



原子力規制委員会
原子力規制庁殿

乾式貯蔵施設を用いた破損燃料等の貯蔵に係る調査
(貯蔵システム全体)

成果報告書

L9-83VQ050 Rev.0

平成 29 年 3 月
三菱重工業株式会社

1. 序論	1-1
1.1 目的	1-1
1.2 実施内容	1-1
1.3 実施期間	1-3
2. 燃料デブリの特性調査.....	2-1
2.1 燃料デブリ収納缶の乾燥特性.....	2-1
2.2 水素ガス生成評価.....	2-8
2.3 腐食評価	2-9
2.4 参考文献リスト	2-21
3. 設計上の考慮すべき事項の作成.....	3-1
3.1 各貯蔵方式の比較.....	3-1
3.2 乾式貯蔵システム建屋配置に係る概念検討.....	3-5
3.3 乾式貯蔵システムの運用様態.....	3-11
4. 貯蔵容器仕様（キャニスタ、収納缶）	4-1
4.1 貯蔵容器の仕様	4-1
4.2 参考文献リスト	4-3
5. 真空乾燥システムの仕様のとりまとめ.....	5-1
5.1 真空乾燥システム評価検討.....	5-1
5.2 真空乾燥試験 概略計画.....	5-10
5.3 参考文献リスト	5-26
6. 安全評価	6-1
6.1 未臨界評価	6-1
6.2 水素ガス生成評価.....	6-41
6.3 腐食評価	6-73
7. 課題の整理及び試験計画の策定.....	7-1
7.1 課題の整理	7-1
7.2 試験計画の策定	7-1
8. まとめ	8-1

表 リ ス ト

表 1.3-1	実施工程	1-4
表 2.2-1	CALIDE 試験における粒子ベッドの空隙率[2-7]	2-8
表 2.3-1(1/2)	TMI 燃料デブリの分析結果[2-11]	2-12
表 2.3-2	TMI 燃料デブリにおける U・Zr 組成[2-11]	2-14
表 2.3-3	1F における海水注入期間と注入量[2-13]	2-15
表 2.3-4	原子力発電所で使用が検討されているケーブル[2-14]	2-16
表 2.3-5	ハロゲン化物の放射線分解例（純 PVC の分解）[2-15]	2-17
表 2.3-6	金属の腐食に及ぼす放射線照射の影響一覧[2-17]	2-19
表 3.1-1	使用済燃料の主な貯蔵方式	3-2
表 3.1-2	乾式貯蔵方式の比較（1）	3-3
表 3.1-3	乾式貯蔵方式の比較（2）	3-4
表 3.2-1	建屋配置検討条件	3-6
表 3.2-2	建屋配置設計上の考慮すべき事項	3-8
表 3.3-1	ボルト I 貯蔵時のハンドリングフロー（1/5）	3-12
表 3.3-2	安全機能/安全維持条件の分類	3-17
表 4.1-1	検討に用いる収納缶及びキャニスタの仕様	4-1
表 5.1-1	蒸発モデル試算結果	5-7
表 5.1-2	真空乾燥システム目標値	5-8
表 5.1-3	試算における仮定した数値の根拠	5-9
表 5.2-1	試験対象実機計画条件	5-13
表 5.2-2	小型試験装置 機器主要仕様	5-17
表 5.2-3	小型試験 主要計測項目	5-18
表 5.2-4	小型試験 試験条件(案)	5-19
表 5.2-5	実規模試験装置 機器主要仕様	5-23
表 5.2-6	実規模試験 主要計測項目	5-24
表 5.2-7	実規模試験 試験条件(案)	5-25
表 6.1-1	燃料デブリ及び破損燃料等の臨界解析の実績(文献調査) (1/3)	6-7
表 6.1-2	燃料デブリ及び破損燃料の臨界解析実績(文献調査) のまとめ	6-10
表 6.1-3	燃料デブリ乾式貯蔵における臨界安全評価上の影響因子と要検討事項	6-11
表 6.1-4	解析条件(収納缶仕様サーベイ計算)	6-20
表 6.1-5	原子個数密度	6-21
表 6.1-6	収納缶単体解析において k_{eff} が最大となる条件	6-22
表 6.1-7	解析条件(ボルト貯蔵体系の実効増倍率計算)	6-25
表 6.1-8	収納缶内水量制限値評価のまとめ(収納缶ケース 2)	6-31
表 6.1-9	燃料デブリの乾式貯蔵に係る臨界解析結果のまとめと課題	6-36

表 6.1-10	燃料デブリ乾式貯蔵における臨界安全確保に必要と思われる要件の整理	6-38
表 6.2-1	放射線分解ガスの測定結果[6-2-2]	6-44
表 6.2-2	高温での G 値[6-2-3]	6-46
表 6.2-3	放射線分解反応と反応速度定数[6-2-3]	6-47
表 6.2-4	γ 線照射による初期 G 値[6-2-7]	6-54
表 6.2-5	α 線照射による初期 G 値[6-2-7]	6-55
表 6.2-6	水素ガス生成に及ぼす放射線の種類による影響	6-56
表 6.2-7	評価条件	6-59
表 6.2-8	炉心内装荷燃料の発熱量	6-60
表 6.2-9	入力条件（最も厳しい条件）	6-61
表 6.2-10	入力条件（より現実的な条件、気相部割合：0.5）	6-61
表 6.2-11	入力条件（より現実的な条件、気相部割合：0.9）	6-61
表 6.2-12	種々の触媒による再結合速度[6-2-12]	6-66
表 6.2-13	水素ガス生成に係わる課題（1/2）	6-67
表 6.2-14	反応速度定数と活性化エネルギー[6-2-9]	6-69
表 6.3-1	コンクリートキャスクと燃料デブリ収納缶の考慮すべき腐食リスクの比較	6-77
表 6.3-2	既往研究における評価範囲と燃料デブリ収納缶の評価上不足している点	6-78
表 6.3-3	ステンレス鋼の外面応力腐食割れの分類とその特徴[6-3-17]	6-83
表 7.2-1	概略工程	7-2
表 7.2-2	調査結果の概要とそれを踏まえた規制審査上の注意事項ならびに課題と対応について（1/2）	7-3

図 リ ス ト

図 2.1-1	乾燥特性曲線（理論）[2-1]	2-2
図 2.1-2	乾燥温度 200℃時の乾燥特性曲線[2-2]	2-3
図 2.1-3	乾燥特性試験結果[2-1]	2-3
図 2.1-4	セメントに含まれる水分[2-3]	2-4
図 2.1-5	空のキャニスタの乾燥特性[2-4]	2-5
図 2.1-6	砂を充填したキャニスタの乾燥特性[2-4]	2-6
図 2.1-7	岩石及び砂を充填したキャニスタの乾燥特性[2-4]	2-6
図 2.1-8	TMI 燃料デブリに使用した真空乾燥機[2-6]	2-7
図 2.3-1	金属の電位例（海水中電位）[2-8]	2-10
図 2.3-2	圧力容器内の燃料デブリの生成状況[2-9]	2-11
図 2.3-3	過酷事故解析コード MAAP のデブリジェット微粒化挙動の概念図[2-16]	2-17
図 2.3-4	γ線照射環境下における炭素鋼の腐食試験結果[2-18]	2-20
図 2.3-5	鋭敏化処理したステンレス鋼の SCC 感受性に対する γ線照射の影響[2-19]	2-20
図 3.2-1	エリア構成と主要動線	3-7
図 3.2-2	貯蔵施設概要（1/2）	3-9
図 4.1-1	収納缶概略図	4-2
図 4.1-2	キャニスタ概略図	4-2
図 4.1-3	ボールド貯蔵概略図	4-3
図 5.1-1	真空乾燥システムの評価フロー	5-1
図 5.1-2	乾燥度 特性曲線（理論）[5-3]	5-4
図 5.1-3	乾燥速度 特性曲線（理論）[5-3]	5-4
図 5.1-4	伝熱モデル概要[5-4]	5-6
図 5.1-5	乾燥特性線図（試算結果）	5-8
図 5.2-1	燃料デブリ収納・移送・貯蔵システム概略（計画案）[5-7]	5-11
図 5.2-2	燃料デブリ収納缶計画[5-7]	5-12
図 5.2-3	小型試験 実施フロー	5-15
図 5.2-4	小型試験 装置系統図	5-16
図 5.2-5	実規模試験 実規模収納缶重量計測概略	5-21
図 5.2-6	実規模試験 装置系統図	5-22
図 6.1-1	TMI-2 燃料デブリ回収時の臨界安全解析に使用した燃料デブリモデル [6-1-1]	6-6
図 6.1-2	臨界解析の全体フロー	6-15
図 6.1-3	燃料デブリ収納缶仕様設定（臨界解析）のフロー	6-16
図 6.1-4	非均質 UO ₂ （ペレット正方配列）の臨界条件[6-1-14]	6-17

図 6.1-5	燃料デブリ収納缶水量制限値評価のフロー	6-18
図 6.1-6	収納缶仕様サーベイ解析の体系（収納缶単体水中孤立系）	6-19
図 6.1-7	収納缶単体解析における UO_2 球形/ UO_2 球ピッチと k_{eff} の関係	6-22
図 6.1-8	燃料デブリ収納キャニスタの寸法形状	6-23
図 6.1-9	キャニスタのボルト貯蔵状態	6-24
図 6.1-10	ボルト貯蔵体系（収納缶無限配列）の k_{eff} （ケース 1、外周空隙ボイド）	6-26
図 6.1-11	ボルト貯蔵体系（収納缶無限配列）の k_{eff} （ケース 2、外周空隙水有/ボイド）	6-27
図 6.1-12	飽和水蒸気中に UO_2 球を充填した場合の収納缶単体の k_{eff} （ケース 2）	6-29
図 6.1-13	下部堆水モデルによるボルト貯蔵体系の k_{eff} と収納缶内水位の関係（ケース 2）	6-29
図 6.1-14	水一様分布モデルによるボルト貯蔵体系の k_{eff} と収納缶内水位の関係（ケース 2）	6-30
図 6.1-15	収納缶内の UO_2 量/水量と貯蔵体系の k_{eff} との関係の模式図	6-37
図 6.1-16	収納缶内の UO_2 量/水量と貯蔵体系の k_{eff} との関係の模式図（水分分布モデルによる違い）	6-37
図 6.2-1	88 日後の収納缶内の圧力とガス濃度[6-2-1]	6-43
図 6.2-2	ガス発生速度と水量の関係[6-2-2]	6-44
図 6.2-3	水素注入時の酸素濃度の計算値と測定値の比較[6-2-3]	6-48
図 6.2-4	ゼオライトと海水の混合物からの水素ガス生成量の測定結果[6-2-4]	6-50
図 6.2-5	水素の G 値と深さの関係[6-2-5]	6-52
図 6.2-6	収納缶内の圧力と水素濃度の評価結果（最も厳しい条件）	6-62
図 6.2-7	収納缶内の圧力と水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.5）	6-62
図 6.2-8	収納缶内の圧力と水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.9）	6-63
図 6.2-9	ガスパージした場合の水素濃度の評価結果（最も厳しい条件）	6-63
図 6.2-10	ガスパージした場合の水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.5）	6-64
図 6.2-11	ガスパージした場合の水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.9）	6-64
図 6.3-1	TMI-2 で採用された収納缶（TMI-2 ではキャニスタと呼称）[6-3-1][6-3-2]	6-74
図 6.3-2	TMI-2 の燃料デブリ取り出し・貯蔵方法の概略図[6-3-1]	6-75
図 6.3-3	ボルト方式の乾式貯蔵概念図（使用済燃料貯蔵）[6-3-1]	6-75
図 6.3-4	ステンレス鋼の発錆条件の付着塩分量（ W_s ）と相対湿度（RH）による整理	

[6-3-12]	6-79
図 6.3-5 ステンレス鋼の大気腐食割れにおよぼす塩分付着量の影響[6-3-13]	6-80
図 6.3-6 種々の環境での付着塩分量[6-3-14]	6-80
図 6.3-7 人工海水を滴下した条件での ESCC に及ぼす相対湿度と温度の影響[6-3-15]	6-81
図 6.3-8 人工海水を滴下した条件での ESCC に及ぼす相対湿度の影響[6-3-16]	6-82
図 6.3-9 キャニスタ表面温度と時間の関係（使用済み燃料用キャニスタの例） [6-3-18]	6-84
図 6.3-10 SUS304 の孔食と SCC の発生におよぼす電位の影響[6-3-19]	6-85
図 6.3-11 ステンレス鋼のすき間腐食と SCC の発生に及ぼす電位の影響[6-3-19]	6-85
図 6.3-12 H ₂ O ₂ 量による孔食電位と再不動態化電位の変化[6-3-20]	6-86
図 6.3-13 各種希釈率の模擬海水のラジオリシス解析結果[6-3-11]	6-86
図 6.3-14 キャニスタ表面のガンマ線照射量の例（使用済燃料用キャニスタの例）	6-87
図 6.3-15 鋭敏化度（再活性化率）と応力腐食割れ発生率[6-3-21]	6-88
図 6.3-16 H ₂ O ₂ の電位 pH 図（25℃） [6-3-22]	6-89
図 6.3-17 U/H ₂ O 系電位 pH 図（25℃） [6-3-22]	6-90
図 6.3-18 Zr/H ₂ O 系電位 pH 図（25℃） [6-3-22]	6-90
図 6.3-19 Pu/H ₂ O 系電位 pH 図（25℃） [6-3-22]	6-91
図 6.3-19 Pu 含有物質保管容器の孔食進展極値統計解析結果[6-3-23]	6-91
図 6.3-21 ステンレス 304 鋼の水素吸収量と機械特性の変化[6-3-22]	6-93
図 6.3-22 各種ステンレス鋼の水素脆化感受性と温度の関係[6-3-22]	6-93
図 6.3-23 ステンレス鋼キャニスタの応力腐食割れの発生評価ロジック [6-3-26]	6-94
図 6.3-24 ステンレス鋼キャニスタの応力腐食割れの発生評価例[6-3-26]	6-94
図 6.3-25 電気化学試験装置図	6-96
図 6.3-26 4点曲げ試験片および治具例	6-97

1. 序論

本書は、原子力規制委員会 原子力規制庁（以降、「規制庁殿」とする。）より受託した『平成 28 年度乾式貯蔵設備を用いた破損燃料等の貯蔵に係る調査（貯蔵システム全体）』の報告書である。

1.1 目的

東京電力福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）1～3 号の廃炉を着実に進めるためには 3 炉心分の燃料デブリを取出し／貯蔵する必要がある。米国 TMI-2(スリー・マイル・アイランド原子力発電所 2 号炉)では、キャニスタを用いた乾式貯蔵システムが利用されているが、我が国ではキャニスタを用いた貯蔵システムは健全燃料でも実用化されていない。このため、燃料デブリ専用の貯蔵施設の設置を想定し、キャニスタを用いた乾式貯蔵システムに係る調査を実施するとともに貯蔵システム全体を明確にする。

1.2 実施内容

1F 燃料デブリを対象とした乾式貯蔵システム全体について明確にし、規制要件に係る課題の抽出及び抽出された課題が机上にて解決できない場合には試験計画の立案を以下のとおり実施した。

1.2.1 燃料デブリに係る乾式貯蔵システムの仕様設定

1.2.1.1 燃料デブリの特性調査

乾式貯蔵システムの仕様の設定に必要な燃料デブリの特性について、国内外の知見を整理・分析した。

1.2.1.2 設計上の考慮すべき事項の作成

以下の前提条件のもと、1F 燃料デブリを対象とした乾式貯蔵システムの設計上の考慮すべき事項（安全機能の考え方、配置、設備、運用様態）のまとめを行った。

- ・貯蔵方式：コンクリートキャスク方式（貯蔵建屋有り）

横型サイロ方式

ボルト貯蔵方式（キャニスタ収納、収納缶直接収納）

なお、上記貯蔵方式より、選択根拠を整理した上で、代表貯蔵方式を選択。

- ・施設設置場所：原子炉サイト内（構内輸送は考慮するが、事業所外運搬は考慮しない）

- ・貯蔵期間：50年
- ・貯蔵容量：1F燃料デブリ全量
- ・燃料条件：1.2.1.1項をもとに決定。
- ・燃料デブリ回収条件：湿式（冠水）
- ・その他：原子炉建屋から回収した燃料デブリは、既存の共用プールにて一定期間貯蔵し、その後乾式貯蔵に移行することを想定。

1.2.1.3 貯蔵容器仕様（キャニスタ、収納缶）

1.2.1.2項でとりまとめた考慮事項を踏まえて燃料デブリを収納する収納缶及び収納缶を収納するキャニスタ（ボルト方式の場合は収納缶を含む）の基本仕様の設定を行い、主要緒元のまとめ及び仕様の設定根拠の整理を行った。

1.2.1.4 真空乾燥システムの仕様のとりまとめ

燃料デブリを収納した収納缶の乾燥方法について調査し、乾燥システムの基本要件をまとめ、乾燥方法と判定基準の設定根拠を整理した。さらに前記の方法にしたがい、1.2.1.3項の貯蔵容器について所定の乾燥度を達成できることを解析により確認した。

1.2.1.5 安全評価

燃料デブリの乾式貯蔵において、主要課題と考えられる以下について評価を行った。

(1) 未臨界評価

1.2.1.3項の収納缶及びキャニスタの臨界解析を行った。解析モデルは3次元モデルとし、解析コードは使用済燃料の輸送、貯蔵等の安全解析で実績のあるものを使用し、解析モデルと条件は、上記の運用や燃料デブリの特性を考慮した保守的なものとした。また、燃料デブリ形状の不特定性を考慮して、中性子実効倍率が最大となる燃料デブリ形状や配置をサーベイした。

(2) 水素ガス生成評価

貯蔵期間中、収納缶及びキャニスタの健全性を確認するため乾燥後の収納缶内に残存する水の放射線分解によって生成する水素ガス量を解析により評価を行った。

(3) 腐食評価

収納缶内の残留水、燃料デブリに含まれる FP（ハロゲン）及び海水塩分等による収納缶の腐食の評価を容器内の放射線による腐食促進効果も考慮した上で行った。また、キャニスタを用いるため、蓋溶接部の腐食についても評価した。

1.2.2 課題の整理及び試験計画の策定

1.2.2.1 課題の整理

1.2.1 項の成果を踏まえ、燃料デブリの乾式貯蔵の安全確保上、規制要件に係る課題を抽出し整理した。

1.2.2.2 事故事象の選定

1.2.1 項で整理された貯蔵システムでの主要な運用要件と容器等の設計から、想定し得る事故事象を抽出し、それらが公衆及び従事者の安全に及ぼす影響のまとめを行った。

1.2.2.3 試験計画案の策定

上記 1.2.2.1 項、1.2.2.2 項に基づいて燃料デブリ乾式貯蔵の規制審査に必要と考えられる研究（計画）項目を抽出し、机上検討にて解決出来ない課題について、目的、方法、試験装置と試験体の基本構成ならびに試験の概略工程を含め試験計画案を策定した。

1.2.3 報告書作成

実施した調査結果を報告書に取りまとめた。

1.3 実施期間

平成 28 年 5 月 24 日～平成 29 年 3 月 31 日

実施工程を表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 実施工程

実施項目	平成 28 年								平成 29 年		
	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
(1) 燃料デブリに係る乾式貯蔵システムの仕様設定											
(2) 課題の整理及び試験計画の策定											
(3) 報告書作成											

2. 燃料デブリの特性調査

乾式貯蔵システムの仕様設定を行うにあたり必要な検討項目を以下に示す。

- ・乾燥特性
- ・水素ガス生成評価
- ・腐食評価

上記項目に対して、国内外の知見を整理・分析した結果を以下に示す。

2.1 燃料デブリ収納缶の乾燥特性

燃料デブリ収納缶の乾燥特性については、TMIにおける燃料デブリ収納時の情報を基に、調査を実施した。

2.1.1 1F 関連研究

燃料デブリの性状把握において、中長期貯蔵では、貯蔵中に発生する水素ガス生成量を低減するために、貯蔵する燃料デブリが含有する水分量を可能な限り低く抑える必要がある。空隙を持つ材料の乾燥特性曲線（理論）を図 2.1-1 に示す。水分の乾燥は、その水の分布（位置）により、乾燥温度までの予熱期間、温度が一定となり表面の水分が乾燥する定率乾燥期間、内部の水分が乾燥する減率乾燥期間に分かれる。燃料デブリの乾燥特性についても同様の乾燥特性を示すことが考えられ、その特性は、含有する水分の性質及び分布が影響することとなる。

この内、水分の分布における影響を評価すべく、多孔質セラミック（材質： Al_2O_3 、 SiO_2 ）を用いた乾燥特性試験の結果を図 2.1-2 に示す。試験の結果、以下の知見が得られている。

- ・乾燥速度に、空隙率及び乾燥温度は影響を与える。
- ・乾燥速度に、1~10 μm の範囲の平均細孔径の差異は影響を与えない。
- ・乾燥速度に、材質の差異（ Al_2O_3 、 SiO_2 ）は影響を与えない。

また、セラミックス系材料及びセメントペースト材料を対象に実施した乾燥特性試験結果を図 2.1-3 に示す。試験の結果、以下の知見が得られている。

- ・セラミックス系の試料に関しては、内的条件（例：材質・空隙分布）、外的条件（例：乾燥温度）により乾燥速度に差異は見られるが、予熱期間移行に乾燥が進行するという同様の乾燥特性を示す。
- ・セメントペースト試料については、化学的に水分と結合した水和物の影響を受けるため、セラミックス試料とは乾燥特性が異なり、1000 $^{\circ}\text{C}$ の条件においても乾燥に長時間を要する。セメントの乾燥特性については、室温等の低温では報告されているが、セメント強度が低下する高温環境、真空状態での報告はほとんどない。また、熱履歴によりセメントは変質することから、詳細な検討については試験的なデータ採取が必要と考えられる。

上述のように、セラミックス試料とセメント試料とでは、その乾燥特性が大きく異なる。セメン

ト試料は、図 2.1-4 に示す複数の種類の水分を有している。それぞれの乾燥特性が異なるために、全体として複雑な乾燥特性を示すものと考えられる。

- ・自由水 : セメント成分 (CSH (Ca-Si 主体の水和物) ゲル) の隙間にある毛細管水
- ・ゲル水 : CSH ゲルに含まれる水分
- ・化学結合水 : CSH ゲルを構成する水和物の結晶水

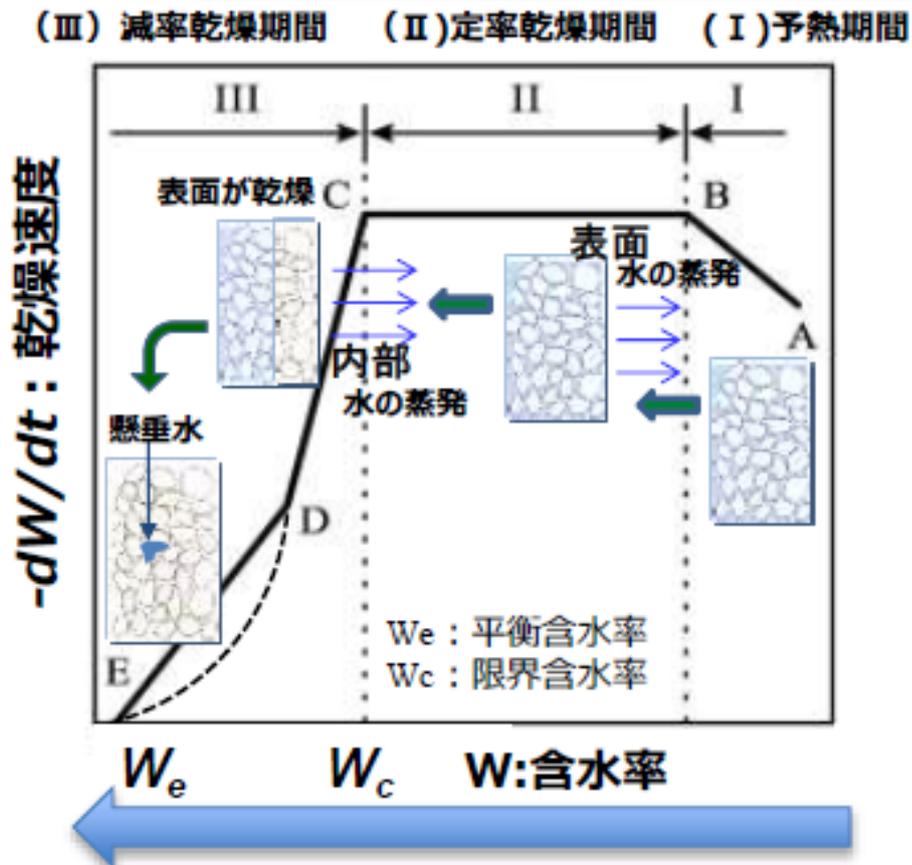


図 2.1-1 乾燥特性曲線 (理論) [2-1]

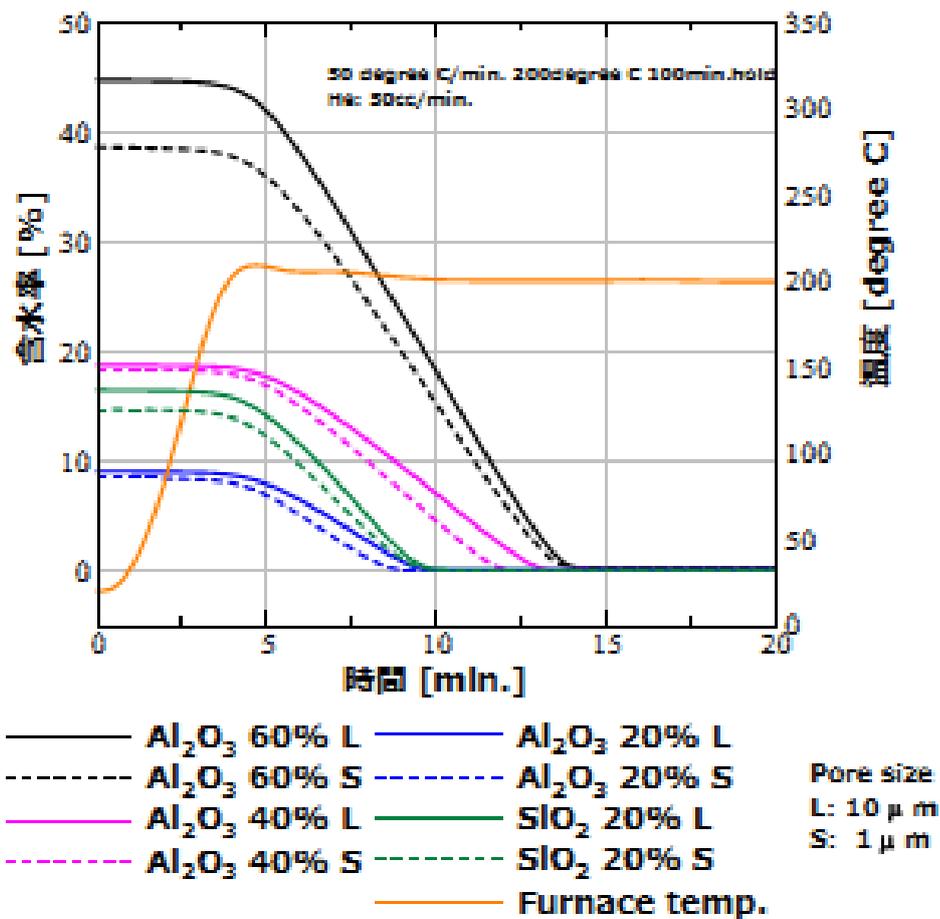


図 2.1-2 乾燥温度 200°C 時の乾燥特性曲線 [2-2]

【内的条件】気孔径：0.1~500 μ m 気孔率：20~60%；【外的条件】温度、Heガス掃気条件

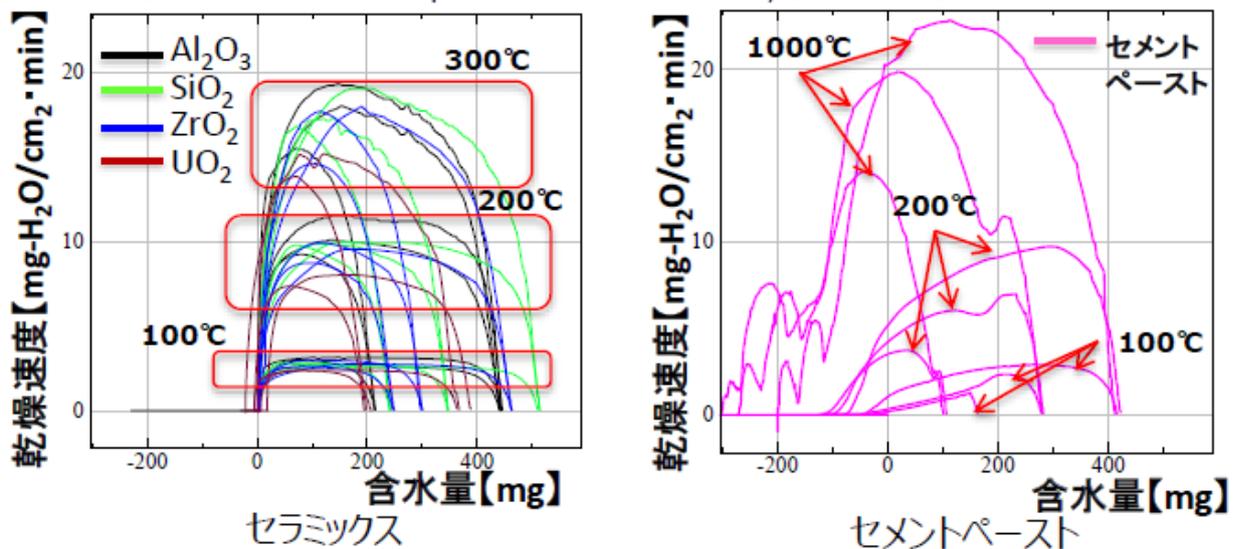


図 2.1-3 乾燥特性試験結果 [2-1]

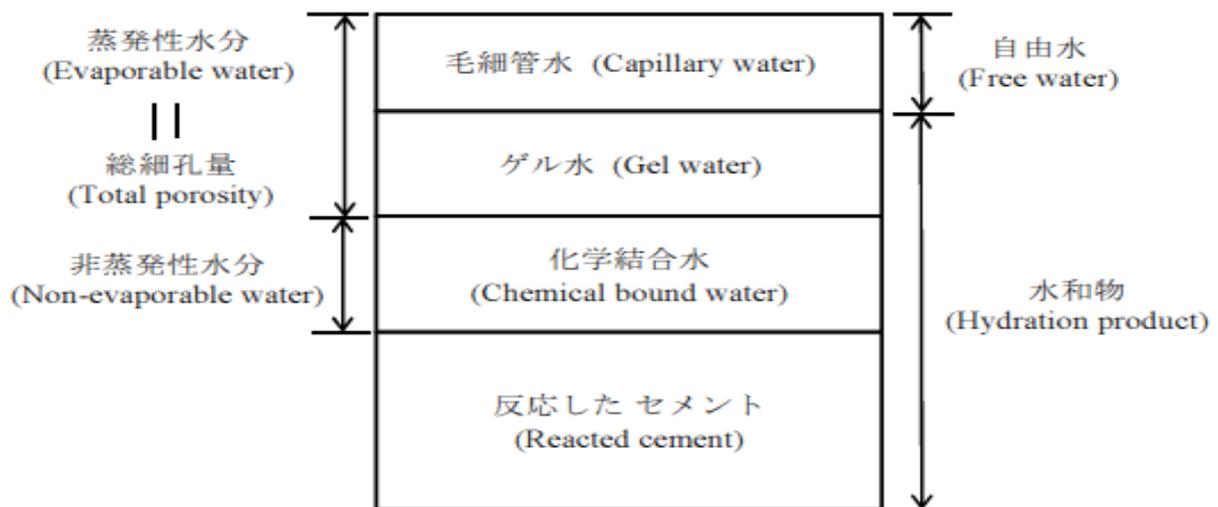


図 2.1-4 セメントに含まれる水分[2-3]

2.1.2 TMI 関連研究

TMI において取出されて燃料デブリは、乾燥貯蔵されている。この乾燥貯蔵に際し、種々の乾燥特性試験及び評価が実施された。

燃料デブリ乾燥に先立ち実施された、空キャニスタの乾燥特性試験結果を図 2.1-5 に示す。概要を以下に記す。

- ・空のキャニスタでは、水分量に依存する重量は、加熱初期で急激に減少する。
- ・初期の急激な重量減少では、水分は 0 にはならず、以降は、緩やかな減少に移行する。
- ・乾燥温度を上げると、減少速度は増加し、下げると重量減少は停止する。

次に、キャニスタに砂を充填した乾燥特性試験結果を図 2.1-6 に示す。概要を以下に記す。

- ・乾燥特性は空のキャニスタのものと同様であり、初期に急激に重量減少するが、以降は緩やかな減少を示す。また、減少速度は、乾燥温度に依存する。
- ・乾燥温度を一定にした状態では、経時的に減少速度は低下する。乾燥温度の上昇に伴い、減少速度は増加するが、その温度にて一定に維持すると、速度は経時的に減少する。

また、キャニスタに岩石と少量の砂を充填した乾燥特性試験結果を図 2.1-7 に示す。概要を以下に記す。

- ・乾燥特性は砂を充填したキャニスタのものと同様であり、初期に急激に重量減少するが、以降は緩やかな減少を示す。また、乾燥温度上昇に伴い、減少速度は増加するが、経時的には減少速度は低下する。

上記試験結果は自由水を対象としたものである。2.1.1 項における乾燥特性試験結果と相関があり、試験開始初期及び乾燥温度の昇温時に観察された重量減少は定率乾燥期間、それ以降の経時的

な重量減少速度の低下は減率乾燥期間に相当するものと考えられる。

TMI 燃料デブリ及び破損燃料を装荷したキャニスタの乾燥特性実績としては、真空乾燥機(図 2.1-8)にキャニスタを装填し、最大温度約 300°C(ヒータ温度:約 500°C)で 2 日間乾燥を実施している[2-5]、[2-6]。ここで、TMI 燃料デブリは主として酸化物又は金属であり、自由水が対象であるが、収納缶には、燃料保持用に低密度コンクリート LICON が使用されており、この LICON に含まれる水分がキャニスタの乾燥に影響を与えた[2-4]。1F においては、MCCI (Molten Core Concrete Interaction) 生成物の収納において、近傍のコンクリートが同梱することが予想され、これが収納缶の乾燥特性に影響を与えることが考えられる。

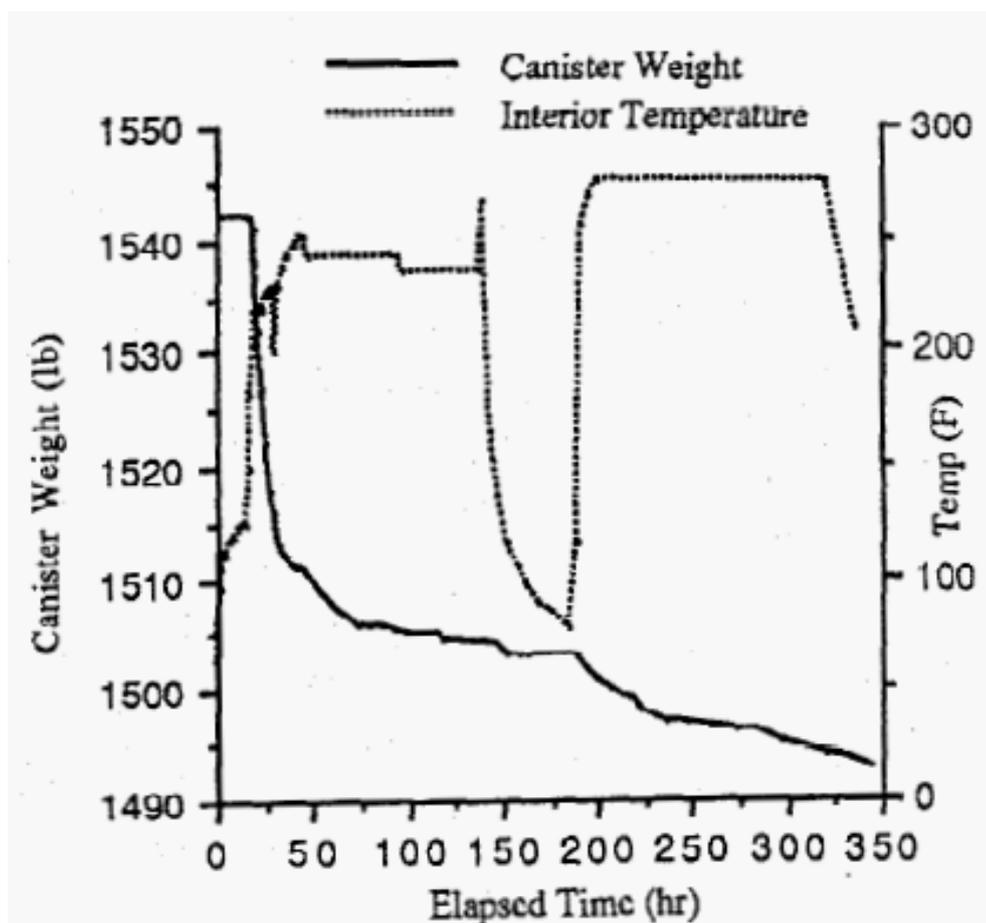


図 2.1-5 空のキャニスタの乾燥特性[2-4]

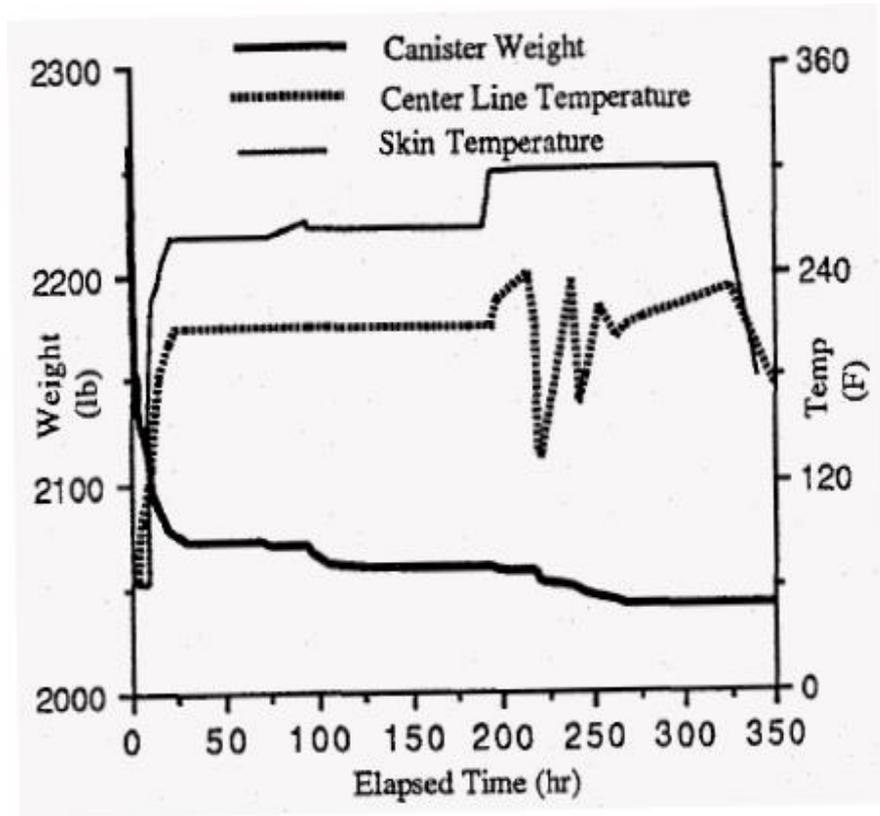


図 2.1-6 砂を充填したキャニスタの乾燥特性[2-4]

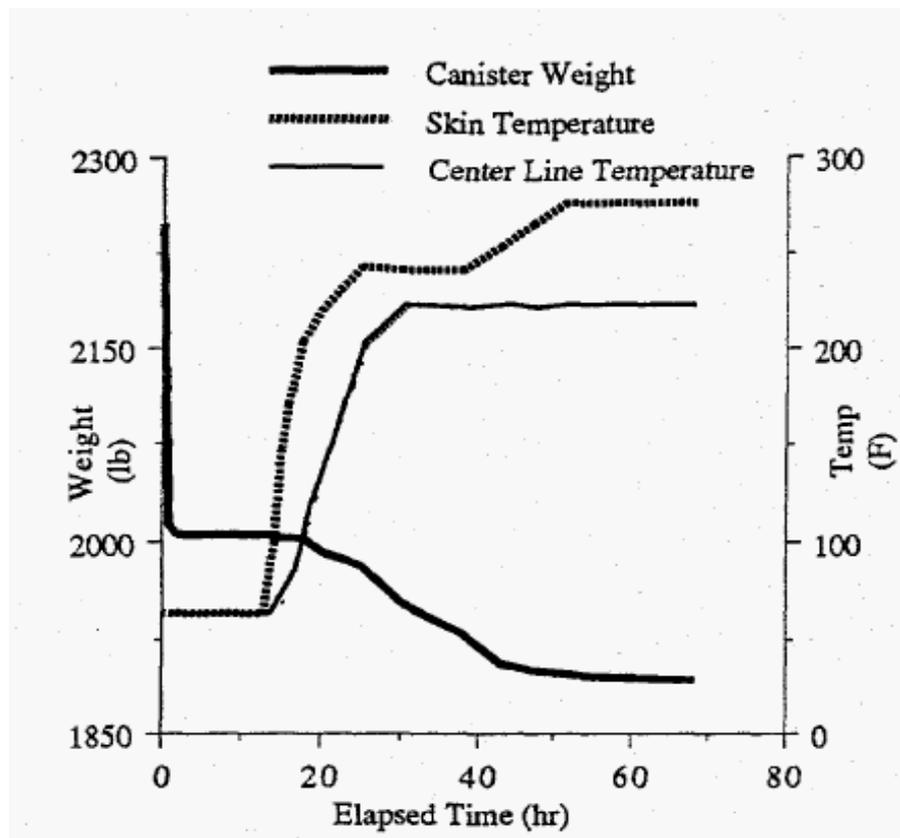


図 2.1-7 岩石及び砂を充填したキャニスタの乾燥特性[2-4]

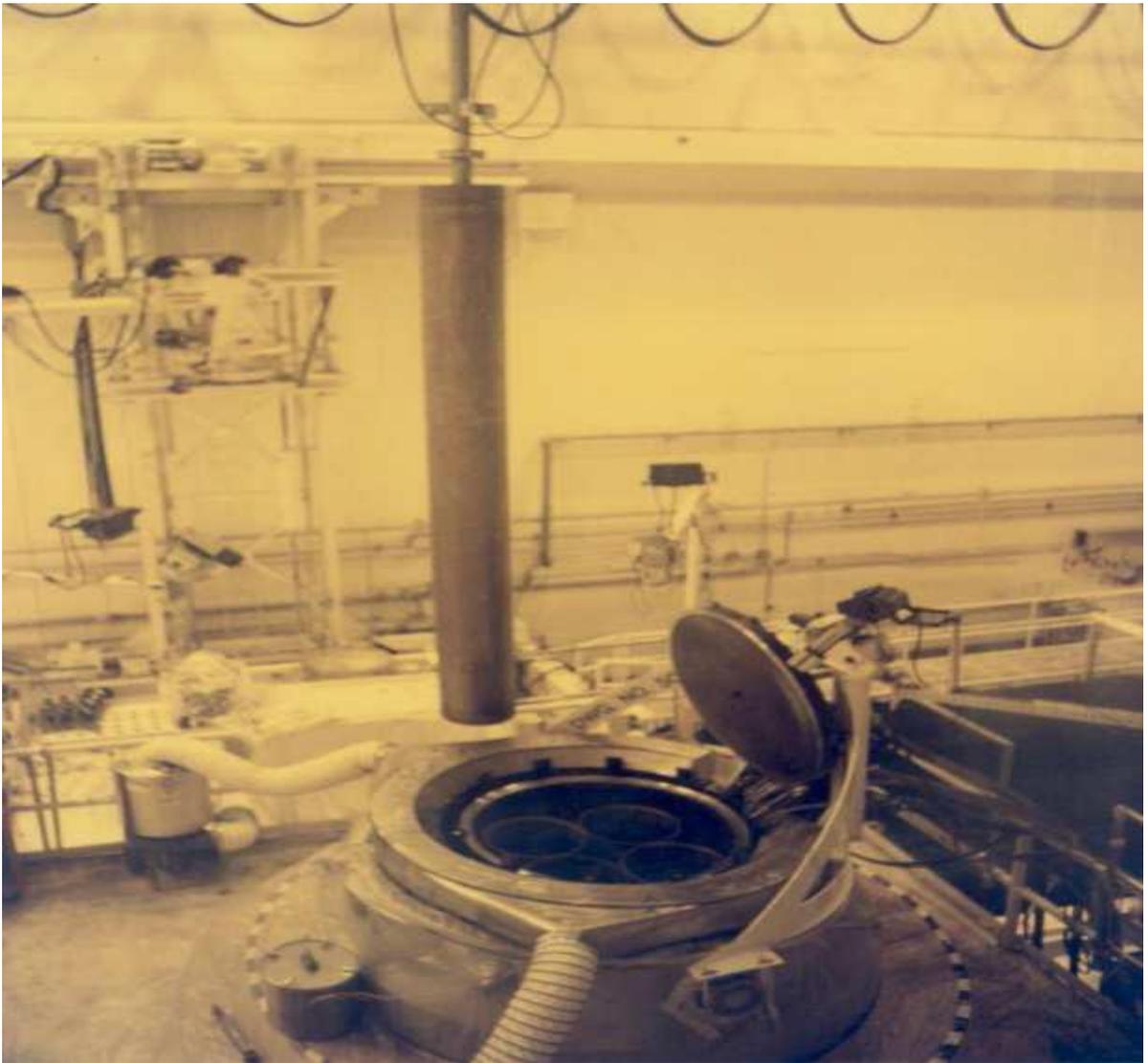


図 2. 1-8 TMI 燃料デブリに使用した真空乾燥機[2-6]

2.2 水素ガス生成評価

燃料デブリの貯蔵においては、水素爆発を避けるために燃料デブリを収納した収納缶内で発生する水素ガスを管理することが重要である。この水素ガスは、主として、燃料デブリが保有する水分から放射線分解によって発生するものである。したがって、収納する燃料デブリについては、十分な乾燥が必要となる。この水素ガス生成量については、燃料デブリに含まれる水分が影響することになる。この水分については、燃料デブリ表面及び空隙に存在する自由水と、燃料デブリの構成成分に含まれる結合水とに分かれる。この内、自由水については、燃料デブリの空隙に残留するものであることから、本項では燃料デブリの空隙率について調査を行った。

2.2.1 1F 関連研究

1F 関連研究の“燃料デブリの性状把握プロジェクト”において、燃料デブリの性状の推定評価が行われている。この内、水素ガス生成に影響する空隙率については、取得が計画されているが、現時点ではデータはない。なお、2.1.1 項に記すように、空隙率については酸化物（セラミックス）主体である燃料デブリについては、乾燥特性に影響しない^{※1}と評価されている。一方、セメント成分を有する MCCI 生成物については、酸化物試料と乾燥特性が異なり、1000℃以上の乾燥温度でも乾燥に長時間を要すると評価されている。成分がセラミックスであるものとセメントであるものの乾燥特性の差異は、セラミックスの水分が表面又は空隙に存在する自由水のみであるのに対して、セメントでは自由水に加えセメント成分に含まれる結合水が含まれるためと考えられる。

2.2.2 TMI 関連研究

TMI における燃料デブリベッドの空隙率は 0.35～0.55（平均：0.45）と評価されている[2-7]。また、CALIDE 実験装置による燃料デブリベッドを模擬した粒子ベッドの空隙率を表 2.2-1 に示す。同表に示す様に、空隙率は約 0.35 程度の値を示した。

表 2.2-1 CALIDE 試験における粒子ベッドの空隙率[2-7]

Particle	ϵ (air experiments)	ϵ (water experiments)
Cyl 5 × 5	0.3525 ± 0.0041	0.3525 ± 0.0041
Cyl 5 × 8	0.3954 ± 0.0047	0.3843 ± 0.0045
Cyl 8 × 12	0.3855 ± 0.0053	0.3642 ± 0.0065
Pri 4 × 4	0.3646 ± 0.0041	0.3750 ± 0.0064
Pri 6 × 6	0.3699 ± 0.0065	0.3666 ± 0.0065

※1 定量的には乾燥速度が異なるが、定性的な挙動は同じである。

2.3 腐食評価

燃料デブリ貯蔵においては、燃料デブリの成分によって、収納缶の腐食を引き起こす可能性が考えられる。この収納缶の腐食において、燃料デブリが原因となる腐食としては、以下のものが考えられる。

- ・ 収納された燃料デブリとの接触によるガルバニック腐食（電池腐食）
- ・ 収納された燃料デブリに含まれるハロゲン化物による局部腐食
- ・ 収納された燃料デブリからの放射線による腐食

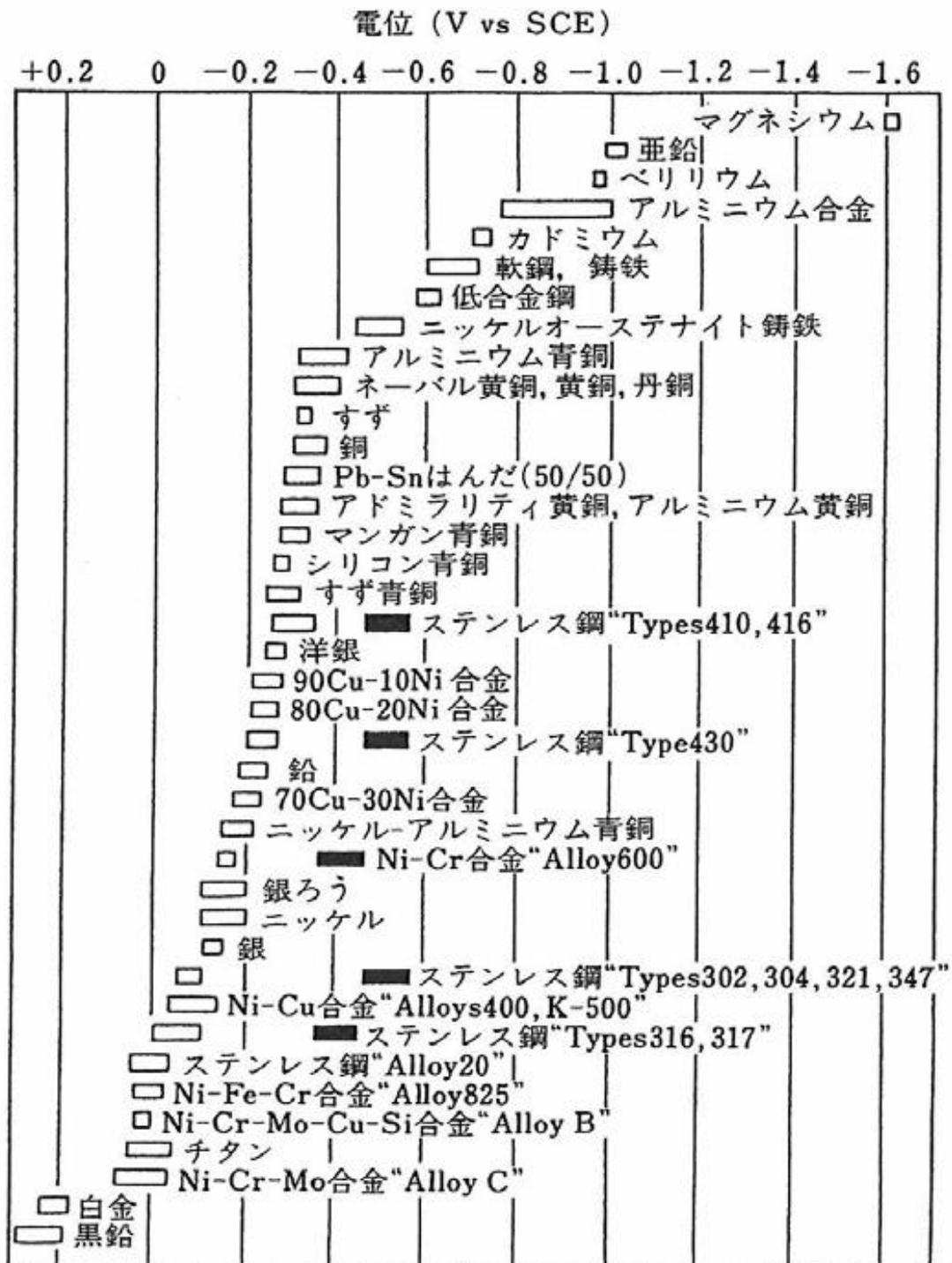
上記の内、放射線を除く 2 点について調査した結果を以下に記す。放射線については存在が明確であることから、詳細は 2.3.3 項に記すものとする。

2.3.1 ガルバニック腐食

水分が存在する環境において異種金属同士が接触した場合、片方の金属の酸還元電位（図 2.3-1）が、もう一方の金属の酸化電位よりも卑な場合、卑な金属が陽極、貴な金属が陰極となる電池を形成し、卑となる金属の腐食が促進されることになる。

後述のように、1F 燃料デブリ（含む MCCI 生成物）については、主要な成分は酸化物である。ただし、1F では、金属として Zr、Zr-U-Fe 合金又は Fe-Cr 合金が存在すると評価されている。U 及び Zr は活性な金属であることから、燃料デブリ取出し時の加工面は速やかに酸化皮膜が覆った状態となる。このため、U 及び Zr を含む金属では、表面において金属面での接触が生じないことから、ガルバニック腐食が発生する可能性は小さいと考えられる。また、Fe-Cr 合金については、クロム含有率が高い場合は、前述の U 及び Zr を含む金属と同様に、表面を酸化皮膜が覆うことから、金属面での接触が無くなり、ガルバニック腐食は発生しにくいと考えられる。なお、これら酸化皮膜が収納缶内壁に圧迫され、電氣的に接合する場合、これら酸化物が電位を引き上げ、腐食スポット（アノードスポット）として機能する可能性が考えられる。ただし、収納缶材質がステンレスの場合は、ガルバニック腐食の影響は生じないと考えられる。

また、TMI では制御棒を主成分とする金属成分が観察されている。このような金属（貴金属）が収納缶内壁と接触した場合も、同様であり、腐食スポット（アノードスポット）として機能する可能性が考えられるが、収納缶材質がステンレスの場合は、ガルバニック腐食の影響は生じないと考えられる。



※1) 測定条件：流速 2.4 ~ 4.0 m/s, 温度 10 ~ 27°C

※2) ■■■■：局部腐食を起こしているときの電位
(活性態の電位)

図 2.3-1 金属の電位例 (海水中電位) [2-8]

2.3.1.1 1F 関連研究

1F 燃料デブリについては、事故進展解析コードの結果を用いて熱力学的計算がなされている。計算の結果、得られた燃料デブリの組成を図 2.3-2 に示す。酸化物としては $(U, Zr)O_2$ 、金属としては $Zr(O)$ 、 $Fe_2(Zr, U)$ が主要な形態と推定されている。

また、1F では、燃料及び炉内材料が溶融したコリウム（注：燃料、被覆管材料等を含む炉心溶融物のこと）が圧力容器より漏えいし、下部のコンクリート床面と反応(MCCI)が生じている。MCCI については仏国 CEA（原子力・代替エネルギー庁）にて模擬試験が実施されている。この CEA 試験の内、1F 条件に近い試験にて得られた MCCI 生成物を分析した結果、MCCI 生成物は下記の 6 相にて構成されていることが確認された[2-10]。

- ・カルシウム等を多く含むシリコンリッチ酸化物相
- ・ほぼシリコンのシリコンリッチ酸化物相
- ・ほとんどクロム酸化物のクロム酸化物リッチ相
- ・クロムを含む鉄リッチ金属相
- ・ウランを含むジルコニウムリッチ酸化物相
- ・ジルコニウムを含むウランリッチ酸化物相

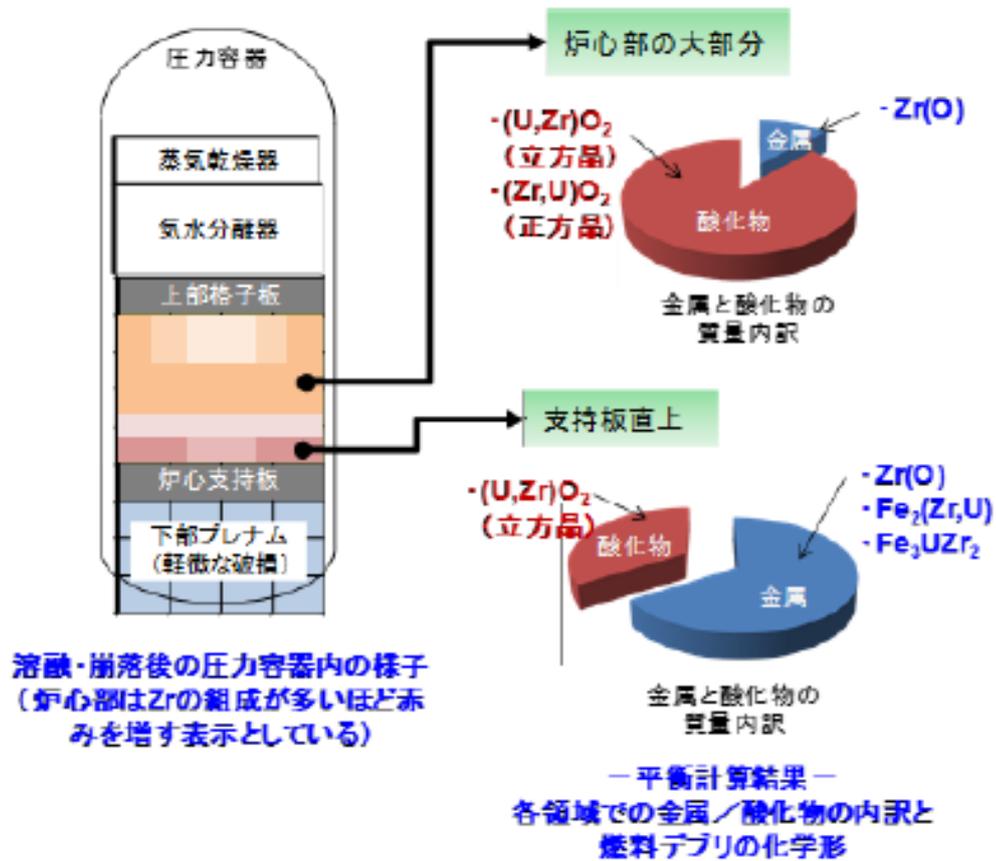


図 2.3-2 圧力容器内の燃料デブリの生成状況 [2-9]

2.3.1.2 TMI 関連研究

TMI より採取された燃料デブリについては、その化学組成が分析された。分析結果を表 2.3-1 に示す。また、主成分は U と Zr である。U 及び Zr の組成割合を表 2.3-2 に示す。これらは酸化物形態であるが、コア中心部では、制御棒構成元素を主体とした金属成分も観察されている [2-12]。

表 2.3-1(1/2) TMI 燃料デブリの分析結果 [2-11]

Element	Sample 1 (23.56 g) ^b	Sample 7 (44.62 g) ^b	Sample 3 (50.10 g) ^b	Samples 8 and 9 ^c (94.6 g) ^b
Ag	1.6 E-1	1.9 E-1	1.5 E-1	1.6 E-1
Al	3.37	<4.6 E-2 ^d	<4.8 E-2	<6.0 E-2
B	8.02 E-1	2.8 E-1	9.3 E-2	1.17
Cd	<5.9 E-3	<2.3 E-3	<2.4 E-3	<3.0 E-3
Cr	3.9 E-1	3.7 E-1	1.2 E-1	2.9 E-1
Cu	<1.5 E-2	5.7 E-3	1.2 E-2	7.6 E-3
Fe	1.19	1.17	5.0 E-1	9.9 E-1
Gd	8.2 E-2	5.7 E-2	5.8 E-2	5.7 E-2
In	<1.8 E-1	<6.9 E-2	<7.2 E-2	6.6 E-2
Mn	4.1 E-2	3.7 E-2	1.9 E-2	3.4 E-2
Mo	<5.9 E-2	<2.3 E-2	<2.4 E-2	<3.0 E-2
Ni	1.38	6.5 E-1	1.7 E-1	3.3 E-1
Nb	<1.8 E-1	1.6 E-1	1.7 E-1	1.7 E-1
Si ^e	3.84	3.63 E-1	1.39	2.8 E-1
Sn	<2.9 E-1	<1.1 E-1	<1.2 E-1	<1.1 E-1
Te	<1.2 E-1	<4.6 E-2	<4.8 E-2	<4.6 E-2
U	7.03 E+1	7.39 E+1	7.25 E+1	7.23 E+1
Zr	1.59 E+1	1.76 E+1	8.24	1.42 E+1

- a. In order of depth into the debris bed.
- b. Weight of sample material dissolved.
- c. Samples 8 and 9 were combined, as they had been mixed during dissolution.
- d. Less than (<) values are the lower limit of detection for the sample analyzed.
- e. Silicon contamination from the glassware occurred during the dissolution process.

