

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

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25年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発のうち、自然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す。

報告書の構成

平成25年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

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

目次

第1章 開発の目的及び概要	1-1
1.1 処分システム工学確証技術開発の背景及び目的.....	1-1
1.1.1 開発の背景	1-1
1.1.2 開発の目的	1-1
(1) 処分システム工学確証技術開発	1-1
(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	1-3
1.1.3 開発項目の相互関係	1-3
1.2 本開発に係る背景及び目的.....	1-5
1.2.1 本開発の背景.....	1-5
1.2.2 本開発の目的.....	1-5
1.2.3 本開発の前提.....	1-5
1.3 検討の基本方針.....	1-7
1.3.1 リスクマネジメントとクライシスマネジメント	1-7
1.3.2 検討方針.....	1-8
1.4 平成24年度の成果	1-9
1.4.1 平成24年度の実施項目	1-9
1.4.2 平成24年度の成果概要.....	1-9
(1) 地層処分施設と類似した施設の調査	1-9
(2) 検討対象の選定	1-9
(3) 状況設定	1-10
(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
(5) 対策技術の調査と開発に関わる試験項目の抽出	1-10
1.5 平成25年度の開発の概要.....	1-12
1.5.1 平成25年度の実施内容.....	1-12
(1) 5年間の研究計画の立案.....	1-12
(2) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討	1-12
(3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験	1-12
(4) 状況把握・監視技術に係る調査・検討	1-12
1.5.2 平成25年度の成果概要.....	1-12

(1) 本報告書の構成	1-12
(2) 成果概要	1-15
第2章 5年間の研究計画の立案	2-1
2.1 平成24年度成果に基づく研究計画の立案	2-1
2.1.1 平成24年度に選定した技術開発課題	2-1
2.1.2 平成25年度以降の開発における技術開発課題の選定	2-1
2.1.3 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係わる今後5年間の研究計画	2-2
(1) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討	2-2
(2) 人工バリアの限界性能等の調査・試験	2-3
(3) 状況把握・監視技術に係る調査・検討	2-4
2.2 新たな視点からの操業安全の検討	2-11
2.2.1 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	2-12
(1) 検討方針の全体概要	2-12
(2) 地下施設の操業安全の検討方針	2-14
(3) 鉱山の保安に係わる法体系	2-14
(4) 鉱山保安法の概要	2-15
(5) 鉱山保安法に基づく災害事象の選定	2-17
(6) 坑内火災による危害防止に必要な措置	2-18
(7) 「施設計画技術」における検討内容の妥当性の確認	2-19
2.2.2 地層処分事業の防災計画の視点からのアプローチ	2-21
(1) 地層処分事業の防災計画の必要性	2-21
(2) 技術開発課題としての「防災計画に係る調査・検討」の必要性	2-21
(3) 「防災計画に係る調査・検討」の実施内容	2-22
(4) 平成26年度の実施内容	2-23
2.3 今後5年間の研究計画	2-24
2.4 まとめ	2-26
第3章 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.1.1 既往の研究成果	3-1
3.1.2 今年度の実施内容	3-2
(1) 背景	3-2
(2) 実施概要	3-2

3.2 地層処分施設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.....	3-3
3.2.1 海外の地層処分計画等における類似検討の文献調査.....	3-3
(1) 調査対象文献.....	3-3
(2) フランス（ANDRA）における地下の火災事象についての検討概要.....	3-6
3.2.2 地層処分施設の類似施設における安全対策技術の整理.....	3-8
(1) 鉱山・トンネルにおける建設中・供用中の安全対策技術の整理.....	3-8
(2) 原子力関連施設における安全対策技術の整理.....	3-27
3.3 解析条件の検討・設定.....	3-42
3.3.1 地下施設の検討・設定.....	3-42
(1) 地層処分施設の地下施設の概要.....	3-42
(2) 定置概念の概要.....	3-43
(3) 解析に反映する定置方式.....	3-44
(4) 処分パネルの形状と配置の設定.....	3-44
(5) 処分パネル運用方法の設定.....	3-46
(6) 処分パネルや坑道の形状・寸法.....	3-47
(7) 地下施設の解析モデル.....	3-52
3.3.2 気流解析条件の検討・設定.....	3-53
(1) 風況場の設定.....	3-53
(2) 初期の坑内温度、圧力の設定.....	3-57
(3) 作業員数、配置の設定.....	3-58
(4) 火災曲線及び火災発生場所の設定.....	3-59
(5) 気流解析の数値解析手法.....	3-62
3.3.3 避難シミュレーション解析条件の検討・設定.....	3-64
(1) 避難シミュレーションの概要.....	3-64
(2) システムの信頼性.....	3-66
(3) 解析条件の概要.....	3-69
(4) 各種条件の設定.....	3-73
3.4 事前解析の実施.....	3-76
3.4.1 事前解析の目的.....	3-76
3.4.2 事前解析の内容.....	3-77
(1) 簡易モデル形状の設定.....	3-77
(2) 簡易モデルサイズの設定.....	3-78
(3) 風況場の設定.....	3-79

(4) 作業員数、配置の設定	3-79
(5) 火災曲線及び火災発生場所の設定	3-80
(6) 事前解析モデル	3-81
(7) 解析条件	3-84
3.4.3 事前解析結果	3-85
(1) 気流解析結果	3-85
(2) 避難シミュレーション解析結果	3-102
3.5 まとめ	3-109
第4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験	4-1
4.1 はじめに	4-1
4.1.1 既往の研究成果	4-1
4.1.2 今年度の実施内容	4-2
(1) 背景	4-2
(2) 実施概要	4-3
4.2 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討	4-3
4.2.1 解析対象及び検討フロー	4-4
4.2.2 解析コードの選定	4-5
(1) 燃焼解析用の解析コードの選定	4-5
(2) 伝熱解析、応力解析用の解析コードの選定	4-6
4.2.3 火災シナリオの検討	4-6
(1) 被災前提条件	4-6
(2) 火災シナリオの設定	4-7
4.2.4 解析モデルの作成	4-9
(1) 解析モデル（燃焼解析）	4-9
(2) 解析モデル（伝熱解析／応力解析）	4-13
4.2.5 解析条件の設定	4-14
(1) 解析条件（燃焼解析）	4-14
(2) 解析条件（伝熱解析／応力解析）	4-15
4.2.6 構成要素の物性値の設定	4-18
(1) 物性値の設定（燃焼解析）	4-18
(2) 物性値の設定（伝熱解析／応力解析）	4-21
4.2.7 解析結果	4-24
(1) 解析結果（燃焼解析）	4-24

(2) 解析結果（伝熱解析／応力解析）	4-42
4.2.8 HE ガス圧力上昇影響の評価手法調査	4-56
(1) HE ガス圧力上昇の影響調査.....	4-56
(2) ガス圧力上昇の解析組込み手法の調査	4-56
4.2.9 まとめと今後の課題.....	4-58
4.3 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握	4-62
4.3.1 試験目的.....	4-62
4.3.2 試験方法.....	4-63
(1) 対象材料.....	4-63
(2) 取得特性.....	4-63
(3) 試験方法.....	4-63
(4) 試験ケース	4-66
(5) 供試体の製作.....	4-68
4.3.3 試験結果.....	4-71
(1) 製作した供試体の特性（緩衝材の製作結果）	4-71
(2) 加熱結果.....	4-74
(3) 熱伝導率試験結果	4-76
(4) 熱拡散率試験結果	4-96
4.3.4 試験結果のまとめと考察.....	4-112
(1) 試験結果のまとめ	4-112
(2) 考察.....	4-117
4.4 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.....	4-121
4.4.1 津波被災シナリオの設定.....	4-121
4.4.2 津波によるガラス固化体キャニスタの腐食発生シナリオ.....	4-121
4.4.3 ガラス固化体キャニスタの仕様.....	4-122
4.4.4 津波によるガラス固化体キャニスタの腐食発生メカニズム	4-123
(1) はじめに.....	4-123
(2) ステンレス鋼の特徴と耐食性.....	4-123
(3) キャニスタの特徴	4-123
(4) ステンレス鋼の腐食、SCC の環境依存性	4-124
(5) その他の環境.....	4-125
4.4.5 調査の方法	4-125
4.4.6 調査結果.....	4-126

(1) 文献検索、及び調査.....	4-126
(2) 海水に対するステンレス鋼の腐食特性に関する情報収集結果.....	4-137
(3) 放射線環境下でのステンレス鋼の腐食特性に関する情報収集結果.....	4-152
4.4.7 調査結果のまとめと今後の課題.....	4-161
第5章 状況把握・監視技術に係る調査・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.....	5-1
(1) 背景.....	5-1
(2) 実施概要.....	5-2
5.2 状況把握・監視手順の整理.....	5-3
5.2.1 地層処分施設で考え得る異常状態や事故と対策の検討例.....	5-3
5.2.2 地層処分施設で考え得る異常状態や事故時の状況把握・監視手順の整理.....	5-8
5.3 放射線環境下に適用できる技術の調査.....	5-25
5.3.1 福島第一原子力発電所事故時の対応の概要.....	5-25
5.3.2 既存の放射線計測技術.....	5-27
5.3.3 福島第一発電所事故等を踏まえた無人化（ロボット）技術.....	5-30
5.4 大深度地下に適用できる技術の調査.....	5-32
5.4.1 チリ・コピアポ鉱山の落盤事故の知見.....	5-32
5.4.2 シガーレイク鉱山の異常出水事故の知見.....	5-35
5.4.3 フィンランド ONKALO 地下特性調査施設におけるモニタリング手法の検討.....	5-36
5.4.4 その他構造物のモニタリングに活用されている既存技術.....	5-37
5.5 緊急時の状況把握・監視手順と適用技術の整理.....	5-37
5.6 まとめと今後の課題.....	5-60
5.6.1 まとめ.....	5-60
5.6.2 今後の課題.....	5-60
第6章 平成25年度のまとめと今後の方針.....	6-1
6.1 はじめに.....	6-1
6.2 平成25年度のまとめ.....	6-1

<参考資料>

- ・参考資料①：リスクマネジメントとは
- ・参考資料②：事業継続計画とは
- ・参考資料③：救援・救出技術の調査結果
- ・参考資料④：鉱業権者が講ずべき措置事例（抜粋）

目 次

図 1.1.3-1	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	1-4
図 1.2.3-1	本開発の前提	1-6
図 1.4.1-1	平成 24 年度の実施項目	1-9
図 1.4.2-1	対策の検討・抽出方法	1-11
図 1.4.2-2	平成 24 年度に抽出した技術課題	1-11
図 1.5.2-1	「2 章 5 年間の研究計画の立案」成果概要	1-16
図 1.5.2-2	「3 章 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」成果概要（その 1）	1-17
図 1.5.2-3	「3 章 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」成果概要（その 2）	1-18
図 1.5.2-4	「4 章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要（その 1）	1-19
図 1.5.2-5	「4 章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要（その 2）	1-20
図 1.5.2-6	「5 章 状況把握・監視技術に係る調査・検討」成果概要	1-21
図 2.1.2-1	平成 24 年度成果に基づく平成 25 年度以降の技術開発課題の選定	2-2
図 2.1.3-1	平成 24 年度成果に基づく 3 つの技術開発課題に係る 5 年間の研究計画概要	2-10
図 2.2.1-1	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の全体概要	2-13
図 2.2.1-2	地下施設の操業安全の検討方針	2-14
図 2.2.1-3	鉱山の保安に係わる法体系	2-15
図 2.2.1-4	鉱山保安法の概要	2-16
図 2.2.1-5	鉱山保安法 第 5 条	2-17
図 2.2.1-6	坑内火災による危害防止に必要な措置	2-19
図 2.2.2-1	地層処分事業の防災計画を検討するにあたり考慮すべき事項の関連性	2-22
図 3.1.2-1	平成 25 年度の検討の概要	3-2
図 3.2.1-1	パネルの運用方法及び換気状態	3-6
図 3.2.1-2	火災時の煙の流れ	3-6
図 3.2.1-3	計算結果（温度－時間関係）	3-7
図 3.2.2-1	坑道断面の寸法	3-15
図 3.2.2-2	菱刈鉱山における救急センター	3-15
図 3.2.2-3	火災対策設備図（昭和 56 年施工時）	3-20
図 3.2.2-4	道路トンネル内非常用施設配置状況の例	3-24
図 3.2.2-5	東京湾アクアラインの構造	3-25
図 3.2.2-6	東京湾アクアライントンネル部の断面	3-25
図 3.2.2-7	火災影響評価手順	3-40

図 3.3.1-1	地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場）	3-42
図 3.3.1-2	搬送・定置技術オプション	3-43
図 3.3.1-3	処分場レイアウト図（硬岩系岩盤、豎置き方式）	3-45
図 3.3.1-4	処分場レイアウト図（軟岩系岩盤、豎置き方式）	3-45
図 3.3.1-5	建設・操業時の地下施設での作業イメージ図	3-46
図 3.3.1-6	処分パネル概略形状（硬岩系岩盤）	3-48
図 3.3.1-7	処分パネル概略形状（軟岩系岩盤）	3-49
図 3.3.1-8	処分パネル坑道断面（硬岩系岩盤）	3-50
図 3.3.1-9	処分パネル坑道断面（軟岩系岩盤）	3-51
図 3.3.1-10	軟岩系岩盤における処分孔豎置き定置方式の場合の処分パネルの詳細	3-52
図 3.3.2-1	風況予測結果の例（日本の風況）	3-53
図 3.3.2-2	フランス ANDRA 社における換気量・換気機械性能値の検討	3-55
図 3.3.2-3	簡易モデルによる風況場の設定例	3-56
図 3.3.2-4	簡易モデルによる作業員数及び配置の設定例	3-58
図 3.3.2-5	一般建築物の火災曲線	3-59
図 3.3.2-6	実物大トンネル火災実験（EUREKA 火災実験）の火災曲線	3-59
図 3.3.2-7	火災発生場所と避難の支障条件の例	3-61
図 3.3.2-8	長大な坑道の解析等に活用する 1D/3D 解析モデルの例	3-62
図 3.3.2-9	坑道内の空気の流れ解析結果①（速度分布図）	3-63
図 3.3.2-10	坑道内の流れ解析結果②（圧力分布図）	3-63
図 3.3.3-1	SOCIAL FORCE モデルの理論	3-65
図 3.3.3-2	歩行者交通量と密度の関係（PTV 社資料）	3-66
図 3.3.3-3	歩行者の軌跡（PTV 社資料）	3-66
図 3.3.3-4	S 実験の様子（左：DELFT 大学、右：DRESDEN 大学）（PTV 社資料）	3-66
図 3.3.3-5	交通シミュレーションクリアリングハウス（(社)交通工学研究会 HP より）	3-67
図 3.3.3-6	シミュレーションモデルの開発（(社)交通工学研究会 HP より）	3-68
図 3.3.3-7	モデルの基本性能検証（PTV 社 HP より）	3-68
図 3.3.3-8	検証結果モデル一覧（(社)交通工学研究会 HP より）	3-69
図 3.3.3-9	避難シミュレーションの実施フロー	3-70
図 3.3.3-10	各パネルの避難開始位置（イメージ）	3-74
図 3.3.3-11	通行不可を表現した避難シミュレーション（イメージ）	3-75
図 3.4.2-1	簡易モデル形状の概略	3-77
図 3.4.2-2	簡易モデルのパネルサイズ	3-78
図 3.4.2-3	簡易モデルの坑道径及び形状	3-78
図 3.4.2-4	事前解析における風況場	3-79
図 3.4.2-5	事前解析における作業員数、配置	3-79

図 3.4.2-6	火災発生場所.....	3-80
図 3.4.2-7	簡易モデルの概要.....	3-81
図 3.4.2-8	簡易モデルにおける入気・排気位置の考え方.....	3-82
図 3.4.2-9	簡易モデルの全体図面.....	3-83
図 3.4.3-1	各解析ケースの計算領域.....	3-85
図 3.4.3-2	解析メッシュ.....	3-86
図 3.4.3-3	平常通気状態の風速分布図.....	3-88
図 3.4.3-4	代表断面の風速分布図.....	3-88
図 3.4.3-5	坑道内温度及び一酸化炭素濃度の拡散状況の着目位置 (SEC-A).....	3-89
図 3.4.3-6	発火点の坑道における坑道内温度の経時変化 (平常通気状態).....	3-90
図 3.4.3-7	発火点の坑道における一酸化炭素濃度の経時変化 (平常通気状態).....	3-91
図 3.4.3-8	強制通気状態の風速分布図.....	3-93
図 3.4.3-9	代表断面の風速分布図.....	3-93
図 3.4.3-10	発火点の坑道における坑道内温度の経時変化 (強制通気状態).....	3-95
図 3.4.3-11	発火点の坑道における一酸化炭素濃度の経時変化 (強制通気状態).....	3-96
図 3.4.3-12	横断面図の位置 (CASE2).....	3-98
図 3.4.3-13	横断面図 (CASE2).....	3-98
図 3.4.3-14	横断面図の位置 (CASE3).....	3-99
図 3.4.3-15	横断面図 (CASE3).....	3-99
図 3.4.3-16	避難完了率 (平常時の通気状態).....	3-102
図 3.4.3-17	火災発生時の作業員の配置、避難開始地点、避難地点 など.....	3-102
図 3.4.3-18	避難完了率 (強制通気状態).....	3-103
図 3.4.3-19	避難未完了者がでた避難開始地点付近の様子.....	3-104
図 3.4.3-20	各ケースの避難完了率の比較.....	3-105
図 4.2.1-1	ガラス固化体の仕様 (日本原燃(株)仕様).....	4-4
図 4.2.1-2	オーバーパックの仕様.....	4-4
図 4.2.1-3	人工バリアの熱応力解析 検討フロー.....	4-5
図 4.2.3-1	地上施設配置図.....	4-7
図 4.2.3-2	火災シナリオのイメージ.....	4-9
図 4.2.4-1	FDS 数値解析形状及び計算格子.....	4-10
図 4.2.4-2	ガラス固化体及びオーバーパックの数値解析での再現.....	4-11
図 4.2.4-3	ガス温度による可燃範囲の変化.....	4-12
図 4.2.4-4	伝熱解析に用いたガラス固化体、オーバーパック形状図.....	4-13
図 4.2.4-5	ガラス固化体の伝熱解析用 FEM モデル.....	4-14
図 4.2.4-6	ガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析用 FEM モデル.....	4-14
図 4.2.5-1	伝熱解析に用いた加熱曲線及び燃焼解析結果.....	4-16

図 4.2.5-2	応力解析時にオーバーパックに与えた初期残留応力分布	4-17
図 4.2.6-1	応力解析に用いた物性値（ヤング率）	4-22
図 4.2.6-2	応力解析に用いた物性値（応力-ひずみデータ）	4-23
図 4.2.6-3	応力解析に用いた物性値（線膨張係数）	4-24
図 4.2.7-1	火災発生 6 秒後のディーゼル燃焼の様子	4-28
図 4.2.7-2	火災中の代表的な火炎形状	4-29
図 4.2.7-3	計算領域内の発熱量	4-30
図 4.2.7-4	廃棄体位置における横断面、縦断面の温度分布 [°C]	4-31
図 4.2.7-5	廃棄体位置における横断面、縦断面の酸素濃度分布 [G/G ガス]	4-32
図 4.2.7-6	廃棄体位置における横断面、縦断面の流速分布（絶対値） [M/S]	4-33
図 4.2.7-7	廃棄体周囲（W2M*L2M*H3M）のガス流速（一区切りの解析）	4-34
図 4.2.7-8	廃棄体周囲（W2M*L2M*H3M）のガス流速（全検査室の解析）	4-35
図 4.2.7-9	廃棄体の真上（天井 4 M下）におけるガス流速	4-36
図 4.2.7-10	廃棄体の真上（天井 4 M下）における温度や化学種濃度	4-37
図 4.2.7-11	廃棄体周囲のガス温度（一区切りの解析）	4-38
図 4.2.7-12	廃棄体周囲のガス温度（全検査室の解析）	4-39
図 4.2.7-13	廃棄体周囲の熱流束（一区切りの解析）	4-40
図 4.2.7-14	廃棄体周囲の熱流束（全検査室の解析）	4-41
図 4.2.7-15	全検査室のガス入出流量	4-41
図 4.2.7-16	ガラス固化体の温度分布の時刻変化（切断図）	4-43
図 4.2.7-17	ガラス固化体の最高温度到達時の温度分布	4-44
図 4.2.7-18	ガラス固化体キャニスタの相当応力分布及び変形の時刻変化（切断図）	4-45
図 4.2.7-19	ガラス固化体キャニスタの相当塑性ひずみ分布の時刻変化（切断図）	4-46
図 4.2.7-20	ガラス固化体及びオーバーパックの温度分布の時刻変化（切断図）	4-48
図 4.2.7-21	オーバーパックの温度分布の時刻変化（切断図）	4-49
図 4.2.7-22	ガラス固化体の温度分布の時刻変化（切断図）	4-50
図 4.2.7-23	オーバーパックの相当応力の時刻変化（切断図）	4-51
図 4.2.7-24	オーバーパックの半径方向応力の時刻変化（切断図）	4-52
図 4.2.7-25	オーバーパックの周方向応力の時刻変化（切断図）	4-53
図 4.2.7-26	オーバーパックの軸方向応力の時刻変化（切断図）	4-54
図 4.2.7-27	オーバーパックの相当塑性ひずみの時刻変化（切断図）	4-55
図 4.2.8-1	ガラス固化体の上部プレナム部	4-56
図 4.3.1-1	緩衝材の熱伝導率の温度依存性に関する試験結果の例	4-62
図 4.3.2-1	熱特性の関係	4-63
図 4.3.2-2	円筒法による熱伝導率測定装置の例	4-64
図 4.3.2-3	熱特性取得装置とその仕様	4-65

図 4.3.2-4	加熱実験炉	4-65
図 4.3.2-5	ISO834 の標準火災温度曲線	4-66
図 4.3.2-6	クニゲル V1 (クニミネ工業)	4-69
図 4.3.2-7	ケイ砂 3 号	4-69
図 4.3.2-8	ケイ砂 5 号	4-70
図 4.3.2-9	供試体 (緩衝材) 製作手順	4-70
図 4.3.3-1	加熱温度 (B9 供試体及び P9 供試体)	4-74
図 4.3.3-2	加熱温度 (B10 供試体及び P10 供試体)	4-74
図 4.3.3-3	加熱前の供試体の状況 (左: P9 供試体右: B9 供試体)	4-75
図 4.3.3-4	加熱後の供試体の状況 (左: P10 供試体右: B10 供試体)	4-75
図 4.3.3-5	温度測定結果 (試験ケース B-0-20-TD)	4-76
図 4.3.3-6	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-20-TD)	4-76
図 4.3.3-7	温度測定結果 (試験ケース B-0-60-TD)	4-77
図 4.3.3-8	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-60-TD)	4-77
図 4.3.3-9	温度測定結果 (試験ケース B-0-90-TD)	4-78
図 4.3.3-10	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-90-TD)	4-78
図 4.3.3-11	温度測定結果 (試験ケース B-0-500-TD)	4-79
図 4.3.3-12	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-500-TD)	4-79
図 4.3.3-13	温度測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD)	4-80
図 4.3.3-14	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD)	4-80
図 4.3.3-15	温度測定結果 (試験ケース B-85-20-TD)	4-81
図 4.3.3-16	熱伝導率測定 (試験ケース B-85-20-TD)	4-81
図 4.3.3-17	温度測定結果 (試験ケース B-85-60-TD)	4-82
図 4.3.3-18	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-85-60-TD)	4-82
図 4.3.3-19	温度測定結果 (試験ケース B-85-90-TD)	4-83
図 4.3.3-20	熱伝導率測定 (試験ケース B-85-90-TD)	4-83
図 4.3.3-21	温度測定結果 (試験ケース B-0-500-TD-2)	4-84
図 4.3.3-22	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-500-TD-2)	4-84
図 4.3.3-23	温度測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD-2)	4-85
図 4.3.3-24	熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD-2)	4-85
図 4.3.3-25	温度測定結果 (試験ケース P-0-20-TD)	4-86
図 4.3.3-26	熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-20-TD)	4-86
図 4.3.3-27	温度測定結果 (試験ケース P-0-60-TD)	4-87
図 4.3.3-28	熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-60-TD)	4-87
図 4.3.3-29	温度測定結果 (試験ケース P-0-90-TD)	4-88
図 4.3.3-30	熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-90-TD)	4-88

図 4.3.3-31	温度測定結果（試験ケース P-0-500-TD）	4-89
図 4.3.3-32	熱伝導率測定結果（試験ケース P-0-500-TD）	4-89
図 4.3.3-33	温度測定結果（試験ケース P-0-1000-TD）	4-90
図 4.3.3-34	熱伝導率測定結果（試験ケース P-0-1000-TD）	4-90
図 4.3.3-35	温度測定結果（試験ケース P-85-20-TD）	4-91
図 4.3.3-36	熱伝導率測定結果（試験ケース P-85-20-TD）	4-91
図 4.3.3-37	温度測定結果（試験ケース P-85-60-TD）	4-92
図 4.3.3-38	熱伝導率測定結果（試験ケース P-85-60-TD）	4-92
図 4.3.3-39	温度測定結果（試験ケース P-85-90-TD）	4-93
図 4.3.3-40	熱伝導率測定結果（試験ケース P-85-90-TD）	4-93
図 4.3.3-41	温度測定結果（試験ケース P-0-500-TD-2）	4-94
図 4.3.3-42	熱伝導率測定結果（試験ケース P-0-500-TD-2）	4-94
図 4.3.3-43	温度測定結果（試験ケース P-0-1000-TD-2）	4-95
図 4.3.3-44	熱伝導率測定結果（試験ケース P-0-1000-TD-2）	4-95
図 4.3.3-45	温度測定結果（試験ケース B-0-20-TC）	4-96
図 4.3.3-46	熱拡散率測定結果（試験ケース B-0-20-TC）	4-96
図 4.3.3-47	温度測定結果（試験ケース B-0-60-TC）	4-97
図 4.3.3-48	熱拡散率結果（試験ケース B-0-60-TC）	4-97
図 4.3.3-49	温度測定結果（試験ケース B-0-90-TC）	4-98
図 4.3.3-50	熱拡散率測定結果（試験ケース B-0-90-TC）	4-98
図 4.3.3-51	温度測定結果（試験ケース B-0-500-TC）	4-99
図 4.3.3-52	熱拡散率測定結果（試験ケース B-0-500-TC）	4-99
図 4.3.3-53	温度測定結果（試験ケース B-0-1000-TC）	4-100
図 4.3.3-54	熱拡散率測定結果（試験ケース B-0-1000-TC）	4-100
図 4.3.3-55	温度測定結果（試験ケース B-85-20-TC）	4-101
図 4.3.3-56	熱拡散率測定結果（試験ケース B-85-20-TC）	4-101
図 4.3.3-57	温度測定結果（試験ケース B-85-60-TC）	4-102
図 4.3.3-58	熱拡散率測定結果（試験ケース B-85-60-TC）	4-102
図 4.3.3-59	温度測定結果（試験ケース B-85-90-TC）	4-103
図 4.3.3-60	熱拡散率測定結果（試験ケース B-85-90-TC）	4-103
図 4.3.3-61	温度測定結果（試験ケース P-0-20-TC）	4-104
図 4.3.3-62	熱拡散率測定結果（試験ケース P-0-20-TC）	4-104
図 4.3.3-63	温度測定結果（試験ケース P-0-60-TC）	4-105
図 4.3.3-64	熱拡散率測定結果（試験ケース P-0-60-TC）	4-105
図 4.3.3-65	温度測定結果（試験ケース P-0-90-TC）	4-106
図 4.3.3-66	熱拡散率測定結果（試験ケース P-0-90-TC）	4-106

図 4.3.3-67	温度測定結果（試験ケース P-0-500-TC）	4-107
図 4.3.3-68	熱拡散率測定結果（試験ケース P-0-500-TC）	4-107
図 4.3.3-69	試験結果（試験ケース P-0-1000-TC）	4-108
図 4.3.3-70	熱拡散率測定結果（試験ケース P-0-1000-TC）	4-108
図 4.3.3-71	温度測定結果（試験ケース P-85-20-TC）	4-109
図 4.3.3-72	熱拡散率測定結果（試験ケース P-85-20-TC）	4-109
図 4.3.3-73	温度測定結果（試験ケース P-85-60-TC）	4-110
図 4.3.3-74	熱拡散率測定結果（試験ケース P-85-60-TC）	4-110
図 4.3.3-75	温度測定結果（試験ケース P-85-90-TC）	4-111
図 4.3.3-76	熱拡散率測定結果（試験ケース P-85-90-TC）	4-111
図 4.3.4-1	熱伝導率と温度との関係	4-113
図 4.3.4-2	熱拡散率と温度との関係	4-114
図 4.3.4-3	熱伝導率と飽和度との関係	4-115
図 4.3.4-4	熱拡散率と飽和度との関係	4-116
図 4.3.4-5	緩衝材の熱拡散率の温度依存性に関する試験結果の例	4-118
図 4.4.3-1	ガラス固化体の仕様	4-122
図 4.4.6-1	海水環境におけるステンレス鋼の腐食におよぼす影響因子	4-142
図 4.4.6-2	海洋性湿潤大気環境におけるステンレス鋼の腐食挙動	4-142
図 4.4.6-3	ステンレス鋼の不働態・局部腐食の発生と進展(模式図)	4-143
図 4.4.6-4	局部腐食におよぼすすきま構造、及び微生物繁殖の寄与	4-145
図 4.4.6-5	ステンレス鋼の孔食、すきま腐食感受性	4-146
図 4.4.6-6	SUS304 ステンレス鋼の孔食、すきま腐食、SCC 感受性温度-塩化物イオン濃度	4-147
図 4.4.6-7	すきま腐食の生起と進展	4-147
図 4.4.6-8	ステンレス鋼の塩化物水溶液環境における SCC 生起温度-塩化物濃度領域図、	4-149
図 4.4.6-9	平均 ASCC き裂進展速度の合金種、付着塩分量依存性	4-150
図 4.4.6-10	ASCC 発生の鋭敏化度、応力、付着海塩量依存性	4-150
図 4.4.6-11	ASCC 発生後の進展予測例	4-151
図 4.4.6-12	SUH309 の湿潤大気下における SCC 生起温度、	4-152
図 4.4.6-13	SUH309 の湿潤大気下における SCC 生起の鋭敏化度、表面塩化物濃度依存性	4-152
図 4.4.6-14	水の放射性分解過程	4-154
図 4.4.6-15	ステンレス鋼の IASCC に関わる照射効果	4-156
図 4.4.6-16	IASCC による粒界割れ破面	4-157
図 4.4.6-17	IASCC 感受性の照射量依存性	4-157
図 4.4.6-18	高温水中における SSRT 試験の SCC 破面率に及ぼす Γ 線照射の影響	4-158
図 4.4.6-19	SUS304, の SCC 破面率におよぼす電位、 Γ 線照射の影響	4-159

図 4.4.6-20	自然水中、及び残留塩素、オゾン添加系における自然電位	4-159
図 4.4.6-21	ステンレス鋼の浸漬電位におよぼす Γ 線照射、及び H_2O_2 添加の影響	4-160
図 4.4.6-22	高レベル廃棄物ガラス固化体容器金属材料の耐食性に	4-160
図 4.4.6-23	湿潤大気中の水膜、苦汁塩滴中における自然電位.....	4-161
図 4.4.7-1	津波被災時のガラス固化体キャニスタ周りの状況の設定(模式図).....	4-162
図 4.4.7-2	ステンレス鋼の腐食損傷生起領域、及び進展挙動(模式図).....	4-162
図 4.4.7-3	津波被災の腐食損傷と今後の課題の整理(模式図).....	4-167
図 5.4.1-1	救出用カプセル及び装備の概要	5-34

表 目 次

表 1.1.3-1	処分システム工学確証技術開発の成果目標	1-4
表 1.4.2-1	技術開発課題の選定と年度展開の一例.....	1-11
表 2.1.3-1	状況把握・監視技術に関わる技術開発概要と年度展開.....	2-5
表 2.1.3-2	施設計画技術に関わる技術開発概要と年度展開	2-6
表 2.1.3-3	人工バリアの熱的性質に関わる技術開発概要と年度展開	2-7
表 2.1.3-4	ガラス固化体キャニスタの腐食特性に関わる技術調査概要と年度展開.....	2-8
表 2.1.3-5	人工バリアの力学的性質に関わる技術開発概要と年度展開	2-9
表 2.2.2-1	防災計画検討の流れ	2-22
表 2.3-1	本開発の5年間の研究計画	3-5
表 3.2.1-1	海外の類似検討の調査結果一覧	3-5
表 3.2.2-1	菱刈鉱山における安全対策	3-15
表 3.2.2-2	火災防止措置にかかわる条項.....	3-16
表 3.2.2-3	避難にかかわる条項.....	3-16
表 3.2.2-4	トンネル工事における坑内火災に対する安全対策.....	3-18
表 3.2.2-5	緊急連絡設備一覧.....	3-19
表 3.2.2-6	トンネル等級別の非常用施設.....	3-21
表 3.2.2-7	再処理施設安全審査指針に示される主な安全上の要求事項	3-28
表 3.2.2-8	廃棄物管理事業許可申請書（本文）における火災防止関連記載事項	3-37
表 3.2.2-9	廃棄物管理事業許可申請書（添付書類）における火災防止関連記載事項	3-38
表 3.3.1-1	坑道の種類と役割.....	3-42
表 3.3.1-2	定置技術のまとめ.....	3-43
表 3.3.1-3	定置技術の組み合わせ.....	3-44
表 3.3.2-1	東京都年平均気温（月別） 気象庁ホームページ.....	3-57
表 3.3.2-2	標高と圧力（参考値）	3-57
表 3.3.3-1	作業・作業員に関する記述一覧（1/2）	3-71
表 3.3.3-2	作業・作業員に関する記述一覧（2/2）	3-72
表 3.3.3-3	各種調査等における避難速度【抜粋版】	3-73
表 3.3.3-4	各種設定条件 一覧.....	3-75
表 3.4.2-1	事前解析条件（気流解析）	3-84
表 3.4.2-2	事前解析条件（避難シミュレーション）	3-84
表 3.4.3-1	解析ケース	3-85
表 3.4.3-2	解析要素数・節点数.....	3-86

表 3.4.3-3	避難開始地点周辺の様子（風下側【建設パネル 右下】）	3-106
表 3.4.3-4	避難開始地点周辺の様子（風上側【建設パネル 右上】）	3-107
表 4.1.2-1	人工バリア構成と各種外力に対する限界性能等の把握に向けた調査・試験の概略	4-2
表 4.2.1-1	今年度の解析ケース	4-5
表 4.2.4-1	総括反応（式 4.2.4-1）の化学量論係数	4-12
表 4.2.5-1	伝熱解析に用いたモデル外表面の熱伝達係数のガス温度との関係	4-17
表 4.2.6-1	構成要素の密度	4-18
表 4.2.6-2	コンクリートの熱容量	4-18
表 4.2.6-3	ガラス固化体キャニスタ（SUS304L）の熱容量	4-18
表 4.2.6-4	オーバパックの熱容量（表 4.2.6 9 より）	4-19
表 4.2.6-5	コンクリートの熱伝導率	4-19
表 4.2.6-6	ガラス固化体キャニスタ（SUS304L）の熱伝導率	4-20
表 4.2.6-7	オーバパックの熱伝導率（表 4.2.6 9 より）	4-20
表 4.2.6-8	構成要素のふく射率	4-20
表 4.2.6-9	伝熱解析に用いた熱物性値	4-22
表 4.3.1-1	人工バリア材料の熱特性取得状況	4-62
表 4.3.2-1	試験対象材料の仕様	4-63
表 4.3.2-2	緩衝材の熱特性把握に向けた試験ケース	4-66
表 4.3.2-3	試験ケース名一覧（緩衝材）	4-67
表 4.3.2-4	試験ケース名一覧（ベントナイトペレット）	4-68
表 4.3.3-1	供試体の特性	4-71
表 4.3.3-2	供試体の外観（緩衝材）	4-72
表 4.3.3-3	供試体の外観（ペレット）	4-73
表 4.3.3-4	試験結果（試験ケース B-0-20-TD）	4-76
表 4.3.3-5	試験結果（試験ケース B-0-60-TD）	4-77
表 4.3.3-6	試験結果（試験ケース B-0-90-TD）	4-78
表 4.3.3-7	試験結果（試験ケース B-0-500-TD）	4-79
表 4.3.3-8	試験結果（試験ケース B-0-1000-TD）	4-80
表 4.3.3-9	試験結果（試験ケース B-85-20-TD）	4-81
表 4.3.3-10	試験結果（試験ケース B-85-60-TD）	4-82
表 4.3.3-11	試験結果（試験ケース B-85-90-TD）	4-83
表 4.3.3-12	試験結果（試験ケース B-0-500-TD-2）	4-84
表 4.3.3-13	試験結果（試験ケース B-0-1000-TD-2）	4-85
表 4.3.3-14	試験結果（試験ケース P-0-20-TD）	4-86
表 4.3.3-15	試験結果（試験ケース P-0-60-TD）	4-87
表 4.3.3-16	試験結果（試験ケース P-0-90-TD）	4-88

表 4.3.3-17	試験結果 (試験ケース P-0-500-TD)	4-89
表 4.3.3-18	試験結果 (試験ケース P-0-1000-TD)	4-90
表 4.3.3-19	試験結果 (試験ケース P-85-20-TD)	4-91
表 4.3.3-20	試験結果 (試験ケース P-85-60-TD)	4-92
表 4.3.3-21	試験結果 (試験ケース P-85-90-TD)	4-93
表 4.3.3-22	試験結果 (試験ケース P-0-500-TD-2)	4-94
表 4.3.3-23	試験結果 (試験ケース P-0-1000-TD-2)	4-95
表 4.3.3-24	試験結果 (試験ケース B-0-20-TC)	4-96
表 4.3.3-25	試験結果 (試験ケース B-0-60-TC)	4-97
表 4.3.3-26	試験結果 (試験ケース B-0-90-TC)	4-98
表 4.3.3-27	試験結果 (試験ケース B-0-500-TC)	4-99
表 4.3.3-28	試験結果 (試験ケース B-0-1000-TC)	4-100
表 4.3.3-29	試験結果 (試験ケース B-85-20-TC)	4-101
表 4.3.3-30	試験結果 (試験ケース B-85-60-TC)	4-102
表 4.3.3-31	試験結果 (試験ケース B-85-90-TC)	4-103
表 4.3.3-32	試験結果 (試験ケース P-0-20-TC)	4-104
表 4.3.3-33	試験結果 (試験ケース P-0-60-TC)	4-105
表 4.3.3-34	試験結果 (試験ケース P-0-90-TC)	4-106
表 4.3.3-35	試験結果 (試験ケース P-0-500-TC)	4-107
表 4.3.3-36	試験結果 (試験ケース P-0-1000-TC)	4-108
表 4.3.3-37	試験結果 (試験ケース P-85-20-TC)	4-109
表 4.3.3-38	試験結果 (試験ケース P-85-60-TC)	4-110
表 4.3.3-39	試験結果 (試験ケース P-85-90-TC)	4-111
表 4.3.4-1	試験結果のまとめ	4-112
表 4.3.4-2	試験で得られた熱伝導率と熱拡散率から求めた比熱	4-120
表 4.4.5-1	J DREAM IIIによるキーワード文献検索	4-125
表 4.4.6-1	J DREAMIII検索によるキーワード別の文献数	4-126
表 4.4.6-2	J DREAMIII検索によって抽出した文献の和文タイトル(1)	4-127
表 4.4.6-3	J DREAMIII検索によって抽出した文献の和文タイトル(2)	4-128
表 4.4.6-4	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(1)	4-129
表 4.4.6-5	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(2)	4-130
表 4.4.6-6	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(3)	4-131
表 4.4.6-7	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(4)	4-132
表 4.4.6-8	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(5)	4-133
表 4.4.6-9	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(6)	4-134
表 4.4.6-10	J DREAMIII検索によって抽出した文献の要旨(7)	4-135

表 4.4.6-11	J DREAMⅢ検索によって抽出した文献の要旨(8)	4-136
表 4.4.6-12	J DREAMⅢ検索によって抽出した文献の要旨(9)	4-137
表 4.4.6-13	SUS304/309 系材料の公称組成と特徴	4-138
表 4.4.6-14	SUS304/309 系材料の化学組成、材料特性規格、及び P.I.	4-138
表 4.4.6-15	ステンレス鋼の鋼種別の材料、加工因子	4-139
表 4.4.6-16	代表的な腐食速度	4-144
表 4.4.6-17	高温の湿潤大気環境における発錆、孔食、SCC の P.I.依存性	4-148
表 4.4.6-18	SUH309/SUS309S]の実測化学組成	4-151
表 4.4.7-1	材料因子のまとめ	4-163
表 4.4.7-2	環境因子のまとめ	4-164
表 4.4.7-3	応力因子のまとめ	4-165
表 4.4.7-4	時間因子のまとめ	4-166
表 5.2.1-1	地上施設に関わる最終的な状況	5-3
表 5.2.1-2	地下施設に関わる最終的な状況	5-4
表 5.2.1-3	地上施設を対象とした対策シートの例	5-5
表 5.2.1-4	地下施設を対象とした対策シートの例	5-6
表 5.2.2-1	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.1)	5-9
表 5.2.2-2	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.2)	5-10
表 5.2.2-3	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.3)	5-11
表 5.2.2-4	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.4)	5-12
表 5.2.2-5	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.5)	5-13
表 5.2.2-6	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.6)	5-14
表 5.2.2-7	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.7)	5-15
表 5.2.2-8	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.8)	5-16
表 5.2.2-9	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.9)	5-17
表 5.2.2-10	地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.10)	5-18
表 5.2.2-11	地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.11)	5-19
表 5.2.2-12	地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.12)	5-20
表 5.2.2-13	地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.13)	5-21
表 5.2.2-14	地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 NO.14)	5-23

表 5.2.2-15 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討 NO.15）	5-24
表 5.3.1-1 福島第一原子力発電所事故時の対応の概要と状況把握・監視方法	5-26
表 5.3.2-1 既存の放射線計測技術	5-28
表 5.3.3-1 状況把握・監視に活用が期待できる無人化技術の例	5-31
表 5.4.1-1 チリ・コピアポ鉱山の落盤事故の知見	5-33
表 5.5-1 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.1）	5-38
表 5.5-2 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.2）	5-39
表 5.5-3 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.3）	5-40
表 5.5-4 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.4）	5-42
表 5.5-5 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.5）	5-44
表 5.5-6 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.6）	5-45
表 5.5-7 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.7）	5-46
表 5.5-8 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.8）	5-47
表 5.5-9 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.9）	5-48
表 5.5-10 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.10）	5-49
表 5.5-11 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.11）	5-51
表 5.5-12 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.12）	5-53
表 5.5-13 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.13）	5-55
表 5.5-14 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.14）	5-57
表 5.5-15 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理（検討 NO.15）	5-35

第1章 開発の目的及び概要

1.1 処分システム工学確証技術開発の背景及び目的

1.1.1 開発の背景

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）については、地層処分に向けた取り組みが行われており、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、サイト選定の第3段階である精密調査の前半段階（地上からの調査段階）にお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。

1.1.2 開発の目的

(1) 処分システム工学確証技術開発

人工バリアとして、オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術について、深地層の環境を考慮し、品質評価に必要な指標の提示や品質評価、健全性評価を行う。また、モニタリング技術の地下研究施設での適用性確認を行う。

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

実際の地下深部を想定した複合系でのオーバーパック溶接部の耐食性評価試験を実施するとともに、オーバーパック材料の機械的性質が長期健全性におよぼす影響を品質評価に取入れるための調査・検討を実施する。

上記実施内容で得られる知見より、オーバーパックの長期健全性をより確実なものとするため、構造評価と腐食評価を合わせた、人工バリア性能を満足するオーバーパック指標の具体化に資するものとする。

平成25年度は、オーバーパック溶接部健全性評価モデルの検討等を実施する。具体的には、オーバーパックの設計、製作、評価の各段階で必要となる判断指標を抽出し、3つの検討項目（腐食、材料劣化、欠陥）に大別する。そして、抽出した判断指標を提示するための健全性評価モデル案を作成する。このモデル案を基に、5カ年の全体計画を立案する。腐食試験については、地上及び地下施設を活用した試験計画を立案し、検討に着手する。また、材料劣化事象の一つである中性子照射脆化を予測するための、オーバーパックの照射線量計算について検討を進める。さらに、非破壊検査による欠陥寸法測定の誤差について検討を実施する。

2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

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

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

平成25年度は、人工バリアの品質確認及び品質改善手法の検討等を実施する。具体的には、今後5ヵ年の研究計画を立案するとともに、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査により緩衝材施工法の選定方法を検討する。また、パイピング／エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討及び人工バリア全体としての設計・施工仕様に関する検討を実施する。さらに、地下施設を活用した試験計画を策定し、試験孔と設備の一部を施工する。平成25年度は、人工バリアの品質確認及び品質改善手法の検討等を実施する。

3) モニタリング関連技術の整備

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

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

上記で得られる知見より、セーフティーケース信頼性強化に資するモニタリングの技術選択肢の整備を推し進め、モニタリングシステムの提示に資するものとする。

また、併せて制度的管理としての記録保存についても動向の調査を実施する。

平成25年度は、モニタリング技術に関する技術選択肢の整備等を実施する。具体的には、国際共同研究 MoDeRn による検討成果の取りまとめにより検討課題を抽出し、5ヵ年の研究計画を立案する。また、モニタリング結果の性能確認への反映方法に関する検討を実施するとともに、研究開発成果や文献調査結果を反映した技術メニューの整備方針を検討する。さらに、モニタリングの技術的実現性の向上のため、地中無線モニタリング技術について地下研究所における中継試験等を実施する。これらに加え、記録保存に関し OECD/NEA 等における検討状況の調査を実施する。

(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

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

平成25年度は、上記の目標を5ヵ年で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画を具体化する。さらに、具体化した研究・試験計画に基づき、技術課題に係る要素技術についての調査及び解析的検討等を実施することにより、要素技術の適用性を確認する。また、異常状態・事故発生時の人工バリアの限界性能等に係る調査・試験を実施する。具体的には、平成24年度に選定した「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」の3つの技術開発課題について、今後5ヵ年の研究・試験計画を具体化する。また、具体化した研究・試験計画に基づき、異常時の状況把握・監視手順の整理と状況把握・監視に係る現況技術の調査、及び処分パネルにおける火災事象等に対する安全確保のための施設計画に係る調査・検討を実施する。さらに、人工バリアの火災影響についての解析的検討と試験によるデータ取得及びキャニスタの腐食特性の調査を実施する。

1.1.3 開発項目の相互関係

人工バリアの品質に係わる判断指標や健全性評価技術は、製作・搬送・定置技術により構築される人工バリアを対象として、オーバーパックと緩衝材の相互影響を考慮した検討を実施するものである。また、人工バリアの構築後の健全性は、性能確認に関するモニタリングの知見と技術に基づいて確認する必要がある。さらに、操業期間中の自然災害への対策に関しては、自然災害が人工バリアの健全性に与える影響や、状態把握のためのモニタリングを理解した検討が不可欠である。以上の様に本事業にて実施される各開発は相互に関係を持つことから、統合的に開発を実施する必要がある。図 1.1.3-1 に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を示す。また、併せて成果目標を表 1.1.3-1 に示す。図 1.1.3-1 に於いて、「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」は、人工バリア品質に関する検討やモニタリング関連技術の整備、さらには回収可能性に関する検討と密接に関係しており、これらの課題との連携を保って実施する必要があることが分かる。

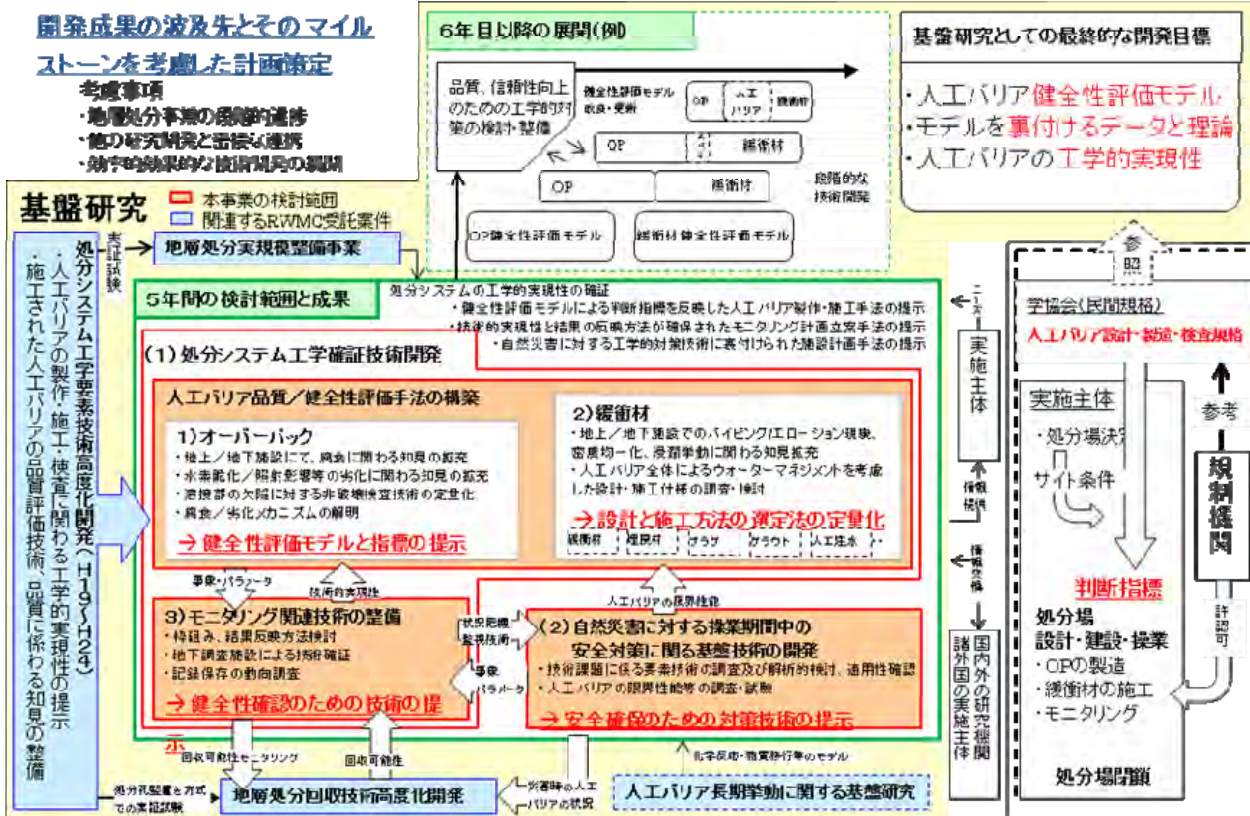


図 1.1.3-1 処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係

表 1.1.3-1 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	・品質評価/健全性評価手法の提案
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	・説明性のある長期健全性判断指標の提示
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	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
(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
- ・技術的実現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

1.2 本開発に係る背景及び目的

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、今年度から「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発」の新テーマ名のもと、今後5年程度の期間で自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行うものである。

1.2.2 本開発の目的

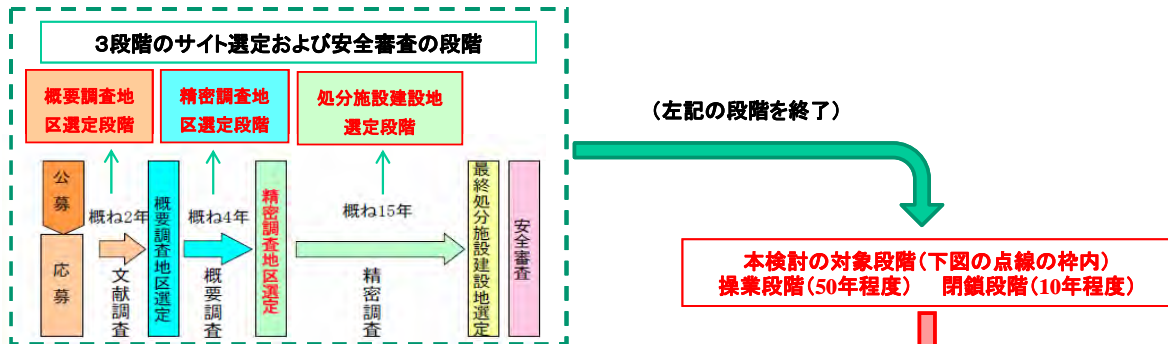
本開発では、地層処分システムに関わる巨大地震、津波等の対策技術を開発し、大規模な自然災害に対する処分システムの安全性確保に資することを目的とする。

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

平成25年度としては、上記の目的を5ヵ年で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画を具体化する。さらに、具体化した研究・試験計画に基づき、技術課題に係る要素技術についての調査及び解析的検討等を実施することにより、要素技術の適用性を確認する。また、異常状態・事故発生時の人工バリアの限界性能等に係る調査試験を実施する。

1.2.3 本開発の前提

本開発では、主に処分施設閉鎖前までの処分事業操業中を想定して、その期間内における地上／地下施設を含む処分システム及び施工された人工バリア等を対象とした安全性確保のための対策技術を、技術調査や適用性確認試験等の実施により開発するものとする。すなわち、既往の研究開発成果[1][2][3]などに基づき、放射性廃棄物の地層処分施設が「サイト選定及び安全審査」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「処分事業操業中」を対象に巨大地震、津波等の大規模な自然災害に対する安全確保について検討するものである（図 1.2.3-1）[3]、[4]。



(NUMO TR-10-02 図1-2に加筆)



(NUMO TR-11-01 図3.3.4-1に加筆)

図 1.2.3-1 本開発の前提 [3]、[4] に加筆

1.3 検討の基本方針

1.3.1 リスクマネジメントとクライシスマネジメント

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

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

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

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

1.3.2 検討方針

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

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

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

- ②広範な事象を対象とした検討

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

- ③既往の研究成果の活用と重複の回避

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

「リスク事象」	：「異常状態や事故」
「リスク低減」	：「異常状態や事故の影響緩和」
「リスク低減対策」	：「異常状態や事故への対策」

1.4 平成24年度の成果[8]

1.4.1 平成24年度の実施項目

平成24年度は下記の実施項目1～実施項目5について調査、検討を行った（図 1.4.1-1）。

- ①実施項目1：「地層処分施設と類似した施設の調査」
- ②実施項目2：「検討対象の選定」
- ③実施項目3：「状況設定」
- ④実施項目4：「異常状態や事故への対策に関わる技術課題の抽出と重要度評価」
- ⑤実施項目5：「対策技術の調査と開発に関わる試験項目の抽出」

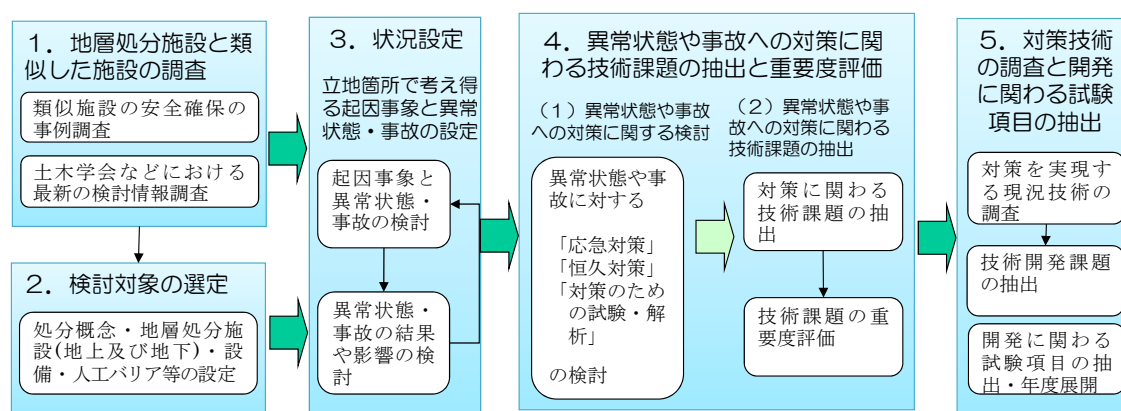


図 1.4.1-1 平成24年度の実施項目[8]

1.4.2 平成24年度の成果概要

(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、それらを起回事象として施設や設備で生じ得る異常状態や事故及び安全確保のための対策などを調査し、本開発に反映する知見を整理した。

(2) 検討対象の選定

自然事象に対して安全確保を検討する対象は、処分サイトや地上/地下施設の設定、定置概念などから多種多様な組合せが考えられる。本開発では、作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ト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、オーバーパットや緩衝材の定置作業などの6作業である。

(3) 状況設定

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

(4) 異常状態や事故への対策に関わる技術課題の抽出

抽出した地上施設及び地下施設それぞれの最終的な状況に対し、応急対策、恒久対策、対策のための試験・解析を「対策シート」(図 1.4.2-1)を作成して検討・抽出した。そして抽出した種々の対策を整理・類型化し、対策に必要な技術を「技術課題」として抽出した。抽出した技術課題は、「救援・救出技術」、「状況把握・監視技術」、「緊急遮へい技術」、「状況修復技術」、「施設計画技術」、「外力低減技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」の7課題である(図 1.4.2-2)。

(5) 対策技術の調査と開発に関わる試験項目の抽出

抽出した技術課題に関わる現況技術の調査に着手し、その調査結果に基づいて「救援・救出技術」、「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」、及び「人工バリアの限界性能等の調査・試験」を技術開発課題の候補として選定した。これらについて概略の開発内容、方法、成果目標、開発工程などを検討・整理して、年度展開を示した(表 1.4.2-1)。

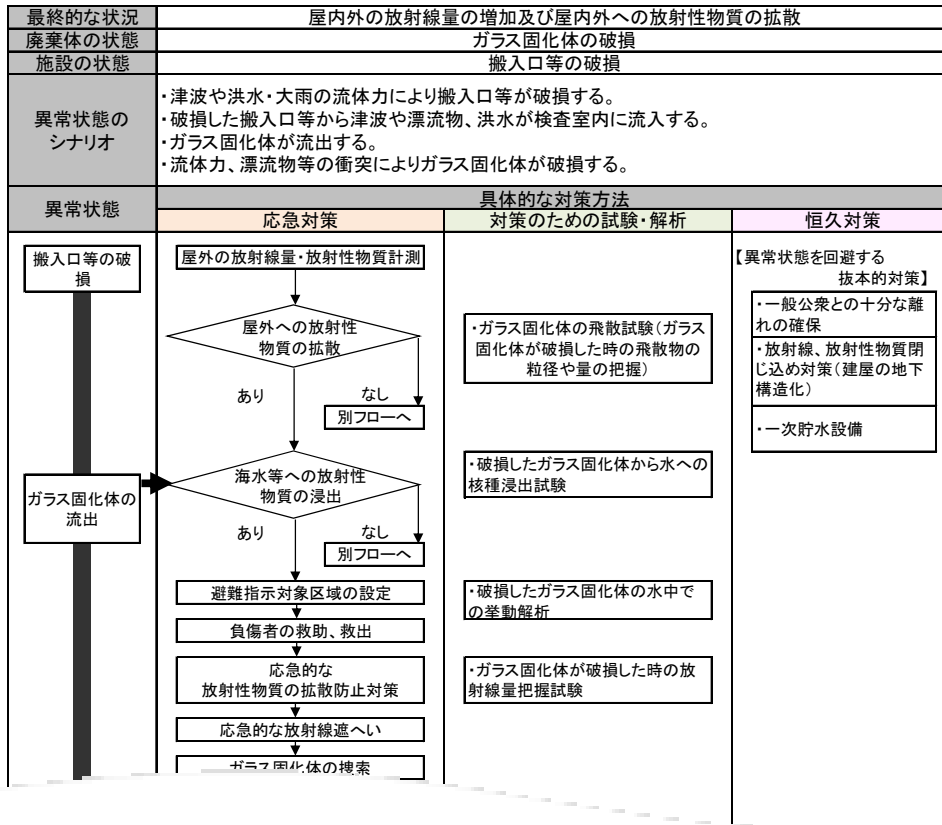


図 1.4.2-1 対策の検討・抽出方法[8]

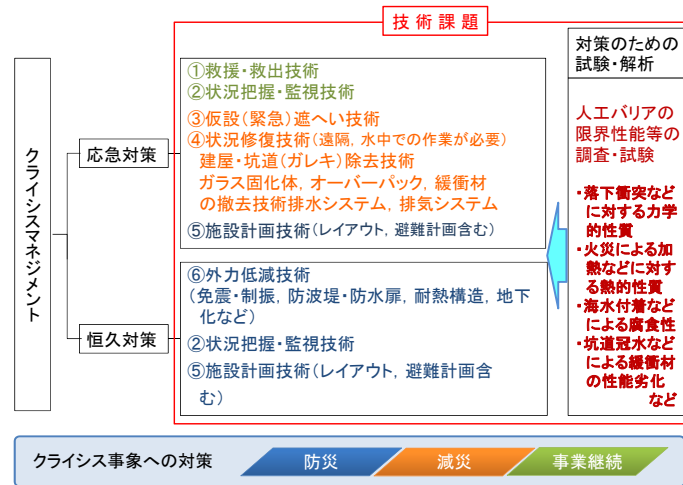


図 1.4.2-2 平成24年度に抽出した技術課題[8]

表 1.4.2-1 技術開発課題の選定と年度展開の一例[8]

調査試験項目	技術課題のカテゴリ	対象事象	概略の調査試験内容	調査・試験項目の選定理由	調査・試験成果目標と成果がもたらす効果	調査・試験にあたっての留意事項等
人工バリアの熱的性質の調査・試験	人工バリアの限界性能等の調査・試験	地震と津波の重畳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 	<p>【地層処分からの観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>【防災の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 	<p>【成果目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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 <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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年度の開発の概要

1.5.1 平成25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)～(4)について調査・検討を行った。

(1) 5年間の研究計画の立案

平成24年度に選定した「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」、「状況把握・監視技術」の各技術開発課題、及び中長期的課題について、5年間で開発目標を達成するための調査及び試験等に係る研究・試験計画を具体化した。

(2) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討

地下の処分パネルを対象に、火災事象等に対する安全確保を考慮した施設計画技術のための検討項目の抽出や、解析的検討手法の適用性等についての調査・検討に着手した。今年度は、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、調査結果に基づく地下施設・設備のレイアウトや人員配置の設定、解析条件の設定、気流解析や避難シミュレーション解析等の解析的検討手法の適用性確認に向けた事前解析の実施、などを行った。

(3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験

人工バリアの熱的性質の調査・試験、及びガラス固化体キャニスタの腐食特性の調査に着手した。前者については、ガラス固化体、オーバーパックの火災影響の解析的検討の実施、及び次年度以降に実施を計画する緩衝材を介した火災影響の検討に向けて緩衝材の高温時熱特性の試験データを取得した。後者については、津波の流入等に起因して海水が付着したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関わる文献調査を行い、知見を収集・整理した。

(4) 状況把握・監視技術に係る調査・検討

平成24年度に検討・設定した地層処分施設で考え得る多様な異常状態や事故について「状況把握・監視」の観点から見直しを行い、考え得る異常状態・事故ごとに状況把握・監視手順を整理した。また、それぞれの異常状態や事故状況を速やかに把握・監視するために必要な機器や技術に関する現況の技術開発情報等の収集・整理に着手した。

1.5.2 平成25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 開発の目的及び概要

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

2章 5年間の研究計画の立案

本開発では、平成24年度に平成25年度以降に取り組む技術開発課題の選定と年度展開を提示したことを踏まえ、まず、平成24年度成果に基づき選定した「操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」、「人工バリアの限界性能等の調査・試験」、「状況把握・監視技術に係る

調査・検討」の3つの技術開発課題について、今後5年間の実施内容の概要と工程を示すとともに、今年度の具体的な実施内容を示した。

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

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

3章 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」などの課題が抽出された。

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。

4 章 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 時取りまとめの試験値と整合性がみられ、また、2 通りの試験方法で得られた高温時の熱特性値は同程度であったことから、次年度以降に実施する緩衝材を介した火災影響の解析的検討においては、本試験で得られた熱特性値を使用する計画である。

(3) 津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査

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

5 章 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、それぞれの当該欄に検討結果を記述した。

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ものである。

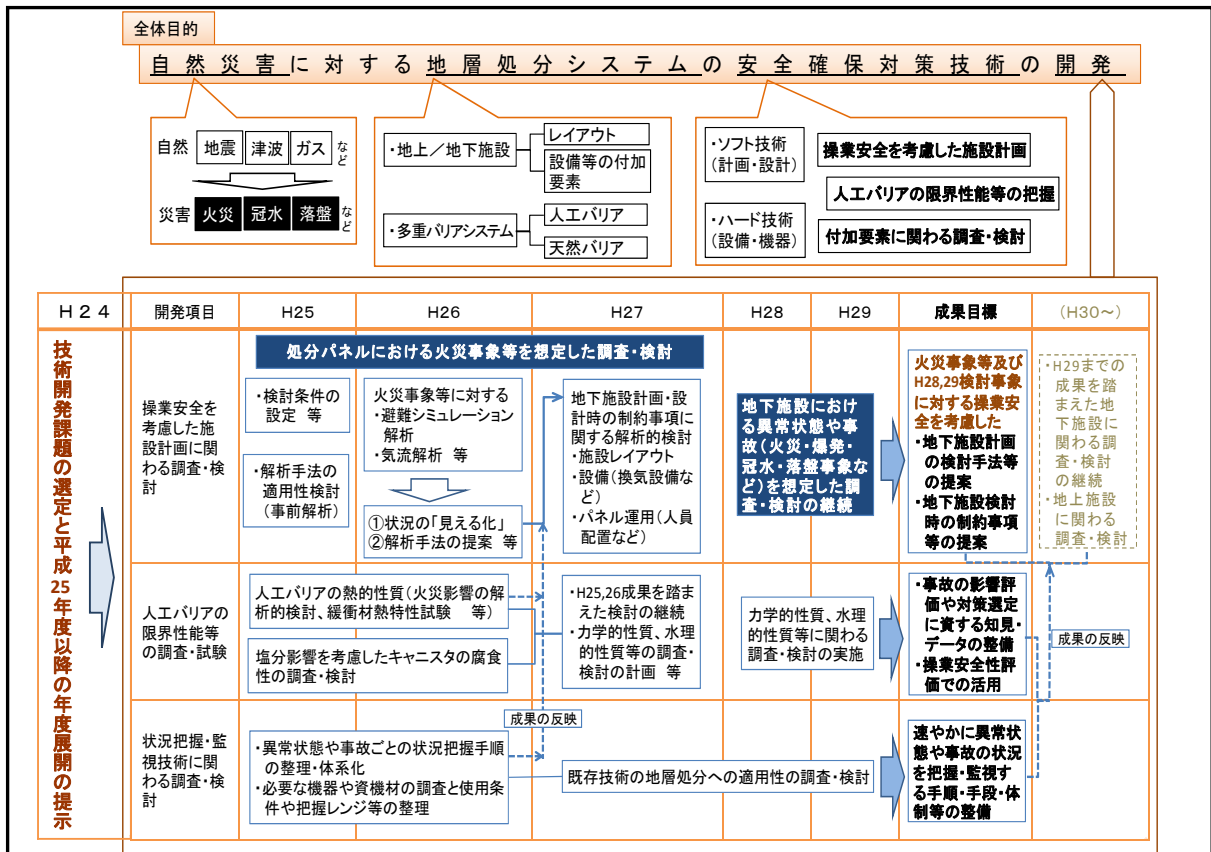
最終的には、地層処分システムで考え得る多様な異常状態や事故時の状況把握・監視手順と、その時に適用できる技術を15枚の整理シートに取りまとめた。

6章 平成25年度のまとめと今後の方針

2章から5章の調査・検討成果を取りまとめて示した。また、2章で立案した5年計画に基づく平成26年度の実施内容（案）を示した。

(2) 成果概要

図 1.5.2-1～図 1.5.2-6 に、本報告書の第2章から第5章の検討成果の概要を示す。



平成24年度成果に基づく3つの技術開発課題に係る5年間の研究概要

	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	操作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		
ii 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	制約事項に関する解析的検討 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		
ii 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				
ii 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の実施					
			上記の①~⑤の項目についての技術開発試験等の継続 救援・救出技術の技術開発成果の取りまとめと適用性の検討 自然課題の災害後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	地下施設の操作安全確保のための制約事項等の提案

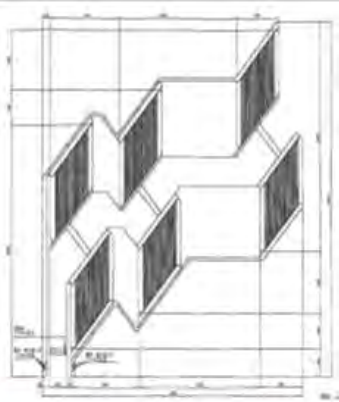
新たな課題を含めた本開発の5年間の研究計画

図 1.5.2-1 「2章 5年間の研究計画の立案」成果概要

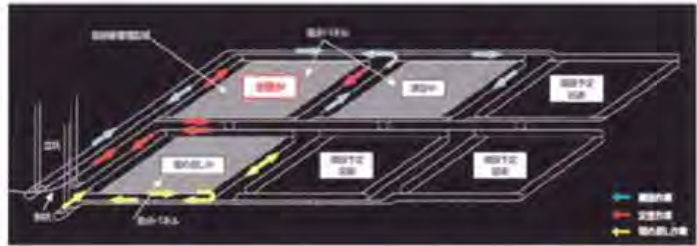
(1) 地層処分施設設計画等における類似検討の文献調査と本検討への知見の反映

- ① 類似検討事例に係る文献調査および本検討への知見の反映
- ② 地層処分施設の類似施設における安全対策技術の整理
 - a. 鉱山・トンネルにおける建設中・供用中（操業中）の安全対策技術の整理
 - b. 原子力関連施設における安全対策技術の整理

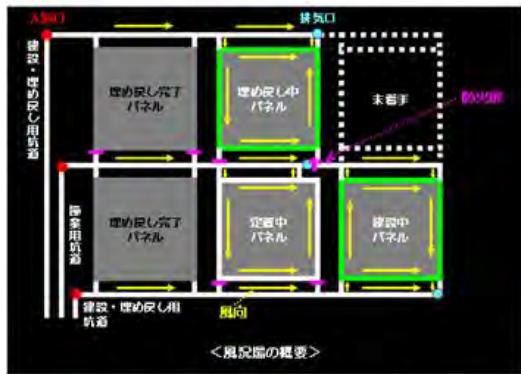
(2) 気流解析と避難シミュレーション解析の条件設定



処分パネルの形状と配置



処分パネルの運用方法



簡易モデルによる風況場の設定例

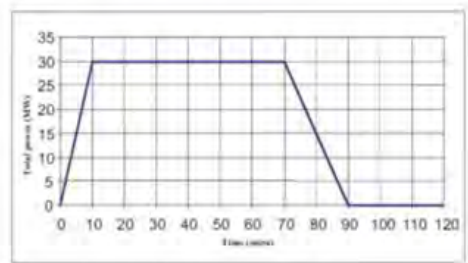
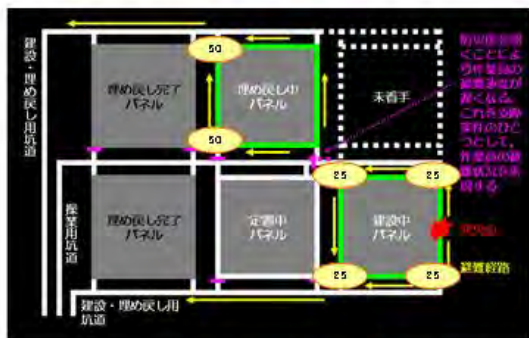
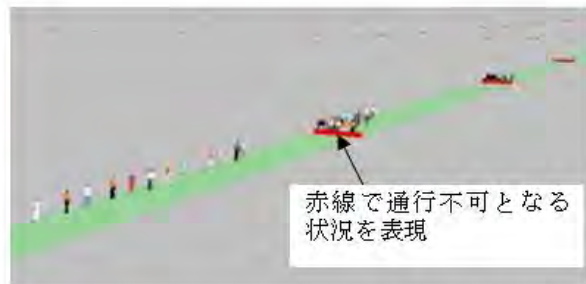


Figure 11.41 Standard total thermal power for a 50 MW fire

解析に用いる火災曲線



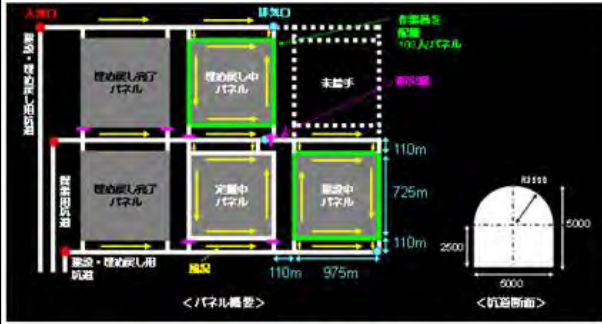
避難シミュレーションにおける人の配置例



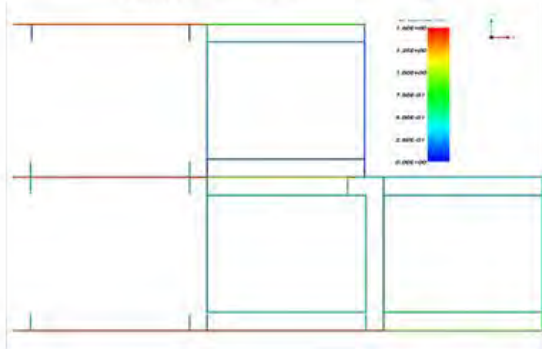
避難シミュレーションにおける避難不可の表現

図 1.5.2-2 「3章 操業安全を考慮した施設設計画技術に係る調査・検討」成果概要（その1）

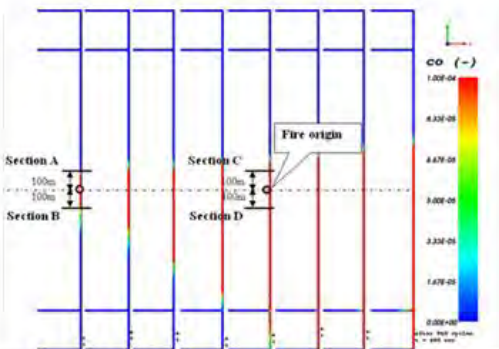
(3) 気流解析と避難シミュレーションの適用性検討のための事前解析



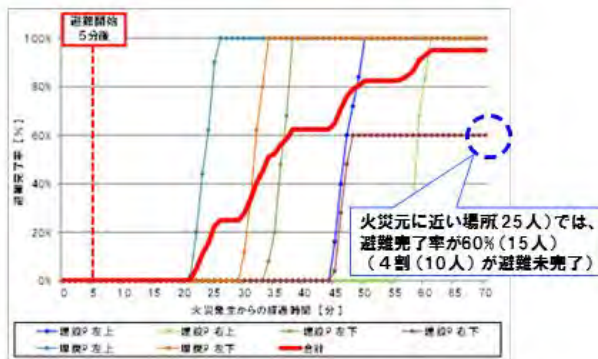
事前解析の簡易モデルの概要



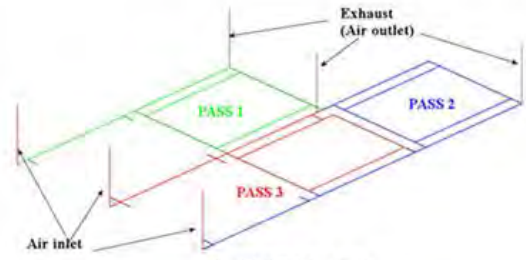
平常通気時の風速分布



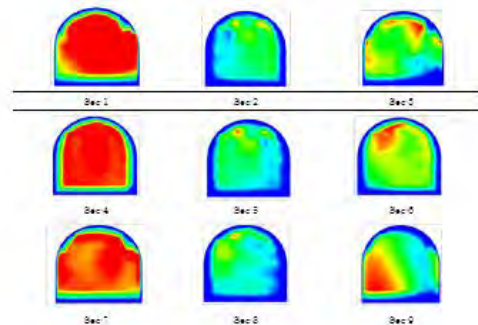
火災時の一酸化炭素濃度の拡散状況



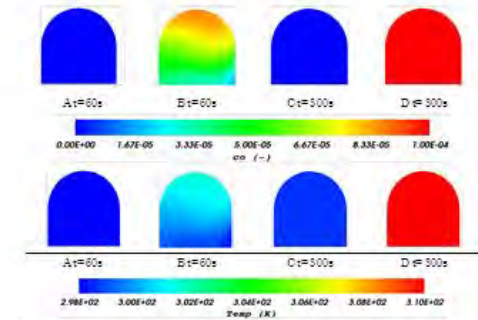
避難開始地点別の避難完了率



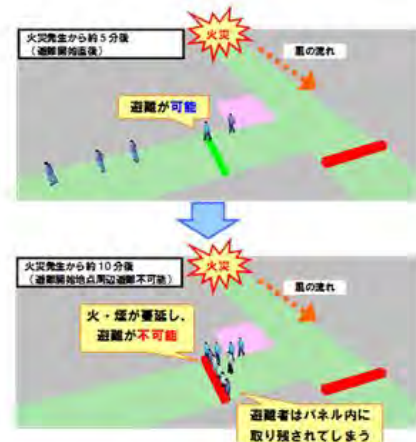
気流解析モデル



坑道断面内の風速分布



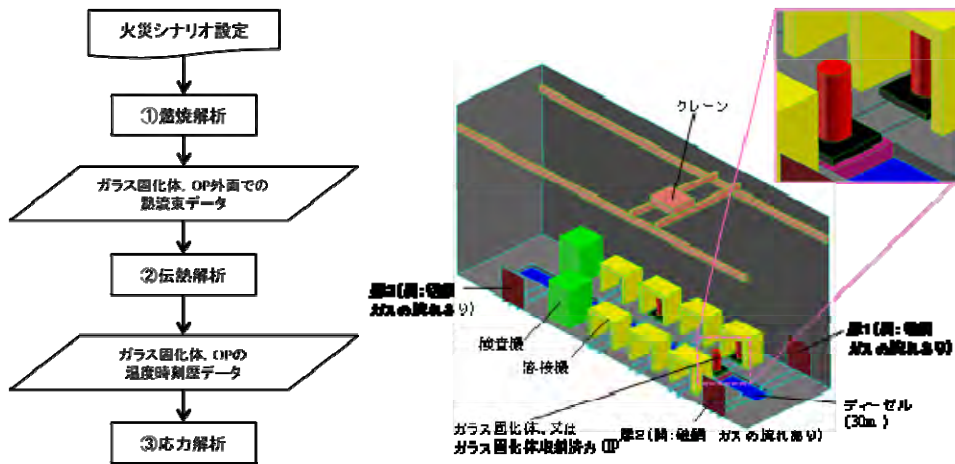
温度と一酸化炭素濃度の坑道断面内分布



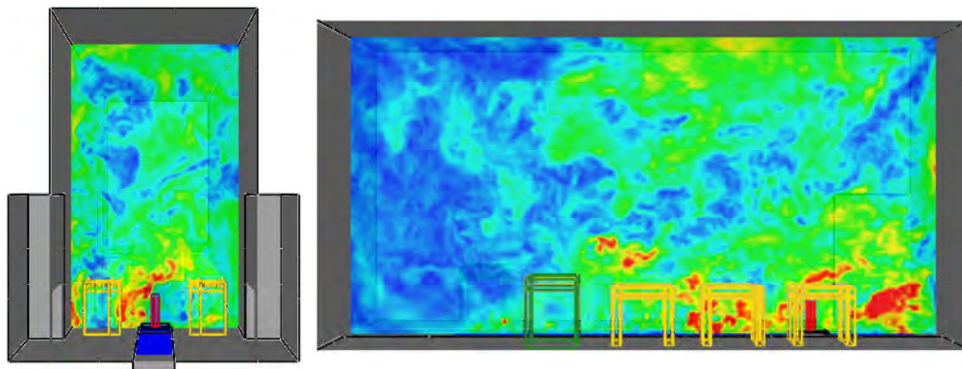
避難状況の3D図化

図 1.5.2-3 「3章 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」成果概要 (その2)

(1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討



地上施設の火災を想定し、ガラス固化体、オーバーパックスへの影響を検討



燃焼解析結果の一例 ⇒ 燃焼解析結果から伝熱応力解析の火災曲線を設定

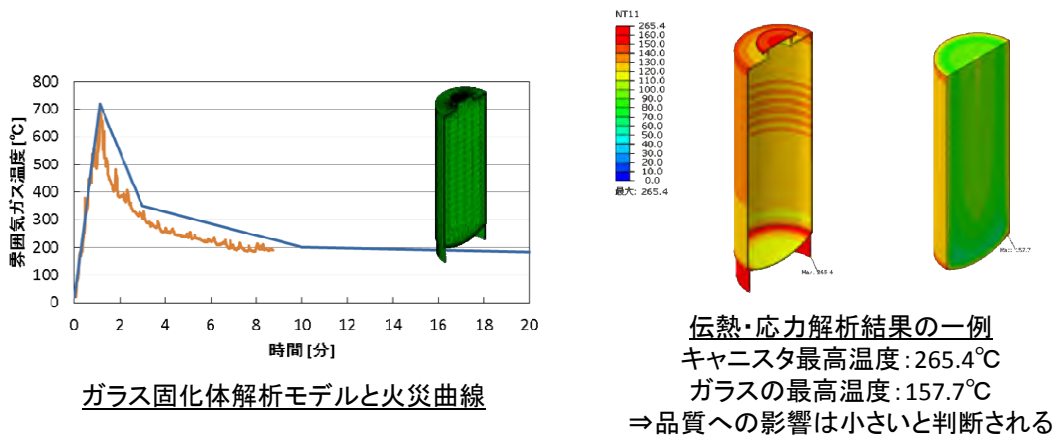


図 1.5.2-4 「4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (その1)

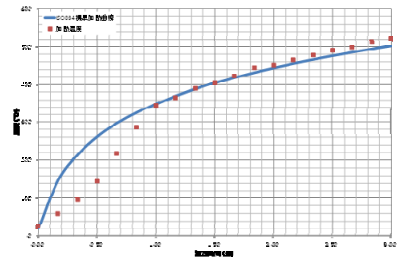
(2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の取得



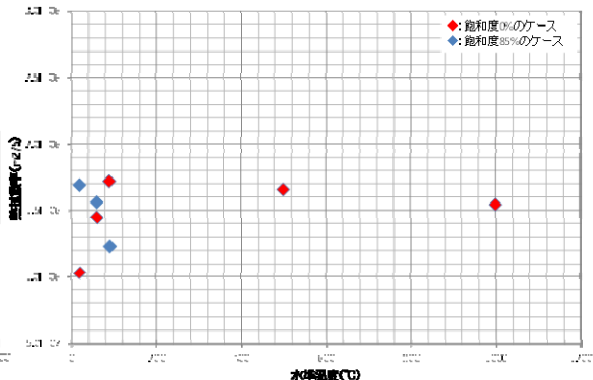
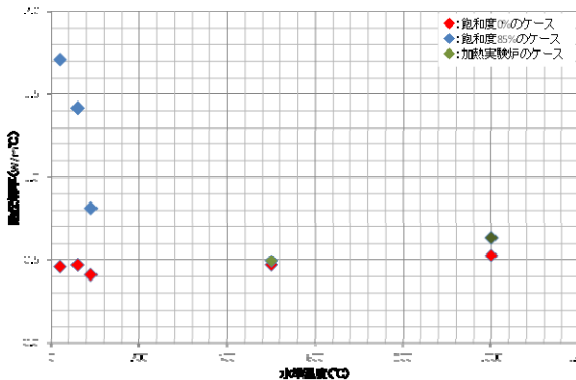
熱特性取得装置



加熱実験状況



加熱実績 (500℃の例)



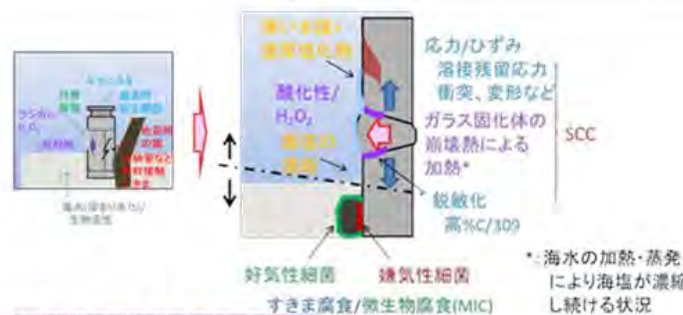
緩衝材の熱伝導率と熱拡散率の取得結果 ⇒ 緩衝材を介した火災影響の解析検討で活用

(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

ステンレス鋼の
 ・海水に対する腐食特性
 ・放射線環境下での腐食特性

【文献調査】

・一般的な海洋環境下における腐食特性の情報・知見を整理した【課題の抽出】
 ①津波被害を受けた場合のキャニスタ材の腐食環境の評価
 ②水の放射線分解による酸化性の高まりを考慮したSCC感受性



I. 津波被災影響予想範囲の見積

1. 予想範囲の見積	温度、塩化物濃度、酸化性、生物活性、変形、すきま
II. 要素試験(案)	
1. 常温・海水環境下	SCC(湿潤大気、気液界面、海水)
2. 酸化性環境/H ₂ O ₂ もしくはH ₂ O ₂ 下(縦横縦)	すきま腐食、SCC
3. 生物活性下	すきま腐食+MIC
4. 溶接、熱処理、冷間加工、応力/ひずみ付与	SCC(海水、湿潤大気)

津波被害を想定した腐食損傷と今後の課題の整理(模式図)

図 1.5.2-5 「4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験」成果概要 (その2)

地層処分施設で考え得る様々な異常状態や事故時の状況把握・監視手順と適用技術を整理(15枚のシートに整理)

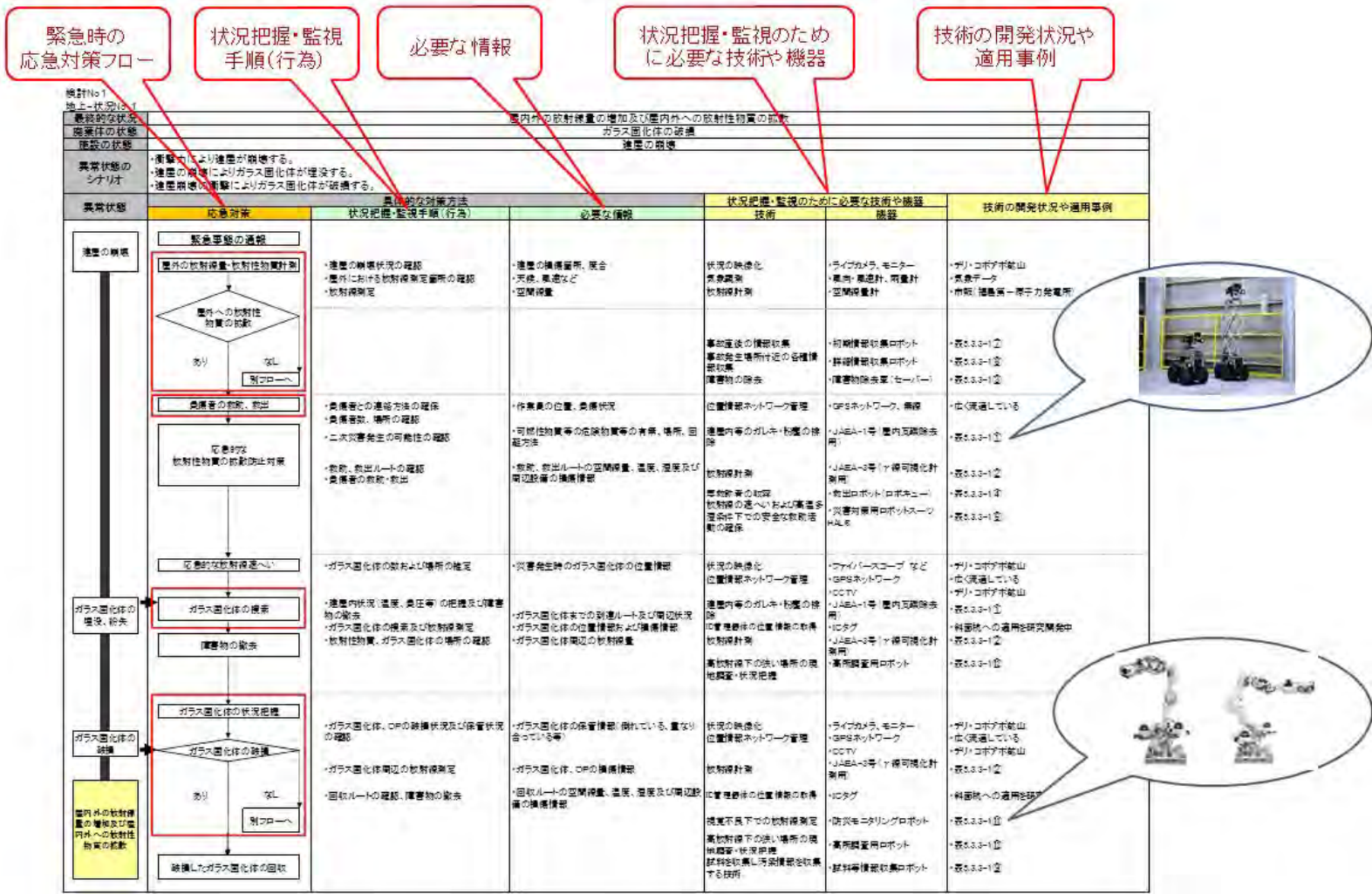


図 1.5.2-6 「5章 状況把握・監視技術に係る調査・検討」成果概要

【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] Risk Financing –A Guide to Insurance Cash Flow, International Risk Management Institute, Inc., Dallas, IV, K.1
- [10] Risk Financing –A Guide to Insurance Cash Flow, International Risk Management Institute, Inc., Dallas, V, K.2
- [11] 9/11 Commission Report: Final Report of the National Commission on Terrorist Attacks upon the United States
- [12] Impact of 9/11 on Lehman Brothers, Merrill Lynch and American Express, DrillDowns, HP CIO.com,
http://www.cio.com/article/31296/Impact_of_9_11_on_Lehman_Brothers_Merrill_Lynch_and_American_Express

第2章 5年間の研究計画の立案

2.1 平成24年度成果に基づく研究計画の立案

2.1.1 平成24年度に選定した技術開発課題

1.2.1「本開発の背景」で述べたように、本開発は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、平成24年度に研究開発に着手したものであり、平成24年度は平成25年度以降に取り組む技術開発課題の選定と年度展開の提示を最終的な目的として研究開発を行った。平成24年度の成果は、1.4.2「平成24年度の成果概要」に示したが、簡潔に再掲すると以下の通りである。

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

次に、類似施設の調査結果などに基づき、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある自然災害を選定し、これらの起因事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出・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」、及び「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」の候補に選定し、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。

2.1.2 平成25年度以降の開発における技術開発課題の選定

上述のように、平成24年度成果として4つの技術開発課題候補を選定したが、このうち「救援・救出技術」については、現況技術の調査を継続した結果、経済産業省の他の事業や、他の省庁・自治体などで同様の研究開発が進められていることが分かり、本開発ではそれらの開発状況を注視していき、成果がまとまった時点で地層処分への適用性等の検討を行うのが適切と判断された。「救援・救出技術」に係る調査結果については、本報告書の参考資料③「救援・救出技術の調査結果」に示す。

このような状況から、平成25年度からの開発では、「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査試験」の3テーマを、平成24年度成果に基づく技術開発課題として取り上げていくこととした（図 2.1.2-1 参照）。

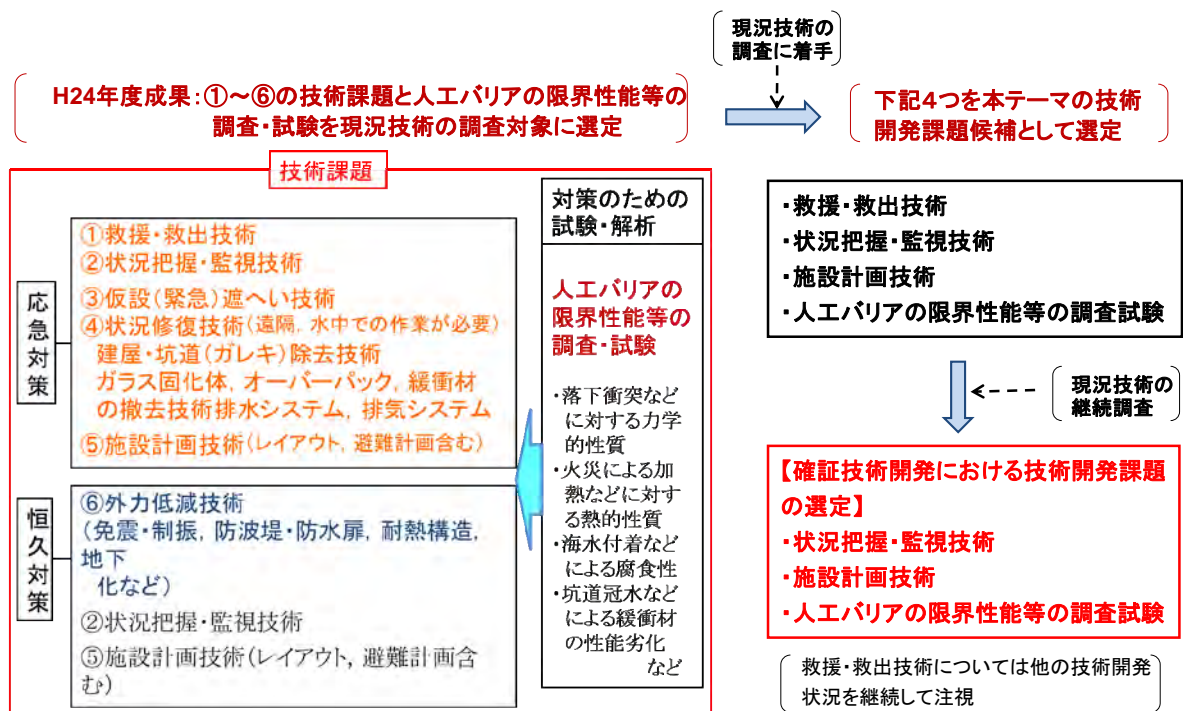


図 2.1.2-1 平成24年度成果に基づく平成25年度以降の技術開発課題の選定

2.1.3 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係る今後5年間の研究計画

「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」、「人工バリアの限界性能等の調査試験」の3テーマについて、平成24年度に検討・作成した年度展開を表 2.1.3-1～表 2.1.3-5 に示す[1]。これらに基づく3つの技術開発課題に係る今後5年間の研究開発計画の概要を図 2.1.3-1 に示す。

(1) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討

地層処分事業操業中においては、作業従事者や処分場の立地点周辺の公衆に対する放射線安全の確保、及び一般産業と同様の労働安全の確保と環境保全に取り組む必要がある[2]。

本技術開発課題においては、上述の「放射線安全」、「一般労働安全」、「環境保全」のうちの前2者に関連するところの、地層処分施設で働く作業員の安全確保を考慮した施設計画技術に関わる調査・検討を行う。当初3年間程度で地下施設における火災事象等を対象とした検討を先行して行い、

- ・火災事故から作業員の人命を守ることを考慮した地下施設を計画・設計するにあたり、有効・有用な検討項目（定置・埋戻し・建設の各パネルレイアウトや運用方法、吸気・排気等の施設内設備、人員配置、など）の提示
 - ・操業安全の検討手法（解析的検討手法の有用性）の提示
- などを成果目標として研究開発を行う。その後、冠水や落盤などの他の事故事象を対象とし検討を行う計画である。

今年度は、以下の項目について調査・検討を行う。

- ・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
- ・上記調査結果等に基づく地下施設・設備のレイアウトや人員配置の設定
- ・気流解析（煙、有毒ガス、熱気などの火災影響の拡散状況の把握などを目的とする）や避難シミュレーション解析（避難経路や避難速度などの把握を目的とする）の解析条件（解析モデル、避難速度、避難のタイミング、境界条件など）の検討・設定
- ・気流解析や避難シミュレーション解析等の解析的検討手法の適用性確認に向けた事前解析の実施

(2) 人工バリアの限界性能等の調査・試験

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

今年度から、平成24年度の検討で優先度が高いと評価した（詳細は4章を参照）人工バリアの熱的性質及びガラス固化体キャニスタ容器の腐食特性に関する調査・検討に着手する。当初3年程度で火災影響を想定した熱的性能に関する検討と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ついての検討を行い、その後、人工バリアの力学的性質や水理的性質の検討を実施する計画である。

今年度は、平成24年度の検討成果を踏まえ、以下の項目について調査・試験を行う。

1) 人工バリアの熱応力解析によるデータ取得

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のデータを取得する。今年度は、人工バリアの状態として「ガラス固化体」及び「ガラス固化体+オーバーパック」を対象に解析を行い、データを取得する。

2) 緩衝材の加熱試験によるデータ取得

解析的な検討においては、材料物性値を適切に設定することが信頼性を向上するうえで重要である。人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックについては、わが国では材質のリファレンスは炭素鋼としており、その熱特性は高温時も含めて把握されている。一方、もう一つの構成要素である緩衝材については、100℃未満の熱特性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・蓄積されていないのが現状である。

以上から、地層処分施設における火災事故を想定し、緩衝材を介したオーバーパックやガラス固化体の温度履歴に対する解析的検討の実施、及び解析結果の信頼性を向上するために、緩衝材の高温時の熱特性を取得する。

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データ取得

本開発においては操業中に津波により地層処分施設に海水や津波土砂が流入することを想定したことから、ガラス固化体キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に晒される状況が考え得る。ステンレス鋼の一般的な海洋大気環境下における腐食特性については既往の研究例があ

る 例えば[3]、[4]。しかし、本開発のように放射性廃棄物を扱う施設における津波被害を想定したより過酷な塩分環境条件（ガラス固化体が海水や津波土砂に浸漬した条件、あるいは半浸漬して気液界面で海塩が析出・濃縮するような条件）における腐食特性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられる。

以上から、津波被害を想定した過酷な塩分環境条件を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性の検討に資することを目的に、ステンレス鋼の海水等に対する腐食特性、及び放射線環境下での腐食特性に係る文献調査を行い、既往の情報・知見を整理するとともに今後の課題を抽出する。

(3) 状況把握・監視技術に係る調査・検討

地層処分施設は多様な施設・設備から成り、想定される異常状態や事故もまた多様である。このような異常状態や事故の影響を緩和し被害を低減するためには、速やかな状況把握・監視が必須と言える。平成24年度は、自然災害を起因事象として地層処分施設で考えられる様々な異常状態や事故状況を検討・抽出したが、このような検討はこれまであまり為されていない。このため、地層処分施設で想定される多様な異常事態・事故の状況を速やかに把握する技術についての体系的・網羅的な検討例も見あたらない。

そこで、状況把握監視技術については、2年程度の期間で、地層処分施設で想定し得る異常状態や事故ごとに、その状況を速やかに把握するための手順を整理・体系化するとともに、その時に必要や機器や技術の抽出とそれら機器・技術に係る開発状況などの情報を収集・整理する計画である。

今年度は、以下の項目について調査・検討を行う。

- ・平成24年度に検討・設定した地層処分システムで考え得る多様な異常状態や事故について「状況把握・監視」の観点からの見直し作業を行い、考え得る異常状態・事故ごとに状況把握・監視手順を整理する。
- ・上記の作業結果を踏まえ、それぞれの異常状態や事故ごとの状況把握に必要な機器や資機材、技術についての情報収集に着手する。情報収集は「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」に着目して行う。
- ・「放射線環境下に適用できる技術」については、主に、福島第一原子力発電所事故を契機に、国等が実施した研究開発に関する報告書等を調査し、検討・開発情報を収集・整理する。
- ・「大深度地下に適用できる技術」については、チリ・コピアポ鉱山の落盤事故やカナダ・シガーレイク鉱山の異常出水事故など、大深度地下における異常状態や事故に関する文献を調査し、それらの事態に適用された状況把握技術の情報を収集・整理する。

表 2.1.3-1 状況把握・監視技術に関わる技術開発概要と年度展開[1]

調査・検討項目	技術課題のカテゴリ	対象事象	概略の調査・検討内容	調査・検討項目の選定理由	調査・検討成果目標と成果がもたらす効果	調査・検討にあたっての留意事項等
緊急時の状況把握手順・方法の調査・検討	状況把握・監視技術	自然災害により地層処分施設が異常状態・事故に陥った状況	<ul style="list-style-type: none"> ・福島第一原子力発電所事故や、その他事例の状況把握技術の調査 ・H24年度に抽出した異常状態・事故ごとに、状況把握のための具体的な作業手順や、作業に必要な機器・資機材・技術を調査し、体系化 	<p>【地層処分の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地層処分場は多様な施設から成り、想定される異常状態・事故事象も多様である。これらの事態が生じた場合の影響を緩和するためには、速やかな状況把握が必須である <p>【防災の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・異常状態・事故の状況を速やかに把握するとともに公表し、それに基づいて対策を講じることで、公衆の安心感の醸成に資することができる 	<p>【成果目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・異常状態・事故ごとの状況把握手順の体系化 ・状況把握に必要な具体的な機器や資機材、技術の抽出 <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上記成果を事業主体が今後実施する施設設計に反映することで、操業安全性を向上することができる 	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な機器・資機材・技術を調査・抽出する過程で、改良や開発が必要な要素技術があれば抽出し、年度展開を検討する

実施項目	1年目	2年目	3年目以降
緊急時の状況把握手順・方法の調査・検討	① クライシス状態を対象とした文献等の調査	福島第一原子力発電所事故や、その他事例の状況把握技術の調査・整理	
	② 状況把握手順の体系化・要素技術の抽出	状況把握・監視に必要な手順、体制、および具体的な機器・資機材・技術等を検討・整理	
	③ 既存の要素技術の改良・新規要素技術の検討開発		開発が必要と判断された場合

表 2.1.3-2. 施設計画技術に関わる技術開発概要と年度展開[1]

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
人命救護に資する施設計画の調査・検討	施設計画技術	自然災害により地層処分施設に火災や海水流入などの異常が発生し、作業員の人命が脅かされる状況	<ul style="list-style-type: none"> ・海外の地層処分計画等における類似検討の調査 ・地層処分の地上・地下施設のレイアウト計画・人員配置 ・緊急時の地上・地下施設内での避難シミュレーション ・坑道内での物質拡散評価や坑口からの水の流入・流下評価のための気流解析、流体解析 	<p>【地層処分の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・作業員の安全確保を考慮した施設計画検討のためのツール(レイアウト構想手法やシミュレーション解析手法など)を保有することは重要と考えられるが、現時点では日本で同様の検討例が見あたらない <p>【防災の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地層処分では周辺住民の被ばくが最大の事故事象であり、これを防止することが第一である。さらに、作業員の人命を守ること、および被ばくを低減することが必要である。 	<p>【成果目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人命救護に資する施設構造や緊急時の避難設備・避難方法等の例示 ・人命救護を考慮した施設計画検討のため考え方・検討手順や解析手法の提示 <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上記成果を事業主体が今後実施する施設設計に反映することで、操業安全性を向上することができる 	<ul style="list-style-type: none"> ・地層処分の地上施設・地下施設のレイアウト等は、既往の文献・資料の調査結果に基づいて設定する

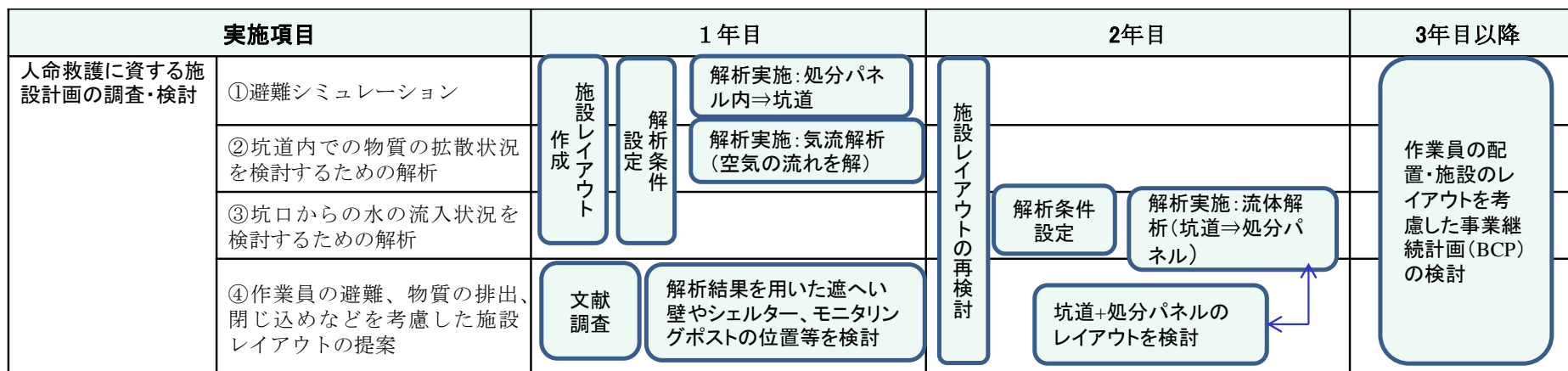


表 2.1.3-3 人工バリアの熱的性質に関わる技術開発概要と年度展開[1]

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	地震と津波の重畳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"> ・火災環境を調査検討し、加熱条件や解析モデルを設定 ・OP及び緩衝材を介したガラス固化体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、緩衝材の熱特性の実験データを取得 	<p>【地層処分の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・万が一火災が発生した時の、ガラス固化体への影響を把握したい ・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 <p>【防災の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地層処分場において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。火災影響を事前に把握することで、安全性の提示や公衆の安心感の醸成に資することができる 	<p>【成果目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・加熱温度や加熱時間などがガラス固化体に及ぼす影響の把握 ・緩衝材の高温時熱特性の把握 <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・OP及び緩衝材に保護されたガラス固化体が、どの程度の火災影響に耐え得るかなどが把握できる ・火災に対する人工バリアの頑健性を把握しておくことで、万が一の事故時に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

実施項目		1年目	2年目
人工バリアの熱的性質の調査・試験	①地層処分に用いるベントナイト系材料の熱特性(特に高温時の特性)の把握試験	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">供試体作成</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">加熱試験による熱特性の把握・確認</div> </div>	
	②火災時の人工バリアの状態把握に向けた解析的検討	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">解析条件設定</div> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">解析実施 ガラス固化体 ガラス固化体+OP</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; text-align: center;">解析実施 ガラス固化体+OP +緩衝材 PEM</div>

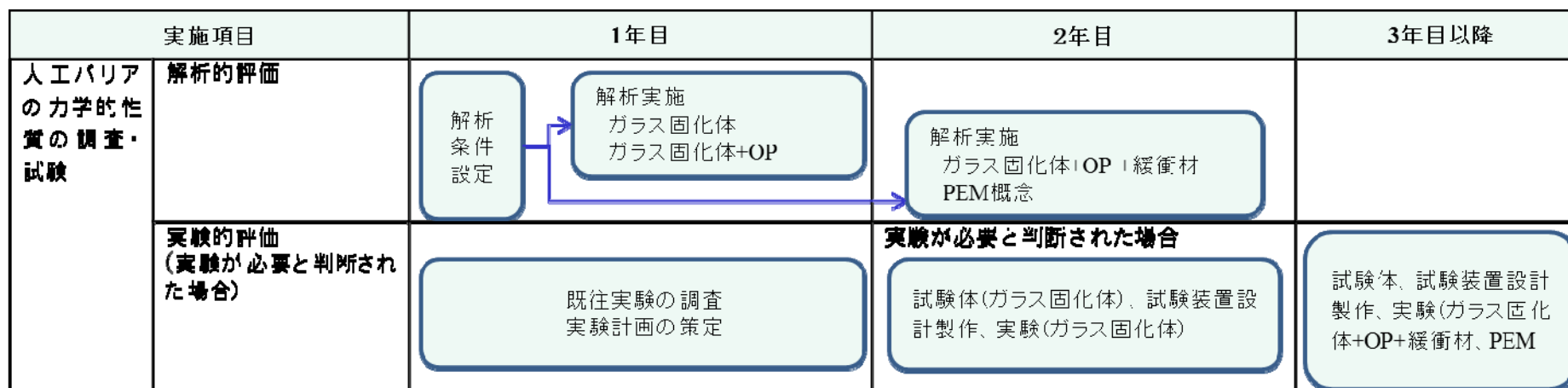
表 2.1.3-4 ガラス固化体キャニスタの腐食特性に関わる技術調査概要と年度展開[1]

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
海水の付着等によるキャニスタの腐食性の調査	人工バリアの限界性能等の調査・試験	津波等により地上施設に海水が流入し、ステンレス製キャニスタが塩化物の影響を受ける状況	<ul style="list-style-type: none"> 海水浸漬したステンレスの腐食性に係る研究成果の調査、整理 放射線影響を考慮した腐食性に関わる研究成果の調査、整理 	<p>【地層処分の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島第一原子力発電所事故から、高線量下では塩化物の影響で鋼材が腐食し易いことが考えられる。このため、津波等の流入により塩化物の影響を受けたステンレス製キャニスタの腐食性を事前に把握しておきたい <p>【防災の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> 津波被害を想定したキャニスタの耐食性を把握することで、万が一の場合の安全性の提示や公衆の安心感の醸成に資することができる 	<p>【成果目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> キャニスタに使用されるステンレス鋼の耐食性を体系的に整理（海水・塩分に着目） 高線量下のステンレスの腐食性に係る研究の有無や成果を整理 <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> 津波等の流入により塩化物の影響を受けたステンレス製キャニスタを、水洗浄等の処置でそのまま処分してよいか等の判断材料を得ることができる 	<ul style="list-style-type: none"> 既存のガラス固化体を扱う関連施設におけるキャニスタ耐食性に係る検討・評価の知見を踏まえて、調査を行う

実施項目		1年目	2年目
海水の付着等によるキャニスタの腐食性の調査	海水に対する腐食性の調査	文献調査 (ステンレス鋼全般、海水)	
	放射線環境下での腐食性の調査		文献調査 (ステンレス鋼 放射線環境下、海水)

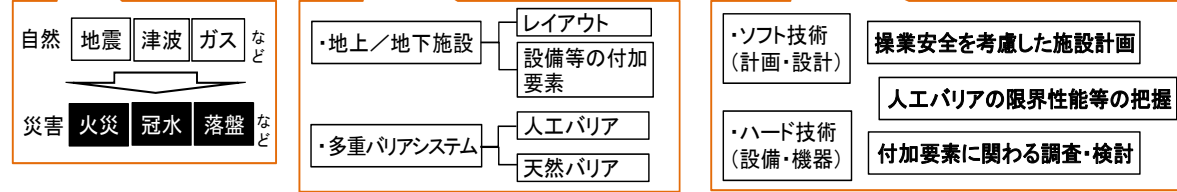
表 2.1.3-5 人工バリアの力学的性質に関わる技術開発概要と年度展開[1]

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
人工バリアの力学的性質の調査・試験	人工バリアの限界性能等の調査・試験	自然災害に起因して廃棄体が高所から落下したり、飛来物や漂流物が廃棄体に衝突する状況	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体に異常外力が作用する状況を調査検討し、解析ケース等を設定 ・異常外力の作用に対するOPの耐力を解析的に検討 ・万が一のガラス固化体破損を想定し、衝撃試験等による破砕生成物の実験データの取得 	<p>【地層処分の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・落下や異物衝突など廃棄体への異常外力の作用は、地層処分場の事故として最も想定し易い事象であり、種々の異常外力を対象に、その影響を事前に把握しておきたい <p>【防災の観点から】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・異常外力に対する廃棄体の頑健性は公衆の関心事でもあり、事前に把握することで、安全性の提示や公衆の安心感の醸成に資することができる 	<p>【成果目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・種々の異常外力に対するOPの健全性や限界性能の把握 ・PEM方式の異常外力に対する頑健性の把握 ・ガラス固化体の破砕特性の把握 <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・異常外力に対するOPの頑健性を把握しておくことで、万が一の事故時に安全性を示すことができる ・ガラス固化体の破損を想定した、放射性物質の拡散評価に活用できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・他の研究開発との情報交換により検討内容の重複を避ける ・ガラス固化体、緩衝材等の人工バリアや衝突物（建屋、岩盤等）の物性値の適切な設定、評価対象物の破損判断方法の検討



全体目的

自然災害に対する地層処分システムの安全確保対策技術の開発



H24	開発項目	H25	H26	H27	H28	H29	成果目標	(H30~)
技術開発課題の選定と平成25年度以降の年度展開の提示	<p>作業安全を考慮した施設設計画に関わる調査・検討</p>	<p>・検討条件の設定等</p> <p>・解析手法の適用性検討(事前解析)</p>	<p>火災事象等に対する ・避難シミュレーション解析 ・気流解析等</p> <p>①状況の「見える化」 ②解析手法の提案等</p>	<p>地下施設設計画・設計時の制約事項に関する解析的検討 ・施設レイアウト ・設備(換気設備など) ・パネル運用(人員配置など)</p>	<p>地下施設における異常状態や事故(火災・爆発・冠水・落盤事象など)を想定した調査・検討の継続</p>	<p>・火災事象等及びH28,29検討事象に対する作業安全を考慮した ・地下施設設計画の検討手法等の提案 ・地下施設検討時の制約事項等の提案</p>	<p>・H29までの成果を踏まえた地下施設に関わる調査・検討の継続 ・地上施設に関わる調査・検討</p>	
	<p>人工バリアの限界性能等の調査・試験</p>	<p>人工バリアの熱的性質(火災影響の解析的検討、緩衝材熱特性試験等)</p> <p>塩分影響を考慮したキャニスタの腐食性の調査・検討</p>	<p>・H25,26成果を踏まえた検討の継続 ・力学的性質、水理的性質等の調査・検討の計画等</p>	<p>力学的性質、水理的性質等に関する調査・検討の実施</p>	<p>・事故の影響評価や対策選定に資する知見・データの整備 ・作業安全性評価での活用</p>	<p>成果の反映</p>		
	<p>状況把握・監視技術に関わる調査・検討</p>	<p>・異常状態や事故ごとの状況把握手順の整理・体系化 ・必要な機器や資機材の調査と使用条件や把握レンジ等の整理</p>	<p>既存技術の地層処分への適用性の調査・検討</p>	<p>速やかに異常状態や事故の状況を把握・監視する手順・手段・体制等の整備</p>	<p>成果の反映</p>			

図 2.1.3-1 平成24年度成果に基づく3つの技術開発課題に係る5年間の研究計画概要

2.2 新たな視点からの操業安全の検討

2.1 で述べたように、本開発は東北地方太平洋沖地震を契機に、平成24年度に研究開発に着手したものであり、平成24年度は平成25年度以降に取り組む技術開発課題の選定と年度展開の提示を最終的な目的として研究開発を行った。このような経緯を勘案すると、今後の研究計画は平成24年度成果に基づいて立案することは一つの妥当な方向性と考えられる。よって、2.1では「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係わる今後5年間の研究計画」を述べた。

一方で、本開発テーマが属する「処分システム工学確証技術開発」は、平成25年度を初年度として今後5年程度の期間に渡り実施する新規事業である。また、本開発のテーマ名についても平成24年度の「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」から「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発」に変わり、検討対象が「自然災害全般」に渡ることや、「操業期間中の安全対策」であることなどが明記された形になった。このような状況の変化を踏まえると、本開発の研究計画についても、平成24年度成果のみにとらわれることなく、新たな視点から操業安全を検討し、それに基づいた技術開発課題の抽出や年度展開の提示も必要と考えられる。

そこで以下に、「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つの視点から地層処分事業の操業安全を検討し、それらを通して平成24年度成果として選定した技術開発課題の妥当性や、新たな技術開発課題の抽出等について考察する。

2.2.1 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

地層処分施設はガラス固化体を受入・検査しこれをオーバーパックに封入する地上施設と、廃棄体を定置・埋戻しする大深度地下施設から構成されることが予定されている。このような施設の操業安全を検討するとした場合、施設構造や操業技術あるいは安全対策上の共通点がある既存施設の保安に係る法令に基づいて検討することが一つの方法と考えられる。

平成24年度に選定した技術開発課題のうち「施設計画技術」については、地下施設における火災事象を対象とした検討に今年度から着手し、その後、冠水や落盤等の事象に対する安全対策の検討を行う計画である。ここでは、「施設計画技術」の検討対象や検討内容・手法について、その妥当性や新たな課題の有無などを、既存類似施設の保安に係わる法令等に基づいて検討する。

(1) 検討方針の全体概要

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の全体概要を、図 2.2.1-1 に示す。

上述のように、地層処分施設は地上施設と地下施設から構成されることが予定されているが、このうち地上施設については、日本原燃（株）再処理施設や廃棄物管理施設が類似施設として挙げられる。これらについては、現在、改正「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（原子炉等規制法）に基づく新規規制基準の施行に向けて検討が進められており、その中で、地震・津波の評価方法の厳格化、火災防護対策の強化、及び設計想定外の重大事故対策の整備、などが検討されている。これらの成果は地層処分事業操業中の地上施設の保安に反映できると考えられる。

これに対して、地下施設については、地下構造物としての類似性からは鉱山やトンネル等があり、同時にガラス固化体を取扱う類似性からは廃棄物管理施設等があり、2面の類似性があると言える。そして、地下構造物の保安に係る法令として鉱山保安法やトンネルの道路法等があり、ガラス固化体の取扱いに係る法令としては原子炉等規制法や管理規則等があるが、地上施設のような、地層処分の地下施設に反映できる具体的な取り組みは為されていないのが現状と考える。

このような状況を踏まえ、本開発テーマにおいては、地下施設を対象とした安全対策について検討を行うことが妥当と考えられる。

<p>地層処分で想定される 施設構成</p>		
<p>地層処分施設と類似する 既存施設</p>	<p><u>放射性廃棄物を取扱う類似性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・再処理施設 ・廃棄管理視施設 	<p><u>①地下構造物としての類似性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉱山、炭鉱 ・トンネル ほか <p><u>②ガラス固化体を取扱う類似性</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物管理施設
<p>地層処分の作業安全</p> <p>↓</p> <p><u>既存の類似施設の保安に係る法令に基づいて検討</u></p>	<p><u>類似施設の保安に係る法令</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉等規制法 ・再処理規則 ・管理規則 ・その他(安全審査指針 など) 	<p><u>①地下構造物の保安に係る法令</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉱山保安法 ・鉱山保安施行規則 ・道路法 ほか <p><u>②ガラス固化体の取扱いに係る法令</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉等規制法 ・管理規則
<p>既存類似施設の保安に係る 取組みと地層処分との関連</p>	<p><u>○改正原子炉等規制法に基づく新規制基準の施行 (H25.12 予定)</u></p> <p><u>○新規制基準のポイント</u></p> <p>①設計基準の強化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震・津波の評価方法の厳格化 ・火災防護対策の強化・徹底 など <p>②重大事故対策の整備</p> <p>↓</p> <p><u>地層処分の地上施設の保安に反映できると考えられる</u></p>	<p>地層処分の地下施設に反映できる 左記のような具体的な取り組みは見られない</p> <p>↓</p> <p><u>本テーマの「施設計画技術」において 地下施設を対象とした安全対策について検討</u></p>

図 2.2.1-1 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の全体概要

(2) 地下施設の操業安全の検討方針

地下施設の操業安全の検討は、前述のように、既存類似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、管理規則などがあるが、本開発テーマでは、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 2.2.1-2 参照）。

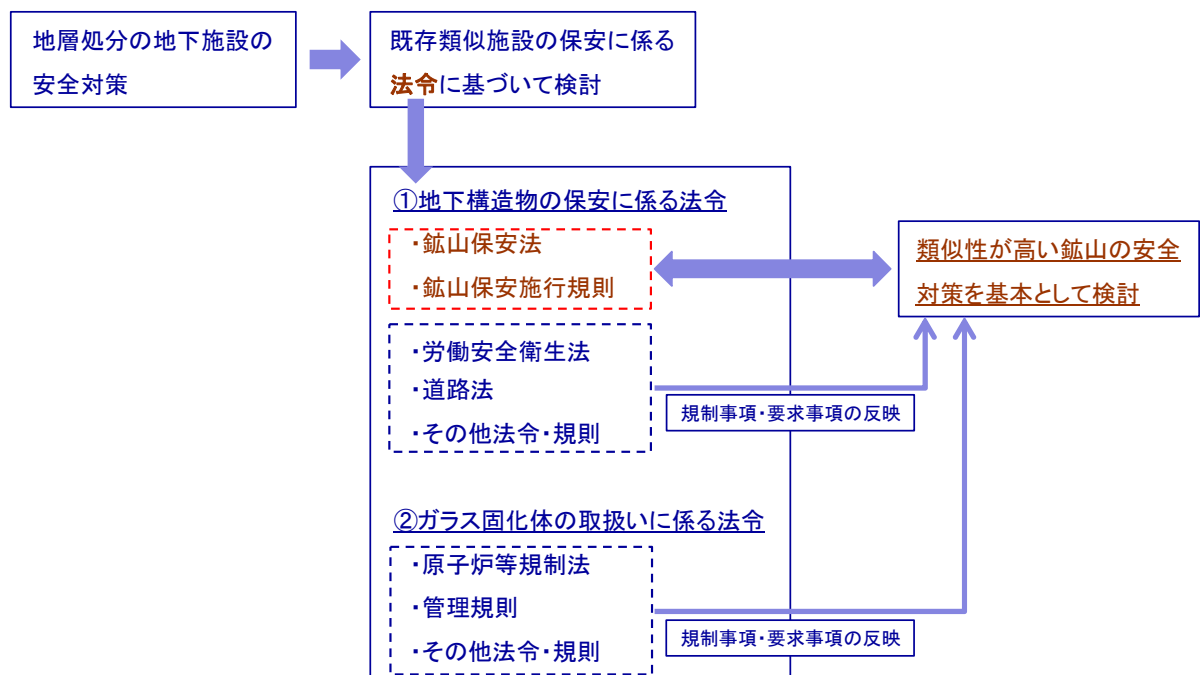


図 2.2.1-2 地下施設の操業安全の検討方針

(3) 鉱山の保安に係わる法体系

地下施設の操業安全を検討するにあたり基本と考える鉱山保安法には、第1条に「鉱山労働者に対する危害の防止、鉱害の防止、鉱物資源の合理的開発」を目的とすることが述べられている。また、第3条には「保安」について述べられており、人に対する危害の防止だけでなく、鉱物資源の保護、施設の保全、公害の防止（環境配慮）の4項目が保安の対象であることが示されている。これら4項目すべてが地層処分にも関連する保安であるが、本開発テーマでは、一般的な概念上、人に対する安全確保が第一という観点から、1の人に対する危害の防止に着目した。

法体系としては、法律のもとに省令（鉱山保安法施行規則）があり、さらに具体的な措置等を記述している内規があるという形である（図 2.2.1-3 参照）。

基本法： 鉱山保安法

○第一条(この法律の目的)
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防止し、鉱物資源の合理的開発を図ることを目的とする。

○第三条 この法律において「保安」とは、鉱業に関する次にあげる事項をいう。

一 鉱山における人に対する危害の防止	} <ul style="list-style-type: none"> ・一～四、いずれも地層処分に関連 ・本開発では、特に、一に着目して検討
二 鉱物資源の保護	
三 鉱山の施設の保全	
四 鉱害の防止	

法体系の概要

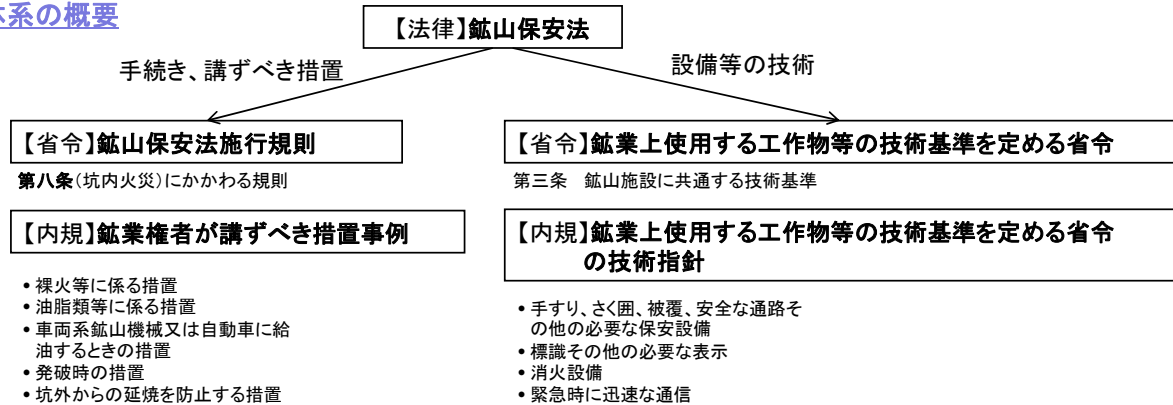


図 2.2.1-3 鉱山の保安に係わる法体系

(4) 鉱山保安法の概要

図 2.2.1-4 に、鉱山保安法の概要[5]（安全確保のための体系図）を示す。

同図の左側の黄色い枠線内は行政の監督等に係る条項であり、本開発テーマに係りが大きいのは右側の緑枠線の条項である。例えば、安全確保に向けて、鉱業権者は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、地層処分の操業においても実施事業者これらの条項を遵守する必要があると考えられる。この緑枠内の鉱業権者に係る条項の中で、本開発テーマに最も係りが大きい条項は、赤線枠内の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」の部分と考えられ、その中でも「第5条 人に対する危害防止のために必要な措置」が特に係りが大きいと考える。

鉱山保安法の概要 (安全確保のための体系図)

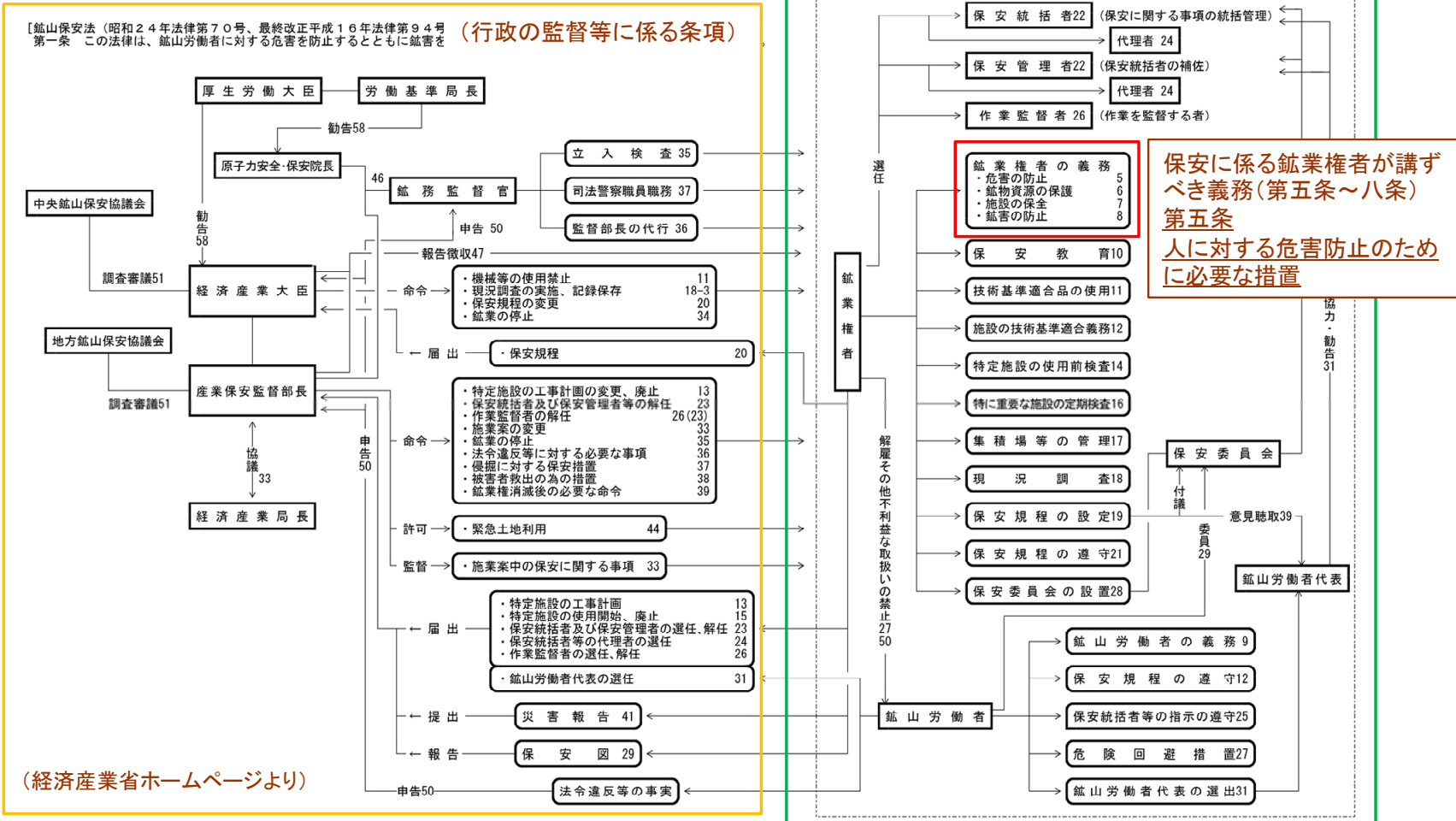


図 2.2.1-4 鉱山保安法の概要 [5]に加筆

(5) 鉱山保安法に基づく災害事象の選定

上述のように、本開発テーマにおいては、鉱山保安法の第5条「人に対する危害防止のために必要な措置」の係りが特に大きいと考える。そこで第5条を見てみると、「次に掲げる事項について、人に対する危害の防止のための必要な措置を講じなければならない」とし、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（図 2.2.1-5 参照）。地層処分事業の操業安全を考えるにあっても、これらの事象を対象とした安全を検討する必要があると考えられ、加えて、廃棄体の落下などの地層処分特有の事象に対する安全も考えていく必要があると言える。

既存の類似施設の保安に係る法令等に基づいて地層処分事業の操業安全を検討する場合、本項の(1)～(5)のような考え方・流れで対象とする災害事象を抽出し、優先順位を検討するなどして対象事象を決めるのが一つの方法と考えられる。

本開発テーマにおいては、平成24年度の成果・年度展開を踏まえて、鉱山保安法において考慮すべき災害の一つに挙げられている坑内火災について先行して検討することとし、その後、他の事象についての検討も行う計画である。

- 第五条 鉱業権者は、次に掲げる事項について、経済産業省令の定めるところにより、鉱山における人に対する危害の防止のため必要な措置を講じなければならない。
- 一 落盤、崩壊、出水、ガスの突出、ガス又は炭じん、の爆発、自然発火及び坑内火災
 - 二 ガス、粉じん、捨石、鉱さい、坑水、廃水及び鉱煙の処理
 - 三 機械、器具（衛生用保護具を除く。以下同じ。）及び工作物の使用並びに火薬類その他の材料、動力及び火気の取扱い
- 2 前項に定めるもののほか、鉱業権者は、経済産業省令の定めるところにより、衛生に関する通気の確保及び災害時における救護のため必要な措置を講じなければならない。



人に危害を与える事象として考慮すべき自然災害

- ・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

図 2.2.1-5 鉱山保安法 第5条

(6) 坑内火災による危害防止に必要な措置

鉱山保安法において考慮すべきとされている災害事象を対象に、「人に対する危害を防止するために必要な措置」として何が求められているかについては、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（章末「参考：鉱業権者が講ずべき処置事例 抜粋」参照）。

坑内火災に係る措置事例については、「鉱業権者が講ずべき措置事例」の第6章に示されているが、項目的には、「1. 坑内火災を防止するための措置」、「2. 坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」、「3. 坑内火災による被害を防止するための措置」に分類されている。

これらの内容をみると、1、2の項目については比較的多くの具体的な措置事例が示されており、地層処分事業の操業中の安全対策に反映できる事項が多いと考える。これに対し、3の項目、すなわち火災が生じてしまった後、その火災による人的被害を防止する措置については記載が少ない。本開発においては、現状、具体的な事例の記述が少ない部分である「坑内火災による被害を防止するための措置」を検討対象とするのが妥当と考えられる。

さらに、具体的な措置に係る記述が少ない中でも、「消火器、散水等による直接消火を行う」などの対応は、「2. 被害範囲の拡大を防止するための措置」に基づいて設置される消火器やスプリンクラー設備等を用いて対応すればよいと考えられるため、本開発テーマにおいては、「鉱山労働者を退避させる」ことに着目して検討を行うことが妥当と考えられる（図 2.2.1-6 参照）。

なお、上記1、2の比較的具体的な措置事例が示されている項目についても、大深度地下における作業であることや、廃棄物の定置・定置後の埋戻し・新たな処分パネルの建設の異なる3つの作業が併行して実施されることなど、地層処分事業の特徴を考慮した場合、それに対する適用性の観点からの課題も有ると考えられる。

人に対する危害の防止のため必要な措置

内容や項目:「鉱山保安施行規則」

具体的措置:「鉱業権者が講ずべき措置事例」



「坑内火災」の場合の主な記載内容

1. 「坑内火災を防止するための措置」
2. 「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」
3. 「坑内火災による被害を防止するための措置」

・具体的な措置事例が記載されており、地層処分に反映できる事項が多いと考えられる
・大深度や操業・埋戻し・建設の並行作業の実施など、地層処分の特徴を考慮した場合の課題も有ると考えられる

- ・下記の通り、1、2の項目に比べて具体的措置の記載が少ない
- ・本研究開発で注力する「異常状態や事故が起きてしまった時にどう対処するか」についての具体的措置事例の記述が少ない



3. 鉱山保安法施行規則第8条第3号に規定する「坑内火災による被害を防止するための措置」とは、次のとおり。

- ・消火器、散水等による直接消火を行う。
- ・直接消火が困難なときは、間接消火(密閉又は水没)を行う。
- ・消火作業により危険があるときは、**鉱山労働者を退避させる。**

「2. 被害範囲の拡大を防止するための措置」に基づいて設置される消火器、スプリンクラー設備等を用いて消火作業を行う

現行の対応で手薄な部分の安全対策を検討

図 2.2.1-6 坑内火災による危害防止に必要な措置

(7) 「施設計画技術」における検討内容の妥当性の確認

2.1.3 (1) に述べたように、平成24年度の研究開発成果に基づいて選定した技術開発課題の一つである「施設計画技術」では、今年度から3年間程度の期間で、「地下施設」における「火災事象」を対象に、作業員の安全確保に係る検討を行う計画である。具体的には、煙、有毒ガス、熱気などの「火災影響」と、それらに対する「避難方法」について解析的な検討を行う計画である。ここで、「地下施設」における「火災事象」に対する「火災影響や避難方法」を検討することについて、本項の(1)～(6)に述べた「既存の類似施設の保安に係る法令等に基づくアプローチ」と照らし合わせると、以下の通りである。

1) 地下施設を検討対象にすることについて

本項の(1)に述べたように、地層処分の地下施設に反映できる具体的な取り組みは為されていない現状を踏まえると、地下施設を対象とした安全対策について検討を行うことは妥当と考えられる。

2) 火災事象を検討対象にすることについて

本項の(5)に述べたように、坑内火災は鉱山保安法において考慮すべき災害の一つに挙げられていることから、これを検討対象にすることは妥当と考えられる。ただし、鉱山保安法では坑内火災の他に落盤、崩壊、出水、ガスの突出、ガス又は炭塵の爆発、自然発火を考慮すべき災害として挙げており、今後、他の災害事象に対する安全性の検討も必要と言える。

3) 火災影響や避難方法を検討することについて

本項の(6)に述べたように、鉱山保安法の内規である「鉱業権者が講ずべき措置事例」の記載内容として、「坑内火災による被害を防止するための措置」、言い換えると、火災が生じてしまった後、その火災による人的被害を防止する措置については記載が少ない。その中でも、「鉱山労働者を退避させる」ことについての具体的な記載は見られないことから、火災影響（気流解析による煙、有毒ガス、熱気などの火災影響の拡散状況の把握）や避難方法（避難シミュレーション解析による避難経路や避難速度などの把握）について検討を行うことは妥当と考えられる。

以上のように、2.1.3、(1)に述べた「施設計画技術」の検討対象や検討内容・手法については、「既存の類似施設の保安に係る法令等に基づくアプローチ」の視点からの操業安全の検討と照らし合わせても妥当と考えられる。

一方で、鉱山保安法に示されている坑内火災以外の複数の災害事象についても、5年程度の期間で安全対策を検討する場合、優先順位や必要性（ある災害事象の検討結果が他の災害事象へも展開できる場合には、その事象に対する検討は省くなどの判断）を検討し、効率的に取り組む必要があると言える。前掲の図 2.1.3-1 に示す計画では、坑内火災以外の災害事象の安全対策については4年目以降に取り組む計画になっているが、検討に要する時間や社会的要請等を考慮して前倒しで着手する必要性が生じることも考えられる。5年程度の研究開発期間の中では、様々な状況の変化等に応じた柔軟な計画の見直しも必要と考えられる。

なお、「鉱業権者が講ずべき処置例」の記載内容は、本項(6)に述べた坑内火災と同様に、他の災害事象についても「〇〇災害による被害を防止するための措置」に係る具体的な事例の記述が少ない傾向にある（章末「参考：鉱業権者が講ずべき処置事例 抜粋」参照）。したがって、他の災害事象に対する安全対策の検討においても、坑内火災と同様に「被害を防止するための措置」の部分により注力することが妥当と考えられる。

2.2.2 地層処分事業の防災計画の視点からのアプローチ

(1) 地層処分事業の防災計画の必要性

国及び地方自治体や主要な公共機関等では、自らが運用・管理する構造物や施設・設備等について、「災害対策基本法」の定めにより「防災計画」を策定し、自然災害や事故等の予防と対応に備えている。

災害対策基本法に基づく最上位計画である国の「防災基本計画」の中の「原子力災害対策編」では、「原子力事業者の原子炉の運転等（加工、原子炉、貯蔵、再処理、廃棄、使用（保安規定を定める施設）、事業所外運搬（以下「運搬」）により放射性物質又は放射線が異常な水準で事業所外（運搬の場合は輸送容器外）へ放出されることによる原子力災害の発生及び拡大を防止し、原子力災害の復旧を図るために必要な対策について記述する」と明記されている。

このことから、地層処分事業・施設においても、事業の計画・実施にあたっては、同様の防災業務計画を策定する必要があると考えられる。

(2) 技術開発課題としての「防災計画に係る調査・検討」の必要性

本開発の目的は、そのテーマ名に明示されるように「自然災害に対する操業期間中の安全対策技術の開発」である。今年度から研究開発に取り組んでいる前記の3つの技術開発課題とその具体的検討内容等は、平成24年度に必要な検討過程と技術調査を経て選定したものであり、本開発の目的に合致した課題・検討内容である。しかし、若干、要素技術に偏っている感も否めない。

前述のように、今年度から開発テーマ名が「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発」に変わり、検討対象が「自然災害全般」に渡ることや、「操業期間中の安全対策」であることなどが明記された形になった。このような状況変化を踏まえ、より全般的な視点に立ってみると、上述の「防災計画を策定し、自然災害や事故等の予防と対応に備える」ことは、本開発において最終的に求める目標であり、本開発の基幹になり得る検討課題と考えられる。「防災計画に係る調査・検討」を基幹とし、平成24年度成果に基づいて選定した前記3つの技術開発課題等は、防災計画の検討・策定に必要な要素技術と位置付けることで、今後5年程度の期間の研究開発の全体像が明確になると考えられる。また、防災計画に係る調査・検討の過程から新たな技術開発課題が抽出されることも考えられる。

以上より、「防災計画に係る調査・検討」について、今後5年程度の期間の新たな検討課題として取り組むことが適切と考える。

(3) 「防災計画に係る調査・検討」の実施内容

本研究開発課題では、将来的な地層処分事業の防災計画の策定に資することを目的に、必要事項（防災計画の構成や計画に定めるべき事項・骨子の考え方、防災基本計画での時期区分（原子力災害予防対策、緊急事態応急対策、原子力災害事故対策）の設定の考え方、など）について調査・検討を行う。

図 2.2.2-1 に、地層処分事業の防災計画を検討するにあたり考慮すべき事項の関連性のイメージを示す。同図のように、地層処分事業の防災計画を検討するにあたっては、防災関連の法令のみならず、様々な計画や法律・基準等を踏まえる必要があると考えられる。前項「2.2.1 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」の観点からの安全確保対策の検討も、防災計画に係る検討の一環に含まれていると言える。

防災関連の法令については「災害対策基本法」が基本になるが、同法は大綱を示すにとどまり具体的な記述が少ないため、その骨子は類似施設等の既存計画から読み取ることが適切と考えられる。表 2.2.2-1 には、「既存計画の調査・分析」から始まる概略の防災計画検討の流れを示す。

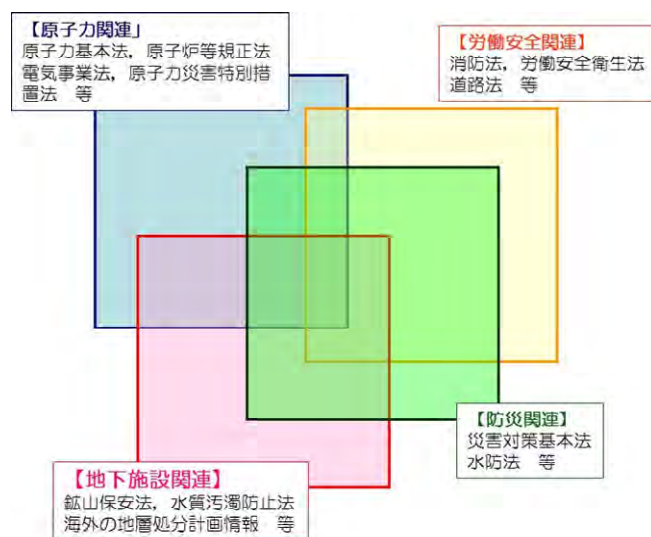


図 2.2.2-1 地層処分事業の防災計画を検討するにあたり考慮すべき事項の関連性

表 2.2.2-1 防災計画検討の流れ

H 2 6	H 2 7	H 2 8	H 2 9
<ul style="list-style-type: none"> ・類似施設等に係る既存計画の調査・分析 ・地層処分事業・施設の防災計画策定に係る課題の検討・抽出 		<ul style="list-style-type: none"> ・防災計画の構成や計画に定めるべき事項・骨子の考え方の提示 ・防災基本計画での時期区分の設定の考え方の提示 	

(4) 平成26年度の実施内容

災害をもたらすような自然事象については、地震発生予知への取組を例に挙げるように、そのメカニズムやもたらされる外力に対する防御など精力的に研究が進められている分野である。

一方で、東北地方太平洋沖地震のように、計画（設計）時点における知見をもってしても、予測し難い規模の自然事象が発生することを完全に否定することは、非常に難しい課題であると認識される。このような認識のもと、近年、災害をもたらすような自然現象に関わる研究は、従来のメカニズムの追求や施設設計等で外力に抗する手法による防災対策に加えて、予測を超えた事象が発生した際に、あらかじめ計画等で定めた行動等をとることで被害を軽減するようなソフト的な防災対策についても範囲を広げている。

これらの研究における大きな目的の一つとして「人命の確保」、「安全・安心」があり、地層処分事業においても、自然災害に対して以下の事項への対策を検討することが重要であり、事業継続の観点からも基本原則であると考えられる。

- ・一般住民の生命と財産
- ・作業員の生命

事業継続性の確保も含めた具体的な安全確保策は、災害発生時において、作業員の生命確保（避難）と施設外への災害影響の防止に向け、処分施設にはハード的な防災（物理的な多重のセーフティーの装備（防災設備））と、ソフト的な防災（ハードの組み合わせを含めた運用方法や扱い方（防災計画や防災マニュアル））が必須であると考えられる。

最終的な防災計画の策定は、実施主体の事業領域であるものの、国の基盤技術整備の面から、防災計画策定に向けた所々の情報を蓄積していくことが求められる。

以上のような背景（現状認識）のもと、平成26年度は、大規模な自然事象に対する災害の発生が否定できない中で、安全を確保するとともに事業継続性も確保するために必要となる諸技術全般について、以下事項の情報収集や検討を図る。

○災害の定義と災害防止に向けた考え方の整理

- ・法令等に基づく防災計画の策定の現状の整理
- ・公共財の設計の考え方の整理
- ・原子力分野の防災の考え方の整理
- ・以上の情報を踏まえた、地層処分事業における防災に向けた必要情報の洗い出しと情報収集方法の設定

また、これらの検討により、以下に示す既に検討を始めている他の検討業務へのニーズ出しを図るとともに、他の検討業務の成果を踏まえた防災に必要な情報が蓄積・更新・改良・改善され、（技術基盤整備事業としての）検討成果の説明性や有効性、また、業務の効率性を高めることが期待される。

○災害規模に対する施設の安全裕度の把握方法の検討

- ・人工バリアを含めた構成部材の事象・災害に対する限界特性
- ・災害拡散もしくは対策効果の確認技術（シミュレーション）

○災害発生時の処分施設の状態を把握するための技術の適用性

○災害防止技術の適用性の把握

2.3 今後5年間の研究計画

表 2.3-1 に、本章の 2.1 及び 2.2 項で述べた内容を踏まえた本開発の5年間の研究計画と各年度の成果目標を示す。

同表中、項目②～④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係わる今後5年間の研究計画である（詳細は、図 2.1.3-1 を参照）。また、2.2.2 で述べた地層処分事業の「防災計画に係る調査・検討」は、項目⑤として平成26年度から取り組む計画である（詳細は、2.2.2 参照）。

なお、2.2.1 で述べた「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」の視点からの操業安全の検討は、防災計画に係る検討の一環として実施することとする。また、2.2.1 (7) で述べたように、研究開発の進捗や社会的要請等を踏まえた研究計画の柔軟な見直しを勘案し、開発期間の中間年度である平成27年度に「進捗の確認と計画の更新」を行うこととする。

表 2.3-1 中の項目①～⑥について、概要を再掲すると以下の通りである。

① 5年間の研究計画立案

平成24年度に選定した安全確保に必要な工学的対策技術及び中長期的課題について、5年間で開発目標を達成するための調査及び試験等に係る研究・試験計画を具体化する。

② 「施設計画技術」に関わる調査・検討

自然災害に対する操業安全を考慮した施設計画技術を考えるにあたっての、検討項目やツール（施設レイアウト検討手法や避難シミュレーション解析手法など）の整備に向けて調査・検討を行う。H25年度から、地下の処分パネルにおける火災事象等に対する安全確保について調査・検討を行う。

③ 「人工バリアの限界性能等の調査・試験」

異常状態・事故時の人工バリアの限界性能等の把握に向けた調査・解析・試験等を行う。H25～H27は人工バリアの熱的性質等について検討し、H28以降は、それらの成果や関係機関の検討成果等を踏まえ、必要と判断される性能（力学的性質や水理的性質等）について調査・検討する。

④ 「状況把握・監視技術」に関わる調査・検討

自然災害に起因して地層処分施設で起こり得る種々の異常状態・事故を設定し、それら種々の異常状態・事故発生時に、安全確保や応急対策を実施していくうえで必要となる「状況把握・監視技術」について調査・検討を行う。

⑤ 「防災計画に係る調査・検討」

地層処分事業においても防災計画は必須と考えられる。計画の策定に資することを目的に、必要事項について調査・検討を行う。

⑥ 中長期的展望に立った技術開発試験等の継続的实施

②～⑤の項目についてのH25、26の検討成果を踏まえ、技術開発試験等を継続的に実施する。

表 2.3-1 本開発の5年間の研究計画

		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		
	ii 調査・解析的検討等の実施	処分パネルにおける火災事象等を想定した調査・検討	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	検討条件の設定等	避難シミュレーション、気流解析等	制約事項に関する解析的検討等
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		
	ii 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)		火災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
	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		塩分影響の評価と対策のまとめ			
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				
	ii 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实施				・上記の～⑤の項目についての技術開発試験等の継続 ・救援・救出技術の技術開発成果の取りまとめと適用性の検討 ・自然課題の災害後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

2.4 まとめ

本章では、本開発の今後5年間の研究計画について述べた。

本開発は東北地方太平洋沖地震を契機に、平成24年度に研究開発に着手したものであり、平成24年度は平成25年度以降に取り組む技術開発課題の選定と年度展開の提示を最終的な目的として研究開発を行った。このような経緯を勘案し、まず、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係わる今後5年間の研究計画を示した。すなわち、「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。

一方、本開発が属する「処分システム工学確証技術開発」は今年度を初年度とする新規事業であること、及び本開発のテーマ名が変わり検討対象が「自然災害全般」に渡ることや、「操業期間中の安全対策」であることなどが明記されたことを考慮し、新たな視点から操業安全の検討を行った。すなわち、「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つの視点から地層処分事業の操業安全を検討し、それらを通して平成24年度成果として選定した技術開発課題の妥当性や、新たな技術開発課題の抽出等について考察した。

前者については、地層処分場の地下施設との類似性が高いと考えられる鉱山に係る法令（鉱山保安法など）に基づく検討を行った結果、「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した。また、後者の視点による検討から、「地層処分事業の防災計画に係る調査・検討」を本開発の新たな課題として抽出した。なお、「防災計画を策定し、自然災害や事故等の予防と対応に備える」ことは、本開発において最終的に求める目標であり、本開発の基幹になり得る検討課題と考えられる。

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

【参考文献】

- [1] 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
- [2] 原子力発電環境整備機構：処分場の安全機能と技術要件（2010年度）、2011年3月
- [3] 植益 広、竹中雅志、清水哲也、山地 徹、審良善和：10年間の海洋環境下でのステンレス鋼の腐食性、電気製鋼、vol 79、NO.3、2008
- [4] 電力中央研究所泊江研究所報告：304系ステンレス鋼の大気中塩化物応力腐食割れ特性、NO.T01042、2002
- [5] 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)

第3章 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討

3.1 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「施設計画技術」について述べる。具体的には、地層処分施設の地下処分パネルを対象に、火災事象等に対する操業安全を確保するための施設計画技術の検討に向け、類似の検討事例や文献の調査、それらの調査結果等に基づいた検討条件の設定、及び解析的検討手法の適用性などについて検討を行った結果を述べるものである。

3.1.1 既往の研究成果

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となる機能について検討し、その結果に基づき、本開発において自然災害に対する安全確保を検討する具体的な作業の選定を行った。

次に、類似施設の調査結果などに基づき、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある自然災害を選定し、これらの起因事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出・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」、及び「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。

3.1.2 今年度の実施内容

(1) 背景

2.1.3.(1)で述べたように、施設計画技術については、今年度から地下施設における火災事象等を対象に、地層処分施設で働く作業員の安全確保に向けた検討に着手する。施設計画技術の検討対象の選定の背景や検討内容・手法の妥当性などについては、2.2.1.(7)に述べたとおりである。

(2) 実施概要

地層処分事業操業中においては、施設内の異常状態や事故の拡大による周辺住民の被ばくが最大の事故事象であり、これを防止することが安全上第一に重要と言える。その上でさらに、作業員の人命を守ること、及び被ばくを低減することが必要と考えられる。

このような観点のもと、地層処分施設で働く作業員の安全確保を考慮した施設計画技術に関わる調査・検討を行った。今年度から、地下の処分パネルを対象に、火災事象等に対する安全確保を考慮した施設計画技術のための検討項目の抽出や、解析的検討手法の適用性等について、調査・検討に着手した。

今年度は、以下の3項目について調査・検討を行った。

- ・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。
- ・解析条件（地下施設・設備のレイアウトや人員配置の設定、解析モデル、避難速度、避難のタイミング、境界条件など）の検討・設定（図 3.1.2-1）。
- ・気流解析や避難シミュレーション等の解析的検討手法の適用性確認に向けた事前解析の実施。

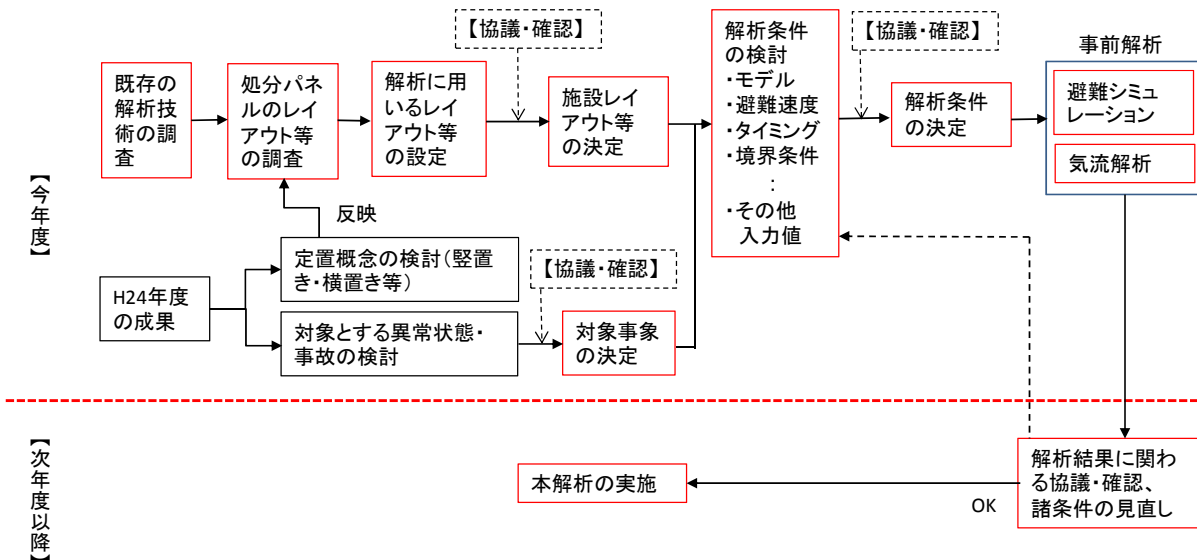


図 3.1.2-1 平成 25 年度の検討の概要

3.2 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

ここでは、地層処分施設計画等における火災に対する安全確保についての類似検討事例、及び地層処分施設の類似施設における火災に対する安全対策について調査・検討を行った。

火災に対する安全確保についての類似検討事例については、国内では地層処分場に係る具体的な計画がないため、海外の地層処分施設計画等の文献調査を行った。

一方、地層処分施設の類似施設における火災に対する安全対策については、「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った。これらの調査は、本課題に係る以降の検討（地下施設の検討・設定や解析条件の検討・設定など）に反映させるものとする。

3.2.1 海外の地層処分計画等における類似検討の文献調査

(1) 調査対象文献

ここでは、海外の地層処分施設計画等における類似検討について文献調査を行い、結果をまとめた。調査対象国はスウェーデン（実施主体：SKB 社）、フィンランド（実施主体：Posiva 社）、フランス（実施主体：ANDRA）、アメリカ（Yucca Mountain 計画）であり、地層処分場の建設許可申請などに係る文献を調査した。

1) スウェーデン（実施主体：SKB 社）[2],[3],[4]

SKB 社の検討は、水理学的・力学的な長期安全性の検討が多いが、操業安全に関する検討も行われている。例えば、ガラス固化体吊上げ時（移動中）のシビアアクシデントなどを内部事象、外部事象の両側面から検討している。また、シビアアクシデントについては、発生確率の低い不測の事態を網羅的に抽出し、解析的な検討も行っている。その中の一つに「熱負荷がガラス固化体キャニスタに及ぼす影響」についての検討が含まれている。これはガラス固化体キャニスタに対する火災影響を検討したものと考えられる。

2) フィンランド（実施主体：Posiva 社）[5],[6]

Posiva 社は、地下特性調査施設（ONKALO）を Orkiluoto で開始し、2020 年ごろから本格的な操業を開始する計画を立てている。このため Posiva 社の検討は多岐に渡り行われているが、操業安全の観点からの検討では、ヒューマンエラーによる設備故障に着目し、特に電源喪失による様々な問題の抽出と電源確保の重要性や方法を机上検討により言及している。しかし、地下施設における火災事象を対象とした検討は現在のところ見当たらない。

3) フランス（実施主体：ANDRA）[7]

ANDRA では、操業中の異常状態・事故として、ある種の廃棄体からの爆発性ガスの放出、廃棄体吊上げ作業中の落下、立坑による搬送中のエレベータの落下、廃棄体輸送中の坑道内や立坑内での火災などを検討している。また、火災発生時の煙の流れ方に関する解析的検討を行っている。ANDRA 社の検討は、本章の検討項目である「火災を対象とした解析条件の設定」に活用でき

るものである。地下施設における火災事象の検討概要については後述する。

4) アメリカ (Yucca Mountain 計画) [8],[9]

操業安全については、操業中に考えられる危険について、考え得る起因事象を網羅的に抽出した上でフォルトツリーを作成し、危険回避のための検討を行っている。リスクマネジメントの観点で確率論的な検討が為されているが、地下の火災事象に対する気流解析や避難方法の検討など見当たらない。表 3.2.1-1 に、上述した海外の地層処分施設計画等の類似施設の調査文献及びその概要をまとめて示す。

表 3.2.1-1 海外の類似検討の調査結果一覧

着目した類似性	調査対象施設	調査した文献 等	備 考
海外の放射性廃棄物地層処分施設計画 等	スウェーデン (実施主体 : SKB 社)	(1) Bilaga SR-Drift Säkerhetsredovisning for drift av slutforvarsanläggningen Kapitel 8 Säkerhetsanalys SKB Oppen Rapport, 2010 (2) Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Volume I-III, March 2011	(1) 操業中に予測される異常状態や事故を検討し、放射性物質放出事故が起きないことを報告 (2) 放射性廃棄物処分後の長期安全性の検討
	フィンランド (実施主体 : Posiva 社)	(1) European Stress Tests for Nuclear Power Plants, National Report, FINLAND, 2011 (2) Working Report 2009-106 Assessment of Radiation Doses in Normal Operation, Upset and Accident Conditions at the Olkiluoto Nuclear Waste Facility, 2009 (3) Interim Summary Report of the Safety Case 2009, Posiva Oy March 2010, 170p	(1) 欧州ストレステストに関する文献 (2) ヒューマンエラーに起因する操業中の異常状態・事故について検討 (3) 2011年の微動観測結果に基づく地盤の地震に対する安全性を検討
	フランス (実施主体 : ANDRA)	Dossier 2005 Argile, Architecture and management of a geological repository, ANDRA, December 2005, 495p	形状・定置概念の違う処分パネルを設定し、それぞれで異常状態(火災・爆発性ガスの放出・廃棄体落下)が発生した場合の影響を解析的手法(気流解析等)により検討している
	アメリカ (Yucca Mountain 計画)	(1) Yucca Mountain Repository SAR, DOE/RW-0573, Rev, 1, U. S. Department of Energy, November 2008, 412p (2) Yucca Mountain Repository License Application Safety Analysis Report, U. S. Department of Energy, November 2008,	(1)、(2) 地層処分施設を建設する際の場所等を含めた安全要求事項に加えて、一般公衆や作業員の安全を確保する上で必要となるリスクマネジメントのあり方に言及している

(2) フランス (ANDRA) における地下の火災事象についての検討概要

地下施設の火災事象を対象に、次の5項目について検討されている。

① パネルの運用方法

図 3.2.1-1 に示すように、地下施設の処分パネルは、坑口に遠い方から順に、建設⇒定置⇒埋め戻しとし、各段階を同時進行で進める。

② 通常時及び火災時の坑道内の換気 (図 3.2.1-1)

通常時の換気は坑口側から入気している。また処分坑道及び主要坑道は、入気と排気を同じ坑道内で行う。

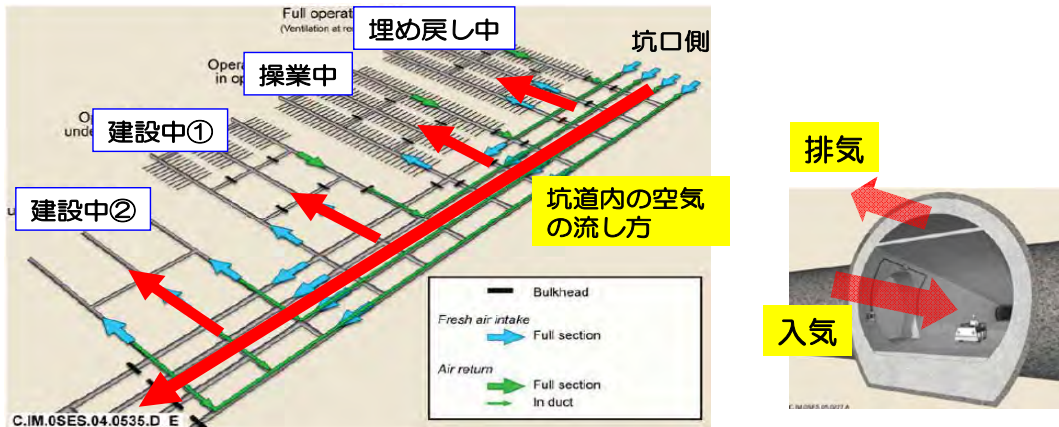


図 3.2.1-1 パネルの運用方法及び換気状態

③ 火災のシナリオと規模

処分坑道内にある機械の液体燃料漏れが起こり、その液体燃料に引火することで火災が発生する。なお火災の規模は最大火力 30MW であり、これはディーゼル車 (ダンプカー) の火災と同等である。

④ 火災時の煙の流れ方と風量 (図 3.2.1-2)

火災時の煙の流れ方向は、基本的には通常換気と同じである。なお、コントロールダクト等の強制排煙設備により煙は強制排気される。火災時には地下施設内の全ての空気が換気されると想定しており、地下施設全体の坑道サイズから必要換気量は $500\text{m}^3/\text{s}$ と求められている。

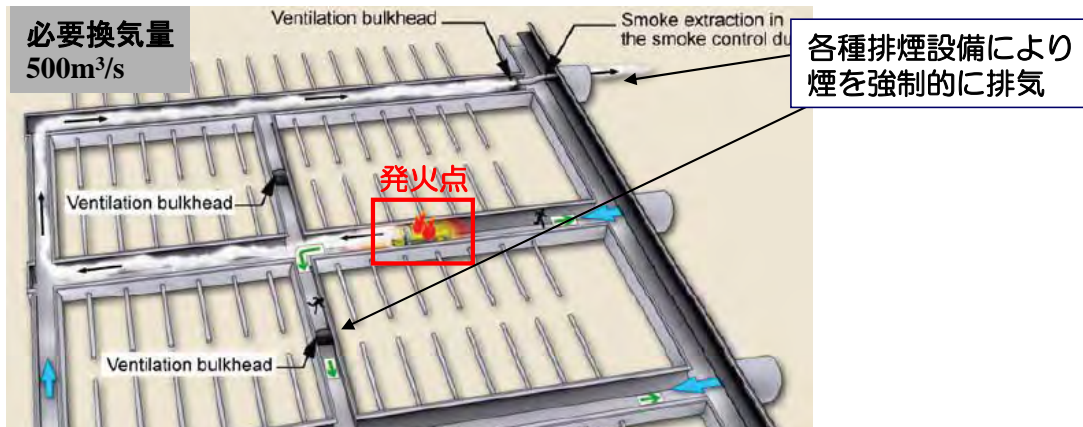


図 3.2.1-2 火災時の煙の流れ

④ 強制換気までの時間や作業員の避難の可能性 (図 3.2.1-3)

強制換気までの時間は、既往の地下施設での実験結果をもとに火災発生から 5 分後とし、外部の新鮮な空気を安定供給できるまでに 8 分かかるとして設定している。

作業員の避難は、解析結果より 0.5m/s 以上の歩行速度であれば発火点近くの作業員でも避難可能とされている。

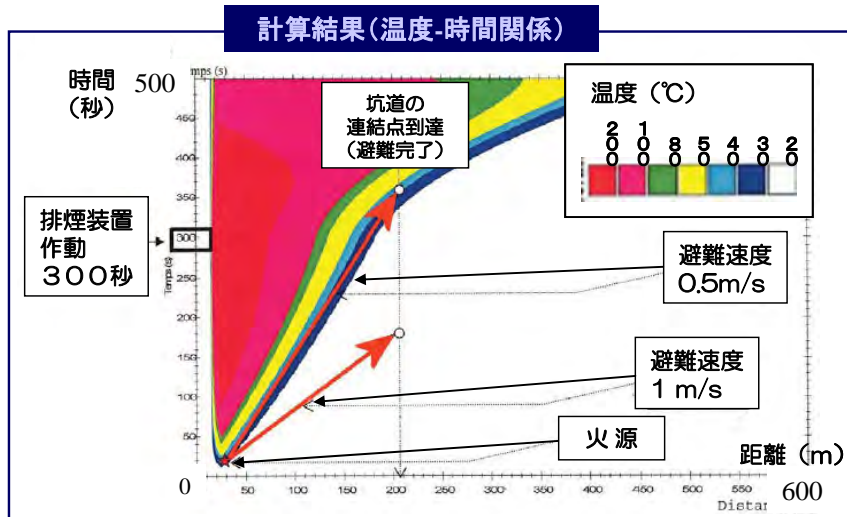


図 3.2.1-3 計算結果 (温度-時間関係)

3.2.2 地層処分施設の類似施設における安全対策技術の整理

(1) 鉱山・トンネルにおける建設中・供用中の安全対策技術の整理

1) 鉱山における災害防止対策の整理

本課題に係る解析的検討の解析条件の設定等に向け、鉱山保安法及び同法施行規則に定められた事由別災害分類のうち坑内火災について、発生原因、発生状況及びその対策を整理した。

a. 鉱山の災害防止にかかわる法令

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、通気門及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及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。また、添付資料に鉱山保安法と鉱山保安法施行規則及び鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令を添付する。

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。

b. 鉱山における災害防止対策

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
通達している。

1 鉱山保安法施行規則第 8 条第 1 号に規定する「坑内火災を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 裸火等に係る措置

- ・石炭坑及び石油坑においては、可燃性ガス及び炭じんに関して危険のおそれがないと確認した箇所において、火気の使用がやむを得ない作業を安全な方法で実施する場合を除き、火気の使用を禁止する。
- ・石炭坑の坑口及びその周辺においては、火気の使用がやむを得ない作業を安全な方法で実施する場合を除き、火気の使用を禁止する。

- ・ 金属鉱山等の坑内に設置している引火又は発火の危険がある次の施設とその周辺においては、火気の使用を禁止する。
 - (1) 油脂類貯蔵箇所
 - (2) 燃料油貯蔵所
 - (3) 燃料給油所
 - (4) 火薬類取扱所
- ・ 火気使用箇所においては、残火の後始末をする。
- ・ 火気使用箇所には、火災を防止するため必要な設備を設ける。
- (2) 油脂類等に係る措置
 - ・ 油脂類の保管又は貯蔵は、ふた付又は密閉式の不燃性容器とする。
 - ・ 燃料油の輸送は、専用タンク又はこれと同等の堅固な容器で行う。
- (3) 車両系鉱山機械又は自動車に給油するときの措置
 - ・ 坑内におけるガソリンの給油を禁止する。
 - ・ 燃料給油所まで移動するために必要な限度で給油する場合を除き、燃料給油所以外での給油を禁止する。
 - ・ 給油中は、車両系鉱山機械又は自動車の内燃機関を停止し、付近では火気の使用を禁止する。
- (4) 発破時の措置
 - ・ 発破により火災発生の危険があるときは、散水設備により散水する。
- (5) 坑外からの延焼を防止する措置
 - ・ 森林火災から坑内を防護する必要があるときは、坑口から30m以内にある樹木を除去する等により、坑口付近に防火地帯を設ける。

2 鉱山保安法施行規則第8条第2号に規定する「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 全鉱種に共通の措置

・次の箇所には、消火器、消火砂又は散水設備を設ける。

- (1)巻揚機械室
- (2)ポンプ室
- (3)扇風機室
- (4)変電設備設置箇所（石炭鉱山における油入電気機器以外の電気機器を使用する変電設備設置箇所を除く。）
- (5)コンプレッサー室
- (6)ベルトコンベア（原動機の出力20kW以上のものであって、掘採作業場又はその付近に仮設されるものを除く。）の駆動装置及び主要なプーリの置箇所
- (7)蓄電池式電気機関車用充電設備設置箇所
- (8)主要油入開閉器室
- (9)油脂類貯蔵箇所
- (10)燃料油貯蔵所
- (11)燃料給油所
- (12)火薬類取扱所
- (13)坑内における溶接又は溶断作業箇所
- (14)坑内事務所

・消火器の備え付け基準は、次のとおり。

- (1)消火器の種類は、粉末ABC型等（消火粉末を放射する消火器）とする。
- (2)設置基準は、次の算定基準による能力単位の数値の合計数以上とし、防火対象物の各部分から歩行距離20m以下となるように配置する。ただし、小数点以下の数値は、切り上げて整数とする。

①防火構造等による能力単位数

$$(\text{当該能力単位数}) \geq (\text{延べ面積又は床面積}) / 100 \text{ m}^2$$

②少量危険物等貯蔵取扱いによる能力単位数付加

イ 少量危険物

$$(\text{当該能力単位数}) \geq (\text{貯蔵取扱い少量危険物の量}) / (\text{次表に定める指定数量})$$

種類	品名	性質	指定数量
第四類	第三油類	非水溶性液体	2,000ℓ
		水溶性液体	4,000ℓ
	第四油類		6,000ℓ

ロ 指定可燃物

$$(\text{当該能力単位数}) \geq (\text{貯蔵取扱い指定可燃物の量}) / (\text{次表に定める指定数量の五十倍})$$

品 名		指 定 数 量
綿花類		200kg
木毛及びかんなくず		400kg
ぼろ及び紙くず、糸類、わら類		1,000kg
可燃性固体類		3,000kg
石炭、木炭類		10,000kg
可燃性液体類		2m ³
木材加工品及び木くず		10m ³
合成樹脂類	発泡させたもの	20m ³
	その他のもの	3,000kg

③電気設備による能力単位数付加

(当該能力単位数) \geq (床面積) / 100m²

④消火栓設備等による能力単位数減少

消火栓設備（防火対象物の各部分から1消火栓まで25m以内であり、放水圧力0.15MPa以上であり、かつ、放水量毎分30ℓ以上の性能のものに限る。）又はスプリンクラー設備（ヘッドは、防護対象物（当該消火設備によって消火すべき対象物）を有効に消火できるほか、放水圧力0.15MPa以上であり、かつ、放水量毎分30ℓ以上の性能のものに限る。）を設けた場合は、前出①から③の算式から求めた単位数の数値の合計数の3分の1まで減少することができる。

・次の箇所には、漏油吸収設備（敷き砂等）を設ける。

(1)変電設備設置箇所（石炭鉱山における油入電気機器以外の電気機器を使用する変電設備設置箇所を除く。）

(2)油脂類貯蔵箇所

(3)燃料油貯蔵所

(4)燃料給油所

・次の箇所は、防火構造とする。

(1)巻揚機械室

(2)ポンプ室

(3)扇風機室

(4)変電設備設置箇所（主要変電設備設置箇所及び石炭鉱山における油入電気機器以外の電気機器を使用する変電設備設置箇所を除く。）

(5)コンプレッサー室

(6)原動機の出力20kW以上のベルトコンベアの駆動装置及び主要なプーリ（掘採作業場又はその付近に仮設されるものを除く。）の設置箇所

(7)蓄電池式電気機関車用充電設備設置箇所

(8)坑口から10mまでの坑道

・次の箇所は、耐火構造とする。

- (1)主要油入開閉器室
 - (2)主要変電設備設置箇所
 - (3)油脂類貯蔵箇所
 - (4)燃料油貯蔵所
 - (5)燃料給油所
- (2) 石炭坑及び石油坑における措置
- ・坑口に防火の戸を設け、又は坑口から10m以上の坑道を防火構造としたときを除き、坑口から30m以内にある坑外建築物には、防火設備を設ける。
- (3) 石炭坑における措置
- ・次の箇所には、自動消火設備を設ける。
 - (1)コンプレッサー室
 - (2)油脂類貯蔵箇所
 - (3)主要変電設備設置箇所
 - (4)主要油入開閉器室
- (4) 石炭坑（亜炭坑を除く。）における措置
- ・一酸化炭素の含有率の増加、煙の発生その他の坑内の状況により、坑内における巻揚機械室、コンプレッサー室、ポンプ室、扇風機室、変電設備設置箇所（主要変電設備設置箇所又は油入電気機器を使用する変電設備設置箇所に限る。）、油脂類貯蔵所、主要油入開閉器室、ベルトコンベア及び人を運搬するリフトを運転する坑道その他必要な箇所に、火災の発生又は危険を感知する装置を設置し、坑外において、これらの結果を集中して監視する集中監視室を設ける。
 - ・次の箇所には、消火栓を設ける。
 - (1)ベルトコンベアを設置した坑道、内燃機関車若しくは架空線式電気機関車を運転する坑道又は動力用の電線を配線（電路に地気を生じたとき自動的に電源を遮断する装置を設けたものを除く。）した坑道にあっては、当該坑道の起点及び終点の箇所並びに起点又は終点から100m以内ごとの箇所
 - (2)坑内における油入電気機器（主要変電設備及び主要油入開閉器を除く。）又はベルトコンベアの駆動装置を設置した箇所
 - ・消火栓設備の性能は、次による。
 - (1)放水用器具の先端における放水圧力は、0.15MPa以上
 - (2)放水量は、毎分300ℓ以上
 - ・消火栓用放水器具を配備する。

3 鉱山保安法施行規則第8条第3号に規定する「坑内火災による被害を防止するための措置」とは、次のとおり。

- ・消火器、散水等による直接消火を行う。
- ・直接消火が困難なときは、間接消火（密閉又は水没）を行う。
- ・消火作業により危険があるときは、鉱山労働者を退避させる。

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）を通達している。

1 技術基準省令第 3 条第 1 号に規定する「その他の必要な保安設備」とは、次に掲げるものをいう。

- (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

2 技術基準省令第 3 条第 2 号に規定する「標識その他の必要な表示」とは、次に掲げる箇所等での表示をいう。

- (1) 坑内採掘跡、石油坑の不要坑道、坑内の通行坑道における工事箇所その他の危険な箇所に対する警標
- (2) 主要な通路又は常時使用しない非常用の出口、通路若しくは階段箇所での表示
- (3) 機械の運転を中止して機械設備の修理又は検査等の作業を行うとき、当該作業中、作業のため機械の運転を停止している旨の警標
- (4) 金属鉱山等の鉱山労働者を就業させる坑内並びに石炭坑及び石油坑の坑内において、通行坑道の分岐点その他の必要な箇所での、坑道の名称及び出口の方向の表示

3 技術基準省令第 3 条第 5 号に規定する「必要な照度」は、鉱山労働者を常時就業させる屋内作業の場合には、当該作業面が次に掲げる照度を有していることをいう。ただし、感光材料を取り扱う作業場については、この限りでない。

- (1) 精密な作業にあつては、300ルクス以上
- (2) 普通の作業にあつては、150ルクス以上
- (3) 粗な作業にあつては、70ルクス以上

5 技術基準省令第 3 条第 6 号に規定する「その他の適切な措置が講じられている」とは、坑内誘導無線機等の警報連絡装置の設置等をいう。

c. 鉱山の調査結果

国内で稼働している数少ない鉱山の1つである菱刈鉱山(鹿児島県)について現地調査を行い、安全対策に対する情報収集を実施した。菱刈鉱山は、住友金属鉱山(株)が所有する金鉱山であり、表 3.2.2-1、図 3.2.2-1 に示すように坑道延長、作業員数、坑道の深さ、断面寸法等において地層処分施設(地下)と類似性が高い施設である。出入口付近の坑道は、構築後 32 年経過しているものの、現在確認されている金の埋蔵量を考慮すると今後さらに 20 年以上坑道を維持管理していくことになり、操業期間においても類似性が高い。

本鉱山の通気については、4本の排気立坑にファンを設置し、110km に及ぶ坑道の換気を確保しつつ、切羽等においては、補助ファン及び局所ファンによって対応しているとのことであった。

安全対策については火災・湧水等について想定しており、地上へ避難できなかった場合のための救急センターを設置している(図 3.2.2-2)。

湧水対策については、ポンプが停止すると坑道が水没して事業に重大な影響が生じること、及び汲み上げた温泉水の一部を近辺の温泉街に給湯していることから、停電時にもポンプが停止しないように非常用電源を常備し、1週間はこれで対応できるだけの燃料を確保しているとのことであった。

表 3.2.2-1 菱刈鉱山における安全対策

	項目	内容
基本情報	坑道延長	総延長143km(内 使用している坑道110km)
	坑道の深さ	抜湯場:坑口から315m以深
	作業員	地下 約60人 地上 約170名
	作業時間	午前 7時45分 ~ 午前0時50分 (2交代制)
	乾球温度	夏季 30℃ 冬季 28℃
	湿度	夏季 60~70% 冬季 30~40%
	順守している法令	鉱山保安法、労働安全衛生法
設備	換気設備	4本の排気立坑にファンを設置(11,000m ³ /min、5,000m ³ /min、4,000m ³ /min、1,500m ³ /min、)
	主な安全対策設備	消火器、消火栓設備 救急センター 避難所 等
災害対応	火災時の通気制御方法	火災発生時においてメインファン停止、シャッターによる通気制御等を行う。
	火災時の対応	避難に係る定量的な判断基準なし 初期消火できなかった場合は、坑外に退避。
	地震時の対応	震度4程度以上の場合は、ファンが自動的に停止し、坑内の照明を点滅させて作業員に知らせる
	停電時の対応	坑外に退避
その他	災害防止についての教育・訓練	作業ごとに年間スケジュールを作成し、教育を実施し、緊急時対応訓練を1回/年実施
	坑道の維持管理	定期点検・パトロール結果に基づいて保坑の要否を判断

a. 半径 : 2 m

b. 幅 : 4.1 m

c. 高さ : 4.1 m

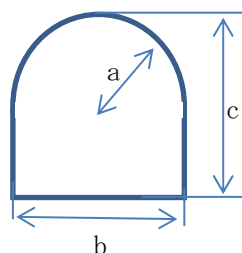


図 3.2.2-1 坑道断面の寸法

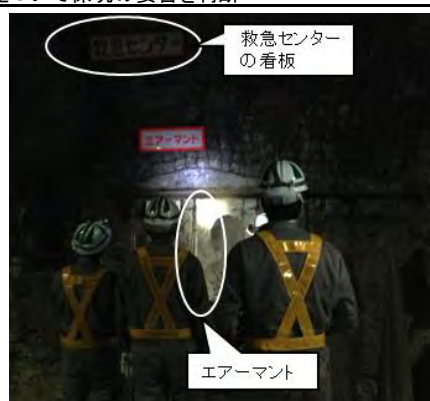


図 3.2.2-2 菱刈鉱山における救急センター

2) 一般トンネルにおける災害防止対策の整理

本課題に係る解析的検討の解析条件の設定等に向け、一般トンネルにおける火災事象に関わり遵守する法令を整理するとともに、法令に従った火災防止対策について事例を含めて整理を図った。

a. 一般トンネルにおける災害防止にかかわる法令

一般トンネルにおける火災事象に対し、施工中と供用中に遵守する法令を抽出・整理した。

(a) 施工中のトンネルにおける法令

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、労働安全衛生法及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 3.2.2-2 及び表 3.2.2-3 に抜粋する。

表 3.2.2-2 火災防止措置にかかわる条項

関係条項	項目	要旨
施行規則 389 の 3	ガス溶接作業時の措置	可燃物への着火防止、作業指揮者の選任
施行規則 257	ガス溶接作業時の措置	可燃物への着火防止、作業指揮者の選任
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 3.2.2-3 避難にかかわる条項

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

① 供用中のトンネルに対する法令

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と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

に繋留された船舶、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。

b. 一般トンネルにおける火災防止対策

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抽出・整理した。

(a) 施工中のトンネルにおける火災防止対策

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 3.2.2-4 にまとめる。

表 3.2.2-4 トンネル工事における坑内火災に対する安全対策

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

トンネル施工時の災害対策事例として、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 3.2.2-5 に示す。

表 3.2.2-5 緊急連絡設備一覧

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 間隔及び切羽
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。避難所は切羽付近及び 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。さらに、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 3.2.2-3 に示す。

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

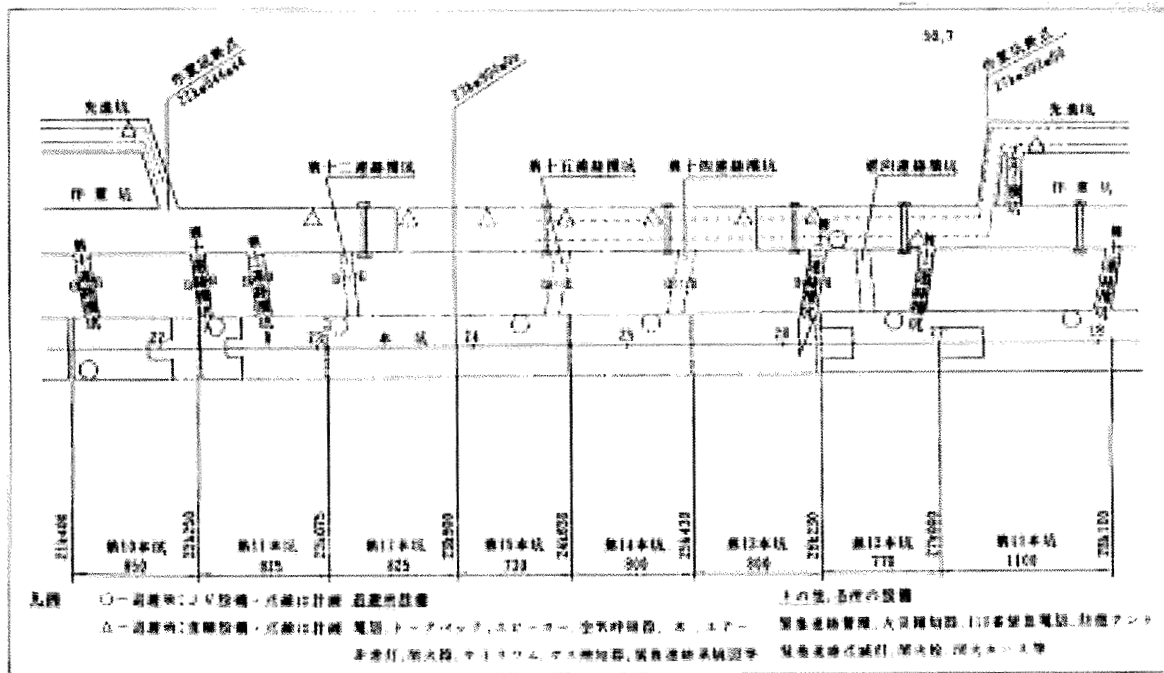


図 3.2.2-3 火災対策設備図 (昭和 56 年施工時)

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。

(b) 供用中のトンネルにおける火災防止対策

鉱山と同様に、一般トンネルのように閉鎖された空間での火災の発生は大きな災害につながってしまう。従って、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)を作成している。同基準における非常用施設の種類の、下記の通りである。

○ 通報・警報設備

通報設備には非常電話、押ボタン式通報装置、火災検知器がある。警報設備には非常警報装置がある。

○ 消火設備

消火設備には消火器、消火栓がある。

○ 避難誘導設備

避難誘導設備には誘導表示板、排煙設備、避難通路がある。

○ その他の設備

その他の設備には給水栓、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、監視装置等がある。

非常用設備の設置にあたっては、その延長及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 3.2.2-6 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 3.2.2-6 トンネル等級別の非常用施設

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。

○ 非常電話

- ①扱い方が簡単で、利用者と管理所等との同時通話が可能な方式とする。
- ②設置間隔は 200m 以下とする。

○ 押ボタン式通報装置

- ①扱い方が簡単な方式とし、押ボタンスイッチの構造は「昭和 56 年 6 月 20 日自治省令

第 17 号「火災報知設備の感知器及び発信器に係る技術上の規格を定める省令」に規定する P 型発信機に準ずるものとする。

② 設置間隔は 50m を標準とする。

○ 火災検知器

① 排気ガスや換気流等に影響されず、火災の初期段階を的確に検知できる方式とする。

② 設置位置は、火災検知能力や水噴霧設備の放水区画等との関連及び保守点検の容易さ等に留意し決定するものとする。

非常警報装置は、トンネル内における火災その他の事故の発生を運転者等に知らせ、二次的災害の軽減を図るための設備である。なお、非常警報装置は通報設備または管理所からの信号により、警報表示が行える機能を有するものとし、警報表示板と制御装置より構成する仕様が定められている。

○ 警報表示板

① 視認性、情報表示の即応性に優れたものとする。また、警報効果をあげるため点滅灯と警報音発生装置を取り付けることを標準とする。

② 設置位置は、表示内容の視認性、判読性に留意して決定するものとする。

○ 制御装置

制御装置は、通報設備等からの信号を受けて表示板を操作して警報表示を行うほか手動でも同様の操作ができるものとする。

消火設備は、火災の初期消火に用いるための設備であり、以下の仕様が定められている。

○ 消火器

① 扱い方が簡単で、有害なガス等を発生しないものを選定するものとする。

② 設置間隔は 50m を標準とする。

○ 消火栓

① 扱い方が簡単な構造とする。

② 設置間隔は 50m を標準とする。

③ 口径は 40mm、放水量は、130ℓ/min、放水圧力は 0.29MPa を標準とする。また、水源は消火栓 3 個同時に、40 分程度放水できる容量を確保することが望ましい。

避難誘導設備は、トンネル内で、火災その他の事故に遭遇した運転者等をトンネル外へ安全に誘導、避難させるための設備であり、以下の仕様が定められている。

○ 誘導表示板

出口までの距離、または避難通路までの距離、方向、位置等の情報を表示し、トンネル内の運転者等をトンネル外へ誘導するための設備である。設置間隔はトンネル延長、避難通路の有無等に留意して決定するものとする。

○ 排煙設備

換気設備を利用して、避難環境の向上を図るための設備である。排煙設備の設計に際しては、常時の換気方式、交通方式等に留意するものとする。

○ 避難通路

本線トンネルに接続して設置される通路で火災時等にトンネル内の運転者等をトンネル外へ避難させるための設備である。避難通路の設計に際しては、トンネル延長、交通方式、排煙設備等に留意するものとする。

その他の設備は通報・警報設備・消火設備及び避難誘導設備を補完し、消火活動等を容易にするための設備であり、以下の仕様が定められている。

○ 給水栓

消防隊による本格消火に資するための設備である。なお、給水栓を設置する場合は、必要に応じて消防ポンプ等からトンネル内給水栓への送水用として送水口を設けるものとする。

1) 給水栓

① トンネル両坑口付近に設置することを標準とし、必要に応じてトンネル内非常駐車帯または避難連絡坑口付近に設置するものとする。

② 口径は 65mm、放水量は 400ℓ/min 放水圧力は 2 個同時放水した場合で 0.29MPa を標準とする。また、水源は 2 個同時放水した場合 40 分程度放水できる容量を確保することが望ましい。

2) 送水口

① トンネル両坑口に設置するものとする。

② 口径 65mm、双口型を標準とする。

○ 無線通信補助設備

トンネル内の救助活動、消火活動等に際して、トンネル外部との連絡に供するための設備である。無線通信補助設備は、漏洩同軸ケーブル等とこれに付帯する装置をもって構成するものとする。

○ ラジオ再放送設備

トンネル内で、運転者等が道路管理者からの情報を受信できるようにするための設備である。設計に際しては、電波法及び同法設備規則を遵守するものとする。

○ 拡声放送設備

拡声放送により、トンネル内の火災その他の事故の発生を、道路管理者から運転者等に伝達するための設備である。設計に際してはトンネル内の騒音、残響音等に留意するものとする。

○ 水噴霧設備

微細な粒子状の水を放水することによって火災の延焼、拡大を抑制し、消火活動等を援助するための設備である。

- ①放水区間は 50m 以上とする。
- ②放水量は 6ℓ/min・m² を標準とする。また、水源は 40 分程度放水できる容量を確保することが望ましい。
- ③放水制御方式はトンネル延長、トンネル構造、換気方式等に留意して決定するものとする。

○ 監視装置

通報装置から受けた情報の確認、消火活動、避難行動等の状況監視を行うための設備 (I・T・V) 設備である。テレビカメラの設置位置は、トンネル内及び坑口付近を一様に監視できるように決定するものとする。

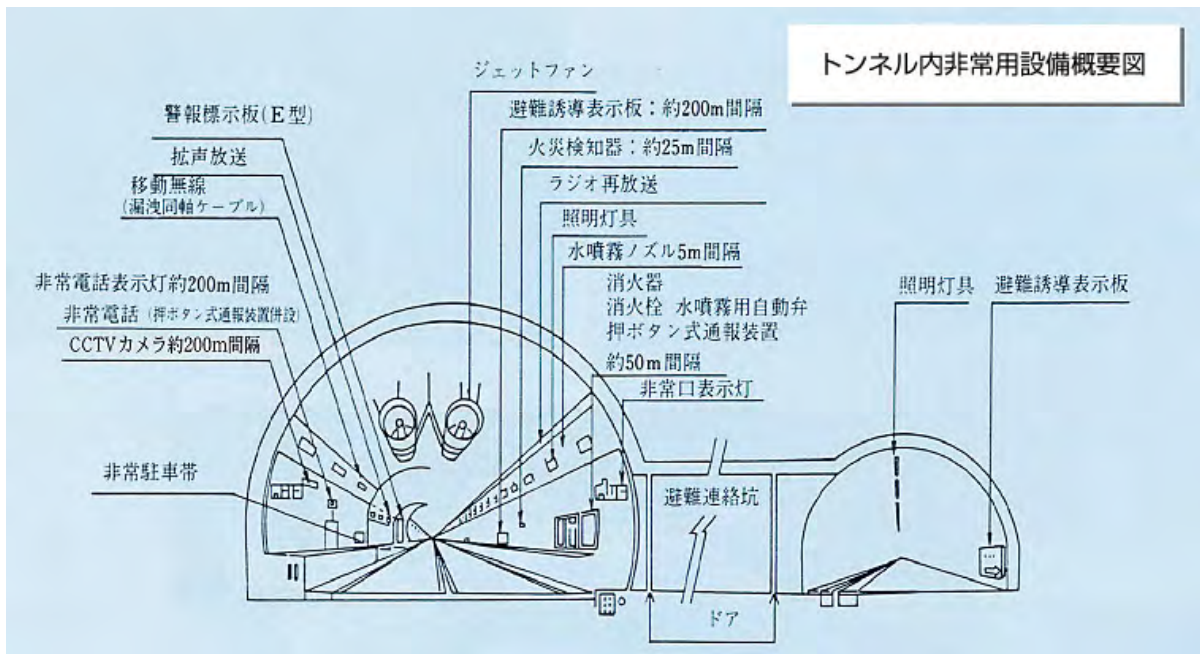


図 3.2.2-4 道路トンネル内非常用施設配置状況の例

(出典：西日本高速道路株式会社ホームページより)

トンネル供用中の火災対策の事例として、東京湾アクアライントンネルの事例を調査した。同トンネル内には、非常用設備としては、以下に挙げる設備が施されている。

- ・ 消火設備
- ・ 水噴射設備
- ・ 通報設備
- ・ 避難誘導灯
- ・ トンネル内情報板

- ・非常口扉（避難用滑り台）
- ・管理用通路（避難通路としても使用）

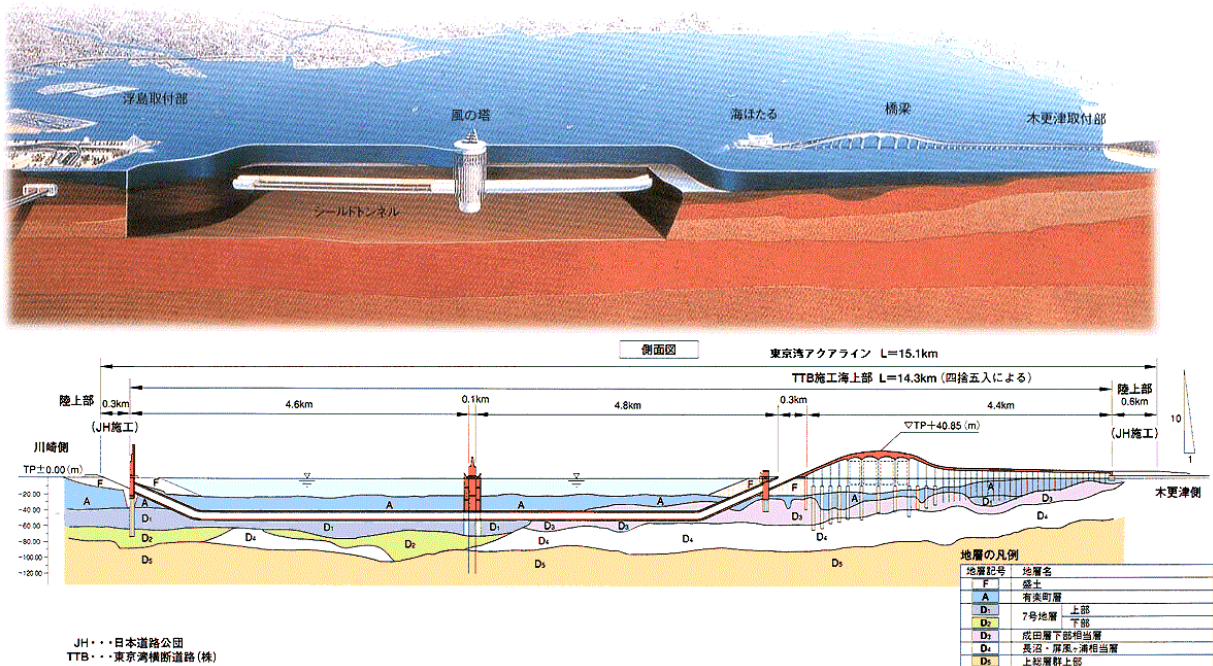


図 3.2.2-5 東京湾アクアラインの構造

(出典：東日本高速道路株式会社ホームページより)



図 3.2.2-6 東京湾アクアライントンネル部の断面

(出典：東日本高速道路株式会社ホームページより)

トンネル内には 150m おきに監視カメラが設置され、24 時間体制で監視している。
 消火設備として、自動火災検知器が 25m おき、消火栓・消火器は 50m おきに設置され、万一火災が発生した場合には、スプリンクラーが作動する。

避難誘導表示灯は、100m おきに設置されている。非常口が 300m おきに設置してある。避難の際には、非常口の引き戸を開け「滑り台」で車道の下にある管理用通路に降りて避難する。

管理用通路の気圧は、トンネル本線部分よりも若干高めになっており、煙が侵入しないようになっていいる。また、縦流換気方式による排煙システムを採用している。

3) 本技術開発課題への知見の反映

気流解析や避難シミュレーション解析の解析条件の設定に向け、鉱山と一般トンネルについて災害（火災）防止にかかわる法令と防止対策を整理した。

調査結果から、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った。最終的には事業者がこれらの法令や事例を踏まえて、地層処分の操業時安全性の確保に向けた施設の計画が立案されていくことになると考えられる。

一方で、本課題の目的として、施設計画技術において災害の防止と拡大防止に向けた個々の対策技術の適用性とともに、対策を多重化した場合の適用性について明らかにしていくことが重要であり、そのような観点から、気流解析や避難シミュレーション解析を実施していくことになる。解析条件としては、法令で求められている事項を具備することが必要最低限ではあるが、安全を確保する対象（公衆安全と労働安全）により、適用する法令や適用可能となる技術が異なると考えられることから、解析目的や解析対象を明確にした上で、災害防止と拡大防止に向けた適用技術を設定していくことが必要である。

(2) 原子力関連施設における安全対策技術の整理

本技術開発課題に係る解析的検討の解析条件の設定等に資するため、原子力関連施設のうちガラス固化体を取り扱う類似性から再処理施設・廃棄物管理施設の関連法令に規定されている安全対策要求事項について、特に火災・爆発事象を対象に調査・整理した。また、対策事例として廃棄物管理施設等の事業許可申請書における火災・爆発の安全対策事例を調査・整理した。さらに、最新の情報として平成 25 年 12 月に施行された再処理施設の新規制基準における火災・爆発に関する考え方について記述した。

1) 原子力関連施設の安全対策要求事項と火災・爆発事象に対する考慮

a. 再処理施設安全審査指針

再処理施設安全審査指針（最新改正：平成 22 年 12 月 20 日版より）[14]には、再処理施設の事業許可申請段階で考慮すべき安全上の要求事項（基本的立地条件、遮へい・閉じ込め、臨界、火災、地震その他の自然現象の考慮など）が記載されている。この指針に示されている主な安全上の要求事項（指針項目）について表 3.2.2-7 に整理する。

表 3.2.2-7 再処理施設安全審査指針に示される主な安全上の要求事項[14]

指針項目	概要
1.基本的立地条件	事故誘因排除、災害拡大防止の観点より自然環境、社会環境に係る事象を検討
2.平常時の線量評価	平常時、放射性物質の放出等で一般公衆線量が線量限度を超えないこと等の評価
3.安全評価	多重防護設計の適切さを確認するため、設計基準事象及び立地評価事故の評価
4.閉じ込めの機能	放射性物質を限定された区域に閉じ込める機能
5.放射線遮蔽	直接γ線・スカイシャインγ線による一般公衆の線量低減、放射線業務従事者への遮蔽
6.放射線被ばく管理	作業環境における放射線被ばく管理、業務従事者個人被ばく管理、管理区域区分
7.放射性廃棄物の放出管理	気体、液体廃棄物の放出管理
8.貯蔵等に対する考慮	貯蔵容量、冷却機能、一般公衆の線量低減のための遮蔽機能等
9.放射線監視	線量率、空气中放射性物質濃度等の測定（事故時も）、放出放射性物質の測定算出
10,11.単一/複数ユニット臨界安全	技術的に見て想定されるいかなる場合でも適切な設計管理により臨界を防止
12.臨界事故に対する考慮	臨界事故が発生した場合の適切な対策（警報、未臨界措置）
13.地震に対する考慮	十分な強度・剛性及び耐力を有する構造、安定地盤への支持
14.地震以外の自然現象に対する考慮	津波、地滑り、陥没、台風、高潮、洪水、異常寒波、豪雪等及び異種自然現象の重畳
15.火災・爆発に対する考慮	不燃難燃性材料の使用、着火源排除、消火設備の設置、発生時の閉じ込め機能
16.電源喪失に対する考慮	安全上重要な施設の安全機能確保のための外部電源系統、非常用所内電源系統
17.放射性物質の移動に対する考慮	工程内・工程間移動に対する漏えい・臨界防止と遮蔽対策
18.事故時に対する考慮	安全対策、事故対策（制御室、放射線計測・防護具、照明、避難通路、緊急時対策所など）
19.共用に対する考慮	他の原子力施設との共用によって、その安全機能を失うことのない設計 安全保護系については、計測制御系との部分的共用によって、その安全機能を失うことのない設計
20.準拠規格及び基準	炉規制法、建築基準法、消防法、高圧ガス取締法等及び規格・基準への適合性
21.検査、修理等に対する考慮	安全上重要な施設の機能確認・維持のための試験検査、保守修理
22.系統の単一故障に対する考慮	非常用所内電源系統のみの運転下又は外部電源系統のみの運転下で単一故障を仮定しても、その系統の安全機能を損なうことのない設計

再処理施設安全審査指針の中で、特に火災・爆発に関連する指針は、「指針 15. 火災・爆発に対する考慮」である。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られる火災・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 を以下に抜粋する。

【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。

上記指針 15 の解説を以下に示す。

【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。

b. 発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針

前項のとおり、指針 15 の解説では、3 項に示す火災発生防止、検知及び消火、火災影響軽減対策について、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」[15] 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」[16] 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、同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。原子炉施設の火災防護審査指針では、原子炉施設における火災防護の見地から、①火災発生防止、②火災検知及び消火、③火災の影響の軽減、の 3 方策を組み合わせ、原子炉施設安全性を確保するための基本的な設計方針を審査する際に考慮すべき事項を示している。

本指針や解説で用いられている用語の意義を以下に示す。

①「火災区域」

耐火壁、隔壁、間隔又は、それらの組合せによって、他の区域と分離され、火災防護の

見地から、1つの単位と考えられる空間をいう。

②「耐火壁」

床、壁、天井、扉等耐火構造の一部であって、火災区域の火災荷重に対して必要な耐火能力を有するものをいう。

③「隔壁」

火災の波及を防止するための不燃性構造物をいう。

④「消火装置」

消火器具、移動式消火設備（消防車等をいう。以下同じ。）、消火栓設備、自動消火設備及び遠隔手動消火設備をいう。

⑤「火災検出装置」

火災の発生の検出を行い、警報等を行う設備をいう。

⑥「火災荷重」

ある空間内に保持されている可燃性材料の潜在的発熱量をその空間の火災荷重という。

⑦「不燃性」

火災により燃焼しない性質をいう。

⑧「難燃性」

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。

⑨「可燃性材料」

不燃性材料以外の材料をいう。

指針内容を以下に記載する。また、再処理施設安全審査指針では、上記3方策の具体的な対策について「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」を参考とすることを求めている為、原子炉施設の火災防護指針の解説に記載されている具体的対策についてもあわせて列記する。

【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。

火災発生防止に係る各項目の解説に記載された具体例は以下のとおりである。

1-1 火災発生を防止するための予防措置（解説）

- (1) 「予防措置」の具体例としては、発火性又は引火性の液体又は気体を内包する系統の漏洩防止、電気系統の地絡、短絡等に起因する過電流による加熱の防止などが挙げられる。
- (2) 運転管理においては、持ち込まれる発火源若しくは可燃性材料又は検査若しくは保守に使用される機器等の管理の方法を含む火災防護に関する計画を策定し、実施状況の確認及び見直しを定期的に行うことが挙げられる。
- (3) 特に水素に関連した設備には次のような事項を満足することが必要である。
 - ① 水素の供給設備については、安全機能を有する構築物、系統及び機器を内蔵する火災区域外の庇護された場所で、かつ、よく換気された場所に設けなければならない。
 - ② 放射線分解等に伴う水素により火災発生（蓄積した水素の急速な燃焼によるものを含む）の危険性がある場合には、水素及び酸素の滞留をできる限り防止することを目的として、配管等の適切な配置、再結合器の使用又は適切な換気、或は他の適切な設計方策とともに、必要に応じての監視等火災防護の観点から対策がなされなければならない。バッテリー室で発生する水素については、水素の蓄積を防止するために換気設備を設けなければならない。

1-2 不燃性又は難燃性材料を使用する設計（解説）

1-2を満足するための設計上の要求事項は次のとおりである。

- ① 使用又は貯蔵している物質の可燃性及び火災により生ずる 2 次的悪影響の可能性を考慮して、不燃性材料及び難燃性材料の選択と使用を行わなければならない。
- ② 安全機能を有する構築物、系統及び機器を設置している区域のうち、手動消火のための接近が出来ない場所で、かつ遠隔消火装置がない場合には可燃性材料の集積を行わないよう設計上の配慮をしなければならない。
- ③ 火災区域内で油のような可燃性材料を使用する場合には、火災区域内貯蔵量は運転上の要求に見合う最低量とし、多量の可燃性材料の供給設備は、安全機能を有する構築物、系統及び機器を内蔵する火災区域外に設けなければならない。
また、防火対策や乾式又は不燃性油の使用等を考慮しなければならない。

1-3 落雷、地震等の自然現象による火災を生じないための防護設計（解説）

「自然現象により火災を生じないように防護した設計」とは、落雷に対しては、安全機能を有する構築物、系統及び機器を内蔵した建屋又は区域に避雷設備を設けることをいう。

また、地震に対しては、十分な支持性能をもつ地盤への設置や耐震上の重要度に応じた設計等の耐震設計審査指針に基づく適切な耐震設計を行うことにより、安全機能を有し、可燃性材料又は発火源を内包する構築物、系統及び機器における火災の発生の可能性を低減させることをいう。

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。

火災検知及び消火に係る各項目の解説に記載された具体例は以下のとおりである。

2-1 火災の悪影響を限定し早期消火を行えるための措置（解説）

(1) 「悪影響を限定し」とは、想定される火災の影響の範囲の拡大を防止し、3-2 の要求が満足されるとともに、放射性物質の制御されない放出を防止することをいう。

(2) 「早期消火を行えるための措置」とは、次の事項を考慮した設計を意味する。

① 火災検出装置は、各火災区域における火災の影響及び性質並びに放射線、温度、湿度、空気流等の環境条件を考慮したものでなければならない。

② 火災検出装置は、常用電源が喪失した場合でも機能を失ってはならない。

③ 火災検出装置は原則として制御室等で適切に監視できるようになっていなければならない。

④ 火災検出装置は、必要に応じてスプリンクラー、換気設備及び防火ダンパ等を制御、作動させねばならない。

⑤ 原子炉施設における設備が内包する可燃性材料及び発火源の性状を踏まえ、想定される火災の態様に応じた適切な消火剤を備えるとともに、それぞれ消火に対して十分な容量を持つものでなければならない。特に、消火用水供給系の水源については、その水源に多重性若しくは多様性を持たせ、又は水タンク車等の移動式消火設備を配備しなければならない。

⑥ 消火用水供給系は、必要とする量の消火用水を供給できるように設計しなければならない。同供給系の主配管をサービス水系または水道水系の配管と共用する場合は、同供給系の信頼度の低下をきたさないよう配慮されなければならない。

また、消火ポンプ系は多重性又は多様性をもたせ、かつ、故障時の警報を制御室で示さなければならない。

さらに、消火ポンプ系は、常用電源が喪失した場合でも機能を失ってはならない。

⑦ 消火栓はすべての火災区域の消火活動に対処できるよう配置しなければならない。

⑧ 電気ケーブルが密集し、かつ、人が容易に接近できない区域に消火装置を設置する場合には、水スプリンクラー系を用いなければならない。

ただし、密閉された区域で、ガススプリンクラー系の効果が期待できる場合には、ガススプリンクラー系を用いてよい。

⑨ ガススプリンクラー系を採用する場合には、系の動作時に立入者の安全をはかるため

に早期に警報を発生させなければならない。

- ⑩ 水スプリンクラー系及びガススプリンクラー系を採用する場合には、安全機能を有する構築物、系統及び機器がその散布により安全機能を著しく阻害されないようにしなければならない。

また、汚染の可能性のある水のプラント外への流出を防止しなければならない。

- ⑪ 運転管理においては、⑤による必要な移動式消火設備の配備のほか、次の事項を含む火災防護に関する計画を策定し、実施状況の確認及び見直しが定期的に行わなければならない。

(a) 目視により火災を検知する場合の方法及び目視又は火災検出装置による検知後の公設消防への通報に関すること

(b) 想定される火災の態様に応じた移動式消火設備の配備に関すること

(c) 自衛消防隊の組織並びに構成員の人数及び能力に関すること（消火並びに放射線防護及び原子炉施設に関する知識を有することを含む。）

2-2 地震等自然現象による火災検出・消火装置性能の阻害を防ぐ措置（解説）

- (1) 「その性能が著しく阻害されることがないような措置」とは、想定される火災に対処する消火能力が喪失することを防止する為、地震等の自然現象が生じた場合であっても早期消火を行えるための措置をいう。

- (2) 特に、大規模な地震により発生する火災については、祝休日又は夜間にも発生しうること、同一発電所内で同時に複数の箇所で発生しうること、初期活動において公設消防の支援が得られない可能性があることを考慮し、地震が生じた後にも次の事項が満たされるよう、設備及び運転管理による措置（運転管理については、次の事項を考慮した火災防護に関する計画が策定され、実施状況の確認及び見直しが定期的に行われることをいう。）を講じなければならない。

① 火災を早期に検出し、及び検出した後に速やかに公設消防に連絡することができること

② 自動消火設備若しくは自衛消防隊による消火装置の使用又はこれらの組合せにより初期消火活動を行う機能を有していること

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。

火災の影響の軽減に係る各項目の解説に記載された具体例は以下のとおりである。

3-1 重要度に応じた隣接区域火災影響も含む火災影響軽減対策（解説）

「それらの重要度」とは、発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針（平成2年8月30日原子力安全委員会決定）における重要度をいう。

「火災の影響の軽減対策」とは、次のような事項を考慮した設計を意味する。

- ① 安全機能を有する構築物、系統及び機器を含む区域のうち、火災の影響を受けるおそれのある所では、適切な区画により火災区域を設定しなければならない。
- ② 各火災区域について、③に述べるように耐火壁によって隣接区域間の延焼防止を行うか、若しくは、④に述べるように耐火壁、隔壁、間隔及び消火装置の組合せによって隣接区域間及び火災区域内の延焼防止を行うことにより、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する火災の影響を軽減し、3-2 に述べた要求を満足しなければならない。ただし、制御室以外では可搬型消火器の効果を期待してはならない。
- ③ 火災の影響を軽減するために耐火壁のみを期待する火災区域では、火災区域の中又は周辺の可燃性材料の種類及び量から算定した火災荷重に基づいて必要な耐火壁能力を決定しなければならない。

この場合にも原則として消火装置を設けることが好ましい。消火装置を設ける場合には、実験的に明らかにされれば消火装置の効果を見込んで難燃性ケーブル及び延焼防止剤を塗布したケーブルの火災荷重を評価してよい。

- ④ 火災の影響を軽減するため、耐火壁、隔壁、間隔及び消火装置の組合せを利用する火災区域では、これらの効果を評価しなければならない。この評価は、火災区域の中及び周辺の可燃性材料の種類、量及び配置を考慮して妥当と認められる手法又は火災事故・実験に基づく適切なデータを用いて行わなければならない。
- ⑤ 上記③及び④の評価に当たっては、消火装置の単一故障を仮定するとともに、熱、煙、流出流体等の影響や断線、爆発等の2次効果を十分考慮しなければならない。

なお、これらの評価に用いた条件は、原子炉施設の運転管理にあたって遵守される必要がある。

- ⑥ 換気系は、他の火災区域の火、熱、又は煙が安全機能を有する構築物、系統及び機器の存在する火災区域に悪影響を及ぼさないようにしなければならない。また、これに係わるフィルタを火災の延焼から防護するために適切な方法を用いなければならない。また、これに係わるフィルタを火災の延焼から防護するために適切な方法を用いなければならない。
- ⑦ 電気ケーブルや引火性液体の密集区域及び制御室のような通常運転員が駐在する区域では火災によって発生する煙を処理できるような設計をしなければならない。
- ⑧ 火災区域内又はその近傍で起こる火災に関連した爆発の潜在的可能性は実行可能な限り排除しなければならない。
- ⑨ 各火災区域について、③に述べるように耐火壁によって隣接区域間の延焼防止を行うか、若しくは、④に述べるように耐火壁、隔壁、間隔及び消火装置の組合せによって隣接区域間及び火災区域内の延焼防止を行うことにより、安全機能を有する構築物、系統

