- 中島規雄、丹羽登(1992):超音波探傷に関する固体材料の超音波速度の温度係数の測定、非 破壊検査 41(3)
- NEXCO(東・中・西日本高速道路株式会社)(2007):切土補強土工法設計・施工要領,平成19 年1月.
- 日本機械学会(2011):発電用原子力設備規格溶接規格(2011 年追補版)、JSME S NB1-2011.
- 日本機械学会(2012):発電用原子力設備規格 維持規格, JSME S NA1-2012 (2012) EB-3500 許容基準.
- 日本機械学会(2013):発電用原子力設備規格材料規格(2013年追補), JSME S NJ1-2013.
- 日本規格協会 (2009): 溶接後熱処理方法、JIS Z 3700.
- 日本道路協会(2009):道路土工-切土工・斜面安定工指針,平成21年6月.
- 日本道路協会(2012):道路橋示方書・同解説 I共通編 IV下部工編,平成24年3月.
- 日本原子力学会(2010), "使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010", AESJ-SC-F002:2010.
- 日本原子力研究所(1999):臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340.
- 日本コンクリート工学協会(1996):コンクリート便覧(第二版),1996年7月.
- 西川聡、古川敬、古村一朗、堀井行彦(2006):Ni 基合金の溶接金属組織と超音波探傷による欠陥検出性の関係、発電技検レビュー Vol.2, pp.8.
- 西村繭果,棚井憲治,高治一彦,平井卓,白武寿和(2006):緩衝材長期力学挙動評価モデルのパラメータ設定に関する検討, JAEA Research 2006-036.
- OECD/NEA Nuclear Science Committee (2013) : International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA-1486/12.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihash, K. (2007):SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System, JAEA-Data/Code 2007-004.
- 奥村啓介,長家康展 (2011): JENDL-4.0 に基づく連続エネルギーモンテカルロコード MVP 用 の中性子断面積ライブラリーの作成と ICSBEP ハンドブックの臨界性ベンチマーク解 析への適用, JAEA-Data/Code 2011-010.
- 大久保誠介,金豊年(1993):非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤の挙動のシミュレー ション,資源と素材, Vol. 109, pp. 209-214.
- 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘(1987): 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレー ション, 日本鉱業会, Vol. 103, pp. 293-296.
- ORNL (2011) : Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1.
- Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968): On the Generalized Stress-Strain behavior of'Wet' clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp. 535-609.Sandstrom, R. and Andersson, H.C.M. (2008a): The effect of phosphorus on creep in

copper, Journal of Nuclear Materials, 372, 66-75.

- Sandstrom, R. and Andersson, H.C.M. (2008b): Creep in phosphorus alloyed copper during power-law breakdown, Journal of Nuclear Materials, 372, 76-88.
- Sandstrom, R. and Hallgren, J. (2009) : Stress strain flow curves for Cu-OFP, SKB R-09-14.
- Scaglione J. M., Mueller, D. E., Wagner, J. C., Marshall, W. J. (2012) : An Approach for Validating Actinide and Fission Product Burnup Credit Criticality Safety Analyses - Criticality (keff) Predictions, NUREG/CR-7109 and ORNL/TM-2011/514. Schofield and Wroth. (1968): Critical state soilmechanics, McGraw-Hill, London.
- Sekiguchi and Ohta. (1977) : Induced anisotropy and time dependency in cray, Proc.9t ICSMFE, special.
- SKB (2015) : Deponeringsmaskinnen Magne KBS-3V, SKB JANUARI 2015.
- 須田久美子, Sudhir, M., 本橋賢一(1992):腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検
 討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 751-756.
- 杉田裕、真田祐幸、相澤隆生、伊東俊一郎(2012):簡易型弾性波トモグラフィ調査システムの 開発、JAEA-Research 2011-043.
- 須山賢也,望月弘樹,高田友幸,龍福進,奥野浩,村崎穣,大久保清志(2009):連続エネル ギーモンテカルロコード MVP および MCNP を使用する統合化燃焼計算コードシステム

-SWAT3.1, JAEA-Data/Code 2009-002.

- 鈴木英明,藤田朝雄(1999):緩衝材の膨潤特性,JNC TN8400-99-038.
- 高治一彦,杉野弘幸,奥津一夫,三浦一彦,田部井和人,納多勝,高橋真一,杉江茂彦(1999): ニアフィールドの長期構造安定性評価, JNC TN8400 99-043.
- 高治一彦,鈴木英明(1999):緩衝材の静的力学特性,JNC TN8400 99-041.
- 高谷哲,中村士郎,山本貴士,宮川豊章(2013):コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違い がひび割れ発生腐食量に与える影響,土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造),

Vol. 69, No. 2, pp. 154-165.

- 寺浦信之、伊藤邦雄、高橋直樹、櫻井幸一(2011): RF タグの放射線環境下での保全への適用、 日本保全学会第8回学術講演、2011年10月21日.
- 鉄道総合技術研究所(2004):鉄道構造物等設計標準・同解説【コンクリート構造物】, 平成 16 年 4 月.
- 鉄道総合技術研究所(2000):鉄道構造物等設計標準・同解説【土構造物】,平成12年1月.
- USNRC (2011) : Intrusion Detection Systems and Subsystems Technical Information for NRC Licensees, NUREG-1959.
- USNRC (2014): Physical Security Best Practices for the Protection of Risk-Significant Radioactive Material, NUREG-2166.
- 山本健土,秋江拓志,須山賢也,細山田龍二(2015):使用済燃料直接処分の臨界安全評価― 燃焼度クレジット評価のためのデータの整備―(受託研究),JAEA-Technology 2015-019.

溶接学会(2005):【新版】溶接・接合技術特論.

第4章

直接処分施設の設計支援システムの構築

4 章詳細目次

4.	直接処分施設の設計支援システムの構築	
	1) 背景と目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-1
	2) iSRE の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-2
	1) iSRE の開発環境 ······	· 4-3
	 iSRE の全体構成の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-4
	3) インターフェースの試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-6
	1) 「解析データの参照」のインターフェースの試作・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-7
	2) 「解析データの参照」のインターフェースの検証・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-9
	4) データベースの設計および試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-9
	1) 「積算データベース」の基本設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 4-9
	2) 「維持管理補修履歴データベース」の基本設計・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-10
	① モニタリング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-11
	② 点検·····	4-12
	③ メンテナンス・・・・・	4-12
	3) 「統合データベース」の詳細設計および試作・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-13
	$ (1) \nu \not \pi - \flat \cdots \cdots$	4-13
	② 設計のストーリボード・・・・・	4-15
	③ 設計条件	4-15
	 ④ 設計根拠······ 	4-15
	⑤ 議事録	4-15
	⑥ ユーザー管理・・・・・	4-15
	4) 「設計データベース」の詳細設計および試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-16
	① 解析データ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-17
	② 外部 DB ······	4-18
	5) iSRE の試運用 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	4-18
	1) 概要······	4-18
	2) データ登録の試行・・・・・・	4-20
	① 登録データの作成・・・・・	4-20
	② 登録データのファイル名の設定方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-21
	③ データの登録・・・・・	4-21
	3) データ検索の試行・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-23
	① データ検索の概要・・・・・・	4-23
	② データ検索の試行の手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-25
	③ データの検索・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-25
	6) 試運用を通じた課題の抽出および課題解決策の立案・・・・・・・・・・・・	4-30
	1) 検索および登録・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4-30
	2) 操作の利便性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4 - 32

3)	誤操作やトラブルの発生・・・・・ 4	-33
(7)	まとめと今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	-34
参考	文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	-35

4. 直接処分施設の設計支援システムの構築

(1) 背景と目的

使用済燃料の直接処分の工学技術に関する知識化ツールの整備を目的として、百年程度の 長期にわたる処分事業の情報を管理・継承するとともに、蓄積・統合された情報を用いて合 理的な設計・施工管理を可能とする「地層処分エンジニアリング総合支援システム (integrated System for Repository Engineering、以下「iSRE」という)」の構築を行う。

iSRE は以下の項目を実施できるシステムとして構築する。

- ・処分場の工学技術に関する知識化ツールとして、知識情報の管理・継承を行う。
- ・調査・建設・操業・閉鎖の各プロセスでの設計・施工・維持管理に関わる情報の管理を 支援する。
- ・設計に用いるデータを共有し、一元的に管理することで、処分容器、緩衝材、搬送・定置設備、地下施設および地上施設の整合的な設計を支援する。
- 事業期間における情報の増大、技術の進歩に応じて繰り返し行われる設計を支援する。
- ・建設時・操業時・閉鎖時における建設機械や搬送・定置設備などの動作をシミュレーションし、安全な現場作業計画の立案を支援する。
- ・ステークホルダーの理解促進を支援する。

iSREの概念図を図 4-1 に示す。iSRE は、ビューワ機能とデータベース機能を有し、インタ ーフェースにより外部の知識ツール、解析システムやデータベース(以下、「DB」という)な どと接続される。また、「処分場の設計」は iSRE の外で設計の内容に応じた適切な解析ソフ トにより行う。



図 4-1 地層処分エンジニアリング統合支援システム(iSRE)の概念図

iSRE は、国土交通省で推進されている CIM(Construction Information Modeling)を利用し

て開発を行う。「処分場の設計」において作成された「設計データ」である CIM は、CAD など で作成した 3 次元モデルに材料や管理情報などの属性データを関連付けた「データモデル」 と、一つの空間に地下施設や地層などの複数のデータモデルを統合した「統合モデル」で構 成される。「処分場の設計」において作成された CIM データと iSRE 間のデータの受け渡しに は、異なるソフト間でデータを交換するために開発された国際標準である IFC フォーマット (経済調査会, 2013)を採用する。これにより、CIM データは「図面データ」や「地質環境 モデル」として iSRE 内のデータベースに蓄積することを目指す。

平成28年度は、以下の項目の検討を実施した。

- ・インターフェースの試作(表 4-1)((3)に示す)
- ・データベースの設計および試作(表 4-2)((4)に示す)
- iSREの試運用((5)に示す)
- ・課題の抽出および課題解決策の立案((6)に示す)
- ・まとめと今後の課題((7)に示す)

表 4-1 インターフェースの設計および試作項目

インターフェース	基本設計	詳細設計	試作
設計および施工時のデータの作成・更新や参照			
ISIS や e-PAR など既存のデータベースにアクセス			
モニタリングデータ更新			
解析データの参照			

一:平成 27 年度までに検討、 =: 平成 28 年度検討、 --: 平成 29 年度以降に検討

表 4-2 データベースの設計および試作項目

データベース	基本設計	詳細設計	試作
ユーザ管理情報や設計根拠のレポートなどを格納する『統合 DB』			
地形データおよび地質環境モデルを格納する『地形・地質 DB』			
設計にあたり実施した解析のデータを格納する『設計 DB』			
データモデル・統合モデルなどを格納する『図面管理 DB』			
部材数量を元にコスト算出した結果を格納する『積算 DB』			
維持管理段階における情報を格納する『維持管理補修履歴 DB』			

一:平成 27 年度までに検討、 =: 平成 28 年度検討、 == :平成 29 年度以降に検討

(2) iSRE の開発

iSRE 開発の現状と方向性を明確にするため、実用段階を見据えた現段階における開発環境 と、これまで進めてきた開発において挙げられている課題から判明したシステムの全体構成 における追加の機能について述べ、プロトタイプ構築に向けた開発の方針について示す。

1) iSRE の開発環境

iSRE の特徴の一つは、地層処分事業に対する理解の促進という観点において、事業主、設計に携わる技術者、施工業者、ステークホルダーなどが一堂に会し、あるいは同時進行で、処分場の建設・操業・閉鎖の際の状況をイメージしつつ、各段階の安全性などの確認を支援できるシステムであるといえる。こうした概念を可能とする使用方法としては、クラウドサービスの活用が有用であると考えられる。クラウド活用にはいろいろな条件や準備が必要であり、かつ、本開発ではシステム機能などのプロトタイプ構築を優先するため、将来的なクラウドサービスの活用を視野に入れつつ、ネットワークからは切り離した閉じた環境において開発を行う。また、数世代の長期にわたる事業において常に最新のシステム環境の採用を可能とする観点から、特定の OS やソフトウェアに限定しないオープンソフトウェアによりシステムを構築する。システムを構築する上で採用したオープンソフトウェアを表 4-3 に示す。

ここでは、iSRE との情報のやり取りを行うこととなる「次世代型サイト特性調査情報統合 システム(以下、ISIS)」(原子力機構, 2013a)、「電子性能評価レポート(以下、e-PAR)」(原 子力機構, 2013b)についても、仮想環境内に構築した。開発環境の構築イメージを図 4-2に 示す。iSREの開発にあたり表 4-4に示すユーザーPC内にヴイエムウェア社製「VMware Player」 を用いて仮想環境を準備し、仮想環境内のデータサーバに iSRE、ISIS、e-PAR)を構築した。 また、データモデルおよび統合モデルを作成するために必要な CIM ツール(表 4-5)および関 連ソフトウェアをユーザーPC にインストールした。なお、以降はこれらのソフトウェアを表 中に示した略称で呼称する。

ユーザーPC内の仮想環境中に iSRE、ISIS、e-PAR は構築されているが、システムとしては、 それぞれ独立しており、仮想環境中のネットワークを経由してデータのやり取りを行い(5) 項で後述する iSRE の試運用を行う。



図 4-2 開発環境の構築イメージ

項目	ソフトウェア
Web サーバ	Apache 2.4
データベース	PostgreSQL 9.4.5
開発言語	PHP 5.6
3次元モデルビューア	Autodesk View and Date API

表 4-3 システムに採用したオープンソフトウェア

表 4-4 ユーザーPC(iSRE 開発用 PC)環境

PC 構成内容	製品	
PC 本体	VAIO 社製 VAIO Pro13 (SVP132A16N) ・CPU:Core i7 ・メモリー:8GB	
OS	Microsoft 社製 Windiws7 Professional (64bit)	
仮想環境	ヴイエムウェア社製 VMware Player	

表 4-5 CIM ツールおよび関連ソフトウェア

ソフトウェア	目的・概要	報告書中 の略称
Autodesk 社製 AutoCAD Civil3D 2014	地形・地質作成、坑道線形作成、 データモデル作成	Civil3D
Autodesk 社製 Revit Structure 2014	構造物作成、データモデル作成	Revit
Autodesk 社製 Navisworks 2014	統合モデル作成	Navis
Autodesk 社製 Infraworks 2014	地形作成、統合モデル作成	Infra
Autodesk 社製 3ds Max Design 2014	データ変換	3ds Max

2) iSRE の全体構成の検討

平成 27 年度までの iSRE の検討成果を踏まえ、iSRE の機能の全体構成を開発の進捗状況と 併せて整理した結果を図 4-3 に示す。図中、赤色枠の部分は、平成 28 年度に試作までを行っ た機能である。青色枠の部分は、平成 28 年度に基本設計までを行った機能である。黒色枠の 部分は、平成 27 年度までに試作まで行った部分である。白色枠は未着手の機能である。

表 4-6 に iSRE の機能の概要を示す。データベースについては、平成 26 年度までの検討で は、データの種類ごとの縦割り的なデータ管理機能として開発を進めていたが、平成 27 年度 の検討においてデータベースを横断して時系列的に事業の各段階でのイベントに対応するデ ータを抽出する「イベント」機能を追加し、データの種類とイベントに対応付けた 2 次元的 な管理を可能とすることとしている。



図 4-3 本研究の実施範囲

表 4-6 iSRE の機能の概要

機能		概要
		各種のドキュメントを管理する機能群。
		事業申請などの正式な申請書類、各種調査や研究開発の取りま
	レポート	とめレポート類、ならびにその他の種別を指定しない文書を管
		理する機能。
	む卦の	処分場の設計条件を導くための、人工バリアや処分場の長期的
	ストーリボード	な状態の変化をベースとして、設計にて考慮すべき状態を整理
文書管理		した設計のストーリボードを管理する機能。
	設計条件	設計作業を行うにあたっての、前提となる条件を管理する機能。
	設計根拠	設計成果資料などを管理する機能。
		核種移行解析の解析・評価ケースと統合モデルを関連付けて管
	性能評価	理する機能。解析・評価ケースは電子性能評価レポート(e-PAR)
		の情報を参照する機能。
	議事録	各種会議体の議事録を管理する機能。
		iSRE システムを利用する際の基礎となる各種マスタデータの設
設定	ユーザー管理	定や、ユーザー情報の設定(ユーザのログイン情報、権限情報
		など)を管理する機能。
		構造物、設備、処分容器の設計および建設を効率的に行うこと
		を支援する機能群。
	図面データ	構造物、設備、人工バリア、処分容器の設計/建設図面データを
		管理する機能。
モデル管理	解析データ	空洞安定解析、浸透流解析などの解析ソフトウェアで行ったシ
	ガキャリノーン	ミュレーションのデータを管理する機能。
	積算	積算単価および積算結果を管理する機能。
	か 立 DB	緩衝材 DB、グラウト DB などの外部システムの情報へのアクセ
	クト言い レロ	ス窓口を提供する機能。
		地形・地質に関する各種情報を管理する機能群。
地 形•地哲	地質環境モデル	次世代型サイト特性調査情報統合システム(ISIS)のドキュメン
地加加其		ト管理情報の参照および取得をする機能。
	地形・地質	処分場建設地の地形・地質・岩盤の調査結果を管理する機能。
	エータリングデ	「建設・操業時の作業安全性の確認」および、「処分場の閉鎖
モニタリング		時の安全評価」を行うために、各種のモニタリングデータを管
		理する機能。
		建設後の施設維持管理に関する情報を管理する機能群。
維持管理	占桧	地上施設、地下施設、坑道などの、定期、緊急の点検記録を管
小田111 日 7王	~~ (英	理する機能。
	メンテナンス	日常的な施設のメンテナンスに関する記録を管理する機能。
		事業の各段階のイベント(審査・確認など)に関連するモデル
イベント	イベント管理	やドキュメントを決定情報として管理する機能。iSRE 全機能を
		横断した情報をイベント毎に管理する。

(3) インターフェースの試作

iSREを用いて、統合モデルの作成・更新、モニタリングデータの更新、既存データベース へのアクセス、解析データの参照などを効率的かつ効果的に行うには、データの受渡しを行 うインターフェース機能が必要となる。平成28年度は、平成27年度に行った「解析データ の参照」のインターフェース機能の詳細設計結果を精査し、試作を実施した。試作したイン ターフェースは iSRE に組み込み、試運用において動作の確認および運用上の課題の抽出を実 施した。

1) 「解析データの参照」のインターフェースの試作

モデル管理における「解析データ」は、空洞安定解析、浸透流解析などの解析ソフトウェ アで行ったシミュレーションのデータを管理する機能である。図 4-4 (青枠)に示すとおり、 解析システムは iSRE の外部に位置し、長期にわたる地層処分事業において、適切な解析手法 が適用されることを想定している。このため、特定のソフトウェアに依存する機能やファイ ルを対象とせず、汎用性を有するものとする。よって、本インターフェースは、外部解析シ ステムで実施された解析データと解析結果などを管理する設計 DB を接続する。

平成 27 年度の成果に基づき、「解析データの参照」のインターフェースの詳細設計について精査し、見直しを実施した。見直し後の画面および機能を、それぞれ図 4-5 および表 4-7 に示す。



図 4-4 iSRE の機能構成



図 4-5 解析データ画面

No	項目名	コントロール	コントロールの役割	I/O	初期値
1	トピック	ラベル	更新履歴の直近5件分を表示	0	直近の 更新履歴
2	フォルダ階層	ラベル	現在のフォルダの階層	I/0	"トップ"
3	フォルダ編集	ラベル	フォルダの編集	Ι	—
4	ファルダ追加	ラベル	フォルダの追加	Ι	_
5	ファイル追加	ラベル	ファイルの追加	Ι	_
6	概要	ラベル	フォルダの概要	0	トップフォルダ の概要
\bigcirc	名称	テキストボックス	検索条件	Ι	なし
8	更新日_自,至	テキストボックス	検索条件	Ι	なし
9	検索	コマンドボタン	検索実行	Ι	—
10	結果のクリア	コマンドボタン	検索結果のクリア	Ι	—
(11)	すべて	チェックボックス	フォルダ・ファイルの選択	Ι	false
(12)	ダウンロード	コマンドボタン	フォルダ・ファイルのダウンロード	Ι	—
(13)	削除	コマンドボタン	フォルダ・ファイルの削除	Ι	_
(14)	選択	チェックボックス	フォルダ・ファイルの選択	Ι	false
15	フォルダ名	ラベル	フォルダの名称	I/0	—
(16)	ファイル名	ラベル	ファイルの名称	I/0	_
17	概要	ラベル	フォルダの概要	0	フォルダの 概要
18	更新日時 (ヘッダー)	ラベル	フォルダ・ファイルのソート	Ι	_
19	更新日時	ラベル	フォルダ・ファイルの登録日時	0	
20	登録者	ラベル	フォルダ・ファイルの登録者	0	_
(21)	削除	コマンドボタン	フォルダ・ファイルの削除	I/0	_

表 4-7 解析データの画面における機能

※「I/0」列の値 "I":入力のみ、"0":出力のみ、"I/0":入出力あり

2) 「解析データの参照」のインターフェースの検証

試作した「解析データの参照」のインターフェースの検証を実施した。解析データの参照 および更新機能について、後述する「iSRE の試運用」の検索シナリオにそって iSRE として の機能動作、ユーザー側の作業を行い、機能として問題がないことを確認することで検証と した。検証の手順を表 4-8 に示す。

iSRE の機能動作	ユーザー作業
【参照】	
①解析データ画面で解析データを検索	
②解析データ画面で解析結果を PC のローカル環	
境へダウンロード	
	③解析結果を閲覧
【更新】	
①解析データ画面で解析データ、解析結果を PC	
のローカル環境へダウンロード	
	②外部解析システムにて、解析データを用い解析
	を実行(今回未実施)
	③解析結果を PDF 作成(今回未実施)
④解析データ画面で解析データ、解析結果を保存	

表 4-8 「解析データの参照」のインターフェースの検証手順

(4) データベースの設計および試作

iSRE は、処分場の工学技術に関する知識化ツールとして、システム内部のデータベース群 により設計・施工・維持管理・モニタリングなどの情報を管理する。平成27年度までに実施 した「統合データベース」、「図面管理データベース」、「地形・地質データベース」および「設 計データベース」の基本設計、詳細設計、試作の結果に基づき、平成28年度は以下の4つの データベースの設計および試作を実施した。試作したデータベースは iSRE に組み込み、試運 用において動作の確認および運用上の課題の抽出を実施した。

- ・積算データベースの基本設計
- ・維持管理補修履歴データベースの基本設計
- ・統合データベースの詳細設計および試作
- ・設計データベースの詳細設計および試作

1) 「積算データベース」の基本設計

積算データベースは、積算単価および積算結果を管理する機能である。iSREの機能要件に おいて、「⑦設計行為の履歴・記録の管理:何故、その様な設計になったのか、何故その特性 値を選択したのか、どのような解析を行って値を決めたのか、などの履歴や記録を設計情報 とセットで管理する」(原子力機構,2014)とされており、機能の一つとして積算データベー スが位置づけられている。この「積算データベース」の位置づけを図 4-6(赤枠)に示す。 積算システムは、iSREの外部に位置し、長期にわたる地層処分事業において、積算システム、 方法が見直されることを想定している。このため、特定のソフトウェアに依存する機能やフ ァイルを対象とせず、汎用性を有するものとする。



図 4-6 iSRE の機能構成(積算 DB)

トンネルの積算を例として、iSRE に蓄積すべき情報を表 4-9 に整理した。表に整理した積 算項目は、建設工事を発注するために必要な情報であり、設計情報、施工情報とセットで管 理しなければならない。そのため、積算項目の全てを、iSRE として蓄積すべき積算情報とす る。基本設計の概要をまとめた一覧を図 4-7 に示す。

表 4-9 積算の項目(例)

区分	項目(例)
施工計画	掘削機械配置、掘削区分、工法、掘削分類、工事工程表、作業内容、余掘、余巻および余 吹、トンネル工事の機械器具経費積算、工事用仮設備、工事用仮設備の計上、計測工、呼 吸用保護具
施工歩掛	掘削工、支保工、補助工法、インバート工、覆工工、非常駐車帯、工事用仮設備
単価表	掘削、大型ブレーカ、吹付、ロックボルト、鋼製支保工など、インバート掘削工、インバ ートコンクリート工など、覆工コンクリート工など、空気圧縮機械設備組立・解体など

【機能】

工事発注者が積算書類を管理する。数量および費用の算出は iSRE で管理するモデルデータを元に、外部ソフトウェアで行うものとする。

- 【積算結果】
- ▶ 積算書類は任意形式のファイルとして管理する。
- ▶ 積算書類は、階層構造を持つ任意のフォルダを設けて管理できる。
- ▶ フォルダ、ファイルには自由入力形式の備考を登録できる。
- ファイル名、フォルダ名、備考の文字列を対象としたキーワード検索によって、積算書類にアクセスする。
- ▶ 積算結果のファイルをダウンロード、追加、削除する。

【積算単価】

- ▶ 資材、機材、機器の積算単価を管理する。
- ▶ 積算単価は任意形式のファイルとして管理する。
- ▶ 積算単価には、「日付」「名称」「種類」「概要」の属性を持たせる。
- ▶ 資材・機材・機器の別、および積算単価の属性値を対象とした検索機能によって、積算単価ファ イルにアクセスする。
- ▶ 積算単価のファイルをダウンロード、追加、削除する。

図 4-7 「積算データベース」の基本設計の概要

2) 「維持管理補修履歴データベース」の基本設計

「維持管理補修履歴データベース」は、「モニタリング」、「点検」、「補修(メンテナンス)」 の機能で構成されている。各機能について基本設計を実施した。「維持管理補修履歴データベ ース」の位置づけを図 4-8 (赤枠) に示す。モニタリングシステムは、iSRE の外部に位置し、 長期にわたる地層処分事業において、多岐にわたるモニタリングが実施されることを想定し ている。このため、特定のソフトウェアに依存する機能やファイルを対象とせず、汎用性を 有するものとする。



図 4-8 iSRE の機能構成(維持管理補修履歴 DB)

① モニタリング

モニタリング機能は、「建設・操業時の作業安全性の確認」および「処分場の閉鎖時の安全 評価」を行うために、各種のモニタリングデータを管理する機能である。モニタリング機能 により iSRE に蓄積すべき情報(モニタリング項目の例)を表 4-10 に整理した。

段階	目的/分類	モニタリング項目(例)
建設時	坑道の維持管理	坑内観察調査、天端沈下測定、内空変位測定など
操業~	処分場の構成物の劣化	岩盤の温度、隙間の変形、処分場近傍の岩盤応力、湧水
閉鎖後		量、支保の状態、処分場の温度、湿度
	処分容器と緩衝材の挙動	パッケージのひずみ、腐食速度、温度、近傍の湿度、排
		水中の放射能、発生ガス、緩衝材の膨潤圧
	ニアフィールドの化学的相互作用	ニアフィールドの温度、湿度、坑道壁面の鉱物、化学、
		生物学的変化、含水比、圧力、化学特性
	地圏の変化	地下水の水圧、化学特性

表 4-10 モニタリング項目の例(操上ほか, 2010)

モニタリング項目の特徴は以下のようにまとめられる。

- モニタリング項目の種類、内容は多岐にわたり、膨大なデータ量となる。
- 各段階で求められるモニタリング項目も変化する。
- ・ 地層処分施設は、様々な情報を同時に取り扱う。
- センサー情報は、継続的に外部のモニタリングシステムへ蓄積される。
 (外部のモニタリングシステムに蓄積される情報を iSRE にも登録すると、データの二 重管理となり、データ管理の観点から望ましくない。)
- モニタリングとして、外部のモニタリングシステムにて自動的に取得されるモニタリングデータと、施設管理者が点検行為により作成したモニタリング帳票の2種類がある。

以上の特徴に基づき、「建設・操業時の作業安全性の確認」および「処分場の閉鎖時の安全 評価」を行うために、各種のモニタリングデータを管理する「モニタリング」の機能を以下 のように設定した。ここで、現時点では外部のモニタリングシステムとの連携は考慮せず、 モニタリングデータの登録、検索、閲覧のみを実装する。

- 任意形式のファイルとしてモニタリングデータを登録・管理する機能とする。
- ・ モニタリングデータのダウンロード、追加、削除を行う。
- モニタリングデータは、属性として観測項目、観測対象、観測期間、観測情報を持つ。
- ・ 属性値の検索機能で、モニタリングデータにアクセスする。

2 点検

点検機能は、地上施設、地下施設、坑道などについての定期・緊急の点検記録を管理する 機能である。点検機能により iSRE に蓄積すべき情報を表 4-11 に整理した。点検項目として iSRE で蓄積すべき情報の特徴は、以下のようにまとめられる。

- ・ 建物、トンネル、設備といった土木・建築施設については、点検方法が構築され、実際に運用されていることから、地層処分施設へ適用可能であると想定できる。
- 現状の点検では、帳票(電子)に点検記録、写真、損傷図、補修の判断といった情報 が集約されている。
- ・ 国土交通省では、CIM を用いた点検の検討が進められているが、実用には至っていない。
- ・ CIM を用いた点検手法が確立するまでは、既往の点検手法と得られる帳票を iSRE に蓄 積するものとする。

段降	皆	目的	点検項目
	日常点検		・目視調査
維持管理	定期点検	トンネルに係る維持管理を適切に行うた めに必要な情報を得る。	 ・目視調査 ・打音検査 ・

表 4-11 点検項目の例

以上の特徴に基づき、地上施設、地下施設、坑道などの定期および緊急の点検記録を管理 する「点検」の機能を以下のように設定した。

- 点検記録は任意形式のファイルとして管理する。
- ・ 点検記録ファイルのアップロード、ダウンロード、追加、削除を行う。
- ・ 点検記録ファイルには「施設種別」、「日付」、「名称」、「健全性」、「概要」の属性値を 持たせる。
- ・ 属性値の検索機能で、点検記録ファイルにアクセスする。

③ メンテナンス

メンテナンス機能は、日常的な施設のメンテナンスに関する記録を管理する機能である。 「メンテナンス」のデータベースにおける特徴は、以下のようにまとめられる。

- 前述の点検と同様、坑道、地上施設、設備、作業機材もメンテナンスに包括している。
- ・ 点検、メンテナンスにおける CIM を活用した維持管理については、国土交通省におい

ても検討中である(平成28年度時点)。

- ・ iSRE の試作では、メンテナンスの登録、検索、閲覧のみを実装するものとする。
- iSREの運用段階では、今後の点検、メンテナンスにおける CIM を活用した維持管理を 踏まえ、改めて基本設計、詳細設計、機能実装を実施することが望ましい。

以上の特徴に基づき、日常的な施設のメンテナンスに関する記録を管理する「メンテナンス」 の機能は以下のように設定した。

- ・ メンテナンス記録は、任意形式のファイルとして管理する。
- ・ 構造物、設備などの項目を選択してメンテナンス記録を検索する。
- 記録名に含まれるキーワードを指定してメンテナンス記録を検索する。
- ・ メンテナンス記録ファイルをダウンロード、追加、削除を行う。
- メンテナンス日、変状種類、メンテナンス概要をメンテナンス記録ファイルとは別に 登録し、参照可能とする。

3) 「統合データベース」の詳細設計および試作

「統合データベース」は、「レポート」、「設計のストーリボード」、「設計条件」、「設計根拠」、 「性能評価」、「議事録」、「ユーザー管理」の機能で構成され、外部の文書ソフトなどで作成 される各種文書は、データとして長期に渡る地層処分事業において随時 iSRE に登録されるこ とを想定している。このため、特定のシステム、ソフトウェアに依存する機能、ファイルを 対象とせず、汎用性を有するものとする。また、「ユーザー管理」は、iSRE を利用するユー ザーを、付与された権限で分類し、アクセスできるデータを制限することを想定している。 「統合データベース」の位置付けを図 4-9 (赤枠) に示す。

平成28年度は、平成27年度に既に詳細設計・試作まで完了している「性能評価」以外の 機能について、基本設計の精査を実施後、詳細設計および試作を行った。本項目では、「統合 データベース」における詳細設計および試作で作成した「画面」および「画面のコントロー ル」を、「レポート」を例として示す。



図 4-9 iSRE の機能構成(統合 DB)

① レポート

「レポート」機能は、申請書類や取りまとめレポートのような種別を指定しないその他の

文書データを管理する機能である。詳細設計および試作で作成した「画面」および「画面の コントロール」を図 4-10 および表 4-12 に示す。

	文書管理 モデル管理 地形・地質 エータル・ク ■トップ → フォルダニ → フォルダ×× → ま	
設計のストリ ⑨	名称	□ ~ □ <u>検 来</u> 結果のクリア < 8
設計条件	1 7×1 []]	
設計根拠 (12)		更新日時 登録者 削厚 2015/4/22 00:00 際環 一郎 (※) 2015/4/23 00:00 防環 一郎
性能評価		2015/4/22 00:00 [RAT - IR (K) 2015/4/22 00:00 [RAT - IR (K)
レポート		2015/4/22 00.00 原理 一郎 🛞
	(4)	

(CAEA)

図 4-10 文書管理/レポート画面

No	項目名	コントロール	コントロールの役割	I/O	必須	初期値
1	フォルダ階層	ラベル	現在のフォルダの階層	I/0		"トップ"
2	ファルダ追加	ラベル	フォルダの追加	Ι		—
3	ファイル追加	ラベル	ファイルの追加	Ι		—
4	名称	テキストボックス	検索条件	Ι		なし
5	更新日_自	テキストボックス	検索条件	Ι		なし
6	更新日_至	テキストボックス	検索条件	Ι		なし
\bigcirc	検索	コマンドボタン	検索実行	Ι		—
8	結果のクリア	コマンドボタン	検索結果のクリア	Ι		—
9	すべて	チェックボックス	フォルダ・ファイルの選択	Ι		false
10	ダウンロード	コマンドボタン	フォルダ・ファイルのダウンロード	Ι		—
(11)	削除	コマンドボタン	フォルダ・ファイルの削除	Ι		—
(12)	選択	チェックボックス	フォルダ・ファイルの選択	Ι		false
(13)	フォルダ名	ラベル	フォルダの名称	I/0		—
(14)	ファイル名	ラベル	ファイルの名称	I/0		_
(15)	更新日時	ラベル	フォルダ・ファイルの登録日時	0		_
(16)	登録者	ラベル	フォルダ・ファイルの登録者	0		—
(17)	削除	コマンドボタン	フォルダ・ファイルの削除	I/0		_

表 4-12 文書管理/レポートの画面における機能

※「I/0」列の値 "I":入力のみ、"0":出力のみ、"I/0":入出力あり

② 設計のストーリボード

「設計のストーリボード」機能は、処分場の設計条件を導くための議論の枠組みを与える ために作成されたストーリボードのデータを管理する機能である。ストーリボードとは、直 接処分を行う際に想定される現象について、人工バリア周辺の空間スケールおよび時間スケ ールごと、処分容器や緩衝材、岩盤の状態や核種の移行に関連するプロセスを、概念図など を用いて表現したものであり、イベントなどに応じて随時再検討される。こうして作成され たストーリボードのデータを登録し、各段階で作成・登録されたデータを時系列やキーワー ドで検索を可能とする。

③ 設計条件

「設計条件」機能は、設計作業を行うにあたって作成された前提となる条件のデータを管 理する機能である。

④ 設計根拠

設計根拠機能は、設計成果の根拠資料として作成されたデータを管理する機能である。

⑤ 議事録

「議事録」機能は、各種会議体の議事録データを管理する機能である。

⑥ ユーザー管理

「ユーザー管理」機能は、iSRE システムを利用するユーザーのログイン情報、権限情報などを管理する機能である。

4) 「設計データベース」の詳細設計および試作

「設計データベース」は、「解析データ」と「外部 DB」の機能で構成される。平成 28 年度 は、「解析データ」と「外部 DB」の機能について、詳細設計および試作を行った。「設計デー タベース」の位置づけを図 4-11 (赤枠)に示す。「解析データ」は、前述の「解析データの 参照」のインターフェースと関連している。「外部 DB」は、緩衝材基本特性 DB などと連携す るため、「外部 DB」の機能を確認するためのインターフェースも併せて詳細設計を行う。本 項目では、「設計データベース」における詳細設計および試作で作成した「ER 図 (Entity Relationship Diagram)」および「試作画面」を、「解析データ」を例として示す。



図 4-11 iSRE の機能構成(設計 DB)

解析データ

「解析データ」機能は、空洞安定解析、浸透流解析などの解析ソフトウェアで行ったシミ ュレーションのデータを管理する機能である。

一般的にデータベースにおける機能は、機能の実体がどういった属性により構成されてい るかで示すことができ、データの管理や検索もまた属性に支配されることにより機能する。 ここに、データベースにおける機能の実体である「解析データ」(四角形上部)と属性(四角 形下部)の関係を示した ER 図(Entity Relationship Diagram)を図 4-12 に示す。また、図 4-13 にモデル管理メニューの中の「解析データ」画面の試作結果を示す。

解析デ		解析	データ_トピック	
РК	ID	РК	ID	
	フォルダ or ファイル区分		更新内容	
	フォルダ名		更新日時	
	ファイル名			
	解析概要			
	ユーザーID			
	親階層ID			
	更新日時			
	• •	 		

図 4-12 解析データの ER 図

SDE		管理者のシステム管理者	
JAL	文書管理 天子川管理 形态地質 无二约几分 被侍管理 設定	1737 1 0379F	
モデル管理 図術管理 解研テータ 私算	Topic 19日本にから行われるからの17ファイルを通知しました。 19日本がんがわれるからの17ファイルを発知しました。 19日本がんがわれるからの17ファイルを発知しました。 19日本がんがわてイルを発行しました。 19日本がんがこの12日が見た。 19日本の1日にからりました。 19日本の1日にからりました。	2017 201-04 10.3 2017 201-04 10.3	724 155 151 140 130
9186DB	"複要:		
	名称: 更新日:	一 枝 平 結果	のクリア
	⊡t≪č	50%-F	(#k
	ファイル 複略 D Manayass pgf	更新日時 登録者- 2017-01-04 10:37 24 admin	南京 和限
	□ = 学術を定解析明白書 主要-連続功書_ Light pat	2016-12-07 11:33:50 admin	削除
	La 空洞实定和新報告者_组分和者_B	2016-12-07 11.33.00 admin	nim
	□ 空洞安定解析報告書_卫统_投計 pot	2016-12-07 11:33:50 admin	相除
	□ 広阪地下水流動時新 複要調査 pdf □ 広規矩下水流動動新インブッチェータ	2016 12:07 11:35:16 admin	RIB2
	Lasef per	2016-12-07 11:37:28 admin	削除
	Lasez pur	2016-12-07 14:53:23 admin	Alle
	case1 (2577)に30 (第107 a pd) (250 方法) (新聞)(第10 7 b pd) case1 (1) (注意) (1) (方) pd)	2016-12-07 14:53:23 admin	削除
	□ ■ 毎分抗道 創業解析・ルフットテーク	2016-12-07 14:53:23 admin	利除
	□ ● 約分に通 ● 開催解析 ・ ジャ・データ	2016 12-07 14:53:23 admin	Alla
	□ ● 処分抗道 計算時代・レスペルデータ	2016-12-07 14:53:54 admin	AIR
	□ ■ 総分に直動開催用インワットデータ	2016-12-07 14:53:54 admin	利除
	□ ● 25.5% 新聞業務指示シストルテーク ● 25.5% 通貨業務指示シストルテーク	2016-12-07 14:53:54 admin	削除
	□ ■ 施分抗進 耐濃解析 センブ・データ	2016-12-07 14:53 54. admin	和除
	□ ■ 急分振道長期力学解析インプ→チテータ	2016-12-07 11.43.24. admin	一刑除
	■ 協力に適量制力で解析・(ンプッチェータ)	2016-12-07 11:43:24 admin	MIER

図 4-13 解析データ画面(試作)

外部 DB

「外部 DB」機能は、緩衝材データベース、グラウトデータベースなどの外部システムの情報へのアクセス窓口を提供する機能である。平成28年度の試作は「緩衝材基本特性データベース」を対象として行った。

(5) iSRE の試運用

1) 概要

処分事業は調査から建設~操業~閉鎖まで数世代にわたる大規模なプロジェクトであり、 事業の進展とともに保管・蓄積されるデータ量が増大し、多くの技術者が携わることが想定 される。そのため、事業におけるデータの運用においては、正確にデータを継承し、必要と なるデータを入手できることが重要となる。処分事業における各段階において想定されるデ ータのやり取りの概要を以下に示す。

- ▶ 調査段階:調査・収集データの登録
- ▶ 設計段階:調査データの検索、設計データの登録
- 建設段階:設計データの検索、施工データの登録、設計変更などにおける蓄積データの検索/更新/登録
- 操業段階:廃棄体管理データの登録、計画変更・維持管理などにおける蓄積データの 検索と検討データの登録
- ▶ 閉鎖段階:閉鎖に伴う施工・品質・モニタリングなどのデータの登録

以上に示すとおり、事業の各段階におけるデータのやり取りには、データの登録/検索、 検索したデータの更新/登録がある。また、調査から閉鎖までの全段階で必要に応じて実施 される性能評価において、データの検索および評価データの登録がある。

本項目では、平成27年度までと平成28年度に試作したiSREのデータベースおよびインタ ーフェース機能(図4-14)の一部を利用し、地層処分事業で行われるデータのやり取りを想 定したシナリオを設定してiSREにおけるデータの登録および検索の試運用を実施した。

試運用における対象構造物は、簡略的に立坑1本と地下水平坑道の一部とする。試運用で は、「地上からの調査段階」「地下施設の建設段階」「操業段階」において実施するステップを 想定し、各ステップにおけるデータベースとのやり取りについて試行する。各段階における 作業ステップとデータベースの関係と、試行の実施範囲(登録:図中の青枠で囲んだ部分、 検索:図中の赤枠で囲んだ部分)を図 4-15 に示す。


図 4-14 iSRE の全体機能および試運用の適用範囲



図 4-15 試運用における検討ステップ

2) データ登録の試行

調査・建設段階の作業ステップにおいて作成された、新規データおよび条件の変更に伴う 更新データの登録を試行することを目的とし、表 4-13 に示す「地上からの調査」~「水平坑 道の再施工」の各ステップにおいて作成されるデータの登録を試行した。本項目では、本試 行において使用する登録データの作成概要、登録データのファイル名の設定方法を示し、作 成したデータの登録を試行する。

ステップ	発生する作業の例	取得/登録先		
地上からの調査	 ・ボーリング柱状図、各種試験・ 探査データ、地質図などのデータの抽出・整理 	ISIS からの取得 地形・地質 DB への登録		
	・簡易地質 3D モデルの作成	地形・地質 DB への登録		
地下施設の設計条件整 理	・地質断面図、各土層の物性など の設計条件の整理	統合 DB「設計条件」への登録		
	・構造毎の設計計算書の作成	統合 DB「設計根拠」への登録		
地下施設の設計	・代表構造の図面の整理	図面管理 DB への登録		
	・施設の簡易構造 3D モデル作成	図面管理 DB への登録		
	施工に基づく地質情報として簡	地形・地質 DB への登録		
立垣の施工	易地質 3D モデルを更新	必要に応じた ISIS への登録		
	施工実績として図面および簡易 構造 3D モデルを更新	図面管理 DB への登録		
	断層発見に関わる調査資料、検討	統合 DB「レポート」、「設計根拠」、「議		
水亚位道の協工/断層	資料の作成	事録」への登録		
小十九道の旭工/ 岡層の発見/ 施工山断	設計変更協議、合意・了承	図面 DB への登録		
	断層情報を反映した簡易地質 3D	地形・地質 DB への登録		
	モデルの更新	ISIS への登録		
水平坑道の設計の見直	設計変更の設計計算書および図	図面 DB への登録		
l	面の作成	統合 DB「設計根拠」への登録		
水亚坊道の再施工	施工実績として図面および簡易	図面管理 DB への登録		
小十元垣の竹旭工	構造 3D モデルを更新	地形・地質 DB への登録		