表 2.3-1(2/2) TMI 燃料デブリの分析結果[2-11]

Element	Sample 4 (5.11 g) ^b	Sample 5 (16.64 g) ^b	Sample 6 (45.97 g) ^b	Sample 10 (57.44 g) ^b	Sample 11 (42.54 g) ^b
Ag	1.5 E-1	5.4 E-2	1.4 E-1	1.3 E-1	1.9 E-1
Al	1.1	<6.7 E-2 ^c	<7.7 E-2	<2.8 E-2	<7.2 E-2
B	3.00	1.4 E-1	1.6 E-1	1.70 E-1	<5.4 E-2
Cd	<2.1 E-2	<3.4 E-3	<3.9 E-3	<1.4 E-3	<3.6 E-3
Cr	<6.3 E-2	9.4 E-2	1.0 E-1	1.45 E-1	2.1 E-1
Cu	<5.3 E-2	<8.4 E-3	<9.7 E-3	5.6 E-3	<8.9 E-3
Fe	5.1 E-1	2.1 E-1	3.3 E-1	4.33 E-1	8.3 E-1
Gd	<1.5 E-1	4.7 E-2	5.4 E-2	5.6 E-2	<2.5 E-2
In	<6.3 E-1	<1.0 E-1	<1.2 E-1	<4.3 E-2	<1.1 E-1
Mn	2.1 E-1	1.4 E-2	1.6 E-2	1.4 E-2	2.1 E-2
Mo	<2.1 E-2	<3.4 E-2	<3.9 E-2	<1.4 E-2	<3.6 E-2
Ni	<1.1 E-1	2.7 E-1	2.4 E-1	2.55 E-1	3.9 E-1
Nb	<6.3 E-1	<1.0 E-1	2.7 E-1	9.8 E-2	<1.1 E-1
Si ^d	2.20 E+1	5.0 E-2	1.36	2.49 E-1	3.9 E-1
Sn	<1.1	<1.7 E-1	<1.9 E-1	1.4 E-1	<1.8 E-1
Te	<4.2 E-1	<6.7 E-2	<7.7 E-2	<2.8 E-2	<7.2 E-2
U	8.32 E+1	8.31 E+1	7.08 E+1	7.34 E+1	7.76 E+1
Zr	1.14 E+1	4.31	8.25	7.19	9.69

a. In order of depth into the debris bed.

b. Weight of sample material dissolved.

c. Less than (<) values are the lower limit of detection for the sample analyzed.

d. Silicon contamination from the glassware occurred during the dissolution process.

表 2.3-2 TMI 燃料デブリにおける U・Zr 組成[2-11]

Sample	Depth into Debris Bed (cm)	Uranium Concentration ^a (wt%)	Zirconium Concentration ^b (wt%)	Zr/U Ratio ^c
H8 Samples				
1	0	70	16	0.23
7	36	74	18	0.24
3	56	72	8.2	0.11
8 and 9	70 and 77	72	14	0.20
E9 Samples				
4	0	83	11	0.14
5	8	83	4.3	0.05
6	56	71	8.2	0.12
10	74	73	7.2	0.10
11	94	78	9.7	0.12

a. Initial U concentration in the core was 65 wt%, in a control rod fuel assembly 64 wt%, and in a fuel rod 71 wt%.

b. Initial Zr concentration in the core was 18 wt%, in a control rod fuel assembly 17 wt%, and in a fuel rod 18 wt%.

c. The Zr/U ratios for a control rod fuel assembly and the core are 0.26 and 0.27, respectively. A fuel rod has a ratio of 0.25.

2.3.2 局部腐食

ハロゲン元素が存在する場合、金属の一部でのみ腐食が進行する局部腐食が発生する。このため、通常の原子炉では、ハロゲン元素の持ち込みについては、制限が行われている。しかしながら、1F では、以下の特異事象が存在する^{※2}。

- ・ 事故時に冷却のために海水が注入された。
- ・ 燃料デブリは、圧力容器から漏えいした。このため、環境からの持ち込みの可能性がある。

上記事象について、1F の燃料デブリ中へのハロゲン元素の持ち込みについて検討を実施した。以下に検討結果の概要を記す。

※2 TMI には、これら事象は発生していない。

2.3.2.1 海水の影響

1F では、事故時に冷却のために表 2.3-3 に示す期間、海水吸入を実施した。海水は塩素を含むハロゲン元素を多く含んでいる。ただし、この際に注入された海水は、その後の淡水注入によって希釈され、冷却水中の海水成分は減少していると考えられる。また、ハロゲン化合物は沸点が低く、かつ溶解度も大きい。このため、高温の燃料デブリと接触した海水中のハロゲン成分は揮発し、残留物もその後の純水冷却水に溶解し、ほとんどが除去されていると考えられる。

しかしながら、比較的早い時期に冷却された燃料デブリの亀裂・空隙等に海水が浸入している場合、その海水はその後の純水冷却水とほとんど置換することなく、燃料デブリ中に残存している可能性が考えられる。燃料デブリ取出し時に、燃料デブリが小片に解体された場合は、その表面は冷却水に曝されることになることから、この過程で、海水成分は浄化・除去されることが考えられる。したがって、注入された海水の影響は小さいと考えられる。

燃料デブリ中のハロゲン成分の確認については、燃料デブリの分析が必要と考えられる。

表 2.3-3 1F における海水注入期間と注入量[2-13]

	海水注入期間	海水注入量
1号機	3/12 19:04~ 3/25 15:37	約2,842m ³
2号機	3/14 19:54~ 3/26終了時不明	約9,197m ³
3号機	3/13 13:12~ 3/25 18:02	約4,495m ³

2.3.2.2 環境からの持込みの影響

圧力容器下部のペダスタル部には表 2.3-4 に示すような計装機器ケーブル等が設置されていた。これらケーブルのシース・絶縁体にはハロゲン化合物を含む材料が使用されていた可能性がある。これらハロゲン化合物が圧力容器より漏えいしたコリウムと接触した場合、コリウムの高熱により燃焼・分解し、その後は海水成分と同様に揮発・純水冷却水への溶解により除去されたと考えられる。したがって、高温のコリウム／燃料デブリと接触したハロゲン化合物については、その影響は小さいと考えられる。

ここで、燃料デブリは、コリウムの冷却の過程で、粒状デブリを形成しているものが存在すると考えられる（図 2.3-3）。この粒状デブリが飛散又は冷却水中を移動してケーブル等のハロゲン化合物に付着する可能性が考えられる。この場合、ハロゲン化合物は粒状デブリの熱で溶解するが、冷却の程度によっては、ハロゲン化合物全体が燃焼・分解しないものと考えられる。燃料デブリ回収時は、その近傍に存在する物質も帯同して燃料デブリと一緒に回収されることから、ハロゲン化合物も一緒に回収され、収納缶に収納されることになる。この場合、ハロゲン化合物は収納缶内で

燃料デブリの放射線照射を受けることになる。ハロゲン化物は表 2.3-5 に例を示す様に、放射線により分解する。この分解生成物は、局部腐食に寄与することになる。

したがって、燃料デブリが電気ケーブル等のハロゲン化物の近傍にある場合、両者が一緒に回収・貯蔵されると、影響があると考えられる。

ハロゲン化物の燃料デブリの帯同については、事故時のシナリオ（PCV（格納容器）内の温度分布・燃料デブリ挙動）、PCV 内の調査（燃料デブリ分布）を基に検討する必要があると考えられる。

表 2.3-4 原子力発電所で使用が検討されているケーブル[2-14]

区分	No.	絶縁体	シース	UL 垂直 燃焼試験	IEEE383 or IEEE1202	フロー 結果
高圧 ケーブル	1	架橋 ポリエチレン	難燃ビニル	○	○	①
	2	架橋 ポリエチレン	難燃特殊 耐熱ビニル	○	○	①
	3	EP ゴム	難燃クロロ ブレンゴム	○	○	①
低圧 ケーブル	4	難燃架橋 ポリエチレン	難燃特殊 耐熱ビニル	○	○	①
	5	難燃架橋 ポリエチレン	難燃架橋 ポリエチレン	○	○	①
	6	難燃 EP ゴム	難燃クロロ ブレンゴム	○	○	①
	7	ノンハロゲン 難燃 EP ゴム	ノンハロゲン難燃 架橋ポリエチレン	○ ^{*2}	○	①
	8	シリコンゴム	ガラス編組	○	○	①
	9	ETFE ^{*1}	難燃特殊 耐熱ビニル	○	○	①
同軸 ケーブル	10	ETFE ^{*1}	難燃クロロ ブレンゴム	○	○	①
	11	耐放射線性架橋 ポリエチレン	難燃架橋 ポリエチレン	○	—	②
	12	耐放射線性架橋 ポリエチレン	難燃特殊 耐熱ビニル	○	—	②
	13	耐放射線性架橋 発泡ポリエチレン	難燃架橋 ポリエチレン	○	—	②
	14	耐放射線性架橋 発泡ポリエチレン	ノンハロゲン難燃 架橋ポリエチレン	○	—	②
	15	架橋 ポリエチレン	難燃架橋 ポリエチレン	○	—	②
光ファイバ ケーブル	16	架橋 ポリエチレン	難燃特殊 耐熱ビニル	○	—	②
	17	FRP ^{*3}	難燃特殊 耐熱ビニル	○	○	①
	18	難燃 FRP ^{*3}	難燃特殊 耐熱ビニル	○	○	①

※ 1：四フッ化エチレン・エチレン共重合樹脂

※ 2：絶縁体については UL 垂直燃焼試験と同等の試験内容である ICEA 垂直燃焼試験で、シースについては UL 垂直燃焼試験に合格した No. 14 と同じであることから、UL 垂直燃焼試験に合格したものと同等と考える。

※ 3：光ファイバケーブルには絶縁体がないため、中央支持材を記載

表 2.3-5 ハロゲン化物の放射線分解例（純 PVC の分解） [2-15]

Component gas	Relative composition	
	40 Mrad under vacuum	20 Mrad in oxygen
HCl	100	100
CH ₄	0.06	0.10
CO	0.17	17.0
CO ₂	0.29	16.9
C ₂ H ₆	0.20	—
C ₂ H ₄	0.05	—
C ₃ H ₈	0.008	—
H ₂ O	0.5	1.1
O ₂ (residue)	—	56.8

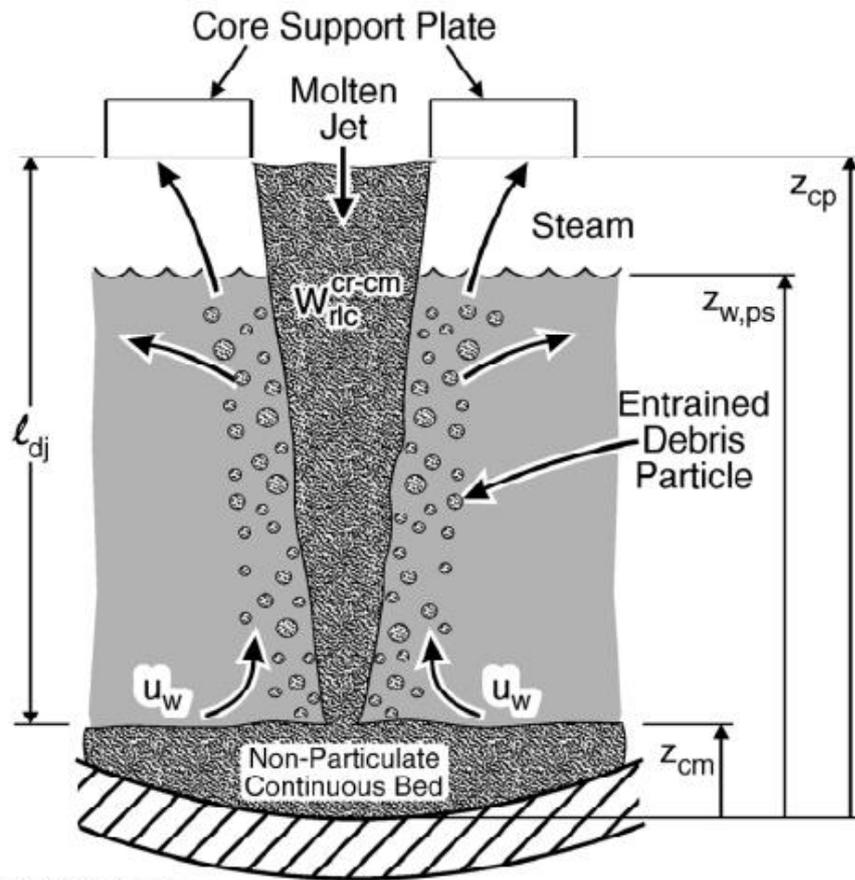


図 2.3-3 過酷事故解析コード MAAP のデブリジェット微粒化挙動の概念図 [2-16]

2.3.3 放射線促進効果

燃料デブリは高線量の放射能を有することから、放射線誘起による腐食について、原子力発電所及び再処理施設での腐食に関する知見を参考とする。

金属腐食に及ぼす放射線の影響については、以下の二つの因子が考えられる。金属の腐食に及ぼす放射線照射の影響を表 2.3-6 に示す。

- ・放射線が金属の接している環境に変化を与え、これが間接的に腐食に影響。

中性子や α , β , γ 線等の電離性放射線が水や溶液を電離して生じたイオンの影響。

- ・放射線による金属(又は表面皮膜)自身に生ずる変化。

中性子等の照射によって金属内、又は既に存在する酸化皮膜内に生じた格子欠陥によってその中の原子や基の易動度が増したり、あるいは金属原子が高速中性子や高速の核分裂生成物の衝撃を受けて原子核変換を起して他の核種となることの影響。

上記因子の内、後者については中性子照射環境における IASCC (Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) がある。ただし、収納缶においては、高速中性子の発生がないことから、主として γ 線照射となる。このため、放射線の影響は後者よりも前者に強く作用するものと考えられる。

前者については、全面腐食の例として、50℃- γ 線照射環境下において、200倍希釈した海水中での炭素鋼の腐食試験結果を図 2.3-4 に、概要を以下に記す。

- ・線量率が低い場合(実機格納容器内で実測された線量率の数倍)には、照射による腐食減量の増加はほとんど見られなかった。
- ・線量率が高い場合(実機格納容器内で実測された線量率の約 100 倍)には、照射による腐食減量は非照射環境の 2 倍弱になった。

また、局部腐食の例として、高レベル廃棄物ガラス固化体に係る貯蔵用金属の耐食性検討結果を図 2.3-5 に、概要を以下に記す。

- ・水冷貯蔵条件下では、鋭敏化処理したステンレスは応力腐食割れ感受性を示した。一方、空冷貯蔵条件では応力腐食割れ感受性を示さなかった。これは、水冷環境における水の放射線分解により、その分解生成物が腐食に影響しているためと考えられる。

上述に記す様に、収納缶材料について、内壁に水分が存在する場合、材料が炭素鋼であれば腐食速度が加速し、ステンレス鋼であれば応力腐食割れの感受性を有することになる。これらはいずれも、水の放射線分解が起因していると考えられる。

また、燃料デブリの放射能と化学組成は、高レベル廃棄物ガラス固化体とは異なり、均質ではない可能性が考えられる。このため、燃料デブリ収納缶内壁は、接触する燃料デブリの性状により、pH、電位が異なる環境に曝される可能性が考えられる。これにより、収納缶内壁は一つの電池(マクロセル)を形成する可能性が考えられる。マクロセル生成による腐食の可能性は、耐食性被膜を形成しない炭素鋼では高く、耐食性被膜を有するステンレス鋼では低い。ただし、燃料デブリに同

伴して、ハロゲン元素を含む材料（例：難燃性塩ビ）が収納された場合、放射線によって、これらが局部腐食を引き起こす可能性があり、影響は生じるものと考えられる。

これら事象の複合条件での腐食については、それぞれの干渉が大きく、理論上での評価が難しいことから、収納缶内の照射と液性の不均一性を模擬した腐食実験によるデータ取得が必要であると考えられる。また、腐食による水素ガス生成に係わるデータ取得も必要である。

表 2.3-6 金属の腐食に及ぼす放射線照射の影響一覧[2-17]

腐食環境	試験条件		材 料	結 果	報 告 者
	放射線の種類	温度および試験法			
純水 (一部水道水)	炉内放射線	304°C d*	炭素鋼	影響なし	Gallonian ⁹⁾
		300°C s**	〃	応力腐食を認めず	Liverman ¹¹⁾
		304°C d	ステンレス鋼	影響なし	Gallonian ⁹⁾
		282°C d	347ステンレス鋼	〃	Rockwell III ¹⁰⁾
		220~290°C d	ステンレス鋼	溶接点の腐食に影響を認めず	Grimshaw ¹²⁾
		304°C d	クロロイ鋼	わずかに腐食増大	Gallonian ⁹⁾
		〃	ジルカロイ-2	影響なし	〃
		282°C d	Zr-Sn合金	重量増加量大となるが腐食によるか否か不明	Rockwell III ¹⁰⁾
		304°C d	ハフニウム	影響なし	Gallonian ⁹⁾
		250~260°C d	Al-Ni合金 (Ni 0.5~2%)	わずかに腐食を抑制する	Krenz ¹³⁾ Martinec ¹⁴⁾ Grant ¹⁵⁾ Draley ¹⁶⁾
	98°C d	2Sアルミニウム	光学および電子顕微鏡観察により腐食増大を認める	Borasky ¹⁷⁾	
	80°C 200°C s	99.0% } 99.9% } アルミニウム 99.99% }	あらかじめ炉内照射した試料を炉外で静的腐食試験をしたが影響を認めない	川崎 ¹⁸⁾	
	γ線	常温 s	99.99% } 24 S } アルミニウム	腐食を抑制する	伊藤 ²¹⁾
		〃	24 ST } アルミニウム	わずかに腐食を抑制する	Hittman ²⁰⁾
2規定酸塩	γ線	〃	軟鋼	腐食を増大	〃
ウラン ニール 溶液	炉内放射線	250~280°C d, s	ステンレス鋼	出力密度大になると急激に腐食増大	Sweeton ²²⁾ Jenks ⁵⁾
		〃	ジルコニウム ジルカロイ-2	〃	Jenks ⁵⁾ Dawson ⁶⁾ ORNL-HARスタッフ ²³⁾
		280°C s	ジルカロイ-2	クロメートイオンの抑制効果なし	Warren ³⁰⁾
		250~280°C s	チタン合金	一般にジルカロイより照射の影響少、流速の影響あり	Jenks ⁵⁾
		260~280°C d, s	白金	わずかに重量減少	Jenks ³¹⁾
	β線	250°C d	ジルカロイ-2	影響なし	Heston ²⁹⁾
	γ線	常温 s	ステンレス鋼	腐食を抑制する	黒柳 ³²⁾
ポリフェル	炉内放射線	270 } 360°C d	炭素鋼	影響なし	Klein ³⁵⁾
			ステンレス鋼	〃	〃
			2Sアルミニウム	〃	〃
			ジルコニウム マグネシウム	腐食を増進する ?	〃
熔融非化物	炉内放射線	815°C s, d	インコネル	影響なし	Keilholz ³⁶⁾
熔融NaNO ₃	γ線	350°C s	軟鋼	わずかに腐食増大	Hittman ²⁰⁾
液体ビスマス	マイクロtron陽子線	—	クロロイ鋼	影響なし	Rasor ³⁷⁾
水分を含む空気	α線	20~25°C s	アルミニウム	腐食を増大	Shatalov ³⁸⁾

*動的試験

**静的試験

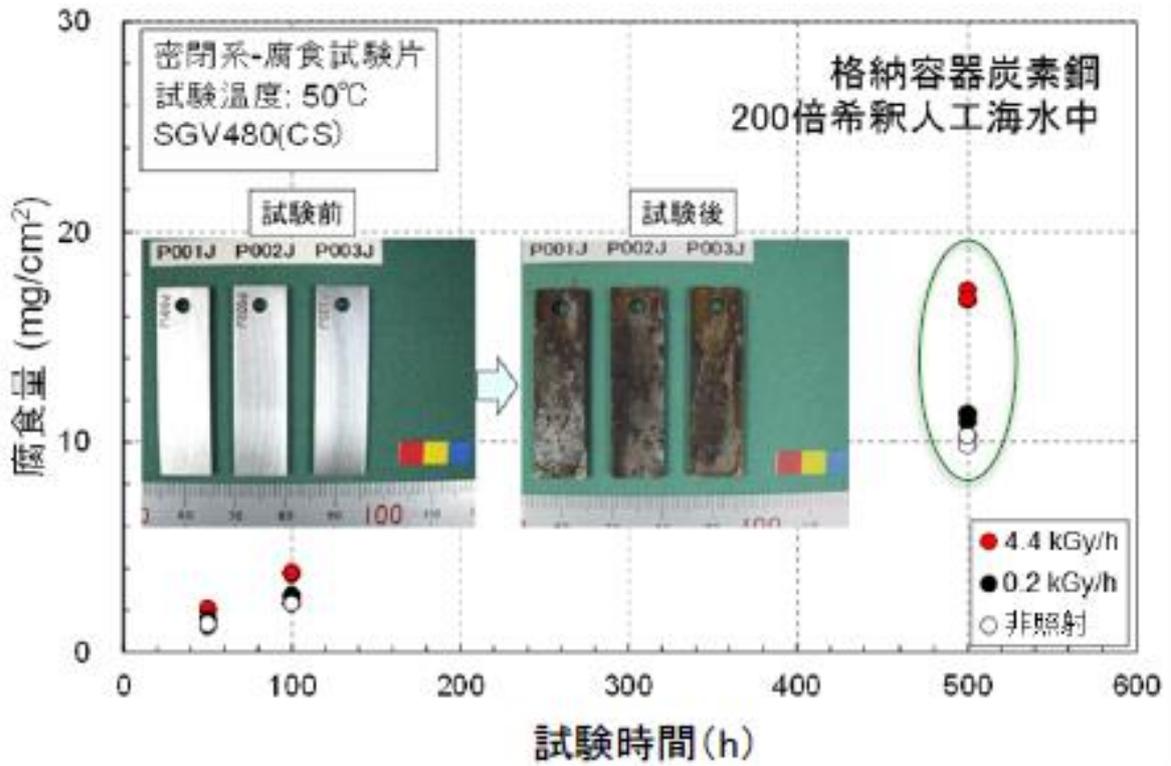


図 2.3-4 γ 線照射環境下における炭素鋼の腐食試験結果[2-18]

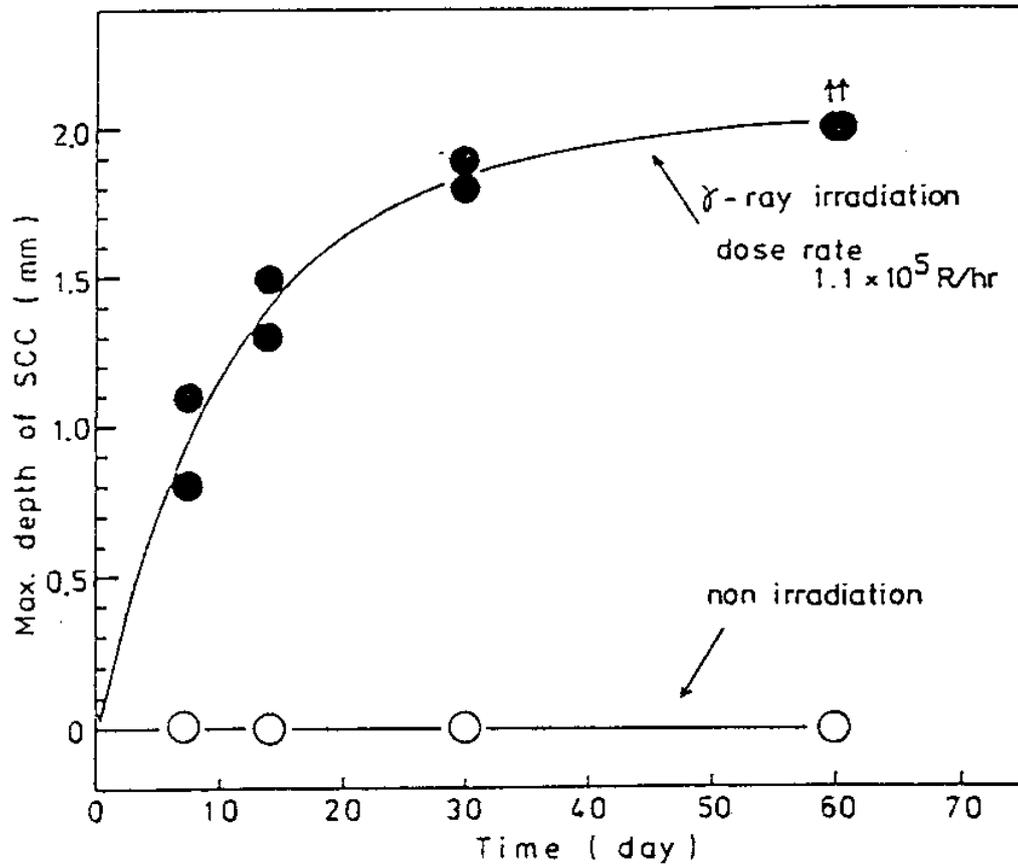


図 2.3-5 鋭敏化処理したステンレス鋼の SCC 感受性に対する γ 線照射の影響[2-19]

2.4 参考文献リスト

- [2-1] IRID, “平成 26 年度補正予算 「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリの性状把握)」進捗状況,” 4 2016. [オンライン]. Available: http://irid.or.jp/_pdf/201509to10_11.pdf. [アクセス日: 19 10 2016].
- [2-2] 仲吉彬, 鹿野祥晴, 岡村信生, 小泉健治, 渡部雅之, 山田誠也, “燃料デブリの性状把握 (27' A), 11; 燃料デブリの含水・乾燥特性の評価,” 著: 日本原子力学会 2015 年秋の大会, 2015.
- [2-3] 須田裕哉, “C-S-H の組成と物理的性質の関係に基づいたセメント硬化体の性能評価に関する研究,” 新潟大学 学位論文, 2013.
- [2-4] Palmer, “DRYING TESTS CONDUCTED ON THREE MILE ISLAND FUEL CANISTERS CONTAINING SIMULATED DEBRIS : INEL--95/00431,” INEL, 1995.
- [2-5] B. Beller, “Presentation to the NWTRB: Fuel Drying Activities by the Environmental Management Program at Idaho National Laboratory,” 著: UNITED STATES, NUCLEAR WASTE TECHNICAL REVIEW BOARD, SUMMER 2014 PUBLIC MEETING, 2014.
- [2-6] C. A. Negin, “Challenges for Removal of Damaged Fuel and Debris,” 著: International Experts' Meeting Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, 2013.
- [2-7] R. Clavier, N. Chikhi, F. Fichot, M. Quintard, “Experimental investigation on singlephase pressure losses in nuclear debris beds: Identification of flow regimes and effective diameter,” Nuclear Engineering and Design, 第 卷 292, p. 222, 2015.
- [2-8] ステンレス協会編: “ステンレス鋼便覧” 第 3 版, 日刊工業新聞社, (1995)
- [2-9] 鷲谷忠博, 荻野英樹, 高野公秀, 矢野公彦, 鍛冶直也, “燃料デブリの特性に関する研究概要,” 著: 日本保全学会 第 12 回学術講演会, 2015.
- [2-10] 日本原子力研究開発機構, 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る廃止措置及び環境回復への原子力機構の取組み (2015 年版), 日本原子力研究開発機構, 2015.
- [2-11] D. W. Akers, Eric R. Carlson, Beverly A. Cook, Scott A. Ploger, Johan O. Carlson, “TMI-2 CORE DEBRIS GRAB SAMPLES EXAMINATION AND ANALYSIS PART1 GEND-INF--075-PT. 1,” EG&G Idaho. Inc., 1986.
- [2-12] Richard K. McCARDELL, Malcolm L. RUSSEL, Douglas W. AKERS, Charles S. OLSEN, “SUMMARY OF TMI-2 CORE SAMOLE EXAMINATIONS,” Nuclear Engineering and Design, 第 卷 118, p. 441, 1990.
- [2-13] 塚田隆, “JAEA における 1F 関連技術開発の状況 -海水と放射線が材料に与える影響に関する検討-,” 著: 日本原子力学会 第 18 回水化学部会定例研究会, 平成 25 年.
- [2-14] 東京電力株式会社, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉 火災防護について,” 東京電力株式会社, 平成 26 年.

- [2-15] EL-SAYED A. HEGAZY, TADAO SEGUCHI , SUEO MACHI, “Radiation-Induced Oxidative Degradation of Poly(vinyl chloride),” Journal of Applied Polymer Science, 第 卷 26, p. 2947, 1981.
- [2-16] 西村聡, 日渡良爾, 古谷正裕, 西義久, “MAAP5.01 及び MELCOR2.1 を用いた軽水炉代表プラントの過酷事故解析 –BWR-5/Mark-II 改良型プラントの全交流電源喪失解析の比較–,” 電力中央研究所, 2014.
- [2-17] 柳沢文夫, “原子炉用金属材料の腐食に及ぼす放射線照射の影響,” 防食技術, 第 卷 8, 第 9, p. 373, 1959.
- [2-18] 本岡隆文, “材料腐食への海水及びガンマ線の影響評価 –1F 廃止措置に向けた JAEA の研究状況–,” 著: 日本原子力学会「水化学部会」第 21 回定例研究会, 平成 26 年.
- [2-19] 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, “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 γ 線照射の影響 (I),” 日本原子力研究所, 1982.

3. 設計上の考慮すべき事項の作成

3.1 各貯蔵方式の比較

代表貯蔵方式を決定するために、海外で採用されている表 3.1-1 に示す使用済燃料の主な貯蔵方式を対象にして比較を行った。各貯蔵方式の比較結果を表 3.1-2 及び表 3.1-3 に示す。表 3.1-2 は各貯蔵方式を貯蔵までのハンドリング毎で比較し、ハンドリング毎での安全機能を抽出したものである。表 3.1-3 は各貯蔵方式を表 3.1-2 で抽出した安全機能、経年劣化防止/監視、異常・事故事象対応ごとに比較したものである。

横型サイロでの貯蔵は、貯蔵密度が低く実現性が低いと推定され、かつ新たな規制要件はキャニスタより内部が対象になることから、他の貯蔵方式に包絡されると考えられる。

コンクリートキャスクでの貯蔵も同様に、コンクリートキャスク自体は国内基準・規格が整備されており、新たな規制要件はキャニスタより内部が対象になることから、他の貯蔵方式に包絡されると考えられる。

ボールドⅡ（収納缶貯蔵）は、他の貯蔵方式と比較し収納缶での閉じ込めが異なるため、規制要件の包絡性ではキャニスタが含まれる地下方式、ボールドⅠのほうが優れている。

地下方式は国内での実績がなく、規制要件はボールドⅠに包絡されるため、海外での燃料デブリ貯蔵の実績があるボールドⅠが、規制要件の抽出を目的とした貯蔵システムのリファレンスとして最適であると考えられる。よって今後の検討はボールド貯蔵（Ⅰ）を代表貯蔵方式として、検討を行っていく。

表 3.1-1 使用済燃料の主な貯蔵方式

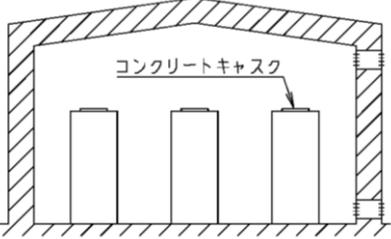
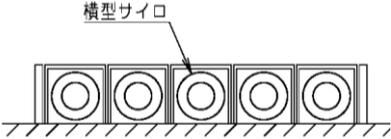
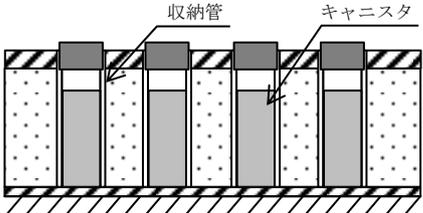
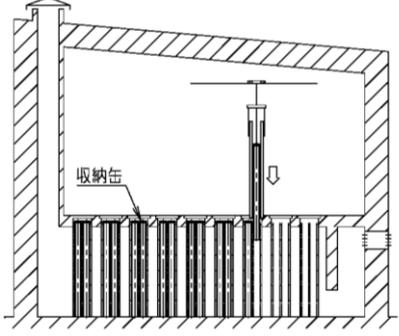
	特徴	主な適用先	概念図
<p>コンクリートキャスク</p>	<p>使用済燃料をキャニスタに入れ、そのキャニスタを貯蔵容器に垂直姿勢で入れて貯蔵する方式。</p>	<p>米国 パリセード原子力発電所 米国 ANO 原子力発電所</p>	
<p>横型サイロ</p>	<p>コンクリートキャスクを横型にした方式で使用済燃料をキャニスタに詰め、貯蔵庫に水平姿勢で貯蔵する方式。</p>	<p>米国 オコニー発電所</p>	
<p>地下方式</p>	<p>地下に設置した給排気付収納缶に、使用済燃料を詰めたキャニスタを入れて貯蔵する方式。ボールドに比べ、遮蔽物量（コンクリート）を削減できる。</p>	<p>米国 キャラウェイ原子力発電所</p>	
<p>ボールド</p>	<p>コンクリート製の大きな空間に収納缶を垂直に並べ、その中に使用済燃料を詰めたキャニスタもしくは収納缶を入れて貯蔵する方式。収納管にキャニスタを収納する方式をボールドⅠ、収納管に収納缶を収納する方式をボールドⅡとして本資料では区別する。</p>	<p>米国 ハンフォードサイト ハンガリー パクシュ原子力発電所</p>	

表 3.1-2 乾式貯蔵方式の比較 (1)

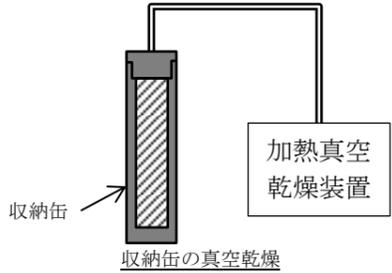
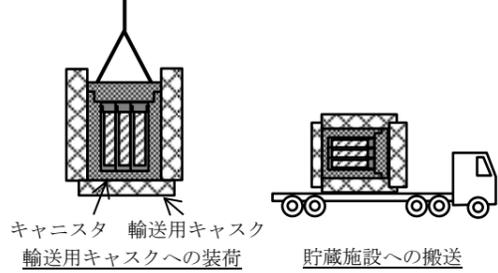
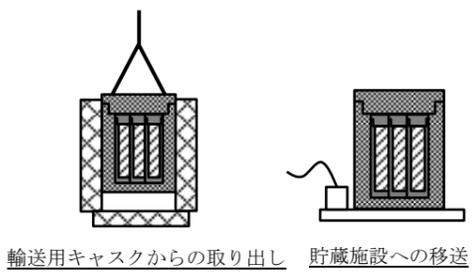
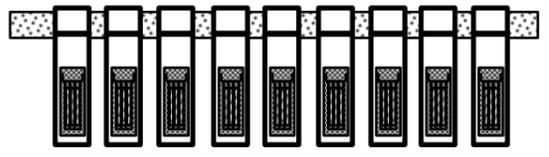
段階		収納缶の真空乾燥	収納缶のキャニスタへの装荷 輸送用キャスクへの装荷 貯蔵施設への搬送	輸送用キャスクからの取り出し 貯蔵場所への搬送・定置	貯蔵場所での貯蔵
貯蔵方式	貯蔵単位				
①コンクリートキャスク	キャニスタ (複数収納缶を収容)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶をプールから引き上げて、乾燥装置（加熱真空乾燥装置）に収容して真空乾燥する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 真空乾燥した収納缶に蓋を設置し、キャニスタに装荷する。キャニスタは収納缶を装荷後に蓋を取り付ける。 ・ キャニスタを輸送用キャスクに装荷して移動台車にて貯蔵施設まで搬送する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送用キャスクを縦起こして、キャニスタを取り出し、コンクリートキャスクに挿入する。 ・ コンクリートキャスクは、移送台車（エアパレット）で貯蔵場所まで移動する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋有 ・ 密封型、開放型の2タイプ
②横型サイロ				<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送用キャスクを横置き状態のままで、キャニスタをコンクリートモジュールに挿入する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋無 ・ 密封型、開放型の2タイプ
③地下方式				<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送用キャスクを縦起こして、キャニスタを取り出し、地下埋設収納缶に挿入する。 ・ キャニスタを収容後、収納缶上蓋（遮蔽プラグ）を設置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋無と有の2タイプ ・ 密封型、開放型の2タイプ
④ボールド I (キャニスタ貯蔵)				<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送用キャスクを縦起こして、キャニスタを取り出し、ボールド収納缶に挿入する。 ・ キャニスタを収容後、収納缶上蓋（遮蔽プラグ）を設置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋有 ・ 密封型、開放型の2タイプ
⑤ボールド II (収納缶貯蔵)	収納缶単体		<ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶（複数）を輸送用キャスクに装荷し、貯蔵施設まで搬送する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 輸送用キャスクを縦起こして、収納缶を取り出し、ボールド収納缶に挿入する。 ・ 収納缶を収容後、収納缶上蓋（遮蔽プラグ）を設置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建屋有 ・ 密封型、開放型の2タイプ
参考：様態		 <p>加熱真空乾燥装置</p> <p>収納缶の真空乾燥</p>	 <p>キャニスタ 輸送用キャスク</p> <p>輸送用キャスクへの装荷 貯蔵施設への搬送</p>	 <p>輸送用キャスクからの取り出し 貯蔵施設への移送</p>	 <p>貯蔵場所での貯蔵（ボールド貯蔵）</p>
安全機能	安全確保のための要件	<ol style="list-style-type: none"> 1) 作業中安全確保 <ul style="list-style-type: none"> ・ 臨界防止（臨界管理） ・ 遮蔽（従事者保護） ・ 閉じ込め（放射性物質放出防止） ・ 除熱 2) 所定の乾燥度の達成 3) 収納缶健全性維持 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 作業中安全確保 <ul style="list-style-type: none"> ・ 臨界防止（臨界管理） ・ 遮蔽（従事者保護） ・ 閉じ込め（放射性物質放出防止） ・ 除熱 2) 収納缶、キャニスタの健全性（密封性） 3) 異常、事故事象対応 <ul style="list-style-type: none"> ・ 落下、転倒 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 作業中安全確保 <ul style="list-style-type: none"> ・ 臨界防止（臨界管理） ・ 遮蔽（従事者保護） ・ 閉じ込め（放射性物質放出防止） ・ 除熱 2) 収納缶、キャニスタ、収納缶（ボールドの場合）の健全性（密封性） 3) 異常、事故事象対応 <ul style="list-style-type: none"> ・ 落下、転倒 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 基本的安全機能確保 <ul style="list-style-type: none"> ・ 除熱、臨界防止、遮蔽、閉じ込め、除熱、放射性分解生成ガスの監視 2) 経年劣化防止/監視 <ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶、キャニスタ、収納缶（ボールド II）の腐食、SCC ・ コンクリート劣化 ・ 放射線分解生成ガス（水素）の発生 3) 異常、事故事象対応 <ul style="list-style-type: none"> ・ 冷却不全（給排気口の閉塞） ・ 水素爆発 ・ 地震、津波、洪水 等の自然災害
	貯蔵方式による違い	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各貯蔵方式で共通。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ボールド II を除き各貯蔵方式で共通。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 横型サイロ方式は、縦起こし操作が無い。 ・ ボールド I・II 及び地下方式では、収納缶の健全性維持が付加される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各貯蔵方式ともに収納缶/キャニスタについて密封型と開放型の2つのオプションがある。 ・ ボールド及び地下方式では、収納缶の経年劣化防止/監視が付加される。

表 3.1-3 乾式貯蔵方式の比較 (2)

項目		コンクリートキャスク	横型サイロ	地下方式	ボールド I	ボールド II
・建屋有無	海外実績	無	無	無	有 (遮蔽機能無)	有 (遮蔽機能無)
	国内での実施	有 (遮蔽機能無)	無	有 (遮蔽機能無)	有 (遮蔽機能無)	有 (遮蔽機能無)
・貯蔵密度 (1000m ² 当り)	海外実績	3252 体 (米国 コロンビア 発電所)	214 体 (米国 モンティセロ 発電所)	3150 体 (HOLTEC 社 UMAX)	3125 体 (仏 CASCAD)	4560 体 (ハンガリー パクシュ)
	相対比較	中	小	中	中	大
・実績	燃料デブリ貯蔵	無	有 (TMI-2)	無	無	有 (ハンフォード)
	健全燃料貯蔵	有	有	有	有	有
・国内基準、規格 (健全燃料)		有	無	無	無	無
・安全機能確保						
臨界防止	真空乾燥	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶	収納缶
	装荷・搬送	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	収納缶群 (総量・水量制限)
	取出し・移動・定置	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	収納缶群 (総量・水量制限)
	貯蔵	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	キャニスタ+収納缶 (総量・水量制限)	収納缶群 (総量・水量制限)
遮蔽	真空乾燥	乾燥装置	乾燥装置	乾燥装置	乾燥装置	乾燥装置
	装荷・搬送	輸送用キャスク	輸送用キャスク	輸送用キャスク	輸送用キャスク	輸送用キャスク
	取出し・移動・定置	移送装置 (詰め替え装置)	移送装置 (詰め替え装置)	移送装置 (詰め替え装置)	移送装置 (詰め替え装置)	移送装置 (詰め替え装置)
	貯蔵	オーバーバック+建屋	コンクリートモジュール	上部遮蔽プラグ	上部遮蔽プラグ	上部遮蔽プラグ
閉じ込め	真空乾燥	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置
	装荷・搬送	収納缶 (蓋付)	収納缶 (蓋付)	収納缶 (蓋付)	収納缶 (蓋付)	収納缶 (蓋付)
	取出し・移動・定置	キャニスタ (収納缶入)	キャニスタ (収納缶入)	キャニスタ (収納缶入)	キャニスタ (収納缶入)	収納缶+収納缶
	貯蔵	キャニスタ (収納缶入)	キャニスタ (収納缶入)	キャニスタ (収納缶入)	キャニスタ (収納缶入)	収納缶+収納缶
除熱	真空乾燥	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置	収納缶+乾燥装置
	装荷・搬送	輸送用キャスク	輸送用キャスク	輸送用キャスク	輸送用キャスク	輸送用キャスク
	取出し・移動・定置	移送装置 (詰め替え装置)	コンクリートモジュール	収納缶 (地下埋設)	ボールド	ボールド
	貯蔵	オーバーバック+建屋	コンクリートモジュール	収納缶 (地下埋設)	ボールド	ボールド
・経年劣化防止 / 監視	密封監視	ガスモニタ	ガスモニタ	地下内雰囲気	収納缶内雰囲気	収納缶内雰囲気
	定期点検	給排気温度	○	○	○	○
		外観	○	○	○	○
		腐食、SCC	○	○	○	○
		水素ガス	○	○	○	○
・異常、事故事象対応	冷却不全	○	○	○	○	
	密封喪失	○	○	○	○	
	落下・転倒	○	○	○	○	
	水素爆発	○	○	○	○	
	自然災害	○	○	○	○	
IAEA の評価としての特徴	評価	△	×	△	○	○
	メリット	健全燃料の国内基準、規格は整備済		貯蔵密度が大きく、敷地面積が小さくなる。	貯蔵密度が大きく、敷地面積が小さくなる。国内では R&D は行われている。国内では R&D は行われている。密封監視が比較的容易。貯蔵後の輸送が比較的容易にできる。	貯蔵密度が大きく、敷地面積が小さい。海外で燃料デブリ貯蔵実績あり。国内では R&D は行われている。密封監視が比較的容易。キャニスタ装荷ハンドリングが省略できる。
	デメリット	貯蔵密度が小さいことと、密封監視技術が確立されていない点が課題	必要な敷地面積が最も大きいのが難点	国内では、R&D 含め未経験で除熱性等の確認が必要。	施設の拡張性が乏しい。	施設の拡張性が乏しい。
規制要件の包絡性		燃料デブリ固有の要件 (キャニスタ (収納缶)) は、コンクリートキャスク、横型サイロ、地下方式と共通			燃料デブリ固有の要件としては、収納缶は全方式共通。収納缶のみが異なるが、燃料デブリに特有の要件は少ない。	
総合評価		△	×	△	○	△
		コンクリートキャスクは国内基準・規格が整備されており、新たな規制要件はキャニスタ内部が対象で他の貯蔵方式に包絡される。	構内貯蔵の実現性が低いため採用が困難と推定され、新たな規制要件はキャニスタ内部が対象で他の貯蔵方式に包絡される。	国内での実績がなく、ボールド I に規制要件が包絡されるため、リファレンスとしてはボールド I が優れている。	規制要件としては他の貯蔵方式を包絡するため、リファレンスとしては最適と考える。	他の貯蔵方式と比較し収納缶での閉じ込めが異なるため、規制要件の包絡性ではキャニスタが含まれる地下方式、ボールド I のほうが優れている。

：各貯蔵方式の共通項目

3.2 乾式貯蔵システム建屋配置に係る概念検討

3.1 項で選定した代表貯蔵システムであるボールド貯蔵方式での建屋配置の概念検討を実施した。ボールド貯蔵方式建屋配置の検討を実施する上での前提条件を表 3.2-1 に示す。

3.2.1 建屋配置設計

3.2.1.1 貯蔵建屋のエリア構成

貯蔵建屋をその機能上、以下の4つのエリアに分ける。エリア構成の概念と主要動線計画を図 3.2-1 に示す。

(1) 受入エリア

トレーラーによるキャスク搬入の受入スペース、キャスクの縦起こしスペースを設ける。また、キャスク吊り上げのための天井クレーン、水平吊具、鉛直吊具、ハンドリングエリアへのキャスク移動のためのエアパレットを受入エリアに配置する。

(2) ハンドリングエリア

受入エリアからエアパレットで運ばれてきたキャスクの蓋取り外し、キャニスタの検査を実施し、天井クレーンにより貯蔵エリアへキャニスタを移動させる。

また、受入エリアに戻す前のキャスク、エアパレットの除染場を設ける。

(3) 貯蔵エリア

ハンドリングエリアから運ばれてきたキャニスタを貯蔵する。

(4) ユーティリティエリア

出入管理室、電気盤、空調設備等を配置する。

3.2.1.2 設計上の考慮すべき事項

建屋配置設計上で考慮すべき事項に対して、燃料デブリ貯蔵特有の項目及び健全燃料貯蔵特有と共通の項目に分類したものを表 3.2-2 に示す。

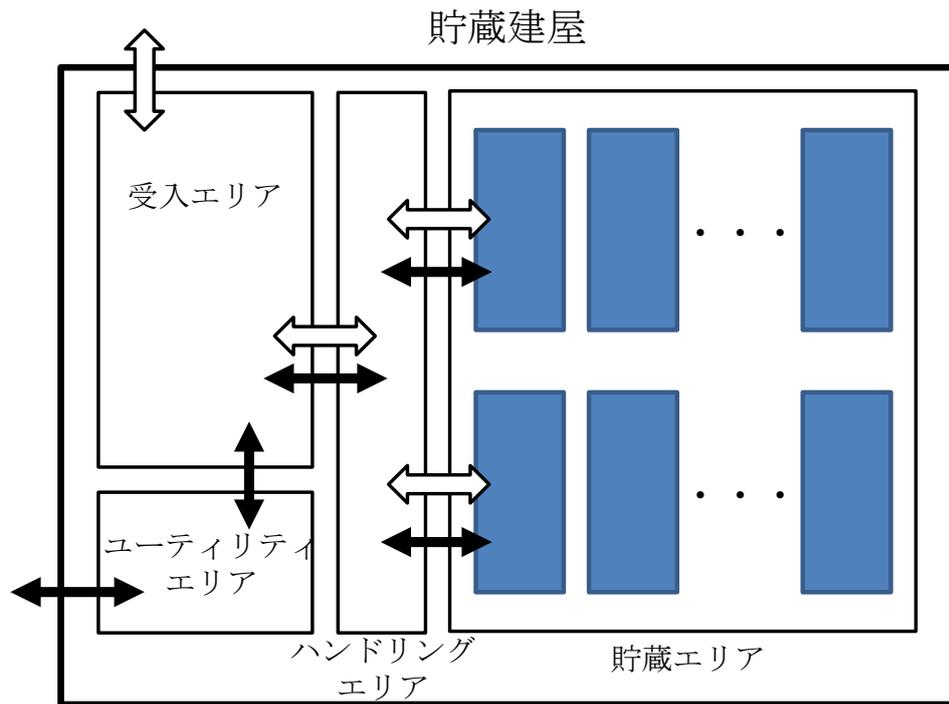
建屋配置設計上で考慮すべき事項で破損燃料特有の項目は特になく、健全燃料の貯蔵建屋と同等の設計方針で問題ないと考えられる。

3.2.1.3 建屋配置検討結果

貯蔵建屋概念配置図を図 3.2-2 に示す。また、貯蔵建屋内ハンドリングフローに基づいたキャスク及びキャニスタの動線を、図 3.2-2 に合わせて示す。

表 3.2-1 建屋配置検討条件

項目		条件	規制要件の抽出
敷地条件	施設設置場所	指定せず	—
	地盤面	指定せず	—
貯蔵容器（キャニスタ）数		600 体	—
容器要件	キャニスタ形状	長さ 5m×直径 2m	—
	メンテナンススペース	なし	・ハンドリング中の事故
建屋要件	建屋形状	地上式	・遮蔽、自然災害
	キャニスタ仮置き場	貯蔵エリア内に併設	・ハンドリング中の事故
	キャニスタ仮置き数	1 ピット内に 1 列分の配置スペース	
	施設内ハンドリング	パレット自立式（2 軸） 床上クレーン	・ハンドリング中の事故
	中性子ストリーミング対策	給気風路、排気風路に遮蔽体を設置する。	・遮蔽
	プラグ・コンクリート厚さ	1m	・遮蔽
	収納管ピッチ	1000mm	・除熱
	外壁厚さ	0.3m 以上	・自然災害、遮蔽
取扱要件	建屋クレーン	160ton	



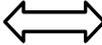
 : キャスク、キャニスタの流れ
 : 人の流れ

図 3.2-1 エリア構成と主要動線

表 3.2-2 建屋配置設計上の考慮すべき事項

項目		燃料デブリ特有の項目	健全燃料との共通項目
安全機能	臨界防止	—	建屋に臨界防止機能を期待しない。
	遮蔽	—	遮蔽要求厚又はその他の遮蔽要求機能を満足する設計とする。
	閉じ込め	—	建屋に閉じ込め機能を期待しない。
	除熱	—	自然冷却方式を採用し、貯蔵エリアに給排気口を設ける。
地震		—	耐震重要度分類に応じた耐震設計を実施する。
津波		—	基準津波による遡上波の地上部からの流入を防止する設計とする。
自然現象	洪水	—	洪水による地上部からの流入を防止する設計とする。
	風（台風）	—	想定される台風を考慮し建築基準法に基づいた設計とする。
	竜巻	—	竜巻荷重により建屋安全機能が損なわれない設計とする。
	凍結	—	—
	降水	—	建屋の降雨水は、建屋内のピットに集水し、排水する設計とする。
	積雪	—	最深積雪量を考慮した設計とする。 積雪による給排気口の閉塞を防止する設計とする。
	落雷	—	想定される落雷に対して、貯蔵建屋に避雷、接地設備を設ける。
	地滑り	—	—
	火山	—	火山灰の堆積を考慮した設計とする。 火山灰の堆積による給排気口の閉塞を防止する設計とする。
	生物学的事象	—	小動物の侵入を防止する設計とする。
外部人為事象	飛来物	—	航空機落下等に対して、建屋構造上耐えられる設計とする。
	ダムの崩壊	—	—
	爆発	—	—
	外部火災	—	建屋周辺の火災により建屋安全機能が損なわれない設計とする。
	有毒ガス	—	有毒ガスにより建屋安全機能が損なわれない設計とする。
	船舶の衝突	—	—
	電磁的障害	—	—