及び機器に対する火災の影響を軽減し、3-2 に述べた要求を満足しなければならない。
ただし、制御室以外では可搬型消火器の効果を期待してはならない。

3-2 火災による外乱発生時の原子炉停止設計（解説）

- (1) 3-2 の要求事項は、安全設計審査指針の指針 9. に定める原子炉施設一般の要求事項である信頼性に関する設計上の考慮における考え方を、火災による外乱発生時にも適用したものである。「単一故障を想定」とは、想定される火災により出力運転中の原子炉に外乱が及び、原子炉を速やかに停止し、かつ、停止状態を維持する必要が生じた場合、高温停止のため新たに作動が要求される安全保護系、原子炉停止系の機器に単一故障（原子炉又は蒸気発生器に給水する系統の機器の新たな作動が要求される場合には、その系統の機器に単一故障）を仮定することを要求するものである。大規模な地震等の苛酷な自然現象の発生により火災が発生する可能性が 1-3 の措置を講じることにより十分低減されている構築物、系統及び機器で火災が発生し、又は当該自然現象と無関係に火災が発生する場合については、当該火災と無関係な故障まで考慮する必要はない。
- (2) 「高温停止できる」とは、想定される火災の原子炉への影響を考慮して、高温停止状態の達成に必要な系統及び機器がその機能を果たすことができることをいう。
- (3) 「その機能を失わない設計であること」とは、低温状態に移行する場合にあっては低温停止に必要な系統のうち少なくとも一つは機能すること、低温状態を維持する場合にあっては低温停止状態が維持されることをいう。

2) 原子炉等規制法とその関係法令

廃棄物管理施設、再処理施設の事業規制に係る主な法令には、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律[17]（以下、「原子炉等規制法」という）、使用済燃料の再処理の事業に関する規則[18]（以下、「再処理規則」という）、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物管理の事業に関する規則[19]（以下、「管理規則」という）がある。

原子炉等規制法の第一条（目的）では、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の利用における災害の防止や公共の安全を図るために必要な規制を行うことが、目的の一部として掲げられている。同法の第 44 条の 2、第 51 条の 3 では、事業指定／許可基準として施設の位置、構造、設備が核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物による災害の防止上支障がないものであることを要求している。

再処理規則、管理規則では、上記の「災害の防止上支障がないこと」を事業許可申請書の中で説明することを具体的に要求している。一例として、管理規則で要求されている事業許可申請書（本文、添付書類）に記載すべき主な事項を以下に示す。

①管理規則 事業許可申請書本文

- ・施設の位置、一般構造、建物の構造、主要設備本体の構造及び設備、受入れ施設の構造及び設備、計測制御系統施設・放射線管理施設の設備、その他附属施設の構造及び設備（各種廃棄施設、非常用電源設備等）

②管理規則 事業許可申請書添付書類

- ・施設を設置しようとする場所における気象、地盤、水理、地震、社会環境等の説明書
- ・施設の安全設計に関する説明書
- ・核燃料物質等による放射線被ばく管理及び放射性廃棄物の廃棄に関する説明書
- ・設備の操作上の過失、機械又は装置の故障、浸水、地震、火災等があった場合に発生が想定される事故の種類、程度、影響等に関する説明書

上記の事業許可申請書本文、及び添付書類で記載すべき事項のうち、火災に関する技術的な記載事項は、管理規則の次の条項に定められている事項として申請書に記載される。

○管理規則 第二条（廃棄物管理の事業の許可の申請）

第1項 申請書記載事項

第二号 廃棄物管理施設の位置、構造及び設備

ロ 廃棄物管理施設の一般構造

3) 火災の防止に関する構造

○管理規則 第二条（廃棄物管理の事業の許可の申請）

第2項 申請書添付書類記載事項

第五号 廃棄物管理施設の安全設計に関する説明書（主要な設備の配置図を含む）

第七号 廃棄物管理施設に係る設備の操作上の過失、機械又は装置の故障、浸水、地震、火災等があった場合に発生すると想定される廃棄物管理施設の事故の種類、程度、影響等に関する説明書

4) 事業許可申請書における火災・爆発事象の対策事例の整理

前項の管理規則条項に従って、廃棄物管理事業許可申請書[20]に記載された火災防止関連事項を表 3.2.2-8、表 3.2.2-9 に示す。

表 3.2.2-8 廃棄物管理事業許可申請書（本文）における火災防止関連記載事項

項目	内容	
本文		
四、A. 廃棄物管理施設の位置、構造及び設備	ロ. 廃棄物管理施設の一般構造 (3)火災の防止に関する構造	以下の設計方針に基づく火災防止設計を行う。 ・ 主要な設備及び機器は、可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計とする。 ・ 火災発生防止のため、着火源の排除及び可燃性物質の漏洩防止対策を講ずる設計とする。 ・ 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を設けるとともに、火災影響軽減のため防火区画を設定し、消火設備との組合せにより延焼を防止する設計とする。
	チ. その他廃棄物管理設備の附属施設の構造及び設備 (6)その他の主要な事項	(i)消防用設備 本設備は、消防法に基づき、自動火災報知設備及び消火設備を設ける。

表 3.2.2-9 廃棄物管理事業許可申請書（添付書類）における火災防止関連記載事項

項目	内容
添付書類	
<p>五 変更後における廃棄物管理施設の安全設計に関する説明書</p>	<p>1.安全設計 1.4 火災の防止に関する設計</p> <p>(1)廃棄物管理施設のうち主要な設備は、可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計とする。 (2)廃棄物管理施設のうち、可燃性物質を使用する設備及び機器は、火災の発生を防止する為に、着火源の排除及び可燃性物質の漏洩防止対策を講ずる設計とする。 (3)廃棄物管理施設は、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を設けるとともに、火災影響軽減のため防火区画を設定し、消火設備との組合せにより延焼を防止する設計とする。</p> <p>7.その他廃棄物管理設備の附属施設 7.5 その他設備 7.5.2 消防用設備</p> <p>本設備は、消防法に基づく自動火災報知設備及び消火設備で構成する。 【設計方針】 ・自動火災報知設備及び消火設備を適切に配置し、火災の早期発見、消火活動の円滑化を図り、火災による人的物的被害を軽減し、施設の安全性が損なわれないようにする。 ・消防法及び関連する規則・規程等に基づいた設計とする。 【主要設備】 ・自動火災報知設備 ・消火設備（消火栓設備、ガス消火設備）</p>
<p>七 変更後における廃棄物管理施設の操作上の過失、機械又は装置の故障、浸水、地震、火災等があった場合に発生すると想定される廃棄物管理施設の事故の種類、程度、影響等に関する説明書</p>	<p>3.その他 3.1 地震、台風、浸水、火災等の外部要因 (5) 火災</p> <p>【主要設備】 ・可燃性物質を用いる設備・機器の着火滅の排除、可燃性物質漏えい防止対策、不燃・難燃材料の使用、消火設備、自動火災報知設備設計により火災による安全性の損失は無いとした。 【付近の工場等の影響】 ・石油備蓄基地は敷地境界から約0.9km離れており、万一の火災を想定しても安全確保上支障なしと評価した。</p>

5) 新規制基準における火災・爆発に関する考え方

a. 新規制基準

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）」[21]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」[22]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」[23]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下記の火災影響評価ガイドを、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[21]。

b. 原子力発電所の火災影響評価ガイド

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、以下の二つである。

- ・原子力発電所の外部火災影響評価ガイド[24]
- ・原子力発電所の内部火災影響評価ガイド[25]

「外部火災影響評価ガイド」は、発電所敷地外で発生する火災が、原子炉施設における安全機能を有する構築物、系統及び機器を内包するものにたいして影響を与えないこと、及び発電所敷地外で発生する火災の二次的影響に対する適切な防護対策が施されていることについて評価するための手順例を示すものである。

外部火災として対象とする火災は、①森林火災、②近隣の産業施設の火災・爆発、③航空機墜落による火災、である。②近隣の産業施設の火災・爆発の例として、石油コンビナート、化学工場、燃料輸送車両、漂流船舶等の発火による火災・爆発が挙げられている。ガイドでは、外部火災による影響として考慮すべき火災負荷（とその特性火災の規模、二次的影響の有無）、及び施設への影響形態（火炎、輻射熱、発生ばい煙の換気設備への影響、爆破による飛来物影響）について必要考慮事項が記載されている。また、外部火災防護のための設計目標、防護手段といった基本事項が定められている。

外部火災の影響評価手法としては、上記の3種類の火災ごとに考慮すべき火災の種類、火災の規模、二次的影響の検討事項、影響評価パラメータと影響評価判断基準等が定められている。

「内部火災影響評価ガイド」は、原子炉施設内の火災区域又は火災区画に設置される安全機能を有する構築物、系統及び機器を火災から防護するための火災防護対策により、施設内で火災が発生しても原子炉の安全停止に係わる安全機能が確保されることを確認するために実施する内部火災影響評価の手順を示すものである。

想定する火災は、原子炉安全機能に影響を及ぼす可能性がある最も苛酷な単一の火災を火災区域／火災区画内に想定する。また、地震時においては、耐震 B、C クラスの機器を火災源として、最も苛酷な単一の火災を、火災区域／火災区画に想定する。

火災影響評価の手順は以下の通り。

- 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

これらの④ステップにおける詳細な実施手順も同ガイドに定められている。評価手順を図 3.2.2-7 に示す。

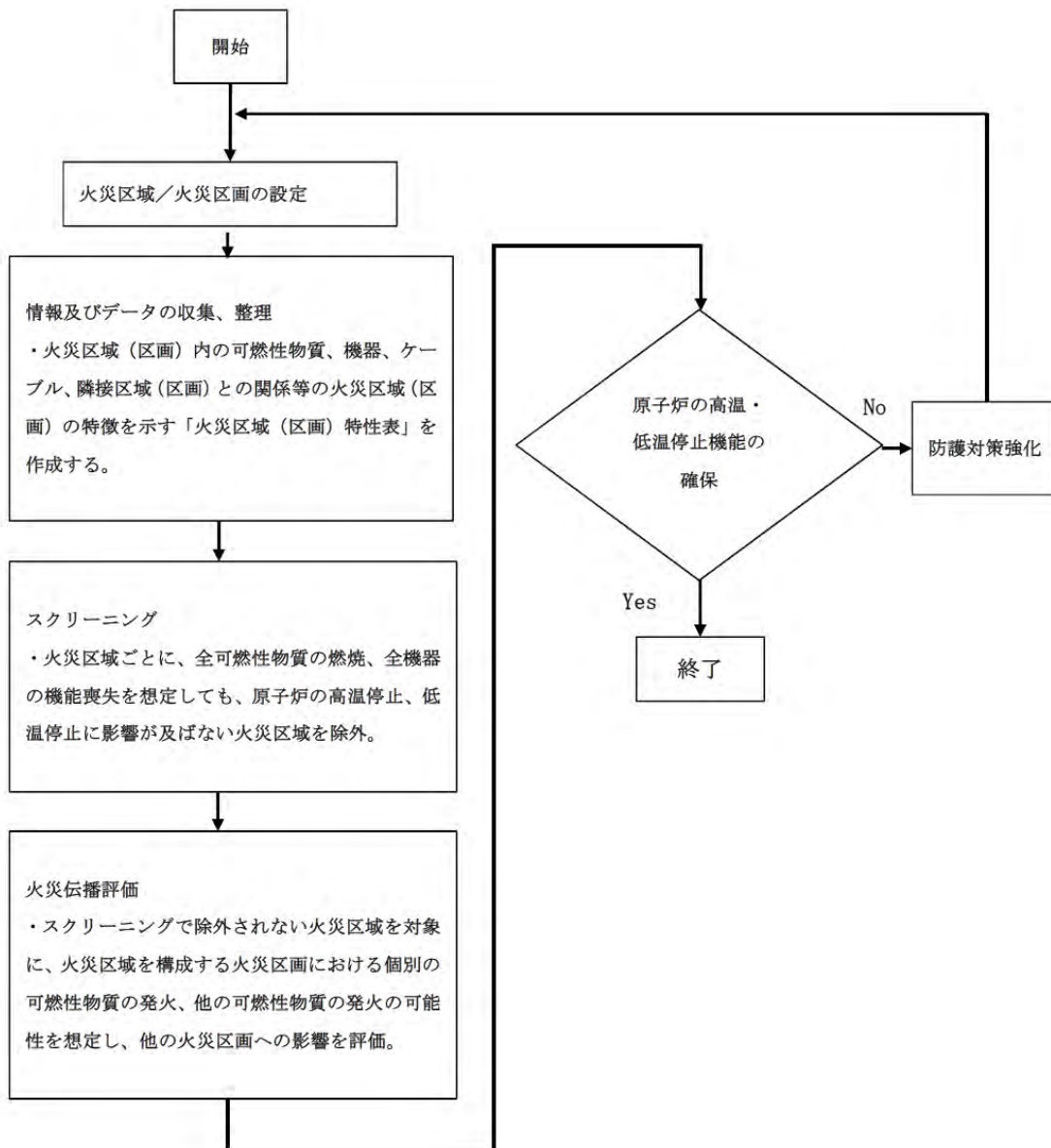


図 3.2.2-7 火災影響評価手順[25]

6) 本検討への知見の反映

気流解析や避難シミュレーション解析の解析条件の設定に資するため、原子力関連施設で準拠している関連法令、指針、評価ガイドラインのうち特に火災・爆発に係る安全対策要求事項について整理した。また、廃棄物管理施設等の事業許可申請書における火災・爆発の安全対策事例を調査した。

その結果、原子力関連施設の火災・爆発事象については、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ことがわかった。具体的には、一般的な防消火の考え方（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と考えられる。

地下施設における火災・爆発発生時の気流解析や避難シミュレーションでは、まず火災影響を評価するための条件設定が必要となる。原子力関連施設では防消火設計の基本である火災区域／区画（防火区画）と原子力関連施設特有の管理区域区分を設定するとともに、要求機能に応じた換気空調機器の系統設計が行われる。従って、これらを地下施設の解析条件として与えるためには、基本的な設計を行って設定することが妥当と考えられる。

3.3 解析条件の検討・設定

2.1.3.(1)に述べたように、地下施設における火災に対する安全性は、気流解析（煙、有毒ガス、熱気などの火災影響の拡散状況の把握を目的とする）と避難シミュレーション解析（避難経路や避難速度の把握を目的とする）に基づいて検討する計画である。ここでは、これらの解析の条件を検討・設定した結果を述べる。

3.3.1 地下施設の検討・設定

(1) 地層処分施設の地下施設の概要

地下施設は、廃棄体を定置する処分坑道群、それらを取り囲む主要坑道からなる複数の区画（処分パネル）及び主要坑道とアクセス坑道を結ぶ連絡坑道から構成される（図 3.3.1-1）。各坑道の役割を表 3.3.1-1 にまとめて示す。

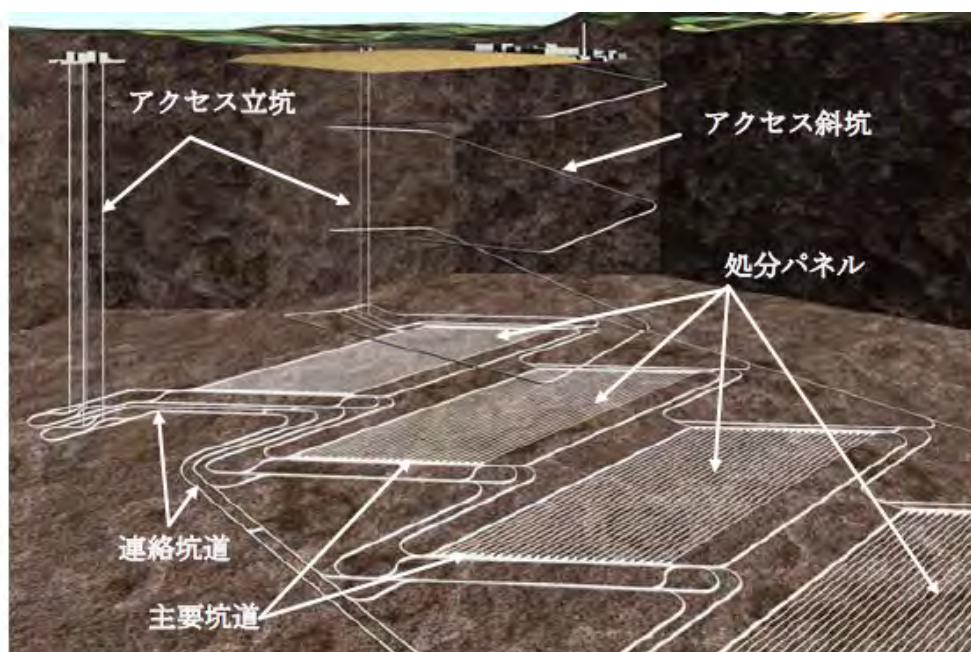


図 3.3.1-1 地下施設レイアウト例（高レベル放射性廃棄物処分場）[1]

表 3.3.1-1 坑道の種類と役割

地下施設の役割	アクセス坑道	主要坑道	連絡坑道	処分坑道
廃棄体搬入路	○	○	○	○
人員の連絡路	○	○	○	○
資材の運搬路	○	○	○	○
換気路	○	○	○	○
給水路	○	○	○	—
排水路	○	○	○	○
給電・通信路	○	○	○	○
緊急時避難	○	○	○	—

(2) 定置概念の概要

定置概念には縦置き、横置き方式があり、廃棄体と緩衝材を搬送・定置する操業技術のうち代表的なものを図 3.3.1-2 及び表 3.3.1-2 にまとめて示す。



図 3.3.1-2 搬送・定置技術オプション[1]

表 3.3.1-2 定置技術のまとめ

定置方式	技術概要
ブロック方式	複数に分割した緩衝材ブロックをあらかじめ地上施設で製作し、地下に搬送して組み立てるものである。底部及び側部の緩衝材ブロックを設置後、廃棄体を定置し上部緩衝材ブロックを設置する。また、緩衝材の密度を確保するため、処分孔壁、あるいは処分坑道壁と緩衝材ブロックの間に生じる隙間を充填する必要がある場合には、緩衝材ペレットなどで隙間を充填する。
原位置締め固め方式	緩衝材材料を地下に搬送し、原位置で所定の密度まで締め固め施工するものである。底部緩衝材を所定の密度・厚さに締め固め、廃棄体定置スペースを確保するためのリング状内型枠を設置した後、側部緩衝材を撒き出し締め固める。側部緩衝材締め固め後に廃棄体を定置し、上部緩衝材を撒き出し締め固める。
ペレット充填方式	廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し、その上に廃棄体を定置する。側部及び上部緩衝材を地上で製作したペレット状の緩衝材を充填することにより構築する。
吹付方式	廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し、その上に廃棄体を定置する。側部及び上部緩衝材を吹付により構築する。
PEM 方式	廃棄体と緩衝材を地上施設において所定の形状に組み立てたものを、地下に搬送し処分孔内あるいは処分坑道内に定置する。

(3) 解析に反映する定置方式

1) 定置技術の組み合わせとその概要

処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き定置方式について、適用する技術の組み合わせは多数考えられるが、既往の基盤研究開発成果や海外機関による技術開発状況等を踏まえ、現時点で有望とされている技術の組み合わせを表 3.3.1-3 にまとめて示す。

表 3.3.1-3 定置技術の組み合わせ[1]

定置方式	技術の概要
処分孔縦置き定置方式	処分孔縦置き定置方式については、基盤研究開発機関において、ブロック方式や締め固め方式について実規模レベルでの製作・実証試験が行われており、その実現性が示されている。特にブロック方式は、緩衝材ブロックの製作と真空把持装置を用いた定置技術が開発されている。フィンランドの地層処分事業者である POSIVA も、真空把持装置を用いて実規模の緩衝材ブロックの定置実証試験（外径 1,700mm、高さ 7,600 mm）を行い、ブロックの定置誤差を±25mm 以下にできること、3 時間あまりですべてのブロックを定置できることを確認している。
処分坑道横置き定置方式（原位置施工方式）	処分坑道横置き定置方式は、狭隘空間での長距離かつ遠隔施工になること、廃棄体と緩衝材の定置方向も重力の作用する方向とは異なる水平方向であることなどから、搬送・定置作業の難易度は処分孔縦置き定置方式よりも高くなると考えられる。例えば、ブロック方式を適用する場合、ブロックの定置や廃棄体の定置作業には水平移動が伴うため、鉛直方向の定置と比べて荷重の支持方法など、定置装置の設計への要求事項が多くなる。また、処分坑道内を長距離移動し、定置済み緩衝材の位置を正確に認知した上で精度の高い緩衝材定置技術が必要になる。
処分坑道横置き定置方式（PEM 方式）	処分坑道横置き定置方式は、上記のとおり処分孔縦置き定置方式に比べて搬送・定置作業の難易度が高いと考えられる。原位置での処分坑道横置き定置方式の作業性と緩衝材の施工品質を向上させるための方策として、PEM 方式について検討を進め、第 2 次取りまとめ以降、基盤研究開発により技術が着実に整備されている。

2) 解析に反映する定置方式の選定

表 3.3.1-3 より、過去に定置技術の実証検討が行われているのは処分孔縦置き定置方式であること、既往の文献等により坑道長や坑道の径、各パネルのサイズ等が分かるものであることから、本検討においては処分孔縦置き定置方式を対象に解析条件を設定することとした。

(4) 処分パネルの形状と配置の設定

処分孔縦置き定置方式の場合、処分パネルの形状と配置については岩盤条件（硬岩と軟硬岩）に応じて図 3.3.1-3、図 3.3.1-4 の 2 例が示されている[2]。

前述のように、本検討では火災時の作業員の避難の様子をシミュレーション解析で表現する予定である。そこで、緊急時の避難経路等がより複雑になると想定される「軟岩系岩盤」の処分パネルの形状・配置について検討することにした。

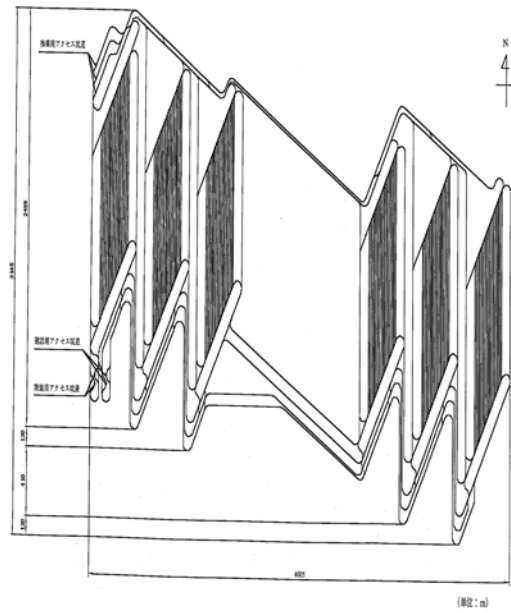


図 3.3.1-3 処分場レイアウト図（硬岩系岩盤、縦置き方式） [2]

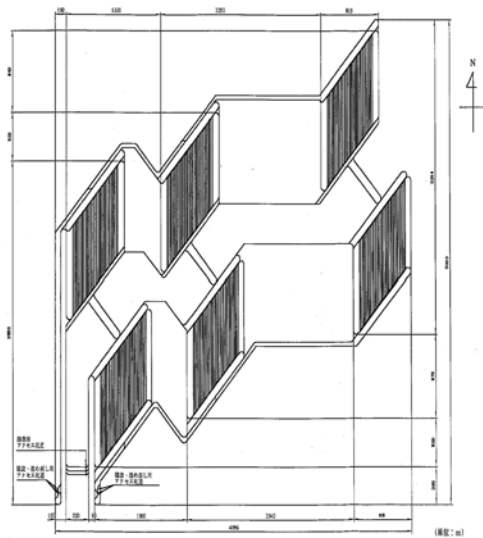


図 3.3.1-4 処分場レイアウト図（軟岩系岩盤、縦置き方式） [2]

(5) 処分パネル運用方法の設定

高レベル放射性廃棄物の地下処分パネルでの作業は、建設、定置、埋め戻しの3つの作業が同時並行で行われる[1]。各作業は、建設中パネル、定置中パネル、埋め戻し中パネルのそれぞれに分かれて実施される。各パネルは、主要坑道で取り巻かれ、連絡坑道で連結されているが、「各処分パネルの作業の独立性を確保するために、アクセス坑道⇒連絡坑道⇒処分パネル（主要坑道⇒処分坑道）⇒連絡坑道⇒アクセス坑道という作業導線は、各作業で閉じるようにする[2]とされている。また、放射線安全を考慮して定置中パネル及び定置の作業導線は、他のパネル及び作業導線と空間的に独立した状態で作業が進められる。なお、地上から連絡坑道に繋がる坑道は、アクセス坑道と呼ばれており、定置中パネルに繋がる坑道が操業用坑道、建設中・埋め戻し中パネルに繋がる坑道が建設・埋め戻し用坑道と呼ばれている[3]。

以上より、気流解析及び避難シミュレーション解析は、図 3.3.1-5 の例のように、一つの処分パネルでは一つの作業のみが行われる条件（例えば一つの処分パネル内で定置と埋戻しの2作業が並行して行われることはない）で実施するものとする。

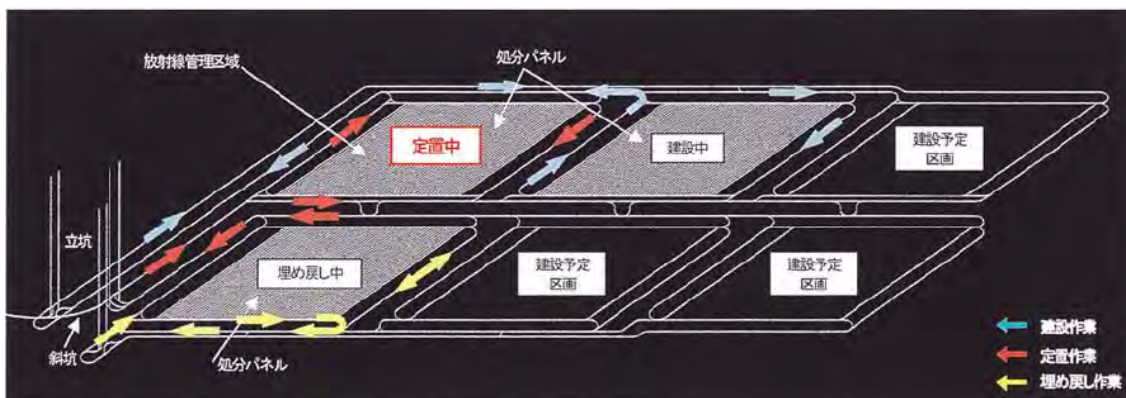


図 3.3.1-5 建設・操業時の地下施設での作業イメージ図

(原子力発電環境整備機構, TR-04-01[3]より抜粋_※現図 2002c[4])

(6) 処分パネルや坑道の形状・寸法

1) 施設形状等を明記した文献の調査

地層処分施設関連の研究報告のうち、施設の形状等が記載されているものを抽出し、処分パネルの形状・寸法や坑道直径等の寸法の検討・設定に活用した。検討対象の文献は以下の通りである。

- ・ 【JNC TN1400 99-020】わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－総論レポート，核燃料サイクル開発機構，平成 11 年 11 月 26 日
- ・ 【JNC TN8400 99-044】地層処分場のレイアウトに関する検討（研究報告），核燃料サイクル開発機構 東海事業所，1999 年 11 月
- ・ 【NUMO-TR-11-01】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－，原子力発電環境整備機構，2011 年 9 月
- ・ 【ANDRA】 Dossier 2005 Argile- Architecture and Management of a Geological Disposal System, Agence Nationale pour la gestion des Dechets Radioactifs -ANDRA-, December 2005

上述の 4 文献を検討し、本検討では基本的に国内文献に基づいて処分パネルや坑道の形状・寸法を確認・抽出した。抽出結果を図 3.3.1-6～図 3.3.1-9 に示す。

前述のように、本検討では軟岩系岩盤における処分孔縦置き定置方式を解析対象とすることから、解析モデルの作成にあたっては図 3.3.1-7 や図 3.3.1-9 を参照にして処分パネルや坑道の寸法を設定する。図 3.3.1-10 には、軟岩系岩盤における処分孔縦置き定置方式の場合の処分パネルの詳細を示す。

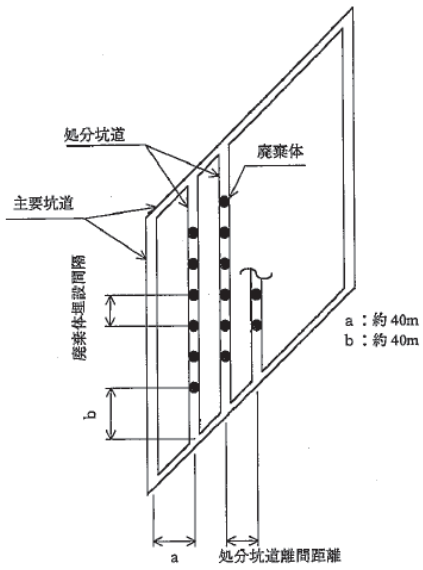


図 2-50 処分パネル規模の模式図

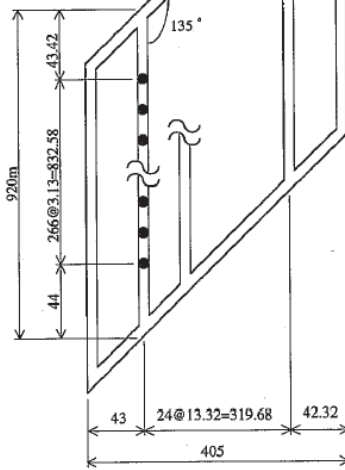


図 2-51 処分パネル概略形状
(硬岩系岩盤，横置き方式)

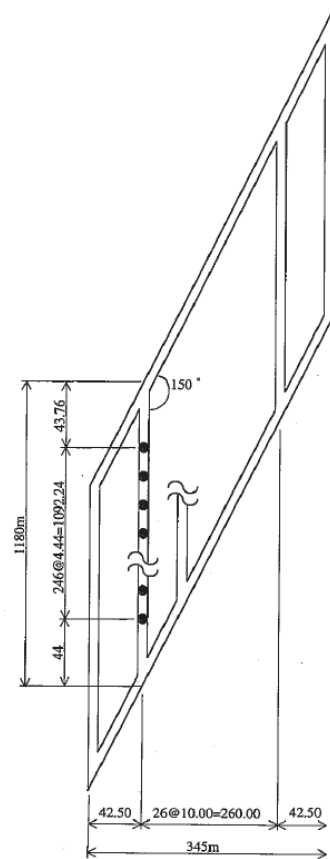


図 2-54 処分パネル概略形状 (硬岩系岩盤，縦置き方式)

図 3.3.1-6 処分パネル概略形状 (硬岩系岩盤) [2]

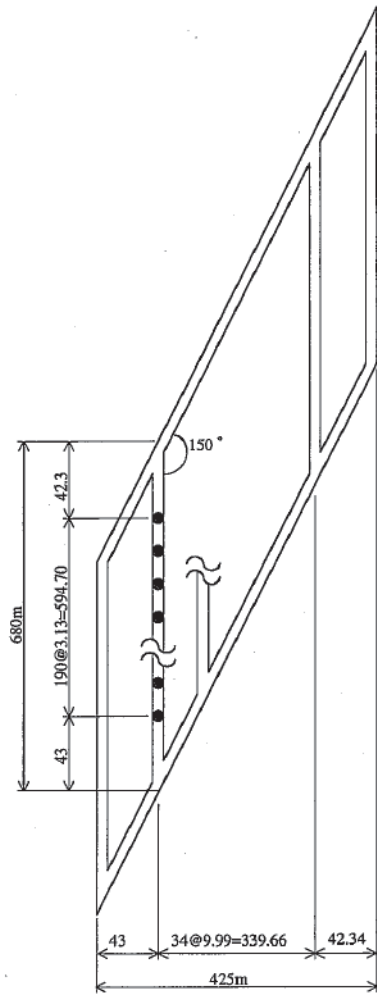


図 2-56 処分パネル概略形状 (軟岩系岩盤, 横置き方式)

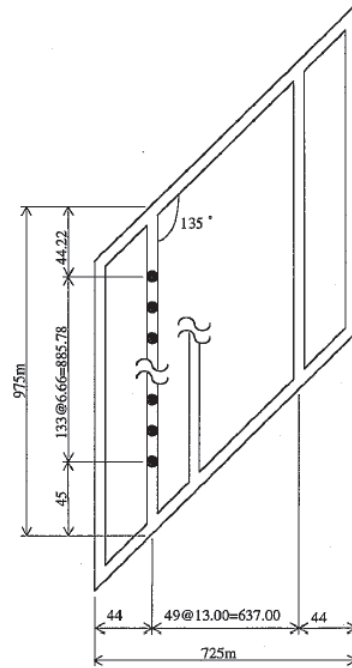


図 2-58 処分パネル概略形状 (軟岩系岩盤, 縦置き方式)

図 3.3.1-7 処分パネル概略形状 (軟岩系岩盤) [2]

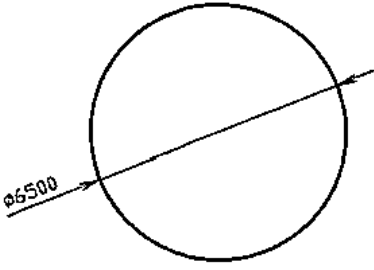
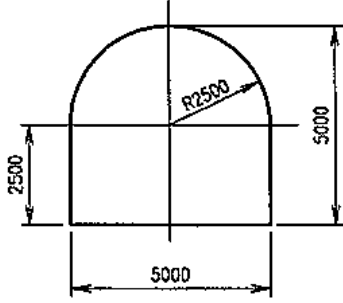

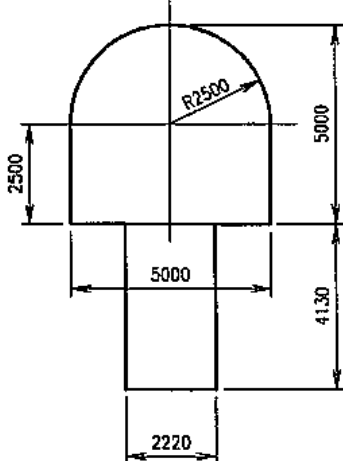
アクセス坑道	主要・連絡坑道
 <p>φ6500</p>	 <p>R2500 5000 2500 5000</p>
処分坑道（横置き方式）	処分坑道（縦置き方式）
 <p>2220</p> <p>(単位：mm)</p>	 <p>R2500 5000 2500 5000 5000 4130 2220</p>

図 3.3.1-8 処分パネル坑道断面（硬岩系岩盤）[2]

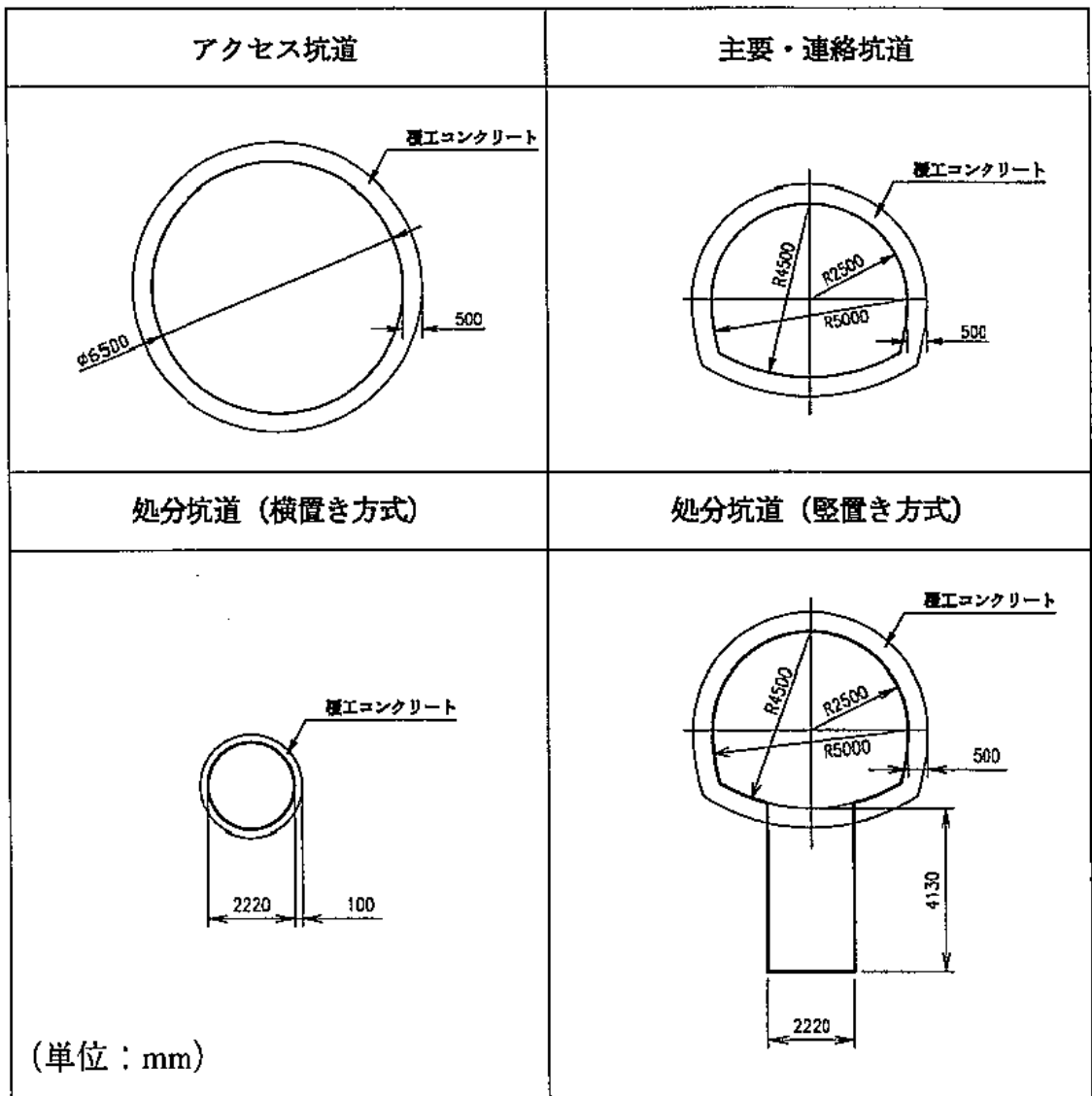


図 3.3.1-9 処分パネル坑道断面（軟岩系岩盤）[2]

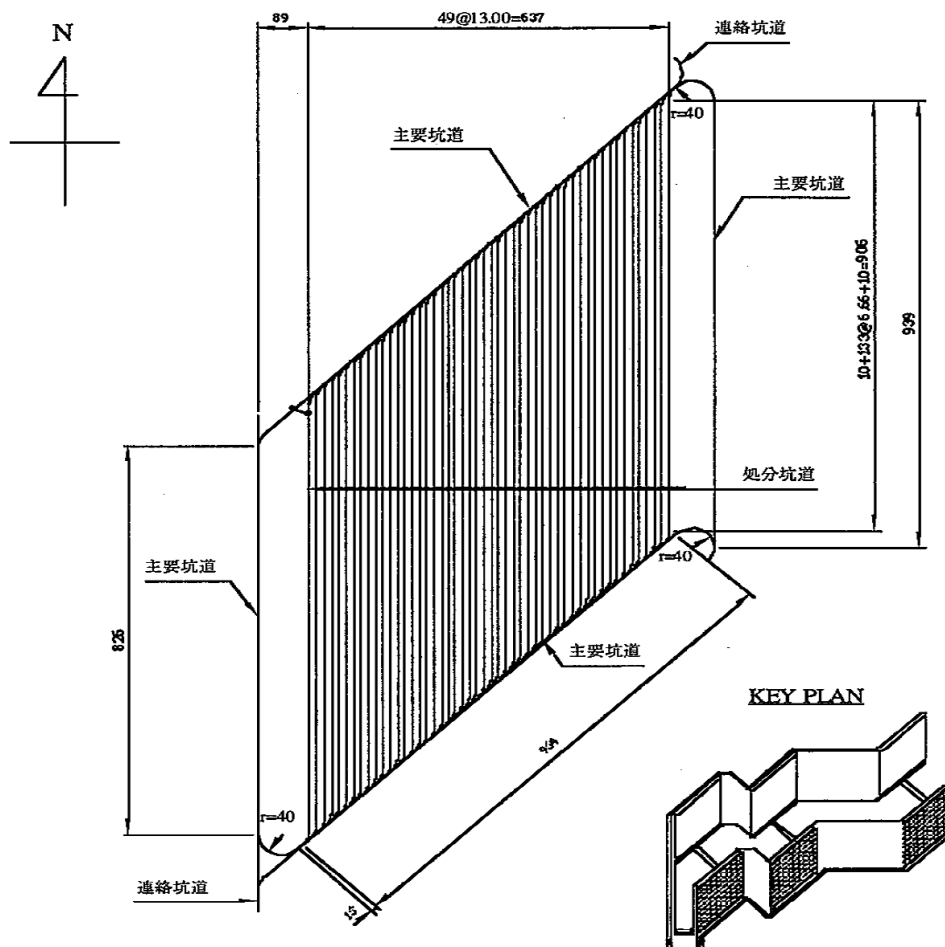


図 3.3.1-10 軟岩系岩盤における処分孔縦置き定置方式の場合の処分パネルの詳細[2]

(7) 地下施設の解析モデル

気流解析及び避難シミュレーション解析に用いる地層処分場地下施設の解析モデルは、本項(1)～(6)に述べた条件を踏まえて作成する。この際、「3.2.2 地層処分施設の類似施設における安全対策技術の整理」で述べた、鉱山・トンネル等の地下構造物や既存の原子力関連施設における安全確保に必要な施設や設備等について、必要に応じて解析モデルの中に組み込んでいくものとする。

3.3.2 気流解析条件の検討・設定

(1) 風況場の設定

1) 風況場とは

風況とは、風速、風向の出現状況、風速状況など、風の状態や性質のことを指し、風況場とは、ある場における風況のことを指す（図 3.3.2-1）。主に、地形や気象条件による風況の変化等に用いられる言葉であるが、本検討では、地下施設内の風況の変化全体を指して風況場と呼ぶこととする。

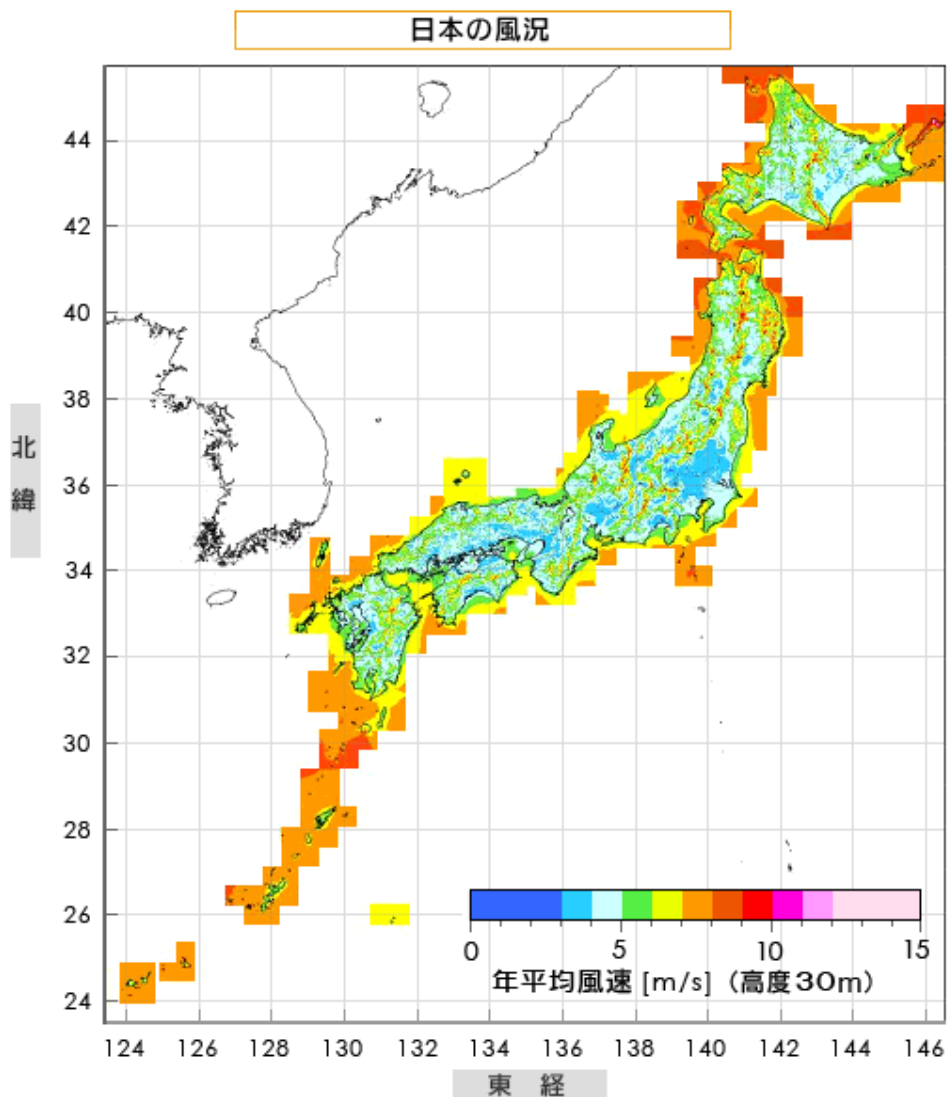


図 3.3.2-1 風況予測結果の例（日本の風況） [5]

2) 地下施設における風速設定の考え方

a. 平常時の風速の設定の考え方

地層処分施設の地下施設は大深度かつ長大な坑道群から成り、施設内で自然に風が発生するものではないため、労働安全の観点から見ても、強制的に通気させる必要がある。坑道内を風が動くために必要な風速は、一般には 0.3m/sec が必要とされているため、地下施設の通常に通気は最低でも 0.3m/sec を満たすような風速となるような入気・排気量が必要と言える。もちろん、坑道内で発破・掘削等の建設作業が行われる場合は、ガスや粉塵対策としてこれ以上の換気量が必要とされ、これを確保できる風速としなければならない。また、労働安全衛生規則により、坑内温度を 37℃以下に設定するよう求められているため、大深度地下施設のように坑内温度が高温となる施設については、温度条件も鑑みた上で通気量を確保する必要がある。

参考 労働安全衛生規則

(坑内の気温)

第六百十一条 事業者は、坑内における気温を三十七度以下としなければならない。ただし、高温による健康障害を防止するため必要な措置を講じて人命救助又は危害防止に関する作業をさせるときは、この限りでない。

(坑内の通気設備)

第六百二条 事業者は、坑内の作業場においては、衛生上必要な分量の空気を坑内に送給するために、通気設備を設けなければならない。ただし、自然換気により衛生上必要な分量の空気が供給される坑内の作業場については、この限りでない。

b. 火災時の風速の設定の考え方

(a) 国内法令をもとにした検討

鉱山保安法、労働安全衛生法によると、火災発生時の通気量及び坑内の風速は一概には決められておらず、状況に応じて適切な対応を取るよう定められている。類似施設であるトンネル内の火災については、火災が発生した場合にその煙がトンネル外へ出ないよう風向・風速をコントロールするとされているが、明確な数値基準は示されていない。ただし、火災による煙をコントロールするための風速は 2.0m/sec （経験値）と言われている。この経験値と鉱山保安法の規定（坑道内で作業員が働く上での最大風速は 7.5m/sec とされていること）を踏まえると、火災時の風速は、 $2.0\text{m/sec} \sim 7.5\text{m/sec}$ の間での設定が妥当と考えられる。

(b) フランス ANDRA 社の検討

フランスの ANDRA 社では、火災の状況をシナリオ化し、各シナリオに応じた換気量の検討を行っている。この検討の目的は、必要換気量を満たす機械性能値を検討することにある。検討手法は、入気坑道、換気用坑道、及び建設中の坑道、搬送用坑道を設定した後、坑道径・坑道長から必要空気量を算出している。なお下図の検討では、 $500\text{m}^3/\text{s}$ の換気量を満たす換気の機械性能値は 3MW であると記されている（図 3.3.2-2）。

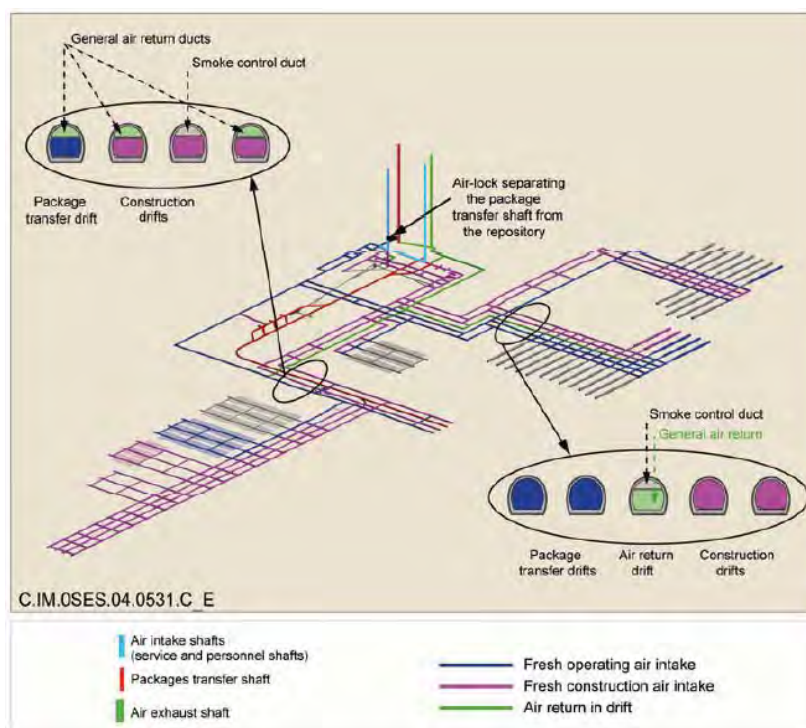


図 3.3.2-2 フランス ANDRA 社における換気量・換気機械性能値の検討[6]

3) 地下施設における風況場の設定

a. 入気用坑道及び排気用坑道の設定

高レベル放射性廃棄物地層処分事業の既往の検討では、専用の入気用坑道及び排気用坑道の径や配置計画などについての具体的・明確な検討は行われておらず、またその必要性についても言及されていない。このため本検討では、専用の入気用坑道や排気用坑道の配置は行わず、操業用の連絡坑道に入気・排気機能を持たせる設定とする。

既存の鉱山、海底トンネルなどの例では、基本的に地上から作業員や資材が入る坑口から入気され、作業突端から排気されている。これは、坑内で異常事態が発生した場合に作業員が坑口に向かって避難できるように、坑口付近の安全性を最も高めるための設定である。本検討でも、同様の考え方にに基づき坑口から入気し、作業突端側で排気するよう入気・排気を行うこととする。

b. 風向の設定

図 3.3.2-3 に、軟岩系岩盤における処分孔縦置き定置方式の処分パネルをイメージした簡易モデルを示す。全体の風向は図 3.3.2-3 の黄線で示すように左から右へ流れるよう設定する。埋め戻し中パネルと建設中パネルの間には防火扉を設け、風の流れをそれぞれで独立させる。なお防火扉は人が避難する場合には開放できる構造とし、火災発生からある程度経過した後はそこを避難する作業員により防火扉が開放され、埋め戻し中パネルと建設中パネルはひとつの風況場になると仮定する。

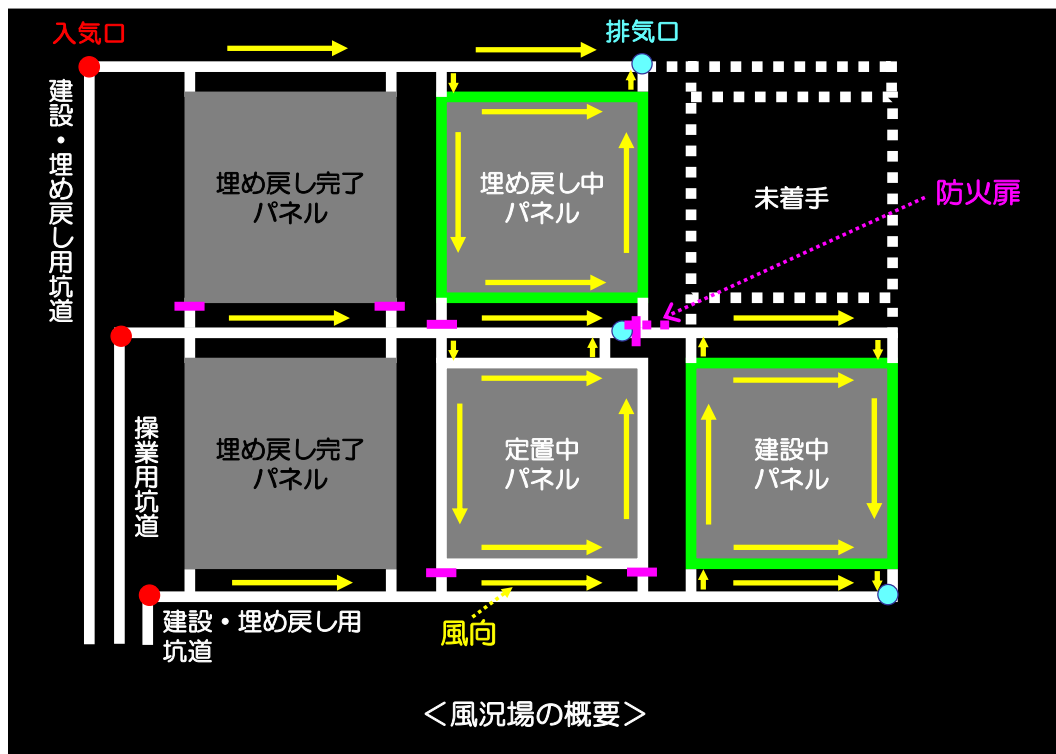


図 3.3.2-3 簡易モデルによる風況場の設定例

(2) 初期の坑内温度、圧力の設定

1) 坑内温度の設定

処分パネル内の坑内温度は、パネル深度により設定する。一般的に、深さ 100m ごとに地中内温度は 3 度ずつ上昇するとされている。たとえば地表温度 0℃の地点で、深さ 200m の坑道を建設した場合、深さ 100m 地点で 3℃、200m 地点で 6℃となる。地表温度は、季節により変動するため、坑道を建設・操業する際には、季節ごとの気温に応じて地中温度を予測し、風量等の設定に用いる。

地層処分施設の建設場所は現時点では決定されていないため、施設建設地の地表温度を設定することはできない。そこで本検討では、地表温度の検討は行わず、東京都の年間の平均気温 (16.1℃) より概算で 15℃と仮定した。なお、参考のため、気象庁から発表されている東京都の月別平均最高気温及び平均最低気温を表 3.3.2-1 に示す。

表 3.3.2-1 東京都年平均気温 (月別) 気象庁ホームページ

月別	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均最高気温	9.8	10	12.9	18.4	22.7	25.2	29	30.8	26.8	21.6	16.7	12.3
平均最低気温	2.1	2.4	5.1	10.5	15.1	18.9	22.5	24.2	20.7	15	9.5	4.6
平均気温	5.9	6.2	9	14.45	18.9	22.1	25.7	27.5	23.8	18.3	13.1	8.5

年間平均気温 = 16.12 度

2) 圧力の設定

既存の地下構造物における、地中空間の圧力の測定事例は見当たらない。そこで本検討では、標高が 100m 下がると圧力は 10hPa (ヘクトパスカル) 上昇することにより、処分パネルが建設される深度に応じて初期圧力を設定することとした。なお参考のため、表 3.3.2-2 に圧力の仮定値を示す (地表面 = 大気圧 (1013.25hPa))。

表 3.3.2-2 標高と圧力 (参考値)

標高	0m	-100m	-200m	-300m	-400m	-500m
圧力(hPa)	1013.25	1023.25	1033.25	1043.25	1053.25	1063.25

(3) 作業員数、配置の設定

1) 処分パネル内の作業員数の設定

本検討では、放射線管理区域である定置中パネル内には作業員を配置せず、埋め戻し中パネル及び建設中パネルには作業員がいると仮定する。埋め戻し中パネル及び建設中パネルにおける作業は、地上からある程度リモートコントロールされているとしても、掘削したズリの搬出や埋め戻しを行うには人が中に入って工事を行っていると考えられるためである。

本検討では、埋め戻し中パネル及び建設中パネルの各パネルのサイズを約 1km^2 と考え、概数として 100m^2 に作業員 1 名を配置し、各パネルには 100 名ほどの作業員が配置されていると仮定する (図 3.3.2-4)。

2) 作業員の配置

作業員の配置は、埋め戻し中パネル及び建設中パネルでの作業内容や手順、作業段階により異なると考えられるが、本検討では、基本的には作業員を各パネルの主要坑道に均等配置するものとし、必要に応じて、実際の作業状況を想定して処分坑道内に作業員を配置した条件での解析を行うものとする。

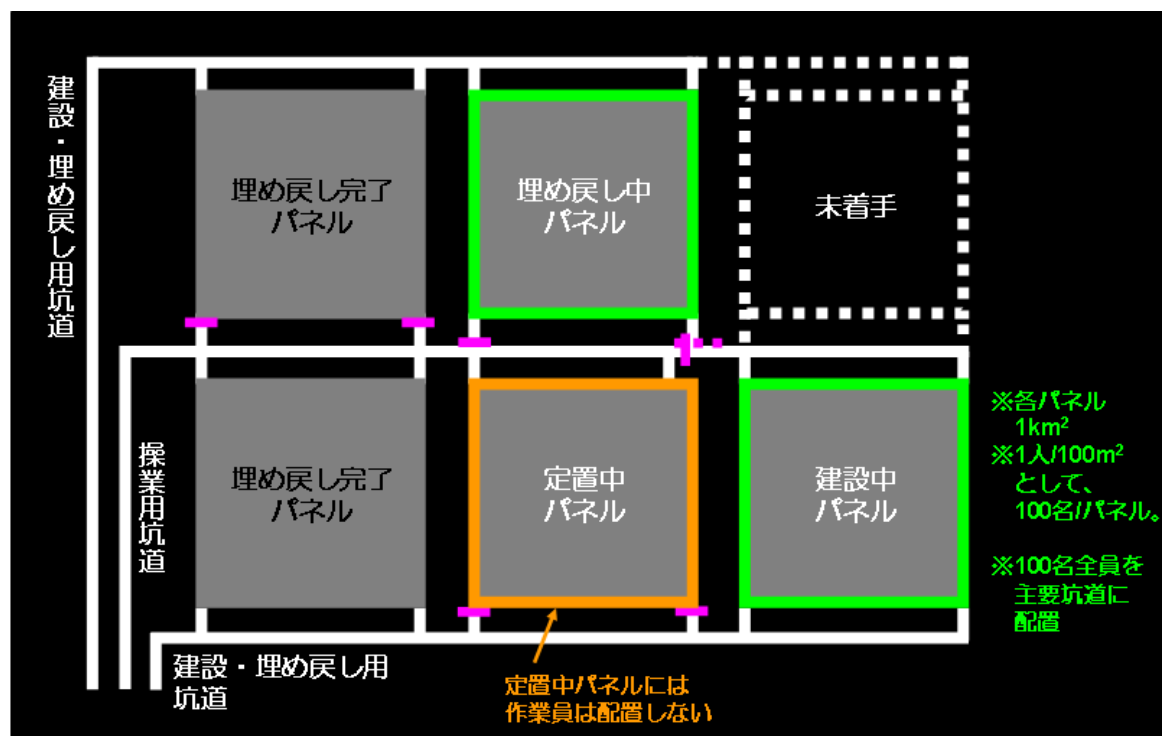


図 3.3.2-4 簡易モデルによる作業員数及び配置の設定例

(4) 火災曲線及び火災発生場所の設定

1) 火災曲線の設定

地層処分の地下施設は、その施設形状が鉱山やトンネルと類似する。このうち、トンネルについては実物大の火災実験もしくは火災事例に基づいて火災曲線を検討している[7]。ここでは、地下処分パネルの類似施設での火災事例としてトンネル火災の特徴をまとめ、それに基づいて本検討で用いる火災曲線を設定する。

a. トンネル火災の特徴と地下処分パネルとの類似性

トンネル火災は、ガソリンやその他の車載物（各種可燃物）から出火する 경우가多く、その原因はトンネル内の交通事故によるものである。比較的規模の大きな長大トンネルは、その構造上、密閉性が高い特徴を持ち一度大きな火災が発生すると、熱気がトンネル内部にこもるため、特に火災初期の温度上昇がその他建築物（一般家屋等）に比べて大きくなる（図 3.3.2-5、図 3.3.2-6）。

地下処分パネルは、大深度地下に建設されるため火災曲線の初期の立ち上がりはトンネル火災のそれと類似すると推測できる。一方で、施設内での交通事故や多量の可燃物は想定し難く、また、地下施設で使用される車両のエンジン等の特性についても未定である。このため本検討では、海外の地層処分施設計画等での同様の検討に倣い、火災曲線を設定することとした。

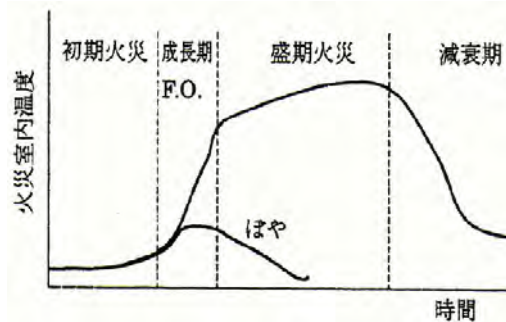


図 3.3.2-5 一般建築物の火災曲線[8]

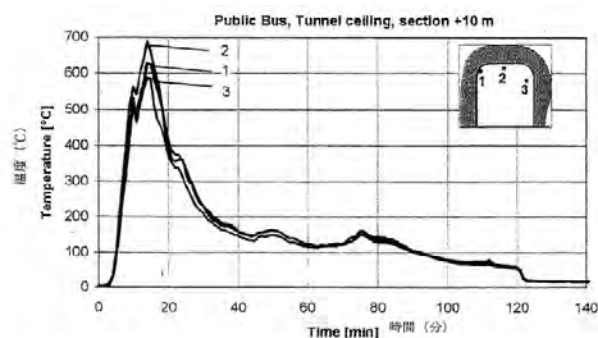


図 3.3.2-6 実物大トンネル火災実験（EUREKA 火災実験）の火災曲線[9]

b. 海外における類似検討に用いられた火災曲線

地層処分の地下施設を対象に本検討と同様の検討を行っているのは、フランスの ANDRA 社である。ANDRA 社の火災曲線に係る記述を下の枠内に示す。ANDRA 社の検討では、施設内の機械類が液体燃料漏れをおこし、何らかの理由でその液体燃料に引火したとして、火災シナリオを想定している。用いられている火災曲線については、比較・検討はされておらず、CETu 標準火災曲線を用いた検討を行っている。

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

地下処分パネルにあるコンベアベルトなどの機械類は、潜在的に高温の火災を引き起こす可能性がある。これらの機械類による火災は、高い火力や毒ガスを含んだ煙を発生することが特徴である。火災シナリオの設定は、現実的なシナリオが定義される必要があるため、本検討では、「処分坑道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」という火災シナリオを想定した。なお、火災の火力と延焼時間は、燃料と車両のタイヤの量で決められ、空气中酸素濃度は火災により減少しないと仮定する。

フランスのトンネル研究センター (French tunnel studying centre, CETu) は、様々な車両・条件で火災実験を行い、火力-延焼時間の関係を表す火災曲線を検討した。本検討では、図 11.4.1 に示す CETu 火災標準曲線を用いる。なお、この標準曲線は路上走行車でたとえると、ディーゼル車 (ダンプカー) が火災を起した場合の最大火力 (30Mw) に相当する。

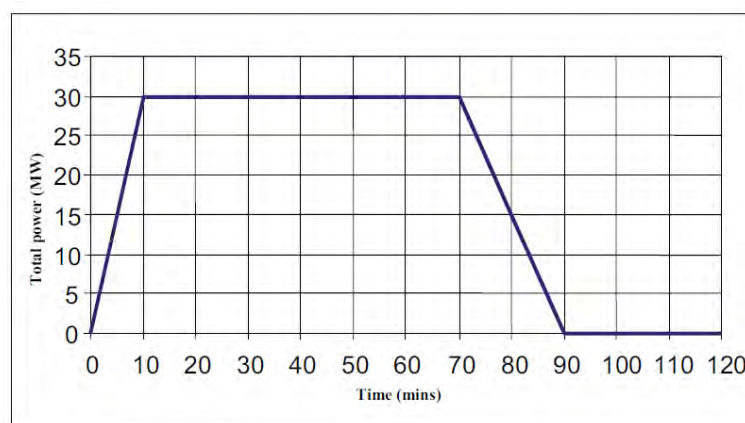


Figure 11.4.1 Standard total thermal power for a 30 MW fire

出展 : ANDRA Dossier 2005 Argile, Tome Architecture and management of a geological repository, December 2005, pp.456-458

2) 火災発生場所の設定

火災発生場所は、機械類の経路・運用方法等により決定することが望ましいが、地下処分パネル内における機械類の具体的な経路・運用方法に係る既往検討がないため、本検討では、基本的には埋め戻し中パネルもしくは建設中パネルの主要坑道で火災が発生するものとし、必要に応じて、処分坑道内を発火点とした条件での解析を行うものとする。

作業員の避難状況の検討を行う上で、作業員の避難路となりうる経路上で火災が発生し、かつ避難がより困難となるように設定にすれば、安全側の評価ができると考えられる。このため本検討では、このような安全側の評価となる場所を火災発生場所に設定することとする。例えば、図 3.3.2-7 のイメージ図に示すように、埋め戻し中パネルと建設中パネルの間の防火扉の存在により、作業員の避難速度が遅くなることを考慮して、これが支障条件のひとつとなるような場所を火災発生場所に設定する（同図中、避難経路は黄色い矢印で、火災発生場所は赤点で示す）。

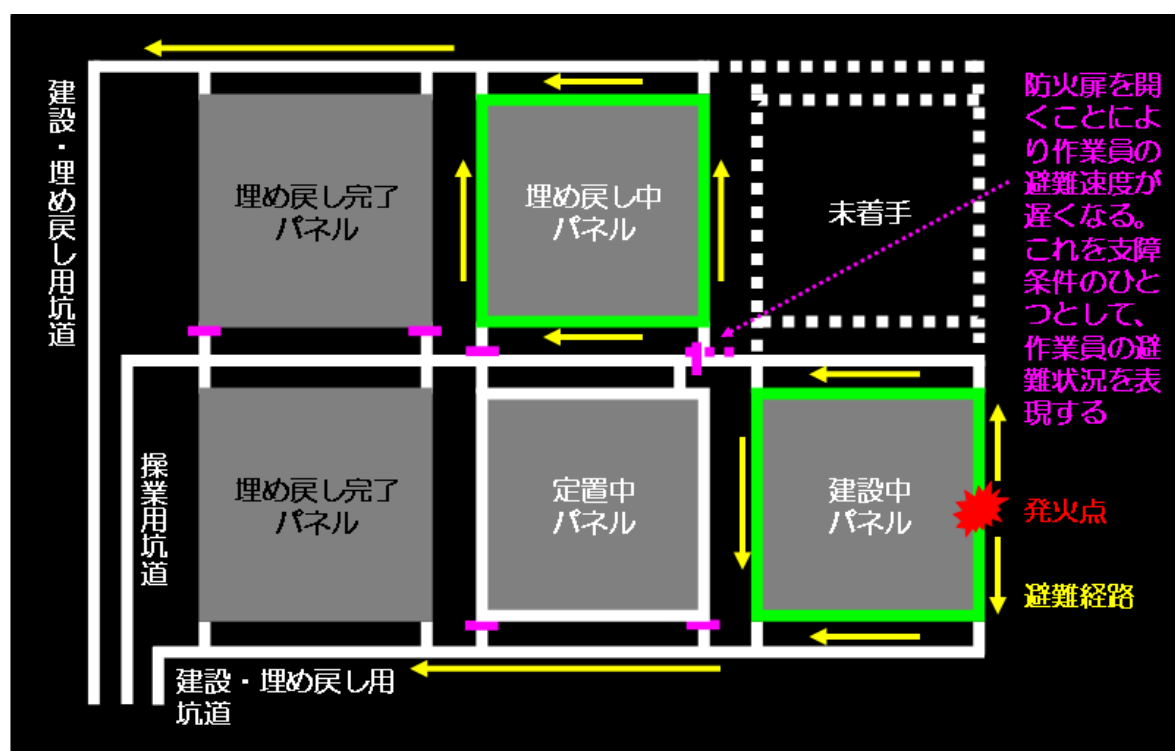


図 3.3.2-7 火災発生場所と避難の支障条件の例

(5) 気流解析の数値解析手法

1) 数値解析手法の検討

流体・気体の流れ解析には、一次元解析から三次元解析まであり、検討対象や結果の整理方法に応じて、どの次元解析を用いるか決める。本検討では、径 5m 程度の坑道内で火災が発生した場合の煙・熱の空間的拡散状況の確認に加えて、同坑道内を作業員が避難する様子を確認する目的を持つため、平面と高さの双方を解析で表現する必要がある。このため、本検討の解析には三次元解析を用いることとした。

2) 三次元気流解析コード (VENTMINE)

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」を用いることにした。VENTMINE は、流れ解析に用いる流体力学方程式を、2 次及び 3 次制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流れ計算は、陽解法で、換気などには陰解法の使用が可能である。壁の熱伝導や輻射、移流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一次元解析モデルと、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。

図 3.3.2-8～図 3.3.2-10 に、VENTMINE の解析機能の例を示す。

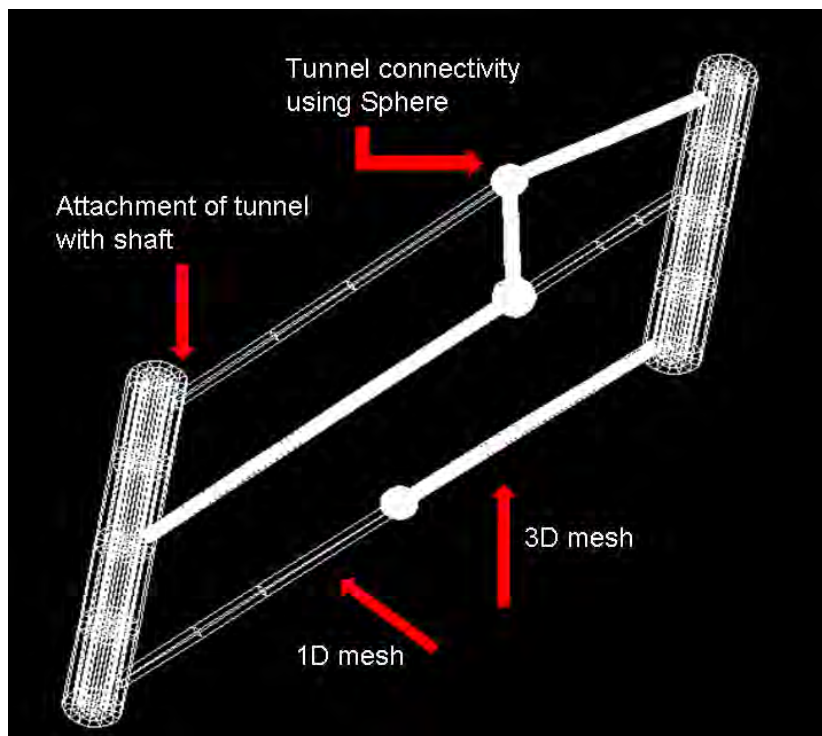


図 3.3.2-8 長大な坑道の解析等に活用する 1D/3D 解析モデルの例

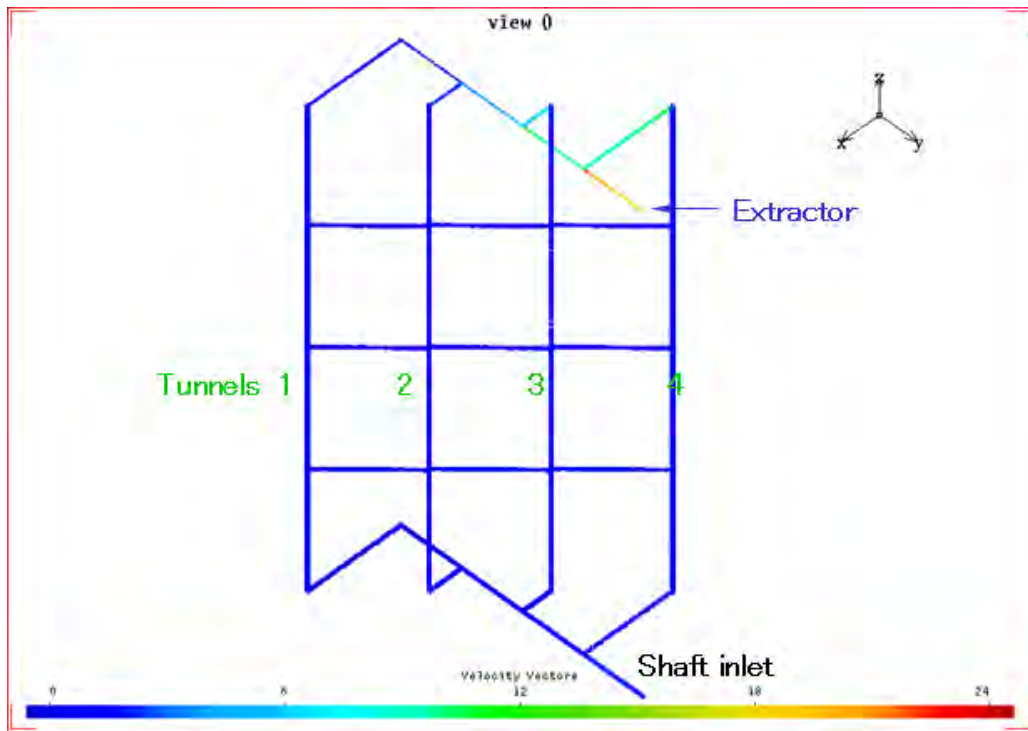


図 3.3.2-9 坑道内の空気の流れ解析結果①（速度分布図）

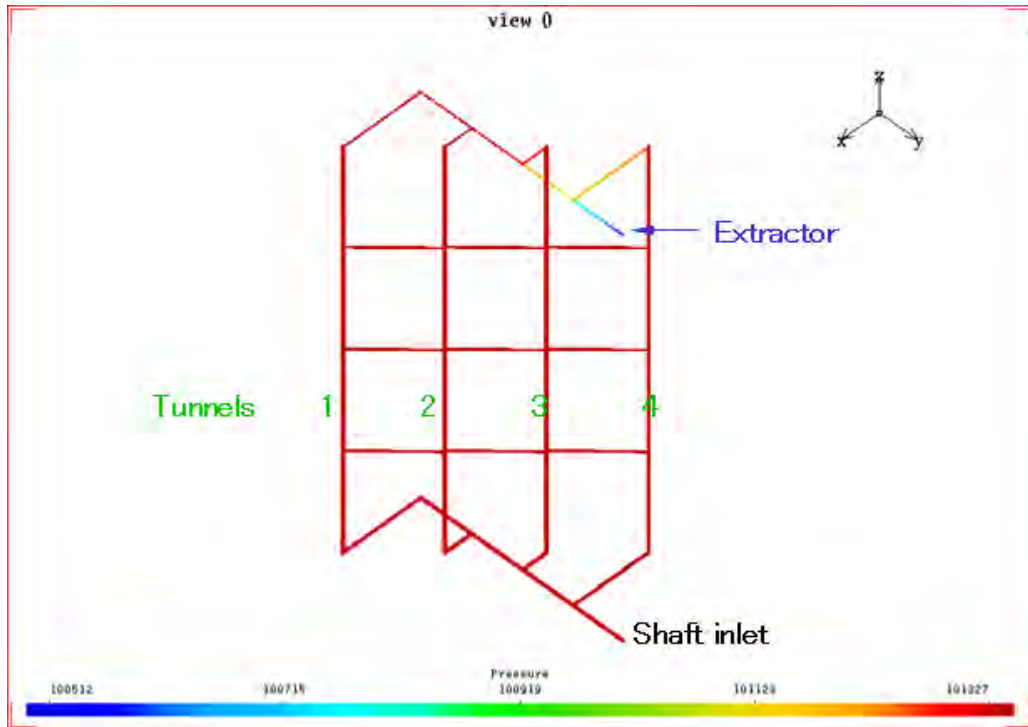


図 3.3.2-10 坑道内の流れ解析結果②（圧力分布図）

3.3.3 避難シミュレーション解析条件の検討・設定

(1) 避難シミュレーションの概要

1) 地層処分施設の地下施設の安全検討への避難シミュレーション技術の適用

地層処分施設の地下施設において、火災などの異常時に作業員が安全に避難できるかは作業計画を立てる上でも最重要項目であり[1]、評価が必要である。これに対し、交通シミュレーションを活用した避難シミュレーション技術は、異常時の人の避難状況を定量的に分析及び評価することが可能である。

2) 避難シミュレーションとは

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

本検討の避難シミュレーション解析では、これまでに上記に示したような事例をはじめ、ドバイの都市計画やオリンピック、ワールドカップといった国際大会の交通計画まで、様々な交通問題に利用されているマイクロシミュレーションソフト「VISSIM (VISWALK)」を活用する（交通シミュレーション活用のススメ：一般社団法人 交通工学研究会，H24.1）。また、同ソフトは、近年の様々な避難計画に活用されている。

なお、本検討では、作業員が避難できたかどうかを避難完了率という形で示す定量的評価と避難状況の経時的な変化を視覚的に確認できる動画による表現の2つをアウトプットと考えている。

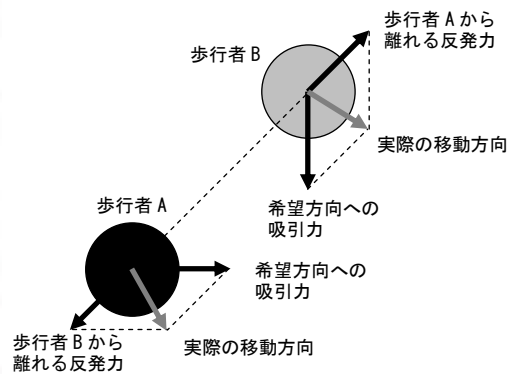
本解析では、歩行者のみを対象とするため、ここで、歩行者の挙動等について解説する。同ソフトの歩行者の行動原理は「Social Force」モデルを基本としている。この「Social Force」とは、図 3.3.3-1 に示すとおり、歩行者・自転車を粒子に捉えたいわゆる「重力モデル」であり、現時点における希望方向・希望速度との差、近接する相手から受ける力により移動方向のベクトルを決定する。

なお、相手の進む方向を予測するなどの先読み行動については当モデルでは対象としていない。

既存モデルの代表例として、Helbingらの提案する Social Force (以下 SF) モデル⁹⁾があり、以下のように単位時間 Δt ごとの歩行者 i の加速度ベクトル α_i が定式化されている。

$$\alpha_i(t + \Delta t) = \eta(v_i(t) - v_i^0(t)) + \tau \sum_j \exp\left(-\xi \frac{x_i(t) - x_j(t)}{|x_i(t) - x_j(t)|}\right) \dots (1)$$

ただし、 $v_i(t)$ 、 $v_i^0(t)$ 、 $x_i(t)$ はそれぞれ歩行者 i の時刻 t における速度ベクトルと希望速度ベクトル、位置ベクトル、歩行者 j は歩行者 i の周辺歩行者、 η 、 τ 、 ξ はパラメータである。式 (1) の第1項は現在の速度ベクトルから自分の希望する方向の速度ベクトルへと修正するための項、第2項は周辺の歩行者から離れようとする反発力項とされる。上記の式から分かるように、周辺歩行者の情報は現在時刻 t での位置情報のみである。



出典「交錯交通の容量評価のためのマイクロ歩行者行動モデル」、浅野、井科、桑原、交通工学 2008,7

図 3.3.3-1 Social Force モデルの理論

(2) システムの信頼性

VISSIM の歩行者シミュレーションモデルについては、図 3.3.3-2～図 3.3.3-4 に示すように、ビデオ解析などから歩行者交通量と密度の関係や軌跡解析を行い、モデルのキャリブレーションを実施することで、システムの信頼性を高めている。

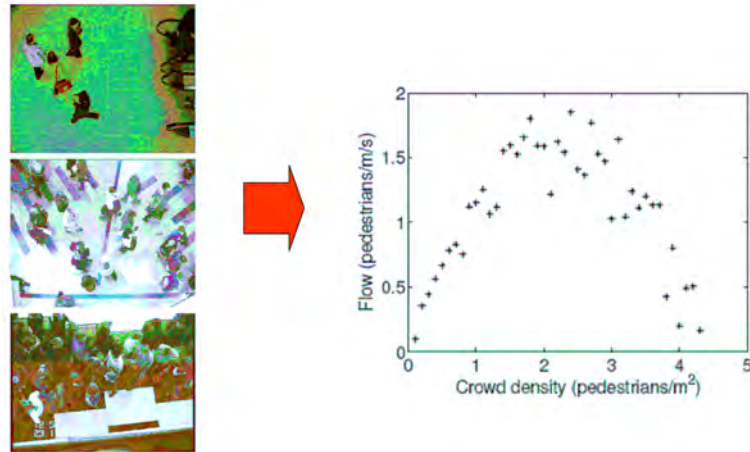


図 3.3.3-2 歩行者交通量と密度の関係 (PTV 社資料)

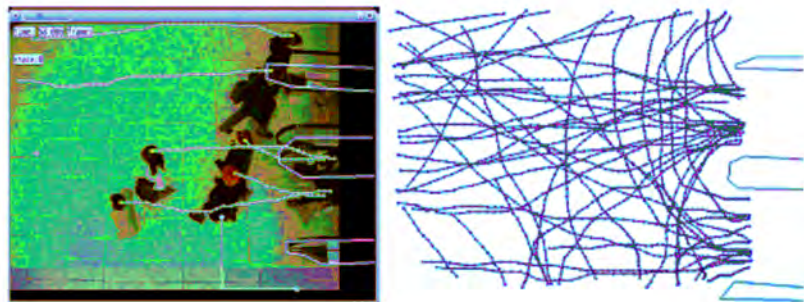


図 3.3.3-3 歩行者の軌跡 (PTV 社資料)

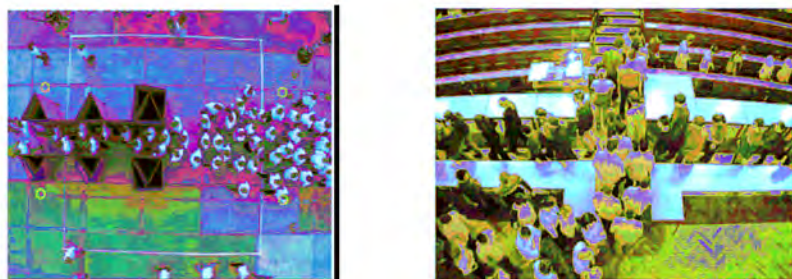


図 3.3.3-4 S 実験の様子 (左 : Delft 大学、右 : Dresden 大学) (PTV 社資料)

本ソフトウェアは、歩行者のみならず、自動車のシミュレーションも同時に行うことができ、歩行者と自動車の干渉なども評価できる。

自動車シミュレーションの部分の基本性能検証については、(社)交通工学研究会の交通シミュレーションクリアリングハウスにおいて提供されている検証マニュアルに基づき、車両発生、QK特性、飽和交通流率、合流比、右折容量等の項目に対して独自に検証が行われており、結果としてシステム基本性能の妥当性が確認されている(図 3.3.3-5)。



図 3.3.3-5 交通シミュレーションクリアリングハウス ((社)交通工学研究会 HP より)

(社)交通工学研究会では、交通流シミュレーションモデルの開発は標準検証プロセスを経ることを推奨している。この標準検証プロセスでは、モデルの性能を検証する過程及びその結果を公開することに重点が置かれている（図 3.3.3-6～図 3.3.3-7）。

これまでも数多くの交通流シミュレーションモデルが開発されてきたが、検証が不十分であったり、検証のプロセスが広く認知されていないがためにモデルの性能を第三者が理解できず、実用の妨げとなっていた。そこで、開発者以外の利用者が目的に応じてモデルを選択することができるよう、各モデルを「共通の土俵」で比較するための「標準検証(verification)マニュアル」を策定している。

本検討に用いる解析ソフトウェア VISSIM は、上述の標準検定マニュアルの規程に適合したものである（図 3.3.3-8）。

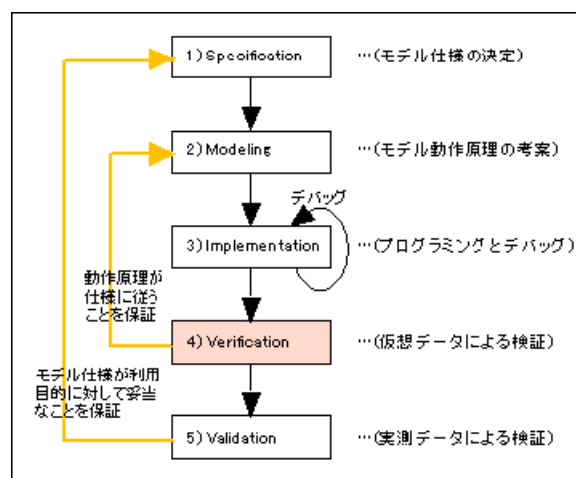


図 3.3.3-6 シミュレーションモデルの開発（(社)交通工学研究会 HP より）

モデルの基本機能検証 (Verification)

VISSIMの基本機能に関して、交通工学研究会の交通シミュレーション委員会における「交通シミュレーションの標準検証プロセス(Verification)マニュアル」に基づくPTV Vision VISSIMの検証結果を公開いたします。

- 1 車両発生⇒
- 2 モデルパラメータと交通流特性の関係/ボトルネック容量⇒
- 3 モデルパラメータと飽和交通流率の関係⇒
- 4 渋滞の延伸と解消およびショックウェーブ⇒
- 5 合流部の容量と合流比⇒
- 6 信号交差点での対向直進交通による右折容量の低下⇒
- 7 経路選択⇒

図 3.3.3-7 モデルの基本性能検証（PTV 社 HP より）

■ 検証結果公開モデルと実施者

1. AIMSUN (Aim) - (株)ユーテック
2. AVENUE (Ave) - (株)アイトランスポート・ラボ
3. INSPECTOR (Ins) - 名古屋大学・中村研究室
4. IOSYS (Ios) - (株)道路計画
5. NETSIM (Net) - 北海道大学
6. NETSTREAM (Nst) - (株)豊田中央研究所
7. Paramics (Prm) - (株)社会システム研究所
8. REST (Res) - 鹿島建設(株)
9. Simr (Smr) - 独立行政法人北海道開発土木研究所、ナシフィックコンサルタンツ(株)
10. SIPA (Sip) - 国土技術政策総合研究所
11. SOUND/A-21 (Soa) - (株)アイトランスポート・ラボ
12. SOUND/Express (Soe) - 東京大学・(株)アイトランスポート・ラボ
13. tiss-NET (Tis) - 埼玉大学
14. TRAFFICSS (Trf) - (株)日立製作所
15. TRANDMEX (Trd) - 首都高速道路公団
16. UC-win/Road (Ucw) - (株)フォーラムエイト
17. VISTOK (Vic) - (株)交通まぶくし技術研究所
18. VISSIM (Vsm) - PTV Vision サポートセンター・ジャパン
19. WATSim (Wat) - (株)ユーテック

図 3.3.3-8 検証結果モデル一覧 ((社)交通工学研究会 HP より)

(3) 解析条件の概要

避難シミュレーション解析を実施するにあたっては、図 3.3.3-9 のように避難速度や避難の開始時間及び開始位置などの避難者に係る条件設定と、施設レイアウトや避難先の設定などの施設に係る条件設定の 2 つが必要である。また、本検討では気流解析の結果を避難シミュレーションに反映させるため、気流解析の結果をインプットするとともに、各種の条件をもとに避難シミュレーション解析を実施する。そのため、様々な初期条件が重要である。

また、前述のように、作業員が避難できたかどうかを避難完了率という形で示す定量的な評価と、経時的な変化を視覚的に確認できる動画による表現の 2 つが、避難シミュレーション解析のアウトプットである。

ここで、避難シミュレーション解析の条件設定にあたり、既往の文献[1]をもとに作業や作業員に関する整理を行った。

文献[1]に基づいて作業や作業員に関する項目を整理すると、表 3.3.3-1、表 3.3.3-2 のとおりである。作業員の避難は作業計画を作成するうえで、非常に需要であることがわかる。

また、避難シミュレーションを行うにあたり重要となる項目としては、地下処分施設には最大で 200 人の作業員がいる可能性があることである。これらを考慮して各条件を設定する。

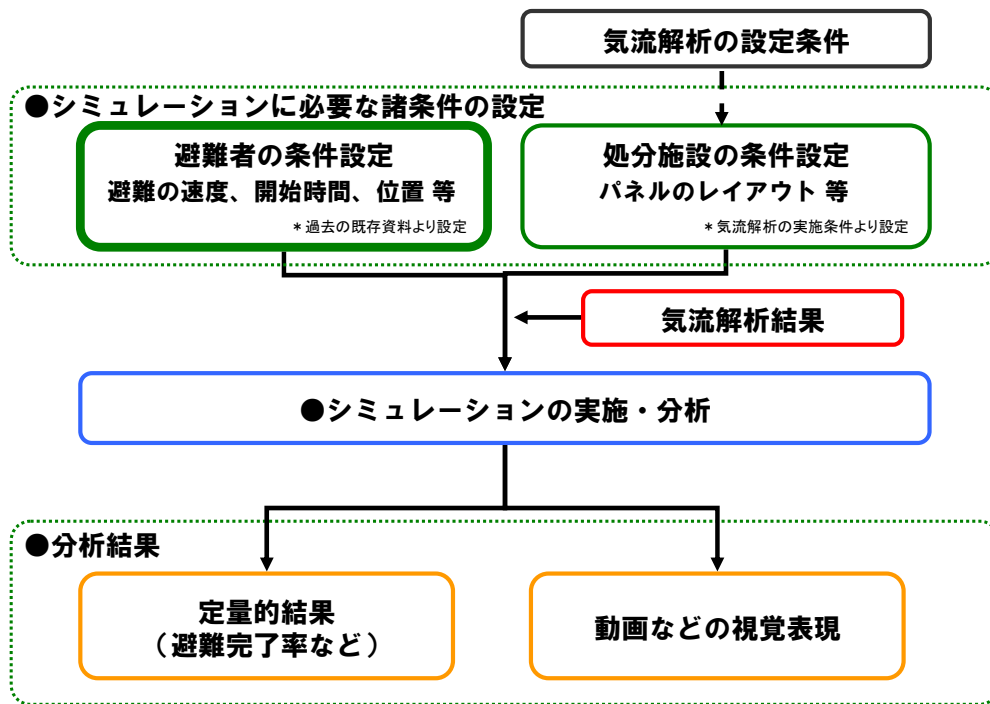
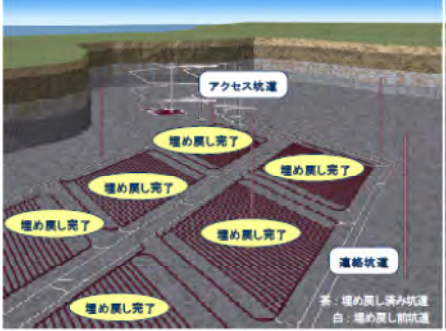
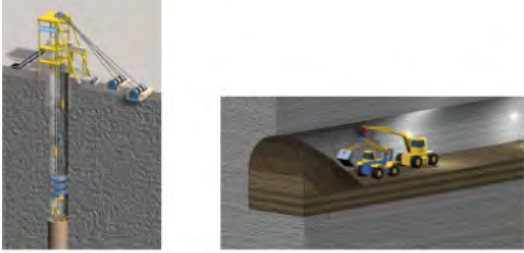


図 3.3.3-9 避難シミュレーションの実施フロー

表 3.3.3-1 作業・作業員に関する記述一覧 (1/2) [1]

1	主な項目	抜粋	該当頁
	坑道内での労働安全に関する対策	<p>一般労働安全に関しては、建設工事における従来の考え方を適用し、土木工事(トンネル工事など)や鉱山の操業などの安全対策の事例をもとに対策を検討して安全を確保する(NUMO, 2004a)。</p> <p>例えば、坑道内の落盤、水没などの事象については、トンネル工事などにおける対策が有効である。また、敷地外においても、資材搬入車両による交通災害などの防止を徹底する。なお、地下施設における火災や爆発などの事象に関しても、坑道が長大であることなどに留意して既設の長大トンネルや鉱山の例を参考に適切な対策を講じる。</p>	3-9
2	地下での危険事象に関する対策 緊急時の避難路等の計画および作業計画	<p>地下での坑道掘削時には切羽の不安定現象、山はね対策、湧水対策、ガス対策などの安全対策を施しながら作業を進める。その場合の安全対策として、ロックボルトにより坑道の力学安定性を図ったり、セメント系材料を注入して湧水を抑えたりするなどの対策が考えられる。</p> <p>地下空間での作業安全という観点で問題となるガスとしては、岩盤中に残存するガスのほかに、内燃機関などを使用する場合に発生する有毒ガス、発破を用いる場合に発生する後ガスなどが考えられる。これらに対しては坑内環境をモニタリングし、換気による除去または希釈を行い、坑内作業従事者に新鮮な空気を供給する。さらに、使用する建設機械についても、電動式あるいは今後開発が進むと思われる燃料電池方式の積極的な導入を図るなどの対策を適用する。</p> <p>また、地下施設において緊急事態が発生した場合を想定して、作業従事者の安全を確保するための緊急退避所や緊急避難経路を確保しておく。特に処分場の地下施設は多数の坑道群が建設され、坑道の掘削や廃棄体の定置のために場所を移動しながらの作業が長期間にわたって行われることから、常に避難経路が確保された状態のもとで作業を行うことができるよう、計画段階から十分な検討を行い、安全確保を最優先とする地下施設全体の作業計画を立てておく。</p>	3-26
3	ガラス固化体の輸送作業	<p>処分場へ輸送されたガラス固化体(輸送容器)は、専用輸送車両に積載された状態のまま高レベル放射性廃棄物受入・封入・検査施設へ搬入される(図 6.4.2-1)。同施設内では、輸送途上における輸送容器やガラス固化体への損傷などの異常の有無について検査を行い、オーバーバックへの封入前にその健全性を確認する。</p> <div data-bbox="675 786 1075 1077" data-label="Image"> </div> <p>図 6.4.2-1 返還ガラス固化体の輸送に使用されている輸送車両 (写真提供：日本原燃株式会社)</p>	6-61
4	廃棄体の搬送・定置作業	<p>地上施設内での検査終了後、廃棄体を地下に搬送し処分坑道内に定置する。図 6.4.2-3 に、地上施設から定置位置までの廃棄体搬送の流れを概略的に示す。廃棄体の搬送に使用するアクセス坑道の形態や定置方式の組み合わせに応じ、搬送途中に廃棄体を縦方向または横方向へ傾転する。廃棄体の搬送装置および定置装置は、採用する搬送方式や定置方式などに応じて遠隔制御による無人または有人での運転とすることが考えられ、いずれの場合においても廃棄体からの放射線を遮へいするための構造および設備を設ける。</p> <div data-bbox="619 1267 1203 1608" data-label="Diagram"> </div> <p>図 6.4.2-3 廃棄体の搬送と定置の流れ (原環センター, 2001 を一部修正)</p>	6-62
5		<p>地上施設から地下施設まではアクセス立坑あるいは斜坑により廃棄体を搬送する。高レベル放射性廃棄物処分場と併置する場合でも、地層処分低レベル放射性廃棄物用の専用のアクセス立坑あるいは斜坑を利用し、搬送設備も専用のものとする。搬送作業に人が携わる場合には、廃棄体あるいは搬送設備に遮へい機能を持たせる。</p>	6-66

表 3.3.3-2 作業・作業員に関する記述一覧 (2/2) [1]

主な項目	抜粋	該当頁
6	<p>(1)閉鎖措置計画 坑道の埋め戻しおよび坑口の閉塞に関する計画を「閉鎖措置計画」として定め、経済産業大臣の認可を受けた上で閉鎖を開始する。図 6.4.3-1に閉鎖措置計画申請前の処分場のイメージを示す。図中の茶色の部分は操業段階で埋め戻しが完了している坑道で、図中の白色の部分が閉鎖の対象となる坑道である。</p>  <p>図 6.4.3-1 閉鎖措置計画申請時の処分場イメージ</p>	
	<p>(2)連絡坑道の閉鎖 連絡坑道は処分パネル間あるいは処分パネルとアクセス坑道を結ぶ坑道であり、処分パネルの周囲にほぼ同一平面内に建設されるものであるが、処分パネルが多層配置または傾斜配置される場合その一部は立坑または斜坑となる。水平坑道に対しては、ブロックの積み上げあるいは埋め戻し材の締固め、吹付などの原位置施工方式を適用する。</p>	
地下施設の閉鎖・埋め戻し作業	<p>(3)アクセス坑道の閉鎖 立坑の閉鎖は、立坑下部より順次締固めながら埋め戻していく方法が効率的であり、原位置施工方式が有望である。また、斜坑についても、坑道の形状に合わせて柔軟な対応が可能な締固め工法を適用する(図 6.4.3-2)。</p>  <p>(a) 立坑の閉鎖 (b) 斜坑の閉鎖</p> <p>図 6.4.3-2 アクセス坑道の閉鎖作業イメージ</p>	6-67 ~ 6-69
	<p>(4)プラグの設置 岩盤の割れ目などからの湧水量が多い場合には、坑道建設時または操業時においてセメント系グラウトの注入などによる止水対策を適宜実施するが、長期的には止水機能が低下していずれは水みちとなりVIA機能に影響を与える可能性がある。このような割れ目に対しては粘土系グラウトの注入や、低透水性を有するペントナイト系材料からなる止水プラグの設置などの方法により閉鎖時に適切に処置する。止水プラグの施工や割れ目の充填方法に関しては、JAEAなどがその実現性に関する研究を実施し、止水の有効性や施工技術の確認が行われている。また、坑道内の湧水状況によっては、処分場の閉鎖までに地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し、閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として、強度を持たせたコンクリート製の力学プラグを処分坑道端部に設置することを考えている。</p>	
	<p>(5)坑口の処置 閉鎖完了後は、坑道内の埋め戻し材の密閉および不意な人間の侵入の防止を目的としたプラグをアクセス坑道の坑口に設置する。</p>	
	<p>(6)ボーリング孔などの埋め戻し 処分場には、サイト調査段階に地表から掘削されたボーリング孔や、湧水を緩和するための水抜き孔など、さまざまな方向や径、長さのボーリング孔などが残存することになる。特に地表からのボーリング孔は地下施設と地表を短絡する水みちに、坑道内からのボーリング孔などは岩盤内での新たな水みちとなる可能性があるため、これらは適切に止水処置をする。</p>	
7 地上施設の解体・撤去作業	<p>地下施設の建設、地上施設と地下施設での操業、および地下施設の閉鎖の作業がそれぞれ終了していくに伴い、地上施設は不要となるものから順次解体・撤去を行っていく。 解体・撤去においては汚染の有無を確認しながら作業を進める。万が一汚染している場合には、現在開発されている原子力発電所などの解体技術を活用するなどして汚染レベルに応じた工法で解体するとともに、発生する廃棄物はその汚染レベルに応じ、法令などで定められている方法により、適切な施設において処理・処分する。</p>	6-69
8 操業方法および作業人員	<p>地下施設内では、第2次取りまとめで示されたように、建設・操業・埋め戻しをパネルごとに独立に並行して進めること、建設時に最大で13切羽を併進するものと仮定すると、各作業の最盛期には地下施設内で最大200人程度が作業することになり、その一般労働安全対策は非常に重要である。一般労働安全のための安全対策は、6.2の一般労働安全の確保で示したように、「労働災害対策」および「作業環境対策」に分類して検討している。</p>	6-73

(4) 各種条件の設定

これまでの整理をもとに各種条件設定を行う。具体的には、本検討においては「避難速度」、「避難人数」、「避難開始時間」、「避難開始位置」を条件設定の対象とする。

1) 避難速度

表 3.3.3-3 に示すように、既往の避難計画や避難シミュレーションなどに活用されている避難速度は、多くが 1.0m/s (時速 3.6 km) 前後であることがわかる。

本検討は、地下施設の作業員の避難が対象である。表 3.3.3-3 は老人、子供、身体障害者などの様々な人の避難を考慮した結果であり、本検討の対象者の速度とは、大きな乖離がある可能性が高い。

表 3.3.3-3 各種調査等における避難速度【抜粋版】

項目	速度	備考	出典
平地			
健康者			
一般の人	1.0m/s		津波避難ビル等にかかるガイドライン(H17,内閣府)
自力のみで行動出来ない人(位置、経路等になれていない人)	1.0m/s	堀内三郎,1972.	津波避難対策推進マニュアル検討会報告書(H25,消防庁)
健康者以上に、歩行に時間がかかることが予想される人			
老人単独歩行	1.3m/s(平均)	足立啓・小松和郎・荒木兵一郎,1980, 障害者を考慮した住宅団地の研究(その1) 歩行行動から見た障壁の分析.日本建築学会大会学術講演梗概集 別冊 建築計画・農村計画.	津波避難ビル等にかかるガイドライン(H17,内閣府)
	1.1m/s	俵元吉,1976.	津波避難対策推進マニュアル検討会報告書(H25,消防庁)
	0.9m/s(平均値) 0.4m/s(最低値)	岡田光正・浅野博光・俵元吉,1978,自由歩行速度と歩幅に関する調査研究 主として老人や子供の場合について.	日本建築学会近畿支部研究報告
歩行困難、身体障害者、乳幼児、重病人等	0.5m/s		津波避難ビル等にかかるガイドライン(H17,内閣府)
子供を連れた人	1.0m/s(平均値) 0.47m/s(最低値)	岡田光正・浅野博光・俵元吉,1978,自由歩行速度と歩幅に関する調査研究 主として老人や子供の場合について.	日本建築学会近畿支部研究報告
患者	0.91m/s(平均値) 0.17m/s(最低値)	岡田光正・浅野博光・俵元吉,1978,自由歩行速度と歩幅に関する調査研究 主として老人や子供の場合について.	日本建築学会近畿支部研究報告
足の不自由な人	0.84m/s(平均値) 0.66m/s(最低値)	岡田光正・浅野博光・俵元吉,1978,自由歩行速度と歩幅に関する調査研究 主として老人や子供の場合について.	日本建築学会近畿支部研究報告
自力のみで行動出来ない人(重病人、障害者等)	0.8m/s	堀内三郎,1972.	津波避難対策推進マニュアル検討会報告書(H25,消防庁)
身障者等の歩行速度(急いで)	C1:1.2m/s C2:0.44m/s	日本建築学会,1980.	津波避難対策推進マニュアル検討会報告書(H25,消防庁)
車いす、ベビーカー等を使っている人			
障害者の歩行速度(車いす利用者)	0.91m/s(平均)	足立啓・小松和郎・荒木兵一郎,1980, 障害者を考慮した住宅団地の研究(その1) 歩行行動から見た障壁の分析.日本建築学会大会学術講演梗概集 別冊 建築計画・農村計画.	津波避難ビル等に係るガイドライン(H17,内閣府)
ベビーカーを押している人(自由歩行速度)	0.9m/s	3俵元吉,1976.	津波避難対策推進マニュアル検討会報告書(H25,消防庁)
	1.07m/s(平均値) 0.71m/s(最低値)	岡田光正・浅野博光・俵元吉,1978,自由歩行速度と歩幅に関する調査研究 主として老人や子供の場合について.	日本建築学会近畿支部研究報告

出典：津波防災まちづくりの計画策定に係る指針（国土交通省，H25.6）

避難速度の中で、最も早い速度としては、北海道南西沖地震時の30～39歳の1.47m/s（＝分速88.2m＝時速5.3km）が報告されている。対象者の年齢構成、避難速度という条件を考慮すると、最も適した速度と考えられる。

上記より、本検討では「分速83m（時速5.0km）」を避難速度として設定する。

2) 避難人数

避難人数については、最大200人程度が地下施設で働いている可能性がある。本検討では、最悪のケースを想定することが重要であると考え、最大の人数200人を対象として設定する。

3) 避難開始時間

避難開始時間については、避難計画が周知され、避難警報装置などが十分に設置されていると仮定する。この仮定より、火災発生5分後に避難を開始すると設定する。

4) 避難開始位置

避難開始位置については、埋戻し中及び建設中のパネル内にそれぞれ設定する。なお、各パネル内の設定位置としては、避難人数と同様に、最悪のケースを想定することが重要と考え、図3.3.3-10のイメージ図に例示するように、パネルに人を配置する。また、実際の作業では、処分坑道に分散して人が配置されていることから、経過時間ごとに数人から十名程度ずつのグループがパネル内を避難するように人を表現する。

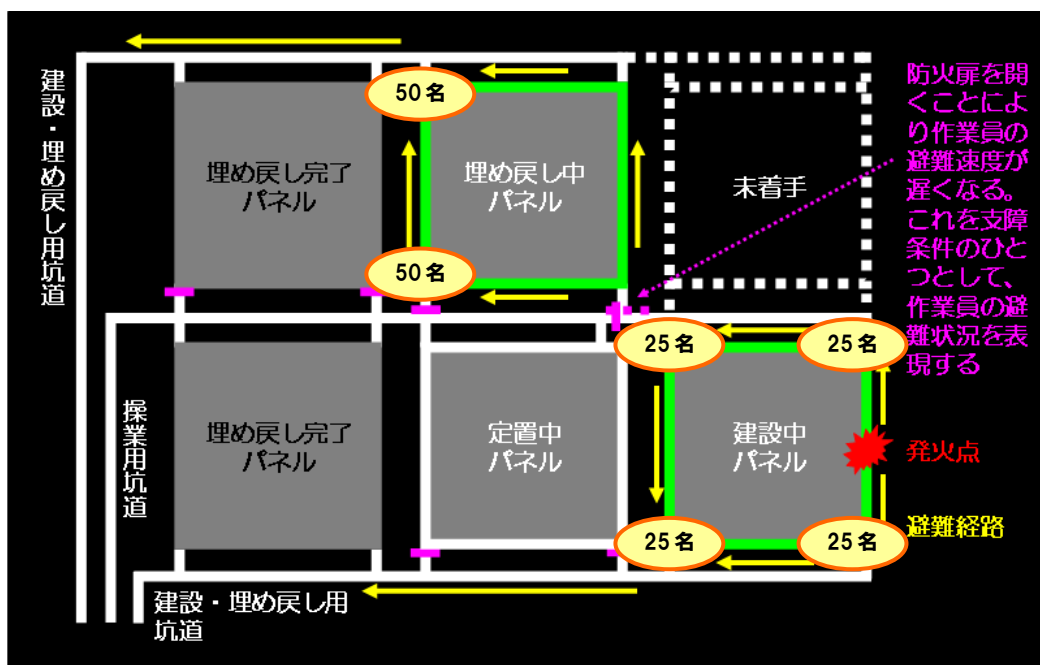


図 3.3.3-10 各パネルの避難開始位置（イメージ）

表 3.3.3-4 に避難シミュレーションに関する各種設定条件を整理して示す。

表 3.3.3-4 各種設定条件 一覧

番号	項目	設定条件
1	避難速度	分速 83m (時速 5.0 km)
2	避難人数	200 人
3	避難開始時間	火災発生 5 分後
4	避難開始位置	埋戻し中及び建設中パネル内の連絡坑道 (四隅)

また、本検討においては、気流解析から得られる火災影響の拡散状況（煙や有害ガス、熱気の拡散状況）と避難シミュレーションを重ね合わせることで、避難可能な人数を定量的に評価することを一つの特長としている。例えば、有毒ガス濃度が所定量以上に上昇した場所に滞留する作業員は、その時点で避難不可と評価するものである。このような状況を解析上で表現するために、避難経路の各地点に信号を設けた。すなわち、有毒ガス濃度が所定量以上になった地点の信号は「赤」になることとし、赤信号に変わった地点から先への通行は不可とするものである（図 3.3.3-11 参照）。各地点の信号が赤に変わる時間は、気流解析結果に基づいて設定し、解析条件として入力する。



図 3.3.3-11 通行不可を表現した避難シミュレーション (イメージ)

上記以外にも避難に特に影響があると考えられる項目は、以下のように避難シミュレーションで表現することが可能であり、適宜必要な場合に設定する。例えば、防火扉などを通行する際には、一定の速度低下が発生する。そこで、避難シミュレーションでは、防火扉などを通行する場合には、一定区間の速度低下区間を設けることで表現をする。このように避難シミュレーションは様々な状況を表現することが可能である。

3.4 事前解析の実施

3.4.1 事前解析の目的

2.1.3 (1) に述べたように、「操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」では、5年計画の当初3年程度の期間で、地下施設における火災を対象とした検討を行う。その具体的な検討内容・手段として気流解析及び避難シミュレーション解析を実施する計画であり、本章の3.3項において次年度以降の本解析に向けた解析条件の検討・設定を行った。

気流解析や避難シミュレーション解析及びそれらの解析ソフトウェアなどは、一般のトンネルや防災計画などに用いられている既往の技術である。しかし、それらを地層処分施設の地下施設を対象として適用した事例はない。地層処分施設の地下施設は、トンネル等の一般の地下構造物に比べて大深度であり、平面的な広がり大きい構造物である。大深度で平面的な広がり大きい類似施設として鉱山が挙げられるが、鉱山を対象とした気流解析は一次元解析が主であり、三次元気流解析の実績は国内では見あたらない。また、避難シミュレーション解析の実績も見あたらない。

さらに、本検討では、気流解析結果と避難シミュレーション解析結果を重ね合わせることで、避難状況を定量的に評価するとともに、避難の様子「見える化」を図ることを考えている。このような両解析の重ね合わせによる評価は本検討の特長の一つであるが、既往の研究等の報告事例は少なく、地層処分の地下施設はもちろん類似構造物を対象とした報告はみられない。

以上の状況を踏まえ、次年度以降の本解析に向けて、地層処分施設の地下施設を想定した解析モデルによる事前解析を行い、下記の項目について検討・把握することとした。

- ・地層処分施設を対象とした安全性の検討への三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た問題点や課題の有無の把握
- ・両解析の重ね合わせによる避難状況の評価にあたっての問題点や課題の有無の把握
- ・今年度に設定した解析条件に係る問題点や課題の有無の把握など

3.4.2 事前解析の内容

(1) 簡易モデル形状の設定

事前解析は、地層処分の地下施設の簡易モデルを用いて行うこととした。簡易モデルの形状は、軟岩系岩盤における処分孔竖置き定置方式に基づき、作業時の地下施設での作業イメージを参考に、以下の点に留意して設定した。

- ・ 処分パネルのパネル枚数は建設予定区域（以下、「未着手パネル」）を含めて6枚とする
- ・ 地上から続く立坑に近いパネルから順次「埋め戻し完了→埋戻し中→定置中→建設中→未着手」のパネルとする
- ・ 建設中パネル、定置中パネル、埋め戻し中パネルの各パネルへ通じる連絡坑道は1本とする
- ・ 建設中パネル、定置中パネル、埋め戻し中パネルの処分坑道は、簡易モデル形状には反映しない
- ・ パネル傾斜はなく、各坑道の曲がり角は90度とする
- ・ 定置中パネル及び操業用坑道が、他のパネル及び建設・埋め戻し坑道と空間的に独立するよう、隔離壁を設ける

図 3.4.2-1 に簡易モデル形状の概略を示す。

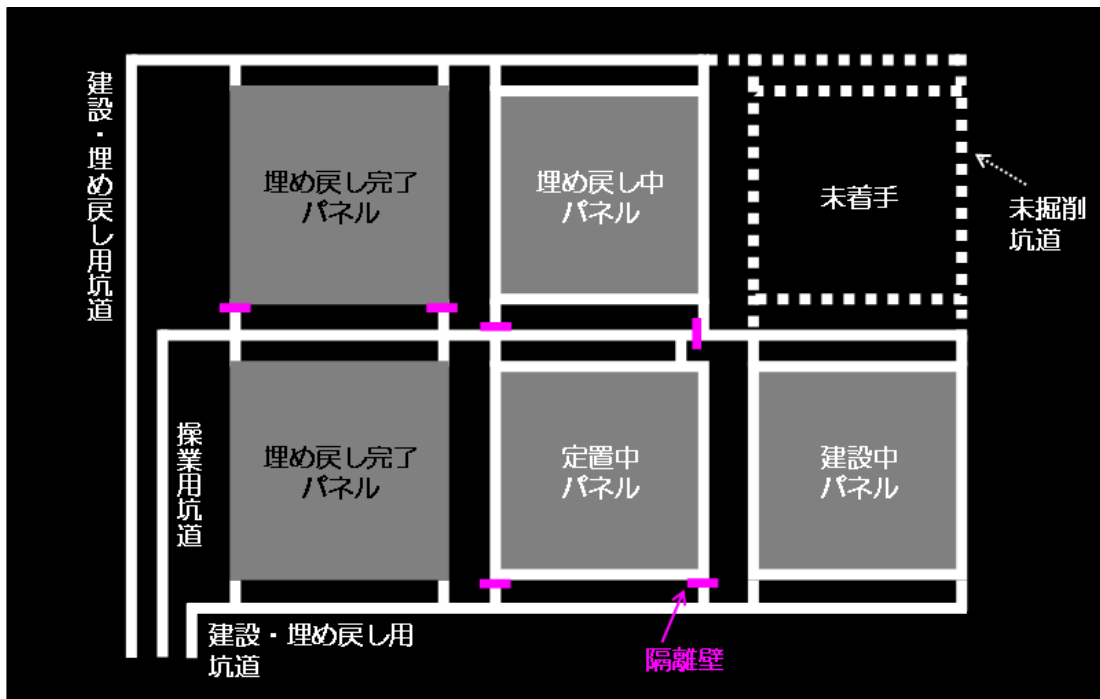


図 3.4.2-1 簡易モデル形状の概略

(2) 簡易モデルサイズの設定

事前解析に用いる簡易モデルサイズは、軟岩系岩盤における処分孔縦置き定置方式のパネルサイズを参考にして、図 3.4.2-2 及び図 3.4.2-3 に示すように設定した。

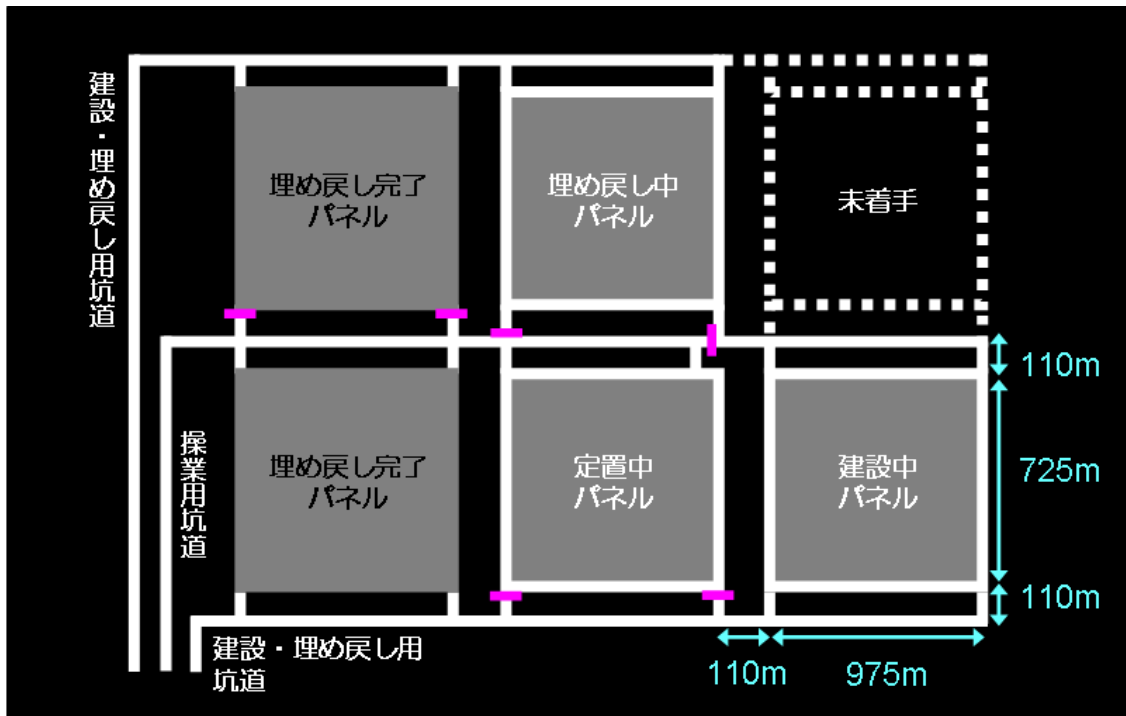


図 3.4.2-2 簡易モデルのパネルサイズ

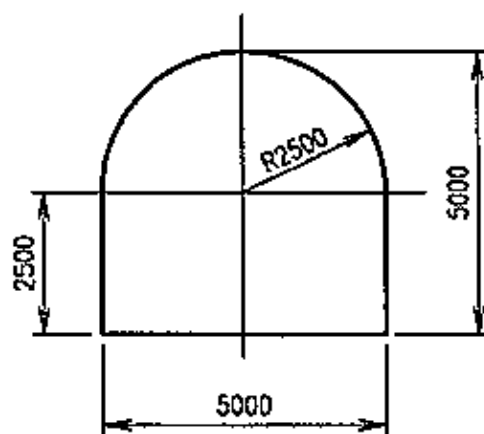


図 3.4.2-3 簡易モデルの坑道径及び形状

(3) 風況場の設定

事前解析における風況場は、図 3.4.2-4 に示すように設定した。

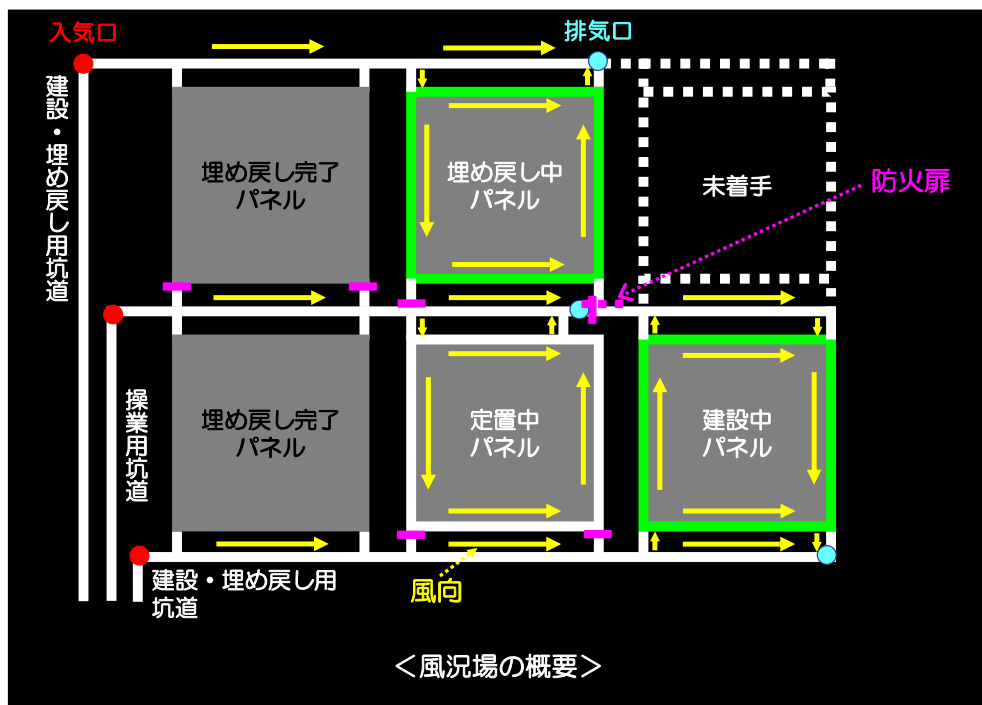


図 3.4.2-4 事前解析における風況場

(4) 作業員数、配置の設定

事前解析における作業員数、配置は、図 3.4.2-5 に示すように設定した。

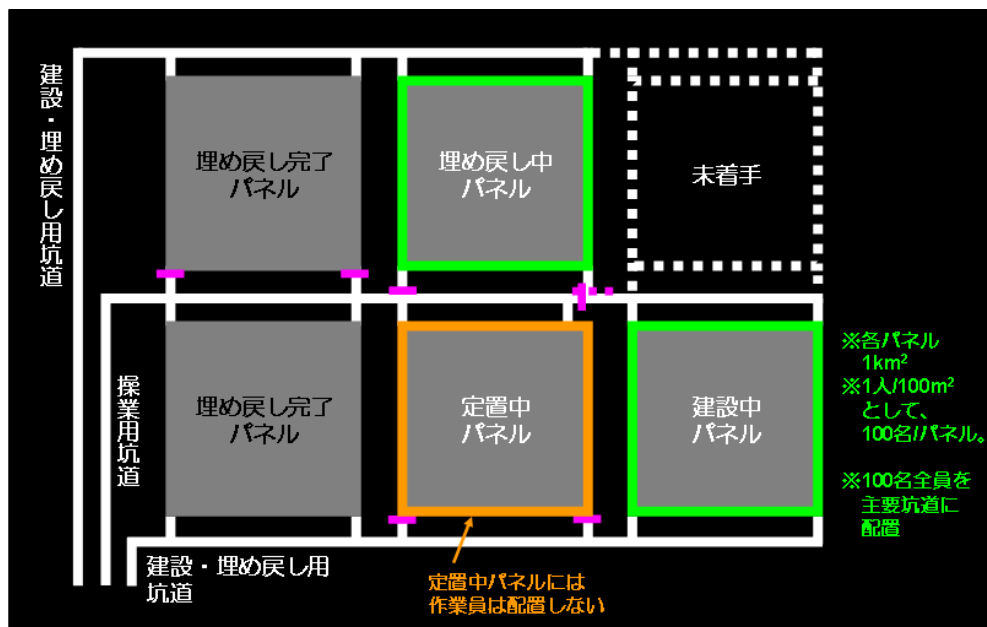


図 3.4.2-5 事前解析における作業員数、配置

(5) 火災曲線及び火災発生場所の設定

事前解析における火災曲線は、3.3 項で示した CETu 標準火災曲線を用いることとした。
また、火災発生場所は図 3.4.2-6 に示すように設定した。

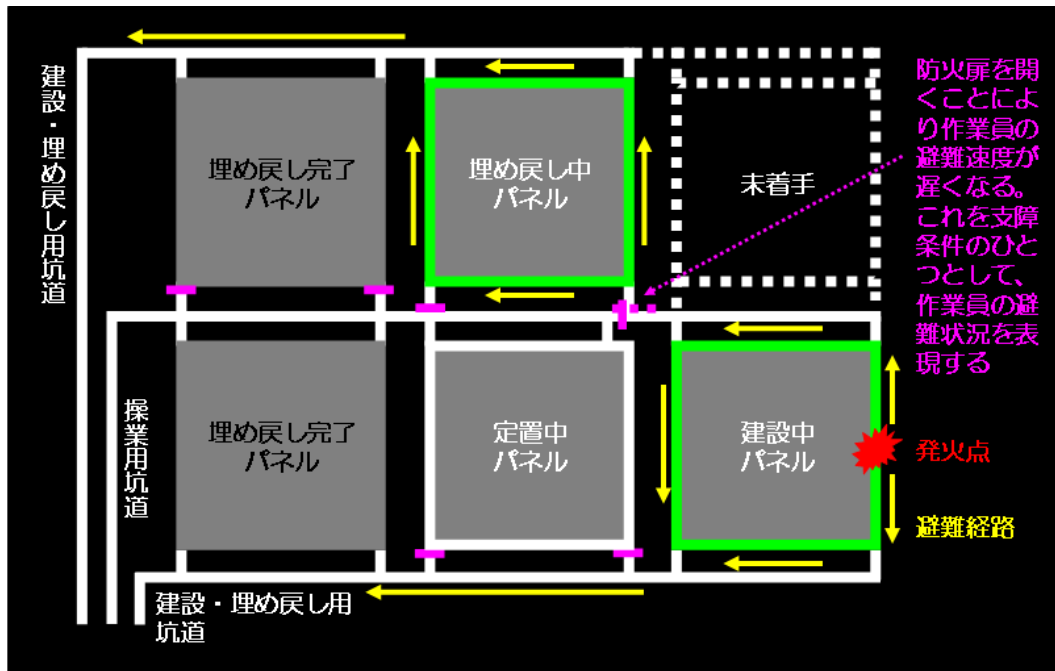


図 3.4.2-6 火災発生場所

(6) 事前解析モデル

図 3.4.2-7 に、本項 (1) ～ (5) に述べた地下施設の簡易モデルの概要を示す。これを踏まえた事前解析モデルを図 3.4.2-8～図 3.4.2-9 に示す。事前解析モデルでは、図 3.4.2-8 の立坑部分に入気・排気の概念のみを与え、深さは圧力のみで表現した。

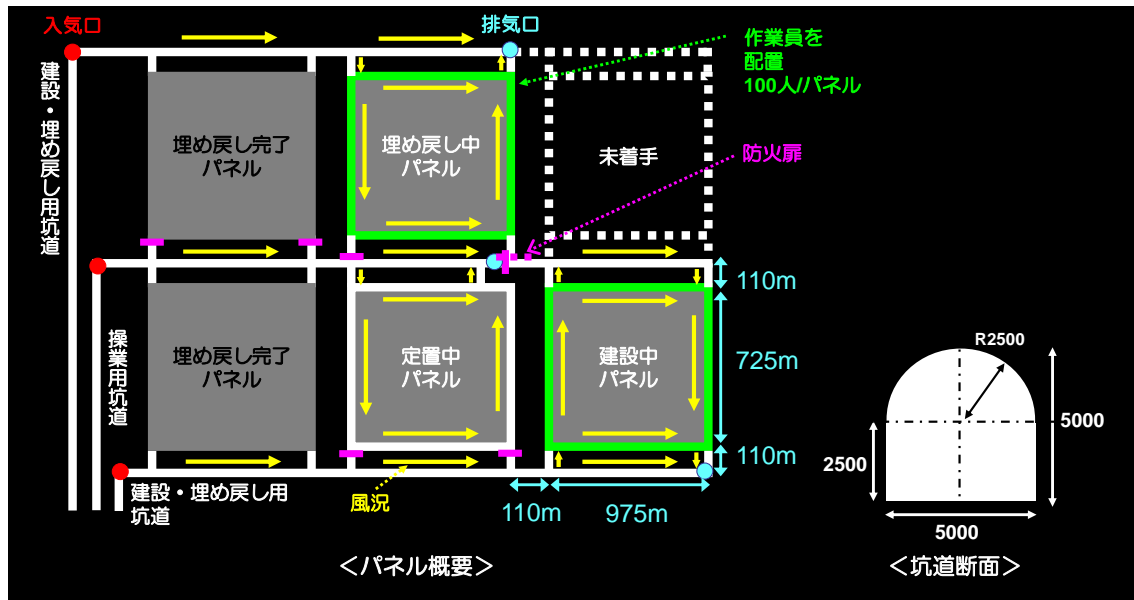


図 3.4.2-7 簡易モデルの概要

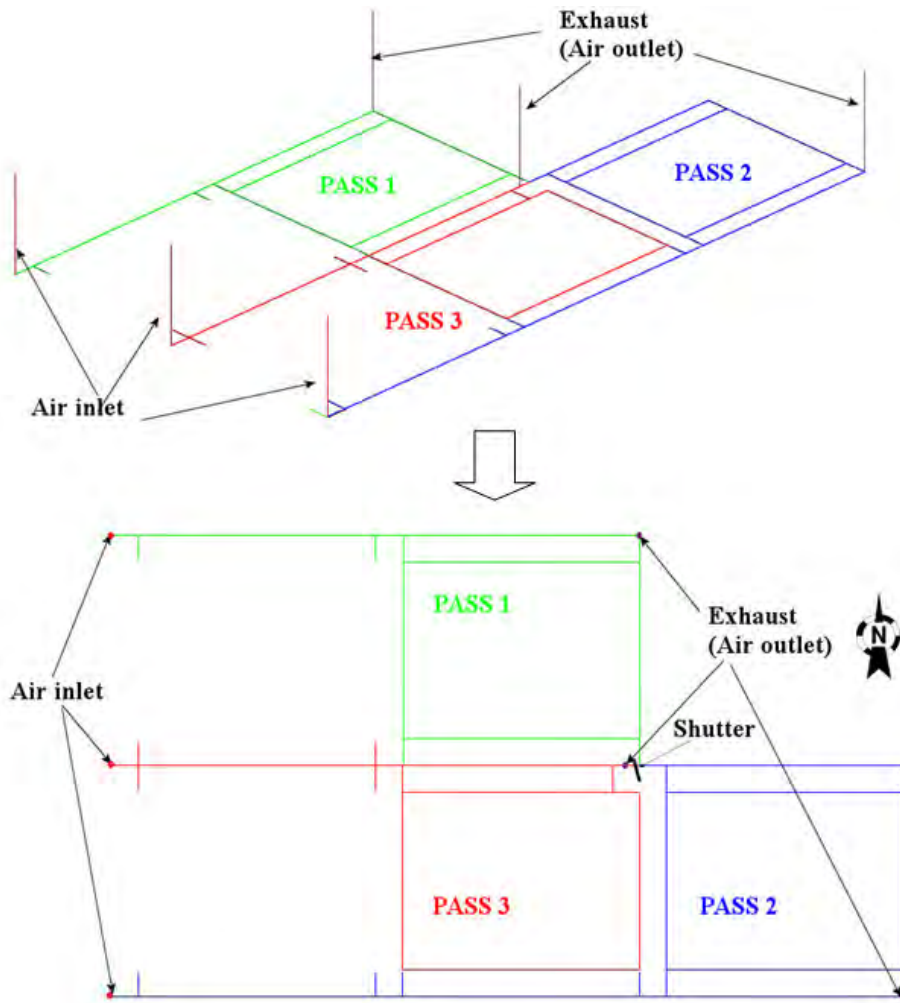


図 3.4.2-8 簡易モデルにおける入気・排気位置の考え方

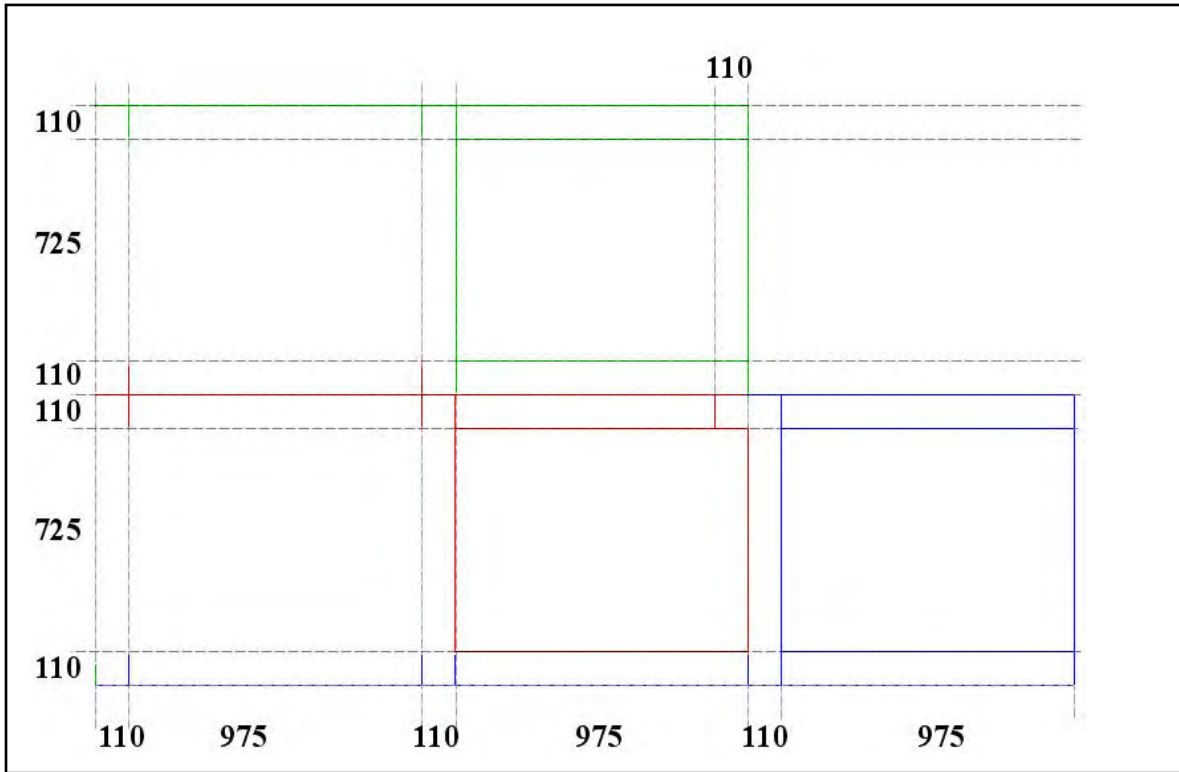


図 3.4.2-9 簡易モデルの全体図面



(7) 解析条件

事前解析に用いる解析条件を、3.3 の条件設定に基づき以下にまとめた。

1) 気流解析の解析条件のまとめ

表 3.4.2-1 事前解析条件（気流解析）

No.	項目	必要データ	備考	バックデータ
1	標高	処分パネルの標高データ	パネル内の初期値として与える圧力・温度に関する	地下 500m と仮定
2	坑道のデータ	温度	摂氏 30°	地表温度 15 度とし、100 m で 3 度上昇すると仮定
		熱伝導率	経験値	現行の鉱山での知見を活用。一定と仮定
		断面形状	—	JNC TN1400-99-020
		断面積	—	JNC TN1400-99-020
		坑道周囲長	—	JNC TN1400-99-020
		支保種類	覆工コンクリート	JNC TN1400-99-020
		摩擦係数	経験値	支保種類に依存
		通気抵抗	経験値	現行の鉱山での知見を活用。風量、風向に影響。坑道内圧力に依存
		坑道長	—	JNC TN1400-99-020
3	平常時の換気状態	風速（風量）	0.3m/s～1.5m/s	労働安全衛生規則
			2.0m/s～7.5m/s	鉱山法
4	火災時の換気状態	風速	風速より換算	—
		風量	風量より換算	—
		圧力	風量より換算	—

2) 避難シミュレーションの解析条件のまとめ

表 3.4.2-2 事前解析条件（避難シミュレーション）

番号	項目	設定条件
1	避難速度	分速 83m（時速 5.0 km）
2	避難人数	200 人
3	避難開始時間	火災発生 5 分後
4	避難開始位置	埋戻し中及び建設中パネル内の連絡坑道（四隅）

3.4.3 事前解析結果

(1) 気流解析結果

1) 解析ケース

事前解析では、処分パネル内の平常時の通気状態の表現、平常時通気状態での火災発生後の熱・煙の拡散状況の表現、及び火災発生後に強制的に通気させた状態（強制通気状態）での熱・煙の拡散状況の表現、の合計3ケースについて解析的検討を行った（表3.4.3-1）。

なお、定置中パネルは、建設中パネルや埋め戻し中パネルと隔離壁により仕切られていることを考慮して定常時の通気状態のみについて解析し、建設中パネルと埋め戻し中パネルについては定常時通気状態に加えて、火災発生後の通気状態についても解析を行った（図3.4.3-1）。

表 3.4.3-1 解析ケース

Cases	シナリオ	火災	シャッター（防火扉）	通気状態	計算領域
Case 1	平常時通気状態	なし	閉じたまま	定常通気	Pass 1 Pass 2 Pass 3
Case 2	火災発生後も平常時通気状態	あり (発火点：下図の Fire Location)	火災発生後、最初にシャッターに到達する作業員によって開かれる	定常通気	Pass 1 Pass 2
Case 3	火災発生とともに強制通気状態	あり (発火点：下図の Fire Location)	同上	強制通気	Pass 1 Pass 2

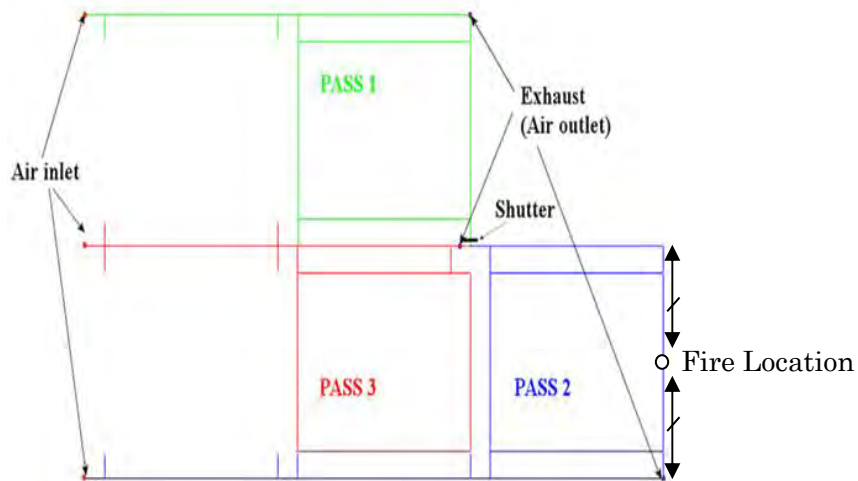


図 3.4.3-1 各解析ケースの計算領域

2) 気流解析の計算メッシュ

表 3.4.3-2 に事前解析の解析要素数と節点数を示す。また、図 3.4.3-2 には入排気口断面及び坑道断面のメッシュ図を示す。解析要素数は、平常時通気状態を検討した Case1 (計算領域 Pass1+ Pass2+Pass3 の場合) で約 147 万要素となり、計算負荷が非常に高いモデルとなっている。このように要素数が多くなった理由は、避難シミュレーション解析との重ね合わせを考慮し、坑道底面からの高さ 1.5m (人が屈んだくらいの高さ) の地点で熱・煙の拡散状態を確認できるようにしたことと、避難時の人の歩行速度 5km/h (約 1.4m/s) に合わせて坑道縦断方向の要素を細かくしている (1.5m ピッチを基本とした) ためである。この結果、計算時間は Case1 で 16 日程度、Case2、Case3 で 10 日程度と長時間を要した。

表 3.4.3-2 解析要素数・節点数

Property	Case 1	Case2・Case 3
節点数	1,472,062	1,044,658
要素数	1,192,876	847,212

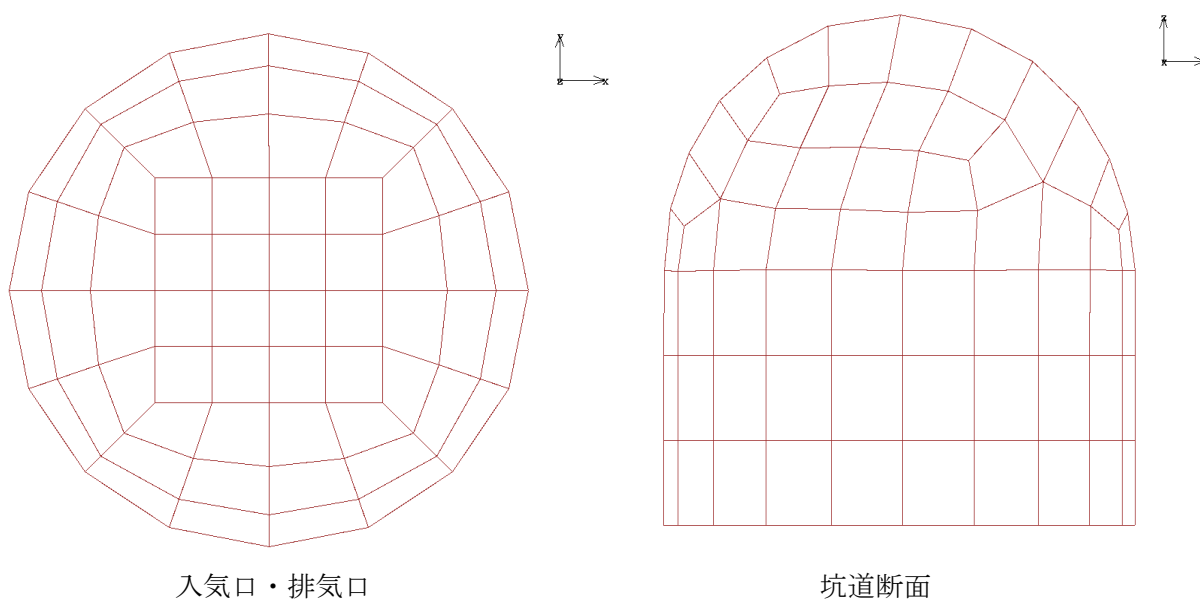


図 3.4.3-2 解析メッシュ

3) 気流解析結果

① 平常時の通気状態の表現 (Case1)

3.3.2 (1) 2)で述べたように、坑道内を風が動くためには一般に 0.3m/s 以上の風速が必要とされており、また、トンネル火災時に煙をコントロールするための(強制)風速は 2.0m/s とされている。これらの風速を勘案し、平常時の通気状態では坑道内各所の風速が 0.3m/s ~ 1.5m/s になることを目標とし、この範囲内に各所の風速が収まるまで繰り返し解析を行った。

図 3.4.3-3 に、このようにして表現した処分パネル全体の平常時の風速分布を、また、図 3.4.3-4 には代表断面 (Sec-1~Sec9) の坑道断面内風速分布を示す。

図 3.4.3-3 から、入気口付近の坑道の風速が大きく、入気口から遠ざかるにしたがい風速は低下し、排気口付近ではまた風速が大きくなる様子が表現できていることが分かる。また、アクセス坑道から連絡坑道を経て建設・埋戻し・定置の各パネルの主要坑道に通気され、最終的に排気口に抜けていく状況が表現できている。この他に、埋め戻し完了パネルに通じる坑道部分などは行き止まりとなっており、空気の入りがほとんどないため風速も小さい傾向にあることなども表現されている。

図 3.4.3-4 から、坑道側壁や天端付近の風速は中心部に比べて小さくなっており、壁面摩擦の影響が表現されていることが分かる。なお、坑道底部よりも坑道上部のほうが風速は若干大きくなっているが、これは入気口・排気口が坑道上部に繋がっていることの影響と考えられる。また、排気口付近の着目断面である Sec-3、Sec-6、Sec-9 断面内風速分布を比較すると、Sec-9 における風速分布が Sec-3、Sec-6 と比較して風速の速い部分が坑道の底部付近に集中する傾向がみられる。この理由については、構成則及び境界条件の影響が強く出ているためと推察できるが、詳細な原因究明については数値解析技術全体の面からの検討が必要と考えられる。

以上のように、本検討で用いた3次元気流解析ソフトにより、平常時の通気状態を表現することができると考えられる。しかし、以下のような課題も残っていると考えている。

- ・前述のように、Case1 の計算に要した時間は 16 日程度であり、実用的な解析手法とするためには相当の時間短縮が必要と言える
- ・本検討は地層処分場の地下施設の簡易モデルを対象としたものである。処分坑道や斜坑・立坑を再現した詳細モデルにおいては計算時間が更に長くなる懸念がある
- ・本検討では、坑道内の各所の風速が所定の範囲に収まるように繰り返し計算を行い、平常時の通気状態を表現した。今後は、実際の坑道通気方法を考慮し、入気口からの入気量を設定し、その入気量のもとで坑道各所の風量・風速を検討し、それらの値が妥当な範囲であることを確認して平常時の通気状態を表現する必要があると考えられる。入気口からの所要の入気量は、風速に基づく本検討結果から推定できると考えている。

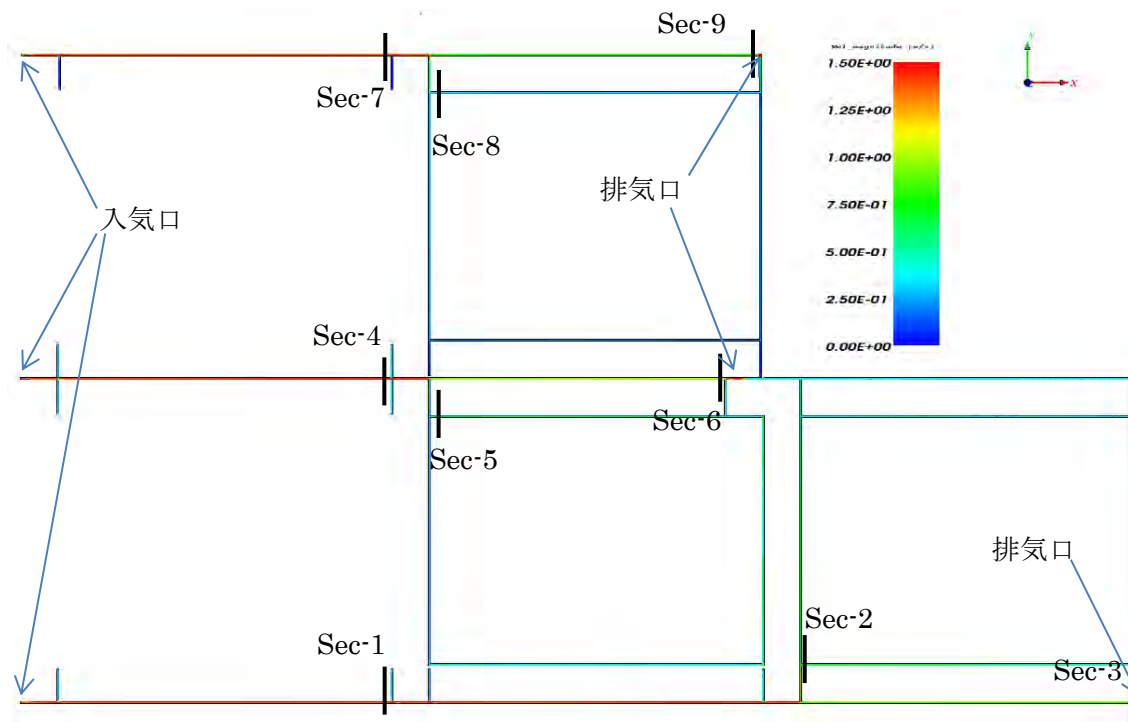


図 3.4.3-3 平常通気状態の風速分布図

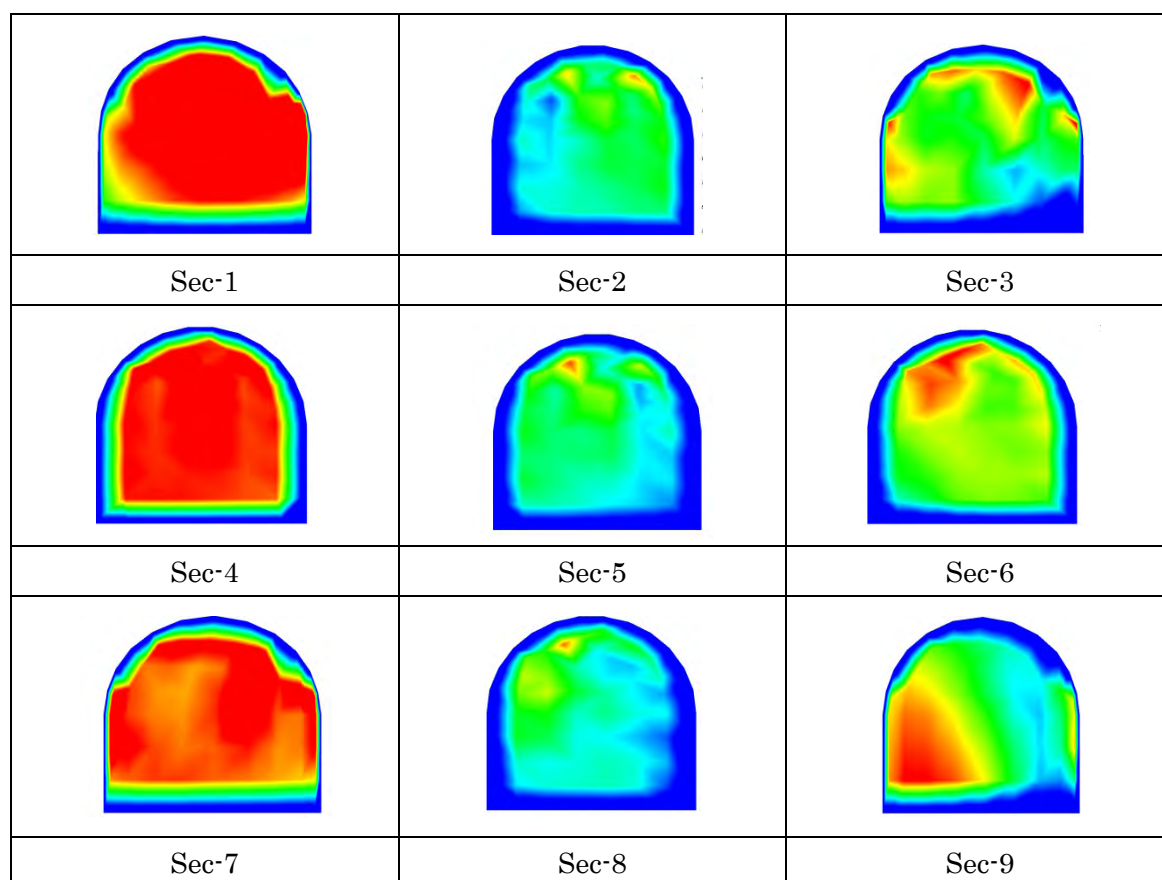


図 3.4.3-4 代表断面の風速分布図

② 平常通気状態での火災時の熱・煙の拡散状況の表現 (Case2)

火災時の熱と煙の拡散状況を表現するために、火災発生後から解析が定常状態となるまでの間の坑道内温度と一酸化炭素濃度の経時変化を検討した。

検討の結果、坑道内温度、一酸化炭素濃度ともに図 3.4.3-5 に示す Sec-A の坑道（発火点が存在する坑道）のみで影響がみられたため、以降の経時変化の状況は Sec-A の坑道の拡大図で示した（図 3.4.3-6、図 3.4.3-7 参照）。

平常通気状態では、火災発生から 1200 秒（20 分）で坑道内温度、一酸化炭素濃度ともに定常状態となった。図 3.4.3-6 に坑道内温度の経時変化を、図 3.4.3-7 に一酸化炭素濃度の経時変化を示す。なお、図 3.4.3-6 では、坑道内温度について 37℃（310K）を評価の閾値（赤色）として表現した。これは、労働安全衛生規則上、坑道内温度の上限値が 37℃とされていることを勘案したものであり、火災による熱拡散で労働環境上の制限温度がどのように侵されていくかに着目したものである。また、一酸化炭素濃度については、鉱山保安法施行規則に定められている 0.01%（9 条第 1 項）を評価の閾値（赤色）として表現した。

図 3.4.3-6 及び図 3.4.3-7 から、坑道内温度及び一酸化炭素濃度それぞれについて、時間経過とともに設定した閾値を超える範囲が広がっていく様子が分かる。拡散の状況としては坑道内温度及び一酸化炭素濃度ともにほぼ同じであり、坑道内の風の流れに沿って排気口に向けた拡がりを見せている。拡散速度としては一酸化炭素濃度の方が若干速い傾向がみられる。

以上のように、本検討で用いた 3 次元気流解析ソフトにより、火災時の熱や煙の拡散状況を表現することができると考えられる。

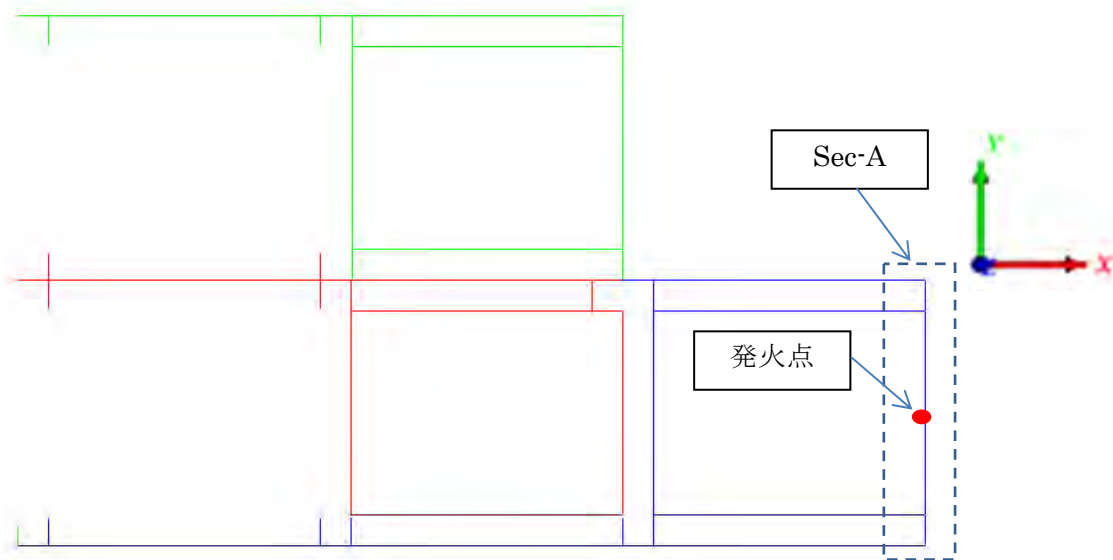


図 3.4.3-5 坑道内温度及び一酸化炭素濃度の拡散状況の着目位置 (Sec-A)

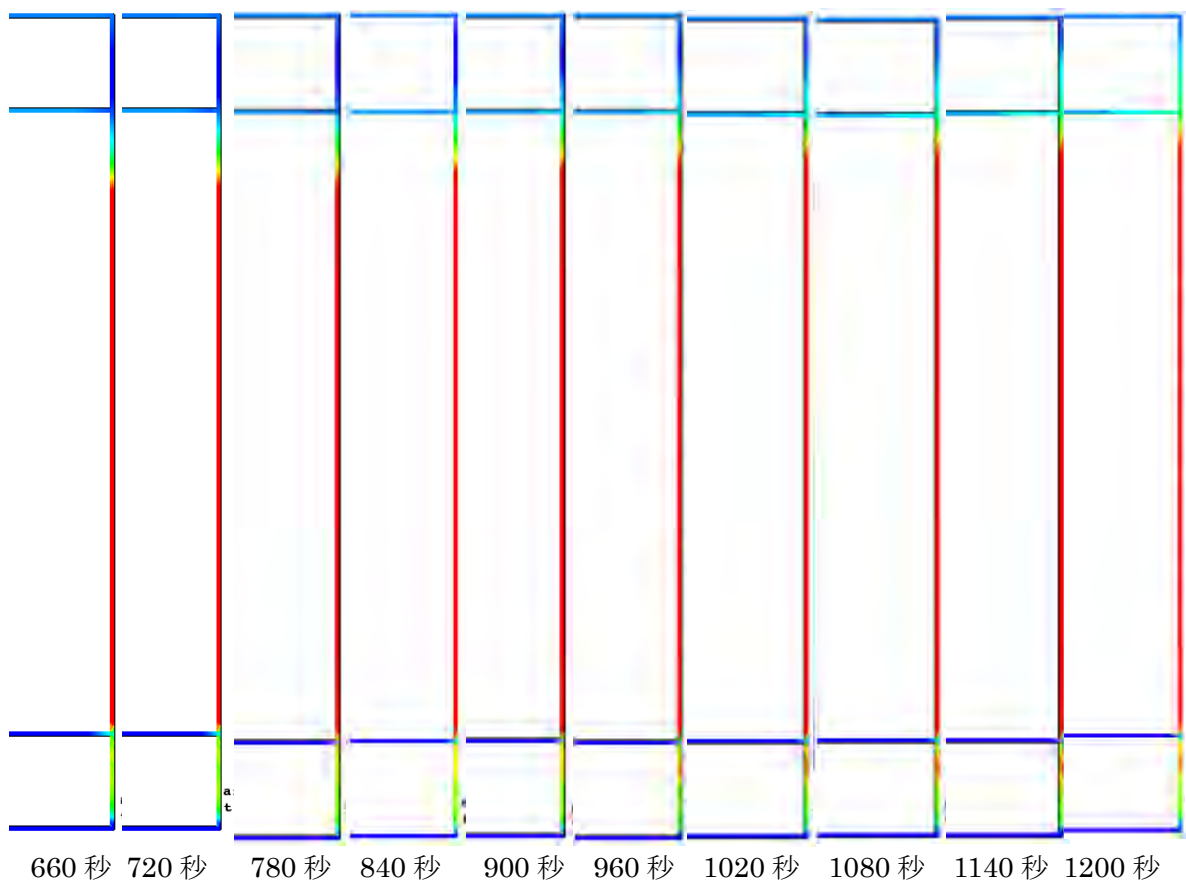
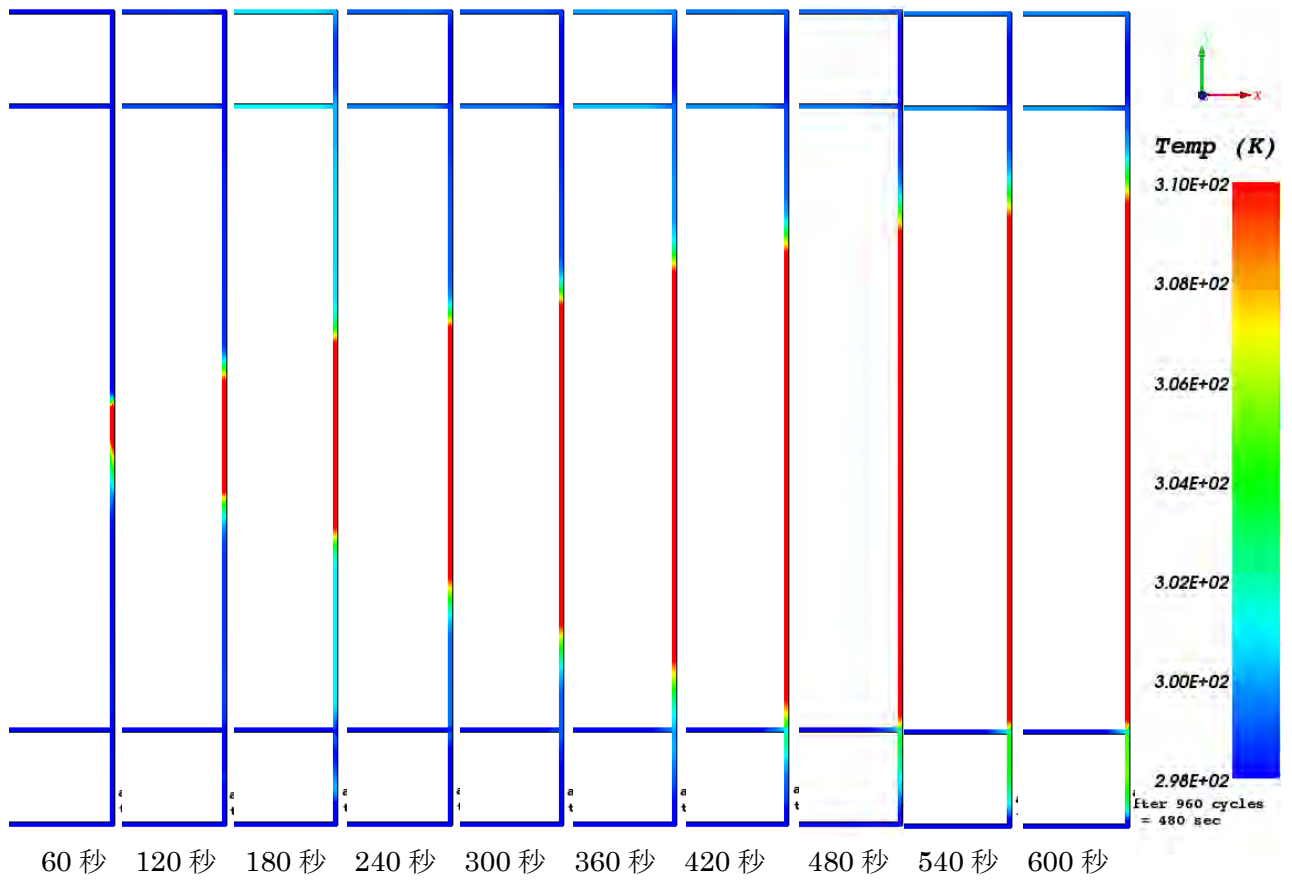


図 3.4.3-1 発火点の坑道における坑道内温度の経時変化（平常通気状）

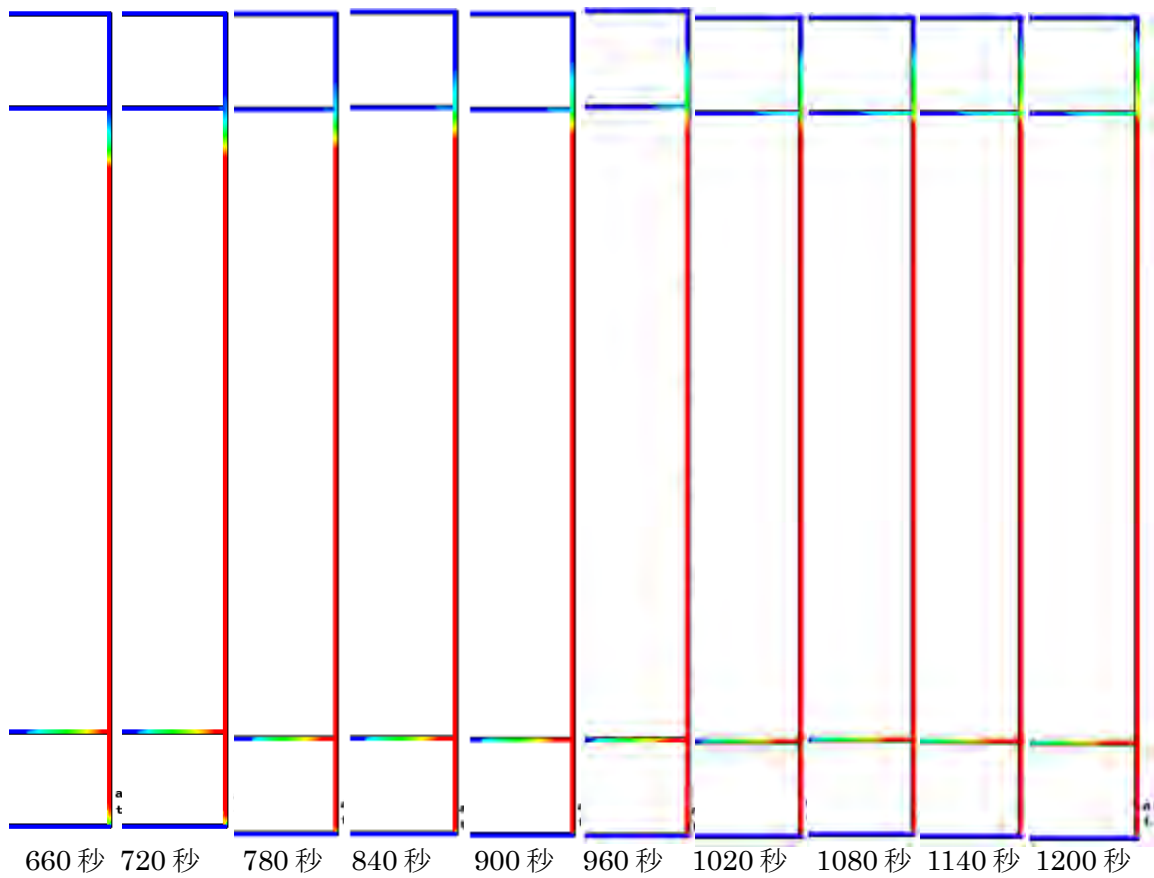
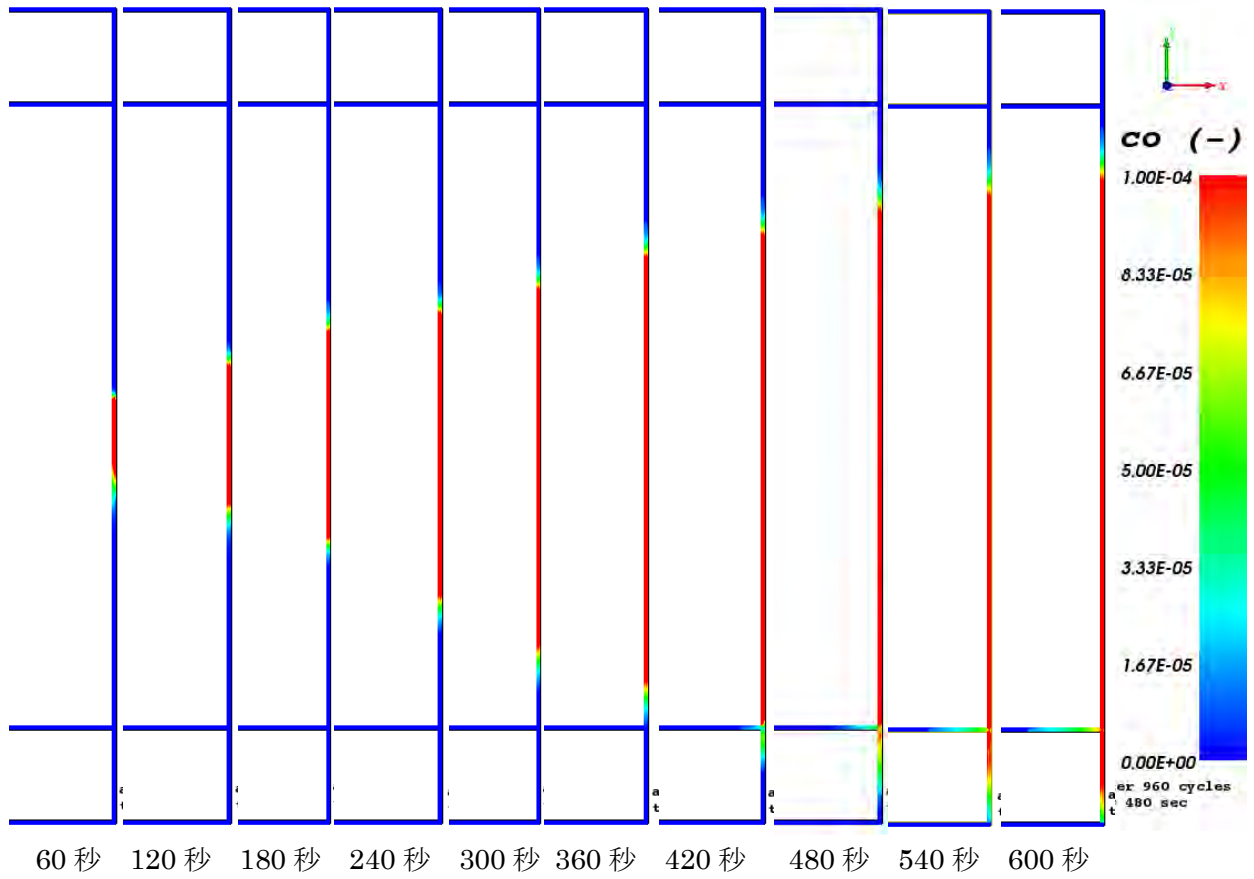


図 3.4.3-2 発火点の坑道における一酸化炭素濃度の経時変化 (定常通気状態)

③ 強制通気状態での熱・煙の拡散状況の表現 (Case3)

トンネル火災時には煙をコントロール（人が避難する方向に煙が拡散しないように制御）するために強制通気の手段をとる場合があるとされている。Case3 は、地層処分場の地下施設の簡易モデルにおいて、このような強制通気の状態を表現するとともに、熱や煙の拡散拡散状況を平常通気の場合と比較したものである。

3.3.2 (1) 2)で述べたように、トンネル火災時に煙をコントロールするための（強制）風速は 2.0m/s とされている。また、鉱山保安法では坑道内で作業員が働く上での最大風速を 7.5m/s としている。これらの風速を勘案し、強制通気状態では坑道内各所の風速が 2.0m/s ～7.5m/s になることを目標とし、この範囲内に各所の風速が収まるように繰り返し解析を行った。

解析の結果、上記の風速目標に対して、空気の出入りの少ない坑道、例えば埋め戻し完了パネルに通じる連絡坑道（行き止まりの状況になっている）などでは、風速 2.0m/s 以上を確保することができなかった。これらの坑道においても風速 2.0m/s 以上を確保しようとすると、他の多くの坑道で風速の上限値 7.5m/s を超えたことから、本検討ではこれら一部分については風速目標値を満足しないことを許容した。

図 3.4.3-8 に、このようにして表現した処分パネル全体の強制通気時の風速分布を、また、図 3.4.3-9 には代表断面（Sec-1～Sec6）の坑道断面内風速分布を示す。

図 3.4.3-8 から、平常時の通気状態（図 3.4.3-3）と同様に、入気口付近の坑道の風速が大きく、入気口から遠ざかるにしたがい風速は低下すること、アクセス坑道から連絡坑道を経て各作業パネルの主要坑道に通気され、最終的に排気口に抜けていく状況などが表現できていることが分かる。

また、図 3.4.3-9 から、坑道断面内風速分布についても平常時の通気状態（図 3.4.3-4）と同様に、壁面摩擦による坑道側壁や天端付近の風速低下の状況が表現されていることが分かる。

以上のように、本検討で用いた 3 次元気流解析ソフトにより、処分パネル内の各所（一部を除く）の風速を 2.0m/s～7.5m/s にするような強制通気状態を解析的に表現できると考えられる。ただし、前述の「①平常時の通気状態の表現 (Case1)」で述べたと同様の課題（計算時間短縮、詳細モデルによる確認、入気量設定に基づく通気状況の確認）が残っていると考えている。

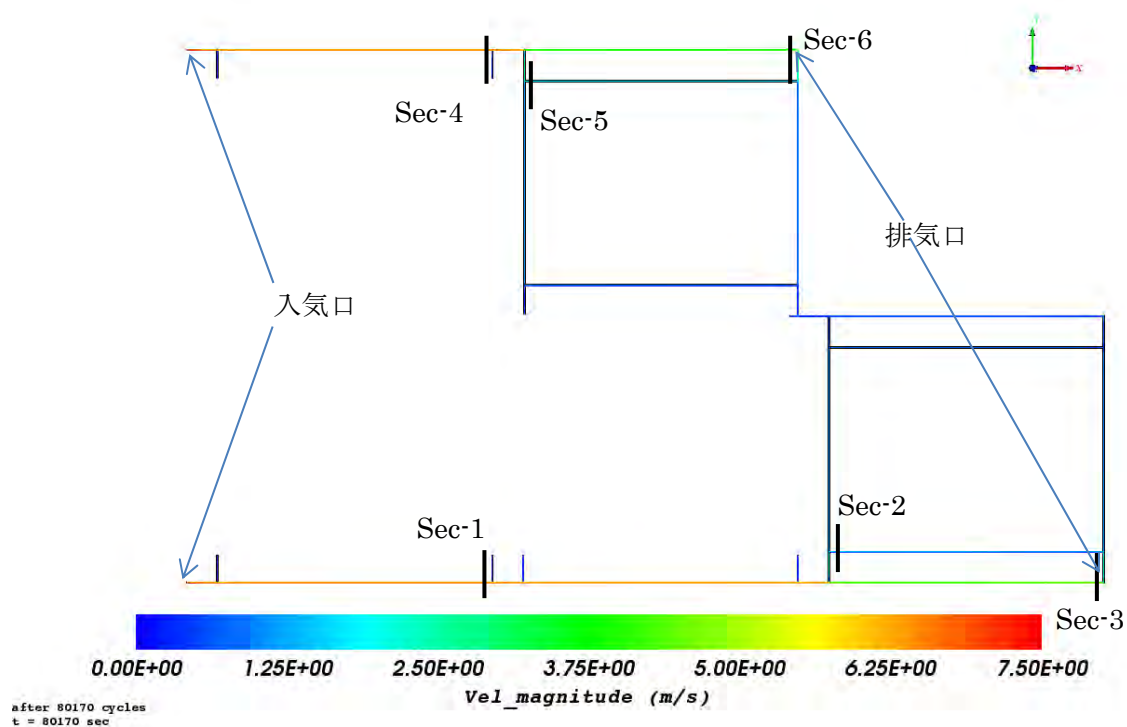


図 3.4.3-8 強制通気状態の風速分布図

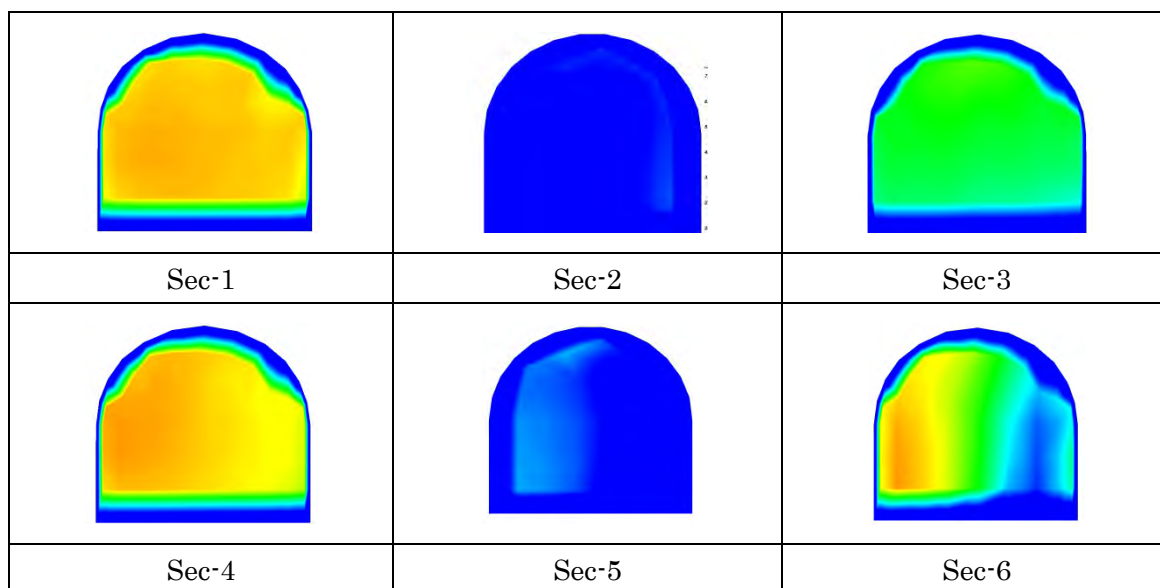


図 3.4.3-9 代表断面の風速分布図

強制通気状態での火災時の熱と煙の拡散状況に関しては、前述の平常通気状態での火災と同様に、坑道内温度、一酸化炭素濃度ともに発火点が存在する坑道のみで影響がみられたため、経時変化の状況は図 3.4.3-5 に示す Sec-A の坑道について検討した。

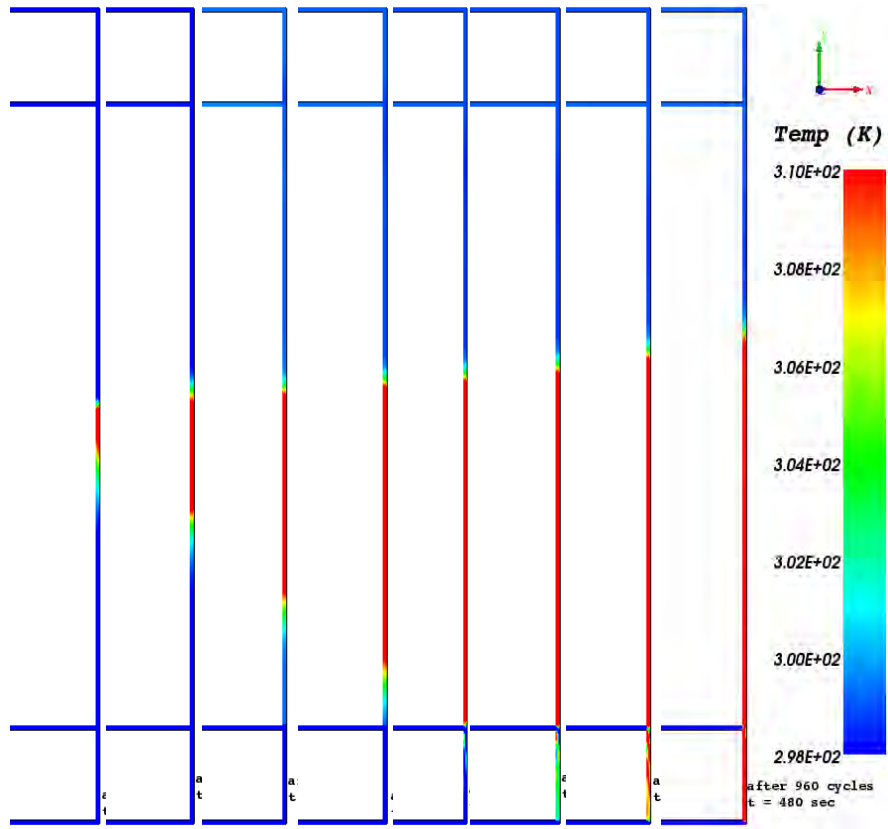
強制通気状態では、火災発生から 960 秒（16 分）で坑道内温度、一酸化炭素濃度ともに定

常状態となった。図 3.4.3-10 に坑道内温度の経時変化を、図 3.4.3-11 に一酸化炭素濃度の経時変化を示す。なお、定常通気状態での影響評価と同様に、坑道内温度については 37°C (310K) を評価の閾値（赤色）とし、また、一酸化炭素濃度については 0.01%を閾値（赤色）として表現した。

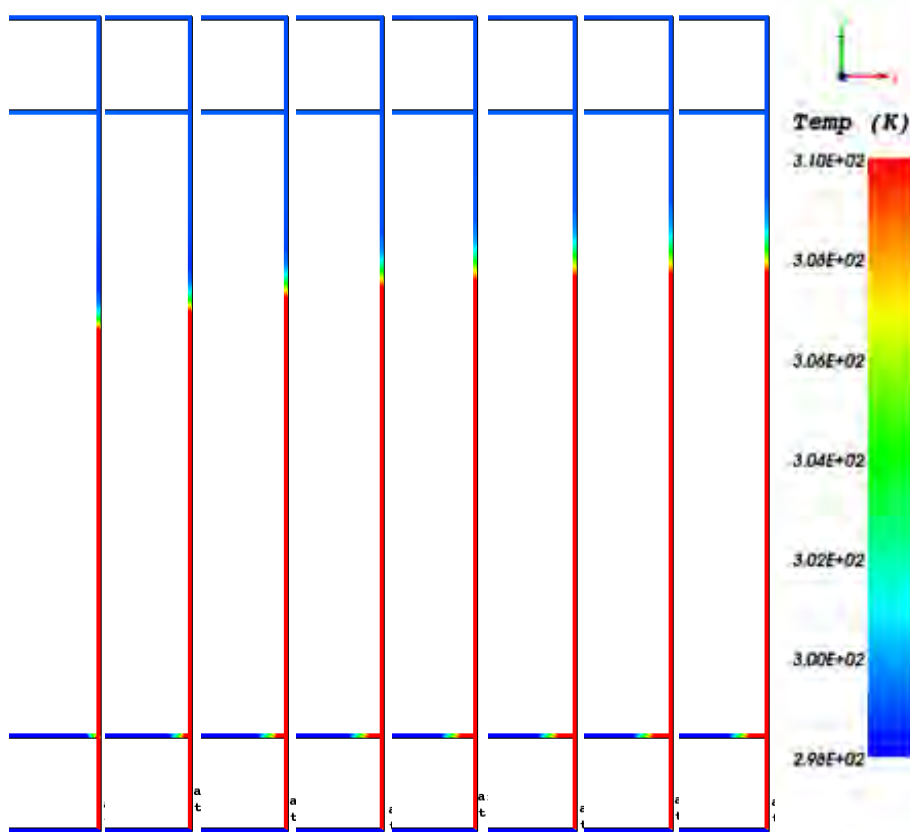
図 3.4.3-10 及び図 3.4.3-11 から、坑道内温度及び一酸化炭素濃度ともに、時間経過とともに設定した閾値を超える範囲が広がっていく様子や、坑道内の風の流れに沿って排気口に向けた拡がりを見せている様子が分かる。また、拡散速度としては一酸化炭素濃度の方が若干速い傾向がみられる。

一方、平常時の通気状態における拡散状況との比較については、上述の熱や煙の広がり方などの拡散の傾向は同じであるが、拡散速度と拡散範囲に違いがみられる。例えば、排気口付近において一酸化炭素濃度が閾値を超える時間は平常時の通気状態では 720 秒程度であるが（図 3.4.3-7）、強制通気状態ではこれよりもかなり速い 360 秒程度である（図 3.4.3-11）。また、熱や煙の拡散範囲については、強制通気状態では定常通気状態と比較して風上側へ拡散しにくい傾向が見て取れる。これは、風速の違いによる拡散状況の違いが表現されているものであり、風速が速い強制通気状態では風下側には火災影響が伝搬し易くなるが、逆に風上側には伝搬し難いことが分かる。

地層処分場の地下施設で火災が発生した場合、通気状態を変化させて熱や煙の拡散を制御する対応を取ることも考えられる。このような対応の是非や効果、あるいは通気切り替えのタイミングなどの具体的事項などを、気流解析を行うことによって検討できると考えられる。



60 秒 120 秒 180 秒 240 秒 300 秒 360 秒 420 秒 480 秒



540 秒 600 秒 660 秒 720 秒 780 秒 840 秒 900 秒 960 秒

図 3.4.3-3 発火点の坑道における坑道内温度の経時変化（強制通気状態）

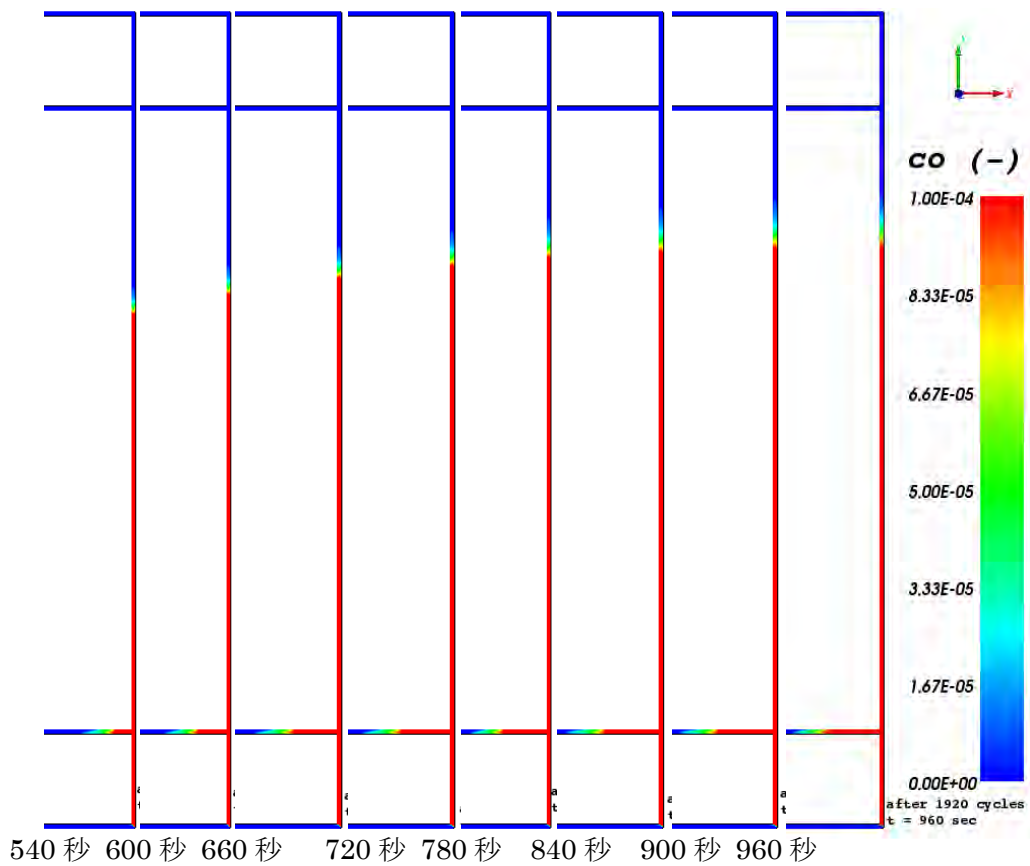
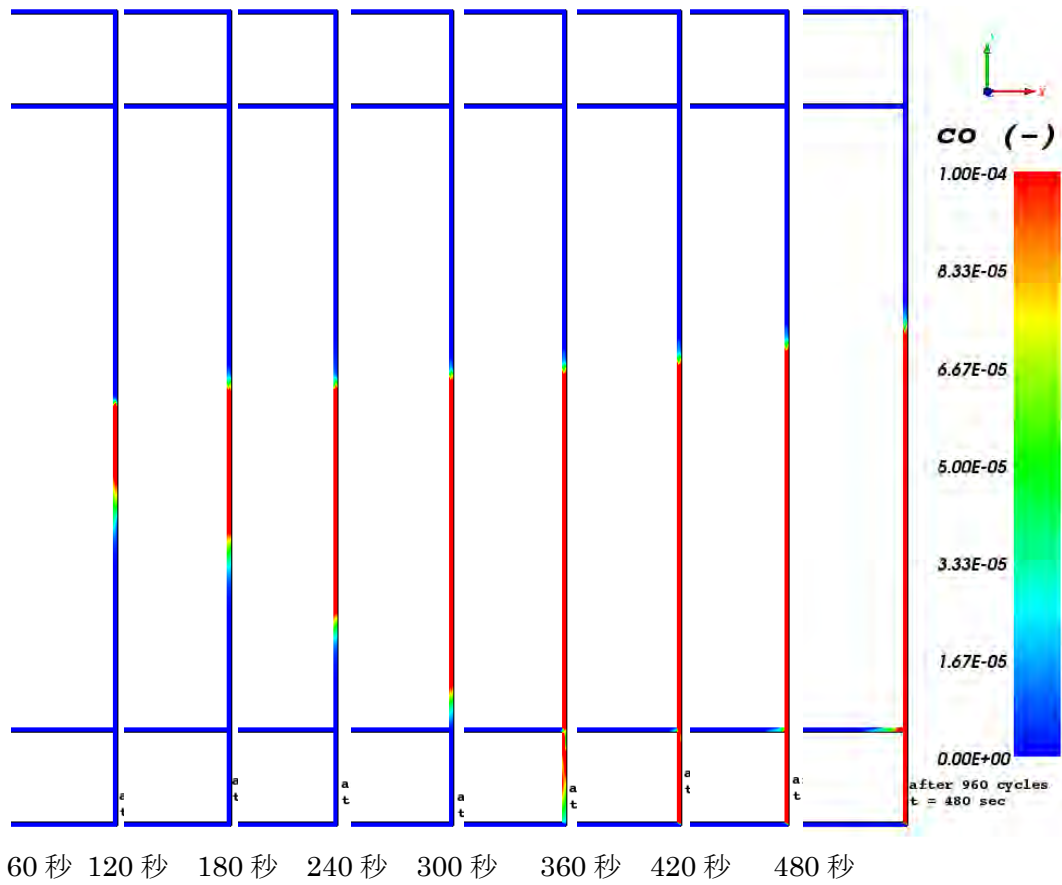


図 3.4.3-4 発火点の坑道における一酸化炭素濃度の経時変化（強制通気状態）

④ 3次元解析の有用性の検討

「1.3.2 (5) 気流解析の数値解析手法」で述べたように、本課題では、径 5m 程度の坑道内で火災が発生した場合の熱や煙の空間的拡散状況の確認に加えて、同坑道内を作業員が避難する様子を確認する目的を持つため、3次元解析による検討を行うこととした。

図 3.4.3-13 に平常通気状態での火災時の発火点近傍(風上、風下それぞれ 100m 地点、図 3.4.3-12、図 3.4.3-14 参照)における、発火から 60 秒及び 300 秒の時点での坑道内温度と一酸化炭素濃度の坑道断面内分布を示す。また、図 3.4.3-15 には強制通気状態での分布を示す。

3次元解析を行うことで図 3.4.3-12 や図 3.4.3-14 に示すような火災影響の平面的広がりや、図 3.4.3-13 や図 3.4.3-15 に示すような断面内分布のデータを得ることができる。これにより、後述する避難シミュレーションがより正確に検討できると考えられる。例えば、図 3.4.3-15 に示す一酸化炭素濃度の坑道断面内分布をみると、経過時間 60 秒における SectionB では坑道上部付近は閾値濃度の 0.01% に近いが、坑道下部ではまだ安全な状況にあることが分かる。したがって、体を少し屈めながら歩行すれば作業員は安全に避難することができると考えられる。

このような評価は、3次元解析を行い熱や煙の空間的拡散状況を把握することで可能になるものであり、こういった観点から3次元解析は、火災事象等に対する種々の安全対策の効果をより詳細に比較検討する場合などに有用と考えられる。

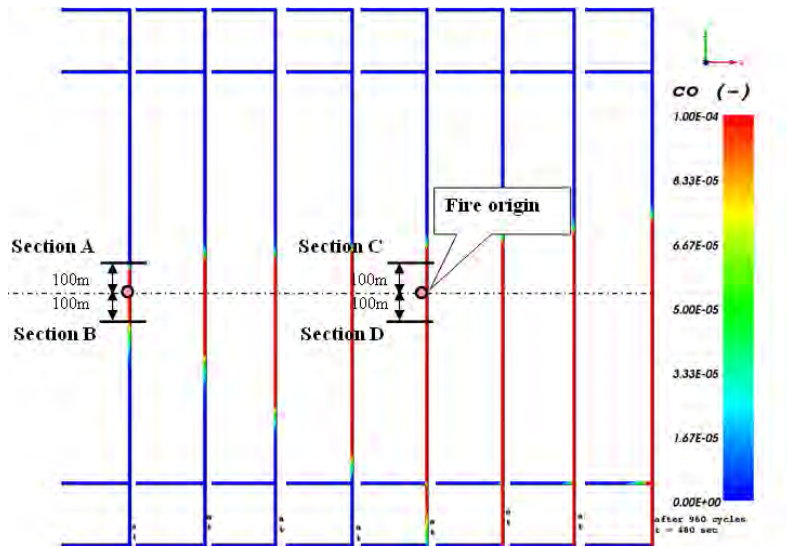


図 3.4.3-12 横断面図の位置 (Case2)

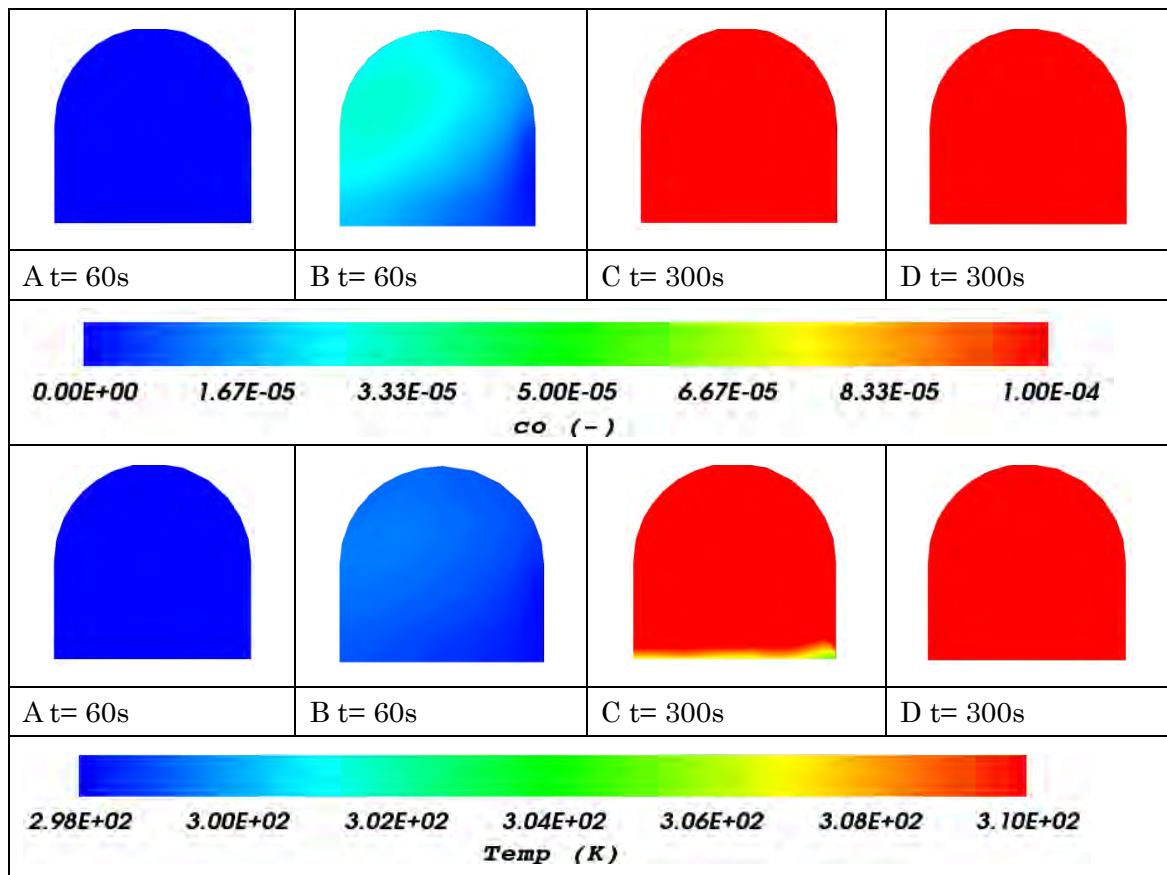


図 3.4.3-13 横断面図 (Case2)

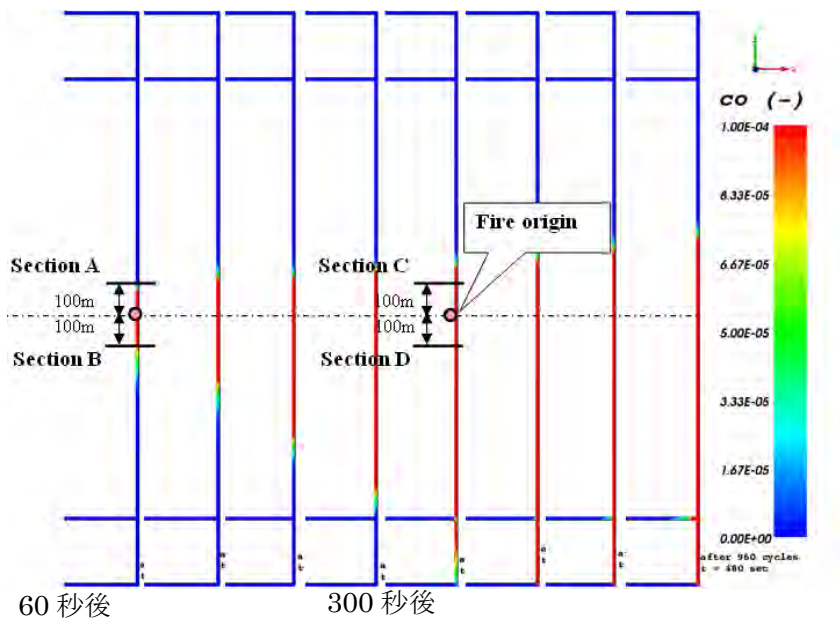


図 3.4.3-14 横断面図の位置 (Case3)

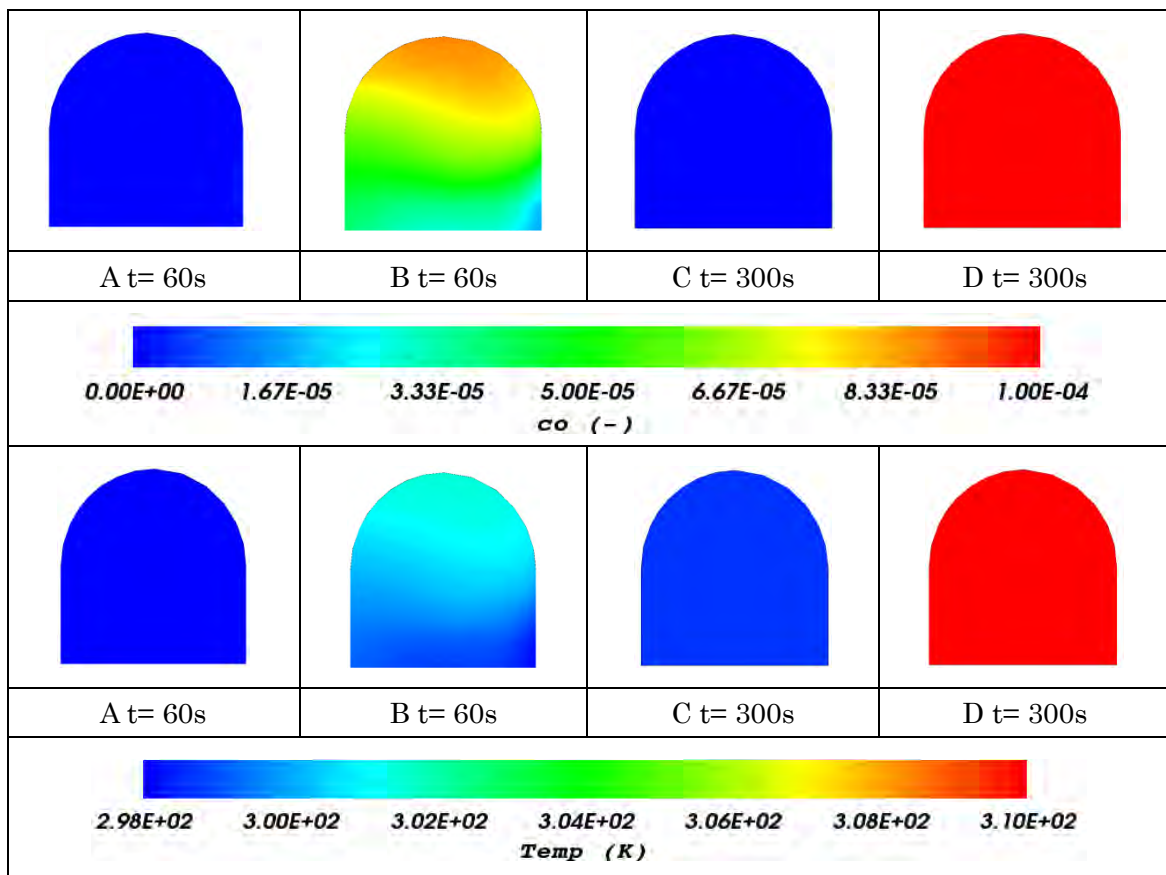


図 3.4.3-15 横断面図 (Case3)

4) 気流解析のまとめ

処分パネルの簡易モデルを対象に事前解析を行い、処分パネル内の平常時の通気状態の表現、平常時通気状態での火災発生後の熱・煙の拡散状況の表現、及び火災発生後に強制的に通気させた状態（強制通気状態）での熱・煙の拡散状況の表現の3ケースについて検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ・本検討で用いた3次元気流解析ソフトにより、処分パネル内の各所の風速が0.3m/s～1.5m/sになる平常時の通気状態を解析的に表現することができた。また、火災時の熱や煙の制御方法の一つとして考えられる強制通気状態についても、処分パネル内の各所（一部を除く）の風速を2.0m/s～7.5m/sにする状態で表現することができた。
- ・火災時の熱や煙の拡散状況については、火災発生後から解析が定常状態となるまでの間の坑道内温度と一酸化炭素濃度の経時変化を検討した。その結果、坑道内温度及び一酸化炭素濃度それぞれについて、時間経過とともに設定した閾値を超える範囲が広がっていく様子などを把握することができた。よって、本検討で用いた3次元気流解析ソフトにより、火災時の熱や煙の拡散状況を表現することができると考えられる。
- ・火災時の熱や煙は、風速の違いにより拡散状況が異なり、平常時より風速が速い強制通気状態では風下側には火災影響が伝搬・移動し易くなるが、逆に風上側には伝搬・移動し難いことが分かった。このような結果から、気流解析を行うことで火災時の気流制御対策の是非や効果、あるいは通気切り替えのタイミングなどの具体的事項などを検討できると考えられる。
- ・解析手法として3次元解析を用いることで、熱や煙の空間的拡散状況を把握することが可能になり、火災事象等に対する種々の安全対策の効果をより詳細に比較検討する場合などに有用と考えられる。

一方で、以下に示す課題が抽出された。

①解析モデルの最適化による計算負荷（計算時間）の低減

Case1（解析用素数 約 147 万）の計算に要した時間は 16 日程度、解析用素数を減らした Case2、Case3 の場合（解析用素数 約 104 万）でも 10 日程度と長時間を要した。また、ここでの検討は地層処分場の地下施設の簡易モデルを対象としたものであり、処分坑道や斜坑・立坑を再現した詳細モデルにおいては計算時間が更に長くなる懸念がある。このため、実用的な解析手法とするためには相当の時間短縮が必要と考えられる。具体的には、解析精度を保ちつつ計算時間を短縮するための3次元解析モデルの最適化の検討や、1次元解析の活用による気流解析全体としての計算負荷低減（1次元解析で十分な結果が得られない場合のみ3次元解析を行うなど）の検討が必要と考えられる。

②数値解析手法の整理と解の特性に関する検討

本検討では、解析コードとして3次元の流れ解析を適切に検討できると考えられる「VENTMINE」を用いた。しかし上述の①の課題などを勘案すると、今後は、他の数値解析手法の特性等を調査・整理し、将来、同様の解析を行う際のより適切な解析コードの検討・選択に資する必要があると考えられる。

③処分パネルの通気方法の妥当性の検討

本検討では、平常時の通気状態及び強制通気状態ともに、坑道内の各所の風速が所定の範囲に収まるように繰り返し計算を行って設定した（処分パネル内の各所の風速に条件を設けて風況場の再現を行った）。今後は、実際の坑道通気方法を考慮し、入気口からの入気量を設定し、その入気量のもとで坑道各所の風量・風速を検討し、それらの値が妥当な範囲であることを確認して平常時の通気状態及び強制通気状態を表現する必要があると考えられる。入気口からの所要の入気量は、風速に基づく本検討結果から推定できると考えている。

(2) 避難シミュレーション解析結果

3.4.2 (7)で整理した条件及び気流解析の結果をもとに避難シミュレーションを実施した。避難シミュレーションの検討ケースは、気流解析の平常時の通気状態 (Case2) 及び強制通気状態 (Case3) での火災を想定した 2 ケースである。

以下に各ケースの検討結果及び各ケースの比較結果について述べる。

1) 平常時の通気状態 (Case2)

図 3.4.3-16 に、平常時の通気状態における避難シミュレーションの結果を示す。同図は、避難地点に到着した作業員の比率 (避難開始地点別及び合計の避難完了率) を示したものである。その結果、平常時の通気状態における火災では、作業員 (200 人) 全員の避難が完了している。また、埋戻しパネルなど、避難地点 (図 3.1.6-17 の左端) までの距離が近い場所からの避難が比較的早く完了する傾向にある。なお、避難完了曲線 (図 3.4.3-16 の赤の太線) が徐々に上昇しているのは、作業員が避難開始場所から避難を開始する時間にばらつきを持たせたためである (全員が一斉に避難を開始するのではなく、各作業員が少しずつ時間をずらして避難している)。

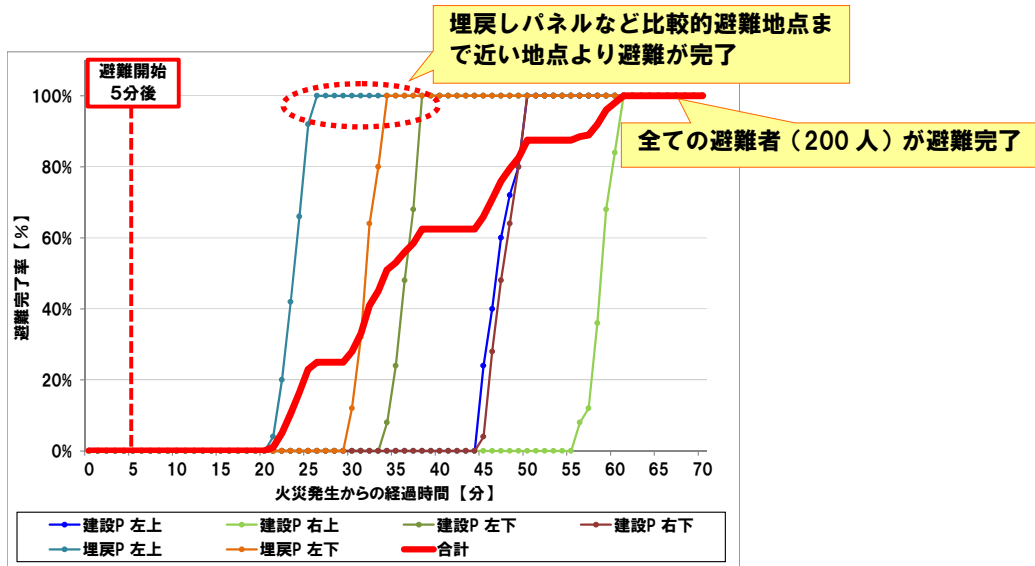


図 3.4.3-16 避難完了率 (平常時の通気状態)

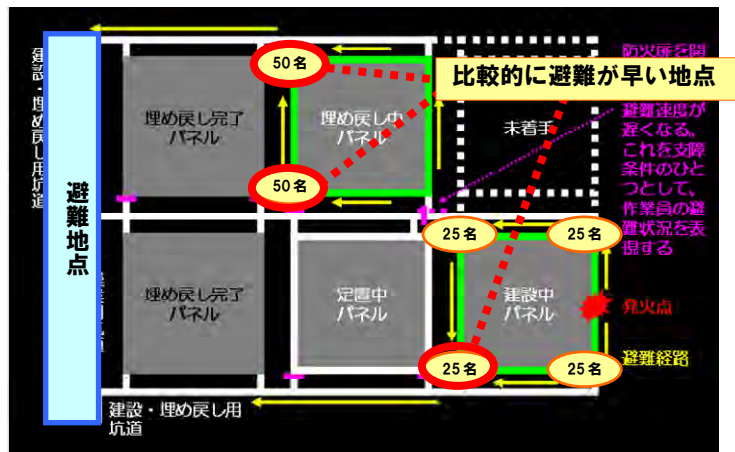


図 3.4.3-17 火災発生時の作業員の配置、避難開始地点、避難地点 など

2) 強制通気状態 (Case3)

図 3.4.3-18 に、強制通気状態における火災時の避難完了率を示す。同図から、強制通気状態での避難状況は、平常時の通気状態の場合と同様に、避難地点に近い場所にいる作業員ほど早く避難ができていることが分かる。

一方、避難完了率（合計：太い赤線）は最終的に 100%に達せず、一部の作業員が避難完了できない結果となった。これは、建設中パネルの火災元に近い風下側に設定した避難開始地点（図 3.4.3-17 の右下の地点）からの避難完了率が、60%（避難者 25 人中 15 人のみ避難完了）に留まったためである。すなわち、この地点の 10 人の作業員が避難できなかったという結果になった。

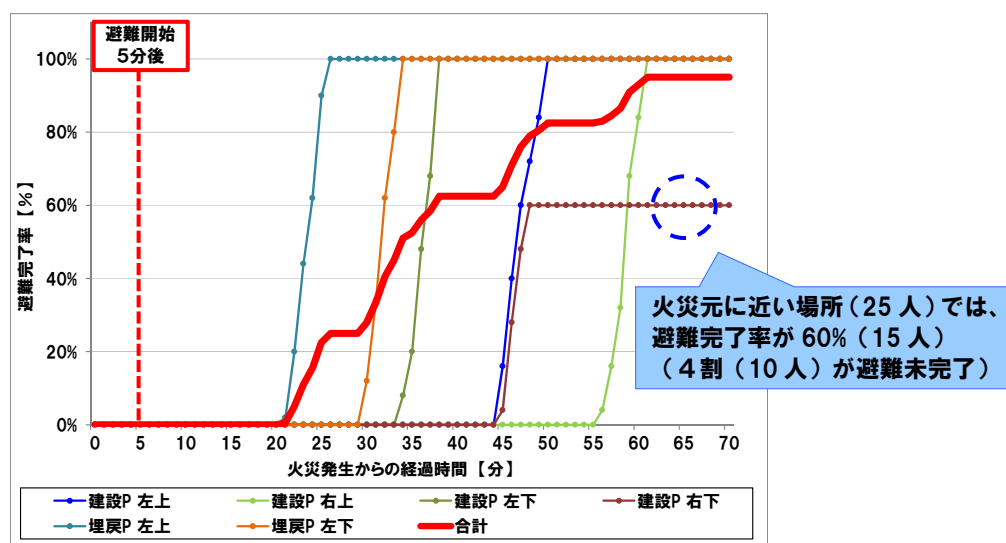


図 3.4.3-18 避難完了率 (強制通気状態)

以上のように、避難シミュレーションの結果を避難開始地点ごとの避難完了率などで整理することで、どの地点からの避難に問題があったのかなどを定量的に把握することが可能である。

図 3.4.3-19 には、10 人の作業員が避難完了できなかった地点についての状況を、3D 図化して視覚的に示した。同図で確認すると、避難者が避難開始地点周辺で既に避難不可の状況に陥ったことが分かった。これは、当該避難開始地点では火災発生から 5~8 分で一酸化炭素濃度が閾値を超えて（図 3.4.3-11）避難ができなくなる状態になる一方で、一部の避難者の避難開始時間が遅れたためである（前述のように、全員が一斉に避難を開始するのではなく、各作業員が少しずつ時間をずらして避難する条件にしたことによる）。

