

平成 26 年度
地層処分技術調査等事業
処分システム工学確証技術開発
報告書
(第 4 分冊)

—自然災害に対する操業期間中の
安全対策に関する基盤技術の開発—

平成 27 年 3 月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

報告書の構成

平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第 1 分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
	第 2 分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
	第 3 分冊	処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備
◎	第 4 分冊	自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

目 次

第1章 開発の目的および概要.....	1-1
1.1 処分システム工学確証技術高度化開発の背景、および目的.....	1-1
1.1.1 開発の背景.....	1-1
1.1.2 開発の目的.....	1-1
1.2 本開発に係る背景および目的.....	1-5
1.2.1 本開発の背景.....	1-5
1.2.2 本開発の目的.....	1-5
1.2.3 本開発の前提.....	1-5
1.3 検討の基本方針.....	1-1
1.3.1 リスクマネジメントとクライシスマネジメント.....	1-1
1.3.2 検討方針.....	1-2
1.4 平成24年度の成果概要[8].....	1-3
1.5 平成25年度の成果概要[9].....	1-5
1.6 平成26年度の開発の概要.....	1-7
1.6.1 平成26年度の実施内容.....	1-7
1.6.2 平成26年度の成果概要.....	1-8
第2章 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討.....	2-1
2.1 はじめに.....	2-1
2.2 検討概要.....	2-2
2.3 事業期間中の安全確保と技術要件.....	2-3
2.3.1 事業期間中の安全確保に対する実施主体の考え方.....	2-3
2.3.2 安全対策と技術機能.....	2-4
2.3.3 安全対策と構成要素の関係.....	2-8
2.3.4 事業期間中の安全に対する技術要件.....	2-9
2.4 放射線安全の確保に向けた安全対策の動向.....	2-12
2.4.1 調査対象とする類似原子力関連施設.....	2-12
2.4.2 原子力関連施設における安全対策要求事項と放射線安全上の考慮事項.....	2-12
2.4.3 放射線安全の確保に係る調査結果のまとめ.....	2-39
2.5 災害発生に着目した安全対策の必要技術.....	2-40
2.5.1 一般労働安全に係る必要技術の確認.....	2-40
2.5.2 放射線安全の確保に係る原子力防災.....	2-45
2.6 安全対策技術の考え方と評価方法に対する考察.....	2-61
2.6.1 安全対策技術の考え方（枠組み）の検討.....	2-61
2.6.2 安全対策技術の評価方法に対する一考察.....	2-63

2.6.3 自然災害に対する安全対策技術の整理.....	2-74
2.7 まとめ	2-77
第3章 火災事象に対する安全確保対策の検討.....	3-1
3.1 はじめに.....	3-1
3.2 検討概要.....	3-2
3.2.1 検討の流れ.....	3-2
3.3 通気解析に関する数値解析技術の検討.....	3-3
3.3.1 物質の状態変化における特性	3-4
3.3.2 流れの運動を支配する方程式の整理	3-7
3.3.3 支配方程式の地層処分施設への適用性.....	3-12
3.3.4 離散化法の整理	3-14
3.3.5 離散化法の地層処分施設への適用性	3-15
3.3.6 解析ソフトの選定.....	3-16
3.4 地層処分施設の解析条件の設定	3-38
3.4.1 地層処分施設のモデル化.....	3-38
3.4.2 解析対象、設定条件の検討.....	3-41
3.5 解析の実施	3-48
3.5.1 解析手順の検討	3-48
3.5.2 通気が確保されない箇所の確認 (STEP1)	3-49
3.5.3 通気が確保された場合の条件の確認 (STEP2)	3-58
3.5.4 火災発生時の影響の確認 (STEP3)	3-65
3.5.5 換気が停止した影響の確認 (STEP4)	3-80
3.6 まとめ	3-86
3.6.1 通気解析に関する数値解析技術の検討	3-86
3.6.2 地層処分施設の解析条件の設定.....	3-87
3.6.3 解析の実施.....	3-87
3.6.4 3次元解析実施における対処事例.....	3-88
第4章 人工バリアの限界性能等に関するデータ取得.....	4-1
4.1 はじめに.....	4-1
4.1.1 既往の研究成果	4-1
4.1.2 今年度の実施内容.....	4-2
4.2 地下施設で火災発生を想定した人工バリアの影響解析.....	4-4
4.2.1 解析対象及び検討フロー.....	4-5
4.2.2 火災シナリオの検討.....	4-7
4.2.3 解析コードの選定.....	4-11
4.2.4 解析モデルの作成.....	4-11

4.2.5	解析条件の設定	4-16
4.2.6	構成要素の物性値の設定.....	4-19
4.2.7	解析結果	4-22
4.2.8	考察と今後の課題.....	4-88
4.3	地下施設における火災発生を想定した緩衝材の特性データの取得.....	4-93
4.3.1	試験目的	4-93
4.3.2	試験方法	4-97
4.3.3	試験体の製作.....	4-103
4.3.4	試験結果	4-106
4.4	地上施設で火災発生を想定したガラス固化体キャニスタの特性データの取得 ..	4-131
4.4.1	試験目的	4-131
4.4.2	試験条件及び試験方法	4-131
4.4.3	試験結果	4-132
4.4.4	考察と今後の課題.....	4-142
4.5	地上施設に津波が流入した場合のガラス固化体キャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理.....	4-145
4.5.1	ガラス固化体キャニスタの仕様.....	4-146
4.5.2	津波腐食評価方針の検討.....	4-146
4.5.3	津波によるガラス固化体キャニスタ浸漬シナリオの整理.....	4-150
4.5.4	解析手法及び解析コードの選定.....	4-153
4.5.5	解析モデルの作成.....	4-155
4.5.6	解析条件の設定	4-159
4.5.7	構成要素の物性値の設定.....	4-160
4.5.8	解析結果	4-164
4.5.9	腐食環境条件のまとめ	4-184
4.5.10	まとめと今後の課題.....	4-204
第5章	平成26年度のまとめと今後の課題	5-1
5.1	はじめに.....	5-1
5.2	平成26年度のまとめ	5-1
5.2.1	操業安全を考慮した技術要件の調査・検討	5-1
5.2.2	火災事象に対する安全確保対策の検討のまとめ	5-2
5.2.3	人工バリアの限界性能等の調査・試験のまとめ	5-4
5.3	今後の課題	5-6
5.3.1	操業安全を考慮した技術要件の調査・検討	5-6
5.3.2	火災事象に対する安全確保対策の検討.....	5-6
5.3.3	人工バリアの限界性能等の調査・試験.....	5-7

目 次

図 1.2.3-1	本開発の前提[3][4]に加筆	1-6
図 1.3.2-1	対策の検討・抽出方法[8]	1-4
図 1.3.2-2	平成 24 年度に抽出した技術課題[8]	1-4
図 1.6.2-1	「2 章 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討」成果概要.....	1-12
図 1.6.2-2	「3 章 火災事象に対する安全確保対策の検討」成果概要(1).....	1-13
図 1.6.2-3	「3 章 火災事象に対する安全確保対策の検討」成果概要(2).....	1-14
図 1.6.2-4	「3 章 火災事象に対する安全確保対策の検討」成果概要(3).....	1-15
図 1.6.2-5	「4 章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (1)	1-16
図 1.6.2-6	「4 章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (2)	1-17
図 1.6.2-7	「4 章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (3)	1-18
図 2.3.2-1	地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係	2-6
図 2.5.1-1	一般労働安全対策の検討の流れ	2-41
図 2.5.1-2	火災発生時における安全確保対策検討の流れ	2-42
図 2.5.2-1	原子力防災に関する法令等	2-45
図 2.5.2-2	防護措置実施のフローの例	2-60
図 2.6.1-1	処分システムの安全確保に向けた安全要件・技術要件と技術対策との枠組み	2-62
図 2.6.2-1	Meyerhof による土質・基礎構造物の年超過確率[21].....	2-69
図 2.6.2-2	Whitman らによる土質・基礎構造物の年超過確率[21]	2-69
図 2.6.2-3	災害、自然災害、人為災害による死亡者数とその発生頻度[21].....	2-71
図 2.6.2-4	n_T の評価法[21]	2-72
図 2.6.3-1	自然災害に対する地層処分施設の安全性の評価と安全対策技術の整理	2-74
図 3.2.1-1	検討の流れ.....	3-2
図 3.3.6-1	次元の比較に用いるモデル図.....	3-18
図 3.3.6-2	1 次元解析用の計算格子図	3-19
図 3.3.6-3	2 次元解析用の計算格子図	3-20
図 3.3.6-4	3 次元解析用の計算格子図	3-21
図 3.3.6-5	坑道高さに対する温度の経時変化 (密要素：800 分割)	3-25
図 3.3.6-6	坑道高さに対する風速の経時変化 (密要素：800 分割)	3-25
図 3.3.6-7	坑道高さに対する圧力の経時変化 (密要素：800 分割)	3-26
図 3.3.6-8	坑道高さに対する圧力、温度の変化 (2 次元解析)	3-27
図 3.3.6-9	坑道高さに対する風速の変化 (2 次元解析)	3-28
図 3.3.6-10	圧力の経時変化 (密要素：35×800 要素)	3-29
図 3.3.6-11	温度の経時変化 (密要素：35×800 要素)	3-29
図 3.3.6-12	風速の経時変化 (密要：35×800 要素)	3-30

図 3.3.6-13	坑道高さに対する圧力、温度の変化（3次元解析）	3-31
図 3.3.6-14	坑道高さに対する風速の変化（3次元解析）	3-32
図 3.3.6-15	圧力の経時変化（密要素：716800要素）	3-33
図 3.3.6-16	温度の経時変化（密要素：716800要素）	3-33
図 3.3.6-17	風速の経時変化（密要素：716800）	3-34
図 3.3.6-18	1次元、2次元、3次元解析の風速変化の比較	3-35
図 3.3.6-19	1次元、2次元、3次元解析の坑道断面の風速変化の比較（疎要素）	3-37
図 3.3.6-20	1次元、2次元、3次元解析の坑道断面の風速変化の比較（密要素）	3-37
図 3.4.1-1	処分場レイアウト図（軟岩系岩盤、縦置き方式） [5]	3-38
図 3.4.1-2	処分場レイアウト図（軟岩系岩盤、縦置き方式、その1） [5]	3-39
図 3.4.1-3	形状定義で考慮すべき事項の整理	3-39
図 3.4.1-4	軟岩系岩盤における各坑道断面[5]	3-40
図 3.4.2-1	地層処分場のパネル配置[5]	3-41
図 3.4.2-2	地層処分場のパネル配置イメージ	3-41
図 3.4.2-3	建設中パネルのイメージ図	3-42
図 3.4.2-4	建設中パネルと作業員の配置イメージ図	3-45
図 3.5.1-1	解析手順	3-48
図 3.5.2-1	3次元解析による風況場の確認	3-49
図 3.5.2-2	全体の風速分布図	3-50
図 3.5.2-3	Zoom1の風速分布図	3-51
図 3.5.2-4	Zoom2の風速分布図	3-52
図 3.5.2-5	Zoom3の風速分布図	3-53
図 3.5.2-6	Zoom4の風速分布図	3-54
図 3.5.2-7	Zoom5の風速分布図	3-55
図 3.5.2-8	Zoom6の風速分布図	3-56
図 3.5.3-1	菱刈鉱山の切羽付近の様子	3-58
図 3.5.3-2	ファン・ダクト設置と組み合わせ次元のイメージ図	3-59
図 3.5.3-3	一筆書きの通気概念図	3-59
図 3.5.3-4	風門の設置と建設中処分坑道の切羽へ向けた通気方法の概念図	3-59
図 3.5.3-5	建設中パネル全体の風速分布図	3-60
図 3.5.3-6	建設完了の処分坑道への空気の流入出状況（南側主要坑道との接合部）	3-61
図 3.5.3-7	建設完了の処分坑道への空気の流入出状況（北側主要坑道との接合部）	3-62
図 3.5.3-8	建設完了の処分坑道から風門を通過して建設途中の処分坑道へ空気が流れる様子	3-63
図 3.5.3-9	建設途中の処分坑道の切羽付近の空気の流出状況	3-64
図 3.5.4-1	発火点の設定	3-65
図 3.5.4-2	発火地点（図 3.5.2-9 再掲）	3-66
図 3.5.4-3	火災曲線の設定（CETu 標準火災曲線） [5]	3-66

図 3.5.4-4	建設途中の処分坑道の風速分布（切羽付近）	3-67
図 3.5.4-5	建設途中の処分坑道の風速分布（主要坑道との接合部付近）	3-68
図 3.5.4-6	熱の拡散状況の経時変化	3-69
図 3.5.4-7	煙の拡散状況の経時変化（一酸化炭素濃度）	3-70
図 3.5.4-8	煙の拡散状況の経時変化（二酸化炭素濃度）	3-71
図 3.5.4-9	煙の拡散状況の経時変化（酸素濃度）	3-72
図 3.5.4-10	処分坑道内における避難開始の様子	3-74
図 3.5.4-11	避難完了率（門扉なしケース）	3-76
図 3.5.4-12	火災が発生した処分坑道における避難の様子	3-77
図 3.5.4-13	各箇所における避難の様子	3-77
図 3.5.4-14	門扉の有無に関する避難完了率	3-78
図 3.5.4-15	門扉部分における避難の様子	3-78
図 3.5.5-1	自然通気による風況場の確認	3-80
図 3.5.5-2	STEP5 の全体概要図（図 3.5.2-8 再掲）	3-81
図 3.5.5-3	換気機能停止から 120 秒後の風速分布	3-82
図 3.5.5-4	換気機能停止から 180 秒後の風速分布	3-82
図 3.5.5-5	換気機能停止から 360 秒後の風速分布	3-83
図 3.5.5-6	換気機能停止から 540 秒後の風速分布	3-83
図 3.5.5-7	換気機能停止から 720 秒後の風速分布	3-84
図 3.5.5-8	立坑部分の風速分布（経時変化）	3-85
図 3.6.5-1	分流部分で起こった解析エラーへの対応	3-88
図 4.2.1-1	ガラス固化体キャニスタの寸法（日本原燃(株)仕様） [3]	4-5
図 4.2.1-2	オーバーパックの寸法 [4]	4-5
図 4.2.1-3	人工バリアの熱応力解析 検討フロー	4-6
図 4.2.2-1	人工バリアの定置方式と供給酸素量の概念	4-8
図 4.2.2-2	主な緩衝材の施工方式[6]	4-8
図 4.2.2-3	地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場） [6]	4-9
図 4.2.2-4	坑道形状（軟岩系岩盤） [7]	4-9
図 4.2.2-5	専有面積（処分孔縦置き方式） [7]	4-10
図 4.2.4-1	燃焼解析の計算領域	4-13
図 4.2.4-2	オーバーパックの数値解析での再現	4-13
図 4.2.4-3	バッテリー燃焼有効面積について	4-14
図 4.2.4-4	解析に用いたガラス固化体、オーバーパック形状図	4-15
図 4.2.4-5	伝熱解析用 FEM モデル	4-15
図 4.2.5-1	オーバーパック定置装置火災における発熱率（数式 4.2.5-1 による）	4-17
図 4.2.5-2	応力解析時にオーバーパックに与えた初期残留応力分布[18]	4-18
図 4.2.6-1	緩衝材の熱拡散率	4-19
図 4.2.6-2	応力解析に用いた物性値（ヤング率）	4-21

図 4.2.6-3	応力解析に用いた物性値 (線膨張係数)	4-21
図 4.2.6-4	応力解析に用いた物性値 (応力-ひずみデータ)	4-21
図 4.2.7-1	熱流束の時間による変化 (ケース 1A)	4-23
図 4.2.7-2	解析結果 (ケース 1A) : 時刻 150 秒	4-24
図 4.2.7-3	解析結果 (ケース 1A) : 時刻 275 秒	4-24
図 4.2.7-4	解析結果 (ケース 1A) : 時刻 500 秒	4-25
図 4.2.7-5	解析結果 (ケース 1A) : 時刻 1615 秒	4-25
図 4.2.7-6	オーバーパックへの熱流束 (ケース 1A)	4-26
図 4.2.7-7	熱流束の時間による変化 (ケース 1B)	4-28
図 4.2.7-8	解析結果 (ケース 1B) : 時刻 200 秒	4-29
図 4.2.7-9	解析結果 (ケース 1B) : 時刻 800 秒	4-29
図 4.2.7-10	解析結果 (ケース 1B) : 時刻 1200 秒	4-30
図 4.2.7-11	解析結果 (ケース 1B) : 時刻 1700 秒	4-30
図 4.2.7-12	オーバーパックへの熱流束 (ケース 1B)	4-31
図 4.2.7-13	定置装置下流における床への熱流束評価について (パネル番号の定義)	4-32
図 4.2.7-14	パネル 3-3 における熱流束の時間による変化	4-34
図 4.2.7-15	定置装置下流の床における熱流束 [kW/m^2]	4-35
図 4.2.7-16	定置装置から 2.5m 下流における床への熱流束 (近似曲線)	4-35
図 4.2.7-17	解析結果 (ケース 2) : 時刻 200 秒	4-36
図 4.2.7-18	解析結果 (ケース 2) : 時刻 800 秒	4-36
図 4.2.7-19	解析結果 (ケース 2) : 時刻 1200 秒	4-37
図 4.2.7-20	解析結果 (ケース 2) : 時刻 1700 秒	4-37
図 4.2.7-21	床から $100\text{kW}/\text{m}^2$ の入熱が続いた場合の	4-38
図 4.2.7-22	地下 (緩衝材内) における入熱による温度履歴 (熱流束 $100\text{kW}/\text{m}^2$)	4-38
図 4.2.7-23	初期温度分布図 (火災前) (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-39
図 4.2.7-24	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の温度分布図 (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-40
図 4.2.7-25	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の温度分布図 (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-40
図 4.2.7-26	火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-41
図 4.2.7-27	火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-41
図 4.2.7-28	初期温度分布図 (火災前) (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-42
図 4.2.7-29	火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-42
図 4.2.7-30	火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : $^{\circ}\text{C}$)	4-43
図 4.2.7-31	初期相当応力分布図 (単位 : MPa)	4-43
図 4.2.7-32	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の相当応力分布図 (単位 : MPa)	4-44
図 4.2.7-33	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の相当応力分布図 (単位 : MPa)	4-44
図 4.2.7-34	火災発生後 3,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位 : MPa)	4-45
図 4.2.7-35	火災発生後 10,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位 : MPa)	4-45
図 4.2.7-36	初期半径方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-46

図 4.2.7-37	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-46
図 4.2.7-38	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-47
図 4.2.7-39	火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-47
図 4.2.7-40	火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-48
図 4.2.7-41	初期周方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-48
図 4.2.7-42	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の周方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-49
図 4.2.7-43	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の周方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-49
図 4.2.7-44	火災発生後 3,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-50
図 4.2.7-45	火災発生後 10,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-50
図 4.2.7-46	初期軸方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-51
図 4.2.7-47	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-51
図 4.2.7-48	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-52
図 4.2.7-49	火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-52
図 4.2.7-50	火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)	4-53
図 4.2.7-51	初期相当塑性ひずみ分布図	4-53
図 4.2.7-52	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の相当塑性ひずみ分布図	4-54
図 4.2.7-53	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の相当塑性ひずみ分布図	4-54
図 4.2.7-54	火災発生後 3,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図	4-55
図 4.2.7-55	火災発生後 10,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図	4-55
図 4.2.7-56	初期半径方向塑性ひずみ分布図	4-56
図 4.2.7-57	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図	4-56
図 4.2.7-58	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図	4-57
図 4.2.7-59	火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図	4-57
図 4.2.7-60	火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図	4-58
図 4.2.7-61	初期周方向塑性ひずみ分布図	4-58
図 4.2.7-62	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の周方向塑性ひずみ分布図	4-59
図 4.2.7-63	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の周方向塑性ひずみ分布図	4-59
図 4.2.7-64	火災発生後 3,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図	4-60
図 4.2.7-65	火災発生後 10,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図	4-60
図 4.2.7-66	初期軸方向塑性ひずみ分布図	4-61
図 4.2.7-67	火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図	4-61
図 4.2.7-68	火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図	4-62

図 4.2.7-69	火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図.....	4-62
図 4.2.7-70	火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図.....	4-63
図 4.2.7-71	初期温度分布図 (火災前) (単位: °C)	4-64
図 4.2.7-72	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の温度分布図 (単位: °C)	4-64
図 4.2.7-73	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の温度分布図 (単位: °C)	4-65
図 4.2.7-74	火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)	4-65
図 4.2.7-75	火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)	4-66
図 4.2.7-76	初期温度分布図 (火災前) (単位: °C)	4-66
図 4.2.7-77	火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)	4-67
図 4.2.7-78	火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)	4-67
図 4.2.7-79	初期相当応力分布 (単位: MPa)	4-68
図 4.2.7-80	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の相当応力分布図 (単位: MPa) ..	4-68
図 4.2.7-81	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の相当応力分布図 (単位: MPa)	4-69
図 4.2.7-82	火災発生後 3,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位: MPa)	4-69
図 4.2.7-83	火災発生後 10,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位: MPa)	4-70
図 4.2.7-84	初期半径方向応力分布図 (単位: MPa)	4-70
図 4.2.7-85	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の半径方向応力分布図 (単位: MPa)	
	.....	4-71
図 4.2.7-86	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の半径方向応力分布図 (単位: MPa)	
	.....	4-71
図 4.2.7-87	火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位: MPa)	4-72
図 4.2.7-88	火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位: MPa)	4-72
図 4.2.7-89	初期周方向応力分布図 (単位: MPa)	4-73
図 4.2.7-90	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の周方向応力分布図 (単位: MPa)	
	.....	4-73
図 4.2.7-91	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の周方向応力分布図 (単位: MPa)	
	.....	4-74
図 4.2.7-92	火災発生後 3,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位: MPa)	4-74
図 4.2.7-93	火災発生後 10,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位: MPa)	4-75
図 4.2.7-94	初期軸方向応力分布図 (単位: MPa)	4-75
図 4.2.7-95	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の軸方向応力分布図 (単位: MPa)	
	.....	4-76
図 4.2.7-96	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の軸方向応力分布図 (単位: MPa)	
	.....	4-76
図 4.2.7-97	火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位: MPa)	4-77
図 4.2.7-98	火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位: MPa)	4-77
図 4.2.7-99	初期相当塑性ひずみ分布図	4-78
図 4.2.7-100	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の相当塑性ひずみ分布図	4-78

図 4.2.7-101	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の相当塑性ひずみ分布図	4-79
図 4.2.7-102	火災発生後 3,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図	4-79
図 4.2.7-103	火災発生後 10,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図	4-80
図 4.2.7-104	初期半径方向塑性ひずみ分布図	4-80
図 4.2.7-105	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図	4-81
図 4.2.7-106	火災発生後最高温度到達大時 (1,440 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図	4-81
図 4.2.7-107	火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図	4-82
図 4.2.7-108	火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図	4-82
図 4.2.7-109	初期周方向塑性ひずみ応力分布	4-83
図 4.2.7-110	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の周方向塑性ひずみ分布図	4-83
図 4.2.7-111	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の周方向塑性ひずみ分布図	4-84
図 4.2.7-112	火災発生後 3,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図	4-84
図 4.2.7-113	火災発生後 10,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図	4-85
図 4.2.7-114	初期軸方向塑性ひずみ分布図	4-85
図 4.2.7-115	火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図	4-86
図 4.2.7-116	火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図	4-86
図 4.2.7-117	火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図	4-87
図 4.2.7-118	火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図	4-87
図 4.2.8-1	Li-ion 電池の火災における発熱量(ケース 1A)	4-89
図 4.2.8-2	Li-ion 電池の火災における発熱量(ケース 1B)	4-89
図 4.2.8-3	ガス流速 (坑道方向成分) の時間による変化 (ケース 1b)	4-90
図 4.2.8-4	換気の火災 (燃焼ガスの広がり) への影響について	4-90
図 4.3.1-1	ケイ砂混合率ごとの密度と引張強度の関係[27]	4-94
図 4.3.1-2	一軸圧縮強度の含水比依存性[9]	4-95
図 4.3.1-3	弾性係数の含水比依存性[9]	4-95
図 4.3.1-4	一次元圧密試験結果[9]	4-96
図 4.3.2-1	実施フロー	4-97
図 4.3.2-2	加熱実験炉の例	4-98
図 4.3.2-3	ISO834 の標準火災温度曲線	4-98
図 4.3.2-4	クリップゲージ図	4-100
図 4.3.3-1	クニゲル V1 (クニミネ工業)	4-103
図 4.3.3-2	ケイ砂 3 号	4-103
図 4.3.3-3	ケイ砂 5 号	4-104
図 4.3.3-4	試験体の作製手順	4-104
図 4.3.4-1	加熱温度 (0~10 分)	4-116
図 4.3.4-2	加熱温度 (0~90 分)	4-116
図 4.3.4-3	加熱後の試験体の状況 (加熱条件 500℃)	4-117
図 4.3.4-4	加熱後の試験体の試験体状況 (加熱条件 1000℃)	4-117

図 4.3.4-5	試験結果 (試験ケース 常温)	4-118
図 4.3.4-6	試験状況 (試験ケース 常温)	4-118
図 4.3.4-7	試験結果 (試験ケース 500°C)	4-119
図 4.3.4-8	試験状況 (試験ケース 500°C)	4-119
図 4.3.4-9	試験結果 (試験ケース 1000°C)	4-120
図 4.3.4-10	試験状況 (試験ケース 1000°C)	4-120
図 4.3.4-11	試験結果 (試験ケース 常温)	4-121
図 4.3.4-12	試験状況 (試験ケース 常温)	4-121
図 4.3.4-13	試験結果 (試験ケース 500°C)	4-122
図 4.3.4-14	試験状況 (試験ケース 500°C)	4-122
図 4.3.4-15	試験結果 (試験ケース 1000°C)	4-123
図 4.3.4-16	試験状況 (試験ケース 1000°C)	4-123
図 4.3.4-17	試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 常温)	4-124
図 4.3.4-18	試験状況 (試験ケース 常温)	4-124
図 4.3.4-19	試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 500°C)	4-125
図 4.3.4-20	試験状況 (試験ケース 500°C)	4-125
図 4.3.4-21	試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 1000°C)	4-126
図 4.3.4-22	試験状況 (試験ケース 1000°C)	4-126
図 4.3.4-23	引張強度と加熱温度との関係	4-128
図 4.3.4-24	一軸圧縮強度と加熱温度との関係	4-128
図 4.3.4-25	弾性係数と加熱温度との関係	4-129
図 4.3.4-26	ポアソン比と加熱温度との関係	4-129
図 4.3.4-27	膨潤応力と加熱温度との関係	4-130
図 4.4.2-1	引張試験体形状 (丸棒)	4-132
図 4.4.3-1	引張試験結果のまとめ	4-132
図 4.4.3-2	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 23°C、N=1)	4-133
図 4.4.3-3	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 23°C、N=2)	4-133
図 4.4.3-4	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 23°C、N=3)	4-133
図 4.4.3-5	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 400°C、N=1)	4-134
図 4.4.3-6	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 400°C、N=2)	4-134
図 4.4.3-7	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 400°C、N=3)	4-134
図 4.4.3-8	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 500°C、N=1)	4-135
図 4.4.3-9	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 500°C、N=2)	4-135
図 4.4.3-10	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 500°C、N=3)	4-135
図 4.4.3-11	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 550°C、N=1)	4-136
図 4.4.3-12	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 550°C、N=2)	4-136
図 4.4.3-13	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 550°C、N=3)	4-136
図 4.4.3-14	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 600°C、N=1)	4-137

図 4.4.3-15	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 600°C、N=2)	4-137
図 4.4.3-16	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 600°C、N=3)	4-137
図 4.4.3-17	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 650°C、N=1)	4-138
図 4.4.3-18	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 650°C、N=2)	4-138
図 4.4.3-19	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 650°C、N=3)	4-138
図 4.4.3-20	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 700°C、N=1)	4-139
図 4.4.3-21	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 700°C、N=2)	4-139
図 4.4.3-22	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 700°C、N=3)	4-139
図 4.4.3-23	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 800°C、N=1)	4-140
図 4.4.3-24	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 800°C、N=2)	4-140
図 4.4.3-25	公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 800°C、N=3)	4-140
図 4.4.3-26	線膨張係数計測結果	4-141
図 4.4.3-27	ヤング率およびポアソン比計測結果	4-141
図 4.4.4-1	SUS304L 材料データの比較: 降伏応力	4-142
図 4.4.4-2	SUS304L 材料データの比較: ヤング率	4-143
図 4.4.4-3	SUS304L 材料データの比較: 線膨張係数	4-143
図 4.4.4-4	材料試験に供した SUS304L の検査証明書	4-144
図 4.5.1-1	ガラス固化体キャニスタの仕様[3]	4-146
図 4.5.3-1	地上施設配置図 ([9]に加筆)	4-151
図 4.5.3-2	浸漬前モデルの概念図 (Case 0)	4-152
図 4.5.3-3	浸漬後モデルの概念図 (Case 1, 2)	4-153
図 4.5.4-1	人工バリアの腐食環境解析 検討フロー	4-154
図 4.5.5-1	地上施設におけるモデル化範囲	4-155
図 4.5.5-2	ガラス固化体検査室躯体のモデル	4-156
図 4.5.5-3	躯体のモデルの寸法	4-156
図 4.5.5-4	ガラス固化体のモデル化	4-157
図 4.5.5-5	解析モデルのジオメトリ	4-158
図 4.5.5-6	解析モデルのメッシュ	4-158
図 4.5.8-1	風速分布 (Case 0)	4-165
図 4.5.8-2	温度分布 (Case 0)	4-166
図 4.5.8-3	着目したガラス固化体配置図	4-169
図 4.5.8-4	モニタ点の設定	4-169
図 4.5.8-5	海水浸漬 30 日後の流速分布 (検査室全体、Case 1, 2)	4-171
図 4.5.8-6	海水浸漬 30 日後の流速分布 (仮置き場、Case 1, 2)	4-172
図 4.5.8-7	海水浸漬 30 日後の温度分布 (検査室全体、Case 1, 2)	4-173
図 4.5.8-8	海水浸漬 30 日後の温度分布 (仮置き場拡大図、Case 1, 2)	4-174
図 4.5.8-9	海水浸漬 30 日後の温度分布 (ガラス固化体キャニスタ表面、Case 1, 2)	4-175
図 4.5.8-10	固化体 A モニタ点 (海水中高さ) の温度変化	4-177

図 4.5.8-11	着目固化体 A モニタ点（液面高さ）の温度変化.....	4-178
図 4.5.8-12	着目固化体 A モニタ点（固化体上端高さ）の温度変化.....	4-179
図 4.5.8-13	着目固化体 B モニタ点（海水中高さ）の温度変化.....	4-180
図 4.5.8-14	着目固化体 B モニタ点（液面高さ）の温度変化.....	4-181
図 4.5.8-15	着目固化体 B（固化体上端高さ）の温度変化.....	4-182
図 4.5.8-16	Case 1 の定常解析による仮置き場内温度分布（参考）.....	4-183
図 4.5.9-1	強鋭敏化 SUH309 ステンレス鋼の湿潤大気 SCC 感受性領域[38].....	4-185
図 4.5.9-2	SUS304 ステンレス鋼の SCC 感受性領域[40].....	4-186
図 4.5.9-3	SCC 感受性におよぼす γ 線照射の影響試験[41].....	4-186
図 4.5.9-4	SUS304 ステンレス鋼の孔食、SCC 感受性領域図、リスクなど[42].....	4-187
図 4.5.9-5	すきま腐食発生におよぼす微生物の寄与[43].....	4-187
図 4.5.9-6	津波浸漬後、換気なしの温度解析結果の例.....	4-188
図 4.5.9-7	SCC の発生と進展(模式図).....	4-190
図 4.5.9-8	代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測.....	4-194
図 4.5.9-9	代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測.....	4-195
図 4.5.9-10	ステンレス鋼の浸漬電位 (E_{CORR}) の経時変化および自然腐食電位 (E_{SP})	4-197
図 4.5.9-11	固化体キャニスタの海水半浸漬状態での温度および電位の経過時変化....	4-198
図 4.5.9-12	湿潤大気応力腐食割れ加速試験における温度-湿度条件と SCC 発生の有無、	4-200
図 4.5.9-13	湿潤大気環境の比較(海洋性湿潤大気環境、保温材下腐食環境、.....	4-200
図 4.5.9-14	湿潤大気応力腐食割れ発生寿命の鋭敏化度、.....	4-201
図 4.5.10-1	ガラス固化体キャニスタ製造時の冷間加工と溶接部(模式図).....	4-206
図 4.5.10-2	U 字曲げ試験片を用いた湿潤大気 SCC 加速試験(模式図).....	4-209

表 目 次

表 1.3.2-1	技術開発課題の選定と年度展開の一例[8].....	1-5
表 2.3.2-1	放射線安全に関する基本的な安全対策	2-5
表 2.3.3-1	事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係	2-8
表 2.3.4-1	地下施設の技術要件	2-9
表 2.3.4-2	地下施設レイアウトに対する安全機能と技術要件.....	2-10
表 2.3.4-3	坑道設計に対する安全機能と技術要件	2-11
表 2.4.2-1	再処理施設安全審査指針に示される主な安全上の要求事項	2-13
表 2.4.2-2	「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成と再処理施設安全審査指針との関係.....	2-20
表 2.4.2-3	「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成.....	2-21
表 2.4.2-4	「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」の調査範囲.....	2-22
表 2.4.2-5	「第二種廃棄物埋設施設の事業に関する安全審査の基本的考え方」の構成.....	2-24
表 2.4.2-6	「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成.....	2-30
表 2.4.2-7	管理区域に係る線量等.....	2-36
表 2.4.2-8	放射線業務従事者及び周辺監視区域外の線量限度	2-37
表 2.4.2-9	事業所内の放射性物質の運搬に係る主な基準等.....	2-38
表 2.5.1-1	事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係	2-40
表 2.5.1-2	安全対策の必要技術の例示	2-44
表 2.5.2-1	原子力災害対策指針の構成	2-46
表 2.5.2-2	原子力災害対策特別措置法に基づき原子力事業者が作成すべき	2-48
表 2.5.2-3	原子力事業者防災業務計画の事例	2-49
表 2.5.2-4	地域防災地域防災計画（原子力災害対策編）作成マニュアルの構成.....	2-50
表 2.5.2-5	原子力災害特有の対策.....	2-52
表 2.5.2-6	原子力防災管理者の通報義務等	2-53
表 2.5.2-7	通報義務等の基準、事象等	2-54
表 2.5.2-8	EAL（緊急事態区分及び緊急時活動レベル）	2-56
表 2.5.2-9	OIL（運用上の介入レベル）	2-59
表 2.6.2-1	安全水準の設定法[21]	2-66
表 2.6.2-2	設計代替案の評価[21]	2-67
表 2.6.2-3	施設の許容破壊確率[21].....	2-68
表 2.6.2-4	原子力発電所施設の安全基準の目標(U.S. NRC).....	2-70
表 2.6.2-5	社会的基準係数[21]	2-72
表 2.6.3-1	各スケールにおける操業期間中の安全対策技術の整理.....	2-76
表 3.3.3-1	支配方程式の地層処分施設への適用性のまとめ.....	3-13
表 3.3.5-1	離散化法の地層処分施設への適用性のまとめ	3-15
表 3.3.6-1	解析ソフトの特徴.....	3-16

表 3.3.6-2	利用分野・利用実績	3-16
表 3.3.6-3	VENTMINE における各再現状況の適用可能性	3-17
表 3.3.6-4	VENTMINE の入力条件と得られる結果	3-17
表 3.3.6-5	空気の属性情報.....	3-22
表 3.3.6-6	圧力と温度の初期条件.....	3-22
表 3.3.6-7	計算にかかる時間の比較（疎要素：高さ方向 400 分割）	3-23
表 3.3.6-8	計算にかかる時間の比較（密要素：高さ方向 800 分割）	3-23
表 3.3.6-9	風速、温度、圧力の変化.....	3-24
表 3.4.2-1	坑道内の作業員数および風速、風量の設定.....	3-45
表 3.4.2-2	設定条件一覧	3-47
表 3.5.2-1	STEP1 の解析結果	3-57
表 3.5.4-1	各種設定条件	3-75
表 3.5.4-2	避難シミュレーションにおける各再現状況の適用（再現）可能性	3-79
表 4.1.2-1	人工バリア構成と各種外力に対する限界性能等の把握に向けた調査・試験の概略	4-3
表 4.2.1-1	今年度の解析ケース	4-6
表 4.2.5-1	発熱曲線（数式 4.2.5-1～3）における定数（Ingason[16]による）	4-17
表 4.2.5-2	発熱曲線の近似（図 4.2.5-1；放出量は 100MW の倍数）	4-17
表 4.2.6-1	燃焼解析に用いた物性値.....	4-19
表 4.2.6-2	緩衝材の熱拡散率.....	4-19
表 4.2.6-3	伝熱解析に用いた熱物性値	4-20
表 4.2.7-1	緩衝材設置前の解析結果（ケース 1A）	4-22
表 4.2.7-2	緩衝材設置前の解析結果（ケース 1B）	4-27
表 4.2.7-3	定置設置装置の下流床への全総熱流速及び熱流速（HRR）	4-34
表 4.3.1-1	人工バリア材料の力学特性取得状況.....	4-93
表 4.3.1-2	膨潤応力，圧密降伏応力，圧縮指数，膨潤指数一覧	4-96
表 4.3.2-1	試験対象材料の仕様	4-98
表 4.3.2-2	緩衝材の力学的性質の取得に向けた試験ケース数.....	4-100
表 4.3.2-3	試験数量.....	4-101
表 4.3.2-4	試験ケース名一覧.....	4-102
表 4.3.4-1	試験体の物理的特性	4-106
表 4.3.4-2	試験体の外観（圧裂試験-20℃）	4-107
表 4.3.4-3	試験体の外観（圧裂試験-500℃）	4-108
表 4.3.4-4	試験体の外観（圧裂試験-1000℃）	4-109
表 4.3.4-5	試験体の外観（一軸圧縮試験-20℃）	4-110
表 4.3.4-6	試験体の外観（一軸圧縮試験-500℃）	4-111
表 4.3.4-7	試験体の外観（一軸圧縮試験-1000℃）	4-112
表 4.3.4-8	試験体の外観（圧密試験-20℃）	4-113

表 4.3.4-9	試験体の外観 (圧密試験-500℃)	4-114
表 4.3.4-10	試験体の外観 (圧密試験-1000℃)	4-115
表 4.3.4-11	試験結果 (試験ケース 常温)	4-118
表 4.3.4-12	試験結果 (試験ケース 500℃)	4-119
表 4.3.4-13	試験結果 (試験ケース 1000℃)	4-120
表 4.3.4-14	試験結果 (試験ケース 常温)	4-121
表 4.3.4-15	試験結果 (試験ケース 500℃)	4-122
表 4.3.4-16	試験結果 (試験ケース 1000℃)	4-123
表 4.3.4-17	試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 常温)	4-124
表 4.3.4-18	試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 500℃)	4-125
表 4.3.4-19	試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 1000℃)	4-126
表 4.3.4-20	力学的性質取得結果まとめ	4-127
表 4.5.2-1	SUS304/309 系材料の公称組成と特徴	4-147
表 4.5.2-2	SUS304/309 系材料の化学組成、材料特性規格、および、P.I.	4-147
表 4.5.4-1	解析ケース	4-153
表 4.5.6-1	室内換気の設定 (Case 0、Case 1)	4-159
表 4.5.7-1	固化ガラスの比熱[36]	4-160
表 4.5.7-2	固化ガラスの熱伝導率[34]	4-160
表 4.5.7-3	ガラス固化体キャニスタ 比熱[35]・熱伝導率[34]	4-160
表 4.5.7-4	コンクリート比熱[37]	4-162
表 4.5.7-5	コンクリートの熱伝導率[37]	4-162
表 4.5.7-6	空気物性値[35]	4-163
表 4.5.7-7	海水の比熱[35]	4-164
表 4.5.7-8	海水の熱伝導率[35]	4-164
表 4.5.7-9	海水の粘性率[35]	4-164
表 4.5.8-1	津波浸漬前後の温度変化	4-170
表 4.5.9-1	環境因子のまとめ	4-184
表 4.5.9-2	鋭敏化ステンレス鋼の定荷重 SCC 試験による SCC 発生寿命[45]	4-191
表 4.5.9-3	鋭敏化ステンレス鋼の定荷重 SCC 試験による SCC 発生寿命の見積	4-192
表 4.5.9-4	海水浸漬状態での SCC 発生寿命解析	4-193
表 4.5.9-5	代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測の鋭敏化度依存性	4-195
表 4.5.9-6	SCC 発生寿命におよぼす化学組成(%Cr、%C)の影響	4-196
表 4.5.9-7	SCC 発生寿命におよぼす鋭敏化、および、応力の影響	4-196
表 4.5.9-8	SCC 発生寿命におよぼす電位、pH、および、塩化物濃度の影響	4-197
表 4.5.10-1	SUH309/SUS309S、および SUS304L の化学組成(分析例)	4-205
表 4.5.10-2	SCC 感受性評価試験に供する材料、冷間加工、材料評価等のマトリックス(案)	4-207
表 4.5.10-3	塩水 SCC 感受性試験マトリックス(案)	4-210

第1章 開発の目的および概要

1.1 処分システム工学確証技術高度化開発の背景、および目的

1.1.1 開発の背景

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）については、地層処分にに向けた取組が行われており、処分技術の信頼性向上に関する基盤技術の開発が、最終処分のサイト選定プロセスを考慮して段階的に実施されている。

処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。

さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の操業期間中の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

本事業では、上記状況を踏まえ、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

1.1.2 開発の目的

平成 25 年度に立案した 5 か年計画の 2 年目として、以下の研究開発を実施する。

(1) 処分システム工学確証技術開発

オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術に対して深部地下環境を考慮した長期健全性の観点から工学的信頼性の向上を図るため、種々の判断指標の提示に向けた品質に係わる知見の拡充、および健全性評価技術の構築に係わる検討を行う。また、これらの健全性を確認するモニタリング技術の整備の一環として地下研究施設での適用性確認等を行う。

1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック

平成 24 年度までの遠隔操作技術高度化開発により、HLW 第 2 次取りまとめで提示された板厚 190 mm の炭素鋼オーバーパックについて、現状の技術で実際に製作、検査が可能であることを示した。さらに、人工バリア品質評価技術の開発では、溶接部と母材の耐食性は同等であることを確認した。

本開発では、実際の地下深部を想定した複合系でのオーバーパック溶接部の耐食性評価試験を実施するとともに、材料の劣化予測方法の検討、非破壊検査による欠陥検出精度の向上

に関する検討を実施する。上記の実施内容で得られる知見より、腐食評価と構造評価を合わせたオーバーパットの健全性評価手法を構築し、判断指標の具体化に資するものとする。

平成 25 年度は、オーバーパットの健全性評価の方法論について整理し、全体計画を立案した。腐食試験については、地上及び地下研究施設を活用した試験計画を立案し、地下研究施設での試験孔の掘削や、試験に必要な溶接供試体や試験機器の一部について製作を実施した。また、材料劣化事象の一つである中性子照射による脆化量を予測するための、オーバーパットの照射線量評価について検討を進めた。さらに、超音波探傷法による欠陥寸法測定誤差について調査した。

平成 26 年度は、腐食・構造評価を合わせた健全性評価手法について検討を進め、オーバーパットの品質確保に必要な判断指標（腐食、材料劣化、欠陥）の観点から健全性評価モデルを検討する。また、複雑系での溶接部の腐食挙動評価のため、地下研究施設および地上での溶接部耐食性評価試験を開始するとともに、耐食性におよぼす溶接組織の影響を評価するための知見を電気化学試験により取得する。材料の中性子照射脆化については、最新の計算コードを用いてオーバーパットへのガラス固化体からの照射線量を取得するとともに、照射脆化量予測のための方法論について検討する。さらに、超音波探傷法による欠陥寸法測定精度向上に関する検討を実施する。

2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

緩衝材の製作・施工技術について実規模試験などを通してその実現性が示された一方、緩衝材の初期の密度分布は膨潤しても均質化せず密度分布が残ることや、隙間を有する緩衝材施工において湧水量によってはパイピングが発生し、ベントナイトの成分が流出することが示されている。

本開発では、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査・検討を実施し、緩衝材施工法の選定方法に定量的な評価を加える。さらに、緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング／エロージョン現象に対しては、工学的対策の提示に向けた調査・検討を実施する。また、上記実施内容で得られる知見を取りまとめ、多様な技術により構築される人工バリアの品質／健全性評価に向け、人工バリア性能を満足する緩衝材指標の具体化に資するものとする。

平成 25 年度は、処分環境（湧水量や水質等）を想定した緩衝材施工法の選定方法を検討した。また、パイピング／エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討では、岩盤と緩衝材との隙間へのペレット充填効果、モンモリロナイト含有率の高い緩衝材ブロックのパイピング／エロージョン挙動の評価を行い、人工バリア全体としての設計・施工仕様に関する検討では、地下水マネジメントを調査した。また、地下研究施設を活用した試験計画を策定し、試験孔と設備の一部を施工した。

平成 26 年度は、塩水環境下における緩衝材の密度分布の残留現象、パイピング／エロージョン現象を定量的に評価するとともに、平成 25 年度に検討したパイピング／エロージョンに対する工学的対策の有効性を検討する。地下研究施設におけるパイピング／エロージョン試験を開始し、工学規模室内試験との比較評価を実施し、小規模試験で得られた挙動の再現性を確認する。人工バリア全体としての設計・施工仕様については、プラグの構築、止水

性能等に資するデータを整備する。

3) モニタリング関連技術の整備

地層処分のためのモニタリングについては、その目的を検討し、特に重点的な検討が必要な性能確認モニタリングについて制約条件やパラメータの選定方法案を提示した。また、バリア機能を保持したモニタリングの実現のため地下研究施設における地中無線通信装置の性能確認試験等を実施し、これらの成果や文献調査結果を反映した技術メニューの整備を実施した。さらに、併せて制度的管理としての記録保存について媒体の開発や国内外の調査を行い、基本的システム案を提示した。

本整備では、技術的選択肢検討の基盤となるモニタリングの枠組みや結果の反映方法等に関する検討を、国際研究等への参画とフィードバック等により実施する。また、モニタリングの技術的実現性の向上のため、バリア機能や処分場性能を保持したモニタリングシステムの確立に向けた地中無線モニタリング技術の検討を、地下研究施設への反映を考慮して実施する。

上記で得られる知見より、セーフティーケースの信頼性強化に資するモニタリングの技術選択肢の整備を行い、モニタリング計画の立案に資するものとする。

また、併せて制度的管理としての記録保存についても動向の調査を実施する。

平成 25 年度は、5 年間の検討計画を国際共同研究 MoDeRn に参画して得た成果等を参照して立案した。これに基づき、モニタリング結果のバリア性能の確認への反映方法に関する課題抽出を実施するとともに、研究開発成果や文献調査結果を反映する技術メニューの整備方針を検討した。さらに、モニタリングの技術的実現性の向上のため、地中無線モニタリング技術について地下研究施設における中継試験等を実施した。これらに加え、記録保存に関し英国及び OECD/NEA における検討状況の調査を実施した。

平成 26 年度は、モニタリングの枠組みの検討及び技術的実現性向上のための整備等を実施する。具体的には、人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材等との連携を図りつつモニタリング結果のバリア性能の確認への反映方法に関する検討を実施するとともに、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発との連携による操業期間中の安全性に関するモニタリングの検討、および回収技術、回収可能性に関する検討成果を参照した廃棄体の回収可能性に関連するモニタリングの検討を実施し、技術的課題を抽出する。また、研究開発成果や文献調査結果を反映する技術メニューの整備を実施する。さらに、モニタリングの技術的実現性の向上のため、地中無線モニタリング技術について地下研究施設における適用試験等を実施する。これらに加え、記録保存に関して引続き OECD/NEA における検討状況の調査を実施する。

(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

本開発では、東北地方太平洋沖地震を受け、事業主体が実施する地層処分施設の設計に反映すべく、主に処分事業操業中の処分システムに対する地震・津波等の大規模な自然災害の影響を検討し、安全確保のための対策技術を開発、提示する。

平成 25 年度は、処分パネルにおける火災事象等を対象に、気流解析及び避難シミュレーシ

ョン解析による安全確保対策の検討に向け、解析条件の設定や事前解析を実施した。人工バリアの限界性能等の調査試験については、ガラス固化体及びオーバーパックを対象とした火災影響についての解析的検討、緩衝材の高温時熱特性試験及び津波被害を想定したガラス固化体の腐食性に関する情報収集を実施した。状況把握・監視技術については、地層処分施設で想定される種々の異常状態や事故ごとに、状況把握手順を整理・体系化するとともに、その際に必要となる技術の抽出と技術情報調査に着手した。

平成 26 年度は、施設計画技術については、平成 25 年度の解析手法等を踏まえ、処分パネルの解析モデルにおける気流解析の課題等を整理・把握するとともに火災等による異常時における煙等の流れや作業員の避難に関する情報を整理・検討する。また、地層処分施設全体についての操業安全確保の観点からの技術要件の調査・検討に着手する。人工バリアの限界性能等の調査試験については、緩衝材を介した火災影響の解析的検討を実施するとともに、高温履歴を受けた人工バリア材料の力学的性質に関する検討、及び津波被害を想定したキャニスタの腐食環境条件に係る検討に着手する。

1.2 本開発に係る背景および目的

1.2.1 本開発の背景

平成 23 年 3 月の東北地方太平洋沖地震及び地震に伴う津波による福島第一原子力発電所事故を契機に、国内では「設計上の想定を超える外部事象に対する頑健性の総合評価」や「シビアアクシデントへの対応措置の実施」など、原子力関連施設について「想定外事象」に対する安全確保に向けた様々な取り組みが続けられている。このような状況を踏まえ、地層処分についても「異常状態や事故の発生を防止するための対策を実施するが、万が一、それらが発生したと想定し、対策を検討しておく」ことが必要と考えられる。

このような背景を踏まえ、本開発は、平成 24 年度に「処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術の開発」として研究開発に着手したものである。平成 24 年度の実施内容や成果については後述するが、昨年度から「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発」の新テーマ名のもと、5 年程度の期間で自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行うものである。

1.2.2 本開発の目的

本開発では、地層処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術を開発し、大規模な自然災害に対する処分システムの安全性確保に資することを目的とする。

具体的な全体方針としては、主に処分施設閉鎖前までの処分事業操業中を想定して、地上／地下施設を含む処分システム及び施工された人工バリアを対象として、巨大地震・津波に代表される大規模な自然災害を原因とするリスク事象、結果及びその影響を想定し、リスク低減に向けての技術開発課題を抽出し、抽出した技術開発課題に対して工学的視点で検討を行い、対策技術に関わる技術調査や適用性確認試験等を実施する。

平成 26 年度としては、平成 24 年度に抽出した技術課題に対して 5 ヶ年で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画を踏まえ、技術開発課題に係る要素技術についての調査及び検討等を実施するものである。技術課題の 1 つである「施設計画技術」では、昨年度において火災発生時における評価手法の提示を行い、適用性について確認した。今年度は、評価手法に関わる通気解析に着目し、地層処分システム施設へ実施するにあたっての適用性・課題等を把握するものである。また、「人工バリアの限界性能等に係る調査試験」では、昨年度に引き続き異常状態・事故発生時を想定した場合の人工バリアへの影響評価手法の提示、影響評価を行うにあたって必要となるデータの取得を実施するものである。

1.2.3 本開発の前提

本開発では、主に処分施設閉鎖前までの処分事業操業中を想定して、その期間内における地上／地下施設を含む処分システム及び施工された人工バリア等を対象とした安全性確保のための対策技術を、技術調査や適用性確認試験等の実施により開発するものとする。すなわち、既往の研

究開発成果[1][2][3]などに基づき、放射性廃棄物の地層処分施設が「サイト選定および安全審査」の段階を経て、安全性を損なうおそれのある自然現象（地震や火山活動など）の著しい影響が及ばない安定した地層を選んで建設されたことを前提とし、その後の「処理事業操業中」を対象に巨大地震、津波等の大規模な自然災害に対する安全確保について検討するものである（図1.2.3-1）[3][4]。

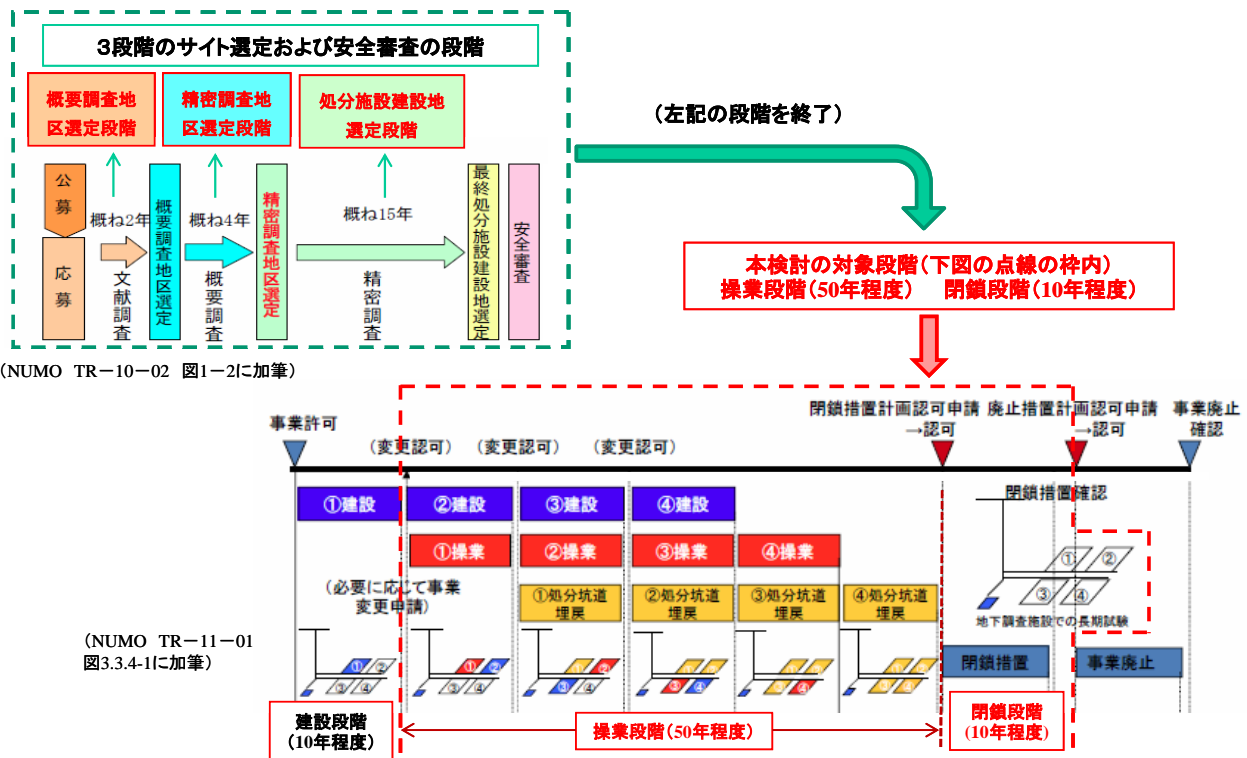


図 1.2.3-1 本開発の前提[3][4]に加筆

1.3 検討の基本方針

1.3.1 リスクマネジメントとクライシスマネジメント

上述の背景・目的に基づき、本開発では「リスク事象の検討による状況設定」（「1.4 平成 24 年度の成果」を参照）を経て、「リスク低減のための対策の開発」を行う。「リスク」とは「起こりうる不確実性」という広義の意味があり[5]、東北地方太平洋沖地震及び地震に伴う津波による福島第一原子力発電所事故を踏まえると、「原子力災害を起こさない、起こさないためにはどのような事前対策を施すべきか」という観点だけでなく、「起きてしまったら、その影響を如何に緩和すべきか、また、如何に復旧に導くか」という観点にも着目して、開発を行うべきと考える。

後者の「起きてしまったら」の観点は、一般防災における「クライシスマネジメント」の考え方に他ならない[5][6][7]。一般に、「リスクマネジメント」は、平常時・異常時を問わず発生するリスクの分析と対応が中心であるが、「クライシスマネジメント」は異常時に発生するリスクの分析と対応が中心となる[6][7]（リスクマネジメントの詳細については「参考資料①：リスクマネジメントとは」を参照）。すなわち「クライシスマネジメント」は、異常状態や事故が発生した場合でも、その被害を最小限に抑えることができるように、異常状態・事故の発生直後から事態が終息するまでの対応のあり方を考えるものである。このため、「クライシスマネジメント」においては「被害の程度」にとらわれず、いわゆる「想定外の事象」についても検討を行う[5]。

なお、「クライシスマネジメント」の概念のもと、「被害の程度」を設定し（被害想定）、それに対する復旧対策を事前に策定・運用するのが「事業継続計画（BCP）」である。BCP は、自然災害や事故、テロなどの異常により通常業務を中断した場合に、可能な限り短い時間（期間）で組織として最も重要な事業活動機能を再開できるように、事前に計画・準備を行うとともに、継続的にメンテナンスを行うプロセスである[6]。最大の特徴は、「重要業務の再開に関連する部分のみを対象とする」ところである。わが国では、1995 年の兵庫県南部地震以降、BCP に対する関心が高まり、2011 年の東北地方太平洋沖地震を経た現在では、民間・自治体を問わずあらゆる組織で BCP が策定・運用され始めている。このような現状から、国の重要な施策である高レベル放射性廃棄物の処分事業においても、万が一の事態が発生した場合の対応の一つとして、速やかな事業再開に向けた BCP の策定・運用が必要と考えられる（BCP の詳細については「参考資料②：事業継続計画」を参照）。

以上を踏まえ、国の基盤研究である本開発は、クライシスマネジメントに立脚し、異常状態や事故の影響を緩和する対策を検討し、その対策に関わる工学的技術の開発を行うこととする。原子力災害における最悪な状態は、「放射性物質が管理状態から逸脱し、それにより周辺住民が被ばくする状態」と考えられる。地層処分事業における地上／地下施設についてもこれは同義であり、本開発では「放射性物質が管理状態から逸脱する」ことをクライシスと捉え、この最悪状態を回避、あるいはその影響を緩和するために異常状態や事故発生時の応急対策、恒久対策、対策のための試験・解析を検討し、それらの対策を実現する技術について開発する。

1.3.2 検討方針

1.2.3 で述べたように、放射性廃棄物の地層処分施設は、その安全性を損なうおそれのある自然現象の著しい影響が及ばない安定した地層を選んで建設される。しかし、このような前提においても大規模な自然事象が作用して処分システムに被害が生じる可能性は残る。本開発においては、クライシスマネジメントの考え方に立脚し、自然事象に起因して処分システムに異常状態や事故が「起こってしまった時にどのように対処するか」に注力するものとし、以下の方針のもとに実施する。

①異常状態・事故の発生を想定し、その後の対策に重きを置いた検討（クライシスマネジメントの考え方に立脚）

異常状態・事故の発生を防止するための対策を実施するが、万が一、それらが発生したと想定して、公衆及び作業員の放射線安全を確保するための対策技術を開発する。また、放射線安全の確保を前提としたうえで、異常状態・事故後の速やかな地層処分事業の継続（事業継続計画：BCP）に資する対策技術についても検討する。

②広範な事象を対象とした検討

工学的には発生の可能性が非常に小さい事象も、原則、検討対象から除外しないものとする。すなわち、「発生確率が低い」、「放射線影響が小さい」などの理由で検討対象から外すという方針はとらないものとする。

③既往の研究成果の活用と重複の回避

起因事象の設定や異常事態・事故などの状況設定などについては、可能な限り既往の研究開発成果を活用し、重複を回避する。

以上のように、本開発は「異常状態や事故が起こってしまった」ことを想定し、その後の対策の検討に重きを置くことを研究開発の特徴の一つとしている。いわば事態が起こった「事後」についてその影響緩和について検討することを特徴としている。このため、1.2.2「本開発の目的」の中などで使用されている「リスク事象」や「リスク低減」などの「事前」をイメージしやすい用語については、本報告では以下のように読み替えるものとする。

「リスク事象」：「異常状態や事故」

「リスク低減」：「異常状態や事故の影響緩和」

「リスク低減対策」：「異常状態や事故への対策」

1.4 平成 24 年度の成果概要[8]

(1) 地層処分施設と類似した施設の調査

地層処分施設と類似した既存の施設について文献調査を行った。地層処分施設は、大きく分けると地上施設と地下施設から成る。地上施設については、高レベル放射性廃棄物やガラス固化体を取扱う既存施設を調査した。地下施設については、地下構造物という共通性に着目してトンネルや鉱山・炭鉱を調査した。また、海外の放射性廃棄物地層処分計画等についても調査を行った。さらに、本開発は大規模な自然事象の影響を検討するものであるため、自然事象で想定外の被害を受けた施設の調査も行った。これらの類似施設について、安全確保の考え方、安全性を脅かす事象として取上げている自然事象、それらを起因事象として施設や設備で生じ得る異常状態や事故及び安全確保のための対策などを調査し、本開発に反映する知見を整理した。

(2) 検討対象の選定

自然事象に対して安全確保を検討する対象は、処分サイトや地上/地下施設の設定、定置概念などから多種多様な組合せが考えられる。本開発では、操業に関わる作業の相互関係や連続性などに着目して、廃棄体の取扱いに関する一連の作業である「操業工程」（ガラス固化体の受入・検査・一時仮置き、アクセス坑道を通しての廃棄体の搬送、などの 6 工程）に着目し、立地条件や定置概念の違い等を必要に応じて考慮することとした。次に、それぞれの操業工程に含まれる作業（ハンドリングフロー）を調査・設定し、本開発において自然災害に対する安全確保を検討する具体的な作業を選定した。選定した検討対象は、地上については、ガラス固化体やオーバーパックの吊上げ作業などの 4 作業、地下については、アクセス坑道を通しての廃棄体搬送作業、オーバーパックや緩衝材の定置作業などの 6 作業である。

(3) 状況設定

類似施設の調査結果などにに基づき、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある自然事象（起因事象：地震、津波・高潮、洪水・豪雨、竜巻、熱波、干ばつ、落雷、隕石衝突、及び地下におけるガス噴出、ガス爆発、坑内火災、湧水、落盤・崩落、山はね、坑口からの水の流入など）を選定した。これらの起因事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と、異常状態を起点とした被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出した。最終的な状況は、「放射線安全に影響する最終的な状況」と「操業継続に影響する最終的な状況」の 2 つに分類した。前者については「検査室内の放射線量の増加、及び検査室内での放射性物質の拡散」、「坑道内の放射線量の増加、及び坑道内での放射性物質の拡散」などの 7 状況を抽出した。後者については「ガラス固化体またはオーバーパックの正常作業工程の中断」、「廃棄体の回収困難」、「人工バリア機能の低下の可能性」などの 11 状況を抽出した。

(4) 異常状態や事故への対策に関わる技術課題の抽出

抽出した地上施設及び地下施設それぞれの最終的な状況に対し、応急対策、恒久対策、対策のための試験・解析を「対策シート」（図 1.3.2-1）を作成して検討・抽出した。そして抽出し

た種々の対策を整理・類型化し、対策に必要な技術を「技術課題」として抽出した。抽出した技術課題は、「救援・救出技術」、「状況把握・監視技術」、「緊急遮へい技術」、「状況修復技術」、「施設計画技術」、「外力低減技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」の7課題である(図 1.3.2-2)。

(5) 対策技術の調査と開発に関わる試験項目の抽出

抽出した技術課題に関わる現況技術の調査に着手し、その調査結果に基づいて「救援・救出技術」、「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」、及び「人工バリアの限界性能等の調査・試験」を技術開発課題の候補として選定した。これらについて概略の開発内容、方法、成果目標、開発工程などを検討・整理して、年度展開を示した(表 1.3.2-1)。

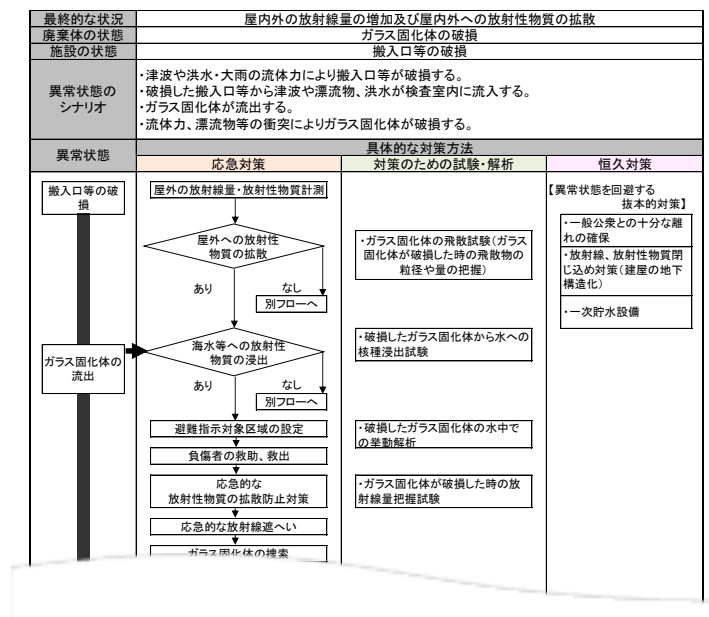


図 1.3.2-1 対策の検討・抽出方法[8]

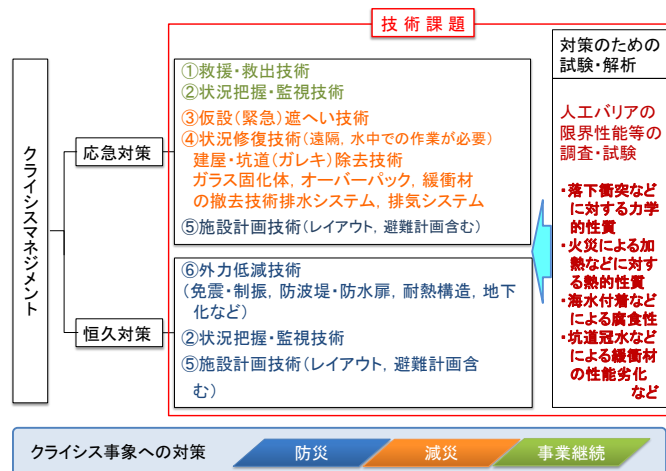


図 1.3.2-2 平成 24 年度に抽出した技術課題[8]

表 1.3.2-1 技術開発課題の選定と年度展開の一例[8]

調査試験項目	技術課題のカテゴリ	対象事象	概略の調査試験内容	調査・試験項目の選定理由	調査・試験成果目標と成果がもたらす効果	調査・試験にあたっての留意事項等
人工バリアの熱的性質の調査・試験	人工バリアの限界性能等の調査・試験	地震と津波の重量などに起因して地上施設や坑道内で火災が発生し、廃棄体が加熱される状況	<ul style="list-style-type: none"> ・火災環境の調査検討と加熱条件や解析モデルの設定 ・人工バリア(ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材)への火災影響を解析的に検討 ・解析の信頼性を向上するために、緩衝材の熱特性の試験データを取得 	<ul style="list-style-type: none"> 【地層処分の観点から】 ・万が一火災が発生した場合を想定し、人工バリアへの火災影響を把握したい ・日本の人工バリア構成を対象に火災影響を検討したデータが無い 【防災の観点から】 ・地層処分施設において万が一火災が発生した場合、安全性に対する公衆の懸念が大きいと考えられる。火災影響を事前に把握し、安全性の提示や公衆の安心感の醸成に資する 	<ul style="list-style-type: none"> 【成果目標】 ・加熱温度・加熱時間などが人工バリアに及ぼす影響の把握 ・緩衝材の高温時熱特性の把握 【効果】 ・緩衝材を介した「ガラス固化体+オーバーバック」への火災影響などが把握できる ・火災に対する人工バリアの健全性・頑健性を把握することで、万が一の事故時の安全性を示すことができる 	<ul style="list-style-type: none"> ・適切な加熱条件(温度・時間)やガラス固化体・緩衝材等の熱特性を設定するために、事前に十分な調査、検討が必要 ・火災影響に対する健全性評価指標の検討など

1.5 平成 25 年度の成果概要[9]

(1) 5 年間の研究計画の立案

本開発では、平成 24 年度に平成 25 年度以降に取り組む技術開発課題の選定と年度展開を提示したことを踏まえ、まず、平成 24 年度成果に基づき選定した「操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」、「状況把握・監視技術に係る調査・検討」の 3 つの技術開発課題について、今後 5 年間の実施内容の概要と工程を示すとともに、今年度の具体的な実施内容を示した。

加えて、「既存類似施設の保安に係わる法令等に基づくアプローチ」、及び「地層処分事業の防災計画の視点からのアプローチ」の 2 つの新たな視点から地層処分事業の操業安全を検討し、その結果から、「施設計画技術」の検討対象や検討内容・手法の妥当性を確認するとともに、「地層処分事業の防災計画に係る調査・検討」を本開発の新規課題として抽出した。

最終的には、平成 24 年度成果に基づき選定した 3 つの技術開発課題に、上記の防災計画に係る課題を加えた 4 つの実施内容についての 5 年間の研究計画と各年度の成果目標を示した。

(2) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討

1) 海外の地層処分施設計画等における類似検討の文献調査と本検討への知見の反映

火災事象に対する操業安全確保に係る類似検討事例として、海外の地層処分施設計画等を対象に文献調査を行った結果、フランス (ANDRA) における火災時の煙の流れ方などに関する解析的検討が本検討の参考になることが分かった。また、本課題の以降の検討 (地下施設の検討・設定や解析条件の検討・設定など) に反映することを目的に、「鉱山、トンネルにおける建設中・供用中の安全対策」及び「原子力関連施設における安全対策」について文献調査を行い、本検討に反映する知見を抽出した。

2) 気流解析と避難シミュレーション解析の条件設定

地下施設における火災に対する安全性は、気流解析と避難シミュレーション解析で比較検討することとし、これらの解析条件について国内外の既往の文献等に基づいて検討・設定し

た。

解析対象となる地下施設については、「解析に反映する定置方式」、「処分パネルの形状と配置」、「処分パネルの運用方法」、「処分パネルや坑道の形状・寸法」を設定した。また、気流解析条件については、「地下施設における風速」、「地下施設における風況場」、「初期の坑内温度と圧力」、「作業員数と配置」、「火災曲線」、「火災発生場所」、「数値解析手法」を設定した。さらに、避難シミュレーション解析については、「避難速度」、「避難人数」、「避難開始時間」、「避難開始位置」を設定した。

3) 気流解析と避難シミュレーションの適用性検討のための事前解析の実施

地層処分施設の地下施設を想定した簡易モデルによる事前解析を行い、火災安全の検討への3次元気流解析や避難シミュレーション解析の適用性と、本解析に向けての問題点や課題の抽出を行った。

気流解析の事前解析の結果、本検討で用いた3次元気流解析ソフトにより、平常時の通気状態及び強制通気状態を処分パネル内の各所の風速に条件を設ける手法で表現できることや、火災時の坑道内温度や一酸化炭素濃度の拡散状況を表現できることなどが分かった。一方で、「解析モデルの最適化による計算負荷（計算時間）の低減」、「数値解析手法の整理と解の特性に関する検討」、「処分パネルの通気方法の妥当性の検討」などの課題を抽出した。

また、避難シミュレーション解析の事前解析の結果、気流解析の熱や煙の拡散状況に係る解析結果を反映した避難シミュレーションが可能で、避難の状況を避難完了率などにより定量的に分析・評価できること、避難状況を3D図化して視覚的に確認できることなどが分かった。

(3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験

1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

地層処分場の地上施設の特定セル内（オーバーパック収納・検査室内）に、非常用発電機用のディーゼル燃料が流入して火災が発生するという一つのシナリオを設定し、これに基づいたモデルと条件で燃焼解析を実施した。また、燃焼解析の結果を境界条件として、①ガラス固化体単体、②ガラス固化体+オーバーパックの2通りの廃棄体状態を対象とした伝熱解析と応力解析を実施し、これらの人工バリアに対する火災影響を評価した。検討の結果、今回設定した火災シナリオではガラス固化体、オーバーパックともに破損に至るような影響を受けないことを確認した。

2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握

緩衝材の高温時熱特性（熱伝導率・熱拡散率・比熱の関係）を把握するための試験を行った。試験の結果、火災時を想定した高温時（試験温度500℃と1000℃）の熱特性（熱伝導率と熱拡散率）は、常温（100℃以下）の値と比べ、同等もしくは若干高くなる傾向が得られた。本試験で得られた100℃以下の熱特性値は第2次取りまとめの試験値と整合性がみられ、また、2通りの試験方法で得られた高温時の熱特性値は同程度であったことから、次年度以降に実施する緩衝材を介した火災影響の解析的検討においては、本試験で得られた熱特性値を

使用する計画である。

3) 津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査

津波被害を受けて復旧までに数か月以上を要する状況を想定し、その間の応力腐食割れなどによるガラス固化体キャニスタの破損などの評価に必要な情報を収集することを目的に文献調査を行った。調査の結果、ガラス固化体キャニスタに使用されているステンレス鋼種については、種々の環境条件に対して腐食特性に関する情報・知見が整理されていることが分かった。一方で、地層処分施設が津波被害を受けた場合にガラス固化体キャニスタが置かれる腐食環境の評価や、水の放射線分解による環境の酸化性の高まりを考慮した SCC 感受性の腐食領域図での整理などの課題を抽出した。

(4) 状況把握・監視技術に係る調査・検討

平成 24 年度に検討・作成した異常状態や事故時の対策シート 15 枚について、状況把握・監視に係る手順（行為）の観点から見直し・整理を行った。具体的には、対策シートの「応急対策」の欄の横に「状況把握・監視手順（行為）」及び「必要な情報」の欄を設け、応急対策のフロー中で状況把握・監視に関連する部分について、その手順と必要な情報を検討し、整理した。

次に、状況把握・監視に必要な技術として、放射線環境下に適用できる技術、及び大深度地下に適用できる技術の調査を行い、上述の状況把握・監視手順に係る 15 枚の整理シートに調査結果を加えて整理した。具体的には、手順の整理シートに、「状況把握・監視のために必要な技術や機器」及び「技術の開発状況や適用事例」の欄を追加し、当該欄に技術調査結果を記述して取りまとめた。

最終的には、地層処分システムで考え得る多様な異常状態や事故時の状況把握・監視手順と、その時に適用できる技術を 15 枚の整理シートに取りまとめた。

1.6 平成 26 年度の開発の概要

1.6.1 平成 26 年度の実施内容

1.2.2「本開発の目的」に記述した平成 25 年度の開発目標を達成するために、今年度は下記 (1)～(3) について調査・検討を行った。

(1) 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討

事業継続性の確保も考慮したうえで、地層処分施設における安全対策に対して、自然災害全般に対する安全対策（技術要件）について整理を行い、昨年度までに整理した技術開発課題、対策技術がどこに該当するのか整理し、新たな安全対策（技術要件）について検討を行った。

(2) 火災事象に対する安全確保対策の検討

平成 25 年度に実施した火災事象に対する評価手法を踏まえ、地層処分施設の立坑・処分坑道等を考慮した地下処分施設を対象に通気解析を実施し、今後取り組むべき課題等の検討を行った。国内の鉱山や類似施設で実績のある通気解析は 1 次元解析であり、本研究で提示している通気解析は、3 次元解析である。坑道延長が長く、かつ坑道の分合流部が多いため通気の乱れが発生しやすい地下処分施設に対してどのような解析手法が適しているか、また今後取り組むべき課題の調査・検討を行った。また、地下処分施設の構造を考慮した解析を実施し、火災事象等に対する作業員の安全性確保に向けた検討を行った。

(3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験

昨年度取得した緩衝材の熱特性データを用いた地下施設における緩衝材を介した火災影響の解析を行うとともに、津波被害を想定した腐食環境条件の設定に資する情報の収集・整理を行った。また、昨年度地上施設火災解析の結果から必要と判断したガラス固化体キャニスタの高温データ、及び地下施設で火災に被災した緩衝材の機械的特性データを取得した。

1.6.2 平成 26 年度の成果概要

(1) 本報告書の構成

以下に、本報告書全体の構成と各章の概要を示す。

1 章 開発の目的および概要

本報告書の導入として、処分システム工学確証技術開発の背景と目的、および本開発に係る背景、目的、基本方針を述べるとともに、平成 24 年度及び平成 25 年度の成果と平成 26 年度の開発概要を示した。

2 章 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討のまとめ

① 操業期間中の安全確保と技術要件

操業期間中の安全確保に対する実施主体（NUMO）の考え方を整理した上で、放射線安全と一般労働安全の確保に向けた安全対策および各安全対策を確保する上での対象となる構成要素の整理を図った。さらに、事業中の安全の確保に対する技術要件を整理した。

② 放射線安全の確保に向けた安全対策の動向

技術要件の整理を受け、地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設・廃棄物管理施設、また、取り扱う廃棄物の種類がガラス固化体とは異なるが地下の施設を有する原子力関連施設として第二種廃棄物埋設施設の関係法令法、および最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について調査・整理した。

③災害発生に着目した安全対策の必要技術

地層処分施設の事業期間中の一般労働安全確保に関わる構成要素と技術要件との関係性について考察を加え、安全に係る必要技術を例示した。さらに、一般労働安全に係る必要技術の検討にあたり、日常的に把握しておくべき事項と災害時の対応事項の双方の技術検討が必要であると考えられることから、平常時と災害時の区分で検討の流れを模式図に示した。また、災害の発生・拡大の防止の「防火対策」に着目し、まず地下坑道における火災等の状況を検討の出発点に、安全確保までの流れを、模式図に示した。

また、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による甚大な被害発生を契機に、原子力災害からの公衆安全に係る防災計画が原子力発電所を抱える自治体において策定されつつある。このことから、一般労働安全確保に資する情報として、原子力防災の現状として、原子力防災に係る法令等を整理するとともに、原子力災害特有の対策や事業者から行政に対する対応と初期対応段階における緊急防護措置について調査・整理を図った。

④安全対策技術の考え方と評価方法に対する考察

最新の知見などを踏まえて、はじめに安全対策技術の枠組みを構築している。構築した安全対策技術の枠組みは、処分システムを物理的なスケールで区分して、整理したものである。さらに、安全対策技術を選択する際に必要となる評価方法について、一般的な施設における安全性の捉え方を踏まえ、安全性を客観的に判断する方法について検討を加えている。また、これらの検討により構築した枠組みに対して、自然災害に対する安全対策技術の抽出と整理を図った。

3章 火災事象に対する安全確保対策の検討のまとめ

①通気解析に関する数値解析技術の検討

流体の力学特性に着目し、その運動を司る物質の運動を表現する式を整理し、地層処分施設で活用する数値解析技術（支配方程式、離散化法）について整理・検討を行った。

支配方程式については、オイラーの微分方程式もしくはナビエ・ストークスの式が壁面付近の渦を表現でき、坑道内の空気の流れを表現するのに適していると判断した。オイラーの微分方程式とナビエ・ストークスの式を比較した場合、式の特性上、ナビエ・ストークスの式は壁面付近の流れの表現も可能であり、分流・合流地点や切羽が存在する地下処分パネルの局所的な検討にはナビエ・ストークスの式が適していると考えた。離散化法では、粗いメッシュでも各種の保存則が成り立つ等を考え有限体積法を用いることとした。

これら検討結果を踏まえ、支配方程式がナビエ・ストークスで、かつ有限体積法を用いることができる解析ソフトとして「VENTMINE」を選定した。

②地層処分施設の解析条件の設定

地層処分施設の形状については、既往の資料から形状、寸法を設定し、形状等から通気用の立坑が各パネルに整備が予定されているため、パネル毎に通気が独立していると仮定した。そこで、解析の対象とするパネルを掘削中の坑道があり、作業員がいる建設中パネルを対象とした。通気解析及び火災影響評価を行うにあたって必要な風量（風速）、坑内温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度の閾値を導き出すため、労働安全衛生規則、新版・ずい道等建設工事における換気技術指針などを参考に整理した。

平成 25 年度の検討結果より、3 次元解析の膨大な計算格子数（140 万要素）が影響して計算時間が 2 週間程度／1 ケースと長時間を必要とした。これを受けて、1 次元モデル化が可能な部分について検討を行い、気流の乱れが小さい個所を 1 次元モデルとし、分合流部などの気流の乱れが大きい個所を 3 次元モデルとし、モデル化を行った。

③解析の実施

解析の実施にあたっては、建設中パネルに必要な風量を送った場合の連絡坑道、主要坑道、処分坑道の通気状態を確認し、強制的に通気する必要がある箇所を確認した。

その結果、分岐部において検討した風速が確保できないこと、また処分坑道内へ空気がほとんど流れないことが分かった。そこで分岐部等において局所ファンの設置を想定し、通気を強制的に誘導することとした。たとえば、建設完了の処分坑道では、全てダクトで繋いで“一筆書き”の方法で通気すると仮定して解析することにより、必要な風量を抑えることとした。また、建設途中の処分坑道では、入気口からダクトを繋いで通気を確保すると仮定し、解析した。

切羽付近での火災を想定し解析を行い、比重が軽い一酸化炭素が最も坑道上面で拡散しやすいことを確認することを確認した。熱の拡散については、発火直後から坑道上面に熱が拡がるという熱影響を確認した。

避難シミュレーションでは、処分坑道に 6 名ずつ作業員を配置して、搬送装置などの障害物を想定した狭い通路を条件設定したところ、単位時間に通過する作業員の数が低下する等の避難速度の低下や避難完了率の低下を確認した。

4 章 人工バリアの限界性能等の調査・試験のまとめ

①人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

燃焼解析では、バッテリーパックの表面からエチレンが放出されると仮定し、発熱曲線を設定した。しかしながら、解析結果による発熱量は、風速 2.0m/s と設定した場合でも 20MW ほど下回った。原因は、昨年度のプールファイヤー（可燃性液体が流出し、平面上に燃え広がること）でも見られたように、多量な燃料に対して局所的に酸素濃度が足りず、燃料が燃焼することなく計算領域から流出したことによるものと考えられる。また、燃焼が一時的に収まり換気によって十分な酸素が供給されると燃焼が活発化し、発熱量が目標曲線に近づいてくることが確認できた。

今回の解析では、流速が遅い場合は燃焼ガスが浮力によって天井に上がり、そこから広がっていく。また、流速が速ければ、燃焼ガスが気流によって下流に流されることを確認した。

伝熱解析分では、火災によるオーバーパックへの入熱は蓋上面からが主であるため、伝熱解析ではオーバーパック蓋上部の温度上昇が顕著である解析結果となった。特に、蓋上部が局所的に 1,000℃超となる部位が見られた。また、1,000℃超の最高温度到達時におけるオーバーパックの胴部の温度は、上部近傍の領域を除くと 200℃以下であり、ガラスの温度上昇は約 1.5℃にとどまった。

応力解析では、温度分布に伴って生じる熱応力が胴部にもみられるが、火災後に初期温度分布に戻ると、蓋部近傍を除いて初期応力分布に近い状態に戻ることがわかった。

②地上施設で火災発生を想定したガラス固化体キャニスタの特性データの取得

今年度計測した SUS304L の降伏応力 (0.2%耐力)、ヤング率、および線膨張係数のデータを平成 25 年度の火災解析に使用した SUS304L の材料データと比較した結果、ヤング率と線膨張係数は、平成 25 年度の解析に使用した値、およびその線形外挿値に近いが、降伏応力については本年度の計測値の方が解析に用いた降伏応力よりも高いという結果であった。

③地上施設に津波が流入した場合のガラス固化体キャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理

津波の被害を受けることにより、ガラス固化体キャニスタ下部で海水の浸漬、ガラス固化体キャニスタ上部で海洋性湿潤大気環境になる一方、放射線分解によって 50～80℃程度まで加熱されるとともに酸化性が高まる可能性がある。海水および海洋性湿潤大気環境下でステンレス鋼は、孔食、すきま腐食感受性を示す。さらに、材料、環境、応力の 3 条件が整った場合に SCC が発生・進展する。30℃(室温)～80℃の温度域で海水相当濃度の塩化物の水溶液環境および海塩付着があれば、SCC を起こし得ることが文献などで報告されている。また、海水の方が空気よりも熱伝導性が良いため、海水に浸漬しているほうが温度の上昇が大きく、温度解析の結果より没水部(海水中)では 300 時間後に 60℃、600 時間後に 70℃に到達するが、非没水部(大気中)では 700 時間後に 60℃に到達し、その後の温度上昇も遅い。気相部での湿潤大気 SCC 発生寿命は海水水没環境よりも低いが、気液界面の高濃度塩化物が高温・中湿度状態でさらに濃縮して SCC 感受性が高まることが危惧される。

これら文献で示された実験による結果は、試験機内の環境温度と試験片の表面温度が同一であるが、実際の津波影響により災害では異なることが考えられる。

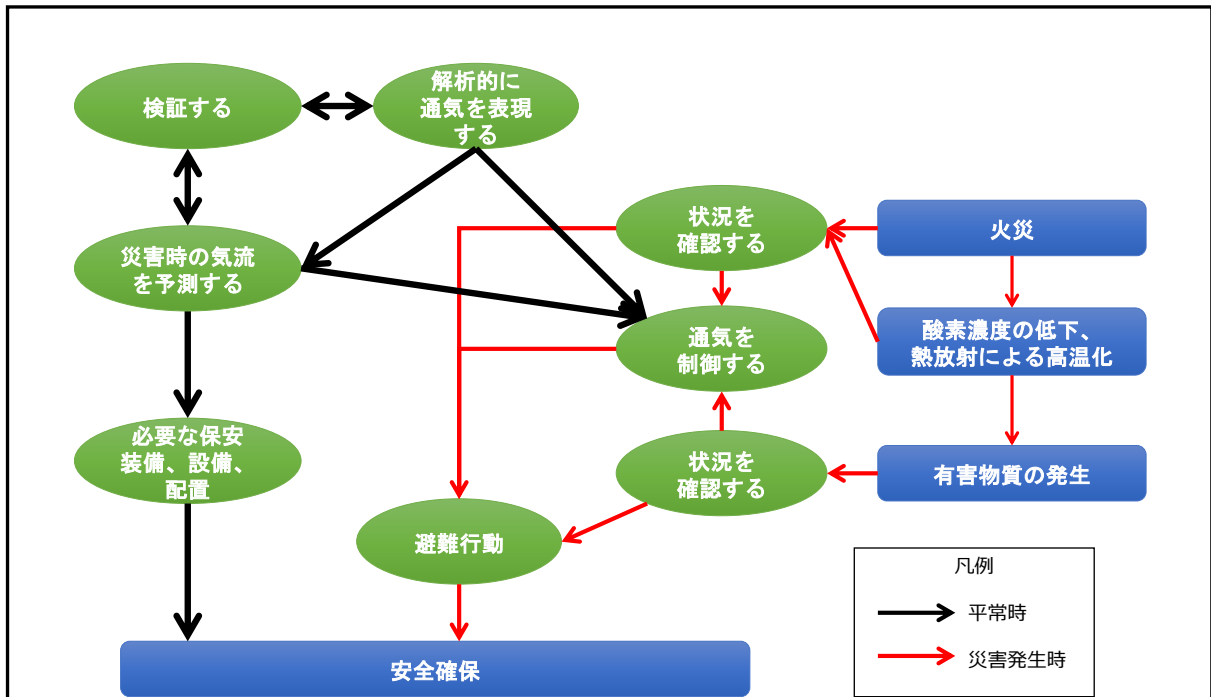
津波腐食へ展開するためには、実機環境の解析結果に基づき、環境と試験片の温度差などを考慮した塩水 SCC 感受性評価試験計画、放射線影響 SCC 感受性評価試験計画を立案し、試験を実施した上で評価する必要がある。

5 章 平成 26 年度のまとめ

2 章から 4 章までの調査・検討成果を取りまとめて示した。

(2) 成果概要

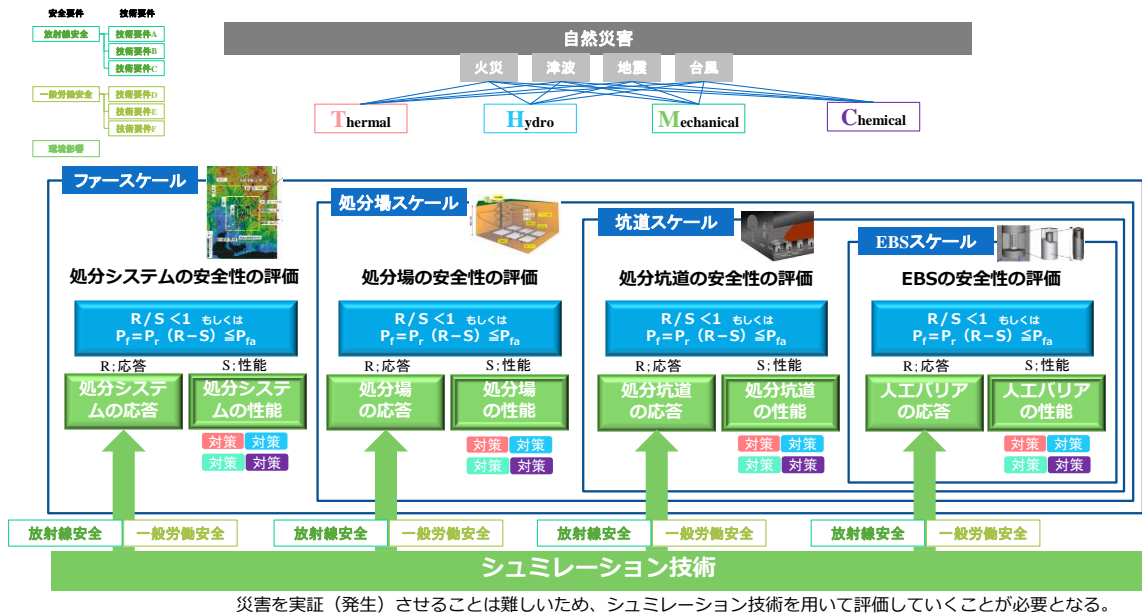
本報告書の第 2 章から第 4 章の検討成果の概要を示す。



火災発生時における安全確保対策検討の流れ

自然災害に対する
処分システムの安全確保

$$R/S < 1 \text{ もしくは } P_f = P_r (R-S) \leq P_{fa}$$



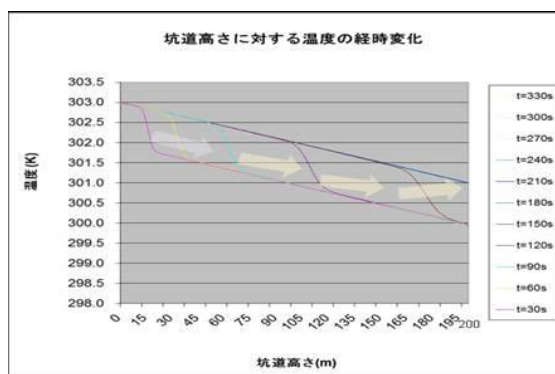
自然災害に対する地層処分施設の安全性の評価と安全対策技術の整理

図 1.6.2-1 「2章 作業安全を考慮した技術要件の調査・検討」成果概要

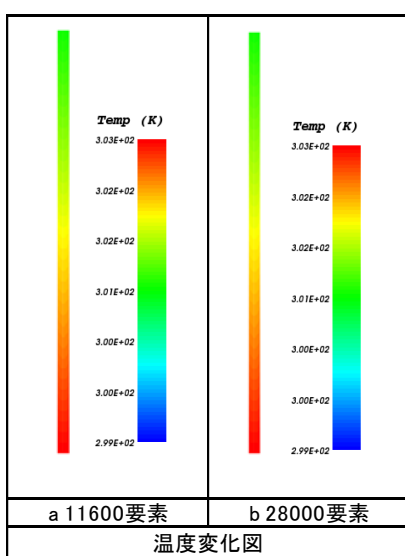
(1) 通気解析に関する数値解析技術の検討

	支配方程式式	特徴	活用上の留意点	地層処分での適用性
運動方程式	ポテンシャルの式	流体の渦度も粘性も考慮しない。	管や煙突等では活用不可。質点系のための検討には活用できる（ただし制約条件は多い）	理論式としては簡易で活用しやすいが、条件が多く適用性は低い
	オイラーの運動方程式 $\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x}$	流体の渦度は考慮するが粘性は考慮しない。	ナビエ・ストークスの簡易版として活用されるが、流路の中に移動する物体がある場合、その表面の速度を数値的に表現できない（境界条件を設定できない）	ナビエ・ストークスの簡易版として活用できる
	ナビエ・ストークスの式 $\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u$	流体の渦度も粘性も考慮する。	流体力学の数値解析では最も良く用いられる。オイラーの式と違い、流路内に移動する物体がある場合でも、その表面の速度を数値的に表現できる（境界条件を設定できる）	流体に対して最も一般的であり、適用性は高い
	ベルヌーイの式 $\frac{1}{2} V^2 + \int \frac{dp}{\rho} + Q = const.$	扱う流体は非圧縮、非粘性、定常流とする。渦度、粘性も考慮しない。	流体の運動エネルギー、圧力エネルギー、重力のポテンシャルエネルギーの和が一定であるため、圧力が上昇すれば速度が減少する可能性がある。	複雑な形状の地層処分施設では、流体が非定常流となる部分が複数箇所あり、その部分への適用性は低い。

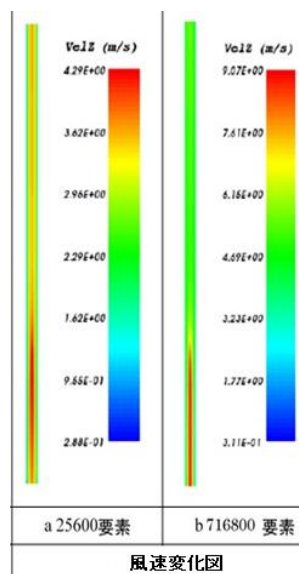
支配方程式の整理結果



1次元解析による温度の経事変化



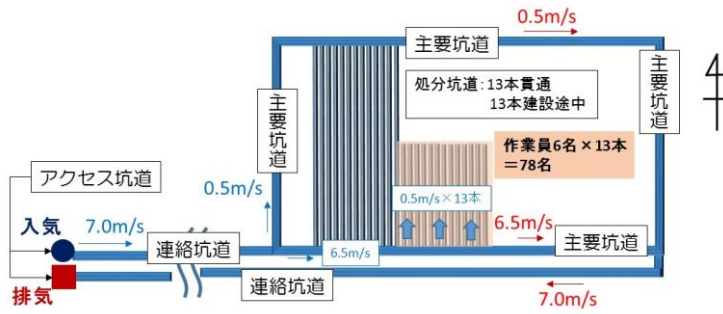
2次元解析による温度変化



2次元解析による風速変化

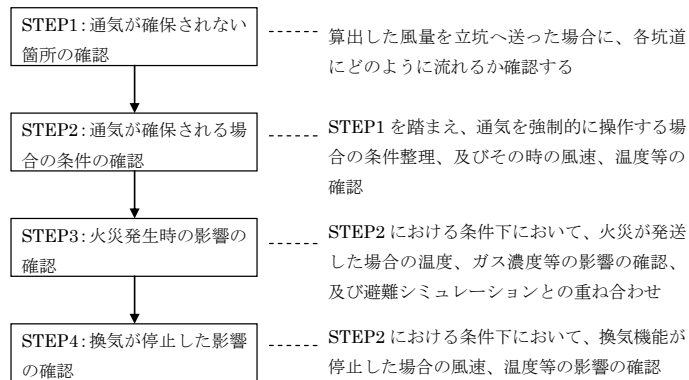
図 1.6.2-2 「3章 火災事象に対する安全確保対策の検討」 成果概要(1)

(2) 地層処分施設の解析条件の設定

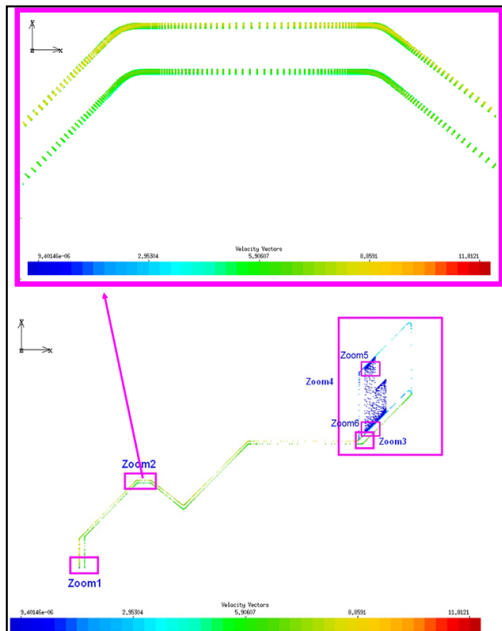


建設中パネルと作業員の配置イメージ

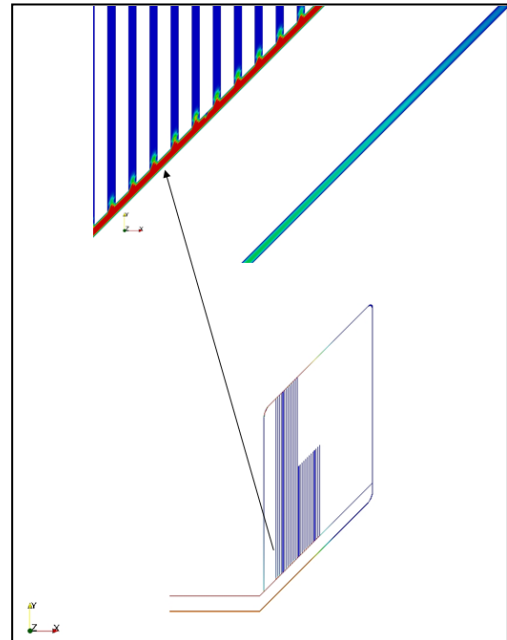
(3) 解析の実施



解析手順

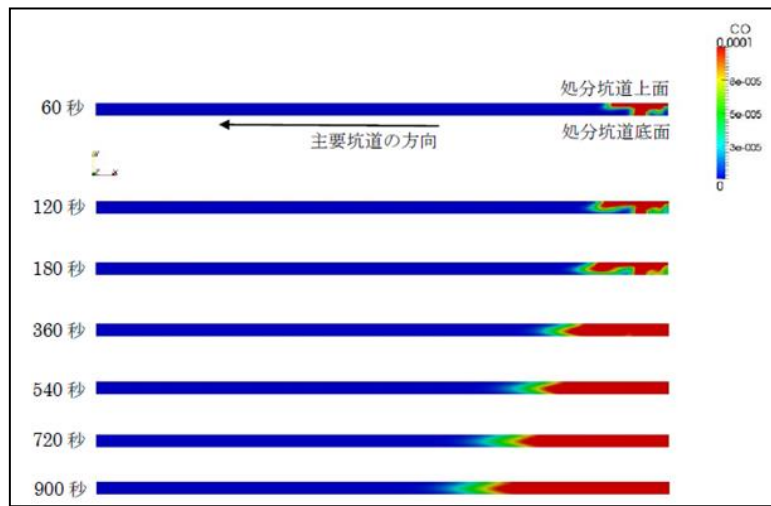


STEP1 の解析結果

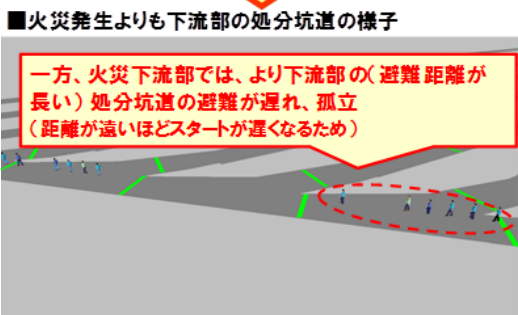
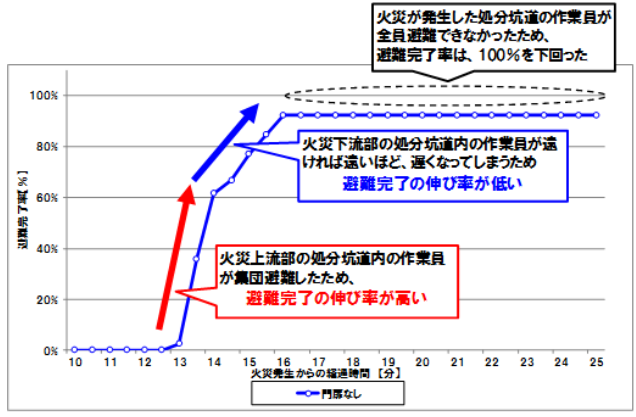


STEP2 の解析結果

図 1.6.2-3 「3章 火災事象に対する安全確保対策の検討」成果概要(2)



STEP3 の解析結果（一酸化炭素の拡がり）

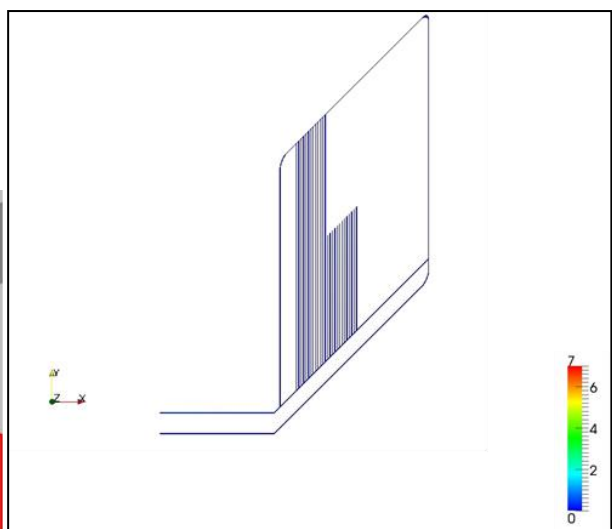


STEP3 の解析結果（避難シミュレーション解析結果）

避難イメージ（合流部）



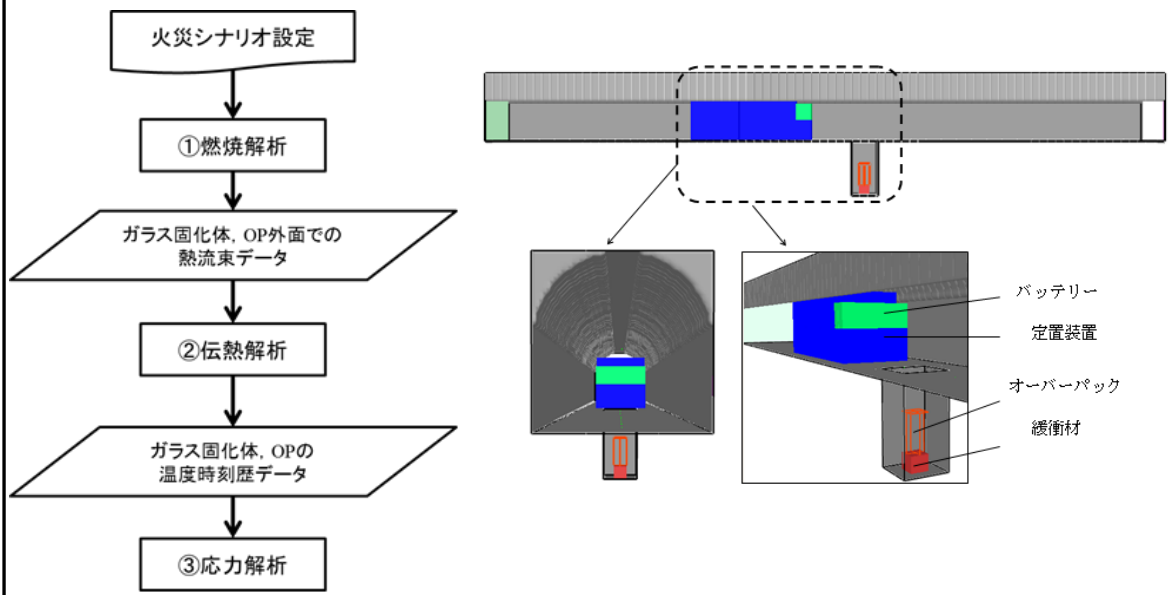
避難イメージ（狭隘部）



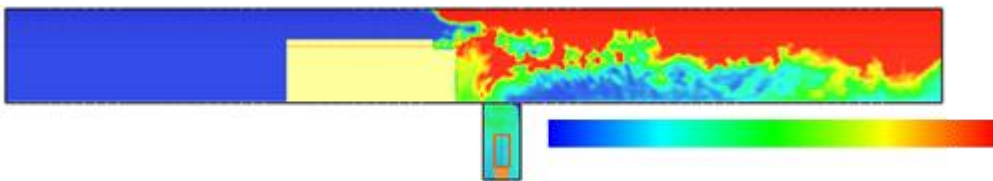
STEP4 の解析結果（換気停止）

図 1.6.2-4 「3章 火災事象に対する安全確保対策の検討」成果概要(3)

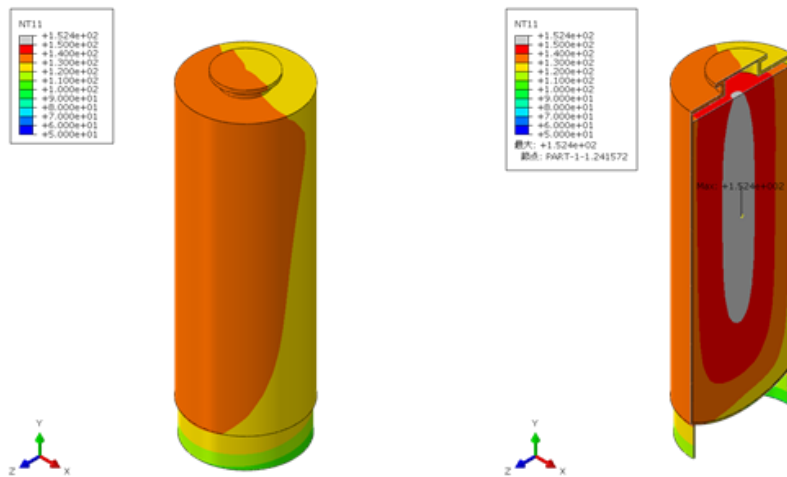
(1) 地下施設で火災発生を想定した人工バリアの影響解析



地下施設の火災を想定し、ガラス固化体、オーバーパックへの影響を検討



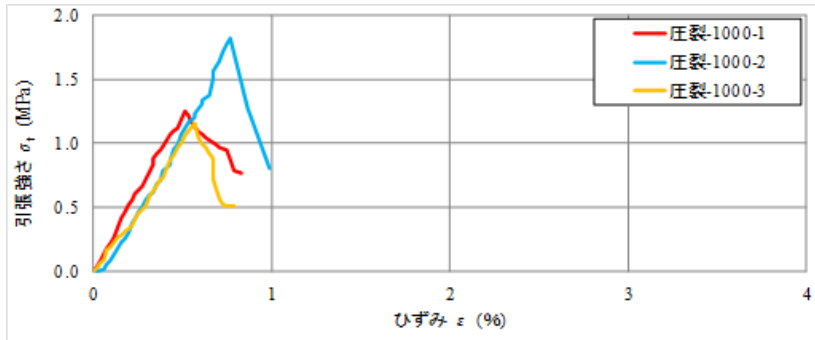
燃焼解析結果の一例 ⇒ 燃焼解析結果から伝熱応力解析の火災曲線を設定



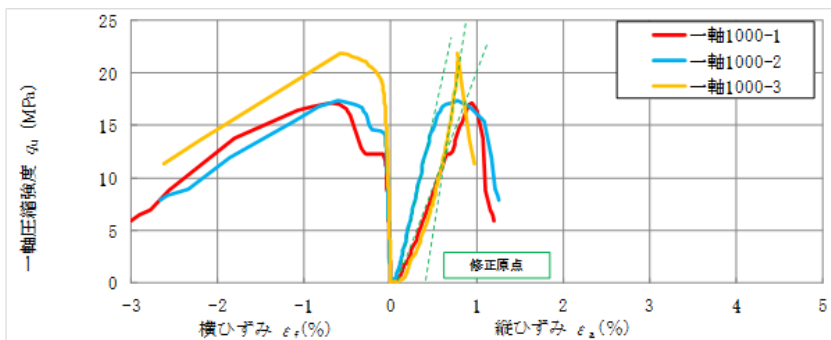
風速 2.0m/s 時で堅孔に定置直後に火災が発生し
多場合でも、オーバーパックにより 1.5℃の上昇
にとどまり、キャニスタへの影響はない。

図 1.6.2-5 「4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (1)

(2) 高温時における緩衝材の力学的特性の把握



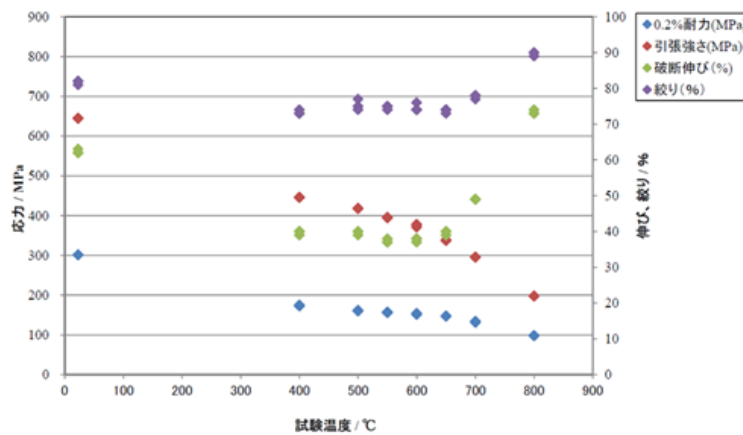
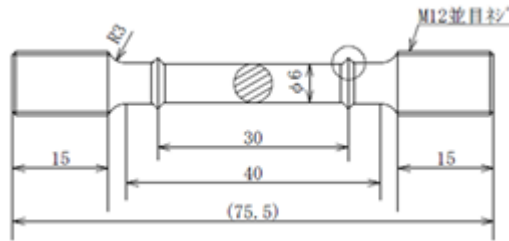
圧裂試験結果の一例



一軸圧縮試験結果の一例

(3) 高温時におけるステンレスの機械特性の把握

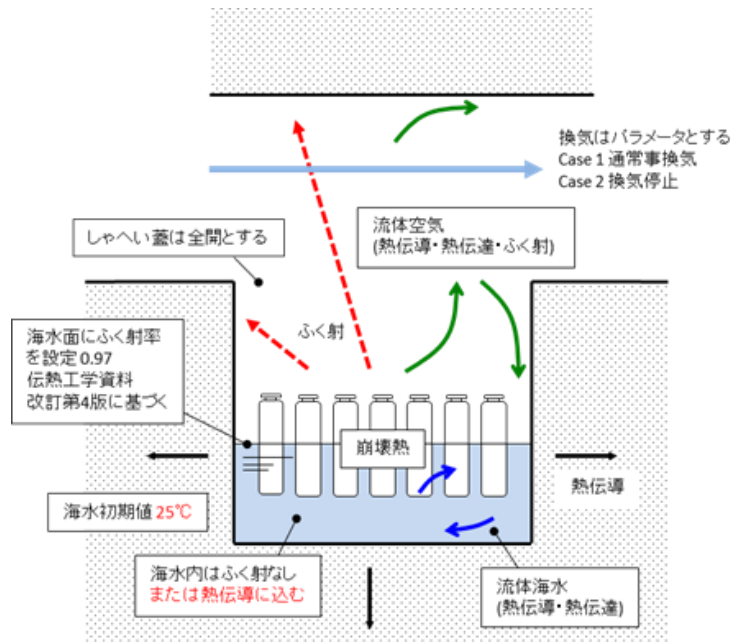
引張試験イメージ



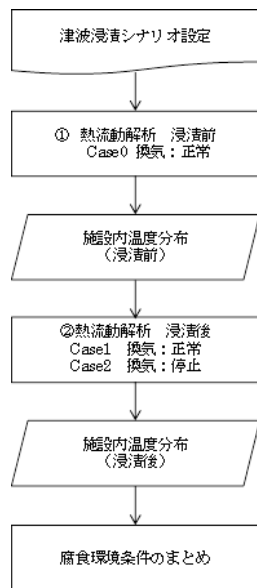
引張試験結果

図 1.6.2-6 「4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」 成果概要 (2)

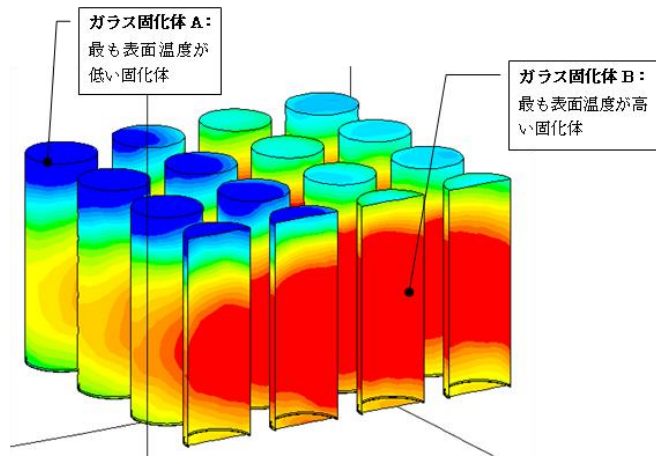
(3) 高温時におけるステンレスの機械特性の把握



浸漬後モデルの概念図



検討手順



ガラス固化体の温度解析

	SCC発生寿命				備考
	hr	月/年	hr	月/年	
鋭敏化度 R_a	固化体B		固化体A		
	液面高さ		上面高さ		
	換気なし		換気なし		
0.2	400	0.5ヶ月	400	0.5ヶ月	溶接強鋭敏化
0.1	2000	3ヶ月	4000	0.5年	高めの鋭敏化
0.05	14000	1.5年	43000	5年	鋭敏化SCC下限界

海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測

図 1.6.2-7 「4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (3)

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：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―、平成11年11月
- [2] 原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性―「処分場の概要」の説明資料―、2004年5月
- [3] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010年版）～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～2011年9月
- [4] 原子力発電環境整備機構：地層処分技術開発ニーズの整理～精密調査地区選定に向けて～、2010年6月
- [5] Forth Generation Risk Management, Jay T. Deragon, The quality Insurance Congress, 1995, Nashville
- [6] Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980
- [7] Risk Management Best Practices, Section: Cost Allocation, RIMS Pittsburgh Chapter, 1998, Pittsburgh
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター：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関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第4分冊）―処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術の開発―、平成25年3月
- [9] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成25年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第4分冊）―自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発―

第2章 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討

2.1 はじめに

本検討は、自然災害に対する操業安全を考慮した技術要件の整理を行うものである。

平成 24 年度は、地層処分施設と類似した既存の施設について文献調査を行い、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある地震・津波等を選定し、これらの起回事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出・整理した。抽出した最終的な状況に対し、応急対策、恒久対策、対策のための試験・解析を検討・整理し、「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」等を選定した。

平成 25 年度は、選定した「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」等について情報を収集し、解析および検討を行った。「施設計画技術」では、国内外の地層処分施設計画等における類似検討の文献調査を行い、それらの検討で適用されている基準等をまとめている。また、地下施設における火災に対する安全性を検討するため、気流解析と避難シミュレーションに基づいた各種検討（施設設定、パラメータ等条件設定）を行い、適用性について検討を行った。さらに、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」では、地上施設での火災を想定した人工バリアの解析を行うとともに、次年度に実施する予定の地下火災を想定した時に必要となる緩衝材の熱特性データを実験により取得した。

昨年度より開発テーマ名が「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発」に変わり、検討対象が地震・津波から自然災害全般に拡大することになった。本年度は、事業継続性の確保も考慮したうえで、地層処分施設における安全対策に対して、自然災害全般に対する安全対策（技術要件）について整理を行い、昨年度までに整理した技術開発課題、対策技術がどこに該当するのか整理し、新たな安全対策（技術要件）について検討を行った。

2.2 検討概要

2.3 節では、事業期間中の安全確保に対する実施主体の考え方を整理した上で、放射線安全と一般労働安全の確保に向けた安全対策および各安全対策を確保する上での対象となる構成要素の整理を図った。さらに、事業中の安全の確保に対する技術要件を整理した。

2.4 節では、2.3 節にて実施した技術要件の整理を受け、地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設・廃棄物管理施設の関連法令等に規定されている安全対策要求事項について、特に放射線安全に関する事項を対象に調査・整理した。また、取り扱う廃棄物の種類がガラス固化体とは異なるが、地下の施設を有する原子力関連施設として、第二種廃棄物埋設施設の関係法令について調査・整理した。さらに、最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について調査を行った。また、具体的な線量基準等について放射線業務従事者・周辺監視区域外の基準、管理区域基準、事業所内の運搬に係る基準を調査した。

2.5 節では、2.3 節にて実施した技術要件の整理を受け、地層処分施設の事業期間中の一般労働安全確保に関わる構成要素と技術要件との関係性について考察を加え、安全に係る必要技術を例示した。また、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による甚大な被害発生を契機に、原子力災害からの公衆安全に係る防災計画が原子力発電所を抱える自治体において策定されつつあることから、一般労働安全確保に資する情報として、原子力防災に係る法令等を整理するとともに、原子力防災の現状を調査・整理した。

2.6 節では、前節までの最新の知見などを踏まえて、はじめに安全対策技術の枠組みを構築している。構築した安全対策技術の枠組みは、処分システムを物理的なスケールを区分として、整理したものである。さらに、安全対策技術を選択する際に必要となる評価方法について、一般的な施設における安全性の捉え方を踏まえ、安全性を客観的に判断する方法についてコメントを加えている。また、本検討により構築した枠組みに対し、自然災害に対する安全対策技術の抽出と整理を図った。

2.3 事業期間中の安全確保と技術要件

2.3.1 事業期間中の安全確保に対する実施主体の考え方

原子力発電環境整備機構(以下、NUMO という)は、地層処分の安全性は、「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」によって達成できると考え、これらを安全の目標として設定しているところである。

事業期間中の安全性は、三つの安全確保策を確実に実施することで確保することとしている。

- ・放射線安全の確保
- ・一般労働安全の確保
- ・周辺環境の保全

NUMO は、サイト選定から事業廃止までの事業の各段階において、地域住民や作業従事者に対して放射線安全および一般労働安全の確保を徹底することとしている。また、安全確保のための対策をより適切に実施するためには、事業期間中におけるさまざまなリスクを分析し、施設設計や調査・工事計画さらには保安規定などに反映し、適切な対策を講じることが重要である。

さらに、地層処分事業においては、坑道の掘削、掘削土の仮置きなど、大規模な土木工事を伴うため、周辺環境へのさまざまな影響を回避・低減することも重要である。

以上のことを考慮して、事業の各段階における安全確保策について、基本的な対策を述べる。

放射線安全の確保については、原子炉等規制法などの関連する法律などを遵守し、地層処分施設に起因する放射線被ばくから一般公衆および作業従事者などを防護するため、十分な対策を講じることとしている。この際、国際放射線防護委員会の考え方(ALARA)に基づいて、放射線影響の低減に努めることとしている。これに対し、処分施設の設計では、地層処分施設に起因する一般公衆が受ける線量および作業従事者が受ける線量を合理的に達成可能な限り低く抑えるよう配慮し、遮へい設備、放射線管理設備など必要な設備を設け、管理区域や周辺監視区域などの区域管理を適正に行うこととしている。また、操業においても、原子力関連施設における安全確保策をもとに対策を講じることとしており、例えば、ガラス固化体の受入、検査、封入のプロセスにおいては、中間貯蔵施設における遠隔操作などの技術を適用するものとしている。一方、火災や地震などの事象に対しては、二次的な事象として設備の破損などによる放射性物質の漏えいの可能性が考えられる。火災に関しては発生防止策や影響緩和策、地震に関しては耐震設計と地震に伴う事象（津波、大規模な斜面崩壊など）が発生した場合の対策などの検討などを行うこととしている。

一般労働安全とは、放射線影響以外の災害に関して安全を確保を範囲とするものである。現地で地質調査などを開始する精密調査地区選定段階から事業の廃止に至るまでの期間が一般労働安

全を確保する対象期間となる。一般労働安全に関しては、建設工事における従来の考え方を適用し、土木工事（トンネル工事など）や鉱山の操業などの安全対策の事例をもとに対策を検討して安全を確保することとしている。地下施設における火災や爆発などの事象に関しても、坑道が長大であることなどに留意して既設の長大トンネルや鉱山の例を参考に適切な対策を講じることとしている。

地層処分の安全確保の目標には、放射性廃棄物が処分場閉鎖後の遠い将来にわたって人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすることであるが、閉鎖完了までの事業期間中において地域住民や作業従事者の安全を確保することも重要である。すなわち、NUMO が進める地層処分事業における安全確保とは、「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の二つの目標を達成することであり、もしこれらの間で対立する要件が存在する場合には、さまざまな施策を導入することによりこれらを両立させる必要がある。ただし、ここで考慮する事業期間中の安全確保は、作業従事者の安全を確保するといったいわゆる労働安全にとどまらず、建設や操業を効率的に実施するために必要な措置なども含んでいる。

工学的な対処は、設計変更や代替材料を用いることにより、その影響を低減するという対処方法である。また、操業期間中の坑道の換気や排水が母岩に及ぼす影響を低減することを目的として、坑道の掘削から廃棄物の定置・坑道の埋め戻しまでの時間を短くするという運用手法の変更による対応も考えられる。スイスの Nagra では、岩盤の力学的影響を低減するために空洞を空けておく期間をできるだけ少なくし、トンネルの掘削と廃棄体の定置を並行して実施するという方法を検討している。

2.3.2 安全対策と技術機能

閉鎖までの事業期間においては、処分施設の建設や操業などに従事する作業者はもとより、周辺地域の一般公衆の安全を確保する。この期間の安全確保の対象を「放射線安全」、「一般労働安全」、「環境保全」に分類し、その要件が検討されている。

処分施設は、地上施設、地下施設および操業システムから構成され、事業期間中の安全を確保するためのさまざまな安全対策を有することになる。地上施設は、廃棄体受入・封入・検査施設や人工バリアの製造施設などから構成され、地下施設は、アクセス坑道、主要坑道、処分坑道などの坑道群から構成される。一方、操業システムは、廃棄体の受け入れと人工バリアの施工にかかわる一連の作業、設備から構成される。操業システムを地上・地下施設の一部と捉え、施設ごとに技術要件を整理することもできるが、操業にかかわる作業の相互の関係や、工程計画の連続性、および操業区画の設定などの観点から、廃棄体の取り扱いに関する作業を操業システムとして、総合的に安全対策を設定している。

(1) 放射線安全の確保に向けた安全対策

1) 放射線安全に対する安全対策の基本概念

操業期間中は、輸送されてきた廃棄体の受け入れ・検査の工程、容器封入・検査の工程、廃棄体の搬送定置作業の工程などにおいて、放射線安全上の対策を講じることになる。潜在的な危険性としては、廃棄物からの外部放射線および廃棄物から漏えいした放射性物質の摂取による地域住民および作業従事者の被ばくであり、そのための安全対策を講じることになる。放射線防護の考え方は、閉鎖までの操業期間中において放射性物質を限定された区域に閉じ込めや施設外への放出を防止する「操業時閉じ込め」と廃棄物からの放射線による地域住民および作業従事者の被ばくを合理的に低減する「放射線遮へい」としている。

また、これらの放射線安全の対策に加え、操業期間中の放射線安全を確保する「放射線被ばく管理」を併せて実施する（表 2.3.2-1）。

表 2.3.2-1 放射線安全に関する基本的な安全対策

安全対策		説明
操業時 閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	操業期間中において廃棄体からの放射性核種の漏えいを防止すること
	施設外への放射性物質の過大な放出の防止	操業期間中において放射性物質取扱施設からの放射性核種の過大な放出を防止すること（廃棄体受入時）
放射線 遮へい	放射線の遮へい	廃棄体からの外部放射線による空間線量率を遮へいにより低減すること
放射線 被ばく管理	放射線管理区域の設定	放射線管理区域を設定すること
	モニタリング・被ばく管理	作業従事者の被ばく管理、管理区域および敷地周辺において放射線モニタリングを実施すること

地層処分対象の廃棄物は、廃棄体受入時に表面汚染の有無などを確認し、廃棄体容器の密閉性（閉じ込め）が確認されたものだけを受け入れることになる。そのため、通常時には放射性物質の吸入・経口摂取のリスクを排除することができる。一方で、高い放射能を有していることから、確実な遮へい対策の実施、管理区域の設定、遠隔操作などによる放射線取り扱い作業時間の短縮などにより作業従事者の被ばくのリスクを低減する。また、操業期間中は、作業従事者の被ばく管理を実施し、施設内はもちろんのこと、敷地の境界などの野外においても放射線モニタリングを実施することとしている。

2) 異常事象に対する安全対策の考え方

NUMO [1]は、「異常事象」について、通常の操業状態から逸脱させるような何らかの要因が施設もしくは廃棄体に加えられた事象と定義している。例えば、地上、地下施設では廃棄体の落下・転倒や衝突などを挙げている。また、「事故」について、異常が拡大して施設から外に放射性物質が放出される事象と定義している。

たとえば、地震、火災、津波、電源喪失などの異常事象の要因を起点として、操業中に廃棄体が装置から逸脱し落下、転倒、あるいは搬送装置の逸走などにより施設壁面に衝突するような異常事象が発生し、さらに廃棄体が損傷するなどして漏えいした放射性物質が空气中に放出されるという過程を経るものである。

その場合の異常事象に対する安全対策の考え方は、廃棄体の落下・転倒・衝突などの異常事象の発生防止対策を要因ごとに検討するとともに、異常が発生した場合に備えて放射性物質の飛散などを防ぐためのフィルタなどの除染機能を有した機器を含む換気系設備などによる異常拡大防止対策を施した上で、万が一に事故にまで発展した場合は、除染などの事故の影響緩和策を実施することを基本としている。

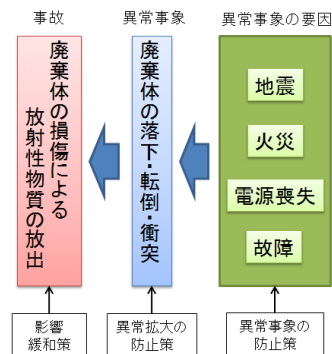


図 2.3.2-1 地層処分の放射線防護上の事故と異常事象の要因の関係

(出典：NUMO、2011) [1]

(2) 一般労働安全の確保に向けた安全対策

1) 一般労働安全に対する安全対策の基本概念

一般労働安全とは、放射性物質の取り扱いを伴わない作業時の安全と定義し、一般労働安全を確保する期間は、現地で地質調査などを開始する精密調査地区選定段階から事業の廃止に至る閉鎖までの期間が対象となる。一般労働安全の安全対策は、労働災害対策と作業環境対策を設定している。

2) 労働災害に対する安全対策

労働災害対策においては、自然災害（地震、津波、土砂崩れなどを要因とする労働災害）および人的災害（坑道内の落盤、水没、火災、爆発、酸素不足などを要因とする労働災害）に対する安全対策を講じることとしている。施設の基本的な安全対策としては、以下の内容があげられる。

- ・災害の発生・拡大を防止する対策
- ・災害時に労働者の人命が確保されるよう避難経路の確保

たとえば、災害の発生・拡大の防止については、無支保での坑道掘削が可能な場合でも落石による災害などを防止するため、坑壁を点検し確実に浮石を落とす。突発的な出水対策としては、十分な排水能力をもつ排水設備を準備する。また、火災や爆発防止対策としては、可燃性ガスが発生する場合には、坑道内への火気の持ち込み禁止措置や自動警報装置の設置を行うことが考えられる。

また、発生危険が予想される場合、あるいは発生した場合には、直ちに作業を中止し、労働従事者を安全な場所に避難させる。避難を確実にを行うため、サイレン、非常ベルなどの警報設備や電話等の通話装置を適切に配置、あるいは携帯させる。これらの避難のための設備や装置は、確実に稼動することを毎日点検する。また、所定の箇所に避難所をもうけ、呼吸用保護具、食料・水などを配備することが考えられる。

3) 作業環境に対する安全対策

地下あるいは地上施設の環境（温度、湿度、酸素濃度、粉じん濃度、ラドン濃度、照度、騒音レベルなど）では、これらの環境が労働に適するように改善または維持することを作業環境対策の安全対策として設定している。

たとえば、作業環境の安全対策として、排気ガスや粉じんにより視界が著しく制限される状態にある時には、換気量を増やし、水をまくなど、作業安全を行うために必要な視界を保持するための措置を講ずる。坑道内には適切な照明を設置する。坑道内温度は、適切に管理するとともに、定期的に測定することとしている。

2.3.3 安全対策と構成要素の関係

基本的な安全対策を踏まえ、地層処分施設へ適用した場合の安全対策を表 2.3.3-1 に示す。

「廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止」に関しては、放射性物質を密封する機能、地震、故障などの際に異常事象の発生防止の機能、廃棄体への衝撃を緩和する機能、施設からの放射性物質の放出防止機能があげられる。

「放射線遮へい」については、遠隔操作による廃棄体の取り扱いを基本とし、遮へい機能を持たせることで、合理的に廃棄体からの放射線を遮へいする。

「一般労働安全のうち作業環境」として、温度、湿度、酸素濃度、粉じん濃度などの管理の機能を設け、サイトの環境に応じて作業環境の維持のための機能を追加し、災害の発生・拡大防止や避難経路の確保を考慮することとしている。

表 2.3.3-1 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係

(出典：NUMO、2011) [1]

基本的な安全対策		安全対策	構成要素	
放射線安全	作業時	廃棄体から放射性物質の漏えいの防止	廃棄体の密封	廃棄体
			搬送時の落下・転倒・衝突時の廃棄体への衝撃の緩和	オーバーパック 廃棄体搬送機器・設備
	閉じ込め	施設からの放射性物質の過大な放出の防止	負圧管理および遠隔操作	廃棄体受入建屋
	放射線遮へい		遮へい壁による放射線の遮へい	廃棄体受入建屋 廃棄体定置機器・設備
			搬送容器による放射線の遮へい	廃棄体搬送機器・設備
	放射線被ばく管理	管理区域の設定	放射線管理区域の設定	廃棄体受入・封入・検査施設 地下施設の一部
		被ばく管理・モニタリング	作業従事者の被ばく管理および放射線取扱作業従事時間の制限、放射線モニタリングの実施	管理区域内（地上、地下）
モニタリングポストの設置			施設屋外	
一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性の確保	地下施設	
		換気経路の確保	地上施設	
		排水対策	地下施設	
	災害の発生・拡大の防止	防火対策		
		その他の災害防止対策		
災害時の避難経路の確保	避難経路の確保			

2.3.4 事業期間中の安全に対する技術要件

(1) 地上施設の技術要件

地上施設では、ガラス固化体の受け入れ、地下への搬送、処分するための準備、地下施設の作業支援などを行うものである。廃棄体受入・封入・検査施設、緩衝材の成型、加工に必要な施設に加え、排気・排水処理施設、掘削土置き場など地下施設の建設、操業に必要となる一連の施設で構成される。さらにサイトによっては、ガラス固化体を受け入れるための港湾施設や専用道路も処分場の敷地内に設置する場合も考えられる。地上施設を構成する各施設の機能に対応して技術要件を考慮することになる。

一般的な施設に対する技術要件に加えて、放射線防護対策と放射線被ばく管理を適切に行うことを技術要件としている。理由としては、輸送中の廃棄体の振動などにより廃棄体の破損の可能性を考慮すると、廃棄体などにより汚染する可能性があるためである。その他の地上施設については、放射性物質を取り扱わないことから基本的に管理区域を設定する必要がない。

(2) 地下施設の技術要件

地下施設は、地上施設から廃棄体や建設資材などを搬送するためのアクセス坑道（立坑、斜坑）や連絡坑道、廃棄体を定置するための処分坑道（処分孔）などで構成される。

表 2.3.4-1 地下施設の技術要件

(出典：NUMO、2011) [1]

坑道	技術要件
アクセス坑道 連絡坑道	<ul style="list-style-type: none"> ・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖に必要な空間が確保できること ・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
処分坑道 (処分孔)	<ul style="list-style-type: none"> ・安全に建設・操業・閉鎖が実施できること ・空洞の力学的安定性が確保されること ・建設に必要な空間が確保できること ・建設関連の物流経路が確保できること ・地理、地形、地質等の設計上の前提となる条件を満たすこと ・操業に必要な空間が確保できること ・廃棄体を含む操業関連の物流経路が確保できること ・閉鎖後長期安全性を有すること ・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 ・長期的に健全であること ・人工バリアが安定するように埋め戻されること

1) 地下施設レイアウト設計の技術要件

地下施設レイアウト設計に対する技術要件は、候補母岩における地下施設建設可能領域内へ廃棄体を適切に配置できることが挙げられる。このため、地下施設建設可能領域での処分パネルの規模や配置などを検討するために、対象とする岩盤の規模や空間的な広がり、割れ目の位置や長さ、幅、方向などの空間的な分布を考慮して地下施設レイアウトが設定されることになる。

一般労働安全としては、施設内の作業従事者の安全を確保することを技術要件とし、空洞の力学的安定性確保の観点から、主たる地圧の方向（最大主応力の方向）と坑道の方向の関係を考慮する。また、酸素濃度、温度、湿度などの管理においては、平常時や何らかの異常時においても、換気経路を確保することとし、かつ、風速が過大とならないよう、経路を設計する。また、火災・事故防止対策と緊急時の避難経路の確保についても、地下施設レイアウトに関する技術要件とする。また、施工実現性の観点から、工期内に建設、操業、閉鎖ができること、物流経路を確保すること、操業スケジュール変更に対応できることなどを考慮して坑道を適切に配置することになる。

表 2.3.4-2 地下施設レイアウトに対する安全機能と技術要件

分類		安全機能	技術要件
一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性の確保	主応力方向や割れ目に対して空洞の力学的安定性が確保されること
		酸素濃度の管理	換気経路を確保し、かつ、坑道内の風速が過大とならないこと ※濃度が高くならないように換気の確保を行う
		温度・湿度の管理	
		有毒ガス、ラドン等の濃度管理	
		湧水の管理	湧水の排水経路を確保すること
	災害の発生・拡大防止	防火対策等の災害防止対策の設置	火災等の防災設備を設置すること
	災害時の避難経路確保	避難経路の確保	緊急時の避難経路を確保すること

2) 作業にかかわる技術要件

作業環境の維持では、必要に応じて排水設備、換気設備などを設置するための空間が必要となる。各坑道の利用目的にあわせた役割により、各坑道が所要の内空断面（形状、寸法、断面積）を有していることと、建設・操業・閉鎖の各作業段階を通じて力学的安定性が確保されていることが技術要件となっている。

放射線安全では、廃棄体の取り扱いに関する廃棄体からの放射性物質の放出防止、放射線遮へい、放射線管理の技術要件が設定されている。例えば、操業期間中の放射線管理区域の設定や遠隔操作により廃棄体の定置や人工バリアの施工を実施することなどが技術要件となっている。

表 2.3.4-3 坑道設計に対する安全機能と技術要件

安全機能		技術要件	
一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性	空洞の力学的安定性を確保すること
		換気路	ダクトなど、換気設備の設置が可能であること 換気に十分な面積を有していること
		給水路	給水のための設備の設置が可能であること
		排水路	排水路および排水のための設備の設置が可能であること
		給電・通信路	給電・通信のための設備の設置が可能であること
放射線安全	廃棄体からの放射性物質の放出防止	廃棄体の破壊の防止 [全工程] ・廃棄体が密封されていること ・フェールセーフ機構により異常時に廃棄体の破損を防止すること ・インターロック機構により、誤操作による廃棄体の破損を防止すること	
	放射線遮へい	搬送容器による放射線の遮へい [搬送工程] ・搬送容器により放射線を遮へいすること [受入・封入および定置工程] ・遠隔操作による作業を基本として、操業設備に遮へい壁を設けること	
	放射線管理	管理区域の設定 [全工程] ・基準となる放射線量を超える区域に対して、管理区域を設定すること	

2.4 放射線安全の確保に向けた安全対策の動向

2.3 にて実施した技術要件の整理を受け、国内類似原子力関連施設の放射線安全の確保に向けた安全対策技術の動向を調査し、地層処分施設の事業期間中の安全確保に資する情報として整理する。

2.4.1 調査対象とする類似原子力関連施設

類似の原子力関連施設として、地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設・廃棄物管理施設の関連法令等に規定されている安全対策要求事項について、特に放射線安全に関する事項を対象に調査・整理する。また、取り扱う廃棄物の種類はガラス固化体とは異なるが、地下の施設を有する原子力関連施設として、第二種廃棄物埋設施設の関係法令等も調査対象とする。

また、最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について記述する。

2.4.2 原子力関連施設における安全対策要求事項と放射線安全上の考慮事項

(1) 再処理施設・廃棄物管理施設

ガラス固化体を扱う国内の既設の施設として、再処理施設（ガラス固化施設、ガラス固化体貯蔵施設を含む）、廃棄物管理施設（ガラス固化体受入、貯蔵施設）がある。これらの施設は、主に再処理施設安全審査指針[2]に基づき安全審査を経て設計、建設、操業されている。現在は新規制基準に基づき改めて規制当局による適合性の審査が行われているが、放射線安全確保の基本的な考え方は再処理施設安全審査指針と変わらないことから、同指針を中心に調査する。

1) 再処理施設安全審査指針

再処理施設安全審査指針（最新改訂：平成 22 年 12 月 20 日版より）[2]には、再処理施設の事業許可申請段階で考慮すべき安全上の要求事項（基本的立地条件、遮へい・閉じ込め、臨界、火災、地震その他の自然現象の考慮など）が記載されている。この指針に示されている主な安全上の要求事項（指針項目）について表 2.4.2-1 に整理する。

再処理施設安全審査指針は原子力関連施設のための安全審査において重要と考えられる基本事項をまとめたものであるから、全ての指針は放射線安全の確保を目的としたものである。

表 2.4.2-1 再処理施設安全審査指針に示される主な安全上の要求事項

指針項目	概要
指針 1. 基本的立地条件	事故誘因排除、災害拡大防止の観点より自然環境、社会環境に係る事象を検討
指針 2. 平常時の線量評価	平常時、放射性物質の放出等で一般公衆線量が線量限度を超えないこと等の評価
指針 3. 安全評価	多重防護設計の適切さを確認の為、設計基準事象および立地評価事故の評価を行う
指針 4. 閉じ込めの機能	放射性物質を限定された区域に閉じ込める機能
指針 5. 放射線遮蔽	直接γ線・スカイシャインγ線による一般公衆の線量低減、放射線業務従事者への遮蔽
指針 6. 放射線被ばく管理	作業環境における放射線被ばく管理、業務従事者個人被ばく管理、管理区域区分
指針 7. 放射性廃棄物の放出管理	気体、液体廃棄物の放出管理
指針 8. 貯蔵等に対する考慮	貯蔵容量、冷却、一般公衆の線量低減のための遮蔽機能等
指針 9. 放射線監視	線量率、空气中放射性物質濃度等の測定（事故時も）、放出放射性物質の測定算出
指針 10,11 単一/複数エントリ臨界安全	技術的に見て想定されるいかなる場合でも適切な設計管理により臨界を防止
指針 12. 臨界事故に対する考慮	臨界事故が発生した場合の適切な対策（警報、未臨界措置）
指針 13. 地震に対する考慮	十分な強度・剛性及び耐力を有する構造、安定地盤への支持。
指針 14. 地震以外の自然現象考慮	津波、地滑り、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等および異種自然現象の重畳
指針 15. 火災・爆発に対する考慮	不燃難燃性材料の使用、着火源排除、消火設備の設置、発生時の閉じ込め機能
指針 16. 電源喪失に対する考慮	安全上重要な施設の安全機能確保のための外部電源系統、非常用所内電源系統
指針 17. 放射性物質移動への考慮	工程内・工程間移動に対する漏えい・臨界防止と遮蔽対策
指針 18. 事故時に対する考慮	安全対策、事故対策（制御室、放射線計測・防護具、照明、避難通路、緊急時対策所など）
指針 20. 準拠規格及び基準	炉規制法、建築基準法、消防法、高圧ガス取締法等および規格・基準への適合性
指針 21. 検査、修理等の考慮	安全上重要な施設の機能確認・維持のための試験検査、保守修理

: 一般公衆 : 一般公衆及び放射線作業従事者

指針 2、3 は、一般公衆を対象とした平常時及び設計基準事象（異常事象）における線量評価により、施設の設計、運転方針、立地条件あるいは一般公衆との離間距離（敷地境界の設定等）等の放射線安全対策の妥当性を評価することについて定めたものである。

指針 4～9、17、18 は放射線安全を確保するための対策系について定めており、安全を確保すべき対象者は一般公衆及び放射線作業従事者である。これらの安全対策系の指針とその解説を以下に抜粋する。

「指針 4.閉じ込めの機能」の内容を以下に示す。

指針 4. 閉じ込めの機能

再処理施設は、以下の対策を講ずることにより、放射性物質を限定された区域に閉じ込める機能を有する設計であること。

1. 放射性物質を収納する系統及び機器は、放射性物質が漏洩し難い構造であること。また、使用する化学製品等に対して適切な腐食対策が講じられていること。
2. プルトニウムを含む溶液、粉末及び高レベル放射性液体廃棄物を内蔵する系統及び機器は、原則として、セル等に収納されること。セル等は、液体状の放射性物質が漏えいした場合に、その漏えいを検知し、漏えいの拡大を防止するとともに漏えいした放射性物質を安全に移送及び処理することができる設計であること。
3. プルトニウムを含む溶液及び高レベル放射性液体廃棄物を内蔵する系統及び機器、ウランを非密封で大量に取り扱う系統及び機器、セル等並びにこれらを収納する構築物は、以下の事項を満足する換気系統を有すること。
 - (1). 換気系統は、放射性物質が漏えいし難く、かつ逆流し難い構造であること。
 - (2). 換気系統により、プルトニウムを含む溶液及び高レベル放射性液体廃棄物を内蔵する系統及び機器、ウランを非密封で大量に取り扱う系統及び機器、セル等並びにこれらを収納する構築物は、原則として、常時負圧に保たれていること。また、それぞれの気圧は、原則として、構築物、セル等、系統及び機器の準に低くすること。
 - (3). 換気系統には、フィルタ、洗浄塔等の放射性物質を除去するための系統及び機器が適切に設けられていること。

<解説>

- ・「放射性物質を収納する系統及び機器」とは、気体状、液体状及び固体状の全ての性状の放射性物質を収納する系統及び機器をいう。
- ・「放射性物質が漏えいし難い構造」とは、放射性物質が収納されている系統及び機器から、周辺環境又は雰囲気中に漏えいし難い構造をいい、放射性気体廃棄物又は放射性液体廃棄物を計画的に放出する場合を含まない。
- ・「セル等」とは、コンクリートセル、グローブボックス及びこれらと同等の閉じ込めの機能を有する施設をいう。
- ・「換気系統」には、給気口のフィルタ、逆止弁、ダクト、洗浄塔、フィルタ、排風機、主排気筒等を含む。
- ・「放射性物質を除去するための系統及び機器が適切に設けられている」とは、次の原則が満足されるよう、換気系統が設計されていることをいう。

平常時においては、一般公衆の線量が合理的に達成できる限り低くなるように、放射性物質を含む気体中の放射性物質の濃度をフィルタ、洗浄塔等によって低減させた後、十分な拡散効果を有する排気筒から放出すること。このため、放射性物質を含む

気体がこれらの低減効果を持つ系統及び機器を経ずに環境中へ放出されることがないように、負圧維持、換気系統外への漏洩防止及び逆流防止の機能が確保されている必要がある。ただし、核種によって、その放出に伴う一般公衆の線量が、合理的に達成できる限り低いと判断される場合においては、この限りではない。また、同様に放出による一般公衆の線量が合理的に達成できる限り低いと判断される場合においては、主排気筒のみならず、局所的な排気筒からの放出も許容される。

設計基準事象想定時においても可能な限り前述の負圧維持、換気系統外への漏洩防止及び逆流防止の機能が確保されるよう設計されている必要がある。ただし、設計基準事象想定時において、一部の換気系統について、これらの機能が損なわれることがあっても、再処理施設全体としてみたときには、これらの機能が維持され、一般公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えないよう、十分な気体の閉じ込めの機能が確保されていなければならない。

「指針 5.放射線遮蔽」の内容を以下に示す。

指針 5. 放射線遮蔽

1. 再処理施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による一般公衆の線量が十分に低くなるように、再処理施設に適切な遮蔽を設けること。
2. 放射線業務従事者が立ち入る場所については、遮蔽設計の基準となる線量率を施設内の区分に応じ適切に定めること。また、開口部又は配管等の貫通部があるものに対しては、必要に応じ、放射線漏洩防止措置が講じられていること。
3. 遮蔽設計に当たっては、遮蔽計算に用いられる線減、遮蔽体の形状及び材質、計算誤差等を考慮し、十分な安全裕度を見込むこと。

<解説>

- ・直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による一般公衆の線量が「十分に低い」とは、平常運転時においては、合理的に達成できる限り低いことを、設計基準自称を想定した場合においては、一般公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えないことをいう。
- ・遮蔽設計の基準となる線量率は、放射線業務従事者の立入時間等を考慮して適切に定めること。この際、放射線業務従事者の線量の低減にも留意する必要がある。

「指針 6.放射線被ばく管理」の内容を以下に示す。

指針 6. 放射線被ばく管理

1. 業環境における放射線被ばく管理

- (1). 放射線業務従事者の作業環境を監視、管理するため、線量率、空気中の放射性物質濃度等の監視系統及び測定機器並びに線量率の異常な上昇に対する警報系統を設けること。
- (2). 上記監視系統及び警報系統からの主要な情報は、適切な場所において集中して監視できる設計であること。

2. 放射線業務従事者の個人被ばく管理

放射線業務従事者の個人被ばく管理のため、適切な外部被ばく管理機器及び内部被ばく管理機器を備えること。

3. 管理区域の区分

再処理施設の管理区域は、線量率、空気中の放射性物質濃度及び表面汚染密度の程度に応じて適切に区分し、適切な出入管理等を行える設計であること。

「指針 7.放射性廃棄物の放出管理」の内容を以下に示す。

指針 7. 放射性廃棄物の放出管理

1. 放射性気体廃棄物の放出管理

- (1). 再処理施設で発生する放射性気体廃棄物については、周辺環境に放出される排気中の放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低くするために、必要に応じて洗浄、ろ過等の適切な処理を行える設計であること。
- (2). 放出される放射性気体廃棄物は、十分な拡散効果を有する排気筒から放出管理が行える廃棄系統を通じて放出される設計であること。

2. 放射性液体廃棄物の放出管理

- (1). 再処理施設で発生する放射性液体廃棄物については、海洋に放出される排水中の放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低くするために、必要に応じてろ過、蒸発、イオン交換、凝集沈殿等の適切な処理が行える設計であること。
- (2). 放出される放射性液体廃棄物は、十分な拡散効果を有する放出口から放出管理が行える排水設備を通じて放出される設計であること。

「指針 8.貯蔵等に対する考慮」の内容及び解説を以下に示す。

指針 8. 貯蔵等に対する考慮

再処理施設における使用済燃料の貯蔵、製品貯蔵、放射性廃棄物の保管廃棄等の放射性物質の貯蔵等は、適切な貯蔵容量及び冷却の機能を有するとともに一般公衆の線量が十分に低くなるように、適切な遮蔽等の機能を有する施設で行う設計であること。

<解説>

- ・一般公衆の線量が「十分に低い」とは、平常運転時においては、合理的に達成できる限り低いことを、設計基準事象を想定した場合においては、一般公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えないことをいう。

「指針 9.放射線監視」の内容及び解説を以下に示す。

指針 9. 放射線監視

1. 再処理施設の主要な箇所においては、線量率、空気中の放射性物質濃度等の測定を行える設計であること。
2. 再処理施設から放出される放射性気体廃棄物及び放射性液体廃棄物については、その放出状況、放射性物質の物理的あるいは化学的性状、放出管理の方法等を勘案し、適切な測定対象核種、測定下限濃度及び計測頻度を定め、適切な試料採取方法及び計測方法により、施設から環境に放出される放射性物質の濃度及び量の測定又は算出が可能な設計であること。
3. 環境における線量率、放射性物質濃度等を監視するため、適切な環境放射線モニタリングが実施できる設計であること。
4. 上記 1、2 及び 3 に述べた施設内及び環境における放射線監視については、事故時においても線量率、放射性物質濃度等に関する情報を得られるような設計であること。

<解説>

- ・具体的な環境放射線モニタリング計画の策定については、「環境放射線モニタリングに関する指針」を参考とすること。
- ・環境放射線モニタリングの具体的な目標は、次のとおりとすること。
 - (1).一般公衆の線量を推定・評価すること。
 - (2).環境における放射性物質の蓄積傾向を把握すること。
 - (3).予期しない放射性物質の放出による周辺環境への影響の判断に資すること。

上記の解説中の「環境放射線モニタリングに関する指針」[3]においては、環境放射線モニタリングの計画、測定、結果の評価等を行うにあたっての平常時、緊急時の基本的考え方がまとめられている。

「指針 17.放射性物質の移動に対する考慮」の内容を以下に示す。

指針 17. 放射性物質の移動に対する考慮

再処理施設においては、放射性物質の工程内及び工程間の移動に対して、移動する放射性物質の形態、形状に応じて漏洩防止、臨界防止、放射線遮蔽のための措置等適切な対策が講じられていること。

<解説>

- ・「適切な対策」には、設計上直接環境に放出することが想定されていない濃度の放射性物質を含む溶液が、系統及び機器の単一故障又は誤動作若しくは運転員の単一誤操作を想定しても、直接環境へ放出されることのない設計となっていることを含む。

「指針 18.」の内容を以下に示す。

指針 18. 事故時に対する考慮

再処理施設においては、他の指針に述べる各種の安全対策の他、従事者による適切な事故対策が可能となるよう、事故時に対応した以下の対策が講じられていること。

1. 制御室等は、事故時にも、従事者が接近し又は留まり、事故対策操作が可能であるように、不燃設計、換気設計、遮蔽設計等がなされているとともに、主要な警報システムを含む計測システム及び通信システムが設けられていること。
2. 適切な放射線計測器、放射線防護具等が確保されていること。
3. 再処理施設は、通常の照明用電源喪失時においても、その機能を失うことのない照明を整備し、かつ、単純、明確、永続性のある標識のついた安全避難通路を有する設計であること。
4. 緊急時において、敷地内で制御室等以外の適切な場所から必要な対策を講ずることができる緊急時対策所が設置可能な設計であること。

<解説>

- ・「制御室等」とは、平常運転時において、従事者が施設の運転又は工程等の管理を行い、事故時においては、従事者が適切な事故対策を講ずる場所であり、1箇所である必要はない。
- ・緊急対策所は、次の機能を有する設計であること。
 - (1) 緊急時において関係要員が必要な期間にわたり安全に滞在できる設計であること。
 - (2) 事故状態を正確かつ速やかに把握するために必要な環境及び再処理施設の情報が収集できること。
 - (3) 再処理施設内外の関連個所との連絡通信のため、少なくとも1つの専用回路を含む多重の連絡回線を有することができる設計であること。
- ・緊急時対策所の設置は、TMI-2号炉の事故の際に、制御室に人が集まり混乱をきたしたとされることに鑑みて導入された。緊急時における「必要な対策」とは、事故時における再処理施設外との連絡等をいう。

2) 再処理施設安全審査指針から新規制基準への変更点

再処理施設安全審査指針の考え方を基本とし、再処理施設に関する新規制基準として「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」[4]、廃棄物管理施設に関する新規制基準として「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」[5]等が制定された。新規制基準の例として表 2.4.2-2 に「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成を示す。

ほぼ全ての項目について、再処理施設安全指針よりも評価すべき事象や対策事項が增強され、「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」[6]に具体的な設備要求機能や評価手法が明示されている。また、安全上重要な施設については、重大事故発生時にも対処可能な施設としての設計要求が成されている。

表 2.4.2-2 「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成と再処理施設安全審査指針との関係

新規制基準		再処理施設安全審査指針	新規制基準		再処理施設安全審査指針
条	見出し	(主な関連指針)	条	見出し	(主な関連指針)
第一章 総則			第二十四条	監視設備	指針 9
第一条	定義	(用語の定義)	第二十五条	保安電源設備	指針 16
第二章 安全機能を有する施設			第二十六条	緊急時対策所	指針 18
第二条	核燃料物質の臨界防止	指針 10、11、12	第二十七条	通信連絡設備	— (独立強化)
第三条	遮蔽等	指針 5	第三章 重大事故等対処施設		
第四条	閉じ込めの機能	指針 4	第二十八条	重大事故等の拡大の防止等	指針 3
第五条	火災等による損傷の防止	指針 15	第二十九条	火災等による損傷の防止	指針 15
第六条	安全機能を有する施設の地盤	指針 1	第三十条	重大事故等対処施設の地盤	— (追加)
第七条	地震による損傷の防止	指針 13	第三十一条	地震による損傷の防止	指針 13
第八条	津波による損傷の防止	指針 14	第三十二条	津波による損傷の防止	指針 14
第九条	外部からの衝撃による損傷の防止	指針 14	第三十三条	重大事故等対処設備	— (追加)
第十条	再処理施設への人の不法な侵入等の防止	— (追加)	第三十四条	臨界事故の拡大を防止するための設備	指針 10、11、12
第十一条	溢水による損傷の防止	— (追加)	第三十五条	冷却機能の喪失による蒸発乾固に対処するための設備	— (追加)
第十二条	化学薬品の漏えいによる損傷の防止	— (独立強化)	第三十六条	放射線分解により発生する水素による爆発に対処するための設備	— (追加)
第十三条	誤操作の防止	— (独立強化)	第三十七条	有機溶媒等による火災又は爆発に対処するための設備	— (独立強化)
第十四条	安全避難通路等	指針 18	第三十八条	使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	— (独立強化)
第十五条	安全機能を有する施設	指針 18、22	第三十九条	放射性物質の漏えいに対処するための設備	— (独立強化)
第十六条	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	指針 3	第四十条	工場等外への放射性物質等の放出を抑制するための設備	— (追加)
第十七条	使用済燃料の貯蔵施設等	指針 8	第四十一条	重大事故等への対処に必要な水の供給設備	— (追加)
第十八条	計測制御系統施設	— (独立強化)	第四十二条	電源設備	— (追加)
第十九条	安全保護回路	— (独立強化)	第四十三条	計装設備	— (独立強化)
第二十条	制御室等	指針 9、18	第四十四条	制御室	— (独立強化)
第二十一条	廃棄施設	指針 7	第四十五条	監視測定設備	— (独立強化)
第二十二条	保管廃棄施設	指針 8	第四十六条	緊急時対策所	— (独立強化)
第二十三条	放射線管理施設	指針 6	第四十七条	通信連絡を行うために必要な設備	— (追加)

「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成を表 2.4.2-3 に示す。

廃棄物管理施設は、輸送キャスクで運ばれたガラス固化体の受け入れ、検査、貯蔵設備等で構成されており、再処理施設よりも地層処分場の地上施設に近い。取り扱う放射性物質は主に固体の廃棄物（ガラス固化体）であることから、再処理施設の新規制基準とは異なり、扱う放射性物質に起因する爆発事象や液体系の漏洩事象（溢水等）については同規則には規定されていない。

表 2.4.2-3 「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成

条	見出し
第一条	定義
第二条	遮蔽等
第三条	閉じ込めの機能
第四条	火災等による損傷の防止
第五条	廃棄物管理施設の地盤
第六条	地震による損傷の防止
第七条	津波による損傷の防止
第八条	外部からの衝撃による損傷の防止
第九条	廃棄物管理施設への人の不法な侵入等の防止
第十条	核燃料物質の臨界防止
第十一条	安全機能を有する施設
第十二条	設計最大評価事故時の放射線障害の防止
第十三条	処理施設
第十四条	管理施設
第十五条	計測制御系統施設
第十六条	放射線管理施設
第十七条	廃棄施設
第十八条	予備電源
第十九条	通信連絡設備等

放射線安全に直接的に関連する事項

(2) 第二種廃棄物埋設施設

ガラス固化体ではないが、放射性固体廃棄物を地中に埋設する施設である第二種廃棄物埋設施設の放射線安全の考え方は、地下施設を有する地層処分施設（第一種廃棄物埋設施設）の安全の考え方の参考となり得る。関連する指針として、ここでは「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」[7]を調査した。また、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準である、「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」[8]についても調査した。

1) 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方

「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」[7]において、適用対象となる埋設方法は、①余裕深度処分、②ピット処分、③トレンチ処分である。このうち、ピット

処分は浅地中（数 m～10m 程度）、余裕深度処分は 50m 以深の地下に人工的な構造物を構築し、そこに廃棄物を埋設することから、地層処分の地下施設形態に近い。従って、余裕深度処分とピット処分に関わる考え方を調査対象とする。

また、これらの埋設事業は、その管理を段階的に軽減して最終的な処分とするという概念（管理型処分）であり、安全審査の基本的考え方は「管理期間内」と「管理期間終了後」に分けて整理されている。本調査では、隔離型処分である地層処分の操業中の安全対策に資するために関連動向を整理することが目的であるが、「管理期間内」の段階における安全の考え方が地層処分施設における「操業期間中」に相当すると考えられるため、これを対象に調査する。埋設方法及び各段階を表 2.4.2-4 にまとめる。なお、第二種廃棄物埋設事業における埋戻し後の段階（放射性物質の漏出・移行を監視する段階）は、ここでは地層処分における閉鎖後段階と位置づけて調査対象から除外する。

表 2.4.2-4 「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」の調査範囲

第一種廃棄物	第二種廃棄物（管理型処分）		
	余裕深度処分	ピット処分	トレンチ処分
地層処分			
操業中	埋戻しまでの段階 人工バリアにより放射性物質が人工バリアの外へ漏出することを防止するとともに、人工バリアから放射性物質が漏出してないことを監視する必要がある段階	第 1 段階 人工バリアにより放射性物質が人工バリアの外へ漏出することを防止するとともに、人工バリアから放射性物質が漏出してないことを監視する必要がある段階	埋設段階 放射性物質の生活環境への移行を抑制するとともに、放射性物質の廃棄物埋設地からの生活環境への移行を監視する必要がある段階
	閉鎖後	埋戻し後の段階 人工バリアと天然バリアにより放射性物質の生活環境への移行を抑制するとともに、放射性物質の人工バリアからの漏出及び生活環境への移行を監視する必要がある段階	第 2 段階 人工バリアと天然バリアにより放射性物質の生活環境への移行を抑制するとともに、放射性物質の人工バリアからの漏出及び生活環境への移行を監視する必要がある段階	保全段階 天然バリアにより放射性物質の生活環境への移行を抑制するとともに、特定の行為の禁止又は制約をするための措置を講じる必要がある段階
		第 3 段階 主として天然バリアにより放射性物質の生活環境への移行を抑制するとともに、特定の行為の禁止又は制約をするための措置を講じる必要がある段階	

※上記において、地層処分の「操業中」に該当すると考えられる部分のうち、余裕深度処分とピット処分を調査範囲とする。

第二種廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方(平成 22 年 8 月 9 日 原子力委員会決定)は、「放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方」を基本に、廃棄物埋設施設の安全審査経験、「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」における提言、これに基づく「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の考え方（中間報告）」及び「余

裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」等を踏まえ、埋設事業の安全確保の考え方について取りまとめたものである。表 2.4.2-5 に示すように立地条件、安全対策、安全評価で構成しており、安全対策は「廃棄物埋設地」の設計及び管理期間内の安全対策について言及している。

安全評価については、管理期間内と管理期間終了以後に分けて記載している。基本的な考え方を整理するとともに、操業期間中の放射線安全に直接・間接的に関連する事項を抽出した。操業中の放射線安全に関連する事項（IV.4-1(1)、4-2、4-3、V.5-1、5-2）の内容とその解説について、以下に記載する。

表 2.4.2-5 「第二種廃棄物埋設施設の事業に関する安全審査の基本的考え方」の構成
及び操業期間中の放射線安全関連項目の抽出

操業期間中の放射線安全に対する見出し	関連項目
I. 適用対象	—
II. 用語	—
(1) 廃棄物埋設地	—
(2) 廃棄物埋設施設	—
(3) 段階管理	—
(4) 人工バリア	—
(5) 天然バリア	—
III. 基本的立地条件	
IV. 基本的安全対策	
4-1 廃棄物埋設地の設計	
(1) 閉じ込め	◎ 埋戻し又は第一段階
(2) 移行抑制	
(3) 離隔	
(4) その他の考慮事項	
4-2 放射線の管理	◎
(1) 放射線防護	◎
(2) 放射線被ばく管理	◎
(3) 放射性気体廃棄物及び放射性液体廃棄物の放出管理	◎
(4) 放射線監視	◎
4-3 その他の管理期間内の安全対策	
(1) 地震に対する設計上の考慮	○
(2) 地震以外の自然現象に対する設計上の考慮	○
(3) 湧水に対する考慮	○ 地下特有
(4) 火災・爆発に対する考慮	○
(5) 電源喪失に対する考慮	○
(6) 準拠規格及び基準	
V. 管理期間内に係る安全評価	◎
5-1 平常時評価	◎
5-2 事故時評価	◎
VI. 管理期間の終了	
VII. 管理期間終了以後に係る安全評価	
(1) 評価シナリオ	
(2) 評価期間	
(3) 状態設定	
VIII. 品質保証	
8-1 管理期間終了までの品質保証	
8-2 モデル及びパラメータに係る品質保証	
8-3 管理期間終了以後に係る安全評価の更新	