表 4-13 各ステップにおける作業の例

① 登録データの作成

iSRE に登録するデータファイルとして、既往公開文献を収集整理し、調査情報、設計根拠、 設計計算書、工事記録などに該当するファイル (PDF) をで作成した。作成したデータファイ ルのイメージ (例) を図 4-16 に示す。



② 登録データのファイル名の設定方法

登録にあたっては、ファイル検索時において重要な要素の一つとなる「ファイル名」について、iSRE 運用上のルールの一例として、以下のような設定方法とした。

ファイル名称=「1(タイトル)_2(対象)_3(分類)_4(位置)」

- ここに、1 (タイトル):ファイルの内容を自由に表現
 - 2(対象):対象とする施設、構造物、設備の名称など。例えば地質、地下施設、立 坑、処分坑道、人工バリア、廃棄体、緩衝材、搬送設備、etc.
 - 3(分類):事業工程や情報の区分。例えば、調査、設計、安全評価、操業、閉鎖、 モニタリング、点検、補修など
 - 4(位置):平面や深度の位置に関する情報
 - (例)「設計計算書_処分坑道_基本設計_エリア a」

なお、上記の2(対象)、3(分類)、4(位置)は可能な範囲でファイル名称に含めること とし、必須ではないこととした。

③ データの登録

図 4-15 に示す各ステップの順に、データの登録を実施し、保存された登録データの取り出 しが可能であることを確認した。登録したデータファイルの一覧を表 4-14 に示す。

段階	No.	登録ファイル名	iSRE 登録先	保存	備考	
	1	ボーリングコアおよび BTV 観察結果.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	2	ボーリングコア力学物性試 験.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	3	ボーリング調査の割れ目デ ータ.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	4	ボーリング孔の水圧モニタ リング結果.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	5	ボーリング調査報告書.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	6	三軸圧縮試験による岩石強 度特性.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	7	力学試験データ.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	8	処分深度の岩盤力学調 査.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
地上かた	9	初期地圧測定.pdf	地形・地質/地形・地質データ	✓	1	
地工がらの調査	10	地下水化学特性.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
♥ 2 10月 旦.	11	表層水理観測データ.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	12	サイトスケール水理地質構 造モデル_初期段階 _ver1.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	13	サイトスケール地質構造モ デル_ver1.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	14	サイトスケール水理地質構 造モデル_データセッ ト.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	15	広域地質環境モデル.nwd	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
	16	中域地質環境モデル.nwd	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
	17	処分場スケール地質環境モ デル.nwd	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
設計条件 整理	18	設計条件の設定.pdf	文書管理/設計条件	1	1	
	19	立坑の設計.pdf	文書管理/設計根拠	1	1	
	20	図面_立坑(当初設計).dwg	モデル管理/図面管理	1	✓	
	21	構造3Dモデル(立坑).nwd	モデル管理/図面管理	~	1	
地下施設	22	水平坑道の設計.pdf	文書管理/設計根拠	1	1	
設計	23	図面_水平坑道(当初設 計).dwg	モデル管理/図面管理	1	1	
	24	構造3Dモデル(水平坑 道).nwd	モデル管理/図面管理	1	1	
	25	立坑工事記録.pdf	文書管理/レポート	\checkmark	✓	
	26	工事写真_立坑.pdf	文書管理/レポート	\checkmark	✓	
	27	工事諸元算出資料.pdf	文書管理/レポート	1	1	
	28	図面_立坑(竣工).dwg	モデル管理/図面管理	\checkmark	✓	
支持の	29	構造3Dモデル(立坑)竣 工.nwd	モデル管理/図面管理	1	1	
施工	30	サイトスケール水理地質構 造モデル_モデル更新 _ver2.pdf	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
	31	サイトスケール地質構造モ デル_ver2.pdf	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
	32	処分場スケール地質環境モ デル rev1.nwd	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得

表 4-14 iSRE に登録したデータ (1/2)

段階	No.	登録ファイル名	iSRE 登録先	保存	登録確認	備考
	33	水平坑道工事記録その 1.pdf	文書管理/レポート	1	1	
	34	壁面地質調查.pdf	文書管理/レポート	1	1	
水平坑道	35	工事写真_水平坑道.pdf	文書管理/レポート	1	1	
の施工	36	図面_水平坑道(竣工 1).dwg	モデル管理/図面管理	1	1	
	37	構造 3D モデル(水平坑道) 竣工 1. nwd	モデル管理/図面管理	1	1	
	38	断層調查情報.pdf	地形・地質/地形・地質データ	1	1	
	39	サイトスケール水理地質構 造モデル_モデル更新 _ver3. pdf	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
祠笡	40	サイトスケール地質構造モ デル_ver3.pdf	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
	41	処分場スケール地質環境モ デル rev2.nwd	地形・地質/地質環境モデル	1	1	ISIS か ら取得
対策協	42	対策検討資料.pdf	文書管理/レポート	1	1	
議・ 方針検討	43	会議議事録.pdf	文書管理/議事録	1	1	
	44	設計条件の設定その2.pdf	文書管理/設計条件	1	1	
水亚齿道	45	水平坑道の設計その2.pdf	文書管理/設計根拠	1	1	
ホー 50 道 の設計見 直1	46	図面_水平坑道(設計変 更).dwg	モデル管理/図面管理	1	1	
直し	47	構造 3D モデル(水平坑道) 設計変更 1. nwd	モデル管理/図面管理	1	1	
水田時房	48	水平坑道工事記録その 2.pdf	文書管理/レポート	1	1	
小平切道 の 西 施 工	49	図面_水平坑道(竣工 2).dwg	モデル管理/図面管理	1	1	
丹旭上	50	構造 3D モデル (水平坑道) 竣工 2. nwd	モデル管理/図面管理	1	1	

表 4-14 iSRE に登録したデータ(2/2)

3) データ検索の試行

① データ検索の概要

データの検索は、処分事業のある段階において、過去の記録やデータを確認・参照する必 要性が生じた場面において実施されることが想定される。このような場面の具体的な例とし て以下のケースが考えられる。

- ▶ 点検やモニタリングなどにより異常が確認された場合
 - ✓ 核種の漏洩を検知
 - ✓ 支保工の破損を確認
 - ✓ 湧水量の急増を確認、etc.
- ▶ 前提条件の変更により安全評価や設計を見直す場合
 - ✓ 掘削などによる新たな地質情報の追加
 - ✓ 規制基準の見直し
 - ✓ 社会情勢に伴う事業計画の見直し、etc.

前者の「異常が確認された場合」では、地質条件や、廃棄体の特性・定置状況、施工記録、 計測値などの確認が必要となる。一方、後者の「安全評価や設計を見直す場合」では、当初 の評価や設計の内容を確認する必要が生じ、こうした状況においてデータの検索が必要とな る。 本試行では、「水平坑道の設計の見直し」から「維持管理」までのステップにおいて以下の シナリオを設定し、iSRE に格納されたデータの検索を試行した。

▶ 「水平坑道の設計の見直し」~「水平坑道の再施工」

→建設段階のシナリオ:「掘削などによる新たな地質情報の追加」

▶ 「維持管理」

→操業段階のシナリオ:「支保工の破損を確認」

ここで、検索の試行における iSRE の画面の例として、「支保工の破損の確認」におけるデ ータの検索の画面イメージを図 4-17 および図 4-18 に示す。



図 4-17 「地形・地質/地形環境モデル」画面における 地質構造モデルの検索イメージ



② データ検索の試行の手法

検索の試行においては、処分事業における保管・蓄積データ量および操作者の増大を考慮 する必要がある。本試行では、検索の容易性を確認し、より効果的に課題を抽出する試行の 目的に鑑み、検索用に 254 項目のデータファイルを作成して iSRE における各データベースに 格納し、さらに、登録データやその内容を事前に知らされていない複数の試行者がデータの 抽出作業を実施することとした。

③ データの検索

・建設段階のシナリオにおける検索

水平坑道建設中に遭遇した断層および破砕帯が当初の想定より高透水性であり、当面の 対策工のほか、処分場の長期安全性の観点からの検討が再実施される状況を想定する。ま た、当該断層の影響は大きいことから、対策工あるいは設計変更が必要と判断され、過去 の実績や事例調査により計画を見直す状況を想定する。このシナリオに対する作業の流れ と、各作業に対し必要な確認事項の関係を図 4-19 に示す。また、具体的な事例として、検 討作業で提示された対策オプションの例を図 4-20 に示す。

図 4-19 に示す各ステップの確認事項に対して、iSRE 登録データから検索を試行したデ ータの一覧を表 4-15 に示す。



※新規作業:調査結果や検討の結果などの本シナリオで作成される新規の成果

図 4-19 建設段階のシナリオで想定する作業の流れと必要な確認事項



【対策1】破砕帯から廃棄体を離して定置



【対策2】破砕帯の両端にプラグ設置



【対策3】破砕帯を避けてパネルを小規模化

図 4-20 対策オプションの例

確認事項	検索データ	iSRE 登録先
水質地質構造モデル	サイトスケール水理地質構造モデル_モデ ル更新_ver3	地形・地質/地質環境モデル
水理解析用物性值	地下水流動特性調查報告書_精密調查	地形・地質/地形・地質デー タ
水理解析モデル・インプッ	設計パラメータ設定根拠資料_処分坑道_ エリア c	文書管理/設計条件
トデータ	処分場スケール地下水流動解析インプッ トデータ case1~2	モデル管理/解析データ
水理解析報告書	処分場スケール地下水流動解析報告書_精 密調査	モデル管理/解析データ
安全評価の報告書	シーリング方法の検討	文書管理/設計根拠
検討報告書	処分場スケール地下水流動解析報告書_精 密調査	モデル管理/解析データ
	シーリング方法の検討	文書管理/設計根拠
議事録	地下施設の設計に関する検討委員会議事 録_日付3	文書管理/議事録
対象地盤の設計用物性値	設計パラメータ設定根拠資料_処分坑道_ エリア c	文書管理/設計条件
設計計算書	設計計算書_処分坑道_詳細設計_エリア c	文書管理/設計根拠
水理解析用物性值(再揭)	地下水流動特性調查報告書_精密調查	地形・地質/地形・地質デー タ
水理解析モデル・インプッ	設計パラメータ設定根拠資料_処分坑道_ エリア c	文書管理/設計条件
トデータ (再掲)	処分場スケール地下水流動解析インプッ トデータ case1~2	モデル管理/解析データ
水理解析報告書 (再揭)	処分場スケール地下水流動解析報告書_精 密調査	モデル管理/解析データ
安全評価の報告書(再掲)	シーリング方法の検討	文書管理/設計根拠

表 4-15 iSRE 登録データから検索したデータ(建設段階のシナリオ)

・操業段階(維持管理)のシナリオにおける検索

立坑構築から数十年後に立坑の覆工表面に発生したクラックの原因の推定・分析、補修 方法の検討および補修工実施に向けた検討を想定する。このシナリオに対する作業の流れ と、各作業に対し必要な確認事項の関係を図 4-21 に示す。また、具体的な事例として、ひ び割れに対する評価の例(国土交通省, 2014)を表 4-16、また、ひび割れ補修方法の選定 例(日本コンクリート工学会, 2013)を図 4-22 に示す。

図 4-21 に示す各ステップの確認事項に対して、iSRE 登録データから検索を試行したデ ータの一覧を表 4-17 に示す。



※新規作業:調査結果や検討の結果などの本シナリオで作成される新規の成果

図 4-21 操業段階のシナリオで想定する作業の流れと必要な確認事項

評価		ひび割れの概要
Ι		ひび割れが生じていない、または生じていても軽微 で、措置を必要としない状態
	∏ a	ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来 的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監 視を必要とする状態
П	∏ b	ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構 造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な 監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必 要とする状態
Ш		ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れな どがあり、構造物の機能が低下しているため、早期 に対策を講じる必要がある状態
IV		ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび 割れなどがあり、構造物の機能が著しく低下してい る、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要が ある状態

表 4-16 ひび割れに対する評価の例



図 4-22 ひび割れ補修方法の選定例

確認事項	検索データ	iSRE 登録先
竣工図	図面_立坑 2_竣工図	モデル管理/図面データ
設計図書	アクセス坑道設計計算書_立坑 2_詳細 設計	文書管理/設計根拠
点検記録	—	—
維持補修記録	_	_
坑内変位の経時変化	工事記録_立坑 2_建設	文書管理/レポート
湧水量などのその他の計測値	工事記録_立坑 2_建設	文書管理/レポート
坑内変位の経時変化(再掲)	工事記録_立坑 2_建設	文書管理/レポート
周囲の地盤条件(工事写真/工事	工事記録_立坑 2_建設	文書管理/レポート
記録)	工事写真_立坑 2_建設	文書管理/レポート
	設計パラメータ設定根拠資料_立坑2	文書管理/設計条件
周囲の地盤条件(地盤モデル)	サイトスケール地質構造モデル_ver3	地形・地質/地質環境モ デル
周囲の地盤条件(近傍のボーリン グデータ)	ボーリングデータ_概要調査_エリア b2	地形・地質/地形・地質 データ
対象土壌の設計用物性値	土質試験調查報告書_B 層_精密調查	地形・地質/地形・地質 データ
	設計パラメータ設定根拠資料_立坑2	文書管理/設計条件
対象土壌の室内試験データ	土質試験調查報告書_B 層_精密調查	地形・地質/地形・地質 データ
コンクリート配合など使用材料 (工事記録)	工事記録_立坑 2_建設	文書管理/レポート
対象土壌の範囲(工事写真/工事	工事記録_立坑 2_建設	文書管理/レポート
記録)(再揭)	工事写真_立坑 2_建設	文書管理/レポート
	設計パラメータ設定根拠資料_立坑2	文書管理/設計条件
N家工場の範囲(地盤モアル)(再 掲)	サイトスケール地質構造モデル_ver3	地形・地質/地質環境モ デル
3D構造モデル		_
竣工図	図面_立坑 2_竣工図	モデル管理/図面管理

(6) 試運用を通じた課題の抽出および課題解決策の立案

システムの試運用および委員会などから抽出された課題と課題解決に向けた具体的な対応 策について、以下に示す。抽出した課題は、「検索および登録の課題への対応」、「操作の利便 性の課題への対応」、「誤操作やトラブル発生の課題への対応」の大きく3つに分類して整理 した。

1)検索および登録

膨大なデータの中から必要なデータを検索・抽出する困難さの課題に対し、検索および登録の方法として、以下の対応策を検討した。

・イベント機能

- [課題] 複数の関連データが異なる登録先にまたがって保存されている場合、検索漏れが発 生する危険性がある。
- ⇒ iSRE内の異なるデータベースに登録された任意のデータに対し、データをイベント名で リンクさせることにより関連データの一括抽出を可能とする「イベント機能」を追加する (一つのデータには複数のイベントを登録可能)。これにより、iSRE 全機能を横断した情 報をイベント毎に管理を可能とする。イベント機能のリンクおよび画面のイメージを図 4-23 および図 4-24 に示す。



1721	イベント	对象明耀	9	~			
	■トップ → 東京語可申請 35条期間:2015/10/12-2016/05/21 3	KME I SZABIPI				作成者:原	環一部 編進
イベントの情報。	処分場事業の認可申請にかかる書類、図	面等一式。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・					
							イベントを追加
1	1421	更新日時	種別	対象期間	状態	関連資料	削除
イベントにぶら下がる	DARS	2015/4/22 00:00:00	TAYL	2012/5/20 - 2016/11/20	かいを見たり	07744	(*)
のイベントー	<u>与主要是</u> 要要許司由號	2015/4/22 00:00:00	INVE	2013/5/20 - 2016/11/20	第7	37744	8
	MARKET PL TOPH	2015/4/22 00:00:00	TOOL	2013/5/20 - 2016/11/20	机硬曲	077414	(8)
		2015/4/22 00:00:00	イベント	2013/5/20 - 2016/11/20	処理中	3ファイル	×
					2	ウンロード	ファイルを追加
	JPTIN	更新日時	種別				削除
イベントに登録された	「住宅評価資料	2015/4/22 00:00:00	レポート				(x)
ルの一覧。	□ 新而詳細図設計線線資料	2015/4/22 00:00:00	29:5+49:M				(X)
A ST AC CONSTRUCT	- 事業申請自利	2015/4/22 00:00:00	レポート				(X)
	1/2山本伝道区間1モデルモー	2015/4/22 00:00:00	國而等理				2
		2015/4/22 00:00:00	1215 〒 タ				9

図 4-24 イベント機能の画面イメージ

全体検索機能

[課題]得たい情報の登録先が明瞭でない場合などに iSRE 全体を検索できる機能がない。

- ⇒ 現状のシステムでは登録先を限定した状態での検索しかできないため、全登録先(全デ ータ)を対象とした検索機能を追加する。
- ・全文検索機能

[課題] 議事録など、ファイル名の検索だけでは該当ファイルの特定が困難。

- ⇒ iSRE 全体について、全文検索機能を追加する。公開もしくは、市販されている全文検索 エンジンを調査し、iSRE への適用性、オープンソース化への対応を踏まえた検討が望ましい。
- ・論理構造を有する検索機能
- [課題] 複数単語のキーワード検索ができないため効率的な検索が困難。
- ⇒ キーワード検索において、"not"、"and"などの最低限の論理構造を有する検索も視野に 入れ、論理構造を有し、複数単語のキーワードで検索可能な機能を追加する。
- ・オントロジー機能(用語の集積・共有から再利用する機能)

[課題] 似た用語の検索、同じ意味の他言語での表現の検索ができない

⇒ 課題の解決に必要なオントロジー機能を実現するためには、専用の辞書を整備する必要 がある。専用の辞書では、地層処分事業全体を包括する単語などが登録されることが想定 される。このため、オントロジー機能で整備する辞書の範囲、iSRE における使い方などを 十分に検討する。

・データ検索履歴管理機能

[課題] データ検索の履歴がわからないため、情報の利用実績や利用パターンが不明。

⇒ 検索者、検索キーワードなどのログを取得し、検索の履歴を管理する機能を追加する。

・データ登録先のルール化

[課題] データの登録ルールが整備されていない

⇒ システム構成の見直し、実用面における取扱説明書の必要性も含め、適切なフォルダの 作成ルールを検討する。

・適切なフォルダ名称のルール化

- [課題] 解析データのように類似した名称をもつファイルの検索では、大量のファイルがヒ ットし該当ファイルの検索が困難。
- ⇒ フォルダ名の命名規則・ルールの検討を行う。また、登録時のミスを軽減するため、実用面における取扱説明書の必要性、指名された管理者によるフォルダ管理についても検討する。

2) 操作の利便性

世代を超えて多数の操作の手が入ることが想定されていることから、取り扱いの容易さが 必要となる課題に対し、操作の利便性向上として、以下の対応策を検討した。

・ファイル閲覧機能の追加

[課題] データの参照方法がダウンロードのみであるため、作業性が悪い。

- ⇒ 現状では、以下の方法が考えられる。
- ブラウザでファイルを開く方法
 PDF は開けるが、docx、xlsx、dwg を開く場合は、現状では Microsoft や Autodesk のサーバにデータを置く必要があり、機密性の観点からは実現が難しい。
- ▶ サムネイルを表示する方法(図 4-25)

ファイル種別ごとに検討を要するが、スタンダードな方法は現状ない。サーバに CAD や Office 製品をインストールしておき、サーバ側で画面キャプチャを生成する方法が考えら れるが、システム構成は複雑になる。

▶ 全てのファイルを PDF 化する方法

サーバ側で全てのファイルを PDF 化し、ブラウザでの参照は PDF で行わせる方法が考え られるがシステム構成は複雑になる。



図 4-25 サムネイル画像のイメージ(例)

・3Dモデルからの関連情報の取得

[課題] 位置情報(例:ボーリング No) などを 3D モデルから属性情報として参照できない。
 ⇒ 3D モデルの各部位にあらかじめ関連ファイルとのリンクを構築(図 4-26) しておき、画面上の 3D モデルをクリックすることでリンクされたファイルを表示させることが考えられる。



図 4-26 3D モデルからの関連情報の参照イメージ

・サイトマップ機能の追加

[課題] フォルダが保有する情報がわからず、作業性が悪い

- ⇒ フォルダ構成を示すサイトマップを整備し、操作時に選択したファイルが何処に格納されているか、どのフォルダにどのような情報があるかなどを表示する機能を追加する。
- 3) 誤操作やトラブルの発生

多くの関係者が関わるシステムであることが想定されていることから、誤操作や操作上の トラブルの発生といった課題に対し、以下の対応策を検討した。

・ファイル履歴管理機能の追加

[課題]登録ミスなどを上書きにより訂正した場合、訂正の理由が不明となる。

⇒ 登録されているデータへの上書きについて、上書き回数、上書きファイル名、上書き理 由などの上書きの履歴を記録する機能を追加する。

・問合せ管理機能の追加

[課題]長い事業期間に多数の操作が入るシステムにおいて、操作上不明な点が発生した場合、解決が困難。

⇒ システムマネージャーに対する問合せメール(改善要望、質問など)を含めたやり取り を記録する掲示板機能を追加する。 ・バックアップ機能の追加

[課題] データバックアップの体制がない

⇒ 平成 27 年度業務において、バックアップの考え方が示されている。これを参考にデータ バックアップの体制について検討する。

・ファイル削除確認機能の追加

[課題] 地形・地質データのファイルを削除するときの確認メッセージでファイル名が表示 されない

⇒ ファイル削除の際、確認メッセージにファイル名を表示する機能を追加する。

(7) まとめと今後の課題

使用済燃料直接処分の工学技術に関する知識化ツールの整備を目的として、iSREのプロト タイプ構築を進めた。平成28年度は、インターフェースとデータベースの設計と試作を進め るとともに、これまでに試作してきたインターフェースとデータベースについての試運用を 実施し、本事業の最終年度である平成29年度でのプロトタイプの整備に向けての課題の抽出 と対策案の整理を行った。

インターフェースの開発に関しては、平成27年度までに詳細設計を行っていた「解析デー タの参照」のインターフェースについて試作を行い、試運用により機能を確認した。今後、 「モニタリングデータ更新」のインターフェースの試作を行うことで、プロトタイプに組み 込む予定のインターフェースが揃う事となる。

データベースの開発に関しては、平成27年度までに基本設計を行っていた「統合データベ ース」および「設計データベース」の詳細設計および試作を行い、試運用により機能を確認 した。また、「積算データベース」および「維持管理補修履歴データベース」の基本設計を行 った。今後、「積算データベース」および「維持管理補修履歴データベース」の詳細設計およ び試作を行うことで、プロトタイプに組み込む予定のデータベースが揃う事となる。

今年度は、試作が終わったインターフェースおよびデータベースを iSRE に組み込み、試運 用を通じて開発課題を洗い出した。課題は、「検索および登録の課題への対応」、「操作の利便 性の課題への対応」、および「誤操作やトラブル発生の課題への対応」に分類して整理し、そ れぞれ挙げられた課題の解決策を抽出・整理した。

参考文献

- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2013a):平成24年度地層処分技術調査等事業 地 層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発 6 カ年とりまとめ報告書,平 成25年3月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2013b):平成24年度地層処分技術調査等事業 高 レベル放射性廃棄物処分関連 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発 6カ年 とりまとめ報告書,平成25年3月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2014):平成25年度地層処分技術調査等事業使用 済燃料直接処分技術開発報告書.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015):研究坑道掘削工事成果資料,平成 28 年 3 月.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2016):瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事,5;平 成24年度、25年度建設工事記録,平成28年6月.
- 経済調査会(2013): CIM 技術検討会 平成 24 年度報告.
- 国土交通省(国土交通省 道路局 国道・防災課)(2014):道路トンネル定期点検要領,平 成 26 年 6 月.
- 操上広志,高橋美昭,吉澤勇二,三和公,赤村重紀,河野一輝(2010):放射性廃棄物の地層 処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討,NUMO-TR-10-01.
- 日本コンクリート工学会(2013):コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-,平 成 25 年 5 月.
- 太田久仁雄、阿部寛信、山口雄大、國丸貴紀、石井英一、操上広志、戸村豪治、柴野一則、 濱克宏、松井裕哉、新里忠史、高橋一清、丹生屋純夫、大原英史、浅森浩一、森岡宏之、 舟木泰智、茂田直孝、福島龍朗(2007):幌延深地層研究計画における地上からの調査研 究段階(第1段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」、JAEA-Research 2007-044.

第5章

その他代替処分オプションについての調査・検討

5 章詳細目次

5. その他の代替処分オプションについての調査・検討 5	5-1
(1) 背景と目的・・・・・・・・・5	5-1
(2) 超深孔処分相当の深度での地質環境の特徴の調査および情報整理・・・・・ 5	5-2
1)諸外国における地質環境の基本要件およびサイト選定条件の考え方・・・・ 5	5-2
① 地質環境の基本要件・・・・・ 5-	5-2
② サイト選定条件・・・・・ 5	5-4
2) 我が国における超深部の地質環境特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5	5-5
① 地下深部の地質環境特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5	5-8
a. 温度特性······5	5-8
b. 物理特性······5	5-10
c. 力学特性······5	5-21
d. 水理特性······5	5-25
e. 地球化学特性······5	5-28
3) わが国で超深孔処分を行う上で検討すべき事項・・・・・・・・・・・・・ 5	5-30
① 諸外国における地質環境の基本的要件およびサイト選定条件のわが国へ	への適
用上の課題 ・・・・・・	5-31
② 堆積岩の分布深度・・・・・ 5	5-31
③ 地温 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5-33
(3) 超深孔掘削関連技術などの調査 5	5-34
 諸外国における技術開発の動向 ······ 5 	5-34
 諸外国における大深度坑井の実績 ······ 5 	5-35
a. 掘削深度と掘削孔径 ······ 5	5-35
b. 掘削リグ・・・・・ 5	5-35
c. 掘削ツールス・・・・・ 5	5-35
d. 方向制御技術・・・・・ 5	5-36
 ② 諸外国における技術開発の最新動向 ····· 5 	5-36
a. 掘削工法・・・・・ 5	5-36
b. 掘削ツールス・・・・・ 5	5-37
c. 掘削リグ・・・・・5	5-37
d. その他・・・・・ 5	5-37
③ 超深孔の掘削技術に関連する既往の技術開発状況 5	5-37
a. 孔内ツールスの耐熱性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5	5-37
b. 吊り上げ荷重・・・・・5	5-38
④ 米国における深孔フィールド試験 5	5-38
2) 我が国における技術開発の動向 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5	5-38
① 我が国における超深孔の実績 5	5-38

 我が国における超深孔の技術開発状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-39
(4) 超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と解析	5-41
1) 米国の事例の調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-41
① 安全性確保の考え方・・・・・	5-41
② FEP ·····	5-42
③ 安全評価のシナリオ・・・・・	5-43
④ モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-45
a. 性能評価モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-45
b. 熱対流解析・・・・・	5-45
c. 地下水の揚水と希釈率の解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-45
⑤ データ ・・・・・	5-46
⑥ 評価結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-46
2)わが国での超深孔処分を想定した予察的な解析の試行 ・・・・・・・・・・	5-46
① 目的 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5-46
② 核種移行モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5-47
③ パラメータおよび解析ケース設定	5-49
④ 結果および考察・・・・・	5-52
(5) まとめと今後の課題・・・・・	5-57
参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5-59

5. その他の代替処分オプションについての調査・検討

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物の最終処分方式としては、国際的共通認識として地層処分が最 も有望な方法とされており、わが国においても、最新の科学的知見を踏まえて地層処分 に関する研究開発が進められてきている。一方、総合資源エネルギー調査会電力・ガス 事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物 WG(以下、「放射性廃棄物 WG」という)による 「放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ(平成 26 年 5 月)」(放射性廃棄物 WG, 2014)(以下、 「WG 中間とりまとめ」という)では、高レベル放射性廃棄物の最終処分方式として、現 在各国が取り組んでいる地層処分のほかに、代替処分概念として、海洋投棄、海洋底下 処分、沈み込み帯への処分(以上はロンドン条約により禁止)、氷床処分(南極条約によ り禁止)、超深孔処分、岩石溶融処分、井戸注入処分、宇宙処分などについての国際的な 評価が示されている。また、地層処分の安全性の不確実性を今後の研究開発などにより 低減することと並行して、今後の技術の進捗により潜在的課題が克服され、検討の対象 となりえる代替処分概念については、その可能性を模索する、という国際的な考え方が 示されている。

このような背景を踏まえ、平成27年度よりわが国の高レベル放射性廃棄物の処分方法 について、将来世代の幅広い選択肢を確保するために、代替処分概念などに関する調査 研究を行うこととした。本調査では、WG 中間とりまとめに示されている代替処分概念、 および最終処分以外の方式(たとえば、使用済燃料の中長期的な貯蔵、暫定保管、核種 分離・変換)を検討対象として情報を整理するとともに、超深孔処分など、現在検討段 階にある代替処分概念については、諸外国の事例調査を行うことにより、それらの考え 方、特徴、検討の背景、技術的課題などを明らかにし、わが国の諸条件を考慮した場合 の有効な代替処分概念について検討することとした。

平成 27 年度は、検討の初年度として、全体の調査研究計画を策定した。その他の代替 処分オプション(長期貯蔵などを含む)について調査を開始し、それぞれの処分概念オ プションが現在の取り扱いに至った技術情報を取りまとめた。

平成28年度は、わが国への超深孔処分の概念の適用に関する検討として、地質環境、 処分技術、安全評価の観点での情報の整理や課題の検討に着手した。以下、(2)に超深孔 処分相当の深度での地質環境の特徴の調査および情報整理を、(3)に超深孔掘削などの関 連技術の開発動向や実績に関する調査および情報整理を、(4)に超深孔処分による安全確 保の見通しに関する情報整理と予察的な検討について述べる。また、そのまとめを(5) に示す。

(2) 超深孔処分相当の深度での地質環境の特徴の調査および情報整理

本項では、わが国への超深孔処分の概念の適用を検討するために、1)にて諸外国におけ る超深孔処分の検討における地質環境の基本要件およびサイト選定条件の考え方を整理 した上で、2)でわが国における超深部の地質環境の調査結果を整理し、これらを踏まえ て3)でわが国における地質環境の基本要件およびサイト選定条件および課題などの検討 を試みた。これらのまとめを(5)に示す。

1)諸外国における地質環境の基本要件およびサイト選定条件の考え方

近年、アメリカをはじめ、スウェーデン、スイスなどの諸外国では、超深孔処分に関 する検討が進められている。これらの諸外国では、超深孔処分に対する地質環境の基本 要件やサイト選定条件が提示されている。このため、わが国における超深孔処分の検討 に資するため、諸外国における地質環境の基本要件およびサイト選定条件を抽出すると ともに、それらの背景や根拠に関する情報とともに抽出・整理した。

諸外国の超深孔処分に関する地質環境の基本要件およびサイト選定条件に関する記述 が認められた文献を表 5-1 に示す。

地質環境の基本要件

超深孔処分に対する地質環境の基本要件は、アメリカ、スウェーデン、スイス、IAEA (International Atomic Energy Agency)から公表された文献にその記載が認められた。

これらの文献から、地質環境の基本要件を抽出するとともに、各基本要件に関連する 背景・根拠情報を抽出・整理した結果を付録2に示す。

超深孔処分に関する検討が進められている諸外国のほとんどでは、結晶質岩または花 崗岩を対象として地質環境の基本要件が検討されている。

アメリカでは、超深孔処分の処分領域(廃棄体の定置領域)と閉塞領域(人工バリア の設置領域)を結晶質岩中に設定することを前提としており、処分領域の長さを 2 km、 閉塞領域の長さを 1 km としている。アメリカで検討が進められている地質環境の基本要 件は、結晶質基盤岩の上限面分布深度、結晶質岩の地質・地質構造、基盤岩構造の複雑 さ、水平応力、地熱流速・地温勾配、隆起、第四紀断層と火山活動、地下資源などに関 するものである。超深孔処分は、検討対象が深度 5 km に及ぶ地下深部に大口径のボーリ ング孔を設置する処分概念であることから、ボーリング孔の掘削、掘削したボーリング 孔内への廃棄体の定置作業における安全性や容易性などの観点から、地質学的、力学的 な岩体の均質性に着目して要件が設定されている。閉鎖後の長期安全性の観点からは、 活断層や火山活動などの地質環境の長期安定性に係る地質現象のほか、地下深部から地 表に至る移行経路となる不連続構造の存在とその水理地質学的特性、地下深部から地表 に至る移行経路の駆動力の1つと考えられる熱流束や温度勾配が着目されている。また、 人為事象の観点からは、地下資源に着目した要件が設定されている。

スウェーデンにおける地質環境の基本要件は、アメリカにおける基本要件とほぼ同様 であるが、スウェーデンの地理的位置(高緯度)に特化した要件として、将来の氷河期 における地質環境の変化が設定されている。

スイスや IAEA における地質環境の基本要件については、アメリカにおける地質環境の 基本要件と大きな違いは認められない。

表 5-1 地質環境の基本要件およびサイト選定条件に関する文献リスト

文献 番号	書誌情報
1	Freeze, G.A. et al. (2015): Siting Guidelines for a deep borehole Disposal Facility. IHLRWM2015, Charleston, SC, April 12-16, pp.618-623.
2	Arnold, B.W et al. (2013): Deep Borehole disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals design, and RD&D Needs. Sandia National Laboratories, October 25, 2013, FCRD-USED-2013-000409, SAND2013-9490P, 149p.
3	Van Schmus, W.R. and Bickford, M.E., eds. (1993): Transcontinental Proterozoic provinces. In Reed, J.C., Jr., d al. (eds.) The Geology of North America, Precambrian: Conterrninous U.S., Vol. C-2, 171-334.
4	Pratt, T. et al. (1989): Major Proterozoic basement features of the eastern Midcontinent of North America revealed by recent COCORP profiling. Geology 17,505509.
5	Heiken, G. et al. (1996): Disposition of Excess Weapon Plutonium in Deep Boreholes, Site Selection Handbook, Los Alamos National Laboratory, LA-13168-MS, 48p.
6	Brady, P. et al. (2012):Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report, Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 29p
7	Arnold, B.W. et al. (2011): Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT SAND2011-6749, 66p.
8	SKB (2010): Choice of Method – Evaluation of Strategies and Systems for Disposal of Spent Nuclear Fuel, SKB, P-10-47, 87p.
9	Åhäll,K-I. (2006): Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: An evaluation based on recent research of bedrock conditions at great depths. ,MKG Report2, 28p.
10	SKB (1989): Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential, SKB, TR-89-39, 91p.
11	NAGRA (1980): Feasibility Study for Large Diameter Boreholes for the Deep Drilling Concept of a High-Level Waste Repository, NAGRA, NTB 80-04.
12	IAEA (2009): Disposal Facilities for Radioactive Waste, SSG-1.
13	Sandia National Laboratories (2013): Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. + Fuel Cycle Research & Development. Sandia National Laboratories, FCRD-USED-2012-000269, SAND2012-8527P, 90p.
14	DOE (2014): Request for Information (RFI) – Deep Borehole Field Test. US Department of Energy Idaho Operations Office, Solicitation Number DE-SOL-0007705.
15	Beswick, A.J. et al. (2014): Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering. Challenges, Energy, Vo;.167, Issue EN2, pp.47-66.
16	National Academy Press (1994): Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium. – Committee on International Security and Arms Control National Academy of Sciences, National Academy Press, 288p.

諸外国で検討されている地質環境の基本的要件は、通常の地層処分で検討されている 地質環境の要件とほぼ同じ項目である。しかし、超深孔処分の対象母岩を結晶質岩また は花崗岩とすることを前提として検討しているため、超深孔処分はサイト選定において 対象母岩の岩種が限定されることが通常の地層処分に比べ不利な点であると考えられる。

また、超深孔処分では、処分施設となるボーリング孔の安定性の観点から水平応力に 異方性がないことが地質環境の基本的な要件となっている。通常の地層処分では、処分 坑道の規模や配置を最適化することにより、処分坑道の安定性に影響を及ぼさない程度 の水平応力の異方性に対しては対応が可能であると考えられる。このため、超深孔処分 はサイト選定において水平応力の異方性に制約があることが通常の地層処分に比べ不利 な点であると考えられる。

2 サイト選定条件

超深孔処分に対するサイト選定条件は、アメリカ、スウェーデン、イギリスから公表 された文献にその記載が認められた。

これらの文献から、超深孔処分のサイト選定条件を抽出するとともに、各条件と関連 する背景・根拠情報を抽出・整理した結果を付録-3に示す。

超深孔処分に関する検討が進められている諸外国では、結晶質岩を対象としてサイト 選定条件が検討されている。

アメリカにおいて検討されているサイト選定条件を集約すると、超深孔処分の対象と なり得るサイト条件は、次のようにまとめられる。

- ・処分領域および閉塞領域の対象母岩は、均質な結晶質岩(花崗岩)であること
- ・結晶質岩の上限面分布深度が2 km 未満であること
- ・地熱流速が 75 mW m⁻²未満であること
- ・地下深部の応力状態に異方性が認められないこと
- ・深部の地下水循環を避けるため、地形の傾斜は 1°以上の地点まで、約 100 km 以上離れていること
- ・処分領域の基盤岩と地表面の間に帯水層が存在しないこと
- ・形成年代が古く、高塩分濃度で還元性の地下水が地下深部に分布すること
- ・結晶質岩中に規模が大きい鉛直のせん断帯や高透水性を示す構造などが存在しないこと
- ・岩体中に第四紀に形成された著しい変質が生じていないこと
- ・対象岩体中に歴史地震の記録がないこと
- ・第四紀の断層から10 km以上離れていること
- ・第四紀の火山活動から10 km以上離れていること
- ・経済的に利用可能な天然資源が分布しないこと
- 石油備蓄基地や市街地から離れていること

スウェーデンおよびイギリスにおいて検討されているサイト条件については、アメリ カで検討されているサイト条件とほぼ同じである。

2) わが国における超深部の地質環境特性

国内において掘削された深度 1,000 m を超える坑井のデータを、公開されている資料から収集した。掘進長 1,000 m を超える坑井は、石油・天然ガス資源開発、地熱・温泉資源開発、水資源開発、土木関係および地震観測などの分野において掘削されている可能性が高いと考え、これらの分野の坑井情報を収集した。情報の収集に利用した資料と得られた情報の概要を表 5-2 に示す。

石油・天然ガス分野から、石油公団(現、石油天然ガス・金属鉱物資源機構)による 基礎試錐調査報告書と民間による調査坑井データを引用している日本の石油・天然ガス 資源(天然ガス工業会・大陸棚石油開発協会,1982)を参照した。基礎試錐調査報告書に は、坑井の深度、孔径、ケーシングなどの掘削技術に関する情報と、地質、物理特性、 力学特性、水理特性および地化学特性に関連する情報が記載されている。これらの中か ら深度1,000 m以深を対象に、以下の情報を収集した。

- 物理特性:温度、熱伝導率、密度(自然状態、乾燥状態、湿潤状態)、有効間隙率
- · 力学特性:一軸圧縮強度、粘着力、内部摩擦角
- 水理特性:水浸透率
- 地化学特性:水質型、塩素イオン濃度

ここで、基礎試錐調査報告書の中には、岩石試験の結果を非公開の別添報告書に収録 し、報告書本編に掲載されていない場合がある。しかしながら、これらのデータの多く は本邦産岩石の深部物性データ集(星野ほか,2001)に転載されていることから、これ を参照した。

自然石油・天然ガス分野では民間石油会社による調査孔が多数存在するが、データが 非公開のため利用できない。そこで、これらの民間の坑井データを引用している日本の 石油・天然ガス資源(天然ガス工業会・大陸棚石油開発協会,1982)から、掘削深度の 情報を抽出した。なお、日本の石油・天然ガス資源(天然ガス工業会・大陸棚石油開発 協会,1982)に記載された坑井情報は掘削深度のみで、地質や物性に関する詳細な情報 は得られなかった。

地熱・温泉分野から、新エネルギー・産業技術総合開発機構による地熱開発促進調査 報告書および日本温泉・鉱泉分布図および一覧(第2版、CD-ROM版)(産業技術総合研 究所,2005)を参照した。地熱開発促進調査報告書には、坑井の深度、孔径、ケーシン グ、泥水などの掘削技術に関する情報と地質、物理特性、水理特性に関連する情報が記 載されており、これらの中から深度1,000 m以深を対象に、以下の情報を収集した。

- 物理特性:温度、熱伝導率、密度(自然状態、乾燥状態、湿潤状態)、有効間隙率
- 水理特性:透水量係数

日本温泉・鉱泉分布図および一覧(第2版、CD-ROM版)(産業技術総合研究所,2005) には、日本全国の温泉井戸の位置、深度、温度、湧出量、pH、水質型が収録されており、 これらの中から深度 1,000 m を超える井戸を対象に深度、温度、pH、水質型の情報を抽 出した。

水資源分野から、国土交通省の全国地下水資料台帳(国土交通省,2016)と日本列島 における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル(越谷 ほか,2012)を参照した。全国地下水資料台帳には、井戸の掘削深度、孔径、地層区分 および水質が記録されており、これらの中から深度1,000 mを超える井戸の情報を抽出 した。地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル(越谷ほ か,2012)は、帯水層の層厚を算出することを目的として、全国のボーリングや井戸デ ータから地層の深度データを集めている。しかしながら、新たに掘削した坑井はなく既 往の資料を収集しているため、今回参考とした他の資料も含まれている。なお、本資料 には具体的な物性などの記載はないが、地下深部の地質分布を把握することができる。

土木分野では、国土交通省が保有するボーリングデータを閲覧できる国土地盤情報検 索サイト(Kunijiban)(国土交通省,2015)を利用して深度1,000 mを超えるボーリング データを検索した。検索されたボーリングの最大掘削深度は545.7 m であり、1,000 m を超えるボーリングは見当たらなかった。

地震観測用としては、防災科学技術研究所が設置している基盤強震観測と併設される 高感度地震計は堆積層を避けて堅硬な岩盤に設置されるため、堆積層が厚い地域では地 震計が地下深部に設置される。そこで、防災科学技術研究所が公開している基盤強震観 測網(Kik-Net)(防災科学技術研究所,2017a)と高感度地震観測網(Hi-Net)(防災科学 技術研究所,2012;防災科学技術研究所,2017b)のデータから観測点の地質柱状図を閲 覧し、掘削深度と地質を抽出した。なお、Kik-Net、Hi-Net 共に掘削孔径の情報は公開 されていないが、地震計が外径約140 mmのケーシング内に設置されていることから(防 災科学技術研究所,2012)、掘削孔径は150 mm 程度と推定される。