避難シミュレーションでは、このようにどこで避難が不可能になったか、避難者と災害の拡散状況を視覚的に確認し、分析することができる。

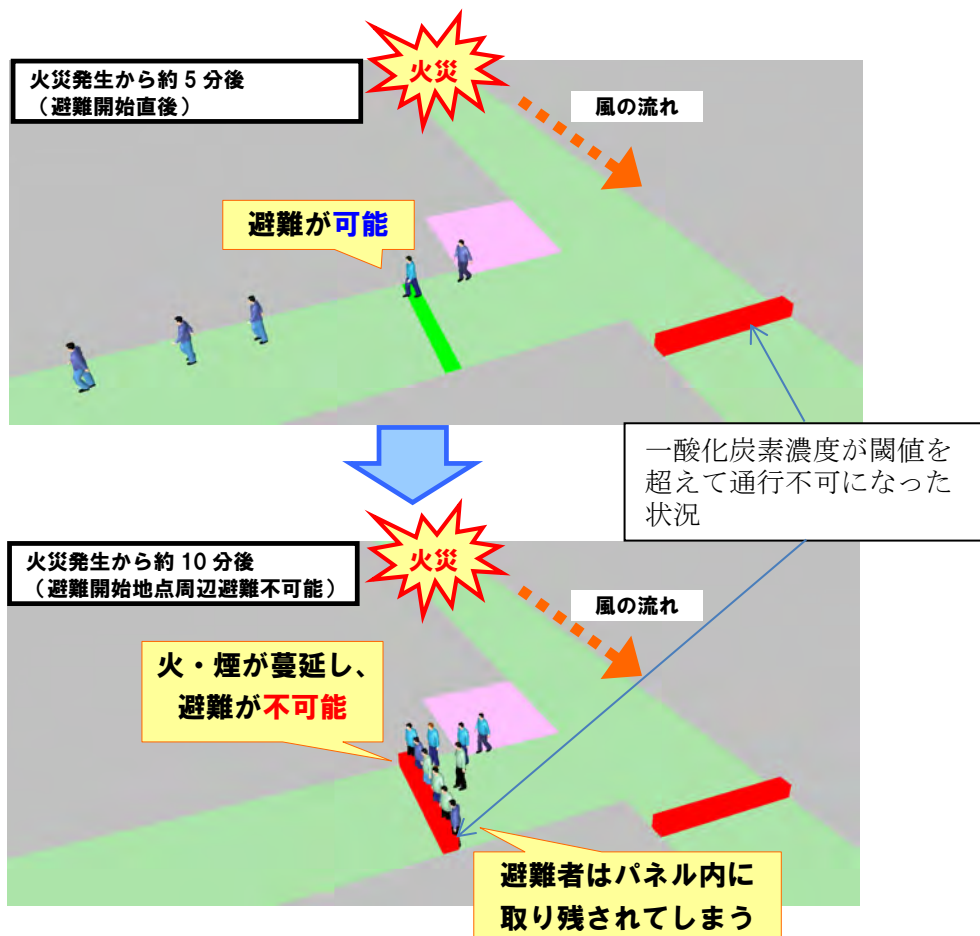


図 3.4.3-19 避難未完了者がでた避難開始地点付近の様子

3) 各ケースの比較分析

図 3.4.3-20 に、1)、2)で述べた平常時の通気状態の避難と強制通気状態の避難の避難完了率を比較して示す。

2つの検討ケースの最終的な避難完了率は、平常時の通気状態では 100%であるが、強制通気状態では 95%に留まっている。これは、強制通気状態では風速が速い分、風下への一酸化炭素濃度の拡散が速くなり、図 3.4.3-17 の右下の避難開始地点付近が比較的短時間で許容閾値を超えたためである。

このように検討ケースを重ね合わせ比較することで、どのタイミングで避難の可否に差が生じたかなど把握することが可能である。

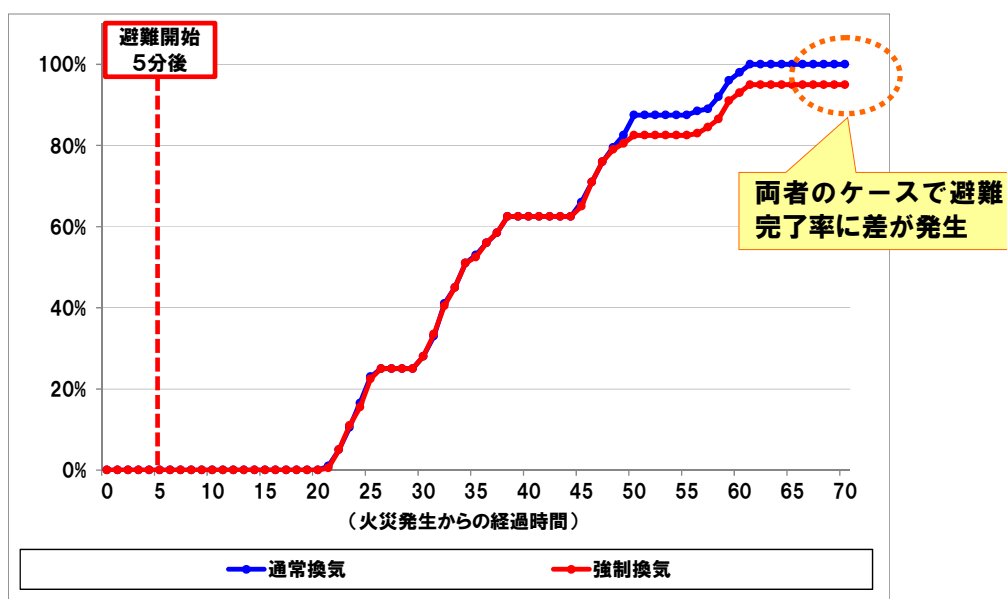


図 3.4.3-20 各ケースの避難完了率の比較

次に、各ケースの発火点に近い2地点(風下:図 3.4.3-17 の右下の避難開始地点、風上:図 3.4.3-17 の右上の避難開始地点) 付近に着目し、それぞれの検討ケースの避難開始時からの様子を 3D 図化して視覚的に比較確認した。

表 3.4.3-3 に、風下側の避難開始地点付近の様子を示す。

発火点から風下にあたる当該避難開始地点では、風速を速める強制通気を実施した方が拡散を早める結果となり、避難が困難になることが分かる（早い時間帯からレッドラインが表示される）。

また、平常通気状態で当該避難開始地点周辺が通行不可となる時間は、避難者全員が当該地点からの避難開始を終了した後であることが分かる（火災発生から 10 分で避難開始終了。当該地点にレッドラインが表示されたのは 11 分後）。

表 3.4.3-3 避難開始地点周辺の様子（風下側【建設パネル 右下】）

地震発生からの経過時間(分)	通常換気	強制換気
5分後 (避難開始)		
6分後		
7分後		
8分後 (強制換気通行不可)		
9分後		
10分後 (全員避難開始済)		
11分後 (通常換気通行不可)		

一方、表 3.4.3-4 には風上側の避難開始地点付近の様子を示す。風上側については、平常時の通気状態及び強制通気状態ともに避難者全員が避難開始を終了するまで、両者の間に状況の違いがないことが分かる。両者に差が表れるのは、火災発生から 17 分後に平常時の通気状態で一部通行不可となるが、避難に影響はなかった。

このように、平常時の通気状態で風上側に火災影響が及ばないような状況下では、強制通気を実施することで風下側の状況が悪化するというデメリットが発生する可能性もあると言える。

以上のように、気流解析と避難シミュレーションを組み合わせることで、様々な発火点における最善の対策などが検討できると考えられる。

表 3.4.3-4 避難開始地点周辺の様子（風上側【建設パネル 右上】）

地震発生からの経過時間(分)	通常換気	強制換気
5分後 (避難開始)		
6分後		
7分後		
8分後		
9分後		
10分後 (全員避難開始済)		
17分後 (通常換気一部通行不可)		

4) 避難シミュレーションのまとめ

ここでは気流解析の結果をもとに、平常時の通気状態（Case2）及び強制通気状態（Case3）での火災を想定した2ケースについて避難シミュレーションを実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ①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が分かった。また、発火点別など様々な火災状況における避難を分析・評価できると考えられる。これにより、火災状況別の最善の避難対策、計画の検討が可能と考えられる。
- ②避難の状況を、避難開始地点別の避難完了率などにより定量的に分析・評価することが可能である。これにより、避難計画においてどのような問題点があるかなどを定量的に把握できるだけでなく、災害に対する各対策の効果を定量的に評価することも可能である。
- ③避難する上で問題が生じる箇所などについて、3D 図化して視覚的に確認することが可能である。これにより、火災と避難者の時系列的な変化が確認でき、両者の状況や問題が発生した地点なども把握することができる。

以上より、地層処分場の地下施設における火災を対象とした避難計画の検討等において、避難シミュレーションを用いた解析手法は有用な検討手段になり得るものと考えられる。

一方で、避難シミュレーションについて、今後より詳細な分析・評価を行うためには、以下のような事項を検証する必要があると考えられる。

①避難者属性の変化による避難の検証

ここでは、避難者の避難速度は全員一律の速度で解析を行った。しかし実際には、負傷者がいることなどによって様々な速度が混在した状態で避難が行われると考えられる。このような、避難速度が混在した状況を設定した検証が必要と考えられる。

②停車、支障物などによって狭隘部が存在する条件での避難の検証

ここでは、坑道内には支障物がない条件で解析を行った。しかし実際には、車両などが停車して避難路を狭めているような状況も考えられる。今後は避難経路上の支障物が避難に与える影響などを分析・評価する必要があると考えられる。

③避難経路などの違いによる避難の検証

ここでは、避難者が最短ルートを通って避難するなど、避難計画が行き届いているとした条件で解析を行った。しかし実際には、避難者がパニックに陥り適切な状況判断が期待できない可能性も考えられる。このよう状況を想定し、避難経路や避難開始時間などをパラメータとした種々の条件での避難の検証が必要と考えられる。

3.5 まとめ

本章では、平成24年度に選定した技術開発課題のうちの「操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討」を行った。本課題は、地層処分事業の操業安全を確保するために必要な技術的要件や留意点などを調査・検討し、将来、具体的に施設を計画・設計する際の「元」、「根拠」、「着目点」などを整備するものである。併せて、操業安全の検討手段・ツールの整備に向けた調査・検討を行うものである。今年度から地下の処分パネルを対象に火災事象等に対する安全確保を考慮した施設計画技術のための検討項目の抽出や、解析的検討手法の適用性等について調査・検討に着手した。今年度は、以下の3項目について調査・検討を行った。

- 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
- ②気流解析と避難シミュレーション解析の条件設定
- 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

以下に、それぞれの実施項目に関するまとめを述べる。

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については、国内では地層処分場の具体的な計画がないため、海外の地層処分施設計画等の文献調査を行った。調査対象国及び施設は、スウェーデン（実施主体：SKB_Forsmark）、フィンランド（実施主体：Posiva_Olkiluoto）、フランス（実施主体：ANDRA）、アメリカ（Yucca Mountain 計画）とした。その結果、フランス（実施主体：ANDRA）において、火災時の煙の流れ方などに関する解析的検討を行っており、以下のような事項が本検討の参考になることが分かった。

- ・パネルの運用方法
- ・通常時及び火災時の坑道内の換気
- ・火災のシナリオと規模
- ・火災時の煙の流れ方と風量
- ・強制換気までの時間や作業員の避難の可能性

一方、地層処分施設と類似した既存施設における火災に対する安全対策の調査は、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実施したものであり、「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った。

「鉱山、トンネルにおける建設中・供用中の安全対策」に係る調査の結果、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て多重かつ多様な防止対策が法令から求められる状況と、それらに基づいて実際の防止対策が講じられている状況が分かった。本課題における解析的検討の条件設定にあたっては、法令で求められている事項を具備することが必要最低限ではあるが、安全を確保する対象（公衆安全と労働安全）により、適用する法令や適用可能となる技術が異なると考えられることから、解析目的や解析対象を明確にした上で、災害防止と拡大防止に向けた適用技術を設定していくことが必要と判断された。特に、2.2.1で述べたように、鉱山については地層処分場の地下施設との類似性が高いと考えられ、その保安に係る法令

である鉱山保安法等で求められる安全要件や安全対策技術は、操業安全を考慮した施設計画技術に反映すべき事項多いと考えられる。このような観点で実施した金属鉱山の調査結果を 3.2.2 (1) c に述べたが、坑内火災等に対する安全対策や坑内火災発生時の対応、及び坑内通気方法・設備など本課題に反映できる多くの知見を得た。今後は、坑内火災がガス爆発と並び重要災害に位置付けられる石炭鉱山の安全対策技術等の調査も必要と考えられる。これらの現地調査から得られる知見を、本課題で実施する解析的検討の条件設定やパラメータ解析（安全確保に有効な項目の比較検討など）に反映することが重要と考えられる。

また、「原子力関連施設における安全対策」に係る調査の結果、原子力関連施設の火災・爆発事象については、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ことが分かった。具体的には、一般的な防消火の考え方（火災発生の防止、検知及び消火、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ことが分かった。地層処分施設においても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と考えられるが、それらを地下施設の火災安全に係る検討の解析条件として与えるためには、基本的な設計を行って設定することが妥当と判断された。

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（煙、有毒ガス、熱気などの火災影響の拡散状況の把握を目的とする）と避難シミュレーション解析（避難経路や避難速度の把握を目的とする）に基づいて検討することとした。ここでは、これらの解析の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、及び気流解析と避難シミュレーション解析それぞれについて、設定した条件は以下の通りである。

1) 地下施設の設定

- ・解析に反映する定置方式（処分孔縦置き定置方式）
- ・処分パネルの形状と配置（処分パネル 6 枚、軟岩系岩盤を想定した形状・配置）
- ・処分パネルの運用方法（建設・定置・埋戻しの各作業は独立したパネルで実施）
- ・処分パネルや坑道の形状・寸法（処分孔縦置き定置方式、軟岩系岩盤を想定）

2) 気流解析条件

- ・地下施設における風速（平常時：0.3～1.5m/s、強制通気時 2.0～7.5m/s）
- ・地下施設における風況場（連絡坑道による入気・排気）
- ・初期の坑内温度と圧力（深度 500m 坑内温度 30℃、圧力 1063.25hPa）
- ・作業員数と配置（建設及び埋戻しパネルそれぞれの主要坑道に 100 人ずつ配置）
- ・火災曲線（ANDRA 社の検討を参考に、CETu 標準火災曲線を採用）
- ・火災発生場所（地下の作業員の避難がより困難になる場所を設定）
- ・数値解析手法（3次元気流解析コード：VENTMINE）

3) 避難シミュレーション解析

- ・避難速度（時速 5.0km）
- ・避難人数（200 人、建設パネル、埋戻しパネルの各箇所に数 10 人ずつ配置）

- ・避難開始時間（火災発生 5 分後から避難開始）
- ・避難開始位置（建設パネル、埋戻しパネルの四隅を避難開始位置として設定）

気流解析や避難シミュレーション解析は、将来、具体的に地層処分施設を計画・設計するにあたり、火災事象等に対する操業安全を確保・向上するために有効な項目（施設構造や設備、施設の運用方法など）について、確認するあるいは比較検討するための手段・ツールになり得ると考えている。上述の条件設定のもと、次年度以降、地層処分場の地下施設をモデル化した解析メッシュを作成し、気流解析及び気流解析から得られる熱や煙の拡散を反映させた避難シミュレーション解析を実施して、火災事象等に対する操業安全を検討するための手段・ツールとしての有用性を提示する。また、これらの手段・ツールを活用して、火災事象等に対する安全確保を考慮した施設計画のための着目点や検討項目を抽出する計画である。

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。以下に、気流及び避難シミュレーションの事前解析結果と今後の課題を述べる。

1) 気流解析の事前解析結果と今後の課題

気流解析の事前解析を行った結果、以下の知見を得た。

- 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（処分パネル内の各所の風速を平常時は 0.3m/s～1.5m/s、強制時は 2.0m/s～7.5m/s に固定する手法）で表現することができた。
- また、火災発生後、坑道内温度及び一酸化炭素濃度それぞれについて設定した閾値を超える範囲が徐々に広がっていく様子などを把握することができ、火災時の熱や煙の拡散状況を表現することができると考えられる。
- 風速の違いによる火災時の熱や煙の拡散状況の違いを解析的に表現することができたことから、気流解析を行うことで火災時の気流制御対策の是非や効果、あるいは通気切り替えのタイミングなどの具体的事項などを検討できると考えられる。
- 解析手法として 3 次元解析を用いることで、熱や煙の空間的拡散状況を把握することが可能になり、火災事象等に対する種々の安全対策の効果をより詳細に比較検討する場合などに有用と考えられる。

知見を得た一方で、以下のような課題が抽出された。

a. 解析モデルの最適化による計算負荷（計算時間）の低減

事前解析では、一つの解析ケースに 2 週間程度と長時間を要した。この計算時間については、処分坑道や斜坑・立坑を再現した処分パネルの詳細モデルにおいては更に長くなる懸念がある。このため、実用的な解析手法とするためには相当の時間短縮が必要であり、3 次元解析モデルの最適化を図るための検討や、1 次元解析との併用による気流解析全体としての計算負荷低減の検討が必要と考えられる。

b. 数値解析手法の整理と解の特性に関する検討

本検討では、解析コードとして3次元の流れ解析を適切に検討できると考えられる「VENTMINE」を用いた。しかし上述の a の課題などを勘案すると、今後は、他の数値解析手法の特性等を調査・整理し、将来、同様の解析を行う際により適切な解析コードの検討・選択に資する必要があると考えられる。

c. 処分パネルの通気方法の妥当性の検討

上述のように、本検討では平常時の通気状態及び強制通気状態ともに、処分パネル内の各所の風速に条件を設けることで表現した。今後は、実際の坑道通気方法を考慮し、入気口からの入気量を設定し、その入気量のもとで坑道各所の風量・風速を検討し、それらの値が妥当な範囲であることを確認して平常時の通気状態及び強制通気状態を表現する必要があると考えられる。

2) 避難シミュレーション解析の事前解析結果と今後の課題

避難シミュレーション解析の事前解析を行った結果、以下の知見を得た。

- a. 気流解析の熱や煙の拡散状況に係る解析結果を反映した避難シミュレーションが可能であり、火災状況別の最善の避難対策、計画の検討に有用と考えられる。
- b. 避難の状況を、避難完了率などにより定量的に分析・評価することが可能であり、災害に対する各対策効果の定量的評価などに有用と考えられる。
- c. 避難する上で問題が生じる箇所などについて、3D 図化して視覚的に確認することが可能である。

以上より、地層処分場の地下施設における火災を対象とした避難計画の検討等において、避難シミュレーションを用いた解析手法は有用な検討手段になり得るものと考えられる。

また、今後より詳細な分析・評価を行うためには、以下のような事項を検証する必要があると考えられる。

a. 避難者属性の変化による避難の検証

負傷者がいることなどによって様々な避難速度が混在した状況を設定した検証が必要と考えられる。

b. 停車や支障物などによって狭隘部が存在する条件での避難の検証

車両が停車して避難路を狭めているような状況など、避難経路上の支障物が避難に与える影響などを分析・評価する必要があると考えられる。

c. 避難経路などの違いによる避難の検証

避難者がパニックに陥り適切な状況判断が期待できない可能性も想定し、避難経路や避難開始時間などをパラメータとした種々の条件での避難の検証が必要と考えられる。

【参考文献】

3.2.1 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

- [1] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010年度版）－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
- [2] Bilaga SR-Drift Sakerhetsredovisning for drift av slutforvarsanlaggningen Kapitel 8 Säkerhetsanalys 2011,101p
- [3] Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Volume I -III, SKB, March 2011, 550p
- [4] European Stress Tests for Nuclear Power Plants, National Report, FINLAND, (STUK)
- [5] Working Report 2009-106 Assessment of Radiation Doses in Normal Operation, Upset and Accident Conditions at the Olkiluoto Nuclear Waste Facility, POSIVA Oy, October 2009, pp.10-11, pp.18-25, pp.48-70,
- [6] Interim Summary Report of the Safety Case 2009, POSIVA Oy, March 2010, 170p
- [7] Dossier 2005 Argile Tome, Architecture and management of a geological repository, ANDRA, December 2005, pp.435-463
- [8] Yucca Mountain Repository Sar, DOE/RW-0573, Rev.1, U.S. Department of Energy, November 2008, pp.1.6-12-1.6-13, pp.1.6-15-1.6-17, pp.1.7-139, pp.1.7-148-1.7-159
- [9] Yucca Mountain Repository License Application Safety Analysis Report, U.S. Department of Energy, November 2008, pp.5.7-1-5.7-58, pp.5.11-1-5.11-6

3.2.2 地層処分施設の類似施設における安全対策技術の整理

- [1] 鉱山保安法（昭和二十四年五月十六日法律第七十号）
- [2] 鉱山保安法施行規則（平成十六年九月二十七日経済産業省令第九十六号）
- [3] 労働安全衛生法（昭和四十七年六月八日法律第五十七号）
- [4] 労働安全衛生法規則（昭和四十七年九月三十日労働省令第三十二号）
- [5] 消防法（昭和二十三年七月二十四日法律第八十六号）
- [6] 消防法施行令（昭和三十六年三月二十五日政令第三十七号）
- [7] 消防法施行規則（昭和三十六年四月一日自治省令第六号）
- [8] 道路構造令（昭和四十五年十月二十九日政令第三百二十号）
- [9] 国土交通省通達：「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）
- [10] 国土交通省通達：「道路トンネル非常用施設設置基準」（昭和56年4月21日 最新改正平成11年9月30日）
- [11] 日本鉄道建設公団青函建設局（1990）津軽可撤動線工事誌（青函トンネル）
- [12] 西日本高速道路株式会社ホームページ
- [13] 東日本高速道路株式会社ホームページ
- [14] 再処理施設安全審査指針（最新改訂：平成22年12月20日版）
- [15] 発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針（最新改訂：平成19年12月27日版）
- [16] 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）
- [17] 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）
- [18] 使用済燃料の再処理の事業に関する規則（再処理規則）

[19]核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物管理の事業に関する規則（管理規則）

[20]再処理事業所 再処理事業指定申請書 本文及び添付書類，日本原燃株式会社，平成元年3月30日申請（平成2年10月18日、平成3年5月15日、平成3年7月30日、平成4年7月3日、平成4年11月16日一部補正）、平成8年4月26日変更申請（平成8年8月30日、平成8年12月16日、平成9年6月2日、平成9年7月1日一部補正）、平成13年7月17日変更申請（平成13年12月4日、平成14年2月15日一部補正）

[21]新規制基準（設計基準）骨子案（使用済燃料再処理施設）

[22]再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

[23]廃棄物管理施設の新規制基準骨子案

[24]原子力発電所の外部火災影響評価ガイド

[25]原子力発電所の内部火災影響評価ガイド

3.3 解析条件の検討・設定

[1] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010年度版）－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

[2] 核燃料サイクル開発機構東海事業所：地層処分場のレイアウトに関する検討（研究報告），1999年11月

[3] 原子力発電環境整備機構（2004a）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，TR-04-01，2004年5月

[4] 原子力発電環境整備機構（2002c）：処分場の概要，高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料2，2002年12月

[5] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

<http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>

[6] ANDRA Agence nationale pour la gestion des dechets radioactifs : Dossier 2005 Argile, Architecture and management of a geological repository, December 2005

[7] 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，2002年6月

[8] 京都大学防災研究所 編：防災学ハンドブック，朝倉書店，2001年4月

[9] EUREKA-PROJECT EU 499: Fires in Transport Tunnels Report on Full-Scale Tests, Editor, Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., 1995.11

第4章 人工バリアの限界性能等の調査・試験

4.1 はじめに

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

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

そこで、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、次年度以降に予定している緩衝材を介した火災影響の検討に向けて、緩衝材の高温時の熱特性を把握するための加熱試験を行い、データを取得した。さらに、津波被害を想定し、海水の付着等による塩分の影響を受けたガラス固化体キャニスタの腐食特性について文献等調査を行った。

4.1.1 既往の研究成果

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、これらの起回事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出・整理した。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」、及び「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。

4.1.2 今年度の実施内容

(1) 背景

地層処分事業操業中の異常状態や事故の影響を緩和するためには、その時の人工バリアの状況を適格に評価し、人工バリアの状況に応じた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の調査・試験は、このような観点から選定した技術開発課題である。

表 4.1.2-1 に、平成24年度成果をもとにまとめた、人工バリア構成と各種外力に対する限界性能等の把握に向けた調査・試験の概略を示す。同表には、本開発において試験項目として取り上げる優先度の評価結果も示している。今年度から、表 4.1.2-1 で優先度が高いと評価した人工バリアの熱的性質及び津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査・検討に着手する。具体的には、人工バリアの火災影響について、解析的な検討及び試験を行いデータを取得するとともに、ガラス固化体キャニスタの津波に対する腐食特性の調査を行う。

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

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

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

(2) 実施概要

前項の背景を受けて、今年度実施した項目は以下の3項目である。

- ① 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討
- ② 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握
- ③ 津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査

1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

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。今年度は、人工バリアの状態として「ガラス固化体」及び「ガラス固化体+オーバーパット」（表 4.1.2-1 の点線内）を対象に解析を行い、データを取得した。

2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握

解析的な検討においては、材料物性値を適切に設定することが信頼性を向上するうえで重要である。人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパットについては、わが国では材質のリファレンスは炭素鋼としており、その熱特性は高温時も含めて把握されている。

一方、もう一つの構成要素である緩衝材については、100℃未満の熱特性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・蓄積されていないのが現状である。

以上から、地層処分施設における火災事故を想定し、緩衝材を介したオーバーパットやガラス固化体の温度履歴に対する解析的検討の実施、及び解析結果の信頼性を向上するために、緩衝材の高温時の熱特性を取得した。

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

操業中に津波により地層処分施設に海水が流入することを想定した場合、ガラス固化体キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に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特性については既往の研究例があり、知見も得られている。しかし、本開発のように放射性廃棄物を扱う施設における津波被害を想定した過酷な塩分環境条件における腐食特性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられる。

以上から、海水付着などによる塩分の影響を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性、及び放射性物質を内包した条件での腐食特性について調査し、クライシス状態への対策技術の検討に資することとした。

4.2 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

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について検討した。

4.2.1 解析対象及び検討フロー

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

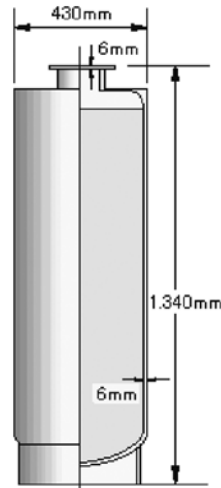


図 4.2.1-1 ガラス固化体の仕様（日本原燃(株)仕様） [1]

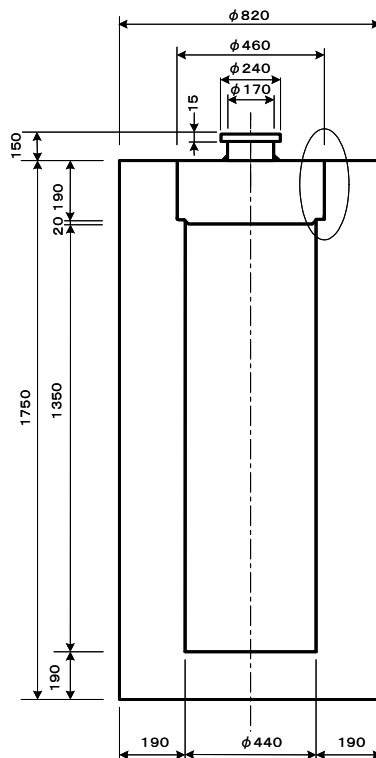


図 4.2.1-2 オーバーパックの仕様 [2]
(資源エネルギー庁 地層処分技術調査等事業の検討仕様)

表 4.2.1-1 今年度の解析ケース

解析ケース NO.	解析対象廃棄物	燃焼解析 ケース数	伝熱解析 ケース数	応力解析 ケース数
1	ガラス固化体	2	1	1
2	ガラス固化体+オーバーパック		1	1

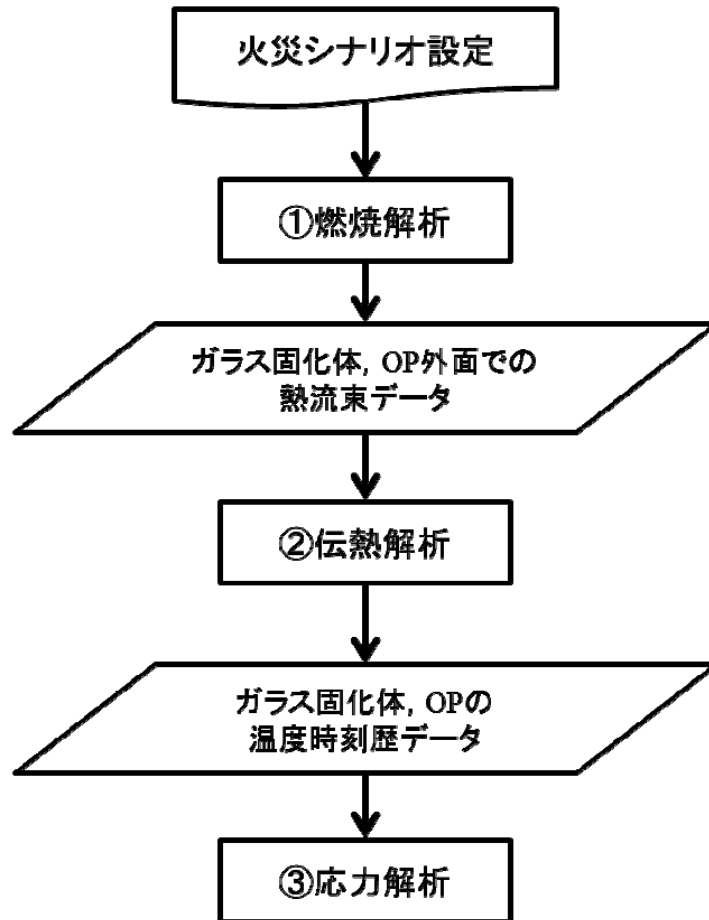


図 4.2.1-3 人工バリアの熱応力解析 検討フロー

4.2.2 解析コードの選定

(1) 燃焼解析用の解析コードの選定

燃焼解析は米国の国立標準技術研究所 NIST [3] が開発して管理している解析ソフトウェア Fire Dynamics Simulator (FDS) [4] 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 の特徴の一つとして、火災に多い低速乱流に適応できるラージ・エディ・シミュレーション (LES) が可能なことが挙げられる。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 (プールファイヤ、建屋や車両火災など) の再現には適している。燃焼は一つの総括反応を伴う燃料の酸化を計算することで表し、未燃分 (一酸化炭素) や煤発生量の計算入力データに対して流れ場、温度分布、熱流束などの解析結果が得られる。

(2) 伝熱解析、応力解析用の解析コードの選定

ガラス固化体単体及びガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析及び応力解析には、構造解析一般で広く用いられている汎用 FEM コード ABAQUS (Ver.6-11-1) を用いた。なお、後述するオーバーパックの火災解析において算入するオーバーパック蓋部の溶接残留応力についても、別途 ABAQUS を用いて解析されており [5]、ビードオンプレート溶接試験体や蓋部模擬試験体における溶接残留応力計測値との比較などによりその妥当性は検証済みである [6,7]。

4.2.3 火災シナリオの検討

火災には複数の因子が影響し、着火の原因、規模、位置や燃料の種類、分配、また、火災の種類 (自然対流、強制対流など)、火の広がり方、最大発熱量、総発熱量、換気状態、消火システム、消火活動などによって状況は大きく変わる [8]。ここでは、以下で述べるように、火災原因としては発生確率が小さいと考えられるシナリオを想定し、燃焼状況としては発熱量が多いプールファイヤを仮定した。しかし、上記の多くの影響因子によって燃焼状況は異なるため、以降の検討や結果は、ここで設定した一つの火災シナリオについてのものであることに留意する必要がある。

(1) 被災前提条件

① 火災発生の起因事象となる自然災害

地層処分施設は、海岸近くあるいは土石流、豪雨等の影響を受ける可能性が考えられる立地条件と仮定し、地震による津波や土石流、豪雨等が起因事象となり火災が発生するものとする (本項の (2) 参照)。

② 燃料

地層処分施設には非常用発電機が常備されており、その燃料は地上施設建屋外に設置された容量 30m³ の貯槽で保管されていると仮定し、これが燃焼するものとする。

③ 火災発生時の人工バリアの状態

解析ケース 1 : ガラス固化体は、直立で台車上に積載し、移送中と仮定する。

解析ケース 2 : ガラス固化体+オーバーパックは、オーバーパック内にガラス固化体を収納し、上蓋を TIG 溶接で密封溶接終了後、直立で台車上に積載し、移送中と仮定する。

(2) 火災シナリオの設定

本解析の火災シナリオ設定にあたっては、第2次取りまとめ[9]で検討された地上施設レイアウトを参考とした。第2次取りまとめの地上施設配置図を図 4.2.3-1 に示す。

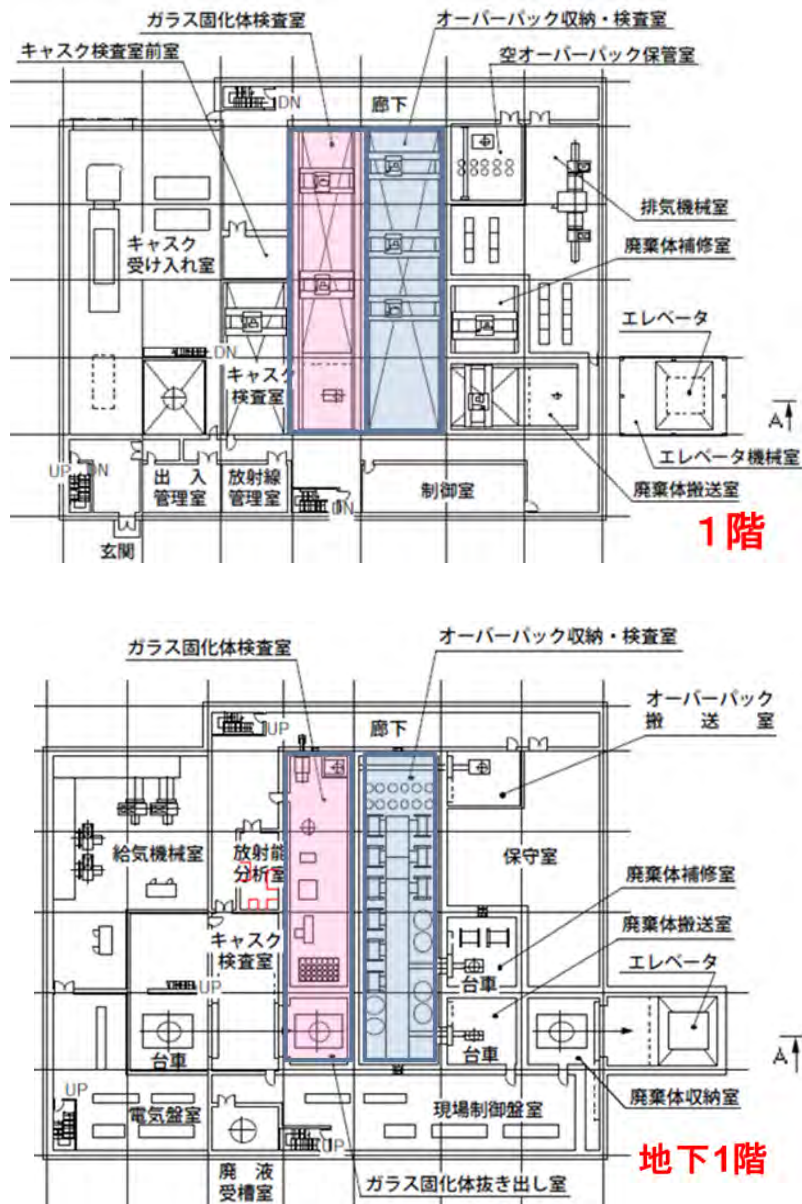


図 4.2.3-1 地上施設配置図
([9]に加筆)

図 4.2.3-1 の地上施設配置を前提として、火災発生に至るシナリオを以下の通り設定した。

- ・地震による津波、あるいは土石流や豪雨等によって、地上施設建屋外の非常用発電機用燃料タンクが押し流され、地上施設に直撃
- ・非常用発電機用燃料タンク（1基分 30m³）のディーゼル全量が建屋の1階の空オーバーパック搬入ポートから地下のオーバーパック収納・検査室へ流入
- ・流入したディーゼルが、ガラス固化体を収納したオーバーパックを搬送する親子台車の走行用のくぼみに溜まり、電気系統のショートや落下物の火花等何らかの原因で着火

本解析では、ガラス固化体単体の温度履歴や応力履歴と、オーバーパックに収納されたガラス固化体の履歴を比較するために、同じ火災シナリオを仮定した。すなわち、ガラス固化体が単体で火災影響を受ける可能性があるのは輸送キャスクから取り出されてからオーバーパックに収納されるまでの間であり、火災に遭遇する可能性の高い場所は「ガラス固化体検査室」になる。一方、オーバーパックに収納されたガラス固化体が火災影響を受けるのは「オーバーパック収納・検査室」である。それぞれの検査室は詳細なレイアウトが異なるが、大きさや機械の配置が似ていると考えられる。従って、ここでは第2次取りまとめで検討された地上施設を参考に、オーバーパックの収納・検査室を火災の解析対象エリアとし、台車の上にはガラス固化体、またはオーバーパックに収納されたガラス固化体が置かれているものと仮定した。

解析の対象エリアとしたオーバーパック収納・検査室は第2次取りまとめの施設レイアウト案等を参考に、寸法等を設定した。すなわち、オーバーパック収納・検査室は長さ 33.6m、幅 10m、高さ 17m の空間とし、溶接機や検査機が置かれているものとした。扉は3箇所を設置されているが、火災中は破損等により開放の状態にあり、圧力バランスの関係でガスの流入出が可能であると仮定した。また、オーバーパック収納・検査室は地上施設建屋の一部として地下階に配置されており、閉じ込め性と遮へい性を確保するための厚いコンクリート壁や気密扉・遮へい扉で外部から何重にも隔離されているものとした。したがって、オーバーパック収納・検査室が建屋の外とつながるまでは収納・検査室体積の数倍以上の空間があり（図 4.2.3-1 を参照）、相当の距離と多くの障壁があるため、火災時にオーバーパック収納・検査室に建屋外の空気が直接流入することは無いものと仮定した。

また、換気については、火災中は安全ダンパの作動等によりシステムは停止しているものと仮定した。これは、消防法上は、火災が発生した場合には、基本的に換気を停止する（換気システムに自動停止機能が付加されている）ことに準拠したものである。一方で、放射性物質を取扱う施設や部屋は、一般に、放射性物質の閉じ込めの観点から負圧で管理されており、これを保つために火災時においても換気機能の維持が求められることも考えられる。換気による負圧（閉じ込め）の維持と換気停止による窒息消火の関係のバランスは非常に難しい問題と考えられる。現時点では明確な基準は見あたらない。今後、既存の原子力関連施設（再処理施設や廃棄物管理施設など）における火災防護に係る検討結果などを踏まえ、火災時の換気の維持・停止について様々なルールが明らかになると考えられる。このような成果を勘案したさらなる検討も必要と考えられる。

ガラス固化体またはガラス固化体を収納したオーバーパックを、移動させるための親子台車は、オーバーパック収納・検査室の中央部のくぼみ部分を走行するものとした。

設定した火災シナリオのイメージを図 4.2.3-2 に示す。

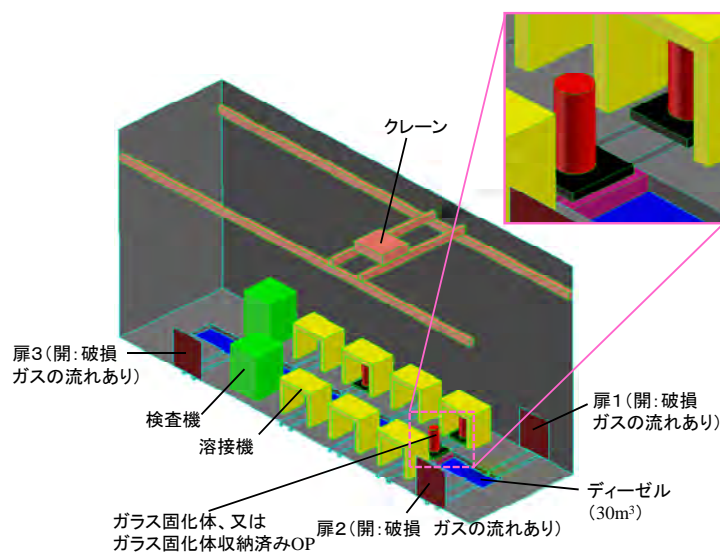


図 4.2.3-2 火災シナリオのイメージ

4.2.4 解析モデルの作成

(1) 解析モデル (燃焼解析)

オーバーパック収納・検査室の全域を対象とした解析（以降、この解析を「全検査室の解析」と称す）を実施する前に、部屋の一部を対象に試し計算を実施し、燃焼モデルの一つである煤の発生量が解析結果へ及ぼす影響を検討した（以降、この解析を「一区切りの解析」と称す）。煤の発生量は燃料種類や空気との混合状態によって変わる。一般に、ディーゼルに含まれている成分からは 0.008g/g 燃料から 0.12g/g 燃料の煤が発生するとされている [10]。FDS の煤の発生量の標準値は 0.01g/g 燃料であり、McGrattan らは 0.02 から 0.04g/g 燃料の値を用いている [11]。そこで、煤発生量 0.01g/g 燃料及び 0.1g/g 燃料の2条件について燃焼解析を実施し、ガラス固化体周囲のガス温度や熱流束を比較した。その結果、煤発生量が少ないほうが発熱量や廃棄体周囲温度が高くなることが分かった。この結果を踏まえ、全検査室の解析では、廃棄体への火災影響がより厳しくなる煤発生量 0.01g/g 燃料の燃焼モデルを用いることにした。

図 4.2.4-1 a)には、上記の一区切りの解析の計算領域を示す。オーバーパックを乗せた親子台車、その台車が移動するくぼみの中で溜まったディーゼルプール及びその左右に設置されている溶接機を示している。また、図 4.2.4-1 b)には一区切りの解析の計算格子を示す。一区切りの解析の対象とした空間は幅 10m 、長さ 4.8m 、高さ 17m である。

オーバーパック収納・検査室は、図 4.2.3-1 に示すように、地上施設の一部である。火災によって発生した燃焼ガスは扉から隣の部屋に流出するが、火災が消えた後は室内の温度が下がるため圧力も下がり、隣の部屋からガスが逆流して検査室に流れ込む。ただし、検査室に入ってくるガスは隣の部屋にあった空気と火災中に検査室から流出した燃焼ガスとの混合気体であり、その組成は未知である。このようなガスの流出入を考慮するため、全検査室の解析では、各扉の外側に幅 2m 、長さ 4.8m 、高さ 8m の空間を設けて隣の部屋の一部を模擬し、その天井に $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ の流出口を設定した。図 4.2.4-1 c) に全検査室の解析の計算領域を、図 4.2.4-1 d) にその計算格子を示す。

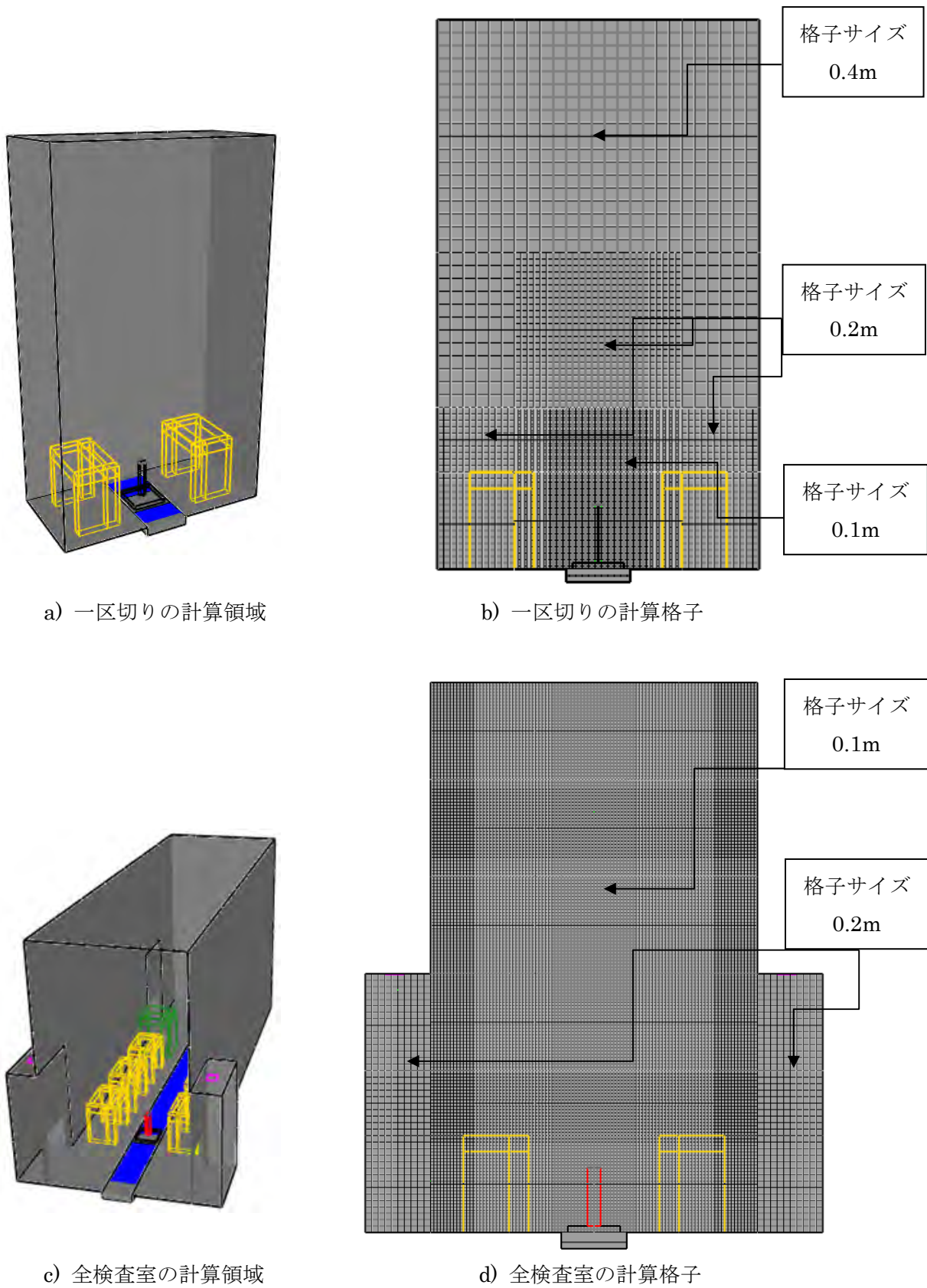


図 4.2.4-1 FDS 数値解析形状及び計算格子

FDS は解析精度を上げるために図 4.2.4-1 b)、図 4.2.4-1 d) に示すように解析モデルには直交格子を用いる。一区切りの解析では、格子サイズは火炎が形成されると考えられる空間で 0.1m、その周り（溶接機、火炎の上）で 0.2m、天井付近では 0.4m とした（図 4.2.4-1 b）。しかし、この格子サイズでは全検査室の解析の収束解が得られなかったため、図 4.2.4-1 d) に示すように、全検査室解析ではオーバーパック収納・検査室内の格子サイズは均等に 0.1m とし、扉の外側の格子サイズを 0.2m とした。

また、FDS は物体（壁、容器など）の熱容量や熱伝導を計算する機能を有していない。ただし、建物火災などでは壁を通した熱伝導で隣の部屋から熱が伝わり火を起こすことがある。そこで、壁のような物体を通る熱量を見積もるために、壁の垂直方向のみ考えて一次元の熱バランスを解くモデルが提供されている。このモデルは壁の特徴（断熱材、熱容量、熱伝導率、厚さなど）を考慮して、壁の表及び裏の温度を予測することができる。この機能を用いてガラス固化体やオーバーパックを通した熱伝導を考慮するため、図 4.2.4-2 に示すように、ガラス固化体やオーバーパックを 3 枚の平面でモデル化した。例えば、同図中の 2 枚の縦平面はふく射や対流による熱伝達を受け、それぞれ幅方向、長さ方向の熱伝導を計算し、面の表裏で温度差を持つことになる。

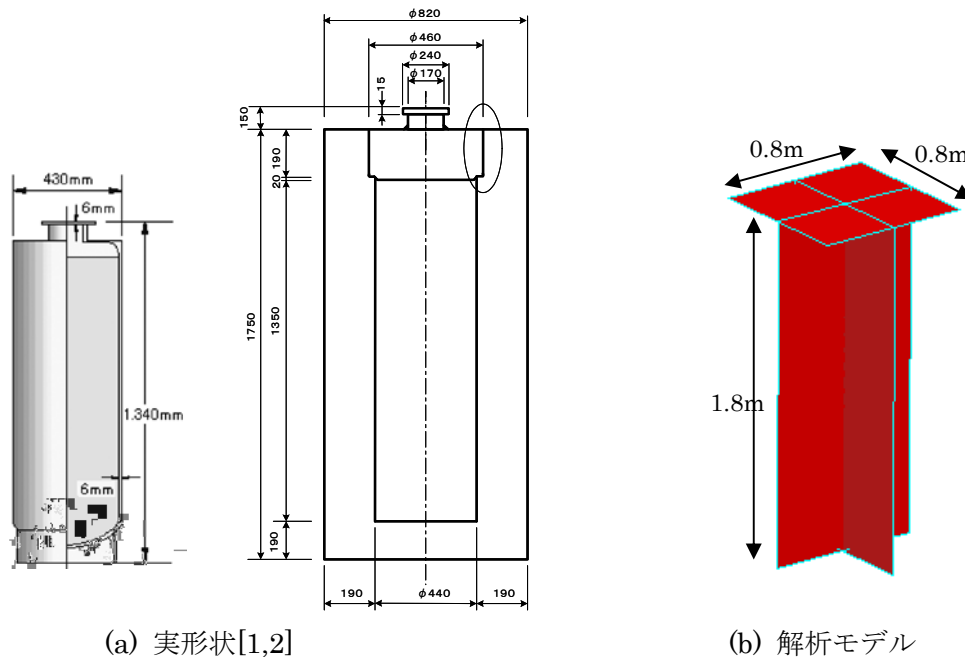
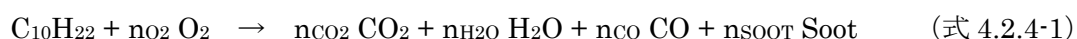


図 4.2.4-2 ガラス固化体及びオーバーパックの数値解析での再現

ディーゼルの蒸発量は大型プールファイヤの試験データ [12] に基づいて $0.04\text{kg/m}^2\text{s}$ とし、その化学反応は式 4.2.4-1 の通り与えた。



上式中の記号 $n\text{O}_2$, $n\text{CO}_2$, $n\text{H}_2\text{O}$, $n\text{CO}$, $n\text{SOOT}$ はそれぞれ酸素、二酸化炭素、水蒸気、一酸化炭素、煤の化学量論係数であり、それぞれの値は煤発生量に応じて表 4.2.4-1 に示すように設定した。一酸化炭素の化学量論係数 $n\text{CO}=0.51$ は空気との混合割合における平衡状態を参考に設定した。煤の発生率は空気とディーゼルの混合状態に強く依存するため、全検査室の解析では、熱的に

厳しい状態を起こす $n_{SOOT}=0.12$ を用いた。この時のその他の化学量論係数は分子量のバランスから $n_{O_2}=15.13$, $n_{CO_2}=9.37$, $n_{H_2O}=11$ となる。

表 4.2.4-1 総括反応 (式 4.2.4-1) の化学量論係数

煤発生量 [g/g 燃料]	n_{O_2} [モル]	n_{CO_2} [モル]	n_{H_2O} [モル]	n_{CO} [モル]	n_{SOOT} [モル]
0.01	15.13	9.37	11.00	0.51	0.12
0.1	14.06	8.31	11.00	0.51	1.18

一般に、室内の火災においては、酸素濃度による可燃限界の変化を考慮しなければならない。酸素濃度が減ると燃料の反応性は低下し、酸素濃度がある値を下回ると化学反応が止まって火災が消炎する。図 4.2.4-3 には、その限界酸素濃度の温度依存性を示すが、FDS ではこの可燃限界が考慮されている。局所的に酸素濃度が可燃限界を下回ると、その計算セルでは燃焼反応ではなく、燃料と周囲の既燃ガスや空気との混合を計算する。

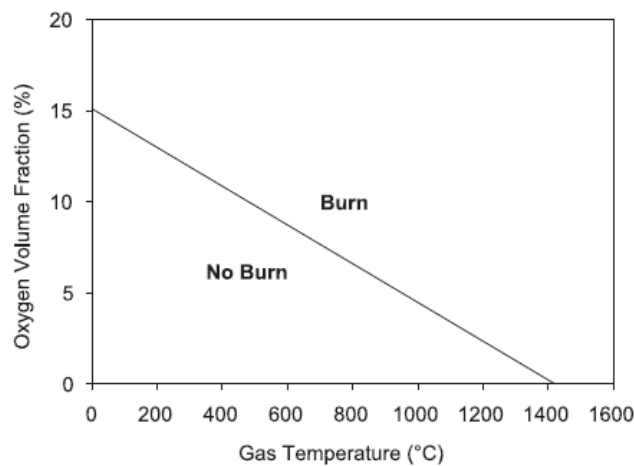
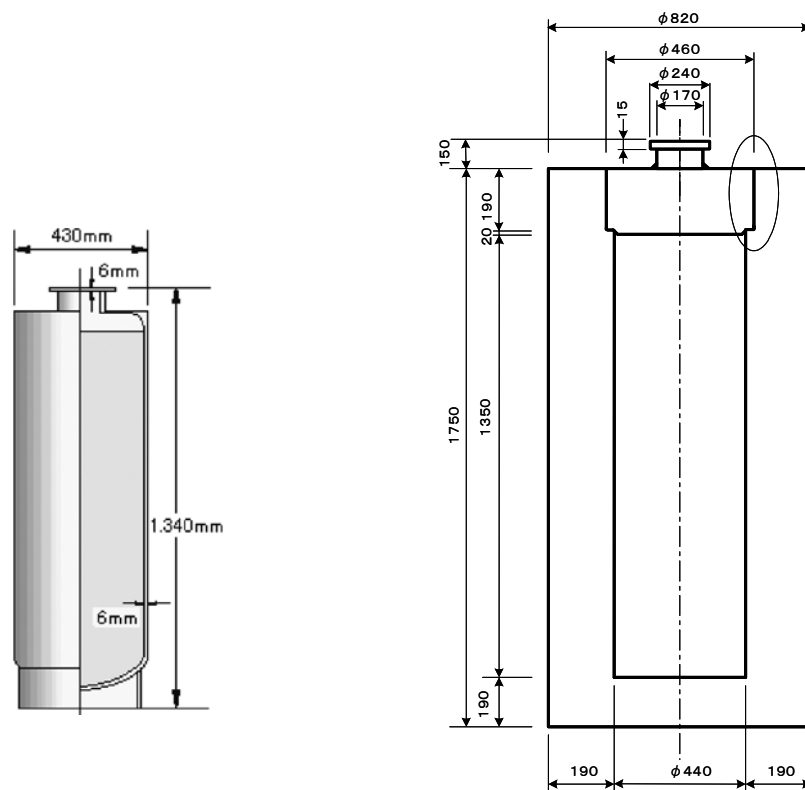


図 4.2.4-3 ガス温度による可燃範囲の変化 [12]

流れ場は、オーバーパックの直径 (0.8m) と空気の動粘性係数 (450°Cの空気は $7.3 \times 10^{-4} m^2/s$) を考慮し、またオーバーパック周りの流速を 2m/s と仮定すると、レイノルズ数が 2.2×10^5 となるため、乱流場である。乱流の数値解析手法では、計算格子より大きな渦を厳密に再現できるラージ・エディ・シミュレーションを用いた。また、燃焼の数値解析手法は、流れの乱れの影響を受ける蒸発燃料の酸素との接触面の揺らぎを考慮する火炎片モデル [13] を用いた。さらに、ふく射の数値解析手法は、有限体積法 (Finite Volume Method) を用いた [12]。

(2) 解析モデル (伝熱解析/応力解析)

解析対象となる①ガラス固化体単体、及び②ガラス固化体+オーバーパック形状を図 4.2.4-4 に示す。これらのモデル化においては、燃焼解析の結果得られるモデル表面からの入熱分布の非対称性を模擬することを想定し、①及び②の 360 度全周モデルを作成した。伝熱解析では、燃焼解析の結果得られるガラス固化体周辺ないしオーバーパック周辺温度の時刻歴変化を境界条件として外面に与えることとした。図 4.2.4-5 及び図 4.2.4-6 にそれぞれガラス固化体単体、及びガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析に用いた FEM モデル図を示す。図中の赤線は、ガラス固化体容器内のガラス上面位置を表している。応力解析においては、ガラス固化体やオーバーパック内の空気層の影響は無いものと見なし、伝熱解析に用いた FEM モデルのうち、空気層をモデル化した要素を削除したモデルを使用した。また、後述する②ガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析結果では、ガラス固化体の温度にはほとんど変化が見られなかったため、応力解析はオーバーパックのみをモデル化して行った。

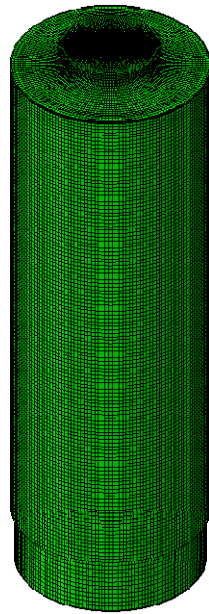


(a) ガラス固化体[1]

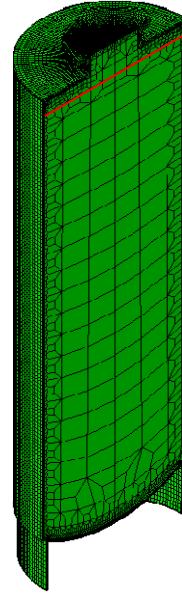
(b) オーバーパック[2]

(日本原燃(株)仕様) (資源エネルギー庁 地層処分技術調査等事業の検討仕様)

図 4.2.4-4 伝熱解析に用いたガラス固化体、オーバーパック形状図

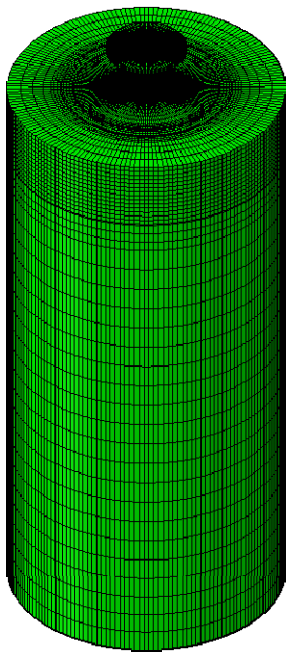


(a) 全体モデル

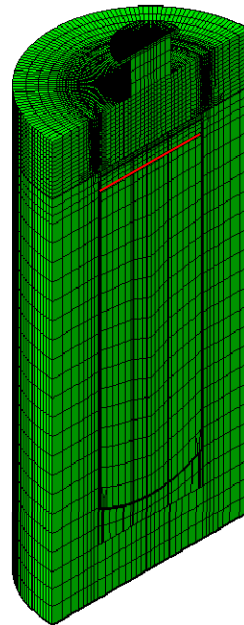


(b) 1 / 2 断面図

図 4.2.4-5 ガラス固化体の伝熱解析用 FEM モデル



(a) モデル全体図



(b) 1 / 2 断面図

図 4.2.4-6 ガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析用 FEM モデル

4.2.5 解析条件の設定

(1) 解析条件（燃焼解析）

- 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。

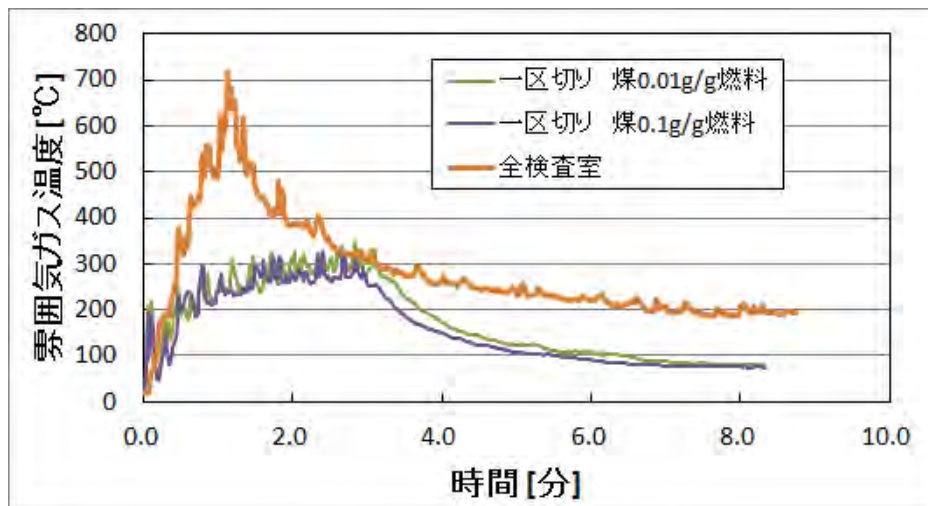
室内温度	20℃
② 空気	
O ₂	21mol%
N ₂	79mol%
③ ディーゼル	
C ₁₀ H ₂₂	100%
蒸発量	0.04kg/m ² s
CO 発生量	0.1g/g 燃料
煤発生量	一区切り解析：0.01g/g 燃料及び 0.1g/g 燃料 全検査室解析：0.01g/g 燃料

(2) 解析条件（伝熱解析／応力解析）

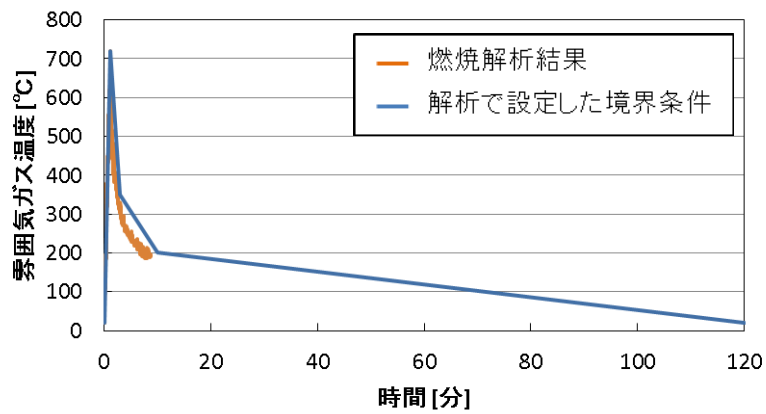
FDS を用いた燃焼解析結果のうち、全検査室の解析で得られた雰囲気ガス温度の時刻歴データを元に加熱曲線を設定し、伝熱解析における熱境界条件として用いた。図 4.2.5-1 に燃焼解析によって得られたモデル外面の雰囲気ガス温度時刻歴変化の解析結果、及び境界条件として設定した加熱曲線を示す（燃焼解析結果の詳細は 4.2.7 項で後述する）。燃焼解析の結果からガスの流速は 2m/sec 程度であると推測されることから、モデル外面での熱伝達率を以下の式により算出し、表 4.2.5-1 に示す値を用いることとした。

ガスの密度 ρ_g	$\rho_g = \frac{101300 \times 0.0288}{R \cdot T_g}$	$R = 8.314 \text{ [J/mol} \cdot \text{K]}$
		T_g : ガス温度 [K]
		大気圧 : 101,300 [Pa]
		1mol 空気の質量 : 0.0288 [kg] と想定
レイノルズ数 Re	$Re = \frac{\rho_g \cdot V \cdot L}{\mu_g}$	V : ガス流速 (2 [m/s] と想定)
		L : モデルの代表長さ (外径 0.8[m] とした)
		μ_g : ガス粘性 (35E-6 [Pa·s] とした)
ヌセルト数 Nu	$Nu = 0.665 \sqrt{Re} Pr$	Pr : プラントル数 (0.7 とした)
熱伝達率 h	$h = Nu \cdot \frac{k}{L}$	k : ガスの熱伝導率 (0.054 [W/mK] とした)

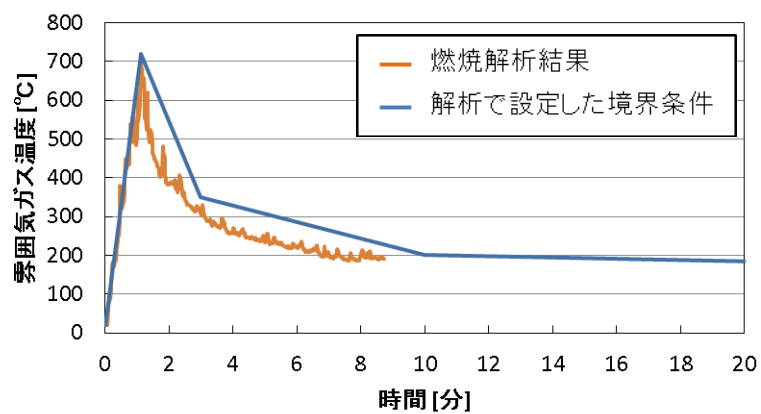
今回実施する①ガラス固化体単体の解析と②ガラス固化体＋オーバーパックの解析においては、オーバーパックの有無によるガラス固化体の火災影響の違いを比較・検討するため、両者の解析に用いる伝熱解析条件は同一とした。



(a) 燃烧解析結果まとめ



(b) 全解析時間



(c) 火災発生から 20 分経過時までの拡大

図 4.2.5-1 伝熱解析に用いた加熱曲線及び燃烧解析結果

表 4.2.5-1 伝熱解析に用いたモデル外表面の熱伝達係数のガス温度との関係

ガス温度 T_g [°C]	熱伝達係数 h [W/m ² ·K]
0	9.52
500	5.66
1000	4.41
1500	3.74

応力解析については、上述した非定常熱伝導解析結果を熱荷重として与え、次項で詳述する物性値を用いた弾塑性解析を実施した。また、ガラス固化体+オーバーパックの応力解析においては、最初のステップでオーバーパック蓋部溶接において生じる残留応力分布を初期応力として与え、その後火災による入熱を考慮した解析を行った。図 4.2.5-2 にガラス固化体+オーバーパックの応力解析でオーバーパックに与えた初期残留応力分布を示す。

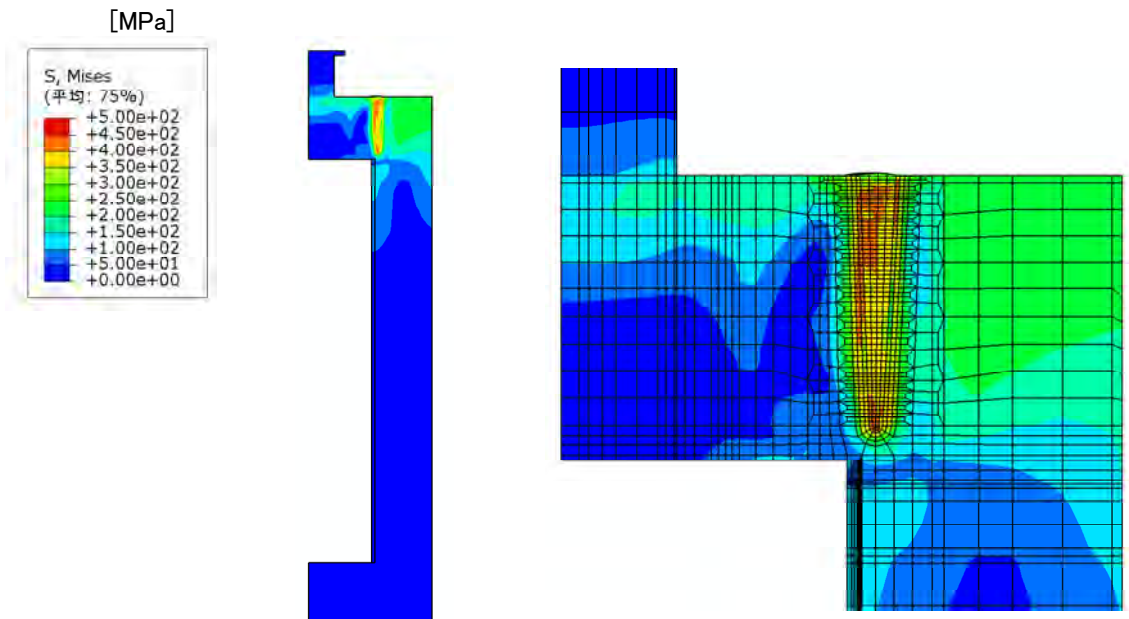


図 4.2.5-2 応力解析時にオーバーパックに与えた初期残留応力分布 [14]

4.2.6 構成要素の物性値の設定

(1) 物性値の設定 (燃焼解析)

燃焼解析には以下の物性値を用いた。

1) 密度 ρ (表 4.2.6-1)

表 4.2.6-1 構成要素の密度

構成要素	密度 [kg/m ³]
コンクリート[15,16]	2200
キャニスタ(SUS304L)(表 4.2.6-9)	7810
オーバーパック(表 4.2.6-9)*	6878

*)ガラスとキャニスタの体積を考慮した平均値

2) 熱容量 c_p

① コンクリート (表 4.2.6-2)

表 4.2.6-2 コンクリートの熱容量 [15,16]

温度 [°C]	熱容量 [kJ/kg K]
<100	0.9
100	0.9
200	1.0
400	1.1
>400	1.1

② ガラス固化体キャニスタ (SUS304L) (表 4.2.6-3)

表 4.2.6-3 ガラス固化体キャニスタ (SUS304L) の熱容量 [17]

温度 [°C]	熱容量 [kJ/kg K]
<300	0.499
300	0.499
400	0.511
600	0.556
800	0.620
1000	0.644
>1000	0.644

③ オーバーパック (表 4.2.6-4)

表 4.2.6-4 オーバーパックの熱容量 (表 4.2.6-9 より)

温度 [°C]	熱容量 [kJ/kg K]
20	0.463
100	0.479
200	0.504
300	0.538
400	0.584
500	0.638
600	0.713
700	0.875
730	0.964
735	2.117
765	0.975
800	0.900
900	0.653
1400	0.653

3) 熱伝導率 λ

① コンクリート (表 4.2.6-5)

表 4.2.6-5 コンクリートの熱伝導率 [16]

温度 [°C]	熱伝導率 [W/m K]
20	1.95
500	1.04
700	0.81
1000	0.62
1400	0.67

② ガラス固化体キャニスタ (SUS304L) (表 4.2.6-6)

表 4.2.6-6 ガラス固化体キャニスタ (SUS304L) の熱伝導率 [17]

温度 [°C]	熱伝導率 [W/m K]
<26.85	16.0
26.85	16.0
126.85	16.5
326.85°C	19.0
526.85°C	22.5
726.85°C	25.7
>726.85°C	25.7

③ オーバーパック (表 4.2.6-7)

表 4.2.6-7 オーバーパックの熱伝導率 (表 4.2.6-9 より)

温度 [°C]	熱伝導率 [W/m K]
20	49.8
100	49.6
200	48.4
400	43.2
600	38.6
800	32.4
>800	32.4

4) ふく射率 ϵ (表 4.2.6-8)

表 4.2.6-8 構成要素のふく射率

構成要素	ふく射率
コンクリート[15]	0.9
キャニスタ(SUS304L)[18]	0.93
オーバーパック(表 4.2.6-9)	0.56

(2) 物性値の設定（伝熱解析／応力解析）

1) 伝熱解析

①ガラス固化体単体、及び②ガラス固化体＋オーバーパックの伝熱解析に用いたガラス、キャニスタ（SUS304L）、オーバーパック（SF340A）及び空気の熱物性値を表 4.2.6-9 に示す。

2) 応力解析

ガラス固化体キャニスタ（SUS304L）、及びオーバーパック（SF340A）の応力解析に用いた SUS304L 及び SF340A の物性値[6,19]を図 4.2.6-1～図 4.2.6-3 に示す。物性値のうちポアソン比については、SUS304L 及び SF340A のいずれにおいても 0.3 で一定とした。また、SUS304L は弾完全塑性材料（降伏するまでは弾性材料、降伏後は降伏応力一定）として定義した。また、ガラスの物性値は以下のように定めた。

ホウケイ酸ガラスの物性値[20]	ヤング率	: 6.4E+04 [MPa]
	ポアソン比	: 0.2
	線膨張係数	: 0.325E-05 [1/°C]

表 4.2.6-9 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
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	526.85	9.40E-03
比熱	kJ/kg・K	26.85	0.73	26.85	1.007	26.85	0.499	26.85	1.007	20.00	0.463	-	-
		126.85	0.89	126.85	1.015	126.85	0.511	126.85	1.015	100.00	0.479	-	-
		226.85	1.02	226.85	1.031	326.85	0.556	226.85	1.031	200.00	0.504	-	-
		326.85	1.12	326.85	1.052	526.85	0.62	326.85	1.052	300.00	0.538	-	-
		-	-	426.85	1.076	726.85	0.644	426.85	1.076	400.00	0.584	-	-
		-	-	526.85	1.099	-	-	526.85	1.099	500.00	0.638	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	600.00	0.713	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	700.00	0.875	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	730.00	0.964	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	735.00	2.117	-	-
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	-	-
		-	-	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	-	-	-	-
密度	kg/m ³	-	-	526.85	0.441	-	-	526.85	0.441	-	-	-	-
		20.00	2.23E+03	26.85	1.176	26.85	7.92E+03	26.85	1.176	20.00	7.84E+03	-	-
		-	-	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	-	-	-	-

注：ガラス固化体及びオーバーパック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ク外側（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 4.2.5-1 に示した値を用いた。

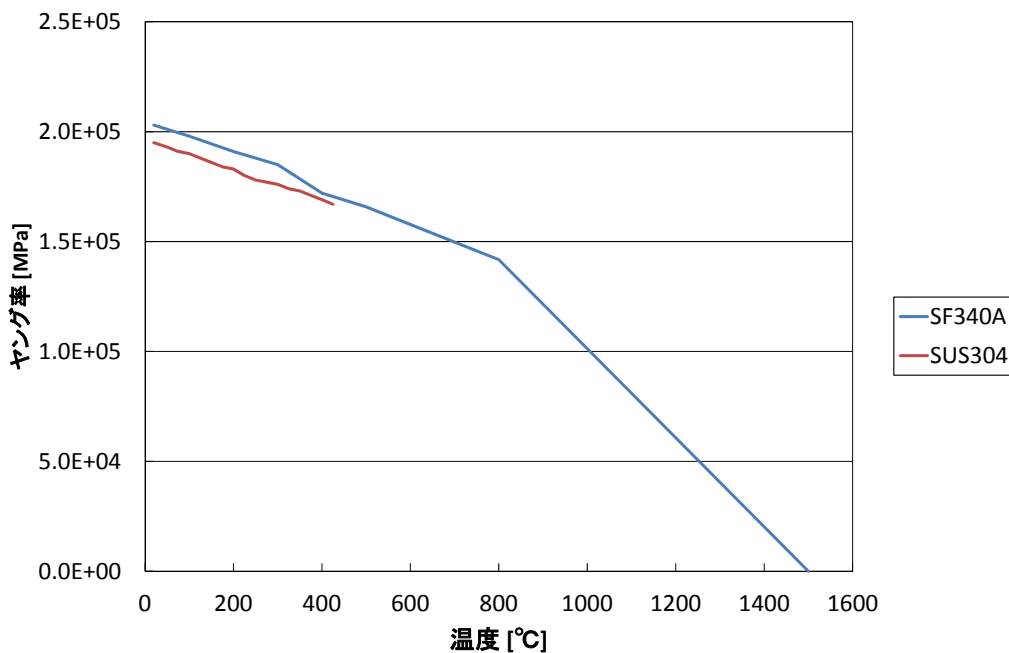
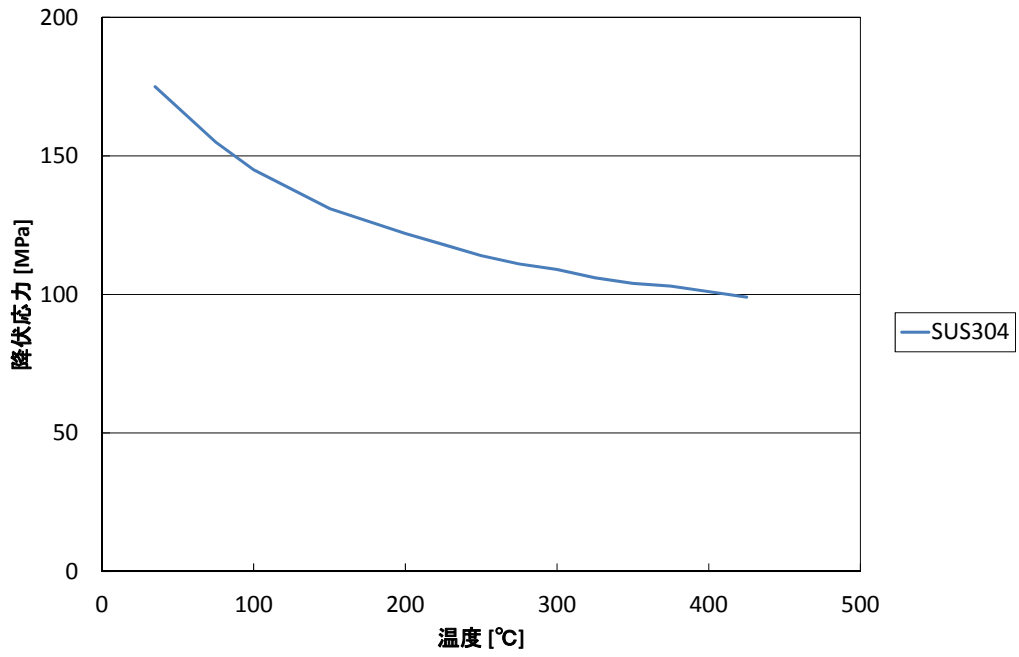
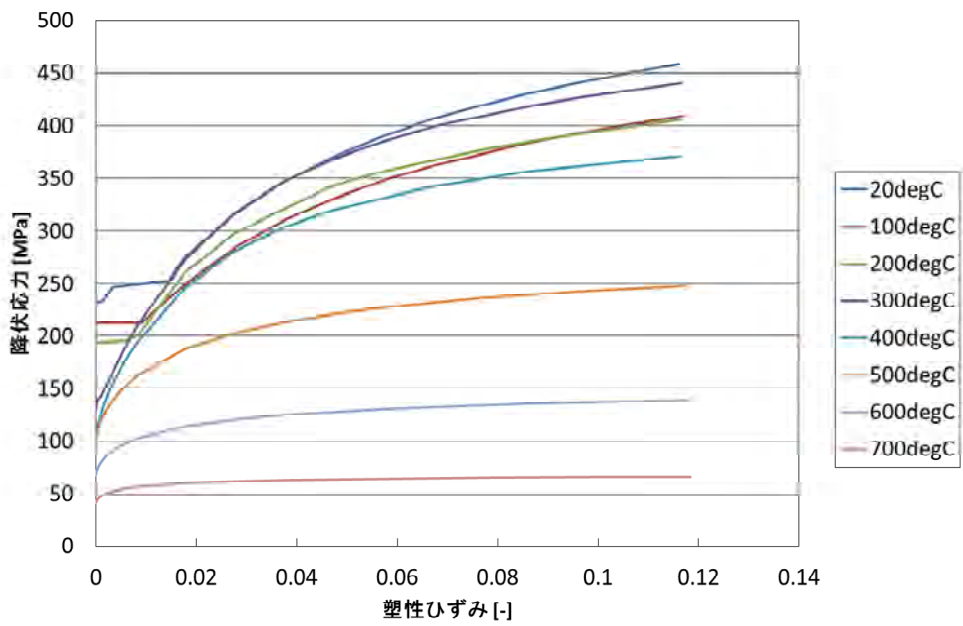


図 4.2.6-1 応力解析に用いた物性値（ヤング率）



(a) ガラス固化体キャニスタ (SUS304L)



(b) オーバーパック (SF340A)

図 4.2.6-2 応力解析に用いた物性値 (応力-ひずみデータ)

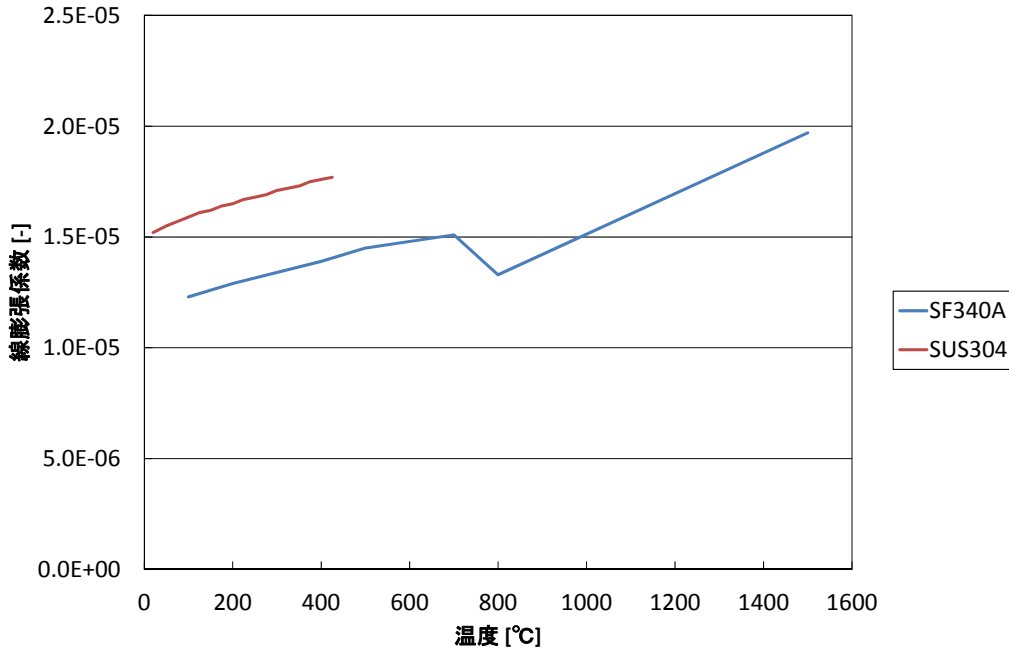


図 4.2.6-3 応力解析に用いた物性値（線膨張係数）

4.2.7 解析結果

(1) 解析結果（燃焼解析）

前述のように、全検査室の解析を実施する前に、図 4.2.4-1 a)、b)に示したモデルで一区切りの解析を実施し、煤発生量の解析結果への影響を調べた。

図 4.2.7-1 に、火災が発生した 6 秒後、つまり初期段階の様子を示す。同図の a)、b) から、煤発生量が 10 倍（0.01g/g 燃料→0.1g/g 燃料）になっても、煤の広がり方は大きく変わらないことが分かる。ただし、後掲する図 4.2.7-11 a)、b)に示すガス温度を比較すると、煤発生量が少ないほうはガス温度が高い傾向にあった。よって、全検査室の解析では、温度が高いほうが火災影響としてより厳しい条件となるため、煤発生量は 0.01g/g 燃料とした（図 4.2.7-1 c)）。

火災発生中の代表的な火災の状態を図 4.2.7-2 に示す。一区切りの解析の場合（同図 a)、b)）は、左の溶接機から右の溶接機へ向かうガスの流れが発生し、火炎が廃棄体の下部にしか触れない様子が伺える。一方、全検査室の解析の場合（図 4.2.7-2 c)）は、オーバーパック収納・検査室の長手方向の左から右へ向かうガスの流れが発生し、火炎が廃棄体全体に触れることが分かる。

図 4.2.7-3 には計算領域内の発熱量の経時変化を示す。煤発生量による発熱量（一区切りの解析）を比較すると、煤発生量が少ない条件（0.01g/g 燃料）では、60 秒あたりで一時的に発熱が落ちるが、全体的な傾向としては発熱量が高く、燃焼時間も長い。前掲の表 4.2.4-1 の化学量論係数から計算すると、煤の発生量が 0.1g/g 燃料の場合には 0.01g/g 燃料の場合に比べて酸素の消費量は約 7% ($15.13-14.06 / 15.13 \div 0.07$) 減る。酸素消費量が減る分だけ燃焼時間は延びると考えられるが、図 4.2.7-3 では逆に煤発生量が少ない場合に燃焼時間が延びる結果になっている。これは、原因は定かでないが、60 秒あたりで発熱量、つまり燃焼反応が一時的に大きく低下していることによると考えられる。一方、全検査室の解析では、発熱量の変化から火

炎は 50 秒程度で消えることが推定される。

図 4.2.7-4～図 4.2.7-6 には、廃棄体位置における、計算領域の横断面及び縦断面の温度、酸素濃度、ガス流速の瞬時分布を示す。図 4.2.7-4 と図 4.2.7-5 を照合すると、解析領域の大きさに関わらず、高温領域ほど酸素濃度が低いことが分かる。一方、図 4.2.7-6 から、ガスの流れについては、一区切りの解析（同図 a）、b）と全検査室の解析（同図 c）では傾向が異なることが分かる。すなわち、一区切りの解析の場合は側面及び天井位置でガスの流れが速い傾向にあるが、全検査室の解析の場合は炎に近いところでガス流速が最も速くなっている。この違いは空間の制限によると考えられる。一区切りの解析の場合は浮力によって燃焼ガスが上に上がり、天上に当たって反対側の側面に沿って燃料プール（台車が走行するくぼみ部分）に向かう流れが形成されたと考えられる。これに対し全検査室の解析では、燃料プールと部屋の壁との距離が、図 4.2.3-16 c)の縦断図の右側が左側に比べて短いため、燃焼ガスが距離の短い方の側面に沿って天井に上り、距離が長い方の側面に沿って燃料プールに戻るような流れが形成されたと考えられる。

図 4.2.7-7 に、廃棄体周囲の空間（幅 W2m*長さ L2m*高さ H3m）のガス平均流速の経時変化を示す。一区切りの解析結果では、煤の発生量の違いがガス流速に及ぼす影響は見られず、いずれの煤発生量でも約 200 秒の時刻でガス流速が急激に落ちることが分かる。また、幅方向の速度成分（図中の赤線）が最初の 200 秒間程度は正であり、これは流れの方向が図 4.2.7-6 a),b)で左の溶接機から右の溶接機に向かっていることを示している。一方、全検査室の解析の場合、ガス流速が一区切りの解析に比べて一桁速い期間が 1 分間ほど続くことが分かる（図 4.2.7-8）。長さ方向の速度成分（図中の緑線）が最初の 1 分間負であり、これは流れの方向が図 4.2.7-6 c)の縦断図において左から右に向かっていることを示している。また、全検査室の解析におけるガス流速は、初めの 1 分程度以降についても一区切りの解析に比べて一桁速い傾向にあった。

図 4.2.7-9 に、廃棄体の真上の空間（天井 4m）のガス流速の経時変化を示す。また、図 4.2.7-10 には、同じ領域のガス温度と化学種濃度を示す。一区切りの解析における廃棄体の真上のガス流速（図 4.2.7-9 a）は、初期段階では浮力によると考えられる速い縦方向（図中の紫線）の流れが生じ、その速度は火災発生約 10 秒後にはおおよそ 7m/s となり、さらに火災発生の約 220 秒後には 0.2m/s 程度となっている。同じ領域の酸素濃度（図 4.2.7-10 a）は、火災発生から 190 秒程度までは一定の率で消費されるが、190 秒程度以降は一定の濃度を保っている。ほぼ同時（火災発生から 190 秒程度）にガス温度も 320℃程度の値から急激に落ちることが分かる（図 4.2.7-10 a）。以上のことから、一区切りの解析においては、火災発生から 190 秒程度の時点で酸素濃度が可燃限界に達したと考えられる。

図 4.2.3-2 に示すオーバーパック収納・検査室には 1200m³ (1700kg) の酸素が含まれている。式 4.2.4-1 によれば、その酸素で 540kg のディーゼルを反応させることができる。一区切りの解析の計算領域は図 4.2.3-2 に示す全検査室解析の計算領域の約 1/7 であること、また酸素濃度が約 13mol%で消炎になることを考慮し、0.04kg/m² s のディーゼル蒸発率を用いて計算すると、一区切りの解析における燃焼時間は約 300 秒と見積もることができる。この見積時間は一区切りの解析で得られた 190 秒程度の燃焼時間と異なるが、その理由は、図 4.2.7-10 a) に示す酸素濃度が全領域における平均濃度ではないこと、また同図に示す温度も全領域にお

る平均温度ではないことによると考えられ、図 4.2.7-9 a)、図 4.2.7-10 a)に示したデータを総合して考察すると、酸素濃度による消炎が生じたと結論付けることができると考えられる。酸素濃度は 190 秒程度以降も微減する傾向がみられるが、これは 190 秒程度以降からは燃料の濃度が少しずつ増え、その分、酸素濃度が減るためである。

全検査室の解析の場合には、消炎が起きるまでの時間が短く (70 秒程度)、ガス温度が 700°C 程度と高くなるが、酸素濃度とガス温度の挙動が変化する時刻がほぼ同じである点など、全体的な傾向は一区切りの解析と同様であった (図 4.2.7-9 b)、図 4.2.7-10 b)。

図 4.2.7-11 には、一区切りの解析における廃棄体周囲のガス温度を示す。火炎が時々台車の上の空間に入り込むため、瞬間的な最高温度は 2500°C 前後となっている (同図 a))。煤の発生量が多い場合には火炎温度が下がるため、瞬間的な最高温度が低くなる傾向にある (同図 b))。一方、廃棄体周囲のガスの平均温度については、280°C 程度までしか上がらない結果であった。

これに対し、全検査室の解析では、廃棄体周囲のガスの平均温度は 450°C 程度で、一時的には 800°C 程度まで上がる結果となった (図 4.2.7-12)。

図 4.2.7-13 に、一区切りの解析における廃棄体周囲の熱流束の経時変化を示す。同図から、対流による熱流束 (図中の青線) よりもふく射による熱流束 (図中の赤線) が支配的であることが分かる。前述のように、煤発生量が多い場合にはガス温度の最大値が下がる (図 4.2.7-11 a) ; 0.01g/g:2500°C 程度、b) ; 0.1g/g:1800°C 程度) ため、熱流束も下がる結果となっている (図 4.2.7-13 a) 、b) の最初の 190 秒間の熱流束の平均値は a) ; 0.01g/g:15.1kW/m²、b) ; 0.1g/g:12.6kW/m²)。熱流束は 50 秒前後で低下する傾向がみられ、その後消炎が起こる 190 秒程度まではある平均値周りで変動している。50 秒前後で熱流束が低下する理由は、廃棄体周囲の発熱量が減るためと考えられる。すなわち、50 秒前後で幅方向の流れが強くなり (図 4.2.7-7 a) 、b))、火炎が燃料プール表面から横の方向に流れて廃棄体に当たるふく射熱が減るものと考えられる (図 4.2.7-13 a) 、b))。熱流束がその後ある平均値周りで変動するのは、煤の発生量が更に上がっても、火炎からのふく射が廃棄体に伝わらなくなり、それ以上の吸収効果が見られないためと考えられる。

図 4.2.7-14 に、全検査室の解析における廃棄体周囲の熱流束の経時変化を示す。全検査室の解析の場合は、火災中の熱流束の平均 (最初の 50 秒間) が一区切りの解析 (最初の 190 秒間) と比べて約 3 倍 (=44kW/m²/14kW/m²) ほど高いことが分かる。前述のように、発熱量の経時変化 (図 4.2.7-3) からは火災は 50 秒程度で消炎すると判断されるが、熱流束は 60 秒程度の時刻で火災中と同程度の高いピークを示している。これは、大規模な火災が消えた後にも局所的に酸素濃度が可燃限界を超え、一時的に (その酸素濃度がまた可燃限界を下回るまで) 燃料と反応するためと考えられる。

また、全検査室の解析では、熱流束は 110 秒程度の時刻において再び 40kW/m² を超える値を示している。この現象を考察するために、図 4.2.7-15 に、オーバーパック収納・検査室におけるガスの入出流量の計算結果を示す。図中、総体積流量 (紫線) は各時刻における三つの扉からガスの入出流量を合計したものであり、正の値は流出を示している。また、流入出バランス (水色線) は火災発生からのガスの総入出流量を合計したものである。図 4.2.7-15 の総体積流量みると、火災中は燃焼ガスが発生し続けるため正の値 (部屋からの流出) を示しているが、ある時刻から総体積流量は低下し始め、火災発生から 80 秒程度経過した時刻から負 (外からの

逆流)に転じることが分かる。この時刻を境に流入出バランスも低下することが分かる。オーバーパック収納・検査室と周囲の部屋とのガスの流入出を模擬するために設けた部屋(図 4.2.4-1c))は、 $3 \times 76.8\text{m}^3 = 230.4\text{m}^3$ の空間である。図 4.2.7-15 の流入出バランスのグラフからは、逆流が発生した 80 秒程度の時刻から 230.4m^3 のガスが逆流するまでの時間(流入出量が 230 m^3 程度減少するのに要する時間)は、20 秒程度かかることが分かる。このようなガスの逆流とそれによる酸素濃度の上昇によって火炎が再燃した結果、110 秒程度の時刻において熱流束が上昇したものと考えられる。なお、本解析ではオーバーパック収納・検査室に逆流してくるガスは「空気」とした。このため酸素濃度が一時的に上昇し、見かけ上火炎が再燃する結果となった。しかし、実際には逆流するガスは空気と燃焼ガスの混合気体と考えられ、その組成は未知であり、このような混合気体の流入による火炎の再燃についてはさらに検討が必要と考えられる。

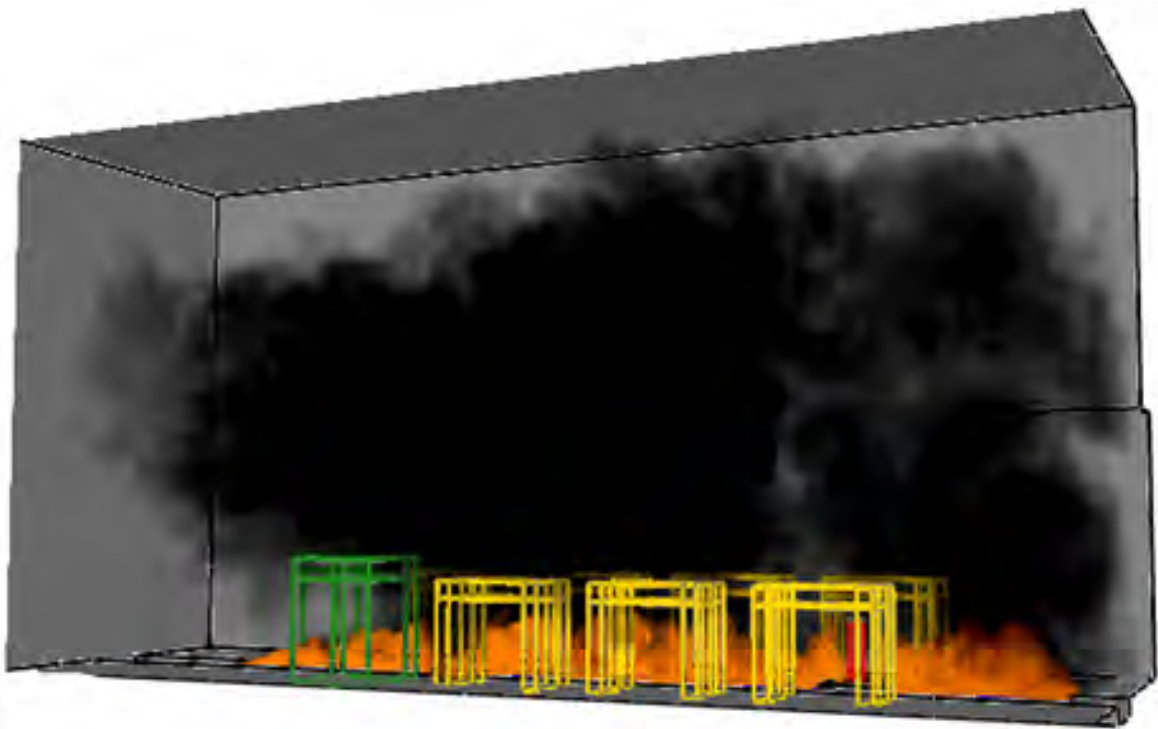
次項で述べる伝熱解析では、境界条件としてガラス固化体またはオーバーパック周囲の雰囲気温度が必要である。本項の燃焼解析では廃棄体周囲の雰囲気温度も求めた(図 4.2.7-12)が、この雰囲気温度は上述のような非現実的な空気の逆流による影響を含んでいると判断される。この点を勘案し、空気の逆流の影響が含まれていないと考えられる廃棄体の真上の空間(天井下 4m)について得られた温度履歴(図 4.2.7-10 b))を伝熱解析における境界条件として用いることにした。



a) 一区切りの解析 (煤発生量 0.01g/g 燃料)

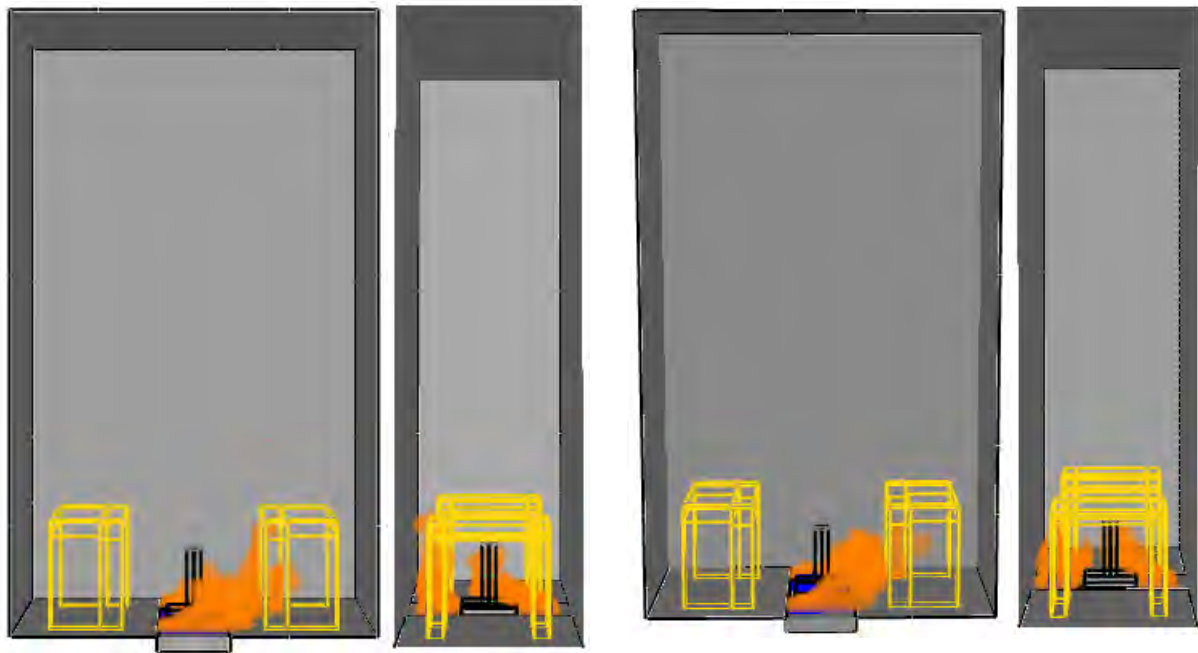


b) 一区切りの解析 (煤発生量 0.1g/g 燃料)



c) 全検査室内の解析 (煤発生量 0.01g/g 燃料)

図 4.2.7-1 火災発生 6 秒後のディーゼル燃焼の様子

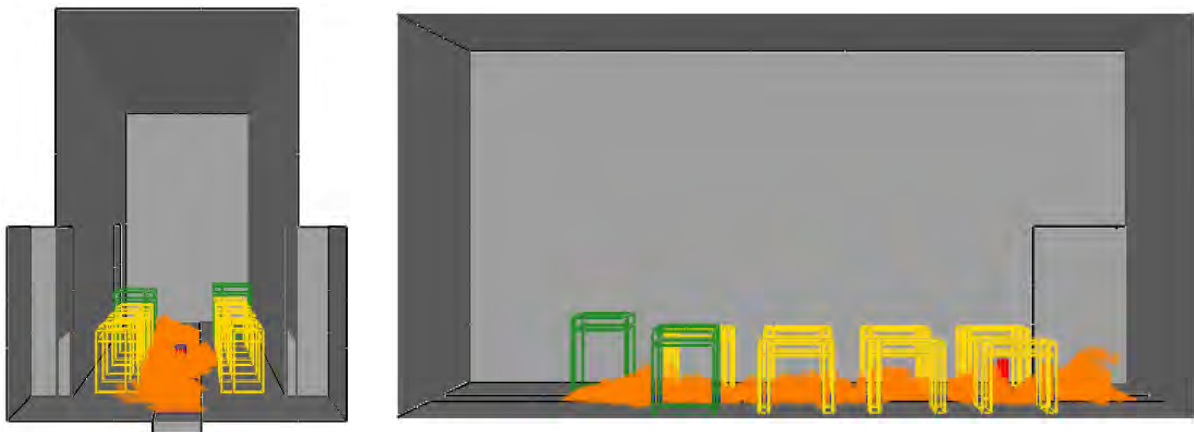


(t=120sec)

a)一区切りの解析 (煤発生量 0.01g/g 燃料)

(t=120sec)

b)一区切りの解析 (煤発生量 0.1g/g 燃料)



c) 全検査室の解析 (煤発生量 0.01g/g 燃料、t=24sec)

図 4.2.7-2 火災中の代表的な火炎形状

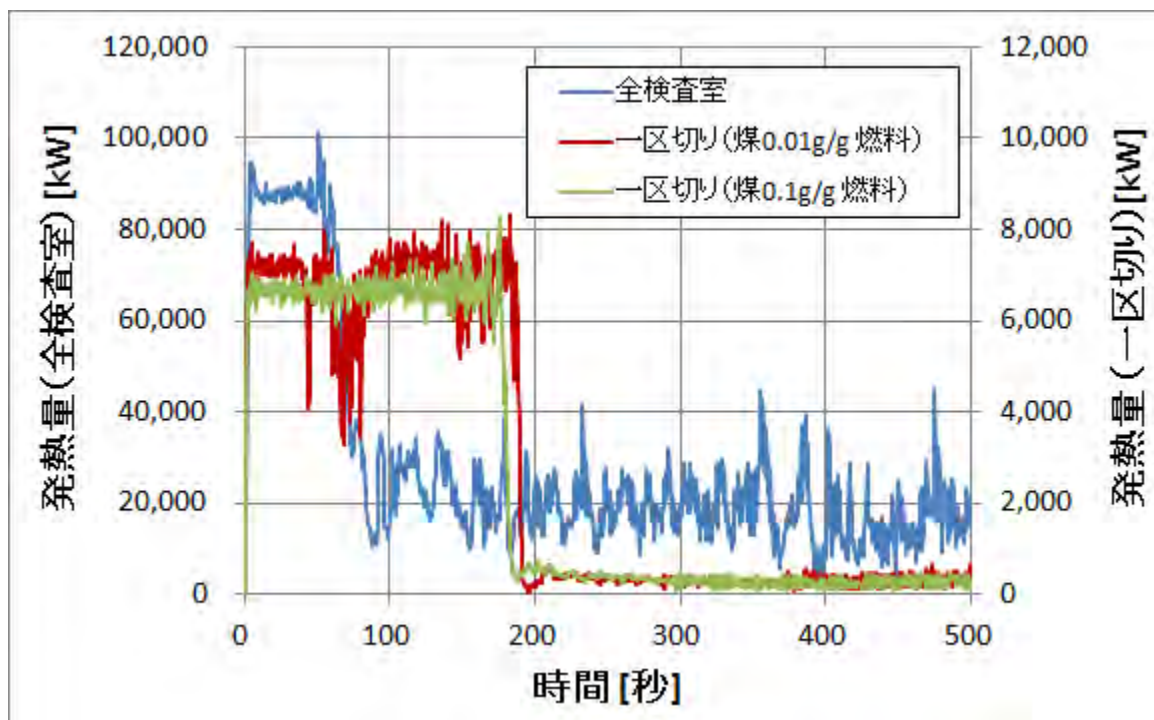


図 4.2.7-3 計算領域内の発熱量

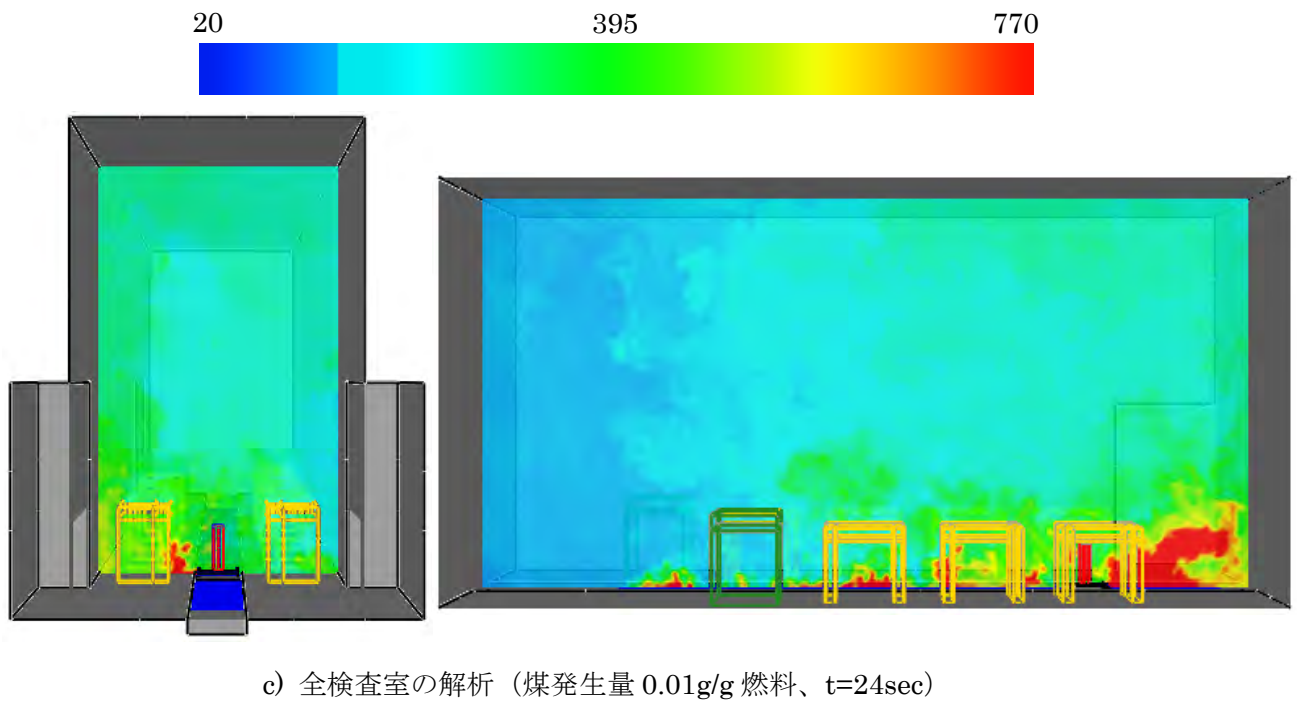
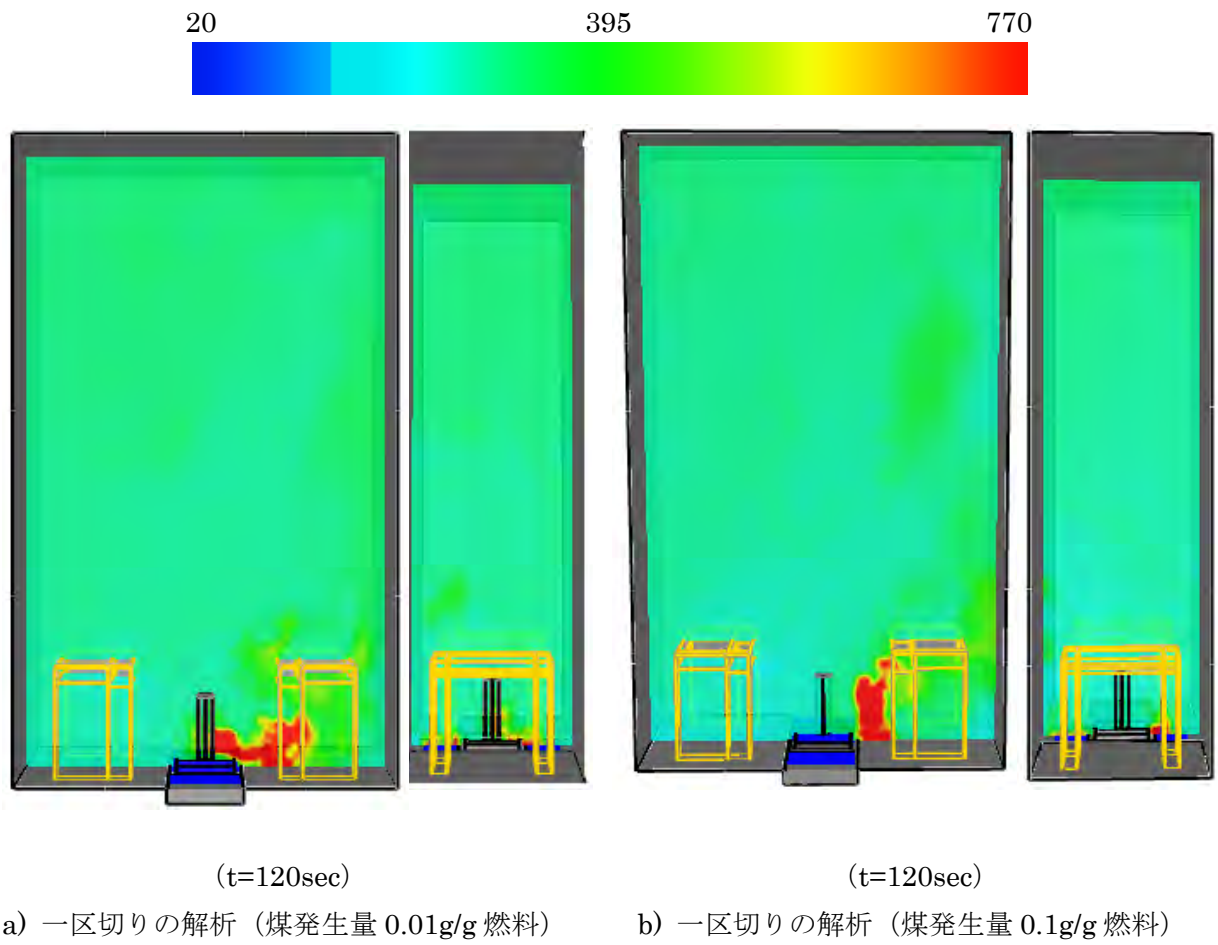


図 4.2.7-4 廃棄体位置における横断面、縦断面の温度分布 [°C]

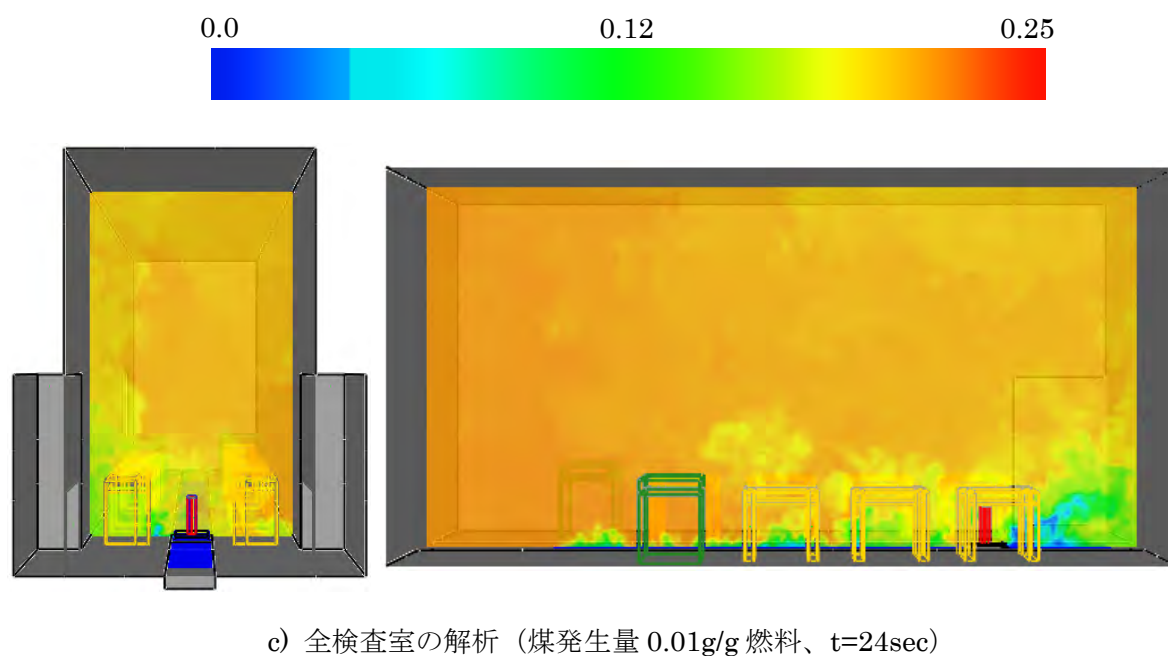
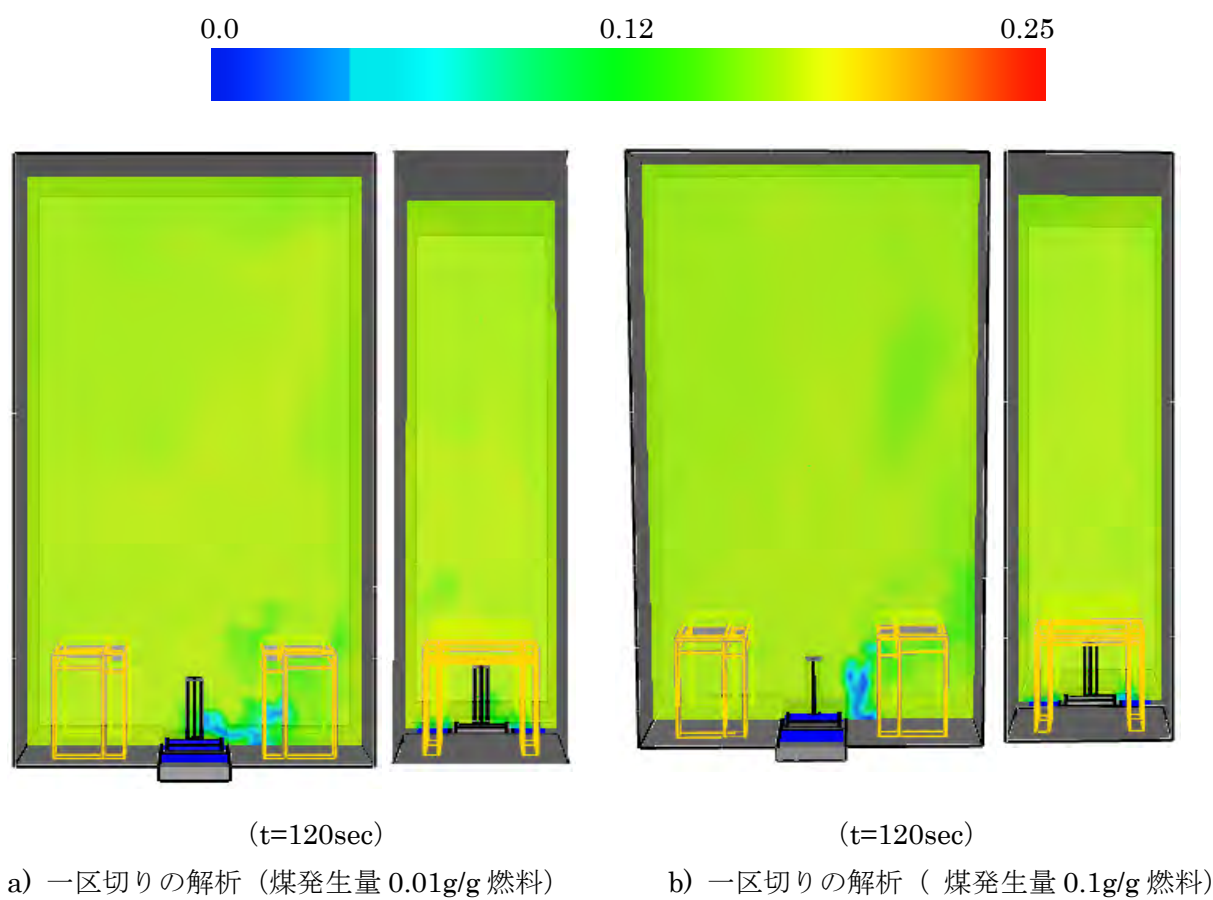


図 4.2.7-5 廃棄体位置における横断面、縦断面の酸素濃度分布 [g/g ガス]

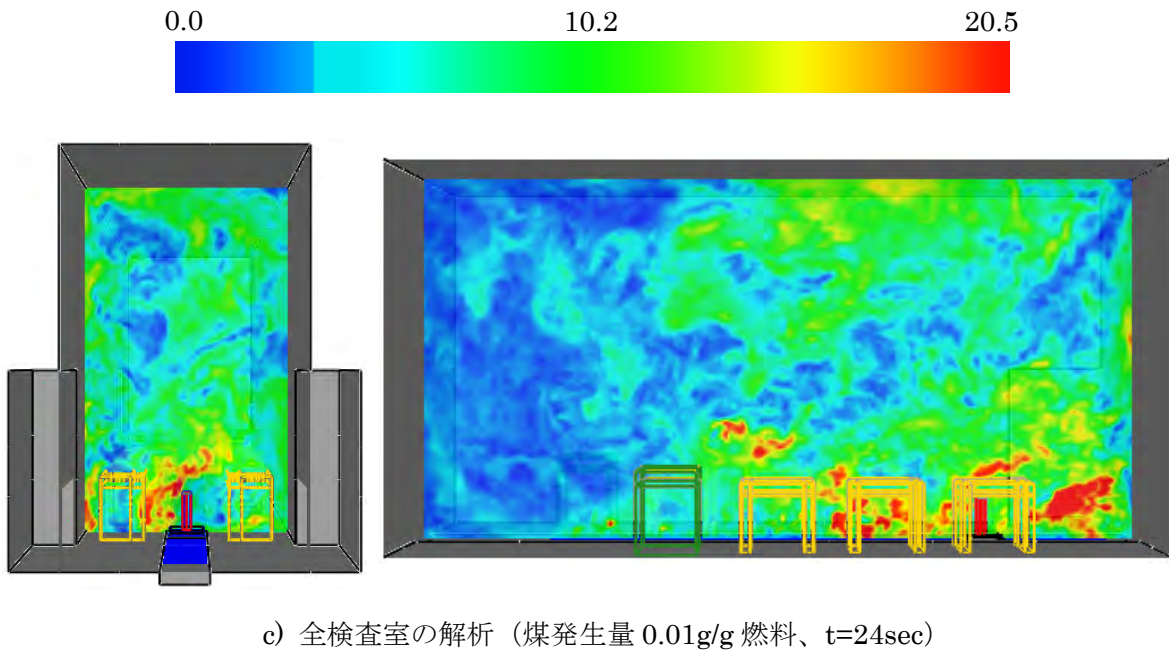
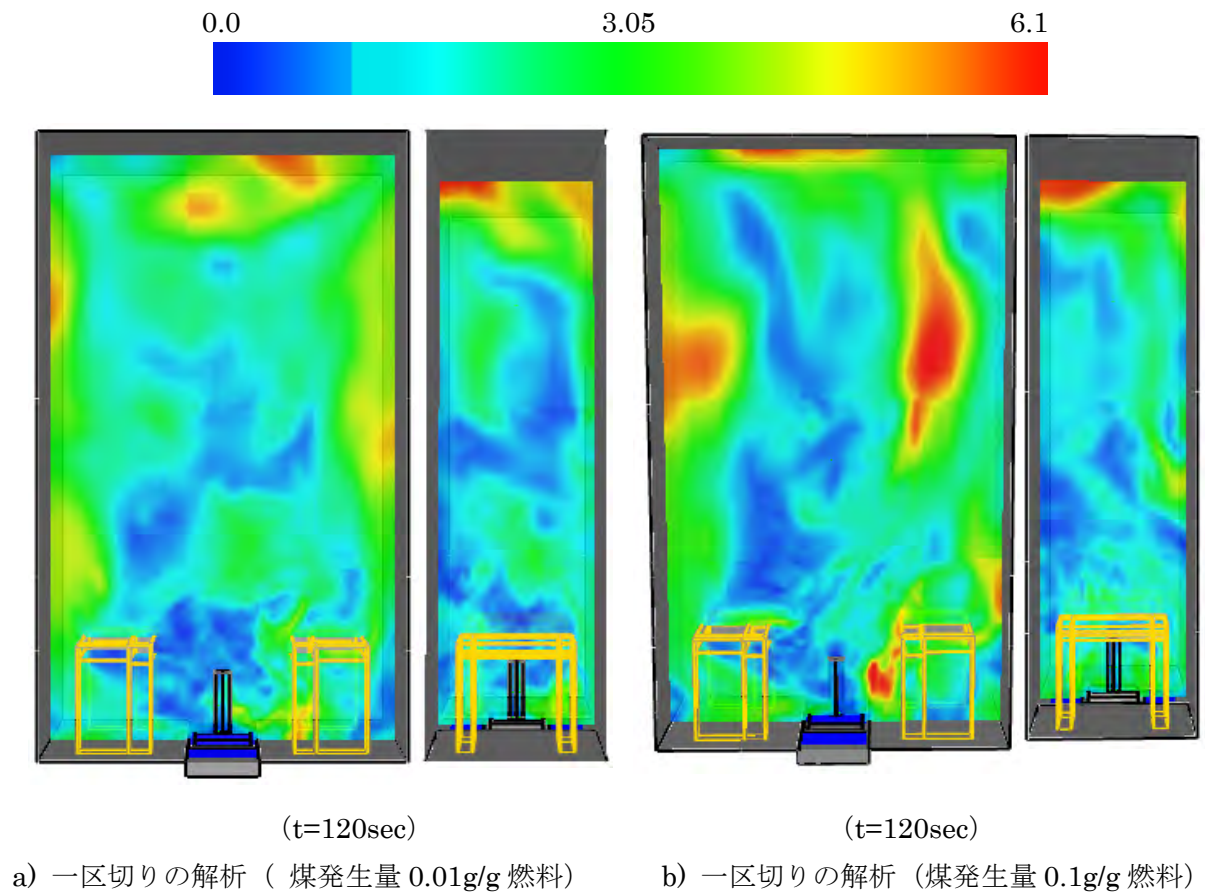
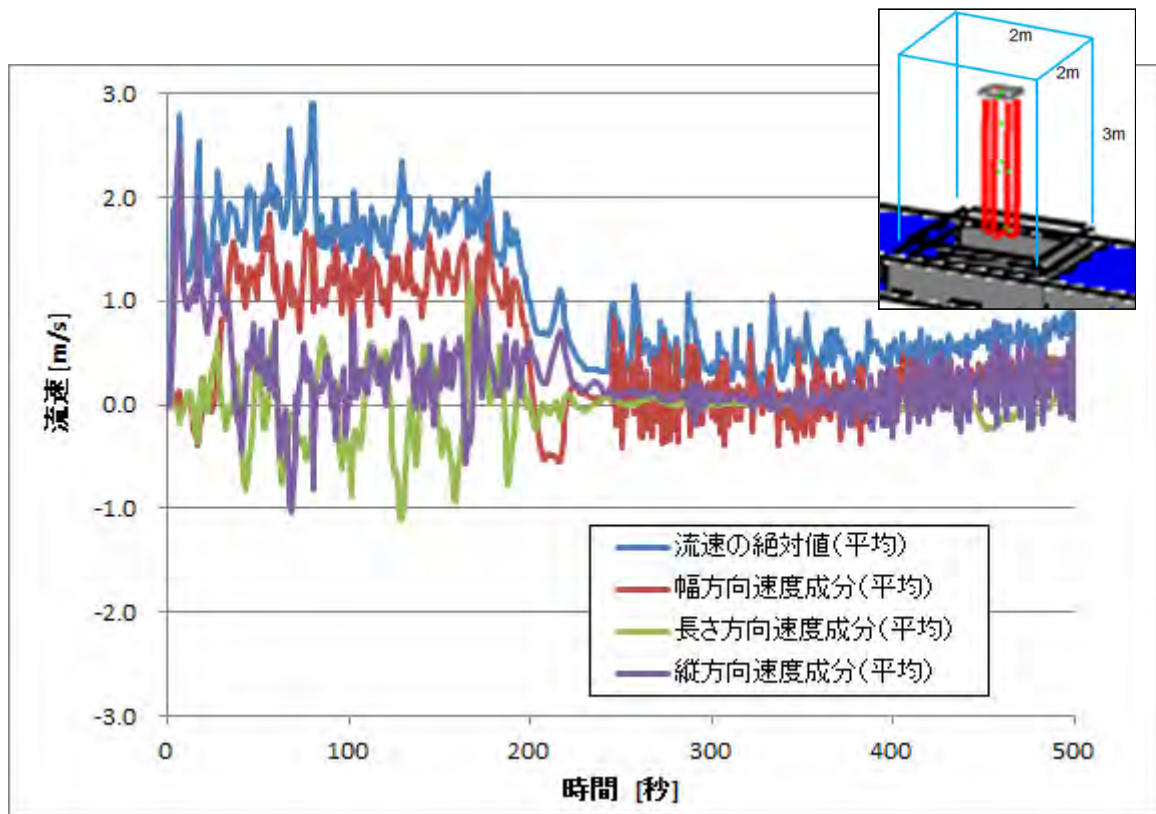
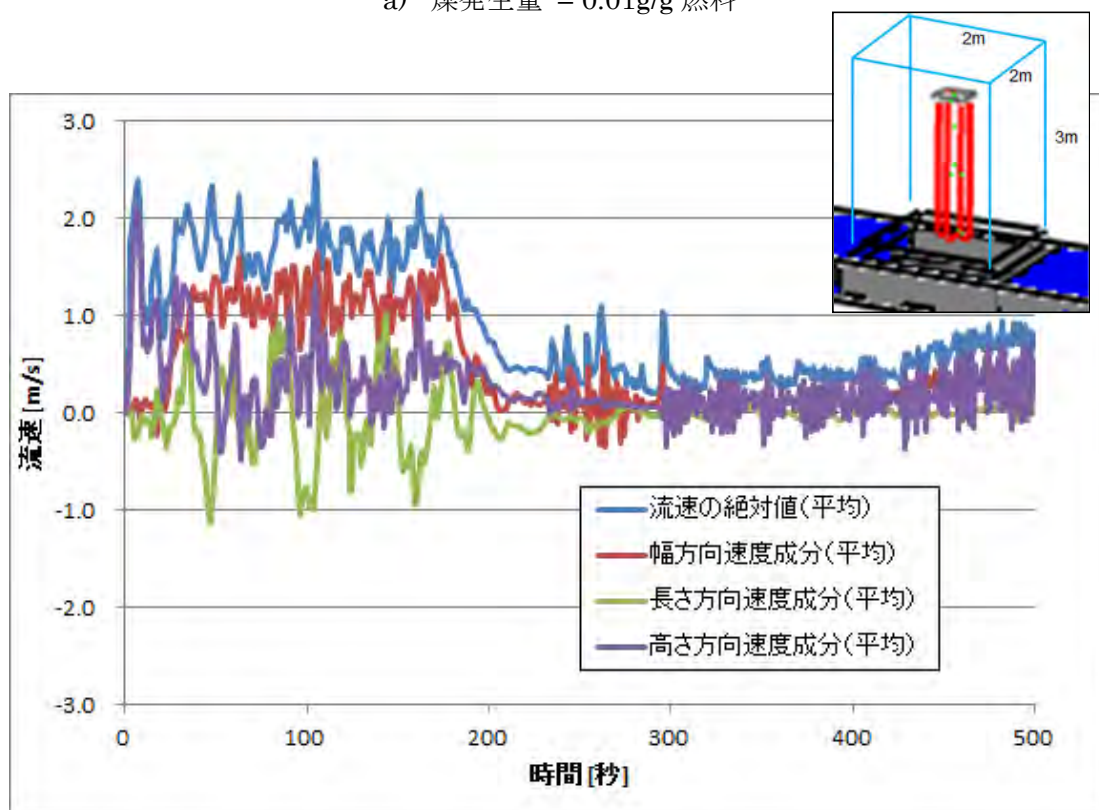


図 4.2.7-6 廃棄体位置における横断面、縦断面の流速分布 (絶対値) [m/s]

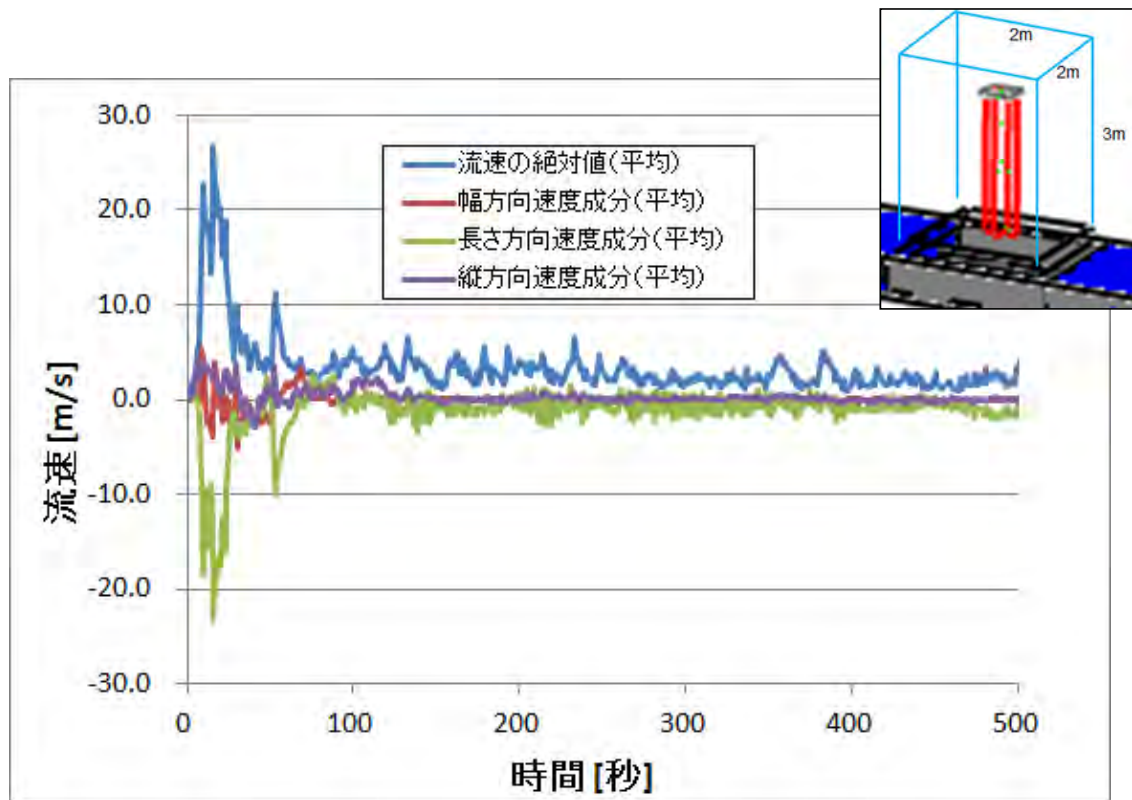


a) 煤発生量 = 0.01g/g 燃料



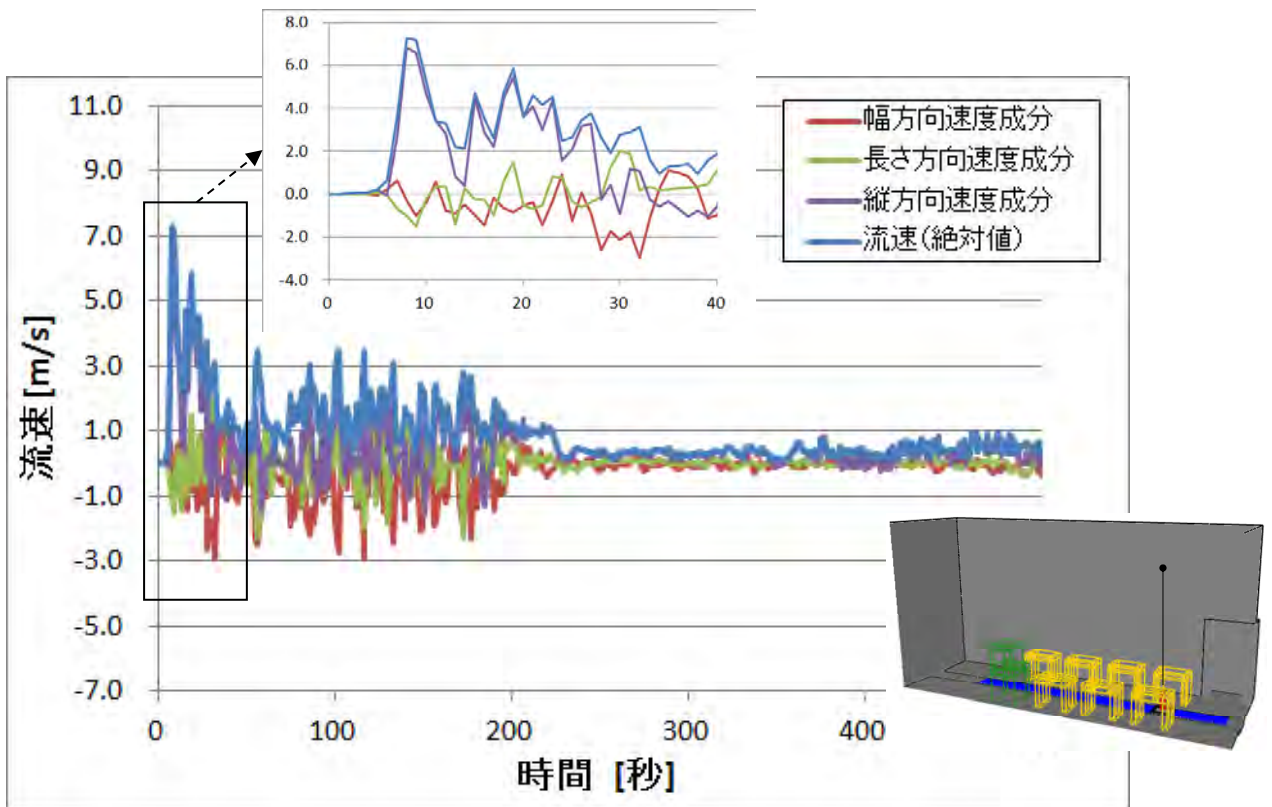
b) 煤発生量 = 0.1g/g 燃料

図 4.2.7-7 廃棄体周囲 (W2m*L2m*H3m) のガス流速 (一区切りの解析)

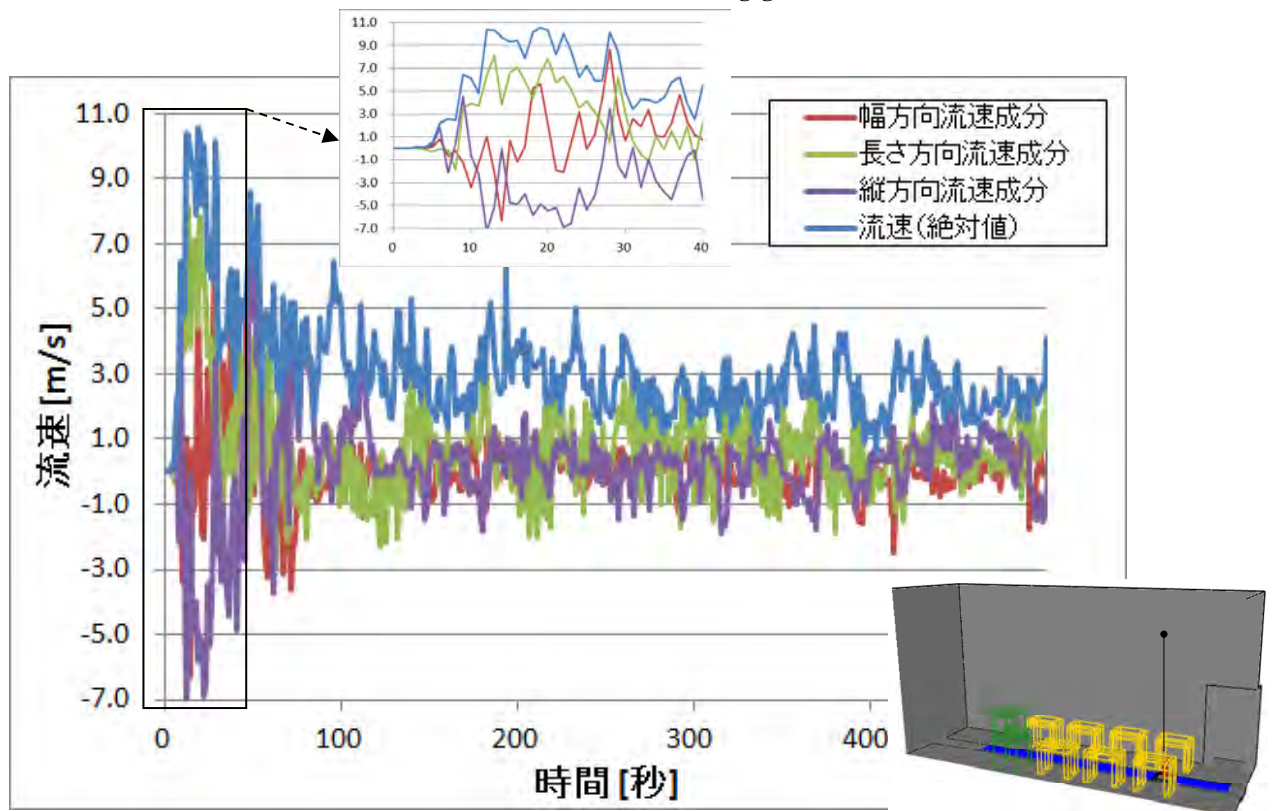


煤発生量 = 0.01g/g 燃料

図 4.2.7-8 廃棄体周囲 (W2m*L2m*H3m) のガス流速 (全検査室の解析)

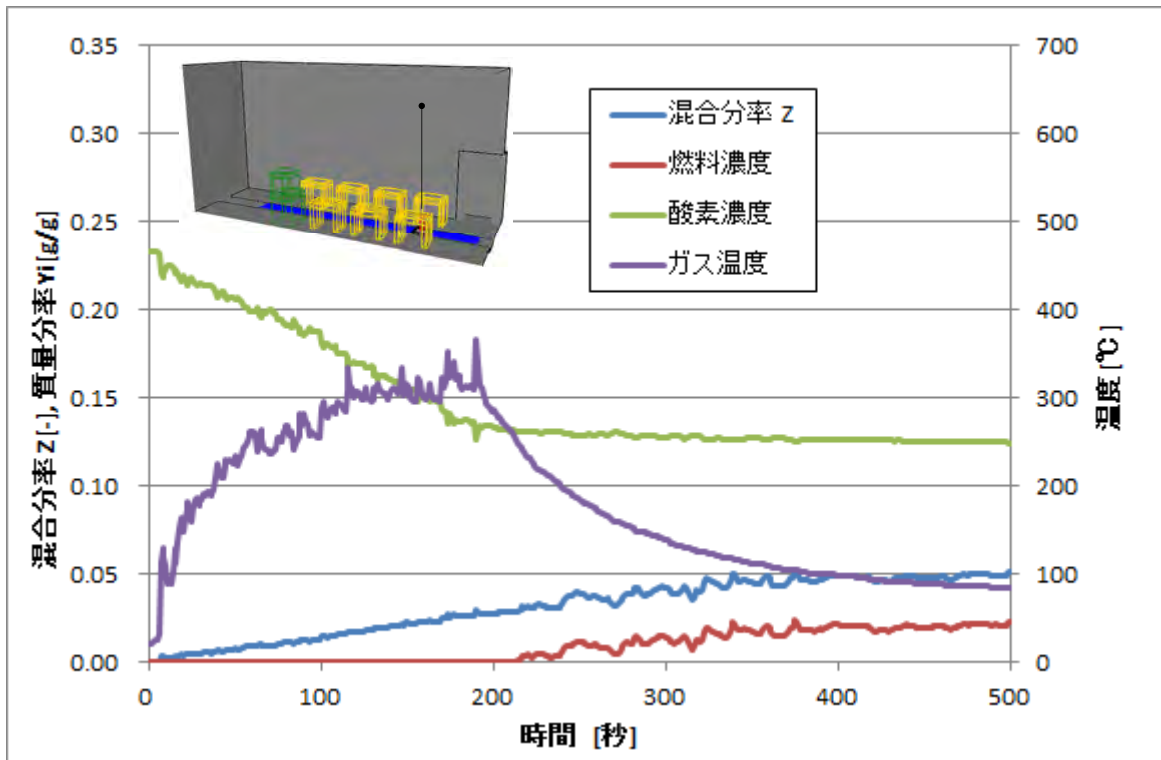


a) 一区切りの解析 (煤発生量 = 0.01g/g 燃料)

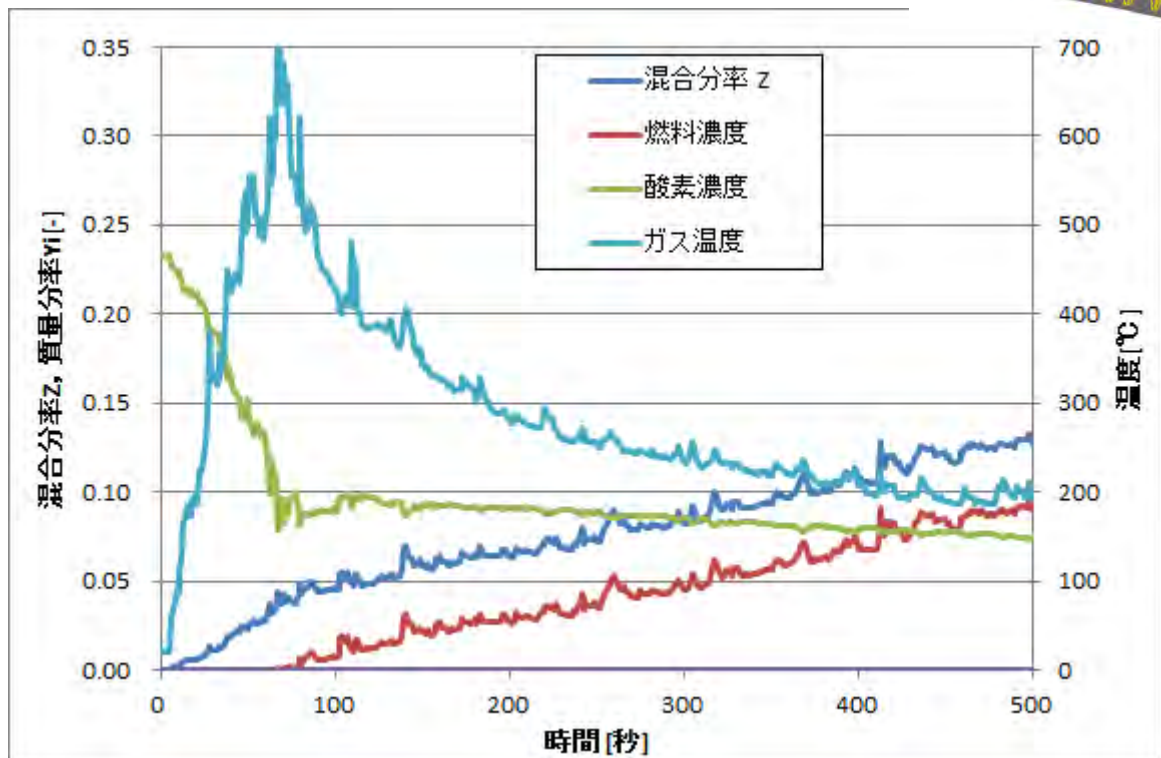
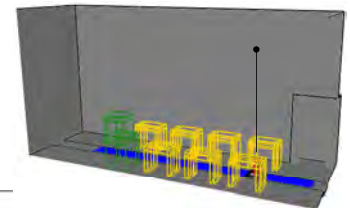


b) 全検査室の解析 (煤発生量 = 0.01g/g 燃料)

図 4.2.7-9 廃棄体の真上 (天井 4 m 下) におけるガス流速

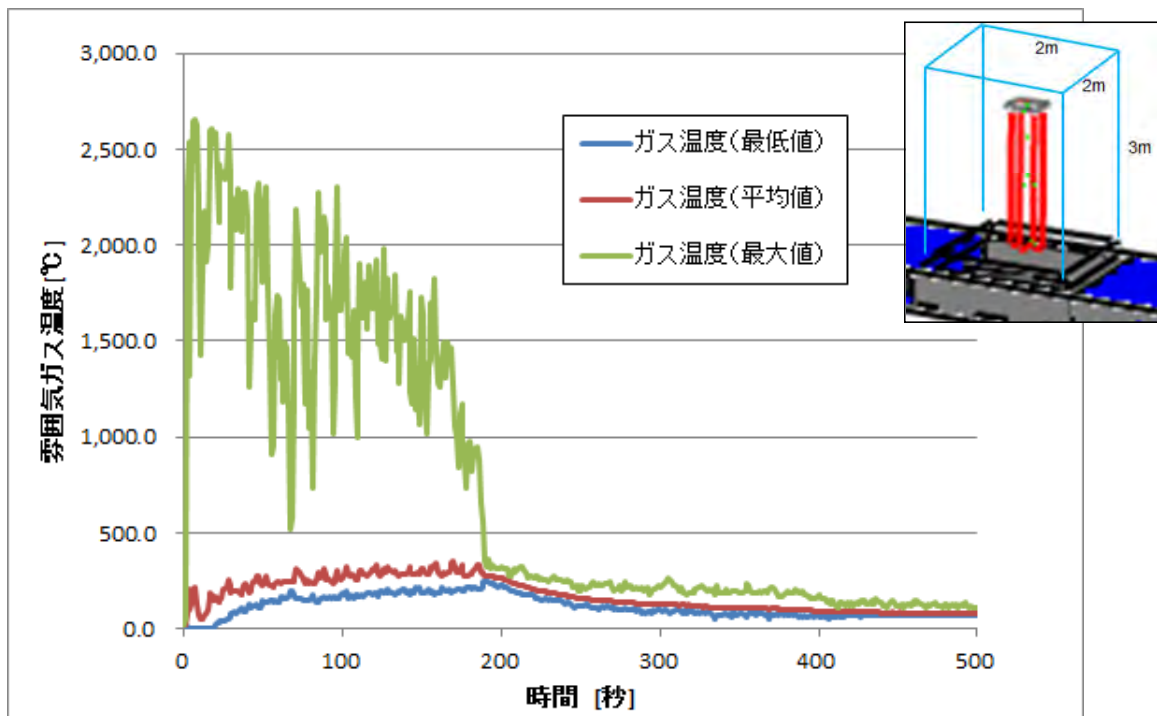


a) 一区切りの解析 (煤発生量 = 0.01g/g 燃料)

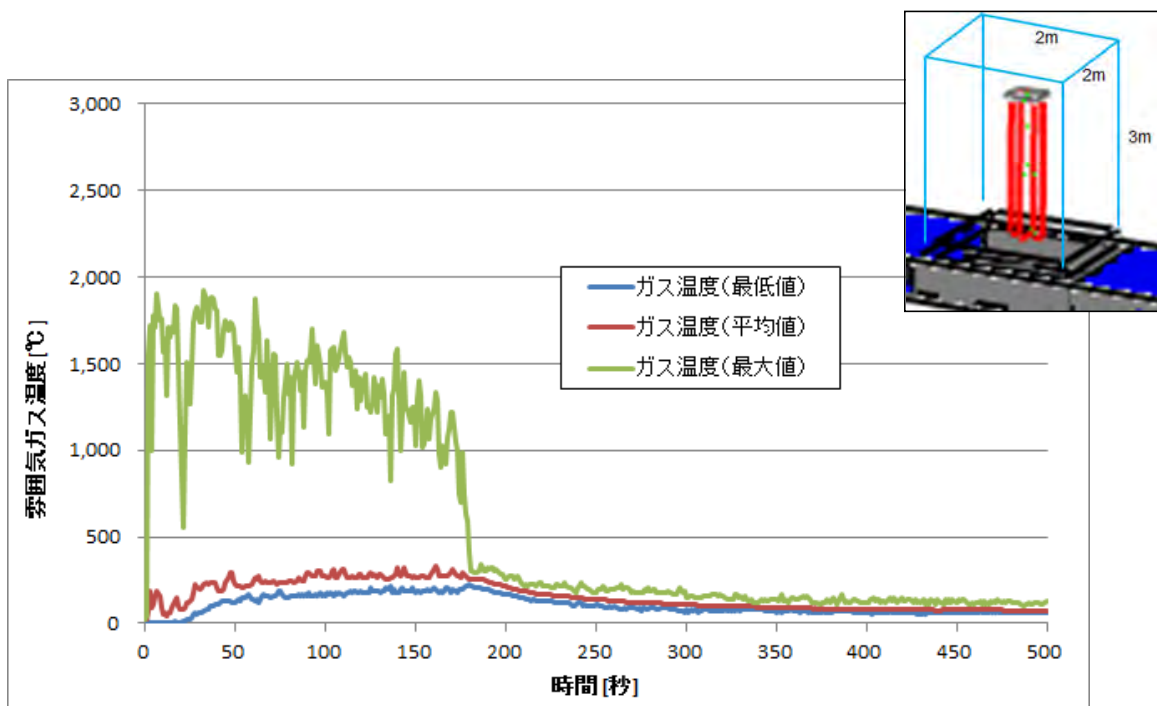


b) 全検査室の解析 (煤発生量 = 0.01g/g 燃料)

図 4.2.7-10 廃棄体の真上 (天井 4 m 下) における温度や化学種濃度

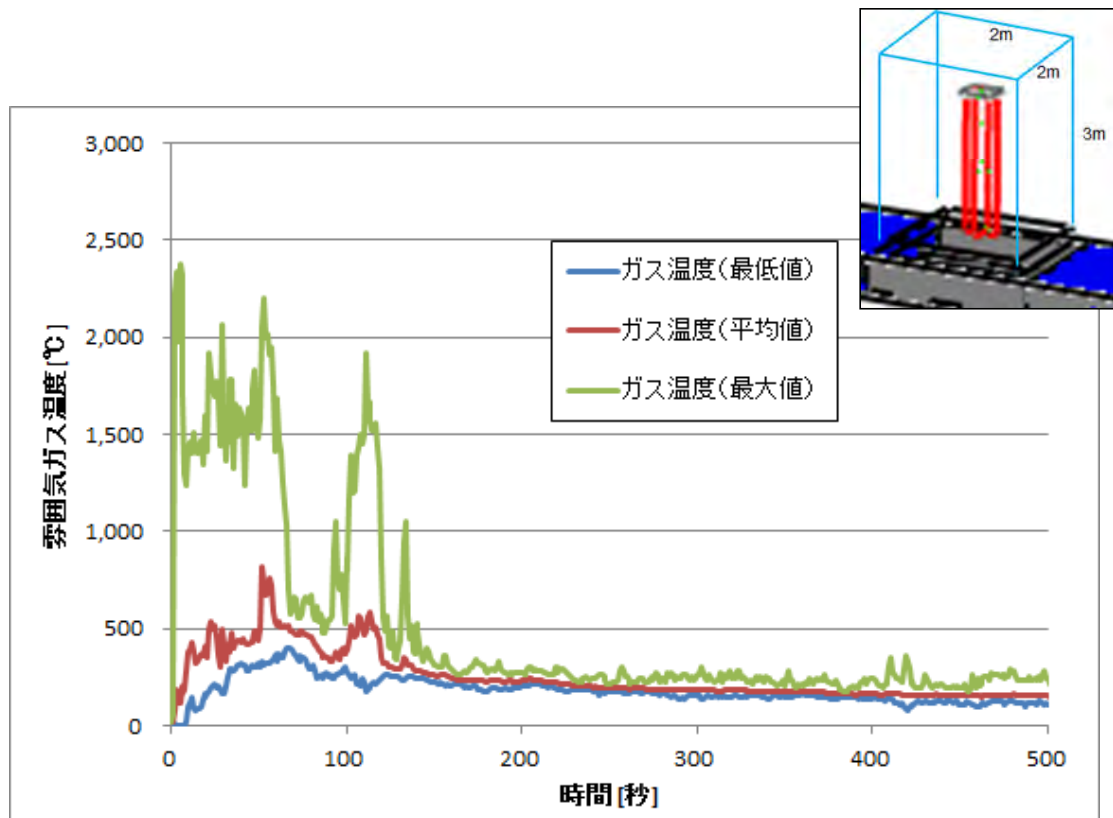


a) 煤発生量 = 0.01g/g 燃料



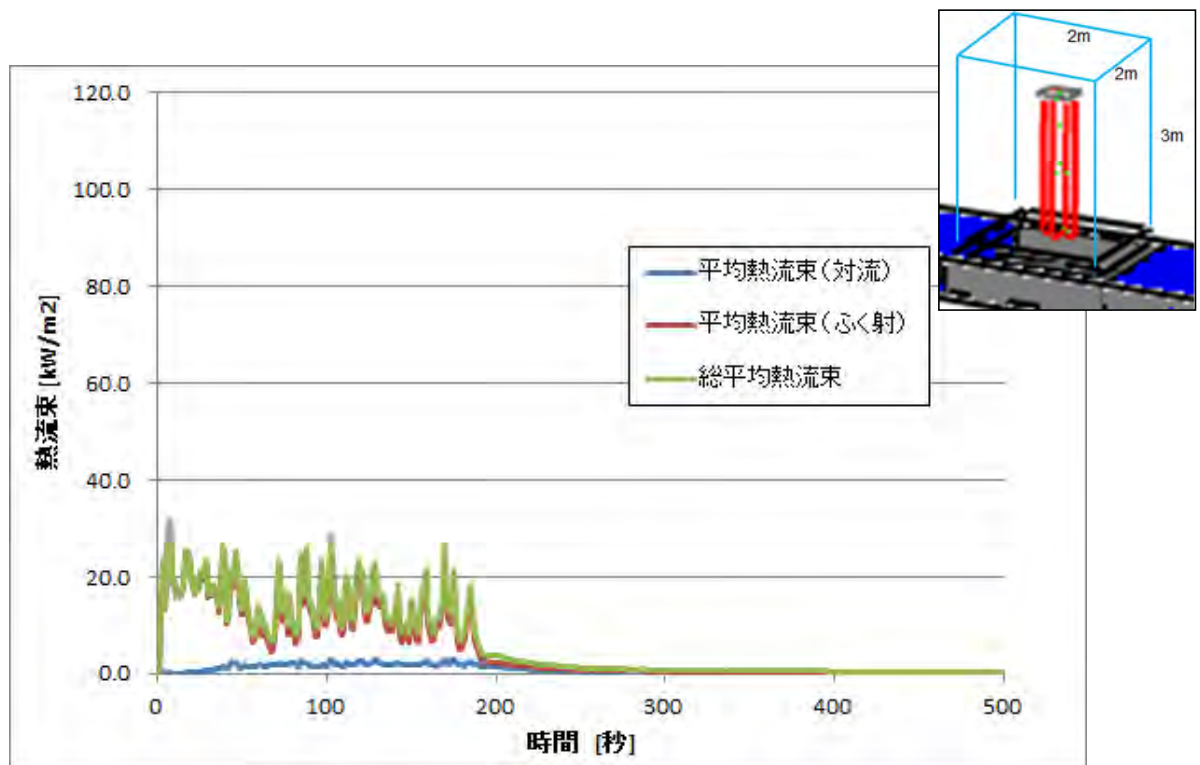
b) 煤発生量 = 0.1g/g 燃料

図 4.2.7-11 廃棄体周囲のガス温度 (一区切りの解析)

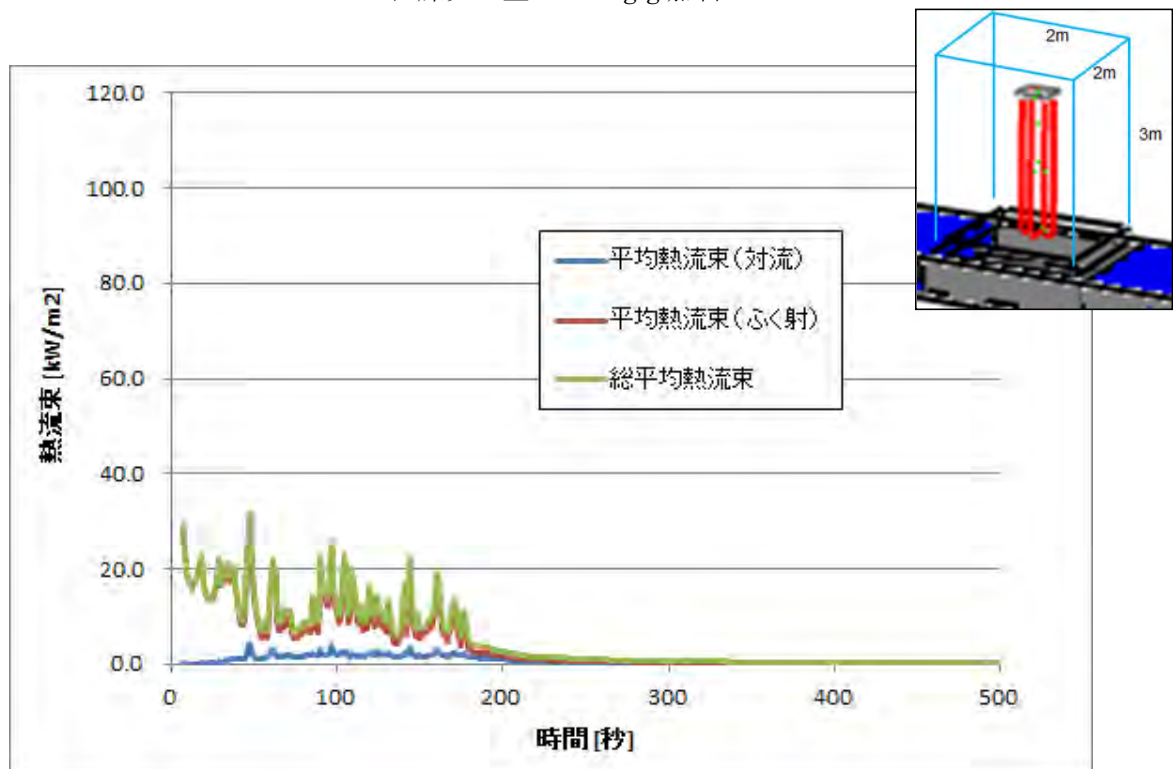


煤発生量 = 0.01g/g 燃料

図 4.2.7-12 廃棄体周囲のガス温度（全検査室の解析）

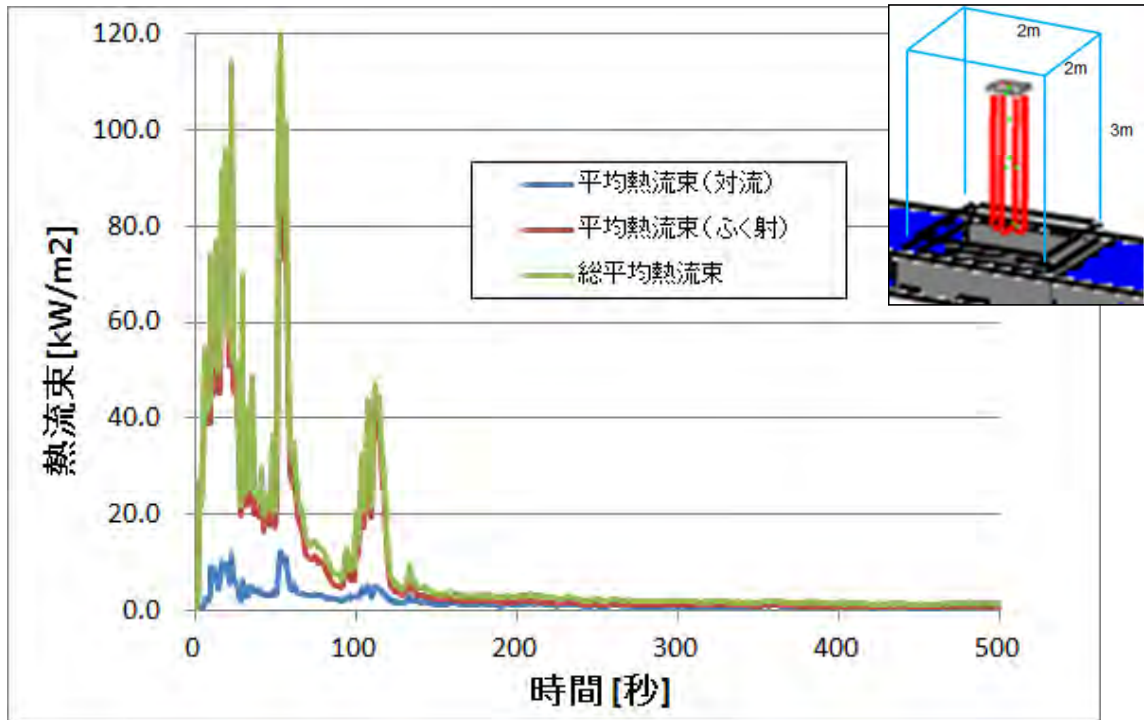


a) 煤発生量 = 0.01g/g 燃料



b) 煤発生量 = 0.1g/g 燃料

図 4.2.7-13 廃棄体周囲の熱流束（一区切りの解析）



煤発生量 = 0.01g/g 燃料

図 4.2.7-14 廃棄体周囲の熱流束（全検査室の解析）

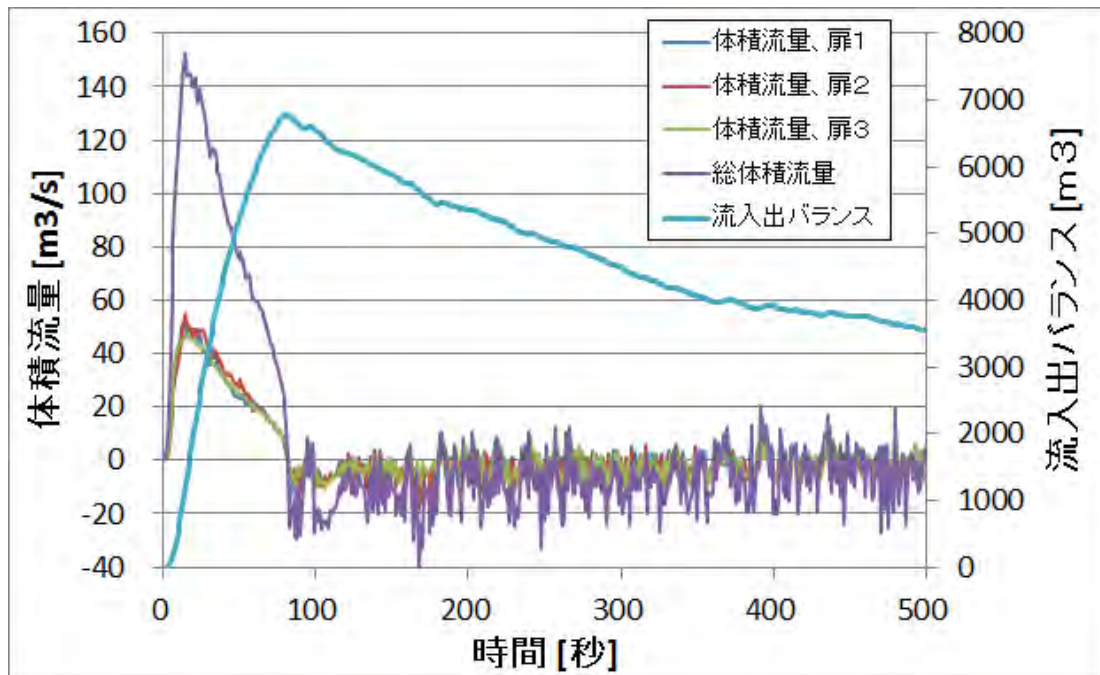


図 4.2.7-15 全検査室のガス入出流量

(2) 解析結果（伝熱解析／応力解析）

前述した通り、伝熱解析及び応力解析における熱境界条件は、図 4.2.5-1 に示すように燃焼解析結果を元に設定した加熱曲線とした。以下に①ガラス固化体単体、及び②ガラス固化体＋オーバーパックのそれぞれのケースにおける伝熱解析と応力解析の結果を示す。

1) ガラス固化体単体

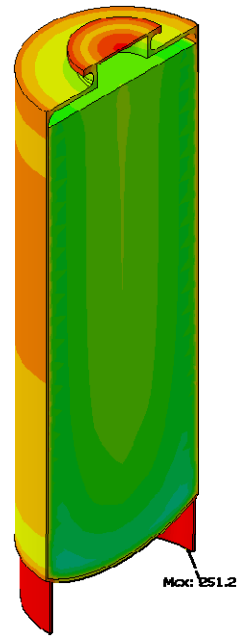
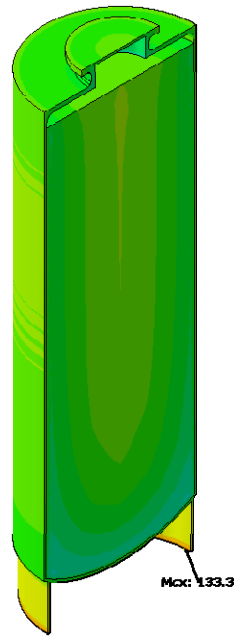
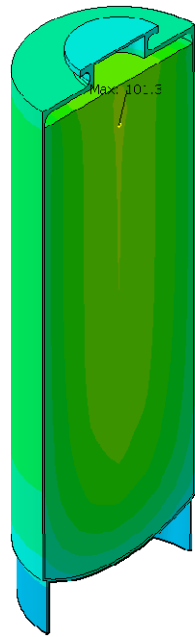
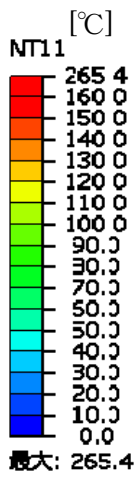
伝熱解析は、以下の 2 つのステップによりガラス固化体温度の時刻歴変化を熱伝導解析により計算した。それぞれのステップにおいては、ガラスの発熱、及びガラス固化体キャニスタ外面における熱伝達と輻射を考慮した。

Step1：初期温度算出ステップ（定常熱伝導解析）

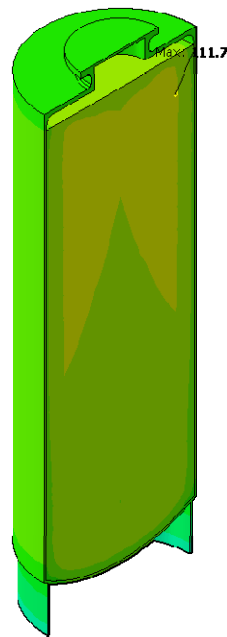
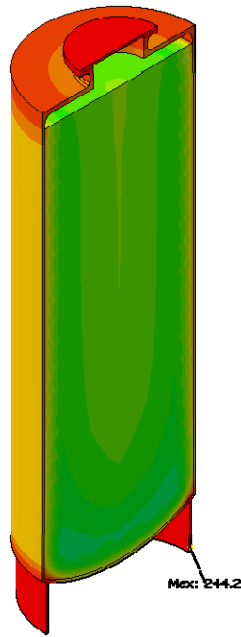
Step2：火災による入熱ステップ（非定常熱伝導解析）

図 4.2.7-16 に解析の結果得られたガラス固化体の温度分布の時刻変化を示す。また、図 4.2.7-17 には、キャニスタ及びガラスが最高温度に達した時の温度分布を示す。図 4.2.7-16 より、ガラス固化体キャニスタが最高温度になるのは火災発生から 5.4 分経過時であり、その温度はキャニスタスカート部において 265.4℃であった。

また、ガラスが最高温度になるのは火災発生から 8.6 分経過時であり、その温度はキャニスタスカート付け根部近傍において 157.7℃であった。ガラス固化体のガラスの平均転移温度は 500℃程度であることを勘案すると、本検討で設定した火災シナリオにおいては、火災がガラス固化体の品質に及ぼす影響は小さいと判断される。



(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 3 分後



(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

図 4.2.7-16 ガラス固化体の温度分布の時刻変化 (切断図)

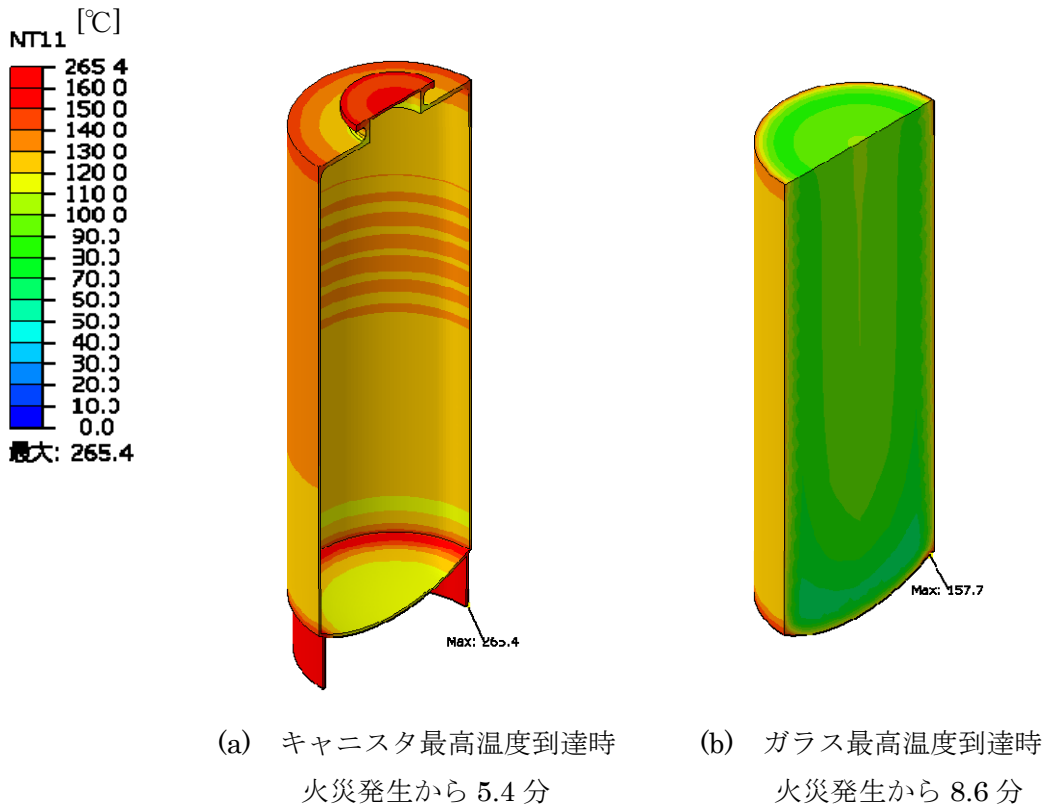


図 4.2.7-17 ガラス固化体の最高温度到達時の温度分布

応力解析においては、ガラスとキャニスタを一体化せず、それらの接触を考慮することで、以下の 2 つのステップによりキャニスタの応力を計算した。

①初期状態算出ステップ

- ・伝熱解析で初期温度として求めた温度分布を与え、自重を負荷した解析

②火災による入熱ステップ

- ・伝熱解析で火災入熱によって得られた温度時刻歴変化を熱荷重として与えた解析

図 4.2.7-18 及び図 4.2.7-19 に、解析の結果得られたガラス固化体キャニスタの相当応力分布及び相当塑性ひずみ分布を示す。図 4.2.7-18 より、ガラス固化体キャニスタ胴部に比べて相対的に高温となるガラス固化体キャニスタ上部とスカート部近傍において応力が高くなることがわかる。特に、ガラス固化体キャニスタのスカート付け根部では、高温になったスカート部の熱膨張がガラス固化体キャニスタ下部に拘束されるために比較的に大きな応力が発生するが、その値は 150~170MPa であり、一般のステンレスの引張強度 (520MPa 以上) に対して十分に小さく、問題が無い値と判断される。

また、図 4.2.7-19 より、比較的に大きな応力が発生するガラス固化体キャニスタのスカート付け根部では、塑性ひずみが 0.15%程度生じる結果となったが、ごく軽微な塑性変形が残る程度で、上述の強度と同様に問題がない値と判断される。

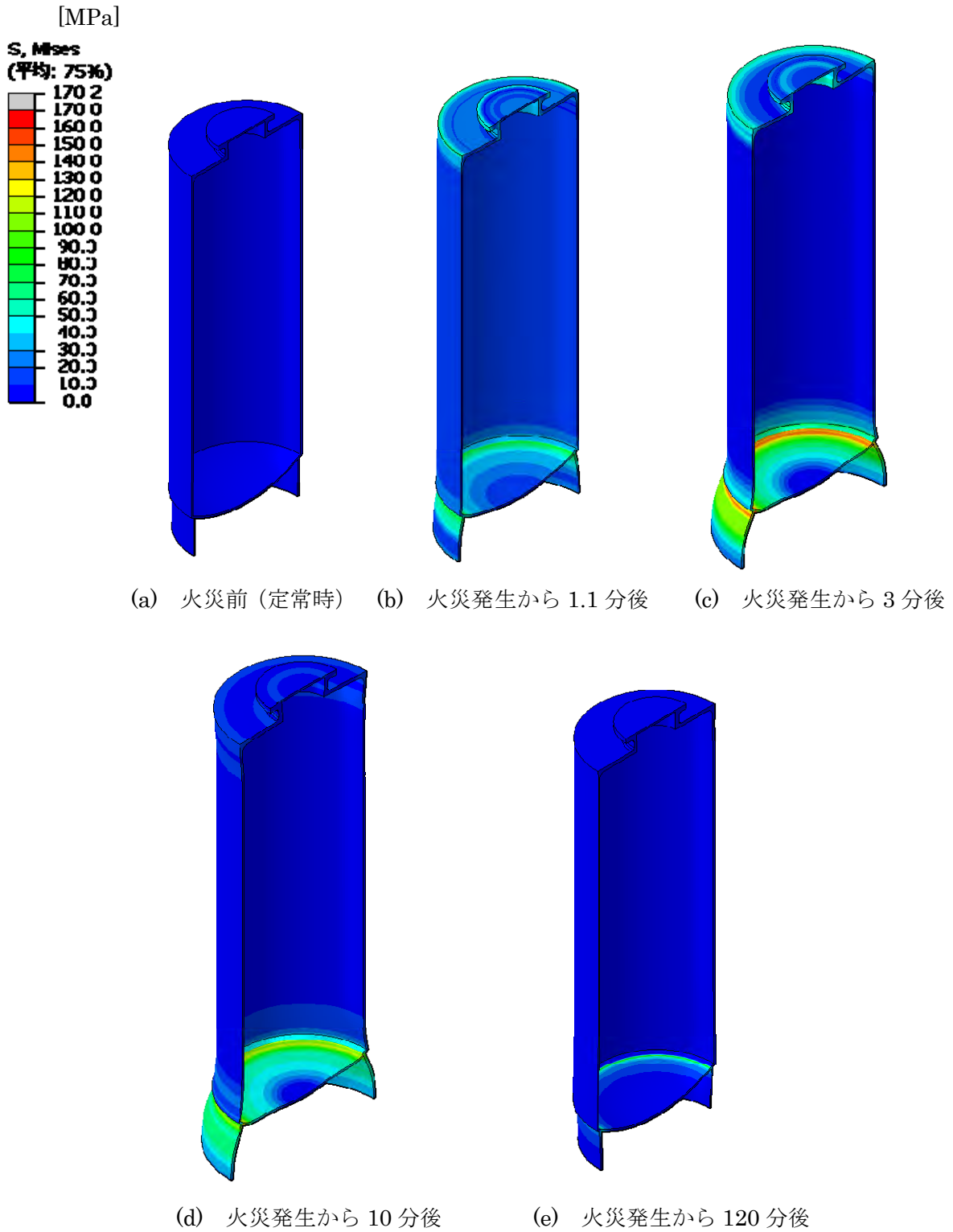
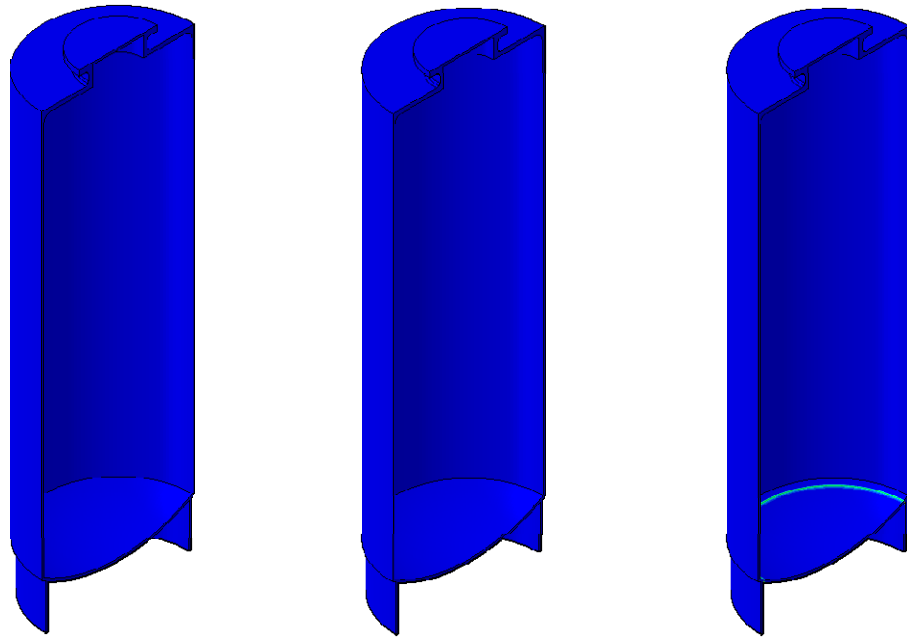
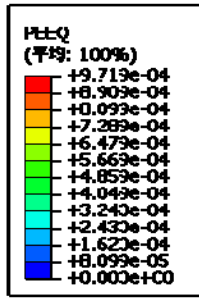
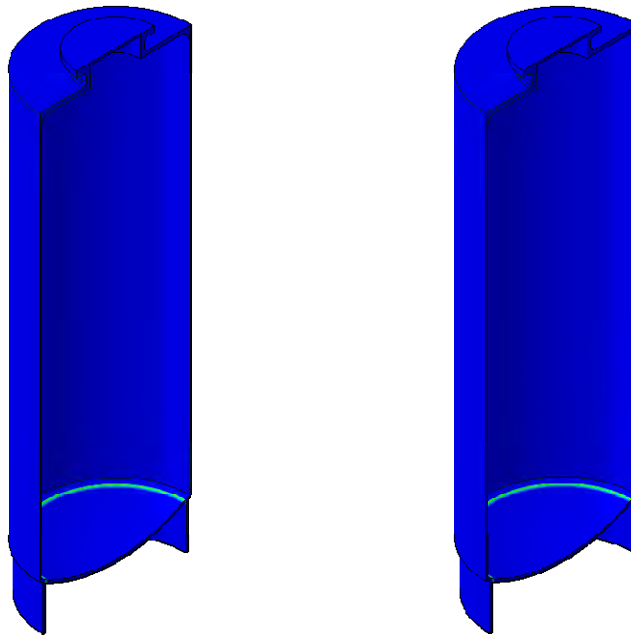


図 4.2.7-18 ガラス固化体キャニスタの相当応力分布及び変形の時刻変化 (切断図)
(変形を 100 倍に誇張した図に相当応力分布を重ねて表示)



(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 3 分後



(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

図 4.2.7-19 ガラス固化体キャニスタの相当塑性ひずみ分布の時刻変化 (切断図)

2) ガラス固化体+オーバーパック

伝熱解析は、ガラス固化体単体のケースと同様に、以下の 2 つのステップによりガラス固化体及びオーバーパックの時刻歴変化を熱伝導解析により計算した。それぞれのステップにおいては、ガラスの発熱、及びオーバーパック外面における熱伝達と輻射を考慮した。

①初期温度算出ステップ（定常熱伝導解析）

- ・ガラス固化体をオーバーパックへ封入後、火災が発生するまでの時間は、ガラス温度にとって最も厳しい条件として定常状態を初期状態とした。

②火災による入熱ステップ（非定常熱伝導解析）

図 4.2.7-20 に解析の結果得られたオーバーパックとガラス固化体の温度分布の時刻変化を示す。

また、図 4.2.7-21 及び図 4.2.7-22 にオーバーパックのみ、及びガラス固化体みの温度時刻変化を図示する。これらの図より、本解析ケースでは火災の入熱がガラスの温度に及ぼす影響はほとんど無いことがわかる。

本解析ケースでは、上述した温度解析結果を用いて応力解析を行っても、ガラス固化体の応力にはほとんど影響がないと判断されるため、ガラス固化体+オーバーパックの応力解析においては、オーバーパックのみのモデルとして解析を行うこととした。応力解析は、ガラス固化体単体のケースと同様に、以下の 2 つのステップによりオーバーパックの応力を計算した。

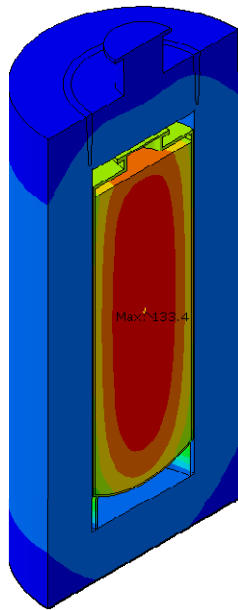
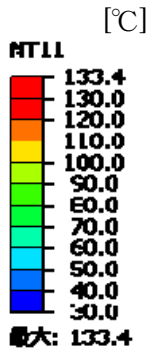
①初期状態算出ステップ

- ・伝熱解析で初期温度として求めた温度分布を与え、自重を負荷した解析

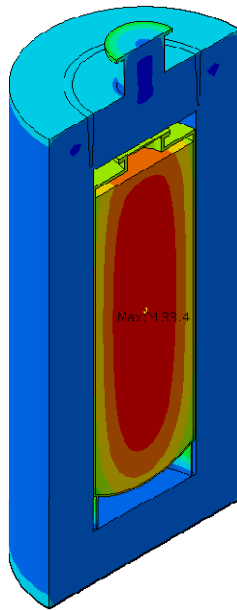
②火災による入熱ステップ

- ・伝熱解析で火災入熱によって得られた温度時刻歴変化を熱荷重として与えた解析

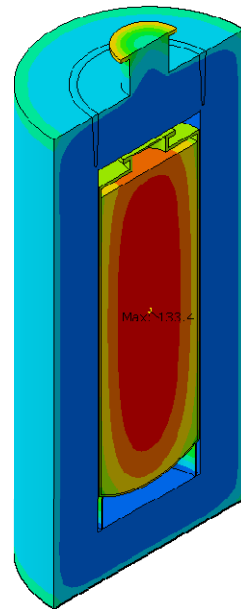
図 4.2.7-23～図 4.2.7-26 に、解析の結果得られたオーバーパックの相当応力分布及び半径方向、周方向、軸方向の各成分応力分布を示す。また、図 4.2.7-27 に相当塑性ひずみ分布を示す。これらの図より、本解析ケースでは火災の入熱がオーバーパックの応力に及ぼす影響は軽微であり、相当塑性ひずみに関しては、初期状態から変化が無いことがわかる。



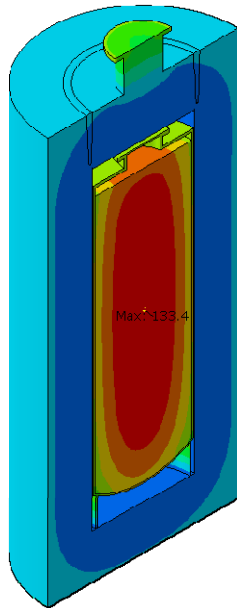
(a) 火災前 (定常時)



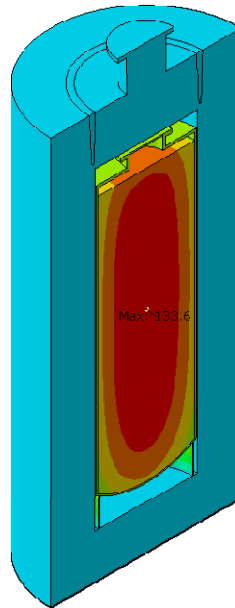
(b) 火災発生から 1.1 分後



(c) 火災発生から 3 分後

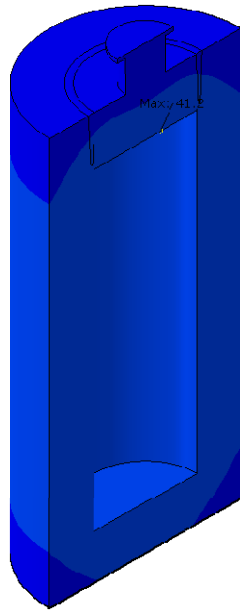
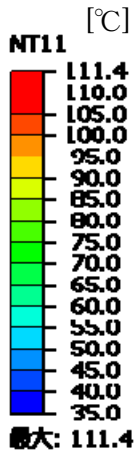


(d) 火災発生から 10 分後

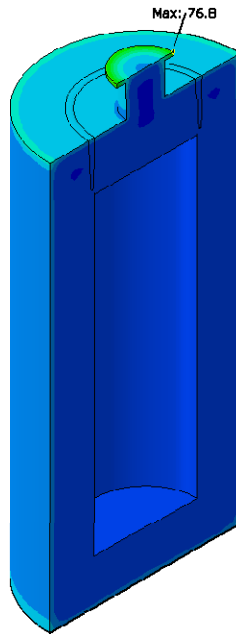


(e) 火災発生から 120 分後

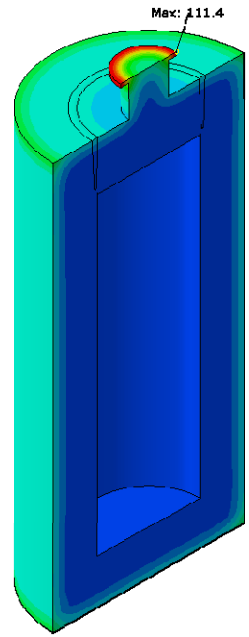
図 4.2.7-20 ガラス固化体及びオーバーパックの温度分布の時刻変化 (切断図)



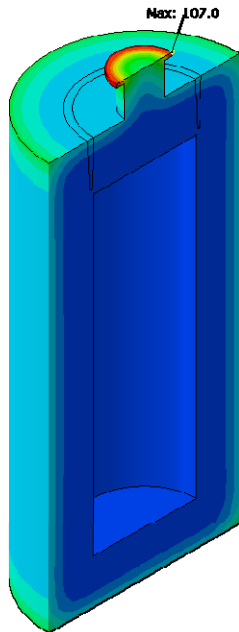
(a) 火災前 (定常時)



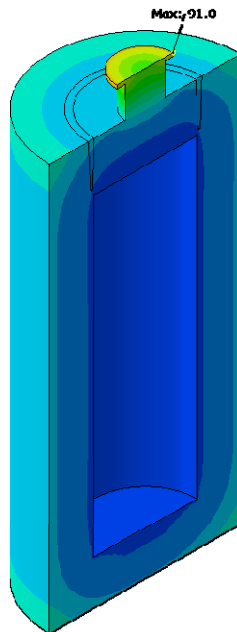
(b) 火災発生から 1.1 分後



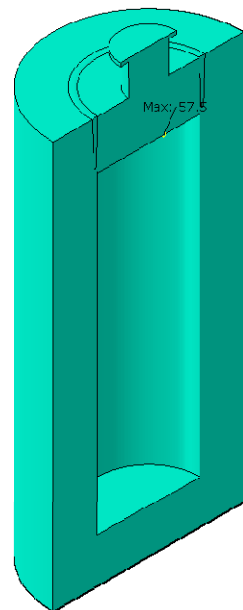
(c) 火災発生から 2.3 分後
最高温度到達時



(d) 火災発生から 3 分後

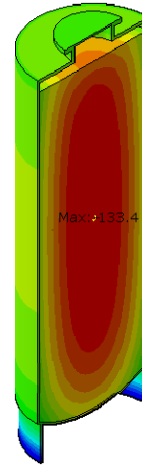
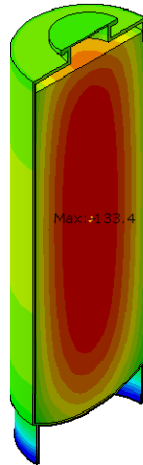
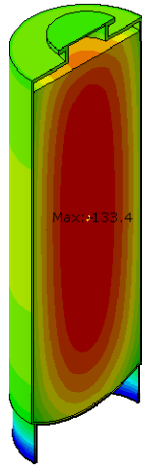
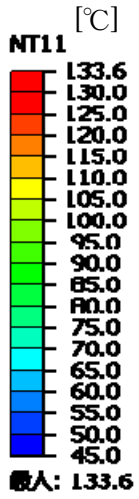


(e) 火災発生から 10 分後

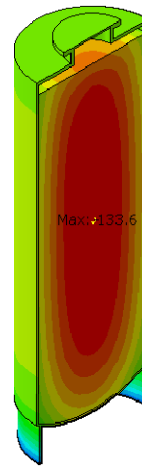
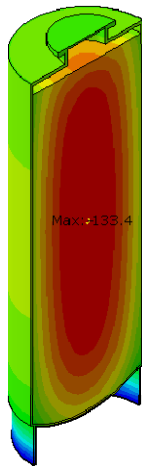


(f) 火災発生から 120 分後

図 4.2.7-21 オーバーパックの温度分布の時刻変化 (切断図)

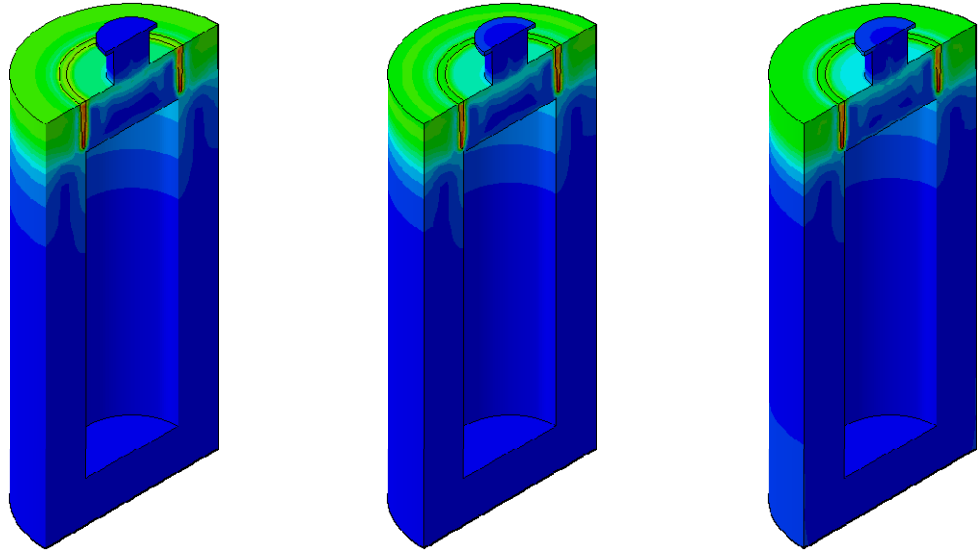
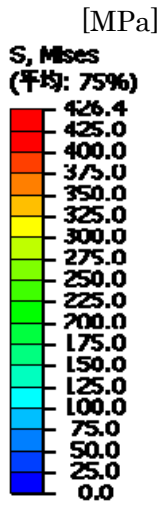


(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 3 分後

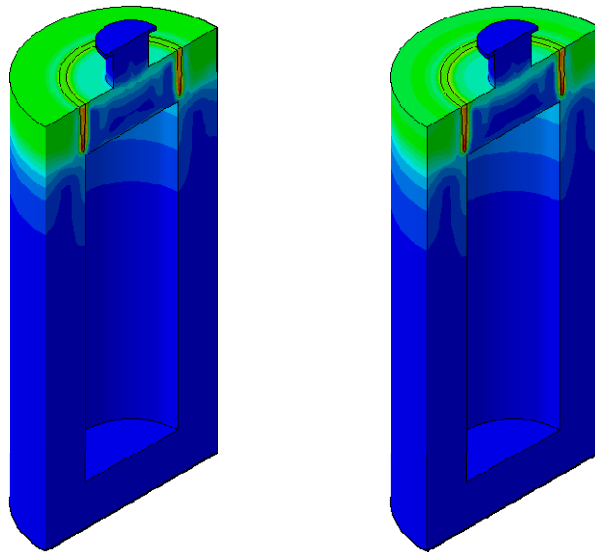


(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後
最高温度到達時

図 4.2.7-22 ガラス固化体の温度分布の時刻変化 (切断図)



(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 2.3 分後

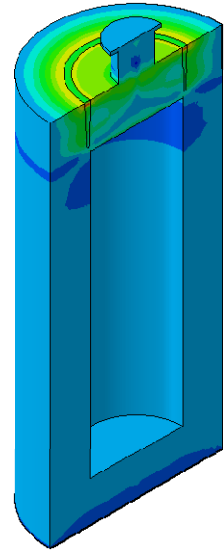
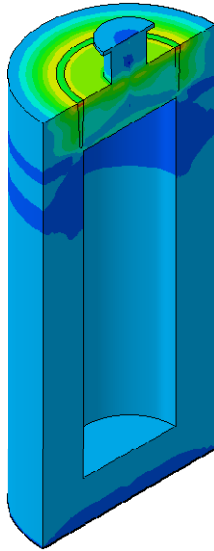
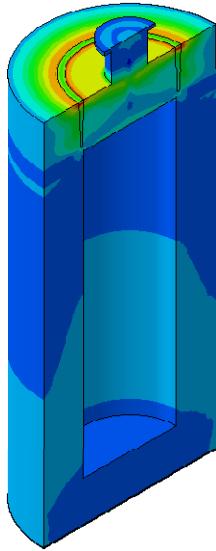
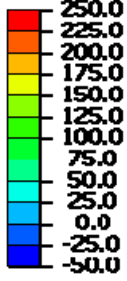


(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

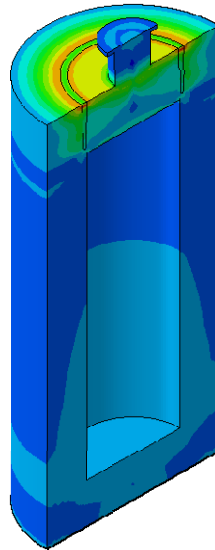
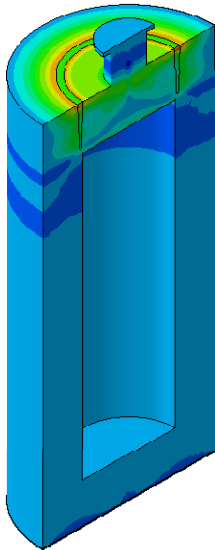
図 4.2.7-23 オーバーパッケの相当応力の時刻変化 (切断図)

[MPa]

S, S11
(平均: 75%)



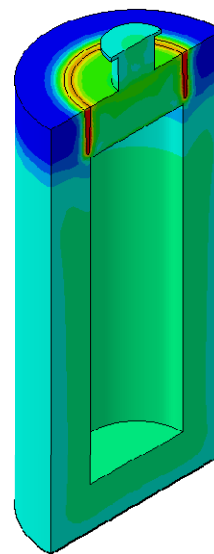
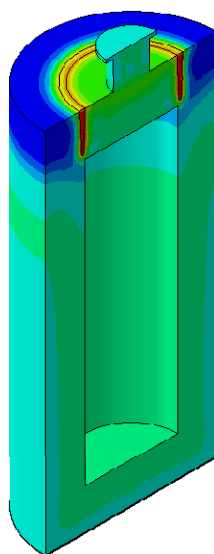
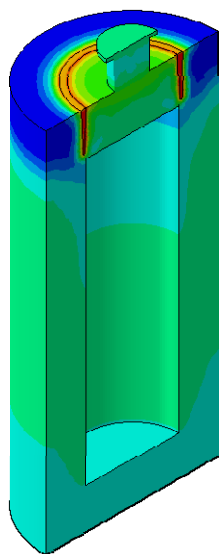
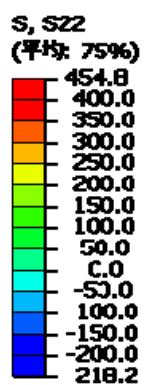
(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 2.3 分後



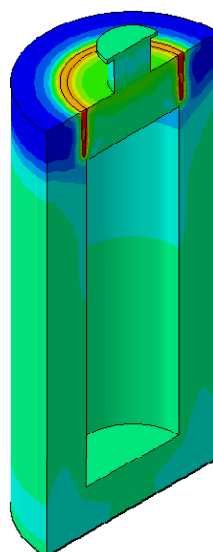
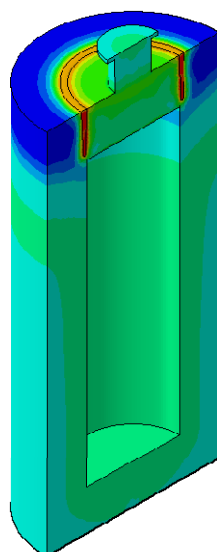
(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

図 4.2.7-24 オーバーパックの半径方向応力の時刻変化 (切断図)

[MPa]



(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 2.3 分後

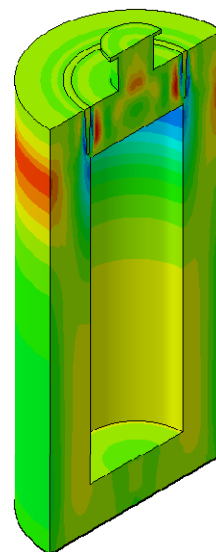
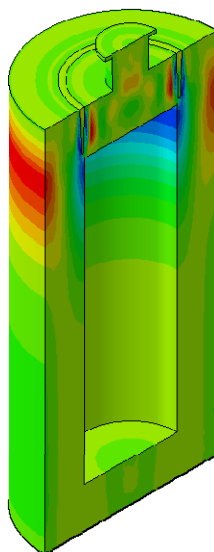
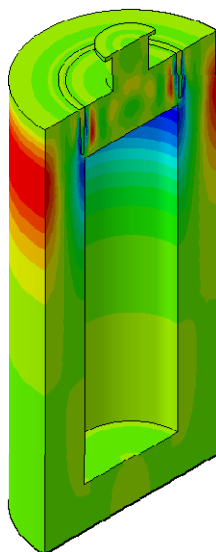
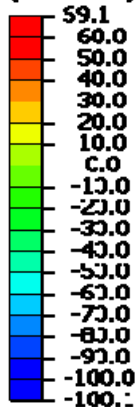


(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

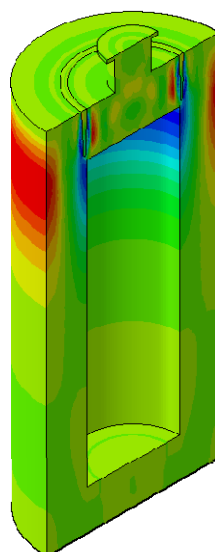
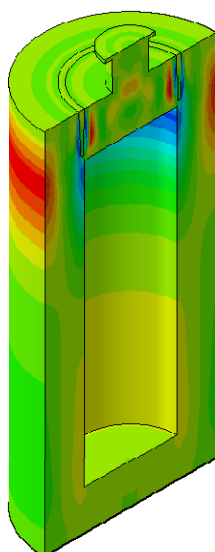
図 4.2.7-25 オーバーパックの周方向応力の時刻変化 (切断図)

[MPa]

S, S33
(平均 75%)

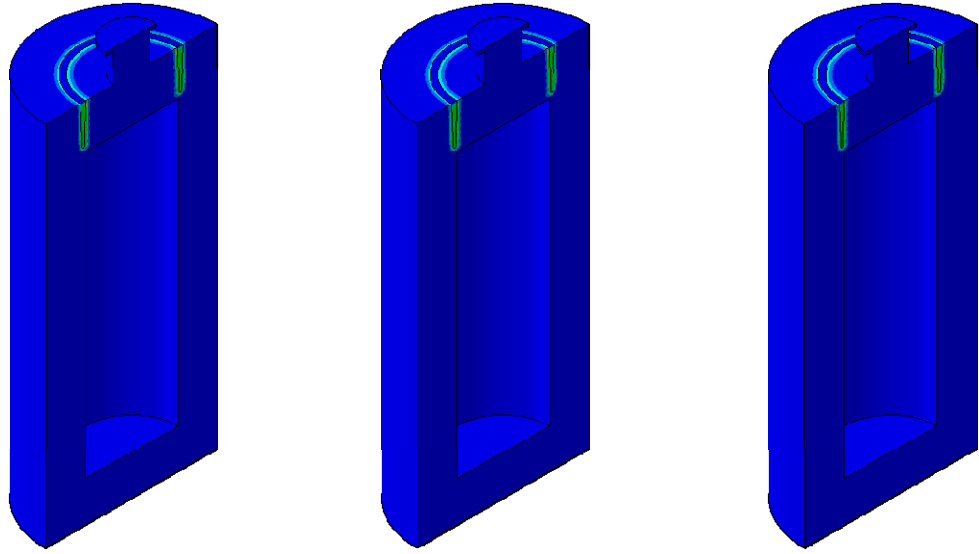
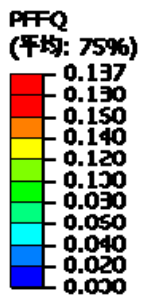


(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 2.3 分後

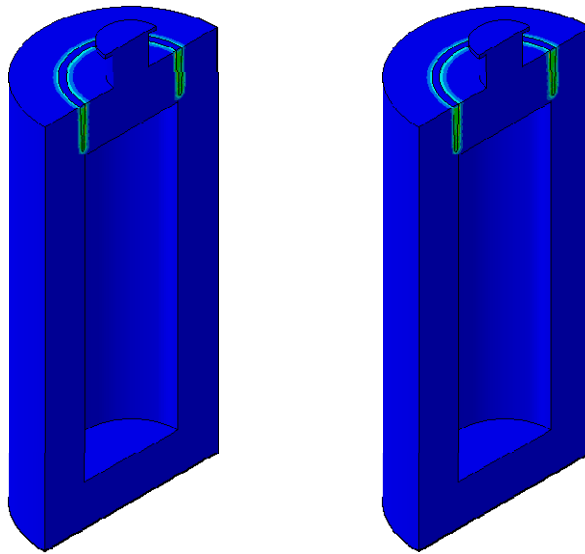


(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

図 4.2.7-26 オーバーパックの軸方向応力の時刻変化 (切断図)



(a) 火災前 (定常時) (b) 火災発生から 1.1 分後 (c) 火災発生から 2.3 分後



(d) 火災発生から 10 分後 (e) 火災発生から 120 分後

図 4.2.7-27 オーバーパックの相当塑性ひずみの時刻変化 (切断図)

4.2.8 He ガス圧力上昇影響の評価手法調査

前節まで一つのシナリオに基づく火災がガラス固化体等に及ぼす影響を述べたが、このような外的要因に対するガラス固化体の健全性は、固化ガラス中に含まれる放射性核種の α 崩壊によって発生する He ガスによる、ガラス固化体キャニスタの内圧上昇の影響を考慮することでより正確に評価できると考えられる。そこで本節では、He ガス圧力上昇影響の評価手法について調査を行った結果を述べる。

(1) He ガス圧力上昇の影響調査

固化ガラス中に含まれる放射性核種の α 崩壊は He 原子を生成する。ガラス固化体製造後から地層処分期間中に発生した He 原子がガラス内部に溶解あるいはガス化してガラス固化体キャニスタ内の圧力を上昇させることが考えられることから、ガラス固化体キャニスタの破損、また破損後の核種の放出による影響評価が重要であるとされている [21]。

ここでは、地層処分場の地上施設においてガラス固化体が火災を受け、図 4.2.8-1 に示す上部プレナム部に蓄積した He ガスの温度上昇による膨張によって内圧が上昇した場合のガラス固化体キャニスタへの影響を解析的に評価するための手法について検討を行った。

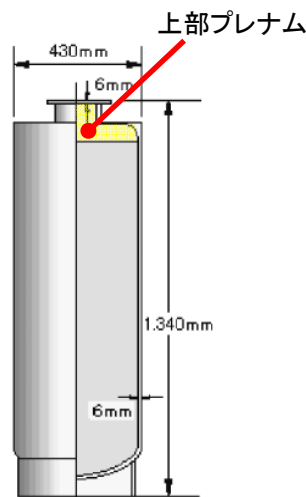


図 4.2.8-1 ガラス固化体の上部プレナム部

[1]に加筆

(2) ガス圧力上昇の解析組込み手法の調査

FEM による応力解析において、プレナム部の圧力は容器外側との差圧を入力データとして与える必要がある。容器外側の雰囲気における圧力は 1 気圧 (101.325Pa) と見なせる。一方、ガラス固化体容器のプレナム部では、ヘリウムの蓄積と温度上昇における内圧上昇 ΔP が生じるため、この ΔP を差圧としてプレナム部にかけることになる。プレナム部の内圧上昇 ΔP は、以下の式で表すことが出来る。

$$\Delta P = P_0 \times \frac{T}{T_0} + \frac{V + V_0}{V_0} - P_0$$

P_0 : プレナム部の初期圧力 (101.325 Pa)

T : 評価時のプレナム部温度 [K]

T_0 : プレナム部の初期温度 [K]

V : ヘリウムの放出量

V_0 : プレナム部の容積

プレナム部の初期圧力は 1 気圧と見なせるが、 ΔP はプレナム部の初期温度 T_0 に大きく影響を受けるため、初期温度 T_0 すなわち熔融ガラスの充填・封入時のプレナム部の温度を適切に見積もる必要がある。

ヘリウムは一時貯蔵期間中に放出され続け、その放出量は 30 年から 50 年とされる一時貯蔵期間に依存する値である。ガラス固化体のヘリウム放出量については 100 年で 7.7 リットルとの報告 [21] があるため、一時貯蔵終了時のヘリウム放出量はその値から適切に内挿するか、安全側評価として 7.7 リットルと想定することが考えられる。

応力解析で上記の差圧 ΔP をモデルに負荷するため、荷重を以下の 2 つに分類し、それらの和として考えることができる。

① 熔融ガラス封入時のプレナム部のガスが温度変化することで生じる圧力荷重 ΔP_1

② α 崩壊によって蓄積されたヘリウムガスによって生じる圧力荷重 ΔP_2

ΔP_1 、 ΔP_2 ともに、プレナム部のガスを FEM 要素分割しておき、伝熱解析で計算されたガス温度を用いて、線膨張係数を定義してガスの無拘束状態での膨張量を定義し、プレナム部のガスと容器の接触を考慮することで容器に圧力荷重を設定することが可能である。

①のプレナム部のガス温度変化によって生じる圧力荷重 ΔP_1 については、無拘束状態（例えば $P=1\text{atm}$ 一定条件下）でのガスの体積はガスの絶対温度に比例することから、線膨張係数は当該温度の 3 乗根を用いて定義する必要がある。すなわち、線膨張係数の基準温度を $T_A[\text{K}]$ 、ガスの初期温度を $T_1[\text{K}]$ 、初期体積を V_1 とした場合、 $T_1[\text{K}]$ のときの線膨張係数 α_1 、及び評価時のガス温度 $T_2[\text{K}]$ のときの線膨張係数 α_2 は、今回応力解析に用いている FEM コード ABAQUS では、以下のように定義すれば良い。ただし、定義していない温度では、線膨張係数は線形補間されてしまうので、定義する温度を細かく設定する必要があることに注意が必要である。

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt[3]{V_1}}{T_1 - T_A}$$

$$\alpha_2 = \frac{\sqrt[3]{V_1 \times \left(\frac{T_2}{T_1}\right)}}{T_2 - T_A}$$

注) ABAQUS においては、線膨張係数は基準温度 T_A からの全熱膨張を線膨張係数として定義する。

②の α 崩壊によって蓄積されたヘリウムガスによって生じる圧力荷重 ΔP_2 については、 ΔP_1 とは別個に扱う必要があるため、ABAQUS の場の変数を用いる必要がある。場の変数とは、温度場と同じような変数をユーザが独自に設定できる ABAQUS の機能であり、場の変数の関数として線膨張係数を定義することが可能である。今、ヘリウムの放出量を V_{He} とし、場の変数の基準値を F_A 、ヘリウムガスが V_{He} 生じたときの場の変数を F_1 とすると、線膨張係数 α_F は場

の変数の関数として以下のように定義し、プレナム部の節点に場の変数 F_1 を与えることで、 ΔP_2 を導入することが出来る。

$$\alpha_F = \frac{\sqrt[3]{V_{He}}}{F_1 - F_A}$$

4.2.9 まとめと今後の課題

(1) まとめ

本項では、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。燃焼解析結果及び伝熱・応力解析結果をまとめると以下の通りである。

1) 燃焼解析

オーバーパック収納・検査室全域を対象とした解析（全検査室の解析）を実施する前に、部屋の一部を取り出した試し計算（一区切りの解析）を実施し、燃焼モデルの一つである煤の発生量が解析結果へ及ぼす影響を検討した。煤発生量 0.01g/g 燃料と 0.1g/g 燃料の2条件で比較検討した結果、煤発生量が少ない方が室内のガス温度が高い傾向にあった。よって、全検査室の解析では、雰囲気温度が高い方が火災影響としてより厳しい条件となるため、煤発生量の燃焼モデルは 0.01g/g 燃料とした。

全検査室の解析では、室内の発熱量の経時変化からは 50 秒前後で、ガス温度や酸素濃度の経時変化からは 70 秒前後で火災が消炎することが推定された。この時の室内のガスの最高温度は、廃棄体周囲の空間（幅 2m *長さ 2m *高さ 3m ）では 800°C 程度、廃棄体真上の空間（天井 4m ）では 700°C 程度であった。（一区切りの解析については、発熱量や化学種濃度の経時変化から 190 秒程度で消炎することが推定され、その時の室内のガスの最高温度は、廃棄体周囲の空間で 280°C 程度、廃棄体真上の空間で 320°C 程度であった）。

燃焼解析結果に基づいて、伝熱・応力解析の熱境界条件（ガラス固化体やオーバーパックの周囲に与える温度履歴）を設定した。上述のように、最高温度は廃棄体周囲の空間が高い傾向にあったが、この温度及び温度履歴には、オーバーパック収納・検査室の周囲の部屋からの火災中のガスの逆流の影響が含まれていると判断された。周囲の部屋から逆流すると考えられるガスの組成は未知であるが、本解析ではこれを「空気」と仮定したため、一旦消炎した後の再燃焼などの現象が生じて不規則な温度履歴となった。この点を勘案し、空気の逆流の影響が含まれていないと考えられる廃棄体の真上の空間について得られた温度履歴を、伝熱解析における境界条件として用いることにした。