◎：直接的に関連する事項

○：間接的に関連する事項

なお、基本的考え方で使用される用語のうち、安全対策に係る施設関係の用語の意義は以下の通りとされている。

廃棄物埋設地：

放射性固体廃棄物を埋設するために又は人工バリアを設置するために土地を掘削した場所、及び放射性固体廃棄物を埋設し、埋め戻した場所をいう。なお、人工バリアを設置する場合は、その人工バリアを含む。

廃棄物埋設施設：

廃棄物埋設地及びその附属施設をいい、附属施設としては、放射性固体廃棄物受入れ施設、放射線管理施設、坑道等がある。

基本的安全対策（廃棄物埋設地の設計）の内容及び解説を以下に示す。

IV. 基本的安全対策

4-1 廃棄物埋設地の設計

廃棄物埋設地の設計に当たっては、処分方法に応じて、以下のような点を考慮し、現状の技術で合理的に達成できる範囲において、公衆の受ける線量が低くできるよう設計すること。

(1). 閉じ込め

一定の期間、放射性物質を廃棄物埋設地の限定された区域に閉じ込める機能を有する設計であること。

<解説>

本項でいう「一定の期間」とは、少なくとも、余裕深度処分を行う場合は埋戻しまでの段階、ピット処分を行う場合は第 1 段階までをいう。トレンチ処分を行う場合は、閉じ込めは求めない。

基本的な安全対策（廃棄物埋設地の設計）の内容及び解説を以下に示す。

IV. 基本的な安全対策

4-2 放射線の管理

(1). 放射線防護

- ① 廃棄物埋設施設は、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線等の散乱ガンマ線により公衆の受ける線量が合理的に達成できる限り低くできるように放射線遮へいがなされていること。
- ② 放射性物質の飛散の可能性がある場合は、これにより公衆の受ける線量が合理的に達成できる限り低くできるように対策が講じられていること。
- ③ 廃棄物埋設施設においては、放射線業務従事者の作業条件を考慮して、適切な放射線遮へい、換気等がなされていること。

<解説>

放射性物質の飛散の可能性については、閉じ込めを要求しないトレンチ処分を行う場合において、考慮しなければならない。

(2). 放射線被ばく管理

廃棄物埋設施設においては、放射線業務従事者の線量を十分に監視し、管理するための対策が講じられていること。

(3). 放射性気体廃棄物及び放射性液体廃棄物の放出管理

廃棄物埋設施設においては、廃棄物埋設地の附属施設から発生する放射性気体廃棄物及び放射性液体廃棄物を適切に処理する等により、周辺環境に放出する放射性物質の濃度等を合理的に達成できる限り低くできていること。

(4). 放射線監視

- ① 廃棄物埋設施設においては、廃棄物埋設地の付属施設から放出する放射性気体廃棄物及び放射性液体廃棄物の放出の経路における放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていること。
また、放射性物質の放出量に応じて、周辺環境における放射線量、放射性物質の濃度等を適切に監視するための対策が講じられていること。
- ② 廃棄物埋設施設においては、一定の期間、廃棄物埋設地から地下水等に漏出し、生活環境に移行する放射性物質の濃度等について、適切に監視するための対策が講じられていること。

<解説>

余裕深度処分を行う場合においては、坑道及び処分空洞からの排気についても、適切に監視するための対策を講ずる必要がある。

本項でいう「一定の期間」とは、余裕深度処分を行う場合には埋め戻しまでの段階及

び埋戻し後の段階、ピット処分を行う場合は第1段階及び第2段階、並びにトレンチ処分を行う場合は埋設段階をいう。

基本的安全対策（その他の管理期間内の安全対策）の関連内容及び解説を以下に示す。

IV. 基本的安全対策

4-3 その他の管理期間内の安全対策

(1). 地震に対する設計上の考慮

廃棄物埋設施設は、設計地震力に対して、適切な期間、安全上要求される機能を損なわない設計であること。

この設計地震力は、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」[23]における耐震設計上の重要度分類に基づき、耐震クラスに応じて定めること。

<解説>

本項でいう「適切な期間」とは、余裕深度処分を行う場合の廃棄物埋設地にあつては埋め戻しまでの段階、ピット処分を行う場合の廃棄物埋設地にあつては第1段階の期間とし、廃棄物埋設地の附属施設にあつては廃棄物埋設事業を適切に進めるうえで必要とされる期間とする。

また、「安全上要求される機能を損なわない」とは、廃棄物埋設地にあつては、閉じ込め等が失われぬものとする。

廃棄体の取り扱い中の落下事故あるいは一時貯蔵時の転倒事故等を想定しても、放射性固体廃棄物が容器に固型化されており容易に飛散する恐れが無い場合、含有する放射性物質が飛散することがないように放射性固体廃棄物が封入されるよう廃棄体が設計されている場合、あるいは取扱う放射性固体廃棄物の放射能濃度が公衆の被ばくの観点から十分に低い場合には、耐震設計上の重要度分類のCクラスの施設に対応するものとして定め、これに適合しない場合には、耐震設計上の重要度分類のBクラスの施設に対応するものとする。

また、遮へいを有する設備については、地震等に伴う破損によって、公衆に過大な放射線被ばくを与える可能性がない場合には、耐震設計上の重要度分類のCクラスの施設に対応するものとして定め、これに適合しない場合には、耐震設計上の重要度分類のBクラスの施設に対応するものとする。

(2). 地震以外の自然現象に対する設計上の考慮

廃棄物埋設施設は、敷地及びその周辺における過去の記録、現地調査等を参照して、予想される地震以外の自然現象を考慮して、適切な期間、安全上要求される機能を損なわない設計であること。

<解説>

本項でいう「適切な期間」とは、余裕深度処分を行う場合の廃棄物埋設地にあつては埋め戻しまでの段階、ピット処分を行う場合の廃棄物埋設地にあつては第1段階の期間とし、廃棄物埋設地の附属施設にあつては廃棄物埋設事業を適切に進めるうえで必要とされる期間とする。

また、「安全上要求される機能を損なわない」とは、廃棄物埋設地にあつては、閉じ込め等が失われないものとする。

(3). 湧水に対する考慮

坑道及び処分空洞等の中で発生する湧水を適切に排水し、かつ、万一の突発的な湧水時にも廃棄体からの放射性物質の漏出が課題とならないための適切な対策が講じられていること。

<解説>

余裕深度処分を行う場合においては、廃棄物埋設地において廃棄体を定置し、充填剤を施工するまでの間、廃棄体と湧水との接触を防止すること、あるいは廃棄体の水密性を有すること等の対策を講じるものとする。

(4). 火災・爆発に対する考慮

廃棄物埋設施設においては、火災・爆発の発生を防止し、かつ、万一の火災・爆発時にも施設外への放射性物質の放出が過大とならないための適切な対策が講じられていること。

(5). 電源喪失に対する考慮

廃棄物埋設地の付属施設においては、外部電源系の機能喪失に対応した適切な対策が講じられていること。

管理期間内に係る安全評価の関連内容及び解説を以下に示す。

V. 管理期間内に係る安全評価

5-1 平常時評価

平常時における公衆の受ける線量は、段階管理の計画、廃棄物埋設施設の設計、並びに敷地及びその周辺の状況との関連において、合理的に達成できる限り低いものであること。

<解説>

平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出又は移行、廃棄物埋設地の附

属施設からの放射性気体廃棄物及び放射性液体廃棄物の放出等に伴う公衆の受ける線量が、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低いことを段階管理の計画、設計、並びに敷地及びその周辺の状況との関連において評価する。

5-2 事故時評価

技術的にみて想定される異常事象が発生するとした場合、公衆に対し、過度の放射線被ばくを及ぼさないこと。

<解説>

- (1).廃棄物埋設地については、事業の長期性に鑑み、平常時評価において考慮した事象を超えるような事象が仮に発生するとしても公衆に対し安全上支障がないことを確認するため、廃棄物埋設地からの放射性物質の異常な漏出又は移行を科学技術的見地から仮定して公衆の受ける線量を評価する。
- (2).廃棄物埋設地の附属施設については、以下のような事故の発生の可能性を検討し、公衆の被ばくの観点から重要と思われる事故を選定して公衆の受ける線量を評価する。
 - ①誤操作による放射性固体廃棄物の落下等に伴う放射性物質の飛散
 - ②配管等の破損、各種機器の故障等による放射性物質の漏出
 - ③火災等
- (3).線量の評価に当たっては、事故発生後、その影響を緩和するための対策が講じられる場合は異常を検知するまでの時間、作業に要する時間等を適切に考慮し、事故が収束するまでの間に漏出若しくは移行し、又は放出された放射性物質等により発生するおそれのある公衆の受ける線量を評価する。
- (4).「公衆に対して、過度の放射線被ばくを及ぼさないこと」とは、事故等の発生頻度の兼ね合いを考慮して判断しようとするものであり、判断基準は、「公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えないこと」とするが、その具体的な運用は以下によるものとする。

ICRP の 1990 年勧告によれば、公衆の被ばくに対する年実効線量限度として、1mSv を勧告しているが、特殊な状況においては、5 年間にわたる平均が年当たり 1mSv を超えなければ、単一年にこれよりも高い実効線量が許されることもありうるとされている。これは平常時の放射線被ばくについての考え方であるが、これを発生頻度が小さい「事故」の場合にも適用することとし、周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり 5mSv を超えなければ「リスク」は小さいと判断する。

2) 第二種廃棄物埋設の事業に関する新規制基準

第二種廃棄物埋設施設に関しても、再処理施設や廃棄物管理施設と同様に新規制基準「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」[8]が制定された。同規則の構成を表 2.4.2-6 に示す。

表 2.4.2-6 「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の構成

条	見出し
第一条	適用範囲
第二条	定義
第三条	廃棄物埋設施設の地盤
第四条	地震による損傷の防止
第五条	津波による損傷の防止
第六条	外部からの衝撃による損傷の防止
第七条	火災等による損傷の防止
第八条	遮蔽等
第九条	異常時の放射線障害の防止等
第十条	廃棄物埋設地
第十一条	放射線管理施設
第十二条	廃棄施設
第十三条	地下水の水位等の監視設備
第十四条	予備電源
第十五条	通信連絡設備等

放射線安全に直接的に関連する事項

第十条（廃棄物埋設地）は、放射性物質の「閉じ込め」に相当する条文である。これらの内容及びその解釈について以下に示す。

第八条（遮へい）に関する内容及び解釈を以下に示す。

（遮蔽等）

第八条

廃棄物埋施設は、当該廃棄物埋施設からの直接ガンマ線及びスカイシャングamma線による事業所周辺の線量を十分に低減できるよう、遮蔽その他適切な措置を講じたものでなければならない。

<解釈>

1. 第1項に規定する「線量を十分に低減できる」とは、平常時における廃棄物埋施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線により公衆の受ける線量が、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出及び移行（第10条第1項）及び廃棄物埋施設からの環境への放射性物質の放出（第12条第1項）により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) の考え方の下、合理的に達成できる限り十分低いものであること（「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」（平成元年3月27日原子力安全委員会了承）を参考に、実効線量で50 μ Sv/年以下を達成できるものであること。）。
2. 廃棄物埋施設は、放射線障害を防止する必要がある場合には、管理区域その他事業所内の人が立ち入る場所における線量を低減できるよう、遮蔽その他適切な措置を講じたものでなければならない。

<解釈>

第2項に規定する「線量を低減できる」とは、次のことをいう。

- 一. 管理区域においては、放射線業務従事者の受ける線量が、放射線業務従事者の線量限度を超えないものであること。
 - 二. 管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者の線量が、公衆の線量限度以下になるようにすること。
3. 廃棄物埋施設は、放射性物質の飛散防止のための措置を講じたものでなければならない。

<解釈>

第1項及び第2項については、ALARA の考え方の下、放射線業務従事者の作業性等を考慮して、遮蔽、機器の配置、遠隔操作、放射性物質の漏えい防止、換気等、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。

4. 第3項に規定する「飛散防止のための措置」は、放射性固体廃棄物の落下防止のために必要な措置を含む。

第九条の内容を以下に示す。

(異常時の放射線障害の防止等)

第九条

廃棄物埋設施設は、次に掲げる要件を満たすものでなければならない。

- 一. 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始の日から廃止措置の開始の日の前日までの間において、廃棄物埋設施設に異常が発生した場合においても事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであること。
- 二. 前号の期間中において、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあること。

<解釈>

第 1 号に規定する「放射線障害を及ぼさないものであること」とは、事故・異常時における公衆の受ける線量が、発生した事故・異常につき 5 mSv 以下であることをいい、以下を考慮して設計されることが必要である。

- 一. 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設終了までの間においては、以下の事故・異常発生可能性を検討し、廃棄物埋設施設に事故・異常が発生した場合においても事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものであること。

- ①誤操作による放射性固体廃棄物の落下等に伴う放射性物質の飛散
- ②配管等の破損、各種機器故障による放射性物質漏出
- ③自然現象による影響
- ④外部人為事象（故意によるものを除く。）、火災・爆発、電源喪失等による影響

第十条の内容を以下に示す。

(廃棄物埋設地)

第十条

廃棄物埋設地は、廃棄物埋設地の外への放射性物質の異常な漏えいを防止する機能を有するものでなければならない。

2. ピット処分を行う場合の廃棄物埋設地は、外周仕切設備を設置する方法その他の方法により、少なくとも埋設が終了するまでの期間、放射性物質を廃棄物埋設地の限定された区域に閉じ込める機能を有するものでなければならない。
3. 廃棄物埋設地は、埋設した放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全性を損なわないものでなければならない。

<解釈>

1. 第1項に規定する「廃棄物埋設地の外へ放射性物質の異常な漏えいを防止する」とは、次のことをいう。
 - 一. 埋設する放射性廃棄物の受入れ開始から廃止措置の開始までの間にあつては、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出及び移行に伴う公衆の受ける線量が、廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャンガンマ線（第8条第1項）並びに廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出（第12条第1項）により公衆の受ける線量を含めて法令に定める線量限度を超えないことはもとより、ALARAの考え方の下、合理的に達成できる限り十分に低いものであること（「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」（昭和50年5月13日原子力委員会決定）を参考に、実効線量で50 μ Sv/年以下を達成できるものであること。）。
 - 二. 廃止措置の開始後にあつては、(省略)
2. 第1項の「異常な漏えいを防止する機能」については、以下に留意して設計されていることが必要である。
 - 一. 合理的に利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること。
 - 二. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること。
 - 三. 劣化・損傷が生じた場合にも当該機能ができるだけ維持できる構成・仕様であること。
 - 四. 人工バリア及び天然バリアが有する機能については、その機能を構成する特性の一つに過度に依存しないこと。

第十一条の内容を以下に示す。

(放射線管理施設)

第十一条

事業所には、次に掲げるところより放射線管理施設を設けなければならない。

- 一. 放射線から放射線業務従事者を防護するため、線量を監視し、及び管理する設備を設けること。
- 二. 事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度及び線量を監視し、及び測定する設備を設けること。
- 三. 放射線から公衆及び放射線業務従事者を防護するため、必要な情報を適切な場所に表示する設備を設けること。

<解釈>

1. 第 11 条に規定する「放射線管理施設」とは、放射線被ばくを監視及び管理するため、放射線業務従事者の出入管理、汚染管理、除染等を行う施設並びに放射線業務従事者等の個人被ばく管理に必要な線量計等の機器をいう。
2. 第 2 号に規定する「事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度及び線量を監視し、及び測定する」とは次のことをいう。
 - 一. 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置までの間において、廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による周辺環境における放射線量並びに操業に伴い周辺環境に放出される放射性物質の濃度等を監視及び測定できる設備を有する設計であること。
 - 二. ピット処分を行う場合は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間において、人工バリアから漏出する放射性物質の濃度等を監視及び測定できる設計であること。
 - 三. 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地の外に漏出し生活環境に移行する放射性物質の濃度等を監視及び測定できる設計であること。
 - 四. 測定期間及び使用環境に適応して実用上必要な精度で監視及び測定ができる性能を有する監視設備及び測定設備を用いること。
3. 第 3 号に規定する「必要な情報を適切な場所に表示する」とは、管理区域における放射線量、空気中の放射性物質の濃度及び床面等の放射性物質の表面密度を、管理区域に立ち入る者が安全に認識できる場所に表示することをいう。

第十二条の内容を以下に示す。

(廃棄施設)

第十二条

1. 廃棄物埋設施設には、周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の濃度を十分に低減できるよう、必要に応じて、放射性廃棄物の埋設に伴い発生する放射性廃棄物を処理する能力を有する廃棄施設(放射性廃棄物を保管廃棄する施設を除く。)を設けなければならない。
2. 廃棄物埋設施設には、十分な容量を有する放射性廃棄物を保管廃棄する施設を設けなければならない。

<解釈>

1. 第1項については、廃棄物埋設施設の操業に伴い発生する放射性廃棄物の処理施設は、平常時に周辺環境に対して放出される放射性物質の濃度について、法令に定める限度を超えないことはもとより、ALARAの考え方の下、合理的に達成できる限り十分に低いものであること。また、その放出される放射性物質により公衆の受ける線量が、平常時における廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線(第8条第1項)並びに廃棄物埋設地から漏出し、及び移行する放射性物質(第10条第1項)による線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、ALARAの考え方の下、合理的に達成できる限り十分に低いものであること(「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」(昭和50年5月13日原子力委員会決定)[8]を参考に、実効線量で50 μ Sv/年以下を達成できるものであること。)
2. 第2項については、放射性廃棄物の保管廃棄施設は、廃棄物埋設施設から発生する放射性廃棄物を保管廃棄する容量が十分であるとともに、放射性物質による汚染の拡大防止を考慮して設計されていること。
3. 第1項及び第2項に規定する「保管廃棄する施設」とは、事業規則第2条第1項第2号トに規定する廃棄槽、廃液槽及び保管廃棄施設をいう。

(3) 原子力関連施設における線量限度等

原子力関連施設においては、各施設での線量限度、濃度限度等が法令により定められている。地層処分施設である第一種廃棄物埋設施設の限量等は、「核燃料物質の加工の事業に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示」[10]に示されている。以下にその内容を整理する。

1) 管理区域に係る線量等

管理区域に係る線量等は、上記告示の第二条に示されている（表 2.4.2-7 参照）。

表 2.4.2-7 管理区域に係る線量等

項目	数値
外部放射線に係る線量	3月間につき 1.3mSv
空气中的放射性物質の濃度	3月間の平均濃度が放射線業務従事者に係る濃度限度*の 1/10
放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度	下記の表面密度限度の 1/10 α線を放出する放射性物質：4 Bq/cm ² α線を放出しない放射性物質：40 Bq/cm ²

* 放射線業務従事者に係る濃度限度：告示第七条、別表 1 参照

原子力関連施設の管理区域においては、上記の線量等の基準に基づき遮へい、閉じ込め等の対策や、放射線業務従事者の管理が行われる。管理区域での外部放射線に係る線量等の算定方法は同告示の第十一条に示されている。

管理区域の線量は、告示で定めるものは上記の表の通りであるが、安全審査時に事業者が提出する事業許可申請書等においては、例えば再処理施設では3か月間に相当する労働時間を500時間として管理区域外の基準線量率を2.6μSv/hr以下とし、管理区域内は放射線業務従事者等の立入頻度、立入時間等を考慮した遮へい設計区分を設け、放射線業務従事者の被ばく低減に留意した設計基準線量率を設定している。

2) 放射性物質の濃度限度

表 2.4.2-7 における「放射線業務従事者に係る濃度限度」は告示の第七条に定められており、放射線業務従事者の呼吸する空气中的放射性物質の濃度限度として、3か月間の平均濃度について放射性物質の種類が明確か否か、種類の数、等に応じて放射性物質毎の限度濃度が告示の別表に定められている。なお外部放射線に被ばくするおそれがあり、かつ、空气中的放射性物質を吸入摂取するおそれがある場合については、外部被ばくによる1年間の実効線量（50mSv）に対する割合を考慮した濃度限度となる。

一方、周辺監視区域外の濃度限度については告示の第九条に定められており、ここでは空

気中及び水中の濃度限度が放射性物質の種類に応じて示されている。

3) 線量限度

放射線の線量限度は、放射線業務従事者（第六条、第八条(緊急時)）及び周辺監視区域外（第三条）について規定されている。それぞれの線量限度を表 2.4.2-8 にまとめる。告示に示す周辺監視区域外の線量限度は表の通り実効線量で 1mSv/年であるが、安全審査指針や法令解釈に示されるように、ALARA（As Low As Reasonably Achievable：合理的に達成できる限り十分低いものであること）の考え方にに基づき、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」[9]を参考に、実効線量で 50 μ Sv/年以下を達成できるように施設設計、評価が行われている。

なお、福島第一原子力発電所の事故対応にあたる作業従事者の実効線量は、「平成 23 年東北地方太平洋沖地震の特にやむを得ない緊急の場合に係る実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」[11]によって、一時的に 100mSv から 250mSv に引き上げられたが、同告示は平成 23 年 12 月 16 日に廃止されている。

表 2.4.2-8 放射線業務従事者及び周辺監視区域外の線量限度

		実効線量	等価線量
放射線業務従事者	通常時	5 年間につき 100mSv 1 年間につき 50mSv 女子：上記に加え各 3 月間につき 5mSv 妊娠中女子：上記に加え出産までの間につき内部被ばく 1mSv	眼の水晶体：1 年間につき 150mSv 皮膚：1 年間につき 500mSv 妊娠中女子腹部表面：出産までの間につき 2mSv
	緊急時	100mSv (女子*を除く)	眼の水晶体：300mSv 皮膚：1mSv
周辺監視区域外		1 年間につき 1mSv 原子力規制委員会が認めた場合 1 年間につき 5mSv	眼の水晶体：1 年間につき 15mSv 皮膚：1 年間につき 50mSv

*妊娠不能と診断された者、妊娠の意思のない旨を書面で申し出た者を除く

(4) 原子力関連施設事業所内での放射性物質の運搬に係る線量基準等

原子力関連施設の事業所内で放射性物質を運搬する際の、運搬物や運搬機器に係る安全上の要求事項や線量当量率等が法令により定められている。地層処分施設の操業中は、地上施設から地下施設の所定位置まで高レベル放射性廃棄物の長距離の運搬作業を伴うことから、運搬時の基準を念頭において放射線安全の確保を考える必要がある。

地層処分施設における放射性物質の運搬については、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」[12]第六十条に定められている。また、運搬に係る線量当量率等は、「核燃料物質の加工の事業に関する規則」第七条の六等の規定に基づく核燃料物質等の工場又は事業所内の運搬に関する措置等に係る技術的細目等を定める告示」[13]に示されている。この告示は、第一種廃棄物埋設施設だけでなく、類似施設である再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設にも適用される。上記の規則、告示に示される運搬時の基準について、表 2.4.2-9 にまとめる。

表 2.4.2-9 事業所内の放射性物質の運搬に係る主な基準等

	基準の内容	
容器*	核燃料物質等は容器に封入すること	
	容器の基準	容器に外接する直方体の各辺が 10cm 以上 ・容易かつ安全に取り扱うことができること。 ・運搬中に予想される温度及び内圧の変化、振動等によりき裂、破損等が生ずるおそれがないものであること
線量当量率*	運搬物	表面： 2mSv、表面から 1m： 100 μ Sv
	車両	表面： 2mSv、表面から 1m： 100 μ Sv (「表面」：開放型車両の場合、その外輪郭に接する垂直面)
	コンテナ	表面： 2mSv、表面から 1m： 100 μ Sv
表面汚染密度*	運搬物	下記の表面密度限度の 1/10 α線を放出する放射性物質：4 Bq/cm ² α線を放出しない放射性物質：40 Bq/cm ²
積載要領	運搬物の運搬機器への積付けは運搬中に移動・転倒・転落のないようにすること	
運搬要領*	・運搬経路への運搬従事者・運搬車両以外の立入りの制限 ・運搬車両の徐行、保安用車両の伴走（運搬行程が長い場合） ・運搬物（コンテナに収納する場合はコンテナ）、運搬車両への標識取付	

*管理区域内で行う運搬については、適用しない。

2.4.3 放射線安全の確保に係る調査結果のまとめ

地層処分施設の操業中の放射線安全確保対策の検討に資するため、類似の原子力関連施設として、地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設・廃棄物管理施設および、取り扱う廃棄物の種類はガラス固化体とは異なるが、地下の施設を有する原子力関連施設として、第二種廃棄物埋設施設の関連法令・指針等に規定されている安全対策要求事項について、特に放射線安全に関する事項を対象に調査・整理した。

また、最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方についても調査した。

さらに、具体的な線量基準等について放射線業務従事者・周辺監視区域外の基準、管理区域基準、事業所内の運搬に係る基準を調査した。

基本的な放射線安全の確保に関する要求内容は、各施設の旧指針類等と新規制基準とで大きく変わらず、放射性物質の閉じ込め、遮へい、放射線管理、及び操業中の安全評価（通常時、事故時）について定められている。新規制基準では、さらに事故時の施設の要求事項、事故・異常事象（自然現象含む）の評価の考え方等が強化されている。

地層処分施設の操業中の放射線安全対策は、地上及び地下施設での閉じ込め・遮へい・放射線管理対策、地上施設を介した周辺監視区域外への気体・液体放出管理方法、およびこれらの通常時・事故時の安全評価手法については、今回調査した類似施設の法令・指針に定められた既設の方法により対応可能と考えられる。一方、操業中の地下施設での放射性物質の漏洩や移行の管理・監視あるいは放出管理については、地下処分場に特有のものであり先行類似施設である第二種廃棄物埋設施設での検討事例等を参考に、今後開発すべき課題と考えられる。

2.5 災害発生に着目した安全対策の必要技術

2.3 にて実施した技術要件の整理を受け、地層処分施設の事業期間中の一般労働安全確保に関わる構成要素と技術要件との関係性について考察を加え、安全に係る必要技術を例示する。また、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による甚大な被害発生を契機に、原子力災害からの公衆安全に係る防災計画が原子力発電所を抱える自治体において策定されつつあることから、公衆安全に係る計画において求められている要素についても、一般労働安全確保に資する情報として調査・整理する。

2.5.1 一般労働安全に係る必要技術の確認

NUMO [1]は、一般労働安全に対する安全対策の考え方について、事業期間中の安全確保に関する基本的な安全対策と処分施設の構成要素ごとの安全対策の関係を、「作業環境の維持」、「災害発生・拡大の防止」、「災害の避難経路の確保」の3つの対策に区分し提示している（表 2.5.1-1）。

表 2.5.1-1 事業期間中の安全確保の安全対策と構成要素の関係
(表 2.3.3-1 を一部抜粋の上再掲)

基本的な安全対策		安全対策	構成要素
一般労働安全	作業環境の維持	空洞の力学的安定性の確保*	地上施設 地下施設
		換気経路の確保	
		排水対策	
	災害の発生・拡大防止	防火対策	
		そのほかの災害防止対策	
	災害時の避難経路の確保	避難経路の確保	

(* 地下施設でのみ考慮する安全対策)

一般労働安全の確保の重要性については、2.3 節にてすでに述べた通りである。ここでは、3つの対策区分について、検討中の技術要件との関係性について考察を加えた後、必要技術を例示することとする。

まず、表 2.5.1-1 に示された「安全対策」のうち、作業環境の維持における「排水対策」、「空洞の力学的安定性の確保」については、施設設計や工法等のハード面に依存する部分が大きいため、本調査においては対象外とする。一方、「換気経路の確保」、災害の発生・拡大の防止における「防火対策」については、双方の関係性も深く、ここでの検討から二次的に派生する「そのほかの災害防止対策」、災害時の避難経路の確保における「避難経路の確保」にも関わってくる。

以上のことから、特に「基本的な安全対策」の中から、「災害の発生・拡大の防止」の「防火対策」に着目し、これより派生する一般労働安全に係る必要技術の検討を例示する。

(1) 災害の発生と拡大の防止に資する安全確保技術の検討

1) 平常時と災害時に必要な対策技術

一般労働安全に係る必要技術の検討にあたり、日常的に把握しておくべき事項と災害時の対応事項の双方の技術検討が必要であると考えられることから、まず、平常時と災害時の区分で検討の流れを模式図に示した（図 2.5.1-1）。

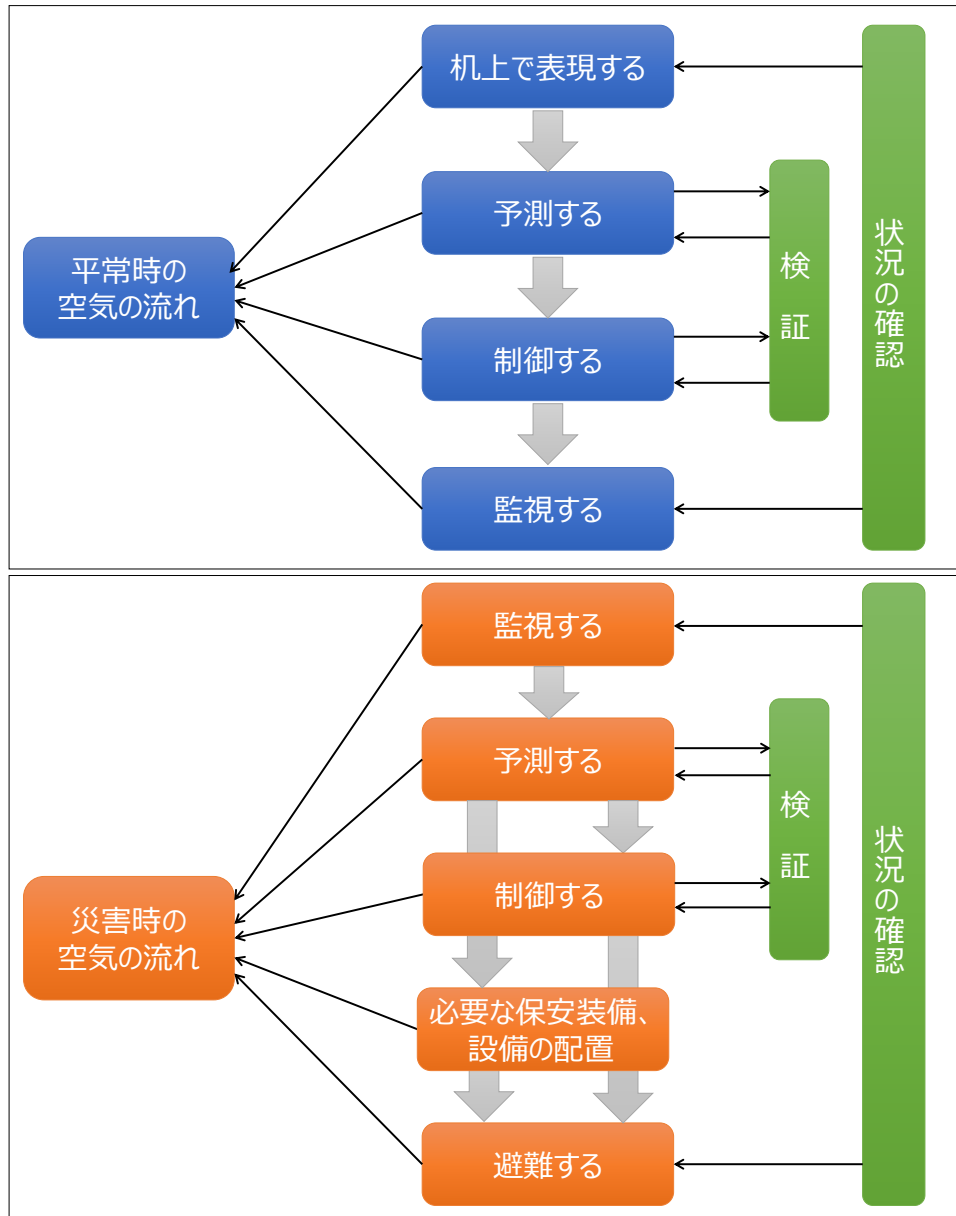


図 2.5.1-1 一般労働安全対策の検討の流れ

平常時においては、建設中や定置中などの作業期間中における通気を解析的に机上で表現・予測・制御し、これらの状況を確認することが第一に考えられる。次に、この解析結果を元にあらかじめ起こりうる事態が発生した際における空気の流れや有害ガス等の流れを予測しておくことが考えられる。そして、予測結果に基づき、送風機等の換気施設を考慮した

上で、どのような操作をすれば最適な換気となるか、気流の制御についての検討を行うことが考えられる。なお、これらの解析結果は、幌延深地層研究センター等のサイトを利用して実地での検証を行うことが考えられる。

また、これらの通気の状態は常に把握されている必要があることから、平常時・災害時ともに監視が必要となる。

なお、通気の制御による有害物質が発生するエリアの遮断等、直接的な対応を行うことも考えられる。また、これらの対応に加えて、装備品や設備で一時的に身の安全を確保させながら作業従事者を避難させる為の方法についても検討が必要と考えられる。

2) 火災の発生・拡大防止対策

前項を踏まえ、災害の発生・拡大の防止の「防火対策」に着目し、まず地下坑道における火災等の状況を検討の出発点に、安全確保までの流れを、模式図に示す（図 2.5.1-2）。

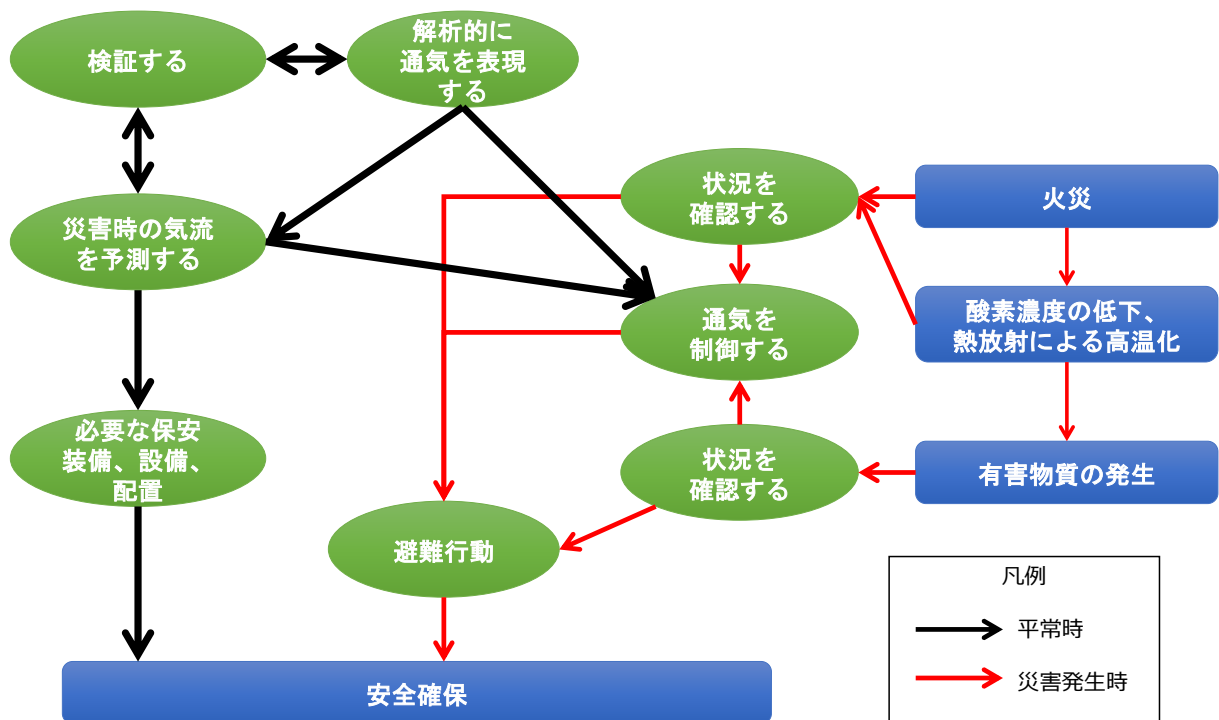


図 2.5.1-2 火災発生時における安全確保対策検討の流れ

図に示すとおり、火災事象の一例として「酸素濃度の低下、熱放射による高温化」と「有害物質の発生」が想定される。これらの事象各々に、拡大防止のための防災対策が連なっているが、大きくは「平常時」からの流れと「災害時の対応」の2つの流れとなる。

火災時における作業員の安全の確保を行う為には、迅速で適切な避難の実現と、必要な保安装備や設備の適正な配置等が必要である。

(2) 検討方法に関する一考察

5.1.1 の検討を踏まえ、一般労働安全対策のうち「災害の発生・拡大防止」の防火対策に着目した必要技術を検討するための各要素（「空気の流れの表現」、「通気の検証」、「災害時の状況予測」、「通気の制御」、「状況の確認」）について、検討すべき項目と更に細分化したテーマを表 2.5.1-2 に例示する。

表 2.5.1-2 安全対策の必要技術の例示

【一般労働安全対策 「災害の発生・拡大防止」の防火対策に着目した場合】

要素	項目	検討テーマ	備考※
空気の流れの表現 (平常時・災害時)	通気の表現	(1) 考慮すべき条件・必要なアウトプット項目の設定	
		(2) 局所的、俯瞰的条件を踏まえた解析手法の検討	
		(3) 常時、災害時等の場面を踏まえた解析手法の検討	
		(4) 事前解析・リアルタイムシミュレーション等の利用時期を踏まえた手法の検討	
	既存解析の適用性及び組み合わせの検討	(5) 解析手法・次元の違いによる結果への影響確認	
		(6) 火災発生等の場面、着目する場所等を考慮した解析の適用性確認	
	通気網解析の検討 (全体系)	(7) 地下処分施設全体系の通気の表現	
		(8) 温度や気圧等の変化を考慮した通気の表現	
		(9) 火災発生や送風機の停止等の非定常流下での通気の表現	
		(10) 坑道内温度や酸素濃度と通気量の影響把握	
	通気網解析の検討 (局所的)	(11) 送風機、ダクト、エアコン等の換気設備・空調設備を考慮した通気の表現	
		(12) 風門の開閉や換気設備の操作を考慮した通気の表現	
		(13) 坑道内の廃棄体の移動、掘削機の移動等通気断面に影響を与える際の表現	
		(14) 有害物質の滞留と送風による変化の確認	
通気の検証	類似施設による実験	(15) 実証実験による解析技術【(8)～(15)の結果等】の検証	
	解析へのフィードバック	(16) 解析技術へのフィードバック(予測技術の高度化)	
災害時の状況予測	有毒ガスによる汚染度	(17) 有毒ガスによる汚染濃度予測と必要換気量の予測	処分坑道で火災が発生した場合の火災延焼シミュレーション(対策のための試験・解析として抽出)
	火災時の予測	(18) 火災時の熱、有毒ガス、酸素濃度の広がりに関する予測	
		(19) 火災時の電源喪失(送風機停止)における予測	
		(20) 坑道内の作業員の避難予測	
通気の制御	通気の制御による安全確保	(21) 有毒ガスの排気制御技術	
		(22) 通気制御による作業員安全の確保(安全な区域の創出)	
		(23) 消火に有効な通気制御技術	坑道内火災の消火(応急対策として抽出)
通気を補完する安全対策		(24) 作業員安全に必要な装備、設備、配置	換気機能の代替設備を投入可能な構造施設(恒久対策として抽出)
状況の確認	平常時の状況	(25) 作業環境のモニタリング技術	坑道内の状況把握・監視機能の代替設備を投入可能な構造施設(恒久対策として抽出)
	災害状況	(26) 災害発生場所および災害種別の把握技術	
		(27) 有毒ガス等の広がりへのモニタリング技術	
	被害状況	(28) 作業員の安否および状況確認技術	
		(29) 廃棄体の状況に関するモニタリング技術	
		(30) 放射線安全に関する継続的監視技術	

※平成24年度地層処分技術調査等事業[14]

2.5.2 放射線安全の確保に係る原子力防災

一般労働安全確保に資する情報として、原子力防災に係る法令等を整理するとともに、原子力防災の現状を調査・整理する。

(1) 原子力防災に係る法令等

1) 原子力防災の定義

原子力防災の定義は、原子力災害対策特別措置法（第 27 条）に基づく、災害対策基本法（第 1 章第 2 条第 3 項）の読み換えにより以下の通り定義されている。

原子力災害（原災法第 2 条第 1 号に規定する原子力災害をいう。）を未然に防止し、原子力災害（原子力災害が生ずる蓋然性を含む。）が発生した場合における被害（被害が生ずる蓋然性を含む。）の拡大を防ぎ、及び原子力災害の復旧を図ることをいう。

2) 関係法令及び防災計画の体系

原子力防災に係る関係法令及び防災計画は、災害対策基本法や災害救助法に基づく災害全般に係る法令に加えて、原子力災害の特性を鑑み原子力災害対策特別措置法や原子力災害対策指針[16]が定められている（図 2.5.2-1）。

なお、地層処分施設事業者についても、原子力災害対策特別措置法（第 2 条第 3 項）において「原子力事業者」として位置付けられており、原子力災害対策特別措置法（第 7 条）に基づき原子力事業者防災業務計画を作成する必要がある。

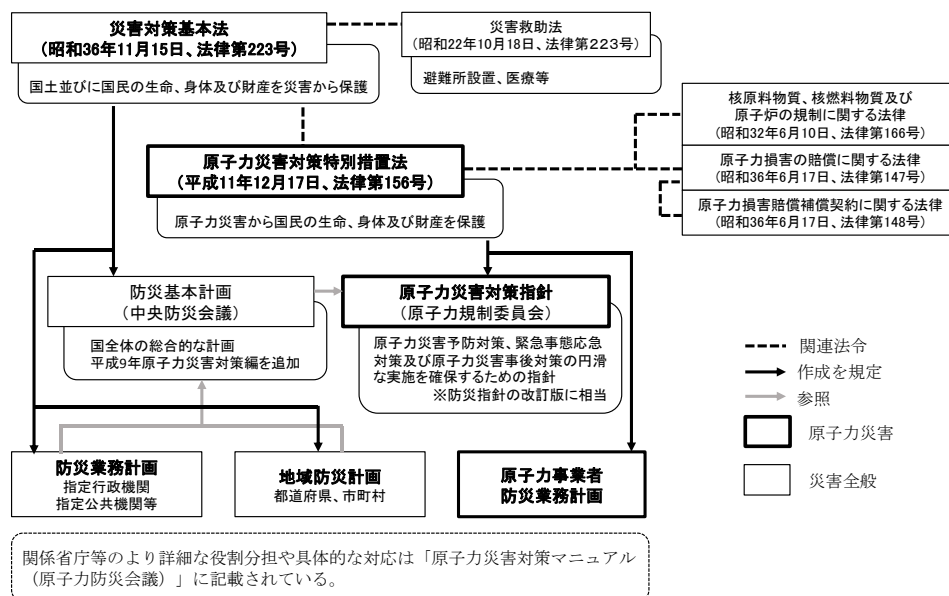


図 2.5.2-1 原子力防災に関する法令等

(出典：JAEA-Review 2013-015[16]図 3-1 に加筆)

3) 防災業務計画及び地域防災計画作成のための指針・マニュアル等

a. 原子力災害対策指針

表 2.5.2-1 に示す原子力災害対策指針[15]は、原子力事業者、国、公共的団体等が原子力災害対策に係る計画を策定や当該対策を実施するにあたって、科学的、客観的判断を支援するために、専門的、技術的事項について定めるものである。

表 2.5.2-1 原子力災害対策指針の構成

	タイトル
第1 原子力災害	
(1)	原子力災害及び原子力事業者の責任
(2)	放射性物質又は放射線の放出形態及び被ばくの経路
(3)	原子力災害の特殊性
(4)	放射線被ばくの防護措置の基本的考え方
第2 原子力災害事前対策	
(1)	原子力災害事前対策の基本的考え方
(2)	緊急事態における防護措置実施の基本的考え方
(3)	原子力災害対策重点区域
(4)	原子力事業者が講ずべき原子力災害事前対策
(5)	緊急時における住民等への情報提供の体制整備
(6)	緊急時モニタリングの体制整備
(7)	被ばく医療体制の整備
(8)	平時からの住民等への情報提供
(9)	オフサイトセンター等の整備
(10)	諸設備の整備
(11)	防災関係資料の整備
(12)	防災業務関係者等に対する教育及び訓練
第3 緊急事態応急対策	
(1)	緊急事態応急対策の基本的な考え方
(2)	異常事態の把握及び緊急事態応急対策
(3)	緊急時モニタリングの実施
(4)	緊急時における住民等への情報提供
(5)	防護措置
(6)	核燃料物質等の輸送時の防災対策
第4 原子力災害中長期対策	
(1)	原子力災害中長期対策の基本的考え方
(2)	発災後の復旧に向けた環境放射線モニタリング
(3)	発災後の復旧に向けた個人線量推定

(4)	発災後の復旧に向けた健康評価
(5)	除染措置
(6)	緊急時被ばく状況から現存被ばく状況・計画的被ばく状況への移行の考え方
第5 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故について	
(1)	特定原子力施設に係る原子力災害対策の取扱い
(2)	原子力災害事前対策及び緊急事態応急対策における留意事項
(3)	中長期対策について
(4)	今後の検討課題について
第6 今後、原子力規制委員会で検討を行うべき課題	
第7 結び	

b. 原子力事業者防災業務計画

原子力事業者防災業務計画は、原子力災害対策特別措置法に基づき原子力事業者が作成すべき原子力事業者防災業務計画等に関する省令（第2条）（以下「省令」という。）により記載すべき事項が示されている（表 2.5.2-2）。

原子力事業者防災業務計画の目次構成の事例（リサイクル燃料貯蔵株式会社 リサイクル燃料備蓄センター（平成25年3月））[17]を表 2.5.2-3 に示す。

表 2.5.2-2 原子力災害対策特別措置法に基づき原子力事業者が作成すべき
原子力事業者防災業務計画等に関する省令（第2条第1項）

番号	原子力事業者防災業務計画に記載すべき事項
1	原子力防災管理者、副原子力防災管理者及び原子力防災要員の職務に関すること。
2	原子力防災管理者又は副原子力防災管理者が、旅行又は疾病その他の事故のためその職務を行うことができない場合にその職務を代行する者に関すること
3	原子力防災組織の編成に関すること。
4	原子力防災要員の配置及び原子力防災要員に対する防災教育の実施に関すること。
5	放射線測定設備その他防災のための設備の設置及び維持に関すること。
6	原子力防災資機材の備付け及び保守点検に関すること。
7	原子力災害対策特別措置法施行令第六条第四項 に規定する事象その他の事象による原子力災害を想定した防災訓練の実施及びその評価に関すること。
8	原子力施設に異常が発生し、又はそのおそれがある場合における原子力規制委員会との連携に係る原子力事業者が行う措置（原子力緊急事態解除宣言をするまでの措置に限る。）に関すること。
9	特定事象が発生した場合における原子力防災管理者の内閣総理大臣及び原子力規制委員会（事業所外運搬に係る特定事象の発生の場合にあつては、内閣総理大臣、原子力規制委員会及び国土交通大臣）、所在都道府県知事、所在市町村長、関係周辺都道府県知事、警察機関その他の関係機関への通報及びこれらの機関への当該特定事象の経過の連絡に関すること。
10	特定事象が発生した場合における原子力災害の発生又は拡大の防止のために行う応急措置の実施及びその措置の概要についての報告に関すること。
11	緊急事態応急対策の実施（原子力災害合同対策協議会への参加を含む。）に関すること。
12	緊急事態応急対策が実施される場合における原子力防災要員の派遣、原子力防災資機材の貸与その他必要な措置の実施に関すること。
13	原子力災害事後対策の実施（原子力災害合同対策協議会への参加を含む。）に関すること。
14	原子力災害事後対策が実施される場合における原子力防災要員の派遣、原子力防災資機材の貸与その他必要な措置の実施に関すること。
15	他の原子力事業者への協力に関すること。
16	原子力事業所の主要な施設又は設備を明示した書類又は図面の整備に関すること。
17	前各号に掲げるもののほか、原子力事業所における原子力災害の発生又は拡大の防止のため原子力防災組織が行うべき業務に関し必要な事項

※省令には上記の他、原子力事業者のうち実用発電原子炉を扱う事業者のみが記載すべき事項が定められている。

表 2.5.2-3 原子力事業者防災業務計画の事例

章／節	タイトル	省令の番号
第1章 総則		
第1節	原子力事業者防災業務計画の目的	—
第2節	定義	—
第3節	原子力事業者防災業務計画の基本構想	—
第4節	原子力事業者防災業務計画の運用	—
第5節	原子力事業者防災業務計画の修正	—
第2章 原子力災害予防対策の実施		
第1節	防災体制	1、2、3
第2節	原子力防災組織の運営	1,3
第3節	放射線測定設備および原子力防災資機材の整備	5、6
第4節	原子力災害対策活動で使用する資料の整備	6
第5節	原子力災害対策活動で使用する施設および設備等の整備・点検	5、6
第6節	防災教育の実施	4
第7節	防災訓練の実施	7
第8節	関係機関との連携	8
第9節	備蓄センター周辺の方々を対象とした平常時の広報活動	17
第3章 緊急事態応急対策等の実施		
第1節	通報および連絡	8、9
第2節	応急措置の実施	10、
第3節	緊急事態応急対策	11
第4章 原子力災害事後対策		
第1節	備蓄センターの対策	17
第2節	原子力防災要員の派遣等	13、14
第5章 その他		
第1節	他の原子力事業者への協力	15
図表集		16

c. 地域防災計画（原子力災害対策編）作成マニュアル

原子力災害対策特別措置法（第 28 条第 1 項）の規定により読み替えて適用する災害対策基本法（昭和 36 年法律第 223 号）第 40 条及び第 42 条の規定により、都道府県及び市町村には、防災基本計画及び原子力災害対策指針[15]に基づく地域防災計画（原子力災害対策編）を作成することが求められている。

また、原子力災害対策特別措置法（第 7 条第 1 項）によると原子力事業者防災業務計画は、地域防災計画等に抵触するものであってはならないと定められている。

原子力事業者防災業務計画作成の際の参考として、内閣府原子力防災担当が、都道府県及び市町村の地域防災計画（原子力災害対策編）を作成の支援として公開している、地域防災計画（原子力災害対策編）作成マニュアル（県分及び市町村分）[18][19]の整理を示す（表 2.5.2-4）。

表 2.5.2-4 地域防災地域防災計画（原子力災害対策編）作成マニュアルの構成

タイトル	県分	市町村分
第 1 章 総 則		
計画の目的	○	○
計画の性格	○	○
計画の周知徹底	○	○
計画の作成又は修正に際し遵守すべき指針	○	○
計画の基礎とするべき災害の想定	○	○
原子力災害対策を重点的に実施すべき区域を含む地域の範囲	○	○
原子力災害対策を重点的に実施すべき区域の区分等に応じた防護措置の準備及び実施	○	○
防災関係機関の事務又は業務の大綱	○	○
第 2 章 原子力災害事前対策		
基本方針	○	○
原子力事業者との防災業務計画に関する協議及び防災要員の現況等の届出の受理	○	○
立入検査と報告の徴収	○	○
原子力防災専門官及び地方放射線モニタリング対策官との連携	○	○
迅速かつ円滑な災害応急対策、災害復旧への備え	○	○
情報の収集・連絡体制等の整備	○	○
緊急事態応急体制の整備	○	○
避難収容活動体制の整備	○	○
飲食物の出荷制限、摂取制限等	○	—
緊急輸送活動体制の整備	○	○
救助・救急、医療、消火及び防護資機材等の整備	○	○

住民等への的確な情報伝達体制の整備	○	○
行政機関の業務継続計画の策定	○	○
原子力防災等に関する住民等に対する知識の普及と啓発及び国際的な情報発信	○	○
防災業務関係者の人材育成	○	○
防災訓練等の実施	○	○
原子力施設上空の飛行規制	○	○
核燃料物質等の運搬中の事故に対する対応	○	○
災害復旧への備え	—	○
第3章 緊急事態応急対策		
基本方針	○	○
情報の収集・連絡、緊急連絡体制及び通信の確保	○	○
活動体制の確立	○	○
屋内退避、避難収容等の防護活動	○	○
治安の確保及び火災の予防	○	○
飲食物の出荷制限、摂取制限等	○	○
緊急輸送活動	○	○
救助・救急、消火及び医療活動	○	○
住民等への的確な情報伝達活動	○	○
自発的支援の受入れ等	○	○
行政機関の業務継続に係る措置	○	○
第4章 原子力災害中長期対策		
基本方針	○	○
緊急事態解除宣言後の対応	○	○
原子力災害事後対策実施区域における避難区域等の設定	○	○
放射性物質による環境汚染への対処	○	○
各種制限措置等の解除	○	○
環境放射線モニタリングの実施と結果の公表	○	○
災害地域住民に係る記録等の作成	○	—
被災者等の生活再建等の支援	○	○
風評被害等の影響の軽減	○	○
被災中小企業等に対する支援	○	○
心身の健康相談体制の整備	○	○
物価の監視	○	—
復旧・復興事業からの暴力団排除	○	—

(2) 原子力防災対策

1) 原子力災害特有の対策

原子力災害対策指針[15]によると、原子力災害の特性を以下の通り示している。

- ・復旧・復興作業が極めて困難となることから、原子力災害そのものの発生又は拡大の防止が極めて重要であること
 - ・放射性物質又は放射線による影響は、すぐに五感で感じるができないこと
 - ・平時から放射線についての基本的な知識と理解を必要とすること
 - ・原子力に関する専門的知識を有する機関の役割、当該機関による指示、助言等が極めて重要であること
 - ・被ばくの影響は長時間経過した後に現れる可能性があるため、住民等に対して、事故発生時から継続的に健康管理等を実施することが重要であること
- 上記の特殊性を踏まえた、原子力災害特有の対策とその実施方法及び注意点を、JAEA-Review2013-015[16]を元に整理した表 2.5.2-5 に示す。

表 2.5.2-5 原子力災害特有の対策

(出典：JAEA-Review2013-015,表 1-5[16]を元に整理)

対策	実施方法	注意点
避難及び一時移転	環境へ放出された放射性物資から距離をおく。	<ul style="list-style-type: none"> ・避難は緊急に実施するもの、一時移転は日常生活を継続した場合の被ばくを低減するもの。 ・災害時要援護者への対応が必要。 ・避難者への肉体的・精神的影響が避けられない。
屋内退避	自宅やコンクリート建物に入り、気密性を高め（窓を閉め、エアコンや換気扇を止め）、口及び鼻をタオル等で保護する。	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的容易に実施可能で、避難までの間の待機のため実施。 ・避難又は一時移転が困難な場合に実施。 ・長期にわたる場合、避難への切替を検討する必要がある。 ・テレビやラジオ等による地方公共団体等からの情報に注意する。
安定ヨウ素剤の服用	国等の指示に従って、適切な時期に安定ヨウ素剤（丸薬）を服用する。（乳幼児にはシロップ）	<ul style="list-style-type: none"> ・ヨウ素以外の核種や外部被ばくに対する効果はない。 ・放射性ヨウ素吸入等の24時間前から直後に服用しなければ効果は低く、また、効果は服用から24時間程度。 ・副作用や禁忌者等に関する注意が必要。
飲食物の摂取制限	基準以上の放射性物質によって汚染された飲料水や飲食物の摂取や出荷の制限。	<ul style="list-style-type: none"> ・代替となる飲食物を提供する。

2) 事業者から行政に対する対応

事業者から行政に対する対応として、原子力災害対策特別措置法（第二章第十条）（表 2.5.2-6）により「原子力防災管理者の通報義務等」が、原子力災害対策特別措置法施行令（第4条）（表 2.5.2-7）により「通報義務等の基準、事象等」が定められている。

表 2.5.2-6 原子力防災管理者の通報義務等

原子力災害対策特別措置（第二章第十条）（抜粋）
<p>1. 原子力防災管理者は、原子力事業所の区域の境界付近において政令で定める基準以上の放射線量が政令で定めるところにより検出されたことその他の政令で定める事象の発生について通報を受け、又は自ら発見したときは、直ちに、内閣府令・原子力規制委員会規則（事業所外運搬に係る事象の発生の場合にあつては、内閣府令・原子力規制委員会規則・国土交通省令）及び原子力事業者防災業務計画の定めるところにより、その旨を内閣総理大臣及び原子力規制委員会、所在都道府県知事、所在市町村長並びに関係周辺都道府県知事（事業所外運搬に係る事象の発生の場合にあつては、内閣総理大臣、原子力規制委員会及び国土交通大臣並びに当該事象が発生した場所を管轄する都道府県知事及び市町村長）に通報しなければならない。この場合において、所在都道府県知事及び関係周辺都道府県知事は、関係周辺市町村長にその旨を通報するものとする。</p> <p>2. 前項前段の規定により通報を受けた都道府県知事又は市町村長は、政令で定めるところにより、内閣総理大臣及び原子力規制委員会（事業所外運搬に係る事象の発生の場合にあつては、内閣総理大臣、原子力規制委員会及び国土交通大臣。以下この項及び第十五条第一項第一号において同じ。）に対し、その事態の把握のため専門的知識を有する職員の派遣を要請することができる。この場合において、内閣総理大臣及び原子力規制委員会は、適任と認める職員を派遣しなければならない。</p>

表 2.5.2-7 通報義務等の基準、事象等

原子力災害対策特別措置法施行令（第4条）（抜粋）	
1.	法第十条第一項の政令で定める基準は、一時間当たり五マイクロシーベルトの放射線量とする。
2.	法第十条第一項の規定による放射線量の検出は、法第十一条第一項の規定により設置された放射線測定設備の一又は二以上について、それぞれ単位時間（二分以内のものに限る。）ごとのガンマ線の放射線量を測定し一時間当たりの数値に換算して得た数値が、前項の放射線量以上のものとなっているかどうかを点検することにより行うものとする。ただし、当該数値が落雷の時に検出された場合その他原子力規制委員会規則で定める場合は、当該数値は検出されなかったものとみなす。
3.	前項の定めるところにより検出された放射線量が法第十一条第一項の規定により設置された放射線測定設備の全てについて第一項の放射線量を下回っている場合において、当該放射線測定設備の一又は二以上についての数値が一時間当たり一マイクロシーベルト以上であるときは、法第十条第一項の規定による放射線量の検出は、前項の規定にかかわらず、同項の定めるところにより検出された当該各放射線測定設備における放射線量と原子炉の運転等のための施設の周辺において原子力規制委員会規則で定めるところにより測定した中性子線の放射線量とを合計することにより行うものとする。
4.	法第十条第一項の政令で定める事象は、次の各号のいずれかに掲げるものとする。 <ol style="list-style-type: none"> (1) 第一項に規定する基準以上の放射線量が第二項又は前項の定めるところにより検出されたこと。 (2) 当該原子力事業所における原子炉の運転等のための施設の排気筒、排水口その他これらに類する場所において、当該原子力事業所の区域の境界付近に達した場合におけるその放射能水準が第一項に規定する放射線量に相当するものとして原子力規制委員会規則で定める基準以上の放射性物質が原子力規制委員会規則で定めるところにより検出されたこと。 (3) 当該原子力事業所の区域内の場所のうち原子炉の運転等のための施設の内部に設定された管理区域（その内部において業務に従事する者の被ばく放射線量の管理を行うべき区域として原子力規制委員会規則で定める区域をいう。）外の場所（前号に規定する場所を除く。）において、次に掲げる放射線量又は放射性物質が原子力規制委員会規則で定めるところにより検出されたこと。 <ul style="list-style-type: none"> ・一時間当たり五十マイクロシーベルト以上の放射線量 ・当該場所におけるその放射能水準が一時間当たり五マイクロシーベルトの放射線量に相当するものとして原子力規制委員会規則で定める基準以上の放射性物質 (4) 事業所外運搬に使用する容器から一メートル離れた場所において、一時間当たり百マイクロシーベルト以上の放射線量が原子力規制委員会規則・国土交通省令で定めるところにより検出されたこと。

- (5) 前各号に掲げるもののほか、実用発電用原子炉（核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第四十三条の四第一項 に規定する実用発電用原子炉をいう。第六条第四項第四号において同じ。）の運転中に非常用炉心冷却装置の作動を必要とする原子炉冷却材の漏えいが発生したことその他の原子炉の運転等のための施設又は事業所外運搬に使用する容器の特性ごとに原子力緊急事態に至る可能性のある事象として原子力規制委員会規則（事業所外運搬に係る事象にあつては、原子力規制委員会規則・国土交通省令）で定めるもの
- (6) 前各号に掲げるもののほか、第六条第四項第三号又は第四号に掲げる事象

3) 初期対応段階における緊急防護措置

原子力災害対策指針[15]によると、緊急防護措置の実施基準として「Emergency Action Level（緊急事態区分及び緊急時活動レベル）、以後 EAL と表記）」及び「Operational Intervention Level（運用上の介入レベル）、以後 OIL と表記）」が示されている。

EAL は、放射性物質の放出開始前から迅速な意思決定ができるよう、施設の状況に応じて緊急事態の区分により実施する予防防護措置、OIL は、観測可能な指標に基づく緊急防護措置を示している。

EAL 及び OIL による防護措置実施の基準と、防護措置の実施フローを次頁以降に示す。

表 2.5.2-8 EAL（緊急事態区分及び緊急時活動レベル）

（出典：原子力災害対策指針（平成 25 年 9 月 5 日全部改訂）[15]）

区分	沸騰水型軽水炉（実用発電用のものに限る。）に係る原子炉施設（原子炉容器内に照射済燃料集合体が存在しない場合を除く。）	措置の概要
緊急事態区分	<p>警戒事態</p> <p>①原子炉の運転中に原子炉保護回路の1チャンネルから原子炉停止信号が発信され、その状態が一定時間継続された場合において、当該原子炉停止信号が発信された原因を特定できないこと。</p> <p>② 原子炉の運転中に保安規定で定められた数値を超える原子炉冷却材の漏えいが起こり、定められた時間内に定められた措置を実施できないこと。</p> <p>③ 原子炉の運転中に当該原子炉への全ての給水機能が喪失すること。</p> <p>④ 原子炉の運転中に主復水器による当該原子炉から熱を除去する機能が喪失した場合において、当該原子炉から残留熱を除去する機能の一部が喪失すること。</p> <p>⑤全ての非常用交流母線からの電気の供給が1系統のみとなった場合で当該母線への電気の供給が1つの電源のみとなり、その状態が15分以上継続すること、又は外部電源喪失が3時間以上継続すること。</p> <p>⑥ 原子炉の停止中に当該原子炉容器内の水位が水位低設定値まで低下すること。</p> <p>⑦ 使用済燃料貯蔵槽の水位が一定の水位まで低下すること。</p> <p>⑧ 原子炉制御室その他の箇所からの原子炉の運転や制御に影響を及ぼす可能性が生じること。</p> <p>⑨ 原子力事業所内の通信のための設備又は原子力事業所内と原子力事業所外との通信のための設備の一部の機能が喪失すること。</p> <p>⑩ 重要区域において、火災又は溢水が発生し、原子力災害対策特別措置法に基づき原子力事業者が作成すべき原子力事業者防災業務計画等に関する命令（平成24年文部科学省・経済産業省令第4号）第2条第2項第8号に規定する安全上重要な構築物、系統又は機器（以下「安全機器等」という。）の機能の一部が喪失するおそれがあること。</p> <p>⑪ 燃料被覆管障壁もしくは原子炉冷却系障壁が喪失するおそれがあること、又は、燃料被覆管障壁もしくは原子炉冷却系障壁が喪失すること。</p> <p>⑫ 当該原子炉施設等立地道府県において、震度6弱以上の地震が発生した場合。</p> <p>⑬ 当該原子炉施設等立地道府県において、大津波警報が発令された場合。</p> <p>⑭ 東海地震注意情報が発表された場合（浜岡原子力発電所のみ）。</p> <p>⑮ オンサイト統括補佐が警戒を必要と認める当該原子炉施設の重要な故障等が発生した場合。</p> <p>⑯ 当該原子炉施設において新規基準で定める設計基準を超える外部事象が発生した場合（竜巻、洪水、台風、火山等）。</p> <p>⑰ その他原子炉施設以外に起因する事象が原子炉施設に影響を及ぼすおそれがあることを認知した場合など委員長又は委員長代行が警戒本部の設置が必要と判断した場合。</p>	<p>体制構築や情報収集を行い、住民防護のための準備を開始する。</p>

区分	沸騰水型軽水炉（実用発電用のものに限る。）に係る原子炉施設（原子炉容器内に照射済燃料集合体が存在しない場合を除く。）	措置の概要
緊急事態区分 施設敷地緊急事態	<ol style="list-style-type: none"> ① 原子炉の運転中に非常用炉心冷却装置の作動を必要とする原子炉冷却材の漏えいが発生すること。 ② 原子炉の運転中に当該原子炉への全ての給水機能が喪失した場合において、全ての非常用の炉心冷却装置（当該原子炉へ高圧で注水する系に限る。）による注水ができないこと。 ③ 原子炉の運転中に主復水器による当該原子炉から熱を除去する機能が喪失した場合において、当該原子炉から残留熱を除去する全ての機能が喪失すること。 ④ 全ての交流母線からの電気の供給が停止し、かつ、その状態が 30 分以上（原子炉施設に設ける電源設備が実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）第 57 条第 1 項及び実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 6 号）第 72 条第 1 項の基準に適合しない場合には、5 分以上）継続すること。 ⑤ 非常用直流母線が一となった場合において、当該直流母線に電気を供給する電源が一となる状態が 5 分以上継続すること。 ⑥ 原子炉の停止中に当該原子炉容器内の水位が非常用炉心冷却装置（当該原子炉へ低圧で注水する系に限る。）が作動する水位まで低下すること。 ⑦ 使用済燃料貯蔵槽の水位を維持できないこと又は当該貯蔵槽の水位を維持できていないおそれがある場合において、当該貯蔵槽の水位を測定できないこと。 ⑧ 原子炉制御室の環境が悪化し、原子炉の制御に支障が生じること、又は原子炉若しくは使用済燃料貯蔵槽に異常が発生した場合において、原子炉制御室に設置する原子炉施設の状態を表示する装置若しくは原子炉施設の異常を表示する警報装置の機能の一部が喪失すること。 ⑨ 原子力事業所内の通信のための設備又は原子力事業所内と原子力事業所外との通信のための設備の全ての機能が喪失すること。 ⑩ 火災又は溢水が発生し、安全機器等の機能の一部が喪失すること。 ⑪ 原子炉格納容器内の圧力又は温度の上昇率が一定時間にわたって通常の運転及び停止中において想定される上昇率を超えること。 ⑫ 原子炉の炉心（以下単に「炉心」という。）の損傷が発生していない場合において、炉心の損傷を防止するために原子炉格納容器圧力逃がし装置を使用すること。 ⑬ 燃料被覆管の障壁が喪失した場合において原子炉冷却系の障壁が喪失するおそれがあること、燃料被覆管の障壁及び原子炉冷却系の障壁が喪失するおそれがあること、又は燃料被覆管の障壁若しくは原子炉冷却系の障壁が喪失するおそれがある場合において原子炉格納容器の障壁が喪失すること。 ⑭ 原子力事業所の区域の境界付近等において原災法第 10 条に基づく通報の判断基準として政令等で定める基準以上の放射線量又は放射性物質が検出された場合（事業所外運搬に係る場合を除く。）。 ⑮ その他原子炉施設以外に起因する事象が原子炉施設に影響を及ぼすおそれがあること等放射性物質又は放射線が原子力事業所外へ放出され、又は放出されるおそれがあり、原子力事業所周辺において、緊急事態に備えた防護措置の準備及び防護措置の一部の実施を開始する必要がある事象が発生すること。 	PAZ 内の住民等の避難準備、及び早期に必要な住民避難、等の防護措置を行う。

区分	沸騰水型軽水炉（実用発電用のものに限る。）に係る原子炉施設（原子炉容器内に照射済燃料集合体が存在しない場合を除く。）	措置の概要
緊急事態区分 全面緊急事態	<p>① 原子炉の非常停止が必要な場合において、制御棒の挿入により原子炉を停止することができないこと又は停止したことを確認することができないこと。</p> <p>② 原子炉の運転中に非常用炉心冷却装置の作動を必要とする原子炉冷却材の漏えいが発生した場合において、全ての非常用の炉心冷却装置による当該原子炉への注水ができないこと。</p> <p>③ 原子炉の運転中に当該原子炉への全ての給水機能が喪失した場合において、全ての非常用の炉心冷却装置による当該原子炉への注水ができないこと。</p> <p>④ 原子炉格納容器内の圧力又は温度が当該格納容器の設計上の最高使用圧力又は最高使用温度に達すること。</p> <p>⑤ 原子炉の運転中に主復水器による当該原子炉から熱を除去する機能が喪失した場合において、当該原子炉から残留熱を除去する全ての機能が喪失したときに、原子炉格納容器の圧力抑制機能が喪失すること。</p> <p>⑥ 全ての交流母線からの電気の供給が停止し、かつ、その状態が1時間以上（原子炉施設に設ける電源設備が実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第57条第1項及び実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第72条第4項の基準に適合しない場合には、30分以上）継続すること。</p> <p>⑦ 全ての非常用直流母線からの電気の供給が停止し、かつ、その状態が5分以上継続すること。</p> <p>⑧ 炉心の損傷の発生を示す原子炉格納容器内の放射線量を検知すること。</p> <p>⑨ 原子炉の停止中に当該原子炉容器内の水位が非常用炉心冷却装置（当該原子炉へ低圧で注水する系に限る。）が作動する水位まで低下し、当該非常用炉心冷却装置が作動しないこと。</p> <p>⑩ 使用済燃料貯蔵槽の水位が照射済燃料集合体の頂部から上方2メートルの水位まで低下すること、又は当該水位まで低下しているおそれがある場合において、当該貯蔵槽の水位を測定できないこと。</p> <p>⑪ 原子炉制御室が使用できなくなることにより、原子炉制御室からの原子炉を停止する機能及び冷温停止状態を維持する機能が喪失すること又は原子炉施設に異常が発生した場合において、原子炉制御室に設置する原子炉施設の状態を表示する装置若しくは原子炉施設の異常を表示する警報装置の全ての機能が喪失すること。</p> <p>⑫ 燃料被覆管の障壁及び原子炉冷却系の障壁が喪失した場合において、原子炉格納容器の障壁が喪失するおそれがあること。</p> <p>⑬ 原子力事業所の区域の境界付近等において原災法第15条に基づく緊急事態宣言の判断基準として政令等で定める基準以上の放射線量又は放射性物質が検出された場合（事業所外運搬に係る場合を除く。）。</p> <p>⑭ その他原子炉施設以外に起因する事象が原子炉施設に影響を及ぼすこと等放射性物質又は放射線が異常な水準で原子力事業所外へ放出され、又は放出されるおそれがあり、原子力事業所周辺の住民の避難を開始する必要がある事象が発生すること。</p>	<p>PAZ内の住民避難等の防護措置を行うとともに、UPZ及び必要に応じてそれ以遠の周辺地域において、放射性物質放出後の防護措置実施に備えた準備を開始する。放射性物質放出後は、計測される空間放射線量率などに基づく防護措置を実施する。</p>

※上記の原子炉施設の他、原子力災害対策指針には、「加圧水型軽水炉（実用発電用のものに限る。）に係る原子炉施設（原子炉容器内に照射済燃料集合体が存在しない場合を除く。）」、「ナトリウム冷却型高速炉（規制法第2条第5項に規定する発電用原子炉に限る。）に係る原子炉施設（原子炉容器内に照射済燃料集合体が存在しない場合を除く。）」、「使用済燃料貯蔵槽内（このみ照射済燃料集合体が存在する原子炉施設（照射済燃料集合体が十分な期間にわたり冷却されたものとして原子力規制委員会が定めたものを除く。））」、「原子炉（1.～4.に掲げる原子炉を除く。）」のEALが示されている。

表 2.5.2-9 OIL (運用上の介入レベル)

(出典：原子力災害対策指針 (平成 25 年 9 月 5 日全部改訂) [15])

	基準の種類	基準の概要	初期設定値※1	防護措置の概要														
緊急防護措置	OIL1	地表面からの放射線、再浮遊した放射性物質の吸入、不注意な経口摂取による被ばく影響を防止するため、住民等を数時間内に避難や屋内退避等させるための基準	500 μ Sv/h (地上 1m で計測した場合の空間放射線量率 (※2))	数時間内を目途に区域を特定し、避難等を実施。(移動が困難な者の一時屋内退避を含む)														
	OIL4	不注意な経口摂取、皮膚汚染からの外部被ばくを防止するため、除染を講じるための基準	β 線：40,000cpm (※3) (皮膚から数 cm での検出器の計数率) β 線：13,000cpm (※4)【1ヶ月後の値】 (皮膚から数 cm での検出器の計数率)	避難基準に基づいて避難した避難者等をスクリーニングして、基準を超える際は迅速に除染。														
早期防護措置	OIL2	地表面からの放射線、再浮遊した放射性物質の吸入、不注意な経口摂取による被ばく影響を防止するため、地域生産物 (※5) の摂取を制限するとともに、住民等を 1 週間程度内に一時移転させるための基準	20 μ Sv/h (地上 1m で計測した場合の空間放射線量率 (※2))	1 日内を目途に区域を特定し、地域生産物の摂取を制限するとともに 1 週間程度内に一時移転を実施。														
飲食物摂取制限※9	飲食物に係るスクリーニング基準	OIL6 による飲食物の摂取制限を判断する準備として、飲食物中の放射性核種濃度測定を実施すべき地域を特定する際の基準	0.5 μ Sv/h (※6) (地上 1m で計測した場合の空間放射線量率 (※2))	数日内を目途に飲食物中の放射性核種濃度を測定すべき区域を特定。														
	OIL6	経口摂取による被ばく影響を防止するため、飲食物の摂取を制限する際の基準	<table border="1"> <thead> <tr> <th>核種 (※7)</th> <th>飲料水 牛乳・乳 製品</th> <th>野菜類、穀 類、肉、卵、 魚、その他</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>放射性ヨウ素</td> <td>300Bq/kg</td> <td>2,000Bq/kg (※8)</td> </tr> <tr> <td>放射性セシウム</td> <td>200Bq/kg</td> <td>500Bq/kg</td> </tr> <tr> <td>プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種</td> <td>1 Bq/kg</td> <td>10Bq/kg</td> </tr> <tr> <td>ウラン</td> <td>20Bq/kg</td> <td>100Bq/kg</td> </tr> </tbody> </table>	核種 (※7)	飲料水 牛乳・乳 製品	野菜類、穀 類、肉、卵、 魚、その他	放射性ヨウ素	300Bq/kg	2,000Bq/kg (※8)	放射性セシウム	200Bq/kg	500Bq/kg	プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種	1 Bq/kg	10Bq/kg	ウラン	20Bq/kg	100Bq/kg
核種 (※7)	飲料水 牛乳・乳 製品	野菜類、穀 類、肉、卵、 魚、その他																
放射性ヨウ素	300Bq/kg	2,000Bq/kg (※8)																
放射性セシウム	200Bq/kg	500Bq/kg																
プルトニウム及び超ウラン元素のアルファ核種	1 Bq/kg	10Bq/kg																
ウラン	20Bq/kg	100Bq/kg																

※1 「初期設定値」とは緊急事態当初に用いる OIL の値であり、地上沈着した放射性核種組成が明確になった時点で必要な場合には OIL の初期設定値は改定される。

※2 本値は地上 1m で計測した場合の空間放射線量率である。実際の適用に当たっては、空間放射線量率計測機器の設置場所における線量率と地上 1m での線量率との差異を考慮して、判断基準の値を補正する必要がある。

※3 我が国において広く用いられている β 線の入射窓面積が 20cm² の検出器を利用した場合の計数率であり、表面汚染密度は約 120Bq/cm² 相当となる。

他の計測器を使用して測定する場合には、この表面汚染密度より入射窓面積や検出効率を勘案した計数率を求める必要がある。

※4 ※3 と同様、表面汚染密度は約 40Bq/cm² 相当となり、計測器の仕様が異なる場合には、計数率の換算が必要である。

※5 「地域生産物」とは、放出された放射性物質により直接汚染される野外で生産された食品であって、数週間以内に消費されるもの (例えば野菜、該当地域の牧草を食った牛の乳) をいう。

※6 実効性を考慮して、計測場所の自然放射線によるバックグラウンドによる寄与も含めた値とする。

※7 その他の核種の設定の必要性も含めて今後検討する。その際、IAEA の GSG-2 における OIL6 値を参考として数値を設定する。

※8 根菜、芋類を除く野菜類が対象。

※9 IAEA では、OIL6 に係る飲食物摂取制限が効果的かつ効率的に行われるよう、飲食物中の放射性核種濃度の測定が開始されるまでの間に暫定的に飲食物摂取制限を行うとともに、広い範囲における飲食物のスクリーニング作業を実施する地域を設定するための基準である OIL3、その測定のためのスクリーニング基準である OIL5 が設定されている。ただし、OIL3 については、IAEA の現在の出版物において空間放射線量率の測定結果と暫定的な飲食物摂取制限との関係が必ずしも明確でないこと、また、OIL5 については我が国において核種ごとの濃度測定が比較的容易に行えることから、放射性核種濃度を測定すべき区域を特定するための基準である「飲食物に係るスクリーニング基準」を定める。

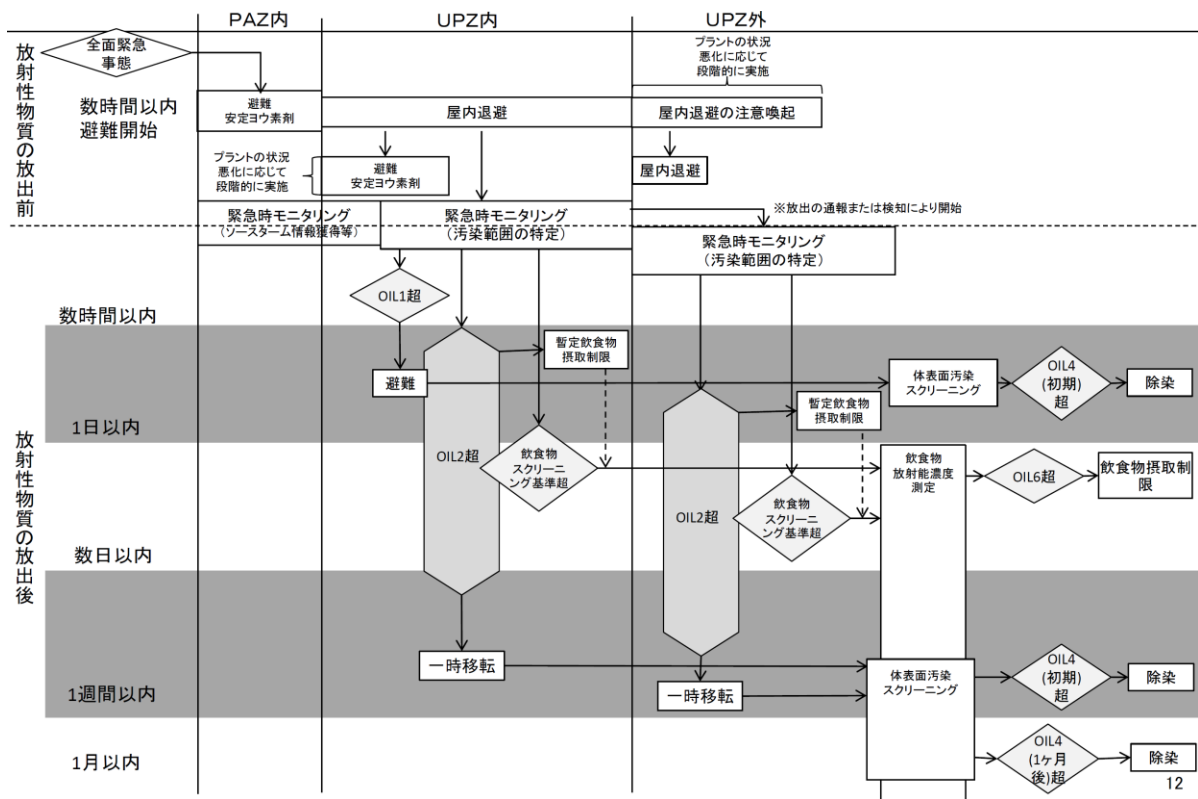


図 2.5.2-2 防護措置実施のフローの例

(出典：原子力災害対策指針（平成 25 年 9 月 5 日全部改訂）[15])

2.6 安全対策技術の考え方と評価方法に対する考察

本節では、安全対策技術の枠組みを構築するとともに、安全対策技術を選択する際に必要となる評価方法について検討を加えた。

2.6.1 安全対策技術の考え方（枠組み）の検討

平成 24 年度の検討において、地震や津波を中心とした大規模な自然災害（以下「起因事象」という）による外力が発生した場合、どのような異常状態や事故（クライシス状態）が生じるかが検討されている（以下、この検討を「状況設定」という）。また、異常状態や事故への対応について検討が加えられ、候補となる対策技術が抽出されている。

一方で、本年度の検討では、操業期間中の安全確保のための安全要件と技術要件が抽出・整理してきた。また、最新動向として、放射線安全と自然災害からの市民の避難計画策定の動向に調査を行ってきた。

これらの成果を踏まえ、操業時安全性の確保に向けた安全要件や技術要件と、安全対策技術との関係について整理を図った。検討結果を図 2.6.1-1 に示す

自然災害に対する異常状態や事故（クライシス状態）は単独または重畳して生じ、最終的な安全性の喪失は、熱的影響（T）、水理的影響（H）、力学的影響（M）、化学的影響（C）を分類とした状態に至るものと考えられる。従って、安全対策技術については、最終的な状態に対するものとして整理していくことが適切であると考えられる。

また、安全対策技術は、処分システムについて物理的なスケールを区分として、整理されるものと考えられる。また、個々の技術要件に対する安全対策技術は、区分されたスケールのそれぞれに存在しているものと考えられる。合わせて、各スケールで安全対策技術を重層的に選択することにより、安全対策は多重化され、更なる安全性の確保に寄与していくものと考えられる。

各スケールに属する安全対策技術は、以下のような特徴を持つものになると考えられる。

- ・ファースケールの安全対策技術は、地層処分施設の立地環境に属するものであり、候補地選定段階における
- ・処分場スケールの安全対策技術は、候補地内でのレイアウトに属するものであり、候補地選定段階で得られた情報を条件に、安全性を確保するための施設配置に属する対策が主たるものになる。
- ・坑道スケールの安全対策は、処分場が設置される立地条件とそれに適したレイアウトを条件に、安全性を確保するための坑道のジオメトリーや坑道に付帯する設備に属する対策が主たるものになる。
- ・人工バリアスケールの安全対策は、立地環境とレイアウトおよび坑道および付帯設備の仕

様を条件に、人工バリアの特性と付帯する設備に属する対策が主たるものになる。

なお、安全対策技術の選択にあたっては、閉鎖後長期の安全性への影響について検討を加え、整合を図っていくことも重要となる。「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」のそれぞれの要件に基づいて処分場建設の計画・設計を行った場合、特別な措置なしでは各要件が両立しない場合もある。

例としては、処分場を建設・操業するために設置・使用する機材などの残置物が処分場の閉鎖後にも残るために処分場の閉鎖後長期の安全性に有意な影響を及ぼす可能性があるというケースや、操業中に地下空洞を開けた状態で長期間にわたって換気や排水を行うことにより母岩が影響を受け、母岩の特性が変化するというケースがある。このようなケースに対しては、科学的な対処と工学的な対処の二種類の対処により要件の両立を図ることになる。「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の要件を両立させるための方策の一つとしては、科学的な対処により、残置物の及ぼす影響や操業期間中に地下環境が受ける擾乱の度合いを評価するものである。この例としては、建設・操業中に設置された支保工（コンクリート、鋼材、有機系材料）が、人工バリアの変質による水理学的特性の変化や、人工バリア・天然バリアによる核種の遅延効果などに及ぼす影響を各種試験やシミュレーションなどにより科学的に評価するという方法が考えられる。



図 2.6.1-1 処分システムの安全確保に向けた安全要件・技術要件と技術対策との枠組み

2.6.2 安全対策技術の評価方法に対する一考察

本節では、一般的な施設を計画する際の安全性の考え方と、地層処分施設の安全性を確保するための考え方をまとめる。

(1) 一般的な施設における安全性の捉え方

安全な施設を工学的に計画することは、対象となる施設の耐用期間を想定し、その耐用期間に対する安全性と使用性を十分に確保するように計画することになると考えられる。

地層処分施設の長い供用期間には、地震荷重や風荷重だけではなく火災・爆発・無知・錯誤などが原因となる外力も含めた様々な被害を受け、時には倒壊（破壊）する外力を受ける可能性がある。外力は、その発生過程の不規則性と発生時期、継続する時間などに様々な変動がある中で、これらの外力の変動を考慮して計画している。しかし、経済性などを考慮した上で妥当と考えられる外力レベルを設定しているため、極稀れに発生する（設定レベルを超過する）外力を受けた結果として、施設が破壊すると考えらえる。このようなことは、耐力においても材料の物性値の変動や製作精度の変動など、さまざまな不確定要因（uncertainty）による変動性を有することから、外力と同様に施設を破壊する誘因になっているものと考えられる。

これらを踏まえると、安全性を十分に確保した施設を計画することは、絶対に破壊しないものをつくるということではなく、破壊の危険性が許容される値（Acceptable Risk）の範囲内において計画をすることが求められる。

1) 安全性を評価する際の基本的な考え方

供用期間中に想定される様々な外力に対し、安全性や使用性を経済的に満足するように、施設を計画していくことになる。一般に、施設の計画では、「施設に作用する外力」より「施設が保有する耐力」が大きければ、安全であると評価することができる。すなわち、施設は、数式 2.6.2-1 が成り立てば安全（safety）であると評価される。

$$S \text{ (外力)} \leq R \text{ (耐力)}$$

数式 2.6.2-1

SとRは同次元の特性である必要がある。たとえば、Sが荷重ならRは耐荷力、Sが曲げモーメントならRは抵抗曲げモーメント、Sが応答変位ならRは限界変位、SがひずみならRは限界ひずみとなる。

もし、数式 2.6.2-1 が、 $S > R$ の関係の場合は、安全な状態ではないことを意味し、力学的には「破壊」する状態、放射線安全の観点からは「被ばく」する状態を意味する。外力Sと耐力Rを明確に求めることができれば、比較的簡単に安全性を確認できるが、複雑なシス

テム系であったり供用期間が長くなったりすると、外力 S 、耐力 R ともに、様々な不確実性を持つことになり、その判断には複雑さが増すことになる。

不確実性が存在する中で、安全性を検討して照査する手法には、確定論的検討手法と確率論的検討手法がある。どちらの検討手法とも、数式 2.6.2-1 を満たすことには変わりはないが、確率論的検討手法では、外力 S や耐力 R に用いる変数を確率変数として扱うことに大きな相違点がある。

十分な説明性を持って不確実性を確定的に論じることができれば、確定論的検討手法によって評価することが合理的である。しかし、外力 S や耐力 R には様々な不確実性を持つことになり、確定論的検討手法を用いて安全性を合理的に説明するのには限界があると考えられる。すなわち、様々な不確実性のある中で、確定論的検討手法で安全性を示すと、リスクはゼロとなり、それ以上の性能が必要としないとの印象を与えることになる。したがって、許容される安全性について、安全でないリスクを確率として定量的に示すとともに、このリスクをステークホルダーと共有して持つことが大切となる。これは、「常にリスクが存在することを明示」することを志向するエネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）の考え方とも合致する。

確率論的検討手法の長所と短所について以下にまとめる。

（長所）

- ・地震などによる外力は確率的現象である
- ・設計自体に不確実性を適切に考慮する必要がある
- ・個々の要素や部材の評価が構造物全体の安全性を評価するのに適する

（短所）

- ・安全目標を確率で表現しにくい
- ・安全性検討の全体のシナリオがみえにくい
- ・不確実性の定量化が必要で困難な場合がある

2) 安全率による評価

不確実性を有する施設の安全性は、次式で、定義される安全率 r を導入して照査している。

施設の計画において外力 S は、供用期間中にそれ以上の外力が作用しないような値を設定する。また、耐力 R は、経済性を含めて検討して外力を下回らないように設計する。したがって、安全率 r は、数式 2.6.2-2 となる。

$$r = \frac{R_{min}}{S_{max}}$$

数式 2.6.2-2

しかし、外力 S と耐力 R には多くの不確実性を起因する要因が存在するため、 R_{min} や S_{max} を確定的な設定は現実と異なることになる。したがって、外力 S や耐力 R の確率分布を考慮し、安全率を定義する方法が用いられることになる。なお、外力 S や耐力 R の確率分布については、材料が持つ強度などのように品質管理によって推定できる確率密度と、地震などの自然現象のように推定が事実上困難な確率密度に分けることができる。

(2) 安全性を客観的に判断する方法の検討

安全性を客観的に判断するために目標となる値（以下、安全基準と呼ぶ）の設定が必要となる。安全基準の設定法を表 2.6.2-1 に示す。

安全基準の設定には、以下の4つに分けることができる。

- ① 事故統計に基づく方法
- ② 現行の基準（手法）へのキャリブレーションに基づく方法
- ③ 他の災害危険性との比較による方法
- ④ 人的損失に対する危険性回避に要する投資効果による方法

③および④の方法は、石油化学工業の安全評価、また原子力発電所・LNG 施設・ダムなどの危険度評価（risk assessment）の分野で一般的に用いられている方法である。

表 2.6.2-1 安全水準の設定法[21]

	方法	方法の概要	問題点	適用例
①	事故統計に基づく方法	事故、損傷に関する統計資料に基づき(年)破壊確率を求め、これを参考として許容破壊確率 P_{fa} (許容安全性指標 β_a) を決定する方法	<ul style="list-style-type: none"> 母数(対象とする構造物の総数)が定めにくいこと。 事故の原因にはヒューマンエラー等による場合が多く、その影響を受け、設計段階での $P_{fa}(\beta_a)$ を直接定めることが難しいこと。 	<ul style="list-style-type: none"> $P_{fa}(\beta_a)$ の決定の参考値として用いられている。 ダムあるいは鉄道、高速道路の橋梁等に対して P_f を求めた事例がある。
②	現行設計示方書へのキャリブレーションに基づく方法	現行の設計示方書により設計された種々の構造物、部材の $P_f(\beta)$ を求めて、その資料に基づき $P_{fa}(\beta_a)$ を定める方法	<ul style="list-style-type: none"> 現行示方書が最適解を与えているという保証はないこと。すなわち、現行示方書が安全側すぎるのではないか(危険側と危惧されることもある)という指摘があること。(P_f, β の評価が部材を対象とすることになる。) 	<ul style="list-style-type: none"> ANSI, AISC など多くの示方書改訂は、この方法によっている。
③	他の災害危険性との比較による方法	構造物の破壊に伴って予測される(1名)の死亡危険性を、自然災害あるいは他の人為災害による危険性と比べて、ある水準以下に設定する方法	<ul style="list-style-type: none"> 一般の土木・建築構造物に適用できる評価式は未だ確立していないこと。 統計データが、土木・建築構造物の種別毎に整理されてなく利用できるまでには至っていないこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 石油化学産業における安全評価、また原子力発電所、LNG施設、ダムなどの重要構造物の危険度評価に用いられている。(原子力発電所施設についてはアメリカ原子力規制委員会(U.S. NRC)から③、④に対する暫定値が公表されている。)
④	人的損失に対する危険回避に要する投資効果による方法	構造物の破壊に伴って予測される一人当たりの死亡率を低減させるのに要する費用の大きさを評価する方法(1つの生命を救うのに社会が支払う金額にはみずからある基準があるとする)。	<ul style="list-style-type: none"> 事故は種々の原因によることから、設計段階での $P_{fa}(\beta_a)$ を定めることが難しいこと。 ④では、生命の価値を評価することになることから、価値観の相違により容易に受け入れられないことがあること。 	<ul style="list-style-type: none"> 建築・土木構造物では、構造物の用途、破壊によって生ずる人的損失の可能性、さらに破壊予知の難易などを考慮したいくつかの評価式が提案されている(CI-RIA, Report 63, Allen, D. E.)

また、表 2.6.2-2 は、客観的な判断を行う際に用いる評価方法についてまとめたものである。評価法としては、この他にも効用理論に基づく方法、多目的問題解決法など多くの方法がある。

表 2.6.2-2 設計代替案の評価[21]

	方法	方法の概要	問題点	適用例	備考 (参考文献)
①	期待総建設費最小化に基づく方法	期待初期建設費 C_I 、耐用期間中の破壊確率 P_f および期待再建設費 C_F から得られる期待総建設費 C_T ： $C_T = C_I + P_f C_F$ を最小とする設計代替案を最適案として採用する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・建設費、特に期待再建設費の見積りが難しい。 ・構造信頼性では、一定の安全基準を満足することなく、この方法（あるいは②の方法）で設計案を決定することについては、法律あるいは行政面からみて問題があるとの指摘がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・この方法は古くから紹介されており、多くの検討事例がある。（海洋構造物、盛土構造物など） 	文献 14), 17), 18), 19) 20)
②	費用－便益評価に基づく方法	期待初期建設費用と建設後得られるであろう期待便益を貨幣換算して得られる期待利益とを対比して評価する方法。この方法では、直接・間接的な経済効果の評価を主に行うが、社会面、環境面への評価も同時に考慮するように改善した方法もある。	<ul style="list-style-type: none"> ・便益の評価は、一般の設計技術者の手にあまるものである（専門家への依頼が必要）。 ・便益の評価に、間接的な経済効果また、社会面、環境面への評価を考慮した場合でも、すべての人を説得しえるものとはなりがたい。（対象が特定の Client になれば欲求を満足させることは容易になる）。 	<ul style="list-style-type: none"> ・社会システム、たとえば交通施設、都市計画などの評価に使われている。 ・重要構造物の危険度評価に一部適用されている。（一般の土木・建築構造物の信頼性設計への適用は少ない） 	文献 21), 22), 23) 文献 24), 25)

1) 現行基準とのキャリブレーションに基づく方法

許容破壊確率 (P_{fa})、許容安全性指標 (β_α) を設定する最も一般的な方法は、現行の基準に従って構築された同種の施設で、ほぼ同じ条件を有する実在の施設の破壊確率を算定し、この値をもとに許容破壊確率 (P_{fa}) あるいは許容安全性指標 (β_α) を決定する方法である。

この方法は、現行の基準に従って構築されている施設が有する信頼度が、社会的にも十分に容認され、経済性と安全性についてもある程度まで均衡がとれていることを前提として適用される方法である。

実在する施設の許容破壊確率 (P_{fa}) について具体的な検討されている。表 2.6.2-3 は、アメリカを中心とした設計基準に対するキャリブレーションの結果から得られた安全性指標 β の値、また実際に設定されている許容安全性指標 (β_α) を示したものである。これらの値は、外力の組合せ、計画に用いられた部材の種類、寸法、破壊モード (曲げ、圧縮、せん断など) によって変化するものであるが、一般の建物や道路橋などの施設では、許容安全性指標 (β_α) を 2.0~3.5、許容破壊確率 (P_{fa}) $2.27 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-4}$ の範囲の数値に設定している。

表 2.6.2-3 施設の許容破壊確率[21]

構造物の種類	P_f or P_{fa} β or β_α	10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8}										備考 (参考文献)		
		1	2	3	4	5								
一般 構造 物 (米 国)	構造物設計荷重 (ANSI-A58)			●	●									(29) 第8章参照
	鋼構造物 (AISC -LRFD 示方書)		●	●	●									(30)
	コンクリート 構造物			├───●───┘										(31)
	道 路 橋			├───●───┘										(32)
	鋼構造物 (カナダ) (CSA S 16.1-1974)			├───●───┘										(33), (34)
	鋼構造物 (日本) (建築 学会 LRFD 指針 (原案))		●	●	●									(35)
原子力	コンクリート製原子炉 格納容器 (米国試案)									├───?───┘			(36) P_{fa} を $10^{-5} \sim 10^{-7}$ で設定する (?)	
海洋 構造 物	鋼製はり受け型プラット ホーム (メキシコ湾)			├───┘									(37) API 規準に よる設計	
	鋼製はり受け型プラット ホーム (アラスカ)			├───┘										
	固定式プラットホーム (米国 API)			├───┘									(38)~(40)	
	鋼製固定式プラットホ ーム (デンマーク DOR)			├───┘										

L, S, W, E はそれぞれ積載荷重、雪荷重、風荷重、地震荷重の組み合わせ荷重を表わす (第8章参照)。
また、●印は許容値を表わし、破線はキャリブレーションによる値である。
図中の値は耐用期間を考慮した値である (一般には 50 年)

原子力発電所施設の中で最も重要な構造物であるコンクリート製の原子炉格納容器に対する 1 つの試案は、許容破壊確率 (P_{fa}) を $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 、許容安全性指標 (β_α) を 4.27~5.20 としており、アメリカにおける一般の建築構造物に対する許容破壊確率と比べて 2 桁ほどその値を小さくし、安全側に設定しようとしている。

海洋構造物の許容安全性指標 (β_α) は約 2.5 と一般の建築・土木構造物に対する許容値とほぼ同じか、あるいはわずかに小さい値になっている。これは、海洋構造物は厳しい環境の

中に建設されるものもあるが、以下の要因が関係していると考えられる。

- ・その耐用期間が 20 年と短いこと
- ・施設の目的が石油掘削などの産業活動のための専用施設として利用され、従業員たちもその危険性（トロール船の乗組員と同じ程度の危険度の負担）を承知していること
- ・環境汚染を除けば第三者に危害を与えることがほとんどないこと
- ・事故に備えて待機船などを含めた緊急配備計画が整備されていること など

土質・基礎関係の構造物の許容破壊確率については適切な資料はないが、その設定のためには Meyerhof による図 2.6.2-1、Whitman、Baecher による図 2.6.2-2 などが参考となる。

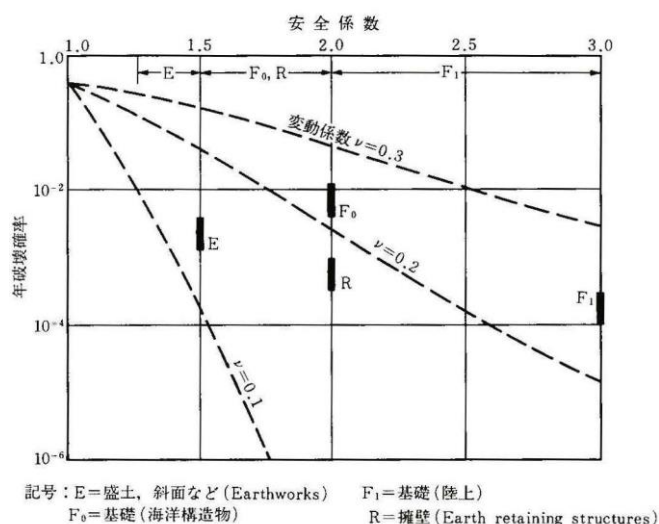


図 2.6.2-1 Meyerhof による土質・基礎構造物の年超過確率[21]

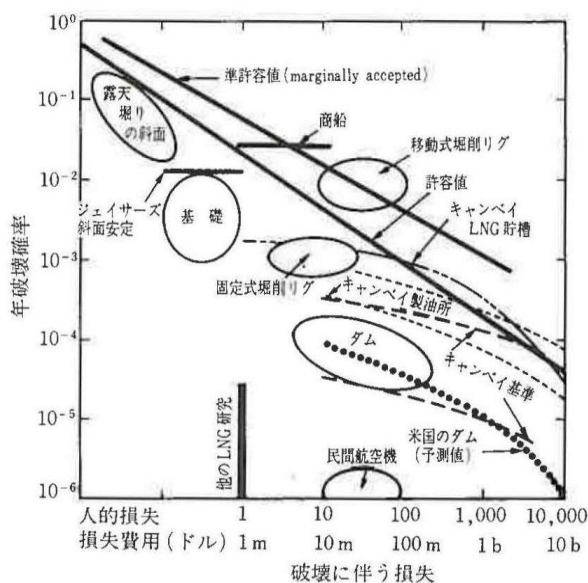


図 2.6.2-2 Whitman らによる土質・基礎構造物の年超過確率[21]

2) 他の災害危険性との比較による方法

人類は、地震・台風などの自然災や人為による災害に出会う可能性を、大小にかかわらず常に持っていると考えべきである。

また、新しい施設の構築に対して住民が期待することは、直接あるいは間接的に、経済的あるいは文化的に、より良い生活を営めるようになることであり、より多くの便益を享受することにある。しかし、施設の建設に伴って相当の危険性を住民が負担することがわかれば、建設そのものの是非が人々の議論の対象となる。その場合には、建設に伴って生ずる新たな災害の危険性は、他の自然災害あるいは人為災害による危険性と比べて十分に小さく、社会的に容認されうる程度のものであることが求められる。この考え方は、石油化学工業の安全評価や原子力発電所などの重要構造物の危険度評価で用いられている。新たな施設に伴う災害の危険性の水準を、他の災害危険性との比較から設定しようとする方法である。CIRIA のレポート[22]では、この方法による基準を社会的な基準(social criteria)と呼んでおり、この考え方に沿って、施設の破壊によって生ずる資源が損失する可能性、破壊予知の難易などを考慮し、施設の許容破壊確率の算定式を示している。

アメリカ原子力規制委員会(U.S. NRC)は、原子力発電所施設の安全基準の目標を表 2.6.2-4 のように示している。

表 2.6.2-4 原子力発電所施設の安全基準の目標(U.S. NRC)

		目 標 内 容
定性的な目標	①	一般公衆個人は、原子力発電所施設の操業によって、生命や健康に対して余分な危険性を負うことがないように、保護されねばならない。
	②	原子力発電所施設の操業によって生命や健康に及ぼす危険性は、他の発電方式による危険性と同等かそれ以下でなければならないし、またその他の災害危険性に余分の危険性を負わせてはいけない。
定量的な目標	①	原子力発電所施設の近隣住民が、原子炉の事故によって死亡する危険性は、アメリカ市民が普通にさらされているその他の事故によって死亡する危険性の合計の 0.1%を超えてはならない（一般公衆個人の危険性）。
	②	原子力発電所施設の近隣住民が、施設の操業が原因によりガンで死亡する危険性は、その他の原因によりガンで死亡する危険性の合計の 0.1%を超えてはならない（社会的危険性）。
	②	便益－費用の関係は、1人当たり1レム減少するための基準として1,000ドルとする（利益－費用の基準）。
	③	大規模の炉心融解に至るような事故の発生する確率は、1年間に1炉心当たり通常1万分の1以下でなければならない（施設性能の基準）。

上記の目標のうち、①、②は社会的な基準、③は表 2.6.2-5 に示した方法のうち4番目の人的損失に対する危険回避に要する投資効果による方法に対する基準である。④は施設外部

への放射能漏れに至る過程の重大局面として設定されたものである。(さらに、これに続くものとして構造部材の安全基準として、に示されるように、設計示方書としてその安全性を照査、保証するようになっている。)

また、原子力発電所施設の建設に伴う危険性と、他の災害による危険性とを比較した結果の一例をに示す。

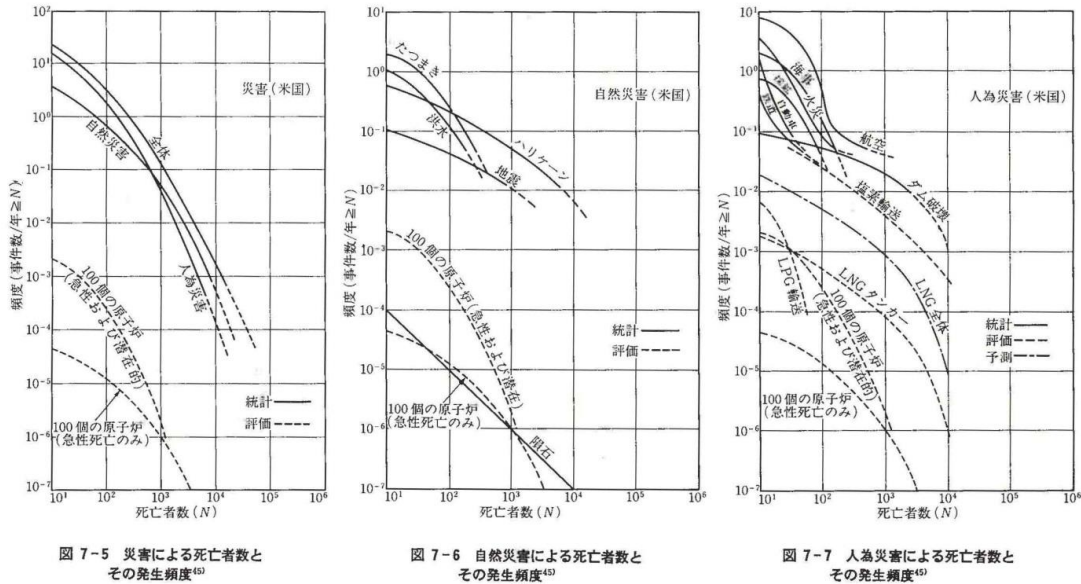


図 7-5 災害による死亡者数とその発生頻度⁴⁵⁾

図 7-6 自然災害による死亡者数とその発生頻度⁴⁵⁾

図 7-7 人為災害による死亡者数とその発生頻度⁴⁵⁾

図 2.6.2-3 災害、自然災害、人為災害による死亡者数とその発生頻度[21]

施設の信頼性設計を実施する際の危険度評価は、想定される複数の原因を考慮して求められるもので、危険度評価の実施により災害に伴う死亡者数とその発生頻度を算定した上で、施設の許容破壊確率をどの程度の値としておけばよいのかということは非常に多くの議論が必要である。

一方で、施設の計画において上記のような危険性を直接的に取り入れることができる許容破壊確率の算定式が提案されている。CIRIA では、社会的な基準を満足するものとして、構造物の許容破壊確率を与える式として次式を提案している。

$$P_{fa} = \frac{10^{-4}}{n_r} K_s T$$

数式 2.6.2-3

P_{fa} : 耐用期間中の構造物の許容破壊確率 (原因は特定しないもの)

T : 構造物の耐用期間 (年)

K_s : 社会的基準係数(social criterion factor)、表 2.6.2-5 の値

n_r : 破壊時に構造物の中あるいは近くにおいて、被災するかも知れない人間の平均的な数 (単位:人)。 n_r の評価は図 2.6.2-4 によれば良い。

表 2.6.2-5 社会的基準係数[21]

構 造 物 の 種 類	K_S
公共建築物, 学校, 病院など (places of public assembly) ダム	0.005
家庭 (domestic), 事務所, (商業, 産業)	0.05
橋 梁	0.5
タワー, マスト, 海洋構造物	5.0

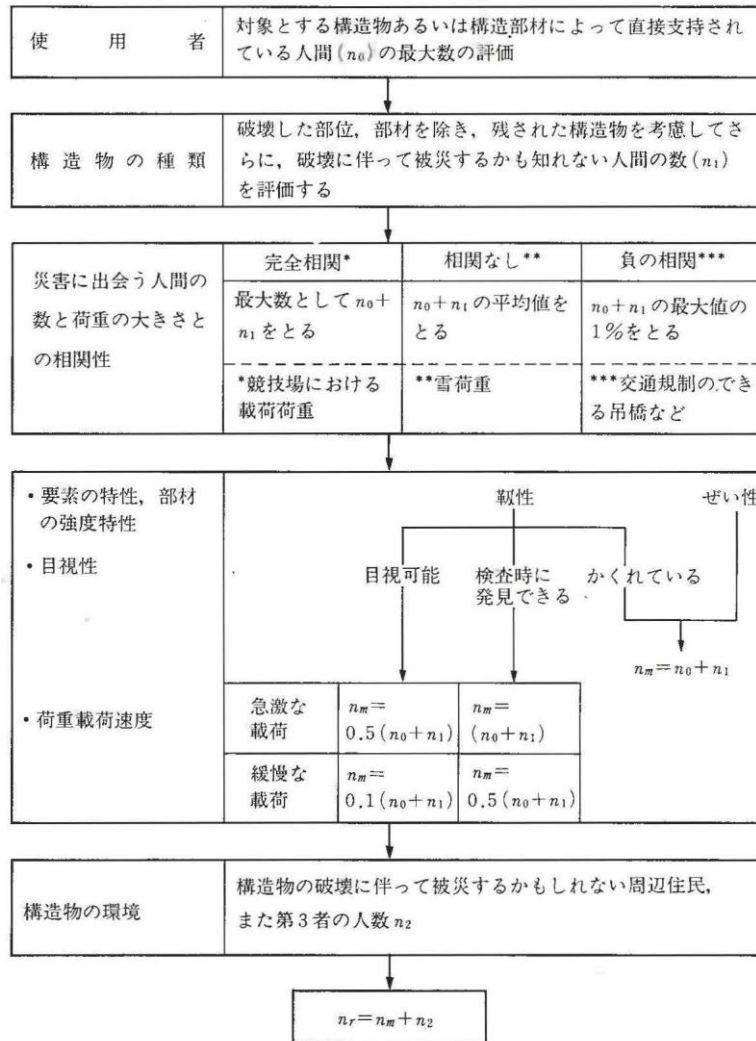


図 2.6.2-4 n_r の評価法[21]

また、数式 2.6.2-3 から求められる許容破壊確率は、種々の原因によるものをすべて含んだ値であるので、CIRIA のレポートにおける許容破壊確率は、この値をさらに 0.1~0.25 倍としている。

さらに、地層処分施設における安全評価の分野では、目的変数を最大の線量と設定し、説

明変数（パラメータ）の重要度と影響度を以下のように設定しているところである（第2次取りまとめ第Ⅲ分冊）。

重要度とは、設定したパラメータの変動範囲内での線量の変動量

影響度とは、重要度／パラメータの変動率

操業安全性の確保に向けて安全対策技術を選択する際においても、この影響度を着目することにより、安全対策技術の効果を客観的に評価できるものと期待される。

2.6.3 自然災害に対する安全対策技術の整理

安全性を客観的に評価していくための手法について前項にて整理してきた。本項では、この手法の導入を前提に、必要となる技術の抽出と整理を行う。

自然災害に対する安全対策技術は、着目するスケールに分類して整理され、分類したスケールにおいて技術要件に対応した安全対策技術を選択することにより、多重化した安全性を確保することが可能となる。すなわち、安全対策技術の選択によって、処分システムなどの各スケールで有する性能が定量化されることになる。

一方で、自然災害に対する安全性を評価するためには、シミュレーション技術が必要となる。これは、自然災害は再現することができないため、机上の検討で評価をしていく必要があるからである。また、このシミュレーション技術によって、各スケールの応答が導きだされることになる。なお、シミュレーション技術には、放射線安全と一般労働安全に対応するツールが求められることになる。

以上の安全対策の枠組みについて概念を図 2.6.3-1 に示す。

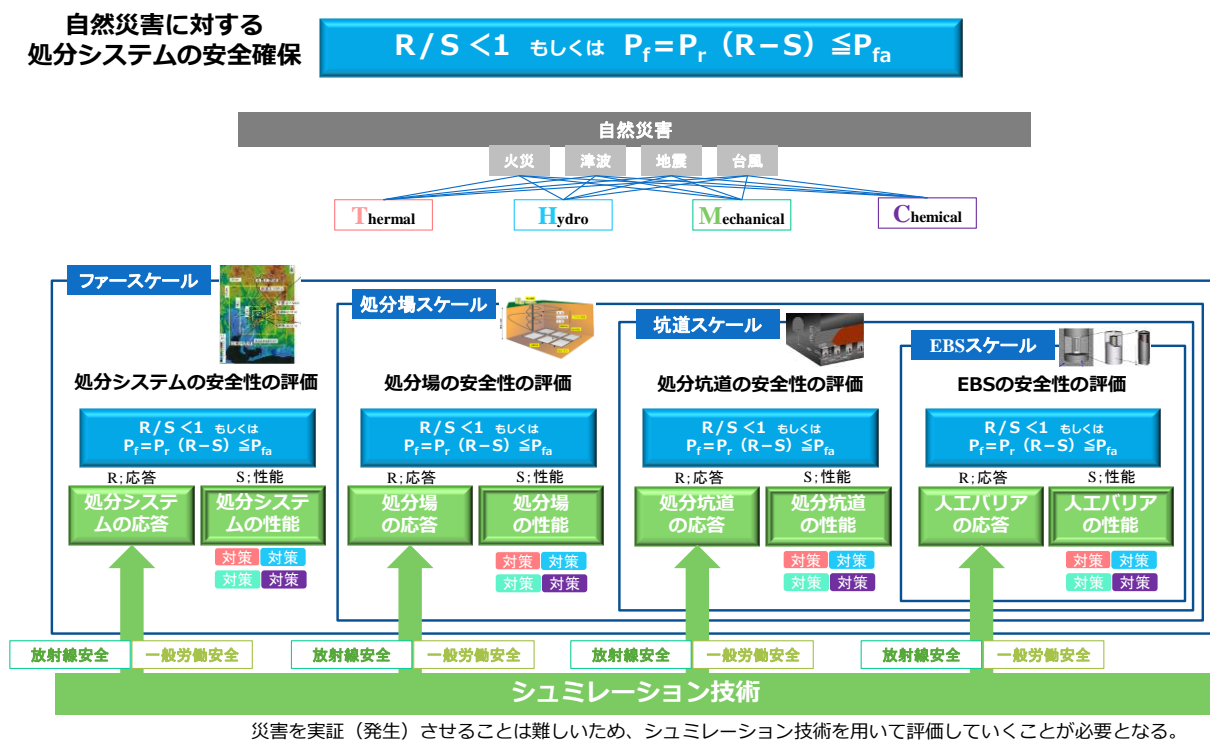


図 2.6.3-1 自然災害に対する地層処分施設の安全性の評価と安全対策技術の整理

また、前項までの検討および昨年度までの検討成果を踏まえ、操業期間中の安全対策技術について、安全機能と上記スケールにて整理した結果を表 2.6.3-1 に示す。

一方、事業を遠隔に進めるための手法として PDCA サイクル手法がある。PDCA サイクル

(PDCA cycle、plan-do-check-act cycle) は、事業活動を円滑に進める手法の一つである。Plan (計画) → Do (実行) → Check (評価) → Action (改善) の4つの段階を繰り返して進めることにより、継続的に品質を改善していく手法である。この考え方は、ISO 9001、ISO 14001、ISO 27001、JIS Q 15001などの管理システムや、反復型開発などに広く反映されているとともに、労働安全衛生においてもPDCAサイクルを活用してリスクアセスメントを行うことで継続的にリスクの低減を図っていくことができる。地層処分における事業期間中の安全性の確保においても、PDCAサイクルを廻せるように準備していくことが必要であると考えられる。

表 2.6.3-1 各スケールにおける操業期間中の安全対策技術の整理

分類		安全機能	技術要件	ファー スケール	処分場 スケール	坑道 スケール	人工バリア スケール
一般労働安全	作業環境の 維持	空洞の力学的安定性の確保	主応力方向や割れ目に対して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を確保すること	応力の異方性や割れ目の少ない岩盤の選定	応力方向・割れ目を考慮した坑道レイアウト	支保設計	—
		酸素濃度の管理	換気経路を確保し、かつ、坑道内の風速が過大とならないこと ダクト等の換気設備の設置など換気に十分な坑道面積を有していること	—	換気路(レイアウト)の確保	換気設計	—
		温度・湿度の管理	換気経路を確保し、かつ、坑道内の風速が過大とならないこと	地温の低い候補地の選定	換気路(レイアウト)の確保	換気設計	—
		湧水の管理	湧水の排水経路を確保すること 排水路および排水のための設備の設置が可能であること	湧水の少ない候補地の選定	排水路(レイアウト)の確保	排水設計	—
		インフラ設備の管理	給水・給電・通信のための設備の設置が可能であること	—	インフラ敷設路(レイアウト)の確保	給水・給電・通信(状況把握含む)設備設計	—
	災害の発生・拡大防止	防火対策等の災害防止対策の設置	火災等の防災設備を設置すること	—	防火区画(レイアウト)の確保	防災設備設計	人工バリアの限界特性の把握
	災害時の避難経路確保	避難経路の確保	緊急時の避難経路を確保すること	—	避難経路(レイアウト)の確保	避難経路設計 救援・救出設備設計	人工バリアの限界特性の把握
放射線安全	廃棄体からの放射性物質の放出防止	廃棄体の破壊の防止	廃棄体が密封されていること フェールセーフ機構により異常時に廃棄体の破損を防止すること インターロック機構により、誤操作による廃棄体の破損を防止すること	—	搬送路(レイアウト)の確保	搬送定置設備の設計	廃棄体の限界特性の把握
	放射線遮へい	搬送容器による放射線の遮へい	搬送容器により放射線を遮へいすること 遠隔操作による作業を基本として、操業設備に遮へい壁を設けること	—	—	遮へい容器の設計 遠隔操作の設計	遮へい容器の設計
	放射線管理	管理区域の設定	被ばく量を適切に抑えられる区域を設定すること	—	管理区域の設定	遮へい壁・扉の設計	遮へい容器の設計

2.7 まとめ

本調査・検討では、事業継続性の確保も考慮したうえで、地層処分施設における安全対策に対して、自然災害全般に対する安全対策（技術要件）について整理を行い、昨年度までに整理した技術開発課題、対策技術が安全対策のどこに該当するのか整理し、新たな安全対策（技術要件）について検討を行った。

2.3 節では、事業期間中の安全確保に対する実施主体の考え方を整理した上で、放射線安全と一般労働安全の確保に向けた安全対策および各安全対策を確保する上での対象となる構成要素の整理を図った。さらに、事業中の安全の確保に対する技術要件を整理した。

2.4 節では、第 3 章にて実施した技術要件の整理を受け、地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設・廃棄物管理施設、また、取り扱う廃棄物の種類がガラス固化体とは異なるが地下の施設を有する原子力関連施設として第二種廃棄物埋設施設の関係法令法、および最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について調査・整理した。

地層処分施設の操業中の放射線安全対策は、地上及び地下施設での閉じ込め・遮へい・放射線管理対策、地上施設を介した周辺監視区域外への気体・液体放出管理方法、およびこれらの通常時・事故時の安全評価手法については、今回調査した類似施設の法令・指針に定められた既設の方法により対応可能と考えられる。一方、操業中の地下施設での放射性物質の漏洩や移行の管理・監視あるいは放出管理については、地下処分場に特有のものであり先行類似施設である第二種廃棄物埋設施設での検討事例等を参考に、今後開発すべき課題と考えられる。

2.5 節では、第 2.3 節にて実施した技術要件の整理を受け、地層処分施設の事業期間中の一般労働安全確保に関わる構成要素と技術要件との関係性について考察を加え、安全に係る必要技術を例示した。さらに、一般労働安全に係る必要技術の検討にあたり、日常的に把握しておくべき事項と災害時の対応事項の双方の技術検討が必要であると考えられることから、平常時と災害時の区分で検討の流れを模式図に示した。また、災害の発生・拡大の防止の「防火対策」に着目し、まず地下坑道における火災等の状況を検討の出発点に、安全確保までの流れを、模式図に示した。

また、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による甚大な被害発生を契機に、原子力災害からの公衆安全に係る防災計画が原子力発電所を抱える自治体において策定されつつある。このことから、一般労働安全確保に資する情報として、原子力防災の現状として、原子力防災に係る法令等を整理するとともに、原子力災害特有の対策や、事業者から行政に対する対応と初期対応段階における緊急防護措置について調査・整理を図った。

2.6 節では、前章までの最新の知見などを踏まえて、はじめに安全対策技術の枠組みを構築している。構築した安全対策技術の枠組みは、処分システムを物理的なスケールを区分として、整理したものである。さらに、安全対策技術を選択する際に必要となる評価方法について、一般的な

施設における安全性の捉え方を踏まえ、安全性を客観的に判断する方法について検討を加えている。また、これらの検討により構築した枠組みに対して、自然災害に対する安全対策技術の抽出と整理を図った。

今後、事業期間中の操業安全の確保に向けた安全対策技術について、先行類似施設での検討事例などを参考にしつつ、客観的な判断を加えることにより、技術調査や研究開発を効率的かつ効果的に進めていく一助になるものと考えられる。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010年度版）、(NUMO-TR-11-01)、2011年月
- [2] 原子力安全委員会：再処理施設安全審査指針（最新改訂：平成22年12月20日版より）
- [3] 原子力委員会：環境放射線モニタリング指針（最新改訂：平成22年4月15日版より）
- [4] 原子力規制委員会：再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- [5] 原子力規制委員会：廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- [6] 原子力規制委員会：再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
- [7] 原子力安全委員会：第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方
- [8] 原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- [9] 発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針、原子力委員会
- [10] 原子力規制委員会：核燃料物質の加工の事業に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示
- [11] 経済産業省：平成23年東北地方太平洋沖地震の特にやむを得ない緊急の場合に係る実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示
- [12] 経済産業省：核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則
- [13] 科学技術庁：核燃料物質の加工の事業に関する規則第七条の六等の規定に基づく核燃料物質等の工場又は事業所内の運搬に関する措置等に係る技術的細目等を定める告示
- [14] 原子力環境整備促進・資金管理センター：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）のうち処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術の開発報告書
- [15] 原子力規制委員会：原子力災害対策指針（平成25年9月5日全部改正）
- [16] 独立行政法人日本原子力研究開発機構（佐藤 宗平、山本 一也）：我が国の新たな原子力災害対策の基本的な考え方について－原子力防災実務関係者のための解説－(JAEA-Review2013-015)
- [17] リサイクル燃料貯蔵株式会社：リサイクル燃料備蓄センター原子力事業者防災業務計（平成25年3月）
- [18] 内閣府、消防庁：地域防災地域防災計画（原子力災害対策編）作成マニュアル（県分）（平成24年12月一部修正）
- [19] 内閣府、消防庁：地域防災地域防災計画（原子力災害対策編）作成マニュアル（市町村分）（平成24年12月一部修正）
- [20] 鈴木基行：構造物信頼性設計法の基礎，森北出版株式会社，2010年12月．
- [21] 星谷勝、石井清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986年5月．
- [22] CIRIA（Construction Industry Research and Information Association）Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes, Report63, 1977.
- [23] 原子力規制委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針

第3章 火災事象に対する安全確保対策の検討

3.1 はじめに

本検討は、自然災害に対する操業安全を考慮した火災事象等に対する安全確保対策の検討を行うものである。

平成 24 年度は、地層処分施設と類似した既存の施設について文献調査を行い、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある地震・津波等を選定し、これらの起因事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出・整理した。抽出した最終的な状況に対し、応急対策、恒久対策、対策のための試験・解析を検討・整理し、「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」等を選定した。

平成 25 年度は、国内外の地層処分施設計画等における類似検討の文献調査を行い、それらの検討で適用されている基準等をまとめた。次に地下施設における火災に対する安全性を検討するため、通気解析と避難シミュレーションに基づいた各種検討（施設設定、パラメータ等条件設定）を行い、その考え方や条件設定上の課題を整理した。さらに、通気解析と避難シミュレーションの適用性検討のための事前解析を実施し、本解析に向けた課題の抽出を行った。適用性について検討を行った。さらに、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」では、地上施設での火災を想定した人工バリアの解析を行うとともに、次年度に実施する予定の地下火災を想定した時に必要となる緩衝材の熱特性データを実験により取得した。

本年度は、平成 25 年度の前記解析の結果を踏まえて、立坑・処分坑道等を含めた地下処分施設を対象とした三次元解析実施時の計算負荷の低減や、換気設備の特性および坑道の形状を考慮した風量等を検討した。なお、本検討では通気解析と避難シミュレーションの本解析を実施し、火災事象等に対する作業員の安全性確保に向けた検討を行った。

3.2 検討概要

通気解析を検討する前に、対象となる物質の物理的な基本事項について整理する。

3.2.1 検討の流れ

今年度の検討項目および検討の流れは以下の通りである。

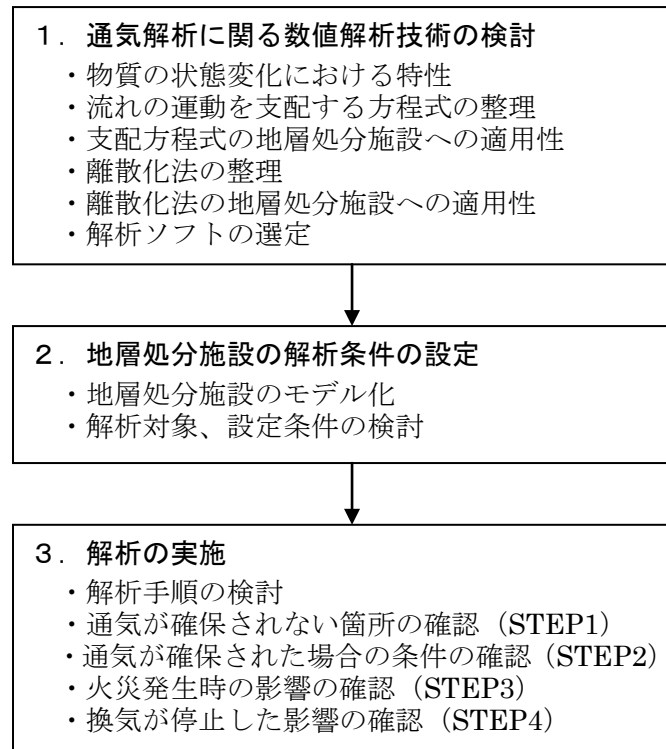


図 3.2.1-1 検討の流れ

3.3 通気解析に関する数値解析技術の検討

本検討で用いた通気解析は熱流体解析の1つであり、計算の結果得られる物理量は、風速、圧力、温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度、一酸化炭素濃度である。熱流体解析も流れ解析の1つであり、流れを表現するために実現象に対して様々な仮定を設け、その仮定のもとで流れを支配する方程式（支配方程式）を導出し、パラメータを与えて支配方程式を解く。支配方程式で得られる解は、ある1点の物理量であるため、計算対象領域全体の物理量を求めるためには、計算対象領域全体を有限個の格子状に切り、各計算格子の物理量を算出し、それらを一定の法則のもとでつなぎ合わせて、計算対象領域全体の物理量を算出する。物理量の算出には、連続の方程式、運動方程式を用い、流れの速度が増すことによって流れに圧縮性の効果が入ってくると、この他に状態方程式や粘性係数を定める式（補助式という）が必要となってくる。

本節では、流体の力学特性に着目し、その運動を司る物質の運動を表現する式を整理し、地層処分施設で活用する数値解析技術について検討する。

3.3.1 物質の状態変化における特性

(1) 物質の三態

物質には気体・液体・固体という 3 つの状態がある。これらは温度や圧力を変化させることにより、固体から液体、液体から気体、というように状態が変化する（状態変化）。また、気体・液体・固体のそれぞれの物質を分子レベルで見ると、分子間の距離は気体・液体・固体の順に長く、分子の運動も気体・液体・固体の順に激しい。「流れ」を力学的に検討する場合には、空気や水の流れを検討することが多く、液体あるいは気体もしくはその双方を扱う。なお、土石流のように液体の中に固体が含まれる場合を対象として「流れ」を力学的に検討する場合は、液体の粘性や固体同士の摩擦力を考慮し、計算上は液体として扱う。

1) 気体

気体の分子運動は不規則である。分子間の距離が液体や固体に比べて長いため、分子同士が離れている場合に働く引力や、近づいた場合に働く斥力は、その影響が小さいものと考えられ通常無視する。

2) 液体

分子の集合状態は密であり、分子運動は気体ほど不規則ではない。また近い距離にある分子同士は、おおよそその配列を保ちながら運動する。

3) 固体

分子の集合状態は規則的である。分子間の力が強く作用しており、気体や液体のような激しい分子運動はせずに、分子は決まった位置の周りを微小に振動している。

(2) 物質の状態変化と性質の変化

物質に状態変化が起こると、その性質が変化する。物質の状態変化は、物質の「質量」「体積」「密度」で確認することができる。質量は、物質がもともと持っている量であり状態変化による変化はない。体積は、物質そのものの大きさであり、これは分子間の距離が離れているほど大きくなる。このため、体積は温度が高くなるほど大きくなり、圧力が低くなるほど大きくなる。密度は、物質の混み具合を表したものであり、通常は単位体積あたりの質量を指す。密度は、温度が高くなるほど小さくなり、圧力が低くなるほど小さくなる。

(3) 物質の圧縮性・非圧縮性

物質は温度・圧力の変化により状態が変化し、性質（体積・密度）が変化する。この性質の変化のうち、圧力の変化による性質の変化を圧縮性・非圧縮性として表される。圧縮性は、圧力を受けたときに体積が減少する性質で、非圧縮性は圧力による体積変化がない性質を指す。

(4) 流体を数式で表すための基本的な物理量

前項までで示したように、物質は温度・圧力で状態が決まり、気体⇒液体⇒固体のような状態変化は、体積・密度の変化で表現できる（質量は不変）。なお、密度が単位体積あたりの質量を指すため、一般的には体積の変化は密度の変化として考える。

以上より、流体そのものを表す基本的な物理量（流体としての形を保持するための物理量）は、温度、圧力、密度となる。

1) 温度

物質を構成する分子の運動エネルギーの統計値（℃）のことで、熱さや冷たさ度合いを表したものである。物質は温度が高くなると膨張する（体積が増加する）性質があり、容積一定のもとでは圧力が高くなる。逆に、圧力の変化でも物質の状態が変化するため、温度は一定の圧力（標準気圧）のもとでの物質の状態により定義されている。基準となっている物質は、純粋な水であり、標準気圧のもとで氷（固体）が液体になる温度を 0℃、液体が気体に変化し始める温度を 100℃と設定されている。

2) 圧力

圧力とは、物質を構成する分子の運動量の大きさであり、一般的には単位面積あたりにかかる力(N/m^2)で表現される。ある点での圧力は、その点を含む任意の面(圧力が掛かる面)の方向には依存しない値として表される。流体を力学的に検討する際には、流体が流れている状態で物質そのものが持っている圧力が静圧、流れの運動エネルギーに相当する圧力が動圧とされ、動圧は $\rho q^2/2$ (ρ : 密度、 q : 流速)と表すことができる。密度や流速が上がると動圧も大きくなる。

3) 密度

単位体積当りの質量(kg/m^3)を表す。数値計算では流れ場全体の密度を同一と仮定し、時間変化による密度変化はないものとして扱う。

(5) 状態方程式

温度 (T)、圧力 (P)、密度 (ρ) のうち、どれかひとつの物理量が決定されれば、他のふたつの量が決定されるように、温度、圧力、密度を関係付ける式が状態方程式である。状態方程式は、圧力を温度と密度の関係式で表すものが一般的であり、温度と密度の関係を「一定」または「温度と密度の間に関係式を与える」等の条件を付けて、圧力を求めることができる式である。状態方程式で最も有名なものは、理想気体の状態方程式であり、気体の流れを力学的に解く上では、計算対象とする気体を理想気体と仮定し、その状態方程式を用いて計算するのが一般的である。理想気体とは、物質の分子間力がなく、分子自体の体積をゼロとし、かつ温度や圧力の変化による体積変化を考慮しない (体積・密度＝一定)、という仮想的な気体である。なお実在する気体 (実在気体) は温度や圧力の変化により体積や状態が変化するが、気体の分子間力や分子自身の体積の影響がでるような状態とは低温・高圧状態であり、人が活動できるような常温・常圧程度であれば実在気体でも理想気体とみなすことができる。

1) 理想気体の状態方程式

理想気体の状態方程式は次式で表される。

$$pV=nRT$$

数式 3.3.1-1

$$pV/nRT=1 \text{ (一定)}$$

数式 3.3.1-2

ここで n は気体の物質量 (mol) であり、理想気体の状態方程式の中では $n=1$ として扱われる。 R は気体定数 (gas constant, 単位質量当たり) で、気体の種類に関係なく $R=8.3143\text{J/K} \cdot \text{mol}$ の値をとる。これに分子量 M を掛けると一般気体定数 R_0 となる。

$$R_0=MR=8.3143 \cdot M \text{ (J/K/mol)}$$

数式 3.3.1-3

気体定数 R_0 をアボガドロ数 $N=(6.022 \times 10^{23})$ で割ると、ボルツマン定数 k になる。ボルツマン定数とは、分子1個当りの気体定数である。

$$k=R_0/N=1.38066 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$$

数式 3.3.1-4

3.3.2 流れの運動を支配する方程式の整理

(1) 基本事項の整理[1]

1) 位置

ある点 P の位置を表すために座標を用いる。座標は、デカルト座標 (x,y,z) 、円柱座標 (r,θ,z) 、球座標 (r,θ,φ) 、一般座標 (ξ,η,ζ) などがある。各座標に沿う実際の長さの単位は(m)である。

2) 速度

物質には気体流体の要素が各瞬間に占める位置が単位時間に変化する割合である。ある流体要素を意識して、それが運動していく途中での速度を考えるよりは、空間分布を重視して、ある点 $P(x,y,z)$ における流体の速度 (u,v,w) を用いた方が便利である。なおこの表現方法をオイラー (Euler) 表示と呼ぶ。

3) 流線

ある時刻での速度ベクトルの分布を空間に描き、それらの速度ベクトルの接線を結んで出来る曲線。定義式は下記の通り。

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{u}{V}, \quad \frac{\partial y}{\partial s} = \frac{v}{V}, \quad \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{w}{V}$$

数式 3.3.2-1

ここで、 s は流線に沿う長さで、 V は速度の大きさ ($V^2=u^2+v^2+w^2$) である。

4) 流管

流線に取り囲まれた管を指す。流管の側壁を流線は突き抜けない。なお、流線および流管は定常流では変化しないが、非定常流では変化する。

5) 定常流と非定常流

流れの様子が時間とともに変化するか否かを表現するとき「定常流」「非定常流」という言葉を用いる。定常流とは、流れの様子が時間とともに変化しない流れを指し、たとえば、速度の関数は場所のみで表される流れである。また、非定常流とは、空間の任意の場所で物理量が時々刻々と変化する流れを指し、たとえば、速度の関数は場所と時刻で表される流れである。

6) 速度歪み

点 $P(x,y)$ の x 方向の速度成分 u を考える。点 P から少し離れた点 $Q(x+\delta x,y+\delta y)$ では速度変化 δu は下記のように表せる。

$$\delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \delta y - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \delta y$$

数式 3.3.2-2

ここで、右辺各項の意味は次のとおり。

- 第1項：単位時間当たりの伸びの割合
- 第2項：せん断変形
- 第3項：回転

速度分布の歪みとして、 $\alpha = \delta v / \delta x$ 、 $\beta = \delta u / \delta y$ が存在するとき、その中で $(\alpha + \beta) / 2$ がせん断変形で、 $(\alpha - \beta) / 2$ が回転である。せん断と回転は別の種類の変形で、せん断には粘性応力が生じるが、回転には生じない。なお、粘性応力は、伸びやせん断変形などの速度分布の歪みに比例する。この比例定数が粘性係数 η である。これを無次元したときに現れるパラメータがレイノルズ数(Reynolds number)である。レイノルズ数が大きくなると流れは乱流になる。

(2) 支配方程式の整理[1] [2][3]

1) 連続の方程式[1]

流れの運動を数式で表すために、流れを途切れの無い連続体と仮定する。連続体であるので、流れが途中で無くなったり、急に発生したりしない。この仮定を数式化したものが「連続の方程式」と呼ばれ、流管の場合の連続の方程式は、以下の式で表される。

$$rVA = \text{一定}$$

数式 3.3.2-3

ここで、 r は密度、 V は流管内の流体の速度、 A は流管の断面積である。連続の方程式は、物質の移動（流体であれば流れ）を連続体として解くために必要な式であり、2)で示す支配方程式を導出するために重要な式である。ちなみに、連続体とみなすことができない流れを希薄流(rarefied gas flow)と呼ぶ。これを支配するパラメータはクヌーセン数である。また、希薄流を計算するにはボルツマン方程式を解くことになる^[2]。

2) 流れを表現する支配方程式（運動方程式）[2][3]

① ポテンシャルの式

流れの運動方程式はニュートンの運動の第2法則、つまり、質量 (m) × 加速度 (a) = 力 (F) で表される。ポテンシャルの式は、ある質点のみの運動を表す式であり、一軸方向のみの運動方程式であるため、渦や粘性は考慮できない[2]。またこの式は、ある質点の力 (F) を増加させれば、加速度 (a) が増加し続ける、すなわち速度が無限に増加し続けることを指し、厳密には成り立たない（速度は光速を越えない：相対性理論）[3]。しかし、扱う速度が光速未満であれば、ポテンシャルの式は成り立ち、②以降に示す連続する質点の流れを表す式を導出する上での大きな条件のひとつとなる。

$$m \times a = F$$

数式3.3.2-4

ニュートンの運動方程式を条件として導出される式は、解析力学（幾何学）、流体力学、量子力学に適用される^{[2],[3]}。気体や液体の流れを表す式は、流体力学の分野で用いられる式であり、オイラーの微分方程式、もしくはナビエ・ストークスの式が用いられる。以降、オイラーの微分方程式とナビエ・ストークスの式の違いを示す。

② 流体力学のオイラーの微分方程式[2]

流れを一軸方向のみで見た場合の運動方程式は

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x}$$

数式 3.3.2-5

である。ここで、 u は速度、 p は圧力である。左辺の括弧の中の第 1 項は時間的に変化がある非定常項、第 2 項は対流を表す対流項である。また、右辺第 1 項の ρX は重力、右辺第 2 項は圧力勾配項である。流体を流すためには、この圧力勾配項が必要である。

③ナビエ・ストークスの式[2]

ナビエ・ストークスの式は、粘性を持つ流体（粘性流体）にも活用できる流れを表す支配方程式であり、粘性流体では、右辺の圧力項の次に粘性項が加わる。

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u$$

数式 3.3.2-6

なお、 ν は分子動粘性係数で、 Δu は速度 u の差分を表す。

i) 流体のもつエネルギーの整理（静止流体と運動している流体のもつエネルギー）

静止流体のエネルギーは熱力学の第一法則より、

$$dQ = de_i + pdv = de_i + pd(1/\rho)$$

数式 3.3.2-7

ここで、 v は比容積で密度の逆数 ($v=1/\rho$) である。

この式の解釈は、外から加えられた熱量 dQ (左辺) は、内部エネルギーの増加 de_i (右辺第 1 項) と、膨張するときの外部への仕事 pdv (右辺第 2 項) に使われる。

ii) 運動している流体のもつエネルギー

一般的に流体は単位面積あたり、

$$E = \frac{1}{2} v^2 + e_u + \frac{p}{\rho} + gy$$

数式 3.3.2-8

のエネルギーEを持つ。

ある流管に入口(1)と出口(2)があり、その途中で仕事Wがなされ、また、熱量Qが加えられると、入口・出口でのエネルギーの差は、

$$E_2 - E_1 = Q + W$$

数式 3.3.2-9

となる。

iii) 力学的エネルギー保存則[1]

前述までで、流れを途切れの無い連続体として扱うための連続の式、物質の運動を扱うための運動方程式を示した。ここでは、流体のもつエネルギーに着目したエネルギーの式を整理する。エネルギーは単位質量当たり、下記の(ア)から(エ)が挙げられ、これらのエネルギーが保存される(総和が一定である)として考えられる。

(ア) 運動エネルギー : $(1/2)V^2$

(イ) 位置エネルギー : gh (g :重力加速度、 h :基準面からの高さ)

(ウ) 圧力エネルギー : p/ρ

(エ) 内部エネルギー : e_i (物質内部に蓄えられる熱的エネルギー)

たとえば、分子の運動が活発化するとそれにつれて温度が上昇する。また、分子間の距離が離れることにより気体は膨張する。気体が膨張すれば分子の位置が変わるため(イ)の位置エネルギーが変わる。なお、本検討のような常温・常圧下では、温度変化による気体の分子の位置エネルギーの変化は微小であるため、一般的には非圧縮性流体と仮定し、この位置エネルギーは変化しないものとして扱う。

力学的エネルギー保存則を用いた流体の支配方程式での密度が変化する流れに対する一般化されたベルヌーイの式は、

$$\frac{1}{2}V^2 + \int \frac{dp}{\rho} + \Omega = \text{const.}$$

数式 3.3.2-10

である。ここで Ω は体積ポテンシャルで、体積力 \vec{X} との関係は、

$$\vec{X} = -\text{grad}\Omega$$

数式 3.3.2-11

である。

一般化されたベルヌーイの式は、密度が一定の場合には以下のように簡略化される。

$$\frac{1}{2}V^2 + \frac{p}{\rho} + \Omega = \text{const.}$$

数式 3.3.2-12

右辺の一定値は流線毎に違う値を取って良い。また、鉛直方向(y 方向) に重力が働く場合には $Q = gy$ となるので

$$\frac{1}{2}V^2 + \frac{p}{\rho} + gy = \text{const.}$$

数式 3.3.2-13

である。この式の意味は、流体の運動エネルギー、圧力エネルギー、重力のポテンシャルエネルギーの和は一定であるということである。つまり、例えば、圧力が上がれば速度は減少する可能性がある。また、高さy 増加しても、速度がV が減少する可能性がある。

3) 流れを表現する支配方程式（運動方程式）の整理[3]

流体力学の運動方程式は簡易なものから順に、

- ポテンシャルの式：渦度も粘性も考慮しない
- ベルヌーイの式：渦度も粘性も考慮しない
- オイラーの微分方程式：渦度は考慮するが粘性は考慮しない
- ナビエ・ストークスの式：渦度も粘性も考慮する

となる。流体に運動方程式を適用して解く際には、求めたい物理量と、それらの物理量を算出する際に着目する仮定や精度を明確にした上で方程式を適用し、物理量を整理することが重要である[3]。

本検討では、地下処分施設が断面積に比べて坑道が長い形状であり坑道壁面の影響を無視できないこと、定常流および非定常流を扱うため局所的に渦が発生しやすいことを考慮し、オイラーの方程式もしくはナビエ・ストークスの式を用いることが適切と考えた。

3.3.3 支配方程式の地層処分施設への適用性

前節までの検討結果を踏まえ、支配方程式の地層処分施設への適用性をまとめる。

(1) ポテンシャルの式

質点系のみを検討する式であり、広い空間の中を移動する 1 質点が一軸方向に移動する様子を表現した式である。極めて簡易で容易に理解できる式ではあるが、管路・煙突等の細長い形状のものには適用できず、地層処分施設の地下施設での適用性は低い。

(2) オイラーの微分方程式

流体の渦を表現できる式であり、流体の運動を表現する上では良く用いられる式である。式に粘性項がなく流体の粘性は表現できないため、管路・煙突等の壁面、管路・煙突等の内部にある物体の表面の分子の運動は表現できない。地層処分施設での適用性を考えると、壁面等の表面の空気の流れを局所的に見る場合は、次に示すナビエ・ストークスの式が適していると考えられるが、単に施設内の風量や風速を平均的に求める場合には適用可能である。

(3) ナビエ・ストークスの式

流体の渦・粘性を表現できる式であり、オイラーの微分方程式とともに流体の運動を表現する上では良く用いられる式である。ナビエ・ストークスの式は、閉空間・開空間の空気の流れを表現する汎用ソフトにも用いられており、流体力学の分野では一般的な式である。上述のオイラーの微分方程式で示したように、壁面等の表面の空気の流れを局所的に見る場合にも適用できるため、地層処分施設での適用性を考えると、壁面付近の風速の検討など局所的な検討にも適しており汎用性が高いと考えられる。

(4) ベルヌーイの式

流体の渦・粘性は表現できないが、オイラーの微分方程式、ナビエ・ストークスの式と比較すると式自体が簡易で分かりやすく、流体力学の基礎的な式として多くの技術者が学ぶ式であるため、流体力学分野では最もポピュラーな式である。特に高い位置から低い位置へ流れる、水の流れを表現するのに適しており、長大な河川流の解析に良く用いられる。なお、河川流の解析であっても河床の複雑な流れや、河川表面の波は表現できない。地層処分施設での適用性を考えると、全体の風量を求めるのに適している。なお風量から坑内の断面平均風速を求めることができるが、壁面等の局所的な風速を求めることはできない。

本検討は、地層処分施設の地下施設の風量、風速、温度、圧力の変化を定常・非定常流（火災時）で検討するものである。当検討の中で、壁面付近の風速等の状況を検討する場合があることも考慮し、流体の表現が理論的に最も再現できると思われるナビエ・ストークスの式を用いることとした。

表 3.3.3-1 支配方程式の地層処分施設への適用性のまとめ

	支配方程式式	特徴	活用上の留意点	地層処分での適用性
運動方程式	ポテンシャルの式 $m \times \frac{dr}{dt} = F$	流体の渦度も粘性も考慮しない。	管や煙突等では活用不可。質点系のみ検討には活用できる(ただし制約条件は多い)	理論式としては簡易で活用しやすいが、条件が多く適用性は低い
	オイラーの微分方程式 $\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x}$	流体の渦度は考慮するが粘性は考慮しない。	ナビエ・ストークスの簡易版として活用されるが、流路の中に移動する物体がある場合、その表面の速度を数値的に表現できない(境界条件を設定できない)	ナビエ・ストークスの簡易版として活用できる
	ナビエ・ストークスの式 $\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u$	流体の渦度も粘性も考慮する。	流体力学の数値解析では最も良く用いられる。オイラーの式と違い、流路内に移動する物体がある場合でも、その表面の速度を数値的に表現できる(境界条件を設定できる)	流体に対して最も一般的であり、適用性は高い
	ベルヌーイの式 $\frac{1}{2} V^2 + \int \frac{dp}{\rho} + \Omega = cost.$	扱う流体は非圧縮、非粘性、定常流とする。渦度、粘性も考慮しない。	流体の運動エネルギー、圧力エネルギー、重力のポテンシャルエネルギーの和が一定であるため、圧力が上昇すれば速度が減少する可能性がある。	複雑な形状の地層処分施設では、流体が非定常流となる部分が複数箇所あり、その部分への適用性は低い。

3.3.4 離散化法の整理

前項までで示した支配方程式により、空間の力学的な現象を、数式を用いて説明する方法について述べた。これらの支配方程式は、ある質点での値などを導くことは可能であるが、空間的に拡がりをもった領域での物理量が解けるものではない（計算機は無限の空間に対して計算できない）。空間内で連続的に分布しているある物理量を保存則等の基礎的原理に基づいて（支配方程式により）解くとともに、その時間的な発展を計算機で解くためには微分・積分演算や偏微積分方程式を活用する。この手法を離散化（数値モデル化）と呼ぶ。

(1) 有限要素法

計算対象領域を細かい計算格子（要素）に区分し、各要素における支配方程式を要素間の補間関数で近似し、比較的簡単に複雑な微分方程式を解く手法である。具体的には、支配方程式に重み関数の積を施しそれを領域内で積分した後、弱形式化された偏微分方程式を補間して連立一次方程式を解くものである。

(2) 有限体積法

計算対象領域を細かい計算格子（要素）に区分し、各要素に対して積分系の物理量の支配方程式を適用する手法。具体的には、考えている格子点を中心とした微小領域内で支配方程式を積分し、その境界の値を隣接する格子点を利用して積分式を離散化する。

(3) 有限差分法

計算対象領域を規則的な計算格子（要素）に区分し、支配方程式を変形して計算する手法。解として求まるのは基本的に格子点上の値である。なお領域の形状が複雑である場合、非常に細かい領域に区分することになり計算負荷がかかるため、領域に沿った形状で計算することは難しい。

(4) 境界要素法

計算対象領域の境界を線要素に分割し、支配方程式を変形して計算する手法。解析的に求まるのは、基本的には線要素と線要素の交点の値である。数学的には難解であるが、領域の形状が複雑でも対応できる。また領域形状が変形するような問題にも対応可能である。ただし、線要素を自由に分割することから要素の対象性を用いた簡易な行列計算を設定できず計算負荷が高いこと、また地震等の波形など解の形がある程度分かっている問題に適用するものであることから、活用分野は限られている。

3.3.5 離散化法の地層処分施設への適用性

前項で4つの離散化法について、特徴と対応可能な計算領域について述べた。次表に離散化法の地層処分施設への適用性をまとめたものを表 3.3.5-1 に示す。

表 3.3.5-1 離散化法の地層処分施設への適用性のまとめ

離散化法	特徴	活用上の留意点	活用される分野
有限要素法	計算対象領域を細かい計算格子(要素)に区分し、各要素における支配方程式を要素間の補間関数で近似し、比較的簡単に複雑な微分方程式を解く手法。	長所は形状的な制約がほとんど無く、同一の解析精度を得るのに相対的に少ない分割数で良いが、計算プログラムがシンプルではなく、CPU等への負荷が大きいことが難点である。	湖沼・氾濫水、複雑な領域の流体、構造物の応力・変形解析等、広く適用される
有限体積法	計算対象領域を細かい計算格子(要素)に区分し、各要素に対して積分系の物理量の支配方程式を適用する手法。	形状の制約が少なく、粗いメッシュでも各種の保存則が成り立つ点が長所であるが、数値拡散(発散)を生じやすいことが難点である。積分形であるため特性が大きく変化する様な領域でも矛盾のない解が得られる。	流体全般に広く適用される
有限差分法	計算対象領域を規則的な計算格子(要素)に区分し、支配方程式を変形して計算する手法。解として求まるのは基本的に格子点上の値である。	高次精度化が容易であるが、解析領域の形状に制約が大きいことが難点である。	河川流、氾濫水、土石流のような流れの速い流体に適用される
境界要素法	計算対象領域の境界を線要素に分割し、支配方程式を変形して計算する手法。解析的に求まるのは、基本的には線要素と線要素の交点の値である。	無限空間を含む領域の解析には特に有効であり、波動問題の解析に広く応用されているが、波動の問題の場合は扱う領域のサイズ・伝播速度・周波数によって扱う問題の特性が変わる可能性があることが難点と言える。	海の波、地震の波動のような、周期性を持つ波に対して適用される

3.3.6 解析ソフトの選定

前項までの検討を踏まえ、三次元通気解析での使用実績が多く支配方程式としてナビエ・ストークスを用いている「VENTMINE」を選定した。VENTMINEは、流れ解析に用いる流体力学方程式を、2次及び3次精度スキームをもとに計算するソフトウェアであり、壁の熱伝導や輻射、移流を考慮することにより、複雑な流体力学的シミュレーション手法の導入もできる。また、一次元モデルと三次元モデルの2つの次元を組み合わせた解析が可能であることも特徴のひとつである。

表 3.3.6-1、表 3.3.6-2 に特徴および利用実績等を示す。

表 3.3.6-1 解析ソフトの特徴

項目	名称
支配方程式	Navier-Stokes の式
離散化法	有限体積法
解析モデル	組み合わせ次元でのモデル化が可能 (※境界条件の設定も比較的簡易)
対象流体	非圧縮流体、混合流体

表 3.3.6-2 利用分野・利用実績

項目	内容
利用分野	通気（閉空間・開空間）、河川流・土石流、地すべり、管路流
利用実績	原子力関連施設、プラント、自動車工場、食品加工場、地下鉄など多数

表 3.3.6-3 に VENTMINE の適用可能性を整理する。また、入力条件と得られる結果を表 3.3.6-4 に示す。

表 3.3.6-3 VENTMINE における各再現状況の適用可能性

番号	空間種別	場所	現象と適用可能性	
			火災	通気
1	閉空間	ビルの中	○	○
2		家屋	○	○
3		地下鉄の駅	○	○
4		鉄道の車内	○	○
5		坑道	○	○
6		長大トンネル	○	○
7		上下水道	—	○
8	開空間	公園	○	○
9		立体駐車場	○	○
10		トンネル	○	○
11		ビル街	○	○
12		山間部	○	—
13		橋梁	—	—

表 3.3.6-4 VENTMINE の入力条件と得られる結果

入力条件	得られる結果	
計算対象領域の圧力	風速分布	
計算対象領域の温度		温度分布
外気温		圧力分布
平均モル質量	(以下は火災のみ)	
摩擦係数		一酸化炭素濃度
密度		二酸化炭素濃度
粘性		酸素濃度
プラントル数		
(必要に応じて) 風量もしくは風速		
(火災の場合) 火災曲線		

(1) 解析ソフト (VENTMINE) の特徴

本検討では、解析次元により計算結果や計算時間がどのように変化するか比較する。比較に用いるモデルは直線かつ上下左右が対象のものとし、解析次元は1次元、2次元、3次元を比較する。

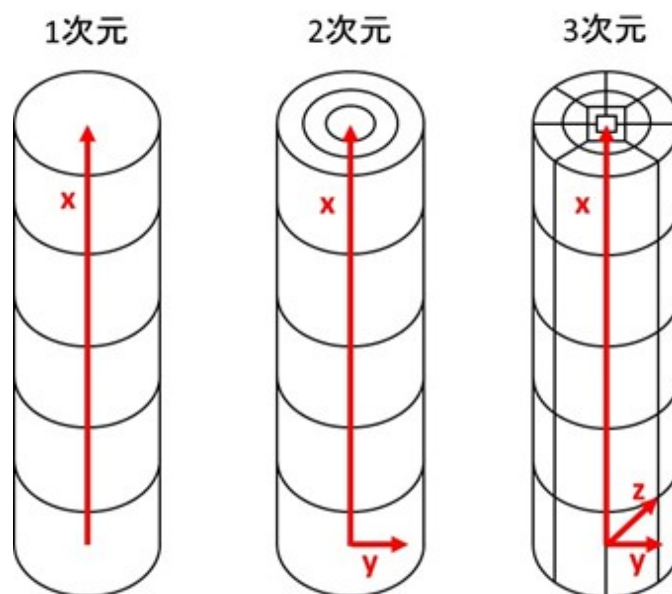


図 3.3.6-1 次元の比較に用いるモデル図

1) 解析モデル

解析モデルは、直径 5m、高さ 200m の円筒形とし、1次元、2次元、3次元でモデル化した。計算格子の多少の影響を確認するため、要素数が少ないものと多いものの2種類、合計6パターン作成した。計算格子図を図 3.3.6-2 に示す。

図 3.3.6-2(1),(2)は、1次元解析用の計算格子を示したものである。

1次元解析は、一軸方向のみの影響を表現する解析（たとえばx軸方向のみ）であり、上下左右対称の円筒形のモデルで1次元解析を行うには、一軸方向のみに区分した計算格子を用いる。なお、円筒形であるため計算格子は円の中心から判断面5度分のみを示す。

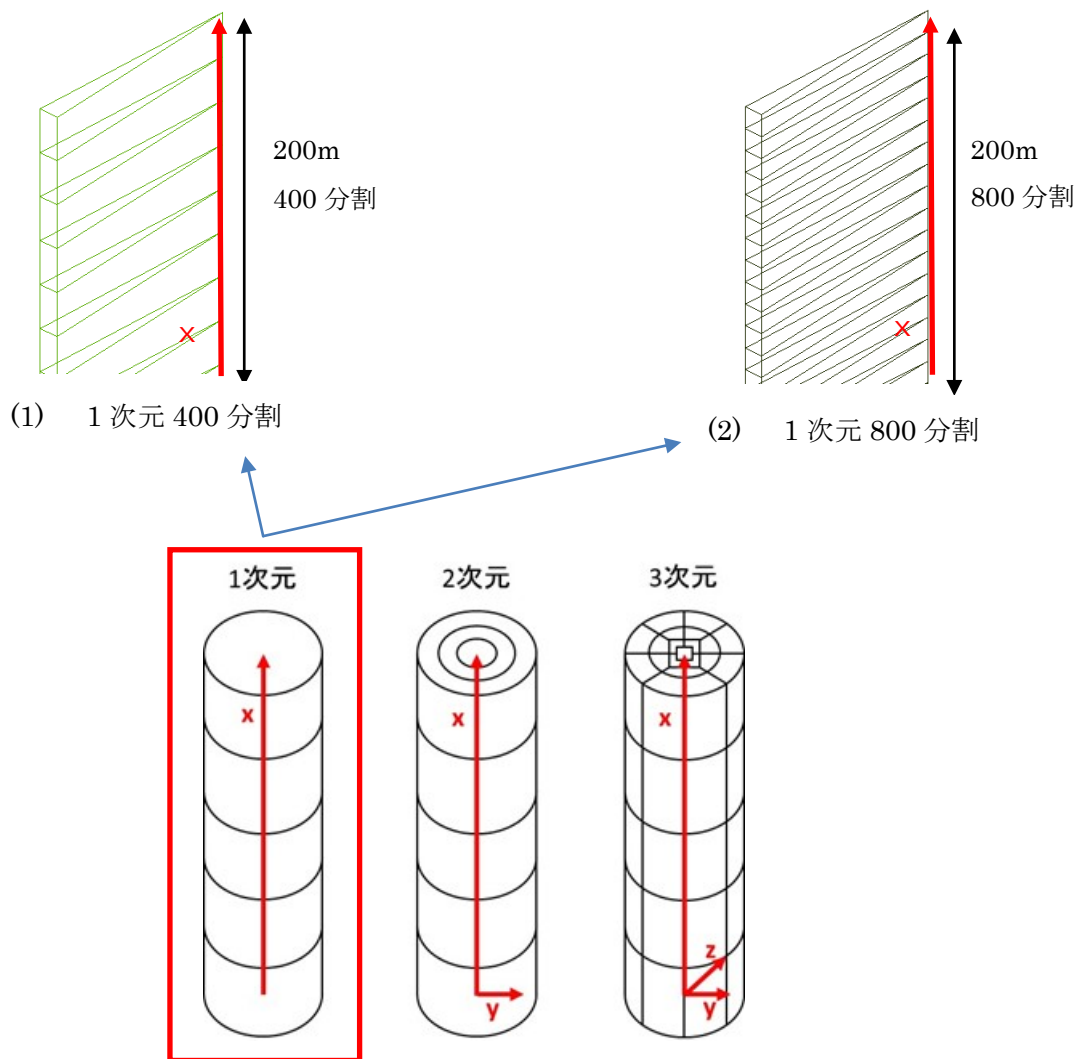


図 3.3.6-2 1次元解析用の計算格子図

図 3.3.6-3(1),(2)は、2次元解析用の計算格子を示したものである。

2次元解析は、二軸方向の影響を表現する解析（たとえばx,y軸方向）であり、上下左右対称の円筒形モデルでは、二軸方向に区分した計算格子を用いる。なお、2次元解析用の計算格子も1次元解析用の計算格子と同様に判断面5度分のみを示す。2次元モデルは、乱流の卓越状況を見ることを目的に、特に密要素では壁面付近の計算格子を細分した。

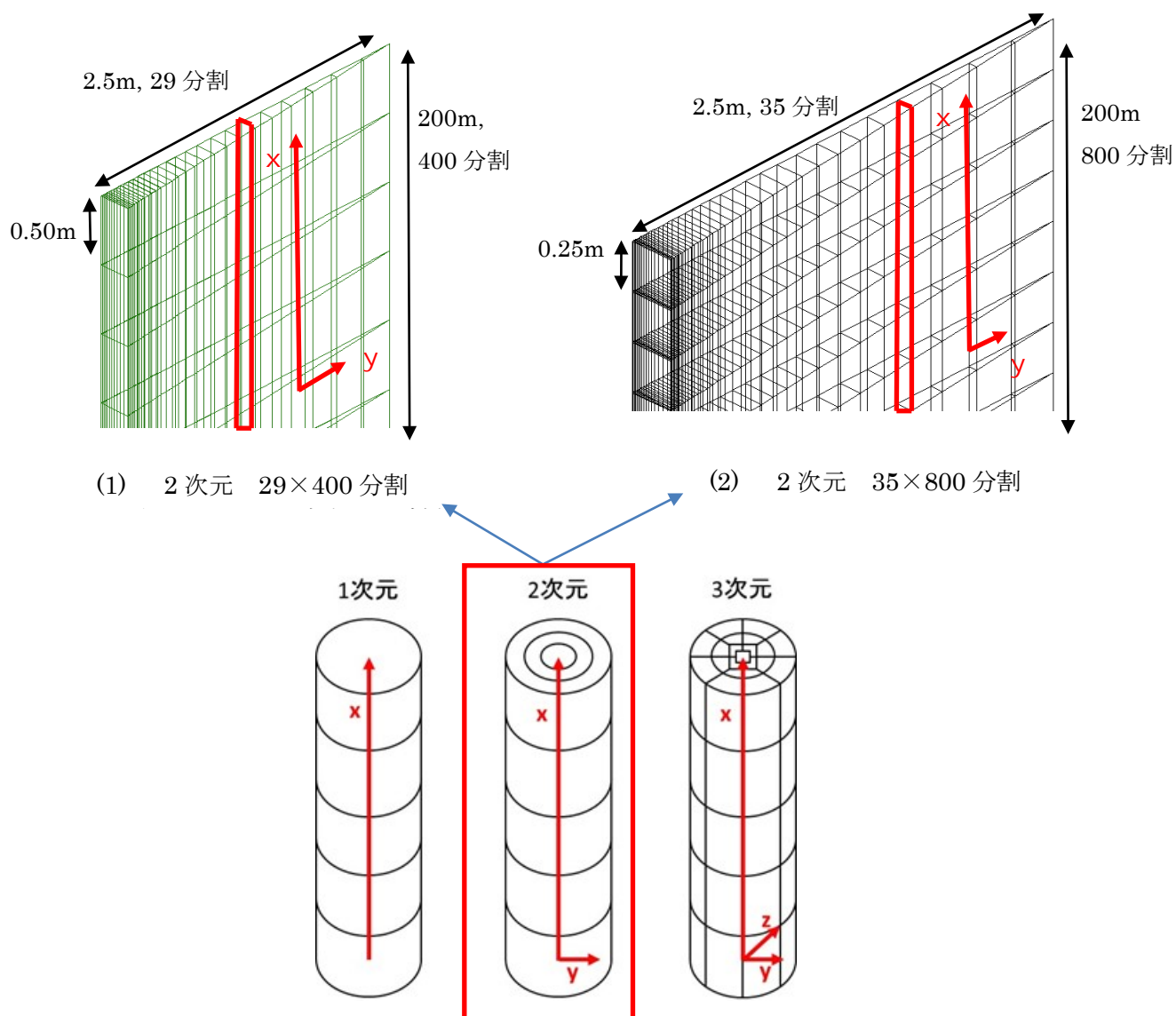


図 3.3.6-3 2次元解析用の計算格子図

図 3.3.6-4(1),(2)は、3次元解析用の計算格子を示したものである。

3次元解析は、三軸方向の影響を表現する解析（たとえば x,y,z 軸方向）である、上下左右対称の円筒形モデルでは、三軸方向に区分した計算格子を用いる。3次元解析用の計算格子は、1次元解析、2次元解析とは異なり、円の中心から外側に向かって、三軸の影響が出るよう計算格子を区分する。なお、3次元解析のモデル化も2次元解析と同様に、壁面付近の乱流の卓越状況を疎要素、密要素で比較できるように計算格子の細分化を行った。