5 - 6

公眠	会昭次约友	烝⁄寻 據問	掘進長 1,000m	最大掘進長	進長 最終孔径	1,000m 以深の情報の有無				
刀到		光11 陇戌	以上の坑井数	[m]	[mm]	地質情報	温度·物性	水理定数	水質	
石油・天 然ガス	基礎試錐調查報告書	経済産業省(石油天然 ガス・金属鉱物資源機 構)	64	6,310	215.9	あり	あり	浸透率	あり	
	日本の石油・天然ガス資源	天然ガス鉱業会・大陸 棚石油開発協会	152	4,801	_	小縮尺の断 面図に孔跡 と地層区分 が示される	無	無	無	
地熱・温 泉	地熱開発促進調査報告書	新エネルギー・産業技 術総合開発機構	197	2,524	215.9	あり	あり	注水試験	無	
	日本温泉・鉱泉分布図およ び一覧(第2版, CD-ROM 版)	産業技術総合研究所	397	2,714	_	無	温度	無	あり	
水資源	全国地下水資料台帳	国土交通省	42	2,200	100	あり	無	無	あり	
	日本列島における地下水賦 存量の試算に用いた堆積物 の地層境界面と層厚の三次 元モデル	産業技術総合研究所	1661	6,310	_	大区分の地 層境界深度 のみ	無	無	無	
地電計	強震観測網 (K-NET, KiK-net)	防災科学技術研究所	27	3,510.50	150	無	無	無	無	
	Hi-net 高感度地震観測網	防災科学技術研究所	4	1,110	150	無	無	無	無	
土木	国土地盤情報検索サイト KuniJiban	国土交通省	0	545.7	_	無	無	無	無	

表 5-2 わが国の掘進長 1,000 m を超える坑井情報

地下深部の地質環境特性

表 5-2 に示した資料から地下深部の地質環境特性として、深度 1,000 m 以深の温度特 性、物理(密度,有効間隙率,熱伝導率)、力学特性(一軸強度,粘着力,内部摩擦角)、 水理特性(浸透率,透水量係数)および地化学特性(塩化物イオン濃度,水質型)の各 特性を抽出し、各地質環境特性の特徴を整理した。

文献情報から抽出した各地質環境データのうち、数値データは地質区分に対応してグ ループ化し、各物性値の統計処理を行い、最大値、最小値、平均値、標準偏差および個 数の一覧表を作成した。また、深度分布図を作成し深度相関および地質区分との対応関 係について検討した。水質については主要な水質型に類型化し、その分布深度を検討し た。さらに、比較的データ数の多い有効間隙率および熱伝導率については、これらの物 性値を核燃料サイクル開発機構(1999)に示された主として深度 1,000 m までの値と比 較を行った。

a. 温度特性

わが国の地下深部(深度 1,000 m 以上)の温度特性に係るデータは、石油資源などの 調査を行っている基礎試錐、地熱開発に係るボーリング調査によって取得されている。 これらの資料から孔内温度データを抽出した。温度特性に係る統計処理結果を表 5-3 に、 深度分布図を図 5-1 に示す。

地下深部で測定された、最高温度は、基礎試錐で 238 ℃ (深度 6,000 m)、地熱開発で 334 ℃ (深度 1,200 m) である。また、地温勾配については、基礎試錐で平均値 30.9 ℃ km⁻¹ (17.3~51.2 ℃ km⁻¹)、地熱開発で 111.6 ℃ km⁻¹ (21.7~282.5 km) である。

地熱開発は、熱エネルギーの高い地域(例えば、第四紀火山の周辺など)を対象に賦存する地熱資源を対象としているため、比較的深度の浅い深度において最高温度を示し、 地温勾配も高いデータになっていると考えられる。図 5-1 によれば地熱開発関係の温度 データは、深度 1,000~2,000 m の間で 100~300 ℃の温度範囲でばらついており深度相 関が認められない。一方、基礎試錐は、石油や天然ガスなどの賦存領域を対象として掘 削されており、図 5-1 によれば深度の増加に伴って温度が高くなる傾向が認められ、わ が国における平均的な地温勾配(30 ℃ km⁻¹)とほぼ同程度の地温勾配を示していると考 えられる。

地下深部の温度の全国的な分布について、村岡ほか(2007)が全国の地熱井戸と温泉 井戸のデータから全国的な深度 1,500 m と 2,000 m の温度分布を推定している。それに よると、深度 1,500 m における最頻値の温度範囲は 50~75 °C (地温勾配 33~50 °C km⁻¹)、 深度 2,000 m では 75~100 °C (地温勾配 37~50 °C km⁻¹)の範囲となっている。最高温 度はいずれの深度でも 400 °C程度となっている。また、深度 1,500 m での坑井温度は北 海道の東部と西部、東北および九州で高く 150 °Cを超えていることがわかる。同様に深 度 2,000 m での坑井温度も北海道の東部と西部、東北および九州で高く、東北では 200 °C を超える箇所も認められる。これはデータの空間分布密度が低いといった欠点があるた め、村岡ほか (2007) は、熱水化学分析値と温度との相関 (アニオンインデックス)を 利用して、地化学分析値から温度を推定して温度構造の補間を行っている。それによれ ば、温度データの密度が少なく低温として示されていた本州中部から中国・四国にかけ てもやや高い温度が分布する可能性が示されている。

項目		基礎試錐	地熱開発
最高温度 [℃]		238.0	334.0
深度 [m]		6,000	1,200
地温勾配 [℃ km ⁻¹]	最大値	51.2	282.5
	最小値	17.3	21.7
	平均值	30.9	111.6
個数		36	181

表 5-3 温度特性に係る統計処理結果



図 5-1 温度分布(温度-深度プロット)

b. 物理特性

自然密度の統計処理結果を表 5-4 に、深度分布図を図 5-2 に示す。新第三紀堆積岩の 自然密度は平均値 2.38 g cm⁻³ (1.05~2.93 g cm⁻³)、先新第三紀堆積岩類の自然密度は 平均値 2.58 g cm⁻³ (2.18~2.96 g cm⁻³) で、同じ岩種であれば地質時代の古い岩石ほど 密度が高く、ばらつきも小さくなる傾向を示す。火山岩類についても同様で、新第三紀 火山岩類は平均値 2.63 g cm⁻³ (1.57~3.15 g cm⁻³) に対し、先新第三紀火山岩類は平均 値 2.84 g cm⁻³ (2.39~2.63 g cm⁻³) となっている。なお、深成岩類については平均値 2.65 g cm⁻³ (1.06~2.97 g cm⁻³) を示す。いずれの岩種についても、深度の増加に対し て高くなる傾向を示し、深度 5,000 m 程度付近では、2.5~3.0 g cm⁻³を示す。

	堆積岩類		火山岩類		源武巴
岩種・時代	新第三紀	先新第三 紀	新第三紀	先新第三 紀	(床) 瓜石 類
最大值 [g cm ⁻³]	2.93	2.96	3.15	2.93	2.97
最小值 [g cm ⁻³]	1.05	2.18	1.57	2.39	1.06
平均值 [g cm ⁻³]	2.38	2.58	2.63	2.65	2.65
標準偏差	0.26	0.14	0.16	0.12	0.14
中央值 [g cm ⁻³]	2.42	2.62	2.65	2.63	2.66
最頻值 [g cm ⁻³]	2.39	2.68	2.58	2.70	2.68
データ数	1275	192	772	61	241

表 5-4 自然密度の統計処理結果



図 5-2 自然密度の深度分布

乾燥密度の統計処理結果を表 5-5 に、深度相関図を図 5-3 に示す。新第三紀堆積岩の 自然密度は平均値 2.35 g cm⁻³ (1.16~2.93 g cm⁻³)、先新第三紀堆積岩類の自然密度は 平均値 2.56 g cm⁻³ (2.24~2.95 g cm⁻³)で、同じ岩種であれば地質時代の古い岩石ほど 密度が高く、ばらつきも小さくなる傾向を示す。火山岩類については、新第三紀火山岩 類は平均値 2.60 g cm⁻³ (1.55~3.14 g cm⁻³) に対し、先新第三紀火山岩類は平均値 2.52 g cm⁻³ (1.79~2.88 g cm⁻³) となり、ほぼ同程度の値を示す。深成岩類については、平 均値 2.64 g cm⁻³ (1.91~2.97 g cm⁻³) を示す。

岩種·時代	堆積岩類		火山岩類		流子巴新
	新第三紀	先新第三紀	新第三紀	先新第三紀	休风石短
最大值 [g cm ⁻³]	2.93	2.95	3.14	2.88	2.97
最小值 [g cm ⁻³]	1.16	2.24	1.55	1.79	1.91
平均值 [g cm ⁻³]	2.35	2.56	2.60	2.52	2.64
標準偏差	0.25	0.14	0.18	0.18	0.11
中央值 [g cm ⁻³]	2.38	2.60	2.63	2.55	2.66
最頻值 [g cm ⁻³]	2.52	2.60	2.64	2.40	2.67
データ数	1097	164	744	103	235

表 5-5 乾燥密度の統計処理結果



図 5-3 乾燥密度の深度分布

湿潤密度の統計処理結果を表 5-6 に、深度相関図を図 5-4 に示す。新第三紀堆積岩の 自然密度は平均値 2.46 g cm⁻³ (1.52~2.94 g cm⁻³)、先新第三紀堆積岩類の自然密度は 平均値 2.61 g cm⁻³ (2.36~2.97 g cm⁻³)で、同じ岩種であれば地質時代の古い岩石ほど 密度が高く、ばらつきも小さくなる傾向を示す。火山岩類についても同様に、新第三紀 火山岩類は平均値 2.65 g cm⁻³ (1.60~3.16 g cm⁻³) に対し、先新第三紀火山岩類は平均 値 2.67 g cm⁻³ (2.49~2.96 g cm⁻³) となっている。深成岩類については、平均値 2.66 g cm⁻³ (1.92~2.98 g cm⁻³) を示す。

	堆積岩類		火山岩類		
岩種・時代	新第三紀	先新第三 紀	新第三紀	先新第三 紀	深成岩類
最大值 [g cm-3]	2.94	2.97	3.16	2.96	2.98
最小值 [g cm-3]	1.52	2.36	1.60	2.49	1.92
平均值 [g cm-3]	2.46	2.61	2.65	2.67	2.66
標準偏差	0.19	0.10	0.15	0.10	0.10
中央值 [g cm-3]	2.48	2.62	2.67	2.65	2.66
最頻值 [g cm-3]	2.62	2.65	2.68	2.63	2.64
データ数	1107	163	750	$\overline{72}$	257

表 5-6 湿潤密度の統計処理結果



図 5-4 湿潤密度の深度分布

有効間隙率の統計処理結果を表 5-7 に、深度分布図を図 5-5 に示す。新第三紀堆積岩 の有効間隙率は平均値 12.97 % (0.0~59.6 %)、先新第三紀堆積岩類の有効間隙率は平 均値 6.52 % (0.12~24.60 %) で、同じ岩種であれば地質時代の古い岩石ほど有効間隙 率が小さくなっている。火山岩類については、新第三紀火山岩類で平均値 4.97 (0.0~ 40.7 %) に対し、先新第三紀火山岩類は平均値 6.09 % (0.2~63.6 %) となっている。 なお、深成岩類については平均値 2.29 % (0.0~16.2 %) となっている。いずれの岩種 においても、深度の増加とともに有効間隙率が小さくなる傾向を示し、新第三紀の堆積 岩でも深度4,000 m以上ではほぼ20%以下の値を示す。

図 5-6~図 5-9 に堆積岩類の頻度分布図を、図 5-10 に核燃料サイクル開発機構(1999) による堆積岩類の有効間隙率の頻度分布図を示す。これらを比較すると、新第三紀の泥 質の堆積岩類では、深度1,000 m以浅で有効間隙率20~30 %程度が卓越するが、深度1,000 m以深で有効間隙率20%以下が卓越する。一方、新第三紀の砂質の堆積岩では、深度1,000 m以浅で有効間隙率10~25 %程度が卓越するが、深度1,000 m以深では有効間隙率10 % 程度および有効間隙率20~40 %程度が卓越する。なお、先新第三紀の堆積岩については 大きな違いは認められない。

巴禾, 時代	堆積岩類		火山岩類		波
石裡可八	新第三紀	先新第三紀	新第三紀	先新第三紀	休风石短
最大值 [%]	59.60	24.60	40.70	63.65	16.21
最小值 [%]	0.00	0.12	0.00	0.21	0.00
平均值 [%]	12.97	6.52	4.97	6.09	2.29
標準偏差	9.23	5.33	5.33	7.25	2.42
中央值 [%]	11.41	5.40	5.40	4.00	1.35
最頻值 [%]	1.00	0.33	0.33	4.00	1.00
データ数	1424	224	224	128	266

表 5-7 有効間隙率の統計処理結果



図 5-5 有効間隙率の深度分布


図 5-6 深度 1,000 m以上の有効間隙率(新第三紀砂質岩)の頻度分布



新第三紀堆積岩(泥質岩·凝灰質岩)

図 5-7 深度 1,000 m以上の有効間隙率(新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布



図 5-8 深度 1,000 m以上の有効間隙率(先新第三紀砂質岩)の頻度分布



先新第三紀堆積岩(泥質岩·凝灰質岩)

図 5-9 深度 1,000 m以上の有効間隙率(先新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布



(核燃料サイクル開発機構, 1999)

熱伝導率の統計処理結果を表 5-8 に、深度相関図を図 5-11 に示す。新第三紀堆積岩の 熱伝導率は平均値 2.34 W Mk⁻¹ (0.20~6.92 W Mk⁻¹)、先新第三紀堆積岩類の熱伝導率は 平均値 2.77 W Mk⁻¹ (0.02~7.15 W Mk⁻¹) で、同じ岩種であれば地質時代の古い岩石ほど 熱伝導率が高い傾向を示す。火山岩類については、新第三紀火山岩類は平均値2.52 W Mk⁻¹ (0.42~5.95 W Mk⁻¹) に対し、先新第三紀火山岩類は平均値 2.84 W Mk⁻¹ (1.70~3.72 W Mk⁻¹)となっている。深成岩類については、平均値 2.73 W Mk⁻¹ (0.01~3.75 W Mk⁻¹)を 示す。いずれの岩種においても、深度1,000~2,000m程度では熱伝導率のばらつきが大 きい傾向を示す。深度 2,000 m 以深の新第三紀の堆積岩については、深度の増加ととも に熱伝導率が大きくなる傾向が認められる。収集した熱伝導率データについて、核燃料 サイクル開発機構(1999)における地質区分に従って分類し、頻度分布図として整理し た結果を図 5-12~図 5-16 に示すとともに、核燃料サイクル開発機構(1999)による熱 伝導率の頻度分布図を図 5-17 に示す。これらを比較すると、深度 1,000 m 以浅のグルー プと深度 1,000 m 以深のグループのピークが、新第三紀の砂質岩、先新第三紀の砂質岩 および結晶質岩ではほぼ同じ位置にあるのに対し、新第三紀の泥質岩・凝灰質岩と先新 第三紀の泥質岩・凝灰質岩では、深度1,000m以深のグループのピーク位置が深度1,000 m以浅のグループのピーク位置よりもやや大きくなっている。

	堆積岩類		火山			
岩種·時代	新第三紀	先新第三 紀	新第三紀	先新第三 紀	深成岩類	
最大値 [W mk ⁻¹]	6.916	7.146	5.947	3.719	7.042	
最小值 [W mk⁻1]	0.204	0.022	0.419	1.703	0.014	
平均值 [W mk ⁻¹]	2.337	2.766	2.524	2.837	3.009	
標準偏差	0.863	1.294	0.825	0.486	0.898	
データ数	1122	150	739	48	194	

表 5-8 熱伝導率の統計処理結果





図 5-11 熱伝導率の深度分布



図 5-12 深度 1,000 m以上の熱伝導率(新第三紀砂質岩)の頻度分布



新第三紀堆積岩(泥質岩·凝灰質岩)

図 5-13 深度 1,000 m以上の熱伝導率(新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布



図 5-14 深度 1,000 m以上の熱伝導率(先新第三紀砂質岩)の頻度分布



図 5-15 深度 1,000 m以上の熱伝導率(先新第三紀泥質岩・凝灰質岩)の頻度分布







図 5-17 主として深度 1,000 m以浅の熱伝導率のヒストグラム

(核燃料サイクル開発機構, 1999)

c. 力学特性

深度 1,000 m 以深の力学特性は『基礎試錐報告書』および基礎試錐のデータを引用し た星野ほか(2001)のみに記載されており、他の資料には記載が認められない。基礎試 錐では力学物性試験として高圧三軸圧縮試験を行っており、一軸圧縮強度、粘着力(C) および内部摩擦角(φ)の結果が示されている。なお、ここで言う一軸圧縮強度は、封 圧 1 kgf cm⁻²の強度である。基礎試錐の報告書には、試験を行ったことの記載があるも のの、試験結果は別冊の報告書となっており参照できない場合がある。しかしながら、 星野ほか(2001)が、これら別冊の試験結果報告書からデータを引用しているため、星 野ほか(2001)に掲載されてデータも合わせて収集した。

ー軸圧縮強度の統計処理結果を表 5-9 に、深度分布を図 5-18 に示す。一軸圧縮強度は、 平均値で新第三紀堆積岩類よりも時代が古い先新第三紀堆積岩類よりも大きな値となっ ており、データ数が少ないものの深成岩類が堆積岩類の平均値よりも小さいなど、岩種 や地質時代による相違が明確でない。また、深度との関係についても明瞭な相関が認め られず、地下深部でもばらつきが大きい結果となっている。

	堆積岩類		火山		
岩種・時代	新第三紀	先新第三 紀	新第三紀	先新第三紀	深成岩類
最大值 [MPa]	275.0	145.6	217.0	-	26.6
最小值 [MPa]	3.0	3.8	8.3	-	9.7
平均值 [MPa]	73.3	56.6	94.7	-	19.6
標準偏差	65.1	39.5	44.7	-	8.8
データ数	83	19	20	0	3

表 5-9 一軸圧縮強度の統計処理結果



図 5-18 一軸圧縮強度の深度分布

粘着力および内部摩擦角の統計処理結果をそれぞれ表 5-10 と表 5-11 に示す。また、 深度分布を図 5-19 と図 5-20 に示す。粘着力(C)は、堆積岩類の平均値で地質時代の差 異はほとんどないが、火山岩類では大きい値となっている。深度との関係では、粘着力 (C)が全体として深度の増加とともに粘着力が大きくなる傾向が認められ、ばらつきが

大きい。

	堆積岩類		火山		
岩種·時代	新第三紀	先新第三	±r ₩r → ₩1	先新第三	深成岩類
		紀	利弗二和	紀	
最大值 [MPa]	120.6	39.5	128.5	-	60.9
最小值 [MPa]	0.0	5.4	20.4	-	8.4
平均值 [MPa]	22.8	22.2	43.1	-	32.1
標準偏差	17.9	9.6	24.6	-	26.6
データ数	84	18	21	0	3

表 5-10 粘着力(C)の統計処理結果

表 5-11 内部摩擦角(φ)の統計処理結果

	堆積岩類		火山			
岩種・時代	·時代 新第三紀 先新第三紀 新		新第三紀	先新第三 紀	深成岩類	
				が口		
最大值 [度]	43.1	44.1	43.8	-	57.5	
最小值 [度]	0.9	23.5	11.9	-	48.1	
平均值 [度]	27.0	31.7	30.2	-	51.6	
標準偏差	9.7	5.2	10.1	-	5.1	
データ数	データ数 85 18		24	0	3	



図 5-19 粘着力(C)の深度分布



図 5-20 内部摩擦角(φ)の深度分布

d. 水理特性

水理特性に関するデータは非常に少なく、基礎試錐で浸透率として測定されたものと 地熱ボーリングにおける産出試験時の圧力変化から算出された透水係数の測定例がわず かにあるのみである。浸透率は試料を室内で計測しているため、割れ目などの影響が無 い岩石そのものの物性である。一方、産出試験は複数の深度に設置されたストレーナを 対象とした長区間で行われているため、複数の地層が試験対象区間に含まれることが多 く地盤全体の透水性を反映していると考えられる。後述の図 5-21 にプロットした深度は、 試験区間の中心深度であり、地質区分はその中心深度に分布する地質を便宜的に対応さ せたものである。

浸透率は15℃における水の動粘性係数を1として以下の式で透水係数に換算した。

1 md $= 1 \times 10^{-8}$ m s⁻¹ ····· $\ddagger 5-1$

透水係数に換算した浸透率の統計処理結果を表 5-12 に、深度分布を図 5-21 に示す。 透水係数に換算した浸透率の対数平均値は、新第三紀堆積岩で 10⁻⁹ m s⁻¹オーダー、先新 第三紀堆積岩および火山岩類で 10⁻¹¹ m s⁻¹オーダーとなっている。深度との関係は、デ ータ個数の多い新第三紀堆積岩類で深度の増加とともに透水性が小さくなる傾向が認め られる。

	堆積	岩類	火山		
岩種・時代	车笛一句	先新第三	车车二公	先新第三	深成岩
	利弗二和	紀	利另二和	紀	
最大值 [m s ⁻¹]	8.60E-07	9.30E-10	4.00E-11	3.00E-11	—
最小值 [m s⁻¹]	9.00E-12	9.00E-12	1.00E-11	9.00E-12	_
平均值 [m s ⁻¹]	9.46E-08	1.23E-10	2.50E-11	1.60E-11	—
対数平均值 [m s⁻¹]	2.84E-09	3.50E-11	2.00E-11	1.34E-11	—
標準偏差	1.88E-07	2.47E-10	-	1.21E-11	_
データ数	51	14	2	3	0

表 5-12 浸透率(透水係数換算)の統計処理結果



図 5-21 浸透率(透水係数換算)の深度分布

産出試験による透水係数の統計処理結果を表 5-13 に、深度分布を図 5-21 に示す。透水係数は 10⁻⁷~10⁻¹¹ m s⁻¹オーダーで岩種、地質時代あるいは深度との関係は認められない。これは、前述したように、試験区間が大きく、また、データ個数も少ないためであると考えられる。

	堆積岩類		火山		
岩種·時代	新第三紀	先新第三	新第三約	先新第三	深成岩類
		紀		紀	
最大值 [m s ⁻¹]	6.21E-07	-	4.90E-08	-	1.71E-09
最小值 [m s⁻¹]	4.51E-10	-	1.24E-10	-	4.93E-11
平均值 [m s ⁻¹]	1.22E-07	-	1.23E-08	-	8.80E-10
対数平均 [m s⁻¹]	2.14E-08	-	8.32E-09	-	2.90E-10
標準偏差	2.47E-07	-	1.63E-08	-	1.17E-09
データ数	6	0	8	0	2

表 5-13 産出試験による透水係数の統計処理結果



図 5-22 注水試験による透水係数の深度分布

e. 地球化学特性

基礎試錐調査では、浸透率の測定を行った試料を利用して間隙水の分析が行われ、塩 化物イオン濃度が記載されている場合がある。また、産業技術総合研究所(2005)には、 温泉ボーリングの揚湯試験などで得られた熱水あるいは温泉水の水質分析結果が示され ている。また、地熱開発促進調査では産出試験時に水質分析が行われている。これらの 分析結果のうち微量成分の濃度から掘削水の混入がないと記載されている水質分析結果 のみを抽出した。

これらのデータは、必ずしも地下水質に係る主要成分の濃度データが記載されていな いため、最もデータ数の多い塩化物イオン濃度を対象にデータの収集・整理を行うとと もに、深度分布の検討を行った。また、詳細な水質分析結果は示されていないものの水 質型の記述がある場合は、試料の採取深度と水質型を抽出した。さらに、詳細な水質分 析結果が示されている場合は、その化学成分組成から水質型を判断し、深度とともにデ ータを抽出した。

・塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度と深度との関係を図 5-23 に示す。塩化物イオン濃度は 10,000 mg 1⁻¹以下のものが多いが、海水の濃度に近いものおよび海水の2倍以上 の濃度のものも認められる。深度との明瞭な関係は認められないが、深度 5,000 m 付近の海水の濃度を超えるデータを除くと、深度増加とともに塩化物イオン濃度 が小さくなる傾向が認められる。

・水質型

水質型は塩化ナトリウム(NaC1)型、重炭酸ナトリウム(NaHCO₃)型および硫酸ナトリウム(NaSO₄)型の三種類に区分した。一部Caイオン濃度の高いデータが認められたが、これらはCaイオン濃度と同等にNaイオン濃度も高く、陰イオンはClイオン濃度が高いことからNaCl型に含めた。なお、地下浅部で岩石/水反応で形成される重炭酸カルシウム(CaHCO₃)型は抽出されなかった。

水質型を深度 250 m 毎のヒストグラムとして図 5-24 に示す。各深度区間にお いて最も多い水質は NaCl 型で、それに次いで NaHCO₃型が多く NaSO₄型が最も少 ない。この傾向はどの深度区間でも同様で、特定の水質型が特定の深度に多くな るといった傾向は認めらない。

5 - 28



図 5-23 塩化物イオン濃度の深度分布





3) わが国で超深孔処分を行う上で検討すべき事項

ここでは、1)で収集・整理した諸外国における超深孔処分に対する地質環境の基本的 要件およびサイト選定条件、2)で収集・整理したわが国における地下深部(深度1,000m 以深)の地質環境特性を踏まえ、わが国で超深孔処分を行う上で検討すべき事項につい て整理した結果を述べる。

① 諸外国における地質環境の基本的要件およびサイト選定条件のわが国への適用上の 課題

1)で述べたように、諸外国における超深孔処分の対象母岩については、結晶質岩(花 崗岩)に限定し検討が進められている。諸外国で検討対象としている結晶質岩(花崗岩) の形成年代は、主として先カンブリア紀の花崗岩類であり、同時代の結晶質岩(花崗岩) はわが国には分布していない。わが国には、形成年代が異なるものの中生代以降の結晶 質岩(花崗岩)が、中部地方~中国地方~九州北部に広く分布しており、その他の地域 においても分布が確認されており、地下深部に広く分布している可能性がある。

アメリカをはじめとする諸外国において検討されている地質環境の基本要件は、結晶 質基盤岩の上限面分布深度、結晶質岩の地質・地質構造、基盤岩構造の複雑さ、水平応 力、地熱流速・地温勾配、隆起、第四紀断層と火山活動、地下資源などである。これら の地質環境の基本要件は、処分施設(深度数 km に及ぶボーリング孔)の建設・操業時に おける安全性や容易性、閉鎖後の安全性に係る要件であり、わが国においても結晶質岩

(花崗岩)を対象として超深孔処分を検討する上で参考になると考えられる。ただし、 わが国では、後述するように新第三紀の堆積盆が発達しており、地下深部に潜在する結 晶質岩(花崗岩)を被覆していると考えられる。新第三紀の堆積岩類などの分布深度や 堆積盆の発達過程などを考慮して、結晶質岩の分布に関するサイト選定条件を設定する 必要があると考えられる。

わが国は、太平洋プレートなどの四つのプレートが会合するプレートの収束境界に位置している。このため、相互のプレート運動の影響を反映した応力場が形成されている。 わが国における応力場に関するデータは深度約 1,500 m 以浅であり、超深孔処分の対象 となる超深部(深度数 km)での応力状態を把握できていない状態にある。このため、わ が国における超深部の応力状態に関して検討する必要があると考えられる。

わが国は地形の起伏に富み、国土の約70%を山地が占めている。諸外国の検討におい て設定されている"深部の地下水循環を避けるため、地形の傾斜は1°以上の地点まで、 約100km以上離れていること"の地形条件とその離隔距離に基づきサイトを選定するこ とは困難であると考えられる。しかし、超深孔処分の安全性の観点において、深部の地 下水循環による影響が小さい領域を選定することは重要であると考えられるため、異な る指標と閾値を検討する必要があると考えられる。

② 堆積岩の分布深度

諸外国の事例では、超深孔処分の対象となる母岩としては結晶質岩が想定されている。 わが国においても結晶質岩は母岩の有力な候補となり得るが、わが国では新第三紀の堆 積盆地が発達している。また、新第三紀の堆積盆地では、その基盤が結晶質岩である場 合が多く、結晶質岩を候補岩体とする場合でも、上載する堆積岩類の層厚はサイト選定 の際の重要な条件となる。そこで、2)で収集した地質情報のうち、深度方向の地質分布 が読み取れ、主要な坑井情報を網羅している、越谷ほか(2012)を利用して新第三紀層 の層厚を検討した。ただし、越谷ほか(2012)の資料では堆積岩と火山岩の区別がされ ていないため、ここで言う新第三紀層には火山岩類も含まれている。

図 5-25 と図 5-26 に新第三紀層の層厚の頻度分布を示す。わが国の新第三紀層の層厚 は 500 m 以下が多数を占めているものの、層厚 2,000 m 以上の箇所もある程度存在する ことが分かる。(2)で示したように、アメリカではサイト選定条件として結晶質岩上限面 の分布深度が 2km 以下とされているが、仮に類似の条件を想定した場合、このような条 件を満たす地域は国内にも多数存在すると考えられる。ただし、前述したように、この 層厚には火山岩類も含まれていることに注意を要する。



図 5-25 新第三紀層の層厚分布



図 5-26 新第三紀層の層厚分布(層厚 2,000 m以上)

③ 地温

IODP 国内科学掘削推進委員会(2002)は、国内外の大深度孔における地温の比較より (Yoshida et al.,1996)、ロシアのコラ半島の SG-3 号井で記録された地層温度は深度 12,000 m で 200 ℃、ドイツの KTB で記録された地層温度は 9,101 m で 260 ℃であるの に対し、日本の石油井である三島では深度 6,300 m で 225 ℃、西頚城では深度 6,005 m で 238 ℃であることから、日本の地層温度は世界的にも極めて高い、としている。わが 国は地熱資源国と言われており、諸外国と比べて地温が高いことは、超深孔を掘削する 上では留意する必要がある。しかしながら、基礎試錐「天北」では深度 5,050 m で 156.8 ℃ と比較的低温のデータも得られており、わが国においても地熱地域を除けば諸外国なみ の地温であると考えられる。

(3) 超深孔掘削関連技術などの調査

本項では、1)諸外国および2)わが国での超深孔掘削などの関連技術の開発動向や実績 に関する調査および情報整理を実施した。また、米国における深孔フィールド試験の現 状についても調査した。これらのまとめを(5)に示す。

1)諸外国における技術開発の動向

わが国において超深孔処分を行うとした場合の課題を抽出するにあたって、まず、諸 外国における大深度坑井の掘削技術の現状を整理した。前節でも述べたように、アメリ カ、スウェーデン、スイスなどにおいては、超深孔処分に関する検討が進められており、 掘削技術などの現状がまとめられている。技術開発動向の調査は、これらの国の文献を 主体とし、さらに関連した文献を対象に行った。情報を収集した文献を表 5-14 に示す。

文献 番号	書誌情報
1	Arnold, B.W. et al. (2011): Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT SAND2011-6749, 66p.
2	Sandia National Laboratories (2016): Deep Borehole Field Test Laboratory and Borehole Testing Strategy, FCRD-UFD-2016-000072, SAND2016-9235 R.
3	Pejac RD and Fontenot EP (1988): Design, testing and planning considerations for a 20 in record casing string. SPE Drilling Engineering June, pp.187–194.
4	Sandia National Laboratories (2015): Deep Borehole Field Test Specifications, FCRD-UFD-2015-000132 Rev. 1
5	Beswick, J. (2008): Status of Technology for Deep Borehole Disposal, EPS International, Contract No NP 01185, 91p.
6	Gibbs, J.S. (2010): Feasibility of Lateral Emplacement in Very Deep Borehole Disposal of High Level Nuclear Waste, Dept. of Nuclear Engineering, Cambridge, MA, MIT.
7	長縄成実(2006):最新の坑井掘削技術(その1),石油開発時, No.148, pp.5-13.
8	斎藤清次(1995):ドイツ KTB の掘削技術と日本の超深度掘削への期待,地質ニュ ース, No.488, pp.43-47.
9	IODP 国内科学掘削推進委員会(2002): IODP 掘削プロポーザル作成の手引き, IODP 国内科学掘削推進委員会 掘削・計測検討専門部会
10	石油技術協会(1998): 深堀技術分科会 1984 年から 1998 年の研究成果, https://www.japt.org/html/iinkai/drilling/seikabutu/fukaboriiin/fukabori.html
11	東洋エンジニアリング (1997): 深層ボーリング技術調査 (動力炉・核燃料開発事業 団 委託研究成果報告書), PNC TJ1277 97-003
12	日本地球掘削科学コンソーシアム (2005):地球をのぞくファイバースコープ陸上掘 削サイエンス・プラン, 101p.
13	齋藤清次・佐久間澄夫(2000):掘削編成降下中にトップドライブ装置でビットを冷却する新工法の経済性-高温度地熱井での実績と高温度油井に適用した場合の予測 -,石油技術協会誌, Vol.65, No.5, pp.403·416.
14	伊藤久男 (1996): 超深度ボーリング JUDGE 計画, 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.1, pp.3-13.
15	ICDP (2003): KTB Deep Crustal Laboratory of GFZ http://www-icdp.icdp-online.org /sites/ktbto/gfz_to.htm

表 5-14 超深孔掘削などに関する文献リスト

諸外国における大深度坑井の実績

諸外国における大深度坑井の実績について、掘削深度と掘削孔径、掘削リグ、掘削ツ ールス、方向制御技術の4つの観点から整理し、各項目について以下にその概要を記す。

a. 掘削深度と掘削孔径

Beswick (2008) は、世界各地の大深度坑井の実績を掘削目的に応じてその特徴を次のようにまとめている。

- ・ 金属探査を目的とした坑井で最も深い深度は、南アフリカで掘削された 5,420 m である。掘削孔径は小孔径で、59~76 mm である。
- 石油・ガス分野では、掘削深度も6,000mに達するものがあり、掘削孔径は一般に150~215 mmである。
- 地熱分野では、掘削深度は1,000~5,000mであり、掘削孔径も比較的大きく215 ~311 mmである。
- 主に学術調査で行われているものには掘削深度の深いボーリングがあり、旧ソビ エト連邦の Kola で掘削された 12,220 m(最終孔径 215 mm) あるいはドイツの 9,100 m(最終孔径 165 mm)がある。
- ・ 掘削孔径の大きなボーリングは、軍事目的で孔径 1.22~3.22 m、最大で 6.4 mの実績があるが、これらの掘削深度は最大で 1,500 m である。
- ・ 立坑も大口径で掘削されているが、実績としては、西オーストラリアで掘削され た孔径 4.4 mで掘削深度が 750 m あるいは孔径 5.8 m で掘削深度 520 m がある。

また、Sandia National Laboratories (2016) によれば、最も深い坑井は旧ソビエト 連邦 Kola の 12.2 km (口径 8・1/2":約 216 mm) であり、最も大きな掘削孔径はニュー メキシコ州で掘削された地熱井の 9・7/8"(約 250 mm)(掘削深度 4.4 km) である。

また、Arnold et al. (2011)は,超深孔処分のレファレンスデザインとして処分深度(裸 孔区間)3,000~5,000 m、孔底での孔径 17″(0.43 m)を示しているが、深度3,000~5,000 mの領域を孔径 17″(0.43 m)で掘削した実績は無いとしている。

b. 掘削リグ

Beswick (2008) によれば、石油掘削用のリグの最大吊り上げ能力は 900 トンであり、 最終孔径 500 mm で深度 4 km から 5 km に適用可能である。また、Sandia National Laboratories (2016) は、陸上用のリグには結晶質岩を孔径 8.5" (216 mm) で深度 5 km までの掘削が可能なリグが多く存在する、と述べている。

c. 掘削ツールス

Beswick (2008) によれば石油・ガス分野では、掘削と同時のモニタリング (MWD) あるいは掘削と同時並行の検層 (LWD) の装置が利用されており、これらの装置は孔径 311

mm から 445 mm のボーリング孔に適用できる。Sandia National Laboratories (2015) は、地熱関係のボーリングは、火成岩を対象とし、生産井が大孔径を必要とすることか ら、これらの実績が超深孔処分の参考となる、と述べている。

d. 方向制御技術

Arnold et al. (2011) は、超深孔処分における処分孔の間隔が 50 m であることから、 孔曲りを 0.6°以内に抑える必要性があるとし、孔曲りの矯正の必要性を指摘している。 方向制御技術の実績として Sandia National Laboratories (2016) は、ハイブリッドロ ータリーシステム (RSS) がドイツの KTB 孔 (掘削深度 9.1 km) において深度 6.1 km ま ですばらしい直進性を示したと述べている。なお、KTB 孔については後述するように深 度 7,000 m で 2°以内との実績が示されている。

② 諸外国における技術開発の最新動向

諸外国における技術開発について、掘削工法に関するもの、掘削ツールス、掘削リグ に関するものおよびその他の4つの観点で整理し、その概要を以下に示す。

a. 掘削工法

地下深部を対象としたボーリングのうち、石油・ガス分野では 100 年以上にわたって ロータリー工法が行われ、この枠の中での技術開発がすすめられており、掘削概念を根 本から覆すほどの画期的な技術革新は今のところない(長縄, 2006)。

Beswick (2008) は、地熱分野の掘削工法について、概ね石油・ガス分野と同じである が、石油・ガス分野よりも温度が高く硬質で亀裂が多いため、超深孔処分の対象となる 花崗岩の掘削技術の参考となる、と述べている。また、結晶質岩を対象とした超深孔掘 削ではビット重量が過大になることを指摘し、全断面掘削ではなく拡孔が必要であると 述べている。また、Beswick (2008) は、鉱業や採石産業で利用されているダウンホール ハンマー掘削 (DTH) では、直径 1,095 mm サイズのハンマーが入手可能であり、最近の 事例として振り子アセンブリで垂直性を制御できることが実証されていると述べ、超深 孔処分への適用性を示唆している。DTH 工法の利点について、Beswick (2008) は、掘進 速度を挙げ、パイロット孔掘削の候補となり得ると述べている。また、DTH 工法の課題 として水の存在を挙げているが、その対策として流体に発泡体を使用することを検討す るべきであると述べている。

Gibbs (2010) は、超深孔処分における処分孔の配置について、垂直定置に対してマル チラテラル孔のほうが 1 孔当たりの定置長を増加させることができると述べている。一 方、Beswick (2008) は、マルチラテラル孔は実績が小孔径に限られていることと、方向 を曲げるためのスプリッタが廃棄体定置の障害となる可能性を挙げて、現時点では推奨 しないとしている。

b. 掘削ツールス

Beswick (2008) は、結晶質岩を対象とした超深孔掘削ではビットとそれに関連する機器は重要な開発項目であるとしている。また、現状で大きな孔径が掘削されている油田掘削のツールスは、結晶質岩には利用できないため開発は必要であると述べている。

c. 掘削リグ

Beswick (2008) は、超深孔処分で想定される 750 mm あるいは 1,000 mm の孔径の掘削 に必要なケーシングの荷重は 2,000 トンに達し、現存のリグの能力を超えていると述べ、 さらに、荷重に対してはケーシングジャッキを使用することで対応できる可能性がある が、仮に荷重に対応できたとしてもケーシングの接続部の強度が問題となることを指摘 している。

d. その他

Sandia National Laboratories (2016) は、圧力をリアルタイムで管理することで孔 壁の崩壊を抑制する Managed Pressure Drilling (MPD)が、孔壁の維持だけでなくベント ナイト系泥水の代わりに、化学的な影響の少ない泥水を利用できる可能性を指摘してい る。

③ 超深孔の掘削技術に関連する既往の技術開発状況

超深孔においては、通常のボーリング掘削と比較して孔内ツールスの耐熱性および吊 り上げ荷重が課題となっており、これらに関する技術開発が求められている。その概要 を以下に示す。

a. 孔内ツールスの耐熱性

東洋エンジニアリング(1997)は、世界最高の地温である 500 ℃が観測された葛根田 の地熱井で使用された機器の耐熱温度として、ダウンホールモーターの 175 ℃、0-リン グの 190 ℃、計測デバイスの 175 ℃、分散剤の 300 ℃などを挙げている。これらのデ ータを元に、IOPD 国内科学掘削推進委員会(2002)は、現状の主な孔内機器の耐熱限界 をシールドベアリングビットの 200 ℃、ダウンホールモーターなどの孔内装置の 175 ℃、 掘削泥水の 300℃およびワイヤラインツールの 175 ℃としている。なお、葛根田におい て観測された地温よりも低い耐熱温度の機器で掘削を行っているが、これは、泥水循環 によって冷却していることによる(IOPD 国内科学掘削推進委員会, 2002)。葛根田にお いては、ビットの交換時においても泥水の循環が可能な冷却法(TDS-Coolong 法)を開 発して適用し(齋藤・佐久間, 2000)、孔内温度を 175 ℃以下に維持した(IOPD 国内科 学掘削推進委員会, 2002)。

耐熱性による適用限界の事例として、孔曲り制御装置であるハイブリッドロータリー システム(RSS)がある。RSS はドイツの KTB 孔(掘削深度 9,100 m)で使用されたもの の、耐熱性が 200 ℃であったため、深度 7,000 m までしか適用できなかった(東洋エン ジニアリング, 1997)。RSS を適用した深度 7,000 m までの孔曲りは 2°以内であったが、 RSS を適用できなかったそれ以深の深度 8,600 m 付近での孔曲りは 21°であった。

b. 吊り上げ荷重

石油技術協会(1998)によれば、世界最大の掘削リグはドイツの UTB-1 で、吊荷重は 816 トン、12,000 m までの掘削が可能である。実際に KTB 孔において 5・1/2"のケーシ ングをつないだ際の総重量は 399.3 トン(石油技術協会,1998)で、吊荷重の約半分の 値となっている。しかしながら、これは 5・1/2"サイズの実績であって、Beswick(2008) が指摘したように、超深孔処分で想定される大孔径の掘削に必要なケーシングの荷重に は適用できない。

④ 米国における深孔フィールド試験

米国エネルギー庁は超深孔処分の実現可能性を評価するためのフィールド試験を検討 している(DOE, 2015a; Sandia National Laboratories, 2015)。フィールド試験では、 結晶質基盤の地質学的に安定な岩盤において深さ5kmの2つの穴を掘削する。先ず、直 径約21.6 cmの「特徴調査用」の孔を掘削し、この孔を用いた物理的、科学的な運用基 礎調査を踏まえ、直径43.2 cmの「フィールド試験用」の孔を掘削する、これらの孔は、 お互いに200 m以内の場所に掘削する。

フィールド試験では、廃棄体パッケージのプロトタイプの試験、パッケージの地上に おける扱い、超深孔における定置と回収のためのシステムの試験を目的とし(Hardin, 2015)、超深孔の密閉(シール)の実地試験はこのフィールド試験の中では計画されてい ない。しかし、室内実験は計画されており、例えばシール材の性能の予測の技術的な基 盤を得ることは計画されている。(Arnold et al., 2013)

2) わが国における技術開発の動向

① わが国における超深孔の実績

表 5-15 にわが国における各分野での最大掘削長とその深度における最終孔径を示す。 わが国における掘進長 1,000 m以上の坑井は、温泉分野で最も多く、地熱分野(地熱開 発促進調査)および石油・天然分野(基礎試錐)で多くの実績がある。最も深い掘削深 度の実績は、基礎試錐の 6,310 m である。また最終孔径の最大 215.9 mm となっている。

分野	掘進長 1,000m 以上の坑井数	最大掘進長 [m]	最終孔径 [mm]			
石油・天然ガス井 (基礎試 錐)	64	6,310	215.9			
石油・天然ガス井(民間)	152	4,801	—			
地熱井	197	2,524	215.9			
土木関係(kunijiban)	0	545.7	—			
水井戸	42	2,200	100			
地下水全般	1661	6,310	_			
温泉井	397	2714	_			
地震計(Kik-NET)	27	3,510.5	(150) *1			
地震計(Hi-NET)	4	1,110	(150) *1			
*1)地震計の最終孔径は地震計を 5"ケーシング内に設置していることから、孔径 150 mm と推定した。						