2) 伝熱・応力解析

燃焼解析で得られた雰囲気ガス温度の時刻歴データを元に加熱曲線を設定し、伝熱解析における熱境界条件として用いた。

ガラス固化体単体の状態を対象とした伝熱解析の結果、ガラス固化体のステンレス製ガラス固化体キャニスタが最高温度になるのは火災発生から 5.4 分経過時であり、その温度はガラス固化体キャニスタスカート部において 265.4℃であった。また、ガラスが最高温度になるのは火災発生から 8.6 分経過時であり、その温度はガラス固化体キャニスタスカート付け根部近傍において 157.7℃であった。ガラス固化体のガラスの平均転移温度は 500℃程度であることを勘案すると、本検討で設定した火災シナリオにおいては、火災がガラス固化体の品質に及ぼす影響は小さいと判断された。

次いで、伝熱解析の温度データを熱荷重とした熱応力解析を行った結果、ガラス固化体キャニスタのスカート付け根部で高温になったスカートの熱膨張がガラス固化体キャニスタ下部に拘束されるために比較的に大きな応力が発生したが、その値は 150～170MPa であり、一般のステンレスの引張強度（520MPa 以上）に対して十分に小さく、破損に至る危険性は小さいと判断した。また、比較的に大きな応力が発生するガラス固化体キャニスタのスカート付け根部では、塑性ひずみが 0.15%程度生じる結果となったが、ごく軽微な塑性変形が残る程度で、強度と同様に破損の危険性は小さいと判断した。

一方、ガラス固化体がオーバーパックに収納された状態を対象とした解析では、ガラス固化体の温度変化は極めて僅かであり、オーバーパックによる火災影響の緩衝効果が確認できた。また、本検討の火災シナリオによる入熱がオーバーパックの応力に及ぼす影響は軽微であり、塑性ひずみに関しても初期状態から変化が無いことが分かった。

以上より、今回設定した火災シナリオにおいては、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が分かった。

(2) 今後の課題

1) 燃焼解析

本検討では、非常用発電機用のディーゼル燃料が地上施設の地下階のオーバーパック収納・検査室に流入して火災が発生するというシナリオを設定した。これは、不燃あるいは難燃材料・設備で構成されると考えられる部屋において、ガラス固化体やオーバーパックの品質に何らかの影響を及ぼす可能性がある大きな規模の火災を発生させるために設定したシナリオである。このような発生確率が小さいと考えられるシナリオを設定したにもかかわらず、燃焼解析で得られた火災継続時間は数分オーダーと短いものであった。これは、地下の閉鎖空間での限られた空気（酸素）の量で生じる火災を評価したことによると判断された。言い換えると、相当に発生確率が小さいシナリオで万が一火災が発生した場合でも、その発生場所が地下の閉鎖空間であれば酸素消費による窒息消火が生じ、ガラス固化体やオーバーパックの品質に大きな影響を与える危険性は小さいと考えられる。

しかし、前述したように、上記の結果は今回設定した一つの火災シナリオについてのもので

あることに留意する必要がある。火災による災害の規模は、4.2.3 で述べた多くの要因（着火の原因、規模、位置や燃料の種類、分配、また、火災の種類（自然対流、強制対流など）、火の広がり方、最大発熱量、総発熱量、換気状態、消火システム、消火活動など）によって大きく左右される。一例として、本検討では、消防法に準拠して火災中は換気システムは停止していると仮定したが、一方で、放射性物質の閉じ込めの観点からは火災時においても換気機能の維持が求められることも考えられる。火災中の換気システムの作動の有無によって火災状況は大きく変わり、ガラス固化体やオーバーパックにとってさらに厳しい加熱条件が生じることも考えられる。今後、具体的に地層処分施設や設備が計画・設計された場合、その具体的条件のもとで、上述した種々の要因を考慮した火災シナリオ（想定し得るシナリオにするべきと考える）を設定し、ガラス固化体やオーバーパックに対する影響を検討・把握する必要があると考えられる。

また、今回設定した火災シナリオに類似したシナリオでも、以下の①、②の条件でガラス固化体やオーバーパックにとってさらに厳しい加熱条件が生じることが考えられる。

- ①一区切りの解析と全検査室の解析の比較により、ガスの流れ方向や火炎形状によって廃棄体周囲の熱流束が変わることが分かった。例えば、全検査室の解析では、廃棄体周囲の熱流束が、消炎直前に火炎が大きく立ち上がることによって一時的に高くなることが分かった。このことから、ガスの流れによって炎が高く立ち上がる可能性がある部屋の壁近傍に廃棄体がある場合には、長時間高い熱流束を受けることになることが予測される。このように、解析領域のモデルが変わらなくても、評価対象物の位置と気流との関係によって熱流束が変化することが考えられる。
- ②全検査室の解析の結果、火災は走行台車が走行するくぼみに沿った細長いプールファイヤが形成され、その炎の高さは壁際の一部を除いて長さ方向に変わらないことが分かった。このことから、プールファイヤの長さ（部屋の長手方向の範囲）が短くなっても廃棄体に対する熱負荷は大きくは変わらないと考えられる。したがって、廃棄体近傍のみの短いプールファイヤを設定する（シナリオにやや無理があるが、ディーゼル燃料が流入・貯留する範囲を廃棄体近傍のみと仮定し、燃焼範囲を短くする）ことが考えられる。これによって、プールファイヤ面積が小さくなり、時間当たりの酸素消費量が減少して、火災継続時間を長くなると考えられる。

2) 伝熱・応力解析

今回設定した火災シナリオでは、雰囲気温度は急激に上昇し、最高温度も 700℃程度に達したが、上述のように火災継続時間は短い結果となった。この影響もあり、燃焼解析で得られた雰囲気温度の時刻歴データをもとに実施した伝熱解析及び応力解析では、ガラス固化体やオーバーパックへの火災影響は小さい結果となった。今後は、雰囲気温度が多少下がっても、火災継続時間が長いケースについて、同様の検討を行う必要があると考えられる。また、今回解析したケースは火災継続時間がきわめて短いため、クリープの効果はほとんど無いと考えられるが、火災の継続時間がクリープを考慮しなければならないほど長くなる場合には、クリープの効果を算入する必要があると考えられる。

以上、燃焼解析及び伝熱／応力解析に共通する課題として、火災継続時間が更に長い場合のガラス固化体やオーバーパックに対する火災影響の把握が挙げられる。この点について、以下の2通りの条件で試算を行った。ただし、これらの試算は、具体的に想定し得る火災シナリオに基づくものではないことに留意する必要がある。今回の火災シナリオに基づく燃焼状況よりも厳しい状況に晒された場合の、ガラス固化体やオーバーパックの健全性や限界的な性能について目安を得る目的で行ったものである。この点を勘案し、計算結果については章末に添付した。

試算①：火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした伝熱・応力解析

- ・先行解析の燃焼解析をもとに火災曲線の最高温度継続時間を長くした解析
- ・火災曲線の最高温度継続時間の条件は、30分（核燃料輸送物に対する耐火試験を参考に設定）、15分の2条件とし、それぞれの条件でガラス固化体、ガラス固化体+オーバーパックに対する伝熱・応力解析を実施

試算②：燃焼範囲をパラメータとした燃焼解析、伝熱・応力解析

【燃焼解析】

- ・燃料の範囲（燃焼範囲）を縮小して人工バリア周囲に配置した保守側の燃焼条件を設定した燃焼解析（上述の「今後の課題 1）燃焼解析 ②」で述べた検討）

【伝熱・応力解析】

- ・上記燃焼解析の結果から設定した火災曲線を境界条件とした伝熱解析、応力解析の実施

試算ケース

試算 ケース NO.	解析対象廃棄物	燃焼解析 ケース数	伝熱解析 ケース数	応力解析 ケース数
①火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした伝熱・応力解析				
1	ガラス固化体	—	2	2
2	ガラス固化体+オーバーパック	—	2	2
②燃焼範囲をパラメータとした燃焼解析、伝熱・応力解析				
1	ガラス固化体	1	1	1
2	ガラス固化体+オーバーパック		1	1

4.3 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握

ここでは、地層処分施設における火災事故を想定し、緩衝材を介したオーバーパックやガラス固化体の温度履歴に対する解析的検討の実施及び解析結果の信頼性を向上するために、緩衝材の高温時の熱特性を検討した。

4.3.1 試験目的

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

人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックについては、わが国では材質のリファレンスは炭素鋼としており、その熱特性は高温時も含めて把握されている。一方、もう一つの構成要素である緩衝材については、100℃未満の熱特性のデータ取得事例[9]はあるが（図 4.3.1-1）、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・蓄積されていないのが現状である（表 4.3.1-1）。

以上を踏まえ、本試験は、地層処分事業操業中の火災等の異常状態や事故に対する人工バリアの熱的な限界性能等の把握に向けて、緩衝材の高温時熱特性（熱伝導率・熱拡散率・比熱の関係）について試験データを取得し、解析的検討の信頼性向上に資することを目的としたものである。

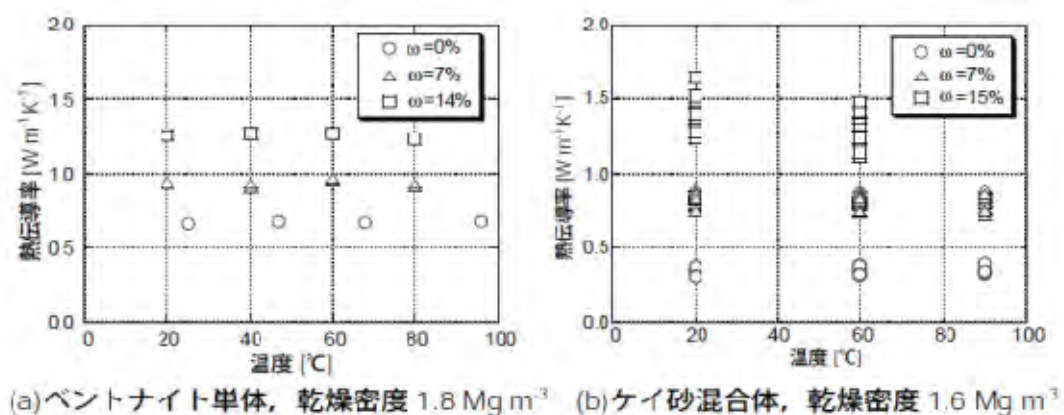


図 4.3.1-1 緩衝材の熱伝導率の温度依存性に関する試験結果の例

表 4.3.1-1 人工バリア材料の熱特性取得状況

人工バリア構成	候補材質	常温 (100℃以下)	高温（火災時等） 例えば 1,000℃
ガラス固化体	ガラス	既知	既知
オーバーパック	炭素鋼	既知	既知
緩衝材	ベントナイト+ケイ砂	既知	未知

4.3.2 試験方法

(1) 対象材料

試験は、緩衝材及び定置時に発生する隙間の充てんに用いられるベントナイトペレットを対象に実施した。両材料の基本的な仕様は表 4.3.2-1 のとおりである。既往のデータ (図 4.3.1-1) に示されるように、常温時の温度特性は材料の含水状態 (飽和度) に依存する可能性があることから、飽和度の違いについても試験水準とした。飽和度の設定は、多様な緩衝材製作方法がある中で、飽和度が高い製作方法である吹付け方式やランマによる締固め方式の実績 [22] を考慮して設定した。

表 4.3.2-1 試験対象材料の仕様

材料	材料構成	乾燥密度	飽和度
緩衝材	ベントナイト 70% +ケイ砂 30%	1.6Mg/m ³ 程度	0%、85%程度
ベントナイト ペレット	ベントナイト 100%	1.37 Mg/m ³ 程度 (空気層を含む密度)	0%、85%程度

(2) 取得特性

緩衝材を介したオーバーパックやガラス固化体の熱解析に用いる熱特性のうち、本試験では熱伝導率と熱拡散率を取得した。図 4.3.2-1 に熱伝導率、熱拡散率、及び比熱の関係を示す。

前述したように、100℃未満の熱特性についてはデータ取得事例があるが、本開発において取得するデータの連続性、及び 100℃を境として物性値が変わる可能性 (非線形性の可能性) などを考慮し、100℃以下における熱特性及び 100℃以上における熱特性の両方を取得した。

熱物性関係式

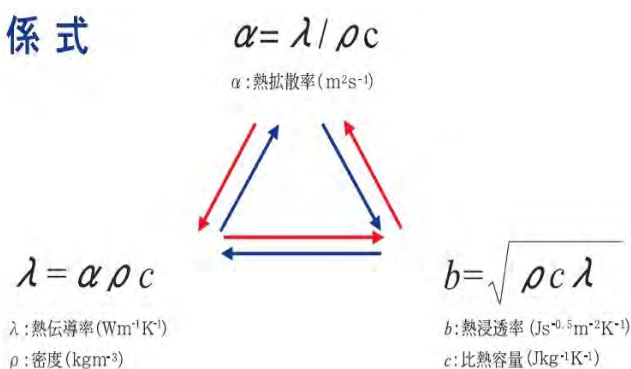


図 4.3.2-1 熱特性の関係

(3) 試験方法

1) 試験装置

第 2 次取りまとめ [9] では、緩衝材の熱特性について、図 4.3.2-2 に示す試験方法 (円筒法) により熱伝導率が取得されている。本試験方法は、2 つの供試体の中央部に温度計 (サーミ

スタ)を設置し、供試体の外面側の温度を制御することにより、熱の伝導状態（熱伝導率：厚さ 1m の測定材料の両面に、温度差 1°C発生させるために必要な熱量）を求めるものである。

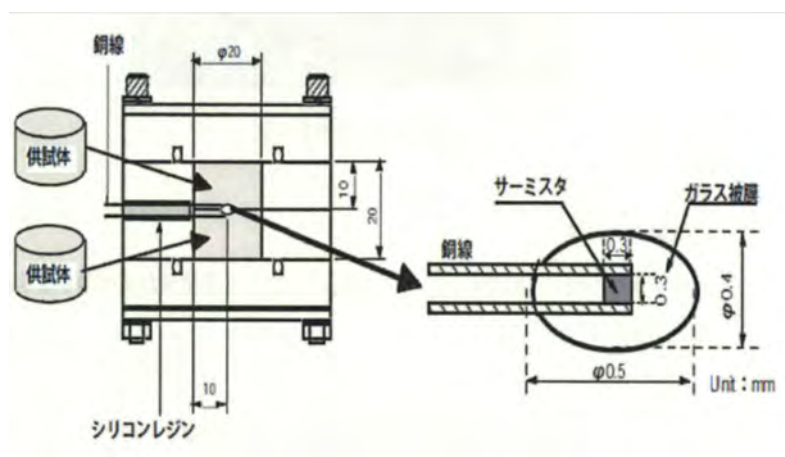


図 4.3.2-2 円筒法による熱伝導率測定装置の例

本検討では、100°C以下における熱特性は円筒法に準じ、供試体の外側からの入熱に対する中央部の温度変化を取得することにより熱伝導率を算出する方法を採用した。図 4.3.2-3 に、試験に用いた熱特性取得装置 [23] とその仕様を示す。同装置は、熱拡散率（定常的な温度勾配が存在する時の熱エネルギーが伝わる速さの割合）の取得も行うことができる機能を有している。また、火災などを想定した高温時の熱特性の取得も可能である。

一方、100°C以上の熱特性については、加熱実験炉（図 4.3.2-4）を用いた加熱を行い、加熱時の供試体の状態を観察するとともに、データ取得を合わせて行った。



XFA 500/LFA 1000

使用装置の仕様

	XFA 300	XFA 500	LFA 1000
Sample dimension	ø6 to 25.4 mm diameter, 0.1 to 6.0 mm height	ø6 to 25.4 mm diameter, 0.1 to 6.0 mm height	ø6 to 25.4 mm diameter, 0.1 to 6.0 mm height
Maximum sample number	up to 6 samples	up to 6 samples	up to 6 samples
Temperature range	RT up to 300°C	RT up to 500°C	-125 up to 500°C RT up to 1250°C/1600°C
Vacuum		10 E ⁻⁴ mbar	10 E ⁻⁴ mbar
Atmosphere	inert, oxid.	inert, oxid., red., vac.	inert, oxid., red., vac.
Thermal Diffusivity	0.01 up to 1000 mm ² /s	0.01 up to 1000 mm ² /s	0.01 up to 1000 mm ² /s
Thermal Conductivity	0.1 up to 2000 W/(m•K)	0.1 up to 2000 W/(m•K)	0.1 up to 2000 W/(m•K)
Pulse source	Xenon Flash	Xenon Flash	Nd: YAG Laser
Pulse energy	10 J/Puls	10 J/Puls	25 J/Puls

図 4.3.2-3 熱特性取得装置とその仕様



図 4.3.2-4 加熱実験炉

2) 入熱条件

加熱試験時の入熱条件としては、図 4.3.2-5 に示す ISO834 標準火災温度曲線相当 [24] とした。

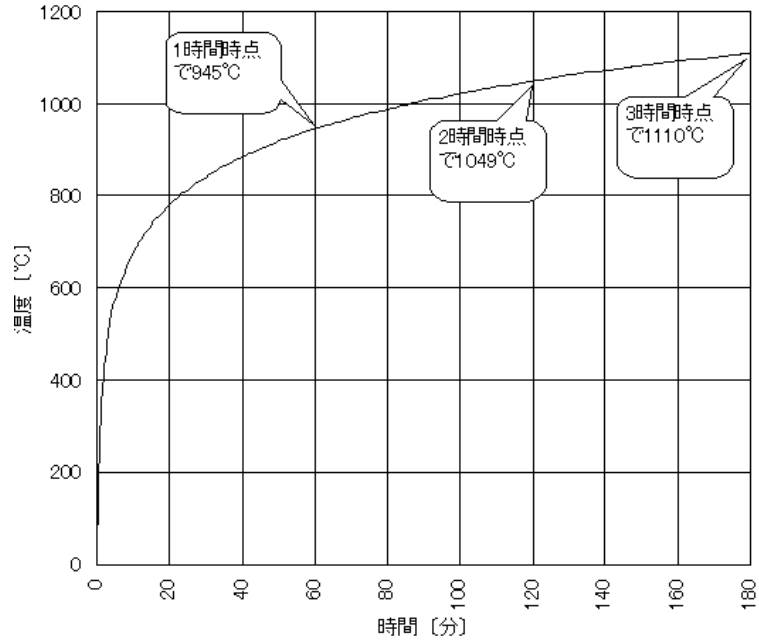


図 4.3.2-5 ISO834 の標準火災温度曲線

(4) 試験ケース

実施する試験ケースを表 4.3.2-2 に示した。また、試験ケース名を表 4.3.2-3 のように設定した。

表 4.3.2-2 緩衝材の熱特性把握に向けた試験ケース

試験対象 材料	飽和度		測定温度水準		
	水準数	摘要	水準数	摘要	備考
緩衝材	2	0%	5	20、60、90°C	
				500、1,000°C	
		85%程度	3	20、60、90°C	
ベントナイト ペレット	2	0%	5	20、60、90°C	
				500、1,000°C	
		85%程度	3	20、60、90°C	

表 4.3.2-3 試験ケース名一覧（緩衝材）

試験ケース名 ¹⁾	試験水準			取得特性	供試体 No.
	材料	飽和度	温度条件		
B-0-20-TD	緩衝材	0%	20℃	熱伝導率	B1
B-0-20-TC	緩衝材	0%	20℃	熱拡散率	B2
B-0-60-TD	緩衝材	0%	60℃	熱伝導率	B1
B-0-60-TC	緩衝材	0%	60℃	熱拡散率	B2
B-0-90-TD	緩衝材	0%	90℃	熱伝導率	B1
B-0-90-TC	緩衝材	0%	90℃	熱拡散率	B2
B-0-500-TD	緩衝材	0%	500℃	熱伝導率	B3
B-0-500-TC	緩衝材	0%	500℃	熱拡散率	B4
B-0-1000-TD	緩衝材	0%	1,000℃	熱伝導率	B5
B-0-1000-TC	緩衝材	0%	1,000℃	熱拡散率	B6
B-85-20-TD	緩衝材	85%	20℃	熱伝導率	B7
B-85-20-TC	緩衝材	85%	20℃	熱拡散率	B8
B-85-60-TD	緩衝材	85%	60℃	熱伝導率	B7
B-85-60-TC	緩衝材	85%	60℃	熱拡散率	B8
B-85-90-TD	緩衝材	85%	90℃	熱伝導率	B7
B-85-90-TC	緩衝材	85%	90℃	熱拡散率	B8
B-0-500-TD-2	緩衝材	0%	500℃	熱伝導率	B9
B-0-1000-TD-2	緩衝材	0%	1,000℃	熱伝導率	B10

1)試験ケース名は、“材料-飽和度-温度条件-取得特性”の順にて略号を付けた

2) B1～B8 が熱特性取得装置用の供試体、B9、B10 が加熱実験炉用の供試体。

前述のように、熱特性取得装置では高温時のデータ取得も可能であるため、500℃、1000℃の温度条件においても熱伝導率と熱拡散率を測定した。

表 4.3.2-4 試験ケース名一覧（ベントナイトペレット）

試験ケース名 ¹⁾	試験水準			取得特性	供試体 No.
	材料	飽和度	温度条件		
P-0-20-TD	緩衝材	0%	20℃	熱伝導率	P1
P-0-20-TC	緩衝材	0%	20℃	熱拡散率	P2
P-0-60-TD	緩衝材	0%	60℃	熱伝導率	P1
P-0-60-TC	緩衝材	0%	60℃	熱拡散率	P2
P-0-90-TD	緩衝材	0%	90℃	熱伝導率	P1
P-0-90-TC	緩衝材	0%	90℃	熱拡散率	P2
P-0-500-TD	緩衝材	0%	500℃	熱伝導率	P3
P-0-500-TC	緩衝材	0%	500℃	熱拡散率	P4
P-0-1000-TD	緩衝材	0%	1,000℃	熱伝導率	P5
P-0-1000-TC	緩衝材	0%	1,000℃	熱拡散率	P6
P-85-20-TD	緩衝材	85%	20℃	熱伝導率	P7
P-85-20-TC	緩衝材	85%	20℃	熱拡散率	P8
P-85-60-TD	緩衝材	85%	60℃	熱伝導率	P7
P-85-60-TC	緩衝材	85%	60℃	熱拡散率	P8
P-85-90-TD	緩衝材	85%	90℃	熱伝導率	P7
P-85-90-TC	緩衝材	85%	90℃	熱拡散率	P8
P-0-500-TD-2	緩衝材	0%	500℃	熱伝導率	P9
P-0-1000-TD-2	緩衝材	0%	1,000℃	熱伝導率	P10

1)試験ケース名は、“材料-飽和度-温度条件-取得特性”の順にて略号を付けた

2) P1～P8 が熱特性取得装置用の供試体、P9、P10 が加熱実験炉用の供試体。

前述のように、熱特性取得装置では高温時のデータ取得も可能であるため、500℃、1000℃の温度条件においても熱伝導率と熱拡散率を測定した。

(5) 供試体の製作

1) 緩衝材

熱特性の取得に用いる供試体のうち緩衝材は、ベントナイト（クニゲル V1）70wt%とケイ砂 30wt%が含有されたものである。緩衝材は、含水比を調整して混練した試料を、載荷装置を用いてプレス成型して製作した。使用した材料はベントナイト（クニミネ工業製クニゲル V1）、ケイ 3 号、ケイ砂 5 号である。



図 4.3.2-6 クニゲル V1 (クミネ工業)



図 4.3.2-7 ケイ砂 3号

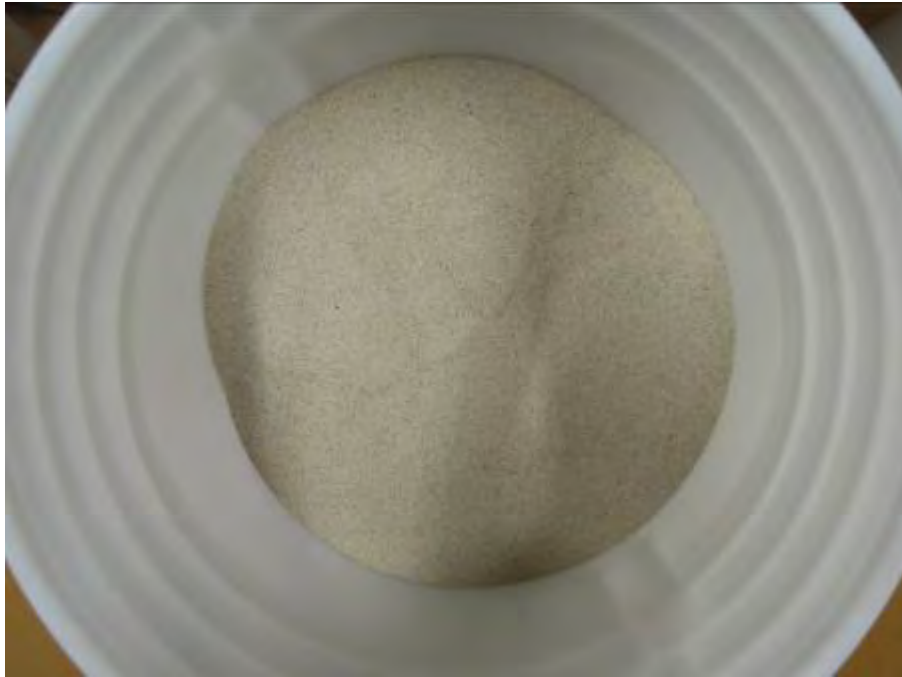


図 4.3.2-8 ケイ砂 5号

供試体の製作手順を図 4.3.2-5 に示す。供試体の成型誤差は飽和度 $\pm 2\%$ 、乾燥密度 $\pm 0.02\text{Mg/m}^3$ となるように製作時の管理をした。

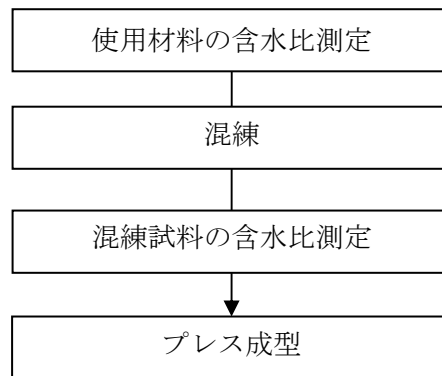


図 4.3.2-9 供試体（緩衝材）製作手順

a. 使用材料の含水比測定

使用する材料（クニゲル、ケイ砂 3号、ケイ砂 5号）それぞれの開封時の含水比を測定した。

b. 混練

クニゲル V1、ケイ砂 3号、ケイ砂 5号と水をミキサーに入れ、一分間混練を行った。混練の際、クニゲル V1、ケイ砂 3号、ケイ 5号は、質量比が 7:1.5:1.5 となるように調整して投入した。水は、成形後に仕様の飽和度、乾燥密度を満たすような含水比を計算し、そ

れに合わせて投入する量を決定した。

c. 混練試料の含水比測定

混練を行なった試料の含水比を測定し、適切な含水比（飽和度 85%の場合、含水比 18%）を得ていることを確認した。

d. 試料のプレス成型

試料成型用の治具に混練試料を投入した。この際、炭酸ガスを同時に封入し、空気による供試体の割れを防いだ。規定量の試料を投入し、真空ポンプを用いて余分な空気を抜きつつピストンを入れた。

載荷装置を用いてピストンを押し、プレス成型を行なった。なお、載荷時及び除荷時に十分な時間をかけ、供試体の割れを防いだ。

2) ベントナイトペレット

熱特性の取得に用いる供試体のうちベントナイトペレットは、既往の研究[14]において使用されている材料について、飽和度を調整した上で使用した。また、4mm 級と 1mm 級のペレットを重量比 50:50 で混合して使用した。

4.3.3 試験結果

(1) 製作した供試体の特性（緩衝材の製作結果）

製作した供試体の特性を表 4.3.3-1 に示す。また、供試体の外観を表 4.3.3-2 及び表 4.3.3-3 に示す。供試体の成型誤差は飽和度±2%、乾燥密度±0.02Mg/m³となるように製作時の管理をした。

表 4.3.3-1 供試体の特性

供試体 No.	密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)	供試体 No.	密度 (Mg/m ³)	飽和度 (%)
B1	1.59	0	P1	1.38	0
B2	1.61	0	P2	1.38	0
B3	1.60	0	P3	1.37	0
B4	1.60	0	P4	1.36	0
B5	1.58	0	P5	1.38	0
B6	1.62	0	P6	1.36	0
B7	1.61	84	P7	1.36	85
B8	1.60	85	P8	1.37	85
B9	1.61	0	P9	1.37	0
B10	1.62	0	P10	1.37	0

表 4.3.3-2 供試体の外観（緩衝材）

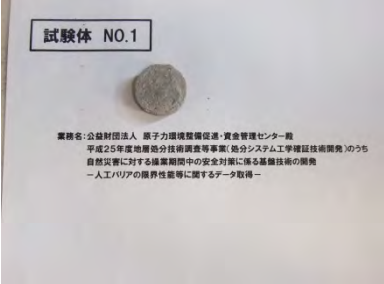

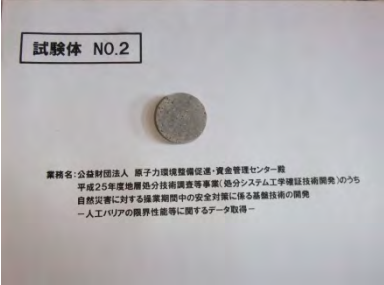
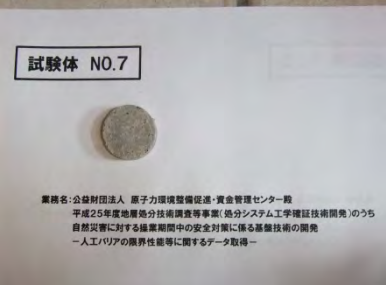
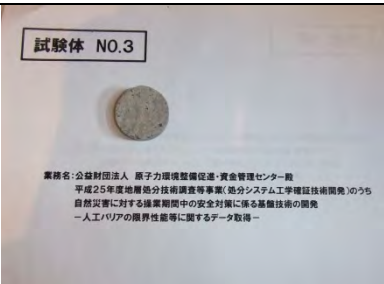
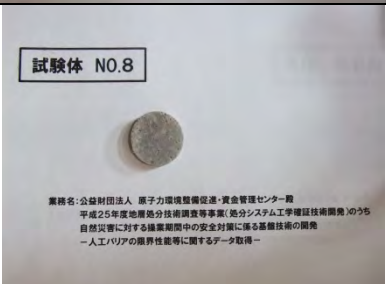
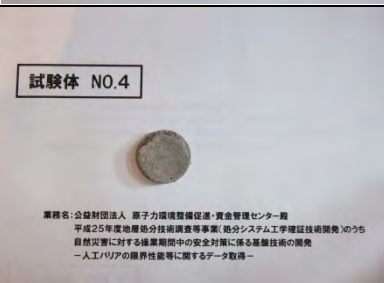

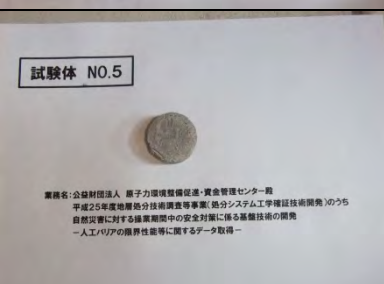

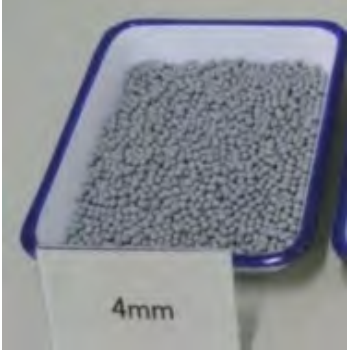

No.	外観状況	No.	外観状況
B1	 <p>試験体 NO.1</p> <p>業務名:公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 平成25年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>	B6	 <p>試験体 NO.6</p> <p>業務名:公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 平成25年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>
B2	 <p>試験体 NO.2</p> <p>業務名: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年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>	B7	 <p>試験体 NO.7</p> <p>業務名: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年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>
B3	 <p>試験体 NO.3</p> <p>業務名: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年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>	B8	 <p>試験体 NO.8</p> <p>業務名: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年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>
B4	 <p>試験体 NO.4</p> <p>業務名: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年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>	B9	
B5	 <p>試験体 NO.5</p> <p>業務名: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年度地震発生技術調査等事業(処分システム工学検証技術開発)のうち 自然災害に対する稼働期間中の安全対策に係る基礎技術の開発 —人工バリアの限界性能等に関するデータ取得—</p>	B10	

表 4.3.3-3 供試体の外観（ペレット）

No.	外観状況	
P1～P10	 <p data-bbox="628 658 730 685">4mm 級</p>	 <p data-bbox="1011 658 1114 685">1mm 級</p>

※熱特性取得装置の容器へ 4mm と 1mm のペレットを重量比 50:50 に混合して充てん

(2) 加熱結果

加熱実験炉を用いて図 4.3.3-1 及び図 4.3.3-2 に示す温度により加熱を行った。

加熱前後の供試体の状況を図 4.3.3-3 及び図 4.3.3-4 に示す。加熱時及び加熱後の供試体は、大きく破損するような現象は確認されなかった。また、1000℃まで加熱した供試体は、茶色く変色したのが確認された。

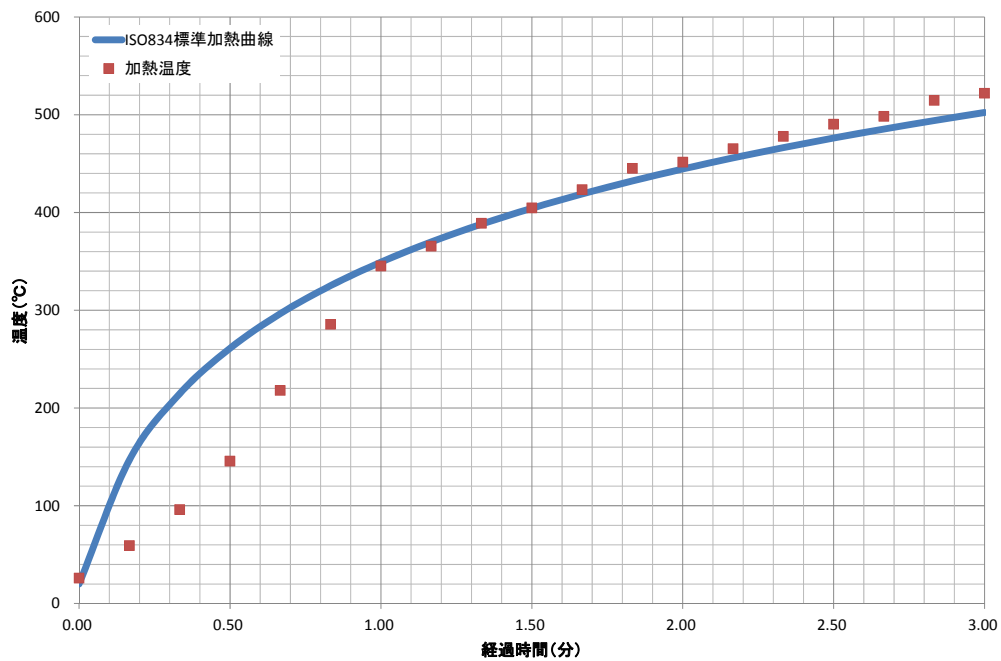


図 4.3.3-1 加熱温度 (B9 供試体及び P9 供試体)

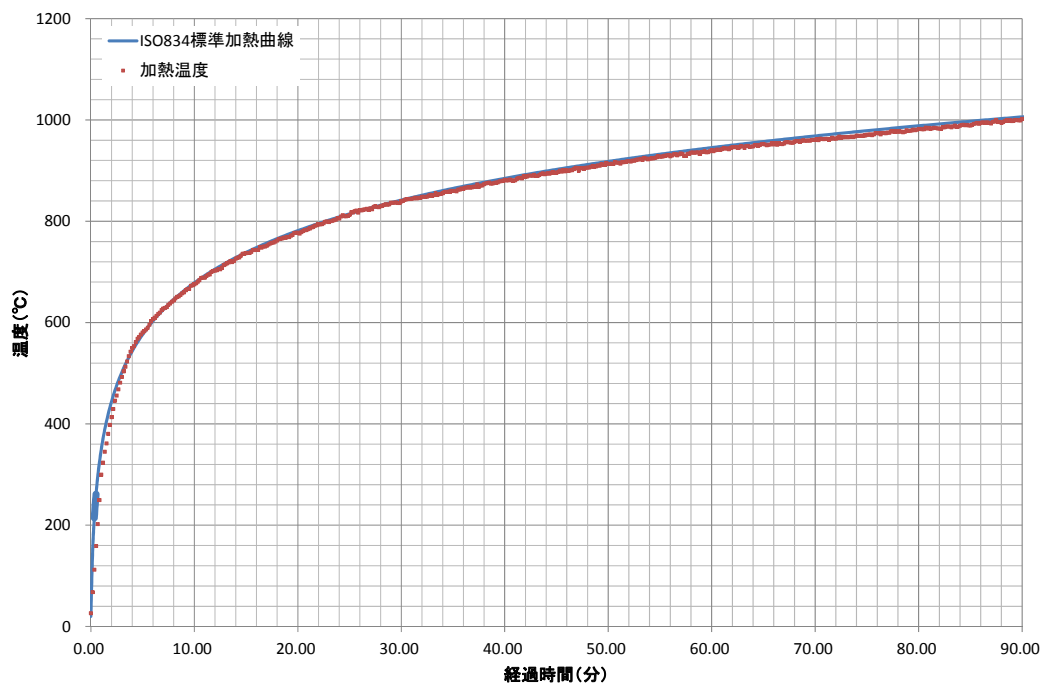


図 4.3.3-2 加熱温度 (B10 供試体及び P10 供試体)



図 4.3.3-3 加熱前の供試体の状況（左：P9 供試体右：B9 供試体）



図 4.3.3-4 加熱後の供試体の状況（左：P10 供試体右：B10 供試体）

(3) 熱伝導率試験結果

1) 緩衝材

a. 試験ケース B-0-20-TD

試験ケース B-0-20-TD に対する試験結果を表 4.3.3-4 及び図 4.3.3-5、図 4.3.3-6 に示す。同図表に示すように、所定温度を 5 分間保持し、その間 10 秒ごとにデータを取得し、これを 3 回実施した（以下、熱特性取得装置による試験ケースについては同じ）。

表 4.3.3-4 試験結果（試験ケース B-0-20-TD）

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.6	19.5	19.6	19.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.457	0.475	0.444	0.459

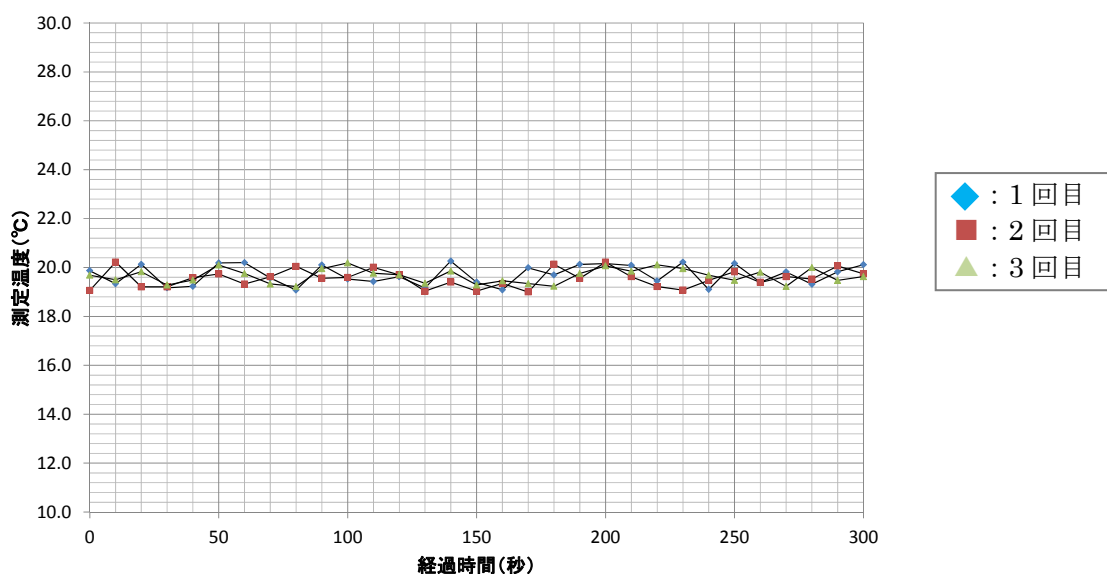


図 4.3.3-5 温度測定結果（試験ケース B-0-20-TD）

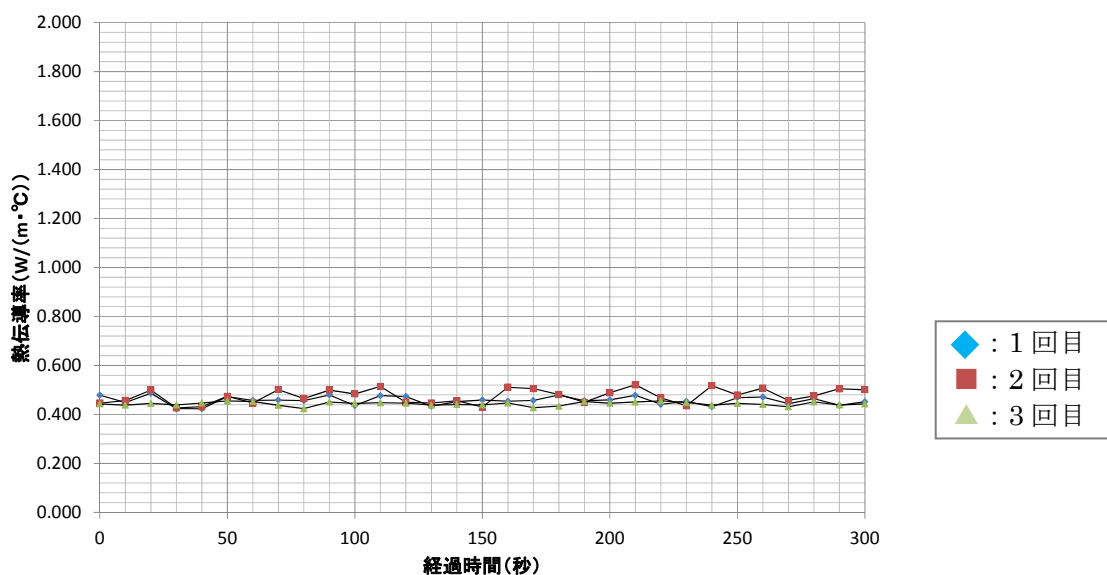


図 4.3.3-6 熱伝導率測定結果（試験ケース B-0-20-TD）

b. 試験ケース B-0-60-TD

試験ケース B-0-60-TD に対する試験結果を表 4.3.3-5 及び図 4.3.3-7、図 4.3.3-8 に示す。

表 4.3.3-5 試験結果 (試験ケース B-0-60-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.7	59.6	59.6	59.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.454	0.483	0.471	0.469

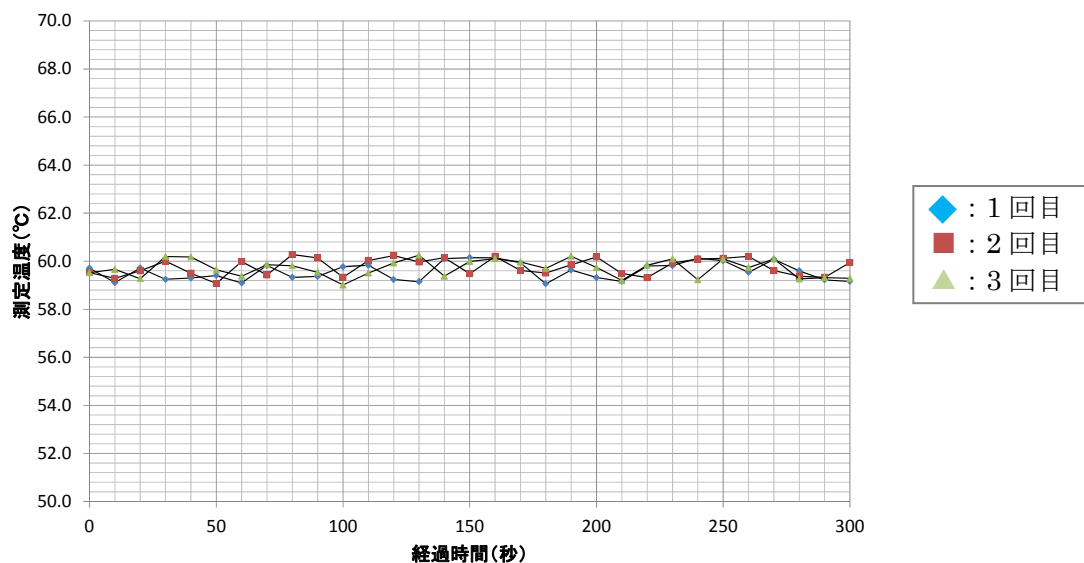


図 4.3.3-7 温度測定結果 (試験ケース B-0-60-TD)

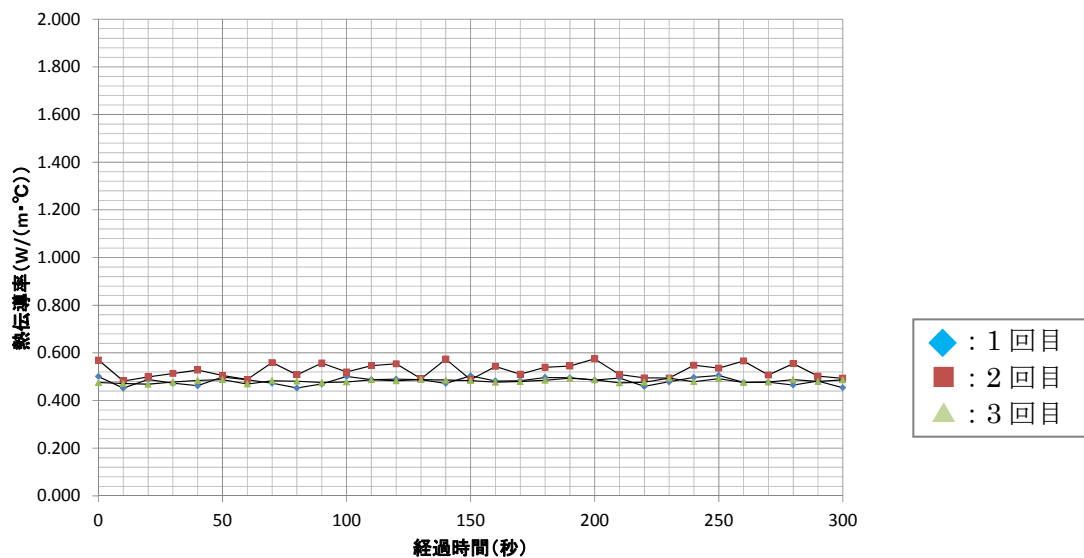


図 4.3.3-8 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-60-TD)

c. 試験ケース B-0-90-TD

試験ケース B-0-90-TD に対する試験結果を表 4.3.3-6 及び図 4.3.3-9、図 4.3.3-10 に示す。

表 4.3.3-6 試験結果 (試験ケース B-0-90-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.7	89.7	89.6	89.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.436	0.439	0.356	0.410

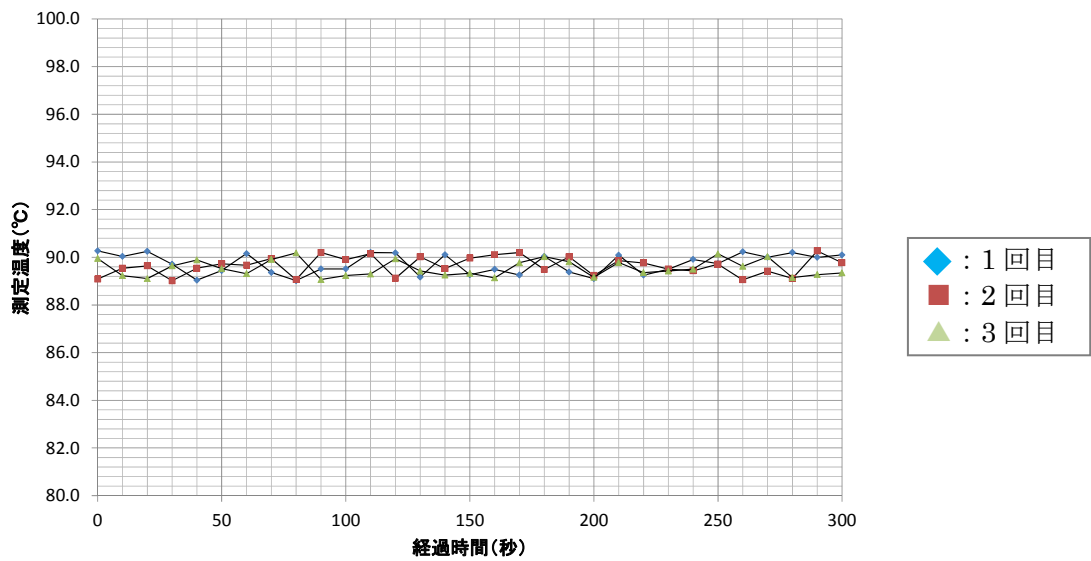


図 4.3.3-9 温度測定結果 (試験ケース B-0-90-TD)

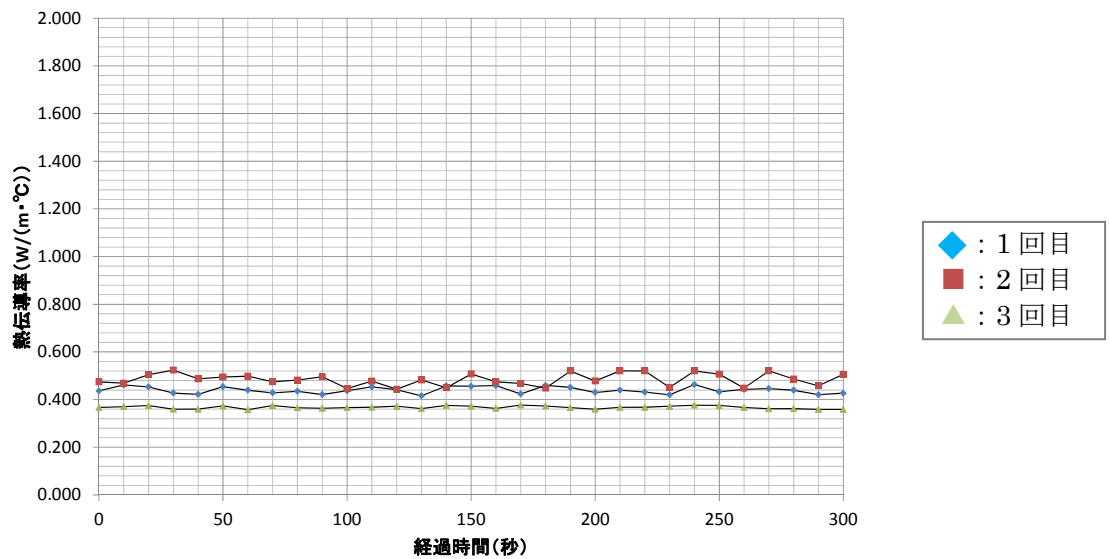


図 4.3.3-10 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-90-TD)

d. 試験ケース B-0-500-TD

試験ケース B-0-500-TD に対する試験結果を表 4.3.3-7 及び図 4.3.3-11、図 4.3.3-12 に示す。

表 4.3.3-7 試験結果 (試験ケース B-0-500-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	499.8	499.6	499.6	499.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.450	0.450	0.459	0.453

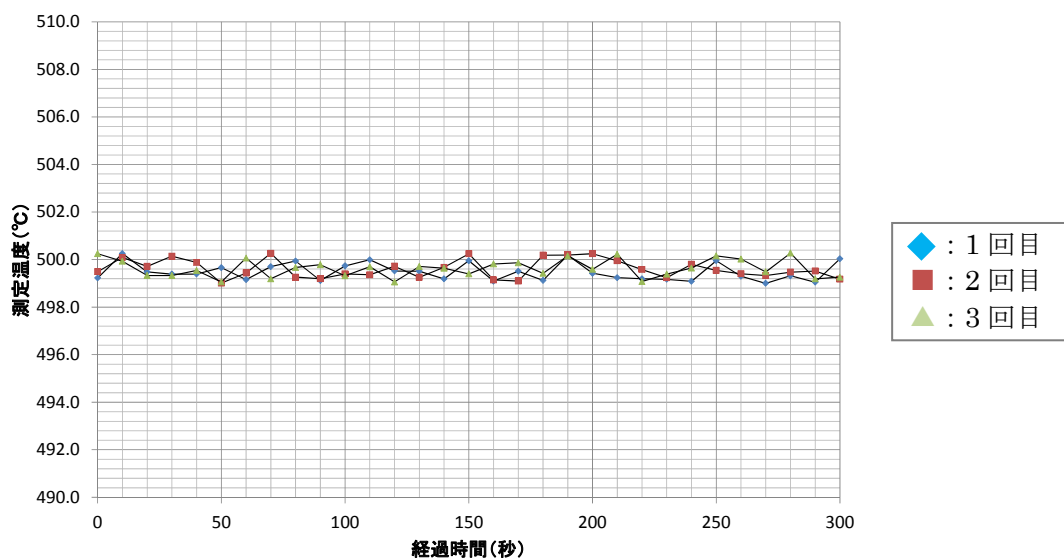


図 4.3.3-11 温度測定結果 (試験ケース B-0-500-TD)

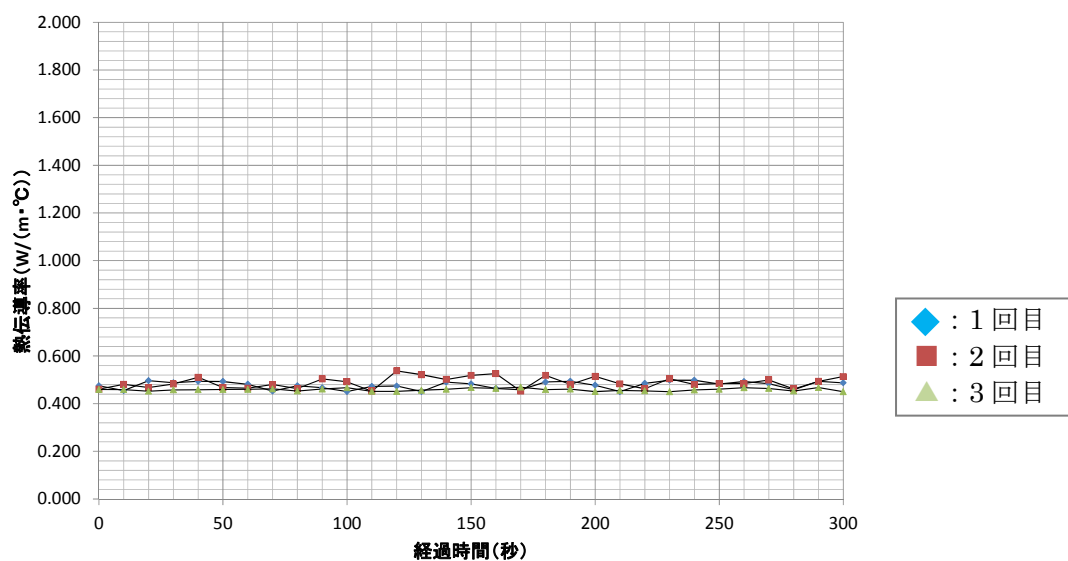


図 4.3.3-12 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-500-TD)

e. 試験ケース B-0-1000-TD

試験ケース B-0-1000-TD に対する試験結果を表 4.3.3-8 及び図 4.3.3-13、図 4.3.3-14 に示す。

表 4.3.3-8 試験結果 (試験ケース B-0-1000-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	999.6	999.8	999.7	999.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.522	0.542	0.516	0.527

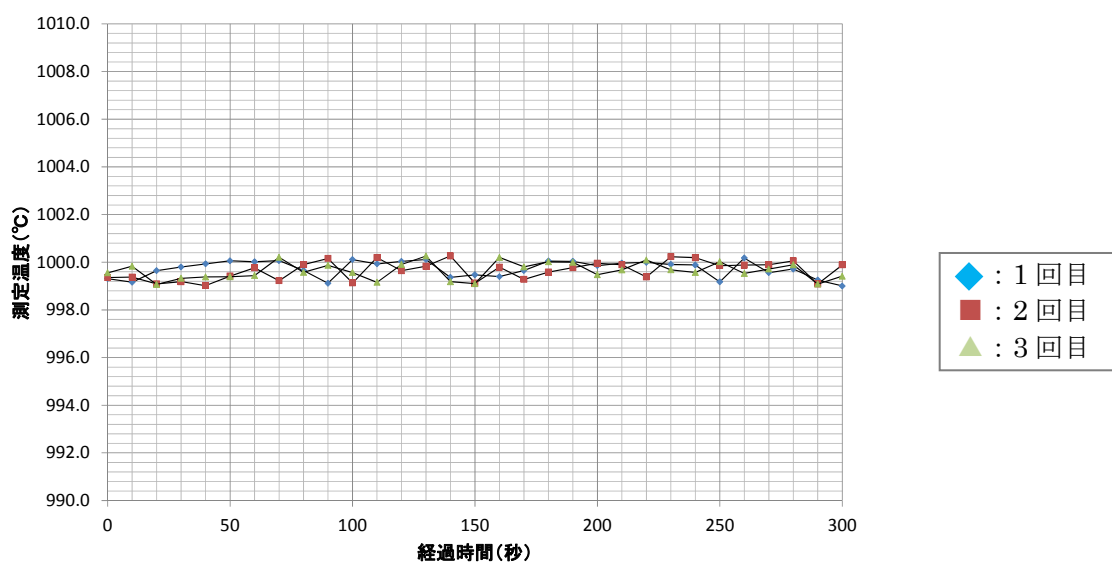


図 4.3.3-13 温度測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD)

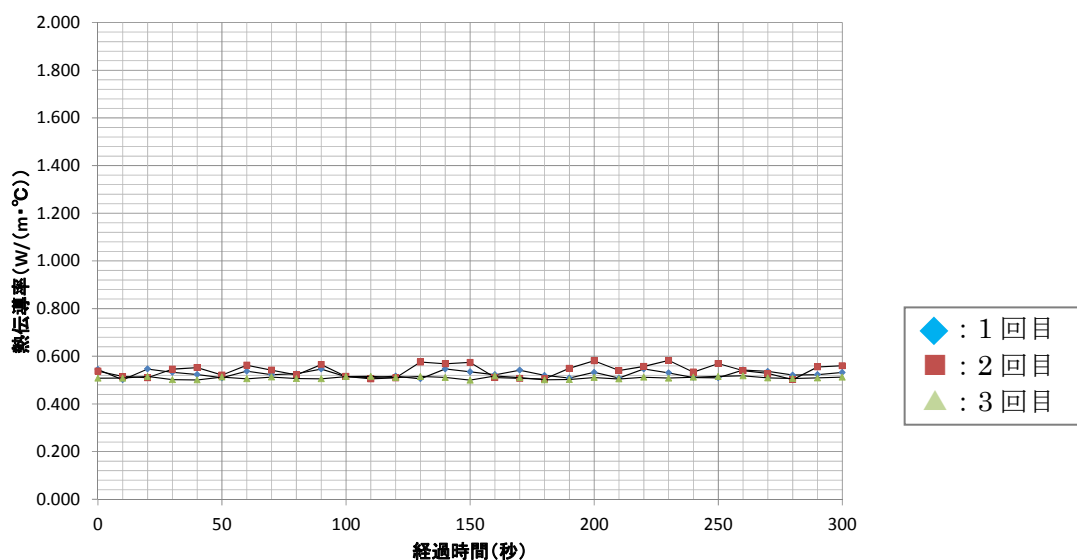


図 4.3.3-14 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD)

f. 試験ケース B-85-20-TD

試験ケース B-85-20-TD に対する試験結果を表 4.3.3-9 及び図 4.3.3-15、図 4.3.3-16 に示す。

表 4.3.3-9 試験結果 (試験ケース B-85-20-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.7	19.7	19.7	19.7
熱伝導率 (W/m°C)	1.675	1.632	1.823	1.710

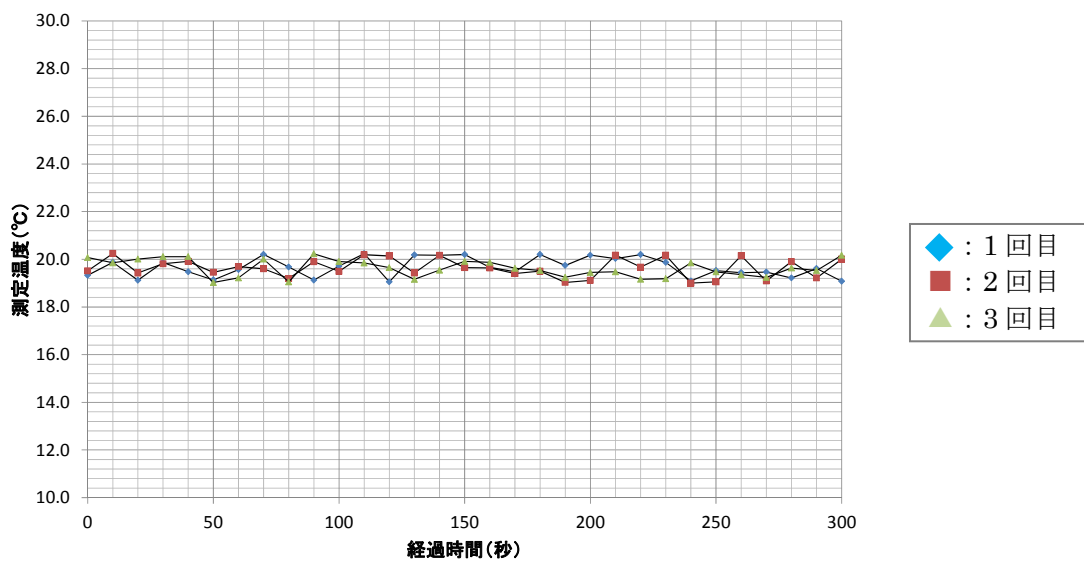


図 4.3.3-15 温度測定結果 (試験ケース B-85-20-TD)

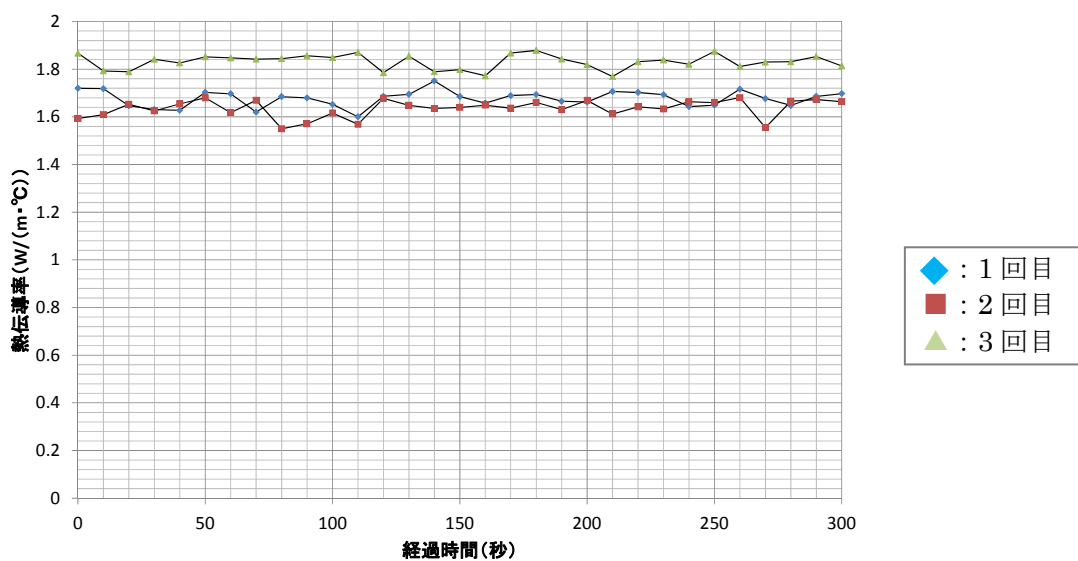


図 4.3.3-16 熱伝導率測定 (試験ケース B-85-20-TD)

g. 試験ケース B-85-60-TD

試験ケース B-85-60-TD に対する試験結果を表 4.3.3-10 及び図 4.3.3-17、図 4.3.3-18 に示す。

表 4.3.3-10 試験結果 (試験ケース B-85-60-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.6	59.6	59.6	59.6
熱伝導率 (W/m°C)	1.393	1.537	1.322	1.417

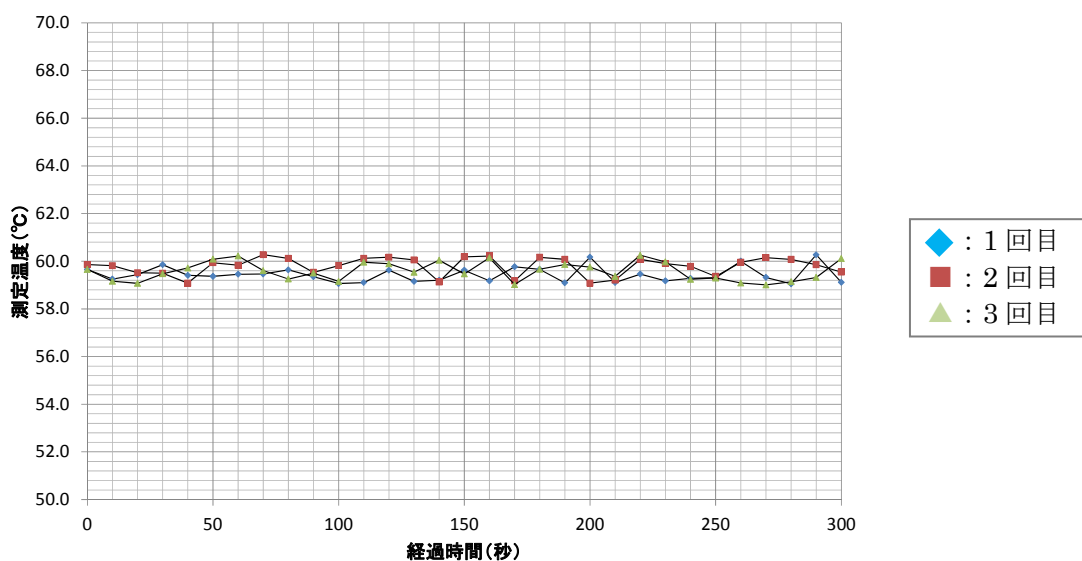


図 4.3.3-17 温度測定結果 (試験ケース B-85-60-TD)

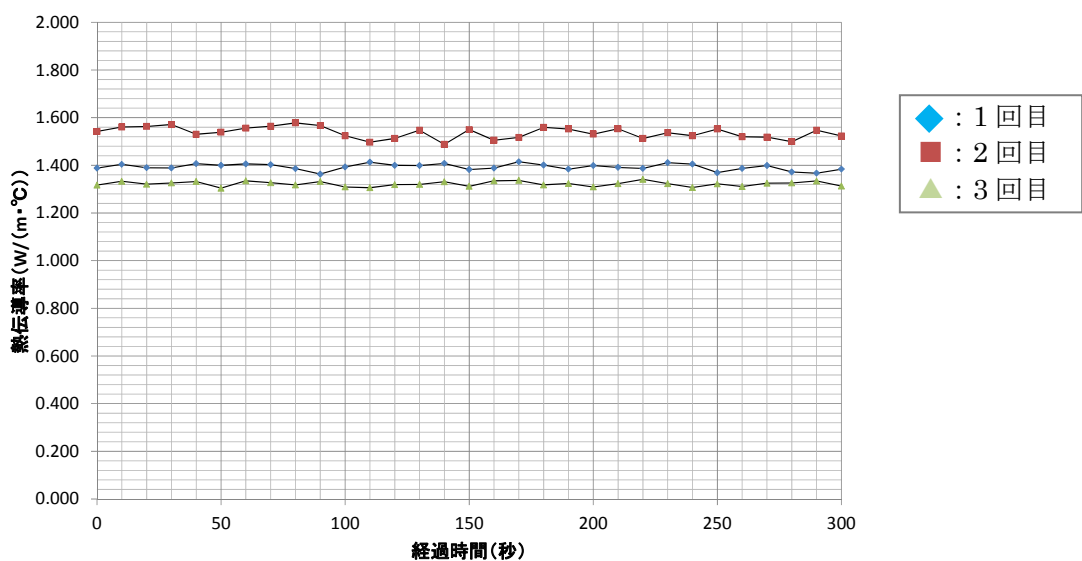


図 4.3.3-18 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-85-60-TD)

h. 試験ケース B-85-90-TD

試験ケース B-85-90-TD に対する試験結果を表 4.3.3-11 及び図 4.3.3-19、図 4.3.3-20 に示す。

表 4.3.3-11 試験結果 (試験ケース B-85-90-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.6	89.7	89.6	89.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.826	0.806	0.807	0.813

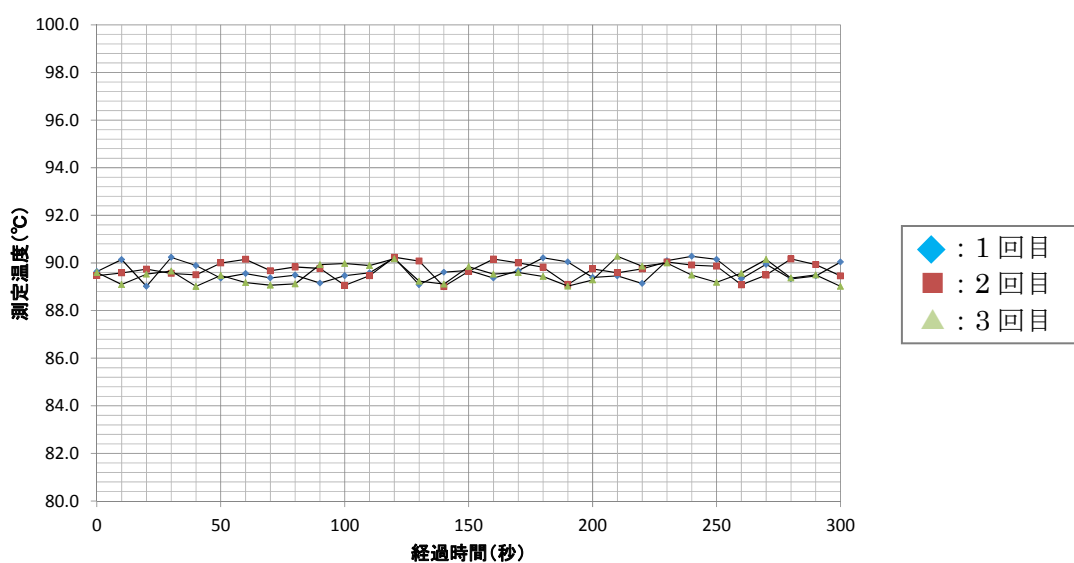


図 4.3.3-19 温度測定結果 (試験ケース B-85-90-TD)

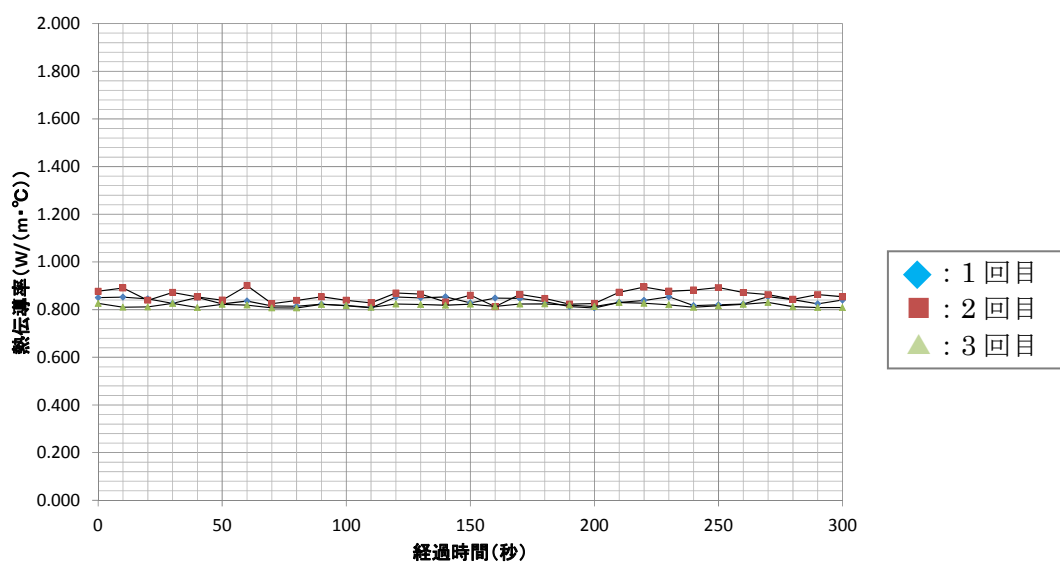


図 4.3.3-20 熱伝導率測定 (試験ケース B-85-90-TD)

i. 試験ケース B-0-500-TD-2

試験ケース B-0-500-TD-2 に対する試験結果を表 4.3.3-12 及び図 4.3.3-21、図 4.3.3-26 に示す。

表 4.3.3-12 試験結果 (試験ケース B-0-500-TD-2)

試験項目	1 回目
測定時温度 (°C)	499.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.494

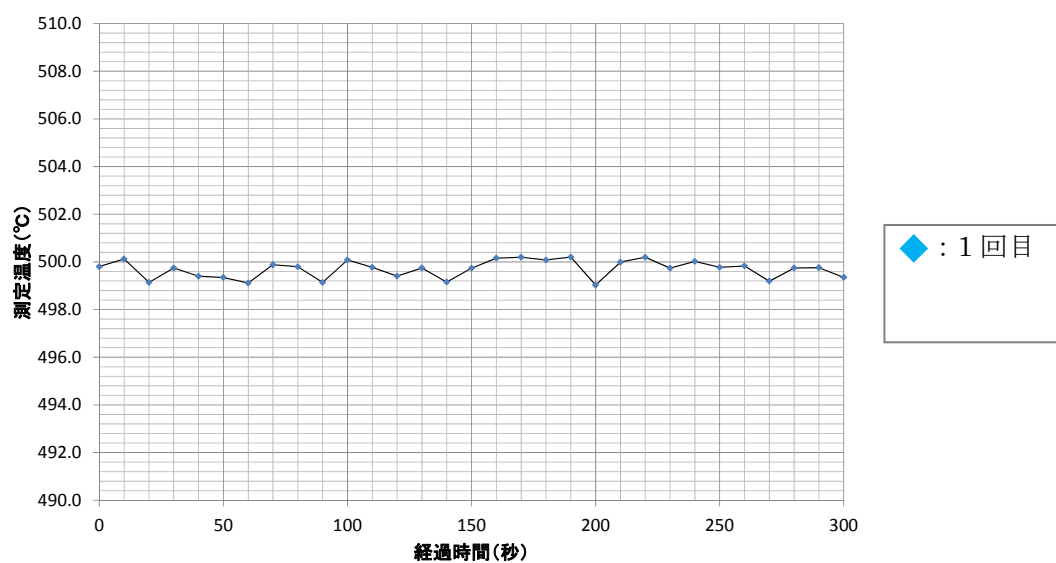


図 4.3.3-21 温度測定結果 (試験ケース B-0-500-TD-2)

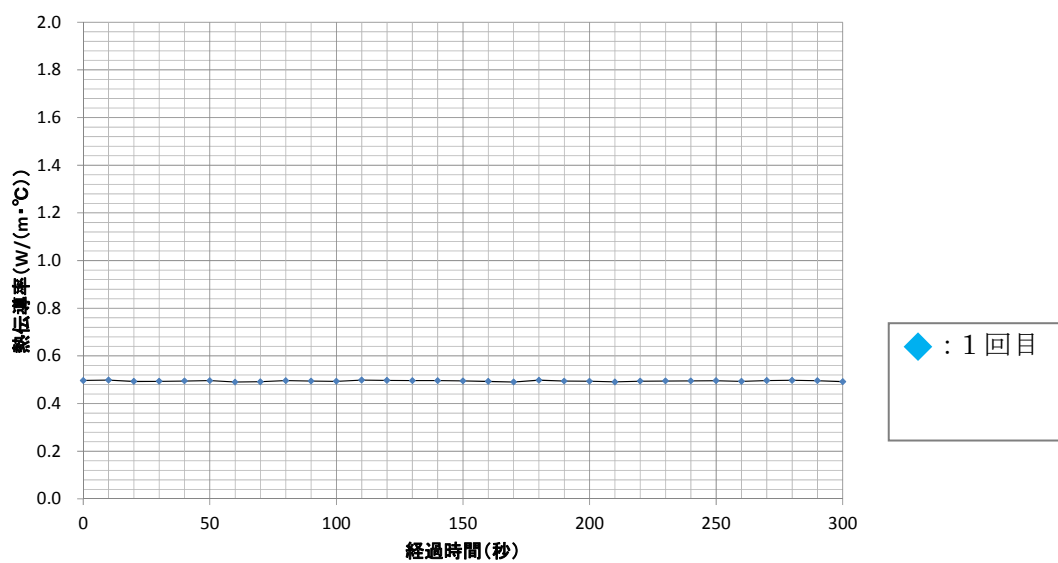


図 4.3.3-22 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-500-TD-2)

j. 試験ケース B-0-1000-TD-2

試験ケース B-0-1000-TD-2 に対する試験結果を表 4.3.3-13 及び図 4.3.3-24、図 4.3.3-24 に示す。

表 4.3.3-13 試験結果 (試験ケース B-0-1000-TD-2)

試験項目	1 回目
測定時温度 (°C)	999.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.636

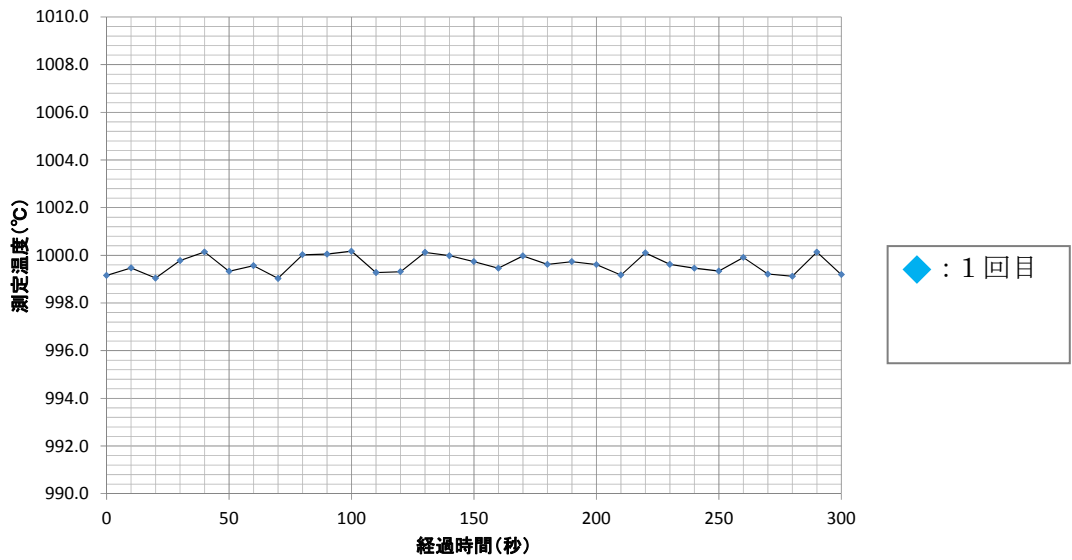


図 4.3.3-23 温度測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD-2)

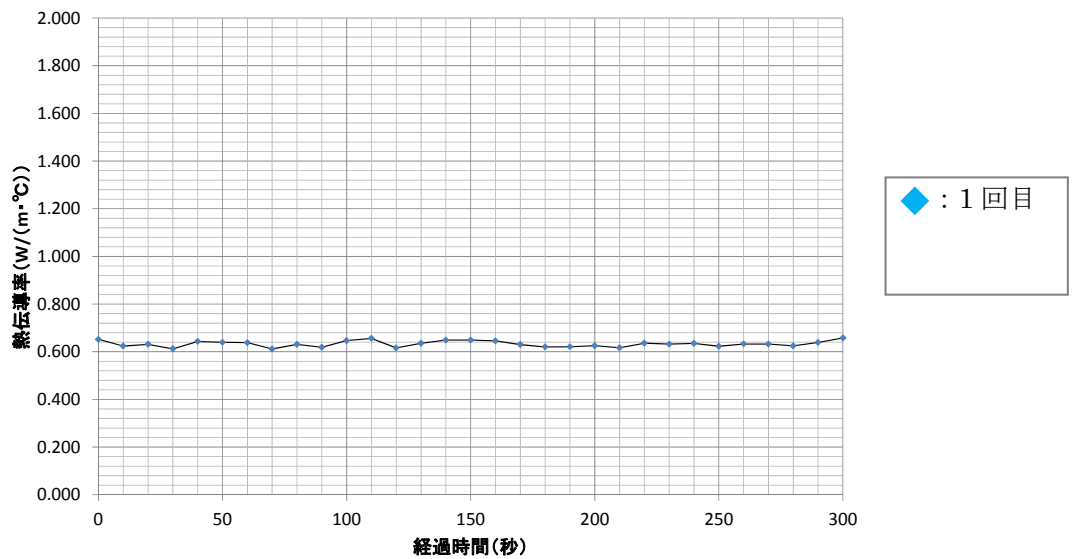


図 4.3.3-24 熱伝導率測定結果 (試験ケース B-0-1000-TD-2)

2) ベントナイトペレット

a. 試験ケース P-0-20-TD

試験ケース P-0-20-TD に対する試験結果を表 4.3.3-14 及び図 4.3.3-25、図 4.3.3-26 に示す。

表 4.3.3-14 試験結果 (試験ケース P-0-20-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.7	19.6	19.6	19.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.414	0.438	0.401	0.418

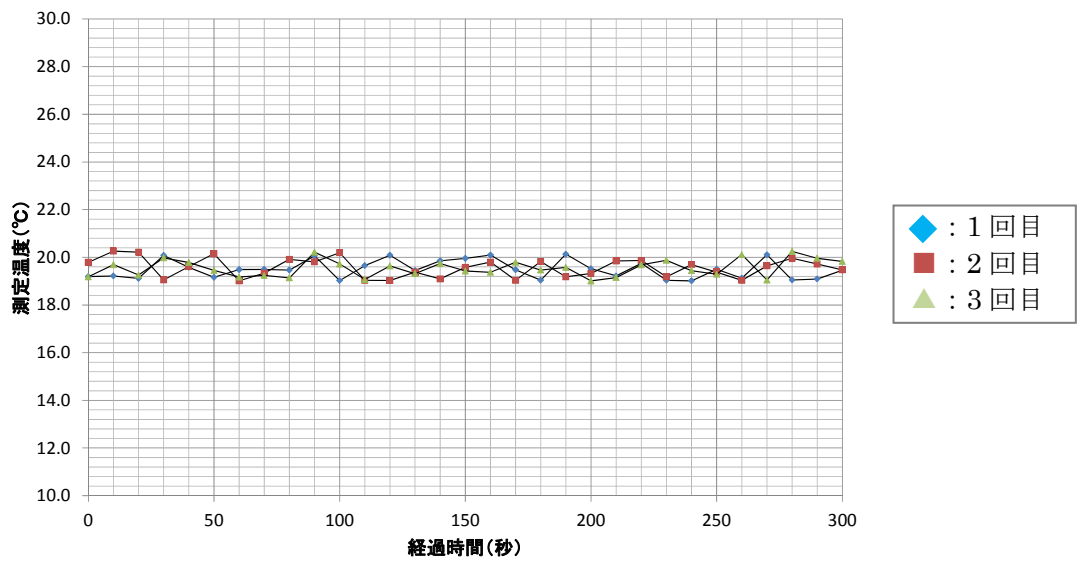


図 4.3.3-25 温度測定結果 (試験ケース P-0-20-TD)

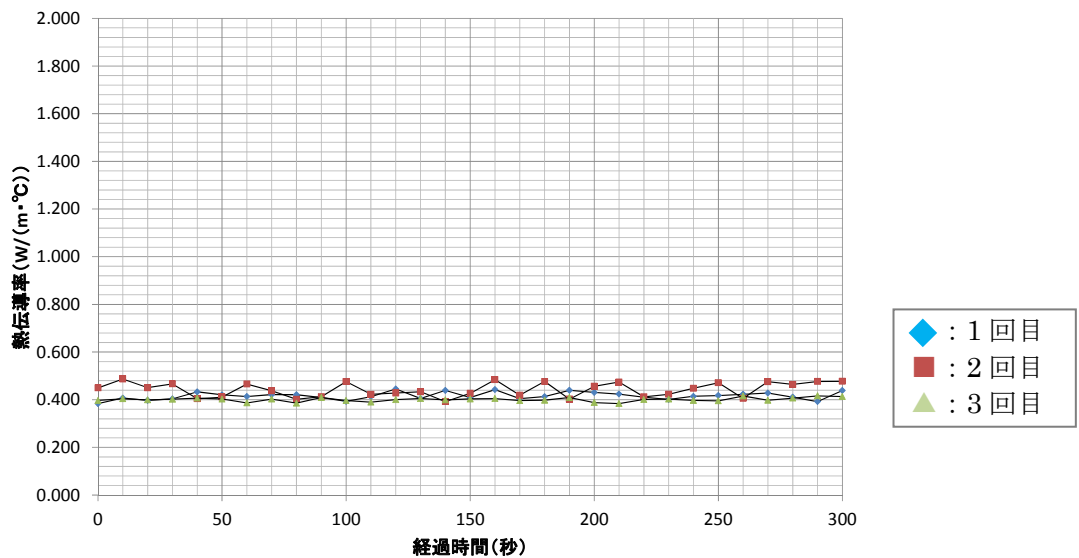


図 4.3.3-26 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-20-TD)

b. 試験ケース P-0-60-TD

試験ケース P-0-60-TD に対する試験結果を表 4.3.3-15 及び図 4.3.3-27、図 4.3.3-28 に示す。

表 4.3.3-15 試験結果 (試験ケース P-0-60-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.7	59.6	59.5	59.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.357	0.506	0.486	0.450

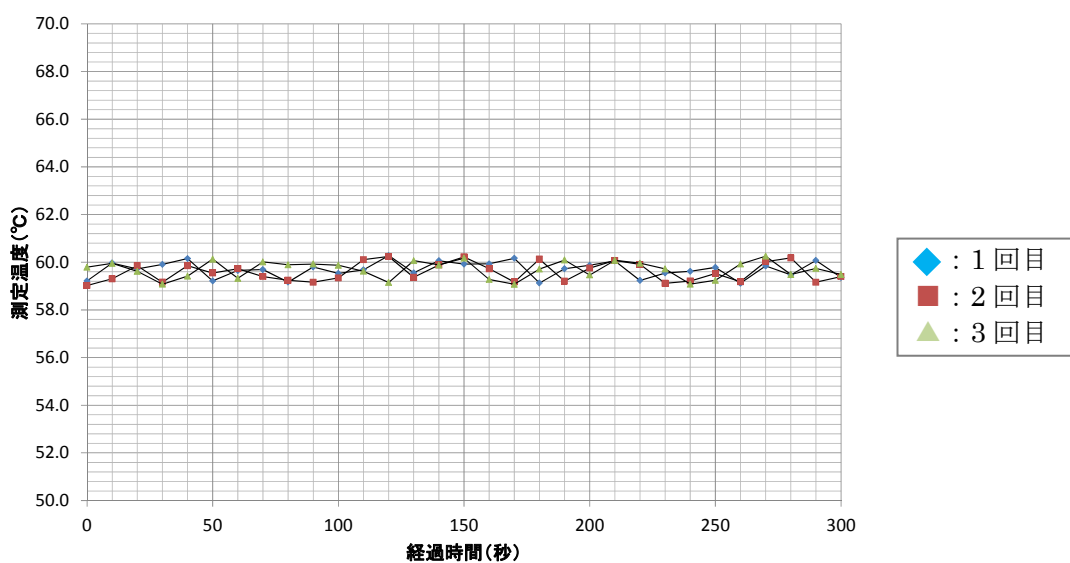


図 4.3.3-27 温度測定結果 (試験ケース P-0-60-TD)

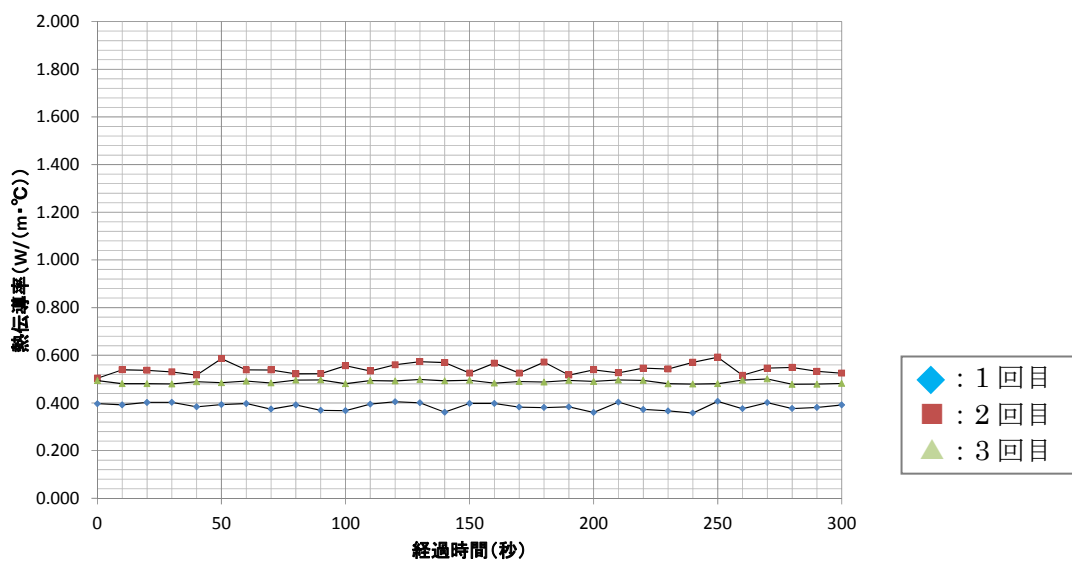


図 4.3.3-28 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-60-TD)

c. 試験ケース P-0-90-TD

試験ケース P-0-90-TD に対する試験結果を表 4.3.3-16 及び図 4.3.3-29、図 4.3.3-30 に示す。

表 4.3.3-16 試験結果 (試験ケース P-0-90-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.7	89.7	89.7	89.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.444	0.469	0.432	0.448

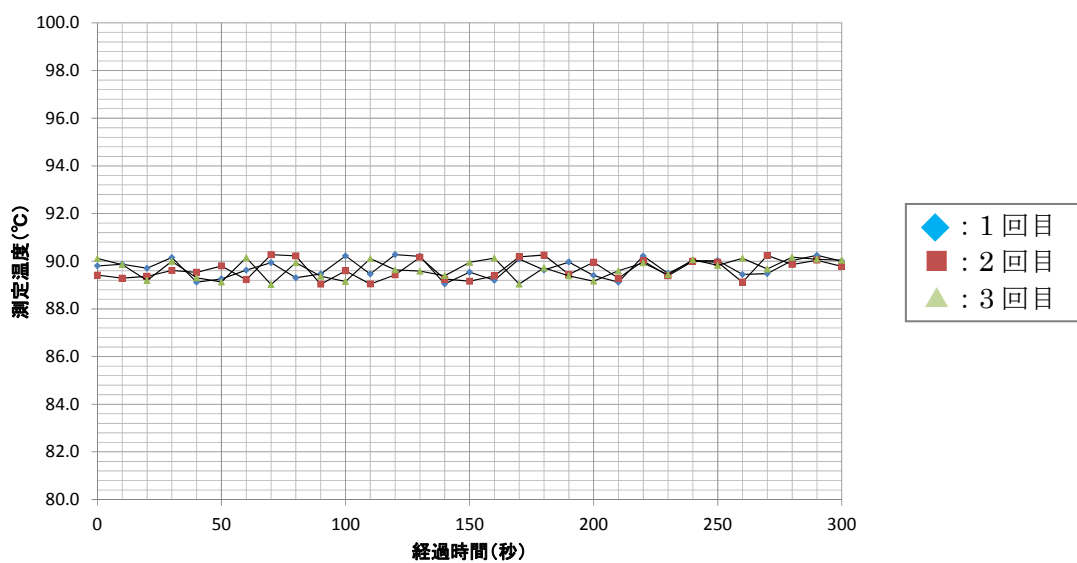


図 4.3.3-29 温度測定結果 (試験ケース P-0-90-TD)

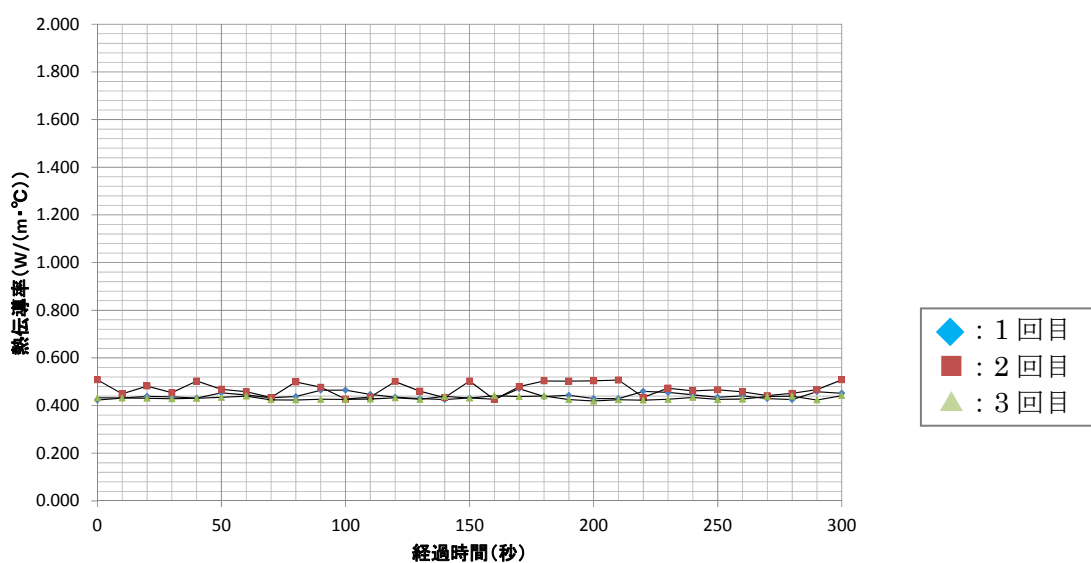


図 4.3.3-30 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-90-TD)

d. 試験ケース P-0-500-TD

試験ケース P-0-500-TD に対する試験結果を表 4.3.3-17 及び図 4.3.3-31、図 4.3.3-32 に示す。

表 4.3.3-17 試験結果 (試験ケース P-0-500-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	499.6	499.7	499.6	499.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.448	0.493	0.410	0.450

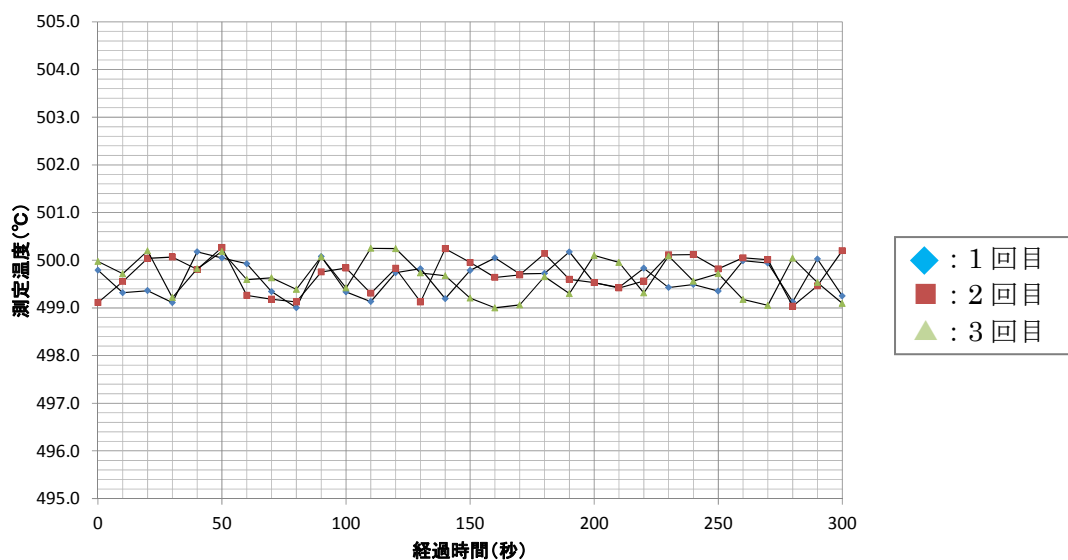


図 4.3.3-31 温度測定結果 (試験ケース P-0-500-TD)

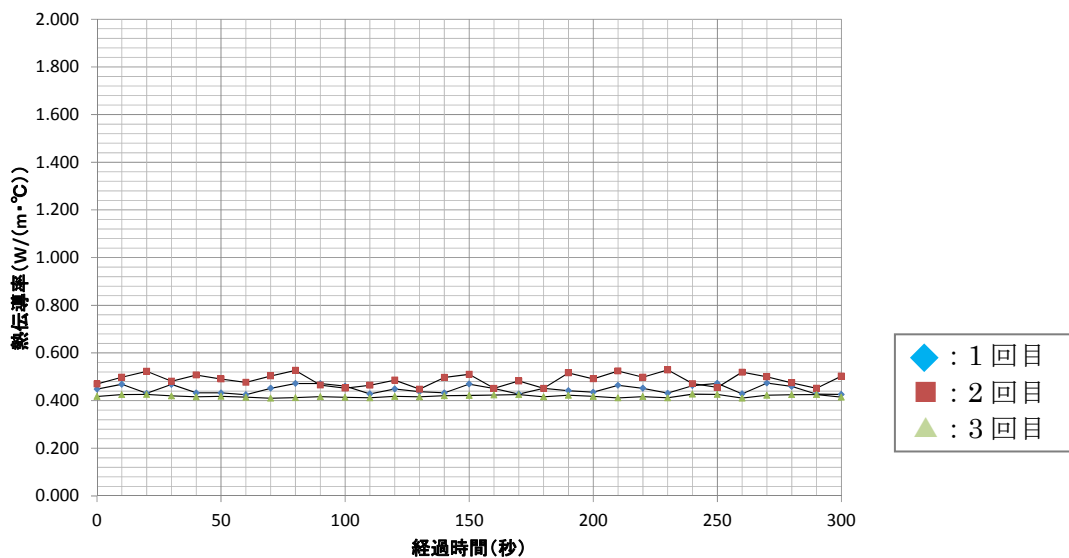


図 4.3.3-32 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-500-TD)

e. 試験ケース P-0-1000-TD

試験ケース P-0-1000-TD に対する試験結果を表 4.3.3-18 及び図 4.3.3-33、図 4.3.3-34 に示す。

表 4.3.3-18 試験結果 (試験ケース P-0-1000-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	999.6	999.7	999.6	999.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.480	0.450	0.490	0.473

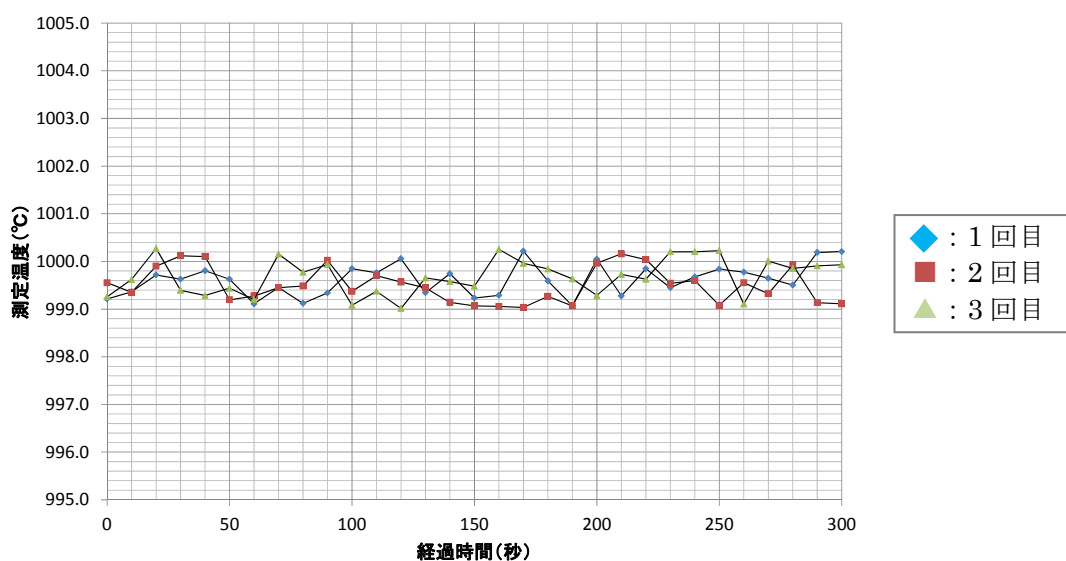


図 4.3.3-33 温度測定結果 (試験ケース P-0-1000-TD)

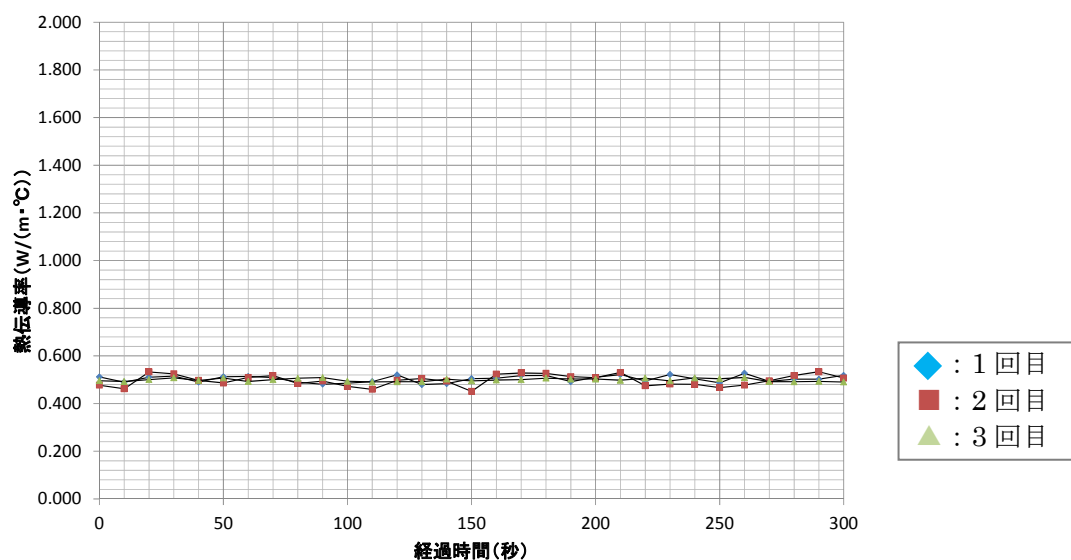


図 4.3.3-34 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-1000-TD)

f. 試験ケース P-85-20-TD

試験ケース P-85-20-TD に対する試験結果を表 4.3.3-19 及び図 4.3.3-35、図 4.3.3-36 に示す。

表 4.3.3-19 試験結果 (試験ケース P-85-20-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.7	19.6	19.6	19.6
熱伝導率 (W/m°C)	1.458	1.453	1.450	1.454

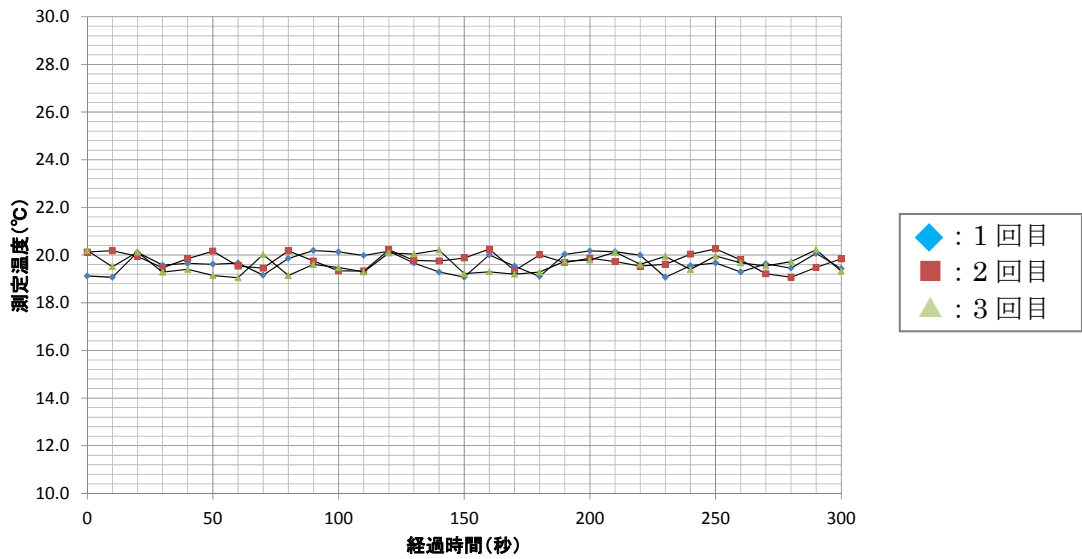


図 4.3.3-35 温度測定結果 (試験ケース P-85-20-TD)

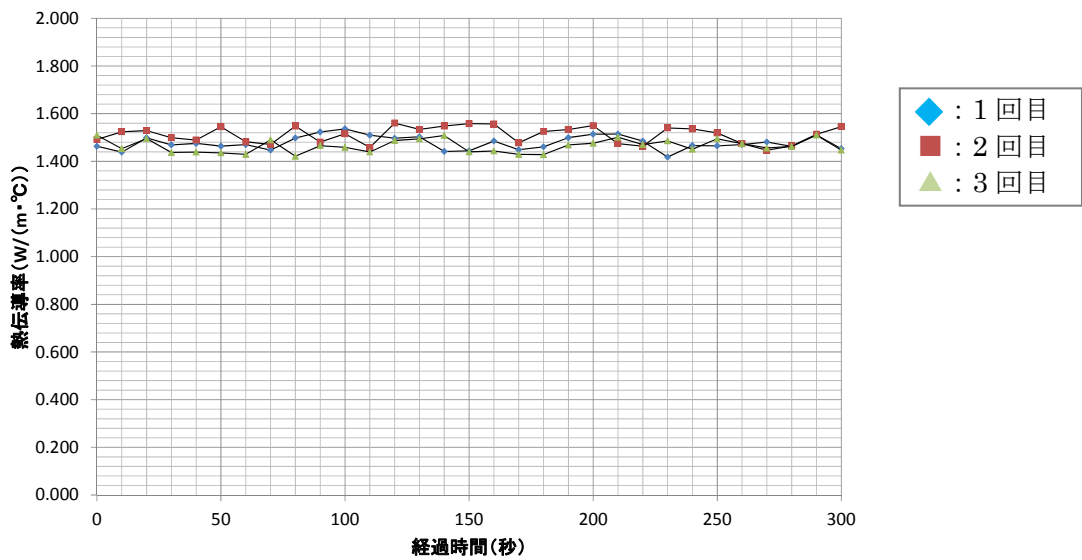


図 4.3.3-36 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-85-20-TD)

g. 試験ケース P-85-60-TD

試験ケース P-85-60-TD に対する試験結果を表 4.3.3-20 及び図 4.3.3-37、図 4.3.3-38 に示す。

表 4.3.3-20 試験結果 (試験ケース P-85-60-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.7	59.7	59.7	59.7
熱伝導率 (W/m°C)	1.493	1.588	1.564	1.548

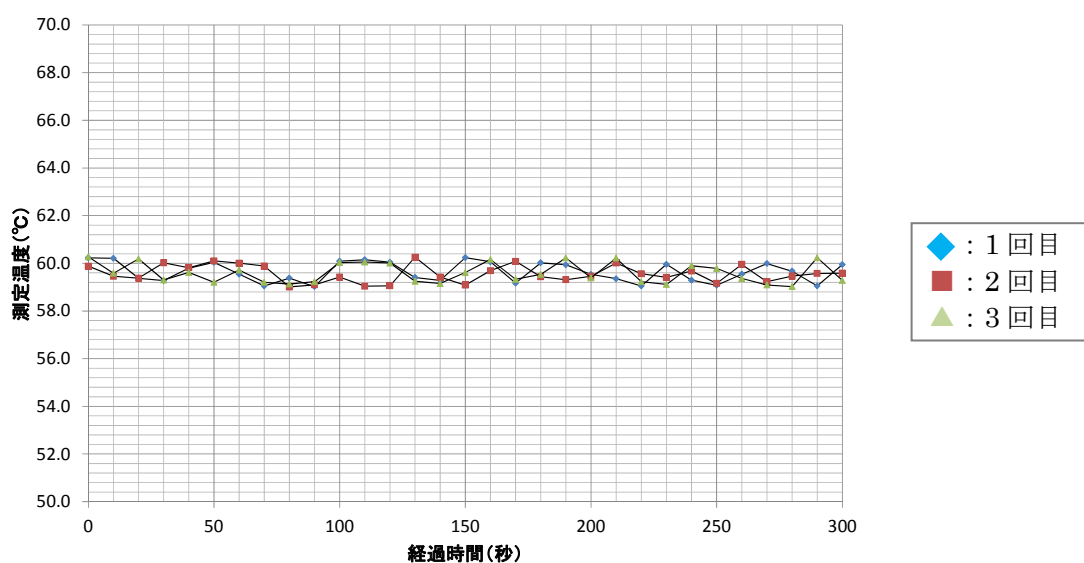


図 4.3.3-37 温度測定結果 (試験ケース P-85-60-TD)

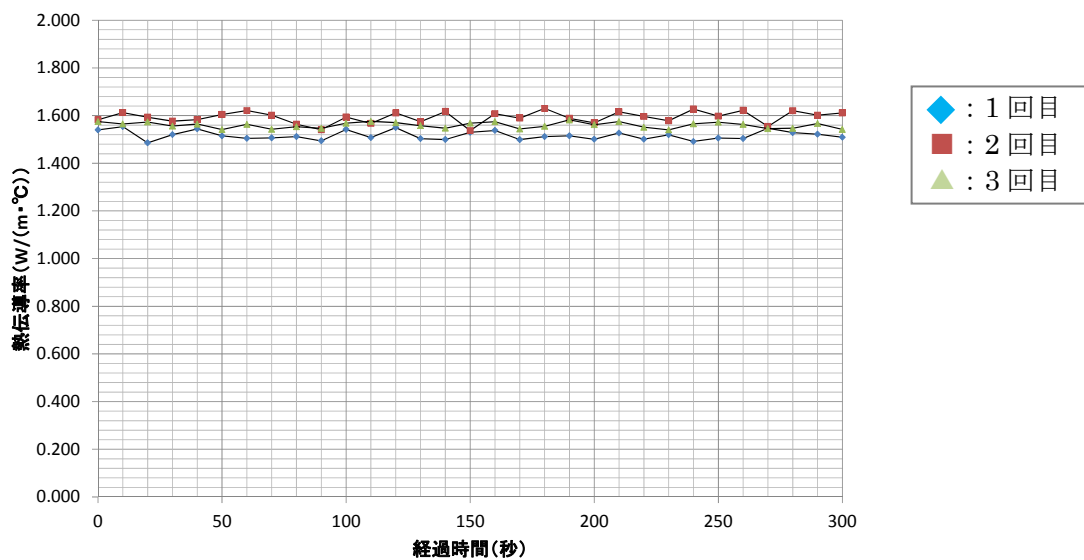


図 4.3.3-38 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-85-60-TD)

h. 試験ケース P-85-90-TD

試験ケース P-85-90-TD に対する試験結果を表 4.3.3-21 及び図 4.3.3-39、図 4.3.3-40 に示す。

表 4.3.3-21 試験結果 (試験ケース P-85-90-TD)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.6	89.6	89.6	89.6
熱伝導率 (W/m°C)	0.764	0.825	0.870	0.820

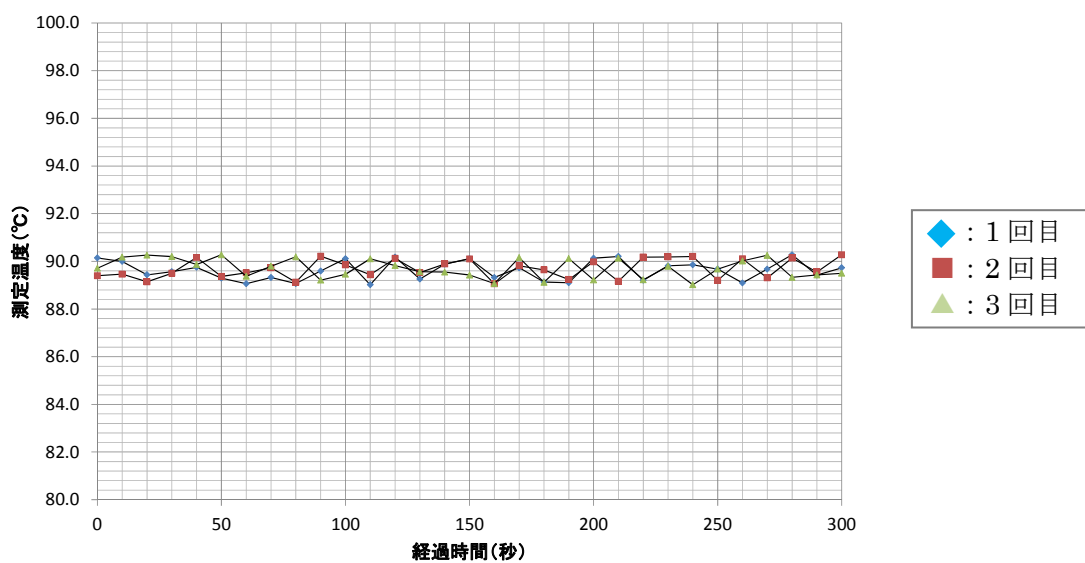


図 4.3.3-39 温度測定結果 (試験ケース P-85-90-TD)

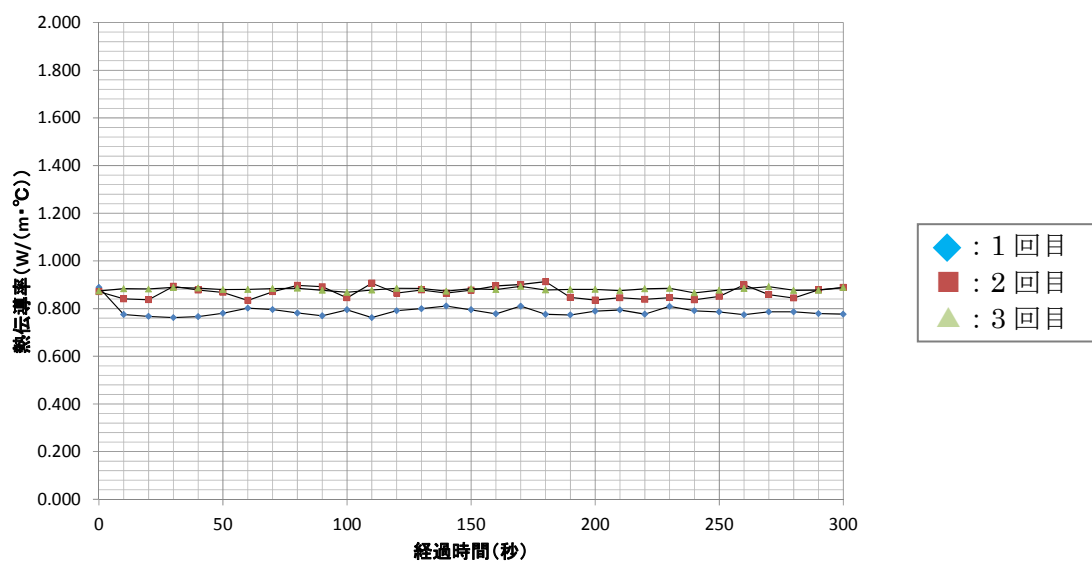


図 4.3.3-40 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-85-90-TD)

i. 試験ケース P-0-500-TD-2

試験ケース P-0-500-TD-2 に対する試験結果を表 4.3.3-22 及び図 4.3.3-41、図 4.3.3-42 に示す。

表 4.3.3-22 試験結果 (試験ケース P-0-500-TD-2)

試験項目	1 回目
測定時温度 (°C)	499.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.450

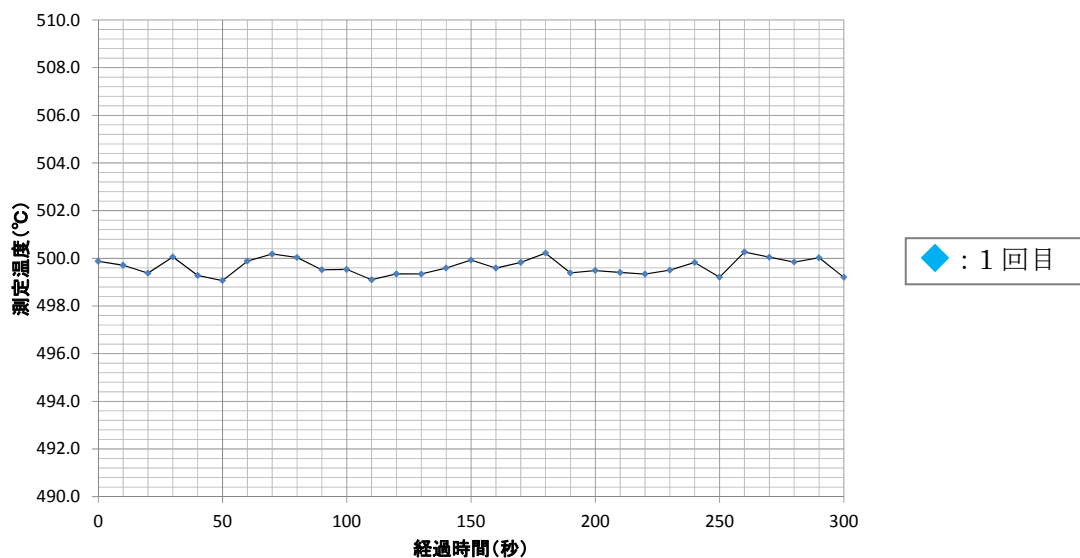


図 4.3.3-41 温度測定結果 (試験ケース P-0-500-TD-2)

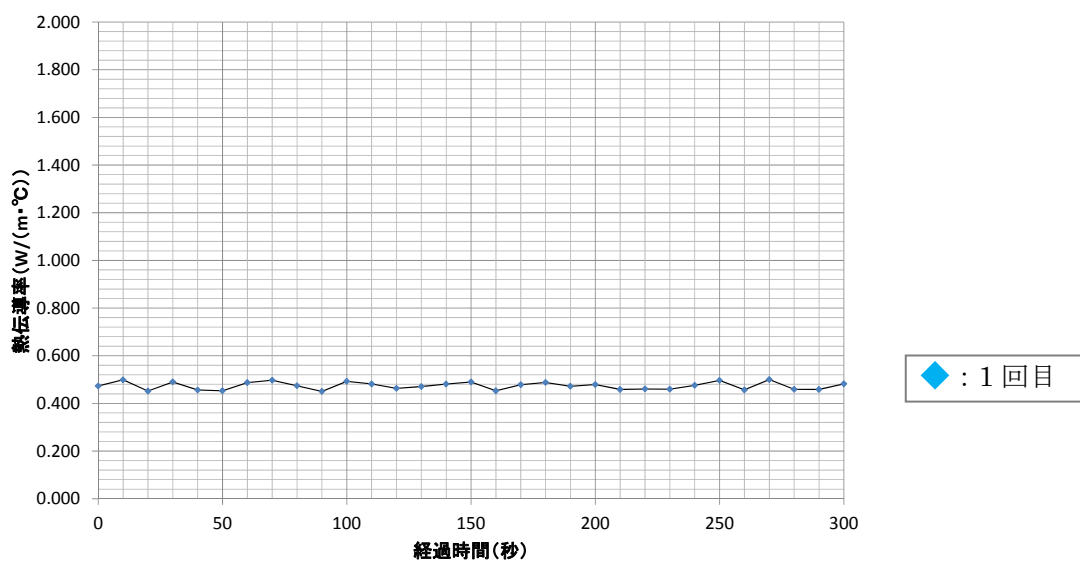


図 4.3.3-42 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-500-TD-2)

j. 試験ケース P-0-1000-TD-2

試験ケース P-0-1000-TD-2 に対する試験結果を表 4.3.3-23 及び図 4.3.3-43、図 4.3.3-44 に示す。

表 4.3.3-23 試験結果 (試験ケース P-0-1000-TD-2)

試験項目	1 回目
測定時温度 (°C)	999.7
熱伝導率 (W/m°C)	0.444

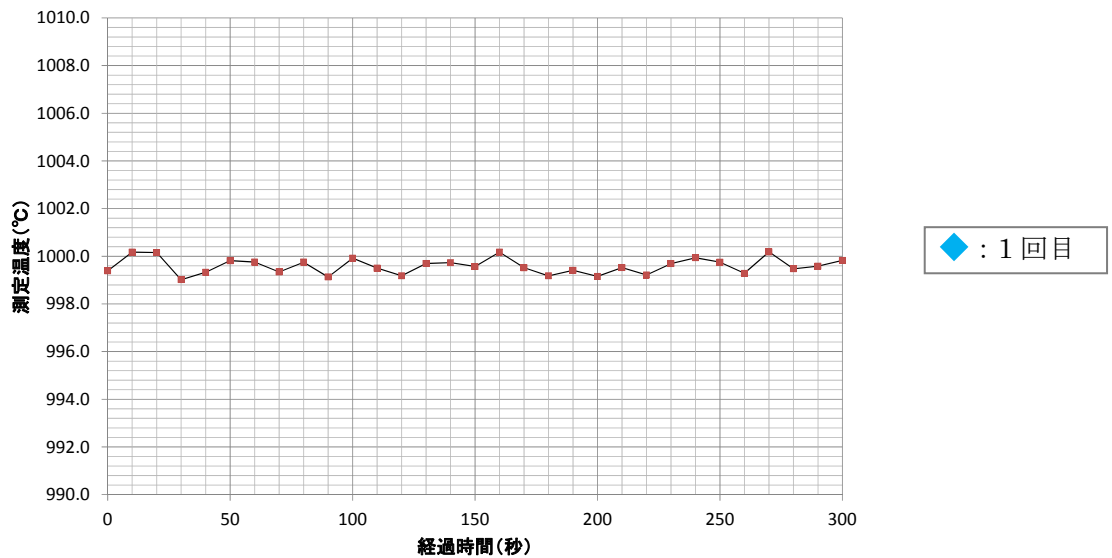


図 4.3.3-43 温度測定結果 (試験ケース P-0-1000-TD-2)

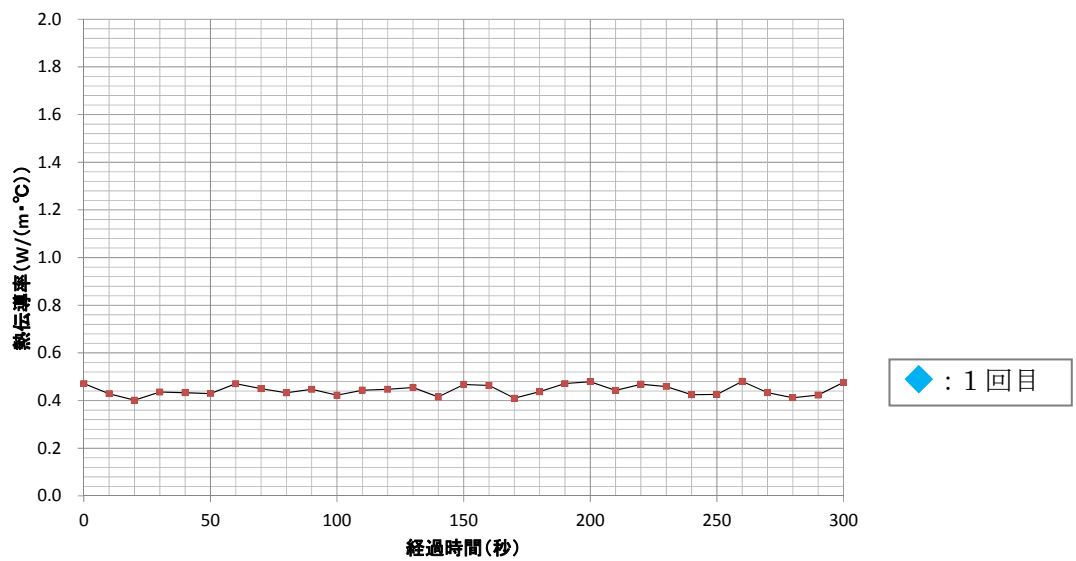


図 4.3.3-44 熱伝導率測定結果 (試験ケース P-0-1000-TD-2)

(4) 熱拡散率試験結果

1) 緩衝材

a. 試験ケース B-0-20-TC

試験ケース B-0-20-TC に対する試験結果を表 4.3.3-24 及び図 4.3.3-45、図 4.3.3-46 に示す。同図表に示すように、所定温度を 5 分間保持し、その間 10 秒ごとにデータを取得し、これを 3 回実施した（以下、他の試験ケースについても同じ）。

表 4.3.3-24 試験結果（試験ケース B-0-20-TC）

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.8	19.7	19.8	19.8
熱拡散率 (m ² /s)	1.331E-06	1.302E-06	1.341E-06	1.325E-06

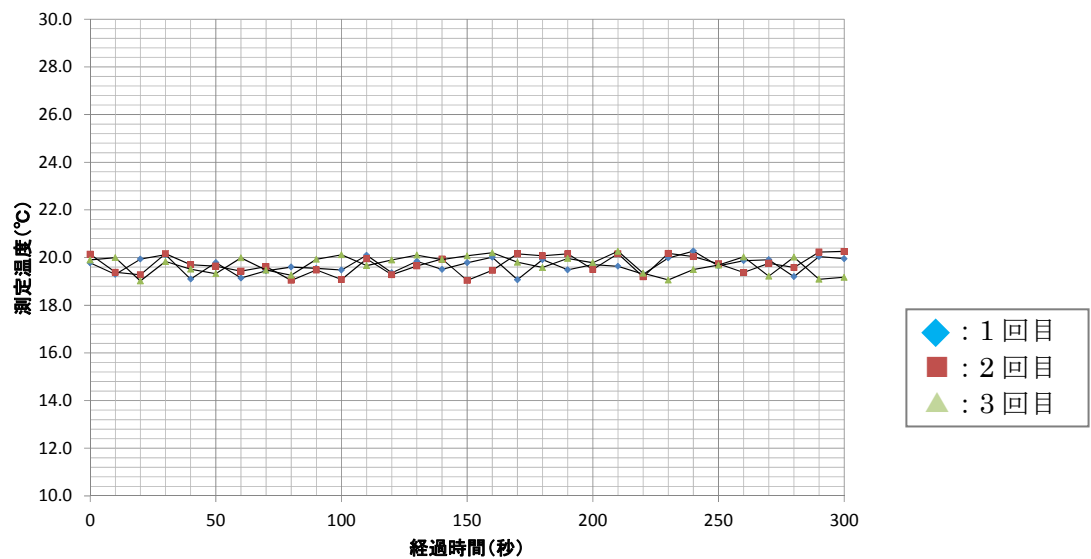


図 4.3.3-45 温度測定結果（試験ケース B-0-20-TC）

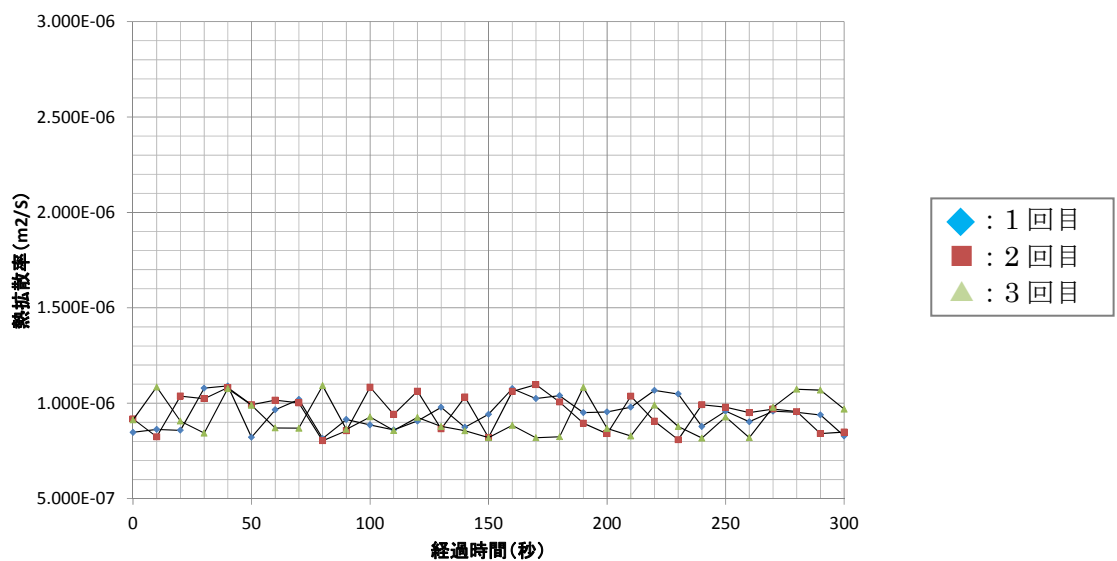


図 4.3.3-46 熱拡散率測定結果（試験ケース B-0-20-TC）

b. 試験ケース B-0-60-TC

試験ケース B-0-60-TC に対する試験結果を表 4.3.3-25 及び図 4.3.3-47、図 4.3.3-48 に示す。

表 4.3.3-25 試験結果 (試験ケース B-0-60-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.7	59.6	59.6	59.6
熱拡散率 (m ² /s)	1.496E-06	1.499E-06	1.498E-06	1.498E-06

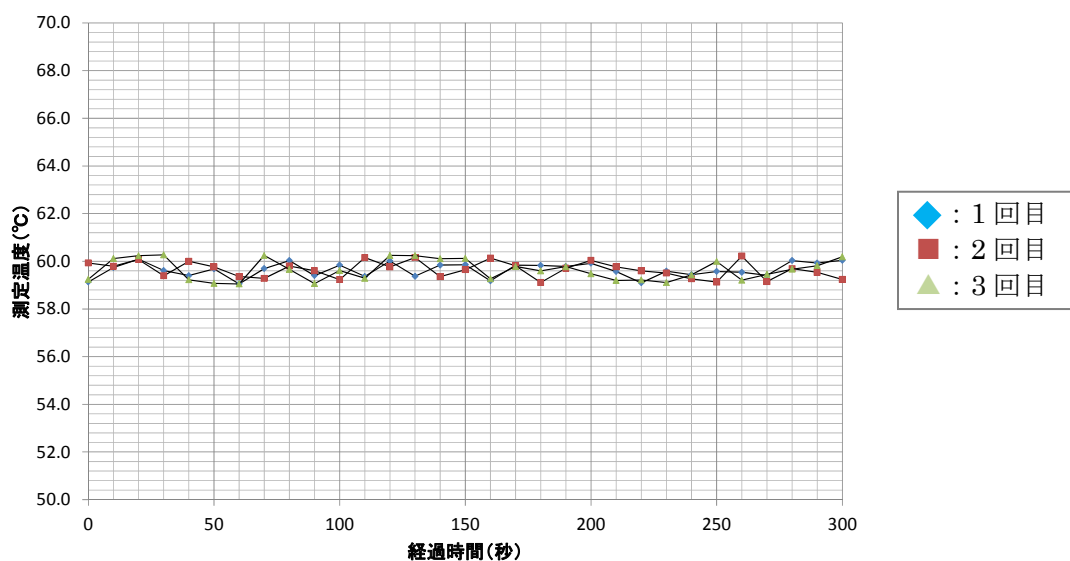


図 4.3.3-47 温度測定結果 (試験ケース B-0-60-TC)

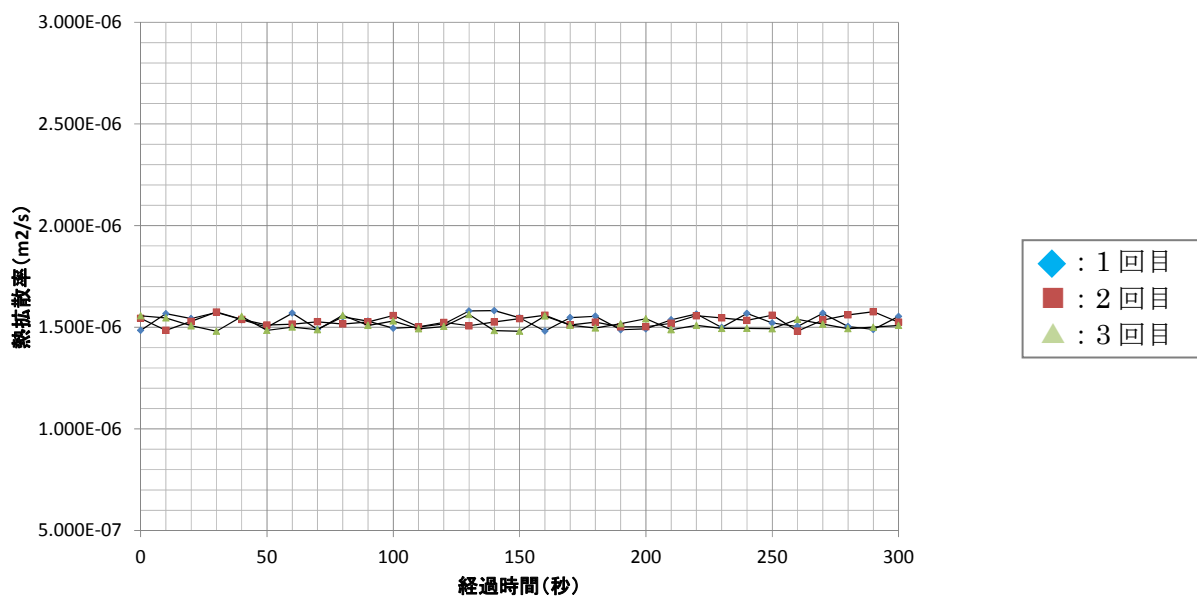


図 4.3.3-48 熱拡散率結果 (試験ケース B-0-60-TC)

c. 試験ケース B-0-90-TC

試験ケース B-0-90-TC に対する試験結果を表 4.3.3-26 及び図 4.3.3-49、図 4.3.3-50 に示す。

表 4.3.3-26 試験結果 (試験ケース B-0-90-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.6	89.7	89.8	89.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.752E-06	1.694E-06	1.712E-06	1.719E-06

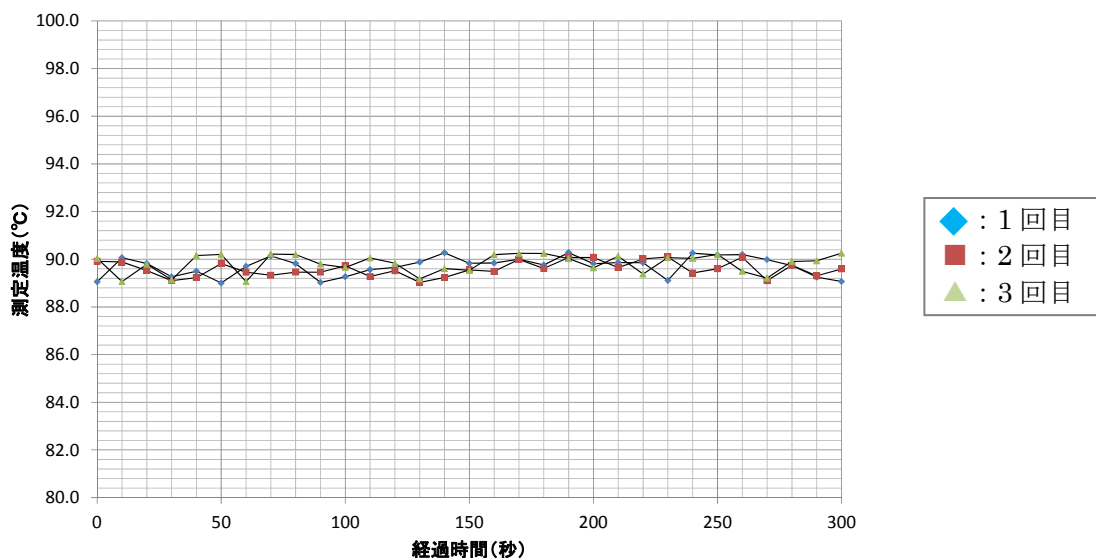


図 4.3.3-49 温度測定結果 (試験ケース B-0-90-TC)

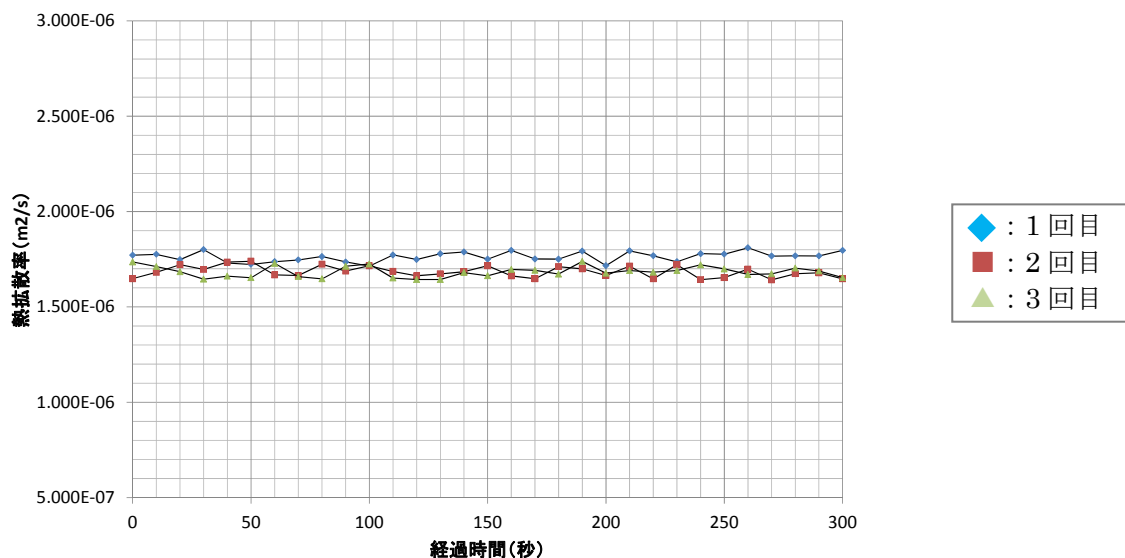


図 4.3.3-50 熱拡散率測定結果 (試験ケース B-0-90-TC)

d. 試験ケース B-0-500-TC

試験ケース B-0-500-TC に対する試験結果を表 4.3.3-27 及び図 4.3.3-51、図 4.3.3-52 に示す。

表 4.3.3-27 試験結果 (試験ケース B-0-500-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	499.7	499.6	499.6	499.6
熱拡散率 (m ² /s)	1.507E-06	1.636E-06	1.761E-06	1.635E-06

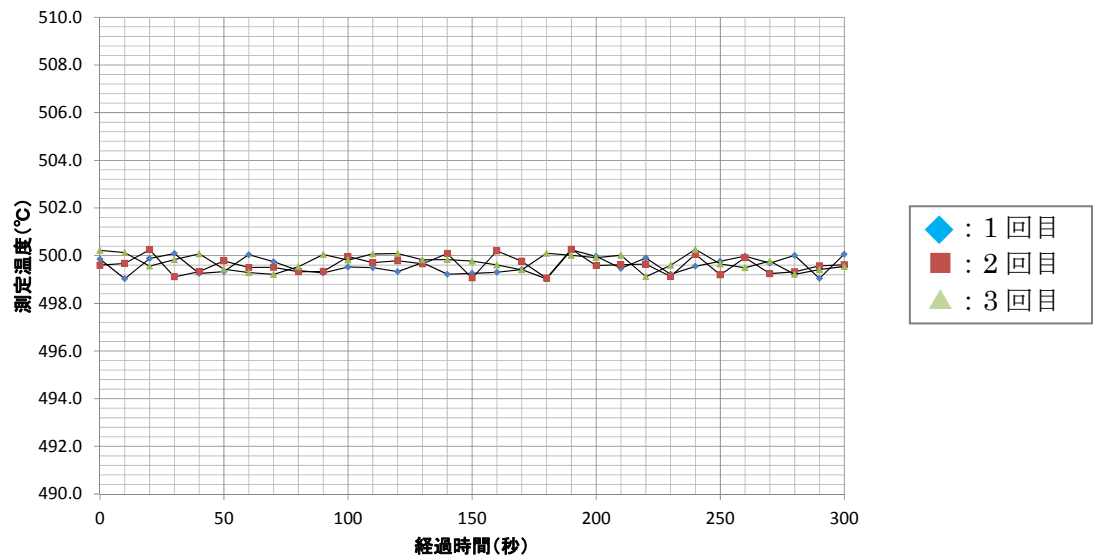


図 4.3.3-51 温度測定結果 (試験ケース B-0-500-TC)

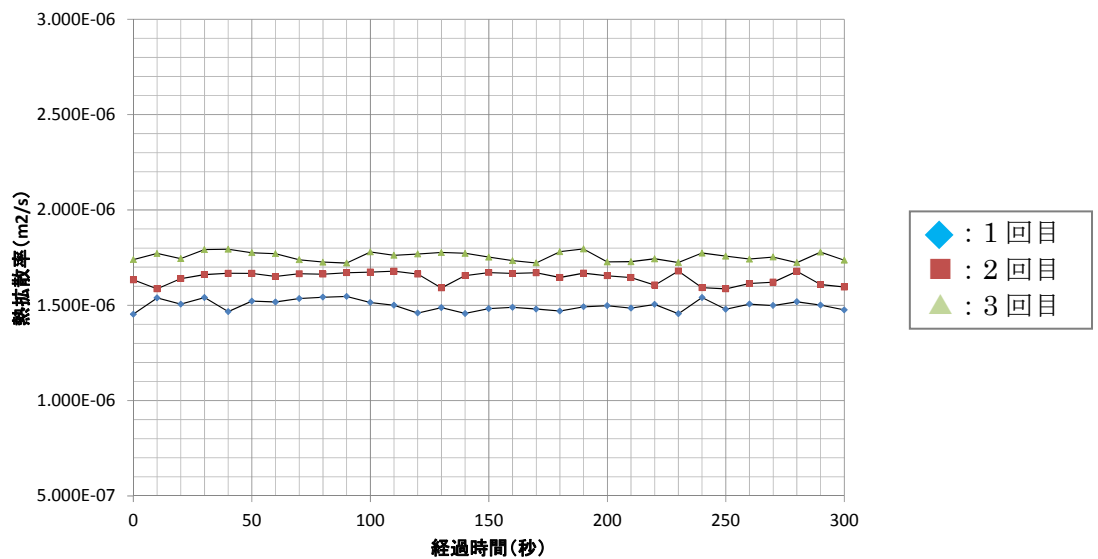


図 4.3.3-52 熱拡散率測定結果 (試験ケース B-0-500-TC)

e. 試験ケース B-0-1000-TC

試験ケース B-0-1000-TC に対する試験結果を表 4.3.3-28 及び図 4.3.3-53、図 4.3.3-54 に示す。

表 4.3.3-28 試験結果 (試験ケース B-0-1000-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	999.7	999.6	999.7	999.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.550E-06	1.642E-06	1.500E-06	1.564E-06

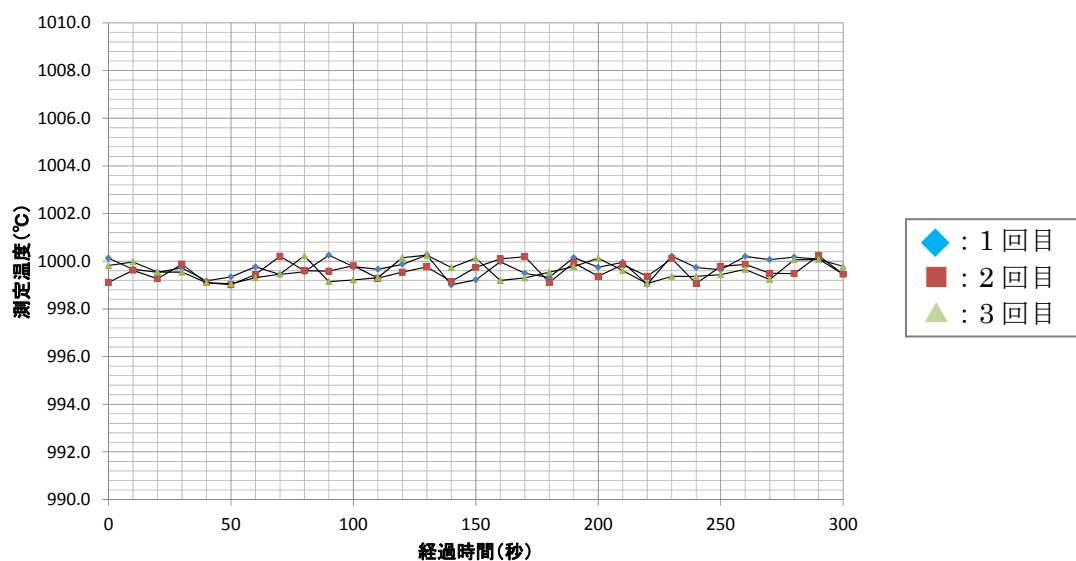


図 4.3.3-53 温度測定結果 (試験ケース B-0-1000-TC)

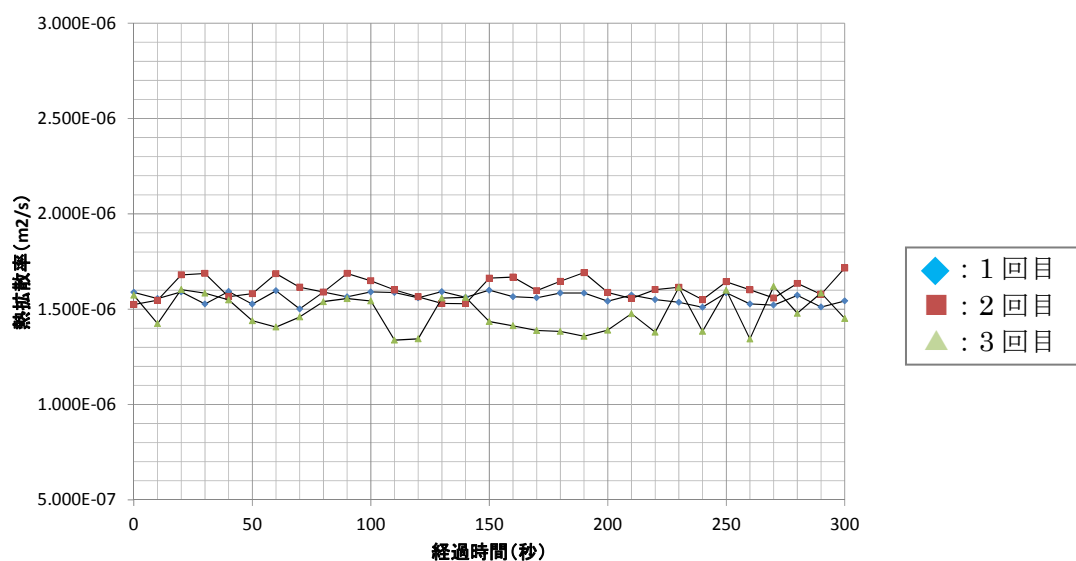


図 4.3.3-54 熱拡散率測定結果 (試験ケース B-0-1000-TC)

f. 試験ケース B-85-20-TC

試験ケース B-85-20-TC に対する試験結果を表 4.3.3-29 及び図 4.3.3-55、図 4.3.3-56 に示す。

表 4.3.3-29 試験結果 (試験ケース B-85-20-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.7	19.6	19.7	19.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.602E-06	1.649E-06	1.794E-06	1.682E-06

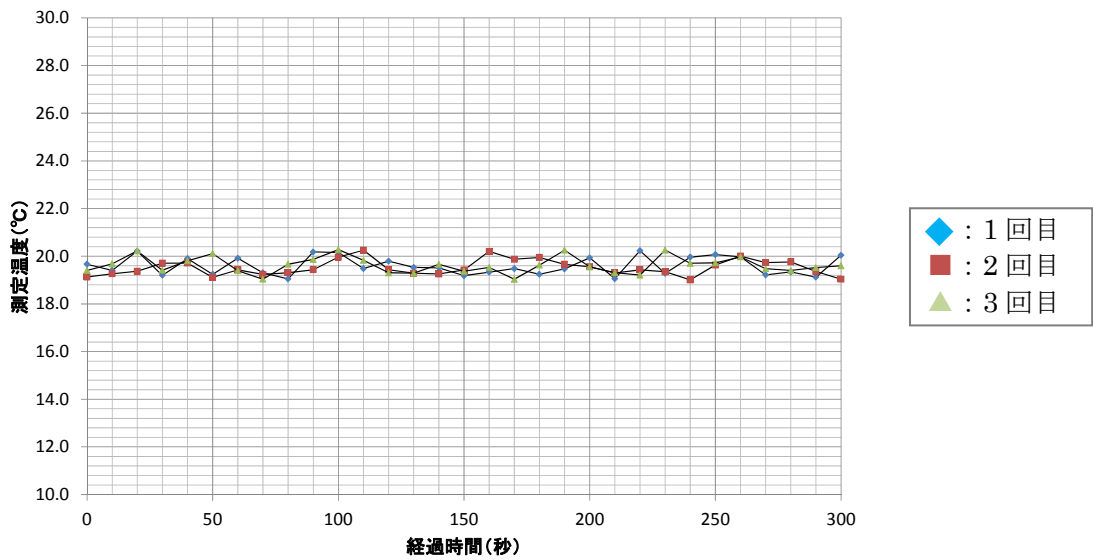


図 4.3.3-55 温度測定結果 (試験ケース B-85-20-TC)

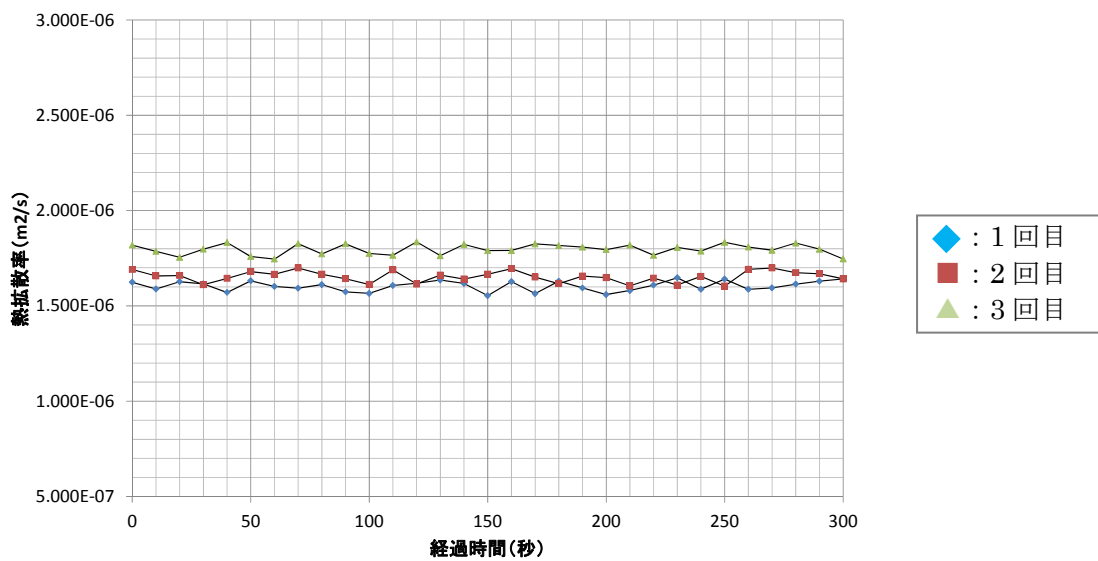


図 4.3.3-56 熱拡散率測定結果 (試験ケース B-85-20-TC)

g. 試験ケース B-85-60-TC

試験ケース B-85-60-TC に対する試験結果を表 4.3.3-30 及び図 4.3.3-57、図 4.3.3-58 に示す。

表 4.3.3-30 試験結果 (試験ケース B-85-60-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.6	59.6	59.5	59.6
熱拡散率 (m ² /s)	1.635E-06	1.424E-06	1.516E-06	1.525E-06

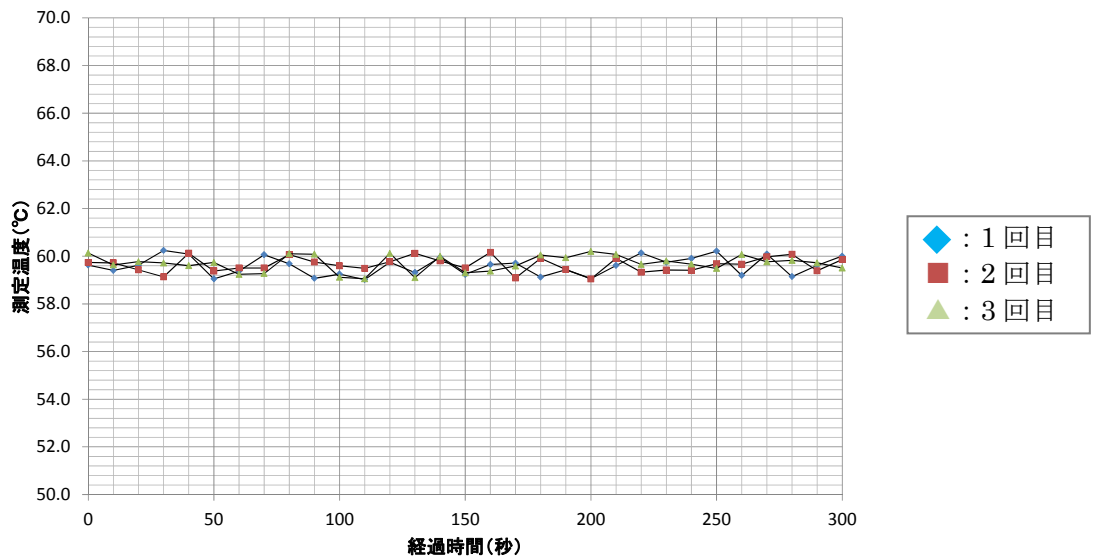


図 4.3.3-57 温度測定結果 (試験ケース B-85-60-TC)

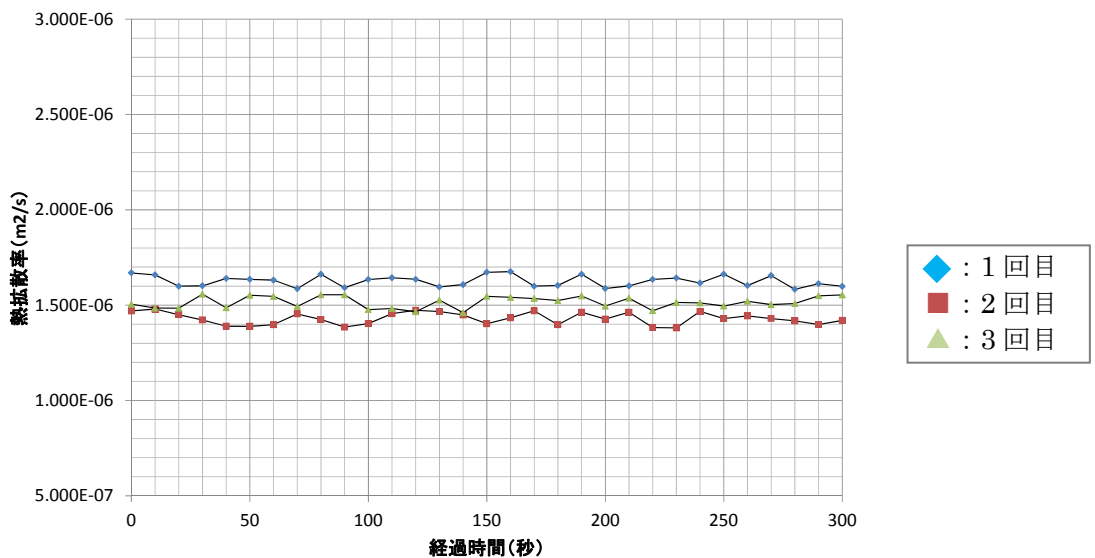


図 4.3.3-58 熱拡散率測定結果 (試験ケース B-85-60-TC)

h. 試験ケース B-85-90-TC

試験ケース B-85-90-TC に対する試験結果を表 4.3.3-31 及び図 4.3.3-59、図 4.3.3-60 に示す。

表 4.3.3-31 試験結果 (試験ケース B-85-90-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.7	89.6	89.7	89.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.249E-06	1.402E-06	1.128E-06	1.260E-06

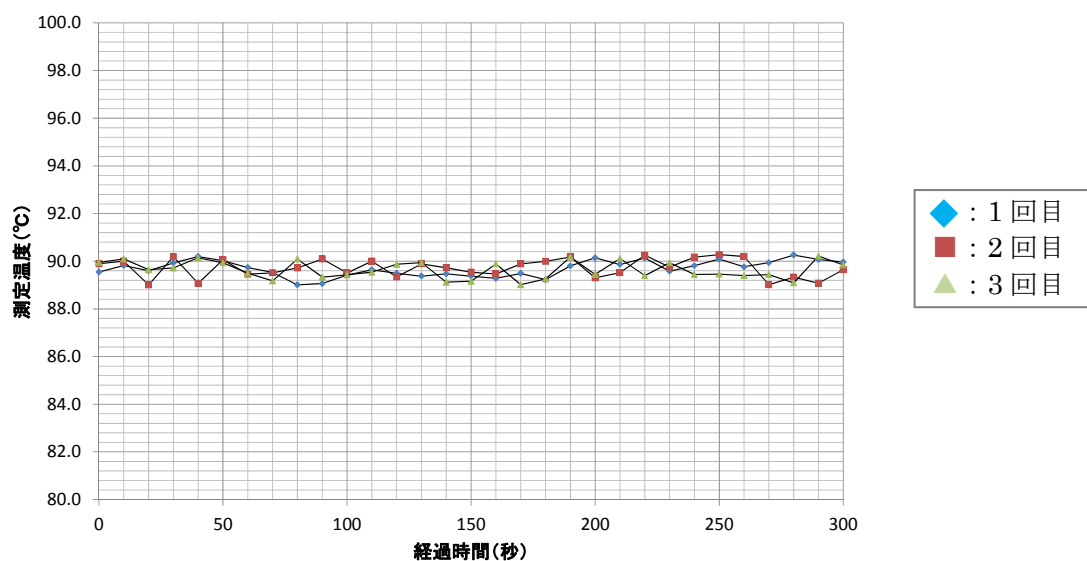


図 4.3.3-59 温度測定結果 (試験ケース B-85-90-TC)

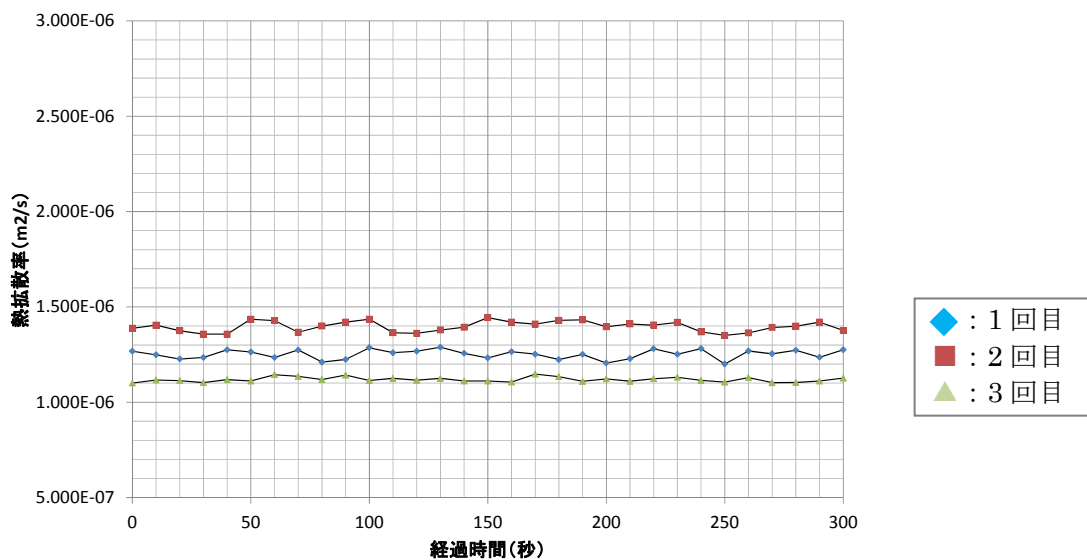


図 4.3.3-60 熱拡散率測定結果 (試験ケース B-85-90-TC)

2) ベントナイトペレット

a. 試験ケース P-0-20-TC

試験ケース P-0-20-TC に対する試験結果を表 4.3.3-32 及び図 4.3.3-61、図 4.3.3-62 に示す。

表 4.3.3-32 試験結果 (試験ケース P-0-20-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.6	19.6	19.6	19.6
熱拡散率 (m ² /s)	6.237E-07	7.335E-07	6.318E-07	6.630E-07

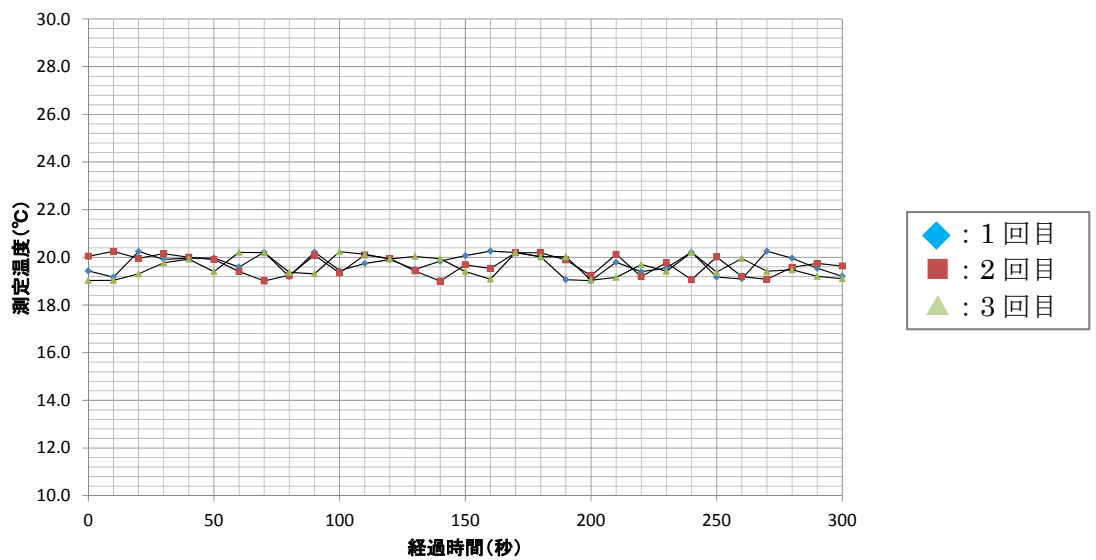


図 4.3.3-61 温度測定結果 (試験ケース P-0-20-TC)

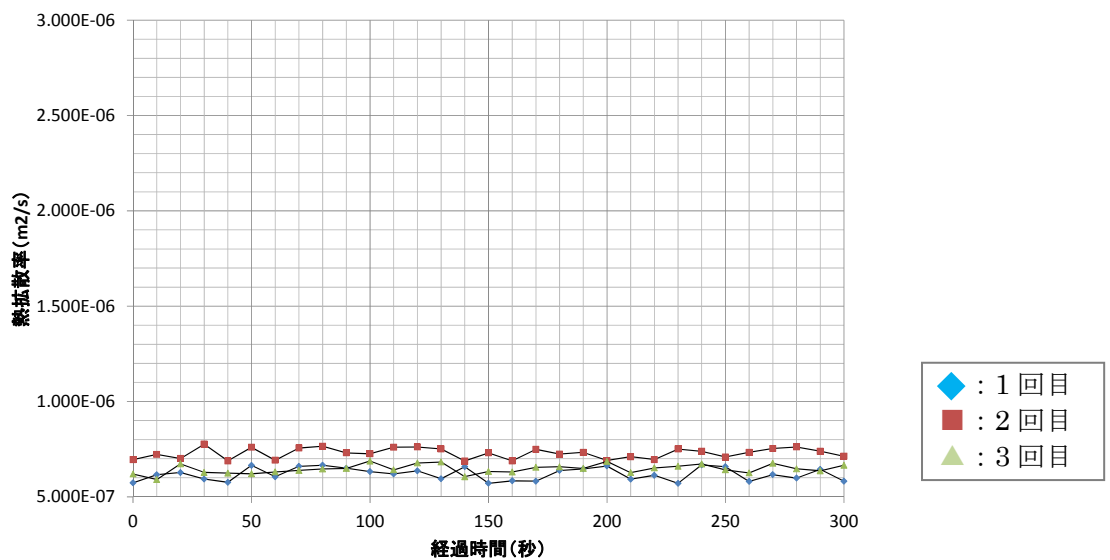


図 4.3.3-62 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-0-20-TC)

b. 試験ケース P-0-60-TC

試験ケース P-0-60-TC に対する試験結果を表 4.3.3-33 及び図 4.3.3-63、図 4.3.3-64 に示す。

表 4.3.3-33 試験結果 (試験ケース P-0-60-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.6	59.6	59.7	59.6
熱拡散率 (m ² /s)	9.516E-07	1.204E-06	1.065E-06	1.074E-06

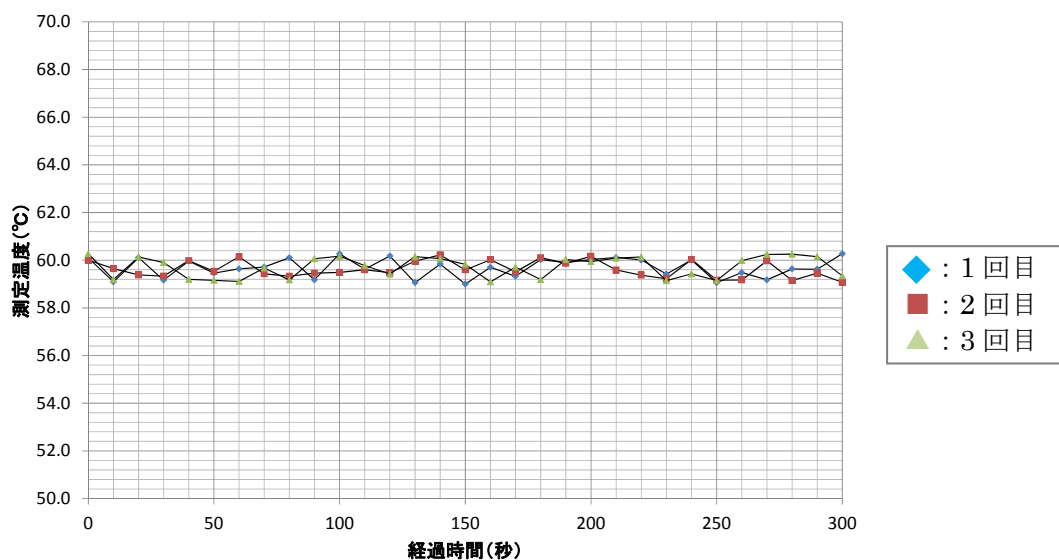


図 4.3.3-63 温度測定結果 (試験ケース P-0-60-TC)

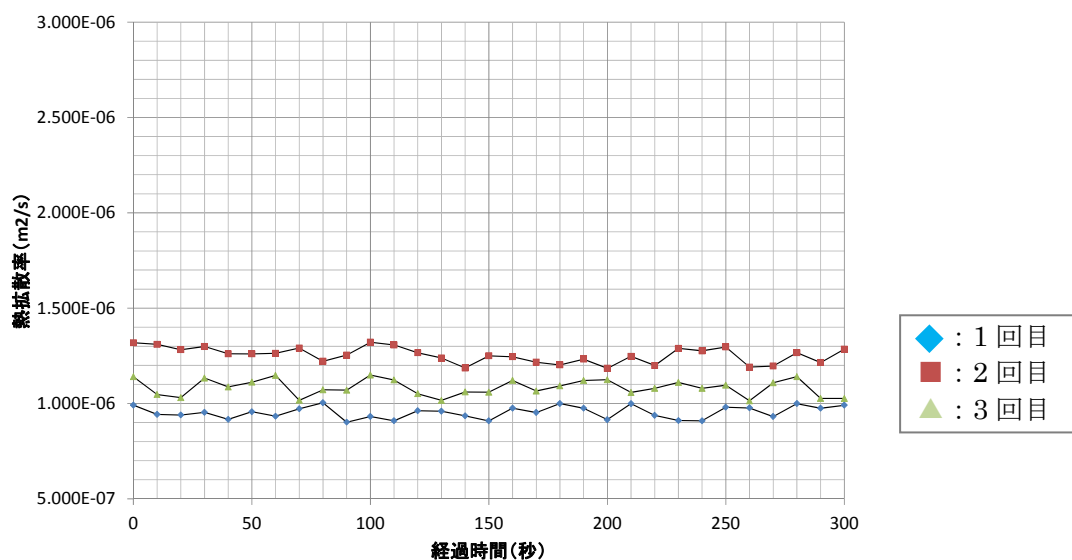


図 4.3.3-64 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-0-60-TC)

c. 試験ケース P-0-90-TC

試験ケース P-0-90-TC に対する試験結果を表 4.3.3-34 及び図 4.3.3-65、図 4.3.3-66 に示す。

表 4.3.3-34 試験結果 (試験ケース P-0-90-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.6	89.6	89.7	89.6
熱拡散率 (m ² /s)	1.047E-06	9.535E-07	1.154E-06	1.052E-06

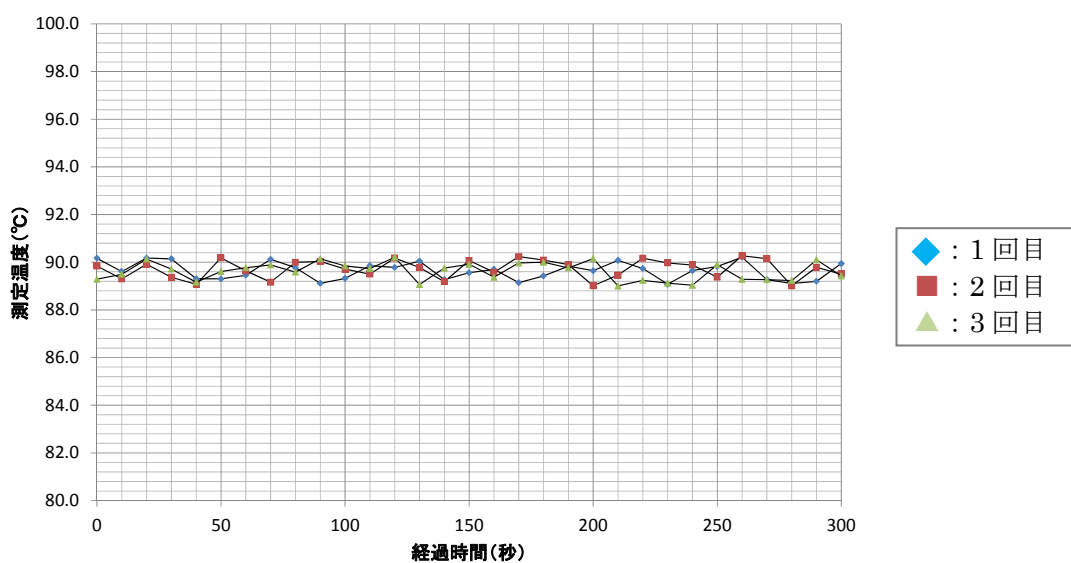


図 4.3.3-65 温度測定結果 (試験ケース P-0-90-TC)

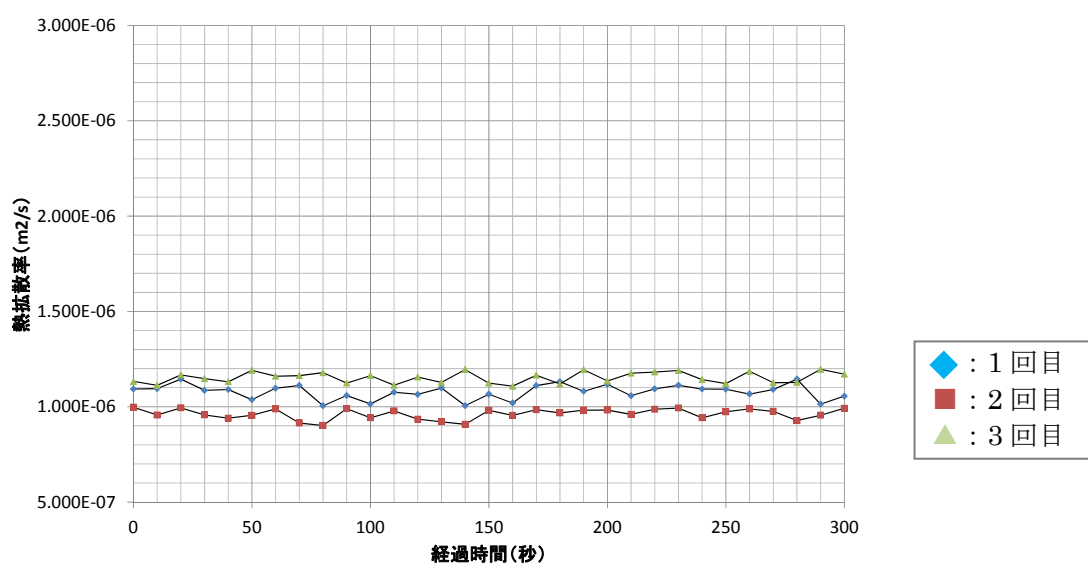


図 4.3.3-66 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-0-90-TC)

d. 試験ケース P-0-500-TC

試験ケース P-0-500-TC に対する試験結果を表 4.3.3-35 及び図 4.3.3-67、図 4.3.3-68 に示す。

表 4.3.3-35 試験結果 (試験ケース P-0-500-TC)

試験項目	1回目	2回目	3回目	平均
測定時温度 (°C)	499.7	499.6	466.6	499.6
熱拡散率 (m ² /s)	1.684E-06	1.617E-06	1.511E-06	1.604E-06

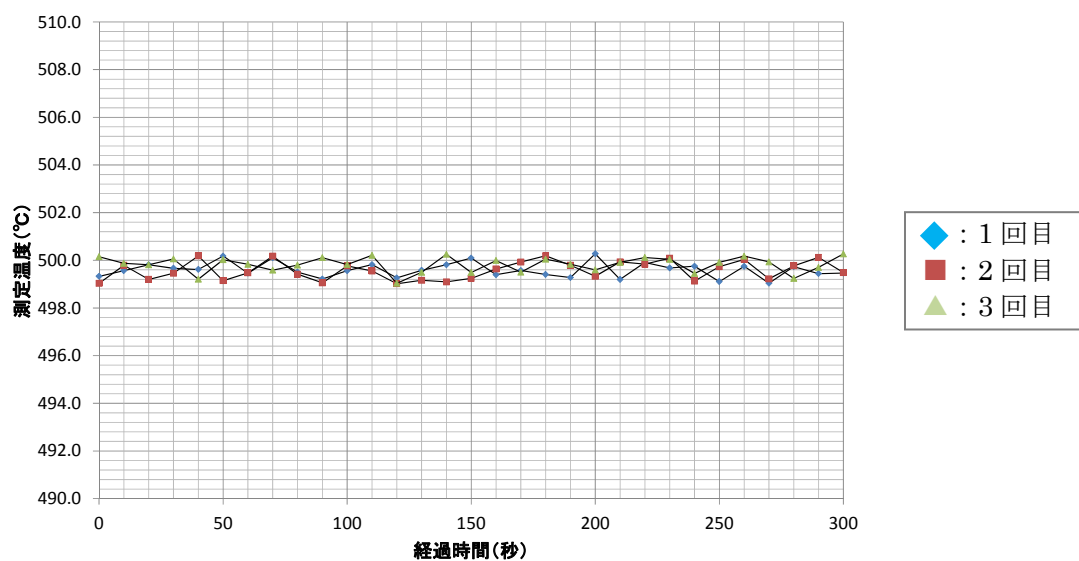


図 4.3.3-67 温度測定結果 (試験ケース P-0-500-TC)

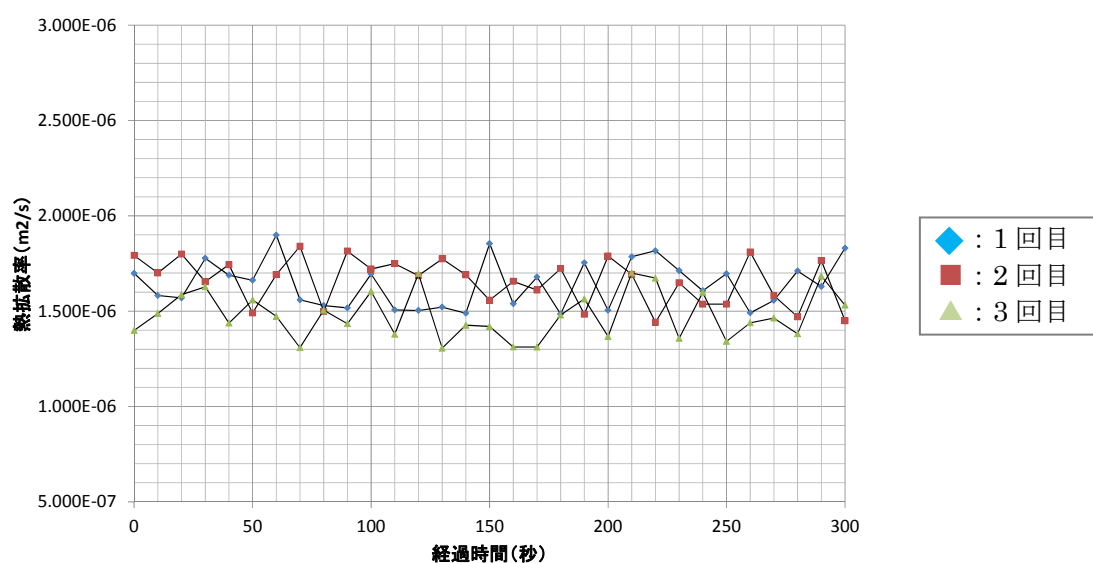


図 4.3.3-68 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-0-500-TC)

e. 試験ケース P-0-1000-TC

試験ケース P-0-1000-TC に対する試験結果を表 4.3.3-36 及び図 4.3.3-69、図 4.3.3-70 に示す。

表 4.3.3-36 試験結果 (試験ケース P-0-1000-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	999.7	999.7	999.7	999.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.692E-06	1.673E-06	1.714E-06	1.693E-06

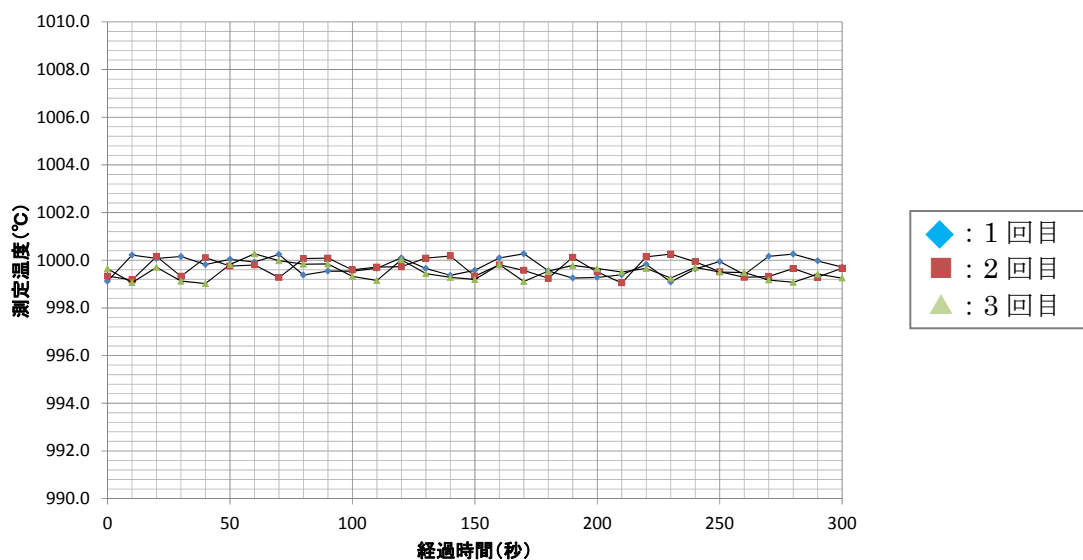


図 4.3.3-69 試験結果 (試験ケース P-0-1000-TC)

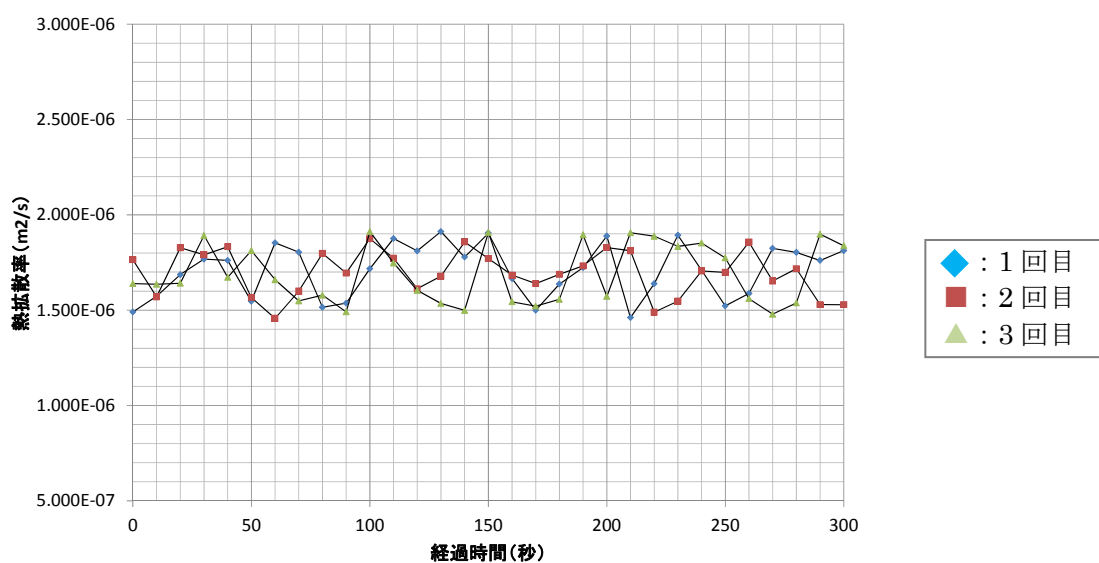


図 4.3.3-70 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-0-1000-TC)

f. 試験ケース P-85-20-TC

試験ケース P-85-20-TC に対する試験結果を表 4.3.3-37 及び図 4.3.3-71、図 4.3.3-72 に示す。

表 4.3.3-37 試験結果 (試験ケース P-85-20-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	19.7	19.8	19.6	19.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.656E-06	1.596E-06	1.565E-06	1.606E-06

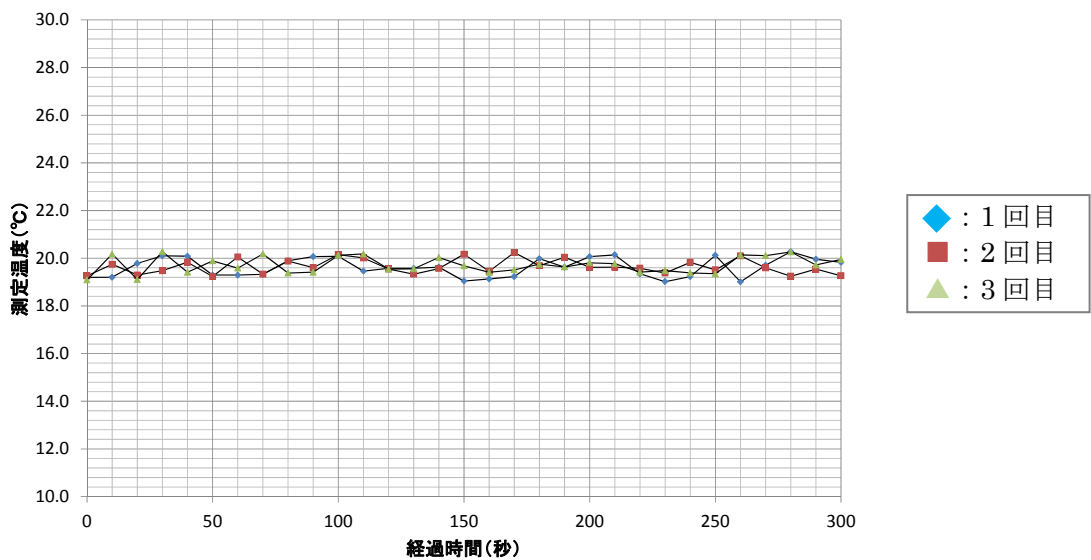


図 4.3.3-71 温度測定結果 (試験ケース P-85-20-TC)

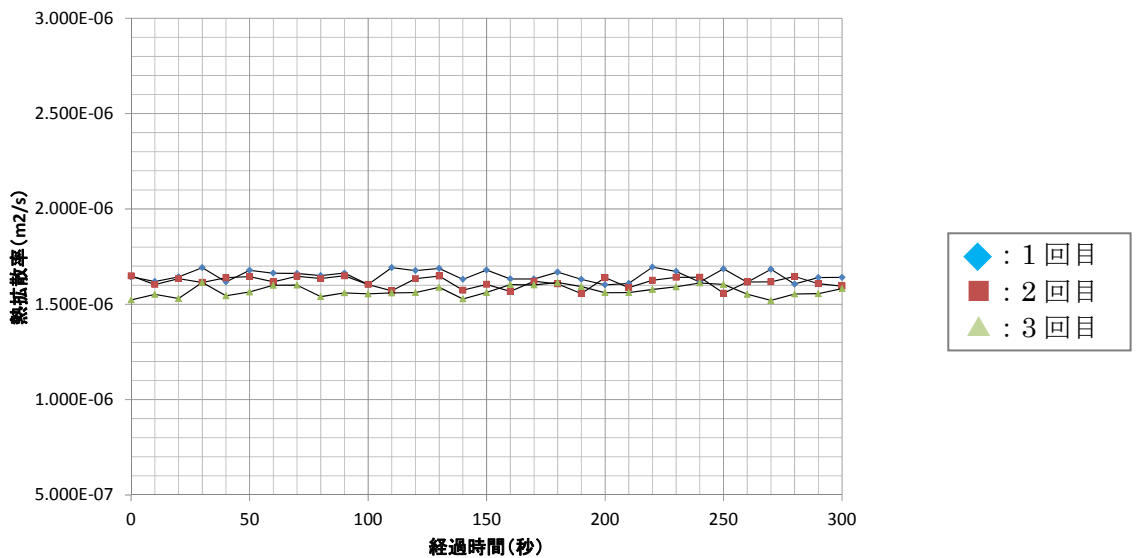


図 4.3.3-72 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-85-20-TC)

g. 試験ケース P-85-60-TC

試験ケース P-85-60-TC に対する試験結果を表 4.3.3-38 及び図 4.3.3-73、図 4.3.3-74 に示す。

表 4.3.3-38 試験結果 (試験ケース P-85-60-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	59.6	59.6	59.7	59.6
熱拡散率 (m ² /s)	1.721E-06	1.634E-06	1.576E-06	1.644E-06

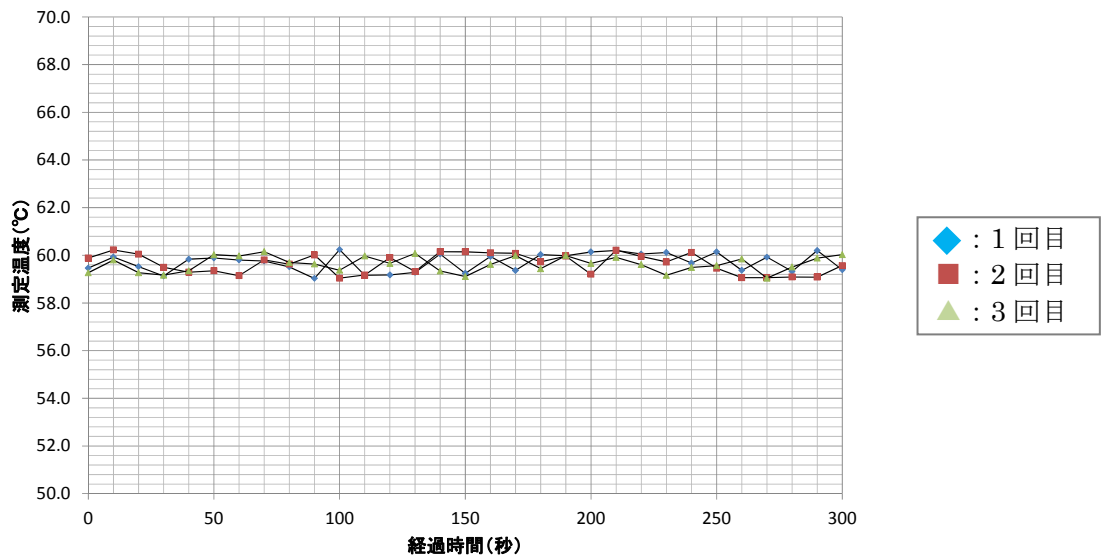


図 4.3.3-73 温度測定結果 (試験ケース P-85-60-TC)

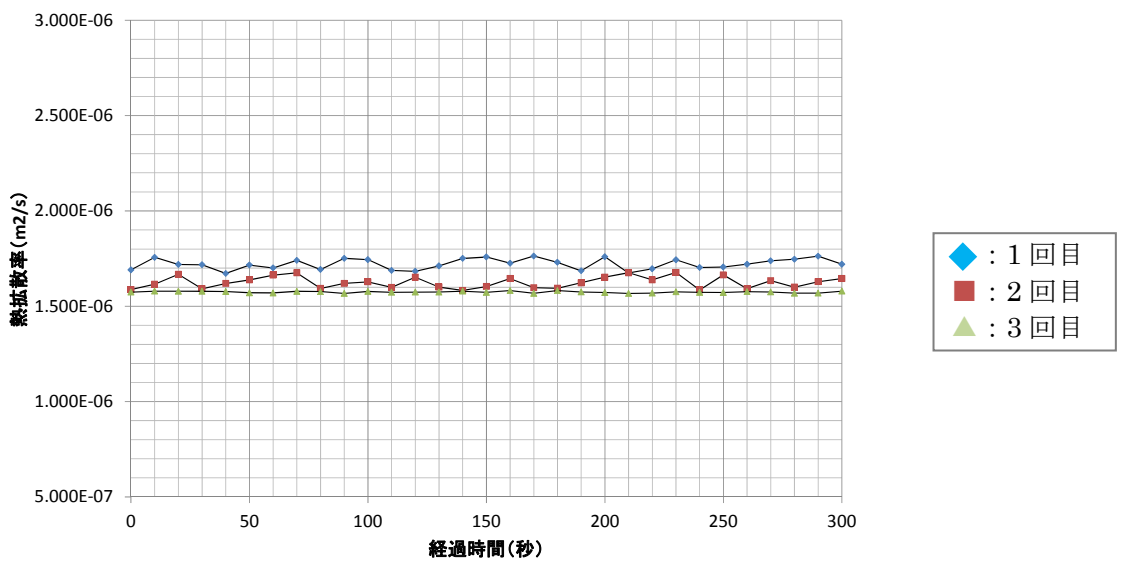


図 4.3.3-74 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-85-60-TC)

h. 試験ケース P-85-90-TC

試験ケース P-85-90-TC に対する試験結果を表 4.3.3-39 及び図 4.3.3-75、図 4.3.3-76 に示す。

表 4.3.3-39 試験結果 (試験ケース P-85-90-TC)

試験項目	1 回目	2 回目	3 回目	平均
測定時温度 (°C)	89.7	89.7	89.6	89.7
熱拡散率 (m ² /s)	1.194E-06	1.297E-06	1.264E-06	1.252E-06

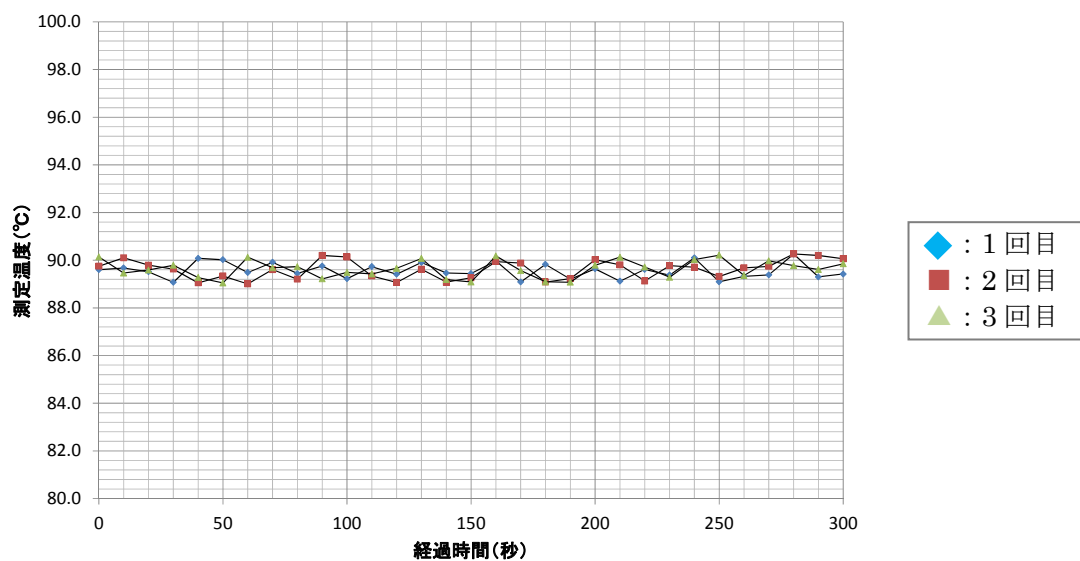


図 4.3.3-75 温度測定結果 (試験ケース P-85-90-TC)

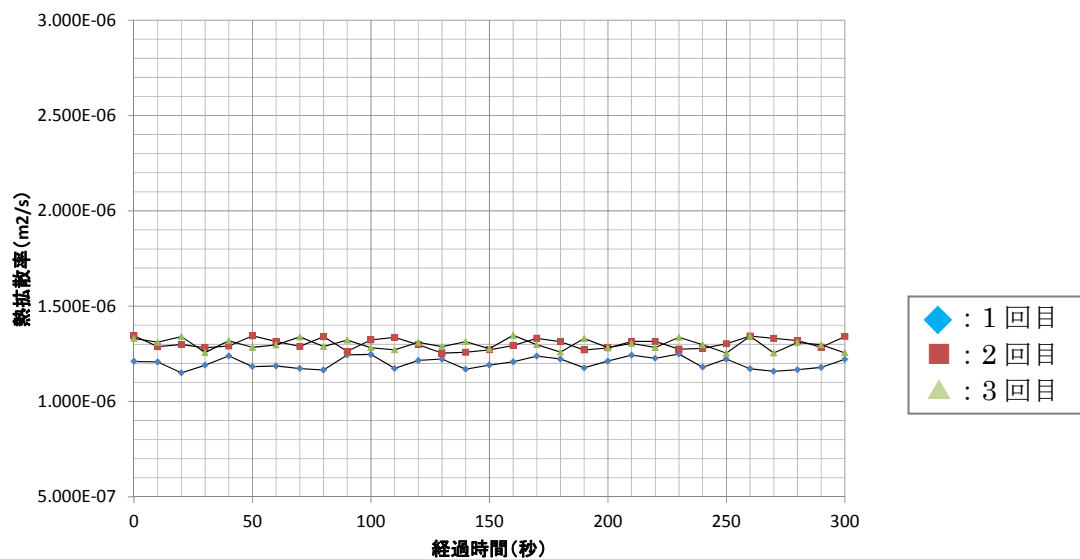


図 4.3.3-76 熱拡散率測定結果 (試験ケース P-85-90-TC)

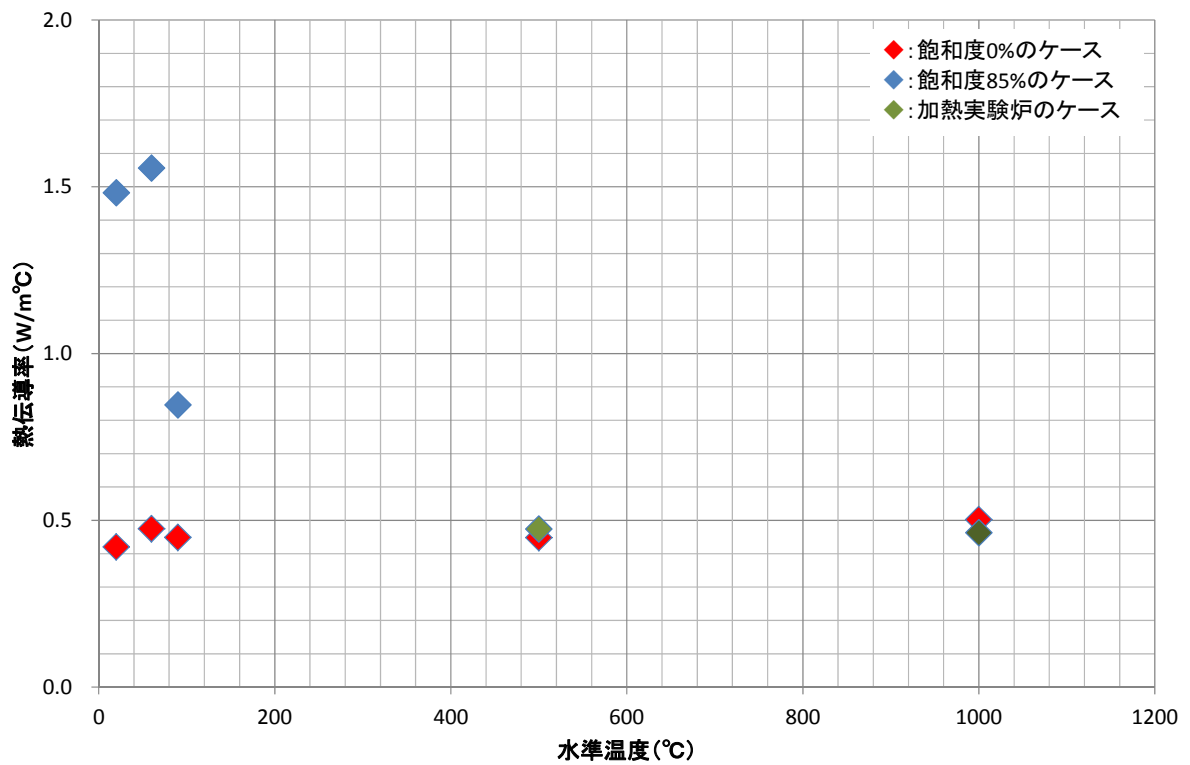
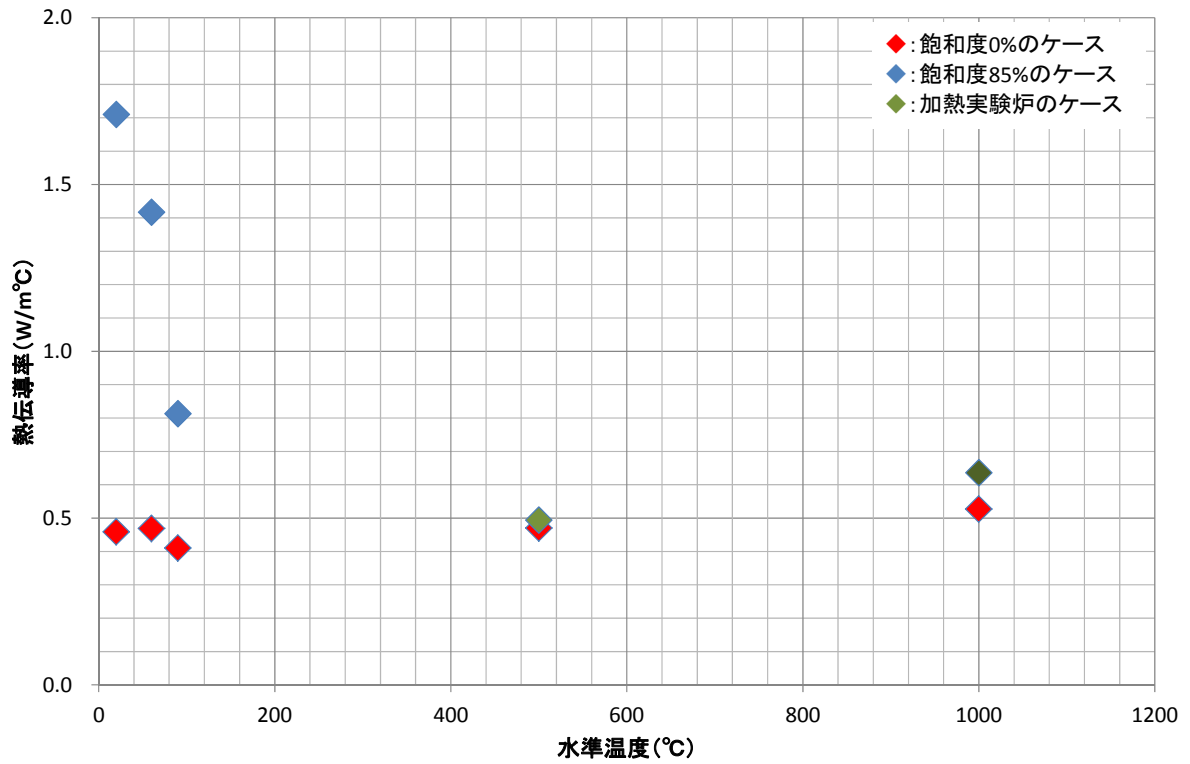
4.3.4 試験結果のまとめと考察

(1) 試験結果のまとめ

表 4.3.4-1 に試験結果のまとめを示す。また、図 4.3.4-1 に熱伝導率と温度との関係を、図 4.3.4-2 に熱拡散率と温度との関係をに示す。さらに、100℃以下における飽和度と熱特性との関係を図 4.3.4-3 及び図 4.3.4-4 に示す。

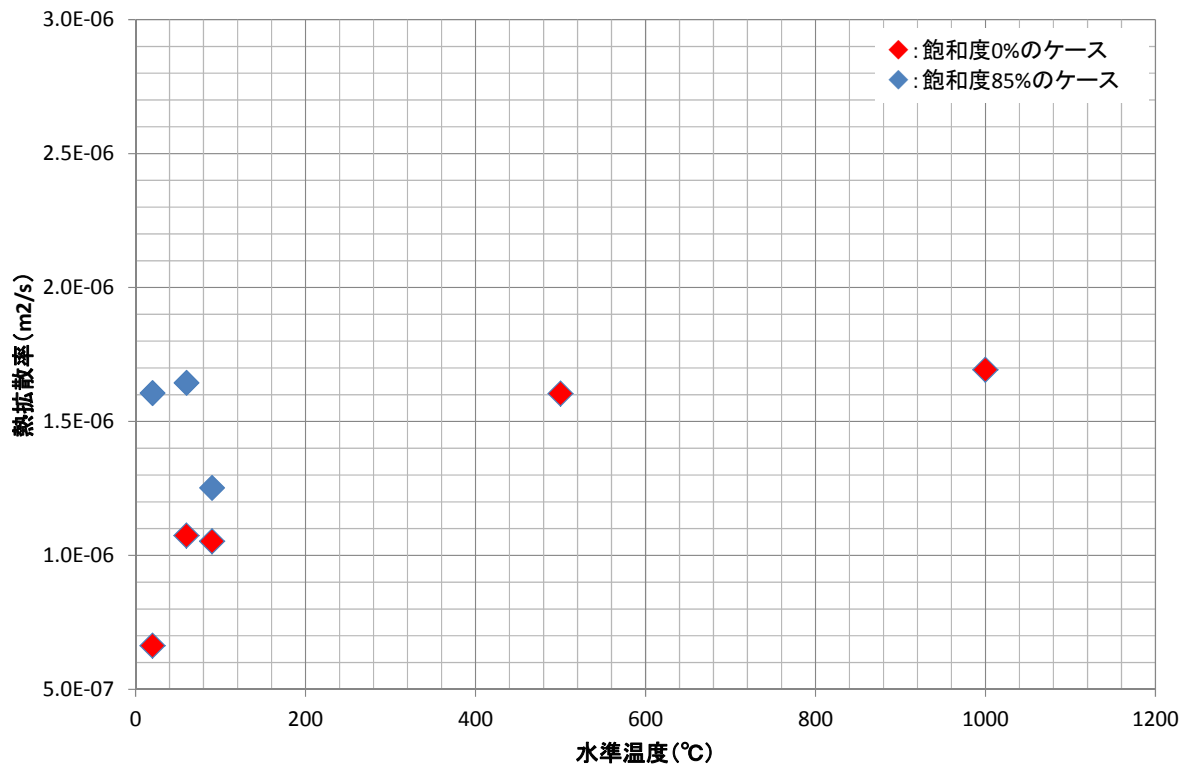
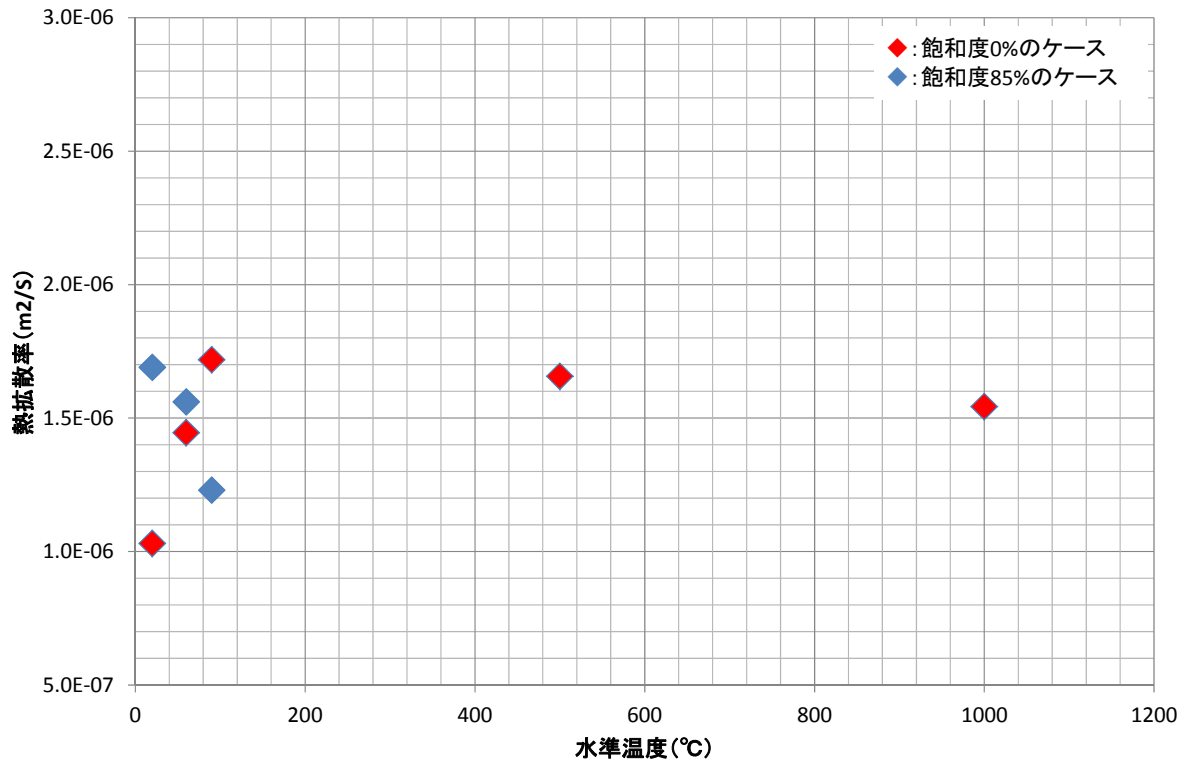
表 4.3.4-1 試験結果のまとめ

試験ケース名	試験水準			取得特性	
	材料	飽和度	温度条件	熱伝導率 (W/(m・℃))	熱拡散率 (m ² /s)
B-0-20-TD, TC	緩衝材	0%	20℃	0.459	1.33E-06
B-0-60-TD, TC	緩衝材	0%	60℃	0.469	1.50E-06
B-0-90-TD, TC	緩衝材	0%	90℃	0.410	1.72E-06
B-0-500-TD, TC	緩衝材	0%	500℃	0.453	1.64E-06
B-0-1000-TD, TC	緩衝材	0%	1,000℃	0.527	1.56E-06
B-85-20-TD, TC	緩衝材	85%	20℃	1.710	1.68E-06
B-85-60-TD, TC	緩衝材	85%	60℃	1.417	1.53E-06
B-85-90-TD, TC	緩衝材	85%	90℃	0.813	1.26E-06
B-0-500-2-TD, TC	緩衝材	0%	500℃	0.494	-
B-0-1000-2-TD, TC	緩衝材	0%	1,000℃	0.636	-
P-0-20-TD, TC	ペレット	0%	20℃	0.418	6.63E-07
P-0-60-TD, TC	ペレット	0%	60℃	0.450	1.07E-06
P-0-90-TD, TC	ペレット	0%	90℃	0.448	1.05E-06
P-0-500-TD, TC	ペレット	0%	500℃	0.450	1.60E-06
P-0-1000-TD, TC	ペレット	0%	1,000℃	0.473	1.69E-06
P-85-20-TD, TC	ペレット	85%	20℃	1.454	1.61E-06
P-85-60-TD, TC	ペレット	85%	60℃	1.548	1.64E-06
P-85-90-TD, TC	ペレット	85%	90℃	0.820	1.25E-06
P-0-500-2-TD, TC	ペレット	0%	500℃	0.450	-
P-0-1000-2-TD, TC	ペレット	0%	1,000℃	0.444	-