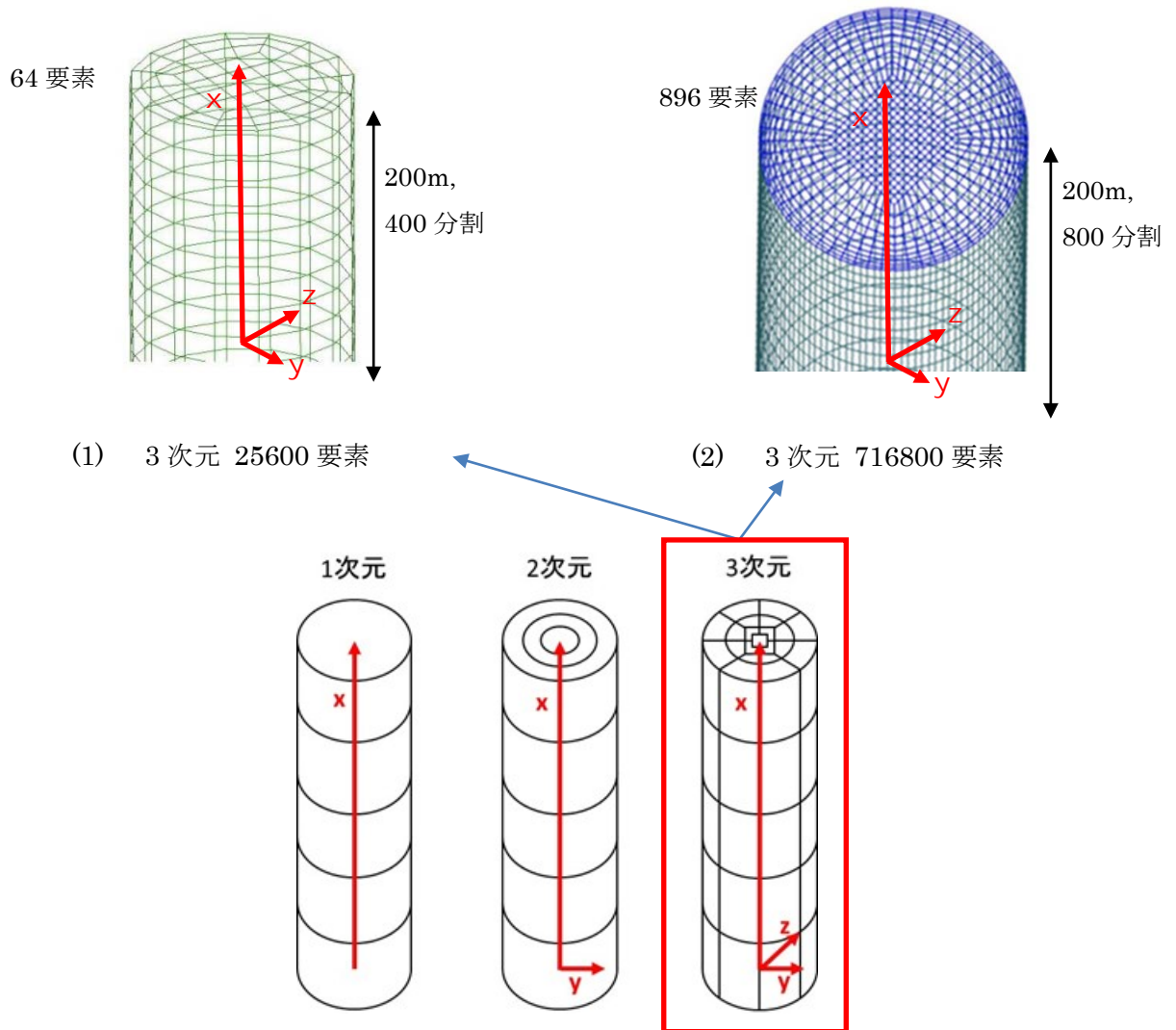


図 3.3.6-4 3次元解析用の計算格子図

2) 解析条件

坑道の初期条件は下記の通り設定した。なお、表 3.3.6-5 空気の属性情報の空気の属性情報は一般的な空気の物性値を用いた。坑道の初期条件は以下の検討を踏まえて決定した。

表 3.3.6-5 空気の属性情報

平均モル質量	0.02897 kg/mol
摩擦係数	1.4
密度	1.293 kg/m ³
粘性	1.86×10 ⁻⁵ kg/(m・s)
プラントル数	0.708 (流体の動粘性度と温度拡散率の比)

a. 坑道の圧力

立坑上面の圧力は 101,300pa と設定した。気圧は標高が 100m 下がるごとに 1,000pa 上昇するため、深度 200m になる坑道底面は 103,300pa と設定した。

b. 温度

立坑上面の地表温度を 297.15K と設定し、標高が 100m 下がるごとに温度が 3K 上昇することを利用して、深度 200m になる坑道底面を 303.15K と設定した。

表 3.3.6-6 圧力と温度の初期条件

項目	立坑底面	立坑上面
圧力	103,300pa	101,300pa
温度	303.15K	297.15K

3) 解析結果

a. 解析時間の比較

下表は、1次元、2次元、3次元解析のそれぞれにかかった時間を比較したものである。なお、解析時間の大小は計算機の性能に左右されるため、比較は1次元解析に用いた計算要素数との割合で示す。

表 3.3.6-7 計算にかかる時間の比較（疎要素：高さ方向 400 分割）

	要素数	要素数割合	計算時間割合
1次元	400	1	1
2次元	11,600	29	42
3次元	25,600	64	347

表 3.3.6-8 計算にかかる時間の比較（密要素：高さ方向 800 分割）

	要素数	要素数割合	計算時間割合
1次元	800	1	1
2次元	28,000	35	48
3次元	716,800	115.5	362

b. 1次元解析結果

坑道の高さに対する風速、温度、圧力の変化を表 3.3.6-9 示したものである。解析結果では、疎要素、密要素ともに1次元解析特有の線形分布の結果を見ることができる。なお、解析結果には要素数の差による有意な差は見られない。

表 3.3.6-9 風速、温度、圧力の変化

坑道高さ (m)	風速(m/s)		温度 (K)		圧力 (Pa)	
	疎要素	疎要素	密要素	密要素	密要素	密要素
0	4.54649		302.996		102,297	
10	4.55009		302.897		102,181	
20	4.55376		302.799		102,065	
30	4.55743		302.7		101,950	
40	4.56108		302.602		101,834	
50	4.56474		302.503		101,719	
60	4.56839		302.404		101,603	
70	4.57203		302.305		101,488	
80	4.57567		302.206		101,373	
90	4.5793		302.106		101,258	
100	4.58293		302.007		101,143	
110	4.58655		301.907		101,028	
120	4.59016		301.807		100,913	
130	4.59378		301.708		100,798	
140	4.59738		301.607		100,683	
150	4.60099		301.507		100,569	
160	4.60459		301.407		100,454	
170	4.60818		301.306		100,340	
180	4.61177		301.105		100,225	
190	4.61536		301.01		100,111	
200	4.61876		302.996		100,003	

風速の経時的な変化を示す。風速は $t=270\text{s}$ 以降ではほぼ一定となった。風速は坑道高さに関わらずほとんど一定であった。

圧力、温度、風速の収束時間は、圧力が $t=30\text{s}$ 後、温度が $t=180$ 秒後、風速が $t=270$ 秒後とそれぞれ収束までの時間が違う。これは圧力、温度、風速を求める順番が、圧力変化を求めた後、温度、風速と求めていくことが影響していると考えられる

坑道高さに対する温度の経時的な変化を示す。温度変化は $t=180\text{s}$ 以降ほぼ一定となり、坑道高さが高いほど温度は下がる傾向にある。

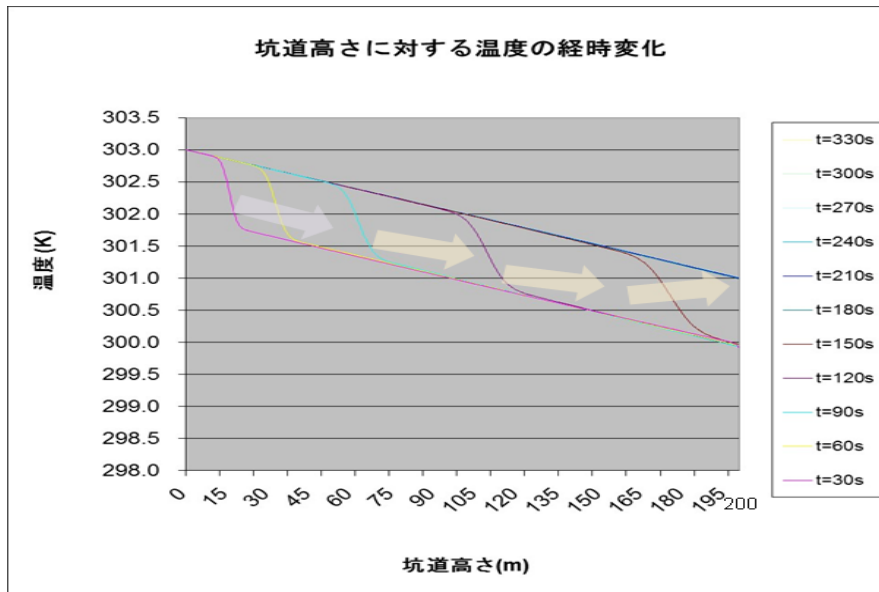


図 3.3.6-5 坑道高さに対する温度の経時変化（密要素：800 分割）

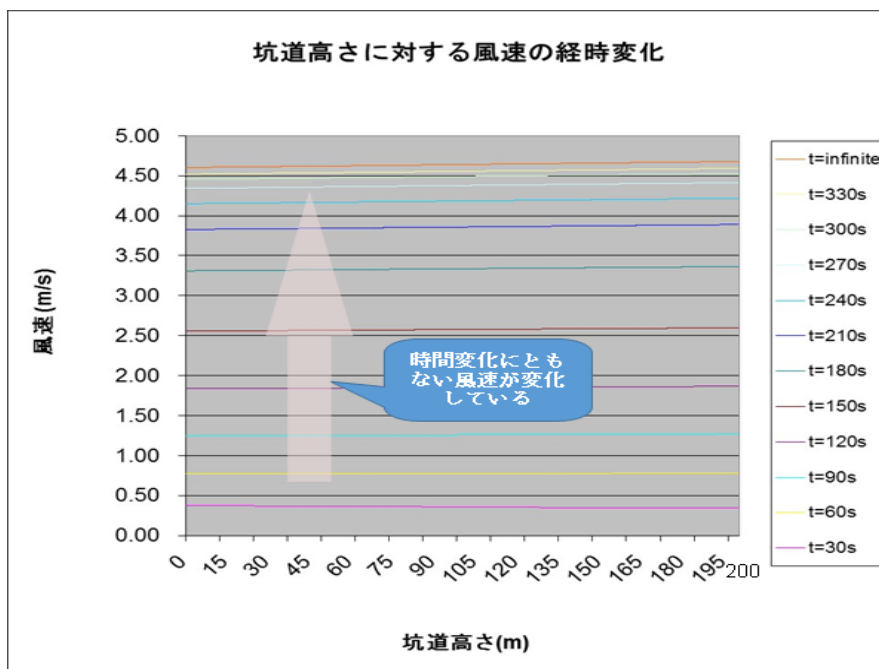


図 3.3.6-6 坑道高さに対する風速の経時変化（密要素：800 分割）

坑道高さに対する圧力の経時的な変化を図 3.3.6-7 に示す。圧力の変化は 30 秒時点で収束しており、温度や風速と比較して収束する計算速度が速い。

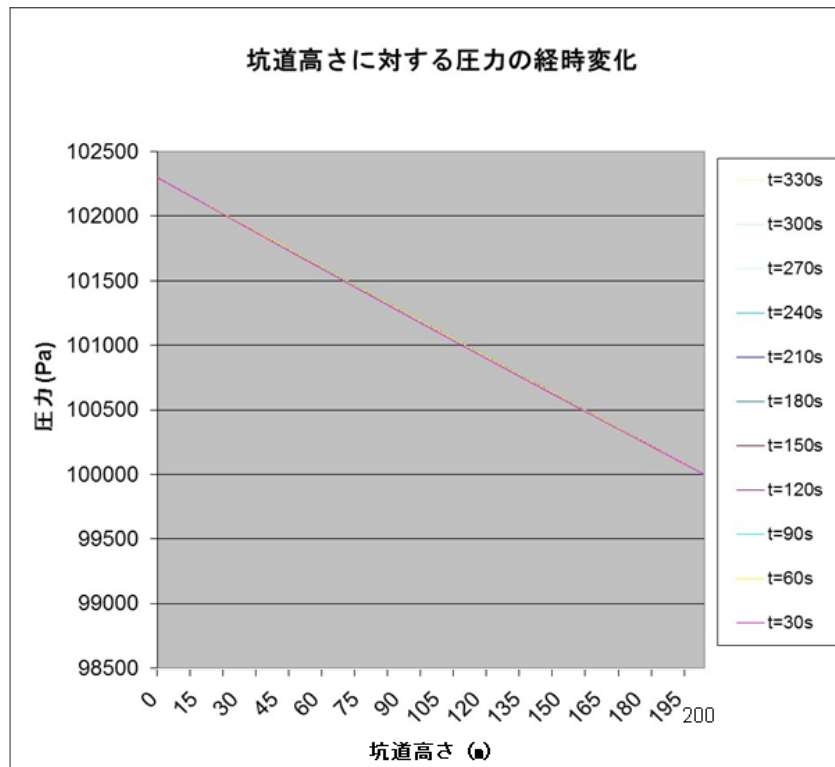


図 3.3.6-7 坑道高さに対する圧力の経時変化（密要素：800 分割）

c. 2次元解析結果

2次元解析も1次元解析と同様に、円筒形であり円の中心から外側に向けて対象であるため、計算格子のどの部分を取っても数学的に等価である。

まず、疎要素（29×400要素）と密要素（35×800要素）の圧力変化、温度変化、風速変化のコンター図を図 3.3.6-8、図 3.3.6-9 示す。風速変化のコンター図を見ると、坑道底部での乱流の卓越状況は密要素のほうが表現できている。このため2次元解析では要素の疎密度により結果が変わることがわかった。

次に、圧力変化、温度変化、風速変化の経時的な変化を図 3.3.6-10、図 3.3.6-11 示す。1次元解析と同様に、圧力の経時変化が最も早く収束し、続いて温度変化、風速変化となっている。これは、圧力、温度、風速を求める順番が、圧力変化を求めた後、温度、風速と求めていくことが影響していると考えられる。

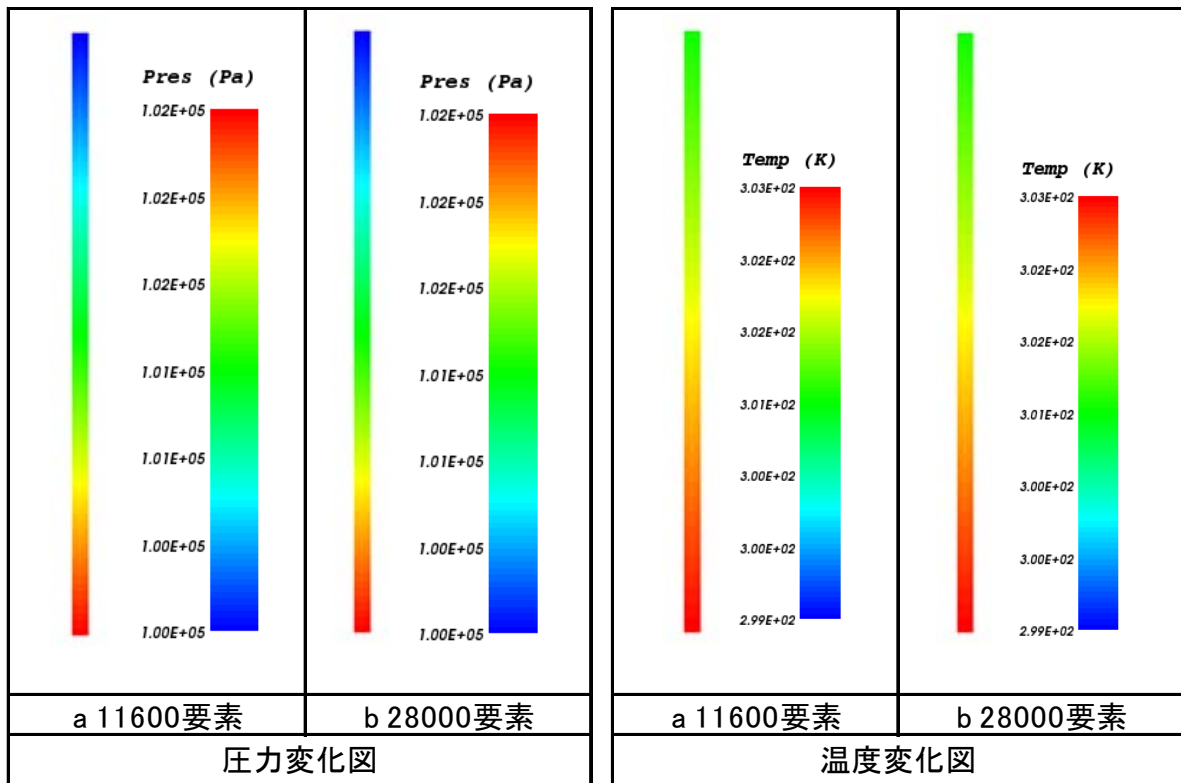


図 3.3.6-8 坑道高さに対する圧力、温度の変化（2次元解析）

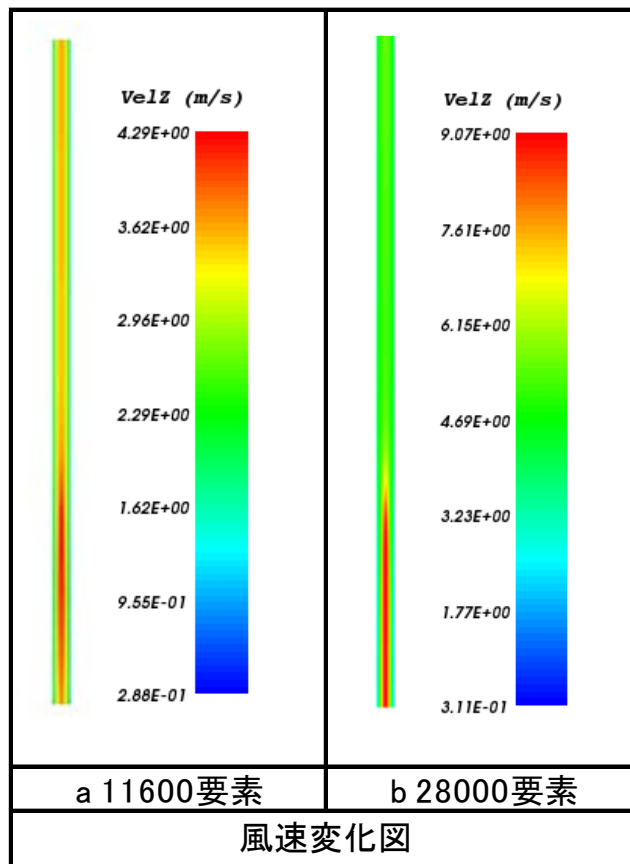


図 3.3.6-9 坑道高さに対する風速の変化 (2次元解析)

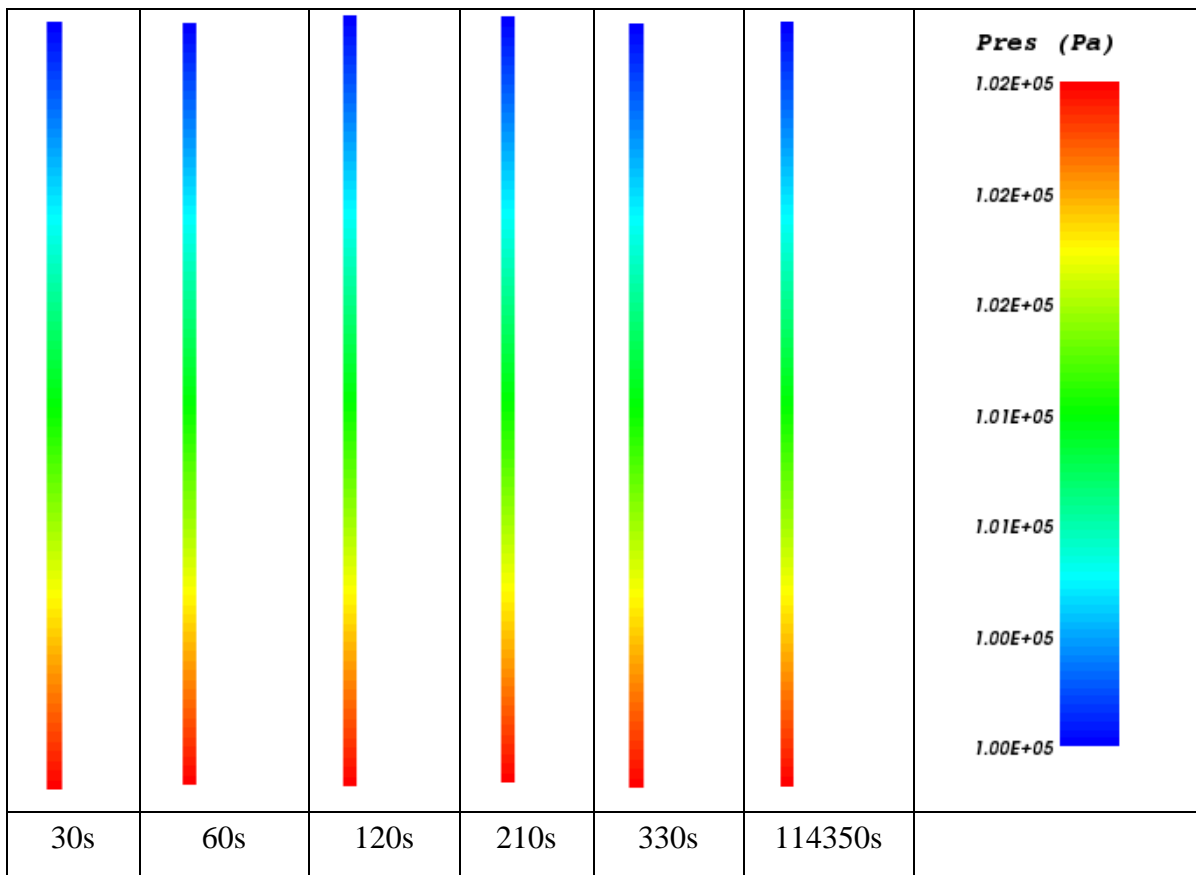


図 3.3.6-10 圧力の経時変化 (密要素 : 35×800 要素)

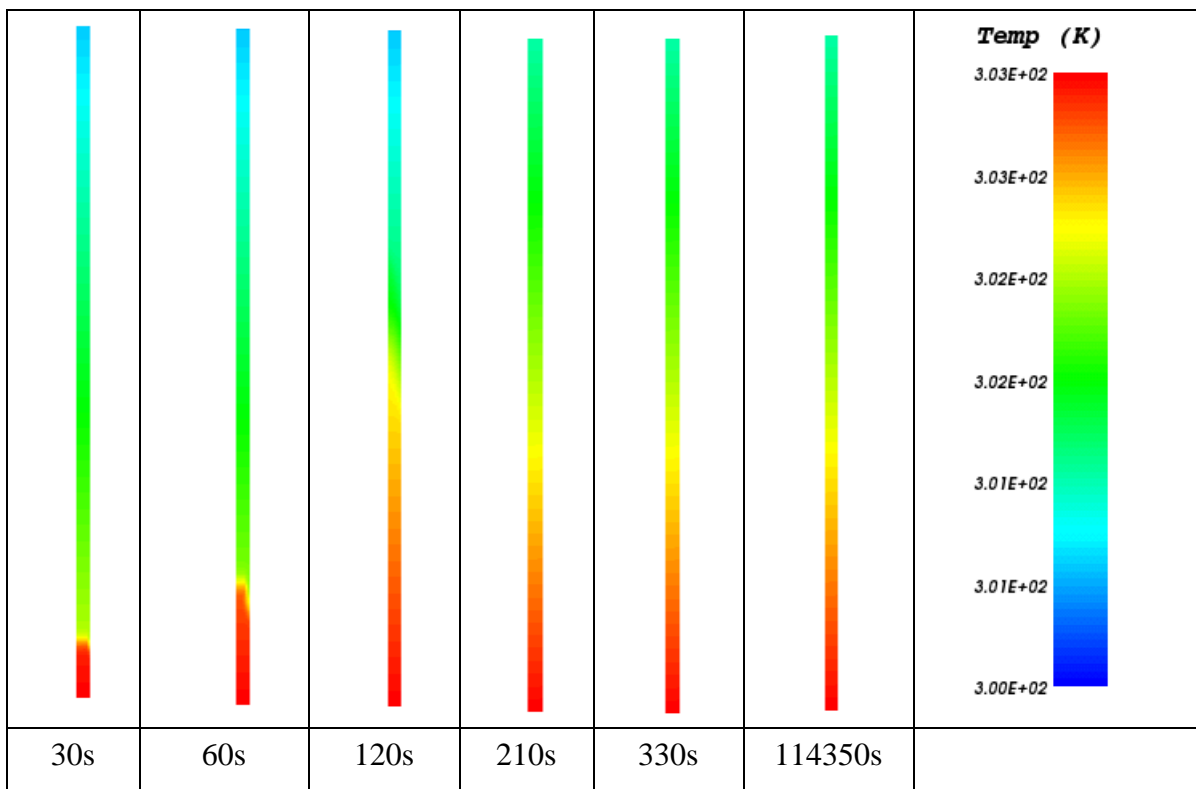


図 3.3.6-11 温度の経時変化 (密要素 : 35×800 要素)

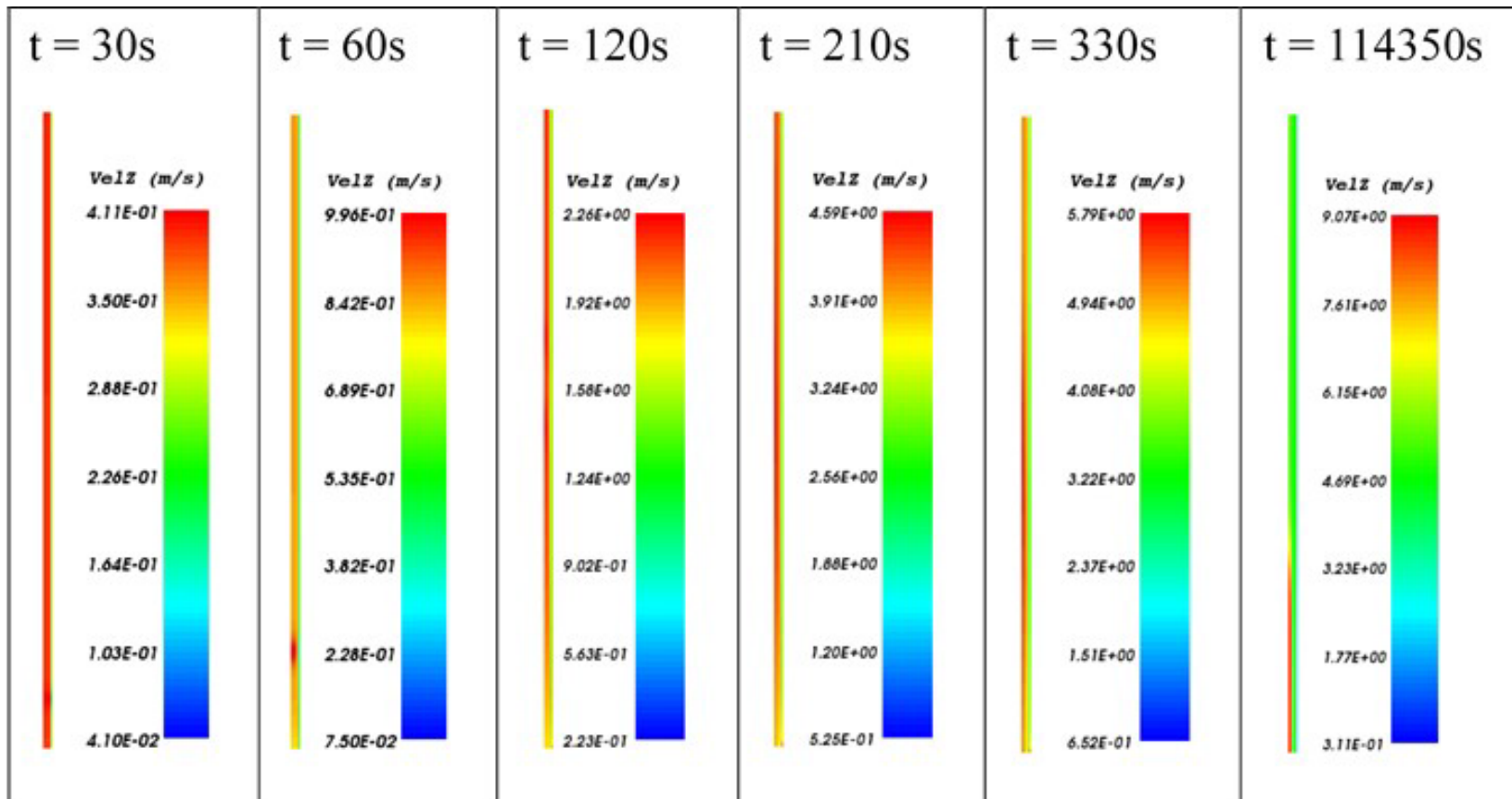


図 3.3.6-12 風速の経時変化 (密要 : 35×800 要素)

d. 3次元解析結果

3次元解析も2次元解析および1次元解析と同様に、円筒形であり円の中心から外側に向けて対象であり円筒の判断面の結果は数学的に等価である。

まず、疎要素（25,600要素）と密要素（716,800要素）の圧力変化、温度変化、風速変化のコンター図を示す。風速変化のコンター図を見ると、2次元の結果と同様に、坑道底部での乱流が卓越している状況は密要素が表現できている。このため3次元解析も2次元解析と同様に要素の疎密度により結果が変わることがわかった。

次に、圧力変化、温度変化、速度変化の経時的な変化をそれぞれ示す。1次元解析、2次元解析と同様に、圧力変化の経時変化が最も早く収束し、続いて温度変化、風速変化となっている。これは、圧力、温度、風速を求める順番が、圧力変化を求めた後、温度、風速と求めていくことが影響していると考えられる。

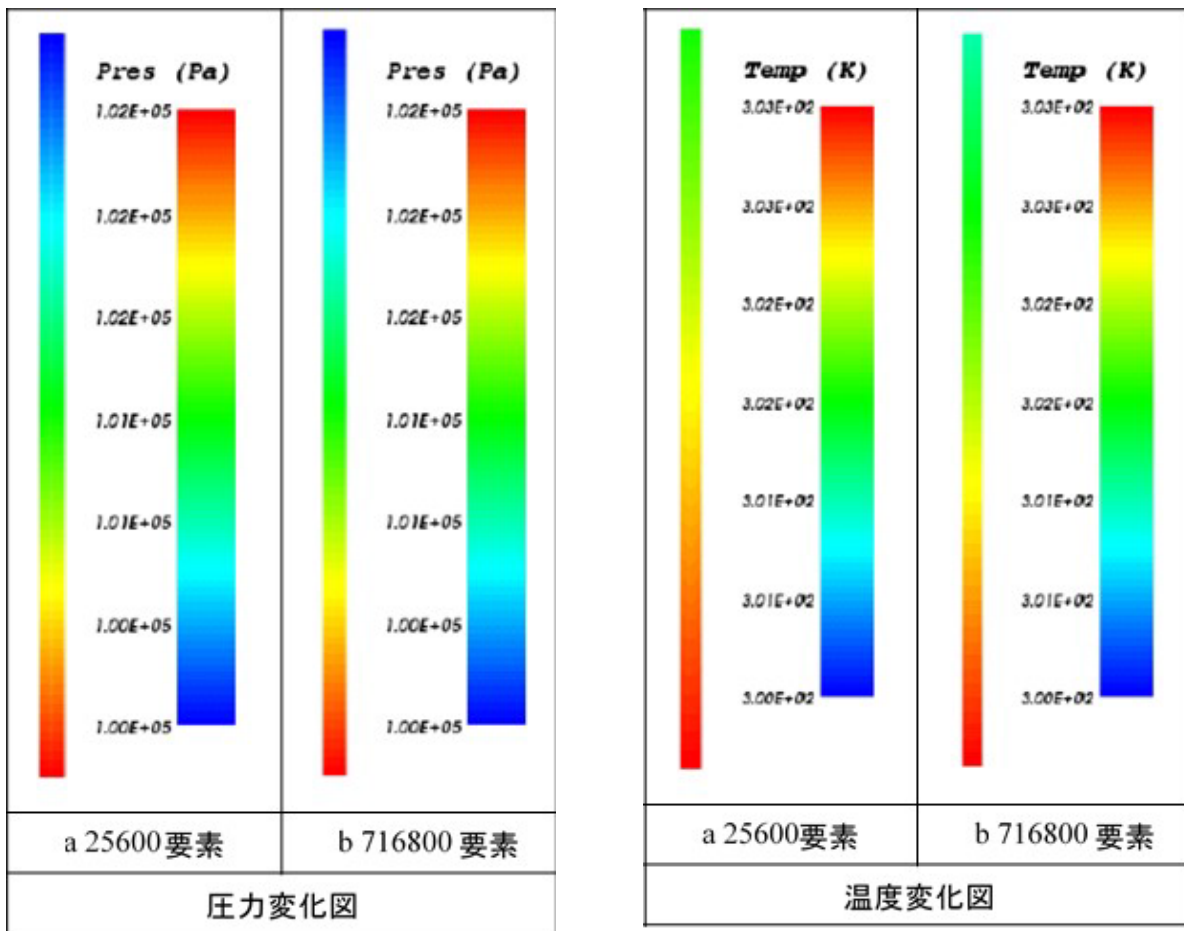


図 3.3.6-13 坑道高さに対する圧力、温度の変化（3次元解析）

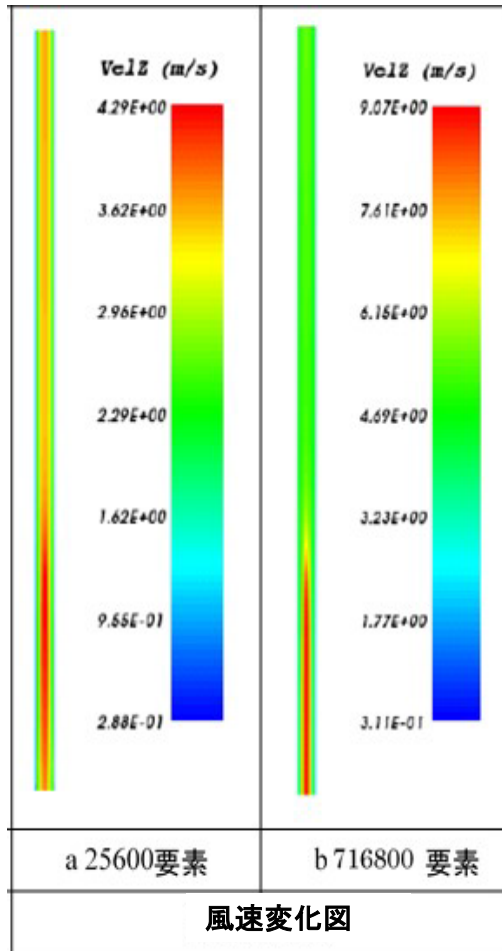


図 3.3.6-14 坑道高さに対する風速の変化（3次元解析）

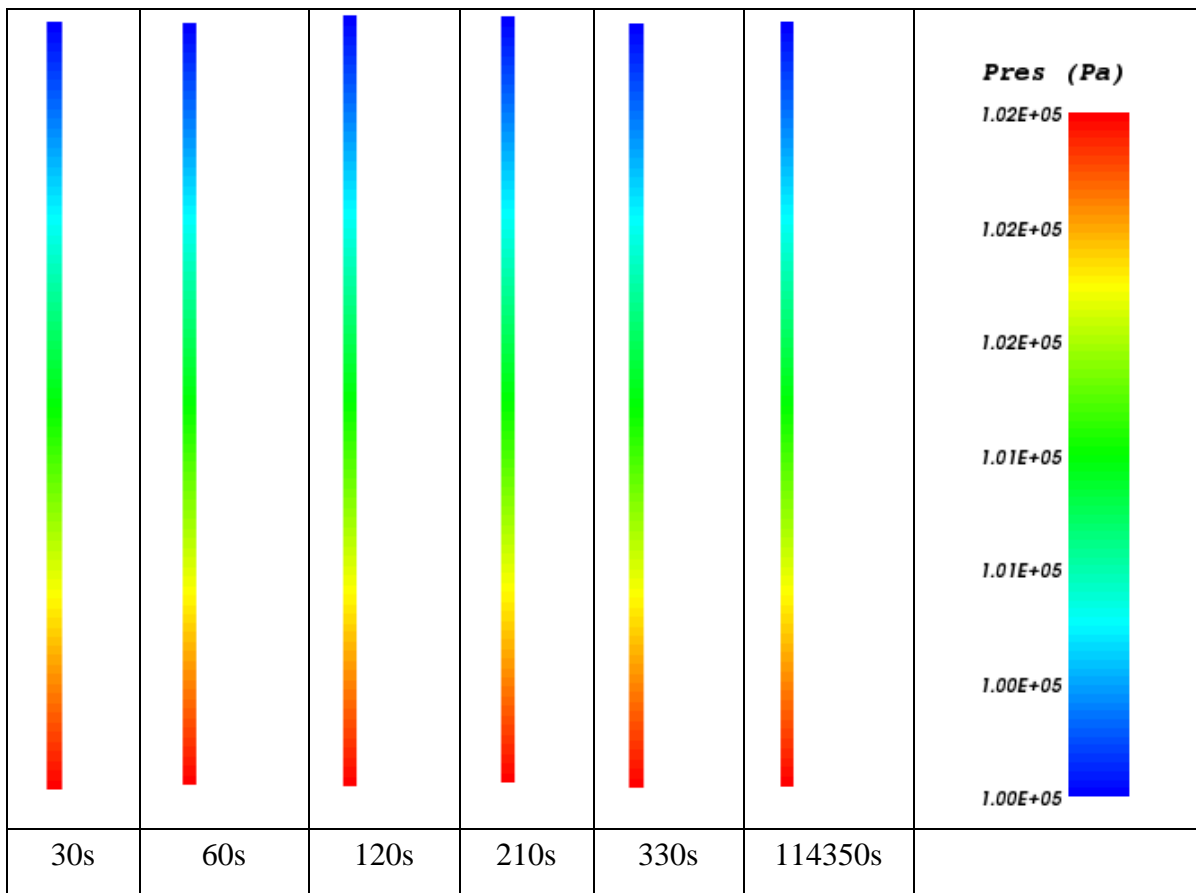


図 3.3.6-15 圧力の経時変化 (密要素 : 716800 要素)

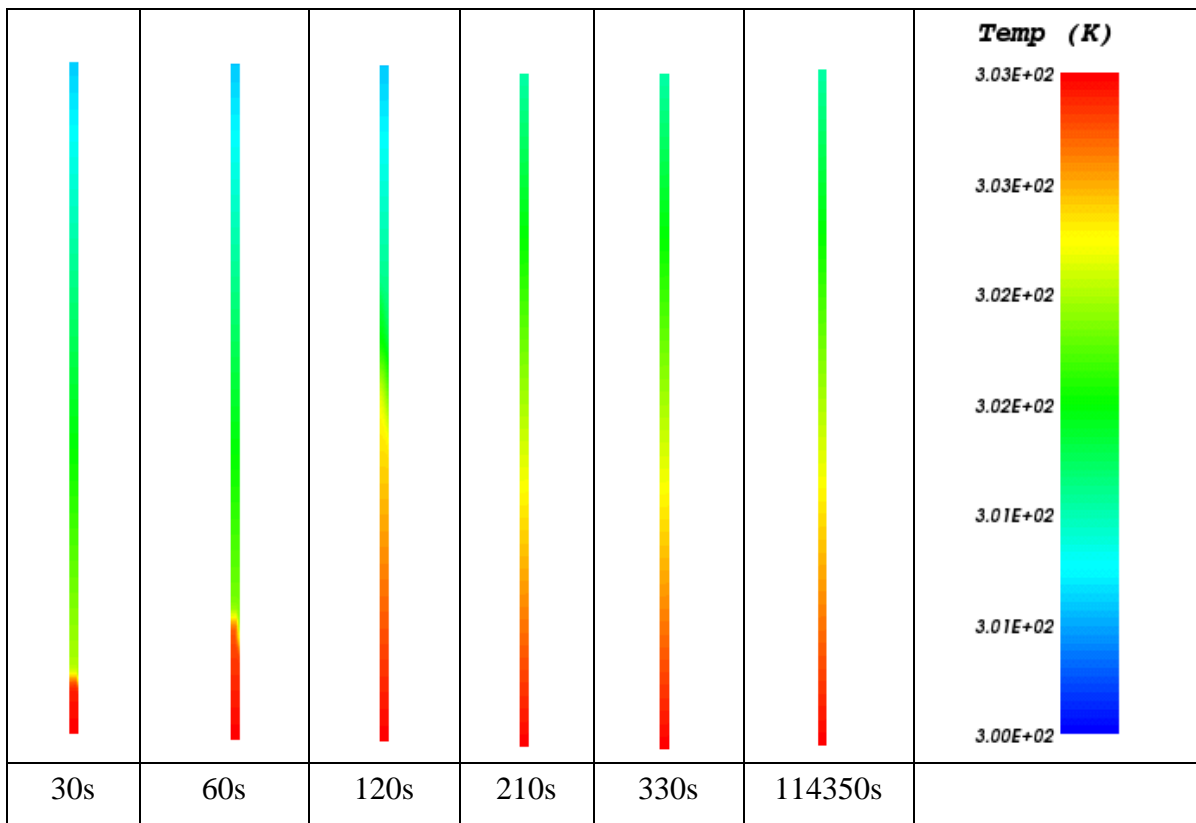


図 3.3.6-16 温度の経時変化 (密要素 : 716800 要素)

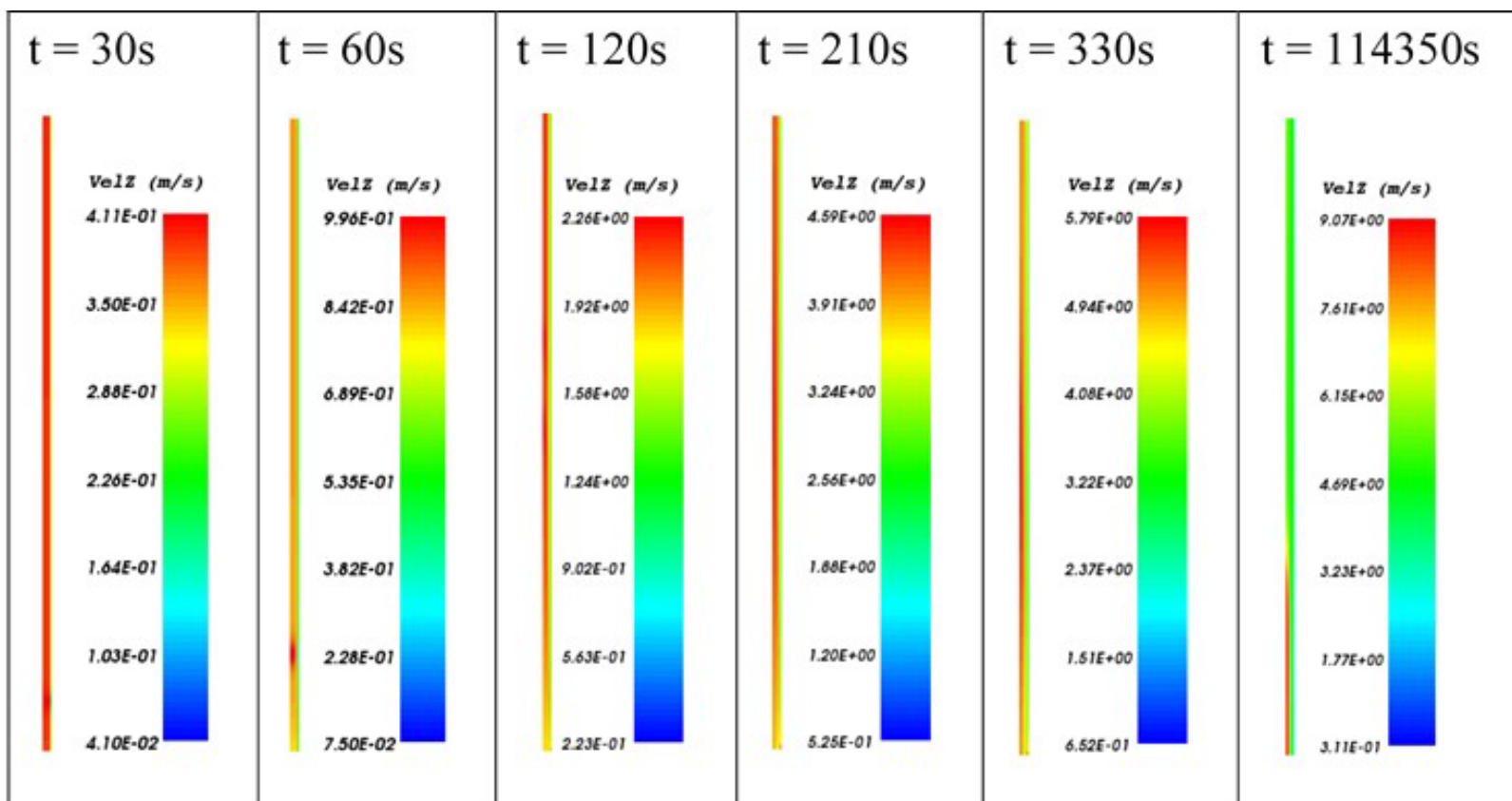


図 3.3.6-17 風速の経時変化 (密要素 : 716800)

e. 1次元、2次元、3次元解析結果の比較

1次元、2次元、3次元の解析結果を比較するため、坑内の速度分布を比較した。1次元解析が軸方向に1要素を重ねたものであるため、境界の影響を考慮して、2次元、3次元の解析結果も断面内のある1要素を取り出し、その速度変化を同軸上にプロットした。結果、2次元と3次元は同値（小数点以下3桁目）であり、1次元のみ0.01~0.015m/s程度の違いが出たが、本検討においては有意な差ではない。

以上より、坑内全体の平滑化された風速変化を確認するのであれば、1次元解析を用いて計算負荷を低減させ、坑内の風速分布等の詳細な検討には2次元、3次元解析を用いる必要があることが分かった。

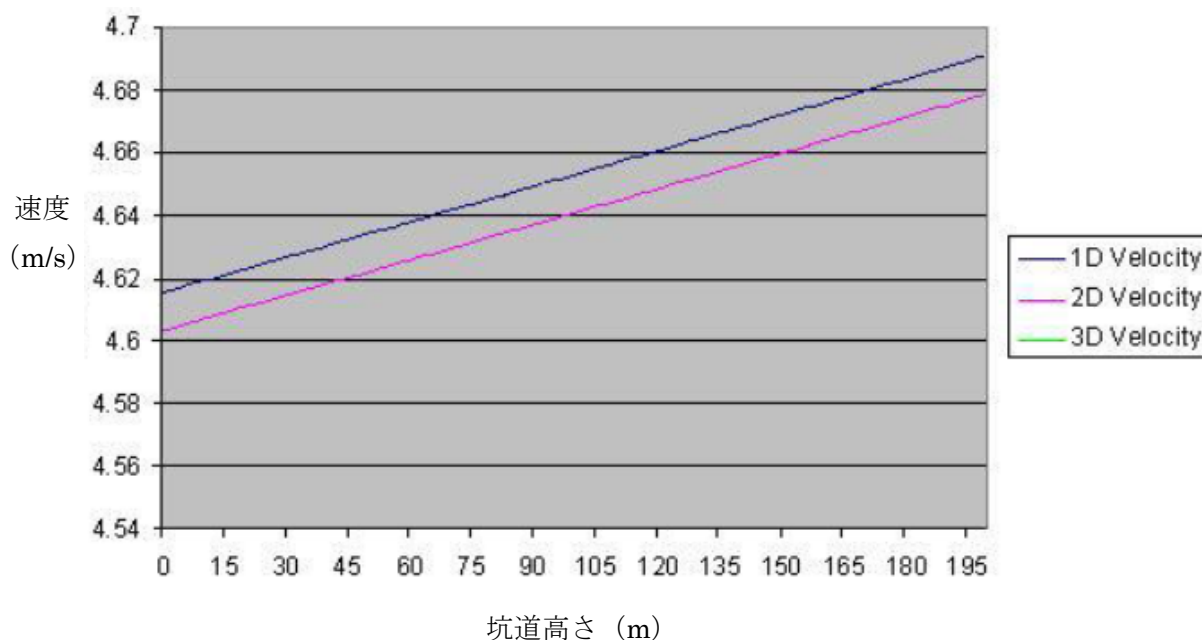


図 3.3.6-18 1次元、2次元、3次元解析の風速変化の比較

図 3.3.6-19、図 3.3.6-20 は、1次元、2次元、3次元解析の坑道断面の風速を、坑道底面から 50m、100m、150m地点で比較したものである。2次元解析および3次元解析の結果は、完全円筒形のシンプルモデルであるため同じとなることを確認した。また、疎要素よりも密要素のほうが坑道壁面付近(x軸の0もしくは5m地点)の風速の立ち上がりや、坑道のほぼ中心となる部分(x軸の2~3m付近)の風速の立ち上がりを良く表現できており、乱流状態を表現するには2次元もしくは3次元の、ある程度密な要素に区分した解析が必要であることが分かった。

以上の検討より、坑道全体の平滑化された風速等を検討するには1次元解析で十分であるが、坑道断面内の風速等を検討するには、2次元解析、3次元解析が必要であり、要素を密にすると解析精度が高くなることを確認した。なお、今回の検討では円筒形のモデルを用い、数学的に等価なモデルであったため、2次元解析と3次元解析が同値であったが、非対象形のモデルを検討する場合は、3次元解析が有用であると言える。

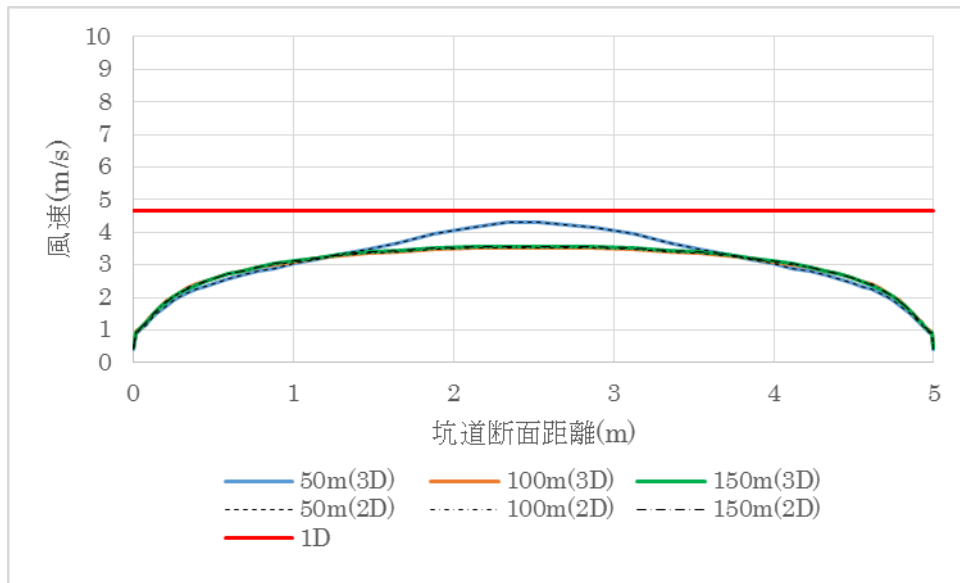


図 3.3.6-19 1次元、2次元、3次元解析の坑道断面の風速変化の比較（疎要素）

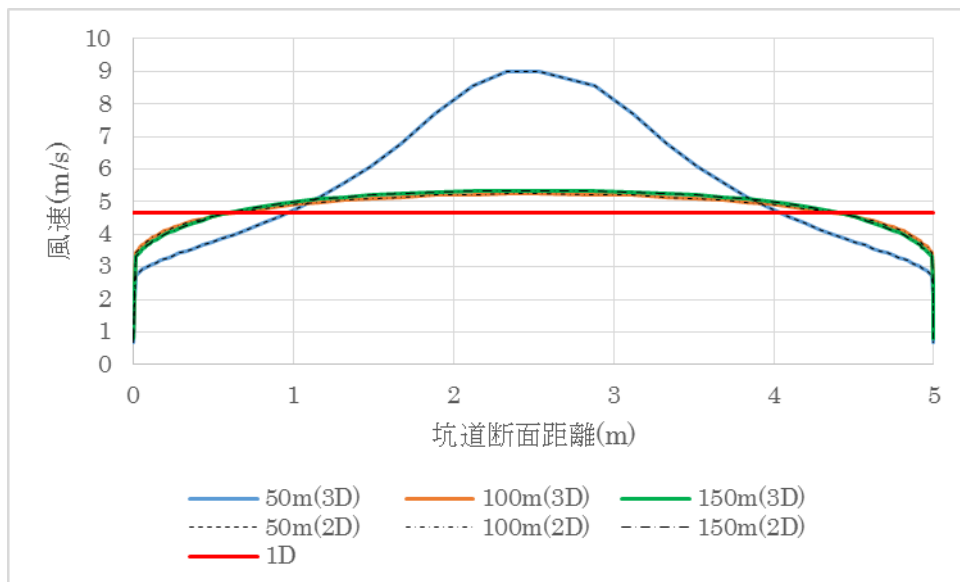


図 3.3.6-20 1次元、2次元、3次元解析の坑道断面の風速変化の比較（密要素）

3.4 地層処分施設の解析条件の設定

本節では、地下施設の通気解析の実施に向けた施設の形状、寸法、解析対象範囲、風速等の条件設定の考え方を整理する。

3.4.1 地層処分施設のモデル化

地下処分施設は規模が大きく、実際に建設した施設がないため、既存の資料[4][5]から施設形状・寸法を設定した。

本検討対象は、軟岩系岩盤の豎置き方式であり、平成 25 年度は同検討対象から簡易モデルを作成したが、本年度は詳細モデルを作成し、検討を行うこととした。

モデル化の検討に用いた図を図 3.4.1-1～図 3.4.1-4 に示す。

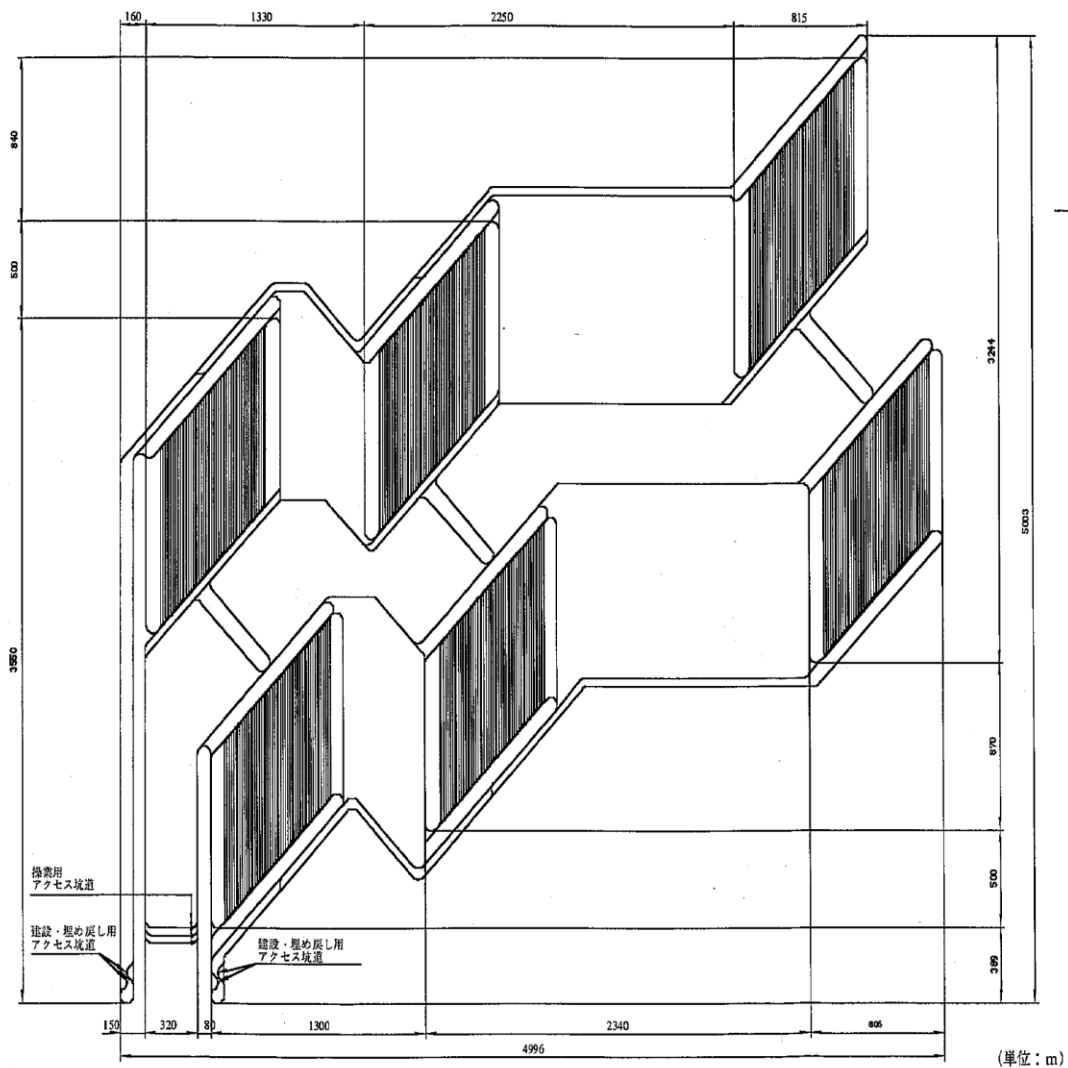
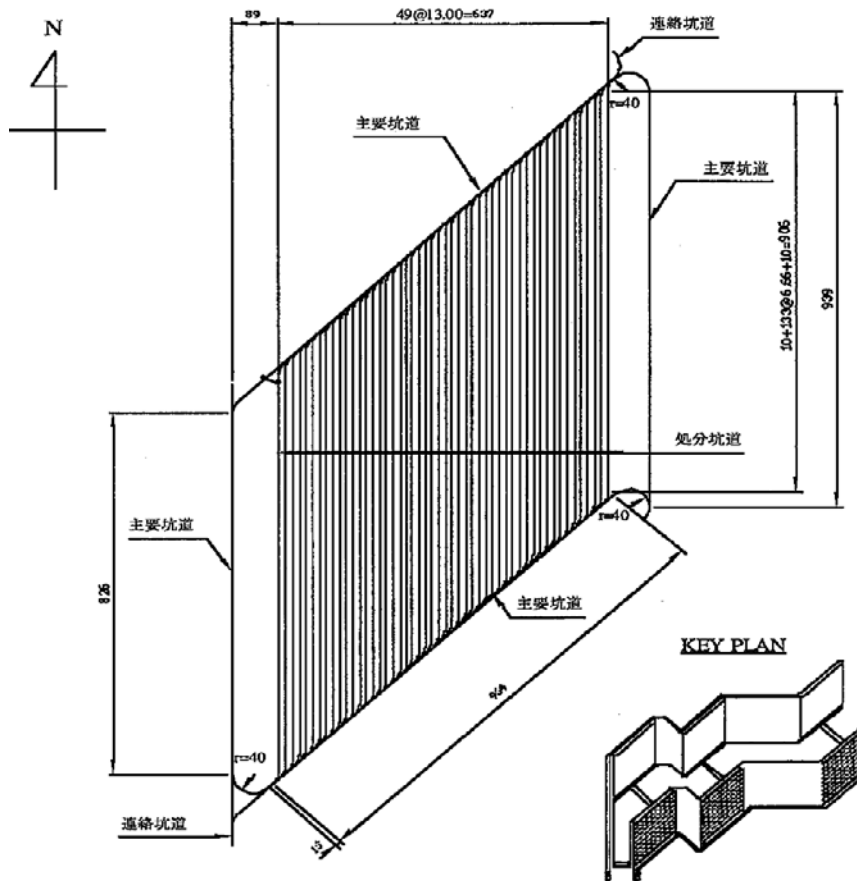


図 3.4.1-1 処分場レイアウト図（軟岩系岩盤、豎置き方式） [5]



(単位：m)

図 3.4.1-2 処分場レイアウト図（軟岩系岩盤、縦置き方式、その 1） [5]

- 処分坑道と主要坑道の接合部には R（坑道の曲線部）をつけず、角度 135° のみ考慮
- 主要坑道の R は考慮し、通気の曲がり方を確認する

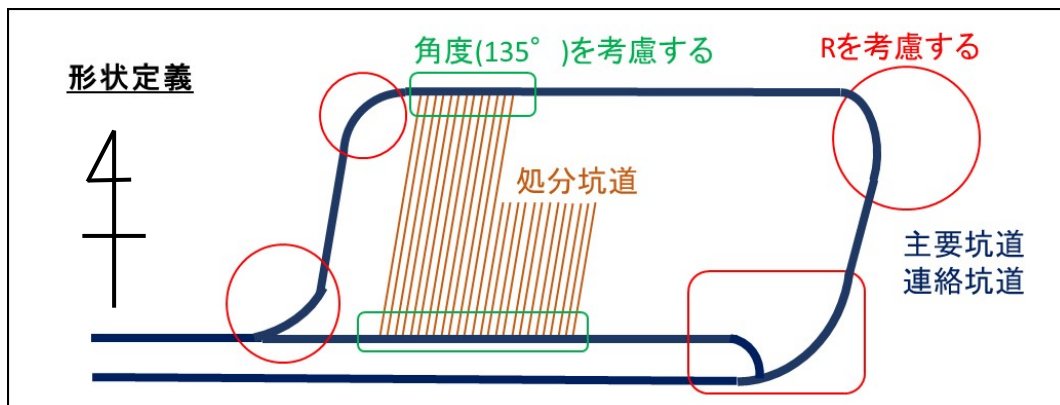


図 3.4.1-3 形状定義で考慮すべき事項の整理

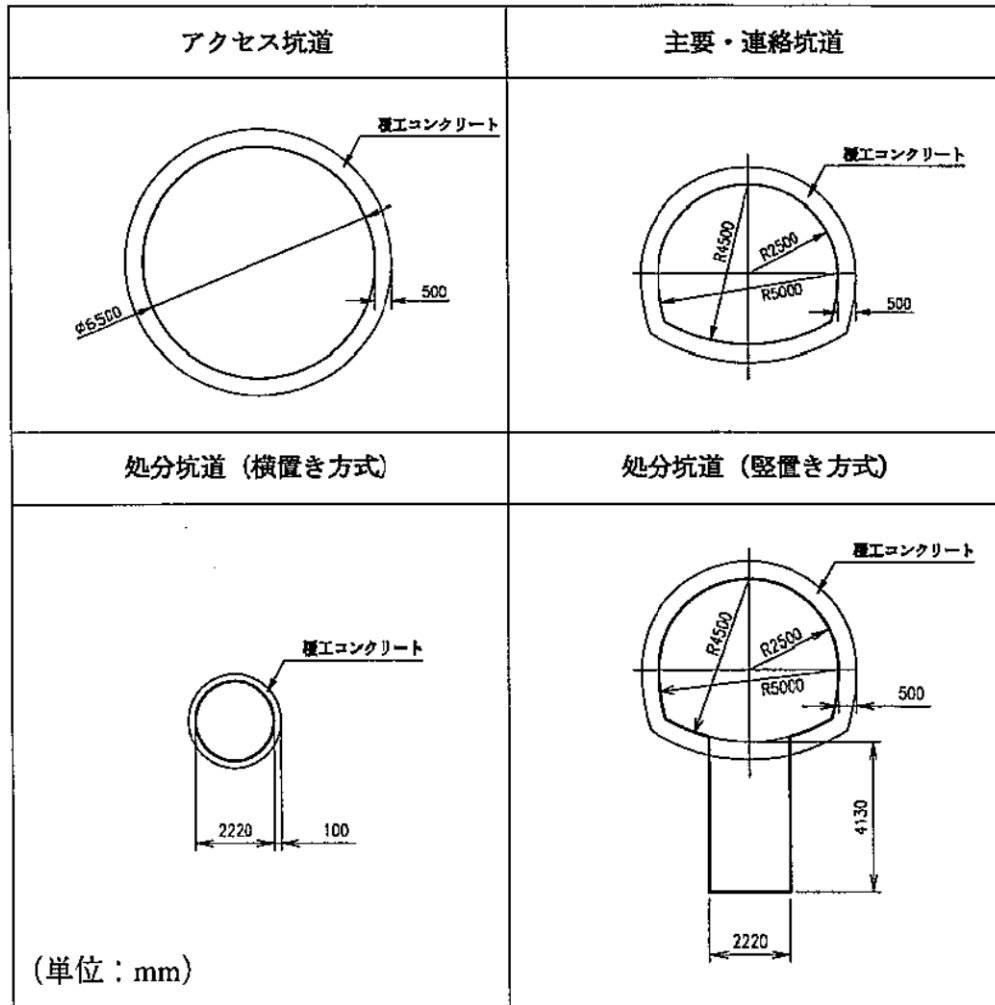


図 3.4.1-4 軟岩系岩盤における各坑道断面[5]

3.4.2 解析対象、設定条件の検討

図 3.4.2-1 を踏まえ、地層処分場の配置イメージを図 3.4.2-2 に示す。地下の地層処分場では、定置中パネル、埋め戻し中パネル、建設中パネルの3つのパネルが、並行して作業を進めている。また、各パネルには、通気用の立坑が2本以上整備することが考えられている。軟岩系岩盤の竖置き方式のパネルでは、50本の処分坑道を予定しており、建設中パネルでは13本の処分坑道を同時に掘削する予定である[4]。

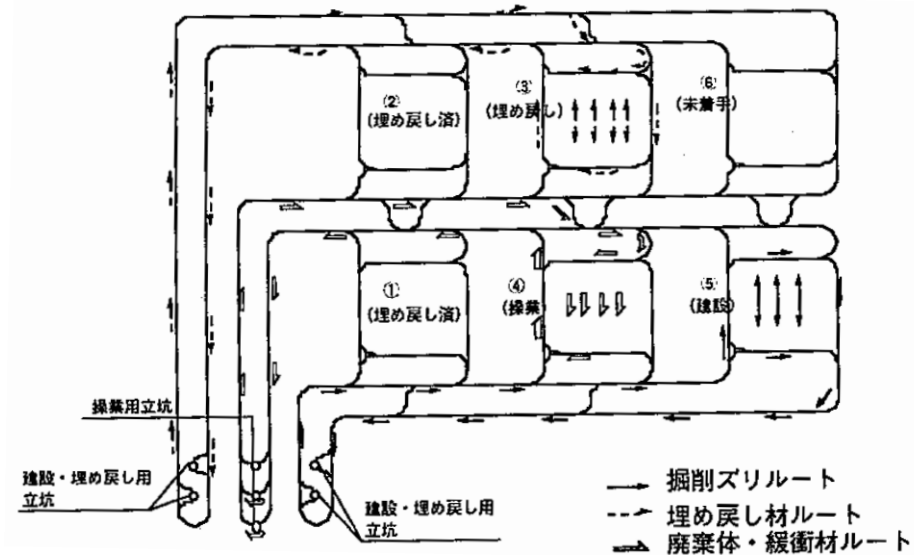


図 3.4.2-1 地層処分場のパネル配置[5]

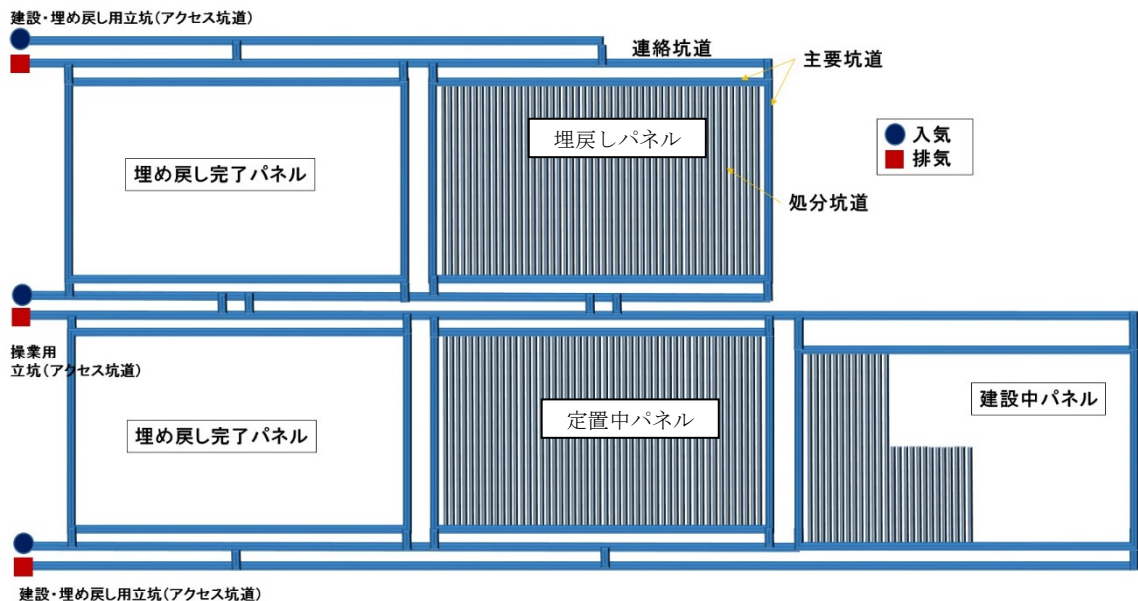


図 3.4.2-2 地層処分場のパネル配置イメージ

(1) 解析対象パネルの選定

定置中パネル、埋め戻し中パネル、建設中パネルには、通気用の立坑が各 2 本以上考えられているため、各パネルの通気が独立して確保されていると考えた。また、建設中パネルは、掘削中の 13 本の処分坑道に空気を送る必要があり、作業員も他のパネルと比べて多く配置されている。

以上より、本検討では通気が複雑となる建設中パネルを対象としてモデル化を行い、通気解析および避難シミュレーションに活用することとした。

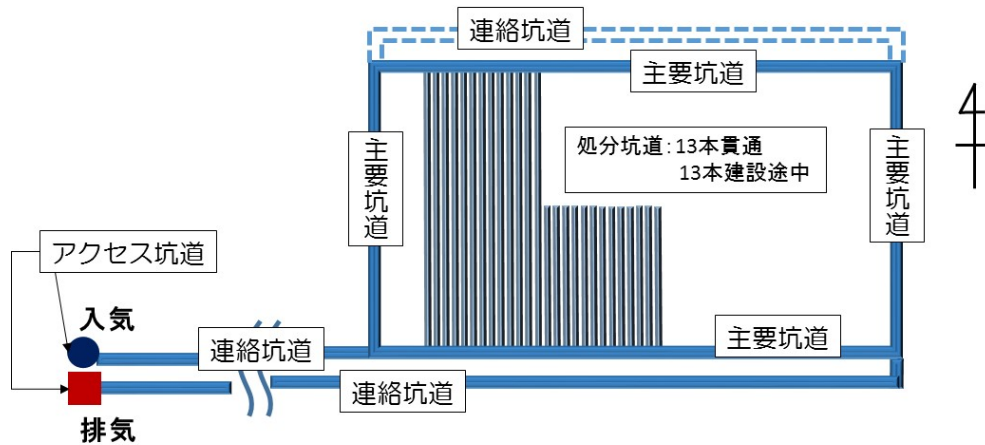


図 3.4.2-3 建設中パネルのイメージ図

(2) 建設中パネルのモデル化

(1) で、解析対象を建設中パネルに設定した。本項では、建設中パネルの形状を定義する上で考慮すべき事項を整理する。

- 主要坑道の北側に建設される連絡坑道（破線）は、定置作業で使用する坑道のため対象外とした。
- 建設中パネル：13本の処分坑道は貫通し、13本が延長の半分の約 400m を掘削中と仮定した。

(3) 坑道条件の検討に用いた資料の整理

本解析上、作業員の安全を考慮した坑道条件を検討する上で満たすべき基準は、坑内温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度、作業員一人当たりの呼気に対する風量、作業員の呼気に対する風量である。本検討では、作業員 1 人当たりの呼気に対する風量から必要な風量を確認し、風速を設定することとした。なお、掘削方法、車両の有無などの作業条件、有毒ガス発生などによる環境条件によって満たすべき風量が異なることに留意する必要があるが、今回の解析においては、除外することとした。

新版・ずい道等建設工事における換気技術指針[7]（以降、新版・[7]指針とよぶ）は、ずい道工事を行う作業員にとって快適な作業環境を保持するための方法等を示したものであり、換気の基準値を包括した上で成り立つ基準である。このため、当該基準をもとに風量と風速の検討を行った。

1) 所要風量の算定条件

新版・換気技術指針[7]によると、作業員 1 人当たりに必要な所要風量 (Q_p) は $3\text{m}^3/\text{min}$ である（鉱山法も同様である）。また、この値は工事状況に係らず最低限確保しなければならないもの、とされており、施工中の所要風量 (Q_a) は工事の諸条件を踏まえて設定する、となっている。

【新版・換気技術指針[7]】 p141

トンネル内作業員に対する所要風量 Q_p は、作業員に必要な適度の空通気等を考慮すると、最低 1 人あたり $3\text{m}^3/\text{min}$ とされている。これは、現場の工事状況の如何に関らず、最低限確保しなければならないものである。したがって、トンネル内作業員に対する所要風量は、前記の工事の諸条件から必要とされる風量とは別個に考えることが望ましい。

工事の諸条件を踏まえた施工中の所要風量 (Q_p) は、新版・換気技術指針[7]で次のように示されている。

【新版・換気技術指針[7]】 p141

〔所要風量〕

$$Q_a = Q_p + Q_{\max} (\text{m}^3/\text{min}) \dots \dots \dots (2.3.27)$$

ただし、 Q_p : トンネル内作業員に対する風量 : $Q_p = q \cdot M$ (m^3/min)

q : 作業員 1 人当たりの風量 ($3\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{人})$)

M : トンネル内での作業員の最大人数 (人)

Q_{\max} : 以下の $Q1 \sim Q6$ のうちの最大量

$Q1$: 地山から発生する有毒ガスの希釈・拡散の風量 (m^3/min)

$Q2$: 発破の後ガスに対する風量 (m^3/min)

$Q3$: 工事用機械や工事用車両の排出ガスに対する風量 (m^3/min)

$Q4$: 工事で発生する粉じんに対する風量 (m^3/min)

$Q5$: 発熱源に対する風量 (m^3/min)

$Q6$: 坑内風速から求めた送気量 (m^3/min)

本検討では、工事内容が不明であること、サイトが決定されていないことを踏まえて、発破によるガス・粉塵、車両の排出ガス・発熱量、吹き付け作業の粉塵、温熱対策、高温岩盤の掘削に対する所要風量は考慮しないこととし、作業員 1 人あたりの呼気から風量を設定する。

なお、可燃性ガスの湧出量が不確定の場合は、坑内風速 0.5m/s 以上を確保する（新版・換気技術指針[7]、p101）。

a. 建設中パネルの風量設定

本項では、前節で検討を行った必要風量を設定する。対象とするモデルは、建設中パネルのモデルのみで、建設中の処分坑道の坑内の作業員は、で示した坑内作業員数を参考にして処分坑道に 6 名/1 本とし、建設完了の主要坑道および処分坑道には、作業員は配置しないと仮定した。

以上より、坑道内の作業員数は、6 名 \times 13 本 = 78 名となる。なお、その内訳は図 3.4.2-4 の坑内作業員「掘削」より、トンネル世話役 1 名、トンネル特殊工 4 名、トンネル作業員 1 名であり、配置は均等配置と仮定する。

必要風量は、作業員 1 人あたりの必要呼気量を担保することと、坑道条件を満たすために必要な風速を担保することが設定の要件となる。まず、作業員 1 人あたりの必要風量は $3.0\text{m}^3/\text{min}$ であることから、坑口からの入気量は、 $3.0\text{m}^3/\text{min} \times 78 \text{名} = 234\text{m}^3/\text{min}$ 以上確保する必要がある。このときの風速は、トンネルの断面積 (21m^2) を考慮すれば、ある断

面を通過する平均風速は 0.18m/s と、坑道条件で設定した 0.5m/s を下回る。各坑道の風速 0.5m/s をすれば、前述に設定した作業員の必要呼気量を確保することができる。したがって、各坑道の風速下限値を 0.5m/s と設定した。建設中の処分坑道が 0.5m/s×13 本=6.5m/s、その他の主要坑道で 0.5m/s であるため、7.0m/s の風速を担保する風量が必要である。これに断面積 (21m²) をかけて必要風量を求めると、8,820m³/min である。以上の検討結果を表 3.4.2-1 にまとめる。なお、北側主要坑道につながっている処分坑道については、図 3.5.3-3、図 3.5.3-4 に示したように一連に通気する (以下一筆書きという) 方法と仮定し、最小限の風量とした。

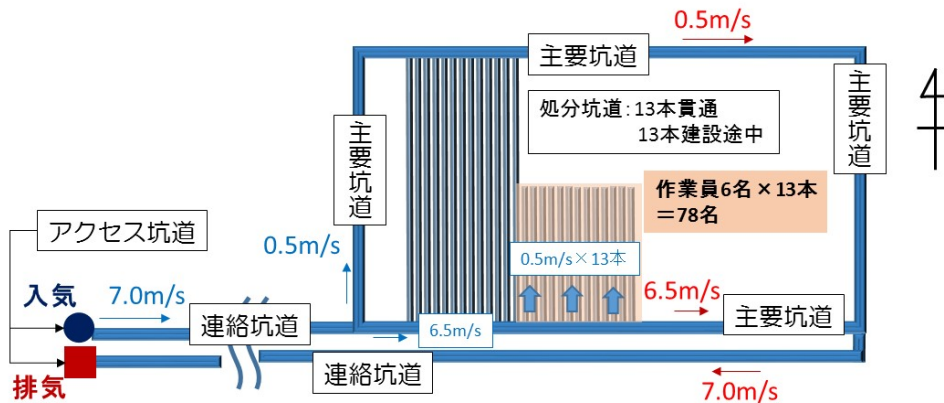


図 3.4.2-4 建設中パネルと作業員の配置イメージ図

表 3.4.2-1 坑道内の作業員数および風速、風量の設定

No.	大項目	設定項目	値
1	作業員数	建設完了の処分坑道	0名
		建設途中の処分坑道	78名/13本 (6名/1本)
		主要坑道	0名
		連絡坑道	0名
2	トンネル断面積		21m ²
3	坑口からの入気量	作業員 1 人当たりの必要風量から算定	234m ³ /min (3.0m ³ /min×78名)
4	No.3÷No.2 で求めた風速		0.18m/s (<0.5m/s)
5	坑道条件の最低値である 0.5m/s 以上で通風させる場合	建設中処分坑道の風速	6.5m/s (0.5m/s×13本)
		主要坑道の風速	0.5m/s 以上
		入気口の風速	7.0m/s
6	No.5 から求めた必要風量		8,820m ³ /min (7.0m/s×21m ² ×60秒)

2) 坑内温度の閾値の設定

坑内温度の閾値は、労働安全衛生規則に定められている 37° 以下とした。

【労働安全衛生規則】第五章 温度及び湿度

第六百十一条

事業者は坑内における温度を三十七度以下としなければならない

3) 酸素濃度、二酸化炭素濃度の閾値の設定

酸素濃度、二酸化炭素濃度の閾値は、それぞれ労働安全衛生規則に定められている値を用いて、酸素濃度を 19%以上、二酸化炭素濃度は 1.5%未満とした。

【労働安全衛生規則】第三篇 衛生基準 第一章 有害な作業環境

第五百八十三条

事業者は、坑内の作業場における炭酸ガス濃度を一・五パーセント以下としなければならない

第五百八十五条

事業者は、次の場所には、関係者以外のものが立ち入ることを禁止し、かつその旨を見やすい箇所に表示しなければならない

四 炭酸ガス濃度が一・五パーセントを超える場所、酸素濃度が十八パーセントに満たない場所又は硫化水素濃度が百分の十を超える場所

各項目の検討結果を表 3.4.2-2 にまとめる。

表 3.4.2-2 設定条件一覧

坑道条件	値	備考
坑内温度	37℃以下	労働安全衛生規則 第五章 温度及び湿度 第六百十一条 事業者は坑内における温度を三十七度以下としなければならない
酸素濃度	19%以上	労働安全衛生規則 第三篇 衛生基準 第一章 有害な作業環境 第五百八十三条 事業者は、坑内の作業場における炭酸ガス濃度を一・五パーセント以下としなければならない
二酸化炭素濃度	1.5%未満	第五百八十五条 事業者は、次の場所には、関係者以外のものが立ち入ることを禁止し、かつその旨を見やすい箇所に表示しなければならない 四 炭酸ガス濃度が一・五パーセントを超える場所、酸素濃度が十八パーセントに満たない場所又は硫化水素濃度が百分の十を超える場所
風量 (風速)	8,820m ³ /min 以上 (0.5m/s 以上)	新版・換気技術指針[7]p101 可燃性ガスの湧出が想定される場所であって、その湧出量が不確定の場合は坑内風速 0.5m/s 以上を確保する

3.5 解析の実施

トンネルや鉱山等における通気解析では、多くの解析事例が発表されているものの、そのほとんどがベルヌーイ式（1次元解析）である。3.3節での検討結果を踏まえ、通気の乱れを理論的に再現可能なナビエストークス式（3次元解析）による解析事例はなく、処分坑道を含めた地層処分施設規模の通気解析を行うのは、国内で初めてである。そのため、条件設定、モデル化、解析手法、通気の解析など様々な検討過程において課題や新しい知見が抽出されると予想される。

以上より、本解析では、地層処分施設の坑道内を既存の解析ソフトを用いて流れる空気の風速・風量、熱等の分布がどのように表現できるか、また、解析を行うにあたってどのような新しい知見や課題が抽出できるかを把握することを目的とする。

3.5.1 解析手順の検討

平成 25 年度の検討では、処分坑道等を含まない簡易なモデルを用いて解析を実施した結果、計算負荷が大きく計算ケースを増やすことが困難であった。また、立坑や掘削中の処分坑道等もなかったことから、地下の地層処分施設における通気の特徴を把握するとともに、計算負荷を抑える手法についても検討する必要がある。

したがって、本節では

図 3.5.1-1 に示す手順により解析を行う。

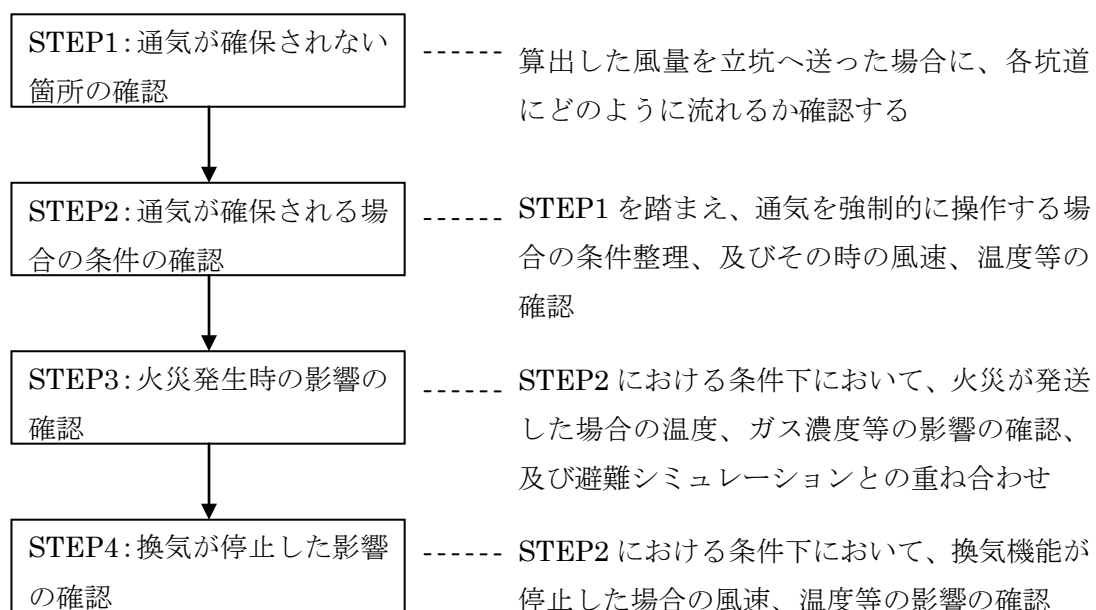


図 3.5.1-1 解析手順

3.5.2 通気が確保されない箇所の確認 (STEP1)

(1) STEP1 の解析の概要

前項で設定した風量 (8,820m³/min) を満たす 3 次元の通気解析を実施する。本項は、パネル全体の風況場を確認する。風況場から、1 次元モデルが適用可能と判断できる場所と通気が確保できない箇所を確認する。

これらの結果を踏まえて、STEP2 以降の検討に用いる解析モデルの次元の組み合わせを決定する。

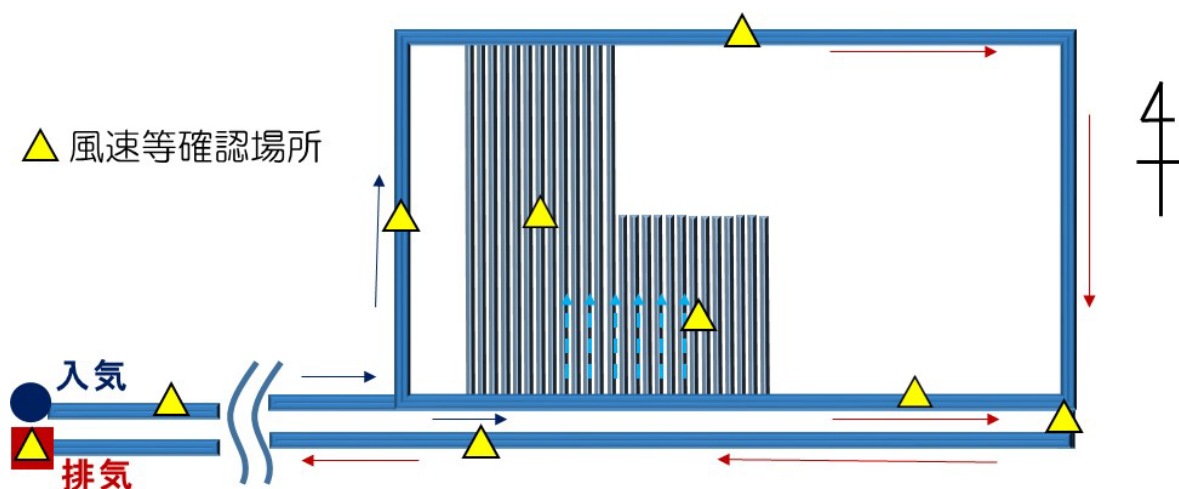


図 3.5.2-1 3次元解析による風況場の確認

(2) 各ポイントにおける風速の確認 (その1)

1) 風速分布の確認

STEP1 は、建設中パネルおよび建設中パネルに繋がる連絡坑道を全て 3 次元でモデル化し、算出した必要風量等の条件を用いた通気解析を実施する。STEP1 の目的は、①建設中パネル全体の風速を把握する、②各処分坑道の空気の流入状況を確認する、ことを第1段階とし、最終的に、③定常かつ一様流れの場所を特定した上で1次元解析が可能な範囲を設定する、ことである。

2) 数値拡散の確認とその対応

1)の検討結果を踏まえて、分流部分に仮定の壁を設けた計算を実施した。結果、解析が収束せず発散した。この原因を詳細に検討するには、計算対象領域全体ではなく局所的に分割して検討を重ねる必要がある。一方で、計算格子の多さが何らかの影響を与えているとも考えられたため、計算格子を疎に設定し解析を実施した結果、解析は収束した。

3) 解析結果

以降、解析結果（風速分布）を示す。

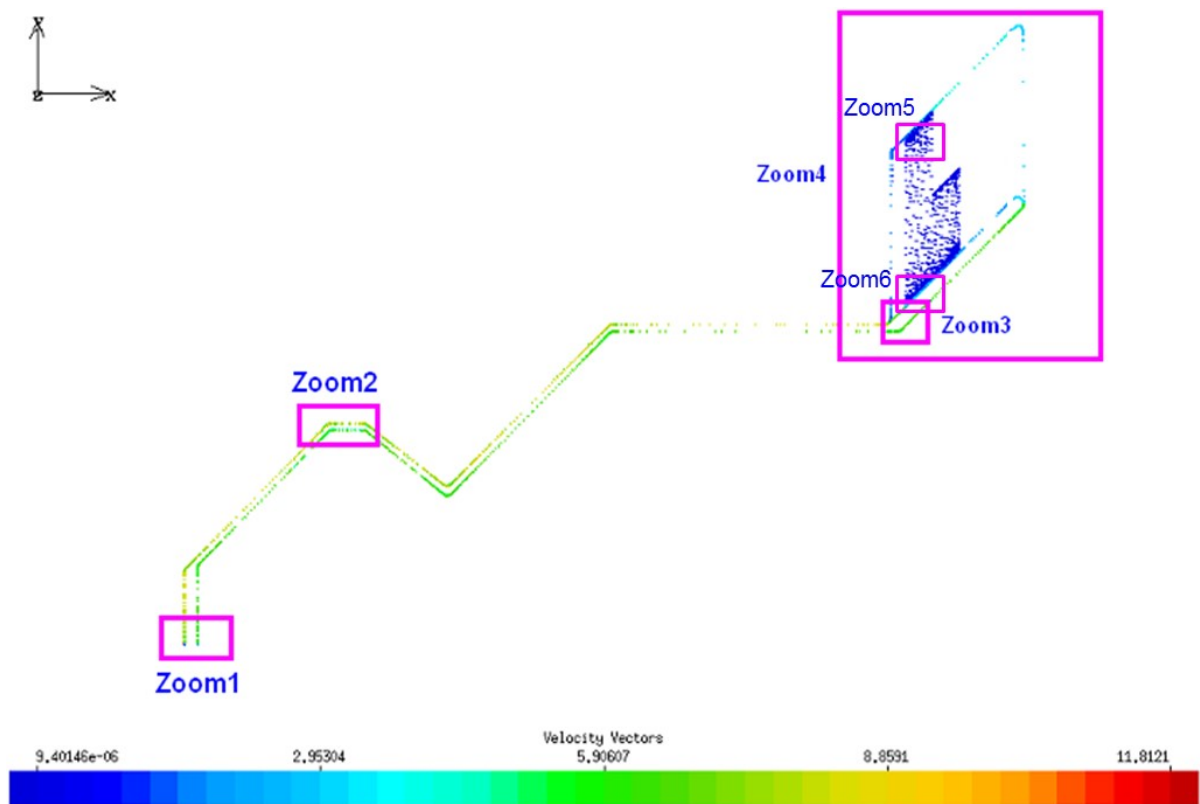


図 3.5.2-2 全体の風速分布図

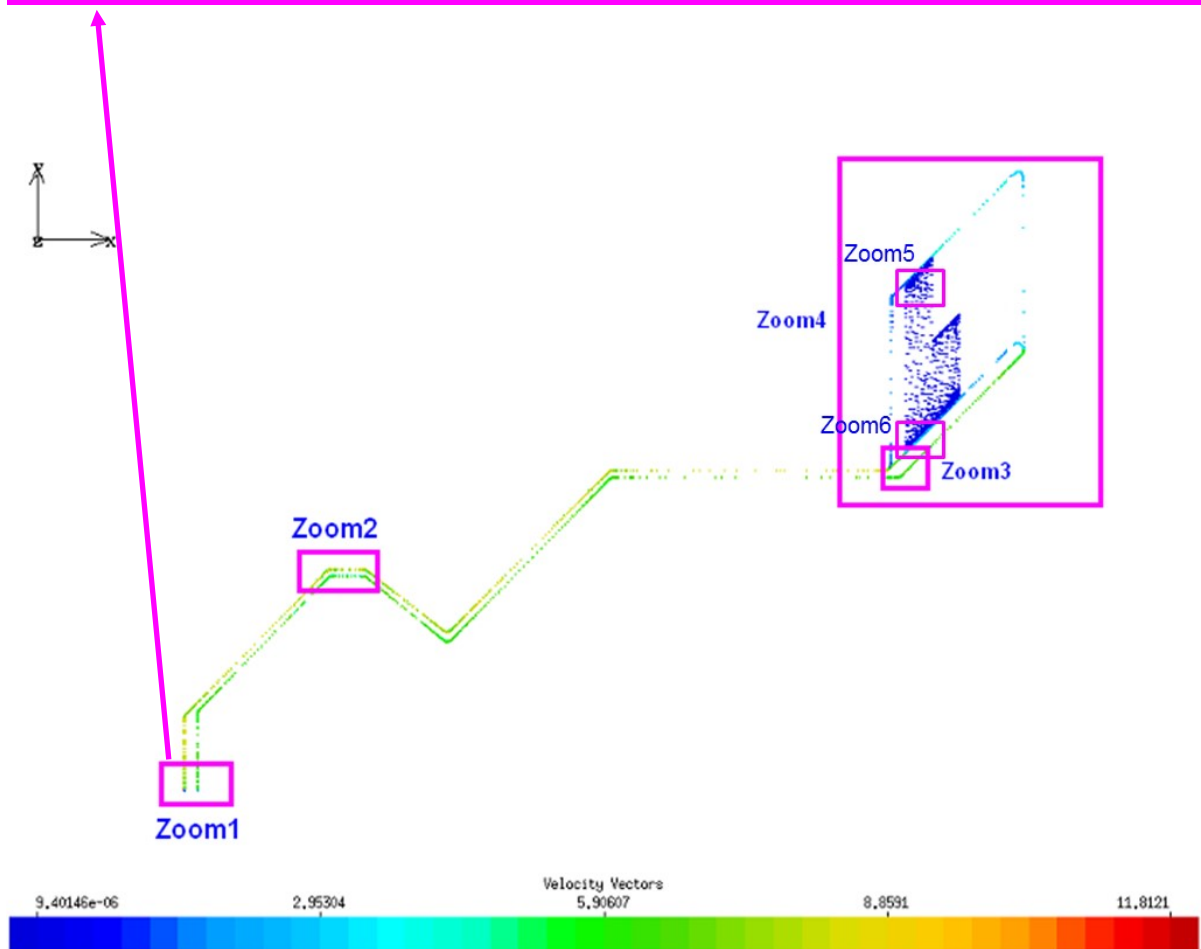
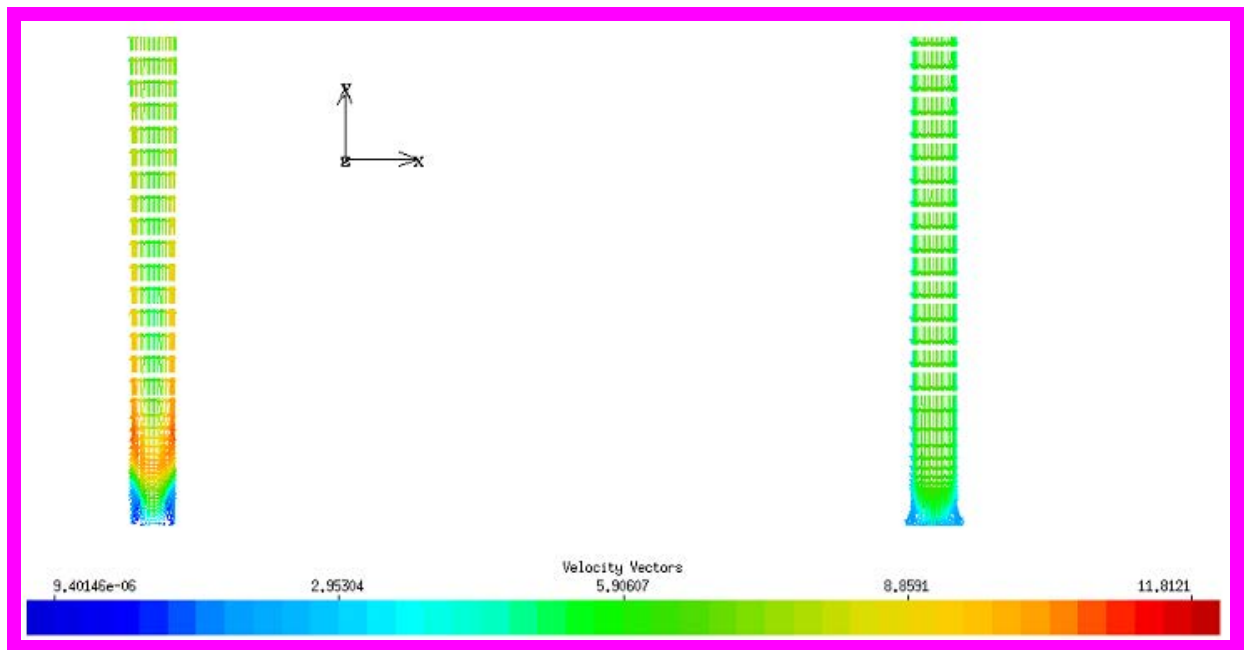


図 3.5.2-3 Zoom1 の風速分布図

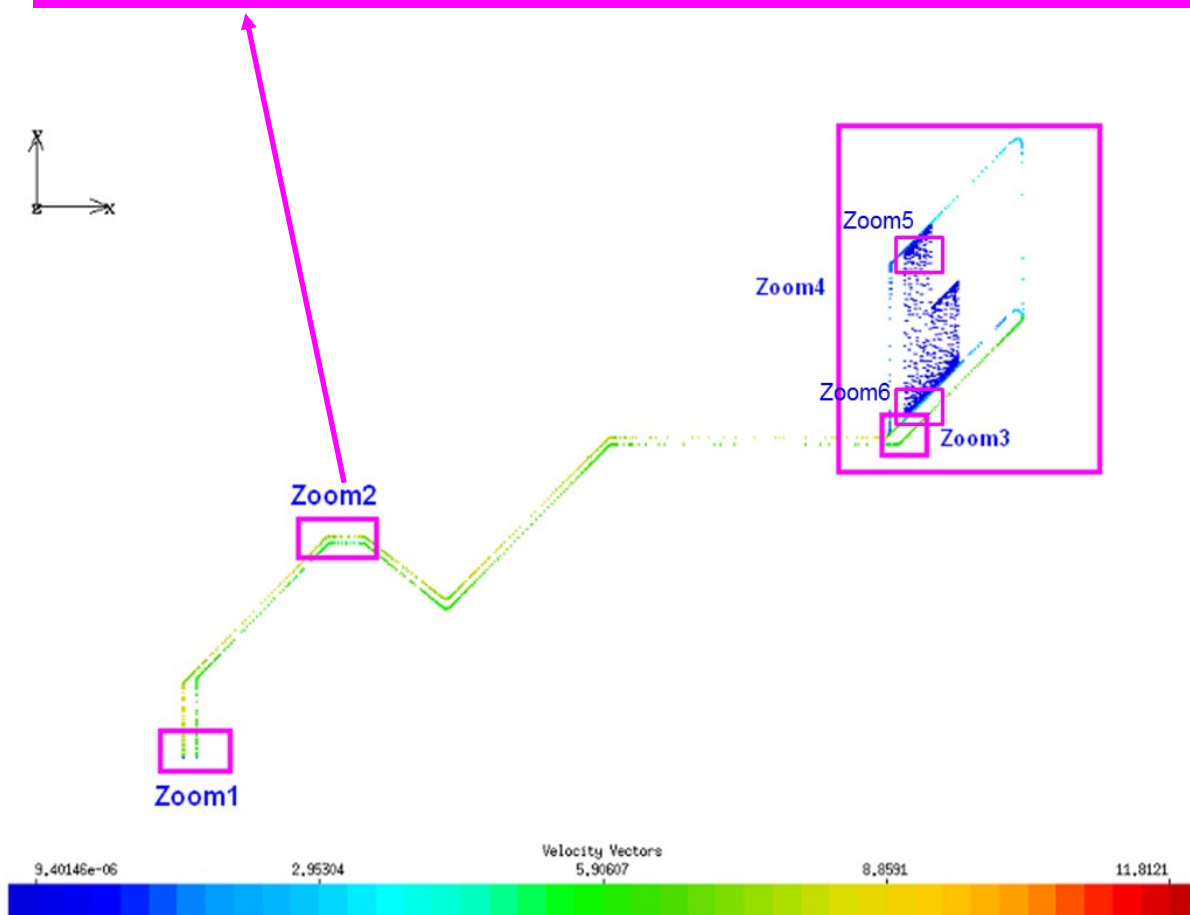
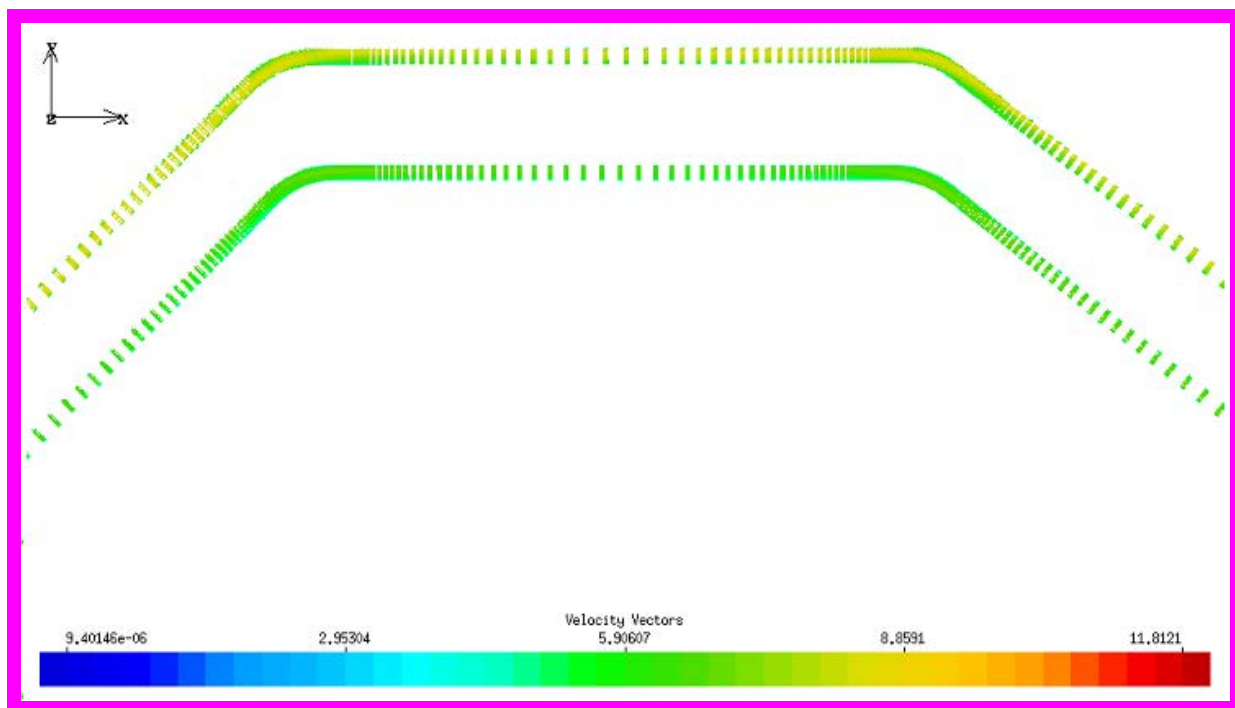


図 3.5.2-4 Zoom2 の風速分布図

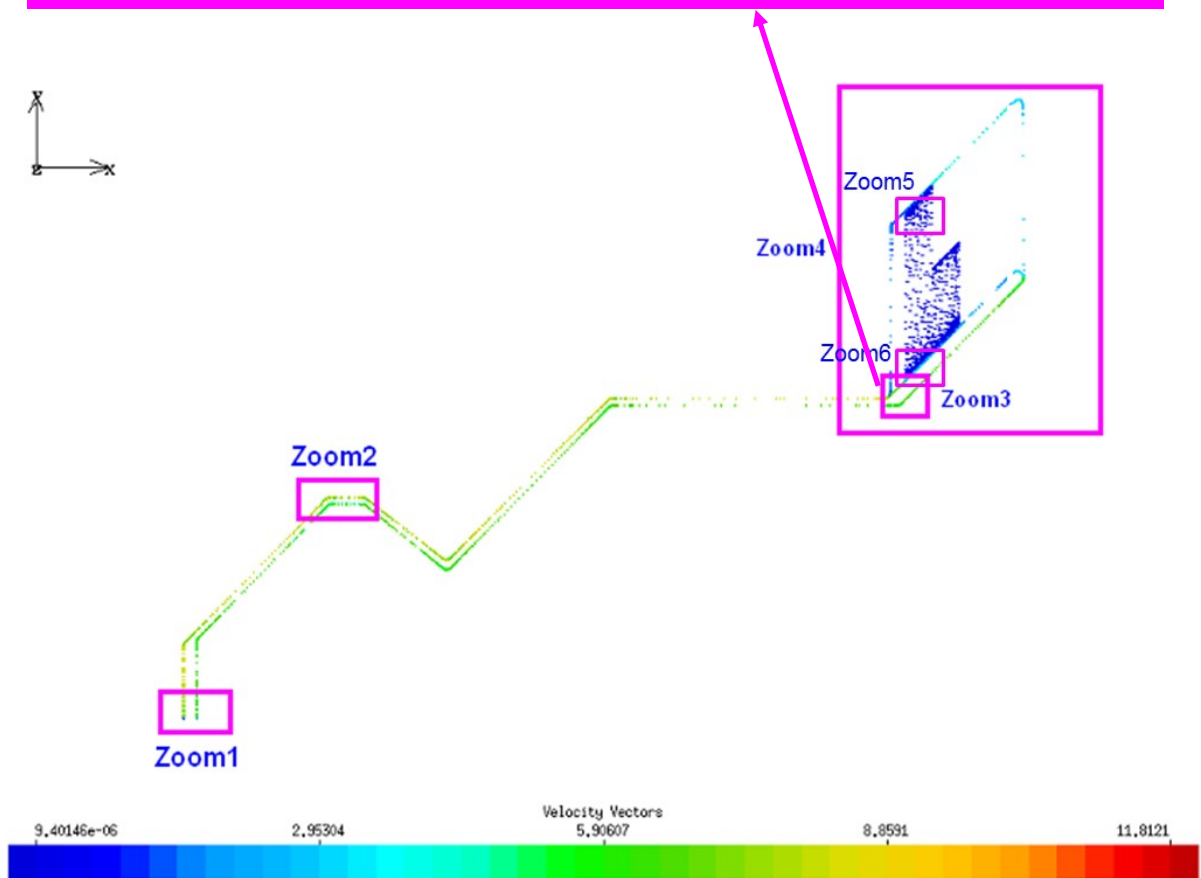
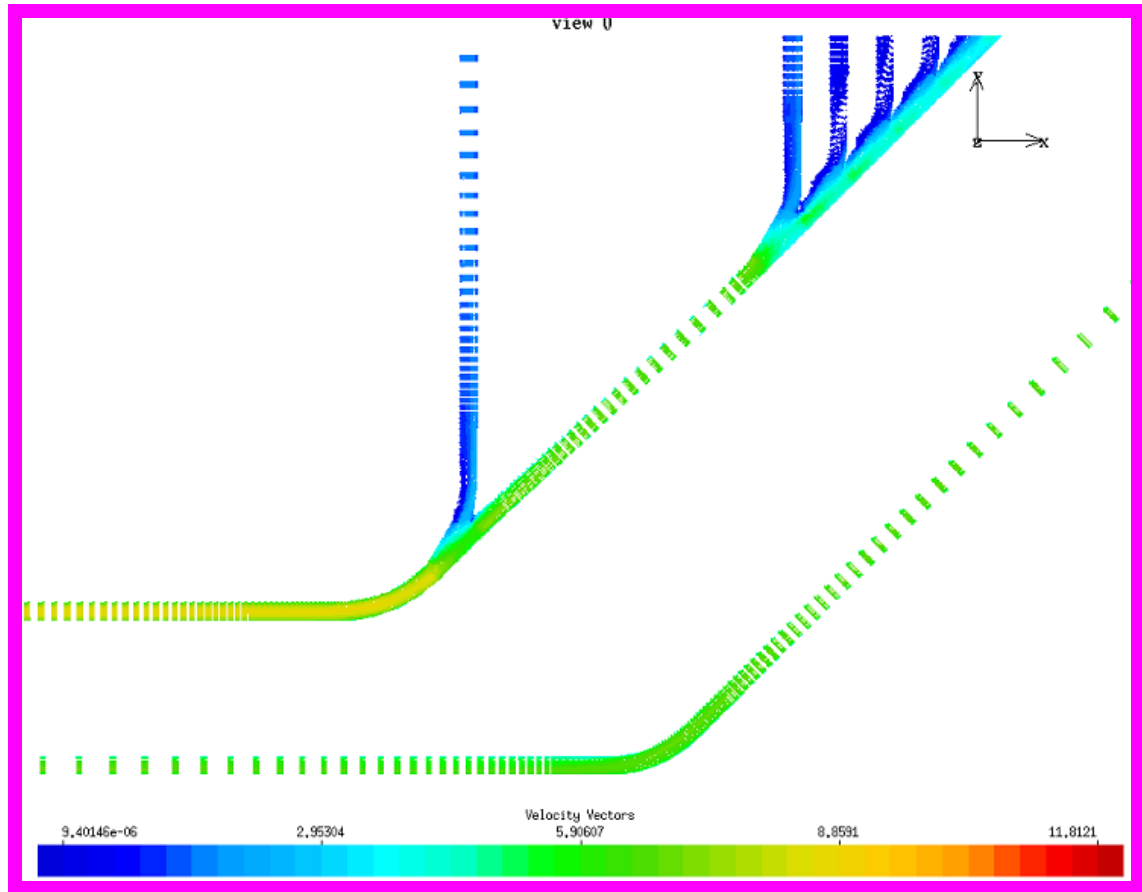


図 3.5.2-5 Zoom3 の風速分布図

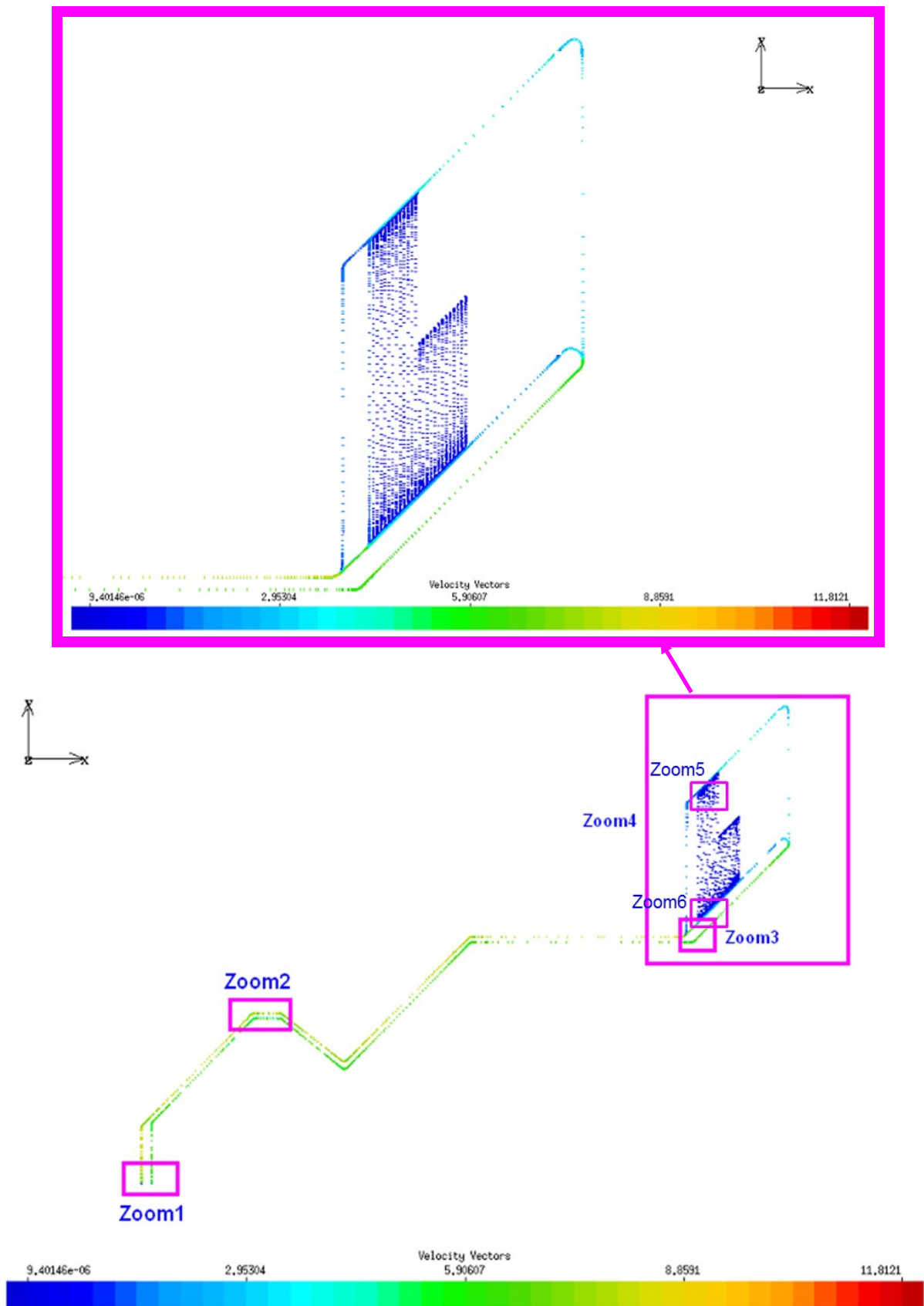


図 3.5.2-6 Zoom4 の風速分布図

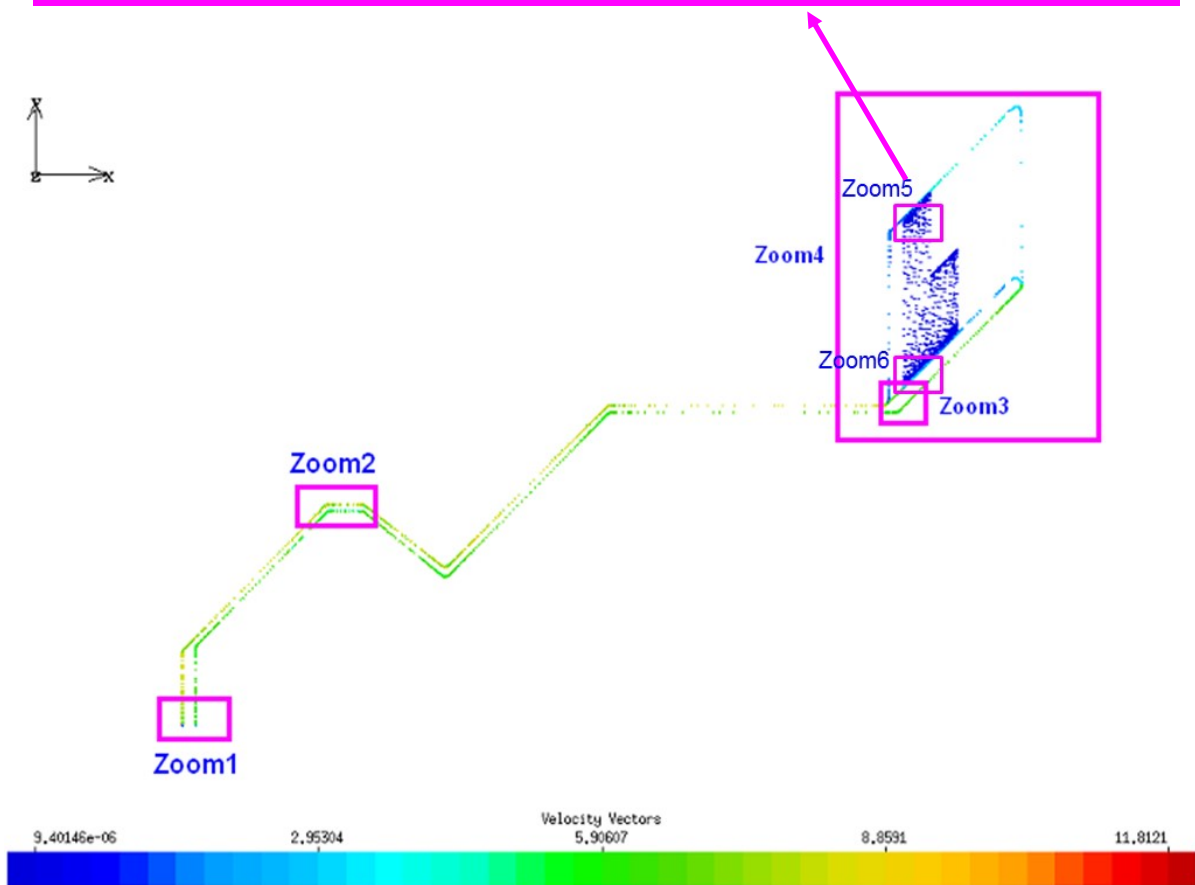
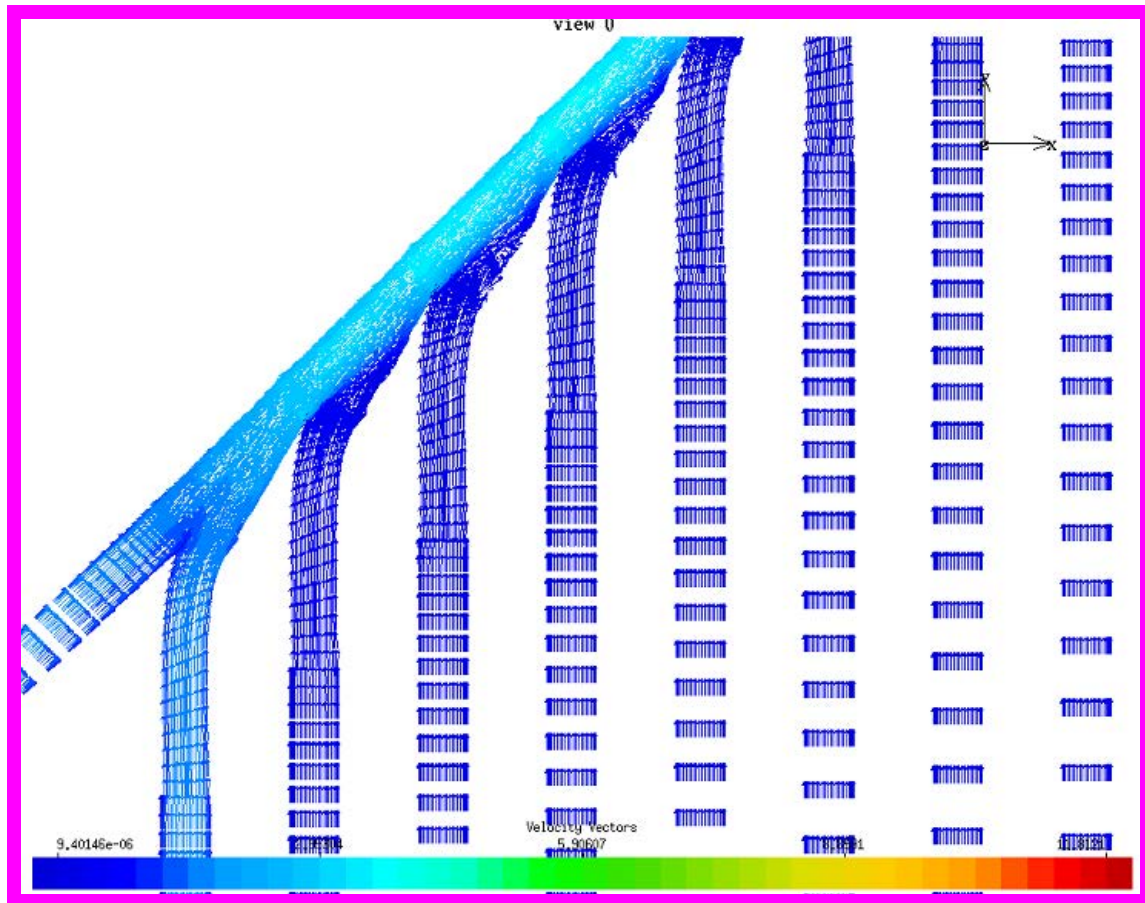


図 3.5.2-7 Zoom5 の風速分布図

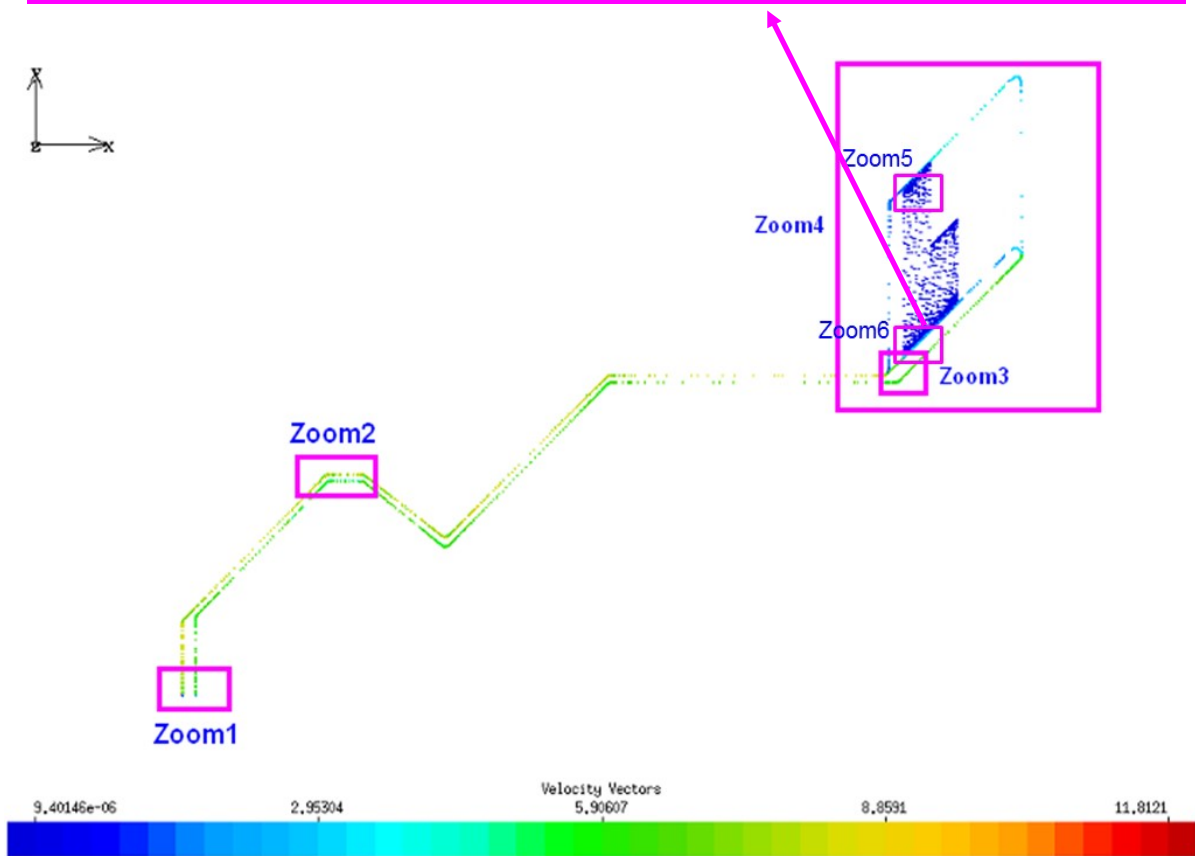
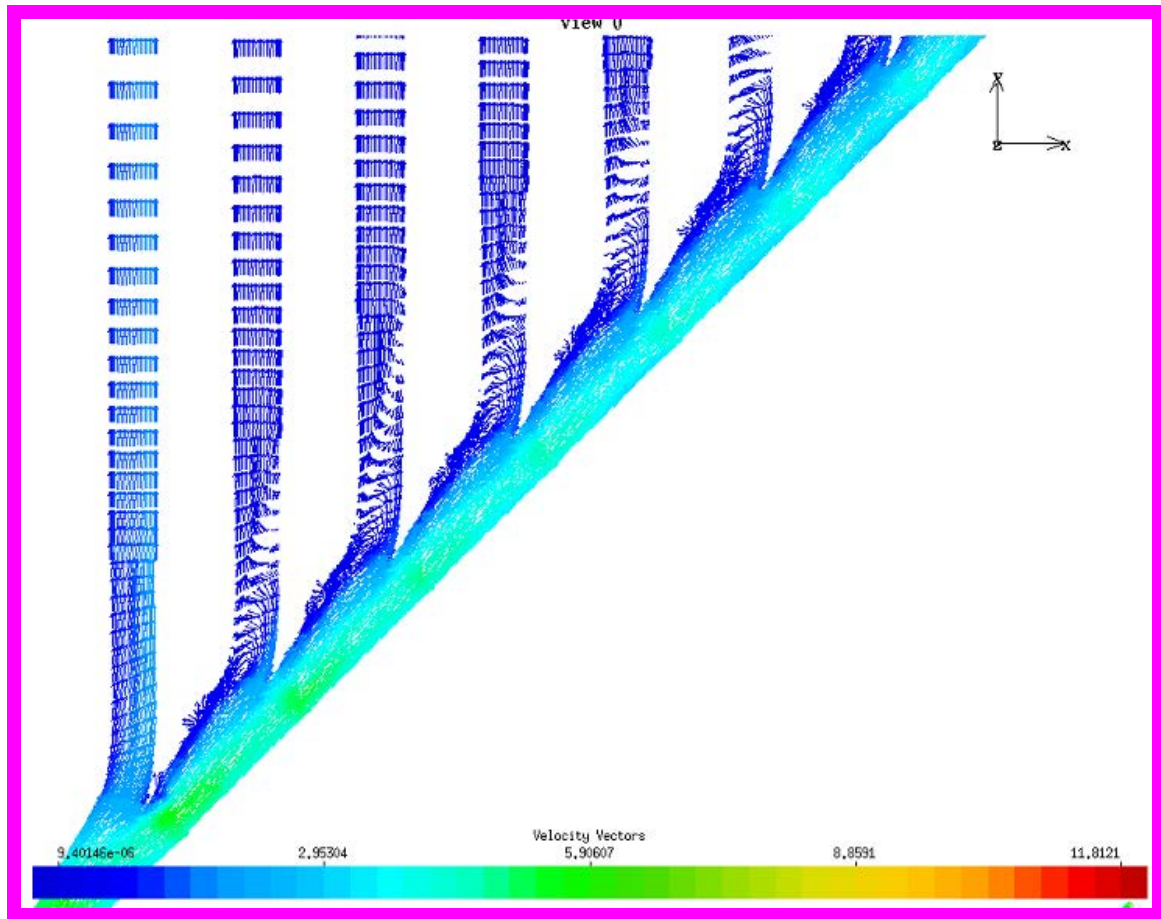


図 3.5.2-8 Zoom6 の風速分布図

4) 解析結果の考察

本解析の結果について、傾向として以下の内容が確認できた。

- ① 建設中パネルの主要坑道の風速が連絡坑道の風速よりも遅い
- ② 建設中パネルの周囲の主要坑道に空気が流れる
- ③ 処分坑道内にほとんど空気が流れない
- ④ 入気側の風速が排気側の風速よりも早い

建設中パネルの風速が連絡坑道の風速よりも遅い理由は、分岐部において空気が分散されるためである。これは、②の主要坑道に空気が流れていることから判断できる。また、1本目の処分坑道には、空気が比較的流れているが、2本目、3本目になるにつれて流れにくくなることが確認できた。また、各ポイントの確認結果を表 3.5.2-1 に示す。

表 3.5.2-1 STEP1 の解析結果

ポイント	解 析 結 果
Zoom1	入気口と排気口の立坑に繋がる部分は、入気側が排気側と比較して高い風速分布を示した。
Zoom2	
Zoom3	分流部分において風速が遅くなっているのを確認した。これは、分岐部により坑道の断面変化から乱流が発生し、速度が低下したように見られる。
Zoom4	南側主要坑道に主に空気が流れている状態であるものの、分岐の確度が135度と緩やかなため、西側主要坑道にも空気が流れているのを確認した。
Zoom5	北側主要坑道では、処分坑道との接続後に風速が上がることを確認した。各坑道の通気が合流し、風量が増えることにより、風速が速くなったと考えられる。また、北側主要坑道の風速が上がることにより、2番目以降の処分坑道の気流がより乱されていることが確認できる。
Zoom6	Zoom5の風速分布と逆に1番目の処分坑道に空気が流れていることを確認した。処分坑道に空気が流入するときに、処分坑道内に空気がぶつかり渦をまく現象を確認した。

本検討では、建設中パネルから立坑までの連絡坑道が長く、計算時間に要する結果となった。そこで、建設中パネルから立坑までの連絡坑道を500mとした解析結果を参考資料として添付する。

3.5.3 通気が確保された場合の条件の確認 (STEP2)

(1) STEP2 の解析の概要

STEP2 のモデル化は、STEP1 の結果を考慮して図 3.5.3-2 のように設定した。図の赤線部分は 1 次元モデルを行った部分で、青線部分が 3 次元モデル化した部分である。建設完了の処分坑道は一筆書きの 1 次元モデルとし、建設途中の処分坑道は作業員の避難を考慮して 3 次元モデルとした。

一筆書きのダクト部分は、形状を定義せず、より簡易にモデル化する手法として「セルポロシティ」を設定した。この手法の利点は、形状変更することなく 2 種類の気流を干渉させることなく解析できることである。なお欠点は、隣の処分坑道へ流す管路をによる気流の乱れを再現できないところである (図 3.5.3-2)。

今回の解析において処分施設全体にかかわる気流の流れに影響を与えるものではないので、「セルポロシティ」を設定することによる問題は軽微であると判断した。

※セルポロシティとは、計算格子の一部を「透過要素」として設定するモデル化の手法の一つであり、今回の解析ではこの透過要素に流入する空気の一部を、境界条件を用いて透過させる手法を取った。



図 3.5.3-1 菱刈鉱山の切羽付近の様子

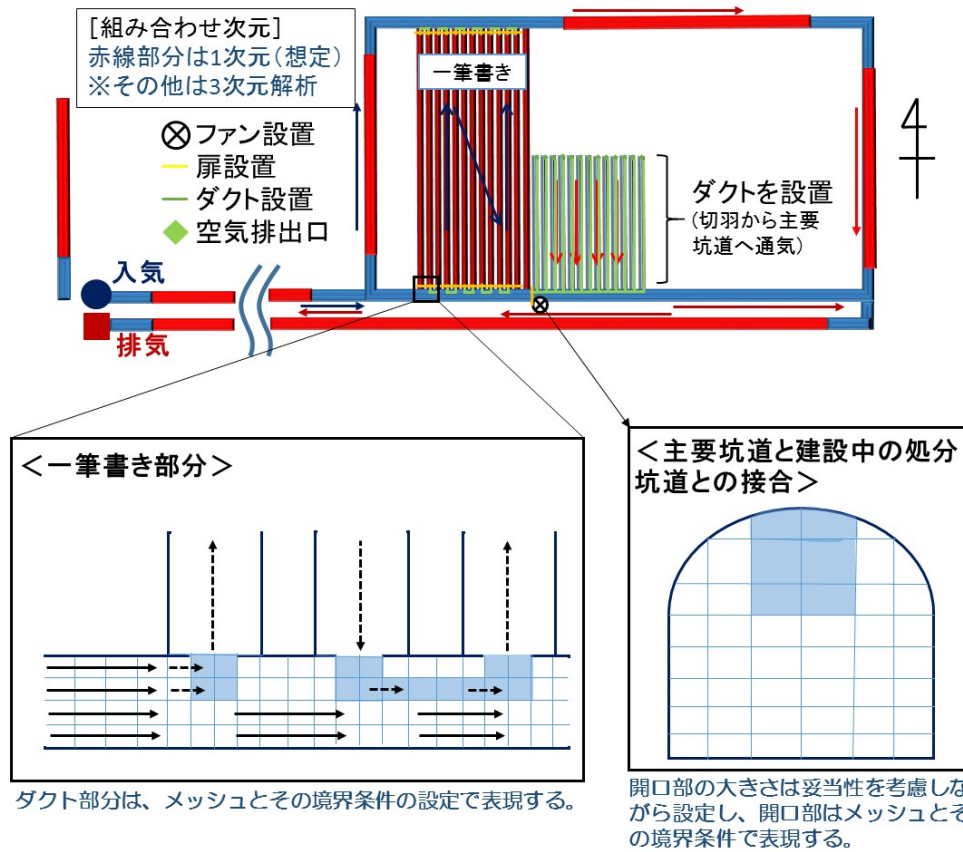


図 3.5.3-2 ファン・ダクト設置と組み合わせ次元のイメージ図

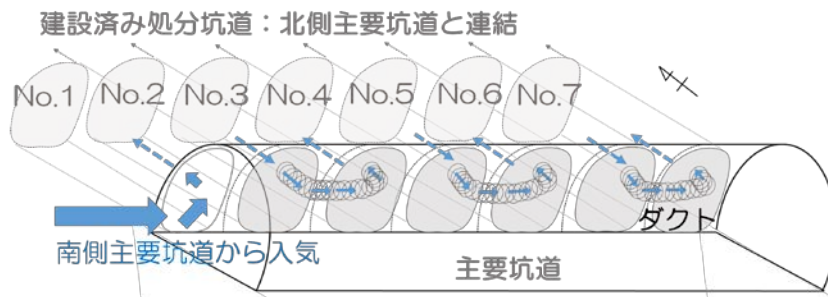


図 3.5.3-3 一筆書きの通気概念図

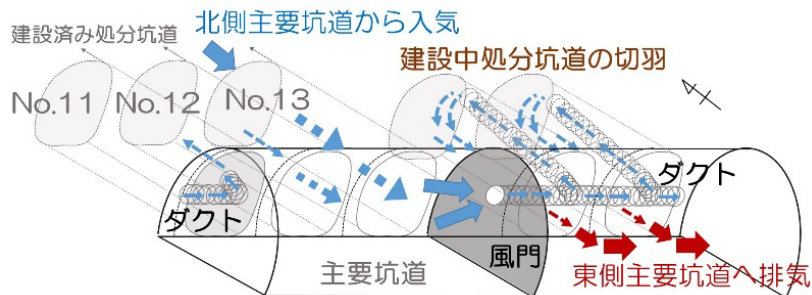


図 3.5.3-4 風門の設置と建設中処分坑道の切羽へ向けた通気方法の概念図

(2) 風速分布の確認

図 3.5.3-5 に建設中パネル全体の風速分布を示す。全体的な傾向は STEP1 の 3 次元モデルと同様であり、入排気口から建設中パネルに繋がる連絡坑道で風速が高く、かつ入気口側よりも排気口側の風速が高い。

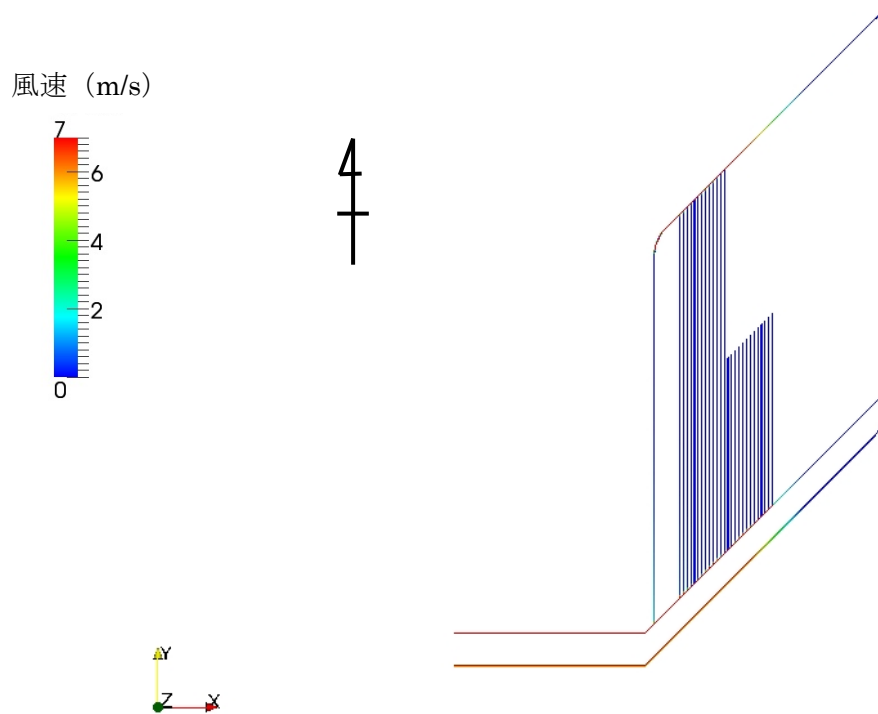


図 3.5.3-5 建設中パネル全体の風速分布図

(3) 建設完了の処分坑道への空気の流入出状況の確認

建設完了の処分坑道への空気の流入出、図 3.5.3-6 において確認できるものの、1次元モデル化した部分への一筆書きの空気の流れは十分には表現できなかつた。なお北側主要坑道との接合部分の空気の流入出状況も同様であった（図 3.5.3-7）。原因は、モデル化と繰り返し計算回数の検討不足が考えられ、当解析の適用性に関する今後の課題である。

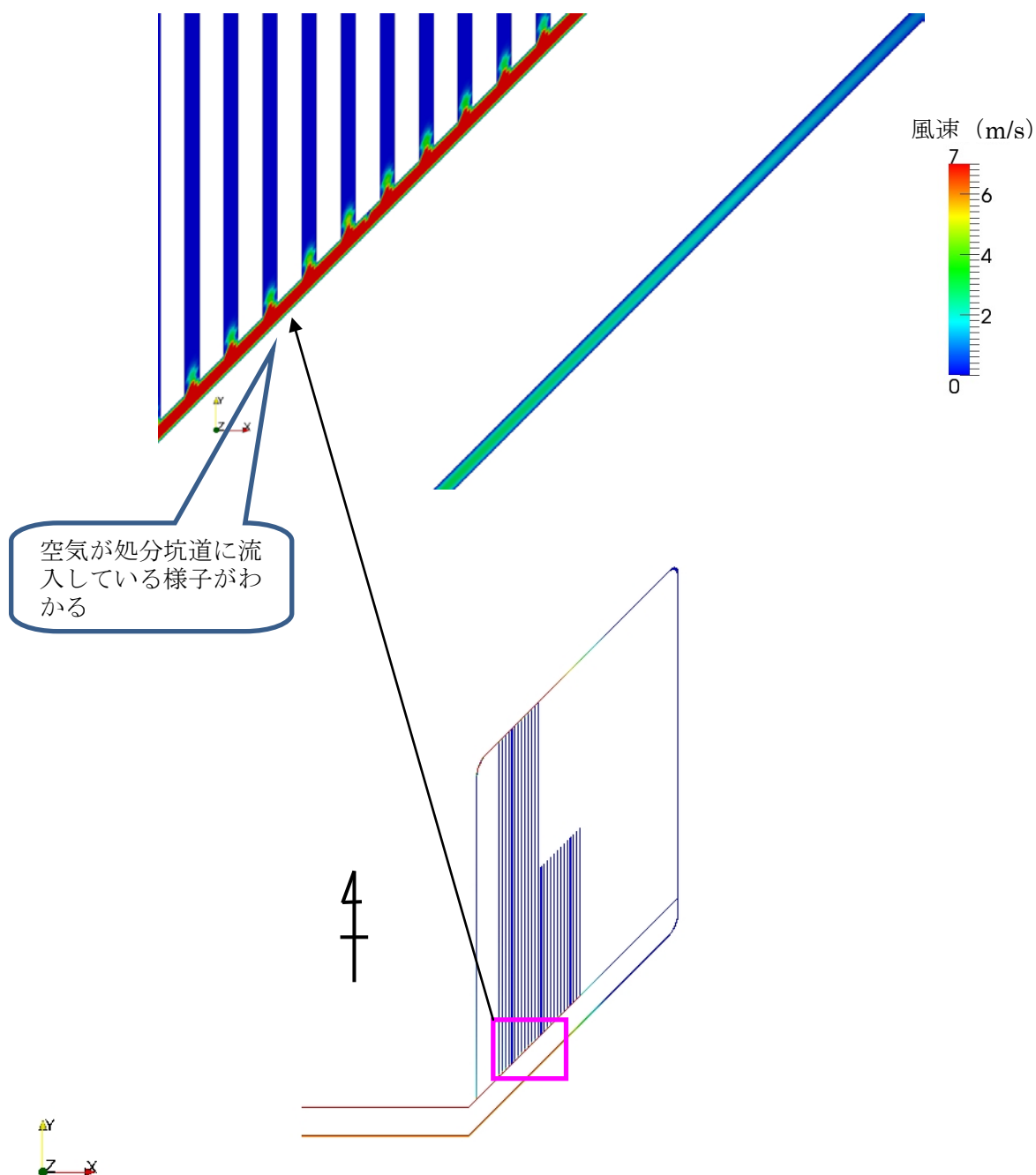


図 3.5.3-6 建設完了の処分坑道への空気の流入出状況（南側主要坑道との接合部）

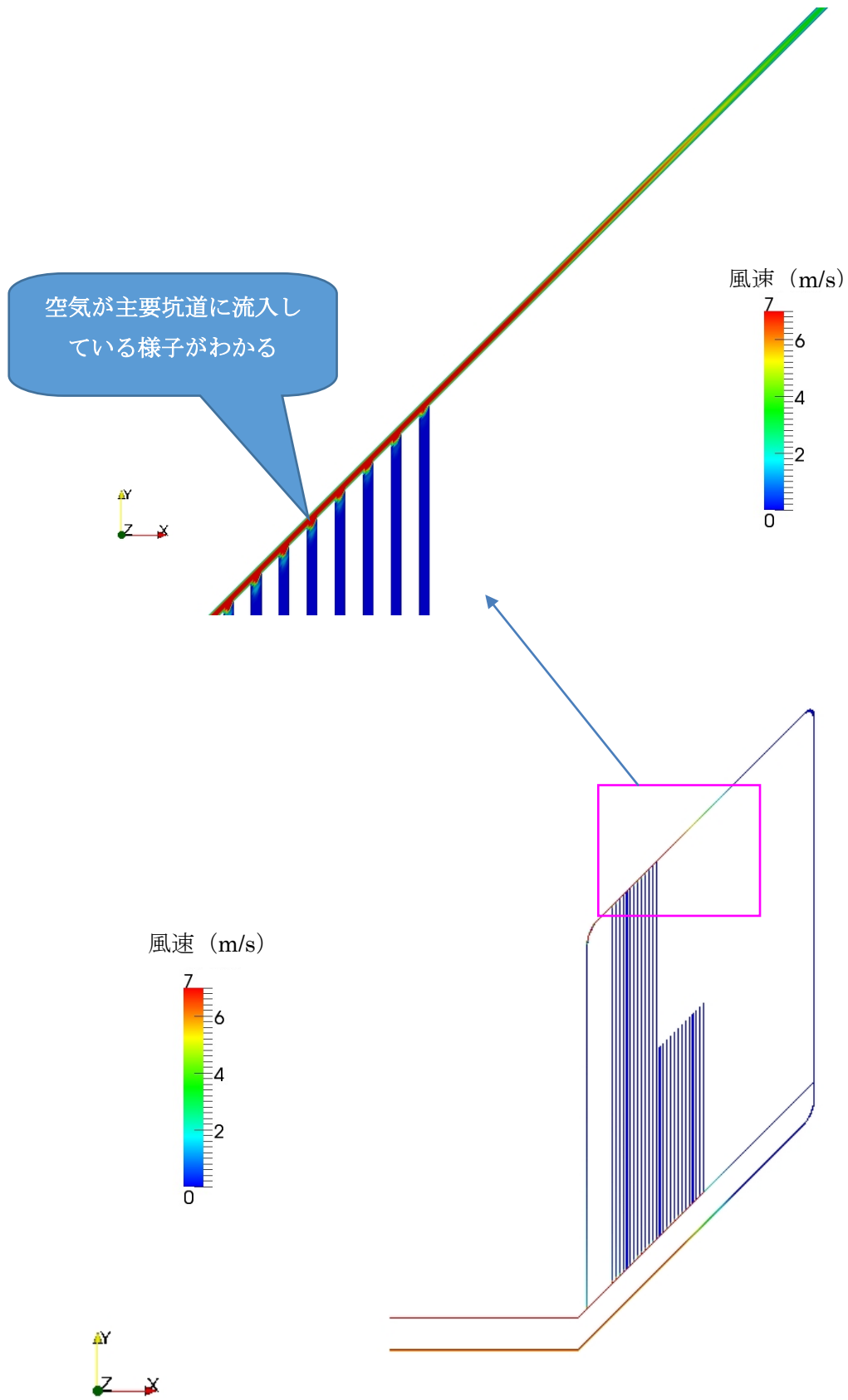


図 3.5.3-7 建設完了の処分坑道への空気の流入出状況（北側主要坑道との接合部）

(4) 建設途中の処分坑道への空気の流入出状況の確認

建設完了の処分坑道から建設途中の処分坑道へ繋がる部分には、前述したようにセルポロシティにより風門を設置し、一筆書きで流れてきた空気を集めて建設途中の処分坑道へ流した。なお、風門は図 3.5.3-8 の A 点のセルポロシティを活用して設置した。A 点では北側から流れてきた空気と南側の主要坑道を通じて流れてくる空気が合流する部分であり、局所的には風速が大きくなる。風門のセルポロシティを通過した空気は 3 次元的な流れを見せながら通過する。

建設途中の処分坑道の切羽付近では、ダクトを通して流した空気が切羽付近で流れていることが確認できる。一方で、一筆書き部分と同様に、1 次元モデル化した部分への空気の流れは表現できず、当解析の適用性に関する今後の課題である。

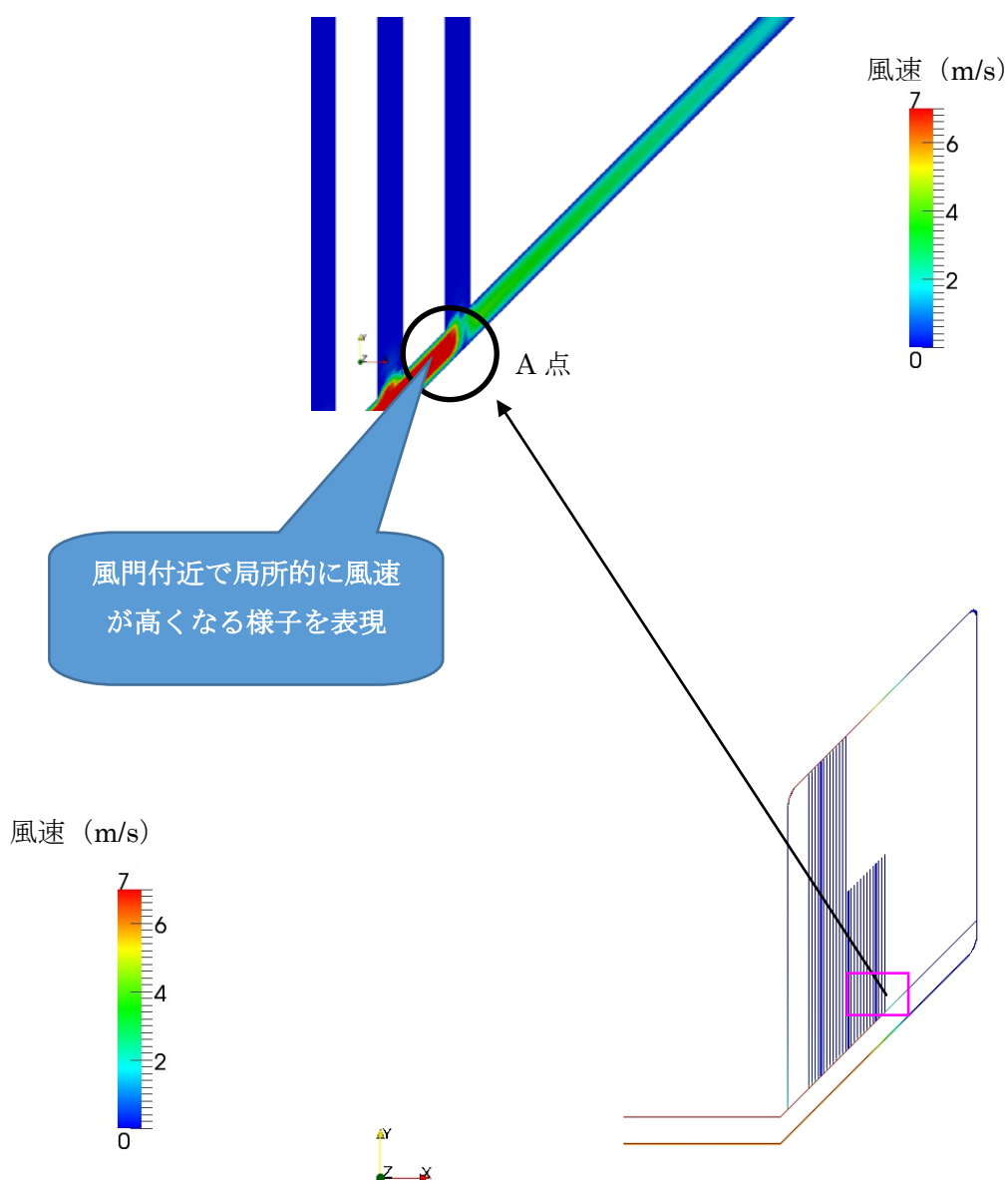


図 3.5.3-8 建設完了の処分坑道から風門を通過して建設途中の処分坑道へ空気が流れる様子

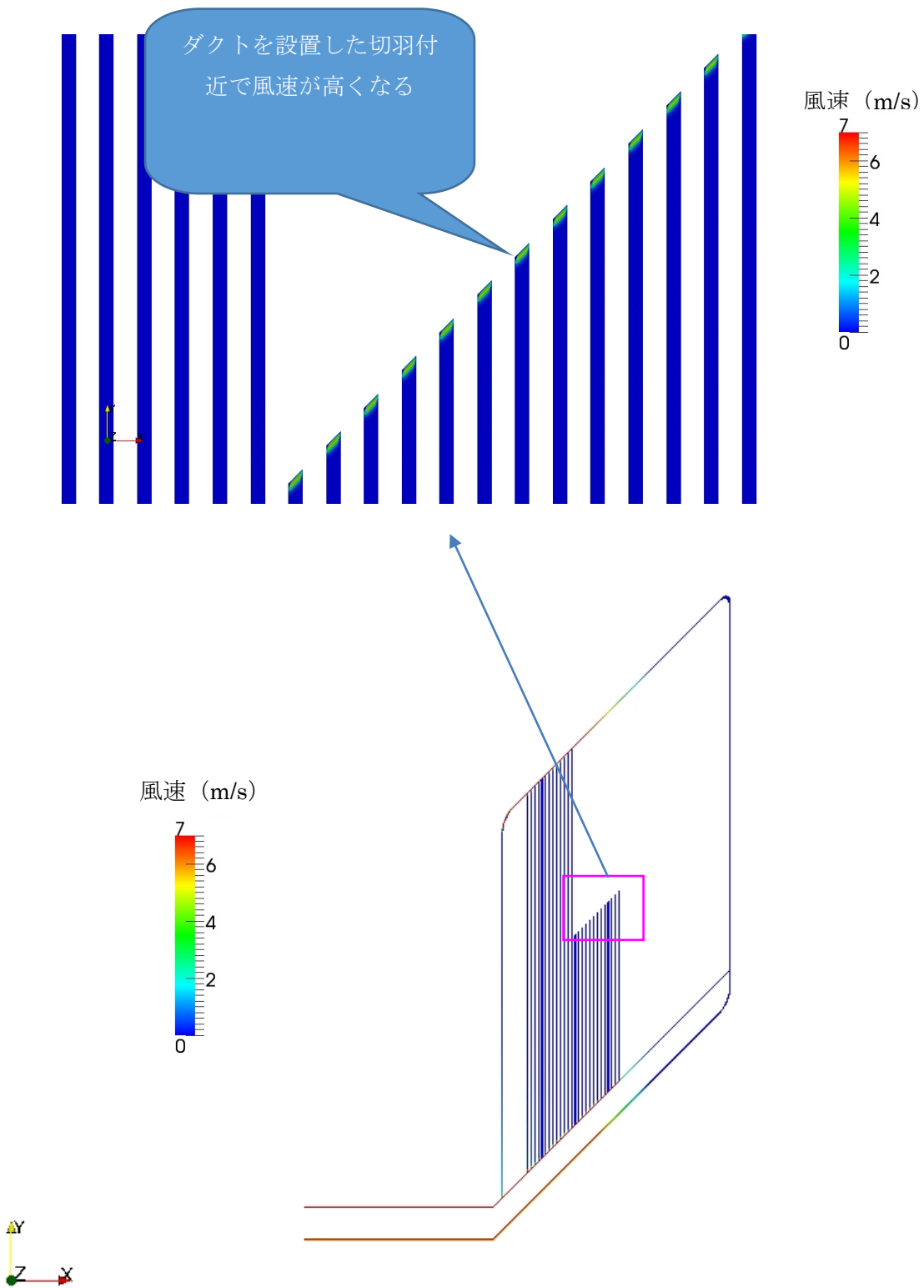


図 3.5.3-9 建設途中の処分坑道の切羽付近の空気の流出状況

3.5.4 火災発生時の影響の確認 (STEP3)

(1) STEP3 の解析の概要

本検討では、STEP2 の検討結果を用いて火災時の熱・煙の拡散状況を確認する。発火点を図の A 点とし、発火点付近の空気の流れ、熱の拡散、一酸化炭素濃度・二酸化炭素濃度・酸素濃度のそれぞれの経時変化を確認する。なお STEP3 では避難シミュレーションを行い、処分坑道内の作業員の避難や、同じ作業員配置条件下で火災時の作業員安全を確認する。

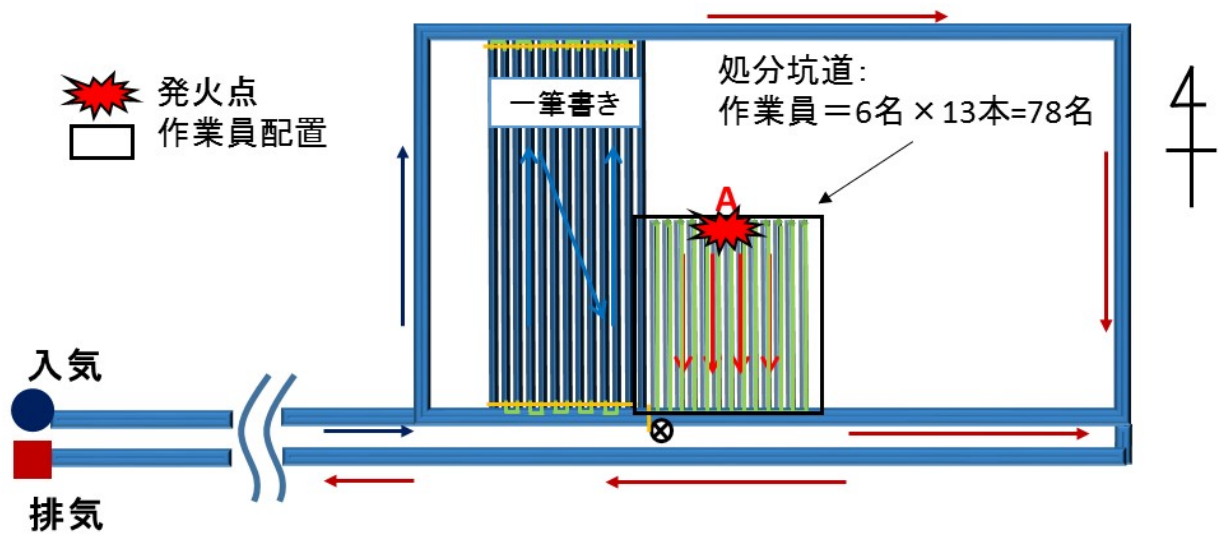


図 3.5.4-1 発火点の設定

(2) 発火地点および火災曲線の設定

STEP6 は STEP4 と同じモデルを用い、図 3.5.4-2 に発火点を設定して解析を行った。発火点の設定は、本解析の結果を作業員の避難状況の確認に用いる避難シミュレーションに活用することを想定し、作業員が配置されている建設途中の処分坑道(7本目)の切羽に設定した。

火災曲線は図 3.5.4-3 に示す標準化際曲線を用いた。地層処分の地下施設を対象に本検討と同様の検討を行っているのは、フランスの ANDRA 社であり、ANDRA 社の検討では、施設内の機械類が液体燃料漏れをおこし、何らかの理由でその液体燃料に引火したとして、火災シナリオを想定している[5]。なお、用いられている火災曲線については、比較・検討はされおらず、CETu 標準火災曲線を用いた検討を行っている。

本検討においても、施設や使用する機械類の詳細が未定なため ANDRA 社の事例に倣い、同様の火災曲線を用いることとした。

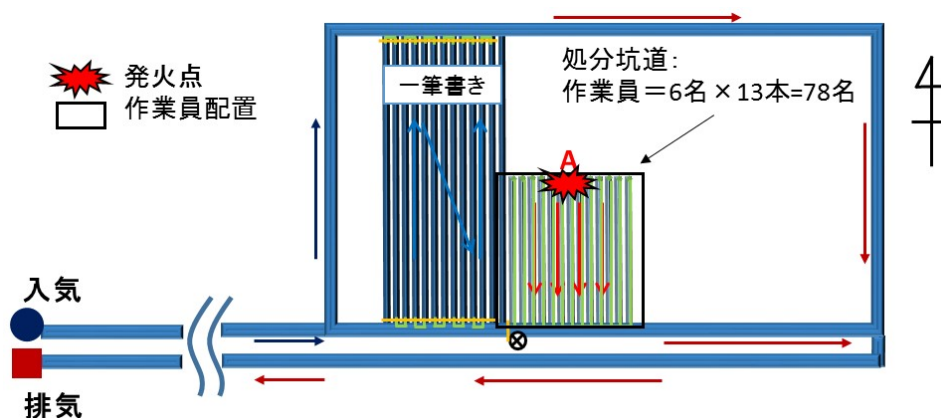


図 3.5.4-2 発火地点 (図 3.5.2-9 再掲)

