

平成 27 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 5 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 28 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

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成 27 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開発成果を取りまとめたものである。

報告書の構成

平成 27 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 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
	第 4 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 5 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 はじめに	1-1
1.1 処分システム工学確証技術開発	1-1
1.1.1 背景および目的	1-1
1.1.2 研究開発項目の相互関係と年度目標	1-1
1.1.3 平成 27 年度の実施内容	1-4
1.2 本開発に係る背景および目的	1-6
1.2.1 本開発の背景	1-6
1.2.2 本開発の目的	1-6
1.3 検討の基本方針	1-7
1.3.1 地層処分施設における安全の確保について	1-7
1.3.2 災害リスクに対する考え方について	1-7
1.3.3 検討対象とする期間について	1-8
1.3.4 検討方針	1-9
1.4 平成 24 年度の成果概要[8]	1-10
1.4.1 地層処分施設と類似した施設の調査	1-10
1.4.2 検討対象の選定	1-10
1.4.3 状況設定	1-10
1.4.4 異常状態や事故への対策に関わる技術課題の抽出	1-10
1.4.5 対策技術の調査と開発に関わる試験項目の抽出	1-11
1.5 平成 25 年度の成果概要[9]	1-12
1.5.1 5 年間の研究計画の立案	1-12
1.5.2 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討	1-13
1.5.3 人工バリアの限界性能等の調査・試験	1-14
1.5.4 状況把握・監視技術に係る調査・検討	1-15
1.6 平成 26 年度の成果概要	1-15
1.6.1 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討	1-15
1.6.2 火災事象に対する安全確保対策の検討	1-16
1.6.3 人工バリアの限界性能等の調査・試験	1-17
1.7 平成 27 年度の開発の概要	1-19
1.7.1 平成 27 年度の実施内容	1-19
1.7.2 平成 27 年度の成果概要	1-19
参考文献	1-24
第 2 章 安全対策を検討するための条件整理、検討	2-1
2.1 はじめに	2-1

2.2 安全対策の考え方	2-2
2.3 自然災害による起因事象と地層処分施設の状況の整理.....	2-4
2.3.1 地上施設を対象とした起因事象の選定.....	2-4
2.3.2 地下施設を対象とした起因事象の選定.....	2-6
2.4 安全対策技術の検討.....	2-7
2.4.1 最終的な状況設定の考え方の検討.....	2-7
2.4.2 最終的な状況の検討.....	2-8
2.4.3 最終的な状況の分析・整理.....	2-15
2.5 安全対策技術の整理.....	2-19
2.5.1 安全対策技術の抽出方法	2-19
2.5.2 地上施設に関わる最終的な状況への対策の検討.....	2-21
2.5.3 地下施設に関わる最終的な状況への対応の検討.....	2-24
2.6 取り組むべき内容	2-28
参考文献	2-32
第3章 自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討	3-1
3.1 はじめに.....	3-1
3.2 検討概要.....	3-2
3.3 操業安全確保の考え方の提示.....	3-4
3.3.1 一般労働安全の確保に向けた国内外の動向	3-5
3.3.2 供用中のトンネルにおける安全確保に向けた動向	3-15
3.3.3 放射性物質取扱い施設の安全確保に向けた国内外の動向	3-17
3.3.4 地層処分における操業時の安全確保の原則的な考え方の検討.....	3-27
3.4 操業安全対策の検討.....	3-28
3.4.1 深層防護の考え方に応じた各安全対策技術の特徴	3-29
3.4.2 処分施設のスケールと安全対策技術との関係.....	3-31
3.4.3 安全対策技術の特徴の整理.....	3-33
3.5 操業安全対策の効果の検討.....	3-41
3.5.1 信頼性工学による安全対策の効果の示し方に対する一考察.....	3-41
3.5.2 リスクアセスメントの導入に向けた一考察	3-45
3.6 まとめ	3-54
参考文献	3-55
第4章 火災事象等に対する安全確保対策の検討	4-1
4.1 はじめに.....	4-1
4.1.1 目的	4-1
4.1.2 検討内容	4-1
4.2 坑道内の風門の効果の解析.....	4-3
4.2.1 解析対象とする風門.....	4-3
4.2.2 解析概要	4-4

4.2.3	解析結果	4-10
4.2.4	火災に関する通気解析結果の考察	4-19
4.3	自然通気の解析	4-23
4.3.1	自然通気に関する通気解析を実施する上での着眼点	4-23
4.3.2	解析概要	4-24
4.3.3	解析モデル	4-32
4.3.4	自然通気の解析結果	4-37
4.3.5	自然通気の解析結果の比較	4-65
4.4	まとめ	4-68
4.4.1	火災に関する通気解析の取りまとめ	4-68
4.4.2	自然通気の解析結果の取りまとめ	4-68
4.4.3	安全対策の効果	4-69
	参考文献	4-70
第5章	自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する 調査・検討	5-1
5.1	はじめに	5-1
5.1.1	既往の研究成果	5-1
5.1.2	今年度の実施内容	5-3
5.2	人工バリアの火災影響の検討	5-6
5.2.1	人工バリア火災影響検討対象	5-6
5.2.2	火災シナリオ設定における過酷条件の検討	5-8
5.2.3	火災影響確認のための重要項目の検討	5-10
5.2.4	人工バリアと火災の相対位置関係、風速等の影響評価（燃焼解析）	5-11
5.2.5	ガス内圧のガラス固化体キャニスタへの影響評価（伝熱解析、応力解析）	5-26
5.3	火災、津波に対する安全対策の検討	5-57
5.3.1	火災に対する人工バリア対応策の検討	5-57
5.3.2	津波に対する人工バリア対応策の検討	5-68
5.4	試験項目の検討および試験計画の作成	5-70
5.4.1	津波腐食評価に必要なデータ取得の検討	5-70
	参考文献	5-78
第6章	まとめと今後の課題	6-1
6.1	まとめ	6-1
6.1.1	自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討	6-1
6.1.2	火災事象等に対する安全確保対策の検討	6-1
6.1.3	自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する 調査・検討	6-2
6.2	今後の課題	6-4
6.2.1	自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討	6-4
6.2.2	火災事象等に対する安全確保対策の検討	6-6
6.2.3	自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する 調査・検討	6-6

目 次

図 1.1.2-1	処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係	1-2
図 1.3.3-1	検討対象とする期間（[3][4]に加筆）	1-8
図 1.4-1	対策の検討・抽出方法[8]	1-11
図 1.4.5-2	平成 24 年度に抽出した技術課題[8]	1-11
図 2.3.1-1	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[1].....	2-3
図 2.3.2-1	安全対策技術の検討手順.....	2-7
図 2.4.1-1	状況設定の検討（ガラス固化体吊上げ作業中に地震が発生した例） [2]	2-7
図 2.5.1-1	対策シートの作成例[2].....	2-20
図 2.6-1	取り組むべき内容	2-31
図 3.3.1-1	深層防護を構成する 2 つの要素[1]	3-2
図 3.3.1-2	検討フロー	3-3
図 3.3.1-1	地下施設の操業安全の検討方針[2].....	3-4
図 3.3.1-1	鉱山保安法の概要	3-6
図 3.3.1-2	火災対策設備図（その 1） [3].....	3-13
図 3.3.1-3	火災対策設備図（その 2） [3].....	3-13
図 3.3.1-4	火災対策設備図（その 3） [3].....	3-14
図 3.3.3-1	IAEA 国際原子力事象評価尺度[5].....	3-17
図 3.3.3-2	新たなシビアアクシデント対策規制の枠組みのイメージ（原子力安全・保安院） [7].....	3-19
図 3.3.3-3	原子炉施設における多重障壁の概念.....	3-24
図 3.3.3-4	ガラス固化体の廃棄物管理施設における多重障壁の概念.....	3-26
図 3.4.2-1	処分施設のスケールと安全対策技術との関係	3-31
図 3.4.3-1	安全対策技術の体系化の例	3-33
図 3.5.2-1	各スケールのリスクの抽出・整理	3-47
図 3.5.2-2	リスク対策の基本的な考え方（リスクマップ）	3-48
図 4.1.2-1	深層防護（一般労働安全）と平成 27 年度の実施内容の関係	4-1
図 4.2.2-1	風門の概要	4-4
図 4.2.2-2	ケース 1 の解析内容	4-4
図 4.2.2-3	ケース 2 の解析内容	4-5
図 4.2.2-4	ケース 3 の解析内容	4-5
図 4.2.2-5	横坑の断面形状.....	4-8
図 4.2.2-6	横坑断面のメッシュ分割.....	4-8
図 4.2.2-7	解析領域全体のメッシュ分割.....	4-8
図 4.2.2-8	ケース 1 の初期条件および境界条件.....	4-9
図 4.2.2-9	ケース 2 の初期条件および境界条件.....	4-9
図 4.2.2-10	ケース 3 の初期条件および境界条件.....	4-9

図 4.2.3-1	坑道内の温度の経時変化（風速 0.3m/s）	4-11
図 4.2.3-2	坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化（風速 0.3m/s）	4-11
図 4.2.3-3	坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化（風速 0.3m/s）	4-12
図 4.2.3-4	一酸化炭素濃度と二酸化炭素濃度の拡散状況の比較（風速 0.3m/s）	4-12
図 4.2.3-5	坑道内の酸素濃度の経時変化（風速 0.3m/s）	4-13
図 4.2.3-6	坑道内の温度の経時変化（風速 0.01m/s）	4-14
図 4.2.3-7	坑道内の一酸化炭素濃度分布の経時変化（風速 0.01m/s）	4-14
図 4.2.3-8	発火点付近での二酸化炭素濃度の経時変化（ケース 2、風速 0.01m/s）	4-15
図 4.2.3-9	一酸化炭素濃度と二酸化炭素濃度の拡散状況の比較（ケース 2、風速 0.01m/s）	4-15
図 4.2.3-10	発火点付近での酸素濃度の経時変化（ケース 2、風速 0.01m/s）	4-16
図 4.2.3-11	坑道内の温度の経時変化（風速 0.3m/s、風門設置）	4-17
図 4.2.3-12	坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化（風速 0.3m/s、風門設置）	4-17
図 4.2.3-13	坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化（風速 0.3m/s、風門設置）	4-18
図 4.2.3-14	坑道内の酸素濃度の経時変化（風速 0.3m/s、風門設置）	4-18
図 4.2.4-1	ケース 1 とケース 2 における火災時の一酸化炭素濃度の比較	4-19
図 4.2.4-2	風門設置の有無による火災時の熱・煙の拡散状況の比較	4-20
図 4.2.4-3	火災発生から 250 秒後の一酸化炭素濃度の分布	4-21
図 4.2.4-4	火災発生から 660 秒後の一酸化炭素濃度の分布	4-22
図 4.3.1-1	坑道における換気方式の種類[5]	4-23
図 4.3.1-2	自然通気圧の計算[6].....	4-23
図 4.3.2-1	自然通気に関する検討ケース概要	4-24
図 4.3.2-2	立坑坑口高さの差による解析ケース（ケース 4、5）	4-25
図 4.3.2-3	横坑の深さの差による解析ケース（ケース 6）	4-25
図 4.3.2-4	立坑底部の温度の差による解析ケース（ケース 7）	4-26
図 4.3.2-5	解析ケース 4 の初期条件および境界条件	4-28
図 4.3.2-6	解析ケース 5 の初期条件および境界条件	4-29
図 4.3.2-7	解析ケース 6 の初期条件および境界条件	4-30
図 4.3.2-8	解析ケース 7 の初期条件および境界条件	4-31
図 4.3.3-1	自然通気の解析モデルの形状定義	4-32
図 4.3.3-2	自然通気の立坑・横坑の解析モデル.....	4-32
図 4.3.3-3	立坑・横坑の断面のメッシュ数、節点数	4-33
図 4.3.3-4	立坑と横坑の接合部の課題および解決策	4-34
図 4.3.3-5	立坑（角柱）と横坑の接合部における流速の合わせ方.....	4-35
図 4.3.4-1	簡易計算（1次元）との比較	4-37
図 4.3.4-2	排気立坑側の横坑部の風速分布（ケース 4）	4-38
図 4.3.4-3	横坑の風速分布（横断面）（ケース 4）	4-39
図 4.3.4-4	立坑の風速分布（縦断面）（ケース 4）	4-40

図 4.3.4-5	入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル (ケース 4)	4-41
図 4.3.4-6	横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル (ケース 4)	4-41
図 4.3.4-7	入排気立坑の風速ベクトル (ケース 4)	4-42
図 4.3.4-8	計算対象領域の圧力分布 (ケース 4)	4-43
図 4.3.4-9	計算対象領域の温度分布 (ケース 4)	4-43
図 4.3.4-10	坑口高さ 10m (ケース 5) の概要	4-44
図 4.3.4-11	排気立坑側の横坑部の風速分布 (ケース 5)	4-45
図 4.3.4-12	横坑の風速分布 (横断面) (ケース 5)	4-46
図 4.3.4-13	立坑の風速分布 (縦断面) (ケース 5)	4-47
図 4.3.4-14	入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル (ケース 5)	4-48
図 4.3.4-15	横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル (ケース 5)	4-48
図 4.3.4-16	入排気立坑の風速ベクトル (ケース 5)	4-49
図 4.3.4-17	計算対象領域の圧力分布 (ケース 5)	4-50
図 4.3.4-18	計算対象領域の温度分布 (ケース 5)	4-50
図 4.3.4-19	ケース 6 の概要	4-51
図 4.3.4-20	排気立坑側の横坑部の風速分布 (ケース 6)	4-52
図 4.3.4-21	横坑の風速分布 (横断面) (ケース 6)	4-53
図 4.3.4-22	立坑の風速分布 (縦断面) (ケース 6)	4-54
図 4.3.4-23	入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル (ケース 6)	4-55
図 4.3.4-24	横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル (ケース 6)	4-55
図 4.3.4-25	入排気立坑の風速ベクトル (ケース 6)	4-56
図 4.3.4-26	計算対象領域の圧力分布 (ケース 6)	4-57
図 4.3.4-27	計算対象領域の温度分布 (ケース 6)	4-57
図 4.3.4-28	ケース 7 の概要	4-58
図 4.3.4-29	通気立坑側の横坑部の風速分布 (ケース 7)	4-59
図 4.3.4-30	横坑の風速分布 (横断面) (ケース 7)	4-60
図 4.3.4-31	立坑の風速分布 (縦断面) (ケース 7)	4-61
図 4.3.4-32	入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル (ケース 7)	4-62
図 4.3.4-33	横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル (ケース 7)	4-62
図 4.3.4-34	入排気立坑の風速ベクトル (ケース 7)	4-63
図 4.3.4-35	計算対象領域の圧力分布 (ケース 7)	4-64
図 4.3.4-36	計算対象領域の温度分布 (ケース 7)	4-64
図 4.3.5-1	モデルおよび入力条件の比較 (ケース 4 とケース 5 の比較)	4-65
図 4.3.5-2	ケース 7 の概要	4-67
図 5.2.1-1	ガラス固化体の形状 (日本原燃(株)仕様) [4]	5-6
図 5.2.1-2	オーバーパックの形状 [5]	5-7
図 5.2.1-3	人工バリアの熱応力解析 検討フロー	5-8
図 5.2.2-1	火災影響の原因と考慮すべき要因	5-9

図 5.2.2-2	燃焼による発熱量の消費空気量との関係[13]	5-9
図 5.2.4-1	燃焼解析モデルの概念	5-11
図 5.2.4-2	ガラス固化体及びオーバーパックの数値解析での再現	5-12
図 5.2.4-3	風速 1m/s, 燃焼範囲の幅 2m における火災	5-17
図 5.2.4-4	風速 5m/s, 燃焼範囲の幅 2m における火災	5-17
図 5.2.4-5	風速 10m/s, 燃焼範囲の幅 2m における火災	5-17
図 5.2.4-6	風速 1m/s, 燃焼範囲の幅 4m における火災	5-18
図 5.2.4-7	風速 5m/s, 燃焼範囲の幅 4m における火災	5-18
図 5.2.4-8	風速 10m/s, 燃焼範囲の幅 4m における火災	5-18
図 5.2.4-9	風速 1m/s, 燃焼範囲の幅 6m における火災	5-19
図 5.2.4-10	風速 5m/s, 燃焼範囲の幅 6m における火災	5-19
図 5.2.4-11	風速 10m/s, 燃焼範囲の幅 6m における火災	5-19
図 5.2.4-12	容器における監視（計測）点	5-20
図 5.2.4-13	容器 3 における入熱量の時間による変化（監視点①、高さ 900mm）	5-21
図 5.2.4-14	各容器への入熱量（20 秒間の時間平均 [kW]）	5-23
図 5.2.4-15	平成 25 年度実施した火災の概念（燃焼範囲の設定）	5-24
図 5.2.4-16	施設安全アセスメントの流れ	5-25
図 5.2.5-1	ガス内圧を考慮するためのガラス固化体の FEM モデル（伝熱解析）	5-27
図 5.2.5-2	ガラス固化体単体の燃焼解析モデル	5-28
図 5.2.5-3	燃焼解析結果	5-28
図 5.2.5-4	ガラス固化体への熱流束の時刻歴変化（伝熱解析の入力データ）	5-29
図 5.2.5-5	ガラス固化体の温度分布　－キャニスタとガラスの 1/2 切断図：内面側－	5-30
図 5.2.5-6	ガラス固化体の温度分布　－キャニスタとガラスの 1/2 切断図：外面側－	5-31
図 5.2.5-7	内部ガスの平均温度および圧力値の時刻歴変化	5-32
図 5.2.5-8	応力解析結果　－半径方向応力：キャニスタ内面側－	5-34
図 5.2.5-9	応力解析結果　－半径方向応力：キャニスタ外面側－	5-35
図 5.2.5-10	応力解析結果　－周方向応力：キャニスタ内面側－	5-36
図 5.2.5-11	応力解析結果　－周方向応力：キャニスタ外面側－	5-37
図 5.2.5-12	応力解析結果　－軸方向応力：キャニスタ内面側－	5-38
図 5.2.5-13	応力解析結果　－軸方向応力：キャニスタ外面側－	5-39
図 5.2.5-14	応力解析結果　－相当応力：キャニスタ内面側－	5-40
図 5.2.5-15	応力解析結果　－相当応力：キャニスタ外面側－	5-41
図 5.2.5-16	応力解析結果　－相当塑性ひずみ：キャニスタ内面側－	5-42
図 5.2.5-17	応力解析結果　－相当塑性ひずみ：キャニスタ外面側－	5-43
図 5.2.5-18	応力解析結果比較	5-44
図 5.2.5-19	応力解析結果比較	5-45
図 5.2.5-20	応力解析結果比較	5-46
図 5.2.5-21	応力解析結果比較	5-47

図 5.2.5-22	応力解析結果比較	5-48
図 5.2.5-23	応力解析結果比較	5-49
図 5.2.5-24	応力解析結果比較	5-50
図 5.2.5-25	応力解析結果比較	5-51
図 5.2.5-26	応力解析結果比較	5-52
図 5.2.5-27	応力解析結果比較	5-53
図 5.2.5-28	応力解析結果比較	5-54
図 5.2.5-29	応力解析結果比較	5-55
図 5.3.1-1	廃棄体の真上（天井 4 m 下）における温度分布.....	5-57
図 5.3.1-2	WIPP 火災発生車両[31]	5-67
図 5.4.1-1	地上施設における津波被害を想定した人工バリアの環境条件（赤枠）	5-70
図 6.2.1-1	課題（1）	6-4
図 6.2.1-2	課題（2）	6-5

表 目 次

表 1.1.2-1	平成 25 年度に策定した処分システム工学確証技術開発の成果目標	1-3
表 1.4.5-1	技術開発課題の選定と年度展開の一例[8]	1-12
表 1.5.1-1	5 年間の研究計画と成果目標	1-13
表 2.3.1-1	地上施設を対象とした起因事象の選定結果[2]	2-5
表 2.3.2-1	地下施設を対象とした起因事象の選定結果[2]	2-6
表 2.4.1-1	最終的な状況の分類[2]	2-8
表 2.4.2-1	ガラス固化体吊上げ作業における最終的な状況[2]	2-9
表 2.4.2-2	斜坑による廃棄体の搬送作業における最終的な状況[2]	2-10
表 2.4.2-3	地上施設における放射線安全に影響する最終的な状況の抽出結果[2]	2-11
表 2.4.2-4	地上施設における操業継続に影響する最終的な状況の抽出結果[2]	2-12
表 2.4.2-5	地下施設における放射線安全に影響する最終的な状況の抽出結果[2]	2-13
表 2.4.2-6	地下施設における操業継続に影響する最終的な状況の抽出結果[2]	2-14
表 2.4.3-1	地上施設における放射線安全に影響する最終的な状況の分析・整理結果[2]	2-16
表 2.4.3-2	地上施設における操業継続に影響する最終的な状況の分析・整理結果[2]	2-17
表 2.4.3-3	地上施設に関わる最終的な状況[2]	2-18
表 2.4.3-4	地下施設に関わる最終的な状況[11]	2-18
表 2.5.1-1	対策等の区分[2]	2-19
表 2.5.2-1	地上施設の検討において抽出した「応急対策」[2]	2-22
表 2.5.2-2	地上施設の検討において抽出した「対策に必要な試験・解析」[2]	2-23
表 2.5.2-3	地上施設の検討において抽出した「恒久対策」[2]	2-23
表 2.5.3-1	地下施設の検討において抽出した「応急対策」[2]	2-25
表 2.5.3-2	地下施設の検討において抽出した「対策に必要な試験・解析」[2]	2-26
表 2.5.3-3	地下施設の検討において抽出した「恒久対策」[2]	2-27
表 2.6-1	具体的な対策と技術課題	2-28
表 2.6-2	抽出した技術課題のカテゴリと具体的な対策の例	2-29
表 3.3.1-1	火災防止措置にかかわる条項[2]	3-10
表 3.3.1-2	避難にかかわる条項[2]	3-10
表 3.3.1-3	トンネル工事における坑内火災に対する安全対策[2]	3-11
表 3.3.1-4	緊急連絡設備一覧[2]	3-12
表 3.3.2-1	トンネル等級別の非常用施設[2]	3-16
表 3.3.3-1	原子力安全・保安院の深層防護レベルの考え方[7]	3-20
表 3.3.3-2	原子力安全委員会による IAEA 基準の多重防護レベルの考え方[6]	3-21
表 3.3.3-3	IAEA の深層防護のレベルとその目的および目的達成に不可欠な手段[9]	3-22
表 3.3.4-1	深層防護のレベルに応じた目標(案)	3-27
表 3.4.1-1	操業中の火災に対する放射線安全の考え方(案)	3-29

表 3.4.1-2	操業中の火災に対する一般労働安全の考え方 (案)	3-29
表 3.4.3-1	異常事象・事故の全般に対する安全対策技術 (案)	3-34
表 3.4.3-2	火災に対する安全対策技術 (案)	3-35
表 3.4.3-3	地震に対する安全対策技術 (案)	3-36
表 3.4.3-4	津波・洪水・突発湧水に対する安全対策技術 (案)	3-36
表 3.4.3-5	深層防護レベル 1 に対応する安全対策技術 (案) とその対応スケール	3-37
表 3.4.3-6	深層防護レベル 2 に対応する安全対策技術 (案) とその対応スケール	3-37
表 3.4.3-7	深層防護レベル 3 に対応する安全対策技術 (案) とその対応スケール	3-38
表 3.4.3-8	深層防護レベル 4 に対応する安全対策技術 (案) とその対応スケール	3-39
表 3.4.3-9	深層防護レベル 5 に対応する安全対策技術 (案) とその対応スケール	3-39
表 3.4.3-10	安全対策技術の分析結果一覧	3-40
表 3.5.2-1	地震に対する地上施設のイベントフローの例	3-45
表 3.5.2-2	地震に対する地下施設のイベントフローの例	3-46
表 3.5.2-3	対策上位のリスクへの対策手法例	3-49
表 3.5.2-4	対策中位のリスクへの対策手法例	3-50
表 3.5.2-5	個別対策リスクへの対策手法例	3-51
表 3.5.2-6	各対策手法の区分	3-53
表 4.2.2-1	火災の検討ケース一覧	4-5
表 4.2.2-2	ケースごとの風速値とその考え方	4-7
表 4.3.2-1	自然通気の検討ケース	4-27
表 4.3.3-1	各坑道のメッシュ数、節点数	4-36
表 4.3.3-2	検討ケース 4~7 のモデル化の結果	4-36
表 4.3.4-1	坑道内の平均風速 (ケース 4)	4-37
表 4.3.4-2	坑道内の平均風速 (ケース 5)	4-44
表 4.3.4-3	坑道内の平均風速 (ケース 6)	4-51
表 4.3.4-4	坑道内の平均風速 (ケース 7)	4-58
表 4.3.5-1	坑内風速の差の確認 (ケース 4 とケース 5 の比較)	4-66
表 4.3.5-2	ケース 4 とケース 5 の風速に関する考察のまとめ	4-66
表 4.3.5-3	坑内風速の差の確認 (ケース 4 とケース 6 の比較)	4-66
表 4.3.5-4	坑道底部の温度差による風速	4-67
表 5.1.2-1	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	5-4
表 5.2.4-1	伝熱解析に用いた熱物性値	5-16
表 5.2.4-2	容器への入熱量 (時間平均 ; 図 4.2.5-1 を参照)	5-22
表 5.3.1-1	解析結果 (ケース 1、ケース 2、ケース 3)	5-58
表 5.3.1-2	解析結果 (ケース 4)	5-58
表 5.3.1-3	人工バリアへの影響防止、軽減策 (地上施設)	5-64
表 5.3.1-4	人工バリアへの影響防止、軽減策 (地下施設)	5-66

表 5.4.1-1	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(平成 26 年度 成果).....	5-71
表 5.4.1-2	SUH309/SUS309S、および SUS304L の化学組成(分析例).....	5-72
表 5.4.1-3	環境因子のまとめ.....	5-74
表 5.4.1-4	SCC 感受性評価試験の供試材等による材料評価マトリックス(案)	5-75
表 5.4.1-5	塩水 SCC 感受性試験マトリックス(案)	5-76

第1章 はじめに

1.1 処分システム工学確証技術開発

1.1.1 背景および目的

(1) 本事業の背景

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。

(2) 本事業の目的

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ことを目的とする。

(3) 本事業の構成

本事業は以下の 5 つの研究開発項目で構成されている。

1) 処分システム工学確証技術開発

- a) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
- b) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- c) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- d) モニタリング関連技術の整備

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

1.1.2 研究開発項目の相互関係と年度目標

(1) 研究開発項目の相互関係

図 1.1.2-1 に処分システム工学確証技術開発の全体概要と検討課題の関連を示す。人工バリアを構成する要素には、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材がある。人工バリアに要求される機能は、ガラス固化体、オーバーパックまたは緩衝材のそれぞれが単独で達成できるものではない。各要素が相互に影響をおよぼし合い、人工バリアシステムとしての要求機能が達成される。仮に一つの人工バリアが機能を満たさなくなれば、人工バリアシステム全体としての機能が損な

われる可能性がある。

一般的な構造物とは異なり、地層処分の人工バリアは供用後（埋設後）の検査や必要に応じた補修を行うことが想定されていない。供用後の検査や補修を必要とせずに人工バリアの健全性を確保するためには、想定される劣化や破損事象を考慮した設計を行い、製作・施工の個々のプロセスで品質管理を実施する必要がある。そして、各プロセスで品質が保証されていることを判断するための指標は、人工バリア構成要素の相互の影響や不確実性を考慮できる健全性評価により設定される必要がある。一方で、人工バリアの健全性評価のためには、モニタリング技術を用いて処分場の環境条件を把握する必要がある。また、処分場操業時のモニタリングにより、人工バリアの健全性に対する信頼性を向上させることができると考えられる。さらに、処分場閉鎖の判断要因の一つとして、処分場の環境条件が想定した範囲内にあることをモニタリングで確認することも必要になると考えられる。そのためには、人工バリアおよびモニタリングに関する個別および境界の課題を抽出し、相互に共有され検討を進める必要がある。さらに、処分場操業期間中に自然災害が発生すれば、その影響により人工バリア機能が低下することも考えられる。処分場の安全確保のためには、必要に応じて災害への対策技術を開発し、人工バリアの限界性能について把握しておくことが重要となる。ただし、この安全対策により人工バリアシステムの機能が低下するようなことがあってはならない。人工バリアの限界性能を把握するためには、個々の人工バリアの特性だけでなく、システム全体としての機能について総合的に検討する必要がある。また、その機能低下を推定するためには、測定すべきパラメータについての検討や、人工バリアシステムの健全性に影響をおよぼさないモニタリング方法の開発が必要となる。したがって、長期間の健全性を有する人工バリアシステムの工学的実現性を示すためには、オーバーパック、緩衝材、モニタリング、自然災害に対する安全対策の4つの検討項目について、それぞれの境界にある課題や個々の成果などを共有しつつ研究開発を進める必要がある。

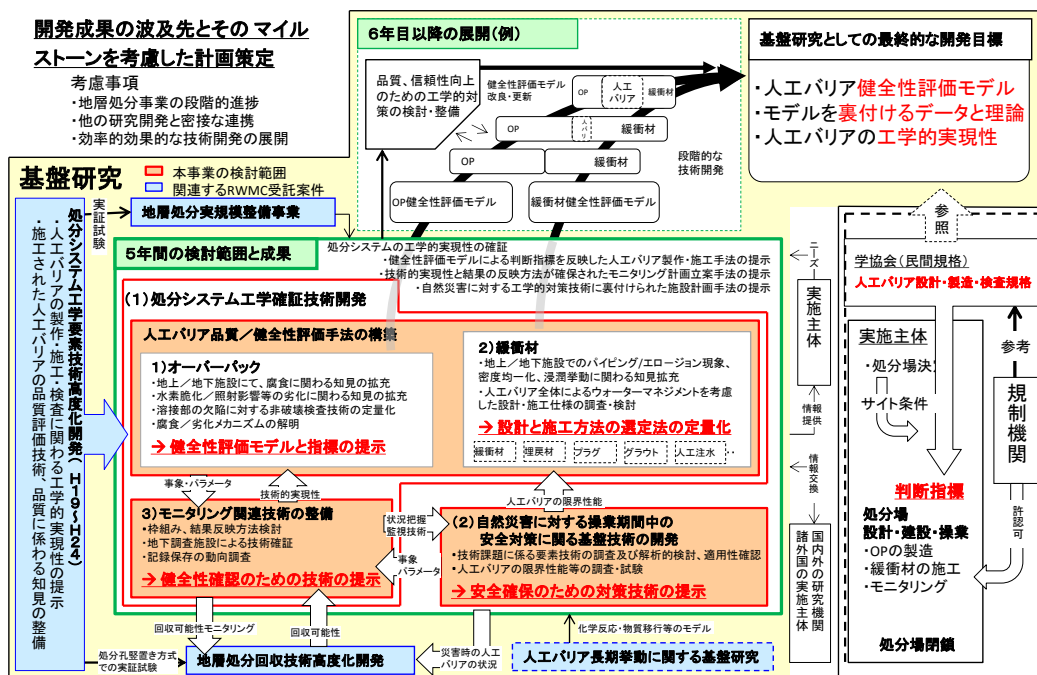


図 1.1.2-1 処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係

(2) 年度毎の成果目標

本研究開発のための年度毎の成果目標を表 1.1.2-1 に示す（追而 年度毎の成果目標は、今年度の研究開発に関する中間評価結果を反映し、必要に応じて更新する予定である）。

表 1.1.2-1 平成 25 年度に策定した処分システム工学確証技術開発の成果目標

		H25	H26	H27	H28	H29
(1) 処分システム工学確証技術開発						
	1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーバック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	<ul style="list-style-type: none"> ・品質評価／健全性評価手法の提案 ・説明性のある長期健全性判断指標の提示
	2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象（流入量、液種）の定量化	・ウォーターマネジメント（人工注水、グラウト等）の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	
	3) モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	
(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		・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備	・地下施設の操業安全確保のための制約事項等の提案

5年間の成果目標

処分システムの工学的実現性の確証

- ・健全性評価モデルによる判断指標を反映した人工バリア製作・施工手法の提示
- ・技術的实现性と結果の反映方法が確保されたモニタリング計画立案手法の提示
- ・自然災害に対する工学的対策技術に裏付けられた施設計画手法の提示



1.1.3 平成 27 年度の実施内容

平成 25 年度に立案した 5 か年計画の 3 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、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 26 年度は、地上及び地下研究施設でのオーバーパック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した。また、計算コードを用いてオーバーパックへのガラス固化体からの照射線量を取得するとともに、オーバーパックの脆化が、長期健全性に影響するか否かを判断するための方法について検討した。さらに、材料の欠陥については、非破壊検査による欠陥寸法測定精度向上に関する検討を実施した。

平成 27 年度は、地下研究施設を活用したオーバーパック溶接部耐食性試験を継続実施するとともに、機械的強度に対する材料劣化や溶接欠陥を考慮した健全性評価手法について検討を実施する。また、緩衝材との境界条件を考慮したオーバーパックの健全性評価に関する検討を実施する。さらに、腐食評価と構造評価を合わせて、オーバーパックの健全性確保のための判断指標の具体化を進める。

2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

平成 26 年度は、地下研究施設および地上でのパイピング／エロージョンに関する試験を開始し、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した。その結果に基づき、人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資するデータを整備した。

平成 27 年度は、再冠水時の処分環境を考慮した緩衝材の挙動評価のために、これまでに実施されている地上での試験結果などと比較しつつ、地下研究施設を活用した試験データに基づく緩衝材の流出等の挙動及び工学的対策の効果について検討を行う。また、緩衝材の設計・施工仕様の策定に資する判断指標の具体化に向けて検討を進める。

3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築のため、人工バリアの定置後に曝される多様な環境条件を考慮した遠心力模型実験と数値解析を通じ、数値解析手法・実験結果の妥当性や実験データの取得方法を検討する。

平成 27 年度は長期挙動データ（数百年相当）を取得するための研究開発計画を策定する。数値解析については長期挙動を評価するための熱－力学－水理連成解析コードを用いて、次年度以降実施する長期挙動を考慮した数値解析に先立ち、パラメータの感度解析と要素試験を通じ必要な解析パラメータの取得を行う。遠心力模型試験については、策定した試験計画に基づいて試験を実施する。

4) モニタリング関連技術の整備

平成 26 年度は、バリア性能の確認に対するモニタリング結果の反映方法について検討を実施するとともに、操業期間中の安全性および廃棄体の回収可能性に関連するモニタリングについて検討を実施した。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について、見直しを含む整備を実施した。さらに、地中無線モニタリング技術については、地下研究施設における適用試験等を実施し、技術的成立性を実証した。記録保存に関しては、引続き OECD/NEA における検討状況の調査を継続実施した。

平成 27 年度は、人工バリアの健全性に関わる状態の把握・確認について、確認対象となる項目と結果の反映方法を検討する。なお、検討においては海外の研究事例についても調査する。また、人工バリアの健全性に対する信頼性を向上させるため、適用技術に関する整理を行うとともに、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性試験等を継続して実施し、埋設後の状態把握の実現に向けた検討を実施する。さらに、記録保存に関して引き続き 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

平成 26 年度は、処分パネルの解析モデルによる気流解析及び避難シミュレーション解析を実施し、火災事象等に対する安全確保対策の検討にあたっての解析的手法の適用性等を検討し、火災事象等に対する安全確保対策の検討課題を整理した。また、火災等により高温履歴を受けた人工バリア材料の力学的な物性値実験により取得し、また津波被害を想定したキャニスタの腐食評価のための温度条件を解析により取得した。

平成 27 年度は、平成 26 年度までに行った解析及び検討の結果に基づき、操業安全に関わる施設計画技術については、抽出された課題に対する具体的な対応策の検討と取りまとめを行う。また、自然災害等による人工バリアへの影響については、想定した災害事象に対する評価手法についての適用性の検討と整理を行う。

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、「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、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平成 24 年度に抽出した。そこで、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 27 年度では、平成 25 年度に作成した 5 ヶ年で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画に基づいて、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」に対しては、一般労働安全の観点から火災発生時における評価手法の適用性について検討しており、今年度は火災に対する安全対策の検討を行うものである。また、「人工バリアの限界性能等に係る調査試験」では、放射線安全の観点から昨年度に引き続き火災・津波発生時を想定した人工バリアへの影響手法の検討、解析を踏まえた安全対策の検討および解析に必要となるデータの試験計画を作成するものである。

1.3 検討の基本方針

1.3.1 地層処分施設における安全の確保について

実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）では、事業期間中の安全確保の対象を「放射線安全の確保」、「一般労働安全の確保」、「周辺環境の保全」としている[3]。

本開発では、検討の第一段階として災害発生直後の「放射線安全の確保」、「一般労働安全の確保」の観点から災害を受けた直後の人工バリアへの影響や作業員への被害について状況を把握する方法、必要となるデータ、状況を把握した上で考えられる安全対策について検討を行うものである。災害直後の状況を把握することは、安全対策の検討へ導くだけでなく、復旧方法や回収方法を検討する上で必要となる情報となるものである。

また、災害を受けた施設、坑道に対して続けて使用していくための検討（事業の継続性）、人工バリアが被害を受けたとして、健全性が確保されていると確認（人工バリア長期安全性）についても安全の確保を検討する上で必要な事項ではあり、次の段階で取り組むべき事項と考えている。

1.3.2 災害リスクに対する考え方について

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]。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]。

災害による「想定外の事象」では、火災、落盤、湧水（津波を含む）等の複合的な事象が考えられるが、第一段階として単体での事象で検討を行い、次の段階で複数の事象による検討を行うものとする。

1.3.3 検討対象とする期間について

本開発では、主に処分施設閉鎖前までの処分手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「処分手業操業中」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 1.3.3-1）[3][4]。

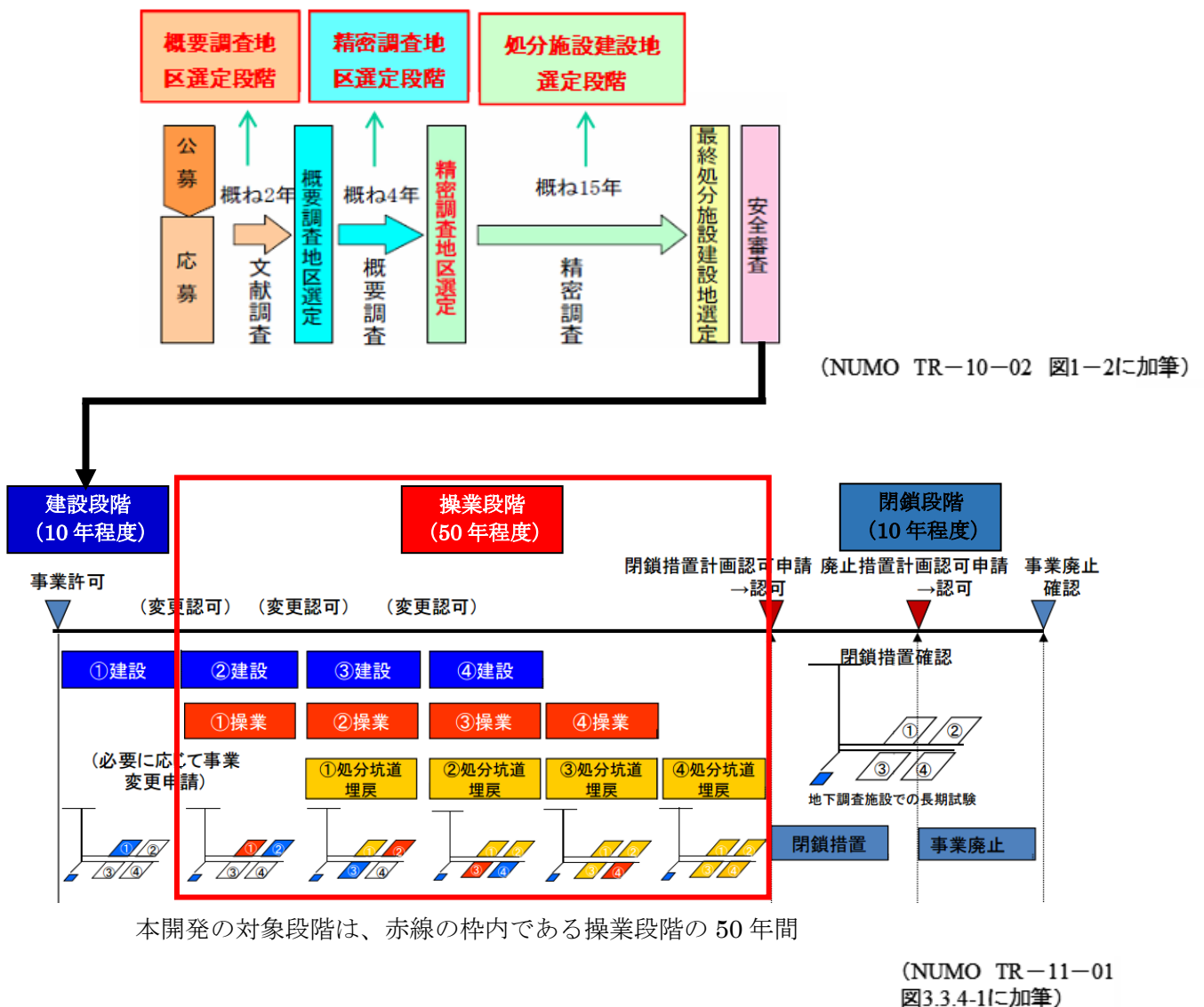


図 1.3.3-1 検討対象とする期間 ([3][4]に加筆)

1.3.4 検討方針

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。原子力災害において回避すべき状態とは、「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」、「作業員の生命に危険が及ぶ」ことをクライシスと捉え、この状態を回避、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対策を実施したとしても、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：Business continuity planning（以下 BCP という））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

起回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、その後の対策や影響緩和策の検討に重きを置くことを特徴としている。

<工学確証の5か年に実施する内容>

- ①地層処分施設における安全性を確保する上で取り組むべき事項の検討・提示
- ②火災、水害（津波・湧水）、落盤による単体での放射線安全、一般労働安全影響を把握する方法の検討・提示、必要なデータの取得
- ③火災、水害（津波・湧水）等による安全対策の検討・提示

<上記以降に取り組むべき内容>

- ①災害発生後に事業の継続を確認するために取り組むべき事項の検討・提示
- ②災害の影響を受けた人工バリアに対する長期の安全性を確認するために取り組むべき事項の検討・
- ③火災、水害（津波・湧水）、落盤等による複合事象が発生した場合の安全対策の検討・提示等

1.4 平成 24 年度の成果概要[8]

1.4.1 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。

1.4.2 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。

1.4.3 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。

1.4.4 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 1.4-1）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 1.4.5-2)。

1.4.5 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 1.4.5-1)。

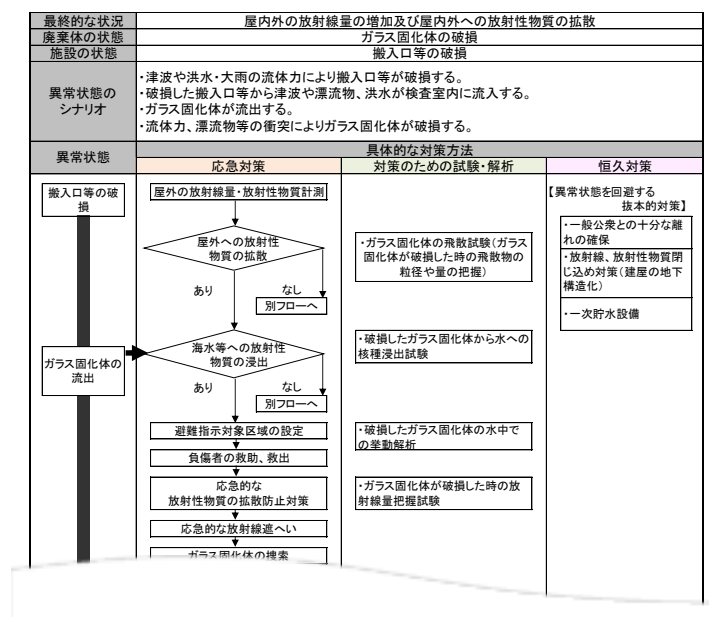


図 1.4-1 対策の検討・抽出方法[8]

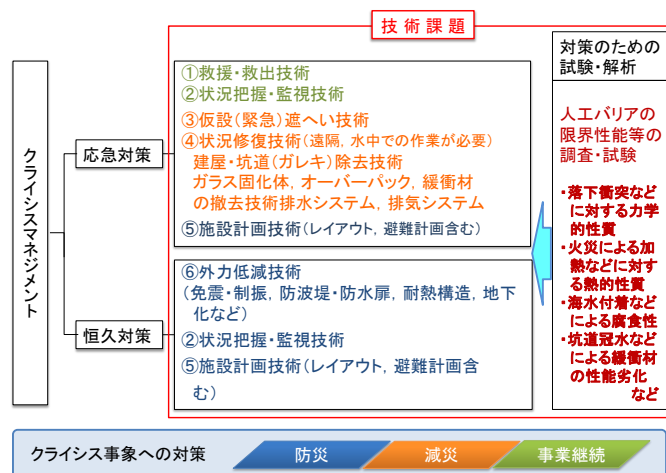


図 1.4.5-2 平成 24 年度に抽出した技術課題[8]

表 1.4.5-1 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]

1.5.1 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 5 年間の研究計画と各年度の成果目標を示した。

表 1.5.1-1 5年間の研究計画と成果目標

		H25	H26	H27	H28	H29
①	5年間の研究計画立案	計画立案		進捗確認・計画更新		
② 「施設計画技術」に係る調査・検討						
I	調査・研究計画	操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討計画の具体化		H25、26の成果を踏まえた計画		
	調査・解析的検討等の実施	検討条件の設定等	避難シミュレーション、気流解析等	処分パネルにおける異常状態や事故(冠水や落盤事象など)を想定した調査・検討の継続		
③ 人工バリアの限界性能等の調査・試験						
I	調査・研究計画	熱的性質、キャニスタの腐食性の調査・試験計画の具体化		H25、26の成果を踏まえた計画		
	調査・解析的検討・試験等の実施	熱的性質の調査・試験(火災影響の解析的検討、緩衝材の熱特性試験等) 塩分影響を考慮(津波被害を想定)したキャニスタの腐食性の調査・検討		火災影響の評価と対策のまとめ 塩分影響の評価と対策のまとめ		人工バリアの力学的性質や水理的性質などに係る調査・試験の実施
④ 「状況把握・監視技術」に係る調査・検討						
I	調査・研究計画	調査計画の具体化				
	調査・検討の実施	異常時の状況把握手順の整理等	既存技術、使用条件の整理等	既存技術の地層処分への適用性の調査・検討		
⑤	防災計画に係る調査・検討		・類似施設等の既存計画の調査・分析 ・防災計画策定に係る課題の検討		・計画の構成や定めるべき事項・骨子の考え方の提示 ・時期区分の設定の考え方の提示	
⑥	中長期的展望に立った技術開発試験等の継続的実施			・上記④～⑤の項目についての技術開発試験等の継続・検証・救出技術の技術開発成果の取まとめと適用性の検討 ・自然課題の災害時の人工バリア等の状況や健全性の把握・評価に係る調査・検討等		
各年度の成果目標		・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・状況把握・監視手順の提示	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備	・地下施設の操業安全確保のための制約事項等の提案

1.5.2 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なこと、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。

1.5.3 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、平成26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。

1.5.4 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 年度の成果概要

1.6.1 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討

(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。

1.6.2 火災事象に対する安全確保対策の検討

(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。

1.6.3 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

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

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。

1.7 平成 27 年度の開発の概要

1.7.1 平成 27 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

地上、地下における操業期間中の自然災害（地震、津波、ガスなど）に対する安全確保を図るため、多重（深層）防護の考えに基づいた地層処分施設の操業期間中における安全確保について検討を行った。

自然災害による火災・冠水・落盤などのリスクに対する安全対策の考え方、方法について過年度までの整理を踏まえ、多重防護の考え方との関連性について検討を行った。

(2) 火災事象等に対する安全確保対策の検討

平成 25 年度および平成 26 年度の検討成果を踏まえ、火災事象に対する安全対策を整理・検討し、施設計画の基盤技術として提案する項目を抽出した。

検討した火災事象に対する安全対策について通期の確保、火災による煙・熱等の影響について把握するために必要な解析を行い、地層処分施設に適用する場合の条件及び安全対策の効果、課題等について検討した。

(3) 自然災害等における人工バリアへの影響評価に関する調査・検討

平成 25 年度および平成 26 年度の成果を踏まえ、火災事象に対する人工バリアへの影響について整理・検討を行い、過年度の解析で設定した条件に加えて重要と考えられる条件を抽出し、人工バリアの火災影響解析を実施するとともに、火災や津波に対する人工バリアへの影響を防止・軽減する対策について整理・検討した。

また、平成 28 年度以降に取得すべきデータの試験計画を作成した。

1.7.2 平成 27 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

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、基本方針を記述するとともに、平成 24 年度～平成 26 年度の成果と平成 27 年度の開発概要を示した。

2 章 自然災害における地層処分施設の開発状況のまとめ

平成 24 年度～平成 26 年度の成果を基に、自然災害による起因事象と地層処分施設の状況、

安全対策技術の検討を行うとともに、取り組むべき対策技術、内容を技術課題として整理し、具体的な対策を例として示した。

3章 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討のまとめ

原子力発電所等での深層防護の考え方を操業中の安全の原則的な考え方として取り入れ、平成 26 年度で検討した自然災害に対する地層処分施設の安全の技術要件に組み入れることにより、操業中の安全対策技術の体系化を例示した。

4章 火災事象に対する安全確保対策の検討のまとめ

火災事象に対する安全対策のうち、風門と自然通気に着目して解析的検討を行い、風門はよる火災影響の拡散防止に効果があること、立坑坑口に高低差をつける、立坑底部に温度差をつけることによ自然通気が得られることを示した。

5章 自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する調査・検討のまとめ

人工バリアに対する火災影響因子を再整理し、燃焼解析に関わる火炎と人工バリアとの相対位置関係や坑内風速等による人工バリアへの入熱量の相違を、そして伝熱解析/応力解析に関わるガス内圧のガラス固化体キャニスタへの影響を定量的に示した。

6章 まとめと今後の課題

平成 25 年度～平成 27 年度の 3 年間のまとめを行うとともに、課題点を示した。

(2) 成果概要

図 1.7.1-1～図 1.7.1-3 に本報告書の第 3 章から第 5 章の検討成果の概要を示す。

レベル	原子力標準における対応	本業務での対応（案）	備考
レベル1	異常運転や故障の防止	異常事象を発生させない (通常操業)	通常作業
レベル2	異常運転の制御及び故障の検知	異常事象の検知および拡大防止 (異常発生)	検知と初期対応
レベル3	設計基準内への事故の制御	放射能を漏らさない (異常拡大)	漏えい防止
レベル4	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和を含む過酷なプラント状態の制御	放射能を施設外へ出さない (構内漏えい)	事故の防止
レベル5	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	放射線影響の緩和 (坑外漏えい)	事故の影響緩和

操業中の安全に対する深層防護のレベルに応じた操業中の安全に対する考え方

防護レベル	目的（状態）	目的達成に不可欠な手段	対策例（火災）	防護レベル	目的（状態）	目的達成に不可欠な手段	対策例（火災）
レベル1	異常事象を発生させない (通常操業)	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	作業前点検教育・訓練多重化	レベル1	災害、故障を起こさない (通常作業)	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	定期点検教育・訓練多重化
レベル2	異常事象の検知および拡大防止（異常発生）	異常の検知、機能維持の防護策	通報設備 消火設備 風門	レベル2	災害、故障の検知および拡大防止 (災害発生)	災害、故障の検知、消火対策	通報設備 消火設備 風門など
レベル3	放射能を漏らさない（異常拡大）	容器内での閉じ込め	換気制御 防火扉	レベル3	作業員の人命確保 (災害拡大)	災害の隔離 退避、坑外避難	換気制御 (自然通気) 防火扉 避難経路
レベル4	放射能を施設外へ出さない (事故の防止)	施設内での閉じ込め	除去フィル 隔離壁 避難経路	レベル4	環境影響の緩和 (サイト外への災害拡大)	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難
レベル5	放射線影響の緩和 (坑外漏えい)	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難				

放射線安全

一般労働安全

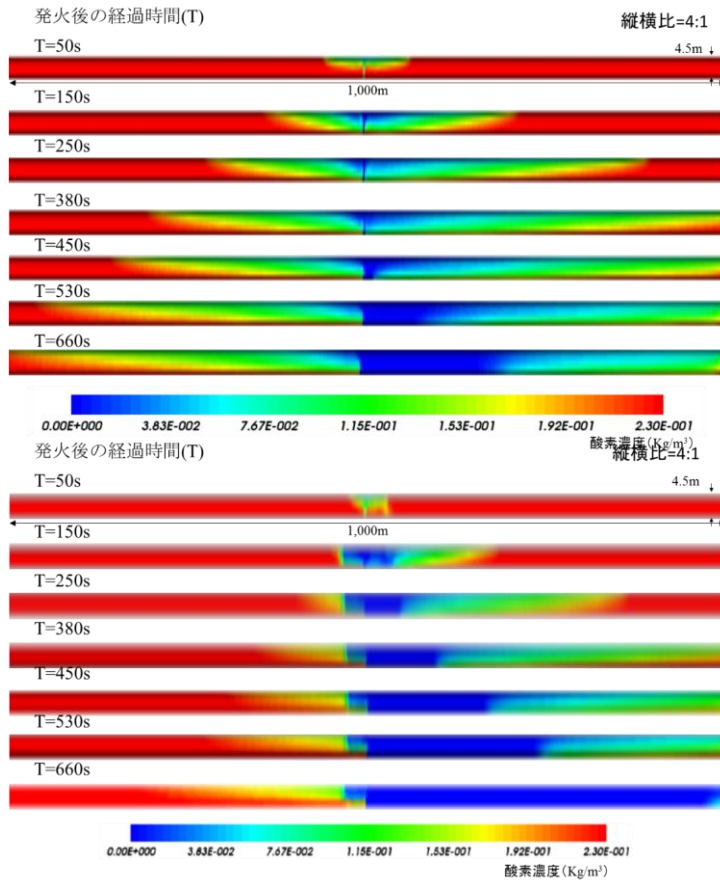
操業中の火災事象に対する安全対策の例



安全対策技術の体系化の例

図 1.7.1-1 「第3章 操業安全を考慮した技術要件の調査・検討」成果概要

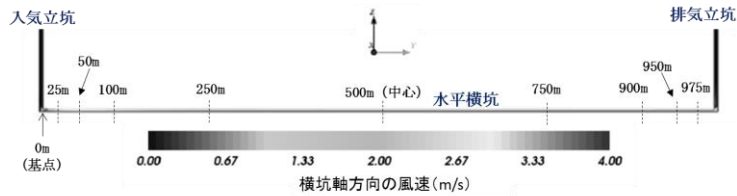
(1) 防火扉、風門の効果の検討



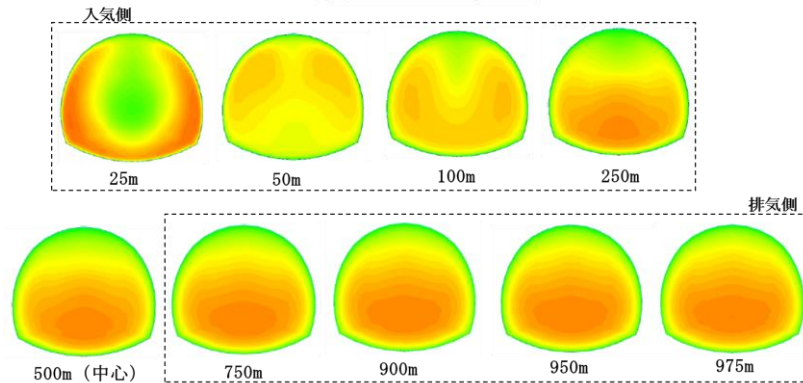
火災影響拡散の経時変化
 (酸素濃度)
 風門のない場合

火災影響拡散の経時変化
 (酸素濃度)
 風紋がある場合

(2) 自然通気の場合



入気立坑と排気立坑の
 坑口高低差 50mの場合
 水平横坑の風速分布



立坑および横坑の
 平均風速

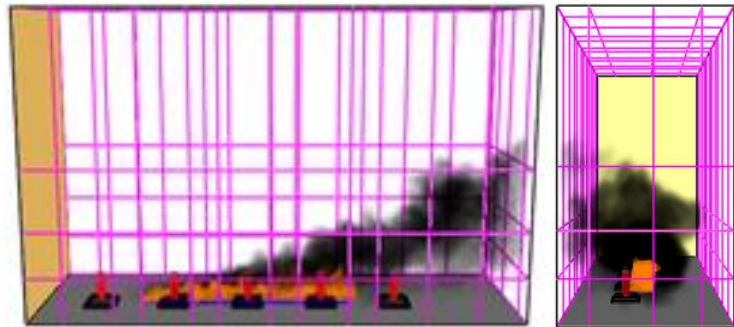
場所	横断面の 平均風速(m/s)
①入気立坑の中央(-150m)地点	1.62
②排気立坑の中央(-125m)地点	1.67
③横坑中央(+500m)地点	3.0

図 1.7.1-2 「第 4 章 火災事象等に対する安全確保対策の検討」 成果概要

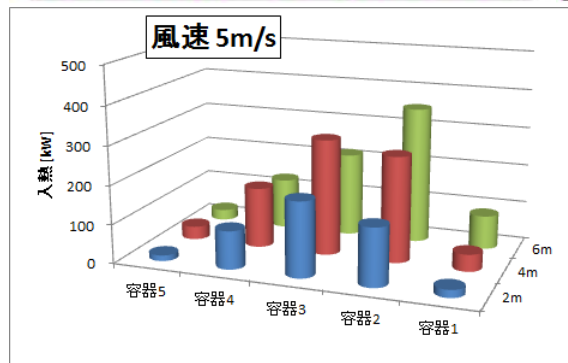
(1) 火災シナリオ設定における過酷条件の検討

過酷条件として、燃焼範囲、対象物の位置、風速について解析を実施し、過酷な条件を整理

燃焼範囲と対象物の配置



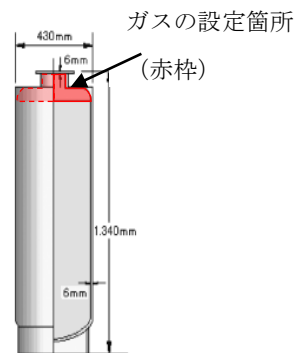
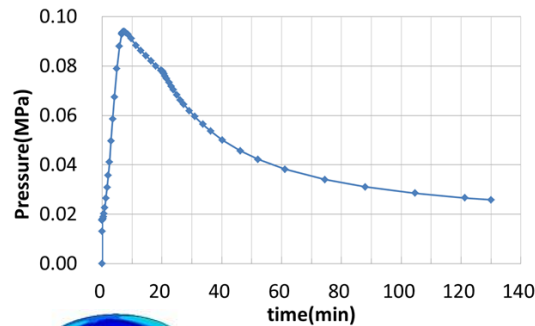
風速と位置における熱量の影響



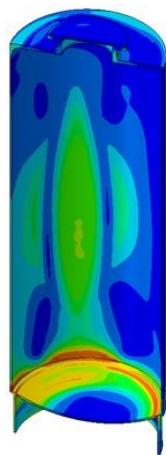
(2) ガスの内圧を考慮した解析

ガスの膨張による内圧の上昇を考慮した、放射線安全の検討を実施

火災に伴う圧力の経時変化



内圧を考慮していない応力分布



内圧を考慮した応力分布

スカート部の付け根で応力が最大

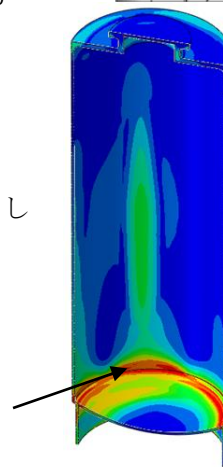


図 1.7.1-3 「第 5 章自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する調査・検討」成果概要

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 安全対策を検討するための条件整理、検討

2.1 はじめに

地層処分の特徴から、長期にわたる処分事業、安全規制を段階的な意思決定を経つつ進めて行く上では、地層処分の特徴を念頭におきつつ、常に最新の知見に基づくセーフティケース構築とそれに基づく意思決定が図られるように、幅広い分野・課題に対する基盤的な研究開発を長期的かつ戦略的な視点をもって進めていくことが重要となる。

また、原子力発電に伴って必然的に生じる放射性廃棄物の処分は、公益性が極めて高く、国民全体の利益から見ても重要な課題である。さらに、地層処分の安全確保の長期性と処分事業の長期性、それに伴って国の監督や規制についても長期的な関与が必要になることを踏まえれば、国として先導性と継続性をもって研究開発を推進する役割を担い、地層処分計画の着実な進展のための知見を整備していくことが重要である。

特に、放射性廃棄物分野の研究開発は、長期的な安全確保に力点が置かれており、操業期間中の運用、維持管理、安全対策等に対する検討が進められておらず、本研究開発において安全対策について着手し始めた段階である。国の基盤研究開発が先行的に新技術や新知見を創出しつつ技術の信頼性・成立性を提示することにより、将来の技術的・社会的な不確実性を低減させることにより、事業の円滑化につなぐことができると考える。

地層処分施設の操業時の安全対策技術の選択は、安全確保方針とそれに基づく安全確保戦略の立て方によって異なり、安全確保戦略の立案は実施主体が行うことになる。一方、安全確保戦略の有効性を確認するのは規制機関の責務である。これに対し、本研究開発は、安全確保戦略を立てる際に必要となる安全対策技術の情報および規制機関が安全性を確認する際に必要となる情報を蓄積していくことを目的とする。

2.2 安全対策の考え方

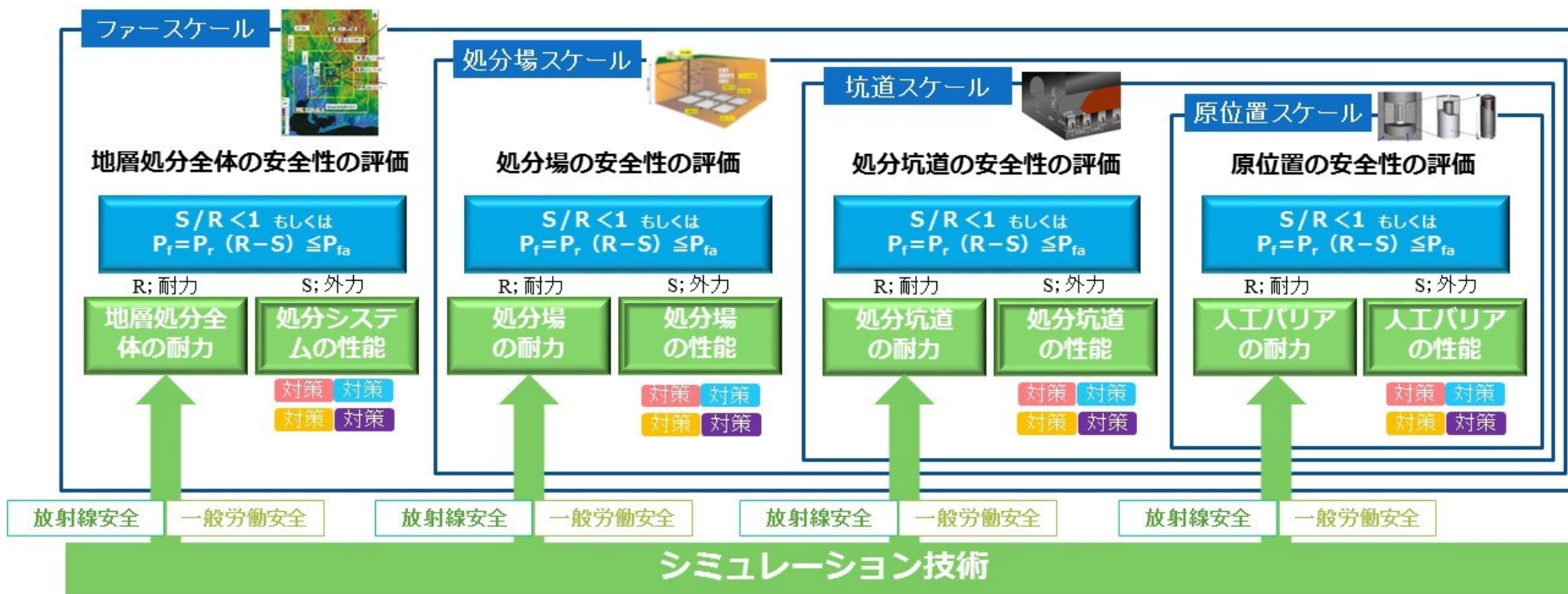
自然災害に対する異常状態や事故（クライシス状態）は単独または重畳して生じ、最終的な安全性の喪失は、熱的影響（T）、水理的影響（H）、力学的影響（M）、化学的影響（C）を分類とした状態に至るものと考えられる。安全対策技術の選択やその組合せについては、実施主体の役割である安全確保戦略の立案、言い換えれば安全を確保するための設計思想によって異なるものと考えられる。このような考え方のもと、操業時安全性の確保に向けた安全要件や技術要件と、安全対策技術との関係について整理した結果を図 2.3.1-1 に示す。

R は耐力、S は作用する外力を示すとともに、P は耐力と外力による限界状態に達する確立分布（破壊確率）を示すものであり、信頼性工学（信頼性設計）に基づいた安全確保の考え方を数式化したものである。すなわち、耐力が外力を上回れば（許容値として P_{fa} ）、信頼性を持って安全であると判断されるこの考え方である。なお、自然災害に対する地層処分施設の耐力は、災害を実証（発生）することが困難なため、シミュレーション技術を活用して評価することが重要である。

自然災害に対する 地層処分施設の安全確保



2-3



災害を実証（発生）させることは難しいため、シミュレーション技術を用いて評価していくことが重要

図 2.3.1-1 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[1]

2.3 自然災害による起回事象と地層処分施設の状況の整理

自然災害（以下「起回事象」という）が地層処分施設に作用した際に生じる可能性がある異常状態（incident）や事故（accident）について検討する。ここでは、地層処分施設で起こり得る異常状態や事故の状況について、考え得る最悪の被災シナリオも含めて抽出・分類した。

2.3.1 地上施設を対象とした起回事象の選定

地層処分施設の類似する既往の地上施設では、施設や操業に脅威を与える可能性がある自然災害として地震、津波、地滑り・陥没、台風、高潮、洪水・大雨、豪雪、異常寒波、竜巻、熱波、火山、落雷の12個の事象を取り上げた検討が行われている。これを参考に、以下3つの事項に着目し、表2.3.1-1に示す8個の事象を地層処分施設の地上施設を対象とした起回事象として選定した

- ① 過去に日本国内で発生した自然災害のうち死者を記録したものを抽出
「地震」「強風（低気圧）」「津波」「高潮」「豪雨・洪水・土砂災害」「竜巻」「干ばつ」「豪雪」「噴火」「落雷」
- ② 世界で20世紀以降に発生した主な自然災害（（1）で既出のもの以外）
「寒波（ボリビア・チリ・ブラジル（2010年））」「熱波（オーストラリア（2009年）・モスクワ（2010年））」
- ③ 近年被害は出ていないものの地球史上過去に大きな被害を与えた自然現象
「隕石の落下（1784年～2005年の間に地上重量10t以上の隕石が16個地球上に落下している）」

なお、類似施設で考慮されている起回事象および上記の災害のうち、地層処分施設の立地選定過程やガラス固化体の特性などから、考えにくい以下の自然災害や他の災害と同様に考えることができる災害は、対象から除くものとした。

- 「火山・噴火」：立地選定で回避するため、選定地から操業期間中に新たな火山が形成されるところは、考えにくい
- 「豪雪・寒波」：温度低下によってガラス固化体あるいはキャニスタに影響を与えて、放射線漏えいが発生することは、考えにくい
- 「地すべり・陥没・土石流」：洪水・豪雨により発生する土砂災害と考える

表 2.3.1-1 地上施設を対象とした起因事象の選定結果[2]

No.	選定した 起因事象	起因事象に伴って生じる「事象」 (作用する外力など)	備考 (事象の選定根拠など)
1	地震	揺れ、ずれ、火災	過去の地震災害の外力などを参考にした
2	津波・高潮	浸水、漂流物の衝突、火災、流出、電源喪失	過去の津波・高潮災害の外力などを参考にした
3	洪水・豪雨 (土砂災害含む)	浸水、漂流物の衝突、火災、流出、電源喪失	※津波の事象(想定外力)に【土砂災害】を追加
4	竜巻(強風含む)	竜巻による巻き上げ・吹き飛び、重量落下物	竜巻の特徴的な外力と考えられる
5	熱波	気温上昇による設備への影響	海外(豪州等)の事例を参考にした
6	干ばつ	乾燥による森林火災など	同上
7	落雷	電源喪失、火災	過去の落雷による災害の外力などを参考にした
8	隕石衝突 (飛来物の衝突含む)	衝撃荷重	南極大陸の隕石衝突の形跡調査などによる

2.3.2 地下施設を対象とした起回事象の選定

地層処分施設の地下施設で起こりうる災害として「ガス爆発」、「ガス噴出」、「坑内火災」、「湧水」、「落盤・崩落」、「山はね」、「坑口からの浸水」を事象として選定し、それらを誘発する自然災害として地上施設で挙げた 8 個の起回事象のうち、地下施設に影響を及ぼす事象として「地震」、「津波」、「洪水・豪雨」を選定した。

表 2.3.2-1 地下施設を対象とした起回事象の選定結果[2]

No.	選定した起回事象	起回事象に伴って生じる「事象」 (作用する外力 など)	備考 (事象の選定根拠など)
1	地震	揺れ、ずれ、ガス噴出、ガス爆発、坑内火災、湧水、落盤・崩落、山はね	トンネル・鉱山等で過去に記録されている災害（ガス噴出、ガス爆発、坑内火災、湧水、落盤・崩落、山はね）の起回事象として設定
2	津波	浸水、漂流物の衝突、火災、流出、電源喪失	坑口からの浸水被害等をもたらす起回事象として設定
3	洪水・豪雨		

2.4 安全対策技術の検討

安全対策技術の検討を行うにあたっては、図 2.3.2-1 に示す手順に従って実施した。

地層処分施設のうち地下施設の安全性を損なう事象として考慮すべき自然災害を踏まえ、地層処分施設に自然災害が作用した際の状況について整理した。その上で、これらの状況に陥った場合あるいは陥る過程で取り組む種々の対策を検討・抽出することにより、安全対策技術を整理した。

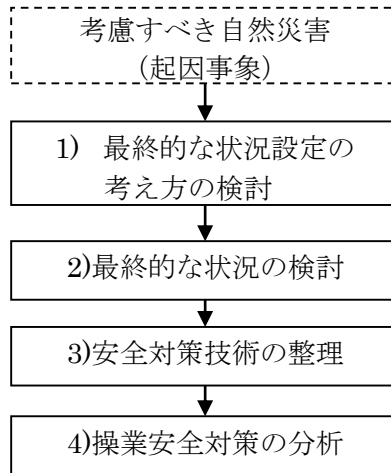


図 2.3.2-1 安全対策技術の検討手順

2.4.1 最終的な状況設定の考え方の検討

図 2.4.1-1 に状況設定の検討の一例を示す。同図は、「ガラス固化体吊上げ作業」（3章で選定した安全検討対象作業の一つ）の作業時に、「地震」が発生した場合の例を示したものである。

起回事象		「検討対象×起回事象」の結果から生じる被害の連鎖			最終的な状況の分類		
起回事象	事象	異常状態	異常状態を起点とした被害の連鎖		放射線安全に影響する最終的な状況	操業継続に影響する最終的な状況	
地震	揺れ	(1) 設備(天井クレーン)の異常	天井クレーンの損傷・停止	ガラス固化体の宙吊り状態の継続		ガラス固化体の正常工程の中断	
			天井クレーンの損傷・落下	ガラス固化体の落下	ガラス固化体の破損 ガラス固化体の転がり・移動	屋内の放射線量の増加、及び屋内での放射性物質の拡散	ガラス固化体の回収困難
		(2) 設備(電気系)の異常	状況把握・監視機能の停止				状況把握又は監視機能の喪失
			自圧維持機能の停止				建屋の放射性物質閉じ込め機能への影響
		換気機能の停止	ガラス固化体の温度上昇			室内高温状態の継続	
		(3) 建屋の異常	天井・壁・コンクリートのひび割れ			屋内外の放射線量の増加の可能性 屋内外の放射線量の増加	
	建屋の前壊		ガラス固化体の埋設	剥落物等によるガラス固化体の破損	屋内外の放射線量の増加、及び屋内外への放射性物質の拡散		
	(4) 外部火災の影響		ガラス固化体の宙吊り状態の継続			ガラス固化体・OPの正常工程の中断	

図 2.4.1-1 状況設定の検討（ガラス固化体吊上げ作業中に地震が発生した例） [2]

起回事象の作用で施設や設備に異常状態が生じ、その異常状態を起点としてどのように被害が進展していくか（被害の連鎖）を抽出する。さらに、被害の連鎖は何らかの状況への帰着点を表 2.4.1-1 に示すように、「A：放射線安全に影響する最終的な状況」、または「B：操業継続に影響する最終的な状況」のいずれかに分類する。

表 2.4.1-1 最終的な状況の分類[2]

分類	分類の説明
A：放射線安全に影響する最終的な状況	放射線量の増加や放射性物質の拡散に直接的に関係する状況
B：操業継続に影響する最終的な状況	放射線量の増加や放射性物質の拡散とまでは言えないが、復旧の足かせとなる状況

2.4.2 最終的な状況の検討

本節では、選定した起回事象が作用した時に生じ得る「異常状態」と「異常状態を起点とした被害の連鎖」を抽出し、被害の連鎖の帰着点を 2 つの「最終的な状況」に分類した。

＜地上施設に関わる状況設定＞

- ・ガラス固化体吊り上げ作業
- ・オーバーパック上蓋溶接作業
- ・オーバーパック吊り上げ作業
- ・地上施設から坑口への廃棄体搬送作業

＜地下施設に関わる状況設定＞

- ・斜坑による廃棄体の搬送作業
- ・立坑による廃棄体の搬送作業
- ・オーバーパック定置作業
- ・緩衝材定置作業
- ・処分坑道埋め戻し作業

なお、被害の連鎖を考える際には、起回事象や異常状態が単独で作用あるいは発生した場合に加え、起回事象が重畳して作用した場合（例：地震＋津波）や異常状態が重畳して生じている場合（例：ガラス固化体の宙吊り状態の継続＋状況把握・監視機能の停止）も検討した。また、異なる起回事象・異常状態でも被害の連鎖の抽出過程で同じ状態となる場合は、「天井クレーンの損傷・停止と同様」などと記し以降の抽出は省略した。

表 2.4.2-1、表 2.4.2-2 に地上施設、地下施設における最終的な状況の検討結果の例を示すとともに状況設定の整理結果を表 2.4.2-3～表 2.4.2-6 に示す。

表 2.4.2-1 ガラス固化体吊上げ作業における最終的な状況[2]

(検討対象の廃棄体等 : ガラス固化体)

	状況 NO.	最終的な状況	最終的な状況に関する 2つの指標	
			ガラス固化体 の状態	施設（建屋や 設備）の状態
A：放射線 安全に影響する最終 的状況	①	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	破損	ガラス固化体 検査室健全
	②	屋内外の放射線量の増加の可能性、又は屋内外への放射性物質の拡散の可能性	破損、又は 健全	躯体コンクリ ートのひび割 れや剥落など
	③	屋内外の放射線量の増加	健全 埋没・流出	建屋崩壊や搬 入口の破損
	④	屋内外の放射線量の増加、及び屋内 外への放射性物質の拡散	破損	建屋崩壊や搬 入口の破損
B：操業継 続に影響する最終 的状況	①	ガラス固化体の正常工程の中断	健全	クレーン停止
	②	ガラス固化体の回収困難	逸脱など	クレーン落下
	③	建屋の放射性物質閉じ込め機能への 影響	健全	建屋の負圧維 持機能停止
	④	検査室内高温状態の継続	温度上昇	換気機能停止
	⑤	ガラスの閉じ込め機能への影響	温度上昇後に 急冷	換気機能停止 建屋冠水
	⑥	状況把握又は監視機能の喪失	－＊	状況把握・監 視機能停止

* ガラス固化体の状態に関わらない

表 2.4.2-2 斜坑による廃棄体の搬送作業における最終的な状況[2]

(検討対象の廃棄体等 : ガラス固化体+オーバーパック+遮へい容器)

	状況 NO.	最終的な状況	最終的な状況に関する 2つの指標	
			廃棄体の状態	施設（建屋や 設備）の状態
A：放射線 安全に影響する最終 的状況	①	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の可能性	オーバーパッ ク破損	坑道の落盤、 ガス爆発、津 波流入 など
	②	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	破損（ガラス 固化体も破 損）	地下深部での 坑道落盤やガ ス爆発 など
	③	屋外の放射線量の増加、及び屋外へ の放射性物質の拡散	破損（ガラス 固化体も破 損）	地上近くでの 坑道落盤やガ ス爆発 など
B：操業継 続に影響 する最終 的状況	①	廃棄体*1の回収困難	逸脱、埋没な ど	坑道落盤や津 波流入 など
	②	アクセス坑道内高温状態の継続	温度上昇	坑道内火災 換気機能停止
	③	ガラスの閉じ込め機能への影響	オーバーパックの 加熱、ガラス 固化体の失透 の可能性 など	坑道内火災 火災発生後の 津波の流入 など
	④	状況把握・監視機能の喪失	—*2	状況把握・監 視機能停止

*1 遮へい容器も含めた状態をいう *2 廃棄体の状態に関わらない

表 2.4.2-3 地上施設における放射線安全に影響する最終的な状況の抽出結果[2]

NO.	操業工程と対象作業	検討対象の廃棄体 等	最終的な状況	備考
1	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体受入・検査・一時仮置き工程 ・ガラス固化体吊上げ作業 	ガラス固化体	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	
2			屋内外の放射線量の増加の可能性、又は屋内外への放射性物質の拡散の可能性	
3			屋内外の放射性線量の増加	
4			屋内外の放射線量の増加、及び屋内外への放射性物質の拡散	
5	<ul style="list-style-type: none"> ・オーバーパック溶接・封入工程 ・上蓋溶接作業 	ガラス固化体+オーバーパック	屋内外の放射線量の増加	ガラス固化体が破損した場合の状況は1、2、4と同じ
6	<ul style="list-style-type: none"> ・オーバーパック溶接・封入工程 ・オーバーパック吊上げ作業 	ガラス固化体+オーバーパック	屋内外の放射線量の増加	ガラス固化体が破損した場合には1、2の状況も加わる
7			屋内外の放射線量の増加、及び屋内外への放射性物質の拡散	
8	地上施設から坑口への搬送工程・作業	ガラス固化体+オーバーパック+遮へい容器	屋内外の放射線量の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・津波、土石流、竜巻の巻上げ落下などの状況 ・竜巻による飛来物衝突などによる
9			屋内外の放射線量の増加、及び屋内外への放射性物質の拡散	

表 2.4.2-4 地上施設における操業継続に影響する最終的な状況の抽出結果[2]

NO.	操業工程と対象作業	検討対象の廃棄体 等	最終的な状況	備考
1	・ガラス固化体受 入・検査・一時仮 置き工程 ・ガラス固化体吊上 げ作業	ガラス固化体	ガラス固化体の正常作業工程の中断	
2			ガラス固化体の回収困難	
3			建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響	
4			検査室内高温状態の継続	
5			ガラスの閉じ込め機能への影響	
6			状況把握又は監視機能喪失	
7	・オーバーパック溶 接・封入工程 ・上蓋溶接作業	ガラス固化体+オーバーパ ック	オーバーパックの正常作業工程の中断	
8			ガラスの閉じ込め機能への影響	
9			状況把握又は監視機能喪失	
10	・オーバーパック溶 接・封入工程 ・オーバーパック吊 上げ作業	ガラス固化体+オーバーパ ック	オーバーパックの正常作業工程の中断	・回収困難は、OP が落下・逸脱した 場合（アームが届かない場所に転 がるなど）、または状況把握・監 視が困難となった場合を想定
11			オーバーパックの回収困難	
12			状況把握又は監視機能喪失	
13	地上施設から坑口へ の搬送工程・作業	ガラス固化体+オーバーパ ック+遮へい容器	廃棄体*の回収困難	廃棄体の屋外での埋没、逸脱を想定
14			状況把握又は監視機能喪失	

*遮へい容器も含めた状態をいう

表 2.4.2-5 地下施設における放射線安全に影響する最終的な状況の抽出結果[2]

NO.	操業工程と対象作業	検討対象の廃棄体 等	最終的な状況	備考
1	斜坑を通しての搬送工程・作業	ガラス固化体＋オーバーパック＋遮へい容器	坑道内の放射線量の増加、又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性	搬送車両の衝突、落盤、浸水、ガス爆発などによる
2			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	
3			屋外の放射線量の増加、及び屋外への放射性物質の拡散	
4	立坑を通しての搬送工程・作業	ガラス固化体＋オーバーパック＋遮へい容器	坑道内の放射線量の増加、又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性	エレベーターの落下、自動制御装置の故障などによる
5			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	
6			屋外の放射線量の増加、及び屋外への放射性物質の拡散	
7	・処分坑への定置工程	ガラス固化体＋オーバーパック＋緩衝材	坑道内の放射線量の増加、又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性	OP や緩衝材の定置作業であるため、大深度を想定 地盤のずれなどによる緩衝材、OP の変形・損傷などを考慮
8	・オーバーパック定置作業 (緩衝材定置完了前)		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	
9	・処分坑への定置工程	ガラス固化体＋オーバーパック＋緩衝材	坑道内の放射線量の増加、又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性	
10	・緩衝材定置作業 (緩衝材定置完了)		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	
11	処分坑道埋戻し工程・作業	ガラス固化体＋オーバーパック＋緩衝材＋埋め戻し材	坑道内の放射線量の増加、又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性	大深度 定置完了後、埋め戻し材を敷設した直後を想定
12			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	

表 2.4.2-6 地下施設における操業継続に影響する最終的な状況の抽出結果[2]

NO.	操業工程と対象作業	検討対象の廃棄体 等	最終的な状況	備考
1	斜坑を通しての搬送 工程・作業	ガラス固化体+オーバーパ ック+遮へい容器	廃棄体*回収困難	廃棄体回収困難は、廃棄体の逸脱 や埋没などにより困難となる場合 と、ガスの噴出や高温状態の継続 などにより困難となる場合を設定 した
2			アクセス坑道内高温状態の継続	
3			ガラスの閉じ込め機能への影響	
4			状況把握又は監視機能喪失	
5	立坑を通しての搬送 工程・作業	ガラス固化体+オーバーパ ック+遮へい容器	廃棄体*回収困難	
6			アクセス坑道内高温状態の継続	
7			ガラスの閉じ込め機能への影響	
8			状況把握又は監視機能喪失	
9	・処分坑への定置工 程 ・オーバーパック定 置作業 (緩衝材定置完了 前)	ガラス固化体+オーバーパ ック+緩衝材	廃棄体回収困難	
10			人工バリア機能の低下の可能性	
11			坑道内高温状態の継続	
12			ガラスの閉じ込め機能への影響	
13			状況把握又は監視機能喪失	
14	・処分坑への定置工 程 ・緩衝材定置作業 (緩衝材定置完了)	ガラス固化体+オーバーパ ック+緩衝材	廃棄体回収困難	
15			人工バリア機能の低下の可能性	
16			坑道内高温状態の継続	
17			ガラスの閉じ込め機能への影響	
18			状況把握又は監視機能喪失	
19	処分坑道埋戻し工 程・作業	ガラス固化体+オーバーパ ック+緩衝材+埋め戻し材	廃棄体回収困難	
20			人工バリア機能の低下の可能性	
21			坑道内高温状態の継続	
22			ガラスの閉じ込め機能への影響	
23			状況把握又は監視機能喪失	