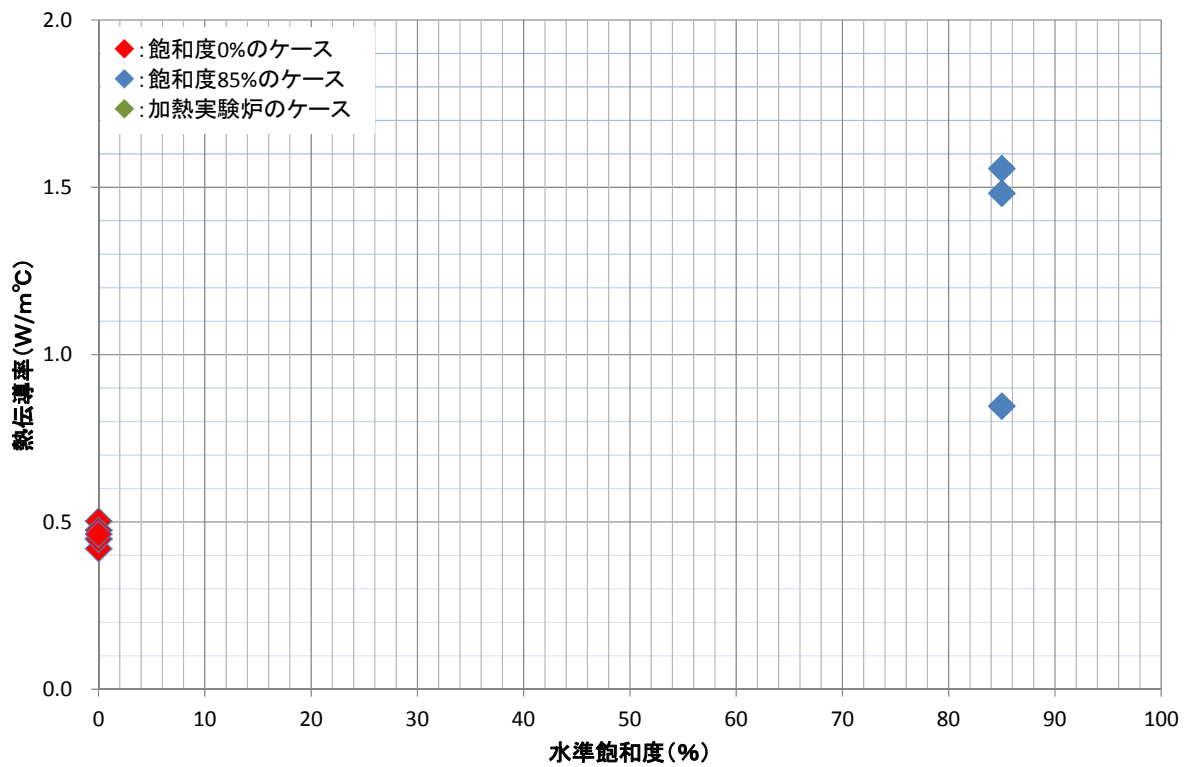
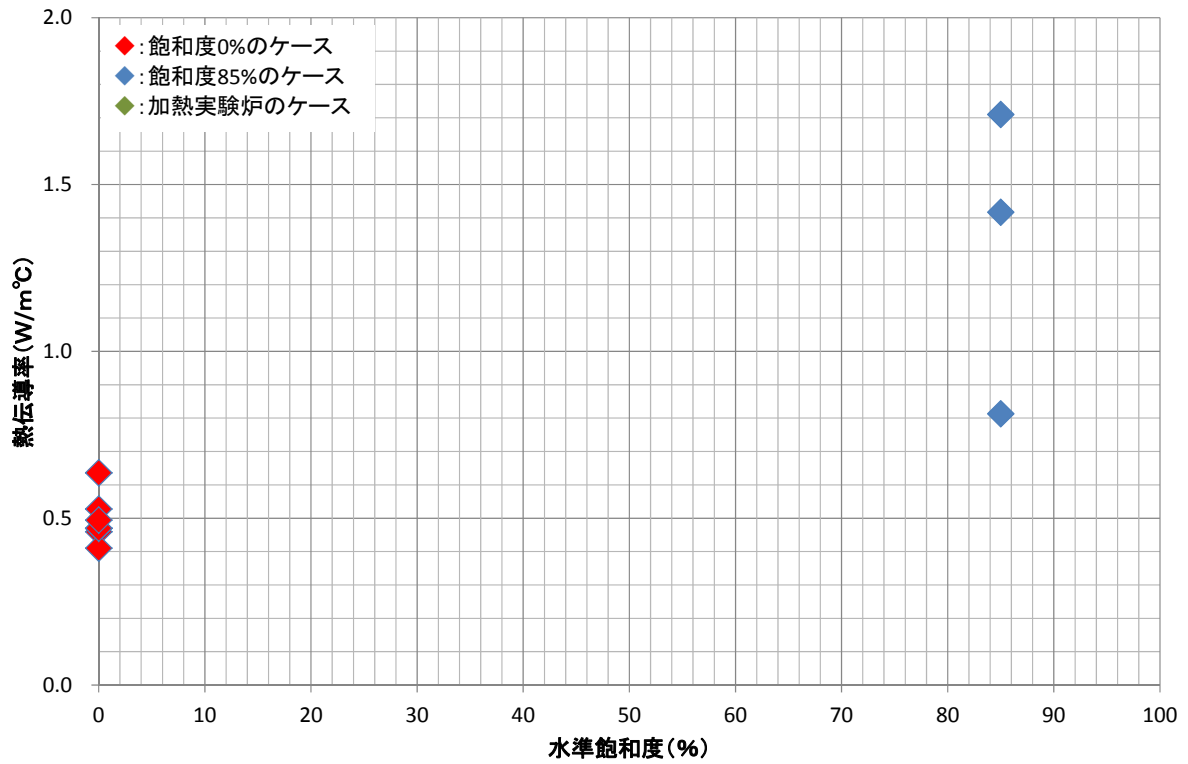
(上段：緩衝材 下段ペレット)

図 4.3.4-1 熱伝導率と温度との関係



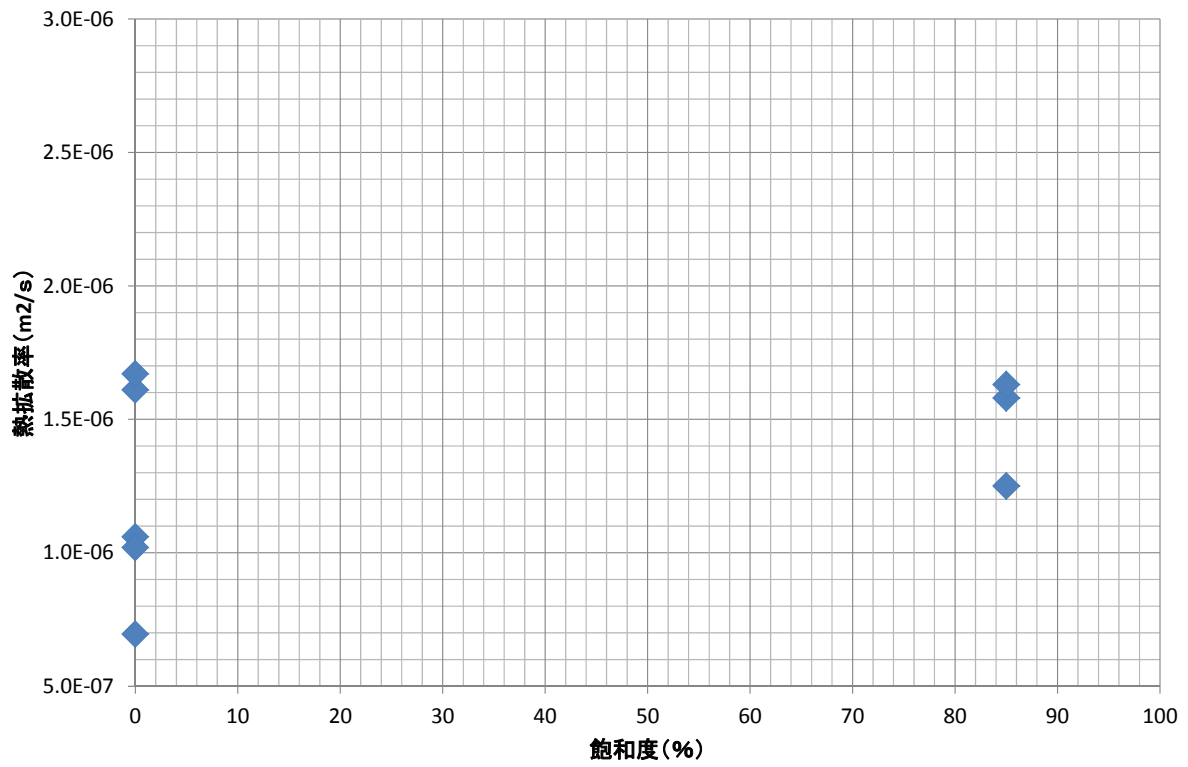
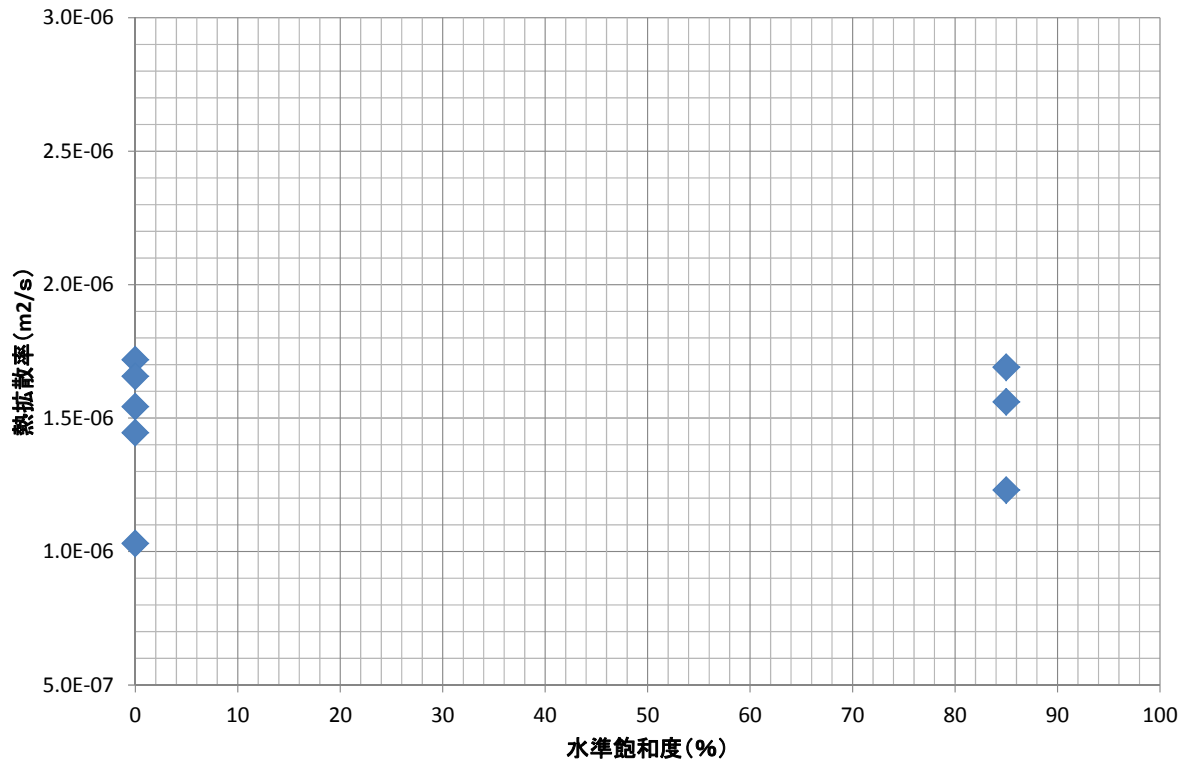
(上段：緩衝材 下段ペレット)

図 4.3.4-2 熱拡散率と温度との関係



(上段：緩衝材 下段ペレット)

図 4.3.4-3 熱伝導率と飽和度との関係



(上段：緩衝材 下段ペレット)

図 4.3.4-4 熱拡散率と飽和度との関係

(2) 考察

a. 既往の試験結果との整合性

前述のように、緩衝材についての 100℃以下の熱特性については第 2 次取りまとめにおいてデータ取得事例[9]がある。熱伝導率の取得事例については図 4.3.1-1 に前掲したが、さらに熱拡散率の取得事例について図 4.3.4-5 に示す。

図 4.3.1-1 において、ケイ砂混合体、乾燥密度 1.6Mg/m³の実験条件では、含水比 0%の場合、測定温度 20~90℃の範囲で熱伝導率は 0.4W/m・℃程度である。また、含水比 15%の場合には、測定温度 20℃のときに 1.5W/m・℃程度、60℃のときに 1.3W/m・℃程度、90℃の時に 0.8W/m・℃程度の熱伝導率が得られている。

これに対し、乾燥密度 1.6Mg/m³の緩衝材について本試験で得られた熱伝導率は、図 4.3.4-1 から、飽和度 0% (含水比 0%) の場合、測定温度 20~90℃の範囲で 0.4~0.5W/m・℃であり、第 2 次取りまとめのデータと同程度と評価される。また、飽和度 85% (含水比 18%程度) の場合、測定温度 20℃のときに 1.7W/m・℃程度、60℃のときに 1.5W/m・℃程度、90℃の時に 1.3W/m・℃程度の熱伝導率が得られており、含水比の違いの影響からか第 2 次取りまとめよりもやや大きな値であるが、熱伝導率の測定温度依存性 (測定温度が高くなるほど熱伝導性が小さくなる) の傾向は同じである。

一方、熱拡散率については、第 2 次取りまとめのケイ砂混合体、乾燥密度 1.6Mg/m³の実験条件 (図 4.3.4-5) では、含水比 0%の場合、測定温度 20~90℃の範囲で 0.5~1.5×10⁻⁶m²/s、含水比 18%程度の場合は 1.0~1.5×10⁻⁶m²/s の値となっている。全般的にばらつきが大きく、また測定温度依存性もみられない。

これに対し、乾燥密度 1.6Mg/m³の緩衝材について本試験で得られた熱拡散率は、図 4.3.4-2 から、飽和度 0% (含水比 0%) の場合は 1.0~1.7×10⁻⁶m²/s、飽和度 85% (含水比 18%程度) の場合は 1.2~1.7×10⁻⁶m²/s であり、第 2 次取りまとめのデータと同程度と評価される。また、ばらつきが大きい傾向にあること、明確な測定温度依存性がみられないことなども第 2 次取りまとめの結果と同様である。

以上より、緩衝材についての 100℃以下の熱特性について、本試験の結果は第 2 次取りまとめの結果と整合しているものと判断される。

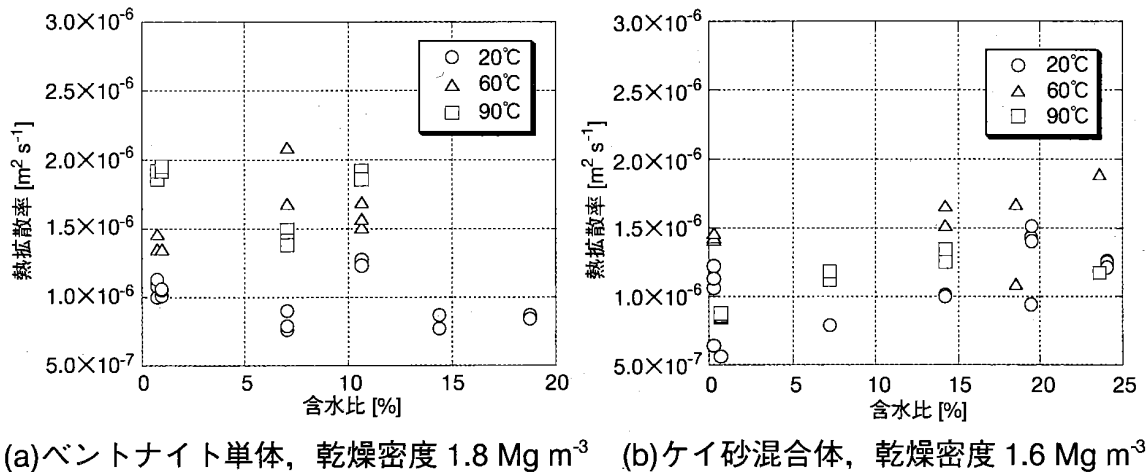


図 4.3.4-5 緩衝材の熱拡散率の温度依存性に関する試験結果の例 [9]

b. 試験方法と高温時熱特性値の関係

本試験では、100°C以上の高温時熱特性については、加熱実験炉による方法と熱特性取得装置による方法の2通りの方法でデータを取得した。図 4.3.4-1 から、緩衝材の熱伝導率については、測定温度 500°Cの条件では上記の2通りの方法による試験値は同程度であり、測定温度 1000°Cの条件では加熱実験炉による試験値がやや大きい傾向にあることが分かる。また、ベントナイトペレットの熱伝導率については、測定温度 500°C、1000°Cいずれの条件においても2つの方法による試験値は同程度と評価される。

以上より、緩衝材についての測定温度 1000°Cの条件での試験値に差がみられるが、その差は20%程度に収まっていること、及び他の測定条件では同程度の試験値が得られていることを総合的に勘案すると、加熱実験炉による方法と熱特性取得装置による方法では、緩衝材やベントナイトペレットの高温時熱特性に関して同等の試験値を得ることができると考えられる。

c. 温度条件と熱特性に対する考察

図 4.3.4-1 から、飽和度 0%の条件においては、緩衝材やベントナイトペレットの火災時を想定した高温時の熱伝導性は、100°C以下の熱伝導性と同等か若干ではあるが大きい傾向にあることが分かる。

一方、図 4.3.4-2 から、緩衝材の熱拡散性については、高温時と 100°C以下の試験値に明確な違いは見られないが、ベントナイトペレットの熱拡散性については、高温時のそれが 100°C以下に比べて $0.5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 程度大きい傾向にあることが分かる。ただし、第2次取りまとめの試験データ等に示されるように、熱拡散率の試験値はばらつきが大きい傾向にあり、上記試験値の差はそのばらつきの範囲と同程度であることに留意する必要があると考えられる。

飽和度 80%の条件においては、測定温度条件が高くなる（試験水準 90°C）と熱伝導性

が低下する傾向がみられた。これは、緩衝材内の水分移動（または水分蒸発）による飽和度の変化が影響していることが考えられる。

d. 緩衝材とベントナイトペレットの違いに対する考察

緩衝材とベントナイトペレットでは、ベントナイトペレットの方が熱伝導性はやや小さい傾向がみられた。しかし、その差は10%程度（例えば20℃の場合： $0.459 \rightarrow 0.415 \text{ W/m}^2\text{C}$ 、60℃の場合： $0.469 \rightarrow 0.450 \text{ W/m}^2\text{C}$ ）であった。これは、ベントナイトペレットが熱伝導性の高いケイ砂を含んでいないことが要因であると考えられる。ただし、今回用いたベントナイトペレットは既往の試験 [21] で用いられたベントナイトペレットに比べて、土粒子自体の密度や充てん率が向上した材料であるため、熱伝導性の差が小さくなっていると考えられる。

e. 飽和度の違いに対する考察

図 4.3.4-3 に示すように、同一の温度条件において、飽和度が高くなると（今回の試験水準 85%）熱伝導性が向上するデータが取得された。第2次取りまとめにおいても同様な傾向が示されている。これは、飽和度が高い場合は、供試体中に緩衝材もしくはベントナイトペレットも熱伝導性の高い水分が存在することによるものと考えられる。

一方、図 4.3.4-4 に示すように、熱拡散性については飽和度の影響は見られない結果となった。

f. 高温履歴を受けた時の緩衝材の状態について

今回の試験温度の範囲では、加熱試験後の緩衝材供試体は、表面にひび割れが発生しているものの大きな損傷には至っていなかった。今回は含水比 0%の供試体で加熱試験を行ったため、爆裂（水分の急激膨張により爆発的に破損する現象）が観察されなかったが、含水した条件での状況についてはさらに検討が必要と考えられる。

また、3 時間高温に曝された供試体は茶色く変色していたが、これは曝露温度によるものか、若しくは曝露時間によるものかは今回の試験の範囲では不明であり、今後さらに試験ケースを加え、挙動を解明していくことも必要と考えられる。

以上をまとめると、火災時を想定した高温時の熱特性（熱伝導率と熱拡散率）は、常温（100℃以下）に比べ、同等もしくは若干高くなるものと考えられる。また、熱伝導性は、緩衝材やベントナイトペレット中の水分の影響を大きく受けることになることも確認された。

表 4.3.4-2 には、本試験で得られた熱伝導率と熱拡散率、及びそれらをもとに計算した比熱の値を示す。前述のように、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あること、2通りの試験方法で得られた高温時（試験温度 500℃、1000℃）熱特性値が同程度であることから、次年度以降に実施する緩衝材を介した火災影響の解析的検討においては、同表に示した熱特性を使用する計画である。

なお、本試験は限られた試験数での評価である。また、試験環境の僅かな変動が試験結果に影響を及ぼす懸念もあることから、今後さらにパラメータを増やしつつデータ取得を進めて、緩衝

材及びベントナイトペレットの熱特性を把握していくことが望ましいと考えられる。

表 4.3.4-2 試験で得られた熱伝導率と熱拡散率から求めた比熱

試験水準			熱特性		
材料	飽和度	温度条件	熱伝導率 (W/(m・℃))	熱拡散率 (m ² /s)	比熱 (kJ/kg・℃)
緩衝材	0%	20℃	0.459	1.33E-06	0.216
緩衝材	0%	60℃	0.469	1.50E-06	0.195
緩衝材	0%	90℃	0.410	1.72E-06	0.145
緩衝材	0%	500℃	0.453	1.64E-06	0.173
緩衝材	0%	1,000℃	0.527	1.56E-06	0.211
緩衝材	85%	20℃	1.710	1.68E-06	0.636
緩衝材	85%	60℃	1.417	1.53E-06	0.579
緩衝材	85%	90℃	0.813	1.26E-06	0.403
緩衝材	0%	500℃	0.494	-	-
緩衝材	0%	1,000℃	0.636	-	-
ペレット	0%	20℃	0.418	6.63E-07	0.460
ペレット	0%	60℃	0.450	1.07E-06	0.307
ペレット	0%	90℃	0.448	1.05E-06	0.311
ペレット	0%	500℃	0.450	1.60E-06	0.205
ペレット	0%	1,000℃	0.473	1.69E-06	0.204
ペレット	85%	20℃	1.454	1.61E-06	0.659
ペレット	85%	60℃	1.548	1.64E-06	0.689
ペレット	85%	90℃	0.820	1.25E-06	0.479
ペレット	0%	500℃	0.450	-	-
ペレット	0%	1,000℃	0.444	-	-

4.4 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

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

ステンレス鋼の一般的な海洋大気環境下における腐食特性については既往の研究例があるが、本開発のように放射性廃棄物を扱う施設における津波被害を想定したより過酷な塩分環境条件（ガラス固化体が海水や津波土砂に浸漬した条件、あるいは半浸漬して気液界面で海塩が析出・濃縮するような条件）における腐食特性については、さらに調査・検討の必要性があると考えられる。以上から、津波被害を想定した過酷な塩分環境条件を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性の検討に資することを目的に、ステンレス鋼の海水等に対する腐食特性、及び放射線環境下での腐食特性に係る文献調査を行い、既往の情報・知見を整理するとともに今後の課題を抽出した。

なお、本調査は、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破損を評価するために必要な情報を収集するものである。ガラス固化体キャニスタの破損の有無によって復旧対策は変わる（破損の危険性があれば放射性物質の飛散を考慮した対策も必要になるが、破損がなければ放射線の遮へい対策のみで良い、など）と考えられることから、復旧作業を行う時の適切な対策の選定などに資すること目的とするものである。

4.4.1 津波被災シナリオの設定

地層処分施設は、わが国では候補地が決まっておらず海岸近くに立地される可能性もある。このような立地においては、地震による津波が発生し地層処分場の地上施設を直撃するシナリオを想定し、津波影響を評価することが必要と考えられる。地上施設では、ガラス固化体が単体の状態で扱われる工程が存在する。具体的には、輸送キャスクから取り出し、ガラス固化体検査、仮置き、オーバーパックへの挿入までの工程である。

上記の工程は地上施設の地下階で行われることから、津波が地上施設を直撃し、ガラス固化体を取り扱う地下階に浸入するシナリオを想定する。

4.4.2 津波によるガラス固化体キャニスタの腐食発生シナリオ

ステンレス鋼は、中性自然水環境、及び湿潤大気環境に於いて不働態しているが、塩化物(Cl-)が存在すると、その不働態が局部的に破られ、孔食、すきま腐食、及び応力腐食割れ(SCC)などの局部腐食を起こすことがある。また、海生生物(藻類、貝類など)の繁殖によって環境が劣化(生物汚染)し、いわゆる微生物腐食を起こすことがある。さらに、ガラス固化体キャニスタから放出される放射線によって海水の放射線分解が起きて、OH ラジカルや過酸化水素 H_2O_2 などの酸化性物質が生成され、環境の酸化性を増すため、局部腐食感受性が高まる。

ガラス固化体キャニスタは SUS304L、もしくは SUH309/SUS309S 製で、特に SUH309/SUS309S 製のものはガラス固化体キャニスタ製造時の溶接による入熱によって鋭敏化(粒

界に Cr 欠乏相を生成)を起こしやすい材料であるため、材料、環境、応力の 3 条件が重畳した SCC を起す危惧がある。なお、SUS304L は鋼中の C(炭素)量を低下させた鋭敏化対策材であり、耐 SCC 感受性に優れている。

地層処分の地上施設が津波に被災すると、ガラス固化体キャニスタが海水と砂礫に浸漬されることが推察される。海水は 3.5%[NaCl]相当の塩化物濃度であるため塩化物の影響を受ける。ガラス固化体キャニスタは発熱体であるため、温度—塩化物濃度—局部腐食領域図などで局部腐食生起感受性を評価する。また、海生生物が持ち込まれ生物汚染を起こす可能性があるため、微生物腐食の可能性を考慮する。ガラス固化体キャニスタが津波によって持ち込まれた砂礫、瓦礫などに埋設され、そこに海水が流入すると、瓦礫下のすきま腐食を考慮する必要がある。

さらに、ガラス固化体キャニスタの発熱によって海水温の上昇に加えて、気液界面の気相側では海水が蒸発して海塩の析出が起きるため、高温・高濃度塩化物水溶液環境になって、一段と厳しい腐食環境になる。また、気相部では海洋性湿潤大気環境になって、発錆(金属表面が錆で茶色くなる現象)し、場合によっては下地への進展性を示し、孔食などの起点となることがある。

4.4.3 ガラス固化体キャニスタの仕様

わが国の地層処分施設で扱うガラス固化体キャニスタの仕様は、国内製造品と海外再処理委託に伴って仏国、英国から返還されるガラス固化体の 2 種類がある。これらは、形状、ガラス固化体キャニスタの材質が異なっている。それぞれの外観・寸法を図 4.4.3-1 に示す[1]。

ガラス固化体キャニスタの材料は、国内ガラス固化体は SUS304L、海外返還ガラス固化体は SUH309/SUS309S が用いられている。

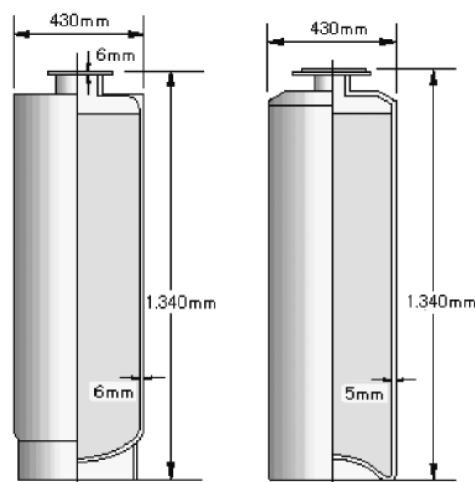


図 4.4.3-1 ガラス固化体の仕様[1]

(左：国内ガラス固化体（日本原燃(株)、右：海外返還ガラス固化体(AREVA NC, セラフィルト社))

4.4.4 津波によるガラス固化体キャニスタの腐食発生メカニズム

(1) はじめに

津波の流入を受け、ガラス固化体キャニスタに海水が付着することを想定した場合、海水に水没したケース/部位と、海水成分の飛沫が付着した湿潤大気環境が考えられる。それぞれ、以下の因子が単独、もしくは重畳して腐食が発生することが想定される。

SUH309/SUS309S 製ガラス固化体キャニスタは溶接により鋭敏化している可能性がある。SUS304L 製ガラス固化体キャニスタは鋭敏化対策が施されている。塩化物の存在によって、これらステンレス鋼は孔食、すきま腐食、SCC などの局部腐食感受性を有し、それぞれ、材料因子：P.I.(Pitting Index、孔食指数)、もしくは PRI (Pitting Resistance Index、耐孔食指数)、鋭敏化の程度、環境因子：温度、塩化物濃度、酸化/還元性などに依存する。海水などの水液環境では塩化物濃度であるが、海洋性湿潤大気環境ではステンレス表面の付着海塩量で評価される。キャニスタは崩壊熱によって内面側から加熱されており、当面の期間は、金属表面温度は常に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 H_2O_2 が生成することによっても酸化性が高まる。また、海生生物や微生物の繁殖によって、いわゆる微生物腐食(MIC、Microbially Induced Corrosion)を起こすことがある。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。

(2) ステンレス鋼の特徴と耐食性

ステンレス鋼は、中性自然水環境、及び湿潤大気環境に於いては、表層に薄く緻密な Cr 酸化物の皮膜で覆われており、その皮膜が下地保護性を有することから事実上の腐食が無視できる。この現象を不働態と言う。しかしながら、塩化物(Cl⁻)などのハロゲンが環境中に一定以上の濃度で存在すると、その不働態皮膜が局所的に破られ、孔食、すきま腐食、及び応力腐食割れ(SCC)などの局部腐食を起こすことが知られている。孔食は自由表面に局所的に起きる穴あき状の腐食で、すきま腐食は構造上(フランジシール面、重ね板部など)、もしくは付着物下(砂礫の堆積、藻類や貝などの生物付着など)のすきま下で起きる腐食で、孔食よりもすきま腐食の方が発生しやすい条件が整いやすい。

材料ごとに、孔食、すきま腐食生起温度-塩化物濃度関係があり、孔食は孔食電位 $V_{C,PIT}$ 、すきま腐食は腐食すきま再不働態化電位 $E_{R,CREV}$ の[Cl⁻]依存性などで評価され、ステンレス鋼の鋼種間比較では、合金中の化学成分の濃度をパラメータとした孔食指数 P.I.、 $P.I.=[\%Cr]+3.3[\%Mo]+10(16 \text{ などの報告例もある})[\%N]$ で評価される。代表的なオーステナイトステンレス鋼、SUS304 の場合、その代表組成は 18Cr-8Ni-残 Fe であるから $P.I.=18$ となり、高耐食性になるほど、P.I.が大きくなる。

(3) キャニスタの特徴

SUH309/SUS309S (22Cr-12Ni) は高%Cr ながら炭素量が高め(高%C)であるから、鋭敏化されるような熱履歴を受けると鋭敏化は進行する。鋭敏化は溶接などによって高温に曝された領域で鋼中の Cr と C(炭素)が結合して粒界に沿って Cr 炭化物($Cr_{23}C_6$)を生成し、結果として

粒界の Cr 濃度が低下することによって粒界の耐食性を失った Cr 欠乏相が生成する現象で、引張りの応力下で粒界に沿った割れ(IGSCC)が進展する。SCC 対策として、鋼中の%Cr を $\leq 0.030\%$ に低下させた低炭素ステンレス鋼が開発されており、国内のキャニスタでは SUS304L が採用されている。一方、海外材のキャニスタに採用されている SHU309/SUS309S は耐熱鋼として高%Cr、高%Cr に設計されていることから、鋭敏化を起しやすい。さらに、 800°C 温度域で加熱されると σ 層が生成して靱性が低下することが知られている。鋼種、%Cr 毎に鋭敏化の温度-時間領域がある。一部の鋼種、及び%Cr に対しては、その鋭敏化する温度-時間領域を示した TTS(Time-Temperature Sensitization)線図で記述されているが、SUH309/SUS309S などの特殊な(鋭敏化の観点から参照頻度の少ない)合金種については必ずしもデータが整っている訳ではない。

鋭敏化していると想定された場合の SCC 感受性の有無は、鋭敏化の程度、材料の冷間加工度に加え、温度、塩化物濃度、応力、環境の酸化・還元性などによって判断される。これら SCC 領域も、TTS 線図と同様にデータが整っている訳ではない。炭素鋼製機器の溶接構造物を制作する際は、適宜、 650°C 前後の温度で溶接後熱処理(PWHT、Post Weld Heat Treatment)、もしくは応力除去焼鈍(SR、Stress Relief)を行うが、ステンレス鋼製機器の場合は鋭敏化温度域と重なることから PWHT や SR が出来ない。したがって、溶接残留応力は除去されていないことが多い。さらに、キャニスタ製造時の曲げなどの冷間加工も重畳して SCC 感受性を高める。

(4) ステンレス鋼の腐食、SCC の環境依存性

海洋性湿潤大気環境では、飛来海塩が鋼表面に付着し、結露水によって濃厚塩化物環境になるため、発錆する。発錆それ自体は金属表面が錆で茶色くなる現象で美観上の劣化に留まる。しかしながら、局所的に孔食の萌芽を経て、残留応力下では湿潤大気応力腐食割れ、ASCC (Atmospheric SCC)感受性が出現する。

ASCC 感受性は材料の鋭敏化、温度、湿度とともに、付着海塩量(g/m^2 単位)に依存し、一般的には付着塩分量は海岸からの距離、外洋か、内湾か、などに依存する。ここで、鋼表面と環境(大気)の温度、湿度が平衡に達しているか否かで、鋼表面が濡れているか否かが決する。すなわち、“鋼表面温度 \gg 大気温度”が維持されていれば、湿潤環境においても鋼表面は乾燥しているので海塩が付着していても腐食環境が整わない。

気液界面では、キャニスタの発熱によって海水温の上昇に加えて、気液界面の気相側では海水が蒸発して海塩の析出が起きるため、高温・高濃度塩化物水溶液環境になって、一段と厳しい腐食環境になる。なお、当面の期間は、金属表面温度は常に大気温度と同等以上に高くなるため、条件によっては付着した海塩は乾燥して腐食環境が整わない場合も想定される。

表層の海水など、大気開放系の水溶液環境(深地層の大気と接触しない地下水、水素注入脱気水などを除く)の酸化性は溶存酸素などの酸化性物質によって高められており、環境中のステンレス鋼は浸漬時間の経過と共に安定な Cr 酸化皮膜が安定化して、その浸漬電位 E_{CORR} は時間とともに上昇し、やがて(百~数百時間オーダー)定常値である自然腐食電位 E_{SP} に到達する。したがって、所与の[Cl⁻]下で E_{SP} と $V_{\text{C,PIT}}$ 、 $E_{\text{R,CREV}}$ の貴卑によって、孔食、すきま腐食の生起が判断できる。

さらに、キャニスタから放出される放射線によって海水の放射線分解が起きて、OH ラジカ

ルや過酸化水素 H_2O_2 などの酸化性物質が生成され環境の酸化性を増すことによって E_{SP} がさらに高くなることから、局部腐食感受性が高まる。

また、海生生物(藻類、貝類など)の繁殖によって環境が劣化(生物汚染)し、いわゆる微生物腐食を起こすことがある。特に、嫌気性細菌の硫酸塩還元細菌(SRB、Sulfate Reducing Bacteria)は、海水中の SO_4^{2-} を $S_2O_3^{2-}$ 、 HS^- まで還元することによって、 $V_{C,PIT}$ 、 $E_{R,CREV}$ が低下する。すなわち、生物付着の表層側に繁殖する好気性細菌の藻類が E_{SP} を高め、溶存酸素を消費し尽くされた付着物の下で嫌気性の SRB が繁殖して $E_{R,CREV}$ を低下させるので、相乗効果で腐食感受性が高まることになる。

(5) その他の環境

また、ガラス固化体貯蔵施設においては収納管のアルミ溶射鋼などの異材との接触によって異種金属接触腐食が起きる系となっており、腐食の加速、及び防食作用が働く可能性がある。

4.4.5 調査の方法

津波によるステンレスの腐食発生メカニズムに基づき、ガラス固化体キャニスタの腐食生起を判断するための調査を行う。ステンレス鋼製溶接構造物の海水中、及びその上部の湿潤大気環境における孔食、すきま腐食、SCC、及び微生物腐食に関する基本的な知見はあるものの、ガラス固化体キャニスタ特有の因子に関する追加の情報を文献調査で補う。

科学技術や医学・薬学関係の国内文献を網羅的に、さらに海外文献についても検索できる日本最大級の科学技術文献データベースである J Dream III の JST7580 (1975-1980、2,140,136 件/1980.12 現在)、及び JSTPlus (1981-、25,462,941 件/2013.11 現在)を用い、表 4.4.5-1 に抽出したキーワードを組み合わせて検索した。その結果、SUS304、SUS304L に対する孔食、すきま腐食におよぼす温度、塩化物の影響、微生物腐食に関しては十分な情報が整っているのに対して、放射線特有の影響に対しては十分な知見が体系化されていない傾向にあることが分かった。一方、SUH309/SUS309S に対しては情報そのものが少ないことが分かった。以上のことから、キーワードの組み合わせによる検索結果数の条件を 100 個以下に指定して、検索を繰り返して実施することとした。

キーワード検索で抽出された文献の表題(英語論文に対しては J Dream が作成した和文表題)に基づいて第一スクリーニングを行い、有用なものは著者、抄録を入手することとした。さらに、必要に応じて元文献を入手することとした。

表 4.4.5-1 J Dream III によるキーワード文献検索

区分	因子				
	SUS304	SUS304L	SUH309	SUS309S	ステンレス
材料因子	加工				
環境因子	海洋	大気	放射線	照射	
現象	腐食				

4.4.6 調査結果

(1) 文献検索、及び調査

J DreamⅢ検索によるキーワード別の文献数を表 4.4.6-1 に、J DreamⅢ検索によって抽出した文献の和文タイトルを表 4.4.6-2、表 4.4.6-3 に示す。なお、SUS304&SUS304L&海洋の検索キーワードで 7 件しか検索されなかったため、追加キーワードとしてステンレスを追加した。その結果、ステンレス&海洋で 1567 件と多数であり、SUS304 を重ねると 102 件まで絞り込まれた。また、J DreamⅢ検索によって抽出した文献のタイトル、出典、文献番号、及び J Dream で作成した要旨(一部著者抄訳)を表 4.4.6-4～表 4.4.6-12 に示す。したがって、ここに記載されている抄訳は、著者抄訳がそのまま記載されたものを除いて、J Dream の編集者の手によるもので、必ずしも、原著者、及びこの文献調査実施者の見解ではない。J DreamⅢでは各文献に整理番号(例えば、08A0875570)が付与されており、整理番号を指定して文献を入手することが可能である。

表 4.4.6-1 J DreamⅢ検索によるキーワード別の文献数

追番	検索キーワード				件数
1	SUS304	SUS304L	海洋		7
2	SUS304	SUS304L	大気		42
3	SUS304	SUS304L	加工	腐食	64
4	SUS304	SUS304L	放射線		68
5	SUS304	SUS304L	照射		75
6	SUH309				10
7	SUS309S				22
追加1	ステンレス				153218
追加2	海洋				395333
追加3	ステンレス	海洋			1567
追加4	ステンレス	海洋	SUS304		102
追加5	ステンレス	海洋	SUS304	SUS304L	7
8	特定著者		ステンレス(など)		88

表 4.4.6-2 J DreamIII検索によって抽出した文献の和文タイトル(1)

追番	和文タイトル
1	10年間の海洋環境下でのステンレス鋼の耐食性
2	海洋環境におけるステンレス鋼の腐食,SCC感受性評価
3	宇宙船打上げ環境におけるステンレス鋼管の腐食
4	IASCCにおけるオーステナイト系ステンレス鋼の照射後焼鈍の効果
5	AISI304と304Lステンレス鋼の照射による溶質の偏析(RIS)と応力腐食割れ(SCC)
6	高耐食性ステンレス鋼の大気中塩化物応力腐食割れ感受性とすき間腐食電位の評価
7	大気中の塩化物誘起応力腐食割れによるオーステナイト系ステンレス鋼の破断特性
8	加熱を受けるステンレス鋼の大気中塩化物応力腐食割れ特性
9	304と304L型ステンレス鋼の大気中の塩化物誘起応力腐食割れ
10	304系ステンレス鋼の大気中塩化物応力腐食割れ特性
11	長期大気暴露によるステンレス鋼の外表面応力腐食割れ性について
12	海浜におけるオーステナイト系ステンレス鋼の15年間大気暴露試験
13	ステンレス鋼の大気中応力腐食割れに及ぼす相対湿度,温度および表面塩素濃度の影響
14	SUS304L鋼のすきま腐食再不動態化電位に及ぼす表面Cr濃度の影響
15	各種酸化皮膜処理したステンレス鋼の皮膜構造と高温純水中の耐食性
16	高温純水中におけるステンレス鋼の微量金属溶出に及ぼす大気酸化処理皮膜構造の影響
17	キャニスター材の耐久性評価 III 貯蔵環境下における大気腐食性の検討
18	SUS304の粒界鋭敏化におよぼす冷間加工の影響
19	304L,316Lステンレス鋼キャニスターへの塩化物応力腐食割れ発生限界塩分濃度評価
20	オーステナイト系ステンレス鋼製ドラムの外表面割れ事例
21	加工硬化層を有する低炭素ステンレス鋼の応力腐食割れ試験
22	SUS304L鋼のSCC挙動に及ぼす加工硬化の影響
23	ステンレス鋼溶接部へのバクテリアの付着に及ぼす表面状態の影響
24	加工熱処理型オーステナイトステンレス鋼の鋭敏化挙動
25	鋭敏化を回避するための低炭素ステンレス鋼の加工規準
26	高温純水中におけるSUS304およびSUS304Lの粒界応力腐食割れに及ぼす冷間加工の影響
27	高温純水中におけるオーステナイト系ステンレス鋼の粒界応力腐食割れに及ぼす加工の影響
28	照射影響を考慮したSCC評価手法の高度化に関する研究(3) γ 線照射下でのステンレス鋼に形成する皮膜に対する材料と溶存酸素の影響
29	微小試験片を用いたSUS304鋼溶接部における中性子照射後SCC評価
30	高レベル廃棄物ガラス固化体容器用ステンレス鋼の応力腐食割れにおよぼすガンマ線照射の影響
31	酸化殺菌剤添加海水中におけるステンレス鋼の腐食挙動
32	H ₂ O ₂ +O ₃ 溶液を用いた不動態化処理によるステンレス鋼の耐食性向上
33	放射線分解水質下のSCC進展挙動評価法の研究(1)
34	超臨界水による廃棄物処理におけるステンレス鋼の不動態皮膜
35	電位ノイズ法ならびに分極抵抗法を用いた亜臨界水酸化環境での腐食損傷の検出
36	腐食電位に及ぼす表面酸化被膜の影響評価
37	生物皮膜の形成を原因とするステンレス鋼の自然電位貴化
38	複合計測によるステンレス鋼表面酸化被膜の特性評価
39	自然海水中に浸漬したステンレス鋼の電位貴化メカニズムの検討
40	放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 5 処分容器材料の自然腐食電位の環境因子依存性
41	SUS304ステンレス鋼の腐食電位に及ぼす過酸化水素の影響
42	SUS304ステンレス鋼の応力腐食割れに及ぼす過酸化水素の影響
43	SUS304の高温水腐食に対する溶存酸素および過酸化水素の役割
44	高温環境での損傷事例 7 熱疲労破壊(2)
45	キャニスター材に対する放射性揮発物に付着性
46	キャニスター材に対する模擬高レベル廃棄物ガラスの付着性
47	δ 相を含むオーステナイトステンレス鋼SUS309Sの熱間加工性
48	高レベル廃棄物ガラス固化体容器用金属材料の耐食性に及ぼすガンマ線照射の影響 I
49	304系ステンレス鋼の大気中塩化物応力腐食割れ特性
50	海浜におけるオーステナイト系ステンレス鋼の15年間大気暴露試験

表 4.4.6-3 J DreamIII検索によって抽出した文献の和文タイトル(2)

追番	和文タイトル
51	ステンレス鋼の大気中応力腐食割れに及ぼす相対湿度,温度および表面塩素濃度の影響
52	ステンレス鋼とともに40年 ステンレス鋼絞りきょう体の実用化
53	JMTRIにおけるBWRを模擬した高温水におけるIASCC研究のための試片の中性子照射
54	304Lステンレス鋼の微細構造および化学組成に及ぼす陽子照射効果
55	高温水中におけるSUS304ステンレス鋼の腐食電位に及ぼす過酸化水素及び溶存酸素の影響
56	湿潤大気応力腐食割れ予測モデル
57	溶接構造物におけるステンレス鋼の選び方,使い方
58	"さび"の定量と"ひび"の予測
59	応力腐食割れ発生から進展過程を評価する試験法に対する破壊力学の寄与
60	ステンレス鋼SUS304における応力腐食割れの表面き裂効果を考慮したモンテカルロ・シミュレーション
61	湿潤海洋性大気環境下における応力腐食割れ生起監視技術へのENA適用性の検討
62	ENAの実機プラントへの展開と今後の展望/適用事例(3)海外における適用事例とその概要
63	鋭敏化ステンレス鋼の湿潤海洋性大気環境下における応力腐食割れ(ASCC)感受性評価
64	ステンレス合金/海水系におけるMICへのENA適用性の検討
65	湿潤海洋性大気環境におけるステンレス合金の局部腐食,応力腐食割れ(ASCC)評価
66	鋭敏化ステンレス鋼/中性塩化物環境系における粒界応力腐食割れ寿命予測モデル
67	コンクリート環境におけるステンレス鋼の局部腐食生起の可能性評価
68	自然水系におけるステンレス鋼の腐食電位挙動
69	汽水環境におけるステンレス鋼の局部腐食生起寿命予測モデル
70	ステンレス鋼の微生物腐食機構に関する一考察
71	鋭敏化ステンレス鋼・中性塩化物環境における応力腐食割れ生起臨界条件
72	温泉水環境における各種ステンレス合金の耐すきま腐食感受性評価
73	複合サイクル試験法によるステンレス鋼の大気腐食加速試験法の検討
74	ステンレス鋼の大気腐食加速試験法の検討
75	BWR環境下における材料耐食性評価 (1) BWR構造材料のSCC発生特性に及ぼす水の放射線分解生成物の影響
76	放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 6 ステンレス合金の腐食すきま生起臨界条件
77	放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 7 ステンレス合金の応力腐食き裂発生臨界条件
78	HNO ₃ -NaNO ₂ -Cl ⁻ 系におけるステンレス鋼のすきま腐食
79	ステンレス鋼およびTi合金の塩化物すきま腐食臨界条件におよぼすチオ硫酸イオンの影響
80	高温純水中におけるSUS304鋼の皮膜成長過程と応力腐食割れ感受性の関係 I
81	海洋環境下でのコンクリートひび割れ部におけるステンレス鉄筋の腐食性状
82	海洋構造物の信頼性を守る鉄—3 耐海水性ステンレス鋼被覆による海洋鋼構造物飛沫帯の100年防食技術
83	海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する研究
84	微弱放射線場におけるステンレス材の隙間腐食挙動
85	酸化被膜の種類が放射線誘起表面活性(RISA)におよぼすすきま腐食抑制効果の影響
86	好気性シュードモナス属菌NCIMB2021バクテリアの存在有無における海水をベースとした媒体におけるタイプ304ステンレス鋼の腐食性
87	電気化学インピーダンス技法を用いる海洋雰囲気中のステンレス鋼の錆進行の監視
88	海洋環境の干満帯におけるステンレス鋼の電気防食試験
89	海洋性大気に暴露したステンレス鋼の発しゅうにおよぼす付着海塩量と相対湿度の影響
90	製塩装置のオーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ 残留応力制御による防止対策
91	水門におけるステンレス鋼の腐食について
92	信頼性評価技術と実証試験 環境強度評価技術の確立 実環境応力腐食割れ寿命評価技術の確立 粒界応力腐食割れフィールド試験
93	海塩粒子による304鋼のESCC防止用ストリップパブル防食テープの適用
94	実海中のステンレス鋼に対する腐食作用

表 4.4.6-4 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(1)

文献名	10年間の海洋環境下でのステンレス鋼の耐食性
出典	電気製鋼、Vol.79, No.3, Page.245-251 (2008)
整理番号	08A0875570
要旨	各種ステンレス鋼について、直接曝露および間欠浸漬の海洋環境下で10年間の耐食性評価試験を行い報告した。評価材はSUS304L,SUS316L,SUS329J4LなどのJIS規格の他、オーステナイト系スーパーステンレス鋼の1種であるGSUS317G4L(原子力規格)ならびに窒素を積極的に添加したN-1~N-3,DSN9である。これらの溶体化処理材から幅50mm×長100mm×厚2~4mmの形状を切り出し表面をJIS#240で仕上げ、試験片としてアセトン脱脂を施した後試験に供した。試験の結果は次のとおりであった。発錆ランクは直接曝露、間欠浸漬のいずれの環境でも5年材との差はほとんどなく、意匠性を判断する外観については使用初期の段階でほぼ決定する。最大食孔深さは5年材と比較し、特に直接曝露環境下での低RPE材で大きくなっており、海洋環境中でのステンレス鋼の腐食の進行は、主として食孔の進行によるものであることを確認した。試験環境によらず、発錆ランク、最大食孔深さともRPE(Cr+3.3Mo+16N)で良く整理でき、この数値が37を超える鋼種では発錆がほとんど認められず、また食孔深さも小さく、海洋環境下で良好な耐食性、意匠性を有する。
文献名	Corrosion of Stainless-steel Tubing in a Spacecraft Launch Environment
出典	Pap Corros, Page.18P (2002)
整理番号	02A0901921
要旨	海洋に面したスペースシャトル打ち上げ環境に11種の耐食性金属管(ステンレス鋼5種類、ニッケル基合金3種類、鉄基合金2種類)を曝露した。この環境では304ステンレス鋼管に孔食が発生している。曝露環境はKennedy宇宙センターにあるシェルター付きおよびシェルター無し海岸およびシェルター付きおよびシェルター無し酸スプレー環境である。酸スプレー環境はアルミナ粉を含む10%塩酸スラリーを2週間毎に噴霧させた環境であり、ロケットブースターからの排気ガスを模擬した。ニッケル基合金(C-2000,Alloy276および625)、鉄基合金(254SMOおよび2507)はほとんど腐食しなかった。304L,316Lおよび317L合金は激しく腐食した。AL29-4Cおよび2205は中程度に酸化した。
文献名	Post-Irradiation Annealing Effects of Austenitic Stainless Steels in IASCC
出典	Pap Corros Page.12P (1998)
整理番号	99A0989149
要旨	照射した後の焼鈍処理が、熱による鋭敏化と照射誘起応力腐食割れ(IASCC)の回復に与える効果を、EPR(電気化学的腐食試験)とSSR(低速歪)試験で調べた。316Lは照射しても鋭敏化は起こらなかったが、IGSCC(粒界応力腐食割れ)感受性は400~700℃(1h)の熱処理で照射のままの23%から7~0%に減少した。304を照射すると簡単に鋭敏化した。IGSCC感受性は400~500℃の熱処理で照射のままの95%から62~45%に減じた。この結果より、304Lと316Lでは熱処理でIASCCの回復が促進することが分かった。
文献名	Radiation-Induced Solute Segregation and Stress Corrosion Cracking Study of AISI 304 and AISI 304L Stainless Steels.
出典	ASTM Spec Tech Publ No.1175, Page.870-888 (1994.01)
整理番号	94A0270587
要旨	商用純度の標記ステンレス鋼の結晶粒界近傍における、Cr,Niと微量元素(Si,P,Sなど)のRISおよびIGSCCに及ぼす影響を高エネルギー陽子照射による試験片について調べた。STEM/EDAX分析の結果、照射は粒界に沿ってM23C炭化物の析出を促進することが分かった。CERT試験の結果、1dpa照射試料について粒内破壊を伴うIGSCC破面が発生した
文献名	大気中の塩化物誘起応力腐食割れによるオーステナイト系ステンレス鋼の破断特性
出典	材料と環境 Vol.55, No.1, Page.20-24 (2006)
整理番号	06A0040082
要旨	SUS304L,SUS316L及びSUS303ステンレス鋼の塩化物誘起応力腐食割れ(ESCC)挙動を、温度範囲333Kから353K、相対湿度35%で、海塩粒子を模擬した人工海水を付着させて検討した。SUS304Lに対して、応力-FSCC破断時間の関係を $\sigma = -A \log(tf) + B$ と定式化した。ここで σ : 応力(MPa), tf : 破断時間(h), $A=23.7T-7020$, $B=43.7T-11600$, T : 絶対温度(K)。応力レベルが $0.25\sigma_y$ (σ_y :0.2%耐力)では、ステンレス鋼試料表面には初期の微小クラックは観察されなかったが、応力レベルが $0.5\sigma_y$ では応力腐食割れが発生した。従って、これらステンレス鋼の応力しきい値は $0.5\sigma_y$ と $0.25\sigma_y$ の間であり、ピットの底と周囲の応力集中を考慮すれば応力しきい値はこれらの値を超えらると思われる。統計解析は、ESCCの亀裂長ささと深さは二重指数分布に従うことを示唆した。(翻訳著者抄録)
文献名	304と304L型ステンレス鋼の大気中の塩化物誘起応力腐食割れ
出典	材料と環境 Vol.52, No.3, Page.166-170 (2003)
整理番号	03A0186276
要旨	相対湿度35%,353Kの大気中で、標記を検討した。SUS304とSUS304L鋼板を1393Kで固溶化熱処理し、引張試験片を削り出し、さらに923Kで時効処理した。この熱処理によるEPR試験値(鋭敏化度)は、SUS304が0.88%,SUS304Lが0.18%であった。応力腐食割れ試験はコイルばねを用いた定荷重法とし、応力は0.2%耐力の0.25~1.75倍とした。人工海水を試験片に滴下し乾燥させ、塩化物を付着させた。人工海水に加え、塩化ナトリウムと塩化マグネシウムについても試験した。試験後の表面をSEM観察し、亀裂発生の有無と腐食形態を調べた。得られた結果は次の通り。1)次の応力(σ_{ap} : kgf/mm^2)と最小破断時間(tf :h)の関係が得られた。 $\sigma_{ap} = -51 \log(tf) + 153$ (SUS304), $\sigma_{ap} = -141 \log(tf) + 386$ (SUS304L)。2)応力腐食割れの応力しきい値は、0.2%耐力の1/2以下であった。3)人工海水中の塩化マグネシウムは、本実験条件における、応力腐食割れの原因である。
文献名	304系ステンレス鋼の大気中塩化物応力腐食割れ特性
出典	電力中央研究所狛江研究所報告 No.T01042, Page.19P (2002)
整理番号	93A0964797
要旨	人工海水を塗布した304及び304Lステンレス鋼の大気中70~80℃、相対湿度35%の雰囲気中の塩化物応力腐食割れを検討し、次の所見を得た。両材について応力と最小破断時間との関係を表す式を得た。0.2%耐力以上の応力では304材の方が破断しやすい傾向にあったが、低い応力では両者に差は認められなかった。両材ともに、0.2%耐力の1/2の応力でも500h程度の短時間で破断したことから、応力の低減によって塩化物応力腐食割れを防止することは困難である。NaCl単独溶液及びMgCl2単独溶液での試験結果から、腐食性は塩の吸湿性に関係すること、及び今回の相対湿度ではMgCl2が塩化物応力腐食割れの発生原因であることを確認した。

表 4.4.6-5 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(2)

文献名	海浜におけるオーステナイト系ステンレス鋼の15年間大気暴露試験	
出典	材料と環境講演集 Vol.2000, Page.165-168 (2000)	
整理番号	00A0553799	
要旨	標記に関し、沖縄・伊計島(亜熱帯清浄地区)と千葉外房・興津(温帯清浄地区)の2か所の海岸近くについて調査して次の結果を得た。1)SUS304鋭敏化材のすみ肉溶接部近傍に粒界割れが生じた。鋭敏化度が高い(再活性化率が高い)ため割れ感受性が高いものと考えられる。2)SUS304,304L溶体化材およびSUS304L鋭敏化材に溶接すき間部を起点とする粒内割れが生じた。3)SUS316,316L材には粒内割れおよび粒界割れのいずれも生じなかった。4)塗装は外面応力腐食割れ(ESCC)に対して、2年までは有効であり15年では効果が低減した。	
文献名	ステンレス鋼の大気中応力腐食割れに及ぼす相対湿度、温度および表面塩素濃度の影響	
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.40th, Page.377-379 (1993)	
整理番号		
要旨	応力腐食割れ(SCC)防止が可能なステンレス鋼表面許容塩素濃度と相対湿度、温度及び鋭敏化度を検討した。SUS304,304L,309及び309S鋼表面に塩化物及びAl ₂ O ₃ 粉末を付着させ定荷重法SCC試験を行った。許容塩素濃度は相対湿度に強く依存する。ステンレス鋼中の炭素量を低減することによって大気中の応力腐食割れを防止することができる	
文献名	SUS304の粒界鋭敏化におよぼす冷間加工の影響	
出典	腐食防食協会春期学術講演大会講演予稿集 Vol.1982, Page.90-93 (1982)	
整理番号	82A0276622	
要旨	SUS304製化学プラントで、内部流体温度が100° C以下の機器および配管の大気側でのIGSCC発生は冷間加工を受け溶接熱により粒界の鋭敏化、環境の塩化物による事例解析の再現を圧延率を変えたSUS304,304Lを用い、電気化学的再活性化法(EPR法)により検討。IGSCCはSUS304では、再活性化率が数%以上あり、IGSCC対策としてSUS304Lへの変更が有効とわかった	
文献名	304L,316Lステンレス鋼キャニスタへの塩化物応力腐食割れ発生限界塩分濃度評価	
出典	日本原子力学会秋の大会予稿集 Vol.2013, Page.ROMBUNNO.119 (2013)	
整理番号	13A1396306	
要旨	コンクリートキャスク貯蔵方式の実用化において、ステンレス鋼製キャニスタ密封機能の維持のため、塩化物応力腐食割れ(SCC)対策が重要な課題である。本報では、SUS304L,316L材を対象とし、SCC発生限界塩分濃度の閾値を評価し、さらに同材料へ施した実機相当の表面研磨施工による加工硬化が及ぼす影響についても評価した。(著者抄録)	
文献名	Effect of Surface Condition on Attachment of Bacteria to Stainless Steel Welds	
出典	Trans JWRI (Join Weld Res Inst Osaka Univ) Vol.29, No.1, Page.45-51 (2000.07)	
整理番号	00A1054487	
要旨	廃水処理プラントの残留水から培養したグラム陽性菌について、しに付着により生じた微生物腐食(MIC)に及ぼすマイクロ組織の影響を研究した。316L及び304ステンレス鋼の溶接試料の溶接金属、HAZ及び母材について試験した。バクテリアの付着は両鋼の母材とHAZ及び溶接金属との間で異なり、溶接金属及びHAZでは多く付着し、母材では少なかった。また同じ供試材内で溶接のままと研磨試料との間では付着面積率に大きな相違が見られた。均一な表面状態の両鋼の母材、HAZ及び溶接金属でも、付着面積に相違が生じたから、マイクロ組織及び表面組成の影響が重要であり、この選択的付着が腐食に寄与し、溶接部のMICアタックを招く因子の一つになると考えた。	
文献名	ステンレス鋼とともに40年 ステンレス鋼絞きょう体の実用化	
出典	ステンレス Vol.37, No.12, Page.2-9 (1993)	
整理番号	94A0072593	
要旨	マンホール内で、通信用同軸ケーブルの中継器を收容するためのきょう体用ステンレス鋼選定の経緯を概説した。機械的強度、耐食性、絞り加工性、価格の点からSUS304,SUS304L,SVS316L,NAS124Lを候補材として選び、引張性質、絞り加工時の組織、成形応力、硬さ変化、耐食性(塩水噴霧、孔食腐食他)を比較検討した。最終的にはNi10%以上のSUS304(板厚2.0mm)が選定された。	
文献名	照射影響を考慮したSCC評価手法の高度化に関する研究(3)γ線照射下でのステンレス鋼に形成する皮膜に対する材料と溶存酸素の影響	
出典	日本原子力学会秋の大会予稿集 Vol.2011, Page.ROMBUNNO.E54 (2011)	
整理番号	11A1467345	
要旨	軽水炉などでは、水の放射線分解によりH ₂ O ₂ 等の酸化剤が生成する。これらの酸化剤は材料のECPを貴な電位とし、ステンレス鋼表面に生成する腐食生成物の形態を変化させる。今回、高温高圧水中におけるSUS316LとSUS304L鋼に関して、γ線照射と溶存酸素が及ぼす酸化皮膜の変化をレーザラマン及びTEM分析により評価した。また、すき間部等の構造的な影響も合わせて検討した。(著者抄録)	

表 4.4.6-6 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(3)

文献名	Neutron Irradiation of Specimens for IASCC Studies in BWR Simulated High Temperature Water at JMTR.
出典	JAERI-Review-2003-023 Page.140-141 (2003.09)
整理番号	03A0700566
要旨	照射助長応力腐食割れ(IASCC)は照射後試験でも再現できるが、照射効果、応力、及び高温水環境といった点で実際のIASCCと区別する必要がある。JMTRではそのための水試験ループを作成した。この施設を用いて炉内IASCC発生試験をBWR相当条件下で単軸荷重法で、亀裂伝搬試験を圧縮引張試験片で行った。試験片はBWR構造材をホットラボで検査した。得られた結果は、亀裂成長速度、IASCC感度、高温水中の単軸定荷重、照射誘起応力緩和である。
文献名	Effects of proton irradiation on the microstructure and microchemistry of type 304L stainless steel.
出典	J Nucl Mater Vol.205, Page.361-373 (1993)
整理番号	93A0891716
要旨	照射促進応力腐食割れを調べるための、不純物制御の304L鋼を400°Cで陽子照射しAESで分析した。照射により黒点状ループを形成、成長後、転位網に変化し、粒界で6at%CrまでCr濃度低下と6.6at%NiまでのNi濃度が上昇した。不純物含有鋼で特に顕著であった。またPとSiの濃化を認め、陽子照射結果は軽水炉における照射と同じである事を明らかにした
文献名	高レベル廃棄物ガラス固化体容器用ステンレス鋼の応力腐食割れにおよぼすガンマ線照射の影響
出典	FAPIG No.111, Page.71-75 (1985.11)
整理番号	86A0133296
要旨	キャニスタ用の有力な候補材料として提案されているSUS304,SUS304Lについての耐食性を評価するため、SCCに及ぼすガンマ線照射の影響を沸騰水中で調べた。その結果、1)ガンマ線照射は沸騰純水中で鋭敏化したSUS304,304LのSCC感受性を増す。一方SUS304ELCに対してはガンマ線照射の影響は認められなかった。2)腐食電位の経時変化、分極曲線及び電位切加SCC試験の結果から、ガンマ線照射により水の放射線分解に伴い酸化性物質が生成し、これらの物質がSCC感受性を増加させるものと考えられる。ことなどが分かった
文献名	酸化殺菌剤添加海水中におけるステンレス鋼の腐食挙動
出典	材料と環境 Vol.60, No.2, Page.72-74 (2011)
整理番号	11A0521977
要旨	ステンレス鋼の生物腐食の防止のために殺菌剤の投入などの方法が検討されているが不明な点が多い。ここでは、船舶バラスト水処理システムに用いられる3種の酸化性殺菌剤を海水に添加し、浸漬試験によりステンレス鋼の腐食挙動(孔食と隙間腐食)を調べた。試験片はSUS316とSUS304。殺菌剤は次亜塩素酸ナトリウム、過酢酸+過酸化水素、オゾン3種である。腐食電位、孔食電位も測定した。過酢酸と過酸化水素を添加した海水中では腐食がほぼ抑制された。また、貴化した自然電位が孔食電位を越えることは殆ど無かった。
文献名	(H ₂ O ₂ +O ₃)溶液を用いた不動態化処理によるステンレス鋼の耐食性向上
出典	材料と環境 Vol.59, No.12, Page.464-467 (2010)
整理番号	11A0099209
要旨	硝酸処理や硝酸+クロム酸塩溶液はステンレス鋼の不動態化処理に有効であることが知られている。しかしながら廃液からの窒素やCr ⁶⁺ は環境に有害であるため排水規制の対象となっている。本研究では代替処理法を開発することを目的として、酸素と水に分解するH ₂ O ₂ およびO ₃ による不動態化処理法について研究した。不動態化処理電位に及ぼすH ₂ O ₂ およびO ₃ 濃度および不動態化処理温度の影響を検討し、不動態化処理後の耐食性を孔食電位測定によって評価した結果、SUS304およびSUS430ステンレス鋼の耐食性向上条件が見いだされた。(著者抄録)
文献名	超臨界水による廃棄物処理におけるステンレス鋼の不動態皮膜
出典	東北大学金属材料研究所金属ガラス総合研究センター共同利用研究報告書 Vol.2005, Page.97-98 (2006.06)
整理番号	06A0858280
要旨	著者らは、原子力発電所からの難燃性低レベル放射性廃棄物の新たな減容法として、超臨界水反応(RuO ₂ 法)による新たな減容法の提案を行っている。その容器候補としてステンレス鋼が考えられるが、その腐食特性は明らかでない。 Hastelloy C-22、ステンレス鋼SUS304を試料として用い、超臨界水、さらにポリエチレンとRuO ₂ あるいは過酸化水素を加えた環境下で生成する不動態皮膜を評価した。RuO ₂ 法では、重量変化、表面組成が不動態皮膜と異なることを明らかにした。
文献名	自然海水中に浸漬したステンレス鋼の電位貴化メカニズムの検討
出典	材料と環境 Vol.50, No.6, Page.285-291 (2001)
整理番号	01A0605980
要旨	自然海水中でのステンレス鋼SUS304および純金属12種の自然電位貴化を例に、環境中の微生物作用による電位貴化メカニズムについて検討した。電位貴化現象はステンレス鋼、Pt,Au,Pd,Cr,Ti,Niで認められ、ステンレス鋼の電位貴化は不動態皮膜の主要元素であるCr,Niの貴化に起因するとした。ステンレス鋼のみならず、Pt,Au,Cr,Tiでも自然海水中での電位貴化は微生物作用に依存した。またカソード分極測定、表面付着物の測定などから、電位貴化の原因として微生物による過酸化水素の発生と低pH化を挙げた。

表 4.4.6-7 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(4)

文献名	放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 5 処分容器材料の自然腐食電位の環境因子依存性
出典	腐食防食講演集 Vol.1993, Page.67-70 (1993)
整理番号	93A0537447
要旨	50及び90°Cの炭酸水素ナトリウム溶液において、2~3年浸漬後のステンレス鋼及びチタン合金の自然腐食電位ESPを測定した。ESPはpHに依存し、pHの増大と共に直線的に低下する。ESPは鋼組成及び温度にあまり依存しない。γ線照射を模擬したH ₂ O ₂ 環境でのESPは短時間で上昇するが10 ⁻³ 秒程度で安定になる。ESPは微生物の影響を受ける
文献名	高温水中におけるSUS304ステンレス鋼の腐食電位に及ぼす過酸化水素及び溶存酸素の影響
出典	防食技術 Vol.36, No.11, Page.721-724 (1987)
整理番号	88A0121329
要旨	過酸化水素の熱分解特性を評価できる電位測定セルを作成し、標題を調べた結果、1)過酸化水素は同濃度の溶存酸素に比べSUS304の腐食電位を著しく高める、2)両者の共存下における腐食電位はそれぞれの濃度に独立して依存する、3)SUS304表面で起こる主な反応は2H ₂ O ↔ O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ , H ₂ O ↔ H ₂ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ と推定された
文献名	湿潤大気応力腐食割れ予測モデル
出典	材料と環境 Vol.62, No.3, Page.117-121 (2013)
整理番号	13A0618642
要旨	ステンレス鋼製溶接構造物を海洋性湿潤大気環境下で使用すると、溶接による鋭敏化が起きていれば湿潤大気応力腐食割れ(Atmospheric Stress Corrosion Cracking,ASCC)を起こすことがある。本報では、ASCCの発生と進展過程をモデル化した。補修溶接を施した溶接継手の軸方向の表面側の残留応力を362MPa、板厚内部の残留応力を200MPa、鋭敏化度を20%、付着塩分量を0.1g/m ² [NaCl]とした時のASCC発生寿命は1.1年で、き裂進展速度の応力拡大係数依存性から約7.6年で20mmの板厚を貫通する可能性がある。(著者抄録)
文献名	溶接構造物におけるステンレス鋼の選び方、使い方
出典	配管技術 Vol.53, No.15, Page.33-38 (2011)
整理番号	11A1873881
要旨	腐食、応力腐食割れ(SCC)を起こさないための溶接構造物についてステンレス鋼の選び方、使い方を解説した。金属の腐食は1)全面腐食型 2)不動態/局部腐食型の二種類で代表できる。ステンレス鋼の耐食性は表層のCr酸化物の被膜が緻密で下地保護性を有することに由来し、耐孔食性指標で評価し、その方法を説明した。すきま腐食の生起領域は、水溶液環境の酸化・還元性の指標で、その生起に関する評価を例で示し、寸法効果や進展予測も説明した。SCCは、変色皮膜破壊型、活性経路型のSCCと水素ぜい化に分類され、材料の履歴、環境に応じて特定のSCCが起きる。溶接などによるステンレス鋼の鋭敏化によるSCCの感受性の変化を説明した。
文献名	"さび"の定量と"ひび"の予測
出典	IHI技報 Vol.51, No.4, Page.48-54 (2011)
整理番号	11A1562501
要旨	腐食損傷形態と腐食機構の特徴に基づく腐食の分類に基づき、全面腐食型の金属("さび"型)と不動態・局部腐食型の金属("ひび"型)に分け、それぞれの腐食の評価の考え方を整理する。さらに、近年精力的に実施しているPWR(加圧水型原子炉)一次系水環境の応力腐食割れ("ひび")に対する試験・評価を通して、プラント構成機器材料の長期健全性担保のシナリオを解説する。(著者抄録)
文献名	応力腐食割れ発生から進展過程を評価する試験法に対する破壊力学の寄与
出典	材料 Vol.59, No.12, Page.890-899 (2010)
整理番号	11A0398063
要旨	これまでに行なわれた応力腐食割れ(SCC)発生試験におけるSCCの発生期から進展期の挙動と破壊力学パラメータの関係を整理し、残っている問題にいかに関与できるかについて解説した。1)SCC試験法:発生と進展、進展性、発生試験、2)SCC発生の破壊力学的評価:塩化物環境のSSRT試験、繰返しSCC、CF試験、高温水中の炭素鋼の定荷重試験、組合せ負荷条件下におけるSCC下限応力、モンテカルロシミュレーションなど、3)破壊力学試験からのKISCC:高温水環境におけるKISCC、沸騰酸性塩化物系でのKISCC、JISCCなど、4)SCC発生から進展過程を評価する試験法に対する破壊力学の器用:弾塑性解析に基づくJ積分の適用、厳密な適用範囲を超えた広範囲で便利な指標。

表 4.4.6-8 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(5)

文献名	ステンレス鋼SUS304における応力腐食割れの表面き裂効果を考慮したモンテカルロ・シミュレーション
出典	日本機械学会論文集 A編 Vol.74, No.737, Page.128-136 (2008)
整理番号	08A0122129
要旨	本研究では、応力腐食割れ(SCC)における微小き裂発生からき裂の合体・成長により大きき裂にいたる過程を予測できるモンテカルロ・シミュレーションを開発した。き裂発生時間は指数分布に基づく乱数、き裂発生箇所は一様乱数、き裂長さは正規乱数により決定し、表面き裂の発生・合体・成長を考慮している。鋭敏化処理したステンレス鋼SUS304についてのCBB試験の結果に基づいてシミュレーションを行った結果、時間に対するき裂個数、き裂分布等の結果は実験結果をよく再現していた。また、き裂発生速度、合体条件の影響も明らかにした。(著者抄録)
文献名	湿潤海洋性大気環境下における応力腐食割れ生起監視技術へのENA適用性の検討
出典	材料と環境 Vol.52, No.9, Page.477-482 (2003)
整理番号	03A0624950
要旨	標記の検討を目的に、鋭敏化熱処理したSUS304ステンレス鋼を供試材として次の試験を行なった。1)NaCl水溶液に人工すきまを付与した試験片を浸漬し、引張応力を負荷し、電位の経時変化その他を測定した。2)恒温恒湿槽内で、U-bend試験片のR部中央に苦汁(NaCl+CaCl+MgCl+KCl水溶液)の塩滴を置き、塩滴下の電位を測定した。得られた結果は次の通り。1)塩化物水溶液環境下で、電位・電流のマクロ的な変化を応力腐食割れの発生・進展の素過程への分離を試みた。2)個々の微小亀裂がそのまま成長を続けるのではなく、近傍に発生した微小亀裂同士との合体により進展性を示すようになる。3)湿潤大気応力腐食割れは、ピット経路型で発生し、その生起を電位挙動で検知できる。ある程度の亀裂ができた段階で再不動態化し、RD型のノイズ信号を示す。4)RD型ノイズ信号の発生頻度が高まれば、近傍の亀裂同士が合体して亀裂が進展性を持つ可能性が高まる。従って、電気化学ノイズ法(ENA)は湿潤大気応力腐食割れの監視技術として有効な手段となりうる。
文献名	ENAの実機プラントへの展開と今後の展望/適用事例(3)海外における適用事例とその概要
出典	材料と環境 Vol.52, No.9, Page.458-459 (2003)
整理番号	03A0624945
要旨	海外における電気化学ノイズ解析(ENA)の適用事例とその概要を紹介した。1)高レベル廃棄物水溶液を貯蔵した炭素鋼製地下タンクの孔食と応力腐食割れのモニタリングへの応用。予亀裂を付与したリング試験片とピンタイプ試験片からなるセンサをタンクの気相、水中及びスラッジ界面に設置し、腐食電流と腐食電位を連続計測している。2)熱交換器の冷却水などの微生物の繁殖モニタへの応用。数段の円盤電極を重ねたプローブの電極間に直流電圧を付与し、電流応答からバイオフィルムの活性を評価している。米国の原子力発電所などでバイオサイドの添加の管理に実用化されている。
文献名	鋭敏化ステンレス鋼の湿潤海洋性大気環境下における応力腐食割れ(ASCC)感受性評価
出典	材料と環境講演集 Vol.2000, Page.55-56 (2000)
整理番号	00A0553769
要旨	100Rかまぼこ型治具で曲げ歪を付与した試験片の暴露試験及びCCC試験を実施してきたが、ASCC生起領域を各種加速因子ごとに整理した。1)ASCC感受性領域の整理:実験における下限界鋭敏化度は1.5%、実機で5%程度であるが、両者間には評価に差異がある。下限界付着塩分量はCCC試験における高々3分間に当たる $5 \times 10^{-10} \text{ g/m}^2$ である。付着塩分の濃縮を妨げるための最適湿度域がある。2)高強度ステンレス鋼のASCC感受性:SUS630のき裂長さは焼戻温度、硬さと相関がある。H900材は鋭敏化304鋼より感受性が高い。3)鋭敏化304鋼の表面粗さ依存性:表面仕上げ粗さによるASCC感受性の顕著な差はない。
文献名	ステンレス合金/海水系におけるMICへのENA適用性の検討
出典	腐食防食シンポジウム資料 Vol.124th, Page.63-74 (1999)
整理番号	99A1030349
要旨	文献を基に海水における微生物腐食への電気化学ノイズ法適用を検討した。炭素鋼の微生物腐食およびバイオフィルム付着に対するモニタリング法への電気化学的ノイズの適用は可能である。ステンレス鋼の微生物腐食に対しては、電気化学的ノイズのミクロな変化を微生物付着、微生物繁殖、孔食発生などに対応づける必要がある。実構造物への腐食オンラインモニタリングへの適用を紹介した。
文献名	湿潤海洋性大気環境におけるステンレス合金の局部腐食、応力腐食割れ(ASCC)評価
出典	材料と環境討論会講演集 Vol.46th, Page.125-126 (1999)
整理番号	99A0862392
要旨	海岸立地のステンレス鋼溶接構造物は湿潤海洋性大気応力腐食割れ(ASCC)の可能性があるので、各種ステンレス鋼の暴露試験中に電位のモニタリングを行い、ASCC生起の可能性を検討した。供試材には鋭敏化SUS304ステンレス鋼(18Cr-8Ni-0.05C)に曲げ歪を付与して、CCC試験装置により試験片-照合電極間の電位を連続計測した。また10種類の各種ステンレス鋼の1~9か月の暴露試験を行い、最大亀裂深さの暴露期間依存性を求めた。電位と時間の関係は、初期は+200mV vs. Ag/AgClであったものが、20日経過後からは+50mV、90日経過後からは-100mV程度以下になる。これはASCCの生起・進展は3つの過程に分離できて、特に-100mV域で定常的にASCC亀裂が進展した可能性がある。湿度による電位変動幅は50mV程度以下であることから、電位変動の大部分は局部腐食の生起・再不動態化と進展過程を反映していると考えられる。
文献名	鋭敏化ステンレス鋼/中性塩化物環境系における粒界応力腐食割れ寿命予測モデル
出典	材料と環境 Vol.48, No.3, Page.162-168 (1999)
整理番号	99A0330823
要旨	海水や淡水の自然水に対するステンレス鋼の要点は、応力腐食割れ(SCC)の危ぐである。本稿では、1)隙間腐食に係る粒界応力腐食割れ(IGSCC)の発生条件、あるいは、2)SCCの実測分布モデルを使った最短割れ発生時間を検討する。試験には、応力、温度、塩素濃度、隙間及び中性塩素環境における条件で、鋭敏化処理したSUS304試片で上記1),2)に係る試験をした。この腐食試験範囲で、SCCに関する分布の下限界値の期待モデルから寿命予測モデルを構築した。

表 4.4.6-9 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(6)

文献名	コンクリート環境におけるステンレス鋼の局部腐食生起の可能性評価
出典	材料と環境討論会講演集 Vol.45th, Page.233-236 (1998)
整理番号	98A0753682
要旨	SUS304鋼の各種コンクリート環境下における標記可能性を検討した。ポルトランドセメント、川砂とイオン交換水を混練し養生したコンクリートを用いた。イオン交換水浸漬や大気中及び硬化セメントの再粉碎粉末を攪はん混合した中性化模擬コンクリート溶液等の環境下での自然腐食電位測定とステンレス鋼平板へのブロック締めつけによる人工隙間での腐食電位測定を行った。この結果、標記環境での隙間腐食は中性自然水系と同様な考え方で評価できることが分かった。また、自然腐食電位のpH依存性やSUS304鋼の可使用塩化物濃度は1200ppm[Cl ⁻]であることを明らかにした。
文献名	自然水系におけるステンレス鋼の腐食電位挙動
出典	材料と環境講演集 Vol.1998, Page.261-264 (1998)
整理番号	98A0557278
要旨	自然腐食電位は環境の酸化・還元性のパラメータで、局部腐食を起こしていない状態で最も貴な電位を自然腐食電位Espとして微生物、海洋生物の繁殖、砂れき等への埋没による酸素の遮断等で変化する。この自然腐食電位の環境依存性に着目して各種環境下の電位を比較検討した。自然腐食電位の模擬自然水と自然水(海水、河川水)の比較、電位に及ぼす砂れきの影響、について解説した。
文献名	気水環境におけるステンレス鋼の局部腐食生起寿命予測モデル
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.43rd, Page.355-358 (1996)
整理番号	96A0931516
要旨	気水域または海水と河川水が交互に入り交じるような環境が変動する条件下における304ステンレス鋼の局部腐食発生・成長の可能性を評価するために、環境変動下での寿命試験を実施した。また、従来の鋭敏化ステンレス鋼/中性塩化物環境系の応力腐食割れ寿命予測モデルを拡張して、気水環境における寿命予測モデルを提示した
文献名	ステンレス鋼の微生物腐食機構に関する一考察
出典	腐食防食講演集 Vol.1996, Page.453-456 (1996)
整理番号	96A0562116
要旨	自然海水或いは淡水環境において、ステンレス鋼の定常腐食電位は、微生物の作用により0.3V貴化する。また硫酸塩還元菌は、SO ₄ ²⁻ を還元してS ₂ O ₃ ²⁻ 等を生成し、隙間腐食臨界電位を0.5V程度卑化する。この環境では、Cl ⁻ 濃度は10ppm前後の淡水で鋼に局部腐食を起こす。微生物による腐食電位貴化及び腐食臨界電位卑化に関して、実験的検討を加えた
文献名	鋭敏化ステンレス鋼・中性塩化物環境における応力腐食割れ生起臨界条件
出典	材料と環境 Vol.45, No.5, Page.298-304 (1996)
整理番号	96A0478275
要旨	粒界SCCを例として腐食隙間からの標題条件について検討した。1)静的荷重と人工隙間のある試験片を往復分極実験してSCC再不動態電位(I)を得た。2)(I)への負荷応力、鋭敏化度、温度、NaClの影響を調べ、(I)は腐食隙間再不動態電位より100mV低かった。3)(I)と定電位保持試験のSCC発生下限界電位は一致することから(I)をしてSCC生起臨界電位とし得る
文献名	温泉水環境における各種ステンレス合金の耐すきま腐食感受性評価
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.42nd, Page.415-418 (1995)
整理番号	95A0928793
要旨	酸性泉での温泉設備材料選定の基礎データを求めた。温泉水と水道水の各混合率で、Tiとステンレス鋼の自然腐食電位と隙間腐食不動態電位を比較して、感受性を評価した。全温泉水ではTiは耐隙間腐食感受性を示した。SUS329J1は使用可能であるが、SUS316、SUS304は隙間腐食を起こす。定電位保持試験で腐食隙間生起寿命を調べた
文献名	複合サイクル試験法によるステンレス鋼の大気腐食加速試験法の検討
出典	腐食防食講演集 Vol.1994, Page.349-352 (1994)
整理番号	94A0454112
要旨	ステンレス鋼の耐大気腐食性を評価するための複合サイクル試験の最適加速条件及び腐食形態を、大気曝露試験と対応させて検討した。塩水噴霧時間を短縮した複合サイクル試験により大気腐食加速性の向上及び大気曝露試験結果に近い腐食形態としてのレイティングナンバの変化が得られた。塩水噴霧に希薄人工海水を用いることにより塩付着の状況が実環境に近づいた
文献名	ステンレス鋼の大気腐食加速試験法の検討
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.40th, Page.297-300 (1993)
整理番号	93A0964779
要旨	4種類のステンレス鋼を用いて塩乾湿複合サイクル試験を実施し、大気腐食加速試験法としての最適加速サイクル条件を検討した。ステンレス鋼の大気腐食性はその腐食形態を反映して最大孔食深さを測定して評価するのがよい。最大孔食深さはサイクル数の増加と対応して深くなった。複合サイクル条件で試験を行うことにより大気腐食加速性を向上させることができた

表 4.4.6-10 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(7)

文献名	BWR環境下における材料耐食性評価 (1) BWR構造材料のSCC発生特性に及ぼす水の放射線分解生成物の影響
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.40th, Page.171-174 (1993)
整理番号	93A0964767
要旨	γ線照射,酸素,水素及び過酸化水素によりBWR炉内水質を模擬した水中において鋭敏化304鋼の粒界応力腐食割れ感受性は電位の低下と共に小さくなった。304鋼の腐食電位及び粒界応力腐食割れの発生に及ぼすγ線の影響は少ない。182Ni基合金は電位の上昇と共にデンドライト内応力腐食割れ感受性が增大したが,600合金はその傾向を示さない
文献名	放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 6 ステンレス合金の腐食すきま生起臨界条件
出典	腐食防食講演集 Vol.1993, Page.415-418 (1993)
整理番号	93A0537511
要旨	深地層地下水環境においてステンレス鋼の可使用条件を環境因子の関数として定量化することを試みた。空気飽和した模擬地下水で試料電極の自然腐食電位Espを測定し,そのpH依存性を示した。隙間腐食生起臨界電位としての腐食隙間再不動態化電位データとEspとの比較から各種ステンレス合金の可使用領域を,温度及び塩化物濃度の関数として示した
文献名	放射性廃棄物処分容器の長期健全性評価 7 ステンレス合金の応力腐食き裂発生臨界条件
出典	腐食防食講演集 Vol.1993, Page.317-320 (1993)
整理番号	93A0537490
要旨	中性塩化物環境において鋭敏化ステンレス鋼の隙間活性先端に応力腐食割れを生じさせる手法により,応力腐食割れ臨界条件を検討した。その臨界電位である応力腐食亀裂再不動態化電位ER,SCCは再不動態化電位ER,crevより低い。Ti合金の水素脆化は水素平衡電位より貴であっても腐食隙間を経由して割れを発生する
文献名	HNO ₃ -NaNO ₂ -Cl ⁻ 系におけるステンレス鋼のすきま腐食
出典	腐食防食講演集 Vol.1993, Page.37-38 (1993)
整理番号	93A0537441
要旨	SUS304及びSUS304L鋼薄板をポリサルフォンワッシャーで締めつけることにより人工隙間を形成した。60°Cの2N硝酸中では隙間腐食は生じにくい,塩化物が共存すると隙間腐食感受性を示す。亜硝酸イオンは硝酸系溶液の隙間腐食感受性を高める。低濃度硝酸系では硝酸イオンは隙間腐食に関して緩衝効果が認められる
文献名	ステンレス鋼およびTi合金の塩化物すきま腐食臨界条件におよぼすチオ硫酸イオンの影響
出典	腐食防食講演集 Vol.1992, Page.351-352 (1992)
整理番号	92A0358187
要旨	常温の工業用水中のSUS304及び90°Cの塩化物溶液中のTi合金について隙間腐食再不動態化電位を測定した。ステンレス鋼,Ti合金隙間腐食再不動態化電位は塩化物濃度依存性を示す。ステンレス鋼はチオ硫酸濃度依存性を示したのに対して,Ti合金は0~10 ⁻⁵ ppmの濃度範囲でチオ硫酸濃度依存性を示さなかった
文献名	高温純水中におけるSUS304鋼の皮膜成長過程と応力腐食割れ感受性の関係 I
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.35th, Page.417-420 (1988)
整理番号	89A0108181
要旨	高温純水中でのSUS304鋼の皮膜成長速度は,時間の平方根と直線関係にある。皮膜の酸化物単独の層と金属/酸化物界面の混在する層の厚さの比は1:1であり,外層はFe ₂ O ₃ ,内層はFe ₃ O ₄ ,NiFe ₂ O ₄ ,Cr ₂ O ₃ から成る。900時間のプレフィルミングを行った低歪速度試験片は,応力腐食亀裂の数は増えるが,亀裂の進展が阻害される
文献名	海洋環境下でのコンクリートひび割れ部におけるステンレス鉄筋の腐食性状
出典	コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集 Vol.12, Page.75-80 (2012)
整理番号	13A0029016
要旨	海水が多量に供給され,かつ亀裂幅が過大な場合のステンレス鉄筋(SUS304及びSUS316)の腐食性状について,海洋環境での約11年間にわたる暴露試験により検討した。その結果,1)亀裂のない箇所では,SUS304及びSUS316いずれも腐食発生限界塩化物イオン濃度は13~14kg/m ³ 程度以上であること,2)過大亀裂のある箇所ではSUS304及びSUS316いずれも,非常に軽微な腐食が確認され,孔食深さ(最大値)はSUS304で120 μm,SUS316で13 μmであることなどが分かった。

表 4.4.6-11 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(8)

文献名	海洋構造物の信頼性を守る鉄—3 耐海水性ステンレス鋼被覆による海洋構造物飛沫帯の100年防食技術
出典	ふえらむ Vol.17, No.2, Page.84-89 (2012)
整理番号	12A0261943
要旨	厳しい腐食環境に設置される海洋構造物は、メンテナンスも容易でなく長期防食対策が不可欠である。本稿では耐海水性ステンレス鋼被覆による海洋構造物飛沫帯における防食技術について述べた。耐海水性ステンレス鋼は、汎用ステンレス鋼(SUS304,SUS316等)に比較してクロム、モリブデン、窒素などの耐食性合金元素量を増加させて飛躍的に耐食性を向上させた材料である。ステンレス鋼の耐食性指標、孔食指数PI(Pitting Index)は促進試験や曝露試験などの研究から40以上であれば、海洋環境でも十分な耐食性が得られている。代表的な20Cr-6Mo系高Nオーステナイト系耐海水性ステンレス鋼(SUS312L)のPIは42である。優れた耐食性も、厳しい腐食環境を模した飛沫帯模擬シャワー試験結果により実証されている。また、耐海水性ステンレス鋼被覆では被覆費用の低減に、ステンレス鋼の薄肉化と溶接能率の向上が必須である。そのために開発された抵抗シーム溶接技術を応用したインダイレクトシーム溶接法について言及した。耐海水性ステンレス鋼と電気防食工法との併用により、海中部の普通鋼の異種金属接触腐食も発生せず確実に防食される。本技術の展開を羽田空港D滑走路ジャケットレグ部への適用例で示した。
文献名	海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する研究
出典	土木学会論文集 E Vol.66, No.2, Page.207-220 (2010)
整理番号	10A0655260
要旨	海洋環境下に位置する港湾RC構造物への適用を目標とし、3種類のステンレス鉄筋(SUS430, SUS304, SUS316)の耐食性に関して、コンクリート模擬溶液浸漬試験および海洋環境曝露試験による検討を行った。その結果、各ステンレス鉄筋における腐食発生限界塩化物イオン濃度は普通鉄筋と比べて極めて大きく、少なくとも12 kg/m ³ 程度以上であると推測された。また、普通鉄筋の場合と比べて、鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値を緩和できることが確認された。上記の結果を基に港湾RC構造物のライフサイクルコストを試算した結果、ステンレス鉄筋を用いた方が、普通鉄筋を用い供用期間中に補修を行う場合より安くなる可能性が示された。(著者抄録)
文献名	微弱放射線場におけるステンレス材の隙間腐食挙動
出典	日本原子力学会秋の大会予稿集 Vol.2009, Page.004 (2009)
整理番号	09A0940455
要旨	酸化金属を溶射したSUS304試験片をRI放射線源と接触させることで、酸化被膜に微弱放射線が供給され、放射線誘起表面活性(RISA)による隙間腐食緩和効果が発現する。本研究では、このRISAによる隙間腐食抑制機構を解明するための要素試験を行った。(著者抄録)
文献名	酸化被膜の種類が放射線誘起表面活性(RISA)におよぼすすま腐食抑制効果の影響
出典	日本原子力学会秋の大会予稿集 Vol.2008, Page.K11 (2008)
整理番号	08A0876992
要旨	中性子線照射によって放射線させたアルミナ溶射被膜、アークプラズマ酸化処理を施したSUS304鋼試験片の腐食溶液中での母材の電気化学的変化を計測し、放射線誘起表面活性によるすま腐食抑制効果をそれぞれ確認した。(著者抄録)
文献名	Corrosion Behavior of Type 304 Stainless Steel in a Simulated Seawater-Based Medium in the Presence and Absence of Aerobic Pseudomonas NCIMB 2021 Bacteria
出典	Ind Eng Chem Res Vol.47, No.9, Page.3008-3020 (2008)
整理番号	08A0571990
要旨	SUS304は、水中環境において優れた耐食性を有しているが、発電設備や海洋構築物においては微生物腐食が発生する。海洋環境におけるSUS304の腐食挙動に関し、シュードモナス属菌を用いた実験検討を行い、下記事項について報告した。1) Tafelプロットとインピーダンス分光法を用いた腐食実験と電気化学的腐食過程に関する過去の研究。2) 金属試料、腐食試験媒体、及び海水をベースとした接種菌培養調製。3) シュードモナス属菌培養を用いた腐食実験と電気化学的特性。4) SEM-EDX法による表面分析。5) 除菌環境及びシュードモナス属菌媒体中でのSUS304の腐食挙動。6) 電気化学的インピーダンスの測定結果。7) ピッチング腐食の発生原因と塩素イオンのどシナジー効果。
文献名	Monitoring of Rusting of Stainless Steels in Marine Atmospheres Using Electrochemical Impedance Technique
出典	J Electrochem Soc Vol.153, No.7, Page.B278-B282 (2006)
整理番号	06A0580576
要旨	遠隔操縦によって電気化学インピーダンスを測定する装置に、対のステンレス鋼304および430の試験片を取付け、日本国内の3箇所(亜熱帯海岸、海岸および田園地帯)に設置して、24箇月間にわたって錆の進行を監視した。304鋼の腐食は相対湿度が35～75%、430鋼の腐食は相対湿度が35%を超えるとだけ起ることを見いだした。下限値および上限値は飽和MgCl ₂ および3M MgCl ₂ 溶液と平衡にある相対湿度に一致した。この塩化物濃度は、前報で報告した孔食腐食の発生限界塩化物濃度と同じであった。この結果は、空気を飛来して付着した塩の潮解の重要性を示している。
文献名	海洋環境の干満帯におけるステンレス鋼の電気防食試験
出典	さび Vol.45, No.1, Page.4-7 (2003)
整理番号	03A0071173
要旨	潮位が定期的に変動する大型海水循環水槽を用い、ステンレス鋼の外部電源方式の陰極防食試験を行った。供試材は、SUS304,SUS316L,耐海水性ステンレス鋼3種,SUS444(フェライト系ステンレス鋼)及びSUS329J4L(二相ステンレス鋼)とし、比較材を普通鋼とした。試験片を干満帯に設置し、電位を-600,-800,-1000mVに設定し、カソード電流密度の2年間の経時変化を測定した。得られた結果は次の通り。1)干満帯のステンレス鋼に流入する電流密度は海水中の普通鋼と同程度であった。2)ステンレス鋼の組織の差は認められなかった。3)干満帯では季節変動による電流密度の変化は認められなかった。4)-800mVと-1000mVでは電流密度の経時的な低減傾向が見られたが、-600mVでは変動が大きく低減傾向は認められなかった。
文献名	海洋性大気に暴露したステンレス鋼の発しゅうにおよぼす付着塩量と相対湿度の影響
出典	材料と環境 Vol.50, No.4, Page.162-169 (2001)
整理番号	01A0444942
要旨	ステンレス鋼(SUS410,22Cr-0.8Mo鋼,SUS430,SUS304)を海浜環境の6か所で、1～2か月間の曝露を7回行った。試験終了後、目視でさびの有無を判定した。ACM型腐食センサ出力と相対湿度(RH)から、付着塩量(Ws)を求めた。全曝露期間、全曝露場所のWs及びRHとさびの有無から、これ以下ではさびが発生する限界相対湿度(RH [*] (%))及びこれ以上ではさびが発生する限界付着塩量(Ws [*] (g・m ⁻²))が決定できた。各ステンレス鋼の限界発しゅう条件(Ws [*] (g・m ⁻²),RH [*] (%))は、SUS410では(5×10 ⁻³ ,45),22Cr-0.8Moでは(5×10 ⁻¹ ,38),SUS430とSUS304では(4×10 ⁻² ,43)であった。

表 4.4.6-12 J DreamIII検索によって抽出した文献の要旨(9)

文献名	製塩装置のオーステナイト系ステンレス鋼の塩化物応力腐食割れ 残留応力制御による防止対策
出典	日本海水学会誌 Vol.55, No.2, Page.69-76 (2001)
整理番号	01A0447288
要旨	オーステナイト系ステンレス鋼における塩化物による応力腐食割れ(SCC)に関し、その特徴とメカニズムにつき概説した。SCCの発生・伝播をとめるための応力規範に関し、腐食の生長過程やSUS304鋼のSCC下限界応力などにつき説明した。応力対策によるSCCの防止に関して、応力低下法及び応力制御につき概説し、SUS304鋼における熱処理温度と内面残留応力、及び処理後の内面残留応力の関係などを説明した。腐食対策として、高級材料への変更もあるが、応力対策の方が重要で効果があると考ええる。
文献名	水門におけるステンレス鋼の腐食について
出典	水門鉄管 No.171, Page.91-97(1992)
整理番号	92A0715798
要旨	SUS304オーステナイト系ステンレス鋼の腐食例を基に腐食の要因について論じた。ステンレス鋼も発錆に対して免疫ではない。大気中でも腐食は起きるし、溶接熱影響部、溶接焼け部の発錆はよく見られる。海洋大気環境下ではSUS304製ボルトに応力腐食割れが生じることがある。海水中では孔食・すきま腐食が生じやすい。異種金属接触腐食は注意が必要である
文献名	信頼性評価技術と実証試験 環境強度評価技術の確立 実環境応力腐食割れ寿命評価技術の確立 粒界応力腐食割れフィールド試験
出典	構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究(第2期)成果報告書 昭和61-62年度 Page.177-190 (1988)
整理番号	90A0103970
要旨	実験室加速試験結果から実環境における装置材料の応力腐食割れ性能を予測する手法の開発/確立のために、加速試験における応力腐食割れ寿命分布を確率論的に評価し、その寿命分布および寿命パラメータの各種加速因子依存性を検討することを目的として、鋭敏化SUS304の中性低濃度塩化物水溶液環境の加速試験による検討を行うとともに、304鋼管溶接継手試験体の湿潤海洋大気環境曝露試験による検討を実施した。高温高純度水および中性食塩水環境における実験室加速試験、海洋大気曝露試験の結果を示し、これを基に寿命分布および分布パラメータの加速因子依存性ならびに基準材に対する代替材の寿命改善度評価モデルを検討した〔1988.5〕
文献名	海塩粒子による304鋼のESCC防止用ストリップابل防食テープの適用
出典	腐食防食講演集 Vol.1987, Page.69-72 (1987)
整理番号	87A0435776
要旨	4種の配管用ストリップابلテープを約1年間海岸近くに曝露することにより、テープの剥離性および防食性能を比較。鋭敏化熱処理後、溶接したSUS304配管の溶接部および母材部にIGSCCが発生。テープはステンレス鋼面との接着力が適度に高いと密着性および剥離性に優れている。粘着剤にアクリル系を使った塩化ビニル系テープは、錆およびSCC発生防止に最適
文献名	実海水中のステンレス鋼に対する腐食作用
出典	腐食防食討論会講演集 Vol.33rd, Page.16-19 (1986)
整理番号	87A0068180
要旨	実海水を用いたステンレス鋼の腐食試験および実海水長期浸せき腐食試験の結果、ステンレス鋼製構造物自由表面における腐食損傷は異物や海洋生物の付着に強く依存し、環境条件のわずかな違いにより変動しやすいこと、海水汚染に伴うステンレス鋼の腐食損傷変化は実質的に化学成分の作用よりも浮遊固形物が主要な役割をはたしていること等がわかった

(2) 海水に対するステンレス鋼の腐食特性に関する情報収集結果

1) 材料因子

ガラス固化体キャニスタは、SUS304L もしくは SUH309/SUS309S (返還廃棄物)製で、いずれもある程度の鋭敏化による塩化物 SCC を考慮した材料選定となっている。SUS304/309系材料の公称組成と特徴を表 4.4.6-13 に、化学組成、及び材料特性規格を表 4.4.6-14 に示す。また、ステンレス鋼の鋼種別の材料、加工因子を表 4.4.6-15 に示す。SUH309 は高%Crながら高%C であるから、鋭敏化されるような熱履歴を受けると鋭敏化は進行する。ステンレス鋼の鋭敏化曲線評価分科会で収集し、公表されている TTS 線図の材料、及び判定法 [25] を表 4.4.6-16 に示すが、全ての鋼種に対して鋭敏化領域図(TTS 線図)が網羅されているのではなく、むしろ、SUS304/316 などの代表鋼種以外ではほとんど体系的な整理がなされていない。

さらに、高%Cr 材のため、800℃域で加熱されるとσ相が生成し、じん性が低下する。一方、SUS304L は通常の溶接などの熱履歴で鋭敏化する危惧はない。ただし、冷間加工と溶接

との複合寄与、表面仕上げを受ければ、鋭敏化を考慮し評価する必要がある。また、地震時などにガラス固化体キャニスタの落下による急速変形/ひずみを受けた場合の、これらの履歴材の腐食などの特性は知られていない。

また、ガラス固化体貯蔵施設における収納管のアルミ溶射鋼などの異材との接触によって異種金属接触腐食が起きる系となって、腐食の加速、及び防食作用が働く可能性がある。

表 4.4.6-13 SUS304/309 系材料の公称組成と特徴

合金種名	JIS解説	
	公称組成	主要用途
SUS304	18Cr-8Ni	ステンレス鋼・耐熱鋼として最も広く使用。 食品設備、一般化学設備、原子力用
SUS304L	18Cr-9Ni-低C	304の極低炭素鋼、耐粒界腐食性に優れ、 溶接後熱処理できない部品類
SUS309S	22Cr-12Ni	耐食性が304より優れているが、実際は耐熱鋼として使われることが多い
SUH309	22Cr-12Ni-0.2C	980°Cまでの繰り返し加熱に耐える耐酸化鋼。加熱炉部品、重油バーナ

表 4.4.6-14 SUS304/309 系材料の化学組成、材料特性規格、及び P.I.

合金種名	化学組成(%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	8.00～13.00	18.00～20.00
SUS304L	≦0.030	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	9.00～13.00	18.00～20.00
SUS309S	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	12.00～15.00	22.00～24.00
SUH309	≦0.20	≦1.00	≦2.00	≦0.040	≦0.030	12.00～15.00	22.00～24.00
合金種名	耐力	引張強さ	伸び	公称組成	P.I.		
	N/m ²	N/m ²	%				
SUS304	≧205	≧520	≧40	18Cr-8Ni	18		
SUS304L	≧175	≧480	≧40	18Cr-9Ni-低C	18		
SUS309S	≧205	≧520	≧40	22Cr-12Ni	22	P.I.=[%Cr]+3.3 [%Mo]+10[%N]	
SUH309	≧205	≧560	≧40	22Cr-12Ni-0.2C	22		

表 4.4.6-15 ステンレス鋼の鋼種別の材料、加工因子

	SUS304	SUS304L	SUH309/SUS309S
	18Cr-8Ni- \leq 0.08C	18Cr-9Ni- \leq 0.03C	25Cr-15Ni- \leq 0.15C
母材	<ul style="list-style-type: none"> ● 多くの実績があり、SCC マップなどが整備されている ● 海洋性湿潤大気環境で IGSCC 感受性、保温材下などの高温下で TGSCC、塩化物水溶液環境で SCC(IG/TG)を示す ● 母材(冷延板材)のデータがほとんどで、熱延材などの厚板、鍛造材(SUS304F)、鋳物(SCS13)などのデータは必ずしも整っていない 	<ul style="list-style-type: none"> ● 鋭敏化対策として低炭素化されており、溶接鋭敏化による IGSCC を起こさない 	<ul style="list-style-type: none"> ● SUH309 は耐熱材料として%Crが高いので%Cも高い(\leq0.15%C)が鋭敏化しなければ耐食性が高い ● SUS309S は低炭素側で SUS304 並の\leq0.08%C
鋭敏化熱処理	<ul style="list-style-type: none"> ● EPR 法(JIS G0580)の再活性化率(鋭敏化度)Ra\geq5%で SCC 感受性が出現するとされている(知見) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 実用的な溶接施工を念頭に置いた熱処理条件では鋭敏化しない条件として、\leq0.03%Cを規定 	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱処理を受けると鋭敏化は不可避(SUH309 は鋭敏化が問題となる系では使用しない) ● 800°C域で加熱されるとσぜい化を起こす
冷間加工(CW)	<ul style="list-style-type: none"> ● CWを受けると、(加工誘起)マルテンサイト化し、鋭敏化もしやすくなる ● CW度が20%程度がピークで、過ぎると転移が増え SCC 感受性低下 	<ul style="list-style-type: none"> ● L材の方が%Niが高いため加工誘起マルテンが生成しにくい傾向 	<ul style="list-style-type: none"> ● 当該加工因子について判断し得る体系的なデータが無い
溶接(W)	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶接金属は母材より孔食、すきま腐食感受性が高いが、SCC 感受性は低い傾向 ● 熱影響部(HAZ)は腐食、SCC 感受性が高い ● SUS304、SUS316ともに腐食しないが、SUS304/316継手では304側が腐食する事例があるなど、異材/類似材継手の評価が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断される 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断されるが、最終的な判断のための体系的なデータは無い
複合(CW+W)	<ul style="list-style-type: none"> ● CW材は鋭敏化を促進させる ● タンクでは加工の厳しい鏡側に SCC が集中する事例(対策として鏡側を低% C 化) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断されるが、最終的な判断のための体系的なデータは無い 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断されるが、最終的な判断のための体系的なデータは無い
応力除去焼鈍(SR)	<ul style="list-style-type: none"> ● 炭素鋼/低合金鋼の SR 温度域に加熱すると激しく鋭敏化する ● SUS304 の SR は 1000°C前後の加熱と急冷が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ● 600°C域の SR で鋭敏化はせず、残留応力は半減 ● SUS クラッド鋼の SR が実施されている(L材が前提) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐熱材料として高温で長期間使用すると Cr 炭化物近傍の Cr 欠乏は回復(ボイラなどの使用条件)
表面状態	<ul style="list-style-type: none"> ● 表面(仕上げ)状態によって耐食性は大きく変わり、硝酸などでの不働態化処理が有効 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断される 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断される
高速変形(地震時)	<ul style="list-style-type: none"> ● (高速変形時の挙動は評価されているが、高速変形を受けた材料の耐食性は体系化されていない) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断される 	<ul style="list-style-type: none"> ● 材料特性から考えて SUS304 と同様と判断される

表 4.4.6-16 公表されている TTS 線図の材料、及び判定法 [25]

表 3 収集 TTS 曲線の内訳 (件数)

種類	ストラウス	ヒューイ	ストライカー	しゅう酸	EPR	特殊環境	合計 (鋼種別)
α系	SUS 430	4	—	—	—	3	7
	SUS 430LX 系	6	—	—	—	—	6
	高Cr系	—	1	—	—	—	1
γ系	SUS 304 系	70	12	6	2	13	110(39%)
	SUS 316 系	31	22	2	1	4	66(23%)
	SUS 321 系	8	3	1	1	—	13(5%)
	SUS 347 系	10	1	—	—	1	14
	SUS 316J1 系	2	—	—	—	—	5
	SUS 317 系 (含SUS 317J1)	3	—	—	—	—	3
	高Ni含Mo(Cu, Ni)系 20Cr	2	—	2	—	—	4
	25Cr	3	—	2	—	—	5
	SUS 309.310 系	5	—	—	5	—	10(4%)
	高Si	4	—	—	3	—	7
	高Mn	3	—	—	—	—	1
α + γ系	SUS 329J2L	2	5	1	—	—	8
Ni基	Alloy 800	9	—	1	—	3	13(5%)
	ハステロイ系	4	—	2	—	—	7
合計 (試験法別)	166(58%)	44(15%)	17(6%)	12(4%)	21(8%)	25(9%)	総計285(100%)

試験法名称	JIS	試験条件	評価	対象	特徴
ストラウス試験 (硫酸・硫酸銅 腐食試験)	G0575	沸騰 15.7%硫酸 +5.5%硫酸銅 +Cu 片中 16hr 浸漬	90° 以上曲げ後の 粒界割れの有無	ステンレス鋼	①欠乏層
ストライカー試験 (硫酸・硫酸第二鉄 腐食試験)	G0572	沸騰 50%硫酸 +硫酸第二鉄 120hr 浸漬試験	重量減より 腐食度を求める (当事者間の協議)	ステンレス鋼	①欠乏層 一部鋼種 の①相
ヒューイ試験 (65%硝酸腐食試験)	G0573	沸騰 65%硝酸中で 48hr・5回	重量減より 腐食度を求める (当事者間の協議)	ステンレス鋼	①欠乏層 炭化物 ①相
10%しゅう酸 エッチ試験	G0571	10%しゅう酸中で電解 I _{an} 、室温、電解時間 90s 電流密度 1A/cm ²	組織観察により分類 ・ 段状 (step) ・ 溝状 (ditch) ・ 混合 (dual)	ステンレス鋼	①炭化物 析出状態
EPR試験 (電気化学的 活性化率測定)	G0580	0.5M硫酸+0.01MKSCN 中で往復分極曲線の測定 30℃	往路と復路の ピーク電流比	ステンレス鋼	①欠乏層 非破壊でも 可能

2) 想定される腐食と速度

津波の流入を受け、ガラス固化体キャニスタに海水が付着することを想定した場合、海水に水没したケース/部位と、海水成分の飛沫が付着した湿潤大気環境が考えられる。海水環境(水没)におけるステンレス鋼の腐食におよぼす影響因子 [26] を図 4.4.6-1 に、海洋性湿潤大気環境(水面上)におけるステンレス鋼の腐食挙動 [26] を図 4.4.6-2 に示す。

ステンレス鋼の不働態・局部腐食の発生と進展の様子 [26] を炭素鋼の全面腐食の進展と比較して模式的に図 4.4.6-3(a、b)に示す。海水は pH=8.2 程度であるから炭素鋼は全面腐食域、ステンレス鋼は不働態・局部腐食域にある。局部腐食は、自由表面に発生する孔食、構造上(重ね板、フランジ締め付け部など)の、もしくは付着物下(生物の繁殖、土砂の堆積、腐食生成物の蓄積など)のすきま部に発生するすきま腐食、及び応力下で発生する応力腐食割れ(SCC)がある。

代表的な腐食速度 [27] を表 4.4.6-16 に示す。全面腐食は平均腐食速度が 0.1mm/年前後であれば許容できる(する)場合が多いが、0.3mm/年を超えて定常進展すると腐食を許容しての供用は難しくなる。局部腐食が発生すると、その進展速度は 2~10mm/年(すきま腐食の場合)と速い速度を取り得るため、その場合は、一般に進展を許容した使い方は出来ない。例えば、図 4.4.6-3(c)のステンレス鋼ボルトの海水中におけるすきま腐食の例 [26] では↓で示したネジ頭部、及びナットとの習合部のすきま下では 6 ヶ月で 3mm 程度の腐食が認められている。

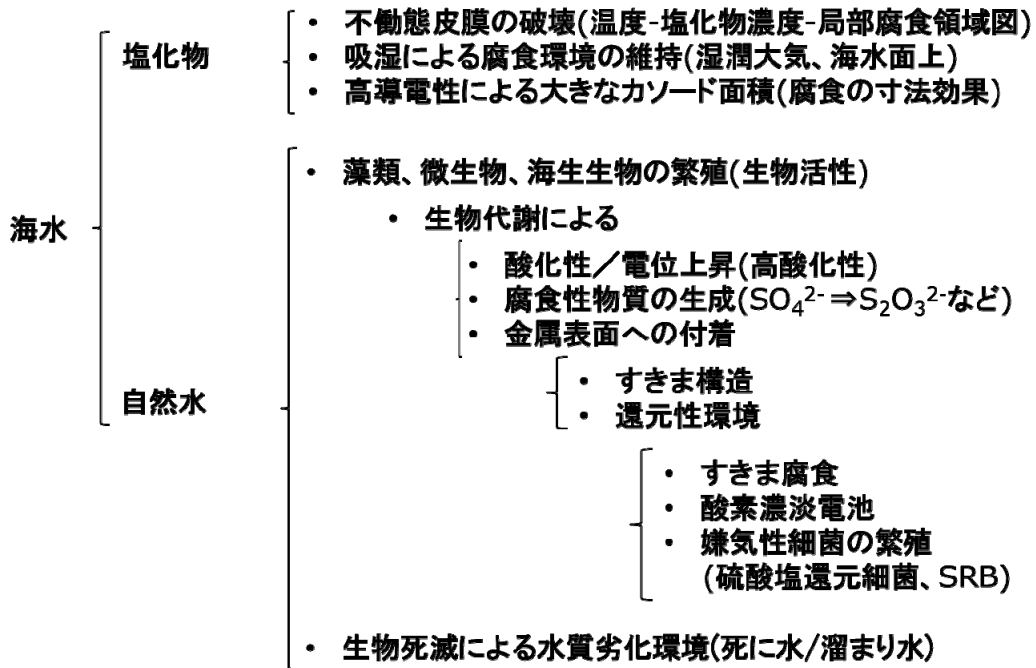


図 4.4.6-1 海水環境におけるステンレス鋼の腐食におよぼす影響因子 [26]

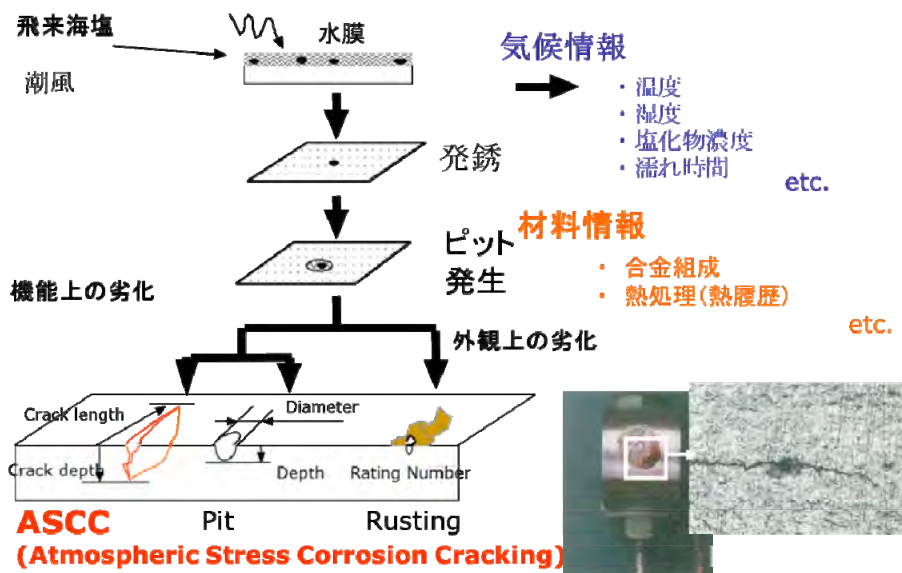
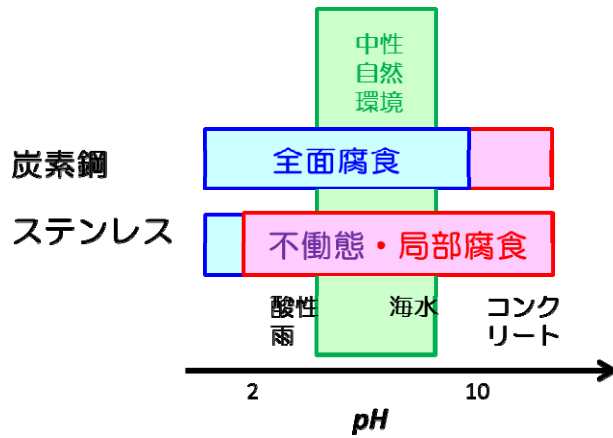
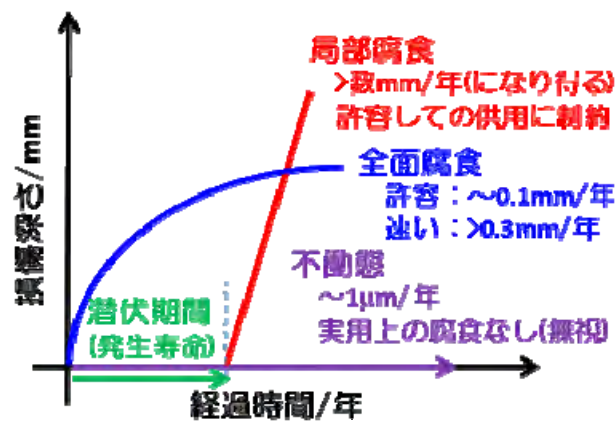


図 4.4.6-2 海洋性湿潤大気環境におけるステンレス鋼の腐食挙動 [26]



(a) 炭素鋼、ステンレスの腐食形態



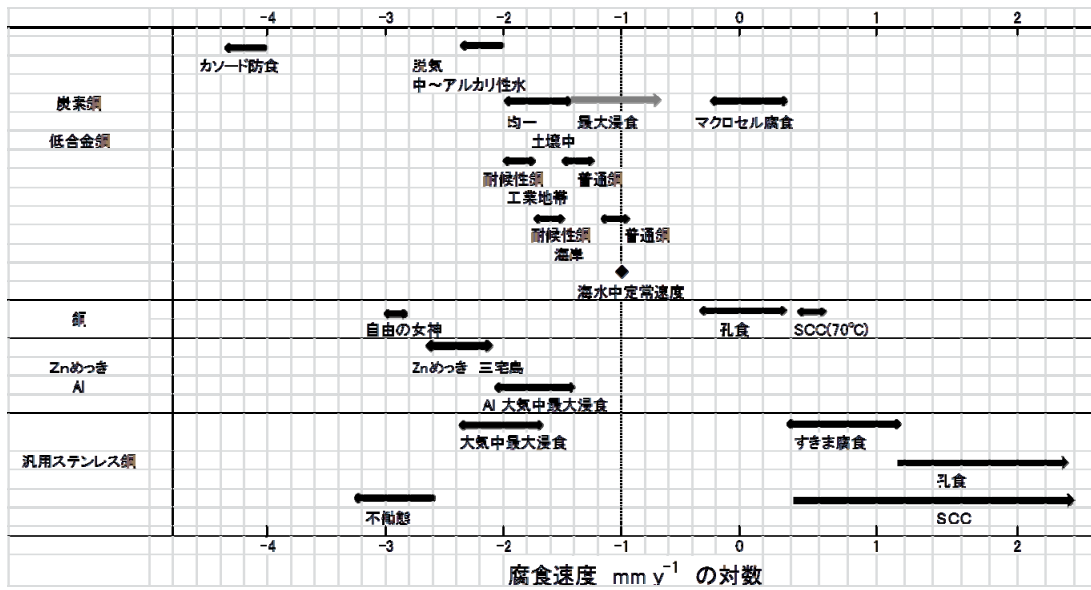
(b) 腐食深さ・経過時間関係



(c) 腐食損傷の例

図 4.4.6-3 ステンレス鋼の不動態・局部腐食の発生と進展(模式図) [26]

表 4.4.6-16 代表的な腐食速度 [27]



3) 海水の特徴と腐食への寄与

海水は、1) 塩化物としての機能と、2) 自然水としての機能を併せ持つ。塩化物の寄与として不働態皮膜の破壊が挙げられ、その材料の可使用は温度-塩化物濃度-局部腐食領域図で示される。さらに、湿潤大気、海水面上で吸湿による腐食環境の維持がされ、気液界面では毛细管現象で薄い水膜が形成され、その水膜は大気中から酸素が溶け込み、溶存酸素濃度が高くなることから厳しい腐食環境になる。さらに、気相部では水溶液環境で有効な電気防食が作用しない。一方、水中では高導電性による大きなカソード面積が確保されることから、腐食の寸法効果が出現する。

自然水としての寄与は、藻類、微生物、海生生物の繁殖(生物活性)が加味されることで、死に水/溜まり水化することによって生物死滅による水質劣化環境となることから、単純に殺菌すれば解決する問題でもない。

局部腐食におよぼすすきま構造、及び微生物繁殖の寄与 [26] を図 4.4.6-4 に示す。構造上のすきま部があれば、すきま内外で腐食の状況が変わってきて、すきま内部が優先的に腐食するようになる。

腐食は、金属の溶解に対応するアノード反応と、溶存酸素の還元(中性の場合)に対応するカソード反応の対で進行する。すきま内部ではカソード反応によって溶存酸素が消費された後はアノード反応のみが起きようになり、溶出した金属イオンが加水分解して腐食生成物として沈殿するとともに H⁺が増加する。したがって、電気的中性を担保するために陰イオンが引き寄せられるが、すきま構造の間口で物質移動が制約されていることから陰イオンの中でも比較的原子径の小さな Cl⁻が引き寄せられ、すきま内での Cl⁻濃度が上昇してさらにすきま内の腐食特性が増す。このようにして、すきま内が小さなアノード、すきま外が大きなカソードとなってすきま内の腐食進展が加速される。すきま腐食の進展速度は、腐食部(アノード)

の面積とそれを支えるカソード面積の比で決ることから、配管内部の接液面側が大きなカソードとなる必要がある。

このすきま構造の生成は、フランジ構造などの物理的なすきま以外、微生物などの付着、水中に溶解している物質の吸着などでも同様である。さらに微生物の場合には、その生物代謝がさらに影響を大きくする場合がある。

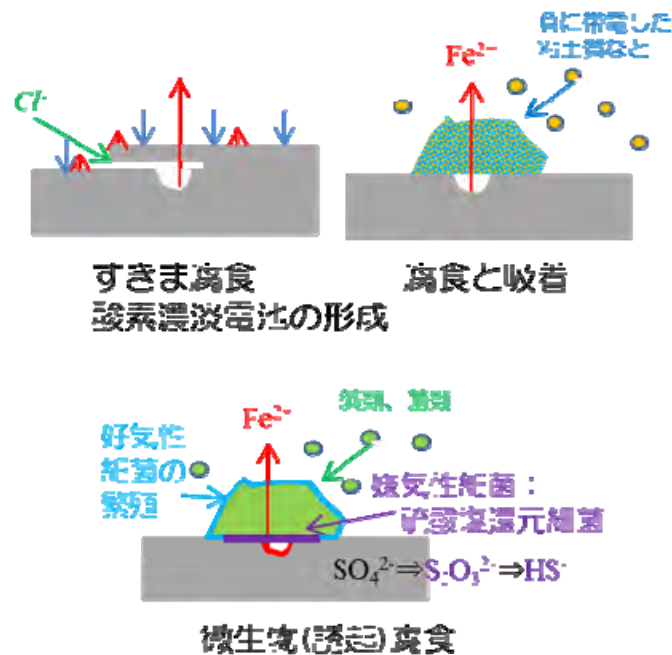


図 4.4.6-4 局部腐食におよぼすすきま構造、及び微生物繁殖の寄与 [26]

4) ステンレス鋼の耐食性におよぼす環境依存性

腐食は以下に例示するようにアノード反応とカソード反応の対となって起きる。また、ステンレス鋼(18Cr-8Ni-残 Fe/SUS304)の耐食性は表層に生成する Cr 酸化物(Cr₂O₃)皮膜が緻密で下地保護性を有すること(不働態)によって担保されている。



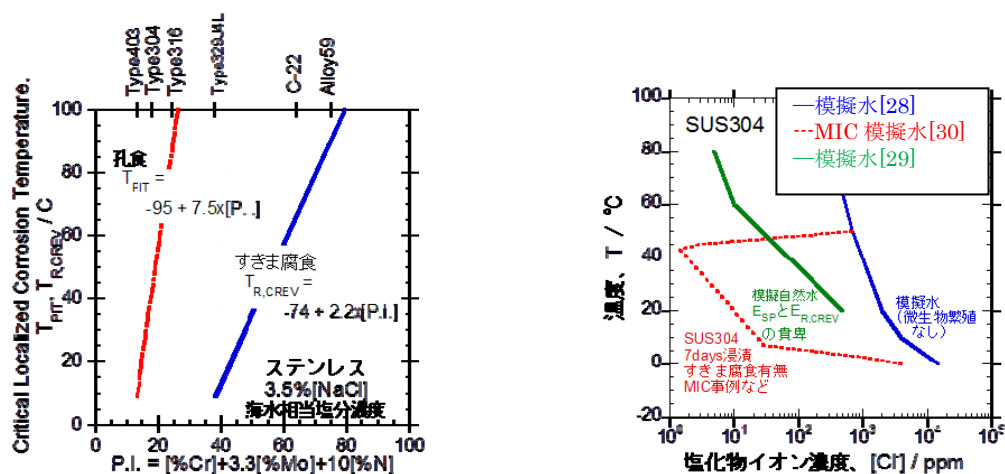
すなわち、腐食反応そのものには塩化物(Cl⁻)は寄与しないが、ステンレス鋼の場合、塩化物が不働態(皮膜)を破ることで、局部腐食が発生する。

ステンレス鋼の海水相当塩化物濃度(3.5%[NaCl])における孔食、すきま腐食発生温度の孔食指数 $\text{P.I.} = [\% \text{Cr}] + 3.3[\% \text{Mo}] + 10[\% \text{N}]$ 依存性 [28] を図 4.4.6-5(a)に、すきま腐食生起温度-塩化物濃度領域 [29]、及び微生物繁殖によるすきま腐食生起領域の拡大状況 [30] を図 4.4.6-5(b)に示す。

ステンレス鋼の耐孔食、耐すきま腐食特性は、ステンレス鋼の化学成分の中の Cr、Mo、及び N(窒素)で担保されており、それらの量に係数を掛け合わせたものを足した孔食指数、

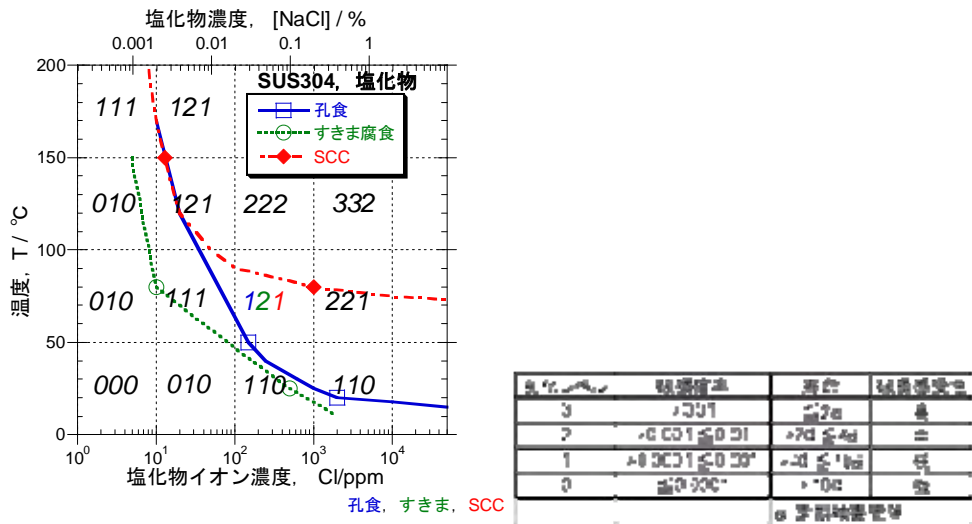
P.I.で記述できる。SUS304(18Cr-8Ni-残Fe)のP.I.は18であり、P.I.の上昇とともに、耐孔食性、耐すきま腐食感受性が上昇する。SUS316(17Cr-10Ni-2Mo)は $P.I.=17+3.3\times 2=23.6$ になる。図4.4.6-5(a)では、塩化物濃度を3.5%[NaCl](海水相当濃度)に固定した時の孔食発生温度 $T_{PIT}(^{\circ}C)$ 、すきま腐食発生温度 $T_{CREV}(^{\circ}C)$ のP.I.依存性を示している。SUS304、及びSUS316は、常温の海水中ですきま腐食感受性を示すが、孔食感受性はギリギリ示さない。ただし、水温が上昇すると孔食感受性を示す。耐海水腐食特性に関してはSUS316の方が耐食性に優れるものの、それほど有意な耐食性の上昇とは言えず、耐海水用ステンレス鋼としては $P.I.>38$ のスーパーステンレス鋼が推奨されている。羽田空港第4滑走路橋脚ではNSSC270、NAS254Nなどが採用されている。

局部腐食の生起は、孔食、すきま腐食、SCCなどの損傷ごとに生起臨界条件があり、材料-温度-塩化物濃度マップなどの形で生起領域が支援され、生起の可能性を判断することが一般的である。SUS304ステンレス鋼の孔食、すきま腐食、SCC感受性温度-塩化物イオン濃度領域図、及びリスク[31]を図4.4.6-6に示す。ここで、温度： $50^{\circ}C$ 、濃度：10倍の枠内に、順に孔食、すきま腐食、SCCの領域線が入った場合の劣化レベルを1とし、1枠離れる毎に劣化レベルが1つ増減している。例えば、 $50\sim 100^{\circ}C$ 、 $100\sim 1,000ppm[Cl^-]$ の範囲に孔食、SCCの領域線が入るから劣化レベルは1、すきま腐食はより低温・低塩化物濃度側に領域線がある(交わらない)から劣化レベルは2であり、グラフ上では順に1、2、1と劣化レベルの数字が記されている。各劣化レベルは、それぞれ、破損確率、寿命、損傷感受性の目安が割り振られている。一方、実際の使用実績と照らし合わせると、生起領域内でも支障なく使用され続けているものもある。すなわち、すきま腐食の生起と進展を図4.4.6-7に示すように、生起領域においても一定の潜伏期間があり進展速度を有するため、この例示したステンレス鋼の室温、自然水系では5mmの深さに達するのに30年を要することが推算できる。ただし、推算式におよぼす各種加速因子依存性は、必ずしも十分な評価による体系化がなされていない。



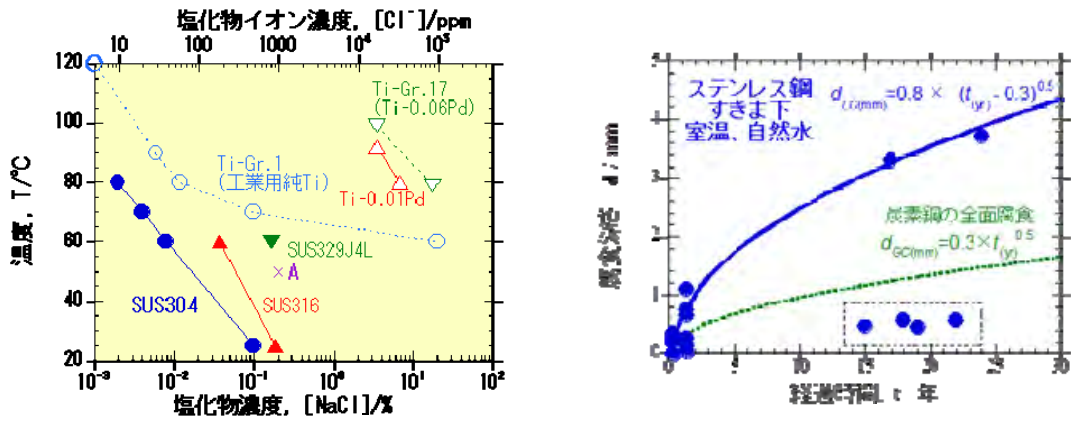
(a) 孔食、すきま腐食のP.I.依存性 [28] (b) すきま腐食食生起におよぼす微生物の寄与[29、30]

図4.4.6-5 ステンレス鋼の孔食、すきま腐食感受性[28、29、30]



温度：50℃、濃度：10 倍の枠内に孔食、すきま腐食、SCC の領域線が入った場合の劣化レベルを 1 とし、1 枠離れる毎に劣化レベルが 1 つ増減

図 4.4.6-6 SUS304 ステンレス鋼の孔食、すきま腐食、SCC 感受性温度-塩化物イオン濃度領域図、及びリスク [31]



(a) すきま腐食生起領域(温度-塩化物濃度)[29] (b) すきま腐食、全面腐食深さ-時間[28]

図 4.4.6-7 すきま腐食の生起と進展[28、29]

5) 高温・高塩化物濃度環境

海洋性湿潤大気環境においても、ステンレス鋼の発錆、孔食、SCC 感受性の序列は変わらず、概ね P.I. で評価出来る。塩化物が付着した状況下で 60°C に加熱され湿度 35% R.H. の高温・高濃度塩化物水溶液になった場合の発錆、孔食、SCC の P.I. 依存性 [32] を表 4.4.6-17 に示す。ここで、付着海塩が加熱・濃縮された環境を模した環境として、海水から NaCl を採取した残渣液である苦汁(4.5%[NaCl]+5.2%[CaCl₂]+16.2%[MgCl₂]+8.6%[KCl])を用い、60°C/35%R.H.とされている。SUS316(P.I.=24.2)は SCC を起こし、Alloy825(P.I.=31.9)は SCC を起こさないから、SCC 生起臨界 P.I. は 24 以上 32 以下と推測される。従って、SUS304L(P.I.=18)、及び SUH309/SUS309S(P.I.=22)は 60°C で高濃度塩化物が濃縮した大気中で SCC 感受性を有することが示唆される。孔食、及び SCC を回避するにはスーパーステンレス鋼(P.I.>38)が必要と考えられる。

一方、加熱を受ける金属においては、外面側の空気冷却による温度勾配成立（金属表面温度 > 空気温度）を加味することによって湿潤大気応力腐食割れの危惧を回避 [33] できる。従って、海塩が付着しても、乾燥していれば SCC を起こさないことから、津波を受けた場合に、加熱された表面に濃厚塩化物の水膜が生成するか否かが重要な判断ポイントとなる。

表 4.4.6-17 高温の湿潤大気環境における発錆、孔食、SCC の P.I. 依存性 [32]

合金種	代表組成	Cr+3.9Mo	60°C、苦汁	60°C、RH35%苦汁塩滴試験			E _{sp} (V vs. SHE)
			V _{c,pit} (V vs. SHE)	発錆	孔食	SCC	
SUS304	18Cr-8Ni	18.0	0.0301	●●	●●	●●	+0.40
鋭敏化-SUS304	18Cr-8Ni(粒界は-6%Cr)	18.0	-	●●	●●	●●	
SUS316	16Cr-12Ni-2.5Mo	24.2	0.048	●●	●●	●●	+0.40
Alloy825	22Cr-42Ni-3Mo	31.9	0.215	●	○	○	
SUS329J4L	25Cr-6Ni-3Mo	34.9	0.307	●	●	○	
YUS270	20Cr-18Ni-6Mo	39.8	0.401	○●	○●	○○	+0.40
YUS270継手	(溶材:Alloy625)	-	-	○	○	○	
SUS836L	23.5Cr-25Ni-5.5Mo	41.7	0.768	○	○	○	
Alloy625	22Cr-59Ni-9Mo	51.7	0.730	○	○	○	
Hastelloy-C22	22Cr-66Ni-14Mo	68.2	0.910	○	○	○	

6) 海洋性湿潤大気環境

ステンレス鋼の SCC 生起温度-塩化物濃度領域図 [34,35]、及び、SCC 試験環境との比較を図 4.4.6-8 に示す。海洋性湿潤環境での ASCC による可使用判断は図中の角丸四角形の範囲が考慮すべき代表的な環境といえる。平均 ASCC き裂進展速度の合金種、付着塩分量依存性 [36] を図 4.4.6-9 に示すように、付着塩分量が 0.1g/m²[NaCl]以上の高塩化物環境で強鋭敏化 SUS304 は ASCC が発生し、その初期の速度は 0.1~数 mm/年の範囲で付着塩分量とともに速くなっている。

鋭敏化ステンレス鋼の SCC 発生寿命予測モデル [37] として、中性塩化物環境系 [38] においては以下が提唱されている。

$$\begin{aligned}
 a &= a_0 \times f_{(すきま)} \times f_{(電位)} \times f_{(応力)} \times f_{(塩化物濃度)} \times f_{(鋭敏化度)} \times f_{(温度)} \\
 &= a_0 \times [fc \cdot (E - E_{R,SCC})]^{-1} \times (S_T/S_y - 0.5)^{-2} \times ([Cl^-])^{-0.5} \times Ra^{-4.1} \times \exp(Q/T) \quad (式 1)
 \end{aligned}$$

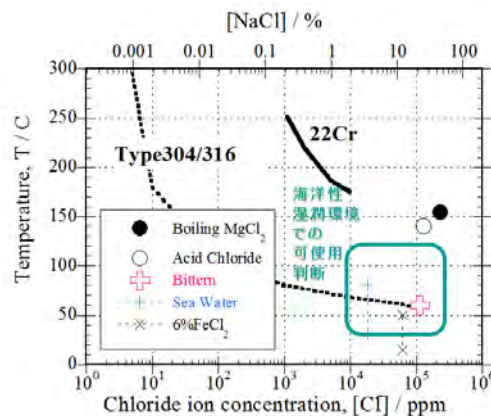
ASCC 発生の鋭敏化度、応力、付着海塩量依存性 [39] を図 4.4.6-10 に示す。高%C 材を使用した溶接継手が内面側から補修溶接されて、鋭敏化度 Ra が 10~20%、外面の溶接残留応力が 200~350MPa、付着塩分が 0.1g/m²程度あれば、数年のうちに ASCC が発生する可能性がある。なお、この解析では低 ASCC 感受性領域（鋭敏化度が低い領域）まで長時間の発生寿命予測線を引いているが、10~20 年後になって始めて ASCC が発生するなどの危惧、もしくは、可能性は、台風の直撃による海塩の多量散布などの特異的な環境（高塩化物濃度など）の変化が考慮されるような場合を除いて低いと考えられる。すなわち、鋭敏化度が低い場合には ASCC に免疫と判断した方が合理的と考えられる。

U 字曲げ試験片の表面の ASCC き裂の長さの経時変化 [40] から求めた ASCC 発生過程のき裂進展速度は 0.99mm/年で、この条件下での応力拡大係数 K は 10MPa√m 程度である。通常炉水環境中のき裂進展評価線図として採用されている da/dt-K 関係 [41] をベースに、

$$da/dt = a_0 \times f_{(塩化物濃度)} \times f_{(鋭敏化度)} \times f_{(K)} = 0.99(\text{mm/y}) \times Ra^{0.576} \times (K^{2.161}/10^{2.161}) \quad (\text{式 2})$$

で、鋭敏化度(一定)、及び K 値(パラメータ)を反映したき裂進展速度が計算できる。

表面側の残留応力を 343MPa(=1.75Sy、Sy:Type304 の設計応力)、板厚内部の残留応力を 200MPa とした時の K 値の板厚内分布を求めた。Ra を 15%、付着塩分量を内海の海岸近傍環境に相当する 0.1g/m² [NaCl]とした時の、補修溶接を施した溶接継手の ASCC を起点とするき裂進展予測例 [38] を図 4.4.6-11 に示す。この条件での ASCC 発生寿命は 0.81 年 (7100hrs)と計算され、da/dt-K 関係から約 5 年で 20mm の板厚を貫通する可能性がある。このように、材料・環境・応力条件から、ASCC の生起とその進展性を推算する式を立てることが可能である。ただし、データベースが整っていないため、推算するためには、基礎的な試験を実施し、データを得ることが必要である。



苦汁(Bittern) ; 4.5% [NaCl] + 5.2% [CaCl₂]+16.2%[MgCl₂] +8.6%[KCl]

図 4.4.6-8 ステンレス鋼の塩化物水溶液環境における SCC 生起温度-塩化物濃度領域図、及び SCC 試験環境との比較 [26]

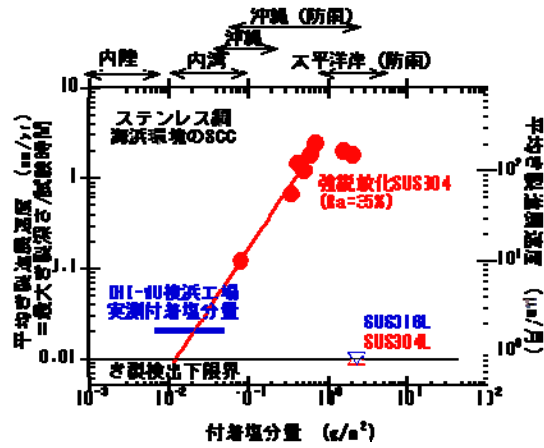


図 4.4.6-9 平均 ASCC き裂進展速度の合金種、付着塩分量依存性 [36]

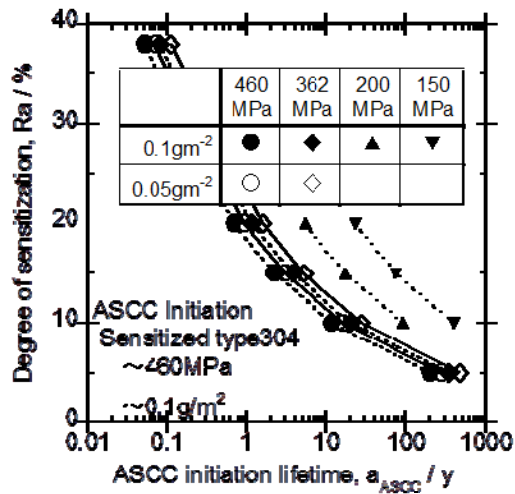


図 4.4.6-10 ASCC 発生の鋭敏化度、応力、付着海塩量依存性 [39]

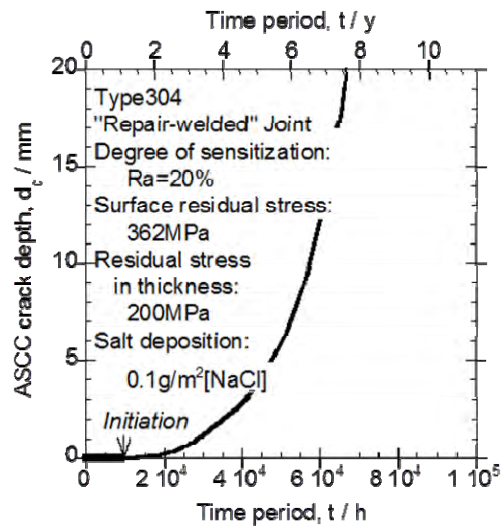


図 4.4.6-11 ASCC 発生後の進展予測例 [39]

7) 返還廃棄物用ガラス固化体キャニスタ受入れ検討時の調査・知見

返還廃棄物のガラス固化体キャニスタの受け入れに際して、電力中央研究所で実施したガラス固化体キャニスタ候補材(SUH309/SUS309S)を対象とした大気環境下での SCC 挙動について、2000hr までの定荷重試験により検討がなされている [42]。なお、SUS309S は $\leq 0.08\%C$ 、SUH309 は $\leq 0.20\%C$ であるから、SCC 感受性領域上は SUH309 に包括される (表 4.4.6-18)。

試験温度 30、50、70 及び 80°C、相対湿度 R.H.=60 及び 40%の条件下で SCC の温・湿度依存性が検討されている。応力と表面塩化物濃度の組み合わせによる SCC 発生域と SCC を防ぎ得る許容表面塩化物濃度の線(Cal.)を図 4.4.6-12 に示すが、Cal.は、相対湿度の低下とともに高応力・高塩化物濃度側に移行して耐 SCC 感受性が上昇している。

試験条件で最も過酷な 50°C、80%R.H.の条件下で SCC 発生におよぼす鋭敏化の影響を検討した結果を図 4.4.6-13 に示すが、鋭敏化度(JIS G0580 に規定する再活性化率)が 5.7%では全ての条件で SCC 感受性を示さなかった。従来から SUS304 は鋭敏化度が 5%以下では SCC 感受性を示さないことが多くの事例解析によって確認されており、SUH309 に対しても SCC の鋭敏化度のしきい値は 5%とみなせることが明確となった。

表 4.4.6-18 SUH309/SUS309S]の実測化学組成 [42]

合金種名	実測化学組成の例(%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304L	0.014	0.49	1.39	0.005	0.003	22.87	12.54
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

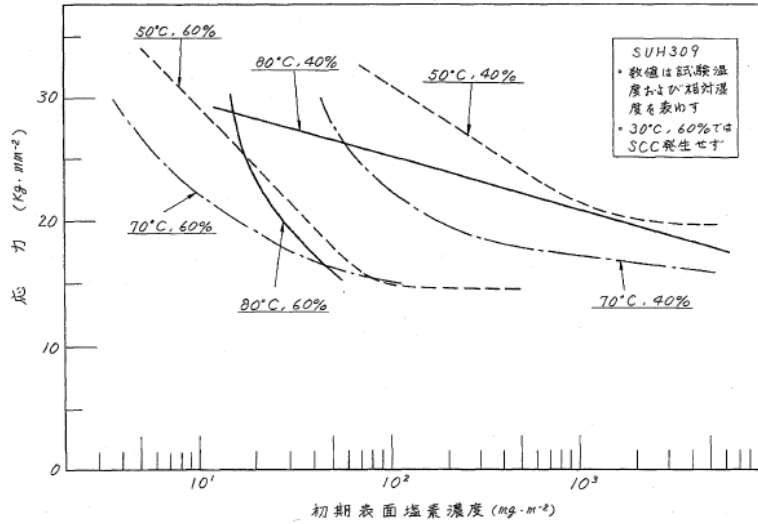


図3. SCC防止のための許容表面塩素濃度の温度依存性 (SUH309, 相対湿度60, 40%)

図 4.4.6-12 SUH309 の湿潤大気下における SCC 生起温度、湿度、応力、表面塩化物濃度依存性 [42]

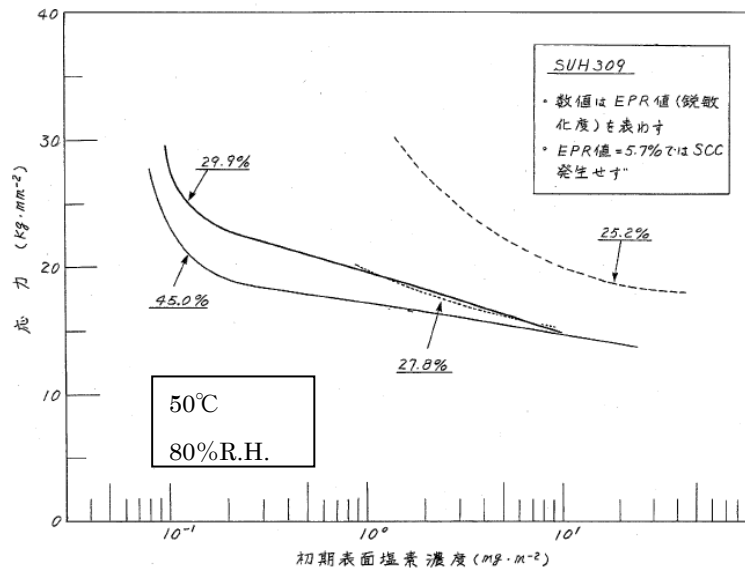


図4. SCC防止のための許容表面塩素濃度の鋭敏化度依存性 (50°C, 相対湿度80%)

図 4.4.6-13 SUH309 の湿潤大気下における SCC 生起の鋭敏化度、表面塩化物濃度依存性 [42]

(3) 放射線環境下でのステンレス鋼の腐食特性に関する情報収集結果

1) ステンレス鋼の腐食、SCC におよぼす放射線の寄与

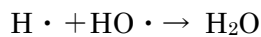
放射線の影響を分子レベルで見た場合、放射線のエネルギーがその分子に直接吸収されて障害をおよぼす直接作用と、他の分子がエネルギーを吸収し活性生成物を作り、それが標的分子と反応して標的分子に障害を及ぼす間接作用に分けることができる。放射線は材料、及び環境に影響を与える [43]。

材料側因子としては、照射ぜい化、及び照射誘起応力腐食割れ(IASCC, Irradiation

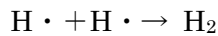
Assisted Stress Corrosion Cracking)などが挙げられる。BWR 相当の高温水環境では 304 型では $5 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) 程度から IASCC が発生するなどのしきい値が報告されており、ガラス固化体キャニスタではその影響は無視され则认为られる。

環境側因子としては、水に対して放射線が作用し、水分子をイオン化したり励起したりする。水の放射性分解過程 [42] を図 4.4.6-14 に示す。水分子のイオン(H_2O^+)は非常に不安定で、10~15 秒以内に分解して $\text{HO}\cdot$ と H_3O^+ とを生ずる。励起された水分子(H_2O^*)は開裂して $\text{HO}\cdot$ と $\text{H}\cdot$ を生じる。水分子から飛び出した電子は他の水分子の間に捕らえられて水和電子 e_{aq}^- を生じる。水和電子は 715nm にモル吸光係数の極大値を持ち、標準還元電位は -2.9mV で、中性の水中での半減期は 2.1×10^{-4} 秒である。

ラジカル同士は反応して、

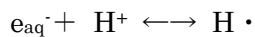


の中和反応のほかに、



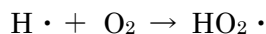
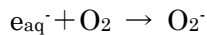
のように分子状生成物 H_2 、 H_2O_2 を生ずる。従って、水の放射線分解によって、 $\text{H}\cdot$ 、 $\text{HO}\cdot$ の 2 種のラジカルと H_2 、 H_2O_2 の 2 種の分子状生成物及び e_{aq}^- を生ずると考えて良い。電離が疎な X 線や γ 線のような放射線では $\text{HO}\cdot$ 、 $\text{H}\cdot$ の密度も低く、 H_2 、 H_2O_2 は生じにくい。これに対し、 α 線のような密な放射線ではラジカルが拡散する前に上記の反応によって H_2 、 H_2O_2 を生じやすい。

これらが溶液中の溶質と反応することにより化学的過程が起こる。 $\text{HO}\cdot$ 及び H_2O_2 は酸化力が強く有機物と反応して間接作用の主因をなすと考えられる。一方、 e_{aq}^- は前述したように強い還元力を有する。水溶液中では



の平衡があるので、pH4~9 では e_{aq}^- と $\text{H}\cdot$ の両者が共存し、pH2 以下では $\text{H}\cdot$ が重要な還元剤となる。

酸素の存在は反応を質的にも量的にも変化させる。そのうちの 1 つは下式に示すように水和電子や水素原子と反応してスーパーオキシド (ハイドロペルオキシラジカル、 $\text{HO}_2\cdot$) を作ることである。



$\text{HO}_2\cdot$ は酸化力が強く、核酸、蛋白質、脂質等の生体有機分子との反応により、 H_2O_2 や、有機分子の不安定なアルコキシルラジカル($\text{RO}\cdot$)を作る。

以上のことから、本来は実際に放射線照射を行って(腐食)挙動を評価すべきではあるが、第一義的には、腐食試験は酸化剤として H_2O_2 を添加した系での実験・評価で代替出来る。ただし、生物活性の放射線照射による変化($\text{RO}\cdot$ 生成など)は代替出来ないと考えられるため、試験の成立性には注意が必要である。

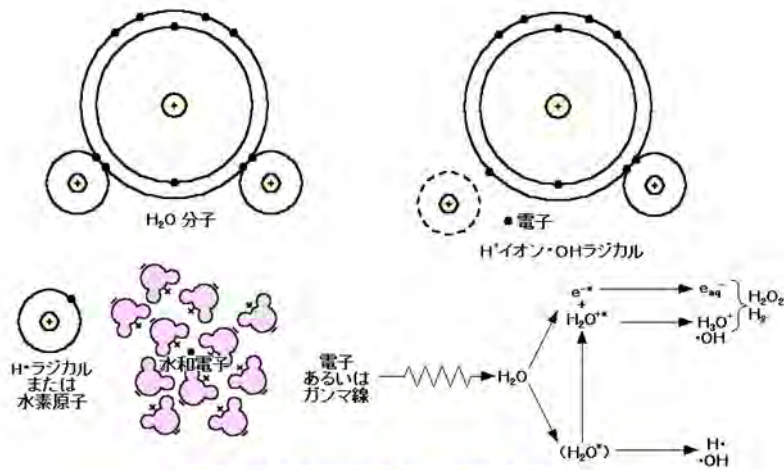


図2 水の放射線分解の初期過程

【出典】山口彦之:放射線と人間のからだ-基礎放射線生物学, 啓学出版(1995), p.55

図 4.4.6-14 水の放射性分解過程 [43]

2) 照射誘起応力腐食割れ (IASCC)

SCCは「材料、環境、応力」の3つの要因が特定の条件を満たすときに発生・進展する。軽水炉の炉内で使用される構造物・機器の場合、これらSCCの3要因のいずれに対しても炉内の強い放射線が影響を与える。照射誘起応力腐食割れ(IASCC) [44]は、オーステナイト系ステンレス鋼の化学組成やマイクロ組織及び機械的性質が中性子照射の影響により変化することに起因して発生するSCCである。ステンレス鋼のIASCCに関わる照射効果の要因 [42] を図 4.4.6-15 に示す。多くの要因が影響する複雑な現象であり、その研究には中性子照射により放射化した材料を遠隔操作により取り扱い得る施設(照射後試験施設、ホットラボ)が必要となる。このためIASCCの機構(メカニズム)については未解明であるが、SCCの材料・応力・環境の主要因に対する照射影響としては以下が考えられ、これらの照射影響の複合作用によりIASCCが発生・進展すると考えられている。

① 材料要因への照射影響:

材料要因として、合金が中性子照射を受けると、原子が格子位置からはじき出されて格子欠陥(格子間原子と原子空孔)が形成される(はじき出し損傷)。同時に、中性子と合金構成原子の核反応によってH、Heなどの異種原子が材料中に生成する(核変換損傷)。はじき出し損傷による初期欠陥の形成は、中性子照射後の極めて短時間に生じる現象であり、その後時間とともに格子欠陥の移動、消滅、集合が起こり、さらに合金のマイクロ組織の変化、強度と硬さの上昇(照射硬化)及び局所的な合金化学組成の変化(照射誘起偏析)が起こる。熱鋭敏化の場合には主にCr欠乏が生じるのに対し、照射誘起偏析の場合にはCr欠乏以外にも他元素の富化(Ni、Siなど)または欠乏(Moなど)も生じることである。また、照射誘起偏析では、偏析の幅が熱鋭敏化よりかなり狭く、粒界近傍の10nm程度に過ぎない。

② 応力要因への照射影響:

応力要因として、照射により形成された格子欠陥の移動により材料内部の格子の歪が再配分されるため、応力が付加された状態では材料の歪が増加し(照射クリープ)、

歪が一定の状態で使用されている場合には応力が低下する（照射応力緩和）。応力の緩和は IASCC を抑制する方向に働くが、き裂の先端部分で生じる照射クリープによる歪は IASCC 進展を加速する可能性も考えられる。

③ 環境要因への照射影響：

環境要因として、BWR では通常水質（NWC：Normal Water Chemistry）で溶存酸素が存在する酸化性雰囲気であるが、PWR では水素添加により還元性雰囲気となっている。ただし、BWR においても水素注入水質（HWC：Hydrogen Water Chemistry）の場合には、炉底部などの溶存酸素濃度は PWR 並みに低められる。炉内では中性子とガンマ線による水の放射線分解（ラジオリシス）が起こり、各種の短寿命のラジカルの他、過酸化水素のように酸化性の強い化学種が生成し、SCC を加速する。また構造的な隙間の内部や SCC のき裂の内部では、放射線の影響が大きく現れる。

IASCC は、熱鋭敏化によるステンレス鋼の粒界応力腐食割れ（IGSCC）とは異なり、ある程度以上の中性子照射を受けると溶体化（固溶化）状態でも SCC が発生する。IASCC 破面の例として、溶体化 SUS316 ステンレス鋼を原子炉で中性子照射した後に、高温水中で低歪み速度引張（SSRT：Slow Strain Rate Tensile）試験し発生させた IASCC による粒界破面の写真 [43] を図 4.4.6-16 に示す。SUS 304 及び SUS 316 ステンレス鋼の IASCC 感受性については、軽水炉の廃却材や試験研究炉での照射材などを用いて SSRT 試験により多くの知見が得られている。図 4.4.6-17 に BWR と PWR の炉内水環境を模擬した試験条件での IASCC 感受性（SSRT 試験破面での粒界割れの面積率）と中性子照射量の関係 [43] を示す。IASCC には発生のにしきい照射量があり、BWR 相当の高温水環境では SUS 304 では $5 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) 程度から IASCC が発生し、SUS 316 ではやや高く $1 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) 程度になると IASCC 感受性を示すことが知られている。また、PWR 相当の環境（溶存酸素濃度 5ppb 以下）では、 $3 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) 程度以上から IASCC が発生する。

応力依存性に関する知見は多くはないが、照射後の高温水中単軸定荷重試験によって、IASCC 発生のにしきい応力が付加応力と降伏応力の比で約 0.4 であることが報告されている。ただし、照射硬化により材料の降伏応力は上昇するため、応力値としては IGSCC の発生にしきい応力に比べ 2 倍程度（約 350MPa）となる。

水質依存性に関しては、高温水中の溶存酸素濃度を低下させると IASCC 感受性は低下し、それに伴い IASCC 発生のにしきい照射量は上昇することが分かっている。しかし、高照射量の材料の場合には、溶存酸素濃度が数 ppb と低い水中へ水素を添加すると IASCC 感受性が上昇することも知られている。

IASCC の進展挙動を調べることは、炉内の厚肉構造物の健全性評価のため必要である。（独）原子力安全基盤機構（JNES）の実施した IASCC 研究事業では、主に材料試験炉（JMTR）で照射したステンレス鋼試験片の BWR 炉内模擬高温水中での IASCC 進展速度データが取得され、それに基づき BWR 炉内構造物 IASCC 評価ガイド（案）が作成された（2009 年）。同ガイドでは、高経年化炉の IASCC 健全性評価をさらに合理的に行うため、き裂進展データの低応力条件への拡張、試験炉照射材データの実機への適用性の評価及び IASCC の機構に関する検討が必要とされた。

IASCCには多くの影響因子があり、IASCCの機構に関する定説はまだない。粒界型SCCへの照射影響は、G.S. Wasによれば以下の5つの機構に分類でき、IASCC機構に関してはこれらの複合的影響を検討する必要がある。

① 照射誘起偏析：

この現象により粒界ではCrが欠乏し、粒界の耐食性が局所的に劣化する。ただし、IASCC感受性と照射によるCr欠乏量の相関性のみではIASCC機構を十分に説明できない。また、粒界でのSiの濃縮も粒界型SCCを加速する要因となり得る。

② 照射硬化：

冷間加工によるステンレス鋼の硬化がSCCを加速することは良く知られており、照射硬化とIASCCき裂進展速度の間にも正の相関がある。しかし、照射硬化のみによりIASCC現象を説明することはできない。

③ 変形モード：

照射材の変形は、転位チャネルによる局所的な歪集中による局所変形（不均一変形）により特徴付けられる。この局所変形が粒界に集中すると大きな局所歪みが発生し、粒界すべり及び材料表面では酸化膜の破壊が生じて粒界型SCCを加速すると考えられる。

④ 選択的内部酸化：

透過電子顕微鏡（TEM）観察により、SCCき裂先端部の合金内への粒界にそった酸素の拡散が観察されている。酸素の粒界での高速拡散及び照射による拡散の加速は、IASCCの加速要因である可能性が考えられる。

⑤ 照射クリープ：

上記の4つの影響と異なり照射クリープは残留応力を緩和させIASCCの発生・進展を抑制する要因である。しかし、き裂先端部で起こるクリープ現象がIASCCに影響を与えているという説もある。

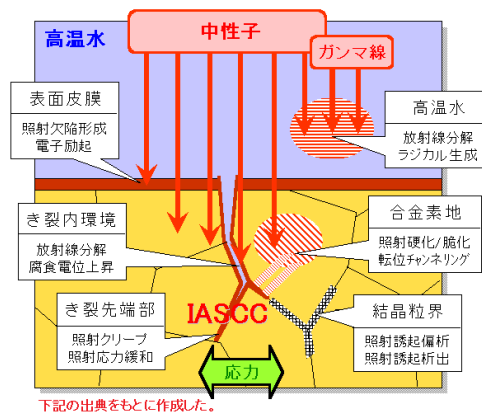


図2 炉内材料の応力腐食割れに関する照射効果

【出典】日本原子力研究所：日本原子力研究所成果報告 平成11年度（1999年11月）、p.30

図 4.4.6-15 ステンレス鋼のIASCCに関わる照射効果 [44]

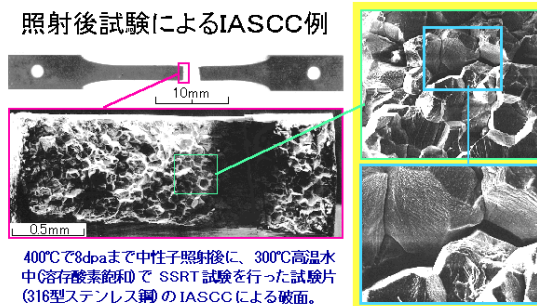


図6 IASCCによる材料破面(粒界割れ)の例
[資料提供]日本原子力研究所

図 4.4.6-16 IASCC による粒界割れ破面 [44]

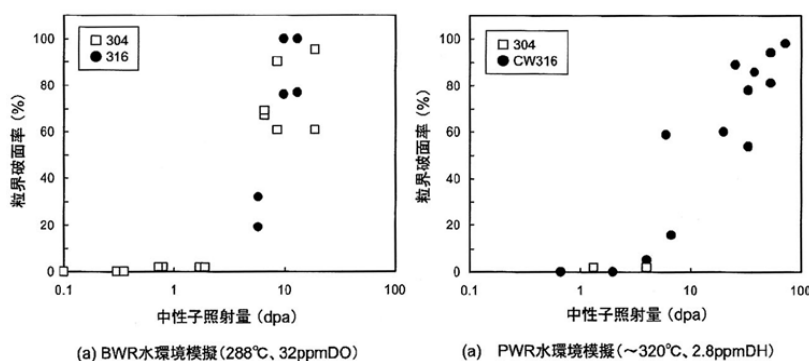


図9 IASCC感受性の照射量依存性

【出典】 福谷、西岡、藤井:「ステンレス鋼の軽水炉照射挙動」原子力安全システム研究所、INSS MONOGRAPHS No.4 (2009)p.61

図 4.4.6-17 IASCC 感受性の照射量依存性 [44]

3) 照射による環境の酸化性

鋭敏化熱処理を施した試験片の、高温水中における低ひずみ速度引張り(SSRT)試験のSCC破面率に及ぼす γ 線照射の影響 [45] を図 4.4.6-18 に示す。放射線による水分子の分解または再結合を考慮し、試験片表面における溶存酸素、水素、及び過酸化水素濃度が照射下、及び非照射下で等しくなるように試験槽入り口における水質をコントロールしている。10⁵R/hr 及び 10⁷R/hr の線量率において腐食電位、SCC 破面率ともに照射の影響は明確ではなかった。したがって、高温水中における SUS304 鋼の腐食電位、及び IGSCC 感受性におよぼす γ 線の影響は主に溶存酸素、水素及び過酸化水素濃度の変化によってもたらされ、短寿命ラジカルによる影響は少ないことがわかった。SUS304 の SCC 破面率におよぼす電位、 γ 線照射の影響を図 4.4.6-19 に示すように、電位と SCC 破面率の間には比較的良い相関が認められている。ただし、ほぼ同じ電位域のデータを細かく比較すると、 γ 線照射ありの方が若干 SCC 破面率が大きい傾向にある。

以上のように、軽水炉の炉内材料に対しては照射による材料への影響が大きい、本課

題に対しては照射量の観点から材料への影響は第一義的に無視できて、専ら、環境への寄与と考えられる。

自然水中、及び残留塩素、オゾン添加系における自然電位、 E_{SP} [46] を図 4.4.6-20 に示すように、自然水中の自然腐食電位、 E_{SP} の pH 依存性 [47] ;

$$E_{SP}(V \text{ vs. SHE}) = 0.733 - 0.059pH \quad (\text{式 3})$$

における平衡電位 $E_{SP}=+0.32V \text{ vs. SHE}$ (pH=7)と比較して、残留塩素、オゾン添加系での電位は高くなる。ステンレス鋼の浸漬電位におよぼす γ 線照射、及び H_2O_2 添加の影響[48]を図 4.4.6-21 に示す。J-13 井戸水(30°C)中の SUS316L 鋼の浸漬電位は $3.8 \times 10^4 R/hr$ の γ 線照射によって約 150mV 貴化し、同様の電位貴化は H_2O_2 添加によっても確認されている。さらに、3.5hr の γ 線照射によって 0.14mM の H_2O_2 の生成を実測している。したがって、 γ 線照射の効果は H_2O_2 によって再現されている。

高レベル放射性廃棄物ガラス固化体容器金属材料の耐食性におよぼす γ 線照射の影響試験の装置構成、及び結果 [49] を図 4.4.6-22 に示す。約 $1.1 \times 10^5 R/hr$ の γ 線照射によって SUS304 の U 字曲げ試験片による SCC 感受性(最大き裂深さ)は増大しているが、最大 60 日間の全照射量の約 $1.7 \times 10^8 R$ の範囲では、ステンレス鋼の組織などへの影響は無く、専ら、環境の酸化性の高まりによって SCC 感受性が出現されたと判断している。

湿潤大気中の水膜、苦汁塩滴中における自然電位 [50] を図 4.4.6-23 に示すように、60°C、35%R.H.環境に設置したの苦汁塩滴中のステンレス鋼の電位は $E_{SP}=+0.45V \text{ vs. SHE}$ で、大気平衡した中性自然水中の $E_{SP}=+0.32V \text{ vs. SHE}$ よりも 100mV 以上高い。鉄の水膜中の電位は水膜が薄いほど電位が高くなる傾向から、水溶液中より水膜のほうが大気中からの酸素の拡散が容易であることが推測される。そこに、 H_2O_2 や O_3 があれば、さらに水膜中に溶け込み、電位が貴化することが推測される。すなわち、湿潤大気環境の薄い水膜の方が水溶液環境よりも γ 線照射による酸化の影響を受けやすい可能性がある。

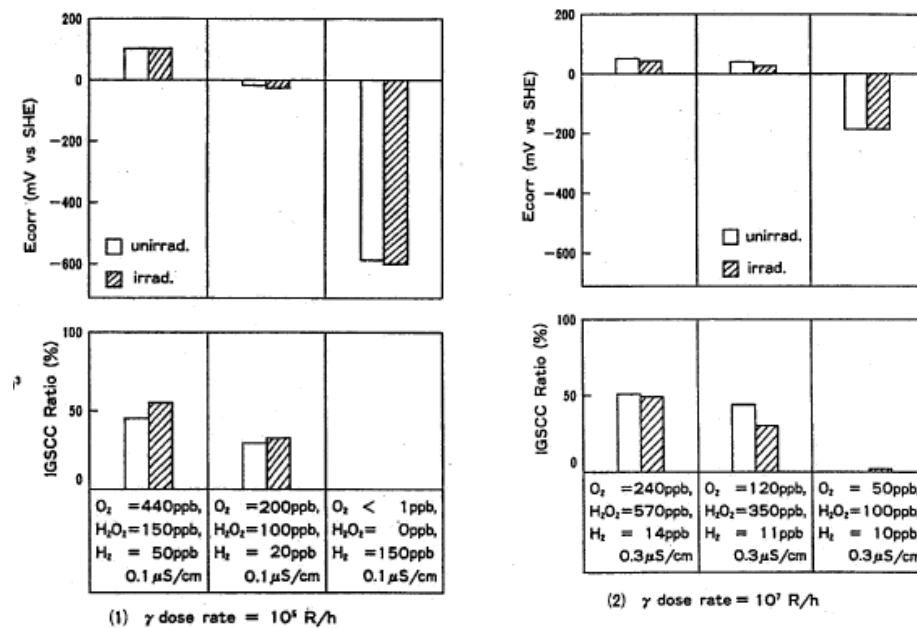


図 4.4.6-18 高温水中における SSRT 試験の SCC 破面率に及ぼす γ 線照射の影響 [45]

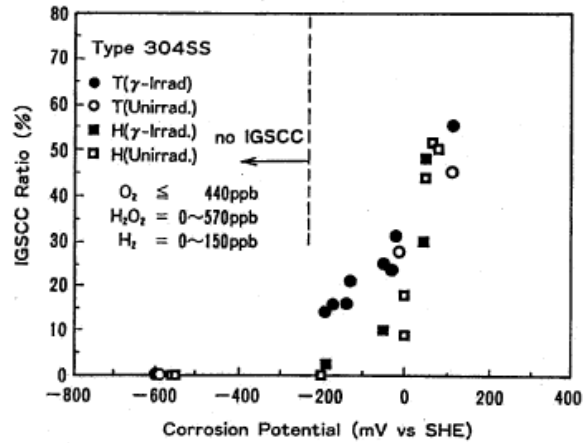


図 4.4.6-19 SUS304,の SCC 破面率におよぼす電位、 γ 線照射の影響 [45]

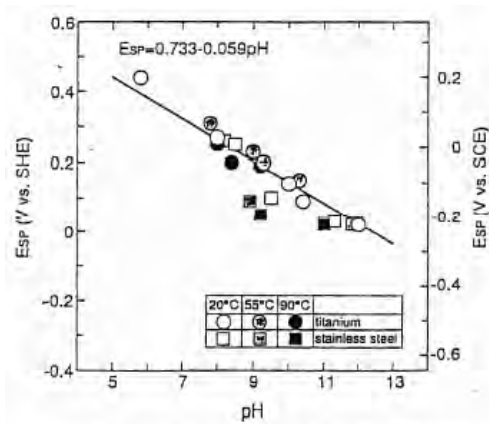


図 4.1 空気飽和模擬地下水 (HCO_3^- 添加) 中のチタン・ステンレス鋼の自然電位 E_{SP}

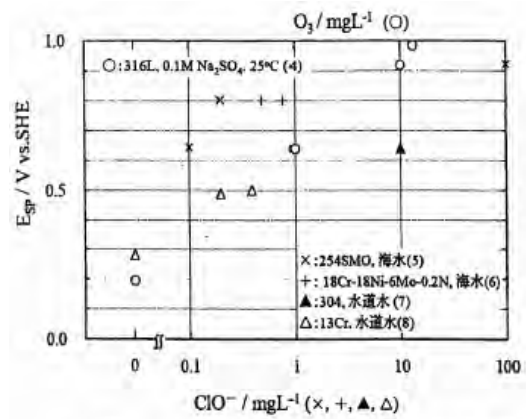


図 4.2 オゾン O_3 または残留塩素の濃度と E_{SP} の関係

(a) 自然水中の自然電位 E_{SP} の pH 依存性 [48] (b) 残留塩素、オゾン添加系における E_{SP} [46]

図 4.4.6-20 自然水中、及び残留塩素、オゾン添加系における自然電位 [46]

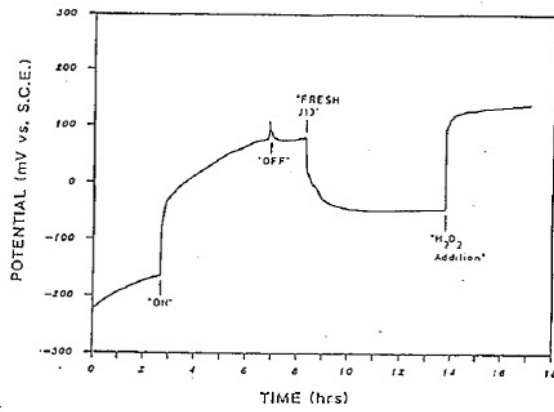


FIG. 7. Corrosion potential behavior for AISI 316L stainless steel in gamma-irradiated J-1) well water. Following the "off" half-cycle the irradiated solution was decanted and replaced by a fresh, unirradiated solution. Following this, H_2O_2 was added to solution at a concentration of 0.4 mM.

図 4.4.6-21 ステンレス鋼の浸漬電位におよぼす γ 線照射、及び H_2O_2 添加の影響 [48]

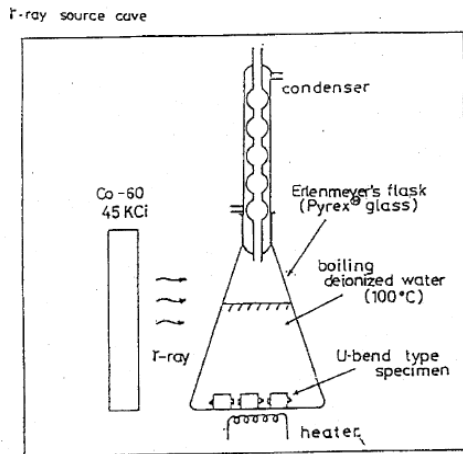


Fig. 3 Schematic diagram of γ -ray irradiation (Series II)

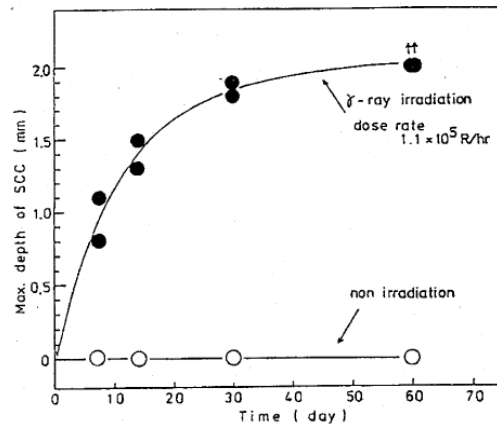


Fig. 4 Effects of γ -ray irradiation on SCC failures of sensitized Type 304 ss. (Series I)

図 4.4.6-22 高レベル廃棄物ガラス固化体容器金属材料の耐食性及び γ 線照射の影響試験 [49]

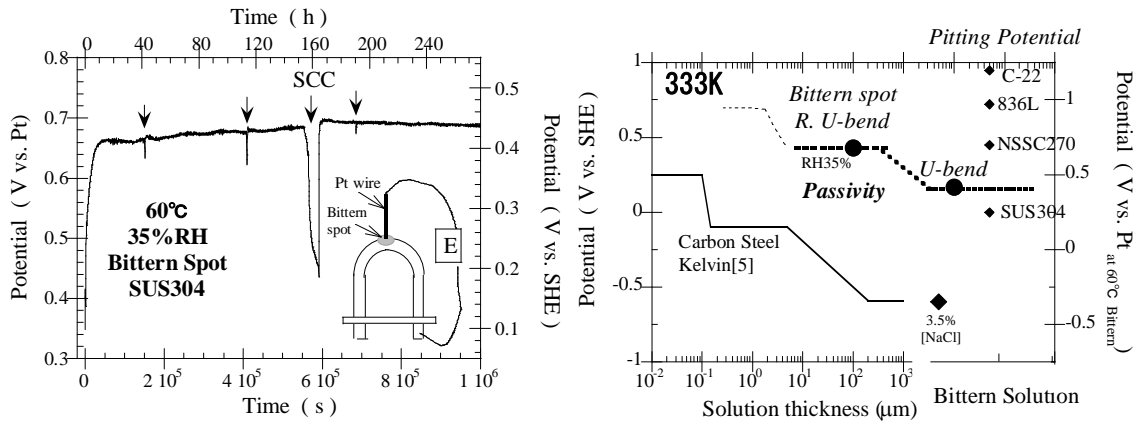


図 4.4.6-23 湿潤大気中の水膜、苦汁塩滴中における自然電位[50]

4.4.7 調査結果のまとめと今後の課題

(1) 調査結果のまとめ

海水の付着などによるガラス固化体キャニスタの腐食特性に関して、1) 海水に対する腐食特性、及び 2) 放射線環境下での腐食特性に注目して調査を行った。津波被災時のガラス固化体キャニスタ周りの状況の設定を模式的に図 4.4.7-1 に示す。また、そのような環境におけるステンレス鋼の腐食損傷生起領域、及び進展挙動を模式的に図 4.4.7-2 に示す。

文献調査と従来知見の整理で得られたステンレス鋼の腐食に係る材料因子のまとめを表 4.4.7-1 に、環境因子のまとめを表 4.4.7-2 に、応力因子のまとめを表 4.4.7-3 に、時間因子のまとめを表 4.4.7-4 に示す。これらを要約すると以下の通りである。

SUS304 及び SUS304L などの汎用オーステナイト系ステンレス鋼は、海水環境下ですきま腐食、微生物腐食、及び SCC 感受性を有することを確認した。また、海洋性湿潤大気環境で発錆、孔食、ASCC 感受性を有することを確認した。ただし、SUS304L は鋭敏化対策材であるため、SCC 及び ASCC 感受性は低いと言える。一方で、微生物腐食の可能性は否定できず、発生した場合には数 mm/年オーダーの速い速度を取り得ることが分かった。

海外返還ガラス固化体に使用されている SUH309/SUS309S の、湿潤大気 SCC 感受性に対しても評価が行われており、SUS304 と同様に鋭敏化度(JIS G0580 の再活性化率)で 5%が SCC 生起のしきい値とみなすことが出来ることが分かった。

以上のように、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、海水環境下から比較的緩やかな腐食環境である海洋性湿潤大気環境まで、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、放射線環境下での腐食の加速に関しては、水の放射線分解による環境の酸化性の高まりが、すきま腐食、微生物腐食及び SCC 感受性を高める可能性があることが分かった。また、そのメカニズムや加速試験法としての過酸化水素を添加した系での評価などが提唱されているが、体系的な腐食領域図での整理までは至っていないことが分かった。

図 4.4.7-2 の模式図に示すように、ステンレス鋼の健全材、及び強鋭敏化熱処理などの劣化模擬材に対する環境(温度-塩化物濃度)-局部腐食(すきま腐食、SCC など)領域図上で、乾式貯蔵想定などの通常的环境では健全材は局部腐食の危惧が無いと言える。一方、本調査の結果、高温・高塩化物濃度加速環境では健全材においても局部腐食感受性が確認された。したがって、津波被災影響予想範囲を広く(保守的に)見積もれば、健全材についても局部腐食生起領域となることが考えられる。しかしながら、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環境が何処ようになるかは不明である。

以上より、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は、津波被災時のガラス固化体キャニスタの腐食環境を適切に見積り、既往の環境-局部腐食領域図等と照合することで評価できると考えられる。

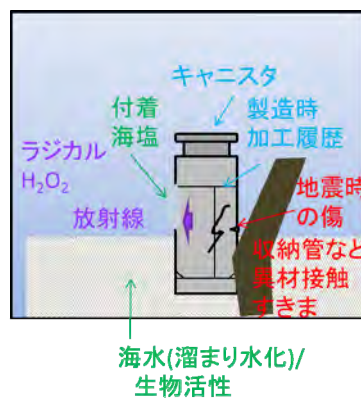


図 4.4.7-1 津波被災時のガラス固化体キャニスタ周りの状況の設定(模式図)

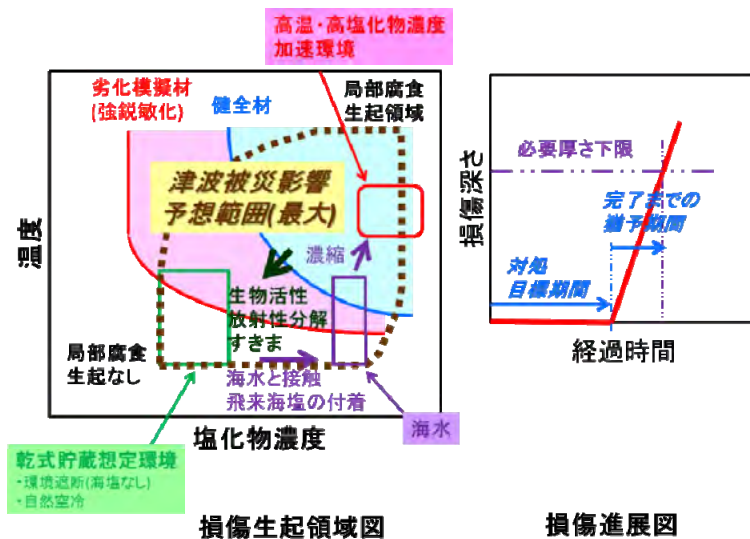


図 4.4.7-2 ステンレス鋼の腐食損傷生起領域、及び進展挙動(模式図)

表 4.4.7-1 材料因子のまとめ

材料因子	定常時特徴	津波影響	影響因子	損傷	調査結果	課題
SUH309/ SUS309S	高%Cr、 高%C	-	強鋭敏化 (しやすい)	SCC 発錆 孔食	<ul style="list-style-type: none"> ・返還廃棄物の受け入れ評価時にSCCの評価を実施し、通常の乾式貯蔵ではSCC感受性が無いことが確認されている ・SCC感受性はSUS304と大差ないと推測(高%Cr↑/高%C↓) ・オーステナイト系ステンレス鋼の局部腐食感受性は$PR=[\%Cr]+3.3[\%Mo]+10\sim 16[\%N]$などで評価出来る 	<ul style="list-style-type: none"> ・熱処理によって強鋭敏化し、高応力、高塩化物濃度/(多量の高塩付着)、高温下でIGSCC感受性を有すること、返還廃棄物乾式貯蔵環境下ではSCC感受性が無いことは確認されているが、津波を受けた環境でSCC感受性があるか否か、不明である。(高加速条件を想定するとSCCを起こすことは明白)
SUS304L	低%C	-	鋭敏化 対策材	すきま腐食	<ul style="list-style-type: none"> ・鋭敏化度、Ra(JIS G0580)≥5%でSCC感受性を示すとされることが多い ・鋭敏化によるSCC対策材として開発・実用化されている ・60°C、35%RHの苦汁塩滴環境ではSCC感受性を有する(非鋭敏化材の高濃度塩化物による粒内型のTGSCC感受性が出現する) 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接などによっては鋭敏化しないため、粒界型SCC(IGSCC)感受性は無いが、津波を受けた環境でSCC感受性があるか否か、不明である。(高加速条件を想定するとSCCを起こすことは明白)
冷間加工、 変形	ひずみ、 硬化	衝突による 変形など	硬化 ひずみ	SCC	<ul style="list-style-type: none"> ・冷間加工によってSCC感受性が高まる(鋭敏化しやすい) 	<ul style="list-style-type: none"> ・返還廃棄物受け入れ評価など、母材、母材+溶接での評価は為されているが、冷間加工や変形部での評価は検討されていないため、冷間加工(+溶接施工)部でのSCC感受性が無いことは確認できていない
溶接	鋭敏化、 残留応力	-	残留応力	SCC 微生物腐食 (MIC) すきま腐食	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接によって1)鋭敏化、2)溶接残留応力が付与され、SCC感受性が高まる ・304系で実際にSCCが生起するのは溶接熱影響部であって、溶接金属はSCCを起こし難い(事例が少ない) ・母材部と比較して溶接金属は、すきま腐食、微生物腐食感受性が高い ・溶接補修によって、さらに残留応力が高くなり、鋭敏化も進む 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接継手部での評価は十分に為されているとは言いがたい ・実機SCCトラブルは溶接補修部で発生するケースが多いが、ガラス固化体容器が溶接補修されていないとの担保は確認されていない(一般産業用途では、補修記録が無いにも関わらず、損傷部は補修されていることが多々ある)
照射	- (低線量で 無視)	-	照射による 金属組織 など変化	IASCC (照射SCC) 照射せい化	<ul style="list-style-type: none"> ・軽水炉内のような高照射環境下では、照射せい化、IASCC(照射による粒界Cr欠乏由来の粒界割れ)感受性が出現する 	<ul style="list-style-type: none"> ・過去に実施された実験・評価の範囲でIASCCが問題になる状況は想定できない

表 4.4.7-2 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/SUS309SI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 (湿润大気 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"> ステンレス鋼の可適用は第一義的には"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	湿润大気+塩化物	発錆 孔食 SCC/ ASCC (湿润大気 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 湿润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、気相部は海洋性湿润大気環境 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.)が整えば、非鋭敏化SUS304は粒内型SCC感受性がある 	<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

表 4.4.7-3 応力因子のまとめ

応力因子	定常時特徴	津波影響	影響因子	損傷	調査結果	課題
溶接残留応力/加工時の残留応力/ひずみ	(同左)	(同左)	応力源	SCC	<ul style="list-style-type: none"> ・表層側の溶接残留応力は材料の降伏応力以上と高く、SCC生起下限界応力を超えている ・実際の溶接継手部の残留応力値を得るのは手間を要し、「溶接=SCC下限界応力以上」と見做せる ・通常の周継手溶接では板厚内部の深さ方向で引張り残留応力が低減する(ため、通常、貫通には至らない) ・補修溶接によって全板厚にわたり引張り残留応力が生じやすい ・グラインダー仕上げなどによって表面硬化層が生成し、SCC感受性が高まる ・冷間加工によるひずみが残存している(応力除去焼鈍されていない)と局部腐食感受性が高まる 	<ul style="list-style-type: none"> ・残留応力(溶接、加工)が明確ではない ・通常的设计/製作に伴う残留応力の見積とは別に、計画外の補修などの影響をどの程度見込む必要があるか、明確ではない
容器/固化体熱膨張差	- (無視できる)	冷却能力の変動による	新たな応力源		<ul style="list-style-type: none"> ・作用応力の一種として引張りの残留応力として取り扱いが可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・考慮されていない
衝突、変形など	- (前提とせず)	衝突、変形など	新たな応力源		<ul style="list-style-type: none"> ・応力集中源、局所的な硬化など、SCCの起点となり得る ・すきま構造となり、すきま腐食、すきま腐食経路型のSCCの起点となり得る 	<ul style="list-style-type: none"> ・どの程度の見積が必要か、明確になっていない

表 4.4.7-4 時間因子のまとめ

時間因子	定常時特徴	津波影響	影響因子	損傷	調査結果	課題
局部腐食	生起 臨界条件	生起領域 になる	生起環境 の成立	すきま腐食 SCC/ ASCC MIC	・乾式貯蔵環境ではSCC感受性が無い領域であるが、津波被災後はSCC感受性領域に入る可能性がある	・局部腐食/SCC感受性領域に入る可能性の程度が見積もられていない
	生起寿命				・局部腐食は、生起領域においても生起寿命があり、生起寿命>供用期間であれば局部腐食は発生しない ・被災後速やかに処置(海水除去、洗浄など)が出来れば、局部腐食の生起は回避可能	・局部腐食/SCC回避の事後対策、およびその時間軸展開が検討されていない
	進展	進展領域 になる	進展環境 の成立		・進展速度の時間積分によって進展深さが推算できる ・進展速度の各種加速因子依存性関係が、一部報告されている	・進展速度の各種加速因子依存性関係のデータベースが整っていない ・進展回避の事後対策、およびその時間軸展開が検討されている
環境	乾式貯蔵	海水浸漬	塩化物	・塩化物濃度-温度-局部腐食生起領域で、生起の有無が判定される ・生起領域では、その進展深さ-経過時間関係で評価出来る	・水分の蒸発などによって塩が濃縮されるなどで、時間経過後に生起領域となる可能性がある	
				酸化性	・溶存酸素、生物活性(一部の好気性細菌の繁殖)、放射線分解によるH ₂ O ₂ 、OH ⁻ の生成などにより酸化性が高まる	・酸化剤の種類ごとの酸化力/酸化電位データはあるが、競合下での知見が無い ・実際の酸化力の想定が出来ていない
				生物活性	・溜まり水になると水や生物が腐り、生物活性が高まる	・生物活性を前提とすれば局部腐食は不可避で、対策を取る必要がある
		空冷 されない	温度上昇	・崩壊熱により加熱され、空冷されない ・気相部の>70℃の高温状態となる期間は金属表面が乾き、腐食環境が整い難い ・発熱量が低下し<70℃になれば腐食環境が整う	・固体ごとに熱量が異なり、一義的に温度が定まらない(低発熱量の固体を想定し、腐食環境が整うことを前提とする必要があるか否かの判断が必要)	
		気液界面	濡れ+ 塩化物	・気液界面の気側の薄い水膜部で塩が濃縮し、酸化性も高まる(溶存酸素濃度が高くなる)	・(被災によって気液界面が存在する状況になれば局部腐食の生起は不可避である)	
湿潤大気	・時間とともに飛来海塩が付着し、付着海塩量が増加するが、平衡付着量に達する ・降雨によって付着海塩は洗い流され、一時的に付着海塩量が低下する ・降雨によって洗い流されない場所では、付着海塩が濃縮する	・進展回避の事後対策、およびその時間軸展開が検討されていない				

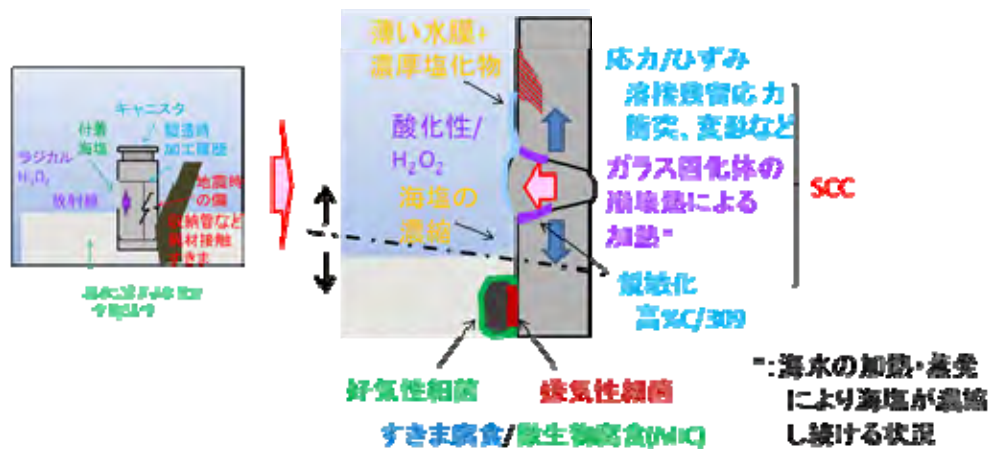
(2) 今後の課題

海水の付着などによるガラス固化体キャニスタの腐食特性に関して、1) 海水に対する腐食特性、及び2) 放射線環境下での腐食特性に注目して調査を行った結果、海水と砂礫などによるすきま腐食、微生物腐食、ガラス固化体キャニスタの冷間加工と溶接による SCC 発生の危惧が考えられた。また、水の放射性分解による酸化性の高まりが、これら、すきま腐食、微生物腐食及び SCC 感受性を高める可能性があることが分かった。津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食損傷模式図と、今後の課題を整理して図 4.4.7-3 に示す。

図 4.4.7-3 に示すように、今後の課題の一つとして、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何処のような腐食環境に置かれるかの評価が挙げられる。ガラス固化体の発熱は、平衡温度として環境評価等に組み入れる視点で考慮されることはあったが、「放熱するガラス固化体が海水に半浸漬した状態に置かれる」ことによって、気液界面で海水が蒸

発して海塩が析出するような視点ではこれまでに検討されたことはなかった。すなわち、地層処分施設の津波被害を想定した場合、30℃、90%R.H.のような常温高湿度環境下で、海水に半浸漬されたガラス固化体キャニスタが、放射性物質の崩壊熱によって内面側から加熱され、その鋼表面で海水が蒸発して海塩が析出して高温・高濃度塩化物溶液環境になる可能性が考えられる。内面側からの加熱により、当面の間は、鋼表面温度は常に大気温度と同等以上に高くなっており、海塩が付着したとしても乾燥するために腐食環境が整わない可能性や部位があることが想定される。このような、津波被害によって海水や津波土砂に半浸漬したガラス固化体キャニスタ表面と大気との温度関係などを、種々の被災ケースごとに温度解析などを行って推定し、SCCなどが生起する腐食環境の成立性を評価する必要があると考えられる。

また、水の放射線分解による環境の酸化性の高まりがSCCなどの感受性を高める可能性が考えられるが、体系的な腐食領域図での整理までは至っていないのが現状である。このため、放射線分解による環境の酸化性の加速の評価も必要で、例えば、一定量の海塩(外洋に面した海岸での代表的な海塩付着量である1g/m²[NaCl])を付与した定荷重、もしくは定ひずみ曲げ試験片を高温・高湿槽内に設置し、さらに高温・高湿槽内に低濃度のオゾンガスを注入することによって高酸化性の加速試験を実施し、SCC感受性の上昇の有無を評価することが必要と考えられる。なお、併せて、水溶液系における酸化性の加速試験・評価も必要と考えられる。



I. 津波被災影響予想範囲の見積	
1. 予想範囲の見積	温度、塩化物濃度、酸化性、 生物活性、変形、すきま
II. 要素試験(案)	
1. 高温・海塩濃縮下	SCC(湿潤大気、気液界面、海水)
2. 酸化性環境/H ₂ O ₂ もしくはO ₃ 下(γ線模擬)	すきま腐食、SCC
3. 生物活性下	すきま腐食+MIC
4. 溶接、熱処理、冷間加工、応力/ひずみ付与	SCC(海水、湿潤大気)

図 4.4.7-3 津波被災の腐食損傷と今後の課題の整理(模式図)

4.5 まとめ

地層処分事業操業中の異常状態や事故の影響を緩和するためには、その時の人工バリアの状況を適格に評価し、人工バリアの状況に応じたより適切な対策を施す必要がある。このような観点から、本章では「人工バリアの限界性能等の調査・試験」として、3項目について検討を行った。

- ① 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討
- ② 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握
- ③ 津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査

それぞれの実施項目に関するまとめの詳細や今後の課題等については、4.2.9、4.3.4、4.4.7に述べた。ここでは、それらを要約してまとめとする。

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。

燃焼解析では、室内の発熱量やガス温度・酸素濃度の経時変化などから、数分オーダーで火災が消炎することが推定された。これは、地下の閉鎖空間の限られた量の空気（酸素）が消費され、窒息消火が生じることによると判断された。この時の室内のガスの最高温度は、廃棄体周囲の空間で800℃程度、廃棄体真上の空間で700℃程度であった。

ガラス固化体単体の状態を対象とした伝熱解析の結果、ガラス固化体キャニスタの最高温度は265.4℃、ガラスの最高温度は157.7℃であった。ガラス固化体のガラスの平均転移温度は500℃程度であることを勘案すると、本検討で設定した火災シナリオにおいては、火災がガラス固化体の品質に及ぼす影響は小さいと判断された。また、熱応力の最大値は150～170MPであり、ステンレスの引張強度に対して十分に小さく、破損に至る危険性は小さいと判断された。

一方、ガラス固化体がオーバーパックに収納された状態を対象とした解析では、ガラス固化体の温度変化は極めて僅かであり、オーバーパックによる火災影響の緩衝効果が確認できた。また、本検討の火災シナリオによる入熱がオーバーパックの応力に及ぼす影響は軽微であり、塑性ひずみに関しても初期状態から変化が無いことが分かった。

以上より、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が分かった。

ただし、上記の結果は今回設定した一つの火災シナリオについてのものであることに留意する必要がある。火災による災害の規模は多くの要因に左右される。一例として、本検討では、消防法に準拠して火災中は換気システムは停止していると仮定したが、一方で、放射性物質の閉じ込めの観点からは火災時においても換気機能の維持が求められることも考えられる。火災中の換気システムの作動の有無によって火災状況は大きく変わり、ガラス固化体やオーバーパックにとってさらに厳しい加熱条件が生じることにも考えられる。今後、具体的に地層処分施設や設備が計画・設計された場合、その具体的な条件のもとで、種々の要因を考慮した火災シナリ

オ（想定し得るシナリオにするべきと考える）を設定し、ガラス固化体やオーバーパックに対する影響を検討・把握する必要があると考えられる。

②緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握

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。しかし、緩衝材については、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、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。また、熱伝導性は、緩衝材やベントナイトペレット中の水分の影響を大きく受けることになることが確認された。

本試験で得られた 100℃以下の熱特性値は第 2 時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（試験温度 500℃、1000℃）の熱特性値は同程度であった。よって、次年度以降に実施する緩衝材を介した火災影響の解析的検討においては、本試験で得られた熱特性値を使用する計画である。

なお、本試験は限られた試験数での評価である。また、試験環境の僅かな変動が試験結果に影響を及ぼす懸念もあることから、今後さらにパラメータを増やしつつデータ取得を進めて、緩衝材及びベントナイトペレットの熱特性を把握していくことが望ましいと考えられる。

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

操業中に津波により地層処分施設に海水や津波土砂が流入することを想定した場合、ガラス固化体キャニスタが塩分の影響を強く受ける環境に晒されることが考えられる。そこで、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、海水環境下から比較的緩やかな腐食環境である海洋性湿潤大気環境まで、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（例えば、ガラス固化体が海水や津波土砂に半浸漬し、気液界面で海塩が析出・濃縮するような環境）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が抽出された。

以上より、今後、津波被害を想定し、海水や津波土砂に半浸漬したガラス固化体キャニスタ表面と大気との温度関係などを、種々の被災ケースごとに温度解析などを行って推定し、SCC などが生起する腐食環境の成立性を評価する必要があると考えられる。

また、放射線分解による環境の酸化性の加速の評価も必要で、例えば、一定量の海塩（外洋に面した海岸での代表的な海塩付着量である $1\text{g/m}^2[\text{NaCl}]$ ）を付与した定荷重、もしくは定ひずみ曲げ試験片を高温・高湿槽内に設置し、さらに高温・高湿槽内に低濃度のオゾンガスを注入す

ることによって高酸化性の加速試験を実施し、SCC感受性の上昇の有無を評価することが必要と考えられる。

【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、放射性廃棄物ハンドブック（平成24年度版）（2012）。
- 2 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
- 3 NIST ホームページ：<http://www.nist.gov/>
- 4 Fire Dynamics Simulator ホームページ：<http://code.google.com/p/fds-smv/>
- 5 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成22年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（1/2）、平成23年3月
- 6 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成19年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－、平成20年3月
- 7 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（1/2）、平成21年3月
- 8 Alfred Haack “Design fire scenarios”, Thematic Network FIT - Fire in Tunnels, Technical report – Part1, European Community (2001).
- 9 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－ 分冊2 地層処分の工学技術、第2次取りまとめ、1999年
- 10 Kathryn M. Butler, George W. Mulholland “Generation and Transport of Smoke Components”, Fire Technology 40, pp.149-176 (2004).
- 11 K.B. McGrattan, A. Hamins “Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001”, NUREG/CR-6793, NISTIR 6902, U.S. Nuclear Regulatory Commission (2002).
- 12 Kevin B. McGrattan *etal.* “Thermal Radiation from Large Pool Fires” NIST report NISTIR 6546 (2000)
- 13 Kevin B. McGrattan *etal.* “Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model” NIST Special Publication 1018-5 (2010)
- 14 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第1分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2）、平成25年3月
- 15 鋼構造耐火設計指針（2008）
- 16 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2
- 17 日本機会学会 「伝熱工学資料」改訂第5版（2009）
- 18 R. Siegel, J.R. Howel Thermal Radiation Heat Transfer 3rd edition, Hemisphere Publishing Corporation 1992
- 19 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版）第1編 軽水炉規格、2005年9月
- 20 動力炉・核燃料開発事業団、高レベル廃棄物固化体の特性、PNC TN8450 92-002(1992).
- 21 DURAN-GLASS ホームページ (<http://www.duran-glass.com>)
- 22 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成22年度地層処分技術調査等高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書(第1分冊)－遠隔操作技術高度化開発－、平成23年3月。
- 23 LINSEIS : THERMAL ANALYSIS & THERMO-PHYSICAL PROPERTIES (www.linseis.com)
- 24 ISO 834-8:2002、Fire-resistance tests -- Elements of building construction-Part 8: Specific requirements for non-loadbearing vertical separating elements

- 25 腐食防食協会 63-2 分科会、防食技術、39、641-652 (1990).
- 26 山本勝美、中山 元、宮坂松補、日工技術セミナー「装置用ステンレス鋼の選び方と使い方」、日本工業出版 (2013).
- 27 腐食防食協会編、材料学会入門、p.273、丸善(1993).
- 28 中山 元：第 48 回材料と環境討論会講演予稿集、A-315、腐食防食協会(2001).
- 29 中山 元、深谷祐一、明石正恒、澤 周補、菅野 毅、大和田 仁、大槻彰良、朝野英一；材料と環境 2004 講演予稿集、A-203、腐食防食協会 (2004).
- 30 天谷 尚、幸 英昭、金属、65,1053(1995).
- 31 機械システム振興協会、機械システム等のメンテナンス最適化のための高度メンテナンス技術開発に関するフィージビリティステディ、18-F-1、(財)エンジニアリング振興協会 (2007).
- 32 中山 元、平野隆、小林俊二、酒井忠嗣、第 49 回材料と環境討論会講演集、p.313-316、腐食防食協会 (2002).
- 33 中山 元、藤原寛明、第 51 回材料と環境討論会、B305、腐食防食協会(2004).
- 34 化学工学会編、塩化物 SCC 対策鋼使用実績データ集、化学工学会(1997).
- 35 明石正恒、第 56 回腐食防食シンポジウム資料、腐食防食協会、p.1 (1984).
- 36 中山 元、第 50 回材料と環境討論会、B-211 (2003).
- 37 M. Akashi, G. Nakayama, Stress-corrosion crack initiation process model for BWR plant materials, Proceedings of international symposium on plant aging and life predictions of corrodible structures, May15-18, 1995 Sapporo, Japan.
- 38 中山 元、明石正恒、材料と環境、48、p.162、腐食防食協会(1999).
- 39 中山 元、榊原洋平、材料と環境、62、p.117、腐食防食学会 (2013).
- 40 梅村文夫、松倉伸二、中村英之、川本輝明、防食技術、36、p.571、腐食防食協会 (1987).
- 41 発電用原子力設備規格 維持規格、JSME S NA1-2002、日本機械学会.
- 42 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及び鋭敏化の影響-、昭和 63 年 3 月.
- 43 原子力百科事典、放射線の直接作用と間接作用 (09-02-02-10)
- 44 原子力百科事典、ATOMIA、軽水炉における照射誘起応力腐食割れ (IASCC) (02-07-02-21)、http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=02-07-02-21
- 45 齋藤宣久、菊池英二、中山 元、山内 清、鈴木俊一、第 40 回腐食防食討論会、p.171、腐食防食協会 (1993).
- 46 腐食センターニュース、No.54、p.44、腐食防食協会 (2010).
- 47 中山 元、福田敬則、明石正恒、防食技術' 93 講演集、p.415 (1993).
- 48 R.S. Grass, R.A. Van Konynenburg, G.E. Overturf, CORROSION'86, Paper No. 258, NACE International (1986).
- 49 降矢 喬、村岡 進、田代晋吾、荒木邦夫、泊里治夫、藤原和雄、福塚敏夫、JAERI-M 82-061、日本原子力研究所 (1982).
- 50 G. Nakayama, Proceeding of MRS2005, Ghent, Belgium, Sep.11-15, Scientific Basis for Nuclear Waste management XXXIX, Volume 932, No.105 (2005).