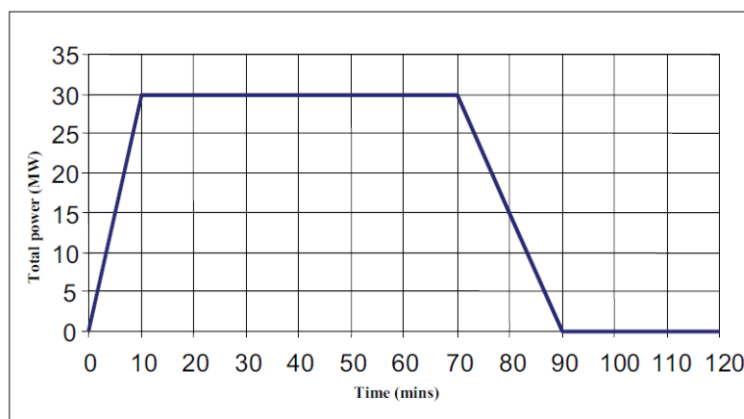


Figure 11.4.1 Standard total thermal power for a 30 MW fire

図 3.5.4-3 火災曲線の設定 (CETu 標準火災曲線) [5]

(3) 解析結果の整理

火災の解析は、時間経過に伴い熱・煙（一酸化炭素、二酸化炭素、酸素濃度）が変化する非定常解析であり、これらの結果は発火から 60 秒、120 秒、180 秒、360 秒、540 秒、900 秒（定常状態）の経時変化で表現する。

1) 風速分布

図 3.5.4-4、

図 3.5.4-5 に建設途中の処分坑道の風速分布を示す。なお、この風速分布は風速が定常状態になったときのものである。7 本目の処分坑道および主要坑道との接合部付近に熱の影響による風速分布が見られるが、隣接する建設途中の処分坑道やその他の坑道には影響がないことが見える。これは、建設途中の処分坑道の長さが 500m 弱と長く、なおかつ坑道間距離が各処分坑道の影響を受けないよう取られているためである。

これを踏まえ、以降の熱・煙拡散の計算結果は建設途中の処分坑道（7 本目）のみを示す。

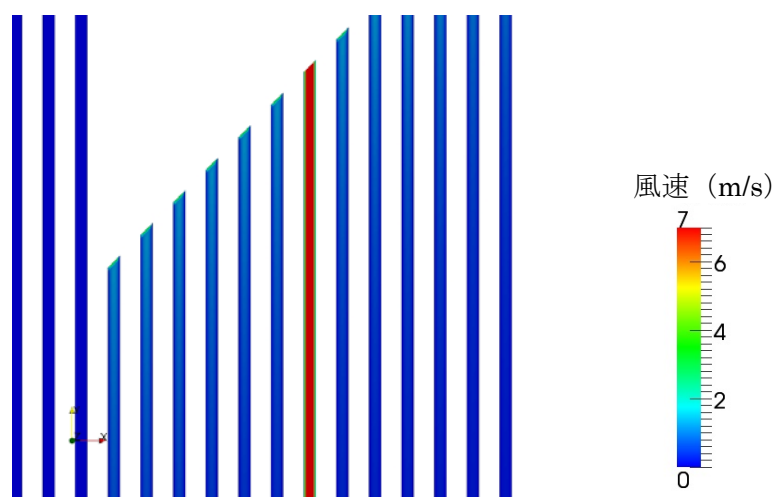


図 3.5.4-4 建設途中の処分坑道の風速分布（切羽付近）

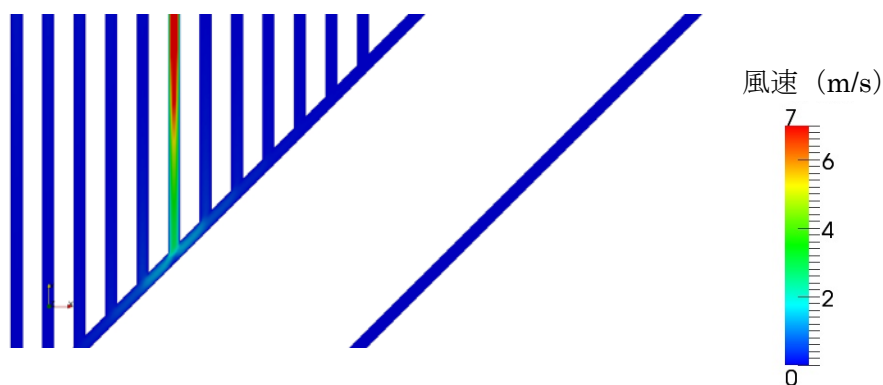


図 3.5.4-5 建設途中の処分坑道の風速分布（主要坑道との接合部付近）

2) 熱・煙の拡散状況

a. 熱の拡散状況の確認

図 3.5.4-6 に火災による熱の拡散状況を経時的に表した結果を示す。発火直後から坑道上面に熱が拡がり、その後も 900 秒まで高温域が拡がり続ける様子が見える。

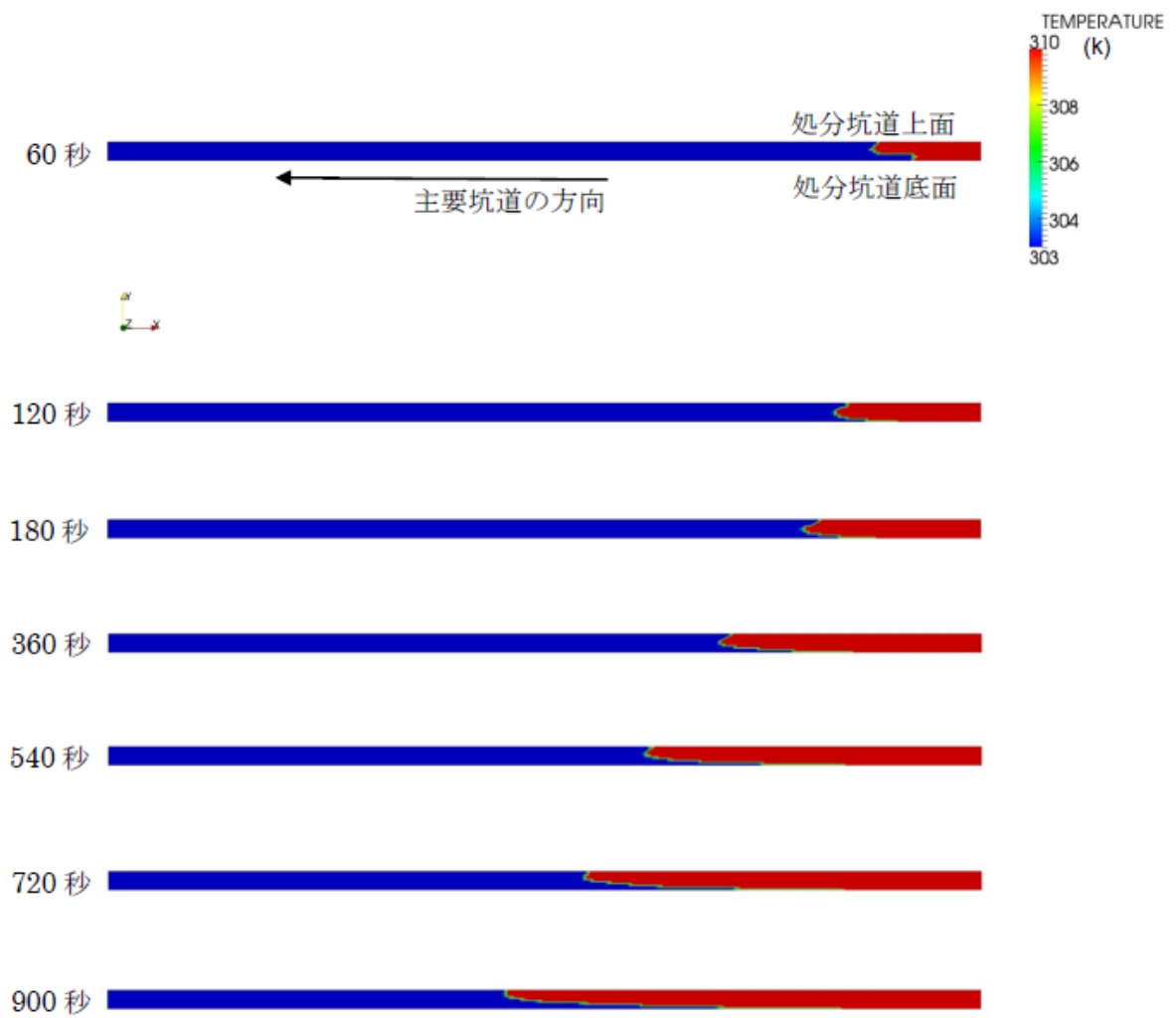


図 3.5.4-6 熱の拡散状況の経時変化

b. 煙の拡散状況の確認（一酸化炭素濃度）

図 3.5.4-7 に一酸化炭素濃度の経時変化を示す。熱の変化と同様に発火直後から 120 秒後までは坑道上面に一酸化炭素濃度の高い部分が拡がるが、360 秒後以降は坑道底面部分にも同様な拡がりが見え、かつ坑道中心部分の拡散が早くなっていることが分かる。これは一酸化炭素等の空気の構成要素は、熱の拡散と比較して、より風速の影響を受けているためと考えられる。

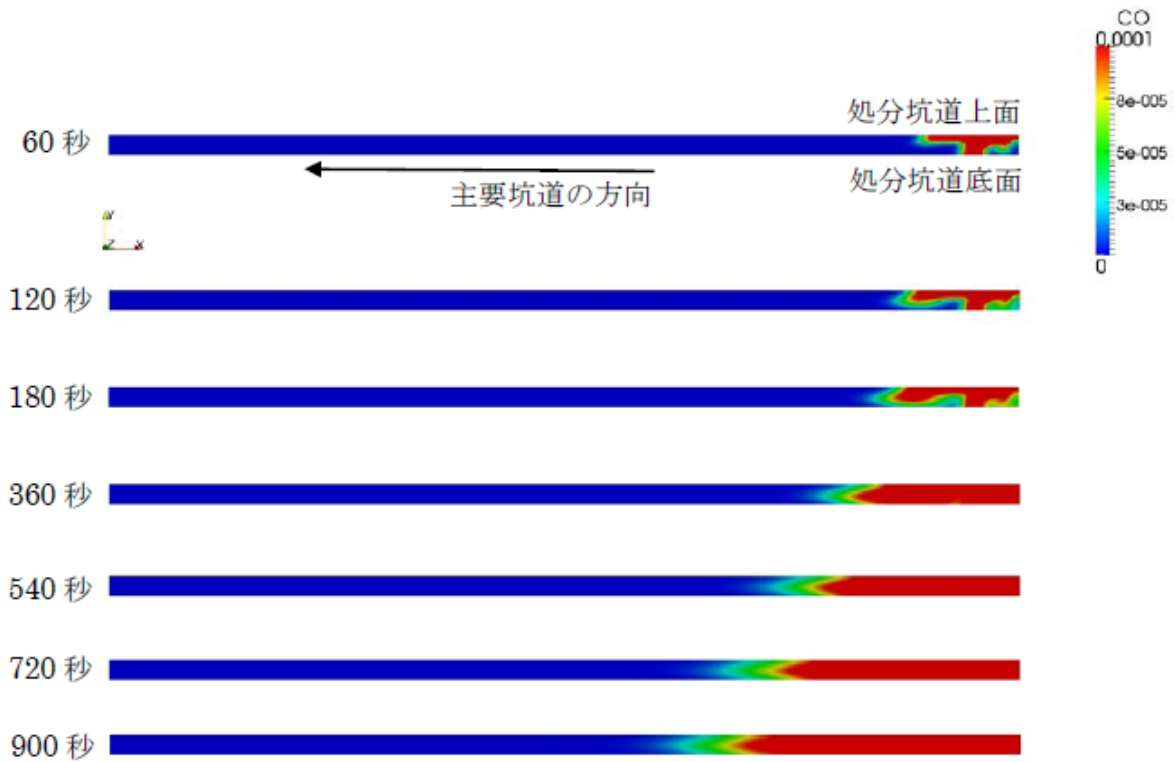


図 3.5.4-7 煙の拡散状況の経時変化（一酸化炭素濃度）

c. 煙の拡散状況の確認（二酸化炭素濃度）

図 3.5.4-8 に二酸化炭素濃度の経時変化を示す。発火直後から 60 秒後までは熱や一酸化炭素濃度の変化と同様に坑道上面に濃度の高い部分が広がるが、120 秒後以降は坑道底面部分に拡がり、かつ坑道中心部分の拡散が早くなっていることが分かる。一酸化炭素濃度と二酸化炭素濃度の拡がり状況を比較すると、二酸化炭素濃度のほうが坑道底面に拡がりやすいことが分かる。これは二酸化炭素のほうが一酸化炭素よりも比重が重いために出る現象である*。

※空気の比重を 1 とした場合、二酸化炭素の比重は 1.53、一酸化炭素の比重は 0.967 であり、二酸化炭素は空気より重く一酸化炭素は空気より軽い。

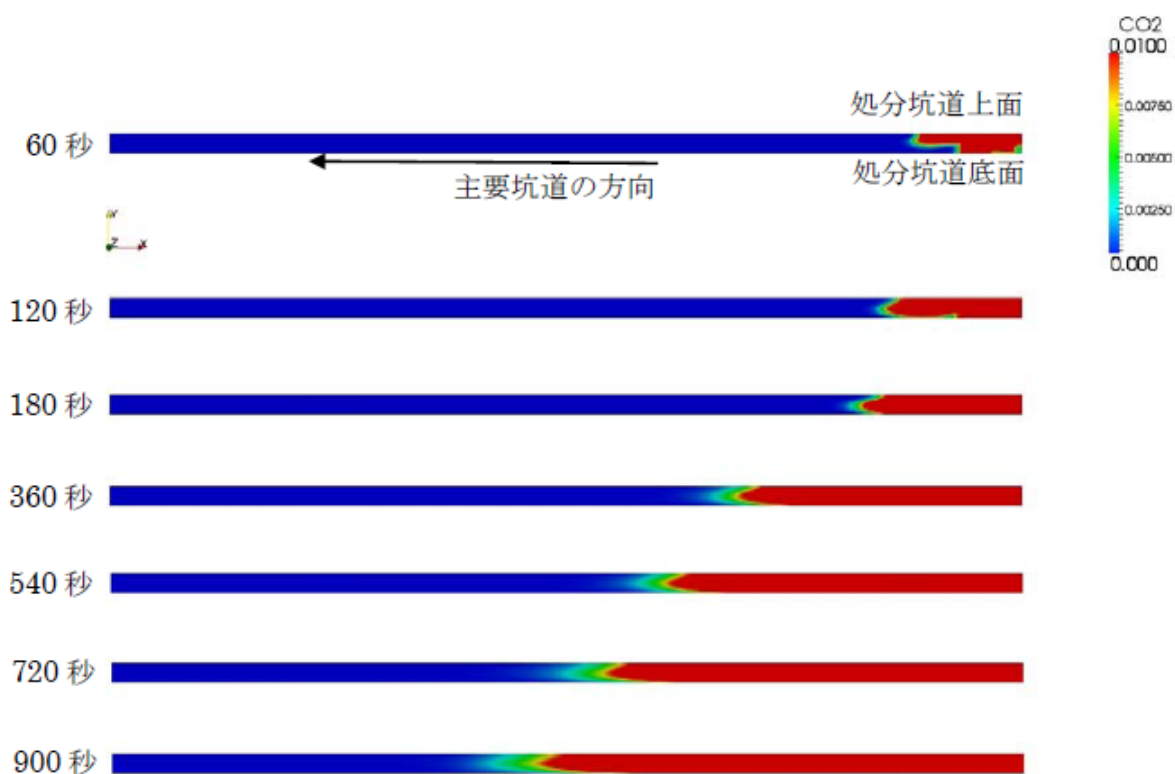


図 3.5.4-8 煙の拡散状況の経時変化（二酸化炭素濃度）

d. 煙の拡散状況の確認（酸素濃度）

図 3.5.4-9 に酸素濃度の経時変化を示す。発火直後から 120 秒後までは熱や一酸化炭素濃度の変化と同様に坑道上面に濃度の高い部分が広がるが、180 秒後以降は一酸化炭素濃度や二酸化炭素の拡散と同様に坑道底面部分に拡がり、かつ坑道中心部分の拡散が早くなっていることが分かる。一酸化炭素濃度、二酸化炭素濃度、酸素濃度の拡がり状況を比較すると、二酸化炭素濃度が坑道底面に最も拡がりやすく、一酸化炭素が坑道上面に最も拡がりやすい。酸素濃度は二酸化炭素と酸素濃度のほぼ中間の拡がりを見せる。これは、酸素の比重が 1.14 とその他 2 つの間の比重であることに依存する^{*}。

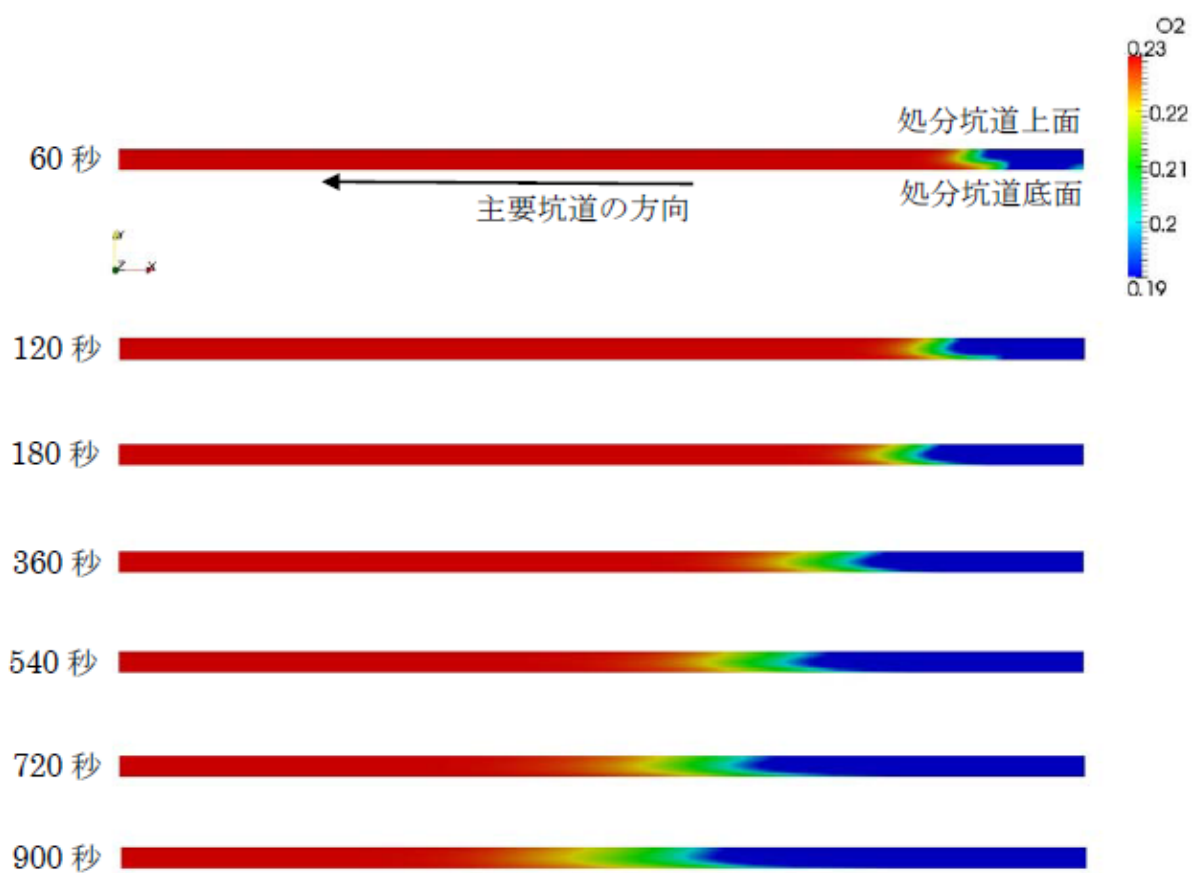


図 3.5.4-9 煙の拡散状況の経時変化（酸素濃度）

(4) 避難シミュレーションによる作業員の避難の様子と通気解析結果との重ね合わせ

1) 避難シミュレーション

歩行者シミュレーションなどの交通シミュレーションは、駅構内や大学構内の計画の中で多く使われている。東北地方太平洋沖地震を経験して、日本全国の避難計画を見直すという流れの中で、交通シミュレーションを応用した避難シミュレーションの開発とこれを用いた避難計画が各所で進められている。

本検討の避難シミュレーション解析では、これまでに上記に示したような事例から、ドバイの都市計画やオリンピック、ワールドカップといった国際大会の交通計画まで、様々な交通問題に利用されているマイクロシミュレーションソフト「VISSIM (VISWALK)」を活用する[6]。また、同ソフトは過年度の施設計画に係る調査・検討にも用いられている。

シミュレーションの対象エリアとしては、これまでの解析同様に建設パネル内とするが、以下に今回実施する避難シミュレーションのその他の設定条件について整理する。具体的には、「避難速度」、「避難人数」、「避難開始時間」、「避難開始位置」・「検討ケース」を条件設定の対象とする。

a. 避難速度

今回の対象者としては、過年度と同様に建設中パネル内で作業する作業員とする。

そのため、避難速度について、過年度と同様に本検討では避難者の速度として、「時速 5 km (分速 83m)」の避難速度を設定する。

b. 避難人数

これまでに整理したように、各処分坑道で作業している作業員は、1本あたり6名である。そのため本検討の避難人数は、全13本の処分坑道を対象としているため、6人/本 × 13本=78人とする。

c. 避難開始時間

避難開始時間は、火災が発生する処分坑道（13本のうち、中心の7本目）については発火直後に避難開始するように設定する。

その他の処分坑道については、図 3.5.4-10 処分坑道内における避難開始の様子 にあるように伝達していくことを想定し、中心から離れる毎に15秒毎、避難開始が遅れるような設定とする。

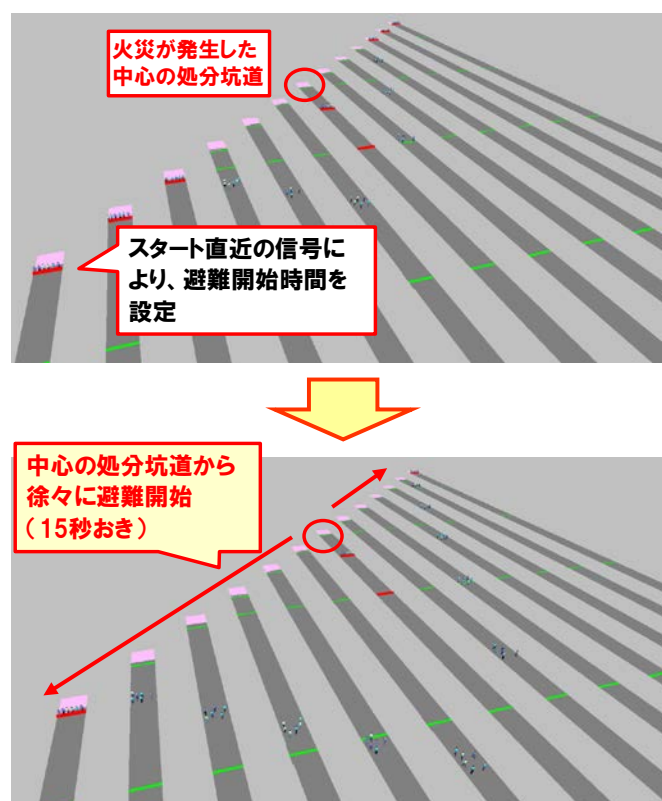


図 3.5.4-10 処分坑道内における避難開始の様子

d. 避難開始位置

避難開始位置は、各処分坑道の切羽からとする。

e. 検討ケース

今回の通気解析は1ケースであるが、避難シミュレーションでは、通気解析と重ねた分析を行うとともに、坑道内の避難に影響しうる施設の有無について影響評価が可能かを検証するため、主要坑道内に門扉を1箇所設置したケース・していないケースの2ケースを設定する。

門扉の設定条件としては、避難者一人が通過できる幅とし、門扉通過の抵抗力として避難速度が1/5 (1km/h) となるように設定する。

なお、通気解析の重ね合わせについては、2ケースともに実施する。

これまでに整理した設定条件について、表 3.5.4-1 に整理して示す。

表 3.5.4-1 各種設定条件

番号	項目	設定条件
i	避難速度	時速 5.0 km/h (分速 83m/min)
ii	避難人数	78 人 (処分坑道あたり 6 人)
iii	避難開始時間	火災発生した処分坑道 (中心) : 火災発生直後 その他の処分坑道 : 中心の処分坑道から離れる毎に 15 秒避難開始が遅れる。
iv	避難開始位置	各処分坑道の切羽部分から避難
v	検討ケース	主要坑道内 1 箇所設定したケース / していないケース

2) 通気解析と避難シミュレーションとの重ね合わせ

今回の通気解析と重ね合わせた避難シミュレーションの検討結果は、以下のとおりである。

a. 通気解析との重ねあわせからみる避難結果

通気解析結果を重ね合わせて避難の状況を確認した。分析結果はより他の条件が入らないようにするために門扉がないケースを対象として避難完了率を分析結果として図

3.5.4-11 に示す。

最終的な避難完了率は、約 92%であり、全ての作業員が避難できなかった。これは、火災が発生した処分坑道の作業員（6名）が発火と同時に避難を開始したが、煙に巻き込まれて避難ができなかったためである（図 3.5.4-12）。

また、避難完了率の時間的変化（伸び率）を解析すると、避難が完了し始めた数分間に比べ、その後数分間の避難完了率の伸び率は低いことがわかる。

これは、火災が発生した処分坑道よりも上流部にある処分坑道（6本）においては、避難開始時間が遅い処分坑道ほど、避難距離が短くなることで、各処分坑道の作業員が合流・集団化したために高い伸び率を示した。その一方で、火災が発生した処分坑道よりも下流部にある処分坑道（6本）においては、避難距離が長い処分坑道ほど、避難開始時間を遅く設定したため、処分坑道単位で避難者が孤立するために避難完了率の伸び率が低くなる（図 3.5.4-13、

図 3.5.4-14）。

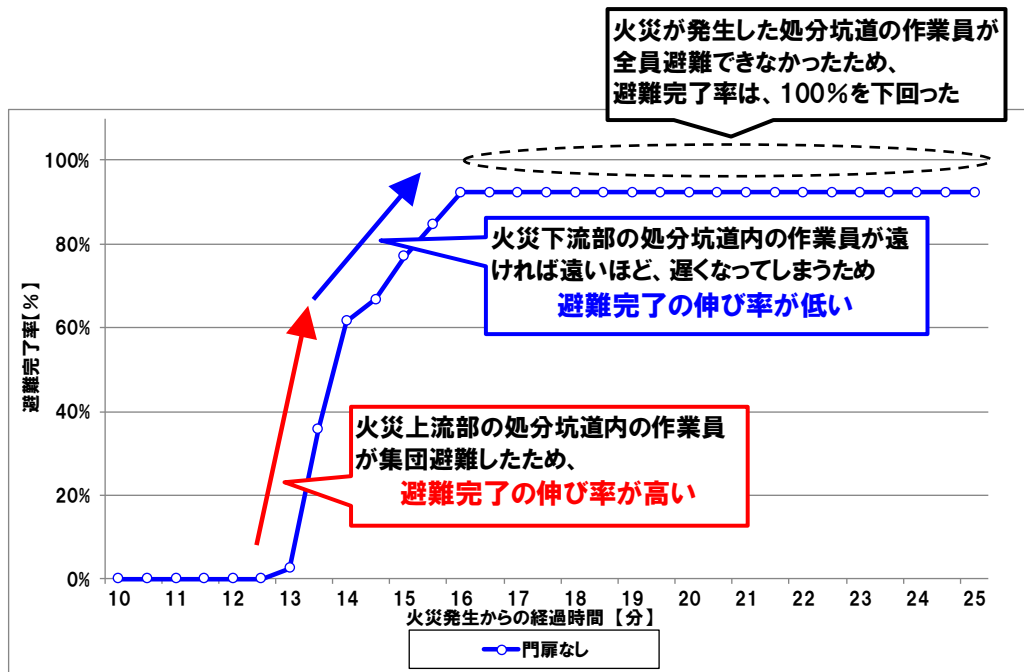


図 3.5.4-11 避難完了率（門扉なしケース）

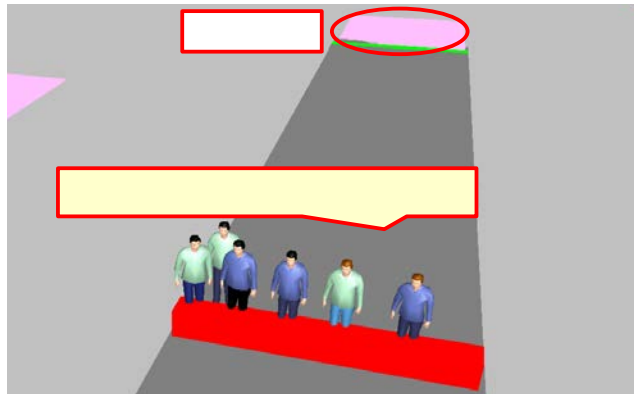


図 3.5.4-12 火災が発生した処分坑道における避難の様子

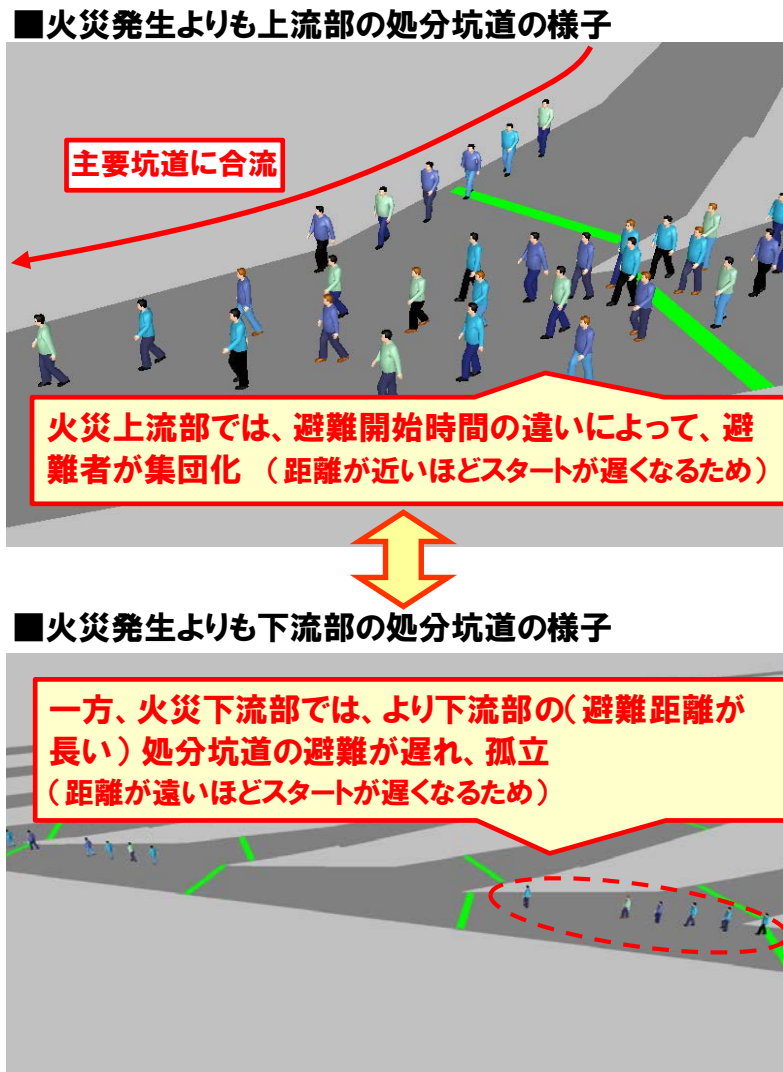


図 3.5.4-13 各箇所における避難の様子

b. 支障物の有無による避難状況の差異

避難状況の検討の可能性を検討するため、作業員の避難に支障が起り得る門扉を主要坑道内1箇所に設置して門扉なしのケースと比較した。

比較の結果、門扉なしに比べ門扉ありのケースでは避難完了率の伸び率は鈍化した。(

図 3.5.4-14) これは、門扉により容量の低下(一人しか通過できない箇所が存在する)や速度低下が発生したことにより避難遅れが生じたためである(

図 3.5.4-15)。

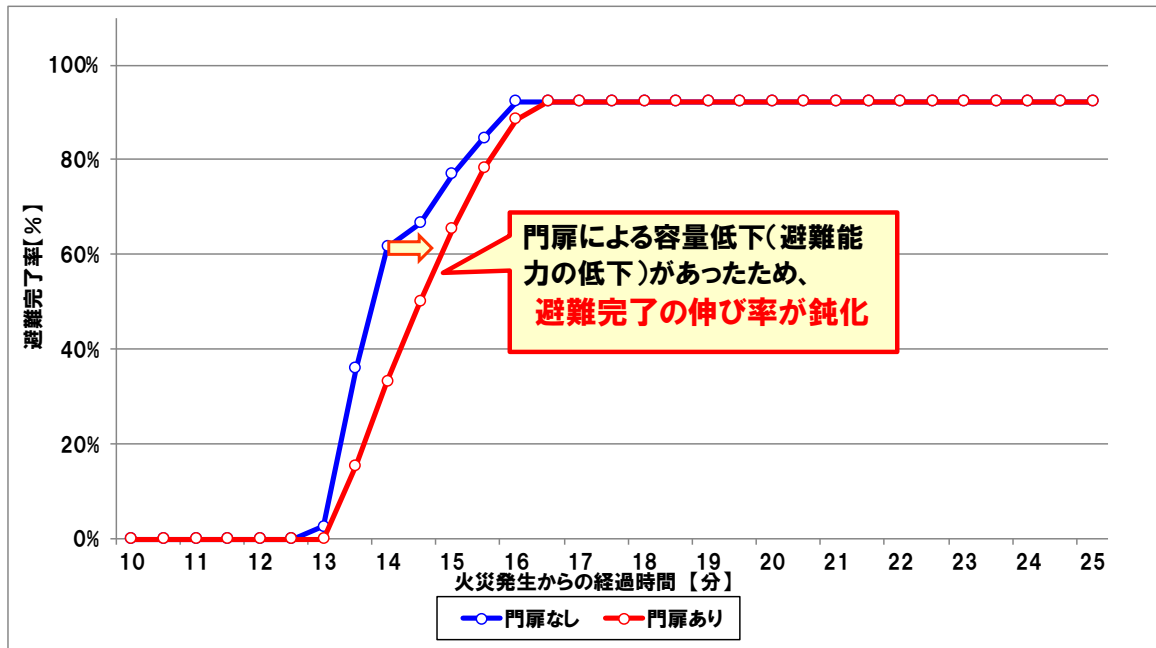


図 3.5.4-14 門扉の有無に関する避難完了率



図 3.5.4-15 門扉部分における避難の様子

避難シミュレーションはこれまで行ってきたとおり、一定の避難の様子再現が可能であることがわかった。その他さまざまな地下施設等の避難再現の適用可能性について整理した表 3.5.4-2 に示すとおり、様々な避難の様子が再現可能である。

表 3.5.4-2 避難シミュレーションにおける各再現状況の適用（再現）可能性

番号	再現状況	可能性	イメージ図	備考
1	熱や煙による通行不可の状況	○		通行不可になる時間の根拠は気流解析の結果を用いて設定が必要
2	支障物や速度が違うエリアを通行するために速度が一時的に低下する状況（階段や坂道を登る時など）	○		坂道や支障物など各低下速度をどの値にするかは事例などを用いての設定が必要
3	扉など幅員が狭隘になる箇所が多くの人々が集中し容量が低下する状況	○		幅員などは事例や設計図を用いての設定が必要
4	扉を開くためなどのために一旦停止する状況	○		停止時間などに設定根拠が必要
5	一部作業員が怪我などをして速度の遅い人が一部いる状況	○		既存研究などから各種属性の設定根拠が必要
6	長距離移動したために速度が低下している状況(疲労している状況)	○		既存事例などから速度低下する距離などの設定根拠が必要
7	作業員が道に迷う状況	○		迷走する避難者の割合などの根拠が必要 但し、迷走率など明確な既存資料はない可能性が高いため、率を変えるなどの比較検討が必要
8	作業員が一斉に避難開始の様子	○		避難開始時間の設定根拠が必要(避難計画など)
9	煙などをみて、作業員が経路を変更したシェルターなどに避難する様子	○		煙の到達時間を気流解析などを基に設定が必要 視認性や判断距離などについて既存研究などから設定が必要

3.5.5 換気が停止した影響の確認 (STEP4)

(1) STEP4 の解析の概要

本検討では、STEP2 と同じメッシュ・境界条件のもと、換気機能を停止させ自然通気にしたときの風況場の経時変化を確認する。ここではまず、自然通気により坑内の通気を確認し、各所の風速がどれくらいになるのかを確認する。

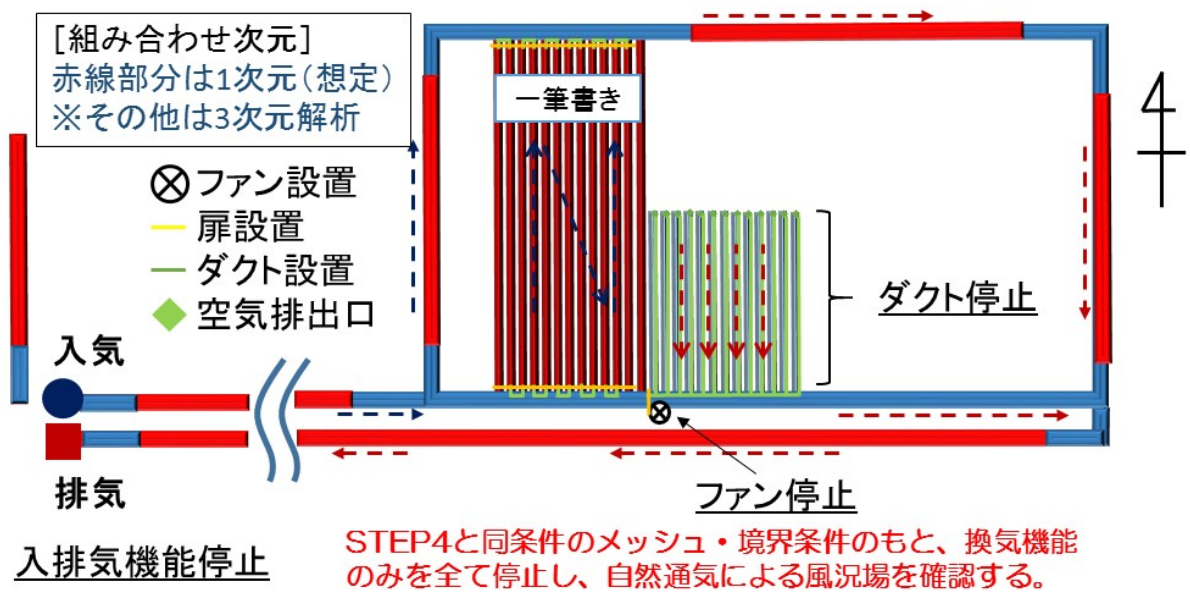


図 3.5.5-1 自然通気による風況場の確認

(2) 風速分布の確認

STEP5 は STEP4 と同条件のモデルを用いて、施設内の全ての換気機能が停止したと仮定し、自然通気による風況場の経時変化を確認した。

換気機能の停止による坑内の気流の変化は、換気機能停止後 120 秒、180 秒、360 秒、540 秒 720 秒とした。図 3.5.5-2～図 3.5.5-7 に全体の通気の変化（風速の変化）を示す。

全体的に、時間の経過に伴い徐々に風速が下がる様子が確認できる。換気機能を停止した場合でも、圧力差や温度差による風速の変化を解析的に表現できていると言える。一方で、換気機能停止から 720 秒後には施設全体の風速が 0.5m/s を下回り、弱風で定常状態となる。数値的な妥当性については本検討の対象外であり割愛するが、今後、実規模の実験による検証が必要と考えられる。

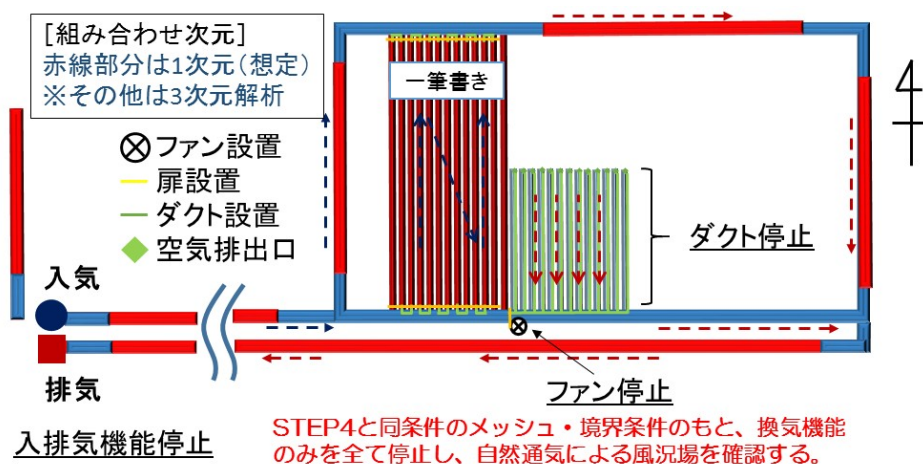


図 3.5.5-2 STEP5 の全体概要図 (図 3.5.2-8 再掲)

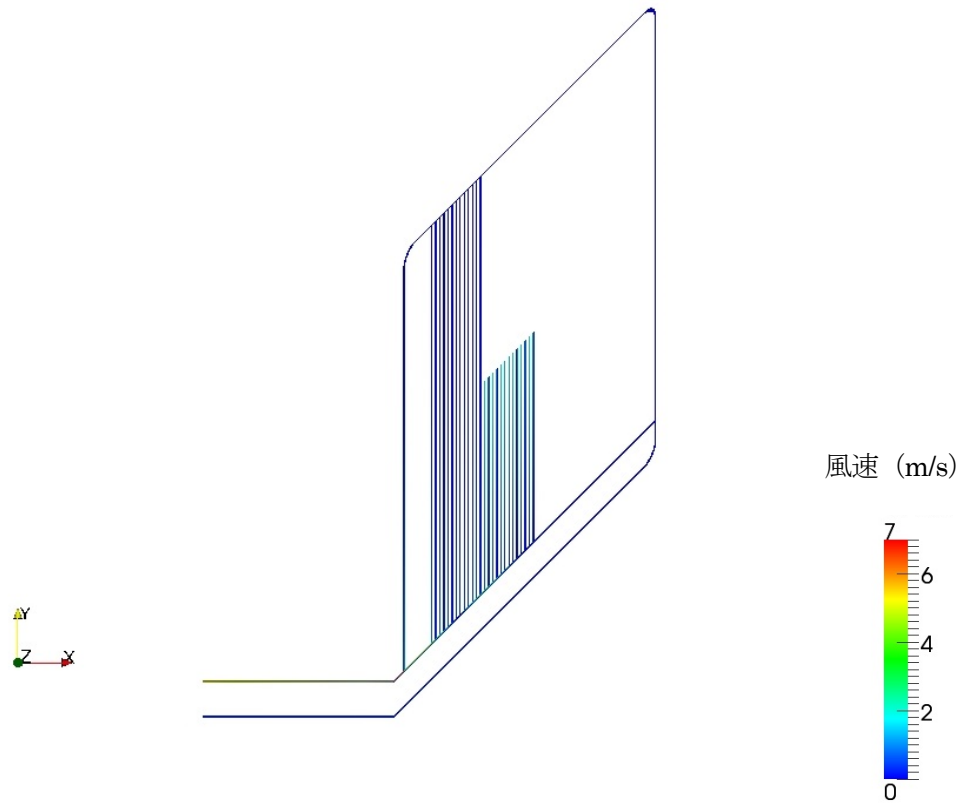


図 3.5.5-3 換気機能停止から 120 秒後の風速分布

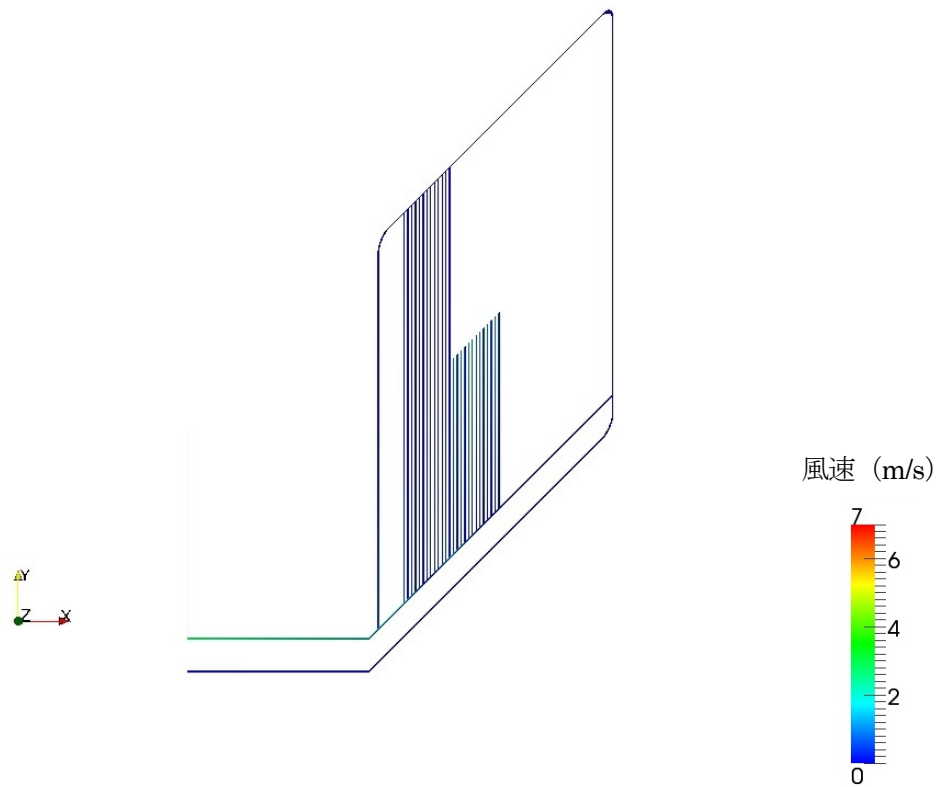


図 3.5.5-4 換気機能停止から 180 秒後の風速分布

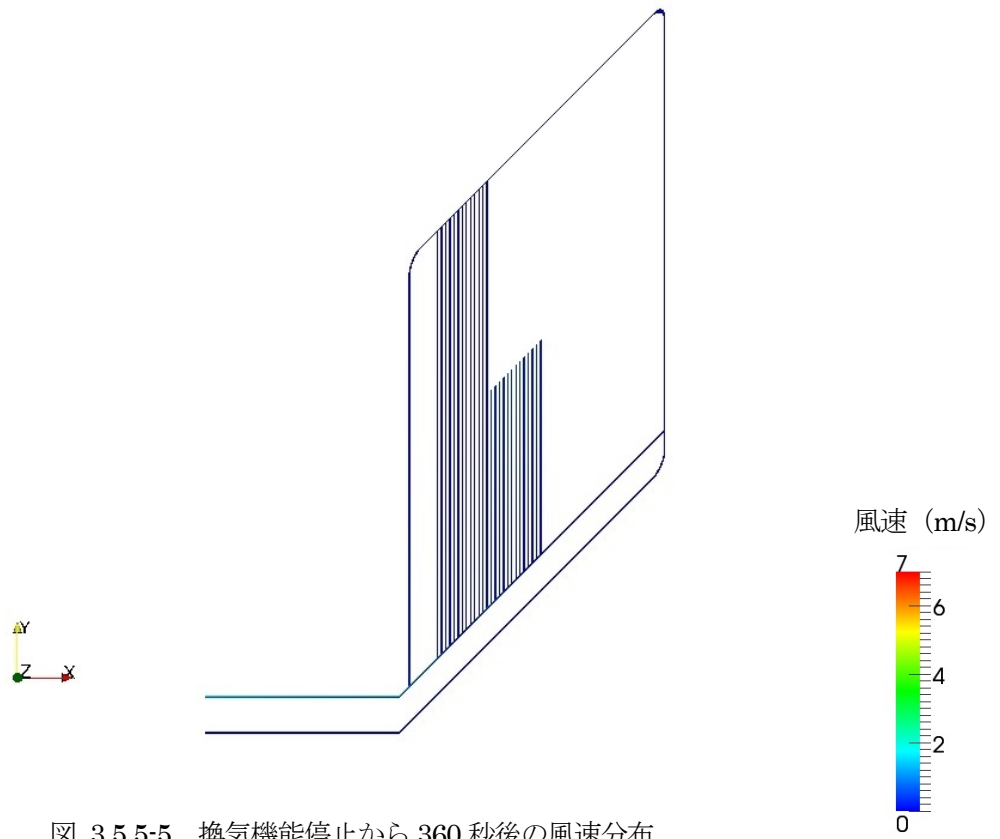


図 3.5.5-5 換気機能停止から 360 秒後の風速分布

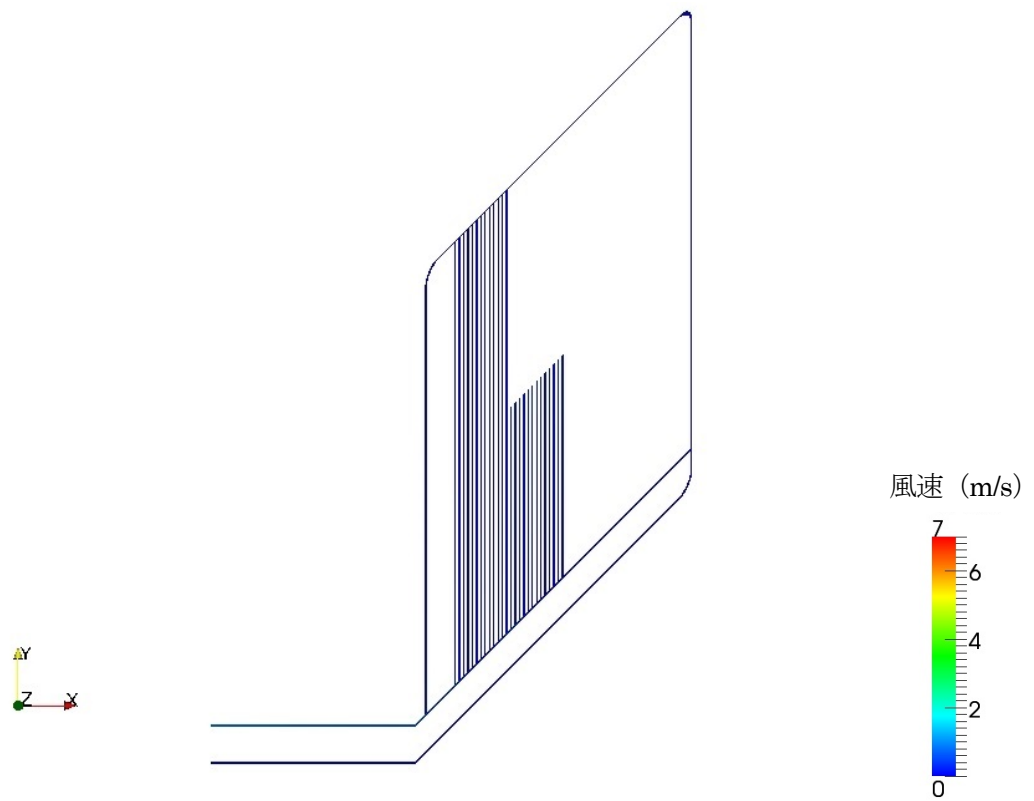
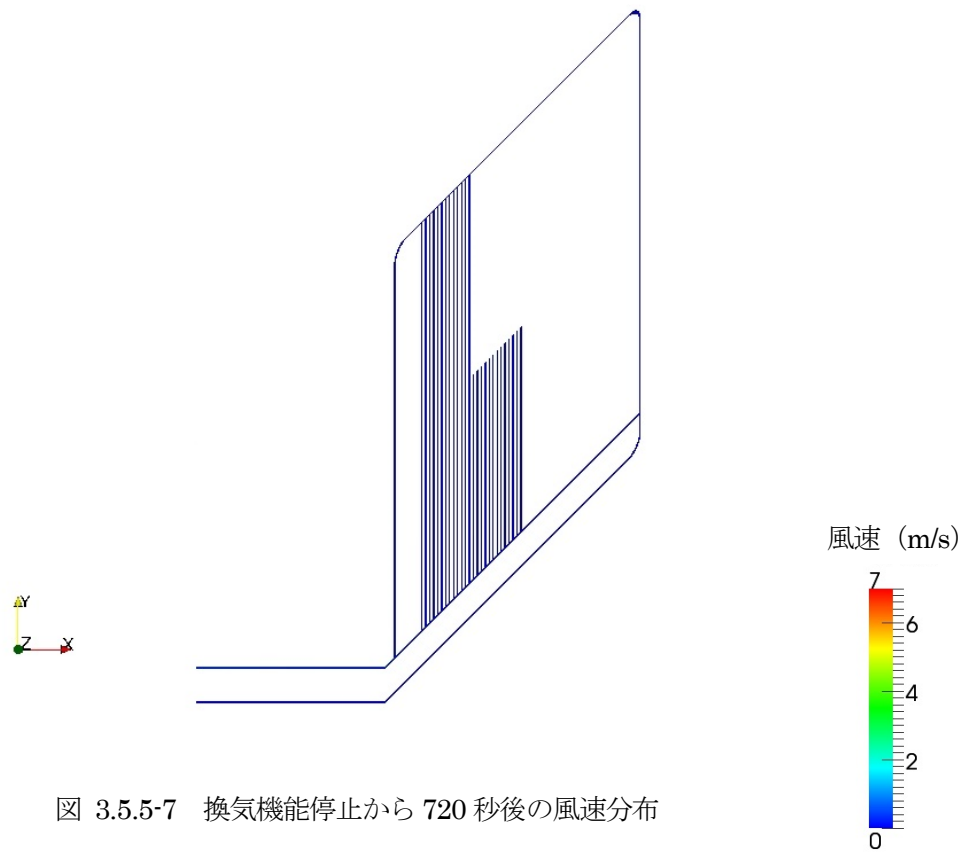


図 3.5.5-6 換気機能停止から 540 秒後の風速分布



(3) 立坑部分の風速分布の確認

図 3.5.5-8 に立坑部分の風速分布の経時変化を示す。全体的に、立坑の坑口付近の風速が立坑底部の風速よりも高い傾向にある。換気停止から 120 秒から 720 秒後まで順次全体的に風速が低下し、入気口よりも排気口のほうが風速の高い状態を保っていることが確認できる。換気機能を停止した場合でも、空気の流れにはその状態を保とうとする慣性の力が働き、風速ベクトルが入気から排気に向かっていていることから排気口側の風速が保たれることが確認できた。

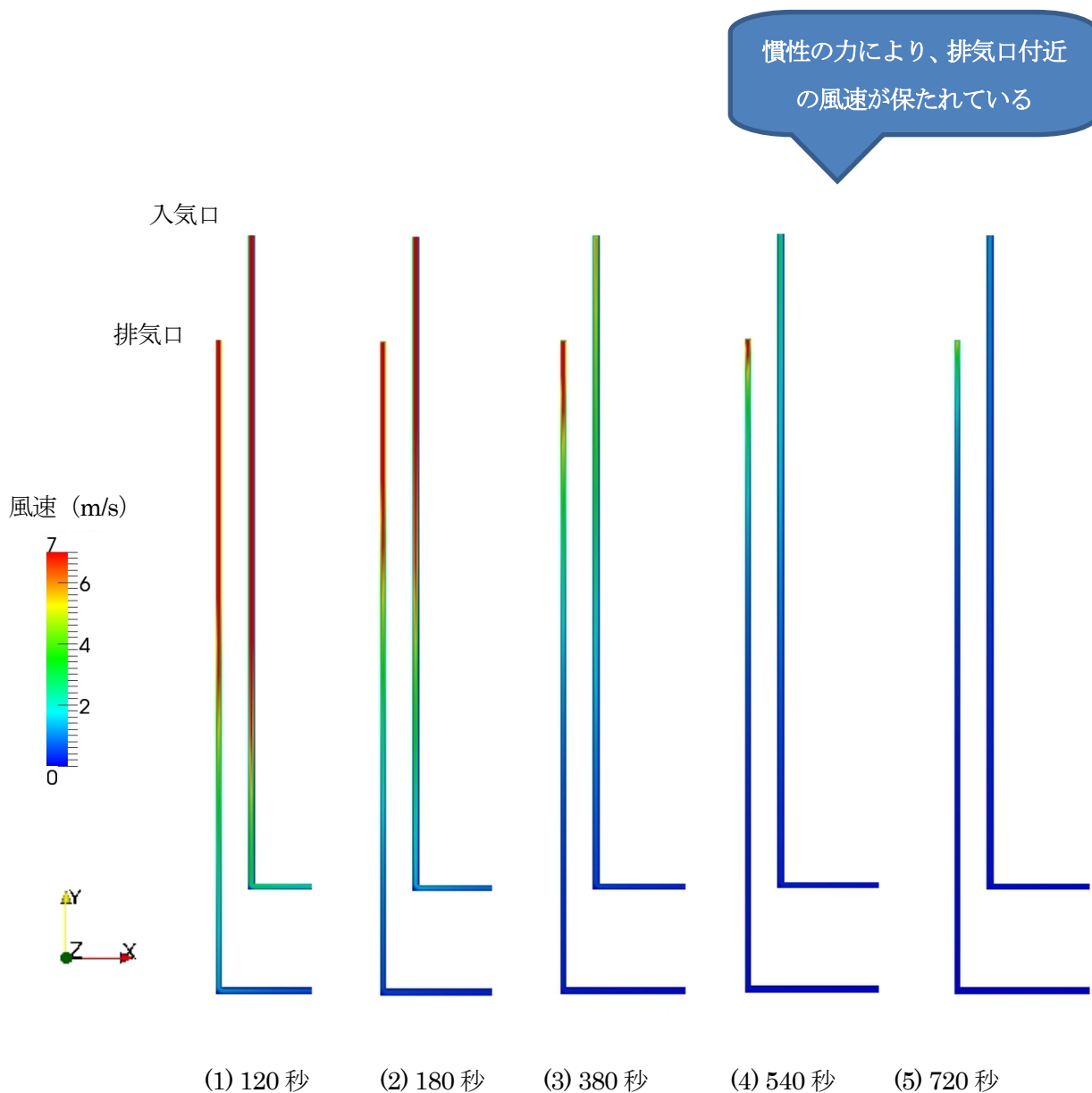


図 3.5.5-8 立坑部分の風速分布 (経時変化)

3.6 まとめ

本章では、平成25年度の事前解析の結果を踏まえて、立坑・処分坑道等を含めた地下処分施設を対象とした三次元解析実施時の計算負荷の低減や、換気設備の特性および坑道の形状を考慮した風量等を検討した。また、通気解析と避難シミュレーションの本解析を実施し、火災事象等に対する作業員の安全性確保に向けた検討を行った。

本年度の調査・検討項目は以下3項目である。

- ①通気解析に関する数値解析技術の検討
- ②地層処分施設の解析条件の設定
- ③解析の実施

以下に、それぞれの実施項目に関するまとめを述べる。

3.6.1 通気解析に関する数値解析技術の検討

流体の力学特性に着目し、その運動を司る物質の運動を表現する式を整理し、地層処分施設で活用する数値解析技術（支配方程式、離散化法）について整理・検討を行った。

本検討の気流解析では、地下施設の風量、風速、温度、圧力の変化を定常流・非定常流（火災時）で検討することを考慮し、支配方程式については、オイラーの微分方程式もしくはナビエ・ストークスの式が壁面付近の渦を表現でき、坑道内の空気の流れを表現するのに適していると判断した。オイラーの微分方程式とナビエ・ストークスの式を比較した場合、式の特性上、ナビエ・ストークスの式は壁面付近の流れの表現も可能であり、分流・合流地点や切羽が存在する地下処分パネルの局所的な検討にはナビエ・ストークスの式が適していると考えた。

離散化法では、以下の利点を考え有限体積法を用いることとした。

- a. 形状の制約が少なく粗いメッシュでも各種の保存則が成り立つ
- b. 積分形であるため特性が大きく変化する様な領域でも矛盾のない解が得られる
- c. 流れを力学的に扱う

以上を踏まえ、支配方程式がナビエ・ストークスで、かつ有限体積法を用いることができる解析ソフトとして「VENTMINE」を選定した。

有限体積法は、数値拡散（発散）を生じやすく、本解析的検討においても解を算出するのに多大な時間・労力を要した。今後、コンピュータの処理速度の向上に伴い計算速度は速くなっていくことになるが、地下処分施設の規模は大きく、精度を良くするためには、格子数を緻密に整備する必要がある。また、地下処分施設は日々建設をすすめているため、形状が変わるとともに火災の発生場所も特定できるものでないため、多くのパターンの解析をする必要が出てくる。したがって、求める結果により支配方程式や離散化などの組み合わせを適切に判断し、計算速度の負担軽減を図る必要がある。

3.6.2 地層処分施設の解析条件の設定

地層処分施設の形状については、既往の資料から形状、寸法を設定し、形状等から通気用の立坑が各パネルに整備が予定されているため、パネル毎に通気が独立していると仮定し、解析の対象とするパネルを建設中パネル、定置中パネル、埋戻しパネルから1つに絞り込むこととした。解析の対象となるパネルについては、掘削中の坑道があり、作業員がいる建設中パネルを対象とした。通気解析及び火災影響評価を行うにあたって必要な風量（風速）、坑内温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度の閾値を導き出すため、労働安全衛生規則、新版・ずい道等建設工事における換気技術指針などを参考に整理した。また、換気技術指針による風速 0.5m/s を確保することにより、処分坑道にいると仮定した作業員の必要呼気量を確保できることを確認し、建設中パネルに必要な風量を算出した。

平成 25 年度の検討結果より、3次元解析の膨大な計算格子数が影響して計算時間が2週間程度/1ケースと長時間を必要とした。これを受けて、1次元モデル化が可能な部分について検討を行い、気流の乱れが小さい個所を1次元モデルとし、分合流部などの気流の乱れが大きい個所を3次元モデルとし、モデル化を行った。

3.6.3 解析の実施

解析の実施にあたっては、建設中パネルに必要な風量を送った場合の連絡坑道、主要坑道、処分坑道の通気状態を確認し、強制的に通気する必要がある箇所を確認した。

その結果、分岐部において検討した風速が確保できないこと、また処分坑道内へ空気がほとんど流れないことが分かった。そこで分岐部等において局所ファンの設置を想定し、通気を強制的に誘導することとした。たとえば、建設完了の処分坑道では、全てダクトで繋いで“一筆書き”の方法で通気すると仮定して解析することにより、必要な風量を抑えることとした。また、建設途中の処分坑道では、入気口からダクトを繋いで通気を確保すると仮定し、解析した。

建設途中の処分坑道 13 本の真ん中にあたる 7 本目の処分坑道の切羽付近で、CETu 標準火災曲線に則った火災を発生させ、火災時の熱・煙の拡散状況を確認した。一酸化炭素濃度、二酸化炭素濃度、酸素濃度の拡散分布では、比重の違いにより、比重が軽い一酸化炭素が最も坑道上面で拡散しやすいことを確認することが出来た。熱の拡散については、発火直後から坑道上面に熱が拡がるという熱影響を確認した。

発火から 900 秒後で定常状態となったが、熱・煙とも処分坑道内に収まった。処分坑道が 500m 程度と長く、火災曲線も長時間の火災を想定していないためと考えられる。

建設途中の処分坑道 13 本の切羽付近に、6 名ずつ作業員を配置し、7 本目の処分坑道で火災が発生した直後から、隣接する坑道の作業員が順次避難を開始するという避難シミュレーションを実施した。また、搬送装置などの障害物を想定した狭い通路を通過する場合を再現するため、扉を設けて解析したところ、単位時間に通過する作業員の数が低下することに伴う避難速度の低下や避難完了率の低下を解析で確認した。

今回の解析では、鉱山等を参考に坑道換気を前提に 13 本の切羽に適切な風量を送るため、主要坑道、連絡坑道等の風速が大きくなる結果となった。火災等により風上側に作業員が退避する場合は、風速が大きくなると障害となるため、安全確保の観点からは課題が残る結果となった。また、多くの風量を送るため設備や維持するための電力等については、考慮していないため検討が必要と考える。

3.6.4 3次元解析実施における対処事例

3.4 節の考えに基づいたモデル・計算格子、初期条件を基に解析ソフトを用いて 3 次元通気解析を実施した結果、解析が途中で止まり解が出なかった。解析が止まった部分を確認すると、建設中パネルの南西端の連絡坑道との接合部が原因であった。これについては、分流のベクトルが南側主要坑道と、西側主要坑道で変わるにも係らず、互いに隣接する要素のベクトルが影響し収束しないためと考えた。

そこで、当該分流部分に仮想の壁を設けることにより計算することができた。

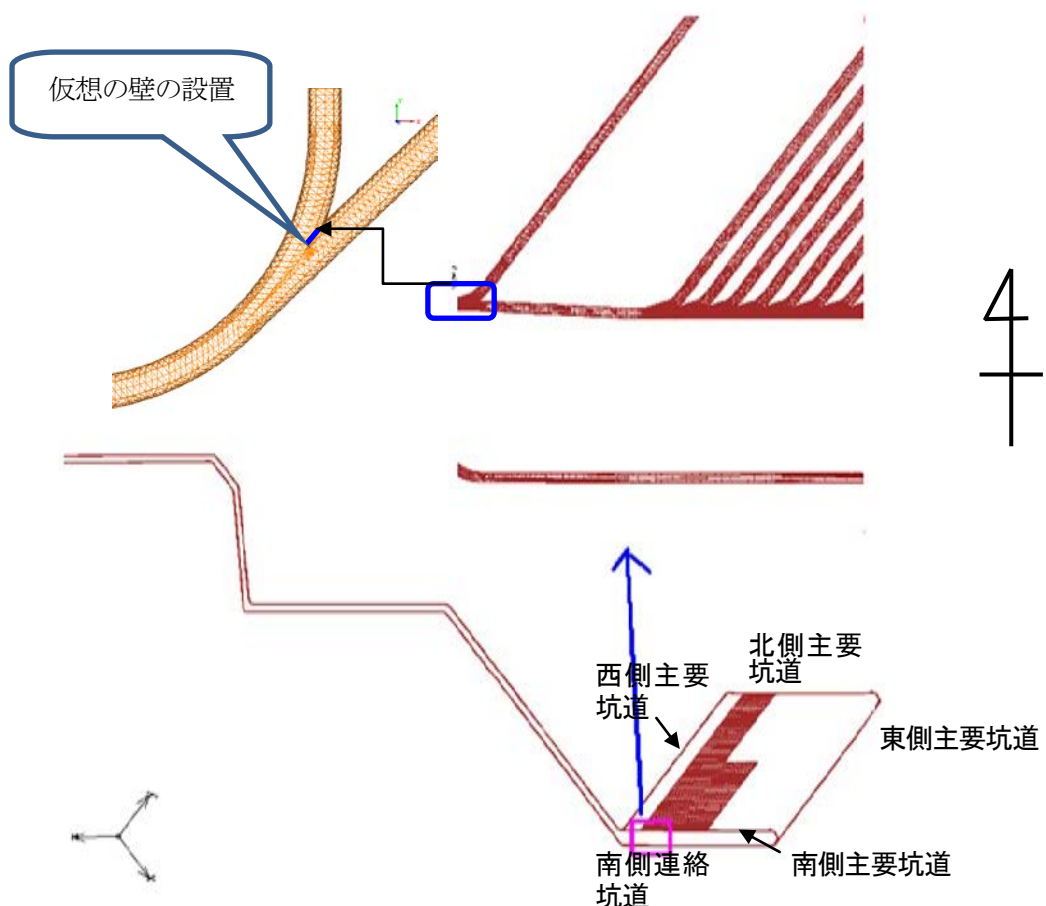


図 3.6.5-1 分流部分で起こった解析エラーへの対応

参考文献

- [1] 鹿島出版会：林 泰造、基礎水理学、1996
- [2] 東京大学出版会：保原 充、大宮司 久明編、数値流体力学－基礎と応用、1998 年
- [3] Ferziger J.H. and Perić M., Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, 2002.
- [4] 原子力発電環境整備機構：「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）」NUMO-TR-11-01 (2011).
- [5] 核燃料サイクル開発機構：東海事業所 地層処分場のレイアウトに関する検討（JNC TN8400 99-044）
- [6] 一般社団法人 交通工学研究会：交通シミュレーション活用のススメ、H24.1
- [7] 建設業労働災害防止協会：新版・ずい道等建設工事における換気技術指針《換気技術の設計および粉塵等の測定》（平成 24 年 3 月）

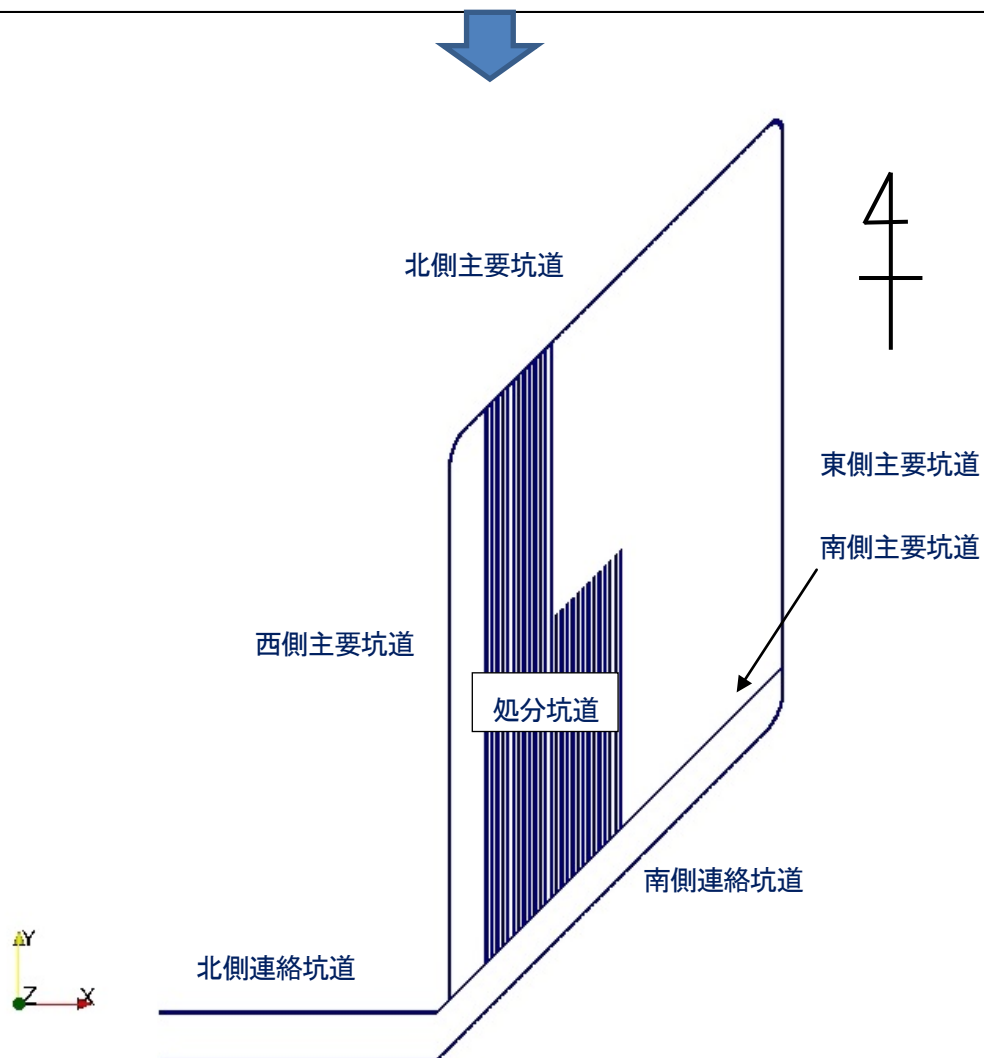
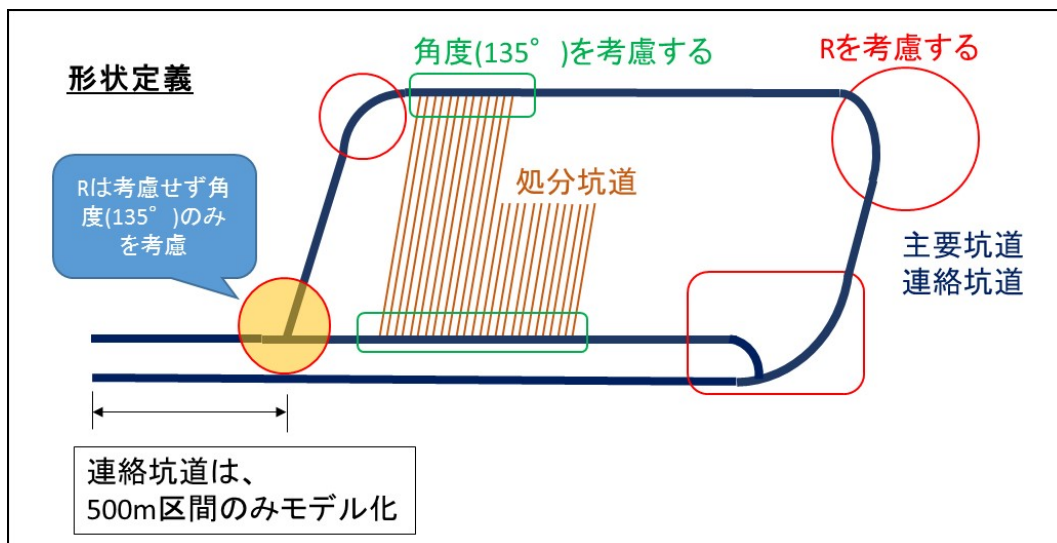
<参考資料>

STEP1 (その2)

本解析では、②の課題以外に、④計算格子が荒く結果が疎に見える、⑤分流部分に仮想の壁を設けて意図的に分流させている、ことが課題と考えられる。

そこで、形状定義を変更することで解決に近づけそうな④、⑤の解決を試み、以下のような形状定義を行い、さらに解析的検討を続けた。

- ▶ 計算対象領域を狭くするため、建設中パネルと繋がる連絡坑道の長さを 500m とする
- ▶ 課題となった分流部分を 135° の斜角で結合し曲率は考慮しないものとする

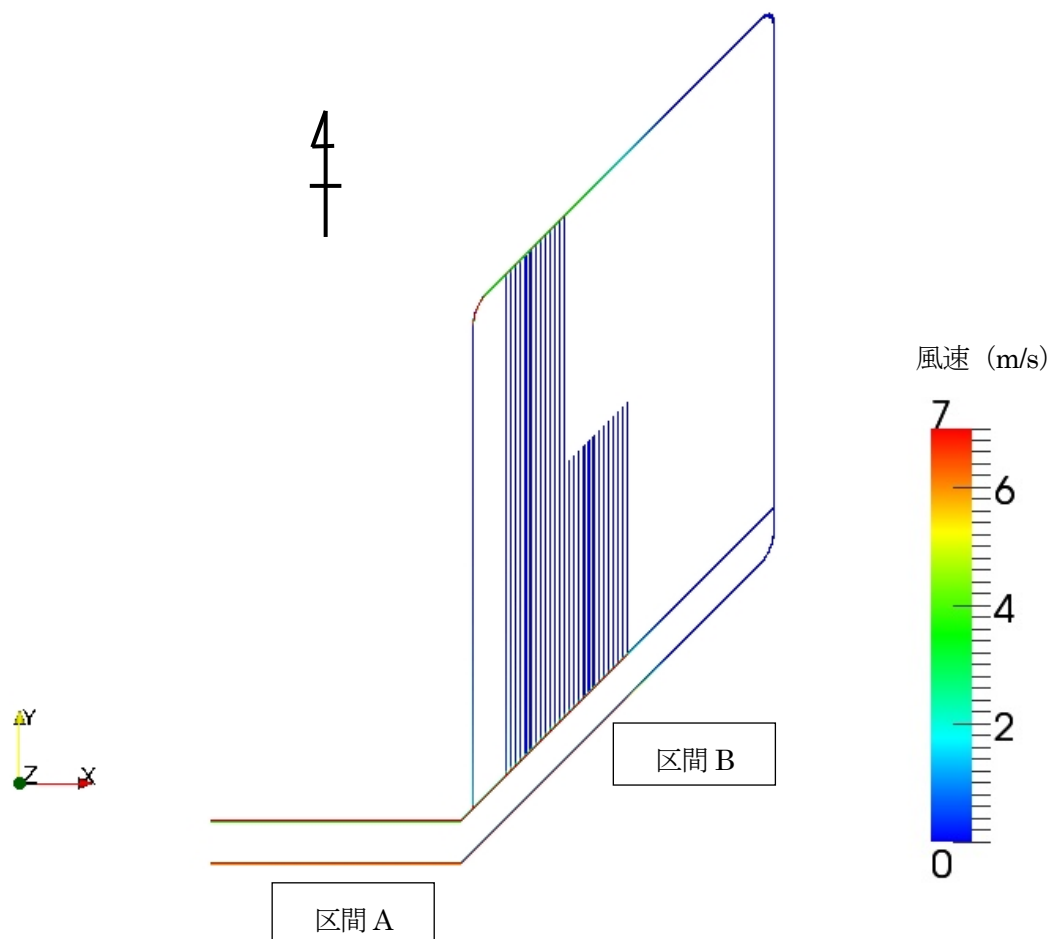


参考資料 図 1 形状定義とモデル化

参考資料 図 2 に建設中パネル全体の風速分布を示す。なお、示した風速分布は坑道底面から 1.5m 高さの縦断面である。

全体的に、入排気口から建設中パネルに繋がる連絡坑道で風速が高く、かつ入気口側よりも排気口側の風速が高い。まず連絡坑道の風速が高い理由は、分岐がなく坑道内の風量が分岐後の処分坑道よりも多いためと考えられる。次に、入気口側よりも排気口側の風速が高い理由は、建設中パネル内温度と地表温度の違いによる浮力効果で排気口から立坑にかけて風速が早くなる現象(煙突効果と呼ぶ)が影響していると考えられる。

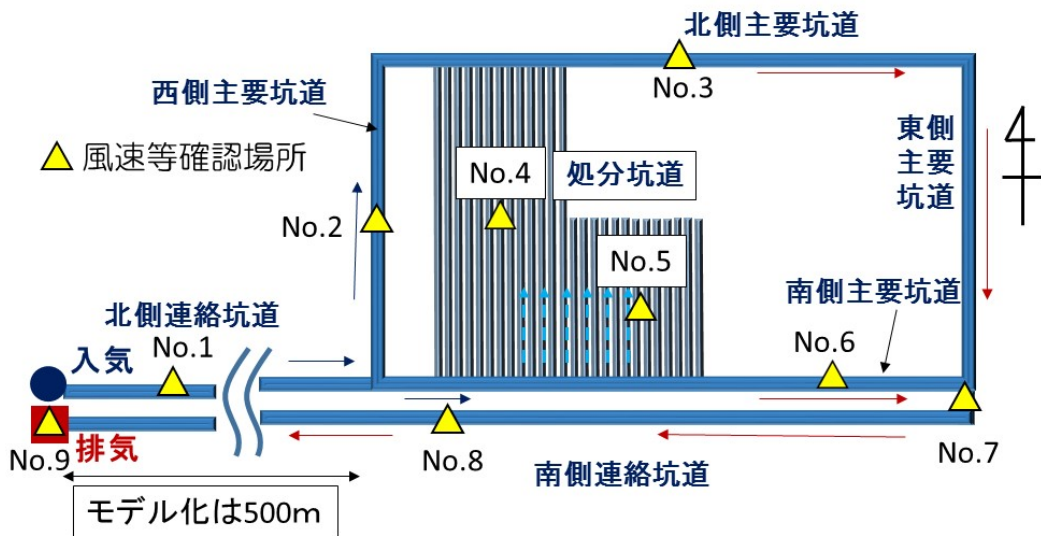
しかし、下図の区間 A と区間 B は同じ坑道断面で分流・合流もないにもかかわらず、風速が 3 倍以上違い、全体を俯瞰的に見ると、正しい解を得たとは言いがたい。そこで、(2)以降で詳細な縦断面図および横断面図を確認する。なお、STEP3 の目的である STEP4 の検討のための解析次元の検討も合わせて行うこととする。



参考資料 図 2 建設中パネル全体の風速分布図

(2)では、(1)で示した建設中パネル全体の風速分布から、代表的な地点の風速を確認する。参考資料図3に風速確認場所を示す。風速確認場所(9点)の着目点は以下の通りである。なお、No.9の排気口付近以外の地点については、各坑道内の代表的な風速を確認する目的に従い、接合部から坑道直径の20倍(20D)、すなわち100m以上離れた地点の風速を確認できるよう留意する。

- ▶ 入気口から建設中パネルに入るまでの北側連絡坑道の風速 (No.1)
- ▶ 北側連絡坑道から建設中パネルの西側主要坑道内に分岐した後の風速 (No.2)
- ▶ 北側主要坑道の風速のうち建設完了の処分坑道を通過した後の風速 (No.3)
- ▶ 建設完了の処分坑道内の風速 (No.4)
- ▶ 建設中の処分坑道内の風速 (No.5)
- ▶ 南側主要坑道の風速のうち建設完了の処分坑道および建設中の処分坑道を通過した後の風速 (No.6)
- ▶ 建設中パネルの南側から連絡坑道へ続く合流部 (No.7)
- ▶ 排気口へ続く南側連絡坑道内の風速 (No.8)
- ▶ 排気口付近の風速 (No.9)

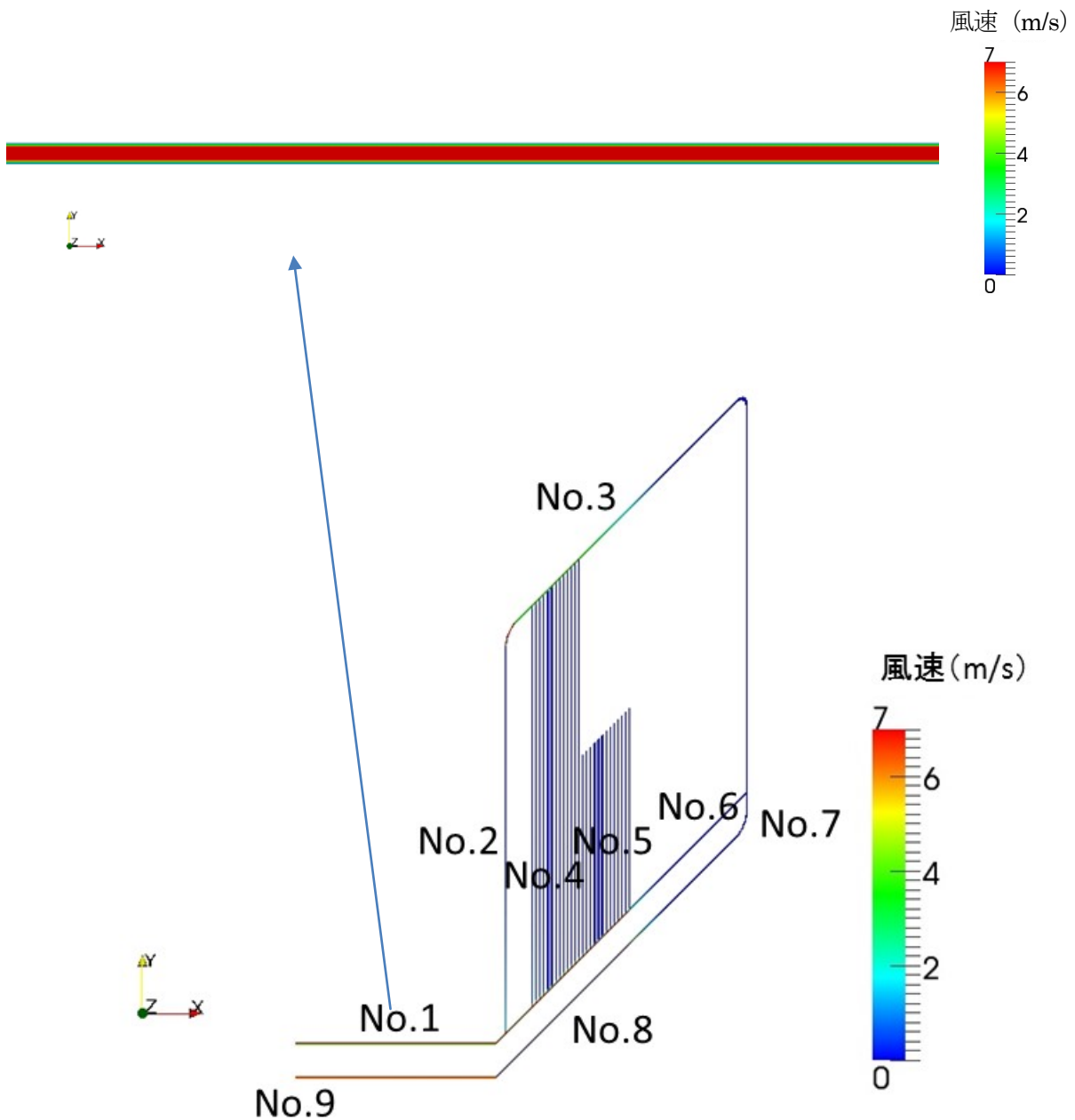


参考資料 図3 STEP3の風速確認地点(図3.5.2-3に地点No.を加筆)

次頁以降に、各Noの風速分布を示す。

1) No.1 の風速分布

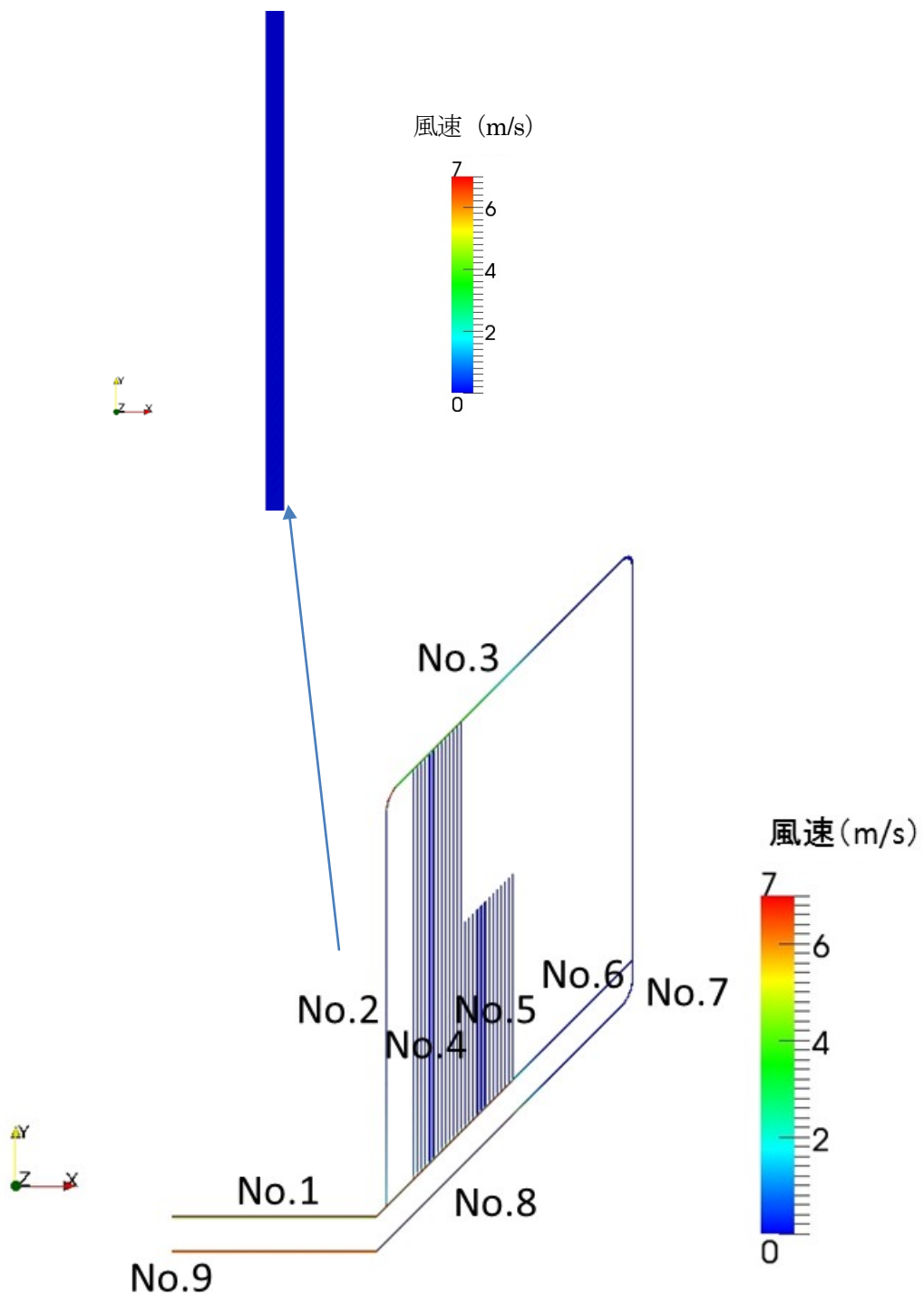
参考資料 図4にNo.1の風速分布を示す。この結果は、全体の風速が定常状態になったときの結果であり、結果として取り出した部分は入気口および建設中パネルとの接合部から各150m離れた中間の200m部分の風速である。坑道壁面の風速と比較して坑道内部の風速が高いものの、空気の流れる方向での場所的な変化はない。本検討では、この部分の空気の流れについて、壁面付近の空気の乱れ（渦）を確認することは目的としておらず、3次元モデル化の必要性は低いと考えられる。このため、STEP4以降では、当該部分を1次元モデル化して検討する。



参考資料 図4 No.1の風速分布

2) No.2 の風速分布

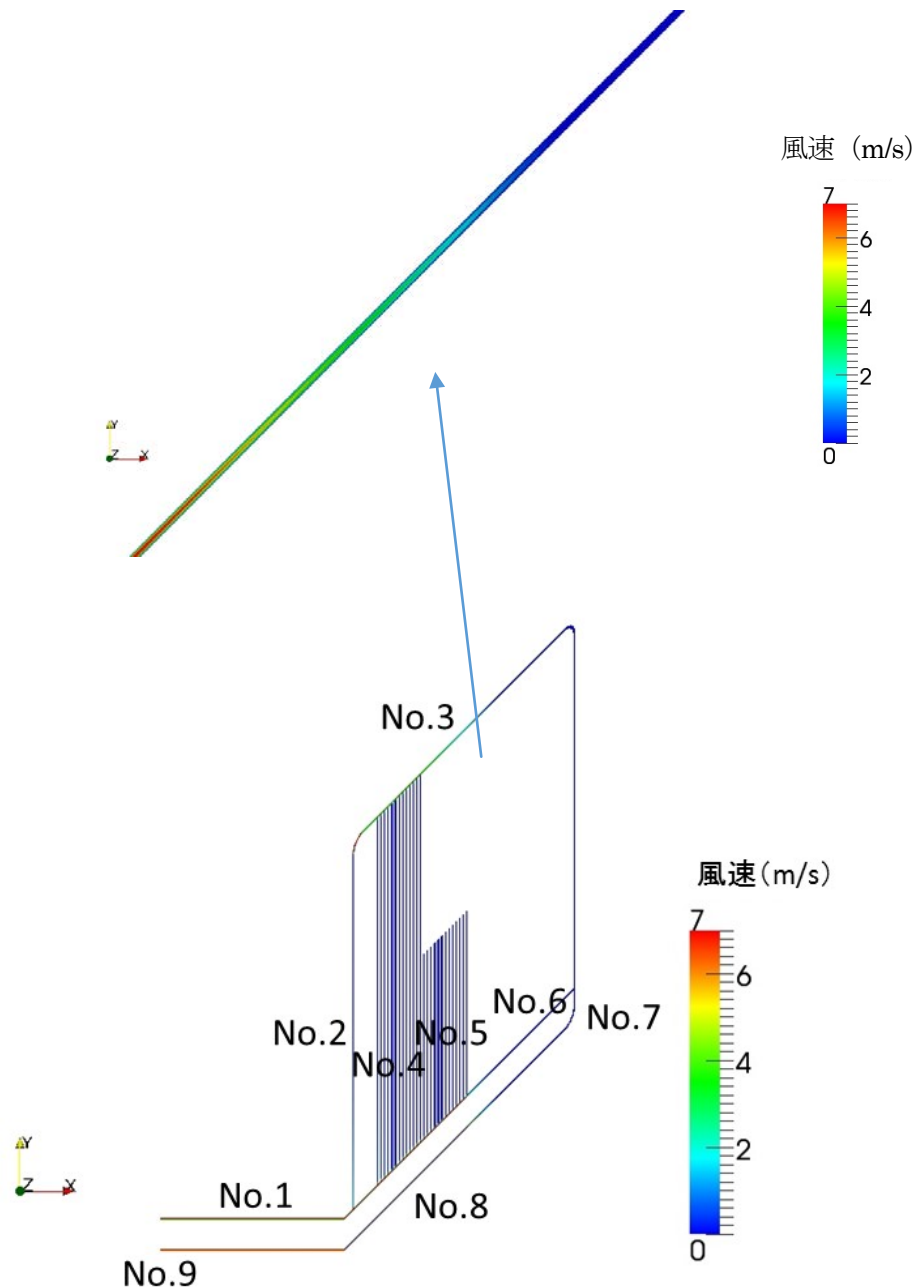
参考資料 図5にNo.2の風速分布を示す。No.1と同様に定常状態になったときの結果であり、結果として取り出した部分は、連絡坑道から主要坑道に分岐した地点および北側主要坑道に繋がる地点から各300m離れた中間の226m部分の風速である。坑道全体の風速が一様であり、3次元モデル化の必要性は低い。このためSTEP4以降では当該部分を1次元モデル化して検討する。



参考資料 図5 No.2の風速分布

3) No.3 の風速分布

参考資料 図6にNo.3の風速分布を示す。No.1と同様に定常状態になったときの結果であり、結果として取り出した部分は、建設完了の処分坑道の東の端から主要坑道に合流した地点から400m区間の風速である。坑道の風速が西側から東側に向けて変化しており、一様となる部分は、建設完了の処分坑道の東の端から主要坑道に合流した地点から300m離れたところであった。このためSTEP4以降では、非一様の300m区間は3次元モデルを用いることとし、その他の一様部分については1次元モデルを用いて検討する。

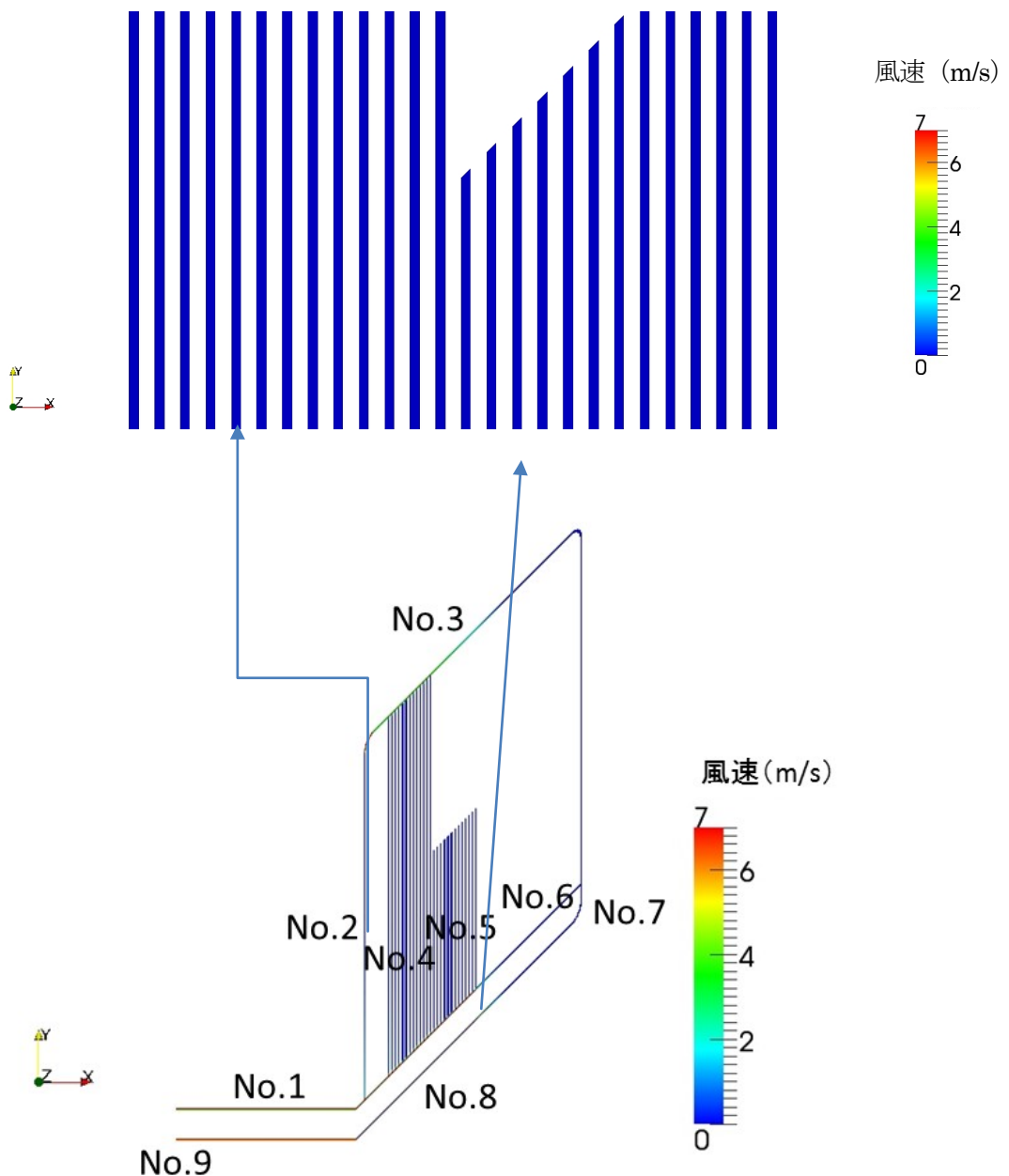


参考資料 図6 No.3の風速分布

4) No.4 および No.5 の風速分布

参考資料 図7に No.4 および No.5 の風速分布を示す。なお、No.1 と同様に定常状態になったときの結果である。建設完了の処分坑道も建設途中の処分坑道も空気の流入はほとんどなく、風速分布は一様であった。このため当該部分は1次元モデル化して解くものとする。

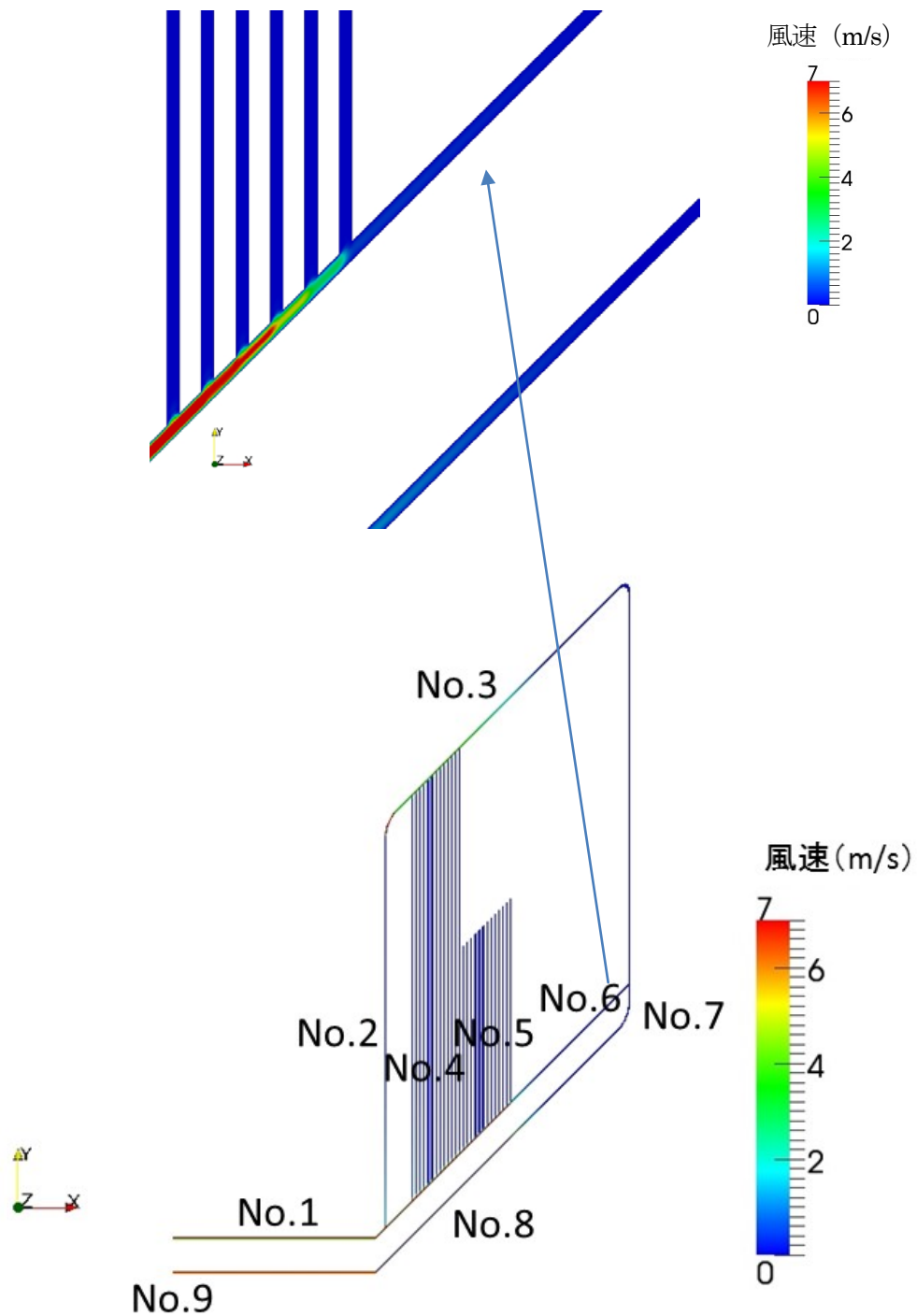
処分坑道内は、掘削後に地中から可燃性ガスが突出する可能性があり、作業員がいない場合であっても空気を流す必要があると考えられている。このため、建設完了の処分坑道は13本の処分坑道同士をダクトでつなげて空気を流すと仮定し、建設途中の処分坑道には作業員がいることを想定して切羽付近にあまねく新鮮な空気を送るためにダクトを設置すると仮定して、STEP4以降の解析を行う。



参考資料 図7 No.4, No.5 の風速分布

5) No.6 の風速分布

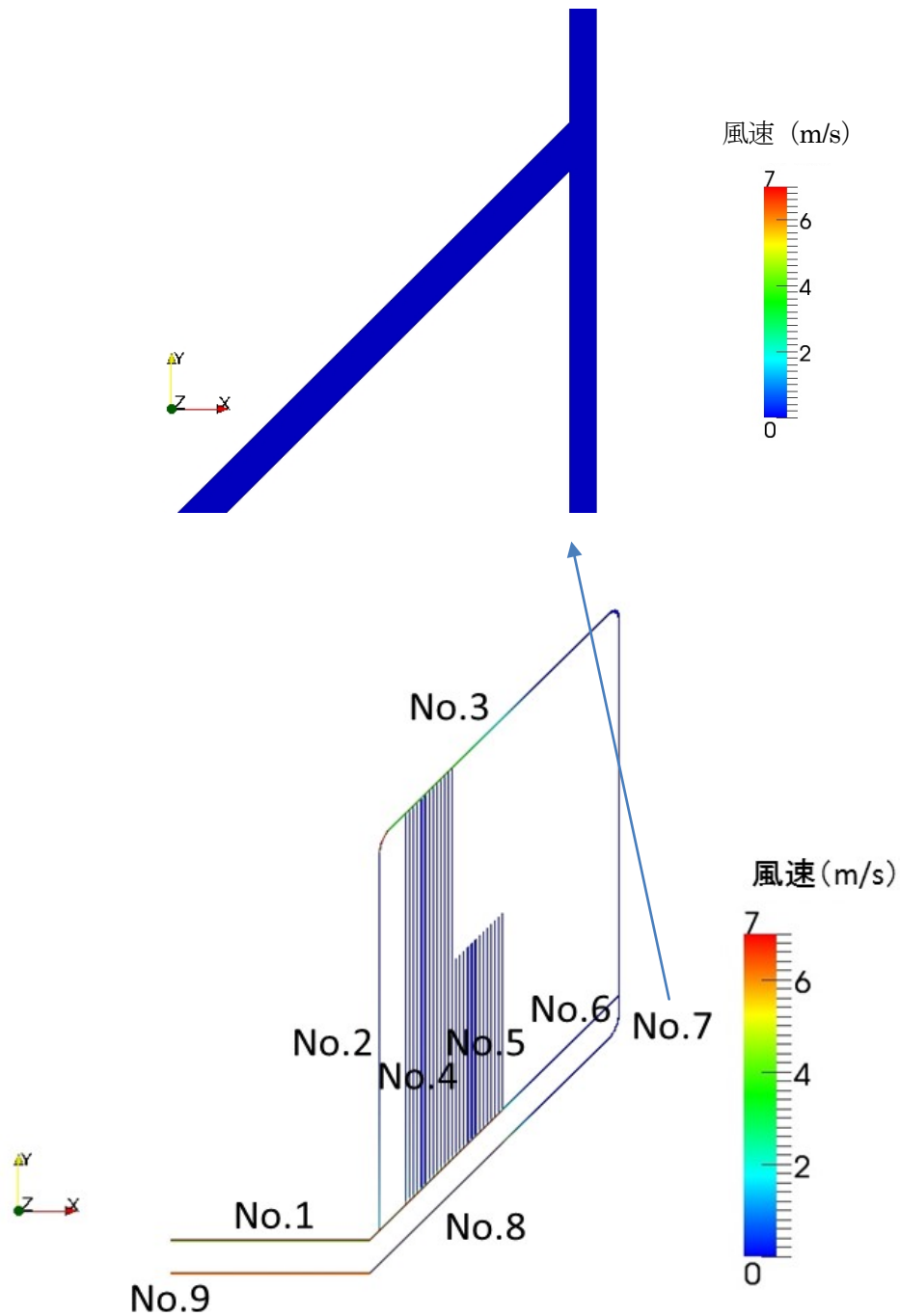
参考資料 図8にNo.6の風速分布を示す。なお、No.1と同様に定常状態になったときの結果である。結果として示した部分は、建設途中の処分坑道の西側から数えて8本目との接合部から400mまでである。処分坑道との接合部付近は非一様であり、STEP4以降の解析では3次元モデル化が必要と考えられるが、13本目の最後の処分坑道との接合部以降はほぼ一様であり、1次元モデル化が可能と考えられる。



参考資料 図8 No.6の風速分布

6) No.7 の風速分布

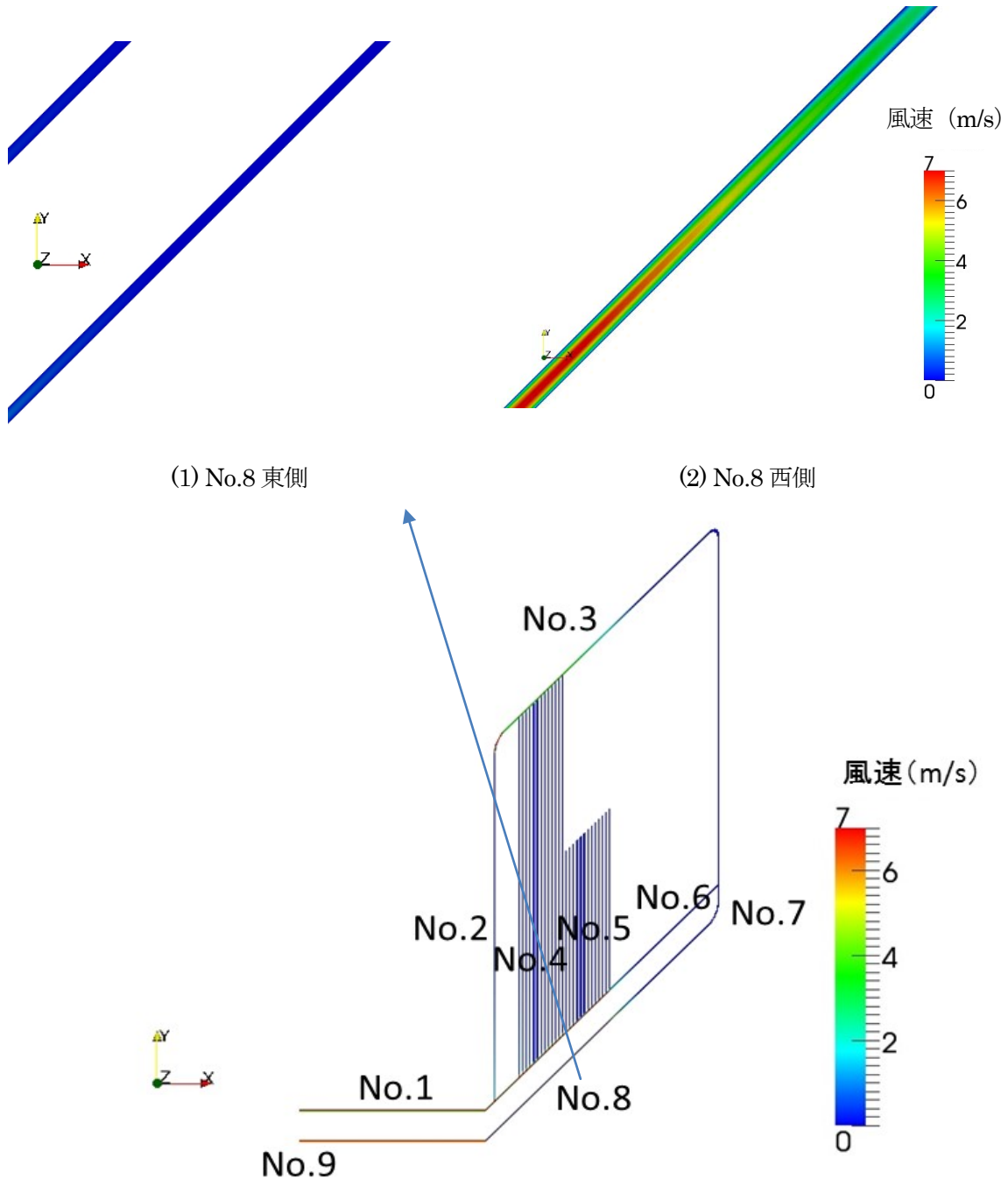
参考資料 図9にNo.7の風速分布を示す。なお、No.1と同様に定常状態になったときの結果である。結果として示した部分は、主要坑道と連絡坑道の接合部であり、風速が高くなると予測していたが、風速はほとんど上がらなかった。原因については不明であるが、各主要坑道を空気が流れた後、ほとんど風速が上がっていないことを考慮すれば、合流部で風速が低いままであることも推察できる。今後の課題として、実規模実験を行い検証する必要があると考える。



参考資料 図9 No.7の風速分布

7) No.8 の風速分布

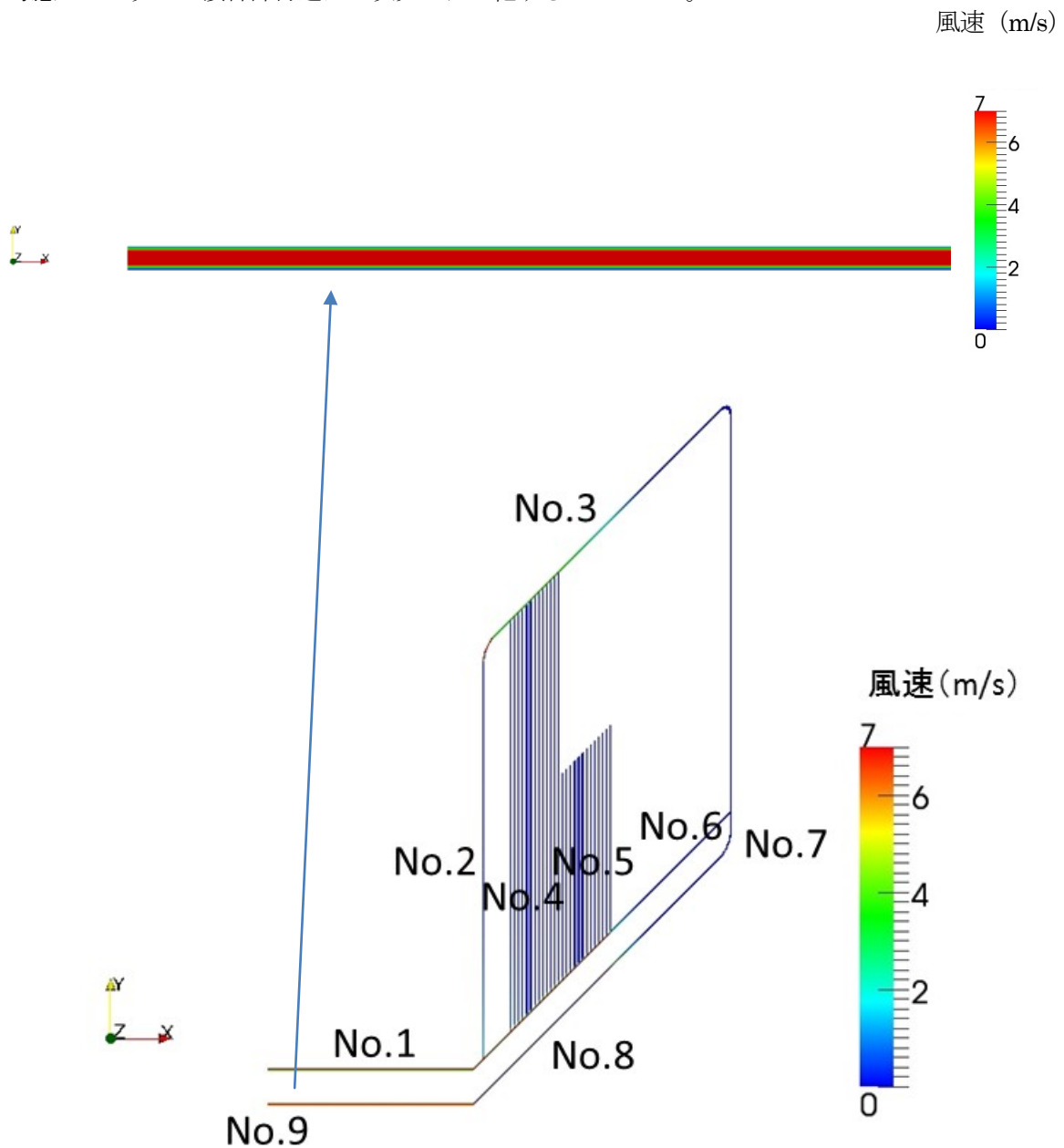
参考資料 図 10 に No.8 の風速分布を示す。なお、No.1 と同様に定常状態になったときの結果である。結果として示した部分は、(1)が主要坑道から南側連絡坑道に接合した No.7 の合流部から 100m 西側の地点から始まり 200m 西側の区間まで (No.8 東側) を示したものであり、(2)は連絡坑道が曲がる点から 100m の区間 (No.8 西側) を示したものである。(1)の区間については、風速は一様であり STEP4 以降では 1 次元モデルを用いることが可能と考える。一方で(2)は非一様であるため 3 次元モデル化が必要と考えられる。



参考資料 図 10 No.8 の風速分布

8) No.9 の風速分布

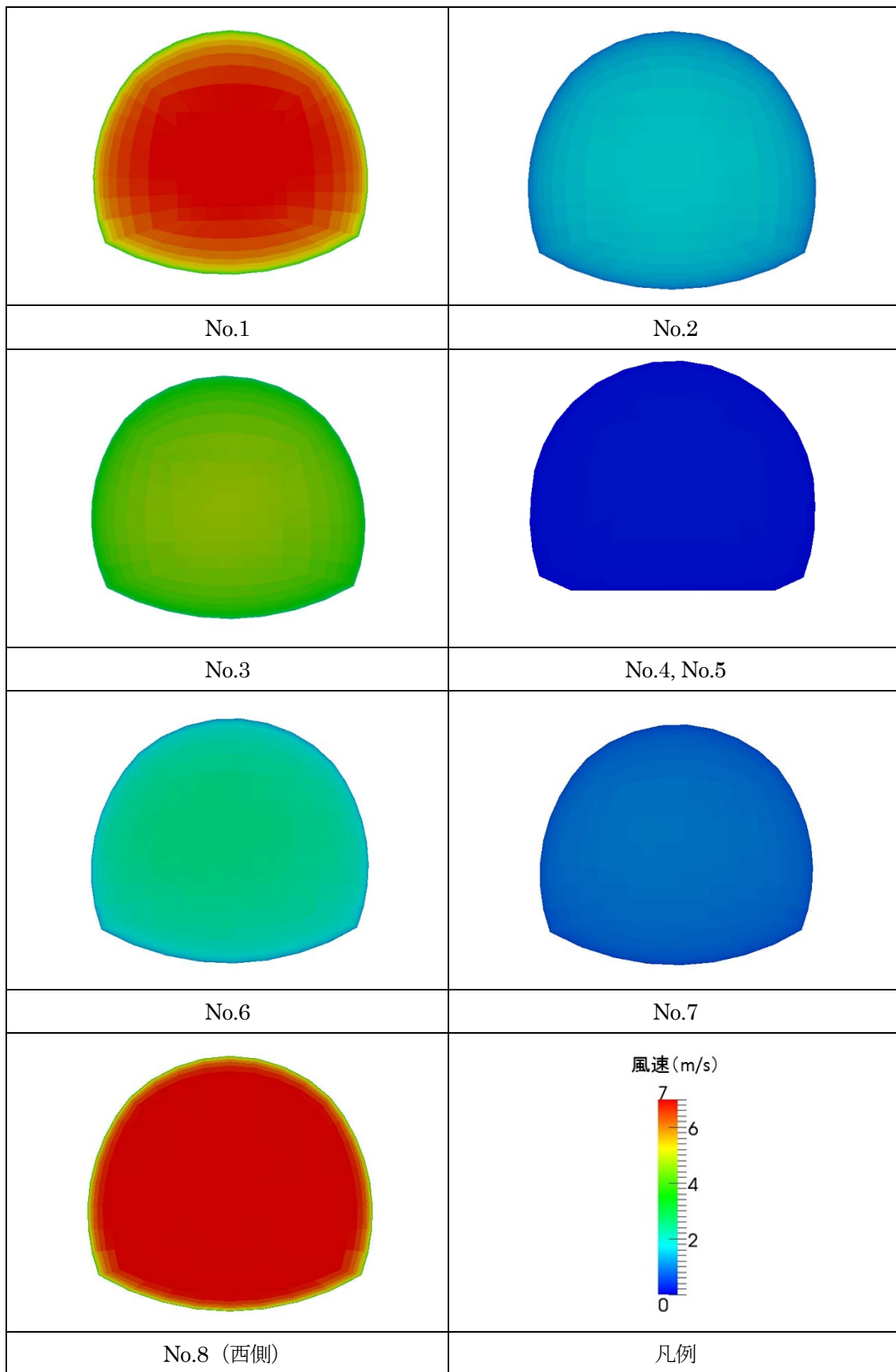
参考資料 図 11 に No.9 の風速分布を示す。なお、No.1 と同様に定常状態になったときの結果である。結果として示した部分は、排気口付近 100m を示したものである。No.1 と同様に、坑道壁面の風速と比較して坑道内部の風速が高いものの、空気の流れる方向での場所的な変化はない。本検討では、この部分の空気の流れについて、壁面付近の空気の乱れ（渦）を確認することは目的としておらず、3次元モデル化の必要性は低いと考えられる。STEP4以降では当該部分を1次元モデル化して解析を行うことが可能であるが、排気口付近の立坑内で煙突効果が確認されることを考慮して立坑との接合部付近は3次元モデル化することとした。



参考資料 図 11 No.9 の風速分布

9) 横断面図による各 No.の風速分布の確認

本モデルは、連絡坑道が長く分流部分で壁を設けたモデルの改良モデルとして作成し、解析をおこなったものである。しかし、風速分布を俯瞰的に見たところ、風速の変化が大きく解が出たか否か疑問が残る。そこで、解析結果をさらに検討するため、各 No.の横断面図を確認することとした。

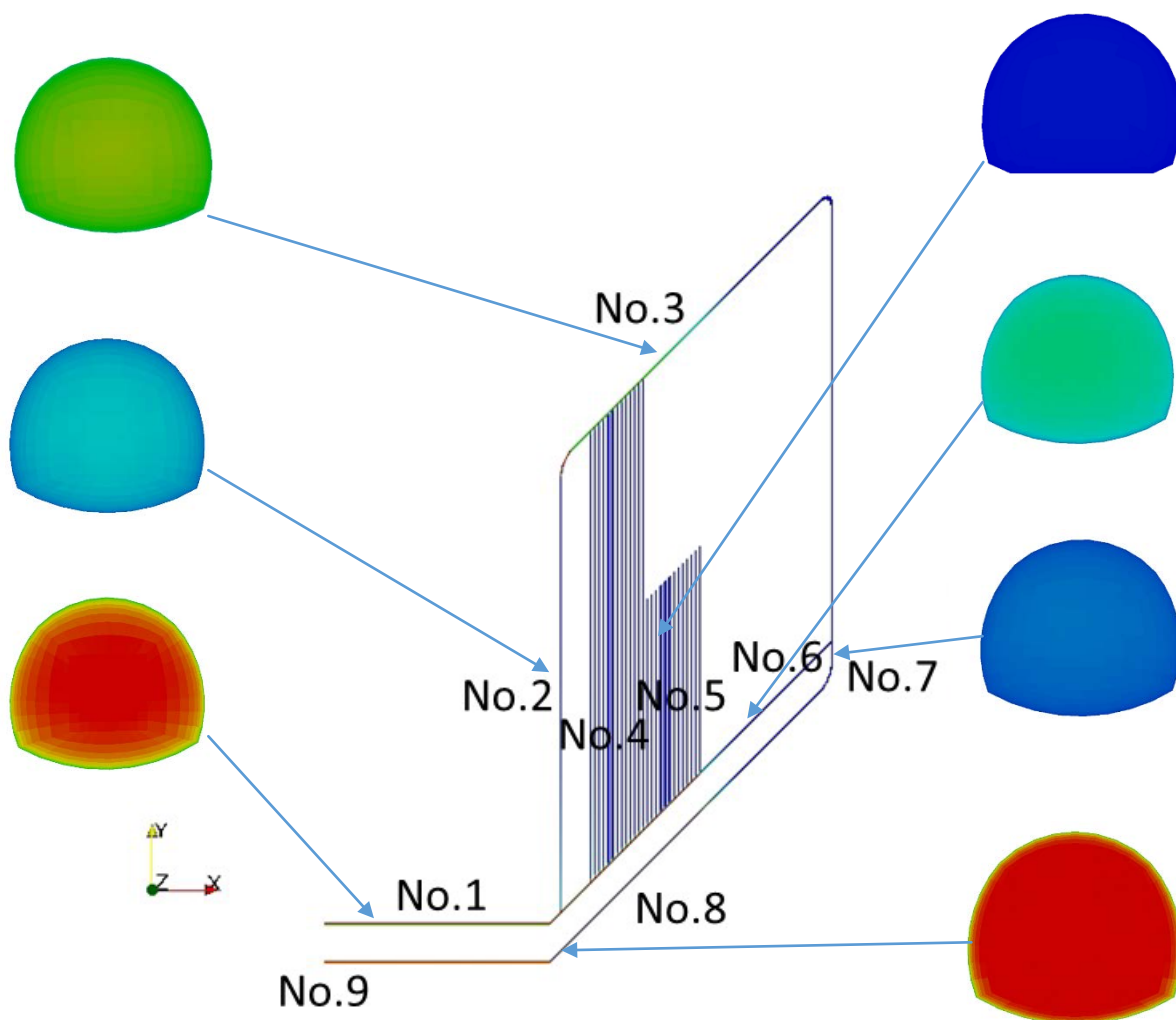


参考資料 図 12 No.9 の断面風速分布

参考資料 図 12 より、断面の中心が側面と比較して風速が早いことがわかる。ただし、処分坑道内の No.4 および No.5 は空気がほとんど入っておらず、風速はほぼゼロである。

参考資料 図 13 は、全体の風速分布図に断面図を合わせて示したものである。No.1 および No.8(西側)の入気および排気の連絡坑道がその他の主要坑道・処分坑道よりも風速が大きい。一方で合流部分である No.7 の風速は、合流前の No.6 よりも低く、解が正しいとは言えない。また、No.7 と No.8 の間には分岐・合流がないにもかかわらず、風速が大きく違っていた。このような結果は、解析が収束していない状態で起こりうるものである。

本解析では、入排気口の風量の絶対値が等しくなり、また各計算格子の風速値の差分に変化がなくなってきたとき、解析は収束していると考えたが、全体の風量および風速の収支のバランスが取れたとしても、局所的に見ると解析が収束していない場合があると考えられる。



参考資料 図 13 縦断面と横断面の風速分布

第4章 人工バリアの限界性能等に関するデータ取得

4.1 はじめに

本章では、平成 24 年度に選定した技術開発課題のうちの「人工バリアの限界性能等の調査・試験」について述べる。

「人工バリアの限界性能等の調査・試験」については、平成 24 年度に、異常状態や事故時の「熱的性質」の把握、およびガラス固化体キャニスタの「腐食性」の把握、が優先課題に選定された。

これを受けて、昨年度は地上施設における火災時の人工バリアの熱応力解析を行い、ガラス固化体キャニスタやオーバーパックの温度履歴や応力履歴について検討した。また、今年度に予定している緩衝材を介した火災影響の検討に向けて、緩衝材の高温時の熱特性を把握するための加熱試験を行い、データを取得した。さらに、津波被害を想定し、海水の付着等による塩分の影響を受けたガラス固化体キャニスタの腐食性について、文献等調査を行った。

今年度は、昨年度取得した緩衝材の熱特性データを用いた地下施設における緩衝材を介した火災影響の解析を行うとともに、津波被害を想定した腐食環境条件の設定に資する情報の収集・整理を行う。また、昨年度地上施設火災解析の結果から必要と判断したガラス固化体キャニスタの高温データ、及び地下施設で火災に被災した緩衝材の機械的特性データを取得する。

4.1.1 既往の研究成果

平成 24 年度、平成 25 年度の研究成果は報告書[1][2]にて参照することができるが、その概要は以下のとおりである。

平成 24 年度は、地層処分施設と類似した既存の施設について文献調査を行い、それらの施設で想定している異常状態や事故などについて知見をまとめた。また、地層処分の操業工程ごとに求められる安全機能や操業継続に必要な機能について検討し、その結果に基づき、本開発において自然災害に対する安全確保を検討する具体的な作業の選定を行った。

次に、類似施設の調査結果などに基づき、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある自然災害を選定し、これらの起因事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を整理した。このようにして整理した最終的な状況に対し、応急対策、恒久対策、対策のための試験・解析を検討・抽出した。そして抽出した種々の対策等を整理・類型化して、対策等に必要な技術を「7つの技術課題」として抽出した。

さらに、抽出した7つの技術課題に関わる現況技術の調査に着手し、その調査結果に基づいて「救援・救出技術」、「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」、および「人工バリアの限界性能等の調査・試験」の4つを「技術開発課題」に選定し、概略の開発内容・方法・成果目標・開発工程などを検討・整理して、年度展開を示した。

平成 25 年度は、人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討を行った。地上施設での火災

時に人工バリアが火炎で加熱される状況を想定した熱応力解析を行い、ガラス固化体キャニスタやオーバーパックの温度履歴や応力履歴のデータを取得した。また、ガラス固化体キャニスタのHeガス内圧上昇の影響を評価するための解析的手法について調査・整理を行った。

解析的な検討においては材料物性値を適切に設定することが必要である。緩衝材については、100℃未満の熱特性についてはデータ取得事例があるが、火災などによる高温履歴を想定した熱特性データは取得・蓄積されていないことから、地下施設における火災事故を想定した解析的検討に資するため、緩衝材の高温時の熱特性を取得した。

また、津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食性に関して調査した。放射性廃棄物を扱う施設におけるガラス固化体キャニスタの海水の影響を想定した腐食性、および放射性物質を内包した条件での腐食性について調査した。

4.1.2 今年度の実施内容

(1) 背景

地層処分事業操業中の異常状態や事故の影響を緩和するためには、その時の人工バリアの状況を適格に評価し、人工バリアの状況に応じた適切な対策を施す必要がある。人工バリアの限界性能等に関するデータ取得項目は、このような観点から選定した技術開発課題である。

表 4.1.2-1 に、人工バリア構成と各種外力に対する限界性能等の把握に向けた調査・試験の概略を示す。同表には、本開発において試験項目として取り上げる優先度の評価結果も示している。今年度は昨年度に引き続き、表 4.1.2-1 で優先度が高いと評価した人工バリアの熱的性質及び津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食性に関する調査・検討を実施する。具体的には、人工バリアの火災影響について、解析的な検討および解析に必要な物性データの取得試験を行うとともに、ガラス固化体キャニスタの津波に対する腐食性の調査を行う。

表 4.1.2-1 人工バリア構成と各種外力に対する限界性能等の把握に向けた調査・試験の概略

人工バリアの 状態 項目	ガラス固化体	ガラス固化体+オーバ ーパック	ガラス固化体+オーバ ーパック +緩衝材	PEM
①力学的性質の 調査・試験	優先度○:海外の詳細な実験データが有り、評価可能と考えられる	優先度○:他の研究開発成果を確認後、必要な検討に取り組む	優先度○: 同左	優先度○: 同左
②熱的性質の調 査・試験	優先度○:右記の検討の基礎データになることから、それらの検討に合わせて着手する	優先度◎:日本の「オーバーパック+ガラス固化体」についての火災影響の検討事例が見あたらない	優先度◎:「ガラス固化体+オーバーパック+緩衝材」の火災影響の検討、及び高温条件での緩衝材の熱特性の実験データがない	優先度◎: 同左
③キャニスタ・オーバ ーパックの腐食性の 調査・試験	優先度◎:キャニスタの過酷な塩分環境に対する耐食性の網羅的・体系的な調査・整理が必要	優先度△:炭素鋼オーバーパックの耐食性は多くの研究が為されており、評価可能と考えられる		
④坑道冠水等に よる緩衝材の性 能劣化調査・試 験			優先度△:事故等による浸水を受けた緩衝材は、交換を基本にするのがよいと考えられる	優先度△: 同左

※優先度 ◎:速やかに着手するのが良いと考えられる項目 ○:優先項目終了後に、必要な検討に着手するのが良いと考えられる項目 △:本開発での優先度は高くはないと考えられる項目
平成 26 年度(今年度)実施範囲

(2) 実施概要

前項の背景を受けて、今年度実施する項目は以下の 4 項目である。

- ① 地下施設で火災発生を想定した人工バリアの影響解析
- ② 地下施設で火災発生を想定した緩衝材のデータ取得
- ③ 地上施設で火災発生を想定したキャニスタの特性データの取得
- ④ 地上施設に津波が流入した場合のキャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理

1) 地下施設で火災発生を想定した人工バリアの影響解析

地下施設での火災時に人工バリアが火炎で加熱される状況を想定した熱応力解析を行い、ガラス固化体キャニスタやオーバーパックの温度履歴や応力履歴のデータを取得する。今年度は、人工バリアの状態として「ガラス固化体キャニスタ+オーバーパック+緩衝材」（表 4.1.2-1 の赤線内）を対象に解析を行い、ガラス固化体キャニスタやオーバーパックに対する緩衝材の火災影響緩和効果を整理する。

2) 地下施設で火災発生を想定した緩衝材のデータ取得

解析的な検討においては、材料物性値を適切に設定することが信頼性を向上するうえで重

要である。人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックについては、わが国では材質のリファレンスは炭素鋼としており、その熱特性は高温時も含めて把握されている。

一方、もう一つの構成要素である緩衝材については、100℃未満の熱特性や常温での力学的特性についてはデータ取得事例があるが、火災などによる高温履歴を想定したデータは取得・蓄積されていないのが現状である。

緩衝材の高温時の熱特性は昨年度取得したが、力学的性質については取得された事例が無く、火災時（および火災後）の操業安全性を評価するために必要な緩衝材の力学的性質の取得実験を行う。

3) 地上施設で火災発生を想定したキャニスタの特性データの取得

平成 25 年度の地上施設の火災解析結果より、条件によってガラス固化体キャニスタの温度が 700℃を超えることがわかった。キャニスタの材料である SUS304L と類似した SUS304 の物性値は、日本機械学会の規格 JSME（2012 年版）等で 650℃までは示されているが、それ以上の高温データが取得されていないことから、平成 25 年度は 650℃以上の物性値を外挿して解析を実施した。

今年度は解析精度を向上させるため SUS304L を対象とした高温の機械的特性データを実験により取得する。

4) 地上施設に津波が流入した場合のキャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理

操業中に津波により地層処分施設に海水が流入することを想定した場合、ガラス固化体キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に曝される状況が考えられる。

ステンレス鋼に対する一般的な海洋環境下における腐食性については既往の研究例があり、知見も得られているが、放射性廃棄物を扱う施設における津波被害を想定した過酷な塩分環境条件における腐食性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられる。

津波によるガラス固化体キャニスタ（SUS304L 等）の腐食性に関して、①海水に対する腐食性、②放射線環境下での腐食性、に着目した平成 25 年度の文献調査により、①についてはすきま腐食・微生物腐食・加工履歴による SCC 発生、②については水の放射線分解による酸化性の高まりが前述の腐食を促進させる可能性について指摘された。

また、固化ガラスの崩壊熱による温度上昇は海水に浸漬したガラス固化体キャニスタ表面の気液界面での海塩析出による高温・高濃度塩化物溶液環境をもたらす可能性があり、このような条件での温度分布を解析によって求め、SCC が発生する腐食環境の成立性を評価することが優先課題として挙げられた。

今年度は、崩壊熱による腐食環境（温度）条件について情報を収集・整理する。

4.2 地下施設で火災発生を想定した人工バリアの影響解析

地下施設での火災時に人工バリアが火炎で加熱される状況を想定した熱応力解析を行い、緩衝材を介したガラス固化体キャニスタやオーバーパックの温度履歴や応力履歴について検討した。

4.2.1 解析対象及び検討フロー

今年度は、人工バリアの状態として「ガラス固化体キャニスタ+オーバーパック+緩衝材」を対象に解析を行った。ガラス固化体キャニスタ[3]およびオーバーパック[4]の仕様をそれぞれ図 4.2.1-1、図 4.2.1-2 に示す。また、今年度の解析ケースを表 4.2.1-1 に示す。表 4.2.1-1 の解析ケースについて、図 4.2.1-3 に示す手順に従い解析を実施した。

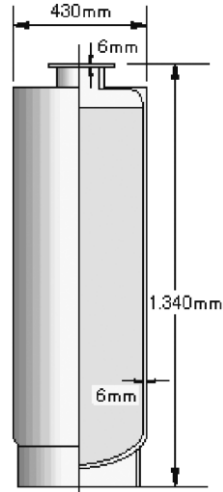


図 4.2.1-1 ガラス固化体キャニスタの寸法（日本原燃(株)仕様）[3]

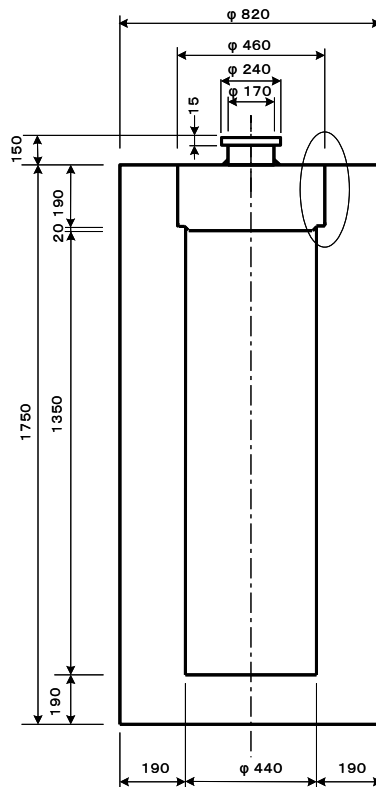


図 4.2.1-2 オーバーパックの寸法 [4]

(資源エネルギー庁 地層処分技術調査等事業の検討仕様)

表 4.2.1-1 今年度の解析ケース

解析ケース NO.	解析対象モデル	換気風量 [m/s]	緩衝材施工状況	燃焼解析ケース数	伝熱解析ケース数	応力解析ケース数
1A	ガラス固化体キャニスタ+オーバーバック+緩衝材	0.5	部分施工 (オーバーバック露出)	1	1	1
1B	ガラス固化体キャニスタ+オーバーバック+緩衝材	2.0		1	1	1
2	ガラス固化体キャニスタ+オーバーバック+緩衝材	2.0	完全施工	1	—	—

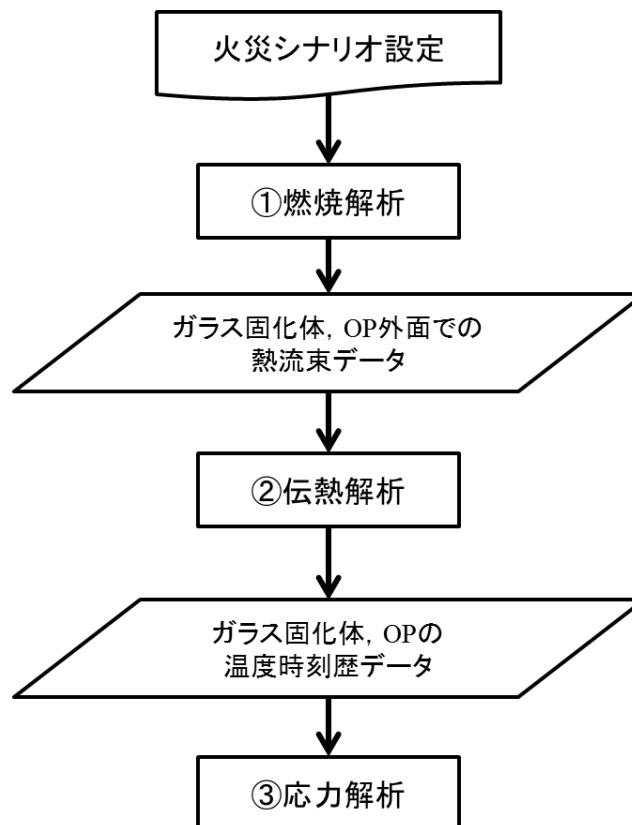


図 4.2.1-3 人工バリアの熱応力解析 検討フロー

4.2.2 火災シナリオの検討

火災は、複数の事象が重なった結果であり、着火の原因、規模、位置や燃料の種類、分配、また、火災の種類（気体の組成や流れ方など）、火の広がり方、最大発熱量、総発熱量、換気状態、消火システム、消火活動などによって大きく変わる[5]。火災燃焼解析の条件（シナリオ）は電気機械のバッテリーパックによる火災を検討した。条件設定によりオーバーパックにとって、さらに厳しい状況となるシナリオを想定することもできるが、地下施設での火災解析の課題を把握するため、搬送・定置装置上でバッテリーパックが燃えた場合の影響について解析を行うこととした。なお、火災中にバッテリー電解液の一部が漏れてオーバーパックの処分孔に入り込む状態、消火システムによって噴射する水によって漏れた電解液がより大きく広がった場合等については、今後のシナリオ設定の課題として提示することとした。

(1) 被災前提条件

① 火災発生の起因事象となる自然災害

地層処分施設の地下施設／処分坑道において、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体キャニスタを収納したオーバーパック（以下、オーバーパックという））の処分孔への搬送・定置作業が電気を動力とした搬送・定置装置によって行われるとする。搬送・定置作業中に地震が起因事象となり火災が発生するものとする（本項の（2）参照）。

② 燃料

オーバーパックの搬送・定置装置は Li-ion 電池から供給される 1300kWh の電力で動くとして仮定し、その電池（電解液、ハウジング材など）が燃焼するものとする。

③ 定置方式

人工バリアの定置方式には、処分孔縦置き方式と処分坑道横置き方式がある。縦置き方式は処分坑道の全通換気により横置き方式に比べて供給酸素量が圧倒的に多い（図 4.2.2-1）ため、火災影響評価上厳しい条件となる処分孔縦置き方式とする。

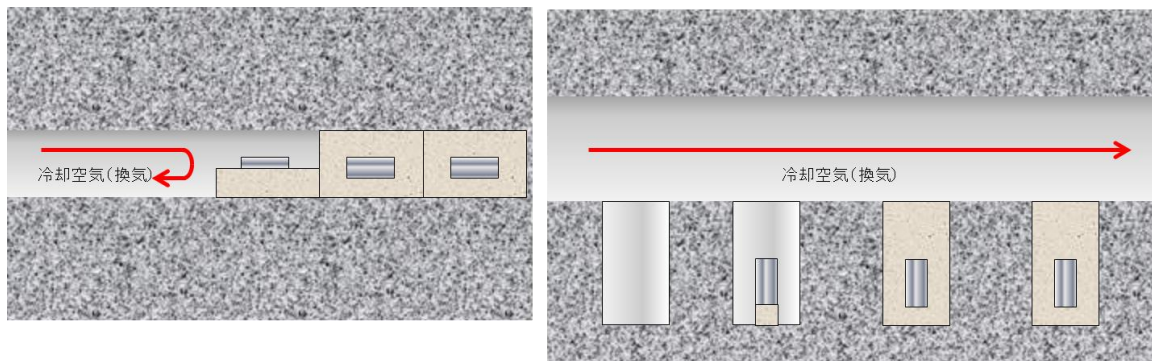
④ 緩衝材施工方式

処分孔縦置き方式における緩衝材施工方式にはブロック、ペレット、原位置締固め方式等がある（図 4.2.2-2[6]）。ペレット方式は施工中にオーバーパックが剥き出しの状態になり、火災の影響を受けやすいことから、ペレット方式とする。

⑤ 火災発生時の人工バリアの状態

ケース 1：オーバーパックは処分孔内に定置済、緩衝材は未施工（オーバーパック下部緩衝材は施工済）の状態、オーバーパックが剥き出しで定置された状態とする。オーバーパック搬送・定置装置がその処分孔から数メートルほど離れている。

ケース 2：オーバーパック、緩衝材ともに処分孔内に定置施工済、オーバーパックは完全に緩衝材中に埋設された状態とする。オーバーパック搬送・定置装置がその処分孔から数メートルほど離れている。



処分坑道横置き方式

処分孔縦置き方式

図 4.2.2-1 人工バリアの定置方式と供給酸素量の概念

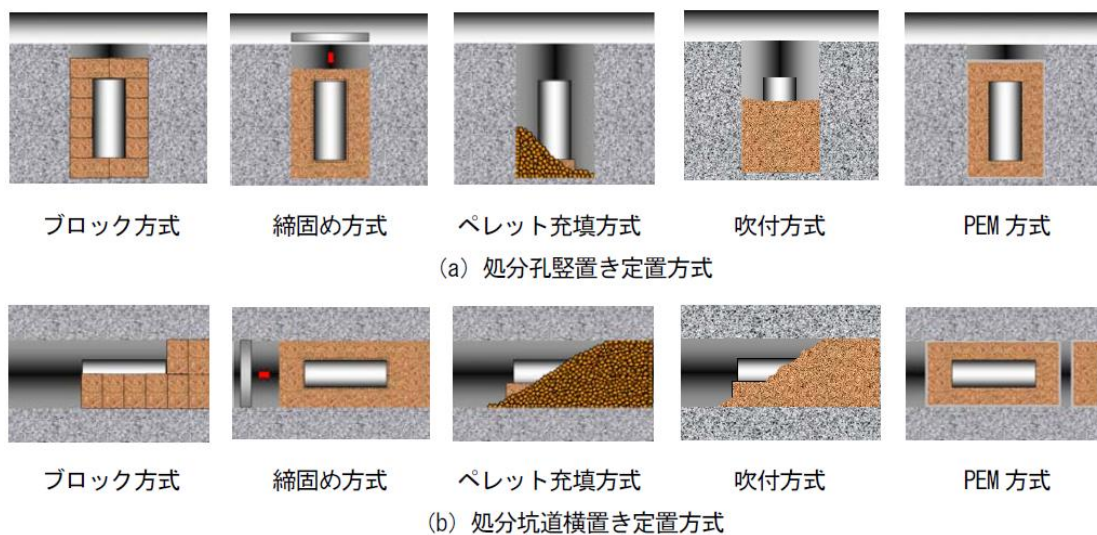


図 4.2.2-2 主な緩衝材の施工方式[6]

(2) 火災シナリオの設定

地下施設は図 4.2.2-3 に示すように、主にアクセス坑道、各パネルへの連絡坑道、主要坑道、及び各パネル内の処分坑道からなる。地下施設では、パネル毎に建設、定置、埋め戻しの三段階で作業が進められる[6]。本検討において、定置方式は処分孔縦置き方式とし、火災は定置作業中に発生すると仮定する。

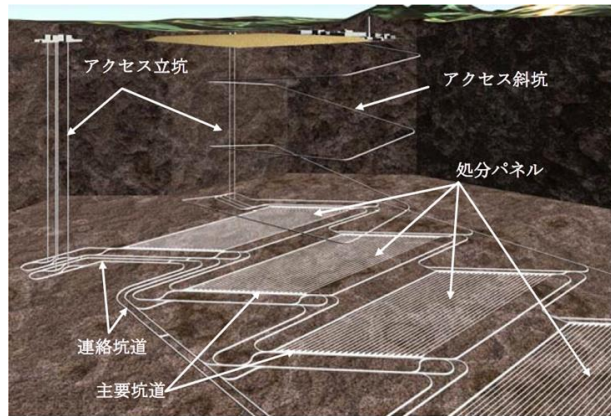


図 4.2.2-3 地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場）[6]

定置深度は地下 500m と仮定する。雰囲気温度は深度によって上昇するので、数式 4.2.2-1 [2] により 30℃と設定する。

$$T_{air} = 15\text{℃} + \frac{\text{深度}}{100\text{m}} 3\text{℃}$$

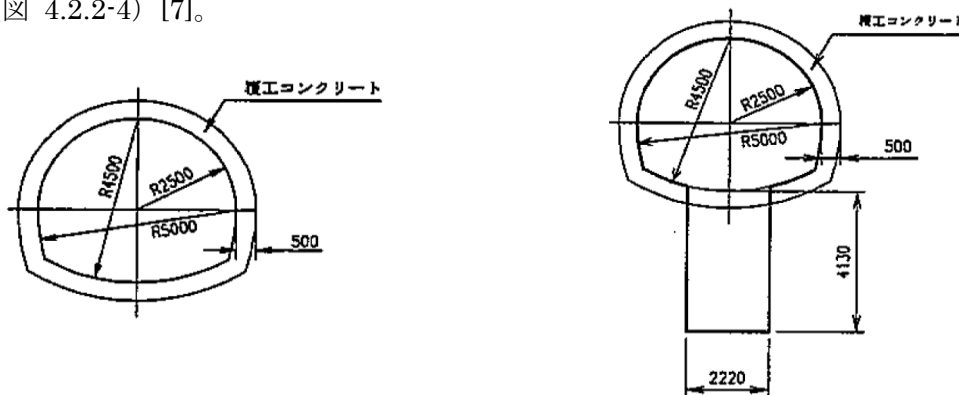
(数式 4.2.2-1)

同様に圧力も深度に比例して上がる[2]。深度 500m の坑道における雰囲気圧力は数式 4.2.2-2 により 5kPa と算出される。但し、火災への影響が小さいため、この圧力差を無視して燃焼解析は地上圧力 $p_0=101.3\text{kPa}$ で実施する。

$$p = p_0 + \Delta p = 101.3\text{kPa} + \frac{\text{深度}}{100\text{m}} 1\text{kPa}$$

(数式 4.2.2-2)

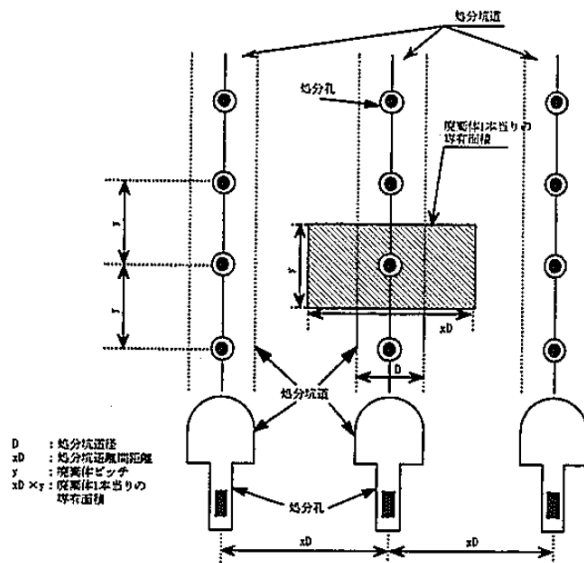
地下施設の岩盤は軟岩系であると仮定する。坑道は 500mm のコンクリートによって補強される (図 4.2.2-4) [7]。



a) 主要・連絡坑道

b) 処分坑道 (縦置き方式)

図 4.2.2-4 坑道形状 (軟岩系岩盤) [7]



(a) 処分孔縦置き方式

図 4.2.2-5 専有面積（処分孔縦置き方式） [7]

深さ 500m において、廃棄物からの発熱量を考慮して空洞の力学的安定性を確保するために処分坑道間の距離は坑道直径の 2.6 倍以上、処分孔の間隔は孔直径の 3 倍以上が必要とされている（図 4.2.2-5） [7]。地層処分場設計のための地質環境基本特性[8]及び第 2 次取りまとめ[9]では、坑道間の距離は 13m、処分孔間の距離は 6.66m となっている。

オーバーパック、緩衝材の定置手順は緩衝材の方式（ブロック、ペレット、現地締固め等）によって異なるが、本検討ではオーバーパックに対する火災の影響をより厳しい条件で評価するため、オーバーパック搬送・定置装置によりオーバーパックを処分孔に定置した後、緩衝材搬送・定置装置によって緩衝材をオーバーパック周囲及び上部に定置するものとする。この手順を前提として、火災発生に至るシナリオを以下の通り設定した。

<ケース 1：緩衝材未施工で火災>

- ・オーバーパック搬送・定置装置でオーバーパックを定置する。
- ・オーバーパック搬送・定置装置が、処分孔から離れていく。
- ・数メートルほど搬送・定置装置が移動したところで地震が発生する。
- ・地震の影響で搬送・定置装置のバッテリーパックに落盤、覆工コンクリート等が落下して損傷を与え、ショート等何らかの原因で火災が発生する。

<ケース 2：緩衝材完全施工で火災>

- ・オーバーパック搬送・定置装置でオーバーパックを定置する。
- ・緩衝材搬送・定置装置で緩衝材を定置する。
- ・緩衝材定置完了した処分孔より奥側の処分孔に別のオーバーパックを定置するため、オー

- ・ パーパック搬送・定置装置が、緩衝材定置済処分孔の上を通過、処分孔から離れていく。
- ・ 数メートルほど搬送・定置装置が移動したところ地震が発生する。
- ・ 地震の影響で搬送・定置装置のバッテリーパックに落盤、覆工コンクリート等が落下して損傷を与え、ショート等何らかの原因で火災が発生する。

4.2.3 解析コードの選定

(1) 燃焼解析用の解析コードの選定

燃焼解析は米国の国立標準技術研究所 NIST[10]が開発して管理している解析ソフトウェア **Fire Dynamics Simulator (FDS)**[11]を用いた。本シミュレータは火災安全性評価ツールとして世界中で使用されている。

FDS の特徴とは、以下に示すものである。また、一つの総括反応を伴う燃料の酸化として計算し、流れ場、温度分布、熱流束などの解析結果が得られる。

- ①火災に多い低速乱流に適応できるラージ・エディター・シミュレーション (LES) が可能である。
- ②爆轟のような、流速が音速まで上がる現象を FDS で解析することは困難だが、一般的な火災 (プールファイヤー、建屋や車両火災など) は解析が可能である。

ここでは FDS を用いてバッテリーパックの火災を解析する。Li-ion 電池の火災では、バッテリーに使われる材料などの詳細が不明のため、文献に基づいたバッテリーパックの発熱量を概算し、その熱がバッテリーパックの表面から放出されると仮定した。発熱量の概算にあたっては、Li-ion 電池の電解質の候補となるエチレンを燃料と仮定し、その燃焼反応から求める。

(2) 伝熱解析、応力解析用の解析コードの選定

ガラス固化体キャニスタ+オーバーパック+緩衝材の伝熱解析およびガラス固化体キャニスタ+オーバーパックの応力解析には、構造解析一般で広く用いられている汎用 FEM コード **ABAQUS (Ver.6.12-1)** を用いることとした。なお、後述するオーバーパックの火災解析において算入するオーバーパック蓋部の溶接残留応力についても、別途 ABAQUS を用いて解析されており[12]、ビードオンプレート溶接試験体や蓋部模擬試験体における溶接残留応力計測値との比較などによりその妥当性は検証済みである[13][14]。

4.2.4 解析モデルの作成

(1) 解析モデル (燃焼解析)

図 4.2.4-1 に燃焼解析した坑道の詳細寸法を示す。坑道の幅は 5m、高さ 5m、長さ 50m である。天井は半径 2.5m の丸い形である。処分孔は直径 2.22m、深さ 4.13m である。オーバーパックは高さ 1.75m、直径 0.82m である。解析に用いるソフトウェア FDS の解析精度を上

げるため直交格子を用いることとし、処分孔とともにオーバーパックも直方体で近似する。なお、面積が同じとなるように、上下の面の底辺長さより求める。

$$a = \frac{d \times \sqrt{\pi}}{2}$$

a : 底辺長さ
d : 直径

処分孔の底辺は 1967mm、オーバーパックの底辺は 727mm となる。但し、格子のセルを揃えるために、処分孔の底辺長さは 2000mm、オーバーパックの底辺長さは 800mm とした（格子サイズは 100mm）。

FDS は物体（壁、容器など）の熱容量や熱伝導を計算するツールが提供されている。このツールは、熱容量、熱伝導率、厚さなどを考慮して、表面および裏面の温度を計算できる。このツールを利用するために、円筒型のオーバーパックを図 4.2.4-2b に示す 3 枚の平面を用いてガラス固化体キャニスタやオーバーパックを模擬した。縦平面は、輻射や対流による熱伝達を受けて、それぞれ幅方向、長さ方向の熱伝導を計算する。

図 4.2.7-15 に示す燃焼解析結果により、定置装置から 2.5m 下流の床への熱流束が最大になると把握したため、定置装置から 1.5m～3.5m 下流に定置穴を設置した。

定置装置は付録 A を参考に長さ 9m(=7.8m+バッテリーパック 1.2m)、幅 3.3m、高さ 2.8m とした。定置装置のバッテリー寸法は長さ 1.2m×幅 3.3m×高さ 1.2m と仮定した。バッテリーの燃焼有効面積（気流に接触する面、図 4.2.4-3 参照）は $2 \times (1.2 \times 1.2) + 3.3 \times 1.2 + 1.2 \times 3.3 = 10.8 \text{m}^2$ とした。

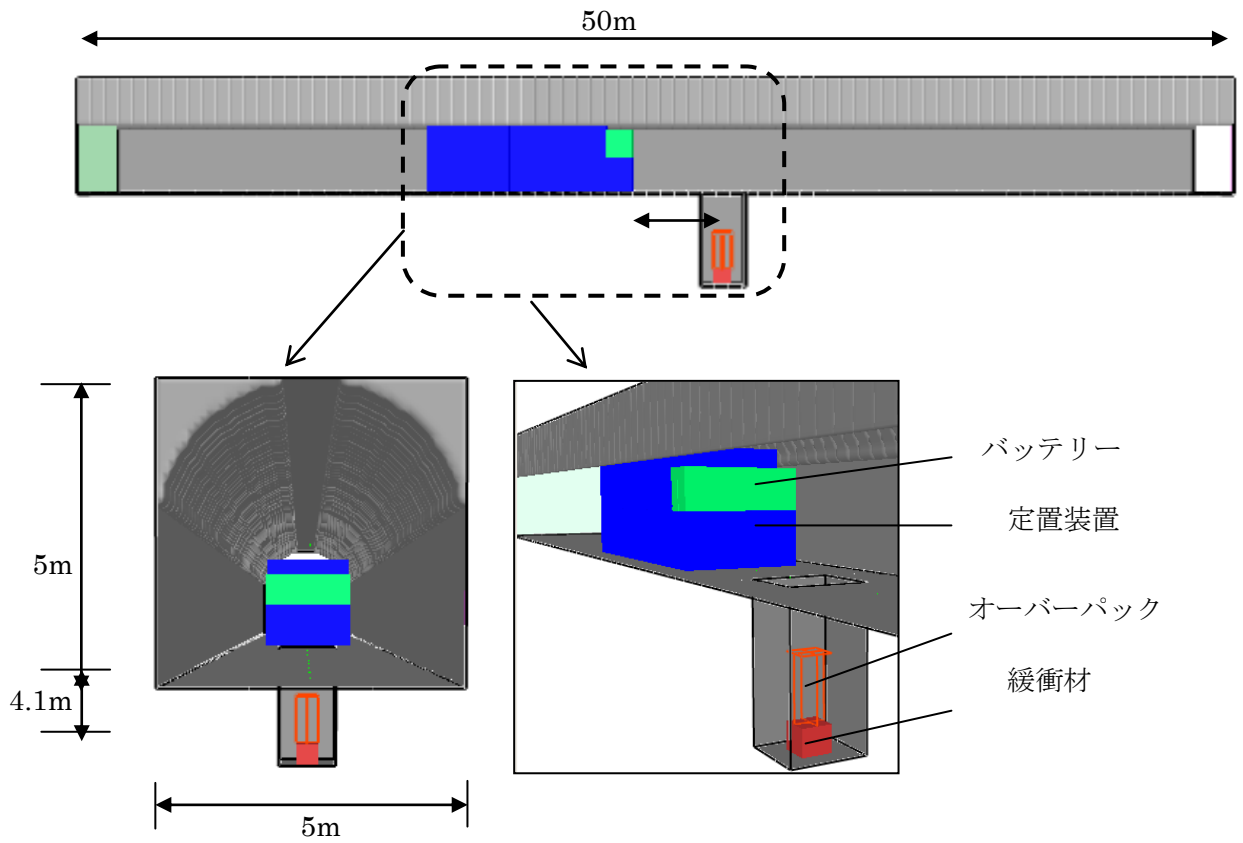


図 4.2.4-1 燃焼解析の計算領域

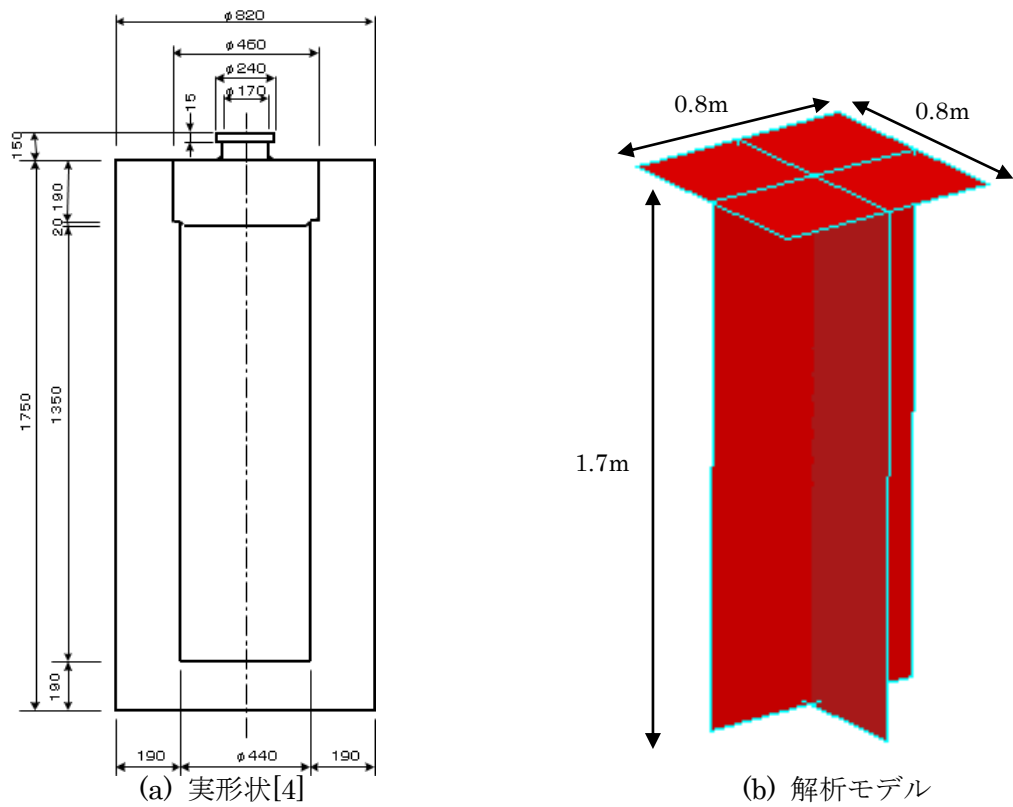


図 4.2.4-2 オーバーパックの数値解析での再現

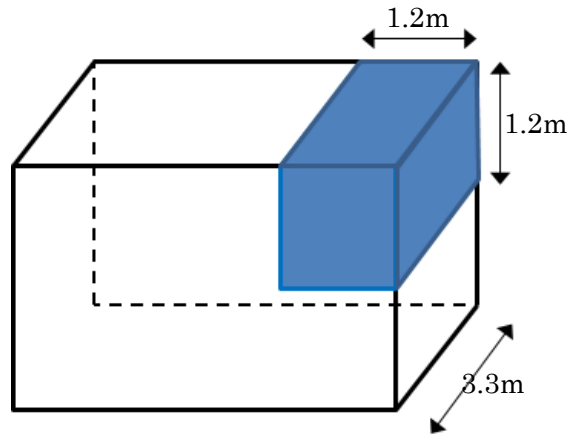
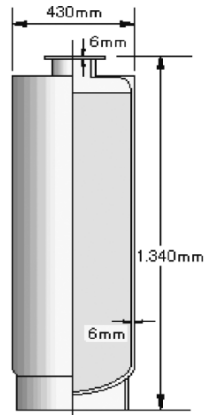