*遮へい容器も含めた状態をいう

2.4.3 最終的な状況の分析・整理

ここでは、安全対策技術の抽出に向けて、分析・整理した。

「放射線安全に影響する最終的な状況」の観点から分析した例を表 2.4.3-1 に示し、「作業継続に影響する最終的な状況」の観点から分析した例を表 2.4.3-2 に示す。

各作業場面における分析結果を踏まえ、最終的な状況の整理結果を表 2.4.3-3、表 2.4.3-4 に示す。

表 2.4.3-1 地上施設における放射線安全に影響する最終的な状況の分析・整理結果[2]

	起回事象と主な異常状態・被害			最終的な状態に関する2つの指標		最終的な状態に関する2つの指標から判断できる「放射線遮へい機能・放射性物質の閉じ込め機能」の状態	「A 放射線安全に影響する最終的な状態」の分類結果	状況No
	起回事象	事象	異常状態・被害	廃棄体の状態	施設の状態(建屋等)			
A 放射線安全に影響する最終的な状態	地震 津波 洪水・大雨 竜巻 隕石衝突	ゆれ 流体力 浸水 重量物の落下 (隕石) 直接衝突	天井クレーン落下 ガラス固化体に崩落物が衝突 化学物質の付着 廃棄体に重量物が衝突 津波流体力、漂流物等による衝撃力の作用	ガラス固化体破損	建屋の崩壊 搬入口等の破損	喪失	屋内外の放射線量の増加及び屋内外への放射性物質の拡散	1
	地震 津波 洪水・大雨 竜巻 隕石衝突	ゆれ 浸水 重量物の落下 (隕石) 直接衝突	天井クレーンの損傷・停止、落下 建屋の水没 負圧機能の停止 ガラス固化体に剥離物が衝突 ガラス固化体が壁に衝突	ガラス固化体破損 又は ガラス固化体健全	建屋の天井・壁コンクリートのひび割れ 建屋の天井・壁コンクリートの剥離・剥落 建屋健全(負圧機能の停止)	低下	屋内外の放射線量の増加の可能性又は屋内外への放射性物質の拡散の可能性	2
	地震 津波 洪水・大雨 竜巻 隕石衝突	ゆれ 流体力 浸水 重量物の落下 (隕石) 直接衝突	ガラス固化体またはオーバーバックの逸脱(屋内) ガラス固化体またはオーバーバックの流失 ガラス固化体またはオーバーバックの埋没 引火した油の流入による火災 化学物質の流入 廃棄体に重量物が衝突 津波流体力、漂流物等による衝撃力の作用	遮へい容器の破損(オーバーバックは健全な状態) 遮へい容器およびオーバーバックの破損(ガラス固化体は健全な状態) ガラス固化体の失透の可能性	建屋の崩壊 搬入口等の破損	喪失	屋内外の放射線量の増加	3
	地震	ゆれ 地盤のずれ	天井クレーン落下 ガラス固化体に剥離物が衝突 ガラス固化体が壁に衝突	ガラス固化体破損	建屋健全 建屋の傾斜	維持	屋内の放射線量の増加及び屋内での放射性物質の拡散	4

表 2.4.3-2 地上施設における操業継続に影響する最終的な状況の分析・整理結果[2]

	起回事象と主な異常状態・被害			最終的な状態に関する2つの指標		最終的な状態に関する2つの指標から判断できる「放射線遮へい機能・放射性物質の閉じ込め機能」の状態	「B 操業継続に影響する最終的な状態」の分類結果	状況No
	起回事象	事象	異常状態・被害	廃棄体の状態	施設の状態(建屋等)			
B 操業継続に影響する最終的な状態	津波 洪水・大雨 地震	流体力 ゆれ	ガラス固化体が温度上昇後に、浸水等によって急冷される 溶接箇所のスレ	ガラス固化体の急冷 ガラス固化体の失透の可能性	建屋内が冠水 建屋健全	低下	ガラスの閉じ込め機能への影響	5
	地震 津波 洪水・大雨 落雷 竜巻 熱波 干ばつ	ゆれ 浸水 電気・熱 強風 長期にわたる気温の上昇 乾燥	天井クレーンの損傷・停止 自動溶接装置の停止	ガラス固化体は健全な状態 オーバーバックは健全な状態	建屋健全	維持	ガラス固化体・オーバーバックの正常作業工程の中断	6
	地震	ゆれ	天井クレーン落下 強風による流出 津波流体力、漂流物等による流出	ガラス固化体の逸脱 オーバーバックの逸脱 遮へい容器の逸脱	建屋健全 建屋の傾斜	維持	ガラス固化体、オーバーバック及び廃棄体(ガラス固化体+オーバーバック)+遮へい容器の回収困難	7
	地震 津波 洪水・大雨 落雷 竜巻 熱波 干ばつ	ゆれ 浸水 電気・熱 強風 長期にわたる気温の上昇 乾燥	負圧設備の停止	ガラス固化体は健全な状態	建屋健全 (負圧機能の停止)	低下	建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響	8
	地震 津波 洪水・大雨 落雷 竜巻 熱波 干ばつ	ゆれ 浸水 電気・熱 強風 長期にわたる気温の上昇 乾燥	換気機能の停止 検査室内の温度上昇	ガラス固化体温度上昇	建屋健全	維持	屋内高温状態の継続	9
	全災害	全事象	状況把握・監視機能の停止	※ガラス固化体や廃棄体の状態に関わらない	※建屋の異常に関わらない	—	状況把握又は監視機能喪失	10

表 2.4.3-3 地上施設に関わる最終的な状況[2]

	状況 NO.	地上施設に関わる最終的な状況
A：放射線安全に影響する 最終的な状況	1	屋内外の放射線量の増加、及び屋内外への放射性物質の拡散
	2	屋内外の放射線量の増加の可能性、又は屋内外への放射性物質の拡散の可能性
	3	屋内外の放射線量の増加
	4	屋内の放射線量の増加、及び屋内での放射性物質の拡散
B：操業継続に影響する 最終的な状況	5	ガラスの閉じ込め機能への影響
	6	ガラス固化体又はオーバーパックの正常作業工程の中断
	7	ガラス固化体、オーバーパック及び廃棄体（ガラス固化体+オーバーパック）+遮へい容器の回収困難
	8	建屋の放射性物質閉じ込め機能への影響
	9	屋内高温状態の継続
	10	状況把握又は監視機能喪失

表 2.4.3-4 地下施設に関わる最終的な状況[11]

	状況 NO.	地下施設に関わる最終的な状況
A：放射線安全に影響する 最終的な状況	1	屋外の放射線量の増加、及び屋外への放射性物質の拡散
	2	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
	3	坑道内の放射線量の増加、又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性
B：操業継続に影響する 最終的な状況	4	ガラスの閉じ込め機能への影響
	5	人工バリア機能の低下の可能性
	6	廃棄体（ガラス固化体+オーバーパック）+遮へい容器の回収困難
	7	アクセス坑道内（又はエレベータ内）、処分坑道内の高温状態の継続
	8	状況把握又は監視機能の喪失

2.5 安全対策技術の整理

地上施設に関わる最終的な状況は 10 状況（放射線安全に影響する 4 状況、操業継続に影響する 6 状況）に集約されている。地層処分施設の地上施設および地下施設それぞれの最終的な状況に対し、これらの状況に陥った場合あるいは陥る過程で取り組む種々の対策を検討・抽出した。

2.5.1 安全対策技術の抽出方法

操業時の安全対策は、表 2.5.1-1 に示すように、事態の悪化を阻止するための応急的な措置である「応急対策」、事業再開に向けた対策や事業継続の観点からの対策である「恒久対策」、および応急対策等の実施に必要なとなる「対策のための試験・解析」に区分して検討・抽出を行った。

表 2.5.1-1 対策等の区分[2]

対策等の区分	対策等の内容
応急対策	事態の悪化を阻止するための応急処置、放射性安全性を掌握するための対策 など
恒久対策	事業再開に向けた対策、事業継続の観点からの対策 など
対策のための試験・解析(応急対策等の実施に必要な試験・解析)	応急対策等の実施に必要な人工バリアの限界性能や性能劣化の把握、実現象予測、解析 など

なお、対策の検討・抽出は、図 2.5.1-1 に示すように「対策シート」を作成した。対策シートには最終的な状況とその時の廃棄体状態および施設状態を記入し、それらの状況・状態に至る「異常状態のシナリオ」について「被害の連鎖」を勘案して設定した。このようにして設定したシナリオの異常状態が生じた時の応急対策をフロー形式で示し、その横に対策のために必要な試験・解析を記述する形とした。また、恒久対策の欄には、異常状態を回避する抜本的対策や事業再開に向けた対策を記述した。

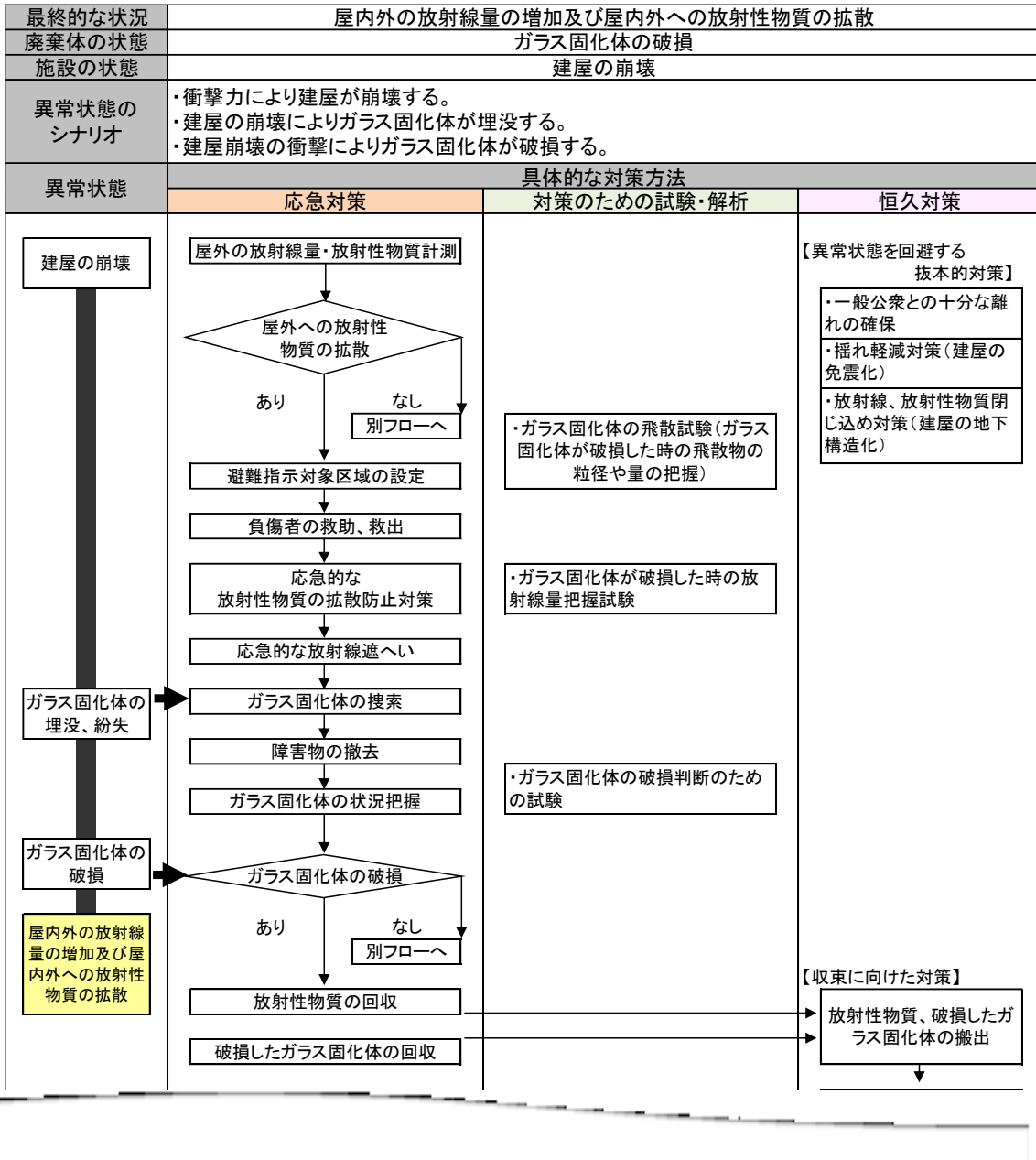


図 2.5.1-1 対策シートの作成例[2]

2.5.2 地上施設に関わる最終的な状況への対策の検討

2.5.1 に示した安全対策技術の抽出方法を踏まえ、地上施設に関わる最終的な状況への対策対策シートを作成し、対策シートから抽出したすべての「応急対策」、「対策のための試験・解析」、「恒久対策」を表 2.5.2-1、表 2.5.2-2、表 2.5.2-3 に示す。

表 2.5.2-1 地上施設の検討において抽出した「応急対策」[2]

検討 No.	抽出した応急対策
1,2,3,4,5,6,7,8	屋外の放射線量・放射性物質計測
1,2,3,5,6	避難指示対象区域の設定
1,2,3,4,5	負傷者の救助、救出
1,2,3	応急的な放射性物質の拡散防止対策
1,2,3,5,6	応急的な放射線遮へい
1,2,10	ガラス固化体の搜索
1,2,3,5	障害物の撤去
1,2,4,7,8	ガラス固化体の状況把握
1,3,4,7	放射性物質の回収
1,4,7	破損したガラス固化体の回収
2	水中、地中からの放射性物質の回収
3,4,5,6,8,9,10	損傷に応じた対応・措置
3	管理区域外の放射線量・放射性物質計測
3	廃棄体（遮へい容器+オーバーパック+ガラス固化体）の搜索
3	廃棄体（遮へい容器+オーバーパック+ガラス固化体）の状況把握
3	廃棄体（遮へい容器+オーバーパック+ガラス固化体）の回収
3	廃棄体（遮へい容器+オーバーパック+ガラス固化体）の移動
3	廃棄体（遮へい容器+オーバーパック+ガラス固化体）の格納
3	検査室内の消火
4,7,8,9,10	状況把握・監視設備の状態確認
4,7,8,9	代替設備・手法による状況把握
4	建屋の損傷の把握
4	建屋の放射線遮へい機能に着目した建屋の評価
4	損傷した建屋の対応、措置
4,10	負圧設備の状態確認
4,10	代替設備・手法による閉じ込め機能の回復
4,9	吊り上げ設備の状態確認
4,9,10	代替設備・手法による宙吊り状態の解除
4,8,9	ガラス固化体の移動
4,8,9	ガラス固化体の格納
5,10	オーバーパックの搜索
5	オーバーパックの状況把握
5	水中からのガラス固化体またはオーバーパックの回収
5	瓦礫からのガラス固化体またはオーバーパックの回収
5,10	ガラス固化体またはオーバーパックの移動
5,10	ガラス固化体またはオーバーパックの格納
6,8	ガラス固化体の冷却
7,9,10	換気設備の状態確認
7,9,10	代替設備・手法によるガラス固化体等の冷却
8	ガラス固化体の高温状態
10	室内の放射線量・放射性物質計測

表 2.5.2-2 地上施設の検討において抽出した「対策に必要な試験・解析」[2]

検討 No.	抽出した対策に必要な試験・解析
1,2,3,4,7	ガラス固化体の飛散試験(ガラス固化体が破損したときの飛散物の粒径や量の把握)
1,3,5,8	ガラス固化体が破損した時の放射線量把握試験
1,3,4,5,8	ガラス固化体の破損判断のための試験
2,3	破損したガラス固化体から水への核種浸出試験
2,3	破損したガラス固化体の水中での挙動解析
2,4	ガラス固化体が破損した時の放射線量把握試験
3,5,8	オーバーパックの破損判断のための試験
3,5,10	オーバーパックの健全性評価のための試験
3,4,5,9,10	ガラス固化体の健全性評価のための試験
3	遮へい容器の破損判断のための試験
4	建屋の放射線遮へい機能に着目した建屋の評価のための試験
6,8	ガラス固化体の加熱試験
6,8	失透したガラス固化体の組成確認試験
7	破損したガラス固化体の温度上昇確認試験
9,10	ガラス固化体の温度上昇確認試験

表 2.5.2-3 地上施設の検討において抽出した「恒久対策」[2]

検討 No.	抽出した恒久対策
1,2,5	一般公衆との十分な離れの確保
1,4,5,7,8,9,10	揺れ軽減対策(建屋の免震化)
1,2,5,6	放射線、放射性物質閉じ込め対策(建屋の地下構造化)
1,4,6,7,8	放射性物質、破損したガラス固化体の搬出
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	対象区域の除染
2,5	一次貯水設備
3,5	損傷した廃棄体の搬出
4,7,8,9,10	機能維持のために無停電化
4,7	建屋・設備の本復旧
4,10	建屋床の低反発化
7,8,9,10	室内の状況把握・監視機能の代替設備を投入可能な構造施設
7,9,10	換気、冷却機能の代替設備を投入可能な構造施設
9,10	吊上げ設備の代替設備を投入可能な構造施設、予め設置
10	負圧機能の代替設備を投入可能な構造施設
9,10	損傷したガラス固化体、オーバーパックの搬出

2.5.3 地下施設に関わる最終的な状況への対応の検討

2.5.1 に示した安全対策技術の抽出方法を踏まえ、地下施設に関わる最終的な状況への対策対策シートを作成し、対策シートで抽出したすべての「応急対策」、「対策のための試験・解析」、「恒久対策」を表 2.5.3-1、表 2.5.3-2、表 2.5.3-3 に示す。

表 2.5.3-1 地下施設の検討において抽出した「応急対策」[2]

検討 No.	抽出した応急対策
1,2,3,4,5	作業員退避
1,2,3,4,5	負傷者の救助、救出
1,2,3,4,5	屋外の放射線量・放射性物質計測
1	避難指示対象区域の設置
1	応急的な放射性物質の拡散防止対策
1,2,3	坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策
1,2,3	応急的な放射線遮へい
1,2	廃棄体の搜索
1,3,4,5	状況把握・監視設備の状態確認
1,3,4,5	代替設備・手法による状況把握
1,2,3,4,5	緩衝材の状態把握
1,2,3,4,5	オーバーパックの状況把握
1,2,3,4,5	ガラス固化体の状況把握
1,3	ポンプ設備の状況確認
1,3	代替設備・手法による揚水
1,2,3,4	障害物の撤去
1,2,3	水中、地中からの放射性物質の回収
1,2,3	破損したオーバーパック、ガラス固化体の回収
2,3,4,5	坑道内の放射線量・放射性物質計測
2,3	坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測
2,3	坑道内での放射性物質の拡散防止対策
4	坑道内火災の消火
4	緩衝材、オーバーパック、ガラス固化体の高温状態
4	緩衝材、オーバーパック、ガラス固化体の冷却
4,5	緩衝材、オーバーパック、ガラス固化体の回収
5	自動送気システムの状況把握
5	代替設備・手法による送気

表 2.5.3-2 地下施設の検討において抽出した「対策に必要な試験・解析」[2]

検討 No.	抽出した対策に必要な試験・解析
1	ガラス固化体の飛散試験（ガラス固化体が破損した時の飛散物の粒径や量、飛散時間の把握）
1,4	ガラス固化体が破損した時の放射線量把握試験
1,2,3	対象（選定）地盤の透水試験、解析
1,2,3	破損したガラス固化体から地下水脈や湿潤土壌への核種浸出試験
1,2,3	破損したガラス固化体から水への核種浸出試験
1,2,3,4,5	緩衝材の破損判断のための試験
1,2,3	緩衝材の破損時のオーバーパック、ガラス固化体の健全性評価のための試験
1,2,3,4,5	オーバーパックの破損判断のための試験
1,2,3	オーバーパックの損傷、破損時のガラス固化体の健全性評価試験
1,2,3,4,5	ガラス固化体の破損判断のための試験
2,3	坑道内ガラス固化体の飛散試験（ガラス固化体が破損した時の飛散物の粒径や量、飛散時間の把握）
4	坑道内設備の耐火性確認試験
4	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
4	緩衝材の加熱試験
4	緩衝材の急冷試験
4	緩衝材の破損判断のための試験
4	オーバーパックの加熱試験
4	オーバーパックの急冷試験
4	冷却材料の違いによるオーバーパックの変質試験
4	ガラス固化体の加熱試験
4	ガラス固化体の急冷試験
4	失透したガラス固化体の組成確認試験
4	冷却材料の違いによる緩衝材の変質試験
5	ガラス固化体の温度上昇 推移確認試験
5	処分坑道で廃棄体が落下した場合の損傷状態と転がり方を見るための試験

表 2.5.3-3 地下施設の検討において抽出した「恒久対策」[2]

検討 No.	抽出した恒久対策
1,2,4,5	揺れ軽減対策（坑道への免震・制振技術の適用）
1,2	強固地盤の選定
1,3	坑口を高所へ設置
1,3	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
1,3	ポンプ機能の代替設備を投入可能な構造施設
1	放射性物質、破損したガラス固化体の搬出
1,2,3,4,5	対象区域の除染
2,3	放射性物質、破損したオーバーパック、ガラス固化体の搬出
3,4,5	機能維持のために無停電化
4,5	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
4,5	緩衝材オーバーパック、ガラス固化体の搬出
5	送気機能の代替設備を投入可能な構造施設

2.6 取り組むべき内容

抽出した応急対策、恒久対策、対策に必要な試験・解析を表 2.6-1 に示すように分類（カテゴリ化）し、以下の 7 つの技術課題にとりまとめ、表 2.6-2 に具体的な対策例を提示し、整理を行った。

- ・ 救援・救出技術
- ・ 状況把握・監視技術
- ・ 仮設（緊急）遮へい技術
- ・ 状況修復技術
- ・ 施設計画技術（レイアウト・避難計画含む）
- ・ 外力低減技術
- ・ 人工バリアの限界性能等の調査・試験

表 2.6-1 具体的な対策と技術課題

対策区分	具体的な対策	対象となる構成要素		技術課題
		施設	人工バリア	
応急対策	負傷者の救助、救出	作業員		救助・救出技術
	応急的な放射性物質の拡散防止対策	遮へい壁		仮設（緊急）遮へい技術
	応急的な放射線遮へい	遮へい壁		仮設（緊急）遮へい技術
	屋外の放射線量・放射性物質計測	状況把握・監視設備		状況把握・監視技術
	ガラス固化体の状況把握		ガラス固化体	
	オーバーパックの状況把握		オーバーパック	
	管理区域外の放射線量・放射性物質計測	状況把握・監視設備		
	遮へい容器の状況把握	遮へい容器		
	廃棄体（オーバーパック+ガラス固化体）の状況把握		廃棄体	
	状況把握・監視設備の状態確認	遮へい壁		
	換気設備の状態確認	換気設備		
	代替設備・手法による状況把握	状況把握・監視設備		
	建屋の損傷の把握	状況把握・監視設備		
	建屋の放射線遮へい機能に着目した建屋の評価	建屋		
	損傷した建屋の対応、措置	建屋		
	負圧設備の状態確認	遮へい壁		
	吊り上げ設備の状態確認	建屋		
	室内の放射線量・放射性物質計測	状況把握・監視設備		
	障害物の撤去	建屋		状況修復技術
	放射性物質の回収		廃棄体	
破損したガラス固化体の回収		ガラス固化体		
水中、地中からの放射性物質の回収		廃棄体		
水中からのガラス固化体またはオーバーパックの回収		廃棄体		
瓦礫からのガラス固化体またはオーバーパックの回収	建屋	廃棄体		
ガラス固化体またはオーバーパックの移動		廃棄体		

表 2.6-2 抽出した技術課題のカテゴリと具体的な対策の例

技術課題のカテゴリ	対 策 例
救援・救出技術	負傷者の救助・救出など（救援ロボット、除染技術・設備がある病院への迅速搬送 など）
状況把握・監視技術	屋内外の放射線量・放射性物質計測、廃棄体（ガラス固化体・OP・OP+緩衝材）の状況把握、逸脱・水没・埋没した廃棄体の捜索、代替設備・手法による状況把握、建屋の損傷状況の把握、落盤や水没・埋没した坑道内の状況把握、火災時の坑道内状況の把握、土壌・水中の放射線物質量の計測 など
仮設（緊急）遮へい技術	応急的な放射性物質の拡散防止対策、応急的な放射線遮へい対策、地盤・地下水脈への放射性物質の拡散防止対策、坑道内での放射性物質の拡散防止対策 など
状況修復技術	土砂や瓦礫等の障害物の撤去、水中や瓦礫中からの廃棄体の回収、破損した廃棄体の移動・格納、検査室内等の消火、坑道内の流入水や湧水の揚水、坑道内の障害物（流入土砂や落石）の撤去、坑道内の火災の消火、水中や土中からの放射性物質の回収 など
施設計画技術（レイアウト・避難計画含む）	緊急時に種々の代替設備・機器が導入可能な地上施設構造、機能維持のための無停電化、地下施設坑口の高所への設置、代替ポンプが導入可能な地下構造、代替の坑道内モニタリング設備・機器が導入可能な地下構造、緊急時の避難を考慮した地下施設レイアウト（シミュレーション解析含む）、火災の排煙を考慮した地下施設レイアウト（シミュレーション解析含む） など
外力低減技術	建屋の免震・制振化、防波堤・防水扉の設置、施設や設備の耐熱化 など
人工バリアの限界性能等の調査・試験	廃棄体（ガラス固化体・OP・OP+緩衝材）の力学的性能の解析・試験、廃棄体の熱的性能の解析・試験、破損したガラス固化体からの核種浸出試験、失透したガラス固化体の浸出率・組成確認試験、廃棄体の破損判断のための解析・試験、緩衝材破損時のOP・ガラス固化体の健全性評価試験、建屋の遮へい機能評価のための試験 など

本開発では「リスク事象の検討による状況設定」を経て、「リスク低減のための対策の開発」を行っている。ここで「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、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。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（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。

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。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。

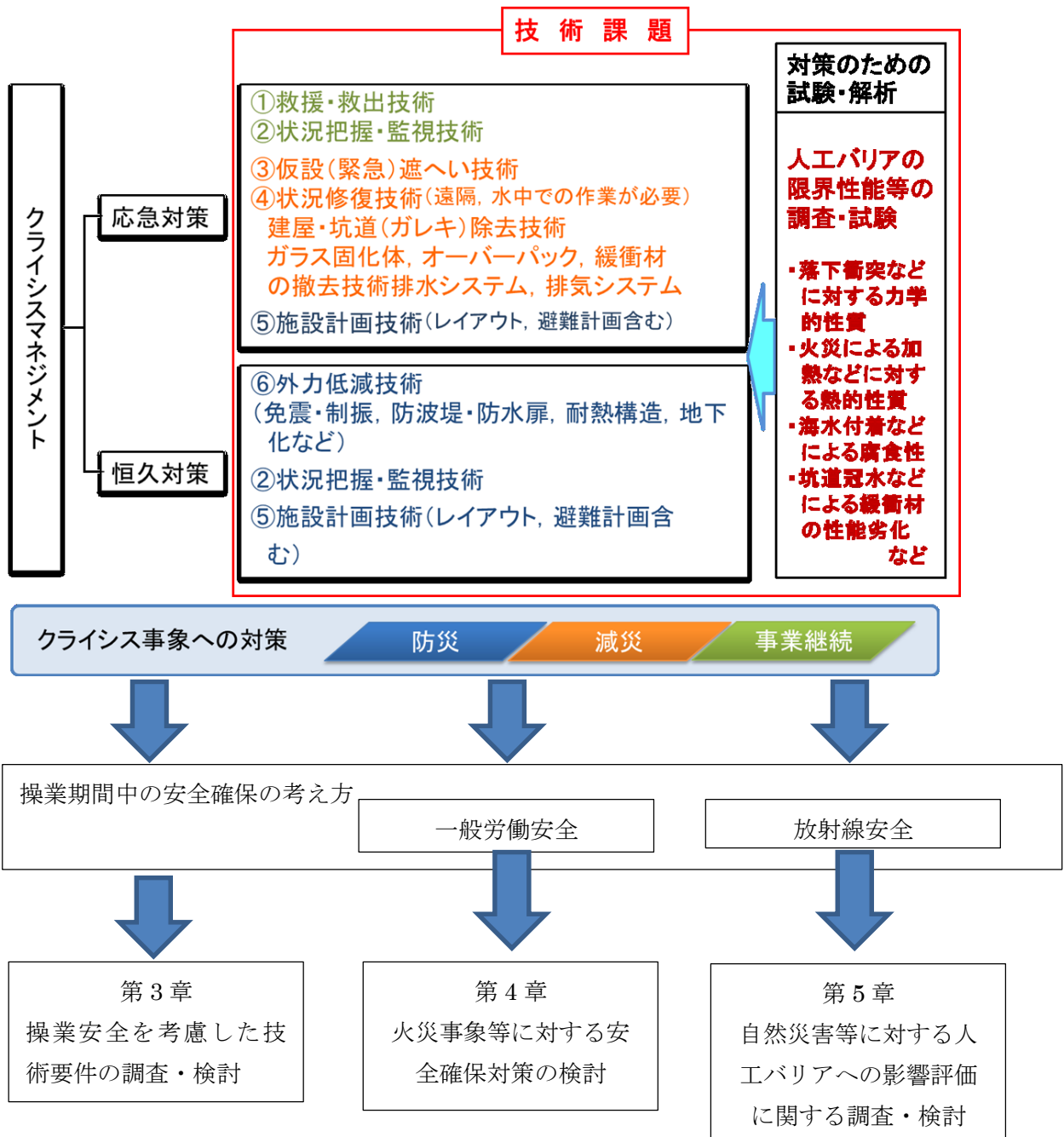


図 2.6-1 取り組むべき内容

図 2.6-1 に示すように平成 27 年度において取り組む内容を示す。本開発では、技術課題を踏まえ、地層処分施設の操業期間中の安全確保の考え方や技術課題に対して取り組みについて検討・実施していくものである。具体的には、「操業安全を考慮した技術要件の調査・検討」では、原子力施設等で取り入れている深層防護の考え方に基づいた安全確保について検討を行う。また、「火災事象等に対する安全確保対策の検討」、「自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する調査・検討」では、一般労働安全、放射線安全の観点から状況把握、安全評価等に必要なツールや必要となるデータの取得を行う。2.3 において抽出した自然災害による起因事象では、地層処分施設の候補地が決まっていないため地域特性に依存せず、被害の影響が大きい火災について先行的に着手することとした。

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 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。
- [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 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。

第3章 自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・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技術要件の調査・検討を行った。

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・整理している。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た。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。

平成 26 年度は、地層処分施設における安全対策（技術要件）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。

本年度は、前年度までの成果を取りまとめるとともに、今後の課題とその解決方法について検討を加えた。

3.2 検討概要

地層処分施設における操業時の安全対策の考え方の例示に向けて、以下の調査、検討を行った。

3.3 節では、操業安全確保の考え方の提示として、以下の調査、検討を行った。放射性物質取扱い施設の安全確保に向けた国内外の動向として、「原子力事象評価尺度」、「多重防護（以下、深層防護という）」、「多重障壁」について整理する。また、一般労働安全の確保に向けた国内の動向として、「鉱山保安法に関わる動向」「労働安全衛生法（土木構造物）に関わる動向」について整理した。深層防護の考え方は、放射性物質を取り扱う地層処分施設における操業時の安全確保を図るために必要であり、図 3.3.1-1 に示すように深層防護を構成する要素を踏まえながら、多重性、独立性、多様性のある安全対策を検討する必要がある。

さらに、地層処分施設の特徴である”大深度”を考慮し、原位置スケール、坑道スケール、処分場スケール、広域スケールによる各スケールに応じた安全対策を実施していくことが、工学的な効率性を持ちつつ、効果的な安全確保が図れることを示した。

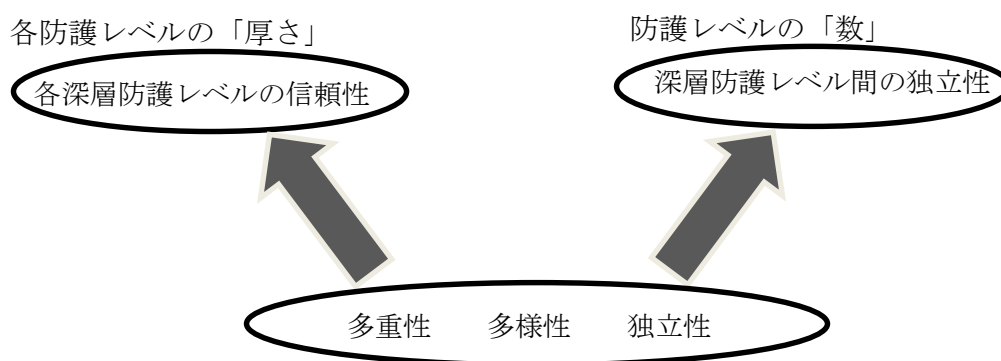


図 3.3.1-1 深層防護を構成する 2 つの要素[1]

3.4 節では、操業安全対策の検討として、地層処分施設における操業時の安全対策の考え方を踏まえ、以下の分析、検討を行った。操業時の安全対策技術の選択は、安全確保方針とそれに基づく安全確保戦略の立て方によって異なり、安全確保戦略の立案は実施主体が行うものである。これに対し、国の基盤研究開発は、安全確保戦略の立案の際に必要な技術情報を蓄積する使命がある。ここでは、今後蓄積されていく安全対策の整理方法を例示した上で、実施している国の基盤研究開発の位置付けについて整理した。

3.5 節では、操業安全対策の選択する際の目安となる効果の示し方について検討と、現状での課題について整理を行った。操業時の安全対策技術を表示に向けて基本となる考え方の整理として、信頼性工学を導入した安全対策の効果の示し方に対する考察と、リスクアセスメントの導入に向けた考察を行った。また、今後の課題と解決方法について整理した。

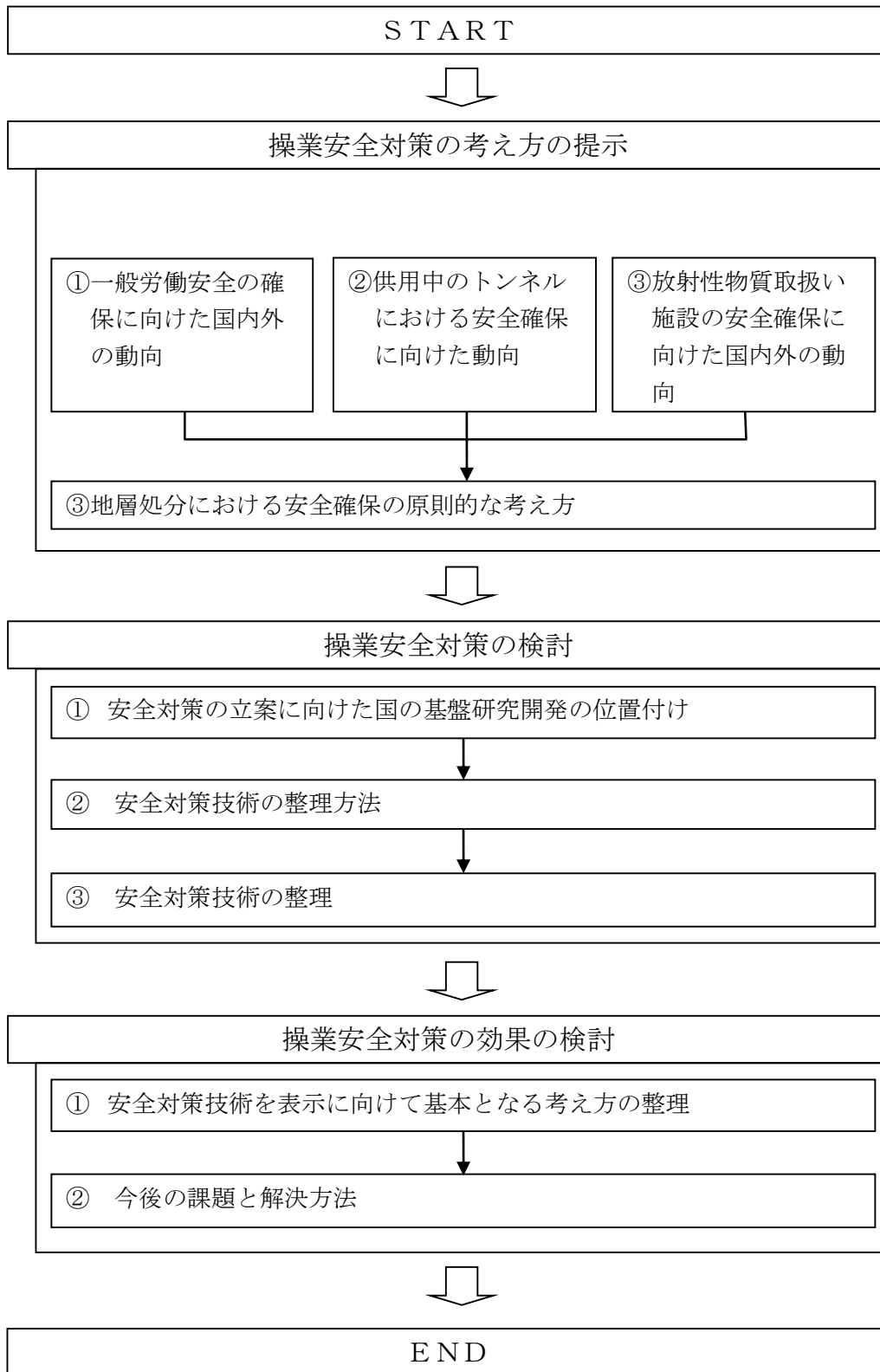


図 3.3.1-2 検討フロー

3.3 作業安全確保の考え方の提示

地層処分施設の事業期間中の安全確保の検討に際し、既存の類似する施設の保安に係る法令に基づいて検討することが妥当と考える。法令としては、鉱山保安法、労働安全衛生法、道路法や、原子力に係る原子炉等規制法、管理規則などが挙げられる。地層処分施設のうち地下施設においては、大深度地下構造物という点で最も類似性が高いと考えられる鉱山に係る法令とそれに基づく安全対策を基本に据え、これに道路法や原子力関連の法令に基づく規制事項や要求事項を反映させることが適切と考える（図 3.3.1-1 参照）。

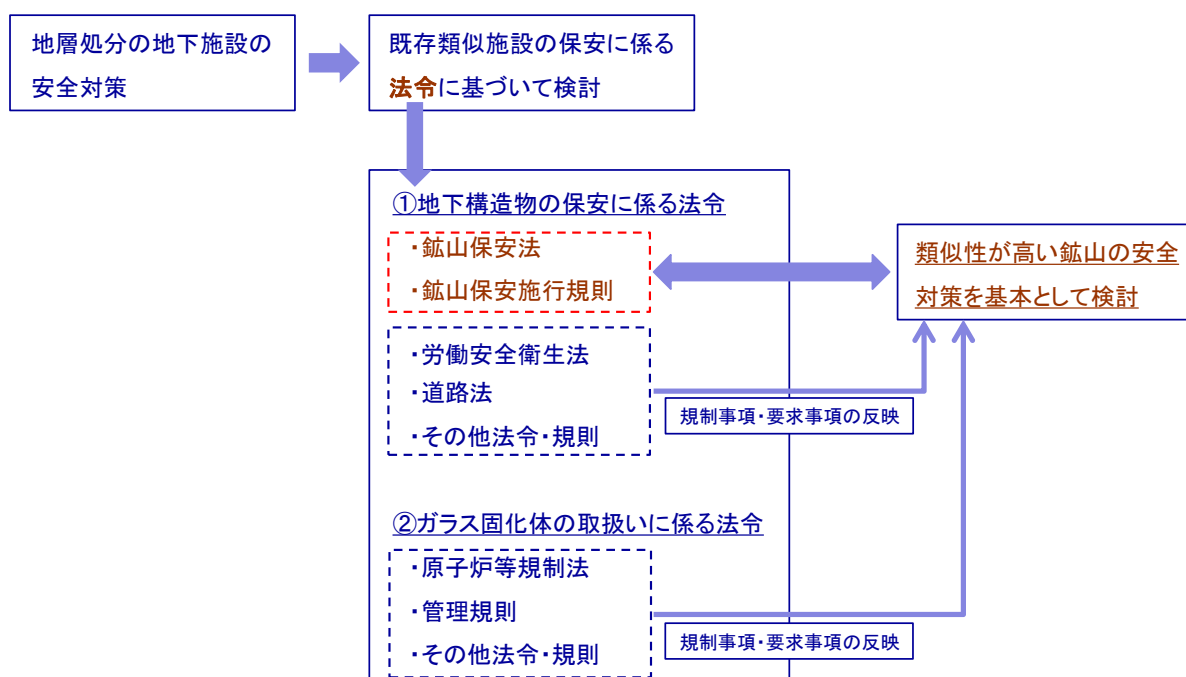


図 3.3.1-1 地下施設の作業安全の検討方針[2]

ここでは、一般労働安全の確保に向けた動向と放射線取扱施設の安全確保に向けた国内外の動向について整理した上で、地層処分施設における安全確保に向けた原則的な考え方について検討するとともに、効率的かつ合理的な安全対策の考え方について検討を加える。

3.3.1 一般労働安全の確保に向けた国内外の動向

地層処分施設における一般労働安全の確保にかかわる、鉱山保安法および労働安全衛生法にかかわる動向を整理する。

(1) 鉱山保安法にかかわる動向

1) 鉱山保安法の枠組み

鉱山保安法の概要（安全確保のための体系図）を図 3.3.1-1 にまとめる。

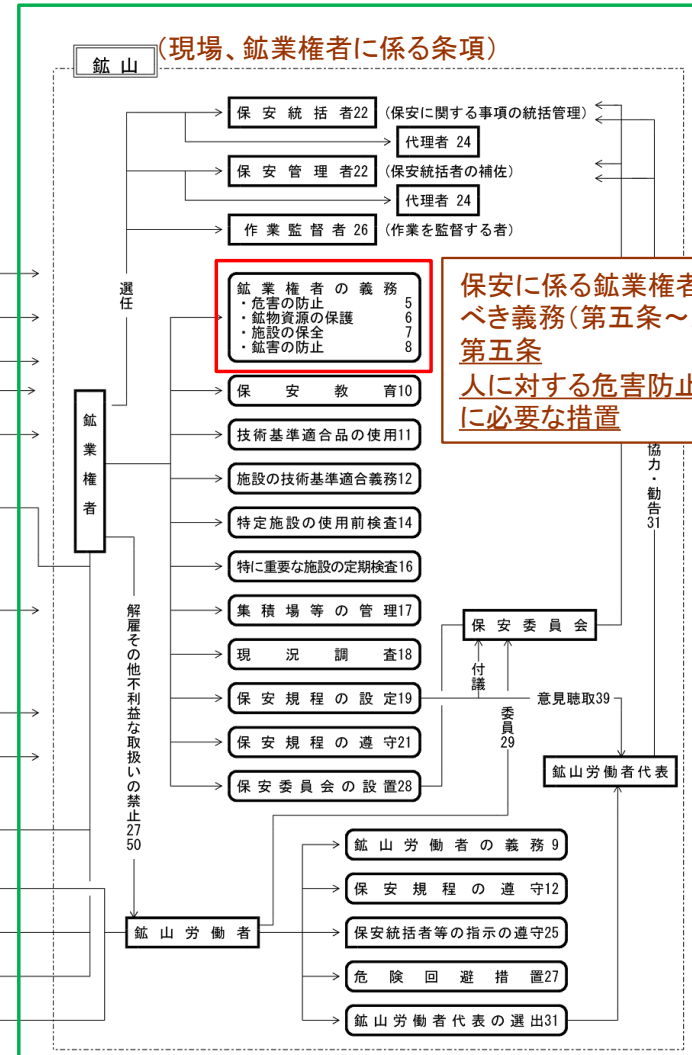
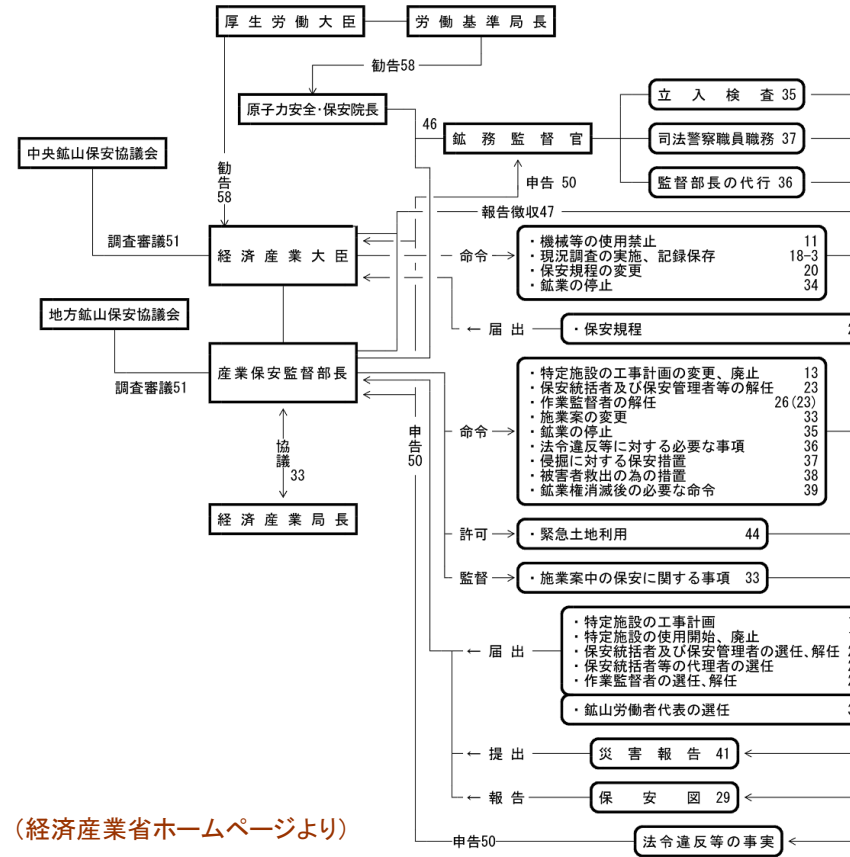
鉱山での安全確保は、鉱業権者が保安統括者や保安管理者を選任して管理体制を整えなければならないこと、保安教育を行わなければならないことなどが規定されており、地層処分の実施主体においても、これらの条項を参考に安全確保策を講じていく必要があるものと考えられる。

鉱山保安法における鉱業権者に係る条項の中で、「第 5 条 人に対する危害防止のために必要な措置」として、鉱業権者が安全確保のために実施しなければならない「義務」が規定されている。この中で、人に危害を与える事象として考慮すべき自然災害として、落盤、崩壊、出水、ガスの突出、ガス又は炭塵の爆発、自然発火、坑内火災、を挙げている。地層処分施設における安全対策の策定においても、これらの事象を対象に検討する必要があると考えられる。

なお、鉱山保安法において考慮すべき災害事象について、「人に対する危害を防止するため必要な措置」の要求内容や要求項目は、経済産業省令である「鉱山保安施行規則」に示されており、さらにその具体的な措置は内規である「鉱業権者が講ずべき措置事例」に示されている。例えば、坑内火災にかかわる措置事例については、「鉱業権者が講ずべき措置事例」に示されており、项目的には、「坑内火災を防止するための措置」、「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」、「坑内火災による被害を防止するための措置」に分類され示されているところである。

鉱山保安法の概要 (安全確保のための体系図)

〔鉱山保安法（昭和24年法律第70号、最終改正平成16年法律第94号）
第一条 この法律は、鉱山労働者に対する危害を防止するとともに鉱害を
（行政の監督等に係る条項）



保安に係る鉱業権者が講ずべき義務(第五条～八条)
第五条
 人に対する危害防止のために必要な措置

図 3.3.1-1 鉱山保安法の概要

2) 鉱山における災害防止対策の整理

石炭鉱山において、坑内火災は、その性質と被害規模の大きさから、ガス爆発と並び重要災害として位置づけられるところである。近年は、集中監視設備の導入による監視体制が強化されたことなどにより件数は減少してきており、特に平成 20 年代に入り災害の発生は報告されていない。しかし、過去の事故例に見るように、一旦発生すれば多くの罹災者を出す恐れがあることは周知の事実である。火災による災害が大きくなる理由は、坑内が狭隘な空間であることともに、その空間の中に機器類、油脂類、その他の可燃物が存在と、限定された空間であるがために熱拡散が小さいことから、火災を防止する上で非常に厳しい環境であることが挙げられる。坑内火災の特徴を以下に列挙する。

- ・一酸化炭素、煙、ケーブル等の燃焼による有害ガス等が発生し、気流に沿って風下に速やかに・拡散する。坑道状況によっては入気側への逆流も起こることもある。
- ・風下側での退避が遅れた場合、火災現場とは異なる場所の人間まで罹災する恐れがある。特に、火災の発生箇所が入気坑道の場合には、火災の影響が極めて広範囲に及ぶ可能性が考えられる。
- ・通常、風上側からの消火作業となり、消火作業に従事する人員、消火ホース数、消火水源が極めて制約される等、消火作業には多大な制約がある。なお、火災がある程度以上になった場合は、直接消火が困難となり、火災風下側の放棄に至る可能性も考えられる。(水没させてようやく消火した事例が多数存在)
- ・限られた坑道からしか避難・脱出することができず、場合によっては坑道内で留まり救援を待つことを余儀なくされる可能性がある。
- ・早期発見・早期消火に失敗すると火災は急速に拡大し、さらに一酸化炭素や有毒ガスの流入・拡散により影響する範囲が急激に広がり、迅速に避難しなければ被害がさらに拡大する。
- ・火災の進展によっては、通気門および坑内換気扇の焼損などにより通気系統が乱れる。

鉱山の安全は、災害防止に向けて鉱山保安法や鉱山保安法施行規則および鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令が定められ、同法に遵守した操業が行われている。特に火災にかかわる条項を以下に抜粋する。

鉱山保安法施行規則第八条

(坑内火災)

第八条 法第五条第一項 及び第六条 の規定に基づき、坑内火災について鉱業権者が講ずべき措置は、次に掲げるものとする。

- 一 火気使用禁止区域の設定、可燃性物質の管理その他の坑内火災を防止するための措置を講ずること。
- 二 火災発生を感知する装置又は消火設備の設置、施設の防火又は耐火構造化その他の坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置を講ずること。
- 三 坑内火災を認めたときは、消火作業の実施、鉱山労働者の退避その他の坑内火災による被害を防止するための措置を講ずること。

鉱業上使用する工作物等の技術基準第三条

(共通の技術基準)

第三条 鉱山施設に共通する技術基準は、次のとおりとする。

- 一 鉱山労働者の安全を確保するため、手すり、さく囲、被覆、安全な通路その他の必要な保安設備が設けられていること。
- 二 鉱山労働者の注意を喚起するため、標識その他の必要な表示が設けられていること。
- 三 粉じんの飛散を防止するため、散水、集じん機の設置、装置の密閉その他の適切な措置が講じられていること。
- 四 火災を防止するため、消火栓、消火器、消火用砂その他の消火設備が適切に設けられていること。
- 五 鉱山労働者が作業を安全に行うため、就業する場所は、必要な照度を確保できる照明設備の設置その他の適切な措置が講じられていること。
- 六 緊急時に迅速な通信を確保するため、電話の設置その他の適切な措置が講じられていること。
- 七 廃止又は休止した施設に起因する危害及び鉱害を防止するため、廃止又は休止した施設は、立入禁止区域の設定、さく囲及び標識の設置、坑口の閉そくその他の適切な措置が講じられていること。

鉱山保安法施行規則第八条に基づき、経済産業省は鉱山保安法施行規則関係（内規）として、「鉱業権者が講ずべき措置事例」（平成 16 年 11 月 19 日、最終改訂 平成 24 年 6 月 1 日）を通知が出されている。同内規の中で「坑内火災を防止するための措置」、「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」、「坑内火災による被害を防止するための措置」がそれぞれ記載されている。

「坑内火災を防止するための措置」

- (1) 裸火等に係る措置
- (2) 油脂類等に係る措置
- (3) 車両系鉱山機械又は自動車に給油するときの措置
- (4) 発破時の措置

(5) 坑外からの延焼を防止する措置

「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」

・・・消火器、消火砂又は散水設備の設置と備え付け規準が鉱種別に記載

- (1) 全鉱種に共通の措置
- (2) 石炭坑及び石油坑における措置
- (3) 石炭坑における措置
- (4) 石炭坑（亜炭坑を除く。）における措置

「坑内火災による被害を防止するための措置」

・・・段階に応じた消火方法と消火に伴う労働者安全確保が記載

また、鉱業上使用する工作物等の技術基準第三条に基づき、経済産業省は鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針（内規）として、「鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針」（平成 24 年 11 月 30 日制定）が通達されている。

「その他の必要な保安設備」として、次に掲げる記載がされている。

- (1) 坑内の奥部において連絡する 2 以上の通路をもって、地表と連絡する通路（開坑初期であって通気をして坑道を掘進する場合を除く。）
- (2) 坑内における巻揚装置により人を昇降させる立坑又は 40° 以上の斜坑において、巻揚装置によらないで出入りできる他の通路がない場合に設ける非常はしご道
- (3) 主要運搬斜坑底に設ける回避所
- (4) 石油坑において、坑内における集油溝の上を通路とする場合の集油溝に設ける木製又は鉄製のふた
- (5) 坑内において、コンベアの幅が広く又は天盤が低いため危険な箇所ではコンベアを横断する際の横断路

さらに、「その他の適切な措置が講じられている」としては、坑内誘導無線機等の警報連絡装置の設置等をいう。

(2) 労働安全衛生法にかかわる動向

施工中の一般トンネルにおける火災事象にかかわる法令として、労働安全衛生法および労働安全衛生法施行規則が挙げられる。労働安全衛生法及び関係政省令のうち、トンネル施工かつ火災にかかわる条項を表 3.3.1-1 および表 3.3.1-2 に抜粋する。施工中のトンネルでは、労働安全衛生法等の求めに従い、火災防止対策が施されている。トンネル工事における坑内火災に対する安全対策を表 3.3.1-3 にまとめる。

表 3.3.1-1 火災防止措置にかかわる条項[2]

関係条項	項目	要旨
施行規則 257	危険物の製造、取り扱い	作業指揮者の選任
施行規則 389 の 3	ガス溶接作業時の措置	火災防止措置
施行規則 389 の 4	防火担当者	火気やアーク溶接使用時の措置
施行規則 389 の 5	消火設備	消火器具の設置と使用方法の周知
施行規則 389 の 6	たて坑の建設の作業	ガス用札作業時の措置など

表 3.3.1-2 避難にかかわる条項[2]

関係条項	項目	要旨
施行規則 389 の 8	退避等	避難、換気、立入禁止など
施行規則 389 の 9	警報避難設備等	非常用の警報装置、通話設備等
施行規則 389 の 10	避難用器具	呼吸用保護具、携帯用照明器具等
施行規則 389 の 11	避難等の訓練	訓練対象、訓練時期

表 3.3.1-3 トンネル工事における坑内火災に対する安全対策[2]

安全対策		対策の要旨
火災対策	着火源の持ち込み禁止	着火源の坑内への持ち込みの禁止
	可燃物の貯蔵扱い	坑内にある可燃物は最小限にとどめ、貯蔵場所・取扱い場所を定める
	溶接・溶断作業	作業指揮者を定めて、下記の事項を行わせる 可燃物の除去または覆い・隔壁を設けること 作業を随時点検し、異常時の措置をとること 作業員に消火設備の設置場所及びその使用方法を周知すること 作業終了後、残り火のないことを確認すること
	電気設備	過熱や燃焼、電気火花などの発生を防止するため、次の事項を実施する 投光器にはガードを付ける 移動及び可搬式の電動機器には、感電防止用漏電遮断装置を付ける 難燃性ケーブルの使用
	喫煙箇所等	休憩場所及び喫煙指定場所以外での喫煙を禁止
坑内設備の不燃化		坑内で使用する設備・材料の不燃化を図る
警報装置の不燃化		緊急事態発生を知らせる装置の設置 点検・整備基準を定める 警報発令の基準、警報の種類、警報発令時の行動について定め、関係労働者へ周知
消火設備		必要な箇所に、火災の性状に応じた消火設備を必要量設置する(消火器、消火栓、消火砂の設置) 消火設備の設置場所を関係労働者へ周知 定期点検、整備の実施と記録
緊急時の措置	緊急措置用具	緊急措置用具を必要な箇所に配置、使用方法を関係労働者へ周知
	消火・避難訓練	緊急事態発生を想定し、消火・避難訓練をトンネル延長の伸長に従い定期的実施 作業内容が変更した場合にも、必要に応じて実施
	救護訓練	緊急事態を想定し、救護訓練を実施
火災防止についての教育		次の事項について教育を行う 火災予防上の遵守事項、初期消火の方法等

長大かつ海底トンネルである青函トンネルの事例を調査した。青函トンネル工事において設置された緊急連絡設備を表 3.3.1-4 に示す。

表 3.3.1-4 緊急連絡設備一覧[2]

設置設備	設置場所
自動発信火災検知機	坑内主要箇所
スピーカー	坑道 250m 間隔
固定式トークバック	坑道 500m 間隔および切羽
防災センター	斜坑口
坑道・切羽照明設備の一斉点滅	坑内各箇所

さらに、青函トンネルの海底部工区は坑道換気を採用していることから、火災時の煙は風下側に流れることとなる。このため、災害対策として避難所を設けていた。避難所は切羽付近および 1,000m 間隔で設置するとともに、以下の設備などを備えていた。

- ・ 電話
- ・ トークバック
- ・ 空気呼吸器
- ・ 水管
- ・ 空気管
- ・ 非常灯
- ・ 消火器
- ・ ガス検知器

また、各工区に火災対策マニュアルが作成され、連絡体制、防火体制、消火体制、避難方法等を計画立案の上、トンネル構築が進められていた。火災対策設備図を図 3.3.1-2 に示す。青函トンネルでは、坑内への通信、電力ケーブル類は、斜坑より取り入れられており、これらの設備が何らかの原因で遮断された場合には、坑内設備の作動が止まることになる。従って、斜坑での通信、電力ケーブル上には熱感知を設け、防災センターにて常時監視するようなシステムを採用していた。これら火災対策を講じた結果、火災・爆発等が原因での災害死亡者は 1 人（全死亡者の 2.9%）であり、一般の山岳トンネル工事と比べ大幅に少なくなっている。

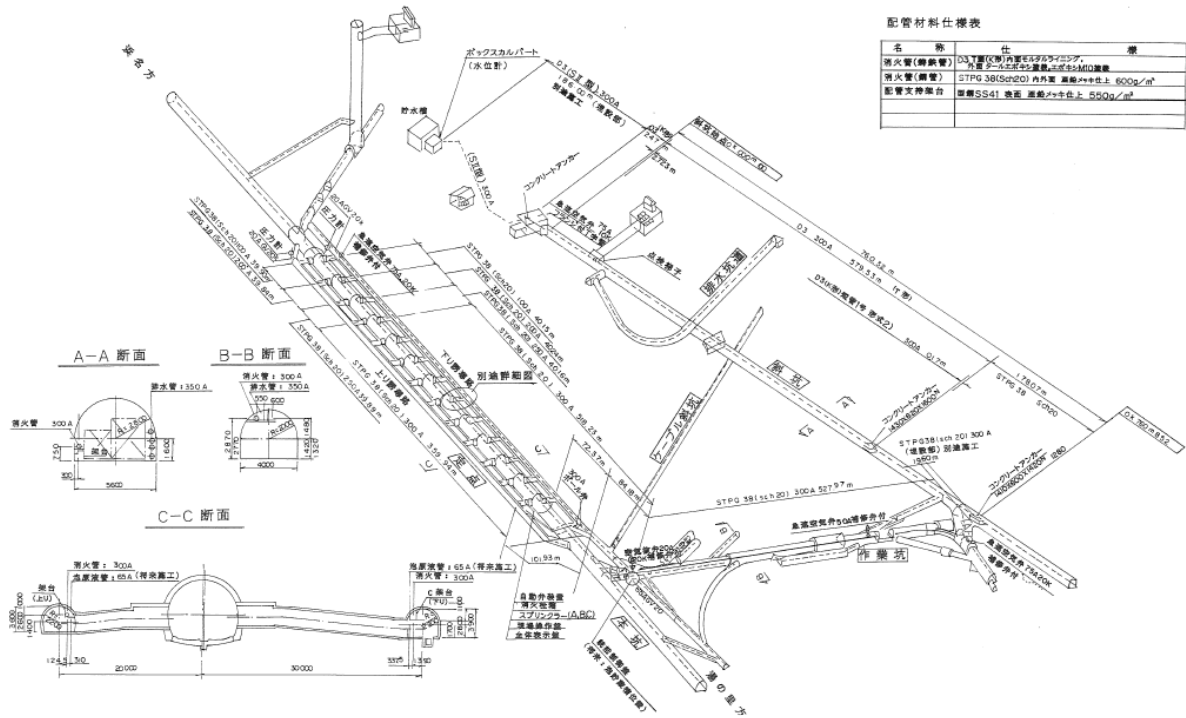


図 3.3.1-2 火災対策設備図 (その1) [3]

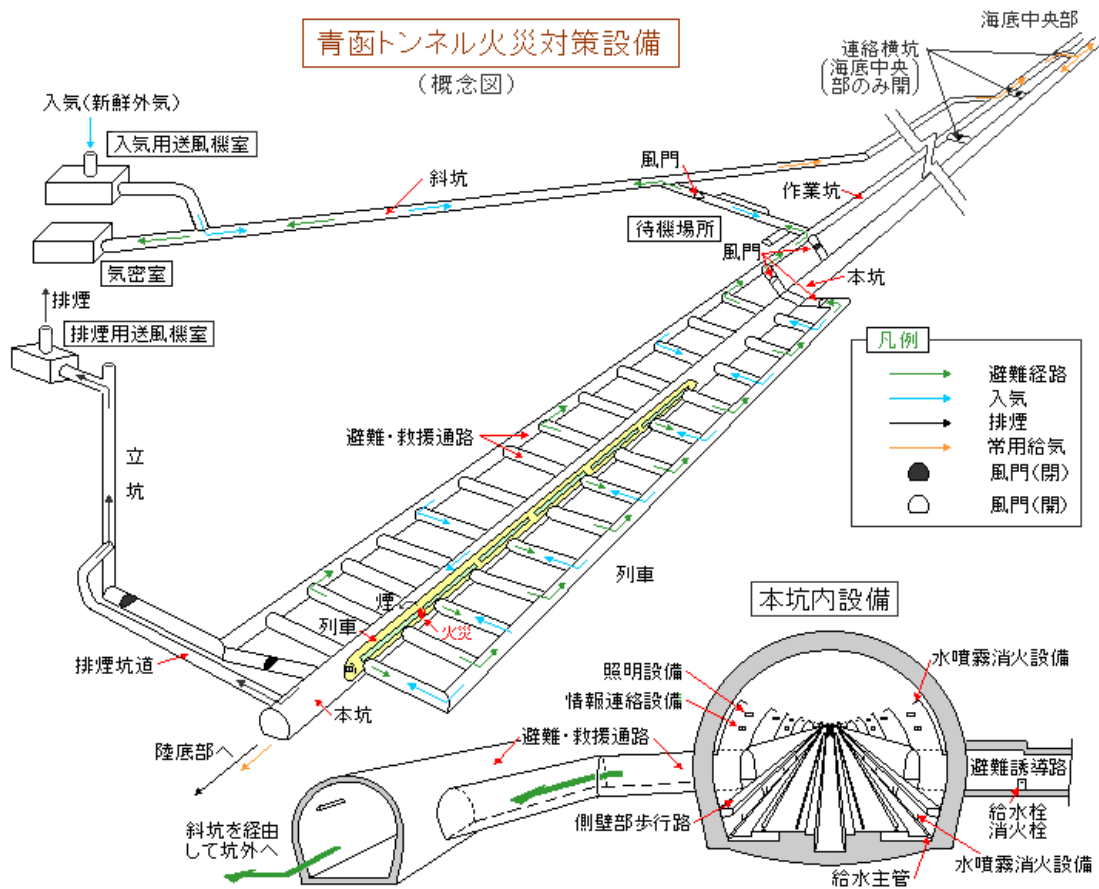


図 3.3.1-3 火災対策設備図 (その2) [3]

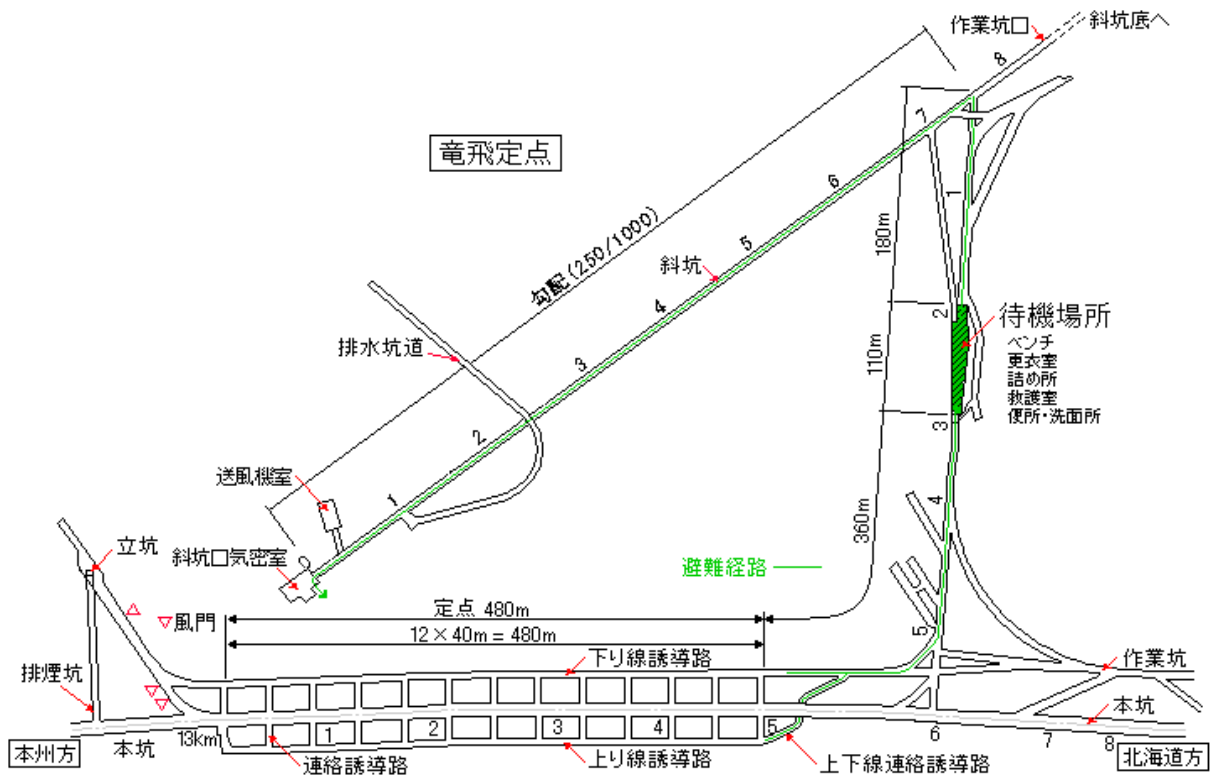
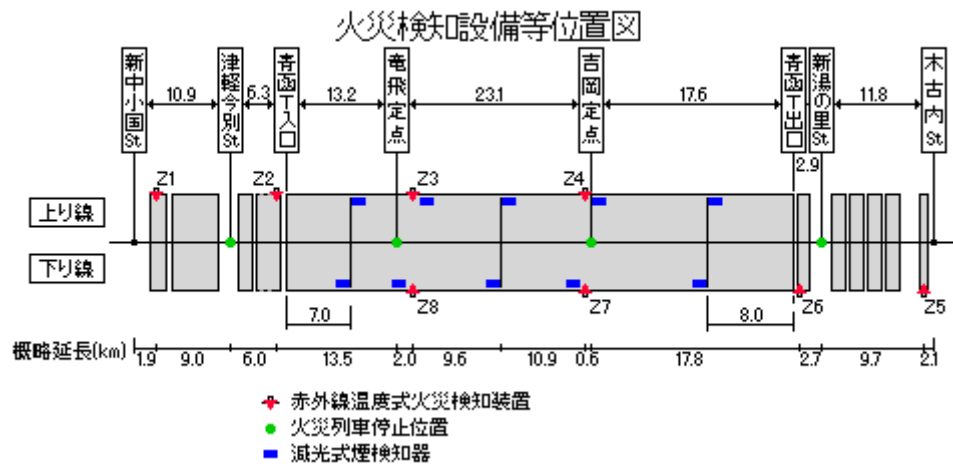


図 3.3.1-4 火災対策設備図 (その3) [3]

3.3.2 供用中のトンネルにおける安全確保に向けた動向

国内道路トンネル火災件数は、毎年 30 件前後発生している。日本における大規模トンネル火災事故としては 1979 年に発生した東名高速道路日本坂トンネル火災事故が有名である。同火災は消火まで 7 日間を費やした。しかし、地山自体で安定性を保持する構造であったことから崩壊には至らなかった。

公道トンネルは、法律上（国家賠償法第 2 条）では「公の営造物」に該当する。消防設備に関しては、消防法第 17 条において防火対象物はその設置が義務づけられているところである。ここで、防火対象物は、消防法第 2 条第 2 項において、山林又は舟車、船きよ若しくはふ頭に繫留された船舶、建築物その他の工作物若しくはこれらに属する物とされていることから、公道トンネルは、直接的には消防法対象外であるとも考えられる。しかし、国土交通省では、東名高速道路日本坂トンネル火災を踏まえて「トンネル等における自動車の火災事故防止対策について」（昭和 54 年 12 月 21 日）を通達し、消防法等の関連法令の趣旨の周知の徹底を促している。

供用中の一般トンネルにおける火災事象にかかわる法令としては、道路法、道路構造令が挙げられる。特に火災にかかわる条項を以下に抜粋する。

(トンネル)

第三十四条 トンネルには、安全かつ円滑な交通を確保するため必要がある場合においては、当該道路の計画交通量及びトンネルの長さに応じ、適当な換気施設を設けるものとする。

2 トンネルには、安全かつ円滑な交通を確保するため必要がある場合においては、当該道路の設計速度等を勘案して、適当な照明施設を設けるものとする。

3 トンネルにおける車両の火災その他の事故により交通に危険を及ぼすおそれがある場合においては、必要に応じ、通報施設、警報施設、消火施設その他の非常用施設を設けるものとする。

一般トンネルにおける火災事象に対し、法令順守に向けた災害防止対策を整理する。火災が発生した場合には、トンネル利用する公衆等に災害の発生を知らせるとともに、避難誘導させるための設備と火災の延焼拡大を防ぐ設備が必要である。国土交通省は、「道路トンネル非常用施設設置基準」（昭和 56 年 4 月 21 日 最近改正平成 11 年 9 月 30 日）を作成し、以下に示す非常用施設を挙げている。

- ・ 通報・警報設備：非常電話、押ボタン式通報装置、火災検知器、非常警報装置
- ・ 消火設備：消火器、消火栓
- ・ 避難誘導設備：誘導表示板、排煙設備、避難通路
- ・ その他の設備：給水栓、無線通信補助設備、ラジオ再放送設備、拡声放送設備、水噴霧設備、監視装置等

なお、非常用設備の設置にあたっては、その延長および交通量に応じたトンネルの等級を設定し、火災その他の非常の際の連絡や危険防止、事故の拡大防止のため、トンネル等級区分に応じ

て、表 3.3.2-1 に示す施設を設置するものとする。ただし、高速自動車国道等設計速度が高い道路のトンネルで延長が長いトンネルまたは平面線形、もしくは縦断線形の特に屈曲している等見通しの悪いトンネルにあっては一階級上位の等級とすることが望ましい、としている。

表 3.3.2-1 トンネル等級別の非常用施設[2]

非常用施設		トンネル等級				
		AA	A	B	C	D
通報・警報設備	非常電話	○	○	○	○	
	押ボタン式通報装置	○	○	○	○	
	火災報知器	○	△			
	非常用警報装置	○	○	○	○	
消火設備	消 化 器	○	○	○		
	消 火 栓	○	○			
避難誘導設備	誘導標示板	○	○	○		
	排煙設備または避難通路	○	△			
その他の設備	給 水 栓	○	△			
	無線通信補助設備	○	△			
	ラジオ再放送設備または拡声放送設備	○	△			
	水噴霧設備	○	△			
	監視装置	○	△			

(注) 上表中「○印は原則として設置する」、「△印は必要に応じて設置する」ことを示す。

通報設備はトンネル内における火災その他の事故の発生を管理所等へ通報し、非常警報装置の制御、消火、救助活動等に役立たせるための設備であり、以下の仕様が定められている。

表 3.3.2-1 で示すように、火災そのものの防止とともに災害発生後の拡大防止に向け、多重かつ多様な防止対策が法令から求められる状況と実際の防止対策が講じられている状況がわかる。最終的には事業者がこれらの法令や事例を踏まえて、地層処分施設における操業時安全性の確保に向けて計画立案されていくことになると考えられる。

3.3.3 放射性物質取扱い施設の安全確保に向けた国内外の動向

放射性物質取扱い施設の安全確保に向けた国内外の動向として、以下の事項について整理する。

- ・原子力事象評価尺度
- ・深層防護
- ・多重障壁

(1) 原子力事象評価尺度

IAEA では、原子力施設に発生する事象評価の尺度として図 3.3.3-1 に示すように 8 つの段階に分けたレベルを定義している。このうちレベル 4 以上では、法定限度を超える外部放出により事業所外への影響が生じるレベルである。また、レベル 3 以下では、事業所内への影響が生じる事象である。

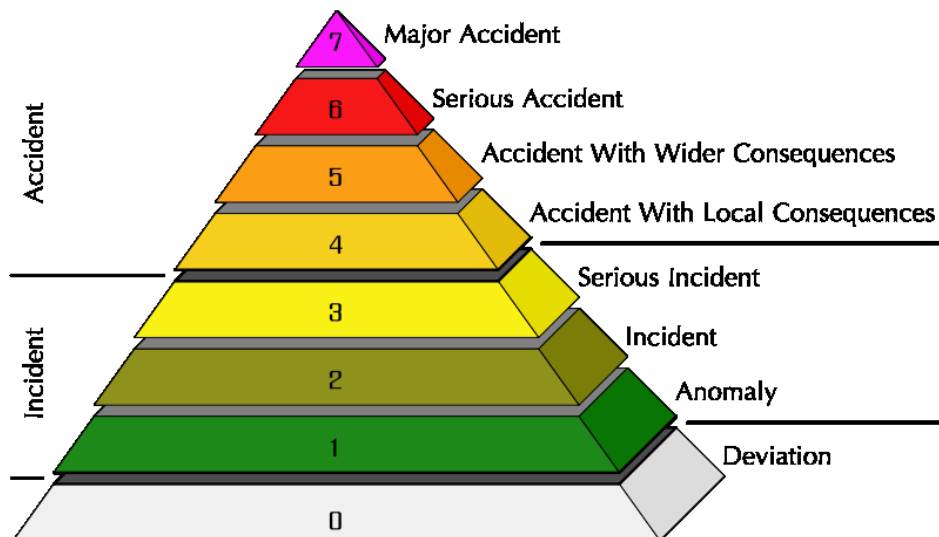


図 3.3.3-1 IAEA 国際原子力事象評価尺度[5]

(2) 深層防護

原子力安全を議論する上で重要な深層防護の考え方については、その解釈、及び適用（防護レベルの設定、防護策）について国際的にも国内においても様々な議論・変遷があり、それぞれ微妙に異なった考え方が示されている。特に原子力発電所の安全確保・向上に資するためには深層防護に関する共通認識が必要との観点から、IAEA や NRC 等の文献を整理し、深層防護の考え方に関する共通認識と、関連する主要な論点についてまとめた技術レポートが日本原子力学会 標準委員会から発行されている[6]。

日本原子力学会の技術レポートにおいて深層防護とは、人と環境を守るという原子力の安全確保の目的を達成するための方策を構築する考え方を定める「基本概念」とであるとされている。一般に、安全に対する脅威から人を守ることを目的として、ある目標をもったいくつかの障壁（「防護レベル」）を用意して、あるレベルの防護に失敗したら次のレベルで防護するという概念である。

この概念を適用して高い安全性を確保するためには、信頼性が高く、かつ共倒れしない「防護レベル」を、脅威に対して幾重にも準備しておく必要がある。ある防護レベルがどんなに頑健であったとしても、単一の防護レベルに完全に頼ってはならず、一つの防護レベルが万一機能し損なっても次の防護レベルが機能するようにしなければならない。

こうした深層防護の概念は原子力に特有のものではない。しかしながら、原子力施設は放射性物質を内蔵しているため、他の産業等が有するのと同種の危険（例えば化学プラントにおける火災、爆発等）があるだけではなく、放射線影響という原子力固有のハザードが存在する。さらに、万一、大量の放射性物質が放出される事故が発生した場合には、広範囲かつ長期間（放出された核種の種類によるが）人と環境に深刻な影響を及ぼすという特徴を持っている。このような原子力固有の特徴を踏まえて、放射性物質の放出を抑制し、放射線影響の顕在化を徹底的に防ぐため、原子力安全を確保する取り組みが必要である。原子力施設において人と環境を防護するにあたって、放射線や放射性物質が制御されずに環境中に放出される原因にも、それらが人と環境に影響を与えるまでの種々の現象にも、人知が及ばない状況が存在する。すなわち、人と環境に影響を与えるまでの諸現象や対策やその対策の効果には不確かさが存在するため、一つの対策のみでは完璧な対策とはなり得ない。事前には充分と思われた対策でも思いがけない理由で失敗するかもしれないという不確かさの影響を考慮して、別の対策、次の防護レベルの対策と繰り返すことにより、人と環境に対する一連の防護策全体の実効性を高めることが必要となる。このように、一つの対策では防げないという不確かさを考慮して、放射線リスクから人と環境を護るための防護策全体の実効性（成功確率）を高めるために適用されるのが原子力安全のための深層防護の概念である。

1) 我が国における深層防護および防護レベルの考え方

我が国では、平成 4 年 5 月 28 日付原子力安全委員会決定文（平成 9 年 10 月 20 日一部改正）「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて」において深層防護の思想に基づく安全確保対策に言及されている。なお、この文書は福島第一原子力発電所事故の経験に鑑み、平成 23 年 10 月 20 日決定「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策について」をもって廃止されている。

また、再処理施設安全指針の「指針 3.安全評価」には、「再処理施設の安全性の判断に当たり、

施設の設計の基本方針に深層防護の考え方が適切に採用されていることを確認するために設計基準事象を選定し評価するほか、一般公衆との隔離距離の妥当性を判断するために立地評価事故を想定し評価すること」とされており、深層防護の考え方に基づいた安全評価の目的が示されている。

福島第一原子力発電所事故以降は、事故の教訓、IAEA等の動向を踏まえ、原子力安全・保安院がシビアアクシデント対策を含めた深層防護の規制上の考え方を示している。ここでは、規制としての深層防護の考え方をこれまでの3つの層（異常・故障発生防止、事故への拡大防止、著しい炉心損傷防止）から、シビアアクシデント対策を含めた5つの層に枠組みの変更を行った[7]。（図 3.3.3-2、表 3.3.3-1 参照）

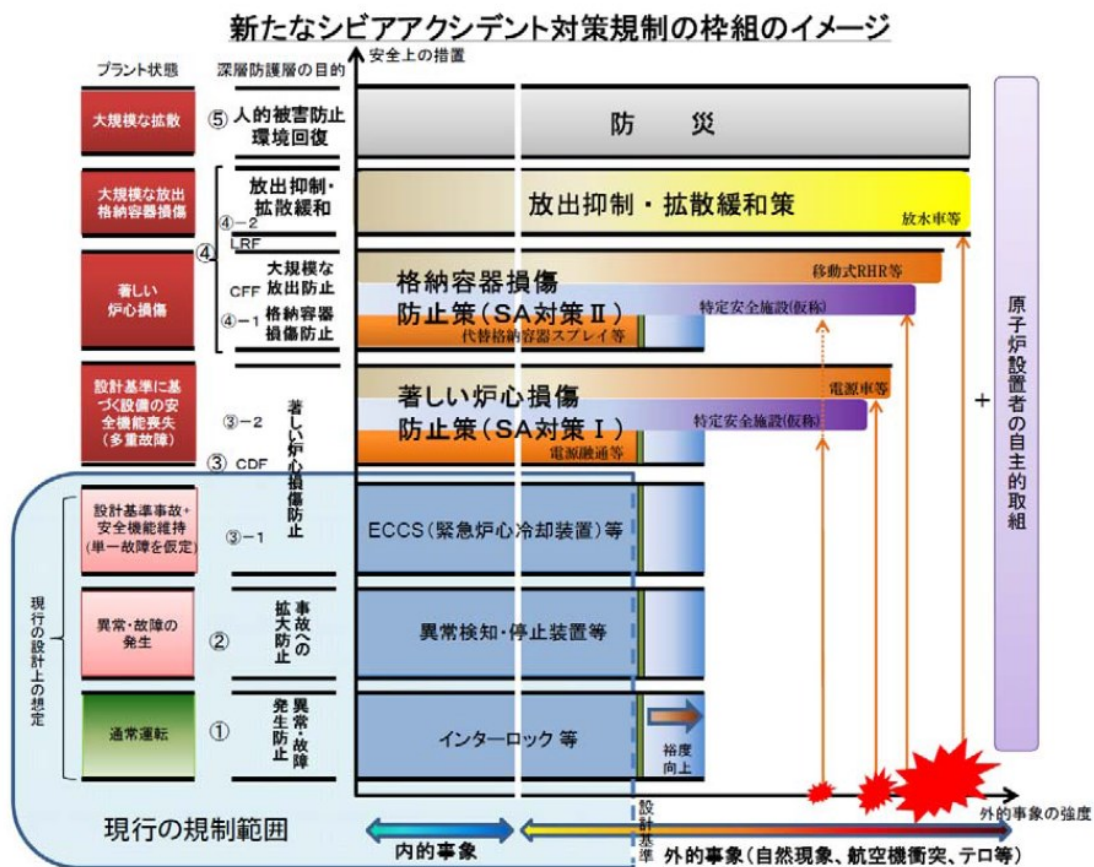


表 3.3.3-1 原子力安全・保安院の深層防護レベルの考え方[7]