【添付資料】

人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

熱境界条件を変えた試計算結果

【試算の結果概要】

4章の燃焼解析で得られたガス温度の最高温度継続時間をパラメータとした解析と、燃焼範囲（プールファイアの面積）をパラメータとした解析の2通りの試算を実施した。試算結果の概要は以下の通りである。

(1) 火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした伝熱・応力解析の結果概要

最高温度（720℃）の継続時間を15分及び30分とした試算では以下の結果が得られた。

- ・ガラス固化体単体モデルにおいては、最高温度継続時間が15分のケースでは、容器スカート部に近い領域でガラス温度が500℃を超えた（最高温度で569℃）が、ごく局所的な領域に留まっていた。この時のガラス固化体キャニスタの最高温度は716℃であり、このような熱荷重によりガラス固化体キャニスタのスカート付け根部において1.9%程度の塑性ひずみが生じた。
- ・ガラス固化体単体モデルにおいては、最高温度継続時間が30分のケースでは、ガラス固化体の温度が外周面全体の領域で500℃を超える（最高温度643℃）結果となった。この時のガラス固化体キャニスタの最高温度は719℃であり、このような熱荷重によりガラス固化体キャニスタのスカート付け根部において2.1%程度の塑性ひずみが生じた。
- ・ガラス固化体+オーバーパックモデルにおいては、最高温度継続時間が15分と30分いずれのケースにおいても、オーバーパック温度が400℃を超える領域は極めて狭い領域に限られ、また、中のガラス温度も最高で160℃程度にとどまっていた。このことから、火災入熱に対するオーバーパックの緩衝効果が大きいことが分かった。

現時点では、地下の閉鎖空間で720℃という高温が15～30分間継続する火災シナリオは考えられないため、上述の結果は火災に対する限界的な性能について仮想的に検討した結果と考える必要がある。この前提のもとで考察すると、ガラス固化体単体の状態で火害を受ける場合、ガラスの品質の面からは、700℃程度の高温に対しては15分程度が大きな影響を受けない限界の時間と考えられる。一方、ガラス固化体キャニスタについては最高温度の継続時間15分と30分いずれの条件でも2.0%程度の塑性ひずみが生じている。このような塑性ひずみによる破断等の評価を行うためには、高温時のSUS304Lの物理的性能に関する試験や、弾塑性による耐力評価手法の調査とその結果に基づく評価、などが必要と考えられる。

(2) 燃焼範囲をパラメータとした燃焼解析、伝熱・応力解析の結果概要

燃焼範囲（プールファイアの面積）を小さくした試算では以下の結果が得られた。

- ・4章本文で述べた先行解析に比べて燃焼時間は8倍ほど（先行解析の燃焼時間50秒程度に対して、本試解析では380秒程度）長くなった。
- ・廃棄体真上の空間（天井4m）におけるガスの最高温度は、先行解析の720℃程度に対して、

本試計算では 450℃程度であった。

- ・上記の燃焼解析から得られた廃棄体周囲の熱流束を熱境界条件とした伝熱解析を行った。その結果、ガラス固化体単体モデルにおいては、ガラスの最高温度は 460℃程度であった。また、ガラス固化体キャニスタについてはスカート部で 700℃程度まで温度が上昇する領域が生じ、このような熱荷重によりガラス固化体キャニスタのスカート付け根部において 5.3%程度の塑性ひずみが生じた。
- ・ガラス固化体+オーバーパックモデルにおいては、オーバーパック温度は最高でも 260℃程度、また、中のガラス温度はほとんど影響を受けない結果となり、火災入熱に対するオーバーパックの緩衝効果が大きいことが分かった。

本試解析の火災シナリオは、前述の最高温度継続時間を延長するシナリオに比べると可能性がいくらか考え得るが、伝熱解析の熱境界条件を厳しくするために無理に設定したシナリオであることから、やはり仮想的に検討した結果と考える必要がある。

ガラス固化体単体モデルにおいて、先行解析のガラスの最高温度は 160℃程度であったが、本試解析では 460℃程度となった。最高温度の比較では先行解析の方が高いことから、火災継続時間がガラス固化体温度に及ぼす影響が大きいと考えられる。また、先行解析ではガス温度を伝熱解析の境界条件として与えたが、本試計算では熱流束を与えており、この違いも影響しているものと考えられる。ただし、本試計算においても先行解析同様に、ガラスの平均転移温度の 500℃程度には至っておらず、火災がガラス固化体の品質に及ぼす影響は小さいと判断される。

一方、ガラス固化体キャニスタについては、上記の熱境界条件の与え方の違いが影響してか、大きな塑性ひずみが生じる結果となった。このような塑性ひずみによる破断等の評価については前述の通りである。

目 次

はじめに	1
第 1 章 火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした解析	1
1.1 解析条件	1
1.2 物性値	4
1.3 解析結果	7
1.3.1 伝熱解析	7
1.3.2 応力解析	19
第 2 章 燃焼範囲をパラメータとした解析	41
2.1 燃焼解析	41
2.2 伝熱解析	50
2.2.1 ガラス固化体単体モデル	50
2.2.2 ガラス固化体+オーバーパックモデル	60
2.3 応力解析	70
2.3.1 ガラス固化体単体モデル	70
2.3.2 ガラス固化体+オーバーパックモデル	91
第 3 章 考察	112
3.1 燃焼解析	112
3.2 伝熱・応力解析	112
3.2.1 ガラス単体モデル	112
3.2.2 ガラス固化体+オーバーパックモデル	113
参考文献	114

図 表 目 次

図 1.1	熱伝導解析における境界条件（雰囲気ガス温度の時刻歴変化）	2
図 1.2	熱伝導解析における境界条件（雰囲気ガス温度の時刻歴変化）	3
図 1.3	応力解析に用いた物性値（ヤング率）	5
図 1.4	応力解析に用いた物性値（線膨張係数）	5
図 1.5	応力解析に用いた物性値（降伏応力）	6
図 1.6	ガラス固化体単体モデルの温度分布（Case1：720℃×15分）	8
図 1.7	ガラス固化体単体モデルの温度分布（Case1：720℃×15分）	9
図 1.8	ガラス固化体単体モデルの温度分布（Case2：720℃×30分）	10
図 1.9	ガラス固化体単体モデルの温度分布（Case2：720℃×30分）	11
図 1.10	ガラス固化体+OPモデルの温度分布（Case1：720℃×15分）	13
図 1.11	ガラス固化体+OPモデルの温度分布（Case1：720℃×15分）	14
図 1.12	ガラス固化体+OPモデルの温度分布（Case1：720℃×15分）	15
図 1.13	ガラス固化体+OPモデルの温度分布（Case2：720℃×30分）	16
図 1.14	ガラス固化体+OPモデルの温度分布（Case2：720℃×30分）	17
図 1.15	ガラス固化体+OPモデルの温度分布（Case2：720℃×30分）	18
図 1.16	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布（Case1：720℃×15分）	20
図 1.17	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布（Case1：720℃×15分）	21
図 1.18	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布（Case1：720℃×15分）	22
図 1.19	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布（Case1：720℃×15分）	23
図 1.20	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布（Case1：720℃×15分）	24
図 1.21	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布（Case2：720℃×30分）	25
図 1.22	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布（Case2：720℃×30分）	26
図 1.23	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布（Case2：720℃×30分）	27
図 1.24	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布（Case2：720℃×30分）	28
図 1.25	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布（Case2：720℃×30分）	29
図 1.26	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布（Case1：720℃×15分）	31
図 1.27	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布（Case1：720℃×15分）	32
図 1.28	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布（Case1：720℃×15分）	33
図 1.29	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布（Case1：720℃×15分）	34
図 1.30	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布（Case1：720℃×15分）	35
図 1.31	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布（Case2：720℃×30分）	36
図 1.32	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布（Case2：720℃×30分）	37
図 1.33	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布（Case2：720℃×30分）	38
図 1.34	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布（Case2：720℃×30分）	39
図 1.35	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布（Case2：720℃×30分）	40
図 2.1	追加燃焼解析モデルの概念	43

図 2.2	収納・検査室内の燃料蒸発量、発熱量及び熱損失.....	43
図 2.3	250 秒における火災の様子.....	44
図 2.4	250 秒における温度分布 [°C].....	44
図 2.5	250 秒における酸素濃度分布 [g O ₂ /g ガス].....	45
図 2.6	250 秒におけるガス流速分布 (絶対値) [m/s].....	46
図 2.7	火災の真上 (天井 4 m 下) における温度や化学種濃度.....	47
図 2.8	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.....	47
図 2.9	ガラス固化体への熱流束の時間による変化 (多項式近似)	48
図 2.10	オーバーパックへの熱流束の時間による変化 (多項式近似)	49
図 2.11	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	51
図 2.12	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	52
図 2.13	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	53
図 2.14	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	54
図 2.15	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	55
図 2.16	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	56
図 2.17	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	57
図 2.18	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	58
図 2.19	ガラス固化体単体モデルの温度分布.....	59
図 2.20	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	61
図 2.21	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	62
図 2.22	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	63
図 2.23	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	64
図 2.24	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	65
図 2.25	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	66
図 2.26	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	67
図 2.27	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	68
図 2.28	ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布.....	69
図 2.29	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布.....	71
図 2.30	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布.....	72
図 2.31	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布.....	73
図 2.32	ガラス固化体単体モデルの相当応力分布.....	74
図 2.33	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布.....	75
図 2.34	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布.....	76
図 2.35	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布.....	77
図 2.36	ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布.....	78
図 2.37	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布.....	79
図 2.38	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布.....	80
図 2.39	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布.....	81

図 2.40	ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布	82
図 2.41	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布	83
図 2.42	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布	84
図 2.43	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布	85
図 2.44	ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布	86
図 2.45	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布	87
図 2.46	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布	88
図 2.47	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布	89
図 2.48	ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布	90
図 2.49	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布	92
図 2.50	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布	93
図 2.51	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布	94
図 2.52	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布	95
図 2.53	ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布	96
図 2.54	ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布	97
図 2.55	ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布	98
図 2.56	ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布	99
図 2.57	ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布	100
図 2.58	ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布	101
図 2.59	ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布	102
図 2.60	ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布	103
図 2.61	ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布	104
図 2.62	ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布	105
図 2.63	ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布	106
図 2.64	ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布	107
図 2.65	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布	108
図 2.66	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布	109
図 2.67	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布	110
図 2.68	ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布	111
図 3.1	ガラス固化体周りの雰囲気ガス温度	112

はじめに

先行解析の燃焼解析結果から設定した火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとして仮想的に変化させた解析と、先行解析における燃焼解析で設定した燃焼範囲をパラメータとした解析の2通りの試計算を実施した。

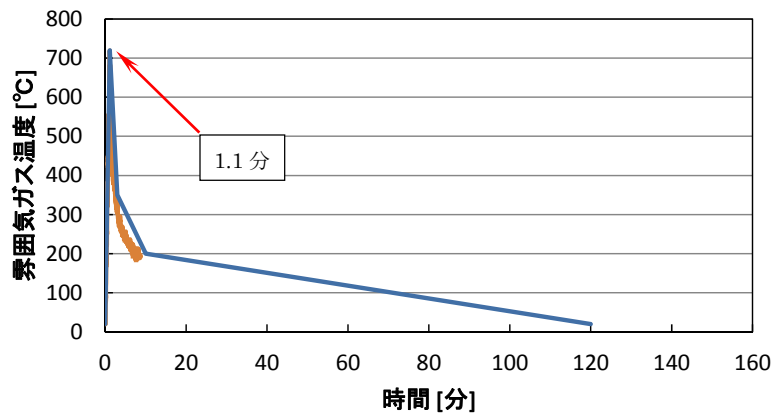
試計算結果について記述するにあたり、本報では主に、先行解析から見直された解析方法や条件及び得られた結果について述べる。解析コードは先行解析と同様に、燃焼解析には FDS、伝熱解析及び応力解析には ABAQUS を用いた。また、燃焼解析、伝熱・応力解析とも、先行解析と同じモデルを用いた。その他、共通となる解析手法や条件については4章本文を参照されたい。

第1章 火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした解析

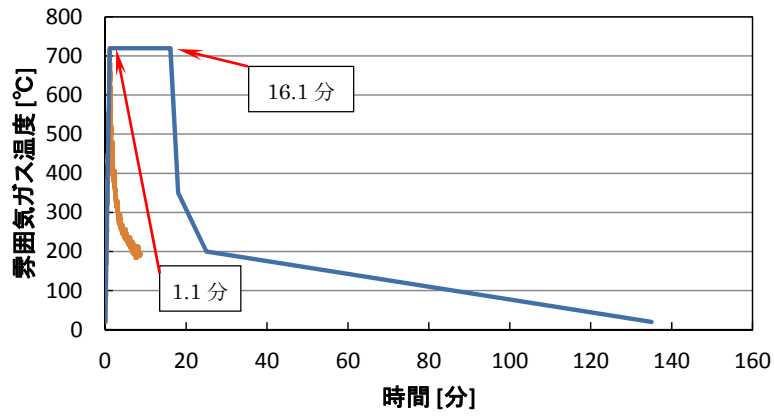
1.1 解析条件

先行解析では、図 1.1(a)及び図 1.2(a)に示すような、ガラス固化体単体またはガラス固化体+オーバーパック周辺の雰囲気ガス温度時刻歴変化を多直線近似したものを熱境界条件として与えた。この条件においては、雰囲気ガス温度は最高で 720℃まで上昇するが、その継続時間はゼロ分で、最高温度に到達すると同時に温度が下がり始めるという境界条件であった。

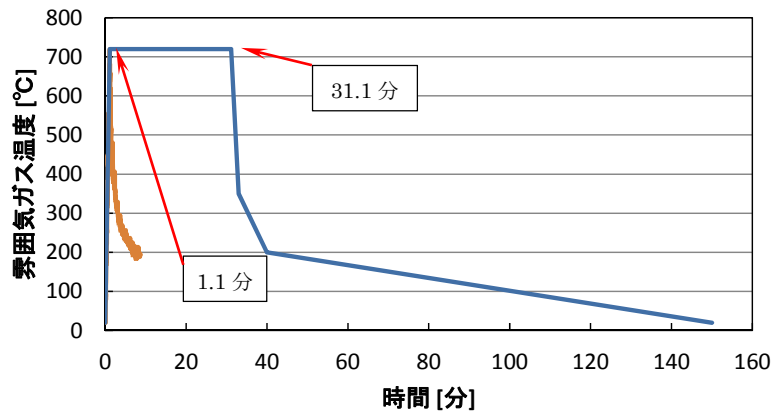
ここでは、火災曲線における最高温度継続時間を①15分、②30分の2条件としたときの伝熱解析及び応力解析を ABAQUS を用いて実施した。それぞれの条件における火災曲線を図 1.1-1(b)(c)及び図 1.2(b)(c)に示す。



(a) 先行解析 (720°C×0分)



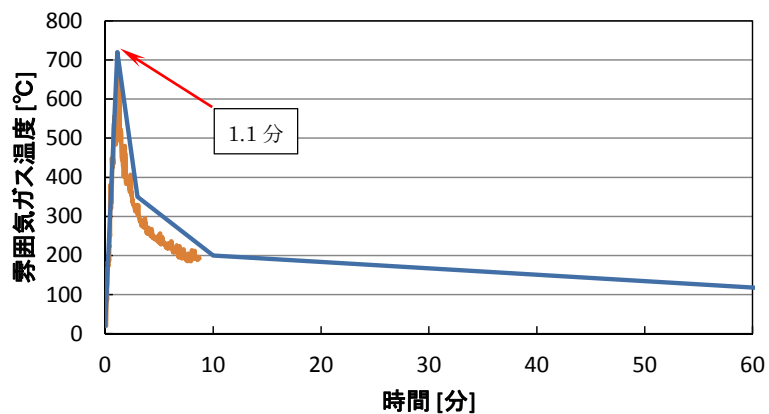
(b) Case1 (720°C×15分)



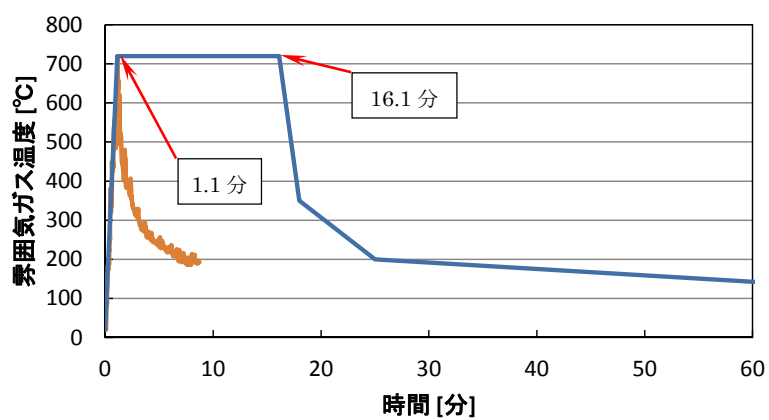
(c) Case2 (720°C×30分)

図 1.1 熱伝導解析における境界条件 (雰囲気ガス温度の時刻歴変化)

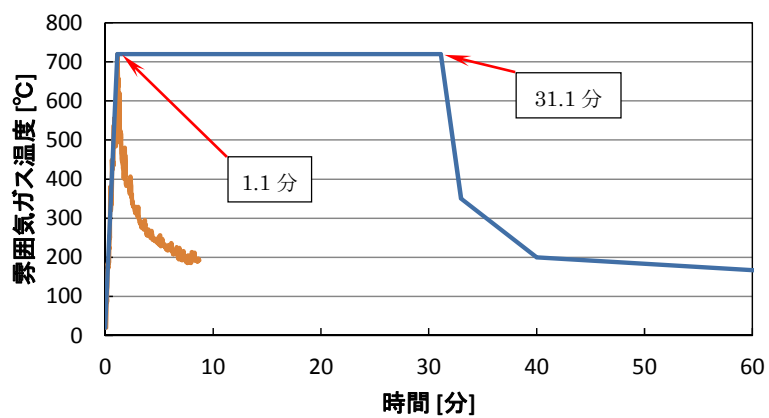
(橙：燃焼解析結果，青：解析で与えた境界条件)



(a) 先行解析 (720°C×0分)



(b) Case1 (720°C×15分)



(c) Case2 (720°C×30分)

図 1.2 熱伝導解析における境界条件 (雰囲気ガス温度の時刻歴変化)
 ～ 火災発生 0 分から 60 分までを拡大 ～

1.2 物性値

伝熱解析には先行解析で用いた熱物性値と同じものを用いた。応力解析に用いた物性値のうち、ガラス固化体容器 (SUS304L) については、先行解析では 425°C までしか定義していなかったが、後述する伝熱解析結果において、容器の温度が局所的にはあるが 700°C 程度になるという結果が得られたため、425°C 以上の温度領域については SUS304 の 650°C までのデータ [1] を参考にして外挿した値を用いた。図 1.3 から図 1.5 に応力解析で用いた SUS304L の物性値を示す。また、以下に SUS304 のデータを用いた外挿方法を記す。ここに示す SUS304L の物性値は、2 章にて後述する燃焼範囲をパラメータとした解析における応力解析でも用いている。

<材料データの外挿方法>

1) ヤング率

SUS304 の 425°C までのヤング率の値は、SUS304L の 425°C までの値とほぼ一致していることから、425°C 以上の温度領域における SUS304L の値は、SUS304 のデータで代用することとした。図 1.3 に SUS304L の 425°C までの値と SUS304 の 425°C から 650°C までの値を示す。

2) 線膨張係数

図 1.4 に示すように、425°C 以下の領域において SUS304 の値は SUS304L の値と似た傾向で直線的に増加していることがわかる。そこで、SUS304 の 425°C の値と 650°C の値から線膨張係数の増加率を算出し、SUS304L についても 650°C まで SUS304 と同じ増加率で線膨張係数の値が増えると仮定した。SUS304L の外挿値を図中の破線で示す。

3) 降伏応力

図 1.5(b) に示すように、425°C 以下の領域において SUS304 の値は SUS304L の値と似た傾向で減少していることがわかる。そこで、SUS304 の 425°C の値と 650°C の値から降伏応力の減少率を算出し、SUS304L についても 650°C まで SUS304 と同じ減少率で降伏応力の値が下がると仮定した。SUS304L の外挿値を図中の破線で示す。

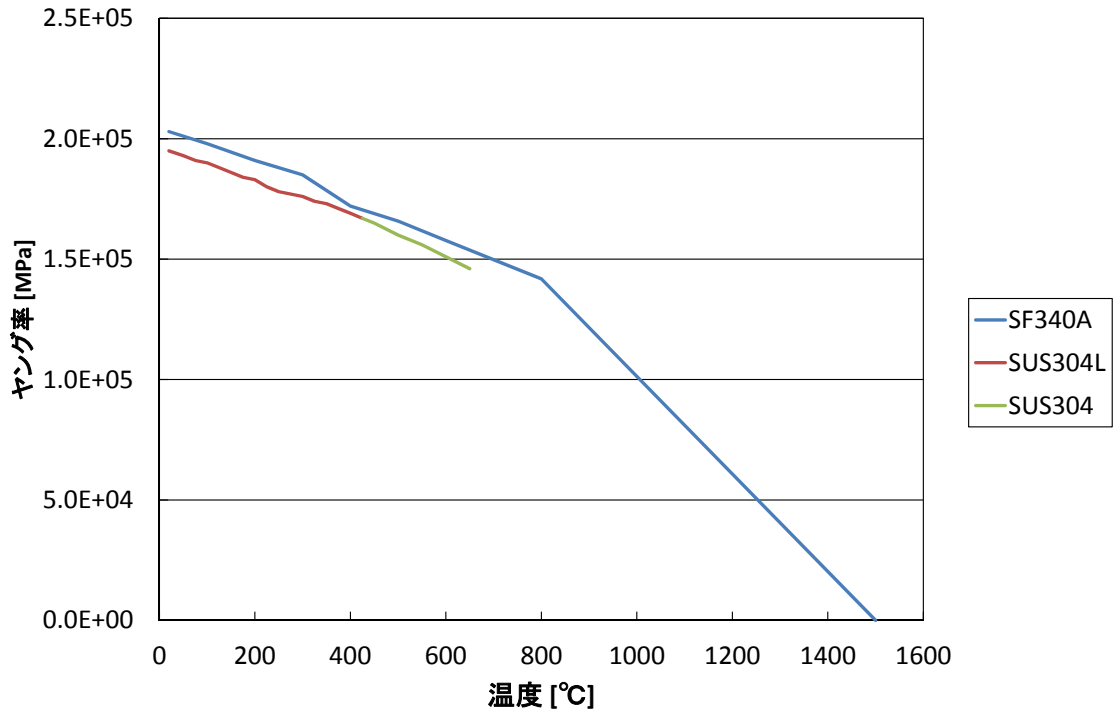


図 1.3 応力解析に用いた物性値 (ヤング率)

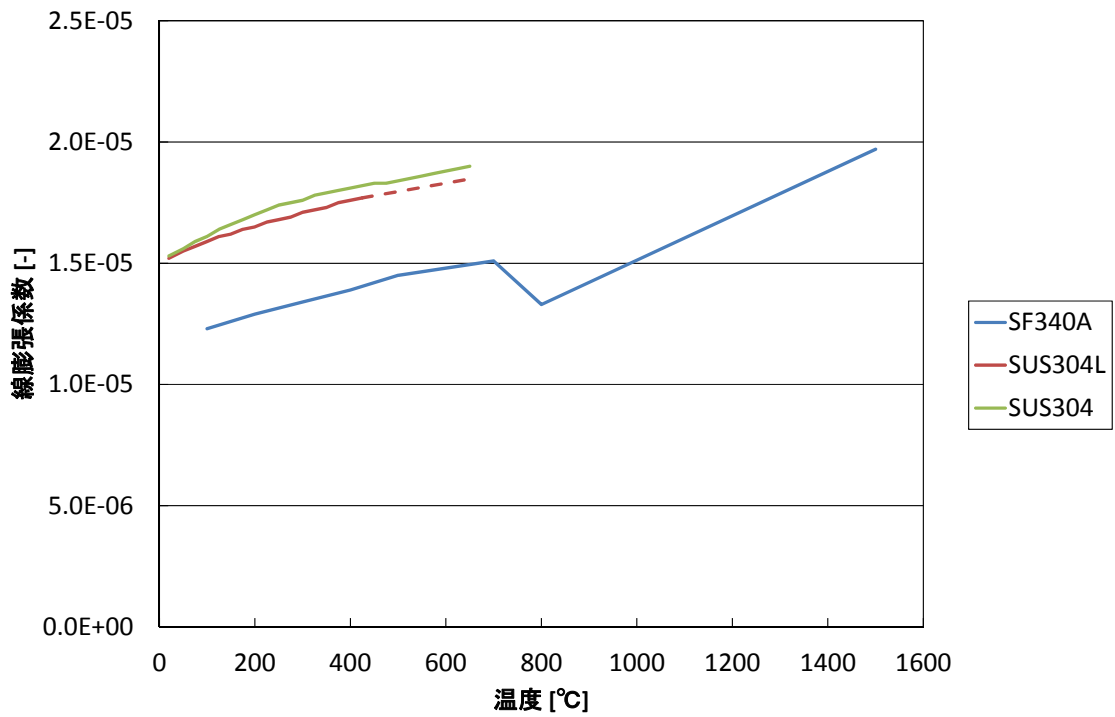
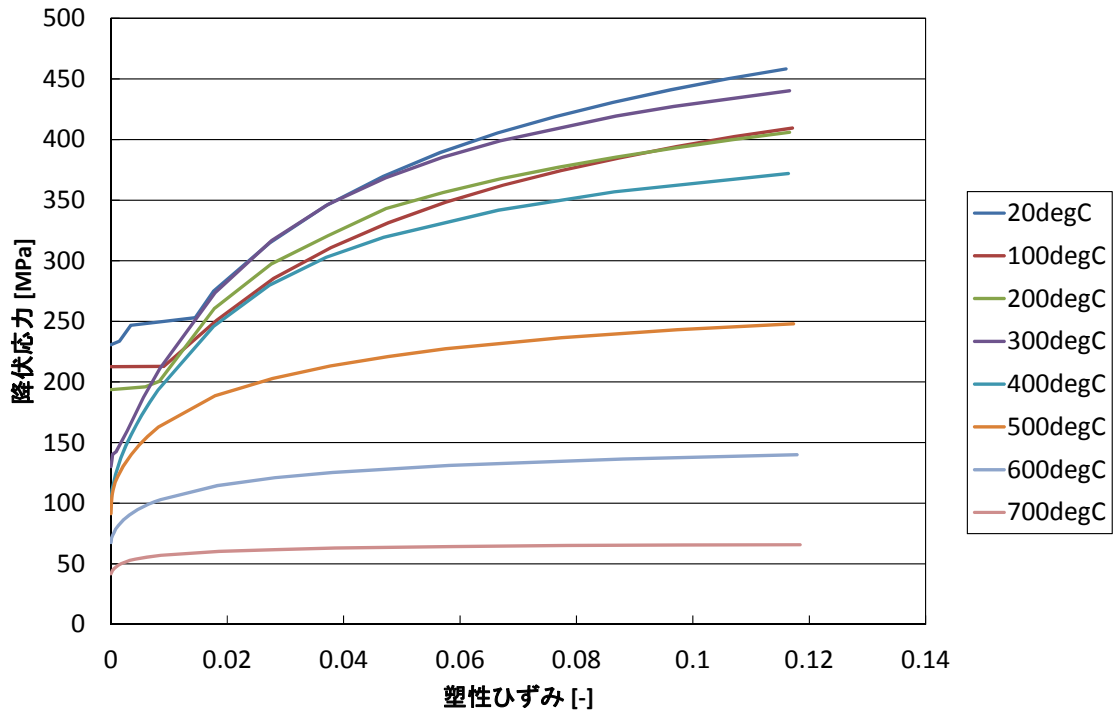
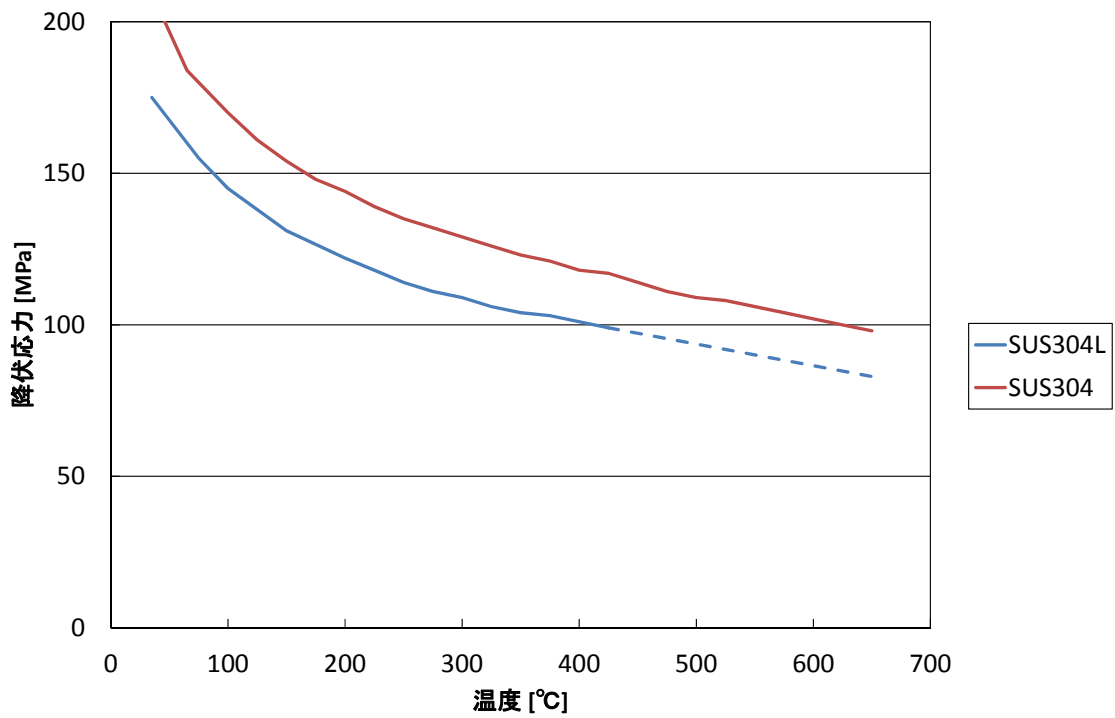


図 1.4 応力解析に用いた物性値 (線膨張係数)



(a) SF340A



(b) SUS304L (弾完全塑性材料として定義)

図 1.5 応力解析に用いた物性値 (降伏応力)

1.3 解析結果

1.3.1 伝熱解析

(1) ガラス固化体単体モデル

図 1.1 及び図 1.2 の多直線で示した火災曲線を用いて伝熱解析を行った。図 1.6 及び図 1.7 に最高温度継続時間 15 分の伝熱解析の結果得られた温度時刻歴変化のうち、(a)火災前（定常温度状態）、(b)火災発生から 1.1 分（雰囲気ガス温度が最高温度 720℃に到達時）、(c)火災発生から 16.1 分、(d)火災発生から 18 分、(e)火災発生から 25 分、(f)火災発生から 135 分の各時点における温度分布図を示す。温度分布図は、容器とガラスの切断図とガラスのみを表示した時の切断図を示しており、図中には表示したモデル範囲における最高温度を記している。

同様に、図 1.8 及び図 1.9 に最高温度継続時間 30 分の伝熱解析の結果得られた温度時刻歴変化のうち、(a)火災前（定常温度状態）、(b)火災発生から 1.1 分（雰囲気ガス温度が最高温度 720℃に到達時）、(c)火災発生から 31.1 分、(d)火災発生から 33 分、(e)火災発生から 40 分、(f)火災発生から 150 分の各時点における温度分布図を示す。

これらの図より、以下のことがわかる。

- ・ガラス固化体は容器のスカート部が高温になりやすい。
- ・最高温度継続時間が 15 分のケースでは、温度が高くなる容器スカート部に近い領域で局所的に 500℃を超え、最高温度は 570℃近くになる。
- ・最高温度継続時間が 30 分のケースでは、ガラス固化体容器に接したガラス固化体外面部において 500℃を超える領域が広がり、最高温度は 640℃を超える。

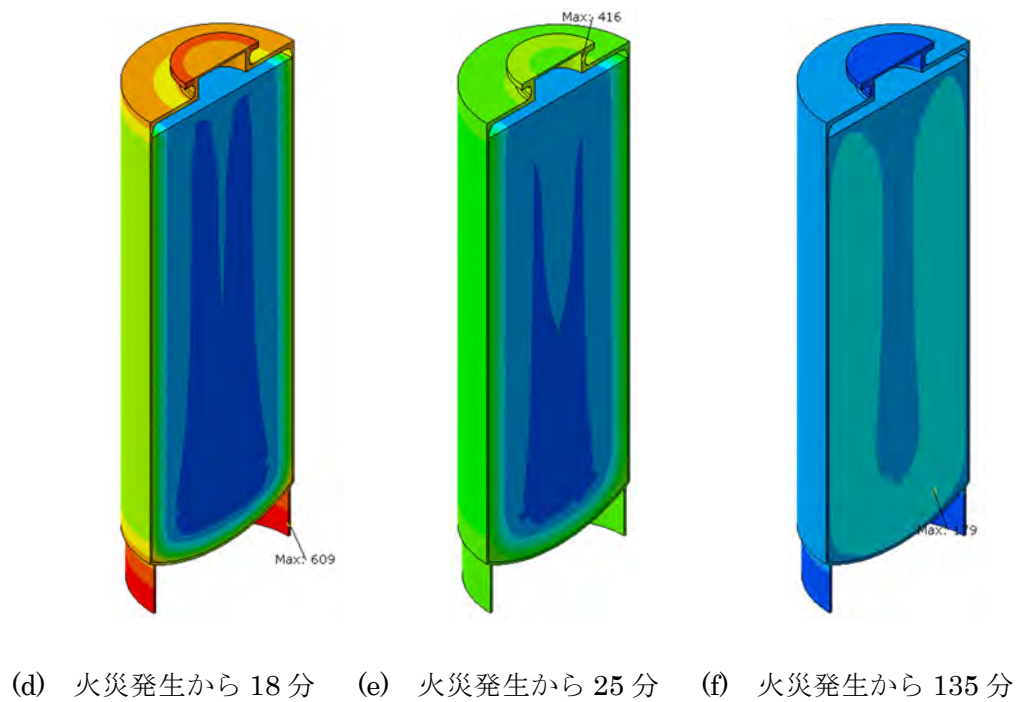
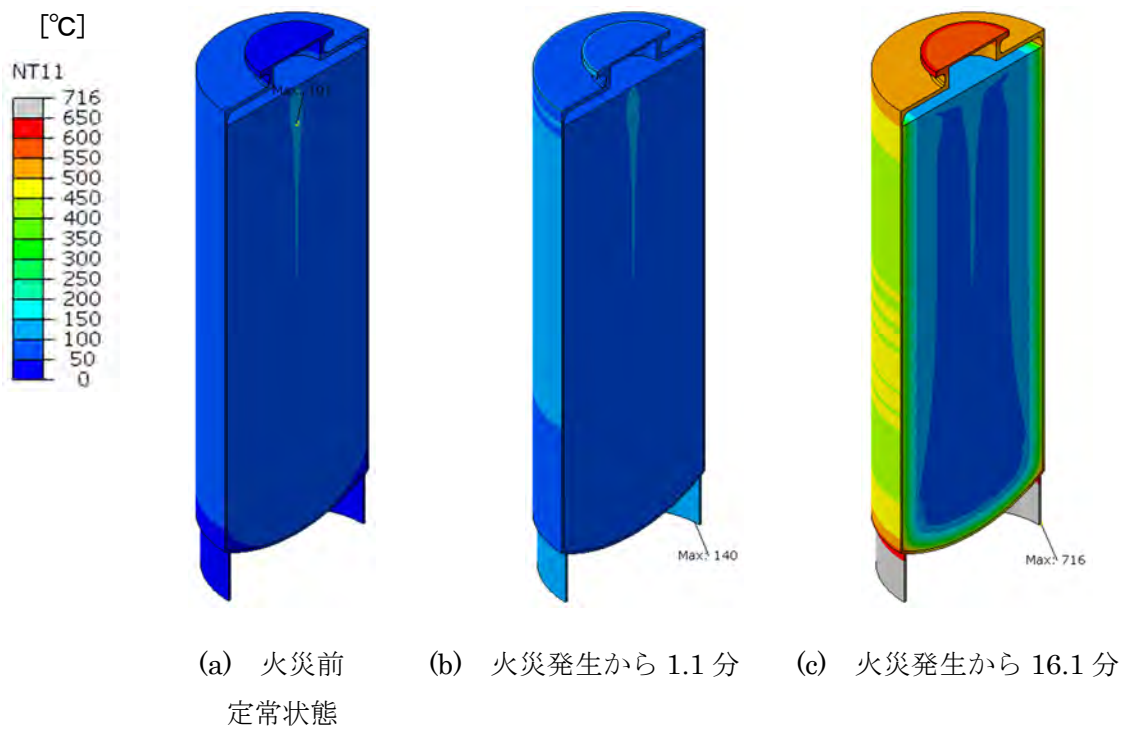


図 1.6 ガラス固化体単体モデルの温度分布 (Case1 : 720°C×15 分)
 ～ 容器+ガラスの切断図 ～

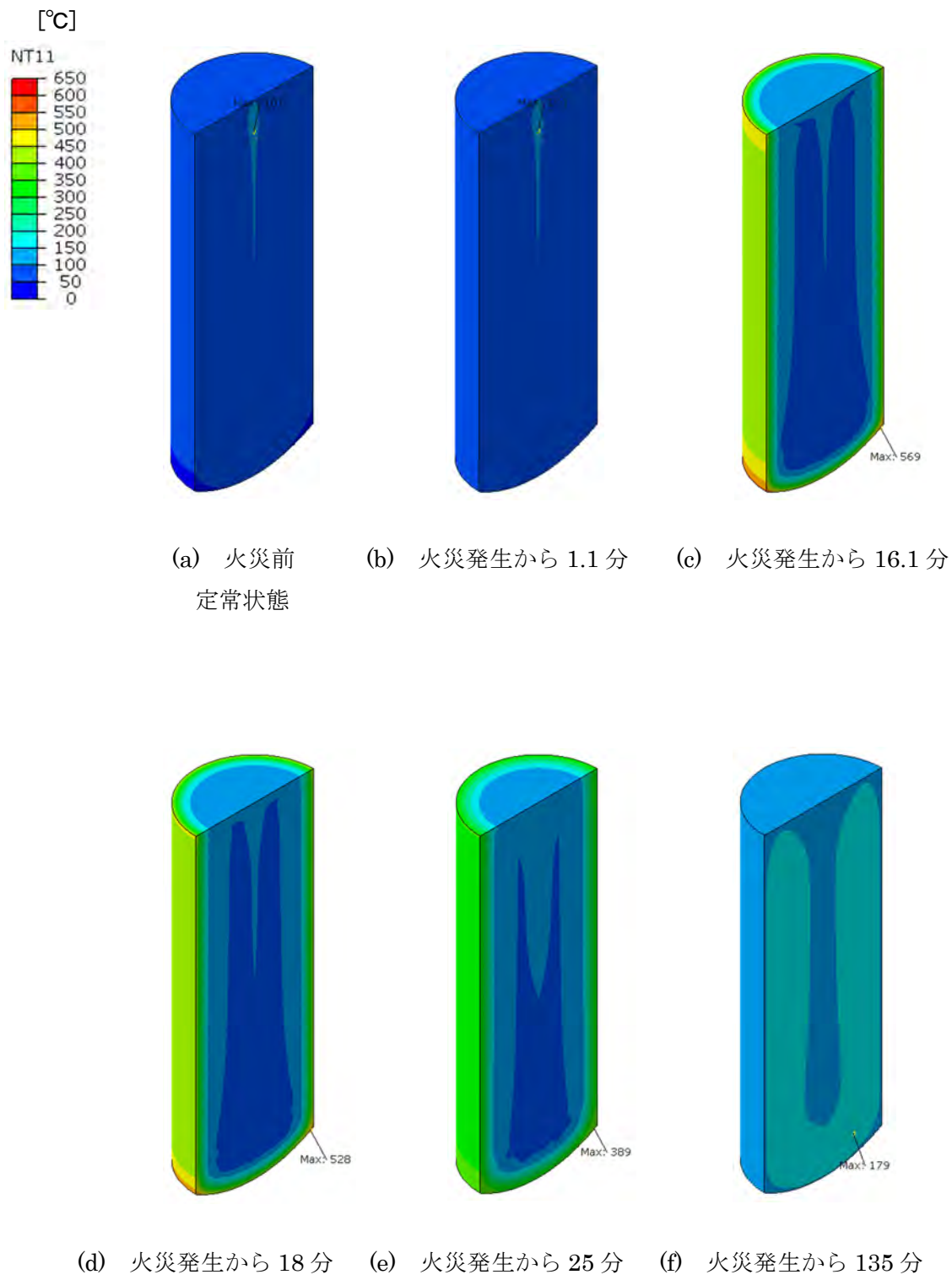


図 1.7 ガラス固化体単体モデルの温度分布 (Case1 : 720°C×15 分)
 ～ ガラスのみ表示した切断図 ～

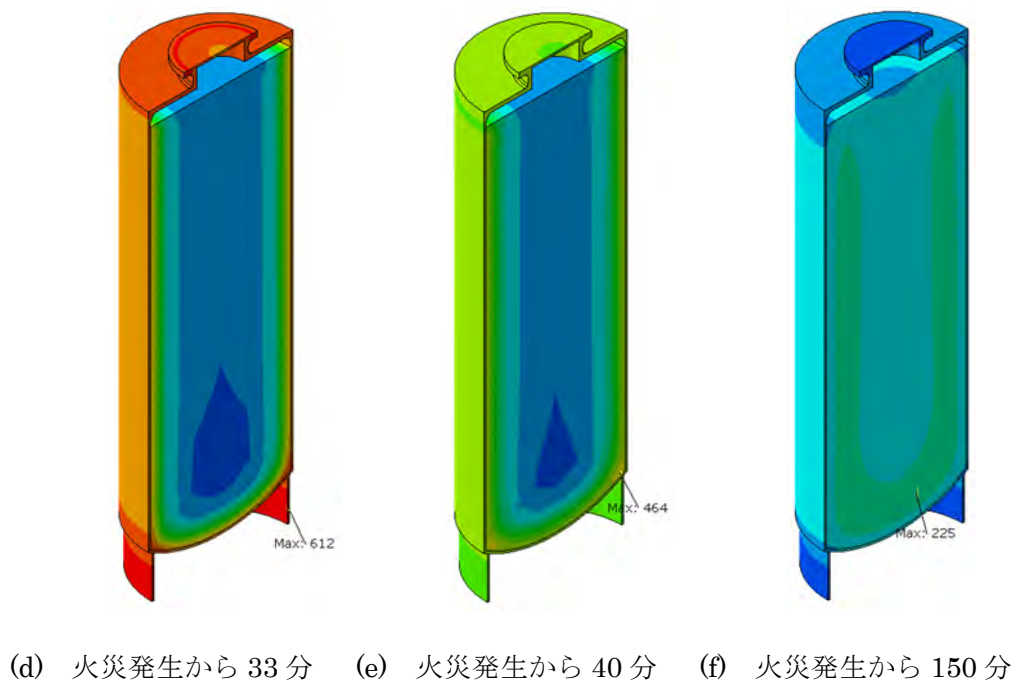
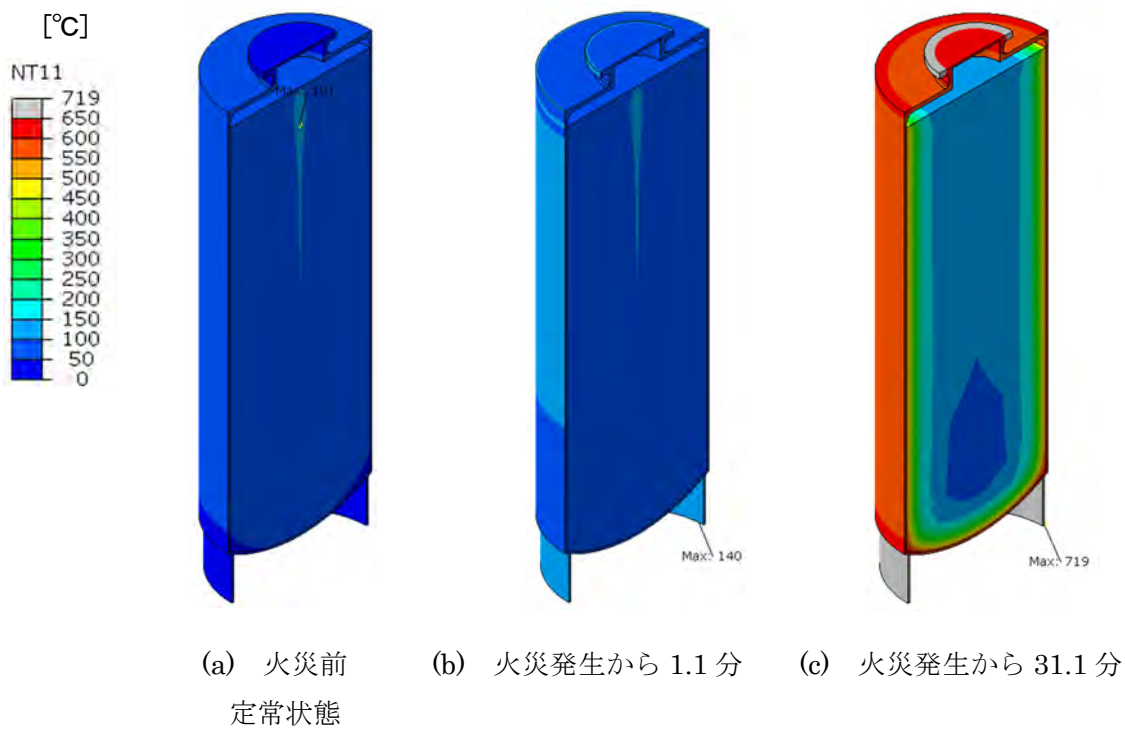


図 1.8 ガラス固化体単体モデルの温度分布 (Case2 : 720°C×30 分)
～ 容器+ガラスの切断図 ～

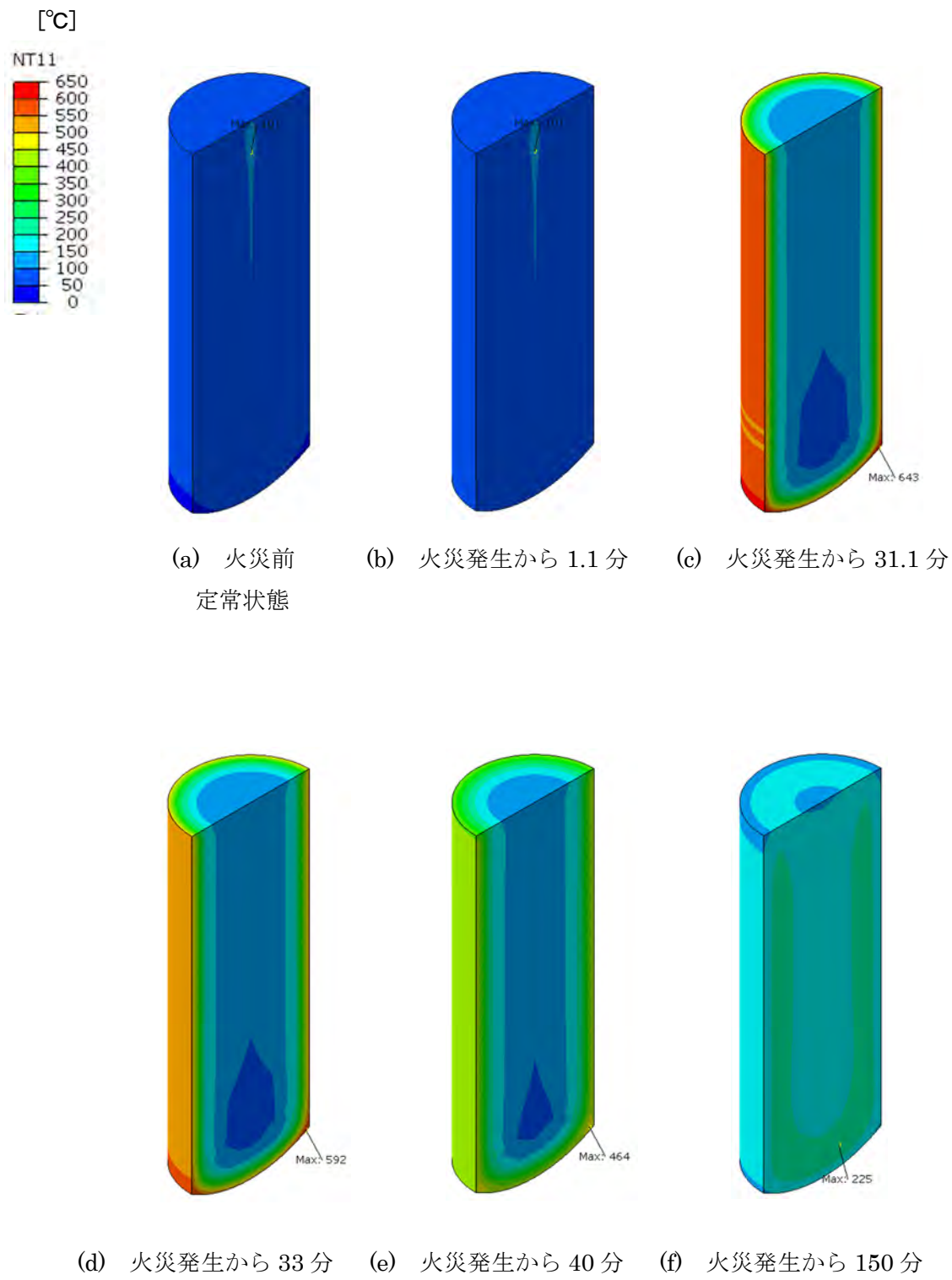


図 1.9 ガラス固化体単体モデルの温度分布 (Case2 : 720°C×30 分)
 ～ ガラスのみ表示した切断図 ～

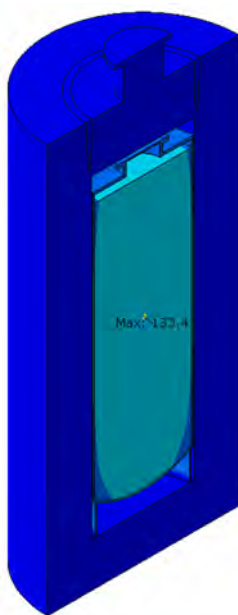
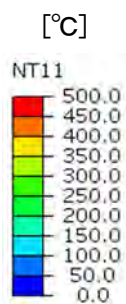
(2) ガラス固化体+オーバーパックモデル

ガラス固化体単体モデルと同様に、図 1.1 及び図 1.2 の多直線で示した火災曲線を用いて伝熱解析を行った。図 1.10 から図 1.12 に最高温度継続時間 15 分の伝熱解析の結果得られた温度時刻歴変化のうち、(a)火災前（定常温度状態）、(b)火災発生から 1.1 分（雰囲気ガス温度が最高温度 720°Cに到達時）、(c)火災発生から 16.1 分、(d)火災発生から 18 分、(e)火災発生から 25 分、(f)火災発生から 135 分の各時点における温度分布図を示す。温度分布図は、オーバーパックとガラス固化体（容器+ガラス）の切断図、ガラス固化体（容器+ガラス）の切断図、及びガラスのみを表示した時の切断図を示しており、図中には表示したモデル範囲における最高温度を記している。

同様に、図 1.13 及び図 1.15 に最高温度継続時間 30 分の伝熱解析の結果得られた温度時刻歴変化のうち、(a)火災前（定常温度状態）、(b)火災発生から 1.1 分（雰囲気ガス温度が最高温度 720°Cに到達時）、(c)火災発生から 31.1 分、(d)火災発生から 33 分、(e)火災発生から 40 分、(f)火災発生から 150 分の各時点における温度分布図を示す。

これらの図より、以下のことがわかる。

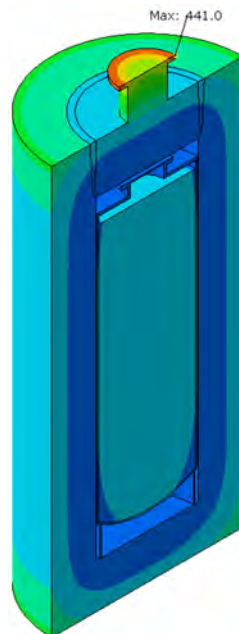
- ・オーバーパックは蓋上部が高温になりやすいが、オーバーパックの板厚が厚く、熱容量が大きいため、400°Cを超えるような高温になる領域は極めて狭い領域に限られる。
- ・ガラス固化体の温度に顕著な変化が表れてくるのは、火災発生から数十分経過してからである
- ・ガラス固化体容器は、容器が接しているオーバーパック底部からの熱伝導により、スカート部から温度上昇するとともに、オーバーパック胴部内面のギャップを通じた入熱により、側面からも緩やかに加熱される。
- ・火災入熱に対するオーバーパックの緩衝効果は大きく、ガラス固化体容器の最高温度は最高温度継続時間が 30 分のケースにおいても 160°C程度であり、ガラスの最高到達温度は 150°C以下である（初期状態における最高温度は 133.4°C）。



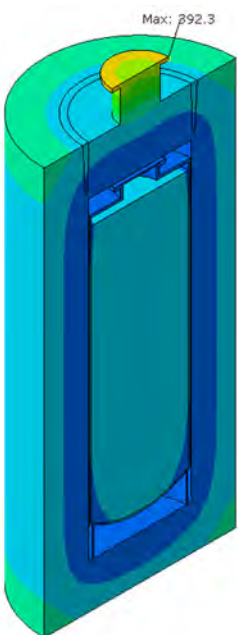
(a) 火災前
定常状態



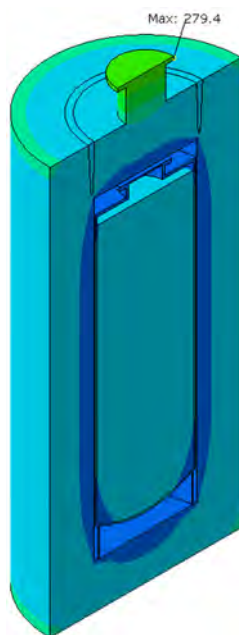
(b) 火災発生から 1.1 分



(c) 火災発生から 16.1 分



(d) 火災発生から 18 分



(e) 火災発生から 25 分



(f) 火災発生から 135 分

図 1.10 ガラス固化体+OP モデルの温度分布 (Case1 : 720°C×15 分)
～ OP+ガラス固化体容器+ガラスの切断図 ～

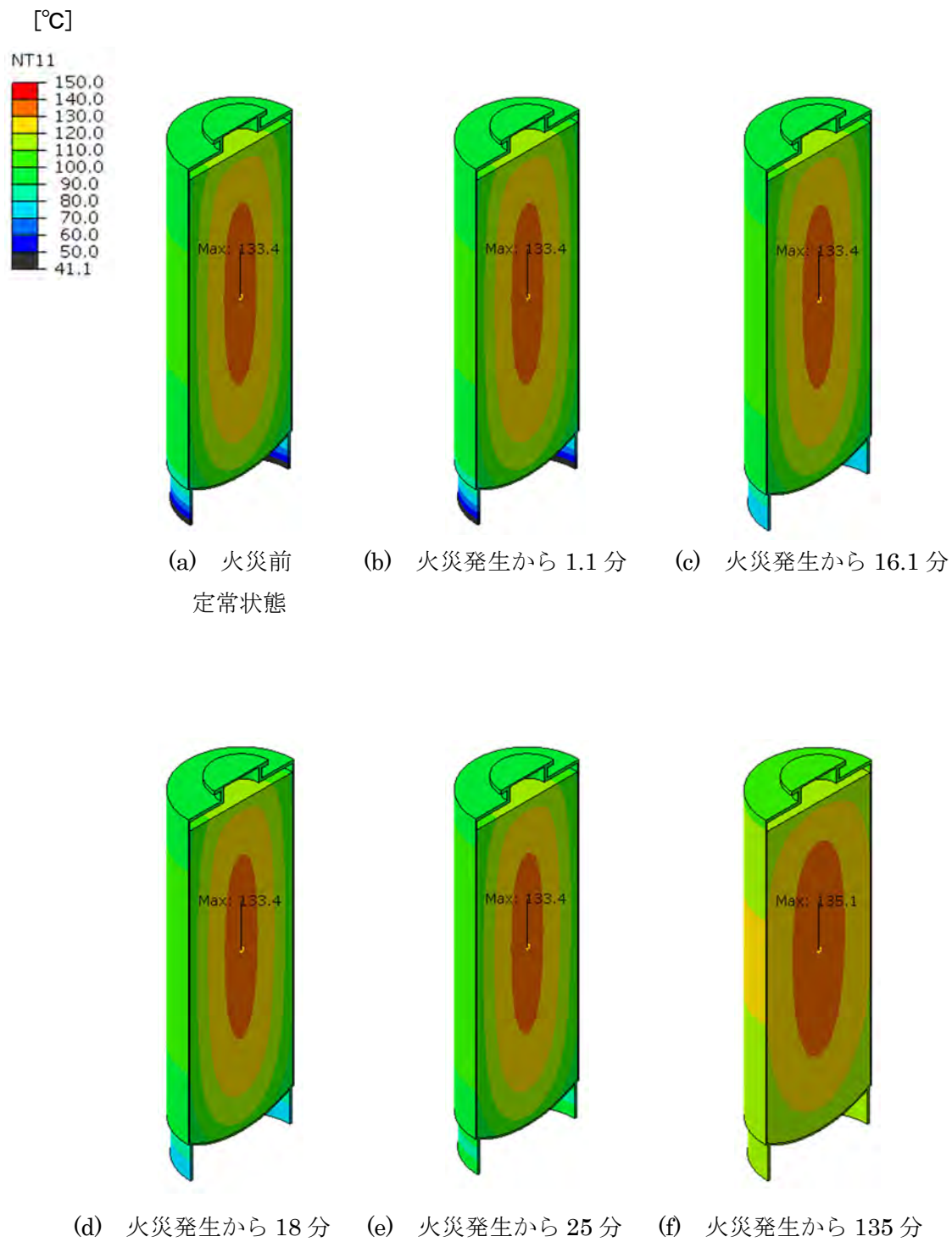


図 1.11 ガラス固化体+OP モデルの温度分布 (Case1 : 720°C×15 分)
 ～ ガラス固化体容器+ガラスの切断図 ～

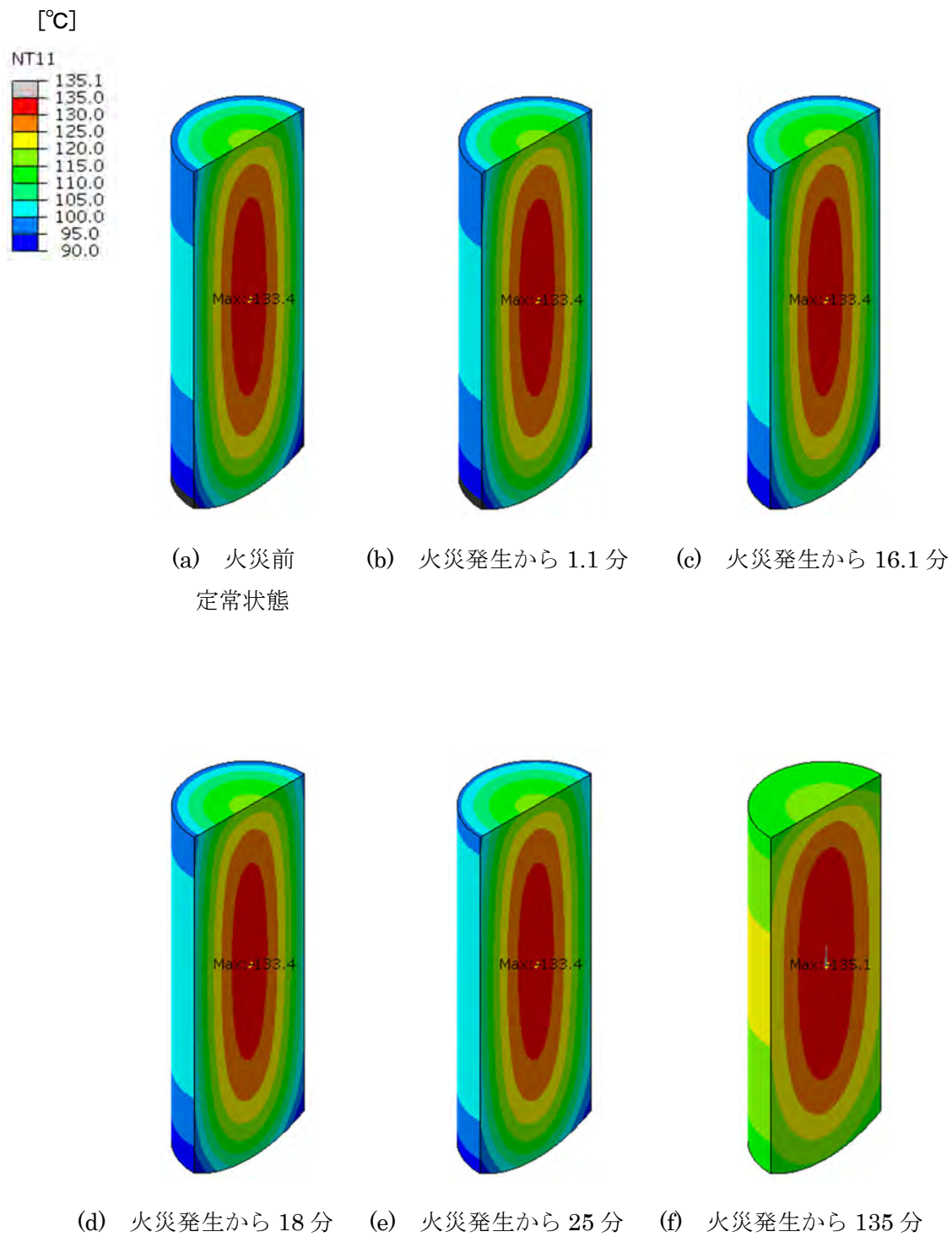
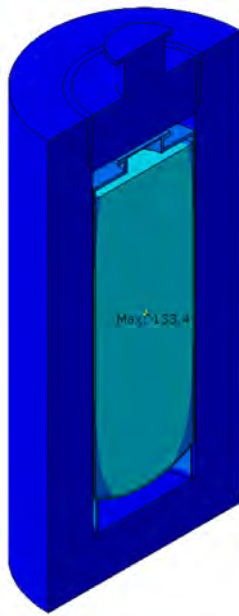
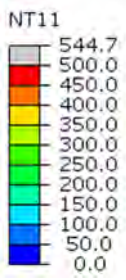
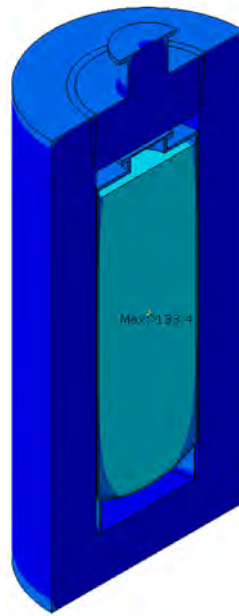


図 1.12 ガラス固化体+OP モデルの温度分布 (Case1 : 720°C×15 分)
 ～ ガラスのみ表示した切断図 ～

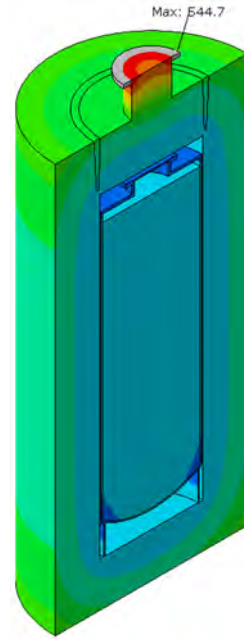
[°C]



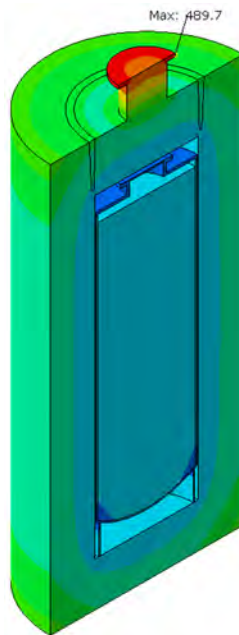
(a) 火災前
定常状態



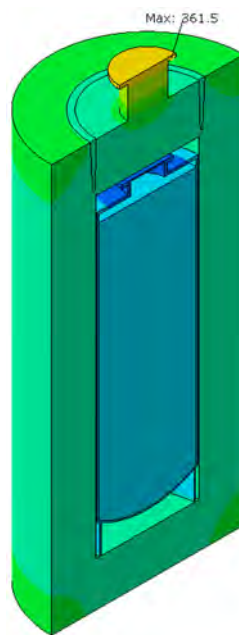
(b) 火災発生から 1.1 分



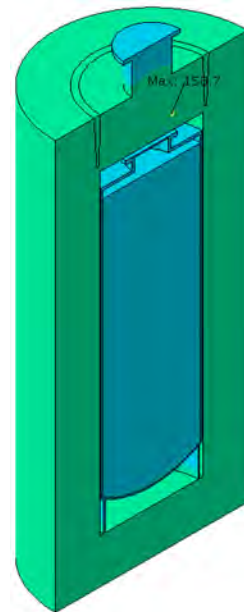
(c) 火災発生から 31.1 分



(d) 火災発生から 33 分



(e) 火災発生から 40 分

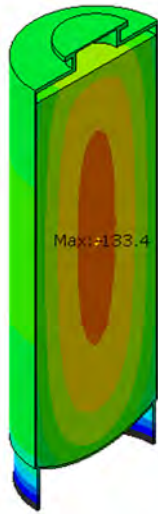
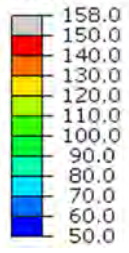


(f) 火災発生から 150 分

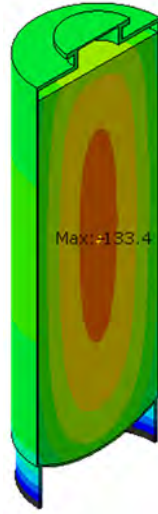
図 1.13 ガラス固化体+OP モデルの温度分布 (Case2 : 720°C×30 分)
～ OP+ガラス固化体容器+ガラスの切断図 ～

[°C]

NT11



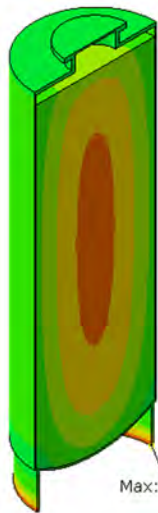
(a) 火災前
定常状態



(b) 火災発生から 1.1 分



(c) 火災発生から 31.1 分



(d) 火災発生から 33 分



(e) 火災発生から 40 分



(f) 火災発生から 150 分

図 1.14 ガラス固化体+OP モデルの温度分布 (Case2 : 720°C×30 分)

～ ガラス固化体容器+ガラスの切断図 ～

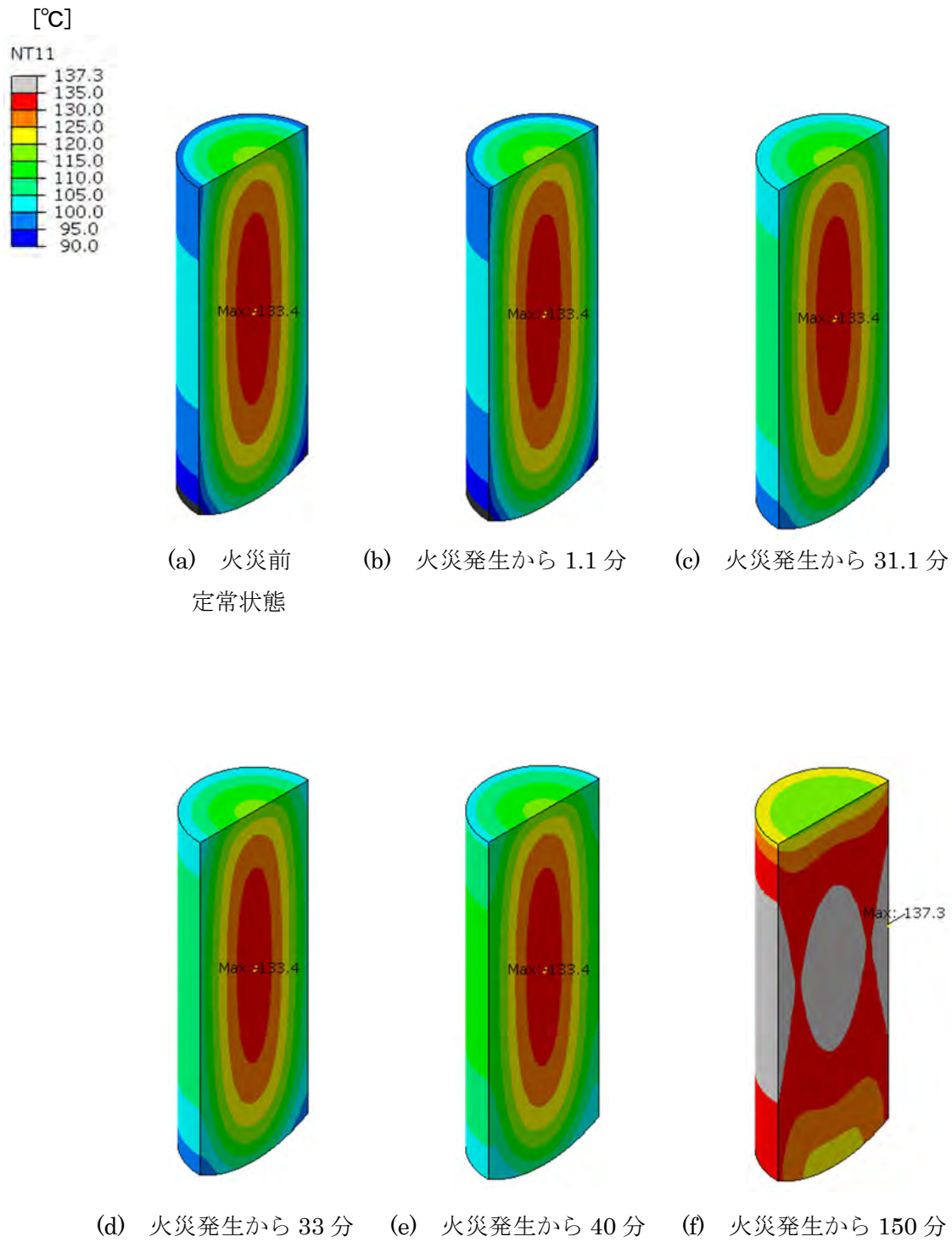


図 1.15 ガラス固化体+OP モデルの温度分布 (Case2 : 720°C×30 分)
 ～ ガラスのみ表示した切断図 ～

1.3.2 応力解析

(1) ガラス固化体単体モデル

応力解析においては、ガラスとガラス固化体キャニスタを一体化せず、それらの接触を考慮することで、以下の2つのステップによりガラス固化体キャニスタの応力を計算した。

① 初期状態算出ステップ

- ・伝熱解析で初期温度として求めた温度分布を与え、自重を負荷した解析

② 火災による入熱ステップ

- ・伝熱解析で火災入熱によって得られた温度時刻歴変化を熱荷重として与えた解析

図 1.16 に最高温度保持時間 15 分の解析ケースにおける、ガラス固化体キャニスタの相当応力分布の時刻変化を示す。図は、変形量を 100 倍に誇張した変形図に相当応力を描画したものである。図 1.17 から図 1.20 に最高温度保持時間 15 分の解析ケースにおける、半径方向応力分布、周方向応力分布、軸方向応力分布、及び相当塑性ひずみ分布の時刻変化を示す。同様に、図 1.21 から図 1.25 に最高温度保持時間 30 分の解析ケースにおける、ガラス固化体キャニスタの相当応力分布、半径方向応力分布、周方向応力分布、軸方向応力分布、及び相当塑性ひずみ分布の時刻変化を示す。図 1.21 の相当応力分布図は、変形量を 100 倍に誇張した変形図に相当応力を描画したものである。

これらの図より、ガラス固化体キャニスタ胴部に比べて相対的に高温となるガラス固化体キャニスタ上部とスカート部近傍において応力が高くなることがわかる。特に、ガラス固化体キャニスタのスカート付け根部において最高到達温度継続時間 15 分のケースで 1.9%程度、最高到達温度継続時間 30 分のケースで 2.1%程度の塑性ひずみが生じる結果となった。

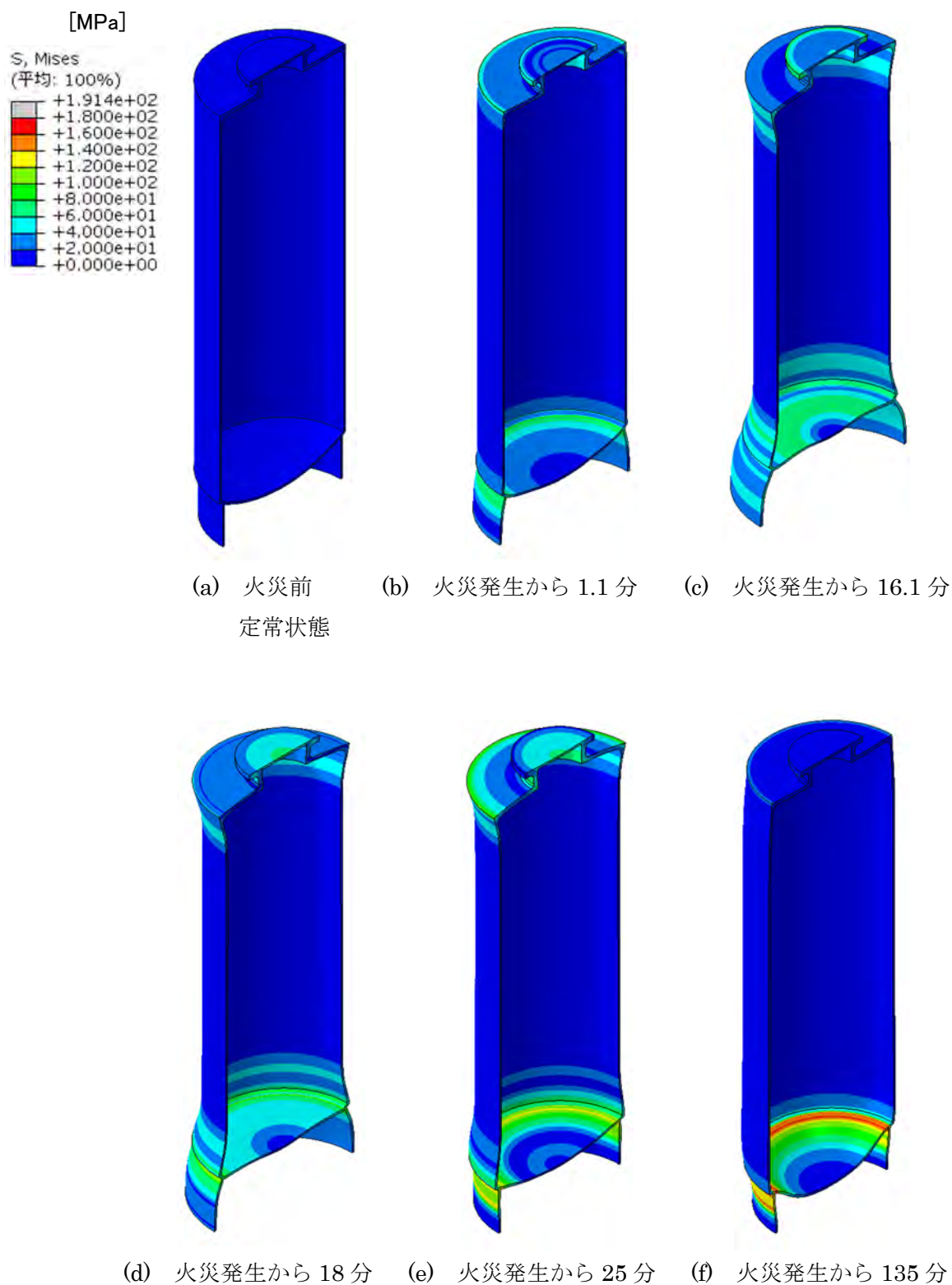


図 1.16 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)

～ 容器のみ表示した切断図 ～

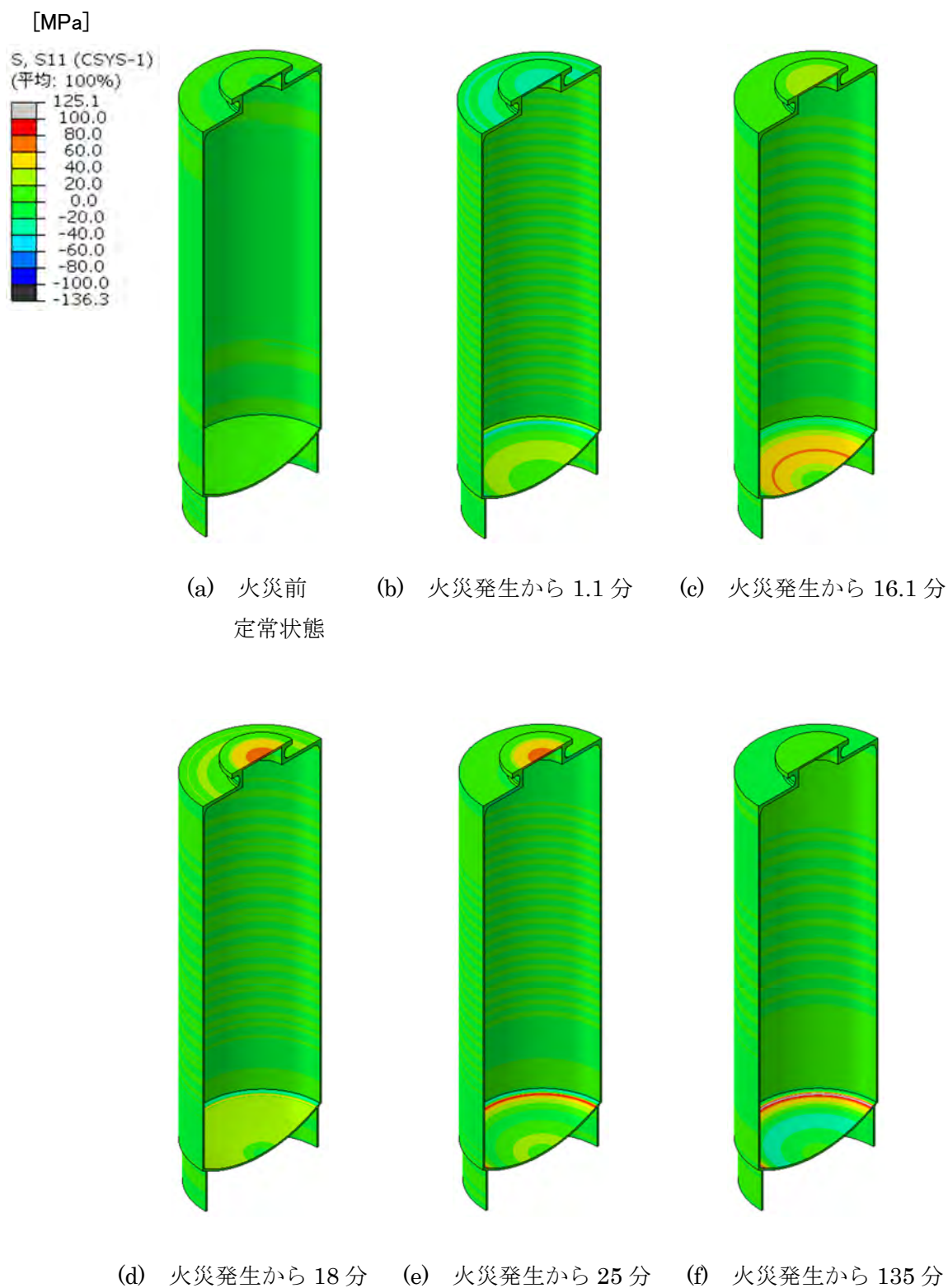


図 1.17 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～

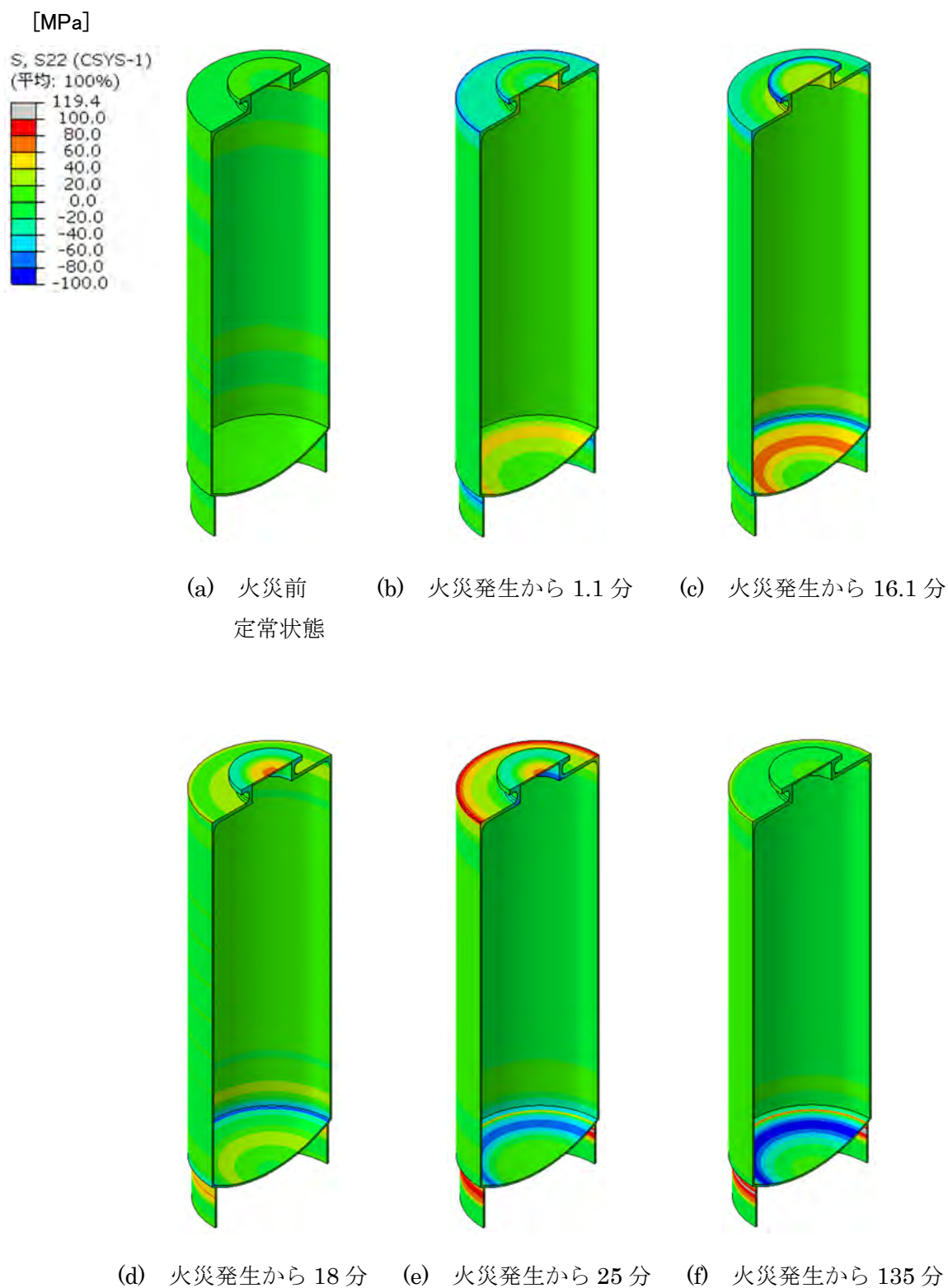


図 1.18 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～

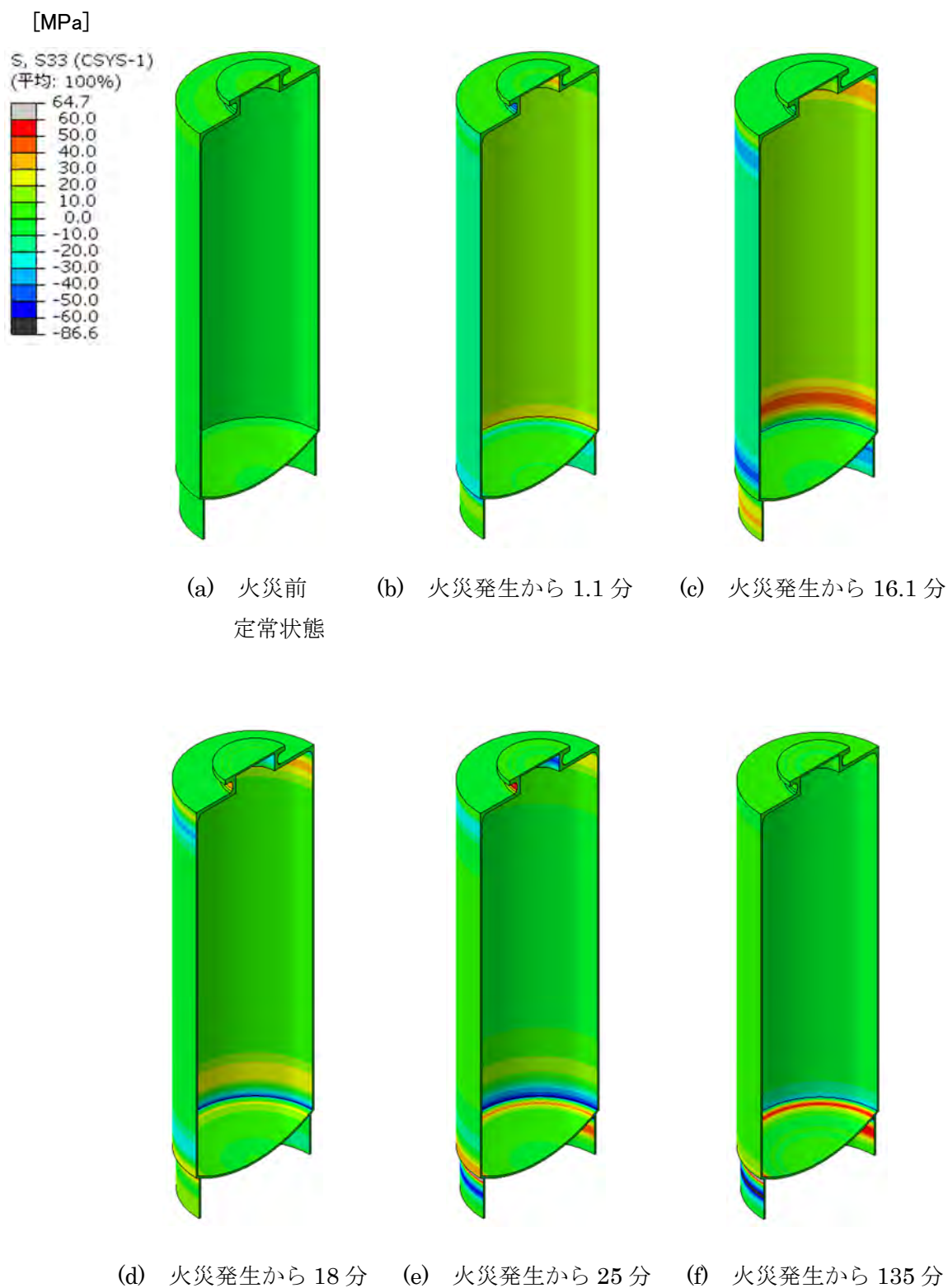
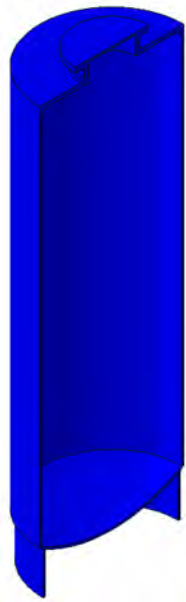
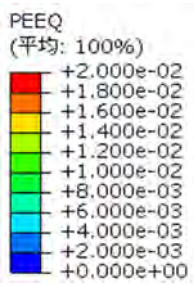
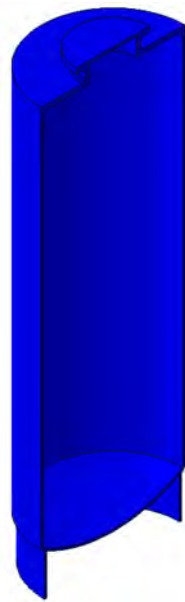


図 1.19 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～



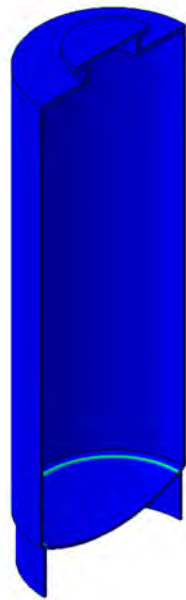
(a) 火災前
定常状態



(b) 火災発生から 1.1 分



(c) 火災発生から 16.1 分



(d) 火災発生から 18 分



(e) 火災発生から 25 分



(f) 火災発生から 135 分

図 1.20 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布 (Case1 : 720°C×15 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～

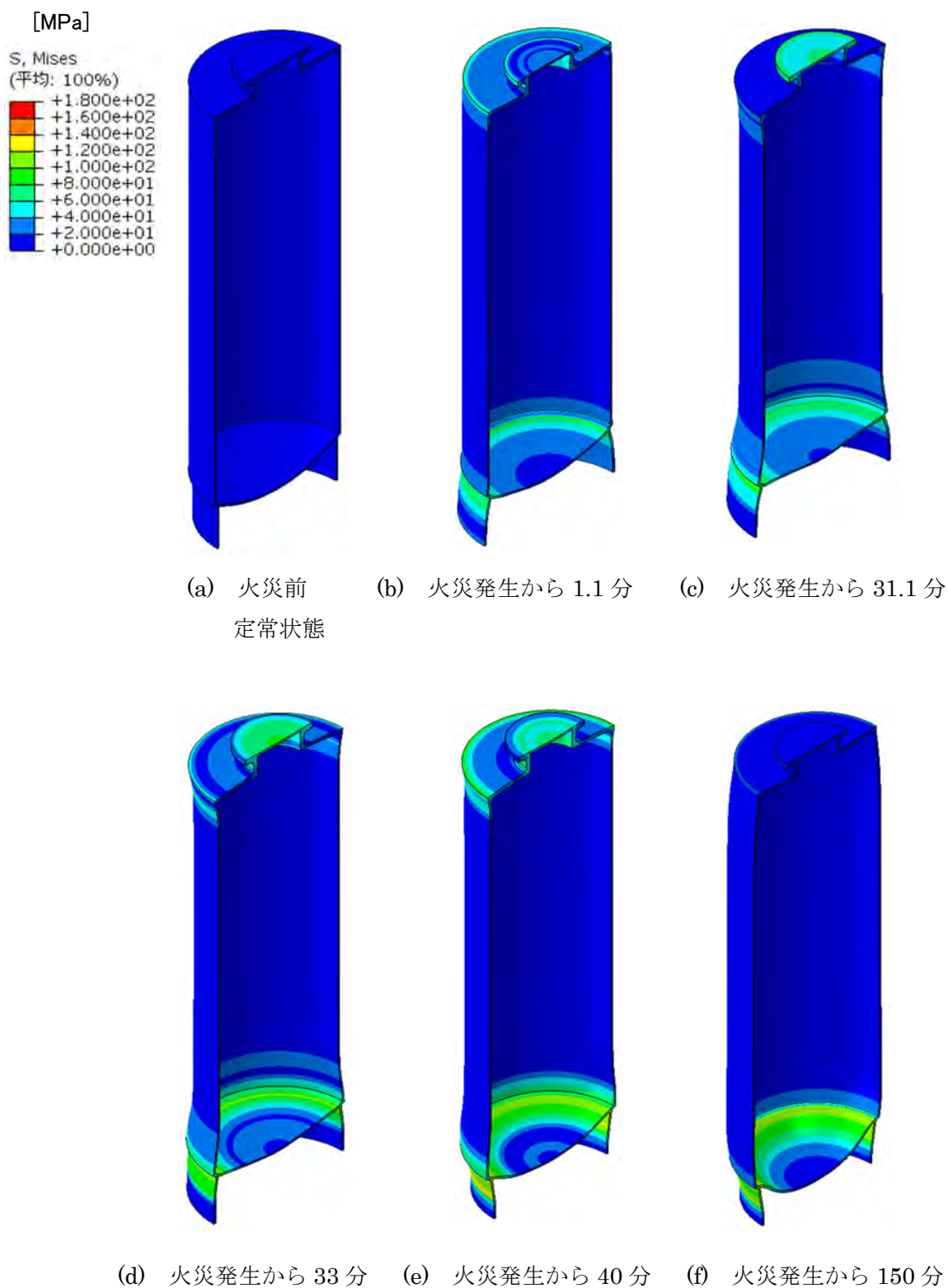


図 1.21 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)

～ 容器のみ表示した切断図 ～

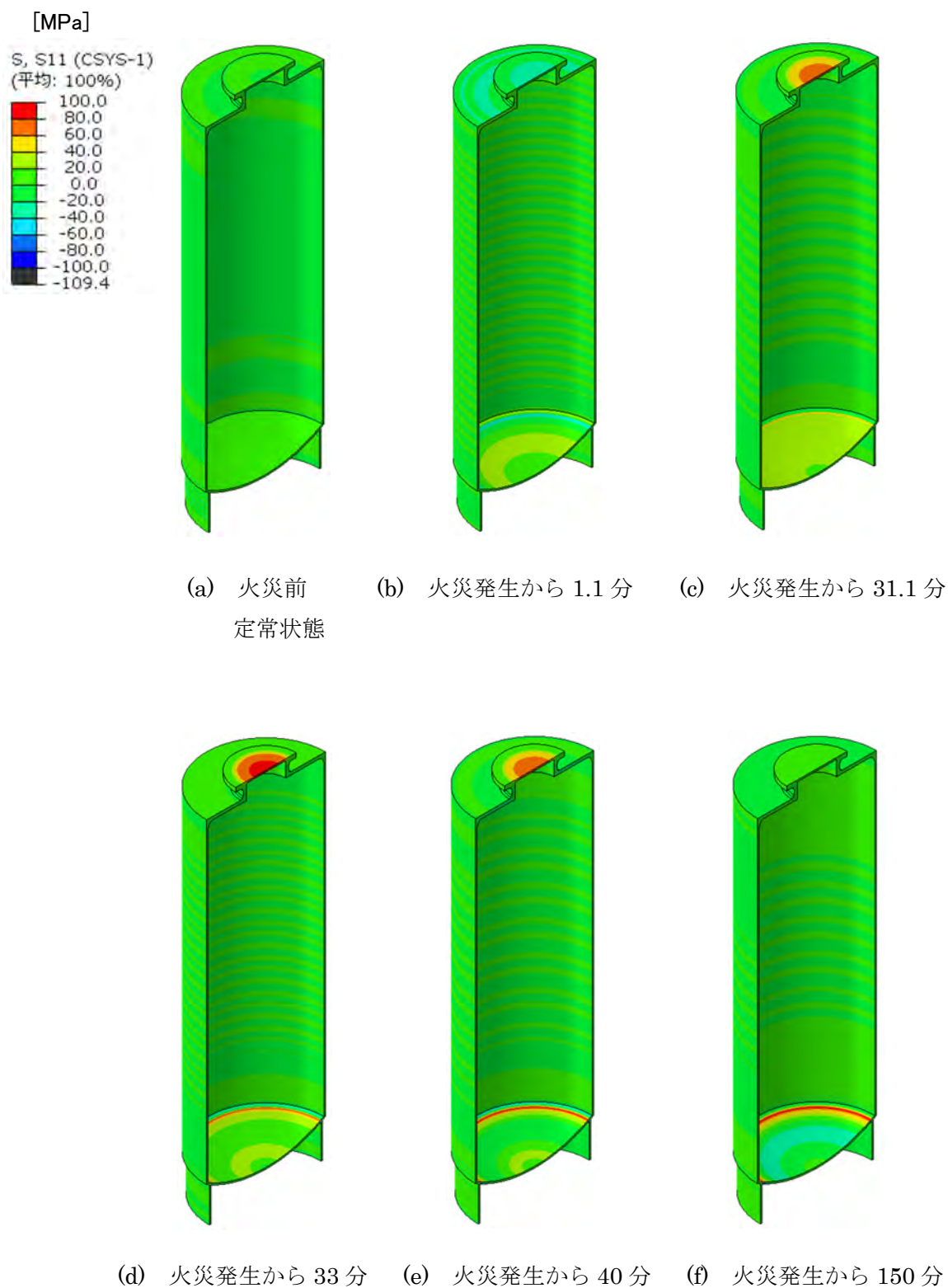


図 1.22 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～

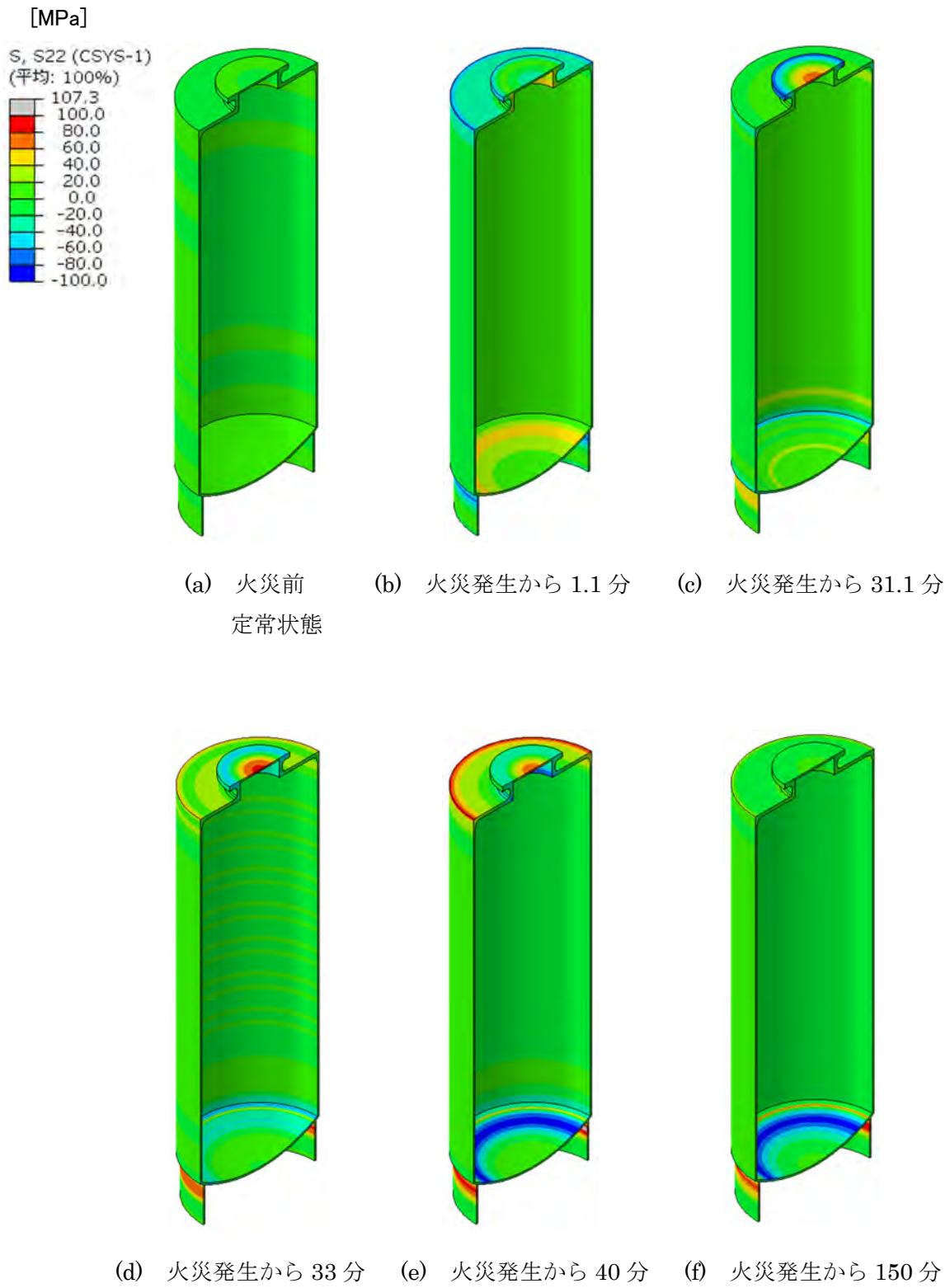


図 1.23 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～

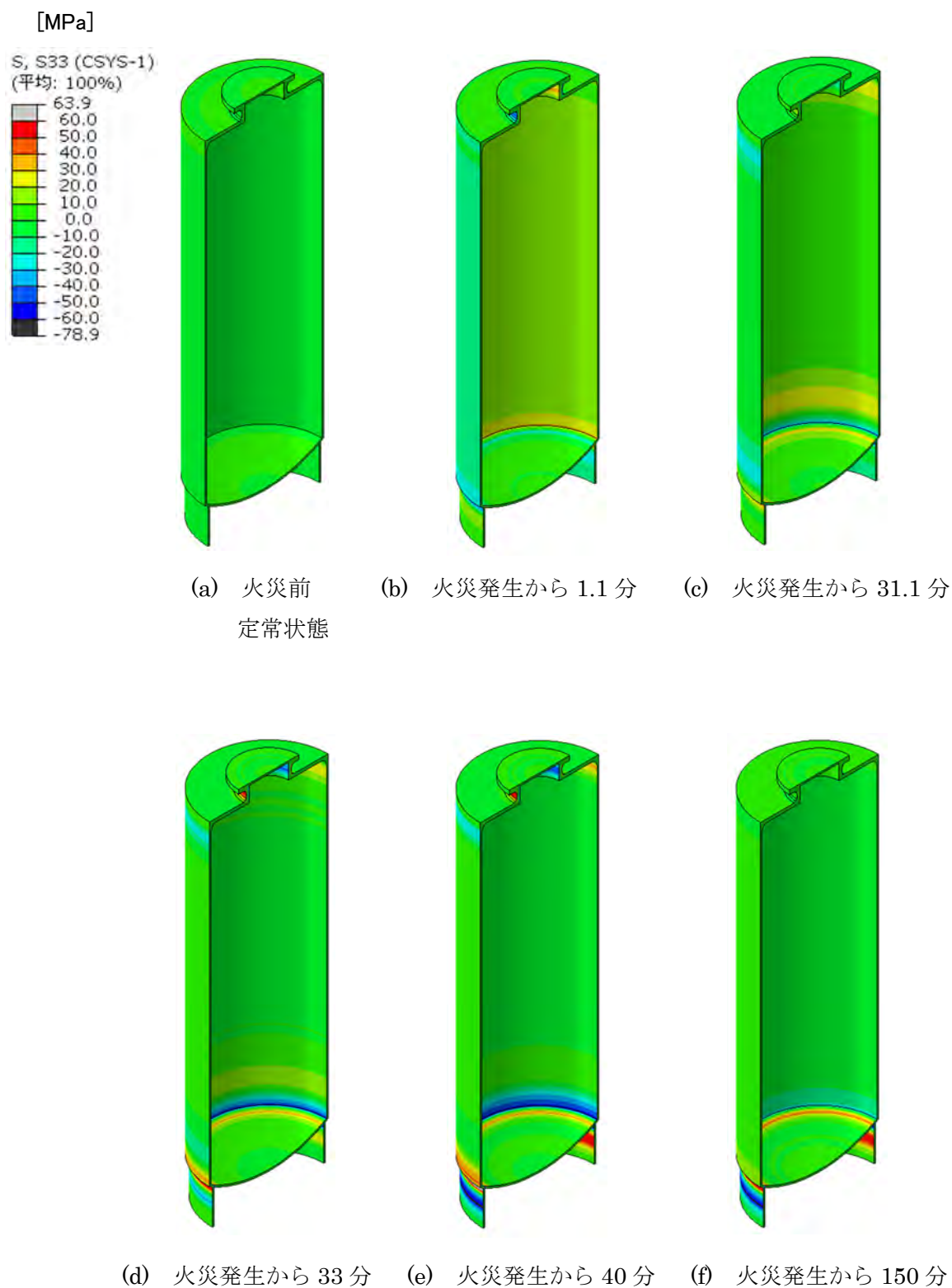


図 1.24 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)
～ 容器のみ表示した切断図 ～

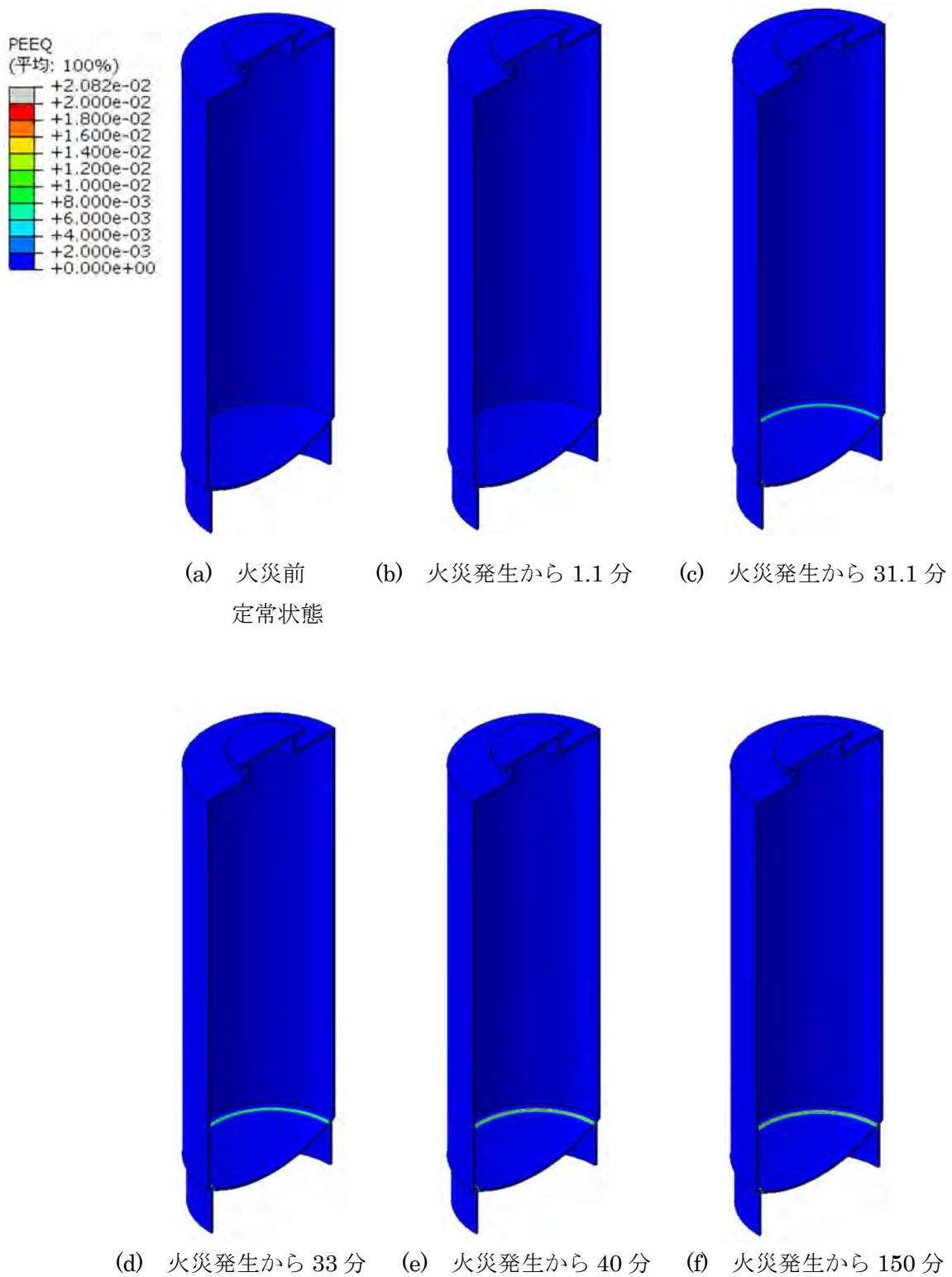


図 1.25 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布 (Case2 : 720°C × 30 分)
 ~ 容器のみ表示した切断図 ~

(2) ガラス固化体+オーバーパックモデル

前述したガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析結果において、本ケースでは火災の入熱がガラス固化体の温度に及ぼす影響はほとんど無いことがわかった。本ケースの温度解析結果を用いて応力解析を行っても、ガラス固化体の応力にはほとんど影響しないと考えられるため、ガラス固化体+オーバーパックの応力解析においては、先行解析と同様に、オーバーパックのみのモデルとして解析を行うこととした。応力解析は、ガラス固化体単体のケースと同様に、以下の2つのステップによりオーバーパックの応力を計算した。

① 初期状態算出ステップ

- ・伝熱解析で初期温度として求めた温度分布を与え、自重を負荷した解析

② 火災による入熱ステップ

- ・伝熱解析で火災入熱によって得られた温度時刻歴変化を熱荷重として与えた解析

図 1.26 から図 1.30 に最高温度保持時間 15 分の解析ケースにおける、オーバーパックの相当応力分布、半径方向応力分布、周方向応力分布、軸方向応力分布、及び相当塑性ひずみ分布の時刻変化を示す。同様に、図 1.31 から図 1.35 に最高温度保持時間 30 分の解析ケースにおける、ガラス固化体キャニスタの相当応力分布、半径方向応力分布、周方向応力分布、軸方向応力分布、及び相当塑性ひずみ分布の時刻変化を示す。

これらの図より、オーバーパック蓋部溶接部に初期状態として導入している塑性ひずみに対する火災入熱の影響は軽微であり、塑性ひずみ分布にはほとんど変化が見られないことがわかる。一方、火災による入熱過程における応力分布は、オーバーパックに生じる温度勾配に伴って生じる熱応力に時刻変化が見られる。特に半径方向応力では、初期状態で 55MPa 程度の引張応力場であった蓋溶接のルート部において、最高温度継続時間 15 分のケースで 250MPa 程度、最高温度継続時間 30 分のケースで 315MPa 程度の引張応力が生じる結果となった。

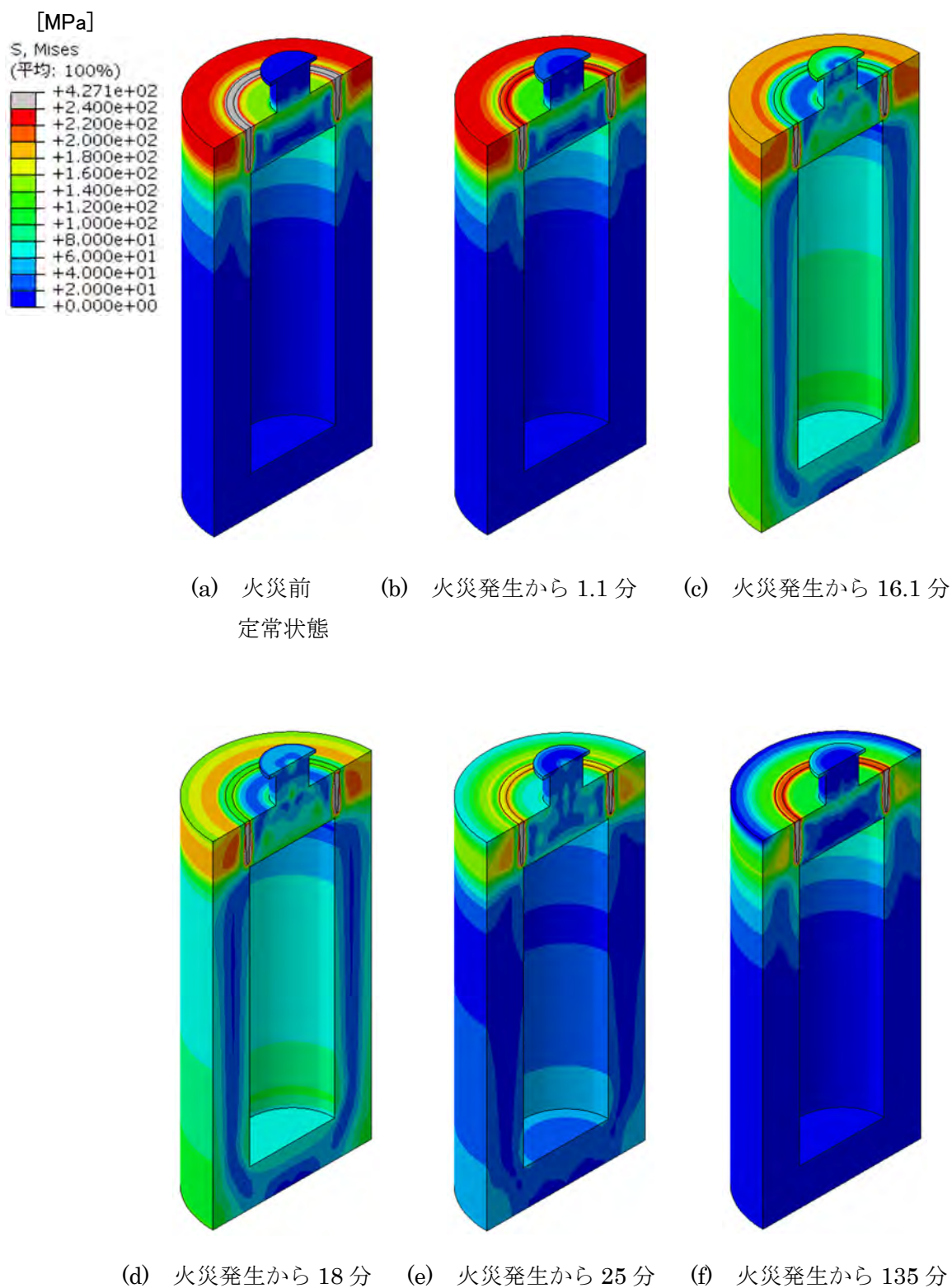


図 1.26 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)

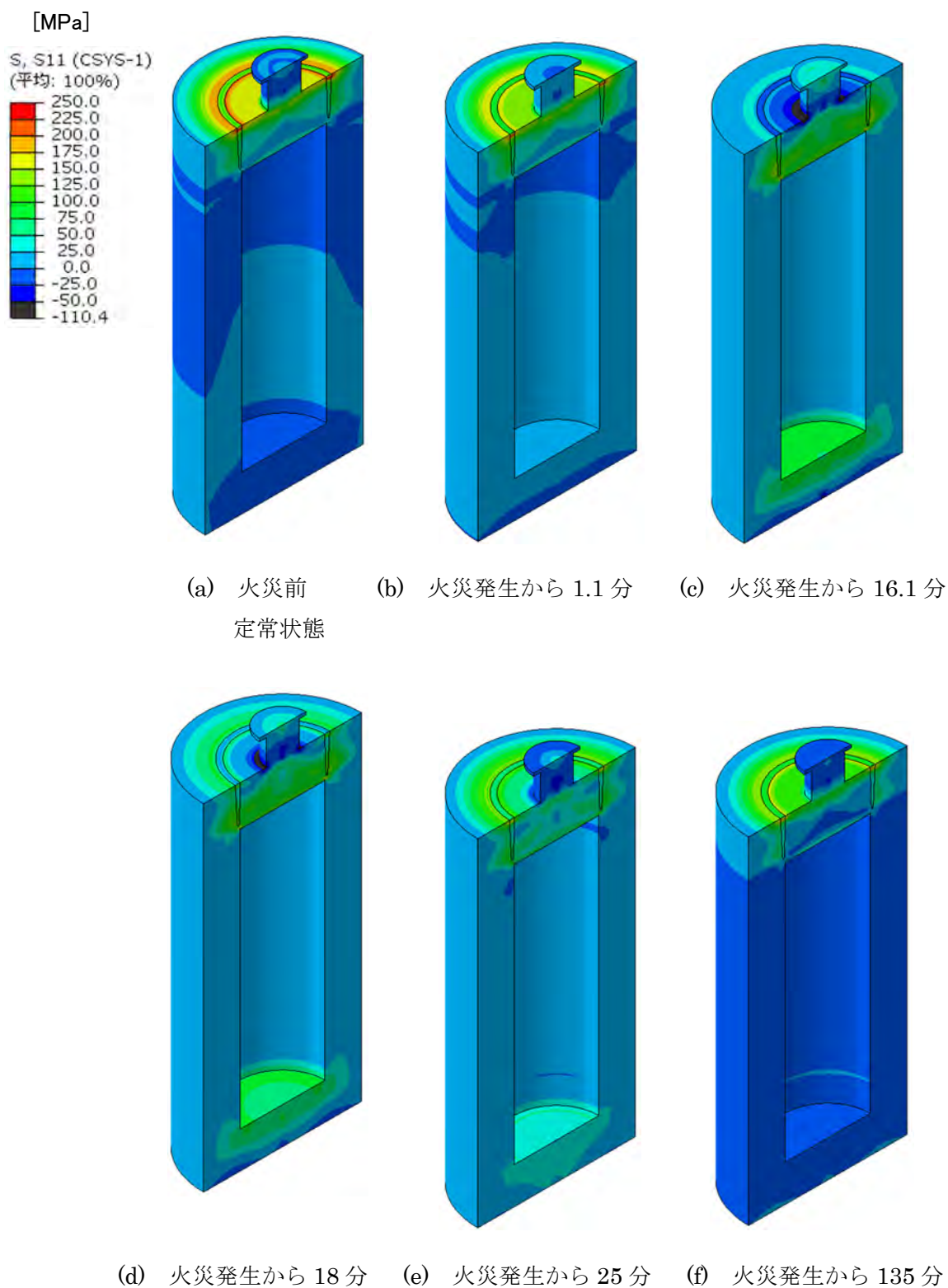


図 1.27 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)

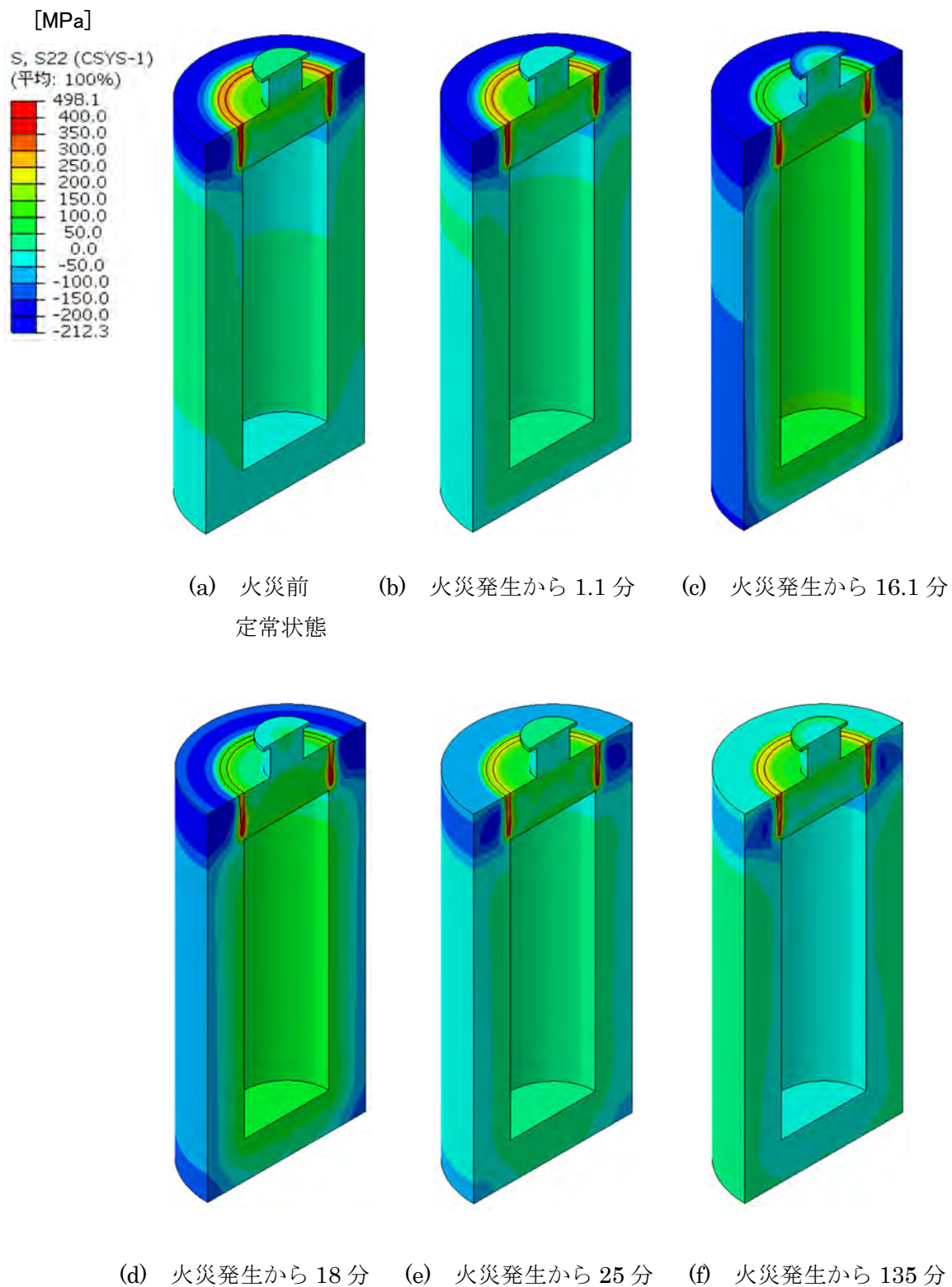


図 1.28 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)

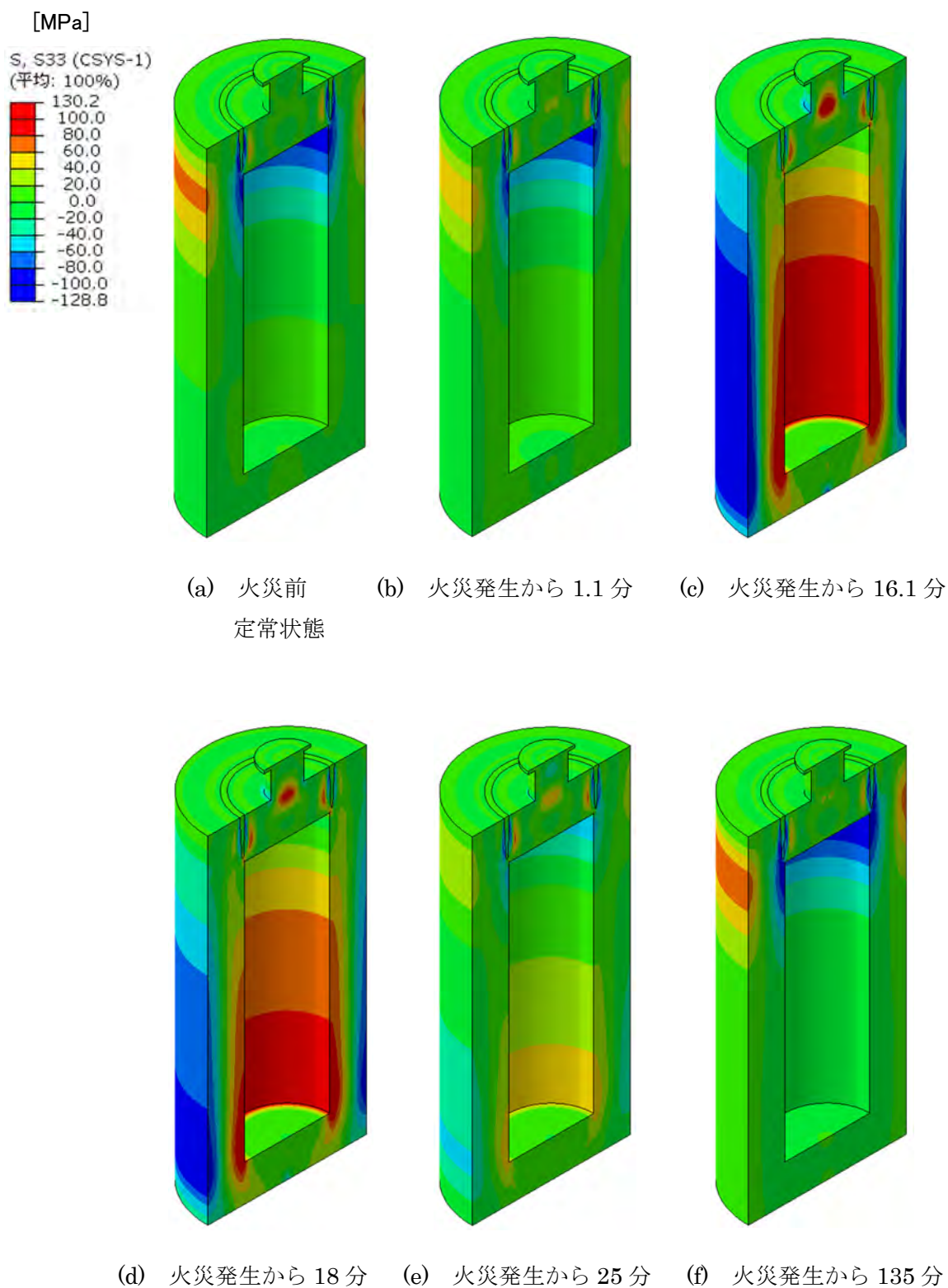
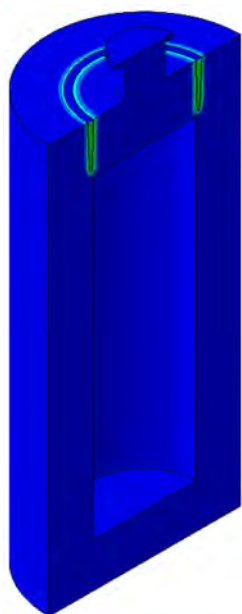
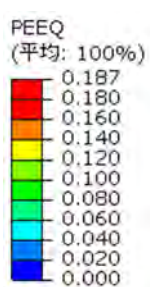
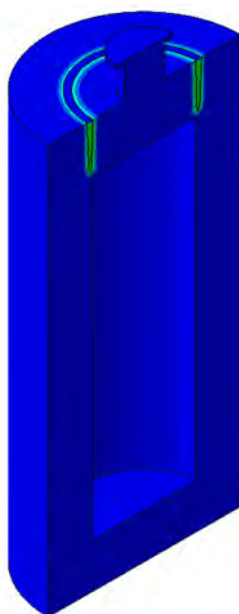


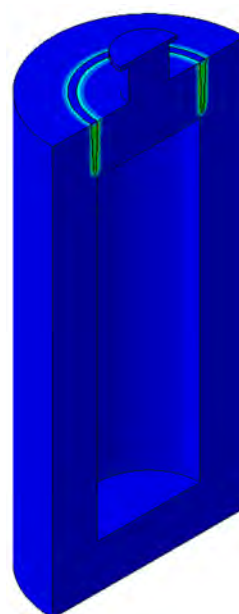
図 1.29 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布 (Case1 : 720°C×15 分)



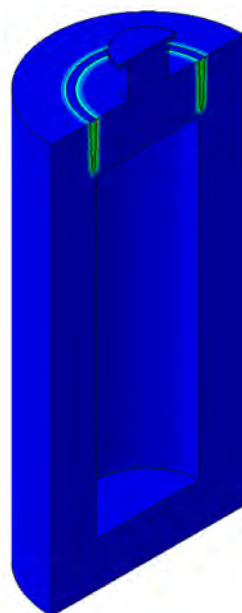
(a) 火災前
定常状態



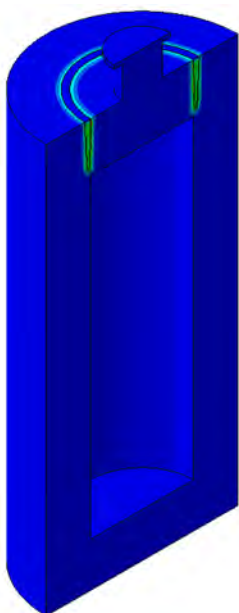
(b) 火災発生から 1.1 分



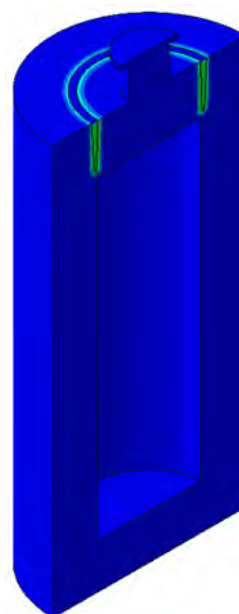
(c) 火災発生から 16.1 分



(d) 火災発生から 18 分



(e) 火災発生から 25 分



(f) 火災発生から 135 分

図 1.30 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布 (Case1 : 720°C×15 分)

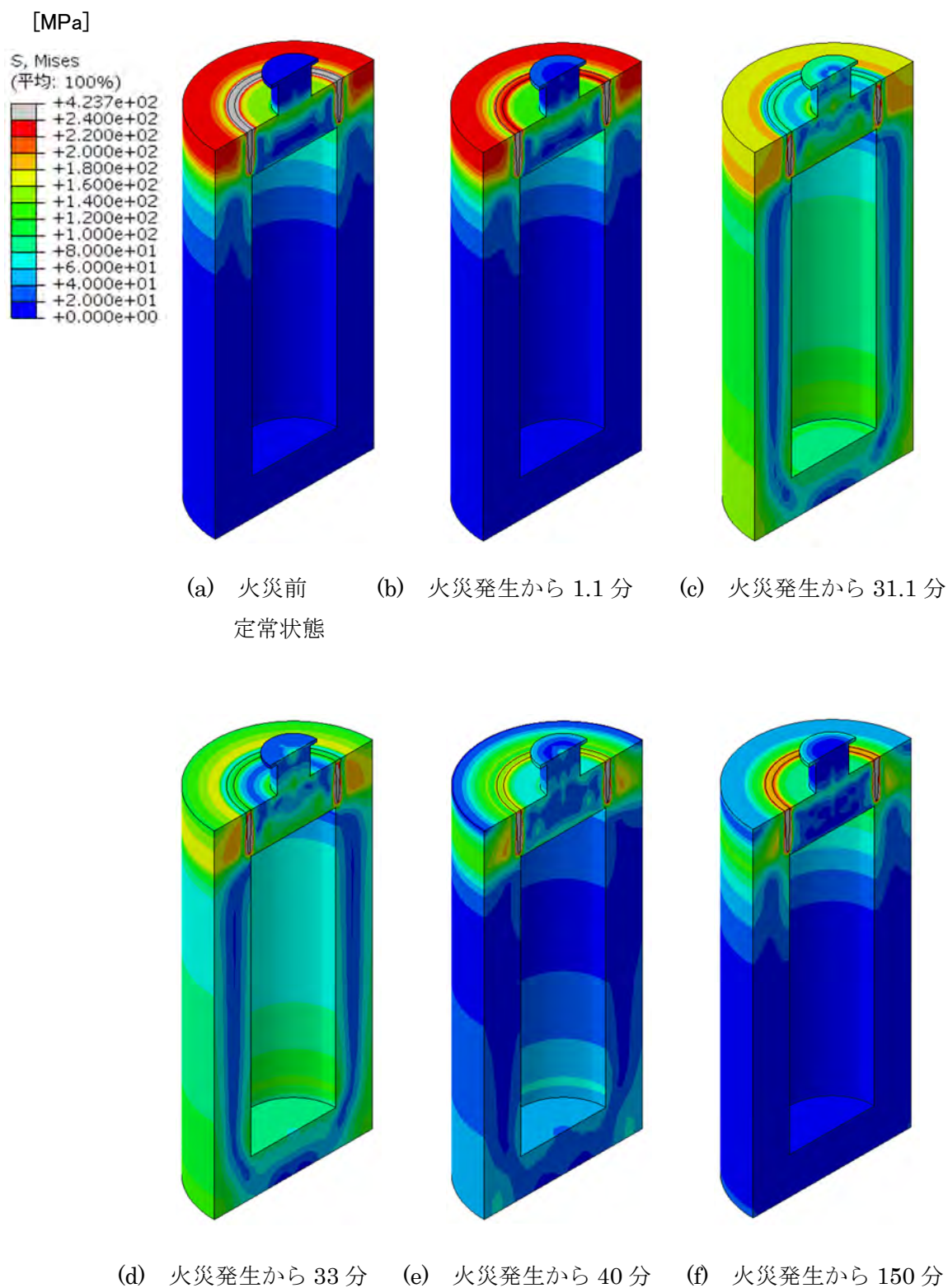


図 1.31 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)

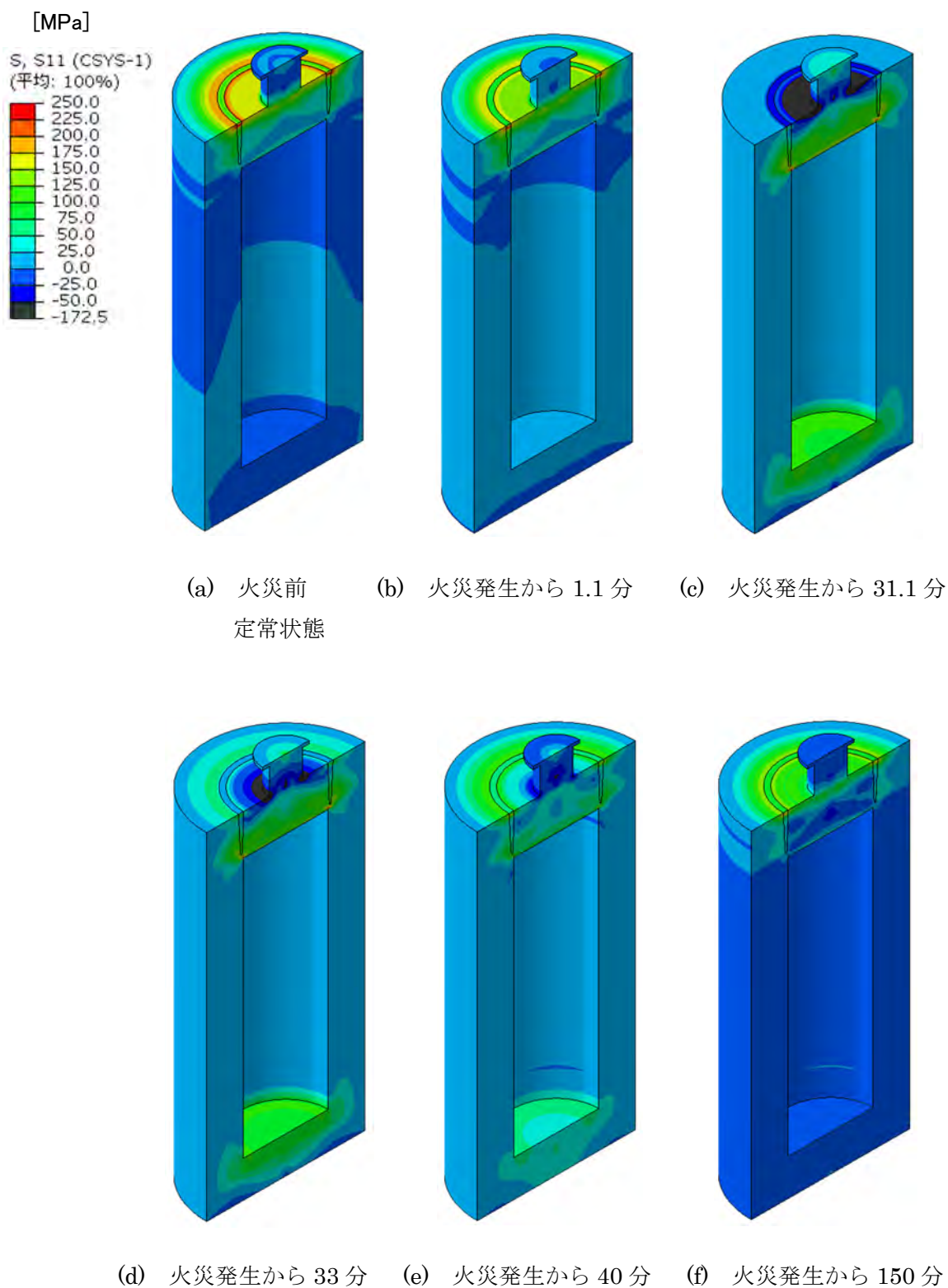
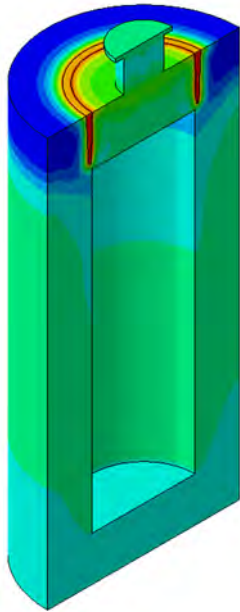
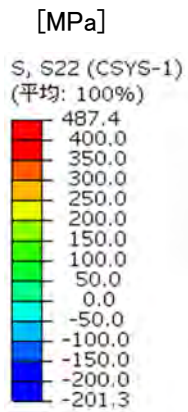
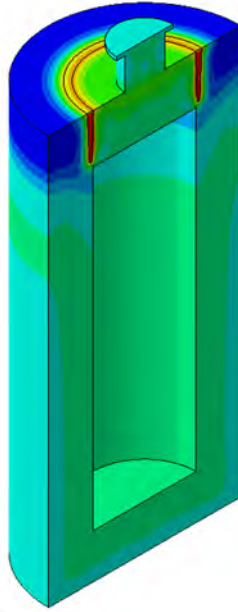


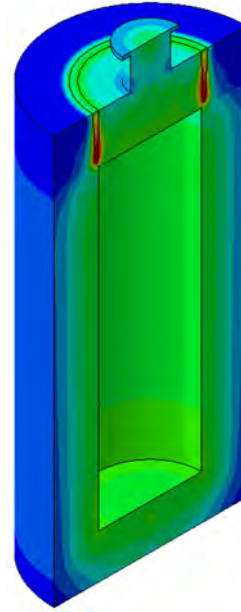
図 1.32 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)



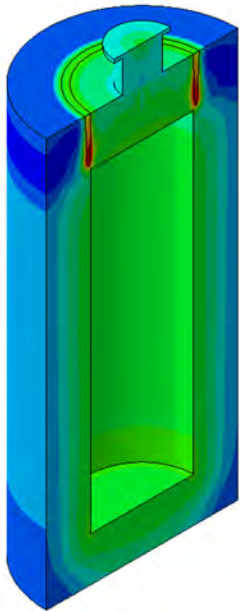
(a) 火災前
定常状態



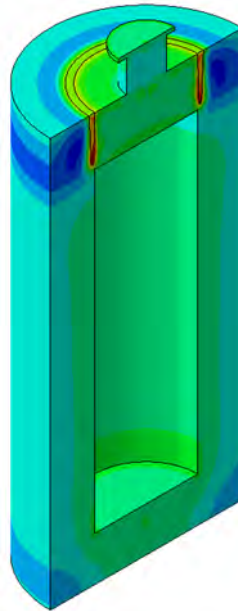
(b) 火災発生から 1.1 分



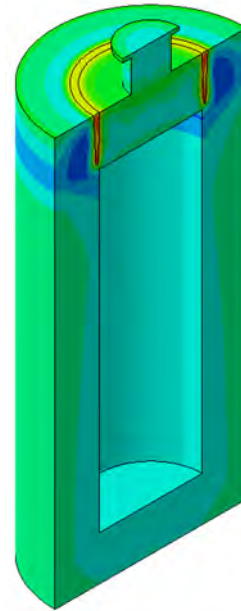
(c) 火災発生から 31.1 分



(d) 火災発生から 33 分



(e) 火災発生から 40 分



(f) 火災発生から 150 分

図 1.33 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)

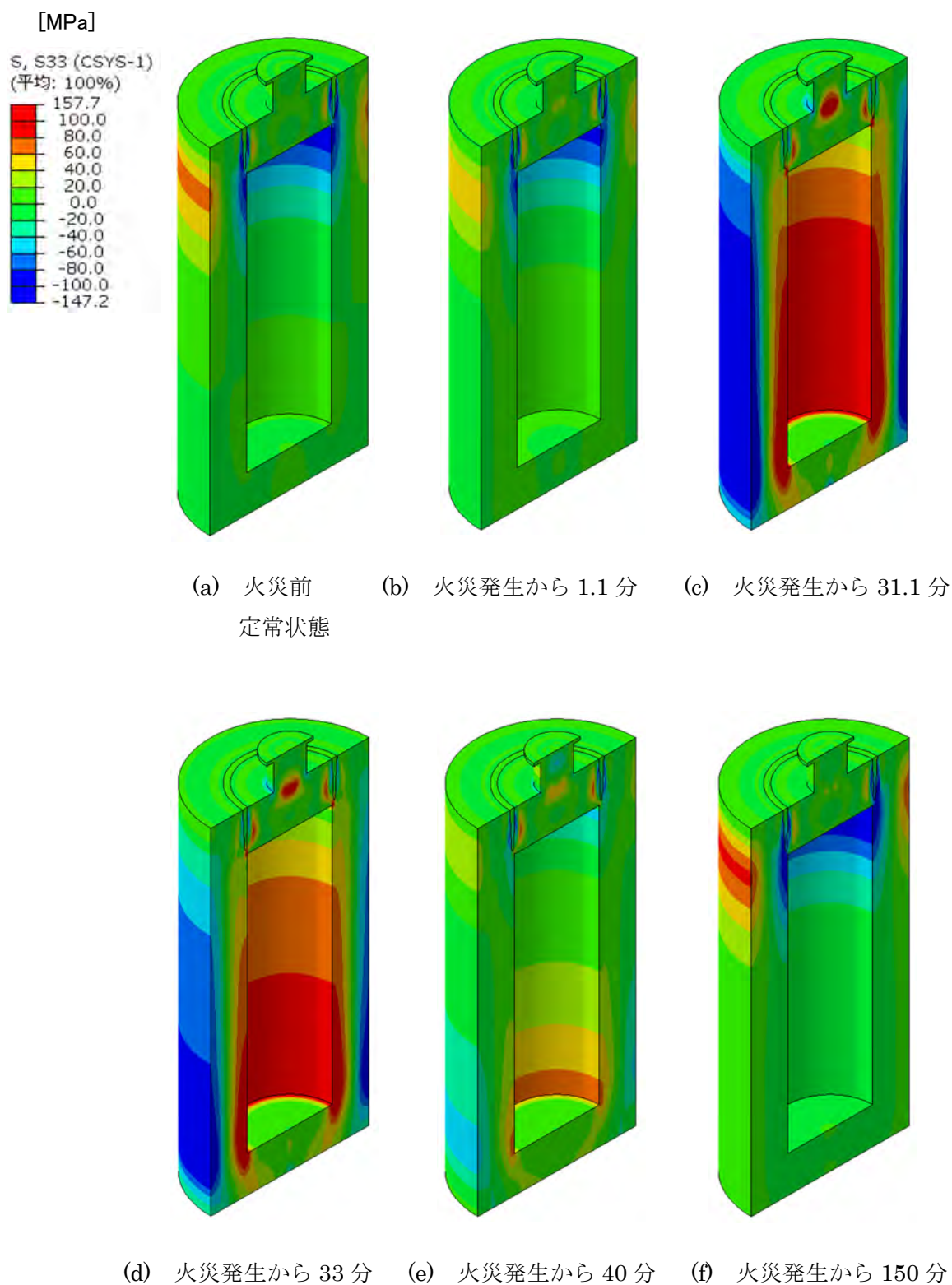
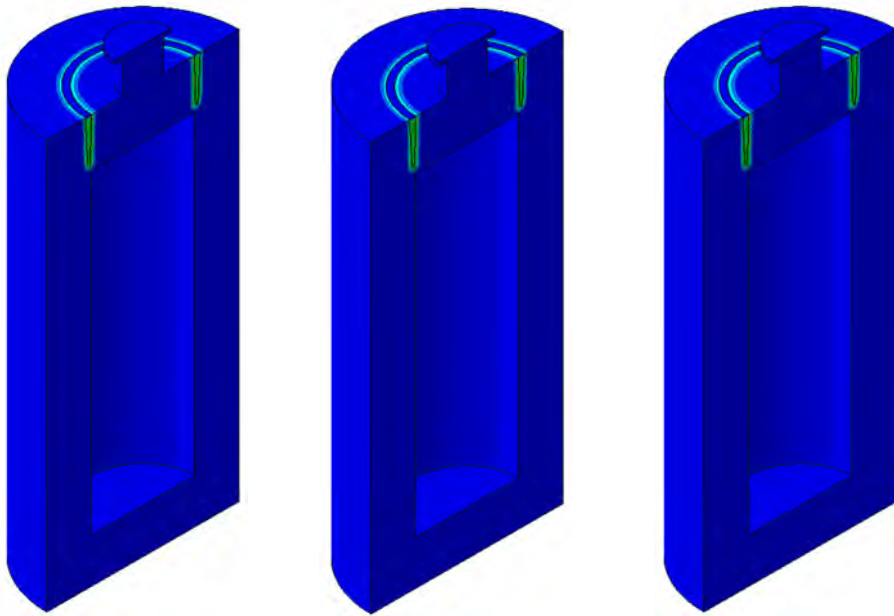
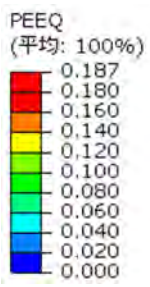
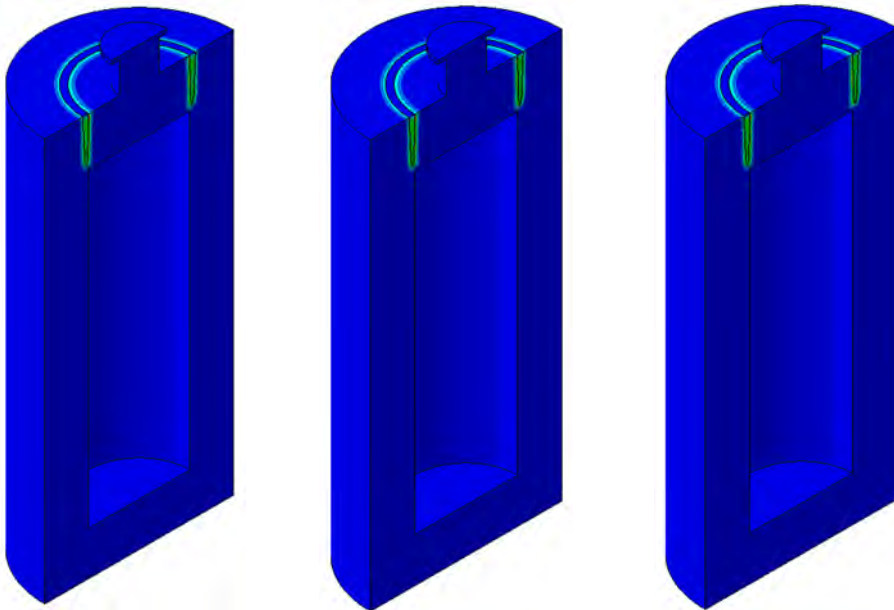


図 1.34 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布 (Case2 : 720°C×30 分)



(a) 火災前 定常状態 (b) 火災発生から 1.1 分 (c) 火災発生から 31.1 分



(d) 火災発生から 33 分 (e) 火災発生から 40 分 (f) 火災発生から 150 分

図 1.35 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布 (Case2 : 720°C × 30 分)

第2章 燃焼範囲をパラメータとした解析

2.1 燃焼解析

火災シナリオは、先行解析と同様に、外部から流入したディーゼルが台車の走行用のくぼみに溜まり、電気系統のショートや落下物の火花等何らかの原因で着火すると仮定した。

先行解析における火災設定はディーゼルプールの幅を 2m、長さを台車の左側で 19.3m、右側で 4.9m であった。その結果、火災は酸素不足のため約 50 秒で消炎した。今回は台車を右へ移動させ、その左右に長さ 2m ほどのディーゼルプールを設置した。プールの面積を減らすことによって酸素の消費率を下げ、燃焼時間を延ばす狙いである（図 2.1 参照）。また、先行解析においては、台車周辺のガス流速が速いために、炎が低くなる傾向にあった。そこで、台車を壁の近くに移動させることによって、壁に近いところのガスの流れが壁に沿って天井に向かう様にした。これにより台車周辺のガス流速が低下し、ガスの流れとともに蒸発した燃料が上に流れて炎が高くなると予想され、ガラス固化体、またはオーバーパックへの熱流束が高まると考えられる。

また、先行解析の燃焼解析ではガラス固化体とオーバーパックのモデルは同じ寸法としたが、本試計算では寸法の違いを考慮した燃焼解析を行い、熱流束の違いを把握することとした。寸法及び解析モデルを図 2.1 に示す。ガラス固化体は直径がオーバーパックの半分、高さがオーバーパックの 2/3 程度である。そのため、空力抵抗によるガスの流れの違いが生じ、これは燃料分布の変化を伴い炎の形が異なるため、熱流束も異なると考えられる。

図 2.2 に、オーバーパック収納・検査室内の燃料蒸発量、発熱量及び熱損失の計算結果を示す。全体的にはガラス固化体のみを対象とした燃焼解析と、ガラス固化体が収納されたオーバーパックを対象とした燃焼解析はほぼ同じ結果が得られている。オーバーパック収納・検査室内の発熱量は 380 秒程度で急激に落ち始めていることから、燃焼時間は 380 秒間程度と判断できる。先行解析では 50 秒程度で消炎が起こったので、燃焼時間は 8 倍ほど延びたことになる。

図 2.3 に火災の様子を、図 2.4 にガス温度分布を、図 2.5 に酸素濃度分布を、図 2.6 にガス流速分布を示す。これらの図から、炎が大きく左右または上下に揺れるため、それに合わせて酸素濃度やガス温度が大きく変動する様子が分かる。瞬時に状況が変化するためガラス固化体とオーバーパックの結果を直接比較することはできないが、ほぼ同様の傾向を示しているものと考えられる。

図 2.3 から、炎の高さは対象物の倍以上であり、先行解析結果と比べて 3~4 倍ほど高いことが分かった。また、図 2.4 から、ガス温度は床近傍で低いことが分かるが、これはガスよりも冷たい面による冷却効果ではなく、横方向から攪拌するガスが流れ込むことによる混合効果によると考えられる。この点については図 2.5 の酸素濃度に示されており、ガス温度が低くなる場所において、酸素濃度が高くなる傾向が分かる。さらに、図 2.6 から、このような混合領域においてはガス流速も低下する傾向にあることが分かる。

台車の真上（天井 4 m 下）の空間におけるガス温度や化学種濃度は、ガラス固化体及びオーバーパックのいずれを対象とした解析でも、混合分率が一致しているため同じ結果となった（図 2.7）。本解析に用いた燃焼モデルは温度や化学種濃度が混合分率の関数となっているため、同じ関数 Z であれば、温度や化学種濃度の結果が一致することになる。

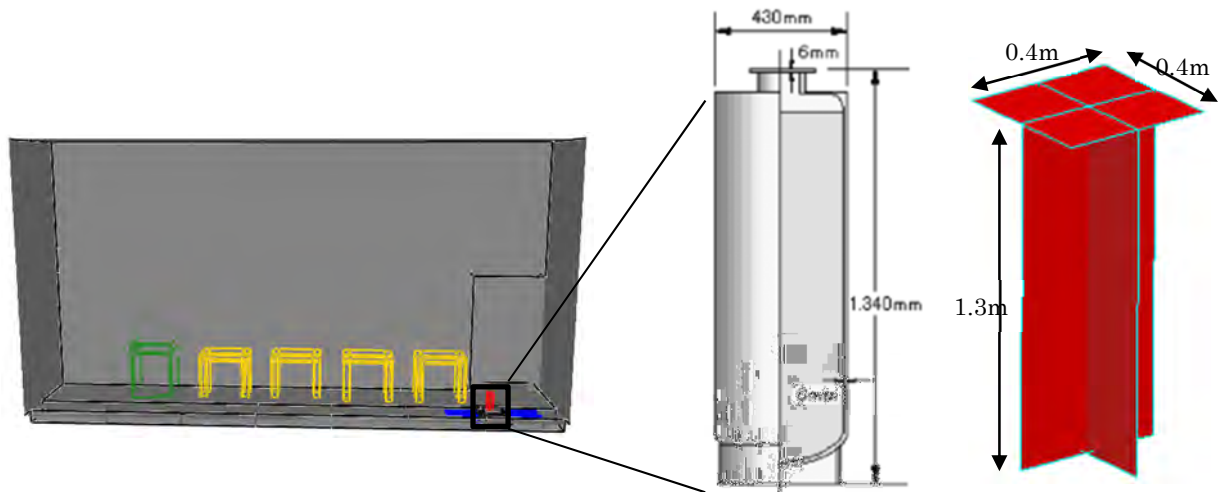
先行解析では、廃棄体の真上の空間（天井 4m）におけるガス温度の経時変化に基づいて伝

熱解析の熱境界条件を設定した。本試計算では、図 2.1 に示すガラス固化体、またはオーバーパットのモデル表面に観測点を設置し、その観測点における記録データからモデルの表面における熱流束を求めて伝熱解析の境界条件を与えることにした。図 2.8 に、燃焼解析モデルに設置した観測点と伝熱解析モデルに境界条件を与える点との位置関係を示す。これらのポイント以外の周方向または高さ方向の熱流束分布は、線形的に補間する方法で求めた。このような方法によって三次元的な熱流束分布を得ることができる。

図 2.9 に、燃焼解析で得られたガラス固化体モデルについての熱流束分布を示す。また、図 2.10 には、オーバーパットモデルについての熱流束分布を示す。なお、両図に示す分布は、燃焼解析で求めた時系列データを多項式で近似したものである。

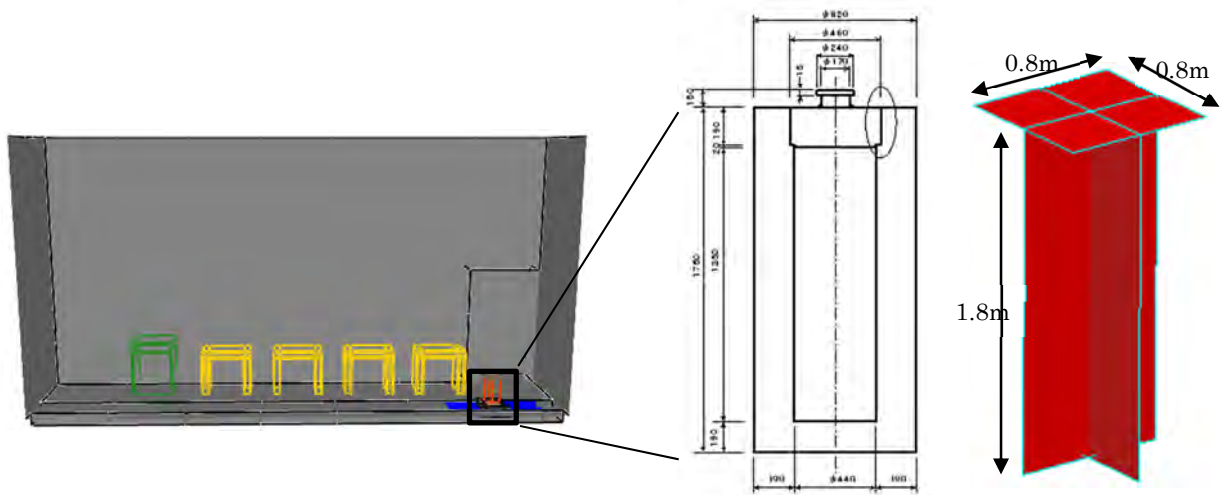
図 2.9 から、ガラス固化体単体を対象とした解析結果は、ガラス固化体の高さ方向でどの高さにおいても定性的に同じ熱流束分布を示していることが分かる。火炎の上流（図 2.3 において廃棄体の左側を「火炎の上流」とし、右側を「火炎の下流」とする）に向かう面（図 2.8 の観測点番号②及び⑦）は高い熱流束を示しており、これはふく射及び対流によると考えられる。また、上流の炎に一番近い観測点（図 2.8 の観測点番号①及び⑧）における熱流束も高く、これは炎に直接的に振られるためと考えられる。一方、火炎の下流側の観測点（図 2.8 の観測点番号③及び⑥、④及び⑤）における熱流束はこれらに比べて低いことが分かる。

また、図 2.10 から、オーバーパットモデルの場合には、火炎の上流（図 2.8 の観測点番号①及び⑧、②及び⑦）と下流（図 2.8 の観測点番号③及び⑥、④及び⑤）の観測点で明確な差がみられ、対象物の寸法の違いによって火炎の上流と下流の熱流束に大きな差が生じることが分かる。



(a) ガラス固化体単体の解析モデル

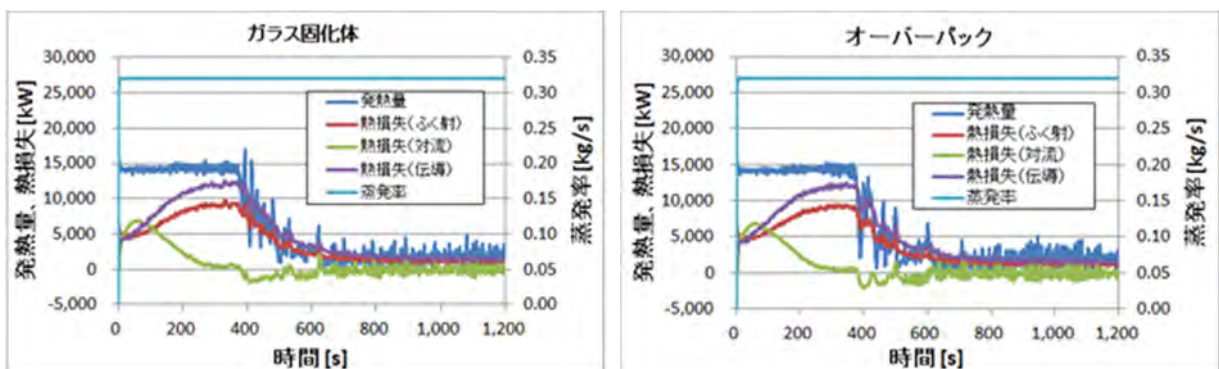
(b) ガラス固化体の実寸及びモデル化



(c) オーバーパックの解析モデル

(d) オーバーパックの実寸及びモデル化

図 2.1 追加燃焼解析モデルの概念



(a) ガラス固化体

(b) オーバーパック

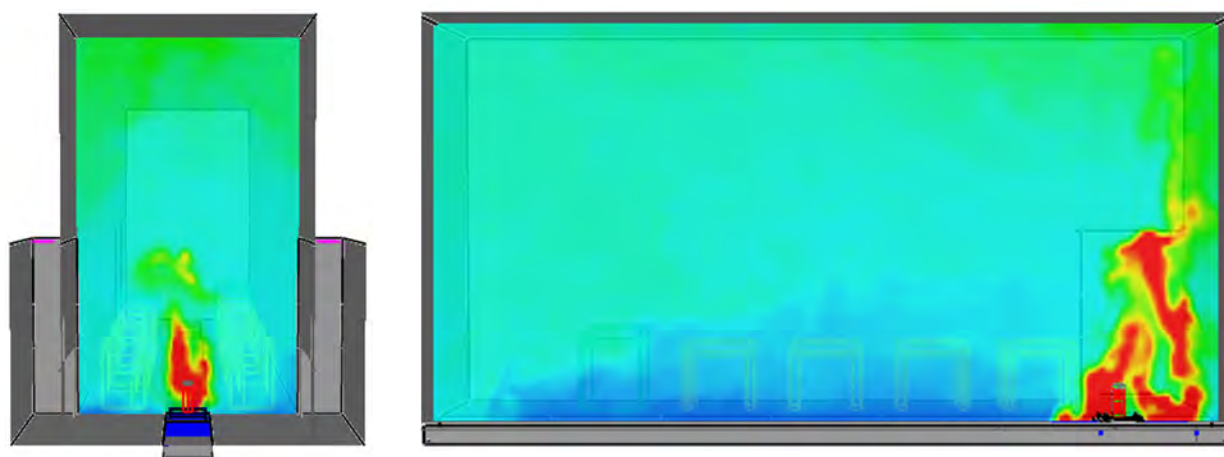
図 2.2 収納・検査室内の燃料蒸発量、発熱量及び熱損失



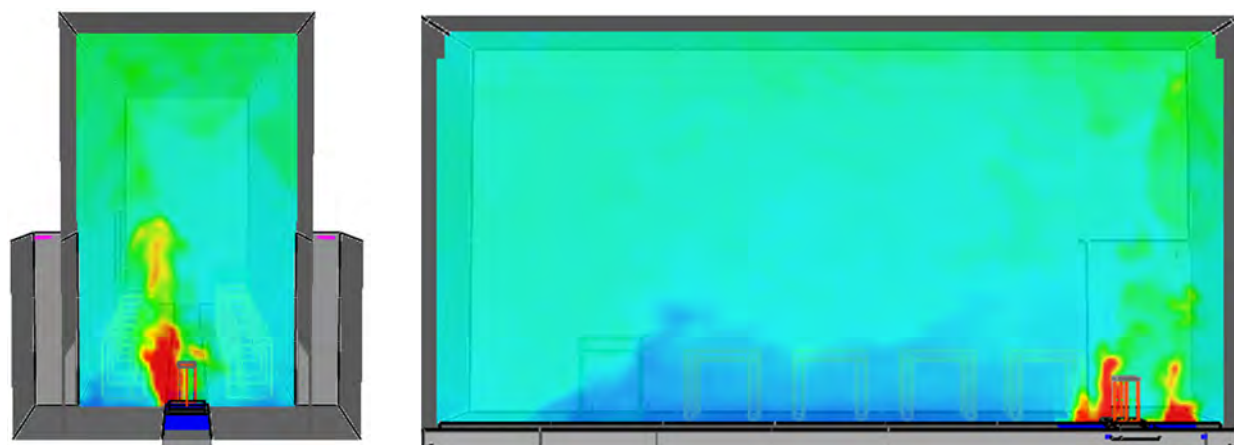
(a) ガラス固化体

(b) オーバーパック

図 2.3 250 秒における火災の様子

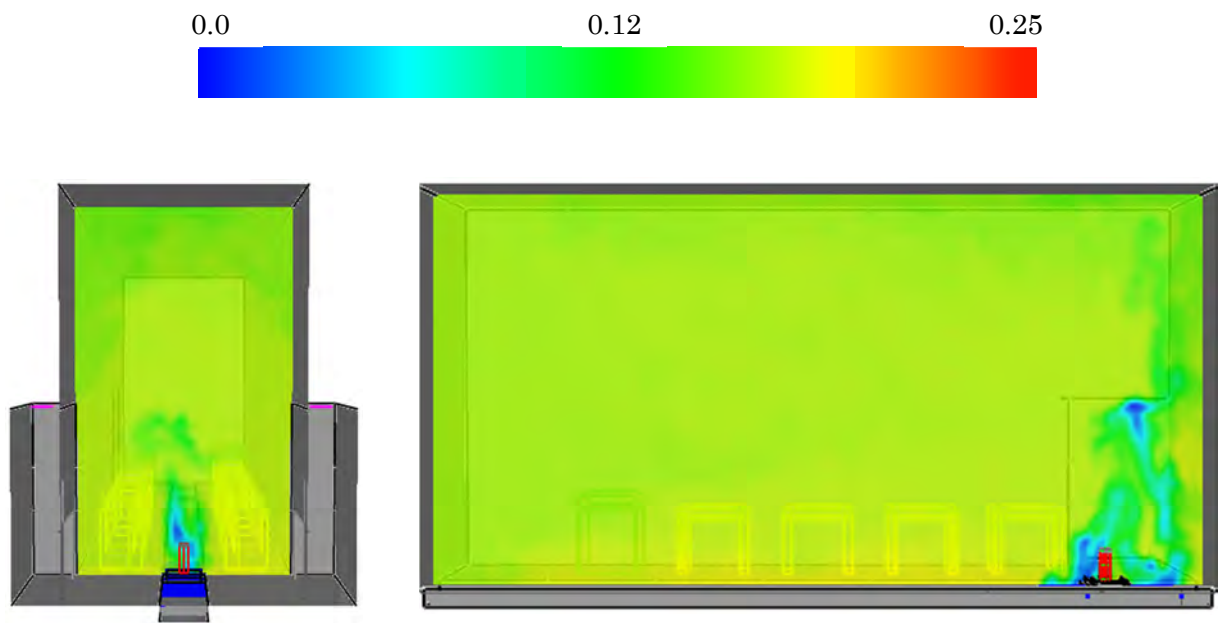


(a) ガラス固化体中央断面

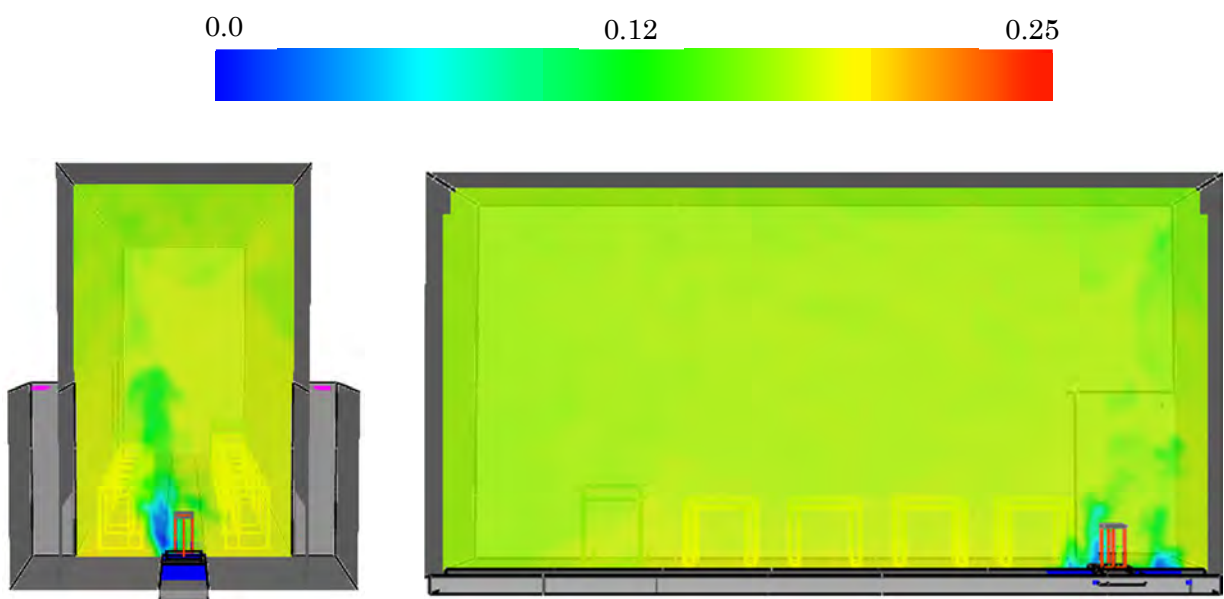


(b) オーバーパック中央断面

図 2.4 250 秒における温度分布 [°C]

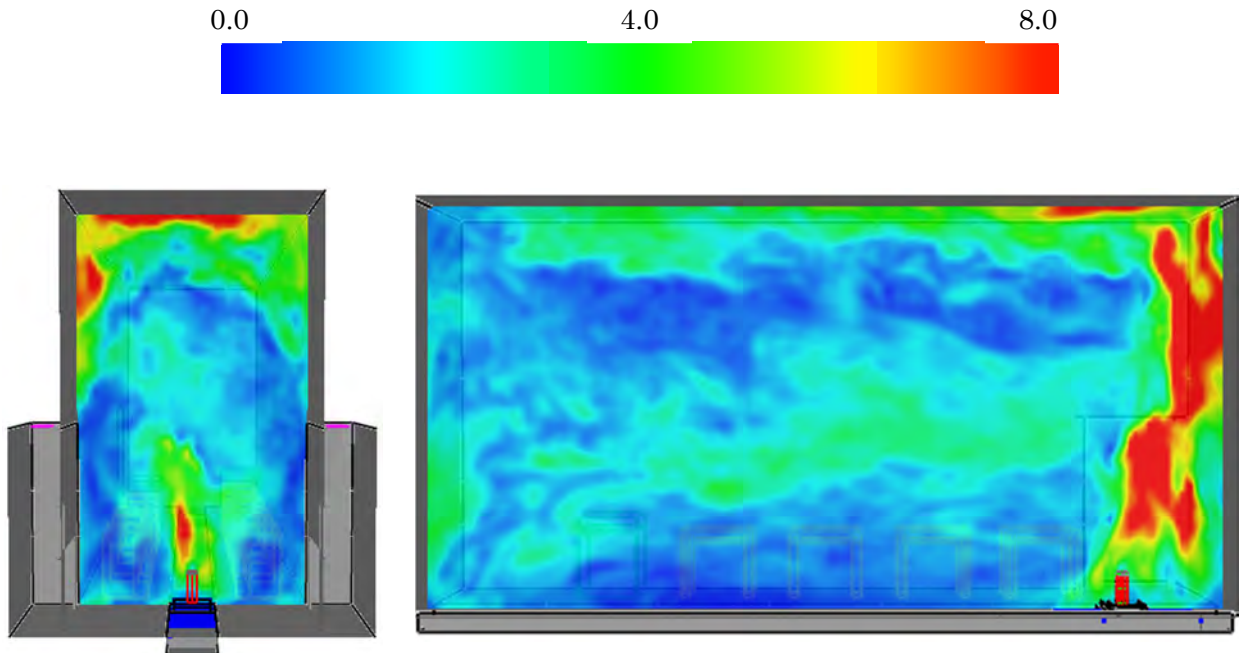


(a) ガラス固化体中央断面

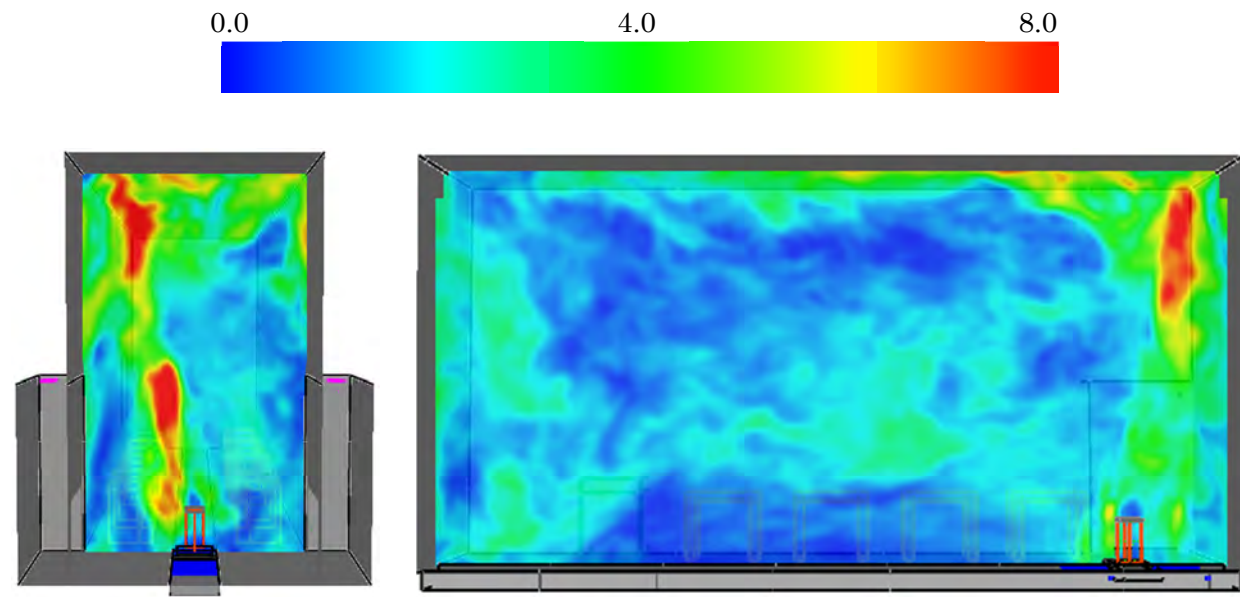


(b) オーバーパック中央断面

図 2.5 250 秒における酸素濃度分布 [g O₂/g ガス]

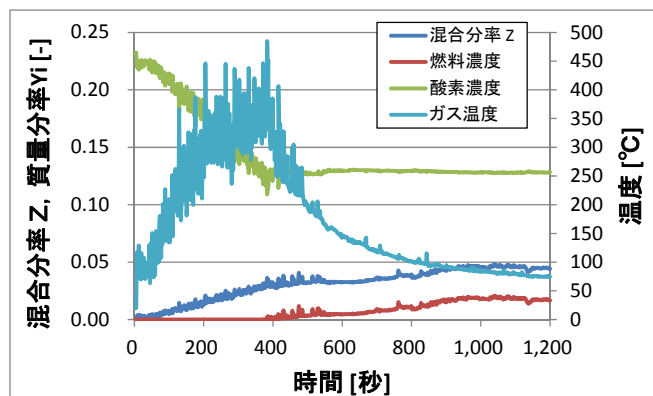


(a) ガラス固化体中央断面

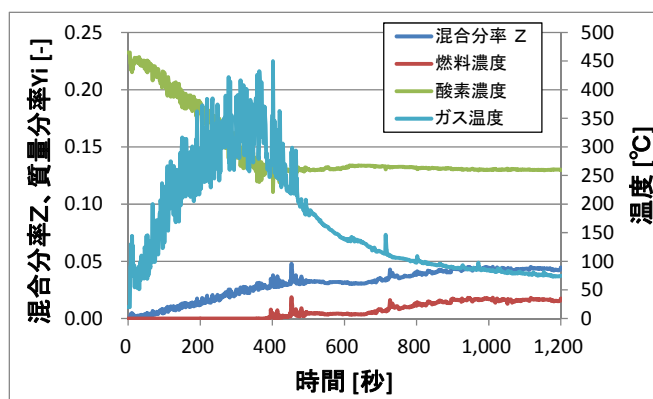


(b) オーバーパック中央断面

図 2.6 250 秒におけるガス流速分布 (絶対値) [m/s]

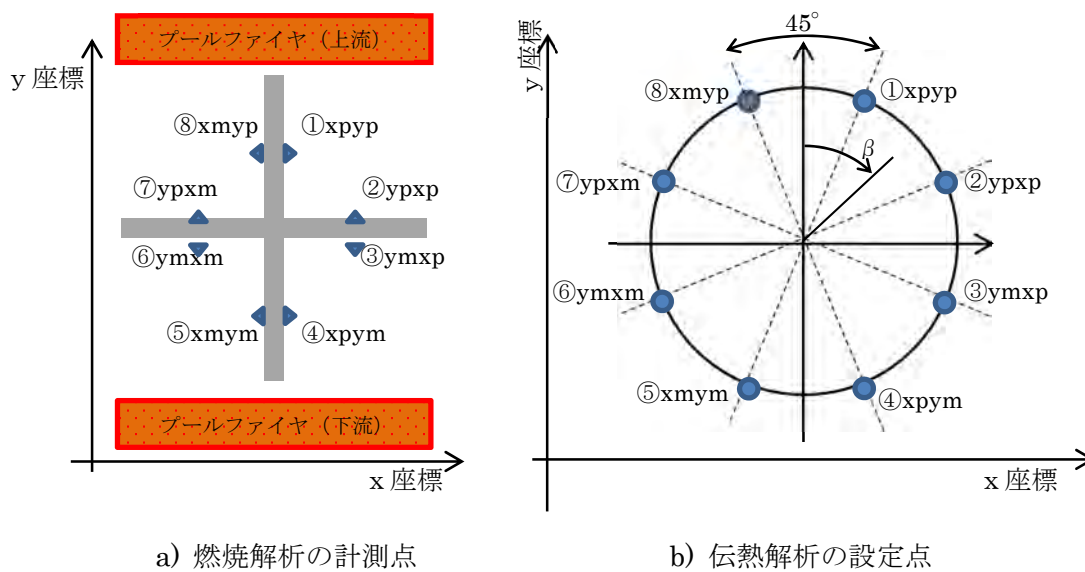


(a) ガラス固化体



(b) オーバーパック

図 2.7 火災の真上（天井 4 m 下）における温度や化学種濃度



a) 燃焼解析の計測点

b) 伝熱解析の設定点

図 2.8 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

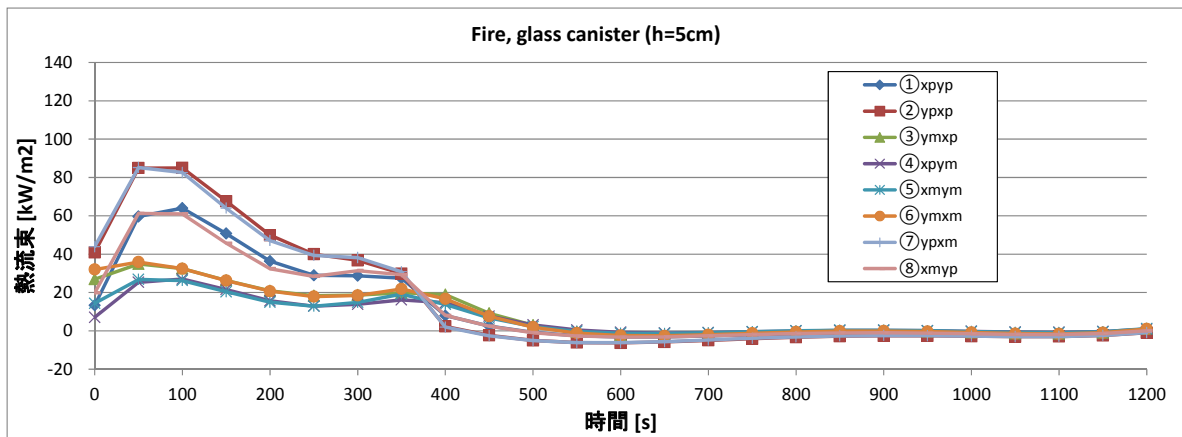
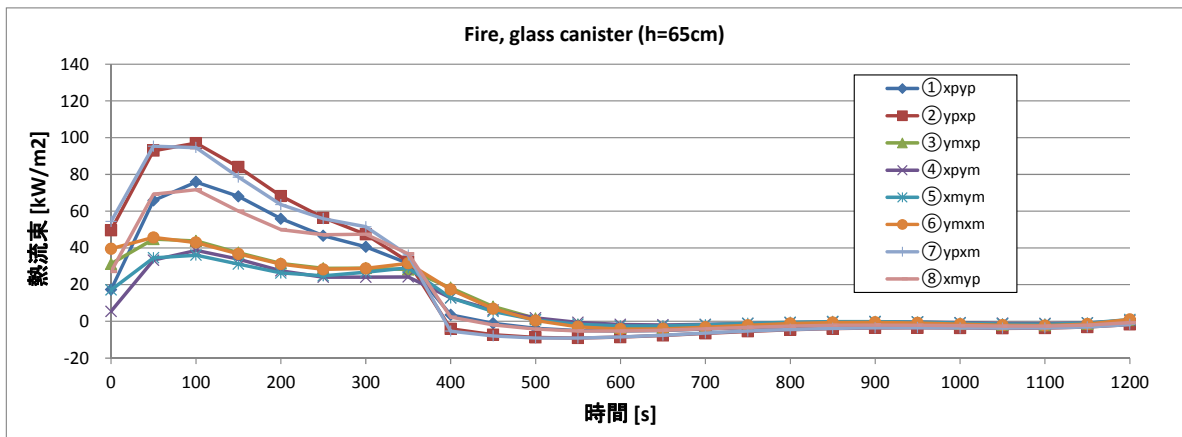
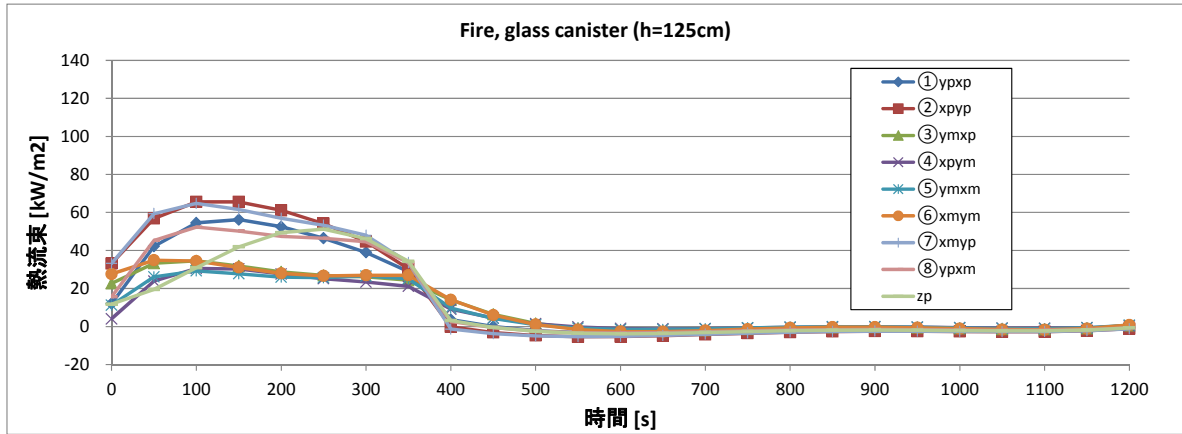


図 2.9 ガラス固化体への熱流束の時間による変化 (多項式近似)

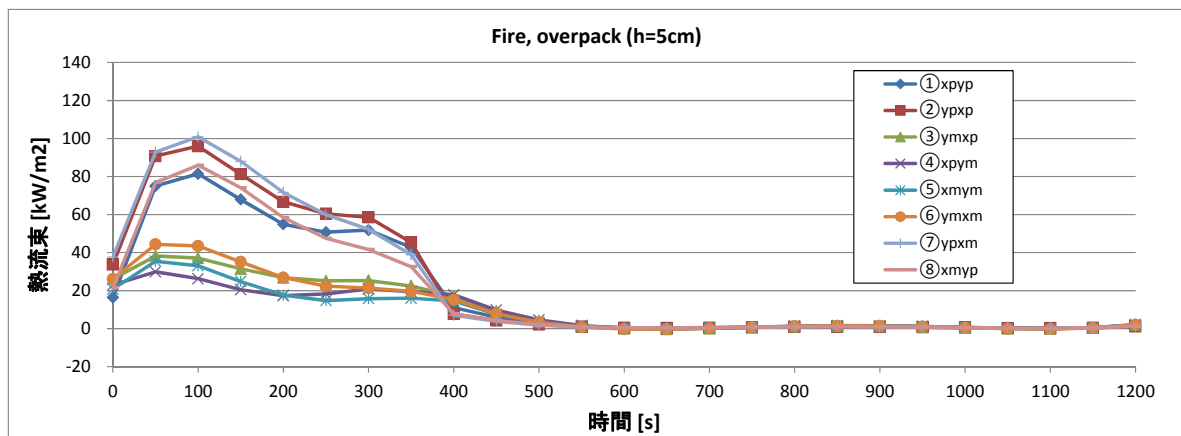
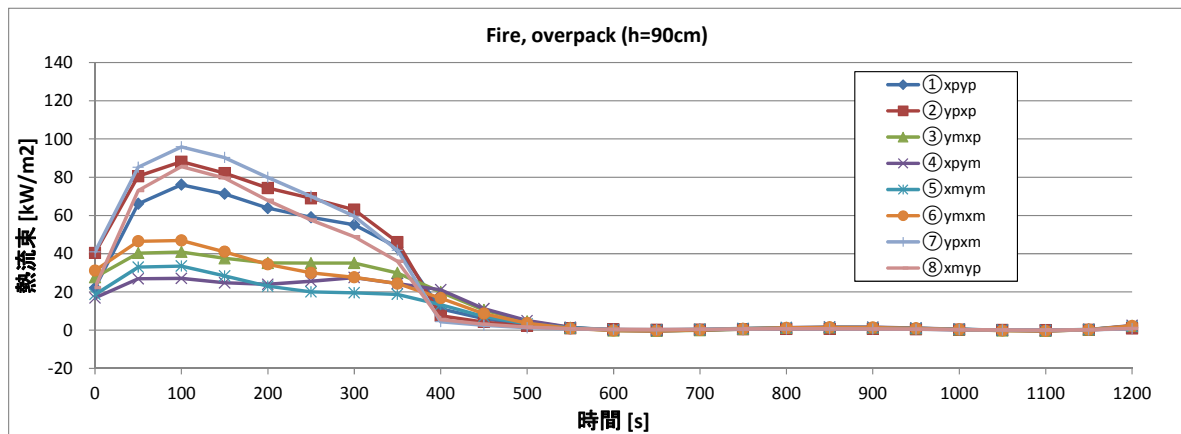
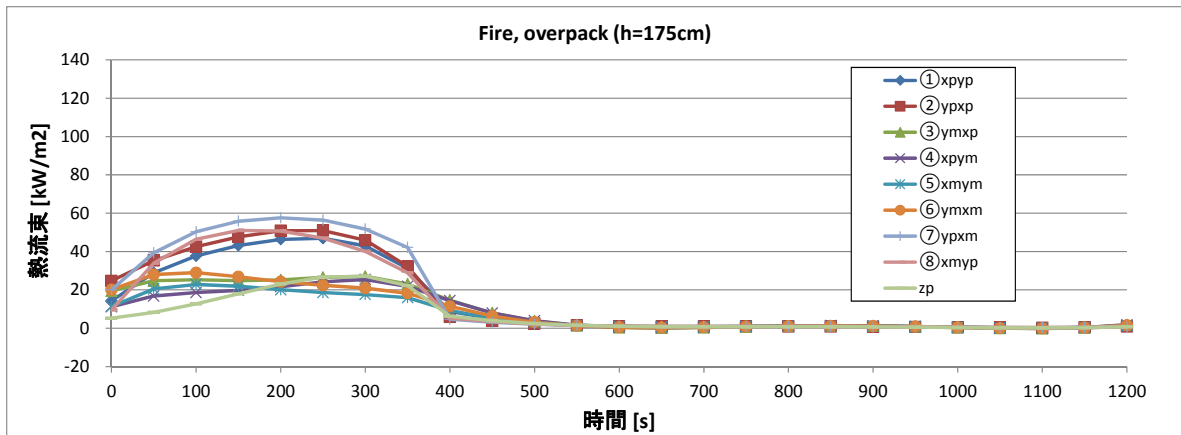


図 2.10 オーバーパックへの熱流束の時間による変化 (多項式近似)

2.2 伝熱解析

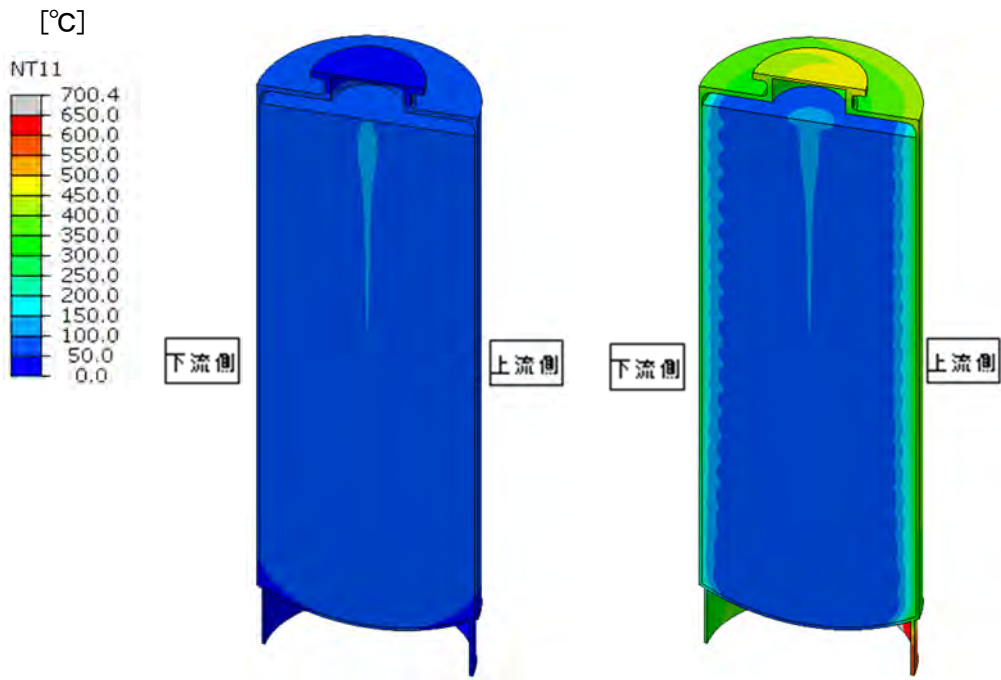
2.2.1 ガラス固化体単体モデル

図 2.8 で示された周方向 8 点について、図 2.9 に示された高さ方向 3 点 ($h=5\text{cm}$, 65cm , 125cm) における熱流束の時刻歴変化を境界条件として与える伝熱解析を行った。FEM 解析で用いたモデルにおける外面の要素への入熱量は、上記の熱流束算出位置と要素の周方向及び高さ方向の座標を用いて内挿し、モデル外面で入熱分布が滑らかに変化するように与えた。

図 2.11 から図 2.14 に伝熱解析の結果得られた温度時刻歴変化のうち、(a)火災前（定常温度状態）、(b)火災発生から 6.7 分（400 秒）、(c)火災発生から 20 分（1200 秒）、(d)火災発生から 130 分の各時点における温度分布図を示す。温度分布図は容器とガラスの切断図を、図中の「上流側」及び「下流側」は、ガラス固化体周辺の燃焼ガスの流れが、上流側から下流側に向かって流れていることを示している。同様に、図 2.15 から図 2.18 に容器内のガラスのみ表示した時の上記の各時点における温度分布図を示す。また、図 2.19 にガラスが最高温度に到達した時の温度分布図を示す。

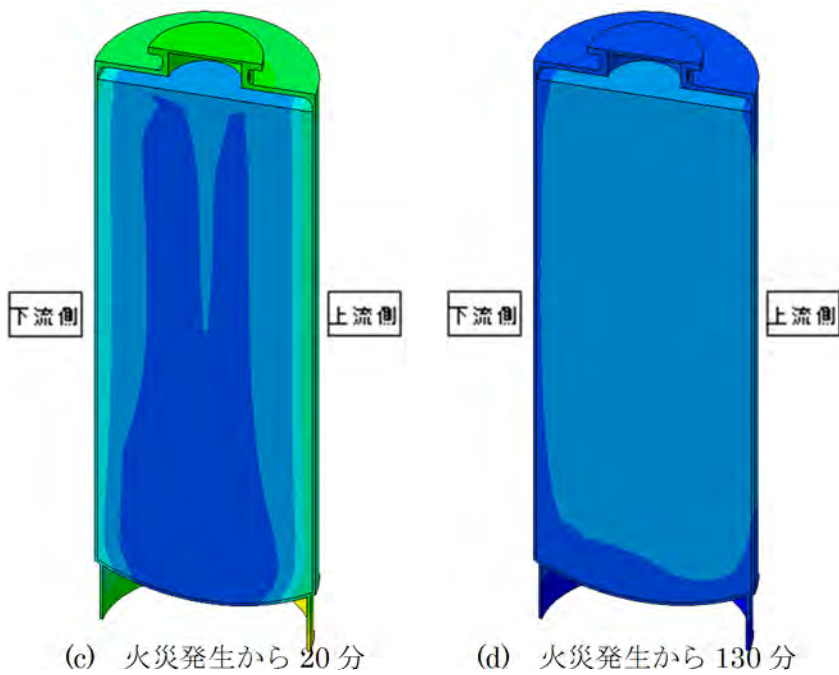
これらの図より、以下のことがわかる。

- ・ガラス固化体は容器のスカート部及び蓋部が高温になりやすく、 700°C 程度まで温度が上昇する。
- ・ガラスはガラス固化体容器側面の高温部に接した外面部において温度が最高になり、最高温度は 460°C 程度である。



(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 2.11 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ 容器とガラスの切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

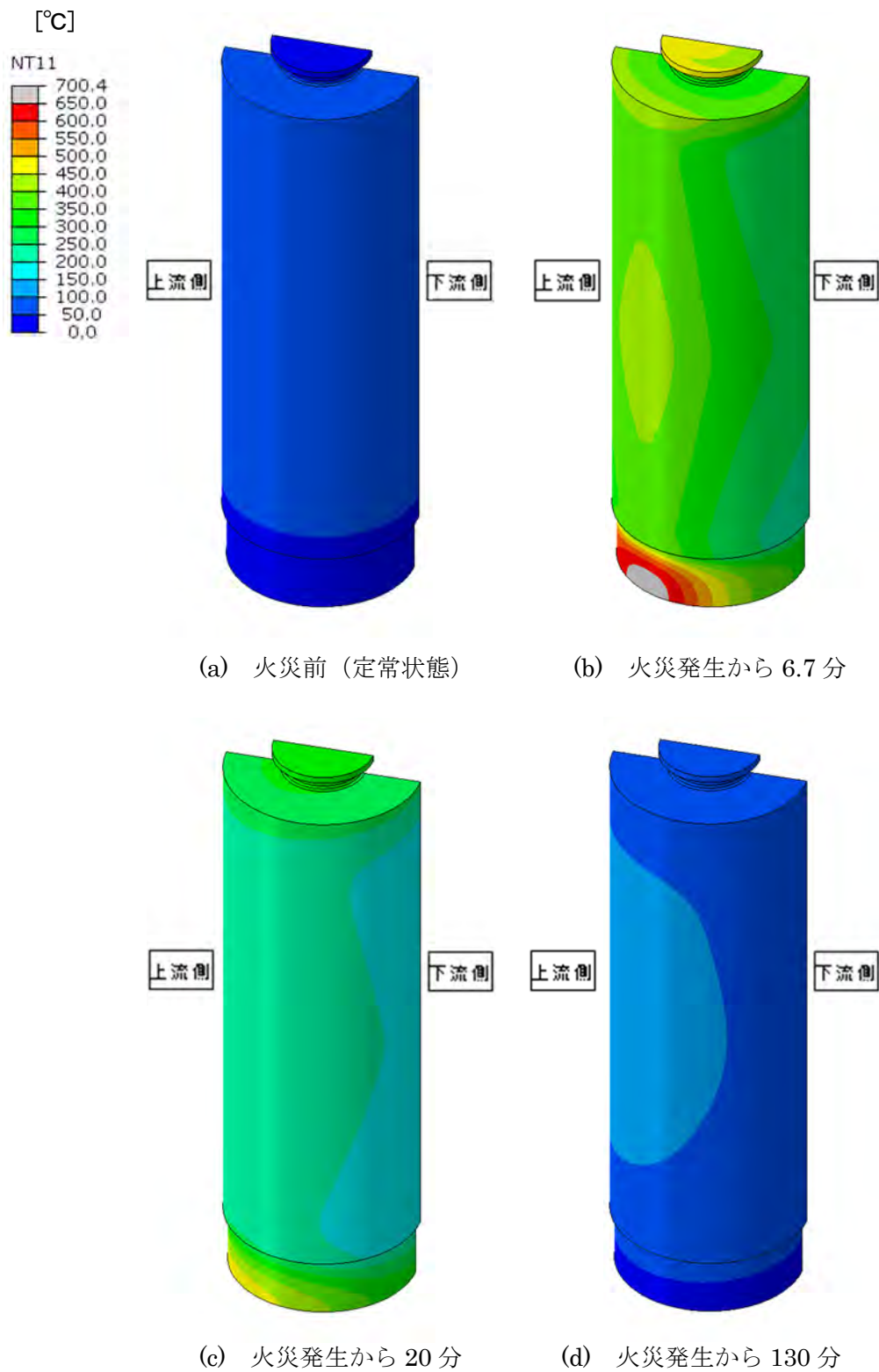


図 2.12 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ 容器とガラスの切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

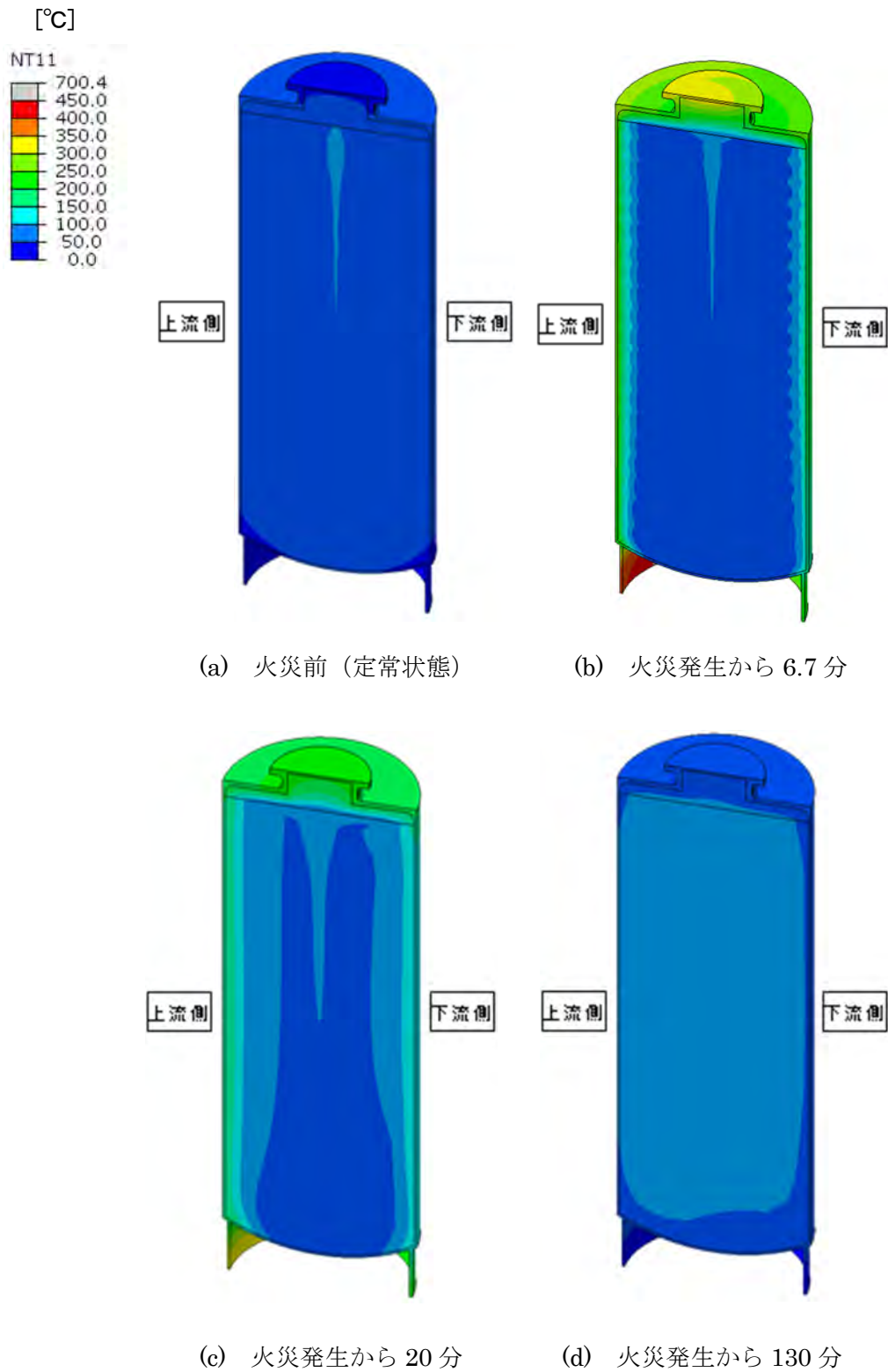
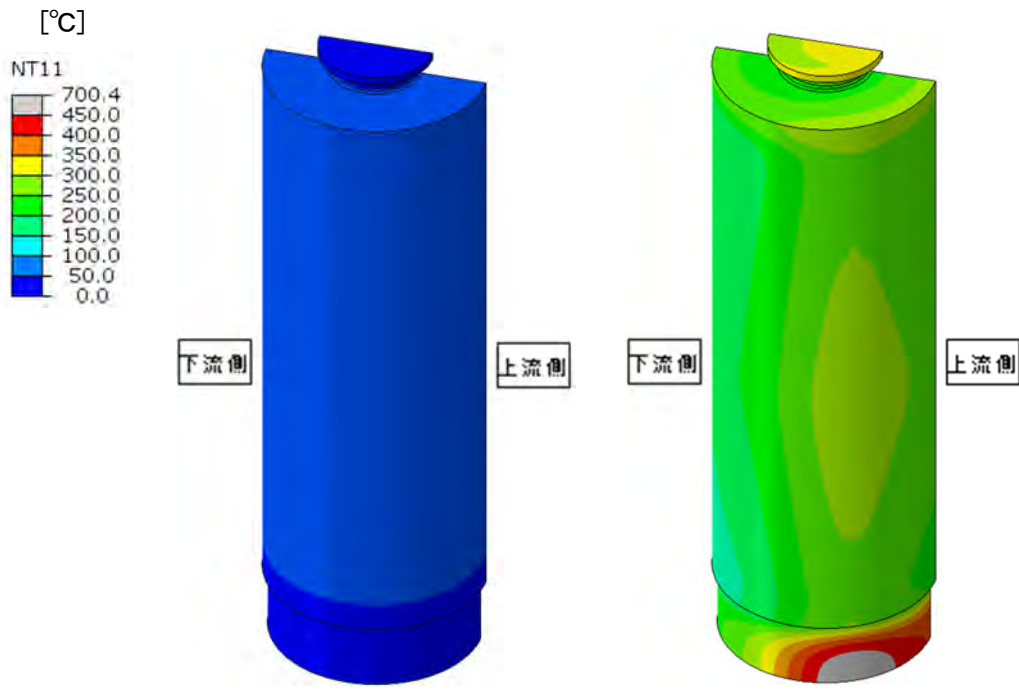
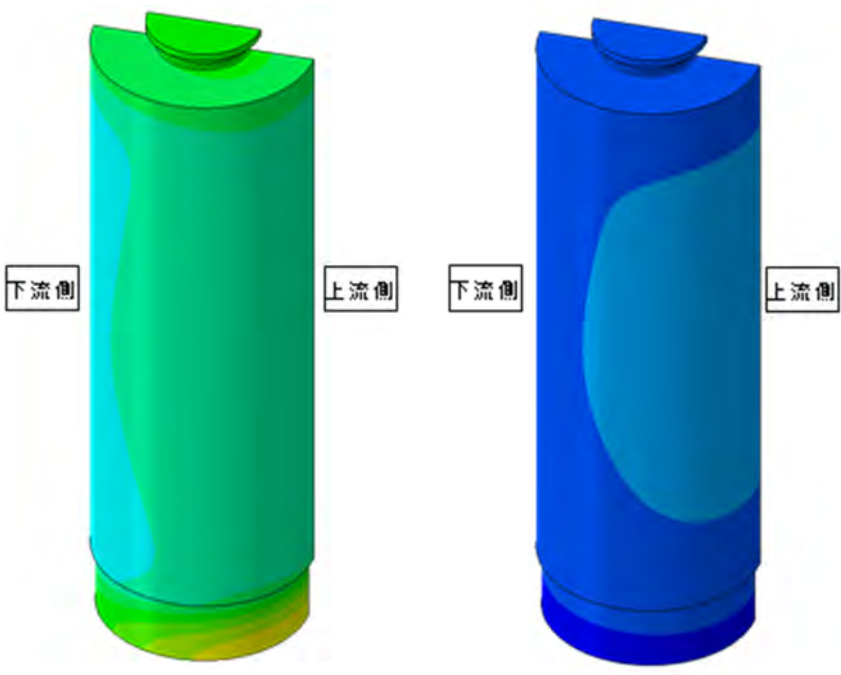


図 2.13 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ 容器とガラスの切断図：+X 側部を表示，内面側 ～



(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 2.14 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ 容器とガラスの切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

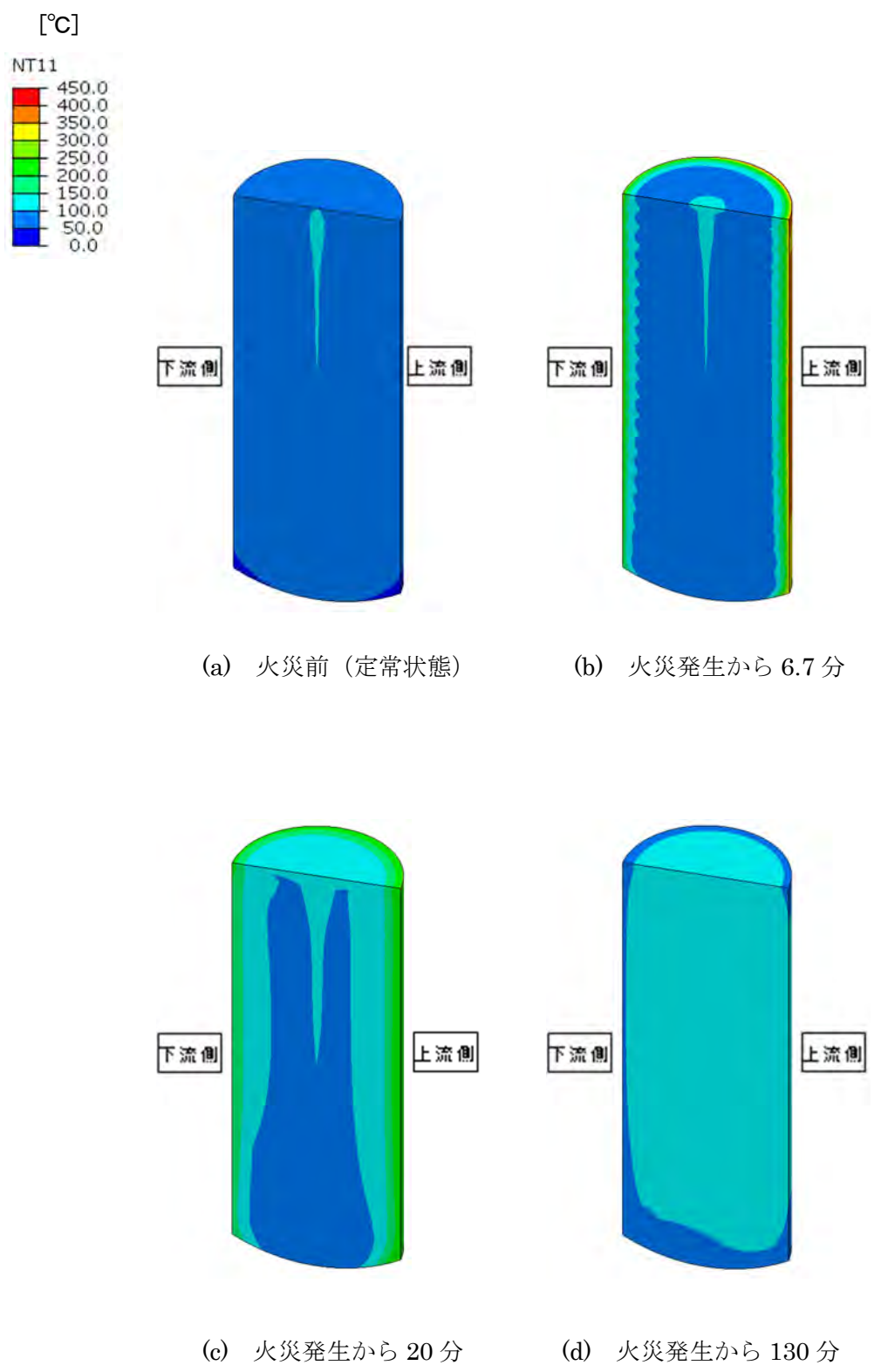
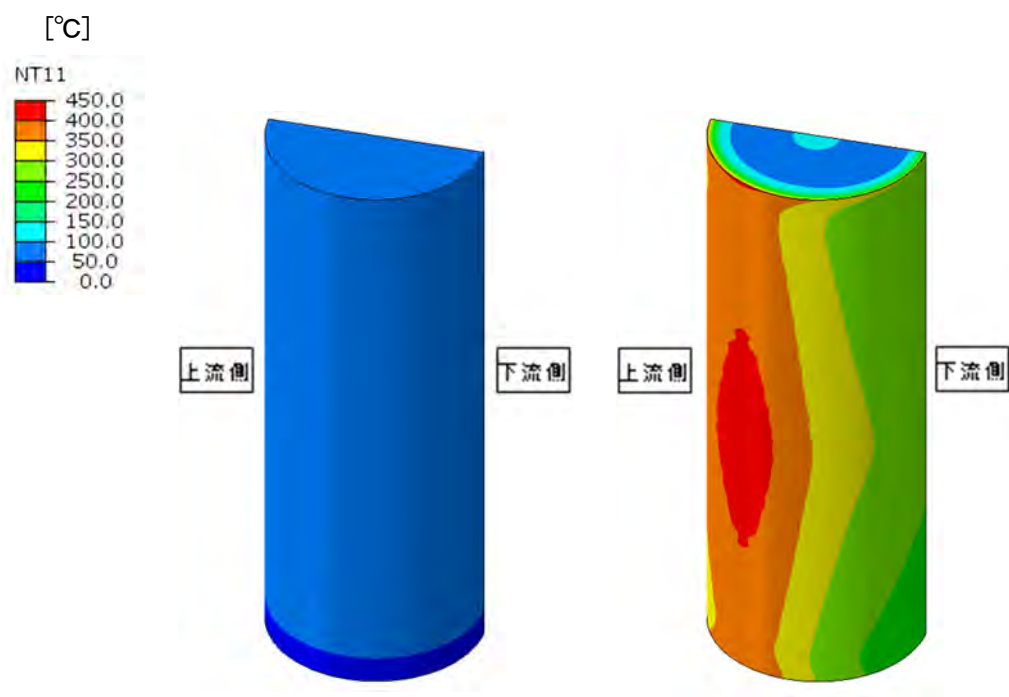
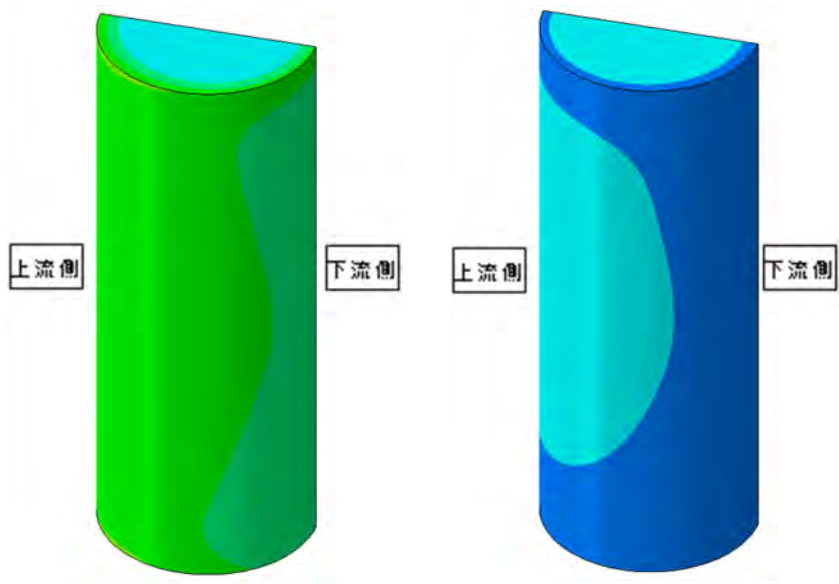


図 2.15 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ ガラスのみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～



(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 2.16 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ ガラスのみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

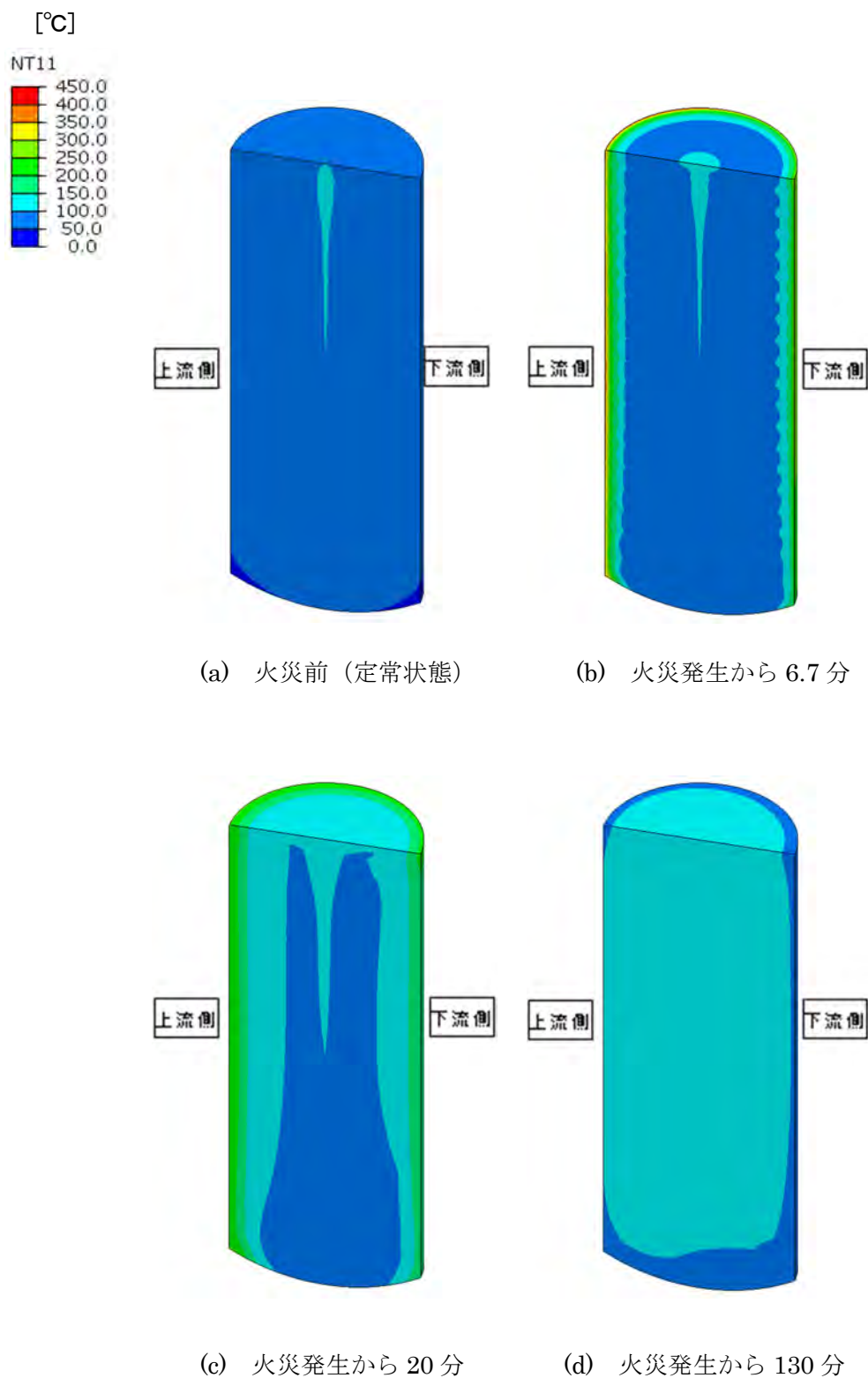


図 2.17 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ ガラスのみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

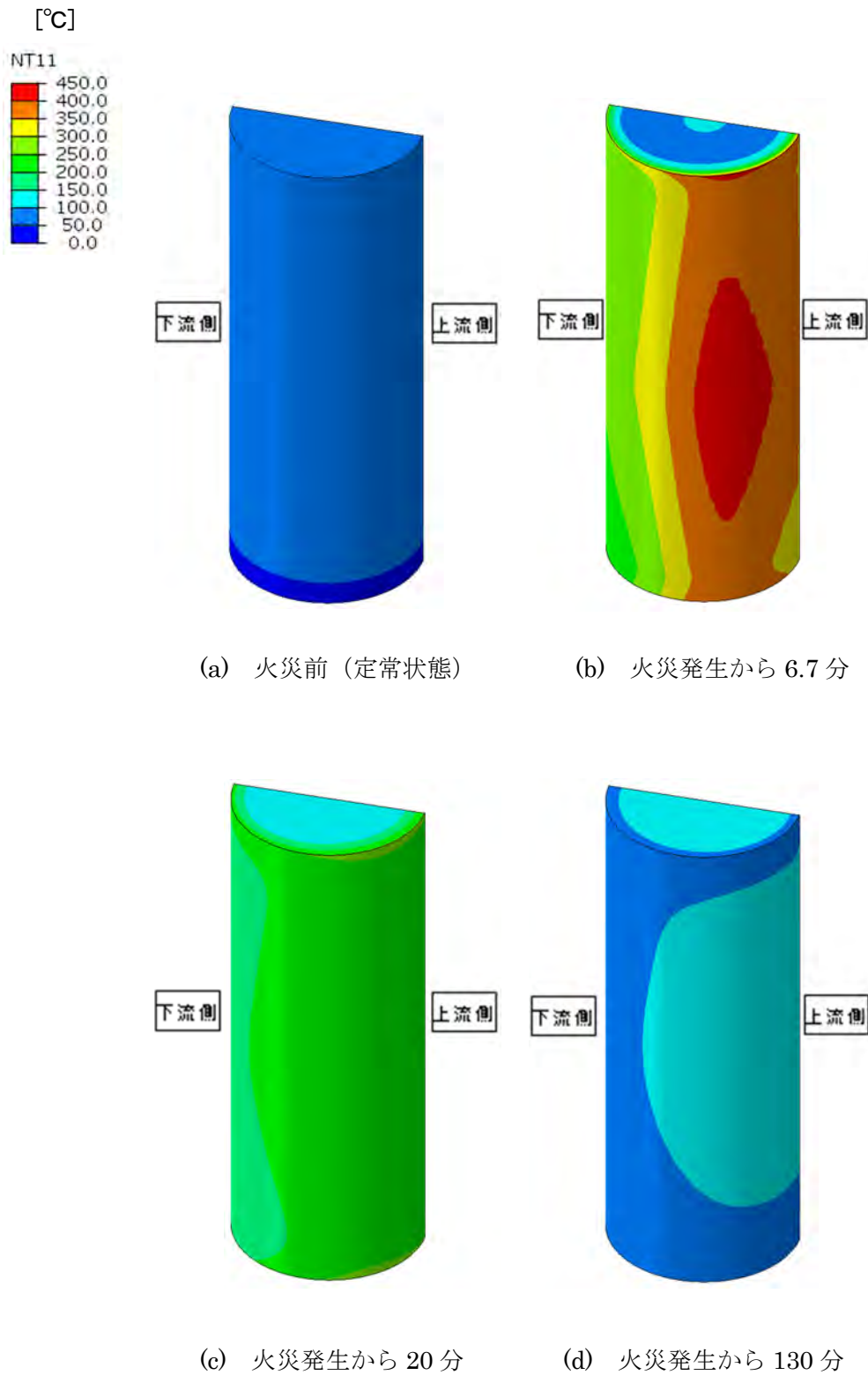


図 2.18 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ ガラスのみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