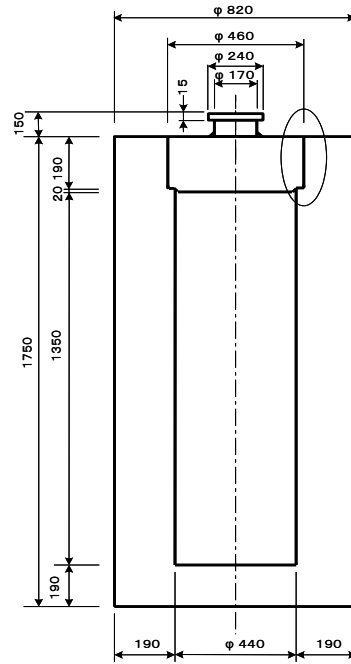
図 4.2.4-3 バッテリー燃焼有効面積について

(2) 解析モデル（伝熱解析／応力解析）

解析対象となるガラス固化体キャニスタ及びオーバーパックの形状を図 4.2.4-4 に示す。これらのモデル化においては、燃焼解析の結果得られるモデル表面からの入熱分布の非対称性を模擬することを想定し、360 度全周モデルを作成した。伝熱解析では、燃焼解析の結果得られるオーバーパック外面からの熱流束の時刻歴データを伝熱解析の境界条件として外面に与えることとした。図 4.2.4-5 に伝熱解析に用いた FEM モデル図を示す。図中の赤線は、ガラス固化体キャニスタ内のガラス上面位置を表している。応力解析においては、4.2.7 項の伝熱解析結果で後述する通り、ガラス固化体キャニスタの温度上昇は僅かであり、ガラス固化体キャニスタの応力変化は軽微と考えられるため、オーバーパックのみのモデルで解析を行った。

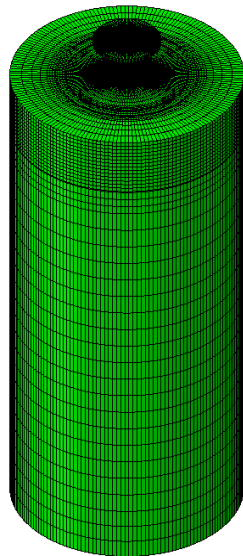


(a) ガラス固化体キャニスタ[3]
(日本原燃(株)仕様)

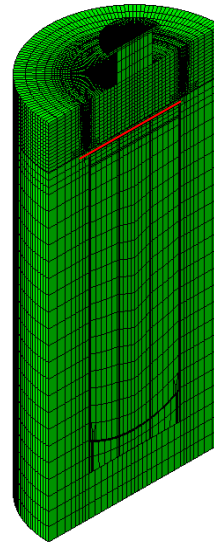


(b) オーバーパック[4]
(資源エネルギー庁 地層処分
技術調査等事業の検討仕様)

図 4.2.4-4 解析に用いたガラス固化体、オーバーパック形状図



(a) モデル全体図



(b) 1/2 断面図

図 4.2.4-5 伝熱解析用 FEM モデル

4.2.5 解析条件の設定

(1) 解析条件（燃焼解析）

オーバーパック定置装置は電動式とし、モータの電力は 1300kWh の電池から供給されると仮定した。Larsson ら[15]の研究によれば、Li-ion 電池の全発熱量は 28～75kJ/Wh と仮定できる。従って、定置装置の全発熱量は(28～75kJ/Wh)*1300kWh = 36～98GJ となる。又、最大の発熱率は 110～490W/Wh と報告されるため、定置装置の場合、最大発熱率は 143～637MW となるが、Li-ion 電池が一度に燃えるのではないため、100MW を超えないと仮定した。Ingason[16]は様々な火災について発熱量の時系列データを調査し、表 4.2.5-1 に示す定数を用いた数式 4.2.5-1～数式 4.2.5-3 によって発熱率 HRR(t)の時間による変化を表現できている。そこで、トンネル火災でよく適応される ZTV-ING や RABT の曲線[17]の火災の立ち上がり時間（約 5 分）と同じになる曲線係数セット「nr4」を用いてバッテリーからの全発熱量 $E_{tot}=100GJ$ の発熱率曲線を作成した（図 4.2.5-1）。

$$HRR(t) = HRR_{max}(n_1 r_1 (1 - e^{-k_1 t})^{n_1 - 1} e^{-k_1 t} + n_2 r_2 (1 - e^{-k_2 t})^{n_2 - 1} e^{-k_2 t})$$

(数式 4.2.5-1)

但し、

$$k_1 = \frac{HRR_{max}}{E_{tot}} (r_1 + \eta r_2)$$

(数式 4.2.5-2)

$$k_2 = \frac{HRR_{max}}{E_{tot}} \left(\frac{r_1}{\eta} + r_2 \right)$$

(数式 4.2.5-3)

上式における各量の単位は発熱率 HRR 及び最大発熱率 HRR_{max} は[MW]、全発熱量 E_{tot} は[MJ]、時間 t は[sec]である。定数 $\eta=10/7$ とされている。

バッテリーの燃焼有効面積は、10.8m² であることから 1 m²当たりの最大発熱率は 9259.3kW と算出される。FDS は発熱曲線を最大発熱率で規格した時系列データとして与えた（表 4.2.5-2）。

坑道は換気が 0.5m/s（ケース 1A）又は、2m/s（ケース 1B,ケース 2）の流速で左から入って、定置装置や処分孔上を通過して右から出る（図 4.2.4-1）。入ってくる空気は圧力 101.3kPa、温度 30℃である（第 4.2.2 節）。

表 4.2.5-1 発熱曲線（数式 4.2.5-1～3）における定数（Ingason[16]による）

Curve nr	n_1	n_2	r_1	r_2
1	1.5	4.757	1.654	1.530
2	2	6.495	1.894	1.612
3	3	9.710	2.135	1.730
4	4	12.220	2.231	1.741
5	5	14.610	2.290	1.760
6	6	16.865	2.330	1.774
7	7	19.040	2.360	1.788
8	8	20.980	2.376	1.789
9	9	22.835	2.387	1.789
10	10	24.675	2.398	1.792

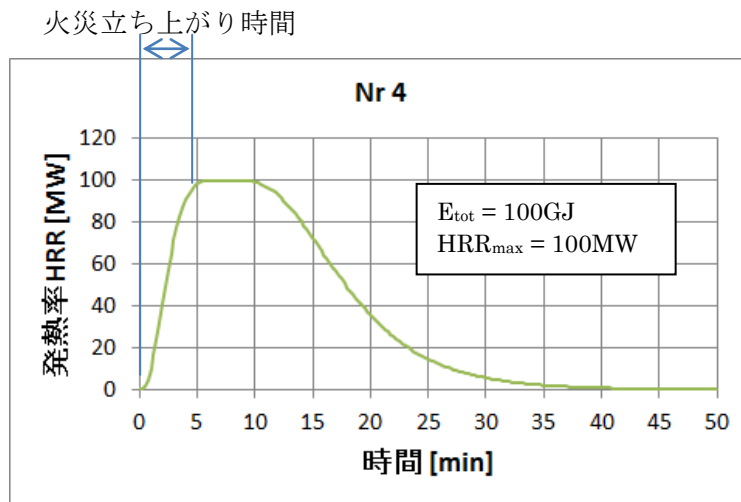


図 4.2.5-1 オーバーパック定置装置火災における発熱率（数式 4.2.5-1 による）

表 4.2.5-2 発熱曲線の近似（図 4.2.5-1；放出量は 100MW の倍数）

時刻 [sec]	放出量 [MW]	時刻 [sec]	放出量 [MW]	時刻 [sec]	放出量 [MW]
80	0.0	105	5.0	120	10.0
150	24.0	210	0.570	270	8.3
315	93.0	360	98.0	405	100.0
660	100.0	765	94.0	855	86.0
1215	40.0	1290	33.0	1455	20.0
1650	11.0	1860	5.6	2055	3.0
2250	1.6	2445	0.8	2850	0.0

(2) 解析条件（伝熱解析／応力解析）

FDS を用いた燃焼解析結果のうち、オーバーパック外面からの熱流束の時刻歴データ（火災発生から 3,000 秒まで）を伝熱解析における熱境界条件として用いた。燃焼解析で得られたオーバーパック外面の熱流束の時刻歴データは、4.2.7 項で後述する。火災発生から 3,000 秒以降については、雰囲気温度が 60℃から 7,000 秒（火災発生から 10,000 秒）かけて 30℃に戻ると仮定して伝熱解析を行った。また、伝熱解析における初期状態は、ガラス固化体の発熱を考慮し、雰囲気温度を 30℃として行った定常伝熱解析の結果得られた温度分布を用いた。

応力解析については、上述した伝熱解析結果を熱荷重として与え、次項で詳述する物性値を用いた弾塑性解析を実施した。また、オーバーパックの応力解析においては、最初のステップでオーバーパック蓋部溶接において生じる残留応力分布を初期応力として与え、その後火災による入熱を考慮した解析を行った。

図 4.2.5-2 にオーバーパックの応力解析においてオーバーパックに与えた初期残留応力分布[18]を示す。

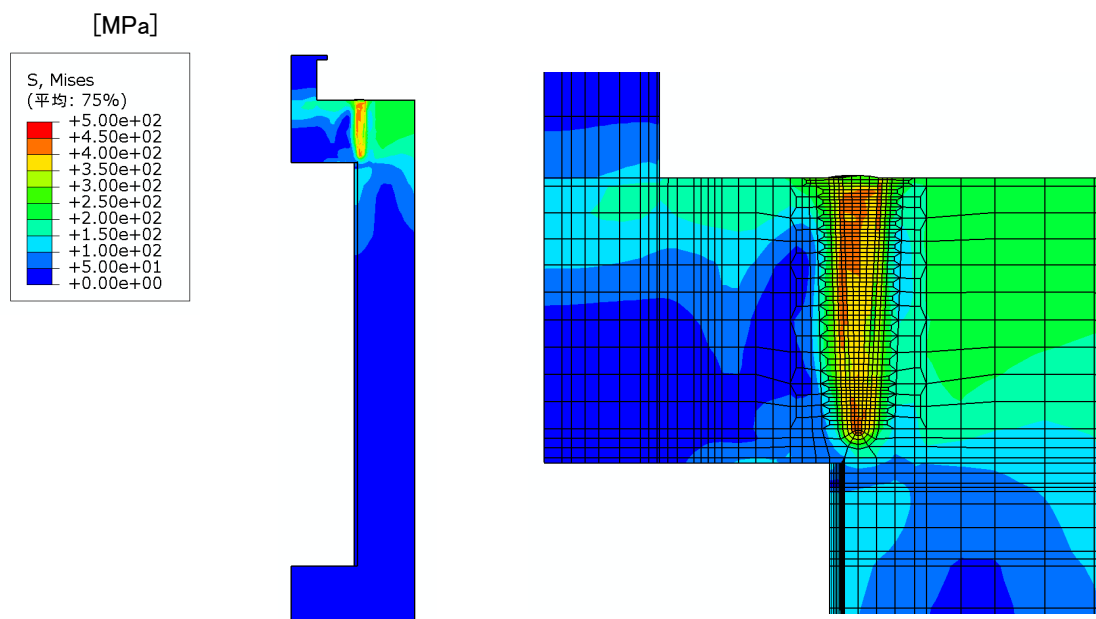


図 4.2.5-2 応力解析時にオーバーパックに与えた初期残留応力分布[18]

4.2.6 構成要素の物性値の設定

(1) 物性値の設定（燃焼解析）

燃焼解析に用いた物性値を表 4.2.6-1 に示す。緩衝材の熱拡散率（表 4.2.6-2）は種類（ブロック、ペレット）、状態（乾燥、飽和度 85%）、温度によって変わることが、平成 25 年度の実験でわかっている。オーバーバックに対する一番厳しい条件での健全性を確認するため、各温度の最大値の熱拡散率を用いることとした。

表 4.2.6-1 燃焼解析に用いた物性値

項目	単位	岩盤		コンクリート		緩衝材		オーバーバック		ガラス固化体キャニスタ		定置装置	
		温度 [°C]	値	温度 [°C]	値	温度 [°C]	値	温度 [°C]	値	温度 [°C]	値	温度 [°C]	値
密度	kg/m ³		2200		2200		1600		7840		7810		7740
熱容量	J/kg K		1400	<100	900	20	635		*)		*)	26.85	499
				100	900	90	149					126.85	511
				200	1000	1000	175					326.85	556
				400	1100							526.85	620
				>400	1100							726.85	644
熱伝導率	W/m K		2.2	20	1.95	20	1.710		*)		*)	26.85	16.0
				500	1.04	90	0.410					126.85	16.5
				700	0.81	1000	0.473					326.85	19.0
				1000	0.62							526.85	22.5
				1400	0.67							726.85	25.7
心く射率	—		0.9		0.9		0.88		*)			0.93	

*) 表 4.2.6-3 による。

参考文献：岩盤[8]、コンクリート[19][20]、緩衝材[21][22][23]、オーバーバック搬送・定置装置[24][25]

表 4.2.6-2 緩衝材の熱拡散率

温度 [°C]	ブロック (dry)	ブロック (飽和度85%)	ペレット (dry)	ペレット (飽和度85%)	燃焼解析
20	1.33E-06	1.68E-06	6.63E-07	1.61E-06	1.68E-06
60	1.50E-06	1.53E-06	1.07E-06	1.64E-06	1.70E-06
90	1.72E-06	1.26E-06	1.05E-06	1.25E-06	1.72E-06
500	1.64E-06		1.60E-06		1.71E-06
1000	1.56E-06		1.69E-06		1.69E-06

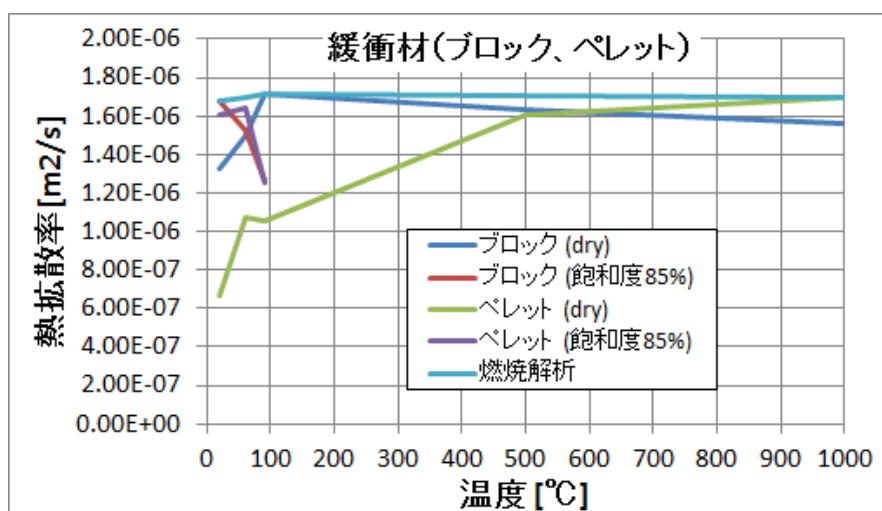


図 4.2.6-1 緩衝材の熱拡散率

(2) 物性値の設定 (伝熱解析/応力解析)

1) 伝熱解析

ガラス固化体キャニスタおよびオーバーパックの伝熱解析に用いたガラス、キャニスタ (SUS304L)、オーバーパック (SF340A) および空気の熱物性値を表 4.2.6-3 に示す。

表 4.2.6-3 伝熱解析に用いた熱物性値

項目	単位	ガラス		キャニスタ内 上部空気層		キャニスタ (SUS)		キャニスタ/OP間 空気層		OP (SF340A)		OP外側 空気層	
		温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値	温度 (°C)	値
ふく射率	-	-	0.9	-	-	-	0.45	-	-	-	0.56	-	-
熱伝導率	kW/m・K	26.85	1.10E-03	26.85	2.61E-05	26.85	1.60E-02	26.85	2.61E-08	20.00	4.98E-02	-	-
		126.85	1.24E-03	126.85	3.31E-05	126.85	1.65E-02	126.85	3.31E-08	100.00	4.96E-02	-	-
		226.85	1.37E-03	226.85	3.95E-05	326.85	1.90E-02	226.85	3.95E-08	200.00	4.84E-02	-	-
		326.85	1.49E-03	326.85	4.56E-05	526.85	2.25E-02	326.85	4.56E-08	400.00	4.32E-02	-	-
		-	-	426.85	5.13E-05	726.85	2.57E-02	426.85	5.13E-08	600.00	3.86E-02	-	-
		-	-	526.85	5.69E-05	-	-	526.85	5.69E-08	800.00	3.24E-02	-	-
熱伝達率	kJ/s・m ² ・K	-	-	1.00E+02	-	-	-	1.00E+02	-	-	-	26.85	2.73E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	126.85	6.63E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	226.85	7.88E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	326.85	8.65E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	426.85	9.08E-03
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	526.85	9.40E-03
比熱	kJ/kg・K	26.85	0.73	26.85	1.007	26.85	0.499	26.85	1.007	20.00	0.463	-	-
		126.85	0.89	126.85	1.015	126.85	0.511	126.85	1.015	100.00	0.479	-	-
		226.85	1.02	226.85	1.031	326.85	0.556	226.85	1.031	200.00	0.504	-	-
		326.85	1.12	326.85	1.052	526.85	0.62	326.85	1.052	300.00	0.538	-	-
		-	-	426.85	1.076	726.85	0.644	426.85	1.076	400.00	0.584	-	-
		-	-	526.85	1.099	-	-	526.85	1.099	500.00	0.638	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	600.00	0.713	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	700.00	0.875	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	730.00	0.964	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	735.00	2.117	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	765.00	0.975	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	800.00	0.9	-	-
発熱量	kJ/s・m ³	-	3.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		20.00	2.23E+03	26.85	1.176	26.85	7.92E+03	26.85	1.176	20.00	7.84E+03	-	-
密度	kg/m ³	-	-	126.85	0.882	126.85	7.89E+03	126.85	0.882	-	-	-	-
		-	-	226.85	0.705	326.85	7.81E+03	226.85	0.705	-	-	-	-
		-	-	326.85	0.589	526.85	7.73E+03	326.85	0.589	-	-	-	-
		-	-	426.85	0.504	726.85	7.64E+03	426.85	0.504	-	-	-	-
		-	-	526.85	0.441	-	-	526.85	0.441	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- : 日本機械学会:伝熱工学資料 改訂第4版
- : 原環センター:平成13年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査-遠隔操作技術高度化調査-(1/2)
(熱伝導率:800°Cまでの実験値、比熱:900°Cまでの実験値)
- または、原環センター:平成14年度 地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査(1/2)
(熱伝導率:800°Cより高温の外挿方法、比熱:900°Cより高温の外挿方法)
- : 安全側の評価となるよう溶接入熱がガラス固化体に伝わりやすいように十分大きい値を設定
- : 垂直円筒の熱伝達率の計算式から計算
- : 核燃料サイクル開発機構:第2次取りまとめ 分冊2
- : 一般的な値を使用(ガラス:ホウケイ酸ガラス、OP:炭素鋼(代表値))

2) 応力解析

伝熱解析結果で後述する通り、ガラス固化体キャニスタの温度上昇は僅かであり、応力変化は軽微と考えられるため、オーバーパックのみのモデルで解析を行った。オーバーパックの応力解析に用いた SF340A の物性値[13]を図 4.2.6-2~図 4.2.6-4 に示す。SF340A のポアソン比は 0.3 で一定とした。

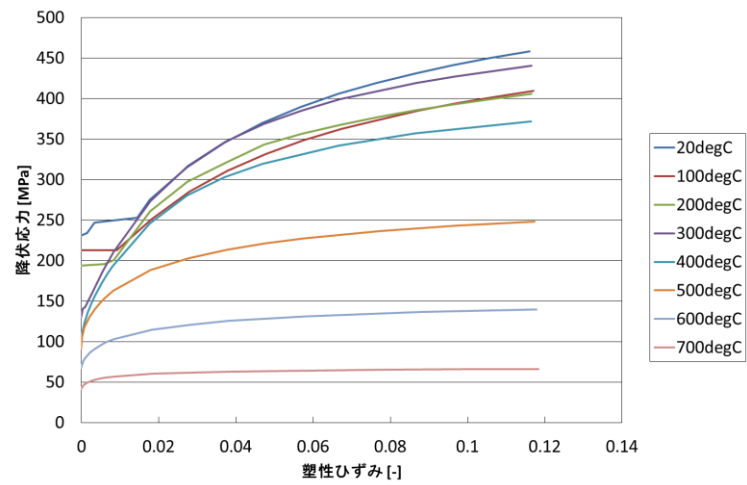
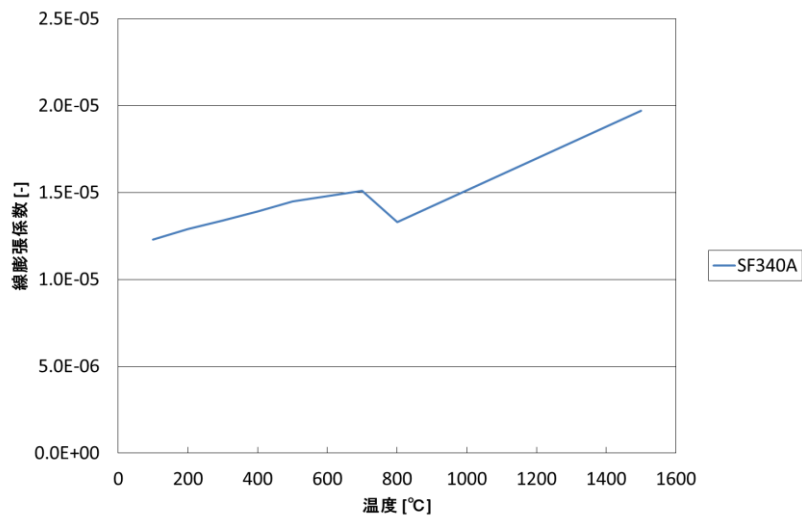
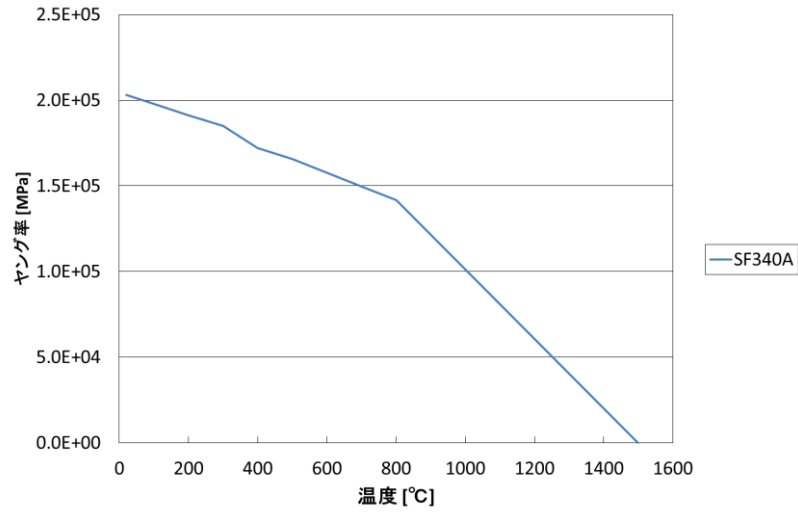


図 4.2.6-4 応力解析に用いた物性値 (応力-ひずみデータ)

4.2.7 解析結果

(1) 解析結果（燃焼解析）

入熱を考慮したオーバーパックやキャニスタの応力解析に必要な熱流束を求めるために燃焼解析を実施した。

1) 緩衝材設置前（ケース 1 A：風速 0.5m/s）

トンネル工事では可燃性ガスの湧出が想定され、その湧出量が不確定の場合、換気の風速を約 0.5m/s 以上確保することになっており、その条件下で解析を行った。

解析の結果、図 4.2.7-1 に示す発熱量が得られた。発熱量の立ち上がりは風速 2.0m/s（図 4.2.7-7）と同じだが、最大の発熱量が Li-ion 電池の火災で想定した半分の 50MWにとどまり、その状態が約 800 秒間続く結果となった。理由としては酸素の供給が少なく、燃焼しきれずに燃料となるエチレンが下流側へ流出していると考えられる。その 900 秒後からは発熱量が下がり始まり、1200 秒以降は著しく減る。

図 4.2.7-1 に示す時刻①～④については発熱量、ガス温度及びガス流速の分布の詳細を示す（図 4.2.7-2～図 4.2.7-5）。

表 4.2.7-1 緩衝材設置前の解析結果（ケース 1A）

時間	解析結果
150 秒後 (図 4.2.7-2)	坑道の天井付近に沿って下流、上流の方向へ高温域が広がっていき、左側の流入口付近でも 200℃程度まで上がる。発熱は定置装置の下流のみではなく、定置装置の上でも見られる。流速分布をみても、流入口付近でガスの流れが 2～3m/s 程度となる場所が現れている。計算領域を上流側の方向に 10m ほど広げても、分布を広げた分だけ左のほうに拡大し、逆流が広範囲に及ぶことがわかる（本章は拡大した計算領域の結果のみ示す）。
275 秒後 (図 4.2.7-3)	火炎（発熱の高い面）がオーバーパックの定置孔の下流までに下がっており（図 4.2.7-3a）、定置孔内の温度が 700℃程度まで上がってしまう。但し、定置孔の下流は発熱の領域や高温領域は天井の近い領域に限られており、ケース 1 B のように坑道の全断面に広がらない。
500 秒後	火炎は火炎が定置装置の約 5m 下流で安定しており（図 4.2.7-4）、そこから下流の発熱分布や温度分布は図 4.2.7-3 と変わらない。火災が終わるところは火炎が再び定置装置に戻る最中に定置孔を通る（図 4.2.7-5）。そのときは可燃ガスが孔内でも燃えてしまい、孔内の温度上昇を起こす。

オーバーパックへの熱流束は上記の火災特徴によって影響を受ける。図 4.2.7-6 に示すように全ての計測点において、275 秒後および 1,600 秒後に二つのはっきりしたピークが現れている。図 4.2.7-3 および図 4.2.7-5 で確認できるように、その時点では炎が処分孔内で存在している状態である。

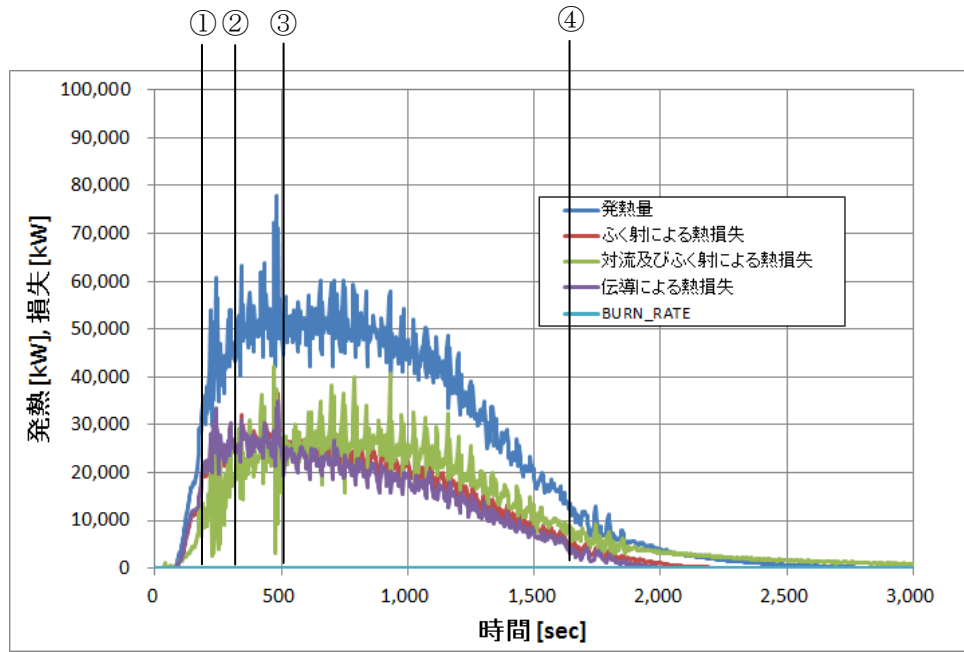


図 4.2.7-1 熱流束の時間による変化 (ケース 1A)

(フレーム① : 150 秒 ; ② : 275 秒 ; ③ : 500 秒 ; ④ : 1,615 秒)

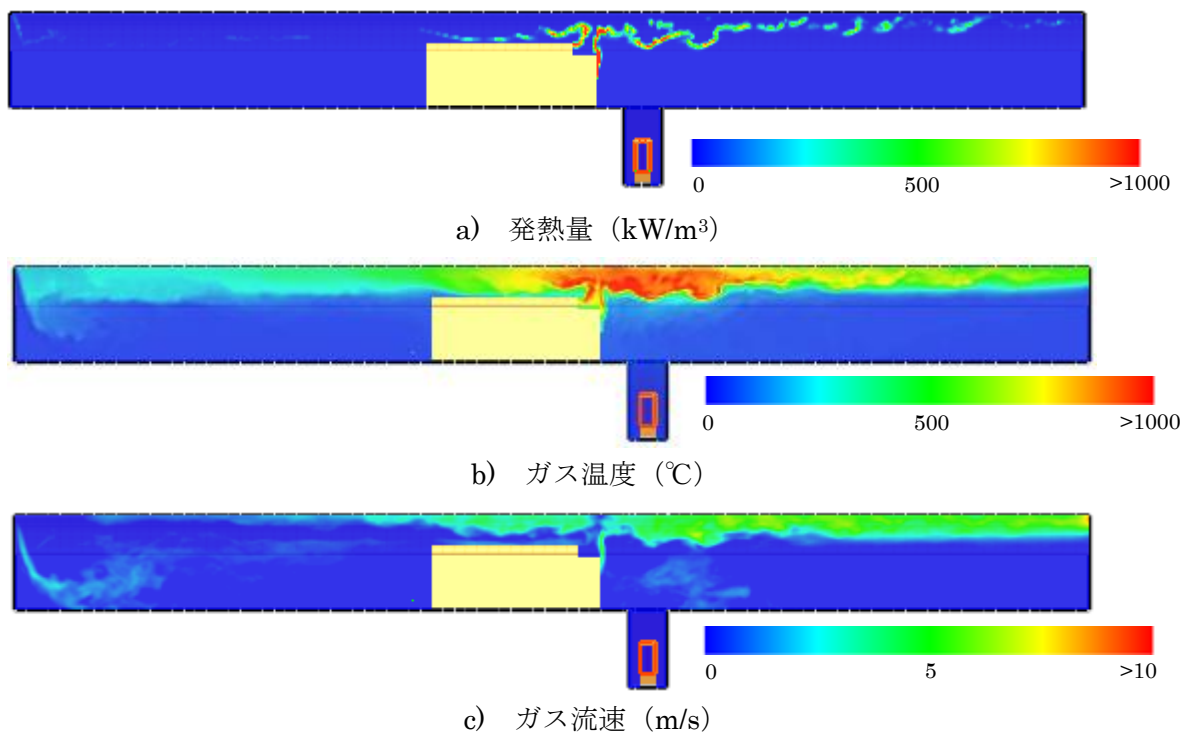


図 4.2.7-2 解析結果 (ケース 1A) : 時刻 150 秒

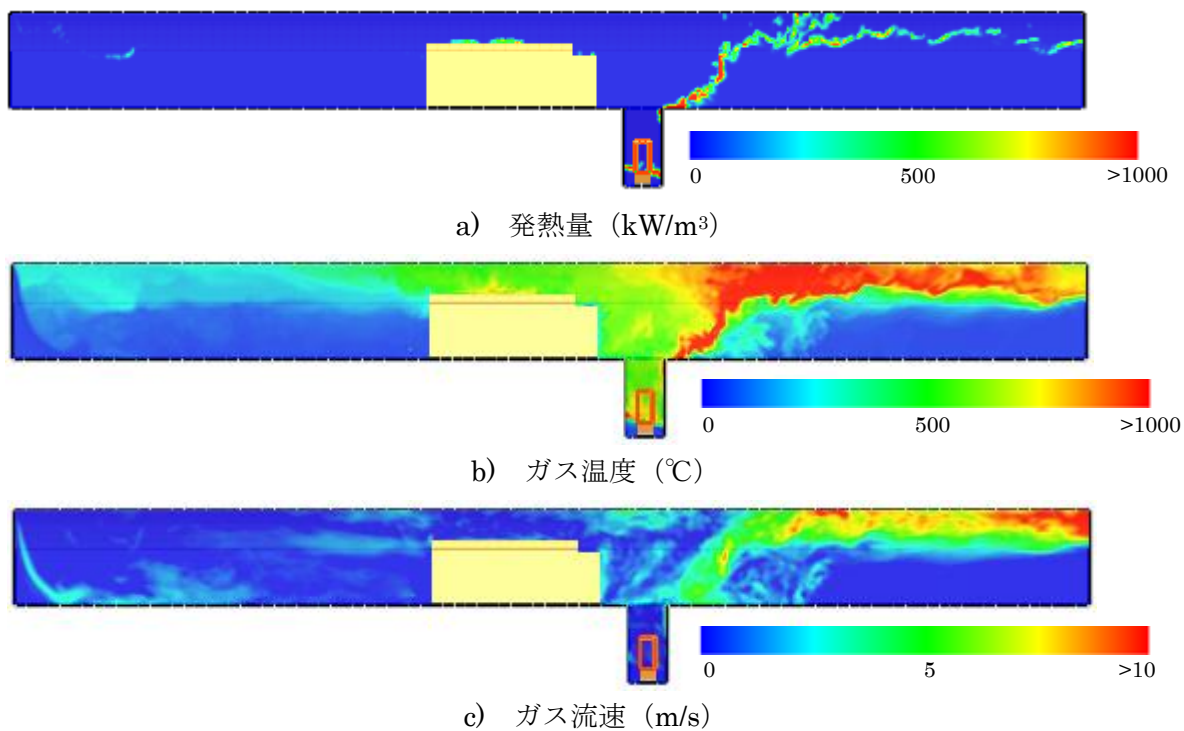


図 4.2.7-3 解析結果 (ケース 1A) : 時刻 275 秒

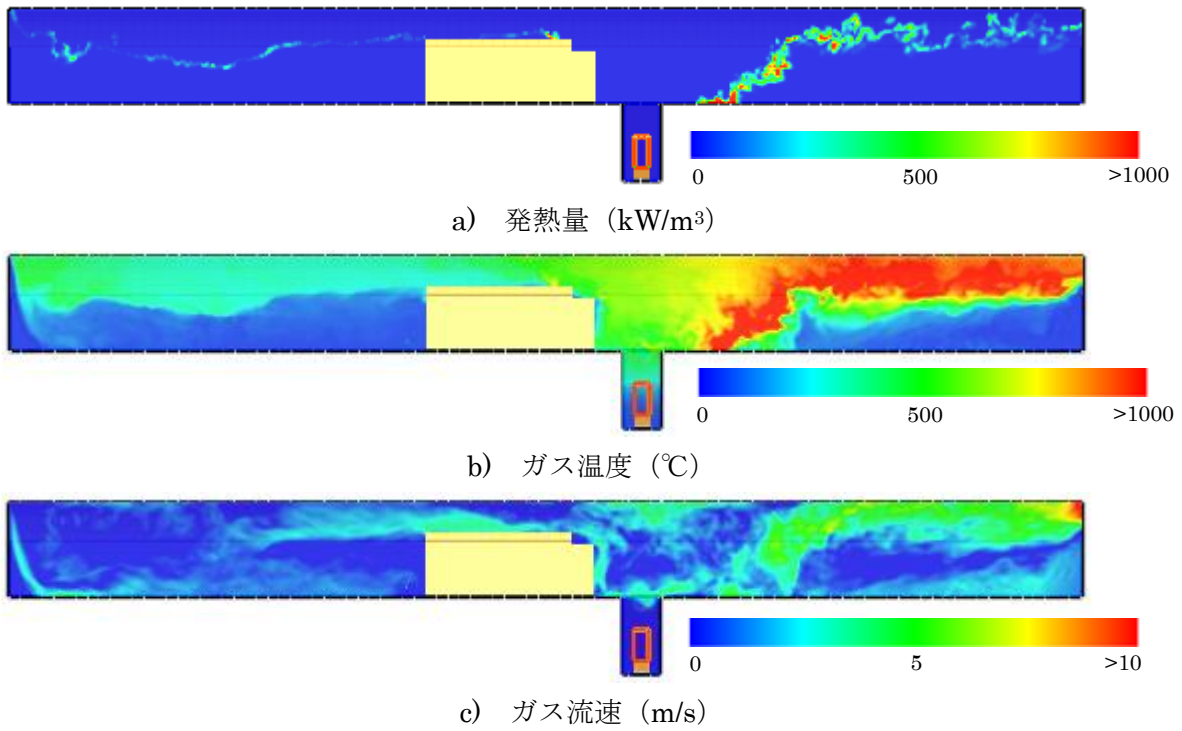


図 4.2.7-4 解析結果 (ケース 1A) : 時刻 500 秒

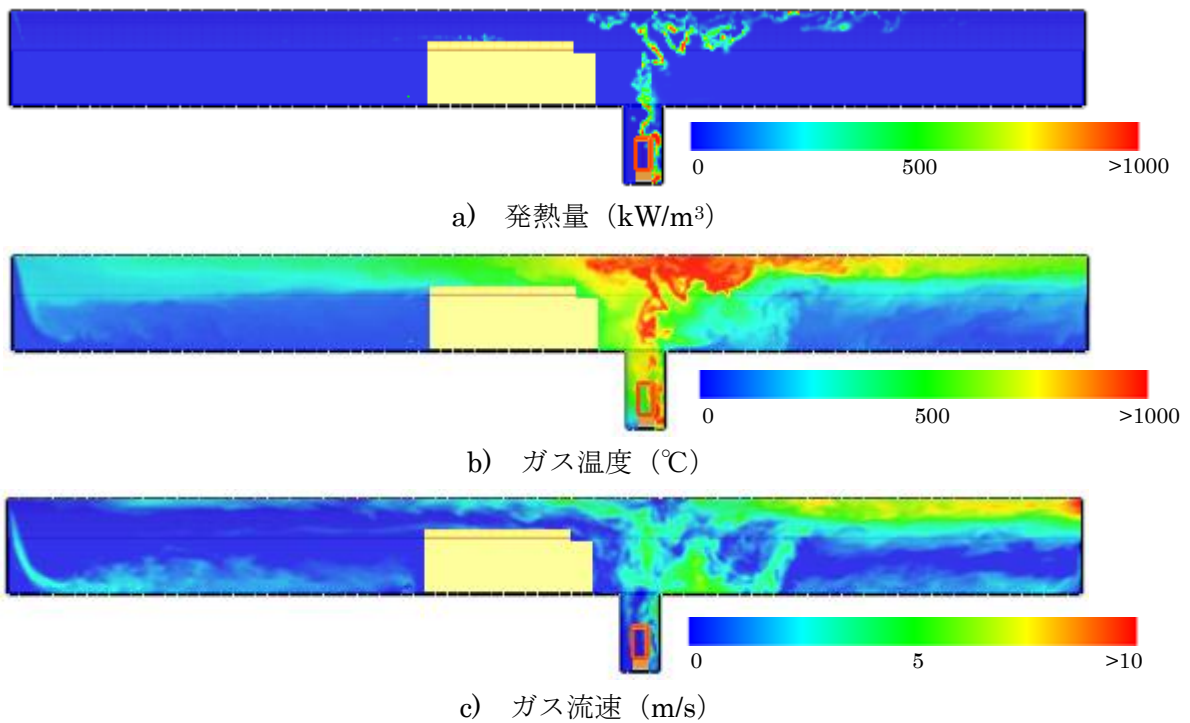


図 4.2.7-5 解析結果 (ケース 1A) : 時刻 1615 秒

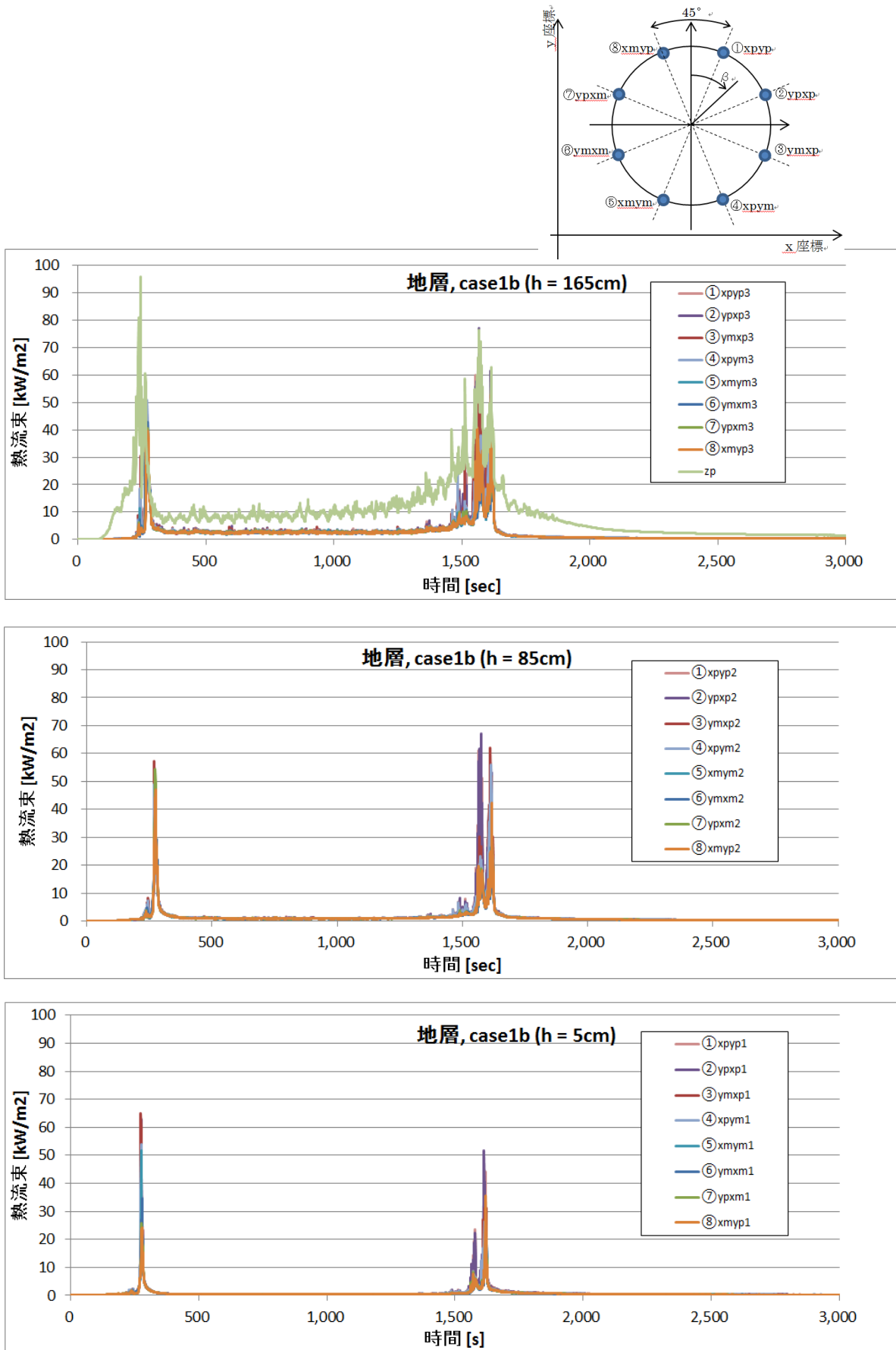


図 4.2.7-6 オーバーパックへの熱流束 (ケース 1A)

2) 緩衝材設置前（ケース1B）

トンネル内で火災が発生した場合、煙の逆流を抑える風速が約 2.0m/s となっており、その条件のもとでの解析を行った。坑道（計算領域）内の発熱量、又は、坑道（計算領域）からの熱損失量を図 4.2.7-7 に示す。発熱量（HRR）はおよそ 200～1,000 秒の間で激しい変化を示す。その期間中には発熱量が約 500 秒において平均で 80MW の最大値を持つ。輻射による熱損失はそれより早い段階で最大となることは、周囲の壁が加熱されてから一部の熱が坑道に返されるためと思われる。対流による熱損失、つまり、計算領域から出て行くガスが持っている熱エネルギーは約 700 秒にて最大となる。

第 4.2.3 節で述べたように、電池からの発熱はエチレン燃料の放出によって模擬している。図 4.2.7-8～図 4.2.7-11 においてエチレンの燃焼による発熱量、ガス温度及びガス流の速度を示す。また、それらの瞬時分布の時刻を図 4.2.7-7 において①から④までのマーカーで示す。

表 4.2.7-2 緩衝材設置前の解析結果（ケース1B）

時 間	解 析 結 果
① 200 秒後 (図 4.2.7-8)	火災による発熱率が立ち上がる最中であり、エチレンの燃焼反応が定置孔の下流までに広がっている。ガス温度は高温領域が発熱する範囲に限られている。
② 800 秒後 (図 4.2.7-9)	エチレンの反応は下流側の計算領域の境界まで続いている。局所的な酸素不足が原因であると思われる。ガス温度は高温領域がバッテリーから下流に向かって広がっている。定置孔内のガス温度も上がっている。
③ 1,200 秒後 (図 4.2.7-10)	完全燃焼によって発熱の領域が定置装置より下流の数メートルに限られている。ガス温度の高温領域も縮小している。但し、バッテリーの真上の壁近傍はバッテリーより上流でも高温となっている。これは輻射による加熱と思われる。
④ 1,700 秒後 (図 4.2.7-11)	可燃物が燃えきるに連れて発熱とともにガス温度も下がる。バッテリーの真上の壁温も 1200 秒の状態と比べて下がっている。

オーバーパックへの熱流束を図 4.2.7-12 に示す。頭部の熱流束（図 4.2.7-12 の zp）が側面より高いことがわかる。また、側面は周方向のどの高さ（h=5, 85, 165cm）においても 1 kW/m² 以内である。高さ方向の熱流束分布は加熱期間中（400～600 秒）に高くなるほど大きくなる（同じ周方向の位置①～⑧における熱流束 q は、(h=165cm) > (h=85cm) > (h=5cm) と言える）。火災の発熱が弱くなっていく期間中（1,200～1,800 秒）は、加熱中に熱流束が高かったところが逆に低くなる結果となった。なお、頭部（zp）の熱流束分布は、1,000～1,200 秒の後半において最大の 8.3kW となる。

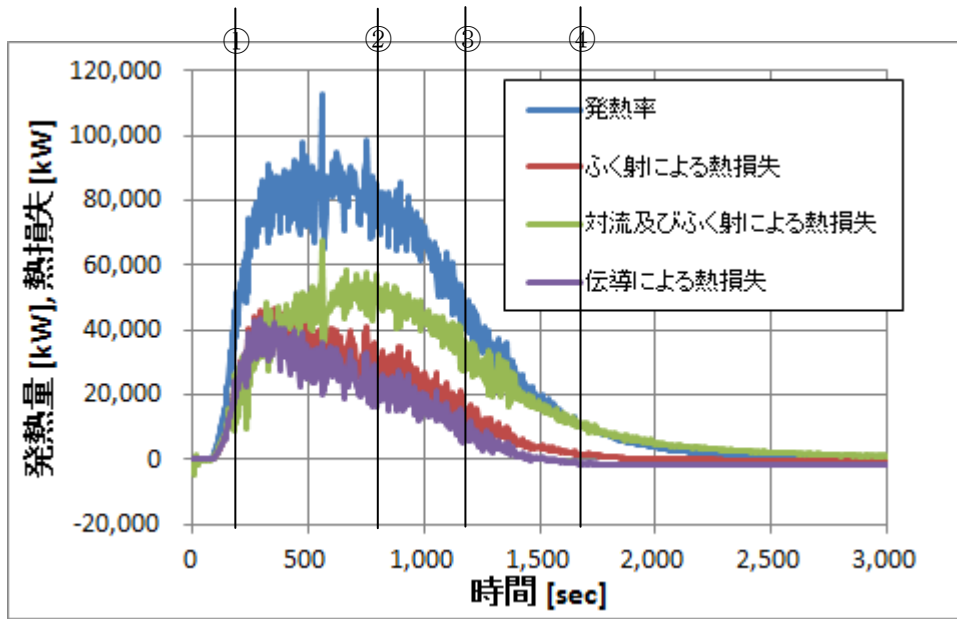


図 4.2.7-7 熱流束の時間による変化 (ケース 1B)
 (フレーム① : 200 秒 ; ② : 800 秒 ; ③ : 1200 秒 ; ④ : 1700 秒)

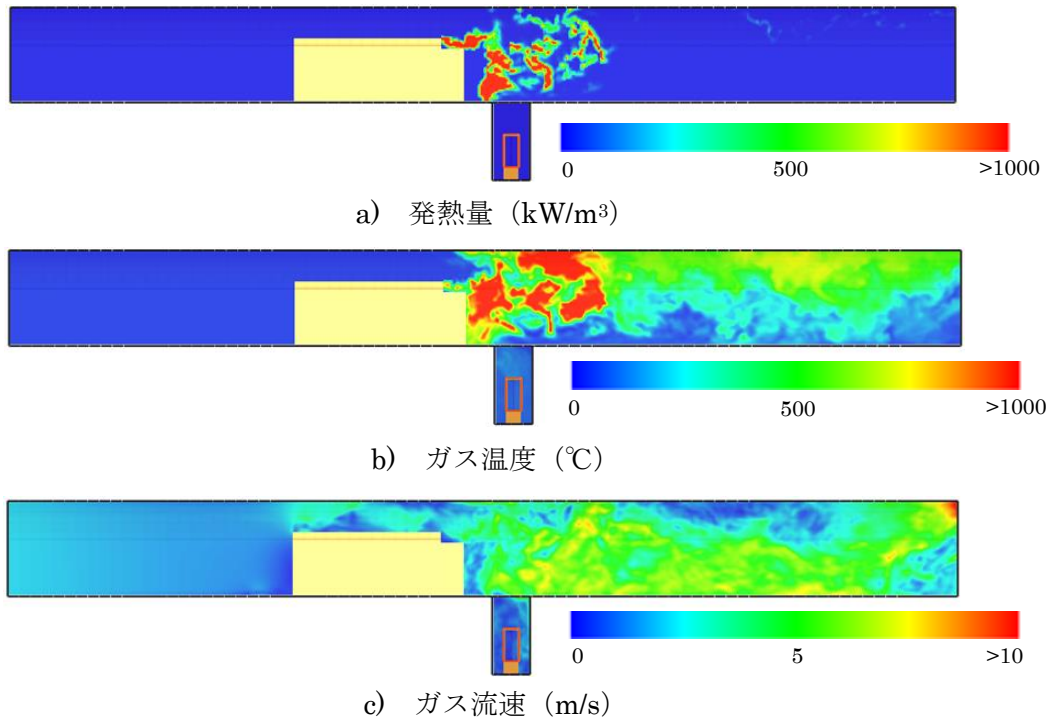


図 4.2.7-8 解析結果 (ケース 1B) : 時刻 200 秒

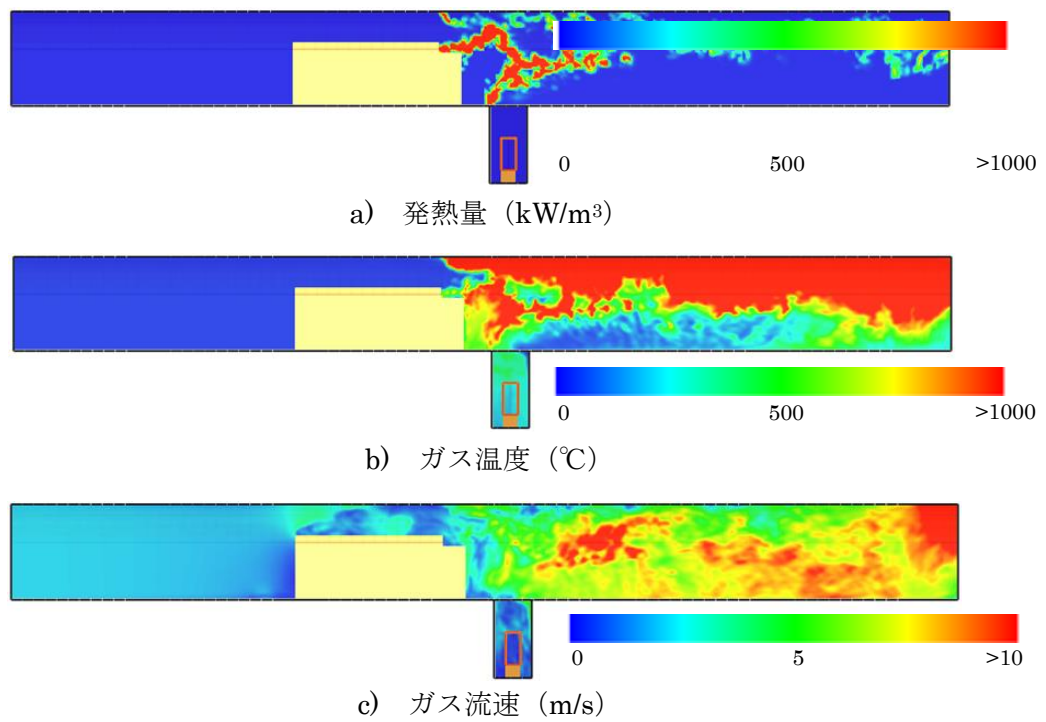


図 4.2.7-9 解析結果 (ケース 1B) : 時刻 800 秒

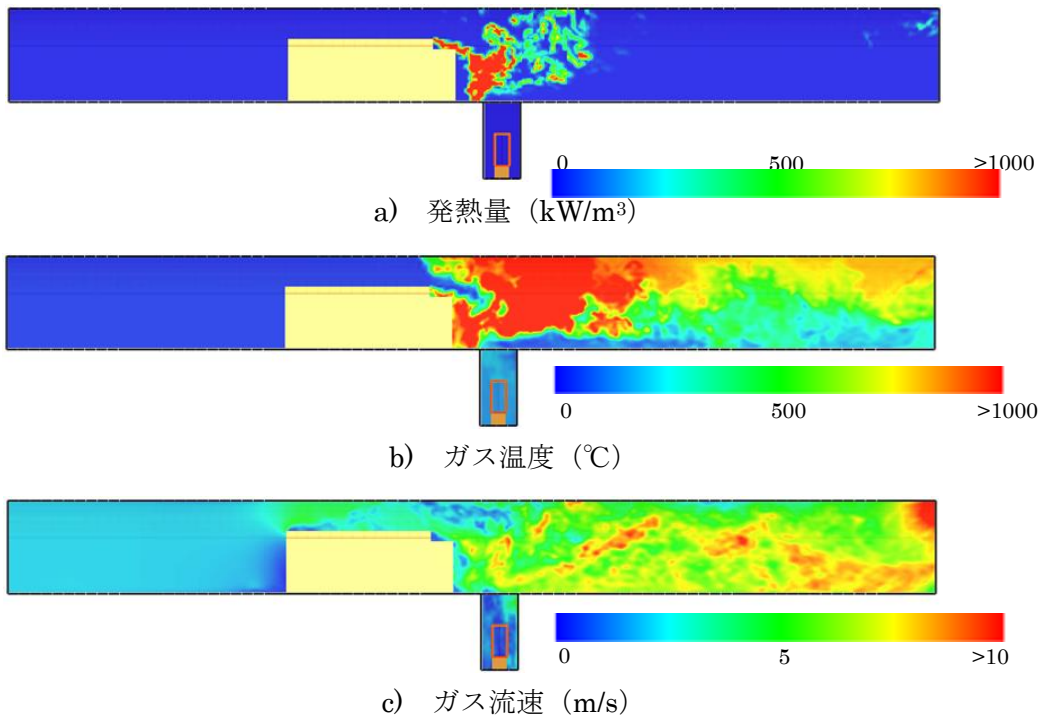


図 4.2.7-10 解析結果 (ケース 1B) : 時刻 1200 秒

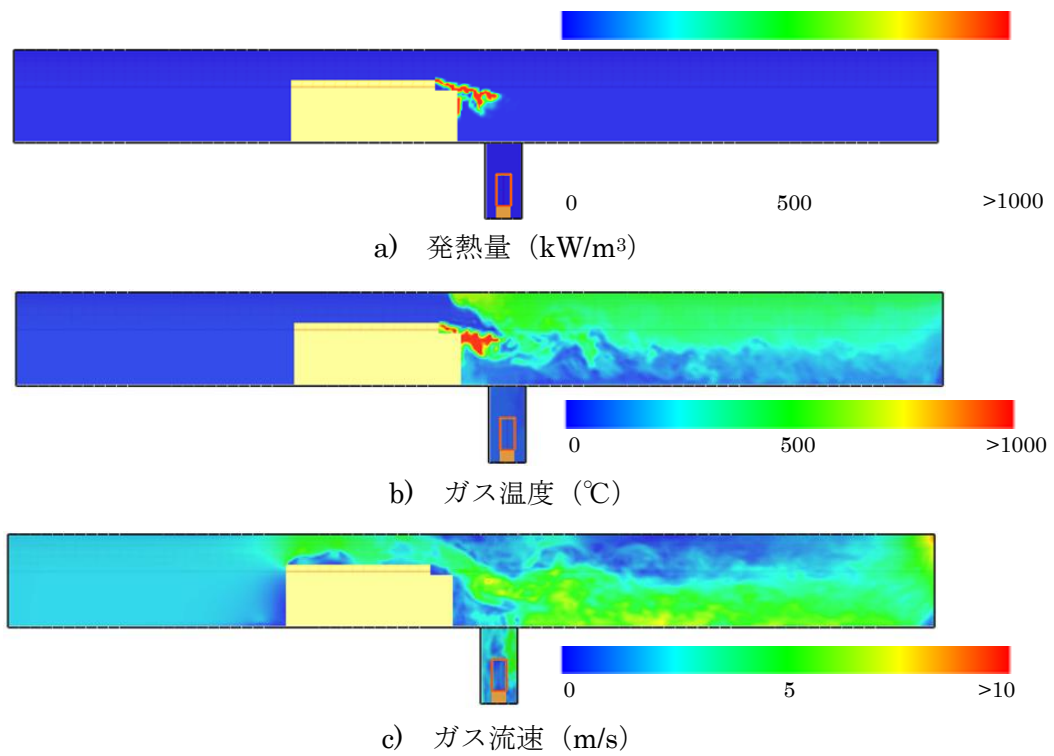


図 4.2.7-11 解析結果 (ケース 1B) : 時刻 1700 秒

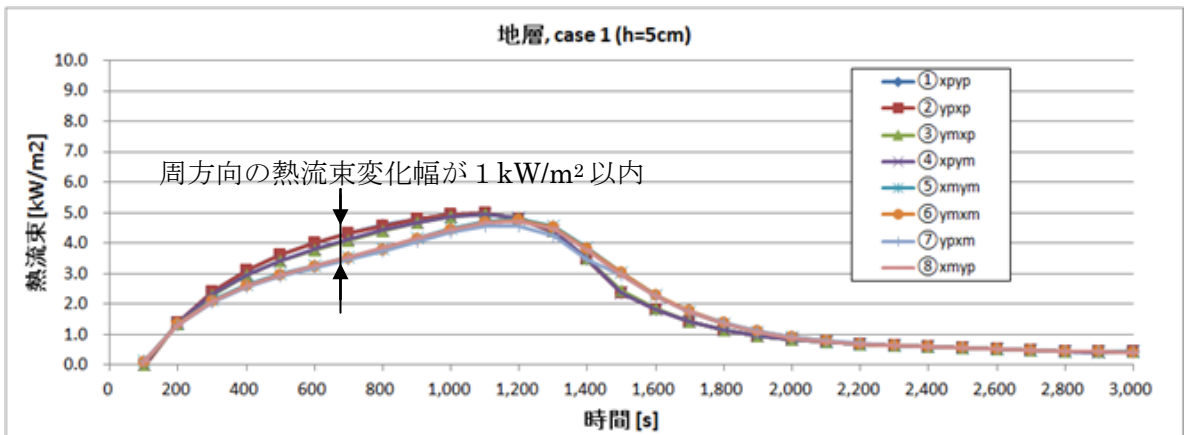
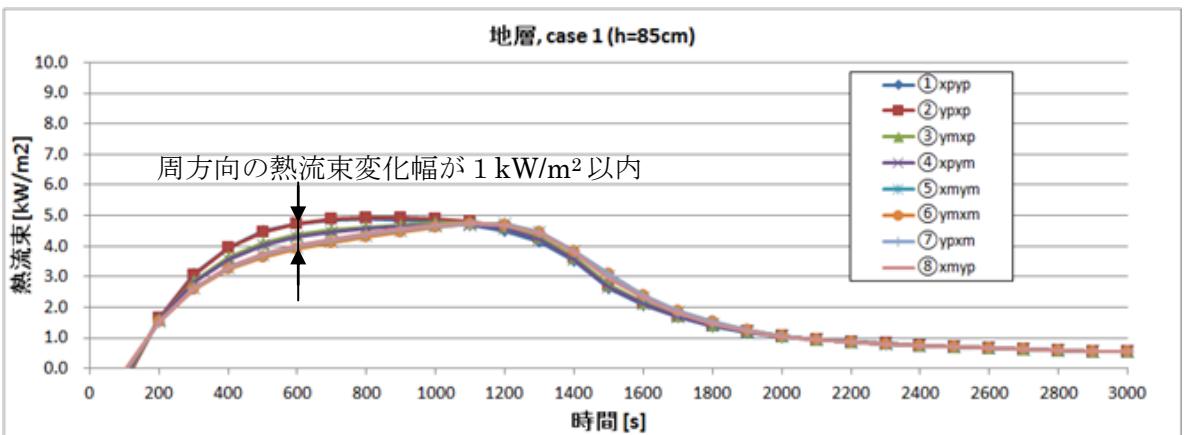
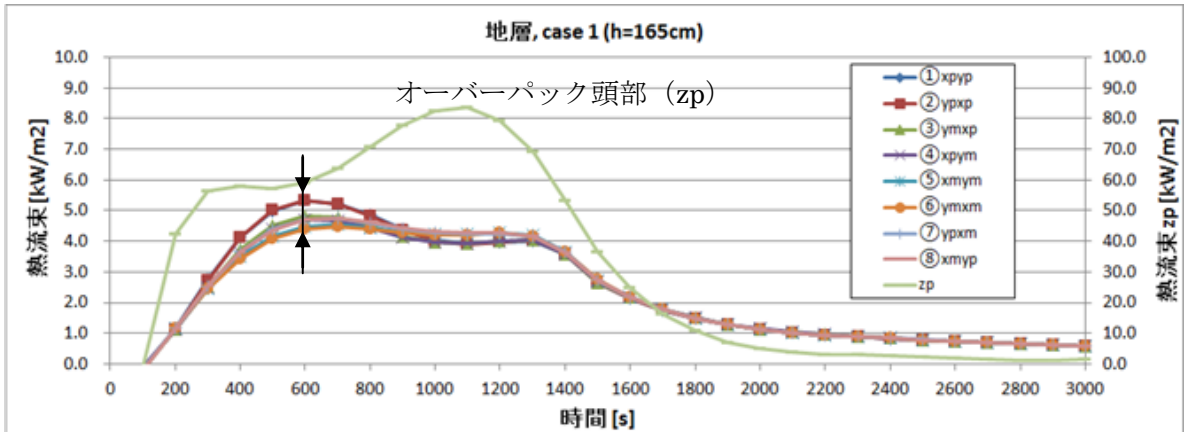
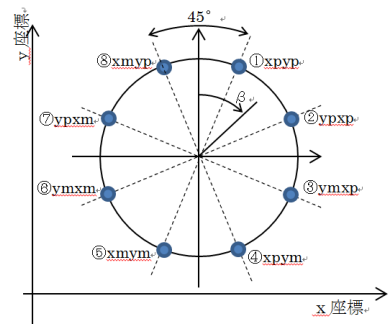


図 4.2.7-12 オーバーパックへの熱流束 (ケース 1B)

3) 緩衝材設置後（ケース2：風速 2.0m/s）

ケース2は火災の熱が間接的に緩衝材などを通してオーバーパックへ伝わるため、先ず火災による坑道の床への熱流束を求めた。FDSを用いて図 4.2.7-13 に示すように定置装置の下流 10m の範囲内で 1m×1m の面積（パネル）毎に熱流束の時間による変化を解析した。図 4.2.7-14 は時系列データの例としてパネル 3-3 における熱流束を示す。時間による変化が激しいことから、定量的な評価を行うために時系列データを積分し、総熱流速を算出した（表 4.2.7-3 の「総熱流束」=ガスから床への熱流束・床からガスへの熱流束）。5枚ある幅方向のパネル毎の熱流束を算出し、それを図化したものを

図 4.2.7-15 に示す。床への入熱は定置装置から 1.5～3.5m の範囲内で一番大きく、坑道の側面側のパネルより中央のパネルの入熱が大きいことが分かる。

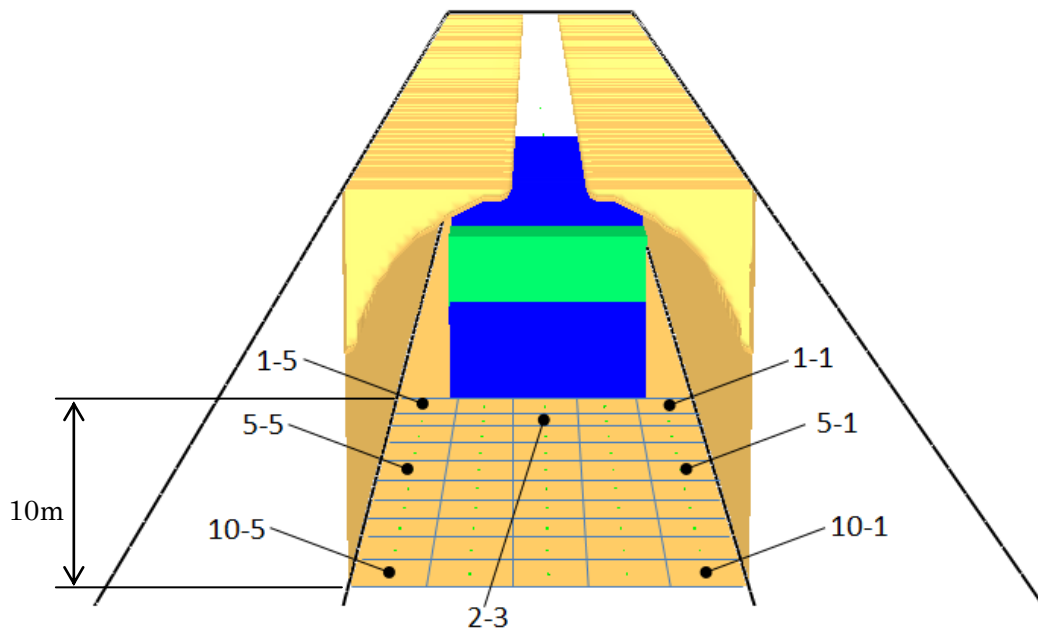


図 4.2.7-13 定置装置下流における床への熱流束評価について（パネル番号の定義）

伝熱解析を実施するため、燃焼解析（FDS）で求めた熱流束データを多項式で近似した結果を

図 4.2.7-16 に示す。1,500 秒過ぎてから熱流束が負となるのは、加熱された床が反対にガスを加熱することを意味する。この結果、表 4.2.7-3 に整理した熱流束の最小値も負となっている。

発熱量や熱損失の時間による変化はケース1B（図 4.2.7-7）と基本的には変わらない。瞬時の発熱量、ガス温度やガス流速（図 4.2.7-17～図 4.2.7-20）はケース1B（図 4.2.7-8～図 4.2.7-11）と異なるように見えるが、変化が激しいことにより瞬時的な分布が影響を受けていると考えられる。

緩衝材定置済み（完全施工）の状態ですべての床から連続的に入熱を受けた場合に、オーバーパッ

クが初めて温度の上昇が見られる時間を評価する方法として、一次元非定常伝導方程式（数式 4.2.7-1）を分析した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; z \geq 0$$

（数式 4.2.7-1）

上式中の κ （=熱伝導 / {密度 * 熱容量}）は熱拡散率[m²/s]を意味する。初期条件は $t=0$ のとき岩盤の温度 $T(z)$ がどこでも雰囲気温度 T_0 と等しく（ $T=T_0$ ）、深さ座標 z は地上が $z=0$ とする。本解析に限って数式 4.2.2-1 と異なり、 $z \rightarrow \infty$ において $T(z)=T_0$ とする。表面 $z=0$ における境界条件を熱流束とした場合、厳密解は z における熱流束 $q_s(z)$ が数式 4.2.7-2、 z における温度 $T(z)$ は数式 4.2.7-3 による[22]。

$$q = q_s \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \right\}$$

（数式 4.2.7-2）

但し、単位は熱流束 q [kW/m²]、座標 z [m]、時間 t [sec]である。

$$T = T_0 + \frac{2q_s\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) - \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$$T(z) = T_0 + \frac{2q_s\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\kappa t}\right) - \frac{z}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

（数式 4.2.7-3）

熱伝導率 k の単位は[W/m K]であり、温度上昇は深さや時間との複雑な関係で成り立っている。緩衝材の物性値（熱伝導率、熱容量）は温度によって変わるが、熱拡散率はほぼ一定である[21]。ここでは、表 4.2.6-1 の燃焼解析に用いた熱拡散率に近い 20°C における物性値を用いて、時間を 10, 48, 72 及び 120 時間において、深さ z における温度を図 4.2.7-21 に示す。また図 4.2.7-22 は、数式 4.2.7-3 の温度分布の深さ z と時間 t との関係を示す。図 4.2.7-21 に示すように、設定している最大熱流束 100kW/m² が 48 時間続いても、深さ 1.7m（オーバーパック上部相当）における温度が 30°C のままであると分かる。Li-ion 電池で想定した火災は約 40 分で消えるため、緩衝材中にあるオーバーパックは火災の影響を受けないと判断できる。

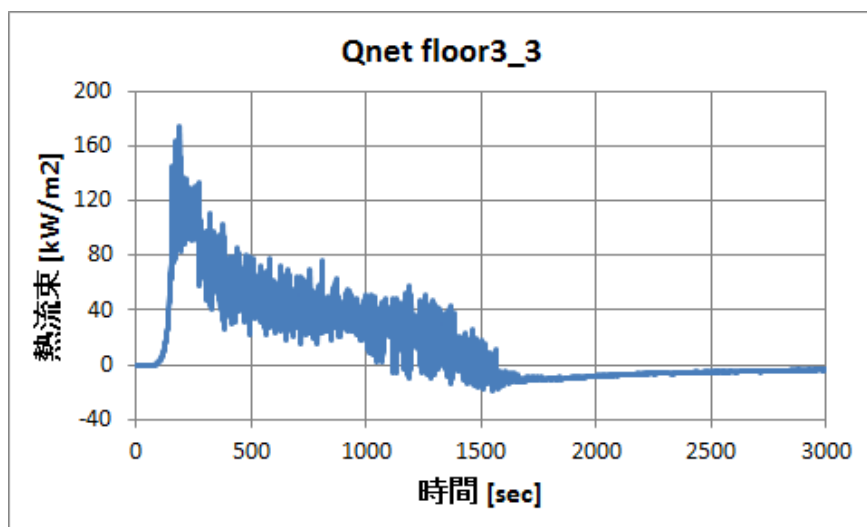


図 4.2.7-14 パネル 3-3 における熱流束の時間による変化

表 4.2.7-3 定置設置装置の下流床への全総熱流速及び熱流速 (HRR)

	距離	総熱流束	HRR,max	HRR,mean	HRR,min
	[m]	[kJ]	[kW/m ²]	[kW/m ²]	[kW/m ²]
Qnet 1	0 - 1	203793	98.6	13.6	-10.0
Qnet 2	1 - 2	232092	137.1	15.5	-16.7
Qnet 3	2 - 3	235353	145.6	15.7	-15.5
Qnet 4	3 - 4	234038	149.0	15.6	-17.7
Qnet 5	4 - 5	227236	145.6	15.1	-31.4
Qnet 6	5 - 6	217456	147.8	14.5	-37.7
Qnet 7	6 - 7	212563	146.4	14.2	-40.5
Qnet 8	7 - 8	203872	137.4	13.6	-41.5
Qnet 9	8 - 9	196823	134.7	13.1	-35.8
Qnet 10	9 - 10	193798	134.7	12.9	-34.4

*)総熱流束＝ガスから床への熱流束から床からガスへの熱流束を引いた量の積分値。

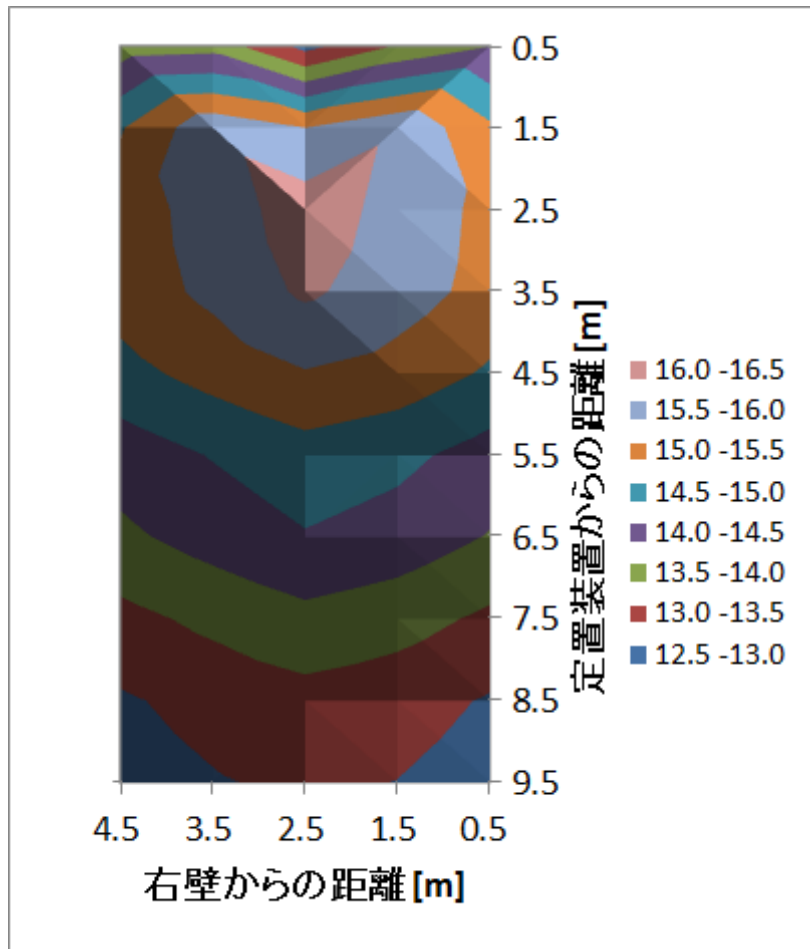


図 4.2.7-15 定置装置下流の床における熱流束 [kW/m²]

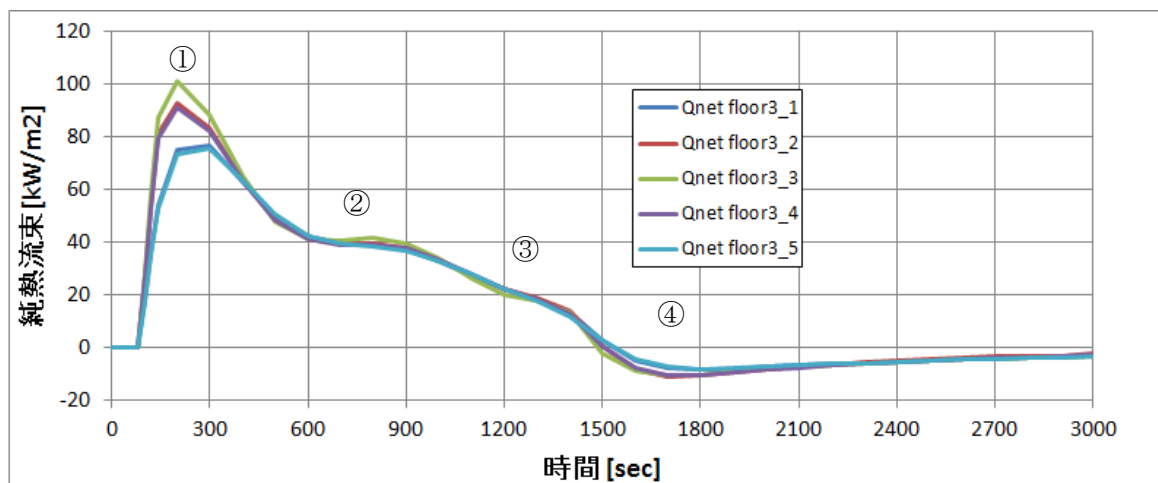


図 4.2.7-16 定置装置から 2.5m 下流における床への熱流束 (近似曲線)

(フレーム① : 200 秒 ; ② : 800 秒 ; ③ : 1200 秒 ; ④ : 1700 秒)

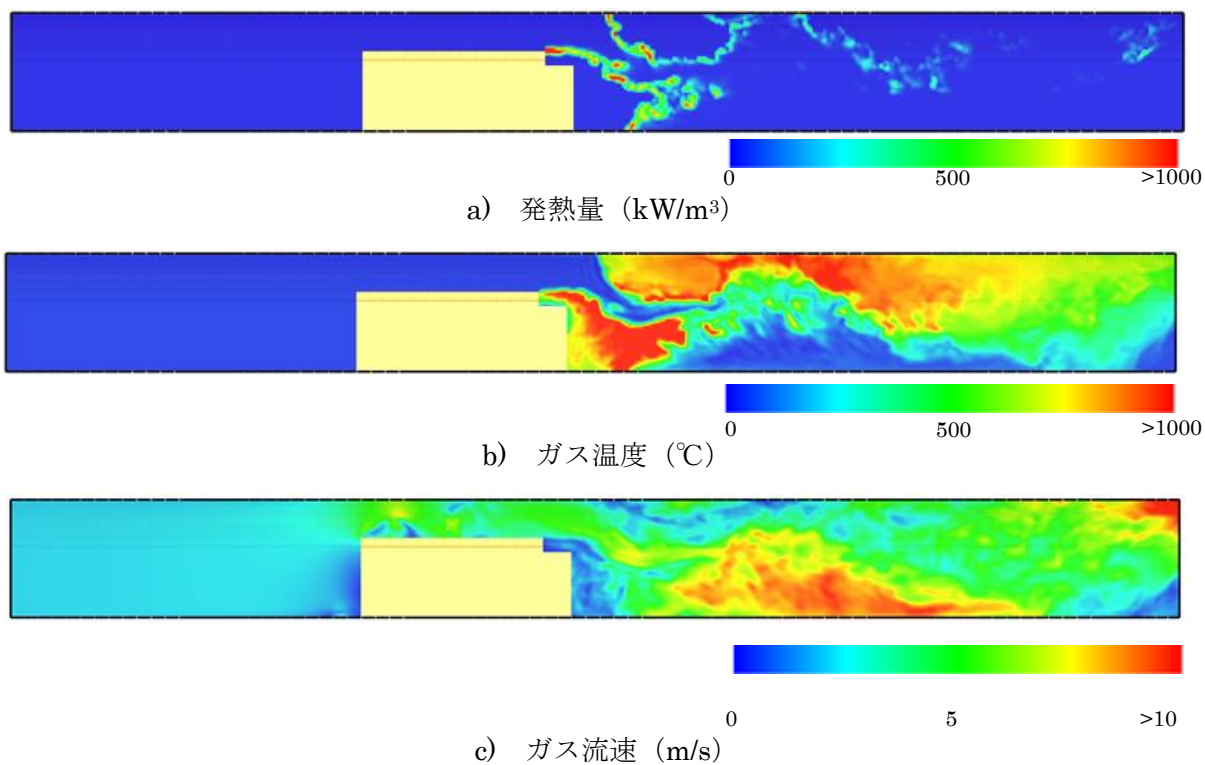


図 4.2.7-17 解析結果 (ケース 2) : 時刻 200 秒

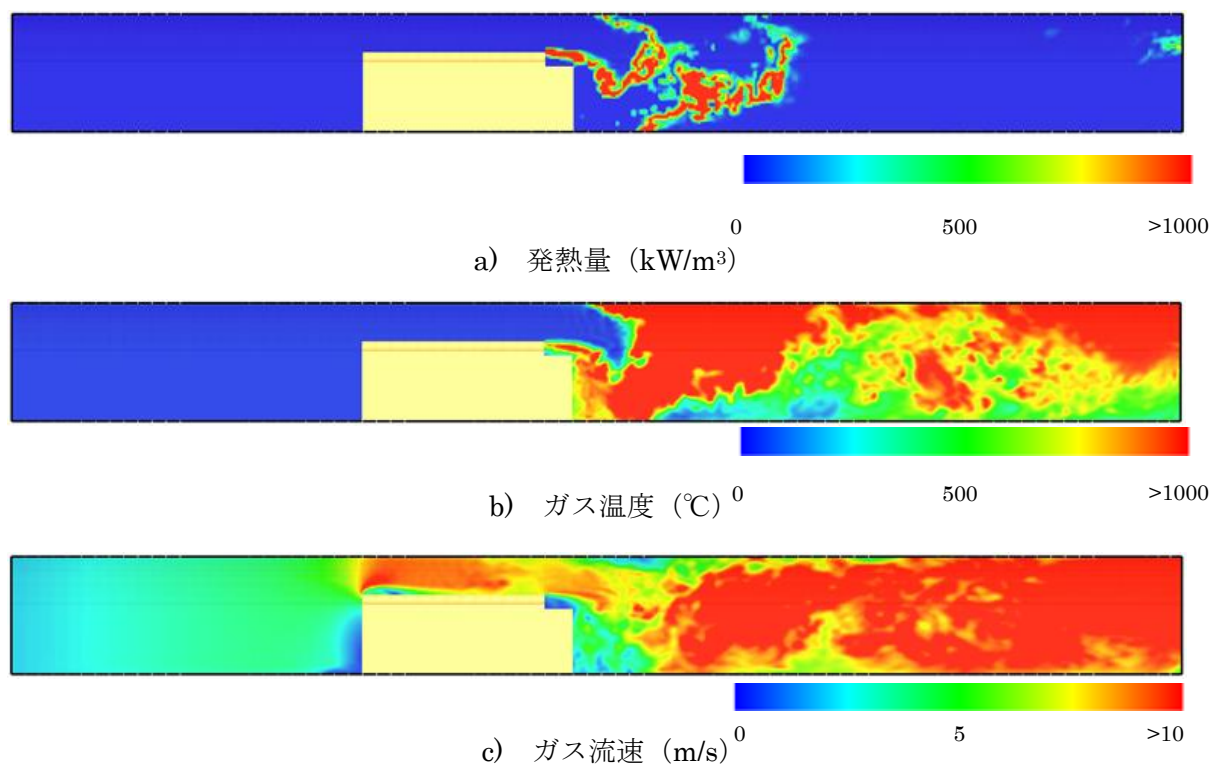


図 4.2.7-18 解析結果 (ケース 2) : 時刻 800 秒

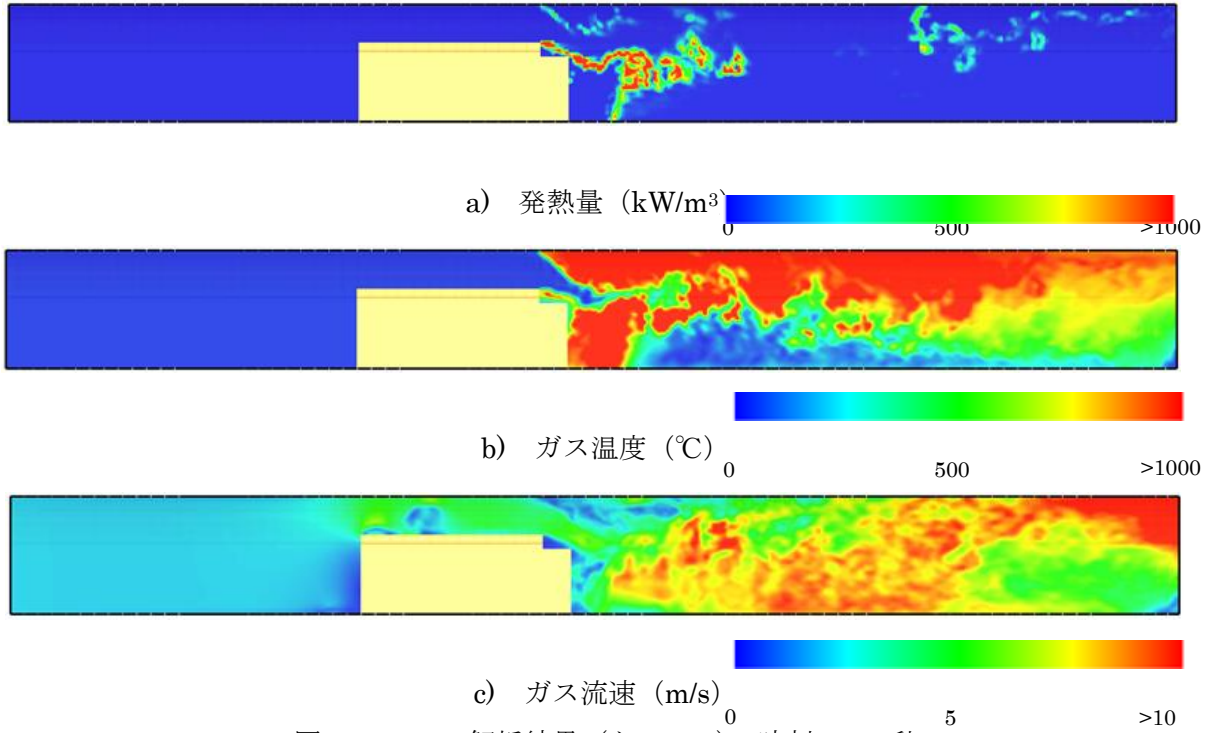


図 4.2.7-19 解析結果 (ケース 2) : 時刻 1200 秒

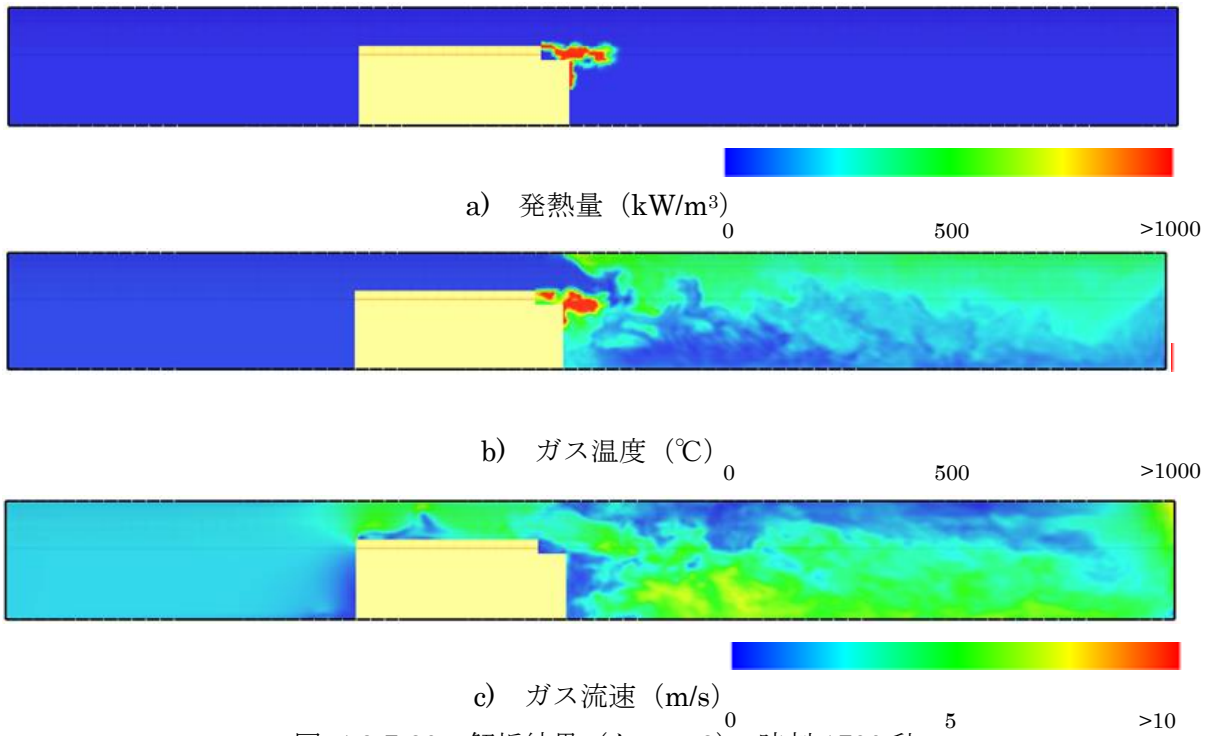


図 4.2.7-20 解析結果 (ケース 2) : 時刻 1700 秒

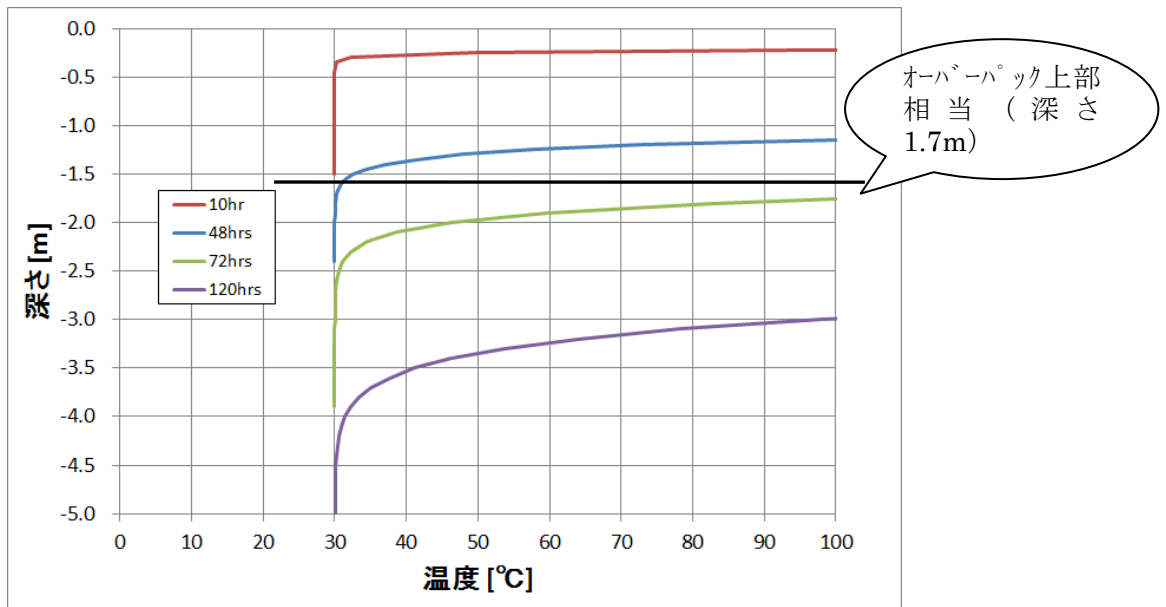


図 4.2.7-21 床から 100kW/m^2 の入熱が続いた場合の深さ方向 z における温度変化について (数式 4.2.7-3 を図化)

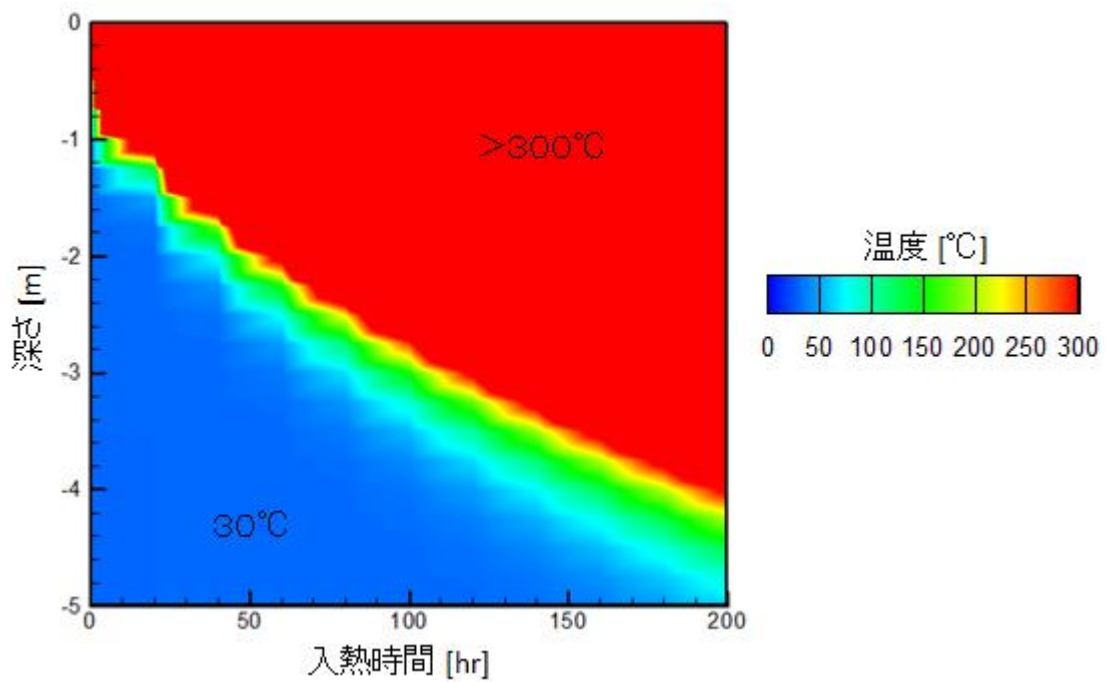


図 4.2.7-22 地下 (緩衝材内) における入熱による温度履歴 (熱流束 100kW/m^2)

(2) 解析結果（伝熱解析／応力解析）

前述した通り、伝熱解析では図 4.2.7-12 に示す燃焼解析の結果得られたオーバーパック表面の熱流束時刻歴を与え、非定常熱伝導解析によりガラス固化体キャニスタおよびオーバーパックの温度時刻歴を解析した。

1) 緩衝材設置前（ケース 1 A：換気 0.5m/s）

図 4.2.7-71～図 4.2.7-75 に伝熱解析の結果得られた温度分布図を示す。温度分布は、火災発生前の初期温度分布、火災発生後オーバーパックの温度が最高温度に到達した時刻（1,620 秒）、後述する応力解析でオーバーパックの等価応力が最大に達した時刻（1,680 秒）、燃焼解析で算出しオーバーパックへ入熱時刻歴を定義した最終時刻（3,000 秒）、および伝熱解析において雰囲気温度が 30℃に戻ると仮定した時刻（10,000 秒）について示した。また、図 4.2.7-28～図 4.2.7-30 にガラス固化体キャニスタの温度分布図を示す。

応力解析は、伝熱解析で得られたオーバーパックの温度時刻歴を熱荷重として与え、応力やひずみの時刻変化を計算した。応力解析においては、伝熱解析結果を見て分かる通り、ガラス固化体キャニスタの温度変化が僅かであり、応力変化も軽微であると推測されることから、オーバーパックのみのモデルを用いて解析を行った。図 4.2.7-31～図 4.2.7-70 に応力解析の結果得られた応力分布および塑性ひずみ分布図を示す。オーバーパックには、初期応力として蓋部の溶接残留応力が軸対称に分布しているが、火災からの非対称の熱荷重でどのように応力分布が変化するかを示すため、相当応力の他に円筒座標系における応力成分（半径方向、周方向、軸方向）についても図示した。また、応力変化を具体的に把握するため、残留応力の発生源である塑性ひずみについても、相当塑性ひずみの他、成分毎の塑性ひずみについても図示した。

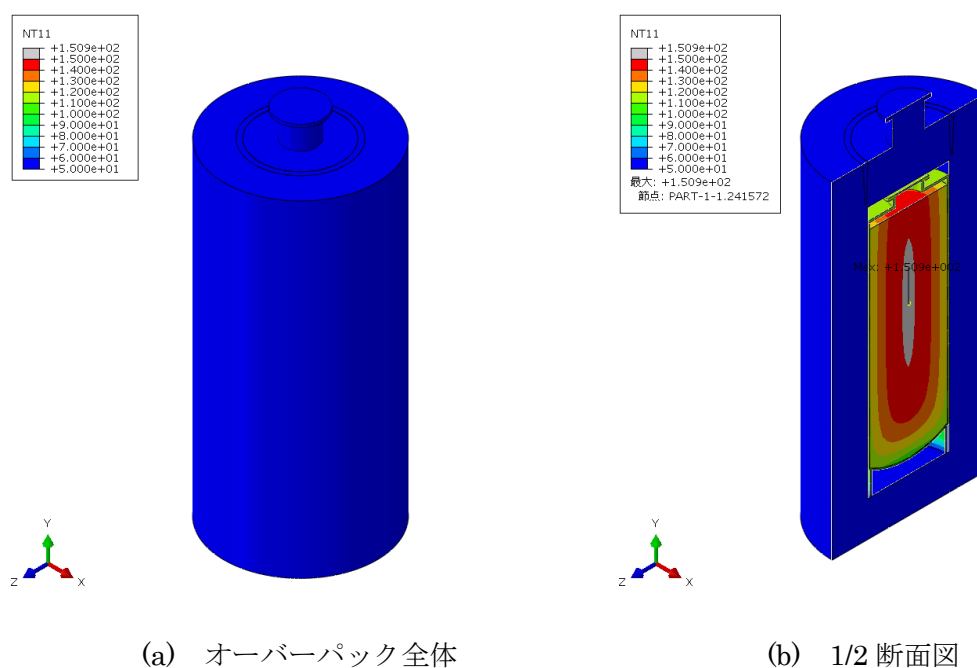
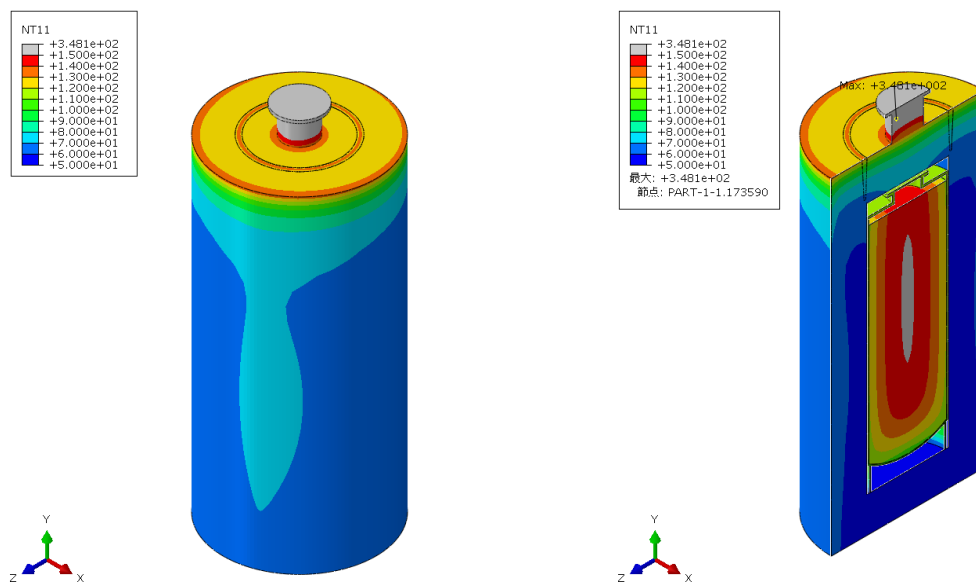


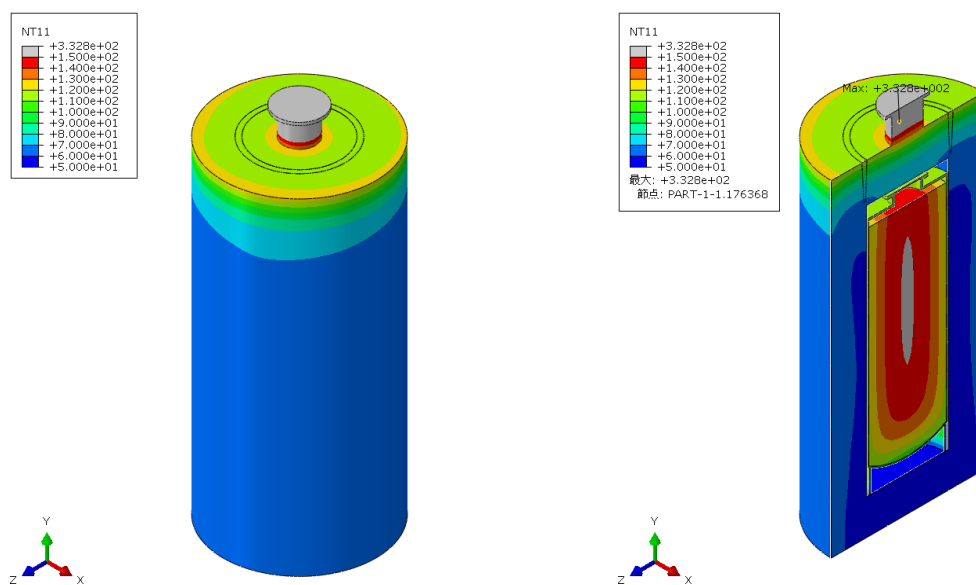
図 4.2.7-23 初期温度分布図（火災前）（単位：℃）



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-24 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の温度分布図 (単位 : °C)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-25 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の温度分布図 (単位 : °C)

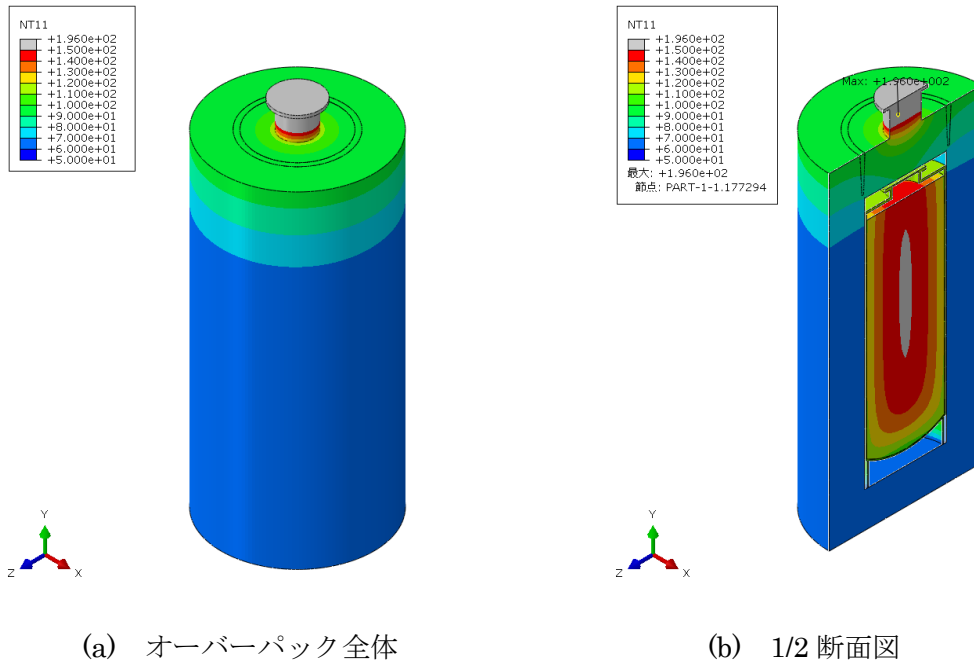


図 4.2.7-26 火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)

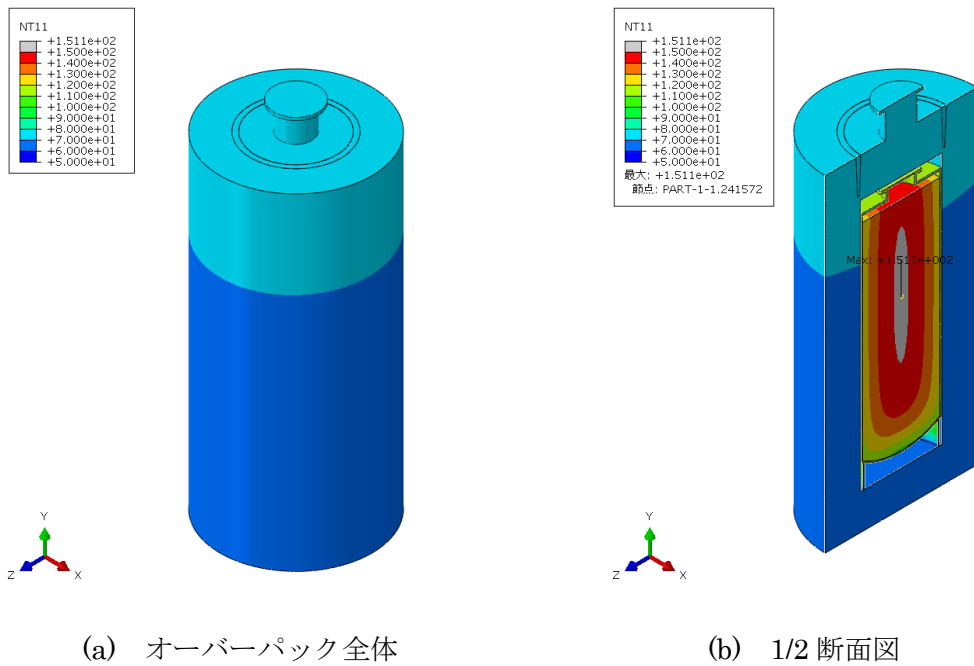
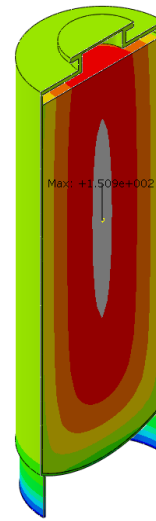
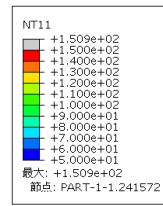
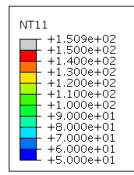


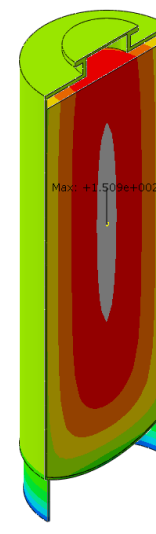
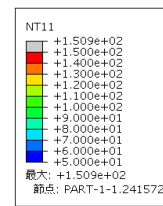
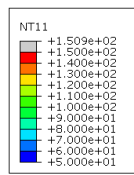
図 4.2.7-27 火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)



(a) ガラス固化体キャニスタ全体

(b) 1/2 断面図

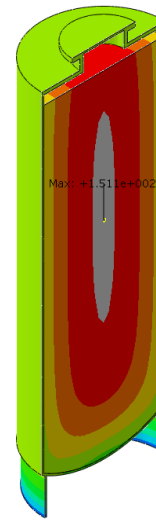
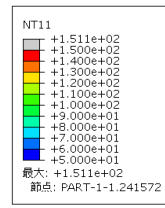
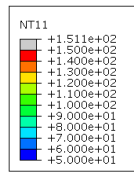
図 4.2.7-28 初期温度分布図 (火災前) (単位 : °C)



(a) ガラス固化体キャニスタ全体

(b) 1/2 断面図

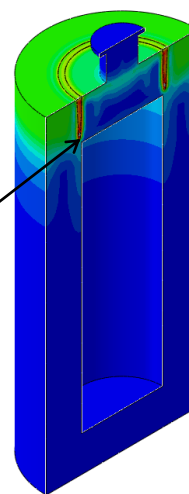
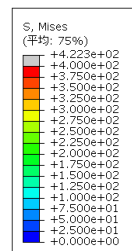
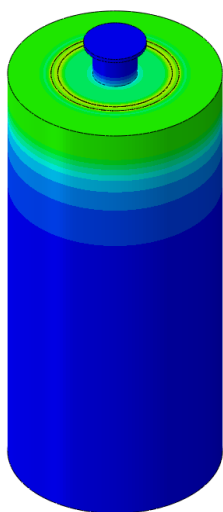
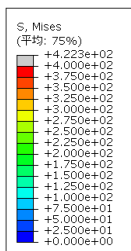
図 4.2.7-29 火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : °C)



(a) ガラス固化体キャニスタ全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-30 火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)



422.3MPa



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-31 初期相当応力分布図 (単位: MPa)

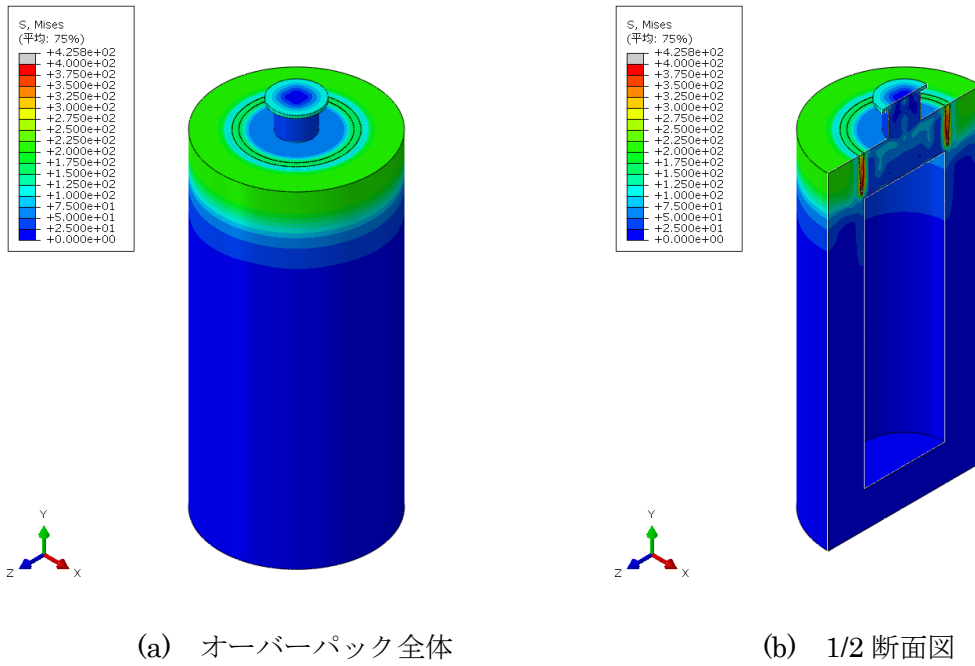


図 4.2.7-32 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の相当応力分布図 (単位 : MPa)

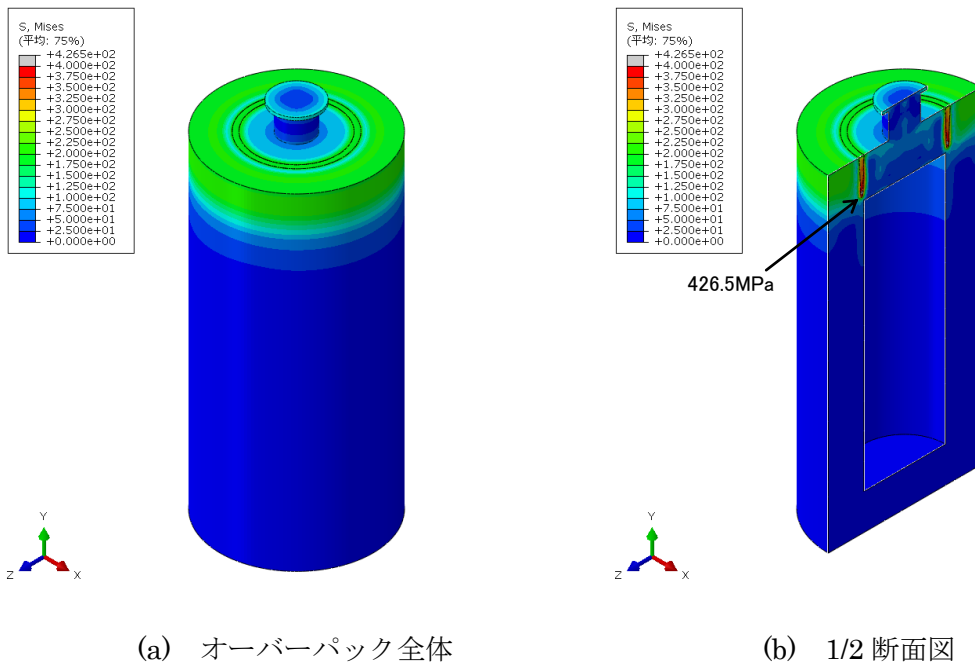
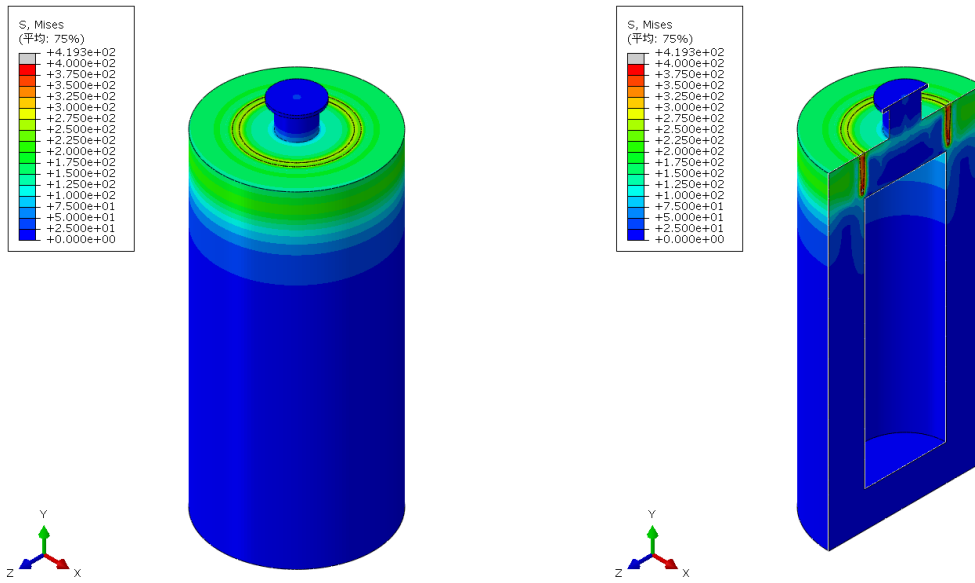


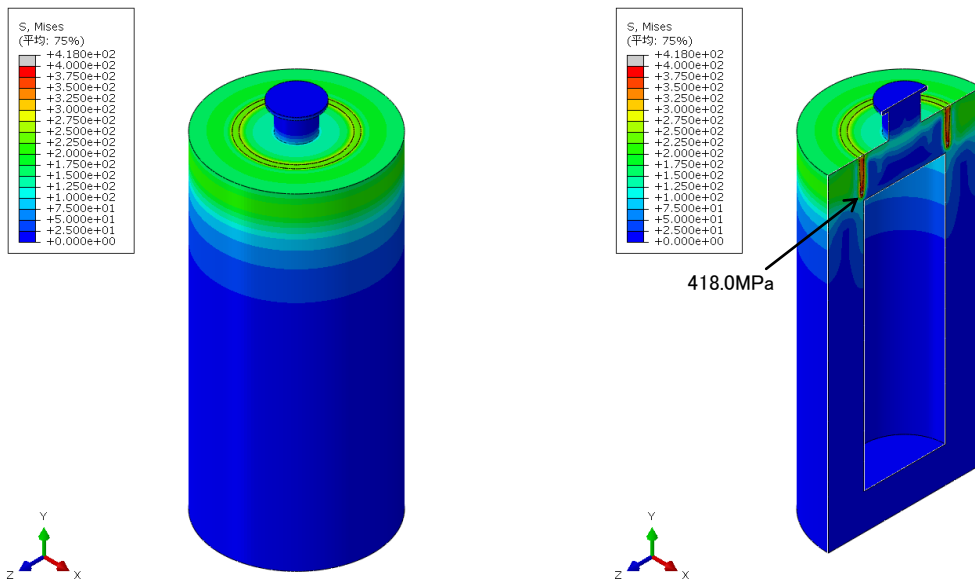
図 4.2.7-33 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の相当応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-34 火災発生後 3,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-35 火災発生後 10,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位 : MPa)

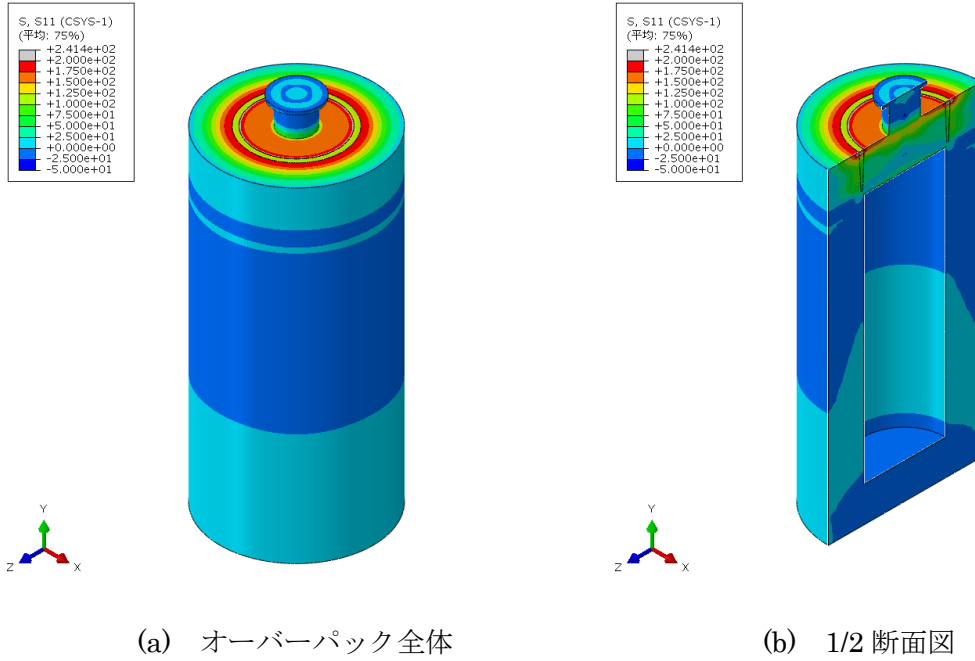


図 4.2.7-36 初期半径方向応力分布図 (単位 : MPa)

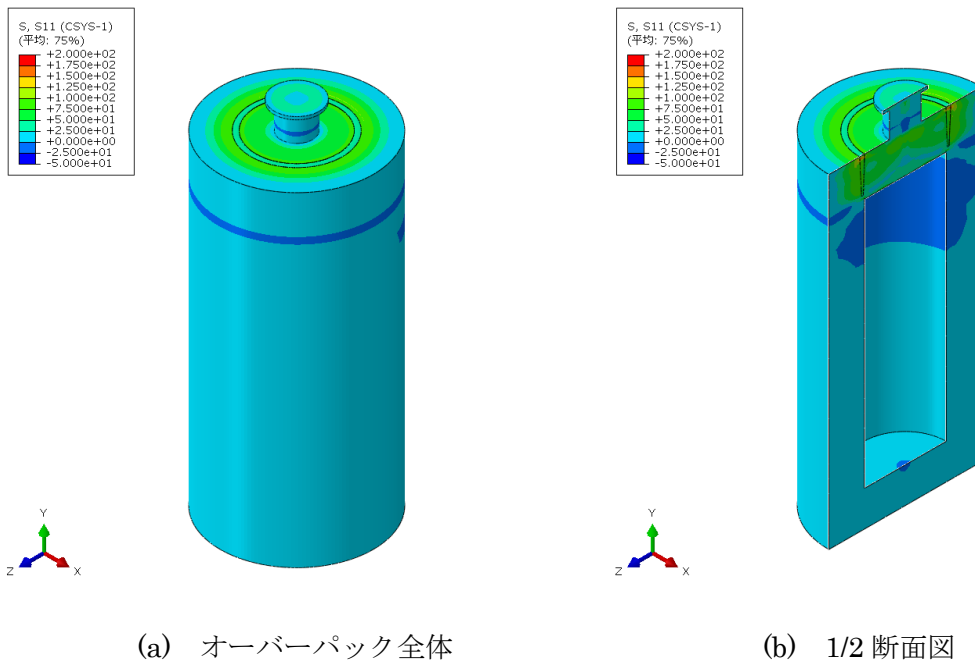
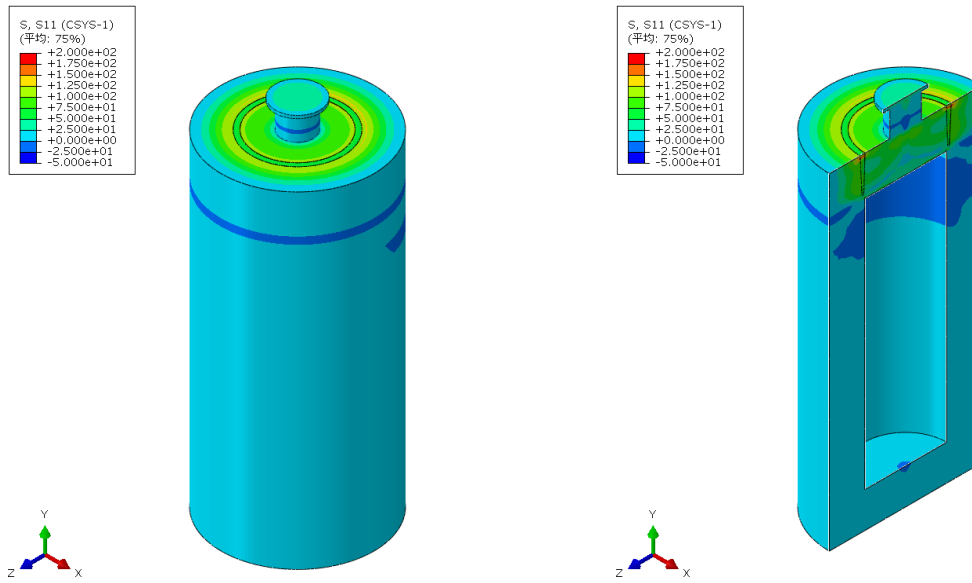


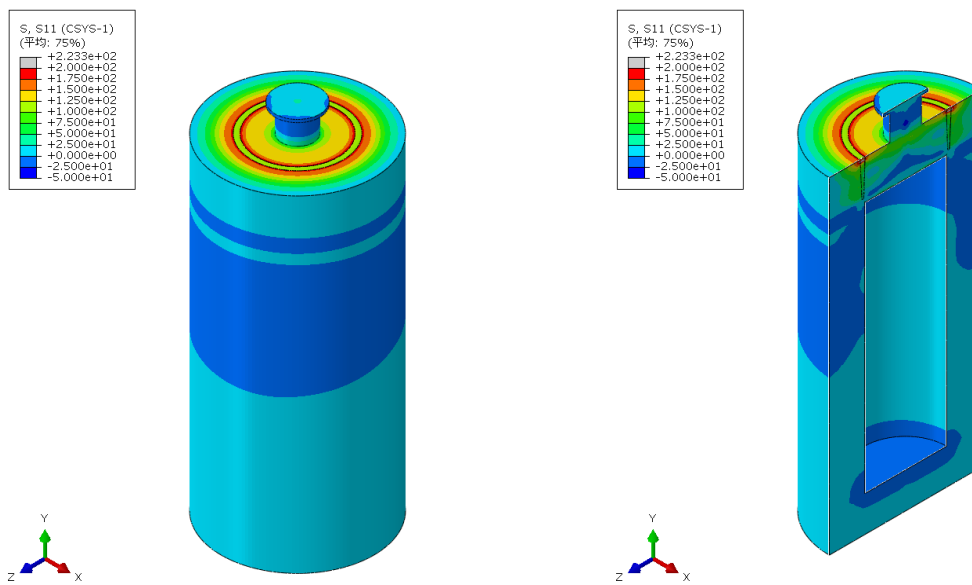
図 4.2.7-37 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-38 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-39 火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)

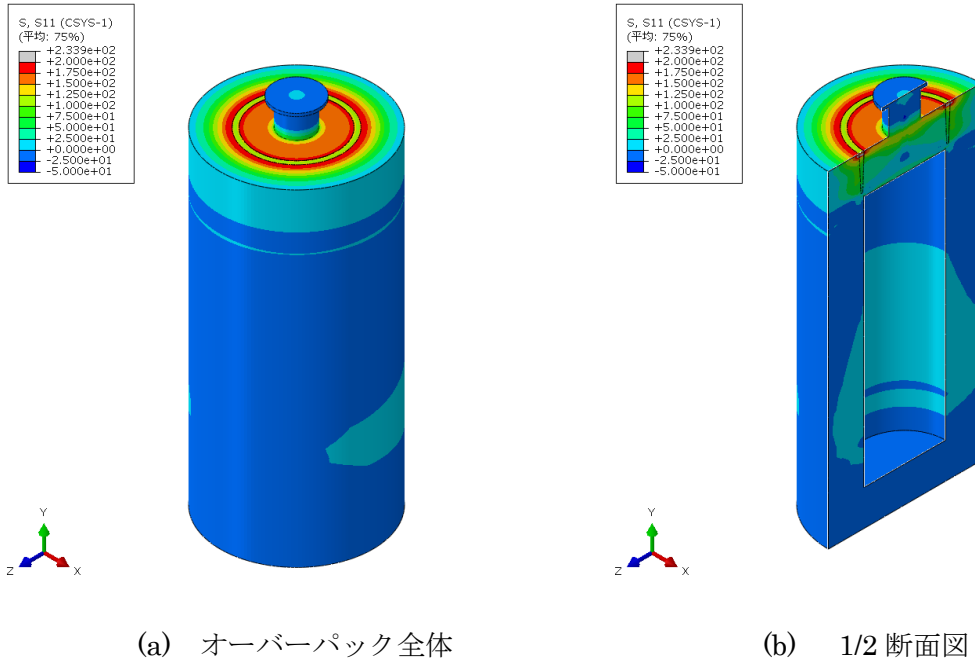


図 4.2.7-40 火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)

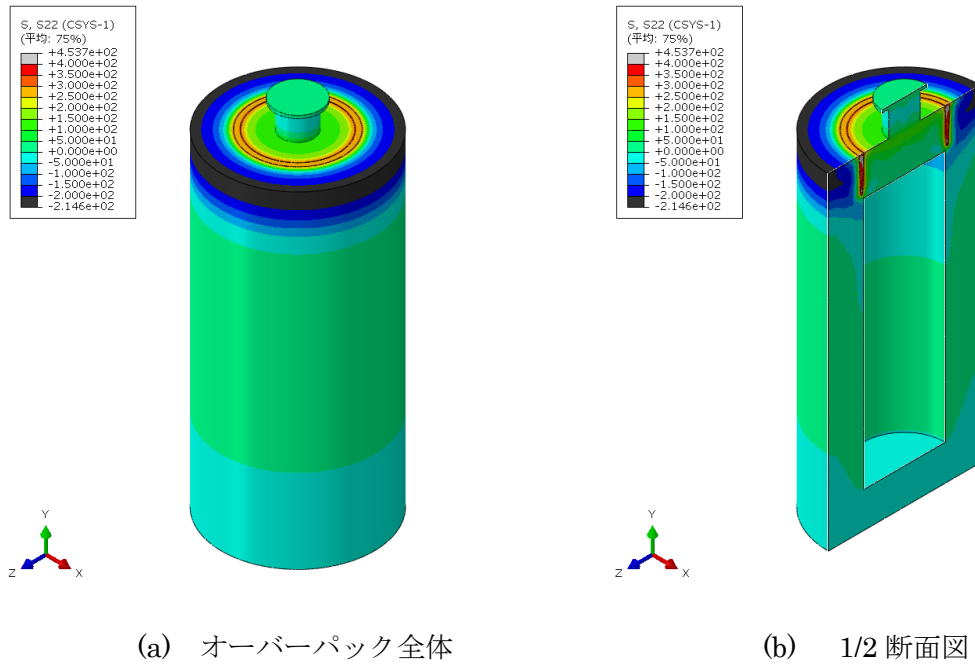


図 4.2.7-41 初期周方向応力分布図 (単位 : MPa)

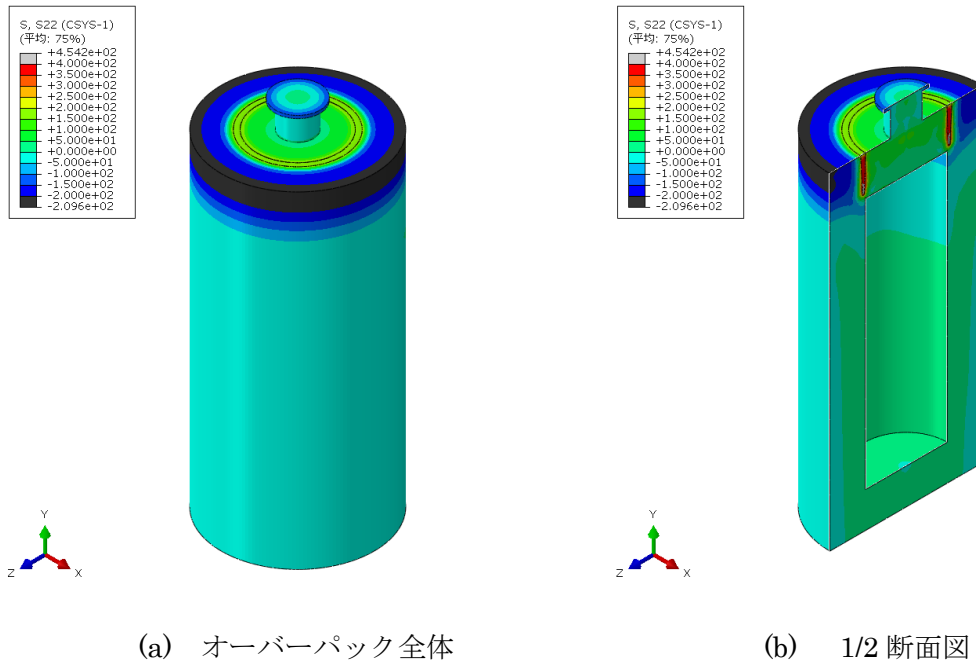


図 4.2.7-42 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の周方向応力分布図 (単位 : MPa)

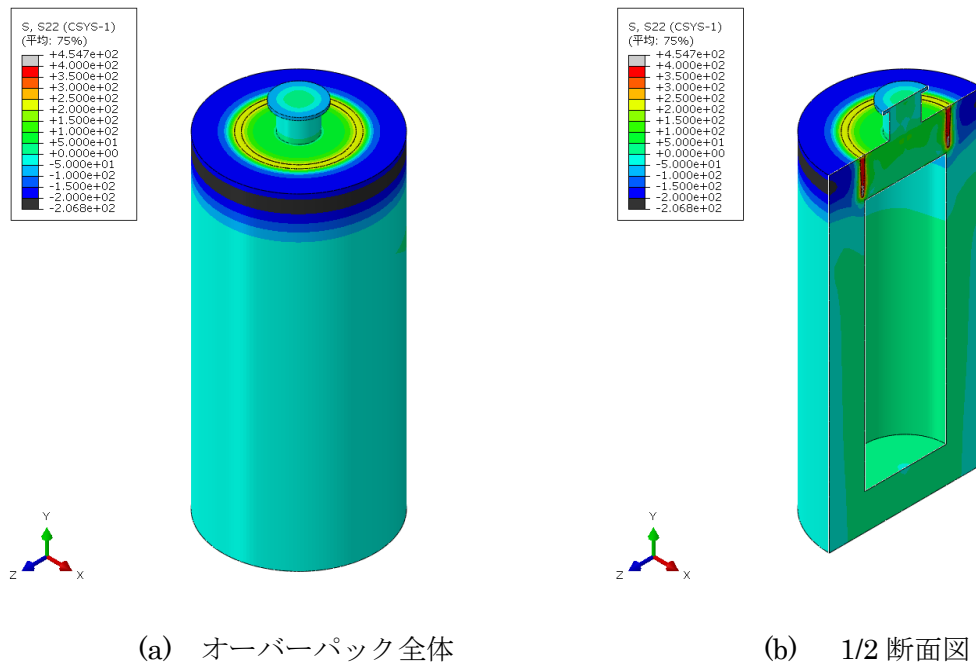
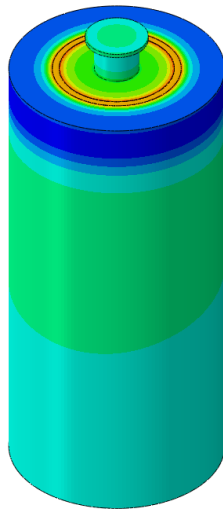
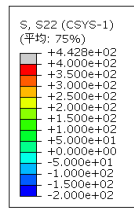
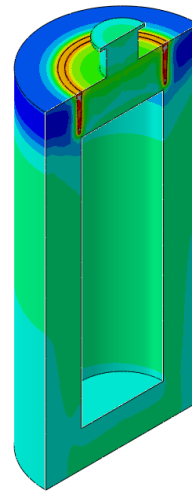
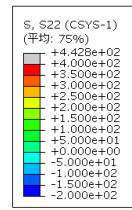


図 4.2.7-43 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の周方向応力分布図 (単位 : MPa)

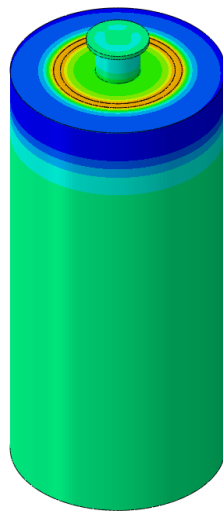
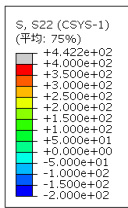


(a) オーバーパック全体

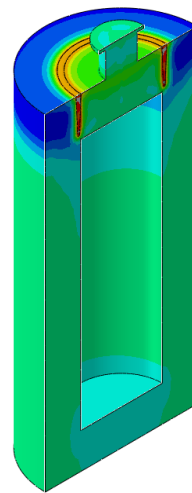
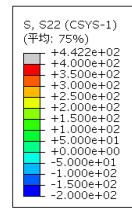


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-44 火災発生後 3,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-45 火災発生後 10,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位 : MPa)

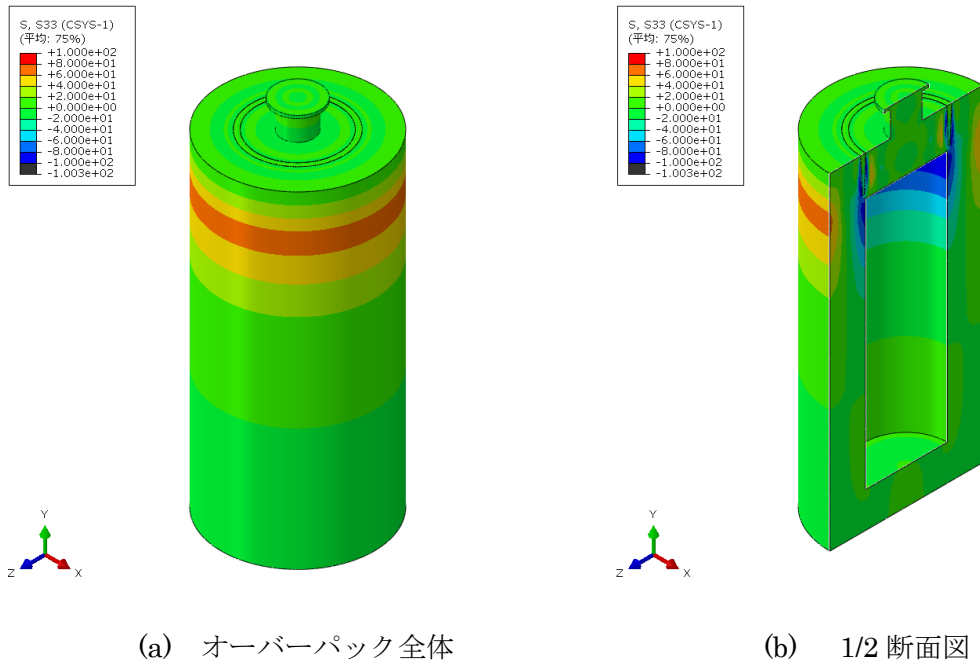


図 4.2.7-46 初期軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

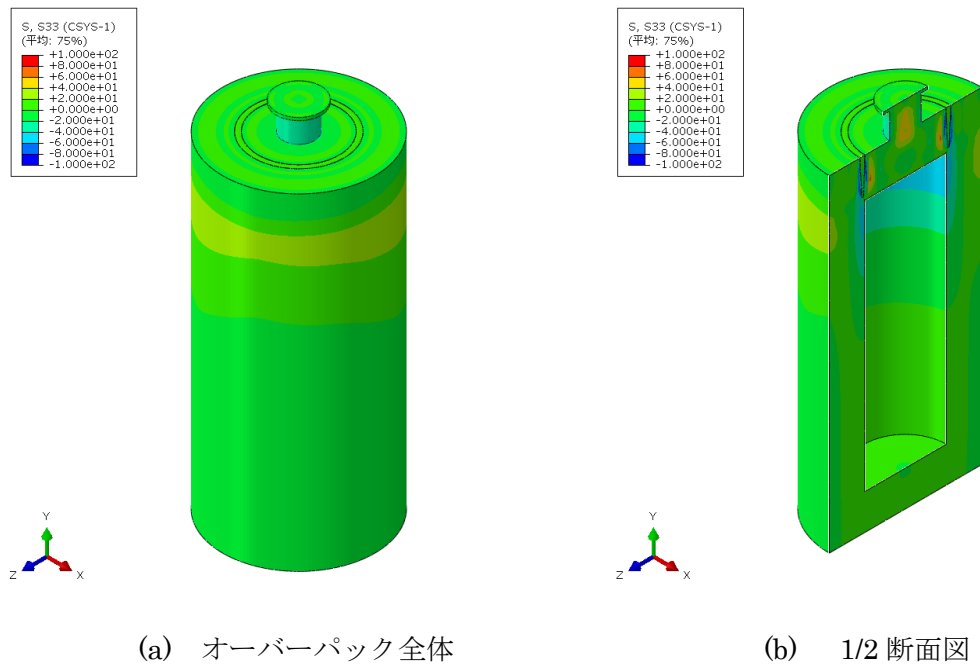
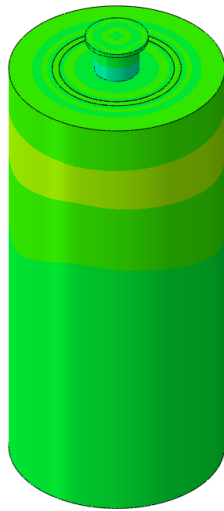
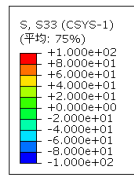
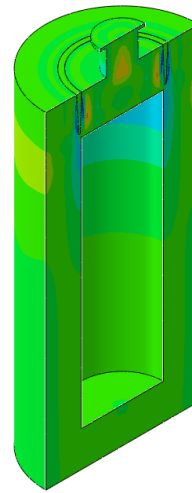
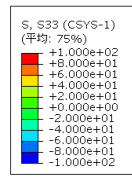


図 4.2.7-47 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

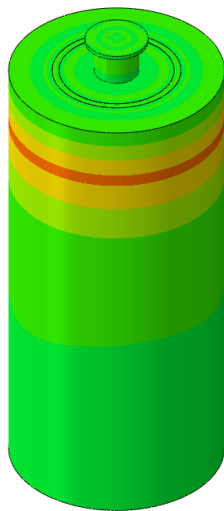
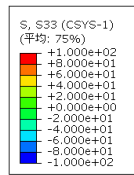


(a) オーバーパック全体

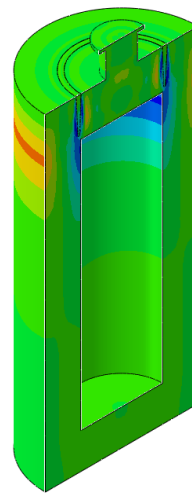
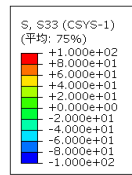


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-48 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-49 火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

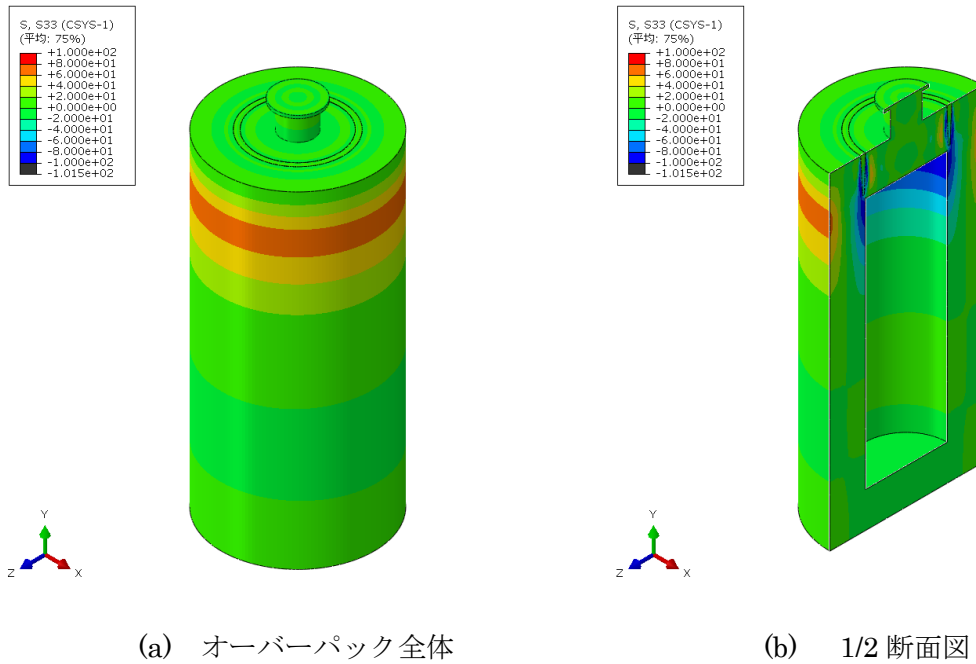


図 4.2.7-50 火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

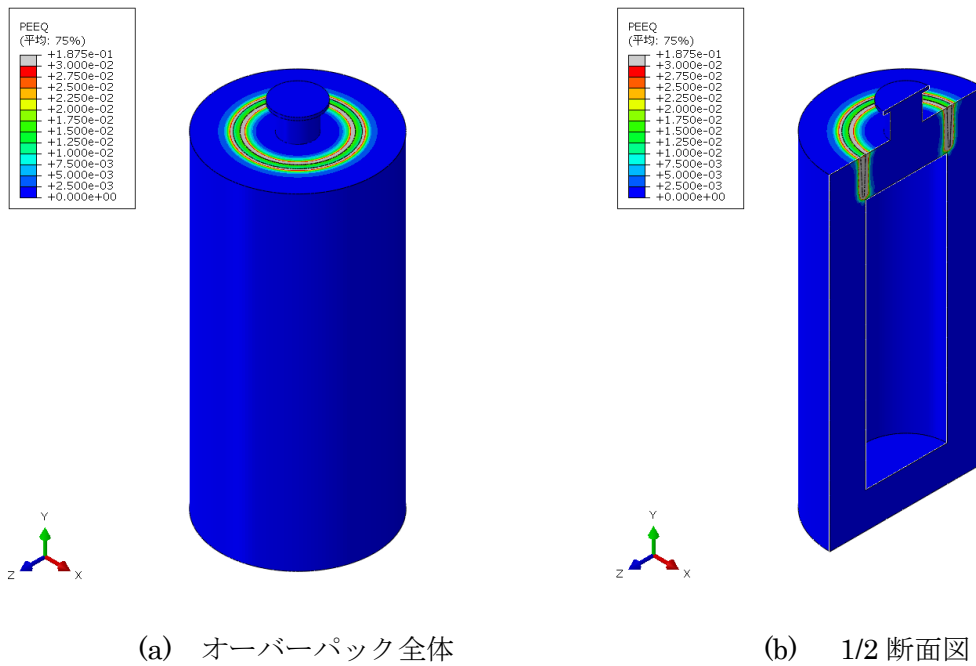


図 4.2.7-51 初期相当塑性ひずみ分布図

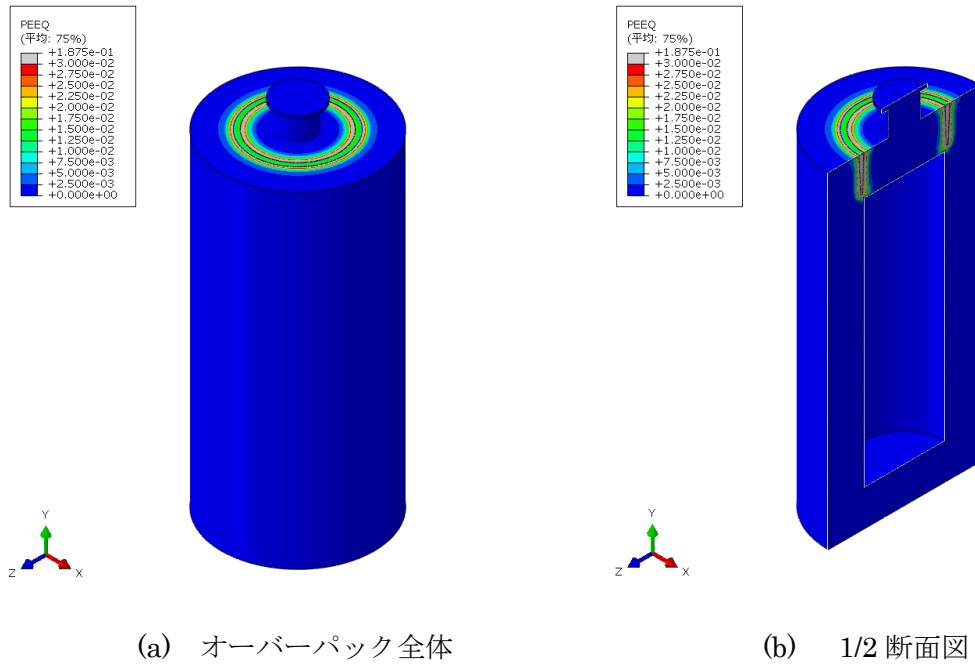


図 4.2.7-52 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の相当塑性ひずみ分布図

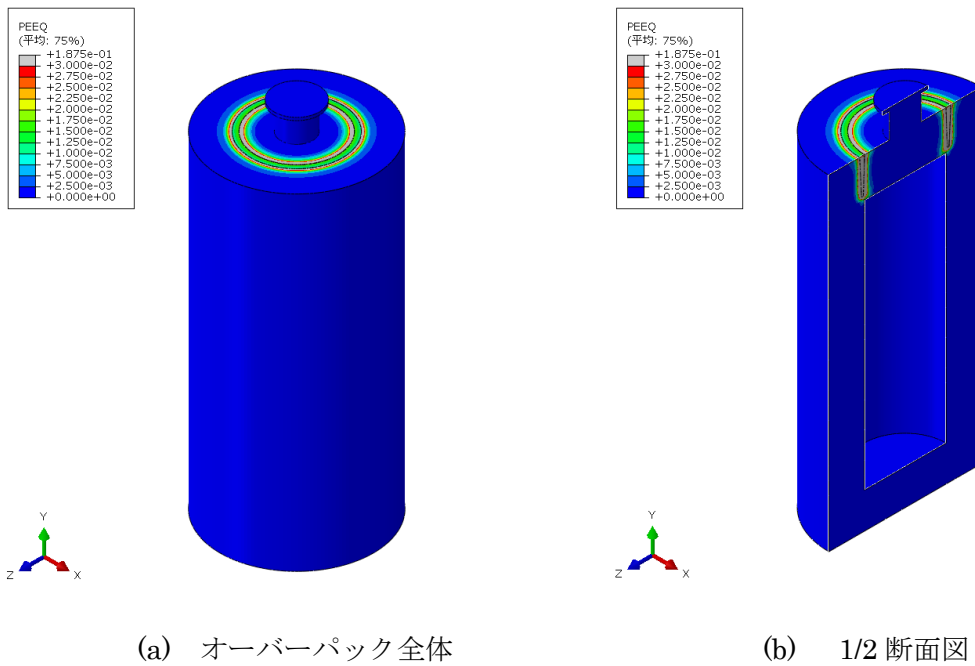


図 4.2.7-53 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の相当塑性ひずみ分布図

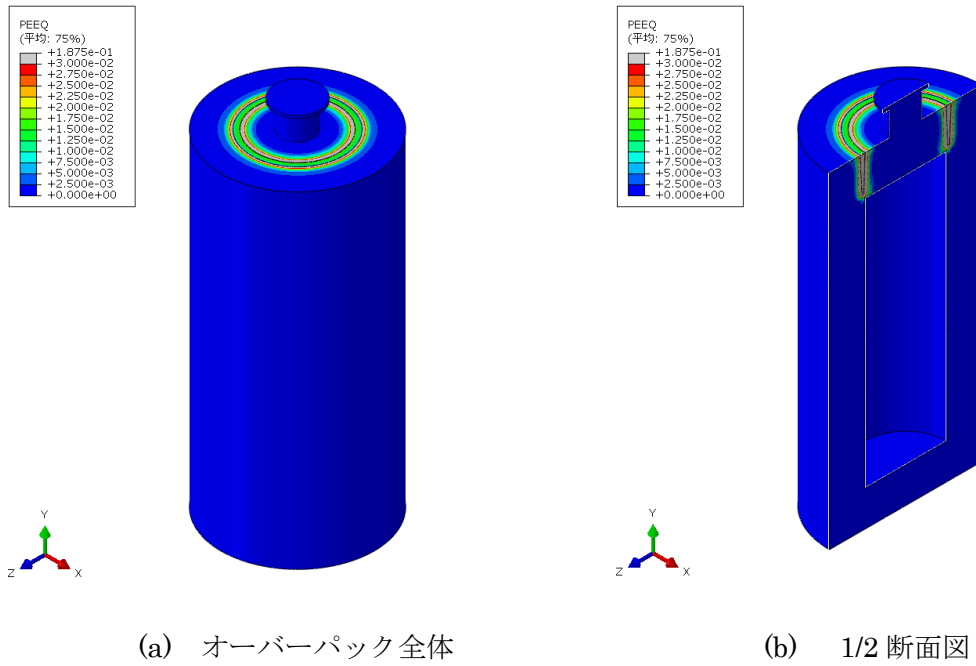


図 4.2.7-54 火災発生後 3,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図

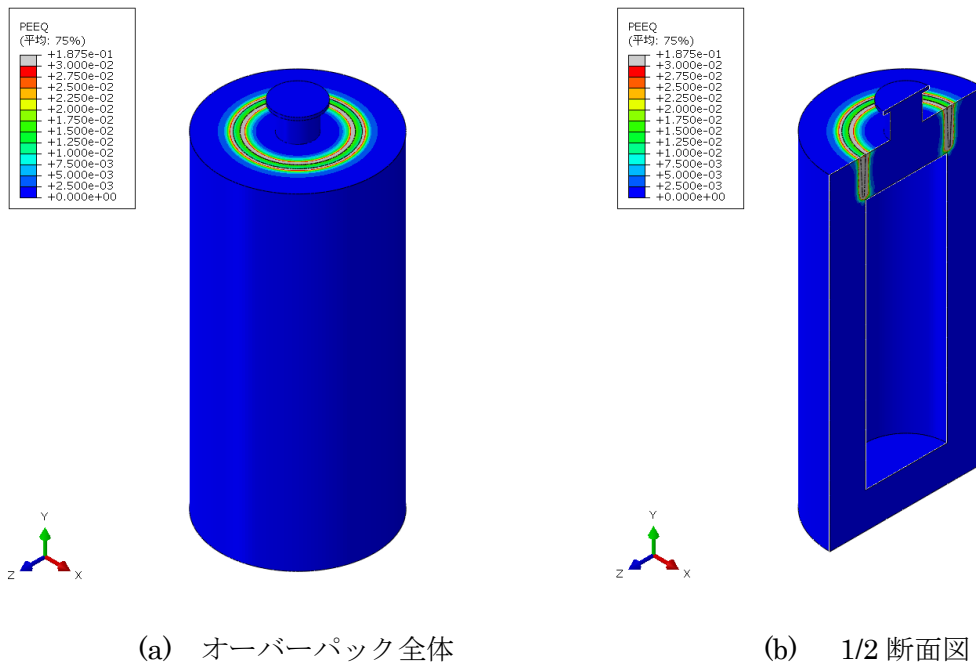
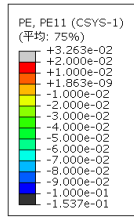
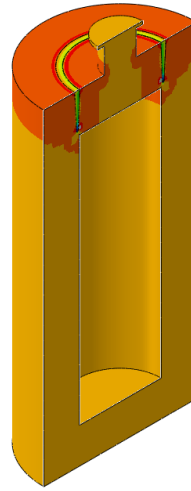
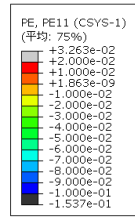


図 4.2.7-55 火災発生後 10,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図

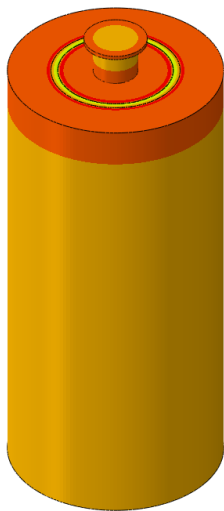
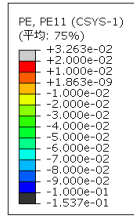


(a) オーバーパック全体

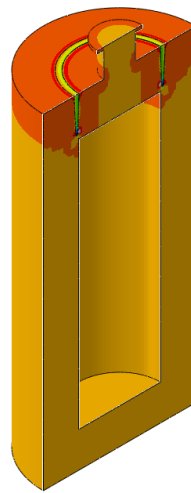
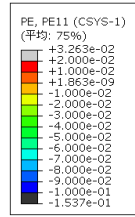


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-56 初期半径方向塑性ひずみ分布図

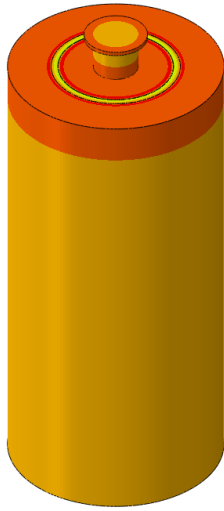
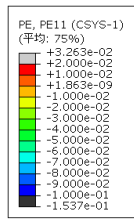


(a) オーバーパック全体

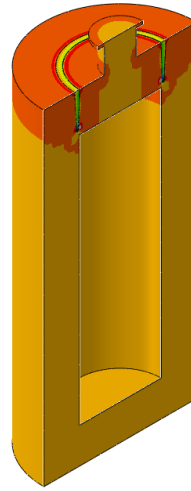
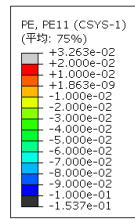


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-57 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図

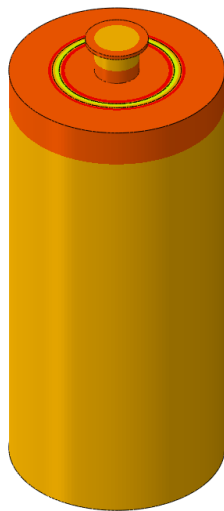
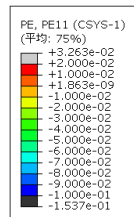


(a) オーバーパック全体

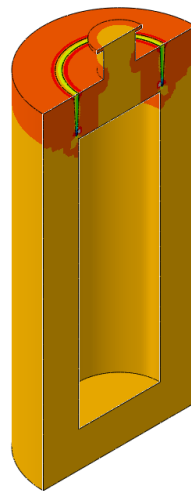
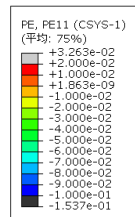


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-58 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-59 火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図

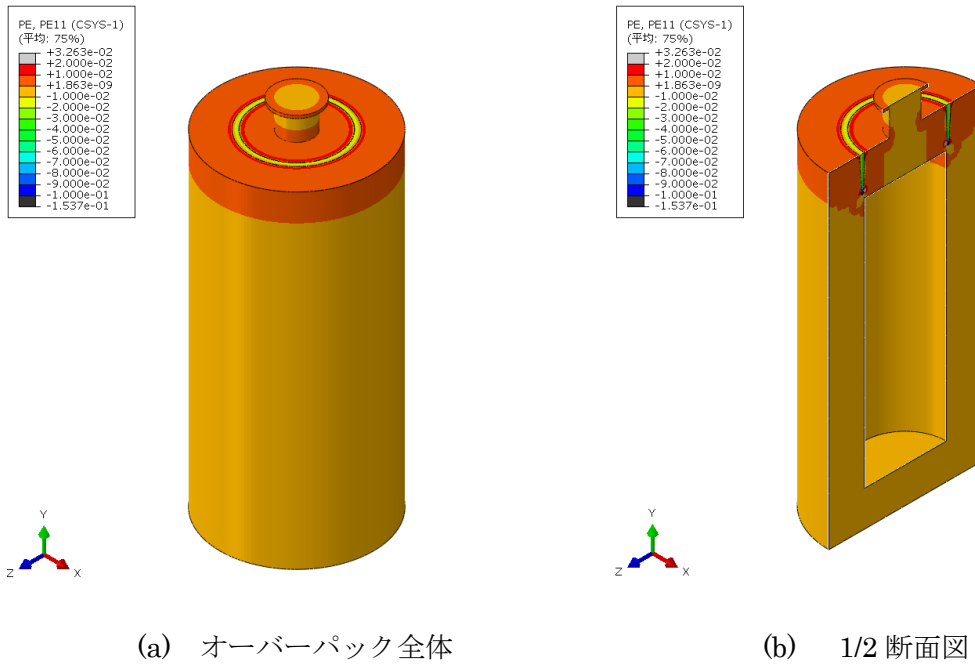


図 4.2.7-60 火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図

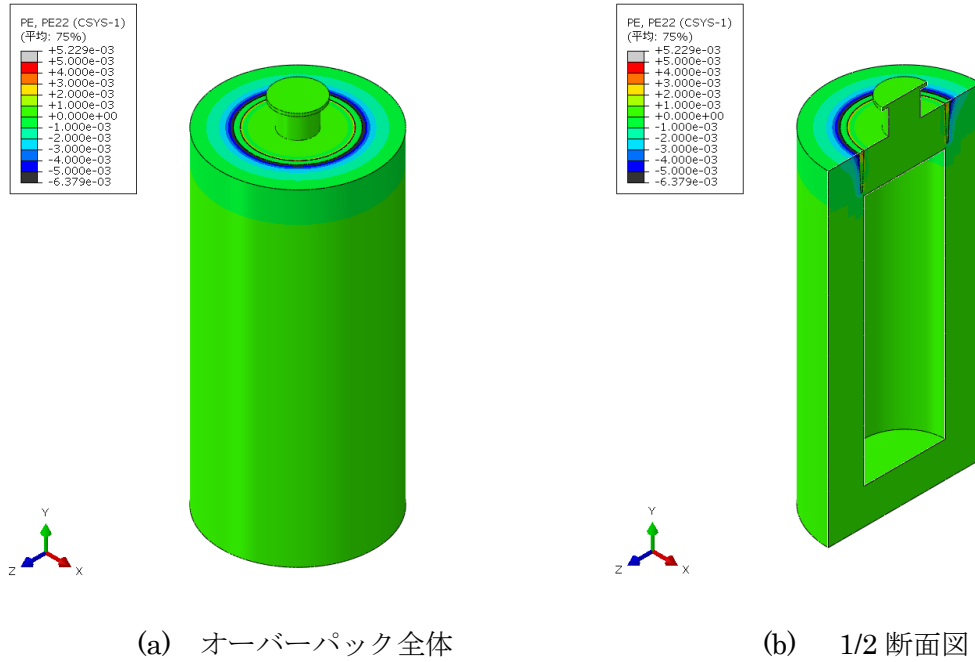
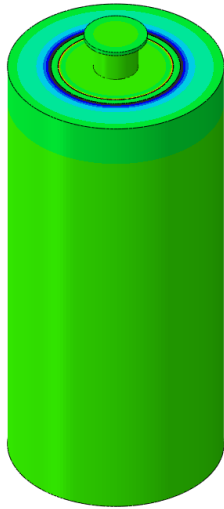
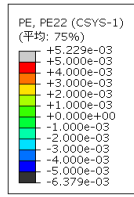
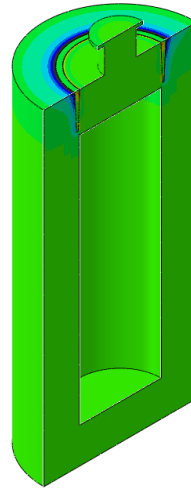
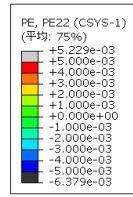