防護レベル	内容
① 異常・故障の発生防止	保守的な設計、フェイルセーフやインターロックの採用、高度な品質保証活動の実施等、適切な設計上の想定（設計基準）への十分な対策により、安全機能に係る異常・故障の発生を防止する。
② 異常・故障の事故への拡大防止	設計基準において想定する異常や故障が発生したとしても異常を早期に検知し、異常が拡大しないうちに原子炉の停止等の必要な措置を講じて、事故への拡大を防止する。
③ 著しい炉心損傷の発生防止	
③-1 設計基準事故が発生したとしても、安全機能が維持（単一故障を仮定）され、著しい炉心損傷の発生防止（設計基準事故に対する著しい炉心損傷の発生防止及び影響緩和）	原子炉冷却材喪失事故（LOCA）など設計基準において想定する事故（設計基準事故）に対して、安全機能の単一故障及び外部電源喪失を仮定しても、ECCS等の工学的安全施設や事故時手順によって、著しい炉心損傷の発生及び周辺環境への放射性物質の放出を防止する。なお、安全評価に当たっては、保守的な手法により確認する。
③-2 多重故障及び共通要因故障によって設計基準に対する設備の安全機能が喪失した場合でも著しい炉心損傷の発生を防止（新たな規制要求）	③-1までの設計基準における想定を超える事故によって、③-1までで整備した安全機能の一部が喪失した場合に対しても、著しい炉心損傷の発生及び周辺環境への放射性物質の放出を防止するための対策を講じることが必要と考えられる。（図 3.3.3-2における「SA 対策 I」（以下単に「SA 対策 I」という。）参照）なお、安全評価に当たっては、不確かさの考慮を含む最適評価手法により確認する。
④ 著しい炉心損傷に対する影響緩和	
④-1 著しい炉心損傷が発生した場合でも、格納容器の損傷及び大規模な放射性物質の放出を防止（新たな規制要求）	③-1及び③-2の対策を取ったにもかかわらず、著しい炉心損傷が発生した場合においても、著しい炉心損傷の進行を抑制し、若しくはできるだけ長時間格納容器の健全性を維持し、大規模な放射性物質の放出を防止するための対策を講じることが必要と考えられる。（図 3.3.3-2における「SA 対策 II」（以下単に「SA 対策 II」という。）参照）
④-2 大規模な安全機能の喪失により格納容器からの大規模な放射性物質の放出が発生した場合でも、放射性物質の放出抑制・拡散緩和（新たな規制要求）	上記までの対策を講じたとしても、事故の進展を抑制することができない可能性や、影響の規模や頻度が想定し難い事象が生じる可能性は残る。このため、特定の事故シーケンスによらず大規模な原子炉施設の安全機能喪失により格納容器からの大規模な放射性物質の放出が発生した場合でも、放射性物質の放出抑制・拡散緩和策を整備しておくことが必要と考えられる。また、この対策は、上記の各層で事故進展を防止できなかった事象（例えば、格納容器バイパス事象）に対応するためにも重要と考えられる。
⑤ 放射性物質の環境への大規模な放出に対する防災対策（原子力災害対応）	上記の対策を講じたとしても、放射性物質の環境への大規模な放出が「絶対に起こらない」と想定してはならないと考えられる。このため、施設の状態に基づいて緊急事態区分を迅速に決定するための緊急時活動レベル（EAL）に加え、環境モニタリング等の結果を踏まえた運用上の介入レベル（OIL）に基づき、屋内退避、避難、安定ヨウ素剤の予防服用を行うなどの緊急防護措置を決定する仕組みを整備する。

一方、原子力安全委員会は、「発電用原子炉施設におけるシビアアクシデント対策—多重防護の考え方について—」（平成24年9月10日）[7]において、「深層防護」の概念を以下のように考えている。

○深層防護概念とは、「前段否定」の考え方に基づいて、防護策を多段に配置することを意味する。すなわち、各防護策は、その前段の防護策によって異常の発生や進展を防止できない場合があることを想定して設けられるものである。さらに、各防護策への性能要求は、その前段や後段の防護策の効果を意図的に過小評価することによって、厳しめに設定することが求められる。

また、原子力安全委員会における防護レベルの考え方では、IAEA 基準 SSR-2/1「原子力発電プラントの安全：設計」において目的によって定義された5つの防護レベル（表 3.3.3-2）に対する多層的な防護策を構築するための考え方や、各防護レベル（層）における防護策のあり方について論じている。例えば、防護策の成功基準を明確に設定できること、脅威となる事象やハザードを想定すること、IAEA 防護レベル第2層、第3層で対象とする「想定される初期事象（PIEs）は内的事象（internal events）、内的ハザード（internal hazard）、外的ハザード（或いは「外的事象」ということもある）（external hazards/events）からなり、それぞれの事象を念頭に対策を講じる必要があること等が示されている。また第2層、第3層では各層の内部でも深層防護概念が適用され、個々の防護策に必要な性能に対して裕度を持つことが求められるとしている。第1層については、立地、設計、製造、建設、運転の各段階を通じて、通常運転からの逸脱及び安全上重要な要素の故障を防止するための考慮を求めている。

表 3.3.3-2 原子力安全委員会による IAEA 基準の多重防護レベルの考え方[6]

防護レベル	防護レベルの目的
第1の防護レベル(第1層)	通常運転からの逸脱及び安全上重要な故障や失敗を防止する。
第2の防護レベル(第2層)	第1層の防護策の機能失敗によって起こりうる、想定される初期事象(Postulated Initiating Events: PIEs)のうち、比較的高頻度の事象である「予期される運転時の事象」(Anticipated Operational Occurrences: AOOs)が事故状態に進展することを防止するために、通常運転状態からの逸脱を検出して制御する。
第3の防護レベル(第3層)	想定される初期事象(PIEs)が第2層の防護策によって制御できない場合において、工学的安全施設、事故時手順等によって、炉心の損傷及びサイト外への重大な放出を防止し、プラントを安全な状態に復帰させる。
第4の防護レベル(第4層)	第3層の機能失敗に起因する事故影響を緩和する。第4層の最も重要な目的は、格納機能を確保し、これによって確実に放射性物質の放出を合理的に達成可能な限り低くすることである。
第5の防護レベル(第5層)	事故状態の帰結として起こる可能性のある放射性物質の放出による放射線影響を、防災対策によって緩和する。

2) IAEA における深層防護の考え方

IAEA における深層防護（Defence-in-depth）の定義は、「運転時の異常な過渡変化の進展を防止し、運転状態およびいくつかの障壁では事故条件として、放射線源または放射性物質と従業員及び公衆又は環境との間に設置された物理障壁の有効性を維持するための様々なレベルでの多様な装置と手順の階層的な展開」である。

その目的は、以下に挙げるとおりである。また、防護レベルは、表 3.3.3-3 に示すような5つ

のレベルで構成される。

- (a) 潜在的な人的失敗及び機器故障を補償する
- (b) 施設と障壁それ自身に対する損傷を回避し障壁の有効性を維持する
- (c) 障壁が完全に効果的でないような事象の事故条件で従業員、公衆及び環境を危害から防護する

IAEA の深層防護の考え方は、安全に関連するすべての活動に独立した多層の措置が準備されていることを確保することであり、したがって万一故障や失敗が生じても、それは適切な措置により検知されて修正されるか是正されるというものである。深層防護の考え方を設計と運転の全体にわたって適用することにより、プラント内の設備の故障又は人間起因の事象を含め、運転時に予想される事象及び事故に対して並びにプラント外に起因する事象に対して防護することができる。

表 3.3.3-3 IAEA の深層防護のレベルとその目的および目的達成に不可欠な手段[9]

防護レベル	目的	目的達成に不可欠な手段
レベル 1	異常運転や故障の防止	保守的設計及び建設・運転における高い品質
レベル 2	異常運転の制御及び故障の検知	制御、制限及び防護系、並びにサーベランス特性
レベル 3	設計基準内への事故の制御	工学的安全施設及び事故時対応
レベル 4	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和を含む過酷なプラント状態の制御	保管的手段及び格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント
レベル 5	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	サイト外の緊急時対応

(3) 多重障壁

多重障壁とは、万が一の事故の際に公衆被ばくを防止するため、施設内で管理している放射性物質の放出経路上に多重の物理障壁を設け、各障壁の持つ放出率の低減効果および放出に対する時間的な遅延効果によって、放射性物質の環境への放出割合の低減をはかることである。前節「深層防護」と混同されることがあるが、多重障壁は深層防護という概念のハード面における適用例に過ぎず、同一ではない。深層防護は各対策が干渉せず、独立で機能する必要がある。多重障壁は物理的な障壁による対策であり、電源喪失等の影響を受けずに効果を発揮するという意味で、単純だが非常に有効な深層防護の考え方の1つであると言える。また、核分裂生成物のうち、気化しやすい核種や反応性の低い希ガスは環境放出されやすいため影響が大きいですが、これらを物理的な障壁以外で封じることが難しい。

1) 原子力発電所の多重障壁

原子力発電所の多重障壁については、図 3.3.3-3 に示す 5 重の壁と呼ばれる多重障壁によってハザードとなるウラン燃料を閉じ込めている。

【5重の壁】

①第1の障壁： 燃料ペレット

核燃料物質を高温で焼き固めたもので容易に飛散しがたい状態としている。

②第2の障壁： 燃料被覆管

耐腐食性のステンレス鋼の管に燃料ペレットを設置し、溶接構造とすることで密閉している。

③第3の障壁： 圧力容器

燃料集合体を鋼製容器にて密閉する。

④第4の障壁： 格納容器

圧力容器をさらに格納容器で密閉する。

⑤第5の障壁： 原子炉建屋

最後の障壁として建屋が存在する。

建屋に対しては、気密性が要求されるものではないが、放射性物質放出の障壁としての効果は一定程度期待できる。

⑤ 原子炉建屋



図 3.3.3-3 原子炉施設における多重障壁の概念

2) 廃棄物管理施設の多重障壁

高レベル廃液をガラス固化したガラス固化体を管理保管する廃棄物管理施設について、多重障壁の考えに基づいて適用した場合の第1障壁～第4障壁を以下に示す。

①第1の障壁： 固化ガラス

高レベル廃棄物を熔融ガラスとともに固化処理することによって、容易に飛散しがたい状態としている。(原子力発電所の原子炉における燃料ペレットに相当する。)

この第1の障壁を機能維持するための方法が冷却管理であり、具体的方法の1つとして、頑健性を高めるために動力電源による駆動方式ではなく自然空冷方式としている。

冷却用の空気は外部から取り入れ、温度差により発生する空気の密度差を利用して通気を確保している。

②第2の障壁： ガラス固化体キャニスタ

耐腐食性のあるステンレス鋼の容器を使用し、溶接構造とすることで密閉性を高めている。

③第3の障壁： 収納管

ガラス固化体キャニスタを収納するためのステンレス鋼製の管であり、プラグ型の蓋を設置することにより密閉されている。

また、腐食性の観点において、長期間のガラス固化体キャニスタの健全性維持として、当該キャニスタが直接、外部から取り込んだ冷却空気に触れないように、管が2重構造となっている。

ガラス固化体キャニスタを収納する管が収納管、その外側の管が通風管と呼ばれている。冷却空気は、収納管と通風管の間の隙間を通過することとなる。

さらに、収納管中の雰囲気は常時負圧とされ、排気は、高性能粒子フィルタを通過して排気筒から排出されており、万一、ガラス固化体キャニスタに汚染があったとしても放射性物質を外部に放出させない仕組みとなっている。

その際、閉じ込め性を確認するために、排気系統においては、放射線検知装置を設置し、常時、放射線モニタリングが実施されている。

④第4の障壁： 建屋壁

ガラス固化体は、放射線遮蔽・線量低減の観点から原則、地下階に保管管理される。

また、ガラス固化体が収容されている部屋の壁、さらに建屋の外壁が障壁となっている。

一方で、ガラス固化体からの放射線によるダクト部のストリーミング及びスカイシャインの低減目的と自然空冷による除熱目的を両立させるために、冷却空気の入口と出口のダクト部には、迷路版と呼ばれる遮蔽物が設置されている。

さらには、地震、竜巻、航空機落下等による外的事象に対しても健全性を維持できるように建屋壁が設計されている。

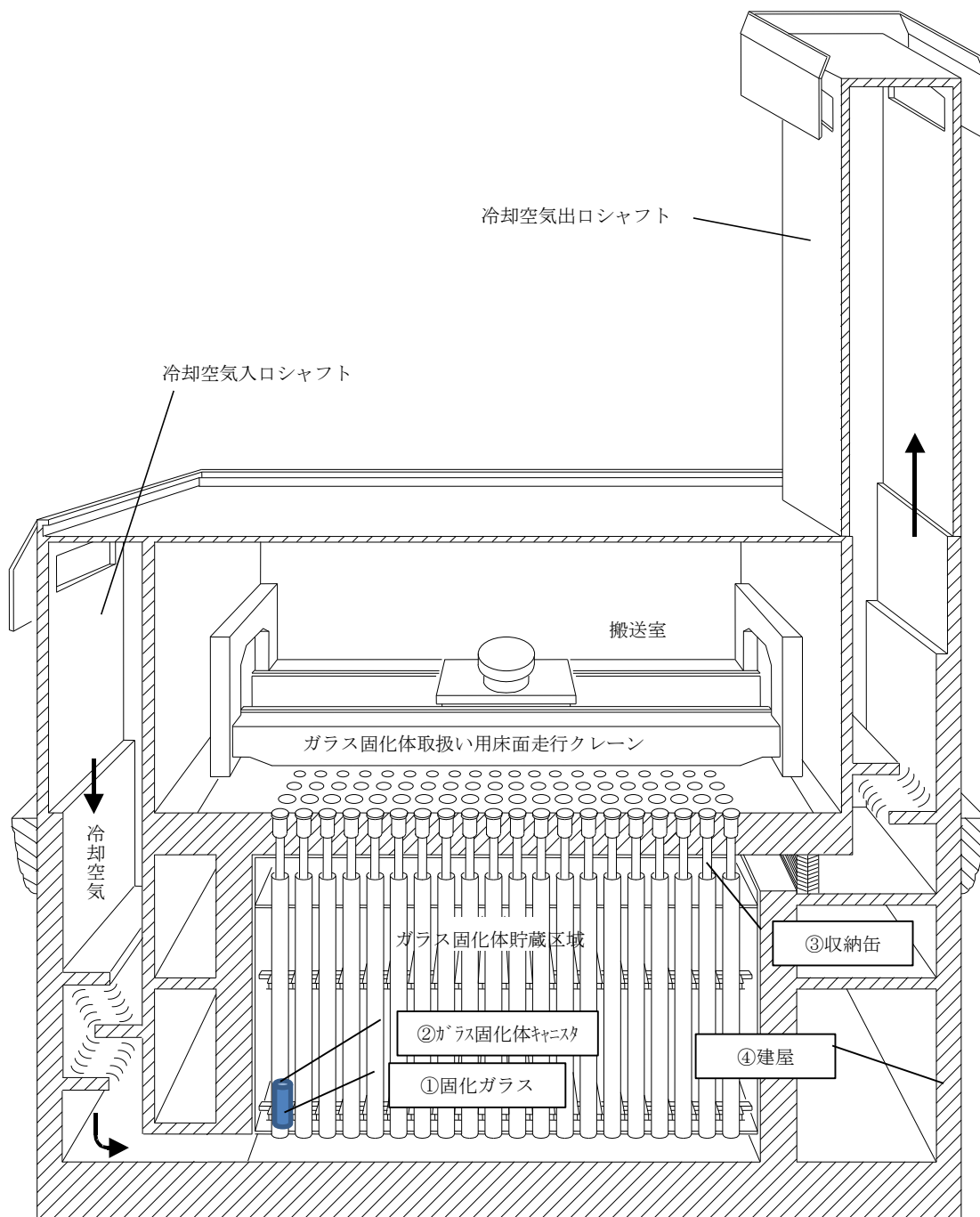


図 3.3.3-4 ガラス固化体の廃棄物管理施設における多重障壁の概念

3.3.4 地層処分における作業時の安全確保の原則的な考え方の検討

前項での国際原子力事象と深層防護に対する最新の動向について整理してきた結果として、深層防護が、放射性物質を取り扱う施設における安全確保を図るための原則的な考え方である。また、深層防護は独立かつ多重的な安全確保対策を講じる多重の障壁が、システムを設計もしくは技術を選択する際の原則的な考え方であると言える。これは、労働安全衛生法や鉱山保安法と言った労働安全関係法令においても同様であり、安全確保に向けた多重の方策を求め、異常事象・事故の“発生防止”、“拡大防止”とともに、万が一異常事象・事故が発生した際の“人的被害防止”の観点での諸条項が示されている。

本検討の対象施設である地層処分施設の作業時の安全確保においても、このような深層防護の考え方で安全対策を講じていくことが原則になるものと考えられる。地層処分施設の作業時の安全確保に向け、深層防護のレベルに応じた目標を表 3.3.4-1 のように設定した。

レベル 5 については、地層処分施設は原子力施設と比較して可能性は小さいが、クライシスマネジメントの観点から設定することとした。

表 3.3.4-1 深層防護のレベルに応じた目標(案)

レベル	原子力標準における目標	地層処分施設の目標 (案)	備考
レベル 1	異常運転や故障の防止	異常事象の発生防止	通常作業
レベル 2	異常運転の制御及び故障の検知	異常事象の検知および拡大防止	検知と初期対応
レベル 3	設計基準内への事故の制御	放射能の漏えい防止	漏えい防止
レベル 4	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和を含む過酷なプラント状態の制御	放射能を施設外への漏えい防止	事故の防止
レベル 5	放射性物質の大規模な放出による放射線影響の緩和	放射線影響の緩和	事故の影響緩和

3.4 操業安全対策の検討

平成 24 年度に抽出した操業時の安全対策技術について、次の視点で分析を加え各安全対策技術の特徴として整理する。

○深層防護の考え方に応じた分析

深層防護の考え方と操業時の安全対策技術の位置付けを整理していくことを目的に、国際原子力事故事象分類を踏まえ、多重化の原則となる“発生防止”、“拡大防止”とともに、万が一、異常事象・事故が発生した際の“人的被害防止”などの観点で、操業時の安全対策技術を分析する。

○着目スケールに対する分析

操業時の安全対策技術は、地層処分施設について物理的なスケールを区分として、整理することができるものと考えられる。また、操業時の安全対策技術は、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、更なる操業時の安全性の確保に寄与していくものと考えられる。

3.4.1 深層防護の考え方に応じた各安全対策技術の特徴

表 3.3.4-1 に示した深層防護に基づいた地層処分(注)の安全確保の考え方を踏まえ、火災に対する安全対策について放射線安全、一般労働安全の観点から表 3.4.1-1、表 3.4.1-2 に整理した。

表 3.4.1-1 作業中の火災に対する放射線安全の考え方（案）

防護レベル	目的（状態）	目的達成に不可欠な手段	対策例（火災）
レベル1	異常事象を発生させない （通常作業）	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	作業前点検教育・訓練多重化
レベル2	異常事象の検知および拡大防止（異常発生）	異常の検知、機能維持の防護策	通報設備 消火設備 風門
レベル3	放射能を漏らさない（異常拡大）	容器内での閉じ込め	換気制御 防火扉
レベル4	放射能を施設外へ出さない（事故の防止）	施設内での閉じ込め	除去フィルタ 隔離壁 避難経路
レベル5	放射線影響の緩和（坑外漏えい）	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難

表 3.4.1-2 作業中の火災に対する一般労働安全の考え方（案）

防護レベル	目的（状態）	目的達成に不可欠な手段	対策例（火災）
レベル1	災害、故障を起こさない （通常作業）	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	定期点検教育・訓練多重化
レベル2	災害、故障の検知および拡大防止（災害発生）	災害、故障の検知、消火対策	通報設備 消火設備 風門など
レベル3	作業員の人命確保（災害拡大）	災害の隔離 退避、坑外避難	換気制御（自然通気） 防火扉 避難経路
レベル4	環境影響の緩和（サイト外への災害拡大）	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難

分析の結果、深層防護のレベルに対する操業時の安全対策技術は、以下で述べるような特徴を有することが分かる。

レベル 1 に対応する操業時の安全対策技術は、“異常事象を発生させない”ことに向けたものであり、通常の操業時の作業による異常事象・事故のそのものの発生を起こさせないように講じる措置が中心となるものである。

レベル 2 に対応する操業時の安全対策技術は、異常事象・事故に至る状態にならないように“異常事象の検知および拡大防止”ことに向けたものが中心である。異常事象・事故そのものの検知だけではなく、地層処分施設の構成要素の状況を検知する技術も含まれている。なお、これらの安全対策技術（検知技術）は、次レベルでの事故の制御を行っていく際にも必要となる技術でもあり、次レベルでの要求や制約も含めて技術を選択することで安全確保が効率的かつ合理的に達成されていくものと考えられる。

レベル 3 に対応する操業時の安全対策技術は、前レベルで述べた監視技術に加え、異常事象・事故の拡大の防止に向けた技術が該当する。特に、これらの技術については、代替となる設備も含めて準備することにより多重の障壁をもって安全性確保できるものと考えられる。また、異常事象・事故の発生場所における技術的成立性の確保だけではなく、例えば配管や配線などのルートについて異常事象・事故の発生時の継続性も考慮して技術選択または配置（レイアウト計画）が必要なものである。さらに、これらの技術は、当該レベルのみを目的としたものではなく、次レベルでの拡大防止を図っていく際にも必要となる技術でもあり、次レベルでの要求や制約も含めて技術を選択することで安全確保を効率的かつ合理的に達成されていくものと考えられる。

レベル 4 に対応する操業時の安全対策技術は、異常事象・事故の拡大防止に向けた措置が中心となるものである。前レベルでの技術による拡大防止に向けた技術とともに、作業員の避難を確実にするための諸技術が該当する。

レベル 5 に対応する操業時の安全対策技術は、レベル 4 に該当する異常事象・事故の拡大防止に向けた監視や措置と合わせ、施設外の防災計画技術が該当する。

3.4.2 処分施設のスケールと安全対策技術との関係

作業時の安全対策技術について、対象となるスケールの視点から分析を図った。スケールは、以下の4つのスケールを設定し、安全対策技術との関係を図 3.4.2-1 に示す。

- ・原位置スケール
- ・坑道スケール
- ・処分場スケール
- ・広域スケール



図 3.4.2-1 処分施設のスケールと安全対策技術との関係

分析の結果を踏まえ、作業時の安全対策技術の特徴を以下に示す。

原位置スケールに適用される作業時の安全対策技術は、作業を実施することにより発生する異常事象・事故を防止するための技術が該当する。これは異常事象・事故の原因となる源を無くすとの思想にたった安全対策となる。また、そのような安全対策の実施状況を監視・管理するための方法も合わせて含まれてくる。

坑道スケールに対応する作業時の安全対策技術は、地層処分施設が安全であることを把握するために構成部材や環境の状態を監視するための諸技術、異常事象・事故の進展を防止するための諸技術、さらに被害の拡大を防止するための諸技術など、様々な安全対策技術が該当する。より大きなスケールへ異常事象・事故が進展しないように、もしくは次スケールへの進展の準備（例えば避難に向けた諸技術）として、坑道スケールで講じる安全対策が多くなり、そのため坑道には安全確保への負荷が大きいスケールでもある。なお、原位置スケールと同様に、安全対策の実施状況を監視・管理するための方法も合わせて含まれる。

処分場スケールに対応する作業時の安全対策技術は、津波や洪水または森林火災と言った自然災害による異常事象・事故を施設内に作用させないために講じる技術が該当する。また、異常事象・事故による被害を防止するための作業員の避難にかかわる措置についても処分場スケールに対応する安全対策技術となる。一方、坑道スケールに該当する、給排水や給排気および動力が必要な技術が、期待した安全対策の効果を得るためには、坑道内のルート（動線）についても成立していることが必要であり、そのルートは処分場スケールでのレイアウトを考慮する必要がある。すなわち、安全対策の視点から、地層処分施設の特徴である広がりのあるスケールを活用し、合理的かつ効率的に対策技術が可能であるとともに、合理的かつ効率的な地層処分施設のレイアウトが存在するものと考えられる。

広域スケールに対応する作業時の安全対策技術は、処分場スケールと同様に、自然災害による異常事象や事故を施設内に作用させないために講じる技術が該当する。これは立地に依存した自然災害の発生やその大きさを低減させる思想にたった技術である。

一方、事業継続の視点からの作業時の安全対策技術や、実施状況を管理するための作業時の安全対策技術は、全てのスケールを横断して該当する。すなわち、安全を継続させるための諸技術は、スケールを横断してその成立性を確保しておくことが必要であることを示唆したものである。

3.4.3 安全対策技術の特徴の整理

作業時の安全対策技術について分析した結果をまとめる、

作業時における各々の安全対策技術は、深層防護の各レベルの目的に応じた効果と、対策効果をもって適用される（できる）スケールが決まっており、それらの関係を取りまとめて図 3.4.3-1 に示す。



図 3.4.3-1 安全対策技術の体系化の例

作業時の安全対策技術は、二つの軸により整理されるものと考えられる。この軸とは、対象スケールに応じた安全対策と、深層防護の目的レベルに対応した安全対策である。どちらの軸においても作業時の安全対策技術を多重的に組み合わせることで安全確保がされることになる。特に横の安全対策の多重化は、異常事象・事故の発生確率または損失コストとの関係があるものと考えられ、安全対策を選択する際の評価軸となりうるものと考えられる。なお、作業時の安全対策の評価の考え方については、次章にて検討を加える。また、作業時の安全対策技術の効果を定量化するために必要なものとして、シミュレーション等による解析や検証および解析に必要となるデータを取得する試験がある。

作業時の安全対策技術について、起因事象別に整理した結果を表 3.4.3-1～表 3.4.3-4 に示す。また、対応する深層防護のレベル毎に整理した結果を表 3.4.3-5～表 3.4.3-9 に示す。なお、これらの表では、対策するスケールについても合わせて整理した。

表 3.4.3-1 異常事象・事故の全般に対する安全対策技術（案）

起回事象	法令・対象		安全対策技術（案）
全般	鉱山保安法関連	「その他の適切な措置」	警報連絡装置の設置
全般	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	非常警報装置
全般	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	非常電話
全般	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	押ボタン式通報装置
全般	(応急対策)	状態監視	ガラス固化体の状況把握
全般	(応急対策)	状態監視	オーバーパックの状況把握
全般	(応急対策)	状態監視	緩衝材の状況把握
全般	(恒久対策)	状態監視	坑道内の状況把握
全般	(応急対策)	状態監視	代替設備・手法による状況把握
全般	(恒久対策)	状態監視	監視機能の代替設備を投入可能な施設構造
全般	(応急対策)	状態監視	坑道内の放射線量・放射性物質計測
全般	(応急対策)	状態監視	坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測
全般	(応急対策)	状態監視	状況把握・監視設備の状態確認
全般	(応急対策)	放射線安全	坑道内での放射性物質の拡散防止対策
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	警報避難設備等
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	避難用器具
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	避難等の訓練
全般	労働安全衛生法	「避難誘導設備」	誘導表示板
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	無線通信補助設備
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	ラジオ再放送設備
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	拡声放送設備
全般	(応急対策)	作業員の避難	作業員退避
全般	労働安全衛生法	「避難誘導設備」	避難通路
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	退避等
全般	(応急対策)	被害防止	負傷者の救助、救出
全般	(応急対策)	防災計画	避難指示対象区域の設置
全般	(応急対策)	状態監視	屋外の放射線量・放射性物質計測
全般	(応急対策)	放射線安全	応急的な放射性物質の拡散防止対策
全般	(応急対策)	放射線安全	応急的な放射線遮へい
全般	(応急対策)	事業継続	廃棄体の搜索
全般	(応急対策)	事業継続	障害物の撤去
全般	(応急対策)	事業継続	水中、地中からの放射性物質の回収
全般	(応急対策)	事業継続	破損したオーバーパック、ガラス固化体の回収
全般	(恒久対策)	事業継続	対象区域の除染
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	監視装置
全般	(恒久対策)		機能維持のための無停電化

表 3.4.3-2 火災に対する安全対策技術（案）

起因事象	法令・対象		安全対策技術（案）
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	裸火等に係る措置
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	油脂類等に係る措置
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	給油するときの措置
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	発破時の措置
火災	労働安全衛生法	「火災防止措置にかかわる条項」	ガス溶接作業時の措置
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	坑外からの延焼を防止する措置
火災	労働安全衛生法	「火災防止措置にかかわる条項」	消火設備
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」	消火器
火災	労働安全衛生法	「消火設備」	消火栓
火災	労働安全衛生法	「その他の設備」	給水栓
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」	消火砂
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」	散水設備
火災	(応急対策)	状態監視	自動送気システムの状態把握
火災	(応急対策)	代替設備の準備	代替設備・手法による送気
火災	(恒久対策)	代替設備の準備	送気機能の代替設備を投入可能な構造施設
火災	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	火災検知器
火災	(応急対策)	被害防止	緩衝材、オーバーバック、ガラス固化体の冷却
火災	労働安全衛生法	「避難誘導設備」	排煙設備
火災	労働安全衛生法	「その他の設備」	水噴霧設備
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害を防止するための措置」	避難にかかわる事項
火災	鉱山保安法関連	「その他の必要な保安設備」	2つ以上の地上との連絡通路の確保
火災	鉱山保安法関連	「その他の必要な保安設備」	立坑または急勾配斜坑における措置
火災	労働安全衛生法	「火災防止措置にかかわる条項」	防火担当者

表 3.4.3-3 地震に対する安全対策技術（案）

起回事象	法令・対象		安全対策技術（案）
地震	(恒久対策)	地震被害を防止するための対策	強固地盤の選定
地震	(恒久対策)	地震被害を防止するための対策	揺れ軽減対策（坑道への免震・制振技術の適用）

表 3.4.3-4 津波・洪水・突発湧水に対する安全対策技術（案）

起回事象	法令・対象		安全対策技術（案）
津波・洪水	(恒久対策)	津波・洪水	坑口を高所へ設置
津波・洪水・突発湧水	(応急対策)	状態監視	ポンプ設備の状況確認
津波・洪水・突発湧水	(応急対策)	代替設備の準備	代替設備・手法による揚水
津波・洪水・突発湧水	(恒久対策)	状態監視	ポンプ機能の代替設備を投入可能な構造施設

表 3.4.3-5 深層防護レベル1に対応する安全対策技術（案）とその対応スケール

安全対策技術の区分		多重防護のグレード					対策スケール				特記
		Incident				Accident	ファースケール	処分場スケール	坑道スケール	EBSスケール	
起回事象	安全対策技術（案）	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5					
火災	裸火等に係る措置								○	○	
火災	油脂類等に係る措置								○	○	
火災	給油するときの措置								○	○	
火災	発破時の措置								○	○	
火災	ガス溶接作業時の措置								○	○	
火災	坑外からの延焼を防止する措置							○			立地および坑口による対策
地震	強固地盤の選定						○				立地による対策
地震	揺れ軽減対策（坑道への免震・制振技術の適用）								○		
全般	監視装置						○	○	○	○	設置箇所と配管（動線）の考慮
全般	機能維持のための無停電化						○	○	○	○	
津波・洪水	坑口を高所へ設置								○		立地および坑口による対策

○：対応するスケールを示す。

表 3.4.3-6 深層防護レベル2に対応する安全対策技術（案）とその対応スケール

安全対策技術の区分		多重防護のグレード					対策スケール				特記
		Incident				Accident	ファースケール	処分場スケール	坑道スケール	EBSスケール	
起回事象	安全対策技術（案）	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5					
火災	防火担当者						○	○	○	○	
全般	ガラス固化体の状況把握								○		
全般	オーバーバックの状況把握								○		
全般	緩衝材の状況把握								○		
全般	坑道内の状況把握								○		
全般	代替設備・手法による状況把握								○		代替手法の準備による多重化
全般	監視機能の代替設備を投入可能な施設構造								○		代替手法の準備による多重化
全般	坑道内の放射線量・放射性物質計測								○		
全般	坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測								○		
全般	状況把握・監視設備の状況確認								○		
全般	監視装置						○	○	○	○	設置箇所と配管（動線）の考慮
全般	機能維持のための無停電化						○	○	○	○	
津波・洪水・突発湧水	ポンプ設備の状況確認								○		

○：対応するスケールを示す。

表 3.4.3-7 深層防護レベル3に対応する安全対策技術（案）とその対応スケール

安全対策技術の区分		多重防護のグレード					対策スケール				特記
		Incident				Accident	ファースケール	処分場スケール	坑道スケール	EBSスケール	
起回事象	安全対策技術（案）	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5					
火災	消火設備								○		設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	消火器								○		
火災	消火器								○		
火災	消火栓								○		設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	給水栓								○		設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	消火砂								○		
火災	散水設備								○		設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	自動送気システムの状態把握							△	○		代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	代替設備・手法による送気							△	○		代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	送気機能の代替設備を投入可能な構造施設							△	○		代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	火災検知器							△	○		配線（動線）の考慮
火災	緩衝材、オーバーバック、ガラス固化体の冷却							△	○		
火災	防火担当者						○	○	○	○	
全般	警報連絡装置の設置							△	○		配線（動線）の考慮
全般	非常警報装置							△	○		配線（動線）の考慮
全般	非常電話							△	○		配線（動線）の考慮
全般	押ボタン式通報装置							△	○		配線（動線）の考慮
全般	ガラス固化体の状況把握								○		
全般	オーバーバックの状況把握								○		
全般	緩衝材の状況把握								○		
全般	坑道内の状況把握								○		
全般	代替設備・手法による状況把握								○		代替手法の準備による多重化
全般	監視機能の代替設備を投入可能な施設構造								○		代替手法の準備による多重化
全般	坑道内の放射線量・放射性物質計測								○		
全般	坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測								○		
全般	状況把握・監視設備の状態確認								○		
全般	坑道内での放射性物質の拡散防止対策							△	○		
全般	監視装置						○	○	○	○	設置箇所と配管（動線）の考慮
全般	機能維持のための無停電化						○	○	○	○	
津波・洪水・突発湧水	ポンプ設備の状況確認								○		

○：対応するスケールを示す。

△；事業の進捗により必要となる可能性のある技術を示す。

表 3.4.3-8 深層防護レベル4に対応する安全対策技術（案）とその対応スケール

安全対策技術の区分		多重防護のグレード					対策スケール				特記
		Incident				Accident	ファースケール	処分場スケール	坑道スケール	EBSスケール	
起回事象	安全対策技術（案）	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5					
火災	自動送気システムの状態把握							△	○		代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	代替設備・手法による送気							△	○		代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	送気機能の代替設備を投入可能な構造施設							△	○		代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	火災検知器							△	○		配線（動線）の考慮
火災	緩衝材、オーバーバック、ガラス固化体の冷却							△	○		
火災	排煙設備							△	○		一般労働安全と放射線安全、換気と避難（動線）の考慮
火災	水噴霧設備							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難と配管（動線）の考慮
火災	避難にかかわる事項							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
火災	2つ以上の地上との連絡通路の確保							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
火災	立坑または急勾配斜坑における措置							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	警報連絡装置の設置							△	○		配線（動線）の考慮
全般	非常警報装置							△	○		配線（動線）の考慮
全般	非常電話							△	○		配線（動線）の考慮
全般	押ボタン式通報装置							△	○		配線（動線）の考慮
全般	坑道内での放射性物質の拡散防止対策							△	○		
全般	警報避難設備等							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	避難用器具							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	避難等の訓練							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	誘導表示板							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	無線通信補助設備							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難と配線（動線）の考慮
全般	ラジオ再放送設備							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難と配線（動線）の考慮
全般	拡声放送設備							△	○		一般労働安全と放射線安全、避難と配線（動線）の考慮
全般	作業員退避							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	避難通路							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	退避等							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	負傷者の救助、救出							○	△		一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	監視装置						○	○	○	○	設置箇所と配管（動線）の考慮
全般	機能維持のための無停電化						○	○	○	○	
津波・洪水・突発湧水	代替設備・手法による揚水							△	○		代替手法の準備による多重化、配管（動線）の考慮
津波・洪水・突発湧水	ポンプ機能の代替設備を投入可能な構造施設							△	○		代替手法の準備による多重化、配管（動線）の考慮

○：対応するスケールを示す。

△；事業の進捗により必要となる可能性のある技術を示す。

表 3.4.3-9 深層防護レベル5に対応する安全対策技術（案）とその対応スケール

安全対策技術の区分		多重防護のグレード					対策スケール				特記
		Incident				Accident	ファースケール	処分場スケール	坑道スケール	EBSスケール	
起回事象	安全対策技術（案）	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5					
火災	防火担当者						○	○	○	○	
全般	避難指示対象区域の設置						○				
全般	屋外の放射線量・放射性物質計測						○				
全般	応急的な放射性物質の拡散防止対策						○	○	○	○	
全般	応急的な放射線遮へい						○	○	○	○	
全般	廃棄体の捜索						○	○	○	○	
全般	障害物の撤去						○	○	○	○	
全般	水中、地中からの放射性物質の回収						○	○	○	○	
全般	破損したオーバーバック、ガラス固化体の回収						○	○	○	○	
全般	対象区域の除染						○	○	○	○	
全般	監視装置						○	○	○	○	設置箇所と配管（動線）の考慮
全般	機能維持のための無停電化						○	○	○	○	

○：対応するスケールを示す。

表 3.4.3-10 安全対策技術の分析結果一覧

起因事象	安全対策技術の区分			多重防護のグレード					対策スケール				特記		
				Incident				Accident	ファースケール	処分場スケール	坑道スケール	EBSスケール			
				レベル1	レベル2	レベル3	レベル4							レベル5	
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	裸火等に係る措置												
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	油脂類に係る措置												
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	給油するときの措置												
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	発破時の措置												
火災	労働安全衛生法	「火災防止措置にかかわる条項」	ガス溶接作業時の措置												
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災を防止するための措置」	坑外からの延焼を防止するための措置												立地および坑口による対策
津波・洪水	(恒久対策)	津波・洪水	坑口を高所へ設置												立地および坑口による対策
地震	(恒久対策)	地震被害を防止するための対策	強固地盤の選定												立地による対策
地震	(恒久対策)	地震被害を防止するための対策	揺れ軽減対策（坑道への免震・制振技術の適用）												
全般	(応急対策)	状態監視	ガラス固化体の状況把握												
全般	(応急対策)	状態監視	オーバーバックの状況把握												
全般	(応急対策)	状態監視	緩衝材の状態把握												
全般	(恒久対策)	状態監視	坑道内の状況把握												
全般	(応急対策)	状態監視	代替設備・手法による状況把握												代替手法の準備による多重化
全般	(恒久対策)	状態監視	監視機能の代替設備を投入可能な施設構造												代替手法の準備による多重化
全般	(応急対策)	状態監視	坑道内の放射線量・放射性物質計測												
全般	(応急対策)	状態監視	坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測												
全般	(応急対策)	状態監視	状況把握・監視設備の状態確認												
津波・洪水・突発湧水	(応急対策)	状態監視	ポンプ設備の状況確認												
火災	労働安全衛生法	「火災防止措置にかかわる条項」	消火設備												設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」	消火器												
火災	労働安全衛生法	「消火設備」	消火器												
火災	労働安全衛生法	「消火設備」	消火栓												設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	労働安全衛生法	「その他の設備」	給水栓												設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」	消火砂												
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」	散水設備												設置箇所と配管（動線）の考慮
津波・洪水・突発湧水	(応急対策)	代替設備の準備	代替設備・手法による揚水												代替手法の準備による多重化、配管（動線）の考慮
津波・洪水・突発湧水	(恒久対策)	状態監視	ポンプ機能の代替設備を投入可能な施設構造												代替手法の準備による多重化、配管（動線）の考慮
火災	(応急対策)	状態監視	自動送気システムの状況把握												代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	(応急対策)	代替設備の準備	代替設備・手法による送気												代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	(恒久対策)	代替設備の準備	送気機能の代替設備を投入可能な施設構造												代替手法の準備による多重化、換気（動線）の考慮
火災	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	火災検知器												配線（動線）の考慮
火災・冠水	鉱山保安法関連	「その他の適切な措置」	警報連絡装置の設置												配線（動線）の考慮
火災・冠水	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	非常警報装置												配線（動線）の考慮
火災・冠水	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	非常電話												配線（動線）の考慮
火災・冠水	労働安全衛生法	「通報・警報設備」	押ボタン式通報装置												配線（動線）の考慮
火災	(応急対策)	被害防止	緩衝材、オーバーバック、ガラス固化体の冷却												
全般	(応急対策)	放射線安全	坑道内での放射性物質の拡散防止対策												
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	警報避難設備等												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	避難用器具												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	避難等の訓練												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「避難誘導設備」	誘導表示板												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
火災	労働安全衛生法	「避難誘導設備」	排煙設備												一般労働安全と放射線安全、換気と避難（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	無線通信補助設備												一般労働安全と放射線安全、避難と配線（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	ラジオ再放送設備												一般労働安全と放射線安全、避難と配線（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	拡声放送設備												一般労働安全と放射線安全、避難と配線（動線）の考慮
火災	労働安全衛生法	「その他の設備」	水噴霧設備												一般労働安全と放射線安全、避難と配管（動線）の考慮
全般	(応急対策)	作業員の避難	作業員退避												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
火災	鉱山保安法関連	「坑内火災による被害を防止するための措置」	避難にかかわる事項												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「避難誘導設備」	避難通路												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
火災	鉱山保安法関連	「その他の必要な保安設備」	2つ以上の地上との連絡通路の確保												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
火災	鉱山保安法関連	「その他の必要な保安設備」	立坑または急勾配坑における措置												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	労働安全衛生法	「避難にかかわる条項」	退避等												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	(応急対策)	被害防止	負傷者の救助、救出												一般労働安全と放射線安全、避難（動線）の考慮
全般	(応急対策)	防災計画	避難指示対象区域の設置												
全般	(応急対策)	状態監視	屋外の放射線量・放射性物質計測												
全般	(応急対策)	放射線安全	応急的な放射性物質の拡散防止対策												
全般	(応急対策)	放射線安全	応急的な放射線遮へい												
全般	(応急対策)	事業継続	廃棄物の捜索												
全般	(応急対策)	事業継続	障害物の撤去												
全般	(応急対策)	事業継続	水中、地中からの放射性物質の回収												
全般	(応急対策)	事業継続	破損したオーバーバック、ガラス固化体の回収												
全般	(恒久対策)	事業継続	対象区域の除染												
全般	労働安全衛生法	「その他の設備」	監視装置												設置箇所と配管（動線）の考慮
火災	労働安全衛生法	「火災防止措置にかかわる条項」	防火担当者												
全般	(恒久対策)		機能維持のための無停電化												

○：対応するスケールを示す。

△；事業の進捗により必要となる可能性のある技術を示す。

3.5 操業安全対策の効果の検討

自然災害による異常事象・事故への操業時の安全対策技術の選択にあたっては、信頼性理論を用いた確率論的評価による定量的な評価が、必要と考える。本項では、操業安全対策の効果を表すためのツールとして信頼性理論を導入に向けて検討を行うとともに、信頼性理論をベースとした確率論を用いて評価を行うリスクアセスメントの導入に向けた試行的な検討を加える。

3.5.1 信頼性工学による安全対策の効果の示し方に対する一考察

供用期間中に想定される様々な作用(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 3.5-1 が成り立てば安全(safety)であると評価される。

$$S \text{ (外力)} \leq R \text{ (耐力)} \quad \text{数式 3.5-1}$$

ここで、 S は外力で、 R は耐力であり、 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 が作用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 が作用ひずみなら R は限界ひずみとなる。

数式 3.5-1 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の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 3.5-1 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)

- ・地震などの外力は確率的現象である
- ・設計自体が不確定性を適切に考慮する必要がある
- ・個々の要素や部材が構造物全体の安全性に及ぼす評価をするのに適する

(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
- ・不確定性の定量化が必要で困難な場合がある

人間は、生活していく上で、常に何らかの異常事象・事故に出会う可能性をもっている。たとえば、その可能性は小さいが隕石の落下によって被災する可能性はゼロとはいえない。また、地震・台風などの自然災害に出会う可能性はそれ以上に大きく、さらに自動車事故に遭う可能性に至っては全ての人間に否定できない異常事象・事故と考えられる。すなわち、人間は（自然あるいは人為の）異常事象・事故に出会う可能性を、大小にかかわらず持っている。

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（benefit）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、その建設に伴って生ずる新たな異常事象・事故の危険性は、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。新たな施設のもつ異常事象・事故の危険性の水準を、他の異常事象・事故の危険性との比較から設定しようとする方法である。CIRIA[13]のレポートでは、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として、以下に挙げる定性的な目標（暫定値）を示している。

- 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、またその他の異常事象・事故の危険性に余分の危険性を負わせてはいけない。

さらに、定量的な目標としては、として、以下に挙げる 4 つを示している。

- 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）。
- ③利益－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）。
- ④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えい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、設計示方書としてその安全性を照査、保証している。）

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異常事象・事故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幾つか提案されている。提案されているもののうち、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。

$$P_{fa} = \frac{10^{-4}}{n_r} K_s T \quad \text{数式 3.5-2}$$

ここで、

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)

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）。

また、数式 3.5-2 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 のレポートによれば、施設の計画における許容破壊確率は、この値をさらに 0.1 ~0.25 倍したものとすればよいとされている。

また、Allen は、数式 3.5-3 に示す許容破壊確率を提案している。

$$P_{fa} = \frac{TA10^{-5}}{W\sqrt{n}} \quad \text{数式 3.5-3}$$

ここに、

P_{fa} : 耐用期間中の (構造部材の) 許容破壊確率

T : 耐用期間 (年)

A : 社会の活動状態あるいは構造物の種類により定まる係数(activity factor)

W : 破壊の前兆係数(warning factor)

n : 被災しうる最大の人間の数 (人)、ビーム材に対して $n = 10$ 、柱・ガーダーに対して $n = 100$ 、key element である最重要構造部材に対して $n = 1,000$ とかなり大きい数を与えている。

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

操業時の安全確保に向けて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、操業時の安全対策技術の効果を客観的に評価するひとつの指標になるものと期待される。

3.5.2 リスクアセスメントの導入に向けた一考察

(1) 異常状態に対するリスクの抽出・整理

シビアアクシデントに至るまでの起因事象ごとの地上施設のイベントフローの例を表 3.5.2-1 に、地下施設のイベントフローの例を表 3.5.2-2 に示す。

平成 24 年度業務では、「安全機能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 つの状況への到達をシビアアクシデントとして捉え、これを回避するための応急対策・恒久対策を検討した。このため、イベントフローの途中段階での対策の検討は行っていない。

本項では、イベントフローの途中段階で生じるリスクを原位置スケールから広域スケールの 4 段階に分類・整理し、各スケールでの対策の検討に繋げる。

表 3.5.2-1 地震に対する地上施設のイベントフローの例

起因事象	事象	異常状態	異常状態を起点とした被害の連鎖				安全機能に影響する最終的な状況	操業継続に影響する最終的な状況	
地震	揺れ	(1) 設備(天井クレーン)の異常	天井クレーンの損傷・停止	ガラス固化体の宙吊り状態の継続				放射線放出状態の継続(室内)	
			天井クレーンの損傷・落下	ガラス固化体の落下	ガラス固化体の破損 ガラス固化体の転がり・移動			破損・放射性物質の室内拡散	
		(2) 設備(電気系)の異常	天井クレーンの停止	ガラス固化体の宙吊り状態の継続					放射線放出状態の継続(室内)
			モニタリング機能の停止						
			負圧維持機能の停止						放射性物質閉じ込め機能への影響
		(3) 建屋の異常	換気機能の停止	ガラス固化体の温度上昇					室内高温状態の継続
			天井・壁コンクリートのひび割れ						放射線の屋外への漏えいの可能性
				天井・壁コンクリートの剥落	ガラス固化体に剥落物が衝突	ガラス固化体の破損			破損・放射性物質の室内拡散
			建屋の崩壊	ガラス固化体の埋没	剥落物等によるガラス固化体の破損			放射線の屋外への漏えい	放射線・放射性物質の屋外への漏えい
		(4) 検査室外の火災(検査室内には可燃物がほとんどないため、ここでは検査室外の火災を考慮する)	外部火災の影響による天井クレーンの機能停止	ガラス固化体の宙吊り状態の継続					放射線放出状態の継続(室内)
			外部火災の影響によるモニタリング機能の停止						
			外部火災の影響による負圧維持機能の停止						放射性物質閉じ込め機能への影響
	外部火災の影響による換気機能の停止		ガラス固化体の温度上昇					室内高温状態の継続	
	加熱による検査室内の温度上昇		ガラス固化体の温度上昇					室内高温状態の継続	
	地盤のずれ	(5) 建屋の傾斜	ガラス固化体の転倒・転がり・移動	ガラス固化体の設備や壁等への衝突	ガラス固化体の破損			破損・放射性物質の室内拡散	
			(1)設備(天井クレーン)の異常のフローへ						HLW回収困難
(3)建屋の異常のフローへ									

表 3.5.2-2 地震に対する地下施設のイベントフローの例

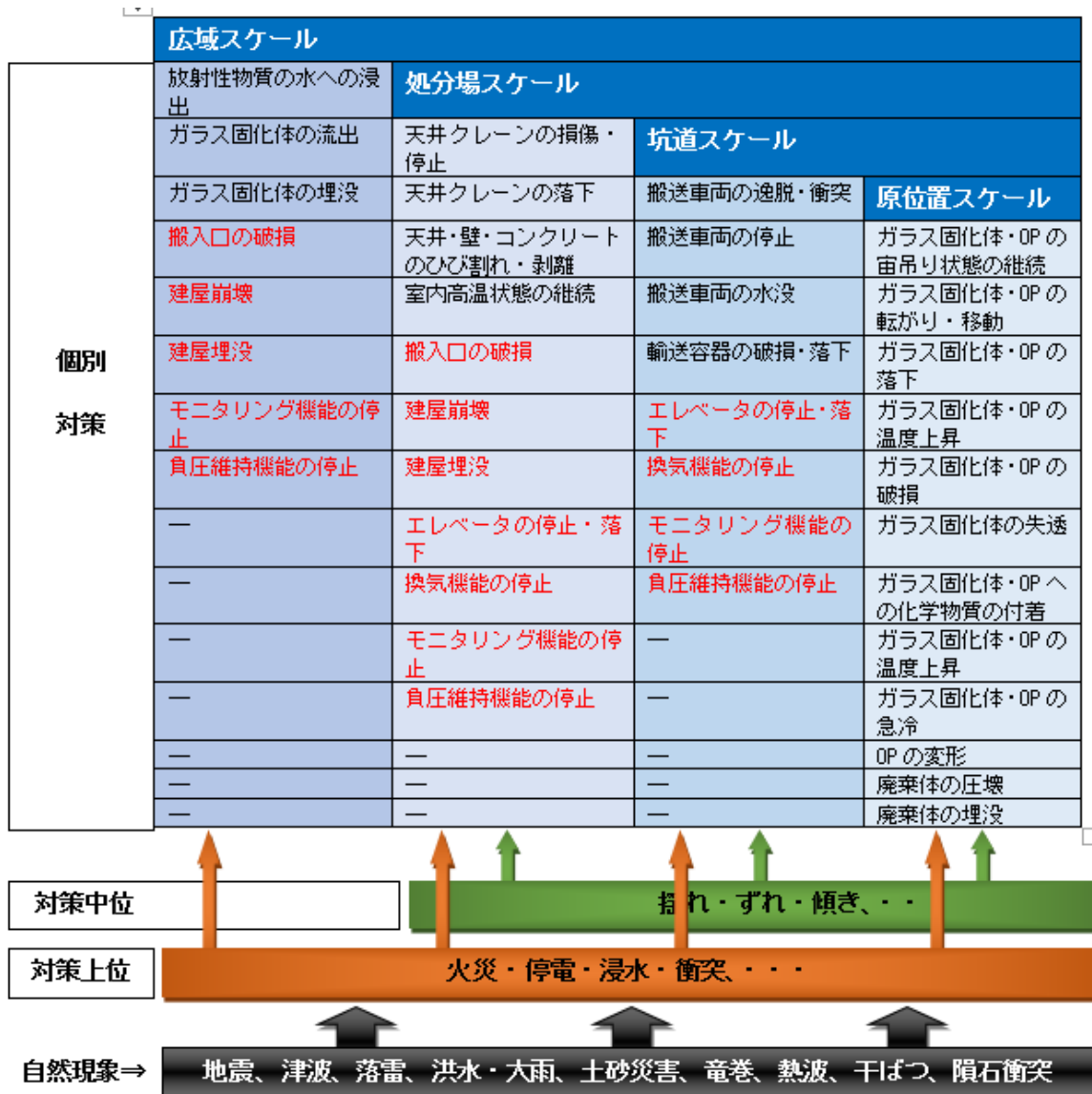
起因 事象	事象	異常状態	異常状態を起点とした被害の連鎖				安全機能に影響する 最終的な状況	操業継続に影響する最 終的な状況		
地震	揺れ・ ずれ	(1) 搬送車両の逸脱	岩盤への衝突	輸送容器の破損				坑道内での放射線の漏えい		
				輸送容器の落下	OPの逸脱				廃棄体回収困難	
				OP変形				坑道内での放射性物質の漏えいの可能性		
				OP破損	ガラス固化体破損			坑道内での放射線・放射性物質の漏えい		
				火災発生(搬送車両の油等による)	廃棄体の加熱			閉じ込め機能への影響		
		(2) 坑道の落盤	搬送車両の埋没	搬送車両への落石の衝突					アクセス坑道内高温状態の継続	
				廃棄体の圧壊	OP破損			坑道内での放射性物質の漏えいの可能性	廃棄体回収困難	
			搬送車両への落石の衝突	輸送容器の破損					坑道内での放射線・放射性物質の漏えい	
				輸送容器の落下	OPの逸脱				坑道内での放射線の漏えい	廃棄体回収困難
				OP変形				坑道内での放射性物質の漏えいの可能性		
		(3) 亀裂からガスの噴出	有毒ガスが坑道内に充満	OP破損	ガラス固化体破損			坑道内での放射性物質の漏えい		
									廃棄体回収困難	
		(4) 亀裂からの大量湧水	搬送車両の水没	流体力による搬送車両の逸脱	異常状態(1)へ					
				廃棄体への水圧の作用				閉じ込め機能への影響		
		(5) 設備の異常	自動送気システムの停止						アクセス坑道内高温状態継続	
			モニタリング設備の停止							

図 3.5.2-1 は、イベントフローから抽出したリスク（表 3.5.2-1、表 3.5.2-2）を原位置スケールから広域スケールの 4 段階で分類したものである。リスクの抽出にあたっては、各リスクの階層に注意し、以下の方針(案)で整理した。

- ・ 起因事象は自然現象としリスクに含まない
- ・ 火災・浸水など 4 段階全てのスケールに影響するリスクを対策上位と位置づける
- ・ 広域スケール以外の 3 つのスケールに影響するリスクを対策中位と位置づける
- ・ 各スケール個別のリスクは、個別対策が必要なリスクとする

4 つ方針（案）に基づいて自然災害について対策上位、対策中位に分類した場合、「火災」「停電」「浸水」「衝突」等のリスクを対策上位として抽出することができる。

また、対策中位のリスクとしては、「揺れ」、「ずれ」、「傾き」等を抽出することができる。



※各スケールのリスクのうち赤文字は 2 つ以上のスケールに影響するリスク

図 3.5.2-1 各スケールのリスクの抽出・整理

(2) リスク対策の検討

計画段階の事業にリスクアセスメントを導入する場合、以下の順序で実施している。

- ① リスク評価
- ② リスク対策方法の検討
- ③ 効果的なリスク対策の検討
- ④ PDCA サイクルの循環によるリスク管理方法の検討

まず、①のリスク評価は、リスクの大小を定量的に評価するものであり、リスクによる影響度と頻度（発生確率）の両軸による評価を行なう（図 3.5.2-2）。この結果から、対応すべきリスクを抽出し、対策方法を検討する（②）。対策方法は、リスクの大きい順に「回避」、「移転／軽減」、「保有」の3種類があるが、地層処分事業においては、労働安全・公衆安全の観点から「回避」もしくは「移転／軽減」が求められると考えられる。③の効果的なリスク対策の検討は、ソフト面（計画・数値解析）およびハード面（施工）の両側面から検討を行い、B/C（Benefit/Cost） \geq 1.0 の観点から最適な対策の組み合わせを検討する。①～③の検討を踏まえ、④では PDCA サイクルの循環により、ソフト面、ハード面の対策を定期的に見直しリスクを管理するための検討を行う。

図 3.5.2-1 で示したリスクについて、対策上位、すなわち「地層処分施設において一度発生すると全てのスケールで多くのリスクを引き起こすと考えられるもの」から順にその対策手法を検討する。

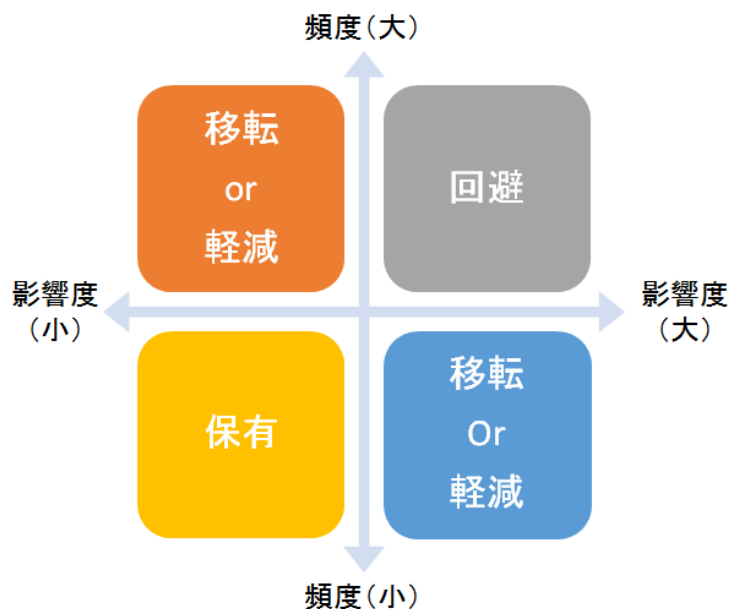


図 3.5.2-2 リスク対策の基本的な考え方（リスクマップ）

1) 対策上位のリスクへの対策手法の検討

以下に対策上位として抽出した各リスクの対策例を表 3.5.2-3 示す。

表 3.5.2-3 対策上位のリスクへの対策手法例

対策上位のリスク	リスクの発現を防ぐための対策	リスク発現後に効果的な対策
火災	可燃物の除去	消火器／スプリンクラーの設置 作業員への教育 初期消火対応マニュアルの作成及び周知 火災を対象とした BCP の策定及び周知
停電	避雷針の設置 通常電源と非常用電源との境界の緩和	非常用電源および燃料の冗長な確保 特別高圧電源（施設）の利用に関する電力会社との協定の締結 停電時を想定した BCP の策定及び周知
浸水	全施設の地下化 排水設備の充実（例：首都圏外郭放水路） 高地に建設 堤防等（輪中堤）の設置	浸水想定をもとにした BCP の策定及び周知
衝突	施設／設備の高強度化 全施設の地下化	—

2) 対策中位のリスクへの対策手法の検討

対策中位のリスクは、「揺れ」、「ずれ」、「傾き」等を抽出することができる。表 3.5.2-4 に対策例を示す。

表 3.5.2-4 対策中位のリスクへの対策手法例

対策中位のリスク	リスクの発現を防ぐための対策	リスク発現後に効果的な対策
揺れ	地震リスクの低い地域での建設 (断層調査結果を活用)	施設の免震構造化 L2 地震動を想定した BCP の策定及び周知
ずれ	地震リスクの低い地域での建設 (断層調査結果を活用)	L2 地震動を想定した BCP の策定及び周知
傾き	地震リスクの低い地域での建設 (断層調査結果を活用) 安定した地盤 (不等沈下が起こりにくい地盤) での建設	L2 地震動を想定した BCP の策定及び周知

3) 個別対策リスクへの対策手法の検討

表 3.5.2-5 に個別対策リスクを原位置スケール、坑道スケール、処分場スケール、広域スケールの 4 区分で整理した。また、同表内に各個別対策リスクへの対策手法を示す。

表 3.5.2-5 個別対策リスクへの対策手法例

スケール	個別対策リスク	リスクの発現を防ぐための対策	リスク発現後に効果的な対策
原位置 スケール	ガラス固化体・OPの宙吊り状態の継続	—	ロボットによる把持機能の解除・回収
	ガラス固化体・OPの転がり・移動	—	ロボットによる搜索・定置
	ガラス固化体・OPの温度上昇	冷却設備等による恒温化	ロボットによる状況確認・回収
	ガラス固化体・OPの破損	—	ロボットによる状況確認・回収
	ガラス固化体・OPの急冷	冷却設備等による恒温化	ロボットによる状況確認・回収
	ガラス固化体・OPへの化学物質の付着	—	ロボットによる化学物質の除去・回収
	ガラス固化体の失透	火災感知システム、スプリンクラーの設置	ロボットによる状況確認・回収
	OPの変形	—	ロボットによる回収、ガラス固化体への影響の確認
	廃棄体の圧壊	—	ロボットによる回収
	廃棄体の埋没	—	ロボットによる搜索・定置
坑道 スケール	搬送車両の逸脱・衝突	衝突防止システムの搭載	車両遠隔操作
	搬送車両の停止	—	車両遠隔操作
	搬送車両の水没	車両水没防止シートの設置	車両遠隔操作
	輸送容器の破損・落下	—	ロボットによる状況確認・回収
	エレベータの停止・落下	—	ロボットによる状況確認・埋め戻し
	換気機能の停止	換気システムの冗長な設置	自然通気の活用
	モニタリング機能の停止	—	—
処分場 スケール	天井クレーンの損傷・停止	—	HEPA フィルタ等の多重化 ロボットによる状況確認・ガラス固化体の回収
	天井クレーンの落下	落下防止設備の取り付け	ロボットによる状況確認・ガラス固化体の回収
	天井・壁・コンクリートのひびわれ・剥離	剥離防止措置	ロボットによる状況確認・補修
	室内高温状態の継続	冷却設備等による恒温化	ロボットによる状況確認
	搬入口の破損	—	搬入口の多重化
	建屋崩壊	建屋の高強度化	ロボットによる状況確認
	建屋埋没	全施設の地下化	ロボットによる状況確認
	エレベータの停止・落下	—	ロボットによる状況確認・埋め戻し
	換気機能の停止	換気システムの冗長な設置	自然通気の活用
	モニタリング機能の停止	—	—
ファール スケール	放射性物質の水への浸出	—	グラウチング・水路の遮断
	ガラス固化体の流出	—	ロボットによる搜索
	ガラス固化体の埋没	—	ロボットによる搜索
	モニタリング機能の停止	—	—
	負圧維持機能の停止	—	HEPA フィルタ等の多重化

(3) 対策上位、対策中位、個別対策リスクの対策手法の整理

本項の前段では、地層処分施設において一度発生すると全てのスケールで多くのリスクを引き起こすと考えられるものから順に、対策上位リスク、対策中位リスク、個別対策リスクを抽出し、各リスクについて「リスクの発現を防ぐための対策」と「リスク発現後に効果的な対策」を検討し整理した。ここでは各対策を性能と応答の2つに区分し整理する。

表 3.5.2-6 は、前段までの整理結果を用いて各対策手法を性能と応答の2つに区分したものである。対策手法の各ランク（対策上位、対策中位、個別対策リスク）は、表中で色分けして示しており、水色が対策上位リスク、オレンジ色が対策中位リスク、緑色が個別対策リスク、の対策手法である。

性能と応答の「リスク発現を防ぐための対策」と「リスク発現後に効果的な対策」を比較すると、応答の欄の「リスク発現を防ぐための対策」が無いことが分かる。これは、今回対象としたリスクの起因事象が自然災害であり、かつ必ずシビアアクシデントに繋げるものとして検討しており、計画等策定によるリスクの発現防止を対象としていないためである。なお、ヒューマンエラーが起因事象となるシビアアクシデントを対象とした場合は、危険予知活動等の対策手法が考えられる。

表 3.5.2-6 の整理結果より、リスクの発現を防ぐための対策が 17、リスク発現後に効果的な対策が 23 あり、B/C を考慮した上でこれらを組み合わせて用いることにより、リスク低減もしくは回避に繋がる対策となることが期待される。

表 3.5.2-6 各対策手法の区分

区分	リスクの発現を防ぐための対策	リスク発現後に効果的な対策
性能	可燃物の除去	消火器／スプリンクラーの設置
	避雷針の設置	非常用電源および燃料の冗長な確保
	通常電源と非常用電源との境界の緩和	施設の免震構造化
	全施設の地下化	ロボットによる把持機能の解除・回収
	排水設備の充実（例：首都圏外郭放水路）	ロボットによる捜索・定置
	高地に建設	ロボットによる状況確認・回収
	堤防等（輪中堤）の設置	ロボットによる化学物質の除去・回収
	施設／設備の高強度化	ロボットによる回収、ガラス固化体への影響の確認
	地震リスクの低い地域での建設（断層調査結果を活用）	車両遠隔操作
	安定した地盤（不等沈下が起こりにくい地盤）での建設	ロボットによる状況確認・埋め戻し
	冷却設備等による恒温化	自然通気の活用
	火災感知システム、スプリンクラーの設置	HEPA フィルタ等の多重化
	衝突防止システムの搭載	ロボットによる状況確認・ガラス固化体の回収
	車両水没防止シートの設置	ロボットによる状況確認・補修
	換気システムの冗長な設置	搬入口の多重化
	落下防止設備の取り付け	グラウチング・水路の遮断
剥離防止措置	—	
応答	—	作業員への教育
	—	初期消火対応マニュアルの作成及び周知
	—	火災を対象とした BCP の策定及び周知
	—	停電時を想定した BCP の策定及び周知
	—	特別高圧電源（施設）の利用に関する電力会社との協定の締結
	—	浸水想定をもとにした BCP の策定及び周知
	—	L2 地震動を想定した BCP の策定及び周知

3.6 まとめ

本年度は、前年度までの成果を踏まえ取りまとめるために、作業時の安全確保の考え方の提示方法を検討した上で、作業時の安全対策の抽出と抽出された作業時の安全対策の特徴の分析を図った。さらに、作業時の安全対策の効果を確認・評価するための方策について検討した。

検討結果を総括して以下に示す。

3.3 では、作業安全確保の考え方の提示として、以下の調査、検討を行った。放射性物質取扱い施設の安全確保に向けた国内外の動向として、「原子力事象評価尺度」「深層防護」「多重障壁」について整理した。また、一般労働安全の確保に向けた国内外の動向として、「鉱山保安法にかかわる動向」「労働安全衛生法にかかわる動向」について整理した。これらの整理を踏まえ、地層処分における安全確保の原則的な考え方として、深層防護が放射性物質を取り扱う施設における安全確保を図るための原則的な考え方であること、また深層防護の達成には、独立かつ多重的に作業時の安全確保対策を講じる多重の障壁が、地層処分施設の設計もしくは技術を選択する際の原則的な考え方であることを示した。さらに、地層処分施設の特徴である”大深度”による「隔離」と「閉じ込め」、すなわち広いスケールを用いて、独立かつ多重的に安全対策を講じることを積極的に利用して安全対策をしていくことが、工学的な効率性を持ちつつ、効果的に安全確保が図れることを示した。

3.4 では、作業安全対策の検討として、地層処分施設における作業時の安全対策の考え方を踏まえ、以下の分析、検討を行った。作業時の安全対策技術の選択は、安全確保方針とそれに基づく安全確保戦略の立て方によって異なり、安全確保戦略の立案は実施主体が行うものである。これに対し、国の基盤研究開発は、安全確保戦略の立案の際に必要な技術情報を蓄積する使命がある。ここでは、今後蓄積されていく作業時の安全対策の整理方法を例示した上で、実施している国の基盤研究開発の位置付けについて整理を図った。

3.5 では、作業安全対策の選択する際の見安となる効果の示し方について検討と、現状での課題について整理を行った。作業時の安全対策技術を表示に向けて基本となる考え方の整理として、信頼性工学を導入した安全対策の効果の示し方に対する考察とリスクアセスメントの導入に向けた考察を行った。また、今後の課題と解決方法について整理した。

参考文献

- [1]原子力安全部会夏期セミナー：2015年8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26年3月。
- [3]日本鉄道建設公団青函建設局：津軽海峡線工事誌、平成2年
- [4]経済産業省ホームページ：
(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/mine/files/hoanh_ou2.pdf)
- [5] IAEA：INES、The International Nuclear Event Scale - User's Manual、Resised and Extended Edition 1992、IAEA-INES-92/01（1992）。
- [6]日本原子力学会 標準委員会：原子力安全の基本的考え方について 第I編 別冊 深層防護の考え方 標準委員会 技術レポート、AESJ-SC-TR005(ANX):2013、2014年5月。
- [7]原子力安全・保安院：発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策規制の基本的考え方について（現時点での検討状況）、平成24年8月27日。
- [8]原子力安全委員会：発電用原子炉施設におけるシビアアクシデント対策－多重防護の考え方について－、平成24年9月10日。
- [9] IAEA INGAS-10：“Defence in Depth in Nuclear Safety”、Vienna、1996。
- [10] 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9月。
- [11]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。
- [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。
- [13] CIRIA（Construction Industry Research and Information Association）Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes, Report63, 1977
- [14]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。
- [15]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。
- [16]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。

第4章 火災事象等に対する安全確保対策の検討

4.1 はじめに

4.1.1 目的

本検討は、平成 24 年度に選定した技術開発課題のうちの施設計画技術に係るものであり、火災事象に対する作業時の安全について検討を行っている。平成 25 年度および平成 26 年度には作業員の避難に関して、坑道内の火災影響解析と避難シミュレーションを組み合わせた方法により、人の避難を定量的に評価することを試みた。人の避難を解析的にシミュレートし、定量的に評価できることは、安全対策の種類、規模および位置などの安全対策の設計を行う上で貴重な情報になる。

本年度は、火災事象に対する安全対策のうち風門、防火扉に着目し、火災影響の拡散に対する抑制効果を解析的に検討する。また、換気設備の停止を想定した安全対策の 1 つとして密度差による通気（以下、自然通気という）が発生する条件等について解析的に検討する。

4.1.2 検討内容

第 3 章では地層処分の作業中における深層防護の考え方から火災事象に対する対策（案）を提示した。そのうち、風門や防火扉は火災時の熱や煙の拡散を防ぎ、作業員の避難を助ける対策と考えられる。また、自然通気は換気設備が停止した場合に、作業員の酸素を確保する対策の一つと考える。一般労働安全における深層防護の考え方と今年度の検討内容との関係を図 4.1.2-1 に示す。

防護レベル	目的（状態）	目的達成に不可欠な手段	対策例（火災）	実施内容
レベル1	災害、故障を起こさない （通常作業）	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	定期点検 教育・訓練 多重化	①風門、防火扉 火災事象における火災点からの一酸化炭素、酸素や温度などの拡散に対する風門や防火扉の効果 ②自然換気を 機械換気が停止しても自然換気を利用して、坑道内に必要な通気を確保する、あるいは通気をコントロールする
レベル2	災害、故障の検知および拡大防止 （災害発生）	災害、故障の検知、消火対策	通報設備 消火設備 風門 など	
レベル3	作業員の人命確保 （災害拡大）	災害の隔離 退避、坑外避難	換気制御 （自然通気） 防火扉 避難経路	
レベル4	環境影響の緩和 （サイト外への災害拡大）	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難	

図 4.1.2-1 深層防護（一般労働安全）と平成 27 年度の実施内容の関係

(1) 防火扉、風門の効果の検討

火災事象が発生し、その熱や煙は人の安全に重大な影響を及ぼすため、青函トンネル【A】などでは避難に際し、火災が発生しているトンネルとは別の避難用坑道を利用し、熱や煙に巻き込まれないようにしている。また鉱山では通気をコントロールするために設けられた仕切りが火災の影響を制御する対策になっている例もある。このようなことから、火災対策として防火扉、風門等の配置が考えられるが、地層処分場の地下施設のように複雑な坑道レイアウトでは、どの場所に配置すれば効率的かの検討はなされていないのが現状である。平成 25 年度、平成 26 年度に検討した火災解析と避難シミュレーションを組み合わせた避難の定量的な検討は、防火扉、風門等の位置を解析的に取り入れることにより、その避難に対する効果を定量的に推定することが可能となる。そのため、平成 27 年度では、火災事象に対する安全対策のうち、風門の坑道内の通気を制御する方法の火災影響の拡散に対する効果を解析的に確認し、避難への効果を検討する。

(2) 自然通気の利用の検討

坑道内は電力などの動力が停止すると強制換気ができなくなり、坑道内の通気が停止する。しかし、坑道内や坑口の温度や気圧状況などにより、自然通気が発生することが知られている。この自然通気を積極的に利用することも操業中の作業員の安全を確保する対策になるとともに、放射性物質が地層処分場内に拡散した場合の対策（拡散する方向が固定される、あるいは自然通気をなくして、坑内と留めるなど）が得られることになる。そのため自然通気の状態についても解析的に検討する。

(3) まとめ

防火扉、風門の効果および自然通気の利用について、解析結果をまとめるとともに、安全対策の効果について整理する。

4.2 坑道内の風門の効果の解析

4.2.1 解析対象とする風門

工事中あるいは供用中のトンネルには、トンネル内の通気や振動、音などを制御するために「扉、門」が使用されている。「扉、門」の構造は頑丈な構造物から単にシートを張ったものまで様々であり、その目的も坑内の騒音や発破時の振動が坑口から漏れるのを防止する、発破時の衝撃や飛石を防ぐ、坑内の空気の流れを遮断や工事中の粉じんの拡散防止するための坑内空気の流れを阻害などとして利用されている。

地層処分の操業中の火災事象に対する火災影響の拡大防止対策として、坑内の空気の流れを建築物での防火扉のように堅固に遮断する方法と、坑道断面の一部を塞ぎ坑道の空気の流れを阻害する方法の2種類が考えられ、前者を「防火扉」、後者を「風門」と呼ぶこととする。

火災影響の拡大防止対策として、「防火扉」は坑内の空気の流れを遮断することから、拡大防止効果や隔離効果、および酸素の供給を遮断することにより火災を消火する効果も予想されるが、坑道断面全面を覆う大掛かりな構造物になり、また、簡単に設置場所を移動することができない。一方、風門はビニールシート等で坑道断面あるいは一部を覆うことにより、坑道内の空気の流れを阻害し、トンネル工事において工事中の粉じんの拡散を防ぐ間仕切りとして利用されている例がある[1]。このような風門は、火災影響の拡大を完全に遮断することはできないが、その拡大を遅らせることが可能である。さらに人力によりビニールシートをワイヤロープで広げたり縮めたりでき、設置も簡単なため、操業状況に合わせて設置位置を移動することもできる。

今回の検討では、このような「風門」による火災影響の拡大防止効果を解析的に検討する。

4.2.2 解析概要

(1) 解析内容

解析は地下 300m に位置する長さ 1000m の横坑で火災が発生した場合を想定し、坑内通気が停止した状態（風速 0.01m/s を設定）と通常の坑内通気状態（風速 0.5m/s）で発生した火災の熱、煙等の拡散状況の解析を行う。さらに通常の坑内通気状態で、図 4.2.2-1 に示すように、坑道断面の上半分を遮断した風門が火災点の前後 30m 地点に存在する場合の火災影響の拡散状況を解析する。解析ケースは以下の 3 ケースであり、表 4.2.2-1 に一覧を示す。なお、解析結果では横坑の横断面、縦断面における一酸化炭素 CO、二酸化炭素 CO₂、酸素 O₂ 濃度や熱の分布を整理する。

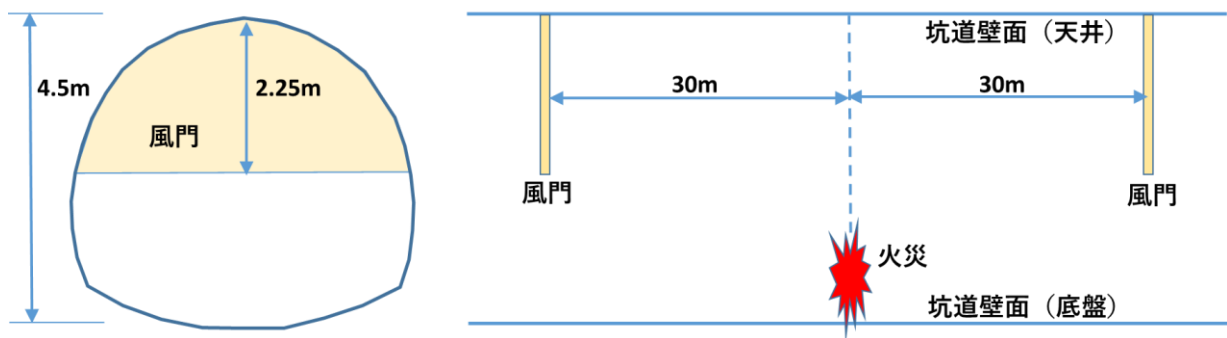


図 4.2.2-1 風門の概要

1) 通常に通気状態における火災時の熱・煙の拡散状況の確認（ケース 1）

目的：通常通気状態下で火災が発生したときの熱・煙の拡散状況を確認する。

内容：坑道内壁は 24℃ とし、熱伝達率を考慮した解析を実施する。結果は縦断面・横断面の CO、CO₂、O₂ 濃度、熱の分布図で整理し、拡散状況を確認する。また、CO、CO₂、O₂ 濃度、熱と風速の関係をグラフ化し、風速との関係性を確認する。

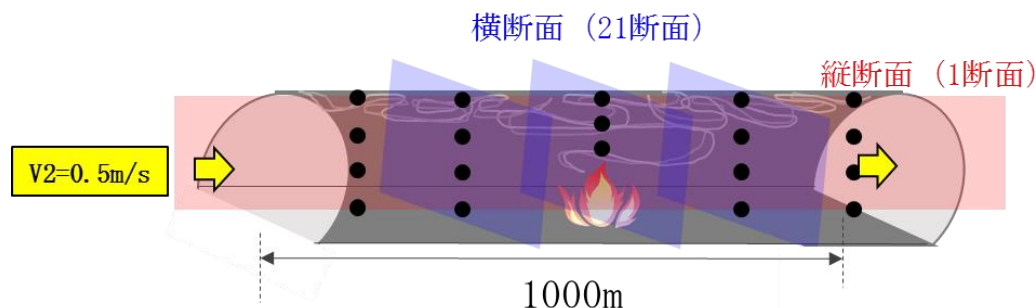


図 4.2.2-2 ケース 1 の解析内容

2) 換気設備の停止時における熱・煙の拡散状況の確認（ケース 2）

目的：換気設備が停止した状態を想定し、ほぼ無風状態で火災が発生したときの熱・煙の拡散

状況を確認する。なお、本結果と上記ケース 1 の結果を比較することで、風速の差による熱・煙の拡散状況の違いを確認する。

内容:坑道内壁は 24℃とし、熱伝達率を考慮した解析を実施する。結果は縦断面・横断面の CO、CO₂、O₂ 濃度、熱の分布図で整理し、拡散状況を確認する。また、CO、CO₂、O₂ 濃度、熱と風速の関係をグラフ化し、風速との関係性を確認する。

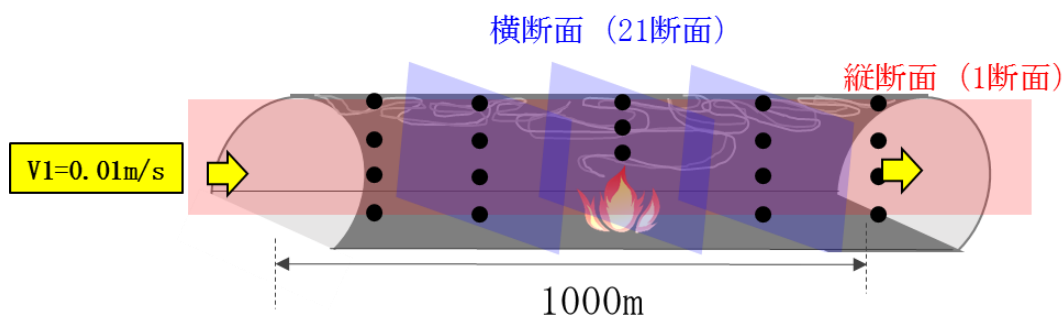


図 4.2.2-3 ケース 2 の解析内容

3) 風門設置による火災時の熱・煙の拡散状況の確認 (ケース 3)

目的: 風門を模擬して設置したモデルを用いて、通常通気状態で火災が発生した場合の熱・煙の拡散状況を確認し、上記ケース 2 の結果と比較することで、風門の有無による熱・煙等の拡散抑制効果を確認する。

内容:坑道内壁は 24℃とし、熱伝達率を考慮した解析を実施する。結果は縦断面・横断面の CO、CO₂、O₂ 濃度、熱の分布図で整理し、拡散状況を確認する。また、CO、CO₂、O₂ 濃度、熱と風速の関係をグラフ化し、風速との関係性を確認する。

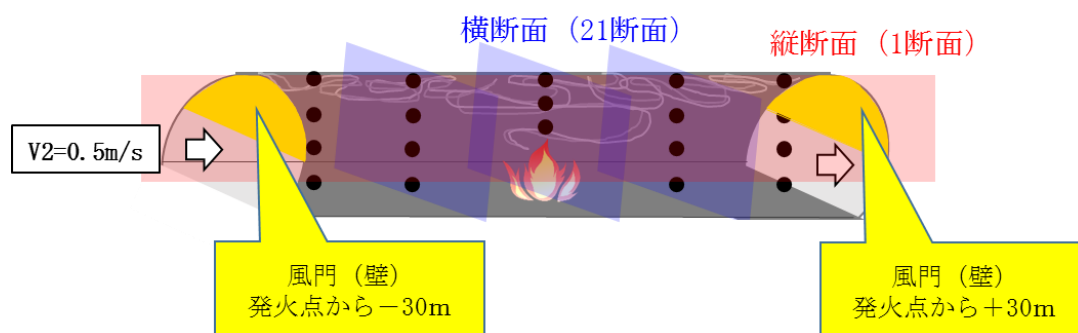
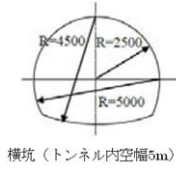


図 4.2.2-4 ケース 3 の解析内容

表 4.2.2-1 火災の検討ケース一覧

項目	Case	概要				
		風門の有無	通気状態	坑道形状	坑内温度	火災曲線
火災	ケース 1	風門なし	通常通気状態		初期条件： 24℃一定 境界条件： 熱伝導率・ 熱伝達率を 考慮	CETu 標 準火災曲 線
	ケース 2	風門なし	通気システム停 止時			
	ケース 3	風門あり	通常通気状態			

(2) 解析手法

本検討では、国内外における三次元気流解析での使用実績が多い解析ソフトウェア「VENTMINE」を用いる。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る。特に爆発など急激な現象に対する空気の速度計算は陽解法※1を、通気などには陰解法※1の使用が可能である。壁の熱伝達を同時に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、簡易で計算時間が短い次元解析モデルと、詳細ではあるが計算時間が長くなる三次元の解析をひとつのモデルの中で組み合わせ、2つの次元での同時解析が可能であることも特徴のひとつである。VENTMINEでは、オイラー式やナビエ・ストークスの式など、解きたい現象に応じて流体力学方程式を自由に選択することが可能である。本検討では、流体を対象とした数値解析分野では最も一般的であり、適用性の高いナビエ・ストークスの方程式を用いた[2]。

VENTMINE では、定常計算、非定常計算とも、時間微分項を持つ偏微分方程式を解くため、 Δt ごとの繰り返し計算を行う。流れ解析の運動方程式は非線形であるため、 Δt ごとの流速成分を固定化（線形化）した上で、次の時刻の流速3成分（ V_x 、 V_y 、 V_z ）を求める。さらに、圧力 P を求めるために連続の式を解くが、この解法として、一般に反復計算を行って圧力 P と温度 U を計算し、連続の式を満足するよう V_x 、 V_y 、 V_z を微修正する。VENTMINE では各 Δt の内部ループで、一定の反復回数に達するか、あるいはある基準値以下になる場合に、内部ループを抜け出す、すなわち Δt の収束計算が終了し、次の Δt の内部ループの計算を行う、としている。

本検討で用いた解析コード VENTMINE の適用範囲や実績、またオイラーの微分方程式やナビエ・ストークスの式など流体力学方程式の適用性については、昨年度報告書に詳細を記載しているため、そちらを参照されたい[2]。

※1 変位の時間的な変化を逐次解析※2する場合に用いられる直接時間積分※3には、大きく分けて陽解法と陰解法がある。陽解法は、時刻 $t + \Delta t$ の変位を時刻 t と時刻 $t - \Delta t$ の状態から求める方法で、陰解法は、時刻 $t + \Delta t$ の変位を時刻 t の状態に係数をかけることで時間増分 Δt の変位を求め、時刻 t に足し合わせる方法である。