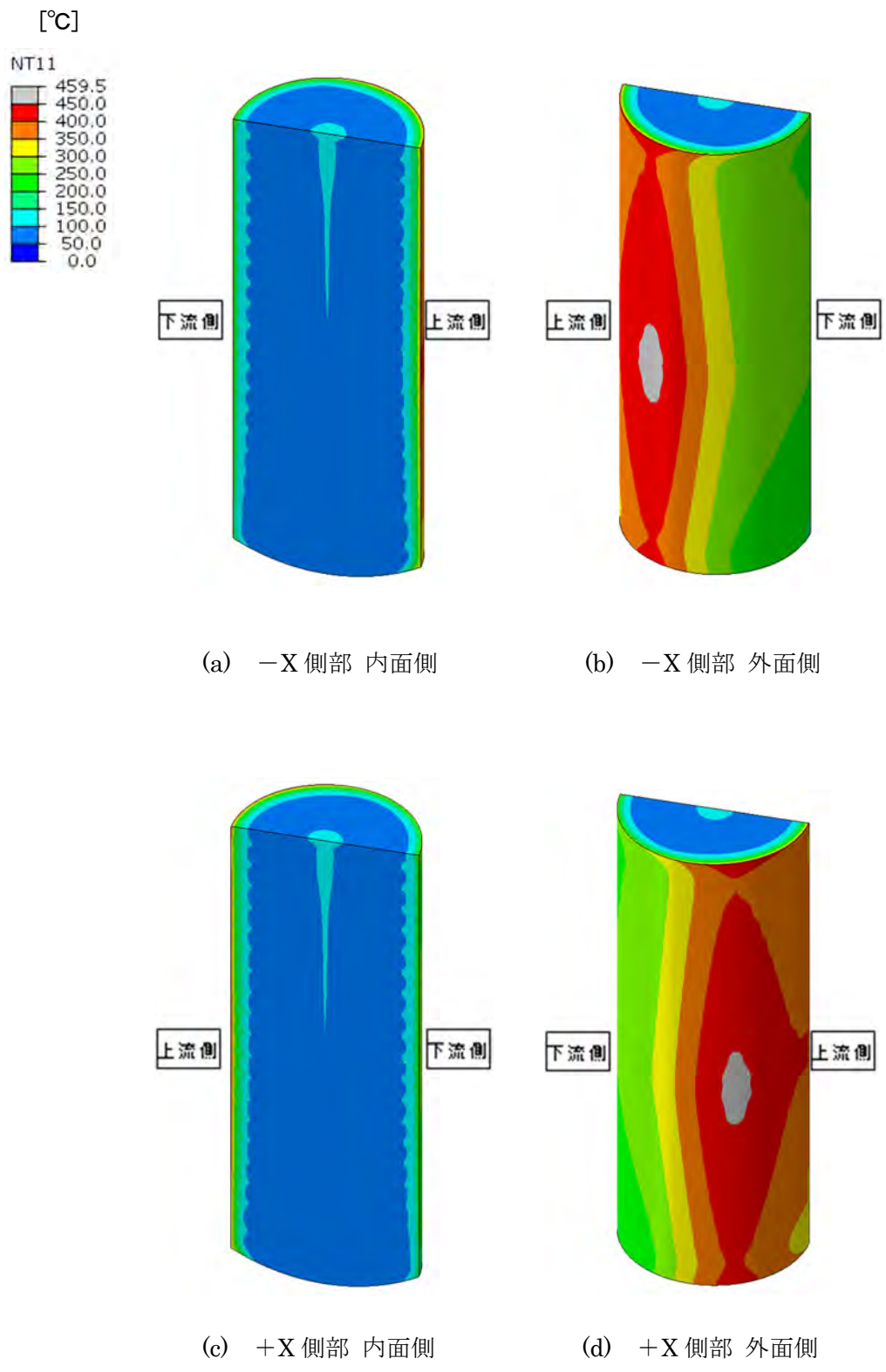


図 2.19 ガラス固化体単体モデルの温度分布
 ～ ガラス最高温度到達時：火災発生から 5.75 分後（345 秒後） ～

2.2.2 ガラス固化体+オーバーパックモデル

図 2.8 で示された周方向 8 点について、図 2.10 に示された高さ方向 3 点 (5cm, 90cm, 175cm) における熱流束の時刻歴変化を境界条件として与える伝熱解析を行った。FEM 解析で用いたモデルにおける外面の要素への入熱量は、上記の熱流束算出位置と要素の周方向及び高さ方向の座標を用いて内挿し、モデル外面で入熱分布が滑らかに変化するように与えた。

図 2.20 から図 2.23 に伝熱解析の結果得られた温度時刻歴変化のうち、(a)火災前 (定常温度状態)、(b)火災発生から 6.7 分 (400 秒)、(c)火災発生から 20 分 (1200 秒)、(d)火災発生から 130 分の各時点における温度分布図を示す。温度分布図はガラス固化体とオーバーパック容器の切断図を、図中の「上流側」及び「下流側」は、オーバーパック周辺の燃焼ガスの流れが、上流側から下流側に向かって流れていることを示している。また、図 2.24 にオーバーパックが最高温度に到達した時の温度分布図を示す。同様に、図 2.25 から図 2.28 にガラス固化体 (容器及びガラス) のみ表示した時の上記の各時点における温度分布図を示す。

これらの図より、以下のことがわかる。

- ・オーバーパックは蓋上部が高温になりやすいが最高でも 260°C程度であり、オーバーパックの熱容量が大きいいため、高温になる領域は極めて狭い領域に限られる。
- ・ガラス固化体の温度に顕著な変化が表れてくるのは、火災発生から数十分経過してからである。
- ・ガラス固化体容器は、容器が接しているオーバーパック底部からの熱伝導により、スカート部から温度上昇するとともに、オーバーパック胴部内面のギャップを通じた入熱により、側面からも緩やかに加熱される。
- ・火災入熱に対するオーバーパックの緩衝効果は大きく、ガラスの最高温度は火災発生から 130 分経過時に 134.1°Cである (初期状態におけるガラス最高温度は 133.4°C)。

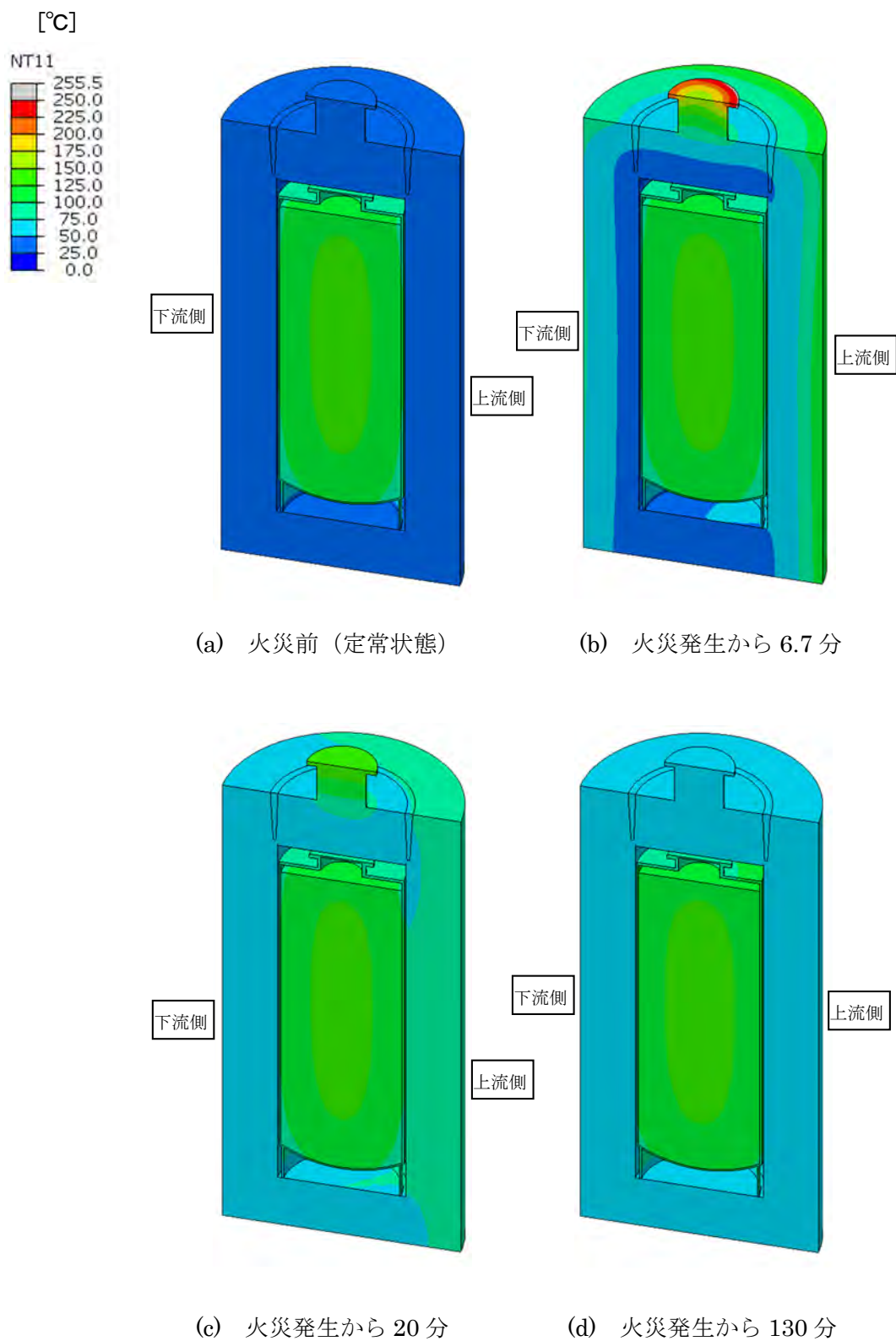
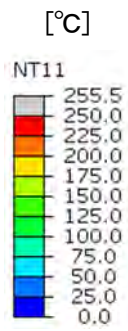


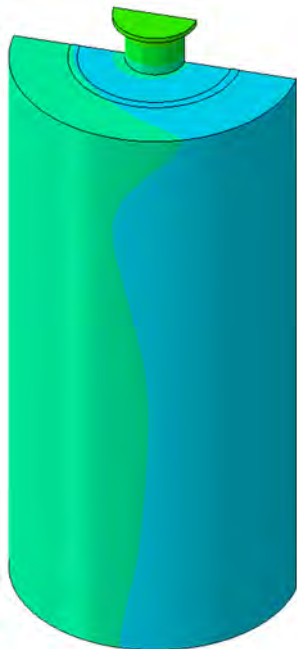
図 2.20 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体とオーバーパックの切断図：-X 側部を表示，内面側 ～



(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

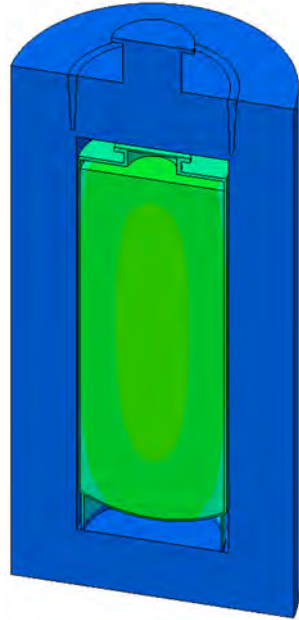
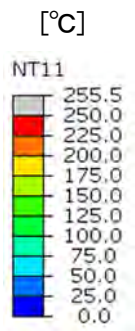


(c) 火災発生から 20 分

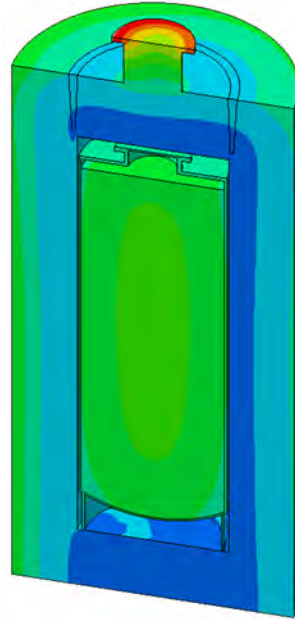


(d) 火災発生から 130 分

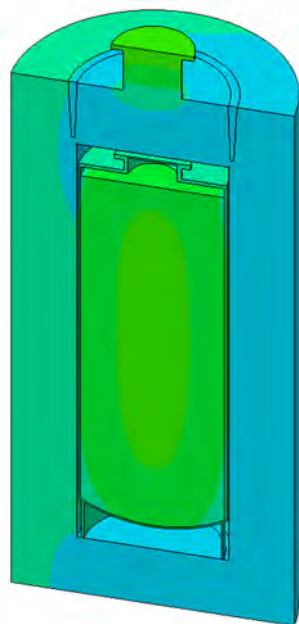
図 2.21 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体とオーバーパックの切断図：-X 側部を表示，外面側 ～



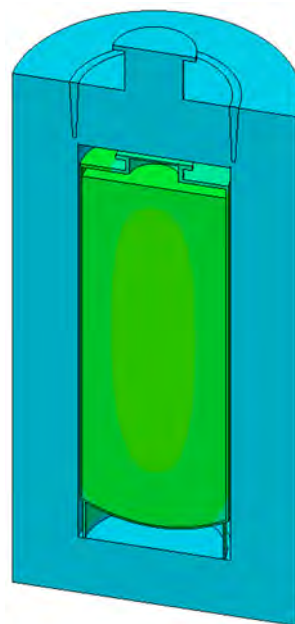
(a) 火災前 (定常状態)



(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 2.22 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体とオーバーパックの切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

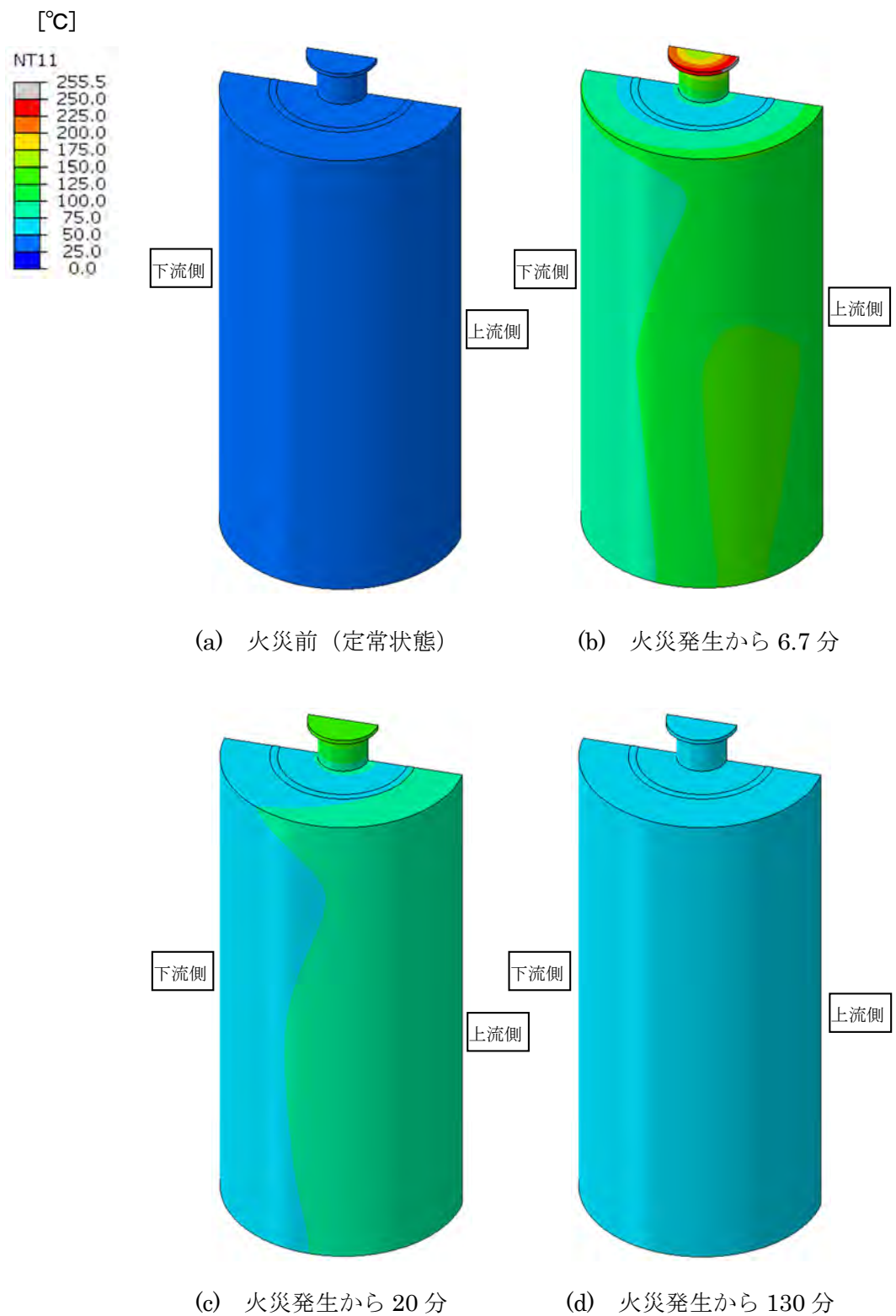


図 2.23 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体とオーバーパックの切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

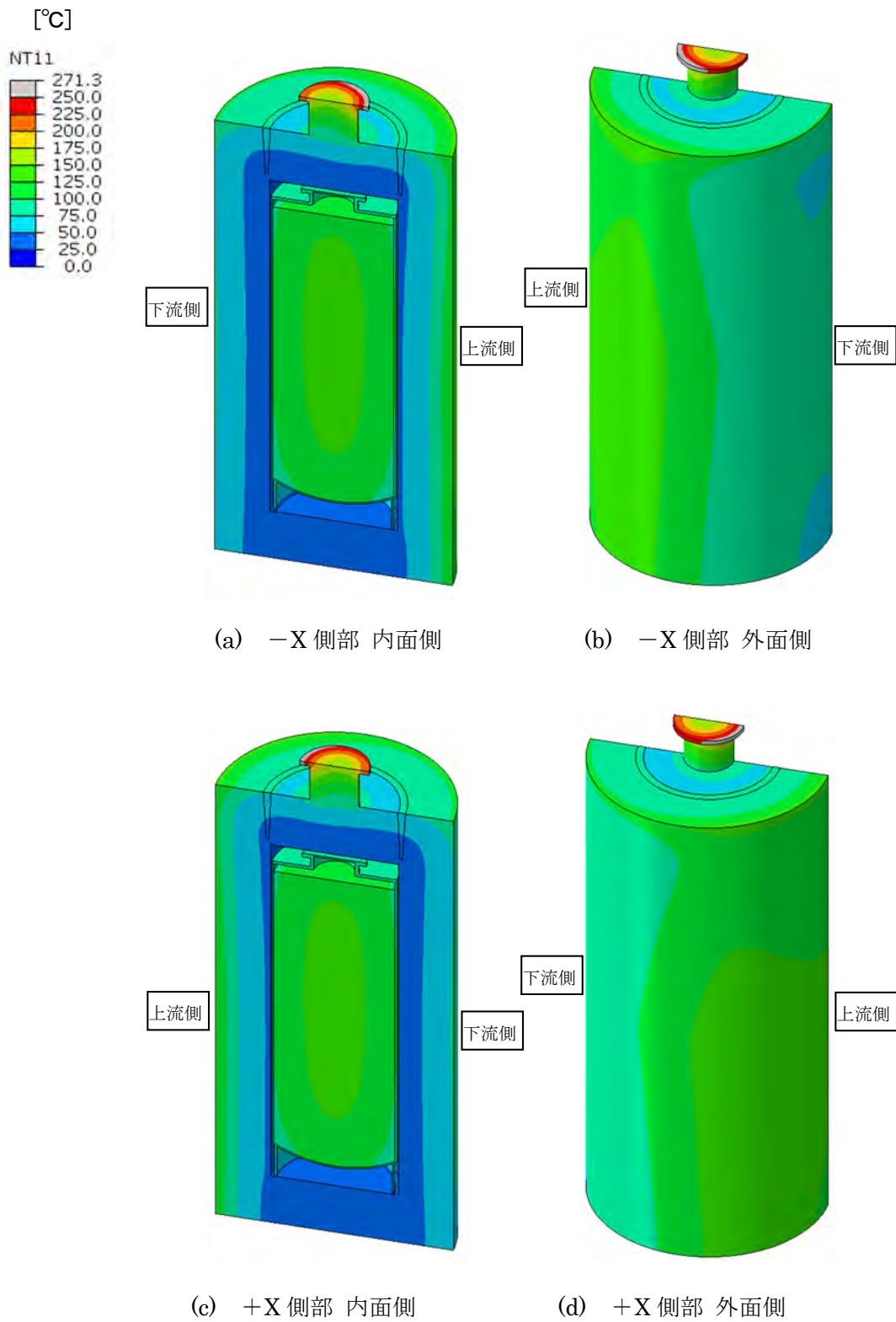


図 2.24 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ オーバーパック最高温度到達時：火災発生から 6.2 分後 (372 秒後) ～

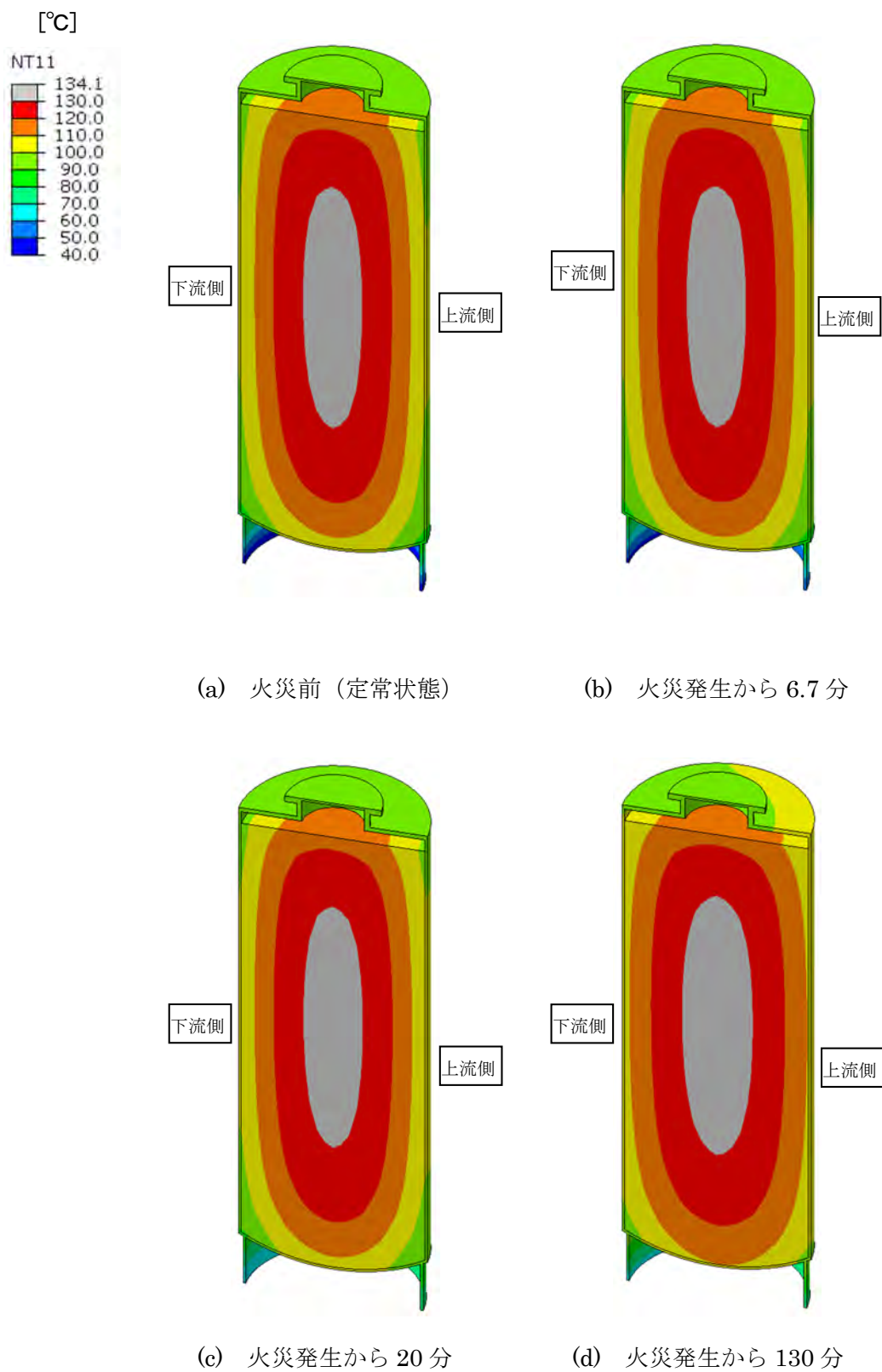
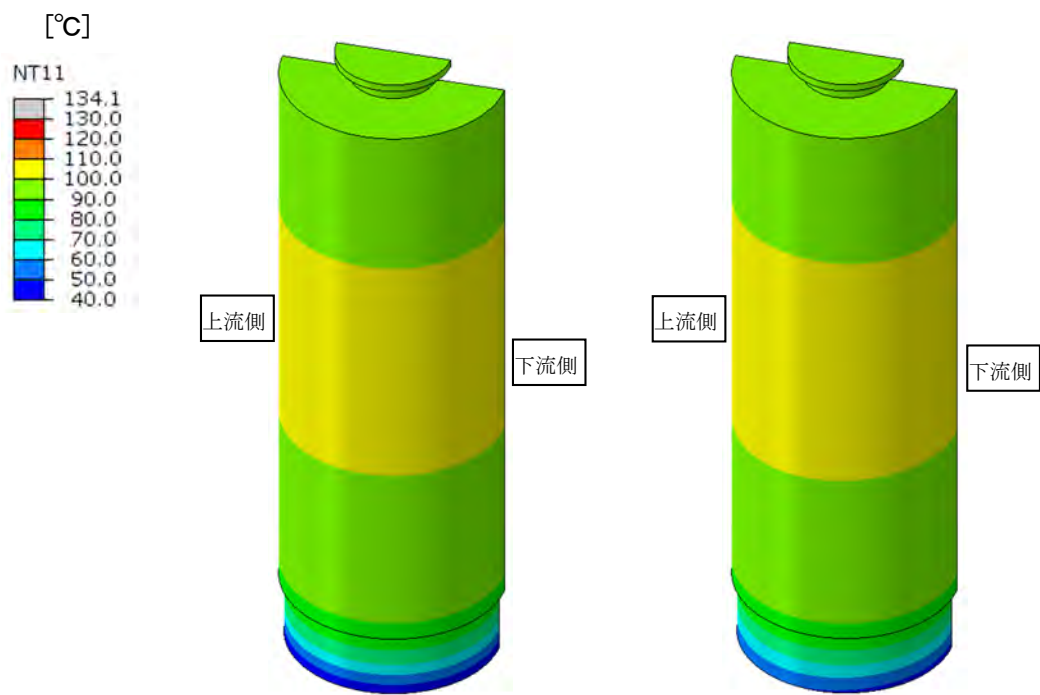
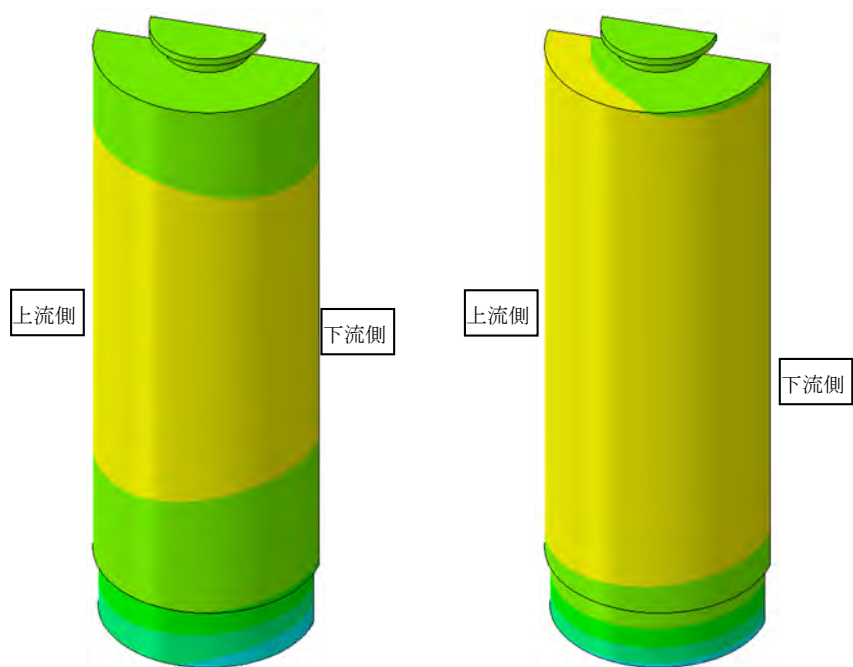


図 2.25 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～



(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 2.26 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

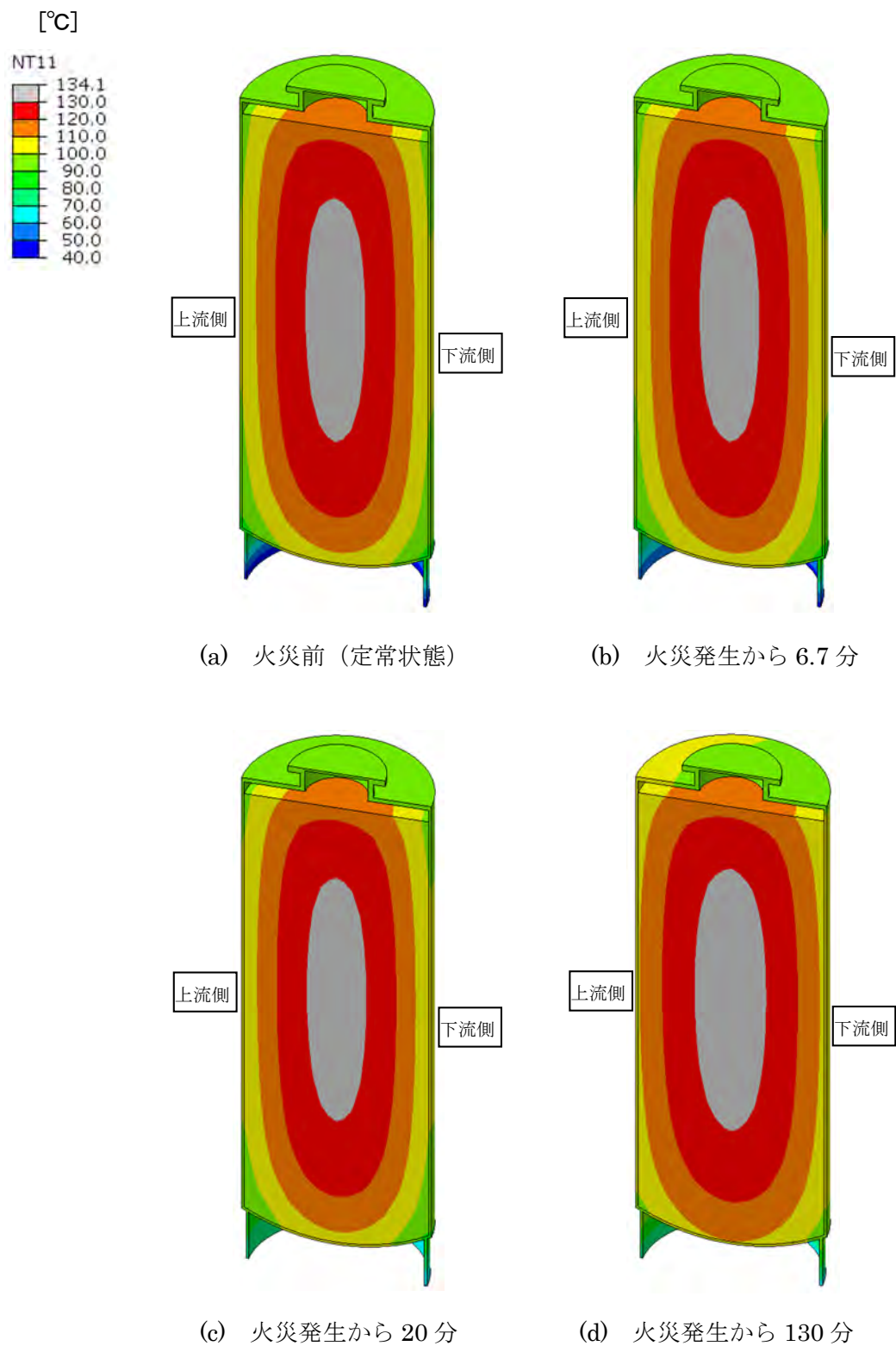


図 2.27 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ～ ガラス固化体の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

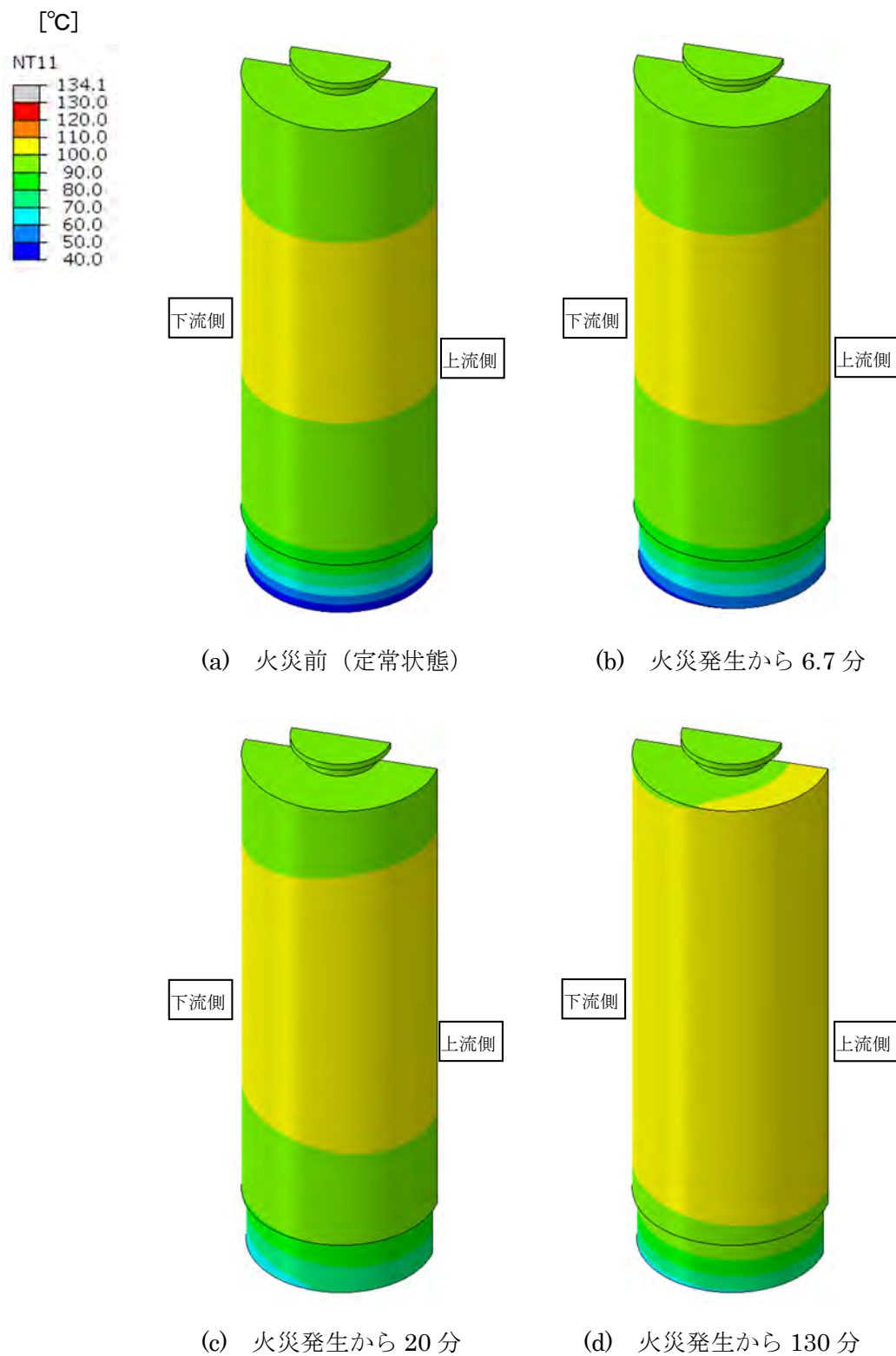


図 2.28 ガラス固化体+オーバーパックモデルの温度分布
 ~ ガラス固化体の切断図：+X 側部を表示，外面側 ~

2.3 応力解析

2.3.1 ガラス固化体単体モデル

応力解析においては、ガラスとガラス固化体キャニスタを一体化せず、それらの接触を考慮することで、以下の2つのステップによりガラス固化体キャニスタの応力を計算した。

① 初期状態算出ステップ

- ・伝熱解析で初期温度として求めた温度分布を与え、自重を負荷した解析

② 火災による入熱ステップ

- ・伝熱解析で火災入熱によって得られた温度時刻歴変化を熱荷重として与えた解析

図 2.29 から図 2.48 に応力解析の結果得られたガラス固化体キャニスタの相当応力分布、半径方向応力分布、周方向応力分布、軸方向応力分布、及び相当塑性ひずみ分布の時刻変化を示す。

これらの図より、スカート部とその近傍で相当応力が 200MPa 超になるほか、胴部や蓋部でも温度勾配に起因する熱応力により局所的に 100MPa 程度の相当応力が生じることがわかる。また、ガラス固化体キャニスタのスカート付け根部では、塑性ひずみが 5.3%程度生じる結果となった。

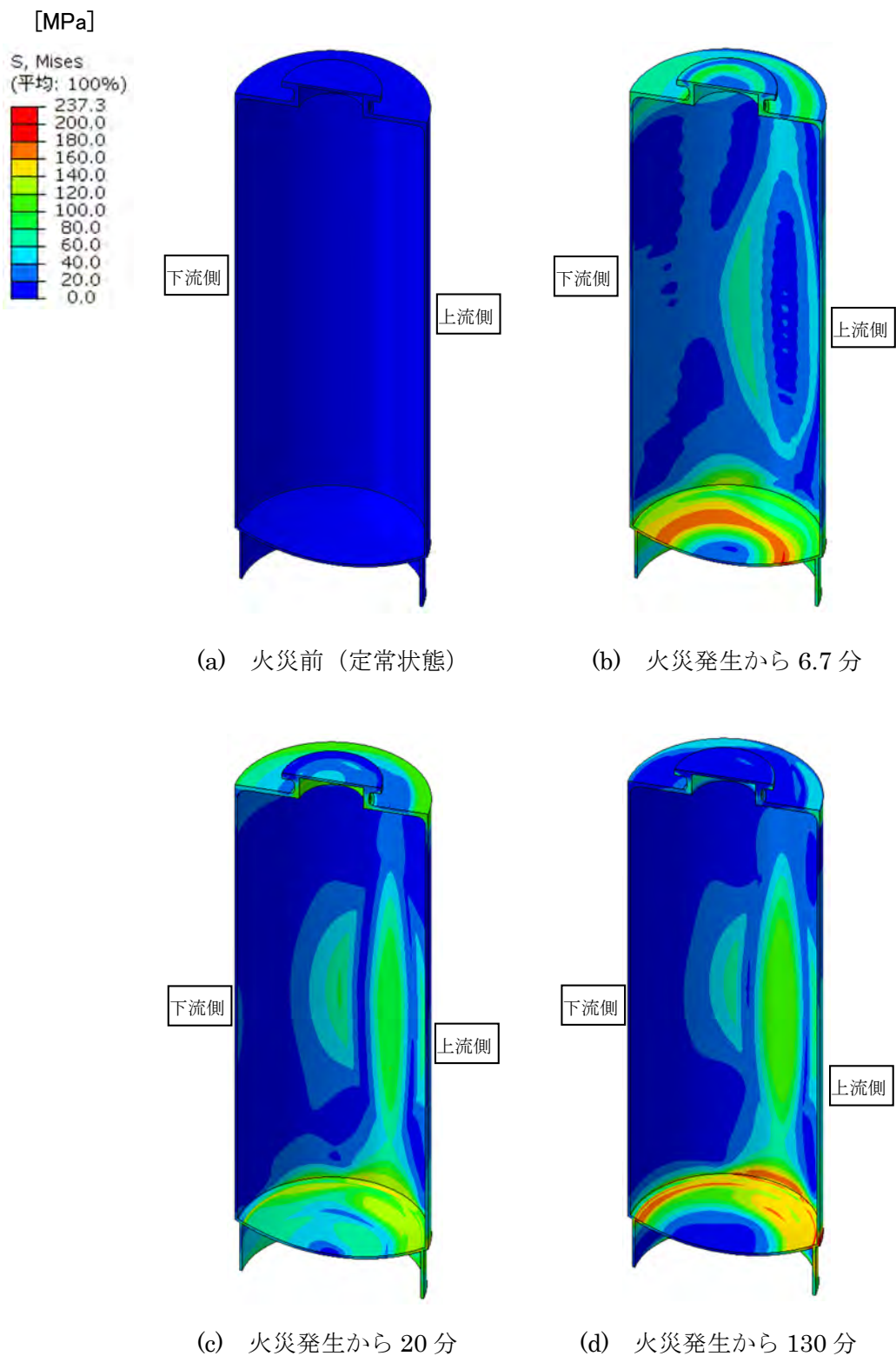


図 2.29 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

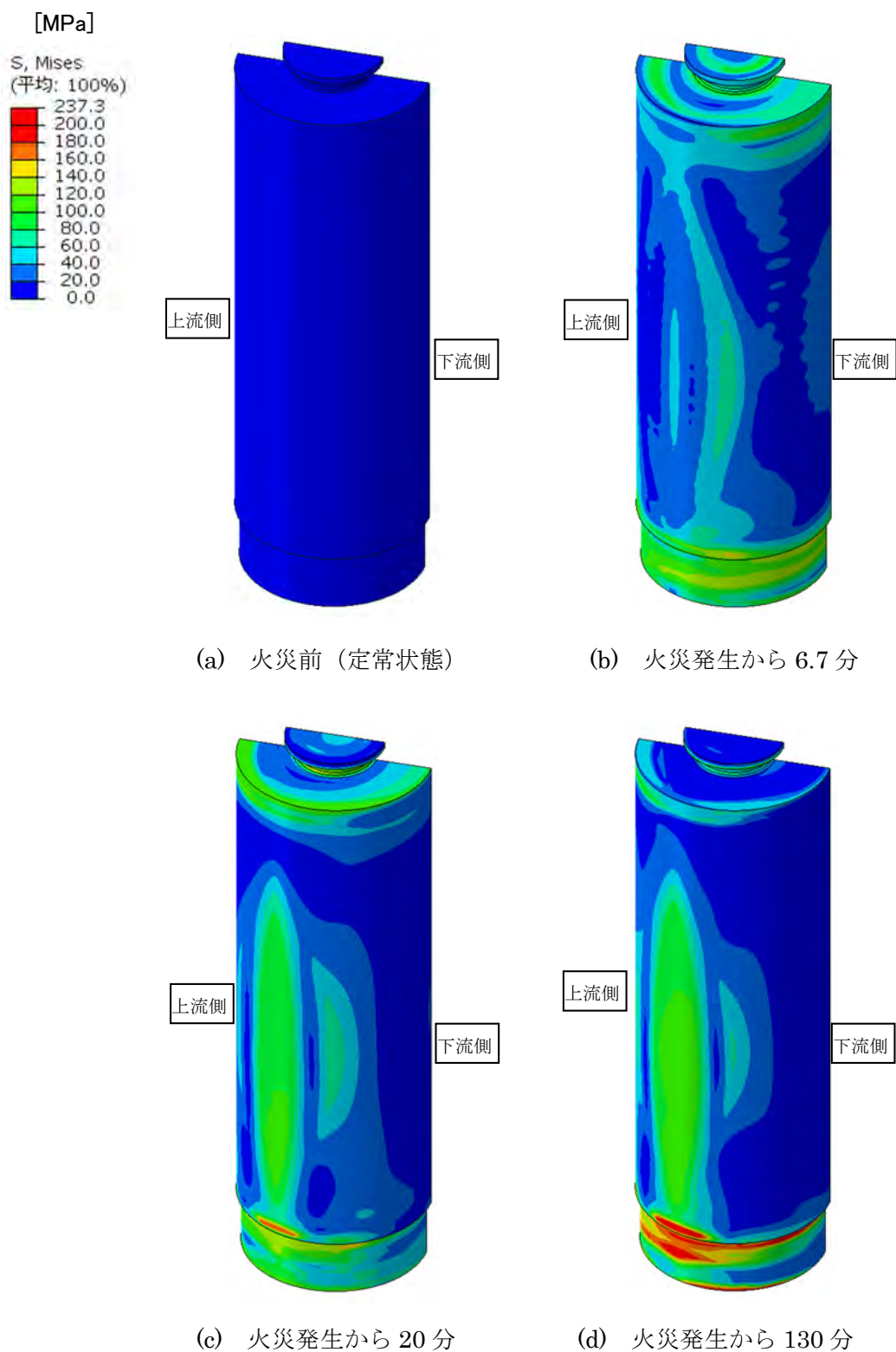


図 2.30 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

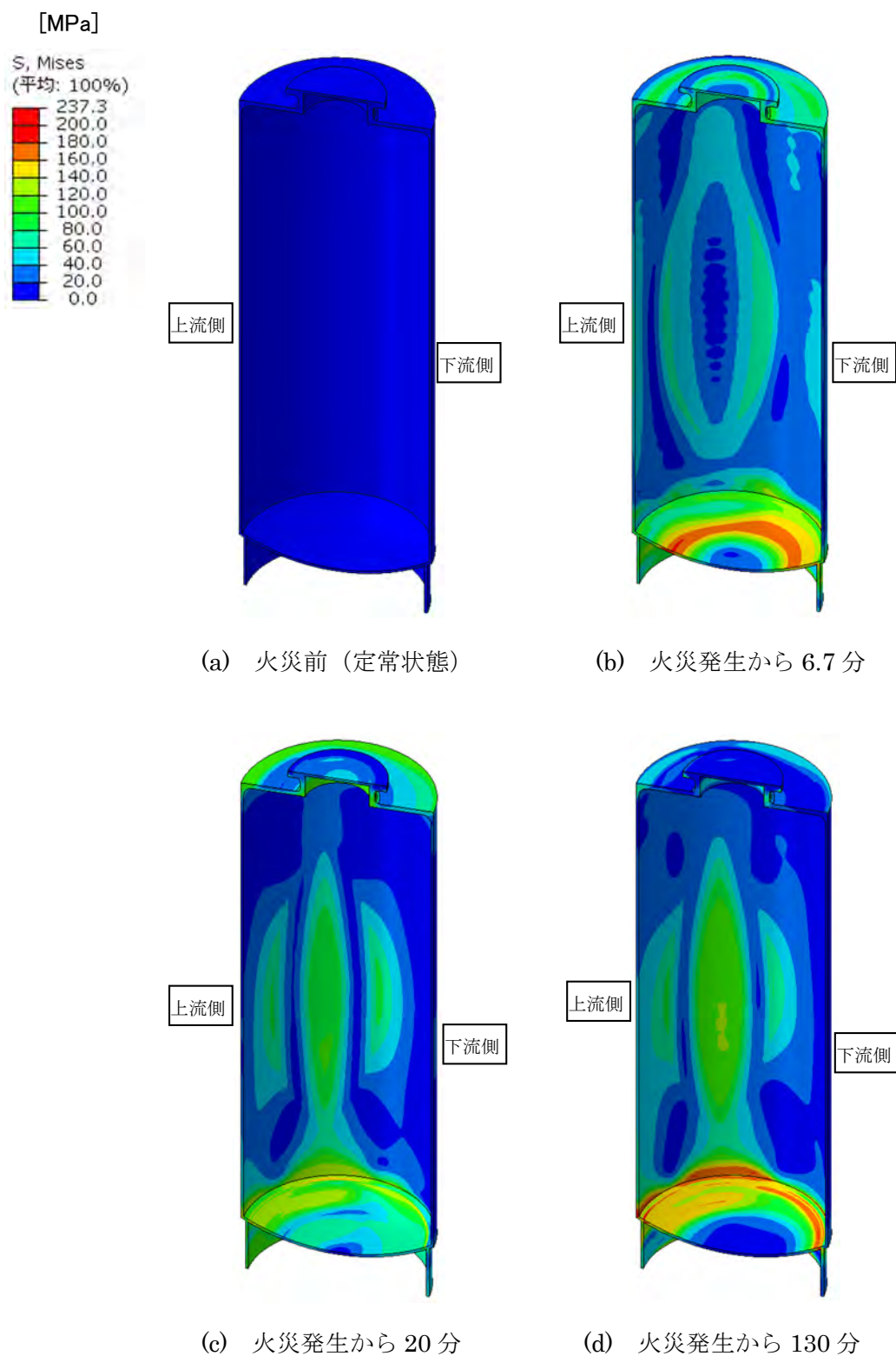


図 2.31 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

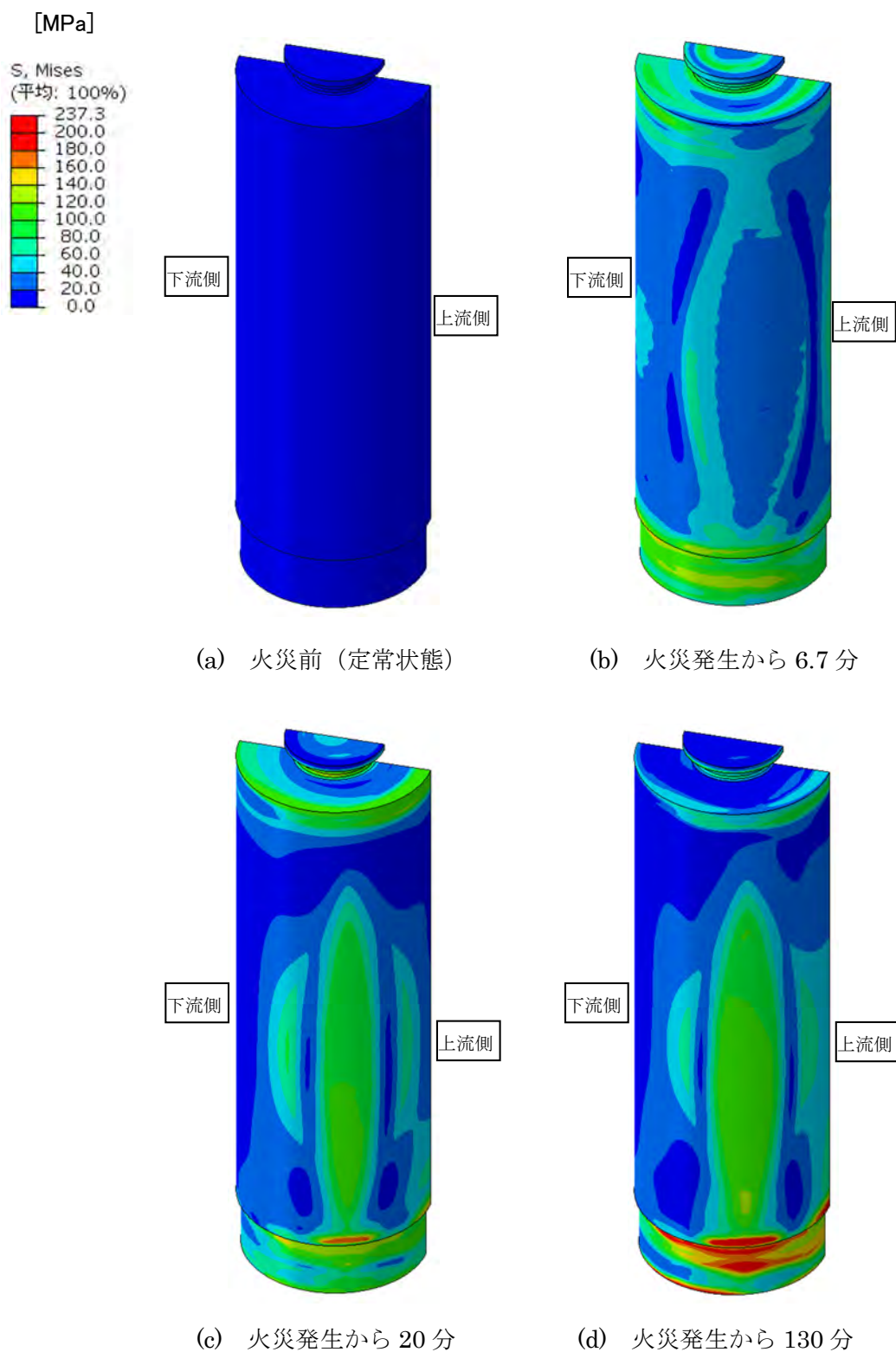
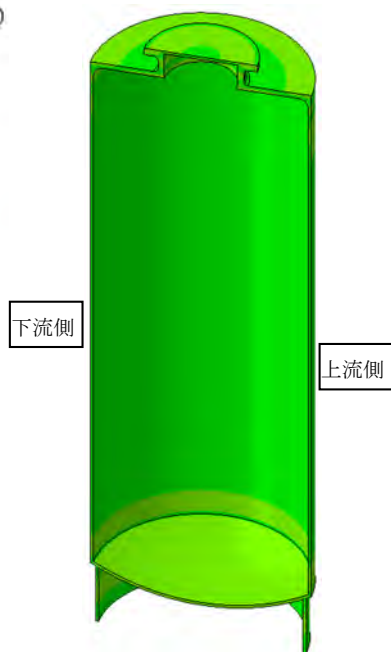
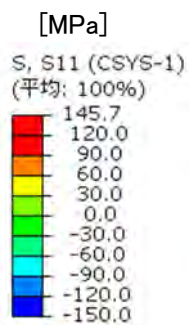
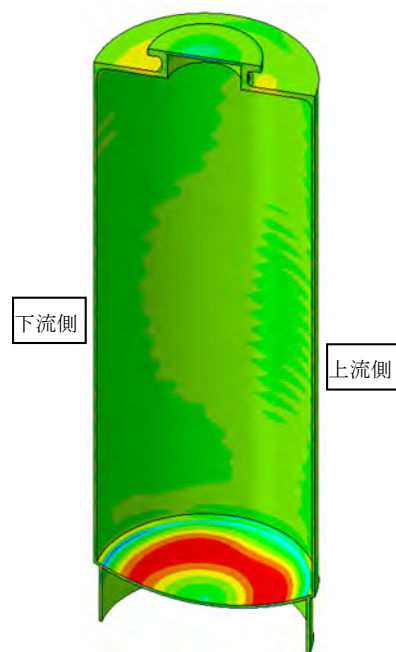


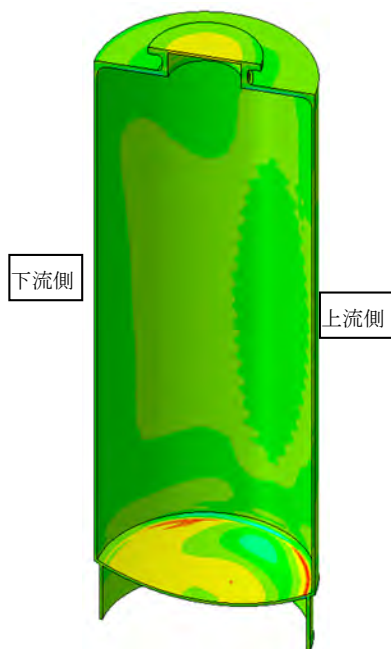
図 2.32 ガラス固化体単体モデルの相当応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～



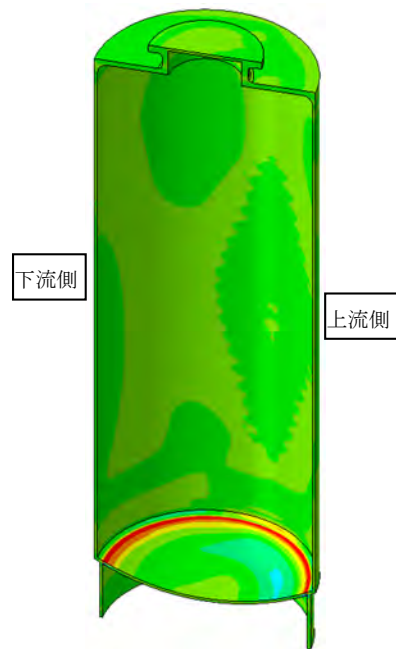
(a) 火災前 (定常状態)



(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 2.33 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布
～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

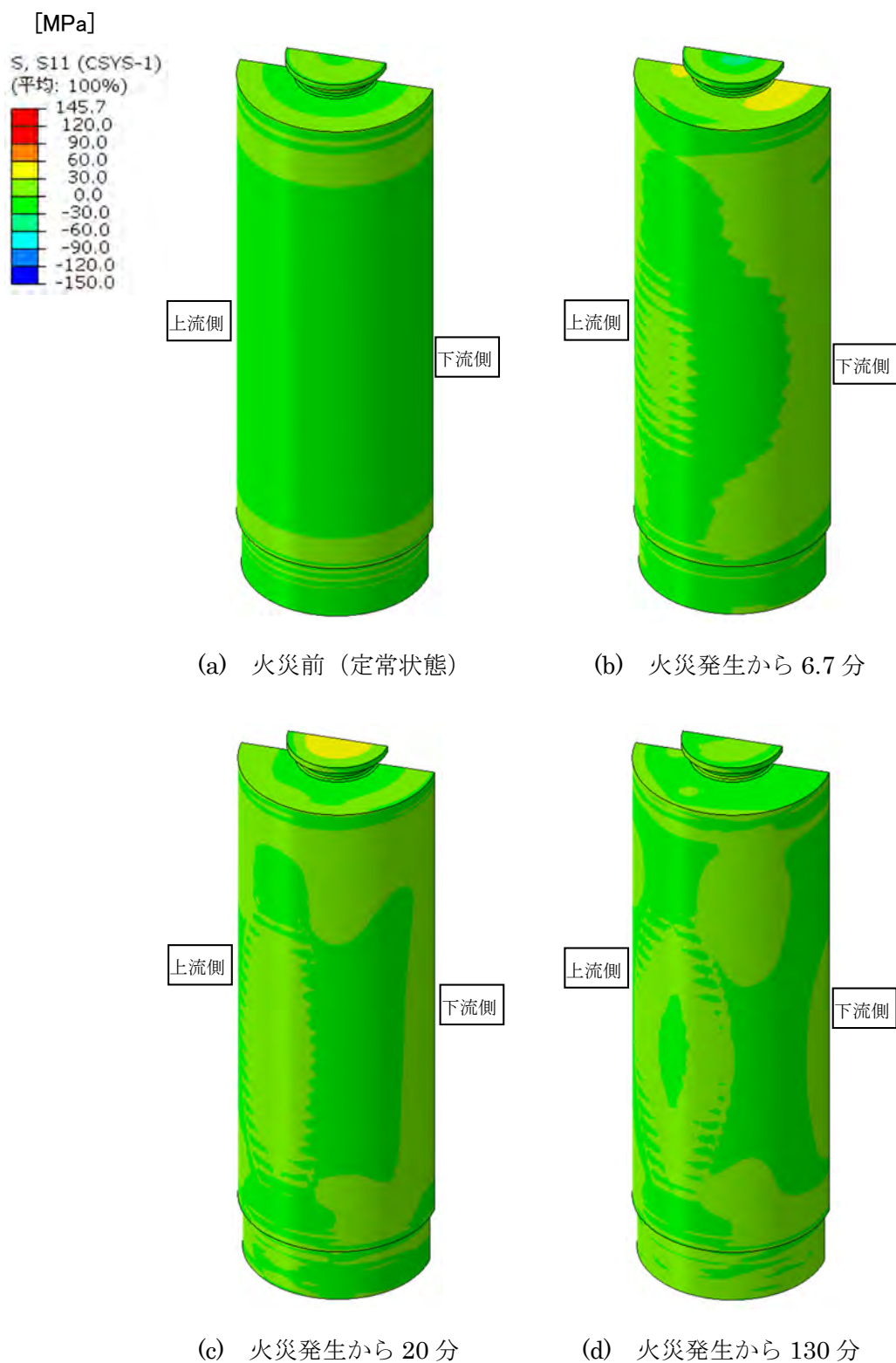


図 2.34 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

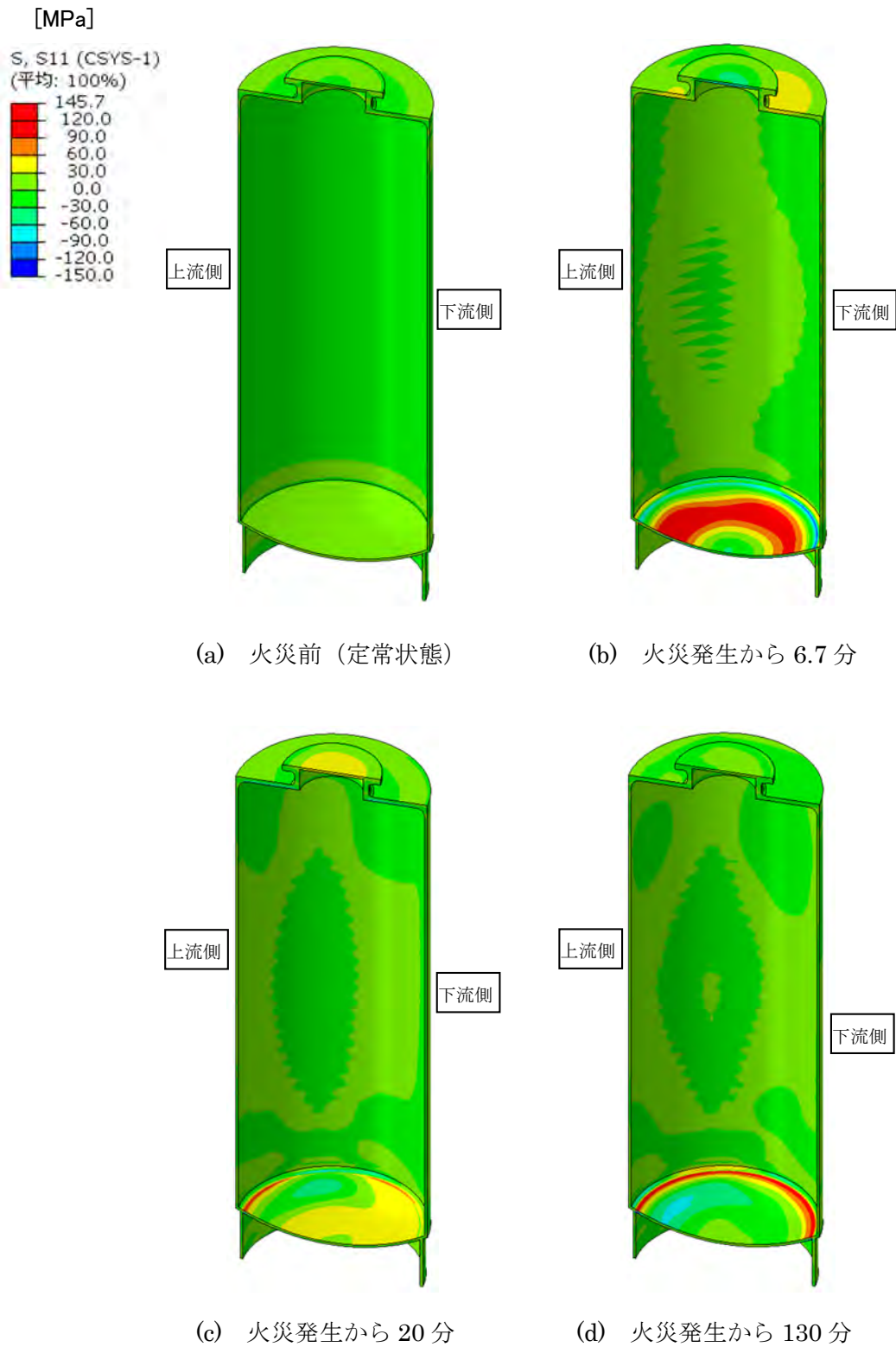
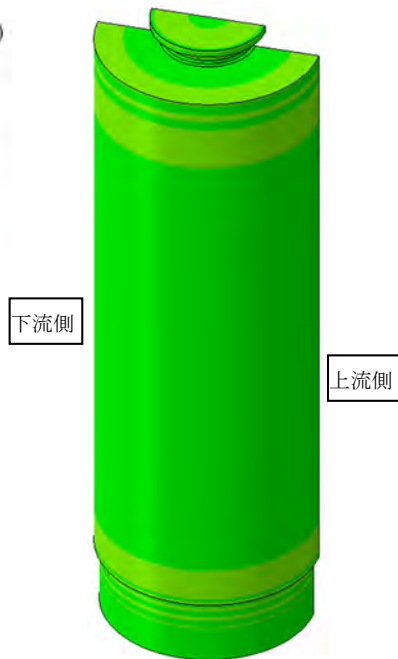
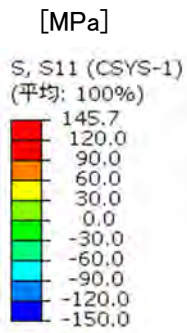
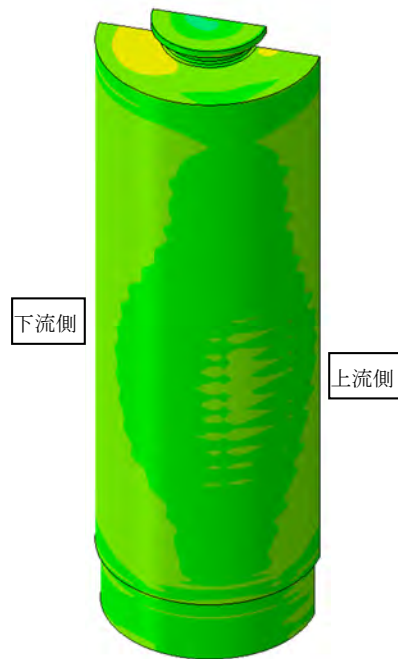


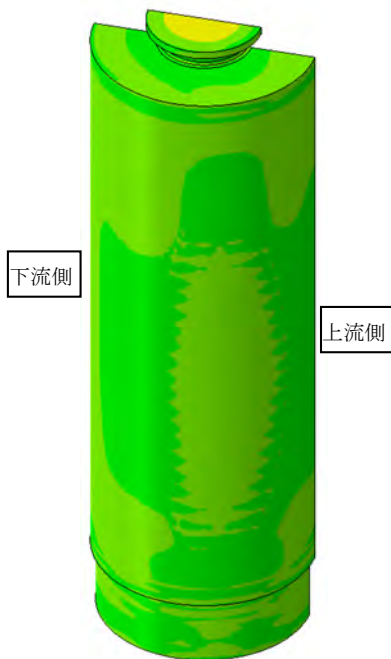
図 2.35 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～



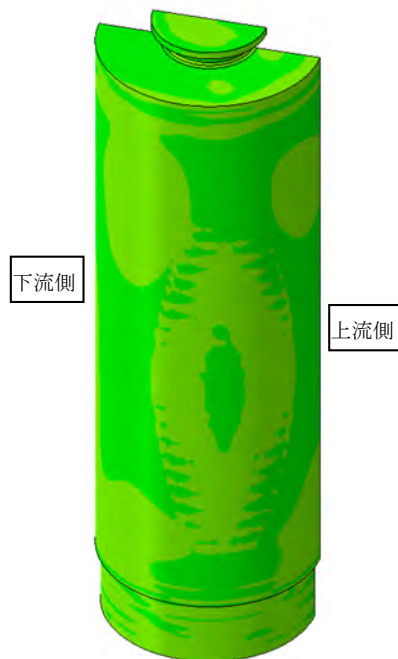
(a) 火災前 (定常状態)



(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 2.36 ガラス固化体単体モデルの半径方向応力分布
～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

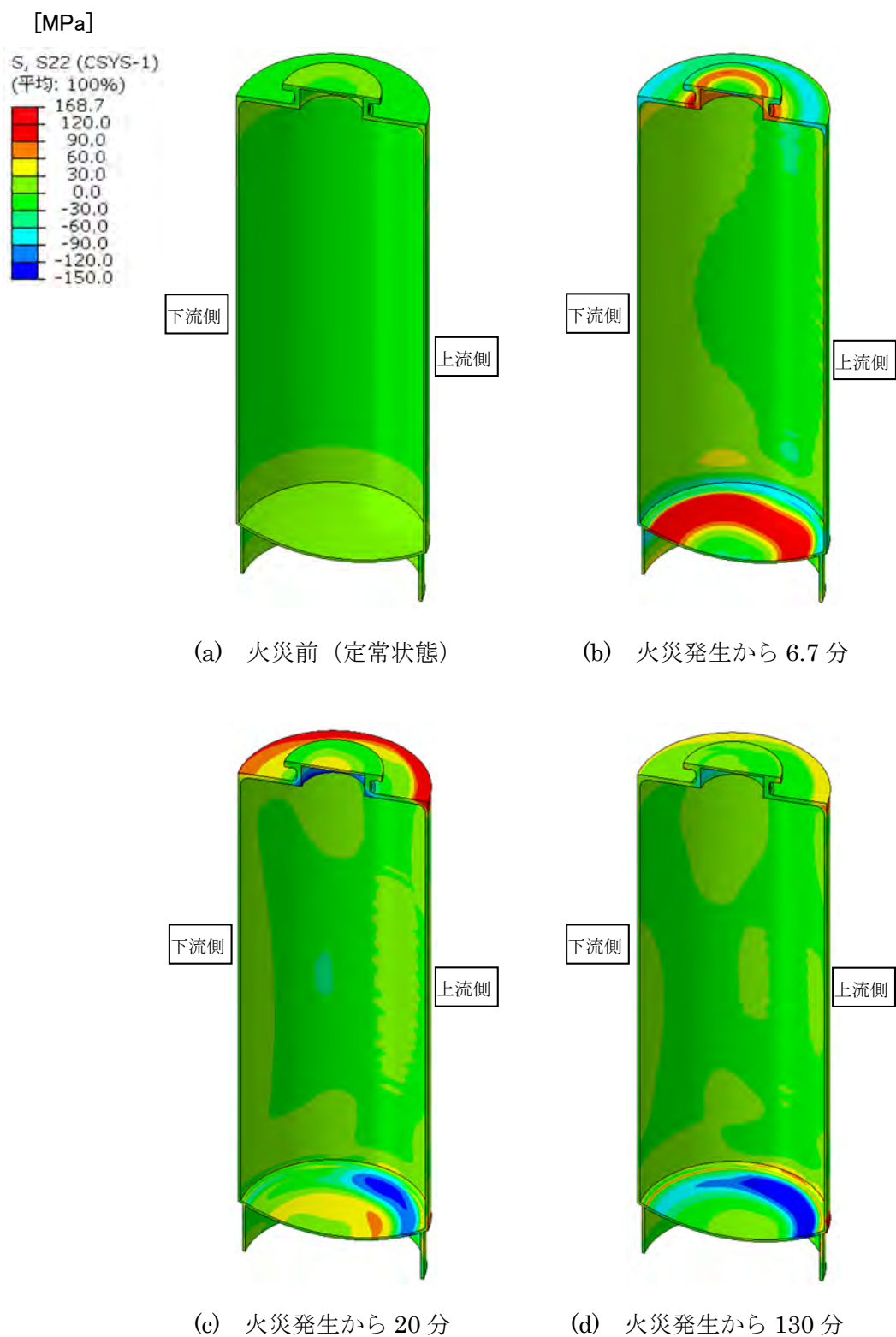


図 2.37 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

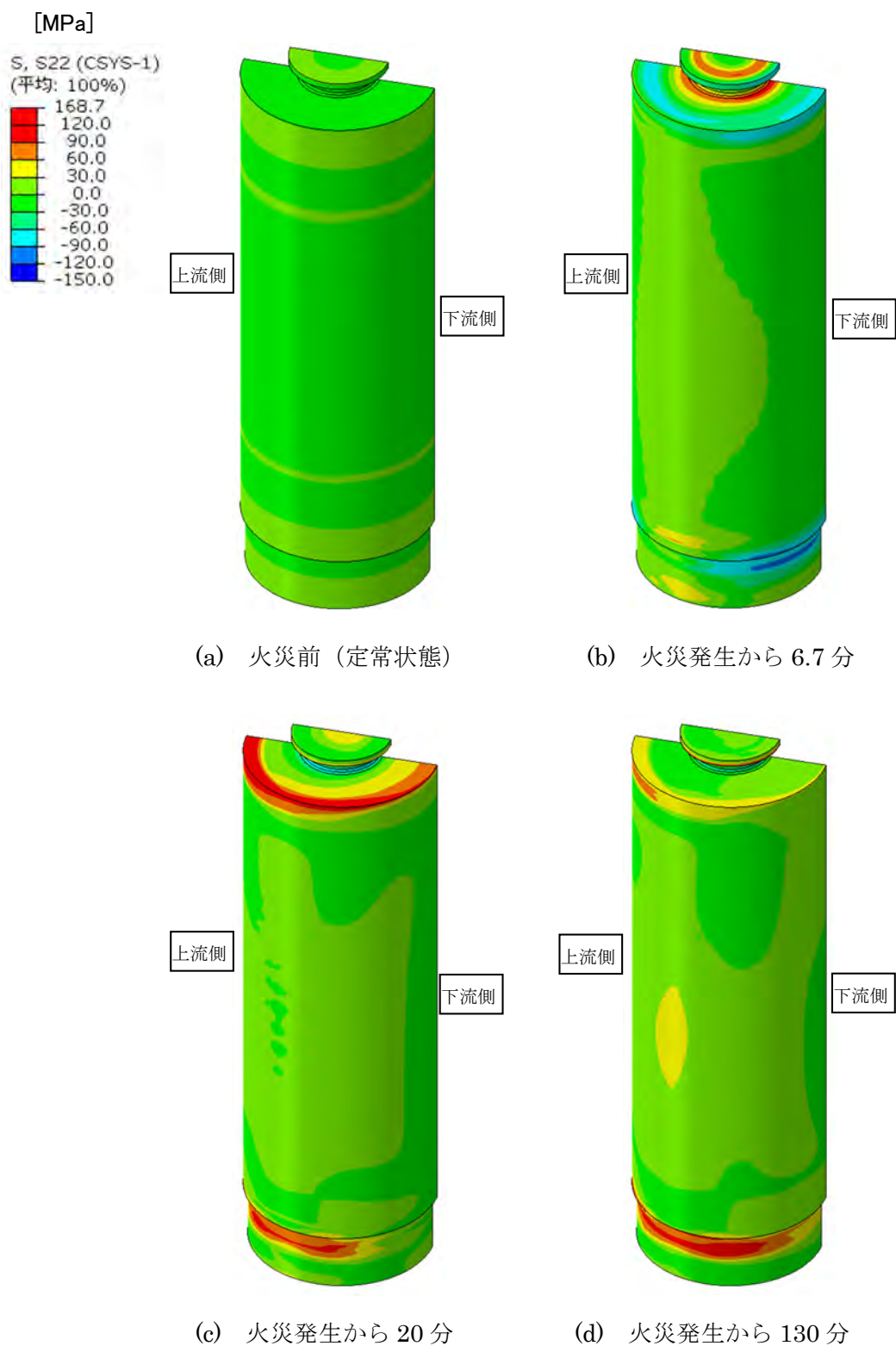


図 2.38 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

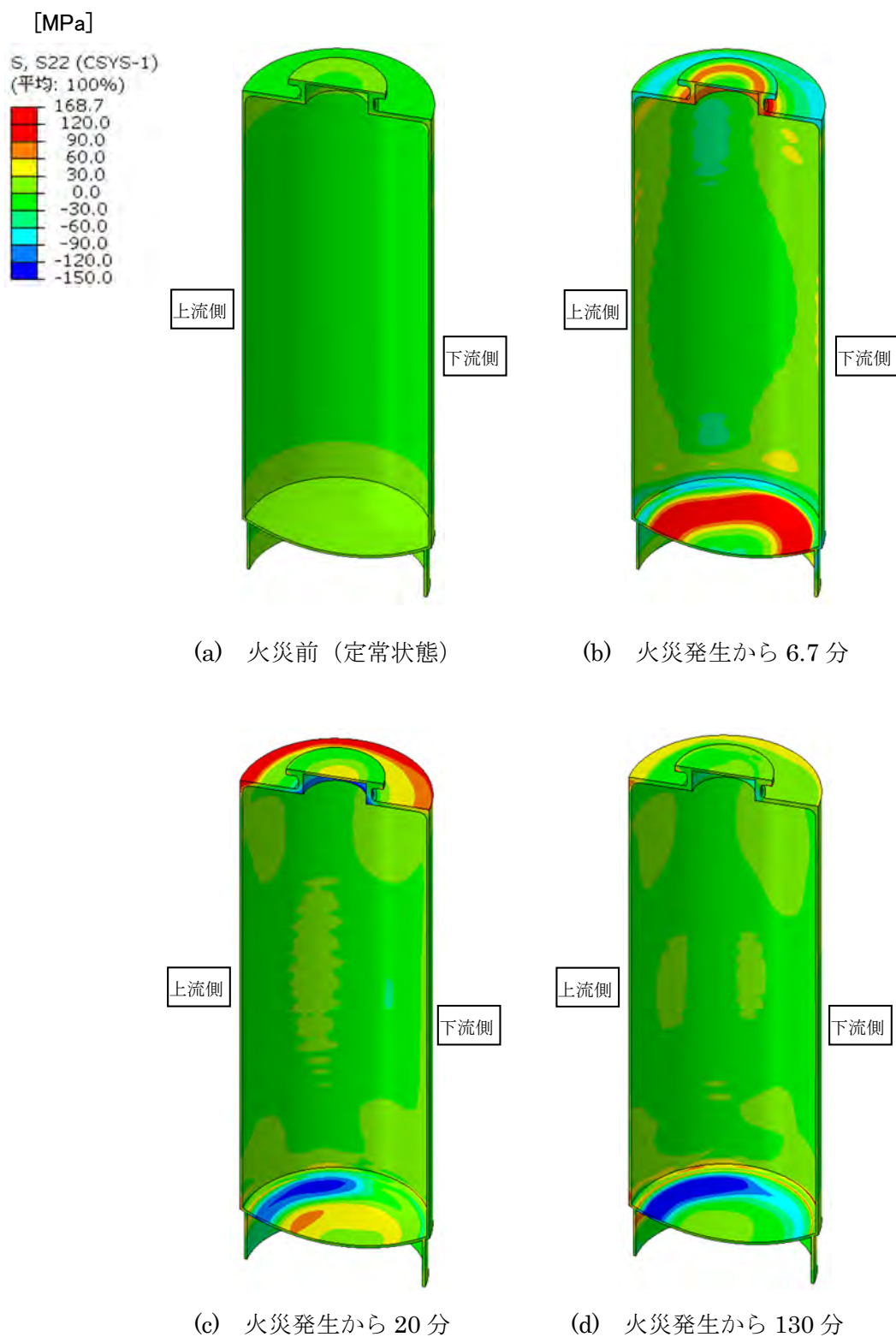


図 2.39 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

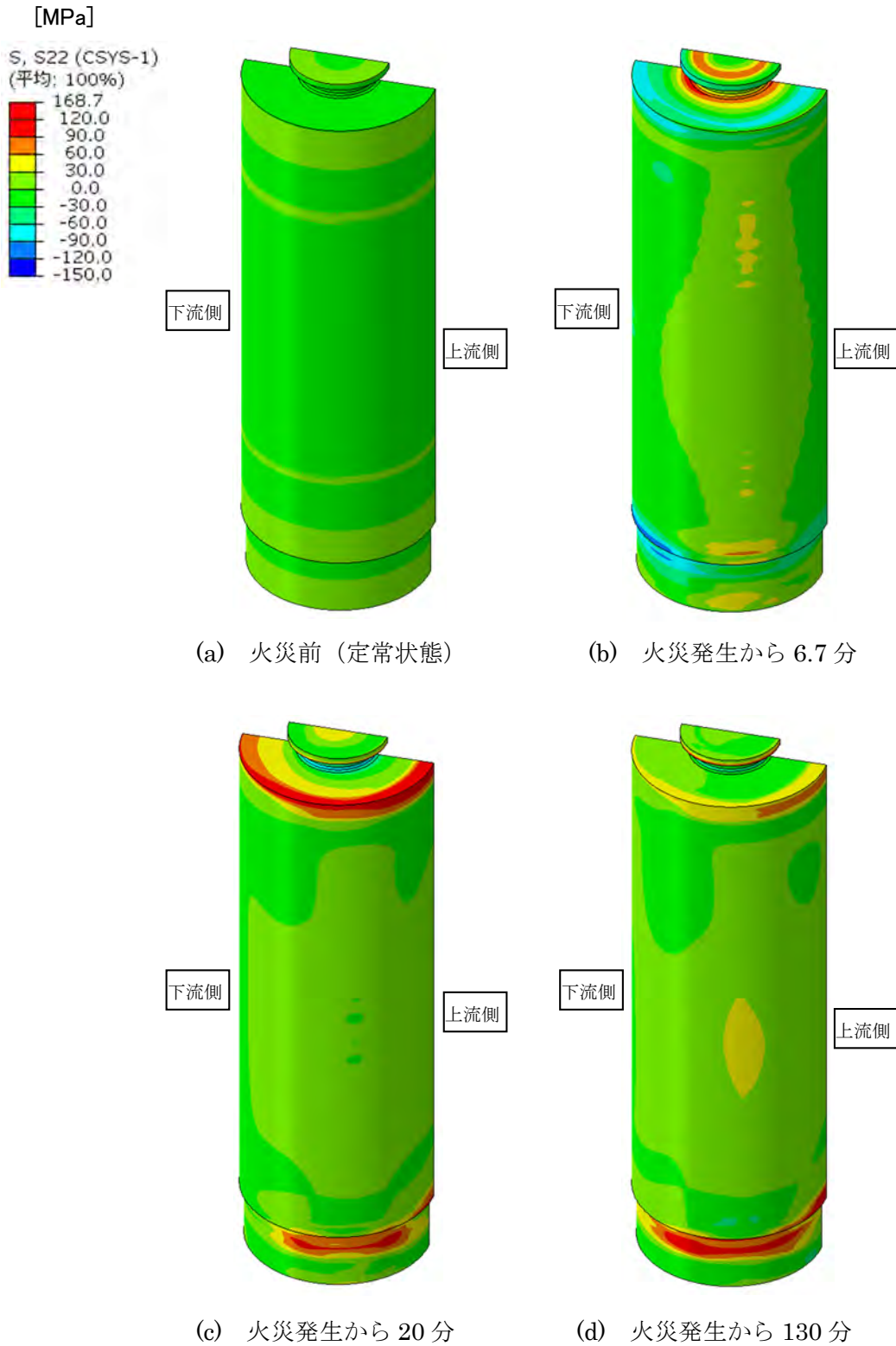


図 2.40 ガラス固化体単体モデルの周方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

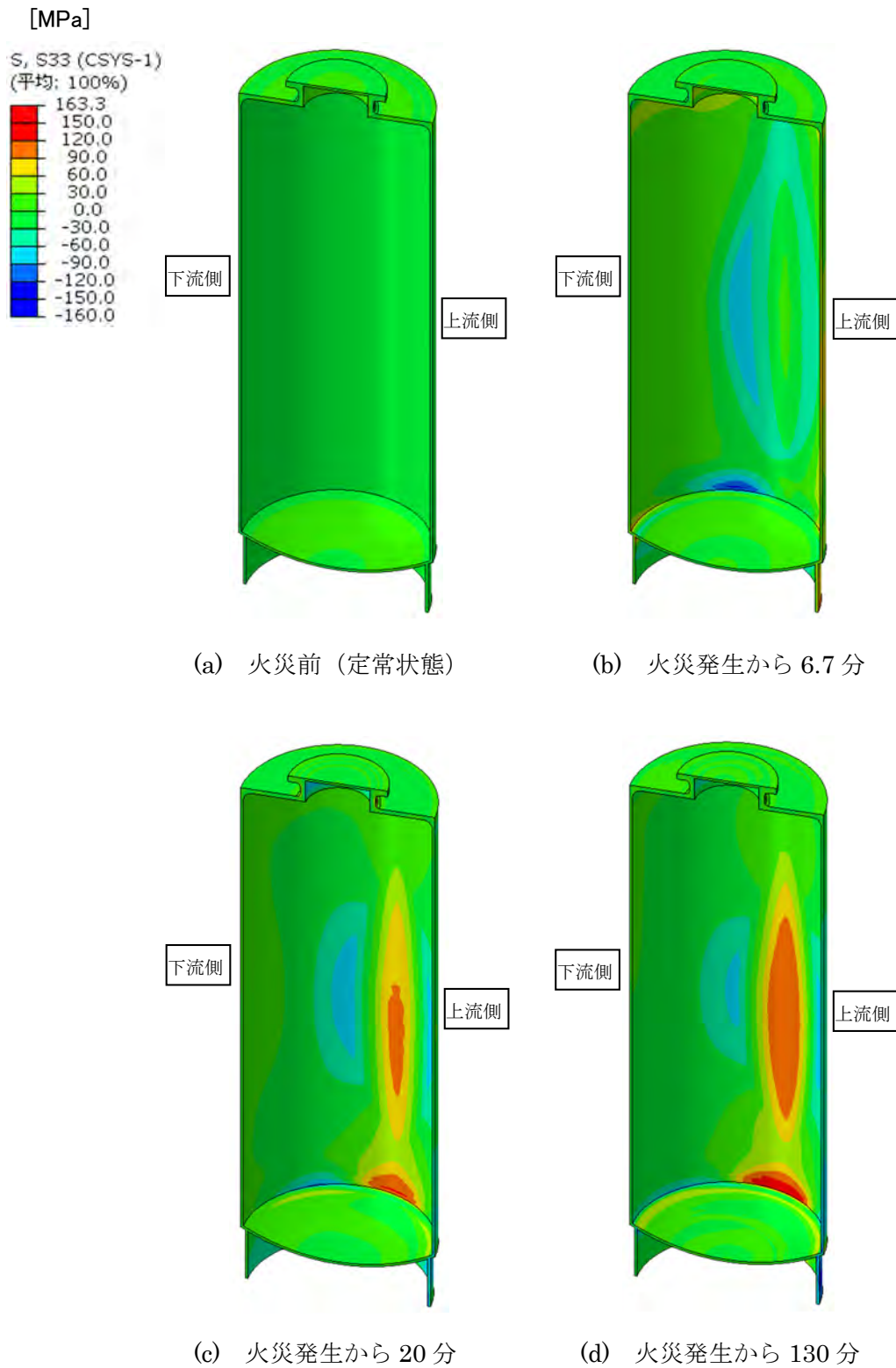


図 2.41 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

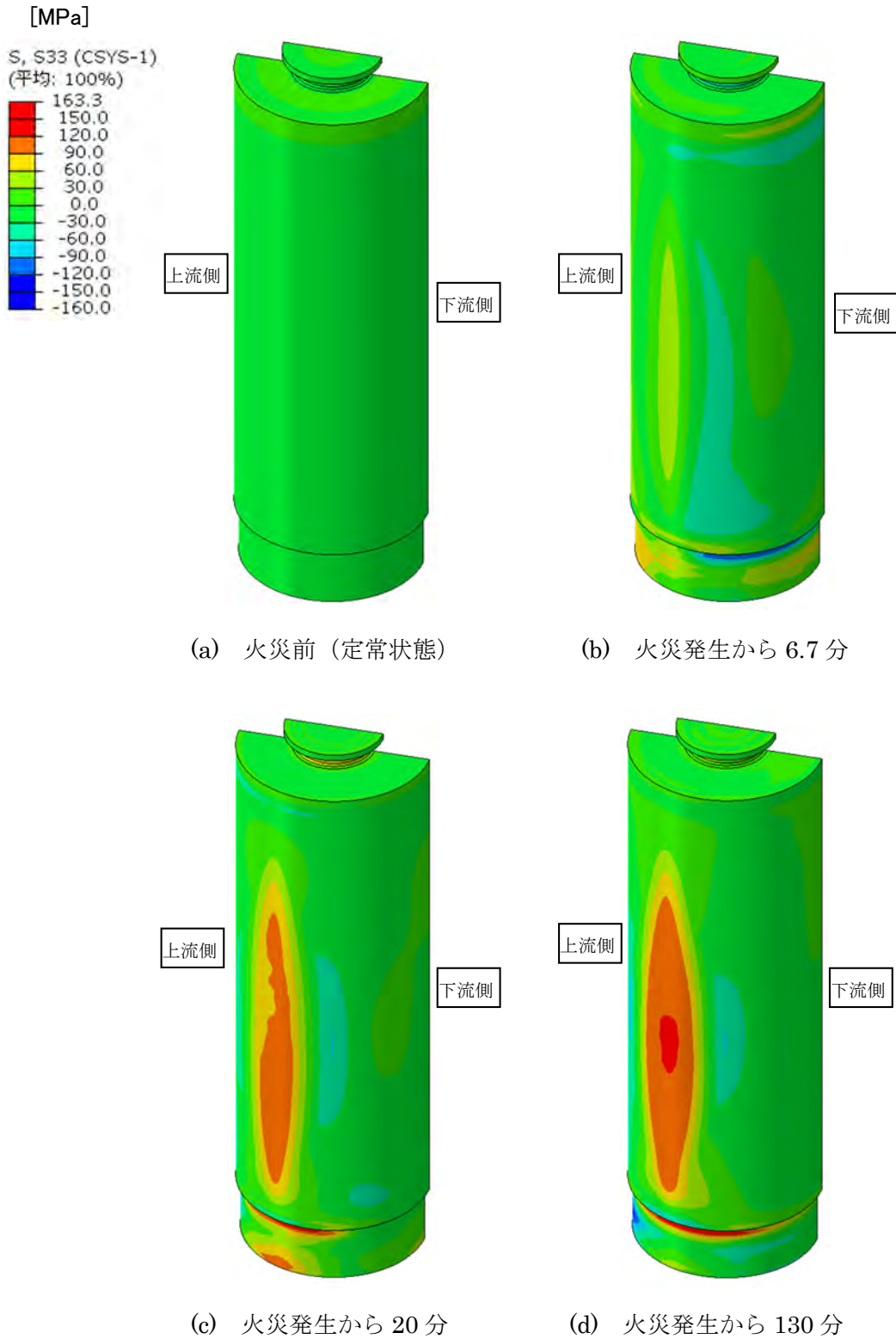


図 2.42 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

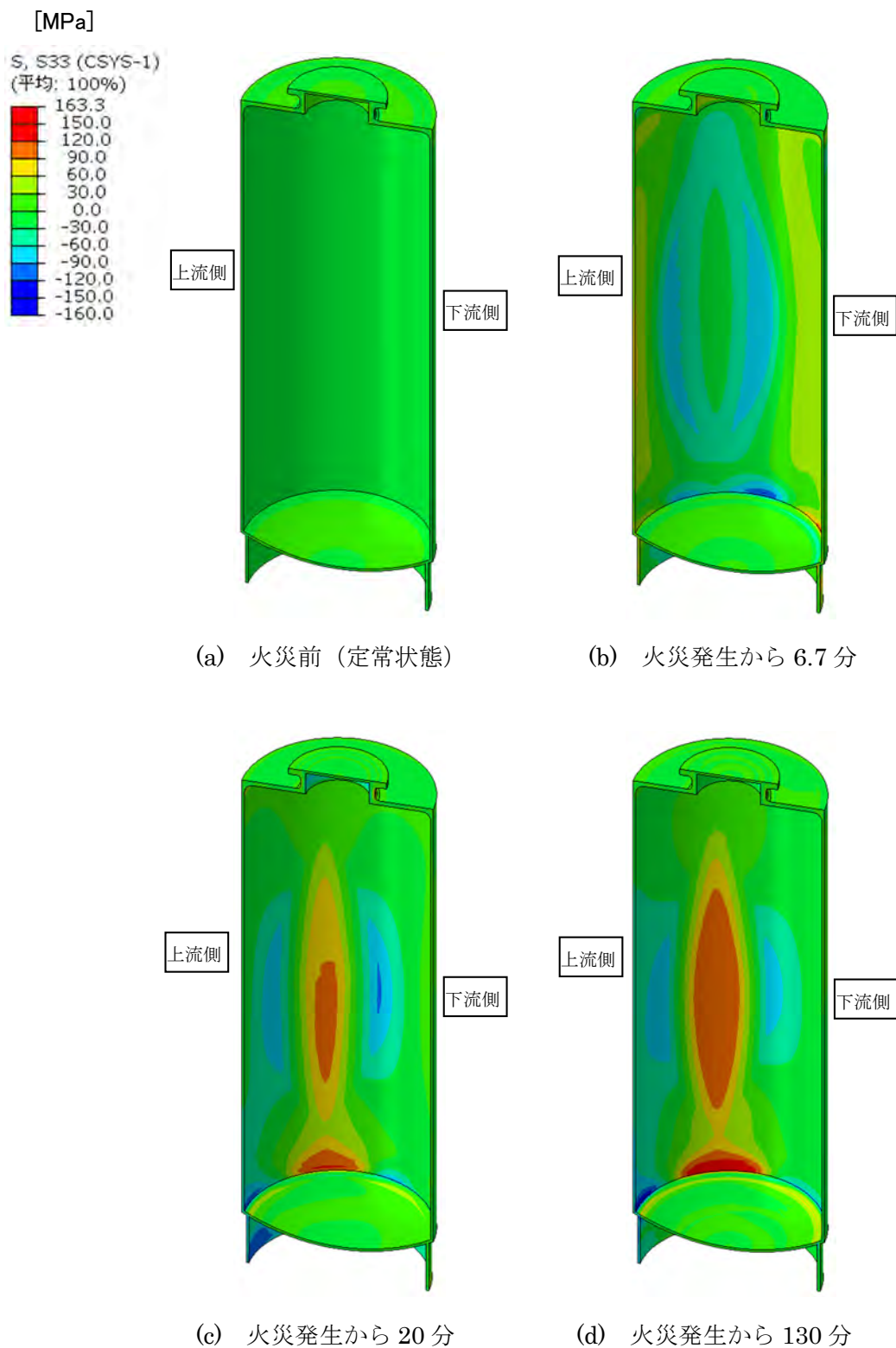
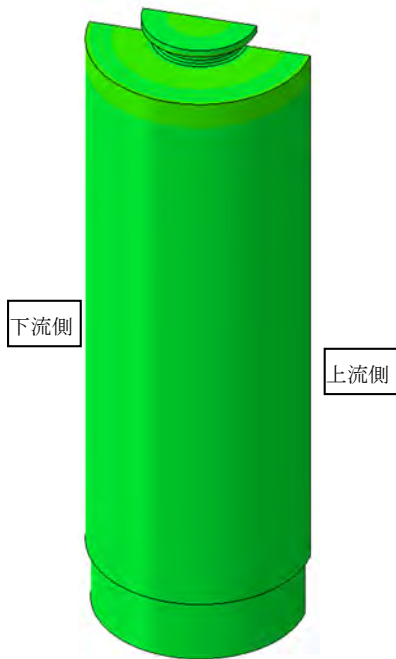
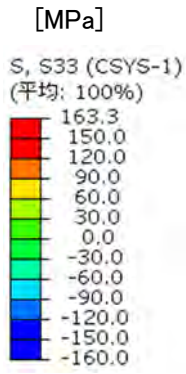
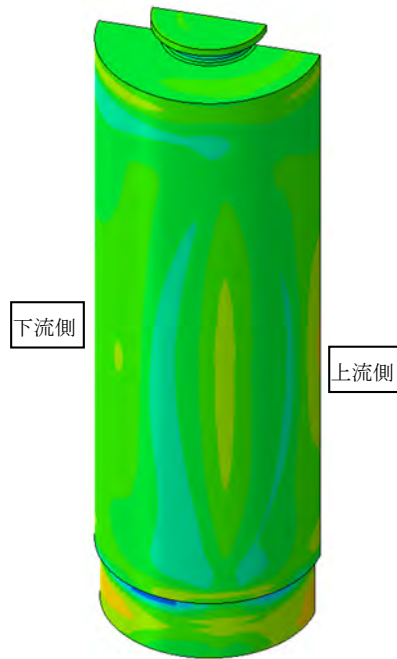


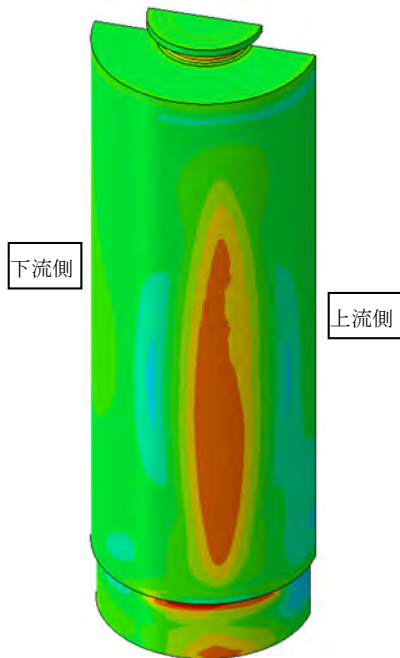
図 2.43 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～



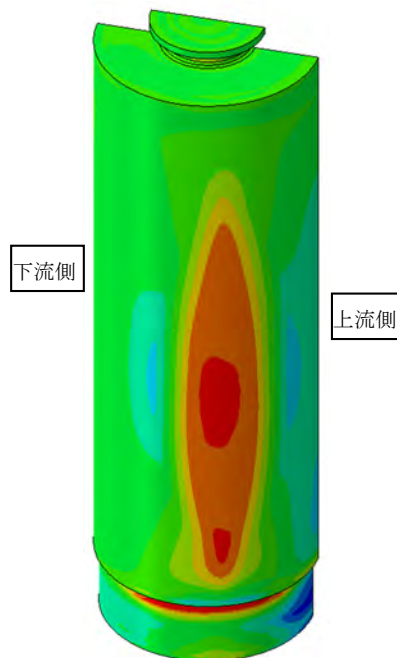
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

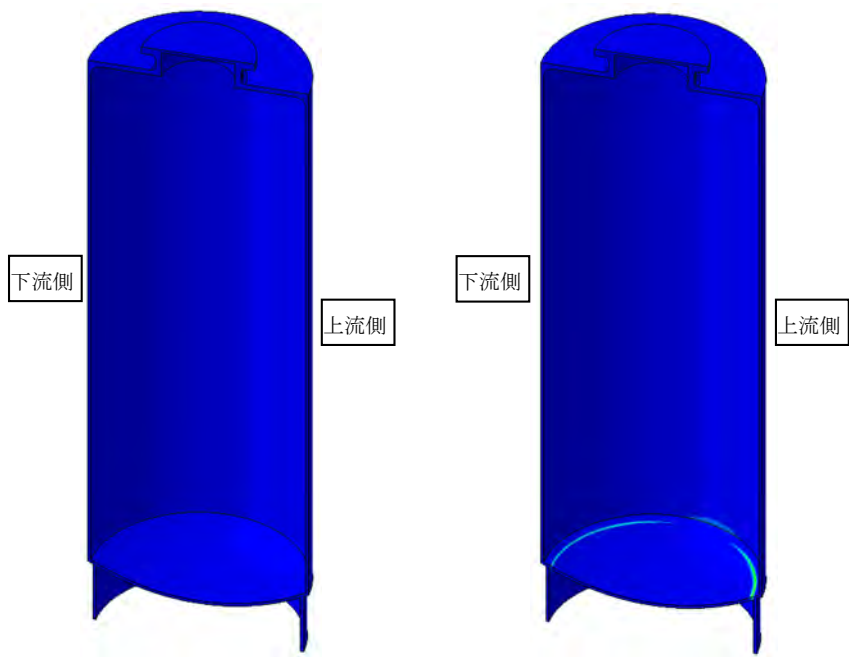
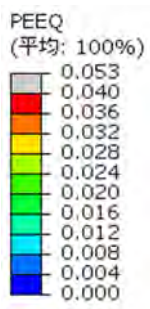


(c) 火災発生から 20 分



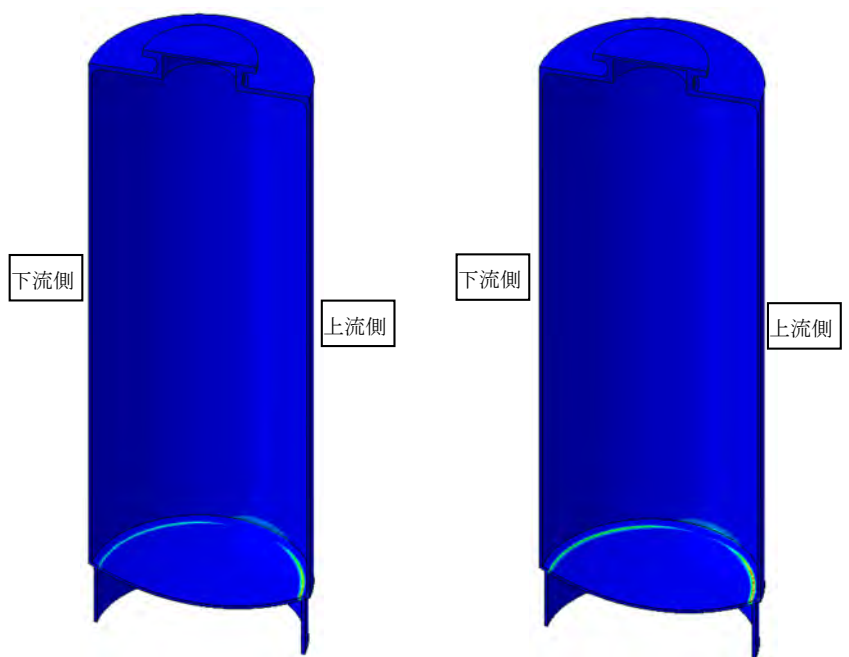
(d) 火災発生から 130 分

図 2.44 ガラス固化体単体モデルの軸方向応力分布
～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～



(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 2.45 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

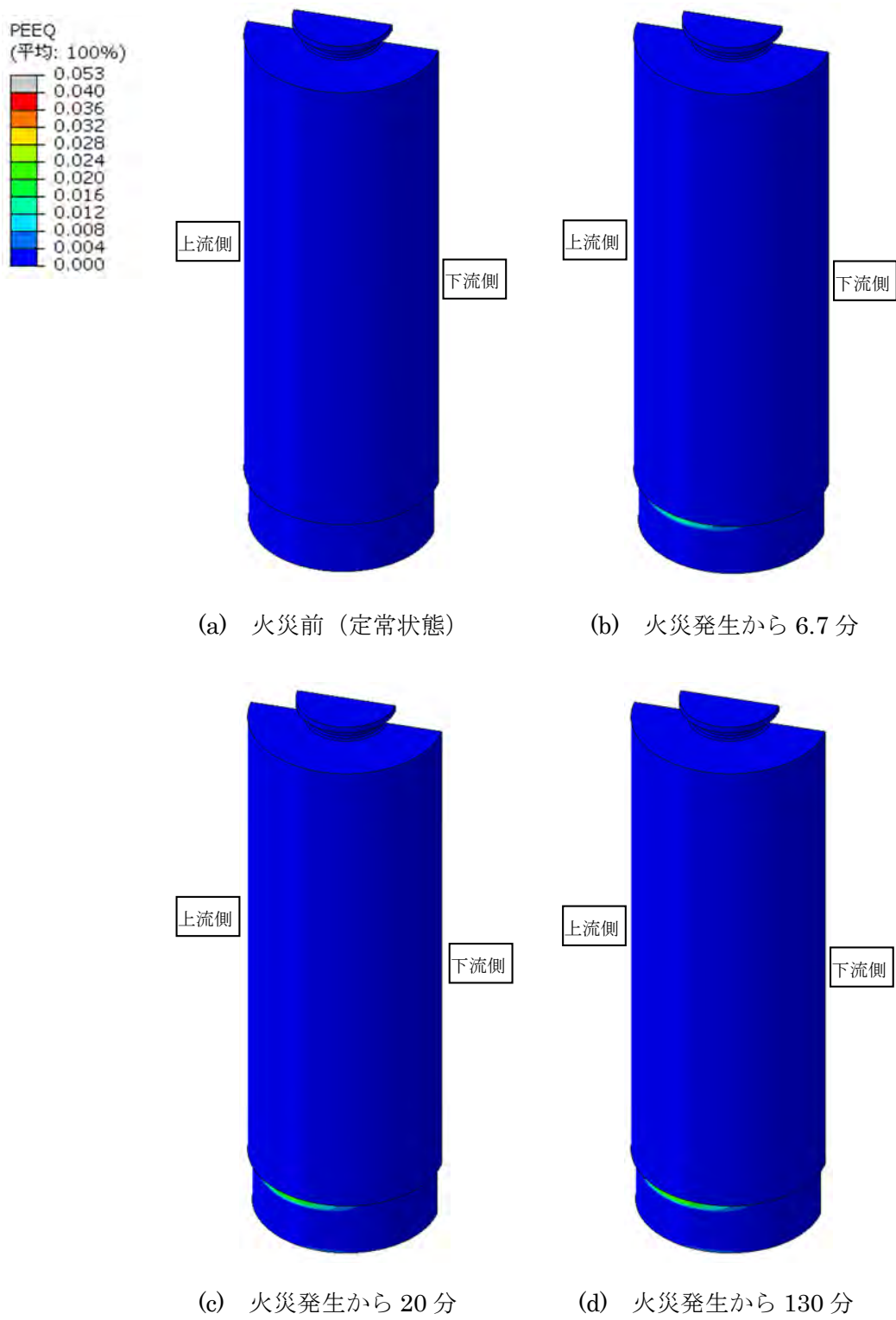
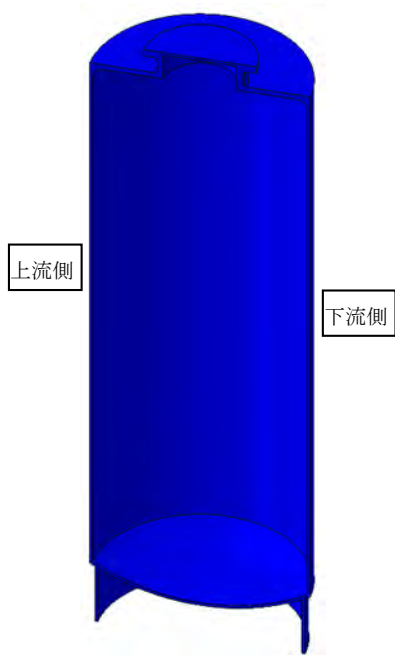
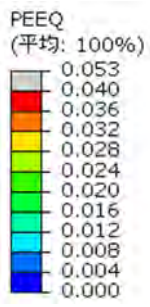
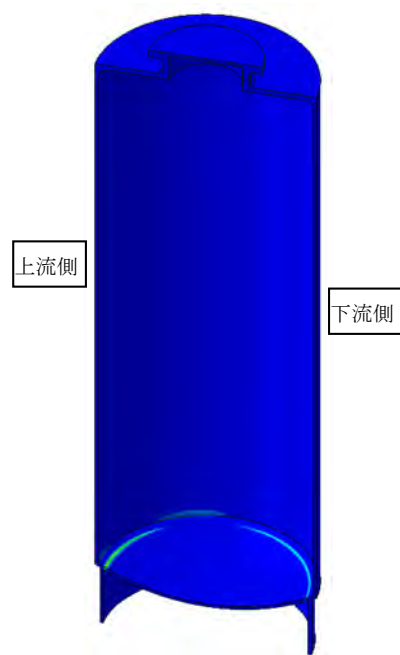


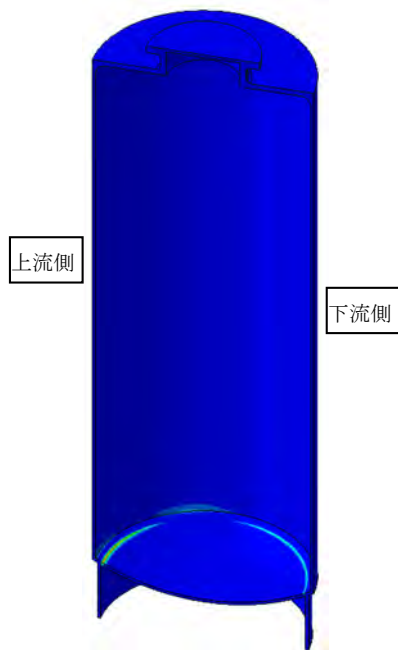
図 2.46 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布
 ～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～



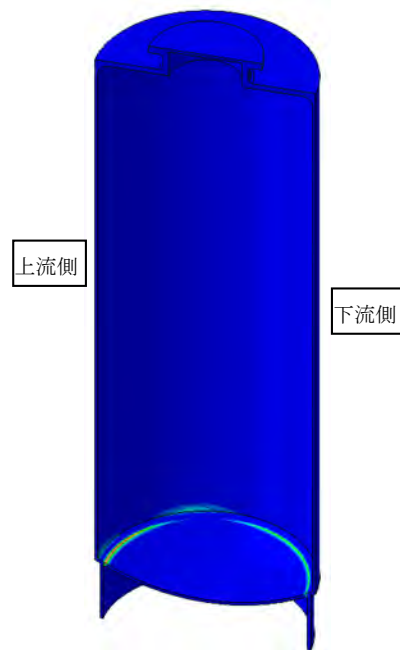
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

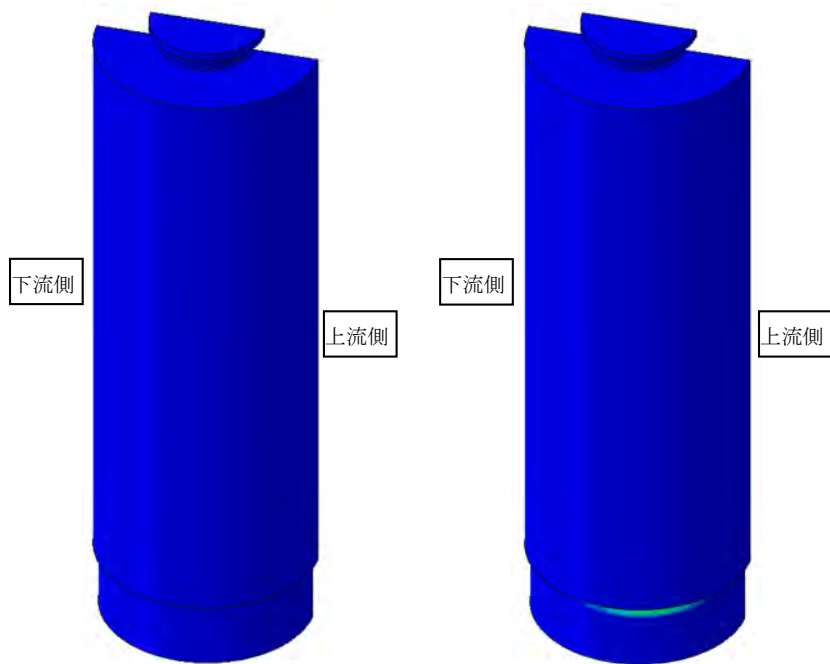
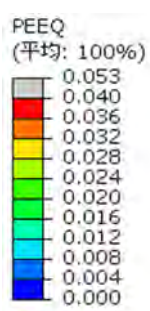


(c) 火災発生から 20 分



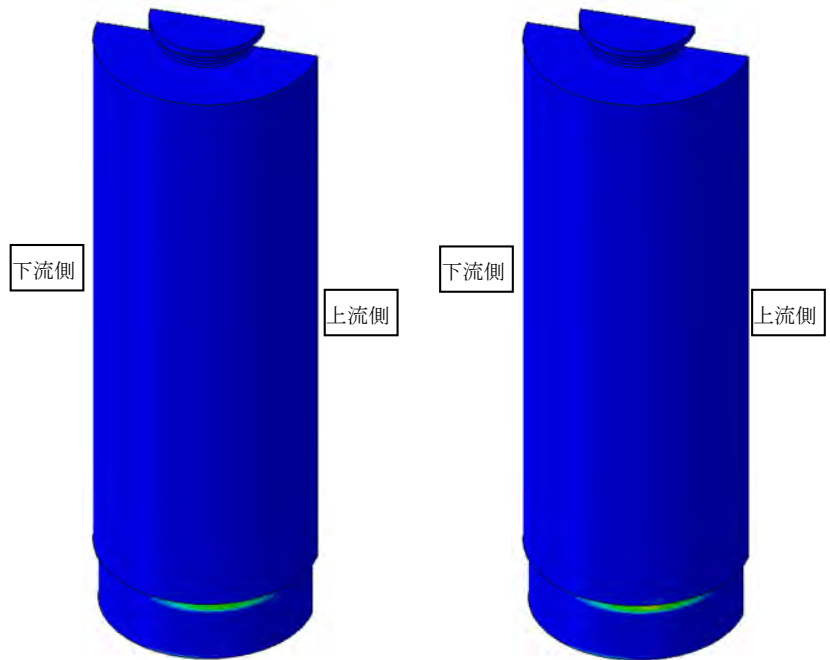
(d) 火災発生から 130 分

図 2.47 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布
 ~ ガラス固化体容器のみ表示の切断図: +X 側部を表示, 内面側 ~



(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 2.48 ガラス固化体単体モデルの相当塑性ひずみ分布
～ ガラス固化体容器のみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

2.3.2 ガラス固化体+オーバーパックモデル

前述したガラス固化体+オーバーパックの伝熱解析結果において、火災の入熱がガラス固化体の温度に及ぼす影響はほとんど無いことがわかった。本ケースの温度解析結果を用いて応力解析を行っても、ガラス固化体の応力にはほとんど影響しないと考えられるため、ガラス固化体+オーバーパックの応力解析においては、オーバーパックのみのモデルとして解析を行うこととした。応力解析は、ガラス固化体単体のケースと同様に、以下の2つのステップによりオーバーパックの応力を計算した。

① 初期状態算出ステップ

- ・伝熱解析で初期温度として求めた温度分布を与え、自重を負荷した解析

② 火災による入熱ステップ

- ・伝熱解析で火災入熱によって得られた温度時刻歴変化を熱荷重として与えた解析

図 2.49 から図 2.68 に応力解析の結果得られたオーバーパックの相当応力分布、半径方向応力分布、周方向応力分布、軸方向応力分布、及び相当塑性ひずみ分布の時刻変化を示す。

これらの図より、本ケースでは火災の入熱がオーバーパック蓋部溶接部に初期状態として導入してある塑性ひずみへの影響は軽微であり、ほとんど変化が見られないことがわかる。一方、火災による入熱過程における応力分布は、オーバーパックに生じる温度勾配に伴って生じる熱応力に時刻変化が見られ、特に軸方向応力では、オーバーパック胴部外面の局所的に高温になる領域で 138MPa 程度の圧縮応力、当該部の胴内面で 134MPa 程度の引張応力が生じる結果となった。

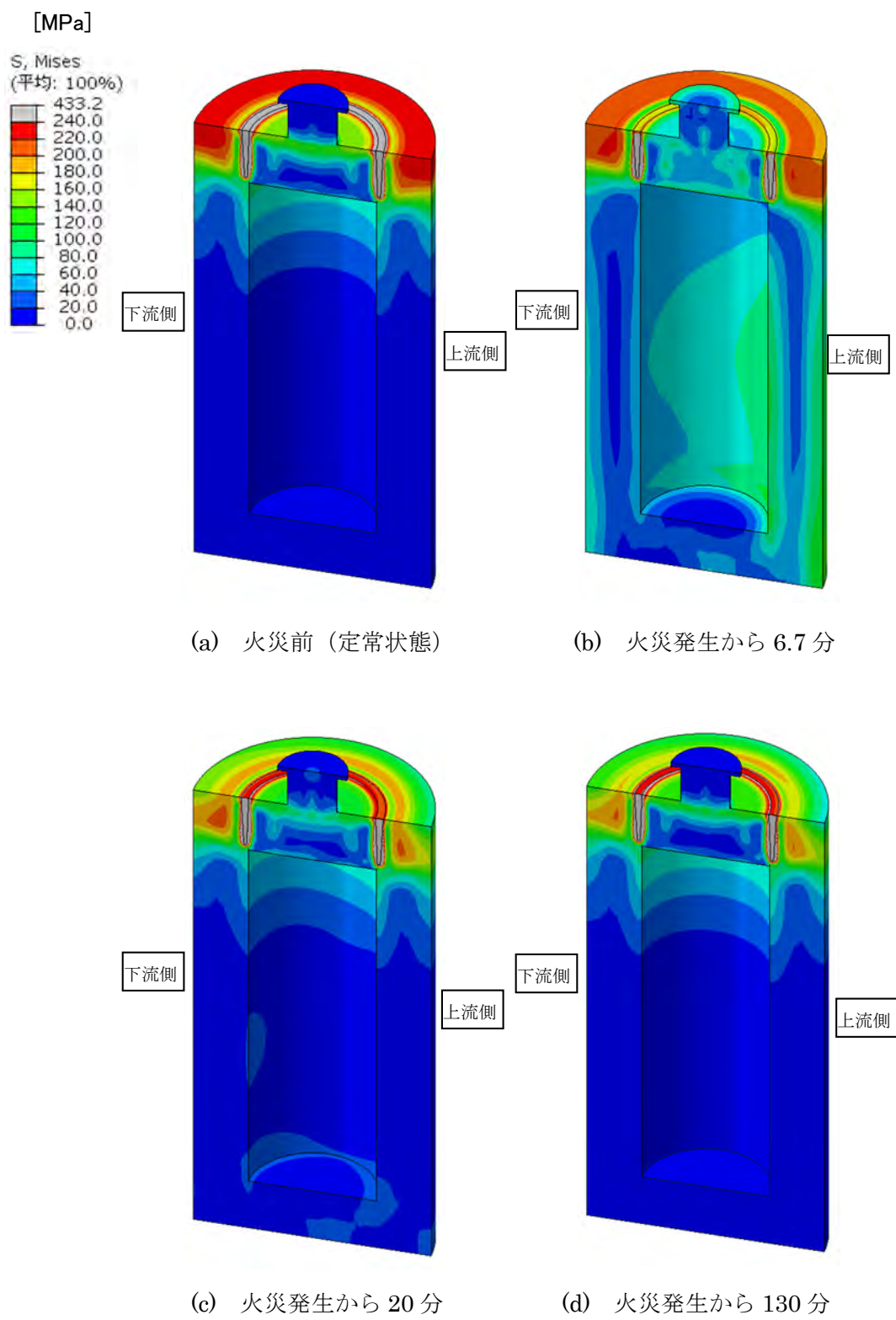


図 2.49 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

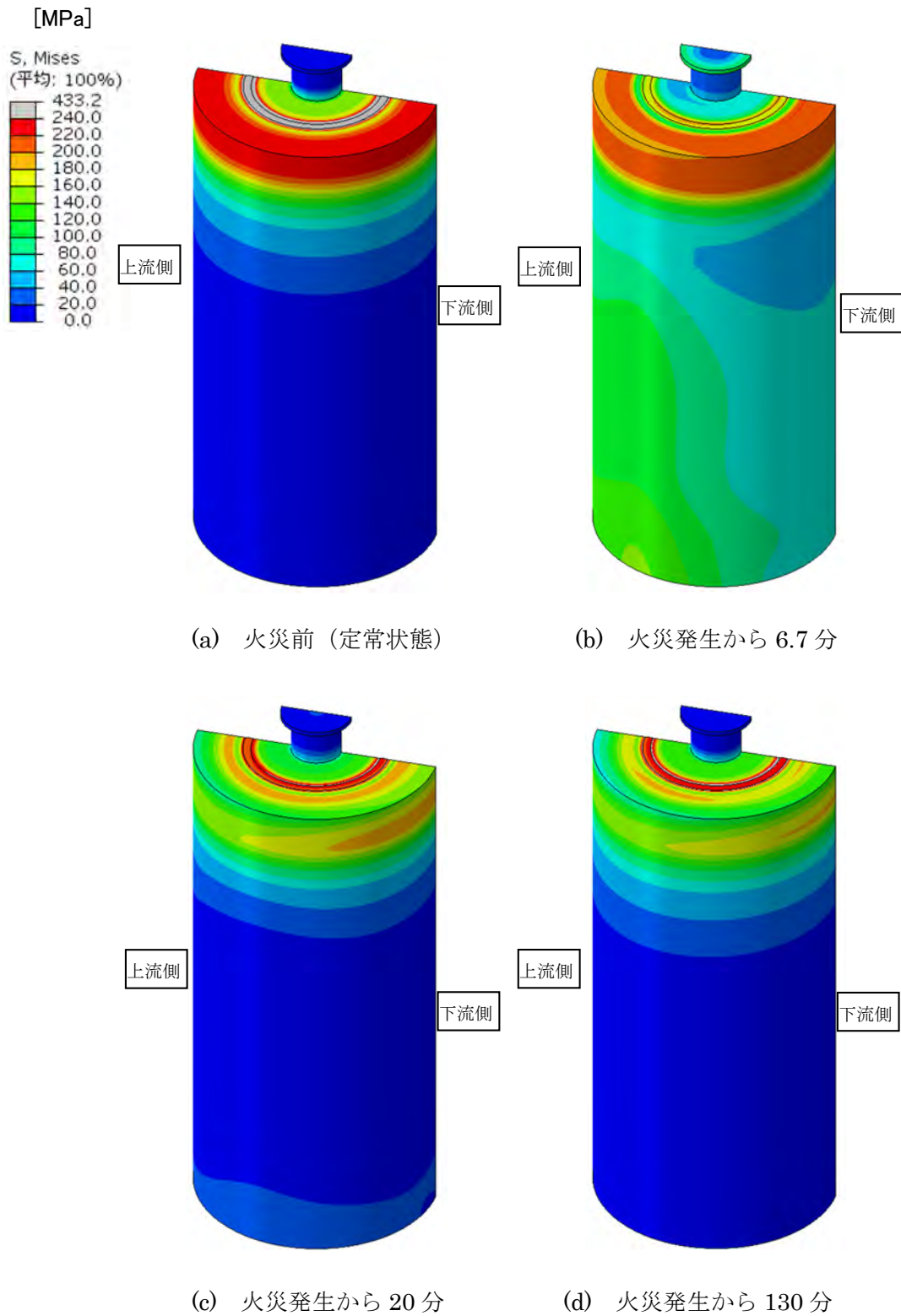


図 2.50 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側～

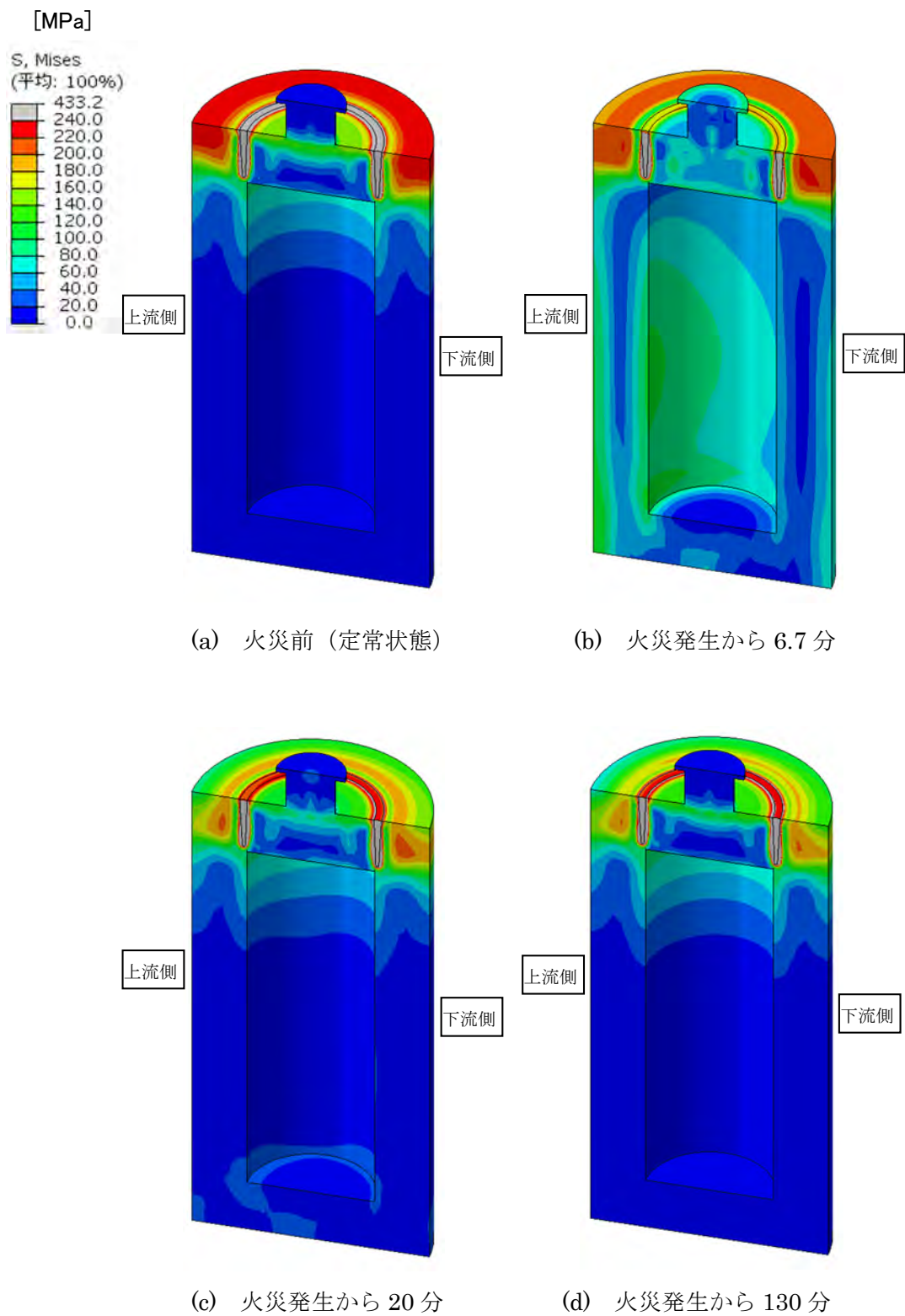


図 2.51 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

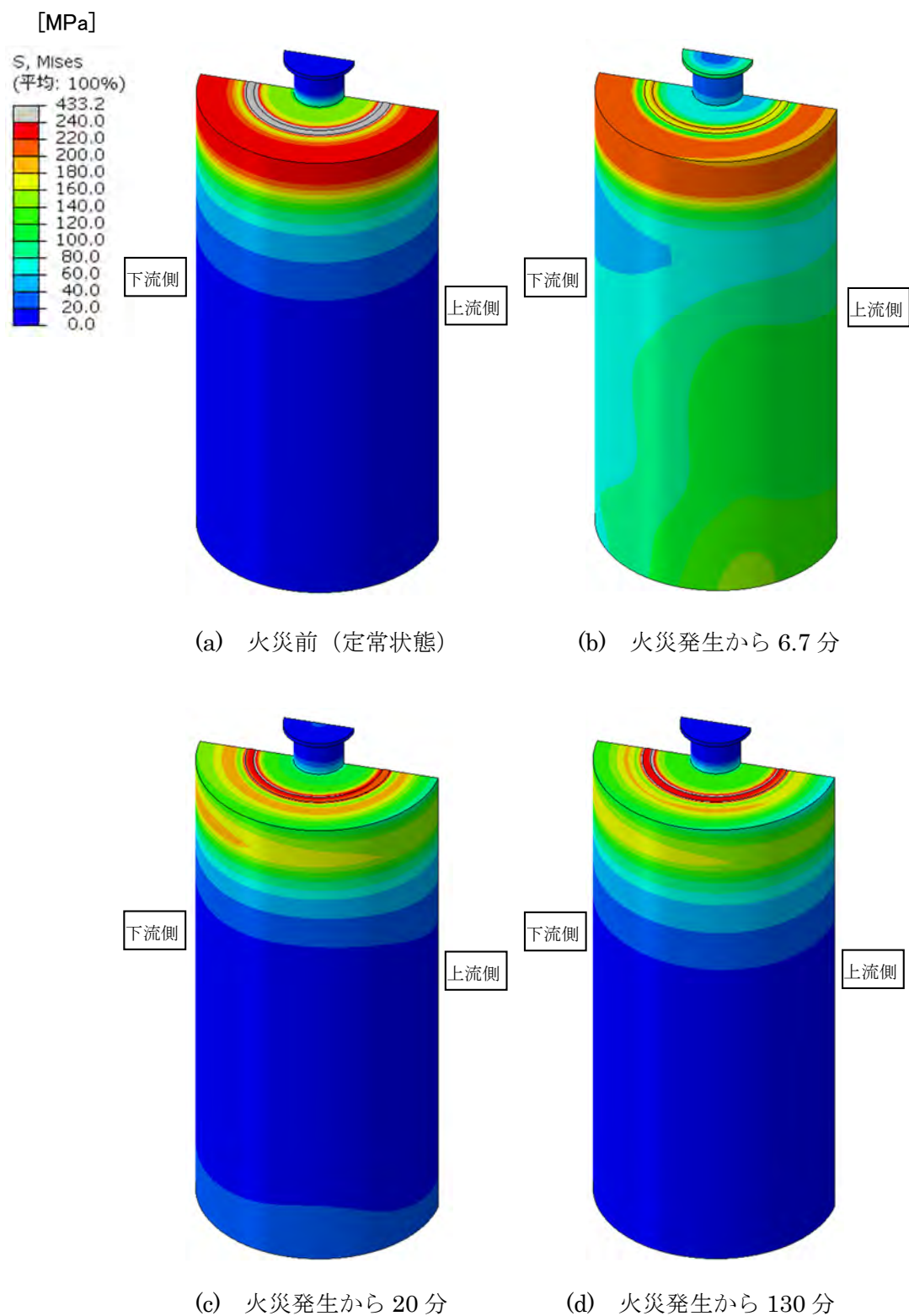


図 2.52 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側 ～

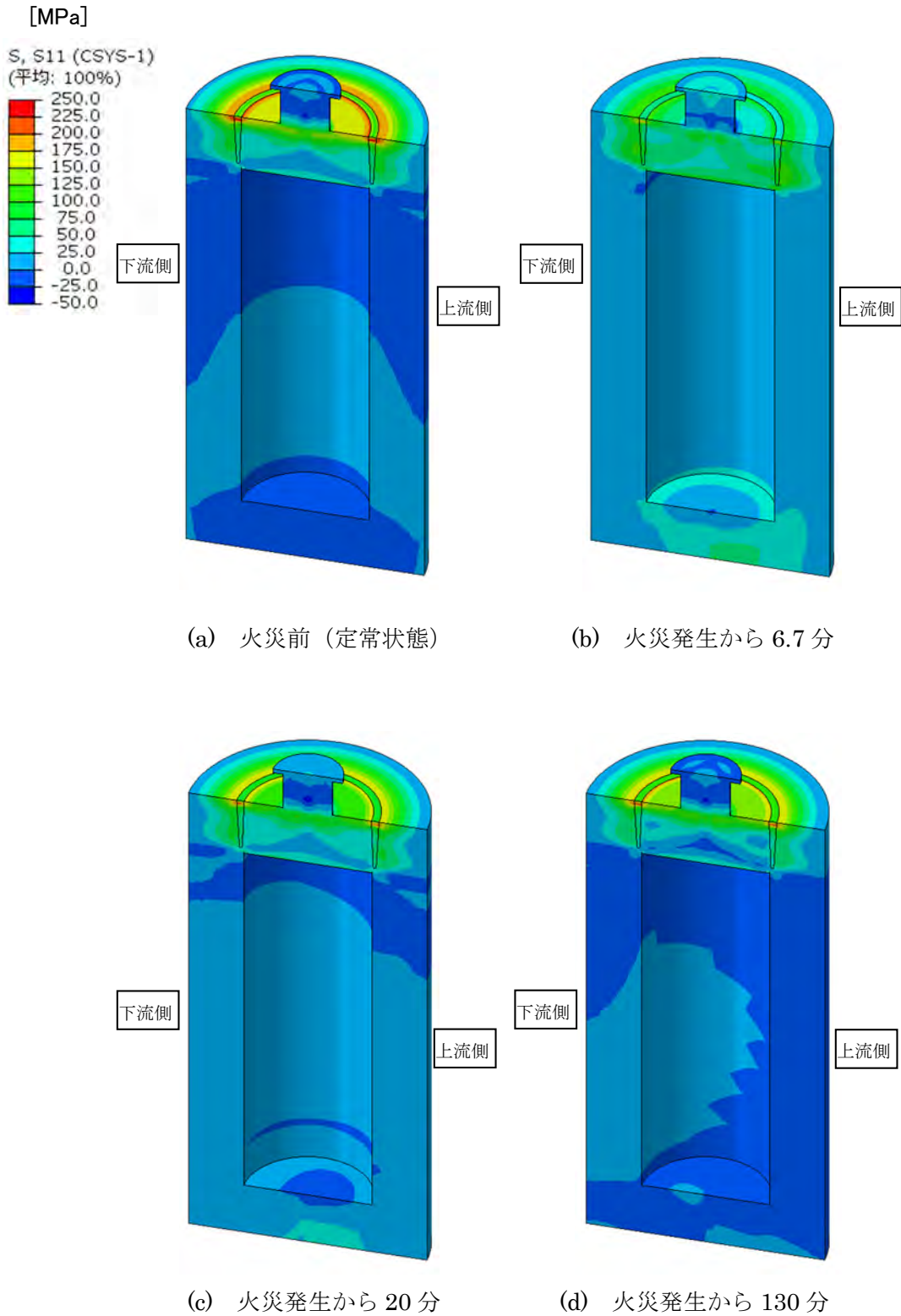


図 2.53 ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側～

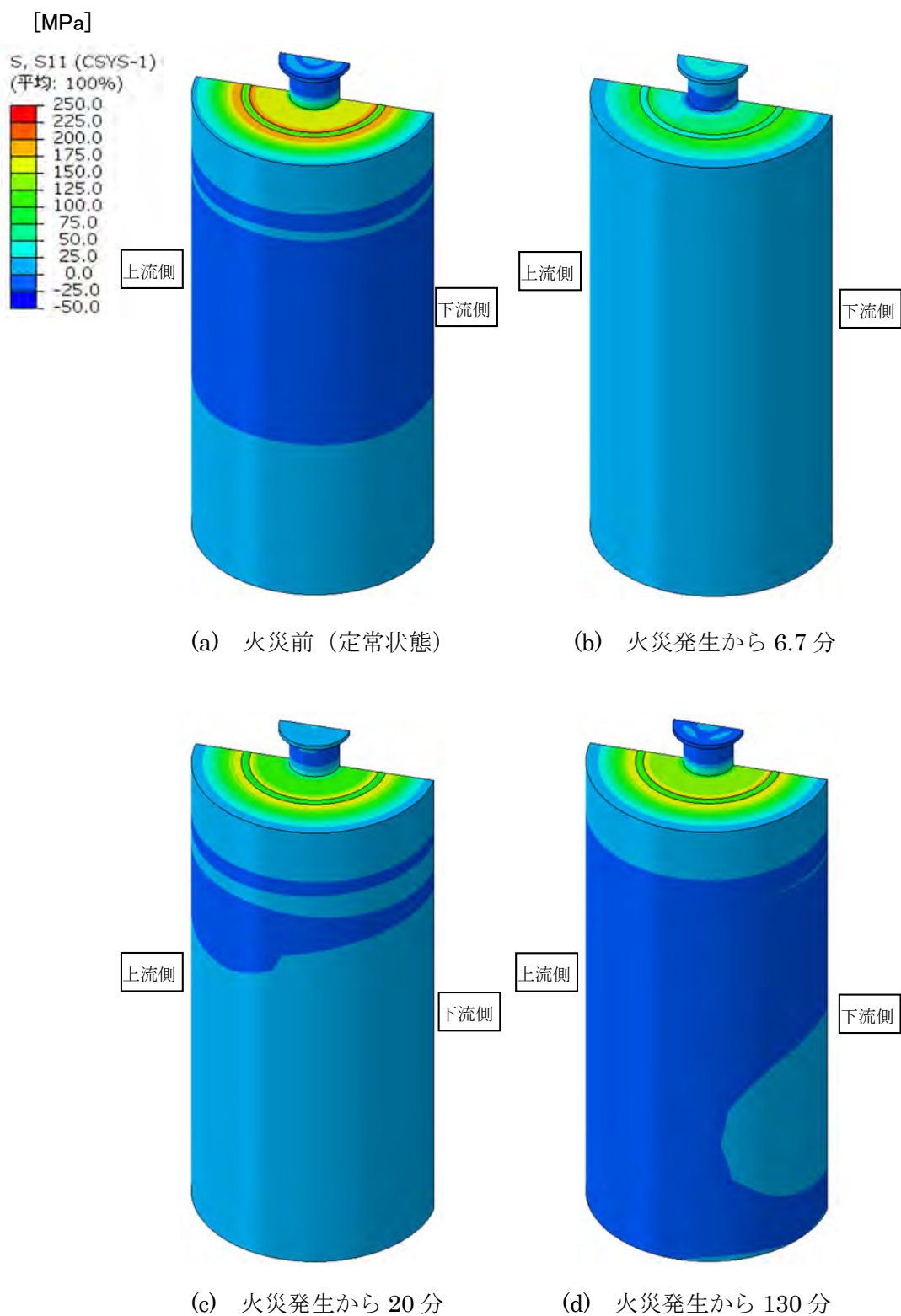


図 2.54 ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側～

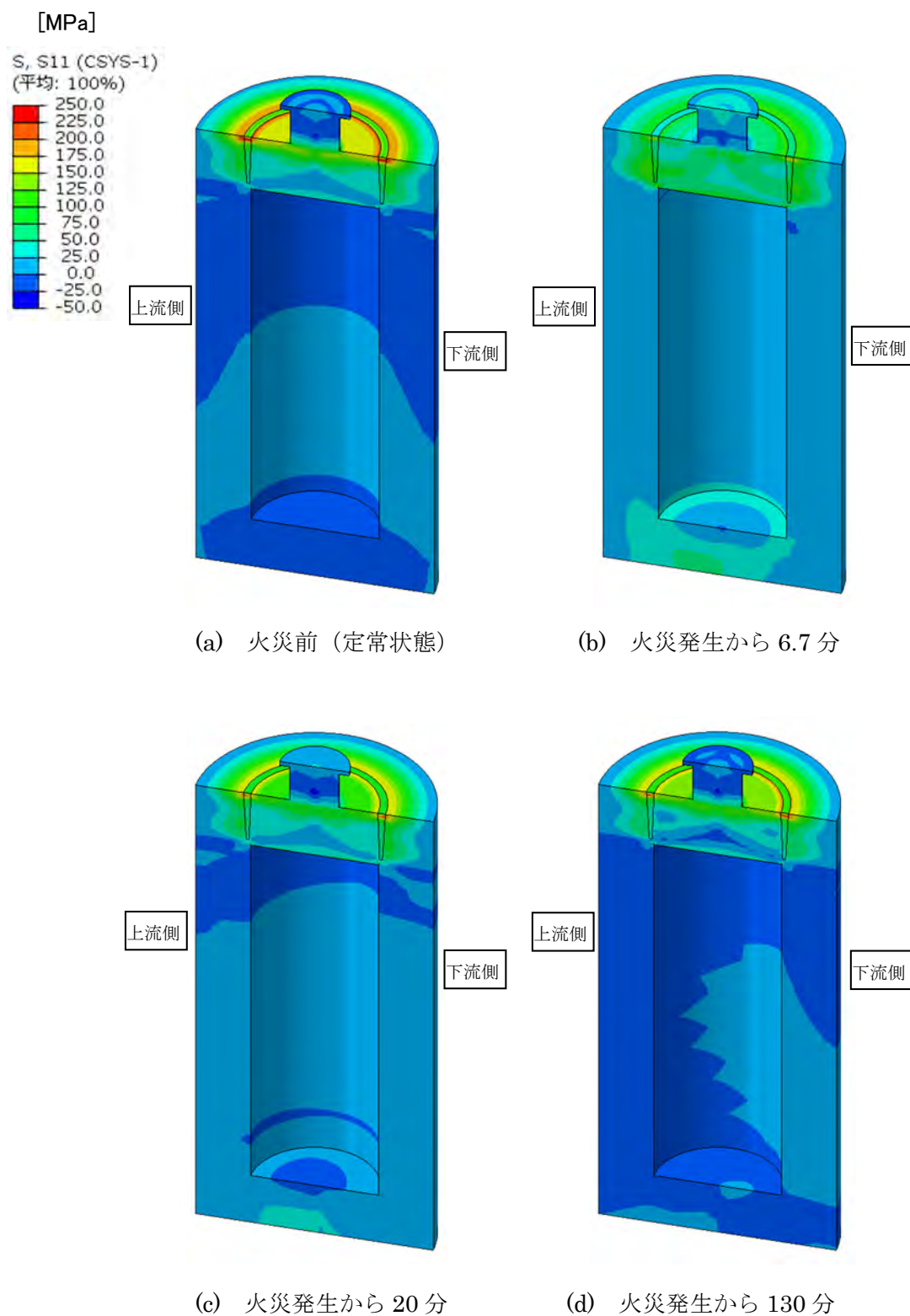


図 2.55 ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

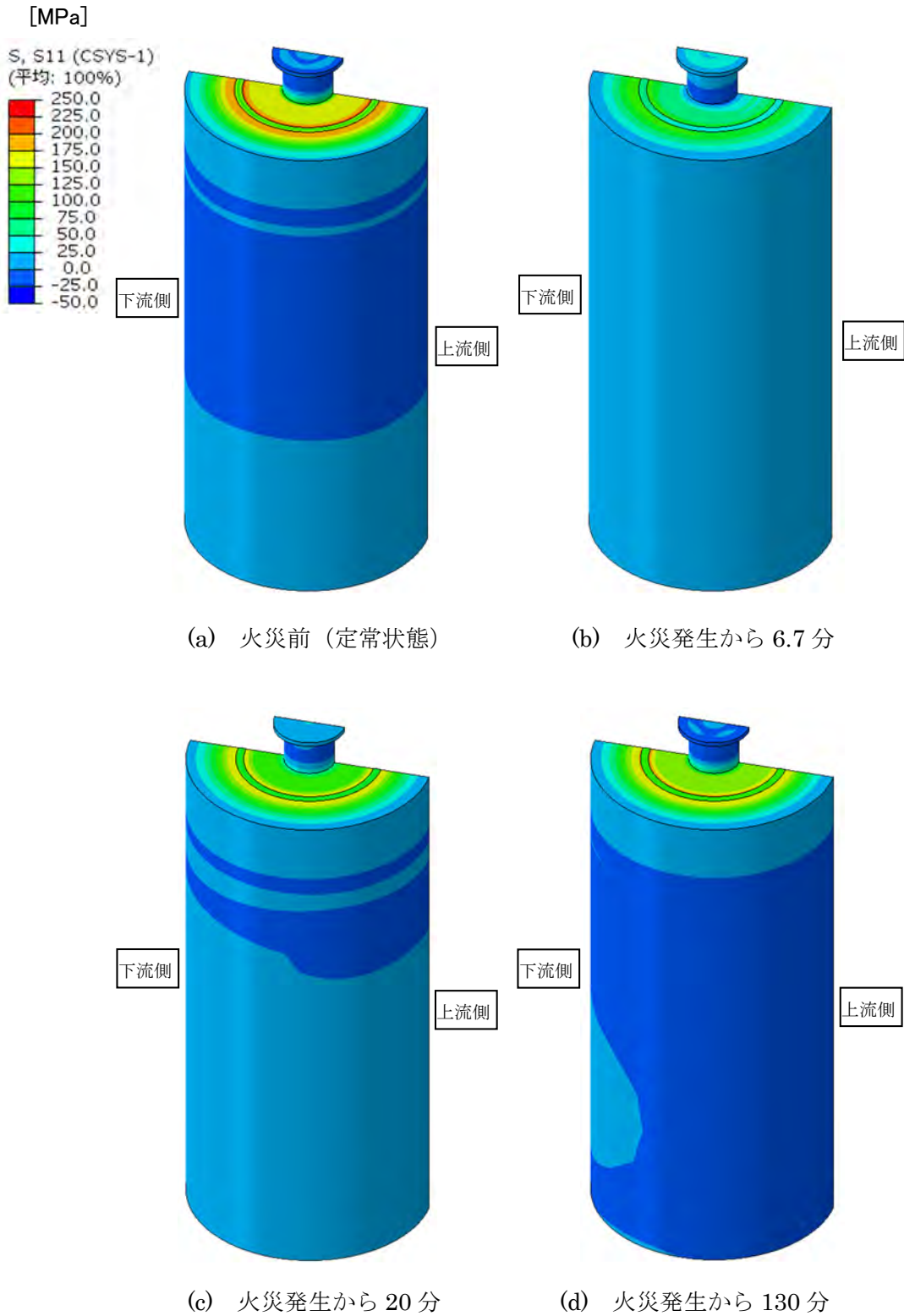


図 2.56 ガラス固化体+オーバーパックモデルの半径方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+Y側部を表示，外面側～

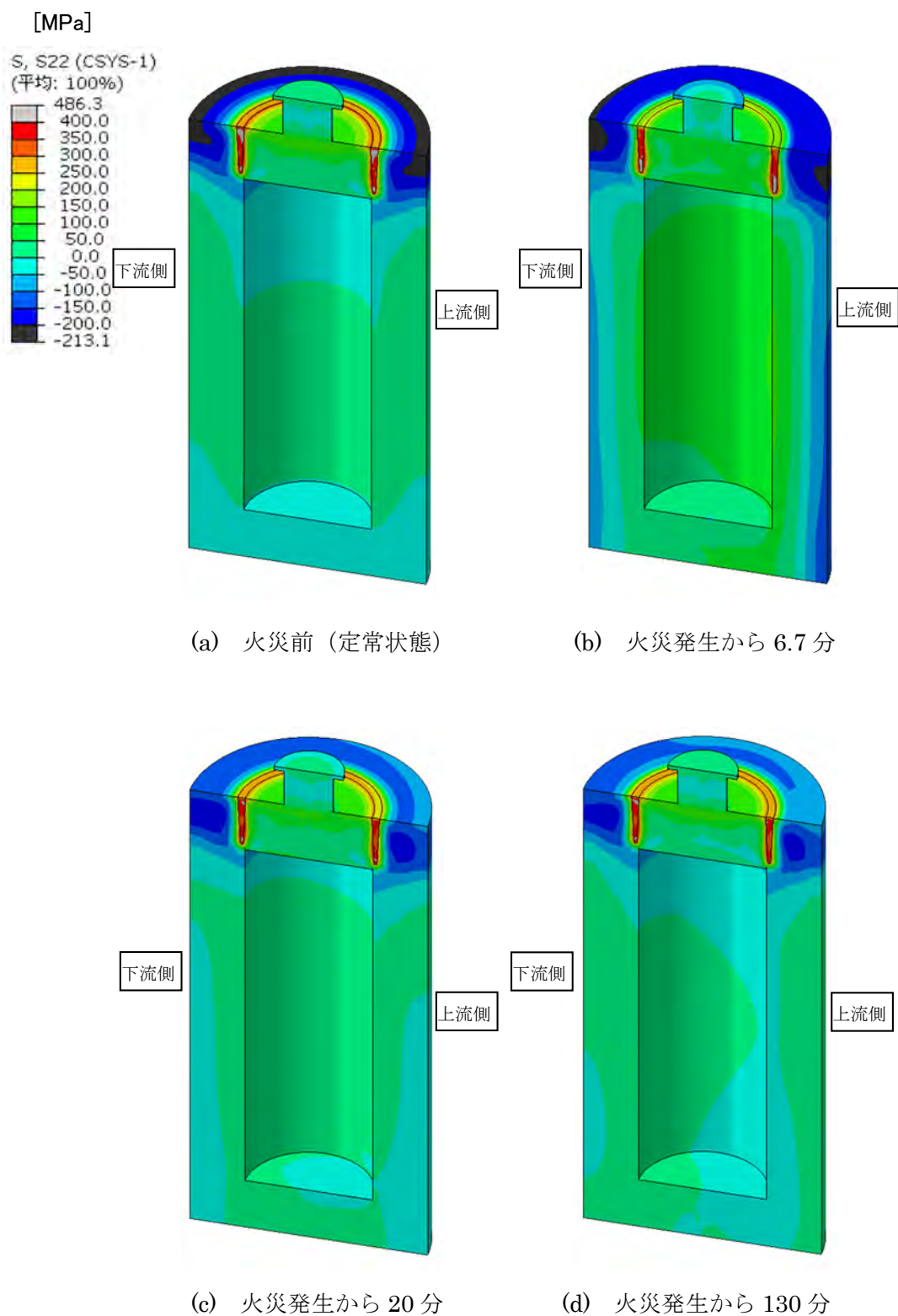


図 2.57 ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側～

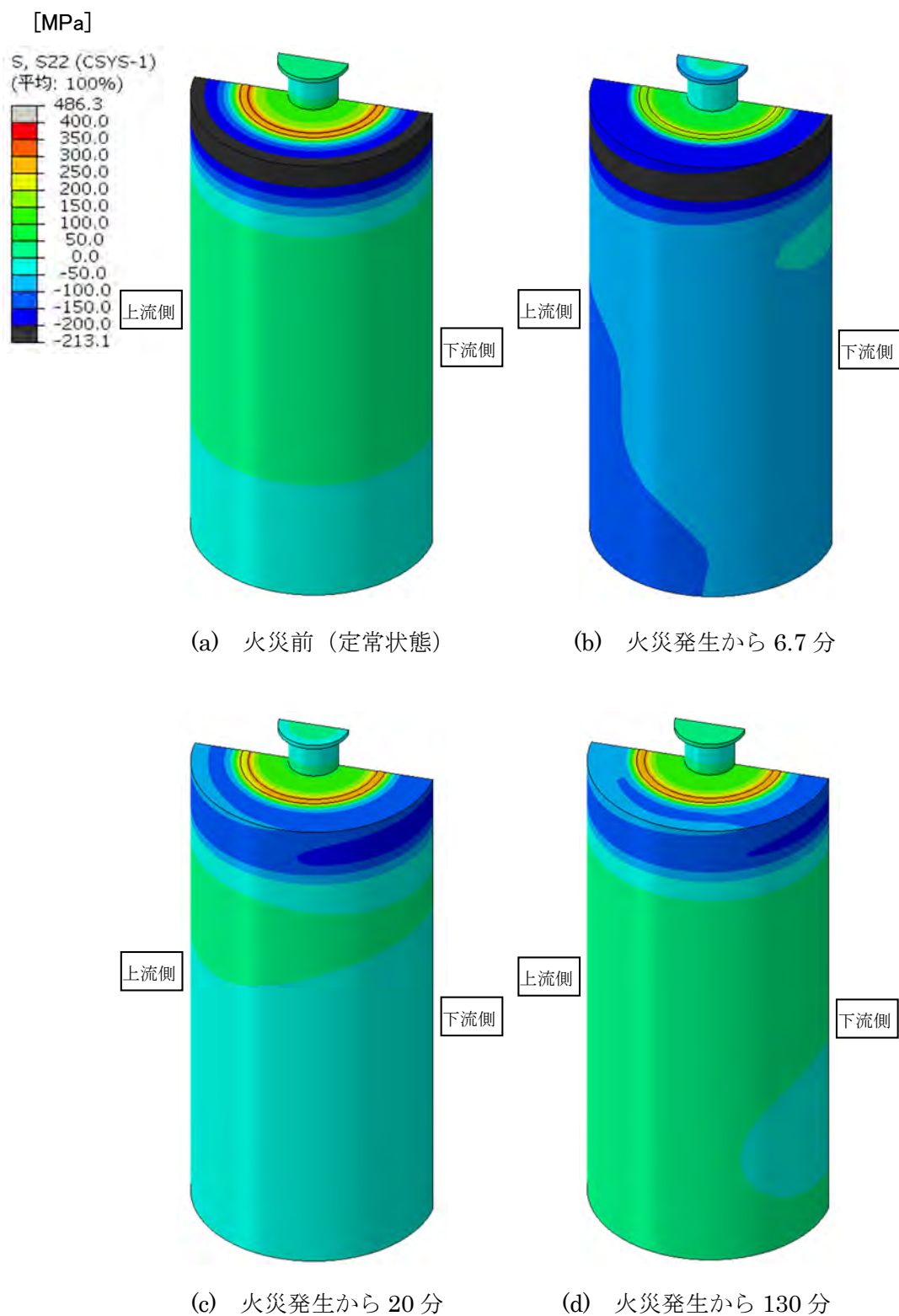


図 2.58 ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側 ～

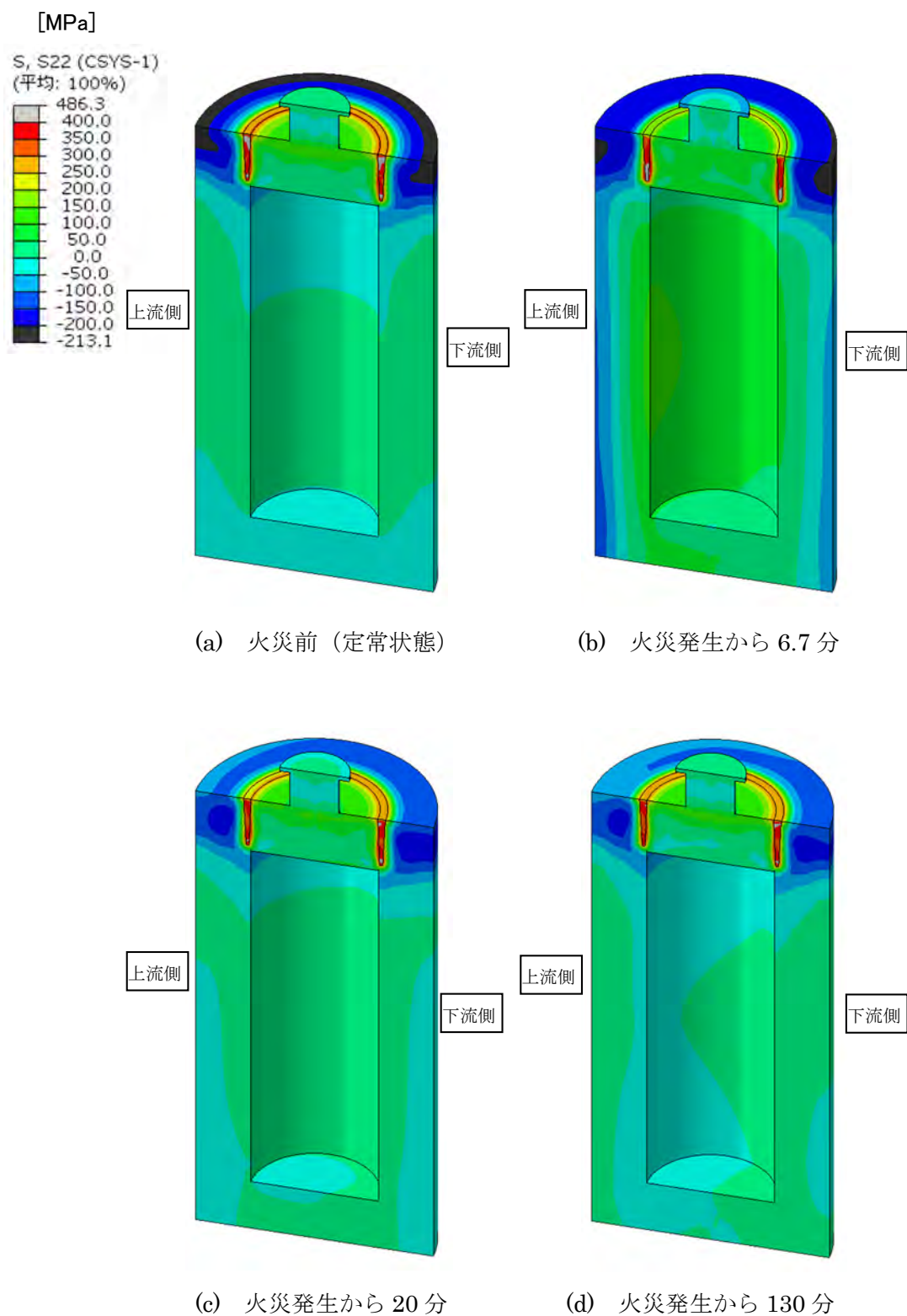


図 2.59 ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

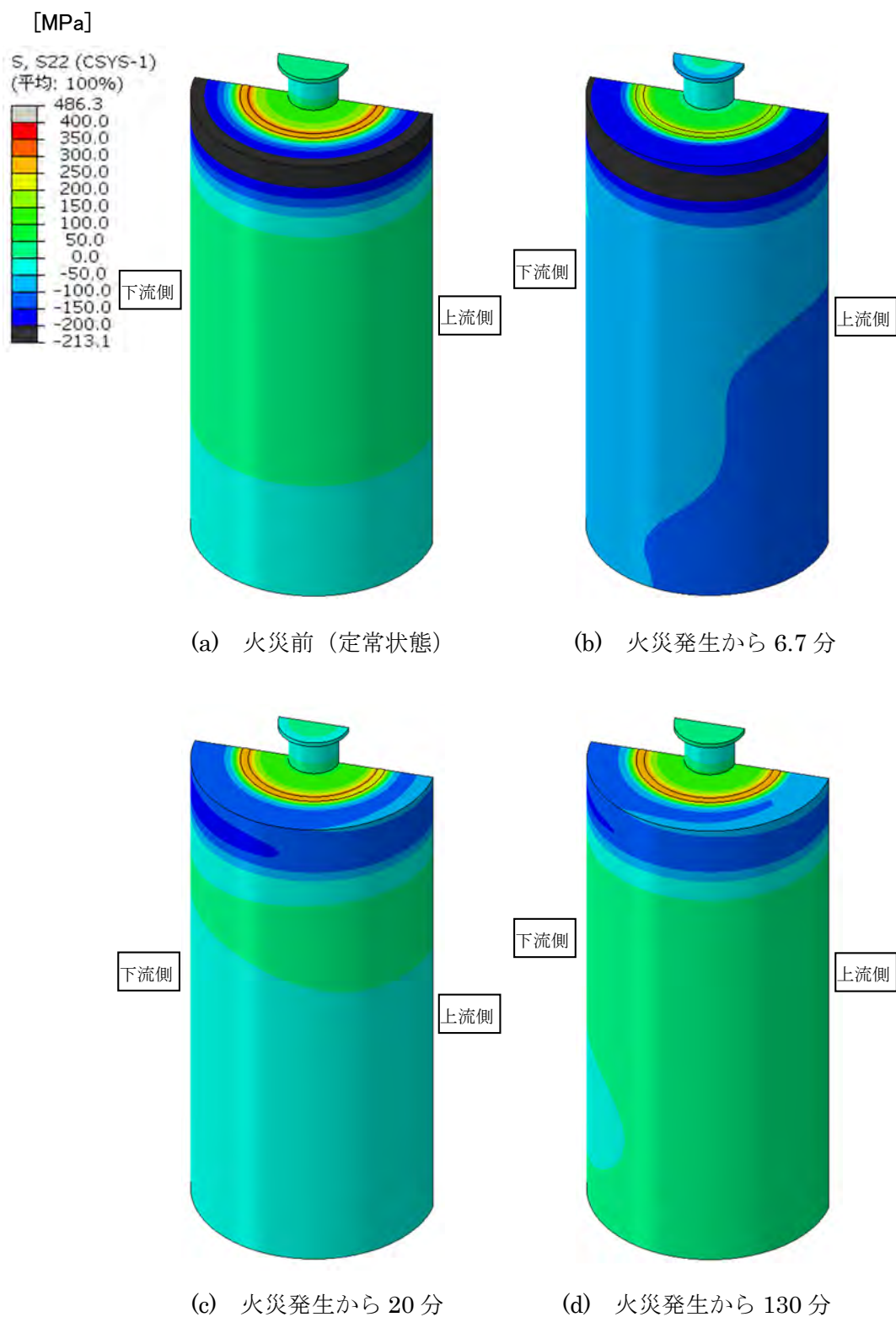


図 2.60 ガラス固化体+オーバーパックモデルの周方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+Y側部を表示，外面側～

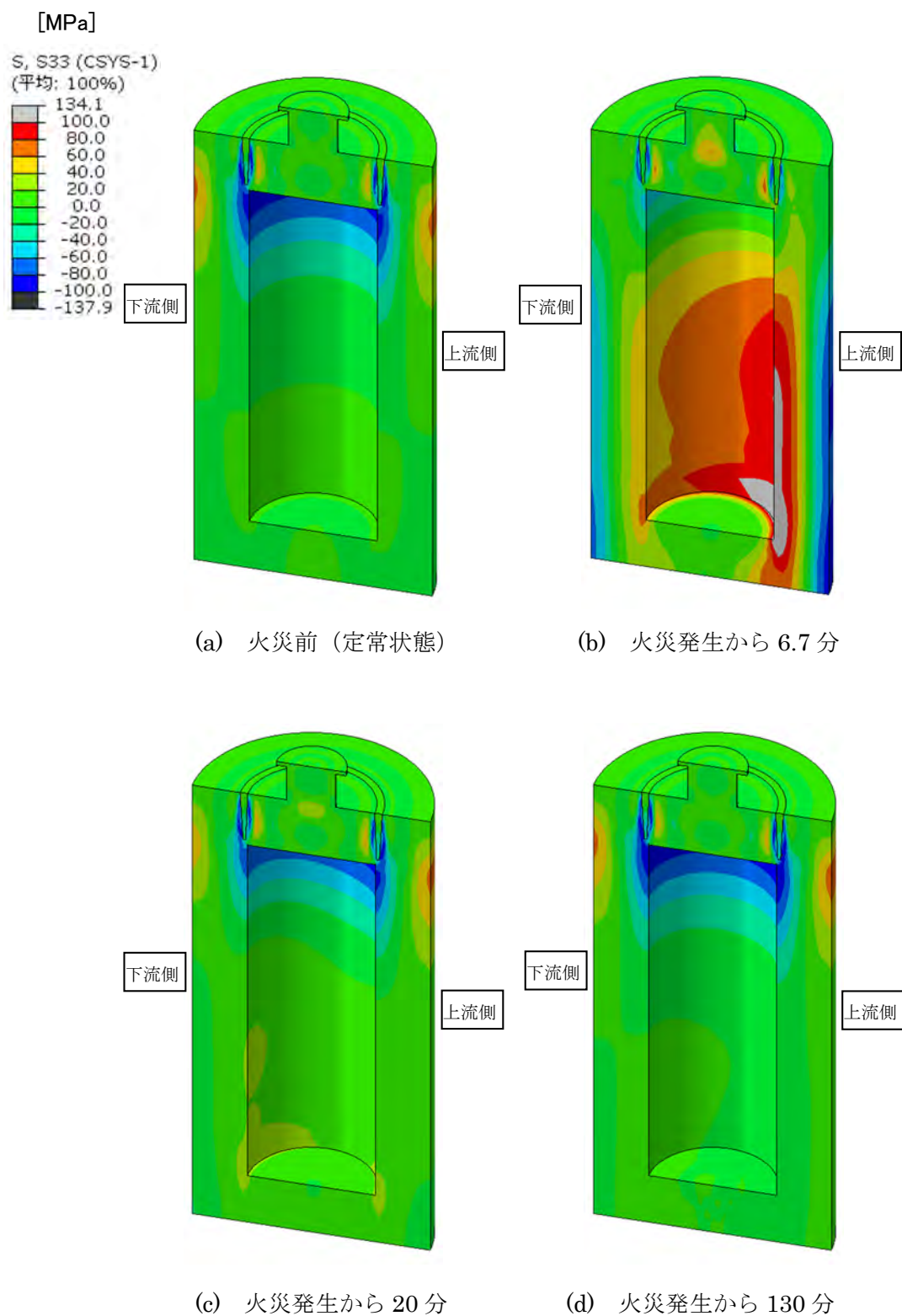


図 2.61 ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～

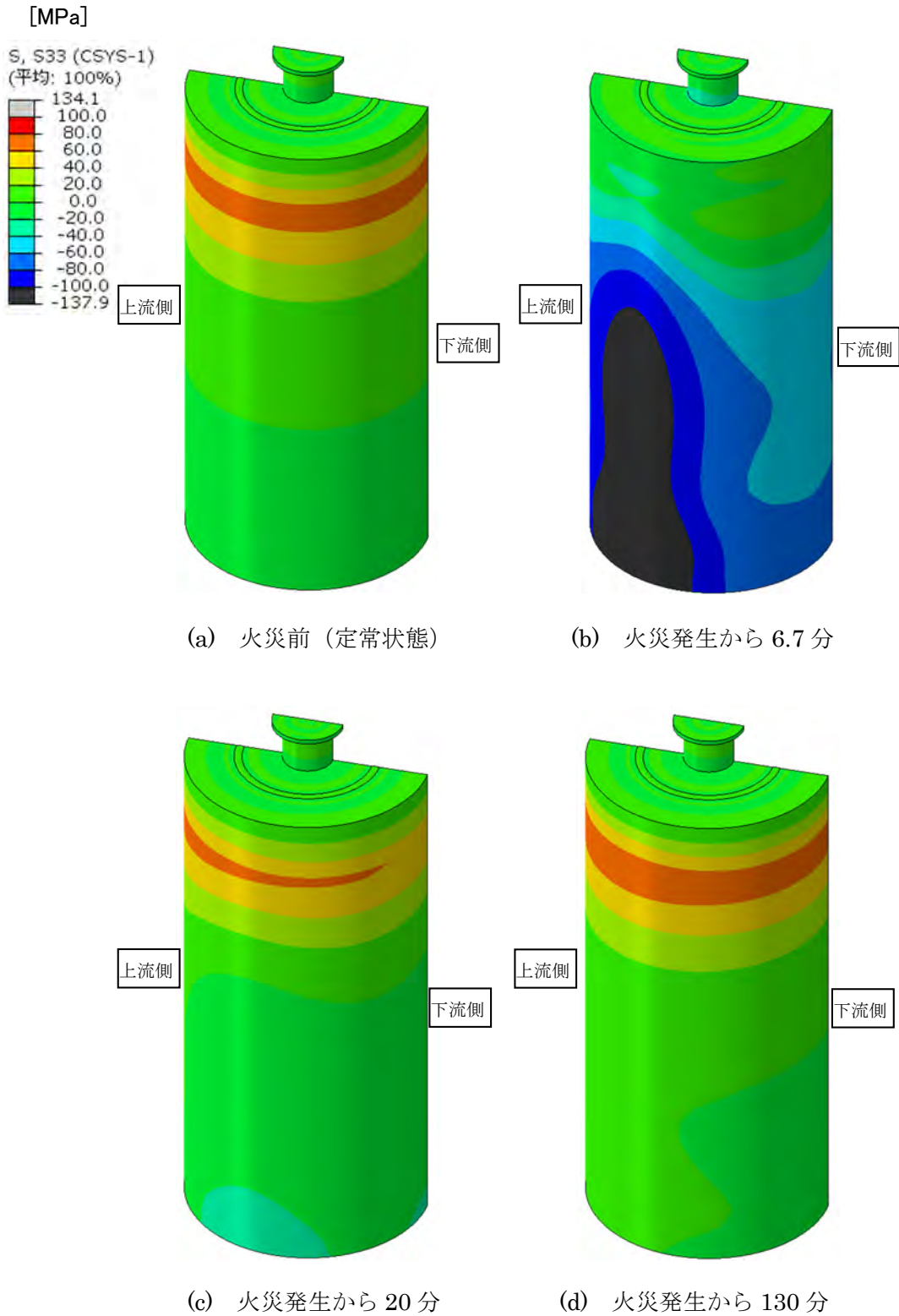


図 2.62 ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側～

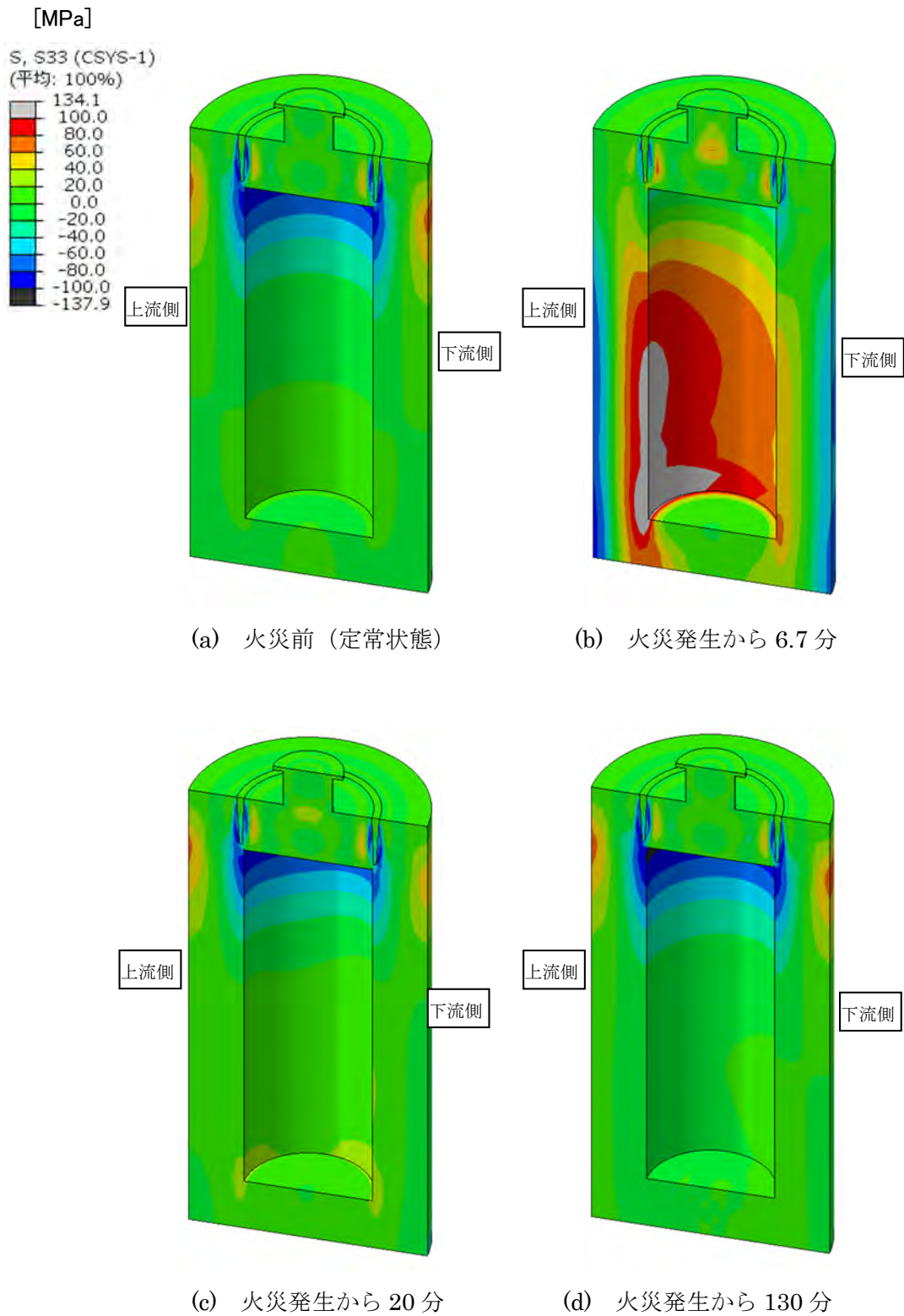


図 2.63 ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側 ～

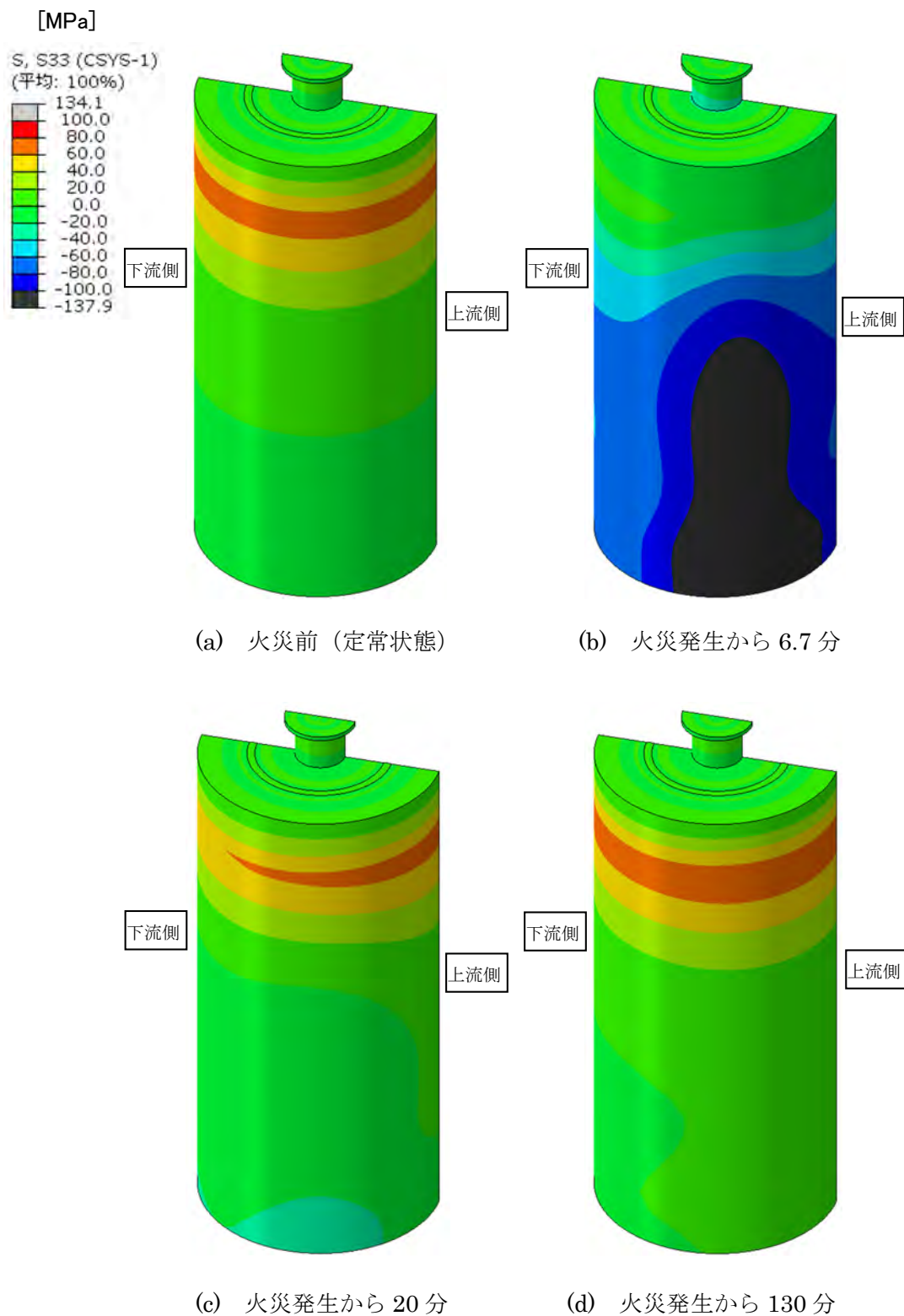


図 2.64 ガラス固化体+オーバーパックモデルの軸方向応力分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側～

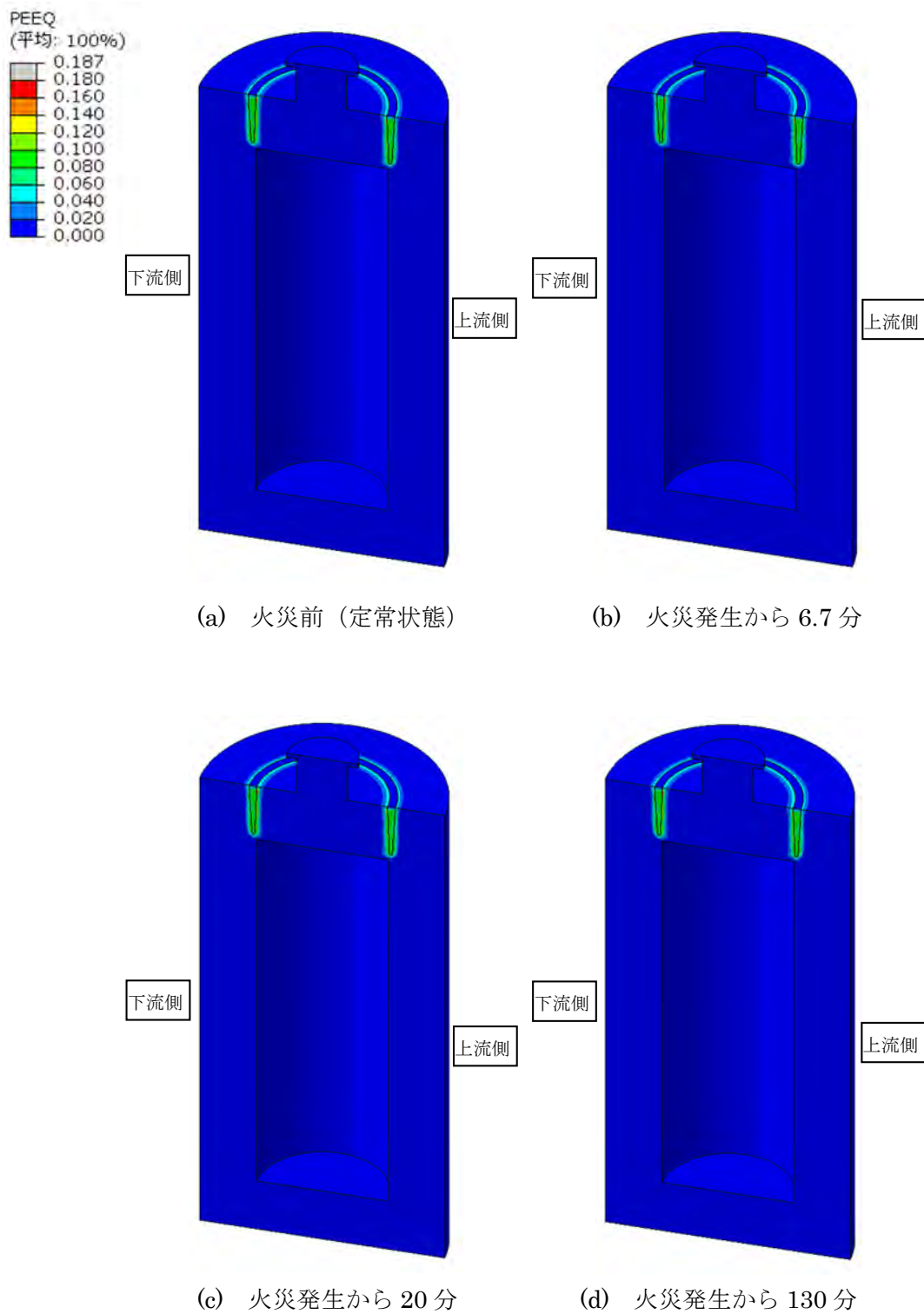
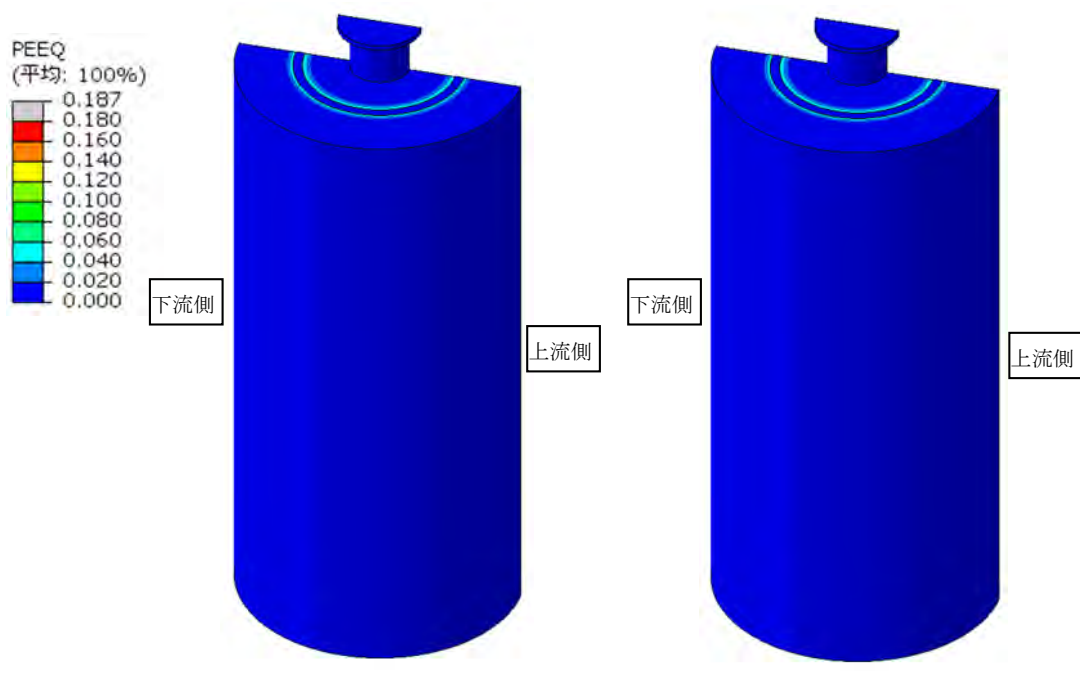
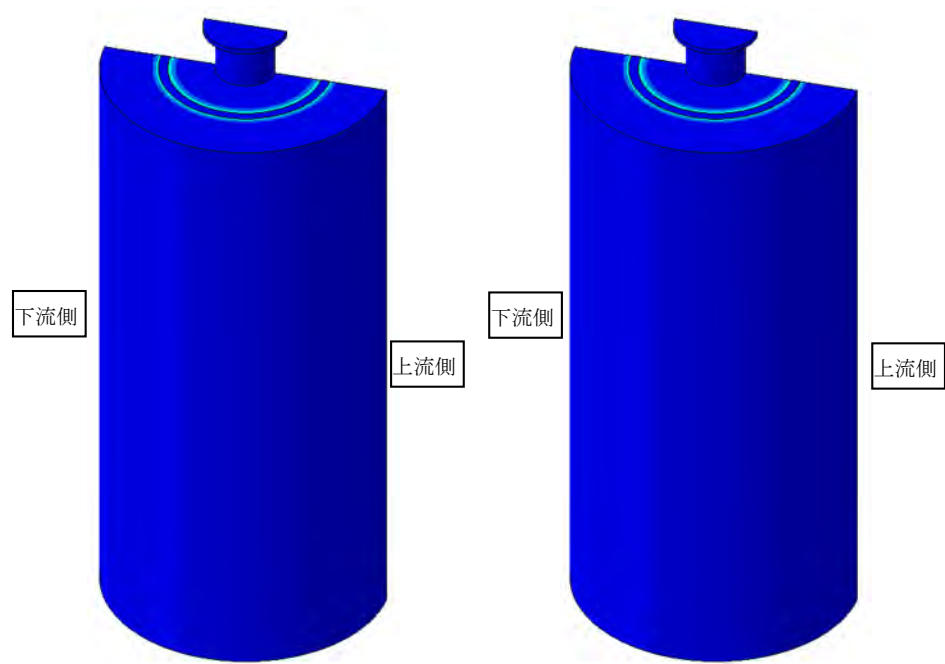


図 2.65 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，内面側 ～



(a) 火災前 (定常状態)

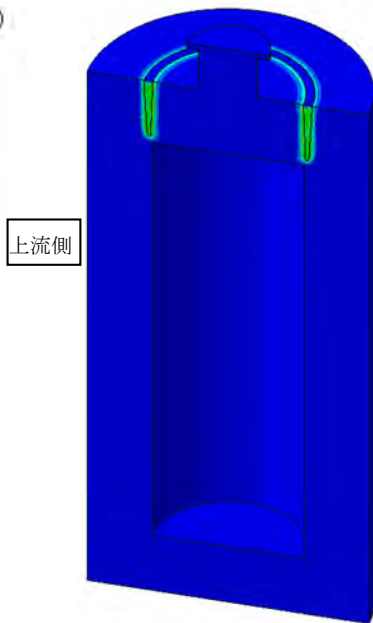
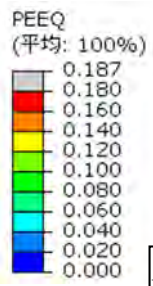
(b) 火災発生から 6.7 分



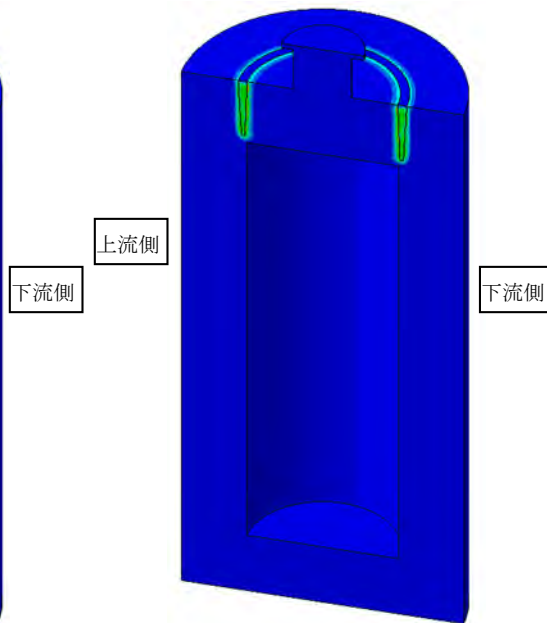
(c) 火災発生から 20 分

(d) 火災発生から 130 分

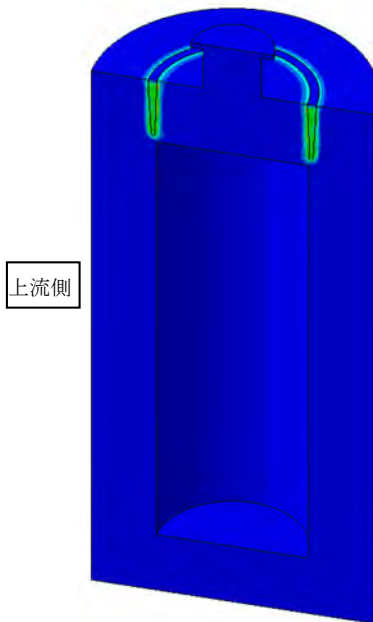
図 2.66 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：-X 側部を表示，外面側～



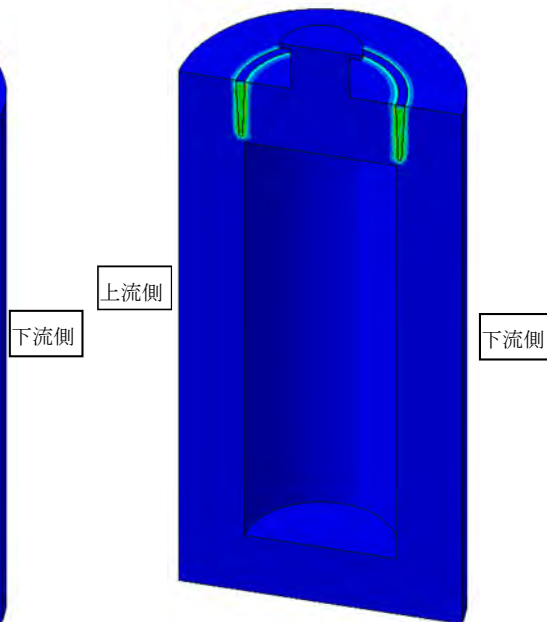
(a) 火災前 (定常状態)



(b) 火災発生から 6.7 分

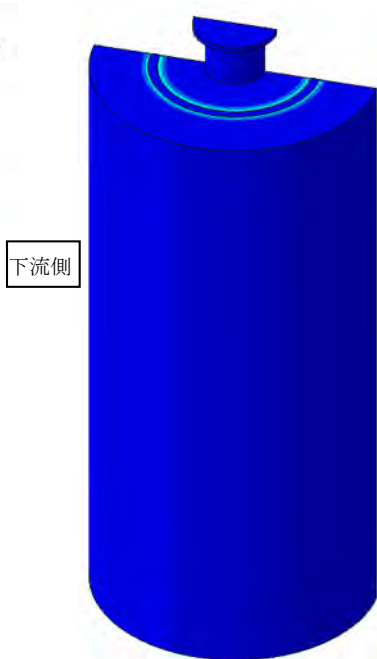
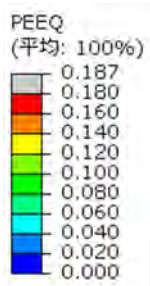


(c) 火災発生から 20 分

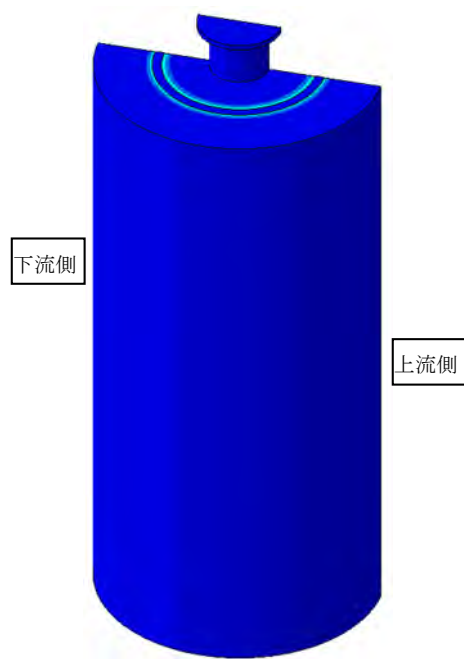


(d) 火災発生から 130 分

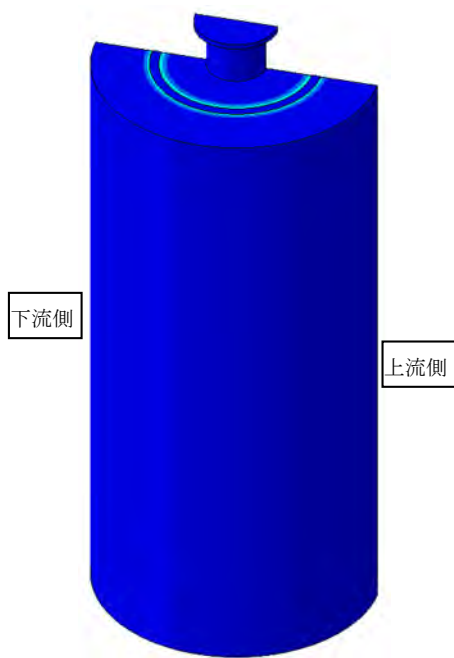
図 2.67 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，内面側～



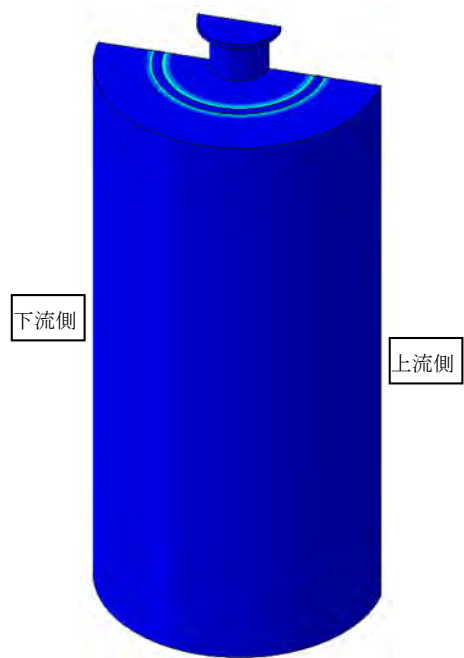
(a) 火災前 (定常状態)



(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 2.68 ガラス固化体+オーバーパックモデルの相当塑性ひずみ分布
～ オーバーパックのみ表示の切断図：+X 側部を表示，外面側～

第3章 考察

3.1 燃焼解析

本試計算においては、炎が対象物（ガラス固化体またはオーバーパック）よりも高くなったため、対象物の違いに起因する収納・検査室内全体のガスの流れやガス温度分布、酸素濃度分布への影響はみられなかった。ただし、対象物に対する熱流束については、小さい差ではあるが、異なった分布を示すことが分かった。

図 3.1 は、対象物周りの雰囲気ガス温度の経時変化を ISO834 にて定義されている曲線[2]と比較したものである。先行解析における火災シナリオ（大規模プールファイヤ）においては急激な温度上昇の後 50 秒程度で消炎が起きた。本試計算（小規模プールファイヤ）ではガス温度が最初の 3 分間 ISO834 と同様な立ち上がりを示しているただし、おおよそガス温度が 450℃となった時点からは、消炎が起きるまでガス温度は 100℃程度の幅で変動していることが分かる。

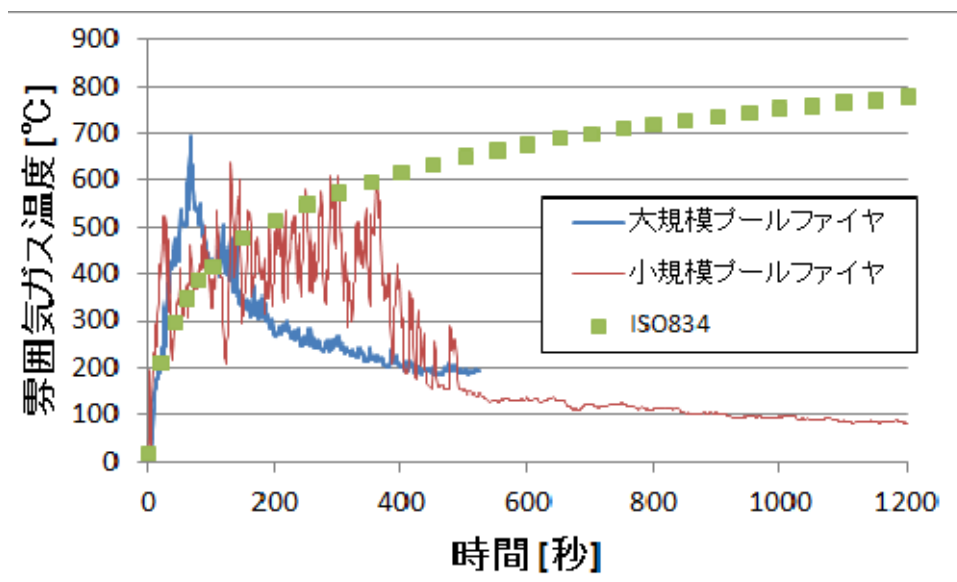


図 3.1 ガラス固化体周りの雰囲気ガス温度
(大規模プールファイヤは天井下 4 m におけるガス温度)

3.2 伝熱・応力解析

3.2.1 ガラス単体モデル

①火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした解析においても、②燃焼範囲をパラメータとした解析においても、容器外面からの火災入熱に対してガラスへ熱が伝わりやすい胴部に比べ、スカート部は温度が高くなる傾向にあり、局所的には 700℃を超える領域が見られた。また、高温になったスカート部の熱膨張がガラス固化体キャニスタ下部に拘束されるため、ガラス固化体キャニスタのスカート付け根部で大きな応力が発生し、いずれのケースにおいても、先行解析に比べて 1 オーダー大きな塑性ひずみがスカート付け根部に生じる結果となった。

ガラスの温度は、①最高温度継続時間をパラメータとした解析の、継続時間 30 分のケースではガラス上面を除く外周全体の領域で 500℃を超える結果となり、最も高温となるスカート付け根

部近傍で 643℃となったが、それ以外のケースでは 500℃を超えることは無かった。

3.2.2 ガラス固化体+オーバーパックモデル

①火災曲線の最高温度継続時間をパラメータとした解析においても、②燃焼範囲をパラメータとした解析においても、オーバーパックは蓋上部が高温になりやすいが、オーバーパックの熱容量が大きいため高温部は局所的である。また、内部のガラス固化体の温度への影響は軽微で、火災入熱に対するオーバーパックの緩衝効果は大きいことが確認できた。

オーバーパック蓋部溶接に初期状態として導入した塑性ひずみへの火災入熱に対する影響も僅かで、塑性ひずみ分布に変化は見られなかった。しかし、火災入熱でオーバーパックに温度勾配が生じるため熱応力が発生し、①最高温度継続時間をパラメータとした解析では、蓋溶接のルート部において、最高温度継続時間 15 分のケースで 250MPa 程度、最高温度継続時間 30 分のケースで 315MPa 程度の引張応力が生じることがわかった。これは火災入熱により蓋が外面から加熱されるが、蓋内側の温度は外側の温度に比べて相対的に低く、蓋の板厚方向に温度勾配が生じることが原因と考えられる。したがって、入熱がほぼゼロになる最終状態では、オーバーパックの温度勾配が小さくなり、応力分布は初期状態に近い状態に戻ることが確認できる。また、②燃焼範囲をパラメータとした解析では、オーバーパック胴部外面の局所的に高温になる領域で 138MPa 程度の軸方向圧縮応力、当該部の胴内面で 134MPa 程度の軸方向引張応力が生じていることがわかる。これは火災入熱により高温になった胴外面側の熱膨張が、比較的低温である内面側に拘束されることが原因と考えられ、同様の傾向は周方向応力においても見られる。入熱がほぼゼロになる最終状態では、オーバーパック内の温度勾配も小さくなり、応力分布は初期状態に近い状態に戻ることが確認できる。

参考文献

- [1] 日本機械学会、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012年版）第Ⅱ編 高速炉規格」、2012年12月
- [2] International Organization for Standardization ISO834-1 “Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements” 1999.