図 4.2.7-61 初期周方向塑性ひずみ分布図

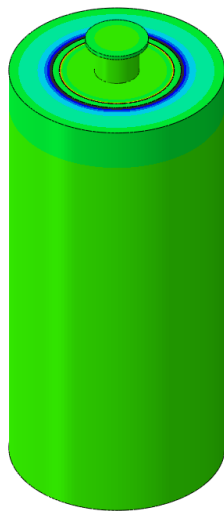
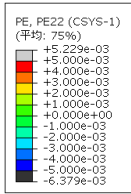


(a) オーバーパック全体

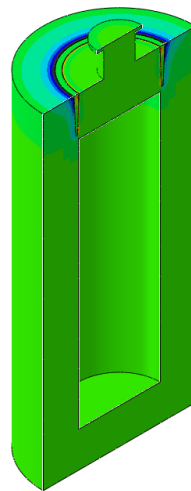
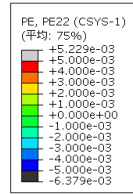


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-62 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の周方向塑性ひずみ分布図

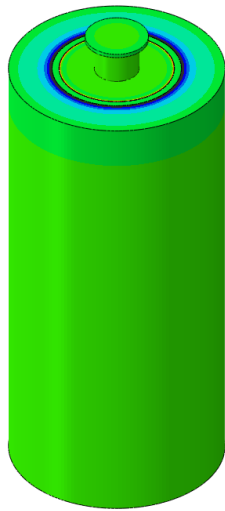
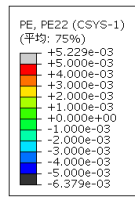


(a) オーバーパック全体

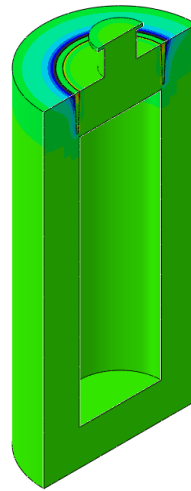
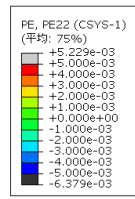


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-63 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の周方向塑性ひずみ分布図

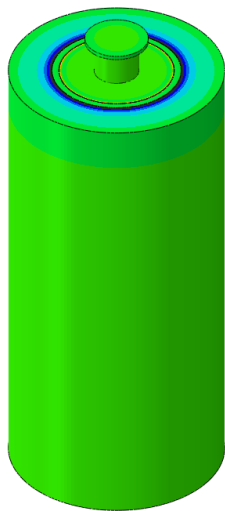
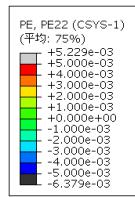


(a) オーバーパック全体

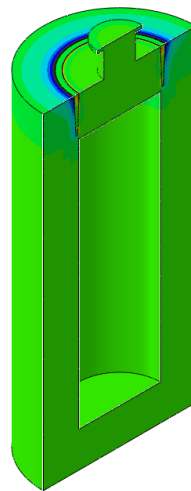
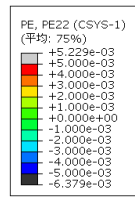


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-64 火災発生後 3,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図

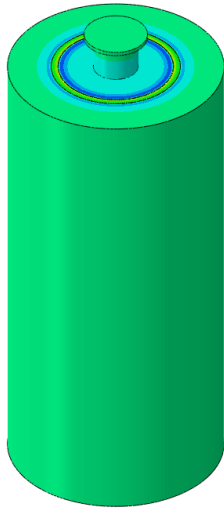
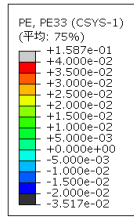


(a) オーバーパック全体

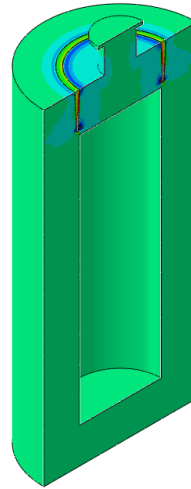
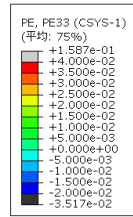


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-65 火災発生後 10,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図

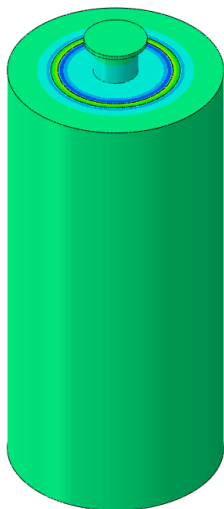
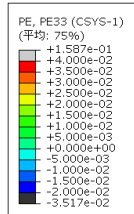


(a) オーバーパック全体

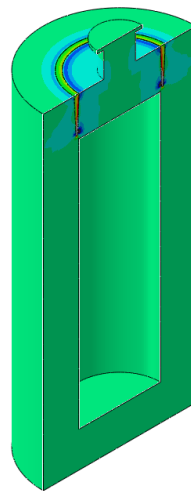
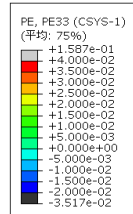


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-66 初期軸方向塑性ひずみ分布図

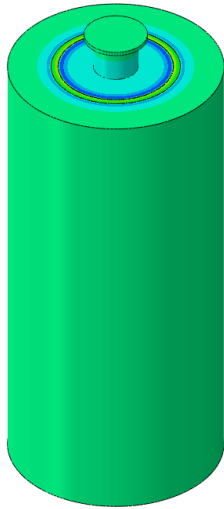
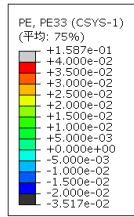


(a) オーバーパック全体

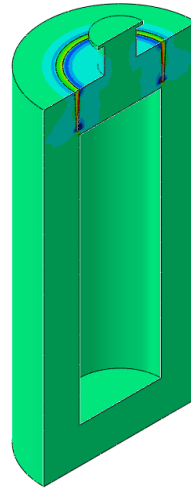
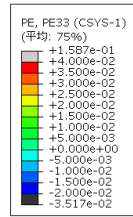


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-67 火災発生後最高温度到達時 (1,620 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図

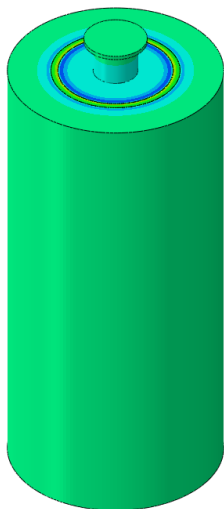
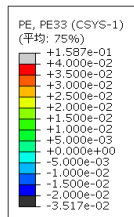


(a) オーバーパック全体

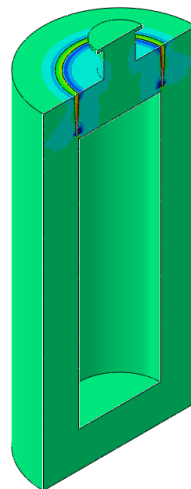
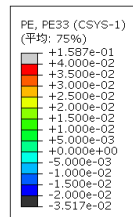


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-68 火災発生後等価応力最大時 (1,680 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-69 火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図

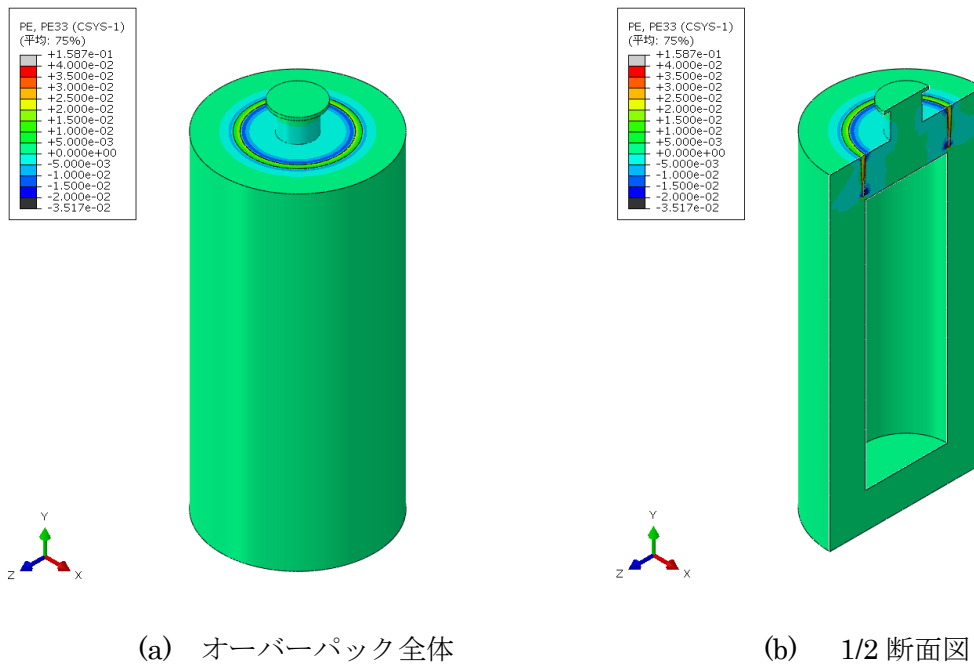
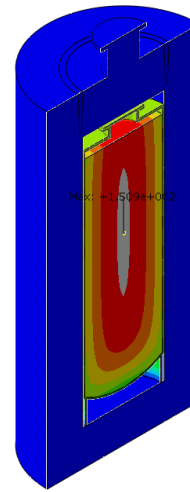
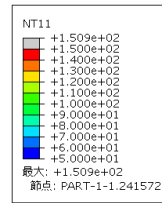
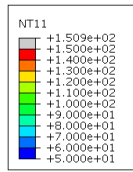


図 4.2.7-70 火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図

2) 緩衝材設置前（ケース 1 B：換気 2.0m/s）

図 4.2.7-71～図 4.2.7-75 に伝熱解析の結果得られた温度分布図を示す。温度分布は、火災発生前の初期温度分布、後述する応力解析でオーバーパックの等価応力が最大に達した時刻（600 秒）、火災発生後オーバーパックの温度が最高温度に到達した時刻（1,440 秒）、燃焼解析で算出しオーバーパックへ入熱時刻歴を定義した最終時刻（3,000 秒）、および伝熱解析において雰囲気温度が 30°Cに戻ると仮定した時刻（10,000 秒）について示した。また、図 4.2.7-76～図 4.2.7-78 にガラス固化体キャニスタの温度分布図を示す。

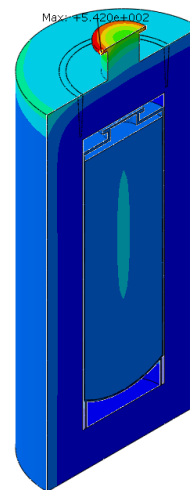
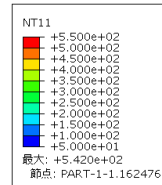
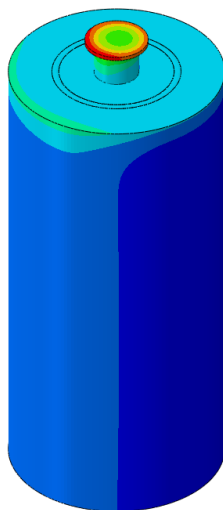
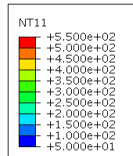
応力解析は、伝熱解析で得られたオーバーパックの温度時刻歴を熱荷重として与え、応力やひずみの時刻変化を計算した。応力解析においては、伝熱解析結果を見て分かる通り、ガラス固化体キャニスタの温度変化は僅かであるため、応力変化も軽微であると推測されることから、オーバーパックのみのモデルを用いて解析を行った。図 4.2.7-79～図 4.2.7-118 に応力解析の結果得られた応力分布および塑性ひずみ分布図を示す。オーバーパックには、初期応力として蓋部の溶接残留応力が軸対称に分布しているが、火災からの非対称の熱荷重でどのように応力分布が変化するかを示すため、相当応力の他に円筒座標系における応力成分（半径方向、周方向、軸方向）についても図示した。また、応力変化についての理解を深めるため、残留応力の発生源である塑性ひずみについても、相当塑性ひずみの他、成分毎の塑性ひずみについても図示した。



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

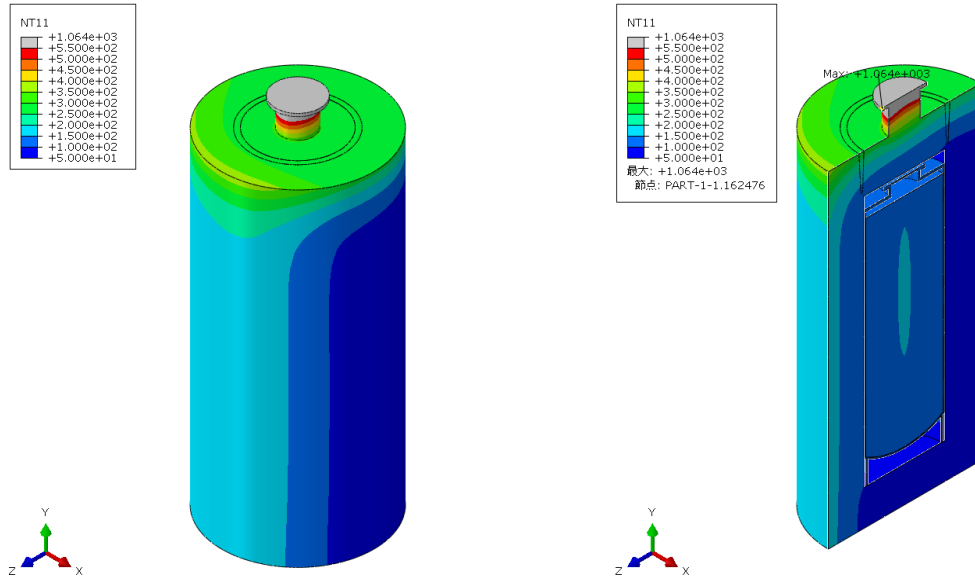
図 4.2.7-71 初期温度分布図 (火災前) (単位: °C)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

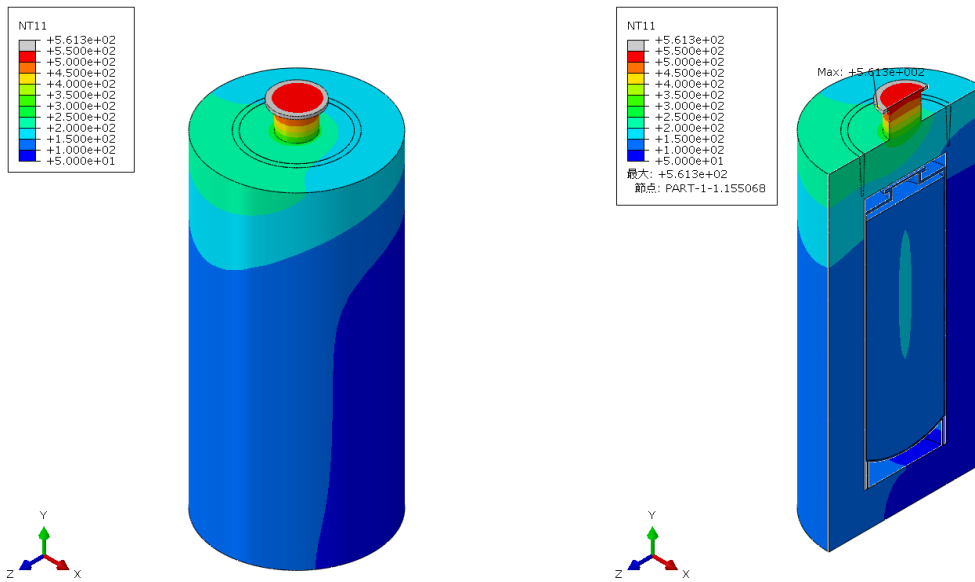
図 4.2.7-72 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の温度分布図 (単位: °C)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

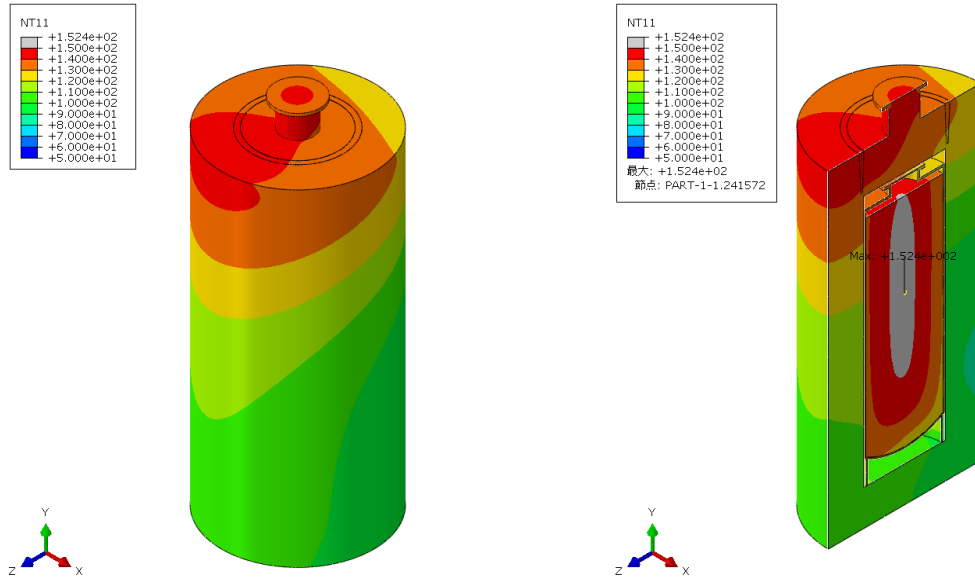
図 4.2.7-73 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の温度分布図 (単位 : °C)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

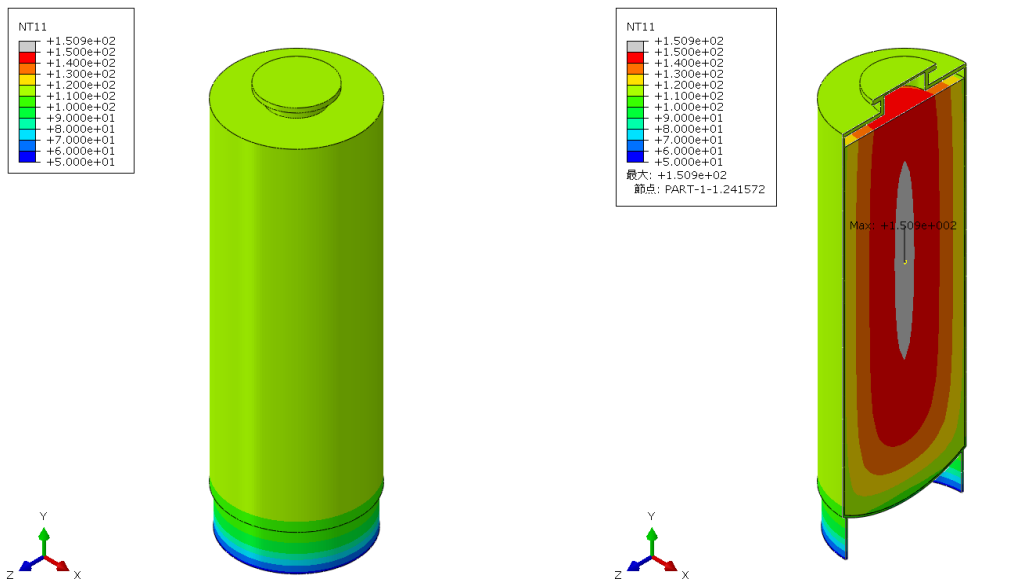
図 4.2.7-74 火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : °C)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

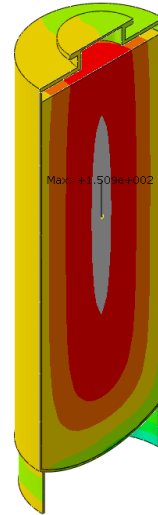
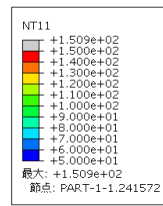
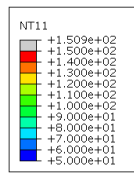
図 4.2.7-75 火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位 : °C)



(a) ガラス固化体キャニスタ全体

(b) 1/2 断面図

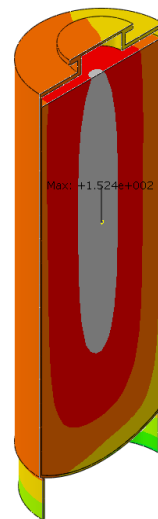
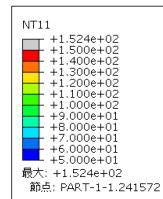
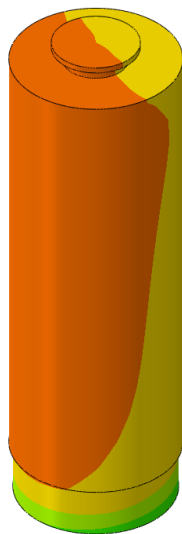
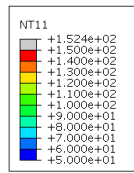
図 4.2.7-76 初期温度分布図 (火災前) (単位 : °C)



(a) ガラス固化体キャニスタ全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-77 火災発生後 3,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)



(a) ガラス固化体キャニスタ全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-78 火災発生後 10,000 秒経過時の温度分布図 (単位: °C)

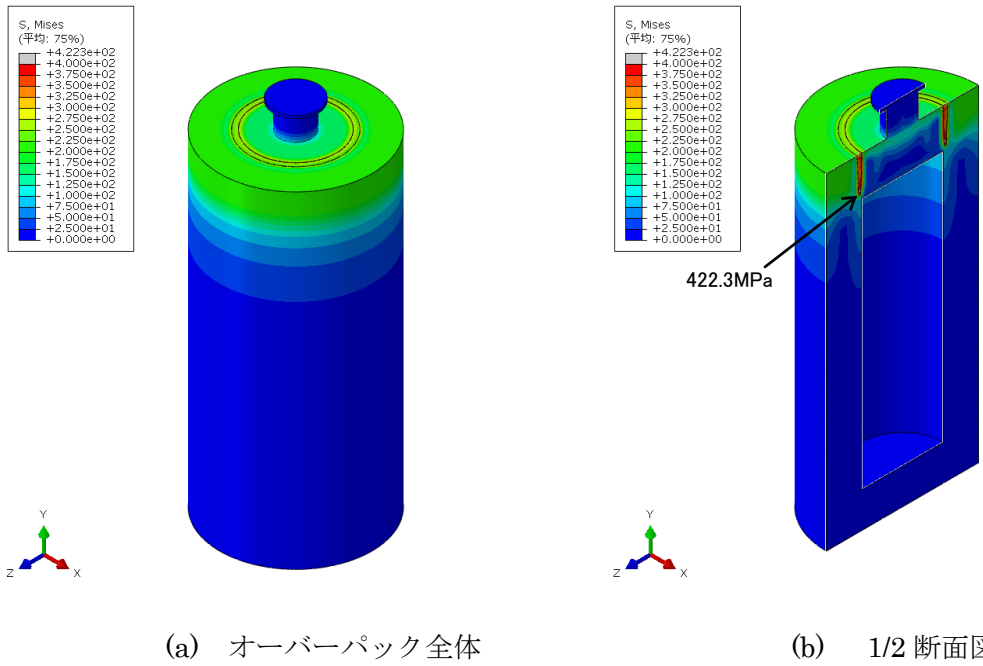


図 4.2.7-79 初期相当応力分布 (単位 : MPa)

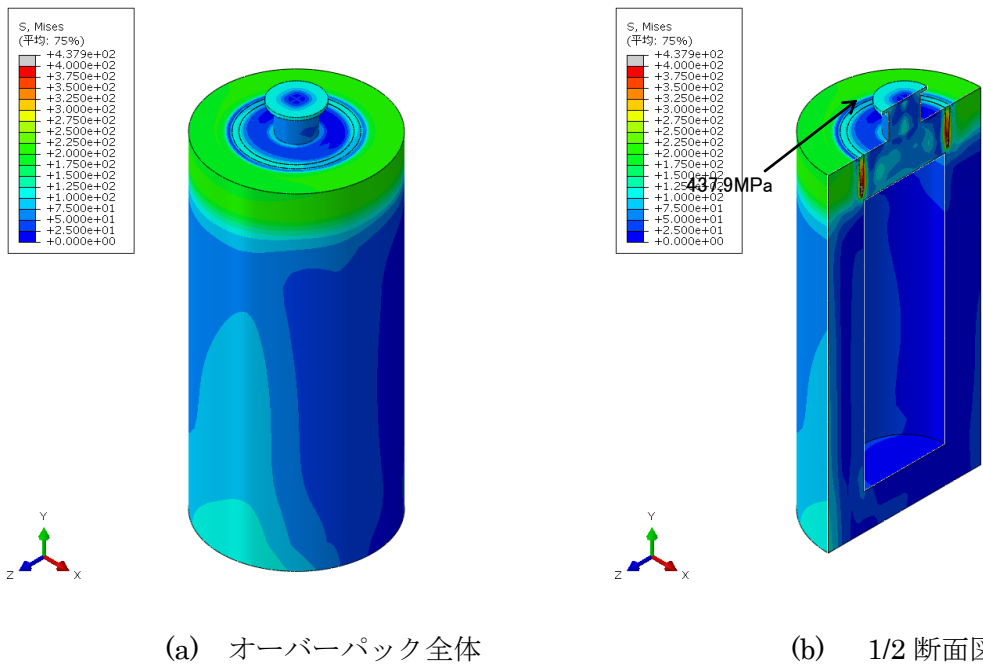


図 4.2.7-80 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の相当応力分布図 (単位 : MPa)

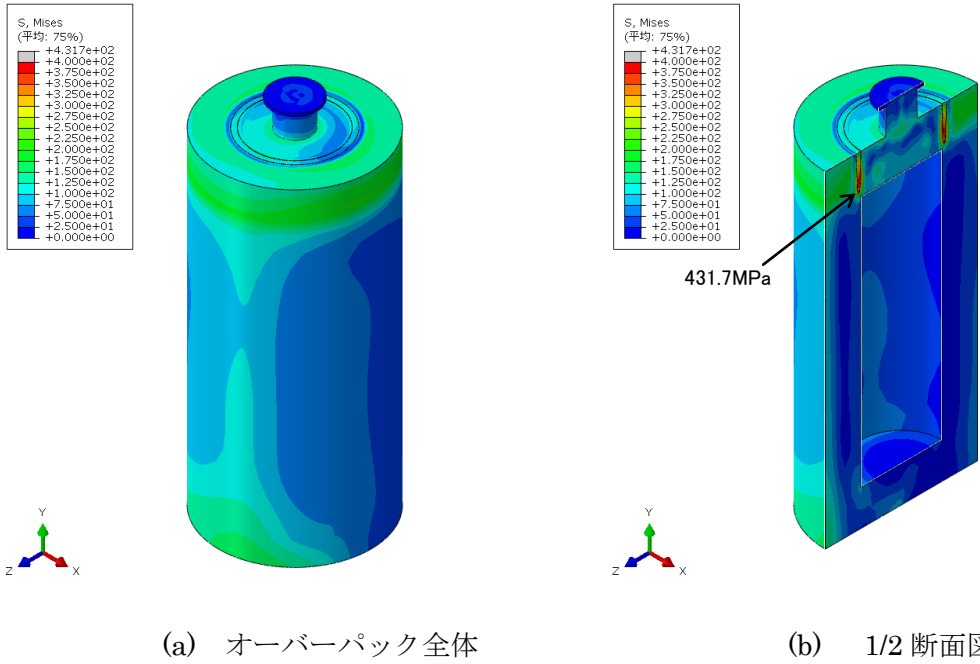


図 4.2.7-81 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の相当応力分布図 (単位 : MPa)

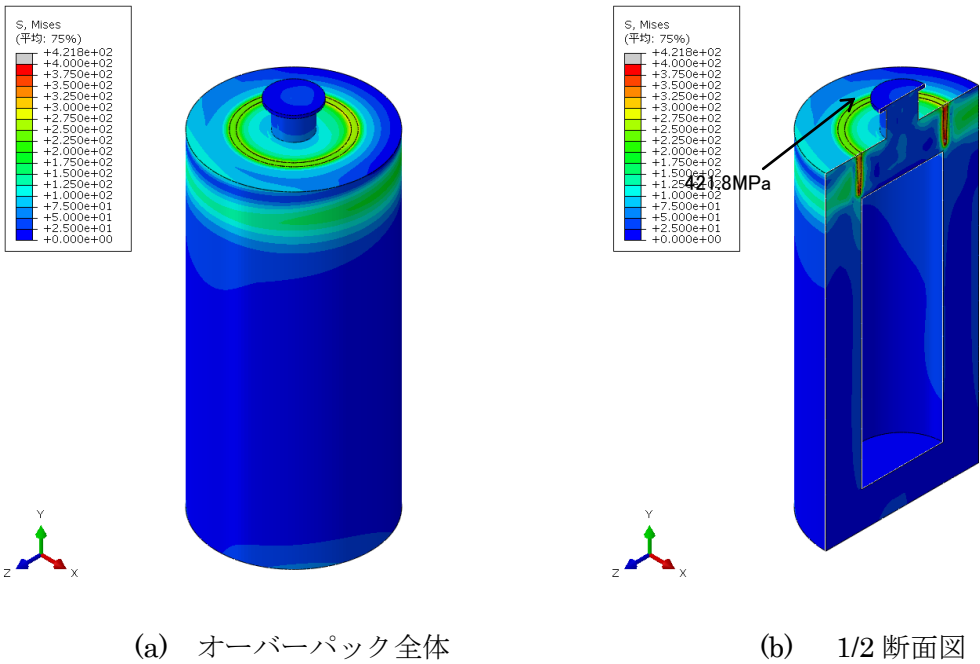
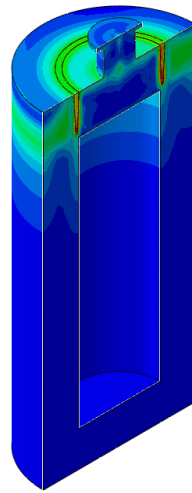
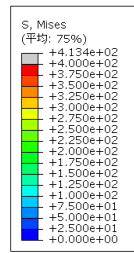
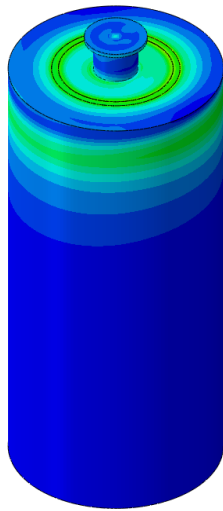
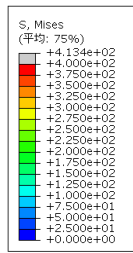


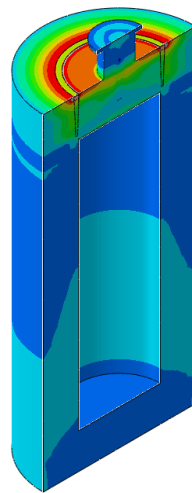
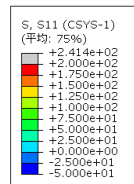
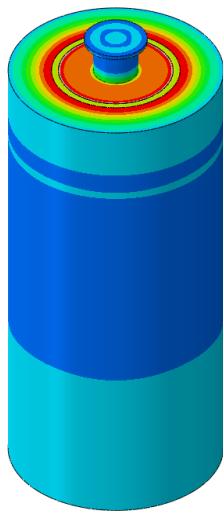
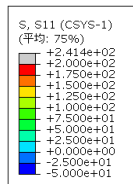
図 4.2.7-82 火災発生後 3,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

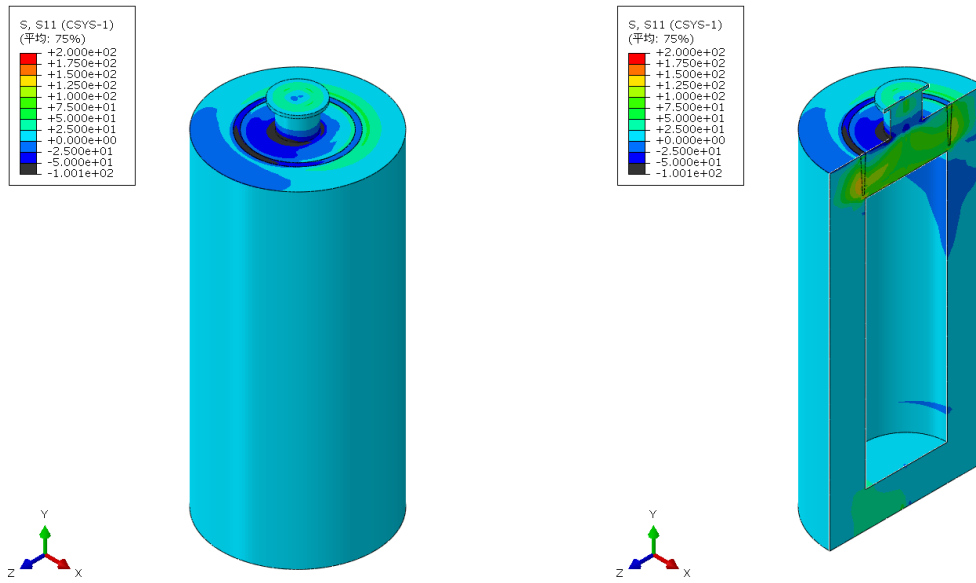
図 4.2.7-83 火災発生後 10,000 秒経過時の相当応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

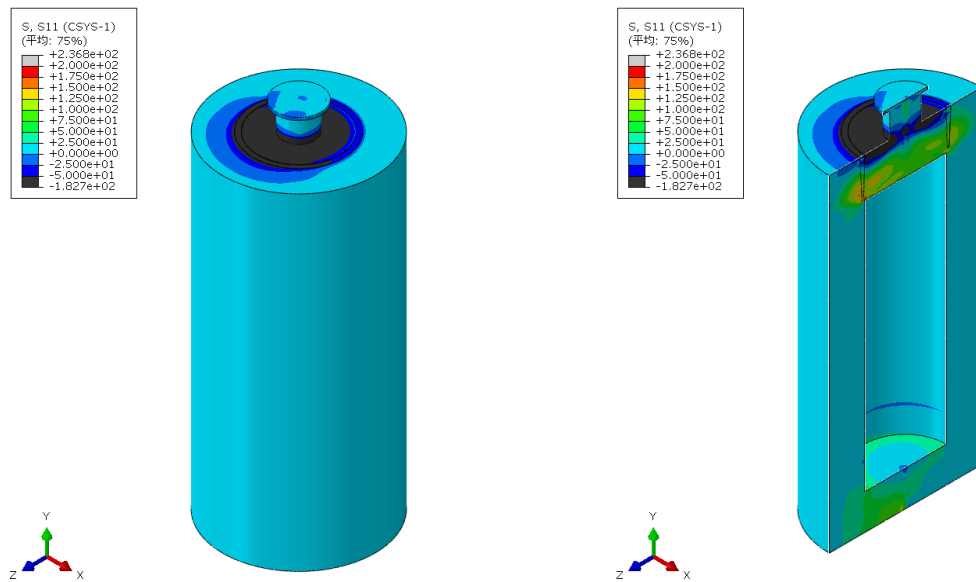
図 4.2.7-84 初期半径方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

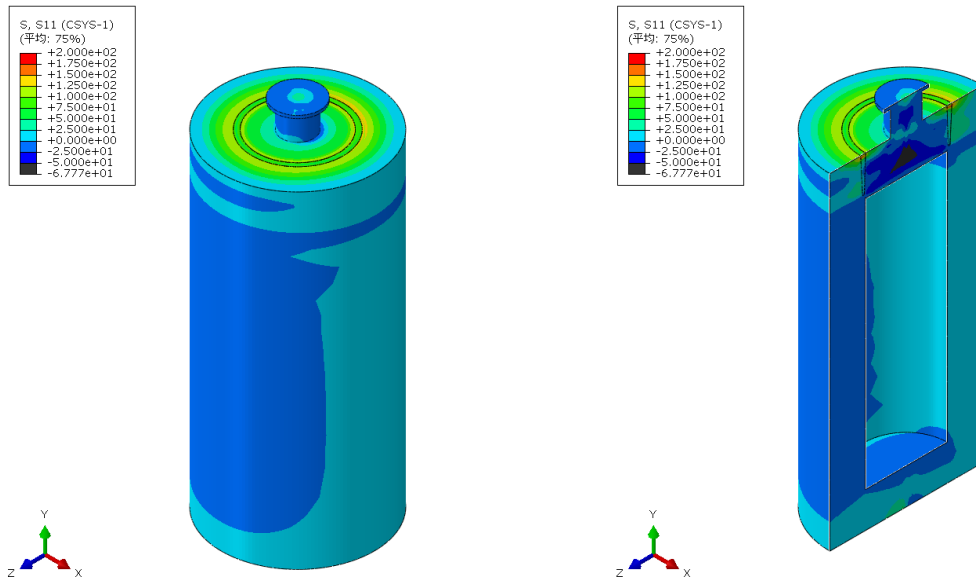
図 4.2.7-85 火災発生後等価応力最大時（600 秒）の半径方向応力分布図（単位：MPa）



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

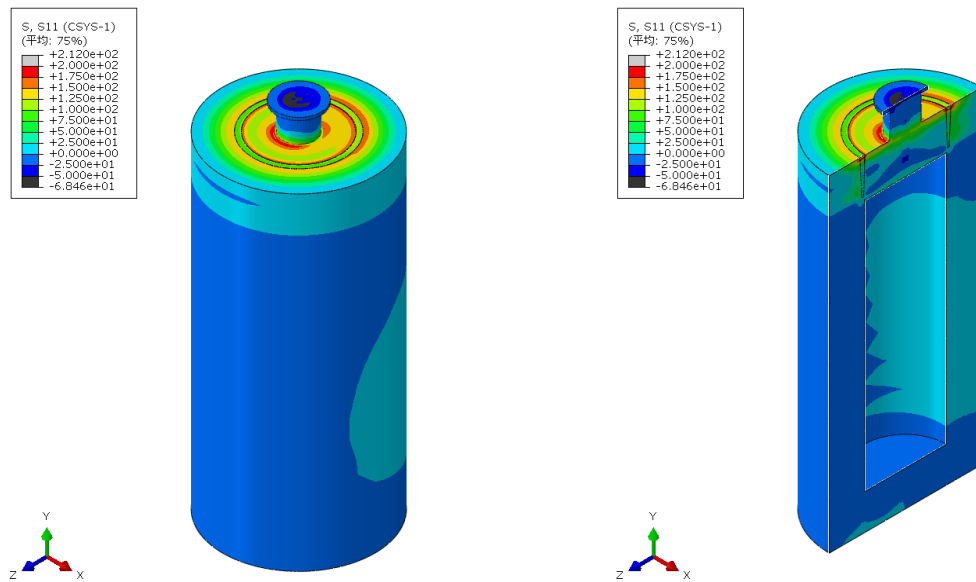
図 4.2.7-86 火災発生後最高温度到達時（1,440 秒）の半径方向応力分布図（単位：MPa）



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

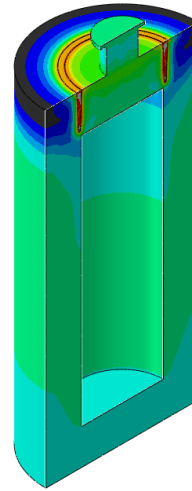
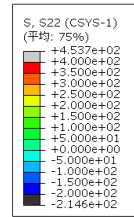
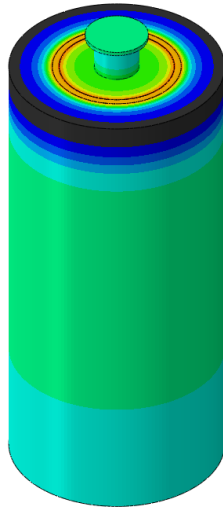
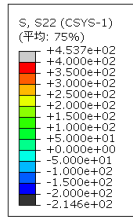
図 4.2.7-87 火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

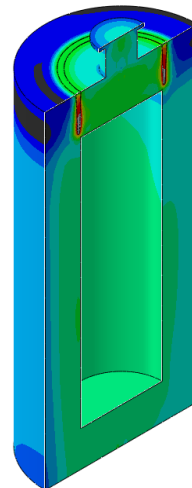
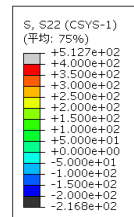
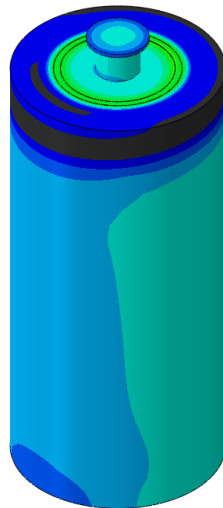
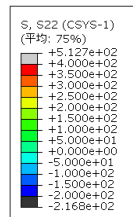
図 4.2.7-88 火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

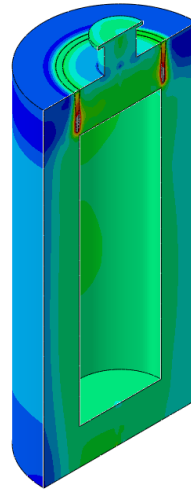
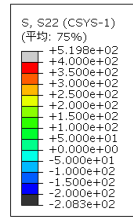
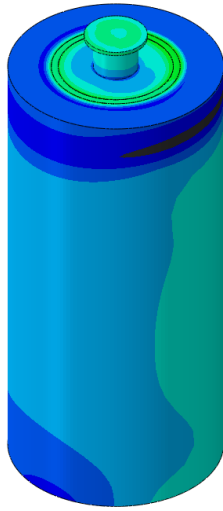
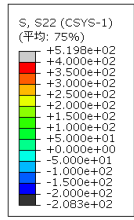
図 4.2.7-89 初期周方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

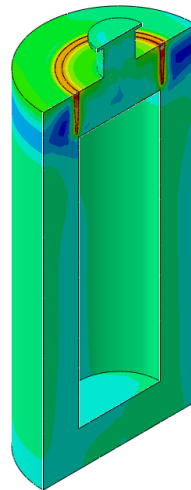
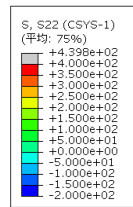
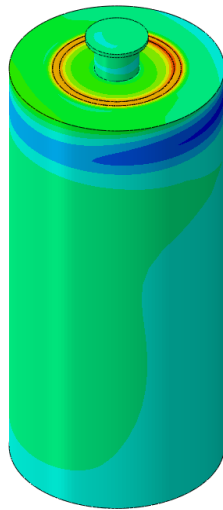
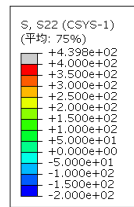
図 4.2.7-90 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の周方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

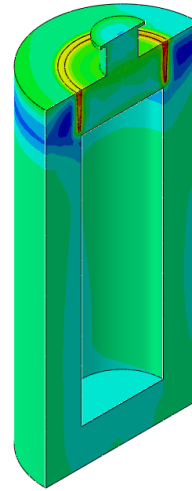
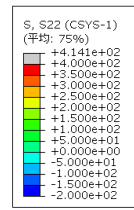
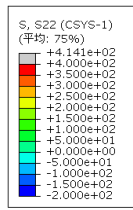
図 4.2.7-91 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の周方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

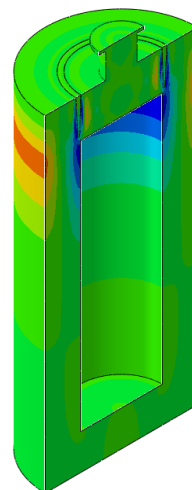
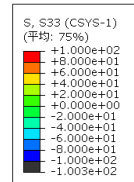
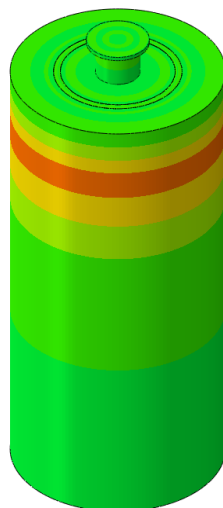
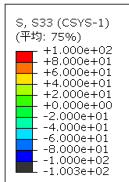
図 4.2.7-92 火災発生後 3,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位 : MPa)



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

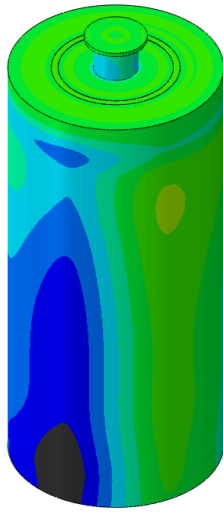
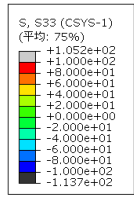
図 4.2.7-93 火災発生後 10,000 秒経過時の周方向応力分布図 (単位 : MPa)



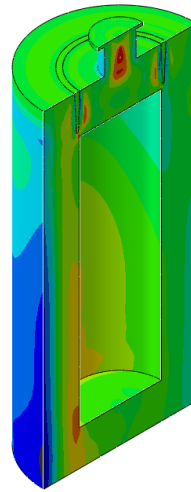
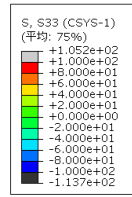
(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-94 初期軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

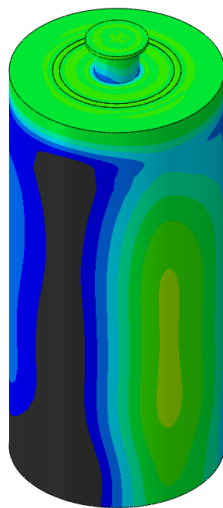
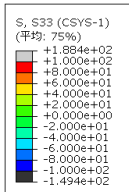


(a) オーバーパック全体

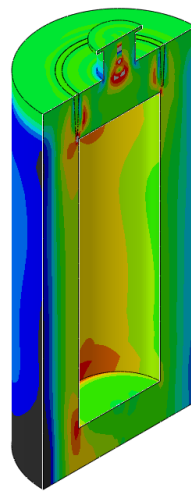
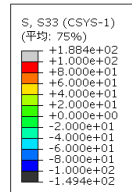


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-95 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

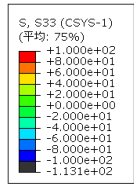


(a) オーバーパック全体

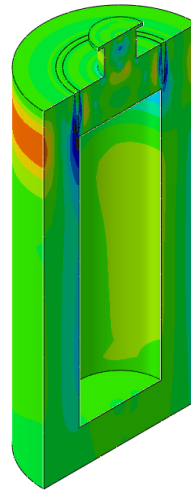
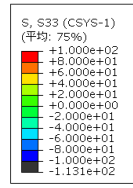


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-96 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の軸方向応力分布図 (単位 : MPa)

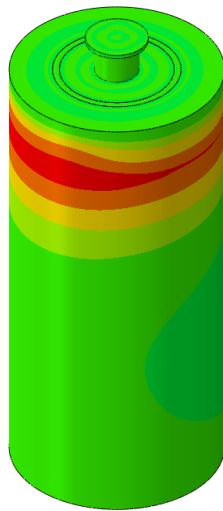
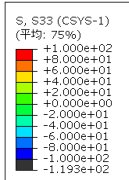


(a) オーバーパック全体

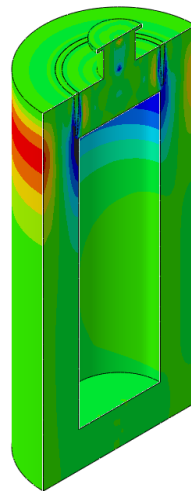
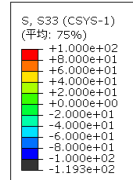


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-97 火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位: MPa)



(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-98 火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向応力分布図 (単位: MPa)

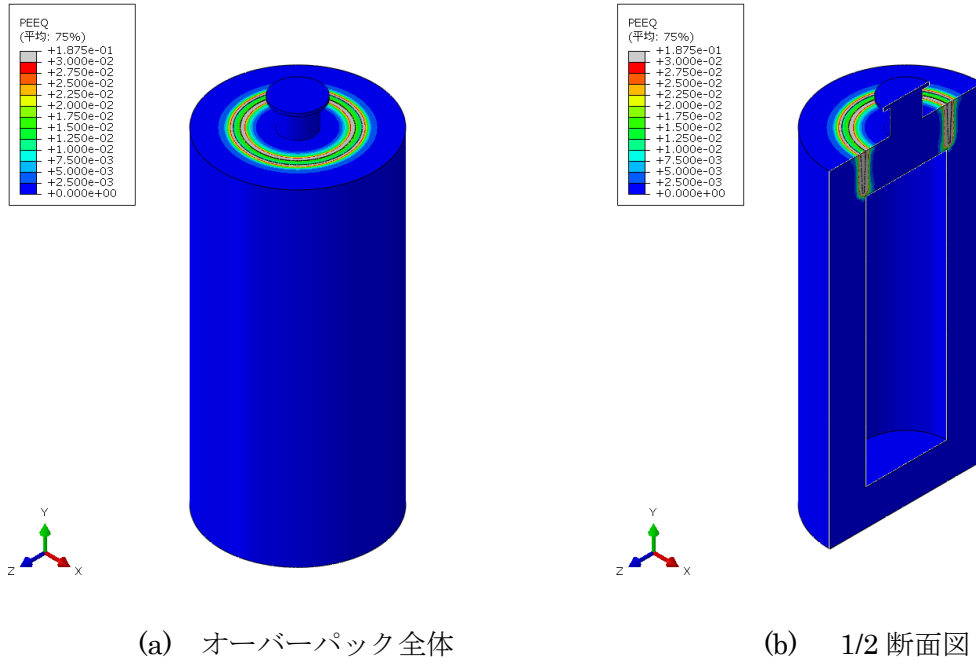


図 4.2.7-99 初期相当塑性ひずみ分布図

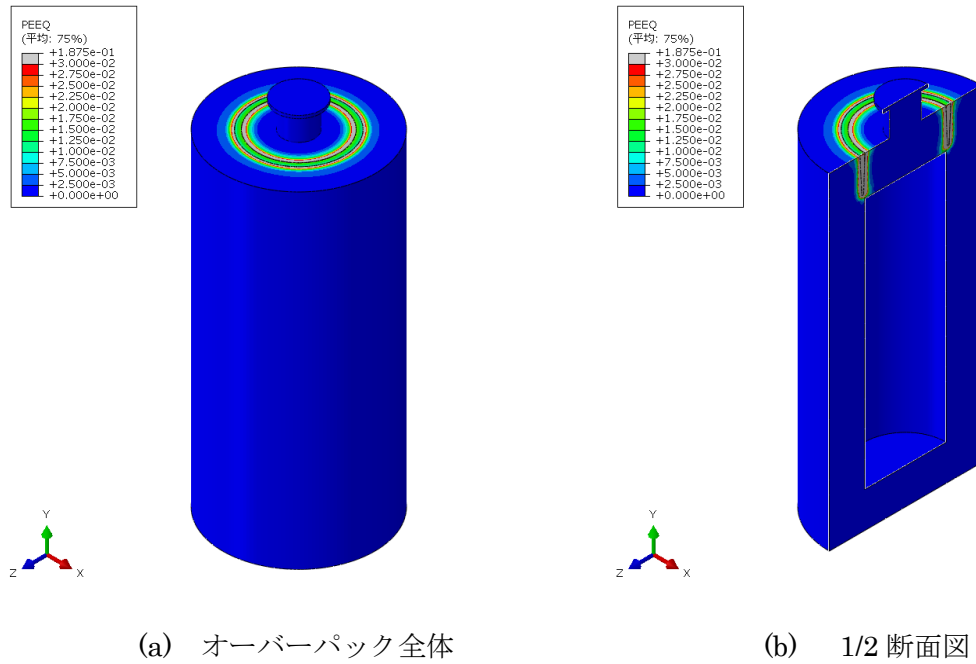
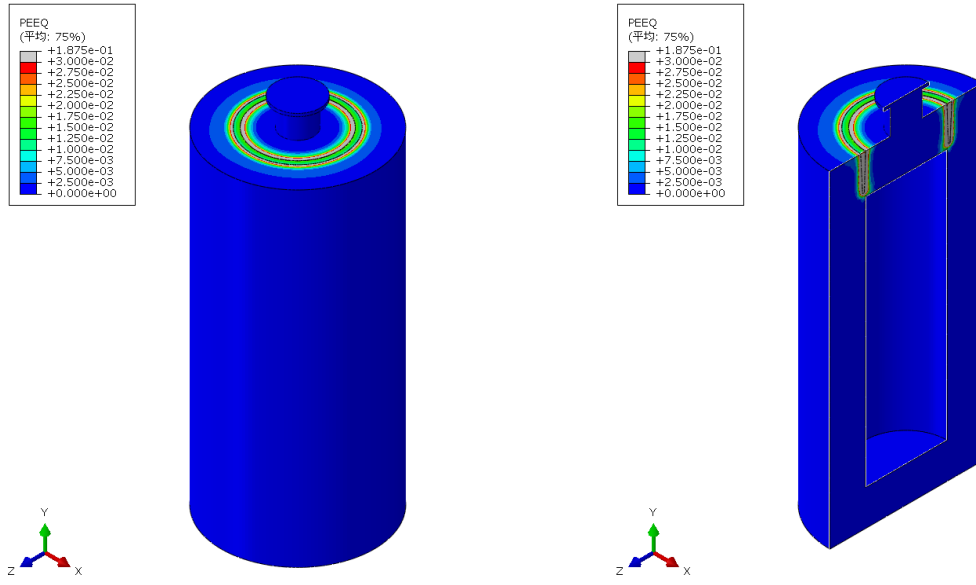


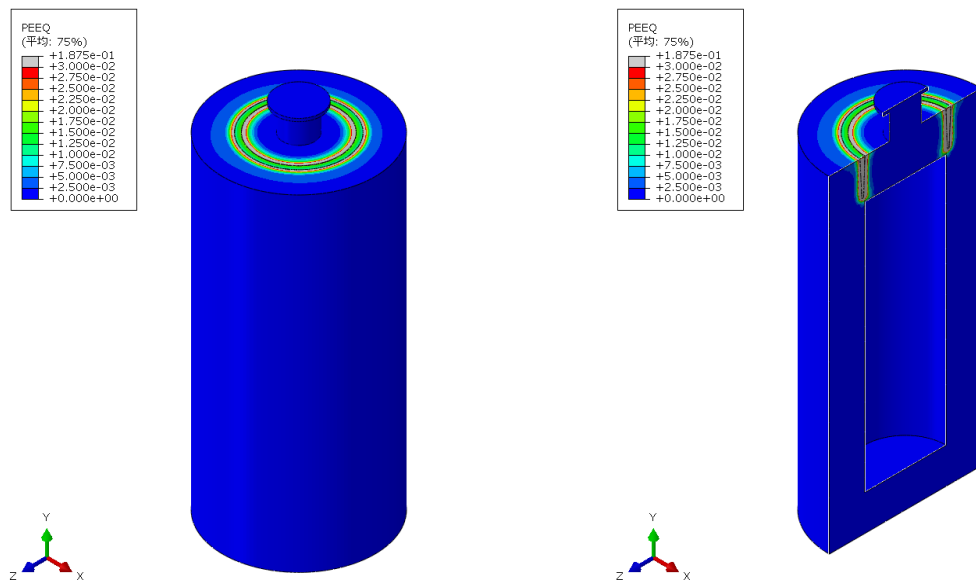
図 4.2.7-100 火災発生後等価応力最大時（600 秒）の相当塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

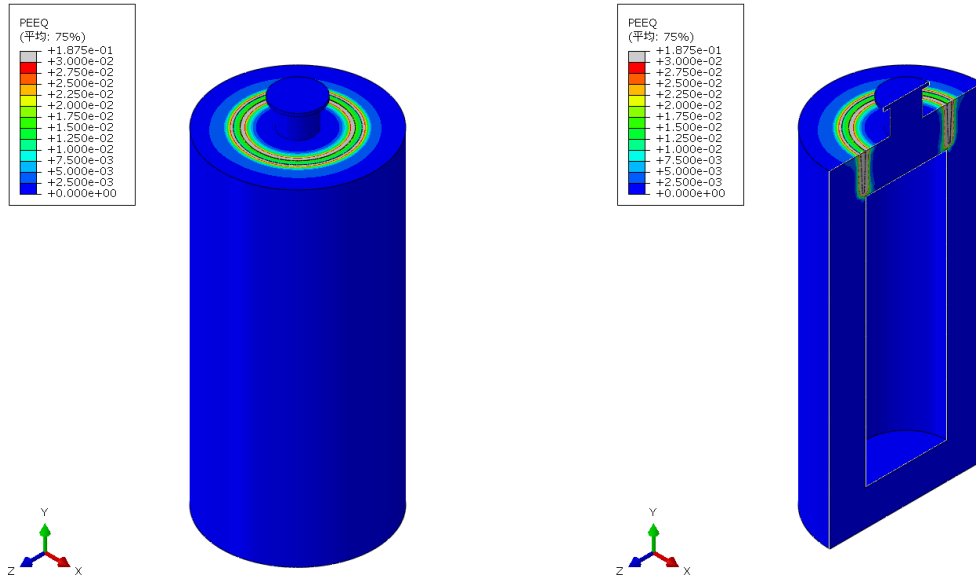
図 4.2.7-101 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の相当塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

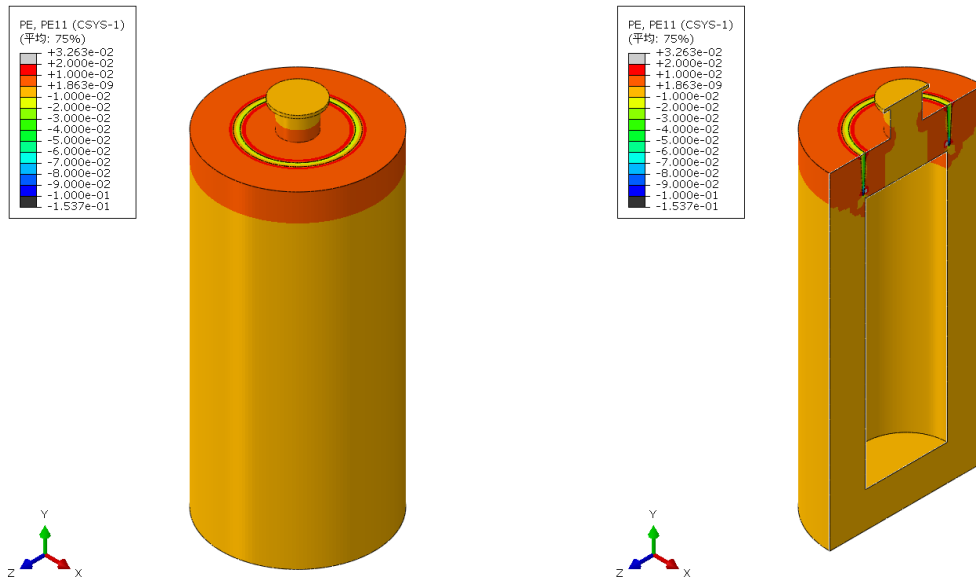
図 4.2.7-102 火災発生後 3,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

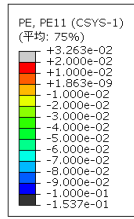
図 4.2.7-103 火災発生後 10,000 秒経過時の相当塑性ひずみ分布図



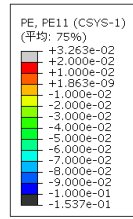
(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-104 初期半径方向塑性ひずみ分布図

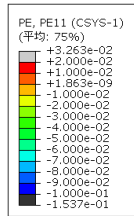


(a) オーバーパック全体

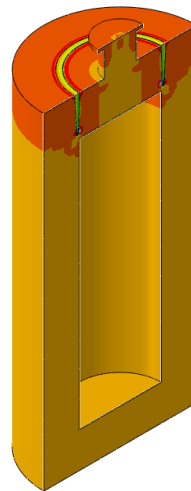
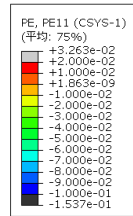


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-105 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図

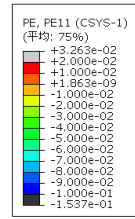
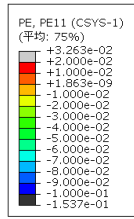


(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

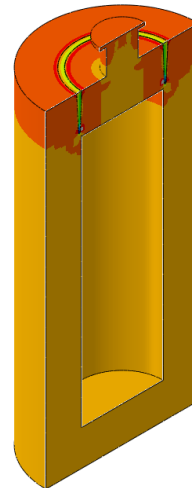
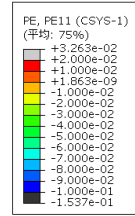
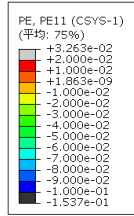
図 4.2.7-106 火災発生後最高温度到達大時 (1,440 秒) の半径方向塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

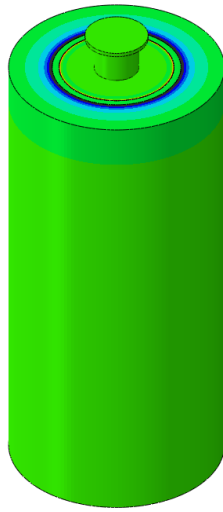
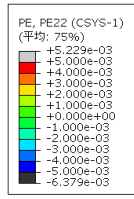
図 4.2.7-107 火災発生後 3,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図



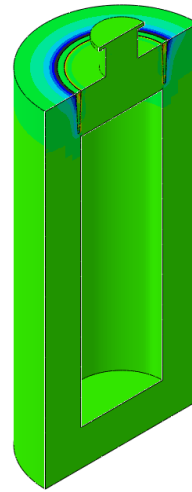
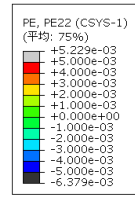
(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-108 火災発生後 10,000 秒経過時の半径方向塑性ひずみ分布図

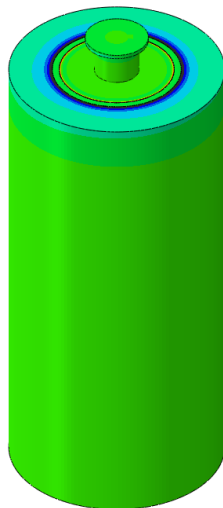
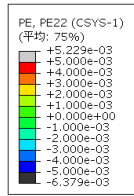


(a) オーバーパック全体

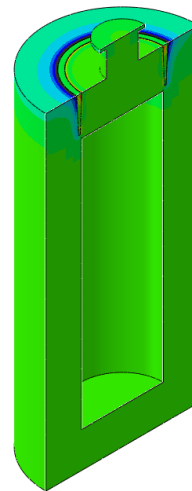
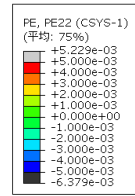


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-109 初期周方向塑性ひずみ応力分布

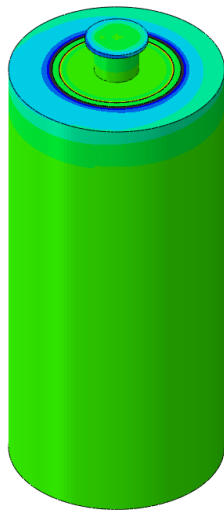
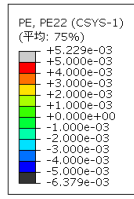


(a) オーバーパック全体

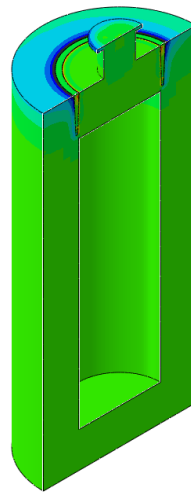
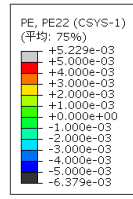


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-110 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の周方向塑性ひずみ分布図

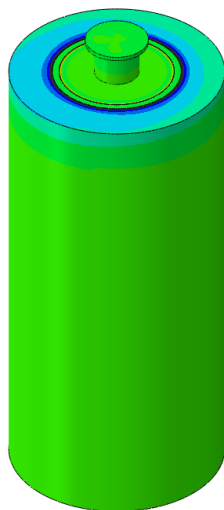
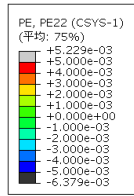


(a) オーバーパック全体

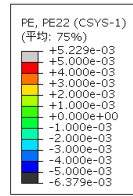


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-111 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の周方向塑性ひずみ分布図

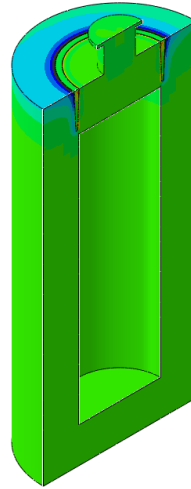
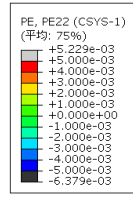
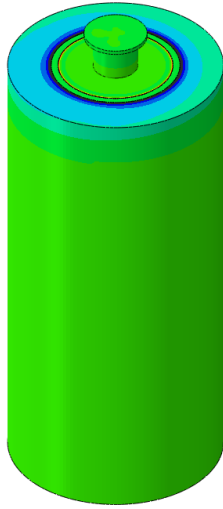
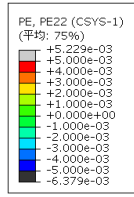


(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

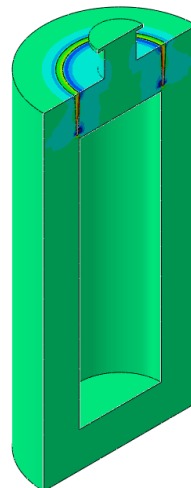
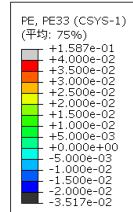
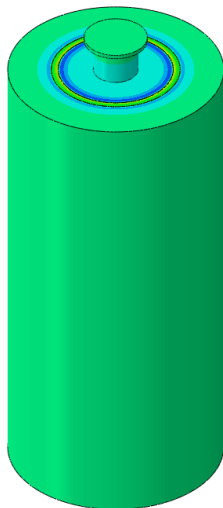
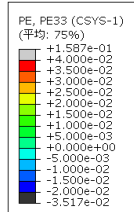
図 4.2.7-112 火災発生後 3,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

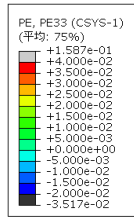
図 4.2.7-113 火災発生後 10,000 秒経過時の周方向塑性ひずみ分布図



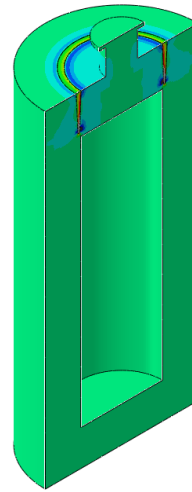
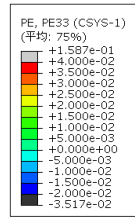
(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-114 初期軸方向塑性ひずみ分布図

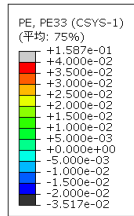


(a) オーバーパック全体

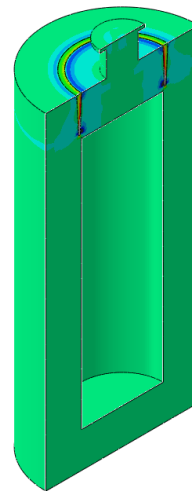
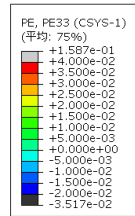


(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-115 火災発生後等価応力最大時 (600 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図

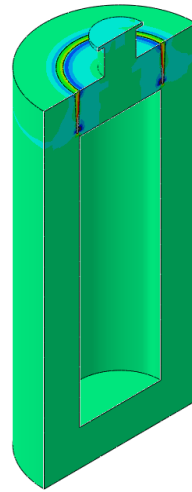
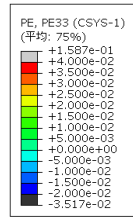
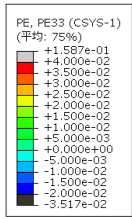


(a) オーバーパック全体



(b) 1/2 断面図

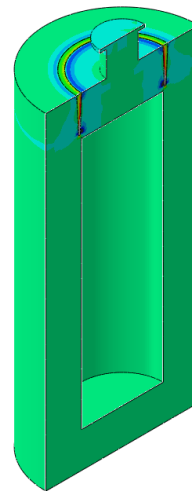
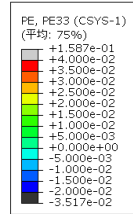
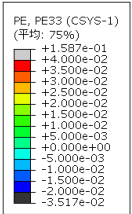
図 4.2.7-116 火災発生後最高温度到達時 (1,440 秒) の軸方向塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-117 火災発生後 3,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図



(a) オーバーパック全体

(b) 1/2 断面図

図 4.2.7-118 火災発生後 10,000 秒経過時の軸方向塑性ひずみ分布図

3) 緩衝材設置後（ケース 2：換気 2.0m/s）

ケース 2 の燃焼解析結果において述べたとおり、オーバーパックは火災の影響をほとんど受けず、温度変動はおよびそれに伴う応力変動は微小であると考えられるため、本検討においては伝熱解析および応力解析は実施しないこととした。

4.2.8 考察と今後の課題

(1) 考察

（燃焼解析）

解析手法は電池火災の詳細が不明のため、バッテリーパックの表面からエチレンが放出されたとした。放出量は完全燃焼の場合、発熱曲線に合った量と設定した。目標の発熱曲線と解析結果として求めた発熱量は図 4.2.8-1（ケース 1A）及び図 4.2.8-2（ケース 1B）で比較したものである。時系列データは火災の初期段階及び 1,000 秒以降の消える段階において、よく一致している。但し、200～1000 秒の間では発熱量が大きな変動を示しながら、目標曲線を 50MW（ケース 1A）、20MW（ケース 1B）ほど下回る。この間の発熱は、定置装置から右へ 10m 以遠まで続いている（図 4.2.7-9、図 4.2.7-18）。原因は昨年度のプールファイヤーでも見られたように、多量な燃料に対して局所的に酸素濃度が足りず、燃料が燃焼することなく計算領域から流出したことによるものと考えられる。また、燃焼が一時的に収まり換気によって十分な酸素が供給されると燃焼が活発化し、発熱量が目標曲線に近づいてくると推測できる。

ケース 1A は熱が発生する領域、又は、ガスの高温領域が天井近辺に限られることが目立つ。ケース 1B の場合は炎が坑道の全断面に広がっていた。この違いは、風速が大きくなることにより坑道内の気流が大きく乱れるためである。図 4.2.8-3 は坑道内の 4 点におけるガス流速の時間による変化を示す。定置装置上の気流は流速の平均が負、つまり、流れが右から左に向いていると分かる。流れが右から左に向いているために、可燃ガスが上流に流れ込んで燃えてしまうため、定置装置の前でもガスの温度が上がる原因となる。物理現象は図 4.2.8-4 の概念図のように、流速が遅い場合は燃焼ガスが浮力によって天井に上がり、そこから広がっていく。一方、流速が速ければ、燃焼ガスが気流によって下流に流されてしまう。

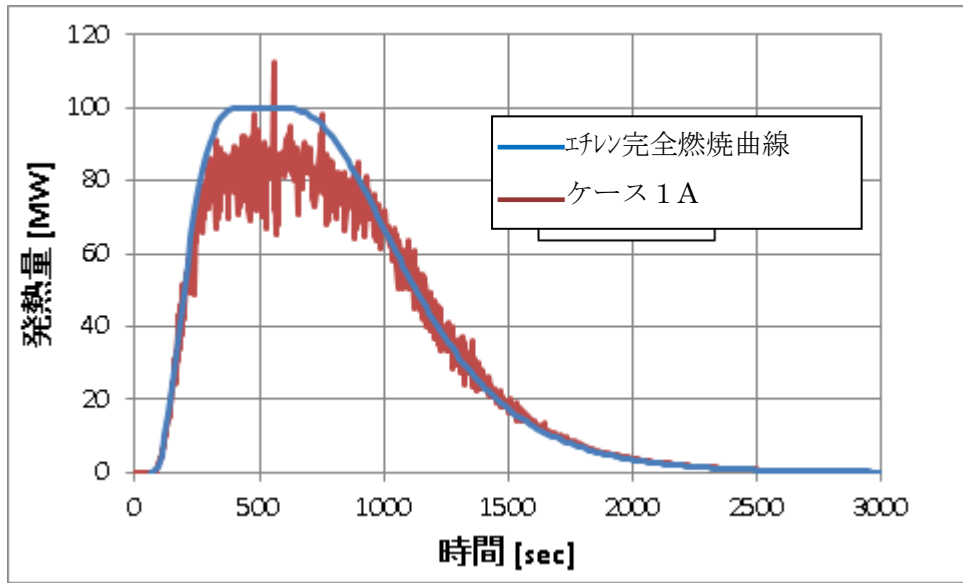


図 4.2.8-1 Li-ion 電池の火災における発熱量(ケース 1A)
(解析結果との比較)

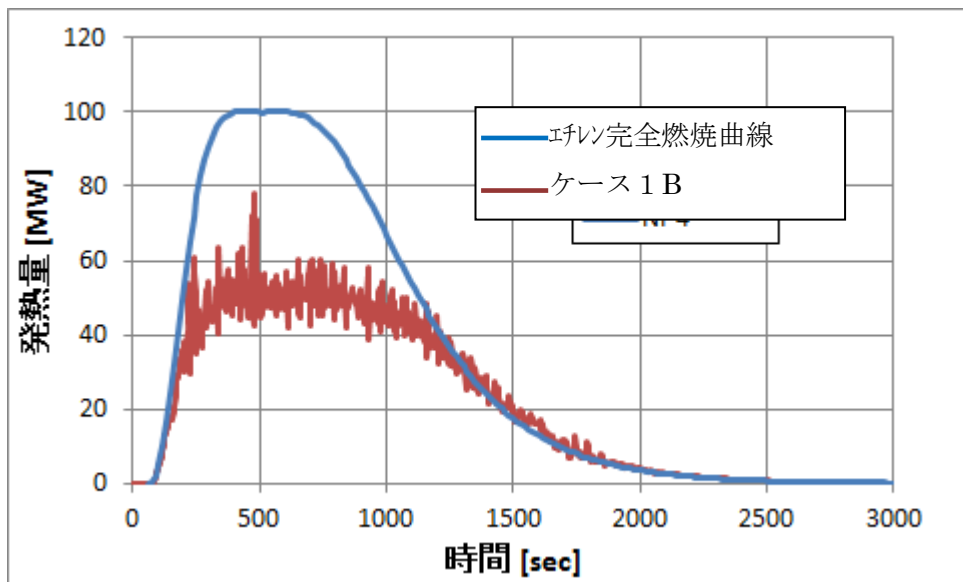


図 4.2.8-2 Li-ion 電池の火災における発熱量(ケース 1B)
(解析結果との比較)

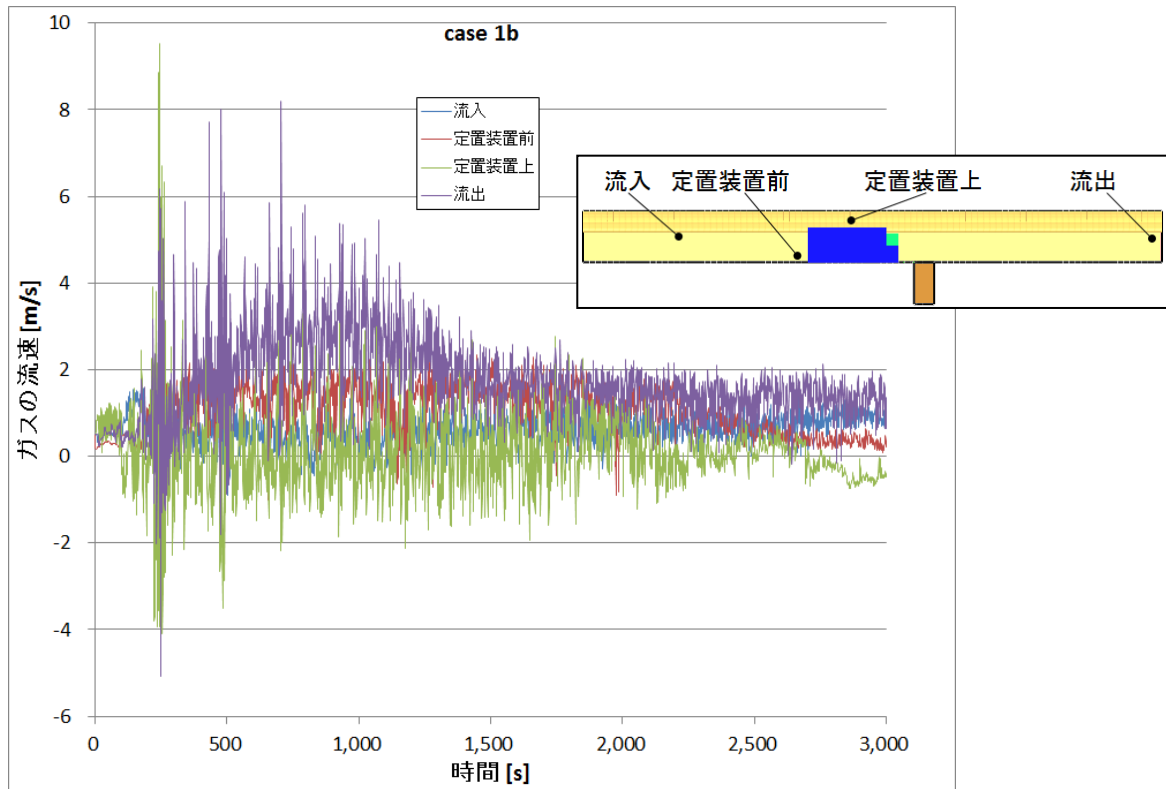


図 4.2.8-3 ガス流速（坑道方向成分）の時間による変化（ケース 1b）
（正方向：左から右へ）

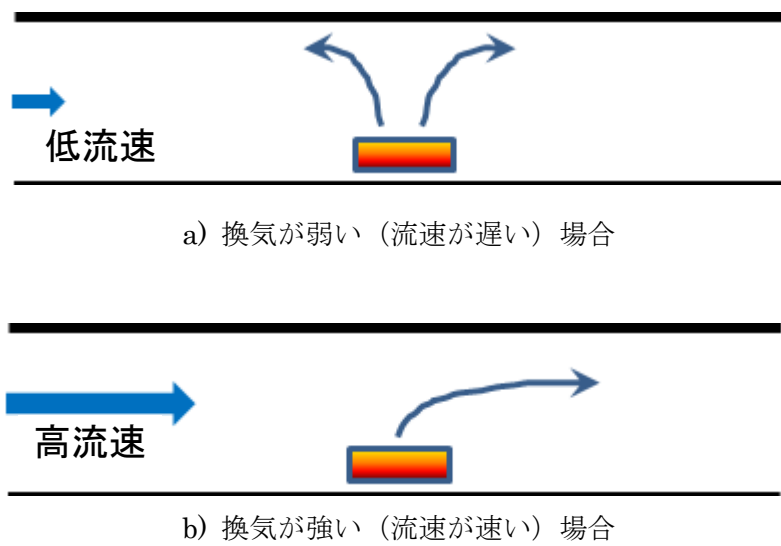


図 4.2.8-4 換気の火災（燃焼ガスの広がり）への影響について

(伝熱・応力解析分)

本年度実施した解析ケースでは、火災によるオーバーパックへの入熱は蓋上面からが主であるため、伝熱解析ではオーバーパック蓋上部の温度上昇が顕著である解析結果となった。特にケース 1A においては、蓋上部が局所的に 1,000°C 超となる部位が見られた(図 4.2.7-73 参照)。

また、1,000°C 超の最高温度到達時におけるオーバーパックの胴部の温度は、上部近傍の領域を除くと 200°C 以下であり、入熱量が大きいケース 1B においてもガラスの温度上昇は約 1.5°C にとどまった(図 4.2.7-78 参照)。

ケース 1B の応力解析では、図 4.2.7-80 や図 4.2.7-81 において見られるように、温度分布に伴って生じる熱応力が胴部にも見られるが、図 4.2.7-83 のように火災後に初期温度分布に戻ると、蓋部近傍を除いて初期応力分布に近い状態に戻ることがわかる。初期状態と比べて最も応力分布に変化が見られた蓋部近傍は、火災前は溶接部近傍だけが溶接収縮していることで蓋外周部が圧縮応力場になっていたものが、火災の入熱による蓋部の温度上昇が胴部に比べて著しく大きく、蓋部全体に周方向圧縮塑性ひずみが入ることで(図 4.2.7-111 参照)、蓋部の圧縮応力が大きく緩和された(図 4.2.7-93 参照)ことが主因と思われる。オーバーパックへの入熱量がケース 1B に比べて小さいケース 1A では、塑性ひずみの変動はほとんど見られず、火災前後の応力変動も軽微である結果となった。

また、本年度の検討では溶接部に溶接残留応力を初期応力として導入しているため、図 4.2.7-79 に示すように、溶接のルート部において 422MPa 程度の等価応力が生じている。これは、溶接金属部の収縮ひずみが蓋外周部に拘束され、大きな周方向引張応力が生じていることが主たる原因となっているが(図 4.2.7-89 参照)、蓋外周部は火災の入熱により熱膨張するため、溶接ルート部の周方向引張応力が大きくなり(図 4.2.7-90 および図 4.2.7-91 参照)、図 4.2.7-80 に示すように、等価応力は 438MPa 程度まで上昇することが分かった。

(2) 今後の課題

(燃焼解析)

地下施設での搬送・定置作業は電動機械の検討が進んでいるため、電池による火災を検討した。但し、本解析は適用した仮定が小規模で行われた燃焼実験結果から概算した条件に基づいた。燃焼実験は容量 100Wh の電池で行われ、その結果を自動車用 10kWh のバッテリーパックへの概算としている。但し、ここでは定置装置用の電池容量が 1300kWh の規模であり、自動車の 130 倍、実験で使われた電池の容量を 4 桁ほど超えてしまう。従って、電池火災における発熱量は予測精度に疑問が残る。より大規模の試験で取得されたデータを用いて、本解析に用いた条件の妥当性を確認する必要がある。

ディーゼルエンジンを原動力とする機械によるトンネル火災が研究されている。Hansen らによれば、ディーゼルエンジン機械の発熱量は 100MJ 程度である[26]。今回の電池火災は発熱量が 100GJ と概算され、ディーゼルエンジン機械を 3 桁ほど上回った。従って、定置装置の設計を進めることに当たって、電動式及びディーゼルエンジン式の火災による発熱量についてより精度の高い調査・検討が必要と考える。

(伝熱・応力解析分)

平成 25 年度および本年度の火災解析において、オーバーパックおよびガラス固化体キャニスタが地上施設および地下施設で火災に遭うことを想定した伝熱解析と応力解析を行った。これらにより火災解析手法としては、以下の手法が整備された。

- ①FDS を用いた燃焼解析によるオーバーパックへの熱流束分布の時刻歴変化の算出
- ②熱流束分布時刻歴データをオーバーパックに与えた伝熱解析
- ③伝熱解析結果を用いた応力解析

今後は、以下の項目が課題と考えられる。

- ✓ガラス固化体キャニスタ内のガス圧を考慮した応力解析
- ✓溶接残留応力低減処理を施したオーバーパックが火災に遭った時の応力解析
- ✓ガラス固化体キャニスタおよびオーバーパックの健全性評価手法の検討

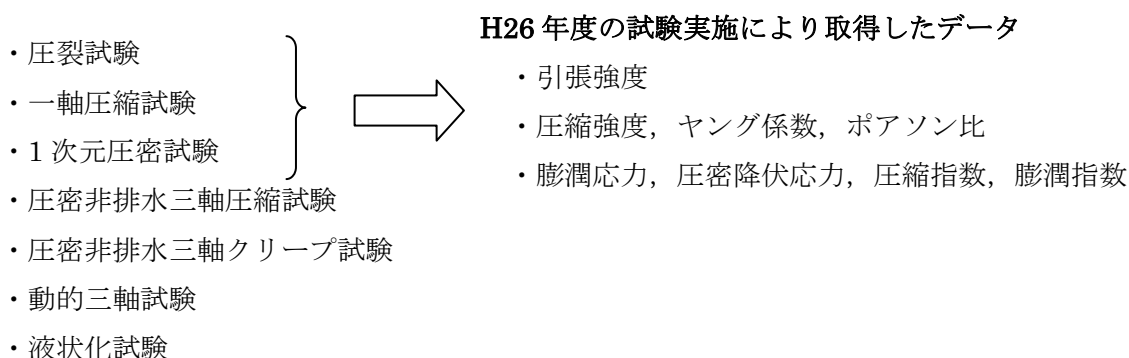
4.3 地下施設における火災発生を想定した緩衝材の特性データの取得

地層処分施設における火災事故を想定し、緩衝材を介したオーバーパックやガラス固化体キャニスタの温度履歴に対する解析的検討の実施および解析結果の信頼性を向上するために、緩衝材の高温時の力学的性質を取得したものである。

4.3.1 試験目的

解析的な検討においては、使用する材料の物性値を適切に設定することが信頼性を向上する上で重要である。

人工バリアの構成要素の一つである緩衝材について、第2次取りまとめ[9]では、常温（20℃前後）での力学的性質に対する様々なデータが取得され、具体的には、以下に示す試験から緩衝材の力学的性質の取得より、処分場の設計に用いられている。



しかし、火災のような高温に曝された緩衝材の力学的性質について取得された事例がないため、火災時（および火災後）の操業安全性を解析的に評価するために必要となる、力学的性質に対するデータの取得・蓄積を目的とする（

表 4.3.1-1）。

表 4.3.1-1 人工バリア材料の力学特性取得状況

人工バリア構成	候補材質	常温 (20℃前後)	高温 (火災時等) 例えば 1,000℃
ガラス固化体	ガラス	既知	未知
ガラス固化体 キャニスタ	ステンレス鋼	既知	未知
オーバーパック	炭素鋼	既知	未知
緩衝材	ベントナイト+ケイ砂	既知	未知

(1) 既往の力学特性の取得状況

1) 圧裂試験

a. 試験条件

高治ら[27]は、乾燥密度とケイ砂混合率をパラメータとし、試験手順などは岩石の引張強さと試験方法（JIS M 0303）に基本的に準拠して試験が行われている。試験におけるベントナイトの含水比は約 7%（自然含水比）、ひずみ速度は約 $1\% \text{ min}^{-1}$ 、供試体のサイズは、乾燥密度 $1.4, 1.6, 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ の仕様は直径 49mm、高さ 49mm、乾燥密度 2.0 Mg m^{-3} の仕様は直径 30mm、高さ 30mm とし、同条件に対して 3 本の試験を実施している。

b. 試験結果

試験より得られた乾燥密度 $\rho_d [\text{Mg m}^{-3}]$ と引張強度 $\sigma_t [\text{MPa}]$ の関係を図 4.3.1-1 に示す。乾燥密度が大きく、ケイ砂混合率が小さいほど引張強度は大きくなる傾向が得られている。また、有効粘土密度 $\rho_e [\text{Mg m}^{-3}]$ と引張強度 $\sigma_t [\text{MPa}]$ の関係で整理することにより、圧縮ベントナイトの引張強度は、有効粘土密度との関係において 1 本の指数曲線によって表現できることも明らかにされている。

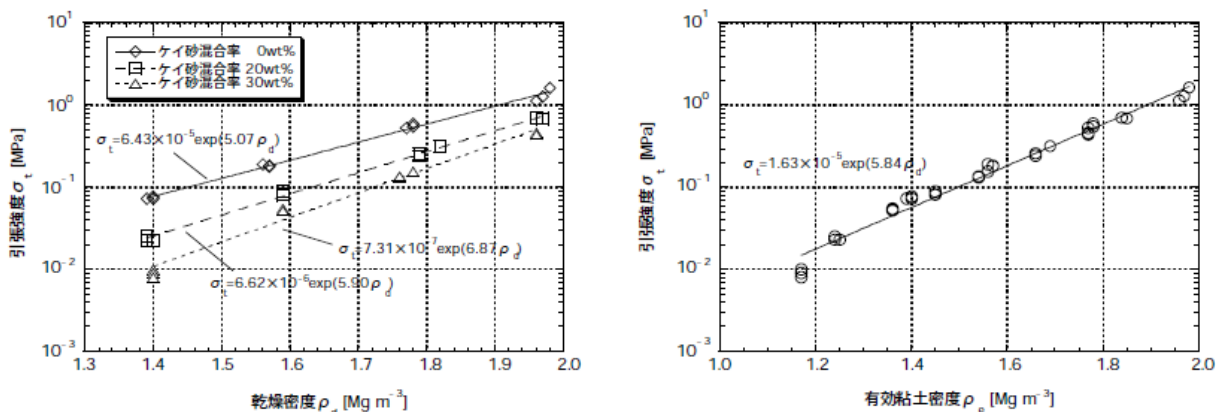


図 4.3.1-1 ケイ砂混合率ごとの密度と引張強度の関係[27]

2) 一軸圧縮試験

a. 試験条件

高治ら[27]は、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} の 30wt%ケイ砂混合体および乾燥密度 $1.6, 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ のベントナイト単体について、供試体の含水比を自然含水比相当（6.81%）からほぼ飽和状態（22.53%）までの試験水準に対し、一軸圧縮試験を行っている。供試体サイズは直径 30mm、高さ 60mm、ひずみ速度は 0.1 mm min^{-1} （ひずみ速度約 $0.17\% \text{ min}^{-1}$ ）としている。また、試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準 JGS T 511 に準拠している。

b. 試験結果

試験の結果から得られた、含水比 ω [%] と一軸圧縮強度 q_u [MPa] の関係を図 4.3.1-2、含水比 ω [%] と弾性係数 E_{50} [MPa] の関係を図 4.3.1-3 に示す。一軸圧縮強度と弾性係数

は、含水比が高い程低下するが、一軸圧縮強度は飽和に近づくにつれて減少の割合は小さくなるのに対し、弾性係数は減少の割合がほぼ一定であることを明らかにしている。

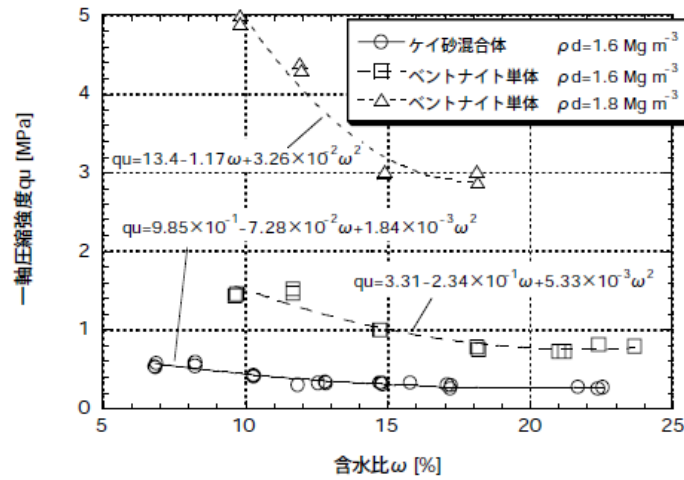


図 4.3.1-2 一軸圧縮強度の含水比依存性[9]

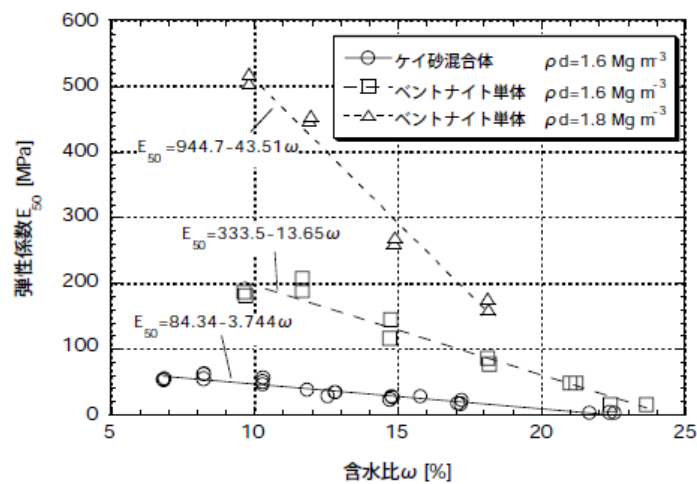


図 4.3.1-3 弾性係数の含水比依存性[9]

3) 一次元圧密試験

a. 試験条件

並河ら[28]は、一次元圧密試験は、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} の 30wt%ケイ砂混合体および乾燥密度 1.6Mg m^{-3} と 1.8Mg m^{-3} のベントナイト単体について実施している。供試体寸法は直径 60mm、高さ 20mm で、同条件に対して 3 本の試験が実施されている。試験は、供試体の給水、飽和により発生する膨潤応力がほぼ一定になった時点初期条件とし、19.6MPa まで 8 段階で荷重を載荷し、その後、初期膨潤応力相当まで 4 段階で除荷し、再び 19.6MPa まで 4 段階で載荷している。また、各段階の載荷応力は対数軸上で載荷応力の間隔が等しくなるよう設定している。各載荷段階での圧密終了は 3t 法により判断し

ている。なお、試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準 JGS T 411 に準拠しているが、上記載荷応力などについて若干の変更が行われている。

b. 試験結果

試験結果の一例として、圧密応力と間隙比の関係 (e-logP 曲線) を図 4.3.1-4 に示す。膨潤応力および図より求められた圧密降伏応力、圧縮指数、膨潤指数を表 4.3.1-2 に示す。圧密降伏応力は Casagrande の方法 (地盤工学会、1996) により求めているが、圧密降伏応力はそれぞれの仕様における膨潤応力より若干大きい値となり、圧密初期の段階では過圧密状態にあることが明らかにされている。膨潤指数は 19.6MPa における点と膨潤圧相当まで除荷した点とを結んだ傾きにより求めている。乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体とベントナイト単体では、初期間隙比、圧密降伏応力は異なるが、圧縮指数、膨潤指数に大きな差は見られなことが明らかにされている。

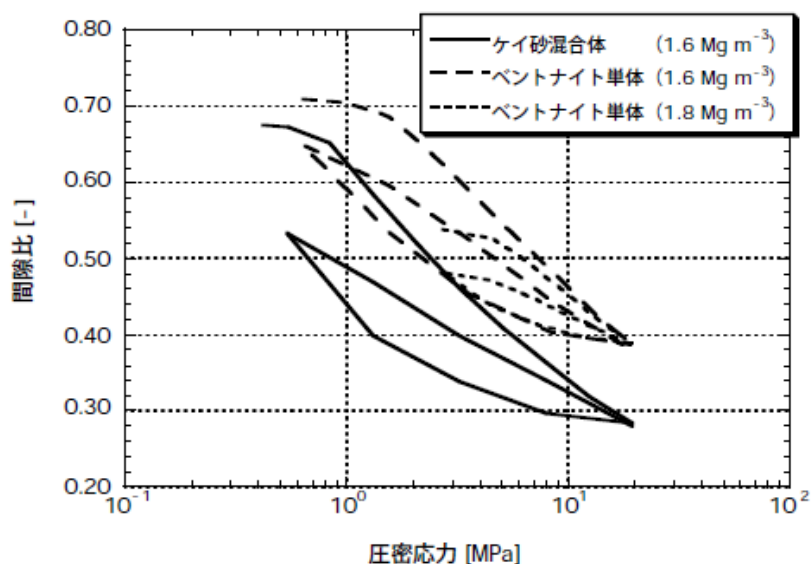


図 4.3.1-4 一次元圧密試験結果[9]

表 4.3.1-2 膨潤応力, 圧密降伏応力, 圧縮指数, 膨潤指数一覧

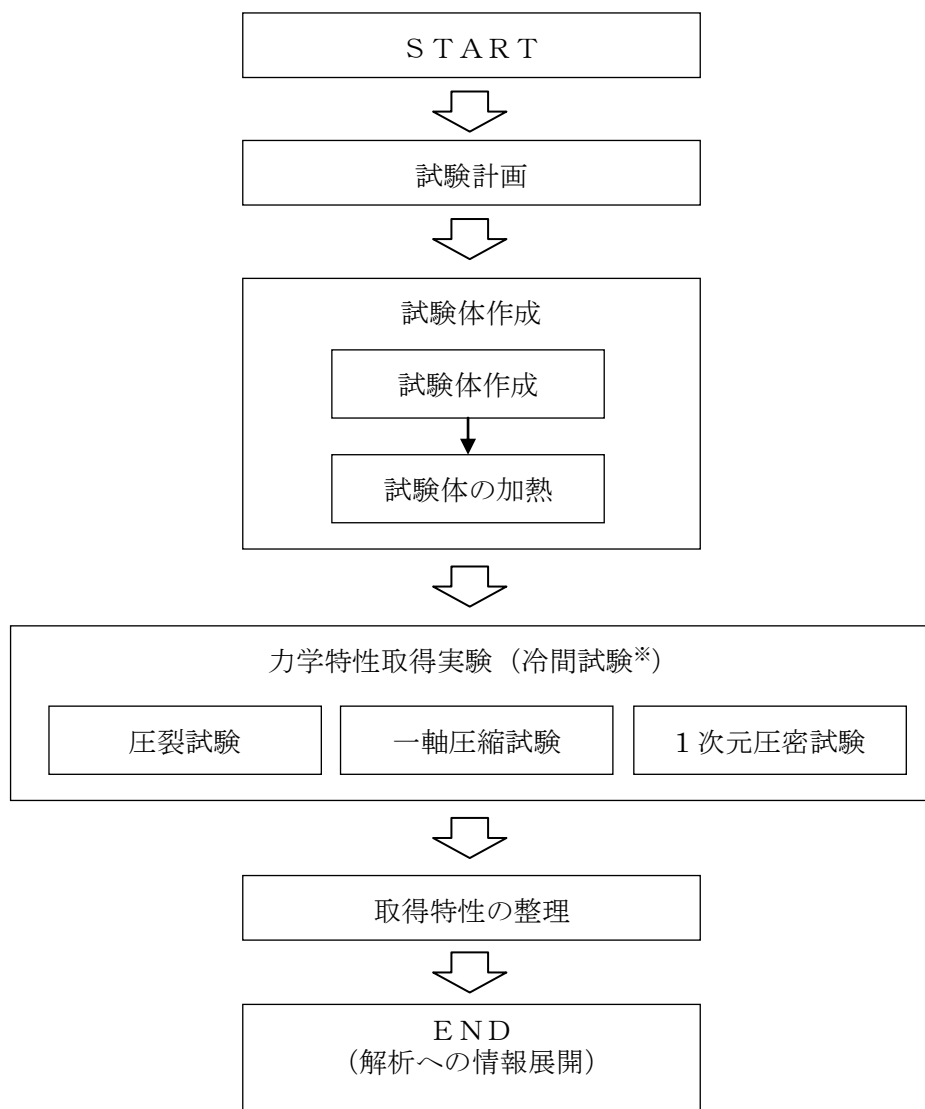
	ケイ砂混合体 1.6Mg m^{-3}	ベントナイト単体 1.6Mg m^{-3}	ベントナイト単体 1.8Mg m^{-3}
膨潤応力 [MPa]	約 0.5	約 0.6	約 2.7
圧密降伏応力 [MPa]	0.8	1.5	4.7
圧縮指数 [-]	0.27	0.27	0.21
膨潤指数 [-]	0.16	0.18	0.11

4.3.2 試験方法

(1) 試験方法および取得特性

図 4.3.2-1 に実施フローを示す。

試験に用いる試験体について、加熱実験炉を用いて所定の温度に曝して作成した後、加熱後の緩衝材に対して試験室温度（約 20℃）で力学的性質の取得を行った。



※冷間試験：加熱後の緩衝材に対して試験室温度で性質取得を行う試験

図 4.3.2-1 実施フロー

(2) 試験対象材料

試験に用いた材料の基本的な仕様を表 4.3.2-1 のとおりとする。

表 4.3.2-1 試験対象材料の仕様

材料	材料構成	乾燥密度	飽和度	含水比
緩衝材	ベントナイト 70% (クニゲルV1) + ケイ砂 30% (3号ケイ砂 15%, 5号ケイ砂 15%)	1.6Mg/m ³	60%	16%

(3) 試験体の加熱方法

加熱実験炉等 (図 4.3.2-2) を用いて、500℃程度及び 1000℃程度に試験体の加熱を行い、試験体を作成した。なお、入熱条件としては ISO834[29]の標準火災温度曲線相当 (図 4.3.2-3) とした。



図 4.3.2-2 加熱実験炉の例

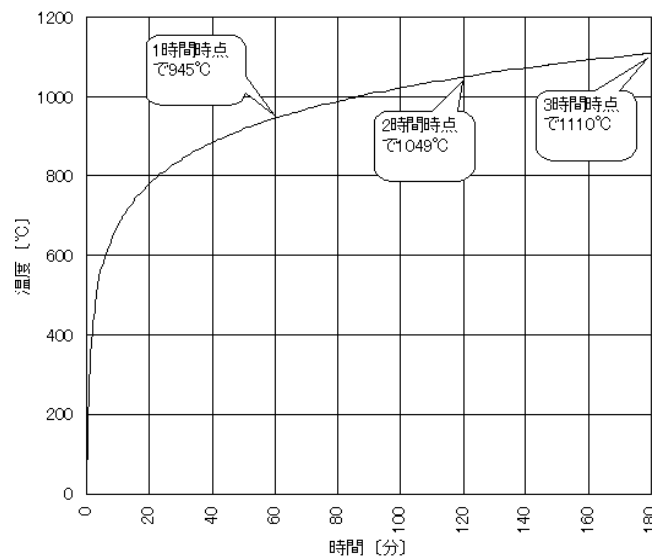


図 4.3.2-3 ISO834 の標準火災温度曲線

(4) 取得特性

取得した力学的性質は、力学解析に必要となる特性（引張強度、圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比）とした。

前述したように、常温における力学的性質についてはデータを取得した事例はあるが、本開発において取得するデータの連続性、および 100℃を境として性質が変わる可能性（非線形性の可能性）などを考慮し、100℃以下における熱特性および 100℃以上における熱特性を取得した。

(5) 力学的性質の取得方法

力学的性質の取得は、第 2 次取りまとめで採用されている試験方法に準拠して実施する。なお、試験に用いる試験体は、各試験において 3 体/加熱水準とする。また、力学性質取得試験において取得した物性値については、力学解析で用いることを念頭に整理を行った。

- ・圧裂試験：「岩石の引張強さ試験方法」（JIS M 0303）に準拠

供試体寸法：直径 50mm，高さ 50mm

載荷速度：荷重を加えて破壊するまでの時間を 1～15 分間

計測項目：荷重，変位

取得データ：引張強度

- ・一軸圧縮試験：地盤工学会基準「土の一軸圧縮試験方法」（JGS T 511）に準拠

供試体寸法：直径 50mm，高さ 100mm

載荷速度：1%/min

計測項目：荷重，変位，横変位

取得データ：圧縮強度，ヤング係数，ポアソン比

なお、横変位については、クリップケージを用いて計測した。使用したクリップゲージの図面を図 4.3.2-4 に示す。

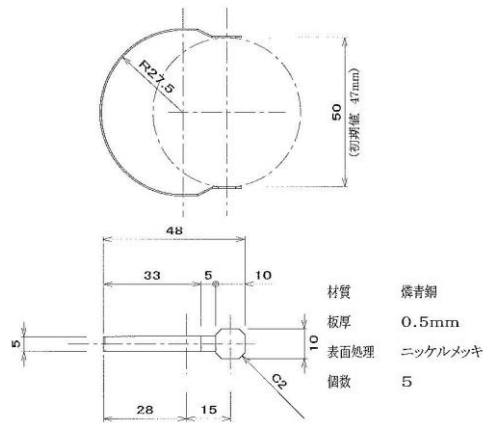


図 4.3.2-4 クリップゲージ図

- ・ 1次元圧密試験：地盤工学会基準「土の段階载荷による圧密試験方法」(JGS T 411) に準拠
 - 供試体寸法：直径 30mm，高さ 20mm
 - 圧密・膨潤終了判定：経時変化をプロットして収束を確認
 - 計測項目：時間，荷重，変位
 - 取得データ：膨潤応力，圧密降伏応力，圧縮指数，膨潤指数

試験手順

- 1) 試験体を圧密容器にセットする。
- 2) 変形を拘束した状態で、試験体下部から注水し、膨潤応力を測定する。
- 3) 膨潤応力の経時変化より、収束を確認する。

(6) 試験ケースおよび数量

上記の内容をまとめて、緩衝材の力学的性質の取得に向けた本作業の試験ケースの概要を表 4.3.2-2、表 4.3.2-3 に示す。また、試験ケース名を表 4.3.2-2 に示す。

表 4.3.2-2 緩衝材の力学的性質の取得に向けた試験ケース数

パラメータ	ケース数	摘要
加熱温度	3	20, 500, 1,000°C
試験項目	3	圧裂試験、一軸圧縮試験、1次元圧密試験

試験体数：加熱温度 3 種類×試験項目 3 種類×試験当たりの試験体 3 体=27 体

加熱に供する試験体数：加熱温度 2×試験種類 3 種類×試験当たりの試験体 3 体=18 体

表 4.3.2-3 試験数量

試験項目	加熱条件	試験数	
圧裂試験	20℃	3	9
	500℃	3	
	1000℃	3	
一軸圧縮試験	20℃	3	9
	500℃	3	
	1000℃	3	
1次元圧密試験	20℃	3	9
	500℃	3	
	1000℃	3	

表 4.3.2-4 試験ケース名一覧

試験ケース名※	試験水準		摘要
	加熱条件	試験方法	
圧裂-20-1	20℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-20-2	20℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-20-3	20℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-500-1	500℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-500-2	500℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-500-3	500℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-1000-1	1000℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-1000-2	1000℃	圧裂試験	引張強度
圧裂-1000-3	1000℃	圧裂試験	引張強度
一軸-20-1	20℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-20-2	20℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-20-3	20℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-500-1	500℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-500-2	500℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-500-3	500℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-1000-1	1000℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-1000-2	1000℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
一軸-1000-3	1000℃	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比
圧密-20-1	20℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-20-2	20℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-20-3	20℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-500-1	500℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-500-2	500℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-500-3	500℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-1000-1	1000℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-1000-2	1000℃	1次元圧密試験	膨潤応力
圧密-1000-3	1000℃	1次元圧密試験	膨潤応力

※：試験ケース名は、“試験名-加熱条件-実験体 NO.”の順にて略号を付けた

4.3.3 試験体の製作

熱特性の取得に用いる試験体のうち緩衝材は、ベントナイト（クニゲル V1）70wt%とケイ砂 30wt%が含有されたものである。緩衝材の製作は、含水比を調整して混練した試料を、載荷装置を用いてプレス整型して作製した。使用した材料はベントナイト（クニミネ工業製クニゲル V1）、ケイ 3 号、ケイ砂 5 号である。



図 4.3.3-1 クニゲル V1 (クニミネ工業)



図 4.3.3-2 ケイ砂 3 号



図 4.3.3-3 ケイ砂 5号

作製手順を図 4.3.3-4 に示す。試験体の成型誤差は飽和度 $\pm 2\%$ 、乾燥密度 $\pm 0.02\text{Mg/m}^3$ となるように製作時の管理をした。

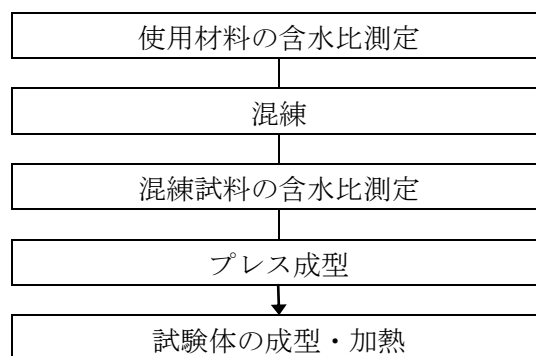


図 4.3.3-4 試験体の作製手順

(1) 使用材料の含水率測定

使用する材料（クニゲル、ケイ砂 3号、ケイ砂 5号）それぞれの開封時の含水比を測定した。

(2) 混練

クニゲル V1、ケイ砂 3号、ケイ砂 5号と水をミキサーに入れ、一分間混練を行った。混練の際、クニゲル V1、ケイ砂 3号、ケイ 5号は、質量比が 7:1.5:1.5 となるように調整して投入した。水は、成型後に仕様の飽和度、乾燥密度を満たすような含水比を計算し、それに合わ

せて投入する量を決定した。

(3) 混練試料の含水比測定

混練を行なった試料の含水比を測定し、適切な含水比を得ていることを確認した。

(4) 試料のプレス成型

試料成型用の冶具に混練試料を投入した。この際、炭酸ガスを同時に封入し、空気による試験体の割れを防いだ。規定量の試料を投入し、真空ポンプを用いて余分な空気を抜きつつピストンを入れた。

載荷装置を用いてピストンを押し、プレス成型を行なう。なお、載荷時および除荷時に十分な時間をかけ、試験体の割れを防いだ。

(5) 試験体の成型・加熱

[圧裂試験 試験体]

20℃ : φ 50mm でプレス成型後に長さ 50mm に成型し、20℃で養生した。

500,1000℃ : φ 50mm でプレス成型後に長さ 50mm に成型し、110℃で乾燥させた後、500, 1000℃にて加熱をした。

[一軸圧縮試験 試験体]

20℃ : φ 50mm でプレス成型後に高さ 100mm に成型し、20℃で養生した。

500,1000℃ : φ 50mm でプレス成型後に高さ 100mm に成型し、110℃で乾燥させた後、500, 1000℃にて加熱をした。

[1 次元圧密試験 試験体]

20℃ : φ 50mm でプレス成型後に高さ 20mm およびφ 30mm に成型し、20℃で養生した。

500,1000℃ : 試験体を加熱するものについては、試験体の収縮があり、圧密容器に収まらない事から、φ 50mm でプレス成型後に高さ 20mm およびφ 31~32mm に成型した。その後 110℃で乾燥させ、500℃、1000℃で試験体の加熱をした。加熱処理後にφ 30mm に成型し、圧密容器に収めた。

4.3.4 試験結果

(1) 使用した試験体の物理的特性（試験体の製作結果）

製作した試験体の特性を表 4.3.4-1 に示す。また、試験体の外観を表 4.3.4-2～表 4.3.4-10 に示す。試験体の成型誤差は飽和度±2%、乾燥密度±0.02Mg/m³となるように製作時の管理を行った。

表 4.3.4-1 試験体の物理的特性

試験体 No.	加熱 条件	試験体作製時 (w=15.8%)					加熱後試験体 (w=0%)			
		直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)	乾燥密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)	直径 (mm)	高さ (mm)	質量 (g)	乾燥密度 (Mg/m ³)
圧裂-20-1	20℃	50.0	50.0	181.54	1.597	59.4	—	—	—	—
圧裂-20-2	20℃	50.0	50.0	181.74	1.599	59.6	—	—	—	—
圧裂-20-3	20℃	50.0	50.0	181.64	1.598	59.5	—	—	—	—
圧裂-500-1	500℃	50.0	50.0	181.53	1.597	59.4	49.6	49.6	154.84	1.616
圧裂-500-2	500℃	50.0	50.0	181.44	1.596	59.4	49.6	49.6	153.67	1.603
圧裂-500-3	500℃	50.0	50.0	181.81	1.599	59.6	49.5	49.5	154.31	1.620
圧裂-1000-1	1000℃	50.0	50.0	181.97	1.601	59.8	49.9	50.7	146.55	1.478
圧裂-1000-2	1000℃	50.0	50.0	181.96	1.601	59.8	49.8	50.7	145.80	1.476
圧裂-1000-3	1000℃	50.0	50.0	181.61	1.597	59.4	50.0	50.7	146.67	1.473
一軸-20-1	20℃	50.0	96.7	350.65	1.595	59.3	—	—	—	—
一軸-20-2	20℃	50.0	97.6	353.61	1.593	59.1	—	—	—	—
一軸-20-3	20℃	50.0	97.1	352.84	1.598	59.5	—	—	—	—
一軸-500-1	500℃	50.0	96.8	351.69	1.598	59.5	49.8	96.2	298.77	1.594
一軸-500-2	500℃	50.0	97.4	351.19	1.586	58.5	49.7	96.6	300.50	1.603
一軸-500-3	500℃	50.0	97.7	352.00	1.585	58.4	49.6	96.8	300.91	1.609
一軸-1000-1	1000℃	50.0	97.0	352.27	1.597	59.4	50.6	97.2	282.26	1.444
一軸-1000-2	1000℃	50.0	97.5	352.76	1.591	58.9	50.8	97.0	284.06	1.445
一軸-1000-3	1000℃	50.0	97.0	352.90	1.600	59.7	50.7	97.0	279.86	1.429
圧密-20-1	20℃	30.0	20.0	26.10	1.594	59.2	—	—	—	—
圧密-20-2	20℃	30.0	20.0	26.07	1.592	59.0	—	—	—	—
圧密-20-3	20℃	30.0	20.0	26.14	1.597	59.4	—	—	—	—
圧密-500-1	500℃	31.0	20.0	27.85	1.593	59.1	30.0	19.2	22.23	1.638
圧密-500-2	500℃	31.0	20.0	27.88	1.595	59.3	30.0	19.2	22.03	1.623
圧密-500-3	500℃	31.0	20.0	27.93	1.598	59.5	30.0	19.6	22.19	1.602
圧密-1000-1	1000℃	31.0	20.0	27.88	1.595	59.3	30.0	20.0	21.04	1.488
圧密-1000-2	1000℃	31.0	20.0	27.95	1.599	59.6	30.0	20.0	20.59	1.456
圧密-1000-3	1000℃	31.0	20.0	27.83	1.592	59.0	30.0	20.0	20.83	1.473

表 4.3.4-2 試験体の外観（圧裂試験・20℃）

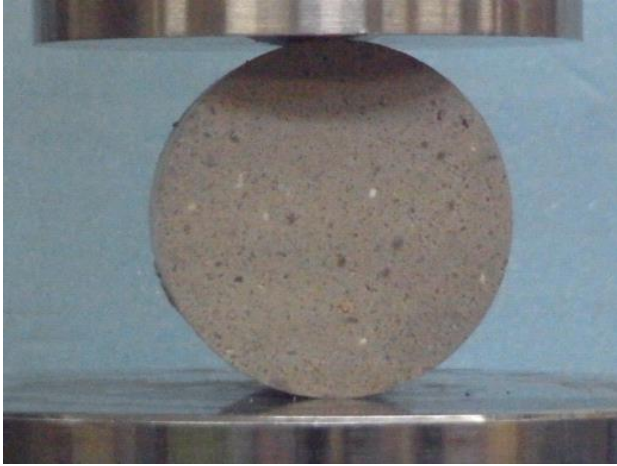
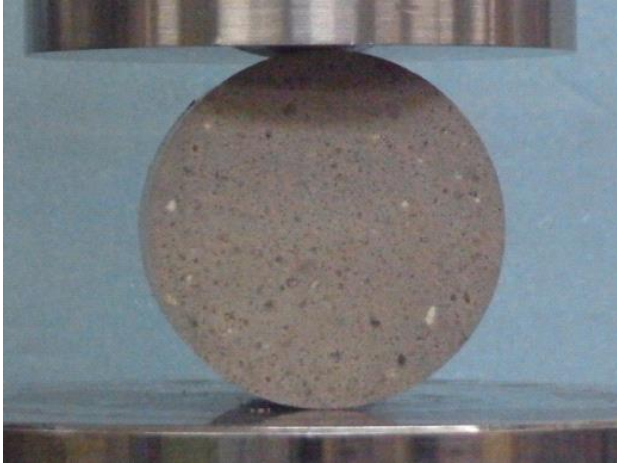
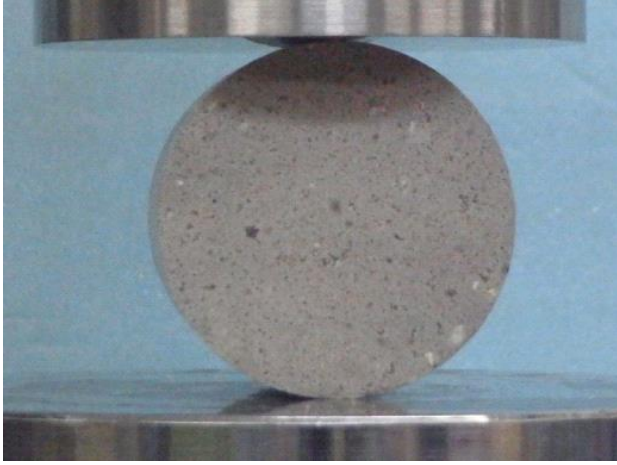
試験体 No.	外観状況
圧裂-20-1	
圧裂-20-2	
圧裂-20-3	

表 4.3.4-3 試験体の外観 (圧裂試験-500℃)

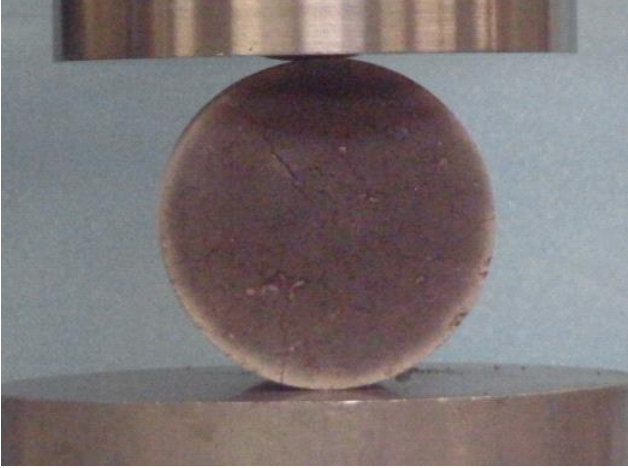
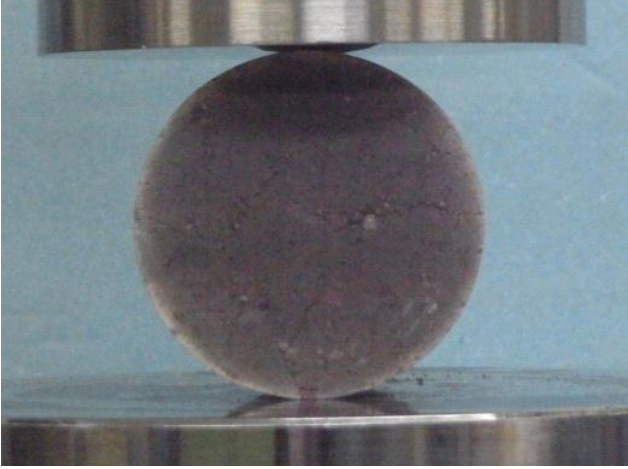
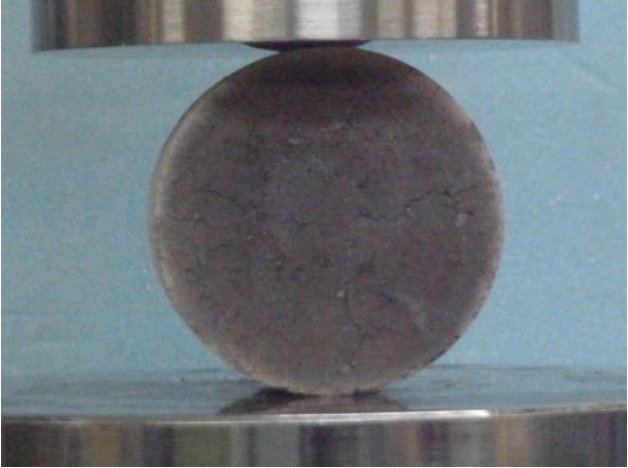
試験体 No.	外観状況
圧裂-500-1	
圧裂-500-2	
圧裂-500-3	

表 4.3.4-4 試験体の外観（圧裂試験・1000℃）

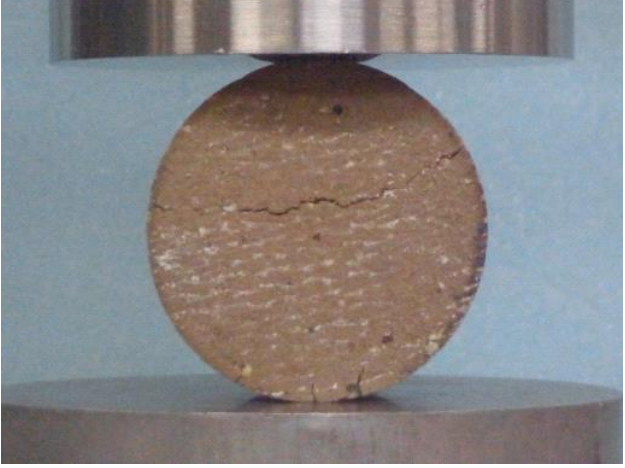
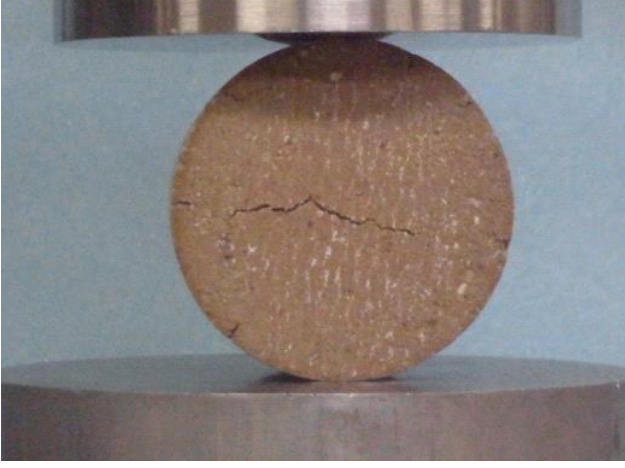
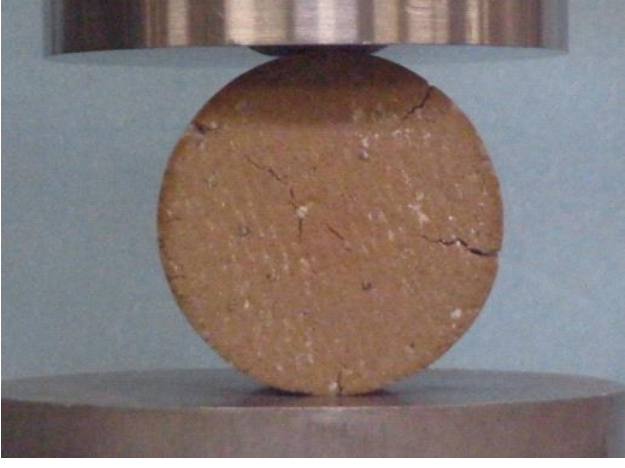
試験体 No.	外観状況
圧裂-1000-1	
圧裂-1000-2	
圧裂-1000-3	

表 4.3.4-5 試験体の外観（一軸圧縮試験-20℃）

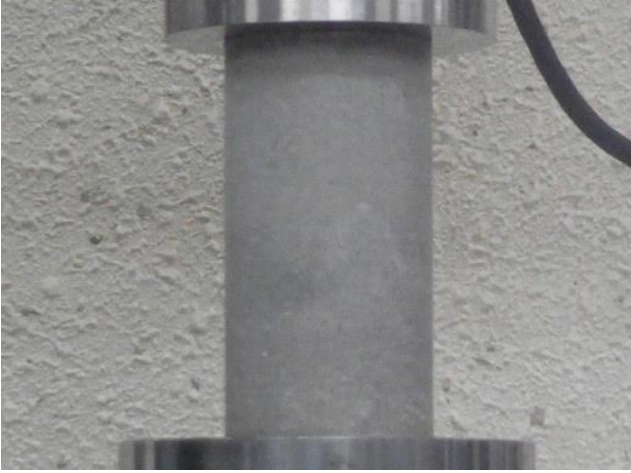
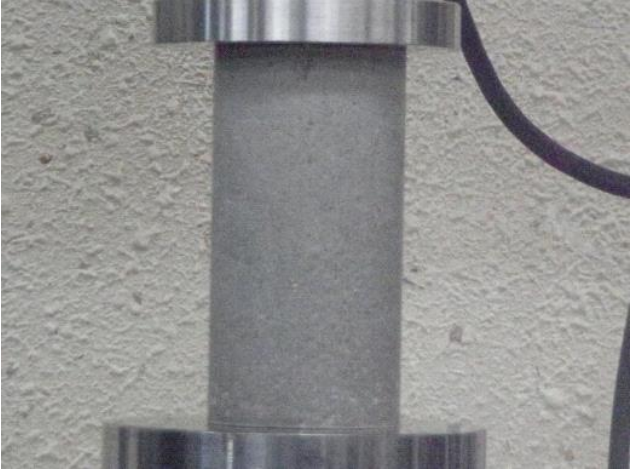
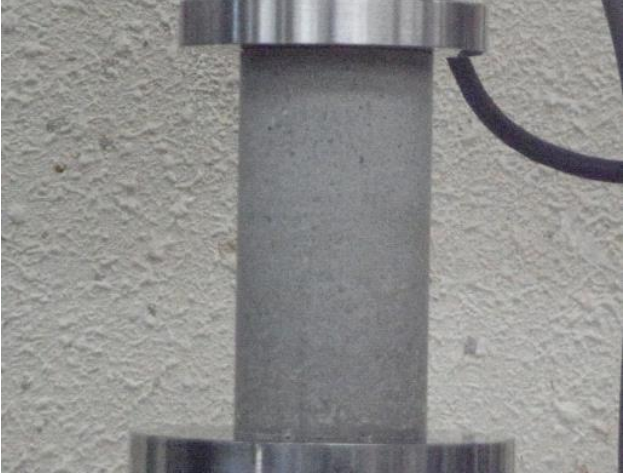
試験体 No.	外観状況
一軸-20-1	
一軸-20-2	
一軸-20-3	

表 4.3.4-6 試験体の外観（一軸圧縮試験-500℃）


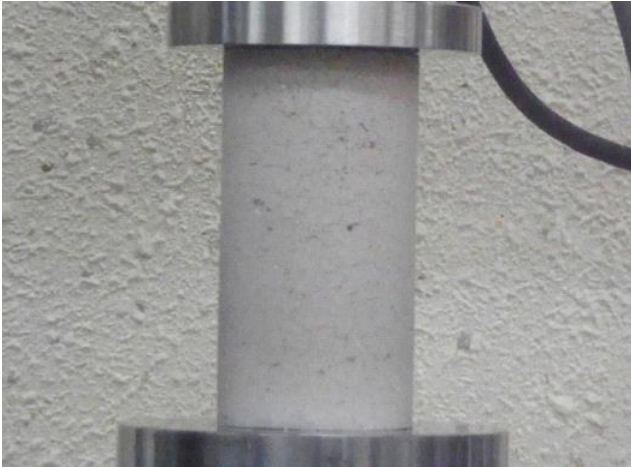
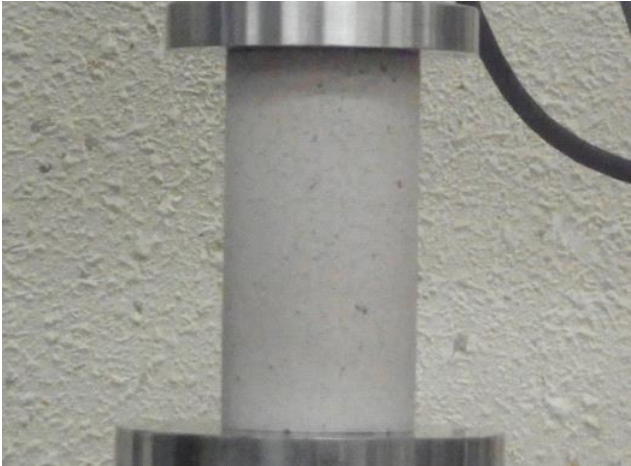
試験体 No.	外観状況
一軸-500-1	
一軸-500-2	
一軸-500-3	

表 4.3.4-7 試験体の外観（一軸圧縮試験-1000℃）




試験体 No.	外観状況
一軸-1000-1	
一軸-1000-2	
一軸-1000-3	

表 4.3.4-8 試験体の外観（圧密試験・20℃）




試験体 No.	外観状況
圧密-20-1	
圧密-20-2	
圧密-20-3	

表 4.3.4-9 試験体の外観 (圧密試験-500℃)

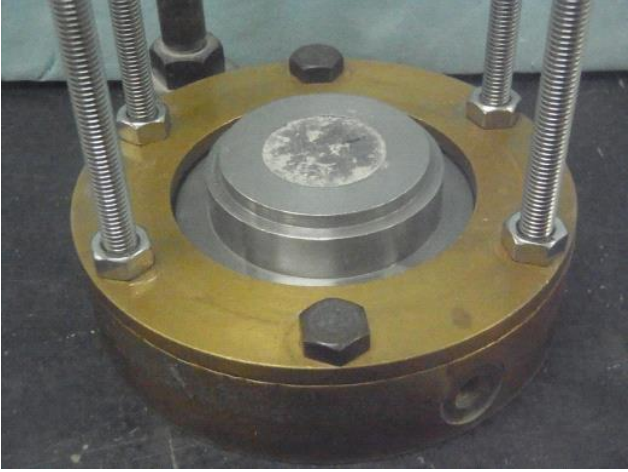





試験体 No.	外観状況
圧密-500-1	 A photograph showing a cylindrical specimen (試験体) inside a brass-colored compression chamber. The specimen is a light-colored, circular disc with a textured surface. The chamber is secured with four large bolts and has two vertical threaded rods on the sides. The specimen is positioned between two metal plates within the chamber.
圧密-500-2	 A photograph showing a cylindrical specimen (試験体) inside a brass-colored compression chamber. The specimen is a light-colored, circular disc with a textured surface. The chamber is secured with four large bolts and has two vertical threaded rods on the sides. The specimen is positioned between two metal plates within the chamber.
圧密-500-3	 A photograph showing a cylindrical specimen (試験体) inside a brass-colored compression chamber. The specimen is a light-colored, circular disc with a textured surface. The chamber is secured with four large bolts and has two vertical threaded rods on the sides. The specimen is positioned between two metal plates within the chamber.

表 4.3.4-10 試験体の外観 (圧密試験-1000°C)

試験体 No.	外観状況
圧密-1000-1	 A photograph showing a cylindrical specimen of light-colored powder or soil, compacted in a brass mold. The mold is held together by four vertical threaded rods with nuts. The specimen is centered within the mold's inner cylinder.
圧密-1000-2	 A photograph showing a cylindrical specimen of light-colored powder or soil, compacted in a brass mold. The mold is held together by four vertical threaded rods with nuts. The specimen is centered within the mold's inner cylinder.
圧密-1000-3	 A photograph showing a cylindrical specimen of light-colored powder or soil, compacted in a brass mold. The mold is held together by four vertical threaded rods with nuts. The specimen is centered within the mold's inner cylinder.

(2) 加熱結果

加熱実験炉を用いて図 4.3.4-1 および図 4.3.4-2 に示す温度により加熱を行った。

加熱後の試験体の状況を図 4.3.4-3 および図 4.3.4-4 に示す。加熱時および加熱後の試験体は、大きく破損するような現象は観察されなかった。

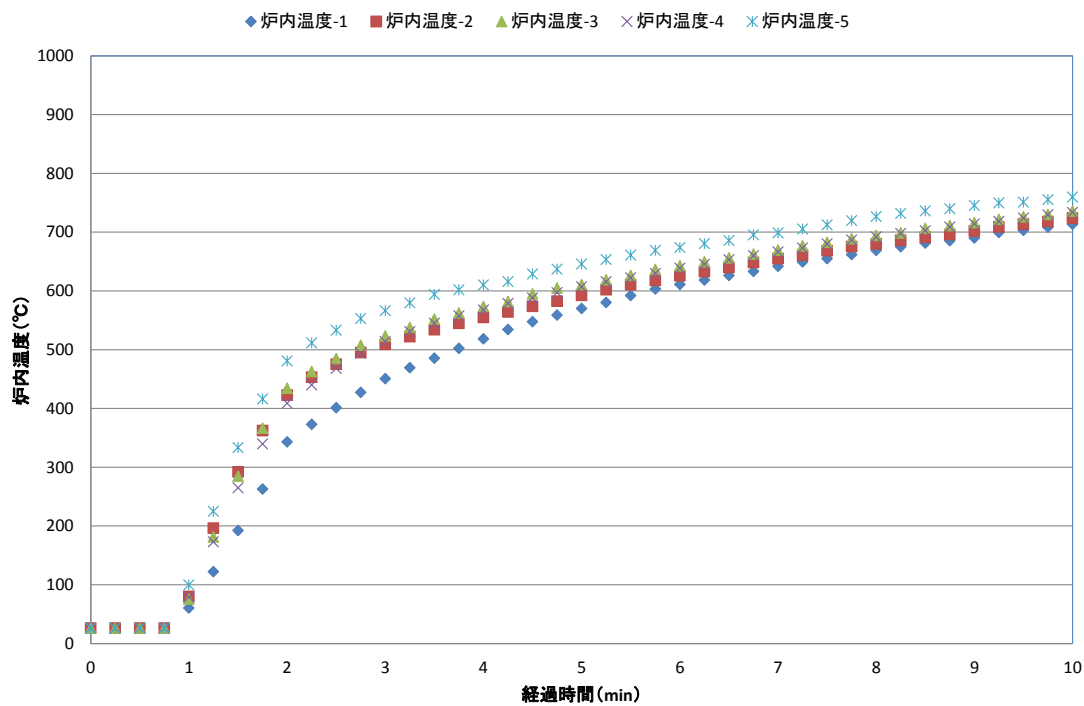


図 4.3.4-1 加熱温度 (0~10 分)

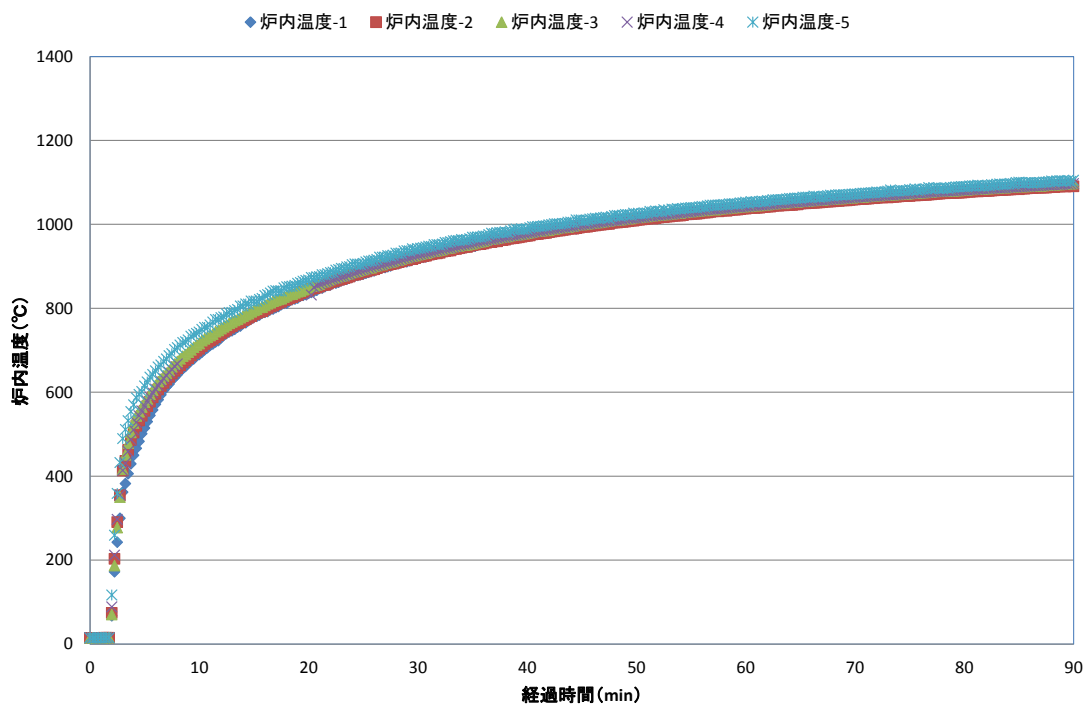


図 4.3.4-2 加熱温度 (0~90 分)

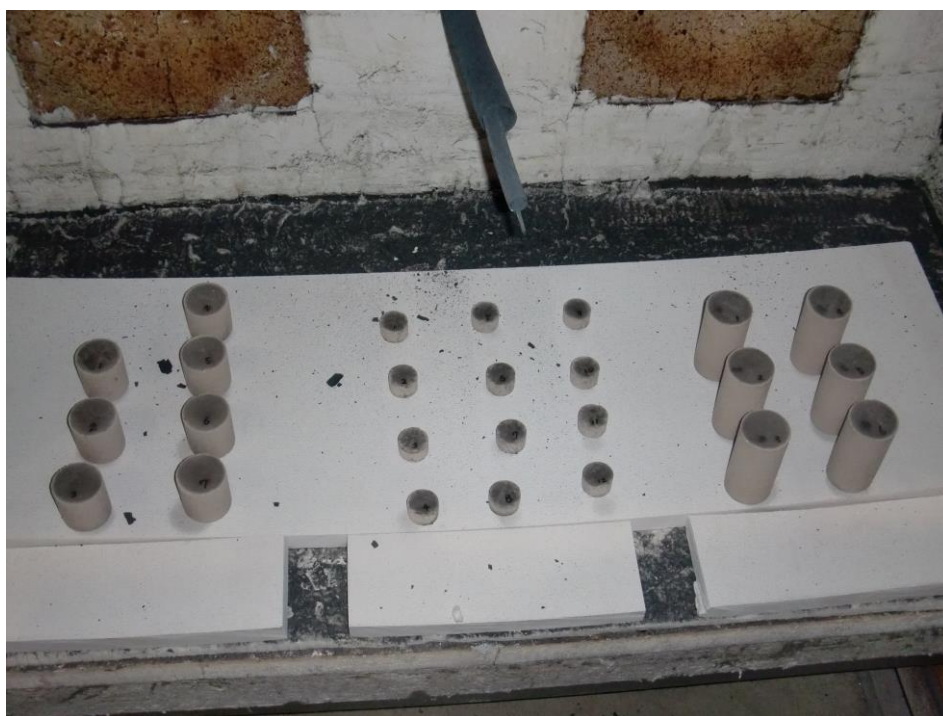


図 4.3.4-3 加熱後の試験体の状況 (加熱条件 500°C)



図 4.3.4-4 加熱後の試験体の試験体状況 (加熱条件 1000°C)

(3) 一軸圧縮試験結果

1) 加熱温度：常温ケース（試験体 No. 圧裂-20-1、圧裂-20-2、圧裂-20-3）

試験ケース：常温に対する試験結果を表 4.3.4-11 および図 4.3.4-5 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-6 に示す。

表 4.3.4-11 試験結果（試験ケース 常温）

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	破壊荷重 F (kN)	引張強度	
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)					σ_t (MPa)	(kN/m ²)
圧裂 20-1	20℃	1.597	15.8	59.4	1.597	5.00	5.00	0.494	0.126	126
圧裂 20-2	20℃	1.599	15.8	59.6	1.599	5.00	5.00	0.460	0.117	117
圧裂 20-3	20℃	1.598	15.8	59.5	1.598	5.00	5.00	0.441	0.112	112

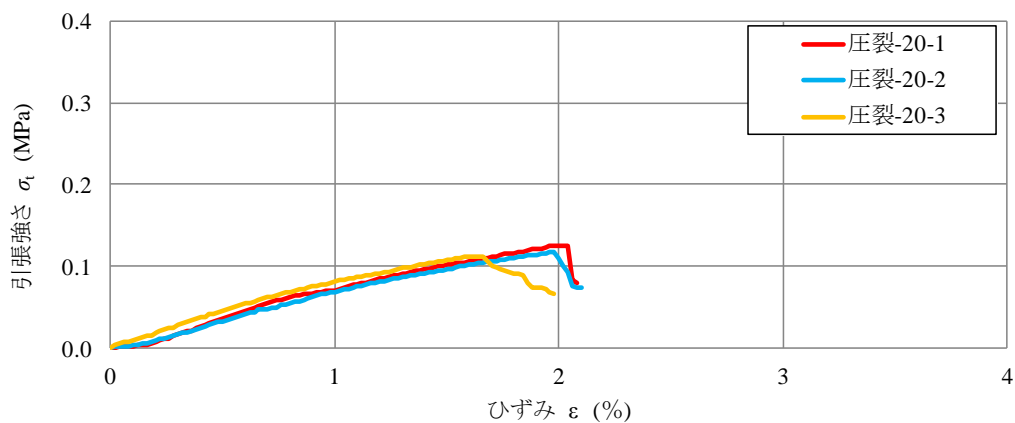


図 4.3.4-5 試験結果（試験ケース 常温）

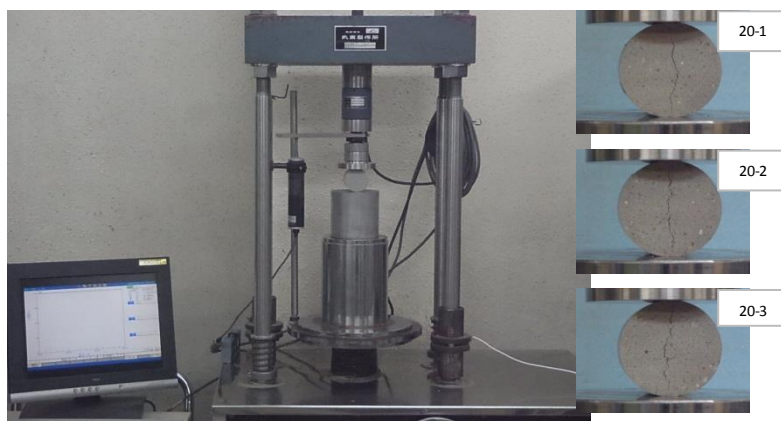


図 4.3.4-6 試験状況（試験ケース 常温）

2) 加熱温度 500°C (試験体 No. 圧裂-500-1、圧裂-500-2、圧裂-500-3)

試験ケース：500°Cに対する試験結果を表 4.3.4-12 およびに示す。また、試験状況を図 4.3.4-8 に示す。

表 4.3.4-12 試験結果 (試験ケース 500°C)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	破壊荷重 F (kN)	引張強度	
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)					σ_t (MPa)	σ_t (kN/m ²)
圧裂 500-1	500°C	1.597	15.8	59.4	1.616	4.96	4.96	0.814	0.211	211
圧裂 500-2	500°C	1.596	15.8	59.4	1.603	4.96	4.96	0.551	0.143	143
圧裂 500-3	500°C	1.599	15.8	59.6	1.620	4.95	4.95	0.671	0.174	174

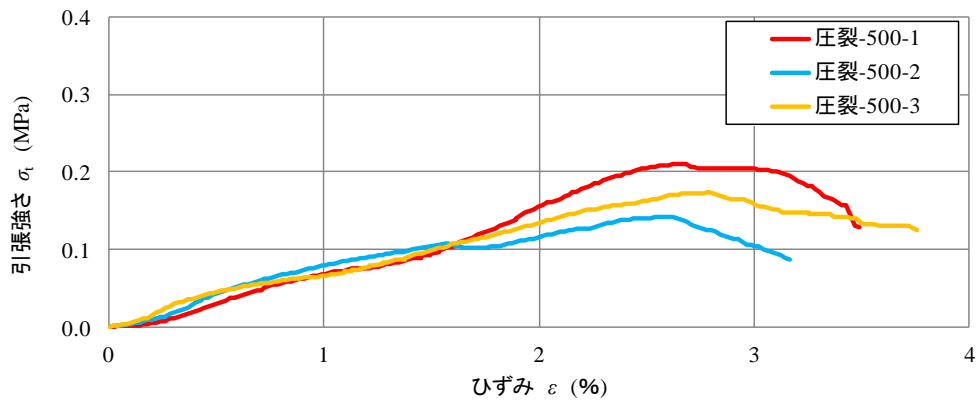


図 4.3.4-7 試験結果 (試験ケース 500°C)

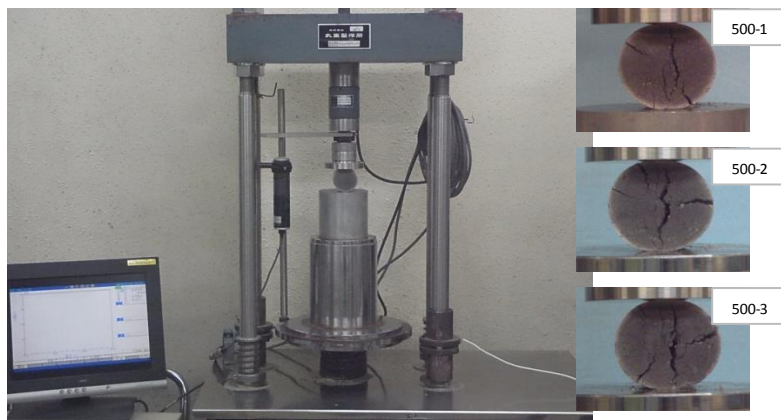


図 4.3.4-8 試験状況 (試験ケース 500°C)

3) 加熱温度 1000°C (試験体 No. 圧裂-1000-1、圧裂-1000-2、圧裂-1000-3)

試験ケース：1000°Cに対する試験結果を表 4.3.4-13 および図 4.3.4-9 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-10 に示す。

表 4.3.4-13 試験結果 (試験ケース 1000°C)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	破壊荷重 F (kN)	引張強度	
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)					σ_t (MPa)	σ_t (kN/m ²)
圧裂 1000-1	1000°C	1.601	15.8	59.8	1.478	4.99	5.07	4.980	1.253	1253
圧裂 1000-2	1000°C	1.601	15.8	59.8	1.476	4.98	5.07	7.208	1.817	1817
圧裂 1000-3	1000°C	1.597	15.8	59.4	1.473	5.00	5.07	4.607	1.157	1157

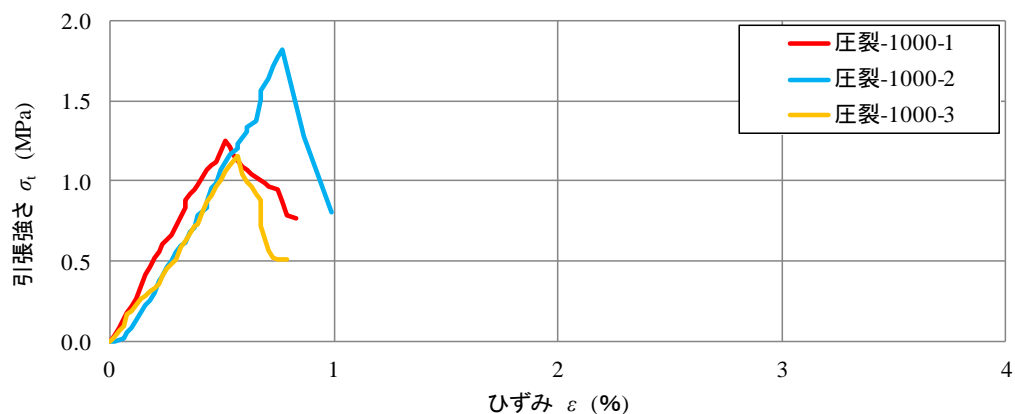


図 4.3.4-9 試験結果 (試験ケース 1000°C)



図 4.3.4-10 試験状況 (試験ケース 1000°C)

(4) 一軸圧縮試験結果

1) 加熱温度：常温ケース（試験体 No. 一軸-20-1、一軸-20-2、一軸-20-3）

試験ケース：常温に対する試験結果を表 4.3.4-14 および図 4.3.4-11 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-12 に示す。

表 4.3.4-14 試験結果（試験ケース 常温）

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	一軸圧縮強度 q_u		弾性係数 E_{50} (MN/m ²)	ポアソン比 ν
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)				(MPa)	(kN/m ²)		
一軸 20-1	20°C	1.595	15.8	59.3	—	5.00	9.67	0.793	793	82	0.214
一軸 20-2	20°C	1.593	15.8	59.1	—	5.00	9.76	0.654	654	80	0.234
一軸 20-3	20°C	1.598	15.8	59.5	—	5.00	9.71	0.665	665	91	0.237

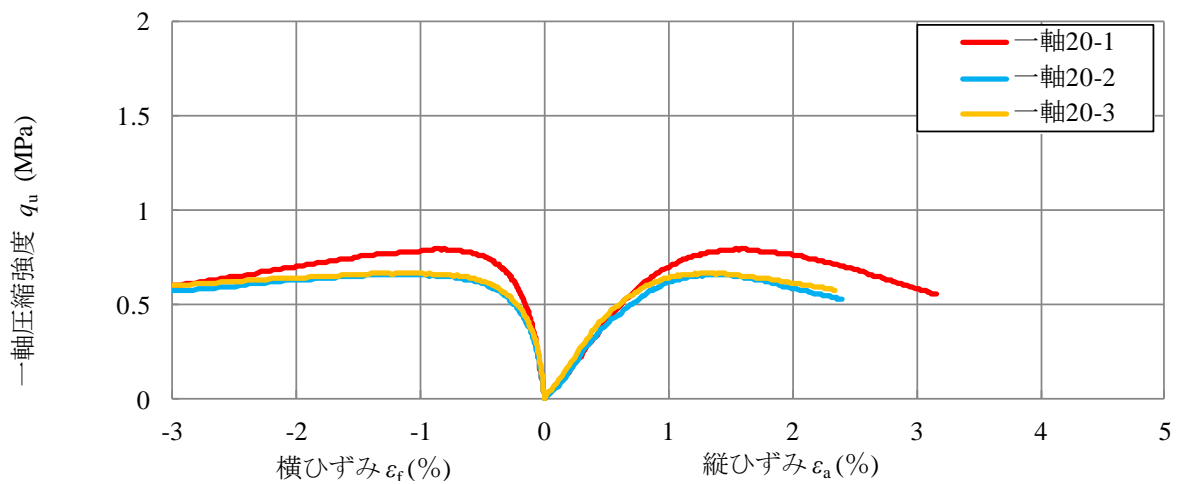


図 4.3.4-11 試験結果（試験ケース 常温）

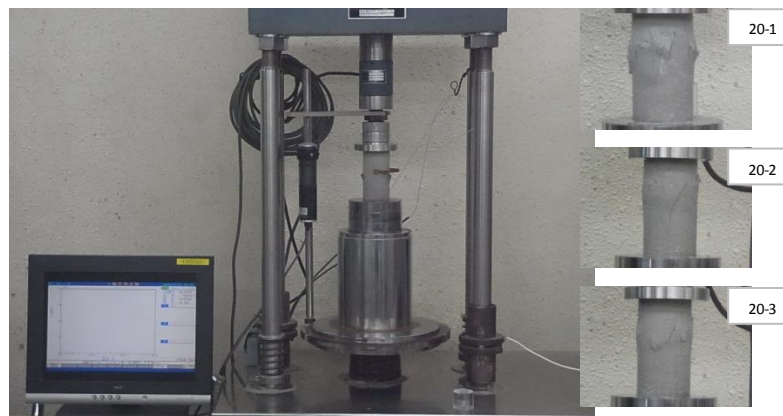


図 4.3.4-12 試験状況（試験ケース 常温）

2) 加熱温度 500°C (試験体 No. 一軸-500-1、一軸-500-2、一軸-500-3)

試験ケース：500°Cに対する試験結果を表 4.3.4-15 および図 4.3.4-13 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-14 に示す。

表 4.3.4-15 試験結果 (試験ケース 500°C)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	一軸圧縮強度		弾性係数 E_{50} (MN/m ²)	ポアソン比 ν
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)				q_u (MPa)	q_u (kN/m ²)		
一軸 500-1	500°C	1.598	15.8	59.5	1.594	4.98	9.62	5.352	5352	446	0.270
一軸 500-2	500°C	1.586	15.8	58.5	1.603	4.97	9.66	4.141	4141	430	0.328
一軸 500-3	500°C	1.585	15.8	58.4	1.609	4.96	9.68	4.339	4339	377	0.302

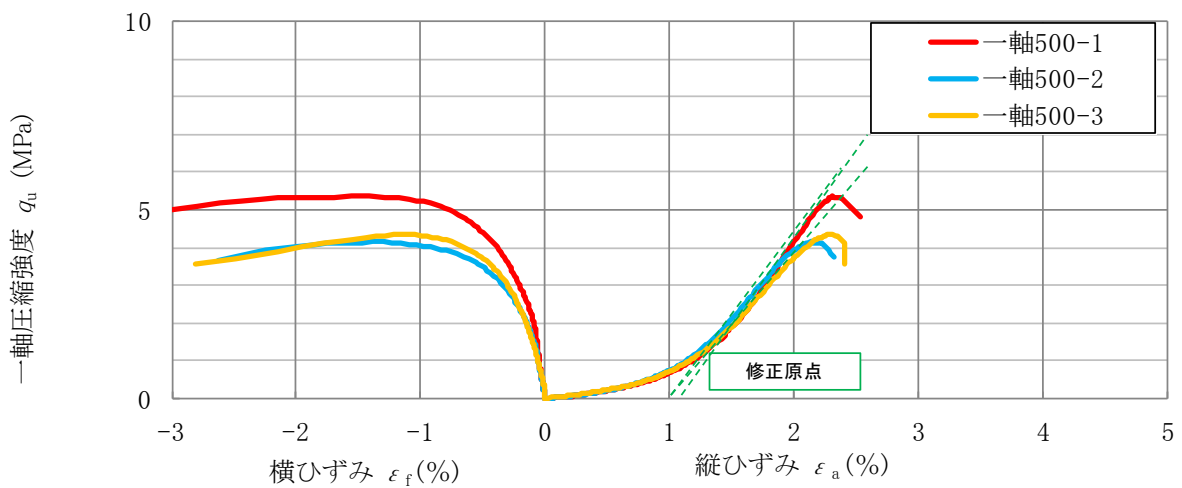


図 4.3.4-13 試験結果 (試験ケース 500°C)

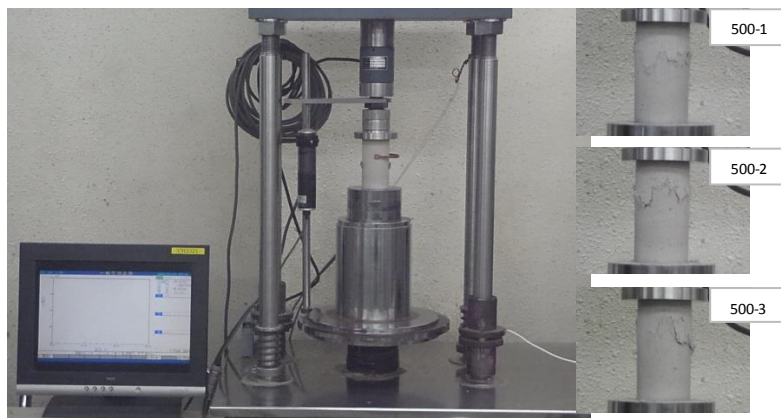


図 4.3.4-14 試験状況 (試験ケース 500°C)

3) 加熱温度 1000°C (試験体 No. 一軸-1000-1、一軸-1000-2、一軸-1000-3)

試験ケース：1000°Cに対する試験結果を表 4.3.4-16 および図 4.3.4-15 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-16 に示す。

表 4.3.4-16 試験結果 (試験ケース 1000°C)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	一軸圧縮強度		弾性係数 E_{50} (MN/m ²)	ポアソン比 ν
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)				MPa	kN/m ²		
一軸 1000-1	1000°C	1.597	15.8	59.4	1.444	5.06	9.72	17.147	17147	2165	0.092
一軸 1000-2	1000°C	1.591	15.8	58.9	1.445	5.08	9.70	17.407	17407	4307	0.152
一軸 1000-3	1000°C	1.600	15.8	59.7	1.429	5.07	9.70	21.857	21857	5895	0.166

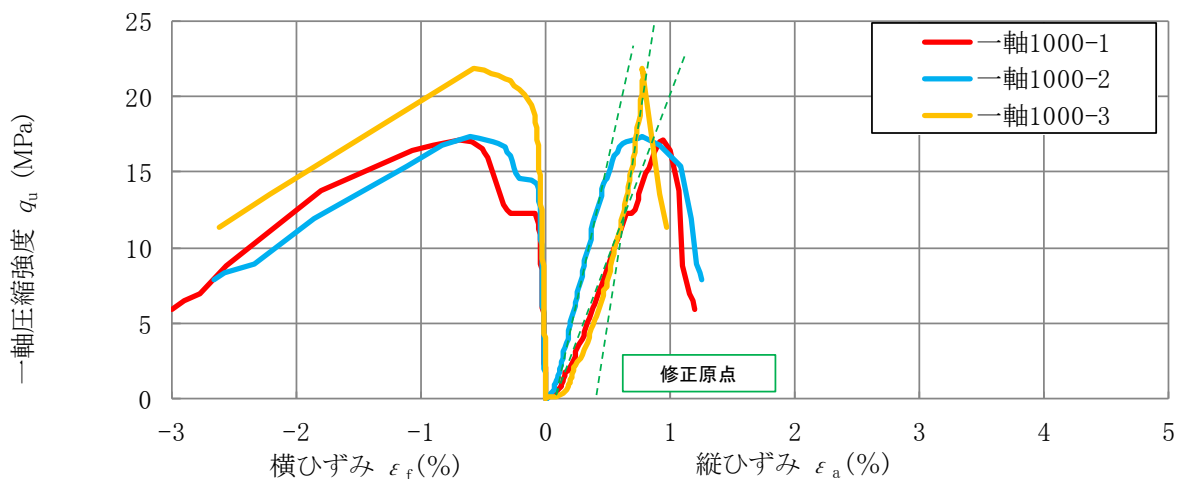


図 4.3.4-15 試験結果 (試験ケース 1000°C)

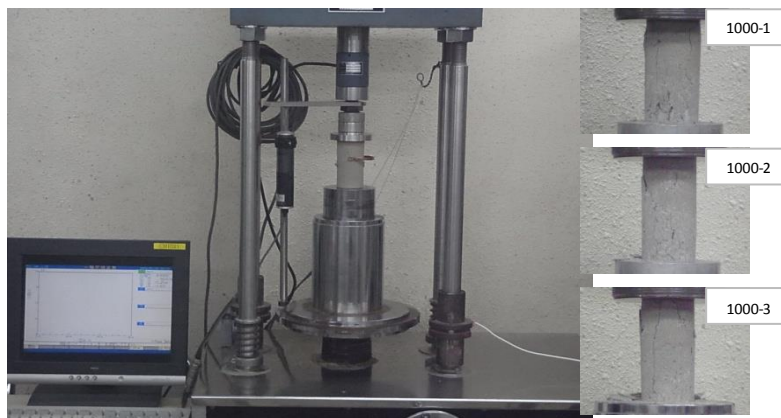


図 4.3.4-16 試験状況 (試験ケース 1000°C)

(5) 一次元圧密試験結果

1) 加熱温度：常温ケース（試験体 No. 圧密-20-1、圧密-20-2、圧密-20-3）

試験ケース：常温に対する試験結果を表 4.3.4-17 および図 4.3.4-17 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-18 に示す。

表 4.3.4-17 試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 常温)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	膨潤過程
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)				膨潤応力 MPa
圧密 20-1	20℃	1.594	15.8	59.2	—	3.00	2.00	0.53
圧密 20-2	20℃	1.592	15.8	59.0	—	3.00	2.00	0.53
圧密 20-3	20℃	1.597	15.8	59.4	—	3.00	2.00	0.57