※2 ある時刻 t から t' までの変化を、時間増分 Δt で区分して Δt ごとに解を求める方法。

※3 関数を時間で積分すること。時間増分 Δt ごとの解を足し合わせて時刻 t から時刻 t' までの解を求めるときに、 t から t' までを積分することで求める方法。

(3) 解析条件

1) 初期条件の設定

本検討では、地下 300mの横坑の地温を想定し、深さに応じた温度・圧力を設定した。設定方法は、地表面温度を 15 度とした場合を想定し、地下 300mの横坑の温度を 24℃とした。圧力は、地表面を基準に圧力を 1atm（大気圧、GL±0m）として、気圧変化を求め、横坑内の圧力を設定した。

坑道壁面のコンクリート摩擦係数および比熱比は、建築構造計算に用いる一般的な値として 0.6 および 1.4 に設定した。空気の平均モル質量、密度、粘性は、理科年表より引用し、0.02897 kg/mol、1.293 kg/m³、1.86×10⁻⁵ kg/(m・s)とした。なお流体の動粘性度と温度拡散率の比であるプラントル数は、空気などの気体に用いる値である、0.708 とした。

火災の検討では、検討の目的に応じて坑内の風速を初期値として設定した。各ケースにおいて設定した風速の値およびその考え方を表 4.2.2-2 に示す。

表 4.2.2-2 ケースごとの風速値とその考え方

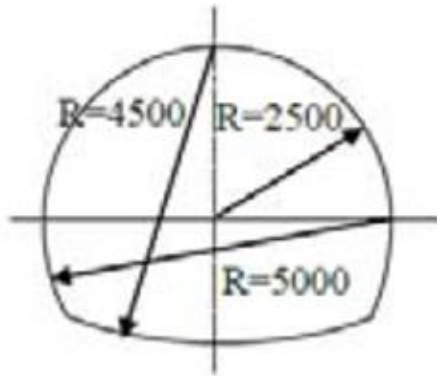
Case	風速値	考え方
ケース 1	0.30 m/s	坑内が通常通気状態である場合を想定し、労働安全衛生規則で定められる坑内風速の最小値 0.3m/s を与える。
ケース 2	0.01 m/s	坑内が停電により無風状態となった場合を想定する。ただし、風速ゼロでは解析ができないため、風速 0.01m/s を初期条件として与える。
ケース 3	0.30 m/s	風門の安全対策を実施した効果を確認するため、ケース 2 と同じ風速 0.3m/s を与える。

2) 境界条件の設定

本解析では横坑は水平坑道のため深さは一定とし、坑内温度と坑道壁面の温度は周辺地盤の地温と同じ 24℃とした。なお、火災により坑道壁面が温められることを考慮して、火災時は坑道壁面の熱伝導率と、坑道壁面から坑道内部の空気に熱が伝わる現象である熱伝達を考慮した。

(4) 解析モデル

横坑の形状は既存の検討結果[3]をもとに設定し、図 4.2.2-5 に示す形状とし、横坑の長さは 1000mで、発火点は横坑の中央部とした。風門は発火点の前後 30mの位置に設け、横坑高さの半分を壁の高さとした。横坑のメッシュ分割を図 4.2.2-6 および図 4.2.2-7 に、各ケースの初期条件、境界条件を図 4.2.2-8～図 4.2.2-10 に示す。メッシュ形状は四角形とした。なお、最小のメッシュサイズは 0.0083m となった。



横坑（トンネル内空幅5m）

図 4.2.2-5 横坑の断面形状

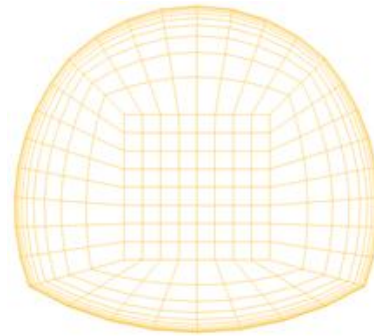


図 4.2.2-6 横坑断面のメッシュ分割

（メッシュ数 384、節点数 401）

メッシュ形状	要素数	節点数	境界面	最小の要素サイズ
四角形	139,008	145,563	12,352	0.0083m

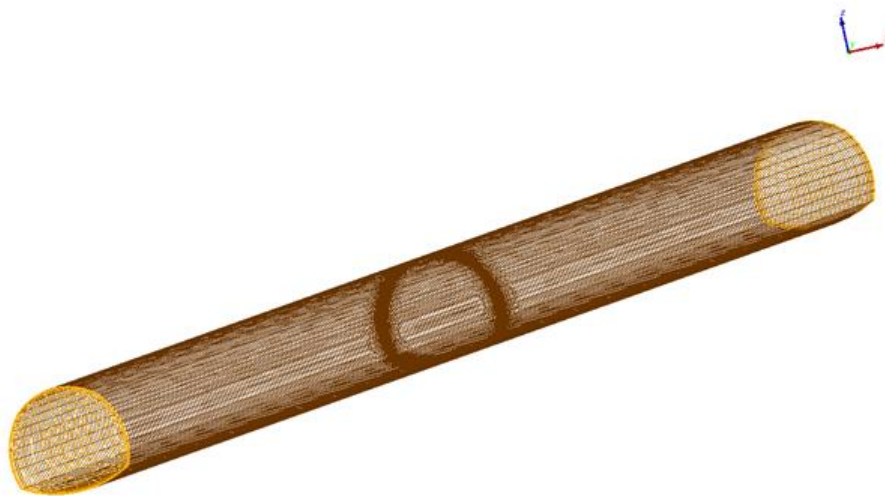


図 4.2.2-7 解析領域全体のメッシュ分割

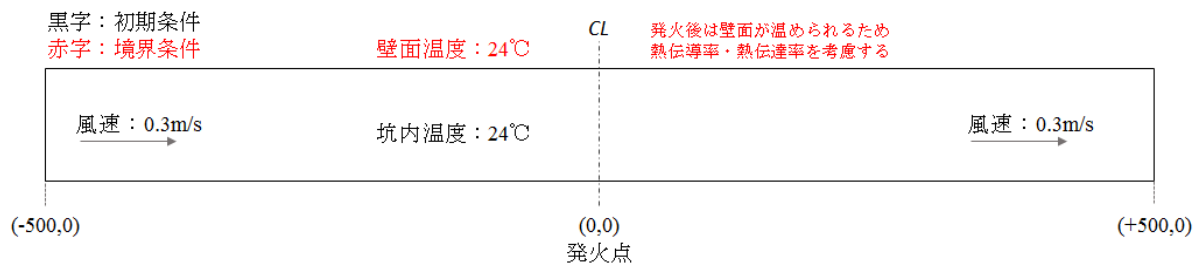


図 4.2.2-8 ケース 1 の初期条件および境界条件

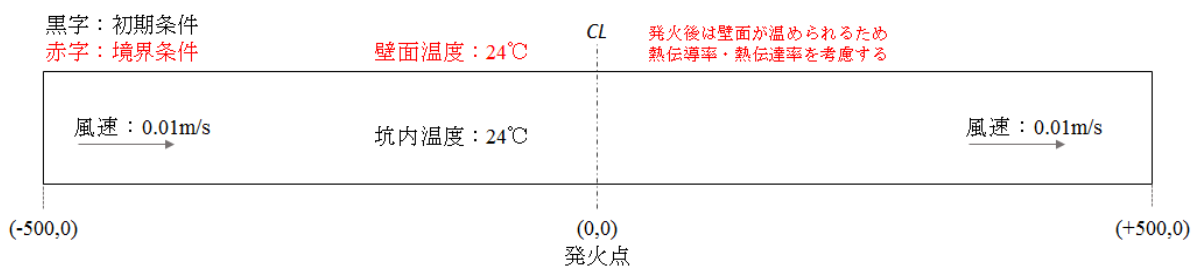


図 4.2.2-9 ケース 2 の初期条件および境界条件

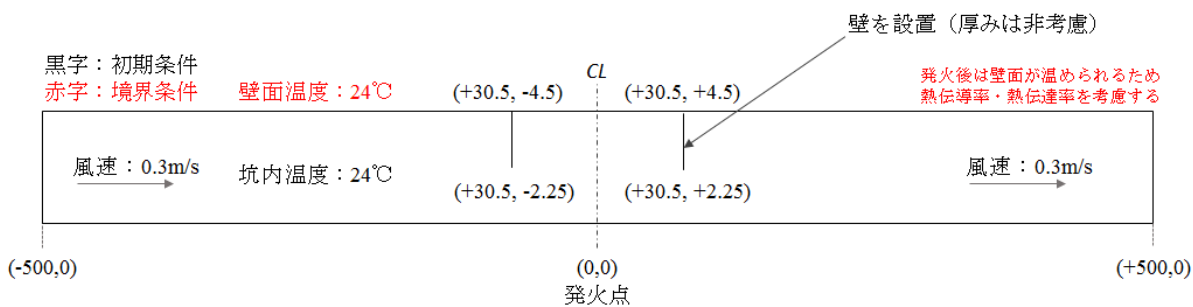


図 4.2.2-10 ケース 3 の初期条件および境界条件

(5) 火災曲線

解析に用いる火災曲線は、図 4.2.2-11 に示す標準火災曲線[4]とした。フランスの ANDRA 社による検討では、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[4]。

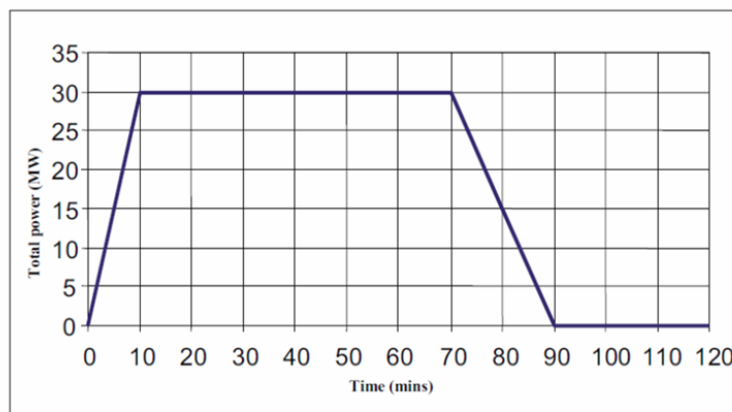


Figure 11.4.1 Standard total thermal power for a 30 MW fire

図 4.2.2-11 火災曲線 (CETu 標準火災曲線) [4]

4.2.3 解析結果

(1) 通常通気状態における火災時の熱・煙の拡散状況 (ケース 1: 風速 0.3m/s)

解析ケース 1 は、坑内風速が通常状態の 0.3m/s において、火災が発生した場合の坑内の熱 (温度)、一酸化炭素、二酸化炭素および酸素濃度の経時変化を解析した。発火点は坑道全長の間接点とし、火災発生から 50 秒後、150 秒後、250 秒後、380 秒後、450 秒、530 秒後、660 秒後の解析結果を整理した。

1) 坑内温度の経時変化

通常通気状態（風速 0.3m/s）で火災が発生した場合、坑道内の温度が時間経過に伴って変化した解析結果を図 4.2.3-1 に示す。

熱は、発火点を中心として時間の経過とともに、主に風下側の坑道へ拡散していく状態を確認した。

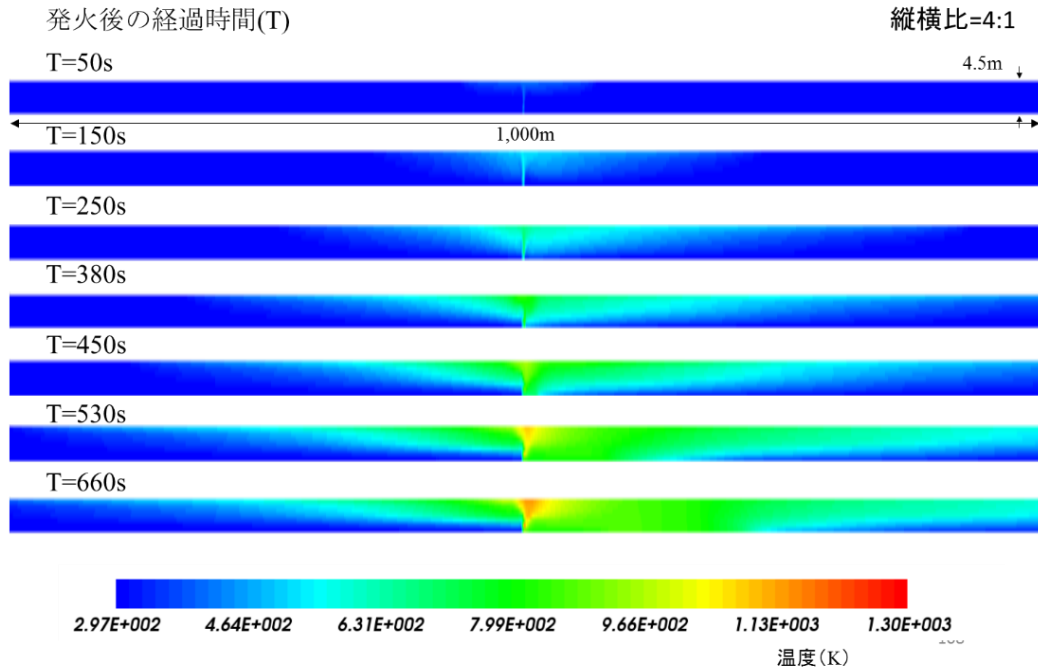


図 4.2.3-1 坑道内の温度の経時変化（風速 0.3m/s）

2) 一酸化炭素濃度（CO 濃度）の経時変化

通常通気状態（風速 0.3m/s）で火災発生した場合の坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化を図 4.2.3-2 に示す。

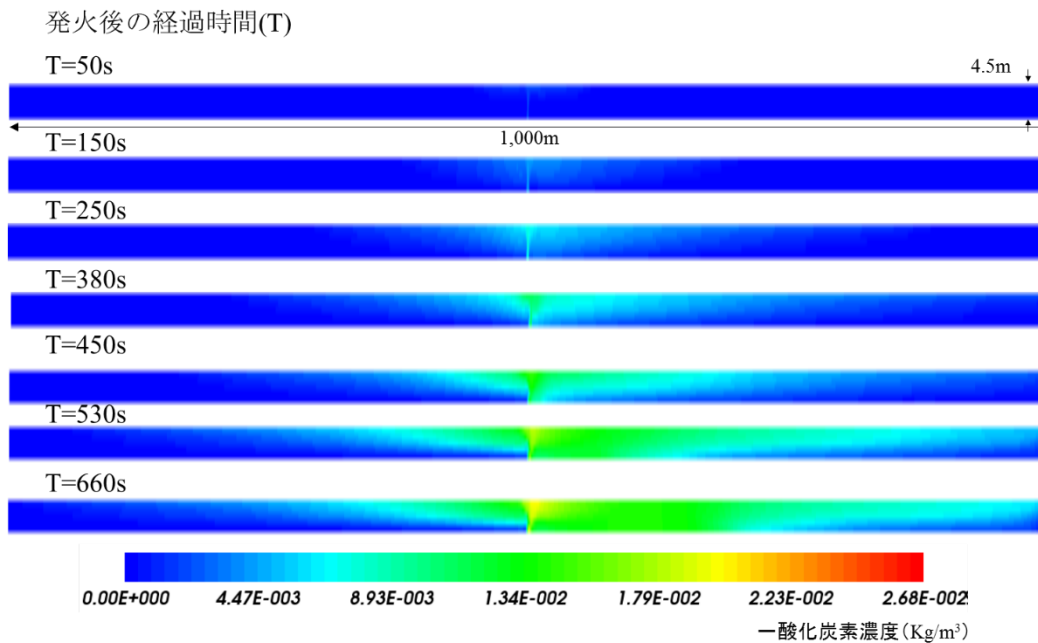


図 4.2.3-2 坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化（風速 0.3m/s）

3) 二酸化炭素濃度 (CO₂濃度) の経時変化

通常通気状態 (風速 0.3m/s) で火災発生した場合の坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化を図 4.2.3-3 に示す。

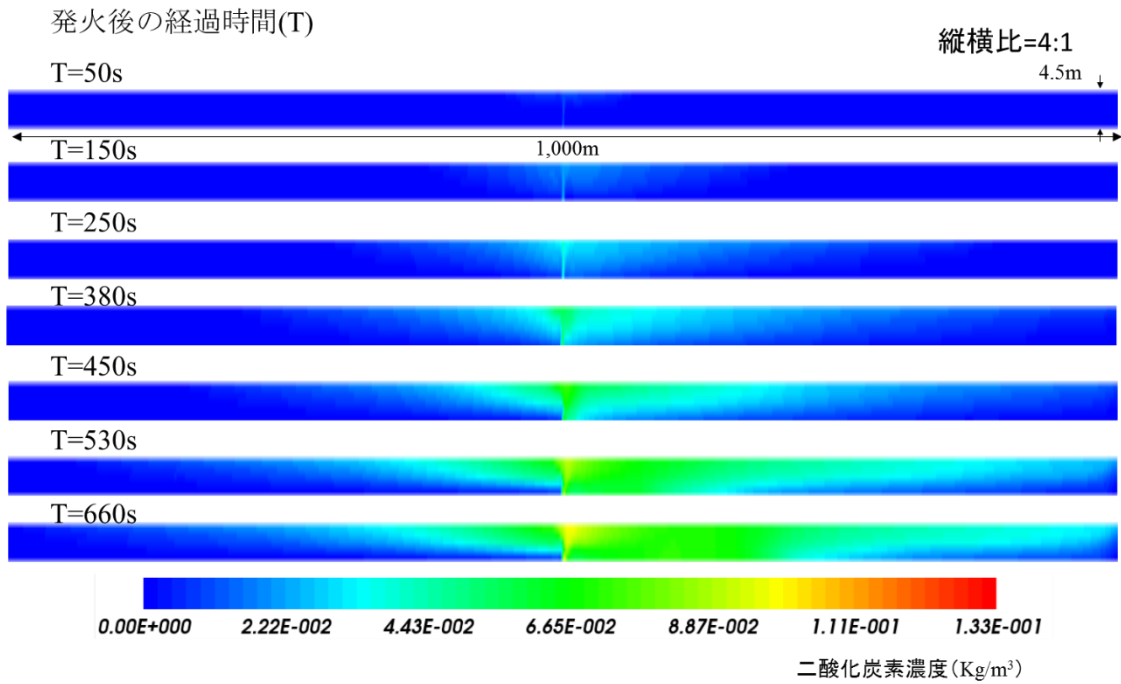


図 4.2.3-3 坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化 (風速 0.3m/s)

図 4.2.3-4 に一酸化炭素濃度 (CO 濃度) と二酸化炭素濃度 (CO₂ 濃度) の発火 660 秒後の結果の比較を示す。これによると、二酸化炭素と一酸化炭素では、二酸化炭素のほうが重い物質であるものの、解析結果では顕著な差を確認することはできなかった。

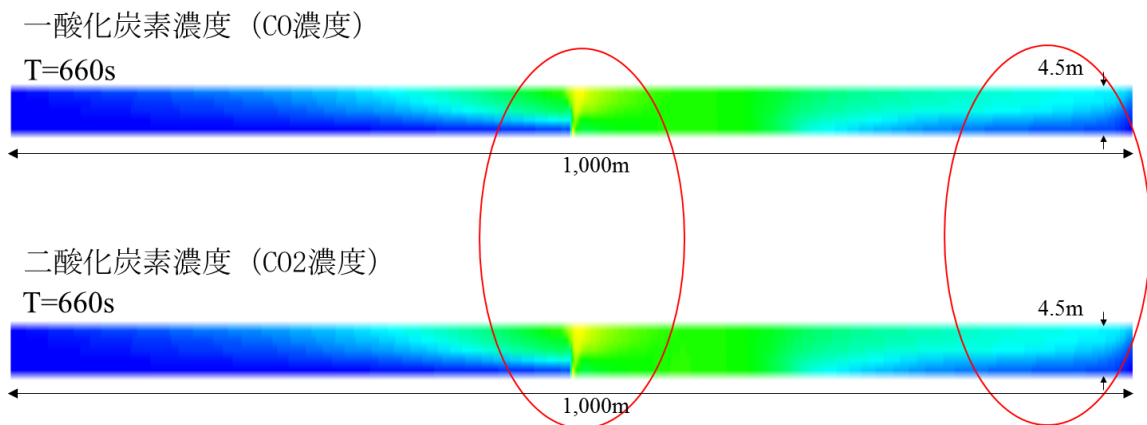


図 4.2.3-4 一酸化炭素濃度と二酸化炭素濃度の拡散状況の比較 (風速 0.3m/s)

4) 酸素濃度 (O₂濃度) の経時変化

火災時の酸素 (O₂) の坑道全体への拡散状況の経時変化を、図 4.2.3-5 に示す。O₂が低濃度の領域は下流側のみならず、上流側にも広がっている。凡例の酸素濃度 $2.3 \times 10^{-1} \text{kg/m}^3$ は、酸素濃度約 16% であり、発火から 380 秒後には 500m 下流側まで労働安全衛生で定める酸素欠乏 (18% 以下) に達し、酸素欠乏領域がかなり速い速度で広がることを確認した。

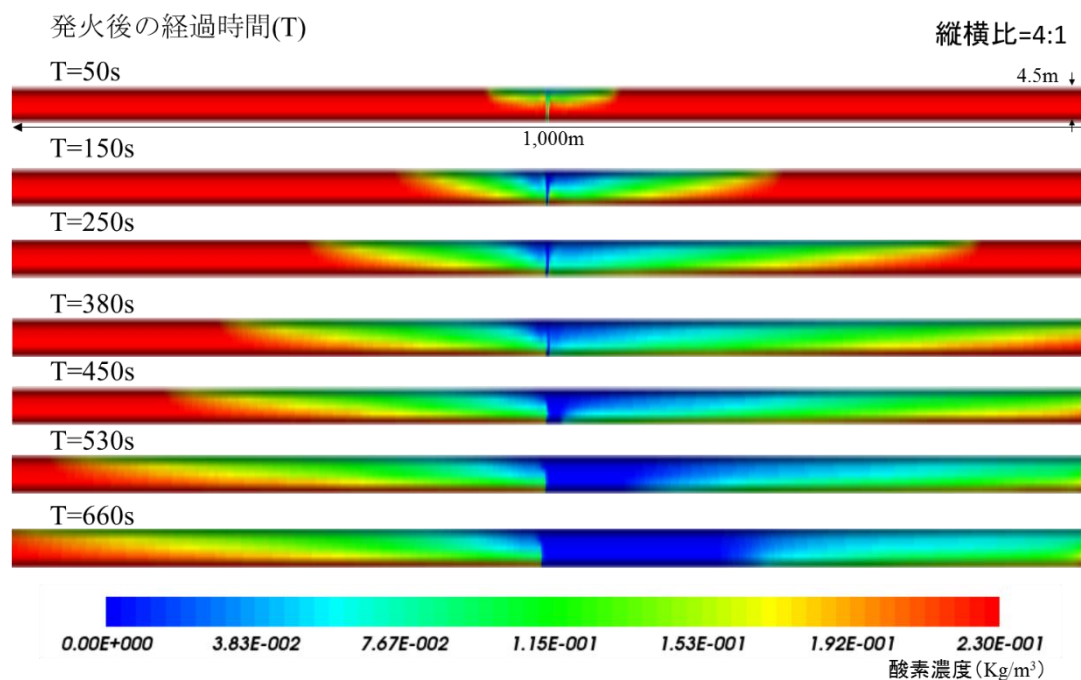


図 4.2.3-5 坑道内の酸素濃度の経時変化 (風速 0.3m/s)

(2) 通気停止状態における火災時の熱・煙の拡散状況 (ケース 2)

解析ケース 2 は、坑内の換気設備が停止状態 (解析上は風速を 0.01m/s) において、火災が発生した場合の坑内の熱 (温度)、一酸化炭素、二酸化炭素および酸素濃度の経時変化を解析した。

ケース 1 と同様に、発火点を坑道全長の間中点とし、火災発生から 50 秒後、150 秒後、250 秒後、380 秒後、450 秒後、530 秒後、660 秒後の解析結果を整理した。

1) 坑内温度の経時変化

換気設備が停止状態において火災が発生した場合、坑道内の温度が時間経過に伴って変化した解析結果を図 4.2.3-6 に示す。

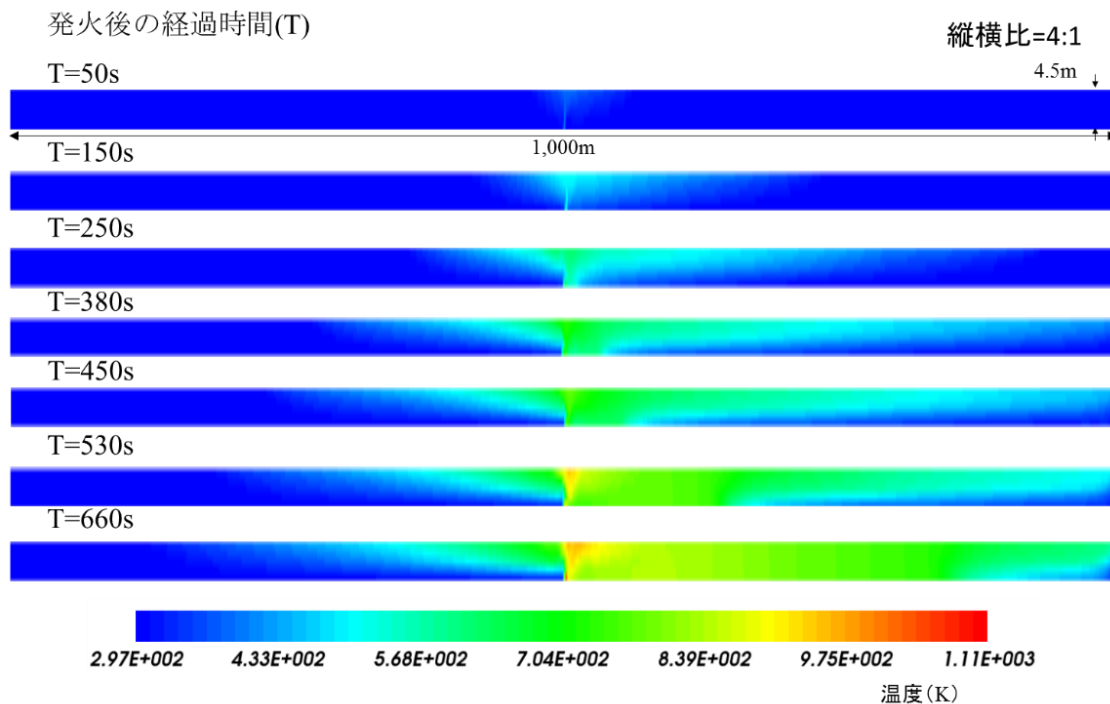


図 4.2.3-6 坑道内の温度の経時変化（風速 0.01m/s）

2) 一酸化炭素濃度（CO 濃度）の経時変化

換気設備が停止状態（風速 0.01m/s）で火災発生した場合の坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化を図 4.2.3-7 に示す。

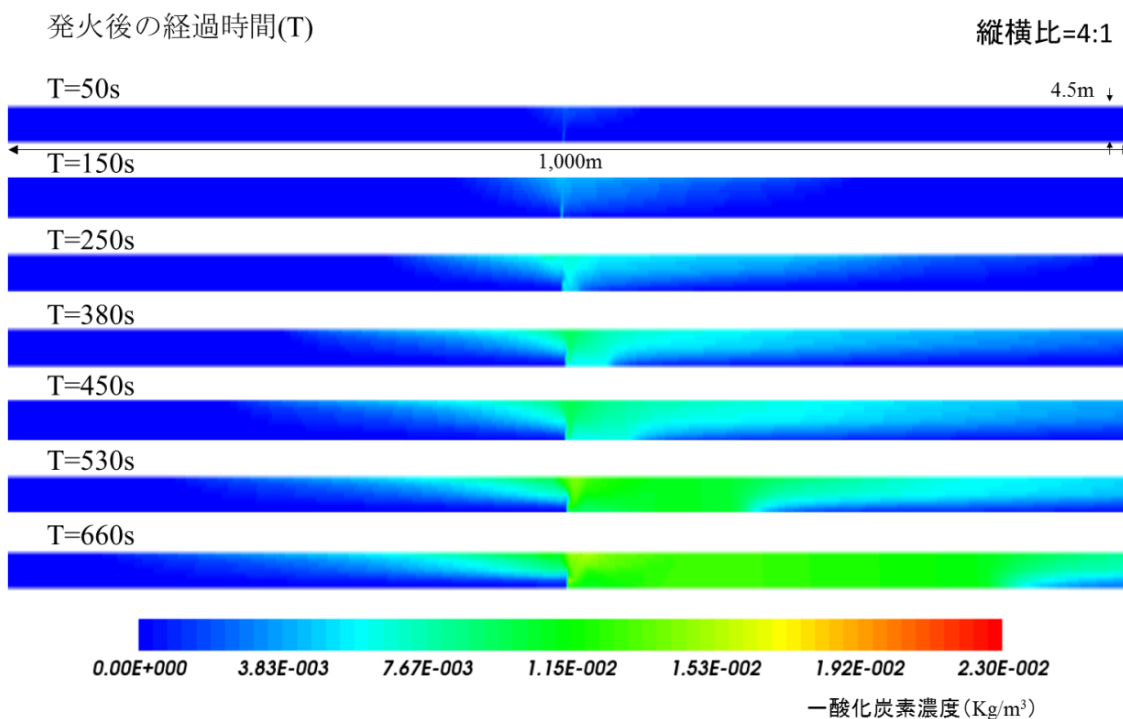


図 4.2.3-7 坑道内の一酸化炭素濃度分布の経時変化（風速 0.01m/s）

3) 二酸化炭素濃度 (CO₂ 濃度) の経時変化

換気設備が停止状態 (風速 0.01m/s) で火災発生した場合の坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化を図 4.2.3-8 に示す。

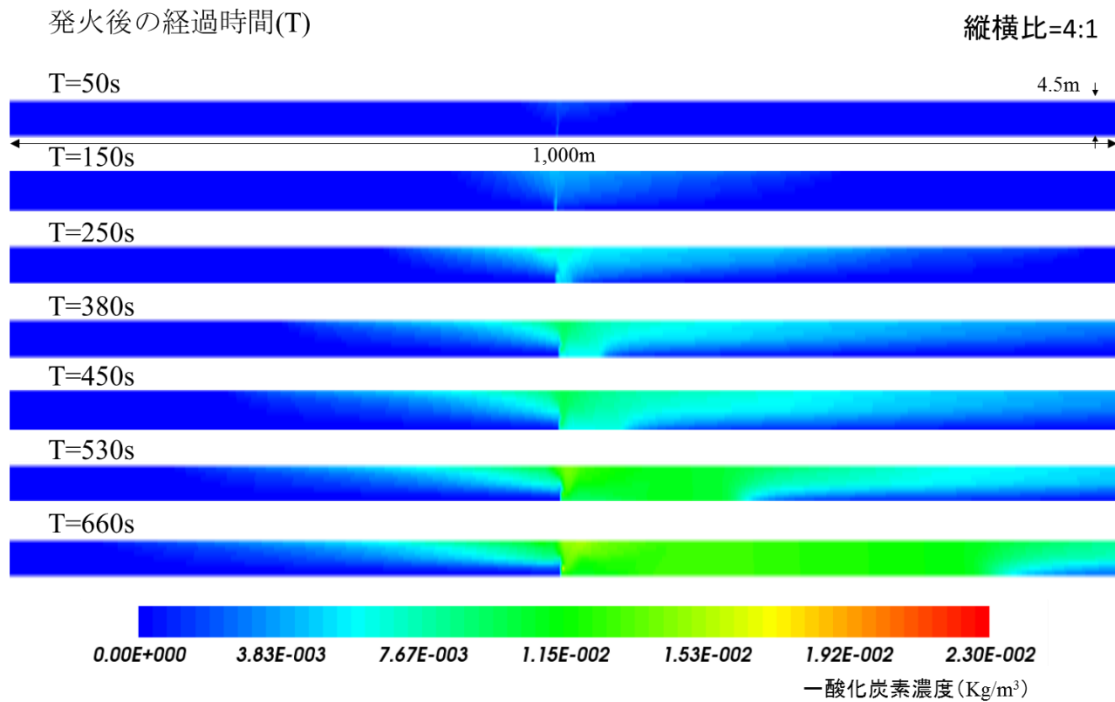


図 4.2.3-8 発火点付近での二酸化炭素濃度の経時変化 (ケース 2、風速 0.01m/s)

図 4.2.3-9 に一酸化炭素濃度 (CO 濃度) と二酸化炭素濃度 (CO₂ 濃度) の発火 660 秒後の結果の比較を示す。これによると、二酸化炭素と一酸化炭素での違いを確認することはできなかった。

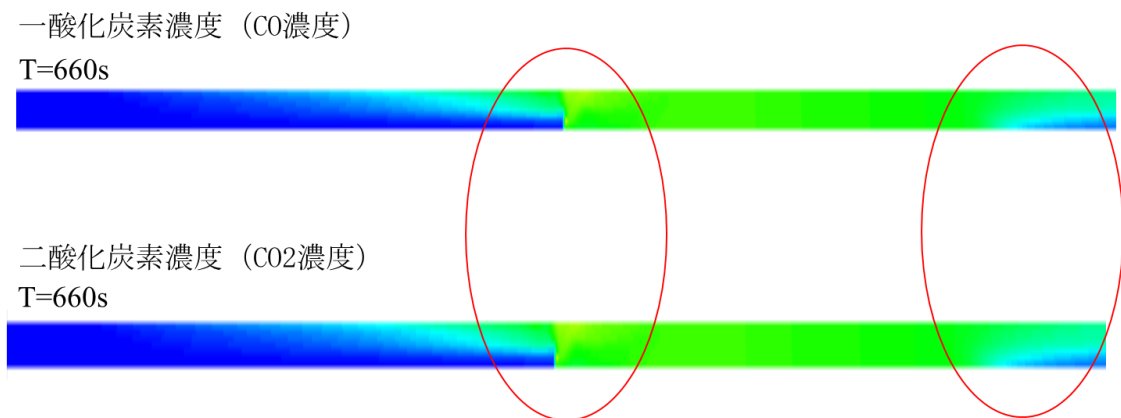


図 4.2.3-9 一酸化炭素濃度と二酸化炭素濃度の拡散状況の比較 (ケース 2、風速 0.01m/s)

4) 酸素濃度 (O₂濃度) の経時変化

換気設備が停止状態 (風速 0.01m/s) で火災発生した場合の坑道内の酸素濃度の経時変化を図 4.2.3-10 に示す。

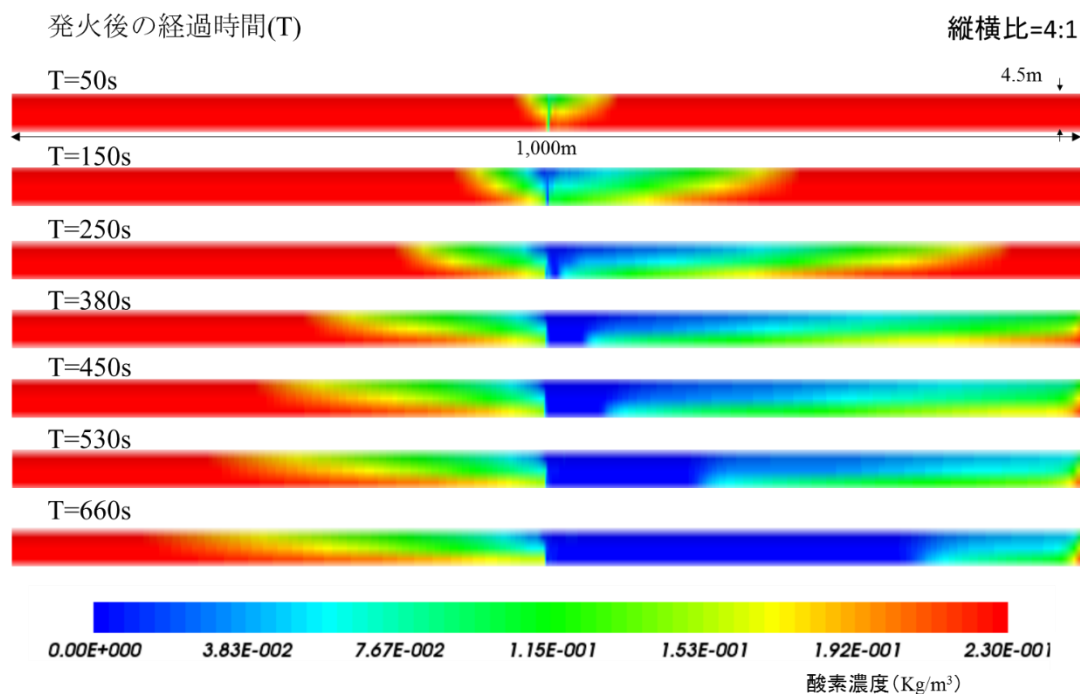


図 4.2.3-10 発火点付近での酸素濃度の経時変化 (ケース 2、風速 0.01m/s)

(3) 風門設置による火災時の熱・煙の拡散状況 (ケース 3)

解析ケース 3 は、通常通気状態 (風速 0.3m/s) において火災が発生し、発火点から上流・下流に 30m離れた位置に風門を設置した場合の坑内の熱 (温度)、一酸化炭素、二酸化炭素および酸素濃度の経時変化を解析した。ケース 1、ケース 2 と同様に、発火点を坑道全長の中間点とし、火災発生から 50 秒後、150 秒後、250 秒後、380 秒後、450 秒後、530 秒後、660 秒後の解析結果を整理した。

1) 坑内温度の経時変化

風門を設置し、通常通気状態（風速 0.3m/s）で火災発生した場合の坑道内の温度の経時変化を図 4.2.3-11 に示す。

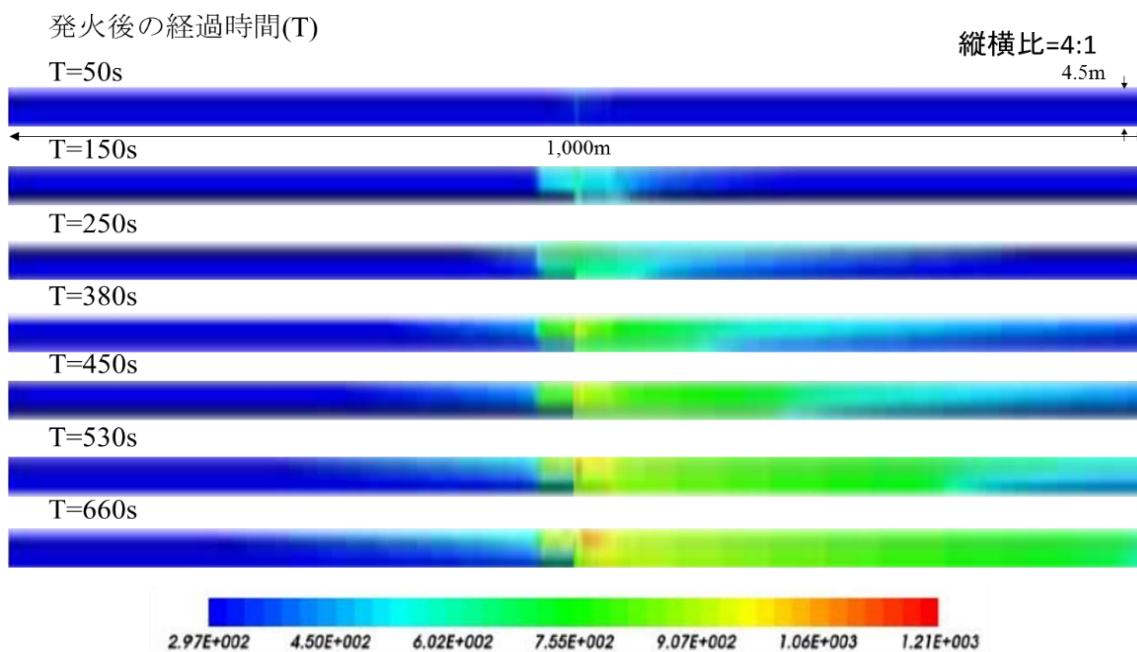


図 4.2.3-11 坑道内の温度の経時変化（風速 0.3m/s、風門設置）

2) 一酸化炭素濃度（CO 濃度）の経時変化

風門を設置し、通常通気状態（風速 0.3m/s）で火災発生した場合の坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化を図 4.2.3-12 に示す。

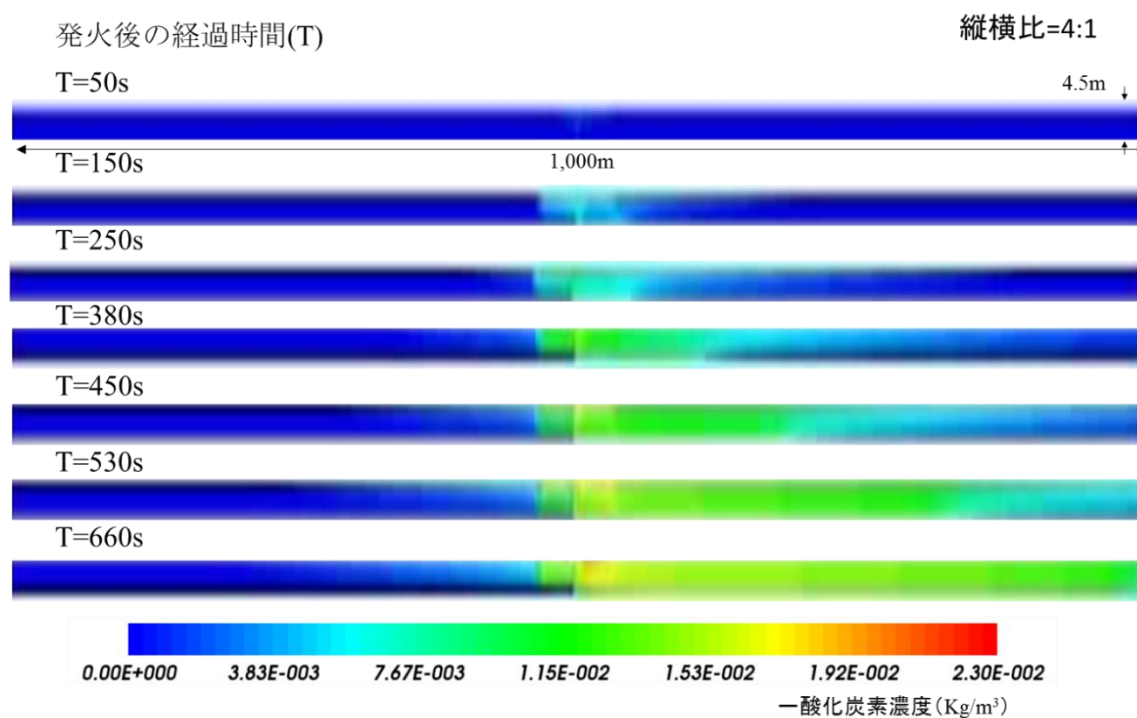


図 4.2.3-12 坑道内の一酸化炭素濃度の経時変化（風速 0.3m/s、風門設置）

3) 二酸化炭素濃度 (CO₂濃度) の経時変化

風門を設置し、通常通気状態 (風速 0.3m/s) で火災発生した場合の坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化を図 4.2.3-13 に示す。

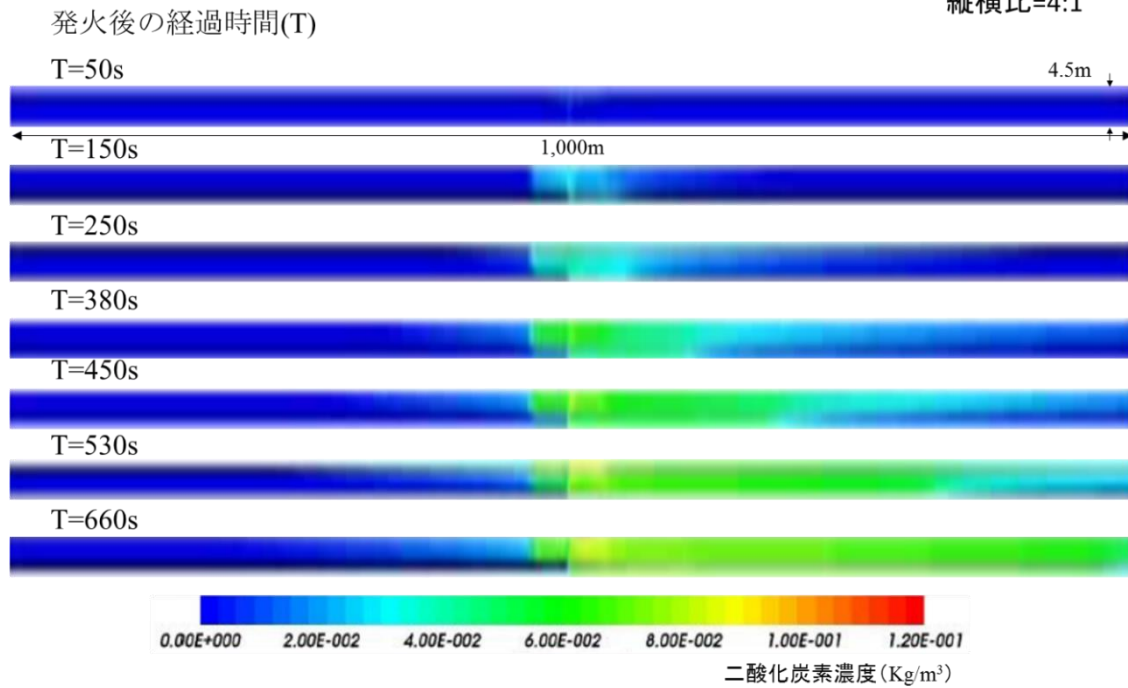


図 4.2.3-13 坑道内の二酸化炭素濃度の経時変化 (風速 0.3m/s、風門設置)

4) 酸素濃度 (O₂濃度) の経時変化

風門を設置し、通常通気状態 (風速 0.3m/s) で火災発生した場合の坑道内の酸素濃度の経時変化を図 4.2.3-14 に示す。

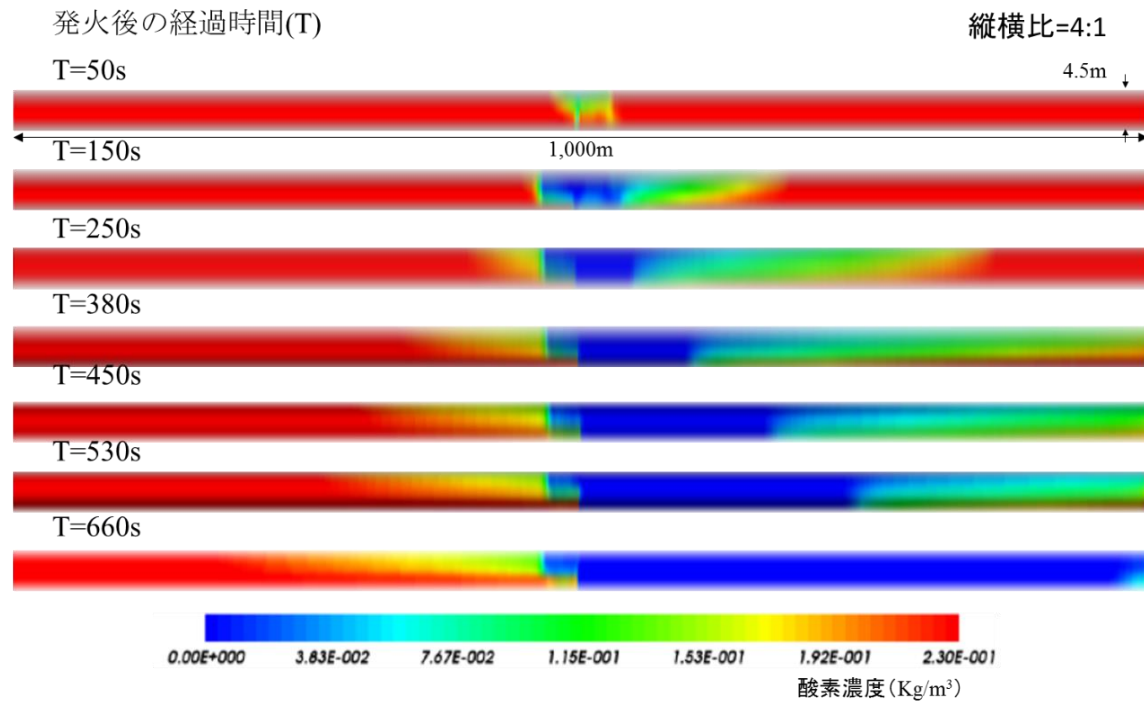


図 4.2.3-14 坑道内の酸素濃度の経時変化 (風速 0.3m/s、風門設置)

4.2.4 火災に関する通気解析結果の考察

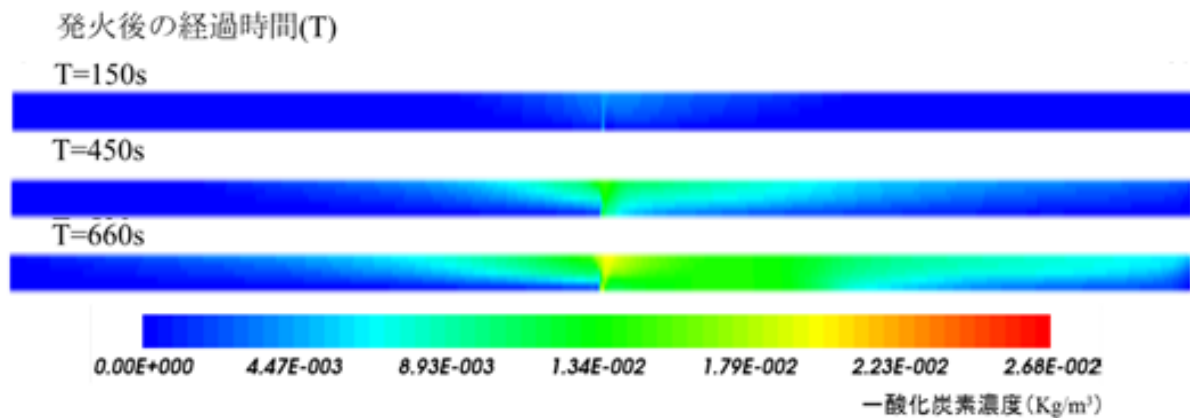
(1) ケース 1 とケース 2 における火災時の熱・煙の拡散状況の比較

ケース 1 とケース 2 の温度、一酸化炭素濃度、二酸化炭素濃度、酸素濃度の経時変化に大きな差が見られなかったため、一酸化炭素濃度の拡散状況を比較したものを図 4.2.4-1 に示す。結果比較の経時変化は、火災発生から 150 秒後、450 秒後、660 秒後とした。

ケース 1 (通常通気状態：風速 0.3m/s) とケース 2 (通気システム停止時：風速 0.01m/s) では、両者とも通気の風上・風下両方に拡散するが、風下側により広く拡散することを確認した。

この現象は、一酸化炭素に限らず、二酸化炭素、酸素および熱の拡散状況と同様であり、通常通気状態 (風速 0.3m/s) と換気設備が停止状態 (風速 0.01m/s) では、火災の影響の拡散に大きな差がないことを確認した。

ケース 1 (風速 0.3m/s)



ケース 2 (風速 0.01m/s)

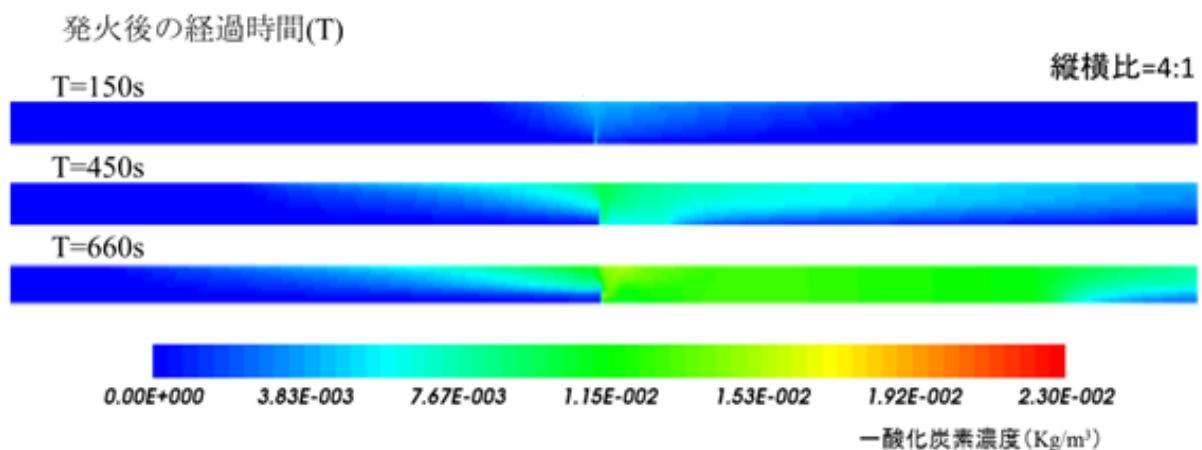
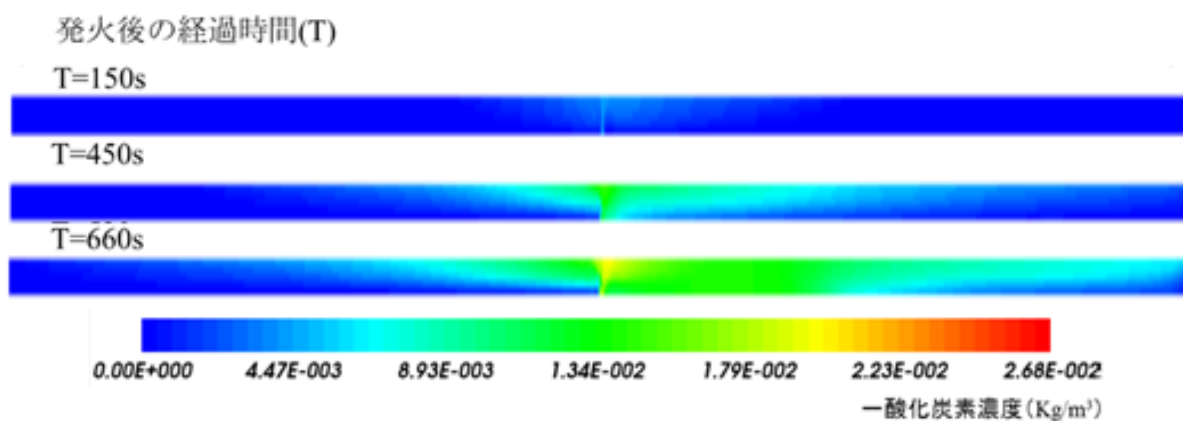


図 4.2.4-1 ケース 1 とケース 2 における火災時の一酸化炭素濃度の比較

(2) 風門設置の有無による火災時の熱・煙の拡散状況の比較

図 4.2.4-2 に風門設置の有無による火災時の熱・煙の拡散状況を比較したものを示す。ケース 1 (風門がない、通常通気状態:風速 0.3m/s) とケース 3 (風門を設置、通常通気状態:風速 0.3m/s) では、ケース 1 が時間の経過とともに風上側、風下側に広く拡散するのに対して、ケース 3 は風上側への拡散が抑えられている。この現象は、一酸化炭素に関らず、二酸化炭素および熱の拡散状況も同様で、風門の設置により風上側への熱・煙の拡散が防止され、火災発生から 660 秒後でも風上側の坑内へは火災の影響は少ない。また、風門より風上側の坑内の酸素濃度は火災発生から 150 秒後ではほとんど変化がなく、530 秒後でも酸素濃度の低い範囲は風門周辺に留まっており、風門の設置は作業員の安全な避難に有効な対策であることを確認した。

ケース 1 (風速 0.3m/s、風門設置なし)



ケース 3 (風速 0.3m/s、風門設置あり)

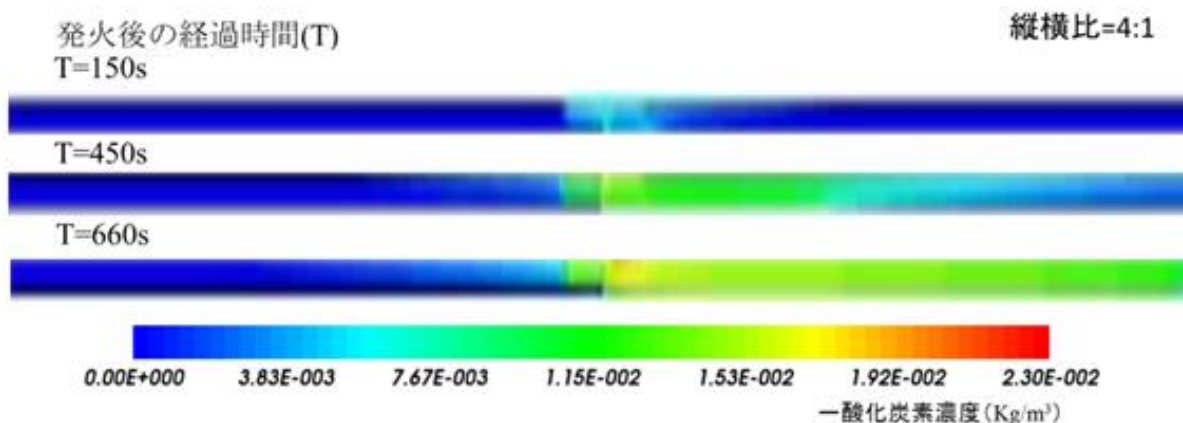


図 4.2.4-2 風門設置の有無による火災時の熱・煙の拡散状況の比較

ケース1（風速 0.3m/s、風門設置なし）とケース3（風速 0.3m/s、風門設置あり）における一酸化炭素濃度の分布を火災から 250 秒後と 660 秒後を図 4.2.4-3 および図 4.2.4-4 に示す。両図とも風門の設置により、発火点の風上側では一酸化炭素の拡散が抑制されていることが分かる。一方、発火点から風下側ではケース1 とケース3 で大きな差がみられず、風門は風上側で効果的な対策といえる。また、風上側に風門があることにより、一酸化炭素は風下側に拡散していることが分かる

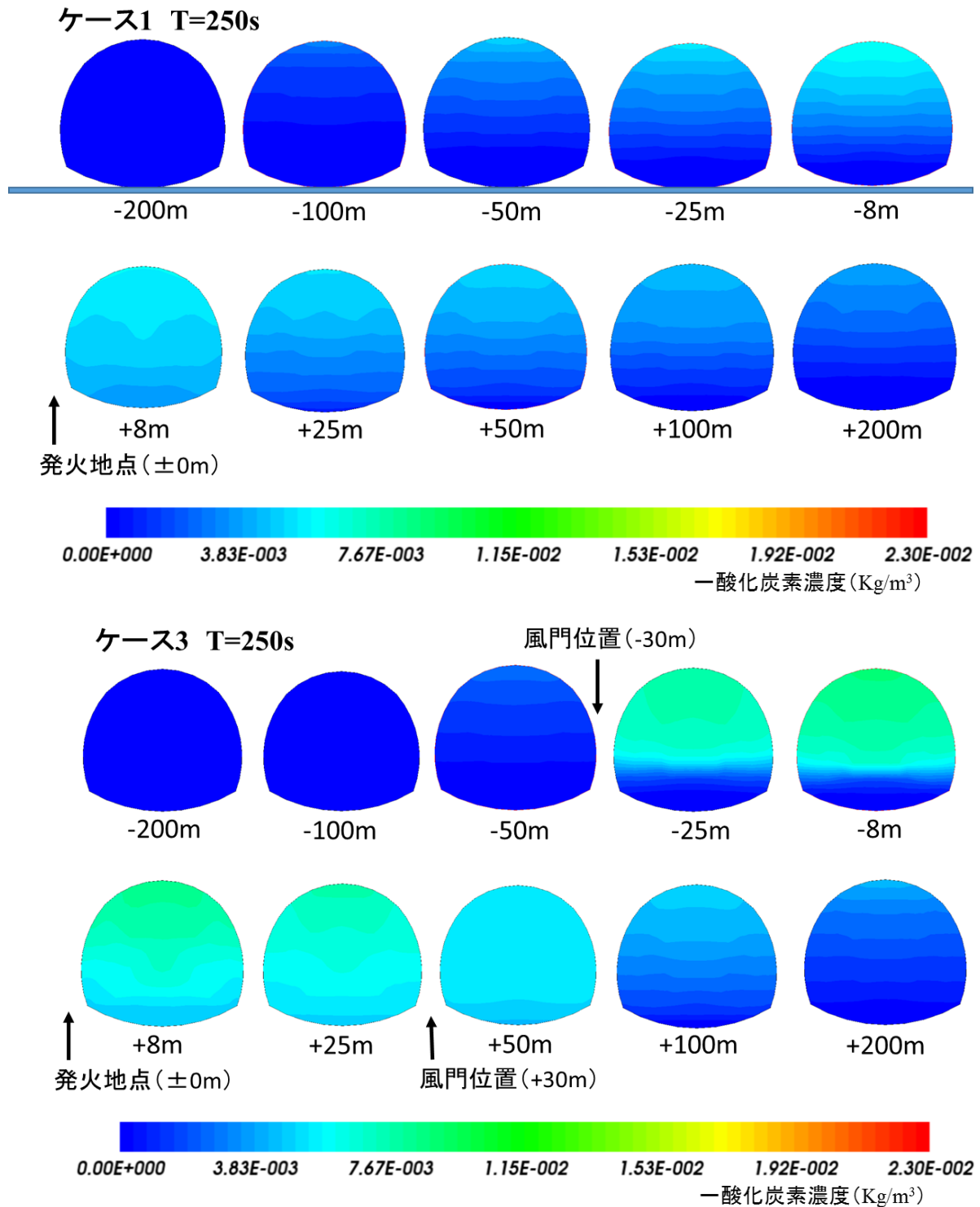
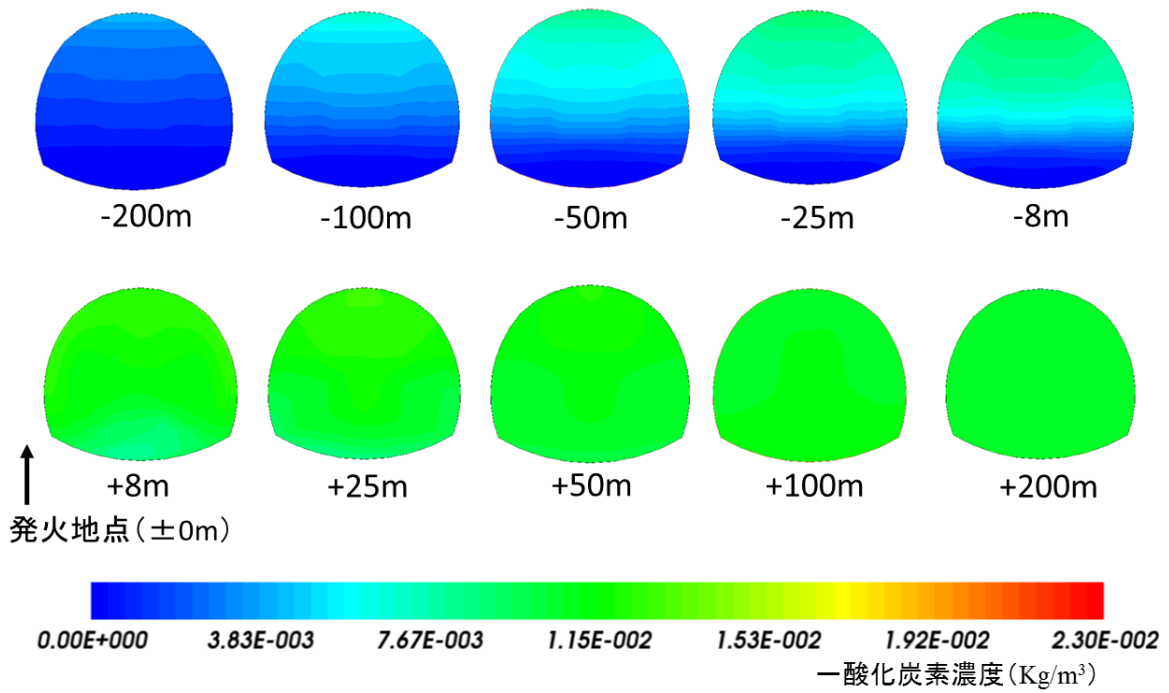


図 4.2.4-3 火災発生から 250 秒後の一酸化炭素濃度の分布

ケース1 T=660s



ケース3 T=660s

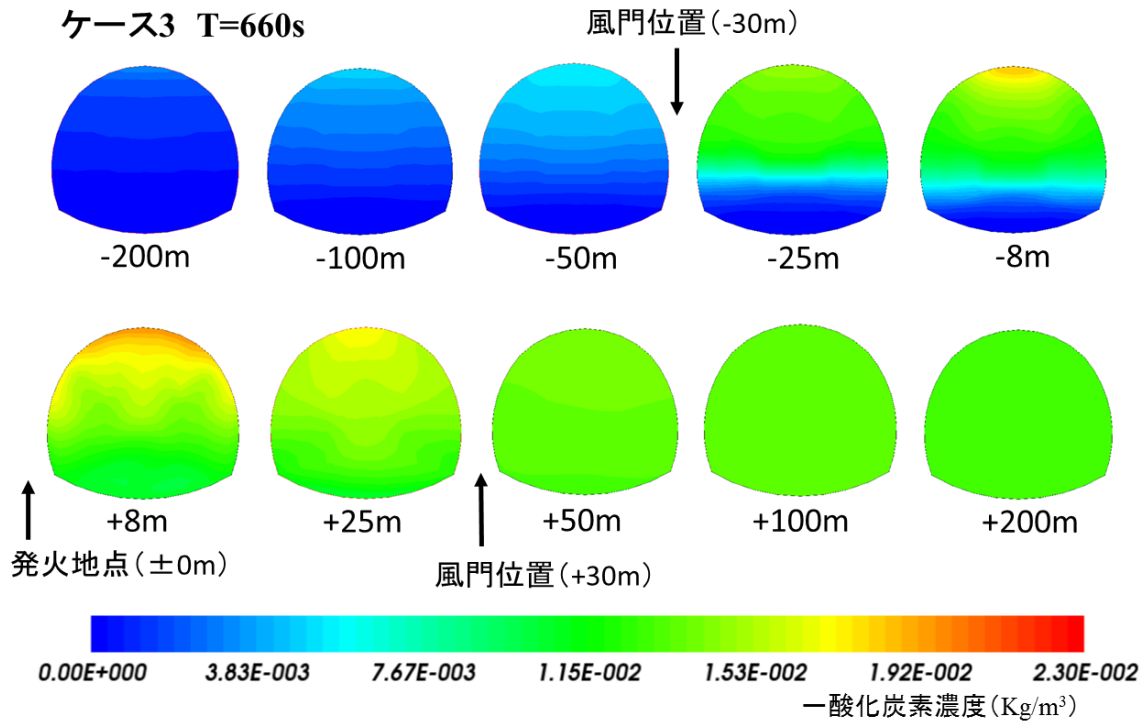


図 4.2.4-4 火災発生から 660 秒後の一酸化炭素濃度の分布

4.3 自然通気の解析

4.3.1 自然通気に関する通気解析を実施する上での着眼点

坑道における通気には図 4.3.1-1 に示すように自然通気と機械換気があるが、機械換気は停電時には換気設備が停止し、地下坑道内へ空気が供給できなくなる。一方で、坑口の高さ、坑道深さ、坑道内温度の差がある場合は坑道内の空気に密度差ができるため、緩やかでも通気が継続されると考えられる。そこで平成 27 年度は自然通気の有無を検討する。

自然通気は自然通気圧 P_N をエネルギーとして発生し、図 4.3.1-2 のように求められる。そのため、図で示した坑道構造の場合、両坑口の入気と排気の空気の平均密度が得られれば、自然通気圧から概略の自然通気量を推定することができる。一方、地層処分場は入気立坑、排気立坑、斜坑、連絡坑道、主要坑道そして多数の処分坑道から構成され、配置は複雑で、自然通気量を推定するためには、坑道網を加味した検討が必要である。今年度は自然通気の発生する坑道条件を確認するため、図 4.3.1-2 に示すような立坑と横坑のみで構成される簡易モデルで解析を行う。しかし、将来的には、地層処分場のレイアウト、条件を反映した解析によって検討する必要がある。

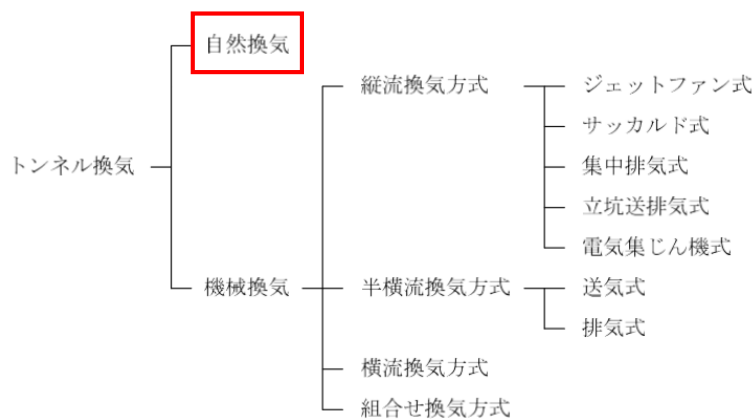
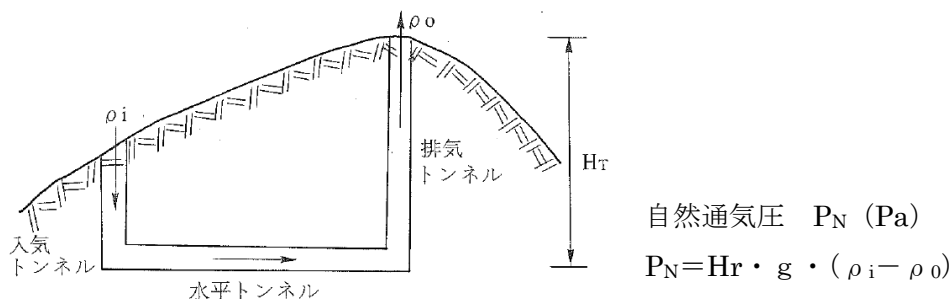


図 4.3.1-1 坑道における換気方式の種類[5]



ここに、 H_r : 入気及び排気の深い方の立坑の垂直深さ (m)
 ρ_i : 入気の平均密度 (kg/m^3)、 ρ_o : 排気の平均密度 (kg/m^3)
 g : 重力の加速度 (m/s^2)

図 4.3.1-2 自然通気圧の計算[6]

4.3.2 解析概要

(1) 解析内容

簡易モデルの解析で設定した坑道条件は、坑道施設で実施が可能と考えられる①2つの立坑坑口の高低差、②主要坑道、処分坑道など中心となる横坑の深度、③2つの立坑坑底部の温度差に着目した。なお、2つの立坑は解析モデルで左側の立坑から入気し、右側の立坑から排気するように解析条件を設定したため、解析モデル左側の立坑を入気立坑、右側の立坑を排気立坑と呼ぶこととする。

入気立坑と排気立坑の坑口の高低差は、図 4.3.2-1 に示すように両坑口に標高差があれば、簡単に確保することが可能である。しかし、両坑口で高低差がなくても、片方に煙突状の構造物を付けることにより、人工的に高低差を得ることが可能である。横坑の深度は地層処分概念や地質条件等により設定される項目である。また、地下深部では周辺地盤の地温が高く、坑道壁面からの湧水も水温が高いことが予想される。例えば湧水を排気坑側に釜場を作って集め、まとめて坑外に排水するの考えると、湧水温度の影響を受け、入気立坑、排気立坑の坑底部に温度差を作ることが可能と考えられる。

以上のような坑道条件を模擬し、検討ケースは施工が実現可能な対策として以下の4ケースとした(図 4.3.2-1)。

①坑口高低差(高低差 50m: ケース 4、高低差 10m: ケース 5)

立坑の地表部に高低差をつける

②-1 横坑内深さの差(ケース 6)

横坑の設定位置に深度差をつける

②-2 立坑底部の温度差(ケース 7)

立坑底部に温度差をつける

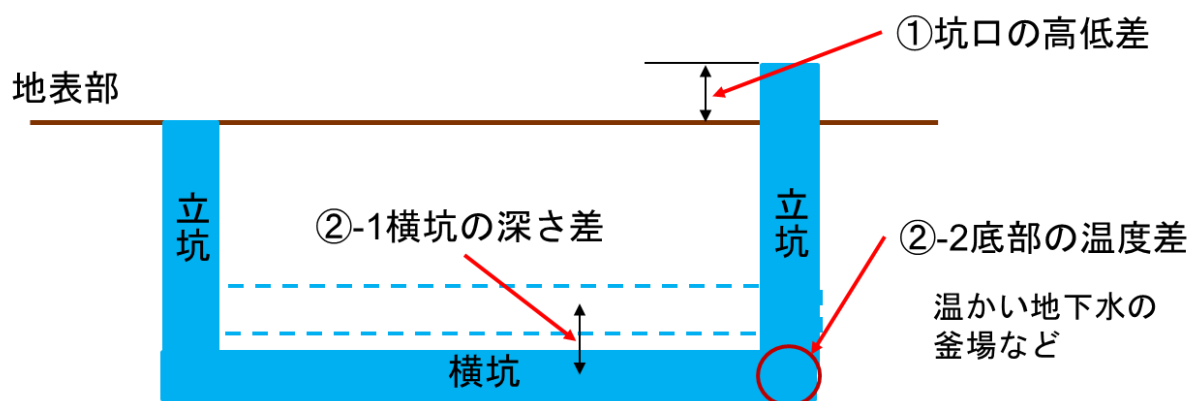


図 4.3.2-1 自然通気に関する検討ケース概要

1) 立坑坑口の高さの差による坑内風速の変化の確認 (ケース 4、ケース 5)

立坑坑口高さ (温度・圧力・密度) の差による自然通気の状態を確認するため、図 4.3.2-2 に示すように、坑口の高さに 50m の差をつけた解析 (ケース 4) と坑口の高さに 10m の差をつけた解析 (ケース 5) を実施する。

立坑や横坑の坑道内では地中温度の影響を考慮するため、坑道壁面と坑内空気の間には熱伝達率を考慮した解析を実施する。解析結果は、立坑坑口高さの違いと坑内風速の関係をグラフ化して整理し、坑口高さの違いによる自然通気の効果を確認する (3次元解析は断面平均風速で整理する)。

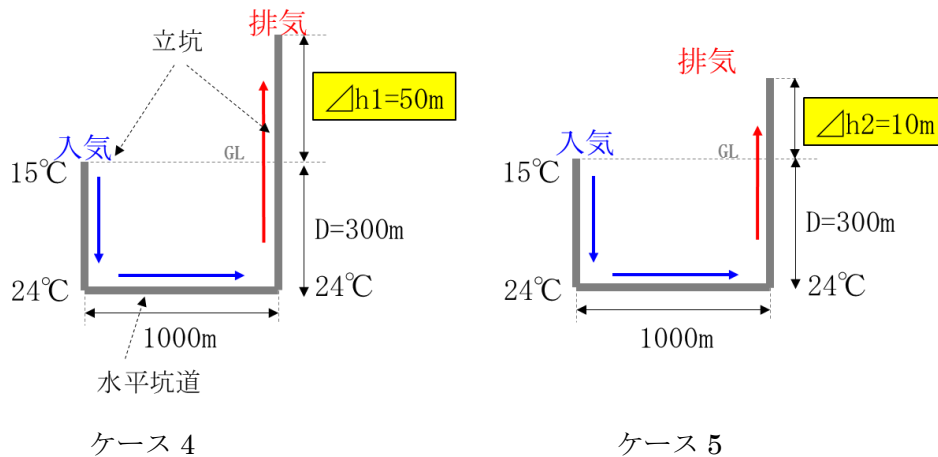


図 4.3.2-2 立坑坑口高さの差による解析ケース (ケース 4、5)

2) 横坑の深さの違いによる坑内風速の変化の確認 (ケース 6)

横坑の深さの差による自然通気の状態を確認するため、図 4.3.2-3 に示すように横坑の深さが 500m の解析 (ケース 6) を実施する。そしてケース 4 (横坑の深さ 300m) と比較することにより、横坑の深さの差に起因する自然通気を確認する

坑道内は地中温度の影響を考慮するため、坑道壁面と坑内空気の間には熱伝達率を考慮した解析を実施する。解析結果は、横坑の深さの違いと坑内風速の関係をグラフ化して整理し、横坑の深さの違いによる自然通気の効果を確認する (3次元解析は断面平均風速で整理する)。

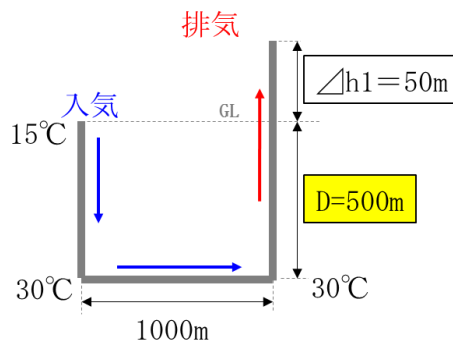


図 4.3.2-3 横坑の深さの差による解析ケース (ケース 6)

3) 立坑底部の温度の違いによる坑内風速の変化の確認 (ケース 7)

立坑底部の温度差による自然通気の状態を確認するため、図 4.3.2-4 に示すように、立坑の坑口高さは同じで、入気立坑底部が 24℃、排気立坑底部が 30℃の温度差の解析 (ケース 7) を実施する。

坑道内には地中温度からの温度の影響を考慮するため、坑道壁面と坑内空気の間には熱伝達率を考慮した解析を実施する。解析結果は、入排気立坑の温度の違いと坑内風速の関係をグラフ化して整理し、入排気立坑の温度の違いによる自然通気の効果を確認する (3次元解析は断面平均風速で整理する)。

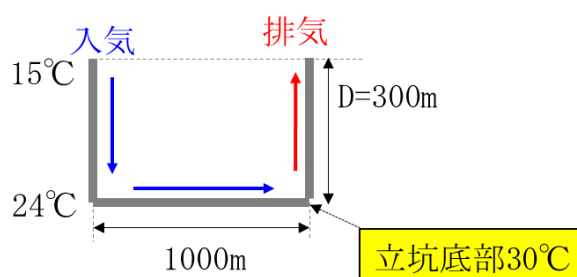


図 4.3.2-4 立坑底部の温度の差による解析ケース (ケース 7)

(2) 解析手法

本検討では、前出の火災解析と同様に解析ソフトウェア「VENTMINE」を用いる。

(3) 解析条件

1) 初期条件

解析の初期条件は、坑道外部の温度 (外気温) を日本の平均気温とほぼ等しい 15℃一定に設定し、坑内温度は立坑・横坑ともに 15℃とした。圧力は地表を基準に圧力を 1atm (大気圧、GL±0m) として、以下の式より気圧を設定した。

$$\text{気圧} = 1\text{atm} - \rho \times g \times (-300\text{m}) \quad \rho : \text{密度} \quad g : \text{重力}$$

坑内環境の初期条件は、前述の火災の検討と同様に、コンクリート摩擦係数および比熱比は 0.6、1.4 に、空気の平均モル質量は 0.02897kg/mol、密度は 1.293kg/m³、粘性は 1.86×10⁻⁵kg/m・s とした。また、流体の動粘性度と温度拡散率の比であるプラントル数は、理科年表に基づいて設定した (図 4.3.2-5～図 4.3.2-8)。

なお、ケース 7 では入気立坑および横坑内の温度は 15℃とし、排気立坑内の温度を 30℃とした。

2) 境界条件

解析では、坑道壁面の温度変化は周辺岩盤の地温と同様に 100m あたり 3°C 上昇するとして、坑道壁面の温度を設定し、坑道壁面から坑道内部の空気に熱が伝わる熱伝達を考慮した。ここでは解析ケース 4 を例に境界条件の設定例を示す。

ケース 4 では、入気立坑は長さ 300m で、坑口は GL±0m、底部は GL-300m とし、横坑は長さ 1000m で、入気立坑底部から排気立坑底部につながる。排気立坑は坑口の高さが入気立坑より 50m 高い位置にあり長さ 350m で、坑口は GL+50m、底部は GL-300m とし、底部で横坑と繋がっている。このケース 4 の坑道壁面の境界条件は、入気立坑の坑口の壁面温度を 15°C とし、深度 300m 地点を 24°C に設定した上で、その間の温度は線形変化とする。横坑は水平で深度が変わらないため横坑壁面の温度は 24°C 一定とし、排気立坑壁面の温度も入気立坑壁面と同様の考え方に基つき、24°C から坑口 (14.5°C) まで線形変化とした。なお、右側立坑の坑口壁面の温度は、地上高さが GL+50m であることから、左側坑口壁面の温度より 0.5°C 低い 14.5°C である。

ケース 4～ケース 7 の初期条件と境界条件を図 4.3.2-5～図 4.3.2-8 に示す。

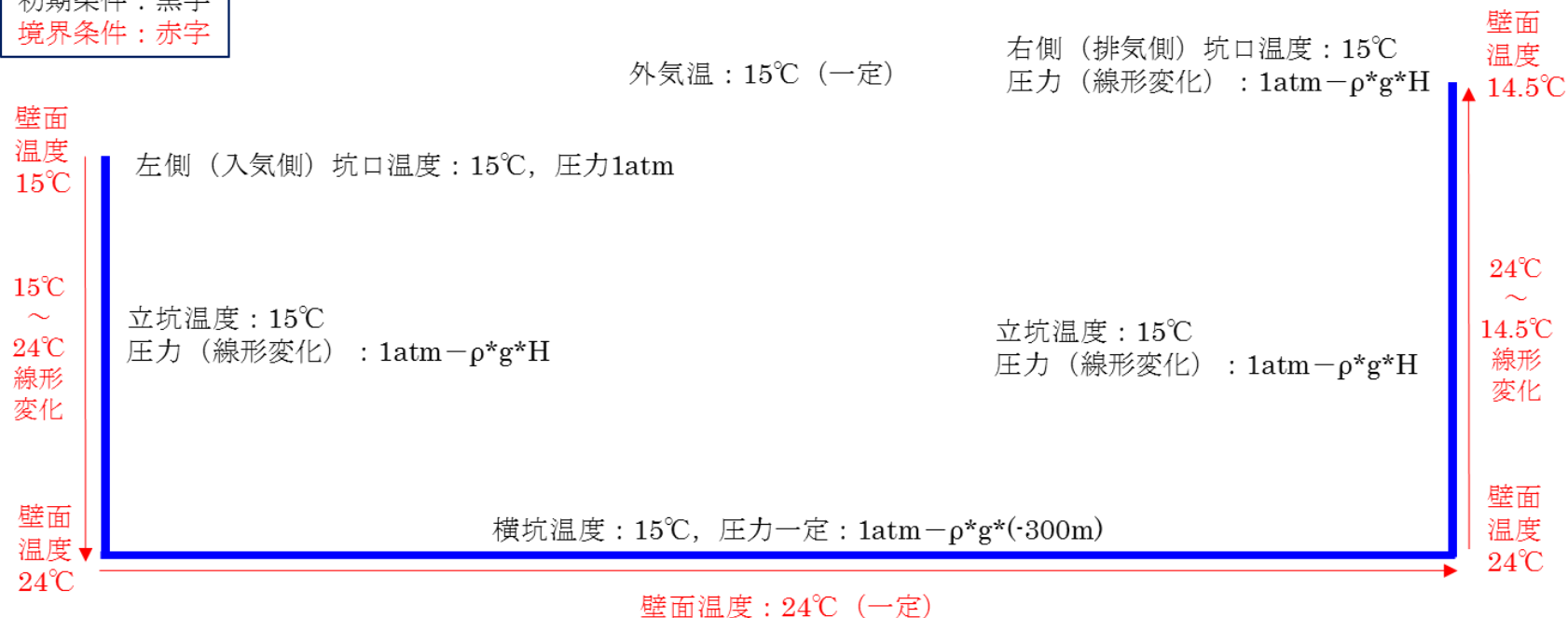
3) 検討ケースの設定のまとめ

自然通気における検討ケースの一覧を表 4.3.2-1 に示す。

表 4.3.2-1 自然通気の検討ケース

項目	Case	概 要		
		坑口高さ	坑道深さ	温 度
自然通気	ケース 4	入気側坑口 GL±0m 排気側坑口 GL+50m	GL-300m	境界条件：深さに応じて坑道壁面 温度が線形変化
	ケース 5	入気側坑口 GL±0m 排気側坑口 GL+10m	GL-300m	境界条件：深さに応じて坑道壁面 温度が線形変化
	ケース 6	入気側坑口 GL±0m 排気側坑口 GL+50m	GL-500m	境界条件：深さに応じて坑道壁面 温度が線形変化
	ケース 7	入気側坑口 GL±0m 排気側坑口 GL±0m	GL-300m	境界条件：排気立坑底部を 30°C とし、横坑は 24°C～ 30°C の線形変化、排気 立坑は排気口に向かっ て 30°C から線形変化