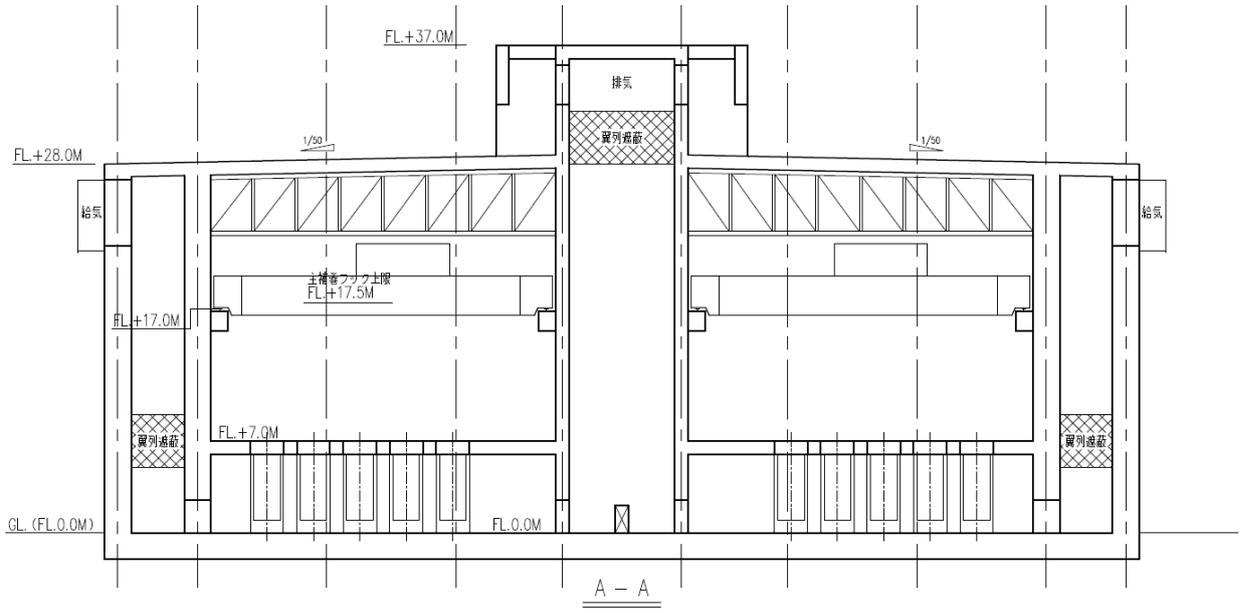


図 3.2-2 貯蔵施設概要 (2/2)

3.3 乾式貯蔵システムの運用様態

燃料デブリを共用プールから搬出し乾式貯蔵施設への搬送、長期貯蔵に至るまでの運用様態を検討した。ハンドリングフローを表 3.3-1 に示し、各状態での安全機能/安全維持条件を抽出した。また、各ハンドリングから抽出した安全機能/安全維持条件を燃料デブリ特有なもの、健全燃料と共通なものに分類したものを表 3.3-2 に示す。

表 3.3-1 ボールト I 貯蔵時のハンドリングフロー (1/5)

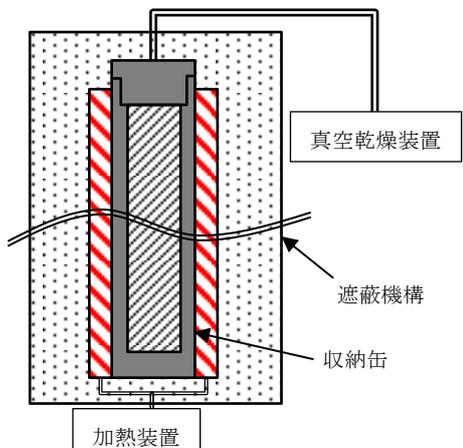
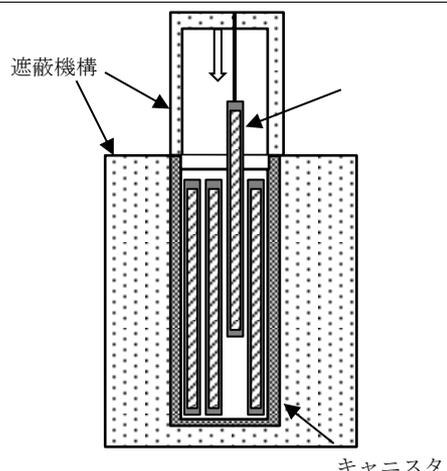
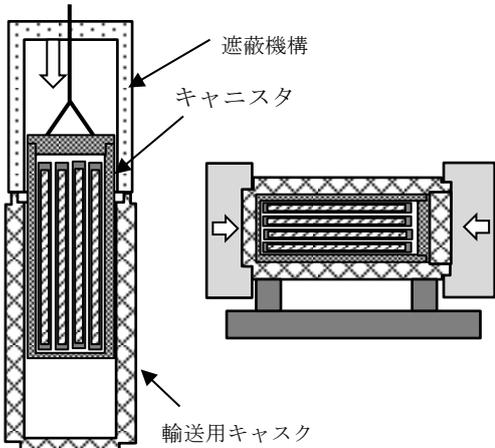
1	真空乾燥	ハンドリング
		<p>収納缶をプールから引き上げて、乾燥装置（加熱真空乾燥装置）に收容して真空乾燥する。</p>
		<p>安全機能/安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 作業中の安全確保</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶内の臨界防止 ・ 真空乾燥中の遮蔽 ・ 収納缶による閉じ込め <p>2) 収納缶の健全性維持</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高温時強度 ・ 応力腐食割れ <p>※以降、同じ様態での安全機能の記載は省略する</p>
収納缶をキャニスタに収納	ハンドリング	
2		<p>真空乾燥した収納缶をキャニスタ内に収納し、キャニスタ蓋を閉鎖する。</p>
		<p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 作業中の安全確保</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ハンドリング装置による遮蔽 (収納缶挿入時、キャニスタ蓋閉め時) ・ 収納缶、キャニスタの除熱 <p>2) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶の落下
3	輸送用キャスクに収納	ハンドリング
3		<p>キャニスタを輸送用キャスク内部に収納する。その後、輸送用キャスクの蓋閉め、横倒し及び緩衝体取付を実施する。</p>
		<p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 作業中の安全確保</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ハンドリング装置、輸送用キャスクによる遮蔽 ・ 輸送用キャスクによる閉じ込め ・ 輸送用キャスクの除熱 <p>2) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ キャニスタ、輸送用キャスクの落下、転倒

表 3.3-1 ボールト I 貯蔵時のハンドリングフロー (2/5)

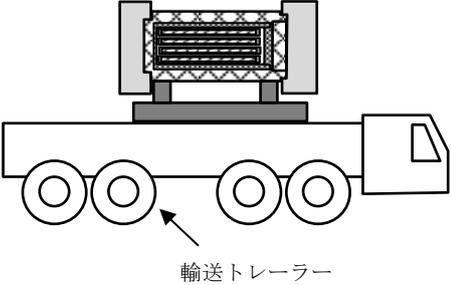
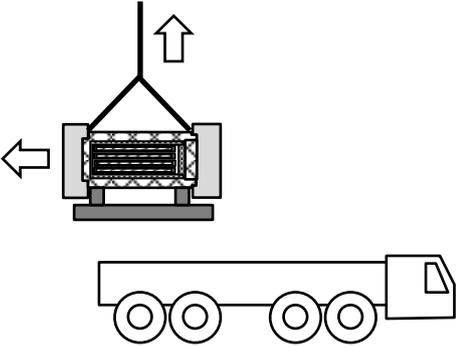
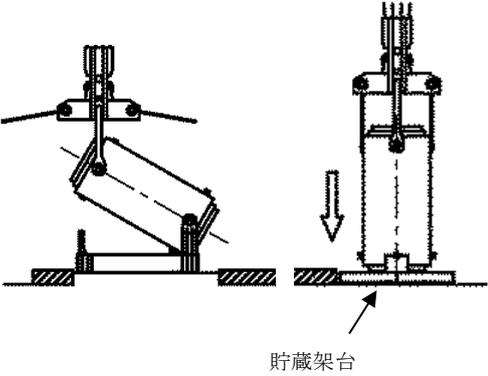
4	貯蔵施設への搬送	ハンドリング
	 <p>輸送トレーラー</p>	<p>構内輸送用キャスクをトレーラー上に設置し、トレーラーにより共用プールから貯蔵施設へ搬送する。</p> <p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送用キャスクの落下
5	トレーラーからのキャスク積み下ろし	ハンドリング
		<p>貯蔵施設内受入れエリアでトレーラーからキャスクを下ろし、縦起こし架台上に設置する。その後、緩衝体を取り外す。</p> <p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送用キャスクの落下
6	キャスク縦起こし	ハンドリング
	 <p>貯蔵架台</p>	<p>縦起こし架台及びクレーンによりキャスクを縦起こし、吊り上げて貯蔵架台上に設置する。</p> <p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・輸送用キャスクの転倒

表 3.3-1 ボールト I 貯蔵時のハンドリングフロー (3/5)

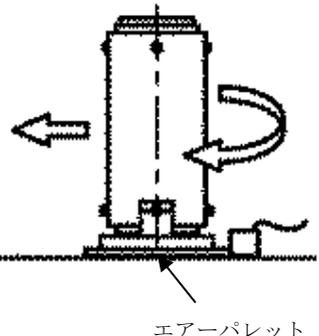
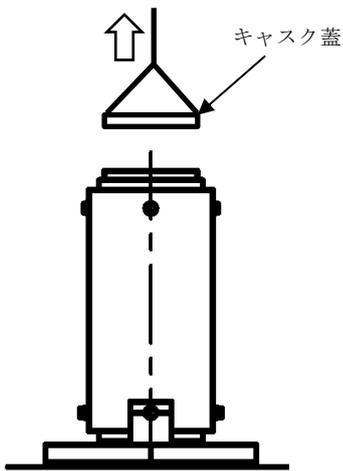
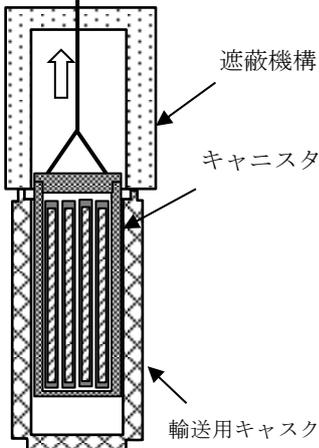
7	エアパレットでの搬送	ハンドリング
		エアパレットにてキャスクをハンドリングエリアに搬送する。
		安全機能/安全維持条件 1) 異常、事故事象対応 ・搬送中の急停止、転倒
8	キャスク蓋取り外し	ハンドリング
		キャスクの蓋を取り外す。
		安全機能/安全維持条件 1) 作業中の安全確保 ・ハンドリングエリアによる遮蔽 ・ハンドリングエリアによる閉じ込め 2) 異常、事故事象対応 ・蓋の落下
9	キャニスタ取出し・検査	ハンドリング
		キャスク内部からキャニスタを取り出し、検査(外観、溶接部、密封等)を行う。
		安全機能/安全維持条件 1) 作業中の安全確保 ・ハンドリング装置による遮蔽 2) 異常、事故事象対応 ・キャニスタの落下、転倒

表 3.3-1 ボールト I 貯蔵時のハンドリングフロー (4/5)

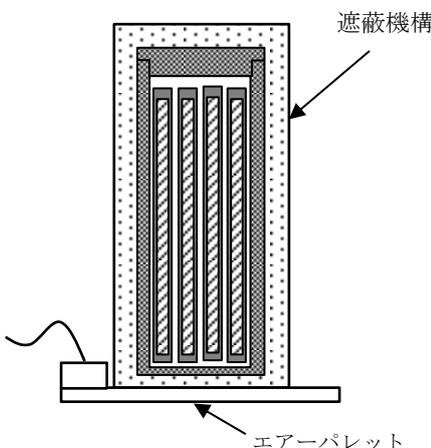
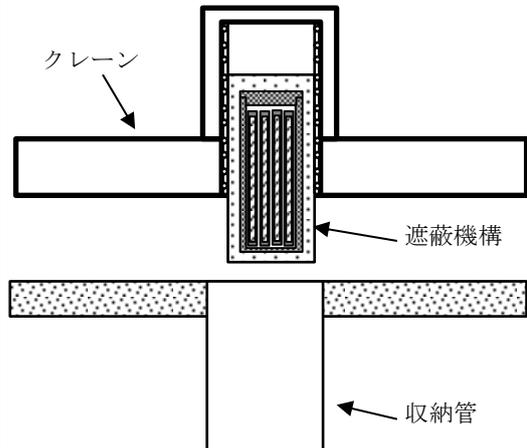
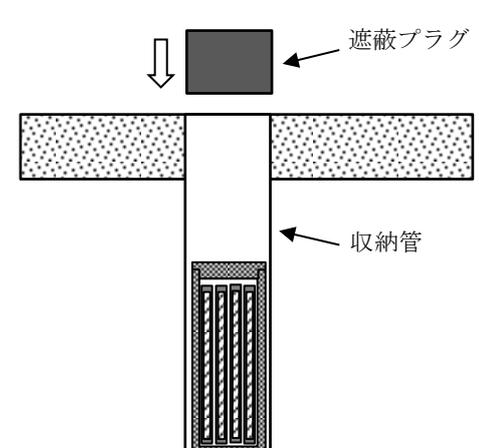
10	エアパレットでの搬送	ハンドリング
	 <p>遮蔽機構</p> <p>エアパレット</p>	<p>エアパレットにてキャニスタを貯蔵エリアに搬送する。</p> <p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・搬送中の急停止、転倒
11	クレーンでの移送	ハンドリング
	 <p>クレーン</p> <p>遮蔽機構</p> <p>収納管</p>	<p>キャニスタを貯蔵エリア内クレーンにて収納缶上に移送する。</p> <p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 作業中の安全確保</p> <ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵エリアによる遮蔽 ・貯蔵エリアによる閉じ込め <p>2) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタの落下
12	キャニスタの収納、遮蔽プラグの設置	ハンドリング
	 <p>遮蔽プラグ</p> <p>収納管</p>	<p>クレーンにてキャニスタを収納管内に収め、遮蔽プラグを設置する。</p> <p>安全機能/安全維持条件</p> <p>1) 作業中の安全確保</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プラグによる遮蔽 <p>2) 異常、事故事象対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プラグの落下

表 3.3-1 ボールト I 貯蔵時のハンドリングフロー (5/5)

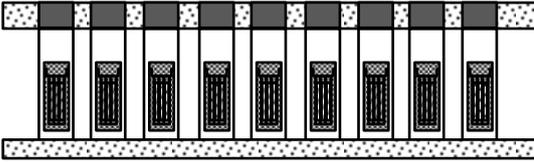
12	長期貯蔵	ハンドリング
		長期貯蔵。監視。
		<p>安全機能/安全維持条件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 基本的安全機能確保 <ul style="list-style-type: none"> ・ 除熱、臨界防止、遮蔽、閉じ込め 2) 経年劣化防止/監視 <ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶、キャニスタ、収納管の腐食、SCC ・ コンクリート劣化 ・ 放射線分解による水素ガスの発生 3) 異常、事故事象対応 <ul style="list-style-type: none"> ・ 冷却不全（給排気口の閉塞） ・ 水素爆発 ・ 地震、津波、洪水 等の自然災害

表 3.3-2 安全機能/安全維持条件の分類

ハンドリング	安全機能/安全維持条件	
	燃料デブリ特有の項目	健全燃料との共通項目
真空乾燥	収納缶内の臨界防止 真空乾燥中の遮蔽 高温時強度 応力腐食割れ	収納缶による閉じ込め
収納缶をキャニスタに収納	ハンドリング装置による遮蔽	収納缶、キャニスタの除熱 収納缶の落下
輸送用キャスクに収納		ハンドリング装置による遮蔽 輸送用キャスクによる遮蔽 輸送用キャスクによる閉じ込め 輸送用キャスクの除熱 キャニスタ、輸送用キャスクの落下、 転倒
貯蔵施設への搬送		輸送用キャスクの落下
トレーラーからのキャスク 積み下ろし		輸送用キャスクの落下
キャスク縦起こし		輸送用キャスクの転倒
エアパレットでの搬送		搬送中の急停止、転倒
キャスク蓋取り外し		ハンドリングエリアによる遮蔽 ハンドリングエリアによる閉じ込め 蓋の落下
キャニスタ取出し・検査		ハンドリング装置による遮蔽 キャニスタの落下 キャニスタの転倒
エアパレットでの搬送		搬送中の急停止、転倒
クレーンでの移送		貯蔵エリアによる遮蔽 貯蔵エリアによる閉じ込め キャニスタの落下
キャニスタの収納、遮蔽プ ラグの設置		プラグによる遮蔽 プラグの落下
長期貯蔵	収納缶内の臨界防止 放射線分解による水素ガスの 発生 水素爆発	収納缶の除熱 遮蔽 閉じ込め 収納缶、キャニスタ、収納管の腐食、 SCC コンクリート劣化 冷却不全（給排気口の閉塞） 地震、津波、洪水 等の自然災害

4. 貯蔵容器仕様（キャニスタ、収納缶）

4.1 貯蔵容器の仕様

真空乾燥システムの仕様及び安全評価の検討で用いる収納缶の仕様は、燃料デブリを貯蔵した実績があることから TMI-2 のキャニスタ[4-1]をリファレンスとした。また、キャニスタの仕様は過去の国内研究[4-2]をリファレンスとした。表 4.1-1 にそれらの仕様を、図 4.1-1 から図 4.1-3 に収納缶、キャニスタ及びボルト貯蔵の概略図を示す。

表 4.1-1 検討に用いる収納缶及びキャニスタの仕様

項目		条件
収納缶	材質	ステンレス鋼 (SUS304)
	形状寸法	円筒容器 全長：3800～4000mm 肉厚：6～10mm 内径：250～360mm 上蓋厚さ：80mm 底板厚さ：10mm
	中性子吸収材	ボロンステンレス (B-SUS) 板 (収納缶内面に正方形に設置) 内寸：160～210mm 板厚：6mm
	中性子吸収材の ボロン含有量	1wt%
キャニスタ仕様/ボルト仕様		<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ：収納缶 12 基収納 ステンレス鋼製円筒容器 外径：1676mm 胴板厚：16mm 収納缶ピッチ：280mm 上部蓋及び遮蔽体：215mm 下部遮蔽体：140mm ・ボルト収納管：キャニスタを 1 基収納、炭素鋼製管 内径：1.7m 板厚：0.25m 管長さ：5m ・ボルト配列：正方格子、ピッチ 3.5m ・その他：ボルト収納管上部は、コンクリート製遮蔽プラグ（厚さ 1m）、下部はコンクリート基礎（厚さ 2m）

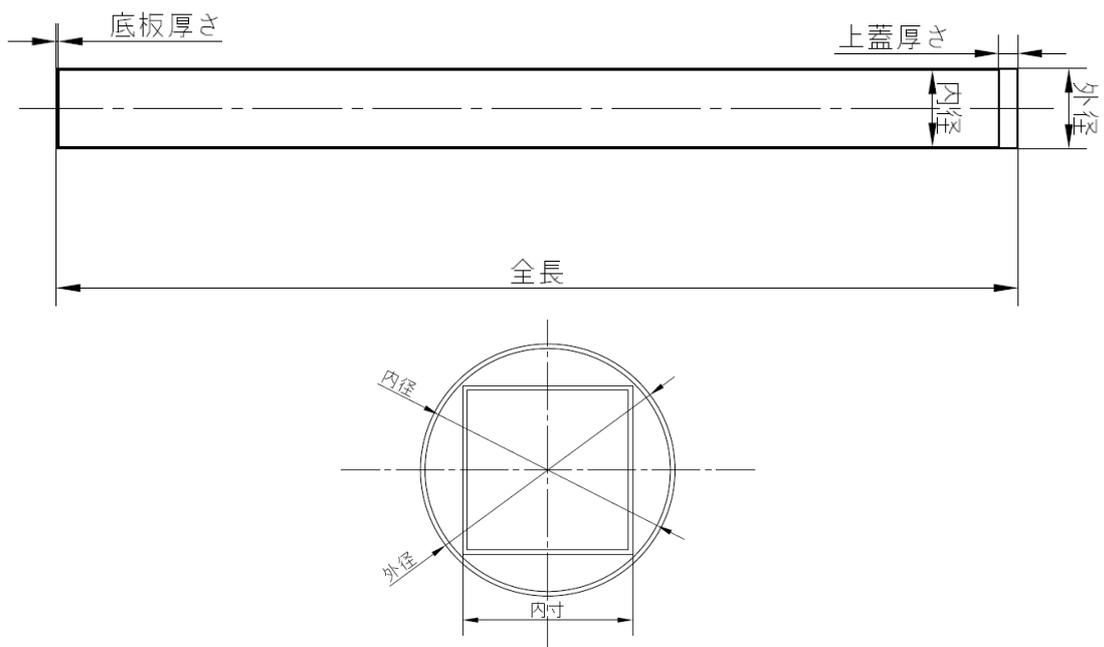


図 4.1-1 収納缶概略図

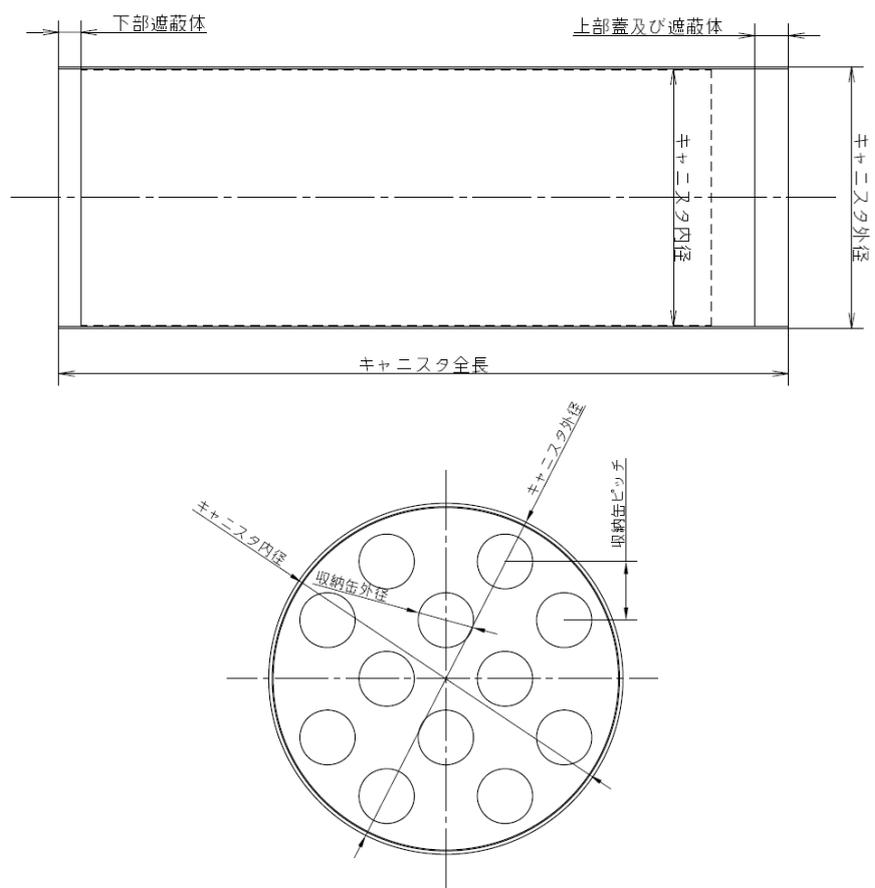


図 4.1-2 キャニスタ概略図

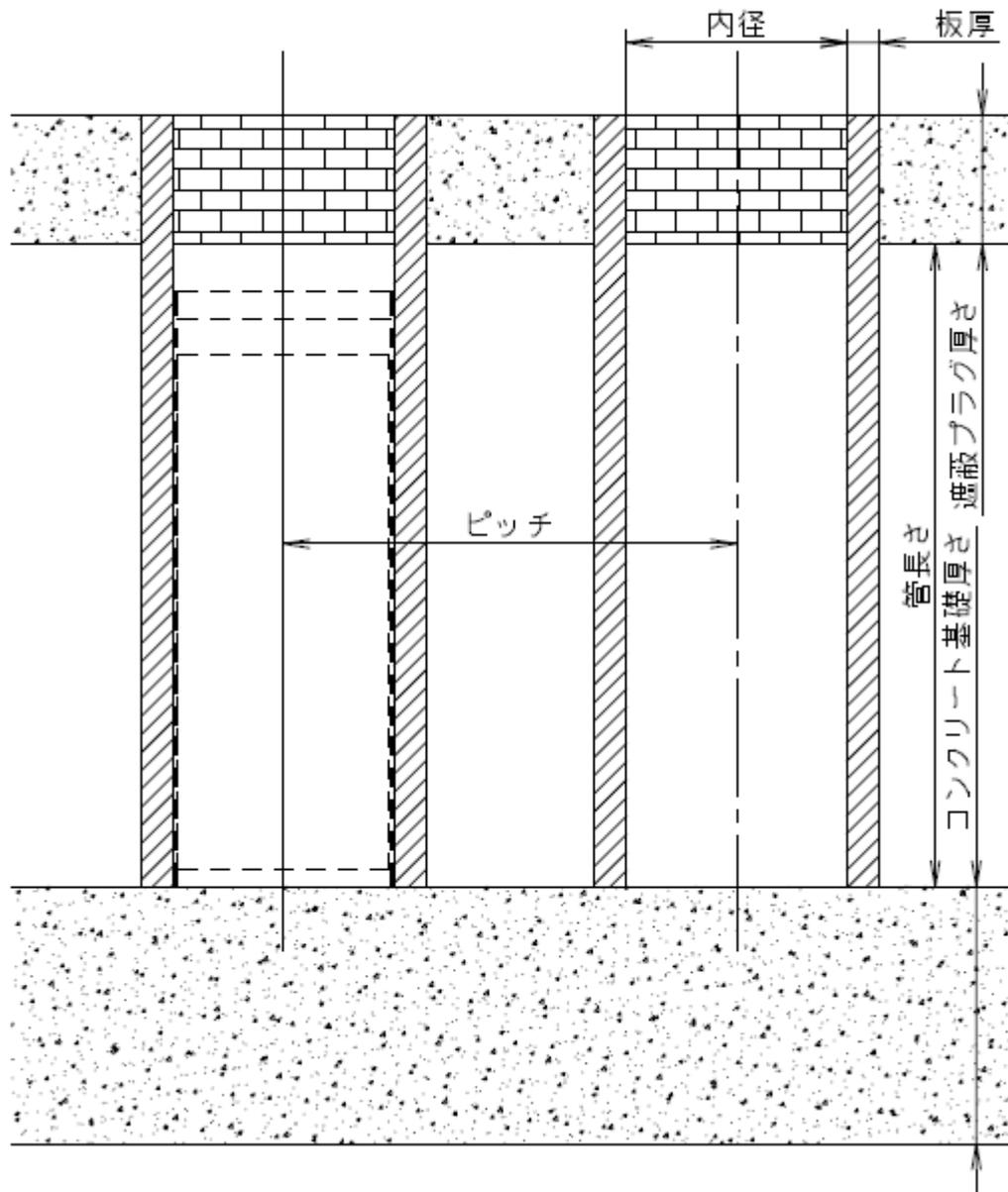


図 4.1-3 ボールト貯蔵概略図

4.2 参考文献リスト

- [4-1] “ TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis ” , DOE , DOE/SNF/REP-084, 2003
- [4-2] 竹田浩文, 亘真澄, 白井孝治, 三枝利有, ”コンクリートキャスクの実用化研究－キャニスタ内のヘリウムの漏えい検知方法の開発”, 電力中央研究所報告 : N04031 (2005)

5. 真空乾燥システムの仕様のとりまとめ

5.1 真空乾燥システム評価検討

5.1.1 目的

燃料デブリを収納した収納缶に対する真空乾燥システムの基本要件をまとめるにあたり、所定の乾燥度を達成できることを解析により確認する必要がある。本項にてその評価（蒸発・伝熱）モデルを構築した。

5.1.2 検討要領

真空乾燥システムの評価フローを図 5.1-1 に示す。真空乾燥システムの評価には、燃料デブリ収納缶の伝熱モデル、その温度解析の結果を用いた蒸発モデルの構築が必要になる。そのため、まず燃料デブリ特性調査及び過去の類似検討結果の調査を行い、それらの情報を基に真空乾燥システムの伝熱モデルと蒸発モデルを構築した。今後実施される、小型試験及び実規模試験を通じてモデルの補正、精度の向上を行う必要がある。

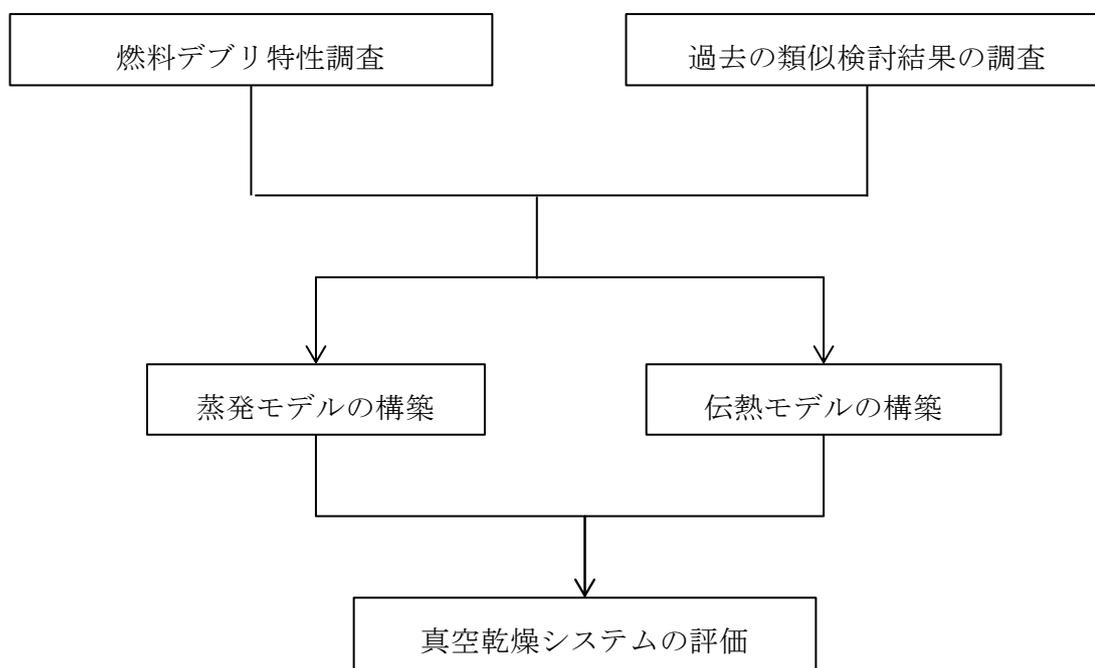


図 5.1-1 真空乾燥システムの評価フロー

5.1.2.1 蒸発モデルの検討

燃料デブリ収納缶の腐食防止のための真空乾燥システムの評価における蒸発モデルを検討した。2.1 項で示されている燃料デブリの特性調査結果から酸化物（多孔性セラミック）主体とセメント成分主体（MCCI 生成物）が考えられ、それらで構成される燃料デブリに含まれる水分として以下が挙げられている。

- ・自由水（Free water, 燃料デブリ中のポアや燃料デブリ層間、表面に存在する。）
- ・物理結合水（ゲル水）（ゲル空隙（0.2～1.5nm レベル）に存在する、セメント成分のみ）
- ・化学結合水（セメント成分のみ）

この内、自由水と物理結合水については 110℃以下で容易に散逸することが明らかになっている[5-1]。化学結合水は、非蒸発性水分と定義されており、100℃以上の加熱で蒸発が開始され 1000℃近くまで強熱して完全除去される水分であるため、完全に除去することは困難と考えられるが、残留する水量が臨界評価の許容値以下であれば問題は発生しない。また、除去できる化学結合水量は燃料デブリ温度に大きく依存しており、より加熱することで収納缶内に残留する水量（平衡水量）を少なくできる[5-2]。以上から、乾燥により時間がかかると想定される燃料デブリがセメント成分主体のケースの乾燥評価について記述する。

次に高温乾燥機中におかれた燃料デブリの乾燥特性について記載する。収納缶重量 G+M(kg) と乾燥速度 R の時間 θ に対する変化を図 5.1-2、図 5.1-3 に示す。乾燥開始後にまず予熱期間があり、その期間中も少量の水分は除去されるが、解析では予熱期間中に水分の除去はないと保守的に仮定することもできる。予熱期間後、燃料デブリの温度上昇が一時止まり、一定の速度で乾燥する恒率乾燥期間となる。燃料デブリの様な固体と水の混合物では、固体中の水が飽和状態に近い限りは乾燥機からの加熱量に依存した一定の乾燥速度となる。その際の乾燥速度 R は以下の式のようになる[5-3]。

$$R = \frac{Q}{\lambda_w} = \frac{h \cdot (t - t_w)}{\lambda_w}$$

ここで

R：乾燥速度(kg/m²s)

Q：熱流束(kW/m²)

H：熱伝達率(kW/m²°C)

λ_w ： t_w における蒸発潜熱(kJ/kg-水)

t_w : 湿球温度 (材料温度) (°C)

t : 乾球温度 (熱源温度) (°C)

自由水がすべて除去され含有水量が限界(臨界)水量に達すると、乾燥速度は含有水量と加熱温度に比例して減少する減率乾燥期間となる。乾燥速度の低下は固定内部の流体抵抗と蒸気によって起こる。含有水量の時間変化は次の式のようなになる [5-3]。

$$M = M_e + (M_c - M_e) \cdot e^{-\alpha \cdot \theta}$$

ここで

M : 含水量 (kg)

M_c : 限界水量 (kg)

M_e : 平衡水量 (kg)

α : 定数 (1/h)

θ : 乾燥時間 (h)

限界水量 M_c は自由水が除去されたあとの含水量、つまり物理・化学結合水の含水量となり、平衡水量 M_e は特定の温度条件で最終的に乾燥が止まる水量である。平衡水量はその対象物の温度に大きく依存し、より乾燥させるためにはより高い温度が必要とされるため、小型試験時に燃料デブリの平衡水量と温度の関係を明らかにする必要がある。定数 α は固体中の液体輸送機構、すなわち固体層の厚さや密度、固体中の液体の拡散率に依存する。それら性状は材料によって様々なので、小型試験・実規模試験において燃料デブリの性状を確認し定数 α を評価することになる。

なお、乾燥試験にて計測されるのは水分の除去量になるので、収納缶に残留する水量を把握するためには予め収納缶内に含まれる水分を予測しておく必要がある。

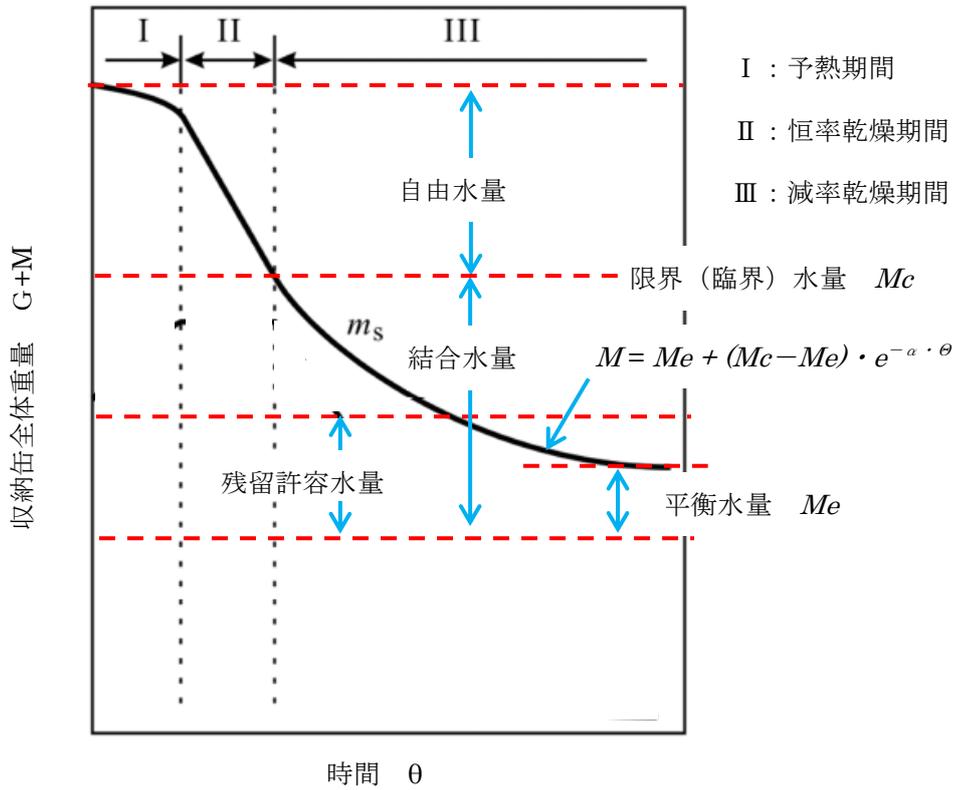


圖 5.1-2 乾燥度 特性曲線 (理論) [5-3]

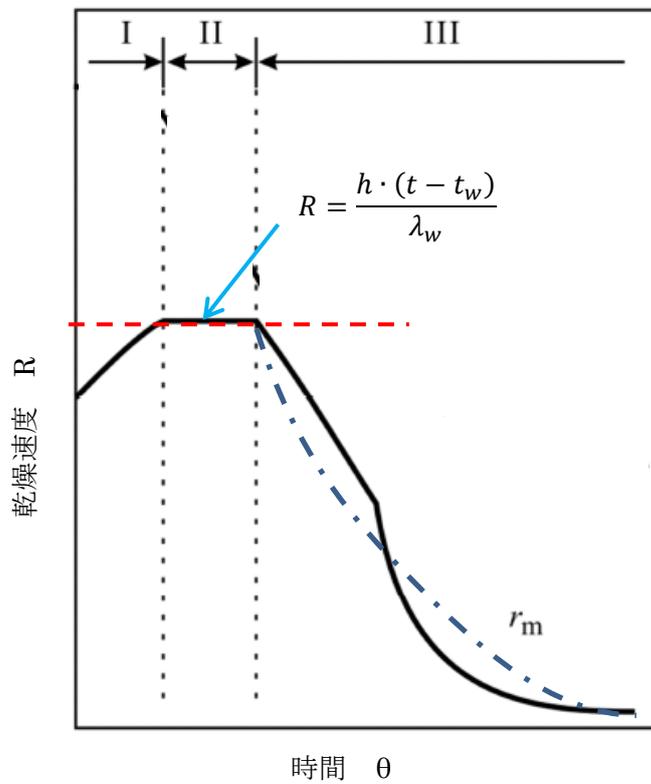


圖 5.1-3 乾燥速度 特性曲線 (理論) [5-3]

5.1.2.2 伝熱モデルの検討

同様に真空乾燥システムの評価における伝熱モデルを検討した。

過去の使用済燃料貯蔵キャスク検討においては 3 次元 FEM による温度解析が行われていたが [5-6]、不確定要素が多い燃料デブリがある本検討については 3 次元 FEM を実施しても、期待する予測精度が得られない可能性が高い。よって本検討は事前検討として保守性を確保した 0 次元又は 1 次元の非定常伝熱解析を行うことで、不確定要素のパラメータスタディが簡便にできるモデルとした (図 5.1-4)。

乾燥工程時の温度履歴(予測)を図 5.1-4 に示す。燃料デブリは加熱器より加熱され温度が上昇する (Ⅰ. 予熱期間) が、自由水の蒸発に伴って温度は一定に保たれる (Ⅱ. 恒率乾燥期間)。自由水の除去された後、燃料デブリの温度上昇が再開し、加熱源温度近傍まで上昇する (Ⅲ. 減率乾燥期間)。伝熱モデルの概要を図 5.1-4 に示す。

伝熱モデルによる燃料デブリ温度評価の際に必要な情報が燃料デブリの熱物性と採用された加熱方法の熱伝達率である。燃料デブリの熱物性 (熱伝導率、密度、比熱、輻射率など) については、その詳しい性状が不明なため試験による情報の取得が必要となる。加熱方法による熱伝達率はその加熱方式によって机上検討による予測が可能だが、その数値を試験によって確認・必要とあれば補正する。

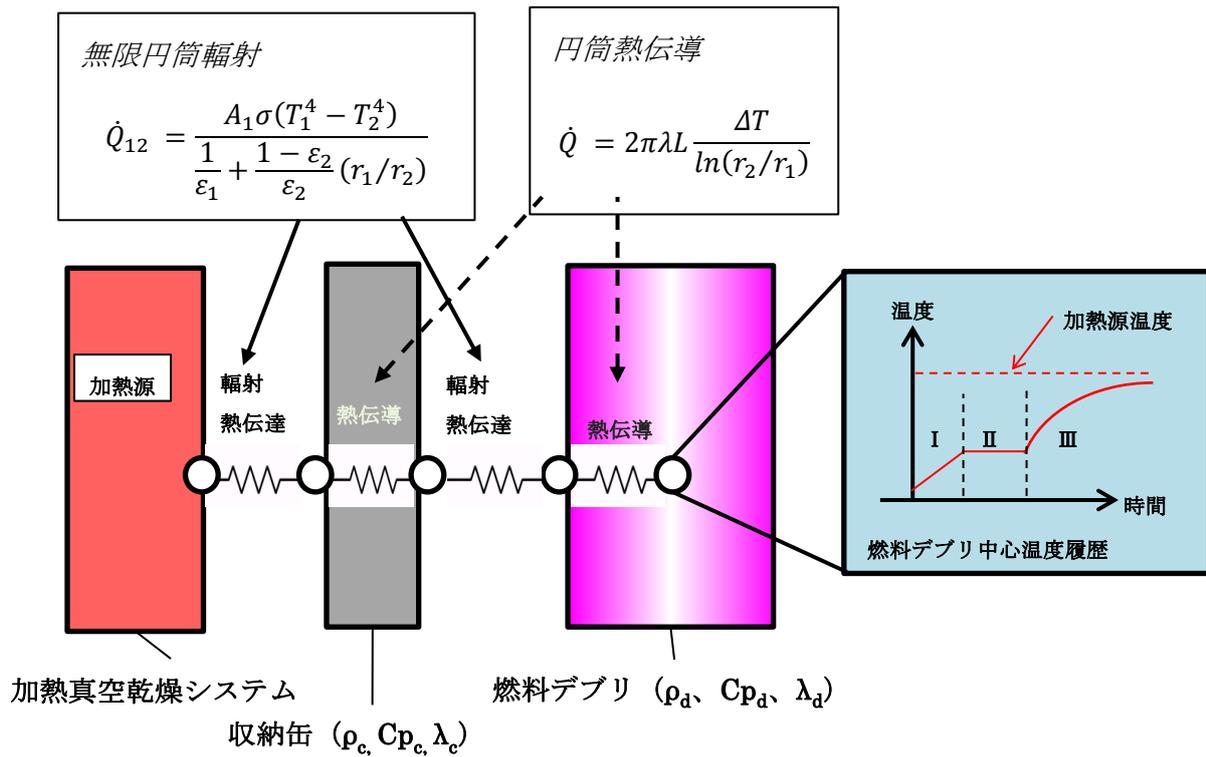


図 5.1-4 伝熱モデル概要 [5-4]

ここで

\dot{Q} : 熱流束 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

σ : ステファンボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

ε : 放射率 (-)

r : 円筒半径 (m)

T : 温度 (K)

λ : 熱伝導率 (W/mK)

L : 円筒長さ (m)

ΔT : 温度差 (K)

A : 伝熱面積 (m^2)

ρ : 密度 (kg/m^3)

C_p : 比熱 (W/kgK)

なお、添字 1 : 外側、 添字 2 : 内側、 添字 c : 収納缶、 添字 d : 燃料デブリ

5.1.3 蒸発モデルの試計算

蒸発モデルについて、現状考えられる仮定を置いて計算を実施した。仮定した条件とその計算結果を表 5.1-1 と図 5.1-5 に示す。構築したモデルにて乾燥工程における恒率乾燥期間と減率乾燥期間を模擬し、収納缶内の含有水量を計算できた。今後、小型試験・実規模試験を通じてモデルの補正、精度の向上を行う必要がある。

表 5.1-1 蒸発モデル試計算結果

乾燥期間	-	-	恒率	恒率	恒率⇒定率	定率	定率
時間	θ	h	0	0.5	～	24.78	25.28
含有水量	M	kg	44.979	43.557	～	5.678	5.499
初期水量	M_0	kg	44.979	44.979	～	44.979	44.979
平衡水量	M_e	kg	2	2	～	2	2
限界水量	M_c	kg	22.135	22.135	～	22.135	22.135
定数	α	1/h	-	-	～	0.1	0.1
乾燥表面	A	m ²	1	1	～	1	1
乾燥速度	R	kg/m ² s	0.00079	0.00079	～	-	-
蒸発潜熱	λ_w	kJ/kg-水	2406	2406	～	-	-
熱伝達率	h	kW/m ² °C	0.08	0.08	～	-	-
乾球温度	t	°C	65.00	65.00	～	-	-
湿球温度	t_w	°C	41.24	41.24	～	-	-
飽和蒸気圧	P_h	Pa	8000	8000	～	-	-

※上表の数値の根拠については 5.1.5 項を参照

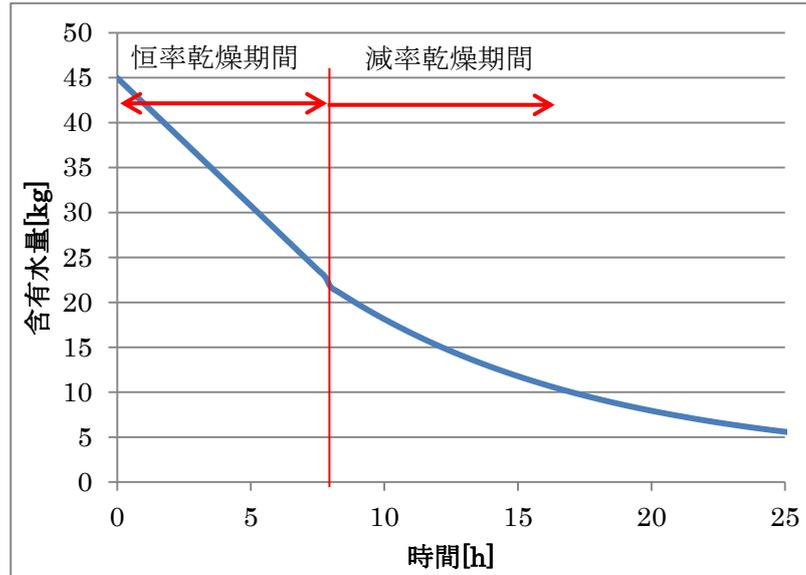


図 5.1-5 乾燥特性線図（試計算結果）

5.1.4 真空乾燥システムの目標値（クライテリア）

文献[5-5]では破損燃料貯蔵用キャニスタ内に存在する水分が臨界安全上 8L 以下で安全水量であるとしているため、40 年間の貯蔵中に燃料デブリが大気から吸収する水分を 1L 以下とし、その上で安全率 3 をかけて、2.3L (= (8L-1L) ÷ 安全率 3) を乾燥工程後の最大許容水量としている。また、乾燥に使われる所定時間を 25H としている[5-5]。表 5.1-2 に示す基準は評価対象となる収納缶の臨界評価の結果に基づいて見直されるべきであるが、事前評価モデルにおいてはこれらを目標値として扱うこととする。

なお、実際の乾燥作業においては収納缶内の残留水量を真空乾燥装置から隔離後の収納缶内圧力変化で判断することとなるため、残留水量と隔離後の収納缶内圧力の関係も検証試験で確認する必要がある。

表 5.1-2 真空乾燥システム目標値

項目	記号	目標
収納缶内残留水量	M_w	2.3L 以下
真空乾燥 所要時間	θ	25H 以下

5.1.5 試計算の数値根拠

蒸発モデルの試計算において仮定した数値の根拠を表 5.1-3 に示す。これらの数値については現状の値が不明なため設定しており、今後の検討・試験において精査されるべきものである。

表 5.1-3 試計算における仮定した数値の根拠

項目	記号	単位	出典根拠
含有水量	M	kg	EDF-1466 Rev.2 p.9-11
初期水量	M_0	kg	同上
平衡水量	M_e	kg	同上
限界水量	M_c	kg	同上
定数	α	1/h	含有水量が 25H 程度で平衡水量に到達する様、調整
乾燥表面	A	m^2	単位面積 $1m^2$ 当り
乾燥速度	R	kg/m^2s	下の数値からの計算結果
蒸発潜熱	λ_w	kJ/kg-水	飽和蒸気圧より引用
熱伝達率	h	$kW/m^2°C$	含有水量が 25H 程度で平衡水量に到達する様、調整
乾球温度	t	°C	含有水量が 25H 程度で平衡水量に到達する様、調整
湿球温度	t_w	°C	飽和蒸気圧より引用
飽和蒸気圧	P_h	Pa	EDF-1466 Rev.2 p.14

5.2 真空乾燥試験 概略計画

5.2.1 概要

燃料デブリを収納した収納缶に対する真空乾燥システムの基本要件をまとめるにあたり、所定の乾燥度を得るための真空乾燥条件、要領及び判定基準を定める必要がある。なお真空乾燥は、未臨界性を確保するために、収納缶内の自由水及び物理結合水を除去することを目的とする。

本項では、これらを定めるための模擬燃料デブリを用いた試験の試験計画の概略をまとめた。試験としては、小型試験装置による模擬燃料デブリ毎の特性（蒸発速度、残存水量、吸水量等）データ取得及び乾燥要領の取得等と、実規模試験装置における、乾燥要領の検証及び乾燥判定基準、蒸発速度、到達乾燥度の確認等を計画した。

5.2.2 実機条件(燃料デブリ、運用条件)

現在、1F 関連研究で計画中の燃料デブリの収納・移送・貯蔵システムを、図 5.2-1 に示す。燃料デブリのキャニスタでの中長期貯蔵前に、燃料デブリを収めた収納缶は、収納缶内の残留水分を考慮しても未臨界性を確保することや発生する水素ガスを可能な限り低く抑える必要があり、加熱真空乾燥する処理を検討している。

また、収納缶は、図 5.2-2 に示す TMI-2 で使用されたものと同程度（ $\phi 360\text{mm} \times \text{H}3800\text{mm}$ 程度）の規模で計画している。

収納される燃料デブリの組成は種々となるが、真空乾燥試験においては、現在想定されている燃料デブリの特性の内、乾燥特性に影響を与えられ、酸化物（セラミックス）及びセメント成分を模擬するため、試験では、多孔質セラミックス材、セメントペースト材を主体する模擬燃料デブリ材を用いて実施する。表 5.2-1 に試験対象実機条件を示す。

【参考】燃料デブリの収納・移送・保管の概要 (TMI-2の例)

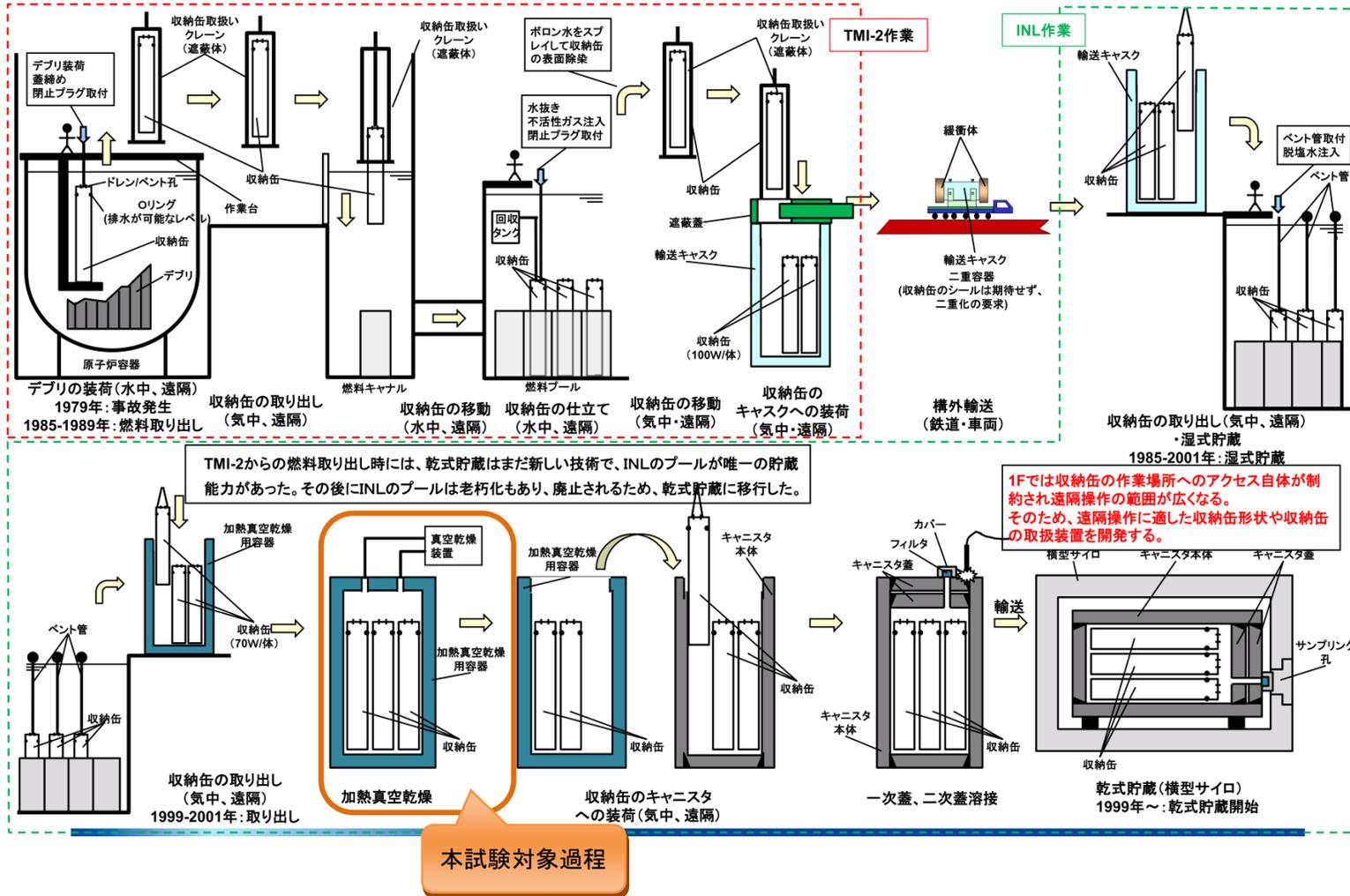


図 5.2-1 燃料デブリ収納・移送・貯蔵システム概略 (計画案) [5-7]

【参考】収納缶の例(TMI-2の例)

14

TMI-2では、収納物の状態に応じた3種類の同一外形(3810H×φ355.6mm)の収納缶を使用。実績重量は装荷状態(水抜き後)で最大1335kg。収納缶の主要な機能は臨界防止と燃料デブリの取扱いであり、遮蔽、除熱、密封の機能は全体のシステムの中で分担されている。

本研究では燃料デブリ回収工法等の他PJと連携して1F向けの収納缶仕様(形状等)を決定する

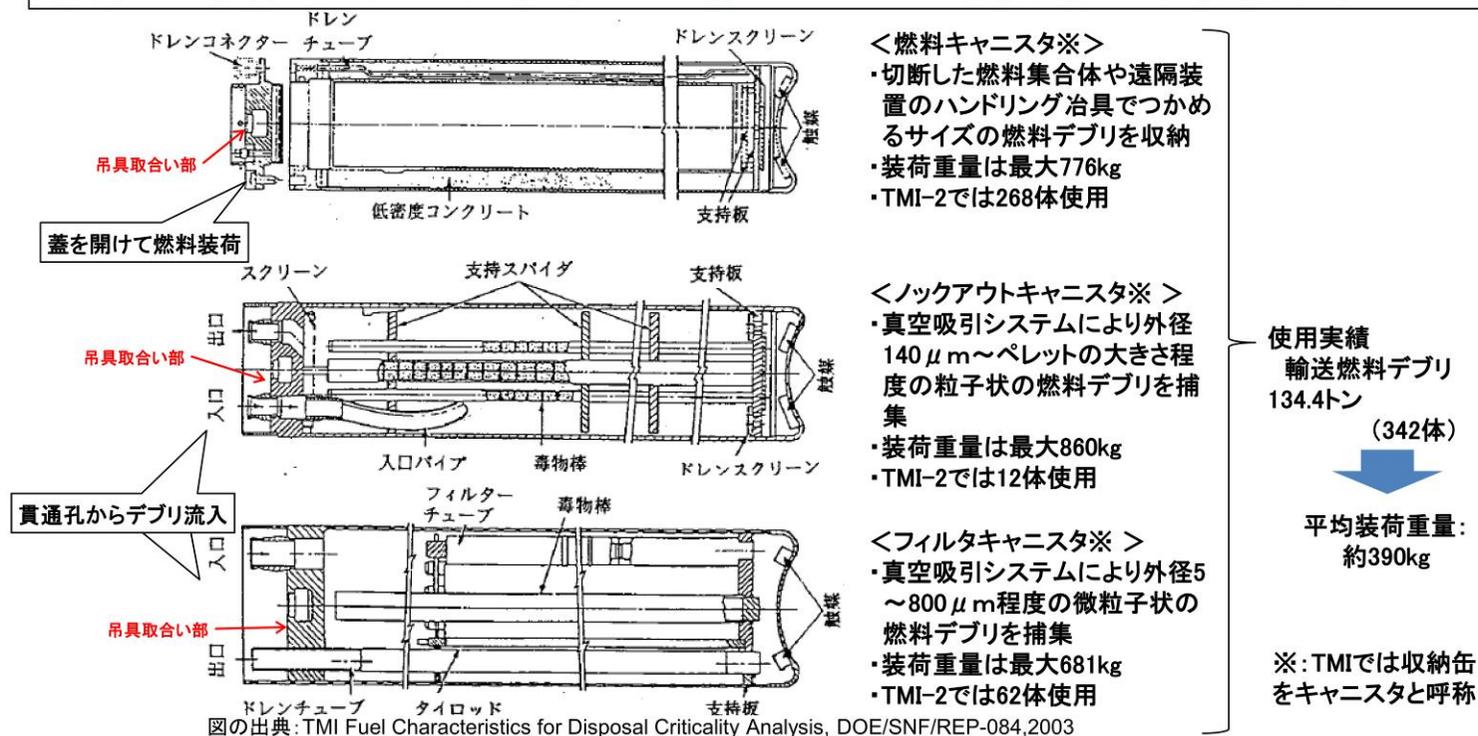


図 5.2-2 燃料デブリ収納缶計画[5-7]