表 5-15 国内における各種坑井の掘削深度と孔径

② わが国における超深孔の技術開発状況

IODP 国内科学掘削推進委員会(2002)は、国内外の大深度孔における地温を比較し、ロシアのコラ半島の SG-3 号井で記録された地層温度は深度 12,000 m で 200 ℃、ドイツの KTB で記録された地層温度は 9,101 m で 260°であるのに対し、日本の石油井である三島 では深度 6,300m で 225 ℃、西頚城では 6,005 m で 238 ℃であることから、日本の地層 温度は世界的にも極めて高い、としている。わが国は世界第三位の地熱資源国と言われ ており、諸外国と比べて地温が高いことは、超深孔を掘削する上では留意する必要があ る。しかしながら、基礎試錐「天北」では深度 5,050 m で 156.8 ℃と比較的低温のデー タも得られており、わが国においても地熱地域を除けば諸外国なみの地温であると考え られる。

東洋エンジニアリング(1997)は、深層ボーリングが技術的に困難な理由に地熱が 300 ℃を超えると軽合金パイプの強度が低下し、また、掘削泥水およびセメンチングが この温度に耐えられないことを挙げており、深度 10 km を目標としたボーリング技術に ついて、主に温度・地圧とのたたかいであると述べ、高度な冷却効率を有する装置を開 発する必要性を指摘している。ドイツの KTB 孔では孔曲り制御装置の耐熱温度が 200 ℃ であったため、7,000 m 以深では使用できなかった。その結果、7,000 m までの孔曲りが 2°以内であったのに対し、7,000~8,600 m では 21°となったことが報告されている(東 洋エンジニアリング, 1997)。

大深度ボーリングにおける高温対応策として IODP 国内科学掘削推進委員会(2002)は、 以下を挙げている。

- ・ワイヤラインツールをフラスコ内へ装てんすることによって 260 ℃対応とし、測定
 用ケーブル絶縁皮膜(温度限界 175 ℃)に高温用テフロンを使用することによって
 260 ℃対応としている
- ・泥水の高温対応としては、日本のテルナイトが開発した油井高温用ポリマー泥水で あるハイパーゲル泥水の 260 ℃、地熱井用泥水の 300 ℃があり、世界一の高温井 NED0 葛根田などに使用され実績をあげた。
- ・175 ℃の温度限界に達する前に孔内を泥水循環によって冷却している。

また、NED0 では葛根田の地温 500 ℃の条件下においても、泥水を循環して冷却することにより孔内温度を 170 ℃以下に抑制している (東洋エンジニアリング, 1997)。

(4) 超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と解析

本項目では、まず1)で予察的な超深孔処分の安全評価が実施されている米国の事例に 関する調査を行った。また、2)でその調査結果を参考とした解析モデルを構築し、わが 国での超深孔処分の安全上の課題を考察するための予察的な解析を試行した。これらの まとめを(5)に示す。

1) 米国の事例の調査

ここでは、米国の事例としてサンディア国立研究所の論文(Brady et al., 2009;Swift et al., 2011)(以下、「サンディア事例」という)を対象とし、以下の項目について調査した。

- 安全性確保の考え方
- ② FEP
- ③ 安全評価のシナリオ
- ④ 評価モデル
- ⑤ 使用データ
- ⑥ 評価結果

① 安全性確保の考え方

米国の超深孔処分では母岩として堆積層の下に存在する結晶質基盤岩を対象としてお り、サンディア事例では、以下のような特性により放射性核種の生活圏からの長期の隔 離を見込むことができるとしている。

- 移行経路が長いこと
- 流体の移動が遅いこと

4 km 以深における低間隙率 (<1%)、低透水性 ($10^{-16} \sim 10^{-20} \text{ m}^2$)、対流に安 定な高イオン強度の塩水 (convectively-stable high-ionic brine) (>=150 g L⁻¹)。なお、上記の $10^{-16}-10^{-20} \text{ m}^2$ は、Freeze and Cherry(1979)に示された permeability (固有透過係数、k[cm²]) と透水係数 K[m s⁻¹] の関係 (1 cm²= 9.80*10² m s⁻¹) から、 $10^{-9}-10^{-13}$ m s⁻¹と推定される。

上方向の圧力がないこと

被圧地下水がなく、上方向へ物質を移動させる圧力がない(予察的評価で は廃棄体からの発熱に由来する上方向の移流は考慮)。

核種放出や移行を制限する化学環境

還元性、高イオン強度のためコロイド形成が阻害される。また、岩盤およ び坑道充填材(borehole fill material)の収着性により移行が遅延される。 力学的安定性

花崗岩のような結晶質岩は以下の理由からボーリング孔設置に適する。 ▶ 大規模に比較的均質であること

- ▶ 低い透水性および間隙率
- ▶ 高い機械的強度(ボーリング孔の変形を防ぐ)
- ▶ 荷重が高いことによる移行経路となりうる亀裂の閉鎖

② FEP

サンディア事例では、超深孔処分の安全性に対する FEP を、以下のように検討している。

- 超深孔処分の安全性を検討するにあたって、Yucca Mountain Project(以下、 YMPとする)のFEPを起点とすることが合理的と考えた。
- 超深孔処分に潜在的に関連する FEP のうち、10⁻⁸ yr⁻¹以下のイベントは除外された。また、発生確率が高い FEP でも長期安全性に顕著な影響を与えないものは無視された。
- YMP の FEP から超深孔処分性能評価をスクリーニングするに当たり、以下の仮定 を置いた(40 CFR part 197 と同様)。
 - 生活圏被ばくはボーリング孔の直近の汚染された帯水層の地下水を取水する井戸を通じて発生する。非飽和帯への放出は考慮しない。
 - 廃棄体パッケージおよび廃棄体を移流へのバリアとして考慮しない。そのため、移流および移流による核種移行へのバリアとしての廃棄体パッケージおよび廃棄体の性能についての FEP は除外する。
 - 「ドリフト」は廃棄体を設置するボーリング孔の一部である(すなわち廃棄 体処分ゾーン waste disposal zone)。(注:「ドリフト」についての明確な 説明および本仮定に関する詳細な説明はないが、YMPのFEPにおいて廃棄体 を定置する横坑を指す「ドリフト」を、超深孔処分ではボーリング孔の廃棄 体定置ゾーンとして読み替える、ということだと考えられる)
 - ➤ EBS はドリフトおよびシール材 (seal) であるが、有効な影響はシール材に 由来する。(注:上記で「ドリフト」を廃棄体処分ゾーンと関連付けている ことを考えれば、安全機能は廃棄体処分ゾーンではなくその上のシール材 (ベントナイト)に依拠する、ということと考えられる)
 - 優先度が高い移行経路として、シール材を介した移行経路と周辺岩盤の飽和 帯を介した移行経路を想定する。
 - ▶ 海軍由来および DOEの使用済燃料は解析上無視する。
 - ▶ 回収可能性は方針上除外されている。

このような考え方に基づき FEP を検討した結果、サンディア事例では、YMP の FEP に 対して超深孔処分に特有の FEP として新規に追加するものはなかったとしている。また、 YMP の FEP から超深孔処分には影響しない FEP として、分子拡散、臨界がスクリーニン グされた。その理由としては、分子拡散(molecular diffusion)については、それにより 100 万年以内において核種が 200 m 程度移行するが、これは 1 km の閉鎖システム(seal system)を通過するには不足であること、また、臨界については、その可能性が、処分孔 の直径が使用済燃料における同位体濃縮による臨界体積よりも小さいという幾何学的な 拘束条件によって排除されること、が挙げられている。また、廃棄体パッケージおよび 廃棄体の化学的影響については、さらに評価する必要があるとしている。

③ 安全評価のシナリオ

サンディア事例では、安全評価のシナリオとして、移行経路に応じて以下の三つのシ ナリオを提示した(図 5-27)。

シナリオ1:ボーリング孔内の移行

核種はボーリング孔を通じて地下浅部の帯水層へ移行し、その水が生活圏に 汲み上げられることにより人間が被ばくする。本シナリオが成立する要件は、ボ ーリング孔内の透水性が(移行が生じる程度には)十分高いことと、水理ポテン シャルにおいて上方向の勾配が維持されることである。

ボーリング孔内の上方向の水理ポテンシャルの勾配(移行の駆動力)は以下 の条件に拠る。

- ▶ 周辺の水理条件(ambient hydrologic conditions)
- 廃棄体の発熱による流体の上方向の熱的圧力(thermal pressurization of fluid within the waste disposal zone from waste heat)
- 熱せられた流体の浮力 (buoyancy of heated fluid within the waste disposal zone)
- 水またはガスを放出する熱化学的反応(thermo-chemical reactions that release water and/or gases within the waste disposal zone)

シナリオ 2:ボーリング孔周辺の擾乱母岩中の移行

核種はボーリング孔周辺の擾乱を受けた母岩を通じた水理的移行によって 地下浅部の帯水層へ移行し、その水が生活圏に汲み上げられることにより人 間が被ばくする。本シナリオが成立する要件は、ボーリング孔周辺の母岩の 透水性が十分高いことと、水理ポテンシャルにおいて上方向の勾配が維持さ れることである。

なお、周辺母岩中の移行の駆動力はシナリオ1と同じである。

シナリオ 3:ボーリング孔から離れた母岩中の移行

核種は結晶質母岩や堆積層を通じた水理的移行により地下浅部の帯水層へ 移行し、その水が生活圏に汲み上げられることにより人間が被ばくする。本 シナリオが成立する要件は亀裂帯または断層が十分透水性が高いこと、およ び水理ポテンシャルにおいて上方向の勾配が維持されることである。 以下に示すサンディア事例での予察的性能評価では、シナリオ1、2を組み合わせた形 とし、以下のような設定を行った。

- 全長5 kmのボーリング孔の下部2 kmに垂直に400 体の燃料集合体(約150 metric tons)を定置(この2 kmを廃棄体処分ゾーン waste disposal zone とする)。
- PWR の初期インベントリは 2117 年時を想定。
- ・ 廃棄体処分ゾーンの上1,000 m 地点から井戸で地表(生活圏)に揚水。ボーリング孔と井戸の間の帯水層中の移行に関して、収着および減衰を考慮しない。



図 5-27 処分体系および評価シナリオの概念図 (Brady et al., 2009の記述に基づき作成)

④ モデル

a. 性能評価モデル

サンディア事例では、前述の③で示した評価シナリオ(1+2)に対し、以下のように モデル化を行った。

- ボーリング孔内の上方向の核種移行は1次元の移流分散方程式で解析する。
- 核種の減衰と収着を考慮する。
- 廃棄体の発熱により一定期間(200年、後述の2)参照)上方向の移流が発生する。
- 帯水層(1,000人に供給と仮定)中における混合希釈を想定する。
- · 揚水井戸付近の仮想的な人間への被ばく線量は Biosphere dose conversion factors(BDCs)により算出する。

なお、このモデルに基づく解析については、Brady et al. (2009)では解析解により Excel シートを用いて行っている。また、Swift et al. (2011)では GoldSim の Contaminant transport module を用いて解析を行っている。

b. 熱対流解析

シナリオ 1、2 では廃棄体定置領域からその上部 1,000 m (地下 2,000 m) までの領域 で熱対流が核種移行の駆動力になるとして、FEHM 法 (Finite Element Heat and Mass Transfer Code)による熱対流解析を行っている。ここでは半径 100 m、深度 2,000 m か ら 6,000 m の系で解析している。境界条件としては、別途行った熱解析の結果から、上 部 (深度 2,000 m) を 60 $^{\circ}$ 、下部 (深度 6,000 m) を 160 $^{\circ}$ と設定している。側部は地 熱勾配に応じて計算した一定温度を仮定している。シール材はベントナイトで、ここで は半径 15 cm を仮定している。解析体系の残りの半径 1 m までの部分は掘削影響領域の 物性値を用いている。これにより、1,000 年以内には熱対流による流速が 0 になるとい う結果を示している。

c. 地下水の揚水と希釈率の解析

前述の熱対流解析は深度2,000 mまでの解析である。安全評価シナリオでは、深度2,000 m から地表までの移行経路として、地下水の揚水が最も影響の大きい(悲観的な)シナ リオであるとし、揚水速度および希釈率の評価を行っている。ここでは、深度2,000 m の一定領域(ソース)から、熱対流解析の結果から計算される 0.0035 m³ yr⁻¹という流 速で核種が放出されるとして解析を行っている。円筒側部および下部は静的水理学条件 (流量一定)、上部はゼロフラックス境界としている。

解析は FEHM 法で実施した。水平方向の固有透過係数は 10⁻¹³ m²、鉛直方向は 10⁻¹⁴ m² である。また、ソースと揚水井戸の間には掘削影響領域が設定され、周囲の岩盤より透水性を 10 倍高くしている。この領域の間隙率は 0.01 (亀裂性岩盤の値) として設定し

た。帯水層の圧縮率は 10⁻⁴ MPa⁻¹とした。揚水率は、米国の平均的な値から、一人一日当 り 86.5 gal とした。

井戸の使用者が 1,000 人の場合と 25 人の場合で解析を行った結果、井戸からの揚水に よる希釈率をそれぞれ 3.16×10⁷、8.19×10⁵とする結果を得た。

⑤ データ

- 初期インベントリは YMP を参考に、PWR(2117 年時)のものを設定している。
- 各元素における溶解度制限固相の溶解度は PHREEQC ver. 2.12.03 およびローレンス・リバーモア国立研究所の thermo.com. V8.R6.230 データベースから計算。テクネチウムの溶解度制限固相である TcO₂の溶解度のみ YMP のデータベースから設定。
- ・ 廃棄体の発熱によるシール材中の上方向の移流は、熱対流解析の結果より 0.017 m yr⁻¹で 200 年間継続すると設定。200 年以降は上方向の移流は停止し、以後拡 散のみを考慮。
- 閉鎖されたボーリング孔の性質はベントナイトと亀裂性母岩を併せた形で表現 (直径 1.1 m、 透水性 1×10⁻¹⁶ m²、 間隙率 0.034、 密度 2,450 kg m⁻³)。
- ・ 井戸水の揚水を想定した核種濃度の解析結果により、帯水層中の移行時間は 8,000年、帯水層中の希釈係数は3.16×10⁷と設定。
- ・ BDCsはYMPから設定。

⑥ 評価結果

前述の②に記したように、発熱による上方向の移流が停止した後の拡散による移行で は、100万年間で顕著な核種量がシール材を通過することはない。その結果として、処 分場上部 1,000 m 地点で核種濃度が非ゼロ値を取るのは非収着性の I-129 と C1-36 のみ であり、非常に低濃度である (I-129 が 1.0×10⁻⁷ mg L⁻¹、C1-36 が 1.9×10⁻¹⁰ mg L⁻¹)。 また、他の核種のシール材中の移行については、1.4 m 移行した Se-79 と Sn-126 以外の 核種は数+ cm 内に留まる (Swift et al, 2011)。

RMEI (reasonably maximally exposed individuals)のピーク線量は処分後 8,200 年後 (うち、井戸中の移行時間が 8,000 年) の 1.4×10⁻¹² mSv yr⁻¹ (Brady et al, 2009)、 および 3.4×10⁻¹² mSv yr⁻¹ (Swift et al, 2011)である。ともにピーク線量の支配核種は I-129 であった。なお、RMEI とはネバダ州アマルゴサバレーの一般的な住民と同様の食 事・生活スタイルを持ち、最も汚染された土地で生活し、汚染された井戸水から1日2 リットルの水を飲用する大人と定義されている(United States Nuclear Regulatory Commission, 2016)。

2) わが国での超深孔処分を想定した予察的な解析の試行

① 目的

ここでは、わが国での超深孔処分の適用性の検討の一環として、わが国での超深孔処

分を想定した予察的な解析を試行する。この試行は、1)で示したサンディア事例を参考 とする。本試行は、サンディア事例をわが国の試行に取り入れる際に不確実性が高いと 考えられるパラメータについて感度解析的に設定することで、それら不確実性が結果に 与える影響を検討することを目的とするものであり、わが国の特定の条件を設定して結 果が安全かどうかを評価することを目指すものではない。また、この予察的な解析の結 果を参考に、わが国への超深孔処分の適用に向けて着目すべき課題を明らかにする。

2 核種移行モデル

前述の調査結果を踏まえ、わが国において検討する核種移行シナリオとして、Brady et al. (2009)の安全評価のシナリオ 1+2 およびシナリオ 3 に対応するモデルを設定すること とした。モデル概念図をそれぞれ図 5-28 および図 5-29 に示す。

まず、シナリオ 1+2 については、2)で整理したように、超深孔処分による安全性確保 の考え方には深部地質環境における母岩中の透水性が低いことが含まれるため、サンデ ィアの事例のように母岩よりも人工バリア(シール材)およびボーリング孔周辺 EDZ 中 の移行が卓越することを前提としたシナリオ 1+2 の検討は必要であると考えた。シナリ オ 1+2 では基本的にサンディアの事例を踏襲し、処分後 0 年で廃棄体から瞬時放出で核 種が放出されシール材に到達すると設定する。シール材に到達した核種は、拡散および 熱対流(初期の 200 年間)の影響で移流によりシール材中を 1,000 m 移行する。その後、 シール材を出た核種はボーリング孔上部に到達するが、その後の移行として次の 2 つの 経路を設定した。

- 経路①:人工バリア放出後生活圏へ至る間の時間が不明のため、保守的にボーリング孔上部領域における核種移行率の遅延を無視し、直接生活圏へと到達する。
- 経路②:サンディア事例と同様に人工バリア放出後の 8,000 年間移行して生活圏 へと到達する。ただし、経路②においてはサンディア事例を踏襲し、人工バリア 放出後の収着や溶解度制限といった移行遅延を見込まない。

一方で、わが国の深部地質環境において常に母岩への核種移行よりも人工バリア中の 移行が卓越するとすることは困難であり、母岩への放出を想定したシナリオ3について も検討することとした。シナリオ3では、廃棄体から瞬時放出された核種の主要な移行 経路が周辺母岩となることを想定する。本シナリオはサンディア事例で解析されていな いため、ソースタームについてはシナリオ1+2における扱い(処分容器寿命を見込まな い、瞬時放出など)を用い、一方、母岩中移行経路は、使用済燃料の地層処分システム に関する概括的評価(原子力機構, 2015)(以下、「直接処分第1次取りまとめ」という) での設定を参考に設定した。周辺母岩に流入した核種はニアフィールド母岩(マルチチ ャンネル)を移行する。母岩中の移行後は、シナリオ1+2と同様、経路①もしくは経路 ②により生活圏に到達するとした。



図 5-28 シナリオ 1+2 における核種移行の概念モデル



図 5-29 シナリオ3における核種移行の概念モデル

③ パラメータおよび解析ケース設定

表 5-16 に本解析におけるインベントリを示す。直接処分第1次取りまとめ(原子力機 構,2015)では処分後1,000年で廃棄体から核種が放出されるとしているが、本解析の レファレンスケースでは埋設直後からの放出を仮定しているため、直接処分第1次取り まとめと同様の使用済燃料(PWR,濃縮度4.5%,燃焼度45,000 MWD MTU⁻¹)に対し、炉取り 出し50年後のインベントリを設定した。また、超深孔処分における廃棄体は、廃棄体定 置領域の孔径が狭いことを考慮して、一廃棄体当たり燃料集合体一体を収容するものと 設定した。超深孔処分における廃棄体は、サンディア事例と同様に一本のボーリング孔 に対して400本としており、これは直接処分第1次取りまとめにおける廃棄体(燃料集 合体2体収容)200本に相当する。このため、直接処分第1次取りまとめの処分場に対 して本解析におけるボーリング孔一本あたりのインベントリは200/36,477≒1/173とな る。

	廃棄体一体あたりのインベントリ[Ba]								
拉话	直接	き処分第1次取りま	とめ(炉取出し後5	0年)					
权性	燃料体	燃料体 (瞬時溶解)	構造材	構造材 (瞬時溶解)	SANDIA				
C-14(無機)	2.5.E+10	2.7.E+09	-	-	2.3.E+10				
C-14(有機)	-	-	3.2.E+10	8.0.E+09	-				
CI-36	3.8.E+08	4.2.E+07	1.3.E+04	-	1.9.E+08				
Ni-59	4.0.E+08	-	1.7.E+11	-	-				
Ni-63	2.9.E+10	-	1.2.E+13	-	-				
Se-79	7.0.E+09	2.9.E+08	1.5.E+02	-	8.2.E+09				
Sr-90	3.2.E+14	3.2.E+12	9.3.E+06	-	6.8.E+14				
Zr-93	8.3.E+10	-	4.3.E+09	-	-				
Nb-93m	7.9.E+10	-	4.0.E+09	-	2.3.E+15				
Nb-94	1.3.E+07	-	1.6.E+10	-	-				
Mo-93	8.1.E+07	-	3.1.E+09	-	-				
Tc-99	6.0.E+11	1.2.E+10	4.6.E+07	-	2.4.E+11				
Pd-107	4.7.E+09	9.6.E+07	2.2.E+02	-	2.4.E+09				
Sn-126	2.1.E+10	8.7.E+08	7.1.E+02	-	1.6.E+10				
I-129	1.0.E+09	4.2.E+07	3.2.E+01	-	6.2.E+08				
Cs-135	2.0.E+10	8.4.E+08	5.1.E+02	-	9.9.E+09				
Cs-137	4.7.E+14	1.9.E+13	1.2.E+07	-	1.0.E+15				
Sm-151	6.1.E+12	-	2.0.E+05	-	-				
Pb-210	7.3.E+05	-	6.0.E-03	-	9.6.E+03				
Ra-226	1.3.E+06	-	1.1.E-02	-	3.5.E+04				
Ra228	6.0.E+01	-	4.1.E-07	-	5.4.E+00				
Ac-227	2.4.E+06	-	1.6.E-02	-	3.2.E+05				
Th-228	6.9.E+08	-	8.4.E+00	-	-				
Th-229	6.5.E+04	-	7.5.E-04	-	1.5.E+04				
Th-230	6.6.E+07	-	6.3.E-01	-	5.2.E+06				
Th-232	6.6.E+01	-	4.6.E-07	-	7.5.E+00				
Pa-231	2.9.E+06	-	2.0.E-02	-	5.4.E+05				
U-233	9.8.E+06	-	1.5.E-01	-	-				
U-234	8.7.E+10	-	9.9.E+02	-	-				
U-235	7.9.E+08	-	6.4.E+00	-	-				
U-236	1.3.E+10	-	9.2.E+01	-	-				
U-238	1.1.E+10	-	5.2.E+02	-	-				
Np-237	2.0.E+10	-	4.4.E+02	-	9.8.E+09				
Pu-239	1.3.E+13	-	6.0.E+05	-	5.2.E+12				
Pu-240	2.0.E+13	-	7.3.E+05	-	1.0.E+13				
Pu-241	4.6.E+13	-	2.3.E+06	-	4.4.E+14				
Pu-242	8.5.E+10	-	4.5.E+03	-	3.5.E+10				
Am-241	1.7.E+14	-	8.5.E+06	-	4.8.E+13				
Am-243	8.9.E+11	-	5.3.E+04	-	6.0.E+11				
Cm-244	3.1.E+12	-	2.0.E+05	-	-				
Cm-245	2.0.E+10	-	1.3.E+03	-	1.8.E+10				
Cm-246	3.1.E+09	-	2.0.E+02	-	-				

表 5-16 本解析におけるインベントリ

シナリオ 1+2 のレファレンスケースにおけるパラメータ設定値を表 5-17 に示す。基本 的に人工バリアの幾何形状や流速はサンディア事例での設定値を踏襲し、インベントリ、 Kd、実効拡散係数、溶解度、および線量換算係数(農作業従事者グループ)を直接処分 第1次取りまとめ(原子力機構, 2015)から設定した。なお、これらのパラメータは直 接処分第1次取りまとめにおける 60 ℃の設定値であり、より現実的には超深孔処分に おける地温勾配を想定した高温時の値を設定するのが望ましいと考えられる。

	モデル上の	· · ·	単位	値			
区分 取扱	取扱い	パラメータ		SF1	SANDIA	今回設定値	設定理由
		インベントリ	Bq	PWR 使用済燃料	PWR 使用済燃料	PWR使用済燃料 (SF1)	我が国のインベントリを使用 詳細インベントリは表5.4.3-1参照
		溶解時間	У	燃料体:1E7 構造材:11400	0	0	当該深度での溶解速度の知見がな いため、サンディア事例に従う
廃棄体	ソースターム	容器開口時期	У	1000	0	0	サンディア事例と同様、容器に安全 機能を見込まない
		廃棄体数	体	燃料集合体2体収容 の廃棄体34677本	燃料集合体1体収容 の廃棄体:400本	燃料集合体1体収容 の廃棄体:400本	5m毎に燃料集合体1本ずつ定置する と仮定 超深孔は十分離れた箇所に作られる ので本数は1本で検討
		移行距離	m	0.7	1000	1000	-
		断面積	m²	円筒座標系: 内側13.7,外側36.6	1.0	1.0	直径1.1m(サンディア)
		真密度	kg m ^{−3}	1600	2450	2450	サンディアの設定値(ベントナイトと周 辺岩盤の平均値)
シール材 + EDZ	多孔質媒体	間隙率	-	0.41	0.034	0.034	サンディアの設定値(ベントナイトと周辺岩盤の平均値)
		Kd	m ³ kg ⁻¹	還元性	還元性	還元性	SF1の設定値
		実効拡散係数	m ² s ⁻¹	還元性	還元性	還元性	SF1の設定値
		溶解度	mol m ⁻³	60 [°] ℃の設定値	100 [℃] の設定値	60 [°] ℃の設定値	SF1の設定値
		実流速	m y ⁻¹	0 (拡散支配)	200年間:0.5 200年以降:0	200年間:0.5 200年以降:0	サンディア
GBI	_	線量換質係数	Sv Ba ⁻¹	核種毎	核種毎	SF1の設定値	SF1の設定値

表 5-17 シナリオ 1+2 のレファレンスケースにおけるパラメータ設定

※SF1:直接処分第1次取りまとめ(原子力機構, 2015)

※青色のハッチング: SANDIA (Brady et al., 2009)を踏襲した設定。

表 5-18 にシナリオ 1+2 の変動ケースの設定を示す。また、表 5-19 にシナリオ 3 にお けるレファレンス設定および変動ケース設定を示す。

シナリオ 1+2 のレファレンスケースでは、サンディア事例を参考に使用済燃料や処分 容器に安全機能を見込まず、埋設直後に処分容器から全量瞬時放出として設定している。 超深孔処分においては、孔径の制限から強固な容器を用いることは困難であると考えら れ、安全機能を見込まないことは合理的であると考えられる。他方、全量瞬時放出とし ている点については、当該深部環境における燃料溶解速度が不明であるための保守的な 設定と考えられるが、詳細な環境条件(温度、地下水化学)により現実的な溶解速度を 設定できる可能性がある。そこで、燃料溶解速度の閉じ込め性能上の影響を見るため、 調和溶解成分を加えた燃料溶解速度の変動ケースを設定した。本ケースにおいては、直 接処分第1次取りまとめにおけるソースターム(燃料マトリクス、構造材)の設定を参 考に、燃料マトリクスおよび構造材を定常溶出とし、瞬時放出成分については瞬時放出 のままとした。

また、その他のパラメータの不確実性を考慮した変動ケースとして、シール材劣化ケ
ースおよび熱対流の不確実性ケースを設定した。

シール材劣化ケースは、地下水および熱(廃棄体+地熱)によるシール材の劣化を想 定したケースである。これにより影響を受けると考えられるパラメータは実効拡散係数、 収着分配係数、溶解度が挙げられる。ケース設定としては、これらのパラメータを単独 でレファレンスケースの設定値より保守側にしたケース、およびすべてのパラメータが 同時に保守側に変動したケースを設定した。

熱対流の不確実性ケースは、熱対流による地下水流速の不確実性を考慮した解析ケー スである。なお、本検討では、熱対流による地下水流速のレファレンス値はサンディア 事例での設定値をそのまま用いるが、本来はわが国の地質環境および廃棄体の条件を適 用した熱対流解析を行った上で得られた地下水流量の時間変化を適用すべきである。そ こで、熱対流による核種移行の促進効果の程度を抑えておくため、感度解析的にケース 設定を行った。具体的には、サンディア事例での設定値を起点として、実流速および熱 対流の継続時間がそれぞれ一桁大きいケースの他、両パラメータが同時に一桁大きくな った場合のケースも設定した。

シナリオ3は周辺母岩からの核種移行が卓越するケースである。現状では廃棄体定置 領域に該当する地下2,000 m以深における母岩中の核種移行パラメータを設定するため の水理的条件(動水勾配や透水量係数)や化学的条件(地下水化学、岩種)といったデ ータが不足しておりパラメータの設定が困難であるが、核種移行速度や核種移行遅延に 対してこれらのパラメータは感度が高いものと考えられる。そのため、ここでは水理学 的パラメータに着目し、感度解析的にパラメータを変化させた解析を実施し、地下深部 の水理学的パラメータ(シール材端部の EDZ 流量、母岩中の移行距離、母岩透水量係数、 母岩動水勾配)を個別に変化させることによりシナリオ3での核種移行に及ぼす影響を 検討することとした。5.2節での地質環境に関する調査結果では、すべての岩種につい ての透水係数の明確な深度依存性は認められないものの、基本的に超深孔処分よりも深 度の浅い直接処分第1次取りまとめ(原子力機構,2015)(地下1,000 mを想定)の設定 は保守的であると考えられる。従って、本検討におけるレファレンスケースでは直接処 分第1次取りまとめ(深度1,000 m)の値を設定し、変動ケースではレファレンスケー スの設定値を起点として感度解析を行った。また、シナリオ1+2で設定した燃料溶解期 間の変動ケースも併せて検討した。

表 5-18 シナリオ 1+2 の変動ケースにおける設定値

区分	パラメータ	単位	ref	case1	case2	case3	
燃料溶解期間 不確実性	溶解期間 (瞬時放出 成分以外 に適用)	У	0	1.00E+02	1.00E+03	1.00E+04	
	パラメータ	単位	ref	case1	case2	case3	case4
シール材劣化	実効拡散 係数	$m^2 s^{-1}$	SF1の設定値	refより1桁大	SF1の設定値	SF1の設定値	refより1桁大
个唯美性	Kd	$m^3 kg^{-1}$	SF1の設定値	SF1の設定値	refより1桁小	SF1の設定値	refより1桁小
	溶解度	mol m ^{−3}	SF1の設定値	SF1の設定値	SF1の設定値	可溶性	可溶性
熱対流不確実性	パラメータ	単位	ref	case1	case2	case3	
	実流速 (熱対流)	m y ⁻¹	0.5	5	0.5	5	
	熱対流 継続時間	У	200	200	2000	2000	

※ref はレファレンスケースを指す。

区分	パラメータ	単位	ref	case1	case2	case3	
燃料溶解速度 不確実性	溶解期間 (瞬時放出成分 以外に適用)	У	0	1.00E+02	1.00E+03	1.00E+04	
シール材端部のEDZ	パラメータ	単位	ref	case1	case2	case3	
流量の不確実性 (シール材と母岩との 接続部分)	EDZ流量	$m^3 y^{-1}$	1E10 (ゼロ濃度境界 条件)	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-03	
	パラメータ	単位	ref	case1	case2	case3	case4
	移行距離	m	100	500	1000	2000	3000
NF母岩の水理パラ	パラメータ	単位	ref	case1	case2		
メータ不確実性 (亀裂性媒体 マルチチャンネル)	透水量係数	$m^2 s^{-1}$	対数正規分布 (μ=-9.99, σ=1.07)	対数正規分布 (μ=-10.99, σ=1.07)	対数正規分布 (μ=−11.99, σ=1.07)		
	パラメータ	単位	ref	case1	case2		
	動水勾配	-	0.01	0.005	0.001		

表 5-19 シナリオ3の変動ケースにおける設定値

※ref はレファレンスケースを指す。

④ 結果および考察

シナリオ 1+2 のレファレンスケースの解析結果を、図 5-30(経路①:帯水層中移行時間 0年)および図 5-31(経路②:帯水層中移行時間 8,000年)に示す。

人工バリア(シール材)経由後の移行遅延を保守的に無視した経路①では、処分後約 200年で被ばく線量がピークに達する(支配核種は C-14)。対して、生活圏到達前に 8,000 年かけて帯水層を移行する経路②では、半減期約 5,700年の C-14 が減衰し、I-129 が支 配核種となる。被ばく線量は直接処分第 1 次取りまとめ(原子力機構, 2015)の基本シ ナリオで廃棄体 200本(使用済燃料 2 体収容)のみを対象とした場合の解析結果と同程 度の 2.4×10⁻³ μ Sv y⁻¹となる。



図 5-30 シナリオ 1+2 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路①)



図 5-31 シナリオ 1+2 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路②)

シナリオ3のレファレンスケースの解析結果を図 5-32(経路①)および図 5-33(経路 ②)に示す。経路①では Sr-90 が早期に母岩出口に到達し、1 µ Sv y⁻¹を超えるが、移 行時間 8,000 年を設定する経路②では、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構, 2015) の基本シナリオで廃棄体 200本(使用済燃料2体収容)のみを対象とした場合の解析結 果より1桁高い程度の線量(4.5×10⁻² µ Sv y⁻¹)となる。







図 5-33 シナリオ 3 レファレンスケースにおける被ばく線量の経時変化(経路②)

以上のレファレンスケースを基本として、③に挙げた各ケースを解析した。これらの ピーク線量を取りまとめたものを表 5-20 に示す。線量の比較として、直接処分第1次取 りまとめ(原子力機構, 2015)の基本シナリオで廃棄体 200本(使用済燃料2体収容) のみを対象とした場合の解析結果を示し、その結果よりも高いピーク線量となった値を 赤くハッチングしている。

			<u>+</u> =,		経路①			経路②	
解	析ケース	case	変動ハフメータ	ピーク時間	ピーク線量	+ = 1+1+1+	ピーク時間	ピーク線量	+ = = + 1+
			設定個	[y]	[uSv y ^{−1}]	文能修裡	[y]	[uSv y ⁻¹]	文配核裡
	SF1	_	-	1150	1.2E+00	C-14(有機)	4000	3.1E-01	C-14(有機)
SF1(2	本収容200本)	-	-	1150	7.0E-03	C-14(有機)	4000	1.8E-03	C-14(有機)
	レファレンス	-	-	205	1.1E-02	C-14(有機)	8175	2.4E-03	I-129
		case1	100 y	205	2.3E-03	C-14(有機)	8175	4.3E-04	I-129
	溶解時間	case2	1000 y	205	1.4E-03	C-14(有機)	8175	2.4E-04	C-14(有機)
		case3	10000 y	205	1.3E-03	C-14(有機)	8175	2.2E-04	C-14(有機)
シナリオ		case1	De1桁大	205	1.4E-02	C-14(有機)	8175	3.1E-03	I-129
シナリオ 1+2	之—————————————————————————————————————	case2	Kd1桁小	205	1.1E-02	C-14(有機)	8175	2.4E-03	I-129
	シール州 务 112	case3	可溶性	205	1.1E-02	C-14(有機)	8175	2.4E-03	I-129
		case4	case1+2+3	205	1.4E-02	C-14(有機)	8175	3.1E-03	I-129
	熱対流不確実性	case1	流速10倍	36	1.4E+01	C-14(有機)	8000	8.0E+00	I-129
		case2	継続時間10倍	343	1.5E+00	I-129	8338	8.6E-01	I-129
		case3	case1+2	36	1.4E+01	C-14(有機)	8000	Hether(2) ピーク線量 支配 [uSv y ⁻¹] 支配 3.1E-01 C-14(1.8E-03 C-14(2.4E-03 I-1 4.3E-04 I-1 2.4E-03 I-1 2.4E-04 C-14(2.2E-04 C-14(2.2E-04 C-14(2.2E-04 C-14(3.1E-03 I-1 2.4E-03 I-1 2.4E-03 I-1 3.1E-03 I-1 3.1E-03 I-1 3.1E-03 I-1 3.1E-03 I-1 8.0E+00 I-1 8.0E+00 I-1 8.0E+00 I-1 4.5E-02 I-1 6.0E-03 Ra-1 6.0E-03 I-1 6.0E-02 I-1 9.2E-03 I-1 4.6E-03 I-1 4.6E-03 I-1 4.8E-03 I-1 5.0E-04 I-1 2.4E-02	I-129
	レファレンス	-	_	40	5.9E+00	Sr-90	8000	4.5E-02	I-129
	溶解時間	case1	100 y	75	1.7E+00	Sr-90	8100	4.8E-02	I-129
		case2	1000 y	68	2.1E-01	Sr-90	8964	2.7E-02	I-129
		case3	10000 y	250000	1.9E-01	Ra-226	260000	6.0E-03	Ra-226
	EDZ流量	case1	$0.1 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$	138	4.4E-01	Sr-90	8000	4.7E-02	I-129
		case2	$0.01 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$	60	1.2E-01	Sr-90	8000	5.6E-02	I-129
		case3	$0.001 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$	54	1.0E-01	I-129	8000	6.0E-02	I-129
シナリオ3		case1	500 m	270000	3.0E-02	Ra-226	8250	9.2E-03	I-129
	母岩移行距離	case2	1000 m	312500	8.4E-03	Ra-226	8500	4.6E-03	I-129
		case3	2000 m	363	3.9E-03	I-129	8338	2.4E-03	I-129
		case4	3000 m	538	2.6E-03	I-129	8500	1.6E-03	I-129
	母岩漆水兽体粉	case1	中央値1桁小	312500	8.5E-03	Ra-226	8500	4.8E-03	I-129
	马石边小里休奴	case2	中央値2桁小	563	8.1E-04	I-129	8500	5.0E-04	I-129
	動水の町	case1	0.005	66	3.3E-01	Sr-90	8000	2.4E-02	I-129
	 新小勾配	case2	0.001	312500	8.5E-03	Ra-226	8500	4.6E-03	I-129

表 5-20 被ばく線量ピーク値のまとめ

※SF1 および SF1(2体収容 200本)の経路①は人工バリア出口の、経路②は母岩出口のピーク線量。

※赤色のハッチング:赤字の SF1(2体収容 200本)より線量が高いケース

レファレンスケースにおいては、経路①で C-14 (シナリオ 1+2)、および Sr-90 (シナ リオ 3) といった短半減期核種が支配核種となることが分かった。これは地層処分で 1,000 年と設定していた処分容器の閉じ込め機能を設定していないため、十分に短半減 期核種が減衰していないためである。一方で、帯水層中の移行時間を 8,000 年設定した 経路②ではこれらの核種が減衰し、両シナリオともに I-129 が支配核種となり、線量は 経路①よりシナリオ 1+2 で 1 桁、シナリオ 3 で 2 桁低下した。

レファレンスケースおよび感度解析ケースの結果の比較より、シナリオ 1+2 において は感度が大きいパラメータとして、燃料体の超深部環境における溶解速度および熱対流 によるシール材中の流速が抽出された。燃料体の溶解速度については、経路①・②とも に 100 年程度確保できれば線量が 1 桁低下するが、100 年以降は瞬時放出割合の寄与が 大きくなり、影響が小さかった。熱対流の流速については、経路①と②ともに流速が 10 倍大きくなると線量が 3 桁増大した。また、シナリオ 3 において感度が大きいパラメー タとして、母岩中移行距離・動水勾配および透水量係数が抽出された。母岩中移行距離 と動水勾配の影響は同様の傾向を示し、経路①と②ともにほぼ線形に寄与した。母岩の 透水量係数については、経路①と②ともに透水量係数分布の中央値が低下することに応 じて線量が低減した。

本試行の解析ケースにおいて特に高い線量となったのは、シナリオ 1+2 の熱対流不確 実性ケースであり、熱対流によるシール材中の流速が重要なパラメータとなることが分 かった。このため、周辺母岩の透水性が十分小さく、主要な移行経路がシール材および 周辺の EDZ となるシナリオ 1+2 の場合には、わが国の地質環境と燃料の発熱を考慮した 熱対流によるシール材および EDZ 中の上方移流速度を検討する必要があると考えられる。 シナリオ 3 においては母岩中の透水量係数に応じて線量が変化するため、処分深度にお ける母岩の透水量係数が重要となり、これは従来の地層処分と共通である。また、本試 行ではシナリオ 1+2 とシナリオ 3 を別個に検討したが、何れのシナリオが主要な移行経 路なのかを検討するためにも、廃棄体定置深度における周辺地質環境条件(特に水理学 的条件)の設定は重要になると考えられる。

経路①と②では感度が異なるパラメータも見られた。これはシール材出口におけるピ ーク線量に上記の通り C-14 (シナリオ 1+2)、Sr-90 (シナリオ 3) が大きく寄与してお り、これらの短・中半減期核種がシール材出口から生活圏に至る間に 8,000 年程度の時 間を経由することで減衰するためである。なお、この 8,000 年という設定はサンディア 事例での設定をそのまま用いているため、わが国の地質環境条件においてどの程度の地 下水移行時間を見積もることができるかが経路①と②との差の有無などの判断において 重要な情報になると考えられる。

(5) まとめと今後の課題

・超深孔処分相当の深度での地質環境の特徴の調査および情報整理

わが国における超深孔処分相当深度での地質環境の特徴について、諸外国の基本要 件やサイト選定条件のわが国への適用性などの観点から調査・情報整理を行った。

わが国の地下深部の地質環境について、密度、有効間隙率および浸透率については、 深度相関が認められた。一方、力学特性は明瞭な深度相関は認められなかった。温度 については基礎試錐の資料で比較的明瞭に深度の増加に応じて温度が高くなるものの、 地熱地域ではばらつきが大きいことが示された。地下水の水質は NaCl 型が最も多いこ とが判明した。しかしながら、水質型あるいはイオン濃度が深度に応じて変化するよ うな傾向は認められなかった。

諸外国では、操業時の安全性、地質環境特性の均質性や閉鎖後長期の安全性などの 観点から結晶質岩または花崗岩を対象母岩として検討が進められている。同様の考え 方を踏襲した場合にはサイト選定において対象母岩が限定されるため、通常の地層処 分に比べ不利な点であると考えられ、また、水平応力に異方性が認められないことを 要件とした場合にもサイト選定上の制約条件になるため、通常の地層処分に比べ不利 な点であると考えられる。

わが国では、形成年代が異なるものの花崗岩が広く分布すると考えられ、花崗岩を 対象母岩とすることは可能であると考えられるが、わが国が変動帯に位置することを 考慮し、火山や活断層に係る要件についてはわが国の地質環境を考慮した見直しが必 要である。また、地形勾配に係わる要件など、わが国では適用が困難な要件もあるた め、諸外国における要件の設定主旨を踏まえつつ、わが国独自の閾値などを検討する ことが必要であると考えられる。

わが国での超深孔処分相当の深度での地質環境の特徴の把握における今後の課題と しては、本検討で収集した地下深部のデータは、石油資源開発あるいは地熱資源開発 分野に関するものが多く、地下資源の存在の観点から超深孔処分に適さない地域のデ ータであり、超深孔処分に適した地域の情報が少ないことが第一に挙げられる。また、 堆積岩については、諸外国において検討対象の候補となっていないことから、地下深 部の堆積岩に関する地質環境データの収集とあわせて、結晶質岩を対象として検討が 進められている超深孔についての地質環境の基本要件やサイト選定条件との比較など を通じて、岩種の違いによる超深孔処分の成立性や優位性の違いの有無などについて 検討することが望まれる。

・超深孔掘削関連技術などの調査

超深孔掘削関連技術などの調査を実施した結果、一般的に、掘削孔径と掘削深度は 相反しており、また、掘削孔径が大きいとケーシングも大きくなる。アメリカの超深 孔処分で想定されている孔径の掘削に必要なケーシングの重量に対して、現状の掘削 リグでこれに適用できるものは存在しない。掘削工法については、アメリカではダウ ンホールハンマー工法が検討されている。しかしながら、わが国では地下水位が高い ため、すぐに適用することは困難である。また、アメリカでは、地下水に対応するた めスライムの排出を気泡で行うように改良することも検討されているが、逸水の多い わが国の岩盤に適用するのは現実的ではないと考えられる。掘削ツールスについては、 わが国でも主に耐熱性の観点から改良が進められており、現状で最も高い耐熱性を持 ったツールスが適用されたのが葛根田の事例である。

超深孔掘削関連技術について挙げられた課題としては、たとえば、廃棄体の定置間 隔を確保するために孔曲りの制御が重要となるが、方向制御装置の耐熱性は 200 ℃の ため、地温勾配が高い地域では、所定の深度に達する前に、方向制御装置は使用でき なくなる可能性がある。また、掘削リグの対荷重性能の向上や、軽量で強度の高いケ ーシングを開発する必要がある。孔径が大きくなると掘削ビットの断面積が大きくな り重量も増すため、軽量で掘削能力の高いビットの開発が望まれる。国内で超深孔を 掘削する際には、亀裂が多く地下水が豊富なわが国の地質環境特性を考慮して、亀裂 の多い結晶質岩を掘削する技術、急激な逸水や湧水をリアルタイムで制御して孔壁崩 壊を抑制する技術などの開発が必要になると考えられる。今後、これらの技術の状況 や開発予定などについて調査を継続することが考えられる。

・超深孔処分による安全確保の見通しに関する情報整理と解析

超深孔処分の安全評価が実施されている米国の事例に関する調査を行うとともに、 その事例を参考として、わが国での超深孔処分の安全上の課題を考察するための予察 的な解析を試行した。その結果、安全評価のシナリオ毎に感度が大きいパラメータを 把握した(坑道内移行を想定するシナリオでは熱対流速度、母岩経由の移行を想定す るシナリオでは母岩透水量係数、また両シナリオともに燃料溶解速度の感度が大きい)。 今後、わが国で想定される超深孔処分の深度における地質環境条件(水理学的条件な ど)や超深孔処分の対象となる廃棄物の条件(使用済燃料の種類・本数、処分容器の 形状、核種量、発熱量など)の設定、およびそのような条件下での処分システムの変 遷や核種移行挙動についてのシナリオ、モデル、パラメータの検討が課題となると考 えられる。

【参考文献】

- Arnold, B.W., et al. (2011): Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT SAND2011-6749, 66p.
- Arnold, B. W, P. Brady, S. Altman, P. Vaughn, D. Nielson, J. Lee, F, Gibb, P. Mariner, K. Travis, W. Halsey, J. Beswick, and J. Tillman (2013): Deep Borehole Disposal
 Research: Demonstration Site Selection Guidelines Borehole Seals Design, and
 RD&D Needs. SAND2013-9490P, FCRD-USED-2013-000409. U.S. Department of Energy,
 Office of Used Nuclear Fuel Disposition, Washington, DC.
- Beswick, J. (2008): Status of Technology for Deep Borehole Disposal, EPS International, Contract No NP 01185, 91p.
- 防災科学技術研究所(2012):高感度地震観測網:Hi-net,防災科学技術研究所 地震· 火山観測網,防災科学技術研究所.
- 防災科学技術研究所 (2017a): 強震観測網 (K-NET, KiK-net),
- http://www.kyoshin.bosai.go.jp /kyoshin/, (最終閲覧日:2017年1月23日) 防災科学技術研究所 (2017b): Hi-net 高感度地震観測網,
- http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja,(最終閲覧日:2017年1月23日)
- Brady, P.V., Arnold, B.W., Freeze, G.A., Swift, P.N., Bauer, S.J., Kenney, J.L., Rechard, R.P. and Stein, J.S. (2009): Deep borehole disposal of high-level radioactive waste, SAND2009-4401.
- 長縄成実(2006):最新の坑井掘削技術(その1),石油開発時報,No.148, pp.5-13.
- DOE (2015) : Deep Borehole Field Test: Site and Characterization Borehole Investigations Request for Proposal. Solicitation Number DE-NE0008071. July 8. Accessed November 30, 2015.

https://www.fedconnect.net/FedConnect/?doc=DE-SOL-0008071&agency=DOE.

- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979): Groundwater, Prentice-Hall, Inc., pp. 605.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015):わが国における使用済燃料の地層処分 システムに関する概括的評価 -直接処分第1次取りまとめ-, JAEA 技術報告書, JAEA-Research2015-016.
- Gibbs, J.S. (2010): Feasibility of Lateral Emplacement in Very Deep Borehole Disposal of High Level Nuclear Waste, Dept. of Nuclear Engineering, Cambridge, MA, MIT.
- Hardin E, Jenni K, Clark A, Cochran J, Finger J, Sevougian SD and Su J. (2016): Deep Borehole Disposal Waste Emplacement Mode Cost-Risk Study. WM2016 Conference Paper, March 6-10 2016, Phoenix, Arizona.
- 星野一男,加藤碵一,深部物性データ編集員会(2001):本邦産岩石の深部物性データ集, 産業技術総合研究所地質調査総合センター,479p.

放射性廃棄物 WG(総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射 性廃棄物 WG)(2014):放射性廃棄物 WG 中間とりまとめ 平成 26 年 5 月.

IODP 国内科学掘削推進委員会 (2002): IODP 掘削プロポーザル作成の手引き, IODP 国 内科学掘削推進委員会 掘削・計測検討専門部会

核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術 的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊1 わが国の地質環境,核燃料 サイクル開発機構, JNC TN1400 99-021.

国土交通省(2015):国土地盤情報検索サイトKuniJiban,

http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/, (最終閲覧日:2017年1月23日)

国土交通省, (2016): 国土政策局国土情報課 HomePage 全国地下水資料台帳,

http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/und erground/F9/exp.html(最終閲覧:2017 年 1 月 23 日)

越谷 賢, 丸井敦尚(2012):日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地 層境界面と層厚の三次元モデル(第一版),地質調査総合センター研究資料集, No. 564, 11p.

村岡洋文・阪口圭一・玉生志郎・佐々木宗建・茂野 博・水垣桂子(2007):日本の熱水 系アトラス,産業技術総合研究所地質調査総合センター.

齋藤清次, 佐久間澄夫(2000):掘削編成降下中にトップドライブ装置でビットを冷却す る新工法の経済性-高温度地熱井での実績と高温度油井に適用した場合の予測-,

石油技術協会誌, Vol. 65, No. 5, pp. 403-416.

Sandia National Laboratories (2015): Deep Borehole Field Test Specifications, FCRD-UFD-2015-000132 Rev. 1

Sandia National Laboratories (2016): Deep Borehole Field Test Laboratory and Borehole Testing Strategy, FCRD-UFD-2016-000072, SAND2016-9235 R.

産業技術研究所(産業技術総合研究所地質調査総合センター)(2005):日本温泉・鉱泉 分布図および一覧(第2版)(CD-ROM版),産業技術総合研究所地質調査総合センタ ー,1 CD-ROM.

石油技術協会(1998):深堀技術分科会 1984 年から 1998 年の研究成果,

https://www.japt.org/html/iinkai/drilling/seikabutu/fukaboriiin/fukabori.h tml

Swift, P.N., Arnold, B.W., Brady, P.V., Freeze, G., Hadgu, T., Lee, J.H. and Wang, Y. (2011): Preliminary performance assessment for deep borehole disposal of

high-level radioactive waste, IHLRWMC 2011, Albuquerque, NM, April 10-14, 2011.

天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会(1982):日本の石油・天然ガス資源《新版》技術 報告書 1982,天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会.

東洋エンジニアリング(1997):深層ボーリング技術調査(動力炉・核燃料開発事業団 委 託研究成果報告書), PNC TJ1277 97-003

- United States Nuclear Regulatory Commission (2016): https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part063/part063-0312.ht ml (2016 年 12 月 22 日閲覧)
- Yoshida, C., Oil and Gas Well Drilling in Japan (1996) : Progress and Outolook, VIII Int., Symp. Tsukuba, Japan, Feb. 26-28, pp. 46-51

第6章

おわりに

6章詳細目次

 おわりに ····································	6-1
6.1 成果の総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-1
(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発	
および閉じ込め性能評価手法の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-1
1) 先進的な材料の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-1
2) 閉じ込め性能評価手法の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-1
(2) 直接処分施設の設計検討	6-2
 直接処分方策に関する調査・検討 	6-2
2) 人工バリアの設計・・・・・	6-2
 処分容器の設計······ 	6-2
② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討 ・・・・・・・・・・	6-2
③ 緩衝材の設計・・・・・	6-2
3) 地下施設の概念設計	6-3
4) 搬送・定置設備の概念設計	6-3
(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-3
(4)その他の代替処分オプションについての調査・検討 ・・・・・・・・・・・	6-3
(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-3
6.2 今後の計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-4
(1) 直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発	
および閉じ込め性能評価手法の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-4
1) 先進的な材料の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-4
2) 閉じ込め性能評価手法の高度化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-4
(2) 直接処分施設の設計検討	6-4
 直接処分方策に関する調査・検討 	6-4
2) 人工バリアの設計・・・・・	6-5
① 処分容器の設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-5
② 処分容器の設計における臨界安全に関する検討	6-5
 3 緩衝材の設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-5
3) 地下施設の概念設計	6-5
4) 搬送・定置設備の概念設計	6-5
(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-6
(4)その他の代替処分オプションについての調査・検討 ・・・・・・・・・・・	6-6
(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6-6

6. おわりに

6.1 成果の総括

本事業は、わが国における地層処分の代替処分オプションの技術的基盤を提供するととも に処分方法についての幅広い選択肢を確保することを目標として、平成 25 年度~平成 29 年 度にかけての5ヶ年の計画で実施されている。平成 25 年度~平成 26 年度の2ヵ年において は、使用済燃料の直接処分に関する技術開発を先行して実施したが、平成 27 年度からはこれ に加えて、その他の代替処分オプションに関する調査と有効性の検討も視野に入れた技術開 発となっている。

本事業では以下の事業項目を設定し、使用済燃料の直接処分に関する技術開発およびその他の代替処分オプションについての調査を実施した。

- ・直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性 能評価手法の高度化
- ・直接処分施設の設計検討
- ・直接処分施設の設計支援システムの構築
- ・その他の代替処分オプションについての調査・検討
- 情報収集および評価委員会の設置と運営

以下に平成28年度に実施した上記事業項目の成果を総括する。

(1)直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能 評価手法の高度化

1) 先進的な材料の開発

処分容器材料への適用を考慮して平成 25 年度に提示された金属ガラスの候補材料を中心 に、物理化学的な基本特性や耐食性等の知見の整備を進めるとともに、従来の処分容器候補 材料との耐食性の比較検討に着手した。また、溶射によるコーティング等の施工技術に関す る適用性を検討し、適用にあたっての課題を抽出した。

2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

人工バリアの閉じ込め性能評価手法に関する研究として、処分容器等人工バリアを構成す る金属材料を対象に、使用済燃料の直接処分を想定した深部地下環境における腐食現象の理 解やメカニズム解明および耐食性向上のための試験、文献調査等を実施した。また、微生物 の影響について、直接処分を想定した長期的な閉じ込め機能への影響評価、影響緩和のため の工学的対策等の観点からの知見を整備した。また、緩衝材によるC-14の移行遅延機能に着 目し、有機化合物の形態で存在するC-14(酢酸イオン等)の緩衝材中の実効拡散係数の整備 を行った。使用済燃料集合体からの瞬時放出および長期溶解について、諸外国におけるソー スターム評価で考慮されている不確実性の調査、国内の使用済燃料の多様性に応じたFGRの検 討などを行った。また、それらの結果に基づいて国内向けのソースタームパラメータの暫定 値を一部更新するとともに、不確実性を取り入れたパラメータの幅を設定した。多重バリア の閉じ込め性能の評価手法について、設計オプションの違いによる水理・物質移行への影響 の定量的な比較・評価に向けて、広域的なスケールの観点からは地質環境条件の多様性(大 規模な断層、海水準変動などに起因する長期変遷など)と処分場位置との組合せの影響、局 所的なスケールの観点からは地質環境条件の多様性(岩種、小規模断層、亀裂の不均質性な ど)と定置方式との組合せの影響等を比較・評価する手法を例示した。また、設計研究の進 展による設計オプションの充実等を踏まえて、閉じ込め性能評価手法を検討するうえでの課 題を再整理するとともに、対応状況の確認などを行った。

(2) 直接処分施設の設計検討

1) 直接処分方策に関する調査・検討

保障措置技術について、超音波計測を用いた廃棄体の同定・識別および未開封確認技術な どの適用可能性を検討した。核セキュリティ対策については、設計基礎脅威の設計手順を参 考に考察した仮想脅威に基づいて物理的な核セキュリティ対策を検討した。また、国際会議 等を通じてIAEAおよび諸外国の関係者から使用済燃料の直接処分に適用する保障措置および 核セキュリティシステムの概念検討の現状に関する技術的トピックの情報を収集した。これ らの結果、処分施設の設計段階で考慮すべき保障措置・核セキュリティ上の要件や適用可能 な技術が明らかになった。

2) 人エバリアの設計

①処分容器の設計

炭素鋼処分容器およびそのオプションとなる銅と炭素鋼からなる複合容器を設計対象とし、 また、PWR および BWR の代表的な使用済燃料集合体を処分対象として、横置きおよび竪置き 定置方式に対応する処分容器の設計を実施した。また、燃料の多様性に着目し、臨界安全解 析、放射線遮へい解析を実施し、使用済燃料集合体の収容体数、寸法、肉厚等の基本仕様の 成立性を評価した。さらに、封入後の使用済燃料集合体や処分容器の構造健全性に関る評価 等を実施し、基本仕様の成立性を確認した。

②処分容器の設計における臨界安全に関する検討

臨界安全ベンチマーク実験データ ICSBEP に内蔵される実験データを対象とした代表性評 価や未臨界を判断するための中性子増倍率の基準値の設定に関する調査・検討を行った。ま た、中性子吸収材の候補材料に対して、未臨界担保のための最小必要量等の検討を PWR 使用 済燃料を対象として行った。さらに、緩衝材や岩盤を構成する物質の中性子反射体効果につ いて、反射体に SiO₂または砂を使用した臨界実験の解析を実施し、SiO₂反射体効果の妥当性 の確認を行った。設計を超える事態の影響評価の必要性については、諸外国の臨界発生時の 影響評価事例について文献調査を行い、保守的な臨界発生シナリオにおいても処分場性能に 影響を及ぼす可能性は小さいことが示唆された。

③緩衝材の設計

銅外層と炭素鋼からなる複合容器を対象として、軟岩・硬岩の両岩盤条件及び横置き定置

方式についてガラス固化体仕様の緩衝材による処分容器の支持性能を確認した。炭素鋼処分 容器の場合の堅置き定置方式については、ガラス固化体仕様の緩衝材による支持性能は確認 されたものの、せん断応力が卓越する箇所が見受けられたため、異なる仕様の緩衝材による 性能確認を行った。また、人工バリアを PEM とした場合について、硬岩系岩盤の条件及び堅 置き定置方式を対象として、ガラス固化体仕様の緩衝材による処分容器の支持性能の確認を 行った。

3) 地下施設の概念設計

地下施設の設計の最適化に向けて、人工バリアの設計及び搬送・定置設備の設計との連携 を考慮した地下施設の設計フローを構築した。また、操業時の荷重に対する坑道底盤の安定 性について、代表的な人工バリア仕様としてブロック方式および PEM 方式、定置方式として 堅置き定置方式を対象とした評価を行った。さらに、支保工について、地下施設の設計に使 用する場所打ちコンクリートの配合選定のための基礎物性の取得を行った。

4) 搬送・定置設備の概念設計

搬送・定置設備の設計を人工バリアや地下坑道等の他施設の設計と整合したものとしてい くための設計フローを構築した。これにより、ブロック・竪置き方式を対象に、他施設の設 計との整合に配慮した搬送・定置設備および地上施設の概念設計例を提示した。

(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築

地層処分エンジニアリング総合支援システム(iSRE)の構築として、データベース機能に ついては、統合データベースと設計データベースの詳細設計と試作を行い、積算データベー スと維持管理補修履歴データベースの基本設計を行った。また、解析データの参照にアクセ スするためのインターフェースについて試作を行った。さらに、試作したインターフェース とデータベースの機能の一部を用いた試行を行った。試行を通じて明らかになったデータベ ースやインターフェースの機能や運用方法についての課題等に対する見直し・改良を行った。

(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討

わが国への超深孔処分の概念の適用を検討するための情報基盤の整備として、検討が進ん でいる米国等での検討の背景や根拠、及び超深孔の深部地質環境特性、超深孔の掘削技術、 超深孔処分の安全評価についての国内外の文献調査と整理を行った。

(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施内容について、国内外の関係機関や大学等との間で必要に応じ情報交換等を 実施し、関連技術等についての最新情報を入手するとともに、成果の普及などを積極的に実 施した。

また、外部の専門家・有識者等で構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果 の評価等に関する審議・検討を行い、成果報告書を取りまとめた。

6.2 今後の計画

(1)直接処分システムの閉じ込め性能を向上させる先進的な材料の開発および閉じ込め性能 評価手法の高度化

1) 先進的な材料の開発

金属ガラスについて、平成28年度までの成果に基づき、引き続き耐食性を含めて基本特性 に関するデータ取得等知見の整備を行うとともに、従来の処分容器候補材料との耐食性の違 いについて検討を継続する。これらの結果に基づいて処分容器材料としての性能を評価する。 また、溶射によるコーティング等の施工技術に関する適用性の検討を継続し、処分容器とし ての施工性を評価する。以上をもとに、金属ガラスの処分容器材料としての適用性を総合的 に評価して取りまとめるとともに、実用上の課題を抽出する。

2) 閉じ込め性能評価手法の高度化

引き続き金属材料の腐食現象の理解・メカニズム解明や、腐食による緩衝材特性への影響 評価のための試験及び文献調査を行い知見を拡充するとともに、平成 28 年度までに得られた 知見を含めて処分容器による閉じ込め機能の高度化の可能性を提示する。また、微生物の活 動に着目し、直接処分システムにおける多様な微生物の影響を考慮し、微生物の種類(硫酸 |還元菌、メタン生成菌、酢酸生成菌等) や共存するベントナイトの影響についてデータの拡 充を行うとともに、人工バリアの閉じ込め性能に及ぼす影響を整理する。更に、緩衝材によ る C-14 等の移行遅延機能については、有機化合物形態の違いに加えて分子量が異なる C-14 に対して実効拡散係数の実測値を整備し、化学形態や分子量が C-14 の拡散挙動に及ぼす影響 について整理する。使用済燃料のソースターム評価では、放射性核種放出挙動の指標となる 国内の使用済燃料における核分裂生成ガスの放出率の解析的調査等を通じて知見を拡充する とともに、平成28年度までに収集した関連情報を総括することで、ソースターム評価をより 現実的にするために必要な項目を整理する。また、調査した燃料溶解速度について、我が国 で想定される緩衝材間隙水への適用性を評価するため、UO2の溶解速度の炭酸濃度依存性に ついて実験的に調査する。多重バリアによる閉じ込め性能の評価手法については、様々な設 計オプションと地質環境条件との組合せ及びスケールの違い等に起因する影響の類似点・相 違点の分析並びにそれら影響の評価手法の体系的整備を行い、取りまとめる。

(2) 直接処分施設の設計検討

1) 直接処分方策に関する調査・検討

国際会議等を通じて IAEA 及び諸外国の使用済燃料の直接処分施設に適用する保障措置及 び核セキュリティの検討状況について、情報を継続して入手する。処分容器の固有性確認技 術に関しては、シミュレーション解析または試験サンプルを用いて、識別符号の付与方法を 含む超音波探傷技術による固有性確認方法の適用性を評価する。加えて、複合容器に対する 超音波探傷測定に係るシミュレーション解析を行い、複合容器への超音波探傷技術の適用可 能性を評価する。上記結果及び平成28年度までの結果を踏まえて、我が国の特徴に応じた処 分施設の設計に反映する保障措置技術、核セキュリティ技術を整理し、取りまとめる。

2) 人工バリアの設計

①処分容器の設計

処分容器仕様に影響を及ぼす設計因子と条件の不確実性及び多様性を考慮して臨界安全、 放射線遮へい性等に係る解析を実施し、平成28年度までに設計した基本仕様の成立性を評価 する。平成28年度までの検討結果と合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立性が確 認された処分容器の仕様を、設定手法、適用範囲及び今後の合理化の可能性とともに整理し、 設計事例として提示する。

②処分容器の設計における臨界安全に関する検討

緩衝材や岩盤を構成する物質の反射体効果について、平成28年度にSi02の反射体効果の 検証で対象とした臨界実験と直接処分体系との類似性について評価を行い、Si02反射体効果 の直接処分体系への適用性を確認する。また、設計を超える事態の影響評価の必要性につい て、米国等でエネルギー発生等の観点での臨界発生時の処分システムへの影響評価に適用さ れた手法の、我が国への適用性等を検討する。中性子吸収材については、BWR使用済燃料に おける現実的な吸収材の挿入添加量等について検討を行う。さらに、これまでの検討結果を、 処分容器の設計検討に適用できる臨界安全評価技術として取りまとめる。

③緩衝材の設計

複合容器について、これまで未検討である竪置き定置方式の人工バリアを対象として、緩 衝材による処分容器の支持性能を確認する。また、人工バリアを PEM 方式とした場合につい ては、平成 28 年度以外の岩盤条件や定置方式を対象として緩衝材による処分容器の支持性能 を確認する。平成 28 年度までの検討結果と合わせて、種々の設計因子や多様性に対して成立 性が確認された緩衝材の仕様を、設定手法、適用範囲及び今後の合理化の可能性とともに整 理し、設計事例として提示する。また、設計に必要となる緩衝材の物性値の取得を継続し、 緩衝材設計の基本データとして取りまとめる。

3) 地下施設の概念設計

人工バリアのレイアウトをオプションから合理的に選定するため方法論として、平成 28 年度までの成果に加え力学的安定性、施工性、経済性等に対する指標を考慮した取りまとめ を行う。さらに、場所打ちコンクリートを対象とした配合選定のための基礎物性の取得を継 続し、平成 28 年度までの検討結果とあわせて、HFSC コンクリートの吹付けコンクリート及 び場所打ちコンクリートの配合選定のための情報を取りまとめる。

4) 搬送・定置設備の概念設計

平成28年度までに検討した、搬送・定置設備への適用可能な技術、他施設との整合を考慮 した搬送・定置設備等の設計フロー及びそれらに基づく設計事例に関する検討結果を取りま とめる。

(3) 直接処分施設の設計支援システムの構築

維持管理補修履歴データベースと積算データベースの詳細設計と試作、モニタリングデー タの更新とのインターフェースの試作を行う。また、設計支援システムの試運用として、地 層処分事業の各段階で行われる行為を想定した機能検証を行う。これにより、プロトタイプ としての設計支援システムを提示するとともに、実際の地層処分事業への適用に向けて充実 させるべき事項とその対策案を整理する。

(4) その他の代替処分オプションについての調査・検討

超深孔処分について引き続き調査を実施して最新情報を整理するとともに、我が国におけ る適用にあたっての成立性の見通し、適用に向けての技術的課題のほか、社会・経済を含む 全般的な課題等を従来の地層処分との比較を含めて整理する。

(5) 情報収集および評価委員会の設置と運営

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学等との間で必要に応じて情報交換等を実施し、関連技術等についての最新情報を入手するとともに、成果の普及等を積極的に行う。 また、本事業に係る専門家・有識者等で構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、 結果の評価等に関する審議・検討を行い、事業報告書を取りまとめる。さらに、平成25年度 ~平成29年度の成果を5か年の報告書として取りまとめる。

付録1

検討課題の再整理の詳細手順

1. 検討の前提の整理

1.1 使用済燃料直接処分に関する設計オプションの整理

本研究では、昨年度までの公募報告書における検討や使用済燃料の直接処分を計画してい る諸外国における基本仕様の設計概念および設計オプションなどを調査し、本事業で別途検 討の行われているオプション(坑道掘削方法や坑道の連続性(貫通型か袋小路か)など(原 子力機構,2016))に加え、近年の本事業の他の研究で検討されているオプション(低アルカ リセメント(原子力機構,2015a)など)を調査し、検討対象とすべき設計オプションを抽出 した(付図 1-1)。ここで、性能評価などの詳細な検討が行われる段階には至っていない開発 中の概念(セラミック製処分容器や CARE 定置方式など)を除いた。設計オプションは、処分 場構成要素として処分容器、緩衝材、坑道、レイアウトに大別して区分した。また、厳密に は設計オプションではないが、廃棄体の違いに直結する燃料の種類(炉型・燃焼度の違い) も設計オプションのひとつとして整理した。



付図 1-1 本研究で検討対象とする設計オプションの整理結果

1.2 使用済燃料直接処分に関する安全機能の整理

閉じ込め性能の観点から上述した種々のオプション間の比較を行うために着目すべき指標 として、地層処分システムの安全機能を整理し、またこれらを規定する主要な状態変数を THMCR に応じて抽出した。本検討における安全機能としては、使用済燃料の地層処分システ ムに関する概括的評価第1次取りまとめ(原子力機構,2015b)(以下、「直接処分第1次取り まとめ」という)において挙げられている安全機能のうち、地下水移行シナリオにおける核 種の閉じ込め性能に直接寄与するもの(処分容器による核種閉じ込め、使用済燃料による核 種溶出抑制および核種の溶解度制限、緩衝材中での小さな物質移行速度、緩衝材中での核種 移行遅延(収着)、コロイドの移動の抑制(ろ過性)、母岩中での核種の移行抑制)を対象と した。なお、母岩中での核種の希釈・分散は、諸外国の事例でも必ずしも安全機能として認 識されているわけではない(例えば、SKB(2011a)など)ことを勘案し安全性に寄与し得る 副次的な効果として参照するにとどめた。また、直接処分第 1 次取りまとめ(原子力機 構, 2015b) において挙げられている安全機能のうち、「人工バリアの化学的緩衝性」および「緩 衝材の膨潤性と可塑性」については、前者は人工バリアの安全機能(上記の全て)、後者は緩 衝材の安全機能(緩衝材中での小さな物質移行速度、緩衝材中での核種移行遅延(収着)、コ ロイドの移行の抑制(ろ過性))の機能を維持するための間接的な安全機能と位置づけ、各設 計オプションにおけるこれらの状態変数(例えば、化学的緩衝性は THMCR の C に影響する) に含めて考慮するものとした。そして、こうして抽出した各安全機能について、影響因子と なる状態変数を SR-Site における同様の整理 (SKB, 2010a) などを参考にしつつ対応づけた。 こうして抽出された、設計オプション間の比較に際して着目する安全機能およびこれらに影 響を与える状態変数を付図 1-2 に示す。



付図 1-2 設計オプション間の比較に際して着目する安全機能およびこれらに影響を与える 状態変数

1.3 検討対象とする多様な地表・地質環境の整理

我が国における多様な地表および地質環境としては、直接処分第1次取りまとめ(3章)(原 子力機構,2015b)を参考として以下の項目を設定した。

・岩種

岩種の区分には様々な基軸があり得るが、ここでは、NUMO セーフティケースワークショップ(原環機構, 2016)における議論を参考に、結晶質岩(深成岩)、先新第三紀堆積岩および新 第三紀堆積岩の三種類の区分を考えた。 ・断層・破砕帯などの高透水性構造、透水性割れ目、母岩透水性

地質環境の水理に関する特徴は、種々の設計オプションの地下水移行シナリオにおける閉 じ込め性能を比較する上で特に重要性が高いと考えられることから、SR-Site などにおける 水理地質構造区分(SKB, 2011a)を参考にしつつ、断層・破砕帯などの高透水性構造およびそ の他の透水性割れ目をそれぞれ区別して考慮することとし、それぞれの分布頻度に関して半 定量的に範囲の区分を行って具体的な議論を行い易くすることに留意した。また、岩盤マト リクス自体を難透水性とみなすことのできる SR-Site などの結晶質岩の事例と異なり、我が 国における多様な岩種の中にはマトリクス自体の透水性も無視し得ない場合があることから、 マトリクス部の寄与も含めた母岩透水性についても同様に範囲をある程度区分した。

地下水質

収着分配係数や溶解度、実効拡散係数といった処分場から放出された核種の移行に関わる 重要パラメータは、地下水質の影響を強く受ける。本項目では、これまでの地層処分研究を 踏襲し、地下水質として降水系地下水と海水系地下水を設定した。

• 地温勾配

地下水質と同様に、核種移行に関わる重要パラメータは温度の影響を受ける。このため、 我が国において考慮すべき地質環境条件の一つとして、地温勾配についても着目し、一般的 なレベルである 0.03 ℃ m⁻¹ 程度以下とそれよりも顕著に高い場合とを区分して考えた。た だし、熱水などの火山活動の影響が明瞭な地域はサイト選定時に除外されると考えられるた め、極端に大きい地温勾配は整理から除いて考えた。

・地理

沿岸域においては江線移動やそれに伴う環境条件の変遷の影響に注意する必要がある。こ れらの変遷は、主に処分場の初期配置(処分当初の江線からの距離)と、以降の長期的変遷 (隆起・侵食による処分場の地表接近および海水準変動)に拠ることから、内陸、沿岸部お よび島嶼といった地理的区分に着目した。また、気候変動の影響を考慮するために、緯度(高 緯度、低緯度)を設定した。

• 地形

地形に関しては、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構,2015b)と同様、山地、丘陵、 平野および海域を想定するが、特に海域に関しては海底の地形勾配によって海水準変動に伴 う汀線移動の距離が顕著に異なることから、急峻地形と遠浅地形とを区分して考えた。

• 地形変化

隆起・侵食の影響を検討するため、隆起傾向にある地域と沈降傾向の地域とに大別し、さ らに前者については、隆起速度の大きい地域と小さい地域を区分して考えた。また、海水準

付 1-4

変動や汀線移動と隆起侵食の複合的な効果として、上記に加え地表水系の変化および気候変 動に対する緯度の影響を考慮することが必要となることから、これらの要因を地表環境の特 性の一部として含めた。なお、これらの将来の地表環境に対応した土地利用の在り方に関し ても、現在の土地利用と同様の区分を参考として設定した(国土交通省の土地利用現況図(国 土地理院)などを参考にして概略的な区分を設定)。

・水系

地下水シナリオにおいては、処分場から放出された核種は生活圏の何処かの水系に流入し、 人間と接触するとして被ばく経路が設定される。このとき、核種の流入する水系に応じて人 間の利用形態が変化し、あるいはその水系の規模によって希釈率が変化する。これらのこと から、流量や利用形態の違いを想定し、水系として大規模河川、小規模河川、沢、湖沼、海 を設定した。

· 土地利用

上記の通り、地下水シナリオでは処分場から放出された核種は生活圏の水系に流入するが、 生活圏評価では水系から周辺の土壌などへの移行も想定してモデル化される。土地の利用形 態によって人間とその土地の関わりも変化するため、土地利用形態として水田、農地(普通 畑、果樹園など)、草地、林(針葉樹林、広葉樹林など)、市街地を設定した。

以上に基づき抽出・整理した我が国の地表環境および地質環境の多様性を付図 1-3 に示す。



付図 1-3 設計オプション間の比較において考慮する地表環境および地質環境の多様性

2. 検討課題の再整理

- 1.に整理した前提に基づき、下記の手順で再整理を行った。
 - 2.1 安全機能の観点から見た設計オプションの差異による検討課題候補の抽出
 - 2.2 地表・地質環境条件の多様性の観点から見た設計オプションの差異による 検討課題候補の抽出
 - 2.3 既存の知見に基づく検討課題候補の優先度の検討

2.1 安全機能の観点から見た設計オプションの差異による検討課題の抽出

閉じ込め性能の観点から設計オプション間の比較を行うために、まず、前述した安全機能 の観点から種々のオプション間で差異の生ずる可能性のある現象を抽出し、これらを検討課 題の候補として設定した。ここで、本検討においては前項で抽出した各安全機能を規定する 状態変数のいずれかについて、設計オプション間で差異が生じ得るか否かを指標として体系 的に調査することとした。具体的には、設計オプションと状態変数の関係によって差異が生 ずる可能性を示唆するような既往の検討事例の有無および内容を、直接処分第1次取りまと め(原子力機構,2015b)および高レベル放射性廃棄物に関する第2次取りまとめ(核燃料サ イクル開発機構,1999a)(総論、第2分冊、第3分冊をそれぞれ1999a、1999b、1999cとし、 以下、総称して「H12レポート」という)などの国内の安全評価レポート、使用済燃料など の地層処分を計画している諸外国の安全評価レポート、および種々の技術報告書などを横断 的に調べることによって抽出した。このように抽出した付図1-4(a)に示すように、図 2.2.3-27に示した設計オプションを横軸に、付図1-2に示す安全機能と状態変数の階層構造 を縦軸に配したマトリクスを構成した。また、異なる設計オプションと状態変数に由来する ものであっても、閉じ込め性能に及ぼす影響が同様、あるいは同時に扱うことが適当である と考えられる場合には、同一の番号を付けた。例えば、炉型の違いによる燃料の放射線量の 差異と燃焼度の違いによる燃料の放射線量の差異が閉じ込め性能に与える影響は、定性的に は同様であると考えられるため、一つの検討課題の候補としてまとめている。また、燃料の 放射能と発熱は相関があることから、検討課題の候補としては同時に扱うことが適当である と考えられるため、一つの検討課題の候補の中で表現している。

このマトリクスによる抽出を基に、抽出された検討課題およびその概要を、安全機能に由 来する検討課題ごとに、由来する安全機能・状態変数、あるいは地表環境およびその課題に おける設計オプションによる差異の安全性への影響の概要を記述した一枚の表にまとめるこ ととした(付図 1-4)。ここで、調査した文献で品質管理や施工不良による影響が懸念されて いる現象が見られた。このような影響が設計オプションの違いにより異なると考えられる場 合(例えば、特定の設計オプションで生じる可能性が高いと考えられるものや、設計オプシ ョン間で影響の程度が異なる可能性が考えられるもの)も併せて考慮した(「設計オプション の差異」の欄に施工不良と付記)。

このような整理の結果、設計オプションとそれに影響を受ける安全機能の観点から、20 個 の検討課題が抽出された(付表 1-1)。抽出された検討課題それぞれについて、着目すべき設 計オプションの差異、影響される可能性のある状態変数および設計オプション間で安全機能 の差異が生ずるに到る可能性のある影響機構の概要を、上述した既往の文献の調査結果に基 づき整理した(付表 1-2)。



 付図 1-4 設計オプション間の比較に関連した検討課題の抽出に用いるマトリクスの概念
 (a) 設計オプションと安全機能および状態変数の観点からの検討課題抽出。異なる状態変数 と設計オプションに由来しても、閉じ込め性能上の影響が類似しており単一の検討課題の候補として考えるものについては同じ番号を振っている。

(b) 抽出結果の表。矢印は例として(a)のマトリクスの内容との対応関係を示す。番号はマトリクス上の順番で付番し、(a)のマトリクスより抽出された検討課題の番号には「安」を、
 (b)のマトリクスより抽出された検討課題の番号には「地」を付記している。

付表 1-1 安全機能を規定する主要な状態変数の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題の抽出マトリクス(1/2)

				業生の	+	加公家器(D+ ポンコン	經衛材の	オプション
				 炉型 (PWR/BWR)	1 ノンョン 燃焼度 (現行/高燃焼度)	廃棄体一体あたりの 燃料集合体数	炭素鋼/複合(鋼等+ 炭素鋼構造材)	組成(現行/高ベント ナイト密度)	プレンコン 定置方式 (ブロック/PEM)
		Т	温度	安①	安①	安①	安3		
		Ĥ	水分飽和度				安3		
	002マトリクス	м	燃料の変形						
使用済燃料	林璠茨出抑制	c	気相の組成	安②	安②	安2			
による	1久1主/廿山14000	Ŭ	間隙水質	安②	安②	安2	安3		
核種溶出抑制		R	放射線強度	安①	安①	安①	安3		
	構造材による	Т	温度	安①	安(1)	安(1)	安(3)		
	UD2で下リクス による 枝種溶出印制 T 温度 出ため 検種溶出印制 M 燃料の変形。 (別なりの液形) (別な) 確認しため (耐酸水質) R 放射線流度 構造材による 核種溶出印制 R 放射線流度 化 四 四酸水質 電波 T 温度 化 日間水度 T 電波 T 温度 日 ガボロ T 電波 T 温度 日 ガボロ T 電波 T 温度 日 ガボロ T 電度 T 温度 ローイド移行 市 電度 の形止・抑制 T 温度 ローイド移行 市 電度 の形止・抑制 T 温度 日 ガェ星度 H ガェ星度 T 温度 日 ガェ星度 T 日 ア 二 ロ ロ T ロ ロ T 国度 T 二 日 ロ T ロ ロ T ロ ロ T 日 ロ T 日 T 二 ロ T 二 ロ T 二 ロ T 二 ロ T 二 ロ T 二 ロ T 二 ロ T 二	表面被膜(ZrO ₂)の特性	安(2)	安(2)	安(2)	+ 0			
		-	間隙水質				安(3)		
			温度 経衛社中の地下水法計						
処分容器(こよる閉じ込め	п	被国内中の地下小川町 ま 市 は 間の 特性						
(而	付食性)	с	役面放送の行住 緩衝材間隙水質						
		-	緩衝材中の溶質移動					安④	
		Т	温度	安①	安①	安①	安③		
		Н	透水性					安④	安5
	移流による		密度						安⑤
	移行の抑制	м	厚さ					安④	安⑤
			すき間						安⑤
1		С	鉱物組成					安④	l
1		Т	温度	安①	安①	安(1)	安3	+ 0	+
(空気)サリートア	コロノビ教行	Н	透水性					安(4)	安(5)
被国材による	コロイト移行の防止・101年		<u> </u>					女(4)	安 ⑤
成別性物質の移行抑制	の防止・抑制	M	序で オキ問		<u> </u>				安ち
被国内による 放射性物質 の移行抑制		0	シロ目 鉱物組成					安全	X U
		т	<u>単物相次</u> 但在	(中心)	売①	(中心)	₩ 3	2.4	
		н	透水性	20	20	X (1)	20	安函	安6
	収着による		密度					安4	安5
	放射性物質	м	厚さ						安5
	の移行抑制		すき間						安5
		0	鉱物組成					安④	
		v	間隙水質						
			埋め戻し材透水性						
			坑道支保透水性						
		н	EDZ透水性						
			EDZIに沿った地下水流動						
坑道	に沿った		廃来体正直部からED2への移行経路 囲め声しせ家庭						
卓越移行網	隆路形成の回避	м	住の床しり留皮						
			FD7大きさ・割れ日類度						
			埋め戻し材鉱物組成						
		С	坑道支保鉱物組成(劣化)						
			EDZ鉱物組成(変質)						
		Т	温度						
			割れ目透水量係数						
1		н	マトリクス透水性						
	10-11-1-1		動水勾配						
	移流による		塩分濃度勾配(密度流)						
	移行の抑制		割れ目頻度						
		М	割れ日天きさ						
			<u>割れは囲い幅</u> 割わ日ち向		+				l
		C	割10日の存留鉱物						
		т	温度		1			1	
母岩による		H	流れに接する表面積				İ	1	i
放射性物質	フレリクマ サナキナ		マトリクス密度						
の移行抑制	マトリクス払取	М	マトリクス間隙率(閉塞を含む)						
	による移行遅延		マトリクス拡散深さ						
1		с	割れ目表面の鉱物組成(被膜)						
		Ť	マトリクス内部の鉱物組成(変質)						
		Т	温度						
		м	マトリクス密度						l
	山羊にして		マトリクス間隙率(閉塞を含む)						
	収石による 旅行遅延		<u>割れ日内尤現動物組成</u> 割わ日表面の鉱物組成(補購)		ł			+	
	1911年25	0	<u>司110日30回の動物和成(</u> 10) 展) マトリカマ内部の鉱物組成(10) 展)		-			1	
1		U U	割れ日内地下水管						
		1	マトリクス間隙水質						
			A CONTRACT OF A						

						作業の	+===>.					ーーー	
				掘削方法 (TBM/NATM)	廃棄体定置方法 (竪置き/横置き)	<u> </u>	40030 処分坑道連続性 (貫通/袋小路)	支保材質 (OPC/HFSC)	連絡坑道 (立坑/斜坑)	汀線との位置関係 (陸側、沿岸、島嶼)	マイアン 深度(500m程度、 1000m程度)	パネル (単層/多層)	地下水流向に対する坑道 配置(直交、平行)
		т	温度								(18)		
		H	水分韵和度										
	002マトリクス	M	燃料の変形										1
使用済燃料	による		気相の組成					1					
による	核裡浴田抑制	C	間隙水質							(16)			
核種溶出抑制		R	放射線強度										
	様法材に下ろ	Т	温度								(18)		
	核種溶出抑制	C	表面被膜(ZrO2)の特性										
	District Marrier	-	間隙水質							(16)			
		T									(18)		
処分容器	による閉じ込め	н	被倒材中の地下水流動										-
í)	耐食性)	0	<u>衣田板族の付け</u> 編集封閉論水質							(ÎL)			
		Ŭ	緩高村同時不良										
		т	温度								(18)		
		H	透水性		(7)	(9)		(12)					
	移流による		密度		() ()	9		(12)					
	移行の抑制	м	厚さ		0	9							
			すき間		0	9							
		С	鉱物組成					12		(16)			
		Т	温度								(18)		
經営サレートア		н	<u> </u>	+	0	9		(12)		+		+	4
被倒付 による	コロイト移行の防止・抑制	м	<u>密度</u>			9	-	02					
の称行抑制	0,000 11 . 110 000	IVI	する問			9		(1)					-
0242111440		С	鉱物組成		<u> </u>			12		(16)			
		T	温度								(18)		
		Н	透水性		Ø	9		12					
	収着による		<u>密度</u>		7	9		12					
	放射性物質	м	厚さ		0	9							
	の移行抑制		すき間		7	9							
		С	鉱物組成					(12)		(6)			
			旧原不良				-	00		(6)			
			住営支保添水性					13					
		н	FD7透水性	6									
			EDZに沿った地下水流動				(ÎI)		(15)	(17)			20
技巧	1-Xot		廃棄体定置部からEDZへの移行経路		8	10							
自拔移行約	経路形成の回避		埋め戻し材密度										
+		м	坑道支保内割れ目					(13)					
			EDZ大きさ・割れ自頻度	6						(F)			
		0	<u>埋め戻し村鉱物組成</u> た満支県な飾組成(少ル)					(3)		(6)			
		Ŭ	<u>- 川坦文体動物和成(方化)</u> FD7鉱物和成(変質)					(3		(1)			-
		т	温度								(18)		
			<u>加度</u> 割れ日添水量係数								(19)		
			マトリクス透水性								(19)		
		н	動水勾配							Û			
	移流による		塩分濃度勾配(密度流)							n			
	移行の抑制		割れ目頻度								(19		-
		м	割れ目大きさ								(19)		
			制れ目開口幅								(19)		
		0	<u>刮れ日方问</u> 割わ日内充信鉱物					(IA)		(Î)	(14)		
		т	温度	1			1	<u> </u>	1		(18)		1
母岩による		Ĥ	流れに接する表面積					(14)					1
放射性物質	フトリカフが夢		マトリクス密度										
の移行抑制	「よろ移行遅延	м	マトリクス間隙率(閉塞を含む)					(14)					
	による移行遅延		マトリクス拡散深さ								1		4
		с	割れ目表面の鉱物組成(被膜)				+	(14)		(16)			+
		+ -	、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	+			+	(14)		(16)	(10)		4
			温度	1	1		+	<u> </u>	ł	+	(8)		+
		м	<u> 、 し ノノヘロ 皮 マトリクス 間 陰 率 (閉 案 を 会 よ 、) </u>	1	1			14			1	-	1
	収着による		割れ日内充填鉱物組成	1				14		(6)			1
	移行遅延		割れ目表面の鉱物組成(被膜)					(14)		(6)			1
		С	マトリクス内部の鉱物組成(変質)					(14)		(6)			
			割れ目内地下水質					14		(6			
	1	1	マトリクス間隙水質	1	1	1	1	(14)	1	(6)		1	1