初期条件：黒字
境界条件：赤字



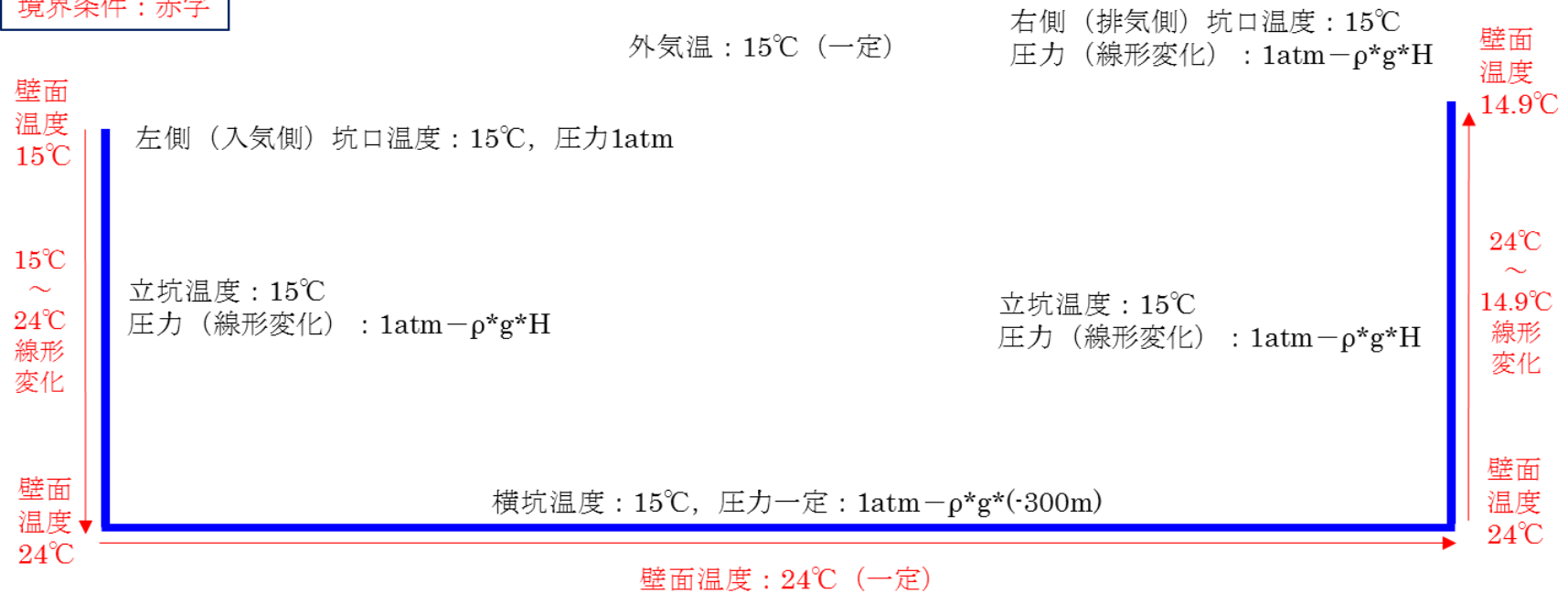
【その他の初期条件（平成25年度、平成26年度と同様）】

- コンクリート摩擦係数：0.6（建築構造計算に用いる一般的な値）
- 比熱比：1.4（空気の比熱の一般的な値）
- 管摩擦係数：0.05（円筒流れの管摩擦係数の代表値）
- 平均モル質量：0.02897(kg/mol)
- 空気の密度：1.293(kg/m³)
- 空気の粘性：1.86×10⁻⁵ (kg/(m・s))
- プラントル数：0.708（空気などの気体の一般的な値）

（理科年表より設定）
（※流体の動粘性度と温度拡散率の比）

図 4.3.2-5 解析ケース 4 の初期条件および境界条件

初期条件：黒字
境界条件：赤字



【その他の初期条件（平成25年度、平成26年度と同様）】

コンクリート摩擦係数：0.6（建築構造計算に用いる一般的な値）

比熱比：1.4（空気の比熱の一般的な値）

管摩擦係数：0.05（円筒流れの管摩擦係数の代表値）

平均モル質量：0.02897(kg/mol)

空気の密度：1.293(kg/m³)

空気の粘性：1.86 × 10⁻⁵ (kg/(m · s))

プラントル数：0.708（空気などの気体の一般的な値）

（理科年表より設定）

（※流体の動粘性度と温度拡散率の比）

図 4.3.2-6 解析ケース 5 の初期条件および境界条件

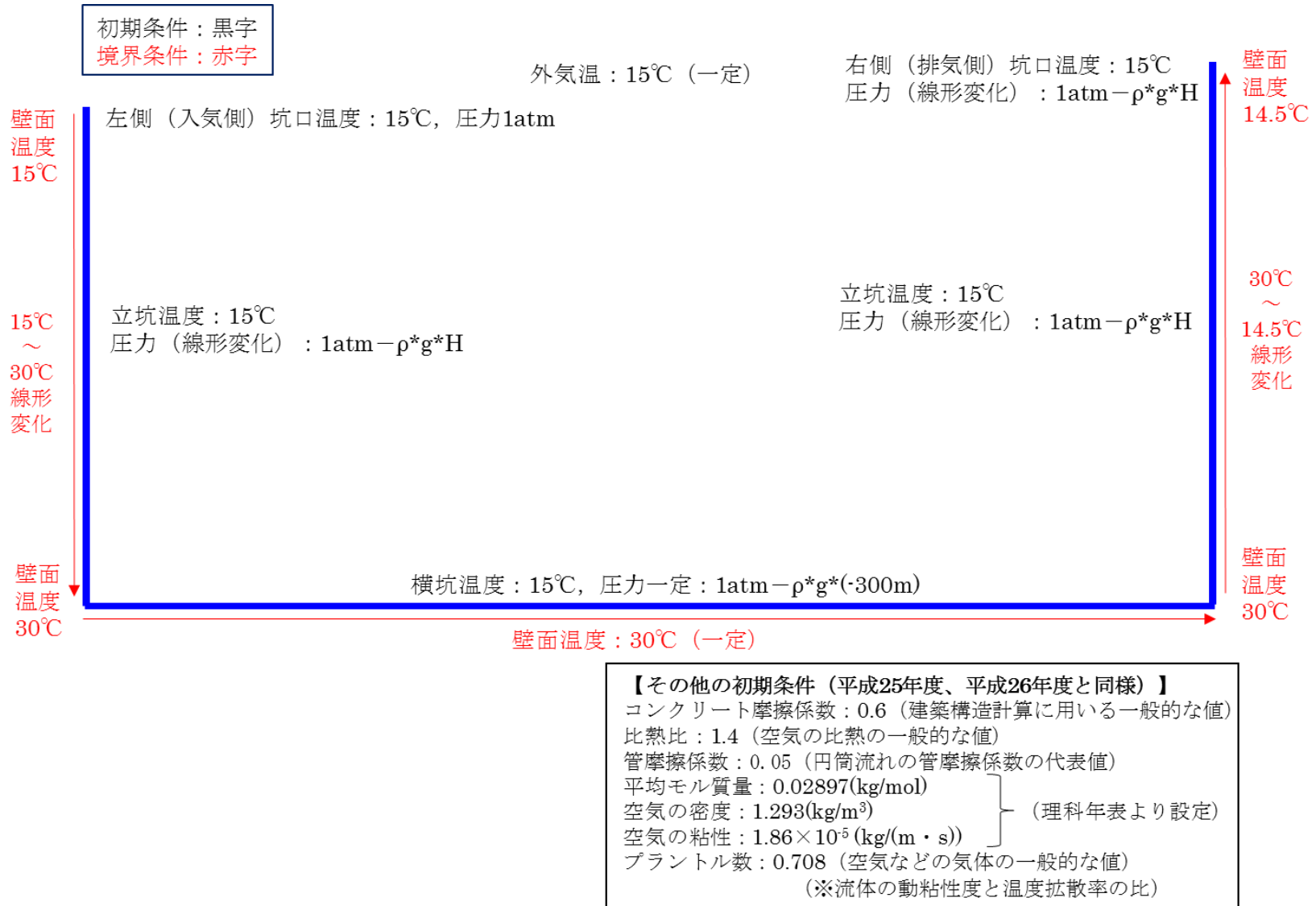
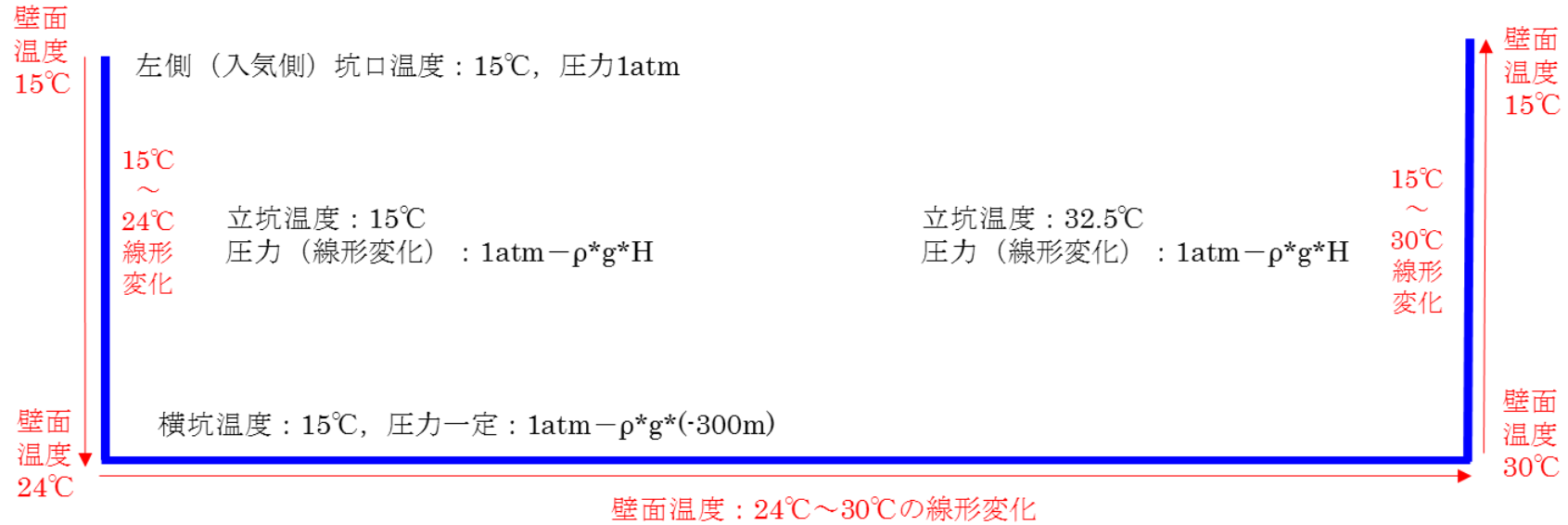


図 4.3.2-7 解析ケース 6 の初期条件および境界条件

初期条件：黒字
境界条件：赤字

外気温：15℃（一定）

右側（排気側）坑口温度：15℃
圧力（線形変化）： $1\text{atm} - \rho * g * H$



【その他の初期条件（平成25年度、平成26年度と同様）】
 コンクリート摩擦係数：0.6（建築構造計算に用いる一般的な値）
 比熱比：1.4（空気の比熱の一般的な値）
 管摩擦係数：0.05（円筒流れの管摩擦係数の代表値）
 平均モル質量：0.02897(kg/mol)
 空気の密度：1.293(kg/m³)
 空気の粘性：1.86×10⁻⁵(kg/(m・s))
 プラントル数：0.708（空気などの気体の一般的な値）
 （理科年表より設定）
 （※流体の動粘性度と温度拡散率の比）

図 4.3.2-8 解析ケース 7 の初期条件および境界条件

4.3.3 解析モデル

(1) 形状定義

解析では立坑と横坑を組み合わせた U 字型のシンプルな形状を用いた解析モデルを設定した。立坑および横坑の形状は、既存の検討結果[3]をもとに設定した。ケース 4～ケース 7 の形状定義を図 4.3.3-1 に示す。

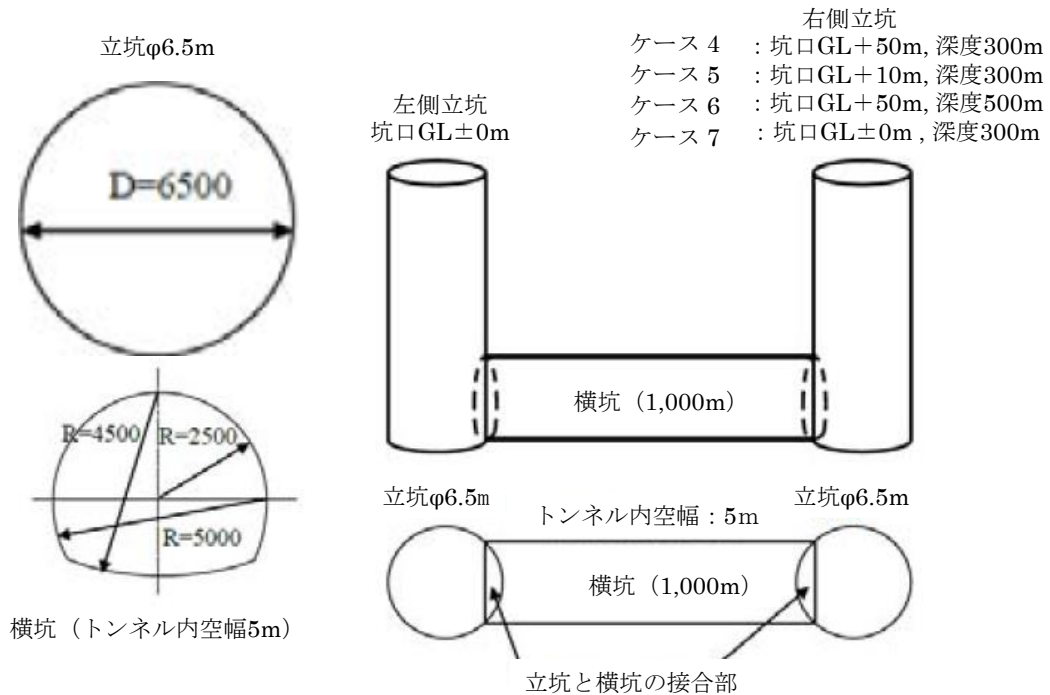


図 4.3.3-1 自然通気の解析モデルの形状定義

(2) 立坑および横坑のメッシュ分割

(1) に示した形状定義図から立坑および横坑のメッシュを図 4.3.3-2、図 4.3.3-3 に示すように作成した。要素形状は四角形とした。なお、最小のメッシュサイズは 0.0083m となった。

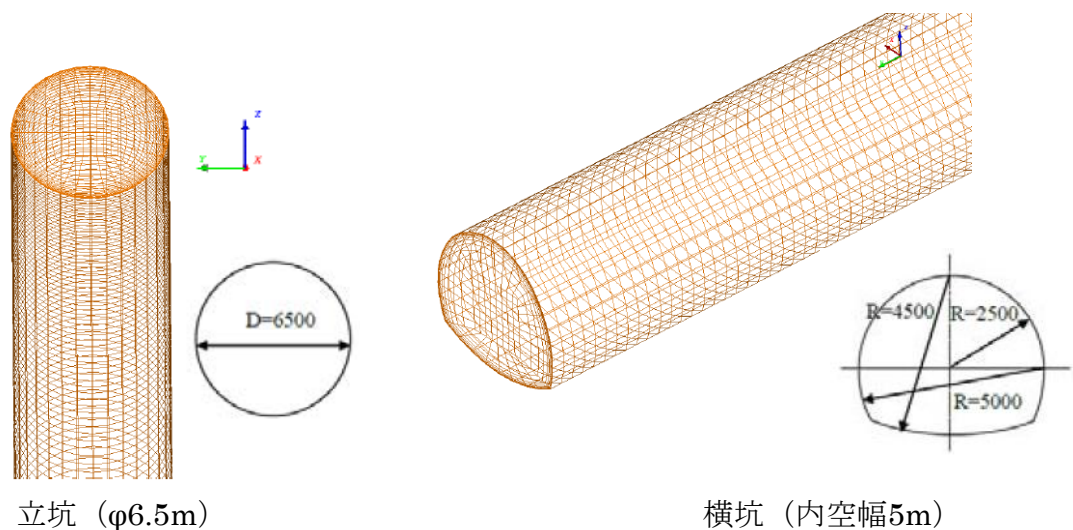
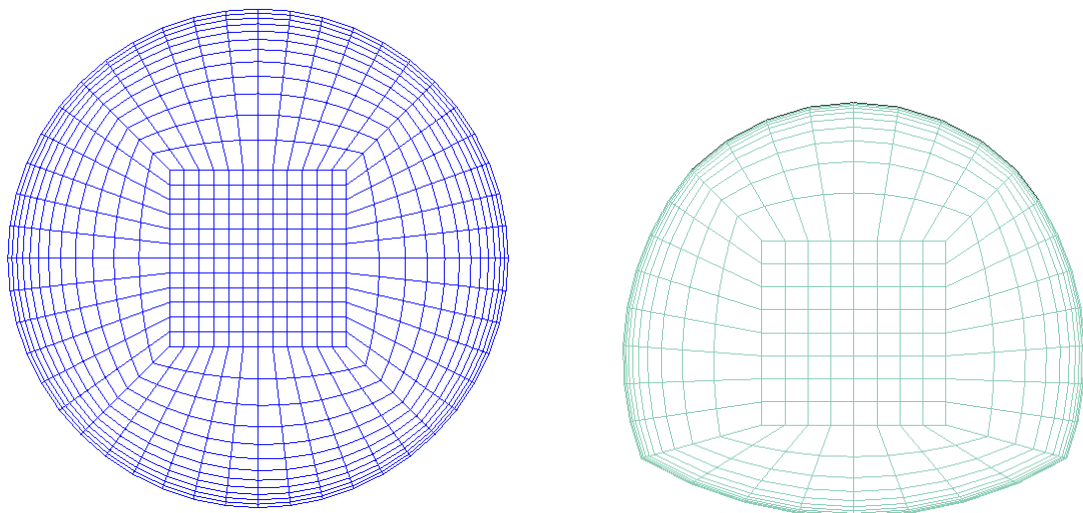


図 4.3.3-2 自然通気の立坑・横坑の解析モデル



(1)立坑のメッシュ数 720, 節点数 745 (2)横坑のメッシュ数 384, 節点数 401

図 4.3.3-3 立坑・横坑の断面のメッシュ数、節点数

(3) 立坑と横坑の接合部のモデル化

1) 立坑（円筒形状）と横坑断面の接合上の工夫点

前述した円筒形状の立坑と、横坑は断面形状が異なる。そのため両者を 3 次元モデルとして接合させると、接合部分のメッシュの形状が複雑になり、計算誤差が出易いという計算上の課題がある。この課題の解決策は以下のように 2 つの方法が考えられる。

① 解決策 1

立坑と横坑を直角に接合せず、曲率をつけて緩やかに接合するもので、これは接合部の空気の流れ方を局所的に見る場合の解決策である。利点としては、接合部が緩やかに曲線で繋がり、結果の見え方が美しいことが挙げられる。欠点は、曲率部分のメッシュが細くなり計算負荷がかかること、また曲率部分の断面積が直角で接合した場合より大きくなり計算結果の数値誤差が出ることが挙げられる。

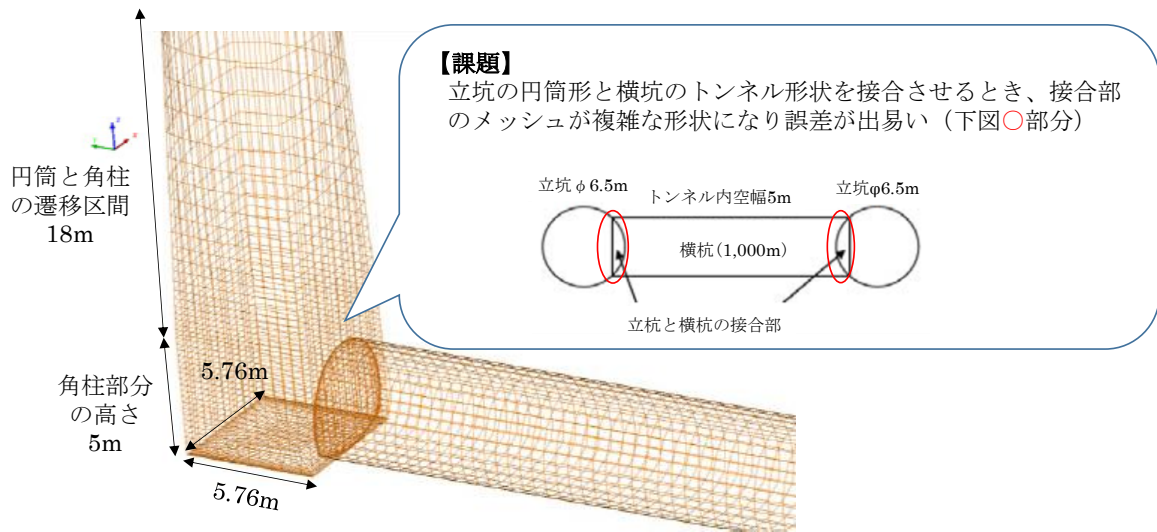
② 解決策 2

立坑と横坑を円筒と等価断面積となるような角柱で接合するもので、これは計算対象領域全体の風量や風速などの計算結果として出てくる数値の誤差を減らす場合の解決策である。利点としては、断面積を忠実に再現するため計算結果の数値誤差が少なくなることが挙げられる。欠点は、一部が角柱となり、実際の接合とは異なることである。

上記の解決策について、本検討の目的が『坑口高さ、坑道深さ、立坑温度差による自然通気の変化の確認』であり、接合部の局所的な空気の流れ方を見るものではなく、計算対象領域全体の風量や風速などの計算結果として出てくる数値を見るものである、ということに留意し、本解析では立坑と横坑の接合部で、立坑側に局所的な角柱形状を利用する解決策 2 を採用した。

図 4.3.3-4 に採用した接合方法を示すが、立坑側の角柱部分の断面は立坑（ $\phi 6.5\text{m}$ ）と等価断面積である一辺 5.76m の正方形とし、角柱部分の高さは 5m （横坑の高さ程度）した。また、立

坑の円筒形状と角柱形状の遷移区間は 18m とした。



【課題の解決策】 ⇒立坑と横杭の接合部に角柱形状を利用

本検討の目的が『坑口高さ、坑道深さ、立坑温度差による自然通気の変化の確認』であることに留意し、立坑と横杭の接合部で局所的に角柱形状を利用して誤差を出にくくした。

【解決策の具体】

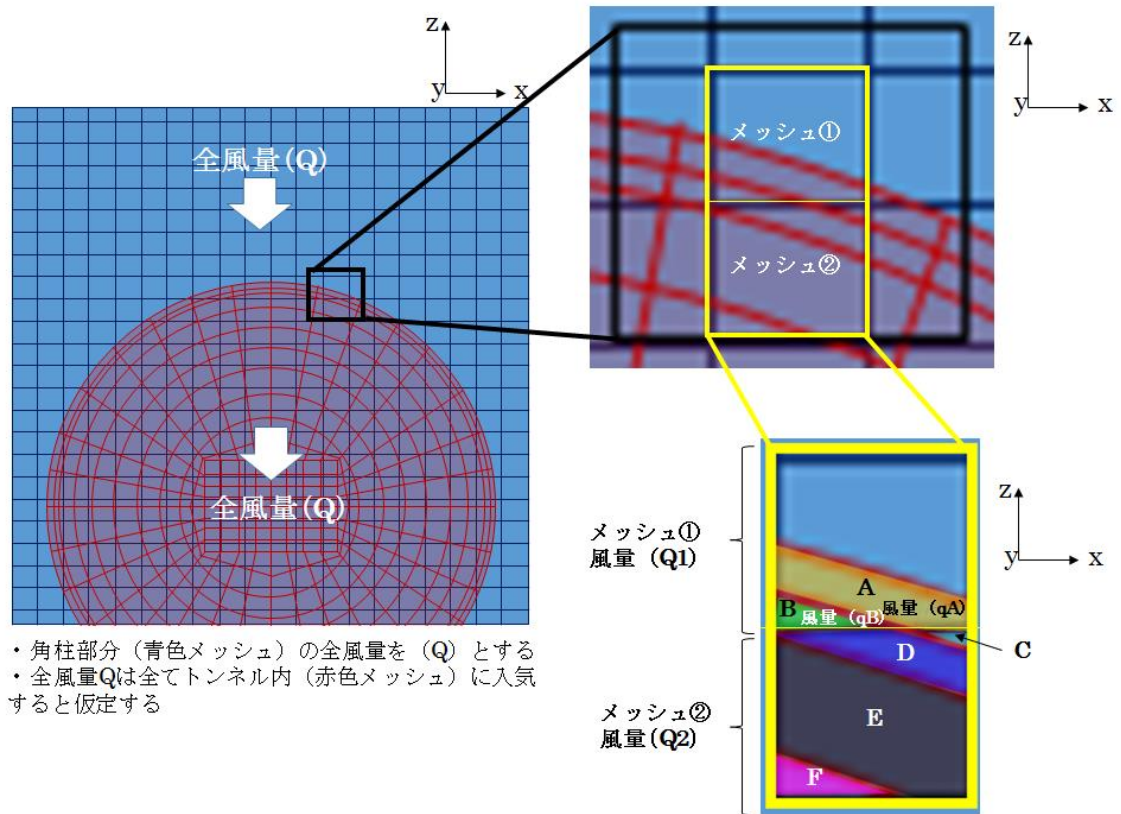
φ6.5m円筒形状と等価断面積（体積）となるよう角柱部分の幅を設定し、メッシュの形状が複雑にならないようにした（※断面積（体積）を等価とする理由は全体のボリュームを同一にするため）。なお、角柱部分は高さ5m、立坑全体の長さ300mに対して1.7%程度と、全体形状に与える影響を極力抑えるよう留意した。

図 4.3.3-4 立坑と横杭の接合部の課題および解決策

2) 立坑と横杭の接合における解の収支の合わせ方

上述した立坑（角柱）と横杭の接合部では、メッシュ形状が一致していない。これについては、接合部の双方のメッシュの流束（単位時間に流れる風量）を合わせることで解決した。その方法を図 4.3.3-5 とともに以下に示す。

- 左側立坑から入気する風量は全て角柱部分に流れることから、この風量を全風量 (Q) とする
- 全風量 (Q) が全て横杭内に入気すると仮定する
- ここで、角柱断面と接着している横杭断面のメッシュをメッシュ①、メッシュ②・・・メッシュ n とする
- 図に示すように、メッシュ①とメッシュ②の角柱断面の風量を Q1、Q2 とし、メッシュ①とメッシュ②に接着している断面のメッシュを、A~F とする
- メッシュ①に接着している断面のメッシュは A、B であり、メッシュ①の風量 Q1 は全て A、B のメッシュに入る
- メッシュ①の風量 Q1 をメッシュ A、B の面積の割合で比例配分し、断面のメッシュ A、B の風量 qA、qB を求める



メッシュ①の風量 (Q1) = メッシュAの風量 (qA) + メッシュBの風量 (qB)
 【計算例】：メッシュ①の風量(Q1)=10m³/s、メッシュAの面積はメッシュ①の面積の3/10とし、メッシュBの面積はメッシュ①の面積の1/10とする。この場合のメッシュA、メッシュBの風量 (qA, qB) は、それぞれ以下の通り

$$qA = 10(\text{m}^3/\text{s}) / 4 \times 3 = 7.5(\text{m}^3/\text{s})$$

$$qB = 10(\text{m}^3/\text{s}) / 4 \times 1 = 2.5(\text{m}^3/\text{s})$$

図 4.3.3-5 立坑（角柱）と横坑の接合部における流速の合わせ方

(4) 解析モデル

本節では自然通気を対象とした Case1～Case4 の解析に用いるモデルについて述べた。各ケースのモデル化の結果、メッシュ数は 455,520～617,520、節点数は 476,551～642,686、また、坑道壁面等の境界条件を設定した境界面の数は 37,456～48,016、節点数は最大でも 642,686 となった。メッシュのピッチは、立坑の円筒部分で 2m、円筒と角柱部分の遷移区間で 1.93m、角柱部分で 0.25m、横坑で 0.47m であり、最小メッシュサイズは 0.0083m であった。表 4.3.3-1～表 4.3.3-2 に解析モデルのメッシュ分割を示す。

表 4.3.3-1 各坑道のメッシュ数、節点数

坑道の名称	坑道の形状	断面のメッシュ数	断面の節点数	メッシュ分割の間隔
立坑	円筒	720	745	2.00m
	円筒から角柱へ遷移			1.93m
	角柱			0.25m
横坑	多芯円	384	401	0.47m

表 4.3.3-2 検討ケース 4～7 のモデル化の結果

Case	メッシュ形状	メッシュ数	節点数	境界面数 (境界条件を設定した面の数)
ケース 4	四角形	473,520	493,626	38,416
ケース 5	〃	459,120	478,786	37,456
ケース 6	〃	617,520	642,686	48,016
ケース 7	〃	455,520	476,551	40,096

4.3.4 自然通気の解析結果

(1) 坑口高さの違い 50mによる坑内風速の変化（ケース 4）

入気立坑より排気立坑の坑口位置が 50m高い場合の自然通気を解析した。

1) 坑道内の平均風速

入気立坑、排気立坑および横坑の中央部における平均風速を表 4.3.4-1 に示す。坑口の高さが異なることにより、坑口の高い方に向けて自然通気による空気の流れができています。横坑中央部の風速は 3m/s 程度となる。排気立坑中央部の平均風速が、入気立坑中央部の平均風速より若干大きいのは、排気立坑の方が坑道内部の温度が高いため、空気の密度が小さくなり体積が増えたことによると考えられる。

また、図 4.3.1-2 で示した簡易計算による立坑の自然通気量の計算結果と、解析結果を比較を示す。簡易計算による自然通気量は約 1.4m/s に対し、解析結果は約 1.6m/s で若干高い値であった。

表 4.3.4-1 坑道内の平均風速（ケース 4）

場所	横断面の平均風速 (m/s)
①入気立坑の中央 (-150m) 地点	1.62
②排気立坑の中央 (-125m) 地点	1.67
③横坑中央 (+500m) 地点	3.0

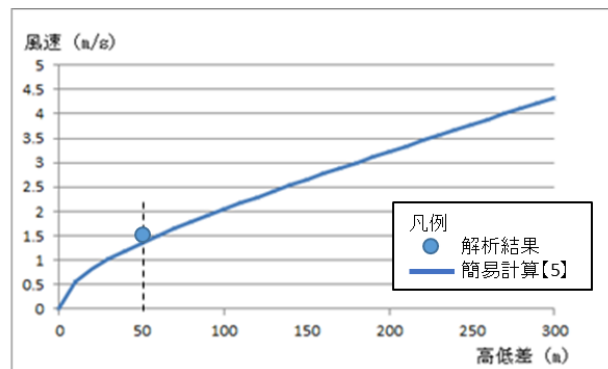
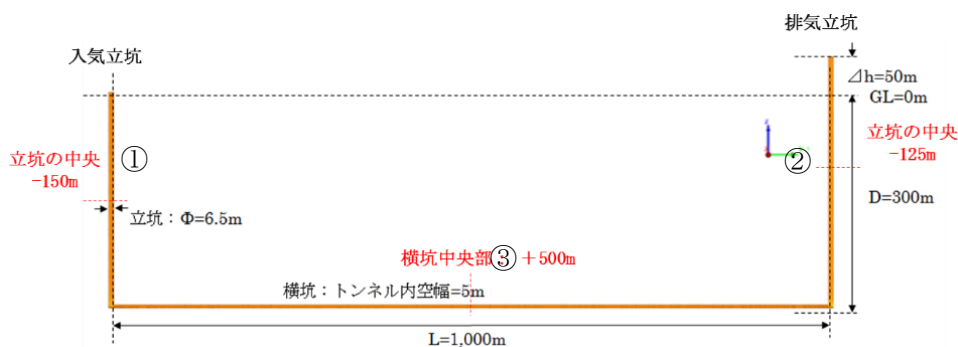


図 4.3.4-1 簡易計算（1次元）との比較

2) 横坑の風速分布（縦断面）

横坑の風速分布を入気立坑側、横坑中央部、排気立坑側に分けて、図 4.3.4-2 に示す。なお、表示した風速は、横坑のセンターラインを通る縦断面での坑道軸方向の風速である。

入気立坑から横坑へ流入した直後は、風の向きが変わりため風速分布に変化がみられる。横坑の中央部付近は風の流れが安定しており風速分布は一様になり、横坑から排気立坑への流出直前で風速にわずかな変化がみられる。

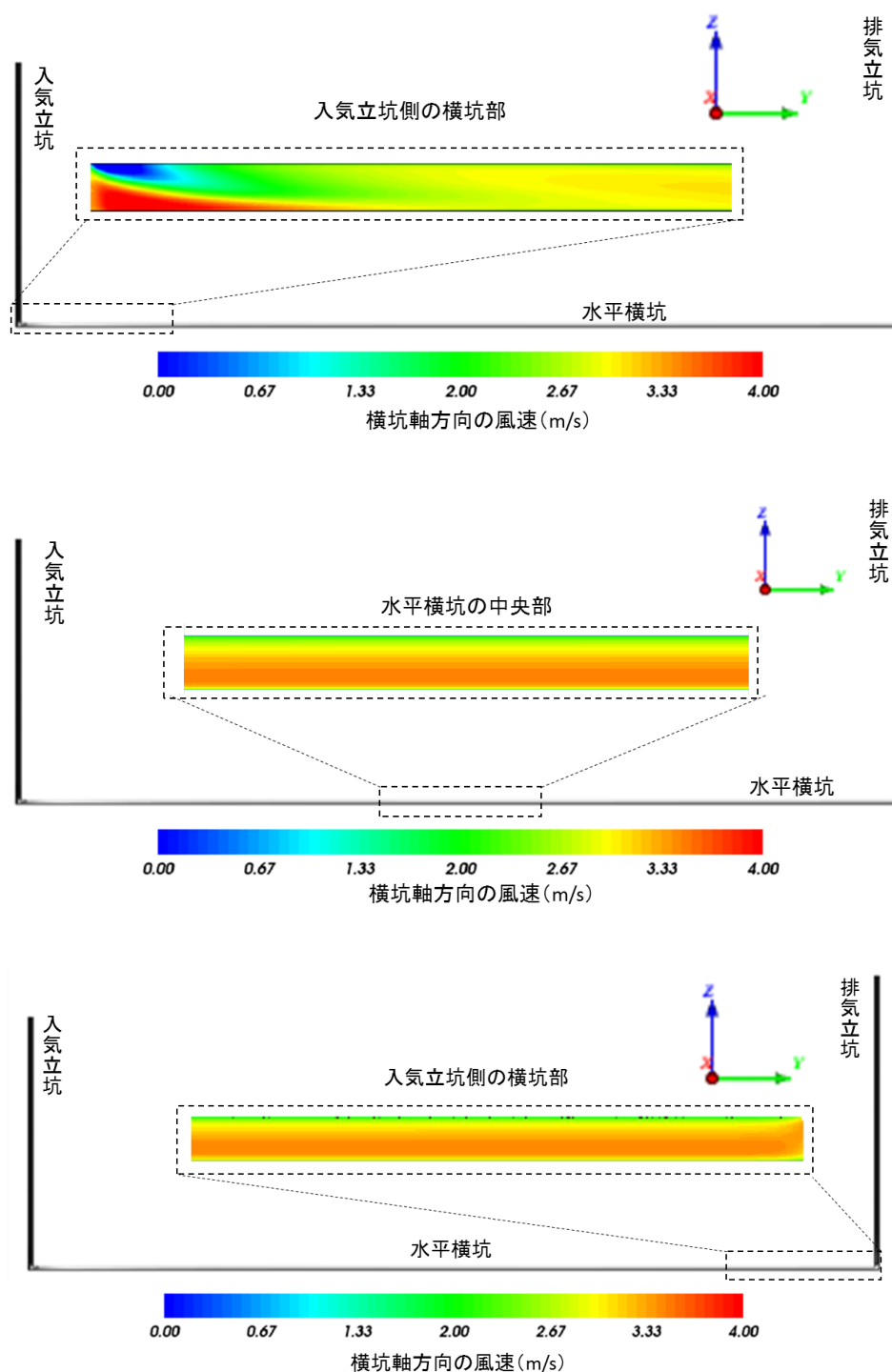


図 4.3.4-2 排気立坑側の横坑部の風速分布（ケース 4）

3) 横坑の風速分布（横断面）

横坑の横断面の風速分布を図 4.3.4-3 に示す。代表横断面は、入気立坑と横坑の接合部を基点（0m）とし、排気立坑に向かって、25m、50m、100m、250m、500m（中心）、750m、900m、950m、975m とした。入気立坑直下の横坑(25m)では坑底部や側部の風速が大きく、横坑(250m～975m)では坑道下半分の風速が大きいことが分かる。

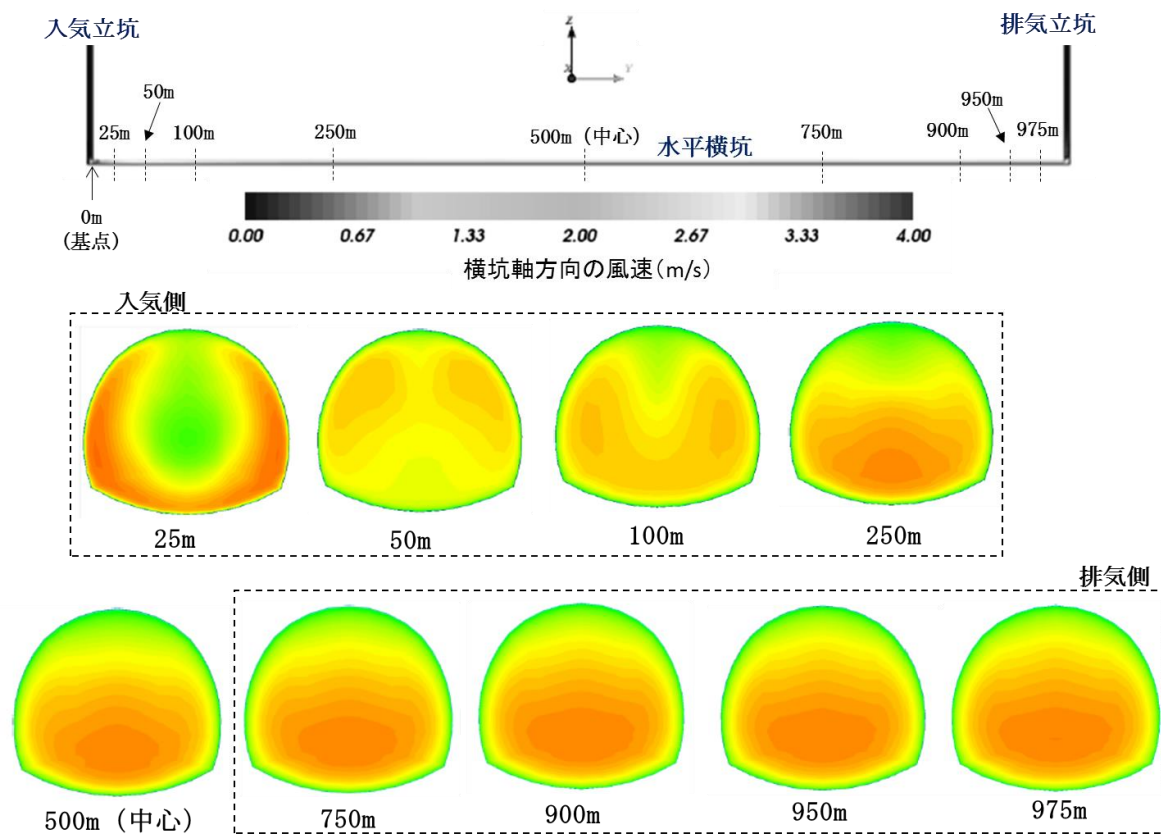


図 4.3.4-3 横坑の風速分布（横断面）（ケース 4）

4) 入排気立坑の縦断面の風速分布

図 4.3.4-4 に入気立坑、排気立坑の立坑軸方向の風速分布を示す。図中の矢印は空気の流れを表し、立坑が 300m と長いため、坑口から坑道底部までを 100m ずつに分割して図化した。図 4.3.4-4 より、両立坑とも横坑との接合部で局所的に風速が速くなる部分が現れた。また、立坑中央部は風の流れが安定しており、軸方向に一様の風速分布となった。

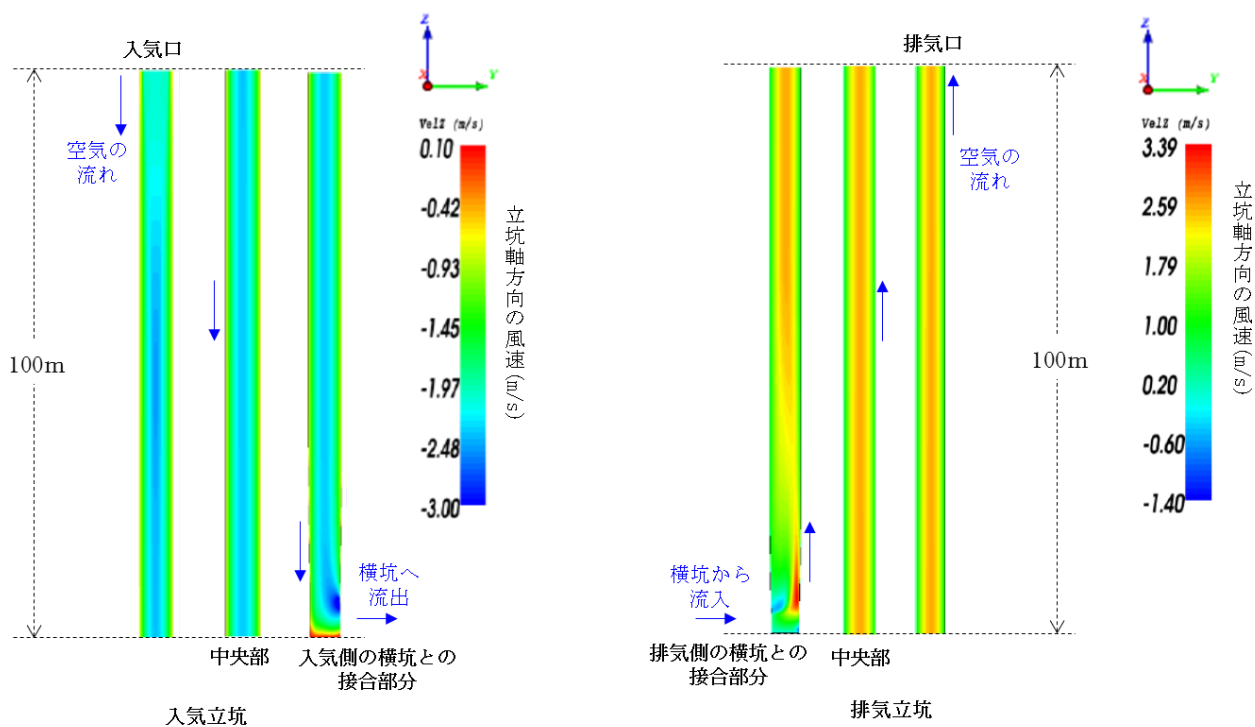


図 4.3.4-4 立坑の風速分布 (縦断面) (ケース 4)

5) 入気立坑から横坑への風の流れ方（風速ベクトル）

図 4.3.4-5 に入気立坑から横坑にかけての風速ベクトルを示す。図より、入気立坑から横坑に流入する部分では渦や空気の回転が見え、風は複雑に流れていることが分かる。

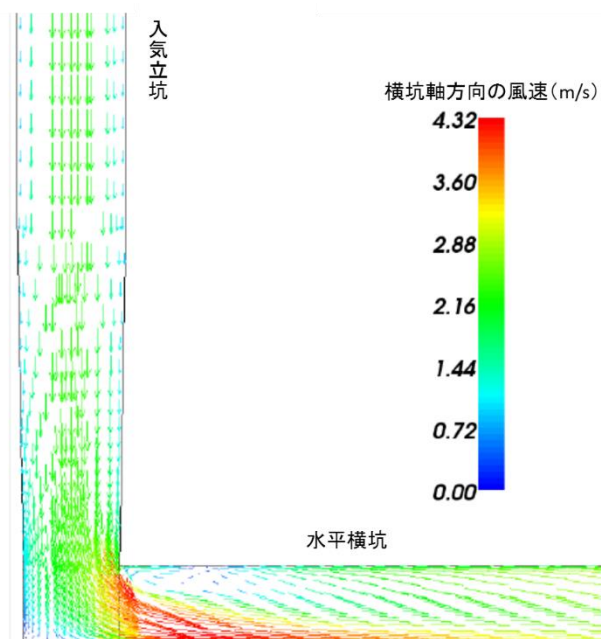


図 4.3.4-5 入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル（ケース 4）

6) 横坑から排気立坑への風の流れ方（風速ベクトル）

横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトルを図 4.3.4-6 に示す。図より、横坑から排気立坑に流出する部分でも図 4.3.4-5 と同様に渦や空気の回転が見え、風は複雑に流れていることが分かる。

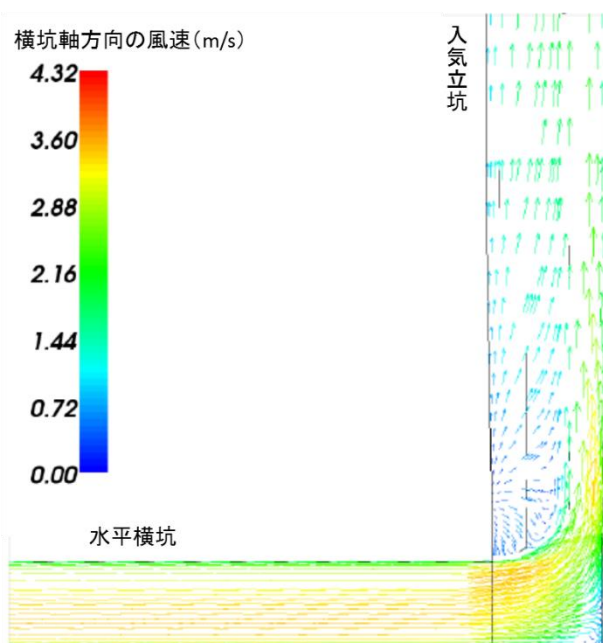
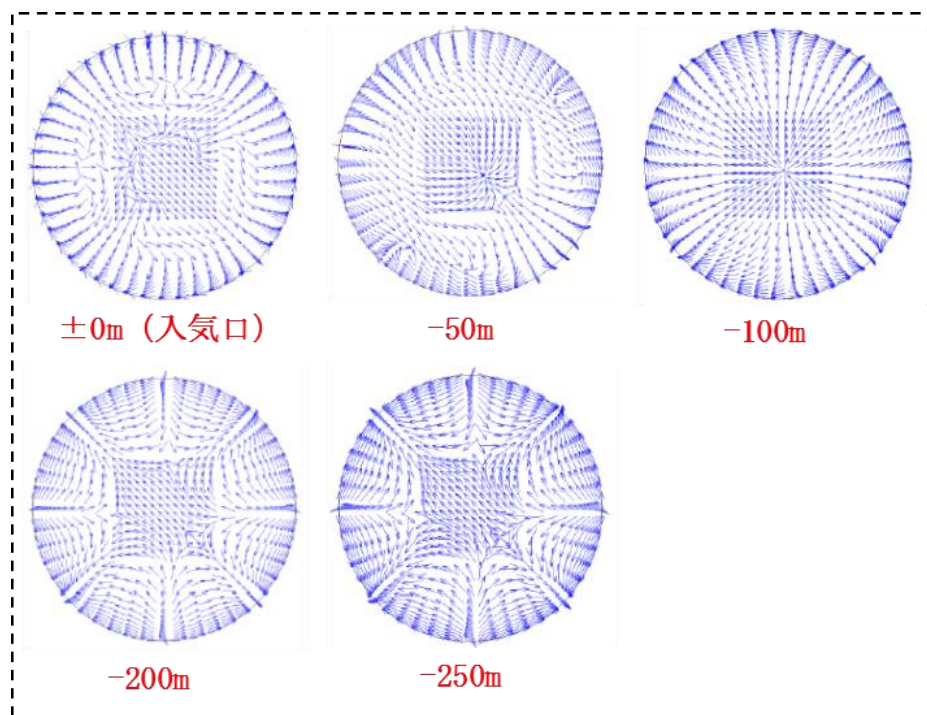


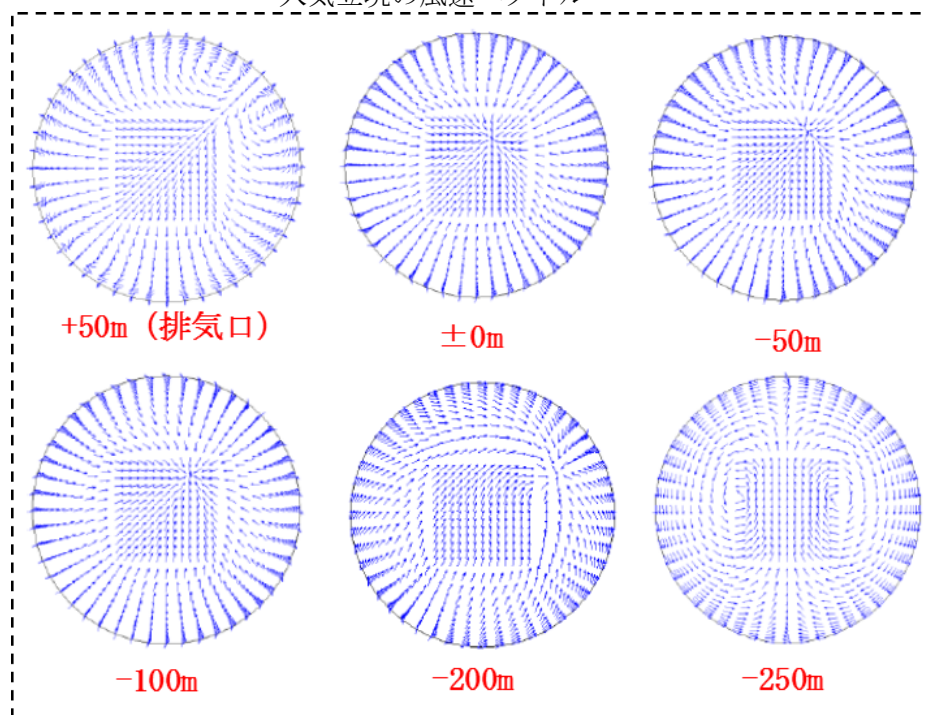
図 4.3.4-6 横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル（ケース 4）

7) 入排気立坑の風速ベクトル (横断面)

図 4.3.4-7 に入排気立坑の風速ベクトルの横断面を示す。代表横断面は、左側立坑 (入気側)、右側立坑 (排気側) とともに地表(GL)を基点とし、GL=±0m 以深で-50m、-100m、-200m、-250m とした。なお右側立坑 (排気側) は坑口である+50m を代表横断面に加えた。入気立坑、排気立坑ともに坑口で風の流れに乱れが見える。



入気立坑の風速ベクトル



排気立坑の風速ベクトル

図 4.3.4-7 入排気立坑の風速ベクトル (ケース 4)

8) 計算対象領域の圧力分布

図 4.3.4-8 に計算対象領域全体の圧力分布を示す。入気立坑エリアと排気立坑エリアの圧力分布を比較すると、排気立坑エリアの圧力のほうが若干低いことが分かる。圧力の大小は空気の密度に影響し、圧力の小さいほうが体積が増えるため、風速は高くなる。なお、この傾向は風速分布の傾向（入気側よりも排気側の風速が高いこと）とも一致する。

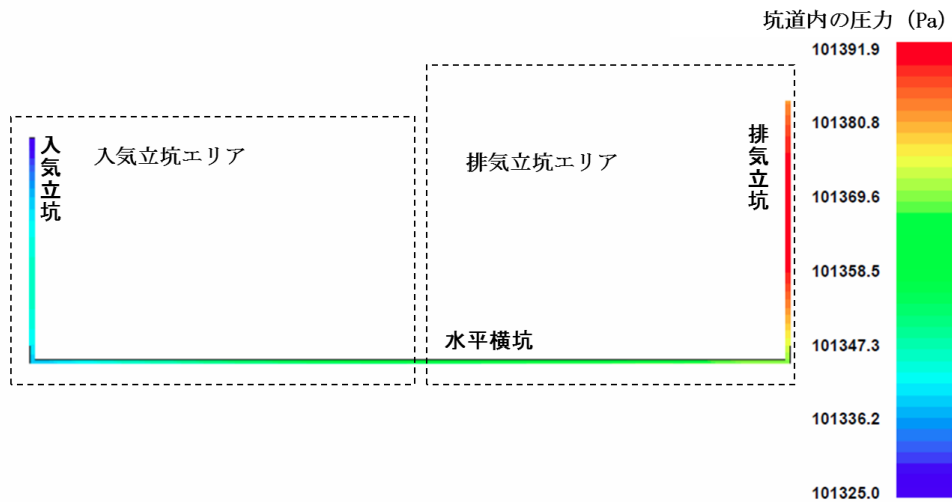


図 4.3.4-8 計算対象領域の圧力分布（ケース 4）

9) 計算対象領域の温度分布

計算対象領域の温度分布を確認する。図 4.3.4-9 に代表横断面の温度分布を示す。なお、両立坑および横坑の横断面の温度分布は、それぞれ若干量であり、分布を確認するために、表示の閾値を各断面で変化させた。入気側は壁面からの熱伝達により、坑道内の空気が温められ、排気側は、温められた空気が壁面によって冷まされていく様子がみられる。

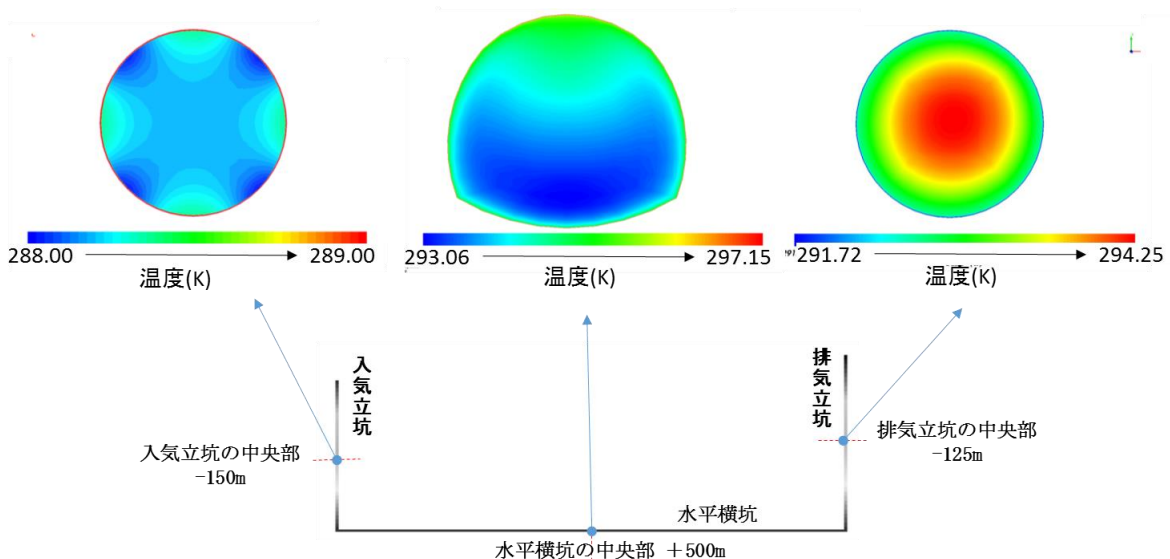


図 4.3.4-9 計算対象領域の温度分布（ケース 4）

(2) 坑口高さの違い 10mによる坑内風速の変化 (ケース 5)

入気立坑の坑口より排気立坑の坑口が 10m高い場合の視線通期を解析した。

1) 坑道内の平均風速

立坑と横坑の中央部における平均風速を表 4.3.4-2 に示す。坑口の低い排気立坑に向けて坑道内の空気が流れ、横坑中央部で約 3.7m/s の自然通気が得られた。これは坑口の高さの差を 50m としたケース 4 より大きな値である。図 4.3.1-2 の 1 次元での自然通気量の簡易計算では、坑口の高さの差が小さいと、自然通気圧が小さくなり、坑道内を流れる自然通気量も小さくなると予想される。ケース 4、ケース 5 の解析結果は簡易計算とは異なるものであり、その考察については、4.3.5 にて詳述する。

表 4.3.4-2 坑道内の平均風速 (ケース 5)

場所	横断面の風速 (m/s)
①入気立坑の中央 (-150m) 地点	1.99
②排気立坑の中央 (-145m) 地点	2.04
③横坑中央 (+500m) 地点	3.69

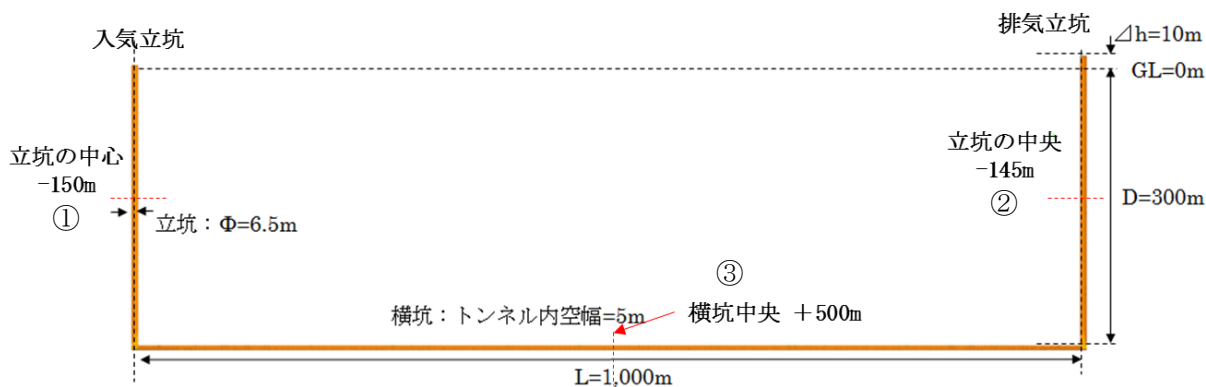


図 4.3.4-10 坑口高さ 10m (ケース 5) の概要

2) 横坑の風速分布（縦断面）

横坑の風速分布を入気立坑、横坑、排気立坑に分けて、図 4.3.4-11 に示す。なお、表示した風速は、横坑のセンターラインを通る縦断面での坑道軸方向の風速である。入気立坑から横坑へ流入した直後は、風の向きが変わりため風速分布に変化がみられる。横坑の中央部付近は一樣な風速分布となっており、横坑から排気立坑への流出直前で風速にわずかな変化がみられる。

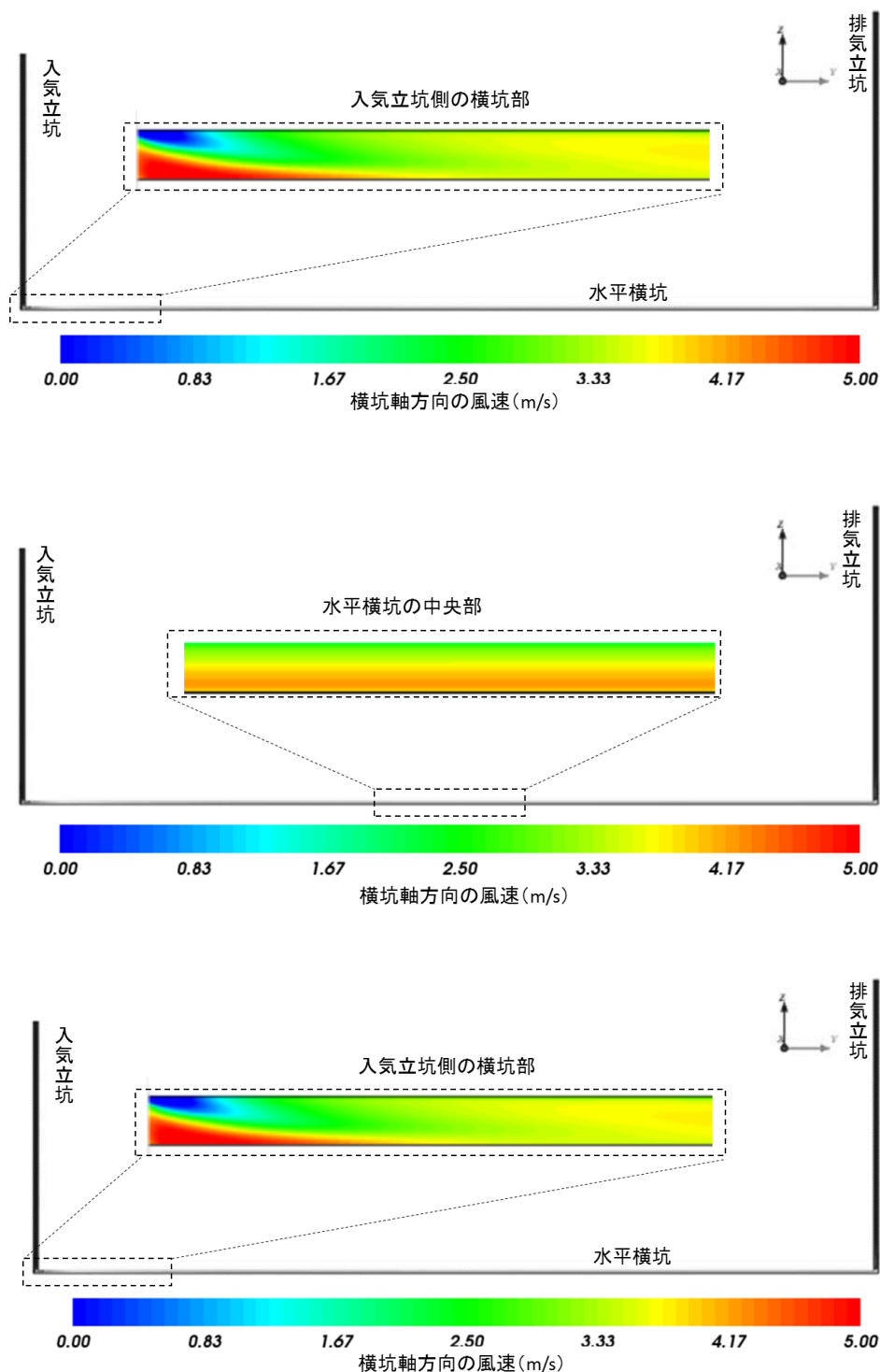


図 4.3.4-11 排気立坑側の横坑部の風速分布（ケース 5）

3) 横坑の風速分布 (横断面)

横坑の横断面の風速分布を図 4.3.4-12 に示す。代表横断面は、入気立坑と横坑の接合部を基点 (0m) とし、排気立坑に向かって、25m、50m、100m、250m、500m (中心)、750m、900m、950m、975m とした。

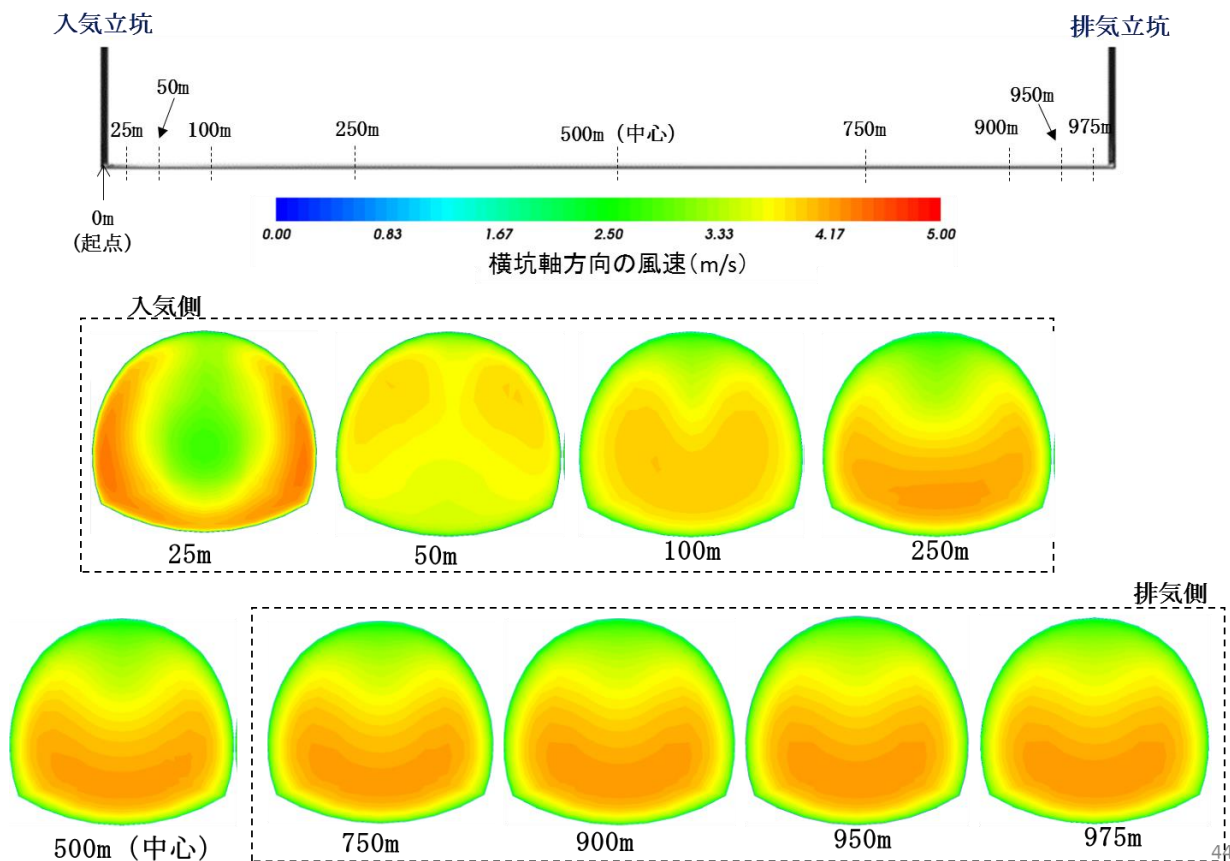


図 4.3.4-12 横坑の風速分布 (横断面) (ケース 5)

4) 入排気立坑の縦断面の風速分布

図 4.3.4-13 に入排気立坑の立坑軸方向の風速分布を示す。図中の矢印は空気の流れを表し、立坑が 300m と長いため、坑口から坑道底部までを 100m ずつに分割して図化した。図 4.3.4-13 より、両立坑とも横坑との接合部で局所的に風速が速くなる部分が見られた。また、立坑中心付近は軸方向に一様の風速分布となった。

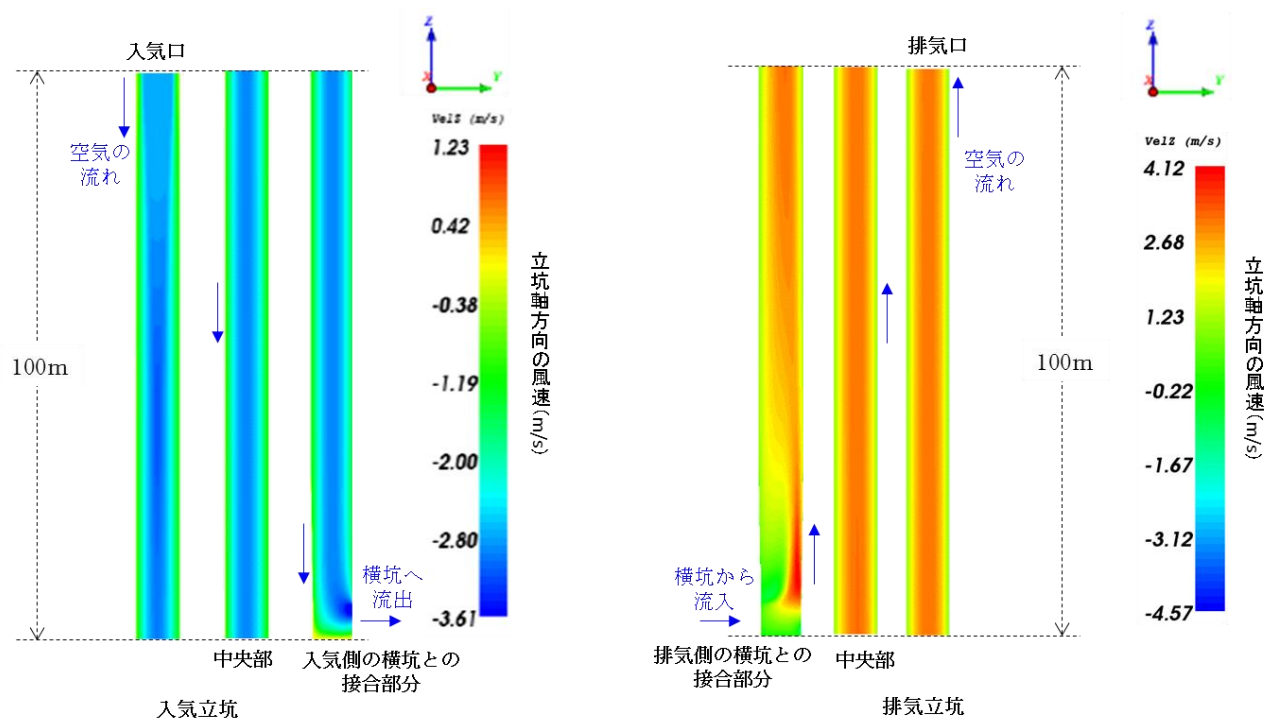


図 4.3.4-13 立坑の風速分布（縦断面）（ケース 5）

5) 入気立坑から横坑への風の流れ方（風速ベクトル）

図 4.3.4-14 に入気立坑から横坑にかけての風速ベクトルを示す。図 4.3.4-14 より、入気立坑から横坑に流入する部分では渦や空気の回転が見え、風は複雑に流れていることが分かる。

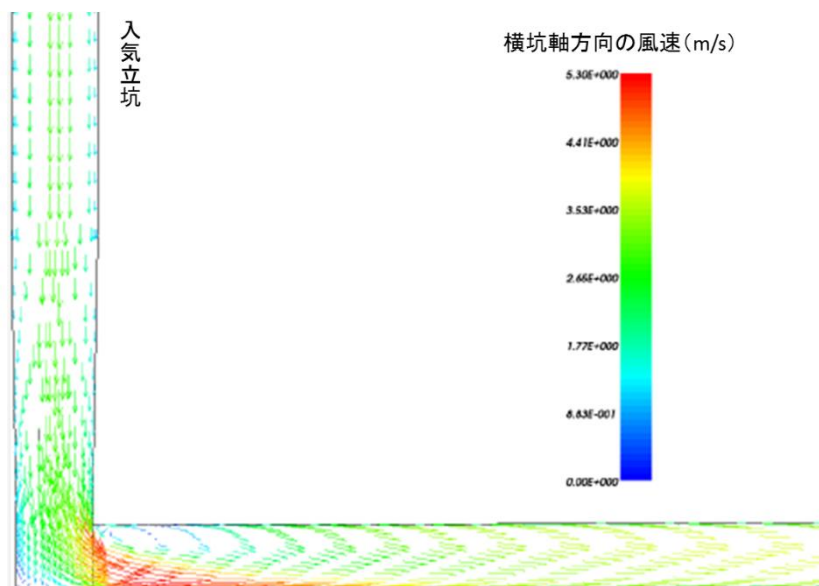


図 4.3.4-14 入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル（ケース 5）

6) 横坑から排気立坑への風の流れ方（風速ベクトル）

横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトルを図 4.3.4-15 に示す。図 4.3.4-15 より、横坑から排気立坑に流出する部分でも図 4.3.4-14 と同様に渦や空気の回転が見え、風は複雑に流れていることが分かる。

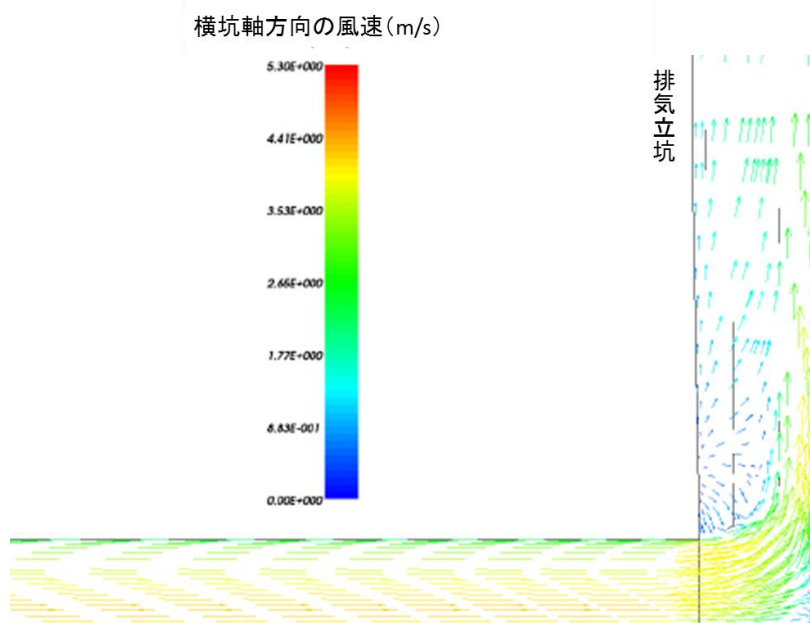
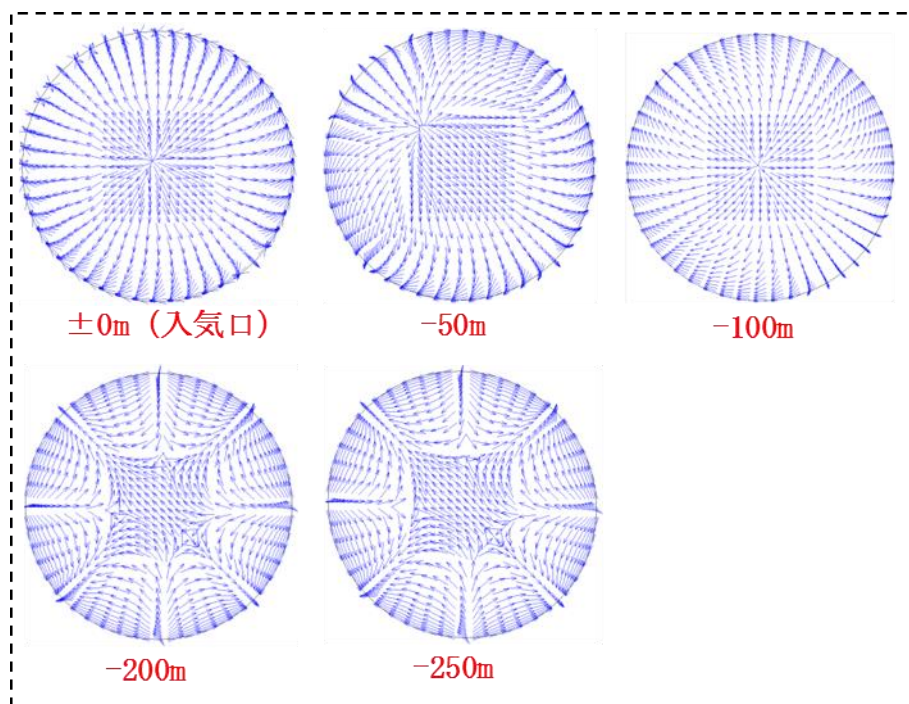


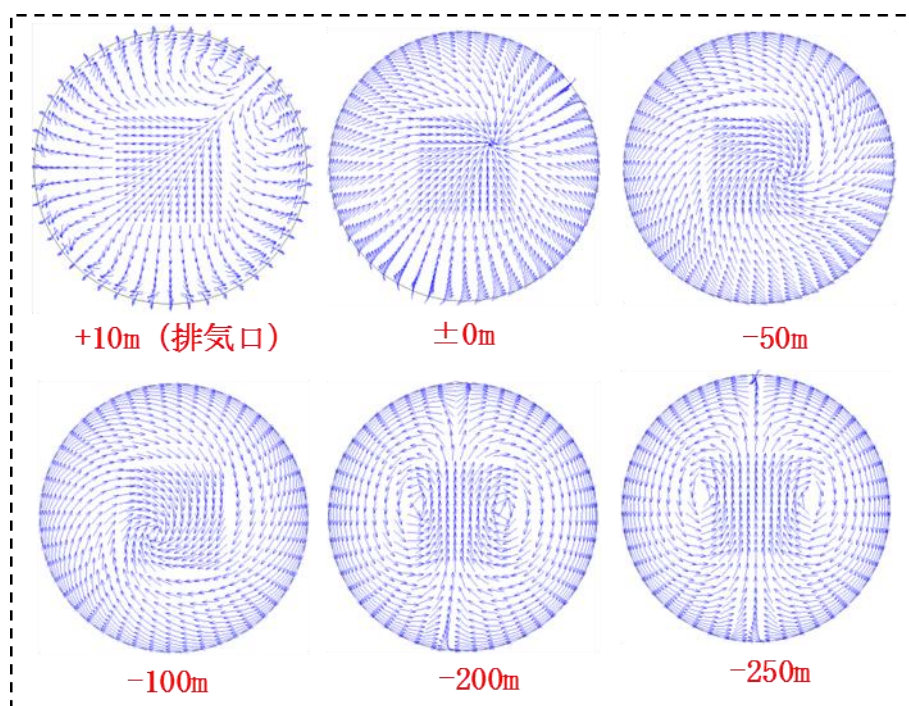
図 4.3.4-15 横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル（ケース 5）

7) 入排気立坑の風速ベクトル (横断面)

図 4.3.4-16 に入排気立坑の風速ベクトルの横断面を示す。代表横断面は、左側立坑 (入気側)、右側立坑 (排気側) とともに地表(GL)を基点とし、GL=±0m 以深で-50m、-100m、-200m、-250m とした。なお右側立坑 (排気側) は坑口である+50m を代表横断面に加えた。入気立坑、排気立坑ともに坑口で風の流りに乱れが見える。



入気立坑の風速ベクトル



排気立坑の風速ベクトル

図 4.3.4-16 入排気立坑の風速ベクトル (ケース 5)

8) 計算対象領域の圧力分布

図 4.3.4-17 に計算対象領域全体の圧力分布を示す。入気立坑エリアと排気立坑エリアの圧力分布を比較すると、排気立坑エリアの圧力のほうが若干低くなっている。

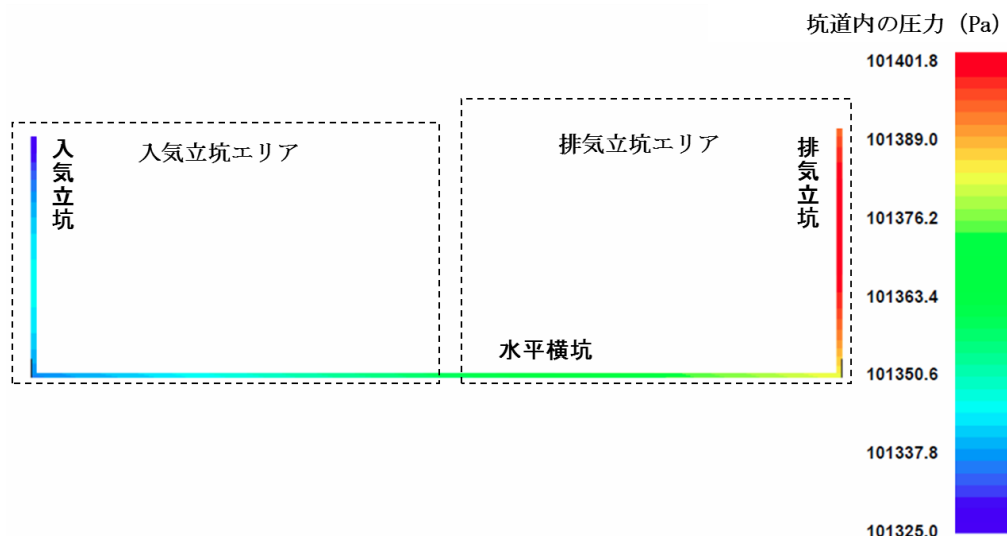


図 4.3.4-17 計算対象領域の圧力分布 (ケース 5)

9) 計算対象領域の温度分布

計算対象領域の温度分布を確認する。図 4.3.4-18 に代表横断面の温度分布を示す。なお、両立坑および横坑の横断面の温度分布は、それぞれ若干量であり、分布を表現するために、表示の閾値を各断面で変化させた。図 4.3.4-18 より、入気側は壁面からの熱伝達により、坑道内の空気が温められる。一方排気側は、温められた空気が壁面によって冷まされていく様子がみられる。

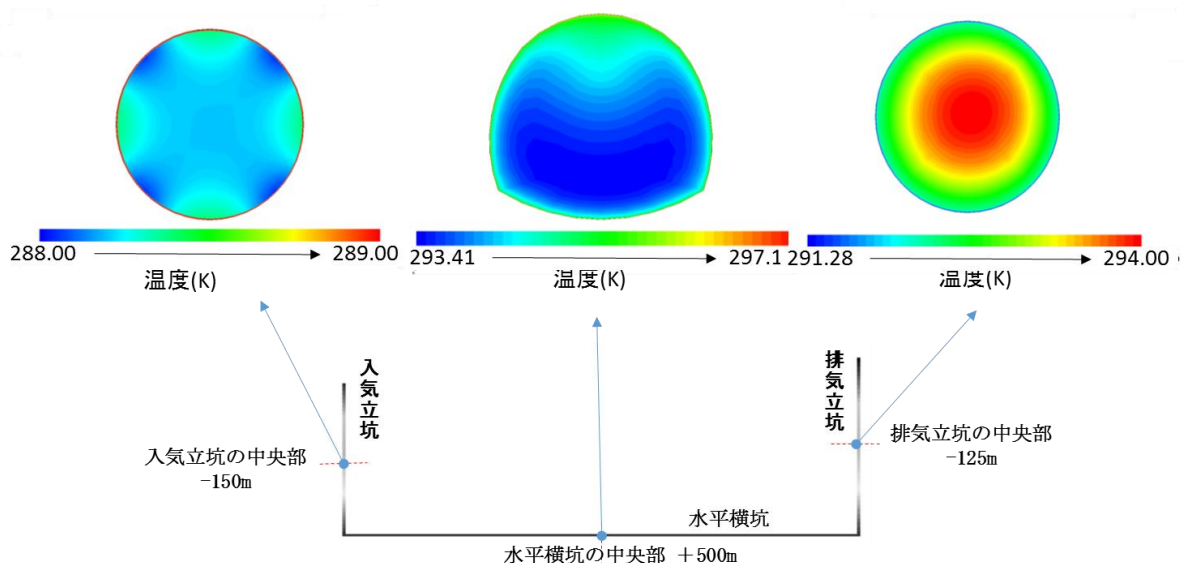


図 4.3.4-18 計算対象領域の温度分布 (ケース 5)