表 5.2-1 試験対象実機計画条件

項目	概要
収納缶	寸法：φ 360mm×H3800mm×t6～10mm 程度 ^{※1} 容積：0.38m ³ 程度 ^{※1} 装荷荷重：(最大)1335kg, (平均)360kg ^{※1}
加熱真空条件	加熱ヒータ温度：(最高)約 480℃(900℉) ^{※1} 収納缶壁面温度：(最高)約 320℃(600℉) ^{※1} 乾燥判定：収納缶内残存水量 2.3L 以下 ^{※1} 乾燥時間：25 時間以下 ^{※1}
燃料デブリ	<ul style="list-style-type: none"> ・多孔質セラミックス系材 ^{※2} (かさ密度 8.8～9.04g/cm³) ^{※3} ・セメントペースト系材 ^{※2} (かさ密度 3.15g/cm³) ^{※4} ・デブリ内の水量(束縛されない水量)：22.8kg(デブリ 773kg 中) ^{※5}

※1：TMI-2 を参考とし、設定。

※2：燃料デブリの組成より、吸水性が高く、含有水が蒸発し難い組成として設定。

※3：技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID), 平成 26 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリの性状把握)」進捗状況”, P. 27, 平成 26 年より設定。

※4：ポルトランドセメント 普通 (セメント協会：セメントの常識, pp. 13-14, 1997)より設定。

※5：EDF-1466 Rev. 2 p. 8-11

5.2.3 実施内容

5.2.3.1 小型試験

小型試験では模擬燃料デブリ毎の特性を得るため、加熱真空乾燥条件毎 (加熱温度、吸水量、真空度) での蒸発速度、残存水量、真空乾燥操作前の吸水量及び乾燥判定条件を確認する。

5.2.3.2 実規模試験

実規模試験では、小型試験より得られた模擬燃料デブリの特性及び真空乾燥要領、乾燥判定を基に、乾燥要領及び乾燥判定の検証を行う。

5.2.4 小型試験の実施要領

5.2.4.1 試験装置

小型試験は、加熱真空乾燥条件毎に加熱量、加熱温度、模擬燃料デブリ温度、模擬燃料デブリの残留水量、到達真空度、真空乾燥所要時間、蒸発速度等を調査するため、図 5.2-3 の実施フローに示すように、まず模擬燃料デブリ毎に模擬収納缶筒内で試験条件吸水量に調整、計測したものをを用いて試験を実施する。試験時は、加熱量他、各部温度、圧力、露点等を計測する。試験終了後、収納缶を取り出し、試験開始前との重量差により残水量を確認する。

試験は、図 5.2-4 に示す装置系統を用いる計画とする。収納缶は、加熱ヒータを取り付けた外容器により加熱し、系統に設けた真空ポンプによる排気系統より、収納缶内の水蒸気、空気を排気する。真空乾燥は 130Pa (1Torr) 程度まで圧力を低下させて行う。

排気系統は、加熱、減圧により発生する蒸気を分離回収するための凝縮器及び水回収容器を設ける。凝縮器及び水回収容器は、外部冷却系統により冷却を行う。また、凝縮器入口までは、発生した蒸気の凝縮防止のため、系統にはトレースヒータを設ける。試験時の到達真空度、水分を計測確認するため、収納缶出口、真空ポンプ上流に真空計、露点計を設置する。試験開始前の系統内の気密確認のための窒素ガス供給用のボンベも設置する。表 5.2-2 に装置主要仕様を示す。

5.2.4.2 計測項目

小型試験における主要計測項目を表 5.2-3 に示す。試験では、模擬燃料デブリ条件毎に、蒸発量、加熱量、到達真空度、残留水量を評価出来るように、各部温度、圧力、露点温度等を計測する。

5.2.4.3 試験条件

小型試験においては、試験毎に使用する模擬燃料デブリ量を 1500g 程度とし、模擬燃料デブリ(セラミックス系材、セメントペースト系材)について、実機計画条件のデブリとデブリ内の水量の関係(乾燥前初期水量)を基に、表 5.2-4 に示すように、模擬燃料デブリの初期水量を 100%, 50%, 0% に設定し、残留水量、蒸発速度、到達真空度及び所要時間への影響を確認する。

各試験条件より、得られた模擬燃料デブリの特性より、乾燥判定基準及び真空乾燥要領を設定する。

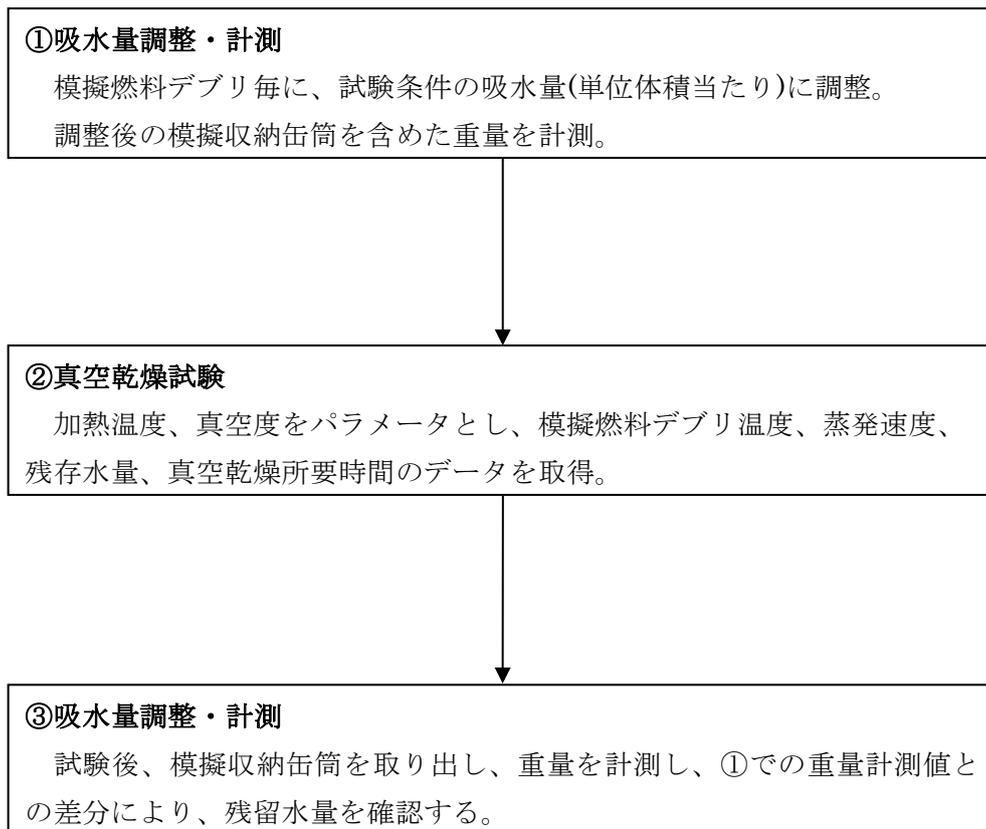


図 5.2-3 小型試験 実施フロー

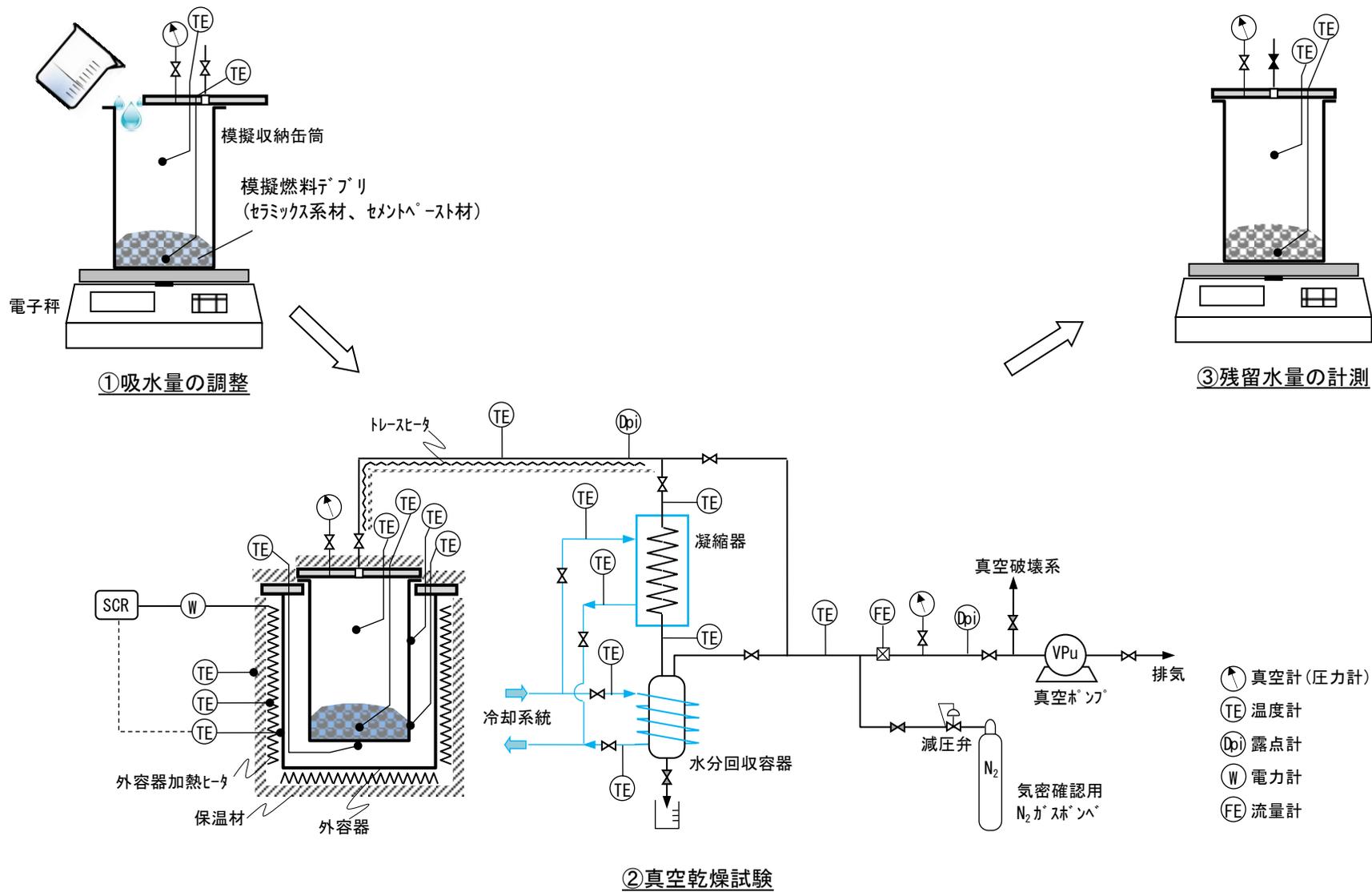


図 5.2-4 小型試験 装置系統図

表 5.2-2 小型試験装置 機器主要仕様

機器名	仕様
外容器	材質：SUS304 又は SUS316 常用圧力：大気圧 常用温度：500℃
収納缶	材質：SUS304 又は SUS316 最高使用圧力：大気圧 常用圧力：2kPa abs 最低圧力：1kPa abs 常用温度：300℃
真空ポンプ	型式：油回転式真空ポンプ 排気速度：100L/min 以上 到達真空度：20Pa abs 以下
外容器加熱ヒータ	材質：SUS304 又は SUS316 形式：マイクロヒータ又はシーズヒータ 最高使用温度：600℃以上 使用環境：大気中
トレースヒータ	材質：SUS304 又は SUS316 形式：マイクロヒータ又はシーズヒータ 最高使用温度：600℃以上 使用環境：大気又は真空中
温度計	材質：SUS304 又は SUS316 形式：シース型熱電対 (K-type, class1) 使用環境：大気又は真空中
真空計	形式：ピラニ真空計 測定範囲：0.4～2.7×10 ³ Pa 精度：±30%(10-1000Pa) 以下
露点計	形式：高分子薄膜容量式 測定範囲：Td -25℃～+100℃ 精度：Td ±2℃以下 使用可能温度：300℃以上
流量計	形式：フローメータ等 測定対象：空気又は窒素ガス 測定範囲：0～100L/min 以上 精度：±5%以下 使用環境：大気又は真空中の常温

表 5.2-3 小型試験 主要計測項目

項目	名称	センサ種類
圧力	収納缶内圧力	ピラニ真空計
	真空ポンプ入口圧力	
温度	模擬燃料デブリ内温度	熱電対
	収納缶空間温度	
	収納缶外壁面温度	
	収納缶外底面温度	
	外容器壁面温度	
	外容器加熱用ヒータ温度	
	外容器保温材外面温度	
	収納缶排気出口温度	
	凝縮器入口温度	
	凝縮器出口温度	
	水分回収容器出口温度(真空ポンプ入口)	
	冷却系統入口温度	
冷却系統出口温度		
露点温度	収納缶排気出口露点温度	露点計
	真空ポンプ入口露点温度	
加熱ヒータ量	ヒータ電力量	電力計 (実行値型)
トレースヒータ量	ヒータ電力量	
重量 (水量)	吸収缶重量 (試験前後重量差)	電子秤
流量	排気流量	フローメータ等

表 5.2-4 小型試験 試験条件(案)

模擬燃料デブリ 初期水量 収納缶温度	乾燥	中間	湿潤
常温	○	○	○
150℃	○	○	○
300℃	○	○	○

※セラミックス系材及びセメントペースト系材の何れも上記試験条件を実施する。

5.2.5 実規模試験の実施要領

5.2.5.1 試験装置

実規模試験は、実機規模の収納缶を用いて、小型試験で得られた模擬燃料デブリの特性及び乾燥判定条件、真空乾燥要領より、模擬燃料デブリ量及び初期水量、加熱温度をパラメータとして、乾燥条件（判定基準値）到達までの所要時間及び乾燥完了までの実施要領の検証を行う。

試験装置は、小型試験装置同様に、図 5.2-5 に示すように、模擬燃料デブリの初期吸水量の調整、計測及び試験終了後の残存水量の計測を、重量計測にて実施する。

重量計測は、実規模収納缶に計測用吊治具を取り付け、計測用架台に設置した秤に吊下げ実施する。

加熱真空乾燥試験も、図 5.2-6 に示すように、小型試験同様に収納缶を加熱する外容器を設け、収納缶内の空気、水蒸気を排気する系統とする。排気系統は、加熱、減圧により発生する蒸気を分離回収するための凝縮器及び水回収容器を設ける。凝縮器及び水回収容器は、外部冷却系統により冷却を行う。また、凝縮器入口までは、発生した蒸気の凝縮防止のため、系統にはトレースヒータを設ける。真空乾燥時の圧力の下限值は、TMI-2 に習い、130Pa(1Torr)程度とする。

また、模擬収納缶は、実機計画条件と同程度（φ360mm×H3800mm 程度）の大きさとする（模擬燃料デブリ量 最大 1335kg 収納）。表 5.2-5 に装置主要仕様を示す。

5.2.5.2 計測項目

実規模試験における主要計測項目を表 5.2-6 に示す。試験では、模擬燃料デブリ条件毎に、蒸発量、加熱量、到達真空度、残留水量を評価出来るように、各部温度、圧力、露点温度等を計測する。また、残存水量は、図 5.2-5 に示すように、試験後の収納缶を取り出し、重量を計測し、試験前後の重量変化によっても計測を行う。

5.2.5.3 試験条件

実規模試験においては、模擬燃料デブリ（セラミックス系材、セメントペースト系材）について、表 5.2-7 に示すように、それぞれの混合量及び初期吸水量をパラメータとして、小型試験より得られた加熱真空乾燥要領を基に試験を実施し、各試験条件による残留水量、蒸発速度、到達真空度及び所要時間を確認する。なお、試験毎に使用する模擬燃料デブリの総量は、1335kg 程度とする。模擬燃料デブリ混合の割合は、重量割合とする。

各試験条件より、得られた結果より、乾燥判定基準及び真空乾燥要領の見直し、修正も実施する。

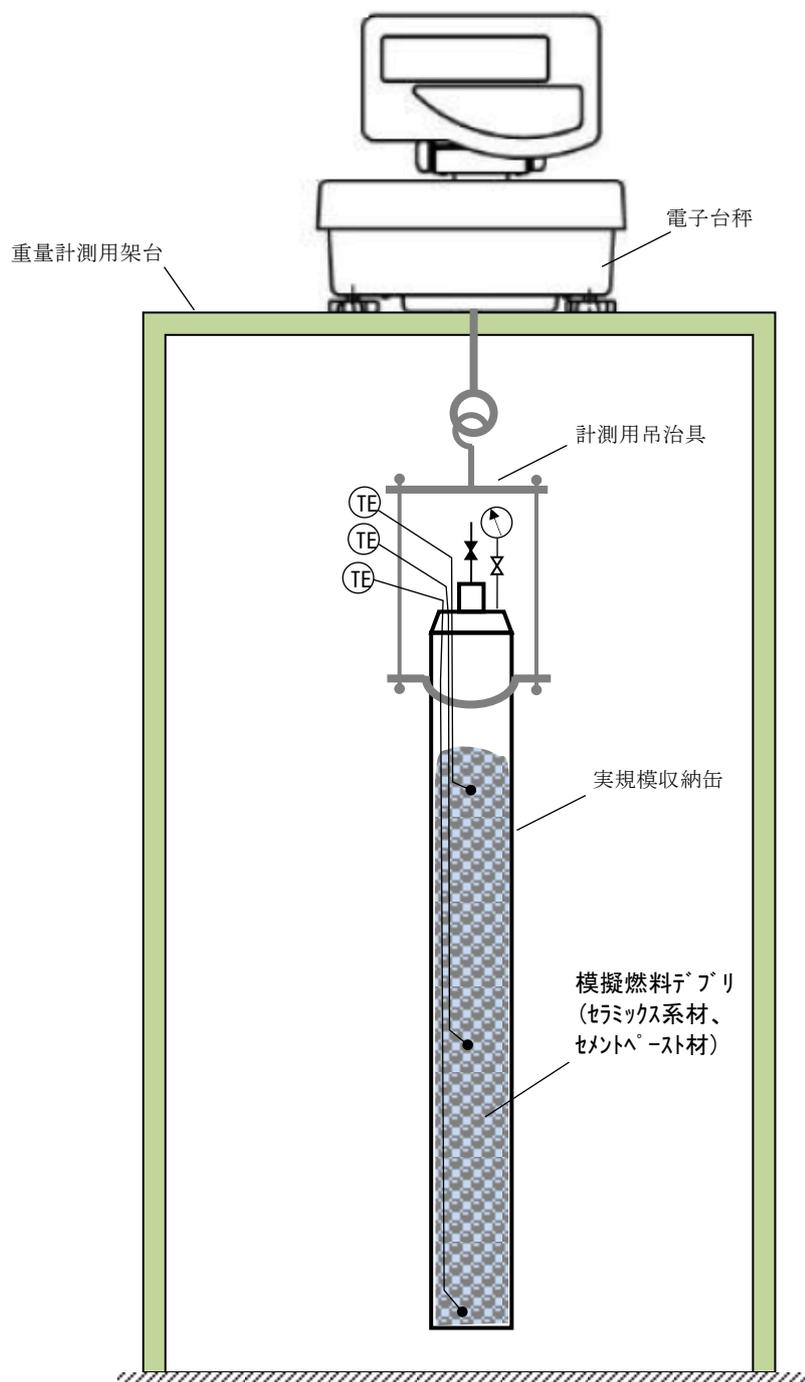


図 5.2-5 実規模試験 実規模収納缶重量計測概略

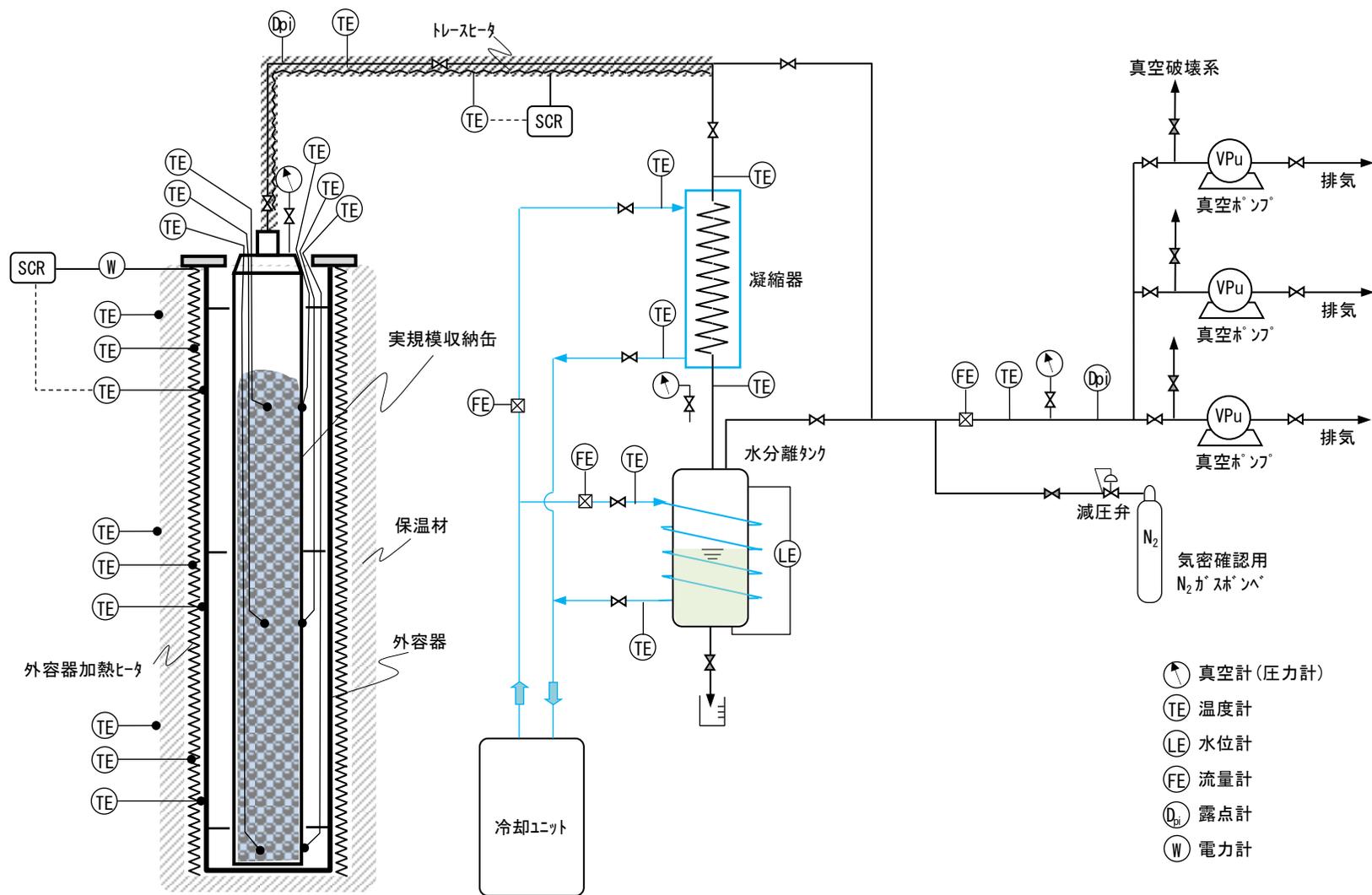


図 5.2-6 実規模試験 装置系統図

表 5.2-5 実規模試験装置 機器主要仕様

機器名	仕様
外容器	材質：SUS304 又は SUS316 常用圧力：大気圧 常用温度：500℃
収納缶	材質：SUS304 又は SUS316 最高使用圧力：大気圧 常用圧力：2kPa abs 最低圧力：1kPa abs 常用温度：300℃
真空ポンプ	型式：油回転式真空ポンプ 排気速度：1000L/min 以上（複数台並列接続可） 到達真空度：20Pa abs 以下
外容器加熱ヒータ	材質：SUS304 又は SUS316 形式：マイクロヒータ又はシーズヒータ 最高使用温度：600℃以上 使用環境：大気中
トレースヒータ	材質：SUS304 又は SUS316 形式：マイクロヒータ又はシーズヒータ 最高使用温度：600℃以上 使用環境：大気又は真空中
温度計	材質：SUS304 又は SUS316 形式：シース型熱電対 (K-type, class1) 使用環境：大気又は真空中
真空計	形式：ピラニ真空計 測定範囲：0.4～2.7×10 ³ Pa 精度：±30%(10-1000Pa) 以下
露点計	形式：高分子薄膜容量式 測定範囲：Td -25℃～+100℃ 精度：Td ±2℃以下 使用可能温度：300℃以上
水位計	形式：差圧式 測定対象：水 測定範囲：0～1000mm 以上 精度：±2%以下 使用環境：大気又は真空中の常温
流量計	形式：フローメータ等 測定対象：空気又は窒素ガス 測定範囲：0～1000L/min 以上 精度：±5%以下 使用環境：大気又は真空中の常温

表 5.2-6 実規模試験 主要計測項目

項目	名称	センサ種類
圧力	収納缶内圧力	ピラニ真空計
	真空ポンプ入口圧力	
温度	模擬燃料デブリ内温度	熱電対
	収納缶空間温度	
	収納缶外壁面温度	
	収納缶外底面温度	
	外容器壁面温度	
	外容器加熱用ヒータ温度	
	外容器保温材外面温度	
	収納缶排気出口温度	
	凝縮器入口温度	
	凝縮器出口温度	
	水分離タンク出口温度(真空ポンプ入口)	
	冷却系統入口温度	
冷却系統出口温度		
露点温度	収納缶排気出口露点温度	露点計
	真空ポンプ入口露点温度	
加熱ヒータ量	ヒータ電力量	電力計 (実行値型)
トレースヒータ量	ヒータ電力量	
重量 (水量)	吸収缶重量 (試験前後重量差)	電子台秤
流量 (排気系統)	排気量	フローメータ等
流量 (冷却系統)	冷却液流量	フローメータ等

表 5.2-7 実規模試験 試験条件(案)

模擬燃料デブリ 初期水量 収納缶温度	乾燥	中間	湿潤
常温	①, ⑤	-	①, ⑤
150℃	-	②, ③, ④	②, ④
300℃	-	-	①, ⑤

※表内の番号は、下記の模擬燃料デブリ条件番号を示す。

模擬燃料デブリ 条件番号	混合割合 (%)	
	セラミックス系材	セメントペースト系材
①	100	0
②	75	25
③	50	50
④	25	75
⑤	0	100

5.2.6 まとめ

燃料デブリを収納した収納缶に対する真空乾燥システムの基本要件をまとめるにあたり、所定の乾燥度を得るための真空乾燥条件、要領及び判定基準を得るための、概略試験計画を実施した。

5.3 参考文献リスト

- [5-1] 須田裕哉, “C-S-H の組成と物理的性質の関係に基づいたセメント硬化体の性能評価に関する研究,” 新潟大学 学位論文, 2013.
- [5-2] Christensen, A. B., “Validation of Water Content in TMI-2 Canisters During Drying in the HVDS,” EDF-1466, Rev2, June 2000.
- [5-3] 桐栄良三, “乾燥装置,” 日本工業新聞社, p. 12-14, 昭和 41 年.
- [5-4] 日本機械学会, “伝熱工学資料 第五版,” 丸善, p. 5, p. 139, 2009 年.
- [5-5] Beller, Barbara, “Fuel Drying Activities by the Environmental Management Program at Idaho National Laboratory”, Presentation to the NWTRB, (2014).
- [5-6] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 「中間貯蔵施設健全性評価手法等調査 報告書(2/2) 別冊」, p. 208-244, 平成 17 年.
- [5-7] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID), “平成 26 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金(燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」進捗状況”, 平成 27 年

6. 安全評価

6.1 未臨界評価

燃料デブリの乾式貯蔵に用いるレファレンス収納缶及びキャニスタ仕様を設定して臨界解析を実施し、臨界安全に及ばず影響因子を抽出して安全性を確保するための要件を検討するとともに今後の課題と対応について整理した。

6.1.1 事前検討

6.1.1.1 文献調査

燃料デブリの乾式貯蔵における臨界解析に使用する解析モデル、解析条件及び計算コードを設定するために、これまで国内外で実施された破損燃料（燃料デブリ含む）の臨界解析モデルや解析に使用する計算コード等について、次の範囲を調査した。

(1) TMI-2 燃料デブリの臨界解析（回収時、湿式輸送時及び乾式貯蔵時）

(2) 1F 燃料デブリの臨界解析

(3) 米国の破損燃料（燃料デブリ含む）収納時のキャスク臨界解析

(4) その他（MOX の最小臨界量評価）

表 6.1-1 に調査した文献（すべて公開文献）から得た情報のうち主要なものの要約を示す。以下にそれらの要点について説明する。

(1) TMI-2 燃料デブリの臨界解析

GPU（電力会社）が実施した燃料デブリ回収時の臨界安全解析[6-1-1]では、燃料デブリを 1 個のペレットと等しい体積の UO_2 球形粒子で置き換えて、これらを六方最密充填構造に配列させた球形塊の周りを水反射体で囲んで実効増倍率 (k_{eff}) を求めている（図 6.1-1）。燃料粒子間のピッチは実効増倍率 (k_{eff}) が最大となる最適減速条件 (H/U) となるよう設定し、未臨界を維持できる最小臨界量を評価している。

燃焼度効果（クレジット）は、U の減損と Pu の生成/消滅及び希土類 FP の生成を考慮している。また、燃焼度は炉内 3 バッチの平均値を用いている。解析に使用した計算コードは、KENO V. a（多群モンテカルロコード）[6-1-12]である。

TMI-2 燃料デブリの輸送時の臨界解析[6-1-2]は、平成 27 年度報告書に記載したとおり燃焼度クレジットを考慮しておらず、また、燃料デブリは UO_2 のみで構成されるとして被覆管等の

構造材や制御材は含まない。ペレットはキャニスタ内に正方格子配列させ、ピッチは最適減速条件になるよう設定している。また、キャニスタは、1次元無限円柱体系でモデル化して実効増倍率 (k_{eff}) を求めている。解析に使用した計算コードは、KENO IVで、燃料格子は均質化している。

INL (アイダホ国立研究所) における燃料デブリ乾式貯蔵時の安全解析書[6-1-3]では、 UO_2 ペレットを正方格子よりも反応度が若干高くなるとの理由から三角格子に配列させて臨界評価を実施している。この解析ではキャニスタ内の水量をパラメータとして水量制限値を求めている。水量によって下部からある高さまで水が存在すると仮定し、水のある領域ではペレットのピッチを最適減速値とし、水の無い領域ではペレット同士を接触させている。また、燃料デブリキャニスタを12基装荷したDSC(Dry Storage Canister)をHSM(コンクリートモジュール)内に置いた状態を設定しており、HSMはコンクリート反射体としてモデル化している。燃焼度クレジットは考慮していない。解析に使用した計算コードは、SCALE4.0 (臨界解析は KENO) [6-1-12]である。

(2) 1F 燃料デブリの臨界解析

文献[6-1-4]では、1F 燃料デブリを直接処分 (地層埋設処分) すると仮定した場合の臨界評価について報告されている。この論文によれば、内径約 30cm、内寸高さ 100cm の炭素鋼容器に燃料デブリを収納して地層埋設した場合の未臨界性を時系列にて解析している。燃料デブリの形状は、先に紹介した TMI-2 燃料デブリ回収時の臨界安全解析[6-1-1]に基づいてペレットと同じ体積を持つ球径 UO_2 とし、これらを容器内に六方最密充填構造状に配列させている。 UO_2 粒子のピッチは、最適減速条件をサーベイして設定する場合と粒子同士を接触させる場合の両方のケースを与えている。容器内は水無を基本ケースとして、仮想的に水没している状態も評価している。燃料デブリは一様な平均燃焼度を持つと仮定して、取出しから 50 年後の組成としている。また、FP は物理的、化学的に安定な核種 (Gd、Nd、Sm、Rh、Eu の同位体) のみとして、気体状及び揮発性 FP は考慮していない。解析に使用した計算コードは、連続エネルギーモンテカルロコードである MCNP [6-1-11] を使用している。

もう一つの文献[6-1-5]では、燃料デブリとコンクリートの反応生成物 (MCCI) を含んだ燃料デブリの最小臨界量についての報告がある。これは、燃料デブリの貯蔵時ではなく回収時を念頭に置いたものと考えられる。ここでは、球形 UO_2 粒子の周囲を MCCI (コンクリート) で覆

った球状セルを水中に正方格子状に配列させて実効増倍率を評価している。まず、 UO_2 と MCCI の体積比と UO_2 半径をパラメータとして無限増倍率 (k_∞) が最大となる条件をサーベイし、次にこの条件を固定して UO_2 +MCCI 球の水中正方配列格子で構成する球体を考え、その周囲を反射体で囲んだ体系の実効増倍率 (k_{eff}) を計算し、最小臨界量を求めている。この解析では、燃焼度ゼロ (新燃料) と燃焼度有 (12GWd/t) の両方について評価している。また、解析に使用した計算コードは、 k_∞ の計算は SRAC (多群衝突確率法) で最小臨界量評価は MVP (連続エネルギーモンテカルロコード) [6-1-13] である。

さらに 1F の安定化・廃炉のための研究開発の一環として燃料デブリ取出し時の臨界管理技術開発が行われている。それらの中では、臨界評価のための燃料デブリ特性評価や MCCI 生成物の影響評価等が行われている [6-1-16]～[6-1-18]。

(3) 米国の破損燃料収納キャスクの臨界解析

文献[6-1-6]は、Humboldt Bay ISFSI の安全解析書で、HI-STAR HB 型キャスクの破損燃料収納時の臨界解析についての記載がある。この解析では、DFC (燃料デブリ収納缶) に入れた破損燃料集合体を被覆管を無視した燃料棒 (ペレット列) を水没した DFC 内部に、外周又はチェッカボード状に配列させてモデル化している。DFC はキャスクの全 80 セルのうち 40 セル (40 個) に設置している。解析に使用している計算コードは、MCNP4A (核データは ENDF/B-V) である。なお、米国 NRC はこれとは独立に SCALE5 (KENO V.a) を用いて検証解析を行っており、両者はよく一致したとしている。

文献[6-1-7]～[6-1-9]は、米国 NRC の委託を受けて ORNL (オークリッジ国立研究所) が実施した使用済燃料輸送、貯蔵キャスクの事故後の燃料損傷による臨界安全への影響について解析したものである。これらの解析では、キャスク落下時に予想される種々の燃料変形や破損のモードを想定して、それらが臨界安全に及ぼす影響 (実効増倍率 (k_{eff}) の変化) を評価している。幾つかの変形、破損シナリオが考えられているが、その中で最も燃料デブリの近いものとして、燃料被覆管がすべてペレットと分離して除去されるというものがある。このシナリオに対する解析モデルは、既に挙げた燃料デブリ臨界解析と同様にペレットのみをバスケット内で六方最密充填構造配列させてペレット間ピッチを最適減速となるようサーベイするものと、ペレット片と被覆管材が均一混合物として存在すると仮定するものの二つがある。前者は自己遮蔽効果があることと構造材を無視しているため、当然後者よりも反応度は大きくなる。燃焼

度については、パラメータとして影響程度の把握を行っている。解析に使用した計算コードは、SCALE の KENO VI である（KENO の最新バージョンで、3次元形状表現が容易）。

文献[6-1-10]では、前記米国 NRC の動きに呼応する形で民間側から輸送時の燃料再配置の臨界安全に及ぼす影響について報告している。燃料デブリに近い最も過酷な条件として被覆管が無いペレットのみの状態で六方最密充填配列する場合を挙げているが、現実にはそのようなことは起こり得ないと米国 NRC を牽制するトーンとなっている。また、燃焼度クレジットは考慮している。解析に使用した計算コードは SCALE と MCNP である。

(4) その他（MOX の最小臨界量評価）

文献[6-1-19]は、旧原子力発電技術機構が平成 12 年度から 15 年度にかけて行った核燃料施設安全解析コード改良整備事業の総括報告で、臨界解析に関しては MVP、MCNP(-4B)、KENO V. a、及び SCALE(1次元 Sn コード XSDRN 又は KENO V. a) の整備を行っている。その中で燃料デブリの臨界解析の参考になるものとして、非均質 MOX 燃料+水体系での MOX の最小臨界量の評価が挙げられる。評価方法は次のとおりである。MOX 球を六方稠密格子に配列し、球径と格子ピッチをパラメータとしてこの格子系の実効断面積を算出し、この実効断面積を持つ均質化した球、無限円筒及び無限平板を考えて k_{eff} を求め、 k_{eff} が 0.98 となる球径、円筒径及び平板厚さを各球径/格子ピッチ毎に求めている。計算に使用したコードならびに断面積ライブラリは XSDRNPM（1次元 Sn 輸送コード）と SCALE44 群ライブラリである。

(5) 文献調査のまとめ

以上をまとめた結果を表 6.1-2 に示す。燃料デブリあるいはキャスク落下時に激しく破損した燃料の臨界安全上最も考慮すべき点は、その形状配置が不確定であるため、極端に言えばあらゆる状態を取り得るということである。燃料の形状配置が変化することによって、水(H)と燃料(U)の割合が変わり中性子減速(スペクトル)が変化することと非均質効果による U-238 の共鳴吸収量の変化の二つの機構で反応度(中性子実効増倍率)に影響が生じる。

これまでの事例では、 UO_2 ペレットを等価な体積を持つ球体で置き換えて、これらを規則正しい六方最密充填構造配列に置いて解析を行うケースが主流である。しかし、六方最密充填構造配列が最も高い反応度を与えるかどうかは、各文献から明確に読み取れなかった。文献[6-1-3]では正方配列よりも三角配列の方が若干反応度が高くなるとの記述があるが、その根

拠は明確ではない。

燃料粒子間ピッチはすべての事例で均等に設定しているが、均等ピッチで反応度が最大になるかどうか、あるいは不等ピッチと均等ピッチで実効増倍率 (k_{eff}) がどの程度変化するかについての情報は無かった。また、文献[6-1-4]では燃料粒子径の影響に言及しているが、そこではペレット相当の大きさよりも径を小さくすると反応度が低下することと、ペレットよりも大きい燃料デブリ粒子は溶けたペレット同士が溶融して合体したものであるため構造材を含んでいるため反応度が下がるとしている。この想定に対するより具体的な根拠は見当たらなかった。さらに粒径の不均一性の影響についても評価した例は見当たらなかった。

参照した解析事例では、すべてのケースで被覆管やその他の構造材の存在を無視している。また、中性子吸収材は、収納缶やキャニスタに設置するものを除いて無視している。なお、米国 NRC では、中性子吸収材は設計の 75%しか臨界解析で考慮してはならないとしている。これは、製造のばらつきや供用中の経年変化を考慮しているためである。

TMI-2 の燃料デブリ乾式貯蔵時の臨界解析では、キャニスタ内部の水量をパラメータとして未臨界性を維持できる水量上限を評価している。それ以外は仮想状態を含め冠水状態で評価を行っている。

TMI-2 燃料デブリでは、燃焼度クレジットは考慮していない。[6-1-1]～[6-1-3]及び 1F 燃料デブリの直接処分容器の臨界解析[6-1-6]では、前述のとおり均一な平均燃焼度として、FP は安定核種のみを考慮し気体状及び揮発性核種は考慮していない。

解析に使用した計算コードは、モンテカルロコード (KENO、MCNP、MVP) が主流であり、決定論的コードはほとんど用いられていない。

なお、これらのコードについては再処理施設の溶解槽模擬体系の臨界実験に基づいてベンチマーク解析が行われている[6-1-20]。

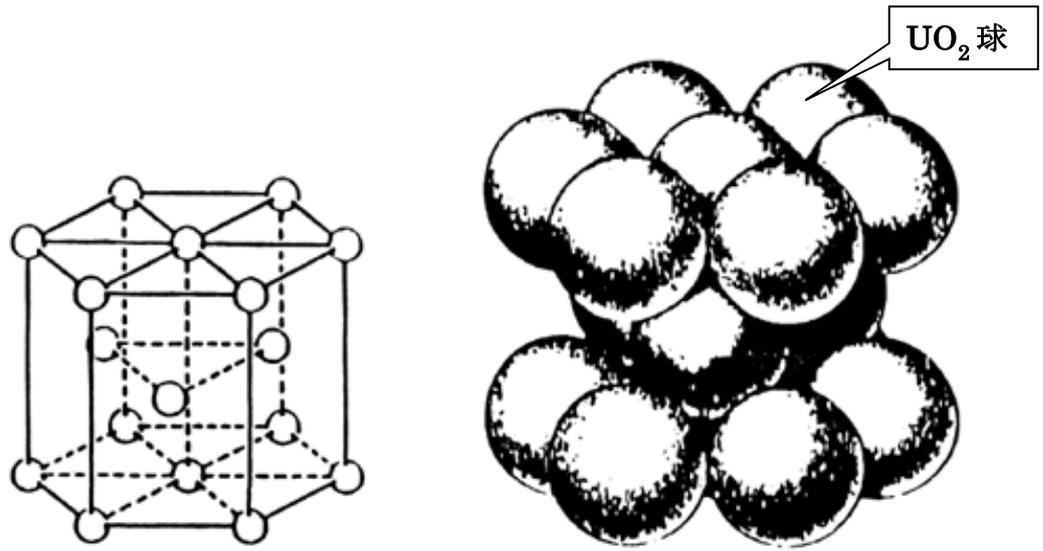


図 6. 1-1 TMI-2 燃料デブリ回収時の臨界安全解析に使用した燃料デブリモデル[6-1-1]

表 6.1-1 燃料デブリ及び破損燃料等の臨界解析の実績(文献調査) (1/3)

[]は引用文献番号

項目	①TMI-2 の燃料デブリ取出し時臨界解析 (GPU) [6-1-1]	②TMI-2 燃料デブリキャニスタ (NUPAC125B) の臨界解析[6-1-2]	③TMI-2 燃料デブリキャニスタ (NUHOMS-12T) の臨界解 析[6-1-3]	④1F 燃料デブリの直接処分容器の臨界解析[6-1-4]
実施者	GPU (電力会社)	B&W	INL	UCB、JAEA
目的	燃料デブリの最小臨界量の評価	燃料デブリ輸送時のキャニスタ未臨界評価	燃料デブリ乾式貯蔵時のキャニスタ未臨界評価	燃料デブリ直接処分時の未臨界評価
解析モデル	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリはペレットと同じ体積の燃料球を水空間に六方晶配列させる。 球ピッチは、最適減速となる水/ウラン体積比から決定。 燃料デブリは球状塊とし、その周囲を水反射体で囲む。 	<ul style="list-style-type: none"> ペレット (被覆管を無視) をキャニスタ内で正方配列させる。 燃料ペレット径はノミナル (9.393mm) 燃料棒ピッチ (水 vs 燃料比) は NULIF (0次元コード) で k_{∞} が最大となる値 (最適減速値) をサーベイし決定 k_{eff} は、均質燃料領域、吸収材領域、キャニスタ壁、外部反射体に分けた 1次元無限円柱体系で計算 	<ul style="list-style-type: none"> ペレット (被覆管無視) をキャニスタ内で三角配列させる。(正方配列より若干反応度が大きくなっている。) 燃料ピッチは、水没領域では最適減速値 (1.3cm~1.4cm) で、水の無い領域では燃料棒同士を接触させる。 燃料デブリキャニスタ 12 基を装荷した DSC (乾式貯蔵キャニスタ) が HSM (横型コンクリートモジュール) 内に置かれた状態を想定。(HMS は厚さ 2 フィートの反射体としてモデル化) 	<ul style="list-style-type: none"> ペレットと同じ体積の燃料球を六方晶状に配列。次の 2 ケースを考えた。 ①燃料球同士が接触して容器内下部に堆積 ②燃料球同士を等ピッチで容器内に均一に分布させる。ピッチは無限格子計算で最適点 (k_{∞} 最大) をサーベイ
構造材や制御材の考慮	考慮せず	キャニスタ内に設置する中性子吸収材のみ考慮 (ただし、設計の 75%) その他の燃料材料や炉心構造材は考慮せず。	同左	考慮せず。
水の有無	水没を前提	水没を前提	水量をパラメータとして水制限量を評価 キャニスタ底部に水が存在すると仮定。	水無 (基本ケース) と水没 (仮想ケース) の両方について評価
燃焼度効果	<ul style="list-style-type: none"> ウランの減損と核分裂性 Pu 及び希土類 FP の生成を考慮 燃焼度は、炉内 3 バッチの平均燃焼度 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮しない。 濃縮度は、バッチ 3 燃料 (最高濃縮度) の平均値 + 2σ 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮しない。 濃縮度は、バッチ 3 燃料 (最高濃縮度) の平均値 + 2σ 	<ul style="list-style-type: none"> ORIGEN にて求めた燃料デブリ取出し後 50 年後の燃料組成を考慮している。 FP は固体状 5 種 (Gd、Nd、Sm、Rh、Eu) のみ考慮し、ガス状及び揮発性 FP は考慮せず。
解析コード	<ul style="list-style-type: none"> KENO V.a (多群モンテカルロコード) 	<ul style="list-style-type: none"> ①KENO IV (多群モンテカルロコード) ②NITAWL で共鳴吸収補正をした群定数を用いて XSDRNPM (1次元 Sn 輸送コード) で格子均質化定数を作成。 	<ul style="list-style-type: none"> SCALE4.0 (臨界解析は多群モンテカルロコード KENO) 	<ul style="list-style-type: none"> MCNP (連続エネルギーモンテカルロコード)

表 6.1-1 燃料デブリ及び破損燃料等の臨界解析の実績(文献調査)(2/3) []は引用文献番号

項目	⑤低濃縮 UO ₂ -コンクリート系燃料デブリの臨界解析[6-1-5]	⑥HI-STAR HB キャスクの破損燃料(燃料デブリ含む) 収容時の臨界解析[6-1-6] (Humboldt Bay ISFSI の SAR)	⑦使用済燃料輸送、貯蔵キャスクの燃料破損による臨界安全への影響解析(NUREG/CR6835)[6-1-7]	⑧使用済燃料輸送、貯蔵キャスクの仮想的燃料配置の影響評価(NUREG/CR7203)[6-1-8]
実施者	JAEA	Pacific Gas and Electric Company	ORNL	ORNL
目的	MCCI を含む燃料デブリの最小臨界量の評価	破損燃料(燃料デブリ) 収納時のキャスク未臨界評価	事故時の燃料破損によるキャスク体系の実効増倍率への影響評価	事故後の燃料破損による仮想的な形状配置の臨界安全への影響評価
解析モデル	<ul style="list-style-type: none"> 球形 UO₂ を中心核として周囲をコンクリートで囲む球状セルの無限格子にて k_∞ を評価。(①) UO₂ とコンクリートの体積比 (V_f/V_m) 及び UO₂ 球半径 (r) を変えて、k_∞ が最大となる条件をサーベイ ①の k_∞ 最大条件にて、次のモデルで最小臨界量(UO₂) を評価 ①の最大 k_∞ を与える球(UO₂+コンクリート)を正方格子に配列した球体を考えて周囲を厚さ 40cm の反射体で囲み、その外はブラック(完全吸収体)とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 3次元モデル 破損燃料集合体は、DFC(燃料デブリ収納缶) に入れ、DFC 内で燃料棒(被覆管無視) を外周部又はチェッカーボード状に配列させる。 DFC は、キャニスタ全 80 体のうち 40 個 	<ul style="list-style-type: none"> 幾つかの燃料破損シナリオを設定して実効増倍率の変化を解析しているが、燃料デブリに近いものとして以下のシナリオがある。 ①燃料棒のコラプス ペレットのみが残り、他の燃料部材はすべて消滅したと仮定。ペレットはバスケット内で六法稠密格子状に配列させ最適減速(反応度最大)となるペレット間ピッチをサーベイ。 3次元モデル ※キャスク/燃料体系は、次の3種 MPC-24 MPC-68 GBC-32 	<ul style="list-style-type: none"> 幾つかの燃料形状配置を仮定しているが、そのうち燃料デブリに近いものは以下がある。 ①均一なラブル(燃料ペレット片と被覆管材、案内管材の均一混合物がバスケットセル内に分布すると仮定) ②燃料ペレットを規則配列(六方稠密格子)で配置 ※②のペレットの規則配列のほうが、共鳴自己遮蔽効果によって①の均一な混合物よりも反応度が高くなる。
構造材や制御材の考慮	考慮せず	固定中性子吸収板中の B-10 は、75%を考慮	キャスク側の構造材、中性子吸収材は考慮 燃料部材はすべて無視	①は被覆管と案内管を考慮(グリッドは考慮せず) ②は考慮せず。
水の有無	減速材をコンクリートから水に置き換えるケースも評価	冠水	冠水	冠水
燃焼度効果	BWR 新燃料に加えて、12GWd/t(FP 無)、12GW/t(FP 有)のケースも評価	考慮せず。	新燃料と燃焼燃料の両方について実施(燃料健全時との差を見るため)	パラメータとする。(0~70GWd/t)
解析コード	①SRAC(多群衝突確率法) ②MVP(連続エネルギーモンテカルロ法) 核データライブラリは、いずれも ENDL-3.3	<ul style="list-style-type: none"> MCNP4A(核データは ENDF/B-V) なお、NRC は申請者とは独立に SCALE5 の KENO V.a でチェック解析を実施した。(両者はよく一致) 	<ul style="list-style-type: none"> KENO VI ペレットの六方晶配列をモデル化できるためとしている。 	<ul style="list-style-type: none"> SCALE(KENO VI(ペレット配列の場合)) ENDF/B-VII.0 による 238 群ライブラリ

表 6.1-1 燃料デブリ及び破損燃料等の臨界解析の実績(文献調査)(3/3) []は引用文献番号

項目	⑨使用済燃料の破損による臨界安全への影響評価(ORNL/TM-2012/325)[6-1-9]	⑩輸送時の燃料再配置の影響(EPRI 1015050(2007))[6-1-10]	⑪非均質 MOX 系の最小臨界量評価(NUPEC ; INS/M03-52(2003))[6-1-19]
目的	事故後の燃料破損による仮想的な形状配置の臨界安全への影響評価	キャスク輸送事故時の燃料破損による臨界安全への影響評価	MOX 燃料の未臨界限度の評価
実施者	ORNL	EPRI	NUPEC (安全解析所)
解析モデル	NUREG/CR6835 の拡張版	NUREG/CR6835 の対案として EPRI がまとめたキャスク事故後の燃料破損による臨界安全への影響評価。燃料デブリに近い条件として、同様に被覆管が消滅してペレットのみが六方格子状に配列する場合は最も厳しいとしているが、このような条件は現実には起こりえないとしている。 ※ k_{eff} が最大となるのは、全体の 62% のペレットが最適ピッチで六方配列する場合	<ul style="list-style-type: none"> MOX 燃料球 (UO_2+PuO_2) を六方稠密格子に配列し、球径と格子ピッチをパラメータとして実効断面積を求める。 この実効断面積を用いて均質化した球、無限円筒、無限平板を考えて、その寸法を変えて、k_{eff} が 0.98 になる球径、円筒径、平板厚さを求める。(各球形-格子ピッチ毎)
構造材や制御材の考慮	⑧NUREG/CR7203 と同じ	考慮せず。	考慮せず。
水の有無	冠水	冠水	冠水
燃焼度効果	パラメータとする。(0~70GWd/t)	考慮(45GWd/t)	考慮せず。
解析コード	<ul style="list-style-type: none"> SCALE (KENOVI (ペレット配列の場合)) ENDF/B-VII.0 による 238 群ライブラリ 	<ul style="list-style-type: none"> SCALE、MCNP SCALE は燃料セルの均質化可能。MCNP は均質化機能が無いが、U-238 共鳴吸収の調整で均質化は可能。 	<ul style="list-style-type: none"> XSDRNPM (1 次元 Sn 輸送コード) 断面積ライブラリは、SCALE44 群

表 6.1-2 燃料デブリ及び破損燃料の臨界解析実績（文献調査）のまとめ

項目	主要な設定	備考
燃料デブリ形状の扱い	<ul style="list-style-type: none"> ・ペレット 1 個と同体積の UO_2 球体 ・UO_2 ペレットは六方最密充填構造配列 ・UO_2 球ピッチは最適減速値 (k_{∞} 最大点) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ペレット 1 個分より大きいあるいは小さい場合の評価は未確認 ・正方格子より三角格子のほうが若干反応度大 [6-1-3] ・不均等ピッチ、不均等粒径の影響は未評価
構造材や制御材の考慮	<ul style="list-style-type: none"> ・被覆管他の構造材は考慮せず ・収納缶（キャニスタ）設置の中性子吸収体*のみ考慮 ・1F では、MCCI 生成物の影響評価事例有 <p>※米国では、75%しか認められない。</p>	
水の考慮	<ul style="list-style-type: none"> ・内部は冠水（水没） ・TMI-2 では、水量をパラメータ（水量制限値評価のため） 	
燃焼度効果	<ul style="list-style-type: none"> ・TMI-2 燃料デブリは新燃料で評価 ・影響程度を見るためパラメータとした事例有 ・燃焼度クレジットを採る場合は、U、Pu の減損/生成及び FP 生成。FP は気体状及び揮発性を除いた安定核種のみ 	
解析コード	<ul style="list-style-type: none"> ・モンテカルロコードが主流である。（KENO、MCNP、MVP） 	

6.1.1.2 燃料デブリ貯蔵の臨界安全に及ぼす影響因子の抽出

6.1.1.1 項で説明した燃料デブリの臨界解析に関する文献調査に基づいて、燃料デブリ貯蔵時の臨界安全に及ぼす影響因子を抽出した。表 6.1-3 に反応度（実効増倍率（ k_{eff} ））に影響すると考えられる因子とそれらに対する検討事項を整理した。

表 6.1-3 燃料デブリ乾式貯蔵における臨界安全評価上の影響因子と要検討事項

影響因子	説明	要検討事項
①収納缶の大きさ	燃料デブリ収納缶の大きさ（内径）は、未臨界性によって制限される。	・収納缶単体で未臨界性を維持できる収納缶サイズ
②中性子吸収材	収納缶内に設置する中性子吸収材	・収納缶単体で未臨界性を維持できる中性子吸収材仕様
③燃料デブリ形状、配置	実効増倍率（ k_{eff} ）に大きく影響する。	・実効増倍率（ k_{eff} ）が最大となる形状、配置の決定 <ul style="list-style-type: none"> ✓ UO_2 粒子の大きさ、配列、ピッチ ✓ 同上の不均一性 ・臨界実験によるベンチマーク
④構造材	被覆管（ジルカロイ）、構造材（SUS）、制御材 吸収体として負の反応度効果を持つが、配置によっては反射体効果も考えられる。	・反応度効果の定量的把握（反射体としての反応度効果）
⑤MCCI（燃料デブリ/コンクリート反応生成物）	水より反応度効果が大きいとの情報有[6-1-5]	・MCCI の混入による反応度効果 ・臨界実験によるベンチマーク
⑥収納缶内水量	燃料デブリ中の水分は真空乾燥で完全に除去できず相当量が残るため、反応度効果が無視できない。	・燃料デブリ含水量 ・収納缶内水量制限値 ・反応度効果が最大となる収納缶内の水分分布
⑦燃焼度効果	U、Pu の減損/生成及び FP 生成の反応度効果（正と負がある）	・燃焼度効果を考慮した場合の反応度効果を定量的に把握する。 （燃焼度、対象核種の選定）
⑧解析コード/核データライブラリ	幾つかのオプションが考えられる。	・使用される可能性があるコード/核データによる差の定量的把握
⑨事故条件	臨界安全上考慮すべき事故事象があれば、対応が必要。	・臨界が関係する最大想定事故の選定と評価