付表 1-1 安全機能を規定する主要な状態変数の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題の抽出マトリクス(2/2)

付表 1-2 安全機能を規定する主要な状態変数の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題の抽出結果(1/2)

	検討課題	設計オプションの差異	影響される状態変数	設計オプションによる差異の安全性への影響
		燃料のオプション		温度が異なることによってUO₂マトリクスや構造材による核種溶出抑制機能に差異が生ずる可
	燃料タイプによる発熱量及び放射線	(炉型/燃焼度)	温度	能性がある(Hofman et al., 1988)。また、緩衝材の安全機能にも影響が生ずる可能性が考えら
安①	強度の差異の影響	処分容器のオプション(廃棄		れる(SKB, 2010b)
		体一体当たりの燃料集合体	放射線強度	放射線強度が高い場合UO2マトリクスの酸化性溶解が生ずる可能性が考えられる(Garisto et
			たちの名子	al., 2012) た田文歴史の時期また日間旅行にまたたたい頃へ、市場歴史はの間日かんこれが月
		燃料のオノション	気相の組成	使用済燃料の貯蔵甲に品資管理が週切に為されない場合、破損燃料棒の開口部から水が使
	中間貯蔵中の燃料棒の破損による	(炉空/ 窓焼度) 机分突哭のオプション(廃棄	间原小員	人し、その後の呈え及び小の放射線が推にようし単明酸等が光生して002×トリクス及び構造 はの変紀・府合業動に影響たみぼし 技種変出抑制機能が低下する可能性がある(Corinto at
安②	処分後の核種溶出抑制機能低下の	体一体当たりの燃料集合体		1100治州·廣長手動に影響と及ばし物性沿山抑制成能が低下する可能性がのる(Garisto et al 2012) これらの影響け故射線分解によるため 燃料(加分容器)に会まれる故射能によっ
	影響	数)	構造材表面被膜(ZrO ₂)の特性	て変化する考えられる
		施工不良		
		加公容哭のオプション(炭麦	温度(容器開口時)	第1次取りまとめで想定している容器寿命1,000年程度であれば容器開口時の温度は地温程
	処分容器の寿命の相違による開口	20月谷福のオンフョン(灰条 鋼/	水分飽和度	度に復旧している(原子力機構, 2015b)ため設計オプション間の差異は顕著ではないが、放射
安3	時の燃料近傍の環境条件の差異の	複合(銅等十炭素鋼構造	放射線強度(容器開口時)	線強度については複合容器の場合よりも顕著に高く放射線分解による燃料マトリクスの酸化性
	影響	材))	間隙水質(容器開口時)	溶解か否定できない可能性がある。また、C=14は複合容器の場合基本シナリオでははとんと
	べいよう 小 密度の高い 緩衝せた		ぶいよりた効率度	谷岙内で減衰する(原丁刀(機構,2013C) 経済社中支払ぶいました。
Ŧ	ハントノイト省度の高い被側材を	緩衝材材料のオプション	ヘント) 1ト有 X) 密度 添水性	板側材中有効ハントノイト留度が高いことにより核性の美効拡散係数の低下や方配係数の上 見が期待できる(些田氏か 1000) また。 喜アルカルのコンクルート問題水等との反応による止
~	影響	(ベントナイト含有率)	鉱物組成	水性等の性能低下が緩衝される可能性がある(澤口ほか, 2013)
			透水性	緩衝材ブロックを定置する方式の場合、施工不良(極端な例はSR-Siteで想定されている一部
	緩衝材定置方式による施工時の	緩衝材定置方式のオプション	有効厚さ	ブロックの置き忘れ(SKB, 2010b))やブロック間の隙間が十分に閉塞せず隙間が残留する場
安⑤	不具合の可能性や安全機能への影	(ブロック/PEM)	密度	合には緩衝材の止水性、コロイドろ過性等が損なわれる可能性があるのに対して、PEMの場
	響程度の差異の影響	施工不良	すき問	合は適切な品質管理によってこのような問題を回避できる(原子力機構, 2016)
			FD7添水性/割れ日類度	TBMを用いた場合とNATM工法を採用した場合では掘削影響の及ぶ範囲の大きさ及び岩盤透
安⑥	坑道掘削方法による卓越移行経路	坑道掘削方法のオプション		水性の上昇する程度が異なる可能性があり(原子力機構, 2016)、このため、坑道に沿った卓
~	形成の可能性の差異の影響	(TBM/NATM)	EDZ大きさ	越移
			AND L LI	
	廃棄体定置方法によって生じ得る緩	廃棄体定置方法のオプション	透水性	廃業体値直ざの設計オフンヨンの場合には、緩衝材フロック設直後の功道上部に原间が残る 可能性がキリー必要に広じてぶ、ホーイトペーットの料体を充填する等の対策が短これることにな
安⑦	衝材施工不良に起因する安全機能	(竪置き/横置き)	有効序で 密度	9能性がのり、必要に応してヘント) 1Fベレットや材体を元場り る寺の対東が休られることでは ろが(頂彊機構 2011a) その際の充填が不均質となって まい かつ 充填不良部が捻出され
	の差異の影響	施工不良	すき間	ない可能性が考えられる。これにより緩衝材機能が部分的に低下する可能性がある
				坑道周辺には掘削影響領域や劣化後の支保といった連続した高透水性領域が形成されると
	廃棄体定置方法による水平坑道周	<u> </u>	廃棄は空澤迎からED7々の	予想され、廃棄体横置きの設計オプションの場合には緩衝材外側にこれらが位置するため人
安⑧	辺の連続した高透水性領域の核種	(図器を/構器を)	焼果仲正直即からED2、00 移行経路	エバリア外側境界条件に影響を与えるとともに緩衝材から移行した核種の卓越経路と成る可
	移行に与える影響の差異の影響		נו ער	能性がある(原環機構, 2011a)のに対して、処分孔内竪置きの場合は一定の離隔が保たれる
			NE J. Id.	
	加公式内名段配置の場合の経衛対	坑道のオプション	透水性	処プれ内焼栗体多段配直(原境機構,2004)の場合の品質官埋か困難で施工不良が生じ、緩 癒け変度低下やすき問題でなた見渡した場合、経癒サウム機能(ルセサーマスパス温祉)
安⑨	施工不良の影響	(処分孔内廃棄体数)	17 別序C 家 使	11 11日2月11日、11日の11日の11日の11日の11日の11日の11日の11日の11日の
		施工不良	すき間	
	処分孔内多段配置の場合のEDZか	14.544 - 1 - 25 .		ー 処分孔内廃棄体多段配置の場合に下段の廃棄体は上部坑道のEDZからの離隔がより大きく
安10	らの離隔確保による安全性向上の影	「 坑道のオブション (加八3) 中広会(145)	廃業体定 置部からEDZへの移行	(原環機構, 2004)、人工バリア中の移行経路が長くなることで遅延機能が向上する可能性が
	響	(処分北内廃業体数)	祚	ある

	付表 1-2	安全機能を規定す	る主要な状態変数の)観点から考慮す.	べき設計オプション	/間の差異に関す/	る検討課題の抽出結果	(2/2
--	--------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------

	検討課題	設計オプションの差異	影響される状態変数	設計オプションによる差異の安全性への影響
安⑪	袋小路の坑道形状による卓越流路 形成の回避の影響	坑道のオプション (処分坑道連続性(貫通/袋 小路))	EDZに沿った地下水流動	パネル内の水平坑道が貫通している設計オプション(原子力機構, 2016)では、坑道周辺の EDZ及び劣化支保といった連続した高透水性領域は地下水流れが坑道と平行な場合には卓 越した移行経路となる可能性があるが、袋小路仕様のオプションの場合にはこの状況は回避 される。ただし、この場合も未接続部の高透水性割れ目等の影響に注意する必要がある (SKB, 2011b)
安⑫	支保材質として低アルカリセメントを 用いることによる緩衝材変質の抑制 の影響	支保材質のオプション (OPC/HFSC)	透水性 密度 すき間 鉱物組成	横置きの設計オプションの場合、緩衝材の直近にコンクリート製坑道支保が位置することとなる ため(原子力機構, 2015c)、OPCを用いた設計オプションでは高アルカリの間隙水の影響でベ ントナイトの変質が顕著となり緩衝材の安全機能(止水性、コロイドろ過性、収着による放射性 物質移行抑制)が低下する可能性が想定される(原子力機構, 2015c)。これに対して、HFSC の場合にはかけが11程度以下とシリカの安定領域であるため(電気事業連合会・核燃料サイク ル開発機構, 2005)変質程度は限定される可能性が高い
安⑬	支保材質として低アルカリセメントを 用いた場合の坑道周辺の高透水性 領域形成の可能性の変化の影響	支保材質のオプション (OPC/HFSC)	坑道支保透水性 坑道支保内割れ目 坑道支保鉱物組成(劣化) EDZ鉱物組成(変質)	坑道支保としてOPCを用いた設計オプションとHFSCを用いた設計オプションとでは施工後初期 の強度が異なる(植田ほか,2008)ため割れの程度が異なる可能性がある。また、その後の溶 脱挙動も異なる(植田ほか,2008)ため劣化程度や劣化に要する期間も異なる可能性がある。 また、間隙水のpHが異なる(植田ほか,2008)ため、OPCを用いたオプションのほうが周囲の 岩盤やEDZへの影響が大きい
安⑭	支保材質として低アルカリセメントを 用いた場合の坑道周辺の岩盤への 化学的影響の抑制の影響	支保材質のオプション (OPC/HFSC)	流れに接する表面積 マトリクス間隙率(閉塞を含む) 割れ目表面の鉱物組成(被膜) マトリクス内部の鉱物組成(変質) 割れ目内充填鉱物 割れ目内地下水質 マトリクス間隙水質	抗道支保としてOPCを用いた設計オプションとHFSCを用いた設計オプションとでは間隙水のpH が顕著に異なる(植田ほか, 2008)ため、地下水水質(特にpH)が影響を受ける程度及び範囲 が異なるものと考えられる。また、割れ目充填鉱物や割れ目直近のマトリクスの溶解や二次鉱 物沈殿といった固相への影響程度や範囲も異なる(植田ほか, 2008)と考えられ、坑道近傍の 母岩における透水性に差が生じる可能性がある
安⑮	アクセス坑道の方式による坑道短絡 シナリオの影響の差異の影響	坑道のオプション (連絡坑道(立坑/斜坑))	EDZに沿った地下水流動	アクセス坑道のEDZ等が連続した高透水性領域と成った場合、将来の地下水流動状況の変化 に伴い連絡坑道に沿った動水勾配が生じた際に立坑と斜坑では核種移行経路の距離が異な る(棚井ほか, 1999)ため、処分場内の核種移行遅延に影響が生じる可能性がある
安⑯	処分場位置による塩淡境界移動の 影響の差異の影響	処分場レイアウトのオプション (陸側、沿岸、島嶼)	間隙水質(岩盤、人エバリア) 鉱物組成(岩盤、人エバリア)	地下水水質が降水系と海水系で異なるあるいはそれらの切り替わり時期が異なることで緩衝 材、埋め戻し材、支保及び母岩(割れ目表面、充填鉱物、マトリクス)の鉱物組成や間隙水・地 下水水質が異なり(SKB, 2011b)、地下水質に影響を受ける収着性等の安全機能が影響を受 ける可能性がある
安⑪	処分場の汀線との位置関係による地 下水流動状況の差異の影響	処分場レイアウトのオプション (陸側、沿岸、島嶼)	EDZIに沿った地下水流動 動水勾配 塩分濃度勾配(密度流)	処分場が塩淡境界の陸側、海側及び境界近傍のいずれに位置するかによって地形勾配に起 因する動水勾配や密度流の影響が異なる(SKB, 2011b)
安18	処分場深度による温度の差異の影響	処分場深度のオプション (500m程度、1000m程度)	温度(岩盤、人工バリア)	処分場深度によって地温が異なり、また、処分場領域内の温度分布の時間変化も異なるため (核燃料サイクル開発機構, 1999a)、人工バリア及び天然バリアの種々の安全機能に影響が 生ずる可能性がある
安19	処分場深度による岩盤割れ目分布 や性状の差異の影響	処分場深度のオプション (500m程度、1000m程度)	割れ目透水量係数 マトリクス透水性 割れ目頻度 割れ目大きさ 割れ目用ロ幅 割れ目方向	岩盤中の割れ目頻度や連続性及び開口幅に深度依存性のある地質環境の場合(特に、比較 的浅い深度に低角の割れ目が高い頻度で分布する領域がある場合),処分場の設置位置に よって天然バリア性能が顕著に異なる(原子力機構,2015c;SKB,2011a)
安20	地下水流向と坑道が平行の場合の EDZ等の影響	地下水流向に対する坑道配 置 (直交、平行)	EDZに沿った地下水流動	坑道力学的安定性等の観点から地下水主流動方向と平行に坑道を掘削する設計オプションでは、坑道周辺のEDZ及び劣化後の支保等の連続した高透水性領域が卓越した流路となる可能性があるが、坑道が流れと直交するオプションではこのような状況は生じにくい(SKB, 2011b)

2.2 地表・地質環境条件の多様性の観点から見た設計オプションの差異による検討課題候補の抽出

安全機能およびこれらに対応した状態変数に着目した検討課題の抽出では、直接処分第1 次取りまとめ(原子力機構,2015b)の基本シナリオで設定した一般的な地表・地質環境が想 定されているが、我が国における多様な地表・地質環境のうち特定の種類のものに着目した 場合に顕在化する設計オプション間の差異もあるものと考えられる。このため、課題抽出の 網羅性を高めるために、このような視点からの検討も行うこととした。ここで、閉じ込め性 能への影響を設計オプションと地質・地表環境条件の多様性の組み合わせに基いて抽出する 場合にも安全機能の観点を踏まえて行う必要があるが、単純にこれらの3つの軸を組み合わ せた検討は複雑であり、非効率的である。このため、まず2.1で抽出された検討課題が、上 記で整理した多様な地表・地質環境条件に応じて更に影響が生じる、または顕著化するかと いう点から検討を進めた。

ここで、前述の通り、地表・地質環境の特徴としては長期的変遷(海水準変動)を考慮す る。地表・地質環境の長期的変遷を踏まえた影響としては、基本となる地下水シナリオだけ でなく、直接処分第1次取りまとめ(原子力機構,2015b)において検討された長期的な変動 に関する議論(処分場の地表接近・地表露出シナリオ)も考慮する必要があるものと考えた。 また、閉じ込め性能には含まれず安全機能が設定されてはいないものの、長期的変遷を考慮 した際に、地質環境と同等以上に変遷速度が速く、被ばく線量への影響が大きいと考えられ る生活圏の変遷についても同様に検討する必要があると考えられる。このような考え方から、 地表・地質環境の多様性と設計オプションの関係から抽出される検討課題は以下の二区分が 考えられた。

- ・2.1 で抽出された検討課題を踏まえ、レファレンス的な地表・地質環境条件と異なる場合に影響が顕著化、あるいは新規の影響が生じる可能性があるもの
- ・地表・地質環境条件の変遷に応じて、安全機能の観点から抽出された検討課題とは別の現象を考慮する必要が生じるもの(処分場の地表接近や地表環境・生活圏の変遷など)

以上から、地表・地質環境条件の多様性による影響を以下の通り抽出した。

具体的には、付図 1-1 に示した設計オプションを横軸に、付図 1-3 に示す地表・地質環境 の多様性を縦軸に配したマトリクスを構成し(付図 1-5)、安全機能の観点から抽出された検 討課題が地表・地質環境条件の多様性により顕著化する可能性が考えられるものを、文献調 査結果を参考に抽出した。また併せて、地表・地質環境条件の変遷に応じて、安全機能の観 点から抽出された検討課題とは異なる現象により安全評価への影響が生じうる影響を抽出し た。この結果、14 個の検討課題の候補が抽出された(付表 1-3)。また、安全機能・状態変数 に由来する検討課題の候補と同様に、これらの課題のそれぞれについて、対象となる設計オ プション、着目すべき地表環境や地質環境の特徴、地表環境および地質環境の多様性に応じ て生ずる可能性のある設計オプション間の差異の概要を文献調査結果に基づき整理した(付 表 1-4)。



付図 1-5 地質環境の多様性の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課 題の抽出概念図

			燃料の	オプション	処分容器の	オプション	緩衝材の:	オプション
			炉型 (PWR/BWR)	燃焼度 (現行/高燃焼度)	廃棄体一体あたりの 燃料集合体数	炭素鋼/複合(銅 等+炭素鋼構造	組成(現行/高ベント ナイト密度)	定置方式 (ブロック/PFM)
		内陸					<u>у на</u> ду	
		沿岸部				地①		
	地理	島嶼				地①		
		高緯度						
		低緯度						
		海底(急峻)				地①		
		海底(遠浅)				地①		
	地形	低地						
		丘陵						
		山地						
ᆘᆎᆍᅖᆄᆇ		隆起(速度大(>0.3 mm/y))				地① 地②		
地衣垛垷	地形変化	隆起(速度小(<0.3 mm/y))				地① 地②		
		沈降				地① 地②		
		大規模河川						
	河川湖沼·海	小規模河川						
		次						
		湖沿						
		小田 豊地(並通畑里樹周笙)						
	十十十十十	<u>展地(自通冲未倒图守)</u> 首地						
		<u>十元</u> 林(針葉樹林 広葉樹林等)						
		市街地						
		結晶質岩				地①		
	岩種	先新第三紀推猜岩				地①		
						地①		
		<u>利 </u>						
	断層・破砕帯等の	<u>頻反同(十均離隔)</u> 頻度由(平均離隔~数 1 m)						
	高透水性構造	頻度低(平均離隔~数km)						
		割れ日頻度高(>1/m)						
	透水性割れ目	割れ目頻度中(>0.1/m)						
地質環境		割れ目頻度低(<0.1/m)						
		平均透水係数高(>1E-8m/s)				地①		
	母岩透水性	平均透水係数中(>1E-9m/s)				地①		
		平均透水係数低(<1F-9m/s)				地①		
		路水玄				地①		
	地下水水質	<u>ニートーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー</u>				 地①		
		/毋小不 他の水質(熱水笑)の影響						
		<u>山間の小員(怒小寺)の影音</u> 地温勾配大(>>0.03℃/m)						
	地温勾配	地温勾配中(003℃/m程度)	ł	1	1			
	ł		ļ					

付表 1-3 地質環境の多様性の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題の抽出マトリクス(1/2)
[坑道のオプション						レイアウトのオプション					
			握削方法	廢棄休完置方法	ゴロ 広義 金 休 数	机分估道連続性	支保材質	連絡情道	江線との位置関係	深度(500m程度	パネル	地下水流向に対する抗道		
			(TBM/NATM)	(竪置き/横置き)	(単一/複数)	(貫通/袋小路)	(OPC/HFSC)	(立坑/斜坑)	(陸側、沿岸、沖合)	1000m程度)	(単層/多層)	配置(直交、平行)		
		内陸												
		沿岸部					地⑧		地⑨			地似		
	地理	島嶼					地⑧		地⑨			地似		
		高緯度							地9					
		低緯度							地(9)					
		海底(急峻)							地⑨					
		海底(遠浅)							地⑨					
	地形	低地							地(9)					
		丘陵							地9					
		山地							地⑨					
地主理培		隆起(速度大(>0.3 mm/y))			地(5)				地(9)	地10	地(12)			
地衣垛境	地形変化	隆起(速度小(<0.3 mm/y))			地⑤				地⑨	地10	地①			
	-	沈降			地5				地9	地⑪	地⑫			
		大規模河川							地(9)					
	河川湖沼・海	小規模河川							地(9)					
		次 248-72							地(9)					
		海沿							1119					
		<i>冲</i> 水田							地(9) 州(9)					
	土地利用	小山 豊地(普通畑里樹園等)							地(9)					
		草地							地(9)					
		林(針葉樹林、広葉樹林等)							地9					
		市街地							地(9)					
		結晶質岩										地似		
	岩種	先新第三紀堆積岩										地似		
		新第三紀堆積岩										地似		
	新屋. 动动学学の	頻度高(平均離隔~数十m)			地⑥	地⑦					地⑬			
	直添水性構造	頻度中(平均離隔~数百m)									地(13)			
	间边水江将道	頻度低(平均離隔~数km)												
		<u>割れ目頻度高(>1/m)</u>												
	透水性割れ目	割れ目頻度中(>0.1/m)		地3										
地質環境	-	割れ目頻度低(<0.1/m)		地(3)								10. A		
		平均透水係数高(>1E-8m/s)		地(4)								地(1)		
	母岩透水性	平均透水係数中(>1E-9m/s)		地(4)								地似		
		平均透水係数低(<1E-9m/s)		地④								地⑭		
		降水系							地⑨			地似		
	地下水水質	海水系							地⑨			地国		
		他の水質(熱水等)の影響												
	地温勾配	地温勾配大(>>0.03℃/m)								地①				
	心血内能	地温勾配中(0.03℃/m程度)								地们				

付表 1-3 地質環境の多様性の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題の抽出マトリクス(2/2)

安全機能の観点から抽出された検討課題に対して地表・地質環境を考慮することにより影響が顕著化する検討課題
長期的変遷を考慮することにより、安全機能の観点から抽出された課題とは別に抽出される検討課題
上記の双方に該当する検討課題

1

	検討課題	設計オプション	着目すべき地表/地質環境	設計オプションによる差異の安全性への影響
地①	寿命が異なる処分容器オプショ ン間での塩淡環境変遷の影響程 度の差異の影響	処分容器のオプション (炭素鋼/複合(銅等+ 炭素鋼構造材))	地理(沿岸/島嶼) 地形(海底(急峻/遠浅)) 地形変化(隆起速度(大/小)沈 降) 岩種(結晶質岩、先新第三紀 堆積岩、新第三紀堆積岩) 母岩透水性(高/中/低) 地下水水質(降水系/海水系)	沿岸部や島嶼で処分場を隆起傾向にある地域の海底下に建設した場合、海水準変動と隆起の影響で 将来のある時点以降は処分場が陸域に位置することとなる。この時期は、処分場の現在の汀線からの 距離、海底の地形勾配、隆起速度によって異なり、また、特に新第三紀堆積岩等の割れ目頻度の低い 透水性の低い母岩の場合、陸域に位置するようになった以降も一定期間は処分場周辺の地下水が海 水系のものにとどまる可能性がある(原環機構, 2011a)。銅等の高耐食性材料を用いた複合型処分容 器の寿命がこれらの環境変遷の時間スケールよりも長い場合には、変遷後の環境(陸域/降水起源地 下水)においてのみ核種移行が生ずることとなるのに対して、1,000年間程度の寿命を想定する炭素鋼 容器の場合には一連の環境変遷を通じて核種移行が生ずることとなり、その放出点に対応して生活圏 モデルも異なる
地②	長寿命処分容器の場合の隆起・ 侵食による処分場露出時の影響 の差異の影響	処分容器のオプション (炭素鋼/複合(銅等+ 炭素鋼構造材))	地形変化(隆起速度(大/小)沈 降)	隆起・侵食速度が大きい場合、処分場が地表に露出するまでの期間に比して複合型処分容器の寿命が同程度以上となる可能性が想定される(原環機構, 2011a;原子力機構, 2015c)。この場合には、地表露出以前の移行による廃棄体内の核種インベントリの低減が期待できないため、露出時の影響が大きくなる可能性がある
地3	廃棄体定置方法による低頻度の 透水性割れ目との交差回避可能 性の差異の影響	廃棄体定置方法 (竪置き/横置き)	透水性割れ目頻度(中/低)	割れ目頻度が中程度以下の場合、竪置きの処分孔と割れ目の交差を避けるように配置することが可能 となる場合がある(棚井ほか, 1999)。横置きの場合にも廃棄体定置部との交差を避けることは可能だ が、EDZや劣化支保等の高透水性領域を介して連続した流路が形成される可能性を評価する必要があ る
地④	廃棄体竪置き方式の場合の 緩衝材から上部坑道埋め戻し材 への拡散による核種移行の影響	廃棄体定置方法 (竪置き/横置き)	母岩透水性(高/中/低)	周囲の母岩透水性が低い場合には、処分孔内に竪置きされた廃棄体からの核種が緩衝材中を拡散で 移行して直近の母岩へと進行するものに比して、緩衝材から埋め戻し材に至り上部坑道まで達するも のの割合が増大する可能性がある(原環機構, 2011b)
地⑤	廃棄体多段配置による処分場露 出時の影響低減の影響	孔内廃棄体数 (単一/複数)	地形変化(隆起速度(大/小)沈 降)	隆起・侵食によって処分場が地表に接近・露出する場合、処分孔内に廃棄体が多段に定置されるオプ ション(原環機構, 2004)のほうが影響の生ずる時期が時間的に分散し影響の大きさも低減される可能 性がある
地⑥	廃棄体多段配置・パネル小型化 による断層等との交差回避の影 響	孔内廃棄体数 (単一/複数)	断層等の高透水性構造頻度 (高:平均離隔~数十m)	断層や破砕帯等の高透水性構造の頻度が高い場合でも、処分孔内竪置きで廃棄体を多段に定置(原 環機構, 2004)して定置密度を上昇させることによってこれらの高透水性構造と処分孔の交差を避けた レイアウトが可能となる場合があり、このような場合には母岩中の核種移行が抑制される可能性がある
地⑦	袋小路の坑道レイアウトによる断 層等との交差の回避の影響	処分坑道連続性 (貫通/袋小路)	断層等の高透水性構造頻度 (高:平均離隔〜数十m)	袋小路であるフィッシュボーン型は、断層の分布位置を避けて定置区間に配置可能としている(原環機構, 2016)。断層や破砕帯等の高透水性構造の頻度が高い場合でも、水平坑道を袋小路とすることに よってこれらの高透水性構造と処分孔の交差を避けたレイアウトが可能となる場合があり(特に横置きの定置方式の場合)、このような場合には母岩中の核種移行が抑制される可能性がある

付表 1-4 地質環境の多様性の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題の抽出結果(2/2)

	検討課題	設計オプション	着目すべき地表/地質環境	設計オプションによる差異の安全性への影響
地⑧	坑道支保材質による海水系地下 水の影響の差異の影響	支保材質のオプション (OPC/HFSC)	地理(沿岸/島嶼)	海水系地下水の場合、OPC及びHFSCそれぞれの溶脱時の反応の影響(pH上昇等)や劣化程度が異 なる可能性がある(原子力機構, 2015a)
地⑨	処分場の汀線との位置関係 による塩淡環境変遷の影響 の差異の影響	処分場と汀線との位置 関係(陸側、沿岸、沖合)	地理(沿岸/島嶼) 地形(海底(急峻/遠浅)) 地形変化(隆起速度(大/小)沈 降) 岩種(結晶質岩、先新第三紀 堆積岩、新第三紀堆積岩) 母岩透水性(高/中/低) 地下水水質(降水系/海水系)	処分場を沿岸部や島嶼で隆起傾向にある地域の海底下に建設した場合、海水準変動と隆起の影響で 将来のある時点以降は処分場が陸域に位置することとなる。この時期は、処分場の現在の汀線からの 距離、海底の地形勾配、隆起速度によって異なり、また、特に新第三紀堆積岩等の割れ目頻度の低い 透水性の低い母岩の場合、陸域に位置するようになった以降も一定期間は処分場周辺の地下水が海 水系のものにとどまる可能性がある(原環機構, 2011a)。さらに、このような環境変遷に従い、処分場 から移行する核種の生活圏への流入位置(GBI)が時間とともに変化する可能性がある。また、GBIに該 当する地点の地表環境が汀線の移動や隆起・侵食によって変遷する(高度、気候(緯度によっても異な る)、河川湖沼や海等の周囲の水系の種類等)とともに土地利用の種類も変化する(SKB, 2010c)
地⑩	処分場深度による地表露出時期 の差異の影響	処分場深度 (500m程度、1000m程度)	地形変化(隆起速度(大/小)沈 降)	隆起速度や隆起開始時期の研究(例えば、浅森ほか2012)が行われており、処分場が地表に露出す る時間も推定可能となる。これにより、処分場深度が異なることによって、隆起・侵食により処分場が地 表に露出するまでの時間スケールが異なるものと考えられ、地表露出時における処分場近傍の残存イ ンベントリや地表環境(起伏や土地利用の種類等)が異なる可能性がある
地①	処分場深度による地温勾配の影 響の差異の影響	処分場深度 (500m程度、1000m程度)	地温勾配(大/小)	地温勾配が大きい場合、処分場深度が大きいオプションでは周辺の地温及び処分場内の温度が顕著 に高くなり(核燃料サイクル開発機構, 1999a)緩衝材等が劣化する可能性がある
地⑫	処分パネル多層化による処分場 露出時の影響低減の影響	処分パネル (単層/多層)	地形変化(隆起速度(大/小)沈 降)	隆起・侵食によって処分場が地表に接近・露出する場合、複数のパネルを多層に配置するオプション (原環機構, 2004)のほうが影響の生ずる時期が時間的に分散し影響の大きさも低減される可能性が ある
地(]3	処分パネル多層化による断層等 との交差の回避の影響	処分パネル (単層/多層)	断層等の高透水性構造頻度 (高:平均離隔~数十m)	断層や破砕帯等の高透水性構造の頻度が中程度あるいは高い場合でも、パネルを小さくして多層に配置(原環機構, 2004)することによってこれらの構造との交差を避けたレイアウトが可能となる場合があり、、このような場合には母岩中の核種移行が抑制される可能性がある
地14	地下水流向と坑道が平行の場合 の塩淡境界移動へのEDZ等の影 響	地下水流向に対する 坑道配置(直交、平行)	地理(沿岸/島嶼) 岩種(結晶質岩、先新第三紀 堆積岩、新第三紀堆積岩) 母岩透水性(高/中/低) 地下水水質(降水系/海水系)	地下水主流動方向が坑道に平行な場合EDZに沿って連続した流路が形成されるが直交する場合には 回避される(SKB,2011b)。このため、処分場領域を塩淡境界が横断する際の影響の進展が異なる可能 性がある(後者の場合には坑道毎に塩淡環境が切り替わるのに対して、前者の場合はEDZ等を介して 塩淡境界が速やかに移動するなど。このような影響は、母岩中の塩淡境界の移動速度との差異によっ て生ずるため、母岩の透水性や割れ目頻度に依存するものと考えられる)

これらの検討課題のそれぞれに対して設計オプション間の閉じ込め性能の定量的な比較を 行う際に着目すべき影響や解析上のアプローチおよび使用するツールなどは空間スケールに よって異なるものと考えられることから、各検討課題における具体的な検討は広域的なスケ ール(隆起侵食および海水準変動などの将来変遷を含めて処分場深度を通過する流線に相当 する地下水循環系を包括する空間領域)および坑道近傍スケール(処分場内の一部の廃棄体 とその周囲の人工バリアおよびその周囲のニアフィールド岩盤から成る 100 m 程度のブロッ ク領域)に区分して進めることが適当であると考えられる。ここでは、上表に概要を記した 各検討課題のそれぞれについて、これら二つのスケールでそれぞれ検討すべき事項を、文献 調査結果に基づき整理した。具体的には、それぞれの検討課題で着目すべき設計オプション 間の差異の

• 原因となる現象や特徴などはどのスケールで生じるか

• 原因と異なる場所に影響が顕在化する場合、そのスケールは上記のうちいずれか

という二点について分析し、それぞれのスケールで検討すべき事項(以下、検討事項)を整 理した。結果を付表 1-5 および付表 1-6 に示す。

付表 1-5 安全機能を規定する主要な状態変数の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題について坑道近傍スケールお

よび広域的スケールで検討すべき事項

	検討課題	坑道近傍スケールで検討すべき事項	広域スケールで検討すべき事項
安①	燃料タイプによる発熱量及び放射線強度の差異の影響	燃料直近の放射線による間隙水放射線分解とUO2マトリクスの酸化性溶解。人工バリア内の温度変化	
安②	中間貯蔵中の燃料棒の破損による処分後の核種溶出抑制機 能低下の影響	燃料直近の間隙水放射線分解による亜硝酸の生成及びそれによる燃料マトリクスや構造材の溶解促進	
安③	処分容器の寿命の相違による開口時の燃料近傍の環境条件 の差異の影響	処分容器開口時期の相違による燃料直近の温度と放射線強度の差異(放射線分解による燃料マトリクスの 酸化性溶解)による燃料溶解挙動の相違	広域の地下水流動場の変化に伴う処分場付近の塩淡環境の変遷が処 分容器開ロ時期における地下水水質に及ぼす影響
安④	ベントナイト密度の高い緩衝材を用いることによる安全機能の向 上の影響	緩衝材中の核種実効拡散係数及び分配係数の差異による人工バリア中核種移行挙動への影響	
安⑤	緩衝材定置方式による施工時の 不具合の可能性や安全機能への影響程度の差異の影響	ブロック方式の緩衝材定置時の施工不良による透水性上昇やコロイドろ過性低下が人工バリア中の核種移行に及ぼす影響	
安⑥	坑道掘削方法による卓越移行経路形成の可能性の差異の影響	坑道掘削方法によるEDZの大きさや透水性上昇程度の差異を考慮した処分場スケールの地下水流動及び EDZに沿った速い核種移行挙動	
安⑦	廃棄体定置方法によって生じ得る緩衝材施工不良に起因する 安全機能の差異の影響	廃棄体横置きの場合に坑道上部の緩衝材充填不良箇所が生じた状況での透水性上昇及びコロイドろ過性 低下が人工パリアとその周囲の地下水流動や核種移行に及ぼす影響	
安⑧	廃棄体定置方法による水平坑道周辺の連続した高透水性領域 の核種移行に与える影響の差異の影響	廃棄体横置きの場合の緩衝材外側直近にあるEDZや劣化支保等の高透水性領域が外側境界条件として 緩衝材中の核種移行に及ぼす影響や卓越移行経路となる場合の坑道周辺の核種移行。竪置きの場合の 処分孔から上部坑道周辺の高透水性領域までの健全な岩盤中の核種移行	
安⑨	処分孔内多段配置の場合の緩衝材施工不良のの影響	ブロック方式の緩衝材定置時の施工不良による透水性上昇やコロイドろ過性低下が人工バリア中の核種移 行に及ぼす影響(長尺の処分孔の場合)	
安⑪	処分孔内多段配置の場合のEDZからの離隔確保による安全性 向上の影響	処分孔内底部の廃棄体から劣化支保等の上部坑道周辺の高透水性領域までの健全な岩盤中の核種移 行	
安⑪	袋小路の坑道形状による卓越流路形成の回避の影響	処分パネル内の水平坑道を袋小路とした場合にEDZ等の透水性領域が連続しないことが処分場スケールの地下水流動及び核種移行を抑制する効果	
安⑫	支保材質として低アルカリセメントを用いることによる緩衝材変 質の抑制の影響	緩衝材と支保コンクリートとの相互作用による化学的劣化(セメント溶脱やベントナイト溶解・二次鉱物沈殿) 及びこれに伴う緩衝材の安全機能低下や卓越移行経路形成を考慮した処分場スケール地下水流動と核種 核種移行	
安⑬	支保材質として低アルカリセメントを用いた場合の坑道周辺の 高透水性領域形成の可能性の変化の影響	コンクリート材質による劣化挙動及びEDZの影響の差異により坑道周辺の連続した高透水性領域の有無や 特性が異なることによる処分場スケールの地下水流動及び核種移行	
安围	支保材質として低アルカリセメントを用いた場合の坑道周辺の 岩盤への化学的影響の抑制の影響	坑道支保のコンクリート材質によって周辺の岩盤中の地下水水質、鉱物組成及び割れ目の透水性に生じる 差異が処分場スケールの地下水流動及び核種移行に及ぼす影響	
安15	アクセス坑道の方式による坑道短絡シナリオの影響の差異の 影響	アクセス坑道の埋め戻し材の劣化等の為に透水性が上昇しかつ将来の地下水流動方向が廃棄体定置領 域からアクセス坑道の向きに変化した場合の処分場スケール地下水流動及び核種移行	処分場付近の地下水流動方向の逆転をもたらすような広域地下水流動 の時間的変遷(海水準変動による塩淡境界の移動等)
安⑯	処分場位置による塩淡境界移動の影響の差異の影響	処分場位置によって塩淡境界が横切る可能性がある。または横切る時期が異なることによる処分場スケールの地下水水質の時間変遷あるいはその結果としての核種移行への影響	気候変動及び隆起・侵食に起因する海水準変動によって生ずる広域ス ケールの地下水化学の変遷
安⑪	処分場の汀線との位置関係による地下水流動状況の差異の影響	処分場位置によって塩淡境界が横切る可能性がある。または横切る時期が異なることによる処分場スケールの地下水流動状況の時間変遷あるいはその結果としての核種移行への影響	気候変動及び隆起・侵食に起因する海水準変動によって生ずる広域ス ケールの地下水流動場の時間的変遷
安18	処分場深度による温度の差異の影響	地温勾配の為に処分場の深度に応じて処分場近傍の初期温度が異なることに起因する人エバリア等の温 度分布及びそれに由来する人エバリア変質の時間変化の予測	
安19	処分場深度による岩盤割れ目分布や性状の差異の影響	処分場深度における岩盤透水性や割れ目頻度及び開口幅が浅部とは異なることによる処分場地下水流動 や核種移行への影響	浅部の基盤岩中に高い頻度で透水性の割れ目が分布する等の水理地 質構造によって生ずる広域地下水流動の浅部と深部のコントラスト
安20	地下水流向と坑道が平行の場合のEDZ等の影響の影響	坑道周辺のEDZや劣化支保等の連続した高透水性領域に沿って顕著な地下水流動が生ずる場合の処分 場スケール地下水流動	地形や海水準変動によって規定される将来の広域地下水流動場におけ る処分場付近での地下水流動方向

付表 1-6 地質環境の多様性の観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題について坑道近傍スケールおよび広域的スケー

ルで検討すべき事項

	検討課題	坑道近傍スケールで検討すべき事項	広域スケールで検討すべき事項
+#h (T)	 寿命が異なる処分容器オプション間での塩淡環境変遷の	処分容器開口時の周辺の環境条件の差異(地下水水質が塩水系か否か、動水 の配の小さいを広ちかき動のたる現在にいたばの地下かるの間の運移性能か	広域の密度流における処分場周辺の塩淡環境の切り替わ
吧①	影響程度の差異の影響	勾配の小さい海底下が流動ののる程度速い陸域の地下がその间の達移状態が 等)及びその核種移行への影響	り時期や環境条件の変遷季動寺 開口時期の相違によるGBI位置の変化
	長寿命処分容器の場合の隆起・侵食による処分場露出時	処分場が地表近傍に至る際の処分容器周辺のTHMC環境条件の変遷及び容器	地表に至った処分場内の残留核種インベントリが溶質或い
地(2)	の影響の差異	一破損時期。容器破損後の核種移行と露出時の残留核種インベントリが生活圏に 及ぼす影響	は土壌粒子等に収着して地表環境中を移行する挙動
拙 ③	廃棄体定置方法による低頻度の透水性割れ目との	竪置きのオプションにおいて低頻度の透水性割れ目を避けて処分孔を設置した	
-100	交差回避可能性の差異の影響	場合の処分孔周辺の割れ目のほぼ無い領域中での核種移行抑制効果	
1	 	竪置きのオプションにおいて廃棄体からの核種が緩衝材から直近の岩盤に至る	
地④	院業体金直さり式の場合の被倒物から上部処理の疾	経路と上部坑道埋め戻し材まで拡散してからEDZ等の高透水性領域に至る経路	
	し物、の加取による核性移行の影音	の相対的重要性	
th (F)		処分孔内に多段で配置された各廃棄体直近の環境条件変遷の時間的ずれの	地表に至った処分場内の残留核種インベントリが溶質或い
123	院来体多校配直による処力場路山时の影音低減の影音	有無及びそれに追従した露出時の核種移行率時間変化の位相差	は土壌粒子等に収着して地表環境中を移行する挙動
the G	廃棄体多段配置・パネル小型化による断層等との交差回	高透水性構造までの離隔を確保した場合とパネル内にこれらの構造が分布する	
щO	避の影響	場合の核種移行挙動及び天然バリア性能の差異	
+++(7)	袋小路の坑道レイアウトによる断層等との交差の回避の	袋小路の坑道端部から断層等までの岩盤中の核種移行挙動及びEDZ等の連続	断層等の大規模高透水性構造中の核種移行まで考慮した
地①	響	した高透水性領域が断層等にまで至る場合に比した天然バリア性能の向上	場合の左記の差異の影響
14 O	は送去には彼にしてたれていていの影響の美国の影響	降水系及び塩水系地下水それぞれの水質及び流動状況に応じたコンクリート溶	広域の密度流における処分場周辺の塩淡環境の切り替わ
128	小坦又休材貝による海水糸地下水の影響の左乗の影響	脱・劣化挙動及びそれに由来する核種移行挙動への影響	り時期や環境条件の変遷挙動等
14 O	処分場の汀線との位置関係による塩淡環境変遷の	塩淡環境の切り替わり時期の相違による人エバリア材料劣化・変質及び処分場	広域の密度流における処分場周辺の塩淡環境の切り替わ
1U(9)	影響の差異の影響	スケールでの核種移行挙動への影響	り時期や環境条件の変遷挙動等
116 (10)	加八坦河南にして地支電力に対象の美国の影響	深度の差による処分場露出時期のずれが残留核種インベントリや地表近傍での	処分場露出時の地形や高度の差異及びそれによる地表環
re (ii)	処分场深度による地衣蕗出時期の差異の影響	核種移行に及ぼす影響	境中での核種移行挙動への影響
116 (13)	加八坦河南にもて地泊ち町の彫郷の美田の彫郷	地温に応じた人エバリア中温度分布の時間変化及びそれがバリア材料変質・劣	
地①	処分場深度による地温勾配の影響の差異の影響	化や核種移行挙動に及ぼす影響	
14 10	処分パネル多層化による処分場露出時の影響低減の影	多層の各パネル内にある廃棄体直近の環境条件変遷の時間的ずれの有無及	地表に至った処分場内の残留核種インベントリが溶質或い
TE (12)	響	びそれに追従した露出時の核種移行率時間変化の位相差	は土壌粒子等に収着して地表環境中を移行する挙動
116 (10)	┉八, 광수고 요료	高透水性構造までの離隔を確保した場合とパネル内にこれらの構造が分布する	
地国	処分ハイル多僧化による断僧寺との父差の回避の影響 	場合の核種移行挙動及び天然バリア性能の差異	
114-00	地下水流向と坑道が平行の場合の塩淡境界移動への	坑道周辺の高透水性領域に沿った塩淡境界の速やかな移動及びそれがバリア	広域の密度流における処分場周辺の塩淡環境の切り替わ
편(14)	EDZ等の影響	材料劣化や核種移行挙動に及ぼす影響	り時期や環境条件の変遷挙動等

2.3 既存の知見に基づく検討課題候補の優先度の検討

上記の手法で再整理した検討課題の候補中には、これまでの検討によって影響の大きさが 顕著ではないことがわかっているものや、影響が大きい可能性があると考えられているもの の、既に他の研究で取り上げられており知見の充足度も向上しつつあるものが含まれており、 これらについては本研究であえて優先的に検討課題として取り上げる必要性は低いと考えら れる。

そこで、上述した既往の文献の調査結果に基づき、各検討課題候補を以下の三つの視点か ら分類した。

- 影響の大きさ:○(大きい可能性がある)、△(顕著ではないと考えられる)、不明
- 知見の充足度:○(定量的な評価を行うための情報が得られており評価の事例も存在する)、△(定性的な情報のみ、あるいは定量的な評価に大きな不確実性が含まれる)、× (情報が見当たらない)
- 他の研究での取り組み:○(他の研究で既に検討が進められている)、×(他の研究で は未だ取り上げられていない)

ここで、影響の大きさは、影響が大きいと考えられるものは検討の必要があるが、一方で 影響の大きさが現状の知見から不明であるものについても検討課題として棄却することは適 当ではないと考えられる。また、他の研究で検討が為されているものについては、その知見 がわが国の条件で適用可能かどうかの検討は必要と考えられるが、検討の優先度は知見が不 足しているものの方が大きいと考えられる。

以上の考えから、ここでは影響の大きさが○または不明であり、知見の充足度が△、かつ、 他の研究での取り組みが×であるものを本研究における課題として優先度が高いものとし、 検討課題と考えることとした。なお、その現象の影響が懸念されているものの現在知見が見 当たらないもの(安③)については、閉じ込め性能評価上の取扱いを検討する以前の情報が 不足しており、ここでは対象外とした。このような観点から、本研究で取り上げるべき検討 課題の絞り込みを行った結果を付表 1-7 および付表 1-8 にまとめる。

付表 1-7 安全機能を規定する主要な状態変数への観点から考慮すべき設計オプション間の差異に関する検討課題のうち本研究で取り上げる

	検討課題	影響の大きさ	知見の充足度	他研究での 取組み	本研究で検討課題として 取扱う優先度
安①	燃料タイプによる発熱量及び放射線強度の差異の影響	0	○₩1,2,3	○₩1,2,3	低い
安②	中間貯蔵中の燃料棒の破損による処分後の核種溶出抑制機能低下の影響	Δ	∆%3	⊖₩3	低い
安③	処分容器の寿命の相違による開口時の燃料近傍の環境条件の差異の影響	不明	×	×	範囲外
安④	ベントナイト密度の高い緩衝材を用いることによる安全機能の向上の影響	Δ	○₩4,5	○₩4,5	低い
安⑤	緩衝材定置方式による施工時の不具合の可能性や安全機能への影響程度 の差異の影響	不明	∆₩2,6	×	高い
安⑥	坑道掘削方法による卓越移行経路形成の可能性の差異の影響	Δ	○₩6,7	○₩7	低い
安⑦	廃棄体定置方法によって生じ得る緩衝材施工不良に起因する安全機能の差 異の影響	不明	∆%8	×	高い
安⑧	廃棄体定置方法による水平坑道周辺の連続した高透水性領域の核種移行 に与える影響の差異の影響	不明	∆%8	×	高い
安⑨	処分孔内多段配置の場合の緩衝材施工不良の影響	不明	∆%9	×	高い
安⑪	処分孔内多段配置の場合のEDZからの離隔確保による安全性向上の影響	不明	∆※9	×	高い
安⑪	袋小路の坑道形状による卓越流路形成の回避の影響	不明	∆‰6, ≫10	×	高い
安⑫	支保材質として低アルカリセメントを用いることによる緩衝材変質の抑制の影響	Δ	○₩11,12	⊖₩11	低い
安13	支保材質として低アルカリセメントを用いた場合の坑道周辺の高透水性領域形成の可能性の変化の影響	Δ	○%13	⊜%13	低い
安14	支保材質として低アルカリセメントを用いた場合の坑道周辺の岩盤への化学的影響の抑制の影響	Δ	⊖%13	⊖%13	低い
安⑮	アクセス坑道の方式による坑道短絡シナリオの影響の差異の影響	Δ	○※14	⊖%14	低い
安⑯	処分場位置による塩淡境界移動の影響の差異の影響	不明	∆%10	⊖%10	低い
安⑪	処分場の汀線との位置関係による地下水流動状況の差異の影響	不明	∆≫10	×	高い
安18	処分場深度による温度の差異の影響	0	○※15	○₩15	低い
安19	処分場深度による岩盤割れ目分布や性状の差異の影響	0	◯※16,17	○₩17	低い
安20	地下水流向と坑道が平行の場合のEDZ等の影響	不明	∆%10	×	高い

べきものの抽出結果

* 1... Hofman, P., Uetsuka, H., Wilhelm, A. N., & Garcia, E. A. (1988): DISSOLUTION OF SOLID U02 BY MOLTEN ZIRCALOY AND ITS MODELLING. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM, SORRENTO, 21-25 MARCH 1988 / JOINTLY ORGANIZED BY IAEA AND NEA (OECD), (March), 21-25.