(3) 坑道深さを深くした場合（ケース 6：D=500m）

横坑の深さが 500m 場合の自然通気を解析した。なお、坑口の高さは入気立坑より排気立坑の方が 50m 高いとした。

1) 坑道内の平均風速

坑道内の平均風速を表 4.3.4-3 に示す。坑口の高い排気立坑に向けて坑道内の空気が流れ、横坑中央部で約 5.3m/s の自然通気が発生し、横坑深度を 300m としたケース 4 の風速 3m/s より大きな値となり、横坑の深さから生じる坑道の温度が自然通気に影響していることが分かる。

表 4.3.4-3 坑道内の平均風速（ケース 6）

場所	横断面の風速 (m/s)
①入気立坑の中央 (-250m) 地点	2.85
②排気立坑の中央 (-225m) 地点	2.94
③横坑中央 (+500m) 地点	5.33



図 4.3.4-19 ケース 6 の概要

2) 横坑の風速分布（縦断面）

横坑の風速分布を入気立坑側、横坑中央部、排気立坑側に分けて、図 4.3.4-20 に示す。なお、表示した風速は、横坑のセンターラインを通る縦断面での坑道軸方向の風速である。

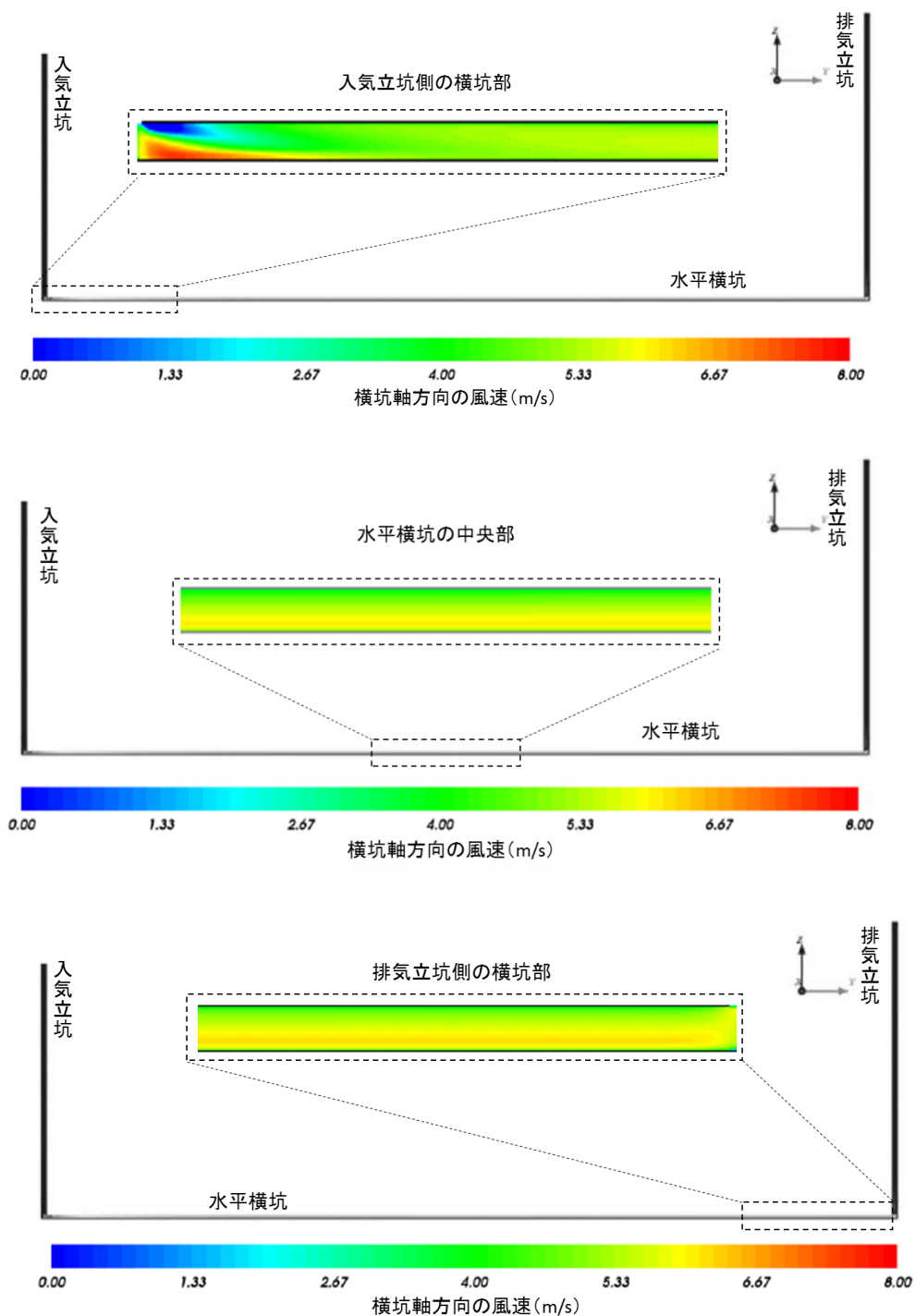


図 4.3.4-20 排気立坑側の横坑部の風速分布（ケース 6）

3) 横坑の風速分布 (横断面)

横坑の風速分布を図 4.3.4-21 に示す。代表横断面は、左側立坑 (入気側) と横坑の接合部を基点 (0m) とし、右側立坑 (排気側) に向かって、25m、50m、100m、250m、500m (中心)、750m、900m、950m、975m とした。

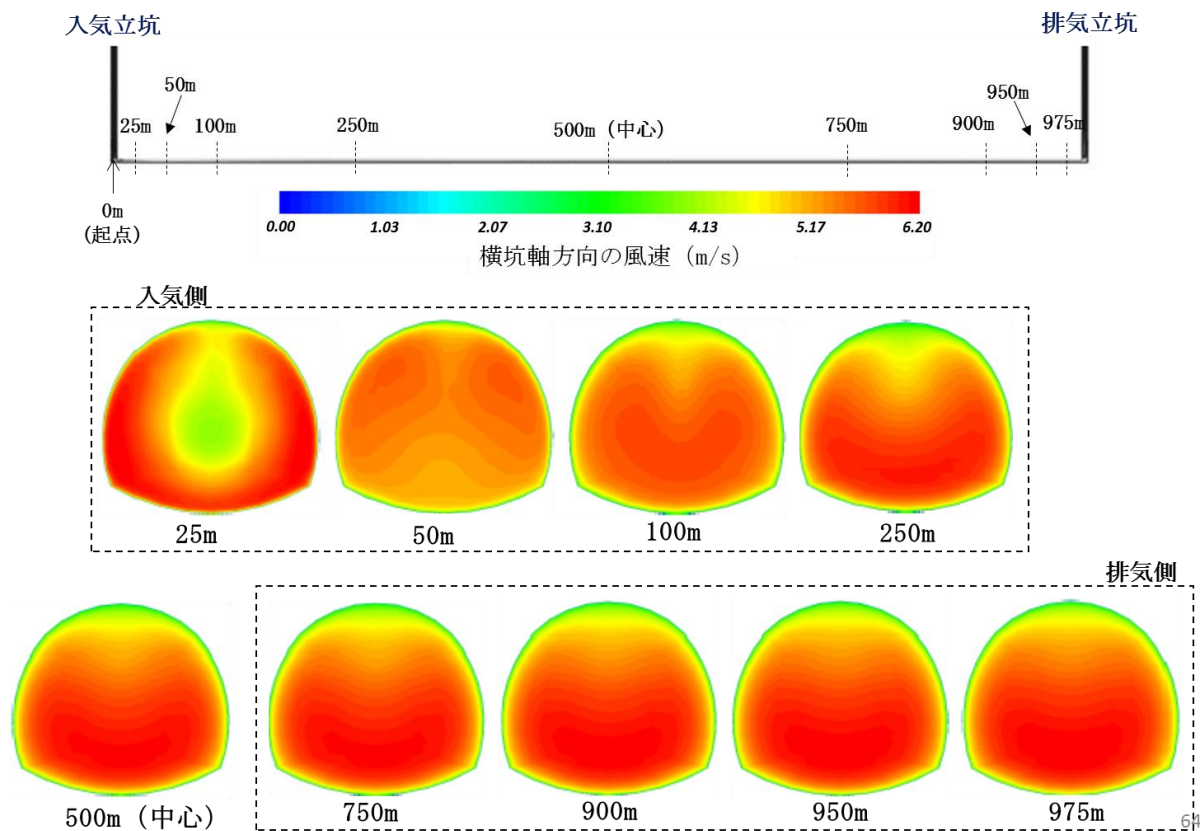


図 4.3.4-21 横坑の風速分布 (横断面) (ケース 6)

4) 入排気立坑の縦断面の風速分布

図 4.3.4-22 に入排気立坑の縦断面の風速分布を示す。図中の矢印は空気の流れを表し、立坑が 300m と長いため、坑口から坑道底部までを 100m ずつに分割して図化した。図 4.3.4-22 より、両立坑とも横坑との接合部で局所的に風速が速くなる部分が現れた。また、立坑中心付近は風の流が安定しており、軸方向に一様の風速分布となった。

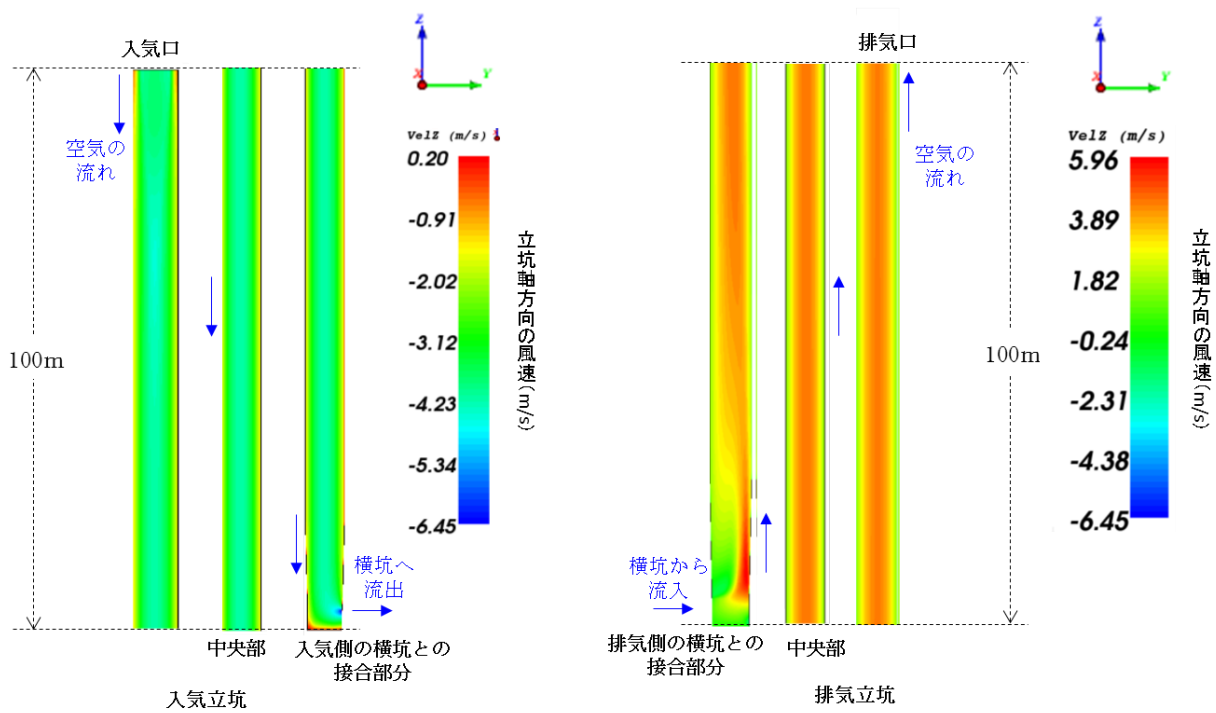


図 4.3.4-22 立坑の風速分布（縦断面）（ケース 6）

5) 入気立坑から横坑への風の流れ方（風速ベクトル）

図 4.3.4-23 に入気立坑から横坑にかけての風速ベクトルを示す。図 4.3.4-23 より、左側立坑（入気側）から横坑に流入する風は複雑に流れていることが分かる。

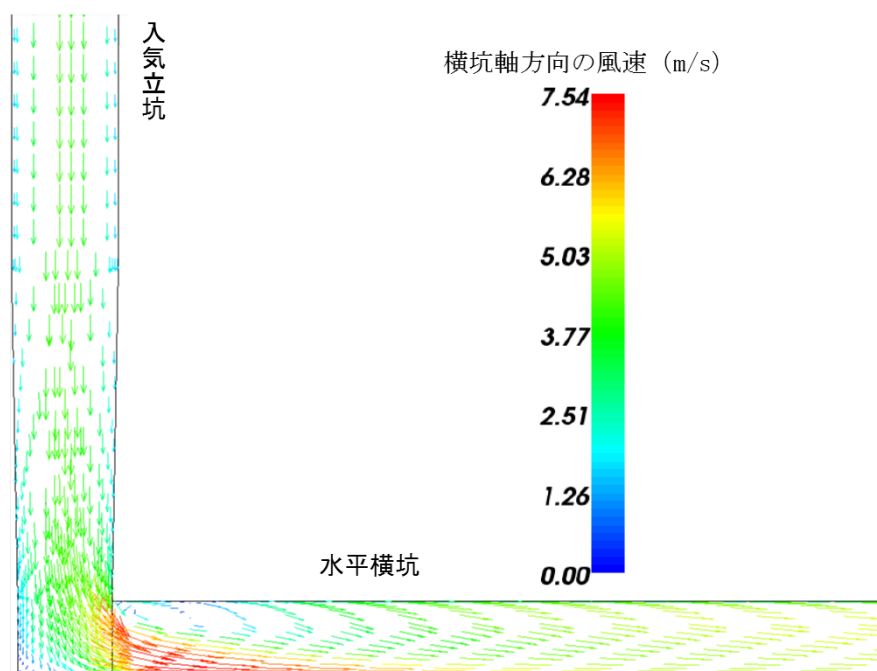


図 4.3.4-23 入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル（ケース 6）

6) 横坑から排気立坑への風の流れ方（風速ベクトル）

横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトルを図 4.3.4-24 に示す。

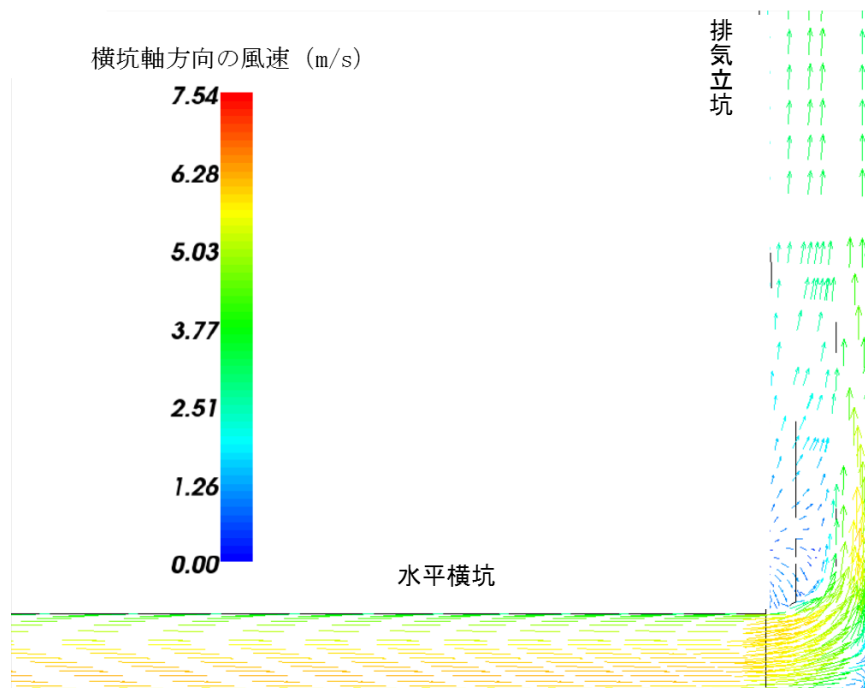
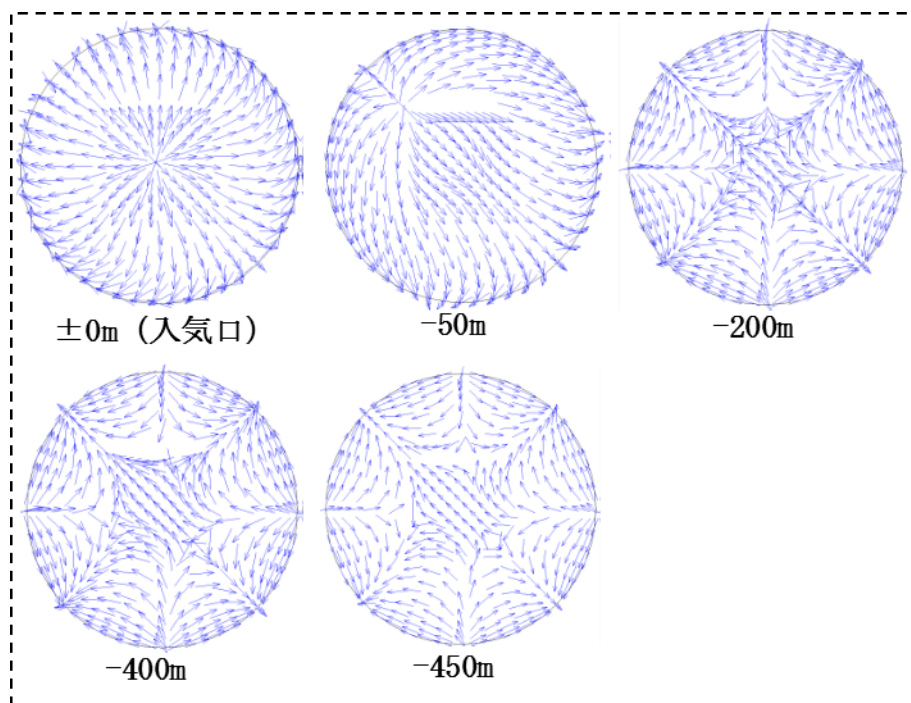


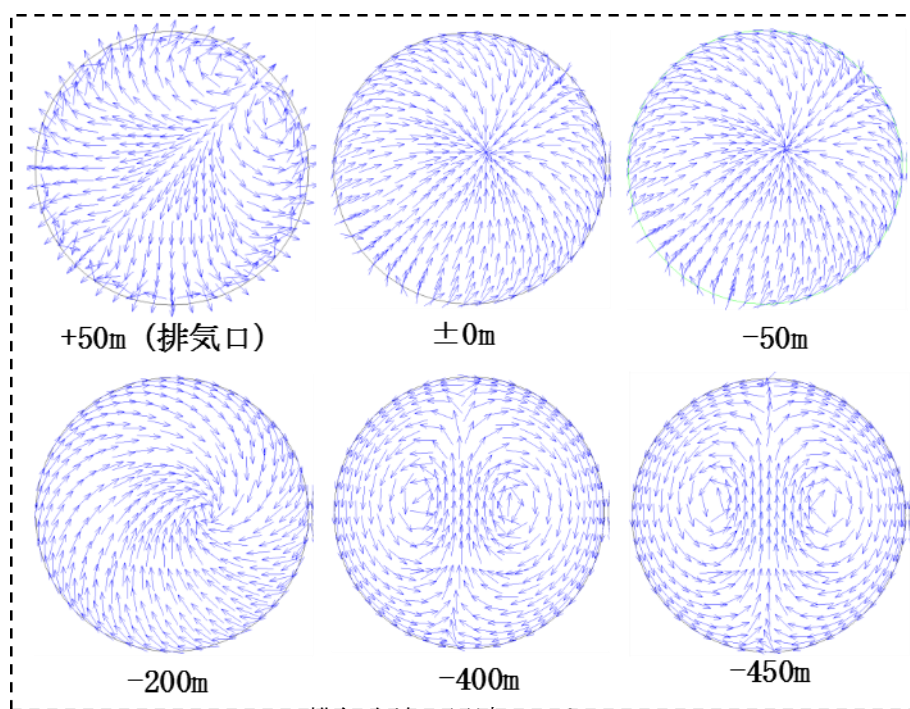
図 4.3.4-24 横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル（ケース 6）

7) 入排気立坑の風速ベクトル (横断面)

図 4.3.4-25 に入排気立坑の風速ベクトルの横断面を示す。代表横断面は、入気立坑、排気立坑ともに地表(GL)を基点とし、GL=±0m 以深で-50m、-100m、-200m、-250m とした。なお排気立坑は坑口である+50m を代表横断面に加えた。



入気立坑の風速ベクトル



排気立坑の風速ベクトル

図 4.3.4-25 入排気立坑の風速ベクトル (ケース 6)

8) 計算対象領域の圧力分布

図 4.3.4-26 に計算対象領域全体の圧力分布を示す。

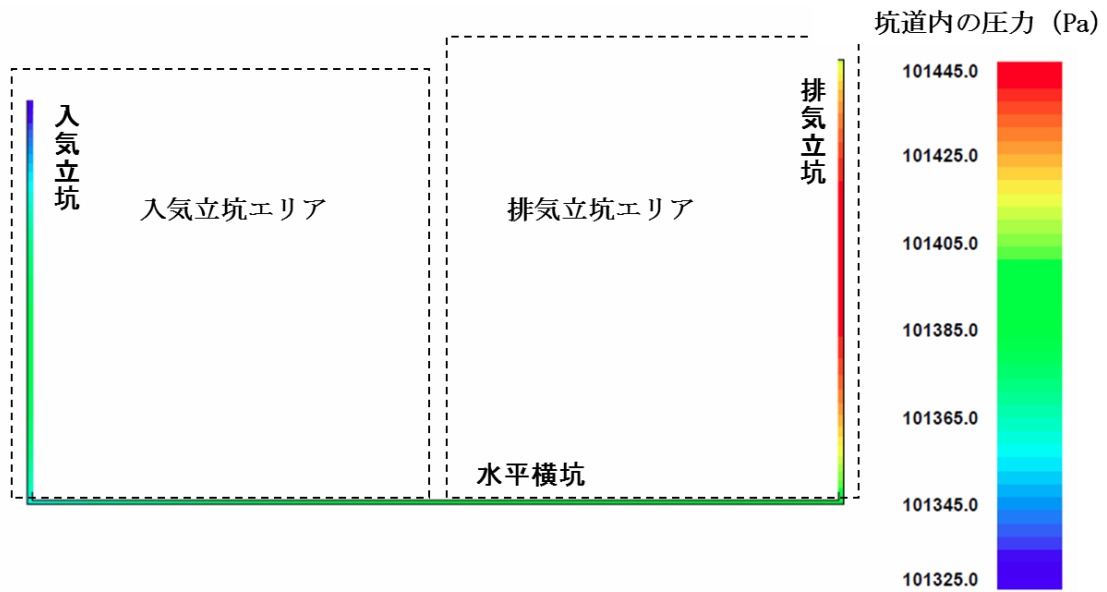


図 4.3.4-26 計算対象領域の圧力分布 (ケース 6)

9) 計算対象領域の温度分布

計算対象領域の温度分布を確認する。図 4.3.4-27 に代表横断面の温度分布を示す。なお、両立坑および横坑の横断面の温度分布は、それぞれ若干量であり、分布を確認するために、表示の閾値を各断面で変化させた。入気側は壁面からの熱伝達により、坑道内の空気が温められる。一方排気側は、温められた空気が壁面によって冷まされていく様子がみられる。

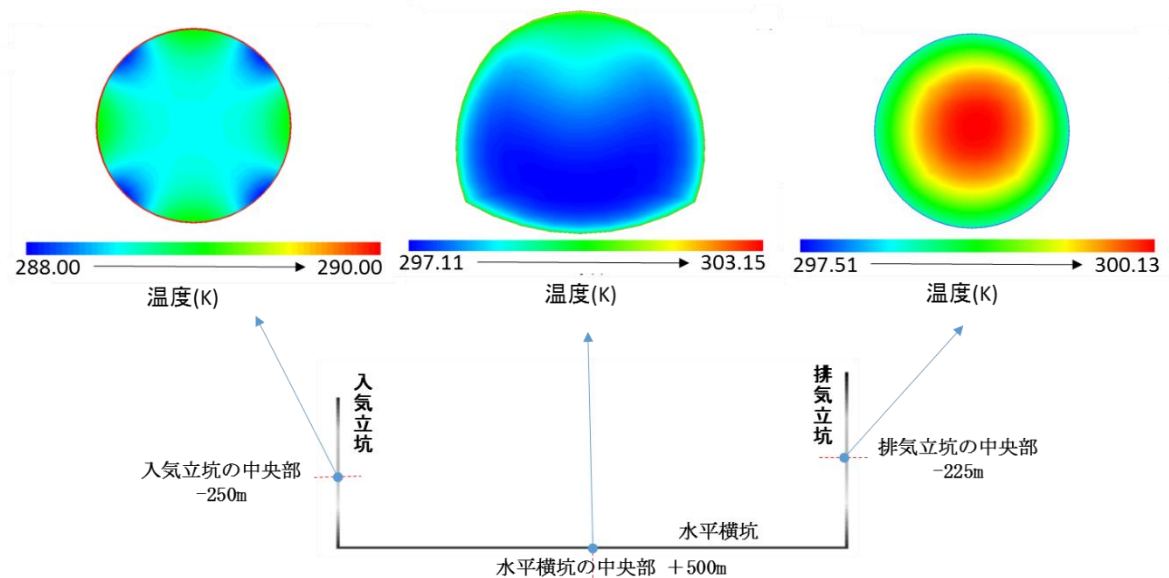


図 4.3.4-27 計算対象領域の温度分布 (ケース 6)

(4) 排気立坑底部の温度を高くした場合（ケース 7 : $t=30^{\circ}\text{C}$ ）

入機立坑、排気立坑の両坑口の高さが同じで、立坑底部に温度差がある場合の自然通気を解析した。

1) 坑道内の平均風速

立坑と横坑の中央部における平均風速を表 4.3.4-4 に示す。立坑底部の温度が高い方へ空気が流れ、温度差は 6°C により横坑内に約 3.8m/s の自然通気が発生した。

表 4.3.4-4 坑道内の平均風速（ケース 7）

場所	風速 (m/s)
①入気立坑の中央部 (-150m) 地点	2.03
②排気立坑の中央部 (-150m) 地点	2.11
③横坑の中央部 (+500m) 地点	3.82

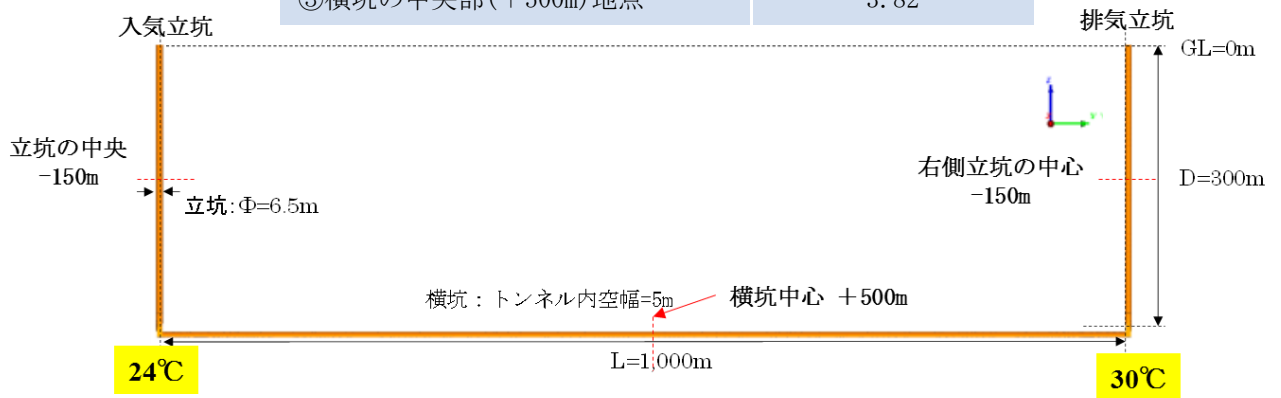


図 4.3.4-28 ケース 7 の概要

横坑の風速分布（縦断面）

横坑の風速分布を入気立坑、横坑、排気立坑に分けて、図 4.3.4-29 に示す。なお、表示した風速は、横坑のセンターラインを通る縦断面での坑道軸方向の風速である。

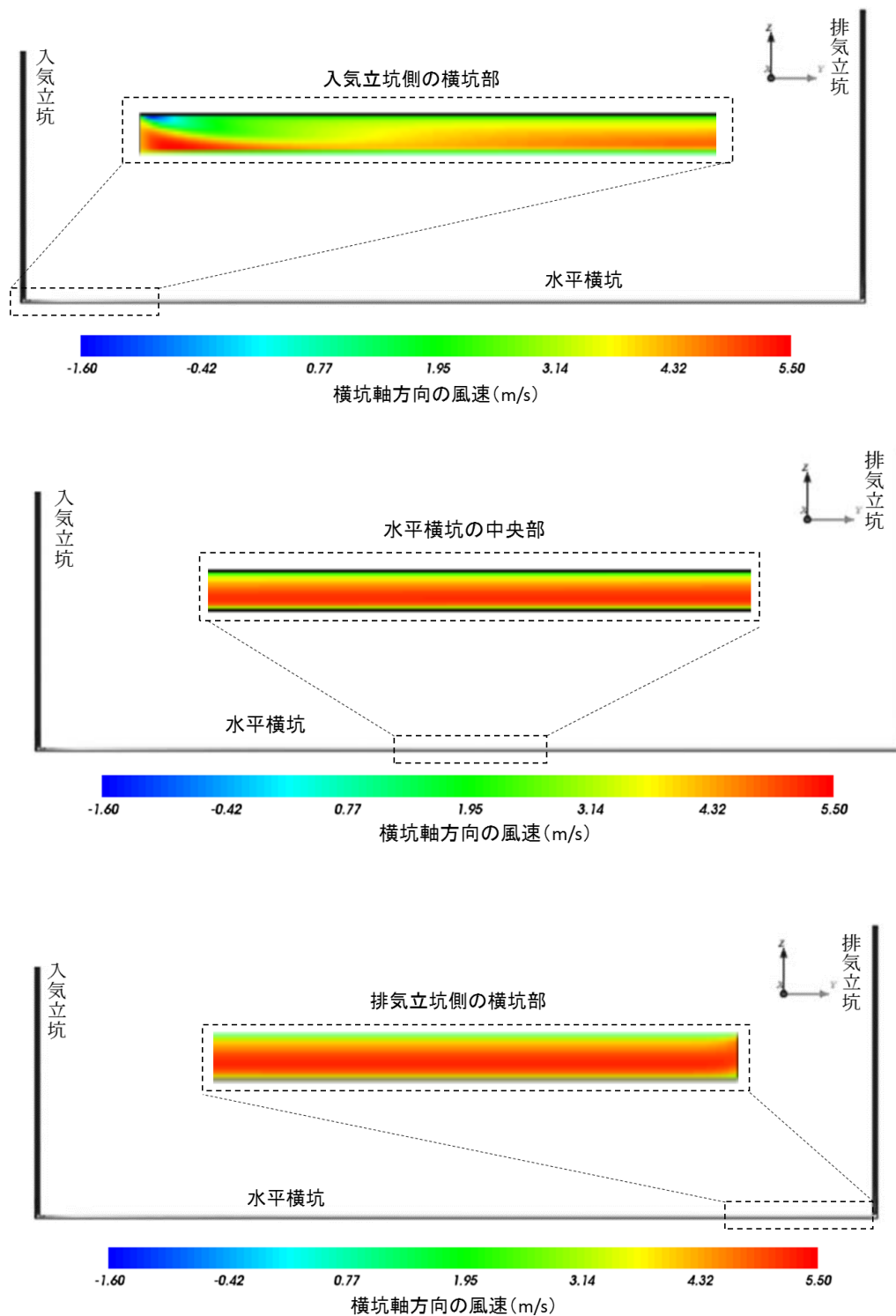


図 4.3.4-29 通気立坑側の横坑部の風速分布（ケース 7）

2) 横坑の風速分布 (横断面)

横坑の横断面の風速分布を図 4.3.4-30 に示す。代表横断面は、入気立坑と横坑の接合部を基点 (0m) とし、排気立坑に向かって、25m、50m、100m、250m、500m (中心)、750m、900m、950m、975m とした。

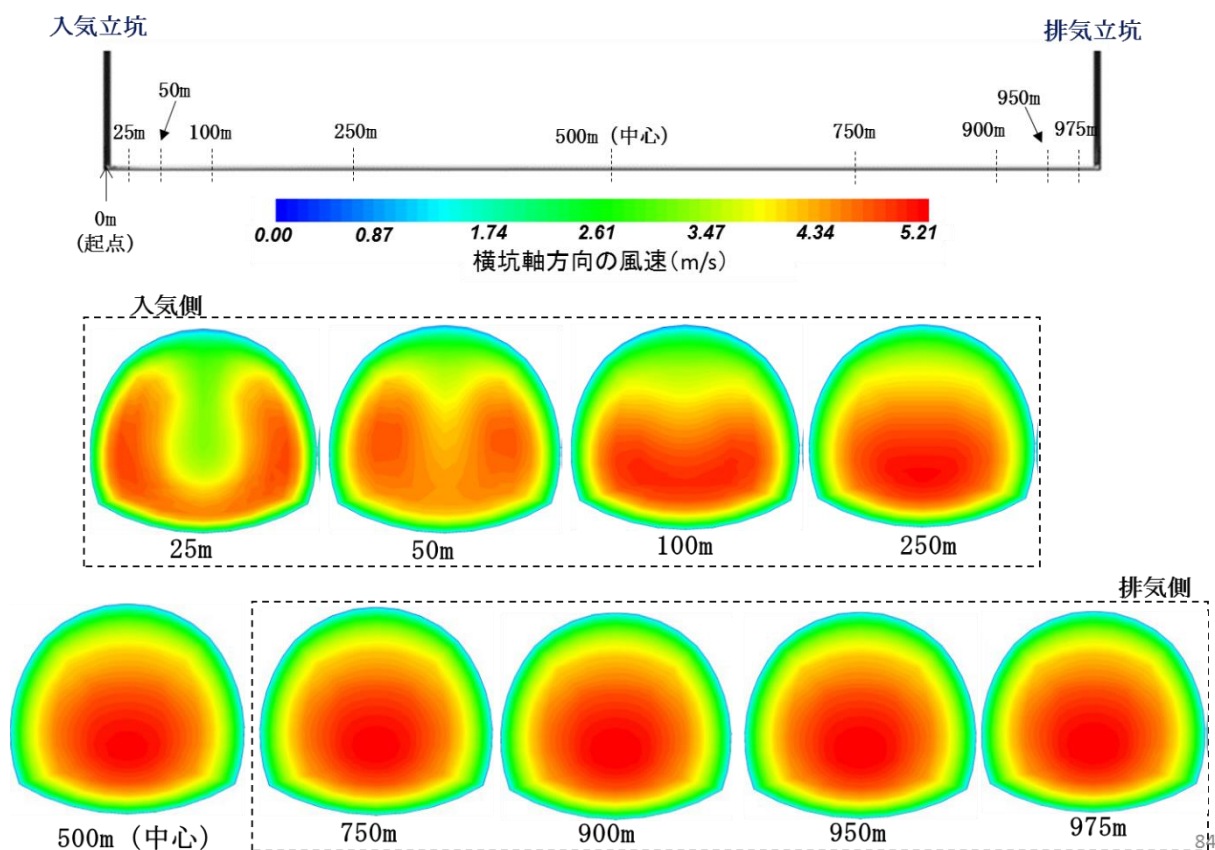


図 4.3.4-30 横坑の風速分布 (横断面) (ケース 7)

3) 入排気立坑の縦断面の風速分布

図 4.3.4-31 に入排気立坑の縦断面の風速分布を示す。図中の矢印は空気の流れを表し、立坑が 300m と長いため、坑口から坑道底部までを 100m ずつに分割して図化した。整理の視点を以下に示す。 図より、両立坑とも横坑との接合部で局所的に風速が速くなる部分が現れた。また、立坑中心付近は風の流れが安定しており、軸方向に一様の風速分布となった。

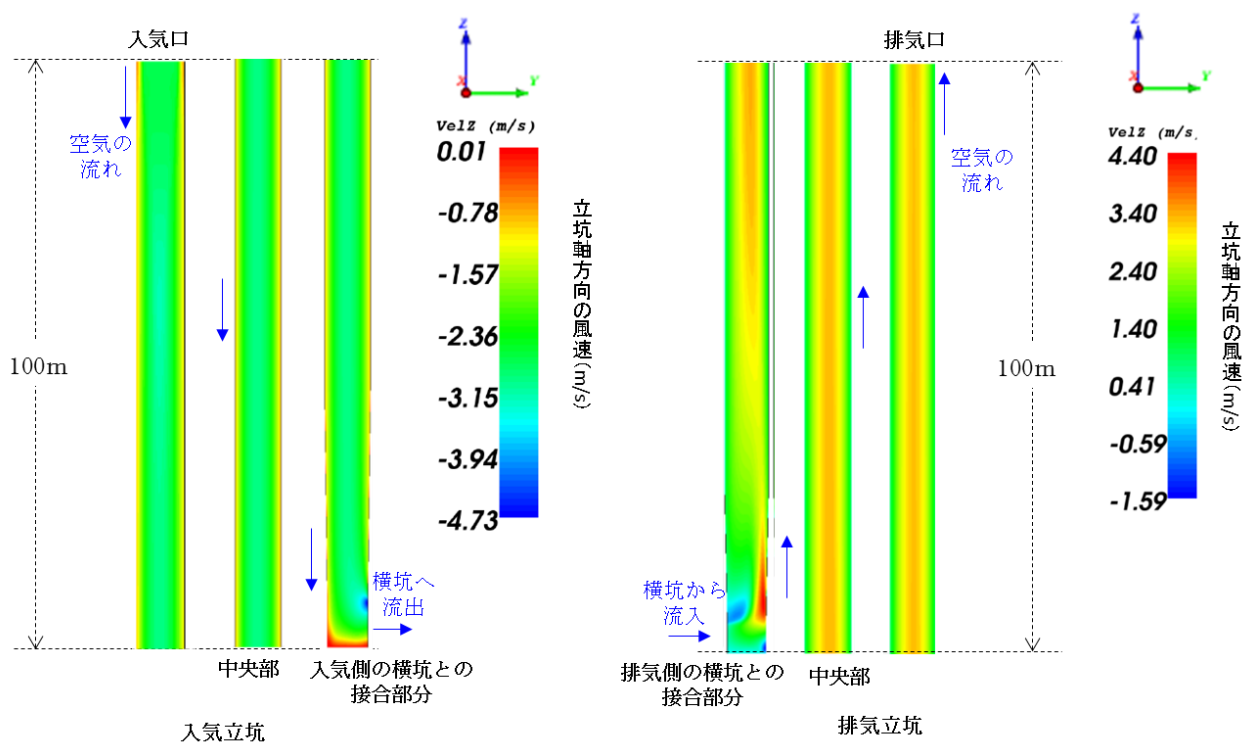


図 4.3.4-31 立坑の風速分布（縦断面）（ケース 7）

4) 入気立坑から横坑への風の流れ方（風速ベクトル）

図 4.3.4-32 に入気立坑から横坑にかけての風速ベクトルを示す。図 4.3.4-32 より、入気立坑から横坑に流入する部分では風は複雑に流れていることが分かる。

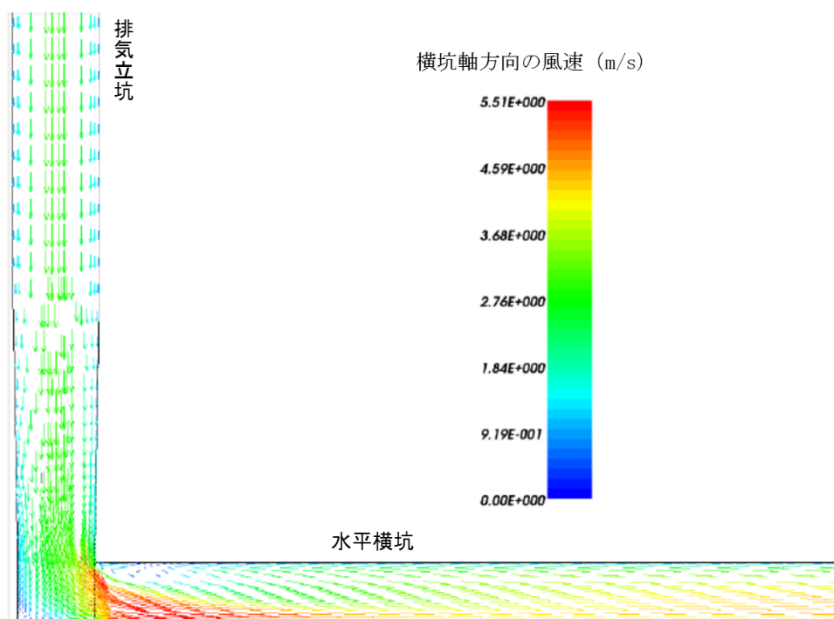


図 4.3.4-32 入気立坑から横坑に流入する部分の風速ベクトル（ケース 7）

5) 横坑から排気立坑への風の流れ方（風速ベクトル）

横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトルを図 4.3.4-33 に示す。

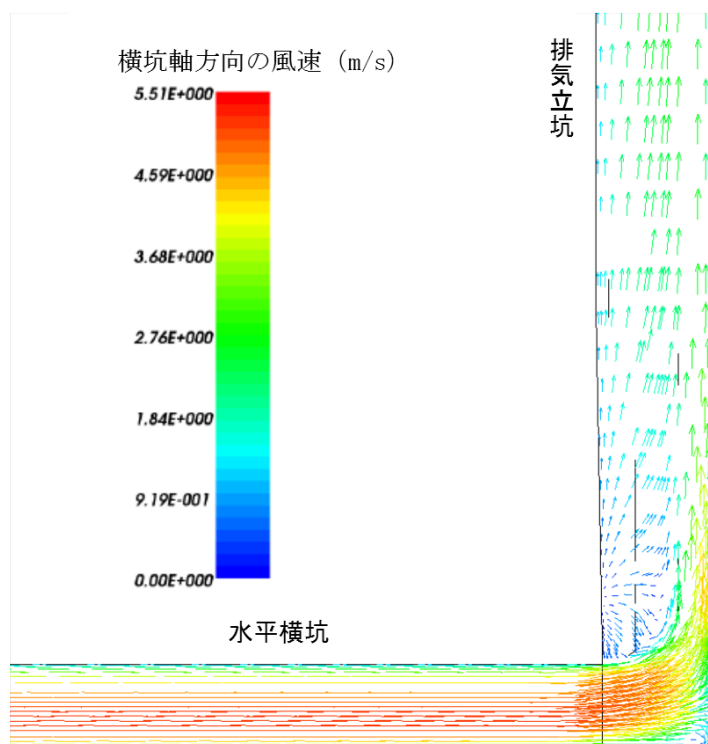
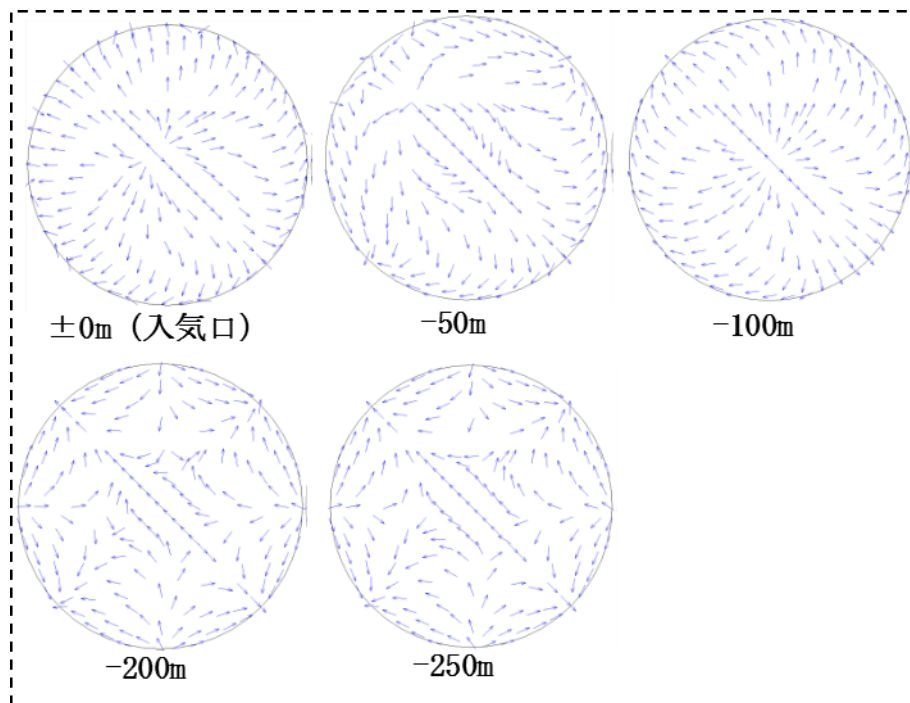


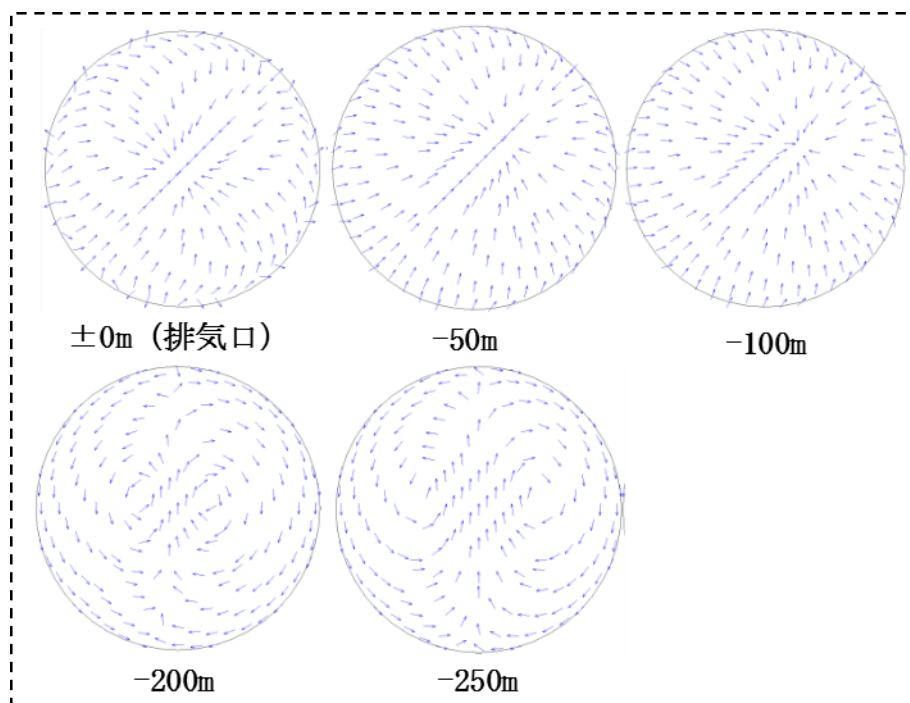
図 4.3.4-33 横坑から排気立坑に流出する部分の風速ベクトル（ケース 7）

6) 入排気立坑の風速ベクトル (横断面)

図 4.3.4-34 に入排気立坑の風速ベクトルの横断面を示す。代表横断面は、入気立坑、排気立坑ともに地表(GL)を基点とし、GL=±0m 以深で-50m、-100m、-200m、-250m とした。なお排気立坑は坑口である+50m を代表横断面に加えた。



入気立坑の風速ベクトル



排気立坑の風速ベクトル

図 4.3.4-34 入排気立坑の風速ベクトル (ケース 7)

7) 計算対象領域の圧力分布

図 4.3.4-35 に計算対象領域全体の圧力分布を示す。入気立坑エリアと入気立坑エリアの圧力分布を比較すると、排気立坑エリアの圧力のほうが若干低い。

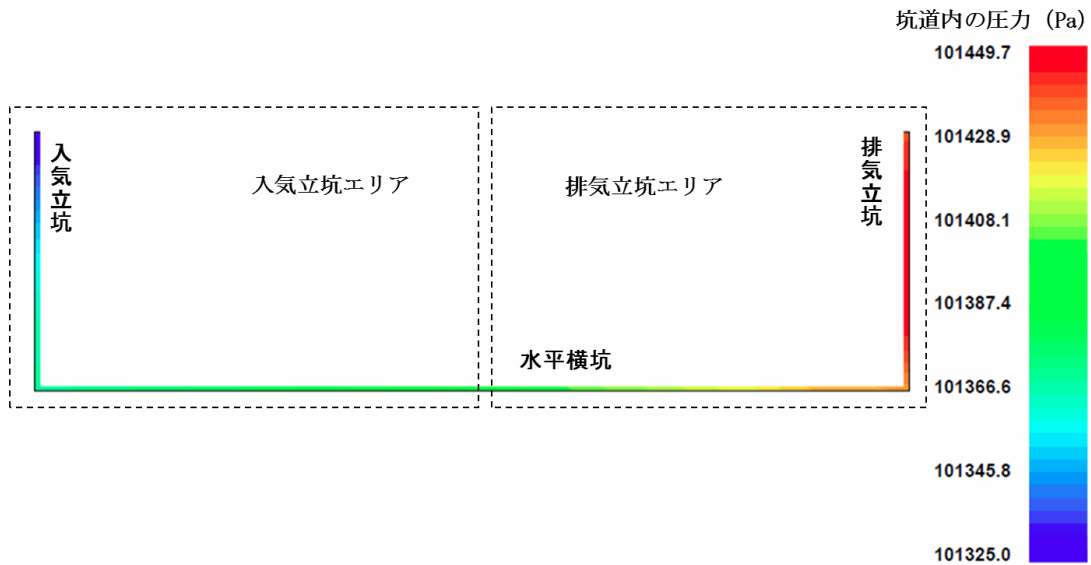


図 4.3.4-35 計算対象領域の圧力分布 (ケース 7)

8) 計算対象領域の温度分布

計算対象領域の温度分布を確認する。図 4.3.4-36 に代表横断面の温度分布を示す。なお、両立坑および横坑の横断面の温度分布は、それぞれ若干量であり、分布を確認するために、表示の閾値を各断面で変化させた。入気側は壁面からの熱伝達により、坑道内の空気が温められる。一方排気側は、温められた空気が壁面によって冷まされていく様子がみられる。

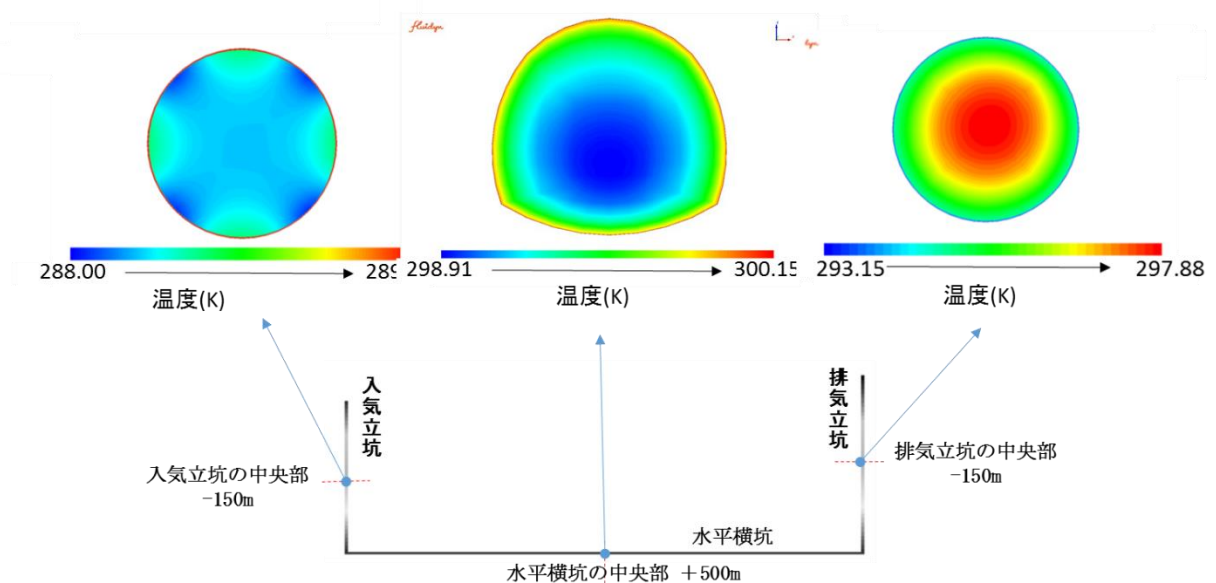


図 4.3.4-36 計算対象領域の温度分布 (ケース 7)

4.3.5 自然通気の解析結果の比較

(1) 坑口高さの違いによる坑内風速の変化

坑口高さ (Δh) が違うケース 4 ($\Delta h=50\text{m}$) およびケース 5 ($\Delta h=10\text{m}$) の結果から、坑口の高さを変えた場合の自然通気のしやすさを確認する。

表 4.3.5-1 は、ケース 4 およびケース 5 の風速の平均値を比較したものである。これによると、坑口高さの差が少ないケース 5 のほうが風速が速いことが分かる。一般的には、坑口高さの差が大きいほど、圧力の差が大きくなり、位置エネルギーが大きくなることから、風速が速くなると考えられるが、本解析結果ではその逆の結果となった。

これについて、図 4.3.5-1 よりケース 4、ケース 5 のモデルおよび入力条件を比較し、以下のよう

- ケース 4 とケース 5 の坑口高さの違いに着目し、位置エネルギーを比較すると、ケース 4 のほうが坑口高さが高く、位置エネルギーは大きくなる
- ケース 4 とケース 5 の温度の違いに着目し、排気口の坑口温度を比較すると、ケース 4 は $T_0=14.5^\circ\text{C}$ 、ケース 5 は $T_0=14.9^\circ\text{C}$ とケース 5 のほうが高く、結果的に計算対象領域の温度はケース 5 のほうが高くなる
- ケース 4 とケース 5 の坑道長さの違いに着目し、坑道全長を比較すると、ケース 4 は $L=1650\text{m}$ 、ケース 5 は $L=1610\text{m}$ とケース 5 のほうが短く、坑道長さが短いほど摩擦の影響は少なくなる

上記を考慮し、位置エネルギー(E)、温度(T)、全長(L)のそれぞれの影響により生じる風速(V)を定性的に比較すると、以下のようになり、結果的にケース 5 の風速が速くなったと考えられる (表 4.3.5-2)。

- 位置エネルギーの影響による風速はケース 4 が大きい
- 温度の影響による風速はケース 5 が大きい
- 全長の影響による風速はケース 5 が大きい

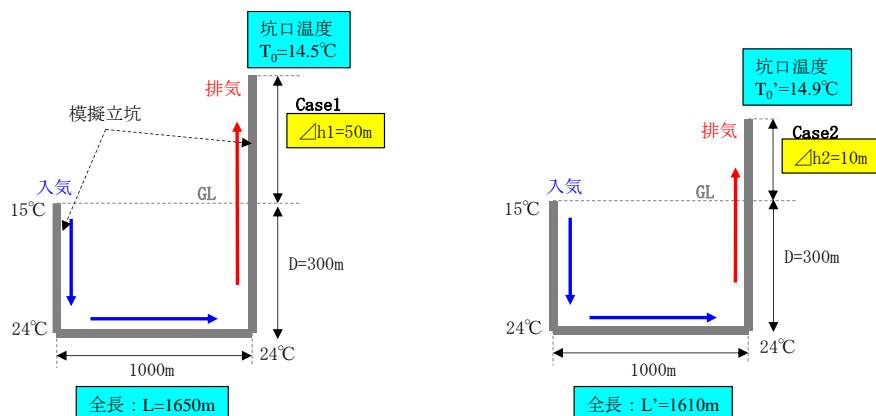


図 4.3.5-1 モデルおよび入力条件の比較 (ケース 4 とケース 5 の比較)

表 4.3.5-1 坑内風速の差の確認（ケース 4 とケース 5 の比較）

場所	横断面の平均風速 (m/s)	
	ケース4 ∠h=50m	ケース5 ∠h=10m
入気立坑の中央部 (-150m) 地点	1.62	1.99
排気立坑の中央部 (-125m) 地点	1.67	2.04
横坑の中央部 (+500m) 地点	3.0	3.69

表 4.3.5-2 ケース 4 とケース 5 の風速に関する考察のまとめ

比較項目	Case1	Case2	比較	判定
位置エネルギー(E)	E	E'	$E > E'$	$V(E) > V(E')$
温度(T)	T	T'	$T < T'$	$V(T) < V(T')$
全長(L) (坑道の摩擦に影響)	L	L'	$L > L'$	$V(L) < V(L')$

(2) 坑道深さの違いによる坑内風速の変化

坑道深さ (D) が違うケース 4 (D=300m) およびケース 6 (D=500m) の結果から、坑口深さを変えた場合の自然通気のしやすさを確認する。

表 4.3.5-3 は、ケース 4 およびケース 6 の風速の平均値を比較したものである。これによると、坑道深さが深いケース 6 のほうが風速が速いことが分かる。

表 4.3.5-3 坑内風速の差の確認（ケース 4 とケース 6 の比較）

場所	横断面の平均風速 (m/s)	
	ケース4 D=300m	ケース6 D=500m
入気立坑の中央部 (-150m) 地点	1.62	2.85
排気立坑の中央部 (-125m) 地点	1.67	2.94
横坑の中央部 (+500m) 地点	3.0	5.33

(3) 入排気立坑底部の温度の違いによる坑内風速の変化（ケース7）

坑口高さの差がゼロで、入気立坑と排気立坑の底部の温度に差がない場合は、坑内のエネルギーが釣り合い、理論上は自然通気が発生しない。一方で、温度もしくは圧力に差がある場合は、自然通気が起きる。そこで、温度もしくは圧力を変化させた場合の自然通気のしやすさを確認することとした。

まず、圧力は深さに影響し、坑内の圧力を意図的に変化させることは自然ではない。しかし、温度は機械熱や地下水等の影響により坑内で変化させても不自然ではない。

そこで本検討では、坑口高さの差をゼロとし、入気立坑と排気立坑の底部の温度を 24℃、30℃とした場合の自然通気のしやすさを確認することとした。

表 4.3.5-4 に結果を示す。これによると、入気立坑と排気立坑の底部の温度差を 6℃設けた場合、立坑の風速で 2.0m/s 以上を、横坑の風速で 3.8m/s 以上を確保することが確認出来た。本検討により、坑内に温度差を設けることで自然通気できることを確認した。

表 4.3.5-4 坑道底部の温度差による風速

場所	横断面の平均風速 (m/s)
①入気立坑の中央部 (-150m) 地点	2.03
②排気立坑の中央部 (-150m) 地点	2.11
③横坑の中央部 (+500m) 地点	3.82

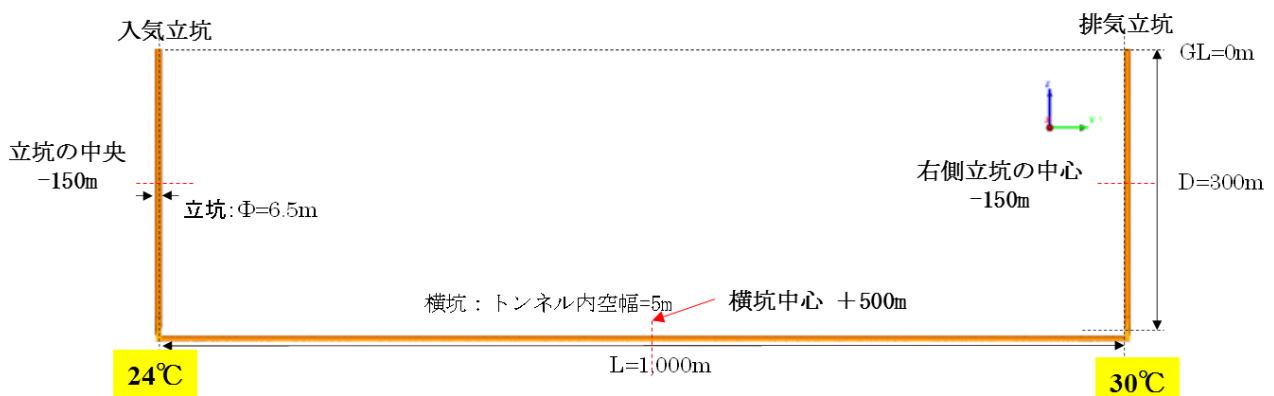


図 4.3.5-2 ケース7の概要

4.4 まとめ

4.4.1 火災に関する通気解析の取りまとめ

(1) 通常通気状態と通気システム停止時における火災時の熱・煙の拡散状況の比較

通常通気状態（ケース 1）と通気システム停止時（ケース 2）における火災時の熱・煙の拡散状況を解析を用いて検討した。

通常通気状態（風速 0.3m/s）と通気システム停止時（風速 0.01m/s）では、一酸化炭素、二酸化炭素、酸素および熱の火災影響が、両者とも通気の風上・風下の両方向に拡散し、より風下側に広く拡散する。そして、通気状態（風速 0.3m/s、風速 0.01m/s）では、火災の影響の拡散に大きな差は、見られなかった。

(2) 風門設置の有無による火災時の熱・煙の拡散状況

風門設置の有無による火災時の熱・煙の拡散状況を解析を用いて検討した。

風門が無い場合では、火災発生後、時間の経過とともに一酸化炭素、二酸化炭素および熱の拡散状況も同様で、風門の設置により風上側への熱・煙の火災影響が風上側、風下側に広く拡散するのに対して、風門のある場合では、風上側への拡散が抑えられている。この現象は、一酸化炭素に限らず、二酸化炭素および熱の拡散状況も同様で、風門の設置により風上側への熱・煙の拡散が防止され、火災発生から 660 秒後でも風上側の坑内へは火災の影響は少ない。また、風門より風上側の坑内の酸素濃度は火災発生から 150 秒後ではほとんど変化がなく、530 秒後でも酸素濃度の低い範囲は風門周辺に留まっており、火災地点より風上側の風門は作業員の避難を支援する有効な対策であることが分かった。

4.4.2 自然通気の解析結果の取りまとめ

(1) 坑口高さの違いによる坑内風速の変化

坑口高さが違うケース 4（ $\angle h=50\text{m}$ ）およびケース 5（ $\angle h=10\text{m}$ ）の結果から、坑口の高さの差による自然通気への影響を検討した。

両者の解析結果から自然通気が発生することを確認した。しかし、坑口高さの差が少ないケース 5 のほうが風速が速くなった。一般的には、坑口高さの差が大きいほど両坑口の圧力の差が大きくなり、自然通気の量が大きくなると考えられるが、本解析結果では逆の結果となった。この理由については、高低差（圧力差）、坑道壁面の摩擦（排気立坑の全長）の違いから、ケース 5（ $\angle h=10\text{m}$ ）の風速が速くなったと考えられる。

(2) 坑道深さの違いによる坑内風速の変化

坑道深さ（D）が違うケース 4（D=300m）およびケース 6（D=500m）の結果から、坑口深さを変えた場合の自然通気が発生する条件を検討した。

結果より、坑道深さが深いケース 6 のほうが風速が速いことが分かった。坑道深さが深いほど風速が速くなる現象は一次元の計算でも表されており、本解析結果でも同様の傾向を得た。

(3) 横坑（坑道底部）の温度の違いによる坑内風速の変化

本検討では、ケース7として坑口高さの差をゼロとし、入気立坑と排気立坑の底部の温度を24℃、30℃とした場合の自然通気の状態について検討した。

入気立坑と排気立坑の底部に6℃の温度差を設けた場合、横坑で3.8m/s以上の風速を確認し、横坑（坑道底部）に温度差を設けることで自然通気が発生することを確認した。

4.4.3 安全対策の効果

通常通気状態と通気システム停止時の両者には火災影響の拡散に差が見られず、風速0.3m/s程度の通気では火災の影響の拡散には大きな影響は与えない。一方、火災地点より風上側に設けられた風門は、火災影響の拡散防止効果が解析的に確認され、坑内の作業員の避難における有効な安全対策と考えられる。

入気立坑と排気立坑の坑口高さの違い、横坑の深さ、横坑底部の温度差により自然通気が発生することを確認した。そして、自然通気は、電源喪失等により換気設備が機能しない状況下において、坑内の作業員に必要な坑道内の通気を確保する有効な手段であり、火災影響等の拡散や避難ルートを確保するうえで有効な手段になると考える。

参考文献

- [1]大林組 HP：プレリリース、https://www.obayashi.co.jp/press/news20111208_1（2016年3月7日閲覧）
- [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26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27年3月
- [3]原子力発電環境整備機構（NUMO）：地層処分事業の安全確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－
- [4]ANDRA Dossier 2005 Argile, Tome Architecture and management of a geological repository, December 2005
- [5]日本道路協会：道路トンネル技術基準・同解説 平成20年改訂版、p37、平成20年10月
- [6]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《換気技術の設計及び粉じん等の測定》

第5章 自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する

調査・検討

5.1 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、異常状態や事故事象として「火災」を想定した「熱的影響」の把握、および自然災害事象として「津波」を想定した際のガラス固化体の容器であるキャニスタ（以下「ガラス固化体キャニスタ」または単に「キャニスタ」という）の「腐食性」の把握、が優先課題に選定された。

これを受けて、平成 25 年度は地上施設における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、緩衝材を介したガラス固化体等の火災影響の検討に必要な、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放射性物質を内包するガラス固化体キャニスタ（ステンレス鋼製）の腐食性について、文献等調査を行った。

平成 26 年度は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・整理を解析も交えて実施した。また、平成 25 年度に実施した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力学的特性データを取得した。

5.1.1 既往の研究成果

平成 24 年度から平成 26 年度の研究成果は報告書[1][2][3]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。

(1) 平成 24 年度研究成果

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なった。

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抽出・整理した。このようにして抽出した

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・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。

(2) 平成 25 年度研究成果

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、ガラス固化体やオーバーパット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に対するガス内圧上昇の影響を確認するための解析的手法についても検討した。

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キャニスタ（ステンレス鋼製）の過酷な塩分環境条件における腐食性について、塩分の影響を想定したキャニスタの腐食性、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。

(3) 平成 26 年度研究成果

平成 26 年度は、地下施設での火災時に人工バリアが加熱される状況を想定した熱応力解析を行い、ガラス固化体やオーバーパットの温度履歴や応力履歴のデータを取得した。人工バリアの状態として「ガラス固化体+オーバーパット+緩衝材」を対象に解析を行い、ガラス固化体やオーバーパットに対する緩衝材の火災影響緩和効果を整理した。

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信頼性を向上するうえで重要である。

解析構成要素の一つ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。緩衝材の高温時の熱特性は平成 25 年度に取得したが、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った。

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。そこで、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した。

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、ガラス固化体のステンレス鋼製キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に晒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、津波被害を想定した過酷な塩分環境条件におけるキャニスタ腐食性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられた。

津波によるガラス固化体キャニスタ（SUS304L 等）について以下の腐食性に関して着目した。

- ①海水に対する腐食性
- ②放射線環境下での腐食性

平成 25 年度による文献調査において、①についてはすきま腐食・微生物腐食・加工履歴による応力腐食割れ（以下、SCC という）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によって腐食が促進する可能性が指摘されていた。

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。これより、平成 26 年度は崩壊熱による腐食環境（温度）条件について解析により評価を行い、熱的には SCC が発生する腐食環境が成立し得ることを確認した。解析で評価した環境に対し、キャニスタの SCC 発生までの寿命を予備的に評価した。

5.1.2 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的確に評価し、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。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 5.1.2-1 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・試験の概略を示す。同表は平成 24 年度に検討した結果であり、本開発において調査・試験項目として取り上げる優先度を整理した。表 5.1.2-1 で優先度が高いと評価した火災による人工バリアの熱的影響及び津波被害を想定したキャニスタの腐食性に関する調査・検討は、前述した通り平成 25 年度、平成 26 年度に所定の知見を得た他、今後の実施課題についても整理した。

今年度は、過年度の検討結果を踏まえて、人工バリアに対する火災影響因子を整理し、重要な因子に着目した解析を実施し、人工バリアの火災影響に必要な因子を検討する。また、今年度までに評価された火災・津波を受けた人工バリアの状態に関する知見等を踏まえ、放射線安全の観点から対応策を検討する。更に今後必要となる試験項目等について検討を行う。

表 5.1.2-1 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(事象)	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力学的影響の調査・試験 (落下、落盤等)	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熱的影響の調査・試験 (火災)	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当たらない	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 (津波)	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緩衝材の性能劣化調査・試験 (坑道冠水等)			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ないと考えられる項目

┌ ─ ─ ─ ┐ 平成 25 年度実施 ┌ ─ ─ ─ ┐ 平成 26 年度実施

(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 3 項目である。

- ① 人工バリアの火災影響の検討
- ② 火災、津波による対応策の検討
- ③ 試験項目の検討および試験計画の作成

1) 人工バリアの火災影響の検討

平成 25 年度および平成 26 年度の成果を踏まえ、火災事象に対する人工バリアへの影響について整理・検討を行い、過年度の解析で設定した条件に加えて重要と考えられる条件を抽出する。抽出した条件での影響を確認するため、過年度と同じ解析コードに必要な応じて追加プログラムを検討・構築し、人工バリアの火災影響解析を実施する。

2) 火災、津波による対応策の検討

平成 25 年度、平成 26 年度の成果及び(1)において実施する解析を踏まえ、火災や津波に対する人工バリアへの影響を防止・軽減する対策について整理・検討する。

3) 試験項目の検討および試験計画の作成

試験計画の検討では、平成 25 年度、平成 26 年度の解析成果及び、平成 24 年度に検討した試験優先度の考え方や施設計画技術、状況修復技術、状況・把握監視技術など他の技術課題との関連性を踏まえた上で、平成 28 年度以降に取得すべきデータの試験計画を作成する。

5.2 人工バリアの火災影響の検討

平成 25 年度および平成 26 年度の成果を踏まえ、火災事象に対する人工バリアへの影響について整理・検討を行い、過年度の解析で設定した条件に加えて重要と考えられる条件を抽出する。抽出した条件での影響を確認するため、過年度と同じ解析コードに必要な応じて追加プログラムを検討・構築し、人工バリアの火災影響解析を実施する。

5.2.1 人工バリア火災影響検討対象

平成 24 年度からの本研究では、人工バリアの状態として「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」を対象に解析を行った。ガラス固化体[4]およびオーバーパック[5]の仕様をそれぞれ図 5.2.1-1、図 5.2.1-2 に示す。

評価対象施設（火災発生場所）として、平成 25 年度は地上施設、平成 26 年度は地下施設を想定した解析を図 5.2.1-3 に示す手順に従い実施した。

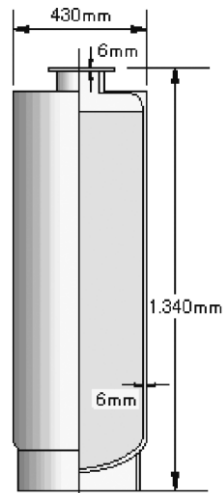


図 5.2.1-1 ガラス固化体の形状（日本原燃(株)仕様）[4]

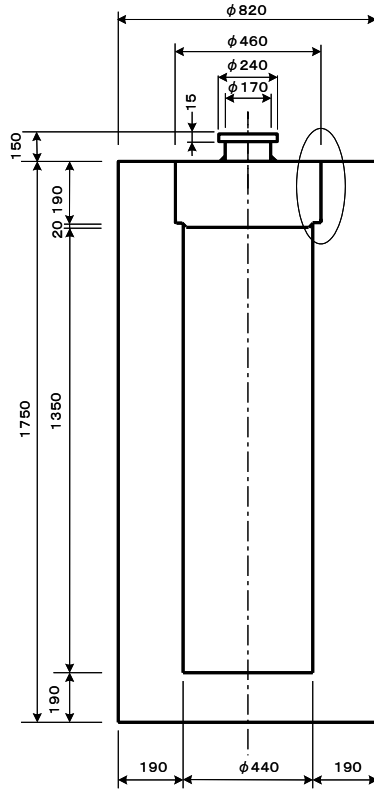


図 5.2.1-2 オーバーパックの形状 [5]
 (資源エネルギー庁 地層処分技術調査等事業の検討仕様)

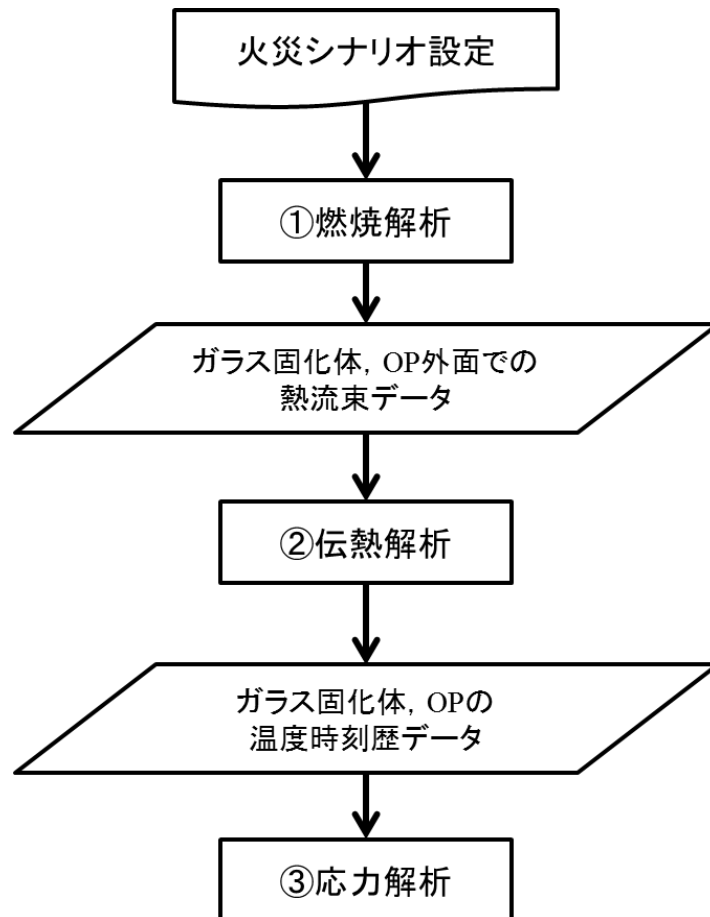


図 5.2.1-3 人工バリアの熱応力解析 検討フロー

5.2.2 火災シナリオ設定における過酷条件の検討

地層処分施設において、ガラス固化体キャニスタの加熱につながる要因は図 5.2.2-1 に示すものが考えられる。火災による人工バリアへの影響は、施設のレイアウトや換気の有無によって変わることを確認した。具体的には、大きくなると燃料を燃焼させるための空気量が増えることから燃焼時間が増加し、人工バリアがより高温になる可能性がある。あるいは、換気することによって新たに空気が供給され、火災が続くことになる。

また、図 5.2.2-2[13]に示すように燃料の種類によって完全燃焼させるために必要とされる空気量が異なる。本解析で設定したディーゼル燃料は、図中の赤い円で示すように比較的高い熱を発生させる燃料であり、発熱量に比例して多くの空気量が必要である。平成 25 年の地上火災解析でも明らかになった通り、必要とされる空気が少ない場合には、燃焼を抑えることができる。

火災解析では複数の条件が結果に作用することから、具体的なシナリオを考えたときにそれらの条件を全てパラメータとすると無限大なケース数になる。人工バリアやガラス固化体キャニスタへの影響確認を行うにあたっては、温度勾配が大きいほど人工バリア等に生じる応力が大きくなるため、温度勾配が大きくなるシナリオが過酷となる。

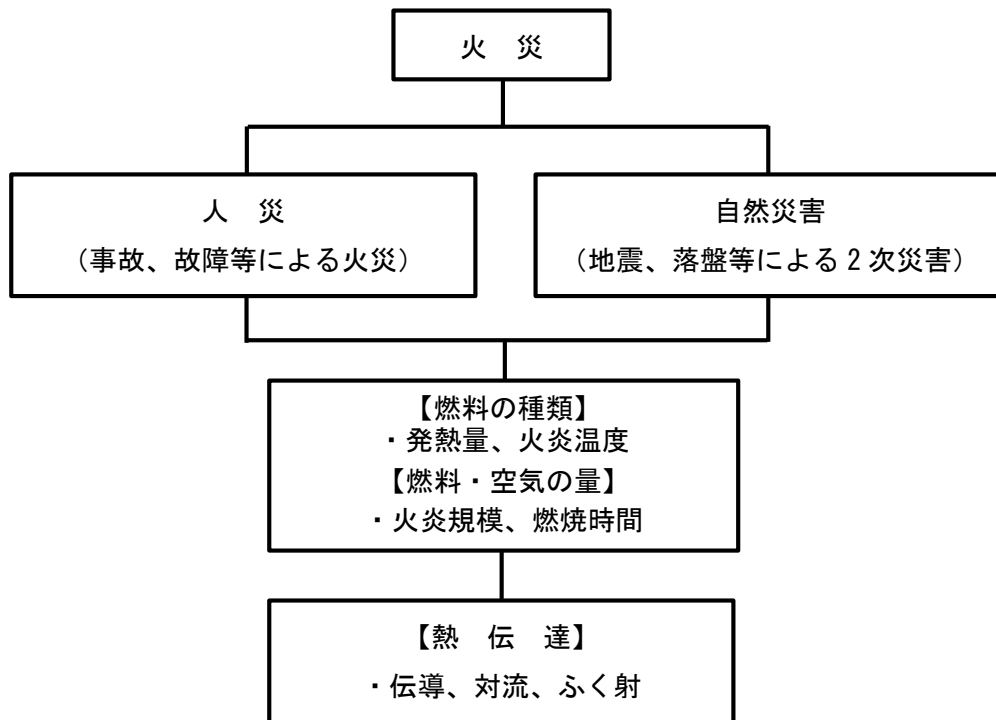


図 5.2.2-1 火災影響の原因と考慮すべき要因

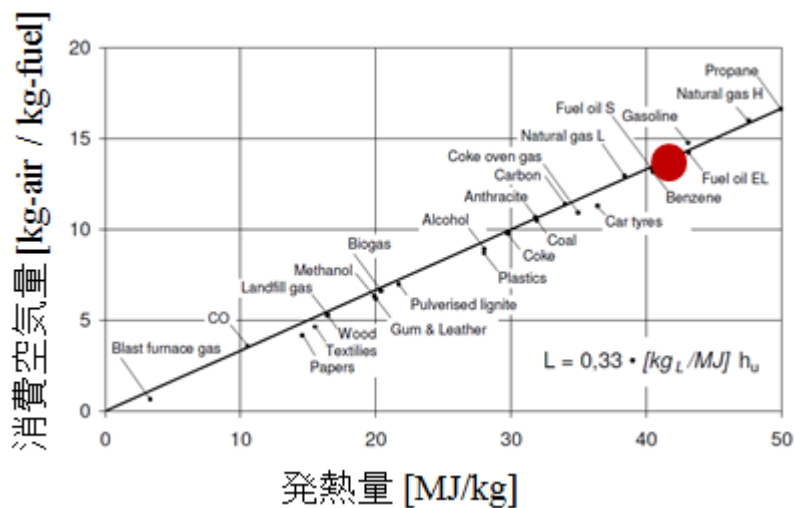


図 5.2.2-2 燃焼による発熱量の消費空気量との関係[13]

5.2.3 火災影響確認のための重要項目の検討

火災影響確認は、火災による熱が人工バリアに伝わる程度及びそれに伴う人工バリアの応力を把握することにより人工バリアの状態を確認するための手法である。

過年度の確認手法を踏まえ、より過酷（保守的）なシナリオを見極めて人工バリアへの熱影響や応力の状態を把握するため、重要と考える項目を検討する。

(1) 燃焼解析の重要項目の抽出

火災によるガス温度の上昇は、温度差のある物体間で熱が移動すること（熱伝達）を計算することにより把握でき、熱伝達は伝導・対流・ふく射（放射）の3つに分けられる。

エネルギーは高密度から低密度へと流れると同様に、熱伝達も高温から低温へと流れることから、単位時間あたりに単位面積（単位： cm^2 ）を流れる熱エネルギー量（熱流束「 W/cm^2 」）が重要となる。

熱流束は熱の流れのエネルギー量を示すもので、この熱エネルギーの流れの結果として温度変化が生じるため、熱流束が分かればその後の温度変化を予測することができる。

また、一般的に燃料種類によって体積当たりの発熱量が異なることが知られており、発熱量が高いほど熱流速も高まる。

以上を踏まえて、人工バリアに対する熱流束について、人工バリアと火災との相対位置関係及び風速の影響を調べることにした。

(2) 伝熱解析、応力解析の重要項目の抽出

オーバーパックおよびガラス固化体キャニスタの状態を応力解析で確認する場合、高温環境下での材料の剛性低下を考慮し、発生応力での即時破壊やクリープ破断について検討を行う必要がある。応力解析を精度良く行うためには、荷重を適切に与えることが重要である。したがって、燃焼解析で得られた入熱分布をオーバーパックおよびガラス固化体キャニスタの温度分布（熱荷重）に正確に反映して伝熱解析を計算すること、および温度分布以外の荷重を考慮する必要がある場合、解析モデルにその荷重を適切に反映することが必要である。

平成 25 年度に実施した地上施設におけるオーバーパック封入の火災解析、および平成 26 年度に実施した地下施設でのオーバーパック封入の火災解析においては、局所的にオーバーパックが高温になるものの、190mm の肉厚を持つオーバーパックの緩衝効果によりガラス固化体への温度には、ほとんど影響を与えないことが確認できた。一方、地上施設においてオーバーパック封入前に火災が発生し、高温状態が 15 分以上継続する場合には、キャニスタの温度が局所的に 700°C 程度まで加熱されるという結果となった。キャニスタ内には、ガラス固化体の他に空気が内包しておりガラス固化体に含まれる放射性核種の α 崩壊によって He ガスが発生し、一時貯蔵期間中もガラス固化体キャニスタ内部の圧力は徐々に増加する。したがって、ガラス固化体キャニスタに生じる応力として、火災による He ガスを含めた内部ガスの圧力上昇の影響について検討する必要がある。

5.2.4 人工バリアと火炎の相対位置関係、風速等の影響評価（燃焼解析）

前述で抽出した重要項目として、人工バリアと火炎の相対位置関係、風速等の影響に関する検討について燃焼解析を用いて実施した。

(1) 燃焼解析用の解析手法及びコードの選定

燃焼解析は米国の国立標準技術研究所 NIST[18]が開発して管理している解析ソフトウェア Fire Dynamics Simulator (FDS)[19]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 の特徴は、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。爆轟のような、流速が音速まで上がるような現象は FDS で再現できないが、一般的な火災（建屋や車両火災など）は再現できる。燃焼解析は、一つの総括反応を伴う燃料の酸化を計算するものであり、未燃分（一酸化炭素）や煤生成量の計算入力データに対して、流れ場（流れ方向、速度分布）、温度分布、熱源である炎から対象物へ移動する熱のエネルギー量（熱流束）などの解析結果が得られる。実際の反応を再現して燃焼解析を実施する場合、未燃分やススの発生量が解析結果として得られるが、計算時間が非常に伸びてしまうため、予め未燃分やススの発生量を文献[20]を基に決定し、残りの燃料は完全燃焼するというモデルを用いることによって短時間で解析結果（熱の発生量）を得ることを可能とした。なお、風速の差による未燃分の増減は考えられるが、火炎とガラス固化体の大きさから入熱量への影響はないと考えた。