6.1.1.3 解析方針及び解析要領

図 6.1-2 に臨界解析の全体の流れを示す。表 6.1-3 に整理した燃料デブリ乾式貯蔵時の臨界安全評価上考慮すべき影響因子の中から、基本的と考えられる項目を取り上げ、以下の 2 ステップで実施した。

- ・ステップ 1 燃料デブリ収納缶仕様の設定
- ・ステップ 2 燃料デブリ収納缶の水量制限値評価

(1)燃料デブリ収納缶仕様の設定

ステップ 1 では未臨界性を維持できる燃料デブリ収納缶の仕様設定のため、設計の前提として以下条件を設定した。

- ①最低限、健全な BWR 燃料集合体 1 体を収納できる大きさとする。収納缶全長は 4m とし、内径は未臨界性確保の観点から決定する。
- ②水中孤立系で未臨界を維持できること。これは、プールでの一時貯蔵を念頭に置いた設計目標であるが、プール貯蔵ならびに燃料デブリ回収時の未臨界性は本業務の範囲外であるため、プール貯蔵時の未臨界性を担保するものではない。プール貯蔵時の未臨界性は、プール側で担保するものとする。
- ③収納缶は、ステンレス鋼製円筒容器とし、内部に中性子吸収材として B-SUS 板を正方形状に設置する。
- ④燃料仕様は、濃縮度 4.9% (1F の最大濃縮度) とし燃焼度クレジットは考慮しない。
- ⑤燃料デブリは、反応度が最大となる形状、配置にモデル化する。また、 UO_2 のみで構成されるものとして、被覆管等の構造材や制御材は考慮しない。燃料デブリ内部の水 (結合水) は反応度を高く見積もるため燃料デブリ外に置く。

上記⑤の燃料デブリ形状、配置は、6.1.1.1 項の文献調査をもとに球形 UO_2 粒子を面心立方格子配列に置き、粒子径/ピッチをパラメータとして無限格子計算を行い、無限増倍率 (k_{∞}) と格子均質化定数を求めた。次に、この格子均質化定数を用いて収納缶 1 基を水中に置いた体系での k_{eff} を計算した。

解析コードには使用済燃料貯蔵設備等の許認可解析での使用実績が豊富な SCALE 6.0[6-1-12]を用い (無限格子計算には CSAS モジュール (1 次元 Sn コード XSDRNPM 使用) を

使用し、実効増倍率 (k_{eff}) の計算は 3 次元モンテカルロコード KENO VI による)、核データは ENDF/B-VII ベースの 238 群ライブラリを使用した。

また、B-SUS 板の厚さ/B-10 密度を調整して、 $k_{\text{eff}} \leq 0.95$ となる収納缶内径をサーベイした。図 6.1-3 に解析のフローを示す。

収納缶は、TMI-2 の燃料デブリキャニスタを参考に全長 400cm で厚さ 6mm のステンレス鋼製の円筒容器とし、収納缶の直径は、前記のとおり燃料デブリの収納性と未臨界性を考慮して決定する。

文献[6-1-14]に記載されている非均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の臨界データを図 6.1-4 に示す。同図は、減速材(水)中に UO_2 ペレットを正方格子に円柱形状に配列した場合(周囲に水反射体)の、U-235 濃縮度と臨界直径の関係を示すものである。同図から、1F の最大濃縮度(4.9%)に対する臨界直径は約 24cm となる。比較のため TMI-2 の最大濃縮度(2.98%)に対する臨界直径(29cm)も併せて示す。これを参考に、収納缶直径は 20cm を下限として上側をサーベイした。TMI-2 の燃料デブリキャニスタの内径は約 34cm で図 6.1-4 の値(29cm)よりも大きい、これは燃料濃縮度が 1F よりも低いことに加え中性子吸収材を導入したためと考えられる。燃料デブリの収納性の点から本検討でも中性子吸収材の導入することとした。

(2)燃料デブリ収納缶の水量制限値評価

ステップ 2 では、(1)で設定した収納缶仕様(内径、B-SUS 仕様)に対して、貯蔵中の未臨界性を維持するための収納缶内の水量制限値を評価した。平成 27 年度の予備調査より、燃料デブリは多量の水を含んでおり、また、化学的、物理的に燃料デブリに束縛された水(結合水)を含むために真空乾燥後においても、相当量の水が収納缶内に留まることが予想される。また、貯蔵中においても収納缶のガスパージを行う開放型設計を採用すれば、外気から収納缶内に水分を取り込むことが考えられる。そのため、貯蔵中の臨界安全確保の観点から収納缶の水量制限値を評価する。

評価に際して以下の前提を置く。

- ①貯蔵方式は、ボルト(収納缶付)とする。収納缶は複数基数をキャニスタに収納し、キャニスタをボルト収納管にて貯蔵する。
- ②キャニスタは、ステンレス鋼製円筒容器で収納缶を 12 基収納できるものとする。
- ③ボルト収納管は炭素鋼製で正方配列とする。また、上部にはコンクリートプラグを置

く。

④収納缶は、(1)で設定した仕様とする。

⑤燃料仕様は、濃縮度 4.9% (1F の最大濃縮度) とし燃焼度クレジットは考慮しない。

収納缶内の燃料デブリと水の形状、配置は次の二つのケースを考える。

- ・ ケース 1 (下部堆水モデル)

水(密度 100%)が収納缶下部に存在し、その上部は飽和蒸気(100°C)が自由空間に一様に存在すると仮定する。

- ・ ケース 2 (水一様分布モデル)

収納缶内のすべての水が収納缶内の自由空間に一様に分布するものとする。

ケース 1 は、(1)で求めた収納缶単体の k_{eff} が最大となる UO_2 球の面心立法格子配列を仮定し、上部については飽和蒸気が一様に満たされるものとする。ケース 2 は、ケース 1 と同じ UO_2 球の面心立法格子配列を仮定して、収納缶内のすべての水が UO_2 球間の自由空間に一様に分布するものとした。以上の燃料デブリ存在領域での条件を用いて、各水量レベルに対してボールト貯蔵体系(収納缶入りキャニスタ+収納管の無限配列(上部はコンクリート反射体))での k_{eff} を評価する。この結果より、 $k_{\text{eff}} \leq 0.95$ を満足できる収納缶内水量の上限値を評価する。

図 6.1-5 に解析のフローを示す。

ステップ1 収納缶仕様設定

- 目的 未臨界を維持できる収納缶寸法/中性子吸収材 (B-SUS) 仕様の設定
- 臨界解析条件
 - ・解析体系：水中孤立系（常温）
 - ・収納缶材質・形状寸法：SUS 製円筒/全長 4m/内径は最低限燃料集合体 1 体収納可能
 - ・中性子吸収材：B-SUS 板（容器内面に正方形に設置）
 - ・燃料濃縮度：4.9%（1F 最大）
 - ・燃焼度クレジット：無
 - ・未臨界基準： $k_{\text{eff}} \leq 0.95$
- 解析方法
 - ・解析モデル：燃料デブリは球形 UO_2 粒子を面心立法格子配列（球形/ピッチをパラメータとした格子均質化定数を用いて体系計算）
 - ・解析コード：SCALE 6.0
- 出力 未臨界性を維持できる収納缶サイズ（内径）及び B-SUS 板厚/B-10 密度



ステップ2 収納缶水量制限値評価

- 目的 貯蔵中における収納缶内水量制限値の評価
- 臨界解析条件
 - ・解析体系：収納缶を複数基収納したキャニスタをボルト収納管に収納した体系無限配列を仮定
 - ・キャニスタ材質・形状寸法：SUS 製円筒容器
 - ・収納管材質：炭素鋼
 - ・収納缶仕様：ステップ1で設定したもの
 - ・燃料濃縮度：4.9%（1F 最大）
 - ・燃焼度クレジット：無
 - ・未臨界基準： $k_{\text{eff}} \leq 0.95$
- 解析方法
 - ・解析モデル：ケース1 下部堆水（堆水部は UO_2 球を面心立法格子配列=ステップ1の最適条件、上部は一様分布水中（飽和蒸気+結合水）に UO_2 球同士接触配置）
ケース2 水一様分布（ UO_2 球を面心立法格子配置し、全水量を自由空間に一様分布）
※いずれも水量をパラメータとして、 $k_{\text{eff}}=0.95$ となる条件をサーベイ
 - ・解析コード：SCALE 6.0
- 出力 未臨界性を維持できる収納缶内水量の上限

図 6.1-2 臨界解析の全体フロー

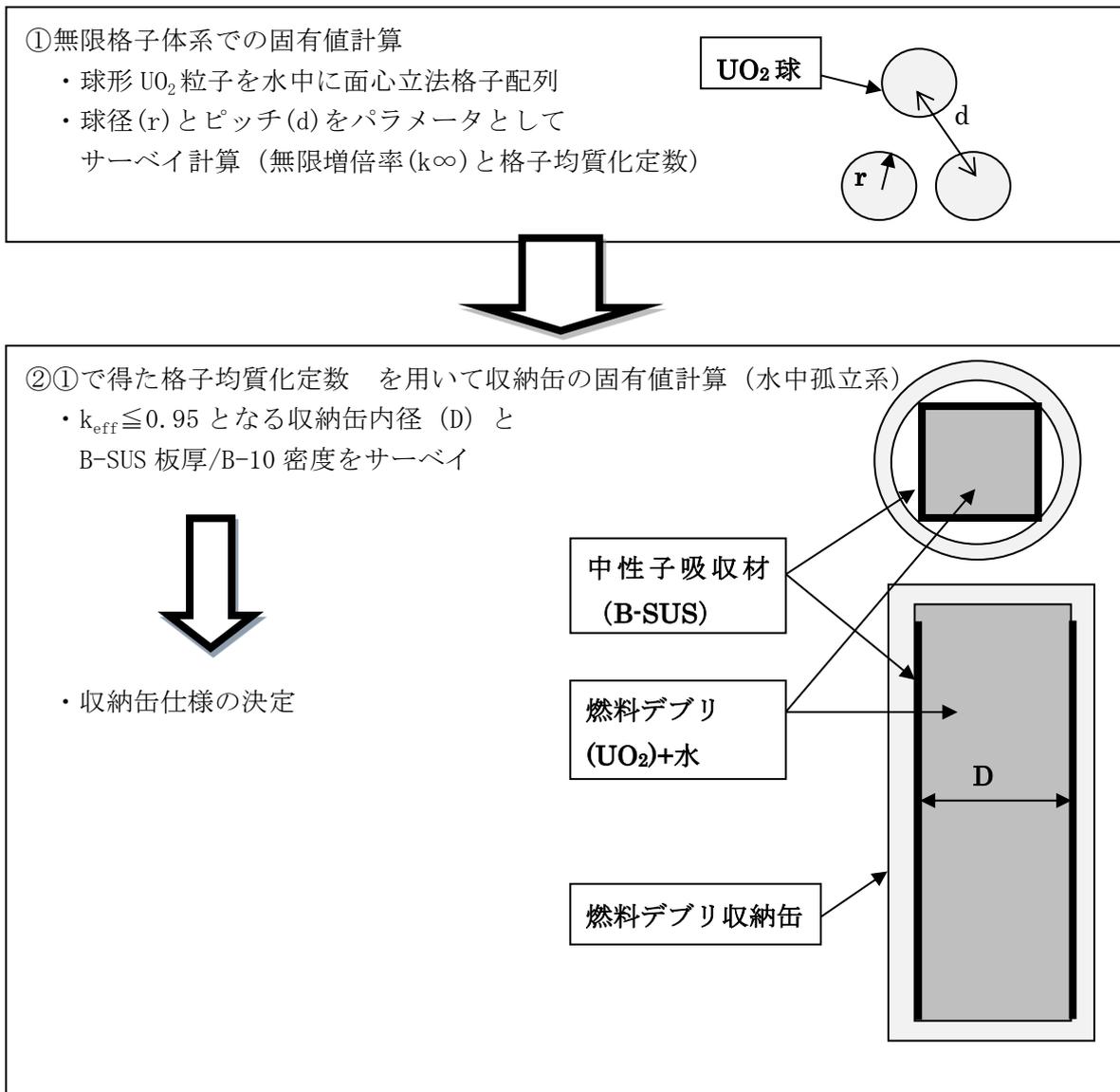


図 6.1-3 燃料デブリ収納缶仕様設定 (臨界解析) のフロー

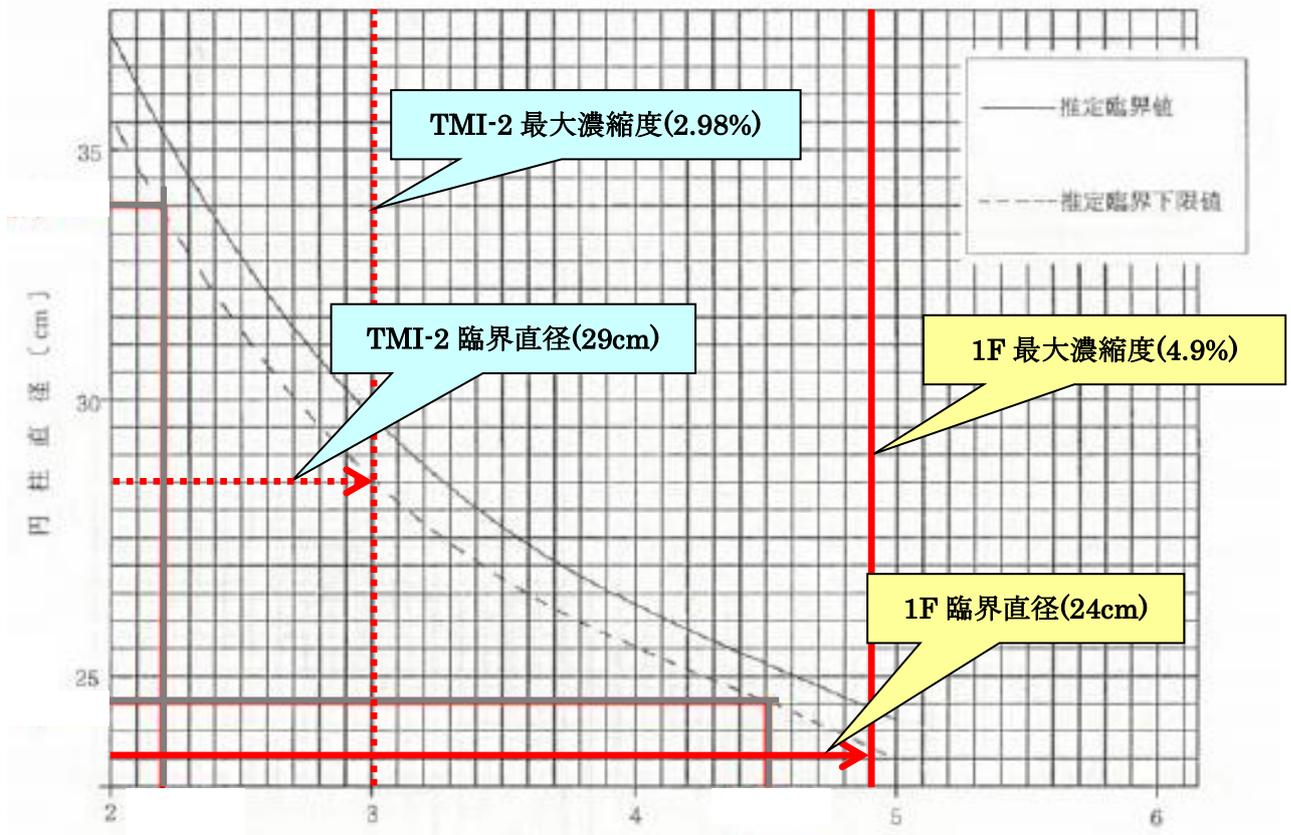


図 6.1-4 非均質 UO_2 (ペレット正方配列) の臨界条件 [6-1-14]

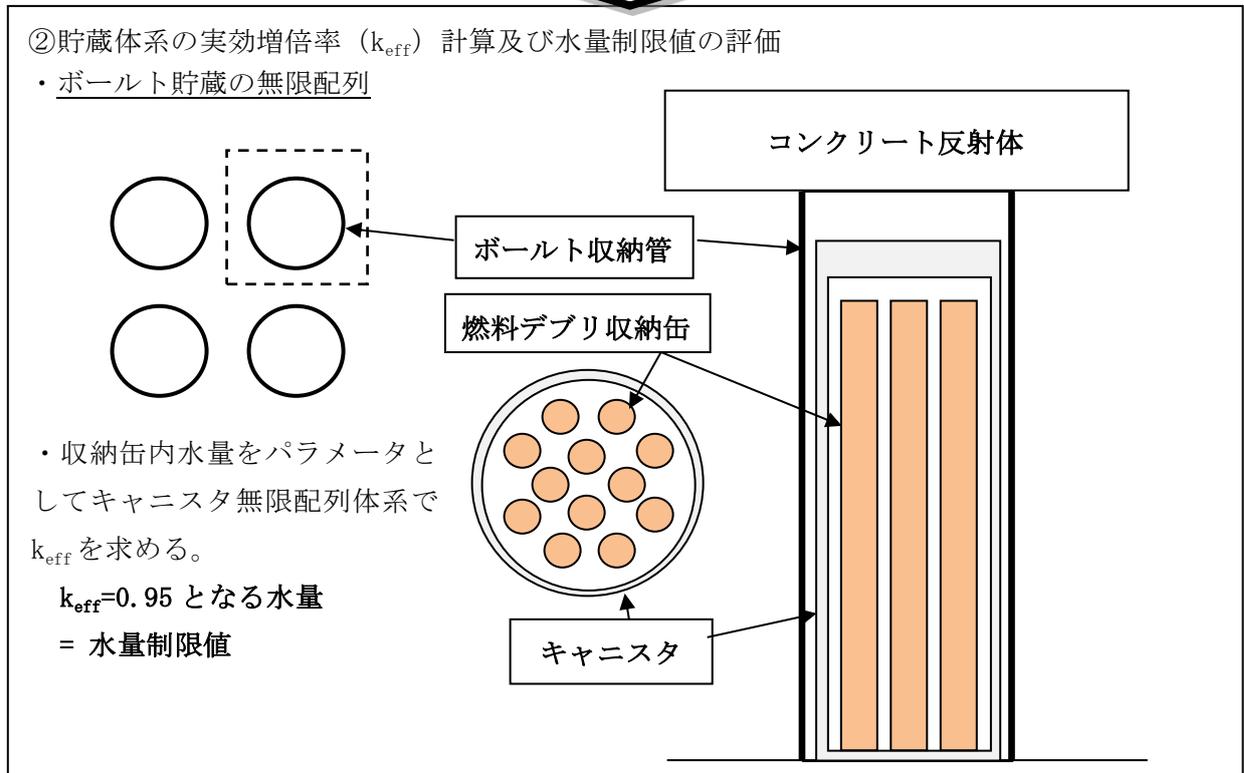
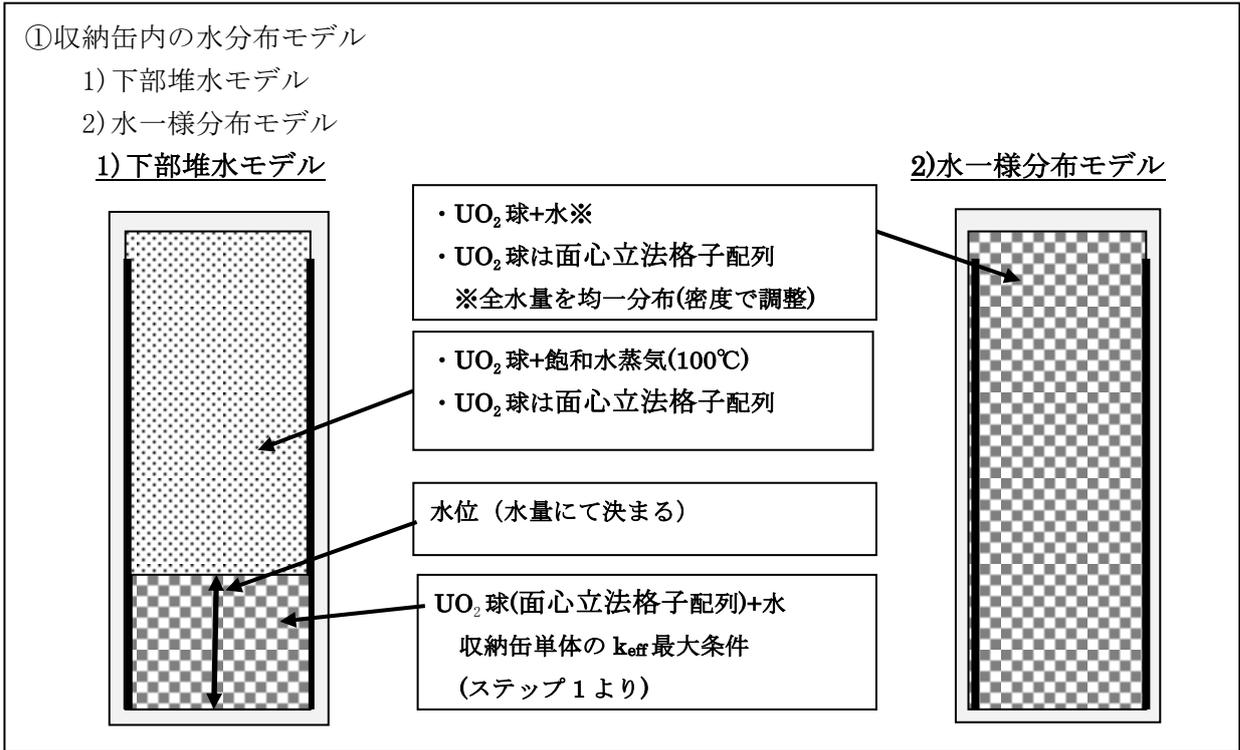


図 6.1-5 燃料デブリ収納缶水量制限値評価のフロー

6.1.2 臨界解析

6.1.2.1 収納缶仕様サーベイ解析

(1) 解析条件

収納缶仕様選定のための解析条件を表 6.1-4 及び表 6.1-5 に示す。なお、表 6.1-5 の原子個数密度は以降の検討でも用いた。収納缶は、内径 250mm（ケース 1）と内径 320mm（ケース 2）の 2 タイプを考えた。どちらも燃料デブリ収納部は板厚 6mm の B-SUS 板から成る正方セルできており、ケース 1 は内法が辺長 160mm の正方形で BWR 燃料集合体 1 体がちょうど収納できる大きさで、ケース 2 は燃料デブリの装荷性を考慮して内法辺長を 210mm とやや大きくしたものである。図 6.1-6 に解析体系を示す。

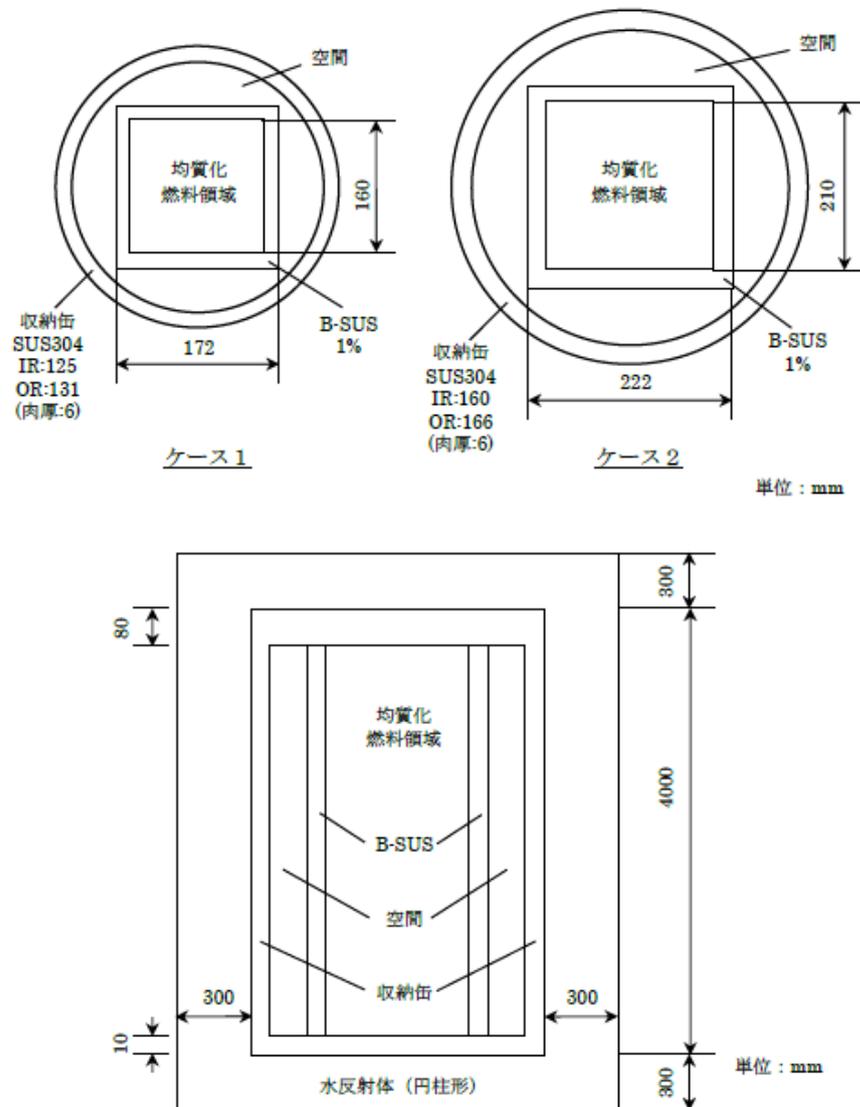


図 6.1-6 収納缶仕様サーベイ解析の体系（収納缶単体水中孤立系）

表 6.1-4 解析条件（収納缶仕様サーベイ計算）

項目	条件	備考
ペレット配列	面心立法格子配列	六方最密充填格子と基本的に同じ。
UO ₂ 球径	0.3、0.4、0.5、0.6、0.75 の計5ケースを実施	
UO ₂ 球ピッチ	燃料デブリ充填率 (Vf/(Vf+Vm) ; Vf ; デブリ体積 Vm ; 水体積) を 0.19~0.27 まで 0.01 刻みでパラメータとする。	
水密度	常温の密度 (1.0g/cm ³)	温度が低い (密度大) 方が反応度は大きくなるため
構造材	被覆管、制御材等は無視、UO ₂ のみとする。	
燃料デブリ含有水 (結合水)	無視する。	水はUO ₂ 外に置く方が反応度が大きくなるため
燃料濃縮度	4.9%	1F 燃料の最大濃縮度 [6-1-21]
燃焼度	新燃料とする。(燃焼度クレジットは採らない)	1F 燃料デブリは、燃焼度が小さい新燃料に近いものも含まれている。
収納缶材質	ステンレス鋼 (SUS304)	
収納缶形状寸法	円筒容器 全長 4m 肉厚 : 6mm 内径 : ①250mm、②320mm (パラメータ) 上蓋厚さ : 80mm 底板厚さ : 10mm 外周空隙 : 水又はボイド(パラメータ)	<ul style="list-style-type: none"> 燃料集合体 1 体装荷可能とする。 肉厚は TMI-2 燃料デブリキャニスタの実績と合わせた。 内径は未臨界性の観点からサーベイする。
中性子吸収材	B-SUS 板 (収納缶内面に正方形に設置) 内寸 : ①160mm、②210mm (○数字は上記内径と対応) 板厚 : 6mm	B-SUS 板厚と B-10 密度は、未臨界性の観点から必要に応じ調整する。
中性子吸収材のボロン含有量	1wt%	
解析体系	<ul style="list-style-type: none"> 孤立系 (水中に収納缶を 1 基置く。周囲の水厚さ 300mm) 3 次元体系 	配列条件は考えない。(プールでの未臨界性は担保しない。)
判定基準	$k_{eff} \leq 0.95$	一般的な判定基準
使用コード / 核データライブラリ	SCALE 6.0 /ENDF/B VIIベース 238 群ライブラリ	使用済燃料貯蔵施設等の許認可解析で実績多数
アボガドロ数	$0.602214086 \times 10^{24}$ atoms/mol	
温度	20°C	

表 6.1-5 原子個数密度

	密度 (g/cm ³)	元素	原子量	核種重量比 (%)	重量割合 (wt%)	原子個数密度 (10 ²⁴ atoms/cm ³)
UO ₂ (4.9wt%)	10.6312	²³⁵ U	235.0439301	4.9	—	1.1765×10 ⁻³
		²³⁸ U	238.0507884	95.1	—	2.2544×10 ⁻²
		O	15.99940492	—	—	4.7442×10 ⁻²
H ₂ O	0.99997	H	1.007940754	11.2	—	6.6854×10 ⁻²
		O	15.99940492	88.8	—	3.3427×10 ⁻²
SUS304	7.93	Cr	51.9961317	—	19	1.7450×10 ⁻²
		Ni	58.6933471	—	9.25	7.5262×10 ⁻³
		Fe	55.8451444	—	71.75	6.1357×10 ⁻²
B-SUS (304B4)	7.63	¹⁰ B	10.0129369	19.9	1	8.4579×10 ⁻⁴
		¹¹ B	11.0093054	80.1	—	3.4044×10 ⁻³
		Cr	51.9961317	—	19	1.6790×10 ⁻²
		Ni	58.6933471	—	13.5	1.0569×10 ⁻²
		Fe	55.8451444	—	66.5	5.4716×10 ⁻²
炭素鋼	7.85	Fe	55.8451444	—	100	8.4652×10 ⁻²
コンクリ ート	2.30	H	1.00794075	0.023	0.99913119	1.3730×10 ⁻²
		O	15.9994049	1.22	52.9973936	4.5881×10 ⁻²
		C	12.0107359	0.0023	0.09991312	1.1522×10 ⁻⁴
		Na	22.9897693	0.0368	1.5986099	9.6313×10 ⁻⁴
		Mg	24.3050516	0.005	0.21720243	1.2378×10 ⁻⁴
		Al	26.9815385	0.078	3.38835795	1.7394×10 ⁻³
		Si	28.0854987	0.775	33.6663771	1.6603×10 ⁻²
		K	39.0983009	0.0299	1.29887055	4.6014×10 ⁻⁴
		Ca	40.0780225	0.1	4.34404865	1.5013×10 ⁻³
Fe	55.8451444	0.032	1.39009557	3.4478×10 ⁻⁴		

(2) 解析結果

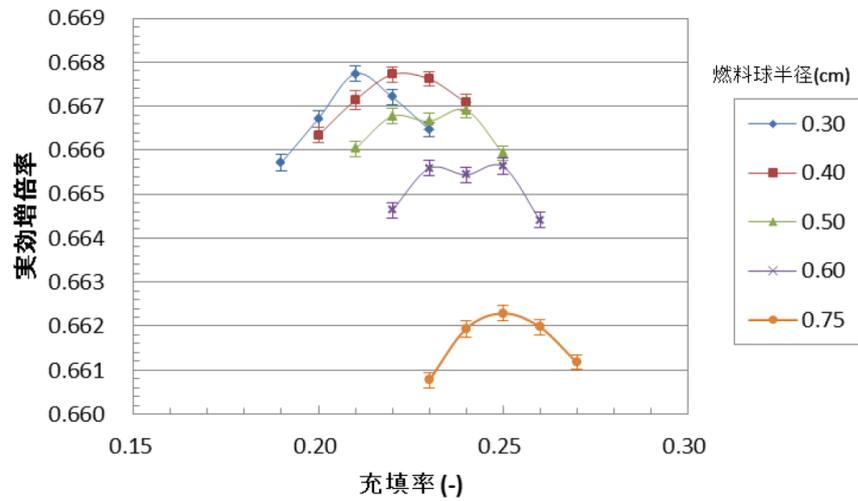
解析結果を図 6.1-7 に示す。図 6.1-7 の上図は、ケース 1 (収納缶内径 160mm) に対するもので下図はケース 2 (収納缶内径 210mm) に対するものである。これらの図は、充填率 (収納缶内の燃料デブリ体積の占める割合) を横軸にとって、各 UO₂ 球径/ピッチの組合せに対する収納缶の k_{eff} をあらわしている。 k_{eff} が最大となるのは、両ケースともに充填率が 0.22 で、UO₂ 球形が 0.40cm の時である。その結果を表 6.1-6 に示すが、いずれも k_{eff} は 0.95 より小さく未

臨界性は維持される。

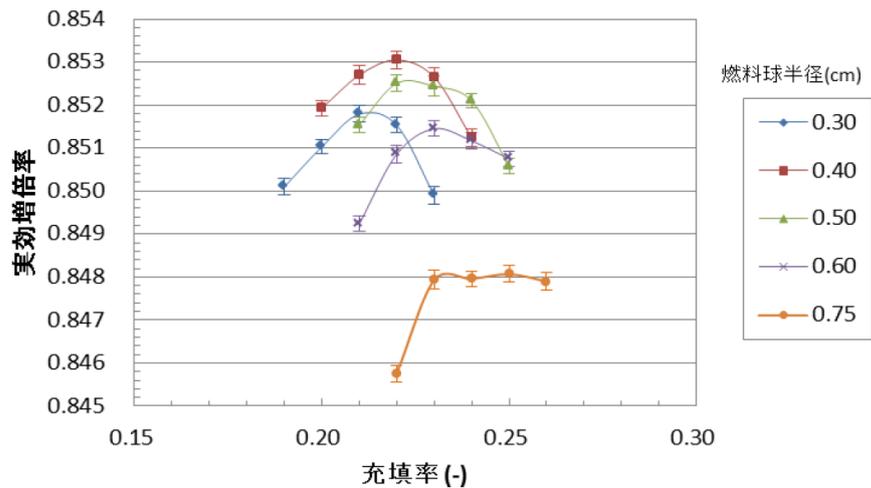
以上の結果は、拡散理論に基づく簡易的な評価と大体の傾向はよく一致しており、妥当なものだと判断される。（付録-1 参照）

表 6.1-6 収納缶単体解析において k_{eff} が最大となる条件

ケース	k_{eff} が最大となる充填率 (UO_2 球形)	最大 $k_{\text{eff}} (+3\sigma)$	k_{∞}
ケース 1	0.22 (0.40cm)	0.66826	1.53242
ケース 2	0.22 (0.40cm)	0.85368	1.53242



(ケース 1)



(ケース 2)

図 6.1-7 収納缶単体解析における UO_2 球形/ UO_2 球ピッチと k_{eff} の関係

6.1.2.2 ボールト貯蔵体系での未臨界評価

ここでは、6.1.2.1 項で設定した収納缶仕様に対して、ボールト貯蔵体系での臨界解析を行う。

(1) 解析条件

表 6.1-7 に解析条件を示す。この解析では、6.1.2.1 項で設定した収納缶仕様の二つのケースに対して、ボールト貯蔵体系での解析を行う。収納缶の B-SUS 正方格子板と円管の間の空隙は、水有と水無（ボイド）の二つのケースを考えた。

ここで、キャニスタは、収納缶を 12 基収容する直径約 1.7m のステンレス鋼製容器で、その断面図で図 6.1-8 に示す。（キャニスタあたり 12 基の収納数は、TMI-2 の乾式貯蔵キャニスタに合わせた。）解析では、キャニスタ内空間（収納缶外部空間）の水密度をパラメータとし、ゼロから 100%まで変化させた。また、キャニスタ内の収納缶ピッチについてもパラメータとして図の寸法より狭まった場合の影響を評価した。キャニスタのボールト貯蔵状態を図 6.1-9 に示す。

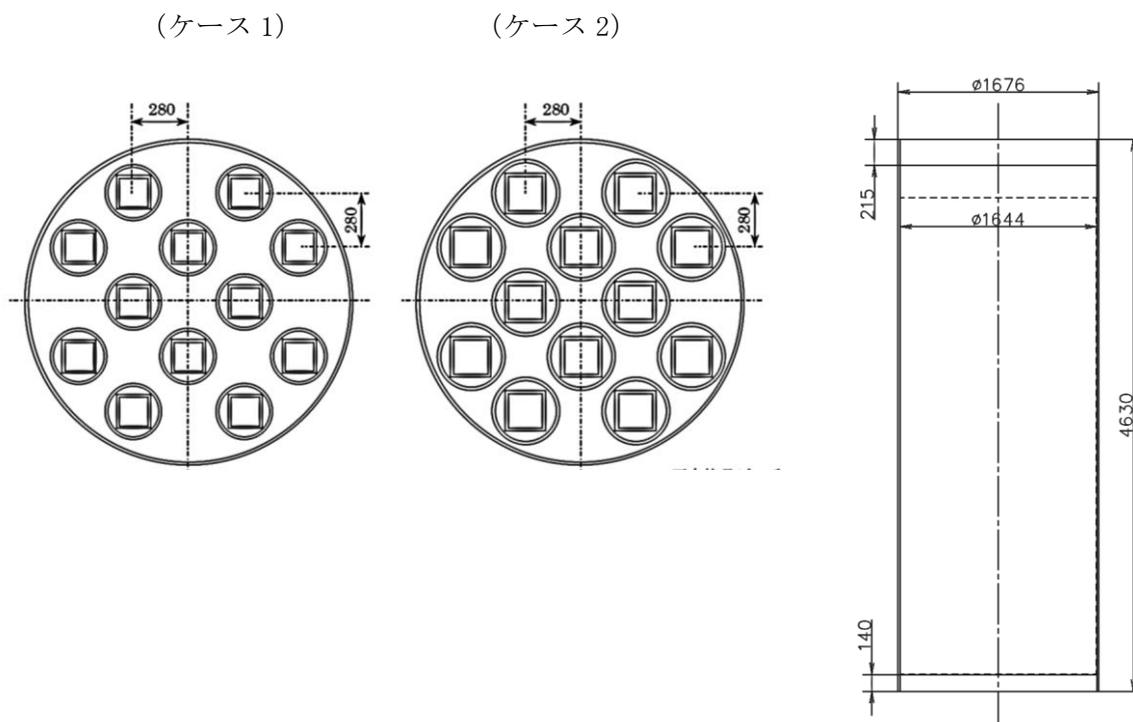


図 6.1-8 燃料デブリ収納キャニスタの寸法形状

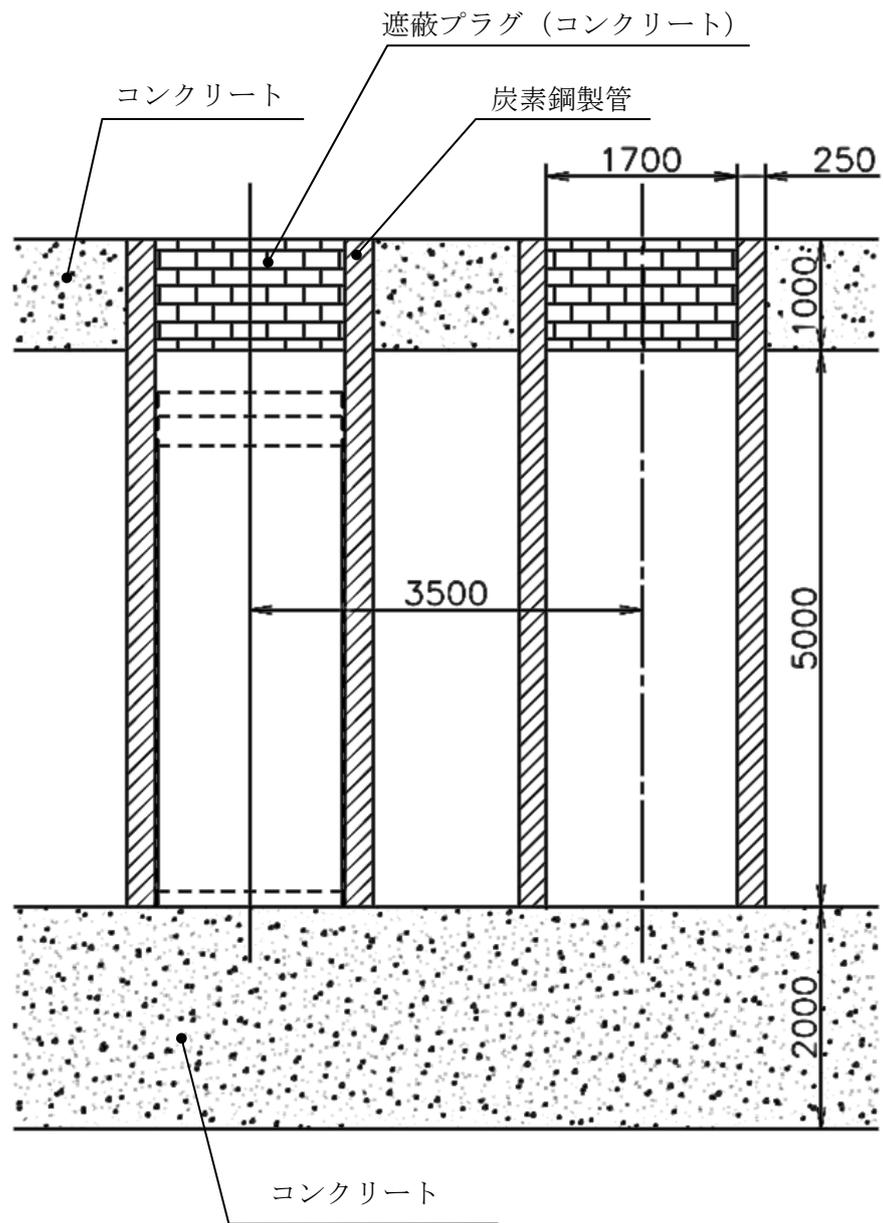


図 6.1-9 キャニスタのボルト貯蔵状態

表 6.1-7 解析条件（ボールド貯蔵体系の実効増倍率計算）

項目	条件	備考
収納缶仕様	6.1.2.1 (2) で設定した仕様（収納缶寸法、中性子吸収材仕様）	
収納缶内水量	満水	別途、水量をパラメータとした解析を行う。
燃料デブリ条件	表 6.1-6 に示す収納缶単体解析で k_{eff} が最大となる充填率/ UO_2 球径 (無限格子計算により燃料デブリ領域は均質化)	同上
キャニスタ仕様 /ボールド仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ：収納缶 12 基収納 ステンレス鋼製円筒容器 外径：1676mm 胴板厚：16mm 収納缶ピッチ：280mm(解析ではパラメータとする。) 上部蓋及び遮蔽体：215mm 下部遮蔽体：140mm ・収納缶外周空隙：水有、無（ボイド）の 2 ケース ・ボールド収納管：キャニスタを 1 基収納、炭素鋼製管 内径：1.7m 板厚：0.25m 管長さ：5m ・ボールド配列：正方格子、ピッチ 3.5m ・その他：ボールド収納管上部は、コンクリート製遮蔽プラグ（厚さ 1m）、下部はコンクリート基礎（厚さ 2m） 	キャニスタ内の収納缶数は、TMI-2 に合わせた。
解析体系	<ul style="list-style-type: none"> ・ボールド収納管（キャニスタ入り）の無限配列 ・キャニスタ内空間（収納缶外部）の水密度（パラメータとする。) ・3次元体系 ・上下の反射体（コンクリート）考慮 	
判定基準	$k_{\text{eff}} \leq 0.95$	一般的な判定基準
使用コード /核データライブラリ	SCALE 6.0 /ENDF/BVIIベース 238 群ライブラリ	使用済燃料貯蔵施設等の許認可解析で実績多数

(2) 解析結果

図 6.1-10 及び図 6.1-11 に解析結果を示す。図 6.1-10 は、ケース 1 に対して収納缶外周部の B-SUS 板の外側の空隙をボイド（水無）とした場合の結果をあらわす。図 6.1-10 では、キャニスタ内空間（収納缶媒部）の水密度を横軸にとって貯蔵体系の k_{eff} を示しており、キャニスタ内の収納缶ピッチ（面間距離）を変えた結果も同時に示している。収納缶外周部空隙をボイドとすれば、キャニスタ内空間の水密度が小さいと臨界になることがわかる。

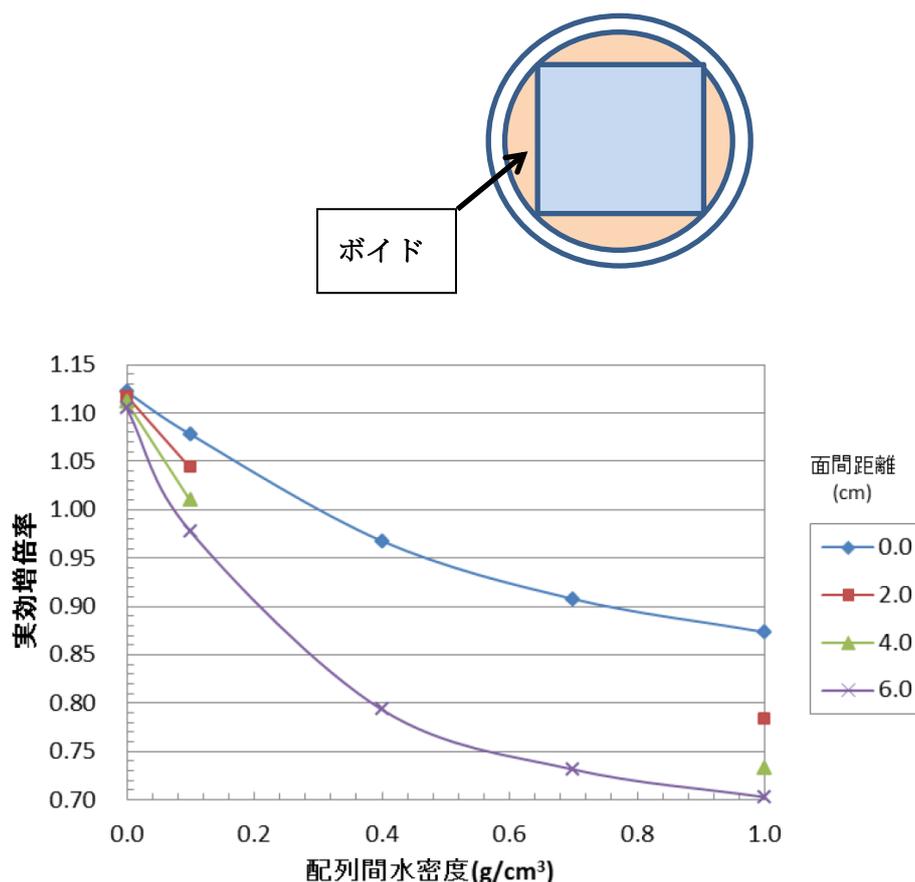
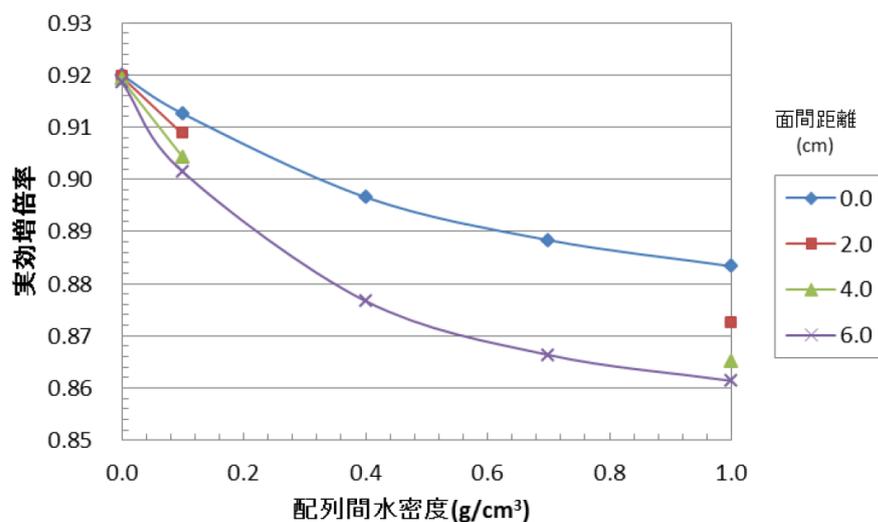


図 6.1-10 ボールト貯蔵体系（収納缶無限配列）の k_{eff} （ケース 1、外周空隙ボイド）

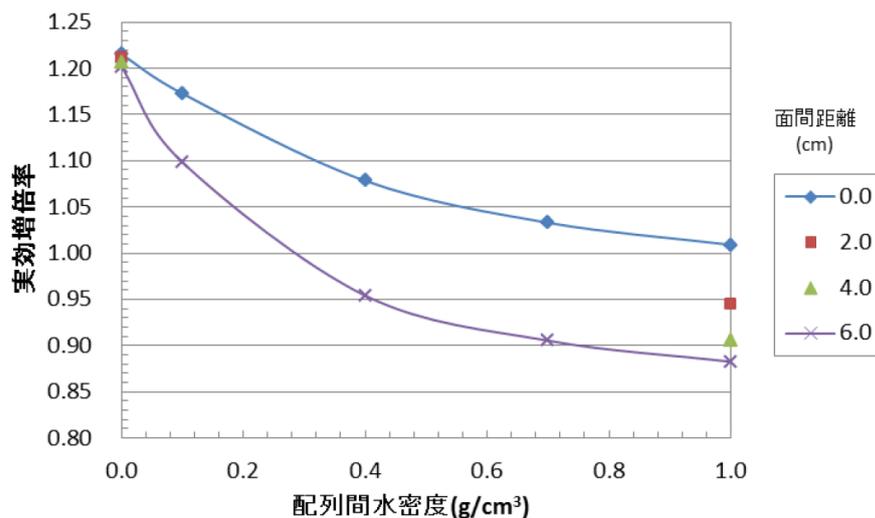
次の図 6.1-11 は、ケース 2 について収納缶外周部空隙が水有の場合（上図）と水無（ボイド）（下図）の両方の結果をあらわす。これより、収納缶外周部に水がある場合は、キャニスタ内空間の水密度によらず未臨界が維持されるが、収納缶外周部空隙がボイドの場合はケース 1 と同様にキャニスタ内空間の水密度が小さいうちは臨界になることがわかる。

以上の結果から、収納缶の B-SUS 板格子と円管の間の空隙がボイドの場合は、ケース 1, 2 ともに貯蔵体系（収納缶無限配列）では臨界の達し得ることが判明した。この理由は、収納缶は

直径が約 30cm 前後と小さいので、収納缶内で十分減速されないまま収納缶を飛び出す中性子の割合が大きい。これらの高速中性子は B-SUS 板中の B-10 に捕獲されず再び隣接する収納缶に入射してしまうので、結局収納缶から見ると高速中性子の実効的な漏れ量の減少と等価である。収納缶外周部あるいはキャニスタ内の収納缶間の空間の水があれば、そこで収納缶から漏えいした高速中性子が減速されるので、B-SUS 板中のボロンで吸収されやすくなる。このため、キャニスタ内空間は水無で設計するとしても、収納缶外周部の空隙は水に代わる中性子減速材を充填するような設計が必要になる可能性がある。



(収納缶外周部水有)



(収納缶外周部ボイド)

図 6.1-11 ボールト貯蔵体系 (収納缶無限配列) の k_{eff} (ケース 2、外周空隙水有/ボイド)

6.1.2.3 収納缶水量制限値評価

(1) 収納缶内の水分分布モデル

この解析では、収納缶内の水の分布が結果に大きく影響するため図 6.1-5 に示したように次の二つの極端なケースを考慮する。

- 1) 下部堆水モデル：収納缶内の水は底部に溜る。その上部は飽和水蒸気（100℃）で満たされるものとする。
- 2) 水一様分布モデル：収納缶内の水は、燃料デブリ（UO₂ 球）を除く空間に一様に分布する。水量は、空間の水密度で調整する。

ここでは、これまで検討した 2 ケースのうちケース 2（収納缶内径 320mm）について解析を行う。前述のとおり、ケース 1,2 ともに収納缶単体及び貯蔵体系での未臨界性を維持できる見通しがあるので、ここでは内径が大きく燃料デブリ装荷性の点で優れるケース 2 を対象とする。

下部堆水モデルでは、上部の飽和水蒸気が占める空間の UO₂ 球の球径/ピッチは 6.1.2.1 項の収納缶単体解析と同じ体系で k_{eff} が最大となるよう決定する。下部は、表 6.1-6 に示した収納缶単体解析の k_{eff} が最大となる、UO₂ 球径 0.4cm の UO₂ 球が充填率 0.22 で面心立法格子配列しているとする。

水一様分布モデルでは、収納缶内の UO₂ 球配列を固定したままで水量を空間内の水密度で調整して解析を行う。また、 k_{eff} を保守側に与えるため以下を仮定した。

- ・ 収納缶外周部空隙はボイドとする。
- ・ キャニスタ内部空間（収納缶外部）もボイドとする。

その他の解析モデル及び条件は、表 6.1-7 と同じである。

(2) 解析結果

a. 飽和水蒸気中の最適 UO₂ 球配列のサーベイ

図 6.1-12 に収納缶単体体系において飽和水蒸気（100℃）中で UO₂ 球径と充填率をパラメータとして k_{eff} を計算した結果を示す。 k_{eff} は UO₂ 球径によらず最密充填時に最大 ($k_{\text{eff}}=0.301$) となる。よって、下部堆水モデルの上部領域（飽和水蒸気充滿空間）は、UO₂ 球径が 0.4cm、充填率が 0.74048（最密充填率、格子ピッチ 0.8cm）で計算する。

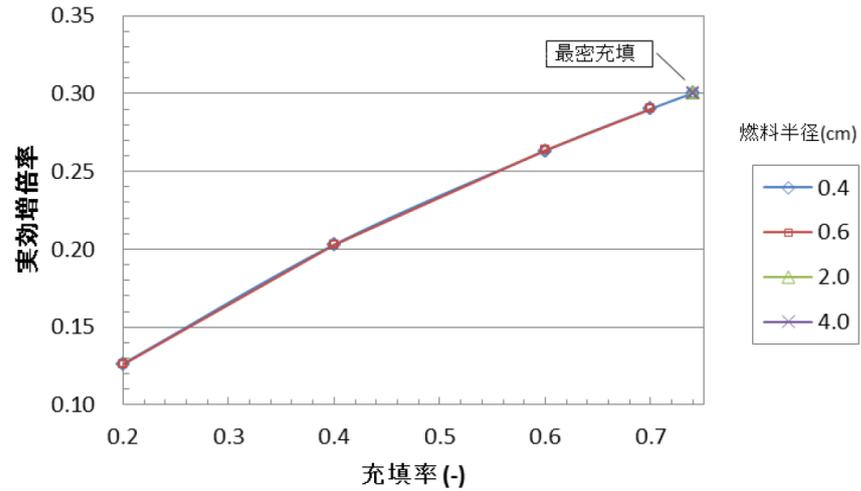


図 6.1-12 飽和水蒸気中に UO_2 球を充填した場合の収納缶単体の k_{eff} (ケース 2)

b. 下部堆水モデルによる水量制限値

下部堆水モデルで計算したボルト貯蔵体系の k_{eff} と収納缶内水量の関係を図 6.1-13 に示す。図 6.1-13 より k_{eff} が 0.95 となる収納缶内水位を内挿によって求めると、約 39.9cm でそれに相当する水量は、13.7kg となる。