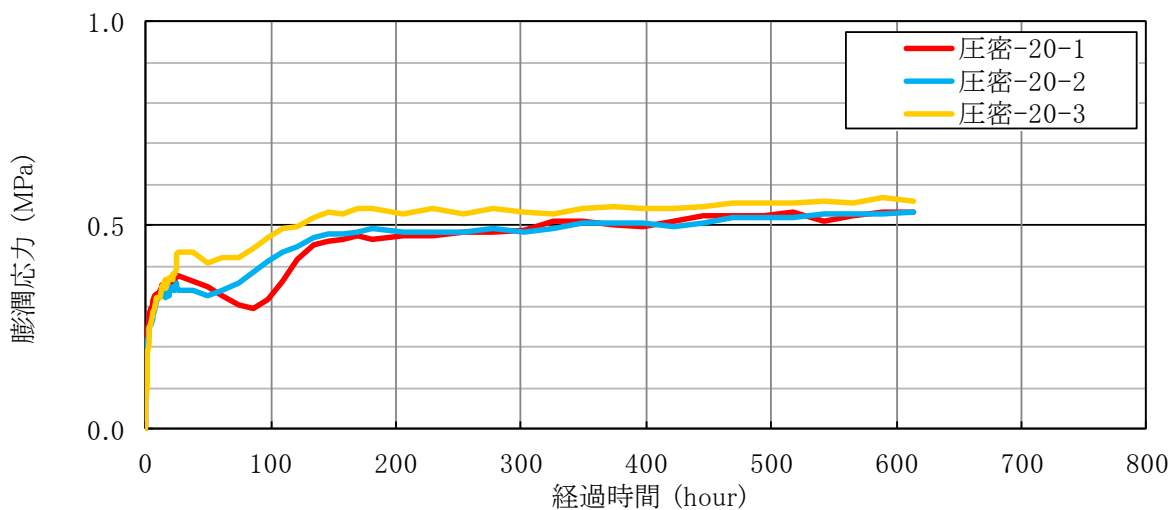


図 4.3.4-17 試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 常温)



図 4.3.4-18 試験状況 (試験ケース 常温)

2) 加熱温度 500°C (試験体 No. 圧密-500-1、圧密-500-2、圧密-500-3)

試験ケース：500°Cに対する試験結果を表 4.3.4-18 および図 4.3.4-19 に示す。また、試験状況を図 4.3.4-20 に示す。

表 4.3.4-18 試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 500°C)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	膨潤過程
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)				膨潤応力 MPa
圧密-500-1	500°C	1.593	15.8	59.1	1.638	3.00	1.92	0.04
圧密-500-2	500°C	1.595	15.8	59.3	1.623	3.00	1.92	0.17
圧密-500-3	500°C	1.598	15.8	59.5	16.02	3.00	1.96	0.06

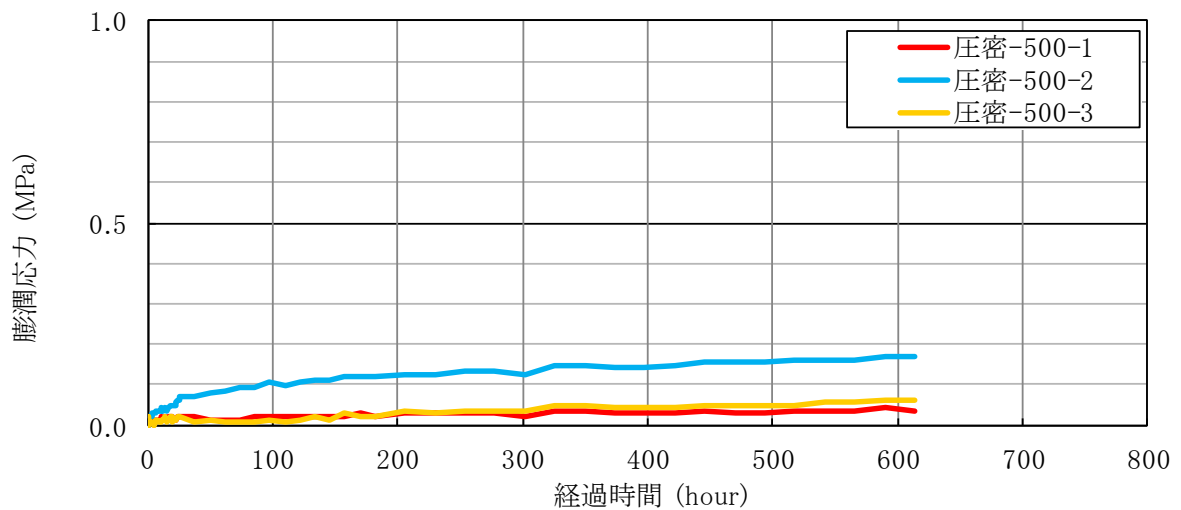


図 4.3.4-19 試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 500°C)



図 4.3.4-20 試験状況 (試験ケース 500°C)

3) 加熱温度 1000℃ (試験体 No. 圧密-1000-1、圧密-1000-2、圧密-1000-3)

試験ケース：1000℃に対する試験結果を表 4.3.4-19 およびに図 4.3.4-21 示す。また、試験状況をに図 4.3.4-22 示す。

表 4.3.4-19 試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 1000℃)

試験体 No.	加熱条件	試験体作成時			加熱後 乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	直径 D_0 (cm)	高さ L_0 (cm)	膨潤過程
		乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)				膨潤応力 MPa
圧密 1000-1	1000℃	1.595	15.8	59.3	1.488	3.00	2.00	0.00
圧密 1000-2	1000℃	1.599	15.8	59.6	1.456	3.00	2.00	0.01
圧密 1000-3	1000℃	1.592	15.8	59	1.473	3.00	2.00	0.03

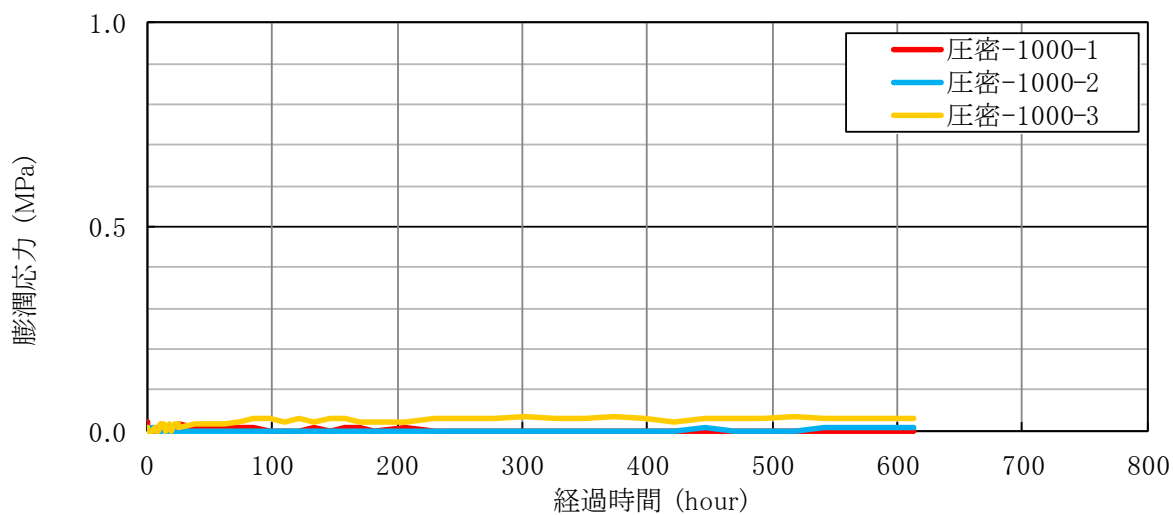


図 4.3.4-21 試験結果 [膨潤過程] (試験ケース 1000℃)



図 4.3.4-22 試験状況 (試験ケース 1000℃)

(6) 力学的性質取得結果まとめ

力学的性質について取得した結果を表 4.3.4-20 にまとめる。また、各力学的性質と加熱温度との関係を図 4.3.4-23～図 4.3.4-27 に示す。

試験結果より、緩衝材の力学的性質は、加熱により変化する傾向が見られた。特に 500℃から 1000℃の間において、ベントナイト（粘土）の特徴的な性質である膨潤応力や弾性係数の変化が大きくなっている。このことから、加熱（焼成）によりベントナイト（粘土）の組成が変化した影響によるものと考えられる。

表 4.3.4-20 力学的性質取得結果まとめ

加熱温度 (°C)	引張強度 (MPa)			
	1	2	3	平均
20	0.126	0.117	0.112	0.118
500	0.211	0.143	0.174	0.176
1,000	1.253	0.817	1.157	1.076
加熱温度 (°C)	一軸圧縮強度 (MPa)			
	1	2	3	平均
20	0.793	0.654	0.665	0.704
500	5.352	4.141	4.339	4.611
1,000	17.147	17.407	21.857	18.804
加熱温度 (°C)	弾性係数 (MN/m ²)			
	1	2	3	平均
20	82	80	91	84.333
500	446	430	377	417.667
1,000	2164	4307	5895	4122.000
加熱温度 (°C)	ポアソン比			
	1	2	3	平均
20	0.214	0.234	0.237	0.228
500	0.27	0.328	0.302	0.300
1,000	0.092	0.152	0.166	0.137
加熱温度 (°C)	膨潤応力 (MPa)			
	1	2	3	平均
20	0.53	0.53	0.57	0.543
500	0.04	0.17	0.06	0.090
1,000	0	0.01	0.03	0.013

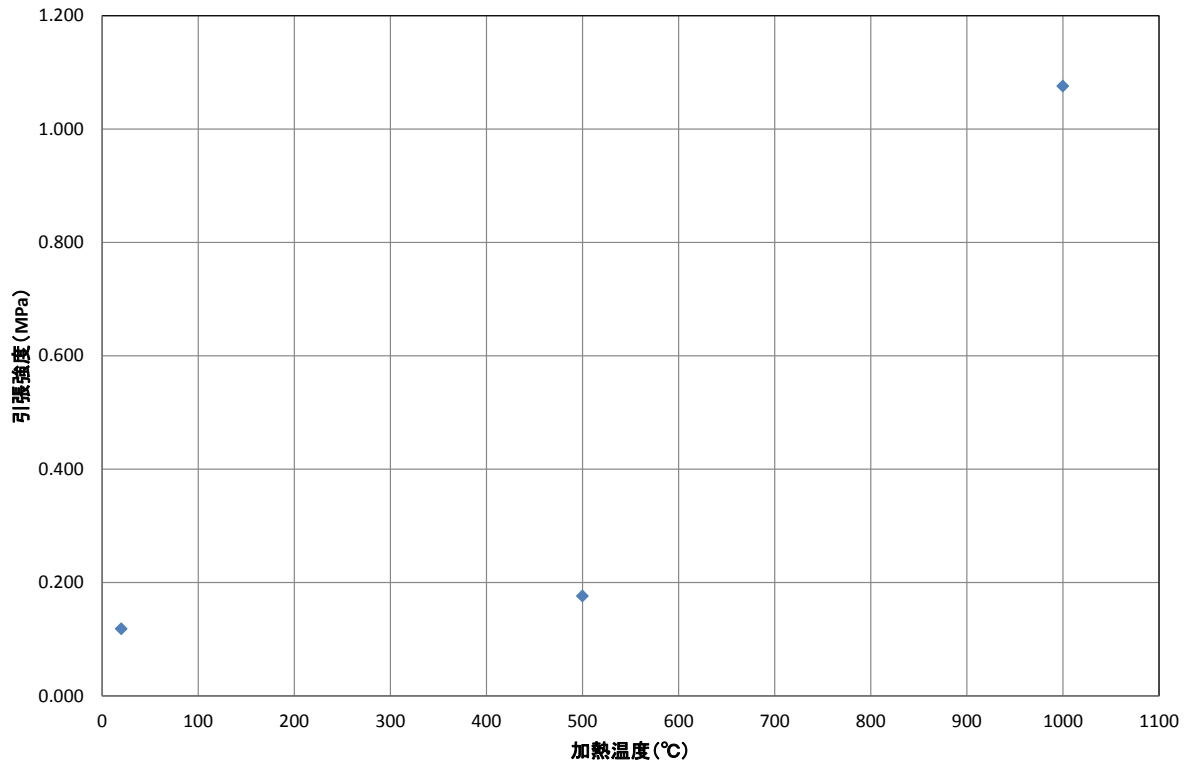


図 4.3.4-23 引張強度と加熱温度との関係

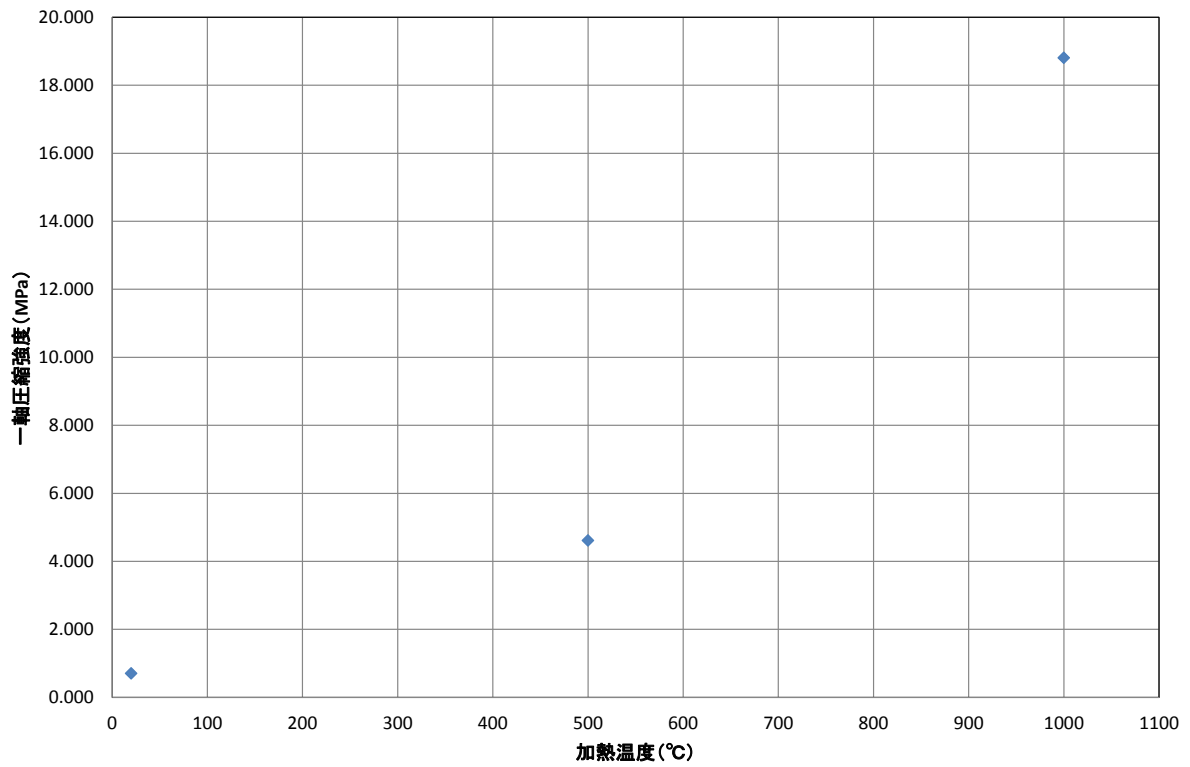


図 4.3.4-24 一軸圧縮強度と加熱温度との関係

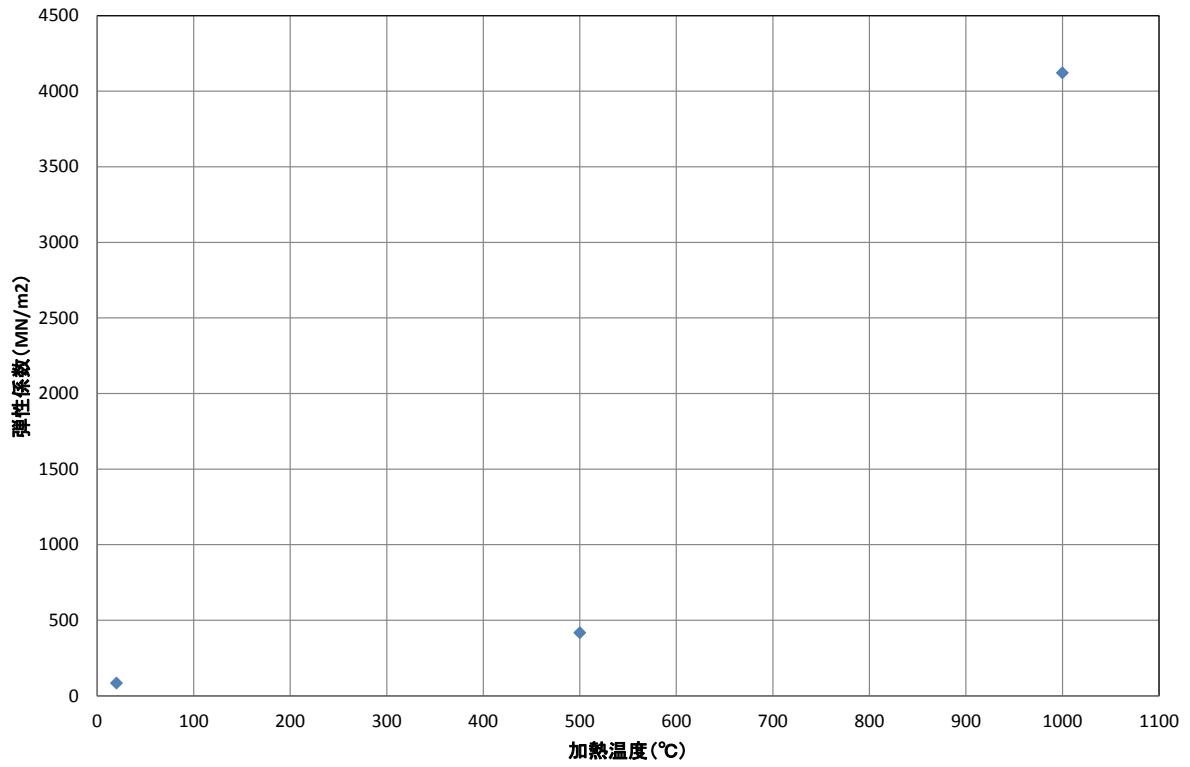


図 4.3.4-25 弾性係数と加熱温度との関係

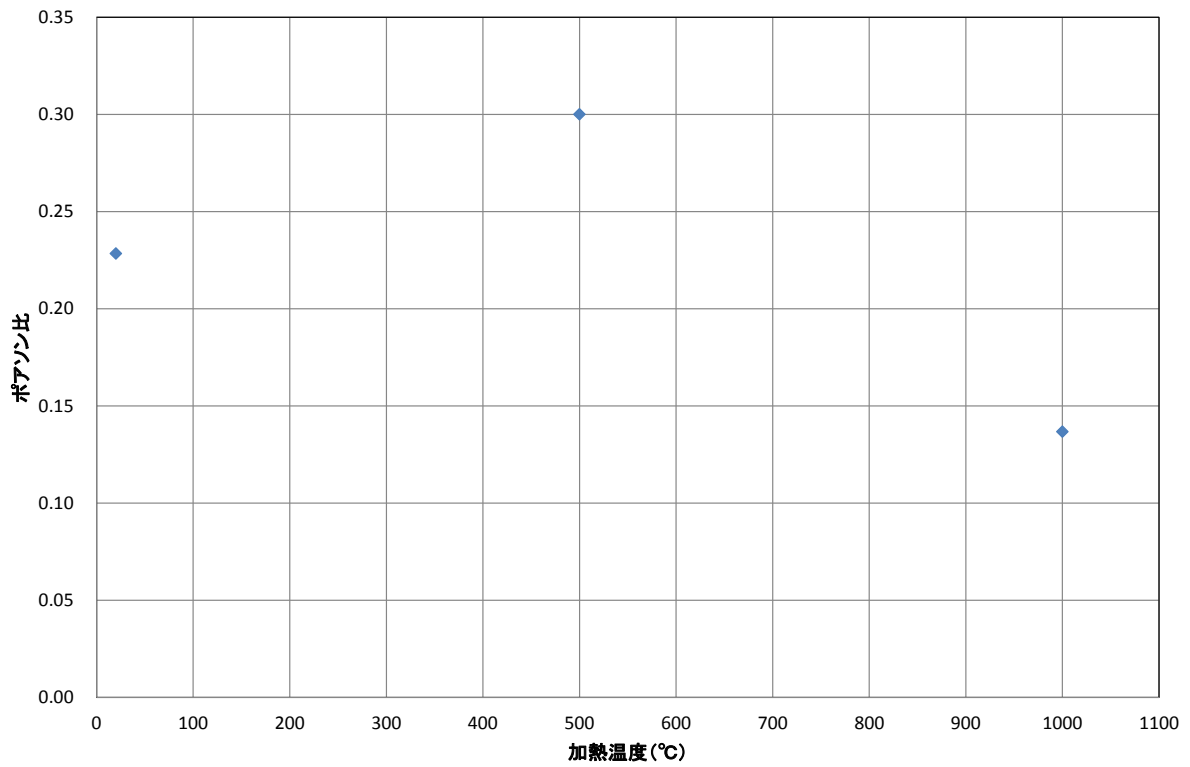


図 4.3.4-26 ポアソン比と加熱温度との関係

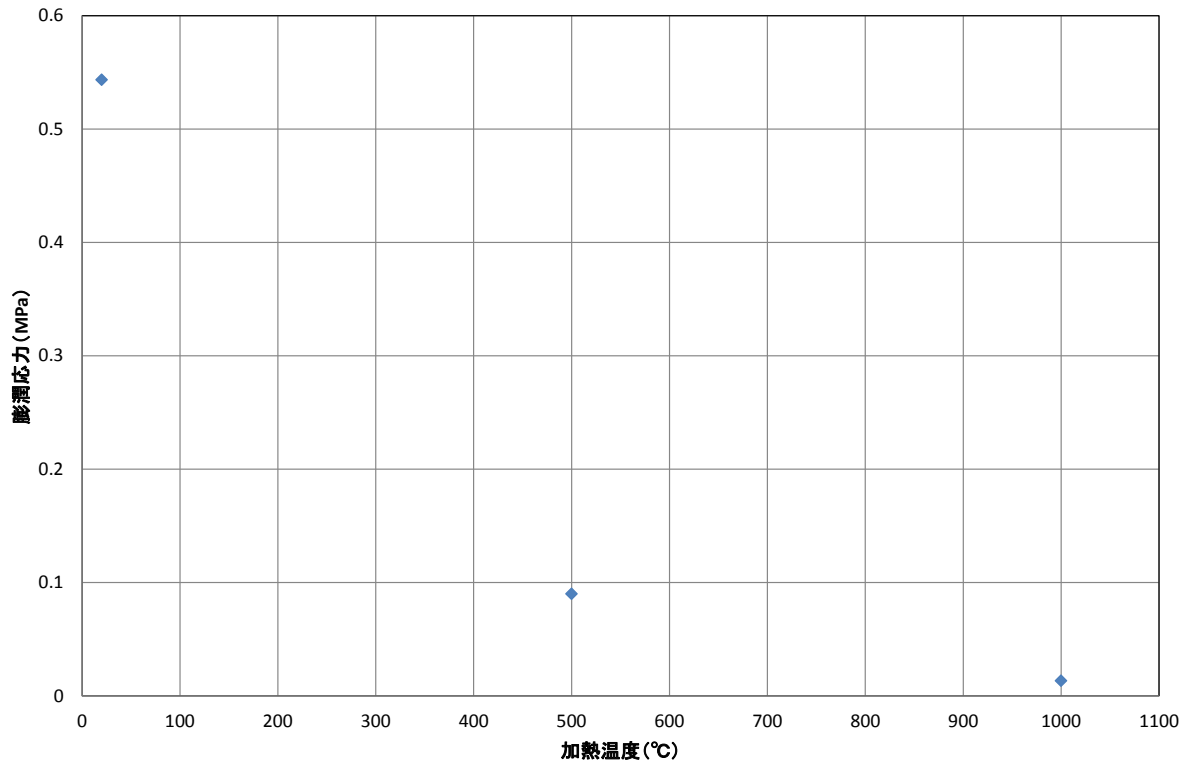


図 4.3.4-27 膨潤応力と加熱温度との関係

4.4 地上施設で火災発生を想定したガラス固化体キャニスタの特性データの取得

平成 25 年度の地上施設の火災解析結果より、条件によってガラス固化体キャニスタの温度が 700℃を超えることがわかった。平成 26 年度は、地下処分施設の火災発生における解析を行うとともに、解析精度を向上させるため SUS304L を対象とした高温の機械的特性データを実験により取得する。

4.4.1 試験目的

平成 25 年度の火災解析結果[2]より、条件によってガラス固化体キャニスタの温度が 700℃を超えることがわかった。ガラス固化体キャニスタの材料は SUS304L である。日本機械学会の規格 JSME (2012 年版) 等で SUS304 の 650℃までの物性値は示されているが、それ以上の高温データが示されていないことから、平成 25 年度は 650℃までは SUS304 を流用し、650℃以上の物性値はそれを外挿して解析を実施した。

解析精度を向上させるには、SUS304L を対象とした高温の機械的特性データが必要であるため、試験により応力-ひずみデータ (引張試験データ)、線膨張係数、ヤング率およびポアソン比を取得する。各種データ取得にあたっては、常温から 800℃までの温度条件で 100℃刻みにデータを取得することとしたが、SUS304 の Ac3 変態温度を下記の数式から 600℃前後と推測し、600℃近辺を 50℃刻みで採取することとした。

(Ac3 温度計算式)

$$\begin{aligned} \text{Ac3} = & 937.2 \cdot 436.5\text{C} + 56\text{Si} \cdot 19.7\text{Mn} \cdot 16.3\text{Cu} \cdot 26.6\text{Ni} \cdot 4.9\text{Cr} + 38.1\text{Mo} \\ & + 124.8\text{V} + 136.3\text{Ti} \cdot 19.1\text{Nb} + 198.4\text{Al} + 3315\text{B} \end{aligned}$$

4.4.2 試験条件及び試験方法

(1) 引張試験

- ・試験温度：常温, 400, 500, 550, 600, 650, 700, 800℃の 8 温度条件
- ・試験体数=3
- ・引張速度を以下に示す。
 - 常温：ひずみ 5%まで, 0.00007/s, その後引張強さまで 0.0014/s
 - 高温：ひずみ 5%まで, 0.00025/s, その後引張強さまで 0.0067/s
- ・引張試験に供した試験体形状を、図 4.4.2-1 に示す。

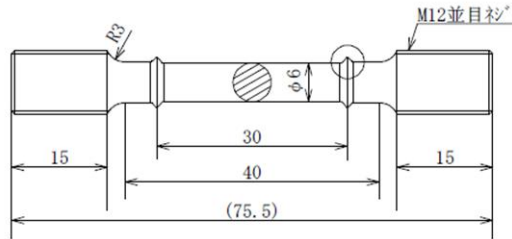


図 4.4.2-1 引張試験体形状 (丸棒)

(2) 線膨張係数測定 (TMA 法)

- ・ 試験温度：常温, 400, 500, 550, 600, 650, 700, 800°Cの8温度条件
- ・ 試験体数=3

(3) ヤング率・ポアソン比測定 (共振法)

- ・ 試験温度：常温, 400, 500, 550, 600, 650, 700, 800°Cの8温度条件
- ・ 試験体数=3

4.4.3 試験結果

(1) 引張試験

引張試験の結果得られた、0.2%耐力、引張強さ、破断伸び、絞りのデータを図 4.4.3-1 に示す。また、各試験温度における引張試験チャート (応力-ひずみ曲線) を図 4.4.3-2~図 4.4.3-25 に示す。

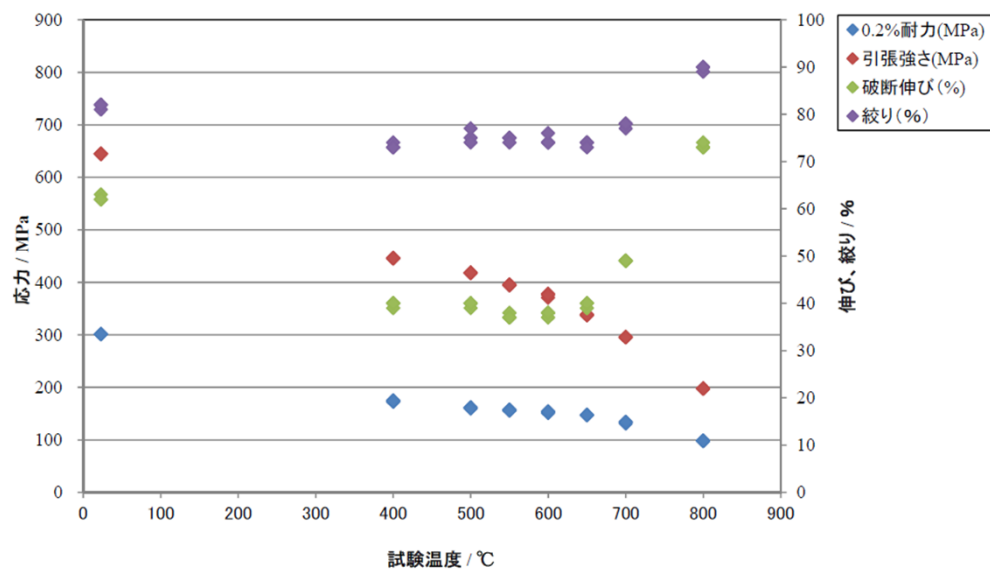


図 4.4.3-1 引張試験結果のまとめ

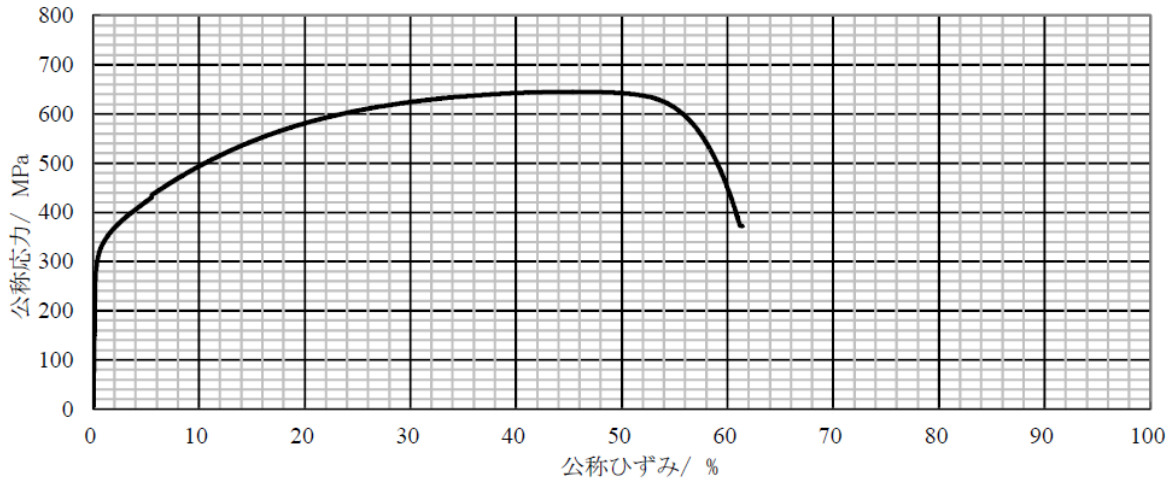


図 4.4.3-2 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 23°C、N=1)

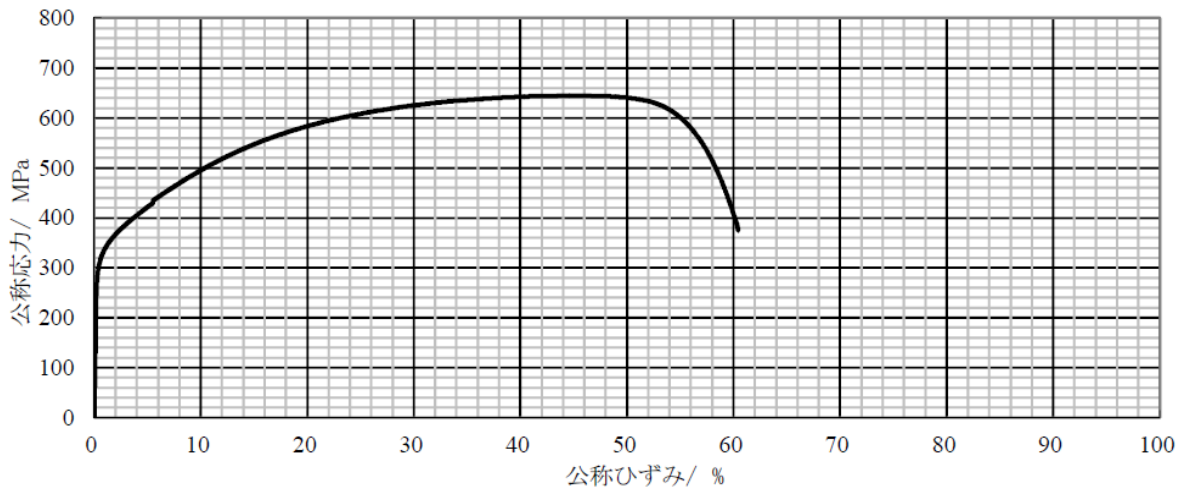


図 4.4.3-3 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 23°C、N=2)

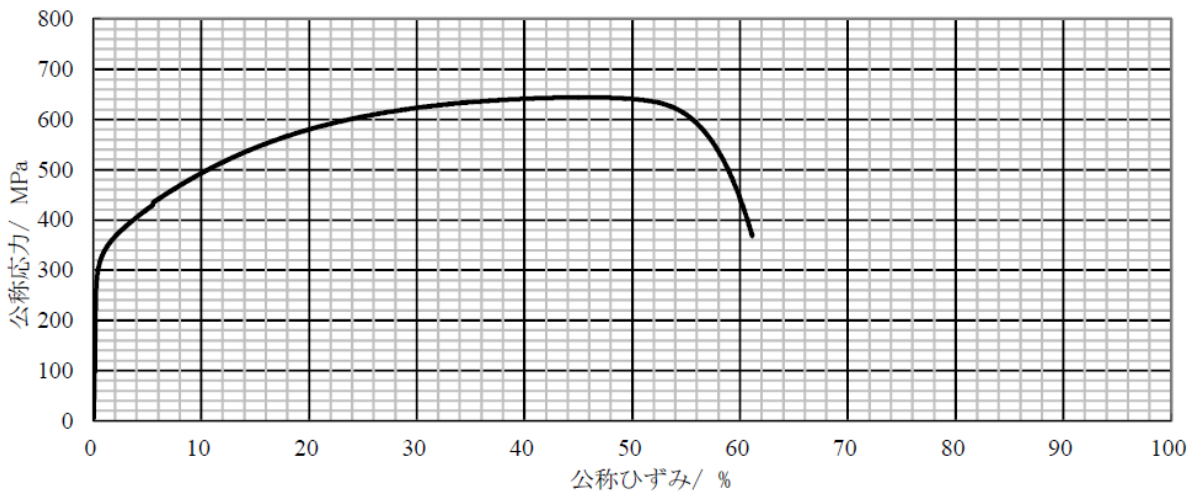


図 4.4.3-4 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度: 23°C、N=3)

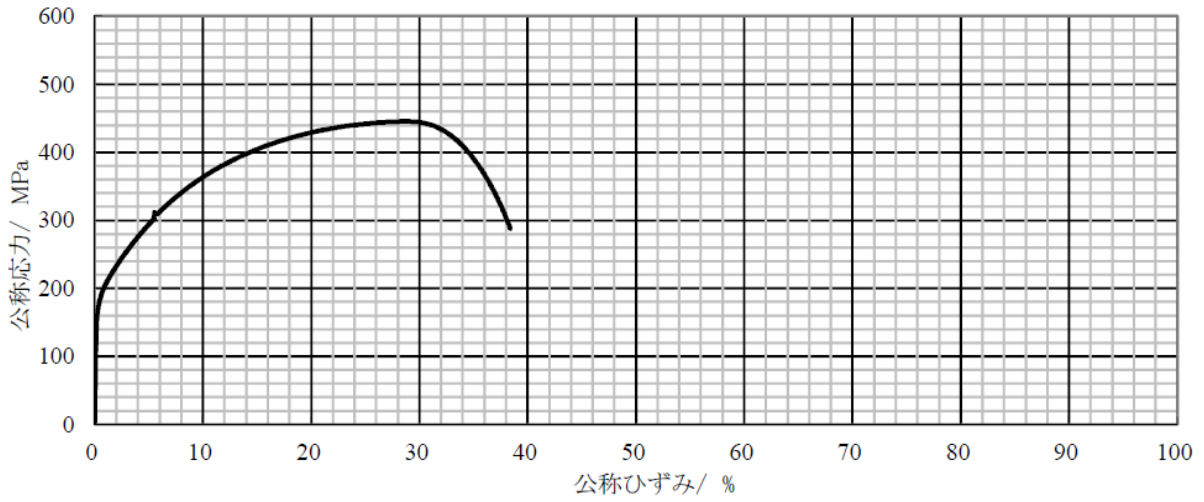


図 4.4.3-5 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 400°C、N=1)

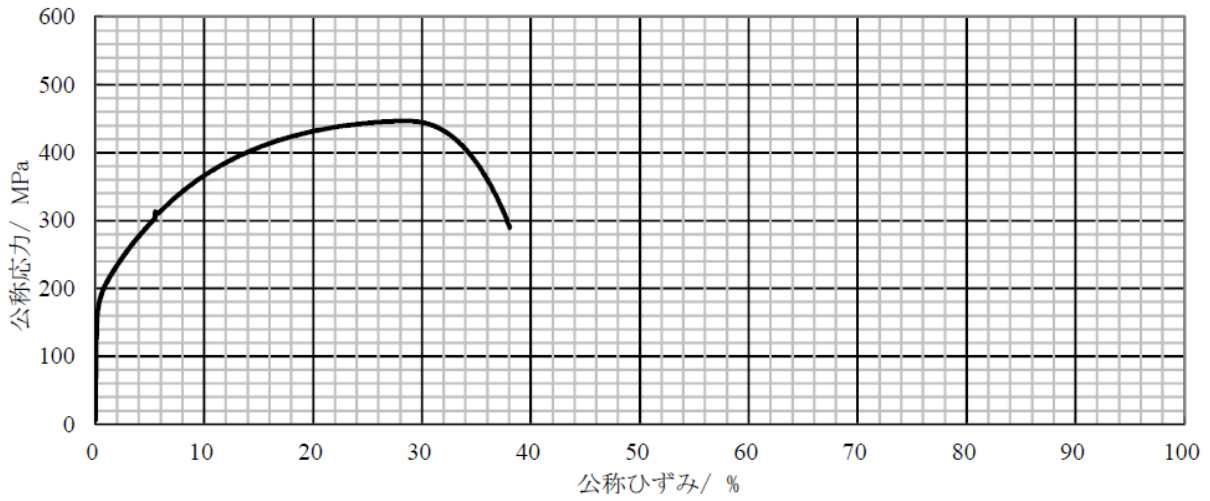


図 4.4.3-6 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 400°C、N=2)

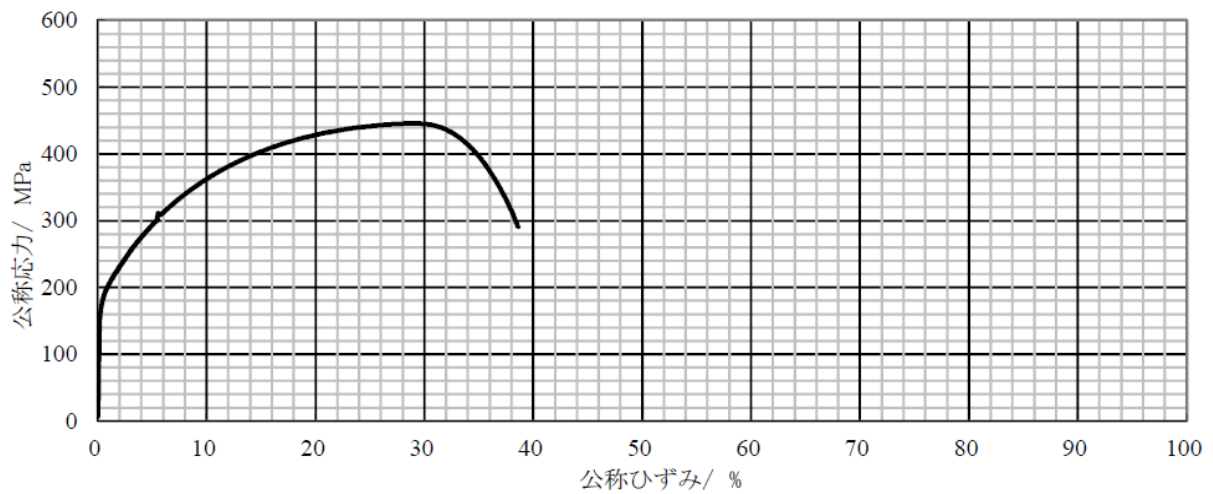


図 4.4.3-7 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 400°C、N=3)

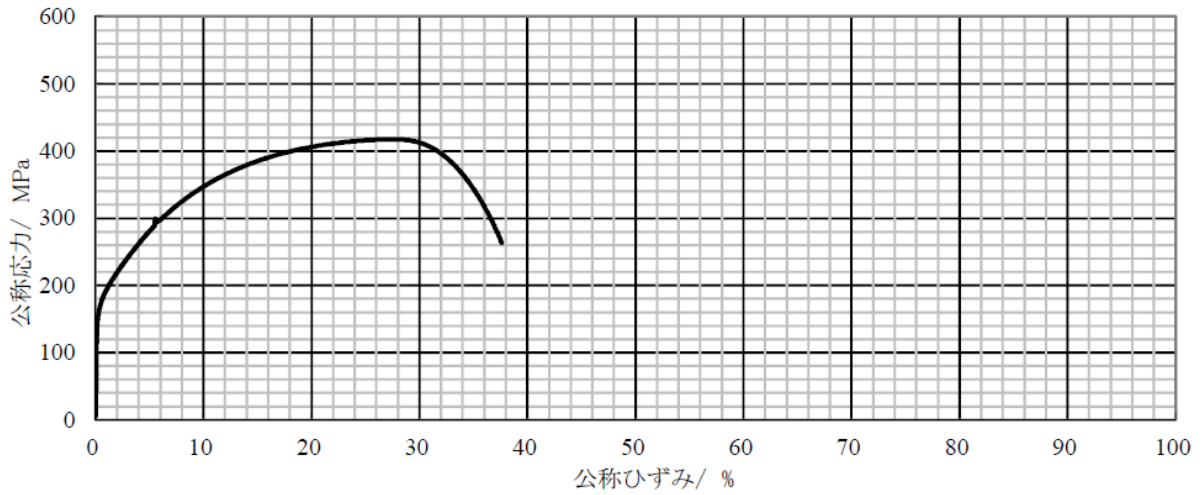


図 4.4.3-8 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 500°C、N=1)

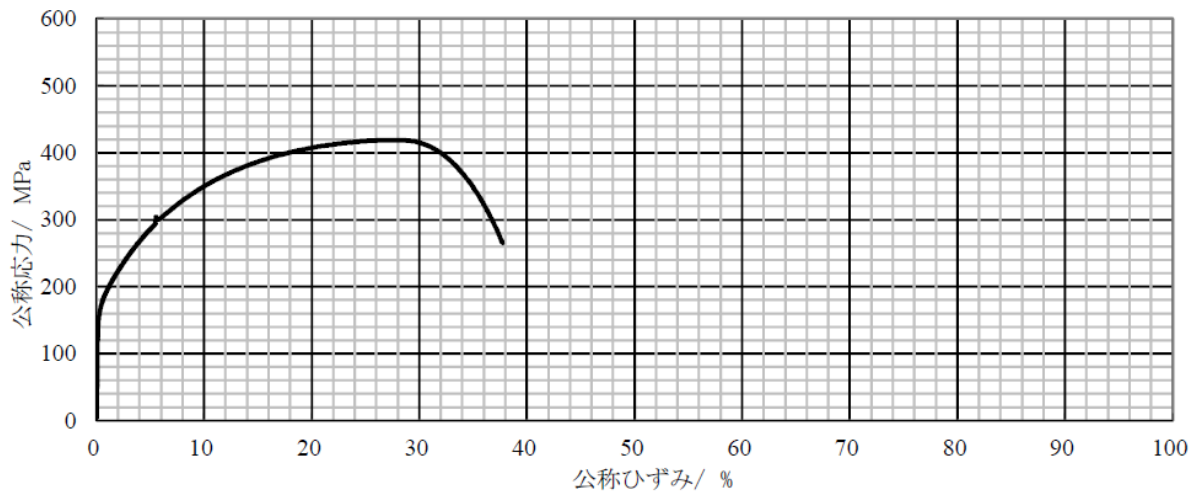


図 4.4.3-9 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 500°C、N=2)

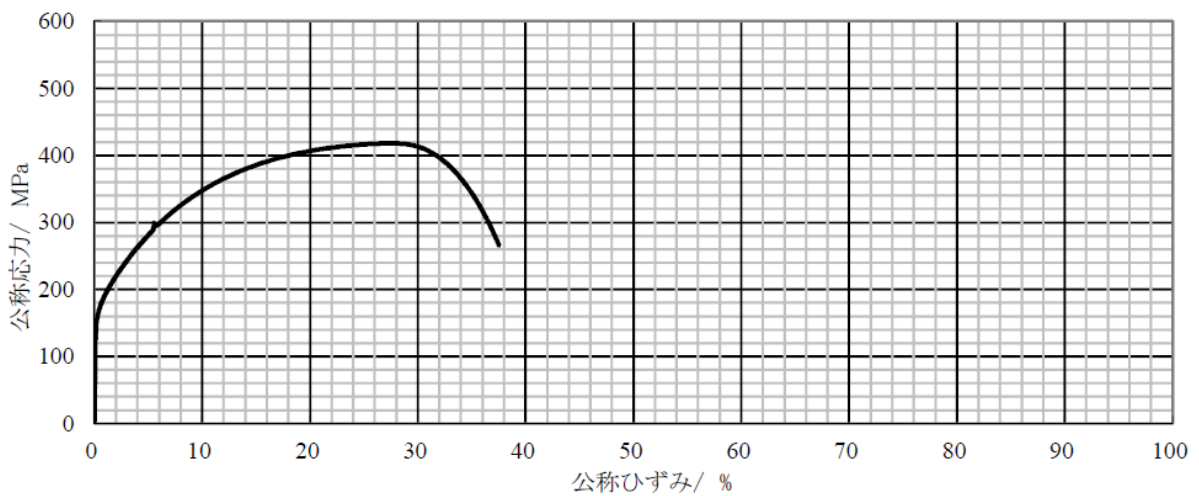


図 4.4.3-10 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 500°C、N=3)

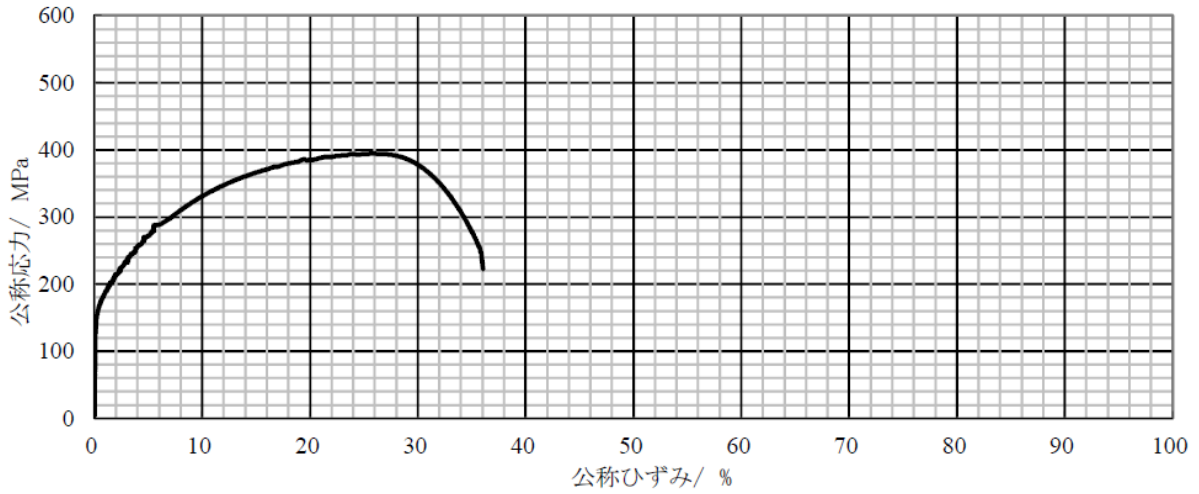


図 4.4.3-11 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 550°C、N=1)

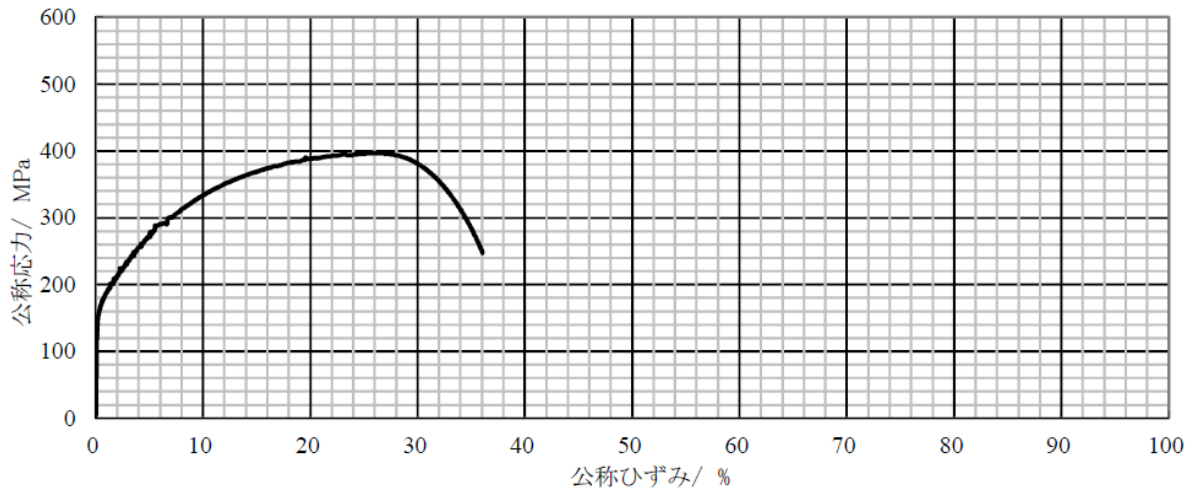


図 4.4.3-12 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 550°C、N=2)

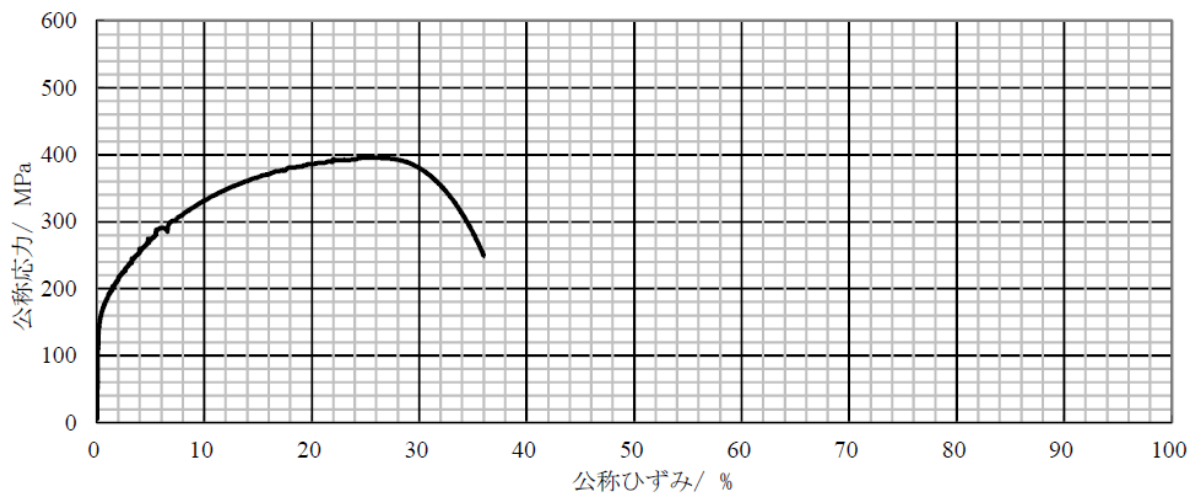


図 4.4.3-13 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 550°C、N=3)

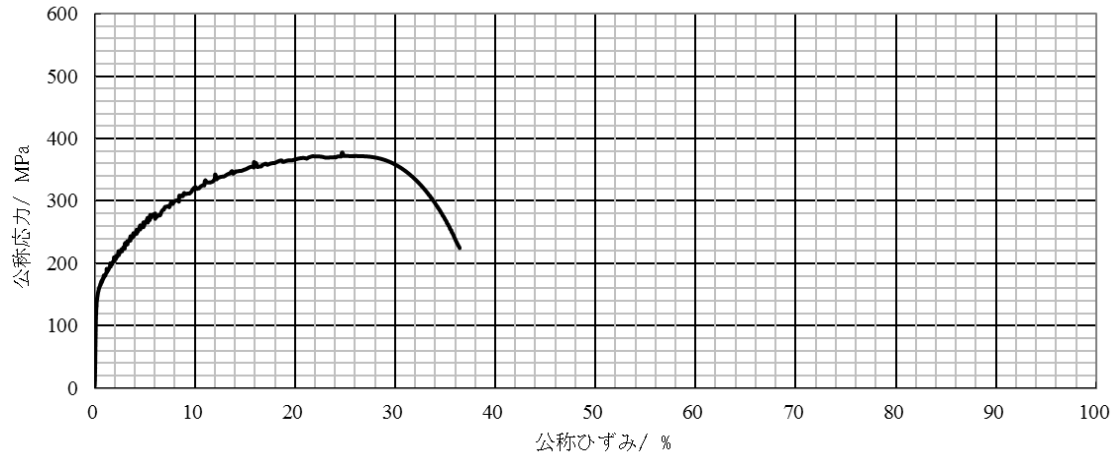


図 4.4.3-14 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 600°C、N=1)

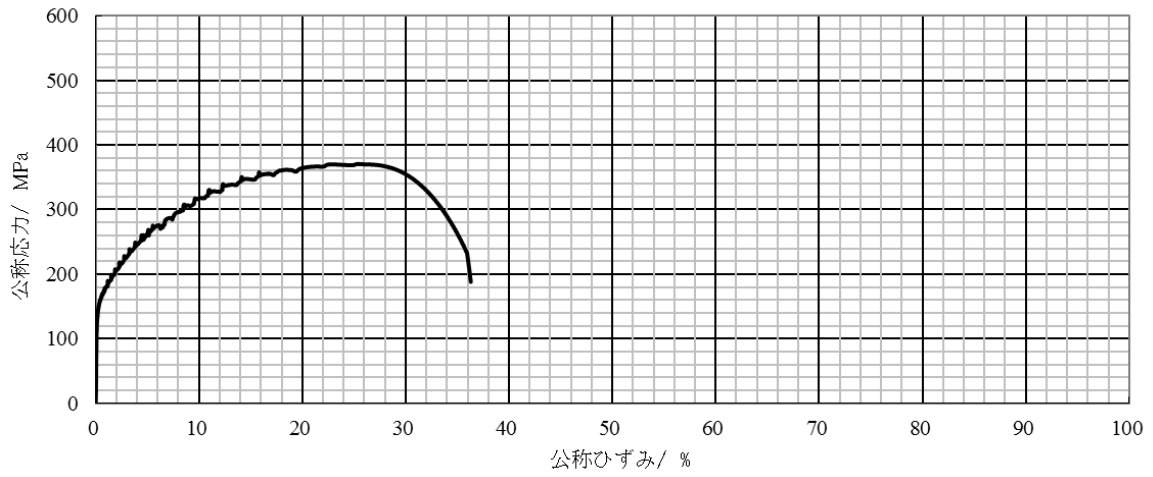


図 4.4.3-15 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 600°C、N=2)

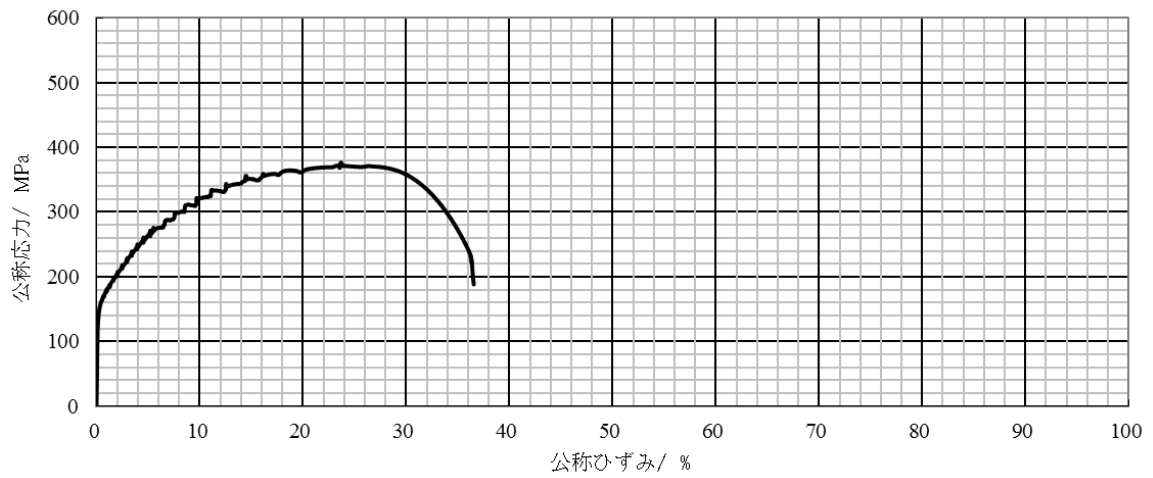


図 4.4.3-16 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 600°C、N=3)

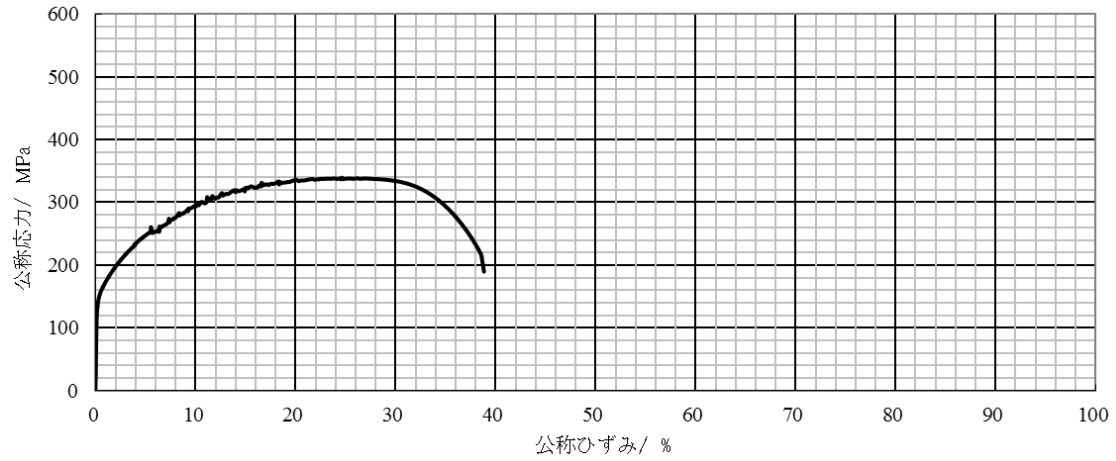


図 4.4.3-17 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 650°C、N=1)

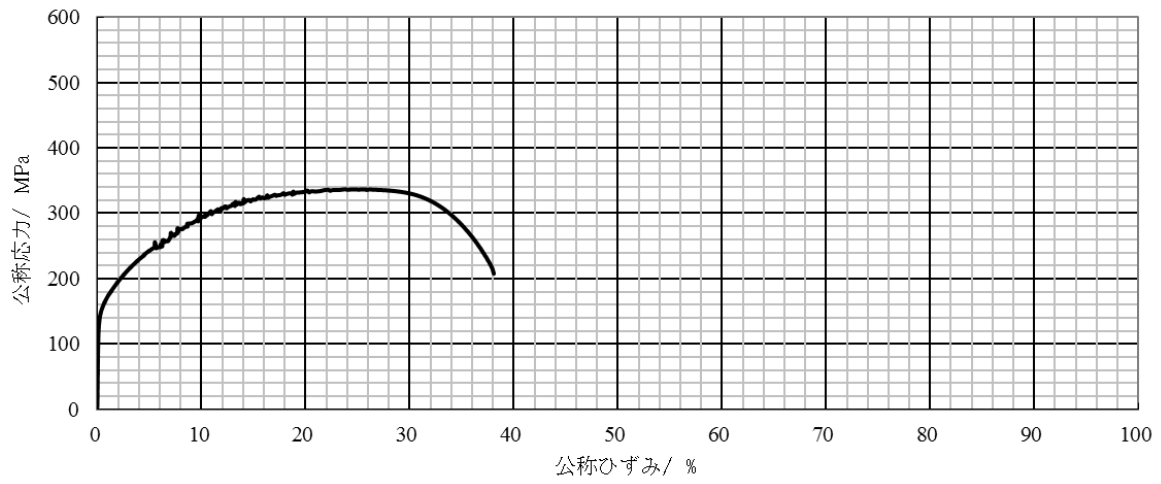


図 4.4.3-18 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 650°C、N=2)

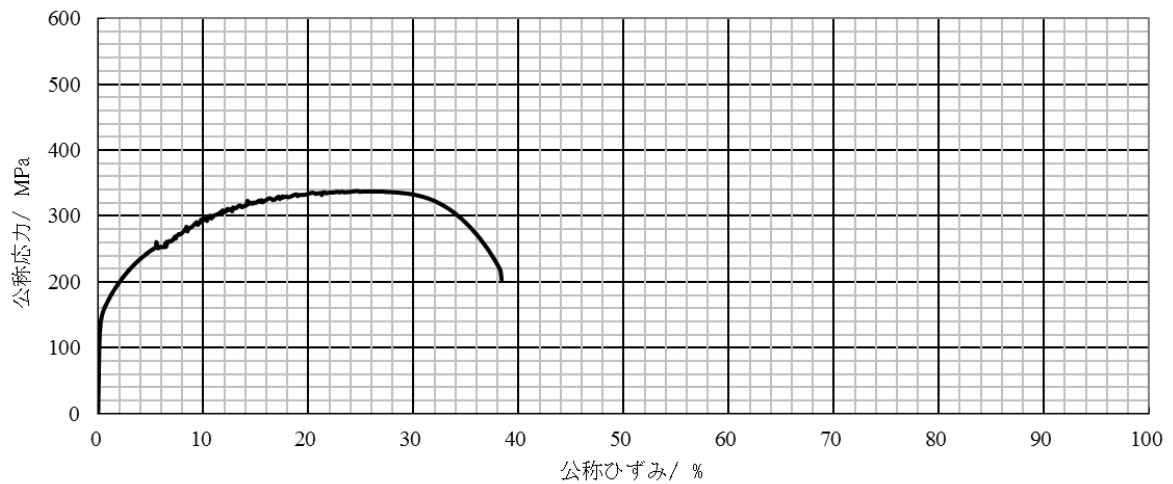


図 4.4.3-19 公称応力-公称ひずみ線図 (試験温度 : 650°C、N=3)

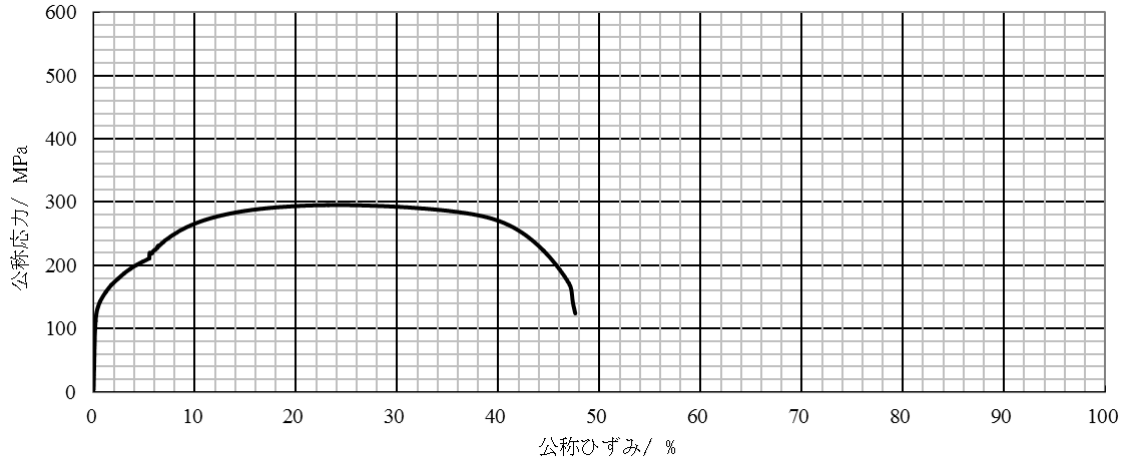


図 4.4.3-20 公称応力－公称ひずみ線図（試験温度：700℃、N=1）

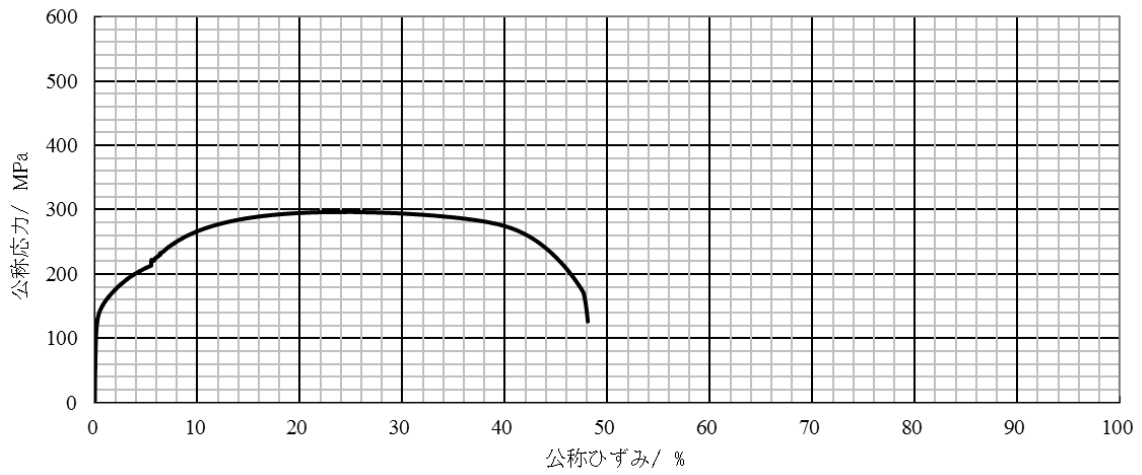


図 4.4.3-21 公称応力－公称ひずみ線図（試験温度：700℃、N=2）

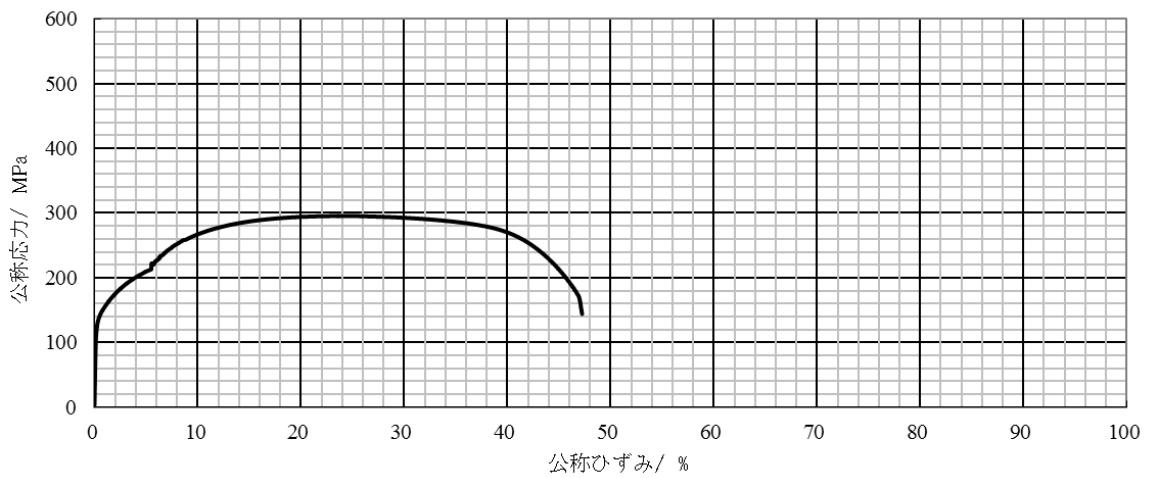


図 4.4.3-22 公称応力－公称ひずみ線図（試験温度：700℃、N=3）

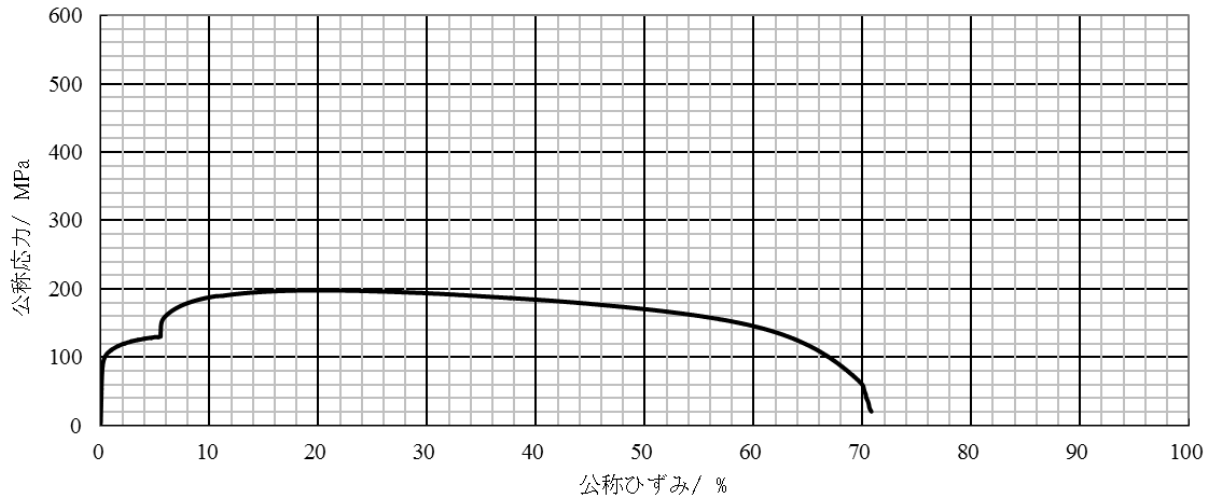


図 4.4.3-23 公称応力－公称ひずみ線図（試験温度：800°C、N=1）

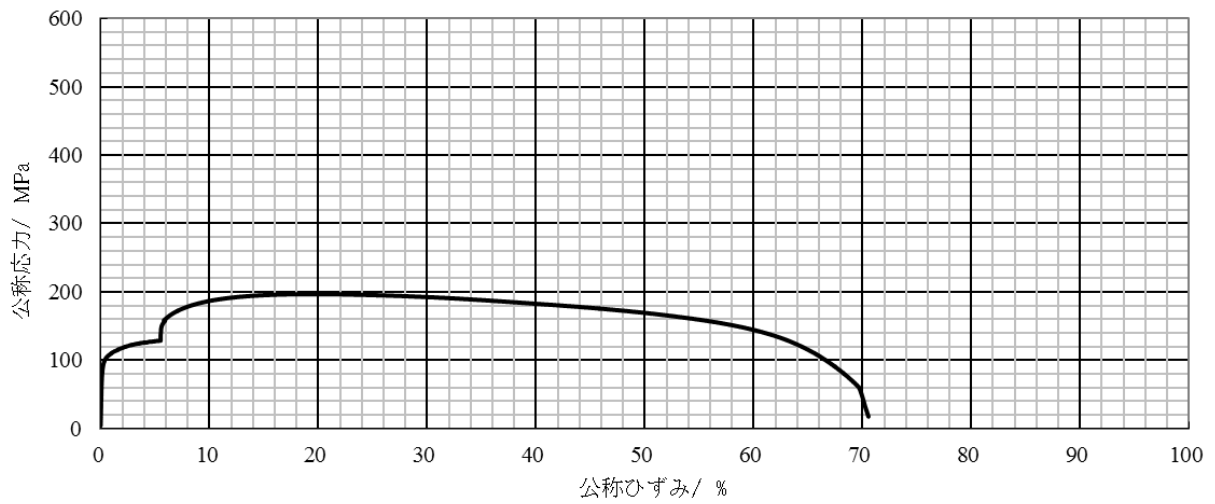


図 4.4.3-24 公称応力－公称ひずみ線図（試験温度：800°C、N=2）

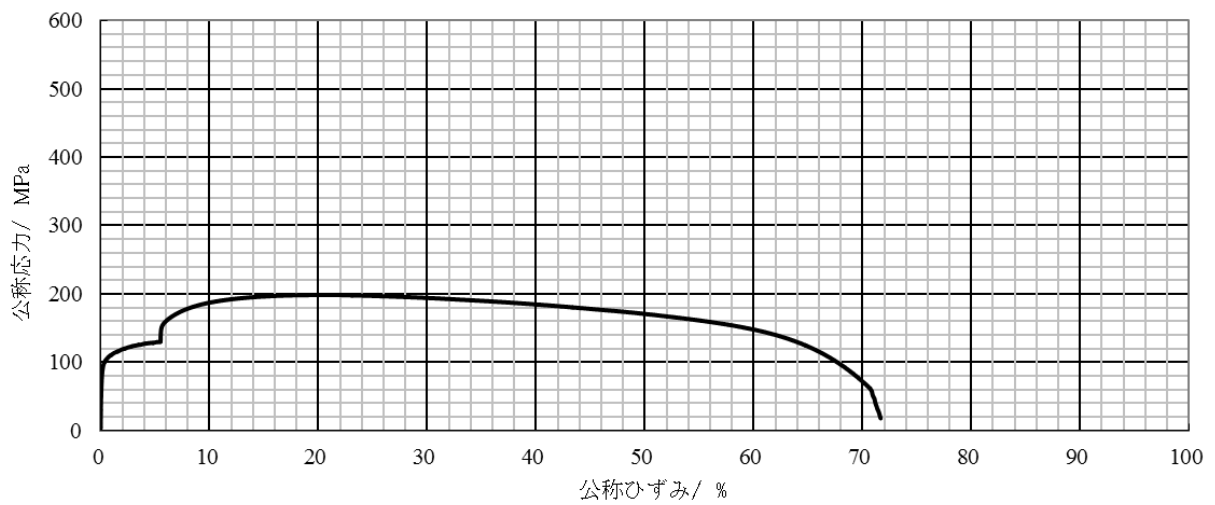


図 4.4.3-25 公称応力－公称ひずみ線図（試験温度：800°C、N=3）

(2) 線膨張係数測定 (TMA 法)

試験の結果得られた、線膨張係数のデータを図 4.4.3-26 に示す。

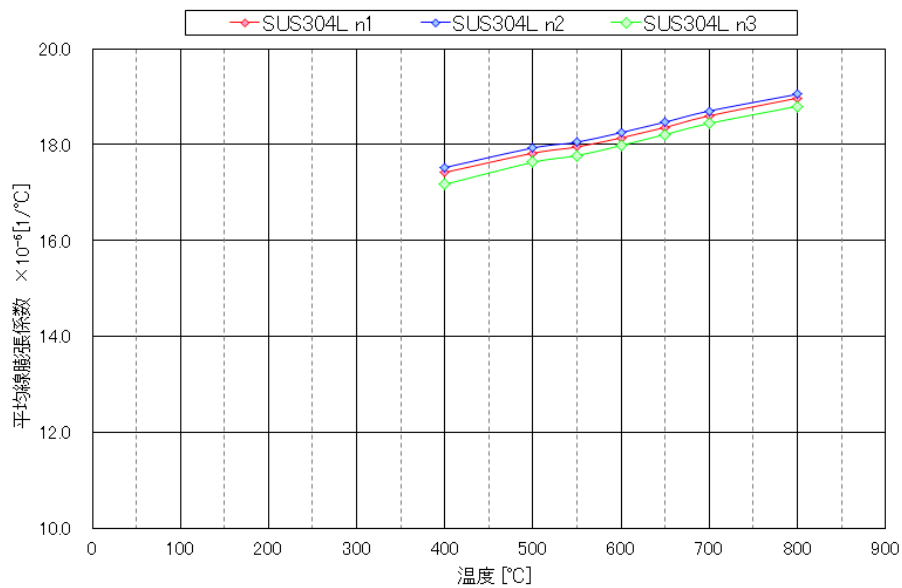


図 4.4.3-26 線膨張係数計測結果

(3) ヤング率・ポアソン比測定 (共振法)

試験の結果得られた、ヤング率およびポアソン比のデータを図 4.4.3-27 に示す。

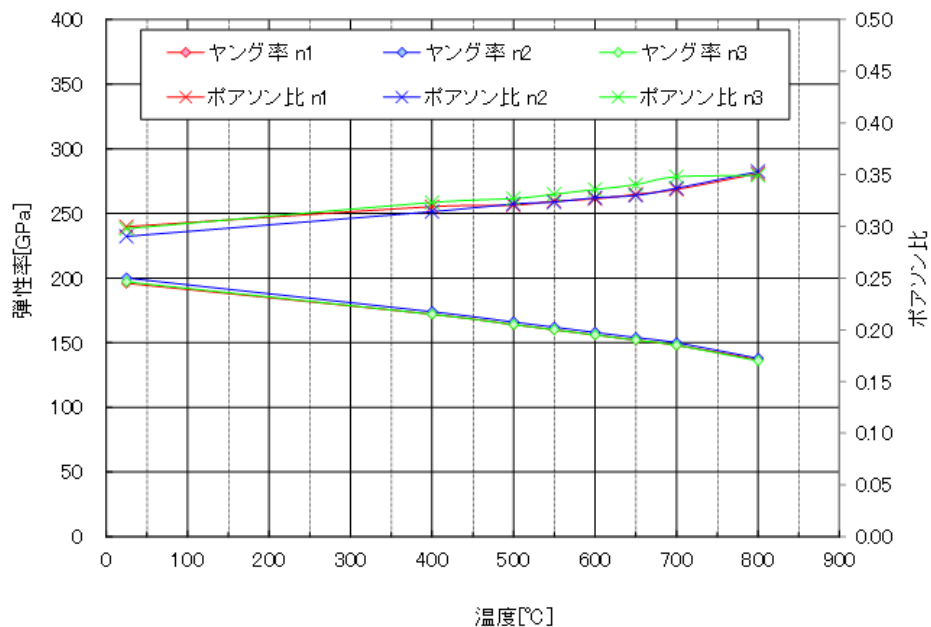


図 4.4.3-27 ヤング率およびポアソン比計測結果

4.4.4 考察と今後の課題

今年度計測した SUS304L の降伏応力（0.2%耐力）、ヤング率、および線膨張係数のデータを平成 25 年度の火災解析[20][21]に使用した SUS304L の材料データと比較した結果を、図 4.4.4-1～図 4.4.4-3 に示す。これらの図より、ヤング率と線膨張係数は、平成 25 年度の解析に使用した値、およびその線形外挿値に近いが、降伏応力については本年度の計測値の方が解析に用いた降伏応力（規格値：設計降伏点[30]）よりも高いという結果であった。

今回材料試験に供した SUS304L の試験材は、キャニスタに用いる鋼材から採取したわけではなく、一般的に入手可能な材料から試験体加工して試験材として供したものである（鋼材検査証明書を図 4.4.4-4 に示す）。今後、キャニスタの応力解析および強度評価を行う際には、キャニスタに供する材料の機械的特性値（降伏応力、応力-ひずみデータ）を適正に把握し、解析を行う必要があると思われる。また、平成 25 年度のガラス固化体キャニスタの応力解析の再解析も課題であると思われる。

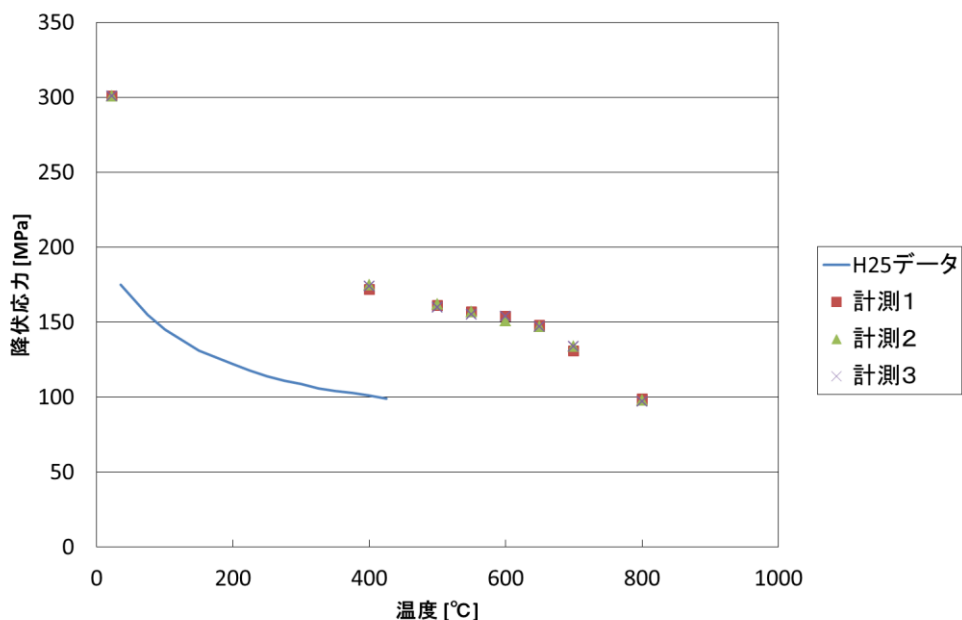


図 4.4.4-1 SUS304L 材料データの比較：降伏応力

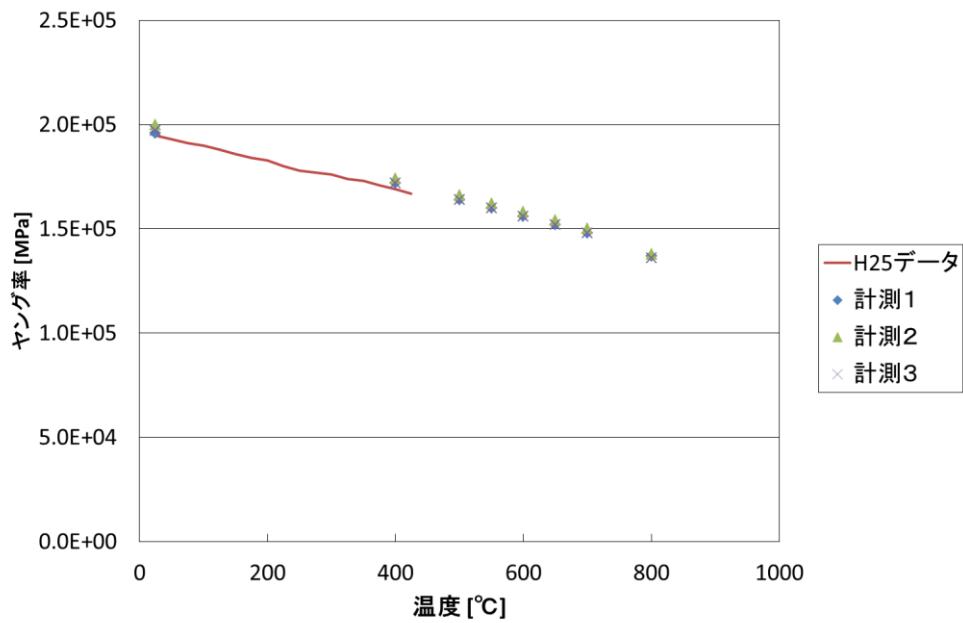


図 4.4.4-2 SUS304L 材料データの比較：ヤング率

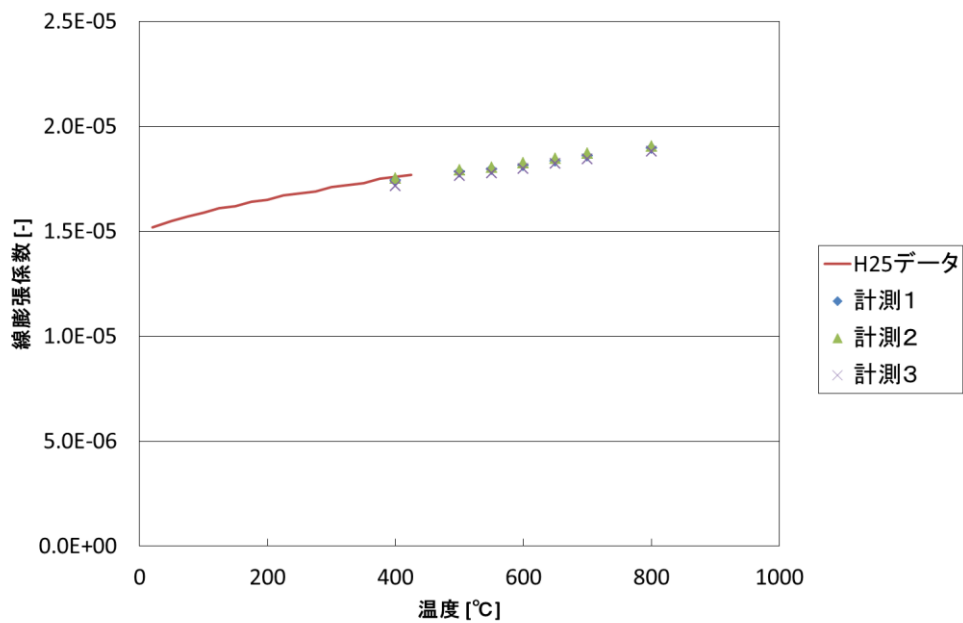


図 4.4.4-3 SUS304L 材料データの比較：線膨張係数

需要NO. CUSTOMER'S REF. NO.

契約番号 OUR REF. NO.
CB46P021

01 INSPECTION

CERTIFICATE

検査証明書

Contractor 契約先		三井物産スチール株式会社		Purchaser 需要家		株式会社 U E X		御中		
Chemical Composition 化学成分										
Elements 成分	C	Si	S	P	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	
Specification 規格	% X1000 MAX 30	% X100 MAX 1.00	% X1000 MAX 30	% X1000 MAX 45	% X100 MAX 200	% X1000 MAX 30	% X100 MAX 900	% X100 MAX 1800	% X100 MAX 2000	%
Results 結果	22	24	197	38	19	918	1936			
Mechanical Properties 機械的性質										
Items 項目	Tension Test 引張試験		Impact Test 衝撃試験		Bending Test 曲げ試験		Heat Treatment 熱処理		Remarks 記事	
	Type of Specimen 試験片	Yield Strength 降伏点 N/mm ²	Elongation 伸び %	Reduction of Area 断面収縮率 %	Hardness 硬度 HBW	非金属夹杂物 非金属夹杂物	熱処理 BODY 1080°C WQ	C : 0.2% 含有 S D S をご参照下さい 寸法検査 GOOD 外觀検査 GOOD		
Specification 規格	JIS10	MIN 480	MIN 40	MIN 60	MAX 187					
Results 結果	283	615	55	75	156					
Items 項目	Grain Size 結晶粒度	Decarburization 脱炭素化	Streak Flaw 地味	Body Hardness 製品かたさ	Non Metallic Inclusion 非金属夹杂物					
Results 結果				HBW 156						
Hardenability (End Quenching Method) 焼入性 (一端焼入法)										
Items 項目	Hardenability 焼入れかたさ									
Results 結果										

Date 発行日	14-9-26 (6W427E)	Certificate No. 証明番号	9M0776 (6BL233)	Type of Steel 鋼種	JISG4303-12-SUS304L	Size & Shape 寸法・形状	20D	Condition 納入時	ST, PM	Heat No. 焼入番号	6215D
-------------	---------------------	-------------------------	--------------------	---------------------	---------------------	-----------------------	-----	------------------	--------	------------------	-------

Quality Assurance Section, Hoshizaki Plant
Daido Steel Co. Ltd.
 大同特殊鋼株式会社
 星崎工場品質保証課
 〒457-8545 名古屋市中区大洞町4-1-1
 TELダイヤルイン (052) 611-1521

Chief of Quality Assurance Section
A. Sanyal

It is hereby certified that the above results are true and correct in every detail
 上記の成績は要求事項を満足していることを証明します。

図 4.4.4 材料試験に供した SUS304L の検査証明書

4.5 地上施設に津波が流入した場合のガラス固化体キャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理

操業中に津波により地層処分施設に海水が流入することを想定した場合、ステンレス鋼製のガラス固化体キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に曝される状況が考えられる。

ステンレス鋼に対する一般的な海洋環境下における腐食性については既往の研究例があり、知見も得られている。しかし、本開発のように放射性廃棄物を扱う施設における津波被害を想定した過酷な塩分環境条件における腐食性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられる。

津波によるガラス固化体キャニスタ（SUS304L等）の腐食性に関して、平成25年度の文献調査により、腐食を促進させる可能性があることが分かっている。

- ① 海水に対する腐食性 → すきま腐食・微生物腐食・加工履歴による SCC 発生
- ② 放射線環境下での腐食性 → 水の放射線分解による酸化性の高まりによる SCC 発生

また、ガラス固化体の崩壊熱による温度上昇は海水に浸漬したガラス固化体キャニスタ表面の気液界面での海塩析出による高温・高濃度塩化物溶液環境をもたらす可能性があり、このような条件での温度分布を解析によって求め、SCCが発生する腐食環境の成立性を評価することを優先課題として挙げた。

今年度は、崩壊熱による腐食環境（温度）条件について解析的に評価し、ガラス固化体キャニスタが津波に被災し、海水に半浸漬状態になったときの海水水没部、気液界面、および、気相部での環境での SCC 感受性の評価、特に、SCC 発生寿命の材料、環境、応力依存性の評価を行う。特に、材料：強鋭敏化、環境：80℃、海水相当塩化物濃度、応力：高い溶接残留応力、の3条件が重畳すると、数百時間以下で SCC が発生することが見込まれるため、これら加速因子をパラメータとして、より、ガラス固化体キャニスタの津波の被災の実態に合わせた SCC 発生の予測を行う。

4.5.1 ガラス固化体キャニスタの仕様

わが国の地層処分施設で扱うガラス固化体キャニスタの仕様は、国内製造品と海外再処理委託に伴って仏国、英国から返還されるガラス固化体の2種類がある。これらは、形状、ガラス固化体キャニスタの材質が異なっている。それぞれの外観・寸法を図 4.5.1-1 に示す[3]。

ガラス固化体キャニスタの材料は、国内ガラス固化体は SUS304L、海外返還ガラス固化体は SUH309/SUS309S が用いられている。

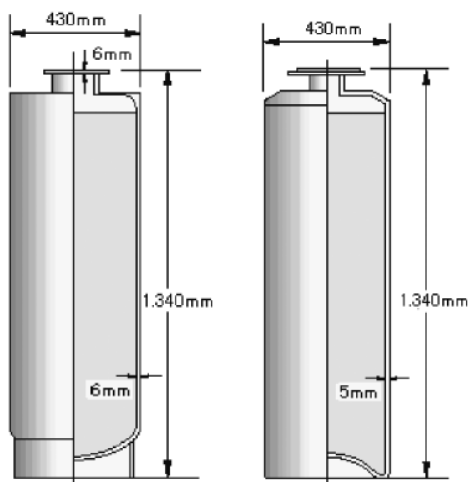


図 4.5.1-1 ガラス固化体キャニスタの仕様[3]

(左：国内ガラス固化体（日本原燃(株)）、右：海外返還ガラス固化体(AREVA NC, セラフィード社))

4.5.2 津波腐食評価方針の検討

津波の流入を受け、ガラス固化体キャニスタが海水に浸漬することを想定した場合、海水に水没したケース/部位と、海水成分の飛沫が付着した湿潤大気環境のケースが考えられる。それぞれ、以下の因子が単独、もしくは重畳して腐食が発生することが想定される。

(1) 材料因子

対象とするガラス固化体キャニスタ材は SUH309、SUS309S、および、SUS304L であるが、これらの材料の使用実績、および、データが少ないため、SUS304 などの汎用オーステナイト系ステンレス鋼の知見を合わせて評価する。SUS304/309 系材料の公称組成と特徴を

表 4.5.2-1 に、SUS304/309 系材料の化学組成、材料特性規格、および、P.I. (Pitting Index、孔食指数)を

表 4.5.2-2 に示す。SUH309 は耐熱ステンレス鋼の規格であるため、高クロム (Cr) ながら炭素量 (C) が多いことから、鋭敏化する熱履歴を受けると鋭敏化は進行する。炭素の含有

率は、SUS304 などの汎用ステンレス鋼の上限が 0.08%以下であるのに対して、耐熱ステンレス鋼の上限は 0.20%以下である。さらに、高クロム材のため、800℃域で加熱されるとσ相が生成し、じん性が低下する。また、ガラス固化体キャニスタに付随する建屋などの構成材料についても、接触などの観点から必要に応じて評価する。

したがって、SUH309/SUS309S 製ガラス固化体キャニスタは溶接により鋭敏化している可能性がある。一方、SUS304L 製ガラス固化体キャニスタは、炭素の含有率を 0.030%以下に低下させることによって鋭敏化対策が施されているため、通常の溶接などの熱履歴で鋭敏化する危険はない。ただし、冷間加工と溶接との複合寄与、表面仕上げを受ければ、鋭敏化を考慮し評価する必要がある。

表 4.5.2-1 SUS304/309 系材料の公称組成と特徴

合金種名	JIS解説	
	公称組成	主要用途
SUS304	18Cr-8Ni	ステンレス鋼・耐熱鋼として最も広く使用。 食品設備、一般化学設備、原子力用
SUS304L	18Cr-9Ni-低C	304の極低炭素鋼、耐粒界腐食性に優れ、 溶接後熱処理できない部品類
SUS309S	22Cr-12Ni	耐食性が304より優れているが、実際は耐 熱鋼として使われることが多い
SUH309	22Cr-12Ni-0.2C	980℃までの繰り返し加熱に耐える耐酸化 鋼。加熱炉部品、重油バーナ

表 4.5.2-2 SUS304/309 系材料の化学組成、材料特性規格、および、P.I.

合金種名	化学組成(%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00~13.00	18.00~20.00
SUS304L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	9.00~13.00	18.00~20.00
SUS309S	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00~15.00	22.00~24.00
SUH309	≤0.20	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	12.00~15.00	22.00~24.00
合金種名	耐力	引張強さ	伸び	公称組成	P.I.		
	N/m ²	N/m ²	%				
SUS304	≥205	≥520	≥40	18Cr-8Ni	18		
SUS304L	≥175	≥480	≥40	18Cr-9Ni-低C	18		
SUS309S	≥205	≥520	≥40	22Cr-12Ni	22	P.I.=[%Cr]+3.3 [%Mo]+10[%N]	
SUH309	≥205	≥560	≥40	22Cr-12Ni-0.2C	22		

(2) 環境因子

環境は、a)定常運用時、b)地震・火災時、および、c)津波時の3つに大別できる。本調査・検討はリスクの抽出が目的の1つであるから、環境因子は、第一義的には上限の環境(温度、湿度、塩化物濃度など、それぞれ想定される最も厳しい環境の重畳)とする。ただし、それらを単純に重畳すると、現実とかけ離れた過度に保守的で現実には成立しない条件となりえるため、具体的な評価条件の設定に際しては、そのバランスを考慮する必要がある。

a. 定常運用時

定常運用時は、空調建屋で、15～25℃程度の室温、および、除湿された環境で、結露などの高温多湿の腐食環境にならないよう制御されていることを前提とする。一般に自然対流エリア(自然対流による空気の循環供給で冷却などを図る系統の建屋、機器などの表面)は、海塩などが持ち込まれ蓄積する環境にあるが、地層処分施設内では、付着海塩などの腐食性物質の持ち込みがなく、ガラス固化体キャニスタの表面は清浄であることを前提とする。

b. 地震・火災時

地震そのもので腐食環境が変化することは前提としない。しかしながら、配管の破損、火災時の消火栓からの放水などによって、工業用水レベルの水質の水によって浸漬する。なお、これらの浸水は、時間の経過とともに、建屋からの若干の汚染の影響を受ける。また、空調設備のある建屋においても、その環境維持機能が絶たれ、海洋性湿潤大気環境に置かれる。また、消火栓から消火剤として化学物質が放散される場合には、化学種が持ち込まれる。

c. 津波時

津波時には、地震・火災時の条件に加え、海水、および、海底の土が持ち込まれる。さらに、近隣に河川がある場合、河川からの栄養物質が豊富に含まれることから、生物活性が高くなることを見込まれる。生物活性は時間的な因子(繁殖までの時間)、および、温度依存性があり、特に、50℃程度を超えるとその活性が低下するが、完全に死滅する訳ではないため、温度が低下すると生物活性が高まる。さらに、瓦礫などによって、その一部が埋没する。すなわち、構造上のすきまが形成され、水質への悪影響もある。

ガラス固化体は発熱体であり、放水や海水により浸漬され、温度と水量によって局部沸騰や蒸発・濃縮の環境変化が起きるため、平衡に達するまでの温度履歴が重要となる。

海水などによる一般的な水環境では塩化物濃度で評価するが、海洋性湿潤大気環境ではステンレス表面の付着海塩量によって評価する。

塩化物の存在によって、これらステンレス鋼は孔食、すきま腐食、SCCなどの局部腐食感受性を有し、材料因子： $P.I.(\text{Pitting Index, 孔食指数})$ 、もしくは、 $PRI(\text{Pitting Resistance Index, 耐孔食指数})=[\%Cr]+3.3[\%Mo]+16[\%N]$ 、鋭敏化の程度、環境因子：温度、塩化物濃度、酸化/還元性、応力因子：溶接残留応力、作用応力などに依存する。

ガラス固化体キャニスタは、ガラス固化体に含まれる放射性核種の崩壊熱によって内面側から加熱されており、ガラス固化体キャニスタの表面温度は常に水溶液温度、および、大気温度と同等以上に高くなっている。環境の酸化性は、通常は水溶液、もしくは薄い水膜中の溶存酸素濃度であるが、放射線分解によって OH ラジカルや H₂O₂ が生成することによっても酸化性が高まる。また、海生生物や微生物の繁殖によって、いわゆる微生物腐食(MIC、Microbially Induced Corrosion)を起こすことがある。環境の腐食性は、一般的に温度の上昇とともに高くなっていくが、50℃を超えると生物活性が低下する。また、70℃を超えると溶存酸素が大気中に逃げられる開放系となり、海水中の溶存酸素濃度が低下してカソード反応が抑制され、こ、腐食性は抑制されることが知られている。したがって、解析から得られる最高到達温度と、溶存酸素飽和の環境でのそれぞれの腐食性を、単純に重畳させると過度に保守的な評価となる。さらに、砂礫に埋もれることによって、すきま腐食の条件が整う。また、海水の蒸発に伴い、気液界面では海塩が濃縮していく。

表面温度が大気温度より高ければ、水蒸気飽和大気環境であっても金属表面は結露しないため、腐食環境が整わない。実際、湿潤大気環境を考慮した厳しい条件として、30℃、90%R.H.に制御した恒温恒湿槽に入れ U 字曲げ試験片の温度を 60℃にコントロールし、試験片の逆U字型の頂部に苦汁塩滴を付与した状態で 500 時間の試験を実施後、発錆、および SCC の有無を確認した結果、SUS316 は若干の変色が認められるが、除塩後は発錆も無く、き裂も発生していない[31]。一方、公表データの多くは、表面温度と大気温度が同じ状態の恒温恒湿槽での実験室試験に基づくもので、SUS316 の 60℃/35%RH における苦汁塩滴試験では SCC が発生している[31]。したがって、過度に保守的な評価となる可能性がある。

(3) 応力因子

ガラス固化体キャニスタはその製造時の冷間加工、および、溶接による（降伏応力に達するレベルの）残留応力がある。

作用応力（プラントにおける内圧などによるもの）は生じないが、加熱されたガラス固化体キャニスタが放水などによって急冷されると、ガラス固化体キャニスタが縮む一方で、内部のガラス固化体が急冷による割れで体積膨張をすれば、ガラス固化体キャニスタ表面に引張り応力が生じる可能性がある。普通ガラスでは 35(薄い場合)~65(比較的厚い場合)℃、テンパックスなどの耐熱ガラスでは 100~180℃が耐熱衝撃温度(0℃まで急冷して割れない温度、JIS S2030 では所与の温度に調整した恒温槽中に 30 分保持した後、冷水中に 1 分間浸漬し、ひび及び割れの有無を確認)とされている。

4.5.3 津波によるガラス固化体キャニスタ浸漬シナリオの整理

地層処分施設は、わが国では候補地が決まっておらず海岸近くに立地される可能性もある。このような立地における過酷なシナリオとして、地震による津波が発生し地層処分場の地上施設を直撃することが考えられる。

先行事例として、原子力発電所については、九州電力株式会社が具体的な被災条件等を設定して川内原子力発電所 1、2 号炉の耐津波設計方針の施設評価を行っている[32]。地層処分施設については、候補地が未定のため具体的な被災条件を設定することができない。ここでは安全側で評価を行うことにより、腐食に対して厳しい条件を選出することとする。

廃棄物が腐食による影響を最も受けやすいのは、ガラス固化体がオーバーパックに格納されず単体の状態で扱われる工程、具体的には、輸送キャスクから取り出し、ガラス固化体検査、仮置き、オーバーパックへの封入までの工程である。

地層処分場の地上施設は、津波の被害を想定した立地・施設設計が成されるが、上記の工程は放射線安全上、地上施設の地下階で行われることとし、津波が地上施設を直撃してガラス固化体を取り扱う地下階に浸入するシナリオを想定する。

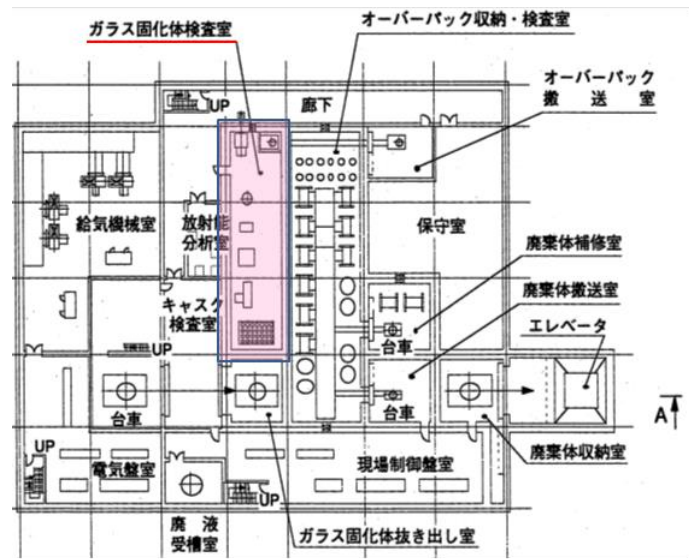
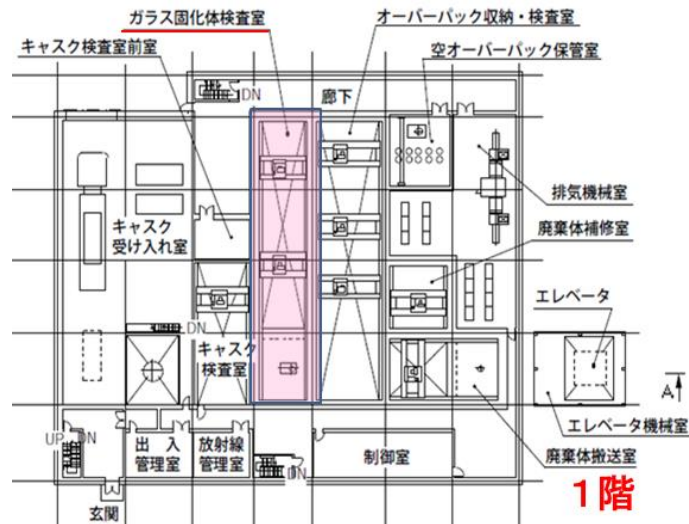
本解析の津波シナリオ設定にあたっては、第 2 次取りまとめ[9]で検討された地上施設レイアウトを参考とし、ガラス固化体検査室内に津波が浸漬するケースを想定する。さらに、電源喪失・換気設備の閉塞等による換気が停止した場合の温度影響を評価する。

これ以外に、地震・津波による電源喪失等によって換気が停止し、一定時間経過後に海水が浸漬するケースが考えられる。換気停止の影響については、原子力環境整備機構 (NUMO) により検討が行われている。それによると、換気停止した 5 日後にガラス固化体表面の温度が 200°C 程度まで上がるものの、その後は温度の上昇が鈍化し、ガラス固化体キャニスタへの影響は小さい、との知見が得られている[33]。また、200°C まで上昇したガラス固化体キャニスタが、海水 (20~30°C) によって急冷される海水腐食等の影響が考えられるが、200°C までに 5 日程度の猶予があることから、ここでは扱わないこととする。

以上のシナリオに基づき、津波浸漬の概念モデルを以下のように整理した。

(1) 施設レイアウト・評価範囲

第 2 次取りまとめ[9]の地上施設配置図と評価範囲としたガラス固化体検査室を図 4.5.3-1 に示す。また、既存類似施設を参考に、地下一階にピット状の仮置き場が設置されているものとする。



□: 評価範囲

地下1階

図 4.5.3-1 地上施設配置図 ([9]に加筆)

(2) 津波浸漬前 (Case 0)

津波浸漬前の概念モデルを図 4.5.3-2 に示す。施設内に仮置きしたガラス固化体の崩壊熱、施設内の輻射、強制換気・自然対流を考慮する。安全側で想定するとして、しゃへい蓋は全開とする。気相部は乱流モデルによりモデル化する。

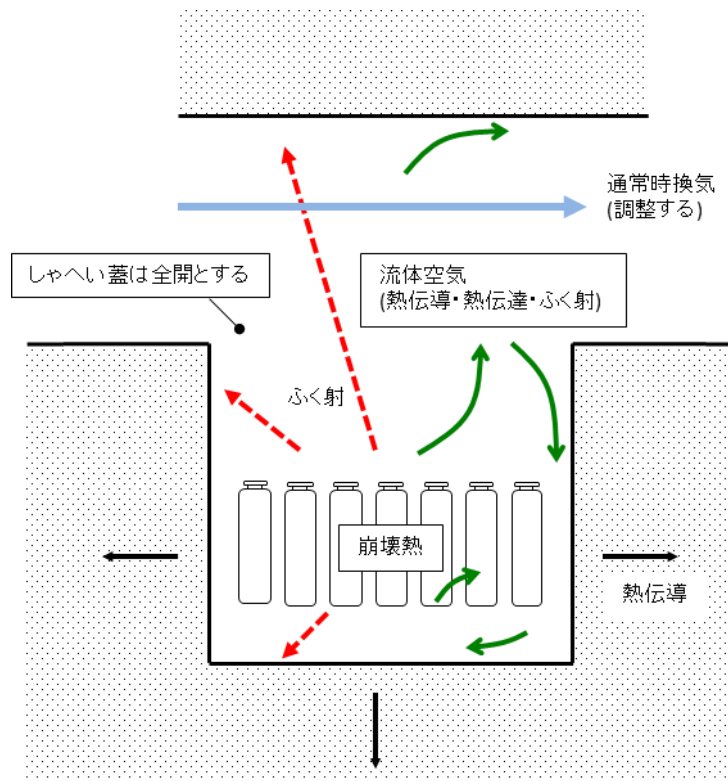


図 4.5.3-2 浸漬前モデルの概念図 (Case 0)

(3) 津波浸漬後 (Case 1、2)

津波浸漬後の概念モデルを

図 4.5.3-3 に示す。浸漬前のモデルに加えて、海水の温度による自然対流、海水表面の輻射等を考慮する。海水部は層流モデルとする。

室内換気について、浸漬前 (Case 0) と同じ換気状態を設定する Case 1 に対して、海水等により換気機能が停止した場合の Case 2 を設定する。

海水浸漬の深さについては、高温、湿度、塩化物濃度の影響を受ける海水と気相の界面に位置するガラス固化体キャニスタ表面が最も腐食すると懸念される。このため、ガラス固化体キャニスタの高さの半分まで海水が浸漬した条件とし、輻射、熱伝導等の影響を受けた温度履歴を解析する。

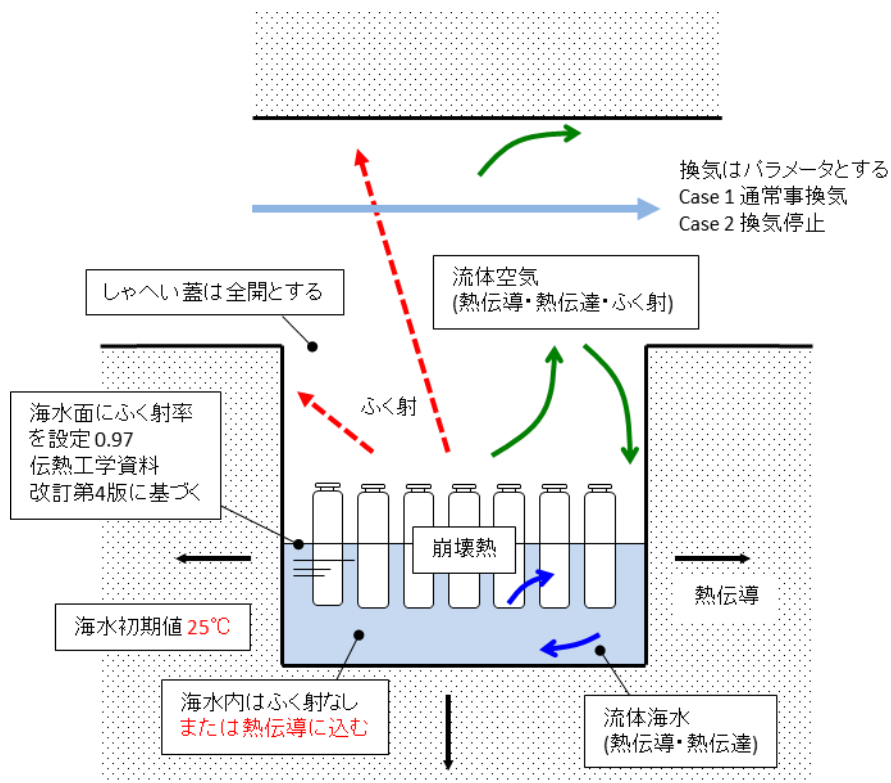


図 4.5.3-3 浸漬後モデルの概念図 (Case1, 2)

4.5.4 解析手法及び解析コードの選定

設定した解析ケースを表 4.5.4-1 に示す。また、図 4.5.4-1 に示す手順に従い、各ケースの解析を実施する。

表 4.5.4-1 解析ケース

	解析ケース	換気状態	海水浸漬
津波被災前	Case 0	正常	無
津波被災後	Case 1	正常	有
	Case 2	停止	有

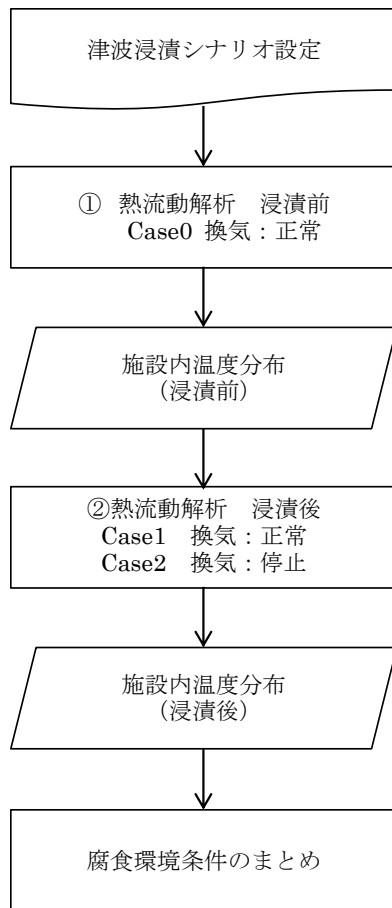


図 4.5.4-1 人工バリアの腐食環境解析 検討フロー

図 4.5.3-2、

図 4.5.3-3 に示すように、以下の現象を考慮した温度評価が必要となる。

③ ガラス固化体検査室内の熱伝達

ガラス固化体の崩壊熱、施設内気相流動、浸漬水内の流動、施設内壁の輻射、海水表面の輻射、熱伝達

④ ガラス固化体検査室外壁の熱伝達（断熱）

このうち、海水の熱伝達形態としては対流が支配的となる。ガラス固化体キャニスタ及び壁面と海水間の熱伝達は、両者の温度及び海水の自然対流に応じて変化するので一律に設定することはできない。さらに海水は上部が加熱されることにより、垂直方向に温度分布を持つと考えられる。その温度分布を求めるためには自然対流を計算する必要がある。そこで流動、伝導及び輻射をリンクして計算することができる熱流動解析プログラムを選定する。これより気中の空気の流れを計算できることで室内換気の考慮も容易となる。

以上から熱流動解析プログラムの中からは使用済燃料貯蔵キャスクの冷却計算等で実績を有する ANSYS Fluent ver 15.0 を選定した。

4.5.5 解析モデルの作成

第2次取りまとめ[9]の地上施設配置図を図4.5.5-1に示す。このうち評価範囲としたガラス固化体検査室について、既存類似施設を参考に地下一階にピット状の仮置き場が設置されているものとし、次のようにモデル化した。

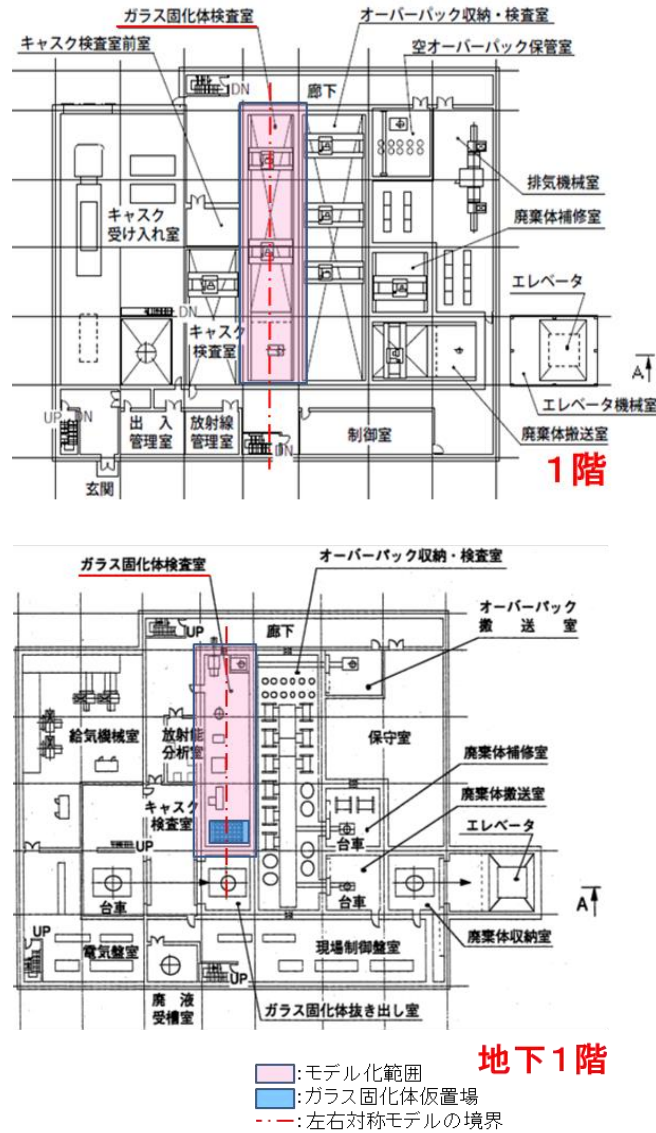


図 4.5.5-1 地上施設におけるモデル化範囲
 ([9]に加筆)

(1) 躯体モデル

処分場地上施設のうちガラス固化体検査室を図 4.5.5-2、図 4.5.5-3 のように左右対称の躯体としてモデル化した。室内換気システムとして、躯体下部に給気口、躯体上部に排気口が設置されると考えられるが、津波浸漬の場合は給気口が閉塞すると仮定し、モデル上は仮想的な給気口・排気口を側壁上部に設置した。具体的には側壁上部に 1,000mm×1,000mm の排気口を設定し、解析安定性のためパイプ状の追加領域を設けた。

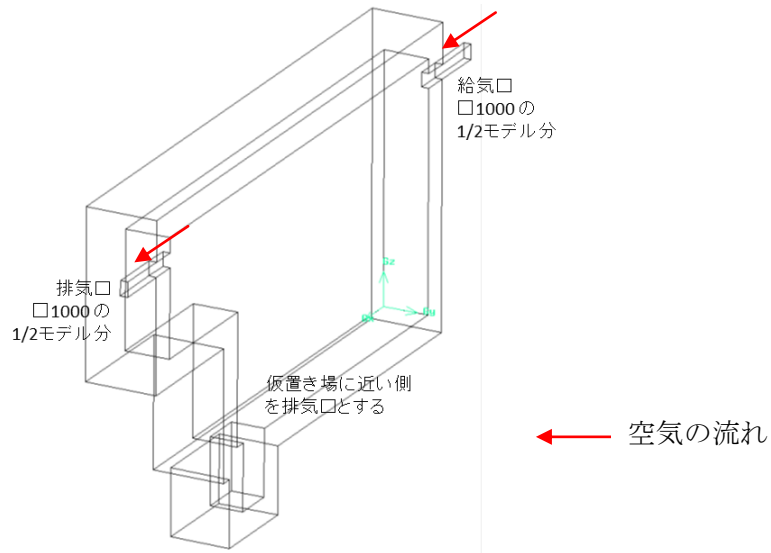


図 4.5.5-2 ガラス固化体検査室躯体のモデル

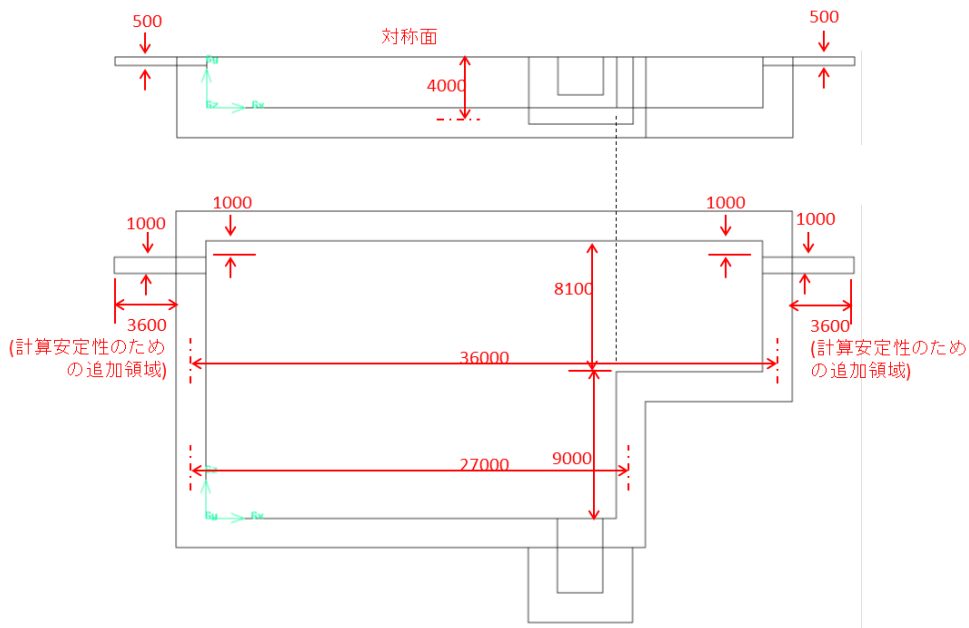


図 4.5.5-3 躯体のモデルの寸法

(2) ガラス固化体モデル

ガラス固化体について、腐食環境の影響をより強くうける返還固化体の形状をもとに、解析負荷低減のため円筒形でモデル化した（図 4.5.5-4）。ガラス固化体仮置架台はモデル化しないものとした。

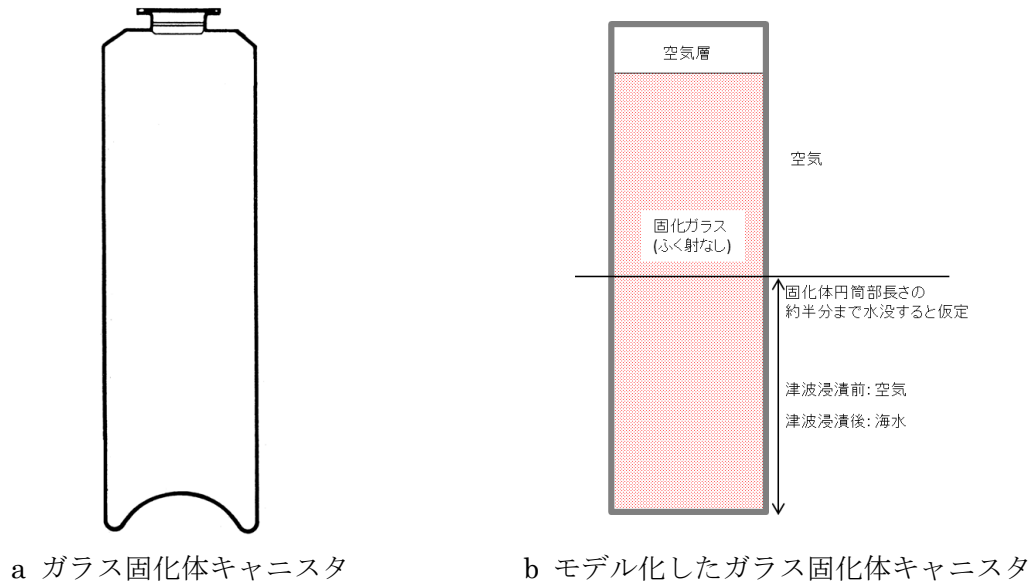


図 4.5.5-4 ガラス固化体のモデル化

(3) 全体モデル

躯体にガラス固化体を加えた浸漬前のモデル、それに海水面を加えた浸漬後のモデルを作成後、それぞれ解析メッシュを設定して解析に用いる全体モデルとした。モデルのジオメトリ・メッシュ図を図 4.5.5-5、図 4.5.5-6 に示す。メッシュ数は浸漬前モデルで 708,049、浸漬後モデルで 714,108 となった。

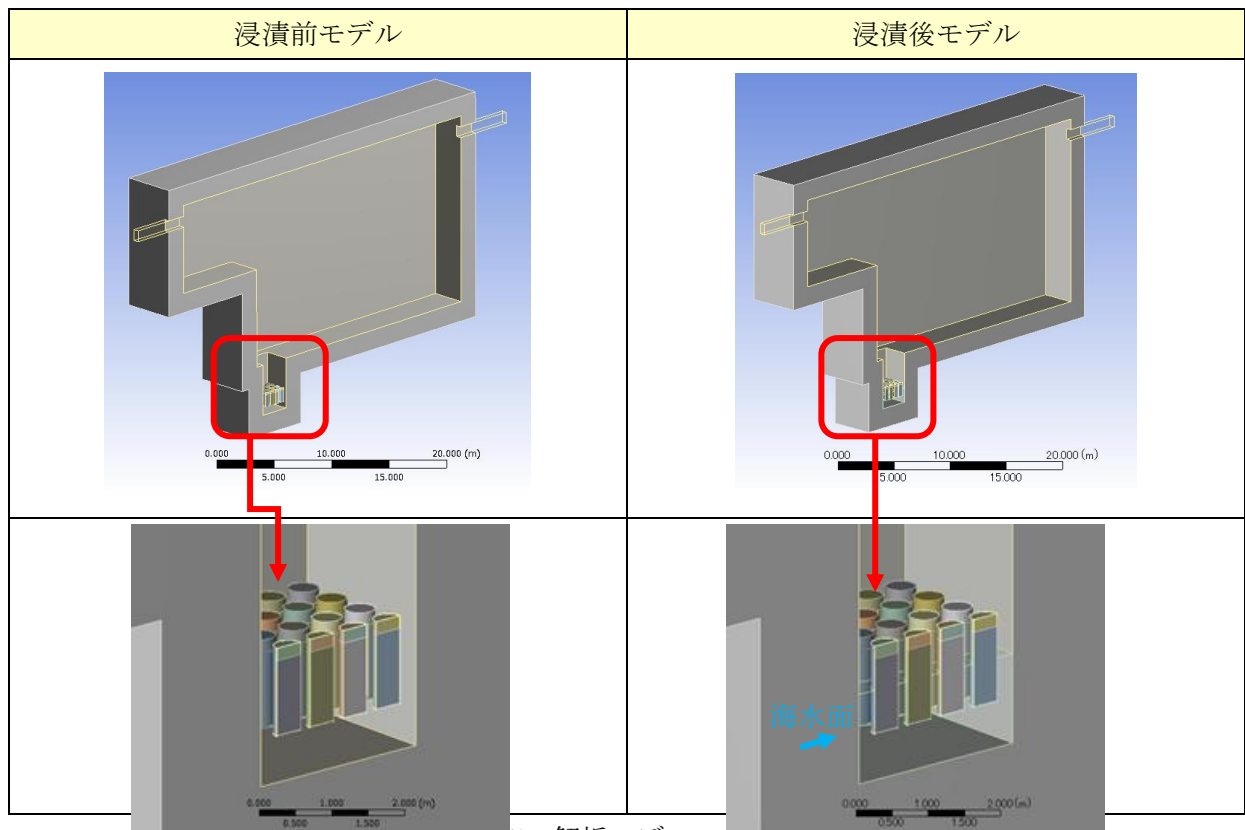


図 4.5.5-5 解析モデルのジオメトリ

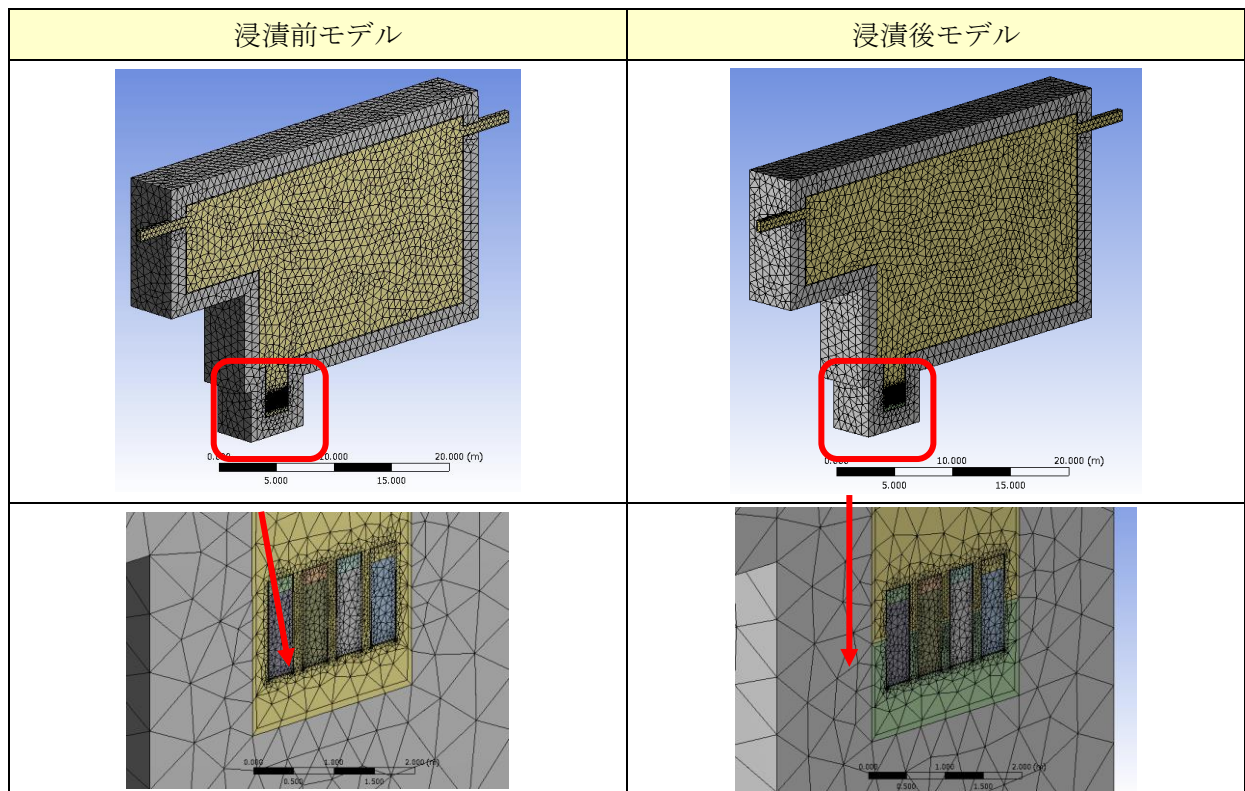


図 4.5.5-6 解析モデルのメッシュ

4.5.6 解析条件の設定

各部位の解析条件を以下のように設定した。

(1) ガラス固化体

1本あたりの発熱量を350W/本[9]とし、28本のガラス固化体が仮置きされているとして総発熱量を9800Wとした。

(2) 室内換気

Case 0、1で設定する室内換気風量について以下のように設定した。

既存類似施設において、ガラス固化体からの発熱量がすべて換気によって持ち出されるとして、流入空気温度29℃に対し排気温度46℃と見積もられている[34]。地上施設においては中間貯蔵期間を経て放熱量が低下するため、上昇温度を12℃程度と見積もり、表4.5.6-1のように設定した。

Case 2について、換気系停止条件として給排気量を0に設定した。

表 4.5.6-1 室内換気の設定 (Case 0、Case 1)

項目	記号	数値	単位	設定根拠
発熱量	Q	9,800	W	[9]
定圧比熱	C _p	1,007	J/kgK	300Kでの値[35]
流入温度	T _{in}	29	℃	既存類似施設を参考に設定[33]
排気温度	T _{out}	41	℃	既存類似施設を参考に設定
給排気量	M	0.833	kg/s	$M \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = Q$

(3) 境界条件

保守的な条件としてガラス固化体温度が高くなるように、コンクリート壁の境界条件は全て断熱とした。

(4) モニタ点

Case 0（定常解析）の結果から、最高温度・最低温度となる固化体を選択して代表的な固化体とし、Case 1、Case 2の非定常解析でキャニスタ表面とその近傍領域に温度モニタ点を設定することとした。

4.5.7 構成要素の物性値の設定

(1) 固化ガラス

固化ガラスの物性値を以下のように設定した。

- ・密度[kg/m^3] : 2700[34]
- ・比熱[$\text{J/kg}\cdot\text{K}$] : 表 4.5.7-1 に示す値
- ・熱伝導率[$\text{W/m}\cdot\text{K}$] :

表 4.5.7-2 に示す値

- ・輻射率[-] : 0.9 [33]

表 4.5.7-1 固化ガラスの比熱[36]

温度		比熱 J/kgK
°C	K	
20	293.15	593
50	323.15	664
70	343.15	704
100	373.15	755
150	423.15	825
200	473.15	881
300	573.15	972
400	673.15	1046
500	773.15	1113

表 4.5.7-2 固化ガラスの熱伝導率[34]

温度		熱伝導率 W/mK
°C	K	
20	293.15	0.795
500	773.15	1.275

(2) ガラス固化体キャニスタ

ガラス固化体キャニスタをステンレス鋼とし、物性値を表 4.5.7-3 のように設定した [34][35]。

表 4.5.7-3 ガラス固化体キャニスタ 比熱[35]・熱伝導率[34]

温度		比熱 J/kgK	熱伝導率 W/mK
°C	K		
26.85	300	499	15.1
126.85	400	511	
326.85	600	556	

526.85	800	620	21.3
--------	-----	-----	------

(3) コンクリート

検査室躯体材料をコンクリートとし、物性値を以下のように[35][37]に基づき設定した。

- ・密度：2300 [kg/m³][20]
- ・比熱：表 4.5.7-4 に示す値
- ・熱伝導率：表 4.5.7-5 に示す値
- ・輻射率：0.9[35]

表 4.5.7-4 コンクリート比熱[37]

温度		密度	比熱	密度(換算値)	比熱(換算値)
K	℃	kg/m ³	J/kgK	kg/m ³	J/kgK
293.15	20	2300	900	2300	900
373.15	100	2300	900	2300	900
373.15	100	2300	2020	2300	2020
388.15	115	2300	2020	2300	2020
473.15	200	2254	1000	2300	980
673.15	400	2185	1100	2300	1045
1473.15	1200	2024	1100	2300	968

表 4.5.7-5 コンクリートの熱伝導率[37]

温度		熱伝導率(上限)	熱伝導率(下限)	平均
K	℃	W/mK	W/mK	W/mK
293.15	20	1.95	1.33	1.64
373.15	100	1.77	1.23	1.50
473.15	200	1.55	1.11	1.33
573.15	300	1.36	1.00	1.18
673.15	400	1.19	0.91	1.05
773.15	500	1.04	0.82	0.93

(4) 空気

領域内空気の物性値を表 4.5.7-6 のように設定した。

表 4.5.7-6 空気物性値[35]

温度		密度	比熱	熱伝導率	分子粘性
K	°C	kg/m ³	J/kgK	W/mK	Pa・s
280	6.85	1.2606	1007	0.02461	1.760E-05
300	26.85	1.1763	1007	0.02614	1.862E-05
320	46.85	1.1026	1008	0.02759	1.969E-05
340	66.85	1.0376	1009	0.02900	2.063E-05
360	86.85	0.9799	1011	0.03039	2.154E-05
380	106.85	0.9282	1012	0.03173	2.242E-05
400	126.85	0.8818	1015	0.03305	2.327E-05
420	146.85	0.8398	1017	0.03437	2.410E-05
440	166.85	0.8016	1020	0.03568	2.490E-05
460	186.85	0.7667	1023	0.03697	2.569E-05
480	206.85	0.7347	1027	0.03825	2.646E-05
500	226.85	0.7053	1031	0.03951	2.721E-05
550	276.85	0.6412	1041	0.0426	2.903E-05
600	326.85	0.5878	1052	0.0456	3.078E-05
650	376.85	0.5425	1064	0.0484	3.247E-05
700	426.85	0.5038	1076	0.0513	3.410E-05
800	526.85	0.4408	1099	0.0569	3.723E-05

(5) 海水

海水の物性値を以下のように設定した。

- ・密度[kg/m³] : 996.66[35]
- ・比熱[J/kg・K] : 表 4.5.7-7 に示す値
- ・熱伝導率[W/m・K] : 表 4.5.7-8 に示す値
- ・分子粘性[Pa・s] : 表 4.5.7-9 に示す値
- ・輻射率[-] : 0.97[35]

表 4.5.7-7 海水の比熱[35]

温度		比熱
°C	K	J/kgK
0	273.15	4001
10	283.15	4005
20	293.15	4009
30	303.15	4013
40	313.15	4017
50	323.15	4021
60	333.15	4025
70	343.15	4029
80	353.15	4033

表 4.5.7-8 海水の熱伝導率[35]

温度		熱伝導率
°C	K	W/mK
25	298.15	0.583
50	323.15	0.594
75	348.15	0.583
100	373.15	0.549
125	398.15	0.493
150	423.15	0.414

表 4.5.7-9 海水の粘性率[35]

温度		粘性率
°C	K	Pa s
26.85	300	854.4E-6
46.85	320	577.2E-6
66.85	340	422.5E-6

4.5.8 解析結果

(1) 海水浸漬前 (Case 0)

海水浸漬前の定常解析 (Case 0) で得られた結果の流速分布、温度分布を図 4.5.8-1、図 4.5.8-2 に示す。

主要な空気流動としては、吸気口から検査室内より低温の外気を取り込むことによる下降流と仮置き場内でのガラス固化体の発熱による上昇流があり、両者が合流して仮置き場上部に上昇流を形成している (図 4.5.8-1)。ガラス固化体の表面温度は、ガラス固化体の位置によって 50~80°C程度となり、ガラス固化体間で温度差が生じた (図 4.5.8-2c)。また、仮置き場のガラス固化体付近の壁面温度は 50°C~60°C程度であった (図 4.5.8-2b)。

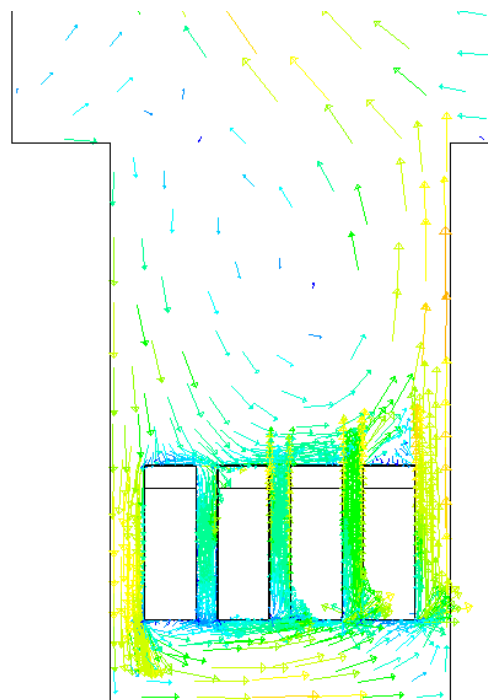
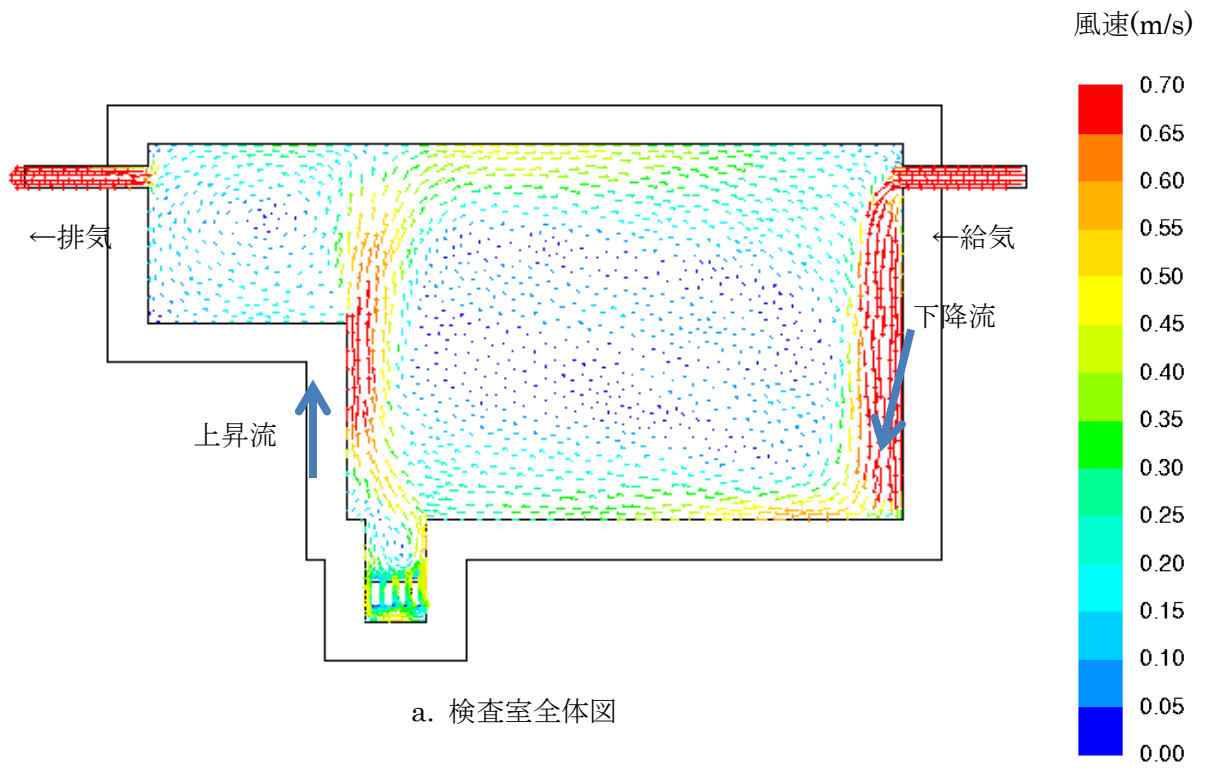


図 4.5.8-1 風速分布 (Case 0)

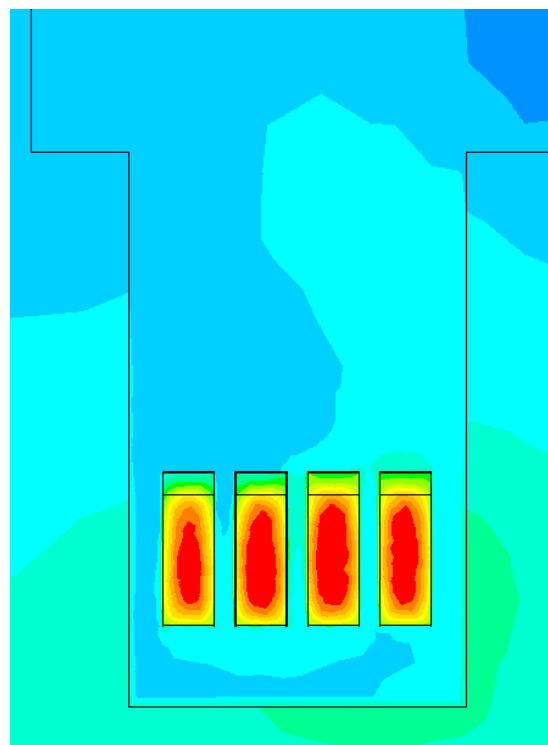
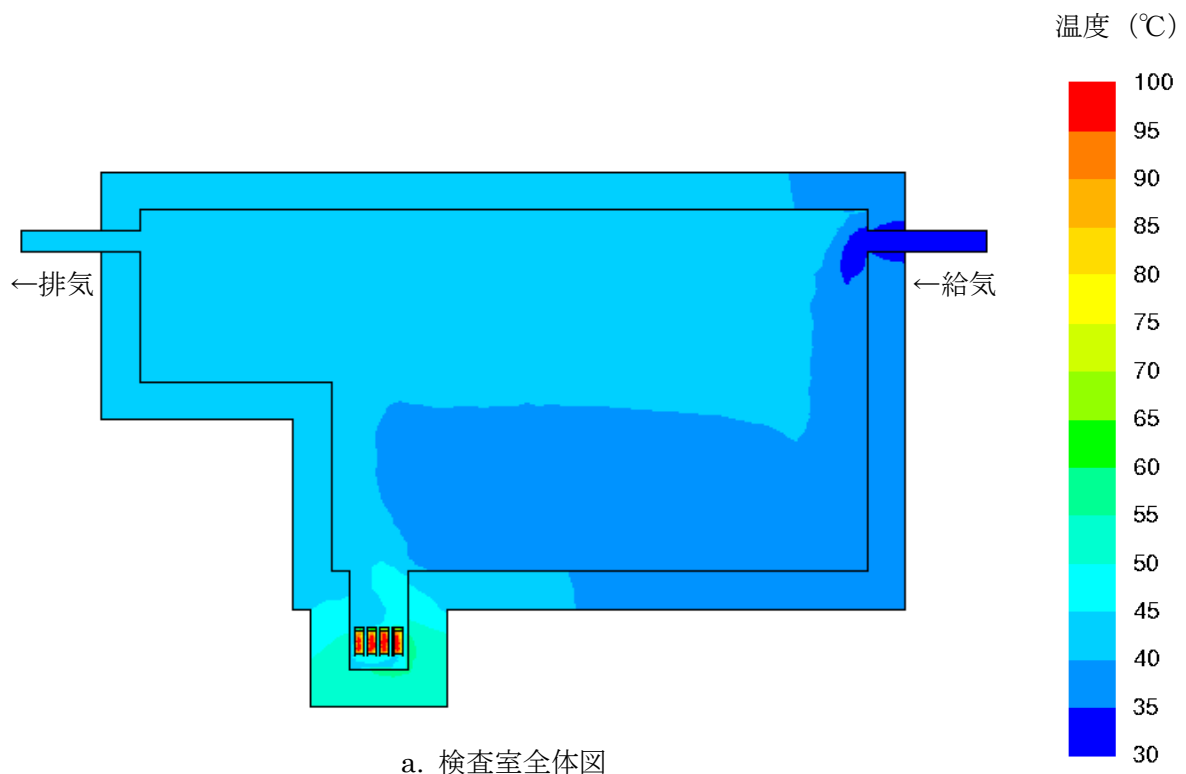


図 4.5.8-2 温度分布 (Case 0)

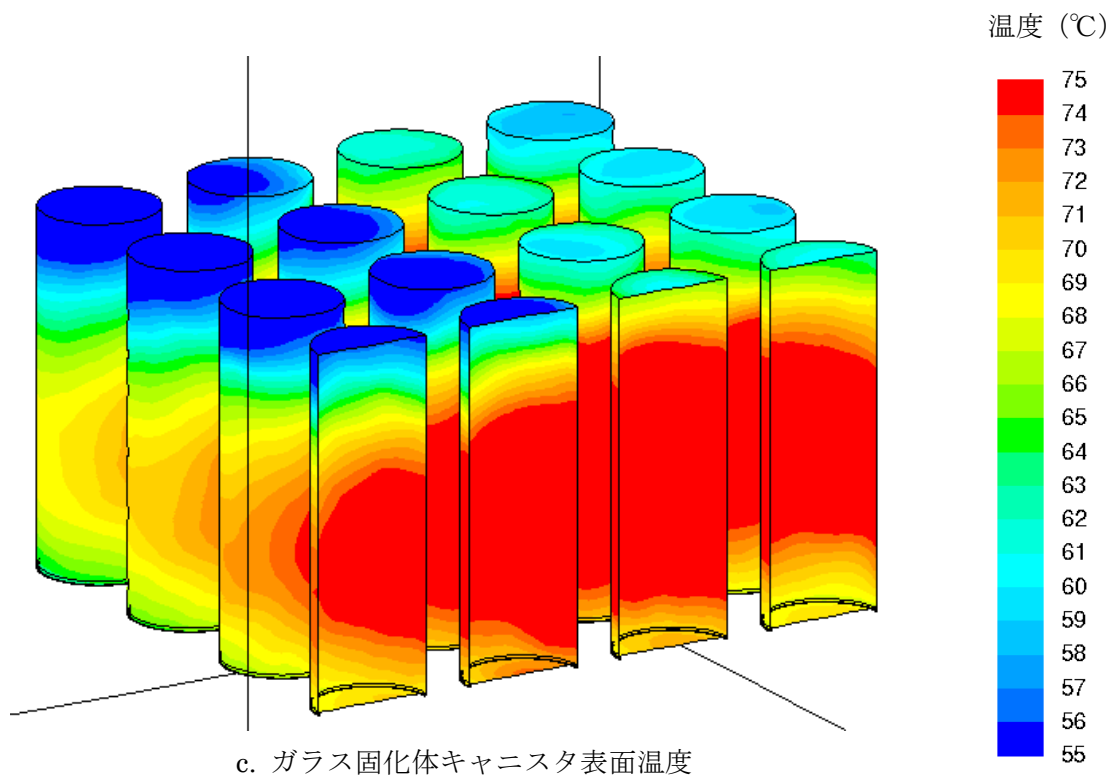


図 4.5.8-2 温度分布 (Case0)

(2) モニタ点の設定

津波浸漬前の定常解析 (図 4.5.8-2) から、ガラス固化体のうち以下の 2 点に着目し選出した (

図 4.5.8-3)。

ガラス固化体 A : 最も表面温度が低い固化体

ガラス固化体 B : 最も表面温度が高い固化体

各固化体表面及び周辺のモニタ点の高さを以下のように 3 つ設定した。

a : 海水中 (固化体下端と液面高さの間)

b : 液面高さ

c : 固化体上端高さ

ガラス固化体 A は、ガラス固化体キャニスタ表面の 4 箇所と隣接するガラス固化体との中間点の 4 箇所の計 8 箇所をモニタ点とし、それぞれの高さ (a,b,c) に設定した (図 4.5.8-4)。

また、固化体 B については、左右対称のため、ガラス固化体キャニスタ表面の 3 箇所と隣接するガラス固化体との中間点の 3 箇所の計 6 箇所をモニタ点とし、それぞれの高さ (a,b,c) に設定した (図 4.5.8-4)。

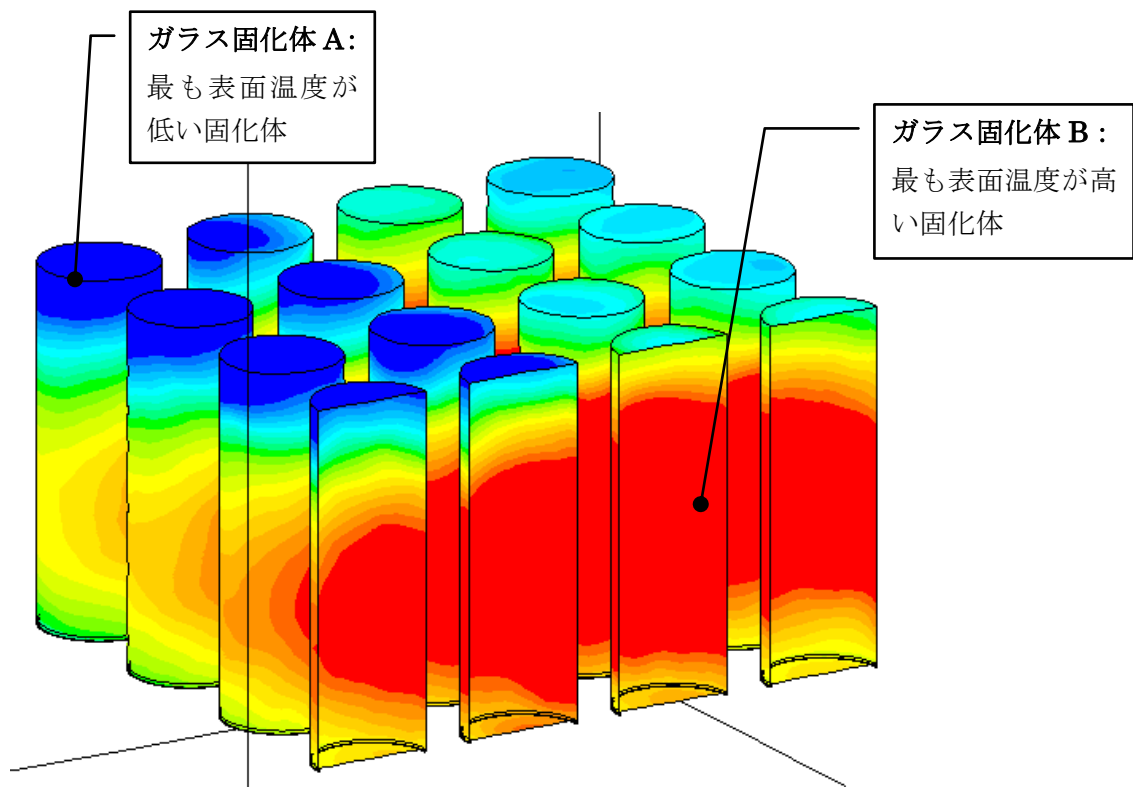


図 4.5.8-3 着目したガラス固化体配置図

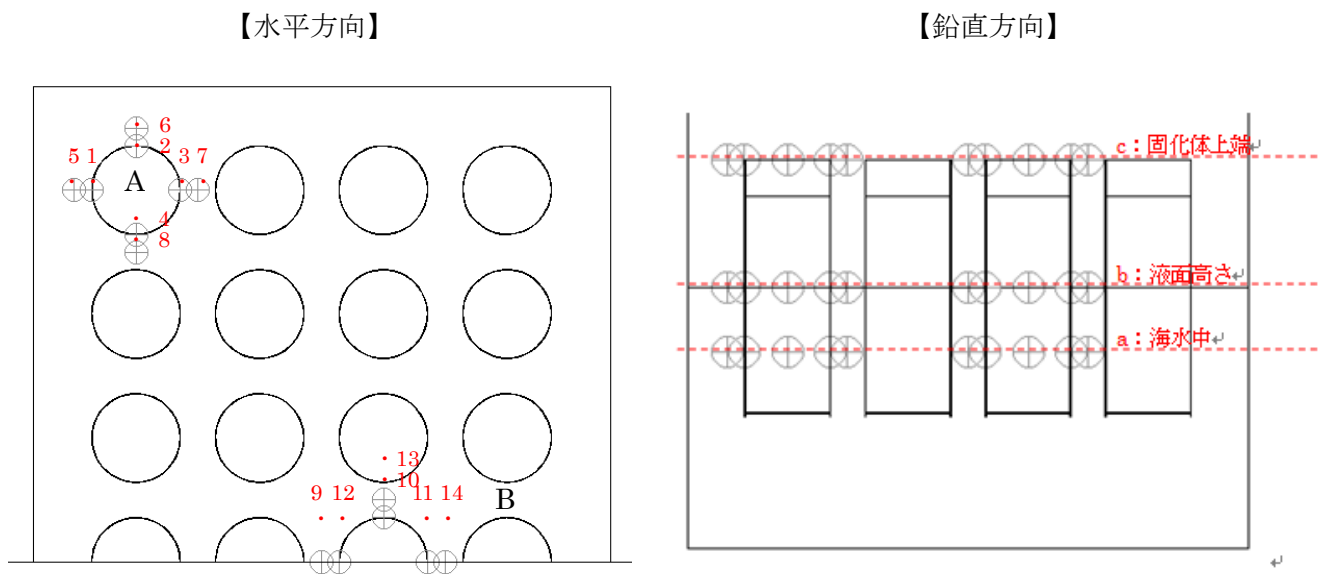


図 4.5.8-4 モニタ点の設定

(3) 非定常解析結果 (Case 1、2)

1) 温度分布・流速分布

非定常解析で得られた室内の平均温度を表 4.5.8-1 に、流速分布を図 4.5.8-5、図 4.5.8-6 に、温度分布を図 4.5.8-7、図 4.5.8-8、図 4.5.8-9 に示す。

換気が正常な状態 (Case 1) では、海水浸漬前 (Case 0) と検査室全体の空気流動に大きな変化は見られず (図 4.5.8-1a、図 4.5.8-5 a)、室内温度が 2°C 程度低下した (表 4.5.8-1)。

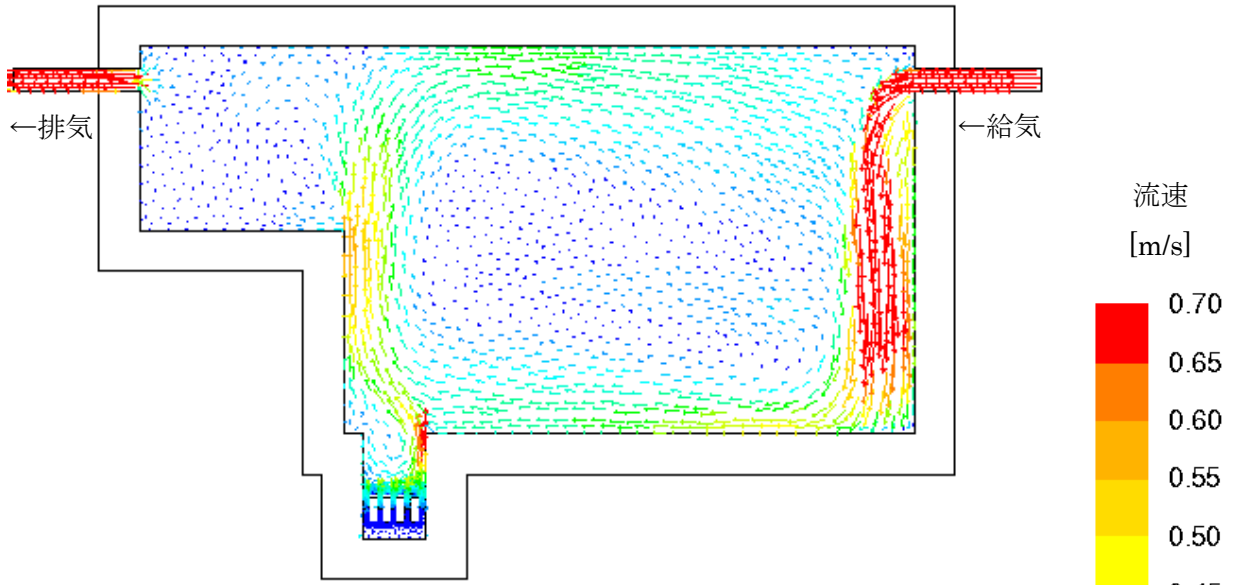
換気が停止した状態 (Case 2) では、仮置き場からの上昇流により室内全体が攪拌され (図 4.5.8-5 b)、室内温度は海水浸漬前に比べ 2°C 程度上昇した。

海水浸漬した 30 日後の海水温度は、換気状態に関わらず同程度 (表 4.5.8-1) で、海水領域内の温度もほぼ均一で同程度となった (図 4.5.8-8)。

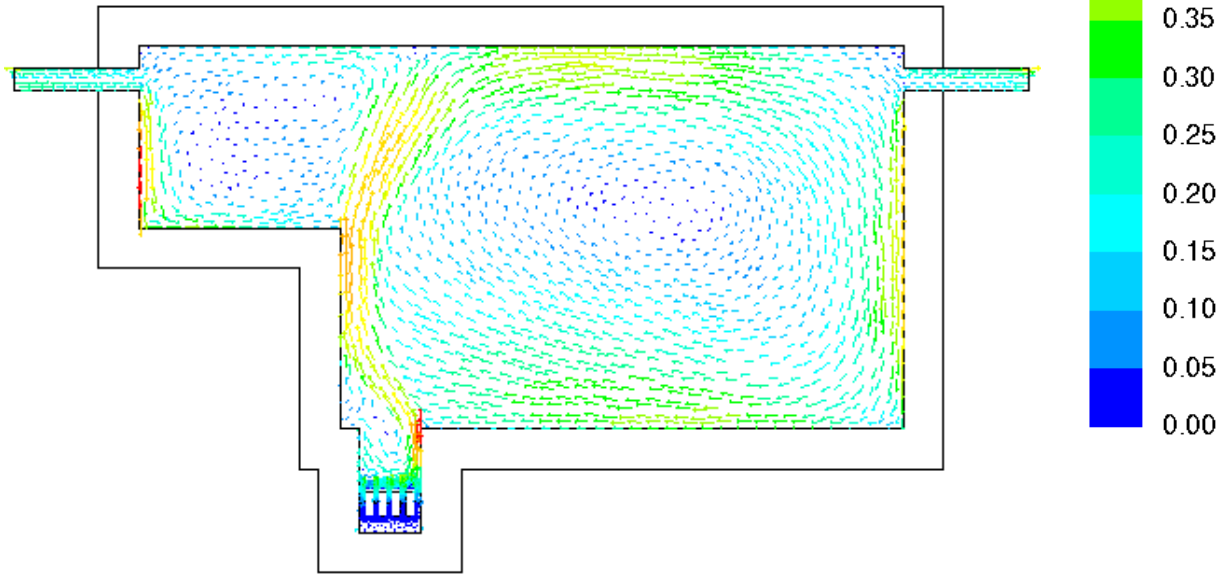
ガラス固化体 A,B のキャニスタ表面の温度 (図 4.5.8-9) は、30 日経過後も 28 本すべてのガラス固化体の中で順位が変わることなく最高 (ガラス固化体 B)・最低 (ガラス固化体 A) であることを確認した。

表 4.5.8-1 津波浸漬前後の温度変化

ケース	Case 0	Case 1	Case2
条件	海水浸漬前		海水浸漬後
換気状態	正常		停止
給気平均温度	29°C (初期設定値)		32.9°C
排気平均温度	40.7°C	38.1°C	32.2°C
平均空気温度	40.2°C	37.5°C	42.2°C
平均海水温度	—	68.4°C	69.4°C



a. Case-1 換気あり



b. Case-2 換気なし

図 4.5.8-5 海水浸漬 30 日後の流速分布 (検査室全体、Case 1, 2)