(2) 解析モデル（燃焼解析）

ガラス固化体やオーバーパックと炎との位置関係を調べるため図 5.2.4-1 に示すモデルを用いた。地上施設内の中央部にディーゼル燃料の溜まる箇所を設定し、その横にガラス固化体あるいはオーバーパックを想定した 5 個の容器を並べ、位置関係による入熱量の違いを比較することとした。換気による風は、左から右の方向へ流れることとし、解析パラメータとして風速と燃料のたまる箇所の幅の値を変えることによる各容器の入熱量の違いを確認することとした。その理由は、風速を速めることによって燃料への酸素供給が増えること、燃焼範囲の面積（幅）を大きくすることによって、容器へのふく射による入熱量が増えと推測できるためである。

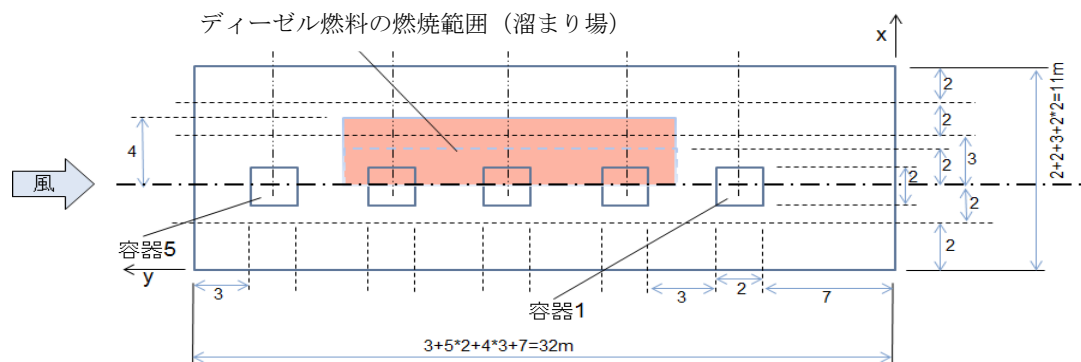
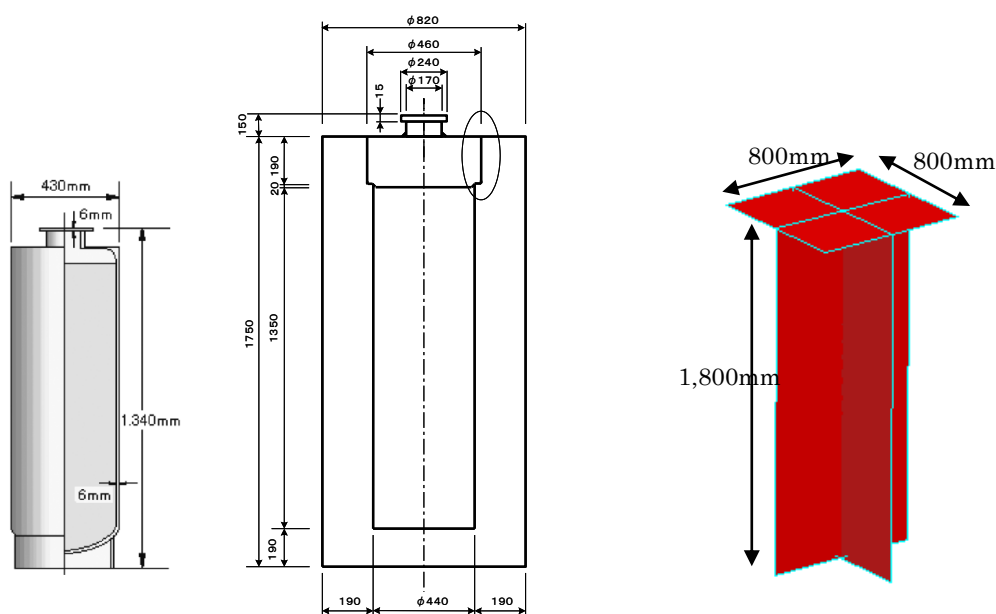


図 5.2.4-1 燃焼解析モデルの概念

FDSは、解析精度を上げるために直交格子を用いているため、計算領域を等間隔で垂直のセル（格子）に分割し、その間隔（格子サイズ）を0.2mとした。FDSの課題として、物体（容器、壁など）の熱容量や熱伝導を計算しない。実際には、周りの火炎によって容器が過熱され、時間の経過とともに容器の温度が上がって周囲からの入熱が減ることになる。この熱伝導等を考慮しないと容器の温度上昇が抑えられることから、容器が周囲から実際より多くの熱を受けることになり、下流へ送られる熱量が小さくなる。この課題に対応するため、FDSの計算格子より小さい壁に対して、熱容量及び垂直方向への熱伝導を一次元の熱バランスを解いて求める方法を利用し、円筒型である容器を3枚の板で模擬した（図5.2.4-2）。オーバーパックの表面は垂直に合わせた2枚の板、蓋は水平の板で近似した。



(a) 実形状[4][5]

(b) 解析モデル

図 5.2.4-2 ガラス固化体及びオーバーパックの数値解析での再現

(3) 解析条件（燃焼解析）

5.2.3 (1) 項で燃焼解析の重要評価項目として抽出した、下記条件をパラメータとして解析を実施する。

燃焼範囲：長さ 15m；幅 2m, 4m, 6m（3 ケース）

風速：1m/s, 5m/s（平成 25 年度の解析において、オーバーパック周りの平均風速）, 10m/s

計算時間：60 秒間

（燃焼解析の結果、数十秒間でオーバーパックへの熱流速が安定すると分かったので、60 秒間にした；図 5.2.4-13 を参照）

(4) 物性値の設定 (燃焼解析)

平成 25 年度に実施した地上施設建屋内の火災で用いたコンクリートの壁、床、キャニスタ又はオーバーパック、金属性の機械、及びディーゼル燃料の条件を次の通り設定した。

① 初期状態 (室内、壁面、機器、ディーゼルなど)

室内圧力 101.3kPa (1 気圧) *

*管理区域は負圧維持が想定されるが、本解析では 1 気圧を設定した。

室内温度 20°C

② 空気

O₂ 21mol%

N₂ 79mol%

③ ディーゼル

C₁₀H₂₂ 100%

蒸発量 0.04kg/m² s

CO 発生量 0.1g/g 燃料

煤発生量 0.01g/g 燃料

燃焼解析には以下の物性値を用いた。

1) 密度 ρ

①コンクリート[14][15] 2,200kg/m³

②キャニスタ (SUS304L) (表 5.2.4-1) 7,810kg/m³

③オーバーパック (表 5.2.4-1) * 6,878kg/m³

*ガラスとキャニスタの体積を考慮した平均値

2) 熱容量 cp

①コンクリート[14][15]

<100°C 0.9kJ/kg K

100°C 0.9kJ/kg K

200°C 1.0kJ/kg K

400°C 1.1kJ/kg K

>400°C 1.1kJ/kg K

②キャニスタ (SUS304L) [16]

<300°C 0.499kJ/kg K

300°C 0.499kJ/kg K

400°C 0.511kJ/kg K

600°C 0.556kJ/kg K

800°C 0.620kJ/kg K

1000°C 0.644kJ/kg K

>1000°C 0.644kJ/kg K

③オーバーパック (表 5.2.4-1)

20°C 0.463kJ/kg K

100°C	0.479kJ/kg K
200°C	0.504kJ/kg K
300°C	0.538kJ/kg K
400°C	0.584kJ/kg K
500°C	0.638kJ/kg K
600°C	0.713kJ/kg K
700°C	0.875kJ/kg K
730°C	0.964kJ/kg K
735°C	2.117kJ/kg K
765°C	0.975kJ/kg K
800°C	0.900kJ/kg K
900°C	0.653kJ/kg K
1400°C	0.653kJ/kg K

3) 熱伝導率 λ

① コンクリート [15]

20°C	1.95W/m K
500°C	1.04W/m K
700°C	0.81W/m K
1000°C	0.62W/m K
1400°C	0.67W/m K

⑩ キャニスタ (SUS304L) [16]

<26.85°C	16W/m K
26.85°C	16W/m K
126.85°C	16.5W/m K
326.85°C	19W/m K
526.85°C	22.5W/m K
726.85°C	25.7W/m K
>726.85°C	25.7W/m K

③ オーバーパック (表 5.2.4-1)

20°C	49.8W/m K
100°C	49.6W/m K
200°C	48.4W/m K
400°C	43.2W/m K
600°C	38.6W/m K
800°C	32.4W/m K
>800°C	32.4W/m K

4) ふく射率 ε

① コンクリート [14]

0.9

②キャニスタ (SUS304L) [17]	0.93
③オーバーパック (表 5.2.4-1)	0.56

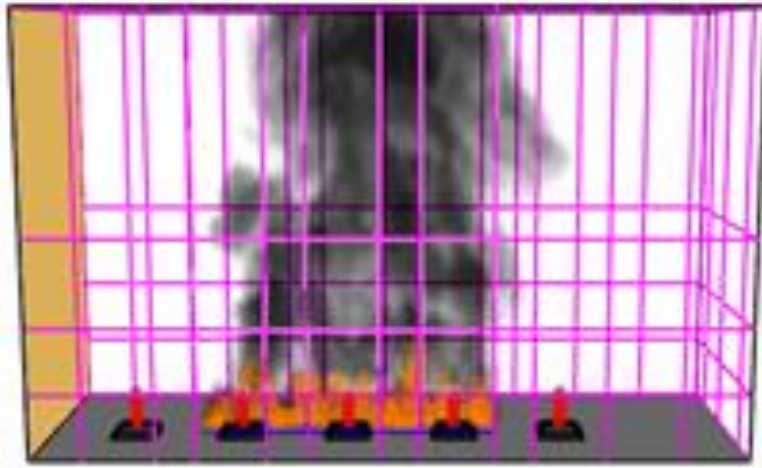
表 5.2.4-1 伝熱解析に用いた熱物性値

項目	単位	ガラス		キャニスター内 上部空気層		キャニスター (SUS)		キャニスター／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
輻射率	-	-	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-05	20.00	4.98E-02	-	-
		126.85	1.24E-03	126.85	3.31E-05	126.85	1.65E-02	126.85	3.31E-05	100.00	4.96E-02	-	-
		226.85	1.37E-03	226.85	3.95E-05	326.85	1.90E-02	226.85	3.95E-05	200.00	4.84E-02	-	-
		326.85	1.49E-03	326.85	4.56E-05	526.85	2.25E-02	326.85	4.56E-05	400.00	4.32E-02	-	-
		-	-	426.85	5.13E-05	726.85	2.57E-02	426.85	5.13E-05	600.00	3.86E-02	-	-
		-	-	526.85	5.69E-05	-	-	526.85	5.69E-05	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
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	-	-	-	-

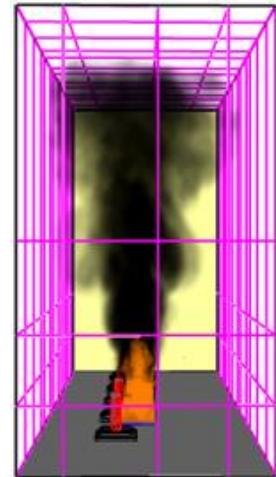
注：本表は解析に使用した熱物性値を記載したものである。ガラス固化体およびオーバーパットの初期温度分布の算出に置いては上記熱伝達係数を用いているが、火災時のオーバーパット外側（ガラス固化体単体モデルにおいてはキャニスター外面）の熱伝達率は表 5.2.4-1 に示した値を用いた。

(5) 解析結果（燃焼解析）

解析結果として、火炎の状況、煙の流れを図 5.2.4-3～図 5.2.4-11 に示す。一般的には、燃焼ガスが高温なことから上昇し、風が左から右の方向へ吹いているために、火炎並びに煙も右上の方向に流れると予測でき、解析結果でも同様の状況を確認することができた。風速が 1m/s の場合、燃焼ガスは床面から垂直方向に上がっている（図 5.2.4-3(a), 図 5.2.4-6 (a), 図 5.2.4-9 (a)）。また、下流側から見た煙の幅は、地面付近では燃料の溜まり場の幅と同じであるが、高くなる程大きく左右に広がる（図 5.2.4-3(b)）。風速が 5m/s, 10m/s の場合は、風の影響により煙は下流側へ流されている。また、下流側から煙の流れを見ると燃料の溜まり場の幅より左右に大きく広がり、10m/s では煙が天井に届かずに横へ流されている。

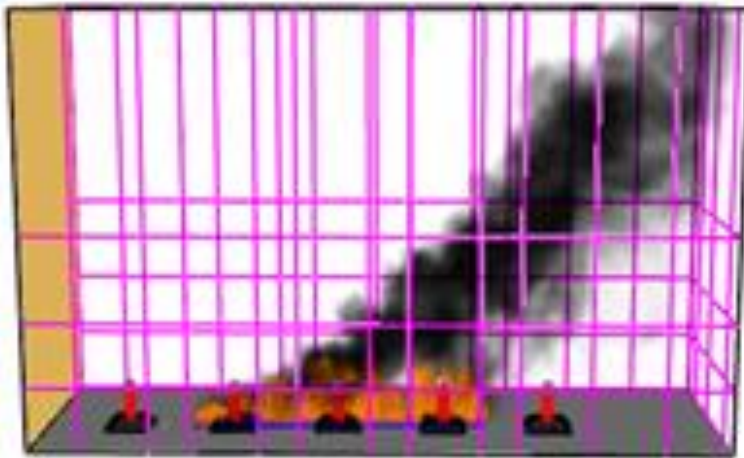


(a) 横から見た図

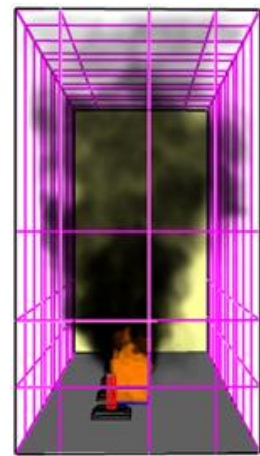


(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-3 風速 1m/s, 燃焼範囲の幅 2m における火災

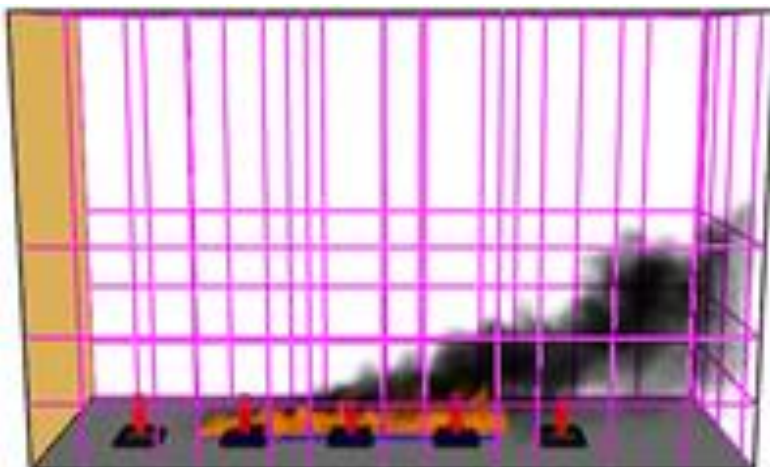


(a) 横から見た図



(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-4 風速 5m/s, 燃焼範囲の幅 2m における火災

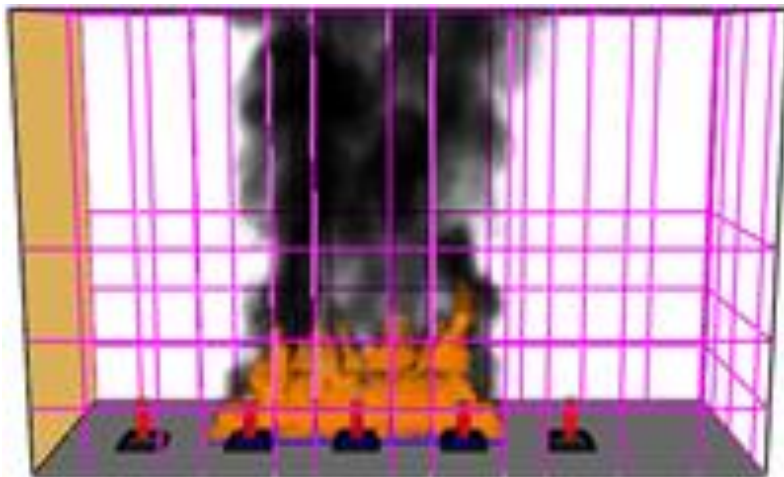


(a) 横から見た図



(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-5 風速 10m/s, 燃焼範囲の幅 2m における火災

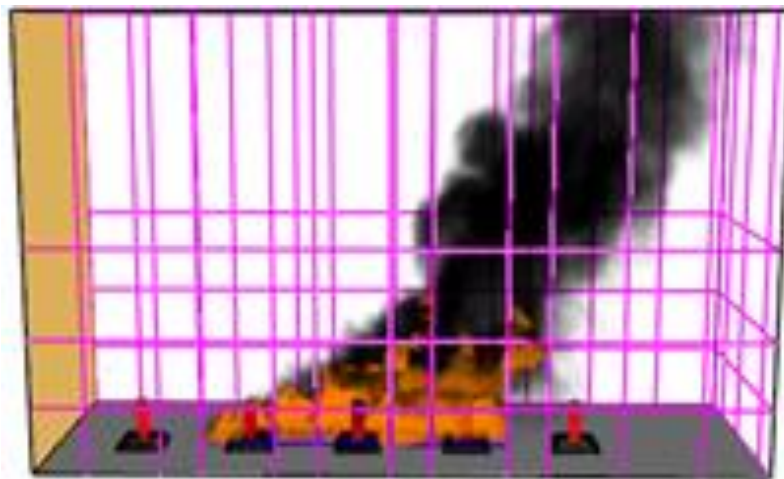


(a) 横から見た図



(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-6 風速 1m/s, 燃焼範囲の幅 4m における火災

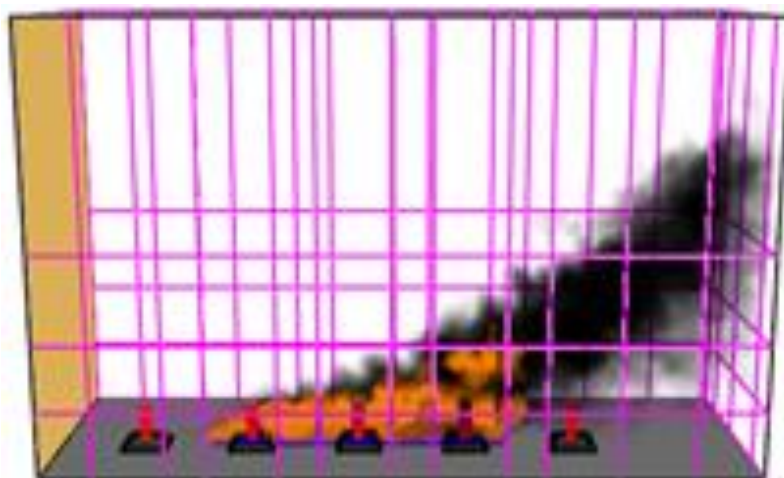


(a) 横から見た図

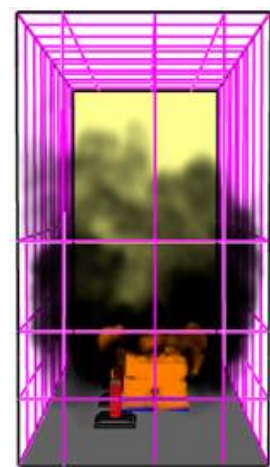


(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-7 風速 5m/s, 燃焼範囲の幅 4m における火災



(a) 横から見た図

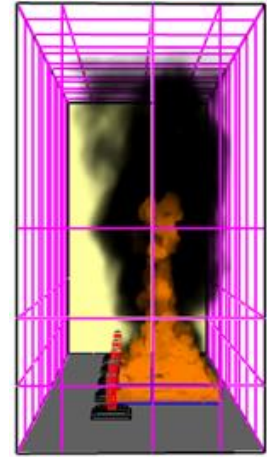


(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-8 風速 10m/s, 燃焼範囲の幅 4m における火災

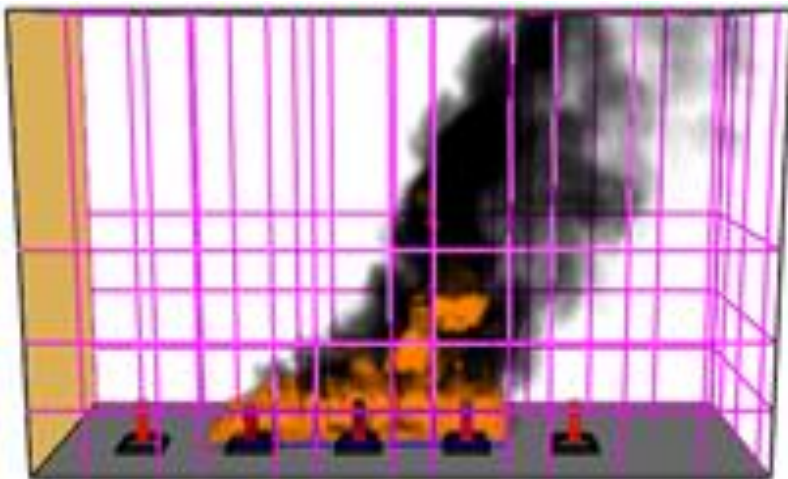


(a) 横から見た図

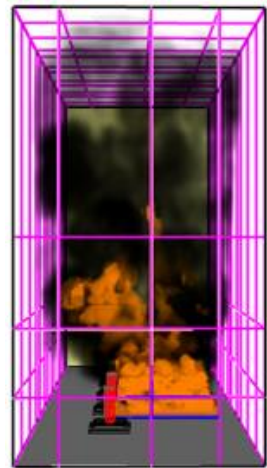


(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-9 風速 1m/s, 燃焼範囲の幅 6m における火災

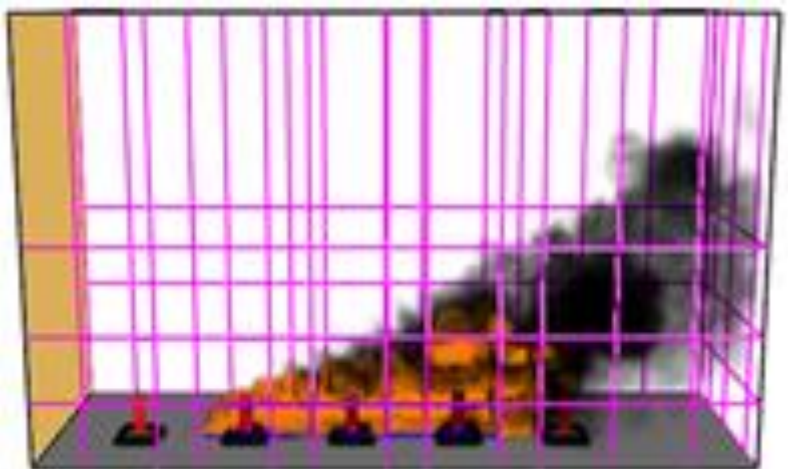


(a) 横から見た図



(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-10 風速 5m/s, 燃焼範囲の幅 6m における火災



(a) 横から見た図



(b) 下流側から見た図

図 5.2.4-11 風速 10m/s, 燃焼範囲の幅 6m における火災

各容器において、図 5.2.4-12 に示すように、上板の中心一点、高さ方向 3 段にて 8 点、合計 25 点で入ってくる熱の量を把握した。代表的な時系列データとして、容器 3 の中部（高さ 900mm）の監視点①への入熱量を図 5.2.4-13 に示す。計算条件（風速、燃料の溜まり場の幅）に関わらず 5 秒以内に入熱量がゼロから最大値まで上がる共通傾向が見られた。最初の 5 秒後の傾向は異なるが、その違いは風速や燃焼範囲の幅と無関係に見える。入熱が一時的に下がってから最終レベルまで上がる場合があれば (1m/s, 6m), (5m/s, 4m), (5m/s, 6m)、下がらないで最初の急激な立ち上がり後一定の量が継続的に入り続く場合もある(1m/s, 2m), (1m/s, 4m), (5m/s, 2m), (10m/s, 2m)。但し、最初の傾向が異なっても、20 秒以降は入熱量がある値の周りに収束し、燃焼範囲の幅が広がることで入熱量が上がる。但し、燃焼範囲の幅を 4m から 6m まで広げた場合では、入熱量は 2m から 4m まで広げた場合ほどは上がらない。

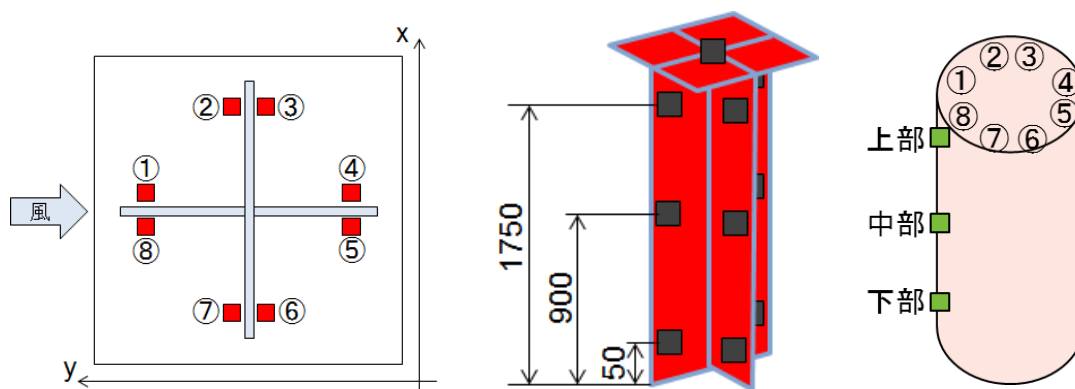


図 5.2.4-12 容器における監視（計測）点

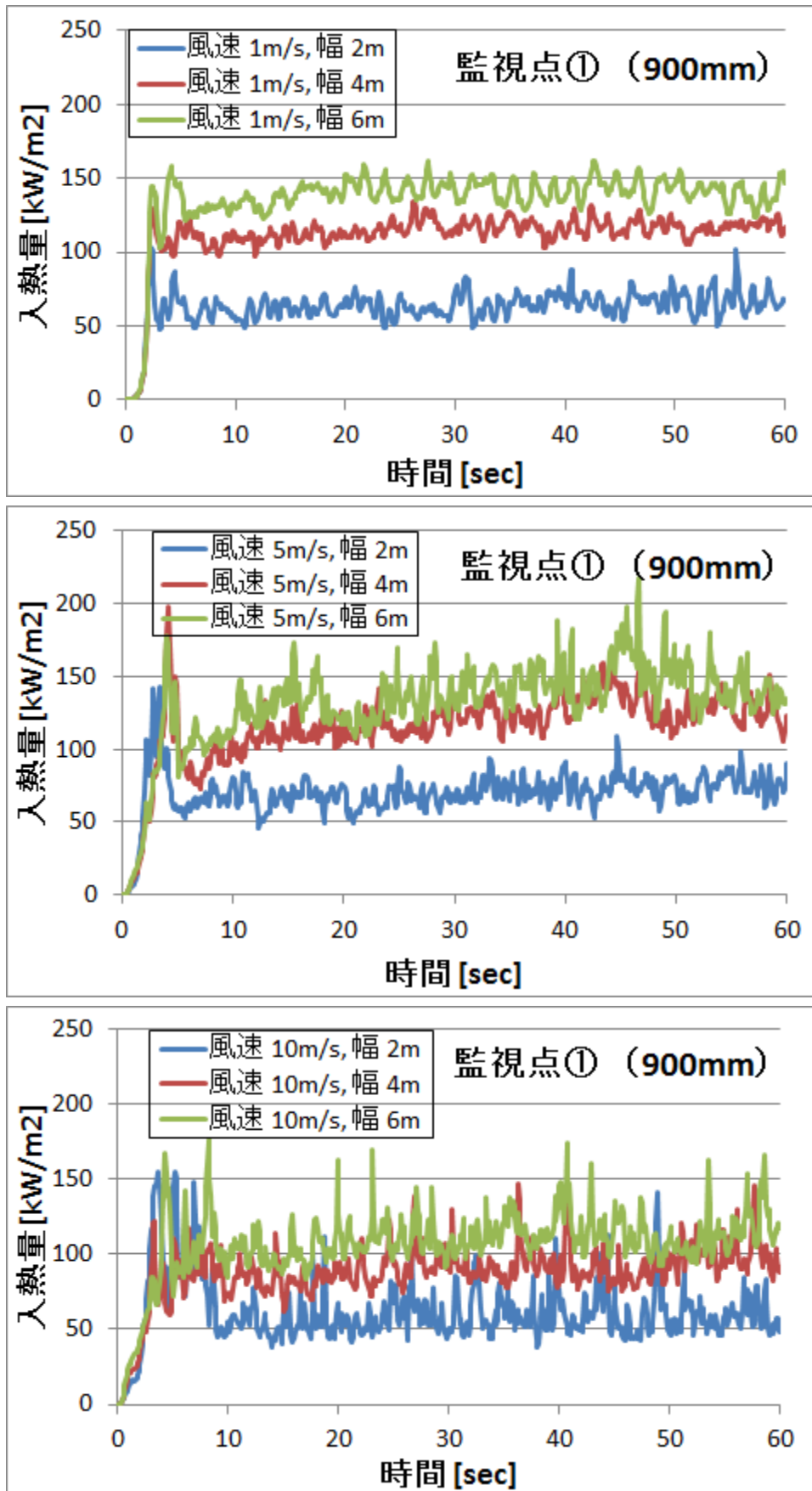


図 5.2.4-13 容器 3 における入熱量の時間による変化 (監視点①、高さ 900mm)

各容器に入ってくる熱を定量的に評価するために各監視点で記録された時系列データの最後の20秒間（図 5.2.4-13 の時刻 40s～60s）を時間平均し、図 5.2.4-12 の右に示すような円筒型容器を仮定して積分した。その結果を表 5.2.4-2 及び図 5.2.4-14 に示す。容器 2, 3 と 4 は溜まり場の横に設置しており、容器の半分が直接炎に曝されるが、火炎に直接曝されない上流側の容器 5 及び下流側の容器 1 が受ける熱は、他の容器と比べて 1/3～1/4 程度に抑えられる。また、下流側の容器 1 は上流側の容器 5 より 3 倍ほどの熱を受ける。風速 1m/s 及び 5m/s の場合は、容器 3 が最大の入熱量を受けるが、風速 10m/s の場合は容器 3 より下流側の容器 2 の方が入熱量を受ける。燃焼範囲の幅の影響は図 5.2.4-13 の時系列データでもわかるように、幅を 6m よりに広げても、入熱の量が上がらなかった。入熱量が一番多くなる風速（10m/s）においても、燃焼範囲の幅を 10m とした図 5.2.4-14 を見ると幅 6m の場合と同程度かそれを下回ることが確認できた。

表 5.2.4-2 容器への入熱量（時間平均；図 4.2.5-1 を参照）

入熱[kW]					
1m/s	容器5	容器4	容器3	容器2	容器1
2m	17	136	160	137	18
4m	38	188	246	196	38
6m	51	195	277	207	51
入熱[kW]					
5m/s	容器5	容器4	容器3	容器2	容器1
2m	15	98	193	149	20
4m	34	156	299	273	44
6m	27	130	216	353	87
入熱[kW]					
10m/s	容器5	容器4	容器3	容器2	容器1
2m	13	77	151	176	27
4m	27	130	216	353	87
6m	39	155	268	466	155

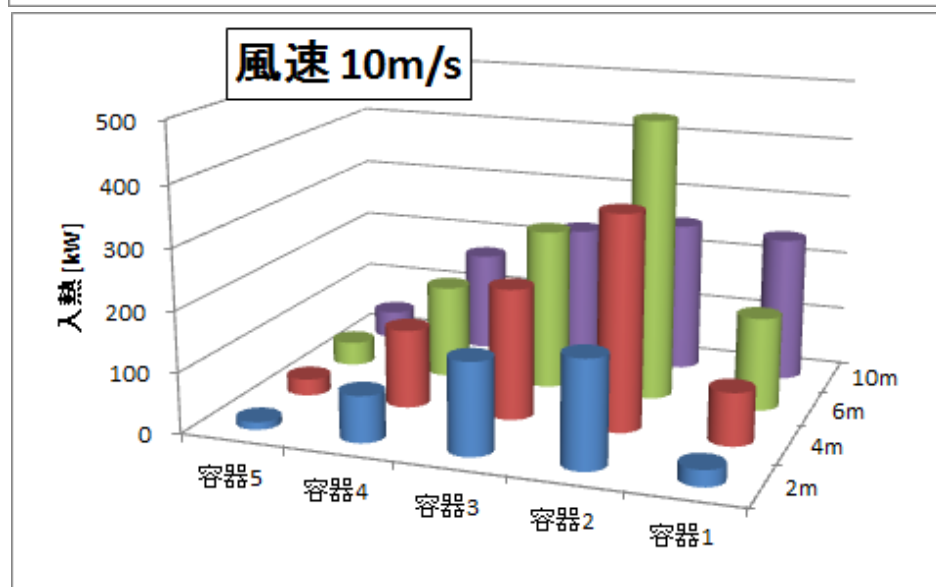
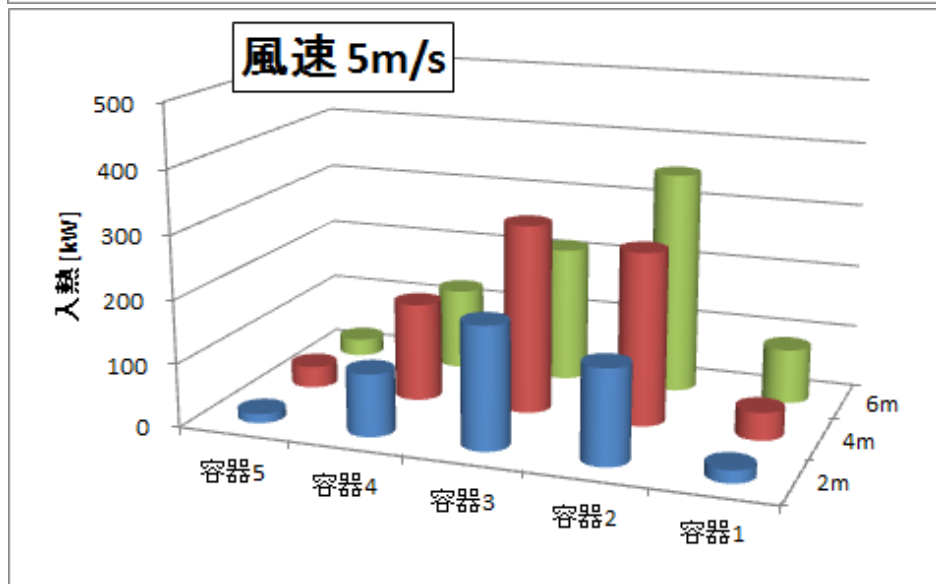
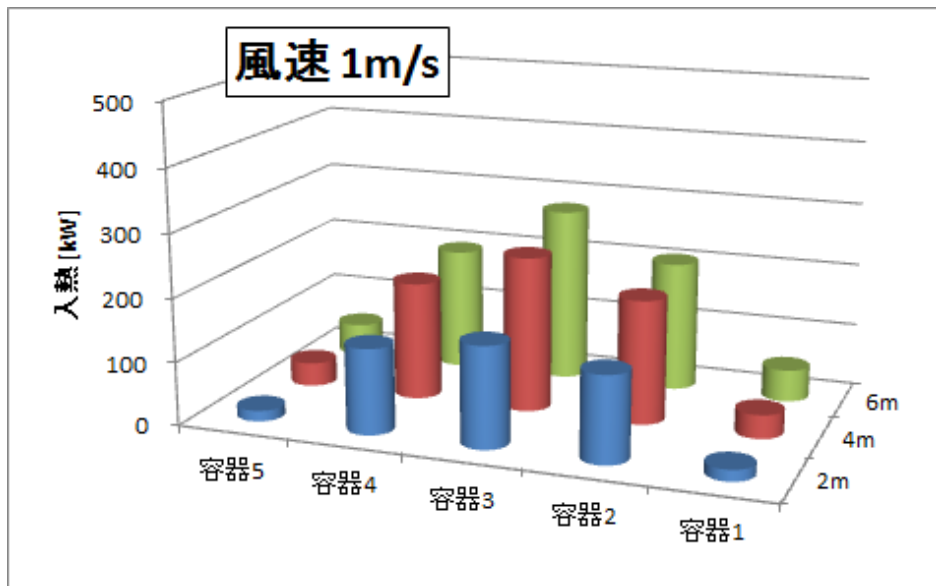


図 5.2.4-14 各容器への入熱量 (20 秒間の時間平均 [kW])

(6) 考察と今後の課題（燃焼解析）

熱伝達は、伝導、対流、ふく射による熱から構成されているが、設定したシナリオによる火災の場合では、ふく射による熱が支配的であることが一般的に知られており、平成 25 年の解析結果でも確認している。ふく射による入熱は、容器に対する火炎の角度で決まるため、炎が垂直に上がる風速 1m/s の場合は、容器 1 から見た火炎の角度と容器 5 から見た角度が同じであることから、容器 1 及び容器 5 への入熱は同じであると推測できる。風速 5m/s や 10m/s の場合は、火炎の形が風の吹く方向に崩れるため、上流側に置かれた容器 5 からは火炎が小さく見えるが、下流側の容器 1 からは大きく見えるため、風速が速くなる程、容器 1 のほうが容器 5 より多い熱量を受けることになると推測でき、解析結果からも定量的に確認することができた。

平成 25 年度に実施した地上施設内の火災は図 5.2.4-15 に示す火災を解析した。燃焼範囲の幅 2m、長さは容器の左（上流）側 19.3m、右（下流）側 4.9m（図 5.2.4-15 (a)）、又は、容器の左右それぞれ 2m であった（図 5.2.4-15 (b)）。換気の無い条件下の解析で、施設内の空気量が限られているため、それぞれの火災で発生した熱の量は限られた時間で一定となり、その後ゼロまで減少した。一定となっている時間中の容器への入熱量はそれぞれ 59kW と 231kW であった。入熱量は今回の調査で得られた結果範囲内である（表 5.2.4-2）。但し、図 5.2.4-15 (a) のように燃焼範囲が長い場合は周辺風速が 1m/s で容器が真ん中に置かれた状態にも関わらず、図 5.2.4-14 に示す入熱と比較して低い量であった。施設内では反時計回りの流れ（強制対流）が発生するが、今年度実施した火災はより広い空間を仮定しているため自然対流が発生する。一方、図 5.2.4-15 (b) に示す燃焼範囲が狭い場合は、周辺の平均風速がおよそ 4m/s であった。容器は燃焼範囲の真ん中に置かれていたが、今回の解析では燃焼範囲の横に置かれた容器と同程度の入熱量であった（表 5.2.4-2、風速 5m/s、幅 2m、容器 3）。上記の結果を踏まえて、風速や容器の炎との相対位置によって容器への入熱量が大きく変わることが言える。また、ふく射による入熱が支配的であるため、容器から見た炎の大きさが大きいほど入熱量が多いことが今年度の解析結果から確認した。

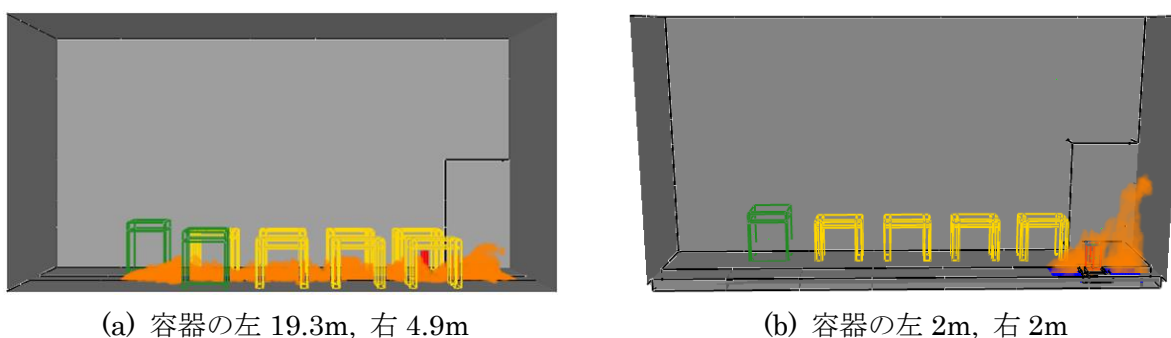


図 5.2.4-15 平成 25 年度実施した火災の概念（燃焼範囲の設定）

本解析は使用済核燃料の処理施設において、難燃性の材料が優先的に利用されるため、自然災害の影響によりディーゼル燃料が漏れて引火するシナリオを検討してきた。他の燃料（可燃物）による火災においてディーゼルより高い発熱量が発生する可能性について調査が必要と思われる。

Fire Dynamics Simulator (FDS) を用いて火災の燃焼解析を実施した結果、施設内の火災シナリオを検討することができた。例えば、平成 25 年度の地上施設において、密閉空間であれば、消火しなくても酸素不足で火災が終わってしまうが、その消炎までの時間内で容器の温度はどこまで上がるかの予測ができた。FDS は火災に対する安全アセスメントを短時間で精度よく実施できるために開発された解析コードである。安全アセスメントは火災の周囲への影響を予測することが目的である。自然火災の人工バリアへの影響を評価するために FDS を用いた理由は短時間で結果が得られるためであり、容器への入熱量を大きく左右させる要因を把握することが可能であることを示した。

FDS の欠点は計算時間を短縮させるためにいくつかの現象が簡略化されている。例えば、容器への入熱を考えた場合、入熱量が時間によって変わると、容器の温度が入熱量と同じ変化ではなく、熱容量によって温度変化が遅れる。但し、容器の温度によって周囲への熱損失も変わる。FDS ではこの現象を簡単なモデルで模擬できるが、その妥当性は確認するべきである。汎用熱流体解析コード（例えば ANSYS Fluent など）は容器の形状を厳密に再現でき、熱伝達についても詳細なモデリングが可能である。その反面、詳細を考慮した解析は計算時間が長いために、今まで実施したアセスメントには向いていない。

FDS を用いて実施した手法を汎用熱流体解析コードで妥当性が示されたら、具体的なアセスメントは図 5.2.4-16 のような流に従って実施できると考える。

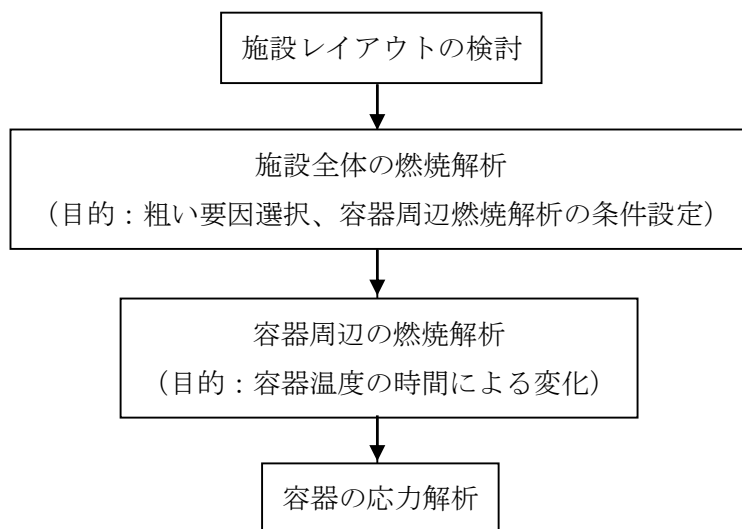


図 5.2.4-16 施設安全アセスメントの流れ

5.2.5 ガス内圧のガラス固化体キャニスタへの影響評価（伝熱解析、応力解析）

5.2.3 (2) で記載したように、ガラス固化体キャニスタが火災に遭うケースを想定する場合、キャニスタの健全性評価を行うためには、キャニスタ内部のガスの膨張による内圧上昇を考慮する必要があると思われる。ここでは、ガスの内圧上昇を応力解析に算入した場合の応力解析結果について記述する。

(1) 伝熱解析、応力解析用の解析手法及びコードの選定

平成 25 年度に検討したガス圧上昇の応力解析への算入手法の考え方を以下に示す。

- ① ガラス固化体キャニスタ内部の空間内にあるガスのメッシュを作成する
（伝熱解析・応力解析とも）
- ② 非定常の伝熱解析により、ガス温度の時刻歴データを求める
- ③ 気体の状態方程式を基に、温度上昇による等圧下での体積膨張量を算出し、応力解析に用いるガスの線膨張係数を導出する
- ④ ガスの熱膨張による体積膨張をキャニスタ内に封じ込めることを模擬するため、ガスとキャニスタ、およびガスとガラスの接触問題として応力解析を行う

この手法を用いて圧力上昇を模擬する場合、所定の圧力荷重がキャニスタに作用するようにガスの機械的物性値を適切に設定する必要がある。また、温度時刻歴データを用いた非定常の接触解析となるため、応力解析の計算負荷は非常に高くなると思われる。そこで、本年度は簡易的な別法として以下の手法を用いることとした。

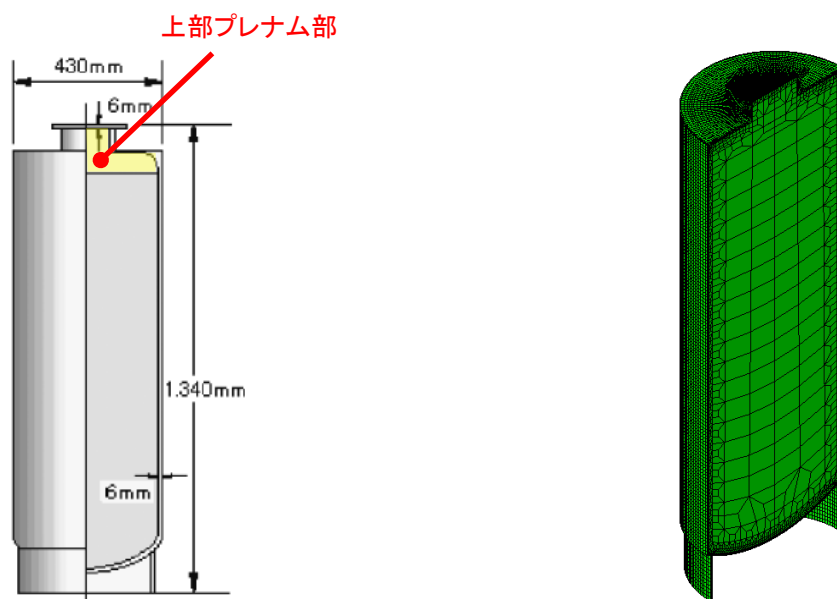
- i) ガラス固化体キャニスタ内部の空間にあるガスのメッシュを作成する（伝熱解析）
- ii) 非定常の伝熱解析により、ガス温度の時刻歴データを求める
- iii) ガスの平均温度および気体の状態方程式から当該温度における圧力値を求め、圧力の時刻歴データを算出する
- iv) キャニスタ内面に圧力荷重として負荷し、応力の時刻歴変化を算出する

解析コードは、ガス温度と圧力値を表形式で簡便に与えられること、および平成 25 年度と平成 26 年度の火災解析で汎用 FEM コード ABAQUS 使用していることから、本検討においても ABAQUS を用いることとした。

(2) 解析モデル（伝熱解析／応力解析）

上述の通り、ガラス固化体がオーバーパックに封入された状態で火災に遭うケースでは、ガラス固化体の温度はほとんど上昇しないことが確認されている。そこで、ここではガラス固化体単体が火災に遭うケースを検討対象とする。

伝熱解析においては、図 5.2.5-1(b)に示すようにキャニスタ内部のガスのメッシュも作成し、火災入熱によるガス温度を非定常解析により算定する。応力解析は、キャニスタに直接圧力荷重を負荷することとしたため、ガスのメッシュを削除した FEM モデルとする。



(a) ガラス固化体の仕様（日本原燃（株）） (b) FEM モデル（360 度モデルの 1/2 を表示）

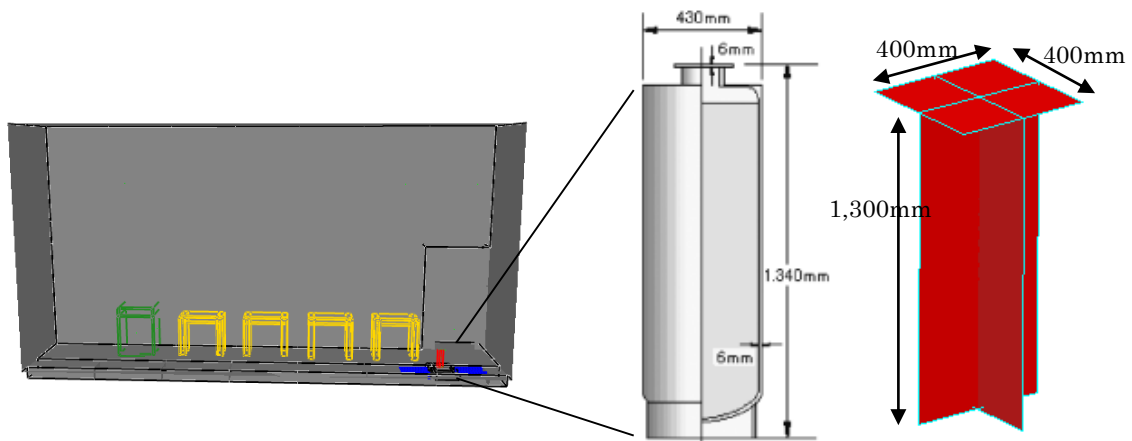
図 5.2.5-1 ガス内圧を考慮するためのガラス固化体の FEM モデル（伝熱解析）

(3) 解析条件（伝熱解析／応力解析）

ガラス固化体単体が火災に遭うケースとして、平成 25 年度に検討した地上施設における火災のケースのうち、添付資料で示した燃焼範囲を調整して燃焼時間を延ばしたケース[2]を解析対象とした。以下に検討対象としたケースの解析条件を示す。

- ・地上施設での火災
- ・ガラス固化体単体
- ・台車の位置：収納・検査室の壁寄り
- ・燃焼範囲：台車の両側に 2m×2m

応力解析に用いる伝熱解析は、上記ケースを対象に実施した平成 25 年度の伝熱解析結果を用いた。図 5.2.5-2 に当該ケースの燃焼解析モデル、図 5.2.5-3 に燃焼解析の結果得られた収納・検査室の燃料蒸発量、発熱量および熱損失、図 5.2.5-4 にガラス固化体への熱流束の時刻歴変化、および図 5.2.5-5 と図 5.2.5-6 に伝熱解析の結果得られたガラス固化体の温度分布図を示す。



(a) 燃焼解析モデル

(b) ガラス固化体の実寸(左)および解析モデル(右)

図 5.2.5-2 ガラス固化体単体の燃焼解析モデル

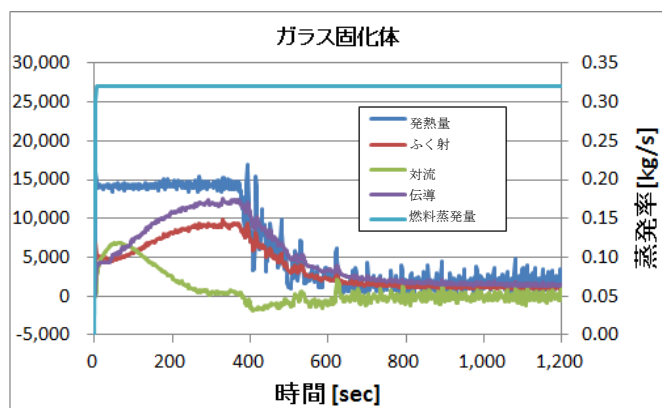
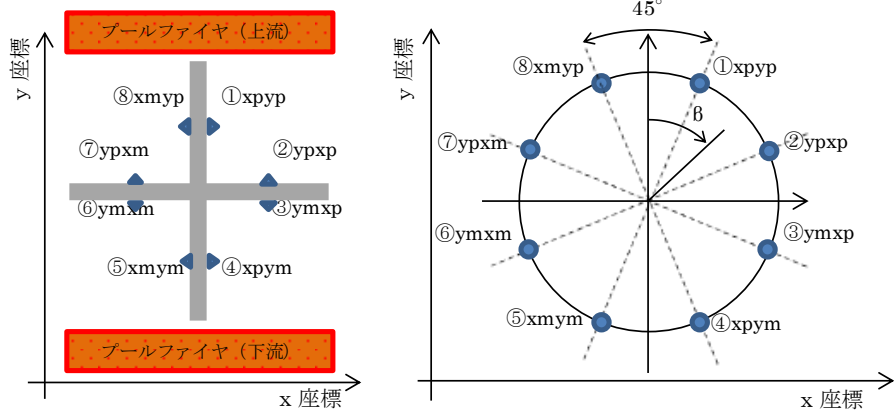
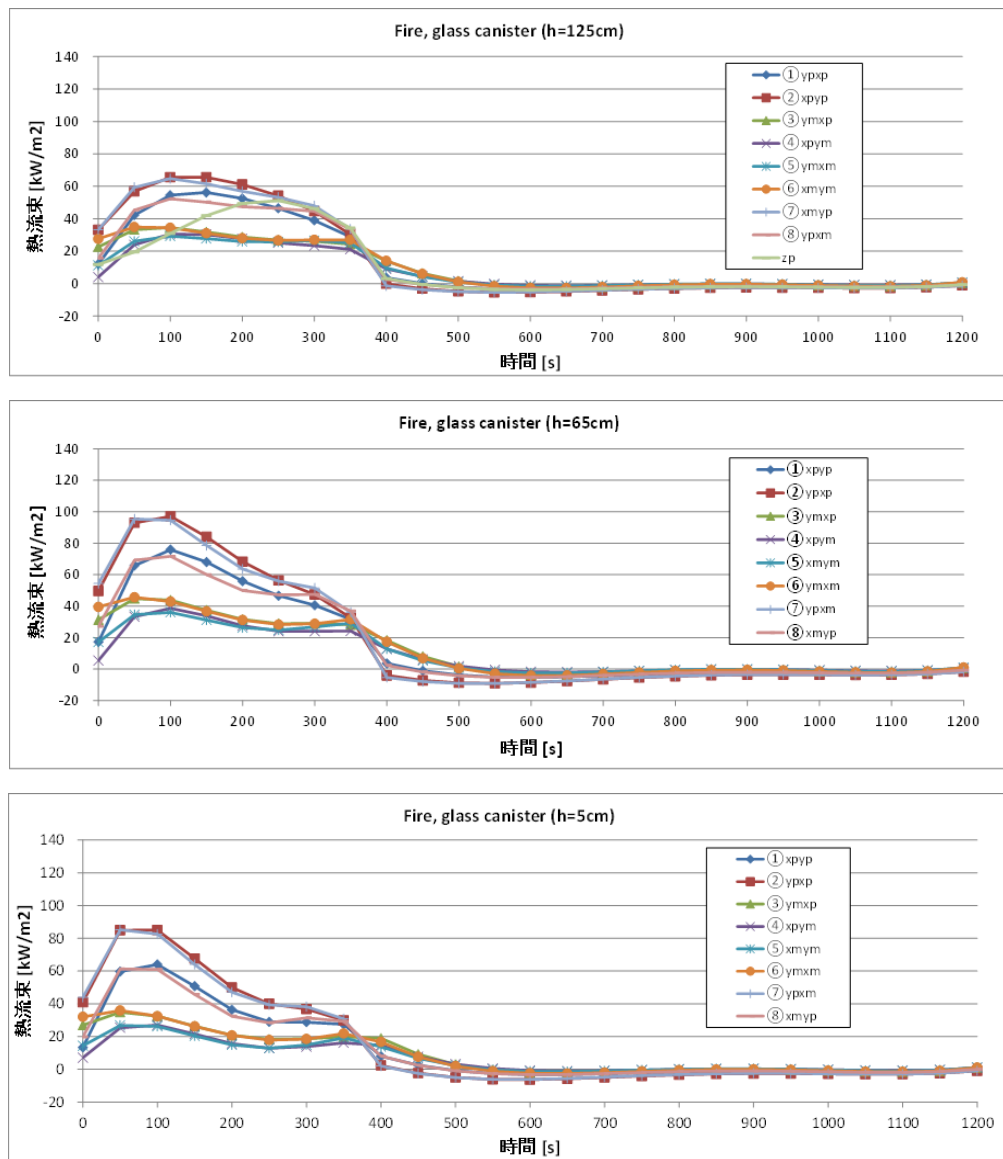


図 5.2.5-3 燃焼解析結果

— 収納・検査室の燃料蒸発量、発熱量および熱損失（ふく射、対流、伝導） —

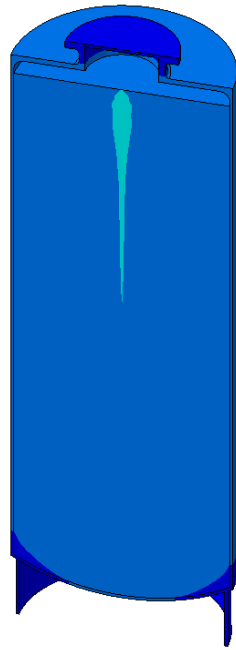
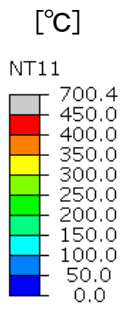


(a) 燃焼解析における熱流束の計測点と伝熱解析における設定点

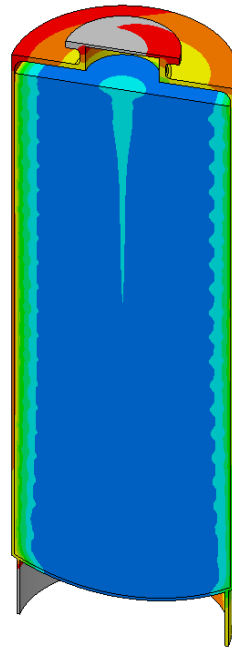


(b) 熱流束の時刻歴変化（上から高さ 125cm, 65cm, 5cm 位置）

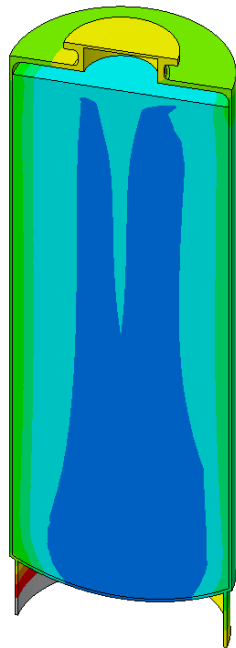
図 5.2.5-4 ガラス固化体への熱流束の時刻歴変化（伝熱解析の入力データ）



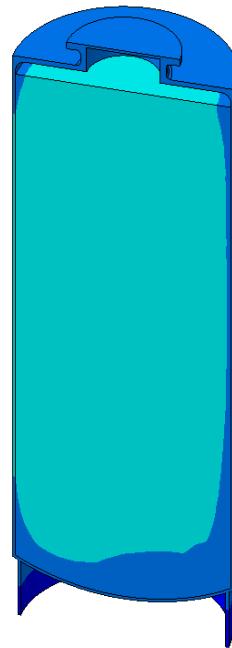
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

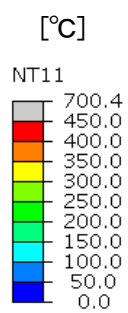


(c) 火災発生から 20 分



(d) 火災発生から 130 分

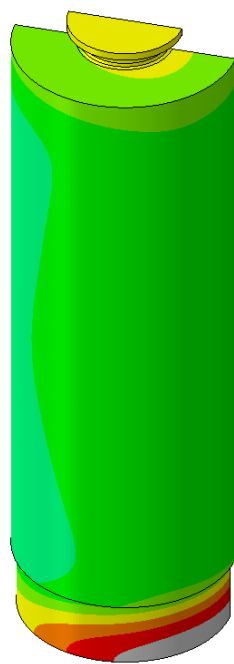
図 5.2.5-5 ガラス固化体の温度分布 —キャニスタとガラスの 1/2 切断図：内面側—
(360 度モデルのうちの 1/2 部分を表示)



(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



(c) 火災発生から 20 分



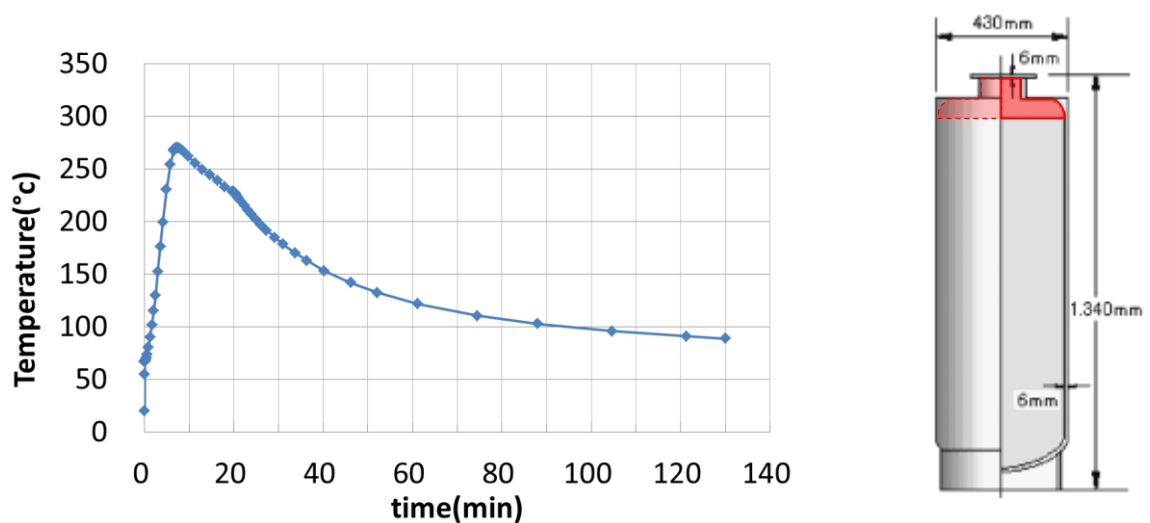
(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-6 ガラス固化体の温度分布 — キャニスタとガラスの 1/2 切断図：外面側—
(360 度モデルのうちの 1/2 部分を表示)

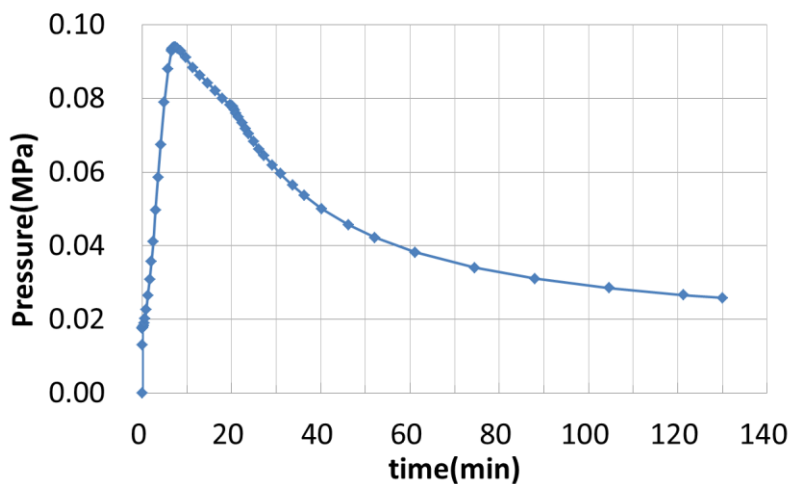
伝熱解析においては上部プレナムのガスも要素分割し、ガス温度の時刻歴変化を、キャニスタとガス、およびガスとガラスとの熱伝導により計算している。キャニスタに与えるガス圧の値は、非定常熱伝導解析結果から算出した各時間のガス平均温度を用いて、以下のように算出した。

- ① 上部プレナムの初期状態（ガラスをキャニスタに封入した時点）の温度を 20℃と想定
- ② 中間貯蔵中に発生する He ガスの量を 5 リットル（常温常圧条件下）と想定
- ③ 理想気体の状態方程式が成り立つと仮定し、上部プレナムの体積が一定とした時の圧力荷重の時刻歴変化を、ガス平均温度の時刻歴データから算出

図 5.2.5-7 に算出したプレナム部の平均温度の時刻歴変化と圧力荷重の時刻歴変化のグラフを示す。



(a) 内部ガス平均温度の時刻歴変化



(b) 内部ガス圧力の時刻歴変化（雰囲気との差圧）

図 5.2.5-7 内部ガスの平均温度および圧力値の時刻歴変化

平成 25 年度のガラス固化体の応力解析モデルは、ガラスとキャニスタを別体としてモデル化し、ガラスの側面と底面におけるキャニスタとの接触を考慮した解析を行った。上部プレナムにガス圧を負荷する場合、以下の状態によりキャニスタとガラスの境界面では剥離が生じる可能性が考えられる。

- ①ガス圧でキャニスタが膨らむ変形が生じる
- ②キャニスタとガラスの線膨張差によりガラスよりもキャニスタが膨らむ

そこで今年度実施する応力解析は、平成 25 年度と同じ別体モデルを用いてガラスとキャニスタの接触を考慮した解析を行うこととし、キャニスタ内面に与えるガス圧は上部プレナムだけでなくキャニスタ内面全体に与えることとした。キャニスタ内面全体に負荷する圧力荷重は、キャニスタとガラスの剥離で生じる空間の体積は上部プレナムの体積に比べて僅かのみとし、上記手法で算出した値をそのまま用いた。

しかし、実際にガラスとキャニスタに剥離が生じるか不明であること、およびガラスとキャニスタが一体化して剥離が生じず、上部プレナムにのみガス圧が負荷されるケースの方が、キャニスタに発生する応力が局所的に高くなる可能性があると考えられることから、上記の別体モデル、一体化モデルで上部プレナムにのみガス圧を負荷する解析ケースについても追加で実施した。

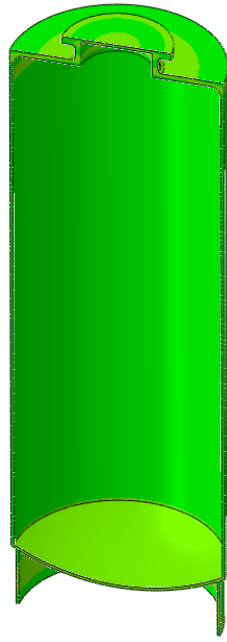
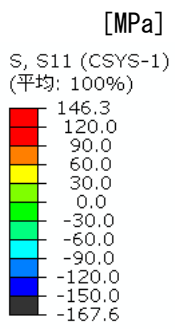
(4) 物性値の設定（伝熱解析／応力解析）

平成 25 年度に実施した解析と比較してガス圧を応力解析に算入する影響を見るために、解析に用いる物性値は、平成 25 年度の解析に用いたデータを踏襲することとした。

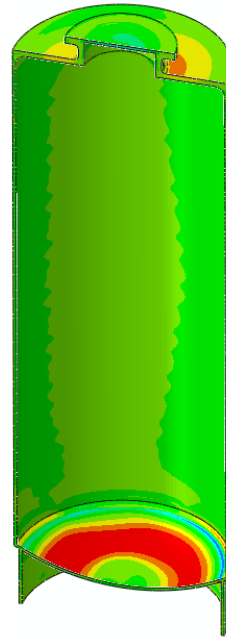
(5) 解析結果（伝熱解析／応力解析）

前述したとおり、伝熱解析結果は平成 25 年度に実施したものをそのまま使用した。図 5.2.5-5 および図 5.2.5-6 に今年度の解析ケースとして選定した平成 25 年度の伝熱解析結果[2]を示す。

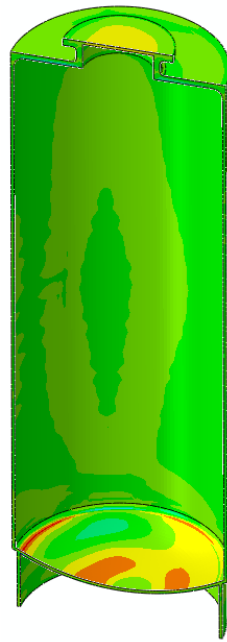
応力解析は、この伝熱解析の結果得られたガラス固化体の温度時刻歴を温度荷重として負荷するとともに、ガス圧の時刻歴データを負荷してガラス固化体キャニスタに生じる過渡的な応力を計算した。図 5.2.5-8 から図 5.2.5-17 に、ガラスとキャニスタが別体となったモデルを用いた解析結果のうち、キャニスタに生じる半径方向応力、周方向応力、軸方向応力、相当応力、および相当塑性ひずみの分布図を示す。また、図 5.2.5-18 から図 5.2.5-29 にガラスとキャニスタを別体にしたモデルと一体化させたモデルの解析結果のうち、相当応力と相当塑性ひずみ分布の比較図を示す。



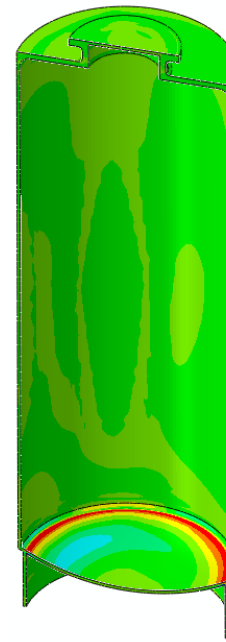
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

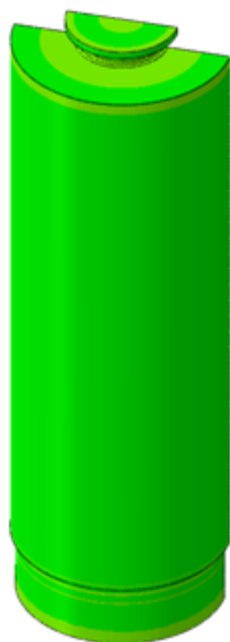
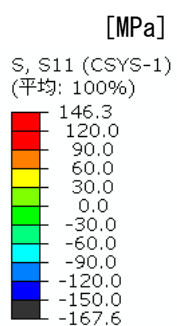


(c) 火災発生から 20 分

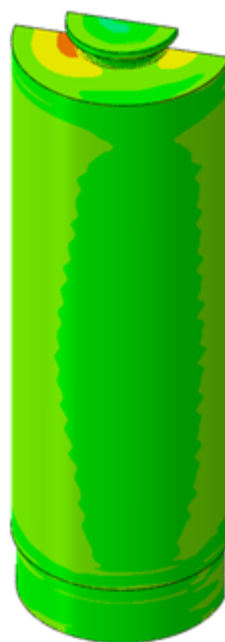


(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-8 応力解析結果 —半径方向応力：キャニスタ内面側—
 ・ガラス/キャニスタ別体モデル
 ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



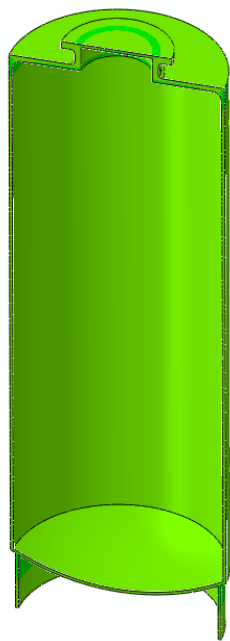
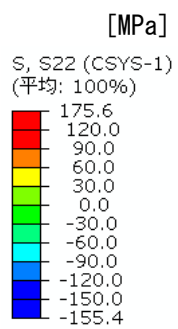
(c) 火災発生から 20 分



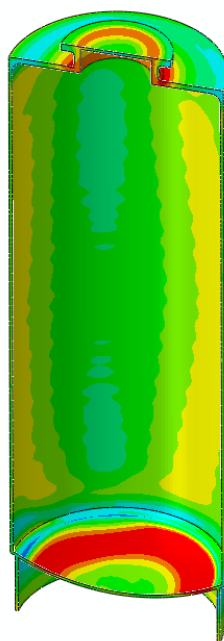
(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-9 応力解析結果 —半径方向応力：キャニスタ外面側—

- ・ガラス/キャニスタ別体モデル
- ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



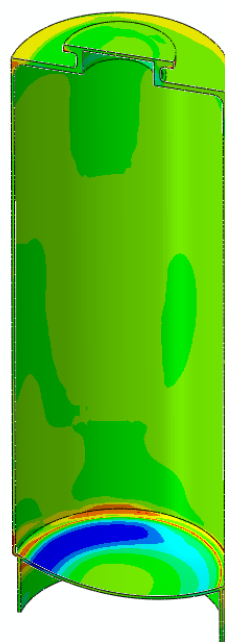
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



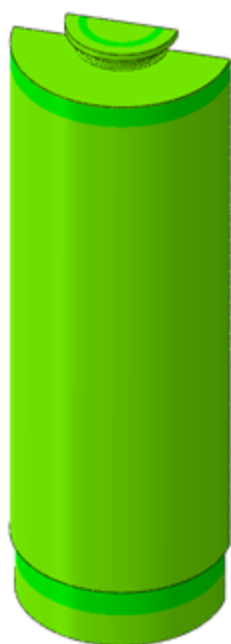
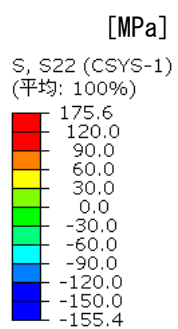
(c) 火災発生から 20 分



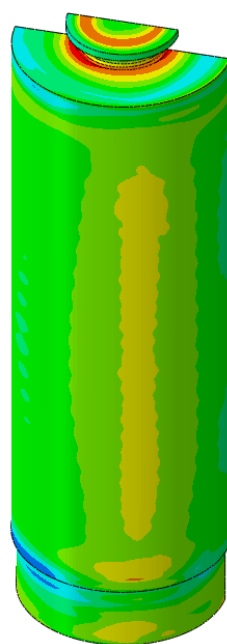
(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-10 応力解析結果 一周方向応力：キャニスタ内面側—

- ・ガラス/キャニスタ別体モデル
- ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



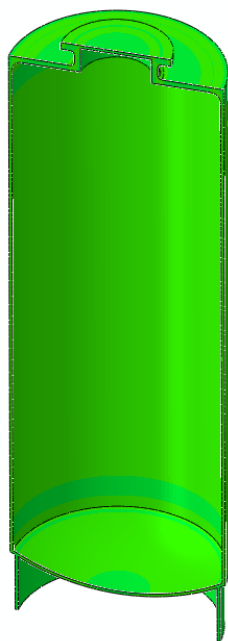
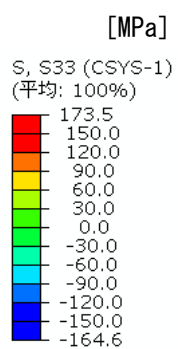
(c) 火災発生から 20 分



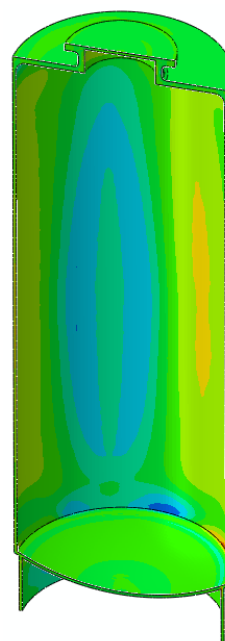
(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-11 応力解析結果 一周方向応力：キャニスタ外面側—

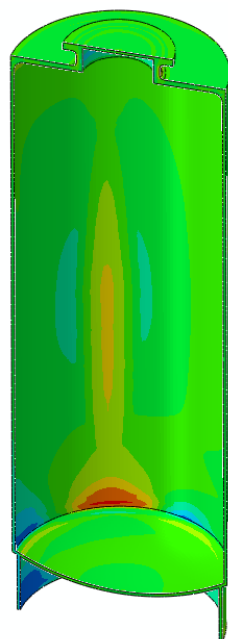
- ・ガラス/キャニスタ別体モデル
- ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



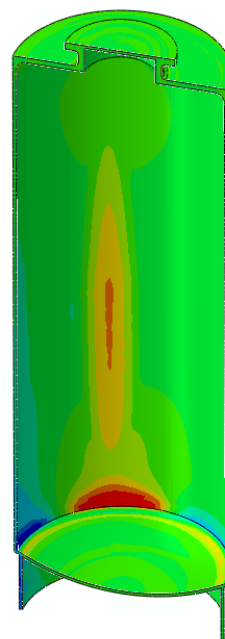
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



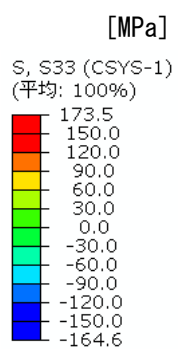
(c) 火災発生から 20 分



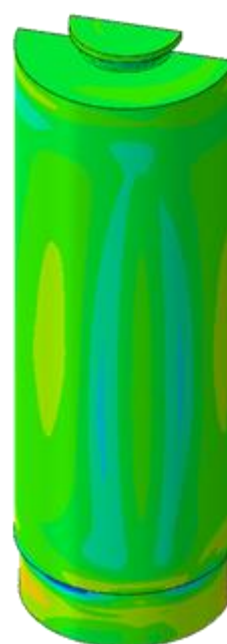
(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-12 応力解析結果 一軸方向応力：キャニスタ内面側一

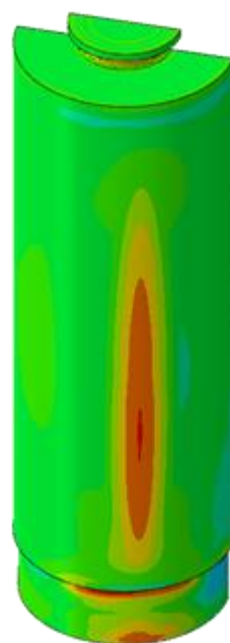
- ・ガラス/キャニスタ別体モデル
- ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



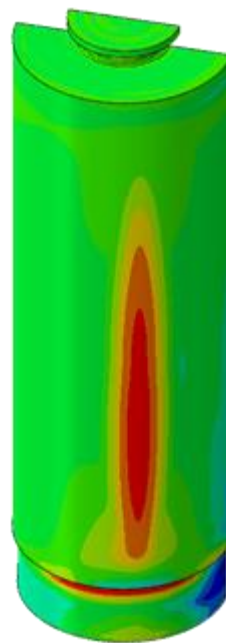
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



(c) 火災発生から 20 分



(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-13 応力解析結果 一軸方向応力：キャニスタ外面側一

- ・ガラス/キャニスタ別体モデル
- ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体

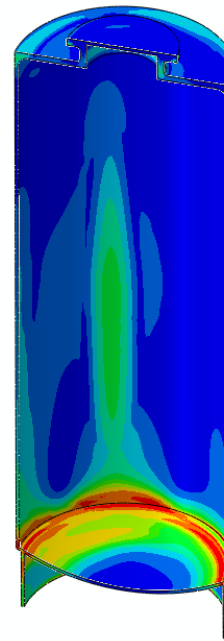
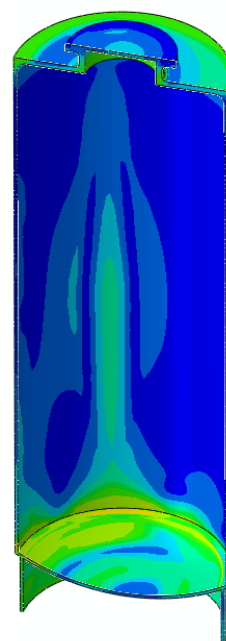
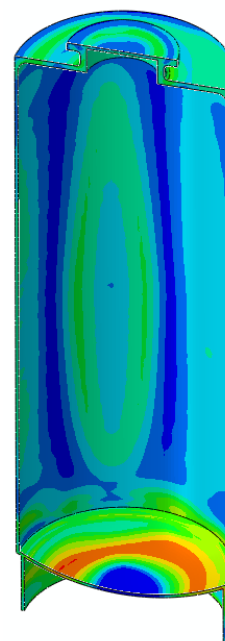
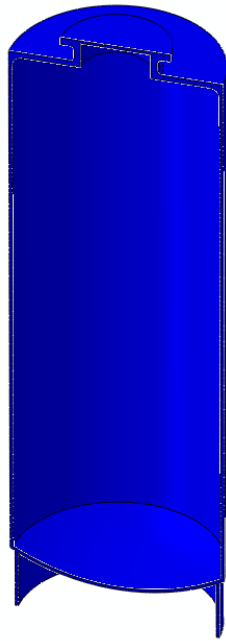
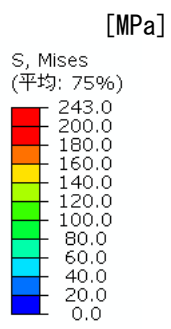


図 5.2.5-14 応力解析結果 —相当応力：キャニスタ内面側—
 ・ガラス/キャニスタ別体モデル
 ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体

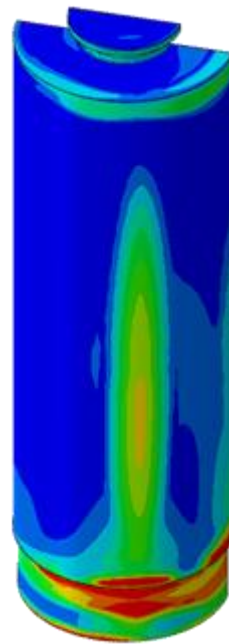
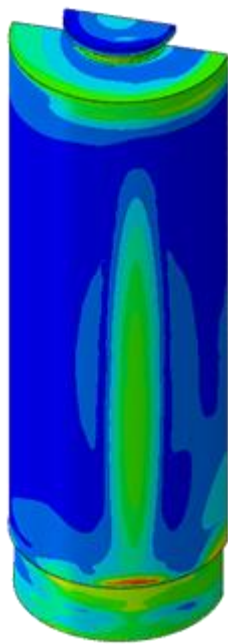
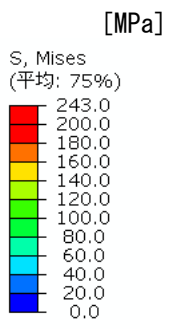
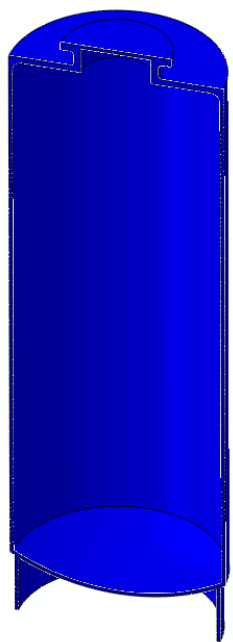
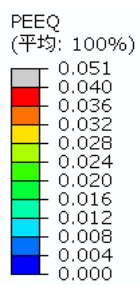
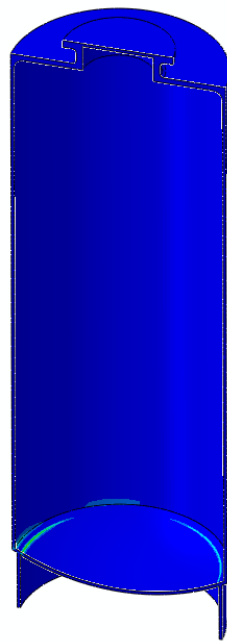