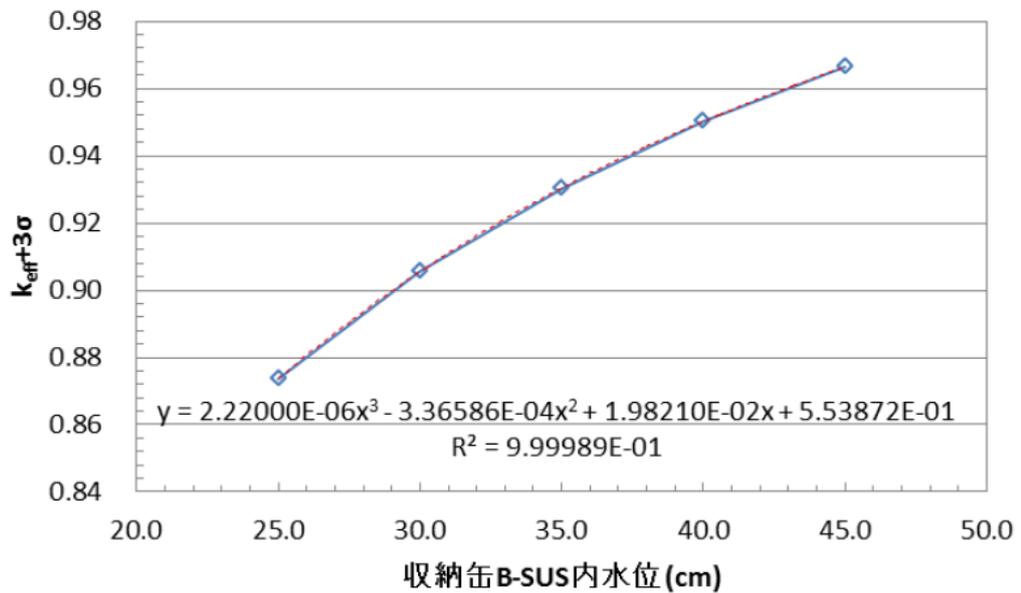


図 6.1-13 下部堆水モデルによるボルト貯蔵体系の k_{eff} と収納缶内水位の関係 (ケース 2)

c. 水一様分布モデルによる水量制限値

水一様分布モデルで計算したボールト貯蔵体系の k_{eff} と収納缶内水量の関係を図 6.1-14 に示す。図 6.1-14 より k_{eff} が 0.95 となる収納缶内水密度を内挿によって求めると、約 0.6g/cm^3 でそれに相当する水量は、80.2kg となる。

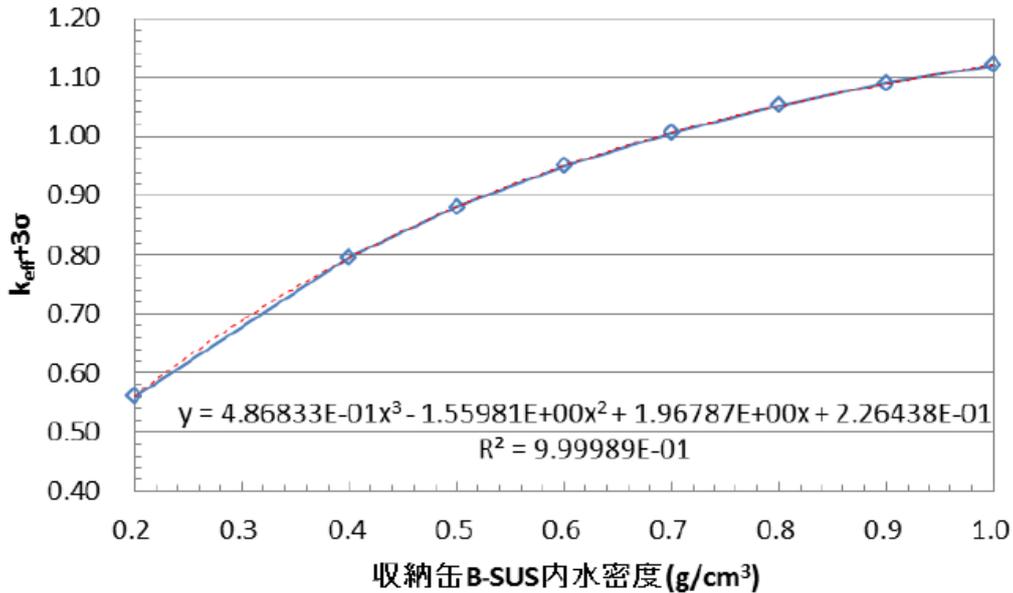


図 6.1-14 水一様分布モデルによるボールト貯蔵体系の k_{eff} と収納缶内水位の関係 (ケース 2)

(3) まとめ

以上の結果から、ボールト貯蔵体系における臨界安全の観点からの収納缶内水量制限値を表 6.1-8 にまとめた。以下の結果は、簡易計算によるものと傾向が概ね一致する。(付録-1 参照)

下部堆水モデルのほうが、水一様分布モデルよりも水量制限値がはるかに少ない理由としては以下が考えられる。

- ・ 水一様分布では、満水状態 (水密度 100%) で k_{eff} が最大となる UO_2 球径/充填率で固定しているため、水密度を下げるほど低減状態が強まって k_{∞} が低下することと中性子の平均自由行程が長くなり、体系 (収納缶) からの中性子漏えい量が増加する二つの効果で反応度が下がる。一方、下部堆水モデルでは、水がある領域の k_{∞} 及び中性子平均自由行程は変化せず水領域の縮小による幾何学的な理由による漏えい量の増加で反応度が下がるだけである。前者の反応度低減効果のほうが、後者よりもはるかに大きいためと考えられる。

- ・なお、水一様分布では、水密度減少によって k_{∞} が低下しない（H/U が最適減速値を維持する）ように燃料デブリ（ UO_2 ）量も同時に減少させるほうが反応度低下が小さいことが予想される。このため、水一様分布による水量制限値評価は上記の観点からの検討が必要と思われる。

表 6.1-8 収納缶内水量制限値評価のまとめ（収納缶ケース 2）

評価モデル	k_{eff} が 0.95 になる水量
下部堆水モデル	13.7kg
水一様分布モデル	80.2kg

6.1.3 解析結果のまとめと課題

表 6.1-9 に以上に説明した解析結果と課題をまとめた。以下にその要点について述べる。

6.1.3.1 解析結果のまとめ

解析結果の要点を以下に示す。

(1) 今回設定した二つの収納缶仕様のいずれも単体での未臨界性（水中孤立系）を維持できる。

- ・ ケース 1 内径 250mm/肉厚 6mm/内法 160mm×160mm/B-SUS6mm $k_{eff}=0.669$
- ・ ケース 2 内径 320mm/肉厚 6mm/内法 210mm×210mm/B-SUS6mm $k_{eff}=0.854$

このうち、ケース 2 は、TMI-2 燃料デブリ収納缶とほぼ同じ寸法（TMI-2 は内径 340mm、肉厚 6mm）で、BWR 燃料は PWR 燃料よりも外寸が小さいことを考えると、燃料デブリの装荷性の点から見て成立性はあると思われる。

(2) 今回設定した仕様では、ボルト貯蔵体系における未臨界性を維持できない条件が存在する。

これは、収納缶を 12 基収容するキャニスタをボルト無限配列に置いた場合、収納缶外周部の B-SUS 板と円管で囲まれた空隙に水が無いと仮定すると、上記ケース 1、2 ともに k_{eff} が 0.95 を超える解析結果となったことを指す。実機でこのような設計を採用する場合は、外周空隙部がボイドにならないよう何らかの方法で担保する必要がある。ちなみに、TMI-2 の燃料デブリ収納缶のうちの一つ（燃料キャニスタ）では、この外周部の空隙に低密度コ

ンクリートを充填しているが、恐らくこれと同様のことを考慮したためではいかと推察される。

(3) 貯蔵時の未臨界性維持の観点からの収納缶水量制限値

(2)で述べたように収納缶の外周空隙がボイド（水無）で、かつキャニスタ内空間（収納缶外部空間）もボイドと仮定すると、貯蔵体系の k_{eff} が 0.95 を大きく超える結果となった。このため、この条件の下で k_{eff} が 0.95 以下となる収納缶内水量をサーベイし、以下の評価値を得た。

- ・ 下部堆水モデル : 13.7kg 以下
- ・ 水一様分布モデル : 80.2kg 以下

前者は、収納缶内の下部に水が溜まるモデルで、後者は水が収納缶内の自由空間に一様分布するモデルで計算した。このように、水が下部に溜まるモデルのほうが反応度が高くなる。これは、今回の水一様分布モデルでは UO_2 球の充填率/球径を変えないで水量（水密度）のみを減少させたために、水量減によって減速能が低下することと中性子漏れが増加することの相乗効果で反応度が減少したためである。（下部堆水モデルでは、減速能は変わらず中性子漏れが増えるのみ。）

6.1.3.2 課題

(1) k_{eff} の影響する諸因子の効果確認

今回の解析で考慮していないが、燃料デブリ貯蔵体系の k_{eff} に影響する因子としては、次に挙げるものが考えられる。

a. MCCI 生成物や構造材（ステンレス鋼）あるいは酸化ジルコニウムの効果

MCCI 生成物は中性子吸収の少ない珪素を主成分としているおり、また、コンクリート片を同梱していることも考えられるため、条件によっては正の反応度効果を与えることが指摘されている[6-1-22]。また、ステンレス鋼や酸化ジルコニウムは、燃料デブリとの相対配置によっては中性子反射体の役割を果たすことも考えられる。 UO_2 と水にこれらの材料が加わった体系で最大反応度を与える条件をサーベイして、 UO_2 +水体系が保守側であるか、あるいはより反応度が高くなる条件があるのかを定量的に把握することが必要と考えられる。

b. 燃料デブリ粒径の不均一性

今回の解析では、燃料デブリはすべて球径の等しい UO_2 球から成ると仮定したが、現実には燃料デブリの形状と大きさは広範に及ぶと考えられる。燃料デブリ形状のばらつきによる k_{eff} への影響を調べるには、幾つかの方法が考えられるが、例えば収納缶中の UO_2 と水の比率（充填率）を一定にした条件で、 UO_2 球径分布をランダムに変化させて k_{eff} の感度を調べることが挙げられる。この解析を幾つかの異なる充填率に対して行うことで、燃料デブリ形状、寸法のばらつきによる体系の k_{eff} への影響が明らかになることが期待できる。

c. 格子均質化の影響

今回の解析では、収納缶内の燃料デブリが存在する領域について無限格子計算を行って求めた中性子スペクトルで格子均質化断面積（均質化定数）を作成し、これを用いて収納缶単体あるいは貯蔵体系の k_{eff} を計算した。この場合、無限格子計算で求まる中性子スペクトルと体系計算の中性子スペクトルが等しくないため、両体系の反応率は保存されないことになる。（所謂、格子計算と体系計算のスペクトルの mismatch が生じる。）これによる影響を評価するには、均質化定数を用いず、直接非均質体系計算を行って k_{eff} を求めるか、あるいは体系計算で得られた中性子漏えい量を格子計算にフィードバックして、均質化定数を再計算しそれを用いて体系計算を行って中性子漏えい量を再評価する。この過程を収束するまで繰り返すことが挙げられる。

(2) 収納缶水量制限値評価

a. 収納缶内水分分布の効果

前述のとおり、今回解析した二つの水分分布モデルのうち、水一様分布モデルは収納缶内の UO_2 の充填率を変えないで水量のみを減少させたため、最大反応度の条件から外れていることが考えられる。このことを図 6.1-15 を用いて説明する。図 6.1-15 は、横軸が収納缶内の UO_2 量 (V_f) で縦軸が水量 (V_m) をあらわす。点 A を通る傾き-1 の太い線は、ちょうど収納缶内が水（100%密度）と UO_2 で埋め尽くされた状態をあらわし、点 A は図 6.1-10 あるいは図 6.1-11 に示したボルト貯蔵体系で k_{eff} が最大となる条件を示す。すなわち、この点は、収納缶内が最大反応度になる燃料デブリ条件（充填率 0.22/ UO_2 球径 0.4cm）で、収納缶外周の空隙とキャニスタ内空間（収納缶外）のいずれもボイドである条件に対応する。太線と横軸

及び縦軸で囲まれた三角形が、収納缶内でとる得るすべての UO_2 量と水量の範囲を示す。太線より下側は、収納缶内にボイドが存在するか、又は水密度が 100%より小さい部分が存在する領域である。真空乾燥前（仮保管プールから収納缶を引き上げた直後）は、太線のどこかの点 B にあるが、真空乾燥終了後は、点 B から降ろした垂線上のどこか 1 点、点 C にたどり着く。点 A と原点を結ぶ破線は、収納内の UO_2 量と水量の比率が点 A と等しい条件で、点 A が最大反応度を与えることから、この破線上はほぼ最適減速条件と見なせる。これより、破線より上部(左)は高減速域で、下部(右)は低減速域となる。点 A を囲む 2 本の破線の曲線は、この体系の k_{eff} が一定となる線（等 k_{eff} 線）の例を模式的にあらわしている。収納缶内の水量制限値を求める問題は、 k_{eff} が 0.95 の等高線を見出して、その線と横軸との最小距離を求めることに他ならない。

問題は、 V_f - V_m 平面上の各点 (V_f , V_m) において最も k_{eff} が大きくなる条件をどのように見出すかということである。今回の解析では前述のとおり、下部堆水モデル、水一様分布モデルの二つを取り上げたが、次に図 6.1-16 でこの二つのモデルの違いを考察する。図 6.1-16 の左図は、下部堆水モデルによって計算した貯蔵体系の k_{eff} が 0.95 となる推定線で、右図は水一様分布モデルによる k_{eff} が 0.95 となる推定線を模式的に示している。点 B、点 C は今回の解析で求めた水量（下部堆水モデルで 13.8kg、水一様分布モデルで 80.2kg）に対応している。下部堆水モデルの場合は、B 点から水量を変えずに UO_2 量を増やしても k_{eff} はほとんど変化しないのは理解できる。増やした UO_2 を水領域に入れると減速不足となり反応度が下がる。 UO_2 量を減らしてゆくと、水位より上の UO_2 を減らせば k_{eff} に変化は小さいが、水面下にある UO_2 を減らさざるを得ないところまでゆくと過減速となり反応度が急速に低下してゆく。このことから、点 B を通る $k_{eff}=0.95$ の等高線は左図のような傾向になることが予想される。一方、水一様分布モデルの場合は、点 C から水量を変えずに UO_2 量を増やすとさらに低減速になるため反応度が下がり、逆に水量を増やすと最適減速に近づき反応度は増加する。このため、点 C 付近の $k_{eff}=0.95$ の等高線は右図のような傾向になることが予想される。

以上の考察から、下部堆水モデルでは今回の解析でほぼ最小水量を捉えていると考えてよいが、水一様分布モデルでは今回サーチした条件よりも低 UO_2 量側に、より少ない水量制限値が存在することが考えられる。今回の解析では水一様分布モデルによる水量制限値が、80.2kg と下部堆水モデルによる制限値 13.8kg よりも数倍大きいことから、水一様分布モデルの最小水量が逆転することは考えにくいだが、定量的な確認を行うことが望まれる。

b. 横置きと縦置きの差異

乾式貯蔵システムには、横型サイロ方式のように収納缶を横置き状態で貯蔵する場合があります。また、キャニスタは横置き姿勢で搬送される場合も考えられるので、収納缶姿勢による影響も評価しなければならない。収納缶の姿勢による違いが生じるのは下部堆水のように水が一部に集まる場合で、当然のことながら水一様分布では差異は生じない。

横置き状態になると、水は収納缶の側面に溜まる。この時、収納缶単体であれば、形状から明らかに横置きのほうが中性子漏えいが大きくなるので縦置きのほうが安全側と言えるが、今回のようにキャニスタ内に収納缶 12 基が隣接して並ぶ体系では、どちらのほうが k_{eff} が大きくなるか解析による評価が必要と考えられる。

c. キャニスタ内水量のばらつきの影響

今回のボルト貯蔵体系の臨界解析では、キャニスタ内の 12 基の収納缶の特性はすべて同じとして解析を行ったが、収納缶ごとに特性の変動がある場合の影響についても評価が必要と思われる。たとえば、中央部の収納缶の水量が外周部よりも少ない場合は、中央の収納缶内の中性子増倍 (k_{∞}) は減るもののスペクトルが硬くなるため、B-SUS 板で捕獲されずに外周部の収納缶に流入する中性子が増えてトータルで見れば 12 基すべて同じ場合よりも k_{eff} が増加することも考えられる。

d. MCCI 生成物や構造材等の影響

(1)a と同様に収納缶内の水量制限値を評価するうえで、MCCI 生成物やステンレス鋼等の混載の影響を見ておく必要がある。これには、たとえば下部堆水モデルで上部が UO_2 ではなくステンレス鋼のような反射体効果を持つ物質が覆うと仮定する場合等が挙げられる。

表 6.1-9 燃料デブリの乾式貯蔵に係る臨界解析結果のまとめと課題

解析ケース	解析結果のまとめ	今後の課題
<p>収納缶単体解析 (水中孤立系)</p>	<p>収納缶仕様の2ケースともに、未臨界性維持できる。</p> <p><u>ケース1</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・仕様：内径 250mm、内法 160mm□、 B-SUS (6mm 厚) ・ k_{eff} : 0.669 <p><u>ケース2</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・仕様：内径 320mm、内法 210mm□、 B-SUS (6mm 厚) ・ k_{eff} : 0.854 	<p>k_{eff} に影響する因子の効果確認 (主なものとして以下が挙げられる)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリ粒径の不均一性 ・MCCI 生成物や構造材等 (SUS、ZrO₂) の混合効果(反射体としてトータルで正の反応度効果をもたらす可能性) ・格子均質化(無限格子スペクトルと体系スペクトルのミスマッチ)
<p>ボルト貯蔵体系 (気中無限配列)</p>	<p>ケース1、2ともに収納缶外周空隙をボイドとすると未臨界性維持できない可能性 (収納缶内は満水。単体解析の最大 k_{eff} 条件)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・同上
<p>貯蔵体系での収納缶水量制限値</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・下部堆水モデルによる評価 13.7kg ・水一様分布モデルによる評価 80.2kg 	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスタ内の収納缶内水量の不均一効果 ・横置きと縦置きの差異 ・MCCI 反応物や構造材等の混入効果(反射体効果) ・水一様分布モデルの最適点サーベイ

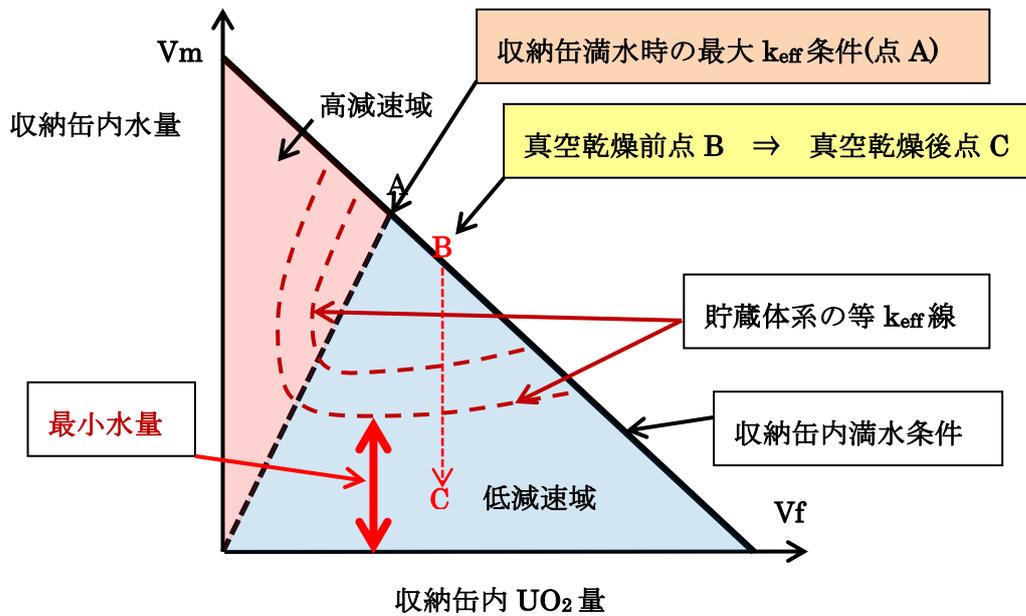


図 6.1-15 収納缶内の UO_2 量/水量と貯蔵体系の k_{eff} との関係の模式図

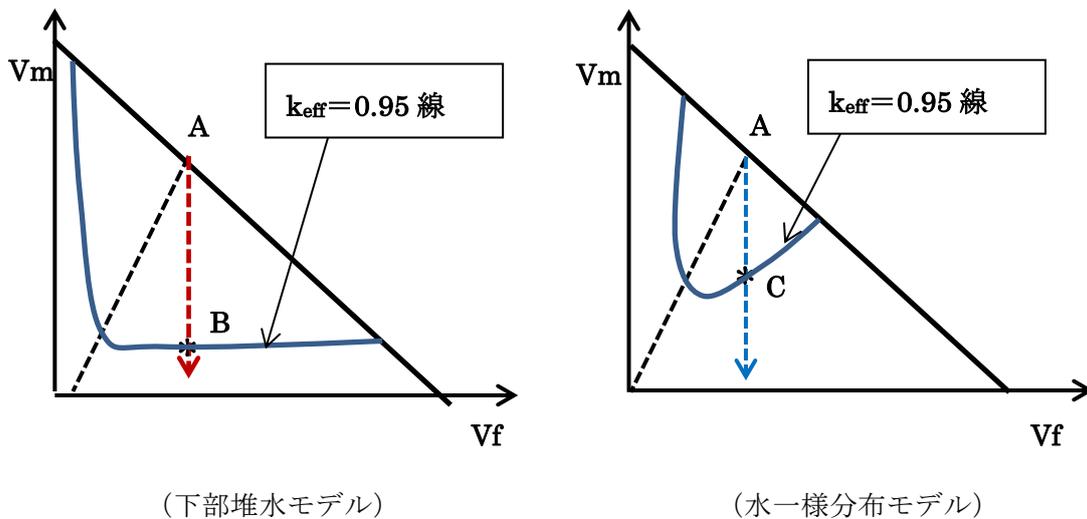


図 6.1-16 収納缶内の UO_2 量/水量と貯蔵体系の k_{eff} との関係の模式図 (水分布モデルによる違い)

6.1.4 臨界安全を確保するための要件の検討

表 6.1-3 に挙げた燃料デブリ乾式貯蔵時の臨界安全に及ぼす影響因子をもとに、安全確保上必要と思われる要件を抽出し整理した。表 6.1-10 に結果を示す。表には、将来規制審査を行ううえで検討整備が必要と思われる事項を並べている。

表 6.1-10 燃料デブリ乾式貯蔵における臨界安全確保に必要なと思われる要件の整理

影響因子	説明	安全確保上必要と思われる要件	燃料デブリ貯蔵特有のもの	要件を満足することの確認方法	要検討事項 (審査までに必要と思われる)
①収納缶の大きさ	燃料デブリ収納缶が大きいほど、中性子漏れが少なくなり反応度が増加する。	未臨界を維持できる ($k_{eff} \leq 0.95$) 収納缶寸法		信頼できる方法によって体系の実効増倍率 (k_{eff}) を評価する。	●収納缶単体での臨界安全解析手法整備
②中性子吸収材	燃焼度クレジットを採らないと、燃料デブリ反応度が大きいので、中性子吸収材を導入することが必要と考えられる。	1) 未臨界を維持できる ($k_{eff} \leq 0.95$) 中性子吸収材仕様 2) 中性子吸収材の劣化や製造ばらつきの考慮		同上	●同上 (中性子吸収材含む) ●吸収材劣化や製造ばらつきの影響把握=基準化
③燃料デブリ形状、配置	燃料デブリの形状や配置が k_{eff} に大きく影響する。	臨界解析における適切な燃料デブリのモデル化	○	・信頼できる方法によってモデル化の妥当性を確認する。 ・臨界ベンチマーク実験による検証	●燃料デブリのモデル化方法整備 (実効増倍率 (k_{eff}) が最大となる形状、配置評価) ・ UO_2 粒子の大きさ、配列、ピッチ ・同上の不均一性 ●臨界実験によるベンチマーク
④構造材	被覆管(ジルカロイ)、構造材(SUS)、制御材は、吸収材として反応度効果を持つが減速効果もある程度存在する。	燃料デブリは形状配置が様々なので、構造材等の正の反応度効果有無と程度を確認する。	○	構造材を考慮する場合は、実燃料デブリの調査に基づいて妥当性を判断する。	●反応度効果の定量的把握 形状配置による反射体効果による正の反応度の可能性有無
⑤MCCI(燃料デブリ/コンクリート反応生成物)	水より反応度効果が大きいとの情報有 [6-1-15]	MCCI の反応度効果を適切に評価する。必要があれば含有量を制限する。	○	・信頼できる方法によって MCCI の実効増倍率 (k_{eff}) への影響を評価する。 ・実燃料デブリの調査	●MCCI の反応度効果評価手法整備 ●臨界実験によるベンチマーク ●実燃料デブリ調査
⑥収納缶内水量	燃料デブリ中の水分は真空乾燥で完全に除去できず相当量が残るため、反応度効果が無視できない。	臨界上の適切な水量制限値を設ける。	○	・信頼できる方法によって体系の実効増倍率 (k_{eff}) を評価する。 ・臨界ベンチマーク実験による検証 ・真空乾燥試験による検証	●収納缶内水量制限値評価手法整備 (水量分布のモデル化 (k_{eff} 最大条件)) ●臨界実験によるベンチマーク ●真空乾燥試験による乾燥要領/判定基準確立
⑦燃焼度効果	U、Pu の減損/生成及び FP 生成の反応度効果 (正と負がある) 事故時のような過酷な条件では、燃焼度クレジットを適切に導入する必要があるかもしれない。	燃焼度クレジットを導入する場合は、 ・燃焼度 ・考慮核種 を適切に設定する。		・信頼できる方法によって体系の実効増倍率 (k_{eff}) を評価する。 ・臨界ベンチマーク実験による検証	●燃焼度効果を考慮した場合の反応度効果を定量的に把握する。 (燃焼度、対象核種の影響)
⑧解析コード/核データライブラリ	複数のオプションが考えられる。	燃料デブリ臨界評価にはそれに対し十分信頼できる解析コード/核データライブラリを使用する。		・使用コード/ライブラリによる差異の確認 ・臨界ベンチマーク実験による検証	●使用される可能性があるコード/核データによる差の定量的把握 ●臨界実験によるベンチマーク
⑨解析モデル	燃料デブリ領域を均質化する場合は、体系とのスペクトルミスマッチがあり得る。	格子均質化手法の妥当性確認 (収納缶はスケールが小さいので体系との差異が大きい可能性がある。)	○	・詳細非均質解析あるいは臨界実験との比較検証	●臨界実験によるベンチマークあるいは、詳細非均質解析
⑩事故条件	臨界安全上考慮すべき事故事象があれば、対応が必要と考えられる。	臨界安全上重要な事故を抽出し影響を評価する。		・信頼できる方法によって事故時の臨界安全性を確認する。	●臨界が関係する最大想定事故候補の選定と評価

6.1.5 参考文献リスト

- [6-1-1] “GPU NUCLEAR THREE MILE ISLAND NUCLEAR STATION UNIT DEFUELING COMPLETION REPORT” , GPU Nuclear, 1990
- [6-1-2] “Safety Analysis Report for the NuPac 125-B Shipping Cask”, NRC Certificate of Compliance No. 71-9200 2. “Safety Analysis
- [6-1-3] “TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis” , DOE, DOE/SNF/REP-084, 2003
- [6-1-4] Xudong Liul and Joonhong Ahn(1) Fumio Hirano(2), “A Criticality Safety Study for the Disposal of Damaged Fuel Debris” , (1)University of California, Berkeley (2)JAEA, IHLRWM 2015, Charleston, SC, April 12-16, 2015
- [6-1-5] Kazuhiko Izawa, Yuriko Uchida, Kiyoshi Ohkubo, Masayoshi Totsuka, Hiroki Sono, Kotaro Tonoike, “Infinite multiplication factor of low-enriched UO₂-concrete system” , JAEA, Journal of Nuclear Science and Technology, 2012
- [6-1-6] “HI-STAR HB Safety Evaluation Report” , NRC
- [6-1-7] KR Elam, J.C. Wagner, C.V. Parks, “Effects of Fuel Failure on Criticality Safety and Radiation Dose for Spent Fuel Casks” , ORNL, NUREG/CR-6835 ORNL/TM-2002/255, 2003
- [6-1-8] J.M. Scaglione, G. Radulescu, W.J. Marshall, K.R. Robb, “A Quantitative Impact Assessment of Hypothetical Spent Fuel Reconfiguration in Spent Fuel Storage Casks and Transportation Packages” , ORNL, NUREG/CR-7203 ORNL/TM-2013/92, 2015
- [6-1-9] W.J. Marshall, J.C. Wagner, “Consequences of Fuel Failure on Criticality Safety of Used Nuclear Fuel” , ORNL, ORNL/TM-2012/325 FCRD-UFD-2012-000262, 2012
- [6-1-10] A. Machiels, “Fuel Relocation Effects for Transportation Packages” , EPRI, EPRI-1015050, 2007
- [6-1-11] D.B. PELOWITZ, “MCNP6TM User’ s Manual” , LANL, LA-CP-11-01708, 2011
- [6-1-12] “SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design” , ORNL, ORNL/TM-2005/39 Version 6.1, 2011
- [6-1-13] 長家康展, 奥村啓介, 森貴正, 中川正幸, “MVP/GMVP 第2版:連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”、日本原子力研究所、2004
- [6-1-14] “臨界安全ハンドブック、科学技術庁原子力安全局核燃料規制課編”、科学技術庁原子力安全局核燃料規制課、1988
- [6-1-15] J. J. ドウデルスタット, L. J. ハミルトン, 成田正邦, 藤田文行 共訳, “原子炉の理論と解析 (下巻)”、1976
- [6-1-16] 鷺谷忠博, 荻野英樹, 高野公秀, 矢野公彦, 鍛治直也, “燃料デブリの特性に関する研究概要 Research Summary on the Characterization of Fuel Debris”、技術研究組合国際廃炉研究開発機構 (IRID) /JAEA、2015

- [6-1-17] “燃料デブリ臨界管理技術の開発（平成 24 年度成果報告）”、JAEA、2013
- [6-1-18] “平成 25 年度実績概要 燃料デブリの臨界管理技術の開発”、IRID、2014
- [6-1-19] “平成 15 年度 核燃料施設安全解析コード改良整備に関する報告書 総括”、原子力発電技術機構 原子力安全解析所、INS/M03-52、2003
- [6-1-20] 奥野浩，高田友幸，吉山弘，三好慶典、“評価済溶解槽模擬臨界実験体系に基づく臨界計算コードのベンチマーク解析”、JAEA、JAEA-Data/Code 2005 001、2005
- [6-1-21] “福島第一原子力発電所燃料デブリ臨界管理に資する基礎臨界データ整備に向けて”、JAEA、2015
- [6-1-22] “燃料デブリ臨界特性評価データベースの整備～コンクリート含有燃料デブリ～”、JAEA 燃料サイクル安全研究ディビジョン臨界安全研究グループ、2016

6.2 水素ガス生成評価

燃料デブリ収納缶内の水素ガス生成に関連して、水の放射線分解によって発生する水素ガス生成量を評価した文献を調査した。調査した文献に基づき、水素ガス生成量の評価方法を検討し、収納缶内の水素ガス生成量及びこれに伴う内圧上昇幅を評価した。

6.2.1 文献情報

6.2.1.1 TMI 関連研究

TMI-2 において、炉心から取り出した燃料デブリの収納缶内での水素ガス生成量を評価している [6-2-1]。生成した水素ガスは、水に戻る逆反応によって生成が抑えられるが、ここでは、この反応は考慮せず、最大の水素ガス生成量を評価している。

燃料デブリの場合は、 γ 線だけでなく α 線と β 線の照射を受ける。また、燃料デブリには、多くの水を含んでおり、これらの水分は、燃料デブリに直接接しており、健全燃料に比べて水素ガス生成速度が高くなる。

密閉された収納缶内の水素ガス生成速度は、水の吸収エネルギーと G 値を用いて評価することができる。この水素ガス生成速度は、おそらく最大値である。実際には、生成した水素ガスが水に戻る逆反応が存在するため、これよりも低くなると考えられる。

$$54.2 \text{ W} \times 1.9 \times 0.2 \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ W-s}} \times \frac{0.44 \text{ molecules}}{100 \text{ eV}} \times \frac{22.4 \text{ L}}{6 \times 10^{23} \text{ molecules}} \times \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} = .076 \text{ L/h}$$

ここで、TMI-2 における評価例を以下に示す。

- 54.2W：燃料デブリ 800kg を収納した缶の単位重量当たりの放射線エネルギー
(8.6kW×800kg/127000kg) (=W)
- 1.9：燃料デブリの平均エネルギーと最大エネルギーの比(=P)
- 0.2：水に対する β 線と γ 線の吸収割合(=F)
- 0.44：水素ガス生成の G 値 (100eV あたりの水素分子の個数) (=G)

上記の W と P は、燃料デブリに含まれる核種や放射エネルギーによって異なる。F は、燃料デブリの幾何学的形状、水の存在状態に影響する。G は、純水の場合の値であり、不純物濃度 (例えば塩化物)

が高濃度で存在した場合には、大きくなると考えられる。

上記の水素ガス生成速度から、酸素の発生速度は、0.038L/hr であり、全ガス生成速度は、0.11L/hr と評価されている。

本評価結果に基づき、88 日後のガス濃度と圧力を図 6.2-1 に示す。図 6.2-1 から、可燃限界（水素ガス濃度 4%以下、又は酸素濃度 5%以下）を保つには、収納缶内の燃料デブリの容積比を 15%以下にする必要があるとの報告がされている。

Cs と Sr を吸着したイオン交換樹脂を浸漬させた容器内のガス（水素+酸素）発生量を測定した例を表 6.2-1 及び図 6.2-2 に示す。表 6.2-1 の $F \cdot G(T)$ は、ガス発生量の測定値から上述の評価式を用いて算出した値である。図 6.2-2 から、ガス発生速度 ($F \cdot G(T)$) は必ずしも水の量に比例していない。また、 $F=1$ とすると $F \cdot G(T)=0.66$ であり、測定値はこれよりも低い値である。ガス発生速度が水量に比例していないことから、水の分解の逆反応の影響があると推測される。

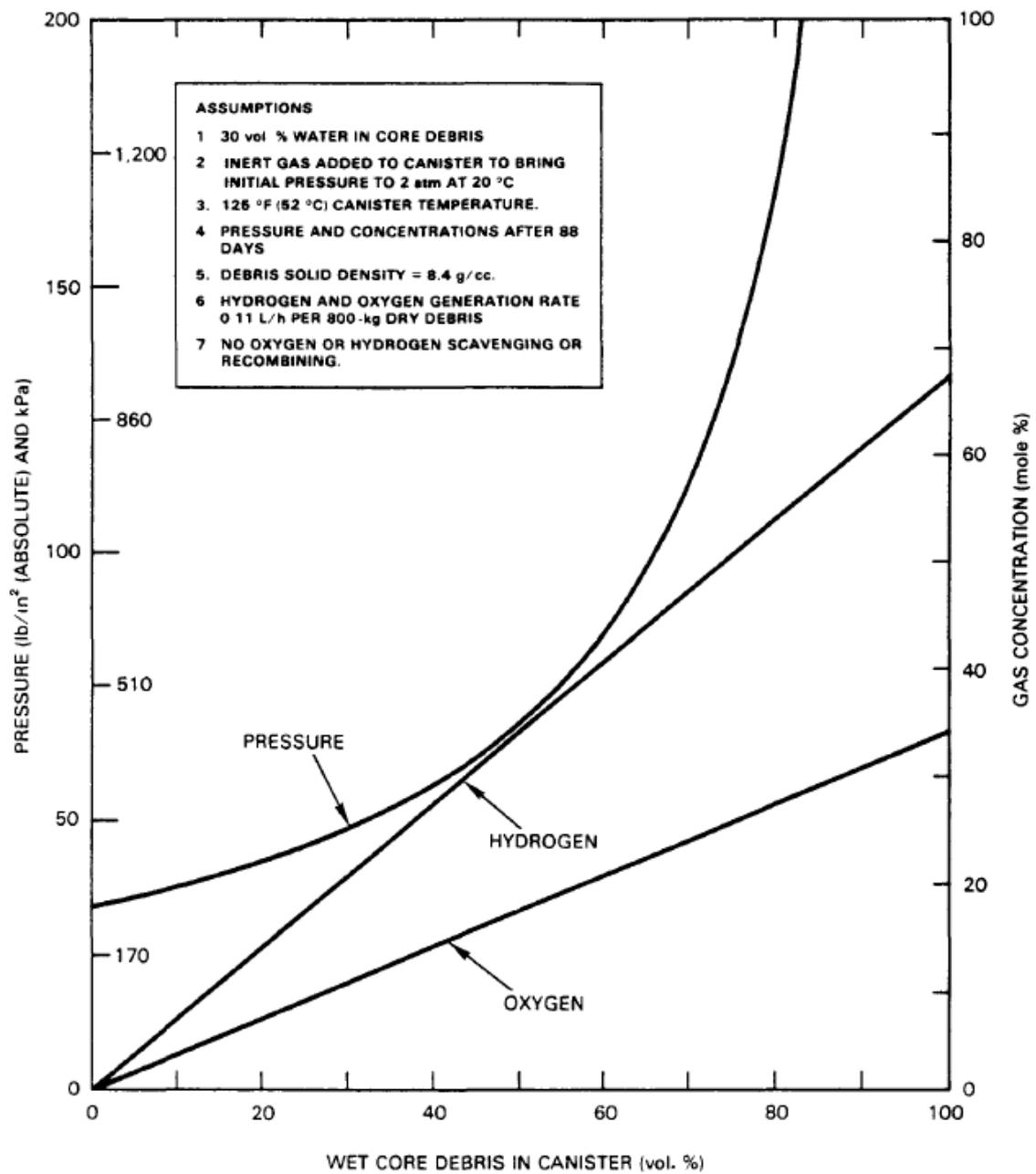


Figure 1. Pressure and Gas Concentration Versus Volume Percent of Wet Core Debris in Canister after 88 Days.

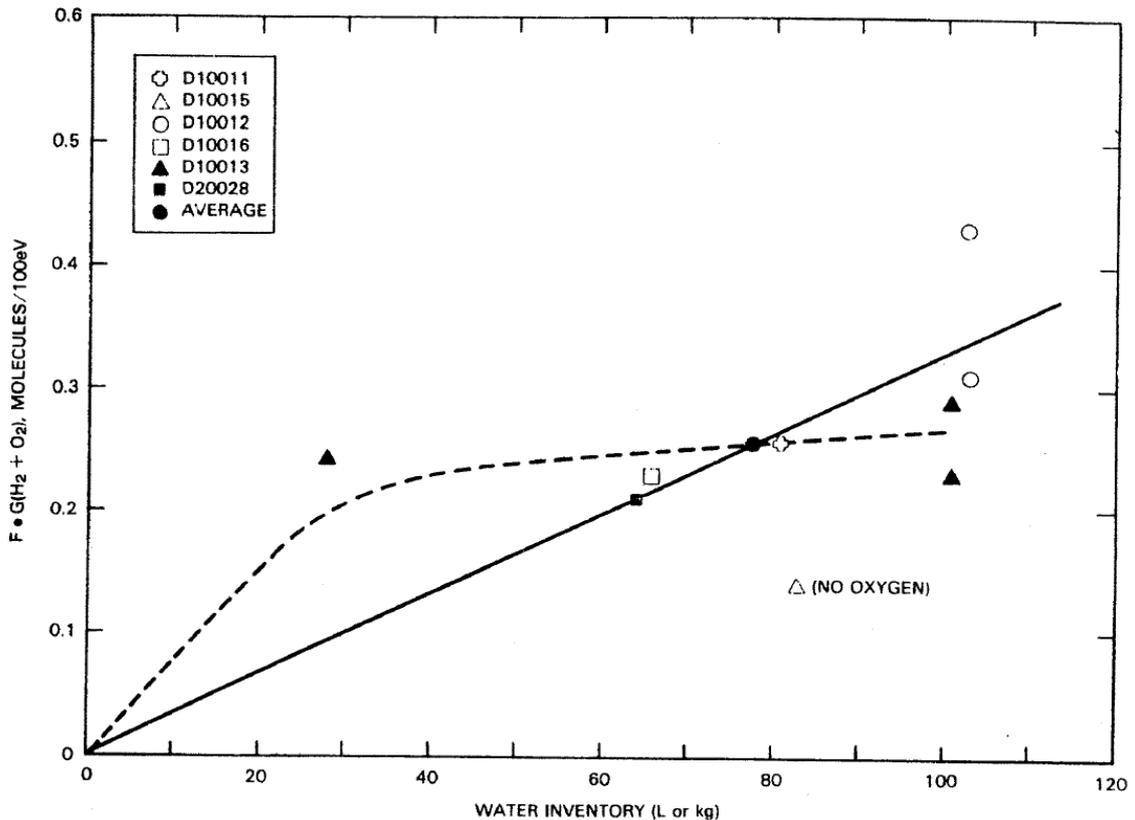
図 6.2-1 88 日後の収納缶内の圧力とガス濃度 [6-2-1]

表 6.2-1 放射線分解ガスの測定結果[6-2-2]

Table 4-1. Radiolytic Gas Generation in Loaded Three Mile Island Unit 2 Submerged Demineralized System Vessels.

Vessel number	Date Test ended	Loading (kCi)(Å)	Decay heat (W)	Water inventory (L)	Gas (void) (L)	Pressure rise rate (lb/in ² /h)	Gas generation rate		F·G(T) mol./100 eV
							(cm ³ /h)	(cm ³ /h-kCi)	
D10011	January 12, 1982	88.2	223	81	129	0.059	481	5.5	.26
D10012	December 22, 1981	112.6	283	103	107	0.15	1,013	9.0	.43
D10012	December 26, 1981	112.6	283	103	107	0.11	744	6.6	.31
D10013	December 1981 (approx.)	97.2	246	101	109	0.069	475	4.9	.23
D10013	January 26, 1983	97.2	246	101	109	0.0861	593	6.1	.29
D10013	February 6, 1983	97.2	246	28	182	0.043	488	5.0	.24
D10015	December 1981 (approx.)	12.9	34	83	127	0.005	40	3.1	.14(b)
D10016	December 1981 (approx.)	112.6	283	66	144	0.061	555	4.9	.23
D20028	January 1982 (approx.)	86.3	216	64	146	0.042	378	4.4	.21
Average		85.0	214	77	133	0.061	475	5.6	.26

(a) Calculated at time of shipment and includes daughter products.
 (b) No oxygen (chemically consumed).



PS8510-161

Figure 4-1. Total Gas Generation Rate Versus Water Inventory in SDS Vessels (beta-gamma radiation).

図 6.2-2 ガス発生速度と水量の関係[6-2-2]

6.2.1.2 BWR（放射線分解反応モデル）

炉心内材料健全性のために、水素注入した際の放射線分解生成物の評価がされている[6-2-3]。

本評価では、水の放射線分解反応及びボイドの移行について考慮している。

水中の放射線分解生成物の濃度は、次式で表せる。

$$\frac{dC_i^l}{dt} = 1.038 \times 10^{-4} (g_i^n Q_n + g_i^r Q_r) + \sum_s \sum_m k_{s,m} C_s^l C_m^l - C_i^l \sum_j k_{i,j} C_j^l \equiv T_i^l \quad (13)$$

where C_i^l : Concentration of i -th species in liquid phase (mol/l)

$g_i^{n,r}$: g -value; number of molecules, ions and radicals created in liquid phase when total energy of 100 eV is absorbed in water by neutrons and γ -ray irradiation, respectively (numbers/100 eV)

$Q_{n,r}$: Energy absorbed in unit volume by neutrons and γ -rays irradiation, respectively

$k_{i,j}$: Rate constant of reaction between i -th and j -th species (l/mol·s)

T_i^l : Homogeneous term for i -th species (mol/l·s).

水が沸騰してボイドが存在する場合には、次式に示す気液間のガス移行を考慮している。

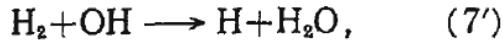
$$\frac{dC_i^l}{dt} = T_i^l + \frac{V_f}{1-V_f} (\mu_i C_i^g - \mu_i^* C_i^v).$$

where k_i, k_i^* : Mass transfer coefficients of i -th species (s⁻¹)

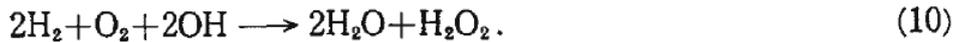
V_f : Void fraction,

評価に使用した G 値と反応速度定数をそれぞれ表 6.2-2 と表 6.2-3 に示す。G 値と反応速度定数には温度依存性があるため、評価温度での値を使用している。

冷却材中に水素注入した際の酸素濃度の計算値と測定値の比較を図 6.2-3 に示す。図 6.2-3 から、水素を注入することによって、酸素濃度が低下することが分かる。これは、下記の反応によって、溶存酸素が除去されることによる。



上式を整理すると、



となる。

図 6.2-3 から、水素ガス濃度が低いところでは、計算値と測定値はよく一致しているが、水素濃度が高くなると、測定値とのずれが見られる。モデルには、G 値と反応速度定数以外に、気液間のガスの移行係数などの不確かなパラメータが含まれており、モデルの改良が望まれる。

表 6.2-2 高温での G 値[6-2-3]

Table A1 G-values of primary radiolytic species at elevated temperature (300~410°C)⁽¹⁹⁾

Species	e_{aq}^-	H ⁺	H	H ₂	OH	O	H ₂ O
G-value (nos. per 100 eV)	0.4	0.4	0.3	2.0	0.7	2.0	-2.7

表 6.2-3 放射線分解反応と反応速度定数[6-2-3]

Table A2 Radiolytic reactions and their rate constants

No.	Reaction			Rate constant at 25°C (l/mol·s)	Activation energy (kcal/mol)	Ref.
1	e_{aq}^-	+H ₂ O	→ H + OH ⁻	1.6×10^3	3	(20)
2	e_{aq}^-	+H ⁺	→ H	2.4×10^{10}	3	(20)
3	e_{aq}^-	+OH	→ OH ⁻	2.4×10^{10}	3	(20)
4	e_{aq}^-	+H ₂ O ₂	→ OH + OH ⁻	1.3×10^{10}	3	(20)
5	H	+H	→ H ₂	1.0×10^{10}	3	(20)
6	e_{aq}^-	+HO ₂	→ HO ₂	2.0×10^{10}	3	(20)
7	e_{aq}^-	+O ₂	→ O ₂	1.9×10^{10}	3	(20)
8	$2e_{aq}^-$	+2H ₂ O	→ H ₂ + 2OH ⁻	1.64×10^6	3	(21)
9	2OH	+	→ H ₂ O ₂	5.0×10^3	3	(20)
10	HO ₂	+OH	→ O ₂ + H ₂ O	1.2×10^{10}	3	(20)
11	O ₂ ⁻	+OH	→ O ₂ + OH ⁻	1.2×10^{10}	3	(20)
12	H	+OH ⁻	→ e_{aq}^- + H ₂ O	2.0×10^7	3	(20)
13	H	+ e_{aq}^- +H ₂ O	→ H ₂ + OH ⁻	4.5×10^8	3	(20)
14	HO ₂ ⁻	+ e_{aq}^- +H ₂ O	→ OH + 2OH ⁻	6.3×10^7	3	(20)
15	H ⁺	+OH ⁻	→ H ₂ O	1.4378×10^{11}	3	(20)
16	H	+OH	→ H ₂ O	2.0×10^{10}	3	(20)
17	H ₂	+OH	→ H + H ₂ O	3.4×10^7	4.6	(22)
18	H ₂ O ₂	+OH	→ HO ₂ + H ₂ O	2.7×10^7	3.4	(21)
19	H	+H ₂ O ₂	→ OH + H ₂ O	9.0×10^7	4.5	(20)
20	H	+O ₂	→ HO ₂	1.9×10^{10}	3	(20)
21	HO ₂	+	→ H ⁺ + O ₂ ⁻	8.0×10^5	3	(20)
22	O ₂ ⁻	+HO ₂	→ HO ₂ ⁻ + O ₂	1.5×10^7	4.5	(20)
23	HO ₂	+HO ₂	→ O ₂ + H ₂ O ₂	2.7×10^6	4.5	(20)
24	2O ₂ ⁻	+2H ₂ O	→ O ₂ + H ₂ O ₂ + 2OH ⁻	5.6×10^3	4.5	(20)
25	H	+HO ₂	→ H ₂ O ₂	2.0×10^{10}	3	(20)
26	H	+O ₂ ⁻	→ HO ₂ ⁻	2.0×10^{10}	3	(20)
27	O ₂ ⁻	+ e_{aq}^- +H ₂ O ₂	→ HO ₂ ⁻ + OH ⁻	1.8×10^8	4.5	(20)
28	H ₂ O ₂	+OH ⁻	→ HO ₂ ⁻ + H ₂ O	5.0×10^8	4.5	(21)
29	H ₂ O	+	→ H ⁺ + OH ⁻	†	†	(23)
30	O ₂ ⁻	+H ⁺	→ HO ₂	5.0×10^{10}	3	(20)
31	HO ₂ ⁻	+H ₂ O	→ H ₂ O ₂ + OH ⁻	1.022×10^4	3	(20)
32	H ₂ O ₂	+	→ 2OH	7.7×10^{-4}	7.28	(24)
33	O	+O	→ O ₂	2.2×10^{10}	3	(19)
34	HO ₂	+O	→ O ₂ + OH	2.0×10^{10}	3	(19)
35	OH	+O	→ H + O ₂	1.0	16.8	(19)
36	H ₂ O	+O	→ 2OH	1.9×10^3	9.8	(19)
37	OH	+O	→ HO ₂	2.0×10^{10}	3	(19)
38	H ₂	+O	→ H + OH	4.8×10^8	8.3	(19)
39	H ₂ O ₂	+O	→ HO ₂ + OH	1.3×10^6	4.2	(19)
40	H	+O	→ OH	2.0×10^{10}	3	(19)

† Calculated from the reverse reaction rate constant k_{15} by equation $k_{29} = K_w \times k_{15}$.

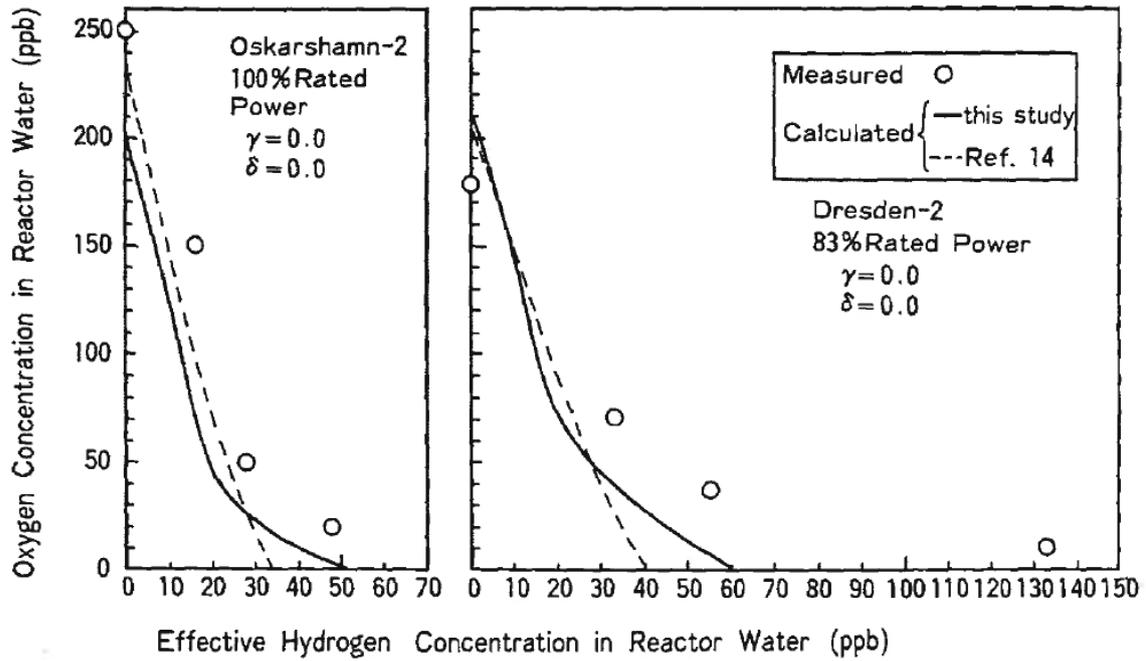


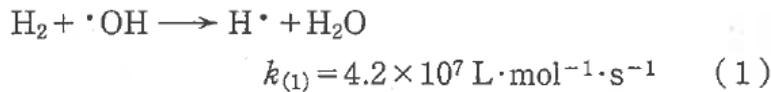
Fig. 10 Calculated and measured oxygen concentrations at Oskarshamn-2 and Dresden-2 as function of effective hydrogen concentration in reactor water

図 6.2-3 水素注入時の酸素濃度の計算値と測定値の比較[6-2-3]

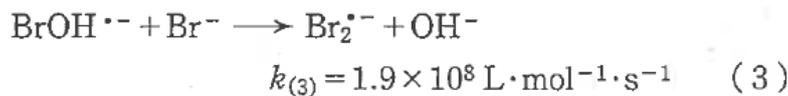
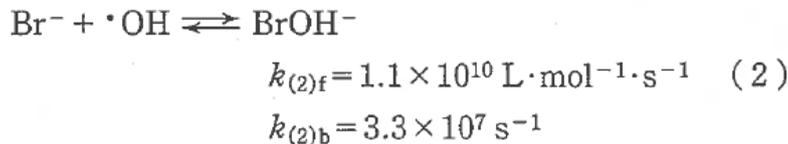
6.2.1.3 ゼオライト系吸着剤[6-2-4] (不純物の影響)

1F 汚染水を処理したゼオライト系吸着剤と海水の混合物からの γ 線照射による水素ガス生成量を実験的に求めている。実験の結果、海水成分(塩素イオン、臭素イオンなどのハロゲン)が、水素ガス生成に影響することが報告されている。

水素ガスの生成に影響が大きいのは、下記の反応である。



臭素イオンを含む溶液では、下記の反応により、上記(1)の反応が抑制される。



脱気した 1mmol/L^{※3}臭化カリウム水溶液で水素ガス生成量を測定した結果、G(H₂)=0.44 と報告されている。この値は、水素ガスの初期 G 値に近い値であり、水素ガスの酸化反応が阻害されていることを示唆している。

ゼオライト系吸着剤と海水の混合物をバイアルに入れてγ線照射し、バイアル上部のガスを分析することで水素ガス生成量を定量した。測定結果を図 6.2-4 に示す。なお、吸収線量は、ゼオライトを除いて水に対する吸収エネルギーに補正した値である。

図 6.2-4 から、吸着剤の種類によらず、線量に比例して水素ガス生成量が増加している。吸着剤の割合が 1wt% の場合には、海水とほぼ同じ水素ガス生成量になっている。本結果から算出した吸着剤の水素ガスの G 値は、0.42~0.47 であった。図 6.2-4 からにおいて吸着剤の割合が 50wt% の場合の水素ガスの G 値が、吸着剤の割合が 1wt% の場合と異なるのは、自由水以外にゼオライトに吸着した水の放射線分解が影響していることが示唆される。

※3 Br-イオン濃度として 80ppm に相当する。

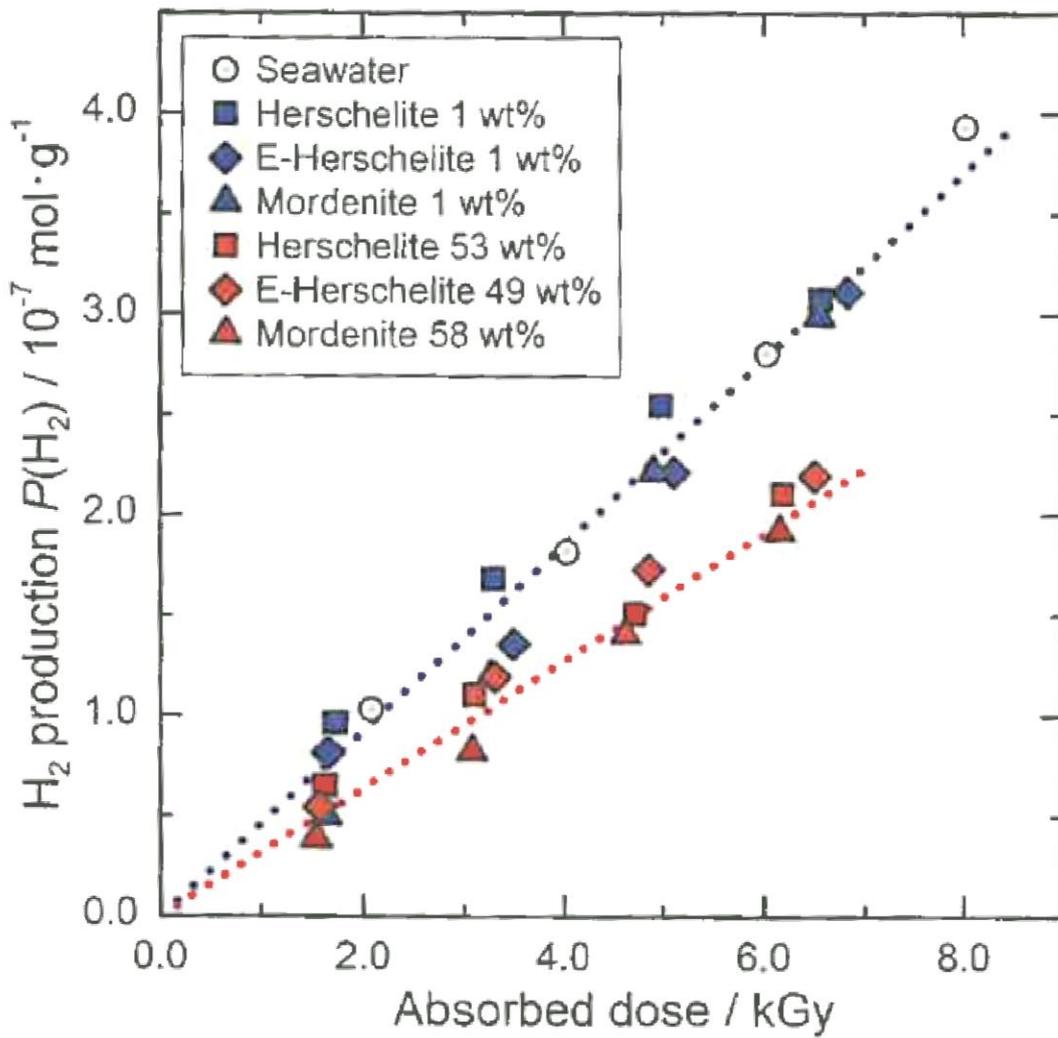
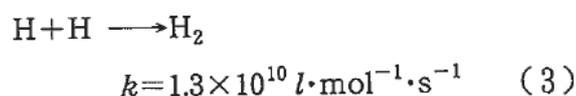
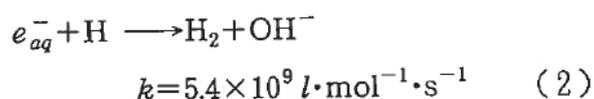
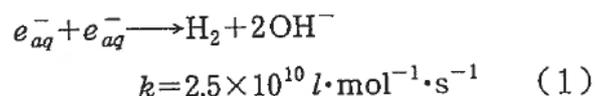


Fig. 1 Hydrogen production by radiolysis of the mixture of the zeolites and seawater
 Blue dotted line: linear fit for the samples containing 1 wt% zeolites. Red dotted line: linear fit for the samples containing *ca.* 50 wt% zeolites.