2... SKB (2010b): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, TR-10-47.

3... Garisto, F., Gobien, M., Kremer, E., & Medri, C. (2012): Fourth Case Study: Reference Data and Codes, NWMO TR-2012-08.

※4...柴田雅博,佐藤治夫,小田治恵,油井三和(1999):地層処分研究開発第2次取りまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定, JNCTN8400 99-072.

※5...澤口拓磨, 角脇三師, 山口徹治, 向井雅之, 田中忠夫. (2013): 研究論文 圧縮状態におけるモンモリロナイトのアルカリ溶解挙動, 原子カバックエンド研究 Vol20 No2.

※6...原子力機構(2016): 平成27年度地層処分技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」報告書

※7...原環機構(2011c):処分場の安全機能と技術要件, NUMO-TR-10-11.

※8...原環機構(2011a):地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01.

※9...原環機構(2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.

** 10... SKB (2011b): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project Volume II, TR-11-01.

※11...電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005):TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ-TRU廃棄物処分技術検討書 根拠資料集7-4ポゾラン材料を多量に添加した低アルカリ性セメント(74.2), JNCTY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.

※12...原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015c): 平成26年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」報告書

※13... 植田浩義, 兵藤英明, 鈴木覚, 廣永道彦, 山本武志, 西田孝弘, 西内達郎, 杉山大輔(2008): 低アルカリ性セントの処分場における長期適用性に関する検討, NUMO-TR-08-02

※14...棚井憲治,岩佐健吾,長谷川宏,郷家光男,堀田正國,納多勝(1999):地層処分場のレイアウトに関する検討, INCTN8400 99-044

※15...核燃料サイクル開発機構(1999a):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-,分冊1わが国の地質環境, JNCTN1400 99-019.

※16...原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015c): 平成27年度地層処分技術調査等事業「直接処分等代替処分技術開発」報告書

** 17...SKB (2011a): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project Volume I, TR-11-01.

付表 1-8	地質環境の多様性の	の観点から考慮す・	べき設計オプショ	ン間の差異に関す	る検討課題のうる	ち本研究で取り上げ	「るべきものの抽出結果
--------	-----------	-----------	----------	----------	----------	-----------	-------------

	検討課題	影響の 大きさ	知見の 充足度	他研究での 取組み	本研究で検討課題として 取扱う優先度
地①	寿命が異なる処分容器オプション間での塩淡環境変遷の影 響程度の差異の影響	不明	∆%1	×	高い
地②	長寿命処分容器の場合の隆起・侵食による処分場露出時の 影響の差異	不明	∆%2	×	高い
地③	廃棄体定置方法による低頻度の透水性割れ目との交差回避 可能性の差異の影響	不明	∆%3	×	高い
地④	廃棄体竪置き方式の場合の緩衝材から上部坑道埋め戻し材 への拡散による核種移行の影響	Δ	⊖‰4	⊖‰4	低い
地(5)	廃棄体多段配置による処分場露出時の影響低減の影響	不明	$\triangle \times 5$	×	高い
地⑥	廃棄体多段配置・パネル小型化による断層等との交差回避 の影響	不明	\triangle $\%5$	×	高い
地⑦	袋小路の坑道レイアウトによる断層等との交差の回避の影響	不明	∆%10	×	高い
地⑧	坑道支保材質による海水系地下水の影響の差異の影響	\triangle	$\Delta \times 6$	○※6	低い
地⑨	処分場の汀線との位置関係による塩淡環境変遷の影響の差 異の影響	不明	∆涨7,8	×	高い
地⑪	処分場深度による地表露出時期の差異の影響	Δ	Δ	×	高い
地①	処分場深度による地温勾配の影響の差異の影響	Δ	\triangle ×9	○※9	低い
地12	処分パネル多層化による処分場露出時の影響低減の影響	不明	Δ \times 5	×	高い
地(13)	処分パネル多層化による断層等との交差の回避の影響	不明	\triangle \times 5	×	高い
地14	地下水流向と坑道が平行の場合の塩淡境界移動へのEDZ等の影響	不明	Δ %4	×	高い

※1...原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011a):地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01.

※ 2... 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015c): 平成26年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」報告書

※3...棚井憲治,岩佐健吾,長谷川宏,郷家光男,堀田正國,納多勝(1999):地層処分場のレイアウトに関する検討,JNCTN840099-044

※4...原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011b): 地層処分事業のための安全評価技術の開発(Ⅱ)-核種移行解析モデルの高度化-, NUMO-TR-10-10.

※5...原環機構(原子力発電環境整備機構)(2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.

※6...原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015a): 平成26年度地層処分技術調査等事業「セメント材料影響評価技術高度化開発-4力年研究成果の取りまとめ-」報告書

※ 7...原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011a): 地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01.

* 8...SKB (2010c): Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site-synthesis and summary of results, TR-10-09.

※9...核燃料サイクル開発機構(1999a):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第2次取りまとめー,分冊1わが国の地質環境,JNCTN1400 99-019. ※10...原環機構(原子力発電環境整備機構)(2016):NUMOセーフティケースに関する外部専門家ワークショップ(3)処分場の設計と工学技術

※11...浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 山田国見, 草野友宏, 幕内歩, 高取亮一, 國分(齋藤) 陽子, 松原章浩, 石丸恒存, 梅田浩司(2012) 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成23年度), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2012-024

以上の結果をまとめ、付表 1-9 に整理した。ここでは個別の検討課題の候補に対し、対応 する設計オプション、検討の優先度(付表 1-7 および付表 1-8)、また施工不良により生じる 検討課題とそれ以外の通常の条件で生じる検討課題に関しては別途考えるべきであることか ら、施工不良によるもの(付表 1-2)を区分した。本検討で取り扱う優先度が高いと考えら れ、検討課題と考えるものを青字でハッチングしている。最終的に安全機能の観点からの検 討課題が 8 個、地表・地質環境条件の観点からの検討課題が 11 個抽出された

		対応。	と認計オコ	パシノコンノ			ね 討	 重百	木検討で
	 伏 半 	机公容哭	経術対	「古道	レイアウト	施工不良	1,213	<u> </u>	中限的で
安白	<u> </u>		收到17	りに迫				山坞	400次7度九反
	0	0				0	0		低い
<u>又乙</u> 中②		0				0	0	0	筋囲め
<u>又③</u> 安④		0	0				0	0	
			0			\circ	0		一下に
x x x			0	0		0	0		同い
				0		\circ	0		古い
<u>又()</u> 空()						0	0		<u>同い</u> 古い
<u>又</u> ③ 安◎							0		同い
<u>又</u> ⑤ 空⑪						0	0		同い
安心							0		<u> 高い</u> 古い
<u>女</u> ① 安①				0			0		同い
<u> </u>							0		低い
女心							0		低い
女世				0			0	0	低い
女 切 安 仰				0			0	00	低い
<u> </u>					0		0	00	低い
<u>女</u> (1) 安(1)					0		0	0	同い
女(18)					0		0		低い
<u> </u>					0		0		低い
女(1)					0		0	0	<u> </u>
地()							0		<u> </u>
地区		0					0	0	<u> 高い</u> 古い
地(3)							0		同い
104				00			0		低い
1113	-						0	•	<u> </u>
1116							0		<u> </u>
地()				0			0	0	同い
1118				0	0		0	0	低い
10(9)					0		0	0	<u> </u>
<u>地())</u>					0		0	0	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一
<u>甩()</u>					0		0	<u> </u>	低い
<u>地(12)</u>					0		0	0	<u> </u>
<u>地(3)</u>					0		0	0	<u> </u>
地(14)					0		0	0	局い

付表 1-9 本検討での再整理のまとめ

【参考文献】

- 浅森浩一,丹羽正和,花室孝広,山田国見,草野友宏,幕内歩,高取亮一,國分(齋藤)陽 子,松原章浩,石丸恒存,梅田浩司(2012)地質環境の長期安定性に関する研究 年度報 告書 (平成23年度),日本原子力研究開発機構,JAEA-Research 2012-024.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集 7-4 ポゾラン材 料を多量に添加した低アルカリ性セメント(7.4.2), JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.

国土地理院:http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/lum-takudo.html, 2017年1月6日閲覧

- Garisto, F., Gobien, M., Kremer, E., & Medri, C. (2012) : Fourth Case Study : Reference Data and Codes, NWMO TR-2012-08.
- 原環機構 (原子力発電環境整備機構) (2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments, NUMO-TR-04-03.
- 原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011a):地層処分事業の安全確保(2010 年度版), NUMO-TR-11-01.
- 原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011b):地層処分事業のための安全評価技術の開発(Ⅱ) -核種移行解析モデルの高度化-, NUMO-TR-10-10.

原環機構(原子力発電環境整備機構)(2011c):処分場の安全機能と技術要件,NUMO-TR-10-11. 原環機構(原子力発電環境整備機構)(2016):NUMOセーフティケースに関する外部専門家ワ ークショップ(3)処分場の設計と工学技術.

- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015a):平成26年度地層処分技術調査等事業「セ メント材料影響評価技術高度化開発-4カ年研究成果の取りまとめ-」報告書.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015b):わが国における使用済燃料の地層処分シス テムに 関する概括的評価 -直接処分第1次取りまとめ -, JAEA-Research-2015-016.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2015c):平成26年度地層処分技術調査等事業「使用済燃料直接処分技術開発」報告書.
- 原子力機構(日本原子力研究開発機構)(2016):平成27年度地層処分技術調査等事業「直接 処分等代替処分技術開発」報告書.
- Hofman, P., Uetsuka, H., Wilhelm, A. N., & Garcia, E. A. (1988) : DISSOLUTION OF SOLID UO2 BY MOLTEN ZIRCALOY AND ITS MODELLING. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM, SORRENTO, pp. 21-25 MARCH 1988 / JOINTLY ORGANIZED BY IAEA AND NEA (OECD), (March), pp. 21-25.
- 伊熊ほか(動力炉・核燃料開発事業団)(1998):岩盤の亀裂・風化状態と透水性の関係についての調査, PNC TJ7308 98-008.
- 核燃料サイクル開発機構(1999a):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的 信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-,分冊1わが国の地質環境,JNC TN1400 99-021.
- 核燃料サイクル開発機構(1999b):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的 信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-,分冊2地層処分の工学技術, JNC TN1400

99-022.

- 核燃料サイクル開発機構(1999c):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的 信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-,分冊3地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- 小坂ほか編(2010):『日本の断層マップ』, 培風館.
- 町田貞ほか編(1981):『地形学辞典』,二宮書店.
- 茂木昭夫,大陸斜面,町田ほか編(1996):『新版 地学事典』,平凡社.
- 日本第四紀学会(1987):『日本第四紀地図』,東京大学出版会.
- 於保幸正,平山恭之(2009):江田島市東能美島における花崗岩の風化,環境科学研究 4,1-9,2009.
- 澤口拓磨,角脇三師,山口徹治,向井雅之,田中忠夫.(2013):研究論文 圧縮状態における モンモリロナイトのアルカリ溶解挙動,原子力バックエンド研究 Vol20 No2.
- SKB (2010a) : FEP report for the safety assessment SR-Site, TR-10-45.
- SKB (2010b) : Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, TR-10-47.
- SKB (2010c) : Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site synthesis and summary of results, TR-10-09.

SKB (2011a):Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project Volume I, TR-11-01.

SKB (2011b):Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project Volume II, TR-11-01.

柴田雅博, 佐藤治夫, 小田治恵, 油井三和(1999): 地層処分研究開発第2次取りまとめに おける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定, JNC TN8400 99-072.

総務省統計局:1-6 都道府県別行政区画と面積,日本の統計 2013,第1章 国土・気象, http://www.stat.go.jp/data/nihon/01.htm (最終閲覧日:2014年11月10日).

高瀬博康ほか(2008):『処分場の設計オプションの違いを考慮した性能評価手法の開発(1)ランダムウォーク法を用いた3次元核種移行解析コード PARTRIDGE の開発』,日本原子力学会 2008 年春の年会.

植田浩義,兵藤英明,鈴木覚,廣永道彦,山本武志,西田孝弘,西内達郎,杉山大輔(2008): 低アルカリ性セメントの処分場における長期適用性に関する検討,NUMO-TR-08-02.

若松加寿江ほか(2005):『日本の地形・地盤デジタルマップ』,東京大学出版会.

棚井憲治,岩佐健吾,長谷川宏,郷家光男,堀田正國,納多勝(1999):地層処分場のレイア ウトに関する検討, JNC TN8400 99-044.

付録2

諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表

付表 2-1 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(1/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
1	アメリカ	結晶質岩	結晶質基盤 岩の上限面 分布深度	 結晶質岩の上限面分布深度が 2km 以浅の場合,処分領域の上部 に少なくとも1kmの閉塞領域が, 結晶質岩中に確保される。 	_	_	1
2	アメリカ	結晶質岩	結晶質基盤 岩の上限面 分布深度	深度 5,000m またはそれ以深に 達するボーリング孔に対して,結 晶質岩中に 2,000m の廃棄体の定 置領域および 1,000m の閉塞領域 を確保する場合,この要件を満足 する場所は,結晶質基盤岩の上限 面が深度 2,000m 以浅に分布する か,地表に分布する場所である。	 ・結晶質岩が露岩する地域の利点は、地下深部の断層や割れ目等の情報が直接的に得られることである。一方、安全性の観点から不利な点は、主要な鉛直の地質構造が、処分領域から地表へ連続する核種移行経路となる潜在的な可能性を有することである。 ・結晶質岩を堆積岩が被覆する地点の利点は、砕屑岩類や炭酸塩岩が互層状に分布することにより鉛直方向の透水性が低くなり遮水効果が得られること、結晶質岩中の断層等の鉛直の地質構造に沿う処分領域から地表への核種移行となる潜在的な経路が分断されることである。一方、不利な点は、直接的に結晶質岩の特徴を把握することが困難となり、結晶質岩の岩相や内部構造の評価に対して不確実性が残存することである。 	_	2
3	アメリカ	結晶質岩	結晶質岩の 地質・地質構 造	既知または分布が疑わしい主要 な断層,せん断帯等の <u>複雑な構造</u> <u>を有する地域は回避すべき</u> であ る。 また貫入により形成された <u>大規</u> <u>模な珪長質深成岩体は,変成岩に</u> <u>比べ葉理構造や不均質性が少ない</u> <u>ためより好ましい岩盤</u> である。	_	_	1
4	アメリカ	結晶質岩	結晶質岩の 地質・地質構 造	処分領域と閉塞領域が結晶質岩 盤中に設置される場合, <u>形成年代</u> <u>が古く分布規模が大きい結晶質岩</u> <u>は,ボーリング孔の掘削,超深孔</u> <u>処分の操業と閉鎖後長期の安全性</u> <u>を非常に高める</u> 。	 ・ボーリング孔の安全性は、結晶質基盤岩の岩種と力学特性に依存し、形成年代の古い結晶質岩で有利である。 ・均質な結晶質基盤岩の応力場は、層状構造を有する変成岩に比べて均一で差応力が小さいため、安定したボーリング孔を形成し、ブレークアウトが少なくなると期待される。 ・閉鎖後長期の安全性に対して、深成岩体や大規模な貫入岩体は、変成岩類またはその他の火成岩類に比べ均質で、移行経路となり得る選択的経路をほとんど含まない特徴を有するため、天然バリアによる隔離性能が増大することが期待される。しかし、深成岩体には断層帯のような大規模な構造が存在する可能性がある。 ・結晶質基盤岩の岩種と力学特性は、ボーリング孔の鉛直掘削を容易にするとともに、廃棄体パッケージを連続的かつ無事故に定置することを可能にする。 ・結晶質岩中の層状構造や葉理構造は、掘削方向の不安定化を生じる恐れがある。 ・結晶質岩盤の地質は、ビットライフと掘削率に影響を与える可能性がある。ドリルビットは、層状構造または葉理構造を有する変成岩においてひどく摩耗する可能性がある。また、珪岩はビットライフと掘削率に対して特に問題を起こしやすい。 	_	2
5	アメリカ	結晶質岩	基盤岩構造の複雑さ	結晶質基盤岩中の構造の複雑さ は、主要断層、断裂帯等の構造的 な特徴として現れ、それらはボー リング孔の掘削作業,閉鎖後長期 の安全性に影響を与える可能性が ある。	 ・結晶質基盤岩の構造的特徴は、一般的に堆積岩に被覆されているため不明である。地球物理学的データと、先カンブリア時代の岩石学的・地質年代学的な推論が結晶質基盤岩における構造の複雑さの推定に利用される。 ・基盤岩構造の複雑さは、候補サイトの不適格性を示すものではない。しかし、ボーリング孔の掘削が困難となる可能性や、廃棄物の隔離に対して好ましくない水理地質学的特徴を有する可能性が増大する。 ・結晶質岩中を対象としたボーリング孔の掘削では、掘削流体の逸水等を引き起こすような著しく破砕された岩盤(例えば、断層や断裂帯)が出現する可能性がある。主要な断層は、地下浅部または地表への核種の移行を促進する高透水性の経路となる可能性があり、処分システムの閉鎖後安全性に対して潜在的にマイナスの結果をもたらす。 	_	2
6	アメリカ	結晶質岩	水平応力	深部での水平応力の大きな差 は、鉛直孔の掘削で想定される困 難さと掘削孔の不安定性 (広範囲 のブレークアウト現象、孔壁周辺 岩盤の緩み領域の進展)の <u>1つの</u> 指標となり得る。	_	_	1
7	アメリカ	結晶質岩	水平応力	深部の処分領域における <u>水平応</u> <u>力の差が大きい場合,サイト選定</u> <u>において大きな懸念</u> となり得る。	 ・深部において水平応力に大きな差が存在する場合,掘削における潜在的困難性と掘削したボーリング孔の不安定性に係る指標となる。 ・ケーシング設置作業は、クリアランスの狭い領域でのケーシング挿入作業となるため、ボーリング孔壁はなめらかで安定していることが重要となる。ボーリング孔の崩壊は、掘削影響領域または岩盤との密着シールの自立を脅かすだけでなく、ケーシング挿入作業を危険にさらすか、より困難にする可能性がある。 ・地下深部に定置された廃棄体からの支配的な核種移行経路は、掘削影響領域または緩衝材と岩盤の接触面のどちらかを通じた鉛直上向きとなる。 ・地下深部における水平応力の小さな差は、不確実性の低減と隔離機能の増大をもたらし、円滑で安全な操業をもたらす。 ・侵食・削剥作用、堆積層の過圧密、氷河の消長に伴う後氷期の隆起は、水平応力に影響を与える可能性がある。 	_	2

付表 2-2 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(2/8)

	No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
	8	アメリカ	結晶質岩	隆起	<u>隆起域では地震活動,活断層,</u> <u>火山活動の危険性が増加するた</u> <u>め,それらが,超深孔処分の機能</u> <u>に影響を与える</u> 可能性があるため 重要である。	 ・隆起運動は構造的またはアイソスタティックなプロセスによる 地表面の上昇である。構造的な隆起プロセスでは2つのプレートの収束により大陸地殻が肥厚し隆起を生じ、アイソスタティ ックなプロセスでは除荷に対するアイソスタティクな応答に 応じた隆起が生じる。 ・安全規制の時間スケールにおける、隆起・侵食による超深孔からの廃棄体の露呈の危険性は、処分領域の深度が深いため地層 処分よりも小さい。 ・第四紀の断層活動、火山活動、隆起速度および水平応力は、地 殻変動の指標である。 	_	2
	9	アメリカ	結晶質岩	地熱流速	<u>高い地熱流速は、上向きの動水</u> <u>勾配と関連付けられる</u> 可能性があ り,さらに地熱資源開発における ボーリング掘削の可能性にも関連 付けられる。	_	_	1
	10	アメリカ	結晶質岩	地熱流速・地 温勾配	<u>地熱流速と地温勾配は</u> ,例えば, <u>掘削・定置・廃棄体への温度影響,</u> <u>地熱資源に対する人間侵入の可能</u> <u>性,鉛直方向の地下水流動に対す</u> <u>る指標等と関連</u> 付けられ,サイト 選定に関連する指標となる。	 ・鉛直方向の温度勾配が小さい場合は、隔離機能の増大と鉛直方向の移行減少を生じ、鉛直方向の流動と不安定性の低減に寄与する可能性がある。 ・熱による岩盤の劣化進行と鉱物変化は、高温状態の下で急速に生じる傾向があるため、低温状態は人工バリアシステムの構成要素の隔離機能の信頼性を高める可能性がある。しかし、高温状態は高密度充填材料の溶解に寄与することもある。 ・深部の温度は、ボーリング孔内機器の適用性、キャニスターの強度や耐水圧に影響を及ぼす可能性があるため、低温状態はボーリング孔の掘削や廃棄体の定置作業の困難さを低減させる可能性があり、操業時の安全性に対する信頼性を高める可能性がある。 ・顕著な熱流束が認められるサイトを除外することは、人間侵入の可能性を低下させる。 ・地温勾配は短尺のボーリング孔で観測されているが、長尺のボーリング孔におけるデータは少ない。このため、深度4kmの温度勾配と温度解析値には大きな不確実性が含まれている。 	_	2
	11	アメリカ	結晶質岩	地形の起伏 と動水勾配	地下深部の動水勾配は,一般に 広域的な地形と関係し,広域の流 出域への上向きの流れを生じる可 能性がある。しかし,深部地下水 流動は,ある水文地質学的環境下 では地形的な影響に関わらず,隔 離,停滞する場合がある。	_	_	1
	12	アメリカ	結晶質岩	地形の起伏 と動水勾配	地下水流動は, ほとんどの流動 経路において地形の起伏により支 配され駆動される。地形の起伏に より駆動される地下水流速は, 水 平方向および鉛直方向とも涵養 量, 地形の起伏量分布, 地下の水 理構造(透水性分布)および深度 によって決定される。	 ・地形の起伏が小さい地域では、超深孔処分の対象深度における 地下水流速が極めて小さい可能性がある。このような地域で は、鉛直方向の動水勾配の低下、表層地下水との混合の減少、 深部に古い高塩分濃度地下水が存在する可能性により隔離機 能の信頼性が高まることが見込まれる。 ・深部の高塩分濃度地下水は、流体の密度勾配に寄与し、鉛直上 向きの流動と溶解核種の移行抑制に寄与する。 	_	2
	13	アメリカ	結晶質岩	第四紀断層 と火山活動	第四紀の断層と火山活動は,将 来の地震活動または火山活動の可 能性の指標となる。	_	-	1
	14	アメリカ	結晶質岩	第四紀断層 と火山活動	超深孔処分のサイトは,活断層 または火山の近傍に選定するべき ではない。 第四紀断層の評価は,安全性の 信頼性に対して重要である。これ らの断層の存在は,地質年代的に 直近の地震活動に対する有力な証 拠であり,将来の活動の可能性を 推定する根拠ともなり得る。	 ・火山活動は、噴火により処分領域からの核種の直接的放出と拡散を引き起こす可能性がある。 ・活断層は、地震活動のリスク増大と活発化した断層が高透水性の経路となり得る可能性があることから避けるべきである。 ・活断層が分布しない、または局所的に分布する地域は、将来の地震活動と構造運動に伴う変形の可能性が低いことを示す。このことは放射性物質の地表への放出に対する地震の影響が性能評価により説明される必要があるかどうかを決定する。地震発生の確率が低いことにより除外される場合、不確実性は低減し、性能評価モデルが単純となり安全性の信頼を高める。 ・処分領域から地表へ連続する高透水性を示す経路の存在可能性が低いこと、または火山噴火による廃棄物の直接放出の可能性が低いことを根拠として、最小限の断層活動または火山活動の兆候を示す地域に掘削されるボーリング孔は、堅牢な隔離機能を示す。 	_	2
	15	アメリカ	結晶質岩	地震活動	地震のハザードは,ボーリング <u>れの掘削中および廃棄体の定置作</u> <u>業中のリスクを高める</u> 可能性があ る。また,地震活動,潜在的断層 活動および地質構造の複雑性の一 般的な指標となる。	_	_	1
付 2-	16	アメリカ	結晶質岩	地化学環境	<u>高塩分濃度と地化学的還元環境</u> <u>は,放射性核種の移行を遅延させ</u> る傾向がある。	_	_	1
-2	17	アメリカ	結晶質岩	地下資源の 可能性	<u>石油資源と鉱物資源の探査およ</u> び/または生産は,超深孔処分領域 への人間の侵入を招くことや,被 <u>覆堆積層への放射性核種の放出に</u> 対して影響を及ぼす恐れがある。	_	_	1

付表 2-3 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(3/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	卡 根拠 背景		備考	文献 番号
18	アメリカ	結晶質岩	地下資源の可 能性	<u>超深孔処分領域への直接的な侵入と遮蔽機能その他への損傷に関する不慮の人間侵入リスクは、全体リスクの大きな部分を占め</u> ,地層処分においても主なリスクとなっている。	 ・結晶質岩盤中の鉱物資源の存在可能性は、いかなる未掘削の場所(特に堆積層に被覆された場所)においても、不確実性を有する。 ・鉱物資源開発に係る物理探査と地化学的探査は、一般的に1,000m以下に限られており、結晶質岩盤を被覆する厚い堆積層がある場所ではほとんど実施されない。 ・結晶質岩盤中には、石油鉱床はほとんど存在しない。 ・鉱物資源開発に係る探査ボーリングは、現状では通常行われず、一般により浅い深度で発見された鉱床のみで行われる。 	_	2
19	アメリカ	結晶質岩	深成岩の分布	<u>基盤岩の大部分は,層厚 1km 未</u> 満の堆積岩と火山岩に覆われてい <u>る</u> 。	 アメリカ合衆国の州の約 90%は、大陸地殻を構成する先カンブリア時代の岩石が分布する。 1.5~1.3Gaの花崗岩-流紋岩質の深成複合岩体は、古い原生代の大陸地殻に貫入している。先カンブリアの基盤岩の分布は、地表露頭の分布と数千のボーリングによるカッティングスとコアから把握されている。 	_	3
20	アメリカ	結晶質岩	深成岩の分布	アメリカの中央内陸部のうち, ロッキー山脈とアパラチア山脈の 間では, <u>地表から1km以浅または</u> <u>地表からアクセス可能な先カンブ</u> <u>リア時代の基盤岩が少なくとも</u> <u>2,600,000km²の規模で存在</u> し,こ れらは深部貯蔵利用の可能性に対 して十分な量である。	・反射法地震探査の結果は,花崗岩-流紋岩がアメリカ内陸部の 多くの州に分布することを裏付けており,その厚さは11kmで ある可能性を示唆している。	_	4
21	アメリカ	結晶質岩	深成岩体の規 模と形状	処分サイトは, <u>岩石が最も均一</u> <u>となる深成岩体の中心付近が望ま</u> <u>しい</u> 。このため,ボーリングによ り対象とする深成岩体の大きさと 形状を把握する必要がある。	 ・深成岩体は様々な形状と大きさを示す。実際の深成岩体の厚さ(深さ)についてはいまだに様々な意見があり、 仮説である。 ・深成岩体に関する公開情報によれば、深成岩体の体積は、 400~20,000km³以上の範囲である。 ・深成岩体の形状モデルは、珪長質マグマが地殻をゆっくり上昇することにより、おそらく底部が先細りする細長い風船状をなす可能性がある。この形状は、特に深度約10kmまでは明らかである。 ・深成岩体の形状は、深成岩体が位置する地質構造によって大きく異なる可能性がある。展張場における深成岩体は節理や断層の分布に規制され、節理や断層は広域応力場に整合する。 	_	5
22	アメリカ	結晶質岩	深成岩の組成 と組織	処分サイトは, <u>深成岩体の最も</u> <u>均質な部分を選定する</u> ことにな る。このため, <u>対象とする岩体の</u> <u>組成と組織を把握・評価する必要</u> <u>がある</u> 。	 多くの場合,深成岩の露頭から,岩体における組成と組織の系統的な特徴を把握することが可能である。 深成岩体の組成と組織は,大部分が液状または一部が液状であった時の流動履歴および母岩との相互作用により形成される。 ある深成岩体では,初生的な組成と組織が後の脆性破壊による構造等を支配する可能性がある。 ボーリングにより深成岩が採取された場合,未融解の母岩の包有物と同じように,斑晶,石基および斑晶の配列に基づき,深成岩体内を掘削するボーリング孔の位置を決めるために利用できる可能性がある。 評価すべき深成岩の組成と組織としては,主要流理構造,母岩との接触,深成岩形成後のせん断と流動などがある。 	_	5
23	アメリカ	結晶質岩	深成岩体の分 布	数千のボーリングデータと広域 物理探査データは,先カンブリア の基盤岩の構造と組成の概念 を提 供する。	 ・堆積岩に覆われた先カンブリア時代の深成岩体の探査は、通常 広域物理探査により開始される。包括的広域物理探査は、アメ リカ合衆国本土の大部分に対して実施されている。 ・基盤岩を対象としたボーリング掘削を行う場合、どの地点にお いても重力と磁気探査の結果を補足するために熱流束測定を 実施する可能性がある。磁気と重力のデータは、上部地殻の岩 石により支配される。 	-	5
33	アメリカ	結晶質岩	深成岩体の構 造	<u>主要な構造的不連続性は、反射</u> 法地震探査や屈折法地震探査によ って把握できる可能性がある。	_	_	5
34	アメリカ	結晶質岩	深成岩体の岩 相	処分場の候補地が選定された場 合, <u>サイトに分布する深成岩は,</u> (a)岩石と放射性物質間の相互作 用を評価するため,(b)過去の岩石 -水相互作用の証拠を把握するた め,化学的および岩石学的な特性 <u>を把握する</u> 必要がある。	 ・花崗岩の組成と組織は変化に富む。鉱物学的,組織的, および構造的変化は,形成過程や構造発達史と同様,深 成岩体の解釈に役立つ特徴として利用できる可能性が ある。 ・岩石学的情報は、マグマ性と後マグマ性の過程および発 生域を明らかにする。これらの鉱物の物理的特徴,岩石 組織および化学成分は、花崗岩類の形成と起源の理解の ための重要な情報を提供する。 	-	5
35	アメリカ	結晶質岩	深成岩の内部 構造	<u>深成岩体中の割れ目は,浅部ま</u> <u>たは貫入岩体の上部の露岩域にお</u> <u>いて発生する</u> 。	 ・全体として弾性波速度は、岩石のかさ密度の増加を反映し、岩石中の割れ目本数の減少により深度の増加とともに速くなる。 ・深度3~4kmにおける長期的な状態変化は最小限となり、ボーリング孔内で人工的な水圧破砕が生じる場合、掘削と破壊プロセスが関連する可能性が最も高い。 ・先カンブリア基盤岩の形成時の初生的な割れ目では、二次鉱物が充填している可能性が高い。 ・開口割れ目は、一般的に露出または浅部の岩体(深度1km未満)に認められ、地表面と平行な伸長節理と剥離節理を含む。 	_	5

付 2-3

付表 2-4 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(4/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
36	アメリカ	結晶質岩	断層および 断裂	<u>処分領域から地表あるいは浅地</u> <u>中へ連続した高透水帯(例えば,</u> <u>断層または高断裂帯)の把握は重</u> <u>要</u> である。深部において,ボーリ ング孔と交差する高透水帯の存在 の可能性を評価する必要がある。	 ・処分領域から浅地中へ連続する高透水帯の存在は、著しい地下水流動と放射性核種の移行、特に廃棄物の高熱発生期間における熱的駆動による流動を発生させる可能性がある。 ・地表に露出する断層の位置、変位および分布状況は特定できる。地表に露出する断層の多くは、地下に伸びている。 ・処分領域に分布する火成岩が、堆積岩上部に貫入している可能性を排除することが重要である。 	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6
37	アメリカ	結晶質岩	地質構造	超深孔処分の候補サイトにおけ る層序の把握は,①結晶質基盤岩 の位置選定のため,②褶曲,貫入 岩および岩塩ドームなどの特徴確 認,③第四紀火山岩または貫入岩 の位置確認のために重要である。	 ・将来,火道や貫入岩が処分領域中を横切った場合,生活圏への放射性核種の直接放出が発生する可能性がある。 ・地表面またはボーリング孔と交差している第四紀の火成岩の存在は,将来の火山活動に対する潜在的な可能性を高め,処分施設の安全評価に対して影響を及ぼす可能性がある。 	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6
38	アメリカ	結晶質岩	物理的・化学 的特性,物質 移行特性お よび岩石学 的情報	<u>物理的・化学的特性および移行</u> 特性は, <u>地下水流動と放射性核種</u> 移行の概念モデル開発と,流動と 移行の数値モデルにおけるパラメ <u>ータ設定に係る情報を提供するた</u> <u>めに必要</u> となる。	 ・サイトが適切か否かの判断や、サイトにおいて何が重要なプロセスであるか検討するための概念モデルの構築に対して、物理的・化学的特性および物質移行特性を把握する必要がある。 ・概念モデルは、数値モデル構築のために必要である。 ・数値モデルは、サイト調査結果に基づき決定または推定された各パラメータにより構築される必要がある。 	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6
39	アメリカ	結晶質岩	地化学特性	 サイトの地質環境の把握に資す <u>あため,次の情報が必要</u>である。 ① 主要なイオン濃度 ② 塩分濃度と鉛直塩分分布 ③ 環境トレーサー ④ 母岩地下水の同位体組成 	_	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6
40	アメリカ	結晶質岩	ボーリング 孔と閉塞の 完全性	<u>ボーリング孔とそのシールの完</u> <u>全性は,廃棄物の閉じ込めにとっ</u> <u>て明らかに重要</u> である。 <u>母岩の力</u> <u>学特性は,ボーリング孔の安定性</u> <u>および閉塞材の有効性に関係</u> す る。	 ・必要に応じて、ボーリング孔の完全性に資するため、 サイト特性評価技術によって重要な特性と特徴が特定 される(例えば、母岩の力学特性、応力場(特に水平 応力場における明確な異方性)、およびボーリング孔を 横断する断層)。 ・これらの特性が確認されたとしても、必ずしも超深孔 処分のサイトとして除外されるものではない。ボーリ ング孔の閉塞は、ボーリング孔のブレークアウトを閉 塞し、ボーリング孔を横切る断層を分断するのに利用 される可能性がある。 	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6
41	アメリカ	結晶質岩	人間侵入の 可能性	人間侵入の可能性は,超深孔処 分場のサイト選定における除外基 準となる。	 ・あらゆる地下資源の存在可能性は、人間の侵入を生じうる。 ・地下の天然資源として、石油資源、鉱床、地熱資源が挙げられる。 	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6
42	アメリカ	結晶質岩	地質環境の 安定性	<u>地震の発生可能性(または地震</u> <u>の履歴)のあるサイトは,超深孔</u> 処分には適さないであろう。	 ・いくつかのサイト特性評価手法(現場測定)は、地震の発生可能性を検討するために用いられる可能性がある。 ・水平差応力は、構造発達史とサイトの構造安定性に関する地質学的証拠を提供する可能性がある。 ・地化学特性(例えば、主要元素、微量元素の化学組成など)と流体含有物調査は、サイトの長期安定性と廃棄物の隔離に関与する全体系の地史に関する情報を提供するはずである。 	サイト選定 の初期にお ける考慮事 項	6

付 2-4

付表 2-5 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(5/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
43	アメリカ	結晶質岩	ボーリング孔は、処分領域を深度 3,000~ 5,000m 区間に設けられるように、深度約 5,000m まで掘削すること	-	-	レファレン ス設計における 技術的要件	7
44	アメリカ	結晶質岩	ボーリング孔とケーシングシステムは,目 的の深度に廃棄体キャニスターを定置可 能とする高い保証を提示するために,十分 な安定性と耐久性を有すること	_	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
45	アメリカ	結晶質岩	ボーリング孔とケーシングは,廃棄体キャ ニスターを定置するために十分大きな径 を有すること	-	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
46	アメリカ	結晶質岩	ホーリンクれ間の離隔距離は, 深度 5,000m で 50m 以上にする必要がある。 複数のボーリング孔により処分施設が構 成される場合, すでに廃棄体が定置されて いるボーリング孔と交差することが生じ ないように, ボーリング孔を掘削する必要 がある。 複数のボーリング孔から構成されるサイ トでの廃棄体離隔距離は, 熱管理要件を満 たす必要がある。	_	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
47	アメリカ	結晶質岩	ケーシングは、ボーリング孔の閉塞領域が 設置される区間から撤去可能なように設 計される必要がある。 最適な閉塞領域性能を有するためには、閉 塞材が孔壁と直接接することが必要であ る。	-	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
48	アメリカ	結晶質岩	廃棄体処分域におけるケーシングとグラ ウトは,廃棄体キャニスター周囲における 流体の過剰な圧力上昇を避けるため,流体 の熱膨張と周辺母岩への流れ込みを許容 する必要がある。	_	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
49	アメリカ	結晶質岩	ボーリング孔の掘削は,処分領域の地質環 境を把握するために,廃棄体定置に先立ち 実施される必要がある。	-	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
50	アメリカ	結晶質岩	ボーリング孔とケーシングは、必要に応じ て操業期間中に廃棄体キャニスターの再 回収ができるように十分な安定性と耐久 性を有する必要がある。 操業期間は、全てのボーリング孔の閉塞が 完了し、地上施設の撤去が終了するまでと する。	_	_	レファレン ス設計における 技術的要件	7
51	スウェーデ ン	結晶質岩	掘削技術とキャニスター径	_	 SKBは、当初 BWRの使用済み燃料の集合体を処分するために外径800mmのキャニスターを計画していたが、掘削技術の困難さから、現在はキャニスターを計画していたが、掘削技術の困難さたら、現在はキャニスター外径を400mm(掘削径約500mm)としている。ただし、400mmキャニスターに燃料を収納するためには、燃料集合体を分解する必要があるため、放射線防護上および経済的に問題があるとしている。 大口径のボーリングは、掘削が困難であるだけでなく掘削時のカッティングス排出も困難にする。さらにボーリング孔の崩壊のリスクとブレークアウトのリスクおよび堀管とケーシングの抑留を招くボーリング孔の変形リスクが増大する。さらに大口径のボーリングではケーシングの重量が増大するため、その取り扱いが困難になる。また、定置中にキャニスターがスタックするリスクも除外できない。 	_	8
52	スウェーデ ン	結晶質岩	キャニスター,緩衝材,埋め戻し材	-	 ・コンクリート充填のチタニウムキャニスターが提案されているが、浸食環境条件下(高塩分、高圧、高温)における長期耐久性に対して大きな不確実性がある。 ・キャニスターは、ベントナイトと土を混合した緩衝材で覆われる。 ・緩衝材の目的は、キャニスターの確実な定置、ボーリング孔内における地下水の流れに伴う核種移行の抑制、および隔離機能を喪失したキャニスターからの放射性核種の拡散遅延である。 ・ボーリング孔の上部2kmは、ベントナイト、アスファルトおよびコンクリートの組み合わせにより閉塞される。 	-	8
53	スウェーデ ン	結晶質岩	長期安全性	-	 ・超深孔処分のコンセプトでは、岩盤自体が最も重要な隔離機能 を有することで核種の移行を防いでいる。 ・超深孔処分では深部地下水は停滞していると想定している。その理由は、透水係数が一般に低く、地下水の塩分濃度が高い(それによって高密度になっている)ので上部の軽い地下水と混ざらない傾向があるからである。 ・超深孔処分の安全性は、地層処分(KBS-3)と同じ方法では解析されていない。その重要な理由は、我々の深部における状況の理解が意味のある安全評価を実施するには不十分であるからである。 	_	8
54	スウェーデ ン	結晶質岩	岩石の限りない不透水性	_	 ・地下水とガスの透水性は地下深部で著しく低下し、超深部での 値は、10⁻¹⁶m/s以下と推定される。このような値は、深度 3~ 5km では地下水の動きがないことを意味している。 ・一般的に地下深部の基盤岩が低透水性であることは、主要な構 造線や断層を除きスウェーデンの大部分を占める大陸基盤岩 の深度 3~5km において低流動性であるという推定と調和して いる。 	深度 3~5km で の核種の拡散を 抑制する重要な 要因	8