第5章 状況把握・監視技術に係る調査・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「状況把握・監視技術」について述べる。具体的には、平成24年度に検討・設定した地層処分システムで考え得る多様な異常状態や事故について、「状況把握・監視」の観点から見直し・整理するとともに、それぞれの異常状態や事故状況を速やかに把握・監視するために必要な技術や機器に関する現況の技術開発情報等を収集・整理した結果を述べるものである。

5.1.1 既往の研究成果[1]

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となる機能について検討し、その結果に基づき、本開発において自然災害に対する安全確保を検討する具体的な作業の選定を行った。

次に、類似施設の調査結果などに基づき、地層処分施設の操業安全を脅かす可能性がある自然災害を選定し、これらの起回事象が検討対象に作用した場合に発生し得る異常状態と被害の連鎖を検討し、被害の連鎖の帰着点である最終的な状況を抽出・整理した。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」、及び「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。

5.1.2 今年度の実施内容

(1) 背景

地層処分施設は多様な施設・設備から成り、想定される異常状態や事故もまた多様である。このような異常状態や事故の影響を緩和し被害を低減するためには、速やかな状況把握・監視が必須と言える。

平成24年度は、自然災害を起回事象として地層処分施設で考えられる様々な異常状態や事故状況を検討・抽出したが、このような検討はこれまであまり為されていない。このため、地層処分施設で想定される多様な異常事態・事故の状況を速やかに把握する技術についての体系的・網羅的な検討例も見あたらない。

(2) 実施概要

平成 25 年度は、状況把握・監視技術に関して以下の検討と情報収集を行った。

- ・平成 24 年度に検討・設定した地層処分システムで考え得る多様な異常状態や事故について「状況把握・監視」の観点からの見直し作業を行い、考え得る異常状態・事故ごとに状況把握・監視手順を整理した。
- ・上記の作業結果を踏まえ、それぞれの異常状態や事故ごとの状況把握に必要な機器や資機材、技術についての情報収集を行った。情報収集は「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」に着目して行った。
- ・「放射線環境下に適用できる技術」については、主に、福島第一原子力発電所事故を契機に、国等が実施した研究開発に関する報告書等を調査し、検討・開発情報を収集・整理した。
- ・「大深度地下に適用できる技術」については、チリ・コピアポ鉱山の落盤事故やカナダ・シガーレイク鉱山の異常出水事故など、大深度地下における異常状態や事故に関する文献を調査し、それらの事態に適用された状況把握技術の情報を収集・整理した。

5.2 状況把握・監視手順の整理

5.2.1 地層処分施設で考え得る異常状態や事故と対策の検討例

平成 24 年度の検討において、大規模な自然災害を起因事象として地層処分施設で考え得る異常状態や事故と、それら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・整理した。抽出した最終的な状況は、地層処分施設の地上施設、地下施設のそれぞれについて、前者が 10 状況、後者が 8 状況となった（表 5.2.1-1、表 5.2.1-2）。

これら 18 の状況を対象に応急対策、恒久対策、及び対策のための試験・解析を「対策シート」を作成して検討・抽出した。対策シートは、1 つのシートで複数の最終的な状況を扱える場合などもあり、結果的に地上施設の最終的な状況について 10 シート、地下施設の最終的な状況について 5 シートの計 15 シートを作成した。

表 5.2.1-3 に地上施設を対象とした対策シートの一例を、表 5.2.1-4 に地下施設を対象とした対策シートの一例を示す。

表 5.2.1-1 地上施設に関わる最終的な状況[1]

	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 5.2.1-2 地下施設に関わる最終的な状況[1]

	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

表 5.2.1-3 地上施設を対象とした対策シートの例[1]

検討No1
地上-状況No 1

最終的な状況	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		
廃棄体の状態	ガラス固化体の破損		
施設の状態	建屋の崩壊		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋が崩壊する。 ・建屋の崩壊によりガラス固化体が埋没する。 ・建屋崩壊の衝撃によりガラス固化体が破損する。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	対策のための試験・解析	恒久対策
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">建屋の崩壊</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の埋没、紛失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">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</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 屋外への放射性物質の拡散 あり → 避難指示対象区域の設定 負傷者の救助、救出 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 なし → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の検索</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">障害物の撤去</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> ガラス固化体の破損 あり → 放射性物質の回収 破損したガラス固化体の回収 なし → 別フローへ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> ・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の把握) </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> ・ガラス固化体が破損した時の放射線量把握試験 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> ・ガラス固化体の破損判断のための試験 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> 【異常状態を回避する抜本的対策】 <ul style="list-style-type: none"> ・一般公衆との十分な離れの確保 ・揺れ軽減対策(建屋の免震化) ・放射線、放射性物質閉じ込め対策(建屋の地下構造化) </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 【収束に向けた対策】 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">放射性物質、破損したガラス固化体の搬出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">対象区域の除染</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 対象区域の線量検査 OK → 対象区域の除染完了 OUT → 再度除染 </div> </div>

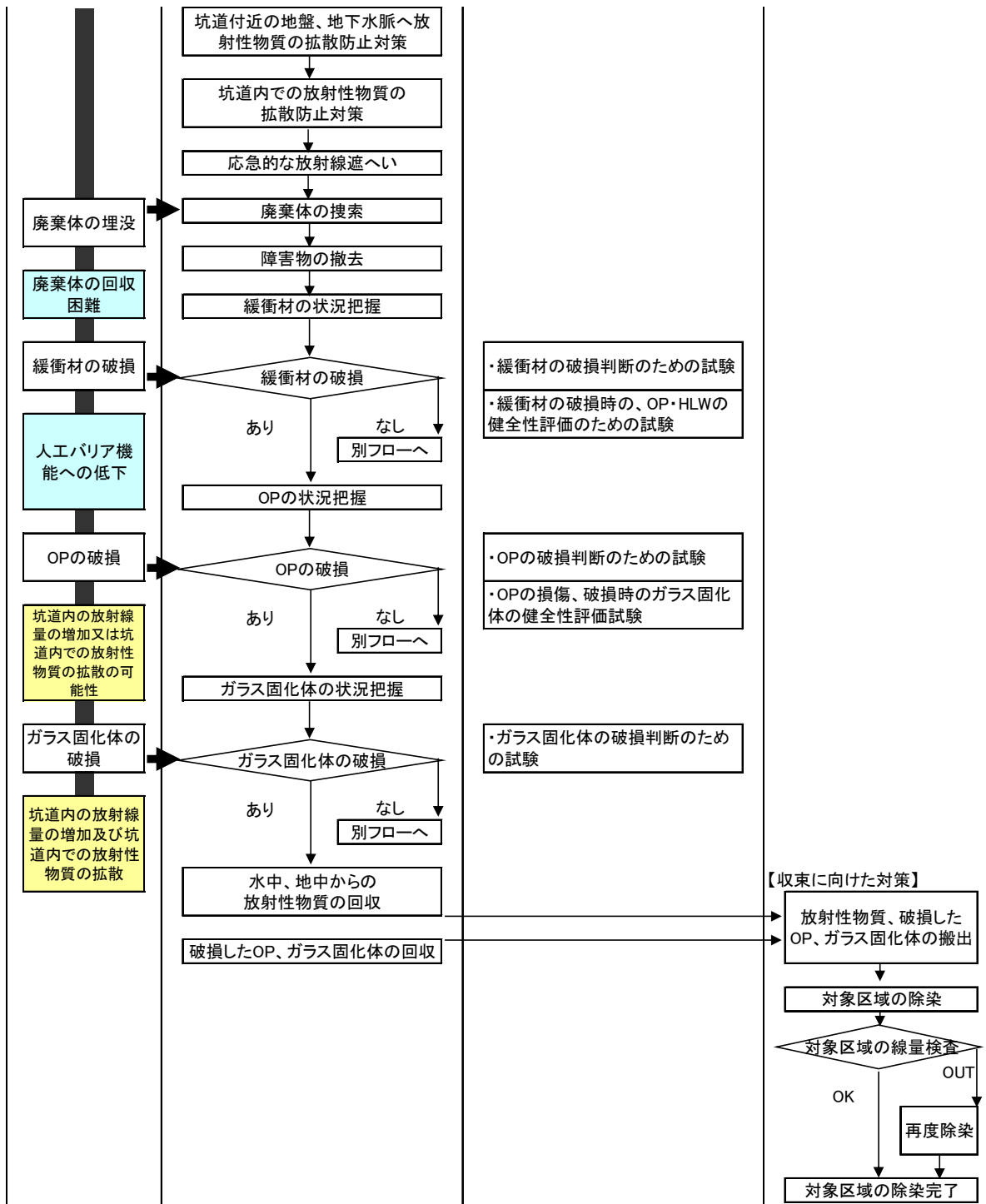
表 5.2.1-4 地下施設を対象とした対策シートの例[1]

検討No2

地下-状況No 2, 3, 5, 6, 8

(表中、オーバーパックは「OP」と略記)

最終的な状況	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、 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、 人工バリア機能の低下の可能性、廃棄体の回収困難、状況把握又は監視機能の喪失		
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、ガラス固化体の破損		
施設の状態	坑道内落盤、ガス爆発、エレベーター落下		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス爆発やエレベーター落下等による衝撃力、または落盤の荷重により、緩衝材、OP、ガラス固化体が破損する。 ・破損した緩衝材、OP、ガラス固化体は落盤により埋没している。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	対策のための試験・解析	恒久対策
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガス爆発</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">エレベーター落下</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">落盤</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #e0f0ff;">状況把握又は監視機能の喪失</div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> ・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) ・破損したガラス固化体から水への核種浸出試験 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> ・対象(選定)地盤の透水試験、解析 ・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 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>【異常状態を回避する抜本的対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・揺れ軽減対策(坑道への免震・制振技術の適用) ・強固地盤の選定 </div>



5.2.2 地層処分施設で考え得る異常状態や事故時の状況把握・監視手順の整理

ここでは、前述の 15 の対策シートについて状況把握・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、それぞれの当該欄に検討結果を記述したものである。

表 5.2.2-1～表 5.2.2-15 に、地層処分施設で考え得る異常状態や事故時の状況把握・監視手順を整理した結果を示す。

なお、手順の具体化や情報取得に必要な技術や機器については、5.3 以降で述べる。

表 5.2.2-1 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 1）

検討No1
地上-状況No 1

最終的な状況	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		
廃棄体の状態	ガラス固化体の破損		
施設の状態	建屋の崩壊		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋が崩壊する。 ・建屋の崩壊によりガラス固化体が埋没する。 ・建屋崩壊の衝撃によりガラス固化体が破損する。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">建屋の崩壊</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の埋没、紛失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">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</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 屋外への放射性物質の拡散 あり → 別フローへ なし → 別フローへ </div> </div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 応急的な放射性物質の拡散防止対策 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 応急的な放射線遮へい </div> </div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の搜索</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 障害物の撤去 </div> </div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> ガラス固化体の破損 あり → 破損したガラス固化体の回収 なし → 別フローへ </div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 破損したガラス固化体の回収 </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の数および場所の推定 ・建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 ・回収ルートの確認、障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合 ・天候、風速など ・空間線量 <ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 <ul style="list-style-type: none"> ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・ガラス固化体周辺の放射線量 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なり合っている等) ・ガラス固化体、OPの損傷情報 ・回収ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報

表 5.2.2-2 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No.2）

検討No2

地上-状況No 1

最終的な状況	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		
廃棄体の状態	ガラス固化体の破損		
施設の状態	搬入口等の破損		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・津波や洪水・大雨の流体力により搬入口等が破損する。 ・破損した搬入口等から津波や漂流物、洪水が検査室内に流入する。 ・ガラス固化体が流出する。 ・流体力、漂流物等の衝突によりガラス固化体が破損する。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	
搬入口等の破損	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p>		
ガラス固化体の流出	<p>海水等への放射性物質の浸出</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p>		
	<p>負傷者の救助、救出</p> <p>応急的な放射性物質の拡散防止対策</p> <p>応急的な放射線遮へい</p>		
	<p>ガラス固化体の検索</p> <p>障害物の撤去</p>		
ガラス固化体の破損	<p>ガラス固化体の状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p>		
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	<p>破損したガラス固化体の回収</p>		
	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損壊箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量 ・作業員の配置状況 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・海水の放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・海水の浸出状況 ・ガラス固化体の破損状況 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の数および場所の推定 ・建屋内状況（温度、負圧等）の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の検索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 ・回収ルートの確認、障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報（倒れている、重なり合っている等） ・ガラス固化体、OPの損傷情報 ・回収ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	

表 5.2.2-3 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 3）

検討No3

地上-状況No 1, 3, 7

最終的な状況	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、 屋内外の放射線量の増加、廃棄体の回収困難		
廃棄体の状態	遮へい容器健全、遮へい容器破損(OP、HLWは健全)、遮へい容器およびOPの破損(HLWは健全)		
施設の状態	建屋なし(地上から坑口まで)		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃力により廃棄体(遮へい容器+OP+HLW)が紛失、流失する。 モニタリング圏外により廃棄体の状況が把握できない。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	
廃棄体が紛失、流失 廃棄体の回収困難 管理区域外でガラス固化体の破損	緊急事態の通報 管理区域外の放射線量・放射性物質計測 管理区域外への放射性物質の拡散 なし → 避難指示対象区域の設定 → 応急的な放射性物質の拡散防止策 → ※2 廃棄体の搜索へ あり → 避難指示対象区域の設定 → 応急的な放射性物質の拡散防止策 → ※2 廃棄体の搜索へ	<ul style="list-style-type: none"> 屋外における放射線測定箇所の確認 管理区域外の放射線測定箇所の確認 放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> 天候、風速など 管理区域外および管理区域境界の空間線量 作業員の配置状況
屋内外の放射線量の増加	屋外の放射線量・放射性物質計測 屋外への放射性物質の拡散 なし → 避難指示対象区域の設定 → 応急的な放射性物質の拡散防止策 → ※2 廃棄体の搜索へ あり → 避難指示対象区域の設定 → 応急的な放射性物質の拡散防止策 → ※2 廃棄体の搜索へ 屋外への放射線の散乱 あり → ※2 廃棄体の搜索へ なし → ※2 廃棄体の搜索へ	<ul style="list-style-type: none"> 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> 天候、風速など 空間線量 作業員の配置状況
廃棄体の埋没・流出、紛失	負傷者の救助、救出 応急的な放射線遮へい ※2 廃棄体の搜索 障害物の撤去	<ul style="list-style-type: none"> 負傷者との連絡方法の確保 負傷者数、場所の確認 二次災害発生の可能性の確認 救助、救出ルートの確認 負傷者の救助・救出 	<ul style="list-style-type: none"> 作業員の位置、負傷状況 親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報
遮へい容器の破損	廃棄体の状況把握 遮へい容器の破損 あり → ※3 廃棄体の回収へ なし → ※3 廃棄体の回収へ	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体の搜索及び放射線測定 放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 廃棄体の状況の確認 遮へい容器の破損状況及び保管状況の確認 遮へい容器周辺の放射線測定 回収ルートの確認、障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体周辺の放射線量 廃棄体の損傷状況 遮へい容器の保管情報(倒れている、重なり合っている等) 遮へい容器の損傷状況 回収ルートの空間線量、温度、湿度および周辺設備の損傷情報
OPの破損	OPの破損 あり → ※3 廃棄体の回収へ なし → ※3 廃棄体の回収へ	<ul style="list-style-type: none"> OPの破損状況及び保管状況の確認 OP周辺の放射線測定 回収ルートの確認 障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> OPの保管情報(倒れている、重なり合っている等) OPの損傷状況 回収ルートの空間線量、湿度、温度および周辺設備の損傷情報
ガラス固化体の破損	ガラス固化体の破損 あり → ※3 廃棄体の回収へ なし → ※3 廃棄体の回収へ	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の破損状況及び保管状況の確認 ガラス固化体周辺の放射線測定 回収ルートの確認 障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なり合っている等) ガラス固化体の損傷状況 回収ルートの空間線量、湿度、温度および周辺設備の損傷情報
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	※3 廃棄体の回収 廃棄体の移動 廃棄体検査 OK → 廃棄体の格納 OUT → 損傷に応じた対応・措置 → 廃棄体の格納		

表 5.2.2-4 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 No. 4)

検討No4
地上-状況No 2, 8, 10

最終的な状況	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、 建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響、状況把握又は監視機能喪失		
廃棄体の状態	HLWの破損、HLWは健全な状態		
施設の状態	建屋のひび割れ・剥離、負圧機能の停止		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋にひび割れまたは剥落が生じる。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 ・負圧機能の停止、換気機能の停止による室内高温状態のため検査室内への侵入が困難となる。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策		必要な情報
ガラス固化体の破損	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>拡散なし → 別フローへ</p> <p>拡散あり → 別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量
建屋の損傷	<p>建屋の損傷の把握</p> <p>建屋の放射線遮へい機能に着目した建屋の評価</p> <p>損傷した建屋の対応、措置</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷状況の確認 ・建屋周辺の放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合い ・天候、風速 ・空間線量
建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響	<p>負圧(排気)設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による閉じ込め機能機能の回復</p> <p>OUT → 代替設備・手法による閉じ込め機能機能の回復</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・負圧設備の状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・負圧設備の不具合箇所 ・修理期間、費用
状況把握又は監視機能喪失	<p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による状況把握</p> <p>OUT → 代替設備・手法による状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリング設備の状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリング設備の不具合箇所 ・修理期間、費用
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	<p>ガラス固化体の状態把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>なし → 放射性物質の回収</p> <p>あり → 放射性物質の回収 → 破損したガラス固化体の回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 ・回収ルートの確認 ・障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なり合っている等) ・ガラス固化体、OPの損傷状況 ・回収ルート空間線量、湿度、温度及び周辺設備の損傷情報
	<p>吊り上げ設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による宙吊り状態の解除</p> <p>OUT → 代替設備・手法による宙吊り状態の解除</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・クレーン、把持装置の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・クレーン、把持装置機能の不具合状況 ・修理期間、費用
	<p>ガラス固化体の移動</p> <p>ガラス固化体検査</p> <p>OK → 損傷に応じた対応・措置</p> <p>OUT → 損傷に応じた対応・措置</p> <p>ガラス固化体の格納</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・代替設備の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・修理期間、費用

表 5.2.2-5 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 5）

検討No5
地上-状況No 3

最終的な状況	屋内外の放射線量の増加		
廃棄体の状態	OPの破損（HLWIは健全な状態）		
施設の状態	建屋の崩壊、搬入口等の破損		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋が崩壊、または搬入口等が破損する。 ・建屋の崩壊、搬入口等の破損により廃棄体が埋没、水没または流出する。 ・ガラス固化体の破損はない。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">建屋崩壊・搬入口等の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">廃棄体の埋没・流出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の破損なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">屋内外の放射線量の増加</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外への放射性物質の拡散</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">あり</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">別フローへ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外への放射線の散乱</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">あり</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">別フローへ</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">応急的な放射線遮へい</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体またはOPの搜索</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">障害物の撤去</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体、OPの状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">あり</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">別フローへ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">水中からのガラス固化体またはOPの回収</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">瓦礫からのガラス固化体またはOPの回収</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体またはOPの移動</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体またはOPの検査</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">OK</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">OUT</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">損傷に応じた対応・措置</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ガラス固化体またはOPの格納</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体またはOPの数及び場所の推定 ・建屋状況（温度、負圧等）の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体またはOPの搜索および放射線測定 ・放射性物質（ガラス固化体の破片）の場所の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・障害物の撤去 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 ・回収ルートの確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合い ・天候、風速 ・空間線量 <ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 <ul style="list-style-type: none"> ・災害発生時のガラス固化体、OPの位置情報 ・ガラス固化体、OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体、OPの位置情報および損傷情報 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報（倒れている、重なり合っている等） ・ガラス固化体、OPの損傷情報 ・回収ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報

表 5.2.2-6 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No.6）

検討No6
地上-状況No 3, 5, 10

最終的な状況	屋内外の放射線量の増加、ガラスの閉じ込め機能への影響 状況把握又は監視機能の喪失		
廃棄体の状態	HLWの失透の可能性		
施設の状態	搬入口等の破損		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体またはOPの吊り上げ中に、津波で搬入口等が破損する。 ・破損搬入口等から油が検査室内に流入、火災が発生する。 ・ガラス固化体が火災により直接加熱される。 ・モニタリングが不能となり、ガラス固化体の状況の把握ができない。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">搬入口等の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">油流入による火災発生</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラスの閉じ込め機能への影響</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">状況把握又は監視機能喪失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の破損なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">屋内外の放射線量の増加</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外への放射性物質の拡散</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">あり</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">別フローへ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">応急的な放射線遮へい</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">検査室内の消火</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の冷却</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">あり</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">別フローへ</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の回収</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体検査</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">OK</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">OUT</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">損傷に応じた対応・措置</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ガラス固化体の格納</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・火災発生場所、規模の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 <ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度計測機器の状況の確認 ・屋内の温度の計測 ・ガラス固化体の数および場所の推定 ・建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合 ・火災発生場所、規模 ・天候、風速など ・空間線量 <ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 <ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度 ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報

表 5.2.2-7 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 7）

検討No7
地上-状況No 4, 9, 10

最終的な状況	屋内の放射線量の増加及び屋内での放射性物質の拡散、 屋内高温状態の継続、状況把握又は監視機能喪失		
廃棄体の状態	HLWの破損		
施設の状態	建屋健全		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により天井クレーンが損傷し、ガラス固化体が落下する。 ・落下物等によりガラス固化体が破損する。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 ・換気機能の停止により検査室内への侵入が困難となる。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ガラス固化体の落下・破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;">状況把握又は監視機能喪失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;">屋内の高温状態の継続</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;">屋内の放射線量の増加及び屋内での放射性物質の拡散</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; border: 2px solid red;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 屋外への放射性物質の拡散 拡散なし → 別フローへ 拡散あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; border: 2px solid red;">モニタリング設備の状態確認</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 設備の復旧 OK → 別フローへ OUT → 代替設備・手法による状況把握 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; border: 2px solid red;">破損したガラス固化体の状態把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 既存のモニタリング設備による拡散した放射性物質の状況把握が可能か OK → 別フローへ OUT → 代替設備・手法による状況把握 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; border: 2px solid red;">空調設備の状態確認</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 設備の復旧 OK → 別フローへ OUT → 代替設備・手法によるガラス固化体等の冷却 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">破損したガラス固化体の回収</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状況把握 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体の周辺の放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・換気状態(温度)の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・換気設備の状況確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・天候、風速など ・空間線量 ・作業員の配置状況 <ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の不具合箇所 ・修理期間、費用 <ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 <ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 <ul style="list-style-type: none"> ・停電・ネットワークの状況 ・施設内の温度 <ul style="list-style-type: none"> ・代替設備の必要能力、動作確認、施設内の温度の状況

表 5.2.2-8 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No.8）

検討No8

地上-状況No 5, 10

最終的な状況	ガラスの閉じ込め機能への影響、状況把握又は監視機能喪失		
廃棄体の状態	HLWの失透の可能性、HLWの急冷		
施設の状態	建屋健全		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・上蓋溶接作業中に衝撃力により溶接箇所がずれる。 ・OP、HLWが加熱され、HLWが高温状態になる。（ガラス固化体の失透の可能性） ・排気口等から津波、大雨洪水等により建屋内が冠水、HLWが急冷する。 ・モニタリングが不能となり、ガラス固化体の状況の把握ができない。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">溶接箇所がずれる</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">状況把握又は監視機能喪失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ガラス固化体の加熱</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ガラス固化体の急冷</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ガラス固化体の破損なし</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ガラスの閉じ込め機能への影響</div>	<p style="text-align: center;">緊急事態の通報</p> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">屋外への放射性物質の拡散</p> <p style="text-align: center;">なし → 別フローへ</p> <p style="text-align: center;">あり → 別フローへ</p> </div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">モニタリング設備の状態確認</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">設備の復旧</p> <p style="text-align: center;">OK → 代替設備・手法による状況把握</p> <p style="text-align: center;">OUT → 代替設備・手法による状況把握</p> </div> <p style="text-align: center;">ガラス固化体の状態把握</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ガラス固化体の高温状態</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ガラス固化体の冷却</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ガラス固化体の破損</p> <p style="text-align: center;">なし → 別フローへ</p> <p style="text-align: center;">あり → 別フローへ</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ガラス固化体の移動</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">ガラス固化体検査</p> <p style="text-align: center;">OK → ガラス固化体の格納</p> <p style="text-align: center;">OUT → 損傷に応じた対応・措置</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状態の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度計測機器の状況の確認 ・屋内の温度の計測 ・ガラス固化体の数および場所の推定 ・建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・天候、風速など ・空間線量 <ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の移動状況 <ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度 ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報

表 5.2.2-9 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 9）

検討No9
地上-状況No 6, 9, 10

最終的な状況	ガラス固化体・OPの正常作業工程の中断、屋内高温状態の継続 状況把握又は監視機能喪失		
廃棄体の状態	HLW,OPの健全な状態		
施設の状態	建屋健全		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体またはOPの吊り上げ中に、クレーンが停止し宙吊り状態が継続する。 ・換気機能停止による室内高温状態の継続により、検査室内への侵入が困難となる。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">クレーンの停止</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">状況把握又は監視機能喪失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋内高温状態の継続</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ガラス固化体・OPの正常作業工程の中断</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">モニタリング設備の状態確認</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">設備の復旧</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;">OK</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px; width: fit-content; margin-left: auto;">代替設備・手法による状況把握</div> </div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">空調設備の状態確認</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">設備の復旧</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;">OK</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px; width: fit-content; margin-left: auto;">代替設備・手法によるガラス固化体等の冷却</div> </div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">吊り上げ設備の状態確認</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">設備の復旧</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;">OK</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px; width: fit-content; margin-left: auto;">代替設備・手法による宙吊り状態の解除</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の移動</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">ガラス固化体検査</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;">OK</div> <div style="width: 5%;">OUT</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px; width: fit-content; margin-left: auto;">損傷に応じた対応・措置</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">ガラス固化体の格納</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状況の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・換気状態(温度)の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・換気設備の状況確認 ・代替設備の起動状況の確認 <ul style="list-style-type: none"> ・クレーン、把持装置の状況の把握 <ul style="list-style-type: none"> ・代替設備の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の稼動状況 <ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 <ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・施設内の温度 <ul style="list-style-type: none"> ・代替設備の必要能力、動作確認、施設内の温度の状況 <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(吊上げ状態等) <ul style="list-style-type: none"> ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況

表 5.2.2-10 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討 No. 10）

検討No10
地上-状況No 6, 7, 8, 9, 10

最終的な状況	ガラス固化体・OPの正常作業工程の中断、ガラス固化体・OPの回収困難、 屋内高温状態の継続、状況把握又は監視機能喪失		
廃棄体の状態	HLW,OPの健全な状態		
施設の状態	建屋健全		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の吊り上げ中に、揺れにより天井クレーンが損傷し、ガラス固化体が落下する。 ・落下したガラス固化体が検査室内を転がり移動する。 ・換気機能の停止により検査室内温度が上昇する。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 ・負圧機能の停止により、放射性物質の閉じ込め機能が低下する。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<p>ガラス固化体の落下・移動</p> <p>ガラス固化体の回収困難</p> <p>屋内高温状態の継続</p> <p>状況把握又は監視機能喪失</p> <p>建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響</p> <p>ガラス固化体、OPの正常作業工程の中断</p>	<p>緊急事態の通報</p> <p>ガラス固化体、OPの搜索</p> <p>室内の放射線量・放射性物質計測</p> <p>空調設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法によるガラス固化体等の冷却</p> <p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による状況把握</p> <p>負圧(排気)設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による閉じ込め機能の回復</p> <p>吊り上げ設備の状態確認</p> <p>既存クレーンでの吊り上げ</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法によるガラス固化体の吊り上げ</p> <p>ガラス固化体、OPの移動</p> <p>ガラス固化体、OPの検査</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>損傷に応じた対応・措置</p> <p>ガラス固化体、OPの格納</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の数、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体、OP周辺の放射線測定 ・屋内の温度計測機器の状況の確認 ・屋内の温度の計測 ・屋内の放射線量・放射性物質の計測 ・停電等の状況の確認 ・換気状態(温度)の確認 ・換気設備の状況確認 ・代替設備の起動状況の確認 ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状況の確認 ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 ・負圧設備の状況把握 ・クレーン、把持装置の状況の把握 ・代替設備の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なりあっている等) ・ガラス固化体、OPの損傷情報 ・屋内の温度 ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・屋内の放射線量・放射性物質の量 ・通電・ネットワークの状況 ・施設内の温度 ・換気設備の状況 ・代替設備の必要能力、動作確認、施設内の温度の状況 ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の不具合箇所 ・修理期間、費用 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 ・負圧設備の不具合箇所 ・修理期間、費用 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 ・クレーン、把持装置の不具合箇所 ・修理期間、費用 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況

表 5.2.2-11 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 No. 11)

検討No11
地下-状況No 1, 5, 8

最終的な状況	屋外の放射線量の増加及び屋外への放射性物質の拡散、人工バリア機能の低下の可能性 状況把握又は監視機能の喪失		
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、HLWの破損		
施設の状態	坑道内落盤、ガス爆発、エレベーター落下、浸水		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・荷重、衝撃力または水圧の作用により緩衝材、OP、HLWが破損する。 ・放射性物質が坑口から屋外へ飛散、または放射性物質が水へ浸出して汚染された水が屋外へ流出する。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">落盤</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;">エレベーター 落下</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;">浸水</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">作業員退避</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;"> 屋外への放射性物質の拡散 あり → 別フローへ なし → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">応急的な放射性物質の拡散防止対策</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">応急的な放射線遮へい</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 ・坑道の水没状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 ・坑道の水没箇所、破損箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">OPの埋没、水没</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">廃棄体の搜索</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の数および場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・廃棄体の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体までの到達ルート及び周辺状況 ・廃棄体の位置情報および損傷情報 ・廃棄体の位置、放射線量
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">状況把握又は監視機能の喪失</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">モニタリング設備の状態確認</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;"> 設備の復旧 OK → 代替設備・手法による状況把握 OUT → 代替設備・手法による状況把握 </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状況把握 ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の不具合箇所 ・修理期間、費用 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">緩衝材の破損</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">緩衝材の状態把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;"> 緩衝材の破損 あり → 別フローへ なし → 別フローへ </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の性能確認 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・緩衝材の搜索及び放射線測定 ・緩衝材の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の配置情報、温度、停電時間、損傷情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">人工バリア機能への低下の可能性</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">OPの状況把握</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・OPの場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・OPの位置情報および損傷情報 ・OP周辺の放射線量
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">OPの破損</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">OPの破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;"> あり → 別フローへ なし → 別フローへ </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・OPの搜索及び放射線測定 ・OPの場所の確認 	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">ガラス固化体の破損</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">ガラス固化体の状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;"> ガラス固化体の破損 あり → 別フローへ なし → 別フローへ </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・ガラス固化体周辺の放射線量
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">屋外の放射線量の増加及び屋外への放射性物質の拡散</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 10px;">ポンプ設備の状況確認</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;"> 設備の復旧 OK → 代替設備・手法による揚水 OUT → 代替設備・手法による揚水 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">障害物の撤去</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; margin-top: 5px;">破損したOP、HLWの回収</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・浸水状態(浸水領域)の確認 ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・停電・ネットワークの状況 ・施設内の浸水状況 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況

表 5.2.2-12 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 12）

検討No.12

地下-状況No. 2, 3, 5, 6, 8

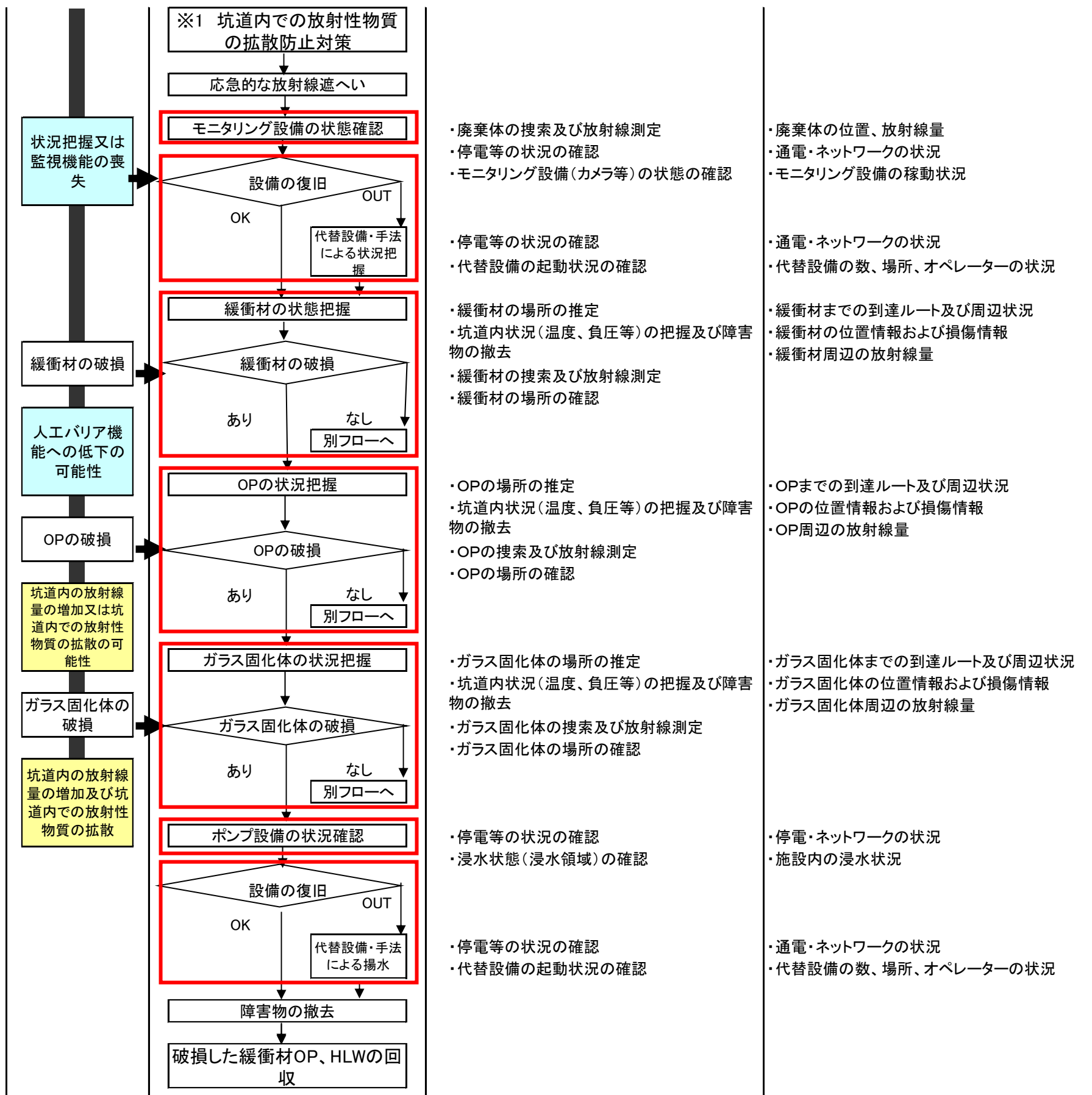
最終的な状況	坑道内の放射線量の増加及び坑道内での放射性物質の拡散、 坑道内の放射線量の増加又は坑道内での放射性物質の拡散の可能性、 人工バリア機能の低下の可能性、廃棄体の回収困難、状況把握又は監視機能の喪失		
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、HLWの破損		
施設の状態	坑道内落盤、ガス爆発、エレベーター落下		
異常状態のシナリオ	・ガス爆発やエレベーター落下等による衝撃力、または落盤の荷重により、緩衝材、OP、HLWが破損する。 ・破損した緩衝材、OP、HLWは落盤により埋没している。		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順（行為）	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ガス爆発</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">エレベーター落下</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">落盤</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">状況把握又は監視機能の喪失</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">作業員退避</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> 屋外への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">坑道内の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> 坑道内への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> 坑道付近の地盤、地下水脈への放射性物質の拡散 なし → ※1 坑道内での放射性物質の拡散防止対策へ あり → 坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">※1 坑道内での放射性物質の拡散防止対策</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">応急的な放射線遮へい</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">廃棄体の埋没 → 廃棄体の捜索</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">障害物の撤去</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">緩衝材の状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> 緩衝材の破損 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">OPの状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> OPの破損 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">ガラス固化体の状況把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;"> ガラス固化体の破損 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 10px;">破損したOP、HLWの回収</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 ・坑道の破損状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 ・坑道における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 ・坑道周辺の放射線量、放射性物質量の測定箇所の確認 ・坑道周辺の土壌、水の採取 ・廃棄体の数および場所の推定 ・坑道内状況（温度、負圧等）の把握及び障害物の撤去 ・廃棄体の捜索及び放射線測定 ・緩衝材の場所の推定 ・坑道内状況（温度、負圧等）の把握及び障害物の撤去 ・緩衝材の捜索及び放射線測定 ・緩衝材の場所の確認 ・OPの場所の推定 ・坑道内状況（温度、負圧等）の把握及び障害物の撤去 ・OPの捜索及び放射線測定 ・OPの場所の確認 ・ガラス固化体の場所の推定 ・坑道内状況（温度、負圧等）の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の捜索及び放射線測定 ・ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート、空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 ・坑道の破損箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量 ・坑道の破損箇所、度合い ・空間線量 ・坑道付近の土壌、地下水の放射性物質質量 ・廃棄体までの到達ルート及び周辺状況 ・廃棄体の位置情報および損傷情報 ・廃棄体周辺の放射線量 ・緩衝材までの到達ルート及び周辺状況 ・緩衝材の位置情報および損傷情報 ・緩衝材周辺の放射線量 ・OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・OPの位置情報および損傷情報 ・OP周辺の放射線量 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・ガラス固化体周辺の放射線量

表 5.2.2-13 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 13）

検討No13

地下-状況No 2, 3, 5, 6, 8

最終的な状況	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、 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、 人工バリア機能の低下の可能性、廃棄体の回収困難、状況把握又は監視機能の喪失		
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、HLWの破損		
施設の状態	浸水		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 湧水、津波の流入の影響で坑道内が浸水する。 浸水により水圧の作用により緩衝材、OP、HLWが破損する。 ポンプ機能、モニタリング機能は喪失している。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">ポンプ機能の喪失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">湧水</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">津波の流入</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;">廃棄体の回収困難</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">作業員退避</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 屋外への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">坑道内の放射線量・放射性物質の計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 坑道内への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 水への放射性物質の浸出 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">坑道付近の地盤、地下水脈の放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> 坑道付近の土壌、地下水脈への放射性物質の拡散 なし → ※1 坑道内での放射性物質の拡散防止対策へ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 ・坑道の破損状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 ・坑道における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 ・坑道周辺の放射線量、放射性物質量の測定箇所の確認 ・坑道周辺の土壌、水の採取 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルートの間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 ・坑道の破損箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量 ・坑道の破損箇所、度合い ・空間線量 ・坑道付近の土壌、地下水の放射性物質質量



検討No14
地下-状況No 4, 5, 7, 8

表 5.2.2-14 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討 (検討 No. 14)

最終的な状況	ガラスの閉じ込め機能への影響、人工バリア機能の低下の可能性、状況把握又は監視機能の喪失、アクセス坑道内(又はエレベーター内)処分坑道内の高温状態の継続		
廃棄体の状態	緩衝材の熱による変形・変質・急冷、OPの熱による変形・急冷、HLWの失透の可能性・急冷		
施設の状態	火災、浸水		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内に火災が発生する。 緩衝材、OP、HLWが加熱される。 津波等の流入により緩衝材、OP、HLWが急冷させる。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
坑道内火災	<p>緊急事態の通報</p> <p>作業員退避</p> <p>負傷者の救助、救出</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>坑道内の放射線量・放射性物質の計測</p> <p>坑道内への放射性物質の拡散</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>坑道内火災の消火</p>	<ul style="list-style-type: none"> 火災発生場所、規模の確認 坑内温度の確認 負傷者との連絡方法の確保 負傷者数、場所の確認 二次災害発生の可能性の確認 救助、救出ルートの確認 負傷者の救助・救出 坑道の破損状況の確認 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 坑内温度の確認 坑道における放射線測定箇所の確認 放射線測定 火災鎮火状況の確認 津波による浸水状況の確認 二次災害発生の可能性の確認 坑内温度の確認 廃棄体の捜索及び放射線測定 停電等の状況の確認 モニタリング設備(カメラ等)の状態の確認 停電等の状況の確認 代替設備の起動状況の確認 緩衝材の温度の計測 緩衝材の場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 緩衝材の捜索及び放射線測定 緩衝材の場所の確認 OPの温度の計測 OPの場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 OPの捜索及び放射線測定 OPの場所の確認 ガラス固化体の温度の計測 ガラス固化体の場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ガラス固化体の捜索及び放射線測定 ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 火災発生場所、規模 坑内温度 作業員の位置、負傷状況 可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 救助、救出ルート的空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 坑道の破損箇所、度合い 天候、風速など 空間線量 坑内温度 坑道の破損箇所、度合い 空間線量 火災鎮火状況 津波による浸水状況 親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 坑内温度 廃棄体の位置、放射線量 通電・ネットワークの状況 モニタリング設備の稼動状況 通電・ネットワークの状況 代替設備の数、場所、オペレーターの状況 緩衝材の温度 緩衝材までの到達ルート及び周辺状況 緩衝材の位置情報および損傷情報 緩衝材周辺の放射線量 OPの温度 OPまでの到達ルート及び周辺状況 OPの位置情報および損傷情報 OP周辺の放射線量 ガラス固化体の温度 ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ガラス固化体周辺の放射線量
アクセス坑道、処分坑内高温状態の継続	<p>モニタリング設備の状態把握</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 別フローへ</p> <p>OUT → 代替設備・手法による状況把握</p> <p>緩衝材の状態把握</p> <p>緩衝材、OP、HLWの高温状態</p> <p>緩衝材、OP、HLWの冷却</p> <p>緩衝材の破損</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>OPの状況把握</p> <p>OPの破損</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>ガラス固化体の状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>障害物の撤去</p> <p>緩衝材、OP、HLWの回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度の確認 モニタリング設備(カメラ等)の状態の確認 代替設備の起動状況の確認 緩衝材の温度の計測 緩衝材の場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 緩衝材の捜索及び放射線測定 緩衝材の場所の確認 OPの温度の計測 OPの場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 OPの捜索及び放射線測定 OPの場所の確認 ガラス固化体の温度の計測 ガラス固化体の場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ガラス固化体の捜索及び放射線測定 ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度 モニタリング設備の稼動状況 通電・ネットワークの状況 代替設備の数、場所、オペレーターの状況 緩衝材の温度 緩衝材までの到達ルート及び周辺状況 緩衝材の位置情報および損傷情報 緩衝材周辺の放射線量 OPの温度 OPまでの到達ルート及び周辺状況 OPの位置情報および損傷情報 OP周辺の放射線量 ガラス固化体の温度 ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ガラス固化体周辺の放射線量
緩衝材、OP、ガラス固化体の加熱			
状況把握又は監視機能の喪失			
人工バリア機能への低下の可能性			
ガラスの閉じ込め機能への影響			

表 5.2.2-15 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順の検討（検討No. 15）

検討No15
地下-状況No 6, 7, 8

最終的な状況	廃棄体の回収困難、アクセス坑道内(又はエレベーター内)、処分坑道内の高温状態の継続、状況把握又は監視機能の喪失		
廃棄体の状態	OPの逸脱		
施設の状況	ガス充満、高温状態		
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・自動送気システムが停止し、自然ガスにより坑道内が有毒ガスで充満する。 ・自動送気システムが停止したことにより、坑道内が高温状態になる。 ・モニタリング機能が喪失し、状況把握ができない。 ・衝撃力によりOPは逸脱している。 		
異常状態	具体的な対策方法		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報
<p>自動送気システムの停止</p> <p>有毒ガスの坑道内充満</p> <p>廃棄体の回収困難</p> <p>アクセス坑道、処分坑内高温状態の継続</p> <p>状況把握又は監視機能の喪失</p>	<p>緊急事態の通報</p> <p>作業員退避</p> <p>負傷者の救助、救出</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>坑道内の放射線量・放射性物質の計測</p> <p>坑道内への放射性物質の拡散</p> <p>自動送気システムの状態把握</p> <p>設備の復旧</p> <p>モニタリング設備の状態把握</p> <p>設備の復旧</p> <p>緩衝材、OP、HLWの状態把握</p> <p>緩衝材、OP、HLWの破損</p> <p>緩衝材、OP、HLWの回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・坑内温度、ガス濃度の確認 ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 ・坑内温度の確認 ・坑道における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 ・坑内温度の確認 ・停電等の状況の確認 ・作業員、オペレーターの確認 ・自動送気システムの状況の確認 ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 ・坑内温度の確認 ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状態の確認 ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 ・緩衝材、OP、ガラス固化体の温度の計測 ・緩衝材、OP、ガラス固化体の場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・緩衝材、OP、ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・緩衝材、OP、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑内温度、ガス濃度 ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 ・天候、風速など ・空間線量 ・坑内温度 ・坑道の破損箇所、度合い ・空間線量 ・坑内温度 ・通電・ネットワークの状況 ・作業員やオペレーターの人数、位置 ・設備の破損等状況 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 ・坑内温度 ・廃棄体の位置、放射線量 ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の不具合箇所 ・修理期間、費用 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状況 ・緩衝材、OP、ガラス固化体の温度 ・緩衝材、OP、ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・緩衝材、OP、ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・緩衝材、OP、ガラス固化体周辺の放射線量

5.3 放射線環境下に適用できる技術の調査

地層処分施設において異常状態や事故が発生した場合、放射性物質の拡散や放射線量の増加を伴う可能性が考えられる。このような放射線影響を伴う緊急時の状況を把握・監視する技術や機器には、放射線環境下への適用性が求められる。放射線影響を伴う事故時の状況把握技術については、福島第一原子力発電所事故を契機に研究や開発が進められていると考えられる。ここでは、福島第一原子力発電所事故時の対応と放射線環境下に適用できる技術を調査した。

5.3.1 福島第一原子力発電所事故時の対応の概要

東北地方太平洋沖地震及び地震に伴う津波により、福島第一原子力発電所は「長時間におよぶ全交流電源と直流電源の同時喪失」ならびに「長時間におよぶ非常用海水系の除熱機能の喪失」により 1 号機、3 号機の原子炉の冷却が出来なくなったことで燃料が損傷し、これに伴って水素が格納容器内に滞留、この水素が原炉建屋へ漏えいし水素爆発に至った。4 号機は、隣接する 3 号機のベント時に水素ガスが非常用ガス処理系配管を通じて回り込んで滞留し、同様に水素爆発に至った。

表 5.3.1-1 に、公表されている資料をもとに当時の対応状況をまとめて示す[2],[3],[4]。

表 5.3.1-1 に示すように、福島第一原子力発電所の事故当時は、その被害状況を把握するために、地上の他の施設で各計測器の変動状況をモニターで確認するとともに、また建物の被害状況を目視で確認して内部の状況が壊滅的になっていることを推定している。また被災後は、モニタリングカーやモニタリングポストでの計測や放射線防護対策を取った作業員による放射線量の計測により状況把握が行われている。

以上より、福島第一原子力発電所の事故時及び被災後の状況は、建屋内外で日ごろから行われていたモニタリングシステム（管理システムやモニタリングポスト等）の数値異常、作業員の目視確認、等により緊急時の状況が把握されていたことが分かった。

表 5.3.1-1 福島第一原子力発電所事故時の対応の概要と状況把握・監視方法

災害	対応状況		状況把握・監視方法
	1 / 2号機 (中央制御室)	3 / 4号機 (中央制御室)	
地震	地震の揺れが収まるのを待って、運転員は通常のスクラム操作を開始	中央制御室の中がホコリで煙幕を張ったように真っ白になる中、地震の揺れの収まるのを待って、通常のスクラム操作を開始	モニターによる確認
	各制御盤前に運転員を配置し主任の指示に従い、状態監視と操作を実施		
	1号機 <ul style="list-style-type: none"> 非常用復水器 (IC) が自動起動したことを確認 原子炉水位が通常水位であることから高圧注水系 (HPCI) ではなく IC での原子炉圧力制御を実施 IC は 1 系列で十分と判断し A 系にて原子炉圧力を制御 	3号機 <ul style="list-style-type: none"> 非常用電源 (D/G) が起動し、非常用母線が充電されたことを確認 R C I C を手動起動し原子炉水位だかでトリップしたことを確認 地震後、運転員の安否確認を行い、地震発生と津波について周知を行った 	D/G が起動し、各計器が作動したため、計測値を見て作業している
	2号機 <ul style="list-style-type: none"> 原子炉隔離時冷却系 (RCIC) を手動起動 (その後再度、手動起動を実施) 		
⇒地震後は目視による状況把握・監視を実施			
津波	電源をはじめ格納容器への注水機能、格納容器からの除熱機能などほぼ全ての機能が喪失。		被災後の状況把握・監視はモニタリングカー及びモニタリングポストにより実施

5.3.2 既存の放射線計測技術[2],[3],[4],[5],[6]

1) 放射線計測器の歴史

放射線計測器は、1895年レントゲンによるX線の発見、1896年ベクレルによる放射能の発見、及び1898年のキュリー夫妻によるラジウムの発見により、放射線の各分野への利用が始まった。放射線計測器は、放射性物質から放出される電離性粒子を検出することにより測定するが、その技術は第二次世界大戦後に飛躍的に進歩し現在に至っている。

2) 放射線計測器

放射線検出器は電離作用及び発光作用を利用するもの与其他に大別されている。

a. 電離作用を利用する放射線計測器の原理

気体を用いた検出器として電離箱、比例計数管、GM計数管があり、固体を用いた検出器としては半導体検出器がある。これらはいずれも電離によって生じた正孔（又は正イオン）と電子（又は負イオン）が再結合しないよう、検出器の正負電極間にバイアス電圧が印加されており、これらイオン等がバイアスの電界によって各々反対極性の電極に移動することにより電気信号が形成される。

b. 発光作用を利用する放射線計測器の原理

発光作用を利用するものにはシンチレーション検出器がある。シンチレーション検出器は放射線を光に変換するシンチレーターと光を電気信号に変換する光電子増倍管から構成される。シンチレーターは放射線の入射に伴いエネルギーの高い励起状態となり、これが元の状態に戻るときに発光する。また、光電子増倍管はこの光を電荷に変換すると共に100万倍近く増幅して電気信号を形成する。

c. その他の作用を利用する放射線計測器の原理

感光作用を利用するものとしてフィルムバッジ、ラジオグラフィーフイルムがある。これは乳剤中に含まれるハロゲン化銀が入射放射線量に比例して活性化されると現像処理によって可視的な金属銀となり、黒化度として計測されるものである。

入射放射線量に従って物質中の捕獲中心に電子正孔対を捕獲することを利用するものとして熱ルミネッセンス素子や蛍光ガラス素子がある。これは照射後の加熱、紫外線照射等により電子正孔対が再結合する際に放出されるルミネッセンス光子を計測するものである。

入射荷電粒子の飛跡に沿って物質中に発生する分子損傷を利用するものが固体飛跡検出器である。これは照射後のエッチング処理速度が損傷部と非損傷部では異なることから損傷が特定出来、その個数を計測するものである。

3) 既存の放射線計測技術の調査結果

放射線環境下で用いられている既存の放射線計測技術を、表 5.3.2-1 にまとめて示す。

表 5.3.2-1 既存の放射線計測技術

項目	計測の名称	製品	備考
1. 空間線量	空間線量計	GM管(ガイガー ミュラー計数管)	α 線を検出できるのはマイカ窓のもののみ。 マイカ窓(雲母窓)は非常に破損しやすいので取り扱いに注意が必要。 ガラスやプラスチックで覆われているものは α 線は検出不可。 γ 線も検出はできるが感度は良くない。
		NaI(Tl)シンチレ ーター	NaI 自体の感度は低いですが、大きな結晶を作りやすく、大きな結晶を搭載した測定器が多い。結晶を大きくすることで、GM管に比べて10~1000倍の感度を持たせることができ、高感度の測定器によく利用されている。
		CsI(Tl)シンチレ ーター	NaIより感度が少し高く、エネルギー分解能も少し改善。NaIと同様に大きな結晶を搭載した測定器が多く、スペクトルをみれる機種での採用例が多い。
		LaBr3(Ce)シンチ レーター	エネルギー分解能がNaI(Tl)の約2倍。核種分析機能付きの上位機種などで利用される。海外メーカーが特許を持っており、生産できる会社は限られる模様。
		CdTe(CdZnTe)半 導体	物質的にはNaIやGeより高感度だが、大きなCdTe素子を利用する技術が成熟していないため、大きな結晶を利用しやすいNaIなどに比べると感度を高くしにくい。また、大きな素子を利用した放射線測定器はまだない。(医療用向けのみ存在)
		Ge半導体	液体窒素による冷却が必要。東電などが核種分析したり、食品調査で利用されるのはこのタイプ。極めて高い分解能があり、なおかつ高感度なので、食品検査をする場合によく利用される。
		Si(Li)半導体	Ge半導体とほぼ同じ。低エネルギー領域測定向き。20keV以下向きで、Cs134/137等の600keVのエネルギーについては検出が難しい。
2. 土壌線量	土壌等の放 射能測定器	ヨウ化ナトリウムシンチレーシ ョン検出器	ヨウ化ナトリウム(NaI)の結晶を検出器として使用し、放射性物質から出るガンマ線を測定。食品・土壌の線量測定に使用される。
3. 個人線量	個人線量測 定器	蛍光ガラス線量 計	放射線を照射したのち紫外線を当てると、放射線の照射量に比例した蛍光を発する性質をもつ特殊なガラスを用いた線量計。
		熱ルミネッサン ス線量計(TLD)	放射線照射された結晶性物質を加熱したときに生ずるルミネセンス(蛍

			光) を利用した線量計。放射線照射によって結晶内で分離した電子や正孔が、熱刺激によって再結合するときに発光する原理を利用したもの。読み取り装置は TLD 素子を 400°C 付近まで加熱し、熱ルミネセンスの発光量を測定して放射線の照射量 (積算線量) を求める。
		OSL (光刺激ルミネッセンス) 線量計	ある種の物質に放射線を照射すると発光することがある。放射線の照射を停止するとこの光は徐々に弱まるが、消える前により波長の長い光を照射することで再び発光を始めることがある。この現象を輝尽発光と言う。光刺激ルミネッセンス線量計はこの輝尽発光を応用した線量計である。
		フィルムバッジ	γ (X) 線、 β 線及び熱中性子線等の放射線がフィルムバッジに入射する場合、材質の異なるフィルタを通してできるフィルムの黒化度の差を利用して被ばく線量を評価し、かつ放射線の種類及び入射エネルギーを推定することが可能。
		電離箱式線量計・電子式線量計	放射線照射によって電離箱の空洞内で発生する電離電流 (電荷) を計測。
4. 井戸・地下水	水中自動放射能測定装置	シンチレーション式水質・底質線量用サーベイメーター	水中・底泥中に設置し、データをパソコンに転送することで、長時間の連続モニタリングを行う。水中・底泥中の放射線量を時系列で監視することが可能。
5. スラッジ等	放射性廃棄物質量放射能濃度測定装置	モニタリングポスト、蛍光ガラス線量計 (3. 参照)	モニタリングポストの計測結果から放射線濃度が高い場所を特定し、その場所で空气中放射性物質濃度を測定。周辺環境の陸域及び海域における放射性物質濃度を測定することを目的に、環境試料を採取し比較的長寿命核種に重点を置いて測定する場合もある。
6. 海洋	海中放射能濃度測定装置	曳航 (えいこう) 式放射線計測システム (海底土)、シンチレーション式水質・底質線量用サーベイメーター (4. 参照)	曳航式放射線計測システムは、海底土の放射能の連続・精密測定を行うシステムであり、海底を約 3m ピッチで連続計測することが可能。同時に水中カメラや GPS 等により測定位置を把握することができる。

5.3.3 福島第一発電所事故等を踏まえた無人化（ロボット）技術

福島第一原子力発電所事故後、放射線環境下での作業を考慮して無人化（ロボット）技術の研究開発が各所で進められている。また、従来から、一般の災害や事故を対象とした無人化技術が自治体や消防庁などで進められている。

表 5.3.3-1 に、これらの無人化技術のうち、地層処分施設における異常状態や事故時の状況把握・監視に活用できると考えられる技術をまとめて示す。ただし、一般の災害や事故を対象として開発された無人化技術については、地層処分への適用性（放射線環境下への適用性）の面での改良が必要と考えられる。

表 5.3.3-1 状況把握・監視に活用が期待できる無人化技術の例

No.	名称	技術の内容	写真	引用元	No.	名称	技術の内容	写真	引用元
①	・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用)	原子炉建屋内等の瓦礫・粉塵の排除が可能な屋内瓦礫除去車両		JAEA	⑦	初期情報収集ロボット	事故直後に現場の状況を迅速に把握するための小型軽量の遠隔自走式ロボット。現場の放射線量、映像・音声、機器類の温度を収集。		日本原子力研究所
②	・JAEA-3号(γ線可視化計測用)	高放射線環境下で駆動できる放射線計測機能(γ線可視化計測カメラ、GM管)を搭載した車両。		JAEA	⑧	詳細情報収集ロボット	扉の開閉、階段の昇降等を行って事故発生場所に接近し、より広範な情報(放射線量、映像・音声、機器類の温度、室内の雰囲気、障害物等の位置)を収集する遠隔自走式ロボット。マニピュレータ2台を装備。		日本原子力研究所
③	・障害物除去車(セーバー)	救援・救出等を目的とした障害物除去車。ドラグショベルタイプとホイールローダタイプの2種類により障害物の除去作業を行う。		東京消防庁	⑨	試料等情報収集ロボット	扉の開閉、階段の昇降等を行って事故発生場所に接近し、汚染情報の収集や試料採取(気体・液体・固体・表面汚染試料の採取等)を行う遠隔自走式ロボット。マニピュレータ2台を装備。		日本原子力研究所
④	・救出ロボット(ロボキュー)	無線操作(無人)で走行し、要救助者をマニピュレーターとコンベアの使用により機体に収容して搬送する。		東京消防庁	⑩	放射線耐性型ロボット	高放射線環境下での事故現場で、継続的に情報収集や試料採取が可能。ロボットは操作盤を備えた専用のコンテナ内から、有線または無線により操作され、ロボットが収集した情報はコンテナ内のコンピュータで集中管理される。		日本原子力研究所
⑤	・遠隔操作ヒューマンインターフェースの開発	ロボット操作の品質確保とロボット操作員リソースの有効活用のため、共有化した遠隔操作ヒューマンインターフェース(HIF)		【株式会社】 【災害対応無人化システム研究開発プロジェクト(NEDO)】	⑪	防災モニタリングロボット	寒冷地に立地する原子力施設防災での利用に焦点を当てたロボット。視覚情報取得重視仕様は、γ線計測、カメラ撮影、映像作成用レーザー距離測定器により視覚不良時でも映像取得が可能。また、雰囲気計測重視仕様は、γ線計測等に加えて中性子線量測定・放射能測定のためのダスト収集を行える。		原子力安全技術センター
⑥	・災害対策用ロボットスーツHAL®	高放射線下および高温多湿な極限状態の過酷な条件下で、復旧作業を行う作業員の安全と健康を確保する着用型ロボットスーツ。		サイバーダイン【災害対応無人化システム研究開発プロジェクト(NEDO)】	⑫	高所調査用ロボット	遠隔操作で原子炉建屋内1階高所の狭い箇所などの構造把握・現地調査を行う。ASIMOのARMロボットの技術を活用し、対象物を用意に捉える上に、指先に設置したズームカメラや線量計により、詳細な画像や線源の特定が可能。		HONDA 独立行政法人産業技術総合研究所

5.4 大深度地下に適用できる技術の調査

地層処分施設の特徴の一つとして、大深度地下施設があることが挙げられる。したがって、地層処分施設の異常状態や事故時に状況を把握・監視する技術や機器には、大深度地下環境への適用性も求められる。ここでは、大深度地下における事故事例とその時の対応、及び大深度地下の環境モニタリング技術等を調査した。

5.4.1 チリ・コピアポ鉱山の落盤事故の知見

ここでは、チリ・コピアポ鉱山における落盤事故の概要と事故時の対応・対策についてまとめた[7],[8]。

本事例は、地層処分施設の処分坑道と同程度の深度での落盤事故である。地上からは確認できない状況も多い中で、このような大深度地下での事故時の対応・対策は本開発に反映できる知見と考えられる。

1) チリ・コピアポ鉱山における落盤事故の概要

本事例は、落盤で地下約 700m に作業員 33 名が閉じ込められ、その救出作業が約 50 日間に及んだものである。落盤箇所近くに比較的広い場所やシェルターがあり、少ないながらも食料が手に入ったこと、バックホーで穴を掘って水を確保したこと、などにより延命した。救出作業は、地上から径 70cm のボーリングを行い、それを使い径約 53cm の救助カプセル（次ページ参照：救助カプセルの概要）を降下して作業員を一人ずつ引き上げる方法で行われた。

2) チリ・コピアポ鉱山落盤事故における作業員の状況把握及び救助

2010年8月5日に発生した落盤事故の報告を受けた救助隊は、地下 700m にある避難所まで直径 8cm のドリルで穴を掘り、22日にドリルを引き上げたとき、そのドリルの先端に書かれた文字から 33名の生存者がいることを確認した。その後、穴を直径 10cm まで拡大しホロスコープを挿し込み、地下の生存者の様子をモニターに映し出すことに成功した。なお、避難所には通気口が繋がっており坑内の通気状況は確保されていたものの、救出のためにドリルで掘った穴を拡大していく作業により、地下にたまる土砂や水の処理を地下に閉じ込められた作業員が行った。最終的には直径 70cm の穴を避難所まで貫通させ、2010年10月12日、13日の2日間をかけて、救助カプセルにより作業員が全員救助された。なお、作業員の状況確認は、ホロスコープや地上のモニター、または音声により行われているが、使用された機材の仕様等は明記されていない。

表 5.4.1-1 チリ・コピアが鉱山の落盤事故の知見

起回事象	落盤事故の概要と事故時の対応・対策	本開発に反映できる知見
落盤	<ul style="list-style-type: none"> ・落盤で地下深部に作業員が閉じ込められたが、比較的広い場所やシェルターが近くにあり、少ないながらも食料が手に入ったこと、バックホーで穴を掘り水を確保したこと、などにより延命 ・地上からドリルで落盤地点まで穴を掘り、ホロスコープで生存を確認するとともに食糧等を供給 ・径 70cm のボーリングを行い、それを使い径 60cm の救助カプセル(Rescue capsule)を降下し、作業員を一人ずつ救出 ・長期間地下にいた作業員の救出は直射日光を避けて深夜に行われた。また、作業員の乗り物酔いを防ぐため、救出カプセルは出来る限り回転しないように工夫されていた 	<ul style="list-style-type: none"> ・平常時のモニタリング設備等が活用できない中、大深度地下の様子を確認するため、小口径のドリル(8cm)で地下 700m まで掘削後、径を 10cm に拡大し、ホロスコープとモニターで地下の様子を確認。救出は径を 70cm まで拡大して救助カプセルにて行われた。

参考：救助カプセル（レスキューカプセル，Phoenix）の概要

The Guardian ニュースサイト（イギリス）から引用：

<http://www.theguardian.com/world/2010/sep/26/rescue-capsule-chilean-miners-delivered>, (2010年9月26日) 2013年12月26日閲覧

アメリカ航空宇宙局（NASA）の協力の下、チリ海軍により設計され、ASMAR社により製造された。人が入る空間は、直径53cm（21インチ）、高さ1.9m（6.25フィート）、で、上部と底部に救出用の穴を通る際の振動を吸収するダンパーを備えた合計8個のホイールが設置されている。また、90分間呼吸可能な酸素供給装置（40%酸素・60%窒素）、搭乗員を固定するハーネス、救助の際に地上のレスキュー隊員と連絡するためのマイク・スピーカーが備えつけられている。なお、このカプセルは、1955年にドイツの炭鉱で起きた落盤事故の際に用いられた緊急脱出カプセル（Dahlbusch Bomb）の改良型である。

Rescue capsule

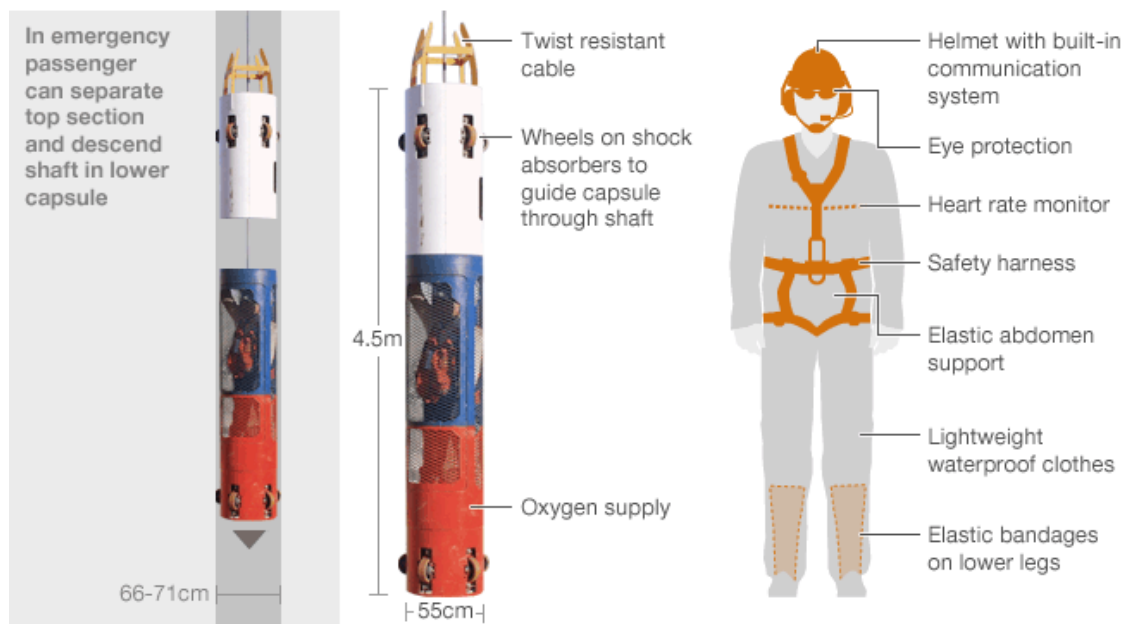


図 5.4.1-1 救出用カプセル及び装備の概要

BBC ニュースサイト（イギリス）から引用：

<http://www.bbc.co.uk/news/world-latin-america-11527129>

(2010年10月12日) 2013年12月26日閲覧

5.4.2 シガーレイク鉱山の異常出水事故の知見

ここでは、Cigar Lake 鉱山における異常出水事故の概要と事故時の対応・対策についてまとめた[9],[10]。

本事例は、大深度地下での異常状態をいち早く察知して、速やかに対策を立てることの重要性を示唆している。鉱山の操業安全確保のためには、地上施設から地下の状況を随時、把握・監視しながら作業する必要があり、異常が発生した際は、地下で働く作業員の安全を確保するためにも、状況把握・監視結果を迅速に反映することが必要である。本事例は、異常出水時にその状況をいち早く察知した平常時のモニタリング技術に係る知見が、本開発に反映できると考えられる。

1) Cigar Lake 鉱山の異常出水事故の概要

本事例は、出水量（1500m³/h）が排水能力（500m³/h）を大幅に超えてしまい、地下施設全体が冠水したものである。出水時に遮へい扉を閉鎖し密閉しようとしたが失敗した。復旧は、地上からのボーリングによる充填技術や凍結技術で出水源を地下施設から分離した後、水をポンプアウトして行った。

2) Cigar Lake 鉱山での異常出水の確認方法

2008年8月12日(火)の出水事故について、当時の Cameco 社の CEO である Gerard Grandey 氏の発表[11]によると、「事故のあった8月12日(火)の朝の時点では、2本ある地表から地中へ通した坑道のうち、“No.1 シャフト”の水位は地表から-430mの地点まで排水していたものの、その日の1時間あたりの水量は600m³と排水能力500m³/hを超えており坑道内での作業を続けることができる範囲を超えた。なお、坑道内での作業を確保するには地表から-480m地点まで水が引いていることが条件である。」となっている。また、当時の報告[12]によると、Cigar Lake 鉱山では、周辺への環境影響を評価することを目的に、水量や水質を管理する環境モニタリングを実施していた、とされている。これらの情報から判断すると、Cigar Lake 鉱山では、Cameco 社が環境モニタリングの一環で行っていた水量管理により、水位上昇を地上の管理システム等で感知し、異常出水を確認したと考えられる。なお、これら環境モニタリングに使用された機械類の仕様等は明記されていない。

表 5.4.2-1 シガーレイク鉱山の異常出水事故の知見

起回事象	異常出水事故の概要と事故時の対応・対策	本開発に反映できる知見
異常出水	<ul style="list-style-type: none"> 出水量（1500m³/h）が排水能力（500m³/h）を大幅に超えて、地下施設全体が冠水 出水時に遮へい扉を閉鎖し密閉しようとしたが失敗 地上からのボーリングによる充填技術や凍結技術で出水源を地下施設から分離した後、水をポンプアウト 	<ul style="list-style-type: none"> 平常時から環境モニタリングの一環で水量を管理していたため、水量の継続的な増加をいち早く確認できた モニタリングに使用していた機器は明記されていない

5.4.3 フィンランド ONKALO 地下特性調査施設におけるモニタリング手法の検討

ここでは、ONKALO 地下特性調査施設におけるモニタリング手法についてまとめた[13],[14]。

本事例は異常状態や事故時の状況把握・監視技術に係るものではないが、災害時の対応を見据えた平常時の地震・地下水変動に対するモニタリング手法や、緊急時に地下と地上で連絡を取り合う方法等が比較的細かく記載されていることから、それらの知見は本開発にも反映できると考えられる。

1) 地震動モニタリング手法

1994年に Olkiloto 地域で GPS ネットワークを設置し、地中内の振動を計測している。使用しているシステムは FinnRef® というもので、全地点の XYZ 方向のベクトルを計測できる上に、計測結果を随時モニターで確認できる。Olkiloto 周辺の地殻の動きを常時計測することで、迅速に異変を察知することが可能である。なお、同様のシステムと高感度のひずみ計を用いて坑道内の岩のひずみ量も計測しており、坑道内部全体の変位量も随時確認することが可能である。

2) 温度モニタリング手法

坑道内温度は温度センサーを設置し、地震動と同様な温度管理モニタリングシステムを用いて随時監視している。なお、温度センサー等計測機器の名称は明記されていない。

3) 地下水変動等モニタリング手法

a. 地下水面

Olkiloto 地域で 1989 年より複数のボーリング孔に設置した計測器で地下水面の変動を計測している。なお 2001 年時点で、18 のボーリング孔の地下水面の変動状況に関する報告がなされており、ほぼ地下水面の変動がないことが確認されている。なお、機器の名称は明記されていない。

b. 水圧

a で示したボーリング孔に水圧計を設置し、モニタリングネットワークにて水圧変化を管理している。なお、機器の名称は明記されていない。

c. 湧水量

施設（坑道）周辺のボーリング孔の水位変動状況をモニタリングし、その結果から坑道内の水量変動を想定・管理している。なお、機器の名称は明記されていない。

4) 緊急時モニタリング手法

平常時から坑道内に CCTV、ワイヤレスのオーディオシステム、電話ケーブルネットワーク、酸素等の濃度計測システムを設置し、コンピューターネットワークで管理して緊急時に備えている。また、火災時は火災警報システム（熱・煙感知システム）と通電用配線等の冷却システムを活用し、坑道内の環境を維持していくように管理されている。なお、火災以外の異変（荷重・圧

力・衝撃)は、ひずみ計や圧力計により異変を迅速に察知する仕組みとなっている。

本研究施設は、常時、地中深くに人が出入りすることは想定されておらず、人の安全の確保という面での検討はなされていないが、平常時から坑道内や敷地周辺地域の環境変化等を計測・管理することで、異常状態の迅速な把握に繋げている。

5.4.4 その他構造物のモニタリングに活用されている既存技術

ここでは、構造上、異常状態が生じた場合の状況把握が困る構造物において用いられているモニタリング手法についてまとめた。

港湾構造物や地すべり防止杭は、その構造上、目視による点検が困難な個所が多いが、即時にデータを知る必要がある、あるいは常にデータ記録を残しておく必要がある場合には、センサー等を用いて加速度、振動、水圧、気温、水温等の計測（モニタリング）を実施していることが多い。こうしたセンサーによるモニタリングデータは、台風などの災害時における状況の即時判断や事故が発生した後の検証などにおいて有効に活用されていると考えられる[15]。

センサーの中の一つである IC タグは、近年、その防災への活用が期待されている。通常の IC タグは高周波を使うため、現状では土中や水中での適用範囲は限られる（土中や水中に埋められると数 cm の範囲しか反応しない）が、将来的に IC タグを用いたモニタリングの適用範囲が広がれば、地層処分事業においても有効な防災対策の一つになると考えられる。

5.5 緊急時の状況把握・監視手順と適用技術の整理

ここでは、5.2～5.4 の調査・検討結果を取りまとめ、地層処分施設で考え得る異常状態や事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理を行った。

本章は、平成 24 年度に抽出・整理した地層処分システムで考え得る様々な異常状態や事故ごとの「状況把握・監視手順」の整理を行い、それぞれの異常状態や事故ごとの状況把握に必要な機器や資機材、技術についての情報収集・整理を行う、ことを目的としてまとめた。

5.2 節では状況把握・監視手順の整理を行い、5.3 節、5.4 節で「放射線環境下に適用できる技術」と、「大深度地下に適用できる技術」について情報収集・整理を行った。

5.5 節では、本章のこれまでの結果を整理することを目的として、5.2 節で示した状況把握・監視手順の整理結果に、5.3 節及び 5.4 節の情報収集・整理結果を加えて 15 のシートに整理した。具体的には、5.2 節で示した状況把握・監視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 5.3 節、5.4 節の調査結果を記述して取りまとめた。

表 5.5-1～表 5.5-15 に、緊急時の状況把握・監視手順と適用技術の整理結果を示す。

表 5.5-1 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No.1)

最終的な状況	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					
廃棄体の状態	ガラス固化体の破損					
施設の状態	建屋の崩壊					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋が崩壊する。 ・建屋の崩壊によりガラス固化体が埋没する。 ・建屋崩壊の衝撃によりガラス固化体が破損する。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
建屋の崩壊	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>負傷者の救助、救出</p> <p>応急的な放射性物質の拡散防止対策</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合 ・天候、風速など ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 気象観測 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・気象データ ・市販(福島第一原子力発電所)
	ガラス固化体の埋没、紛失	<p>応急的な放射線遮へい</p> <p>ガラス固化体の搜索</p> <p>障害物の撤去</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 事故直後の情報収集 事故発生場所付近の各種情報収集 障害物の除去 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期情報収集ロボット ・詳細情報収集ロボット ・障害物除去車(セーバー)
ガラス固化体の破損		<p>ガラス固化体の状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>破損したガラス固化体の回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の数および場所の推定 ・建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・ガラス固化体周辺の放射線量 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSネットワーク、無線 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・救出ロボット(ロボキュー) ・災害対策用ロボットスーツ HAL®
	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		<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 ・回収ルートの確認、障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なり合っている等) ・ガラス固化体、OPの損傷情報 ・回収ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集する技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイバースコープ など ・GPSネットワーク ・CCTV ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・ICタグ ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・高所調査用ロボット ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・CCTV ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・ICタグ ・防災モニタリングロボット ・高所調査用ロボット ・試料等情報収集ロボット

表 5.5-2 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 2)

最終的な状況	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					
廃棄体の状態	ガラス固化体の破損					
施設の状態	搬入口等の破損					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 津波や洪水・大雨の流体力により搬入口等が破損する。 破損した搬入口等から津波や漂流物、洪水が検査室内に流入する。 ガラス固化体が流出する。 流体力、漂流物等の衝突によりガラス固化体が破損する。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">搬入口等の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の流出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ガラス固化体の破損</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">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</div>	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>海水等への放射性物質の浸出</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>負傷者の救助、救出</p> <p>応急的な放射性物質の拡散防止対策</p> <p>応急的な放射線遮へい</p> <p>ガラス固化体の搜索</p> <p>障害物の撤去</p> <p>ガラス固化体の状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>破損したガラス固化体の回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> 建屋の崩壊状況の確認 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> 海水の放射線測定箇所の確認 放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> 負傷者との連絡方法の確保 負傷者数、場所の確認 二次災害発生の可能性の確認 救助、救出ルートの確認 負傷者の救助・救出 <ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の数および場所の推定 建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ガラス固化体の搜索及び放射線測定 放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 <ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体、OPの破損状況及び保管状況の確認 ガラス固化体周辺の放射線測定 回収ルートを確認、障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋の損傷箇所、度合い 天候、風速など 空間線量 作業員の配置状況 <ul style="list-style-type: none"> 海水の浸出状況 ガラス固化体の位置や状況 <ul style="list-style-type: none"> 作業員の位置、負傷状況 親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 <ul style="list-style-type: none"> 災害発生時のガラス固化体の位置情報 ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ガラス固化体周辺の放射線量 <ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なりあっている等) ガラス固化体、OPの損傷情報 回収ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 気象観測 放射線計測 労働管理 位置情報ネットワーク管理 <ul style="list-style-type: none"> 障害物の除去 位置情報ネットワーク管理 危険物管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 ロボット操作の品質確保とロボット捜査員リソースの有効活用 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 <ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 ID管理個体の位置情報の取得 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 <ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 放射線計測 放射線管理 ID管理個体の位置情報の取得 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> ライブカメラ、モニター 風向・風速計、雨量計 空間線量計 作業管理システム GPSネットワーク <ul style="list-style-type: none"> 障害物除去車(セーバー) GPSネットワーク、無線 薬品管理 JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) JAEA-3号(γ線可視化計測用) 救出ロボット(ロボキュー) 遠隔操作ヒューマンインターフェース 災害対策用ロボットスーツHAL® <ul style="list-style-type: none"> ファイバースコープ など GPSネットワーク、CCTV JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ICタグ 高所調査用ロボット <ul style="list-style-type: none"> ライブカメラ、モニター GPSネットワーク CCTV JAEA-3号(γ線可視化計測用) 水中線量計、土壌線量計 ICタグ 防災モニタリングロボット 高所調査用ロボット 試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> チリ・コポアボ鉱山 気象データ 市販(福島第一原子力発電所) 一般企業等多数 広く流通している <ul style="list-style-type: none"> 表5.3.3-1⑦ 表5.3.3-1⑧ <ul style="list-style-type: none"> 広く流通している 斜面杭への適用を研究開発中 市販(福島第一原子力発電所) <ul style="list-style-type: none"> 表5.3.3-1③ 広く流通している 各種医療機関 表5.3.3-1① 表5.3.3-1② 表5.3.3-1④ 表5.3.3-1⑤ 表5.3.3-1⑥ <ul style="list-style-type: none"> チリ・コポアボ鉱山 広く流通している 表5.3.3-1① 斜面杭への適用を研究開発中 表5.3.3-1⑫ <ul style="list-style-type: none"> チリ・コポアボ鉱山 広く流通している チリ・コポアボ鉱山 表5.3.3-1② 市販(福島第一原子力発電所) 斜面杭への適用を研究開発中 表5.3.3-1⑪ 表5.3.3-1⑫ 表5.3.3-1⑨

表 5.5-3 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 3)

検討No3
地上-状況No 1, 3, 7

最終的な状況	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、 屋内外の放射線量の増加、廃棄体の回収困難					
廃棄体の状態	遮へい容器健全、遮へい容器破損(OP、HLWIは健全)、遮へい容器およびOPの破損(HLWIは健全)					
施設の状態	建屋なし(地上から坑口まで)					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により廃棄体(遮へい容器+OP+HLWI)が紛失、流失する。 ・モニタリング圏外により廃棄体の状況が把握できない。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
<p>廃棄体が紛失、流失</p> <p>廃棄体の回収困難</p> <p>管理区域外でガラス固化体の破損</p>	<p>緊急事態の通報</p> <p>管理区域外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>管理区域外への放射性物質の拡散</p> <p>なし</p> <p>あり</p> <p>避難指示対象区域の設定</p> <p>応急的な放射性物質の拡散防止策</p> <p>※2 廃棄体の検索へ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・管理区域外の放射線測定箇所の確認 <p>・放射線測定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・天候、風速など ・作業員の配置状況 <p>・管理区域外および管理区域境界の空間線量</p>	<p>状況の映像化</p> <p>気象観測</p> <p>労働管理</p> <p>事故直後の情報収集</p> <p>放射線計測</p> <p>放射線計測</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・風向・風速計、雨量計 ・作業管理システム ・初期情報収集ロボット ・空間線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コボアボ鉱山 ・気象データ ・一般企業等多数 ・表5.3.3-1⑦ ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1②
<p>屋内外の放射線量の増加</p>	<p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>なし</p> <p>あり</p> <p>避難指示対象区域の設定</p> <p>応急的な放射性物質の拡散防止策</p> <p>※2 廃棄体の検索へ</p> <p>屋外への放射線の散乱</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>※2 廃棄体の検索へ</p> <p>負傷者の救助、救出</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外における放射線測定箇所の確認 <p>・放射線測定</p> <p>・救助、救出ルートの確認</p> <p>・負傷者の救助・救出</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・天候、風速など ・作業員の配置状況 <p>・空間線量</p>	<p>状況の映像化</p> <p>気象観測</p> <p>労働管理</p> <p>放射線計測</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・風向・風速計、雨量計 ・作業管理システム ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コボアボ鉱山 ・気象データ ・一般企業等多数 ・表5.3.3-1②
	<p>負傷者の救助、救出</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 <p>・救助、救出ルートの確認</p> <p>・負傷者の救助・救出</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・親水性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート、空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<p>事故発生場所付近の各種情報収集</p> <p>位置情報ネットワーク管理</p> <p>労働管理</p> <p>危険物管理</p> <p>放射線計測</p> <p>要救助者の収容</p> <p>ロボット操作の品質確保とロボット捜査員リソースの有効活用</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・詳細情報収集ロボット ・GPSネットワーク、無線 ・作業管理システム ・薬品管理 ・空間線量計 ・救出ロボット(ロボキュー) ・遠隔操作ヒューマンインターフェース ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・表5.3.3-1⑧ ・広く流通している ・一般企業等多数 ・各種医療機関 ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1④ ・表5.3.3-1⑤ ・表5.3.3-1⑥



表 5.5-4 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 4)

検討No4
地上-状況No 2, 8, 10

最終的な状況	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、 建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響、状況把握又は監視機能喪失					
廃棄体の状態	HLWの破損、HLWは健全な状態					
施設の状況	建屋のひび割れ・剥離、負圧機能の停止					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋にひび割れまたは剥離が生じる。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 ・負圧機能の停止、換気機能の停止による室内高温状態のため検査室内への侵入が困難となる。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		
	応急対策	必要な情報	技術	機器	技術の開発状況や適用事例	
ガラス固化体の破損	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>拡散なし → 別フローへ</p> <p>拡散あり → 別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・天候、風速など ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 気象観測 放射線計測 放射線計測 事故直後の情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・初期情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・気象データ ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑦
建屋の損傷	<p>建屋の損傷の把握</p> <p>建屋の放射線遮へい機能に着目した建屋の評価</p> <p>損傷した建屋の対応、措置</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷状況の確認 ・建屋周辺の放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合い ・天候、風速 ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 気象観測 放射線計測 放射線計測 事故発生場所付近の各種情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・詳細情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアポ鉱山 ・気象データ ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑧
建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響	<p>負圧(排気)設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による閉じ込め機能機能の回復</p> <p>OUT → 代替設備・手法による閉じ込め機能機能の回復</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・負圧設備の状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・負圧設備の不具合箇所 ・修理期間、費用 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・CCTV ・空間線量計 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアポ鉱山 ・チリ・コポアポ鉱山 ・市販(福島第一原子力発電所)
状況把握又は監視機能喪失	<p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による状況把握</p> <p>OUT → 代替設備・手法による状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリング設備の状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリング設備の不具合箇所 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・CCTV ・空間線量計 ・災害対策用ロボットスーツHAL[®] 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアポ鉱山 ・チリ・コポアポ鉱山 ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1⑥
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	<p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による状況把握</p> <p>OUT → 代替設備・手法による状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状態 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電管理システム ・発電装置等の代替設備管理システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・アナログ管理事例は多数

<p>ガラス固化体の状態把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>なし</p> <p>あり</p> <p>放射性物質の回収</p> <p>破損したガラス固化体の回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 ・回収ルートの確認 ・障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なり合っている等) ・ガラス固化体、OPの損傷状況 ・回収ルート of 空間線量、湿度、温度及び周辺設備の損傷情報 	<p>状況の映像化 位置情報ネットワーク管理</p> <p>放射線計測</p> <p>ID管理個体の位置情報の取得</p> <p>放射線計測</p> <p>建屋内等のガレキ・粉塵の排除</p> <p>高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・CCTV ・空間線量計 ・ICタグ ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・高所調査用ロボット ・災害対策用ロボットスーツHAL[®] 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・広く流通している ・チリ・コポアボ鉱山 ・市販(福島第一原子力発電所) ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1① ・表5.3.3-1⑫ ・表5.3.3-1⑥
<p>吊り上げ設備の状態確認</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・クレーン、把持装置の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・クレーン、把持装置機能の不具合状況 	<p>状況の映像化</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・CCTV 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・Olkiloto
<p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による宙吊り状態の解除</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・代替設備の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・修理期間、費用 ・修理期間、費用 	<p>放射線計測</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p> <p>視覚不良下での放射線測定</p> <p>高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p> <p>試料を収集し汚染情報を収集</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・空間線量計 ・災害対策用ロボットスーツHAL[®] ・発電装置等の代替設備管理システム ・防災モニタリングロボット ・高所調査用ロボット ・試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1⑥ ・アナログ管理事例は多数 ・表5.3.3-1⑪ ・表5.3.3-1⑫ ・表5.3.3-1⑨
<p>ガラス固化体の移動</p> <p>ガラス固化体検査</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>損傷に応じた対応・措置</p> <p>ガラス固化体の格納</p>					

表 5.5-5 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 5)

最終的な状況	屋内外の放射線量の増加					
廃棄体の状態	OPの破損 (HLWIは健全な状態)					
施設の状態	建屋の崩壊、搬入口等の破損					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・衝撃力により建屋が崩壊、または搬入口等が破損する。 ・建屋の崩壊、搬入口等の破損により廃棄体が埋没、水没または流出する。 ・ガラス固化体の破損はない。 					
異常状態	具体的な対策方法					
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	状況把握・監視のために必要な技術や機器 技術	機器	
建屋崩壊・搬入口等の破損	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>屋外への放射線の散乱</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合い ・天候、風速 ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 気象観測 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コボアボ鉱山 ・気象データ ・市販(福島第一原子力発電所)
廃棄体の埋没・流出	<p>負傷者の救助、救出</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 労働管理 危険物管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期情報収集ロボット ・詳細情報収集ロボット ・障害物除去車(セーバー) ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・表5.3.3-1⑦ ・表5.3.3-1⑧ ・表5.3.3-1③ ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1①
	<p>応急的な放射線遮へい</p> <p>ガラス固化体またはOPの捜索</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体またはOPの数及び場所の推定 ・建屋状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体またはOPの捜索および放射線測定 ・放射性物質(ガラス固化体の破片)の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・災害発生時のガラス固化体、OPの位置情報 ・ガラス固化体、OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体、OPの位置情報および損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 ID管理個体の位置情報の取得 放射線計測 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSネットワーク、無線 ・作業管理システム ・薬品管理 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・空間線量計 ・救出ロボット(ロボキュー) ・遠隔操作ヒューマンインターフェース ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・ファイバースコープ など ・GPSネットワーク、CCTV ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・ICタグ ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・高所調査用ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・一般企業等多数 ・各種医療機関 ・表5.3.3-1① ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1④ ・表5.3.3-1⑤ ・表5.3.3-1⑥ ・チリ・コボアボ鉱山 ・広く流通している ・表5.3.3-1① ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑫
ガラス固化体の破損なし	<p>障害物の撤去</p> <p>ガラス固化体、OPの状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体周辺の放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なり合っている等) ・ガラス固化体、OPの損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・CCTV ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コボアボ鉱山 ・広く流通している ・チリ・コボアボ鉱山 ・表5.3.3-1②
屋内外の放射線量の増加	<p>水中からのガラス固化体またはOPの回収</p> <p>瓦礫からのガラス固化体またはOPの回収</p> <p>ガラス固化体またはOPの移動</p> <p>ガラス固化体またはOPの検査</p> <p>OK → 別フローへ</p> <p>OUT → 損傷に応じた対応措置</p> <p>ガラス固化体またはOPの格納</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・回収ルートの確認 ・障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・回収ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・空間線量計 ・ICタグ ・防災モニタリングロボット ・高所調査用ロボット ・試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.3.3-1⑪ ・表5.3.3-1⑫ ・表5.3.3-1⑨

表 5.5-6 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 6)

検討No6
地上-状況No 3, 5, 10

最終的な状況	屋内外の放射線量の増加、ガラスの閉じ込め機能への影響 状況把握又は監視機能の喪失					
廃棄体の状態	HLWの失透の可能性					
施設の状態	搬入口等の破損					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体またはOPの吊り上げ中に、津波で搬入口等が破損する。 ・破損搬入口等から油が検査室内に流入、火災が発生する。 ・ガラス固化体が火災により直接加熱される。 ・モニタリングが不能となり、ガラス固化体の状況の把握ができない。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
搬入口等の破損	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>なし あり</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の崩壊状況の確認 ・火災発生場所、規模の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋の損傷箇所、度合 ・火災発生場所、規模 ・天候、風速など ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 気象観測 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・火災警報システム ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・ONKALO地下特性調査施設 ・気象データ ・市販(福島第一原子力発電所)
油流入による火災発生	<p>負傷者の救助、救出</p> <p>応急的な放射線遮へい</p> <p>検査室内の消火</p> <p>ガラス固化体の冷却</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 労働管理 危険物管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSネットワーク、無線 ・作業管理システム ・薬品管理 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・空間線量計 ・救出ロボット(ロボキュー) ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・一般企業等多数 ・各種医療機関 ・表5.3.3-1① ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1④ ・表5.3.3-1⑥
ガラスの閉じ込め機能への影響	<p>ガラス固化体の状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>なし あり</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度計測機器の状況の確認 ・屋内の温度の計測 ・ガラス固化体の数および場所の推定 ・建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度 ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 温度計測 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 ID管理個体の位置情報の取得 放射線計測 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・詳細情報収集ロボット ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・CCTV ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・ICタグ ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・防災モニタリングロボット ・高所調査用ロボット ・試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・表5.3.3-1⑧ ・チリ・コポアボ鉱山 ・広く流通している ・チリ・コポアボ鉱山 ・表5.3.3-1① ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑩ ・表5.3.3-1⑫ ・表5.3.3-1⑨
状況把握又は監視機能喪失	<p>ガラス固化体の回収</p> <p>ガラス固化体検査</p> <p>OK OUT</p> <p>損傷に応じた対応・措置</p> <p>ガラス固化体の格納</p>					
ガラス固化体の破損なし						
屋内外の放射線量の増加						

表 5.5-7 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 7)

検討No7
地上-状況No 4, 9, 10

最終的な状況	屋内の放射線量の増加及び屋内での放射性物質の拡散、 屋内高温状態の継続、状況把握又は監視機能喪失					
廃棄体の状態	HLWの破損					
施設の状態	建屋健全					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 衝撃力により天井クレーンが損傷し、ガラス固化体が落下する。 落下物等によりガラス固化体が破損する。 モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 換気機能の停止により検査室内への侵入が困難となる。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
ガラス固化体の落下・破損 状況把握又は監視機能喪失	緊急事態の通報 屋外の放射線量・放射性物質計測 屋外への放射性物質の拡散 拡散なし → 別フローへ 拡散あり → 別フローへ	<ul style="list-style-type: none"> 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> 天候、風速など 空間線量 作業員の配置状況 	気象観測 放射線計測 労働管理 放射線計測 事故直後の情報収集	<ul style="list-style-type: none"> 風向・風速計、雨量計 空間線量計 作業管理システム JAEA-3号(γ線可視化計測用) 初期情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> 気象データ 市販(福島第一原子力発電所) 一般企業等多数 表5.3.3-1② 表5.3.3-1⑦
	モニタリング設備の状態確認	モニタリング設備(カメラ等)の状況把握	モニタリング設備の不具合箇所	状況の映像化	ライブカメラ、モニター CCTV 空間線量計	チリ・コボアボ鉱山 チリ・コボアボ鉱山 市販(福島第一原子力発電所)
	設備の復旧	設備の復旧 OK OUT → 代替設備・手法による状況把握	<ul style="list-style-type: none"> 修理期間、費用 通電・ネットワークの状況 代替設備の数、場所、オペレーターの状況 	放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 事故発生場所付近の各種情報収集	<ul style="list-style-type: none"> 災害対策用ロボットスーツHAL® 詳細情報収集ロボット 通電管理システム 発電装置等の代替設備管理システム 	<ul style="list-style-type: none"> 表5.3.3-1⑥ 表5.3.3-1⑧ ONKALO地下特性調査施設 アナログ管理事例は多数
	破損したガラス固化体の状態把握	ガラス固化体の破損状況及び保管状況の確認	<ul style="list-style-type: none"> ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ガラス固化体の位置情報および損傷情報 	建屋内等のガレキ・粉塵の排除 位置情報ネットワーク管理	<ul style="list-style-type: none"> JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) GPSネットワーク 	<ul style="list-style-type: none"> 表5.3.3-1① 広く流通している
	既存のモニタリング設備による拡散した放射性物質の状況把握が可能か	ガラス固化体の周辺の放射線測定	<ul style="list-style-type: none"> 通電・ネットワークの状況 代替設備の数、場所、オペレーターの状況 	放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握	<ul style="list-style-type: none"> CCTV 空間線量計 ICタグ JAEA-3号(γ線可視化計測用) 災害対策用ロボットスーツHAL® 高所調査用ロボット 通電管理システム 発電装置等の代替設備管理システム 	<ul style="list-style-type: none"> チリ・コボアボ鉱山 市販(福島第一原子力発電所) 斜面杭への適用を研究開発中 表5.3.3-1② 表5.3.3-1⑥ 表5.3.3-1⑫ ONKALO地下特性調査施設 アナログ管理事例は多数
	空調設備の状態確認	停電等の状況の確認 換気状態(温度)の確認	<ul style="list-style-type: none"> 停電・ネットワークの状況 施設内の温度 	放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握	<ul style="list-style-type: none"> 災害対策用ロボットスーツHAL® 高所調査用ロボット 通電管理システム 温度センサー、温度管理モニタリングシステム 	<ul style="list-style-type: none"> 表5.3.3-1⑥ 表5.3.3-1⑫ ONKALO地下特性調査施設 ONKALO地下特性調査施設
	設備の復旧	設備の復旧 OK OUT → 代替設備・手法によるガラス固化体の冷却	<ul style="list-style-type: none"> 換気設備の状況確認 代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 代替設備の必要能力、動作確認、施設内の温度の状況 	放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集	<ul style="list-style-type: none"> 発電装置等の代替設備管理システム 温度センサー、温度管理モニタリングシステム 防災モニタリングロボット 高所調査用ロボット 試料等情報収集ロボット
破損したガラス固化体の回収						

表 5.5-8 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 8)

検討No8
地上-状況No 5, 10

最終的な状況	ガラスの閉じ込め機能への影響、状況把握又は監視機能喪失					
廃棄体の状態	HLWの失透の可能性、HLWの急冷					
施設の状態	建屋健全					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・上蓋溶接作業中に衝撃力により溶接箇所がずれる。 ・OP、HLWが加熱され、HLWが高温状態になる。(ガラス固化体の失透の可能性) ・排気口等から津波、大雨洪水等により建屋内が冠水、HLWが急冷する。 ・モニタリングが不能となり、ガラス固化体の状況の把握ができない。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
溶接箇所がずれる	<p>緊急事態の通報</p> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p>屋外への放射性物質の拡散</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・天候、風速など ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 気象観測 放射線計測 事故直後の情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・初期情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・気象データ ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑦
状況把握又は監視機能喪失	<p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → 代替設備・手法による状況把握</p> <p>OUT → 代替設備・手法による状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状態の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の稼働状況 	<ul style="list-style-type: none"> 状況の映像化 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 事故発生場所付近の各種情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電管理システム ・ライブカメラ、モニター ・CCTV ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・詳細情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・チリ・コポアポ鉱山 ・チリ・コポアポ鉱山 ・表5.3.3-1⑥ ・表5.3.3-1⑧
ガラス固化体の加熱	<p>ガラス固化体の状態把握</p> <p>ガラス固化体の高温状態</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度計測機器の状況の確認 ・屋内の温度の計測 ・ガラス固化体の数および場所の推定 	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度 ・災害発生時のガラス固化体の位置情報 	<ul style="list-style-type: none"> 温度計測 状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 	<ul style="list-style-type: none"> ・温度センサー、温度管理モニタリングシステム ・ライブカメラ、モニター ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・CCTV 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・チリ・コポアポ鉱山 ・チリ・コポアポ鉱山
ガラス固化体の急冷	<p>ガラス固化体の冷却</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 	<ul style="list-style-type: none"> ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・表5.3.3-1①
ガラス固化体の破損なし	<p>ガラス固化体の破損</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>ガラス固化体の移動</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 ・放射性物質、ガラス固化体の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> ID管理個体の位置情報の取得 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・ICタグ ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・防災モニタリングロボット ・高所調査用ロボット ・試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑥ ・表5.3.3-1⑪ ・表5.3.3-1⑫ ・表5.3.3-1⑨
ガラスの閉じ込め機能への影響	<p>ガラス固化体の検査</p> <p>OK → ガラス固化体の格納</p> <p>OUT → 損傷に応じた対応・措置</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の格納 				

表 5.5-9 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 9)

検討No9
地上-状況No 6, 9, 10

最終的な状況	ガラス固化体・OPの正常作業工程の中断、屋内高温状態の継続 状況把握又は監視機能喪失					
廃棄体の状態	HLW,OPの健全な状態					
施設の状態	建屋健全					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体またはOPの吊り上げ中に、クレーンが停止し宙吊り状態が継続する。 ・換気機能停止による室内高温状態の継続により、検査室内への侵入が困難となる。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
クレーンの停止	<p>緊急事態の通報</p> <p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状態の確認 ・停電等の状況の確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の稼働状況 ・通電・ネットワークの状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状態 	<p>状況の映像化</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 事故直後の情報収集</p> <p>事故発生場所付近の各種情報収集</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・通電管理システム ・ライブカメラ、モニター、CCTV ・通電管理システム ・発電装置等の代替設備管理システム ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・初期情報収集ロボット ・詳細情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・チリ・コボアボ鉱山 ・ONKALO地下特性調査施設 ・アナログ管理事例は多数 ・表5.3.3-1⑥ ・表5.3.3-1⑦ ・表5.3.3-1⑧
屋内高温状態の継続	<p>空調設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法によるガラス固化体等の冷却</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・換気状態(温度)の確認 ・換気設備の状況確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・施設内の温度 ・代替設備の必要能力、動作確認、施設内の温度の状況 ・代替設備の数、場所、オペレーターの状態 	<p>事故発生場所付近の各種情報収集</p> <p>状況の映像化</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・通電管理システム ・温度センサー、温度管理モニタリングシステム ・詳細情報収集ロボット ・ライブカメラ、モニター ・CCTV ・発電装置等の代替設備管理システム ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・高所調査用ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・ONKALO地下特性調査施設 ・表5.3.3-1⑧ ・チリ・コボアボ鉱山 ・チリ・コボアボ鉱山 ・アナログ管理事例は多数 ・表5.3.3-1⑥ ・表5.3.3-1⑫
ガラス固化体・OPの正常作業工程の中断	<p>吊り上げ設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による宙吊り状態の解除</p> <p>ガラス固化体の移動</p> <p>ガラス固化体検査</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>損傷に応じた対応・措置</p> <p>ガラス固化体の格納</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・クレーン、把持装置の状況の把握 ・代替設備の状況の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(吊り上げ状態等) ・代替設備の数、場所、オペレーターの状態 	<p>状況の映像化</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での放射線測定 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・CCTV ・発電装置等の代替設備管理システム ・作業管理システム ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・防災モニタリングロボット ・高所調査用ロボット ・試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コボアボ鉱山 ・チリ・コボアボ鉱山 ・アナログ管理事例は多数 ・一般企業等多数 ・表5.3.3-1⑥ ・表5.3.3-1⑪ ・表5.3.3-1⑫ ・表5.3.3-1⑨

表 5.5-10 地上施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討No. 10)

検討No10
地上-状況No 6, 7, 8, 9, 10

最終的な状況	ガラス固化体・OPの正常作業工程の中断、ガラス固化体・OPの回収困難、 屋内高温状態の継続、状況把握又は監視機能喪失					
廃棄体の状態	HLW,OPの健全な状態					
施設の状況	建屋健全					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の吊り上げ中に、揺れにより天井クレーンが損傷し、ガラス固化体が落下する。 ・落下したガラス固化体が検査室内を転がり移動する。 ・換気機能の停止により検査室内温度が上昇する。 ・モニタリング機能が停止し、室内の状況把握ができない。 ・負圧機能の停止により、放射性物質の閉じ込め機能が低下する。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な技術や機器		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の落下・移動</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ガラス固化体の回収困難</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">屋内高温状態の継続</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;">ガラス固化体、OPの搜索</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の数、OPの破損状況及び保管状況の確認 ・ガラス固化体、OP周辺の放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の保管情報(倒れている、重なりあっている等) ・ガラス固化体、OPの損傷情報 	状況の映像化 位置情報ネットワーク管理 放射線計測 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 事故直後の情報収集	・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・CCTV ・空間線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・ICタグ ・初期情報収集ロボット	・チリ・コポアポ鉱山 ・広く流通している ・チリ・コポアポ鉱山 ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1② ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.3.3-1⑦
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">室内の放射線量・放射性物質計測</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度計測機器の状況の確認 ・屋内の温度の計測 ・屋内の放射線量・放射性物質の計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内の温度 ・屋内の放射線量・放射性物質の量 	放射線計測 放射線計測 事故発生場所付近の各種情報収集	・温度センサー、温度管理モニタリングシステム ・空間線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・詳細情報収集ロボット	・ONKALO地下特性調査施設 ・市販(福島第一原子力発電所) ・表5.3.3-1② ・表5.3.3-1⑧
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">空調設備の状態確認</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin-top: 10px;"> 設備の復旧 OK OUT 代替設備・手法によるガラス固化体等の冷却 </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・換気状態(温度)の確認 ・換気設備の状況確認 ・代替設備の起動状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・施設内の温度 ・代替設備の必要能力、動作確認、施設内の温度の状況 		・通電管理システム ・温度センサー、温度管理モニタリングシステム ・発電装置等の代替設備管理システム ・温度センサー、温度管理モニタリングシステム	・ONKALO地下特性調査施設 ・ONKALO地下特性調査施設 ・アナログ管理事例は多数 ・ONKALO地下特性調査施設

<p>状況把握又は監視機能喪失</p>	<p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>↓</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → ↓</p> <p>OUT → 代替設備・手法による状況把握</p>	<p>・モニタリング設備(カメラ等)の状況の確認</p> <p>・モニタリング設備の不具合箇所</p> <p>・停電等の状況の確認</p> <p>・代替設備の起動状況の確認</p>	<p>・モニタリング設備の不具合箇所</p> <p>・通電・ネットワークの状況</p> <p>・代替設備の数、場所、オペレーターの状態</p>	<p>状況の映像化</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p> <p>高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p>	<p>・ライブカメラ、モニター</p> <p>・CCTV</p> <p>・災害対策用ロボットスーツHAL®</p> <p>・高所調査用ロボット</p> <p>・通電管理システム</p> <p>・発電装置等の代替設備管理システム</p>	<p>・チリ・コボアボ鉱山</p> <p>・表5.3.3-1⑥</p> <p>・表5.3.3-1⑫</p> <p>・ONKALO地下特性調査施設</p> <p>・アナログ管理事例は多数</p>
<p>建屋の放射性物質の閉じ込め機能への影響</p>	<p>負圧(排気)設備の状態確認</p> <p>↓</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK → ↓</p> <p>OUT → 代替設備・手法による閉じ込め機能の回復</p>	<p>・負圧設備の状況把握</p> <p>・負圧設備の不具合箇所</p> <p>・修理期間、費用</p> <p>・停電等の状況の確認</p> <p>・代替設備の起動状況の確認</p>	<p>・負圧設備の不具合箇所</p> <p>・修理期間、費用</p> <p>・通電・ネットワークの状況</p> <p>・代替設備の数、場所、オペレーターの状態</p>	<p>状況の映像化</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p> <p>高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p>	<p>・ライブカメラ、モニター</p> <p>・CCTV</p> <p>・建屋内圧力計測システム</p> <p>・災害対策用ロボットスーツHAL®</p> <p>・高所調査用ロボット</p> <p>・通電管理システム</p> <p>・発電装置等の代替設備管理システム</p>	<p>・チリ・コボアボ鉱山</p> <p>・チリ・コボアボ鉱山</p> <p>・ONKALO地下特性調査施設</p> <p>・表5.3.3-1⑥</p> <p>・表5.3.3-1⑫</p> <p>・ONKALO地下特性調査施設</p> <p>・アナログ管理事例は多数</p>
<p>ガラス固化体、OPの正常作業工程の中断</p>	<p>吊り上げ設備の状態確認</p> <p>↓</p> <p>既存クレーンでの吊り上げ</p> <p>OK → ↓</p> <p>OUT → 代替設備・手法によるガラス固化体の吊り上げ</p>	<p>・クレーン、把持装置の状況の把握</p> <p>・クレーン、把持装置の不具合箇所</p> <p>・修理期間、費用</p> <p>・代替設備の状況の把握</p>	<p>・クレーン、把持装置の不具合箇所</p> <p>・修理期間、費用</p> <p>・代替設備の数、場所、オペレーターの状態</p>	<p>状況の映像化</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p> <p>高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p>	<p>・ライブカメラ、モニター</p> <p>・CCTV</p> <p>・災害対策用ロボットスーツHAL®</p> <p>・高所調査用ロボット</p> <p>・発電装置等の代替設備管理システム</p>	<p>・チリ・コボアボ鉱山</p> <p>・チリ・コボアボ鉱山</p> <p>・表5.3.3-1⑥</p> <p>・表5.3.3-1⑫</p> <p>・アナログ管理事例は多数</p>
	<p>ガラス固化体、OPの移動</p> <p>↓</p> <p>ガラス固化体、OPの検査</p> <p>OK → ↓</p> <p>OUT → 損傷に応じた対応・措置</p> <p>↓</p> <p>ガラス固化体、OPの格納</p>			<p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p> <p>視覚不良下での放射線測定</p> <p>高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握</p> <p>試料を収集し汚染情報を収集</p>	<p>・災害対策用ロボットスーツHAL®</p> <p>・防災モニタリングロボット</p> <p>・高所調査用ロボット</p> <p>・試料等情報収集ロボット</p>	<p>・表5.3.3-1⑥</p> <p>・表5.3.3-1⑪</p> <p>・表5.3.3-1⑫</p> <p>・表5.3.3-1⑨</p>

表 5.5-11 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 11)

検討No11
地下-状況No 1, 5, 8

最終的な状況	屋外の放射線量の増加及び屋外への放射性物質の拡散、人工バリア機能の低下の可能性 状況把握又は監視機能の喪失					
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、HLWの破損					
施設の状態	坑道内落盤、ガス爆発、エレベーター落下、浸水					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・荷重、衝撃力または水圧の作用により緩衝材、OP、HLWが破損する。 ・放射性物質が坑口から屋外へ飛散、または放射性物質が水へ浸出して汚染された水が屋外へ流出する。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な機器や技術		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	技術	機器	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">落盤</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">エレベーター落下</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">浸水</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">作業員退避</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 2px; margin-bottom: 10px;"> 屋外の放射線量・放射性物質計測 屋外への放射性物質の拡散 あり なし 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">応急的な放射性物質の拡散防止対策</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 10px;">応急的な放射線遮へい</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">OPの埋没、水没 廃棄体の搜索</div>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 <ul style="list-style-type: none"> ・坑道の水没状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の数および場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・廃棄体の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 ・坑道の水没箇所、破損箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量 ・廃棄体までの到達ルート及び周辺状況 ・廃棄体の位置情報および損傷情報 ・廃棄体の位置、放射線量 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 水圧モニタリング 気象観測 放射線計測 坑道内等のガレキ・粉塵の排除 事故発生場所付近の各種情報収集 ID管理個体の位置情報の取得 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSネットワーク、無線 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・空間線量計 ・救出ロボット(ロボキュー) ・災害対策用ロボットスーツHAL® ・坑内水圧の常時計測システム ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・詳細情報収集ロボット ・ファイバースコープ ・廃棄体管理システム、ICタグ ・坑内温度、圧力の常時計測システム ・水中線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・表5.3.3-1① ・広く流通している ・表5.3.3-1④ ・表5.3.3-1⑥ ・Cigar Lake 鉱山 ・気象データ ・広く流通している ・表5.5-16① ・表5.5-16⑧ ・チリ・コポアボ鉱山 ・斜面杭への適用を研究開発中 ・ONKALO地下特性調査施設, Cigar Lake 鉱山 ・広く流通している ・表5.5-16② ・表5.5-16⑥

状況把握又は監視機能の喪失	<p>モニタリング設備の状態確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・モニタリング設備(カメラ等)の状況把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・通電・ネットワークの状況 ・モニタリング設備の不具合箇所 	放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・通電管理システム ・CCTV、モニター ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・表5.5-16⑥
緩衝材の破損	<p>緩衝材の状態把握</p> <p>緩衝材の破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の性能確認 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・緩衝材の搜索及び放射線測定 ・緩衝材の場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の配置情報、温度、停電時間、損傷情報 	放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・温度計、通電管理システム ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・ONKALO地下特性調査施設 ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
人工バリア機能への低下の可能性	<p>OPの状況把握</p> <p>OPの破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・OPの場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・OPの搜索及び放射線測定 ・OPの場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・OPの位置情報および損傷情報 ・OP周辺の放射線量 	位置情報ネットワーク管理 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・広く流通している ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
OPの破損	<p>OPの状況把握</p> <p>OPの破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・OPの場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・OPの搜索及び放射線測定 ・OPの場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・OPの位置情報および損傷情報 ・OP周辺の放射線量 	位置情報ネットワーク管理 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・広く流通している ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
ガラス固化体の破損	<p>ガラス固化体の状況把握</p> <p>ガラス固化体の破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・ガラス固化体周辺の放射線量 	位置情報ネットワーク管理 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアボ鉱山 ・広く流通している ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
屋外の放射線量の増加及び屋外への放射性物質の拡散	<p>ポンプ設備の状況確認</p> <p>設備の復旧</p> <p>OK</p> <p>OUT</p> <p>代替設備・手法による揚水</p> <p>障害物の撤去</p> <p>破損したOP、HLWの回収</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・停電等の状況の確認 ・浸水状態(浸水領域)の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・停電・ネットワークの状況 ・施設内の浸水状況 	放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保	<ul style="list-style-type: none"> ・通電管理システム ・坑内水圧の常時計測システム ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・Cigar Lake鉱山 ・表5.5-16⑥

表 5.5-12 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 12)

検討No12

地下-状況No 2, 3, 5, 6, 8

最終的な状況	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、 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、 人工バリア機能の低下の可能性、廃棄体の回収困難、状況把握又は監視機能の喪失					
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、HLWの破損					
施設の状態	坑道内落盤、ガス爆発、エレベーター落下					
異常状態のシナリオ	・ガス爆発やエレベーター落下等による衝撃力、または落盤の荷重により、緩衝材、OP、HLWが破損する。 ・破損した緩衝材、OP、HLWは落盤により埋没している。					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な機器や技術		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	機器	技術	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>ガス爆発</p> <p>エレベーター落下</p> <p>落盤</p> <p>状況把握又は監視機能の喪失</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>緊急事態の通報</p> <p>作業員退避</p> <p style="border: 2px solid red; padding: 2px;">負傷者の救助、救出</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・負傷者との連絡方法の確保 ・負傷者数、場所の確認 ・二次災害発生の可能性の確認 ・救助、救出ルートの確認 ・負傷者の救助・救出 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員の位置、負傷状況 ・可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 ・救助、救出ルート空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSネットワーク、無線 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・空間線量計 ・救出ロボット(ロボキュー) ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSネットワーク、無線 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・空間線量計 ・救出ロボット(ロボキュー) ・災害対策用ロボットスーツHAL®
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>屋外の放射線量・放射性物質計測</p> <p style="border: 2px solid red; padding: 2px;">屋外への放射性物質の拡散</p> <p>なし → 別フローへ</p> <p>あり → 別フローへ</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道の水没状況の確認 ・屋外における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道の水没箇所、破損箇所、度合い ・天候、風速など ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 水圧モニタリング 気象観測 放射線計測 坑道内等のガレキ・粉塵の排除 事故発生場所付近の各種情報収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑内水圧の常時計測システム ・風向・風速計、雨量計 ・空間線量計 ・JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) ・詳細情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> ・Cigar Lake 鉱山 ・気象データ ・広く流通している ・表5.5-16① ・表5.5-16⑧
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>坑道内の放射線量・放射性物質計測</p> <p style="border: 2px solid red; padding: 2px;">坑道内への放射性物質の拡散</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → 別フローへ</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道における放射線測定箇所の確認 ・放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道の破損箇所、度合い ・空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道壁面圧力の常時計測システム ・空間線量計 ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・ONKALO地下特性調査施設 ・広く流通している ・表5.5-16⑥
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>坑道付近の土壌、地下水脈の放射性物質計測</p> <p style="border: 2px solid red; padding: 2px;">坑道付近の地盤、地下水脈への放射性物質の拡散</p> <p>あり → 別フローへ</p> <p>なし → ※1 坑道内での放射性物質の拡散防止対策へ</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道周辺の放射線量、放射性物質量の測定箇所の確認 ・坑道周辺の土壌、水の採取 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道付近の土壌、地下水の放射性物質量 	<ul style="list-style-type: none"> ・土壌線量計、水中線量計 ・試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・表5.5-16⑨

<p>廃棄体の埋没</p>	<p>坑道付近の地盤、地下水脈へ放射性物質の拡散防止対策</p> <p>※1 坑道内での放射性物質の拡散防止対策</p> <p>応急的な放射線遮へい</p> <p>廃棄体の搜索</p> <p>障害物の撤去</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の数および場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・廃棄体の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体までの到達ルート及び周辺状況 ・廃棄体の位置情報および損傷情報 ・廃棄体の位置、放射線量 	<p>ID管理個体の位置情報の取得</p> <p>放射線計測</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイバースコープ ・廃棄体管理システム、ICタグ ・坑内温度、圧力の常時計測システム ・水中線量計 ・JAEA-3号(γ線可視化計測用) ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアポ鉱山 ・斜面杭への適用を研究開発中 ・ONKALO地下特性調査施設, Cigar Lake 鉱山 ・広く流通している ・表5.5-16② ・表5.5-16⑥
<p>廃棄体の回収困難</p>	<p>緩衝材の状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の性能確認 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・緩衝材の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の配置情報、温度、停電時間、損傷情報 	<p>放射線計測</p> <p>ID管理個体の位置情報の取得</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・温度計、通電管理システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・ONKALO地下特性調査施設
<p>緩衝材の破損</p>	<p>緩衝材の破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の場所の確認 			<ul style="list-style-type: none"> ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
<p>人工バリア機能への低下</p>	<p>OPの状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・OPの場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・OPの搜索及び放射線測定 ・OPの場所の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・OPまでの到達ルート及び周辺状況 ・OPの位置情報および損傷情報 ・OP周辺の放射線量 	<p>位置情報ネットワーク管理</p> <p>放射線計測</p> <p>ID管理個体の位置情報の取得</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアポ鉱山 ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
<p>OPの破損</p>	<p>OPの破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>					
<p>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</p>	<p>ガラス固化体の状況把握</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の場所の推定 ・坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 ・ガラス固化体の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 	<p>位置情報ネットワーク管理</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ライブカメラ、モニター ・GPSネットワーク 	<ul style="list-style-type: none"> ・チリ・コポアポ鉱山 ・広く流通している
<p>ガラス固化体の破損</p>	<p>ガラス固化体の破損</p> <p>あり</p> <p>なし</p> <p>別フローへ</p>		<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の位置情報および損傷情報 ・ガラス固化体周辺の放射線量 	<p>放射線計測</p> <p>ID管理個体の位置情報の取得</p> <p>放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・水中線量計 ・ICタグ ・災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> ・広く流通している ・斜面杭への適用を研究開発中 ・表5.5-16⑥
<p>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</p>	<p>破損したOP、HLWの回収</p>					

表 5.5-13 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 13)

検討No13
地下-状況No 2, 3, 5, 6, 8

最終的な状況	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、 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、 人工バリア機能の低下の可能性、廃棄体の回収困難、状況把握又は監視機能の喪失					
廃棄体の状態	緩衝材の破損、OPの破損、HLWの破損					
施設の状況	浸水					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 湧水、津波の流入の影響で坑道内が浸水する。 浸水により水圧の作用により緩衝材、OP、HLWが破損する。 ポンプ機能、モニタリング機能は喪失している。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な機器や技術		技術の開発状況や適用事例
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	機器	技術	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">ポンプ機能の喪失</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">湧水</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">津波の流入</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">廃棄体の回収困難</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">作業員退避</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> 屋外への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">坑道内の放射線量・放射性物質の計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> 坑道内への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> 水への放射性物質の浸出 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">坑道付近の地盤、地下水脈の放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> 坑道付近の土壌、地下水脈への放射性物質の拡散 なし → ※1 坑道内での放射性物質の拡散防止対策へ あり → 別フローへ </div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> 負傷者との連絡方法の確保 負傷者数、場所の確認 二次災害発生の可能性の確認 救助、救出ルートの確認 負傷者の救助・救出 坑道の水没状況の確認 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 坑道における放射線測定箇所の確認 放射線測定 坑道周辺の放射線量、放射性物質量の測定箇所の確認 坑道周辺の土壌、水の採取 	<ul style="list-style-type: none"> 作業員の位置、負傷状況 可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 坑道の水没箇所、破損箇所、度合い 天候、風速など 空間線量 坑道の破損箇所、度合い 空間線量 坑道付近の土壌、地下水の放射性物質量 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 水圧モニタリング 気象観測 放射線計測 坑道内等のガレキ・粉塵の排除 事故発生場所付近の各種情報収集 坑道壁面圧力の常時計測システム 空間線量計 災害対策用ロボットスーツHAL® 土壌線量計、水中線量計 試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> GPSネットワーク、無線 JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 空間線量計 救出ロボット(ロボキュー) 災害対策用ロボットスーツHAL® 坑内水圧の常時計測システム 風向・風速計、雨量計 空間線量計 JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 詳細情報収集ロボット 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> 広く流通している 表5.3.3-1① 広く流通している 表5.3.3-1④ 表5.3.3-1⑥ Cigar Lake 鉱山 気象データ 広く流通している 表5.5-16① 表5.5-16⑧ ONKALO地下特性調査施設 広く流通している 表5.5-16⑥ 広く流通している 表5.5-16⑨

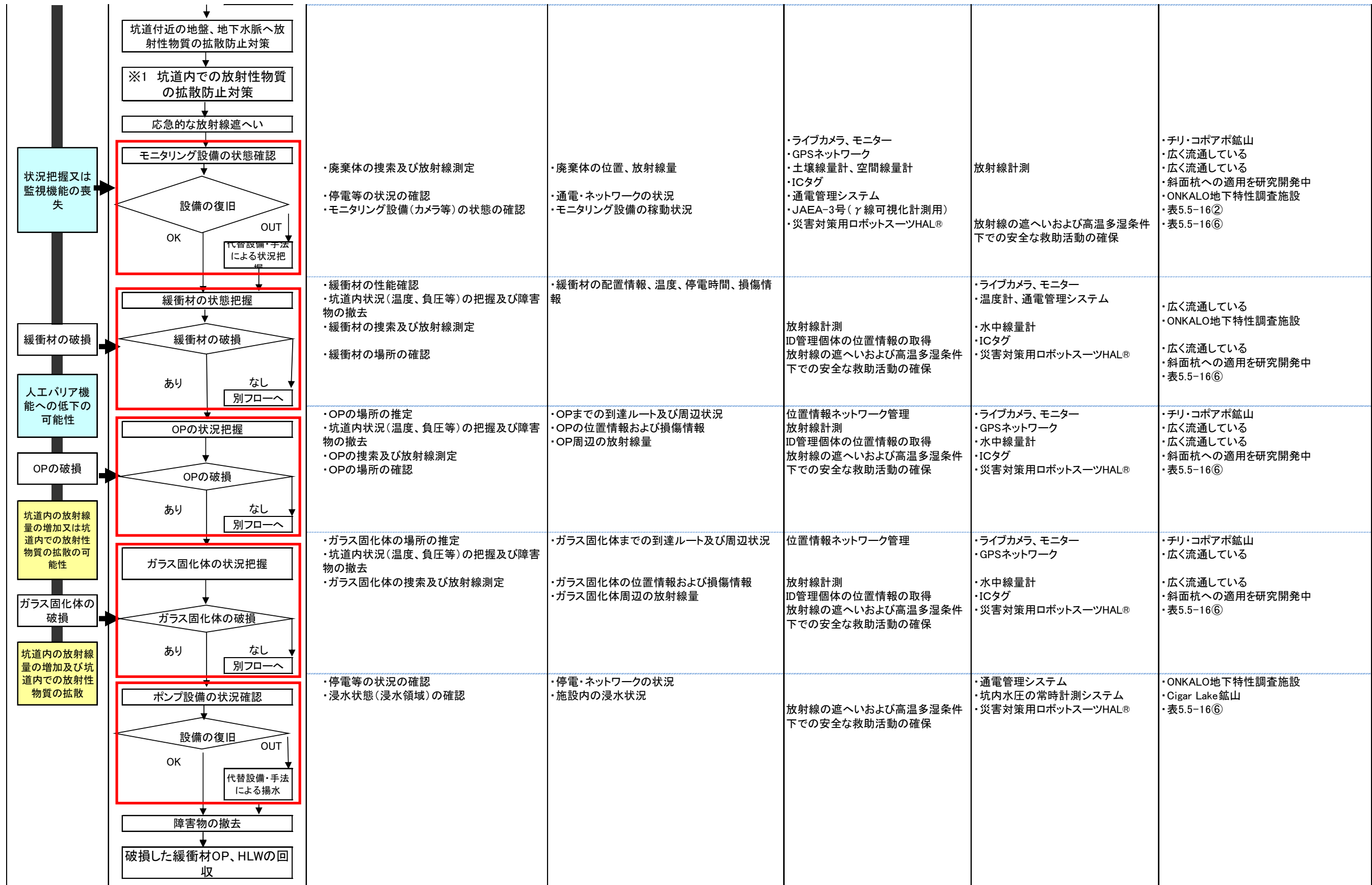


表 5.5-14 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 14)

検討No14
地下-状況No 4, 5, 7, 8

最終的な状況	ガラスの閉じ込め機能への影響、人工バリア機能の低下の可能性、状況把握又は監視機能の喪失、アクセス坑道内(又はエレベーター内)処分坑道内の高温状態の継続					
廃棄体の状態	緩衝材の熱による変形・変質・急冷、OPの熱による変形・急冷、HLWの失透の可能性・急冷					
施設の状態	火災、浸水					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内に火災が発生する。 緩衝材、OP、HLWが加熱される。 津波等の流入により緩衝材、OP、HLWが急冷させる。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な機器や技術		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	機器	技術	
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">坑道内火災</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">アクセス坑道、処分坑内高温状態の継続</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">緩衝材、OP、ガラス固化体の加熱</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">緊急事態の通報</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">作業員退避</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">負傷者の救助、救出</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">屋外の放射線量・放射性物質計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> 屋外への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;">坑道内の放射線量・放射性物質の計測</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> 坑道内への放射性物質の拡散 なし → 別フローへ あり → 別フローへ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">坑道内火災の消火</div> </div>	<ul style="list-style-type: none"> 負傷者との連絡方法の確保 負傷者数、場所の確認 二次災害発生の可能性の確認 救助、救出ルートの確認 負傷者の救助・救出 坑道の水没状況の確認 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 坑内温度の確認 坑道における放射線測定箇所の確認 放射線測定 火災鎮火状況の確認 津波による浸水状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 作業員の位置、負傷状況 可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 坑道の水没箇所、破損箇所、度合い 天候、風速など 空間線量 坑内温度 坑道の破損箇所、度合い 空間線量 火災鎮火状況 津波による浸水状況 	<ul style="list-style-type: none"> 位置情報ネットワーク管理 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の収容 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 水圧モニタリング 気象観測 放射線計測 坑道内等のガレキ・粉塵の排除 事故発生場所付近の各種情報収集 坑道壁面圧力の常時計測システム 空間線量計、温度・湿度計 災害対策用ロボットスーツHAL® 火災警報システム 坑内水圧の常時計測システム 	<ul style="list-style-type: none"> GPSネットワーク、無線 JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 空間線量計 救出ロボット(ロボキュー) 災害対策用ロボットスーツHAL® 坑内水圧の常時計測システム 風向・風速計、雨量計 空間線量計 JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 詳細情報収集ロボット 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> GPSネットワーク、無線 JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 空間線量計 救出ロボット(ロボキュー) 災害対策用ロボットスーツHAL® Cigar Lake 鉱山 気象データ 広く流通している 表5.5-16① 表5.5-16⑧ ONKALO地下特性調査施設 広く流通している 表5.5-16⑥ ONKALO地下特性調査施設 Cigar Lake 鉱山

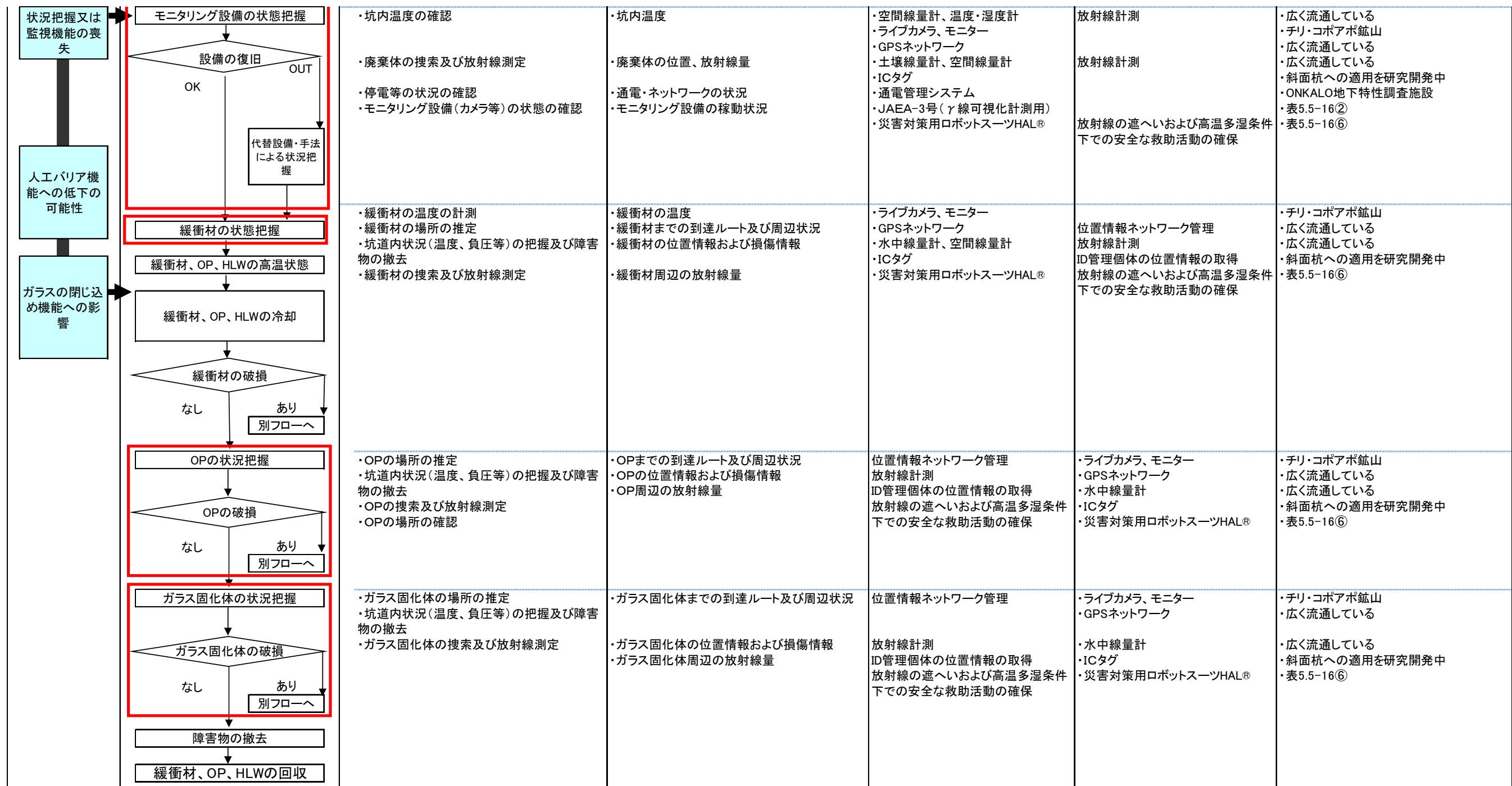


表 5.5-15 地下施設における異常状態・事故時の状況把握・監視手順と適用技術の整理 (検討 No. 15)

検討No15
地下-状況No 6, 7, 8

最終的な状況	廃棄体の回収困難、アクセス坑道内(又はエレベーター内)、処分坑道内の高温状態の継続、状況把握又は監視機能の喪失					
廃棄体の状態	OPの逸脱					
施設の状態	ガス充満、高温状態					
異常状態のシナリオ	<ul style="list-style-type: none"> 自動送気システムが停止し、自然ガスにより坑道内に有毒ガスで充満する。 自動送気システムが停止したことにより、坑道内が高温状態になる。 モニタリング機能が喪失し、状況把握ができない。 衝撃力によりOPは逸脱している。 					
異常状態	具体的な対策方法			状況把握・監視のために必要な機器や技術		
	応急対策	状況把握・監視手順(行為)	必要な情報	機器	技術	
自動送気システムの停止	緊急事態の通報	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度、ガス濃度の確認 負傷者との連絡方法の確認 負傷者数、場所の確認 二次災害発生の可能性の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度、ガス濃度 作業員の位置、負傷状況 	<ul style="list-style-type: none"> 初期情報収集ロボット CO濃度計測システム 位置情報ネットワーク管理 	<ul style="list-style-type: none"> 事故直後の情報収集 GPSネットワーク、無線 	<ul style="list-style-type: none"> 表5.5-16⑦ ONKALO地下特性調査施設 GPSネットワーク、無線
有毒ガスの坑道内充満	作業員退避	<ul style="list-style-type: none"> 救助、救出ルートの確認 負傷者の救助・救出 	<ul style="list-style-type: none"> 可燃性物質等の危険物質等の有無、場所、回避方法 救助、救出ルートの空間線量、温度、湿度及び周辺設備の損傷情報 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋内等のガレキ・粉塵の排除 放射線計測 要救助者の收容 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 空間線量計 救出ロボット(ロボキュー) 災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> JAEA-1号(屋内瓦礫除去用) 空間線量計 救出ロボット(ロボキュー) 災害対策用ロボットスーツHAL®
廃棄体の回収困難	負傷者の救助、救出	<ul style="list-style-type: none"> 坑道の水没状況の確認 屋外における放射線測定箇所の確認 放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道の水没箇所、破損箇所、度合い 天候、風速など 空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 水圧モニタリング 気象観測 放射線計測 	<ul style="list-style-type: none"> 坑内水圧の常時計測システム 風向・風速計、雨量計 空間線量計 	<ul style="list-style-type: none"> Cigar Lake 鉱山 気象データ 広く流通している
	屋外の放射線量・放射性物質計測	<ul style="list-style-type: none"> 坑道内の放射線量・放射性物質の計測 坑道内への放射線測定箇所の確認 放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度 坑道の破損箇所、度合い 空間線量 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道壁面圧力の常時計測システム 空間線量計、温度・湿度計 災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 表5.5-16① 表5.5-16⑧
	屋外への放射性物質の拡散	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度の確認 停電等の状況の確認 作業員、オペレーターの確認 自動送気システムの状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度 通電・ネットワークの状況 作業員やオペレーターの人数、位置 設備の破損等状況 	<ul style="list-style-type: none"> 空間線量計、温度・湿度計 通電管理システム GPSネットワーク 災害対策用ロボットスーツHAL® 通電管理システム 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 位置情報ネットワーク管理 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ONKALO地下特性調査施設 広く流通している 表5.5-16⑥
	坑道内の放射線量・放射性物質の計測	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度の確認 停電等の状況の確認 作業員、オペレーターの確認 自動送気システムの状況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 坑内温度 通電・ネットワークの状況 作業員やオペレーターの人数、位置 設備の破損等状況 	<ul style="list-style-type: none"> 空間線量計、温度・湿度計 ライブカメラ、モニター GPSネットワーク 土壌線量計、空間線量計 ICタグ 通電管理システム JAEA-3号(γ線可視化計測用) 災害対策用ロボットスーツHAL® 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 放射線の遮へいおよび高温多湿条件下での安全な救助活動の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ONKALO地下特性調査施設 広く流通している 表5.5-16② 表5.5-16⑥
	坑道内への放射線測定箇所	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材、OP、ガラス固化体の温度の計測 緩衝材、OP、ガラス固化体の場所の推定 坑道内状況(温度、負圧等)の把握及び障害物の撤去 緩衝材、OP、ガラス固化体の搜索及び放射線測定 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材、OP、ガラス固化体の温度 緩衝材、OP、ガラス固化体までの到達ルート及び周辺状況 緩衝材、OP、ガラス固化体の位置情報および損傷情報 緩衝材、OP、ガラス固化体周辺の放射線量 	<ul style="list-style-type: none"> ライブカメラ、モニター GPSネットワーク 空間線量計 ICタグ 防災モニタリングロボット 高所調査用ロボット 試料等情報収集ロボット 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線計測 位置情報ネットワーク管理 放射線計測 ID管理個体の位置情報の取得 視覚不良下での放射線測定 高放射線下の狭い場所の現地調査・状況把握 試料を収集し汚染情報を収集 	<ul style="list-style-type: none"> チリ・コボアボ鉱山 広く流通している 広く流通している 斜面杭への適用を研究開発中 ONKALO地下特性調査施設 表5.5-16⑨ 表5.5-16⑩ 表5.5-16⑪ 表5.5-16⑫ 表5.5-16⑬
	自動送気システムの状態把握	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材、OP、HLWの破損 緩衝材、OP、HLWの回収 	<ul style="list-style-type: none"> 緩衝材、OP、HLWの破損 緩衝材、OP、HLWの回収 			
	設備の復旧					
	モニタリング設備の状態把握					
	緩衝材、OP、HLWの状態把握					
	緩衝材、OP、HLWの破損					
	緩衝材、OP、HLWの回収					
アクセス坑道、処分坑内高温状態の継続						
状況把握又は監視機能の喪失						

5.6 まとめと今後の課題

5.6.1 まとめ

本章では、平成24年度に検討・設定した地層処分システムで考え得る多様な異常状態や事故について、「状況把握・監視」の観点から見直し・整理するとともに、それぞれの異常状態や事故状況を速やかに把握・監視するために必要な技術や機器に関する現況の技術開発情報等を収集・整理した。

平成24年度の検討においては、大規模な自然災害を起因事象として地層処分施設で考え得る異常状態や事故を対象に、15枚の対策シートを作成して応急対策、恒久対策、及び対策のための試験・解析を検討・抽出した。今年度は、まずこれら15枚の対策シートについて状況把握・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、それぞれの当該欄に検討結果を記述した。したがって、状況把握・監視手順についても15枚の整理シートを作成した。

次に、状況把握・監視に必要な技術の調査を行った。地層処分施設における異常状態や事故では放射性物質の拡散や放射線量の増加を伴う可能性が考えられ、このような放射線影響を伴う緊急時の状況を把握・監視する技術や機器には、放射線環境下への適用性が求められる。そこで、福島第一原子力発電所事故時の対応と放射線環境下に適用できる技術を調査した。また、地層処分施設には大深度地下施設が含まれることから、異常状態や事故時の状況把握・監視技術には大深度地下環境への適用性も求められる。そこで、大深度地下における事故事例とその時の対応、及び大深度地下の環境モニタリング技術等を調査した。

さらに、上述の状況把握・監視手順に係る15枚の整理シートに、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結果を加えて整理した。具体的には、状況把握・監視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、当該欄に上記の2通りの技術調査結果を記述して取りまとめた。

以上のように、本章では、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。

5.6.2 今後の課題

福島第一原子力発電所事故を契機に、放射線環境下に適用できる無人化（ロボット）技術に関する研究開発が各所で進められており、それらの成果は地層処分施設の異常状態や事故時の状況把握・監視に活用できるものと考えられる。今後は、それらの研究開発動向を注視し、成果がまとまった時点で地層処分施設の緊急事態への適用性等を検討する必要があると考えられる。

現在、開発が進められている無人化（ロボット）技術は、出来るだけ多様な状況に対応できるように工夫がなされているものと考えられる。しかし、実際の事故状況はより複雑であり、開発段階で適用範囲が広がるように工夫されていても、種々の制約によって実際の事故時には活躍

できなかったことは過去の災害事例等でも多く見られる。

このように、異常状態や事故が発生した事後に投入する技術や機器による状況把握・監視には制約も多いと考えられる。コピアが鉱山の事故事例にみられるように、大深度地下の事故で落盤等により地下へのアクセスが絶たれた場合、ボーリング等による方法でしか地下との連絡が取れないようでは、速やかな状況把握・監視という意味では心もとない。

このような事後対応の難しさを考えると、平常時のモニタリング技術を緊急時に如何に活用できるようにするかが重要と考えられる。シガーレイク鉱山の異常出水事故時に、平常時から環境モニタリングの一環で水量を管理してことでいち早く状況を確認できたことなどは良い例である。地層処分分野では、「モニタリング関連技術」について従前から研究開発が続けられており、種々の技術が開発提示されている。これらの技術は、異常状態や事故時の状況把握を目的としたものではないが、今後は、緊急時の状況把握・監視も意識し、種々の外力に対する頑健性を備えた技術として改良・改善することも必要と考えられる。

異常状態や事故への頑健性を備えた平常時のモニタリング技術を緊急時の状況把握・監視の基本技術と位置付け、現在研究開発が進められている種々の無人化（ロボット）技術などは、平常時のシステムが適用できない場合などに適用する技術と位置付けることが、今後の状況把握・監視技術の開発の進め方として妥当と考えられる。

参考文献

- [1] 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、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
- [2] 東京電力福島第一原子力発電所における事故調査・検証委員会「最終報告」
- [3] 福島原発事故独立検証委員会「調査・検証報告書」
- [4] 国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書 (第 1 報、第 2 報)
- [5] 文部科学省「放射能測定法シリーズ」<http://www.jcac.or.jp/series.html> (財団法人日本分析センター ホームページ)
- [6] 一般社団法人 日本電気計測器工業会 JEMIMA, <http://www.jemima.or.jp/index.html>
- [7] Mining in Chile, Engineering and Mining Journal, March 2012, pp50-82
- [8] Leading the Rescue of the Miners in Chile, University of Pennsylvania, May 2011, pp.12-15
- [9] Cigar Lake Project, Northern Saskatchewan Canada, National Instrument 43-101 Technical Report, Cameco Corporation, March 30, 2007, pp.49-61
- [10] Cigar Lake Project, Mine Flood Incident Cigar Lake Uranium Mine October 22, 2006. Cameco's Responses to the TapRoot® Investigation Report & TapRoot® Investigation Report April, 2007, May 1, 2007, pp.8-9, pp.15-23, pp.28-32
- [11] Mine web uncompromising independence, Water inflows halt Cameco's Cigar Lake uranium project yet again, Posted Wednesday, 13 Aug 2008
- [12] Cigar Lake Project, Water Inflow Management Project, Project Description, Cameco Co., December 2008, 66p
- [13] Posiva 2003-05, Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of ONKALO, Posiva Oy, December 2003, 92p
- [14] Working Report 2013-17, Design of the Disposal Facility 2012, Posiva Oy, November 2013, 190p
- [15] 平成 21 年度 (財) 港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書、IC タグ、センサーネットワーク、PDA を用いた点検モニタリングデータの維持管理への高度利用に関する研究、平成 23 年 4 月 28 日、大阪大学 矢吹信喜

第6章 平成25年度のまとめと今後の方針

6.1 はじめに

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

平成25年度は下記(1)～(4)について調査・検討を行った。

- (1) 5年間の研究計画の立案
- (2) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討
- (3) 人工バリアの限界性能等の調査・試験
- (4) 状況把握・監視技術に係る調査・検討

本章では、上記の各実施項目についての検討成果と今後の方針について述べる。

6.2 平成25年度のまとめ

6.2.1 5年間の研究計画の立案のまとめ

本開発は東北地方太平洋沖地震を契機に、平成24年度に研究開発に着手したものであり、平成24年度は平成25年度以降に取り組む技術開発課題の選定と年度展開の提示を最終的な目的として研究開発を行った。このような経緯を勘案し、まず、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係わる今後5年間の研究計画を示した。すなわち、「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(図2.1.3-1)。

一方、本開発が属する「処分システム工学確証技術開発」は今年度を初年度とする新規事業であること、及び本開発のテーマ名が変わり検討対象が「自然災害全般」に渡ることや、「操業期間中の安全対策」であることなどが明記されたことを考慮し、新たな視点から操業安全の検討を行った。すなわち、「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つの視点から地層処分事業の操業安全を検討し、それらを通して平成24年度成果として選定した技術開発課題の妥当性や、新たな技術開発課題の抽出等について考察した。その結果、前者の視点による検討から、「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、後者の視点による検討から、「地層処分事業の防災計画に係る調査・検討」を本開発の新たな課題として抽出した。なお、「防災計画を策定し、自然災害や事故等の予防と対応に備える」ことは、本開発において最終的に求める目標であり、本開発の基幹になり得る検討課題と考えられる。

最終的には、平成24年度成果に基づき選定した3つの技術開発課題に、上記の防災計画に係る課題を加えた4つの実施内容についての5年間の研究計画と各年度の成果目標を示した(表2.3-1)。

6.2.2 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討のまとめ

本課題については、今年度から地下の処分パネルを対象に火災事象等に対する安全確保を考慮した施設計画技術のための検討項目の抽出や、解析的検討手法の適用性等について調査・検討に着手した。今年度は、以下の3項目について調査・検討を行った。

- (1) 海外の地層処分施設計画技術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
- (2) 気流解析と避難シミュレーション解析の条件設定
- (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

それぞれの実施項目に関するまとめは以下の通りである。

(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については、国内では地層処分場の具体的な計画がないため、海外の地層処分施設計画等に係る文献調査を行った。調査対象国はスウェーデン(実施主体:SKB社)、フィンランド(実施主体:Posiva社)、フランス(実施主体:ANDRA)、アメリカ(Yucca Mountain計画)とした。その結果、フランス(ANDRA)において、火災時の煙の流れ方などに関する解析的検討を行っており、「パネルの運用方法」、「通常時及び火災時の坑道内の換気」、「火災のシナリオと規模」、「火災時の煙の流れ方と風量」、「強制換気までの時間や作業員の避難の可能性」などが本課題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、地層処分施設と類似した既存施設における火災に対する安全対策の文献調査を行った。調査対象は「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」とした。

「鉱山、トンネルにおける建設中・供用中の安全対策」に係る調査の結果、本課題における解析的検討の条件設定にあたっては、法令で求められている事項を具備することが必要最低限ではあるが、安全を確保する対象(公衆安全と労働安全)により、適用する法令や適用可能となる技術が異なると考えられ、解析目的や解析対象を明確にした上で、災害防止と拡大防止に向けた適用技術を設定していくことが必要と判断された。特に、地層処分場の地下施設との類似性が高い鉱山の保安に係る鉱山保安法の安全要件や安全対策技術は本課題に反映すべき事項が多いと考えられる。この法令に基づいて現在操業している鉱山の操業安全に関する調査を行い、そこから得られる知見を本課題の解析条件の設定やパラメータ解析(安全確保に有効な項目の比較検討など)に反映することが重要と考えられる。

また、「原子力関連施設における安全対策」に係る調査の結果、原子力関連施設の火災・爆発事象については、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ことが分かった。地層処分施設においても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と考えられるが、それらを地下施設の火災安全に係る検討の解析条件として与えるためには、基本的な設計を行って設定することが妥当と判断された。

(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(煙、有毒ガス、熱気などの火災影響の拡

散状況の把握を目的とする)と避難シミュレーション解析(避難経路や避難速度の把握を目的とする)に基づいて検討することとした。ここでは、これらの解析の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(処分孔縦置き定置方式)」、「処分パネルの形状と配置(処分パネル6枚、軟岩系岩盤を想定した形状・配置)」、「処分パネルの運用方法(建設・定置・埋戻しの各作業は独立したパネルで実施)」、「処分パネルや坑道の形状・寸法(処分孔縦置き定置方式、軟岩系岩盤を想定)」を設定した。

気流解析条件については、「地下施設における風速(平常時:0.3~1.5m/s、強制通気時2.0~7.5m/s)」、「地下施設における風況場(操業用連絡坑道による入気・排気)」、「初期の坑内温度と圧力(深度500m坑内温度30℃、圧力1063.25hPa)」、「作業員数と配置(建設及び埋戻しパネルそれぞれの主要坑道に100人ずつ配置)」、「火災曲線(ANDRA社の検討を参考に、CETu標準火災曲線を採用)」、「火災発生場所(地下の作業員の避難がより困難になる場所を設定)」、「数値解析手法(3次元気流解析コード:VENTMINE)」を設定した。

避難シミュレーション解析については、「避難速度(時速5.0km)」、「避難人数(200人、建設パネル、埋戻しパネルの適当な箇所数10人ずつ配置)」、「避難開始時間(火災発生5分後から避難開始)」、「避難開始位置(建設パネル、埋戻しパネルの適当な箇所を設定)」を設定した。

気流解析や避難シミュレーション解析は、将来、具体的に地層処分施設を計画・設計するにあたり、火災事象等に対する操業安全を確保・向上するために有効な項目(施設構造や設備、施設の運用方法など)について、確認するあるいは比較検討するための手段・ツールになり得ると考えている。上述の条件設定のもと、次年度以降、地層処分場の地下施設をモデル化した解析メッシュを作成し、気流解析及び避難シミュレーション解析を実施して、火災事象等に対する操業安全を検討するための手段・ツールとしての有用性を確認・提示する。さらに、これらの手段・ツールを活用して、火災事象等に対する安全確保を考慮した施設計画のための着目点や検討項目を抽出する計画である。

(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。気流解析及び避難シミュレーションの事前解析結果と今後の課題は以下の通りである。

① 気流解析の事前解析結果と今後の課題

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(処分パネル内の各所の風速を平常時は0.3m/s~1.5m/s、強制時は2.0m/s~7.5m/sに固定する手法)で表現することができた。また、火災発生後、坑道内温度及び一酸化炭素濃度それぞれについて設定した閾値を超える範囲が徐々に広がっていく様子などを把握することができ、火災時の熱や煙の拡散状況を表現することができると考えられる。

さらに、風速の違いによる火災時の熱や煙の拡散状況の違いを解析的に表現することができたことから、気流解析を行うことで火災時の気流制御対策の是非や効果などを検討できること、及び解析手法として3次元解析を用いることで、熱や煙の空間的拡散状況を把握することが可能となり、火災事象等に対する種々の安全対策の効果をより詳細に比較検討する場合などに有用であ

ると考えられることが分かった。

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」などの課題が抽出された。

②避難シミュレーション解析の事前解析結果と今後の課題

気流解析の熱や煙の拡散状況に係る解析結果を反映した避難シミュレーションが可能であり、火災状況別の最善の避難対策、計画の検討に有用であることが分かった。また、避難の状況を、避難完了率などにより定量的に分析・評価することが可能であり、災害に対する各対策効果の定量的評価などに有用であること、及び避難する上で問題が生じる箇所などについて、3D 図化して視覚的に確認することが可能であることが分かった。これらのことから、地層処分場の地下施設における火災を対象とした避難計画の検討等において、避難シミュレーションを用いた解析手法は有用な検討手段になり得るものと考えられる。

一方で、今後より詳細な分析・評価を行うためには、「避難者属性の変化による避難の検証」、「停車車両など狭隘部や支障物が存在する条件での避難の検証」、「避難経路などの違いによる避難の検証」などが必要と判断された。

6.2.3 人工バリアの限界性能等の調査・試験のまとめ

地層処分事業操業中の異常状態や事故の影響を緩和するためには、その時の人工バリアの状況を適格に評価し、人工バリアの状況に応じたより適切な対策を施す必要がある。このような観点から、人工バリアの限界性能等の調査・試験として、平成25年度は以下の3項目について検討を行った。

- (1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討
- (2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握
- (3) 津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食特性に関する調査

それぞれの実施項目に関するまとめと今後の課題は以下の通りである。

(1) 人工バリアの熱応力解析による火災影響の検討

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。

燃焼解析では、室内の発熱量やガス温度・酸素濃度の経時変化などから、数分オーダーで火災が消炎することが推定された。これは、地下の閉鎖空間の限られた量の空気（酸素）が消費され、窒息消火が生じることによると判断された。この時の室内のガスの最高温度は、廃棄体周囲の空間で 800℃程度、廃棄体真上の空間で 700℃程度であった。

ガラス固化体単体の状態を対象とした伝熱解析の結果、ガラス固化体キャニスタの最高温度は 265.4℃、ガラスの最高温度は 157.7℃であった。ガラス固化体のガラスの平均転移温度は 500℃程度であることを勘案すると、本検討で設定した火災シナリオ（津波等により非常用発電機用の

燃料タンクが押し流されて建屋に衝突⇒タンクの中のディーゼル燃料が地下のオーバーパック収納・検査室に流入⇒流入したディーゼルは台車走行用の窪みに溜まる⇒何らかの原因でディーゼルに着火してプールファイヤが発生。廃棄体は直立で台車上に積載、また、火災発生と同時に安全ダンパが作動して換気は停止)においては、火災がガラス固化体の品質に及ぼす影響は小さいと判断された。また、熱応力の最大値は150~170MPであり、ステンレスの引張強度に対して十分に小さく、破損の危険性が小さいと判断した。

一方、ガラス固化体がオーバーパックに収納された状態を対象とした解析では、ガラス固化体の温度変化は極めて僅かであり、オーバーパックによる火災影響の緩衝効果が確認できた。また、本検討の火災シナリオによる入熱がオーバーパックの応力に及ぼす影響は軽微であり、塑性ひずみに関しても初期状態から変化が無いことが分かった。

以上より、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が分かった。

ただし、上記の結果は今回設定した一つの火災シナリオについてのものであることに留意する必要がある。火災による災害の規模は多くの要因に左右される。一例として、本検討では、消防法に準拠して火災中は換気システムが停止していると仮定したが、一方で、放射性物質の閉じ込めの観点からは火災時においても換気機能の維持が求められることも考えられる。火災中の換気システムの作動の有無によって火災状況は大きく変わり、ガラス固化体やオーバーパックにとってさらに厳しい加熱条件が生じることも考えられる。今後、具体的に地層処分施設や設備が計画・設計された場合、その具体的な条件のもとで種々の要因を考慮した火災シナリオ（想定し得るシナリオにするべきと考える）を設定し、ガラス固化体やオーバーパックに対する影響を検討・把握する必要があると考えられる。

(2) 緩衝材の加熱試験による高温時熱特性の把握

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。しかし、緩衝材については、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、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。また、熱伝導性は、緩衝材やベントナイトペレット中の水分の影響を大きく受けることになることが確認された。

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（核燃料サイクル開発機構、1999）と整合性がみられたこと、また、2通りの試験方法で得られた高温時（試験温度500℃、1000℃）熱特性値が同程度であったことから、本試験結果は妥当と判断された。したがって、次年度以降に実施する緩衝材を介した火災影響の解析的検討においては、本試験で得られた熱特性値を使用することができると考えられる。

(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

地層処分事業操業中に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、厳しい海水環境下から比較的緩やかな腐食環境である海洋性湿潤大気環境まで、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環境がどのようになるかの知見や、水の放射性分解による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が抽出された。

以上より、今後、津波被害によって海水や津波土砂に半浸漬したガラス固化体キャニスタ表面と大気との温度関係などを、種々の被災ケースごとに温度解析などを行って推定し、SCC などが生起する腐食環境の成立性を評価する必要があると考えられる。

また、放射線分解による酸化性の加速の評価も必要で、例えば、一定量の海塩(外洋に面した海岸での代表的な海塩付着量である $1\text{g}/\text{m}^2[\text{NaCl}]$)を付与した定荷重、もしくは定ひずみ曲げ試験片を高温・高湿槽内に設置し、さらに高温・高湿槽内に低濃度のオゾンガスを注入することによって高酸化性の加速試験を実施し、SCC 感受性の上昇の有無を評価することが必要と考えられる。

6.2.4 状況把握・監視技術に係る調査・検討のまとめ

地層処分施設は多様な施設・設備から成り、想定される異常状態や事故もまた多様である。このような異常状態や事故の影響を緩和し被害を低減するためには、速やかな状況把握・監視が必須と言える。

平成24年度の検討においては、大規模な自然災害を起因事象として地層処分施設で考え得る異常状態や事故を対象に、15枚の対策シートを作成して応急対策、恒久対策、及び対策のための試験・解析を検討・抽出した。今年度は、まずこれら15枚の対策シートについて状況把握・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、それぞれの当該欄に検討結果を記述した。したがって、状況把握・監視手順についても15枚の整理シートを作成した。

次に、状況把握・監視に必要な技術の調査を行った。地層処分施設における異常状態や事故では放射性物質の拡散や放射線量の増加を伴う可能性が考えられ、このような放射線影響を伴う緊急時の状況を把握・監視する技術や機器には、放射線環境下への適用性が求められる。そこで、福島第一原子力発電所事故時の対応と放射線環境下に適用できる技術を調査した。また、地層処分施設には大深度地下施設が含まれることから、異常状態や事故時の状況把握・監視技術には大深度地下環境への適用性も求められる。そこで、大深度地下における事象事例とその時の対応、及び大深度地下の環境モニタリング技術等を調査した。

さらに、上述の状況把握・監視手順に係る15枚の整理シートに、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結果を加えて整理した。具体的には、状況把握・監視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、当該欄に上記の2通りの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。

なお、上記の整理シートの「適用できる技術」の欄には、既存技術や現在研究開発が進められている技術を示したが、それらは主に緊急事態が発生した「事後に投入」するイメージの技術が多い。しかし、実際に緊急事態が発生した場合の状況は極めて複雑な場合が多いと考えられ、事後投入の技術では種々の制約によって実際の事故時には活躍できないことも予測される。

このような事後対応の難しさを考え、今後は、異常状態や事故への頑健性を備えた平常時のモニタリング技術を緊急時の状況把握・監視の基本技術と位置付け、現在研究開発が進められている種々の無人化（ロボット）技術などは、平常時のシステムが適用できない場合などに適用する技術と位置付けることが、状況把握・監視技術の開発の進め方として妥当と判断された。

6.2.5 今後の方針

「処分システム工学確証技術開発」は平成25年度を初年度とし5年程度の期間で実施する事業である。このように比較的長い期間に渡る研究開発では、研究開発期間全体を俯瞰した計画に基づき業務を実施し、各年度に必要な成果を計画的に積み上げていかないと最終的に目標とする成果が得られないと考えられる。このため、本テーマについても今年度に5年間の研究計画を立案しており（表 2.3-1）、今後は基本的にはこれに則って研究開発を進めていく必要がある。以下に、5年計画に基づく平成26年度の実施内容（案）を示す。

(1) 操業安全を考慮した施設計画技術に係る調査・検討

本課題は、地層処分事業の操業安全を確保するために必要な技術的要件や留意点などを調査・検討し、将来、具体的に施設を計画・設計する際の「根拠」、「着目点」などを整備するものである。併せて、操業安全の検討手段・ツールの整備に向けた調査・検討を行う。

平成26年度は、地下の処分パネル及び施設全体を対象に、以下2項目について調査・検討を行う。なお、下記②の実施項目が、6.2.1で述べた「地層処分事業の防災計画に係る調査・検討」の取り掛かりになる課題である。

①平成25年度に実施した事前解析結果等を踏まえ、地下の処分パネルにおける火災事象等を対象に、操業安全の検討手段・ツールとしての、気流解析や避難シミュレーション解析などの解析的手法の適用性等を検討する。具体的な実施内容（案）は以下の通りである。

- ・気流解析等の流れ解析に関する既往の数値解析技術の整理及びその解の信頼性の検討
- ・解析モデルの最適化を図るための基礎的検討
- ・処分パネルの解析モデルによる通気の確認
- ・気流解析や避難シミュレーション解析などの解析的手法の適用性の確認

②大規模な自然災害に対する、地上施設を含めた地層処分施設全体の操業安全を確保する観点からの、技術的要件や技術的論拠の検討・整理を行う。平成26年度は、法令等に基づく防

災対応の現状の調査・整理に着手する。

(2) 人工バリアの限界性能等に係る調査・試験

本課題は、異常状態や事故が人工バリアに及ぼす影響を調査・検討し、異常状態や事故発生時の的確な状況評価や影響緩和対策の選定等に資する知見・データを整備するものである。平成26年度は以下3項目について調査・検討を行う。

①緩衝材を介した火災影響について解析的な検討を行い、ガラス固化体やオーバーパックに対する緩衝材の火災影響緩和効果等を把握する。具体的な実施内容(案)は以下の通りである。

- ・緩衝材を組み込んだ火災評価対象として考えられる火災シナリオの検討
- ・評価事象及び評価対象項目に対して適切な解析手法の選定
- ・火災シナリオを考慮した解析条件の検討・設定
- ・物性値の設定(緩衝材の高温時熱特定地は平成25年度成果にもとづいて設定)
- ・燃焼解析モデルを含む解析モデルの検討・作成
- ・燃焼解析及び伝熱・応力解析の実施と評価

②火災による高温履歴を受けた人工バリア材料の力学的性質に関する検討に着手する。対象とする人工バリア材料は、緩衝材及びガラス固化体のキャニスタ材料を考えている。

③津波被害を想定したガラス固化体キャニスタの腐食環境条件に係る検討に着手する。具体的な実施内容(案)は以下の通りである。

- ・海水に半浸漬したガラス固化体キャニスタの腐食環境の成立性に関する解析的検討(温度解析等によるガラス固化体キャニスタ表面の温度・湿度や塩化物濃度の把握、など)
- ・放射線分解による酸化性加速評価に向けた試験計画等の検討

(3) 状況把握・監視技術に係る調査・検討

本課題は、地層処分施設で考え得る多様な異常状態や事故の影響緩和と被害低減に向けて、速やかに状況を把握・監視するための手順を整理するとともに、必要な技術を調査・整備するものである。平成25年度は、様々な異常状態・事故ごとに状況把握手順とその時に必要な情報を整理した。また、情報を得るための具体的技術の現況や研究開発状況の調査に着手した。

平成26年度以降は、上記の技術調査を継続して技術の現況を把握・整理し、今後の研究開発要素の有無や地層処分施設への適用性の検討が必要と考えている。一方で、本課題については、「処分システム工学確証技術開発」のうちの別件の研究開発テーマである「モニタリング関連技術の整備」と密接に関連している。当該テーマでは、平成26年度の実施内容の一つとして「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発との連携による操業期間中の安全性に関するモニタリングの検討」を計画している。このような連携は、研究開発目標の確実な達成の面からも、また事業としての統合性の面からも重要と考えられる。

そこで、本課題については、モニタリング関連技術の整備のテーマの中で継続するものとし、密接な連携のもと、本課題に係る平成25年度までの成果を平成26年度以降の研究開発に反映していくことが適切と判断される。

【参考資料①】

リスクマネジメントとは

(1) リスクマネジメントの歴史[7]

リスクマネジメントとは、何らかの原因により「起こりうる不確実性（リスク）」を管理する（マネジメント）ことを指す。以降に、リスクマネジメントの形成と発展を簡単に示す。

① ‘災い’の低減[5]、[6]

古来より人類は、天災等によるリスクを神の領域として扱い、生贄をささげる、人柱を立てる、などで被害の軽減・回避を図ってきた。科学的根拠や論理性はないものの、これもリスクマネジメントのひとつであり起源である。

② 海上運送とリスクマネジメント – 保険によるリスクの移転 – [9]、[10]

保険制度は、ひとたび遭難すれば大規模な損害を被る「貿易船」への対策として、14世紀ごろから開発・発展してきた（保険によるリスク移転）。現在では様々な保険制度が活用され、個人・企業問わずリスク移転が行われているが、1666年のロンドン大火を契機に火災保険が出来るまでは海上保険が唯一の保険であった。

③ 商取引とリスクマネジメント – 商品受取りと支払期限（猶予） – [7]、[9]

1830年代にイギリスで世界初となる信用調査機関が設立された。これは、商品の引渡し時には代金を支払わず、一定の期限内に支払う信用取引が発生し、資金の立替え、回収とそれに伴う信用調査の需要が高まったことにより設立されたものである。商取引における互いの信頼関係が成り立つかどうかを、第三者判断により管理するという手法がリスクマネジメントとして誕生した（与信リスク回避）。

④ 第一次世界大戦とリスクマネジメント – 国を挙げたリスクマネジメント – [7]

第一次世界大戦（1914年～1918年）は、人類史上最初の世界大戦であり、言語・文化が違う国同士の戦いであった。当時、対戦国の情報を傍受するため、また自国の機密情報の流出を避けるため、暗号の解読・傍受装置の開発が世界的に行われた（情報リスクの回避・軽減）。これまでの、商人が利益を守るために行うリスクマネジメントだけでなく、国を挙げた戦略的なリスクマネジメントが重要視されるようになった。

⑤ 自然災害リスクマネジメント[7]、[9]

自然災害に対するリスクマネジメントは、予測・対応が難しくかつ突発的な事象・事故を扱う。人類は、①で自然災害リスクマネジメントを神の領域として扱っていたが、技術の発展に伴い、気象予測や建物の頑健化による事前対策を行うようになった（リスクの低減）。

(2) クライシスマネジメントの事例紹介[11]、[12]

① アメリカ同時多発テロ – リーマンブラザーズの事例 –

2001年9月11日、アメリカ同時多発テロにより世界貿易センタービルが崩壊した。リーマンブラザーズが入居していた世界金融ビルは世界貿易センタービルに隣接しており、建物自体が使用不能となった。多くの企業が業務を再開出来ない状況となったにも関わらず、リーマンブラザーズは48時間で隣のニュージャージー州の施設を購入し、ニューヨーク本社の社員（約6500名）を移動させた。9月17日の証券取引の再開後には、すぐに取引に復帰し損害を最小限に抑えた。なお、その後は臨時のオフィスやホテルを利用しながら限られた人員で重要業務を遂行した。テロによる建物の倒壊は、予測・対策が出来ない上に極めて異常な状態といえる。リーマンブラザーズがこの異常状態に対応できた理由は、どのような状況であっても「重要業務を継続して遂行する」ことを徹底したためである。起因事象の種類や異常状態の度合いに拘らず、「組織の損失を抑えるためには何を行うべきか」を組織が一丸となりシナプスに実行した、クライシスマネジメントの成功事例である。

【参考資料②】

事業継続計画とは

事業継続計画（Business Continuity Plan。以降、BCPと略す）とは、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、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、事前に計画・準備し、継続的にメンテナンスを行うプロセスを指す。最大の特徴は、「重要業務の再開に関連する部分のみ対象とする」ところである。

我が国では、1995年の兵庫県南部地震により、当時国内の多くのシェアを誇っていた神戸市・長田区の「靴の製造業」が衰退し、BCPの必要性が認識され始めた。90年代当時は「計画」を作ることだけに注目が集まっていたものの、2001年のアメリカ同時多発テロ事件を契機に、計画の策定だけでなく「計画を点検・是正していく」という概念が注目され始めた。その後、新潟県や岩手県で、数十年～百年に一度と言われるような大地震が数年で複数回発生し、大企業の関連企業や工場が繰り返し被害を受けた。このとき、主に被害を受けた製造業、IT関連企業に加えて、被災企業を支える側である金融関係機関や復旧活動の中心となる建設業で、ハード対策にソフト対策を融合させた「防災」の重要性が認識され、ソフト防災のひとつとしてBCPは様々な業種に浸透していった。そして、2011年の東北地方太平洋沖地震を経た現在では、リスクマネジメントの一環として、自治体を含めあらゆる組織でBCPが策定・運用されている。

【参考資料③】

救援・救出技術の調査結果

表-1 救援・救出技術の開発・導入事例（経産省（1/3））

開発項目		概要	基本機能・性能	実用イメージ	
① 小型高踏破性遠隔移動装置の開発	①-1 狭隘空間先行調査型移動ロボットの開発	災害時に、人が立ち入り困難な原子炉建屋内や地下施設設備等の保全状態と線量の調査を行える狭隘空間先行調査型移動ロボット「Sakura」を開発	Sakuraは、階段や段差などの不整地の走行性能を損なうことなく小型化している。例えば、原子炉建屋内の地下に通じる階段は、幅が70cm、傾斜角度は42度あり、地上部分より20cm狭く、2度急峻な場所である。この環境に適応するために、低重心設計、前方のサブクローラ先端プーリをステンレスにして、重心位置の適正化をしている。	Sakuraには、長さ300mのケーブルを保有する自動通信ケーブル巻き取り装置が装備されており、ロボットは、安全な場所から遠隔操作可能である。得られた線量データや施設設備の保全状況などは大型モニタにより確認することができる。 期待されるミッション例として以下が想定される。 ①圧力抑制室の保全状況（映像・音） ②高機能移動カメラ「目」として無人化施工建設機械の支援 ③狭隘空間の線量マップ作製	
	①-2 重量計測器搭載型移動ロボット「Tsubaki」の開発	放射線源を特定できるガンマカメラを搭載可能な重量計測器搭載型移動ロボット「Tsubaki」を開発。本ロボットを使用して計測情報を収集することで、建屋内の汚染状況マップを作製することが可能	床面の汚染状況を正確に得るには、カメラを高い位置に固定し、俯瞰視する必要がある。そのため、「Tsubaki」には約90kg近くの重さがあるガンマカメラをリフトアップするパンタグラフ機構と、カメラをパン・チルトする機構が装備している。一方で、ロボットが大きくなると機動性が劣ることになるため、小型化にも配慮している。	原子炉建屋内の床面、壁面、天井、各種装置、配管などすべての資材から放射される線量マップを作製。このマップ情報により、除染可能資材を除去する。また、できない部材は遮蔽することになる。建屋内の除染や遮蔽の施工が終了した後も、ガンマカメラで再調査することにより、人が立ち入ることのできる作業環境を構築することを支援できる。	
	①-3 移動ロボット遠隔自動充電システムの開発	ロボットに触れることなく、バッテリーを充電できる移動ロボット用遠隔自動充電システムを開発	①小型移動ロボットに、自動充電回路と電源ソケットを装備し、遠隔操作で充電ステーションに進入し停止する。 ②自動充電回路は、バッテリーの安全性を確認しつつ、充電電流を制御するように作られている。 ③4～6時間充電を行い、自動的に充電を終了することが可能。	災害対応ロボットには、防水、防塵機能が求められる。このため、バッテリーの交換作業はかなりの時間を要し、例えば、高放射線という状況下では、その間に人は被曝することになる。自動充電ステーションは、人の被曝をゼロにするとともに、充電中のロボットも遮蔽することが可能である。また、原子炉建屋内にステーションが設置されると、ロボットに搭載されている高機能カメラは、定点観測装置として24時間のモニタリングが可能になる。	
	①-4 小型移動ロボット遠隔除染システムの開発	クローラ表面に付着した放射性物質を超音波と気泡により洗い落とすことが可能な小型移動ロボット遠隔除染システムを開発	原子炉建屋内で活動するクローラ型移動ロボットは、クローラの表面に放射性物質が付着し、作業員さんらの被曝とロボットのメンテナンスを著しく困難にしている。本装置では、ロボットのクローラ部分を集中的に「洗う」ことにより除染し、放射性物質に起因する経年劣化を低減する。	ロボットの汚染の大部分は、クローラに付着した放射性物質である。本装置ではロボットが自走して除染槽に入り、ローラー上をゆっくりと空走することにより、一様にクローラ表面を洗浄する。洗浄後、ロボットは自然乾燥させ、メンテナンスや必要なオプション機材の装着などの作業を、安全に行うことが可能となる。	
② 通信技術の開発	災害対応無人化システムにて開発される遠隔操作型移動装置が、長期的・安定的に制御・操作可能となるよう、多重性・多様性を有する無線通信システムを開発	①無線LAN規格に適合する周波数から異なる2種類の周波数（5.2GHz、4.9GHz）で相互バックアップ可能な通信システム。 ②無線通信中継局の運搬・設置・ケーブル接続を無人に行い、電源供給、通信信号の安定的供給が可能。 ③無線通信中継局間のケーブル断線が生じた場合でも無線でバックアップする有線／無線ハイブリッド方式を採用。またバッテリーにより通信環境を維持することが可能。 ④無線通信中継局の故障、中継局間のケーブル断線等の故障事象を管理用コンピュータにてモニタリングが可能。 ⑤ロボット搭載通信機器を1BOX化。	①災害現場において、複数の無線通信中継局の設置、ケーブル接続により、広域の無線通信可能エリアを構築する。 ②中継局の追加設置（無線中継）により、遠隔操作型移動装置の移動エリアの局所的な拡大が可能となる。 ③中継局の故障、接続ケーブルの断線等の発生時には、故障箇所の取替えにてシステムの維持が可能となる。		

表-2 救援・救出技術の開発・導入事例(経産省(2/3))

開発項目	概要	基本機能・性能	実用イメージ	
作業移動機構の開発	③遠隔操作ヒューマンインターフェースの開発	<p>ロボット操作の品質確保とロボット操作員リソースの有効活用のため、共通化した遠隔操作ヒューマンインターフェース(HIF)を開発</p> <p>・基本機能: ①操作方法の共通化 ②複数カメラからの画像やレーザの距離計測値を画像合成で提供 ・特長: ①ゲームパッドによる前後進、旋回、停止操作、カメラ操作方法を統一②前後左右4ヶ所の魚眼カメラの画像合成で、真上からの全周囲俯瞰画像を生成 -停止位置ずれ10cm以下に改善 -計測領域:周囲1m(前後左右) -計測速度:2フレーム/s ③距離センサ情報をカメラ画像に重畳し、障害物までの奥行き距離を表示 -計測領域:周囲30m(前方、左右) -計測速度:30フレーム/s</p>	<p>・全方位俯瞰画像を取得・変換して操作者に距離感と周囲の状況を提供し、周囲の障害物に接触させるリスクを低減し、ガイド表示付きの前方監視カメラを併用することで、移動方向に対する位置決め精度も向上 ・操作ボタン位置等を共通化したHIFを用いることにより、習熟訓練を削減</p>	
	④狭隘部遠隔重量物荷揚／作業台車の開発	<p>原子力発電所災害や過酷事故等、人が近づけない現場を自由に移動し、7個の関節を持つロボットアームで高さ8mまでの高所作業が可能な遠隔作業ロボットを開発</p> <p>寸法: 全長2350[mm] 幅800[mm] 高さ2000[mm] 質量: 4[ton] 移動方式: 4輪駆動4輪操舵方式 走行性能: 50mm段差、15度傾斜走行可能 荷揚げ機構: 5段テレスコピック梯子構造 ロボットアーム: 7関節 可搬質量20[kg] バッテリ: リチウムイオンバッテリー*1 稼働時間: 5時間 操作方式: 無線遠隔操作 *1: 三菱自動車工業のEV(電気自動車)用バッテリー技術を本ロボット用にカスタマイズ。高性能と高信頼性を両立。</p>	<p>4輪駆動4輪操舵方式により、その場旋回や真横への移動が可能。狭い場所での機動性に富み、目的の場所へ容易にアクセスできる。作業時はアウトリガでロボットを固定し、高所での安定した作業を実現。作業用ロボットアームは人の腕と同等な7個の関節を持ち、先端部の専用ツールを交換することにより、複雑かつ多様な作業に対応する。また、モジュール構造を採用しており、必要なモジュールを開発し交換することで、将来の多様なニーズに対応可能。</p>	
	⑤重量物ハンドリング遠隔操作荷揚台車の開発	<p>作業員が立ち入り困難であり、空間が制限された場所まで走行し、遠隔作業装置や重量物(最大約4トン)を最高約30mの高所まで持ち上げ上階フロアに送り込む作業を、遠隔操作で行う台車(スーパーリフタ)を開発</p> <p>・積載重量: 最大約4トン ・荷揚げ高さ: 最高約30m ・外形: 約4mW×約9mL×約4mH(走行時) ・特長: ①遠隔操作が可能 ②約6.5mW×約12mL×約6.5mHの空間内での垂直昇降作業を実現 ③水平レベル調整機能により、傾斜した床面(最大傾斜4度)での使用が可能</p>	<p>・共通ヒューマンインターフェース(HIF)を適用し、移動と作業を遠隔操作で実施 ・プラットフォームに設置した複数のカメラで全方位俯瞰画像を提供し、プラットフォーム上昇時に周囲状況を確認可能 ・回転機構付きプラットフォームにより、搬送物の移送方向を前後左右に設定可能 ・建物との間は、突っ張り機構あるいはアンカー等で固定し、転倒を防止 ・カメラにより着座目標位置を確認して、パワーブリッジを展開。センサにより着座を検出</p>	
計測・作業要素技術の開発	⑥ガンマカメラの開発	<p>災害時に放射線環境化となった施設内等においてホットスポット位置等の確認を可能とする移動台車へ搭載可能な高放射線場対応型ガンマカメラを開発</p> <p>①同プロジェクトで移動ロボット研究所が開発した小型高踏破性遠隔移動装置(Tsubaki)に搭載可能。 ②高放射線環境場(300mSv/h雰囲気)でも使用可能。 ③ガンマカメラの撮影範囲の対象物との距離測定を行い、距離の影響を補正した線量率分布を算出可能。 ④光学カメラ画像に放射線分布情報を重ね合わせた表示とし、放射線分布を可視化することが可能。</p>	<p>①災害現場において、小型高踏破性遠隔移動装置(Tsubaki)に搭載し、放射線環境場での放射線分布情報の採取を遠隔で実施する。また、多角的な視点からの放射線情報の採取が可能となる。 ②遠隔移動装置(Tsubaki)の無線通信機能にて、ガンマカメラの映像、操作信号を伝送し、遠隔操作で情報収集可能となる。 ③災害現場での放射線分布情報を地図情報と重ね合わせることで、線量分布の視覚化が可能となる。</p>	
	⑦-1 汚染状況マッピング技術の開発	<p>環境の3次元形状と、サーモグラフィー及びガンマカメラの計測値を可視化するマッピング技術を開発</p> <p>①レーザスキャナやセンサ(サーモグラフィやガンマカメラ)により収集したデータをオフラインで処理することにより、3次元形状や汚染状況を可視化することが可能。 ②3次元の汚染状況マップはPC画面上でインタラクティブに視点を変更しながら閲覧することが可能。</p>	<p>移動ロボットにレーザスキャナやセンサを搭載し、遠隔操縦で対象環境を走行することにより、情報を収集する。実験室ではサーモグラフィーでの動作を確認している。今後、ガンマカメラを使った検証を進めていく予定である。</p>	

表-3 救援・救出技術の開発・導入事例（経産省（3/3））




開発項目	概要	基本機能・性能	実用イメージ		
計測・作業要素技術の開発	⑦-2 災害対応ロボット操縦訓練シミュレータの開発	災害対応ロボットの操縦練習が可能な災害対応ロボット操縦訓練シミュレータを開発	オープンソースのOpenHRP*1をベースにした、クローラ型レスキューロボットの走行シミュレータで、操縦PCとそのまま接続、模擬操縦が可能。階段昇降、段差走行などの練習が可能。 今後、練習メニューの追加や訓練ガイドブックを充実させて行く予定。 *1:ロボットのソフトウェア開発・シミュレーションのための統合ソフトウェアプラットフォーム。	いきなり実機を用いた操縦練習では、高価な実機を壊す恐れがあるため、シミュレータを活用することにより、事前の操縦訓練が可能。 練習メニューとして、操縦器の操作方法、ロボットの各動作機能の制御方法、ロボット搭載カメラからの画像の見方などがあり、典型的なプラント内走行において基本となる操縦技術をあらかじめ身につけることができ、実機でのトラブルを予防に役立つ。 何回でも繰り返し練習が可能で、その他、実機の開発にも利用できる。	
	⑧水陸両用移動装置の開発	水中構造物からの漏水箇所調査を想定し、漏水箇所把握のためのモニタリングデバイスと、そのモニタリングデバイスを搭載することが可能な水陸両用移動装置を開発	水陸両用移動装置に多様なモニタリングデバイスをコンパクトに実装。 <水中モニタリングデバイス> ①ドップラー流速計 ・広がり角度50°の円錐状領域の平均流速計測 ・流速計測レンジ: ±10m/s ・流速計測精度: ±25mm/s ・流速計測領域: 0.06m~5m ②超音波カメラ ・解像度: 20mm(距離1m) ・計測速度: 約1フレーム/s <水陸両用移動装置> ・幅: 650mm、最小旋回径φ900mm ・走行速度: 0.3m/s(気中)、0.1m/s(水中) ・中性浮力化で水中遊泳も可能	<ul style="list-style-type: none"> ・水陸両用移動装置で構造物の表面に沿って移動しながら、ドップラー流速計で構造物近傍の流速を計測 ・流速が検出される構造物表面に接近し、超音波カメラと水中カメラで当該部の形状を確認。形状不連続部、割れ等の状況により構造物の損傷状況を特定 	<p>水中階段昇降</p> 
災害対策用作業アシストロボットの開発	⑨災害対策用ロボットスーツHAL®の開発	例えば福島第一原発のような放射線や高温多湿な極限環境下において、過酷な復旧作業を行う場合、作業員の安全や健康を確保することが喫緊の課題となっている。 この問題を解決するために、災害対策用ロボットスーツHAL®を開発	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線防護装備 タングステン等の防護装備により作業員のガンマ線被ばく線量を低減。 ・クーリングシステム タイベック内へ冷気を直接送風することにより、作業員の体温上昇を抑え熱中症を未然に防ぐ。 ・バイタルセンサ 作業員の胸に取付けたセンサによりバイタル情報（心拍、体温、加速度）をモニタリング可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線被ばくの低減 放射線被ばく量を抑えながらの復旧・点検作業ができる。 ・熱中症対策 クーリングシステムにより高温多湿な環境下でも作業ができる。 ・作業員の安全管理機能 作業員のバイタルモニタリングにより遠隔からの作業管理ができる。 	

表-4 救援・救出技術の開発・導入事例（東京消防庁）

	機能概要	寸法	実用イメージ
東京消防庁	<p>無人走行放水装備 (デュアルファイター)</p> <p>従来の無人走行放水車の放水機能と障害物除去機能を分割し、それぞれを小型化するとともに、機動性の向上が図られる。 消防隊員が接近困難な災害現場(大規模火災、爆発火災、地震や洪水といった自然災害)に対処する。 無人走行放水車(ドラゴン)は、無線操縦で5,000・/分の放水や泡放射を行い、障害物除去車(セーバー)は、乗員による操縦や無線操縦で障害物を除去する。</p>	<p>全 長 3.0m 全 幅 1.6m 全 高 1.9m 総 質 量 2,500kg 放 水 量 毎分5,000L 放 泡 量 毎分5,000L</p>	
	<p>障害物除去車 (セーバー)</p> <p>障害物除去車(セーバー)には2種類あり、交換式アタッチメント(バケット・ブレイカー・グラブ)を使って障害物を除去するドラグショベルタイプと、バケットにより障害物を除去するホイールローダータイプがある。</p>	<p>ドラグショベルタイプ 全 長 3.8m 全 幅 1.5m 全 高 1.9m 総 質 量 2,200kg</p> <p>ホイールローダータイプ 全 長 3.4m 全 幅 1.4m 全 高 1.8m 総 質 量 2,000kg</p>	  <p style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> ドラグショベルタイプ ホイールローダータイプ </p>
	<p>水中検索装置</p> <p>この水中検索装置は、水難事象において天候、深度、障害物等のため消防隊員が活動困難な場合等に、水(陸)上からの遠隔操作により水難救助者の水中検索を行うものである。 水深約150mまで潜航することができ、マニピュレータによる救助もできる。</p>	<p>全 長 1.20m 全 幅 0.54m 全 高 0.54m 総 質 量 47kg 操作方式 有線150m</p>	
	<p>救出口ロボット (ロボキュー)</p> <p>本救出口ロボットは、モーター駆動のクローラにより無線操縦で走行し、マニピュレータとコンベアにより機体内に要救助者を収容可能なものとしている。 従来の救出口ロボットと比較して、小型軽量化と無線操縦化を図り、災害現場における活動性が向上する。</p>	<p>全長 1,900mm 全幅 1,200mm 全高 1,600mm 総質量 1,500kg 操作方式 無線、有線 動力源 バッテリー モーター</p>	

表-5 救援・救出技術の開発・導入事例（その他の消防局）

	機能概要	寸法	実用イメージ
<p>横浜市安全管理局 (自走式放水砲+救助)</p>	<p>リモートコントロールで放水と人命救助活動などができる無人放水車である。石油コンビナートなどの油脂火災や大規模火災、爆発の危険性のある火災などで、消防隊員が接近困難な災害に出動する。階段の走行も可能で、水や泡を放射する放水砲を装備し、危険物を除去する作業アームも装備されている。走行・放水等の作業は無線遠隔操作であるが、有人による操作も可能である。車両表面には1000度の耐熱塗装が施してある。</p>		
<p>大阪市消防局 自走式放水砲車</p>	<p>この消防用ロボットは主に爆発危険のあるコンビナート火災等で、強い輻射熱を受ける災害現場において、遠隔操作によって消火を行う放水砲車である。駆動はゴムクローラー走行方式で戦車のようなです。専用の大型化学車に積載されており、災害現場到着と同時に耐熱ホースによって、100m先まで走行し即座に放水を行う。超音波センサーによって障害物を検知し、自動停止ができる機能も備えている。</p>		
<p>堺市消防局 自走式放水砲車</p>	<p>石油コンビナート地域における災害に対応する化学車に積載された大容量の自走式放水砲車である。クボタ製のエンジンを搭載し四連ホイールで走行する。有線での遠隔操作で放水活動を行う。</p>		
<p>北九州消防局 レスキューロボット T-52 支援</p>	<p>北九州市と株式会社テムザックが共同で2億円の開発費をかけた最新型のレスキューロボットである。2本の腕は人間の腕と同じくらいに滑らかな動きが出来るので、瓦礫や危険物の除去がスムーズに行う。乗用操作と遠隔操作が可能で、平成19年の新潟県中越沖地震にも出動した。</p>		

【参考資料④】

【鉱業権者が講ずべき措置事例 抜粋】

出典：「経済産業省ホームページ」より

(http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/kouzan_sochijirei.pdf)

鉱業権者が講ずべき措置事例

(平成16・11・19原院第1号)

平成16年11月19日制定

平成19年 3月30日一部改正 (平成19年4月 1日施行)

平成20年 3月19日一部改正 (平成20年3月21日施行)

平成24年 6月 1日一部改正 (平成24年6月 1日施行)

目 次

	頁
第1章 落盤又は崩壊の防止（第3条関係）	1
第2章 出水の防止（第4条関係）	4
第3章 ガスの突出の防止（第5条関係）	7
第4章 ガス又は炭じんの爆発の防止（第6条関係）	9
第5章 自然発火の防止（第7条関係）	16
第6章 坑内火災の防止（第8条関係）	18
第7章 ガスの処理（第9条関係）	22
第8章 粉じんの処理（第10条関係）	23
第9章 捨石、鉱さい又は沈殿物の処理（第11条関係）	30
第10章 機械、器具及び工作物の使用（第12条関係）	33
第11章 火薬類の取扱い（第13条関係）	36
第12章 毒物及び劇物の取扱い（第14条関係）	46
第13章 坑外における火気の取扱い（第15条関係）	48
第14章 通気の確保（第16条関係）	51
第15章 災害時における救護（第17条関係）	53
第16章 鉱業廃棄物の処理（第18条関係）	56
第17章 坑水又は廃水の処理（第19条関係）	59
第18章 鉱煙の処理（第20条関係）	62
第19章 石綿粉じんの処理（第21条関係）	64
第20章 ダイオキシン類の処理（第22条関係）	66
第21章 海洋施設における鉱業廃棄物等の処理（第24条関係）	67
第22章 土地の掘削（第25条関係）	69
第23章 巡視及び点検（第26条関係）	73
別紙1 炭じんについての試料の採取及び分析の方法	77
別紙2 岩粉散布の実績を示す試料を採取すべき箇所、試料の採取の方法 及び時期並びに不燃性物質の量の測定方法	78

第1章 落盤又は崩壊の防止

鉱山保安法施行規則 第3条（落盤又は崩壊）

法第5条第1項及び第6条の規定に基づき、落盤又は崩壊（浮石の落下又は転石を含む。以下同じ。）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 支柱の設置、浮石の除去、先受け又は作業面押えの実施、防護設備の設置その他の落盤又は崩壊を防止するための措置を講ずること。
- 二 露天掘採場においては、前号の規定によるほか、適当な高さ及び奥行きを有するベンチの設置、掘採壁及び残壁の安全な傾斜の保持その他の崩壊を防止するための措置を講ずること。
- 三 落盤若しくは崩壊が発生したとき又はその兆候を認めるときは、立入禁止区域の設定その他の落盤又は崩壊による被害を防止するための措置を講ずること。

1 鉱山保安法施行規則第3条第1号に規定する「落盤又は崩壊を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 坑内

1) 坑内全般に係る措置

- ・浮石を落とすための適当な器具を用いて、安全な方法で作業又は通行等に危険がある浮石を除去する。
- ・天盤及び側壁等の状態に応じた支柱、側壁押さえ、ロックボルトなどを設ける。
- ・保安のため必要があるときは、仮支柱を設ける等応急の措置を講ずる。
- ・折損し又は腐朽した支柱は、速やかに取り替え又は補強を行う。

2) 掘進箇所に係る措置

- ・石炭鉱山において保安のため必要があるときは、先受け及び作業（切羽）面押えを設ける。
- ・金属鉱山等において保安のため必要があるときは、先受けを設ける。

3) 採鉱箇所又は採炭箇所に係る措置

- ・金属鉱山等において保安のため必要があるときは、岩盤等の状況に応じた適切な（大きさ及び配置箇所）鉱柱を設ける。
- ・保安のため必要があるときは、採掘終了箇所に対し、支柱の設置又は充てん等を実施する。
- ・保安のため必要があるときは、岩盤異常の早期発見のため、岩盤の変位又は応力状態の計測を行う。

(2) 坑外

1) 露天掘採場に係る措置

- ・作業に危険を及ぼす表土を安全な方法で除去する。
- ・作業に危険がある浮石を安全な方法で除去する。
- ・保安のため必要があるときは、浮石の落下による危険を防止するための防護施設を設ける。
- ・浮石の落下、転石による危険があるときは、危険箇所の上下での同時作業及び

下部通過を禁止する。

- ・ 鉱山外へ転石による危険があるときは、防護施設の設置、立入禁止区域の設定、見張人の配置又は警標の掲示を行う。

* 「防護施設」とは、転落石防止柵、ネットによる浮石止めなどをいう。

- ・ 採掘終了箇所には、崩壊防止のための覆土又は植栽を行う。

2 鉱山保安法施行規則第3条第2号に規定する「崩壊を防止するための措置」とは、次のとおり。

- ・ 掘採方法は、原則として、ベンチカット方式とする。(各ベンチの高さ、幅、傾斜については、各鉱山の地質状況に応じた安全なものとする。)
- ・ 残壁については、岩盤状況に応じた安全な傾斜(断層、石目、湧水等、岩盤状況に応じた安全な傾斜。)とし、必要に応じ、次による。
 - (1) 適当な間隔に犬走りを設けた多段式とする。
 - (2) 断層、節理、地層の傾斜等の地質構造に適應する。
 - (3) 上部から下部に至るに従い、緩傾斜とする。
 - (4) 土地の形状、表土の状況、湧水等を考慮して隣接地の崩壊を防止するため保全区域を設定する。
 - (5) 壁面の岩盤強度に影響が少ない工法を採用する。
 - (6) 地表水、湧水等を排除する。
 - (7) 頂部の裸地を最小限とする。
- ・ 残壁の異常の早期発見のために、次の点検、観測等を選択して行う。
 - (1) 目視点検(亀裂、湧水、岩盤の緩み等の発見)
 - (2) 定位置からの観測(残壁表面の変位の発見)
 - (3) 調査孔を利用した観測(岩相の把握、ボアホールカメラを利用した亀裂調査等)
 - (4) 変位計測(GPS又は光波測距儀による岩盤変位の把握、伸縮計・岩盤変位計等による岩盤内変位の把握)
 - (5) その他必要な計測及び調査
- ・ 保安のため必要があるときは、残壁の安定解析を行う。

* 残壁の安定解析、施工及び管理等については、「露天掘鉱山における残壁技術解説書(残壁ハンドブック)」(2003年3月(社)資源・素材学会)を参照。

3 鉱山保安法施行規則第3条第3号に規定する「落盤又は崩壊による被害を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 兆候を認めたときの措置

- ・ 兆候が認められた箇所に対して影響を与える作業を制限する。
- ・ 想定される影響範囲内への立入禁止のためのさく囲、警標等を設ける。
- ・ 危険な状態にあることを鉱山労働者へ周知する。
- ・ 鉱山外へ影響を及ぼす可能性がある場合には、周辺住民、自治体へ情報提供する。

- ・残壁において保安のため必要があるときは、崩壊を防止するため盛土工法又は切土工法等を行う。

*「落盤の兆候」とは、一般的には次の現象が考えられるが、過去の事例を十分考慮する。

- (1)浮石が連続するとき。
- (2)山鳴りが発生するとき。

*「崩壊の兆候」とは、一般的には次の現象が考えられるが、過去の事例を十分考慮する。

- (1)落石が連続するとき。
- (2)各種観測の結果、岩盤等が膨張しているとき。
- (3)各種計測の結果、岩盤変位に通常とは異なる変動があったとき。

(2) 発生したときの措置

- ・鉱山労働者に対し緊急連絡又は避難命令する。
- ・崩壊等が発生した箇所に対して影響を与える作業を制限する。
- ・危険区域内への立入禁止のためのさく囲、警標等を設ける。
- ・鉱山外へ影響を及ぼした場合には、周辺住民、自治体へ緊急連絡する。
- ・保安のため必要があるときは、防護施設を設ける。

*「防護施設」とは、転落石があった場合に、その影響範囲を最小限とするために設ける柵、壁などをいう。

第2章 出水の防止

鉱山保安法施行規則 第4条（出水）

法第5条第1項及び第6条の規定に基づき、出水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 海底、河底若しくは湖沼底の地下又は水没し、若しくは水没しているおそれが多い旧坑若しくは水脈に近接している場所において、坑道の掘進その他の掘削及び鉱物の掘採を行うときは、先進ボーリングの実施、坑道へのセメント注入、保護区域（出水による被害を防止するために掘削及び鉱物の掘採を行わない区域をいう。）の設定その他の出水を防止するための措置を講ずること。
- 二 防水えん堤又は排水設備の設置その他の出水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 出水が発生したとき又はその兆候を認めるときは、鉱山労働者の避難その他の出水による被害を防止するための措置を講ずること。

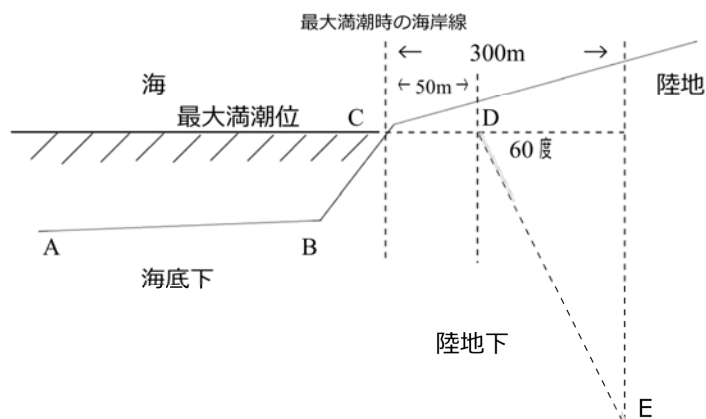
1 鉱山保安法施行規則第4条第1号に規定する「出水を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 全般に係る措置

- ・水没し、又は水没しているおそれが多い旧坑又は水脈に50m以内に近接して掘採するときは、坑道の延長線に沿って、先進ボーリングを実施する。なお、坑道掘進するときは、先進ボーリング孔底から5m以内へ近接しない。
- ・総排水量、主要ポンプ室の排水量及び湧水の状況変化を把握する。
- ・水没している旧坑等からボーリングにより水抜きを行う。

(2) 海底下を掘採する石炭鉱山における措置

* 「海底下」とは、下図（不定尺）におけるA B C D Eの範囲をいう。



- ・掘採予定区域及びその周辺の水深を予め精密に測定する。
- ・海底から炭層に達するまでの地質条件を調査する。
- ・地質条件が不明な区域への坑道掘進には、10m以上の先進ボーリングを坑道の延長線に実施し、ボーリング孔底から5m以内に近接せず、かつ、坑道は採炭面から50m以上先進する。
- ・保安のため必要があるときは、保護区域を設ける。
- ・次の箇所は掘採を禁止する。
 - (1)海底下の第四紀層が30m以上のときは、第三紀層の厚さ10m未満の箇所
 - (2)海底下の第四紀層が10m以上30m未満のときは、第三紀層の厚さ20m未満の箇所
 - (3)海底下の第四紀層が5m以上10m未満のときは、第三紀層の厚さ40m未満の箇所
 - (4)海底下の第四紀層が5m未満のときは、第三紀層の厚さ60m未満の箇所
 - (5)海底下の炭層露頭から当該炭層の傾斜に沿い100m未満の箇所
 - (6)水没し、又は水没しているおそれが多い旧坑から当該炭層に沿い100m未満の箇所
 - (7)前記以外の場合において、水没している旧坑の水位が低い箇所の上部のほか、水没し、又は水没しているおそれが多い旧坑から30m未満の箇所
- ・次の箇所を掘採するときは、石炭坑終了期において、掘採跡全充てん式又は残柱式により掘採する。
 - (1)海底下の第四紀層が30m以上のときは、第三紀層の厚さ10m以上20m未満の箇所
 - (2)海底下の第四紀層が10m以上30m未満のときは、第三紀層の厚さ20m以上40m未満の箇所
 - (3)海底下の第四紀層が5m以上10m未満のときは、第三紀層の厚さ40m以上60m未満の箇所
 - (4)海底下の第四紀層が5m未満のときは、第三紀層の厚さ60m以上100m未満の箇所

2 鉱山保安法施行規則第4条第2号に規定する「出水による被害範囲の拡大を防止するための措置」とは、次のとおり。

- (1) 全般に係る措置

掘採状況等に応じて、実施。

 - ・防水えん堤を設ける。
 - ・排水設備を設ける。
 - ・旧坑を利用した水抜調整坑道を設ける。
 - ・土嚢等の防水材料を準備する。
 - ・坑道へセメント等の地盤凝固剤を注入する。
- (2) 海底下を掘採する石炭鉱山における措置
 - ・出水の危険が多い断層を通過する坑道に対し防水えん堤を設け、セメント注入

又はコンクリート巻等の防水設備を設ける。

- ・出水の危険が多い断層付近を採炭するときは、その両側に各20m以上の炭壁を存置する。
- ・出水により水没するおそれがある箇所には、主要人道及び主要機械器具を設けない。
- ・警報連絡のため坑内作業区域等に直通電話及び作業箇所に坑内誘導無線機等を設ける。
- ・海底下等の深度200m以上であって、立坑によるほか開坑できないときを除き、坑内と坑外とを連絡する通路のひとつは、非常退避用として25度以下の斜坑とする。
- ・掘採は、海底下等の深度200m未満の区域（地質状況等により出水のおそれがない区域を除く。）においては、区画式採炭法により行い、各区画別に遮断できるように扉付防水えん堤を設ける。

3 鉱山保安法施行規則第4条第3号に規定する「出水による被害を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 兆候を認めたときの措置

- ・保安のため必要があるときは、土嚢等の防水材料積み上げによる防水壁を設ける。
- ・さらに危険のあるときは、鉱山労働者に対し緊急連絡又は避難命令する。

* 「出水の兆候」とは、一般的には次の現象が考えられるが、過去の事例を十分考慮する。

- (1)湧水量が増大したとき。
- (2)排水量が増大したとき。
- (3)水質（濁り等）が変化したとき。
- (4)時間の経過に伴い湧水している箇所が移動したとき。

(2) 発生したときの措置

- ・鉱山労働者を退避させる。

第3章 ガスの突出の防止

鉱山保安法施行規則 第5条（ガスの突出）

法第5条第1項及び第6条の規定に基づき、ガスの突出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 坑道の掘進その他の掘削を行うときは、先進ボーリングの実施、ガス抜きの実施、孔口において自噴するガスの圧力及び量の測定その他のガスの突出を防止するための措置を講ずること。
- 二 独立分流方式による通気の採用その他のガスの突出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 ガスの突出が発生したとき又はその兆候を認めるときは、鉱山労働者の退避、送電の停止その他のガスの突出による被害を防止するための措置を講ずること。

1 鉱山保安法施行規則第5条第1号に規定する「ガスの突出を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) ガスの突出による危険発生のおそれが多い区域における措置

- ・坑道掘進するときは、先進ボーリングを行い、その先進ボーリング孔底から常に安全な距離を保持する。
- ・先進ボーリングの方向、本数及び孔長は、地質条件及び可燃性ガスの状況を把握するために必要なものとする。
- ・掘削予定箇所を包蔵されるガスの圧力及び量に応じて、必要なガス抜きを行う。
- ・可燃性ガスの状況を把握するため、先進ボーリング及びガス抜ボーリングの孔口において自噴するガスの圧力、量、その他必要な事項を測定し、その変動に注意する。

* 「ガスの突出による危険発生のおそれが多い区域」とは、次のとおりであるが、過去の事例を十分考慮する。

- (1) 岩石坑道にあつては、炭層（含媒層も含む。ただし、ガスの突出のおそれのない薄層は除く。）又は断層若しくは地層擾乱地帯等に10m以内に接近して掘進する区域
- (2) 沿層坑道にあつては、上下の既掘採によりガスが放散又は去勢されていない区域を掘進するすべての区域
- (3) 掘進前に沿層坑道又は盤下坑道等から先行してガス包蔵量に対して十分ガスが去勢されていない採炭作業場

2 鉱山保安法施行規則第5条第2号に規定する「ガスの突出による被害範囲の拡大を防止するための措置」とは、次のとおり。

- ・ガス突出が発生しても直接、他の作業箇所に対し突出したガスの影響を回避し、鉱山労働者の退避経路を確保するために、通氣的に独立した形である分流方式の通気方式を採用する。

3 鉱山保安法施行規則第5条第3号に規定する「ガスの突出による被害を防止する

ための措置」とは、次のとおり。

- ・着火源となる可能性のある電気工作物に対する送電を停止する。
- ・鉱山労働者を退避させる。

* 「ガス突出の兆候」とは、一般的には次の現象が考えられるが、過去の事例を十分考慮する。

- (1)地層条件の変化が著しく、炭壁返り、微崩落があるとき。
- (2)山鳴りが連続的に発生し、激しく鳴るとき。
- (3)ガス湧出量が急激に増減する場合、又は石炭が急に硬くなるか、軟化するとき。

第4章 ガス又は炭じんの爆発の防止

鉱山保安法施行規則 第6条（ガス又は炭じんの爆発）

法第5条第1項及び第6条の規定に基づき、ガス又は炭じんの爆発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 掘採跡又は不要坑道の充てん又は密閉、可燃性ガス排除のための通気、可燃性ガス自動警報器及び可燃性ガス含有率を測定する装置の設置、炭じん飛散防止のための散水、帯電防止処理を施したものの使用、火気の使用禁止その他のガス又は炭じんの爆発を防止するための措置を講ずること。
- 二 爆発伝播防止施設の設置その他の爆発の伝播を防止するための措置を講ずること。
- 三 可燃性ガス含有率の増加により爆発の危険が生じたときは、直ちに当該区域への送電の停止その他の爆発を防止するための措置を講ずること。
- 四 前号の場合において危険な状態を改めることができないとき又は爆発が発生したときは、鉱山労働者の退避その他の鉱山労働者の危険を回避するための措置を講ずること。

1 鉱山保安法施行規則第6条第1号に規定する「ガス又は炭じんの爆発を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 掘採跡・旧坑道に係る措置

- ・可燃性ガス又は炭じんが多量に存在する掘採跡又は旧坑道は、密閉又は充てんを行う。

* 「炭じん」とは、別紙1により試料を採取し、これを分析したときに、その揮発分が11%を越える炭層（亜炭又は無煙炭（せん石を含む。）の炭層を除く。）から発生する爆発性の炭じんをいう。以下、本章において同じ。

(2) 可燃性ガスに係る措置

- ・通気施設による通気量の確保により可燃性ガスを排除する。

* 「可燃性ガスに係る措置が必要となる坑内の気流中における可燃性ガス含有率」とは、次のとおり。

- (1) 主要分流の排気においては、石炭坑では1.5%を超え、石油坑では1%を超える場合
- (2) 坑内作業場においては、石炭坑及び金属鉱山等では1.5%を超え、石油坑では1%を超える場合
- (3) 坑内通行箇所においては、石炭坑及び金属鉱山等では2%を超え、石油坑では1.5%を超える場合

(3) 局部通気に係る措置

1) 局部扇風機により可燃性ガス排除のために通気を行うときの措置

- ・排気がその入気に引き入れられない位置へ局部扇風機を設け、かつ、車風が起らない通気量を確保する。

- ・ 局部扇風機は、連続的に運転する。
- ・ 風管は、漏風を防止し、その先端は掘採作業面から7m以内とする。
- ・ 停電時においては、当該箇所の電動局部扇風機の開閉器を開く。
- ・ 電動局部扇風機の運転停止後は、運転再開前に可燃性ガスの測定を実施し、危険のないことを確認してから運転を再開する。
- ・ 局部扇風機が運転を停止した後運転を再開したときは、可燃性ガスの測定を実施し、危険のないことを確認した後に当該箇所へ送電し、鉱山労働者を就業させる。

2) 石炭鉱山における措置

- ・ 局部通気のために設ける張出し又は風管の長さは、その先端における通気力で可燃性ガスを運び去る適当な長さとする。

3) 石油坑における措置

- ・ 張出しにより局部通気を行うときの張出しの長さは、最後の目抜きから90m以下とする。
- ・ 主要扇風機の通気力による風管通気を行うときの風管の長さは、300m以下とする。
- ・ 局部扇風機による風管通気を行うときの風管の長さは、500m以下とする。

(4) 可燃性ガス自動警報器に係る措置

- ・ 石炭坑（石炭の探鉱のみを行うもの及び垂炭鉱山を除く。）においては、次により可燃性ガス自動警報器を設ける。
また、当該警報器を可燃性ガスの著しい増加による危険の多い箇所に設ける場合には、その区域又は箇所の可燃性ガス含有率が1.5%を超えたときに、その区域又は箇所に設置された電気工作物（携帯用安全電灯、精密可燃性ガス検定器等の小型の電気機器は除く。）に対する送電を自動的に停止する機能を有するものとする。

* 「送電を自動的に停止する機能」とは、蓄電池式電気機関車において、当該蓄電池式電気機関車を運転する鉱山労働者が送電を直ちに停止できる場合も含まれる。

(1) 設置箇所

- ① 採炭作業場
- ② 掘進作業場（可燃性ガスが湧出するおそれがない岩石掘進作業場を除く。）
- ③ 可燃性ガス含有率が常時1%を超える箇所で電気工作物（微弱電流を使用する電話器等の配線及び精密可燃性ガス検定器等の小型の電気機器及び地中配線を除く。）を設置した箇所
- ④ 次に掲げる箇所で電気工作物を設置した箇所
 - イ 可燃性ガスを希釈するために局部通気施設（エアジェットを含む。）により通気されている箇所
 - ロ 沿層坑道又は次に掲げる岩石坑道で局部的にループ状となってお

り、かつ、調整戸門により通気調整が行われている箇所

(a) 炭層を露出又は炭層に接近している岩石坑道

(b) 可燃性ガスが湧出するおそれがある含煤層、断層、褶曲、採掘跡に遭遇している岩石坑道

⑤ガス突出又は異常湧出のおそれがある掘進作業場又は採炭作業場の排気側及びガス突出又は異常湧出によりその可燃性ガスが逆流するおそれがある入気側に電気工作物を設置した箇所

⑥可燃性ガスが湧出するおそれがあるガス抜孔が存在し、ガス誘導中の箇所（ガス誘導休止中の箇所も含む。）であって、排気側に電気工作物を設置した箇所

⑦可燃性ガスが湧出するおそれがある密閉箇所であって、排気側に電気工作物を設置した箇所

⑧可燃性ガスが湧出するおそれがあるボーリング作業箇所

⑨採炭作業場及び掘進作業場の排気が通過する区域の作業場であって、可燃性ガスによる危険の発生を早期に観測できる適当な箇所

(2)設置位置

①掘進作業場にあつては、次の位置とする。

イ 作業面、採炭作業場にあつては肩部（下向通気の場合は深部（肩部、深部がない場合は作業面））から排気側概ね20m以内の位置

ロ 発破または散水等の作業により機器が損傷するおそれのある場合であつて、排気側概ね20m以内の位置における同等程度の効果が得られる位置

②電気工作物を設置した箇所については、その風上側とする。ただし、可燃性ガスの突出または著しい増加によりその可燃性ガスが逆流するおそれのある箇所については、風下側にも設ける。

(3)取付方法

原則として、梁下又は天盤より0.3mの位置とする。

(4)警報の伝達方法

ガス自動警報器が作動したとき、それを直ちに誘導無線その他の方法により関係者に伝達できる体制とする。

(5)監視のための措置

- ・石炭坑（亜炭鉱山を除く。）においては、主要分流排気坑道の気流中、ガスの突出による危険発生のおそれが多い区域その他必要な箇所において可燃性ガスの含有率を継続して測定する装置を設置し、坑外において、これらの結果を集中して監視する集中監視室を設ける。

* 「その他必要な箇所」とは、次のとおりであるが、過去の事例を十分考慮する。

(1)気流中の可燃性ガス含有率が常時1%を超える掘採作業場

(2)気流中の可燃性ガス含有率が常時は1%以下であるが、可燃性ガスの著しい増加のおそれがある掘採作業場

(3)ガス突出による危険発生のおそれが多い区域

(4)可燃性ガス含有率が常時は1%を超える箇所であつて電気工作物（電話

機並びに小型の電気機器及び地下配線を除く。)を設置した箇所

(6) 掘採作業場に係る措置

- 1) 坑道の掘進その他の掘削を行う際、可燃性ガスの著しい増加による危険があるときの措置
 - ・先進ボーリングを行う。
 - ・掘削予定箇所に包蔵されるガスの圧力及び量に応じて、必要なガス抜きを行う。
- 2) その他の措置
 - ・石炭坑(亜炭鉱山を除く。)における長壁式採炭作業場又は掘採跡の排気は、原則として、他の採炭作業場を通過させない。
 - ・石炭坑(亜炭鉱山を除く。)の長壁式採炭作業場においては、原則として、下向通気を行わない。
 - ・採炭機械又は掘進機械を用いて作業を行うときは、岩石その他の掘削により生ずる火花又は摩擦熱による可燃性ガスの発火を防止するため散水を行う。

(7) 可燃性ガスの存在する区域に係る石炭坑に関する静電気に係る措置

- 1) 静電気の帯電による危険がある施設に対する措置
 - ・次に掲げる静電気の帯電による危険がある施設(可燃性ガスの最小着火エネルギー以上の静電気が帯電するおそれがある施設)には、帯電防止処理を施したものを使用する。
 - (1)扇風機
 - (2)ビニル風管
 - (3)エアジェット
 - (4)集じん機
 - (5)ベルトコンベア
 - (6)圧気用ホース
 - (7)ビニルトラフ
 - (8)ボーリング機械
 - (9)岩粉散布機
 - (10)セメントモルタル吹付器
 - (11)ビニルシート類

*「帯電処理を施したもの」とは、導電性材質の練り込み、織り込み、塗布、浸漬等の方法によって主材料に導電性を持たせたものであって、次のいずれかに該当するものをいう。

(1)厚さ1mm以下で自由に変形するゴム、プラスチック類のフィルムシートについては、次の基準のいずれかを満たすもの。

①均一な帯電防止処理を行ったものにあつては、絶縁抵抗が $1.0 \times 10^{10} \Omega$ 以下

②不均一な帯電防止処理を行ったものにあつては、帯電電荷密度が $4.0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ 未満

(2)帯電防止フィルムを用い、ビニル加工布風管規格(日本工業規格M7102)に従って作られた風管にあつては、隣り合うリング間の

抵抗が $1.0 \times 10^7 \Omega$ 未満、又はリングの漏えい抵抗が $1.0 \times 10^8 \Omega$ 未満及び風管の帯電電位が 1.0KV 未満。

- ・接地する（帯電防止処理を施したものを使用した場合も同じ。）。
 - ・保安のため必要があるときは、散水する（帯電防止処理を施したものを使用した場合も同じ。）。
 - ・静電気の帯電による危険発生がある次の作業を行うときは、散水する。
 - (1)ボーリングさっ孔、エアパイプ清掃等、その作業に伴い微粒子状物質を飛散させる作業
 - (2)セメントモルタル吹付け等、微粒子状物質を飛散させることを目的とする作業
 - (3)微粒子状物質が大量に存在する環境下における救護活動等の作業
- (8) 裸火等に係る措置
- ・可燃性ガスが存在する区域においては、保安統括者又は保安管理者の指示を受け、安全な方法により又は安全な箇所において、やむを得ない作業のため電気又は炎を使用するときを除き、裸火の使用を禁止する。
 - ・可燃性ガスが存在する鉱山においては、発火具等の入坑時検査を行う。
- (9) 電気工作物に係る措置
- ・可燃性ガス含有率が、石炭坑においては常時 1.5%、石油坑においては常時 1%を超える箇所へは、電気工作物を設けない。
- (10) 炭じんに係る措置
- ・集積した炭じんは、定期的に清掃する。
 - ・次の箇所には、炭じんの飛散防止のための散水又は炭壁注水を行う。
 - (1)採炭機械、ピック等の使用により炭じんが飛散しやすい採炭作業場及び掘進作業場並びに採炭作業場の肩部、深部（肩部、深部がない場合及び掘進作業場にあつては、その作業面）より 20m 間
 - (2)炭層発破の前後における発破箇所及び発破箇所を中心として約 5m の範囲
 - (3)石炭の積込口及び積換場（コンベアの積換場を含む。）
 - (4)坑内貯炭場及び臨時に坑内に集積した石炭の全面
 - (5)鉱車に積込みの直前若しくは直後における石炭の全面又は適当な箇所における鉱車内の石炭の全面
 - ・散水を実施している箇所を除く炭じんが飛来集積する箇所には、次に示す量の岩粉を散布する。
 - (1)岩粉散布率（集積炭じん又は集積混合じんと散布すべき岩粉の合計重量に対する散布すべき岩粉の重量比をいう。以下同じ。）が次に掲げる計算式によって算出される数値以上となる岩粉の量とする。この場合において使用する岩粉は、日本工業規格 Z 8 8 0 1 - 1（試験用ふるい-第1部：金属製網ふるい）に定める呼び寸法 $74 \mu m$ （200メッシュ）の網ふるいを通過するもの（以下「微粒岩粉」という。）を 4.5%以上含んでいるものとする。

①可燃性ガスが常時1.0%以下の箇所

$$R \geq C \frac{N - (a + b)}{100 - (a + b)}$$

$$N = 100 (V - 10 / V)$$

ここに R：岩粉散布率（単位 %）。

N：不燃性物質率（単位 %）（Nの値が50より小であるときは、Nの値を50として算出する。）。

V：別紙1の方法により試料の採取及び分析をしたときの揮発分率（単位 %）。

a：別紙2の方法により試料を採取し、測定したときの全水分率（単位 %）。

b：別紙2の方法により試料を採取し、測定をしたときの灰分率（不燃性物質分値の率）（単位 %）。

C：定数とし、次の表のとおりとする。

C	使用する岩粉中における微粒岩粉の全量に対する重量比（%）
1.00	85以上
1.03	75以上85未満
1.06	65以上75未満
1.08	55以上65未満
1.10	45以上55未満

②可燃性ガスが常時1.0%を超える箇所

$$R \geq C \frac{N' - (a + b)}{100 - (a + b)} \times 100$$

$$N' = 100 \{1.1 N / (0.1 N + 100)\}$$

ここに R：岩粉散布率（単位 %）。

N：不燃性物質率（単位 %）。

N、a、b及びCについては、①と同じ。

2 鉱山保安法施行規則第6条第2号に規定する「爆発の伝播を防止するための措置」とは、次のとおり。

・次により爆発伝播防止施設を設ける。

(1)設置位置

- ①主要運搬坑道（立坑を除く）
- ②坑内作業場の出入口付近
- ③坑内作業区域の出入口付近

(2)施設の内容

- ①主要運搬坑道（立坑を除く）及び坑内作業場の出入口付近（次の一に該当するものを設置）
 - イ 坑道の平均横断面1㎡につき0.1㎡以上の岩粉又は水を積載する棚
 - ロ 坑道の平均横断面1㎡につき0.3㎡以上の岩粉を散布する濃密岩粉地帯

②坑内作業区域の出入口付近

- イ 坑道の平均横断面 1 m²につき 0.4 m³以上の岩粉又は水を積載する棚

(3)設置方法

- ①岩粉棚又は水棚は、岩粉又は水が爆発により飛散しやすい状態に置き、岩粉又は水が飛散したときに坑道横断面の全体に広がるように設ける。
- ②岩粉棚又は水棚は、ほぼ等間隔に設け、その間隔は 1 m 以上 3.0 m 以下とする。
- ③濃密岩粉地帯に散布する岩粉は、床面上 1.0 cm 以上の厚さとする。

3 鉱山保安法施行規則第 6 条第 3 号に規定する「爆発を防止するための措置」とは、次のとおり。

- ・当該箇所への送電を停止する。
- ・通気量を増加し、可燃性ガスを排除する。

* 鉱山保安法施行規則第 6 条第 3 号の「爆発の危険が生じたとき」とは、坑内作業場又はその排気において、可燃性ガス含有率が石炭坑及び金属鉱山等の坑内では 1.5 %、石油坑では 1 % を超えるときをいう。

- ・さらに、可燃性ガス含有率が石炭坑及び金属鉱山等で 2 %、石油坑で 1.5 % を超える箇所は、さく囲等により通行を遮断する。

4 鉱山保安法施行規則第 6 条第 4 号に規定する「鉱山労働者の危険を回避するための措置」とは、次のとおり。

(1) 危険状態を改められないときの措置

- ・危険区域から鉱山労働者を退避させる。
- ・当該危険箇所へ警標を設ける。

(2) 爆発が発生したときの措置

- ・坑内から鉱山労働者を退避させる。

第5章 自然発火の防止

鉱山保安法施行規則 第7条（自然発火）

法第5条第1項及び第6条の規定に基づき、自然発火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 掘採跡、坑道、炭壁又はボーリング孔の充てん、密閉又はセメント注入、一酸化炭素含有率を測定する装置の設置その他の自然発火を防止するための措置を講ずること。
- 二 消火設備の設置、密閉用資材の配備その他の自然発火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 自然発火を認めたときは、当該箇所を密閉、鉱山労働者の退避その他の自然発火による被害を防止するための措置を講ずること。

1 鉱山保安法施行規則第7条第1号に規定する「自然発火を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 坑内

1) 自然発火の危険がある掘採跡、坑道（特に高落箇所）、炭壁（特に三角炭、高差圧箇所）又はボーリング孔に対する措置

- ・当該箇所に適した方法で措置（充てん、密閉又はセメント注入等）を行う。充てん又は密閉するときは、充てん又は密閉箇所の状況を示す図面を作成し、密閉するときは、密閉内の空気検査のための鉄管を設ける。
- ・保安のため必要があるときは、ガス分析を行う。

2) 監視のための措置

- ・石炭坑（垂炭鉱山を除く。）においては、主要排気坑道の気流中、ガス誘導施設（坑外へ直接ガスを誘導するものに限る。）のガスパイプ内その他必要な箇所における一酸化炭素の含有率を継続して測定する装置を設置し、坑外において、これらの結果を集中して監視する集中監視室を設ける。

* 「その他必要な箇所」とは、次のとおりであるが、過去の事例を十分考慮する。

- (1) 掘採跡、沿層坑道の高落箇所、弱小炭柱（脆弱炭柱）、盲沿層坑道（鉄砲坑道）、沿層坑道高差圧部その他保安統括者又保安管理者が認めた箇所
- (2) 自然発火の兆候を察知した箇所
- (3) 自然発火の兆候又は発生により坑道等を密閉した箇所

(2) 坑外

1) 石炭、硫化鉱その他の自然発火の危険の多い物を集積するときの措置
集積物の性状に応じて、実施。

- ・石炭の場合は、酸化の難易が異なる石炭は別々に集積し、粉と塊炭に分離して集積する。
- ・水分との接触を防止するため、コンクリート地盤に集積する。
- ・集積物を直射日光から遮断する。

- ・集積高さは低くし、集積方法は平積みとする。
- ・同一場所へ長期間、集積しない。
- ・集積物を転圧し、締め固め、又は集積物に自然発火防止の薬液を散布する。
- ・定期的な温度測定を行う。

2 鉱山保安法施行規則第7条第2号に規定する「自然発火による被害範囲の拡大を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 自然発火の危険のある箇所に対する措置

当該箇所に応じて、実施。

- ・消火設備を設ける。
- ・密閉するための防火材料を準備する。
- ・自然発火の兆候がみられる場合には、速やかに積み替え、散水等を行う。

* 「自然発火の兆候」とは、一般的には次の現象が考えられるが、石炭等の性状などにより異なることから、過去の事例を十分考慮する。

- (1) 局所的な温度上昇があるとき。
- (2) 石炭の表面に、水蒸気又は発汗現象があるとき。
- (3) 異臭（木材の腐敗臭（古洞臭）・甘酸臭・油臭）があるとき。
- (4) 一酸化炭素、炭酸ガスなどの含有率が漸次増加するとき。
- (5) 飽和炭化水素ガス相互の比（アルカン比：エタン濃度／メタン濃度等）の上昇が認められるとき。
- (6) エチレン、プロピレン等不飽和炭化水素ガスが認められるとき。

3 鉱山保安法施行規則第7条第3号に規定する「自然発火による被害を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 坑内

1) 自然発火をした掘採跡、坑道、炭壁又はボーリング孔に対する措置

- ・当該箇所に適した方法で措置（充てん、密閉又はセメント注入等）を行う。充てん又は密閉するときは、充てん又は密閉箇所の状況を示す図面を作成し、密閉するときは、密閉内の空気検査のための鉄管を設ける。
- ・保安のため必要があるときは、注水し、又は水没させる。なお、硫化鉱が自然発火した場合は、水を添加しても安全な場合に限る。
- ・鉱山労働者を退避させる。

(2) 坑外

- ・十分に注水する。なお、硫化鉱に対する注水の際は、消石灰、セメントを混入する。（酸性水となるため排水処理を考慮する。）

第6章 坑内火災の防止

鉱山保安法施行規則 第8条（坑内火災）

法第5条第1項及び第6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。

1 鉱山保安法施行規則第8条第1号に規定する「坑内火災を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 裸火等に係る措置

- ・石炭坑及び石油坑においては、可燃性ガス及び炭じんに関して危険のおそれがないと確認した箇所において、火気の使用がやむを得ない作業を安全な方法で実施する場合を除き、火気の使用を禁止する。
- ・石炭坑の坑口及びその周辺においては、火気の使用がやむを得ない作業を安全な方法で実施する場合を除き、火気の使用を禁止する。
- ・金属鉱山等の坑内に設置している引火又は発火の危険がある次の施設とその周辺においては、火気の使用を禁止する。
 - (1) 油脂類貯蔵箇所
 - (2) 燃料油貯蔵所
 - (3) 燃料給油所
 - (4) 火薬類取扱所
- ・火気使用箇所においては、残火の後始末をする。
- ・火気使用箇所には、火災を防止するため必要な設備を設ける。

(2) 油脂類等に係る措置

- ・油脂類の保管又は貯蔵は、ふた付又は密閉式の不燃性容器とする。
- ・燃料油の輸送は、専用タンク又はこれと同等の堅固な容器で行う。

(3) 車両系鉱山機械又は自動車に給油するときの措置

- ・坑内におけるガソリンの給油を禁止する。
- ・燃料給油所まで移動するために必要な限度で給油する場合を除き、燃料給油所以外での給油を禁止する。
- ・給油中は、車両系鉱山機械又は自動車の内燃機関を停止し、付近では火気の使用を禁止する。

(4) 発破時の措置

- ・発破により火災発生の危険があるときは、散水設備により散水する。

(5) 坑外からの延焼を防止する措置

- ・森林火災から坑内を防護する必要があるときは、坑口から30m以内にある樹木を除去する等により、坑口付近に防火地帯を設ける。

2 鉱山保安法施行規則第8条第2号に規定する「坑内火災による被害範囲の拡大を防止するための措置」とは、次のとおり。

(1) 全鉱種に共通の措置

- ・次の箇所には、消火器、消火砂又は散水設備を設ける。

- (1)巻揚機械室
- (2)ポンプ室
- (3)扇風機室
- (4)変電設備設置箇所（石炭鉱山における油入電気機器以外の電気機器を使用する変電設備設置箇所を除く。）
- (5)コンプレッサー室
- (6)ベルトコンベア（原動機出力20kW以上のものであって、掘採作業場又はその付近に仮設されるものを除く。）の駆動装置及び主要なプールの設置箇所
- (7)蓄電池式電気機関車用充電設備設置箇所
- (8)主要油入開閉器室
- (9)油脂類貯蔵箇所
- (10)燃料油貯蔵所
- (11)燃料給油所
- (12)火薬類取扱所
- (13)坑内における溶接又は溶断作業箇所
- (14)坑内事務所

- ・消火器の備え付け基準は、次のとおり。

- (1)消火器の種類は、粉末ABC型等（消火粉末を放射する消火器）とする。
- (2)設置基準は、次の算定基準による能力単位の数値の合計数以上とし、防火対象物の各部分から歩行距離20m以下となるように配置する。
ただし、小数点以下の数値は、切り上げて整数とする。

①防火構造等による能力単位数

（当該能力単位数） \geq （延べ面積又は床面積） \div 100 m^2

②少量危険物等貯蔵取扱いによる能力単位数付加

イ 少量危険物

（当該能力単位数） \geq （貯蔵取扱い少量危険物の量） \div （次表に定める指定数量）

種類	品名	性質	指定数量
第四類	第三油類	非水溶性液体	2,000 l
		水溶性液体	4,000 l
	第四油類		6,000 l

□ 指定可燃物

(当該能力単位数) \geq (貯蔵取扱い指定可燃物の量) / (次表に定める指定数量の五十倍)

品名	指定数量	
綿花類	200 kg	
木毛及びびかんなくず	400 kg	
ぼろ及び紙くず、糸類、わら類	1,000 kg	
可燃性固体類	3,000 kg	
石炭、木炭類	10,000 kg	
可燃性液体類	2 m ³	
木材加工品及び木くず	10 m ³	
合成樹脂類	発泡させたもの	20 m ³
	その他のもの	3,000 kg

③電気設備による能力単位数付加

(当該能力単位数) \geq (床面積) / 100 m²

④消火栓設備等による能力単位数減少

消火栓設備（防火対象物の各部分から1消火栓まで2.5m以内にあり、放水圧力0.15MPa以上であり、かつ、放水量毎分30ℓ以上の性能のものに限る。）又はスプリンクラー設備（ヘッドは、防護対象物（当該消火設備によって消火すべき対象物）を有効に消火できるほか、放水圧力0.15MPa以上であり、かつ、放水量毎分30ℓ以上の性能のものに限る。）を設けた場合は、前出①から③の算式から求めた単位数の数値の合計数の3分の1まで減少することができる。

・次の箇所には、漏油吸収設備（敷き砂等）を設ける。

- (1)変電設備設置箇所（石炭鉱山における油入電気機器以外の電気機器を使用する変電設備設置箇所を除く。）
- (2)油脂類貯蔵箇所
- (3)燃料油貯蔵所
- (4)燃料給油所

・次の箇所は、防火構造とする。

- (1)巻揚機械室
- (2)ポンプ室
- (3)扇風機室
- (4)変電設備設置箇所（主要変電設備設置箇所及び石炭鉱山における油入電気機器以外の電気機器を使用する変電設備設置箇所を除く。）
- (5)コンプレッサー室
- (6)原動機出力20kW以上のベルトコンベアの駆動装置及び主要なプーリ（掘採作業場又はその付近に仮設されるものを除く。）の設置箇所
- (7)蓄電池式電気機関車用充電設備設置箇所
- (8)坑口から10mまでの坑道

・次の箇所は、耐火構造とする。

- (1)主要油入開閉器室