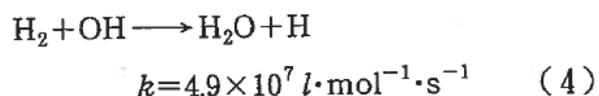
図 6.2-4 ゼオライトと海水の混合物からの水素ガス生成量の測定結果[6-2-4]

6.2.1.4 高レベル放射性廃棄物（水中深さの影響）

燃料デブリ収納缶内には、燃料デブリと水が存在すると考えられるが、一部気相部も存在する。そこで、気相部が存在する系において水素ガス生成に及ぼす水中深さの影響を検討した再処理廃液である硝酸水溶液の γ 線照射実験の結果を以下に示す[6-2-5]。実験の結果、溶液の深さが深くなるほど、水素ガスの生成割合（G 値）が低下することが報告されている（図 6.2-5）。水中では、以下の反応によって水素ガスが生成する。



生成した水素ガス、以下の反応により消滅する。



水中で生成した水素ガスが、気相部に移行する場合、液中での滞留時間が長くなると、反応(4)の影響が無視できなくなり、水素ガスのG値が低下すると考えられる。

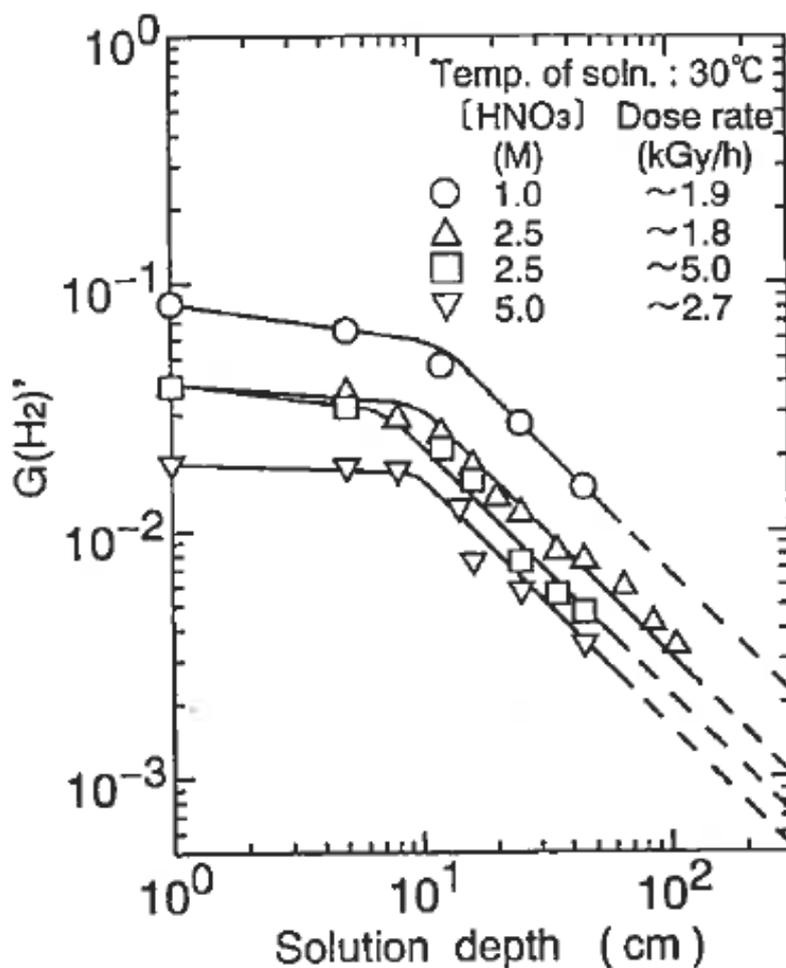


Fig. 5 $G(\text{H}_2)'$ as a function of solution depth

図 6.2-5 水素の G 値と深さの関係[6-2-5]

6.2.2 評価方法

6.2.2.1 収納缶内の水素ガス濃度

6.2.1 項の調査の結果、水の放射線分解による水素ガスの発生には、水の存在状態（温度、不純物、深さなど）や線量が影響すると考えられるが、実験的なデータで確認されているのみで、データを説明できるモデルが確立されていないのが現状である。そこで、収納缶内の残留水分が全て分解すると仮定することで、安全側に最大濃度を評価した。

水素ガスの最大濃度は TMI-2 での評価で実施されていることから、同方法[6-2-1]に従って単位時間あたりの水素ガス生成量を評価した。評価式を以下に示す。

$$H = D \times F \times W \times G(\text{H}_2) \times \frac{22.4 \left(\frac{l}{mol} \right)}{1.602E-19 \left(\frac{J}{eV} \right) \times 100(eV) \times 6.02E23(n)} \times t \times 3600(s)$$

ここで

H : 水素ガス生成量(L)

D : 燃料デブリの単位重量当たりの発熱量(W/kg)

F : 水に対する吸収割合(-)

W : 燃料デブリの重量(kg)

G(H₂) : 水素ガスの G 値 (n/100eV)

t : 時間(hr)

水素ガス生成量の評価に必要なデータを以下に示す。

(1) 水素ガスの G 値

G 値は放射線の種類によって異なる。また、温度依存性も報告されているがあまり大きくない [6-2-10]。燃料デブリの場合、 γ 線の寄与が大きいと考えられるが、室温近傍での γ 線の G 値は比較的文献間で差異は小さい (表 6.2-4)。燃料デブリからはウラン及び TRU 核種からの α 線も放出される。燃料中の α 線の飛程は短く (約 10 μ m) 燃料デブリ表面近傍に存在する α 核種に限られることから γ 線に比べると寄与は小さいと考えられるものの、燃料デブリの形状によっても変化することから、今後詳細検討が必要である。 α 線の G 値はデータが少なく、表 6.2-5 に示す文献間でもばらつきが見られる [6-2-7]。

(2) 燃料デブリの発熱量

燃料デブリの核種組成による。

(3) 燃料デブリの重量

燃料デブリを収納する容器の形状に依存する。

(4) 水に対する吸収割合

放射線のエネルギーと種類、燃料デブリの形状、水の存在状態 (表面積、水の深さあるいは燃料デブリ表面の水膜厚さ) に依存する。水素ガス生成に及ぼす放射線の種類による影響を定性的に整理した結果を表 6.2-6 に示す。

表 6.2-4 γ 線照射による初期 G 値[6-2-7]

Table 5: Primary g-values for gamma radiation at ambient temperature.

Ref.		E	H	H ₂	OH	H ₂ O ₂	HO ₂
Kent & Sims	(1992)	2.5	0.54	0.47	3.1	0.75	
Buxton & Elliot	(1991)	2.65	0.56	0.42	2.58	0.7-0.74	
Elliot et al	(1992)	2.65	0.59	0.42	(2.78)	0.69	
Ruiz et al	(1987)	2.7	0.66	0.43	2.86	0.61	
Sunaryo et al	(1994)	2.75	0.63	0.45	3.12	0.58	
Bjergbakke	(1984)	2.66	0.55	0.45	2.67	0.72	
Elliot	(1994)	2.63	0.57	0.44	2.78	0.65	
Elliot	(1993)	2.6	0.57	0.43	2.7	0.65	
La Verne & Pimblott	(1993)	2.5	0.66	0.44	2.4	0.75	
La Verne	(2004)	2.5	0.56	0.45	2.5	0.70	0.02
Christensen	(2002)	2.65	0.55	0.45	2.80	0.65	
Mean value*		2.61	0.59	0.44	2.75	0.69	0
Redox balanced**		2.62	0.59	0.44	2.75	0.67	0

* Neglecting highest and lowest value.

** Recommended values.

表 6.2-5 α 線照射による初期 G 値 [6-2-7]

Table 9: g-values for alpha radiation.

Ref.		Temp ¹ °C	E	H	H ₂	OH	H ₂ O ₂	HO ₂	Type of radiation
Jenks	(1965)	a	0.04	0.16	1.7	0.1	1.3	0.3	B(n, α)Li
Bibler	(1974)	a	0.13	0.50	1.28	0.18	0.98	0.35	²⁴⁴ Cm
Burns	(1981)	a	0.13	0.14	1.17	0.44	0.92	0.11	LET ~200 eV/nm
Lefort	(1981)	a	-	0.25	1.65	0.45	1.55	-	B(n, α)Li
Lefort	(1981)	a	-	0.55	1.70	0.65	1.65	-	5.3 MeV α
Lundgren*	(2004)	a	0.50	0.41	1.22	0.74	1.23	0.05	B(n, α)Li
La Verne	(2004)	a	0.26	0.12	1.12	0.38	0.95	0.10	5 MeV He ⁺
Bjergbakke et al	(1984)	a	0.06	0.21	1.30	0.25	0.98	0.22	
Mean ²			0.13	0.21	1.40	0.31	1.14	0.25	
Mean ³			0.17	0.29	1.40	0.42	1.20	0.17	
Redox balanced ⁴			0.17	0.29	1.40	0.39	1.18	0.17	
High temperature									
Lundgren*	(2004)	286	0.60	0.50	1.60	1.70	1.24	0.04	B(n, α)Li
Bjergbakke et al	(1984)	289	0.15	0.20	1.96	1.13	1.12	0.30	B(n, α)Li

* Calculated.

¹ a = ambient.

² Mean value, neglecting highest and lowest value, 5 MeV α and calculated values.

³ Mean.

⁴ Recommended values.

表 6.2-6 水素ガス生成に及ぼす放射線の種類による影響

放射線の種類	水素ガス生成への影響	影響の程度
β/γ線	<ul style="list-style-type: none"> 放射線のエネルギーの一部が水に吸収されて、水素ガスが発生する。 時間が経つ（数10年）につれて、減衰して放射線のエネルギーは低下する。 	<p>大</p> <p>水へのエネルギー吸収割合は、水と燃料デブリの存在状態による。β線の一部は燃料デブリ自体に吸収されるが、燃料デブリを通過したβ線は、水に吸収される。</p>
α線	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリ表面に接した水にα線が吸収されて、水素ガスが発生する。 長半減期核種のため、時間が経つと、α線の寄与が、β/γ線よりも相対的に大きくなる。 	<p>中</p> <p>α線の大部分は、燃料デブリ自体に吸収されるが、燃料デブリを通過した一部のα線は、水に吸収される。</p>
中性子線	<ul style="list-style-type: none"> アクチニドの自発核分裂によって中性子が発生し、水の分解に寄与する。 	<p>小</p> <p>中性子束が低く、α/β/γ線の放射線エネルギーに比べて極めて低いため、ほとんど影響しない。</p>

6.2.2.2 燃料デブリ収納缶の内圧

上記 6.2.2.1 項の水素ガス生成量 H(L) を用いて、密閉系での内圧上昇幅を評価した。なお、水の放射線分解によって、水素以外に酸素、過酸化水素が生成するが、安全側に過酸化水素の生成量は無視し、水が分解して水素と酸素のみが発生するとして評価している。このとき、分解ガスによる圧力上昇幅は、次式で表せる。

$$\Delta P = \frac{3/2 \times H}{V} \times \frac{1}{22.4(L)} \times R \times T$$

ここで

ΔP：収納缶内圧上昇幅 (atm)

H：水素ガス生成量(L)

V：収納缶内気相部容積(L)

R：気体定数(L・atm/(mol・K))

T：温度(K)

収納缶内の水素濃度は、初期の内圧（封入ガス圧）を 1atm(at 25℃)相当として、次式により概

略評価した。なお、水蒸気圧は水素ガスにより圧力上昇に対して小さいため無視した。

$$\Delta C \approx \frac{\Delta P \times 2/3}{\Delta P + 1} \times 100$$

ここで、

ΔC : 水素濃度 (%)

一方、水素ガス濃度が高くなり、収納缶内をガスパージする必要がある場合には、次式が成り立つ。

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = A_0 - Q \cdot C$$

となる。なお、気相部の濃度分布は考慮せず、ガスパージによって気相部は均一に混合されているものとした。

ここで

C : 気相部水素濃度 (mol/L)

Q : パージ流量 (L/s)

V : 気相部容積 (L)

A_0 : ガス発生量 (mol/s) (=H/(t×22.4×3600))

上式を $t=0$ のとき、 $C=0$ として解くと

$$C = \frac{A_0}{Q} \cdot (1 - \exp(-\frac{Q}{V} \cdot t))$$

となる。

初期の封入ガスの内圧 (封入ガス圧) を 1atm (at 25°C) 相当として、封入ガスの濃度 C_0 (mol/L) は、

$$C_0 = \frac{1}{24.4}$$

このとき、ガスパージしたときの水素濃度 C' (%) は、 $C \ll C_0$ として

$$C' = \frac{C}{(C_0 + C)} \approx \frac{A_0}{Q} \cdot (1 - \exp(-\frac{Q}{V} \cdot t)) \cdot 2440$$

上式から、 C' (%) (=4%) 以下となるために必要なパージ流量 Q は

$$Q > \frac{A_0}{C'} \cdot 2440$$

となる。

6.2.3 評価結果

評価に必要なデータ（表 6.2-7）を設定して、収納缶内の水素ガス生成量を評価した。

6.2.3.1 ガスパージなしの場合

表 6.2-7 の条件に基づき、設定した入力条件を表 6.2-9～表 6.2-11 に示す。入力条件は、最も厳しい条件（表 6.2-9）とより現実に近い条件（表 6.2-10 と表 6.2-11）とした。最も厳しい条件（水に対するエネルギー吸収率：1.0、気相部割合：0.1）としたときの圧力上昇と水素濃度を図 6.2-6 に示す。この場合、極めて短時間で圧力及び水素濃度が上昇する。より現実的な条件として、水に対するエネルギー吸収率を 0.2^{※4}とし、気相部割合を 50%と 90%にした場合の評価結果をそれぞれ図 6.2-7 と図 6.2-8 に示す。図 6.2-7 と図 6.2-8 から、気相部の割合が大きくなるほど、圧力上昇幅は小さくなり、水素濃度も低くなる。しかしながら、圧力と水素濃度は時間に比例して上昇するため、水素濃度が 4%を超える可能性がある。

6.2.3.2 ガスパージありの場合

上記 6.2.3.1 項の評価結果から、水素濃度は時間と共に上昇することが推定される。そこで、ガスパージを実施した場合の水素濃度を試算した。試算結果を図 6.2-9～図 6.2-11 に示す。図 6.2-9～図 6.2-11 から、ガスパージを実施することで、水素濃度を低下できる可能性がある。気相部容積の割合が小さい（=0.1）場合には、水素濃度の上昇幅が大きいため、パージ流量を多く（約 17L/hr）する必要がある。気相部容積の割合が大きくなると、水素濃度の上昇も小さくなるため、パージ流量は少なくなる（約 3.5L/hr）。また、水素濃度が定常濃度に達するのに、数 100hr を要する。

※4 TMI-2 の例を参考に設定したもので、実際には、放射線の種類、燃料デブリの形状、水の状態によるため、今後、取り出す燃料デブリ性状に応じた詳細な検討が必要である。

表 6.2-7 評価条件

	設定値	備考
燃料デブリの発熱量 (W/kg-U)	0.6 (核分裂生成物) 0.15 (アクチニド)	文献[6-2-11]に基づき、冷却期間 10 年時点の値から、設定した (表 6.2-8)。
燃料デブリ (UO ₂ 燃料として) の重量 (kg-UO ₂)	約 200 (kg-UO ₂) (172 (kg-U))	最大で、BWR 燃料集合体 1 体あたりの概略値[6-2-11]を仮定。 燃料以外の構造物の混入は、安全側に考慮しない。
収納缶内容積(L)	283	集合体 1 体が収まる寸法として、 φ 300mm×4000mm を仮定
水素の G 値(n/100eV)	0.44 (β/γ線) 1.2 (α線)	表 6.2-4 より設定 表 6.2-5 より設定
水に対するエネルギー吸収割合(-)	0.2 (より現実的な条件) 1.0 (最も厳しい条件)	燃料デブリの形状、水の状態、放射線の種類に依存するが、最大で 1.0 を仮定 下限値(0.2)は、TMI-2 における設定値相当
(気相部容積) / (収納缶内容積) の比(-)	0.1, 0.5, 0.9	燃料デブリの収納量によって変化する。気相部以外は、(燃料デブリ+水) と仮定
温度 (°C)	25, 50, 100	仮定 (水が沸騰しないことを前提)

表 6.2-8 炉心内装荷燃料の発熱量

項目	単位	1F1号機	1F2号機	1F3号機
炉内Uインベントリー	tHM	69	94	94

1号機	冷却期間(年)			
発熱量(W/kg-U)	0	10	20	50
放射化物	7.01E-01	1.11E-04	1.03E-05	5.22E-07
アクチニド	5.36E+01	1.52E-01	1.61E-01	1.61E-01
核分裂生成物	1.20E+03	6.45E-01	4.77E-01	6.65E-01
合計	1.25E+03	7.97E-01	6.38E-01	3.91E-01

2号機	冷却期間(年)			
発熱量(W/kg-U)	0	10	20	50
放射化物	8.61E-01	1.24E-04	1.14E-05	4.73E-07
アクチニド	6.63E+01	1.24E-01	1.33E-01	1.36E-01
核分裂生成物	1.52E+03	6.05E-01	4.45E-01	2.15E-01
合計	1.60E+03	7.30E-01	5.79E-01	3.51E-01

3号機	冷却期間(年)			
発熱量(W/kg-U)	0	10	20	50
放射化物	8.82E-01	1.17E-04	1.07E-05	4.43E-07
アクチニド	6.61E+01	1.39E-01	1.51E-01	1.56E-01
核分裂生成物	1.52E+03	5.71E-01	4.20E-01	2.03E-01
合計	1.59E+03	7.11E-01	5.71E-01	3.60E-01

表 6.2-9 入力条件（最も厳しい条件）

収納缶内容積(L)	283	←	←
燃料デブリの重量(kg-U)	172	←	←
放射線エネルギーの水に対する吸収割合	1	←	←
気相部の容積比	0.1	←	←
温度(K)	298	323	373
デブリ発熱量(β y)	0.6	←	←
デブリ発熱量(α)	0.15	←	←
G値(β y)	0.44	←	←
G値(α)	1.2	←	←
水素発生速度(L/hr)(β y)	3.80E-01	←	←
水素発生速度(L/hr)(α)	2.59E-01	←	←
水素発生速度(L/hr)(合計)	6.39E-01	←	←

表 6.2-10 入力条件（より現実的な条件、気相部割合：0.5）

収納缶内容積	283	283	283
燃料デブリの重量	172	←	←
放射線エネルギーの水に対する吸収割合	0.2	←	←
気相部の容積比	0.5	←	←
温度	298	323	373
デブリ発熱量(β y)	0.6	←	←
デブリ発熱量(α)	0.15	←	←
G値(β y)	0.44	←	←
G値(α)	1.2	←	←
水素発生速度(L/hr)(β y)	7.59E-02	←	←
水素発生速度(L/hr)(α)	5.18E-02	←	←
水素発生速度(L/hr)(合計)	1.28E-01	←	←

表 6.2-11 入力条件（より現実的な条件、気相部割合：0.9）

収納缶内容積	283	283	283
燃料デブリの重量	172	←	←
放射線エネルギーの水に対する吸収割合	0.2	←	←
気相部の容積比	0.9	←	←
温度	298	323	373
デブリ発熱量(β y)	0.6	←	←
デブリ発熱量(α)	0.15	←	←
G値(β y)	0.44	←	←
G値(α)	1.2	←	←
水素発生速度(L/hr)(β y)	7.59E-02	←	←
水素発生速度(L/hr)(α)	5.18E-02	←	←
水素発生速度(L/hr)(合計)	1.28E-01	←	←

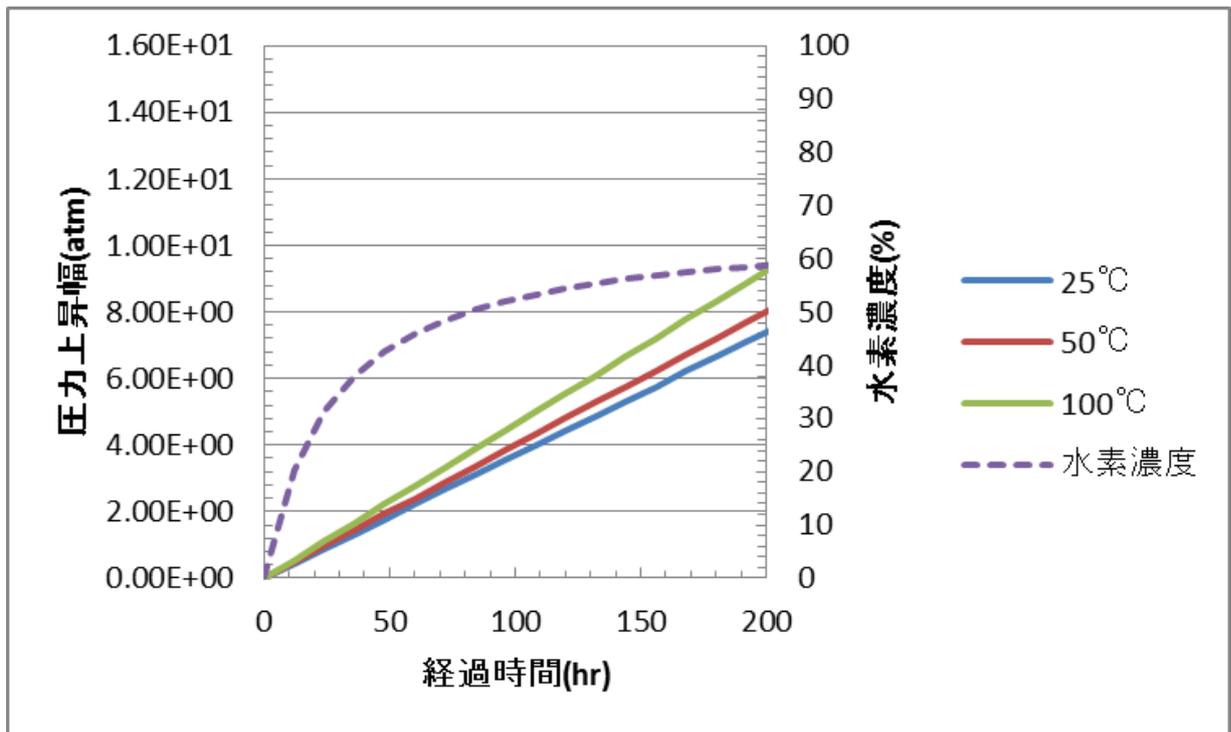


図 6.2-6 収納缶内の圧力と水素濃度の評価結果（最も厳しい条件）

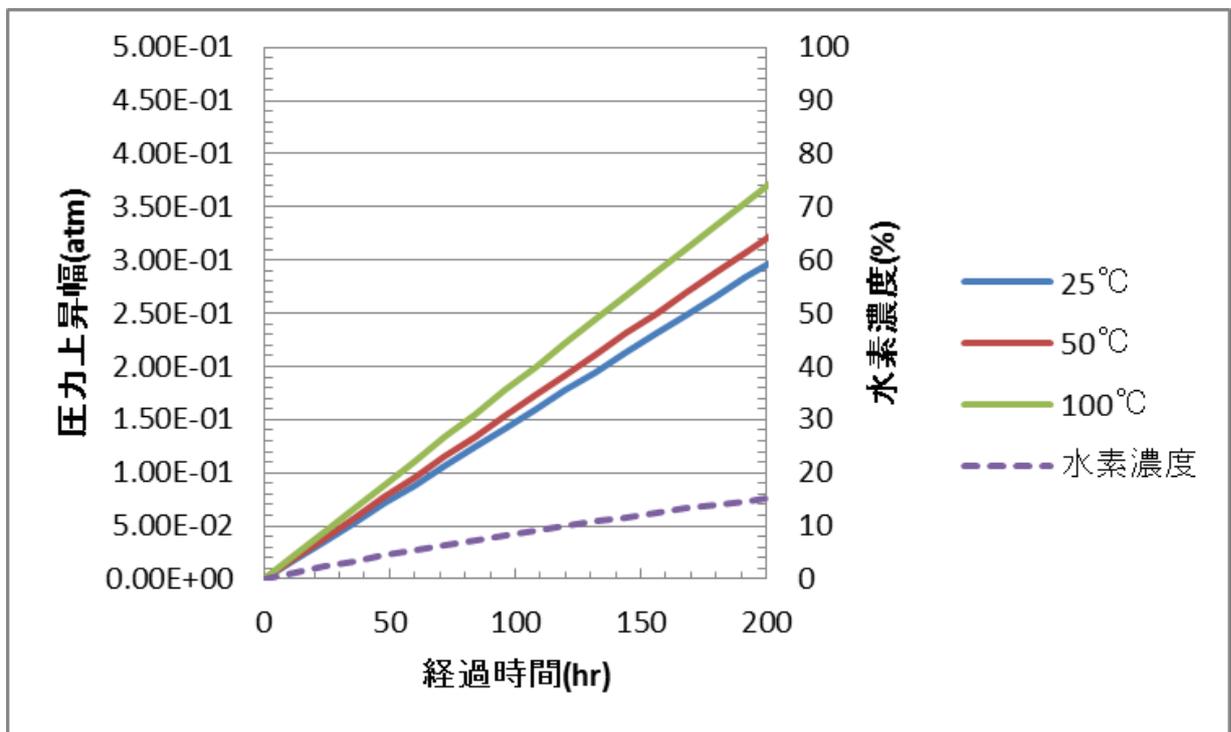


図 6.2-7 収納缶内の圧力と水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.5）

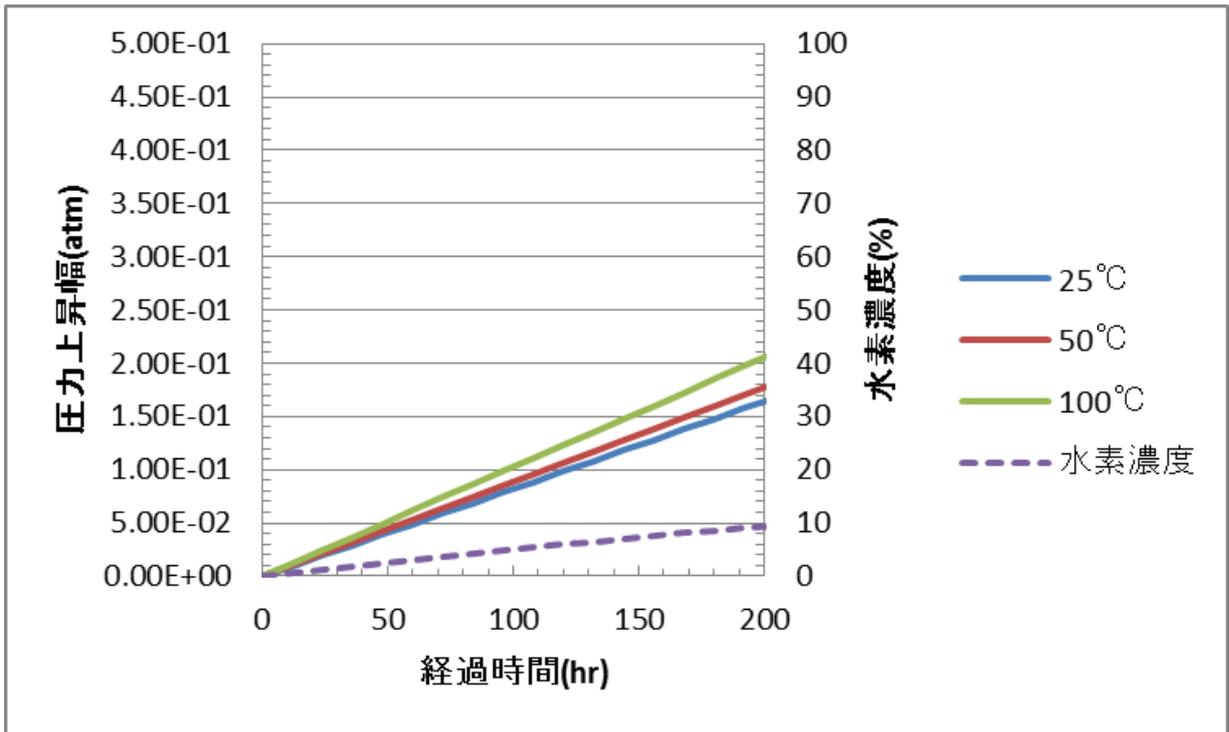


図 6.2-8 収納缶内の圧力と水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.9）

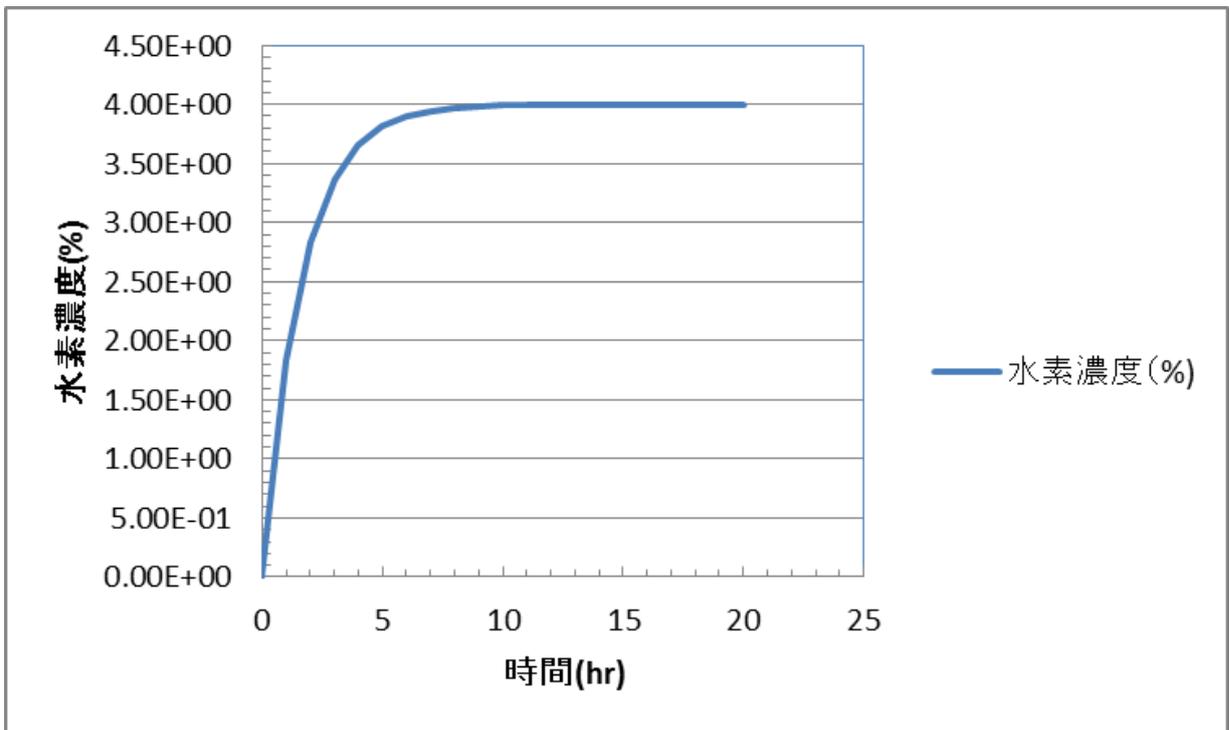


図 6.2-9 ガスパージした場合の水素濃度の評価結果（最も厳しい条件）

（パージ流量：17.4L/hr）

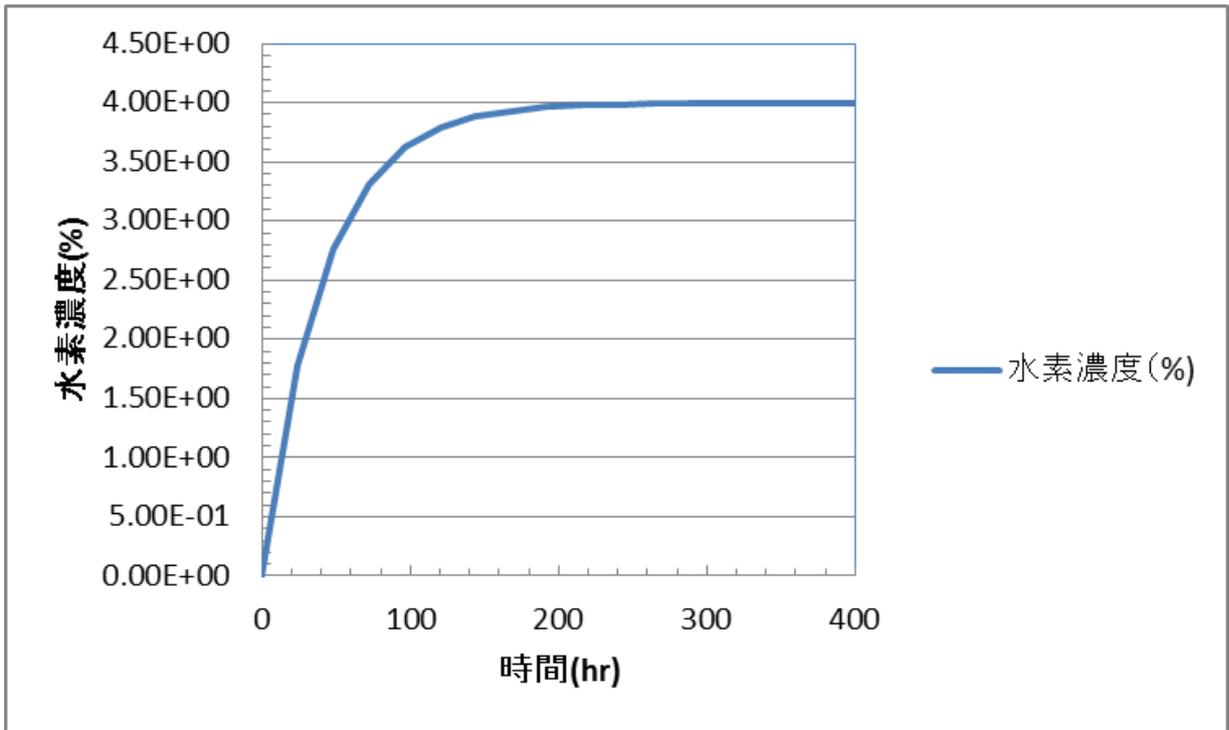


図 6.2-10 ガスパージした場合の水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.5）
（パージ流量：3.5L/hr）

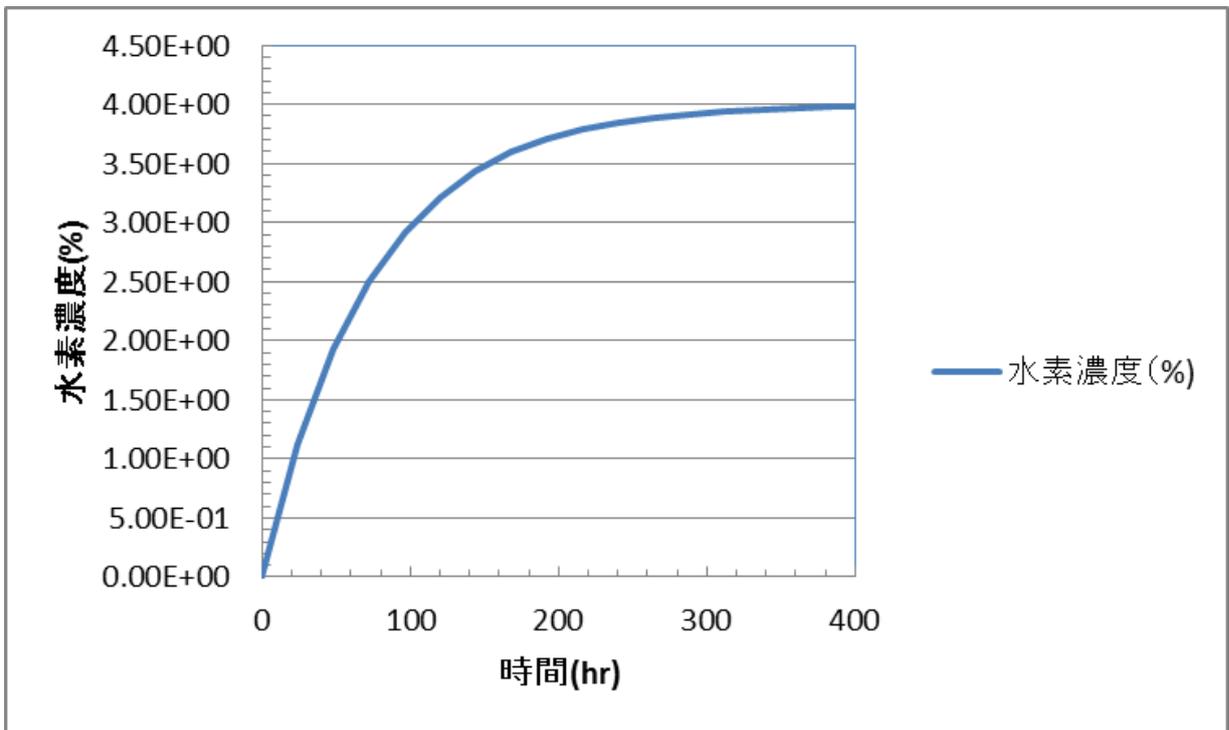


図 6.2-11 ガスパージした場合の水素濃度の評価結果（現実ベース、気相部割合：0.9）
（パージ流量：3.5L/hr）

6.2.3.3 密閉系での触媒の効果

密閉系において、生成した水素を酸素と再結合させて水に戻すための触媒を入れることで、水素濃度を上昇させない対策案が考えられる。TMI-2の燃料デブリ収納缶において、種々の候補となる触媒について性能試験（ラボ試験）が実施され、表 6.2-12 の結果が得られている。表 6.2-12 において、触媒の有効性因子 (Effectiveness factor) は、酸素濃度 5% に規格化した触媒 100g あたりのガスの再結合速度 (L/hr) を表している。乾燥条件の方が、再結合速度が大きく、湿潤条件では再結合速度が小さくなるものの、0.3~1L/hr 程度の値になっている。定常時の水素濃度が 4% (酸素濃度 2%) の場合の再結合速度は、

$$0.3 \sim 1 \text{L/hr} \times 5\% / 2\% = 0.75 \sim 2.5 \text{L/hr}$$

となる。

表 6.2-9~表 6.2-11 における水素ガス生成速度は 0.1~0.6L/hr 程度であり、(水素+酸素、モル比 2:1) の混合ガスで 0.15~0.9L/hr となる。最も厳しい条件 (0.9L/hr) を除けば、上述の試験結果を下回っている。再結合速度は、触媒の種類、使用量、触媒の設置位置、反応温度、ガス組成等に影響されると考えられるため、単純な比較はできないが、触媒による水素濃度の低減効果が期待される。今後、想定される条件での確認試験が必要である。

表 6.2-12 種々の触媒による再結合速度[6-2-12]

Table 4-2. Effects of Catalyst Wetness, Openness, and Bed Size.

Catalyst	Wetness	Bed configuration	Effectiveness factor ^a
● Engelhard	Dry ^b	Open ^c , small (4.5 g)	120
● "	"	" " (10 g)	90
● "	"	" " (45 g)	20
● "	"	" (100 g)	10
● AECL	"	" " (10 g)	8
● "	"	" (100 g)	2.5
● Mixed ^d	Wet ^e	" "	1.5
● "	"	Cavity ^f	1.2
● Engelhard	"	Open	1.1
● Engelhard	"	Cavity	1.0
● AECL	"	Open	0.3
● "	"	Cavity	0.3

^aEffectiveness factor--recombination rate in L/h, per 100 g of catalyst, and normalized to 5% oxygen.

^bAmbient air dry.

^cA screened enclosure that allows water vapor to move up and away from the catalyst.

^dA mixture of 80% Engelhard Deoxo-D catalyst and 20% AECL silicone-coated catalyst.

^eDripping wet with water.

^fCatalyst in a machined recess in the underneath side of the upper head of the canister or test vessel, which prevents the upward escape of water vapor.

6.2.4 試験計画

6.2.4.1 課題整理

既往の知見を調査した結果にもとづき、燃料デブリを乾式貯蔵する際の水素ガス生成に係わる課題を表 6.2-13 に示す。

表 6.2-13 水素ガス生成に係わる課題 (1/2)

項目	課題	対応
・水素ガス生成量	<p>①水素ガス生成には、以下の因子が影響すると考えられる。想定される燃料デブリ貯蔵条件において、これらの因子の影響を把握することが必要である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・残留水分量 (0~100%) ・燃料デブリの形状 (微粒子~ブロック状、コロイド) ・水分の存在状態 (溜まり水、表面付着水、空隙水) ・水質 (純水~海水、pH=約7~約13、燃料溶解成分など) <p>②水素濃度が高くなった場合には、気相部パージあるいは触媒を利用した設備を検討する必要がある。</p>	燃料デブリの模擬物を作製して、照射試験により実験的に確認する。
・混在物の影響	<p>収納缶にケーブルの絶縁体・ケーシングが混入した場合、これらが放射線環境下で分解・揮発し、その構成成分が残留水分に溶存する可能性が考えられる^{※1}。この分解成分が水素ガス生成に与える影響を把握する必要がある。</p> <p>※1：例えば、塩ビが分解すると、塩素及び臭素が放出される。これらハロゲン元素（特に臭素）が存在すると、水の水素ガス生成G値が増加する。</p>	燃料デブリと同伴して収納される材料について、水と一緒に照射試験を行い、水素ガス生成量の変化を実験的に確認する。
・触媒活性	<p>水素再結合に触媒を使用する場合、その触媒活性を長期的に維持する必要がある。触媒活性の低下については、長期使用による触媒表面積の縮小が考えられる。これら触媒活性低下挙動を把握する必要がある。</p> <p>*インテリジェント触媒(自己再生型触媒)の使用で、触媒活性の長期化が期待できるが、酸化・還元繰り返しが無い状態では、自己再生が難しい。</p>	密閉状態での触媒試験を実施する。

表 6.2-13 水素ガス生成に係わる課題(2/2)

項目	課題	対応
・逆反応・被毒	密閉環境では、再結合した水分が、再度放射線分解によって水素ガス生成する可能性が考えられる。触媒によっては、再結合した水分が触媒を被毒するために、触媒活性が低下し、水素ガス生成速度>再結合速度となり、水素濃度が継時的に増加することが考えられる。また、収納缶に燃料デブリと同伴して収納された材料が放射線分解する場合、その分解成分により触媒が被毒する可能性も考えられる。これらの挙動を把握することが必要である。	放射線照射環境下での触媒試験を行う。 また、被毒成分材料を共存させた状態で、放射線照射環境での触媒試験を実施する。
・評価モデル	燃料デブリを収納した体系でのモデルの検証はなされていない※2。	実験データとモデル評価結果を比較することで、モデルが安全側であることを確認する。

※2: より現実的な評価をするためには、放射線分解反応を考慮したモデルを検討する必要がある。

純水系でのモデルの概略を以下に示す。

(参考) 現実的な水素濃度を評価する場合

水中での放射線分解反応(表 6.2-3)に基づき、生成する化学種のマスバランス式をたてて、連立微分方程式を解く。

評価に必要なデータを以下に示す。

- ・放射線分解生成物の G 値
- ・反応式と反応速度定数
- ・温度
- ・水の吸収エネルギー
- ・水相及び気相部の容積
- ・気液間の移行速度(気相部を考慮する場合)

純水系では、30 個以上の反応があり、各反応の反応速度定数が報告されている(表 6.2-3)。また、室温近傍では、表 6.2-14 に示す反応速度定数が報告されている。本デ

一タは、実験結果と合うように、定数の最適化が行われている。これらは、純水系での反応であるが、1F の燃料デブリの場合、海水が注入されているため、海水成分との反応を考慮する必要がある。海水系での過酸化水素の生成に着目した評価した例はあるが、評価に必要なデータ（G 値、反応速度定数）が十分でないのが現状の様である [6-2-8]。

燃料デブリを乾式で貯蔵する場合、容器内の水分の量は少ないと推定され、水の放射線分解で生成した水素は、比較的速やかに気相中に移行すると考えられる。このため、水中で生成した水素が水に戻る反応の影響は小さくなる。この場合、本項での水素ガス生成量に近づくと推定される。

表 6.2-14 反応速度定数と活性化エネルギー [6-2-9]

Table 1
Reactions, rate constants and activation energies used in the model*

No.	Reaction	k_{opt} ($M^{-1} s^{-1}$)	k_{rec} (k_{min} - k_{max}) ($M^{-1} s^{-1}$)	E_a (kJ mol)
1	$OH + H_2 \rightarrow H + H_2O$	3.74×10^7	$4.2 (3.4-6.0) \times 10^7$	18.0
2	$OH + HO_2^- \rightarrow HO_2 + OH^-$	5×10^9	$7.5 (5.6-8.3) \times 10^9$	12.6
3	$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$	3.8×10^7	$2.7 (2.0-3.8) \times 10^7$	14.0
4	$OH + O_2^- \rightarrow O_2 + OH^-$	9.96×10^9	$8.0 (7.0-9.4) \times 10^9$	12.6
5	$OH + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O$	7.1×10^9	$6.0 (6.0-6.6) \times 10^9$	12.6
6	$OH + OH \rightarrow H_2O_2$	5.3×10^9	$5.5 (5.2-6.2) \times 10^9$	8.0
7	$OH + e_{aq}^- \rightarrow OH^-$	3.0×10^{10}	3.0×10^{10}	12.6
8	$H + O_2 \rightarrow HO_2$	2.0×10^{10}	2.1×10^{10}	12.6
9	$H + O_2^- \rightarrow HO_2^-$	2.0×10^{10}	2.0×10^{10}	12.6
10	$H + HO_2 \rightarrow H_2O_2$	2.0×10^{10}	$\sim 1.0 (1.0-2.0) \times 10^{10}$	12.6
11	$H + H_2O_2 \rightarrow OH + H_2O$	3.44×10^7	9.0×10^7	13.6
12	$H + OH \rightarrow H_2O$	7.0×10^9	7.0×10^9	12.6
13	$H + H \rightarrow H_2$	7.9×10^9	$7.8 (7.8-12) \times 10^9$	12.6
14	$e_{aq}^- + O_2 \rightarrow O_2^-$	1.94×10^{10}	$1.9 (1.8-1.9) \times 10^{10}$	13.0
15	$e_{aq}^- + O_2^- \rightarrow HO_2^- + OH^-$	1.3×10^{10}	1.3×10^{10}	18.8
16	$e_{aq}^- + HO_2 \rightarrow HO_2^-$	2.0×10^{10}		12.6
17	$e_{aq}^- + H \rightarrow H_2 + OH^-$	2.5×10^{10}	2.5×10^{10}	12.6
18	$e_{aq}^- + H_2O_2 \rightarrow OH + OH^-$	1.14×10^{10}	$1.1 (0.95-1.2) \times 10^{10}$	15.1
19	$e_{aq}^- + H^+ \rightarrow H$	2.3×10^{10}	$2.3 (2.2-2.4) \times 10^{10}$	12.2
20	$e_{aq}^- + e_{aq}^- \rightarrow H_2 + OH^- + OH^-$	5.6×10^9	$5.5 (5.0-7.0) \times 10^9$	20.5
21	$HO_2 + O_2^- \rightarrow O_2 + HO_2^-$	9.5×10^7	9.5×10^7	8.8
22	$HO_2 + HO_2 \rightarrow O_2 + H_2O_2$	8.1×10^5	8.1×10^5	24.7
23	$HO_2 + H_2O_2 \rightarrow O_2 + OH + H_2O$	3.7	3.7	20.0
24	$HO_2 \rightarrow H^+ + O_2^-$	$7 \times 10^5 s^{-1}$	pK = 4.8	12.6
25	$H^+ + O_2^- \rightarrow HO_2$	4.5×10^{10}		12.6
26	$H_2O_2 \rightarrow H^+ + HO_2^-$	$0.0356 s^{-1}$	pK = 11.7	12.6
27	$H^+ + HO_2^- \rightarrow H_2O_2$	2×10^{10}		12.6
28	$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$	1.4×10^{11}	pK = 15.7	12.6
29	$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$	$2.5 \times 10^{-5} s^{-1}$		45.4
30	$H + OH^- \rightarrow e_{aq}^- + H_2O$	1.8×10^7	1.8×10^7	26.0
31	$O_2^- + O_2^- \rightarrow O_2 + HO_2^- + OH^-$	0.3	<0.35	12.6
32	$O_2^- + H_2O_2 \rightarrow O_2 + OH^- + OH$	16	16	20

* k_{max} and k_{min} are maximal and minimal and k_{rec} is recommended (or average) values borrowed from the known collection of reaction rate constants (Buxton et al., 1988).