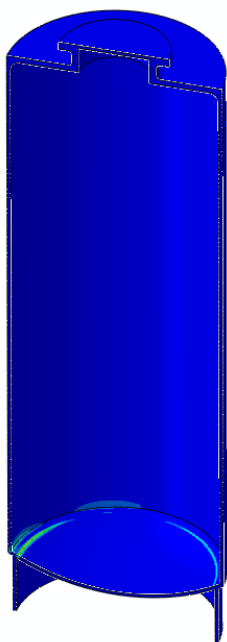
図 5.2.5-15 応力解析結果 —相当応力：キャニスタ外面側—
 ・ガラス/キャニスタ別体モデル
 ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



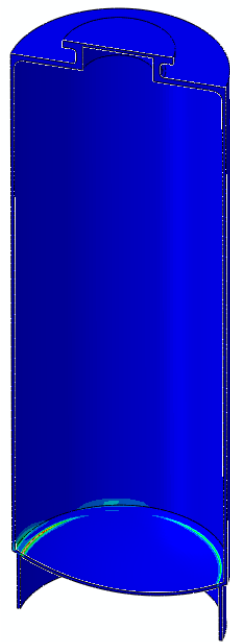
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

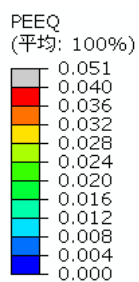


(c) 火災発生から 20 分



(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-16 応力解析結果 —相当塑性ひずみ：キャニスタ内面側—
 ・ガラス/キャニスタ別体モデル
 ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分



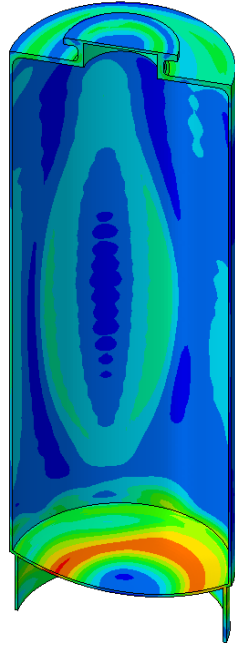
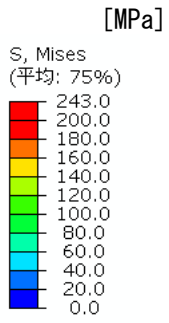
(c) 火災発生から 20 分



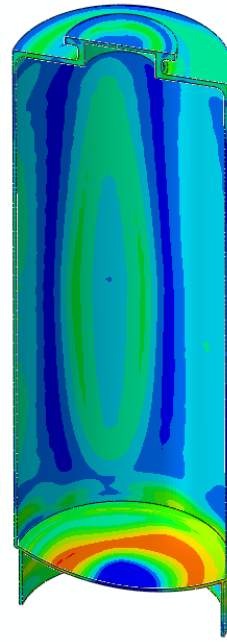
(d) 火災発生から 130 分

図 5.2.5-17 応力解析結果 —相当塑性ひずみ：キャニスタ外面側—

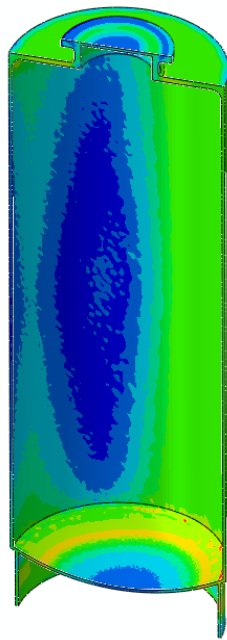
- ・ガラス/キャニスタ別体モデル
- ・ガス圧負荷領域：キャニスタ内面全体



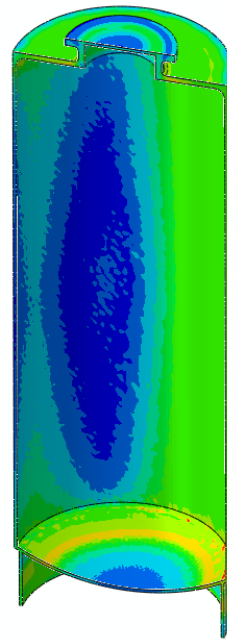
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

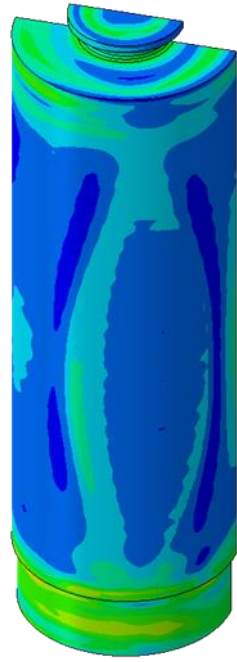
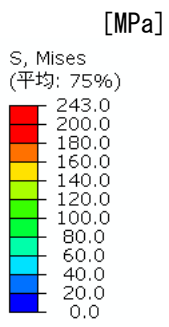


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>



(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

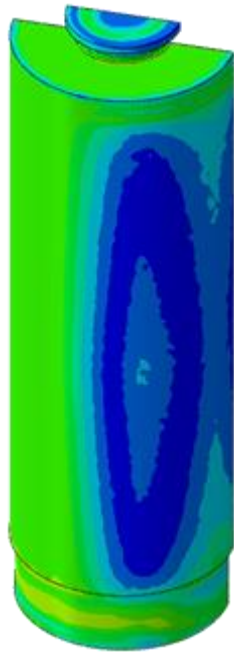
図 5.2.5-18 応力解析結果比較
 一火災発生から 6.7 分における相当応力：キャニスタ内面側一



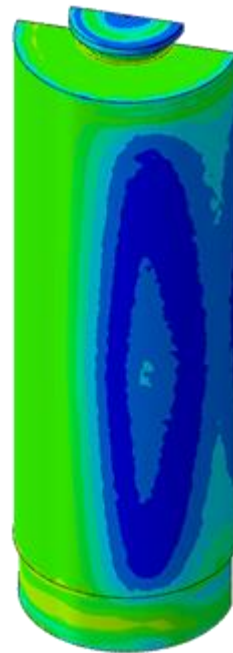
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

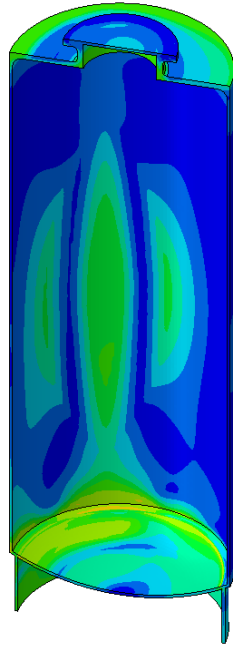
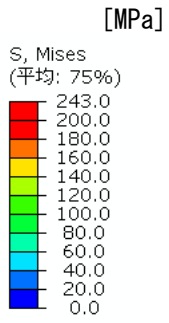


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

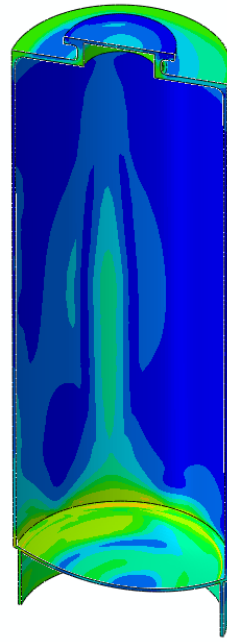


(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

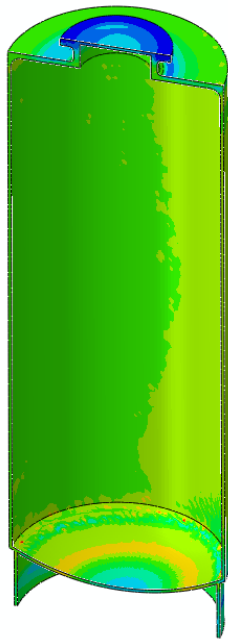
図 5.2.5-19 応力解析結果比較
 ー火災発生から 6.7 分における相当応力：キャニスタ外面側ー



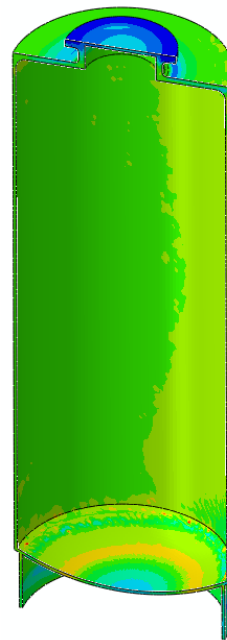
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

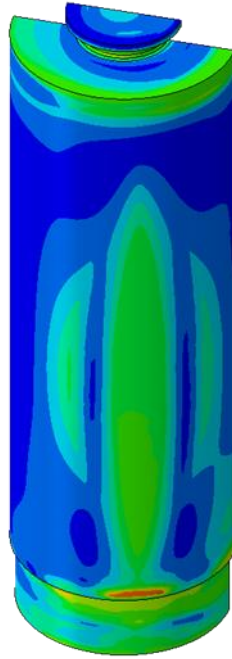
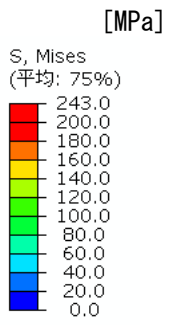


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

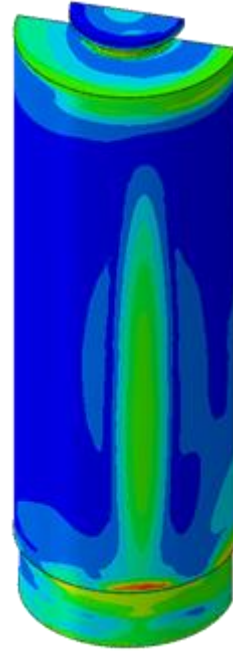


(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-20 応力解析結果比較
 —火災発生から 20 分における相当応力：キャニスタ内面側—



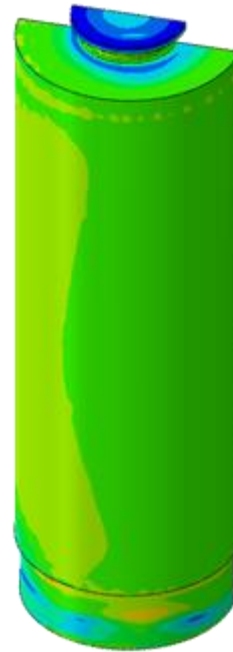
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

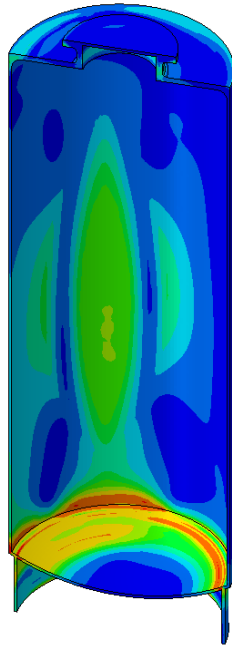
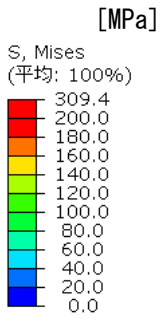


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

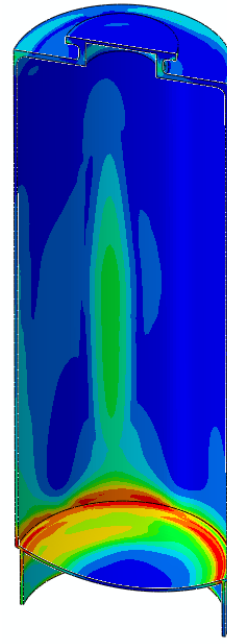


(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

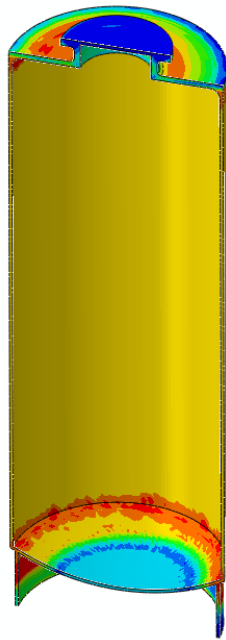
図 5.2.5-21 応力解析結果比較
 —火災発生から 20 分における相当応力：キャニスタ外面側—



(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

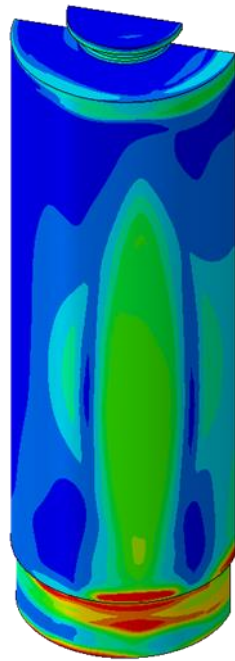
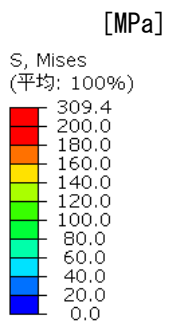


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

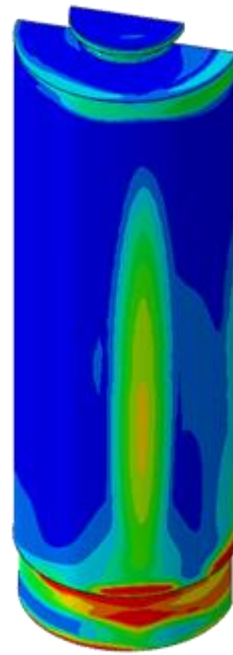


(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-22 応力解析結果比較
 ー火災発生から 130 分における相当応力：キャニスタ内面側ー



(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

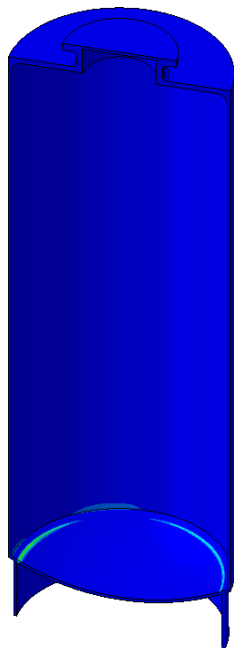
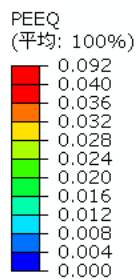


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

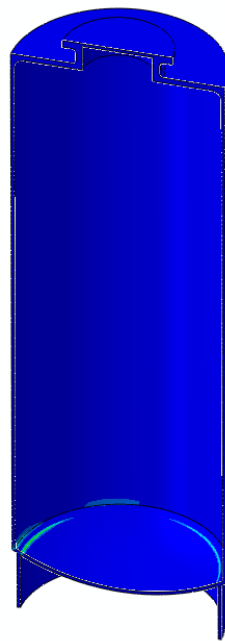


(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

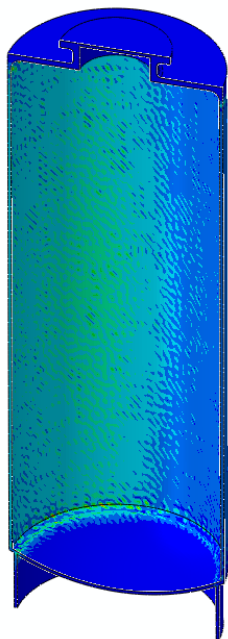
図 5.2.5-23 応力解析結果比較
 ー火災発生から 130 分における相当応力：キャニスタ外面側ー



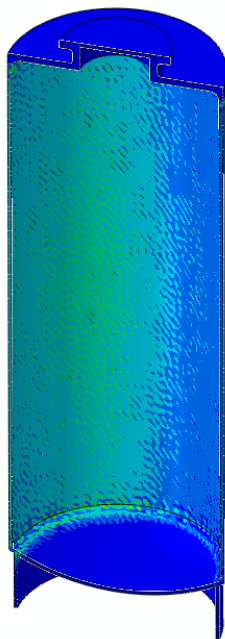
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>



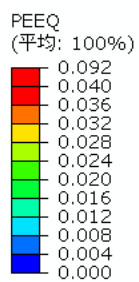
(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>



(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-24 応力解析結果比較

—火災発生から 6.7 分における相当塑性ひずみ：キャニスタ内面側—



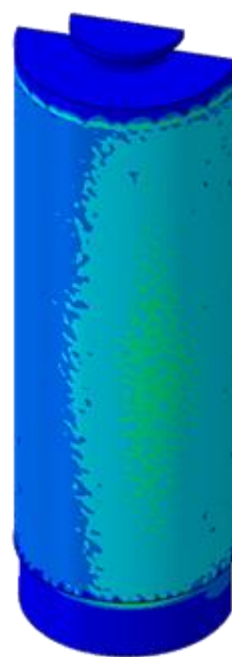
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>



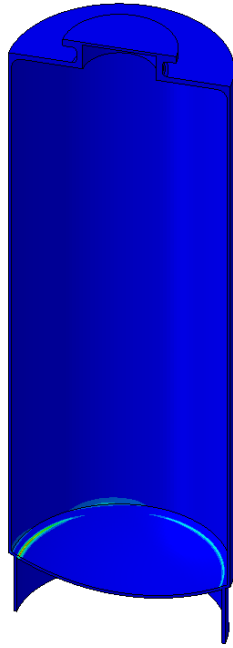
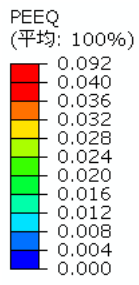
(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>



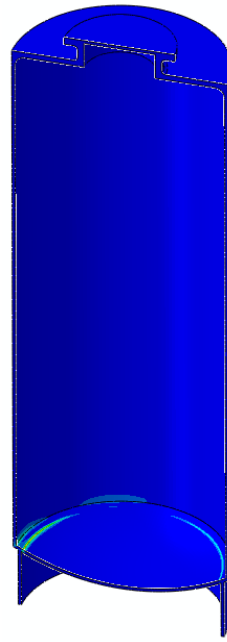
(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-25 応力解析結果比較

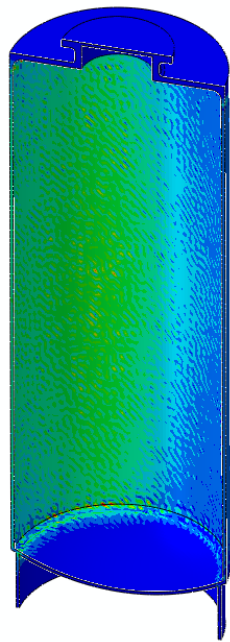
—火災発生から 6.7 分における相当塑性ひずみ：キャニスタ外面側—



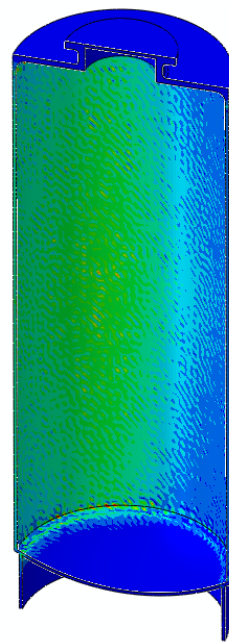
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>



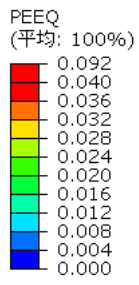
(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>



(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-26 応力解析結果比較

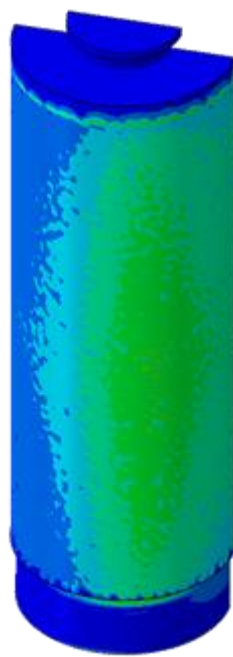
—火災発生から 20 分における相当塑性ひずみ：キャニスタ内面側—



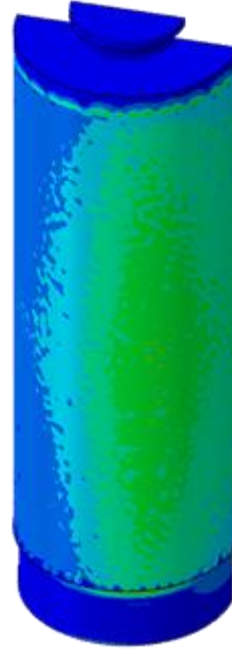
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>

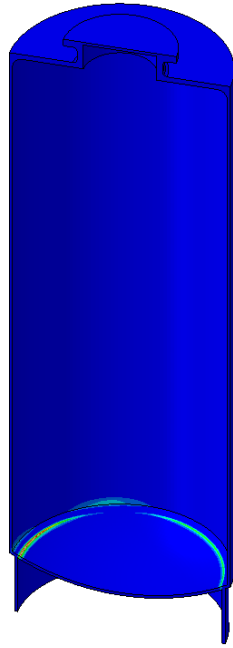
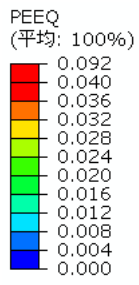


(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

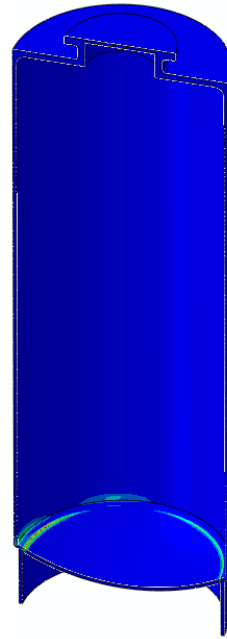


(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

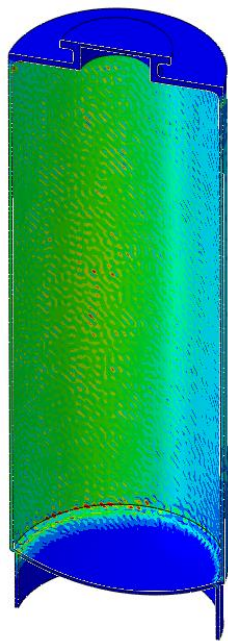
図 5.2.5-27 応力解析結果比較
 ー火災発生から 20 分における相当塑性ひずみ：キャニスタ外面側ー



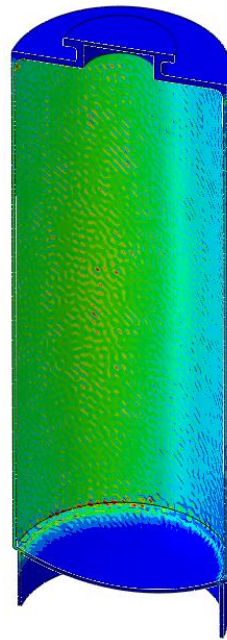
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>



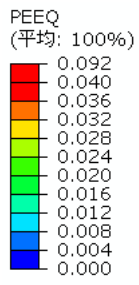
(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>



(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-28 応力解析結果比較

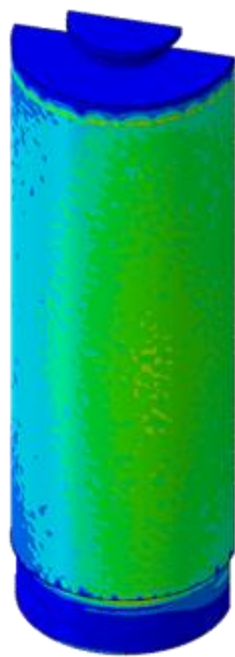
—火災発生から 130 分における相当塑性ひずみ：キャニスタ内面側—



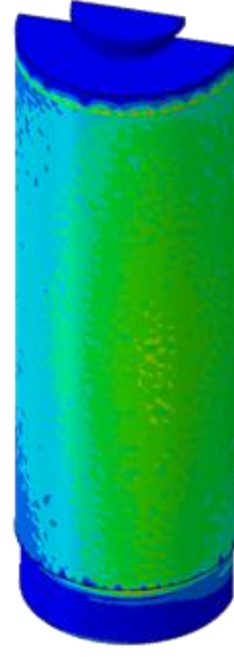
(a) ガス圧無し (H25 解析結果)
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(b) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 別体>



(c) ガス圧無し
 <ガラス・キャニスタ 一体化>



(d) ガス圧考慮
 <ガラス・キャニスタ 一体化>

図 5.2.5-29 応力解析結果比較
 一火災発生から 130 分における相当塑性ひずみ：キャニスタ外面側一

(6) 考察と今後の課題（伝熱解析／応力解析）

ガラス固化体容器を、①ガラスとキャニスタを別体としてモデルの場合と、②一体化したモデルの場合について応力解析を実施した結果を以下に示す。

①別体モデルによる応力解析

- ・火災による入熱によってスカート部が高温になり、スカート部が熱膨張して増径するような変形が生じるため、キャニスタ下部の曲面部において径方向の引張応力が生じる。
- ・スカート部が増径しようとする変形が生じることで、スカート付根部に塑性ひずみが生じ、その影響によってスカート付根近傍で高応力となる。
- ・火災発生の初期段階においてキャニスタ側面が局所的に高温になり（図 4.2.6-6(b)参照）、高温部で圧縮の塑性ひずみが入ることで、キャニスタの温度差が小さくなると当該部に軸方向の引張応力が生じる（図 5.2.5-6 (c)(d)参照）。
- ・キャニスタに火災による熱荷重だけが負荷されるケースと、熱荷重と内圧を負荷するケースを比較すると、相当応力で最大数十 MPa 程度の差が生じるものの、定性的な応力分布に変化は無いことがわかる。

②一体化モデルによる応力解析

- ・キャニスタとガラスの熱膨張差により、キャニスタの熱変形が拘束されてキャニスタとガラスの接触面全体に塑性ひずみが生じる。
- ・別体モデルと同様に、スカート部の変形が拘束されて近傍に塑性ひずみが生じ、スカート部付根に高応力となる。ただし、一体化モデルではキャニスタの変形がガラスに拘束されるため、スカート付根部近傍に生じる塑性ひずみの値は、別体モデルが 5%程度であるのに対し、一体化モデルでは 8%程度となる（それぞれ火災発生から 130 分での値）。
- ・キャニスタとガラスの熱膨張差により、キャニスタ上部のガラス上端位置において局所的な変形が生じて高応力となる。
- ・キャニスタに火災による熱荷重だけが負荷されるケースと、熱荷重と内圧を負荷するケースを比較すると、ガラス上端位置のキャニスタに生じる塑性ひずみは、いずれも 8.6%程度でほとんど差が無く、ガス圧荷重の有無による顕著な差は見られないことがわかる。

以下に今後の課題を示す。

- a) ガラスとキャニスタ界面における付着強度に関するデータが無く、実際のガラスとキャニスタの界面挙動を明らかにする必要がある。
- b) ガラス固化体キャニスタは局所的に 700°C程度にまで加熱され、クリープが生じる温度領域となるため、キャニスタの強度評価を行う場合、即時破断だけでなくクリープ破断についても検討を行う必要がある。
- c) 今回の解析で用いているガラスの強度データは、温度依存性を考慮していない。伝熱解析ではガラスの温度は局所的に 400°Cを超える領域もあり、ガラスの物性値の温度依存性を考慮する必要がある。

5.3 火災、津波に対する安全対策の検討

平成 25 年度、平成 26 年度の成果及び 4.2 節で実施する解析結果を踏まえ、火災や津波に対する人工バリアへの影響を防止・軽減する対策について整理・検討する。

5.3.1 火災に対する人工バリア対応策の検討

これまでに実施した人工バリアへの火災影響評価結果より、火災に対する人工バリア影響を防止・低減するための対応策を検討した。

(1) 地上施設の火災に対する人工バリア影響対応策の検討

平成 25 年度及び本年度に実施した、地上施設の火災に対する人工バリア影響評価解析結果より、地上施設で火災が発生した際の人工バリア影響防止・軽減対応策を検討した。

1) 解析結果を踏まえた人工バリアへの影響整理

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燃焼解析、伝熱・応力解析を行い、ガラス固化体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。

具体的には、設定した火災シナリオに基づいて燃焼解析を実施してガス温度時刻歴変化(図 5.3.1-1)を多直線近似して加熱曲線を求め、これを人工バリア(ガラス固化体単体またはオーバーパック)に与えて、伝熱解析、応力解析を実施した。

設定した条件の燃焼解析では、図 5.3.1-1 に示すようにガス温度は最高で 720℃まで上昇するが、酸素濃度不足による消炎で急激に下降することを確認した。

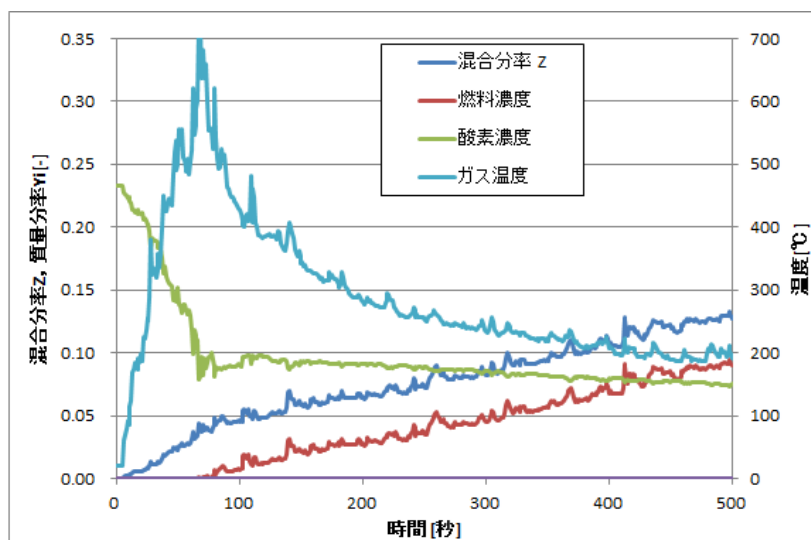


図 5.3.1-1 廃棄体の真上(天井 4 m 下)における温度分布

燃焼解析結果を踏まえ、以下の 4 ケースの人工バリアへの影響について確認した（表 5.3.1-1、表 5.3.1-2）。

- ・ 図 5.3.1-1 の温度分布に基づいた伝熱解析、応力解析（ケース 1）
- ・ 最高温度（720℃）が 15 分継続した場合の伝熱解析、応力解析（ケース 2）
- ・ 最高温度（720℃）が 30 分継続した場合の伝熱解析、応力解析（ケース 3）
- ・ 燃焼範囲を人工バリア周辺に限定し、壁付近に人工バリアを定置した場合の伝熱解析、応力解析（ケース 4）

表 5.3.1-1 解析結果（ケース 1、ケース 2、ケース 3）

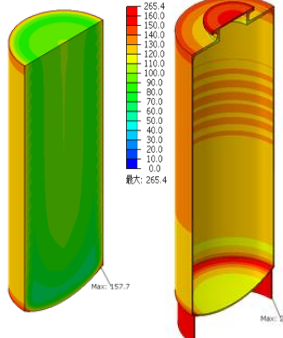
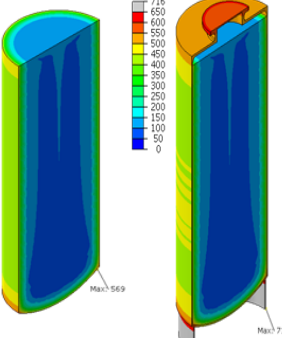
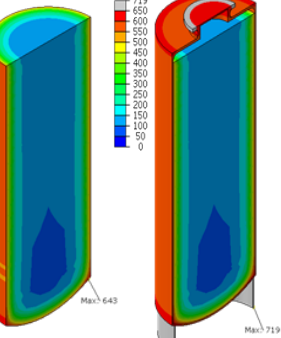
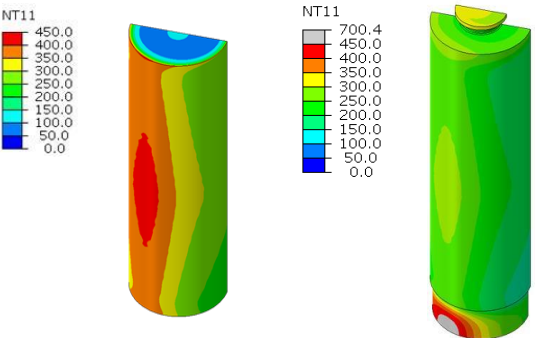
		温度分布に基づいた解析 (ケース1)		火災(720℃)を15分継続 (ケース2)		火災(720℃)を30分継続 (ケース3)	
		ガラス 固化体	キャニスタ	ガラス 固化体	キャニスタ	ガラス 固化体	キャニスタ
オーバーパックに 封入前	最高温度 (到達時間)	157.7℃ (8.6分)	265.4℃ (5.4分)	569℃ (16.1分)	716℃ (16.1分)	643℃ (31.1分)	719℃ (31.1分)
	塑性ひずみ	—	0.15%	—	1.9%	—	2.1%
	入熱分布						
オーバーパック に封入後	最高温度 (到達時間)	133.6℃ (120分)	105.0℃ (120分)	135.1℃ (135分)	130℃ (135分)	137.3℃ (150分)	158.0℃ (150分)
	オーバーパック 最高温度 (到達時間)	111.4℃ (2.3分)		441℃ (16.1分)		544.7℃ (31.1分)	

表 5.3.1-2 解析結果（ケース 4）

		キャニスタ付近のみで火災(ケース4)	
		ガラス 固化体	キャニスタ
オーバーパックに 封入前	最高温度 (到達時間)	450℃ (5.8分)	700.4℃ (6.7分)
	塑性ひずみ	—	5.30%
	入熱分布		
オーバーパック に封入後	最高温度 (到達時間)	134.1℃ (130分)	—
	オーバーパック 最高温度 (到達時間)	260℃ (2.3分)	

ケース1～ケース4の解析結果からガラスの転移温度 500℃を超えるものの、放射能漏えいに及ぶような状況は、確認できなかった。

伝熱解析の結果からは、最も過酷な条件は 720℃の最高温度を 30 分継続したケース 3 で、ガラス固化体が 643℃、キャニスタが 719℃となった。一方、オーバーパックに封入した状態では、火災入熱に対するオーバーパックの緩衝効果が大きく、キャニスタの最高温度は 160℃程度であり、ガラスの最高温度は 150℃以下であった。

応力解析（塑性ひずみ）の結果からは、ケース 4 のキャニスタのスカート付け根部において 5.3%発生することを確認した。これは、ケース 1～ケース 3 が 1 点の温度分布から応力解析しているのに対し、ケース 4 は 8 点の周方向の温度分布を用いて解析していることから、温度差が生じることに伴って応力差もより大きくなったと考えられる。つまり応力解析においては、対象物全体を温度上昇させるより、一部を温度上昇させて温度差を大きくする方が、より過酷な条件になると考えられる。

また、火災継続時間は酸素量、酸素消費率（燃焼範囲）等で大きく変わり、火災の継続時間はガラス固化体やオーバーパックの到達最高温度、応力状態に影響を与えること、人工バリアへの入熱はふく射が支配的であることを確認した。さらに、熱源（火炎）と評価対象物との相対位置関係は容器の応力分布に影響を与えることから、特にキャニスタやオーバーパックの応力評価を行う上で考慮すべき因子であることが解析によって確認した。

以上の結果を踏まえ、人工バリアへの入熱量を左右すると考えられる風速、燃焼範囲、火炎と人工バリアの相対位置をパラメータとする燃焼解析を今年度を実施した。

この結果、入熱量はふく射が支配的であることを再確認するとともに、燃焼範囲の面積（燃焼範囲の幅をパラメータとした）が大きくなると入熱量が増えることがわかった。しかし、燃焼範囲の面積が増えても評価対象の人工バリアとの相対位置や風向で入熱量が単純な増加傾向を示さないことも確認した。また、風速が増えると火炎の立ち上がり方や火炎と人工バリアとの相対関係が変化することから、全体的な傾向としては風速が速くなると入熱量が増えると言えるが、評価対象物が火炎に対してどの位置にあるかによって入熱量が影響を受けることを確認した。

また、キャニスタの閉じ込め性に影響を及ぼす応力分布因子のうち、キャニスタ内の内圧変化に着目し、キャニスタプレナム部の温度上昇と内圧の変化とを連成させた伝熱・応力解析を実施して人工バリアの火災影響解析を実施した。その結果、ガスの内圧による応力は、火災による熱荷重の応力の 1/10 程度と影響が軽微であることを確認した。

2) 人工バリアへの影響防止、軽減策の検討

前述のように、これまでの地上施設火災影響評価によって、人工バリアへの火災影響の因子は、酸素量、燃焼する燃料の種類・量・面積、風速、火災継続時間、火炎と評価対象物の相対位置関係などの火災環境因子と、人工バリア自体の因子すなわち鋼種、ガラス物性、寸法・構造、空気などの断熱層、キャニスタプレナム部の内圧等が挙げられることがわかっている。

このうち、キャニスタ鋼種、ガラス物性、寸法・構造、プレナム部の内圧等は、ガラス固化体として固定された仕様であることから、対策の対象から除外した。また、オーバーパック

の仕様については、主として処分後の長期性能要求に基づいて仕様を検討しており、結果的に耐火性能、ガラス固化体への火災影響緩和効果を有するが、積極的に火災対策を講じる対象物ではないと考える。

基本的な火災対策については、原子力関連施設で検討されている火災に対する安全設計の考え方が、地層処分場の地上施設にも適用可能である。例えば、再処理施設安全審査指針（最新改正：平成 22 年 12 月 20 日版より）[21]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。火災・爆発に関連する指針は、「指針 15. 火災・爆発に対する考慮」が対象となる。また、「指針 20. 準拠規格及び基準」では炉規制法等の原子力関連法令の他、建築基準法、消防法等、一般的な法令の遵守が求められており、再処理施設ではこれらの法令で定めている火災・爆発に関する条項が、申請内容に考慮されているかどうか安全審査の対象となる。再処理施設安全審査指針の指針 15 及びその解説について次ページに示す。

【再処理施設安全審査指針】

指針 15.火災・爆発に対する考慮

1. 再処理施設における安全上重要な施設は、可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。
2. 再処理施設において可燃性若しくは熱的に不安定な物質を使用するか又は生成する系統及び機器は、火災・爆発の発生を防止するため、着火源の排除、異常な温度上昇の防止対策、可燃性物質の漏洩防止対策、混入防止対策等適切な対策が講じられる設計であるとともに、適切な熱及び化学的制限値が設けられていること。
3. 火災の拡大を防止するために、適切な検知、警報系統及び消火設備が設けられているとともに、火災による影響の軽減のために適切な対策が講じられる設計であること。
4. 火災・爆発の発生を想定しても、閉じ込めの機能が適切に維持できる設計であること。

【再処理施設安全審査指針】（解説）

指針 15.火災・爆発に対する考慮

1. 「不燃性」とは、火災により燃焼しない性質をいう。
2. 「難燃性」とは、火災により著しい燃焼をせず、また加熱源を除去した場合はその燃焼部が広がらない性質をいう。
3. 火災の発生防止、火災の検知及び消火並びに火災による影響の軽減対策については、本指針の規定によるほか、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」を参考とすること。

再処理施設安全審査指針の解説では、3 項に示す火災の発生防止、火災の検知及び消火並びに火災による影響の軽減対策について、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」[22]を参考とするよう記載している。

ここで、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」は、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」[23]の中で示される火災に対して設計上考慮すべき内容を受け、原子炉施設の安全機能維持の観点から、火災防護に関して考慮すべき事項をとりまとめたものである。

指針内容を次ページに記載する。

【発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針】

(最新改正：平成19年12月27日版より)

1.火災発生防止

- 1-1 原子炉施設の設計にあたり、通常運転時（停止時を含む。）はもとより異常状態においても火災の発生を防止するための予防措置を講じること。
- 1-2 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。
- 1-3 原子炉施設内の構築物、系統及び機器は、落雷、地震等の自然現象により火災を生ずることがないように防護した設計であること。

2.火災検知及び消火

- 2-1 火災検出装置及び消火装置の設計にあたり、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する火災の悪影響を限定し、早期消火を行えるための措置を講じること。
- 2-2 火災検出装置及び消火装置の設計にあたり、地震等の自然現象によっても、その性能が著しく阻害されることがないように措置を講じること。
- 2-3 消火装置は、その破損、誤動作又は誤操作によって安全機能を有する構築物、系統及び機器の安全機能を失わない設計であること。

3.火災の影響の軽減

- 3-1 安全機能を有する構築物、系統及び機器を含む区域は、それらの重要度に応じ、隣接区域の火災による影響も含めて火災の影響の軽減対策を講じること。
- 3-2 原子炉施設内のいかなる場所の想定される火災に対しても、この火災により原子炉に外乱が及び、かつ、安全保護系、原子炉停止系の作動を要求される場合には、単一故障を仮定しても、原子炉を高温停止できる設計であること。
低温停止に必要な系統は、原子炉施設内のいかなる場所の想定される火災によっても、その機能を失わない設計であること。

再処理施設の安全審査指針は、「新規制基準（設計基準）骨子案（使用済燃料再処理施設）」[24]でその内容が見直しされている。この骨子案をもとに、「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」[25]が制定された。また、廃棄物管理施設についても、「廃棄物管理施設の新規制基準骨子案」[26]が作成された。新規制基準における火災・爆発に関する事項は、「2.(6)火災・爆発に対する設計上の考慮」であり、これは再処理指針の「指針 15 火災・爆発に対する考慮」に相当する。再処理施設の新規制基準は、基本的に発電炉の新基準案の考え方にに基づき再処理施設の特徴を踏まえて策定されているが、火災・爆発については発電炉の新基準案と再処理指針との間に考え方の相違はなく、再処理指針の考え方を基本としている。

なお、火災の評価については発電炉において定められる火災の評価ガイドを、再処理施設においても当面は参考として利用することとされている[24][27]。

新規に制定された原子力発電所の火災影響評価ガイドは、以下の二つであり、①火災区域／火災区画の設定、②情報及びデータの収集、整理、③スクリーニング、④火災伝播評価の実施手順で定めている。

- ・原子力発電所の外部火災影響評価ガイド[28]
- ・原子力発電所の内部火災影響評価ガイド[29]

以上のように、原子力関連施設で準拠している関連法令、指針、評価ガイドラインでは火災・爆発に係る安全対策要求事項が整理されている。また、廃棄物管理施設等の事業許可申請書では、法令等に定められる安全要求事項に基づいた火災・爆発の安全対策が示されている。原子力関連施設の火災・爆発事象については、建築基準法、消防法等の一般法令と原子炉等規制法等の原子力関連法令・指針の双方の規定に従って設計、評価及び対策がなされている。具体的には、一般的な防火・消火の考え方（①火災発生の防止、②検知及び消火、③影響の軽減）と、原子力関連施設特有の考え方（火災発生時の安全上重要な機器類の機能確保、放射性物質の建屋内拡散の低減、建屋外拡散の防止など）を同時に満足するよう、各原子力施設固有の安全上配慮すべき事象や機器機能を踏まえた対策がとられている。

地層処分施設も原子炉等規制法の規制対象となる原子力関連施設であることから、安全審査に向けて、既存の原子力関連施設の火災・爆発対策を参考にしつつ、それらとは異なる処分施設固有の特性を考慮した設計検討を行う必要がある。

地上施設における処分施設固有の特性としては、ガラス固化体を内包した状態でのオーバーパックの密封溶接工程があるため、溶接工程で想定される火災対策を検討する必要がある。「原子力発電所における火災の発生防止対策の充実に関する報告書」（原子力防災小委員会火災防護ワーキンググループ、平成 21 年 8 月）[30]によれば、平成 12 年以降平成 21 年 6 月末までに発生した火災発生時の状況は 44%が作業中で、その 59%が溶接等作業であると報告されている。溶接工程は処分場の地上施設に必須の工程であるから、着火エネルギーとしての溶接エネルギーの排除対策は取れない為、使用機器・ケーブル類の不燃・難燃化や可燃

物の排除、電気系統の防火設計等で火災の発生を防止することが必要である。

表 5.3.1-3 に地上施設における火災の影響防止、軽減策を示す。

表 5.3.1-3 人工バリアへの影響防止、軽減策（地上施設）

	対 応 策
火災発生防止	・可燃性物質の使用を避ける、使用する場合の着火源の排除、可燃性物質漏えい（流入）防止対策等
火災検知及び消火	・火災検知器、消火設備の設置 ・防火区画設定や防火ダンパ等による燃焼に必要な酸素の供給停止策 ・空調換気システムの制御により負圧等を維持することで放射性物質の漏洩防止策
火災の影響の軽減	・ガラス固化体単体での取扱い工程を削減し、オーバーパックに封入策

人工バリアの災害影響確認では、燃焼範囲が入熱に影響を与え、かつ酸素量が火災の継続時間に大きく影響することがわかっている。このことから、防火・消火の基本的考え方の「火災発生防止」において、対策としては可燃性物質の使用を避ける、使用する場合の着火源の排除、可燃性物質漏えい（流入）防止対策等、既施設と同様な対策が有効であると考えられる。また酸素量の抑制は早期消火につながることから、基本的考え方「火災検知及び消火」の対策として防火区画設定や防火ダンパ等によって燃焼に必要な酸素の供給を断ち、かつセル空調換気システムの制御によりセル内の負圧を維持することで万一人工バリアの閉じ込め性が失われたとしても放射性物質の外部への漏洩を防止する対策が必要である。解析では酸素不足によって自然鎮火に至る火災シナリオにおいて、ガラス固化体キャニスタの応力的には最高温度到達時よりも温度低下後に厳しい状態になることがわかっている。このことから、容器の閉じ込め性を考慮した消火方法の選定も重要であり、急冷するような消火方法は適切ではない可能性がある。なお、ガラス固化体の火災影響軽減材としてオーバーパックは非常に大きな緩衝機能を有することから、施設運用上の対策としては出来るだけガラス固化体単体での取扱い工程を削減し、オーバーパック内部に収納することが有効と考える。

3) 課題（制約事項の整理）

地上施設における人工バリアへの火災影響防止・軽減対策は、前述のように既存の原子力関連施設の防火・消火設計の考え方の応用で対応できると考えられる。消火対策の1つである酸素の供給を断つことについては、事前に作業員がいないことを確認する必要がある。実施地層処分場の地上施設の特徴は、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体を取り扱う工程に溶接工程が含まれることである。今後設計が進んだ段階で、原子力施設としての一般的な防火・消火対策のみならず、選定された溶接手法・溶接機に対する火災対策の検討が必要

である。

一方、人工バリアへの火災影響確認手法については原子力施設の安全評価にも使われている汎用解析コードを用いているものの、設定した条件（建物の構造、材質、村法、火災燃料、風速など）には、不確定事象があるため詳細が決まり次第、再度解析を行う必要がある。

また、放射線漏えいの観点から解析、安全対策の検討を行っているが、ガラスの転移温度の防止の観点からの場合は、火災（700度以上）が15分以上継続しない対策が必要となる。

(2) 地下施設の火災に対する人工バリア影響対応策の検討

平成26年度に実施した、地下施設の火災に対する人工バリア影響評価解析結果より、地下施設で火災が発生した際の人工バリア影響防止・軽減対応策を検討する。

1) 解析結果を踏まえた人工バリアへの影響整理

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燃焼解析、伝熱・応力解析を行い、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材の温度履歴やオーバーパック応力履歴のデータを取得した。

燃焼解析では風速をパラメータとしたが、風速によって燃焼ガスの広がり方が変わるため、評価対象と高温の燃焼ガスの相対関係も変化する。設定した条件の燃焼解析では、風速2m/sで最大発熱量80MW、0.5m/sでは50MWだがその継続時間は風速が遅い方が長くなり、約800秒間継続した。地下施設の燃焼解析で風速が速いケースでは、発熱量の時刻歴を見ると200～1000秒の間で発熱量が大きく変動した。この原因は平成25年度の地上施設での解析と同様に、大量な燃料に対して局所的な酸素濃度が足りず、燃料が反応せず計算領域から流出してしまい、逆に燃料の放出量が減ると反応に十分な酸素が供給される状態に戻り、反応が進んで発熱量が上がると考えられる。また、ガスの広がり方は風速が速いケースでは処分坑道全断面に広がり大きく坑道下流側に流れる一方、風速が遅いケースでは、ガスの気流が乱れ燃料側に可燃ガスの逆流が生じることから燃料近傍での温度が上昇する。

上記火災条件で緩衝材を完全に施工した状態でのオーバーパックの温度上昇開始時間を計算した結果、仮定した熱流束（100kW/m²）が48時間続いても、緩衝材中のオーバーパック上端面の温度は30℃のままであった。燃焼解析結果より、風速が速いケースでの火災は約40分で消えることから、緩衝材の火災緩衝効果は非常に大きく、緩衝材中のオーバーパックは火災の影響を受けないと判断できる。

また、オーバーパックが露出した状態での伝熱解析より、風速が速いケースではオーバーパックの蓋上部（吊り部）が局所的に1,000℃超となる部位が見られた。一方、オーバーパック胴部の温度は上部近傍を除くと200℃以下となり、ガラスの温度上昇は約1.5℃に留まった。

応力解析では、火災による入熱過程では温度分布に伴って生じる熱応力がオーバーパック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。平成25年度の解析ではオーバーパック蓋部の溶接残留応力

を初期応力として導入しており、溶接ルート部に 422MPa 程度の等価応力が生じた状態を初期状態としている。従って火災前に蓋部に大きな周方向引張応力が生じているが、火災の入熱で蓋外周部が熱膨張し、溶接ルート部の周方向引張応力が大きくなり、等価応力が 438MPa まで上昇することがわかった。

上記のように、平成 26 年度の地下施設解析の火災条件では、最大発熱量は風速の影響を受け、その継続時間は約 15 分、火災の継続時間は設定したモデルでは約 40 分であった。消炎理由は、燃料の量と供給酸素量とのバランスで決まることが解析によっても明らかになった。

地下施設ではガラス固化体はオーバーパックに収納された状態であるため、ガラス固化体への火災影響は僅かでありガラスおよびキャニスタの閉じ込め性は確保されると判断される。オーバーパックが直接火災影響を受ける解析ケースでは、オーバーパックが局所的に 1,000℃ を超える他、応力的には初期溶接残留応力の溶接ルート部の等価応力が火災によって上昇する結果となった。

また、緩衝材の火災緩衝効果は非常に大きく、緩衝材中のオーバーパックは火災の影響を受けないと考えられる。

2) 人工バリアへの影響防止、軽減策の検討

地下施設においては、オーバーパックに封入された状態で搬送、定置作業が進められるため、封入前の地上施設よりは、過年度の解析結果からも影響が小さいことを確認した。人工バリアへの影響防止、軽減策については、4 に示す地上施設と同様の考え方を適用することが可能と考えられる。一方、地下施設の特徴として、地下 300m 以深の施設であり、複数の坑道群が存在することから、類似する施設として 3.3.1 で整理した鉱山、トンネルに関する法令等の安全対策が参考になると考える。

表 5.3.1-4 人工バリアへの影響防止、軽減策（地下施設）

	対 応 策
火災発生防止	・可燃性物質の使用を避ける、使用する場合の着火源の排除、可燃性物質漏えい（流入）防止対策等
火災検知及び消火	・火災検知器、消火設備の設置 ・防火区画設定や防火扉、風門等による燃焼に必要な酸素の供給停止策
火災の影響の軽減	・オーバーパック単体での取り扱いを削減し、緩衝材の火災干渉効果を利用

3) 課題（制約事項の整理）

地層処分場の地下施設における人工バリアへの火災影響防止・低減対策を検討するにあたっては、国内には地下の原子力関連施設が無いことから、既存の原子力関連施設での原子炉等規制法と関連法規（建築基準法、消防法等）だけではなく、鉱山保安法や労働安全衛生法、道路法、消防法等の安全確保の考え方や対策を参考に、放射性物質を取り扱う地下施設としてのハザードとリスクを定義して、火災安全対策の検討を行う必要がある。一方、海外の施設の火災安全対策や事故事例に学ぶことは、大変重要と考える。地下の原子力関連施設としては、米国の TRU 廃棄物処分場（WIPP）、ドイツのモルスレーベン処分場、スウェーデンの使用済燃料地下貯蔵施設（CLAB）、フィンランドの中レベル廃棄物処分場等がある。

米国の TRU 廃棄物地下処分場（廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP））では、2014年2月に地下で火災事故を起こしており、火災の原因は母岩である岩塩の運搬車両からの出火によるものであった。この時の事故調査報告書が DOE[31]から発行されており、火災した運搬車両（図 5.3.1-2）、火災発生個所、対応状況、火災対策とそれらが適切に機能したかどうか、また課題等についてまとめられている。また、今回の火災事故を踏まえてどのような対策が実施されるのかも注視する必要がある。



図 5.3.1-2 WIPP 火災発生車両[31]

地下施設の火災対策検討においては、動線計画、換気空調設計と配置設計（管理区域や防火区画等のゾーニング）を地下の長大なエリアにおいて最適設計することが重要である。本検討において実施した人工バリアの状態確認の結果から、地上施設に比べて放射能漏えいの可能性は極めて小さいが、検討は必要である。また、解析検討では燃料の種類で発熱量が変わることを課題としており、地下で使用する装置の燃料は難燃性だけでなく、人工バリアへの影響低減の観点からも適切に選定するべきである。

5.3.2 津波に対する人工バリア対応策の検討

平成 25 年度の文献調査、平成 26 年度の解析検討結果から導き出せる範囲において、津波に対する人工バリア対応策について検討した。

(1) 調査検討結果を踏まえた人工バリアへの影響整理

平成 25 年度には、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文献調査を実施した。地層処分施設におけるガラス固化体キャニスタ（ステンレス鋼製）の過酷な塩分環境条件における腐食性について、塩分の影響を想定したキャニスタの腐食性、および放射性物質を内包した条件での腐食性（水の放射線分解の影響）について調査した。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、ガラス固化体のステンレス鋼製キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に晒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、津波被害を想定した過酷な塩分環境条件におけるキャニスタ腐食性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられた。

津波によるガラス固化体キャニスタの腐食性に関して、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。

平成 26 年度は、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を優先課題とした検討を実施した。すなわち、崩壊熱による腐食環境（温度）条件について解析により評価を行い、熱的には SCC が発生する腐食環境が成立し得ることを確認した。解析で評価した環境に対し、キャニスタの SCC 発生までの寿命を予備的に評価した。その結果、キャニスタの鋭敏化度等の条件に応じて、SCC 発生時間は 400hr(0.5 か月)～43000hr(5 年)と見積もられた。

キャニスタの肉厚は 5～6mm であることから、SCC が発生した時点でキャニスタの閉じ込め機能が失われると考えた。従って、過年度の評価の範囲においては津波に浸漬したガラス固化体のキャニスタの閉じ込め性は、塩水影響のみでも早い場合は 0.5 か月で失われると考えられる。

(2) 人工バリアへの影響防止、軽減策の検討

平成 26 年度の評価において、津波によるキャニスタ SCC 発生寿命の影響因子は、キャニスタ鋼種、キャニスタの鋭敏化度、温度、海水浸漬状態、塩分濃度などである。このうち、キャニスタ鋼種、鋭敏化度、温度（固化ガラスの崩壊熱による）については、ガラス固化体として固定された仕様であることから、対策を講じることはできない。一方、セル内の冷却換気を維持することができれば、影響因子の温度上昇を抑え、発生寿命を遅らせることが可能かもしれない。

深層防護の第1層としての最も効果的な対策は、津波の流入を防止するための対策である。これについては、原子力発電所等で検討されている津波対策が、地層処分施設にも適用可能と考えられる。

また、万が一津波の流入を許してしまった場合は、SCC発生寿命前（例えば0.5か月以内）にガラス固化体を回収し、洗浄・乾燥等の適切な処置を行うことが出来れば閉じ込め性を維持することが出来る。

(3) 課題（制約事項）の整理

平成26年度の検討では、塩分によるSCC発生についてのみ評価している。実際は、これに放射線影響を加えてSCC発生寿命を評価する必要がある。

また、水の放射線分解による水素ガス発生はキャニスタの閉じ込め性だけでなく、爆発事象にも影響することから、ガラス固化体の海水浸漬環境におけるガス発生量の予測評価も重要な課題である。

5.4 試験項目の検討および試験計画の作成

試験計画の検討では、平成 25 年度、平成 26 年度の解析結果及び、平成 24 年度に検討した試験優先度の考え方や施設計画技術、状況修復技術、状況・把握監視技術など他の技術課題との関連性を踏まえた上で、平成 28 年度以降に取得すべきデータの試験計画を作成する。

5.4.1 津波腐食評価に必要なデータ取得の検討

(1) 試験項目の検討

地上施設が津波被災した環境を海洋性湿潤大気環境、保温材下腐食環境、コンクリートキャスクの自然空冷保管環境と比較して模式的に図 5.4.1-1 に示す。

- (a) 海洋性湿潤大気環境では、日射、降雨、および、潮風の影響を受け、潮風から海塩の供給を受け海塩が金属表面に付着する一方、降雨によって付着海塩が洗い流される。したがって、シェルターなどによって付着海塩が洗い流されずに蓄積する方が厳しい腐食環境となり得る。
- (b) 化学プラントなど高温の内部流体が流れる配管などの保温のために巻かれる保温材の下では内部流体によって金属表面が加熱される一方、保温材の中に雨水などが染み込む。染み込んだ雨水の蒸発の抑制や濃縮によって、高温の濃厚塩化物を含む薄い水膜が生成して、いわゆる保温材下腐食 (CUI, Corrosion Under Insulation) を起こす可能性があり、炭素鋼製配管の腐食速度が低濃度の塩化物水溶液環境よりも大きくなることが知られている。
- (c) コンクリートキャスクの自然空冷保管はコンクリート製の筒状の胴内に空気の流路を確保して、放射線分解により内部加熱される金属製収納容器が置かれ自然通風によって冷却する構造である。必要に応じて金属製収納容器として用いられるステンレス鋼の耐食性を高くするなどの対策が検討されている。
- (d) ガラス固化体キャニスタ処分地上施設の津波被災状況の例では、平成 26 年度までに検討したように、断熱壁の中に置かれた、内部加熱・放射源を有するガラス固化体キャニスタが津波の被災によって海水に半浸漬状態に置かれ、上部は熱容量の大きな非加熱の空気により覆われている。

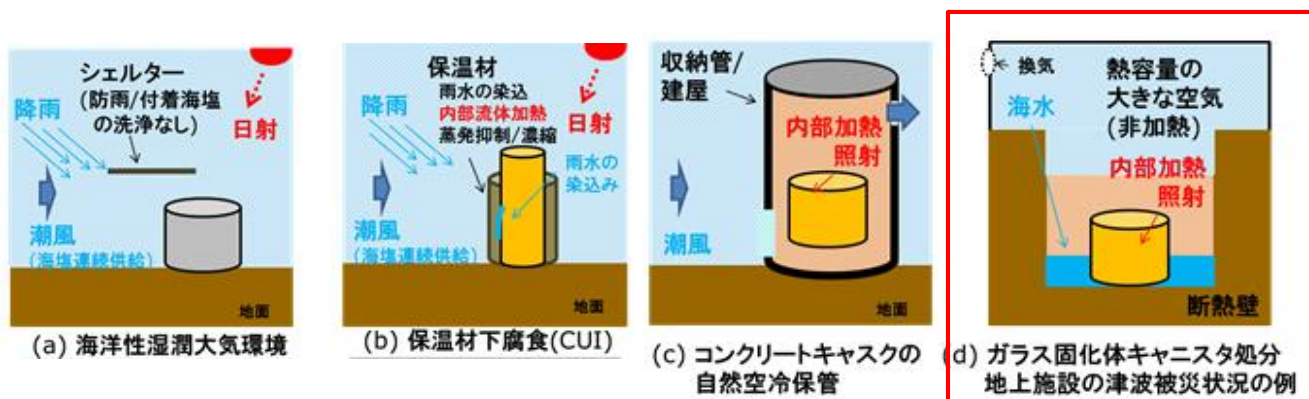


図 5.4.1-1 地上施設における津波被害を想定した人工バリアの環境条件 (赤枠)

津波の被害を受けた場合、海水の浸漬または海洋性湿潤大気環境になり、海水は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。海水の浸漬、および海洋性湿潤大気環境下でのステンレス鋼は、孔食、すきま腐食感受性を示し、材料、環境、応力の 3 条件が整った場合には、応力腐食割れ (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、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。また、海水は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い。平成 26 年度の解析結果においても、没水部(海水中)では 300hr 後に 60℃、600hr 後に 70℃に到達するが、非没水部(大気中)では 700hr 後に 60℃に到達し、その後の温度上昇も遅いことを確認した。

したがって、海水水没部での SCC 発生寿命で評価することが保守側の評価であると考え。解析におけるガラス固化体の最高温部(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 400hr 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 2,000hr、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 14,000hr 程度であった (表 5.4.1-1)。

表 5.4.1-1 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
(平成 26 年度成果)

	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

また、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十～200hr で SCC が発生する可能性がある。

調査した文献のデータは、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、津波による腐食の検討を行うためには、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以下の、試験を実施した上で評価するべきと考える。

- ①塩水 SCC 感受性評価試験計画
- ②放射線影響 SCC 感受性評価試験計画

また、試験を実施するにあたっての SCC 発生要因である材料、環境、応力の留意事項を以下に示す。

1) 材料

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。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、耐食性が 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、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の回避のために調査・検討されたものが大部分で、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(使用済み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て、その一部が公開されている。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ものの、報告例は SUS304 と比較して少ない。また、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と考える。化学組成、特に、分析例表 5.4.1-2 に示す導入当時の 1990 年代前後の化学組成[32]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。

表 5.4.1-2 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

2) 環境因子

環境は、定常運用時、地震・火災時、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)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

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。また、建設時を含め、付着海塩などの腐食性物質の持込もない、清浄表面である。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。

b. 地震・火災時

そのもので腐食環境が変化することはないが、配管の破損、火災時の消火栓からの放水などによって浸水し、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、空調建屋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

海水、および、海底の底土が持ち込まれる。河川には栄養物質が豊富に含まれることから、河川水が混入すると生物活性が高くなる。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、当面の間は、ガラス固化体キャニスタ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。

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>>大気温度”であれば、その間は、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。一方、公表データの多くは“表面温度=大気温度”の恒温恒湿槽での実験室試験に基づくものであるから、過度に保守的な評価となる可能性がある。

表 5.4.1-3 に文献調査に基づいた環境の課題について示す。

表 5.4.1-3 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	<ul style="list-style-type: none"> 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空く、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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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/m²[NaCl]でASCC感受性を示す 	<ul style="list-style-type: none"> ステンレス鋼の可成用は第一義的には“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	発錆 孔食 SCC/ ASCC (湿潤大気 SCC)	<ul style="list-style-type: none"> 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く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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> H₂Oの放射線分解でH₂O₂、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) 	<ul style="list-style-type: none"> H₂O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	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 金属表面の温度の時系列データが明確ではない

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危惧がある。

(2) 試験計画の作成

1) 材料評価マトリックス

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 5.4.1-4 に示す。材料は返還廃棄物材料の、SUH309、SUS309S、国内処理材の SUS304L、および、比較材の SUS304 とする。ガラス固化体の製造過程で生じる加工履歴を模して、冷間加工、溶接、および、溶接を(加速)模擬した熱処理を施し、組織観察、鋭敏化度、および、粒界腐食感受性を評価する。

SCC 感受性評価試験に供する供試材、冷間加工、溶接による材料評価マトリックスは、材料：4、冷間加工：3、溶接/熱処理：5 の、4×3×5 の 60 通りの組み合わせを例示しているが、これらの中から優先度を設けて供試材を絞り込む。

表 5.4.1-4 SCC 感受性評価試験の供試材等による材料評価マトリックス(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(気液界面を模した半浸漬試験を含む)

温度解析の結果、固化体 B が 1/2 高さまで海水に浸漬したときの気液界面(1/2 高さ)での温度は 50°C/100hr、60°C/300hr、70°C/600hr のペースで上昇し、SCC 発生寿命予測モデルに基づいた解析をした結果、SCC 発生寿命は鋭敏化の程度に依存して、400hr から 14000hr 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。しかしながら、特に、SUH309/SUS309S に対しては、これらの想定環境での SCC 感受性を評価した公開データがない。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

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、2,000hr(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°C/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。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°C)に加熱したものを、所与の温・湿度(例えば 40°C、90%R.H.)に制御した恒温恒湿槽内に設置して、試験に供する。

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、定荷重試験に供する。定荷重試験は定量的では在るが、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。

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 5.4.1-4 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 通りの組み合わせを例示しているが、これらの中から優先度を設けて供試材を絞り込み、表 5.4.1-5 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 5.4.1-5 塩水 SCC 感受性試験マトリックス(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/-	◎	○	◎	△	△
			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 hr 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、より、実験上の制約条件と合わせて、試験要領を詳細に検討する必要がある。

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[33]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°C 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であり、今後は実施に向けた詳細な検討を進める必要がある。

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：平成 26 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 27 年 3 月
- [4]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）.
- [5]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
- [6] Alfred Haack “Design fire scenarios”, Thematic Network FIT - Fire in Tunnels, Technical report – Part1, European Community (2001).
- [7]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
- [8]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）.
- [9]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（2/3）、平成 18 年 3 月
- [10]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）.
- [11]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
- [12]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
- [13]インターネット公開資料：http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel_3_Combustion_Engineering.pdf
- [14]鋼構造耐火設計指針（2008）
- [15] Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2
- [16]日本機化学会 「伝熱工学資料」改訂第 5 版（2009）
- [17]R.Siegel, J.R.Howel Thermal Radiation Heat Transfer 3rd edition, Hemisphere Publishing Corporation 1992
- [18] NIST ホームページ：<http://www.nist.gov/>
- [19]Fire Dynamics Simulator ホームページ：<http://code.google.com/p/fds-smv/>
- [20]H.Pretel, W.Le Saux, L.Audouin Determination of the heat release rate of large scale hydrocarbon pool fires in ventilated compartments, Fire Safety Journal 62, pp.192-205 (2013)], [K.M.Butler, G.W.Mulholland Generation and Transport of Smoke Components, Fire Technology 40, pp.149-176 (2004)
- [21]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）
- [22]発電用軽水型原子力施設の火災防護に関する審査指針（最新改訂：平成 19 年 12 月 27 日版より）
- [23]発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針（最新改訂：平成 13 年 3 月 29 日版より）

- [24]新規制基準（設計基準）骨子案（使用済燃料再処理施設）
- [25]再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- [26]廃棄物管理施設の新規制基準骨子案
- [27]原子力規制委員会、核燃料施設等の新規制基準に関する検討チーム、第1回資料（平成25年4月15日）
- [28]原子力発電所の外部火災影響評価ガイド
- [29]原子力発電所の内部火災影響評価ガイド
- [30]原子力防災小委員会火災防護ワーキンググループ、原子力発電所における火災の発生防止対策の充実に関する報告書、平成21年8月
- [31]U.S.DOE Office of Environmental Management, Accident Investigation Report, Underground Salt Haul Truck Fire at the Waste Isolation Pilot Plant February 5, 2014,(2014).
- [32]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.
- [33]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).

第6章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

6.1.1 自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討

操業安全確保の考え方の提示として、放射性物質取扱い施設の安全確保に向けた国内外の動向として、「原子力事象評価尺度」「深層防護」「多重障壁」について整理した。また、一般労働安全の確保に向けた国内の動向として、「鉱山保安法にかかわる動向」「労働安全衛生法にかかわる動向」について整理した。

原子力施設、特に原子力発電所を対象として、一般的な産業施設と同種の危険（火災、爆発等）および原子力固有のハザードから人と環境を守り、安全確保方策を構築するための考え方を定める基本概念である「深層防護」について、地層処分施設における安全確保の原則的な考え方として、取り入れることを検討した。この深層防護の考え方は、原子力施設に限定されるものではなくいかなるプラントにおいても適用が可能である。またハザードは原子力固有のハザードだけでなく対象とする施設固有のハザードが何かを深い検討のもとに抽出することが、「深層防護」の考え方の正しい理解に基づいた適切な対策を構築するために重要なことである。さらに、ハザードから守るべき「人」を誰に設定するのかによって、抽出するハザードや深層防護の防護レベルの設定は変化するから、それによって対策の立て方や各防護レベルの区分は異なったものになる。

深層防護について様々な機関で検討されている防護レベルの区分の仕方が異なるのは、施設の特徴やハザードをどのように捉え区分しているかの違いによるものと考えられる。

本研究開発では、深層防護の考え方と地層処分施設のスケール（原位置スケール、処分坑道スケール、処分場スケール、広域スケール）を考慮した地層処分施設における安全対策の目標レベル（放射線安全、一般労働安全）を提示した。

6.1.2 火災事象等に対する安全確保対策の検討

流れ解析に関する既往の数値解析技術の適用性について検討を進め、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各式・手法の特徴を整理した。また、本検討対象の通気解析の支配方程式は、地下施設内の定常流・非定常流（火災時）に対して風量、風速、温度、圧力の変化より検討することから、ナビエ・ストークスの式を用いた。また、ナビエ・ストークスの式は、壁面付近の流れの解析も可能であることから、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当該式が適している。

全坑道を対象とした通気解析を実施した場合、特に処分坑道内は作業安全上の風速（0.5m/s）を確保できず、処分坑道入口にファンを設置する等の対策が必要であることを確認した。また、平常時の通気状態を保ったまま火災が発生した場合、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した。さらに、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。

通気解析結果と避難シミュレーション解析結果の重ね合わせが行われている。掘削中の処分坑

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。当該条件によれば、最終の避難完了率は、約 92%となり火災に巻き込まれた作業員の避難が困難な状況が表現されている。また、風門設置場所に扉を設けて、狭い通路を通過する様子を表現した結果、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引き起こす結果が得られた。

また、通常通気状態と通気システム停止時における火災時の熱・煙の拡散状況は、前者が風下側に広く拡散するのに対して、後者は風上・風下両方に拡散する様子が確認できた。すなわち本解析により、通気システム停止後は煙や熱が坑内に満遍なく拡散する状況が表現されている。また、壁の設置により風上側の熱・煙の拡散を遅らせ、作業員の安全な避難に有効な手段のひとつであることが解析により確認した。以上を踏まえ、火災に対する安全対策の方向性を以下に示す。

- ・坑口高さの差、坑道内の温度差を設けることにより、自然通気が可能であり、坑道深さが深いほど自然通気がしやすくなることを確認し、通気システム停止時や放射性物質の閉じ込め等を考慮し、自然通気により通気を制御可能な状況（坑口高さの差、坑道内温度差）を設定することが有効であると考え。
- ・火災発生場所から風上側は風下側に比べて熱・煙の拡散が緩やかであることが解析で確認したことから、火災時の作業員の避難は風上側を徹底するとともに、火災拡大防止の観点からは、酸素の供給を減らすことによる通気の遮断も有効な手段の 1 つである。
- ・坑道上部に壁を設置することにより風上側への熱・煙の拡散が時間的に緩やかになることを確認した。一方で、下流側については効果を確認することができなかったことから、上流側に壁等の熱や煙を遮る壁を設置することが有効な手段の一つと考える。

以上に示す通り、地層処分施設の建設場所が決まっていない中で、安全対策の効果を確認するために、解析を用いることが効率的で重要な手段の 1 つであると考え。

本研究開発では、3 次元解析を中心に検討を行っているが、目的や精度、時間、費用等を考慮しながら、1 次元解析、2 次元解析、3 次元解析を使い分けて運用していく必要がある。

6.1.3 自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する 調査・検討

「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、異常状態や事故事象として「火災」を想定した人工バリアの「熱的影響」の把握、および自然災害事象として「津波」を想定した際のガラス固化体の容器であるキャニスタ（以下「ガラス固化体キャニスタ」または単に「キャニスタ」という）の「腐食性」の把握を優先課題と選定した。

(1) 火災による人工バリアへの影響解析

平成 25 年度は地上施設における火災時に人工バリアが火災で加熱される状況を想定し、この影響を評価するために設定した火災シナリオに基づく燃焼解析を実施して火災曲線を設定し、これを人工バリアに与えて熱応力解析を行い、ガラス固化体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。シナリオに基づく燃焼解析を実施することによって、火災の継続時間や消炎

の理由を明らかにした。

平成 26 年度は平成 25 年度に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った。平成 25 年度と同様、地下施設での火災シナリオを設定して燃焼解析を実施し、オーバーパックに与える火災曲線を設定し、これをオーバーパックに与えて熱応力解析を実施した。緩衝材の存在によってオーバーパックへの熱影響は大幅に緩和できることが確認された。

今年度は、前年度までの成果を踏まえ、火災事象に対する人工バリアへの影響について整理・検討を行い、過年度の解析で設定した条件に加えて重要と考えられる条件を抽出し、抽出条件での影響を評価するため、過年度と同じ解析コードに必要に応じて追加プログラムを検討・構築し、人工バリアの火災影響解析を実施した。ガスの膨張による内圧を考慮した解析結果では、ステンレスの破断が想定されるほどの影響は見られなかったことから、火災影響における放射線安全では、内圧の影響は小さいと考える。また、今年度までの検討成果を踏まえて、火災や津波に対する人工バリアへの影響を防止・軽減する対策について整理・検討した。放射線安全の観点からは、ガラス固化体をオーバーパックに封入、さらには緩衝材で覆う PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式が災害対策においても有効と考える。

(2) 津波による被害を想定した腐食影響について

平成 25 年度において津波被害を想定し、海水の付着等による塩分の影響を受けた放射性物質を内包するガラス固化体キャニスタ (ステンレス鋼製) の腐食性について文献等調査を行い、平成 26 年度において人工バリアの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・整理を解析も交えて実施した。

今年度は、検討成果を踏まえて、津波に対する人工バリアへの影響を防止・軽減する対策について整理・検討した。

(3) 試験によるデータ取得

緩衝材を介したガラス固化体等の火災影響の検討に必要な、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。

平成 25 年度に実施した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力学的特性データを取得した。

津波に対する人工バリアの影響評価を行う上で必要となる試験項目を検討し、試験計画を策定した。

6.2 今後の課題

6.2.1 自然災害に対する安全対策（技術要件）の調査・検討

これまで本開発では、地下施設における火災に対する検討を他の要因に先行して進めてきた。今後は、水理（洪水や津波または大量／突発湧水）に対する事項やその他の事項についても、操業時の対策技術の検討を進める必要があるものとともに、全ての事項を網羅的かつ効率的に包括して成立する地層処分施設のレイアウトと、その設計方法を考えていくことが必要である。

さらに、地層処分施設のシステムとしての性能を確証していく必要があるものと考えられるが、自然災害を再現することは現実的に難しいことから、解析的検討と室内試験を積極的に活用する必要があると考えられる。また、海外の施設の火災安全対策や事故事例に学ぶことは大変重要であるため、動向に注視しながら新しい知見、技術を検討すべきと考える。

地層処分施設のシステムとしての性能の確証とシステムの高度化に向けた課題の位置付けを [図 6.2.1-1](#) ~~図 6.2.1-1~~ にまとめた。提示した防護レベル、目的、手段等については、今後も新しい知見を加えながら、さらなる向上を図るべきと考える。

地層処分施設の安全性の向上を、応答向上と性能向上として捉えた場合、前者に対する課題は、施設計画の分野におけるシミュレーション技術の精度向上が挙げられる。また、後者に対する課題は、事故に至らないように人工バリアを含めた地層処分施設の持つ性能の限界状態を向上させるための取り組み、そして操業時の安全対策技術の劣化の抑制に向けた取り組みにあると考えられる。なお、シミュレーション技術の向上等に向けた取り組みについては、不確実性の低減に向けた取り組みでもある。

防護レベル	目的（状態）	目的達成に不可欠な手段	対策例（火災）
レベル1	異常事象を発生させない（通常操業）	脅威を想定し、発生を未然に防止する仕組み	作業前点検教育・訓練多重化
レベル2	異常事象の検知および拡大防止（異常発生）	異常の検知、機能維持の防護策	通報設備 消火設備 風門
レベル3	放射能を漏らさない（異常拡大）	容器内での閉じ込め	換気制御 防火扉
レベル4	放射能を施設外へ出さない（事故の防止）	施設内での閉じ込め	除去フィルタ 隔離壁 避難経路
レベル5	放射線影響の緩和（坑外漏えい）	サイト外の緊急時対応	周辺住民の避難

人工バリアの限界

↓

自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する調査・検討

- ・解析による状況把握
- ・試験によるデータ取得

図 6.2.1-1 課題（1）

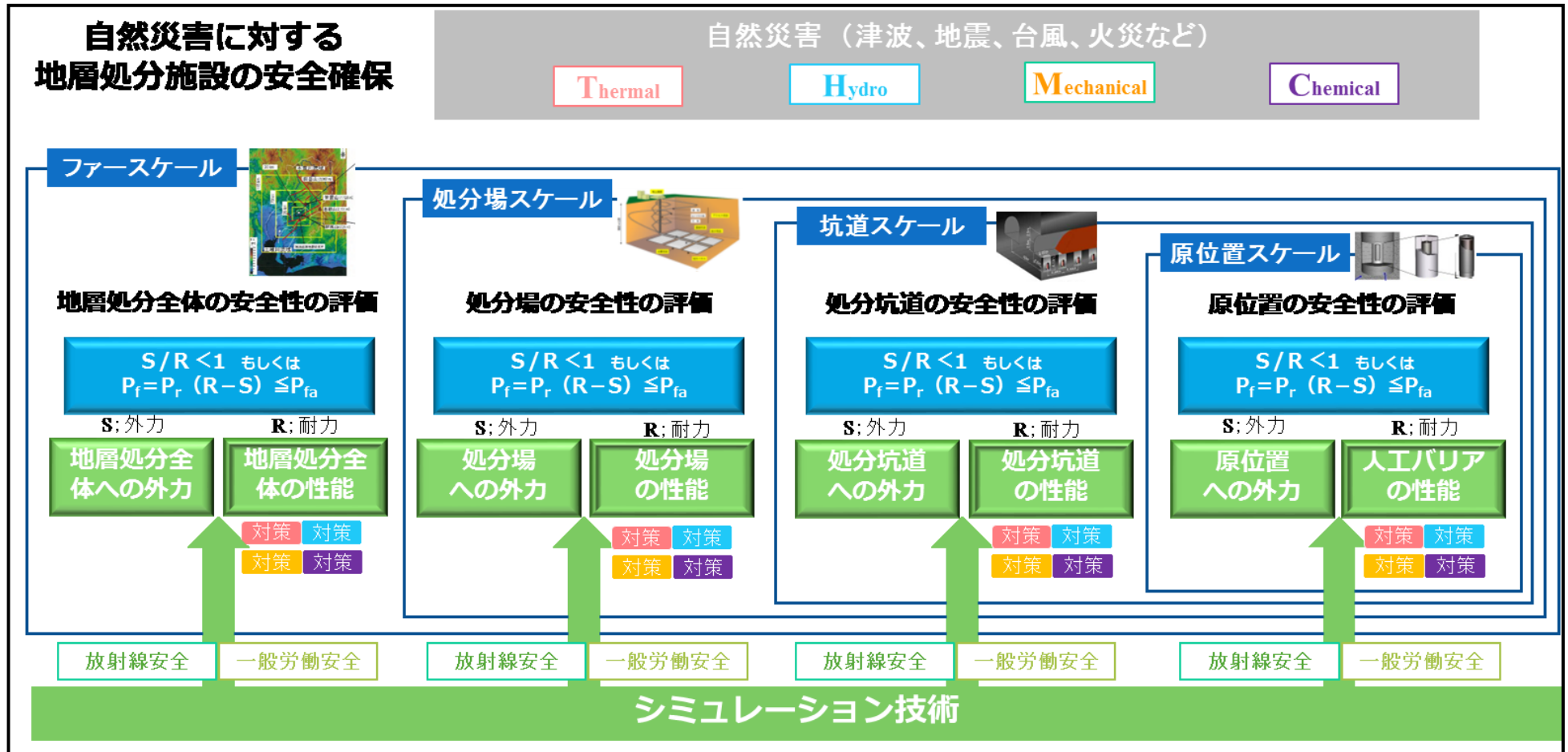


図 6.2.1-2 課題（2）

6.2.2 火災事象等に対する安全確保対策の検討

以下に課題を示す。

- a) 1次元による通気解析は、鉱山等で多く利用実績があるため、より空気の流れが詳細に解析できる3次元解析を中心に検討を行った。坑道断面での風速、酸素濃度等の違いを確認できるものの、地層処分施設のような長大な施設では、計算に時間を要し、かつ条件設定により収束しないケースがあった。したがって、解析の目的や精度、時間、費用等を考慮しながら、1次元解析、2次元解析、3次元解析を使い分けて運用していく必要がある。
- b) 火災の消火、拡大防止には、通気を止める（酸素の供給を停止する）ことが、効果の大きい対策であるが、作業員の安全に影響を及ぼすことになる。したがって、作業員の存在を確認した上での実施となるため、状況把握監視技術などとの連携が必要となる。
- c) 主要坑道、処分坑道の全ての坑道において通気を確保する場合は、膨大な風量を確保する必要があり、一部の坑道（合流部等）では風速が速くなり、火災時の煙等の拡散で被害が拡大することが考えられる。坑道の維持管理の観点だけでなく、災害時の被害拡散を考慮した風速の設定が必要である。
- d) 立坑の高低差（圧力差）、温度差により自然通気の可能性があることを確認した。温度差については、夏は小さく、冬は大きくなるため、一定ではない。特に夏においては、地上と地温（300m以深）の差がなくなり、自然通気が発生しない場合も考えられるため、1年通しての安全対策とならば可能性がある。
また、高低差10m、50mの解析では、高低差10mのケースの風速が速い結果となり、予想と異なる結果となった。その原因は、特定されていないため、引き続いて検証を行う必要がある。
- e) 地下施設で災害が発生し、停電して設備等が利用できない場合においても、地上へ自力で脱出できる手段が必要と考える。地層処分施設に適用が考えられるトンネルに関連する法令（労働安全衛生法、構造令、消防法）、鉱山保安法を踏まえると斜坑あるいは立坑に梯子を整備する必要がある。
- f) 本解析では、想定したシナリオに基づいて条件設定を行い、解析手法を提示したものである。したがって、条件等が確定され次第、火災影響について確認する必要がある。

6.2.3 自然災害等に対する人工バリアへの影響評価に関する 調査・検討

(1) 火災による人工バリアへの影響解析

以下に人工バリアへの影響解析における課題を示す。

- a) ガラス固化体キャニスタは局所的に700℃程度にまで加熱され、クリープが生じる温度領域となるため、キャニスタの強度評価を行う場合、即時破断だけでなくクリープ破断についても検討を行う必要がある。
- b) ガラスとキャニスタ界面における付着強度に関するデータが無く、実際のガラスとキャニスタの界面挙動を明らかにする必要がある。
- c) 火災の燃料として、地上施設ではディーゼル燃料（軽油）、地下施設ではリチウムバッテリー

一を想定した。リチウムバッテリーは、難燃性ではあるものの、一旦発火してしまうと熱量は高くなる。安全対策を講じる場合には、火災発生の予防だけでなく、火災発生時の熱量を考慮した燃料の選定が必要と考える。

- d) 今回の解析で用いているガラスの強度データは、温度依存性を考慮していない。伝熱解析ではガラスの温度は局所的に 400℃を超える領域も有り、ガラスの物性値の温度依存性を考慮する必要がある。
- e) 本解析では、想定したシナリオに基づいて条件設定を行い、解析手法を提示したものである。したがって、条件等が確定され次第、再度人工バリアへの影響について確認する必要がある。

(2) 津波による被害を想定した腐食影響について

塩分による SCC 発生に着目して評価しているが、これに放射線影響を加えて SCC 発生寿命を評価する必要がある。

また、水の放射線分解による水素ガス発生はキャニスタの閉じ込め性だけでなく、爆発事象にも影響することから、ガラス固化体の海水浸漬環境におけるガス発生量の予測評価も重要な課題である。

(3) 試験によるデータ取得

文献におけるデータは、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、津波による腐食の検討を行うためには、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試験計画に基づいたデータを取得すべきと考える。

①塩水 SCC 感受性評価試験計画

②放射線影響 SCC 感受性評価試験計画