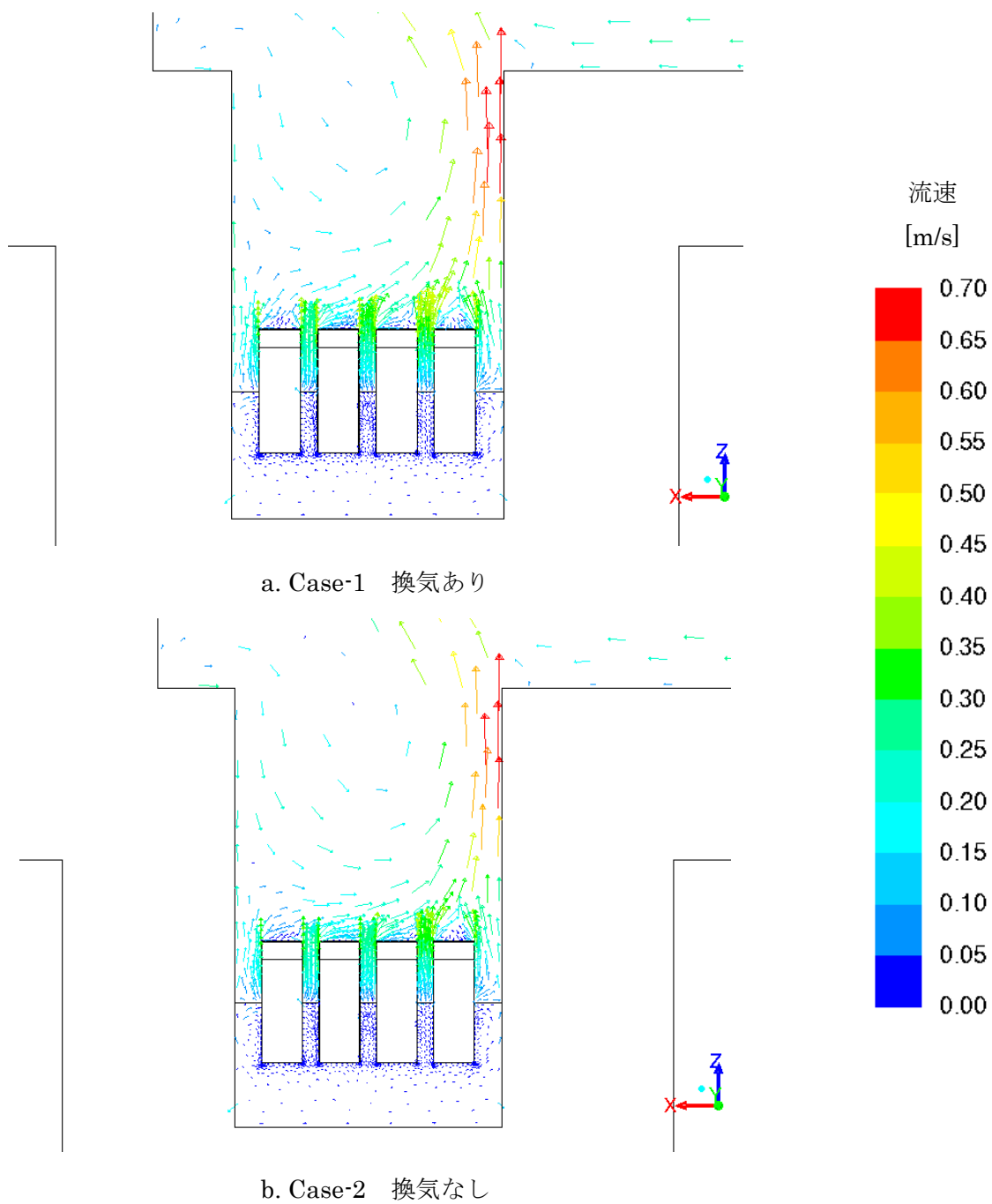


図 4.5.8-6 海水浸漬 30 日後の流速分布 (仮置き場、Case 1, 2)

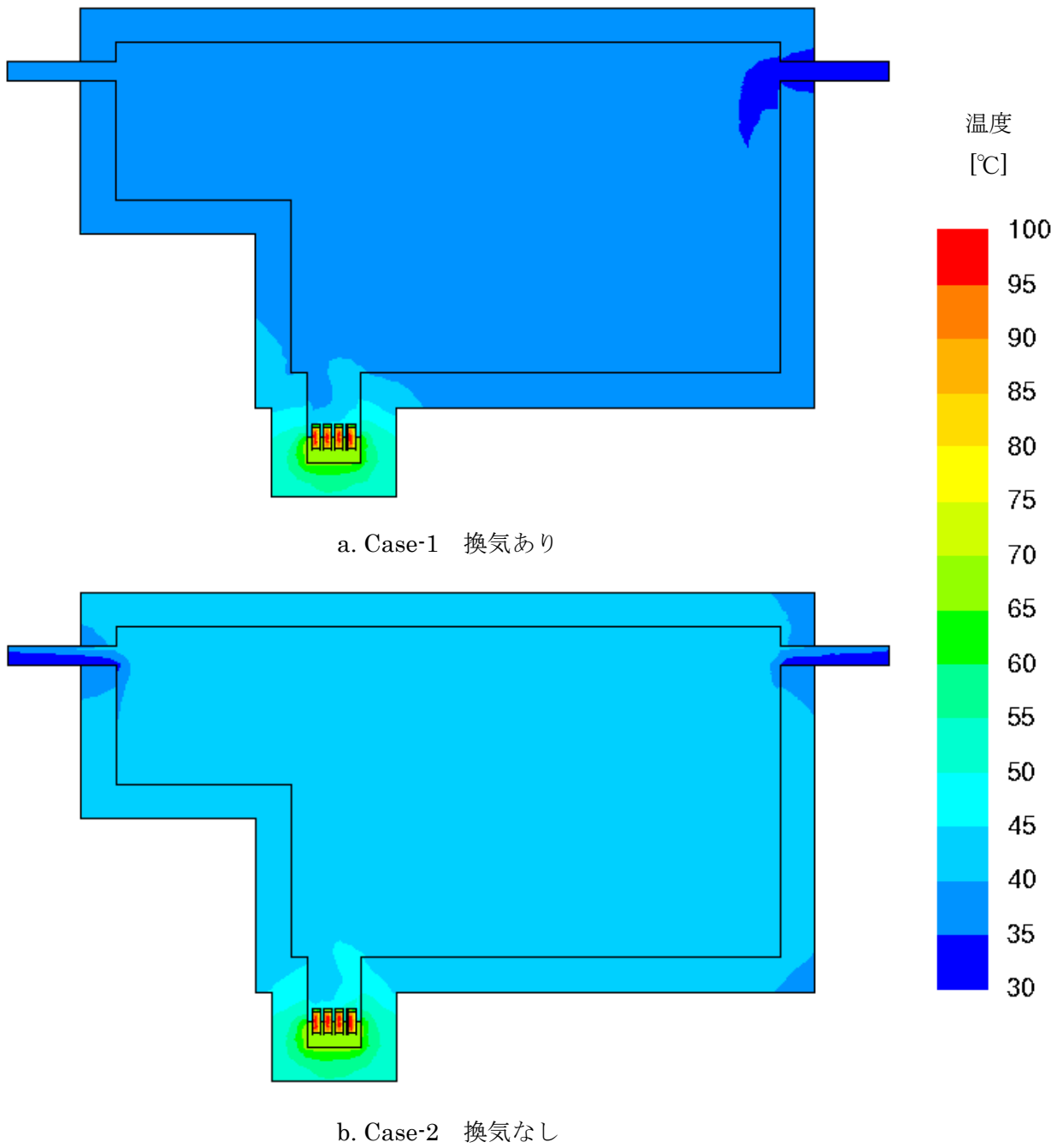


図 4.5.8-7 海水浸漬 30 日後の温度分布 (検査室全体、Case 1, 2)

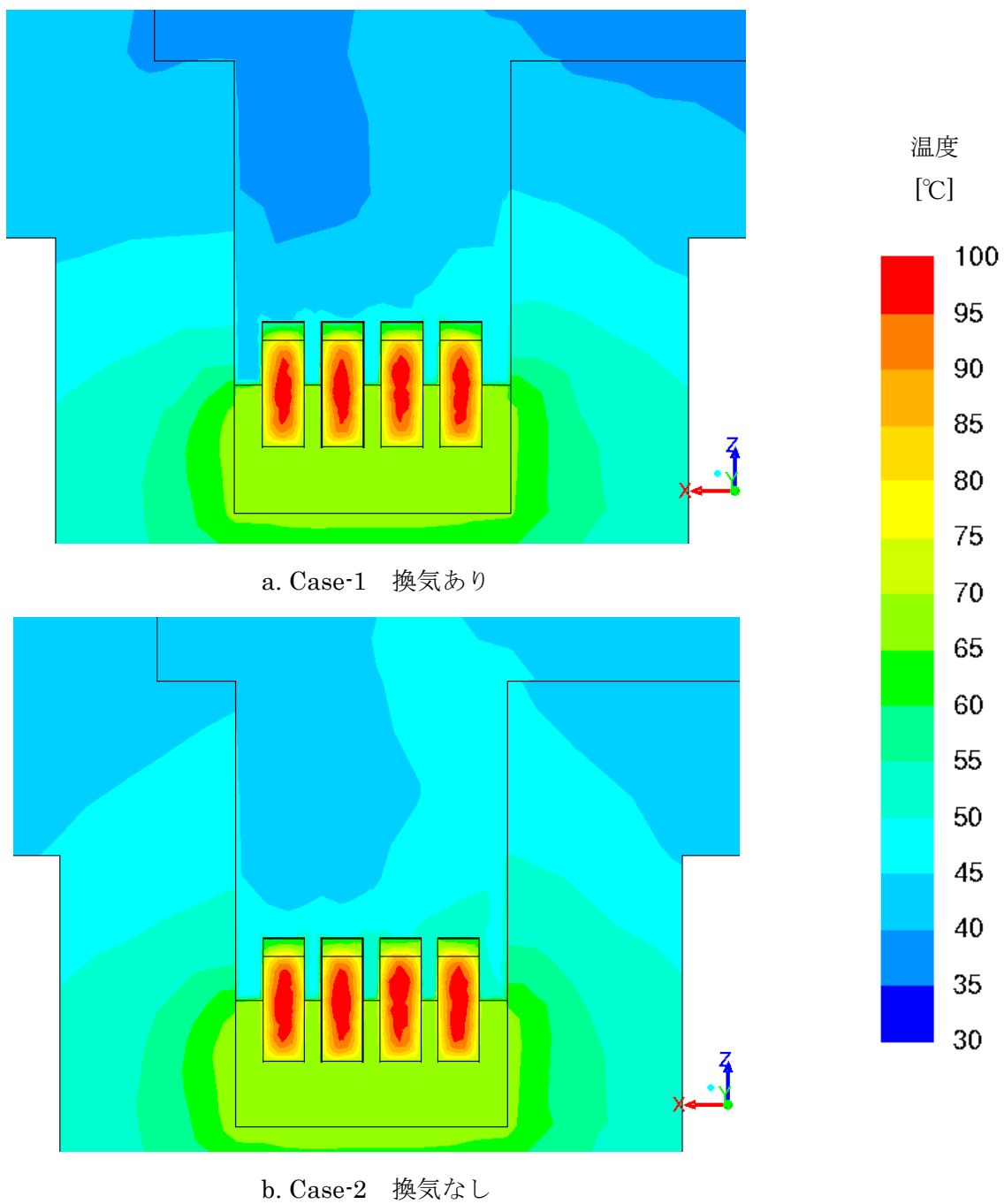
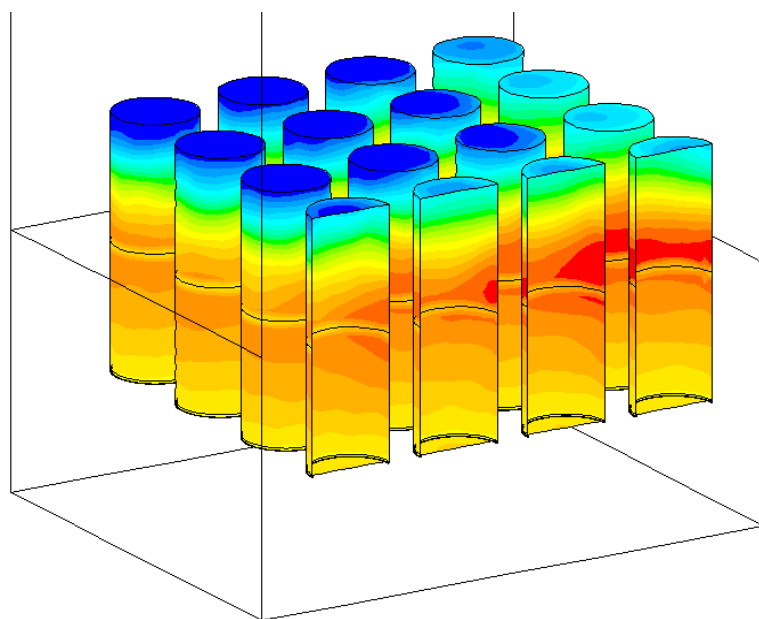
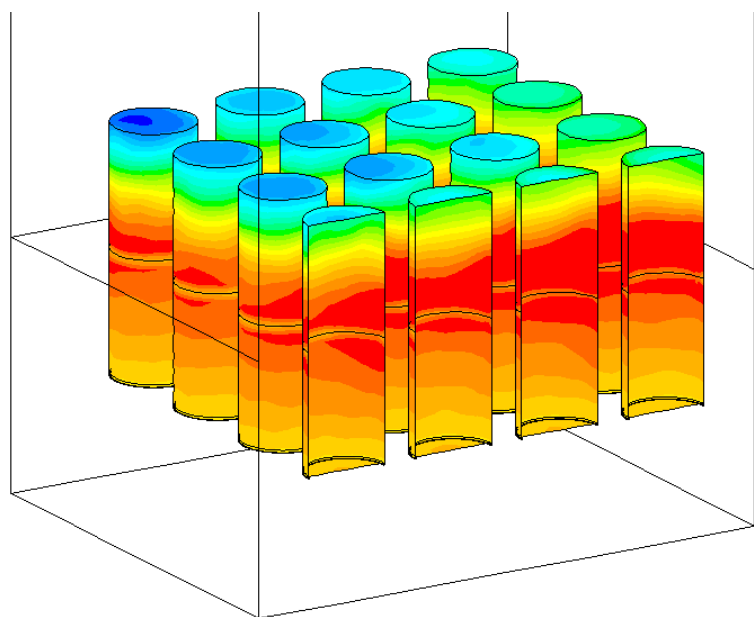


図 4.5.8-8 海水浸漬 30 日後の温度分布 (仮置き場拡大図、Case 1, 2)



a. Case-1 換気あり



b. Case-2 換気なし

温度
[°C]

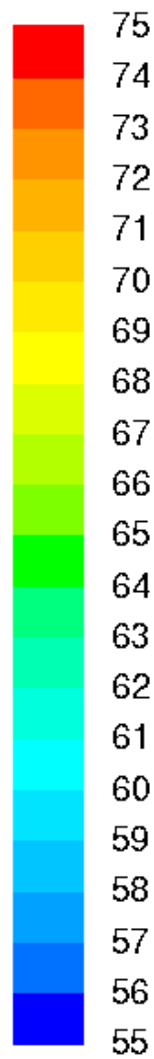


図 4.5.8-9 海水浸漬 30 日後の温度分布 (ガラス固化体キャニスタ表面、Case 1, 2)

2) モニタ点の温度変化

非定常解析において得られた固化体 A の温度変化を

図 4.5.8-10～

図 4.5.8-12 に、着目固化体 B の温度変化を

図 4.5.8-13～

図 4.5.8-15 に示す。

海水中のモニタ点では、海水（25℃）浸漬時に一旦海水温度まで降した後、温度の上昇が始まり、30 日経過後においても上昇傾向であった。

空気に接するモニタ点 c では、ガラス固化体表面の温度は、気相温度よりも 10℃以上高い状態を維持していたが（

図 4.5.8-12、

図 4.5.8-15）、析出した塩類等固化体表面付着物が予想されることから腐食に関する検討が必要と考えられる。

また、最終到達温度を確認するために Case 1 の条件で定常解析を行ったところ、海水領域の温度が 100℃を超えたため（図 4.5.8-16）、最終的に海水はすべて蒸発し、Case 0 に近い状態に戻ると予想される。

解析結果において、Case 1、Case 2 の温度差は 5℃以内となったが、この温度差は通常換気時の換気量に依存する。また本検討では保守的評価を行うため蒸発に伴う潜熱と壁面からの熱逃げを考慮していないため、最適評価を行う場合にはより具体的な施設検討（壁面熱逃げ・給排気量等）に基づいた評価を行う必要がある。

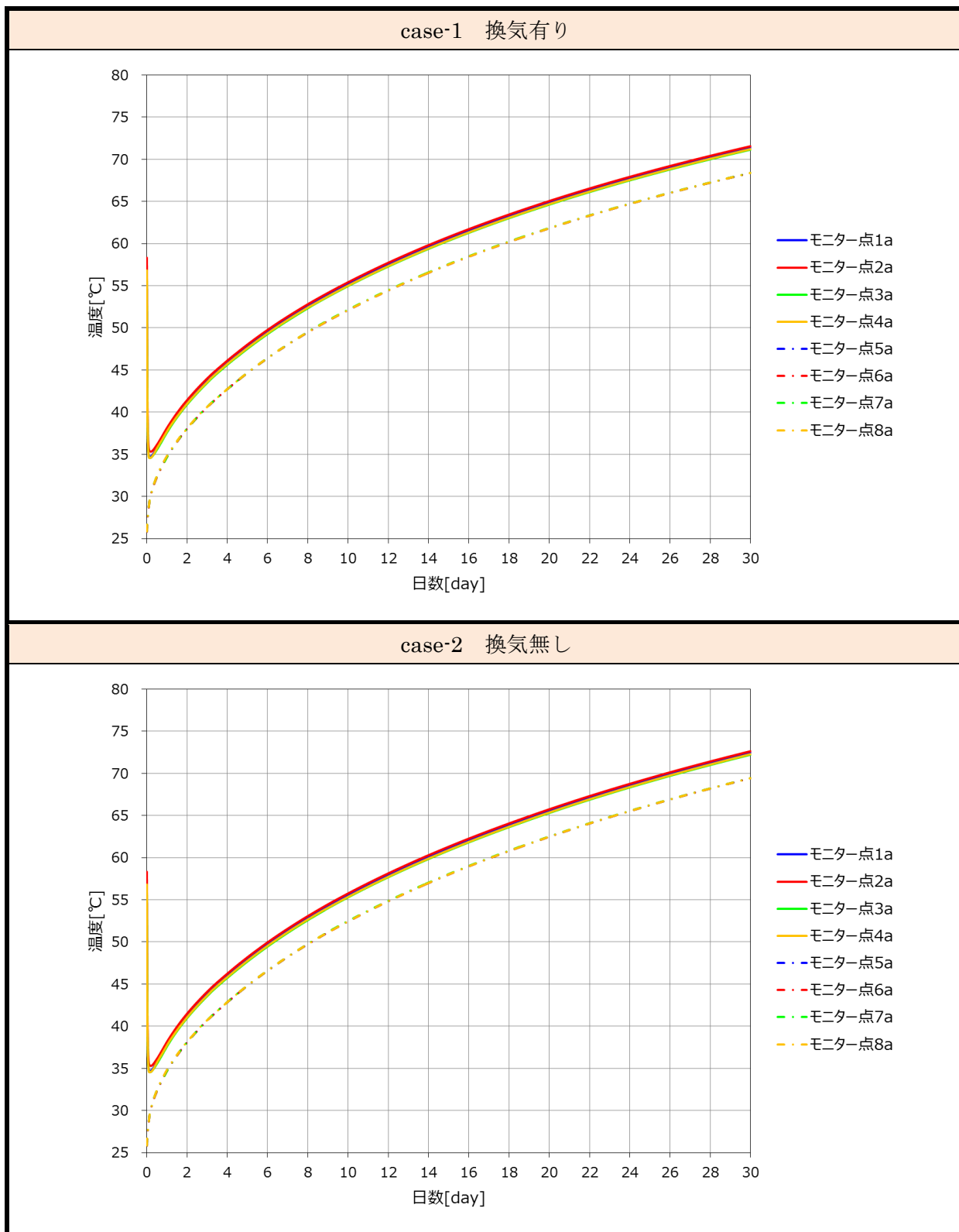


図 4.5.8-10 固化体 A モニタ点（海水中高さ）の温度変化
 （実線：固化体表面温度、一点鎖線：海水中温度）

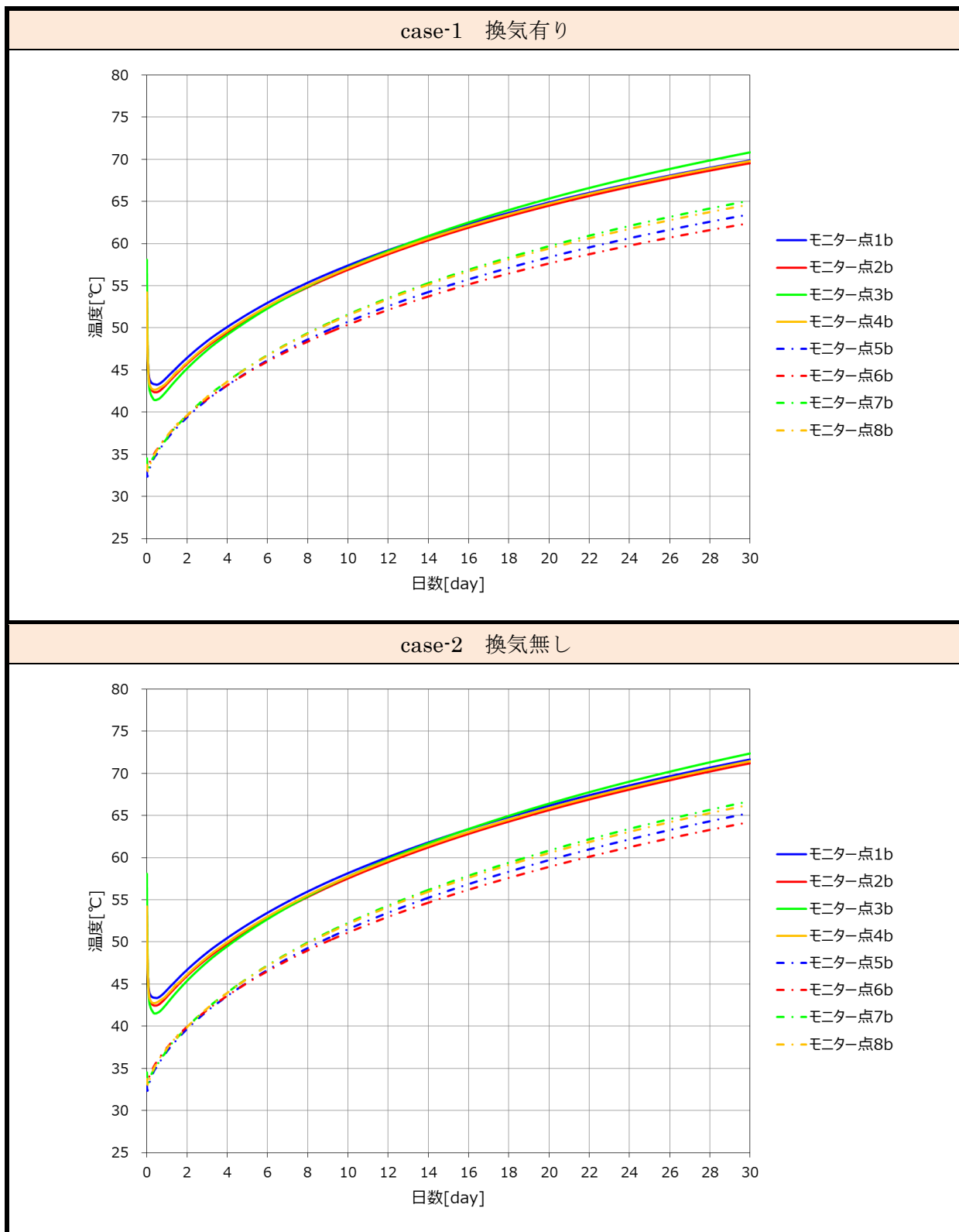


図 4.5.8-11 着目固化体 A モニタ点（液面高さ）の温度変化
 （実線：固化体表面温度、一点鎖線：海水表面温度）

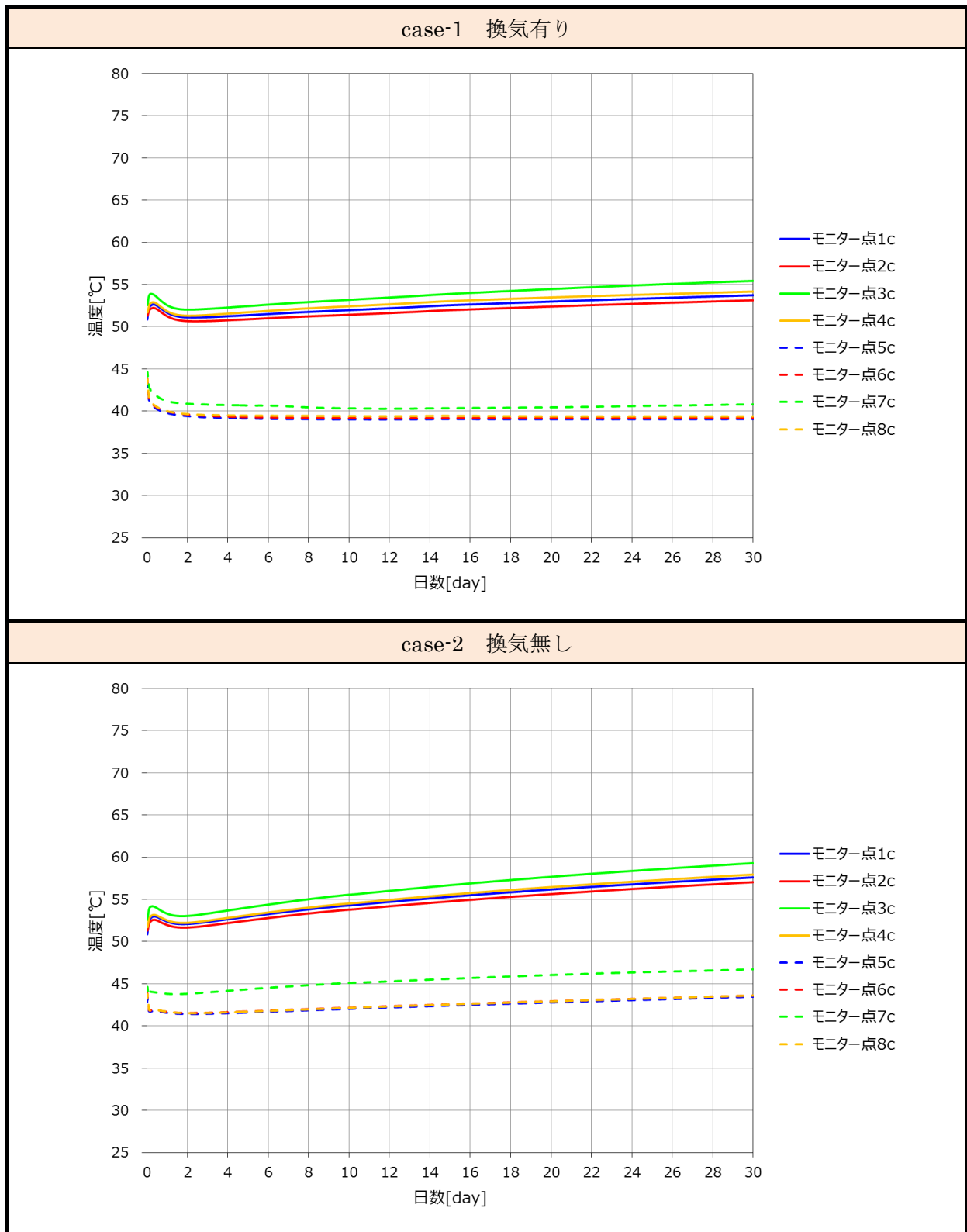


図 4.5.8-12 着目固化体 A モニタ点（固化体上端高さ）の温度変化
 （実線：固化体表面温度、破線：気相温度）

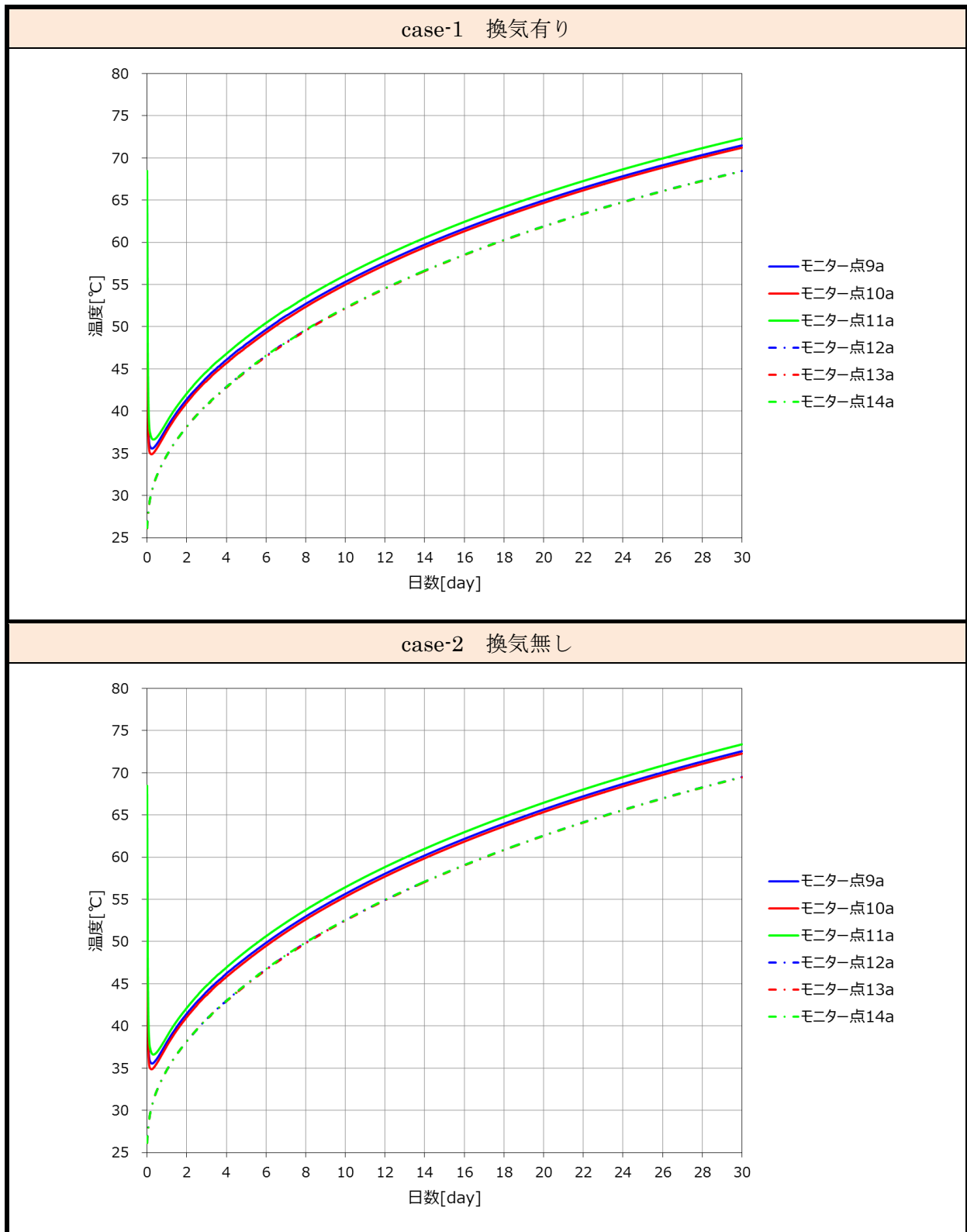


図 4.5.8-13 着目固化体 B モニタ点（海水中高さ）の温度変化
 （実線：固化体表面、一点鎖線：海水温度）

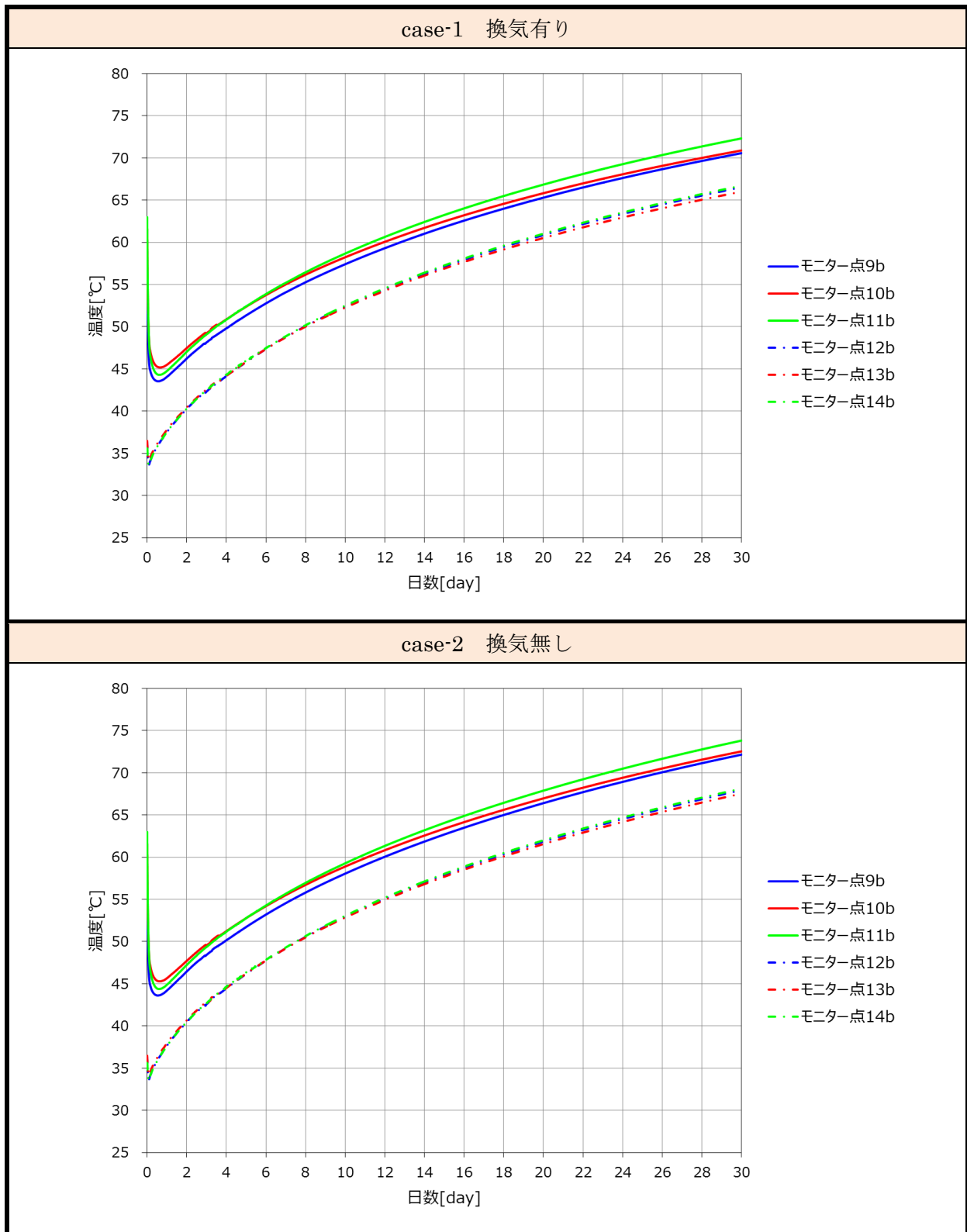


図 4.5.8-14 着目固化体 B モニタ点（液面高さ）の温度変化
 （実線：固化体表面温度、一点鎖線：海水表面温度）

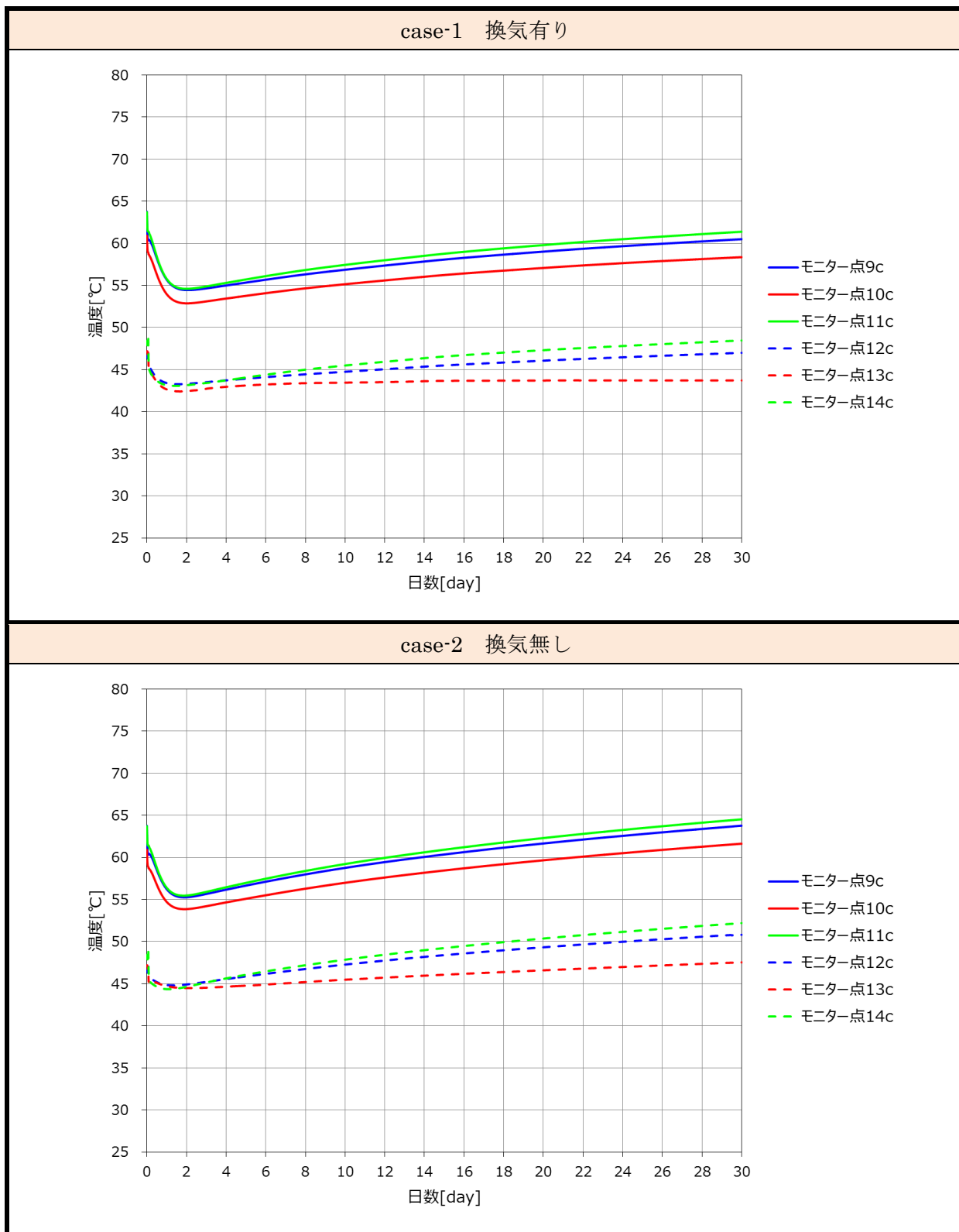


図 4.5.8-15 着目固化体 B（固化体上端高さ）の温度変化
 （実線：固化体表面温度、破線：気相温度）

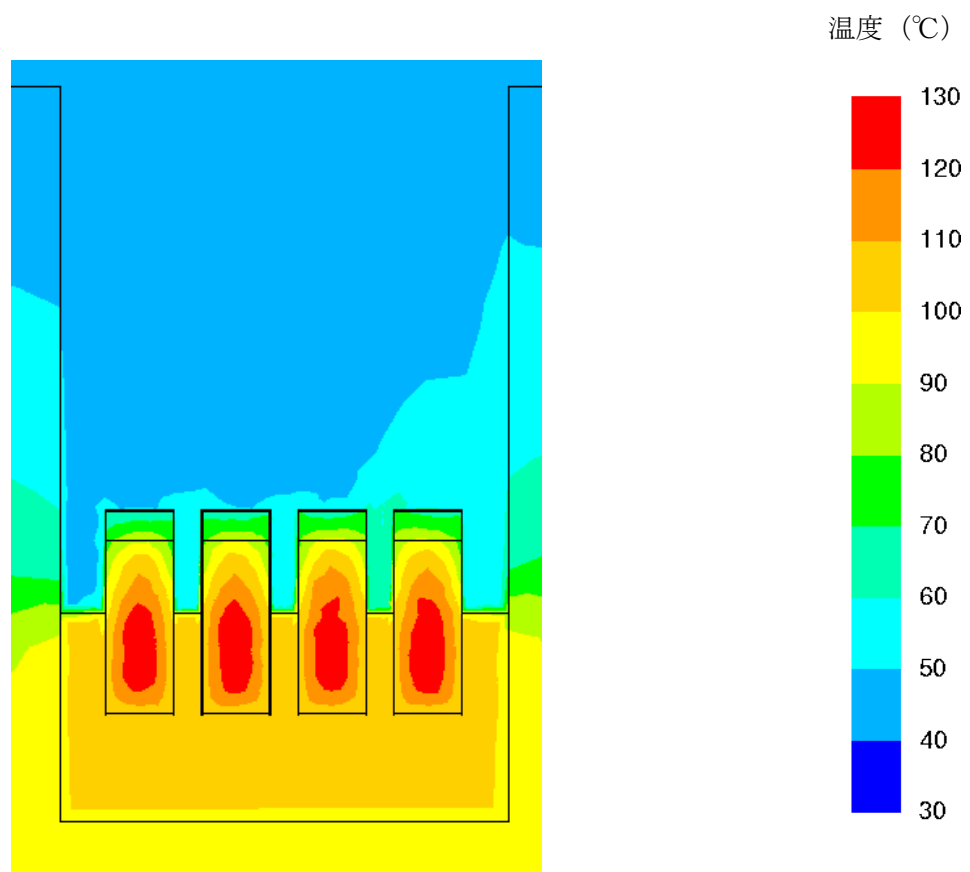


図 4.5.8-16 Case 1 の定常解析による仮置き場内温度分布 (参考)

4.5.9 腐食環境条件のまとめ

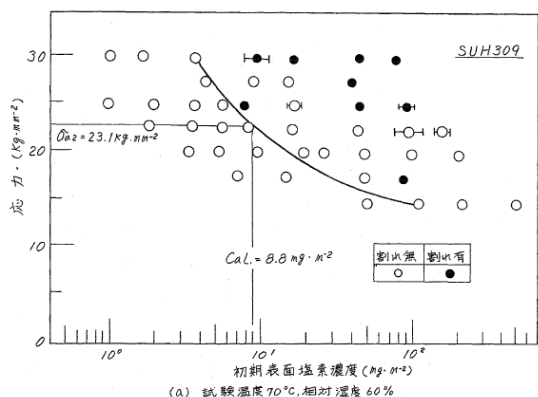
(1) 従来の知見

平成 25 年度の調査[21]で抽出した環境因子を表 4.5.9-1 に示す。環境因子として、隙間、塩化物、温・湿度、放射線分解を抽出し、定常時の特徴、津波影響とその因子、損傷を軸に調査結果を踏まえ、課題を抽出した。

表 4.5.9-1 環境因子のまとめ

環境因子	定常時特徴	津波影響	影響因子	損傷	調査結果	課題
すきま	重ね、接触	砂礫などに埋没	すきま構造	すきま腐食 →MIC →SCC	・水溶液中では、自由表面で起きる孔食よりすきま腐食のほうが起こしやすくなる、構造上のすきまは回避すべき ・砂礫、微生物などの付着下がすきま構造になる	・すきまは不可避であるから、原則としてすきまを前提として評価する必要がある
塩化物	供給なし(管理下)	海水	塩化物(Cl ⁻)水溶液	すきま腐食 SCC	・SUS304は海水中で、基本的にすきま腐食感受性を示し、高温(>50℃)ではSCC感受性も出現する ・電気防食などの、何らかの防食対策が望ましい	・SUS304クラスは、もともと耐海水性に難があることは周知されているが、SUH309/SUS309Sは、海水環境での使用が前提とされていないこともあって、難があるとの知見が揃っていない
		生物活性	微生物、貝類など	MIC すきま腐食	・生物活性によって電位が貴化する ・硫酸塩還元細菌の代謝生成物のチオ硫酸などによってすきま腐食臨界電位が低下する ・相互作用によって腐食感受性が高まり、より低Cl ⁻ 環境でも腐食する ・50℃以上では生物活性を失う ・溜まり水になると水や生物が腐り、生物活性が高まる	・生物活性を前提としていない用途/設計(未対策)が生物活性環境下で使用すると、腐食損傷を起こすことが多く報告されている
		付着海塩	濃厚塩化物水膜	発錆 孔食 SCC/ ASCC (湿潤大気 SCC)	・外洋、内湾、内陸、海岸からの距離などに依存した付着海塩量の平衡値で整理できる ・強鋭敏化材は>0.1g/m ² [NaCl]でASCC感受性を示す	・ステンレス鋼の可使用は第一義的には"発錆"であり、"孔食"深さのデータが少ない ・ASCC生起領域は強鋭敏化材に対するデータが中心で、低鋭敏化材のデータが少ない
温・湿度	- (乾式保管状況)	結露	湿潤大気+塩化物	SCC/ ASCC (湿潤大気 SCC)	・金属表面温度>>環境(大気)温度では結露しない(海塩付着下でも乾燥塩では腐食しない) ・薄い水膜下は溶存酸素などが解けやすい環境の酸化性の影響を受けやすい ・湿潤大気環境下では室温で強鋭敏化材はASCC感受性	・実際に結露環境が整うか否か、不明である ・ただし、海水の半浸漬状態になれば、気液界面は結露環境が整うと判断できる
		水没 温度上昇	高温塩化物水溶液	すきま腐食 ASCC	・水没部は海水相当塩化物濃度水溶液、気液界面は塩分濃縮、気相部は海洋性湿潤大気環境 ・加熱の程度によって状況が異なる ・>70℃では付着海塩が乾き、ASCC感受性を示さない(ただし、気液界面は濡れているため、ASCCに注意) ・高温-高濃度塩化物環境(ex: 苦汁塩滴、60℃、35%R.H.)におけるSUH309/SUS309Sの耐局部腐食感受性データが揃っていない	・高温-高濃度塩化物環境(ex: 苦汁塩滴、60℃、35%R.H.)が整えば、非鋭敏化SUS304は粒内型SCC感受性があることは事実であるが、どのような環境になり得るか、明確ではない ・高温-高濃度塩化物環境(ex: 苦汁塩滴、60℃、35%R.H.)におけるSUH309/SUS309Sの耐局部腐食感受性データが揃っていない
放射線分解	- (低線量で無視)	水の放射線分解	酸化性(H ₂ O ₂ など)	酸化性の加速	・H ₂ Oの放射線分解でH ₂ O ₂ 、OH ⁻ などの酸化性物質が生成し、電位が貴化する(電位が貴化するとすきま腐食、SCC感受性が増す)	・H ₂ Oの放射線分解で電位が貴化することは事実であるが、局部腐食感受性の危惧の程度が明確ではない
		崩壊熱	高温化	海塩濃縮 すきま腐食 SCC/ ASCC 乾燥	・収納管1本に収納されるガラス固化体(最大9本)の総発熱量を、18kW以下に管理されており、金属表面温度が高くなっている	・金属表面の温度の時系列データが明確ではない

SUH309 ステンレス鋼の代表的な湿潤大気 SCC 領域[38]を図 4.5.9-1 に示す。



(a) 70°C、R.H.60%での SCC 試験結果

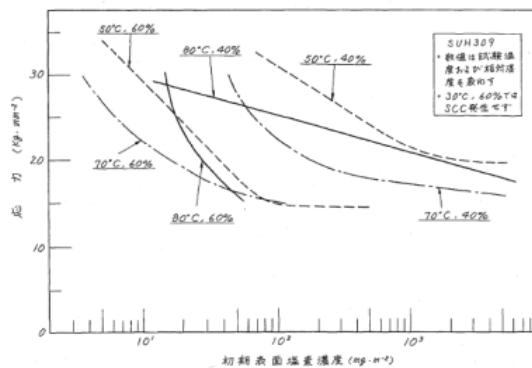


図3. SCC防止のための許容表面塩素濃度の温度依存性 (SUH309, 相対湿度 60, 40%)

(b) 温度-湿度依存性

図 4.5.9-1 強鋭敏化 SUH309 ステンレス鋼の湿潤大気 SCC 感受性領域[38]

ステンレス鋼が強く鋭敏化され、耐力の1.5~2倍相当の残留応力が存在すれば、内湾に面した海岸近くの環境相当 (NaCl が数十 mg/m^2 以上) で湿潤大気 SCC 感受性がある。ただし、表面が乾いた状態が持続されれば腐食環境(結露、水膜の生成)が整わないため、湿潤大気 SCC を起こさない。また、低及び非鋭敏化材 (SUS304L) では、図 4.5.9-1 に示したように試験した全ての範囲 (応力: $>27\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、初期表面塩素濃度: $6\sim 1000\text{mg}/\text{m}^2$ 、温度: 50°C 、湿度: $80\% \text{ R.H.}$ 、試験時間: 2000 時間) で SCC が発生していない。

鋭敏化に基づく粒界応力腐食割れ (IGSCC) は、 $R_a \geq 5\%$ で SCC 感受性を示し始め、 $R_a \geq 20\%$ では、かなりの高い確率で SCC を起こす[39]。炭素含有率 $0.04\sim 0.05\%$ の SUS304 系材料(規格上 $\leq 0.08\% \text{C}$)の通常の溶接では $R_a \geq 20\%$ となることはほとんど無いが、規格上限の炭素含有率 $0.07\sim 0.08\%$ では、厚板に対する多層・多パスの溶接、溶接補修、冷間加工などが重畳すれば、 $R_a \geq 20\%$ となることがある。一方、電気炉などを用いた試験片に対する鋭敏化熱処理(650°C を継続するなど)では、 20% を超える強鋭敏化材が得られる。

SUS304 ステンレス鋼の SCC 感受性領域[40]を図 4.5.9-2 に示す。

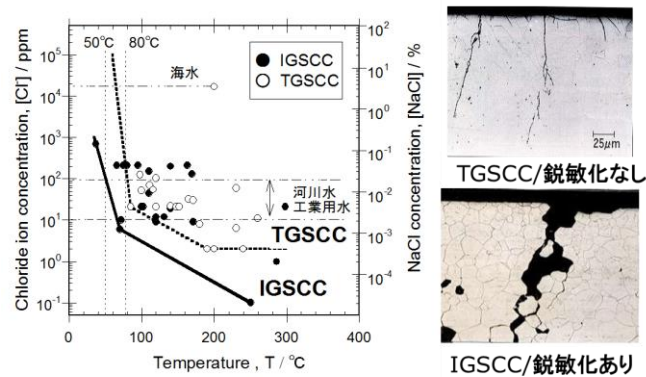


図 4.5.9-2 SUS304 ステンレス鋼の SCC 感受性領域[40]

鋭敏化した SUS304 ステンレス鋼は、50°Cで河川水や工業用水程度の塩化物イオン濃度が100ppm[Cl⁻]以上(水道法の上限は200ppm)で粒界応力腐食割れ(IGSCC)感受性が出現する。一方、鋭敏化していなくても、海水相当の塩化物濃度で60°C以上、100ppm[Cl⁻]で80°C以上の高温域で粒内応力腐食割れ(TGSCC)感受性が出現する。さらに、気液界面では海水の蒸発に伴い海塩が付着、濃縮して、高温・高濃度塩化物環境が出現するため、さらに、SCC のリスクが高まる。

ガラス固化体キャニスタの SCC 感受性におよぼすγ線照射の影響[41]を図 4.5.9-3 に示す。

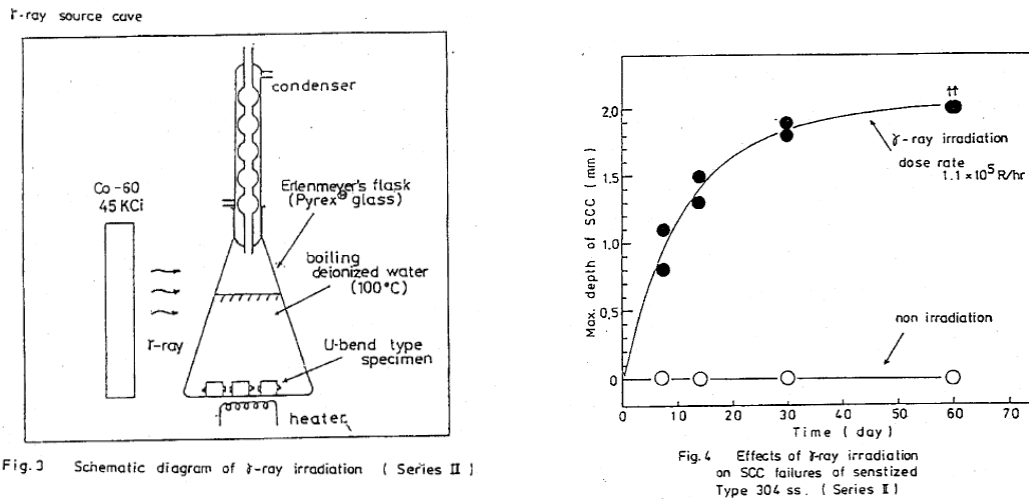
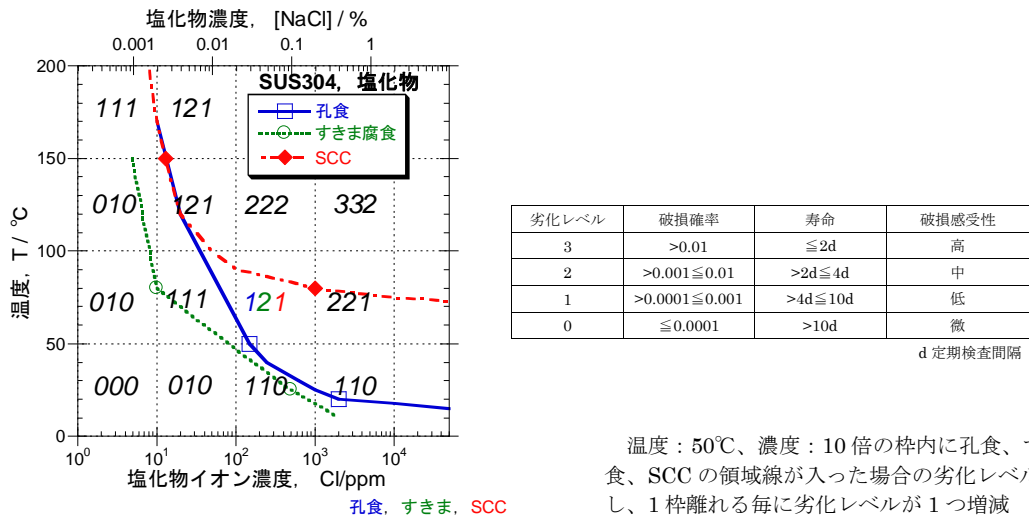


図 4.5.9-3 SCC 感受性におよぼすγ線照射の影響試験[41]

ガラス固化体程度の線量では、照射誘起応力腐食割れ(IASCC)の可能性は無いが、SUS304 が SCC 感受性を示さない条件でも、γ線照射(1.1×10⁵R/時間)による放射線分解によって環境の酸化性が増すと SCC 感受性が出現し、時間の経過とともに SCC き裂深さが深くなっていく。

孔食、すきま腐食、SCC 感受性領域およびリスク [42] を図 4.5.9-4 に示す。



温度：50℃、濃度：10 倍の枠内に孔食、すきま腐食、SCC の領域線が入った場合の劣化レベルを 1 とし、1 枠離れる毎に劣化レベルが 1 つ増減

図 4.5.9-4 SUS304 ステンレス鋼の孔食、SCC 感受性領域図、リスクなど [42]

孔食、すきま腐食の感受性領域は、SCC 感受性領域より低温、低塩化物濃度側に広がる。津波によって海水とともに持ち込まれる砂礫などは、すきま形成材として機能するほか、微生物の繁殖の温床になる。

微生物の寄与 [43] を図 4.5.9-5 に示す。

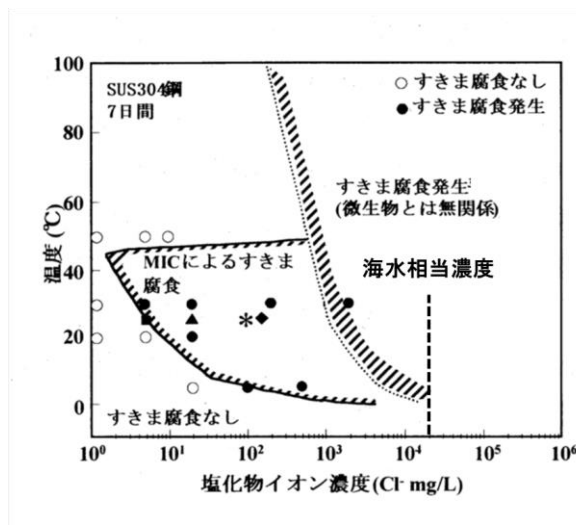


図 4.5.9-5 すきま腐食発生におよぼす微生物の寄与 [43]

微生物の繁殖系では、すきま腐食の領域が低塩化物濃度側に広がるが、おおむね 50℃以上で活性を失い、その影響は無くなる。しかし、完全に死滅する訳ではなく、再度 50℃以下になった段階で影響が出現する。完全に死滅したとしても、新たに大気側から菌類が持ち込まれる可能性がある。

したがって、津波によって海水相当の塩化物濃度の水と接した場合、あるいは、海洋性湿潤大気と接した場合には、50～80℃に加熱された条件下では SCC が出現する可能性があり、放

射線影響によって、さらに SCC 感受性が高まる。

- (2) 熱解析結果に基づく津波被災時の腐食環境の想定
津波による浸漬前の試解析結果を図 4.5.9-6 に示す。

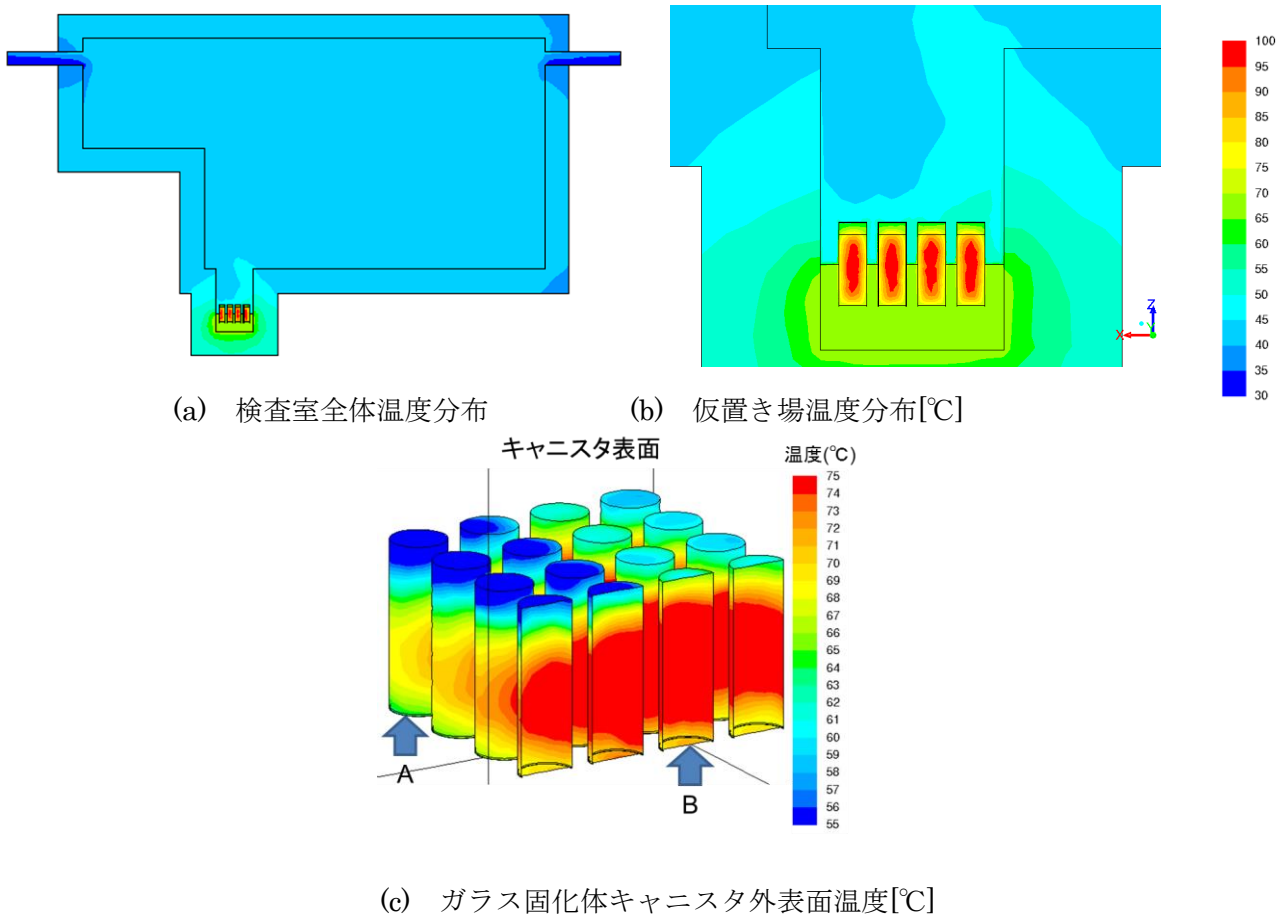


図 4.5.9-6 津波浸漬後、換気なしの温度解析結果の例

試解析の結果では、ガラス固化体内部の最高温度は 108°C、ガラス固化体キャニスタ表面の温度は 50~80°C 程度で、時間とともに上昇していく。

津波による海水が検査室内に入った直後のガラス固化体キャニスタ表面の温度は、海水に浸漬する部分が海水温度近くまで低下するが、時間の経過とともに上昇に転じて数百時間経過後には 50~80°C、さらに時間が経過すれば沸点に達すると考えられる。熱容量が空気中よりも小さく加熱されやすい海水浸漬部では、海水の蒸発が起きる。換気停止により水蒸気と熱の放出がない場合には、温度上昇とともに海水の蒸発による湿度の上昇が見込まれる。

したがって、a) ガラス固化体キャニスタが津波に被災して、海水に半浸漬状態になったケースでは、海水浸漬部のほうが気相部よりも温度が高く、かつ、気液界面では海水の蒸発に伴い塩分が濃縮し、高温・高湿度の高塩化物濃度環境が成立する。気相部、および、b) キャニスタ部まで海水が来なかったケースでは、海水による塩化物の供給が比較的抑制された高温、高

湿度～低湿度の環境となる。

一方、平成 25 年度の調査で抽出した 材料、環境、応力因子から、

①30～80℃の、海水相当濃度である 3.5%[NaCl]、および、その 1/10 希釈濃度の塩化物水溶液環境で、鋭敏化した SUS304 の設計応力の 1.5～2 倍の応力を付与した定荷重試験において数～数百時間で IGSCC が発生する。

②海洋性湿潤大気環境、すなわち、日射を除いて積極的な加温がなく、1g/m² オーダーの海塩が付着した環境で、鋭敏化した SUS304 は数十～数千時間で IGSCC を起こす。

③海塩が濃縮した苦汁塩滴環境で、60℃、35%R.H.のような高温・低湿度環境(高湿度環境よりも塩が濃縮して、より厳しい腐食環境が成立)で、鋭敏化していない SUS304 が TGSCC(鋭敏化に基づかない粒内割れ)を起こす。

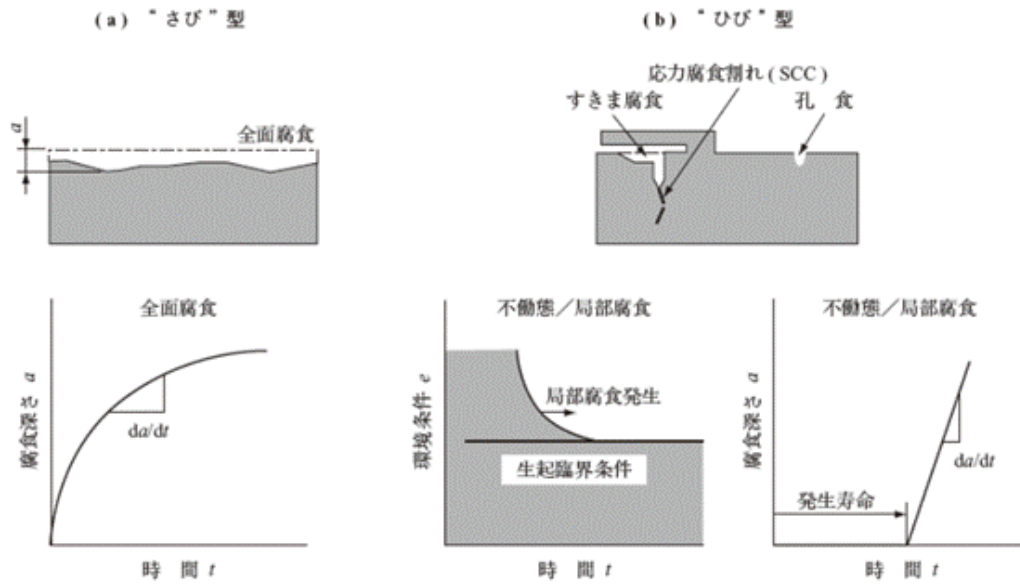
などの知見が得られている。

以上のことから、ガラス固化体キャニスタが津波を被災し、海水に半浸漬状態になったときの海水水没部、および、気液界面での環境での SCC 感受性の評価では、SCC 発生寿命の材料、環境、応力依存性が重要となる。特に、材料：強鋭敏化(高% C 材の鋭敏化熱処理材)、環境：80℃、3.5%[NaCl](海水相当濃度)、応力：350～400MPa(高い溶接残留応力を想定した、設計応力の 1.75～2 倍)の 3 条件が重畳すると、数百時間以内で SCC が発生することが見込まれる。これら加速因子をパラメータとして、ガラス固化体キャニスタの津波の被災の実態に合わせた SCC 発生予測を行なった。

(3) 海水浸漬状態での SCC 発生寿命解析

1) 中性塩化物環境中の鋭敏化ステンレス鋼の SCC 発生寿命

SCC の発生と進展の状況[44]を模式的に図 4.5.9-7 に示すように、不動態・局部腐食型の SCC は、横軸に時間 (t)、縦軸に損傷深さ (a) を取り、SCC が発生するまでの期間を発生寿命と、その後の進展過程に分けて評価される。



第1図 腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類と寿命予測の考え方

図 4.5.9-7 SCC の発生と進展(模式図)

鋭敏化ステンレス鋼の中性塩化物環境における SCC の発生過程は確率過程であって、同一条件であっても個々の発生寿命はばらつきがあるものの、それらの発生確率 $F(t)$ の時間 t 依存性は指数分布モデル[44]で近似できる。同一条件で6本(以上)の SCC 試験を実施し、各試験片の破断時間を小さい順に並べて指数分布モデルで解析して寿命分布下限界値(最小寿命)を求める。鋭敏化ステンレス鋼の定荷重 SCC 試験条件および SCC 発生寿命[45]を表 4.5.9-2 に示す。

表 4.5.9-2 鋭敏化ステンレス鋼の定荷重 SCC 試験による SCC 発生寿命[45]

Table 2 UCL test conditions and test results.

No.	Mat.	Heat Treat.	Ra	Stress (Sy)	Temp. (°C)	[NaCl] (%)	Potential (V. SHE)	Crev.	a (h)	θ (h)
	#1	#2	#3	#4			#5	#6		
1	A	A	0.38	2.00	80	0.35	free	n	21	17
2	A	A	0.38	1.75	80	0.35	free	n	29	27
3	A	A	0.38	1.50	80	0.35	free	n	42	47
4	A	A	0.38	1.75	50	0.35	free	n	228	300
5	A	A	0.38	1.75	30	0.35	free	n	678	2470
6	A	A	0.35	1.75	30	0.35	free	y	593	1130
7	B	A	0.29	1.75	80	0.21	free	y	486	381
8	B	A	0.29	1.75	80	2.10	free	y	125	55
9	B	A	0.31	1.75	80	0.35	free	y	208	124
10	B	A	0.35	1.75	80	0.35	free	y	50	20
11	B	B	0.28	1.75	80	0.35	free	y	511	3193
12	B	C	0.13	1.75	80	0.35	free	y	3103	4523
13	B	A	0.46	1.75	80	0.35	free	y	48	77
14	B	A	0.46	1.75	80	0.35	0.144	y	2	8
15	B	A	0.46	1.75	80	0.35	0.094	y	10	17
16	B	A	0.46	1.75	80	0.35	0.044	y	23	29
17	B	A	0.46	1.75	80	0.35	-0.006	y	29	39
18	B	A	0.46	1.75	80	0.35	-0.056	y	40	81
19	B	A	0.46	1.75	80	0.35	free	y	68	587
20	B	A	0.35	1.75	80	0.35	0.094	y	10	6
21	B	A	0.35	1.75	80	0.35	0.044	y	19	14
22	B	A	0.35	1.75	80	0.35	-0.006	y	20	15
23	B	A	0.35	1.75	80	0.35	-0.081	y	68	587
24	B	A	0.35	1.75	80	0.35	-0.106	y	2760	#7
25	B	A	0.35	1.75	80	0.35	-0.156	y	>2400	No SCC
26	B	A	0.35	1.75	80	0.35	-0.206	y	>3000	No SCC
27	B	A	0.35	1.00	80	0.35	free	y	229	320
28	B	A	0.35	1.75	80	0.35	free	y	31	29
29	B	B	0.20	1.75	80	0.35	0.244	y	16	27
30	B	B	0.20	1.75	80	0.35	0.194	y	29	870
31	B	B	0.20	1.75	80	0.35	0.144	y	180	367
32	B	B	0.20	1.75	80	0.35	0.094	y	832	1249

標準条件 ←

- #1 Material A or B for table 1
- #2 Heat treatment conditions for sensitization
A; SA+750°C/1h+500°C/24h
B; SA+600°C/2h
C; SA+600°C/0.5h
- #3 Degree of sensitization for EPR test
- #4 X-times Sy (Design yield stress=207MPa)
- #5 open curcuit potential test (free) or constant potential test
- #6 y; with PTFE crevice former, n; free surface
- #7 No definition because only one specimen were broken

$$F(t) = 1 - \exp [- (t - \alpha) / \theta],$$

(数式 4.5.9-1).

ここで α は寿命分布下限界値(最小寿命)を表し、 θ は分布の標準偏差(ばらつき)を表す。条件によらず θ と α の比は一定($\theta/\alpha=1.2$)に保たれている。すなわち、最小発生寿命が長くなるほど個々の寿命のばらつきも大きくなる。任意の損傷確率を前提とした寿命、 t_i は、数式 4.5.9-2)で示される。

$$t_i = \alpha - \theta \ln[1 - F(t)]$$

(数式 4.5.9-2).

ステンレス鋼の中性塩化物環境での SCC 発生寿命、 $\alpha_{\text{predict}}(h)$ を予測する数式の例として数式 4.5.9-3 を示す。

$$\alpha_{\text{predict}}(h) = a_0 \times [f_c \times (E - E_{R,SCC})]^{-1} \times (S_T/S_y - 0.5)^{-2} \times ([Cl^-])^{-0.5} \\ \times Ra^{-4.1} \times \exp(6.8 \times 10^2/T)$$

(数式 4.5.9-3).

a_0 : 定数

f_c : すきま構造の有無による因子

E : 電位、 $E_{R,SCC}$: SCC 臨界電位

S_T : 応力、 S_y : 設計応力(207MPa)

Cl^- : 環境中の塩化物濃度

Ra : 材料の鋭敏化度(JIS G0580 に規定する再活性化率)

T : 使用温度

鋭敏化ステンレス鋼の定荷重 SCC 試験による SCC 発生寿命の見積を表 4.5.9-3 に示す。

表 4.5.9-3 鋭敏化ステンレス鋼の定荷重 SCC 試験による SCC 発生寿命の見積

因子	モデル		海水相当濃度					
	モデル	標準	塩化物濃度依存性		塩化物濃度依存性		塩化物濃度依存性	
			条件	加速倍率	条件	加速倍率	条件	加速倍率
すきま	f_c^{-1}	free	→	1	→	1	→	1
電位	$(E - E_{R,CREV})^{-1}$	free	→	1	→	1	→	1
応力	$(S_T/S_y - 0.5)^{-2}$	362MPa	→	1	→	1	→	1
塩化物	$[Cl^-]^{-0.5}$	0.35%	→	0.59	→	0.32	→	0.19
鋭敏化度	$Ra^{-4.1}$	0.38	→	1	→	1	→	1
温度	$\exp(Q/T)$	30°C	→	1	→	1	→	1
小計	積分	678hrs		0.59		0.32		0.19
SCC 発生寿命		hrs/yrs	401	0.05	214	0.02	127	0.01

標準条件(表 4.5.9-2 に→で示した No.5 条件)として、以下の場合の定荷重 SCC 試験における SCC 発生寿命：678 時間を用いた。

- ・ すきま：なし
- ・ 電位：自然浸漬(電位付与無し)
- ・ 応力：363MPa(SUS304 の設計応力)

※設計応力とは、その部材が破壊や降伏を起こす限界応力に対して、安全率を考慮した設計上の部材に作用してよい応力の大きさの上限値である。

- ・ S_y の 1.75 倍、溶接残留応力模擬)
- ・ 塩化物濃度：0.35%(海水の 1/10 相当塩化物濃度)
- ・ 鋭敏化度： $Ra=38\%$ (JIS G0580 ステンレス鋼の電気化学的再活性化率の測定方法における再活性化率、 Ra 、強鋭敏化に相当)
- ・ 温度：30°C(室温)

SCC 発生寿命におよぼす塩化物濃度の依存性は $[Cl^-]^{-0.5}$ であることから、 $[Cl^-]$ をパラメータとして、標準条件が 0.35%に対して、濃度が、1%、3.5%(海水相当濃度)、10%の場合、それぞれ、0.59 倍、0.32 倍、0.19 倍となる。したがって、塩化物濃度が 3.5%以外は標準条件と同一の場合は、SCC 発生寿命は 678 時間の 0.59 倍の 214 時間となる。

同様に解析した海水浸漬状態での SCC 発生寿命解析を表 4.5.9-4 に示す。温度は 30~90℃、鋭敏化度は Ra : 5~38%(0.05~0.38)とした。

表 4.5.9-4 海水浸漬状態での SCC 発生寿命解析

(a) 標準モデルに対する塩化物濃度依存性の解析例

因子	モデル		塩化物濃度依存性					
	モデル	標準	条件	加速倍率	条件	加速倍率	条件	加速倍率
すきま	f_c^{-1}	free	→	1	→	1	→	1
電位	$(E - E_{R,CREV})^{-1}$	free	→	1	→	1	→	1
応力	$(S_p/S_y - 0.5)^{-2}$	362MPa	→	1	→	1	→	1
塩化物	$[Cl]^{-0.5}$	0.35%	1%	0.59	3.5%	0.32	10%	0.19
鋭敏化度	$Ra^{-4.1}$	0.38	→	1.00	→	1	→	1
温度	$\exp(Q/T)$	30℃	→	1.00	→	1	→	1
小計	積分(Σ 各加速倍率)	678hrs		0.59		0.32		0.19
SCC 発生寿命	[NaCl]濃度	hrs	1%	401.1	3.5% (海水相当)	214.4	10%	126.8
		yrs		0.05		0.02		0.01

(b) 強鋭敏化材(Ra=0.38)における SCC 発生寿命の塩化物濃度、および温度依存性解析例

	塩化物濃度、温度: パラメータ 応力: 362MPa 鋭敏化度: Ra=0.38	温度加速倍率 ↓		SCC発生寿命 (hrs)		
		塩化物濃度		1%	3.5%	10%
		塩化物濃度加速倍率 →	-	0.59	0.32	0.19
強鋭敏化 (実験室加速 SCC試験)	温度 依存性	30℃	1.00	401.1	214.4	126.8
		40℃	0.49	195.8	104.7	61.9
		50℃	0.25	99.9	53.4	31.6
		60℃	0.13	53.1	28.4	16.8
		70℃	0.07	29.3	15.7	9.3
		80℃	0.04	16.7	8.9	5.3
		90℃	0.02	9.8	5.3	3.1

(c) IGSCC 生起下限界鋭敏化度材(Ra=0.05)における SCC 発生寿命の塩化物濃度、および温度依存性解析例

	塩化物濃度、温度: パラメータ 応力: 362MPa 鋭敏化度: Ra=0.05 鋭敏化度加速倍率: 4085	塩化物濃度	SCC発生寿命							
			hrs		yrs		hrs		yrs	
			1%		3.5%		10%			
IGSCC 生起 下限界 鋭敏化	温度 依存性	30℃	1638936	187.1	876048	100.0	518277	59.2		
		40℃	800149	91.3	427698	48.8	253029	28.9		
		50℃	408377	46.6	218287	24.9	129140	14.7		
		60℃	217018	24.8	116001	13.2	68627	7.8		
		70℃	119657	13.7	63959	7.3	37839	4.3		
		80℃	68239	7.8	36475	4.2	21579	2.5		
		90℃	40139	4.6	21455	2.4	12693	1.4		

2) 温度解析に基づくガラス固化体キャニスタの SCC 発生予測

4.5.8(3)2)に示した代表点の温度解析結果に対して、各温度帯での時間を SCC 発生寿命で除した値を SCC 発生寿命消費率として累積し、累積消費率、L が 1 に達した時点で SCC 発生とした。高い SCC 感受性を示す強鋭敏化として、 $Ra=20\%(0.2)$ 、 $10\%(0.1)$ の場合の海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測を図 4.5.9-8 に示す。ガラス固化体 B (最も高い温度部) の場合、約 400 時間で SCC が発生すると推算される。一方、ガラス固化体 A の低温部では、キャニスタ上面で実際には海水に水没しない部分での参考値であるが、同じく約 400 時間で SCC が発生すると推算される。さらに、SCC 発生寿命の鋭敏化度依存性を推算するため、解析した温度-時間関係を累乗則で高温-長時間側に外挿した。

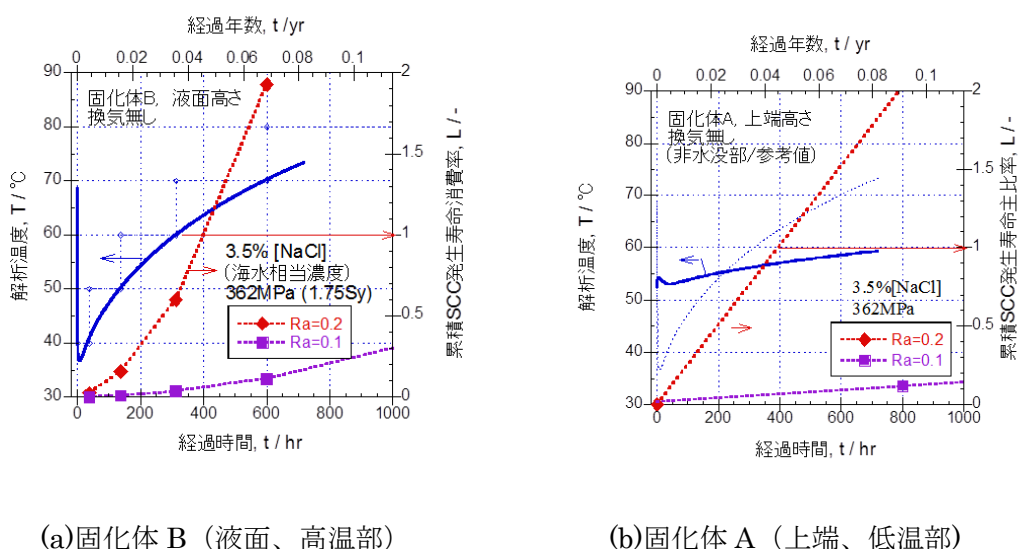
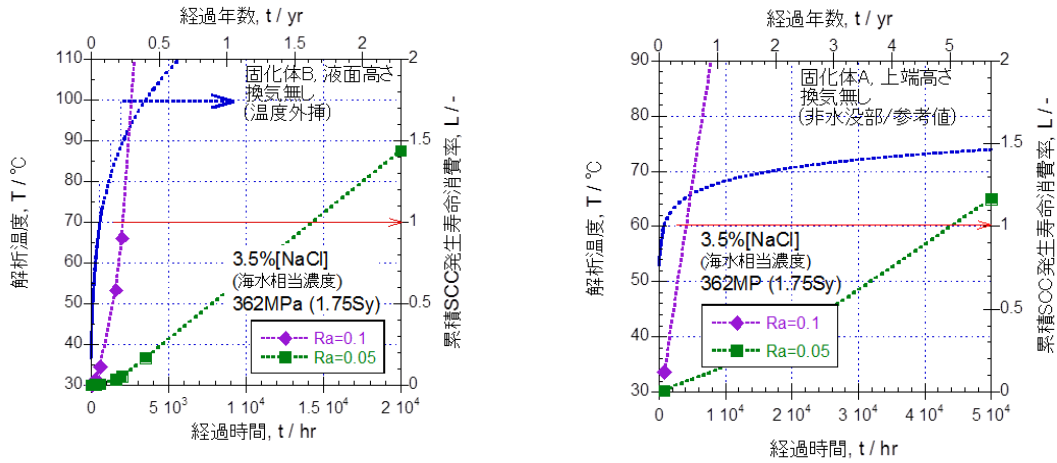


図 4.5.9-8 代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測

$Ra=10\%(0.1)$ 、 $5\%(0.05)$ の場合の海水浸漬部の SCC 発生寿命(温度変化外挿、低鋭敏化度予測)を図 4.5.9-9 に示す。

ガラス固化体 B の場合、通常の溶接継手部での高めの鋭敏化度である $Ra : 0.1$ で 2,000 時間であり、SCC を起こし得る下限界の鋭敏化度である $Ra : 0.05$ で 14,000 時間であった。すなわち、鋭敏化していなければ、SCC 発生までに 1 年半の猶予がある。同様に、ガラス固化体 A では、5 年程度の余裕がある。



(a) 固化体 B (液面、高温部) (b) 固化体 A (上端、低温部)

図 4.5.9-9 代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測
(温度変化外挿、低鋭敏化度)

代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測の鋭敏化度依存性を表 4.5.9-5 に示す。

表 4.5.9-5 代表点での海水浸漬部の SCC 発生寿命解析予測の鋭敏化度依存性

	SCC発生寿命				備考
	hr	月/年	hr	月/年	
鋭敏化度 Ra	固化体B		固化体A		
	液面高さ		上面高さ		
	換気なし		換気なし		
0.2	400	0.5ヶ月	400	0.5ヶ月	溶接強鋭敏化
0.1	2000	3ヶ月	4000	0.5年	高めの鋭敏化
0.05	14000	1.5年	43000	5年	鋭敏化SCC下限界

3) ガラス固化体キャニスタの SCC 発生寿命におよぼす各種影響因子の寄与

SCC 発生寿命におよぼす化学組成(クロムや炭素の含有率)の影響を表 4.5.9-6 に示す。ステンレス鋼の SCC 感受性は、孔食、すきま腐食感受性と同様に以下の数式で表わされる。

$$P.I.=[\%Cr]+3.3[\%Mo]+16[\%N]$$

SUS304(18Cr)系と 309(22Cr)系材料との比較は、60℃、35%R.H.の恒温恒湿中における苦汁塩滴での SCC 発生寿命[47]をベースに推算した。炭素依存性は、650℃における鋭敏化時間[48]をベースに、実測の炭素含有率 0.01~0.09%での関係を高炭素含有率側に外挿して推算した。SUS304(炭素 0.05%)に対して、SCC 対策を施した SUS304L は寿命改善率が約 5 倍(数字が大きいほど SCC 発生までの寿命が長い)、クロムを高めた SUS309S は 2 倍、高クロム・高炭素の SUH309 は半分以下と見込まれる。

表 4.5.9-6 SCC 発生寿命におよぼす化学組成(%Cr、%C)の影響

P.I.	合金種		%C(SUS304ベース)			%C(SUS309ベース)	
	寿命改善率	備考	%C	寿命改善度	備考	寿命改善度	備考
12	0.13	鋭敏化304	0.03	4.63	304L(≤0.03%C)	8.66	
14	0.42		0.05	1.00	SUS304通常材	1.87	SUS309S
16	0.71		0.07	0.36	(≤0.08%C)	0.68	
18	1.00	SUS304	0.09	0.17		0.32	
20	1.29		0.11	0.09		0.18	
22	1.58		0.13	0.06		0.11	
24	1.87	SUS309, SUS316	0.15	0.04	SUH材	0.07	SHU309
26	2.15		0.17	0.03	(≤0.2%C)	0.05	

SCC 発生寿命におよぼす鋭敏化、および、応力の影響を

表 4.5.9-7 に示す。炭素含有率 0.05% の SUS304 を熱処理(650°Cを継続するなど)によって強鋭敏化させた場合の鋭敏化度 (Ra) は、ロットなどによって 35~46%までの範囲の値を示していたが、実際に溶接施工した際の鋭敏化は、最大で 20%(Ra=0.2)程度である。なお、以下の解析では、強鋭敏化した材料の鋭敏化度として、38%(Ra=0.38)で代表させる。一方、SCC 感受性を示さなくなる下限界 Ra は 5%(Ra=0.05)程度とされており、Ra=5%の時の Ra=20%に対する寿命改善率は約 300 倍になると算出した。SUS304 の設計応力、Sy の 207MPa に対して、溶接残留応力は、350~400MPa が見込まれ、Sy の 1.75 倍の 362MPa を基準として Sy レベルの寿命改善率は 5 倍を超える。したがって、SCC の発生は鋭敏化と溶接残留応力が重畳する溶接継手部に集中すると考えられる。

表 4.5.9-7 SCC 発生寿命におよぼす鋭敏化、および、応力の影響

鋭敏化度			応力		
Ra(%)	寿命改善率	備考	σ (MPa)	寿命改善率	備考
0.4	0.06		450	0.56	
0.38	0.07	強鋭敏化(熱処理)	400	0.76	溶接残留 応力レベル
0.3	0.19		362	1.00	
0.2	1.00	強鋭敏化(溶接)	350	1.10	
0.1	17	高めの鋭敏化	300	1.73	
0.05	294	SCC生起下限	250	3.12	
0.01	215885	非鋭敏化	207	6.25	設計応力

SCC 発生寿命におよぼす電位、pH および塩化物濃度の影響を表 4.5.9-8 に示す。ステンレス鋼の浸漬電位、 E_{CORR} の経時変化、および、自然腐食電位、 E_{SP} [49]を図 4.5.9-10 に示す。

ステンレス鋼の水溶液中における浸漬電位 (E_{CORR}) は、pH および環境の酸化・還元性に依存し、合金種、温度などの依存性は小さい。生物活性がない海水相当の塩化物濃度 (3.5%[NaCl]、pH=8.2 の 8ppm の溶存酸素(DO)) である大気平衡水溶液の浸漬電位は、+0.25V vs. SHE 程度である。一方、天然海水など生物活性が高い場合の浸漬電位は+0.6V vs. SHE まで貴化し、寿命改善率は 0.5 倍になる。しかしながら 50°Cを超えると生物活性を失うとされている。

表 4.5.9-8 SCC 発生寿命におよぼす電位、pH、および、塩化物濃度の影響

電位/生物活性、酸化剤			pH			塩化物			
E (V)	寿命改善率	備考	pH	寿命改善率	備考	[NaCl] (%)	[Cl] (ppm)	寿命改善率	備考
0.1	2.50		3	0.45		10	48570	0.59	
0.2	1.25		4	0.50		3.5	17000	1.00	海水相当
0.25	1.00	生物非活性	5	0.57		1.0	4857	1.87	
0.3	0.83		6	0.66		0.35	1700	3.16	
0.4	0.63		7	0.78	中性	0.1	486	5.92	
0.5	0.50		8	0.96		0.035	170	10.01	工水(上限)
0.6	0.42	生物活性	8.2	1.00	海水	0.01	49	18.72	
			9	1.23		0.0035	17	31.65	工水(標準)
0.9	0.28	過酸化水素	10	1.74		0.001	5	59.20	

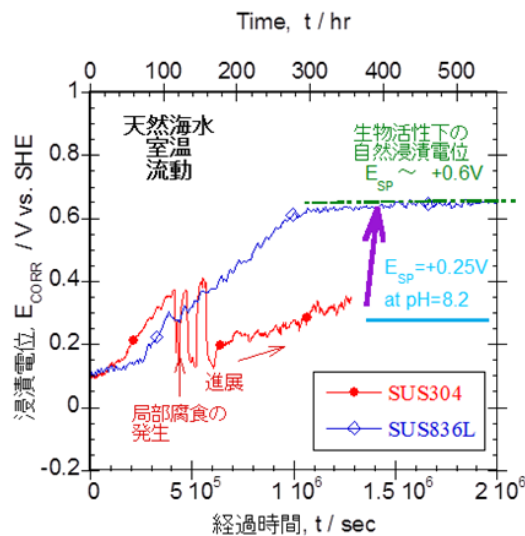
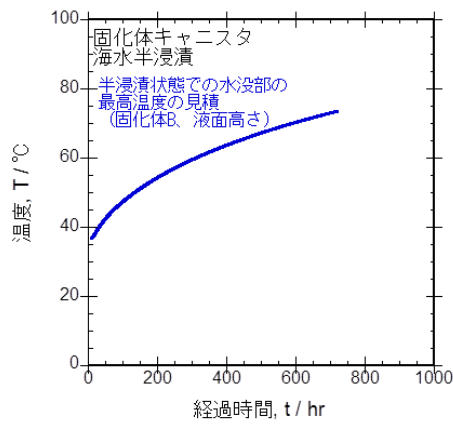
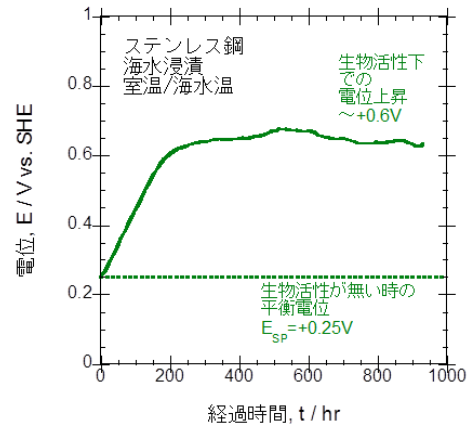


図 4.5.9-10 ステンレス鋼の浸漬電位 (E_{CORR}) の経時変化および自然腐食電位 (E_{SP})

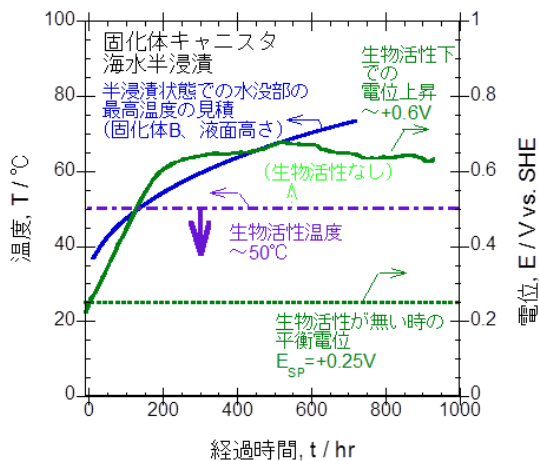
固化体キャニスタの海水半浸漬状態での温度および電位の経過時変化を
 図 4.5.9-11 に示す。



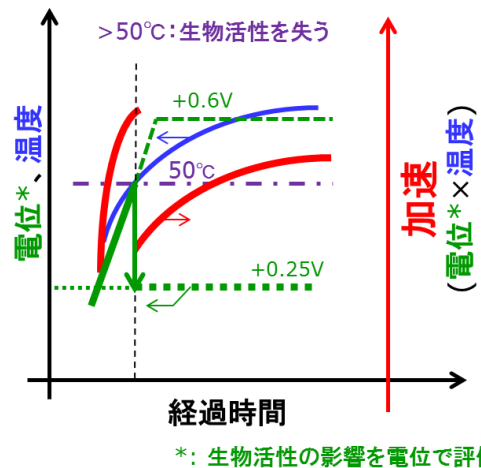
(a) 固化体キャニスタの温度上昇挙動



(b) ステンレス鋼の室温海水中の電位上昇挙動



(c) 温度上昇と電位上昇挙動の重書き



(d) 温度上昇と電位上昇の重畳加速(模式図)

図 4.5.9-11 固化体キャニスタの海水半浸漬状態での温度および電位の経過時変化

固化体 B (液面高さ) の温度解析では海水流入直後の 40°Cから温度上昇を続け、約 100 時間で 50°Cに達する。一方、浸漬電位は、当初の+0.25V vs. SHE から+0.5V vs. SHE に達するが、100 時間以降は生物活性を失うため、電位は+0.25V vs. SHE に低下することが見込まれる。したがって、全体としては、SCC 発生寿命におよぼす生物活性の影響は限定的である。ただし、ガラス固化体キャニスタから離れていて温度が 50°Cまで上昇しない機器・配管

部などは、溜まり水部で生物活性が起こり、腐食性が高まる可能性があるため注意が必要である。

浸漬電位のうち、局部腐食を起こしていない場合の最も高い電位を特別に自然腐食電位、 E_{SP} のpH依存性が認められ、以下の数式で定式化[50]されていることから、pHの影響は電位で代替できる。

$$E_{SP} = +0.733 - 0.059\text{pH}$$

(数式 4.5.9-4).

中性(pH=7)の E_{SP} が+0.32Vで在るのに対して、海水の代表的なpHであるpH=8.2では E_{SP} =+0.25Vとなる。

過酸化水素(H_2O_2)、オゾン(O_3)、次亜塩素酸ナトリウム($NaHClO$)などの酸化剤があれば、さらに電位が貴化する。これら酸化剤は浄水の殺菌などに用いられるほか、過酸化水素はγ線などによる水の放射線分解によって生じたラジカルの寄与に対する代替試験としても用いられている。第一義的には放射線の寄与は電位(の上昇)で評価出来て、+0.5Vまで貴化した場合、寿命改善率は0.5倍になる。

塩化物濃度は、海水相当の3.5%[NaCl](~17,000ppm[Cl])に対して、河川水、工業用水は~200ppm[Cl]と2~3桁低下し、それに伴って寿命改善率も10~30倍となる。すなわち、津波に加えて、火災が発生して放水され、河川水、工業用水が持ち込まれれば、塩化物濃度は低減する。また、河川水や工業用水などの方が海水よりもpHが低く、さらに、消火剤などの化学薬品が用いられるとpHが低下することにより、生物活性が上昇する可能性があるが、ステンレス鋼は3ヶ月程度では腐食しない[51]との報告もある。

以上のことから、解析上の最高温部である固化体B(液面高さ、換気無し)の場合は、標準的なSUS304(0.05%C)が、溶接によってRa=20%に強く鋭敏化していれば約400時間でSCCが発生すると推算される。通常の溶接継手部での高めの鋭敏化度であるRa=10%で2,000時間、鋭敏化型のSCCを起こし得る下限界鋭敏化度程度のRa=5%で14,000時間であった。

SUH309の場合0.5倍、SUS309Sでは2倍、SCC対策材のSUS304Lで5倍の寿命尤度が見込まれる。すなわち、鋭敏化していなければ、SCC発生までに1年半~数年の猶予があるが、鋭敏化の程度に応じてSCC発生までの寿命が縮まり、SUH309が強鋭敏化していれば数十~200時間でSCCが発生する可能性がある。

(4) 気相部での湿潤大気 SCC 発生寿命解析

これまでに湿潤大気 SCC 感受性に関する多くの研究が行われてきたが、その中には湿潤大気応力腐食割れ(ASCC)感受性を評価するために実験的に ASCC を起こさせるための(過度の)加速温度-湿度条件で試験が行われることも多い。湿潤大気応力腐食割れ加速試験における温度-湿度条件と SCC 発生の有無、および、35°Cおよび 40°Cでの相対湿度 100%の空気の温度上昇における湿度変化を図 4.5.9-12 に、湿潤大気環境を比較してに図 4.5.9-13 示す。

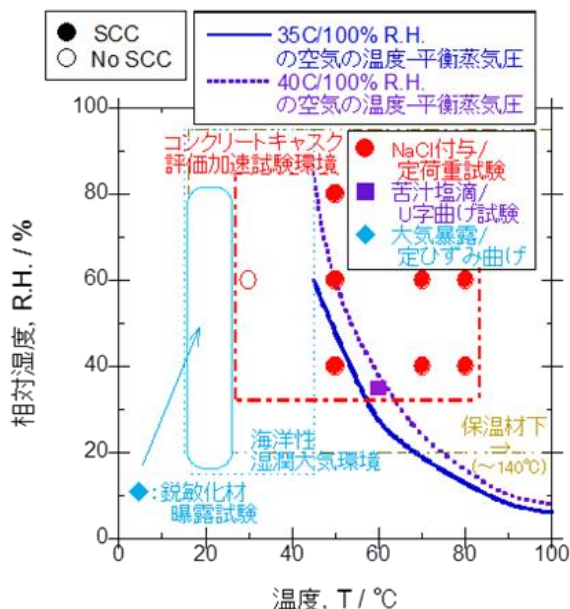


図 4.5.9-12 湿潤大気応力腐食割れ加速試験における温度-湿度条件と SCC 発生の有無、および、35 および 40°Cでの相対湿度 100%の空気の温度上昇における湿度変化 ([38][52] をもとに作成)

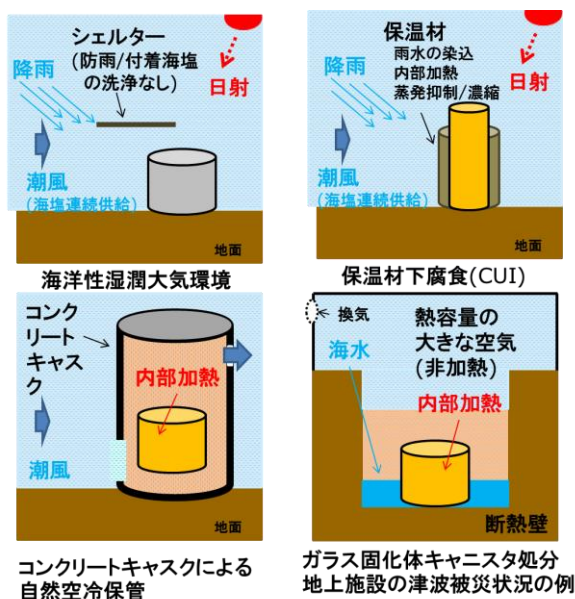


図 4.5.9-13 湿潤大気環境の比較(海洋性湿潤大気環境、保温材下腐食環境、ガラス固化体キャニスタの自然空冷保管環境、地上施設が津波被災した環境)

通常の海洋性湿潤大気環境は、潮風によって運ばれた飛来海塩が構造体金属表面に付着し、大気中の湿度の低下によって乾燥塩となり、吸湿によって濃厚塩化物水溶液環境となる。したがって、海洋性湿潤大気環境においては塩分濃度(g/m^3)の定義が困難であり、一般に単位面積あたりの付着海塩量(g/m^2)で評価を行い、水分量は温度・湿度によって決まる。シェルターなどの防雨構造があれば、降雨による付着海塩の洗い流しが起きず、海塩が蓄積されやすい。それでも、一般には、付着海塩が無限に蓄積することはなく、平衡状態に達する。外洋に面した海岸近傍では数 g/m^2 [NaCl]、内湾で $0.1\text{g}/\text{m}^2$ [NaCl]程度の海塩が付着する。日射およびプロセス温度によって加熱されるが、基本は室温もしくは室温+ α であり、温度および付随して決まる湿度はパラメータにならない。しかしながら、温度-湿度の変化によって塩分濃度が濃縮を繰り返すことが SCC の発生に大きな影響を与えると考えられる。湿潤大気応力腐食割れ (ASCC) 発生寿命の鋭敏化度、応力、付着塩分量依存性[52]を図 4.5.9-14 に示す。大気曝露試験に加え、実験室加速試験では、塩水噴霧-乾燥-湿潤の複合サイクルを繰り返し付与する方法や、塩滴もしくは塩を噴霧して予め海塩を付与した試験体を恒温恒湿槽に静置する方法がある。

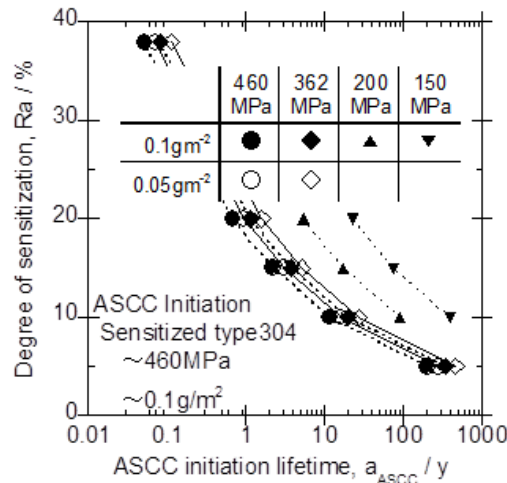


図 4.5.9-14 湿潤大気応力腐食割れ発生寿命の鋭敏化度、
応力、付着塩分量依存性

保温材下腐食(CUD)環境は、プロセス温度によって加熱される金属表面を保温材が覆う構造で、雨水の染み込みによって水分が供給され蒸発も抑制されるため、持ち込まれた塩類が濃縮して炭素鋼配管・機器の腐食やステンレス配管・機器の外表面応力腐食割れ(ESCC)を起こす条件が整う。

保温材下腐食の実例から、概ね 140°C を超えると金属表面が乾燥して、保温材下腐食を起こさなくなることが知られている。塩分濃度が濃縮して高濃度塩化物となって高温に曝されることから、ESCC は鋭敏化によらず粒内型の応力腐食割れ(IGSCC)となる。実験室加速試験では、加熱した試験片表面と下部に設けた塩水との間にろ紙によって液絡を確保し、試験片表面に海塩が濃縮する Wick 試験と塩水を含ませた保温材を被せた試験体を恒温槽で加熱保持し必要に応じて適宜水分を供給する方法がある。

本検討で対象としている海塩付着影響のある環境に曝された内部発熱のある金属の腐食影響

評価の類似例として、使用済燃料のコンクリートキャスク方式による自然空冷保管を対象とした腐食影響検討が行われている。これは、キャスク下方の取り込み口から入った空気を使用済み燃料の崩壊熱を駆動力とする自然対流によって上部から排気する空冷方式で、外気が直接使用済み燃料の収納管に接触し、かつキャスクの設置場所として想定される原子力発電所が海岸付近に位置することが多いことから、コンクリートキャスク内に置かれたステンレス鋼製の内部加熱体（キャニスタ）が潮風に曝される環境に置かれる。

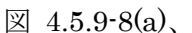
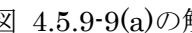
したがって、海塩を含む室温の湿潤大気を過熱しながら常に供給されるため、一定量の海塩を付与した試験体を恒温恒湿環境に置いて SCC 感受性を評価する。SCC の加速試験としては、任意に温度-湿度の組み合わせを選択できるが、実際には 100% R.H. の室温外気に含まれる飽和水分量以上の水分は供給されないため、図 4.5.9-12 に例示した 35°C もしくは 40°C における相対湿度曲線を超えるような環境にはならない（たとえば、80°C、60% R.H. など）。一方、実験室試験としては、これら高温・高湿度条件に制御することによる環境加速を行い、より厳しい加速環境下で SCC 感受性の評価を行なっている。

図 4.5.9-12 中の○/●(ASCC が発生)は、SUH309 製キャニスタの ASCC 感受性を評価するために電力中央研究所において精力的に実施された条件[38]で、鋭敏化熱処理を施した供試材を用いて、塩水噴霧によって NaCl を付与した後にばね式荷重付与機構で所与の荷重を付与し、恒温恒湿槽中で 2,000 時間の曝露を行い、ASCC の有無を判定した。試験した範囲の中では○で示した比較的マイルドな設定の 40°C、60% R.H. では ASCC を起こしていない。すなわち、海洋性湿潤大気環境で出現する ASCC 感受性は、材料、環境、応力の条件が重畳した場合に限定されると考えられる。一方、太平洋、東シナ海から 3~4km の丘陵にシェルター部で実施した鋭敏化ステンレス鋼の 100R の定ひずみ曲げ試験片の曝露試験[53]では 1~3 ヶ月で ASCC が発生しており、付着海塩量の多さに加え、日々の温度・湿度の変化が ASCC の発生に大きな影響を与えることを示唆している。

■は、U 字曲げ試験片に対して苦汁塩滴(4.5%[NaCl]+5.2%[CaCl₂]+ 16.2% [MgCl₂]+8.6%[KCl])を付与し、60°C/35%R.H.の恒温恒湿槽中に最大 500 時間静置したもので、鋭敏化していない SUS304 は粒内型の SCC[54]を起こしていた。苦汁は天然海水から塩化ナトリウム(NaCl)を採取する際の代表的な残渣液であり、天然海水中の CaCl₂、MgCl₂などが濃縮している。これら化学種は NaCl よりも低濃度まで吸湿性を示すため、試験した 60°C、35% R.H. では NaCl が析出する一方、この湿度では液中に残存し、CaCl₂、MgCl₂が少量残存した濃厚塩化物溶液となる。試験した 60°C、35% R.H.は 40°C、100% R.H.の空気が 60°Cに加熱されたときの温度-平衡 R.H.上であるため、成立し得る条件に近い。

ガラス固化体処分場地上施設の津波被災状況の例では、周りが断熱壁、上方が熱容量の大きな非加熱の空気に囲まれ、下部に海水がある状況下で金属表面が内部加熱される。したがって、湿分の供給は無限であるから、高温・高湿度環境に曝されることになる。ガラス固化体 B（液面高さ、換気停止）の気液面は、海水からの海塩の供給も十分であることから、高温・高湿度で数 g/m²[NaCl]が付着した厳しい環境が出現する。さらに、海水の加熱による蒸発に伴い、気液界面では海水成分の濃縮も起きる。

以上のことから、気相部での湿潤大気 SCC 発生寿命は海水水没環境よりも低い、気液界面

の高濃度塩化物が高温・中湿度状態でさらに濃縮して SCC 感受性が高まることが危惧される。一方、解析に資する十分なバックデータが整っている訳ではない。したがって、現時点では、、の解析を準用することで対応する。

4.5.10 まとめと今後の課題

(1) まとめ

津波の被害を受けることにより、ガラス固化体キャニスタ下部で海水の浸漬、ガラス固化体キャニスタ上部で海洋性湿潤大気環境になる一方、放射線分解によって 50～80℃程度まで加熱されるとともに酸化性が高まる可能性がある。海水および海洋性湿潤大気環境下でステンレス鋼は、孔食、すきま腐食感受性を示す。さらに、材料、環境、応力の 3 条件が整った場合に SCC が発生・進展する。30℃(室温)～80℃の温度域で海水相当濃度の塩化物の水溶液環境および海塩付着があれば、SCC を起こし得ることが文献などで報告されている。また、海水の方が空気よりも熱伝導性が良いため、海水に浸漬しているほうが温度の上昇が大きく、温度解析の結果より没水部(海水中)では 300 時間後に 60℃、600 時間後に 70℃に到達するが、非没水部(大気中)では 700 時間後に 60℃に到達し、その後の温度上昇も遅い。気相部での湿潤大気 SCC 発生寿命は海水水没環境よりも低いが、気液界面の高濃度塩化物が高温・中湿度状態でさらに濃縮して SCC 感受性が高まることが危惧される。一方、解析に資する十分なバックデータが整っている訳ではないことから、第一義的には、海水水没部での SCC 発生寿命で評価することとする。

これら文献で示された塩化物水溶液中の鋭敏化ステンレス鋼の SCC 発生寿命におよぼす各種加速因子依存性と、今回の温度解析で得られた代表点の到達温度の経時変化から、解析上の最高温部である固化体 B (液面高さ、換気無し) の場合、標準的な SUS304(0.05%C)が、溶接によって Ra=20%に強く鋭敏化していれば約 400 時間で SCC が発生すると推算される。通常の溶接継手部での高めの鋭敏化度である Ra=10%で 2,000 時間、鋭敏化型の SCC を起こし得る下限界鋭敏化度程度の Ra=5%で 14,000 時間程度であった。

SUH309 の場合 0.5 倍、SUS309S では 2 倍、SCC 対策材の SUS304L で 5 倍の寿命改善が見込まれる。すなわち、鋭敏化していなければ SCC 発生までに 1 年半～数年の猶予があるが、鋭敏化の程度に応じて SCC 発生までの寿命が縮まり、SUH309 が強鋭敏化していれば数十～200 時間で SCC が発生する可能性がある。

(2) 今後の課題

30～80℃の温度域で海水相当濃度の塩化物の水溶液環境および相応の海塩付着があれば、SCC を起こし得ることが文献などで報告されているが、これら文献のデータは、特定の1因子をパラメータとする一方、残りの因子はそれぞれ何らかの加速条件で試験された結果であることが多い。また、通常の実験室試験では環境の温度試験片の表面温度が同一であるが、実機環境においては機器の表面温度とそれに接する環境の温度が異なることが普通で、機器表面の乾燥状態が維持されれば腐食環境が整わないため、SCC 感受性を示さない場合がある。したがって、津波腐食へ展開するためには、実機環境の解析結果に基づき、環境と試験片の温度差などを考慮した塩水 SCC 感受性評価試験計画、放射線影響 SCC 感受性評価試験計画を立案し、試験を実施した上で評価する必要がある。

1) 材料、冷間加工と溶接、および、鋭敏化

ガラス固化体キャニスタ材は、SUH309、SUS309S および SUS304L を対象とする。汎用オーステナイトステンレス鋼 SUS304 に対して、耐熱鋼の規格である SUH309 および SUS304 よりも耐食性が高いが主として耐熱鋼として用いられる SUS309S は非腐食性環境で用いられることが多く、耐食性や耐 SCC 感受性のデータはほとんど報告されていない。すなわち、これら SUH309、SUS309S の腐食・SCC データは、返還廃棄物の貯蔵時に想定されるリスク回避のために調査・検討されたものが大部分であり、乾式貯蔵を念頭に置いた海塩付着環境における定常的な恒温恒湿度環境および湿式貯蔵を念頭に置いた極低濃度塩化物に制御された水溶液(使用済燃料貯蔵プールレベル)環境でのすきま腐食、SCC 感受性の評価がなされ、その一部が公開されているに過ぎない。一方、SUS304L は SCC 対策材としての用途であることから多くの研究がなされているが、それでも、報告例は SUS304 と比較して格段に少ない。津波影響で想定される環境での実験データに基づく評価はなされていないことから、当該材料の試験が必要である。

化学組成、特に、分析例を

表 4.5.10-1 に示す。導入当時の 1990 年代前後の化学組成³⁸⁾を前提とした%Cr、および、%C を規定した、もしくはパラメータとした供試材を用いることが望ましい。しかしながら、SUH309、SUS309S は市場での流通も少なく、要求に合致する材料が入手できない可能性がある。その場合は、成分を規定した実験室溶解鋼の手配を選択肢に加える必要がある。

表 4.5.10-1 SUH309/SUS309S、および SUS304L の化学組成(分析例)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUH309	0.147	0.49	1.39	0.005	0.003	12.54	22.87

SUS309S	0.06	0.66	1.68	0.027	0.003	14.03	22.35
SUS304L	0.023	0.25	1.17	0.032	0.001	9.21	18.33

ガラス固化体キャニスタ製造時の冷間加工と溶接部を模式的に図 4.5.10-1 に示す。

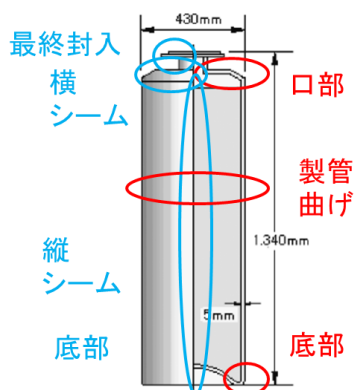


図 4.5.10-1 ガラス固化体キャニスタ製造時の冷間加工と溶接部(模式図)

ガラス固化体キャニスタ（板厚：5～6mm、直径：430mm）は、円筒の胴に底部および蓋を設けた構造であるから、多くの冷間加工を受け、縦・横のシーム溶接部などがある。冷間加工を受けた部分は溶接入熱による鋭敏化を受けやすい。板厚が5～6mmと比較的薄いためパス数も少ないため、鋭敏化している可能性は低い。目違い、溶け込み不良などの解消のための補修溶接を受けている可能性は否定できず、局所的に鋭敏化している危険がある。なお、SUS304のSCC試験では熱処理(例えば、650℃を継続するなど)による鋭敏化を加速した供試材を用いた評価が併用されていることから、SUH309/SUS309Sに対しても鋭敏化熱処理条件の最適化が望ましい。一方、低炭素ステンレス鋼(SUS304L)に対しては、硫酸・硫酸銅試験などの複数の粒界腐食、SCC試験などで鋭敏化熱処理をした上で、試験を実施することが規定されている。

さらに、通常の溶接によって、材料の降伏応力オーダーの溶接残留応力が生じるが、さらに溶接補修によって、溶接残留応力の板厚内分布が全て(正)となり、板厚全断面に対して200MPa程度以上の引張り残留応力場となる可能性がある。したがって、溶接補修を前提として、溶接条件(入熱)をパラメータとした溶接を付与する必要がある。なお、溶接後にSCC試験片を採取する際に溶接ひずみが開放されることから、SCC試験に際して、改めてひずみを付与する必要がある。

また、高含有率クロムの309系材料は800℃前後の温度域の加熱で σ ぜい化感受性を示すことが知られていることから、ガラス固化時の熱履歴によっては、800℃での熱時効を付与する。

ただし、溶接継手部に対しては、鋭敏化度の測定範囲と実際に溶接で鋭敏化する範囲を特定することなどが難しいため、その範囲が視覚的に確認できる硫酸・硫酸銅試験などとの併用が考えられる。

SCC 感受性評価試験に供する供試材、冷間加工、溶接、および材料評価マトリックス(案)を表 4.5.10-2 に例示する。

表 4.5.10-2 SCC 感受性評価試験に供する材料、冷間加工、材料評価等のマトリックス(案)

材料		合金種	代表組成	位置付け
	M1	SUH309	22Cr-12Ni-0.2C	返還廃棄物
	M2	SUS309S	22Cr-12Ni	返還廃棄物
	M3	SUS304L	18Cr-9Ni-低C	国内処理
	M4	SUS304	18Cr-8Ni	比較材
冷間加工		加工度	加工度の例	備考
	C1	受入材	0%(AR)	
	C2	加工模擬	10%	通常の加工部
	C3	過大加工	30%	
溶接/熱処理		溶接	溶接状況	備考
	W1	母材	母材受け入れまま	
	W2	通常溶接	標準的なTIG溶接条件	溶接部模擬
	W3	過大入熱	はつり→補修など	補修溶接部模擬
	W4	鋭敏化	650°C/X hr, X=9,24など	鋭敏化度をパラメータ
	W5	σ ぜい化	800°C/Xhr	σ ぜい化感受性
材料評価		評価	試験方法	規格
	T1	組織	エッチング後のマイクロ組織	JIS G0571
	T2	鋭敏化度	再活性化率、Ra	JIS G0580
	T3	粒界腐食	硫酸・硫酸銅試験	JIS G0575

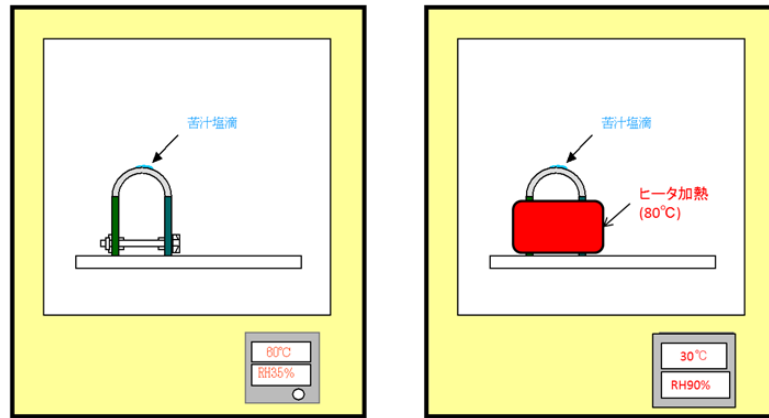
2) 塩水 SCC 感受性評価試験

温度解析の結果、固化体 B が 1/2 の高さまで海水に浸漬した時の気液界面での温度は 100 時間後に 50℃、300 時間後に 60℃、600 時間後に 70℃と上昇し、文献などで示された SCC 発生寿命予測モデルに基づいた解析をした結果、各温度での鋭敏化 SUS304 ステンレス鋼の海水相当の 3.5%[NaCl]環境における SCC 発生寿命は鋭敏化の程度に依存して、数十時間～数千時間の範囲になることが推算された。

一方、海水に浸からない気相部の温度上昇は緩やかであるが、付着海塩と結露水によって濃厚塩化物環境(数 g/m²[NaCl]もしくは塩滴/飽和塩化物溶液)が成立する可能性があり、同じ程度の SCC 発生寿命を有すると予見される。特に、気液界面では塩が濃縮しやすいため、厳しい環境が成立する可能性がある。特に、海洋性湿潤大気環境では、MgCl₂、CaCl₂ などの非 Na 塩が吸湿して低湿度まで腐食環境が維持されるため、海水に少量含まれるこれらの Mg 塩や Ca 塩の寄与が大きいことが知られており、実際に人工海水や苦汁 (MgCl₂ 溶液) などを用いた試験・評価が主流となっている。しかしながら、SUH309/SUS309S に対しては、これらの想定環境での公表ベースの SCC 感受性を評価したデータがない。

したがって、塩水 SCC 感受性評価試験を実施する必要がある。試験・評価環境は、a) 海水(水没)環境、および、b) 海塩が付着・濃縮した湿潤環境の 2 つに大別される。なお、a) の試験片の一部に気液界面を設けることで b) の環境・条件を代替・模擬することも可能である。また、b) 金属表面温度と環境温度に差を生ずる環境が想定される。

多数の試験片の SCC を実施し、SCC 発生/感受性を評価するための試験方法として、U 字曲げ試験片の浸漬試験が合理的である。U 字曲げ試験(JIS G0576)は、75×15×2mm t の短冊状試験片を内側半径 8mm のポンチを用いて U 字型に曲げ、両脚が並行になるまでボルト/ナットで締め付けた試験片を用い、所与の条件に調整した大型の腐食セル内に浸漬をして、適宜、取り出して目視で SCC の有無を確認する。SCC が発生していない試験片は腐食セルに戻し、SCC 発生までの累積時間を求め、2,000 時間(目標)で浸漬を終了する。苦汁塩滴試験の場合には、U 字曲げ試験片を 60℃/35%R.H.の恒温恒湿槽内に天地逆に置いて、頂部に苦汁塩滴を付与する。60℃/35%R.H.の恒温恒湿環境は、に示したように、40℃/100%R.H.の空気の温度上昇時の温度-湿度関係線上に位置することから、実現され得る温度-湿度条件の範囲にある。金属表面温度と環境温度に差を生ずる環境を想定した試験では、U 字曲げ試験片の脚部にヒータを取り付け所与の温度(例えば、80℃)に加熱したものを、所与の温・湿度(例えば 40℃、90%R.H.)に制御した恒温恒湿槽内に設置して、試験を実施する。U 字曲げ試験片を用いた湿潤大気 SCC 加速試験要領[31]を模式的に図 4.5.10-2 に示す。



(a)通常の湿潤大気加速暴露試験 (b) 試験片表面と環境に温度差を設けた加速試験

図 4.5.10-2 U字曲げ試験片を用いた湿潤大気 SCC 加速試験(模式図)

なお、U字曲げ試験片の、それぞれの試験片に付与するひずみ量は一定であるが、硬度が異なる各材料の、各位置での応力/ひずみは明確にならないため、力学的な側面での定量性に劣る。

SCC 発生寿命の応力依存性を定量的に取り扱う際には、丸棒試験片を採取し、定荷重試験を実施する。定荷重試験は定量的ではあるが、試験装置律速となり、実施数に制約が加わることが多い。通常の定荷重・浸漬試験では、試験片並行部が全て没水して同一環境にあることが原則であるが、試験片並行部に気液界面が出来るように水位を制御した試験を実施すれば、水分蒸発による気液界面での塩の濃縮が起きて、厳しい腐食環境になる。なお、60°C/35% R.H.の恒温恒湿環境では、塩の化学種によって 60°C/35%R.H.中で析出するもの(NaCl など)と、溶液中にあるもの(CaCl₂ など)があることで、濃厚塩化物溶液環境を実現するため塩の構成化学種が重要であるが、気液界面に生成する析出塩には水面側から十分な湿気が供給され続けていることから、塩の構成化学種の重要度は低下し NaCl 水溶液でも可能である。

SCC 感受性評価試験に供する供試材、冷間加工、溶接、および材料評価マトリックスを表 4.5.10-2 に示したように、材料：4、冷間加工：3、溶接/熱処理：5 の、4×3×5 の 60 通りの組み合わせが例示されているが、これらの中から優先度を設けて供試材を絞り込み、表 4.5.10-3 に示した塩水 SCC 感受性試験マトリックスの中から試験するものを選定する。

表 4.5.10-3 塩水 SCC 感受性試験マトリックス(案)

(a) 材料マトリックス(案)

		C1(受入材)					C2(加工模擬/10% C.W.)					C3(過大加工/30% C.W.)				
		W1	W2	W3	W4	W5	W1	W2	W3	W4	W5	W1	W2	W3	W4	W5
		母材	溶接	過大	鋭敏化	σ ぜい化										
M1	SUH309	◎	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	△	○	△
M2	SUS309S	○										△				
M3	SUS304L	◎	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	○	○	△	△		
M4	SUS304(比較材)	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△				

(b) 試験法、試験条件マトリックス(案)

試験環境			U字曲げ*2	定荷重試験*3			
塩	設置	温度(°C)/湿度(R.H.)	SCC発生時間	2Sy (414MPa)	1.75Sy (362MPa)	1.5Sy (311MPa)	1.0Sy (207MPa)
3.5%[NaCl] (人工海水)	浸漬	TP/ 環境	60/-	△			
			70/-	○			
	80/-		◎	○	◎	△	△
	半浸漬*1		80/-			○	
苦汁塩滴	恒温恒湿	TP 環境	60/35	◎			
			80	○			
		40/90					

*1: 定荷重試験片の試験片並行部の上部側に気液界面が来るように水位を調整
 *2: ~2000hrの浸漬試験中に適宜、目視でSCCの発生の有無を確認
 *3: 破断寿命で評価、~2000hrを目標として試験を打ち切り、表面き裂観察など

3) 放射線影響 SCC 感受性評価試験

SCC 感受性におよぼす放射線影響は環境因子に限定できる。さらに、環境因子の中では水の放射線分解によって生じるラジカルなどの酸化性物質が主体である。したがって、本来であれば、放射線源を用いた環境系での試験・評価することが望ましいが、第一義的には、酸化剤の添加、もしくは外部電源を用いて電位を付与した SCC 試験で代替できる。

しかしながら、照射線量とステンレス鋼の電位との関係は必ずしも定量的な知見が得られていない。すなわち、炭素鋼の中性自然水中の電位が浸漬直後から安定して、多くの測定者でも測定値が一致しているのに対して、ステンレス鋼の電位は直前研磨などを施した新生面では電位が低く、数百時間かけて上昇して平衡電位に達するが、局部腐食の発生によって電位は低下する、などの複雑な挙動を示す。したがって、放射線影響によるステンレス鋼の電位の上昇は、実験上の制約条件と合わせて、試験要領をより詳細に検討する必要がある。

さらに、気相中の電位を計測することは可能[55]であるが、気相部では外部電源による電位の付与が不可能で、環境側を制御した SCC 試験を実施する必要がある。

以上のことから、放射線影響 SCC 感受性評価試験は、a. 放射線影響によるステンレス鋼の電位の上昇試験、b. 放射線影響を模擬した酸化性環境における浸漬 SCC 試験、および、c. 放射線影響を模擬した酸化性環境における気相部 SCC 試験、の3つに大別され、優先度に応じて実施を検討する。

a. 放射線影響によるステンレス鋼の電位の上昇試験

大阪府大の照射炉を用いた炭素鋼の腐食におよぼす放射線の影響試験[56]は、直径 1mm、長さ 146mm の鉄線を直径 6mm のコイル状に巻いた電極(接液面積：4.6cm²)などを照合電極とともに外径φ30mm のステンレス鋼製照射容器に挿入し、水深 5m、液温が 22～32℃ のプール底に設置した ⁶⁰Co 線源に差し込み、32～35kG/h のガンマ線照射を 3 日間実施している。したがって、ステンレス鋼の照射下の電位の測定に際しても、同様の制約下で実施することが前提となるであろう。今後、実施に向けて詳細な検討と調整が必要である。

b. 放射線影響を模擬した酸化性環境における浸漬 SCC 試験

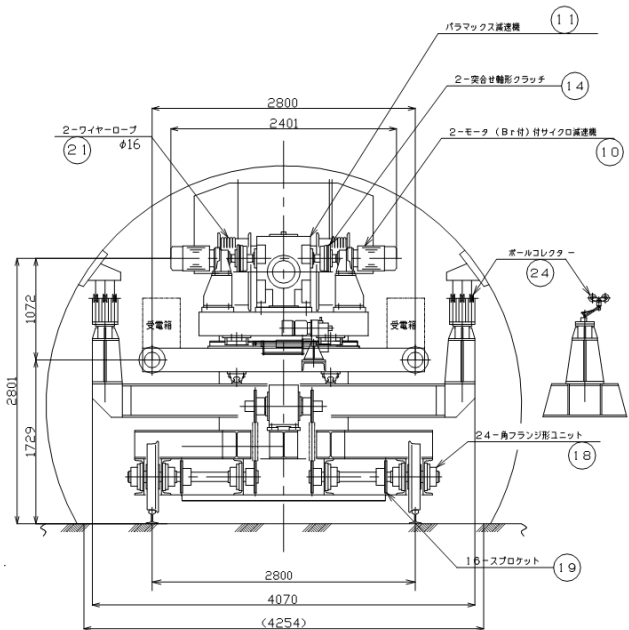
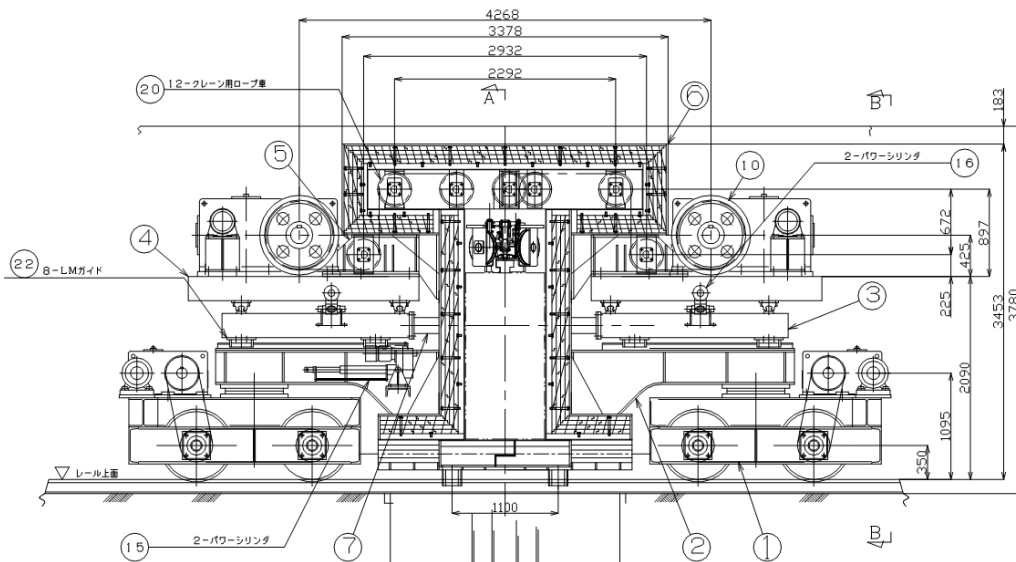
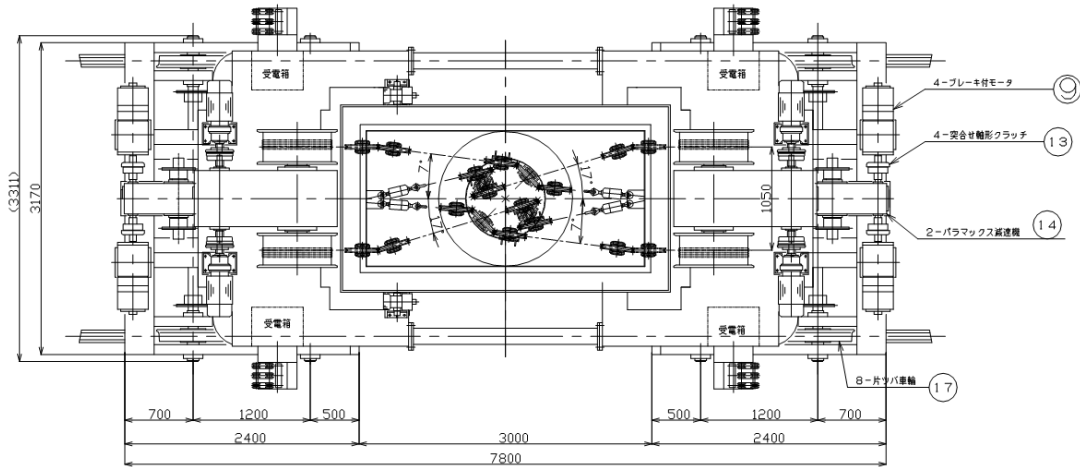
放射線影響を模擬した酸化性環境における浸漬 SCC 試験は、塩水 SCC 感受性試験に際して、試験溶液中に過酸化水素(H₂O₂)、オゾン(O₃)などの酸化剤を添加するか、もしくは外部電源を持ちいて、上で求めた放射線影響によって上昇するステンレス鋼の電位になるように調整すればよい。これら酸化剤は温度による分解が激しく、開放系の高温下で高酸化性を維持することは難しい。逆に言えば、照射による水の放射線分解の影響も、高温・開放下では、寄与が少ないと推測される。なお、放射線影響を模擬した酸化性環境における気相部 SCC 試験にあわせて実施する必要がある。

c. 放射線影響を模擬した酸化性環境における気相部 SCC 試験

放射線影響を模擬した酸化性環境における気相部は、密閉容器の下に張った水溶液中にオゾン(O₃)を吹き込み、もしくは、気相中を通気させることによって、気中、もしくは、気液界面に設置した試験片の表面に生じた結露水に気中の O₃ を溶存させて、高酸化性を実現する。気中の電位は計測可能であるが、気中の O₃ 濃度、電位の安定性は良くない。さらに、吹き込むオゾン濃度、量との対応性に乏しいため、フィードバック制御にはならないと見込まれる。なお、O₃ はアルカリ性の溶液には溶存し難いため、下に張る水溶液をアルカリ性にしたほうが気相部の O₃ 濃度が高い試験ができる。ここで、十分に電位が上昇して過不働態域に到達すると、粒界腐食感受性を示し脱粒を起こすため、過度な試験条件にならないよう留意する必要がある。

(3) 添付資料

付録A: オーバーパック定置装置の設計例[57]



参考文献

- [1] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：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 4 分冊）－処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術の開発－、平成 25 年 3 月
- [2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 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 4 分冊）－自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発－、平成 26 年 3 月
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター、放射性廃棄物ハンドブック（平成 24 年度版）（2012）
- [4] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度 地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査 報告書（1/3）、平成 18 年 3 月
- [5] Alfred Haack “Design fire scenarios”, Thematic Network FIT - Fire in Tunnels, Technical report – Part1, European Community (2001).
- [6] 原子力発電環境整備機構「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）」NUMO-TR-11-01 (2011).
- [7] 核燃料サイクル開発機構 「地下空洞の力学的安定性評価（研究報告）」JNC TN8400 99-037 (1999).
- [8] 核燃料サイクル開発機構「地層処分場設計のための地質環境基本特性」JNC TN8400 99-053(1999 年 11 月)、p.54
- [9] 核燃料サイクル開発機構：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、第 2 次取りまとめ、1999 年
- [10] NIST ホームページ：<http://www.nist.gov/>
- [11] Fire Dynamics Simulator ホームページ：<http://code.google.com/p/fds-smv/>
- [12] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 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－（1/2）、平成 23 年 3 月
- [13] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 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－、平成 20 年 3 月
- [14] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 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－（1/2）、平成 21 年 3 月
- [15] F. Larsson et al. “Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests” J. Power Sources 271, pp.414-420 (2014).
- [16] H. Ingason “Design fire curves for tunnels” Fire Safety Journal 44, pp.259-265 (2009).
- [17] Verbundprojekt SKRIBT “Schutz kritischer Bruecken und Tunnel im Zuge von Strassen; Bauwerksbezogene Objektanalyse: Tunnel”, oeffentliche Fassung, VDI Technologiezentrum GmbH, Duesseldorf（ドイツ語）
- [18] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等委託費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 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2）、平成 25 年 3 月
- [19] 日本建設学会：鋼構造耐火設計指針（2008）
- [20] Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2
- [21] 株社 IHI・清水建設株式会社「平成 25 年度地層処分技術調査等事業（処分システム工学確証技術開発）のうち 自然火災に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発－人工バリアの限界性能等に関するデータ取得－」報告書(2014 年 2 月)（非公開）
- [22] R.Siegel, J.R.Howel Thermal Radiation Heat Transfer 3rd edition, Hemisphere Publishing Corporation 1992
- [23] P.Maul et al. “EBS Evolution Calculations using QPAC-EBS: A Progress Report for Work undertaken in 2008” QRS-3008C-1, Quintessa (March 2009)
- [24] 日本機化学会 「伝熱工学資料」改訂第 5 版（2009）
- [25] R.Siegel, J.R.Howel Thermal Radiation Heat Transfer 3rd edition, Hemisphere Publishing Corporation 1992

- [26] R.Hansen, H.Ingason “Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine”, Maelardalen University, Research Report 2013.2
- [27] 高治一彦, 鈴木英明: 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041 (1999)
- [28] 並河努, 菅野毅: 緩衝材の圧密特性, 動燃技術資料, PNC TN8410 97-051 (1997)
- [29] ISO 834-8:2002、Fire-resistance tests -- Elements of building construction-Part 8: Specific requirements for non-loadbearing vertical separating elements
- [30] 日本機械学会: 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005年度版) <第 I 編 軽水炉規格>、JSME S NC1-2005 (2005)
- [31] 中山 元、藤原寛明、第 51 回材料と環境討論会、B305、腐食防食協会 (2004).
- [32] 九州電力株式会社: 川内原子力発電所 1、2 号炉の耐津波設計方針に基づく施設評価について (案)、2014 年
- [33] 原子力発電環境整備機構: NUMO 技術開発成果報告会 2014~地層処分の技術的信頼性を支える技術~技術開発成果の定期的な取りまとめテーマ 3: 技術包括的技術報告書の作成方針および骨子の紹介、(2014 年 6 月)
- [34] 日本原燃株式会社: 再処理事業所廃棄物管理事業変更許可申請書本文及び添付書類 平成 22 年 10 月 20 日変更申請 <平成 23 年 1 月 20 日一部補正> (平成 24 年 1 月 6 日一部補正) (2012)
- [35] 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第 4 版 (1986)
- [36] T. Sugawara, J. Katsuki, T. Shiono, S. Yoshida, J. Matsuoka, K. Minami, E. Ochi. High-temperature heat capacity and density of simulated high-level waste glass Journal of Nuclear Materials 454 (2014) 298-307
- [37] European Committee for standardization: Eurocode2 Design of concrete structures Part1-2: General rules –structural fire design. (2004)
- [38] 電力中央研究所報告、T87042、キャニスタ-材の耐久性評価-大気腐食割れにおよぼす温度および鋭敏化の影響-、昭和 63 年 3 月.
- [39] 中山 元、配管技術、2011.12、p.33、日本工業出版
- [40] G. Nakayama, Proceeding Volume 932, Paper No.105, Material Research Society (2005)、化学工学会編、塩化物 SCC 対策鋼使用実績データ集、化学工学会(1997)、明石正恒、第 56 回腐食防食シンポジウム資料、腐食防食協会、p.1 (1984). をもとに中山 元が作成
- [41] R.S. Grass, R.A. Van Konynenburg, G.E. Overturf, CORROSION’86, Paper No. 258, NACE International (1986).
- [42] 機械システム振興協会、機械システム等のメンテナンス最適化のための高度メンテナンス技術開発に関するフィージビリティステディ、18-F-1、(財)エンジニアリング振興協会 (2007).
- [43] 天谷 尚、幸 英昭、金属、65,1053(1995).
- [44] 中山 元、榊原洋平、IHI 技報、51、No.4、p.48-54 (2011).
- [45] G. Nakayama, M. Akashi, and A. Ohtomo; ISIJ International, 31, 223 (1991).
- [46] 中山 元、明石正恒、材料と環境、48、162、腐食防食協会 (1999).
- [47] 中山 元、榊原洋平、材料と環境 2008 講演予稿集 A309、大宮、腐食防食協会(2008).
- [48] 腐食防食協会 63-2 分科会、防食技術、39、641-652 (1990).
- [49] 中山 元、第 50 回材料と環境討論会講演予稿集、B-211、腐食防食協会 (2003).
- [50] 中山 元、福田則敬、明石正恒、腐食防食’93、p.415 (1993).
- [51] 菊池保正、江口 真、山本真靖、消防技術安全所報、45、p.114-118 (平成 20 年)
- [52] 中山 元、榊原洋平、材料と環境、62,117-121、腐食防食学会(2013).
- [53] 中山 元、榊原洋平、中野 敦、押川 渡、第 57 回材料と環境討論会講演予稿集、p.245 (2010).
- [54] G. Nakayama, Proc. of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Vol. 932, Paper No.105, MRS (2005).
- [55] 中山 元、榊原洋平、水庭直樹、第 61 回材料と環境討論会講演予稿集、p.429-432 (2014).
- [56] 井出原龍一、井上博之、小嶋崇夫、岩瀬彰宏、第 61 回材料と環境討論会講演予稿集、p.227-230 (2014).
- [57] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター「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－遠隔操作技術高度化調査－ (2/2)」 (2000). (http://www.numo.or.jp/approach/houkokukai/pdf/houkokukai20140623_07.pdf)

第5章 平成26年度のまとめと今後の課題

5.1 はじめに

本開発は、東北地方太平洋沖地震を受け、事業主体が実施する地層処分施設の設計に反映すべく、主に処分事業操業中の処分システムに対する大規模な自然災害の影響を検討し、安全確保のための対策技術を開発・提示することを目的とするものである。

平成26年度は下記(1)～(3)について調査・検討を行った。

- (1) 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討
- (2) 火災事象に対する安全確保対策の検討
- (3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験

本章では、上記の各実施項目についての検討成果と今後の方針について述べる。

5.2 平成26年度のまとめ

5.2.1 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討

本調査・検討では、事業継続性の確保も考慮したうえで、地層処分施設における安全対策に対して、自然災害全般に対する安全対策（技術要件）について整理を行い、昨年度までに整理した技術開発課題、対策技術がどこに該当するのか整理し、新たな安全対策（技術要件）について検討を行った。

(1) 操業期間中の安全確保と技術要件

操業期間中の安全確保に対する実施主体（NUMO）の考え方を整理した上で、放射線安全と一般労働安全の確保に向けた安全対策および各安全対策を確保する上での対象となる構成要素の整理を図った。さらに、事業中の安全の確保に対する技術要件を整理した。

(2) 放射線安全の確保に向けた安全対策の動向

技術要件の整理を受け、地層処分施設と同様にガラス固化体を扱う施設である再処理施設・廃棄物管理施設、また、取り扱う廃棄物の種類がガラス固化体とは異なるが地下の施設を有する原子力関連施設として第二種廃棄物埋設施設の関係法令法、および最新の情報として福島第一原子力発電所の事故以降に施行された再処理施設、廃棄物管理施設、第二種廃棄物埋設施設の新規制基準における放射線安全に関する考え方について調査・整理した。

地層処分施設の操業中の放射線安全対策は、地上及び地下施設での閉じ込め・遮へい・放射線管理対策、地上施設を介した周辺監視区域外への気体・液体放出管理方法、およびこれらの通常時・事故時の安全評価手法については、今回調査した

類似施設の法令・指針に定められた既設の方法により対応可能と考えられる。一方、作業中の地下施設での放射性物質の漏洩や移行の管理・監視あるいは放出管理については、地下処分場に特有のものであり先行類似施設である第二種廃棄物埋設施設での検討事例等を参考に、今後開発すべき課題と考えられる。

(3) 災害発生に着目した安全対策の必要技術

地層処分施設の事業期間中の一般労働安全確保に関わる構成要素と技術要件との関係性について考察を加え、安全に係る必要技術を例示した。さらに、一般労働安全に係る必要技術の検討にあたり、日常的に把握しておくべき事項と災害時の対応事項の双方の技術検討が必要であると考えられることから、平常時と災害時の区分で検討の流れを模式図に示した。また、災害の発生・拡大の防止の「防火対策」に着目し、まず地下坑道における火災等の状況を検討の出発点に、安全確保までの流れを、模式図に示した。

また、東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波による甚大な被害発生を契機に、原子力災害からの公衆安全に係る防災計画が原子力発電所を抱える自治体において策定されつつある。このことから、一般労働安全確保に資する情報として、原子力防災の現状として、原子力防災に係る法令等を整理するとともに、原子力災害特有の対策や事業者から行政に対する対応と初期対応段階における緊急防護措置について調査・整理を図った。

(4) 安全対策技術の考え方と評価方法に対する考察

最新の知見などを踏まえて、はじめに安全対策技術の枠組みを構築している。構築した安全対策技術の枠組みは、処分システムを物理的なスケールで区分して、整理したものである。さらに、安全対策技術を選択する際に必要となる評価方法について、一般的な施設における安全性の捉え方を踏まえ、安全性を客観的に判断する方法について検討を加えている。また、これらの検討により構築した枠組みに対して、自然災害に対する安全対策技術の抽出と整理を図った。

5.2.2 火災事象に対する安全確保対策の検討のまとめ

本章では、平成 25 年度の事前解析の結果を踏まえて、立坑・処分坑道等を含めた地下処分施設を対象とした三次元解析実施時の計算負荷の低減や、換気設備の特性および坑道の形状を考慮した風量等を検討した。また、気流解析と避難シミュレーションの本解析を実施し、火災事象等に対する作業員の安全性確保に向けた検討を行った。本年度の調査・検討項目は以下 3 項目である。

- ① 通気解析に関する数値解析技術の検討
- ② 地層処分施設の解析条件の設定
- ③ 解析の実施

以下に、それぞれの実施項目に関するまとめを述べる。

(1) 通気解析に関する数値解析技術の検討

流体の力学特性に着目し、その運動を司る物質の運動を表現する式を整理し、地層処分施設で活用する数値解析技術（支配方程式、離散化法）について整理・検討を行った。

本検討の気流解析では、地下施設の風量、風速、温度、圧力の変化を定常流・非定常流（火災時）で検討することを考慮し、支配方程式については、オイラーの微分方程式もしくはナビエ・ストークスの式が壁面付近の渦を表現でき、坑道内の空気の流れを表現するのに適していると判断した。オイラーの微分方程式とナビエ・ストークスの式を比較した場合、式の特性上、ナビエ・ストークスの式は壁面付近の流れの表現も可能であり、分流・合流地点や切羽が存在する地下処分パネルの局所的な検討にはナビエ・ストークスの式が適していると考えた。

離散化法では、以下の利点を考え有限体積法を用いることとした。

- a. 形状の制約が少なく粗いメッシュでも各種の保存則が成り立つ
- b. 積分形であるため特性が大きく変化する様な領域でも矛盾のない解が得られる
- c. 流れを力学的に扱う

以上を踏まえ、支配方程式がナビエ・ストークスで、かつ有限体積法を用いることができる解析ソフトとして「VENTMINE」を選定した。

(2) 地層処分施設の解析条件の設定

地層処分施設の形状については、既往の資料から形状、寸法を設定し、形状等から通気用の立坑が各パネルに整備が予定されているため、パネル毎に通気が独立していると仮定し、解析の対象とするパネルを建設中パネル、定置中パネル、埋戻しパネルから 1 つに絞り込むこととした。解析の対象となるパネルについては、掘削中の坑道があり、作業員がいる建設中パネルを対象とした。通気解析及び火災影響評価を行うにあたって必要な風量（風速）、坑内温度、酸素濃度、二酸化炭素濃度の閾値を導き出すため、労働安全衛生規則、新版・ずい道等建設工事における換気技術指針などを参考に整理した。また、換気技術指針による風速 0.5m/s を確保することにより、処分坑道にいると仮定した作業員の必要呼気量を確保できることを確認し、建設中パネルに必要な風量を算出した。

平成 25 年度の検討結果より、3次元解析の膨大な計算格子数が影響して計算時間が 2 週間程度／1 ケースと長時間を必要とした。これを受けて、1次元モデル化が可能な部分について検討を行い、気流の乱れが小さい個所を 1次元モデルとし、分合流部などの気流の乱れが大きい個所を 3次元モデルとし、モデル化を行った。

(3) 解析の実施

解析の実施にあたっては、建設中パネルに必要な風量を送った場合の連絡坑道、

主要坑道、処分坑道の通気状態を確認し、強制的に通気する必要がある箇所を確認した。

その結果、分岐部において検討した風速が確保できないこと、また処分坑道内へ空気がほとんど流れないことが分かった。そこで分岐部等において局所ファンの設置を想定し、通気を強制的に誘導することとした。たとえば、建設完了の処分坑道では、全てダクトで繋いで“一筆書き”の方法で通気すると仮定して解析することにより、必要な風量を抑えることとした。また、建設途中の処分坑道では、入気口からダクトを繋いで通気を確保すると仮定し、解析した。

建設途中の処分坑道 13 本の真ん中にあたる 7 本目の処分坑道の切羽付近で、CETu 標準火災曲線に則った火災を発生させ、火災時の熱・煙の拡散状況を確認した。一酸化炭素濃度、二酸化炭素濃度、酸素濃度の拡散分布では、比重の違いにより、比重が軽い一酸化炭素が最も坑道上面で拡散しやすいことを確認することが出来た。熱の拡散については、発火直後から坑道上面に熱が拡がるという熱影響を確認した。

処分坑道の切羽付近で火災が発生したと想定し、隣接する処分坑道の作業員が順次避難を開始するという避難シミュレーションを実施し、確認した。また、搬送装置などの障害物を想定した狭い通路を通過する場合を再現するため、扉を設けて解析したところ、単位時間に通過する作業員の数が低下することに伴う避難速度の低下や避難完了率の低下を解析で確認した。

5.2.3 人工バリアの限界性能等の調査・試験のまとめ

地層処分事業操業中の異常状態や事故の影響を緩和するためには、その時の人工バリアの状況を適格に評価し、人工バリアの状況に応じたより適切な対策を施す必要がある。このような観点から、人工バリアの限界性能等の調査・試験として、平成 26 年度は以下の 3 項目について検討を行った。

- (1) 地下施設で火災発生を想定した人工バリアの影響解析
 - (2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握
 - (3) 津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査
- それぞれの実施項目に関するまとめと今後の課題は以下の通りである。

(1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

燃焼解析では、バッテリーパックの表面からエチレンが放出されると仮定し、発熱曲線を設定した。しかしながら、解析結果による発熱量は、風速 2.0m/s と設定した場合でも 20MW ほど下回った。原因は、昨年度のプールファイヤー（可燃性液体が流出し、平面上に燃え広がること）でも見られたように、多量な燃料に対して局所的に酸素濃度が足りず、燃料が燃焼することなく計算領域から流出したことによるものと考えられる。また、燃焼が一時的に収まり換気によって十分な酸素が供給されると燃焼が活発化し、発熱量が目標曲線に近づいてくることが確認でき

た。

風速が速いと炎が坑道の全断面に広がっており、風速が大きくなることにより坑道内の気流が大きく乱れるためである。また、風速が遅いと可燃ガスが上流に流れ込んで燃えてしまうため、定置装置の前でもガスの温度が上がる原因となる。したがって、今回の解析では、流速が遅い場合は燃焼ガスが浮力によって天井に上がり、そこから広がっていく。また、流速が速ければ、燃焼ガスが気流によって下流に流されることを確認した。

伝熱解析分では、火災によるオーバーパックへの入熱は蓋上面からが主であるため、伝熱解析ではオーバーパック蓋上部の温度上昇が顕著である解析結果となった。特に、蓋上部が局所的に $1,000^{\circ}\text{C}$ 超となる部位が見られた。また、 $1,000^{\circ}\text{C}$ 超の最高温度到達時におけるオーバーパックの胴部の温度は、上部近傍の領域を除くと 200°C 以下であり、ガラスの温度上昇は約 1.5°C にとどまった。

応力解析では、温度分布に伴って生じる熱応力が胴部にもみられるが、火災後に初期温度分布に戻ると、蓋部近傍を除いて初期応力分布に近い状態に戻ることがわかる。初期状態と比べて最も応力分布に変化が見られた蓋部近傍は、火災前は溶接部近傍だけが溶接収縮していることで蓋外周部が圧縮応力場になっていたものが、火災の入熱による蓋部の温度上昇が胴部に比べて著しく大きく、蓋部全体に周方向圧縮塑性ひずみが入ることで、蓋部の圧縮応力が大きく緩和されたことが主因と思われる。

また、本年度の検討では溶接部に溶接残留応力を初期応力として導入しているため、溶接のルート部において 422MPa 程度の等価応力が生じている。これは、溶接金属部の収縮ひずみが蓋外周部に拘束され、大きな周方向引張応力が生じていることが主たる原因となっているが、蓋外周部は火災の入熱により熱膨張するため、溶接ルート部の周方向引張応力が大きくなり、等価応力は 438MPa 程度まで上昇することがわかった。

(2) 地上施設で火災発生を想定したガラス固化体キャニスタの特性データの取得

今年度計測した SUS304L の降伏応力 (0.2% 耐力)、ヤング率、および線膨張係数のデータを平成 25 年度の火災解析に使用した SUS304L の材料データと比較した結果、ヤング率と線膨張係数は、平成 25 年度の解析に使用した値、およびその線形外挿値に近いが、降伏応力については本年度の計測値の方が解析に用いた降伏応力よりも高いという結果であった。

(3) 地上施設に津波が流入した場合のガラス固化体キャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理

津波の被害を受けることにより、ガラス固化体キャニスタ下部で海水の浸漬、ガラス固化体キャニスタ上部で海洋性湿潤大気環境になる一方、放射線分解によっ

て 50～80℃程度まで加熱されるとともに酸化性が高まる可能性がある。海水および海洋性湿潤大気環境下でステンレス鋼は、孔食、すきま腐食感受性を示す。さらに、材料、環境、応力の 3 条件が整った場合に SCC が発生・進展する。30℃(室温)～80℃の温度域で海水相当濃度の塩化物の水溶液環境および海塩付着があれば、SCC を起こし得ることが文献などで報告されている。また、海水の方が空気よりも熱伝導性が良いため、海水に浸漬しているほうが温度の上昇が大きく、温度解析の結果より没水部(海水中)では 300 時間後に 60℃、600 時間後に 70℃に到達するが、非没水部(大気中)では 700 時間後に 60℃に到達し、その後の温度上昇も遅い。気相部での湿潤大気 SCC 発生寿命は海水水没環境よりも低い、気液界面の高濃度塩化物が高温・中湿度状態でさらに濃縮して SCC 感受性が高まることが危惧される。

これら文献で示された塩化物水溶液中の鋭敏化ステンレス鋼の SCC 発生寿命におよぼす各種加速因子依存性と、今回の温度解析で得られた代表点の到達温度の経時変化から、解析上の最高温部である固化体 B (液面高さ、換気無し) の場合、標準的な SUS304(0.05% C)が、溶接によって Ra=20%に強く鋭敏化していれば約 400 時間で SCC が発生すると推算される。通常の溶接継手部での高めの鋭敏化度である Ra=10%で 2、000 時間、鋭敏化型の SCC を起こし得る下限界鋭敏化度程度の Ra=5%で 14、000 時間程度であった。

SUH309 の場合 0.5 倍、SUS309S では 2 倍、SCC 対策材の SUS304L で 5 倍の寿命改善が見込まれる。すなわち、鋭敏化していなければ SCC 発生までに 1 年半～数年の猶予があるが、鋭敏化の程度に応じて SCC 発生までの寿命が縮まり、SUH309 が強鋭敏化していれば数十～200 時間で SCC が発生する可能性がある。

5.3 今後の課題

5.3.1 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討

今後、事業期間中の操業安全の確保に向けた安全対策技術について、先行類似施設での検討事例などを参考にしつつ、客観的な判断を加えることにより、技術調査や研究開発を効率的かつ効果的に進めていく一助になるものと考えられる。

5.3.2 火災事象に対する安全確保対策の検討

有限体積法は、数値拡散(発散)を生じやすく、本解析的検討においても解を算出するのに多大な時間・労力を要した。今後、コンピュータの処理速度の向上に伴い計算速度は速くなっていくことになるが、地下処分施設の規模は大きく、精度を良くするためには、格子数を緻密に整備する必要がある。また、地下処分施設は日々建設をすすめているため、形状が変わるとともに火災の発生場所も特定できないものではないため、

多くのパターンの解析をする必要が出てくる。したがって、求める結果により支配方程式や離散化などの組み合わせを適切に判断し、計算速度の負担軽減を図る必要がある。

今回の解析では、鉱山等を参考に坑道換気を前提に 13 本の切羽に適切な風量を送るため、主要坑道、連絡坑道等の風速が大きくなる結果となった。火災等により風上側に作業員が退避する場合は、風速が大きくなると障害となるため、安全確保の観点からは課題が残る結果となった。また、多くの風量を送るため設備や維持するための電力等については、考慮していないため検討が必要と考える。

5.3.3 人工バリアの限界性能等の調査・試験

(1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

地下施設での搬送・定置作業は電動機械の検討が進んでいるため、電池による火災を検討した。但し、本解析は適用した仮定が小規模で行われた燃焼実験結果から概算した条件に基づいた。燃焼実験は容量 100Wh の電池で行われ、その結果を自動車用 10kWh のバッテリーパックへの概算としている。但し、ここでは定置装置用の電池容量が 1300kWh の規模であり、自動車の 130 倍、実験で使われた電池の容量を 4 桁ほど超えてしまう。したがって、電池火災における発熱量は予測精度に疑問が残る。より大規模の試験で取得されたデータを用いて、本解析に用いた条件の妥当性を確認する必要がある。

ディーゼルエンジンを原動力とする機械によるトンネル火災が研究されている。Hansen らによれば、ディーゼルエンジン機械の発熱量は 100MJ 程度である。今回の電池火災は発熱量が 100GJ と概算され、ディーゼルエンジン機械を 3 桁ほど上回った。

したがって、定置装置を設計するにあたっては、電動式及びディーゼルエンジン式の火災による発熱量について、より精度の高い調査・検討が必要と考える。

また、昨年度の検討結果を踏まえて、以下の項目が課題と考えられる。

- ① ガラス固化体キャニスタ内のガス圧を考慮した応力解析
- ② 溶接残留応力低減処理を施したオーバーパックが火災に遭った時の応力解析
- ③ ガラス固化体キャニスタおよびオーバーパックの健全性評価手法の検討

(2) 地上施設で火災発生を想定したガラス固化体キャニスタの特性データの取得

今回材料試験に供した SUS304L の試験材は、キャニスタに用いる鋼材から採取したわけではなく、一般的に入手可能な材料から試験体加工して試験材として供したものである。今後、キャニスタの応力解析および強度評価を行う際には、キャニスタに供する材料の機械的特性値（降伏応力、応力-ひずみデータ）を適正に把握し、解析を行う必要があると思われる。また、平成 25 年度のガラス固化体キャニスタの応力解析の再解析も課題であると思われる。

(3) 地上施設に津波が流入した場合のガラス固化体キャニスタの腐食環境（温度）条件設定に関する情報収集・整理

30～80℃の温度域で海水相当濃度の塩化物の水溶液環境および相応の海塩付着があれば、SCC を起こし得ることが文献などで報告されているが、これら文献のデータは、特定の 1 因子をパラメータとする一方、残りの因子はそれぞれ何らかの加速条件で試験された結果であることが多い。また、通常の実験室試験では環境の温度試験片の表面温度が同一であるが、実機環境においては機器の表面温度とそれに接する環境の温度が異なることが普通で、機器表面の乾燥状態が維持されれば腐食環境が整わないため、SCC 感受性を示さない場合がある。したがって、津波腐食へ展開するためには、実機環境の解析結果に基づき、環境と試験片の温度差などを考慮した塩水 SCC 感受性評価試験計画、放射線影響 SCC 感受性評価試験計画を立案し、試験を実施した上で評価する必要がある。

1) 材料、冷間加工と溶接、および、鋭敏化

ガラス固化体キャニスタ材は、SUH309、SUS309S および SUS304L を対象とする。汎用オーステナイトステンレス鋼 SUS304 に対して、耐熱鋼の規格である SUH309 および SUS304 よりも耐食性が高いが主として耐熱鋼として用いられる SUS309S は非腐食性環境で用いられることが多く、耐食性や耐 SCC 感受性のデータはほとんど報告されていない。すなわち、これら SUH309、SUS309S の腐食・SCC データは、返還廃棄物の貯蔵時に想定されるリスク回避のために調査・検討されたものが大部分であり、乾式貯蔵を念頭に置いた海塩付着環境における定常的な恒温恒湿度環境および湿式貯蔵を念頭に置いた極低濃度塩化物に制御された水溶液(使用済燃料貯蔵プールレベル)環境でのすきま腐食、SCC 感受性の評価がなされ、その一部が公開されているに過ぎない。一方、SUS304L は SCC 対策材としての用途であることから多くの研究がなされているが、それでも、報告例は SUS304 と比較して格段に少ない。津波影響で想定される環境での実験データに基づく評価はなされていないことから、当該材料の試験が必要である。

2) 塩水 SCC 感受性評価試験

温度解析の結果、固化体 B が 1/2 の高さまで海水に浸漬した時の気液界面での温度は 100 時間後に 50℃、300 時間後に 60℃、600 時間後に 70℃と上昇し、文献などで示された SCC 発生寿命予測モデルに基づいた解析をした結果、各温度での鋭敏化 SUS304 ステンレス鋼の海水相当の 3.5% [NaCl] 環境における SCC 発生寿命は鋭敏化の程度に依存して、数十時間～数千時間の範囲になることが推算された。

一方、海水に浸からない気相部の温度上昇は緩やかであるが、付着海塩と結露水によって濃厚塩化物環境(数 g/m²[NaCl]もしくは塩滴/飽和塩化物溶液)が成立する可能性があり、同じ程度の SCC 発生寿命を有すると予見される。特に、気液界面では塩が濃縮しやすいため、厳しい環境が成立する可能性がある。特に、

海洋性湿潤大気環境では、 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ などの非 Na 塩が吸湿して低湿度まで腐食環境が維持されるため、海水に少量含まれるこれらの Mg 塩や Ca 塩の寄与が大きいことが知られており、実際に人工海水や苦汁などを用いた試験・評価が主流となっている。しかしながら、SUH309/SUS309S に対しては、これらの想定環境での公表ベースの SCC 感受性を評価したデータがない。したがって、塩水 SCC 感受性評価試験を実施する必要がある。

3) 影響 SCC 感受性評価試験

SCC 感受性におよぼす放射線影響は環境因子に限定できる。さらに、環境因子の中では水の放射線分解によって生じるラジカルなどの酸化性物質が主体である。したがって、本来であれば、放射線源を用いた環境系での試験・評価することが望ましいが、第一義的には、酸化剤の添加、もしくは外部電源を用いて電位を付与した SCC 試験で代替できる。

しかしながら、照射線量とステンレス鋼の電位との関係は必ずしも定量的な知見が得られていない。すなわち、炭素鋼の中性自然水中の電位が浸漬直後から安定して、多くの測定者でも測定値が一致しているのに対して、ステンレス鋼の電位は直前研磨などを施した新生面では電位が低く、数百時間かけて上昇して平衡電位に達するが、局部腐食の発生によって電位は低下する、などの複雑な挙動を示す。したがって、放射線影響によるステンレス鋼の電位の上昇は、実験上の制約条件と合わせて、試験要領をより詳細に検討する必要がある。

さらに、気相中の電位を計測することは可能であるが、気相部では外部電源による電位の付与が不可能で、環境側を制御した SCC 試験を実施する必要がある。

以上のことから、放射線影響 SCC 感受性評価試験は、以下の 3 つに分類され、優先度に応じて実施を検討する。

- a. 放射線影響によるステンレス鋼の電位の上昇試験
- b. 放射線影響を模擬した酸化性環境における浸漬 SCC 試験
- c. 放射線影響を模擬した酸化性環境における気相部 SCC 試験、