付表 2-6 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(6/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
55	スウェー デン	結晶質岩	地下水分布	_	 ・深度 3km 以深の基盤岩中の地下水流動は、非常に塩分濃度が高く 重いため、数百万年間にわたり密度成層を維持する。全体として、 既往の研究は次の2つのことを示している。 ① 安定した密度成層を含む超深部の基礎岩盤域の存在 ② この密度成層が非常に長期間維持されている可能性があること 	深度 3 [~] 5km での核種 の拡散を抑制する重要 な要因	9
56	スウェー デン	結晶質岩	地化学的現象	_	・深部における高圧・高温状態は、処分領域からの漏出時により急速な吸着が生じると考えられる。これは、温度上昇(60~105℃)が一般に割れ目充填鉱物の生成などの地化学現象に寄与するからである。	深度 3 [~] 5km での核種 の拡散を抑制する重要 な要因	9
57	スウェー デン	結晶質岩	主要な割れ 目,断層等の 存在	-	 ・生活圏への漏洩のリスク、処分深度が深くなるリスクが減少するとしても、安全措置として、開口した破砕帯により特徴付けられる区域に処分場を選定すべきではない。 ・これは、基盤岩の上部と比較して、深度3~5kmにおける地下水の上向き流動が深部密度成層のより強い不動性により妨げられるからである。 	核種の拡散を促進す る可能性がある要因	9
58	スウェー デン	結晶質岩	処分場周辺岩 盤の加熱	_	 ・キャニスター内の崩壊過程により、高レベル放射性廃棄物処分場 近傍の周辺岩盤への何らかの熱的影響は避けられない。崩壊熱が 発生し、数千年の間放出される。これにより、岩盤内で熱対流が 発生し、地下水の流動をもたらす可能性がある。 	核種の拡散を促進す る可能性がある要因	9
59	スウェー デン	結晶質岩	ボーリング孔 の閉塞		 ・現在、大深度ボーリング孔を利用した処分に対して適用可能で、 数種類の適切な方策が示されている。 ボーリング孔が的確に閉塞されるかかが重要である。 	核種の拡散を促進す る可能性がある要因	9
60	スウェー デン	結晶質岩	処分場におけ る微生物の影 響	-	 ・最近の研究は、深部基盤岩中での微生物の生存を確認している。 これらの有機体は、115℃までの地化学環境に影響を与える可能 性がある。 ・スウェーデンの深度 3~5kmの基盤岩における温度が 105℃を超え ない場合、超深孔処分施設に対してバクテリアが影響を与える可 能性がある。既存の知見に基づくと、バクテリアの影響は、限定 的とみなされている。例えば、SKB の最近の研究によるとそのリ スクは低く見積もられている。 	核種の拡散を促進す る可能性がある要因	9
61	スウェー デン	結晶質岩	将来の氷河期 における変化	_	 ・将来の氷河期の予測は、基盤岩中の構築される全てタイプの処分施設に対する問題の複雑性を提起する。 ・第一に、直接的なリスクとして、氷床の拡大または融解による地震と断層活動および基盤岩の変形がある。 ・第二に、間接的なリスクとして、気候変動または地下水涵養および流出経路のパターン変化は地下水質の変化として現れる。氷河期シナリオはスウェーデンにおける全ての種類の最終処分に対するリスクである。そして、スカンジナビアは、高レベル放射性廃棄物中の核種が完全に消失する前に、少なくとも部分的な氷河作用を受ける可能性が非常に大きい。 	核種の拡散を促進す る可能性がある要因	9
62	スウェー デン	結晶質岩	基盤岩	_	・基盤岩は,深度約1200mまでは,非常に割れ目が多い。この深度 以深は,割れ目帯(2-20m)が200-300mごとに出現する。	SKB は, Gravberg-1 ボーリング孔 (深度 6km)の調査結果を基に, 超深孔処分の可能性を 検討している。	10
63	スウェー デン	結晶質岩	透水性	_	・1,250~3,200m 間の透水試験から,透水係数は k=10 ⁻⁹ ~10 ⁻¹⁰ m/s と なった。この値は,おそらく基盤岩中のほとんどの透水域と一致 すると考えられる。	SKB は, Gravberg-1 ボーリング孔 (深度 6km)の調査結果を基に, 超深孔処分のの可能性 を検討している。	10
64	スウェー デン	結晶質岩	塩水	-	・高濃度塩水(塩分濃度 10~15%)が深度 6km 以浅で出現する。	SKB は, Gravberg-1 ボーリング孔 (深度 6km)の調査結果を基に, 超深孔処分のの可能性 を検討している。	10
65	スウェー デン	結晶質岩	深部地下水	-	 ・カルサイトの同位体データから地下水が超深部まで浸透している 可能性がある。 	SKB は, Gravberg-1 ボーリング孔 (深度 6km)の調査結果を基に, 超深孔処分のの可能性 を検討している。	10
66	スウェー デン	結晶質岩	地温勾配	_	・地温勾配は 1.61℃/100m である。	_	10
67	スウェー デン	結晶質岩	応力場	_	・Gravberg-1 孔とその他の情報から得られたスウェーデンの応力場 について,鉛直応力は静地圧と同等であり,最小水平応力は鉛直 応力の 2/3,最大水平応力は鉛直応力よりもいくらか大きな値と なる。	SKB は, Gravberg-1 ボーリング孔 (深度 6km)の調査結果を基に, 超深孔処分の可能性を 検討している。	10
68	スイス	花崗岩	地質的に安定 し,十分な層 厚と広がりお よび低透水性 を有しなけれ ばならない。	-	 ・高レベル放射性廃棄物の処分のために選択される地層は、評価対象期間を通じて閉じ込め機能を保持するための特性を持たなければならない。このような特性を有する多くの地層の中で、ボーリング本数を減らせる等の理由から、花崗岩は適切な選択と思われる。 	_	11

付表 2-7 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(7/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
69	スイス	花崗岩	もし他の堆積岩層に 覆われ,それが将来起 こるイベントから処 分領域の地層を効果 的に保護するに十分 な層厚なら有利とな る。	_	 ・高レベル放射性廃棄物の処分のために選択される地層は、評価 対象期間を通じて閉じ込め機能を保持するための特性を持たな ければならない。このような特性を有する多くの地層の中で、 ボーリング本数を減らせる等の理由から、花崗岩は適切な選択 と思われる。 	_	11
70	IAEA	_	閉鎖後の放射線防護	_	 適切に設計,配置された超深孔処分施設は,閉鎖後の放射線影響が他の処分方法同様に低いという十分な確実性を示さなければならない。 サイトは,封じ込めと廃棄物の生活圏からの隔離および人工バリアの維持に対して好ましい条件が継続する場所が選定されなければならない。 超深孔処分施設は,サイトで得られた特性を考慮し,防護を最適化し,線量拘束値および/または,リスク拘束値内にとどまるよう考慮して設計されなければならない。超深孔処分施設は想定された人工バリアと天然バリアの両方の安全性が実現されるように評価された設計に基づいて建設,操業および閉鎖されなければならない。 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m(地層処分 相当)を対象としている。	12
71	IAEA	-	閉鎖後の放射線防護	_	 ・将来の個人の生活に対する線量評価においては、人間が廃棄物 由来の放射性核種が含まれる可能性がある様々な資源を利用す ることが想定される。 ・評価モデルにおける将来の人間活動の描写は、将来の人間活動 が確信をもって予想できないので、必ず様式化されなければな らない。 ・生活圏のモデリングと固体廃棄物処理で発生する核種の評価に 対する論理的で可能な手法は IAEA BIOMASS Project 内で検討さ れている。 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m(地層処分 相当)を対象としている。	12
72	IAEA	_	閉鎖後の放射線防護	_	 ・環境への放射性核種の放出と人間の被爆をもたらす極低頻度の 自然事象は、超深孔処分施設のバリア機能を低下させる可能性 がある。ただし、ボーリング孔を利用した処分に関しては、想 定される廃棄物が比較的短い半減期を有していることと、その 結果として短い評価時間となることが、極低頻度の自然現象の 重要性を弱める傾向にある。 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m(地層処分 相当)を対象としている。	12
73	IAEA	-	閉鎖後の放射線防護	_	 ・超深孔処分施設への人間の不慮の侵入に関して、ボーリング孔の掘削または処分施設への掘削等に従事する少数の個人が高い 被ばくを被る可能性がある。 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百m(地層処分 相当)を対象としている。	12
74	IAEA	_	隔離	_	・30m 以深に設置される廃棄物については、第一に地層によって 隔離機能がもたらされ、その適切な隔離に必要となる深度を決 定するために考慮されるべき主な要因は、地表の侵食速度、評 価の時間スケールおよび永久凍土層の深度である。もちろん、 隔離機能だけがボーリング孔の深度を決める時に考慮すべき事 項ではない。基盤岩の地質環境が封じ込め機能に与える影響も 考慮されるべきである。	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m(地層処分 相当)を対象としている。	12
75	IAEA	_	サイト選定	_	 ・地表付近に処分施設を設置する場合におけるサイト選定では、 少なくとも地質、水理地質、地化学、テクトニクスおよび地震動、地表現象、気象、気候と人間活動の影響を考慮すべきである。 ・超深孔処分に対してはこれらに変更が必要かもしれないが、以下の項目が評価に利用される。 (a)地下水への汚染の可能性 (b)洪水、侵食、地すべりまたは風化等の気候・気象と関連する地表現象が、処分システムの隔離機能へ及ぼす影響 (c)断層活動、地震活動または火山活動が、処分場の隔離機能を喪失させる可能性の程度 (d)処分場の隔離機能を脅かす可能性のある予測可能な人間活動の程度、これには、土地の所有、資源およびサイトと周辺環境の開発の可能性の考慮する必要がある (e)周辺の地化学環境が人工バリアの寿命を損なう可能性の程度 (f)地質が物理的・化学的安定性に寄与する程度 (g)地質、水理地質および地化学特性が、サイトからアクセス可能な環境への放射性核種の移行抑制に寄与する程度 (h)廃棄体や掘削重機をサイトへ運搬するための交通網、必要に応じて、水や電気等のインフラ設備 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m (地層処分 相当)を対象としている。	12
76	IAEA	_	サイト選定の初期作業	_	 ・サイト選定の初期段階に必要な情報は、既存の地質図、地形図および水理地質地図、気象データおよび環境調査データである。 ・多くの地域では、全国規模の詳細な調査データやマッピング情報が不足しているため、地質構造が単純で安定した領域を見つけることは困難である。これらの多くの情報は、地表近傍に建設された既存の処分サイトから容易に入手できると想定される。 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m(地層処分 相当)を対象としている。	12
77	IAEA	_	サイトの水理地質学的 特性の評価	_	 ・数百mまたはそれ以深では、好ましい基盤岩は、閉じ込め期間相当の長期にわたり浅部地下水との混合がほとんどなく、非常に流れが遅く古い塩分濃度の高い地下水を含む可能性がある。 ・深部の飽和領域は、嫌気性あるいは還元環境を提供することにより、腐食の抑制とおそらく幾つかの多価放射性核種の溶解の抑制に有効である。飽和と不飽和領域が混在するサイトは避けるべきである。 	放射性廃棄物のボーリン グ孔処分に関する安全指針 書。ただし,ボーリング孔 の深度は数百 m(地層処分 相当)を対象としている。	12

付表 2-8 諸外国の超深孔処分に対する地質環境の基本要件に関する整理表(8/8)

No.	国名	地質環境	基本要件	根拠	背景	備考	文献 番号
78	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	_	 ・完全に飽和したサイトで考慮すべき重要事項は、混合による希釈と 拡散である。これらは、特に長期間において、人工バリアの機能喪 失が生じて放射性核種の移行が避けられなくなった時、廃棄物の影 響を少なくする上で有効な現象となる可能性がある。希釈と拡散が 効果を発揮するためには、放射性核種の閉じ込めが最も重要とな る。したがって、希釈の場合、微量の放射性核種(Bq/年)の移行 と大量の地下水体積流束(m³/年)との混合が、地下水中の放射性 核種の低濃度(Bq/m³)をもたらす。拡散は処分場からの放射性核 種プルーム移行の時間的、空間的分散を意味する。最も重要な観点 は、時間にともなう拡散である。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
79	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	-	 ・希釈と拡散は、人工バリアの有効性と、サイト選定で重要となる、 処分施設から地表面への放射性核種の移行時間で決まる放射性核 種の閉じ込めにより支援される。これは、地質中の低地下水流動(前 項)と強力な放射性核種の収着(次項)によりもたらされる。低流 動の処分場の層と高流動の地表付近の層の地下水流動の大きな違いが発生する場所において混合による高希釈が発生する可能性が ある。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
80	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	_	 ・基盤岩および被覆層中における高い収着性は、閉じ込め機能を高めるための好ましい要素である。同時に、特定の非吸着イオン(例,塩化物)が岩種にかかわらずほとんど収着を示さないことを確認する必要がある。吸着、イオン交換および化学反応等の一連のプロセスを含む収着は、放射性核種の移行が遅延することにより、放射壊変に要する時間を与えることにもなる。収着が放射性核種の移行を遅らせ、混合による希釈と拡散が高いサイトでは、安全評価により算出される放射線量が法的規制を下回るはずである。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
81	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	_	 ・もし、母岩が自立しているならばボーリング孔の構築に有利となる ため、岩石の性能は重要となる。ボーリング孔が不安定になる岩石 と深部堆積層は、特に対象母岩として避けるべきである。 ・地表付近において、風化等の影響により岩石の性能が劣っている場 合には、ケーシングの挿入が必要である。また、処分領域にケーシ ングを設置する必要がある場合、ケーシングと岩盤との間のアニュ ラス部をグラウトにより閉塞する必要があるため、良好なセメンチ ングが可能な岩盤であることが望ましい。人工改変が行われた地盤 は、一般に不安定なので避けるべきである。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
82	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	_	 ・深孔処分では、人間侵入の可能性とその影響が地下浅部を対象としたボーリング孔処分に比べて小さい。しかし、処分サイトは、有用な天然資源(例,豊富な地下水、鉱物または炭化水素)が賦存する地域を避けることにより不慮の人間侵入の可能性を減らすように選定すべきである。 ・処分サイトへのアクセスに関して、小規模の処分施設の場合は未舗装道路で十分であり、移動式の電気と水の供給サービスの利用が可能である。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
83	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	-	 ・地下浅部を対象としたボーリング孔処分と同様に、地殻変動が継続している地域を避けてサイトを選定すべきである。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
84	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	-	 ・侵食や風化などの地表現象は、深孔処分のサイトに対してはそれほど重要ではないが、考慮すべきである。 ・閉鎖後の安全性と同様に、操業時の安全性を確保する観点から、洪水や地すべりが起こりやすい領域は避けるべきである。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
85	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	-	 ・気候と異常気象に関して、深孔処分に対する主な考慮事項は、それらの広域地下水流動への影響である。地下水が極端な季節変動を示す地層への処分は避けるべきである。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12
86	IAEA	_	サイトの水理地質 学的特性の評価	_	 ボーリング調査のみによる深部地質環境の把握は困難であるため、 単純で特性を捉えやすい地質構造と水理地質構造を有する地点が 優位である。地質環境の把握が難しく、安全評価の結果の信頼性を 低下させる可能性があるので、地質的に著しく複雑なエリアは避けるべきである。 	放射性廃棄物のボ ーリング孔処分に関 する安全指針書。ただ し,ボーリング孔の深 度は数百 m(地層処分 相当)を対象としてい る。	12

【付録2,3の参考文献】

文献 番号	書誌情報
1	Freeze, G.A. et al. (2015): Siting Guidelines for a deep borehole Disposal Facility. IHLRWM2015, Charleston, SC, April 12-16, pp.618-623.
2	Arnold, B.W et al. (2013): Deep Borehole disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals design, and RD&D Needs. Sandia National Laboratories, October 25, 2013, FCRD-USED-2013-000409, SAND2013-9490P, 149p.
3	Van Schmus, W.R. and Bickford, M.E., eds. (1993): Transcontinental Proterozoic provinces. In Reed, J.C., Jr., d al. (eds.) The Geology of North America, Precambrian: Conterrninous U.S., Vol. C-2, 171-334.
4	Pratt, T. et al. (1989): Major Proterozoic basement features of the eastern Midcontinent of North America revealed by recent COCORP profiling. Geology 17,505509.
5	Heiken, G. et al. (1996): Disposition of Excess Weapon Plutonium in Deep Boreholes, Site Selection Handbook, Los Alamos National Laboratory, LA-13168-MS, 48p.
6	Brady, P. et al. (2012):Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report, Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 29p
7	Arnold, B.W. et al. (2011): Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT SAND2011-6749, 66p.
8	SKB (2010): Choice of Method – Evaluation of Strategies and Systems for Disposal of Spent Nuclear Fuel, SKB, P-10-47, 87p.
9	Åhäll,K-I. (2006): Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: An evaluation based on recent research of bedrock conditions at great depths. ,MKG Report2, 28p.
10	SKB (1989): Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential, SKB, TR-89-39, 91p.
11	NAGRA (1980): Feasibility Study for Large Diameter Boreholes for the Deep Drilling Concept of a High-Level Waste Repository, NAGRA, NTB 80-04.
12	IAEA (2009): Disposal Facilities for Radioactive Waste, SSG-1.
13	Sandia National Laboratories (2013) : Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. + Fuel Cycle Research & Development. Sandia National Laboratories, FCRD-USED-2012-000269, SAND2012-8527P, 90p.
14	DOE (2014): Request for Information (RFI) – Deep Borehole Field Test. US Department of Energy Idaho Operations Office, Solicitation Number DE-SOL-0007705.
15	Beswick, A.J. et al. (2014): Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering. Challenges, Energy, Vo;.167, Issue EN2, pp.47-66.
16	National Academy Press (1994): Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium. – Committee on International Security and Arms Control National Academy of Sciences, National Academy Press, 288p.

付録3

諸外国の超深孔処分に対する サイト選定条件に関する整理表

付表 3-1 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(1/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献番号
1	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 結晶質岩盤の上限面までの深度が 2km 未満であること	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
2	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 結晶質岩盤中に既知のせん断帯または地殻変動が認められな いこと	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
3	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 地熱流束が 75mW/m ² 未満であること	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば, RFIの好ましい指針は, 2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
4	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 深部地下水循環を避けるため、地形の傾斜が 1°以上の地点 まで、約 100km 以上離れていること	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
5	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 第四紀の断層から 10km 以上離れていること	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
6	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 第四紀の火山活動から 10km 以上離れていること	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
7	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 地震活動による 50 年以内の 0.16G を超える表面最大加速度 の発生確率が 2%未満であること	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書 (RFI) に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
8	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 戦略的な石油備蓄サイトが近傍にないこと	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
9	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 市街地が近傍にないこと	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
10	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 サイト面積が 1km ² より広いこと	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
11	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 地表や地下に既知の人為的な放射能汚染がないこと	2015 年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば, RFI の好ましい指針は, 2013 年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
12	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 石油掘削の頻度が少ないこと	2015年のサイト選定指針 ¹⁾ によれば,RFIの好ましい指針は,2013年の超深孔処 分実証プロジェクト報告書 ¹³⁾ の基本要件(技術的要因)に基づいて設定したとして いる。	DOE が実施する超深孔処分フィールド試験への 利害関係者に向けた情報提供依頼書(RFI)に示さ れる実験サイトとして好ましい条件	14
13	アメリカ	結晶質岩	【理想的な組み合わせ】 結晶質岩が地表または深度 1km 以浅に分布すること	理想的なサイトは、ボアホールの底部からの地下水流動がなく、次の 100 万年に わたり顕著な移動がないことを示す必要がある。理想的な処分地は、大規模で、構 造的に安定な基盤岩地域であるカナダ楯状地である。楯状地内の深成岩は、比較的 均一な特性により卓越した対象となる。	_	5
14	アメリカ	結晶質岩	【理想的な組み合わせ】 サイトが構造的に安定していること	理想的なサイトは、ボアホールの底部からの地下水流動がなく、次の 100 万年に わたり顕著な移動がないことを示す必要がある。理想的な処分地は、大規模で、構 造的に安定な基盤岩地域であるカナダ楯状地である。楯状地内の深成岩は、比較的 均一な特性により卓越した対象となる。	_	5
15	アメリカ	結晶質岩	【理想的な組み合わせ】 サイトが市街地から離れていること	理想的なサイトは、ボアホールの底部からの地下水流動がなく、次の100万年に わたり顕著な移動がないことを示す必要がある。理想的な処分地は、大規模で、構 造的に安定な基盤岩地域であるカナダ楯状地である。楯状地内の深成岩は、比較的 均一な特性により卓越した対象となる。	_	5

付表 3-2 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(2/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献番号
16	アメリカ	結晶質岩	【理想的な組み合わせ】 サイトが国境に近くないこと(200m以上の離隔)	理想的なサイトは、ボアホールの底部からの地下水流動がなく、次の100万年にわたり顕著な移動がないことを示す必要がある。理想的な処分地は、大規模で、構造的に安定な基盤岩地域であるカナダ楯状地である。楯状地内の深成岩は、比較的均一な特性により卓越した対象となる。	_	5
17	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =基盤岩までの深さ= 結晶質岩盤の上限面分布深度が,一般に地質構造の広範囲にわたり,深度 2km 以深でないこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
18	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =基盤岩までの深さ= 結晶質岩盤までの深度が一般に 2km 以上であること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
19	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =基盤岩までの深さ= 基盤岩中に若すぎるか同時代の岩相層序単位の移動岩石を伴い,地質図等に記 載可能な規模の衝上断層を含むことが知られていること 2km 以上の厚さの堆積岩と火山岩を伴う巨大な構造岩塊の存在が,深度 2~ 4km の基盤岩の処分場選定範囲を著しく狭めること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
20	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =基盤岩の岩種= 深度 2~4kmの基盤岩の岩種が,広義の花崗岩質または花崗岩質深成岩である こと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
21	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =基盤岩の岩種= 基盤岩が花崗岩質である証拠がまったく,またはほとんどないこと。著しく葉 状であるか,破砕されていると判断される花崗岩質岩盤。	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
22	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =基盤岩の岩種= 地質または構造の予測において,水平方向の拡がりが超深孔処分地の位置選定 の自由度に対して十分でないことを示すか,深度 2~4km に花崗岩岩の位置選 定を著しく妨げるような構造を形成していること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で、サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件、不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として、NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性、テクトニクス、地化学的要件と、連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
23	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =基盤岩の放射年代= 基盤岩の放射年代が,一般に単一年代周辺に集まり,同一岩石試料に対して異 なる年代測定手法による放射年代と一致すること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
24	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =基盤岩の放射年代= 基盤岩の放射年代のパターンが,岩石の変形の特徴,再結晶および冷却に対し て著しい不均一性をしめすこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で、サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
25	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =基盤岩の放射年代= 放射年代により貫入性花崗岩を示す岩体が,他の基盤岩が有する放射年代パタ ーンよりも若い形成時期を示す証拠を示すこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で、サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要 件として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦 政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5

付表 3-3 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(3/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献 番号
26	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =歴史地震活動= 構造的岩体中で発生する歴史地震の活動記録と関連する地震活動 の特徴と頻度が,核種のアクセス可能な環境への放出に至る可能 性がないとみなせること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
27	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =歴史地震活動= 断層運動の歴史的特徴と頻度または他の地震動が,処分場の天然 バリア性能を脅かすと合理的に想定されること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
28	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =歴史地震活動= 処分施設と操業に影響を及ぼす可能性があるほどの構造的岩体中 での歴史地震の再発や,地すべりまたは広域地下水流動系を変化 させる可能性がある巨大な表層貯水域を形成する見込みがある沈 下の可能性を示す歴史地震事象の再発があること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
29	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =地殻応力場= 深度方向の応力分布が,類似する地質環境における既知の平均応 力と等しいこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
30	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 = 地殻応力場= 深度 2~4km の処分領域において,潜在的にボアホールブレイク アウトが発生するような最大水平応力と最小水平応力を示すこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
31	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =熱流束= 広域にわたり低熱流束で,変化しやすいが比較的均一であり,類 似の地質環境と同程度の大きさであること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
32	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =熱流束= 廃棄体の放射性崩壊による熱負荷,超深孔処分における公開パラ メータモデル,水理シナリオを組み合わせた評価において,アク セス可能な循環水環境への移行時間が1,000年以内を示すこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
33	アメリカ	結晶質岩	【不利なる可能性のある条件】 =熱流束= 高い地温勾配は、処分場建設の技術的実現性の困難さと過度のコ ストを伴いながら、処分場建設、定置および閉鎖のための特別な 工学技術および機械設備の利用を必要とすること 高い熱流束域は、地下水流動系の把握またはモデル化の困難さに 著しく関わること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
34	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =断層,割れ目等= 岩体中に活断層や,第四紀に形成された割れ目または節理の証拠 がないこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件 (好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件 として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政 府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準 10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5

付表 3-4 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(4/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献 番号
35	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =断層,割れ目等= 第四紀における断層運動の特徴と頻度が,処分場の概念設 計における廃棄物の隔離機能を脅かすほど顕著であること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として,NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
36	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =断層,割れ目等= 活断層の証拠,断層面に沿って歴史地震の活動が認められ ること,ほぼ鉛直な断層面は,深部の処分領域からアクセ ス可能な環境への地下水循環をもたらす可能性があること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として,NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
37	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =層序= 基盤岩を被覆する地層が著しく変形しておらず,処分施設 の建設,操業および閉鎖に適した力学的優位性を有するこ と	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で、サイト選定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として、NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性、テクトニクス、地化学的要件と、連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
38	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =層序= 岩石状態は、処分場の建設、操業および閉鎖に対して合理 的に利用可能な技術を超えた工学的方策を必要とする可能 性があること 廃棄物の閉じ込めまたは隔離に影響する可能性がある鉱物 の水和または脱水、塩水の移動、他の物理的または化学的 に関係する現象が発生する可能性がること 地質環境が第四紀における極端な侵食の証拠を示すこと 基盤岩を被覆する地層が、処分場の操業および閉鎖中にボ ーリング孔の大掛かりな維持管理を余儀なくする可能性が ある地質工学的特性を有すること 変形した地層が処分場を取り巻き、閉鎖後における水理状 況のモデリング化の確実性を下げる可能性があること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選 定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条 件は技術的要件として,NAS (1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地 化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存 在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。		5
39	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =溶解,沈殿,続成作用= 岩体中に第四紀に生じた著しい変質の証拠がないこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として,NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
40	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =溶解,沈殿,続成作用= 基盤岩を被覆する堆積岩において,角礫パイプ,溶解性洞 穴,著しい規模の間隙が形成された痕跡,または構造的崩 壊が水理地質学的な連続性を示す可能性があること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として,NAS(1994) ¹⁶ に示される岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
41	アメリカ	結晶質岩	【好ましい条件】 =広域水理地質= 処分領域の基盤岩と地表面の間に帯水層が存在しないこと 処分場の建設,操業および閉鎖に必要とされる水が入手可 能なこと	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で、サイト選定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として、NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性、テクトニクス、地化学的要件と、連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
42	アメリカ	結晶質岩	【不適格な条件】 =広域水理地質= 予想される地下水状況が,処分場の建設,操業または閉鎖 に必要とされる合理的で利用可能な技術を超える工学的方 策を必要とする可能性があること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で、サイト選 定条件(好ましい条件。不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条 件は技術的要件として,NAS(1994) ¹⁶⁾ に示される岩石特性,テクトニクス,地 化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制基準は存 在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5

付表 3-5 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(5/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献 番号
43	アメリカ	結晶質岩	【不利になる可能性のある条件】 =広域水理地質= 地下水状況が処分場の建設,操業または閉 鎖に対して複雑な工学的技術手段を必要と する可能性があること	理想的な組み合わせにおけるサイトの地質を結晶質岩とした上で,サイト選定条件(好ましい条件。 不適合条件,不利になる条件)を示している。選定条件は技術的要件として,NAS(1994) ¹⁶⁾ に示され る岩石特性,テクトニクス,地化学的要件と,連邦政府の規制基準(ただし超深孔処分に関する規制 基準は存在しないので関連基準10 CFR Part 960)を組み合わせて設定している。	_	5
44	アメリカ	結晶質岩	【除外基準】 上向きの動水勾配	ボーリング孔内の水理的ポテンシャルの上向き勾配は,次の状態により発生する。 ① 周囲の水理学的状況 ② 廃棄体の熱による処分領域での流体の熱的加圧 ③ 処分領域の過熱流体の浮力 ④ 処分域の水,またはガスを放出する熱-化学反応	_	6
45	アメリカ	結晶質岩	【好ましくない条件】 深部の若い天水起源の地下水	安定大陸地域の深部結晶質基盤岩中の地下水は、通常非常に古い年代を示す化学的および同位体特 性を有する。深部における若い天水起源の地下水の存在は、深部での活発な地下水流動を示す。若い 天水起源の地下水の下向き方向の流動は、核種を地下浅部へ移動することを可能とする上向き方向の 地下水流動に対応する可能性を示唆する。	_	6
46	アメリカ	結晶質岩	【好ましくない条件】 低塩分濃度,酸化性地下水	深部結晶質基盤岩中の地下水は,通常高い塩分濃度と強還元性を有する。淡水に積層される高塩分 地下水の密度成層は,上向き方向の地下水流動を妨げる。還元環境は使用済み核燃料核種の強収着と 低溶解を導くため,低塩分濃度と酸化性地下水の存在は,高濃度で高速での核種の上方への移動の大 きな可能性を示唆する。また,低塩分濃度,酸化性地下水は,一般に深部での淡水の循環の指標とな る。	_	6
47	アメリカ	結晶質岩	【好ましくない条件】 経済的に利用可能な天然資源の存在	地下の天然資源の存在は,掘削または採掘を通じた人間侵入および超深孔処分施設からの放射性核 種の放出の可能性を増大する恐れがある。天然資源の例としては,鉱床,地熱開発のための地熱流束 および石油資源を含む。	_	6
48	アメリカ	結晶質岩	【好ましくない条件】 処分領域から地表または浅地中へと連続す る高透水帯	処分領域から浅地中までの高透水性を有する移行経路は,著しい地下水流動,特に廃棄体の高温発 生期間の熱駆動による放射性核種の移行を発生させる可能性がある。	_	6
49	アメリカ	結晶質岩	【好ましくない条件】 第四紀の火山岩または貫入岩の存在	火山噴火を引き起こすマグマの通り道が処分領域を通過する場合,生物圏への放射性核種の直接放 出が発生する可能性がある。地表面に出現またはボーリング孔で遭遇する第四紀の火成岩は,将来の 火山活動と処分場性能に著しい影響を及ぼす可能性を示す。	_	6
50	アメリカ	結晶質岩	処分深度 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
51	アメリカ	結晶質岩	被覆層 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
52	アメリカ	結晶質岩	境界条件 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
53	アメリカ	結晶質岩	堆積基盤岩の地質 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
54	アメリカ	結晶質岩	結晶質基盤岩の地質 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
55	アメリカ	結晶質岩	塩水の特性 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
56	アメリカ	結晶質岩	塩水の起源と年代 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
57	アメリカ	結晶質岩	地熱流束 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-
58	アメリカ	結晶質岩	応力状態 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際会議での SNL での超深孔処分サイト選定指針に関するコメント	-

付表 3-6 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(6/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献 番号
59	アメリカ	結晶質岩	テクトニック構造 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際 会議での SNL での超深孔処分サイト 選定指針に関するコメント	-
60	アメリカ	結晶質岩	希ガスの存在 (サイト選定に影響を与える要因)	実際の候補地のサイト選定おいて得られた技術的教訓による	英国シェフィールドにおける国際 会議での SNL での超深孔処分サイト 選定指針に関するコメント	-
61	スウェー デン	結晶質岩	【地質学的考慮事項】 広域の鉛直断裂帯	鉛直の断裂帯が高透水帯として機能し,放射性核種の地表への直接的な移行経路となる可能性があるため,ボーリン グ孔は鉛直断裂帯に遭遇または連結する場所に掘削すべきでない。サイト全体は,広域の鉛直断裂帯から十分離して選 定されるべきである。 水理地質モデリングの結果によれば,ボーリング孔周辺の高透水性の鉛直断裂帯の存在は周辺岩盤における地下水の 鉛直方向の流動を低減することを示しているため,広域の鉛直断裂帯の影響は,以前考えられていたほど重要ではない かもしれない。 しかし,サイトの長期安定性を考慮すると,サイトは広域の鉛直断裂帯に接近しないように選択するのが賢明である。	サイトの前提条件とサイト選定に 関する地質学的考慮事項	10
62	スウェー デン	結晶質岩	【地質学的考慮事項】 均一な岩石	理想的なサイトは、低透水性で規模の大きな均一の岩体であるが、これは前提条件ではない。 構造的な活動が認められない地域における全ての深部ボーリング孔により把握された深度 200m 以深の母岩の透水性 は非常に低く、これらの深度における断裂帯であっても比較的低い透水性を示す。 高透水性を有する断裂帯の存在は、定置領域が小容量となる可能性があること、追加のボーリング孔が必要になるこ とから、明らかに高透水性の断裂帯は避けるべきである。 現状、花崗岩の透水性は、概して、片麻岩の透水性よりも低いことから、好ましい岩種となる。	サイトの前提条件とサイト選定に 関する地質学的考慮事項	10
63	スウェー デン	結晶質岩	【地質学的考慮事項】 高塩分濃度地下水の存在	処分孔内状況を模擬した解析的な検討によれば、地下深部と地表付近の密度差が大きいほど廃棄体の熱による対流が 抑制され、地下水の濃度境界面(halocline)の上昇が小さくなることが示されていることから、深部に高塩分濃度地 下水が存在することは、超深孔処分において極めて有利となる。 高塩分濃度地下水は、結晶質岩の深部で遭遇する可能性が高い。高塩分濃度地下水の分布深度は、ほぼスウェーデン 全域で未知であるが、内陸に比べバルト海に近い地下浅部(深度1~2km)に分布している兆候がある。深度1~2kmに 存在する高塩分濃度地下水分布域の選定は、比較的断裂帯が少ないサイトの選定よりも重要である。	サイトの前提条件とサイト選定に 関する地質学的考慮事項	10
64	スウェー デン	結晶質岩	【地質学的考慮事項】 水平応力における異方性の程度	_	サイトの前提条件とサイト選定に 関する地質学的考慮事項	10
65	スウェー デン	結晶質岩	【地質学的考慮事項】 サイトの長期安定性	サイト選定時に地質学的に考慮すべき事項における最大の不確実性は、当該地域の長期安定性である。サイトが数十 万年を超える期間安定であることを保証するのは不可能である。しかし、スウェーデンの楯状地の浅いレベルで変動が 発生する場合、それが既存の脆弱部に沿うことが一般に認められている。容易に特定できる、これらのゾーンに沿って 廃棄物を設置しなければ、将来の変動によって廃棄物が設置されるボーリング孔が変形される恐れはほとんどない。た とえ変動が生じて廃棄物が定置されているボーリング孔を変形させたとしても、超深部への定置は、放射性核種が地表 に到達する時、おそらくそれが影響のない程度まで十分に希釈される結果となるであろう。	サイトの前提条件とサイト選定に 関する地質学的考慮事項	10
66	スウェー デン	結晶質岩	【物流上の考慮事項】 サイトへのキャニスターの搬入	超深孔処分概念において,輸送面を高度に考慮してサイトを選定することは可能である。例えば,適切なサイトは, サイトへの全てのキャニスターが船舶で搬入されよう海岸に沿うかもしれない。これは,特別な鉄道網建設とコストお よび鉄道輸送に伴う安全上の問題に対する要求を打ち消すであろう。深度 1~2km に高塩分濃度の地下水が存在する場 合には,バルト海沿岸のサイトの選択は,地質学的観点からも有利となろう。	サイトの前提条件とサイト選定に 関する物流上の考慮事項	10
67	スウェー デン	結晶質岩	【物流上の考慮事項】 廃棄物全量を単一のサイトに定置する 必要はない	全ての廃棄物を一箇所のサイトに貯蔵できないと物流上の判断がなされた場合,超深孔処分概念では異なるサイトへ 廃棄物を定置することが可能である。 当該サイトへの廃棄物の輸送に大きなリスクが懸念される場合や,単一サイトでの許可に対して十分なスペースを確 保できない場合,複数のサイトを選定することが望ましいかもしれない。	サイトの前提条件とサイト選定に 関する物流上の考慮事項	10

付表 3-7 諸外国における超深孔処分場サイトの選定条件などに関する整理表(7/7)

No.	国名	地質環境	サイト選定条件	根拠・背景 (表中の引用は右の文献番号に対応する)	備考	文献番号
68	スウェー デン	結晶質岩	プロジェクト実行に対する政治的・初回的容認と今後15~30年間の コスト	超深孔処分を確立するための基準としては,地質学的,水理地質学的,技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが,最近の研究結果を考慮すると,最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
69	スウェー デン	結晶質岩	深度 3~5km に密度成層が安定した地下水が分布する十分広い領域 の存在	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
70	スウェー デン	結晶質岩	深度 3~5km に密度成層が安定した地下水が分布する領域の存在を 特定可能な信頼性のある測定技術と解析技術	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	-	9
71	スウェー デン	結晶質岩	深度 3~5km に将来の氷河期の影響が処分場の長期安全性を侵害し ない領域を特定可能な力学的および水理地質学的知識	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	-	9
72	スウェー デン	結晶質岩	探査と処分の両方に求められる正確な掘削技術の可能性	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
73	スウェー デン	結晶質岩	キャニスターを安全に定置する技術, 操業中に定置したキャニスター を交換または技術的試験のためにキャニスターを回収する技術	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
74	スウェー デン	結晶質岩	処分場周辺の密度成層した安定な地下水に影響を与えることなくボ ーリング孔の掘削,廃棄体の定置,ボーリング孔の閉塞を可能とする 技術	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
75	スウェー デン	結晶質岩	放射壊変により発生する熱や放射線が、処分場周辺の密度成層した安 定な地下水に影響を与えることなく、高レベル放射性廃棄物を深度3 ~5kmに長期間貯蔵可能であることの実現可能性	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
76	スウェー デン	結晶質岩	処分領域においてガス発生を起こす可能性がある化学反応を避ける ことが可能な掘削機器,キャニスター,ボーリング孔の閉塞材料の選 択	超深孔処分を確立するための基準としては、地質学的、水理地質学的、技術 的および経済的/政治的要因が含まれるが、最近の研究結果を考慮すると、最も 重要な9側面のうちの1つ	_	9
77	イギリス	結晶質岩	複雑な堆積岩層は避けるべきである	ボーリング孔の掘削において,複雑な堆積岩は複数のケーシングを挿入する 必要がある。しかし,堆積岩の被覆層は容易に掘削することが可能であり,比 較的安定しているはずである。	サイト選定に関して、地質環境の側面から の条件は提示されているが、その背景や根拠 に関する記述はない。	15
78	イギリス	結晶質岩	処分域全体は安定している地層を選定すべきである	_	サイト選定に関して,地質環境の側面から の条件は提示されているが,その背景や根拠 に関する記述はない。	15
79	イギリス	結晶質岩	ボーリング孔の掘削位置は, 異常な地圧を受けている領域を避けて選 定されるべきである	_	サイト選定に関して,地質環境の側面から の条件は提示されているが,その背景や根拠 に関する記述はない。	15
80	イギリス	結晶質岩	ボーリング孔の掘削位置は、将来の人間侵入の恐れの可能性がある潜 在的な石油資源,鉱物資源(地表から確認され経済的価値のあるも の),地熱探査の見込み(高地温勾配)およびその他の地下資源を避 けて選定されるべきである	_	サイト選定に関して,地質環境の側面から の条件は提示されているが,その背景や根拠 に関する記述はない。	15
81	イギリス	結晶質岩	著しい異方性を有する水平応力が発生する領域は避けるべきである	-	サイト選定に関して,地質環境の側面から の条件は提示されているが,その背景や根拠 に関する記述はない。	6

【付録2,3の参考文献】

文献 番号	書誌情報
1	Freeze, G.A. et al. (2015): Siting Guidelines for a deep borehole Disposal Facility. IHLRWM2015, Charleston, SC, April 12-16, pp.618-623.
2	Arnold, B.W et al. (2013): Deep Borehole disposal Research: Demonstration Site Selection Guidelines, Borehole Seals design, and RD&D Needs. Sandia National Laboratories, October 25, 2013, FCRD-USED-2013-000409, SAND2013-9490P, 149p.
3	Van Schmus, W.R. and Bickford, M.E., eds. (1993): Transcontinental Proterozoic provinces. In Reed, J.C., Jr., d al. (eds.) The Geology of North America, Precambrian: Conterrninous U.S., Vol. C-2, 171-334.
4	Pratt, T. et al. (1989): Major Proterozoic basement features of the eastern Midcontinent of North America revealed by recent COCORP profiling. Geology 17,505509.
5	Heiken, G. et al. (1996): Disposition of Excess Weapon Plutonium in Deep Boreholes, Site Selection Handbook, Los Alamos National Laboratory, LA-13168-MS, 48p.
6	Brady, P. et al. (2012):Deep Borehole Disposal of Nuclear Waste: Final Report, Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT, SAND2012-7789, 29p
7	Arnold, B.W. et al. (2011): Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT SAND2011-6749, 66p.
8	SKB (2010): Choice of Method – Evaluation of Strategies and Systems for Disposal of Spent Nuclear Fuel, SKB, P-10-47, 87p.
9	Åhäll,K-I. (2006): Final Deposition of High-level Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: An evaluation based on recent research of bedrock conditions at great depths. ,MKG Report2, 28p.
10	SKB (1989): Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential, SKB, TR-89-39, 91p.
11	NAGRA (1980): Feasibility Study for Large Diameter Boreholes for the Deep Drilling Concept of a High-Level Waste Repository, NAGRA, NTB 80-04.
12	IAEA (2009): Disposal Facilities for Radioactive Waste, SSG-1.
13	Sandia National Laboratories (2013) : Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. + Fuel Cycle Research & Development. Sandia National Laboratories, FCRD-USED-2012-000269, SAND2012-8527P, 90p.
14	DOE (2014): Request for Information (RFI) – Deep Borehole Field Test. US Department of Energy Idaho Operations Office, Solicitation Number DE-SOL-0007705.
15	Beswick, A.J. et al. (2014): Deep borehole disposal of nuclear waste: engineering. Challenges, Energy, Vo;.167, Issue EN2, pp.47-66.
16	National Academy Press (1994): Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium. – Committee on International Security and Arms Control National Academy of Sciences, National Academy Press, 288p.