6.2.4.2 計画検討

(1) 水素ガス生成量取得

下記の条件に着目した照射試験を実施し、水素ガス生成量を実験的に取得する。

a. 照射条件

- ・ 水分量（種々の乾燥条件で水分量を調整する）
- ・ 固体（既知の形状の模擬燃料デブリ（セラミックスなど）を作製する）
- ・ 気液比（水分量と固体の重量を変えたパラメータとする）
- ・ 水質（pH, ハロゲンイオン）
- ・ 温度（室温とする）
- ・ γ 線線量率（線量率を変えた照射で、線量率の影響を把握する）
- ・ 照射時間（最大数日程度、水素ガス生成量の傾向が把握できる期間）

b. 評価

照射後の容器内気相部の水素ガスを分析することで、水素ガス生成量と線量の関係を求める。また、水素のG値を算出し、水の分解のG値と比較する。

(2) 混在試験

下記の条件に着目した照射試験を実施し、水素ガス生成量を実験的に取得する。

a. 照射条件

- ・ 燃料デブリと同伴して収納される可能性のある材料（電気ケーブルなど）
- ・ γ 線線量率（線量率を変えた照射で、線量率の影響を把握する）
- ・ 照射時間（最大数日程度、水素ガス生成量の傾向が把握できる期間）

b. 評価

照射後の容器内気相部の水素ガスを分析することで、同伴材料の有無における水素ガス生成量の差異を評価する。また、水素のG値を算出し、水の分解のG値と比較する。

(3) 触媒活性試験

下記の条件に着目した触媒試験を実施し、水素処理量を実験的に取得する。

a. 試験条件

- ・ 水分量

- ・触媒条件（触媒材料・触媒表面）
- ・ γ 線線量率（線量率を変えた照射で、線量率の影響を把握する）
- ・照射時間（最大数日程度、水素ガス生成量の傾向が把握できる期間）

b. 評価

容器内気相部の水素ガスを定期的に分析することで、水素処理量の経時変化を求める。

(4) 逆反応・被毒

下記の条件に着目した触媒試験を照射環境下で実施し、水素処理量を実験的に取得する。

a. 試験条件

- ・水分量
- ・同伴物質（ケーブル材料・機械油）
- ・ γ 線線量率（線量率を変えた照射で、線量率の影響を把握する）
- ・照射時間（最大数日程度、水素ガス生成量の傾向が把握できる期間）

b. 評価

容器内気相部の水素ガスを定期的に分析することで、水素ガス生成に対する触媒の処理量の経時変化を求める。

6.2.5 参考文献リスト

- [6-2-1] J. O. Henrie and J. N. Appel, Evaluation of Special Safety Issues Associated with Handling the Three Mile Island Unit 2 Core Debris, GEND-051 (1985)
- [6-2-2] J. O. Henrie et al., Hydrogen Control in the Handling, Shipping, and Storage of Wet Radioactive Waste, GEND-052 (1986)
- [6-2-3] E. Ibe et al., Theoretical Model Analyses for Effects of Hydrogen Injection on Radiolysis of Coolant Water in BWR, J. Nucl. Sci. and Tech. 23(1) (1986)11-28
- [6-2-4] 熊谷他、放射性汚染水処理に関わるゼオライト系吸着剤と海水との混合物からの水素ガス生成量の測定と評価、日本原子力学会和文論文誌、10(4) (2011)235-239
- [6-2-5] 仲吉他、高レベル廃液からの放射線分解発生水素量の評価 (II)、日本原子力学会誌、37(12) (1995)1119-1127
- [6-2-6] J. A. LaVern and Lav Tandon, H₂ Production in the Radiolysis of Water on UO₂ and Other Oxides, J. Phys. Chem. B 107 (2003) 13623-13628
- [6-2-7] H. Christensen, Fundamental Aspects of Water Coolant Radiolysis, 6th International Workshop on LWR Coolant Radiolysis and Electrochemistry, Jeju Island, Korea, Oct. 27 (2006)
- [6-2-8] K. Hata et al., Radiolysis calculation and gamma-ray irradiation experiment of aqueous solutions containing seawater components, Water Chemistry and Corrosion in Nuclear Plants in Asia, Taichung Taiwan, Oct. 14-17 (2013)
- [6-2-9] B. G. Ershov and A. V. Gordeev, A model for radiolysis of water and aqueous solutions of H₂, H₂O₂ and O₂, Rad. Phys. and Chem. 77 (2008) 928-935
- [6-2-10] A. J. Elliot et. al, Temperature Dependence of g Value for H₂O and D₂O irradiated with Low Linear Energy Transfer Radiation, J. Chem. Soc. Faraday Trans. 89(8) (1993) 1193-1197
- [6-2-11] 西原他、「福島第一原子力発電所の燃料組成評価」、JAEA-Data/Code2012-018 (2012)
- [6-2-12] J. O. Henrie et al., Catalyst Tests for Hydrogen Control in Canisters of Wet Radioactive Wastes, GEND-062 (1987)

6.3 腐食評価

6.3.1 目的

燃料デブリの乾式貯蔵に用いるレファレンス収納缶及びキャニスタ仕様を設定するにあたり、収納缶内の残留水、燃料デブリに含まれる FP 及び海水塩分等による収納缶の腐食を考慮する必要がある。この点で安全性を確保するため腐食に関する文献調査、腐食評価を行うとともに、試験計画案を策定した。

6.3.2 実施内容

6.3.2.1 腐食評価

収納缶内の残留水、燃料デブリに含まれる核分裂生成物（FP）及び海水塩分等による収納缶の腐食の評価を行った。この評価においては、容器内の放射線による腐食促進効果も考慮した。また、キャニスタを用いる場合には、蓋溶接部の腐食についても評価対象とした。

(1) 文献調査

関連文献（破損燃料、キャニスタの腐食に関するもの）における腐食評価の既往知見を整理し、1F における燃料デブリ収納缶との違いを踏まえて、評価における課題を抽出した。

(2) 腐食発生リスクの評価

キャニスタ及び収納缶（ともに材質はステンレス鋼：SUS304 あるいは SUS316L）の長期貯蔵中において腐食発生の可能性を検討し、影響因子の抽出及び影響度の評価を行った。

6.3.2.2 試験計画案の策定

燃料デブリ乾式貯蔵の規制審査に必要と考えられる研究（計画）項目を抽出し、机上検討にて解決出来ない課題について、試験計画案を策定した。

6.3.3 想定条件

6.3.3.1 取り出し、貯蔵方式

現在、1F の燃料デブリ取り出し工法・システムや燃料デブリ収納・搬送・貯蔵技術については、国際廃炉研究開発機構（IRID）が中核となり研究開発が進められている。収納缶の構造の参考と

して TMI-2 で採用された収納缶（TMI-2 ではキャニスタと呼称）を図 6.3-1 に、燃料デブリ取り出し・貯蔵方法の参考として、TMI-2 の燃料デブリ取り出し・貯蔵方法の概略図を図 6.3-2 に示す。また、使用済燃料貯蔵における乾式貯蔵の方式のうち、ボルト方式の概念図を図 6.3-3 に示す。燃料デブリの取り出し方法や貯蔵方法についてはまだ確定していない状況であるが、本調査では以下の想定の下、検討を行った。

- ①取り出した燃料デブリを収納缶内に収納、共用プールにて貯蔵（満水状態）
- ②高温真空乾燥にて収納缶内の水分を除去（残留水あり）
- ③貯蔵施設に移送し、ボルト方式で長期貯蔵
- ④キャニスタ及び収納缶はステンレス鋼（SUS304 あるいは SUS316L）製とする。

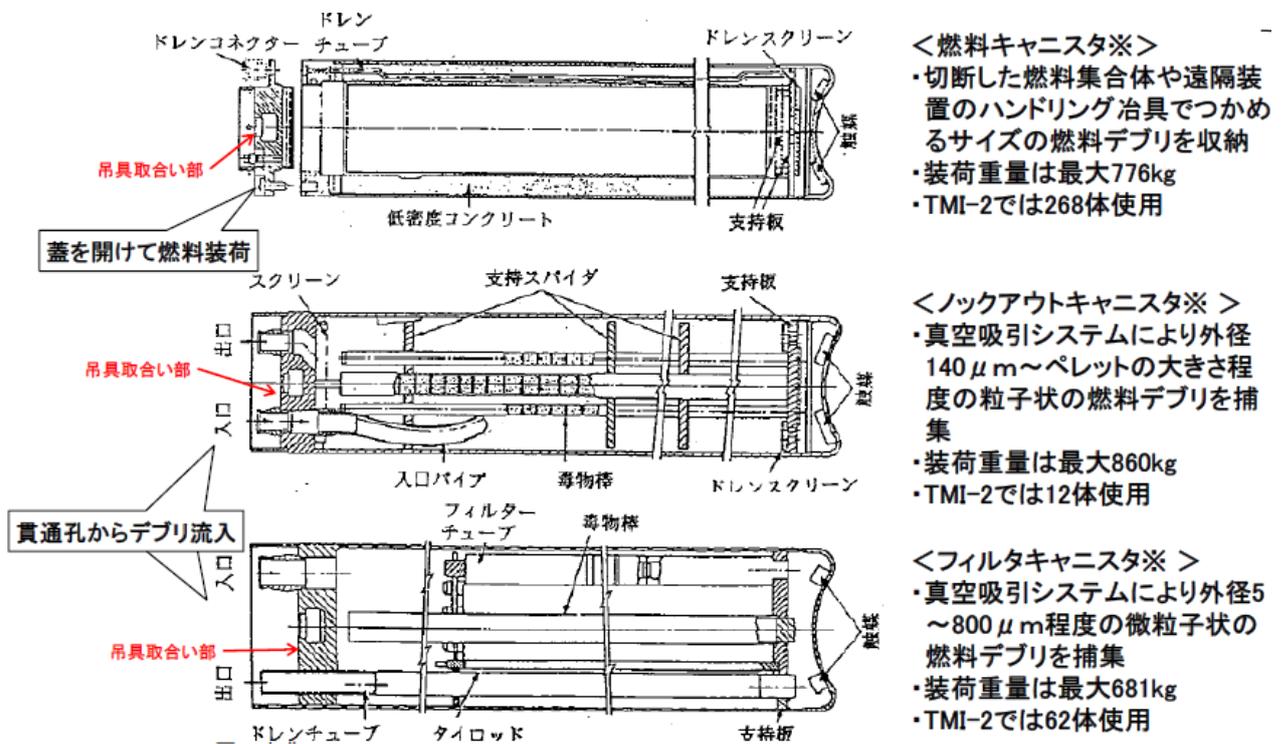


図 6.3-1 TMI-2 で採用された収納缶（TMI-2 ではキャニスタと呼称） [6-3-1][6-3-2]

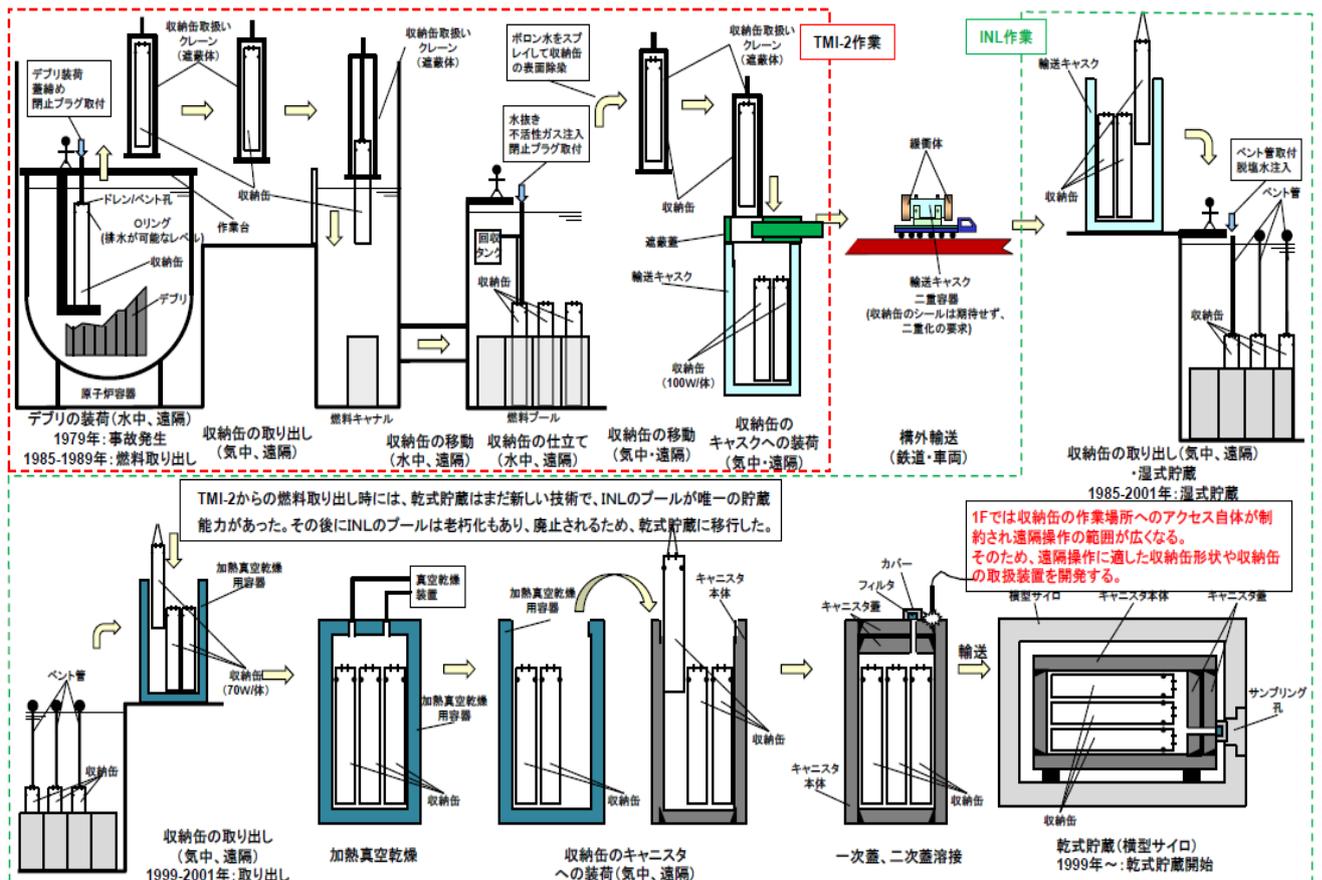


図 6.3-2 TMI-2 の燃料デブリ取り出し・貯蔵方法の概略図[6-3-1]

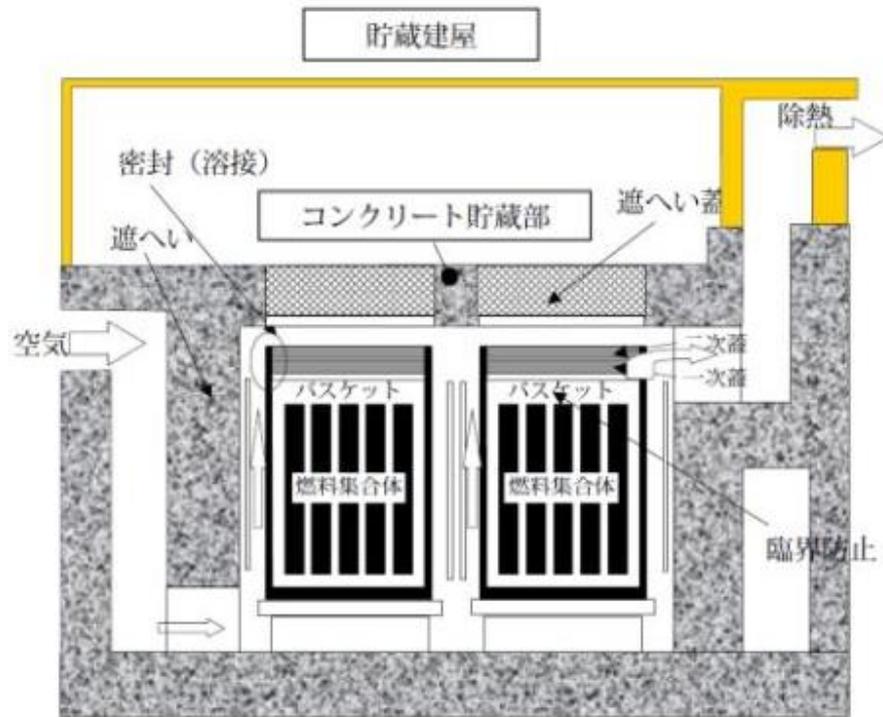


図 6.3-3 ボールト方式の乾式貯蔵概念図(使用済燃料貯蔵)[6-3-1]

6.3.3.2 収納缶・キャニスタが曝される環境

(1) 収納缶内側

収納缶内側には、様々な性状・成分・大きさの燃料デブリが循環冷却水とともに入れられ、高温真空乾燥にて水分が除去される。1F の燃料デブリについては、事故進展解析コードの結果を用いて熱力学的計算がなされており、酸化物としては(U, Zr)O₂、金属としてはZr(O)、Fe₂(Zr, U)が主要な形態と推定されている[6-3-3]。大部分が燃料構成成分の酸化物となっていると考えられているが、金属としてZr、Zr-U-Fe合金又はFe-Cr合金が存在すると評価されている。そのほか、核分裂生成物(FP)、ハロゲンも含まれている可能性がある。また、TMI-2の燃料デブリと異なる点として事故初期の比較的高温時に海水成分に曝された履歴を持つ[6-3-4]ことから、Cl等の海水成分が含まれている可能性がある。また、圧力容器下部のペDESTALには設置されていた計装機器ケーブルにはETFEやクロロプレンゴム等のハロゲンを含む材料が使用されていた可能性があり[6-3-5]、これらを由来とするハロゲン化物やこれらが放射線分解した成分[6-3-6]を含む可能性がある。さらに、1Fでは溶融した燃料や炉内構造物からなるコリウムが圧力容器から溶け落ち、下部コンクリート床面と反応(MCCI)することによってコンクリート由来の成分(カルシウムやシリコン)が含まれている可能性がある[6-3-7]。また、なお、燃料デブリとともに収納缶に入る循環冷却水には臨界防止のための五ホウ酸ナトリウム等の溶解性中性子吸収剤[6-3-8]や鋼材腐食抑制のための防錆剤[6-3-9]が添加される予定であり、これらの成分が残留する可能性がある。なお、温度条件は内部の燃料デブリの発熱により特に初期は温度が高いことが想定されているが、貯蔵システムが確定していないため、現時点では明確ではない。

(2) キャニスタ外側

乾式貯蔵では基本的に空気冷却であり、キャニスタ外面は冷却空気に曝される。貯蔵設備の仕様は確定していないが、冷却空気には大気中の海塩粒子等の不純物が含まれている可能性があり、長期間にわたり曝露すると、表面の付着塩分も蓄積して濃度が高くなっていく可能性がある。

6.3.4 腐食評価

6.3.4.1 関連技術の文献調査

本調査では、乾式貯蔵の技術開発で先行しているコンクリートキャスクによる使用済燃料の乾式貯蔵で用いられるステンレス鋼製のキャニスタの健全性評価に関する研究が、本調査の対象と重なる部分が多く詳細かつ網羅的な検討を行っていることから、これを調査して不足している検討項目や燃料デブリ貯蔵の特有の課題を抽出して補うことが合理的な進め方と考えられる。ここでは独立行政法人日本原子力開発研究機構（JAEA）が進めている「中間貯蔵設備長期健全性等試験委託費（実環境下でのキャニスタの腐食試験等）事業」の平成 25 年度成果[6-3-10]、平成 26 年度成果[6-3-11]を整理し、燃料デブリを対象とした場合に不足している部分や課題を抽出することとした。

表 6.3-1 に考慮すべき腐食リスクの違いを比較した。キャニスタ外面側はどちらも冷却空気中の海塩粒子付着による腐食のリスクが考えられ、コンクリートキャスクにおける研究成果が流用できるものと考えられる。ただし、検討している鋼種や温度条件、照射条件の範囲に違いがある場合は新たに試験や検討を行う必要がある。一方、キャニスタ（収納缶）内面側はコンクリートキャスクでは腐食リスクが低いと考えられ、評価対象となっていないのに対し、燃料デブリ収納缶の内面側は、収納する燃料デブリによって持ち込まれる腐食リスクを新たに評価する必要があると考える。ただし、考えられる腐食リスクの種類としては塩化物を起因とした外面応力腐食割れ（ESCC）が考えられ、データを流用できるものも多い。

次に表 6.3-2 に前述のコンクリートキャスクのキャニスタの評価で考慮されている事象、因子を整理するとともに、燃料デブリ収納缶の健全性を評価する上で不足している点を整理した。

表 6.3-1 コンクリートキャスクと燃料デブリ収納缶の考慮すべき腐食リスクの比較

	使用済燃料用コンクリートキャスク用キャニスタ	燃料デブリ収納缶・キャニスタ
キャニスタ外面側	冷却空気により持ち込まれる塩分起因の腐食（外面応力腐食割れ（ESCC））リスク。	同左
キャニスタ（収納缶）内面側	腐食リスクは低く未考慮。	燃料デブリにより持ち込まれる腐食リスク。

表 6.3-2 既往研究における評価範囲と燃料デブリ収納缶の評価上不足している点

腐食事象	影響因子		コンクリートキャスクにおける評価			燃料デブリ収納缶の評価上、不足している点
			文献	試験実施	解析	
孔食 (発錆) すき間腐食 応力腐食割れ	環境 因子	付着塩分量（塩化物濃度）	○	○	○	・燃料デブリと共に入ってくる海水由来塩分量
		その他成分				・燃料デブリと共に入ってくる防錆剤、中性子吸収材成分の影響
		電位（放射線分解生成物、酸化性化学種）	○	○	○	・燃料デブリ成分による電位上昇
		湿度	○		○	
		温度	○	○	○	・燃料デブリによる表面温度
	材料 因子	溶接の影響（鋭敏化）	○	○	○	
		溶接の影響（硬化）	○			
		加工影響	○			
	応力 因子	応力（残留応力・荷重）	○		○	

注) ○：実施例有り

6.3.4.2 燃料デブリ収納缶（キャニスタ）の腐食評価

(1) キャニスタ外面

キャニスタ外面側は冷却空気に曝され、空気に含まれる塩分の蓄積が想定されることから、コンクリートキャスクにおけるキャニスタと同様、湿潤大気中における孔食（発錆）や外面応力腐食割れ（ESCC）のリスクを評価する必要がある。以下に想定される影響因子と燃料デブリ用のキャニスタにおけるリスクを評価した。

a. 付着塩分量

元田らによるとステンレス鋼の発錆条件は図 6.3-4 に示すように、表面の付着塩分量 (W_s) と相対湿度で整理でき、SUS304 の発錆の限界塩分量として 0.04g/m^2 を与えている。大中らステンレス鋼の大気応力腐食割れの発生の限界塩分量として 0.01g/m^2 を報告している（図 6.3-5）。飛来海塩による付着塩分量は図 6.3-6 に示すように、海からの距離が近いほど高く、雨で洗い流される屋根上よりも屋根下（軒下）で高い傾向にある。屋内である乾式貯蔵施設では吸気系統の流路やフィルタ有無などによっても付着塩分量が異なるものと考えられる。ただし、雨で洗い流されることがないため、長期間の貯蔵中に表面に蓄積していく可能性が考えられる。

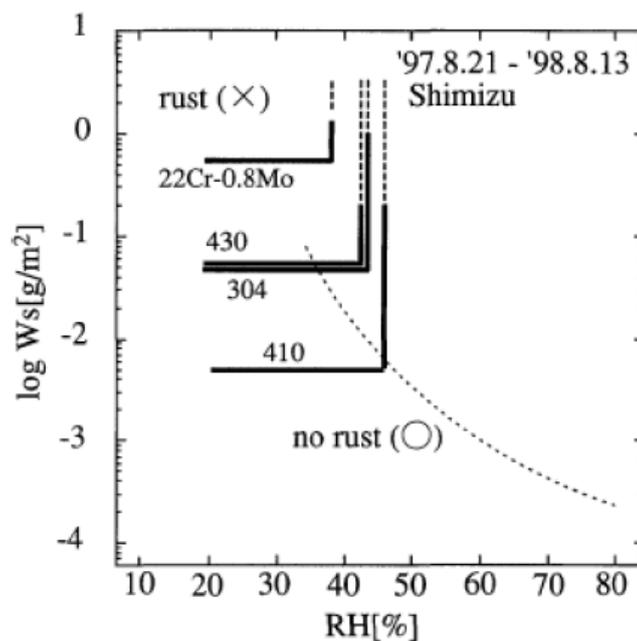


図 6.3-4 ステンレス鋼の発錆条件の付着塩分量 (W_s) と相対湿度 (RH) による整理 [6-3-12]

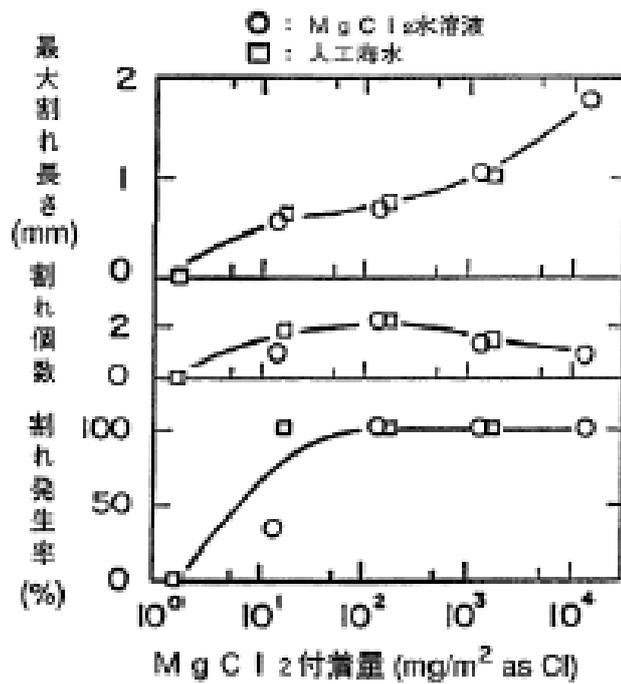


図 6.3-5 ステンレス鋼の大気腐食割れにおよぼす塩分付着量の影響[6-3-13]

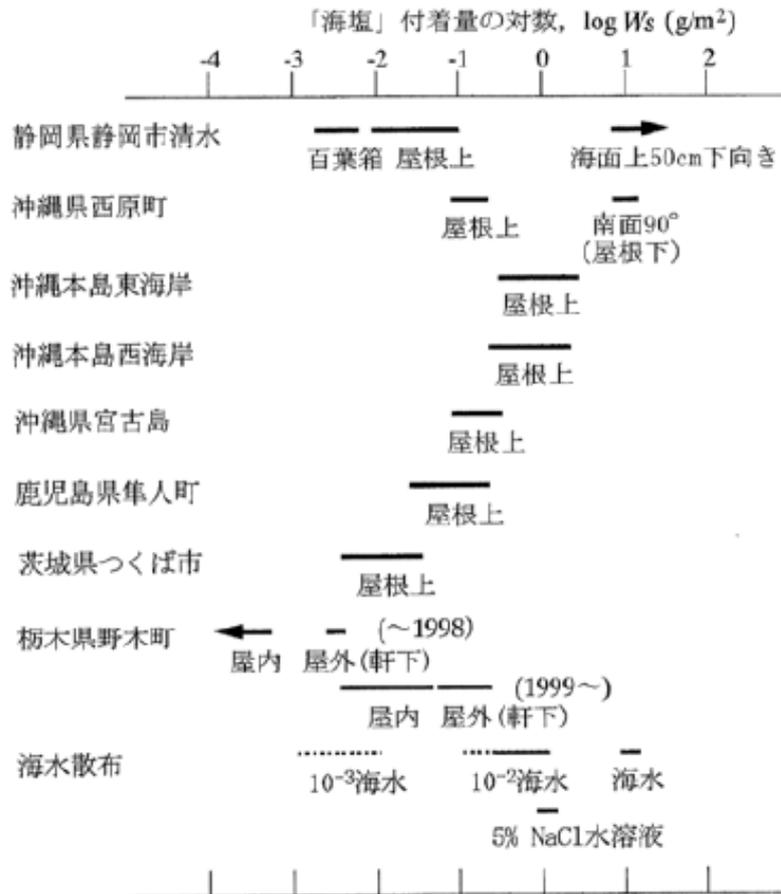


図 6.3-6 種々の環境での付着塩分量[6-3-14]

b. 相対湿度

ステンレス鋼の発錆や応力腐食割れに及ぼす相対湿度の影響を図 6.3-4、図 6.3-7、図 6.3-8 に示す。相対湿度が低いほど液膜が薄くなり、液膜中の塩化物イオン濃度が高くなるために SCC 感受性が高くなる。また、付着塩の種類によっても感受性領域が異なる。

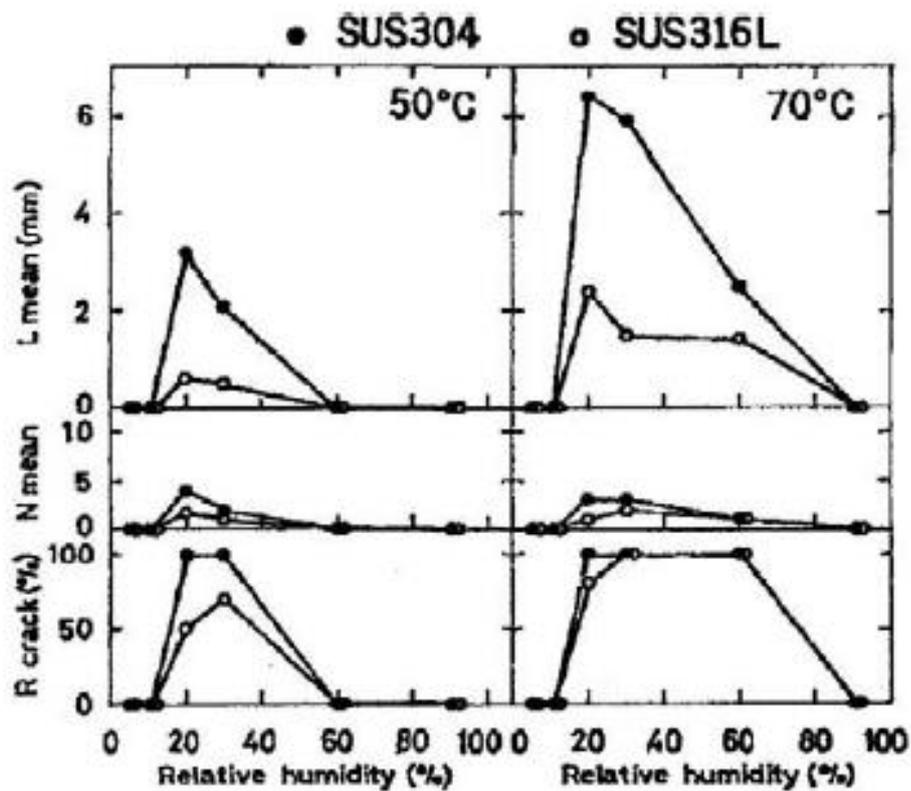


図 6.3-7 人工海水を滴下した条件での ESCC に及ぼす相対湿度と温度の影響[6-3-15]

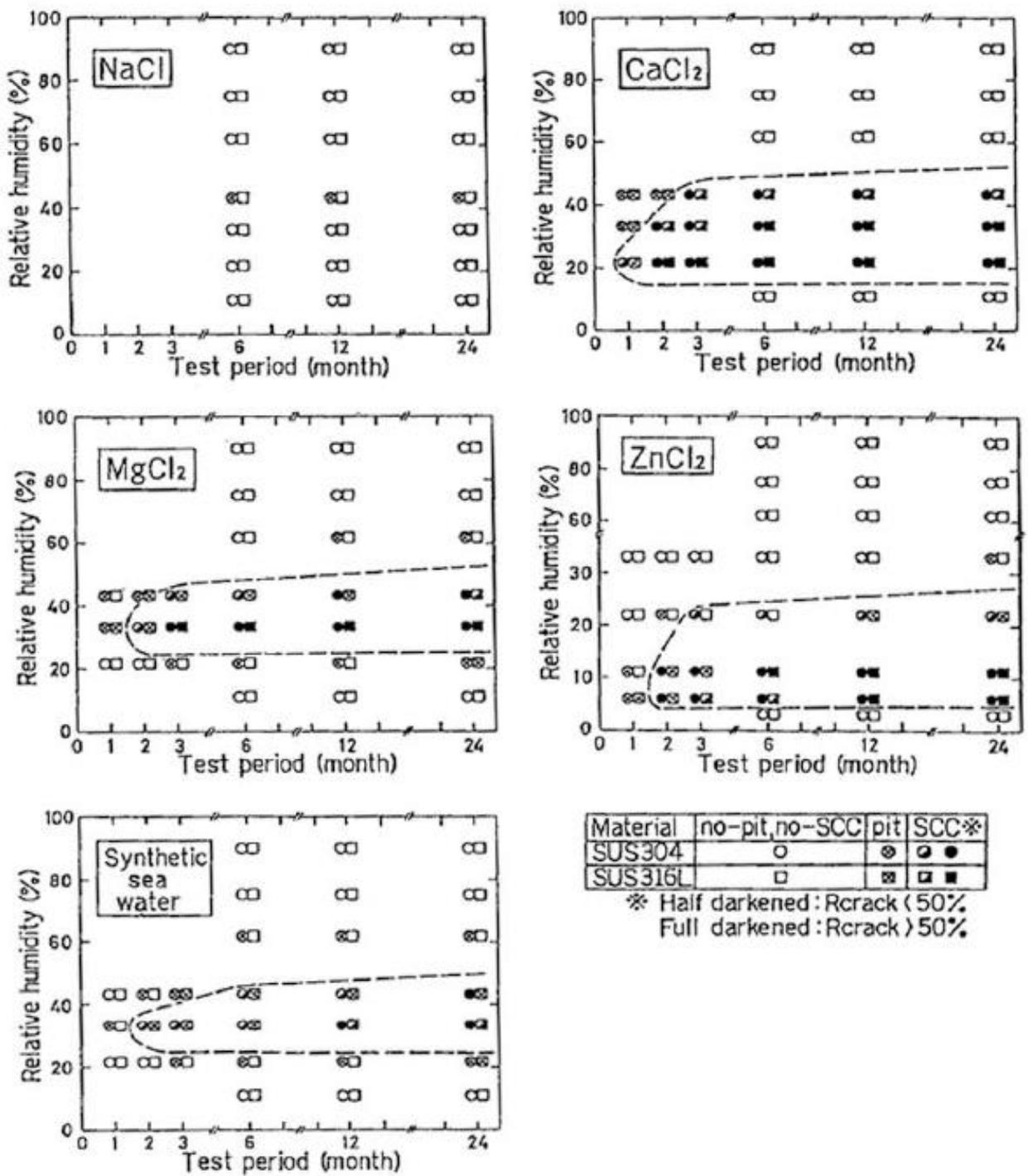


図 6.3-8 人工海水を滴下した条件での ESCC に及ぼす相対湿度の影響[6-3-16]

c. 温度

表 6.3-3 はステンレス鋼の外面応力腐食割れの発生しやすい温度範囲を分類毎にまとめたものである。ただし、塩化物イオン濃縮型でも 70℃以下でも割れた例があるため、この温度範囲が必要条件ではない。図 6.3-7 では温度が高いほうが感受性が高いことがわかるが、相対湿度によっても影響が変わるため、相対湿度と併せて評価する必要がある。

使用済み燃料用のキャニスタの表面温度の予測例を図 6.3-9 に示した。表面温度は周辺温度に依存することがわかっており、初期の表面温度は 145～192℃と想定されている。使用済み燃料よりも燃料デブリの発熱量が高く、収納缶のほうが温度条件が高い可能性がある。これにより、腐食リスクが相対的に高くなる可能性がある。ただし、沸点以上の温度では表面の液膜が乾燥して腐食は起こらないため、沸点以下の温度域に厳しい温度条件があるものと考えられる。

表 6.3-3 ステンレス鋼の外面応力腐食割れの分類とその特徴[6-3-17]

タイプ	名称	形態	温度	発生部の特徴	鋭敏化
I	塩化物イオン濃縮型	すきま腐食を起点とする粒内型応力腐食割れ	70℃～130℃程度(内面側温度)	構造的なすきま部(保温材や当て板下部)	なし
II	鋭敏化型	粒界型応力腐食割れ	常温(50℃以下)	開放面(非すきま部)で鏡板や溶接部に多い	あり(10%シュウ酸エッチで溝状組織、EPR 試験で5%以上)

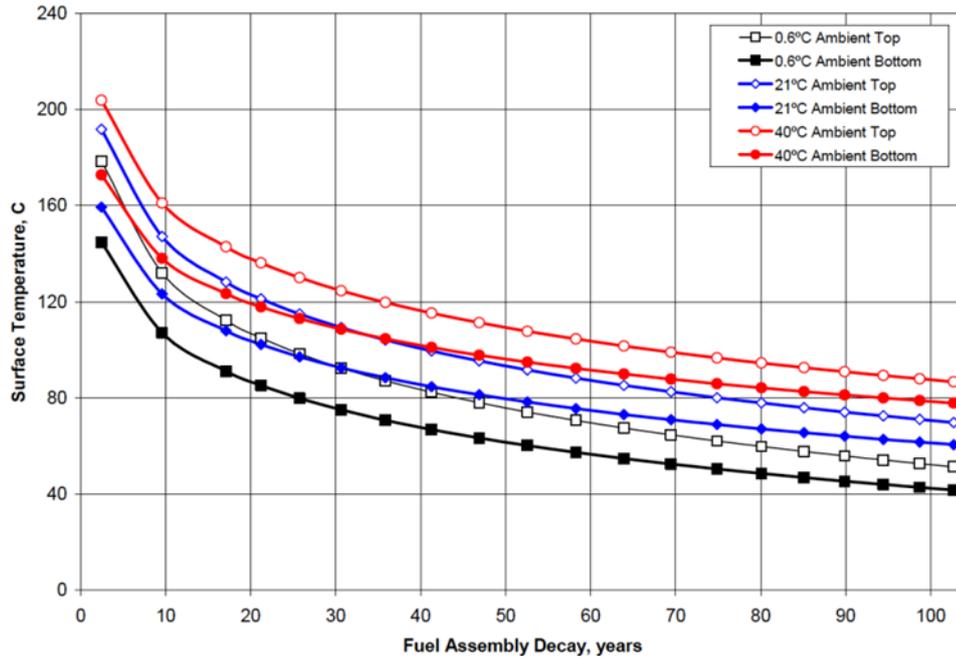


図 6.3-9 キャニスタ表面温度と時間の関係（使用済み燃料用キャニスタの例） [6-3-18]

d. 電位

図 6.3-10 や図 6.3-11 に示すようにステンレス鋼の孔食やすき間腐食、SCC の発生は電位依存性がある。孔食やすき間腐食については基本的にある電位以上に発生領域があるが、SCC の場合は活性態/不動態遷移域付近の電位領域に発生する領域がある。湿潤大気中での応力腐食割れのデータは電位の影響が考慮されていない場合が多いが、照射環境では液膜の水の放射線分解による H_2O_2 の生成により電位が上昇する可能性があり（図 6.3-12）、加速要因となりうる。また、塩分を含むと H_2O_2 が放射線分解で生成しやすいというデータもある（図 6.3-13）。

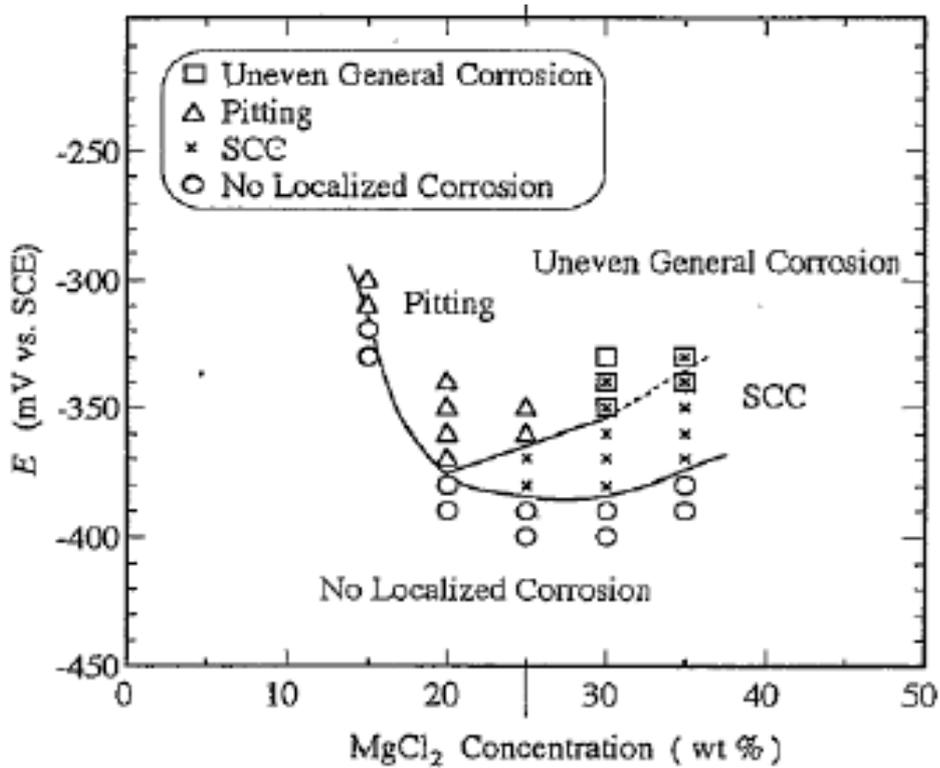


図 6.3-10 SUS304 の孔食と SCC の発生におよぼす電位の影響[6-3-19]

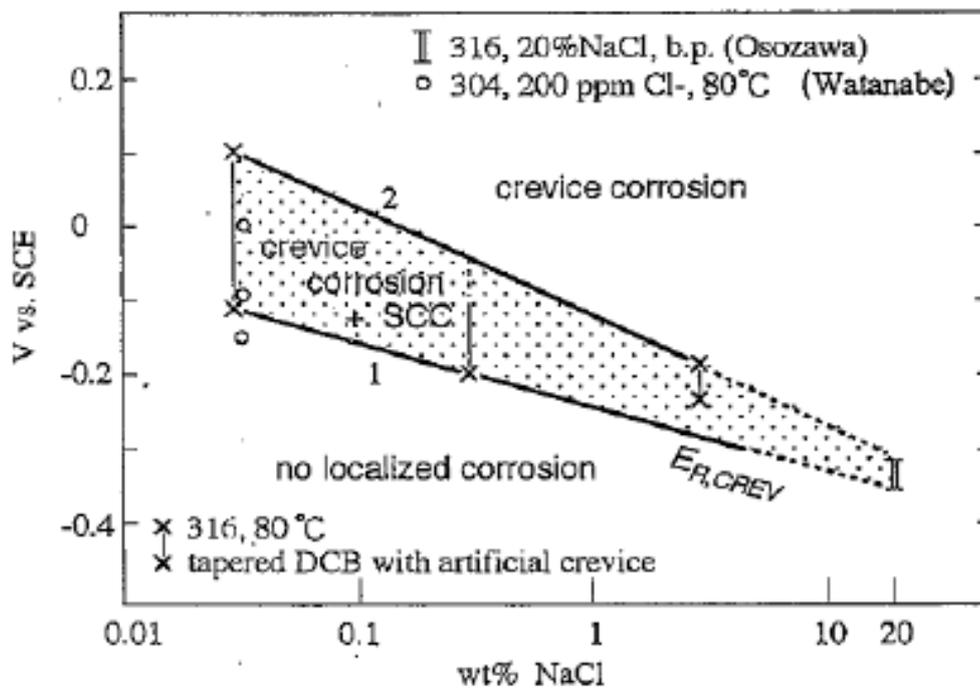


図 6.3-11 ステンレス鋼のすき間腐食と SCC の発生に及ぼす電位の影響[6-3-19]

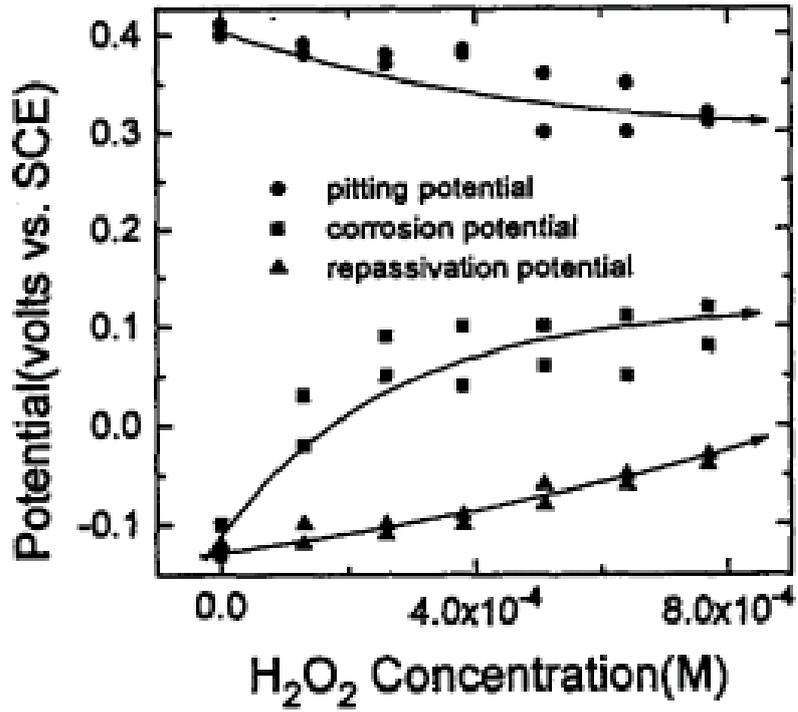


図 6.3-12 H₂O₂ 量による孔食電位と再不動態化電位の変化[6-3-20]

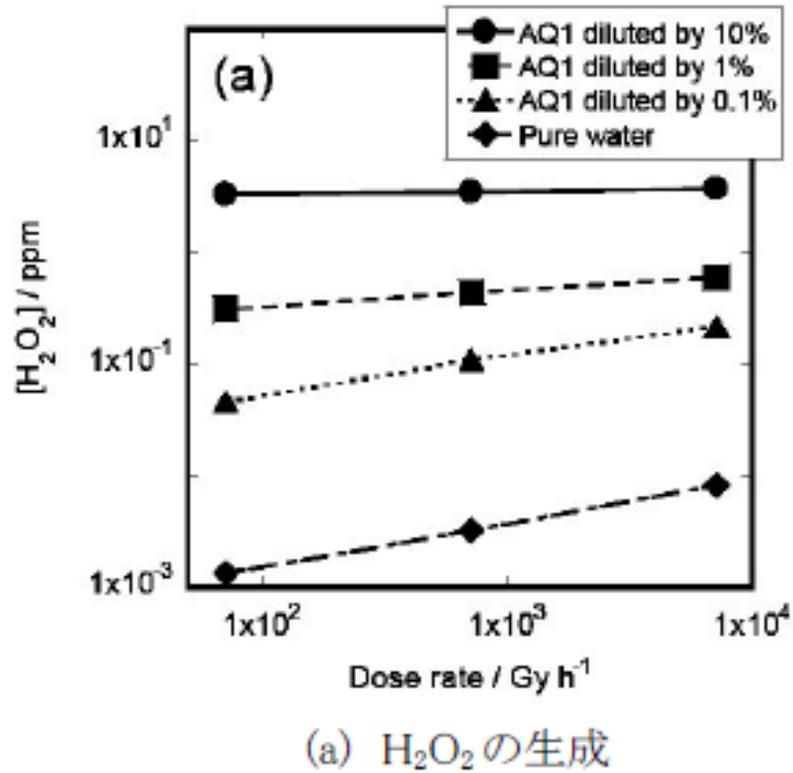


図 6.3-13 各種希釈率の模擬海水のラジオリシス解析結果[6-3-11]

e. 照射量

使用済燃料用のキャスク表面のガンマ線の線量分布の例を図 6.3-14 に示す。使用済燃料用のキャスクの外表面よりも燃料デブリ収納管キャニスタ外面の照射量は大きくなる可能性があり、図 6.3 13 に示すとおり、照射量が多いほど放射性分解による酸化性化学種による電位上昇の影響が大きくなり、照射に起因した腐食リスクが高くなる可能性がある。

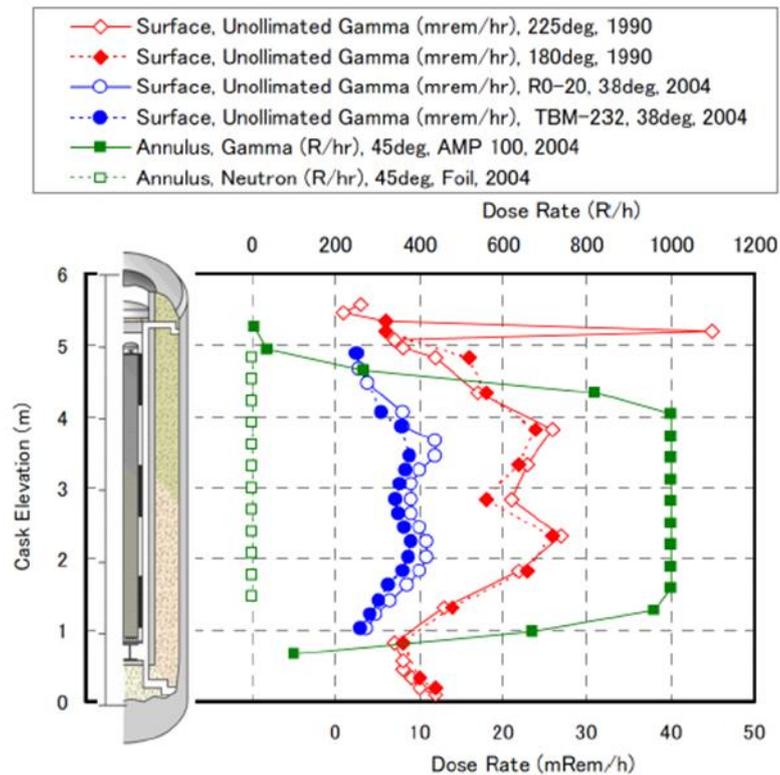


図 6.3-14 キャニスタ表面のガンマ線照射量の例（使用済燃料用キャニスタの例） [6-3-20]

f. 鋭敏化度

キャニスタは収納缶を挿入後、溶接により最終封入する予定であるが、溶接により熱影響部が鋭敏化する可能性がある。図 6.3-15 に示すとおり、鋭敏化の指標となる再活性化率が 5% 以上で応力腐食割れの感受性が増加する傾向がある。

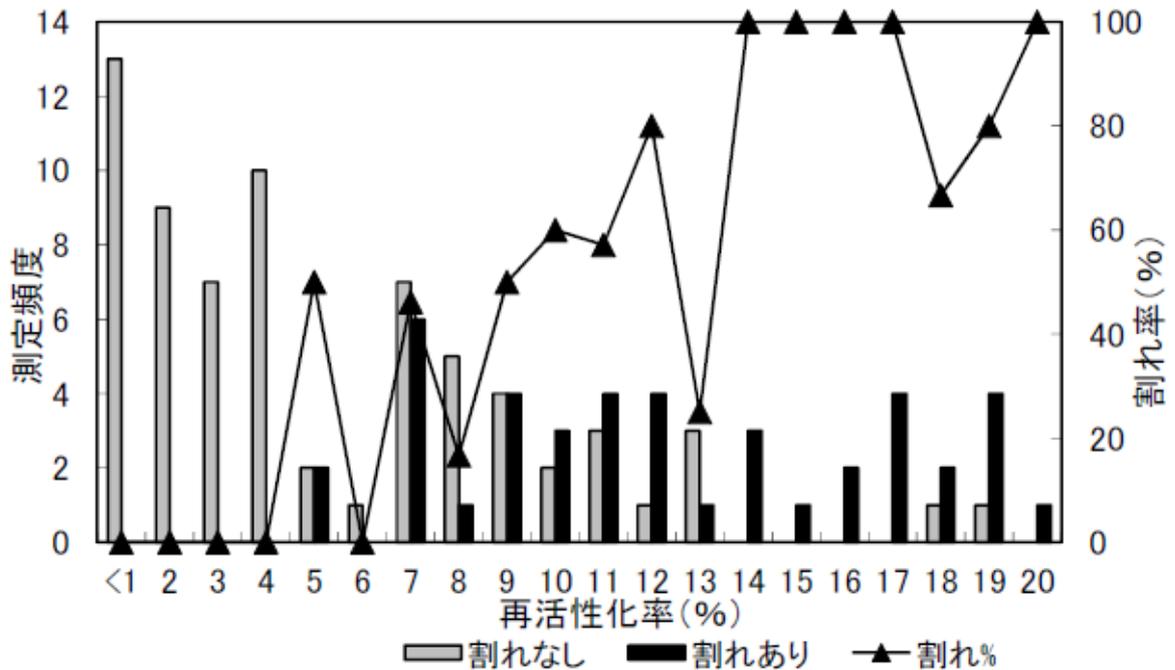


図 6.3-15 鋭敏化度（再活性化率）と応力腐食割れ発生率[6-3-21]

(2) 収納缶（キャニスタ）内面

収納缶も燃料デブリに海水由来の塩化物等が含まれる可能性があり、かつ水分を完全に除去できない可能性があることから、キャニスタと同様の腐食リスクが考えられる。一方、以下のように収納缶特有のリスクも考えられる。

a. 燃料デブリとの接触による影響

乾式貯蔵における湿潤大気環境では金属表面には液膜が形成され、水の放射線分解により生成される H₂O₂ により、図 6.3 16 に示した H₂O₂ の酸化還元電位付近まで電位が引き上げられる可能性がある。燃料デブリと接している場合、これらの成分も酸化還元反応に寄与する可能性がある。燃料デブリは Zr や U の酸化物等から構成されているものと予測されており、その他、Pu や FP を含む可能性がある。図 6.3 17 に U/ H₂O 系の電位 pH 図を、図 6.3 18 に Zr/ H₂O 系の電位 pH 図を、図 6.3 19 に Pu/ H₂O 系の電位 pH 図を示した。主成分である U や Zr の酸化物は H₂O₂ の酸化還元電位相当以下であり、H₂O₂ の酸化還元電位を最大の電位として想定しておけば保守的である。Pu の酸化物の酸化還元平衡電位は H₂O₂ の酸化還元電位よりも高い。米国ではプルトニウム含有物質（PuO₂ や塩を含む）の保管容器としてステンレス鋼

製の容器が考えられており、長期の健全性を検討した研究例がある。その中で、模擬環境中でのステンレス鋼の孔食の進展が検討されており、極値統計解析の結果、接触面では約 36～56 年で保管容器の板厚 1.6mm を貫通すると見積もられている (図 6.3-20)。その他の FP の中でも酸化性の高い化学種が存在する可能性があるが、濃度が低いためにその影響は限定的であると考えられる。ただし、液膜中で局部的に高い濃度となる可能性も含めて検討が必要である。

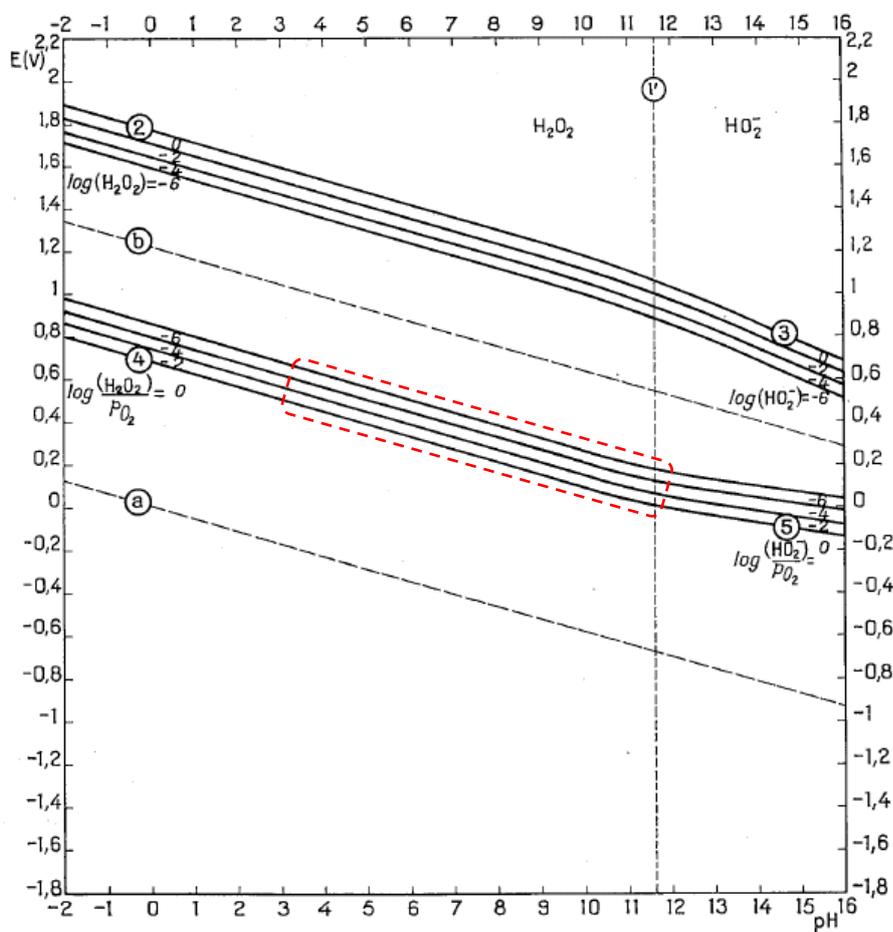


図 6.3-16 H_2O_2 の電位 pH 図 (25°C) [6-3-22]

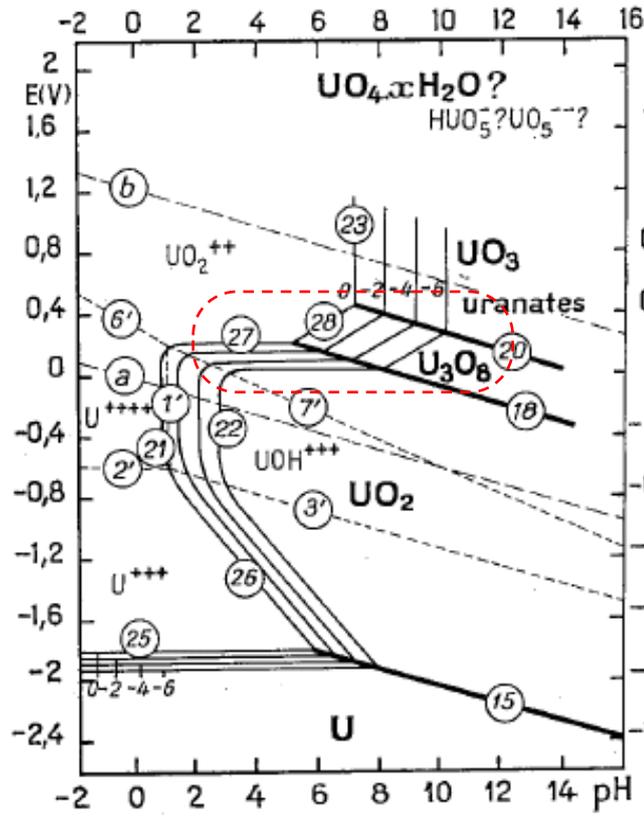


図 6.3-17 U/H₂O 系電位 pH 図 (25°C) [6-3-22]

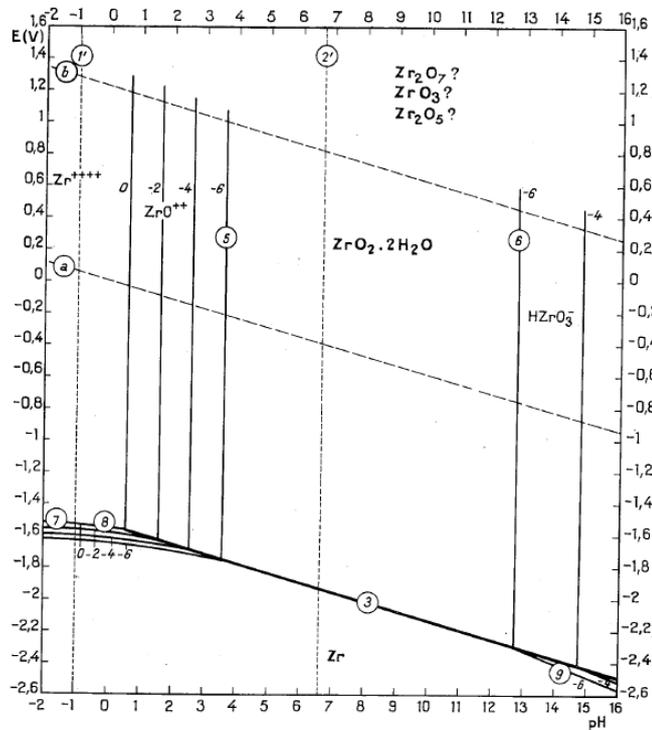


図 6.3-18 Zr/H₂O 系電位 pH 図 (25°C) [6-3-22]

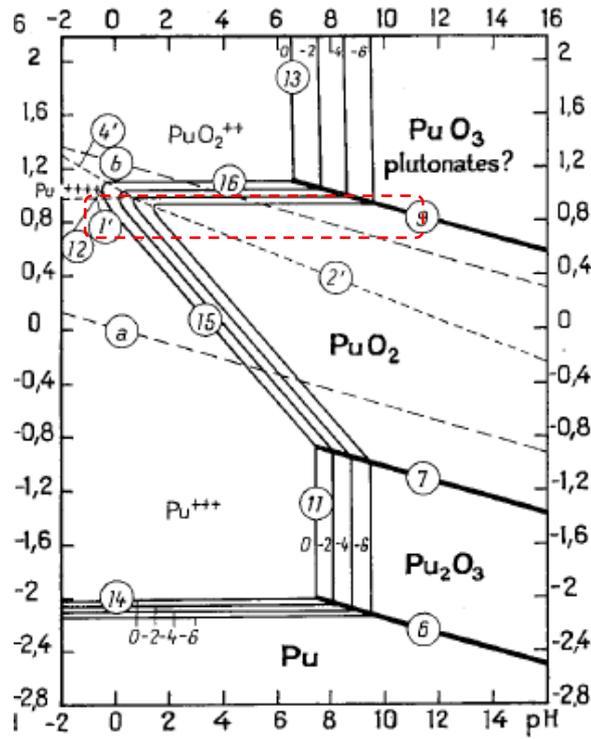


図 6.3-19 Pu/H₂O 系電位 pH 図 (25°C) [6-3-22]

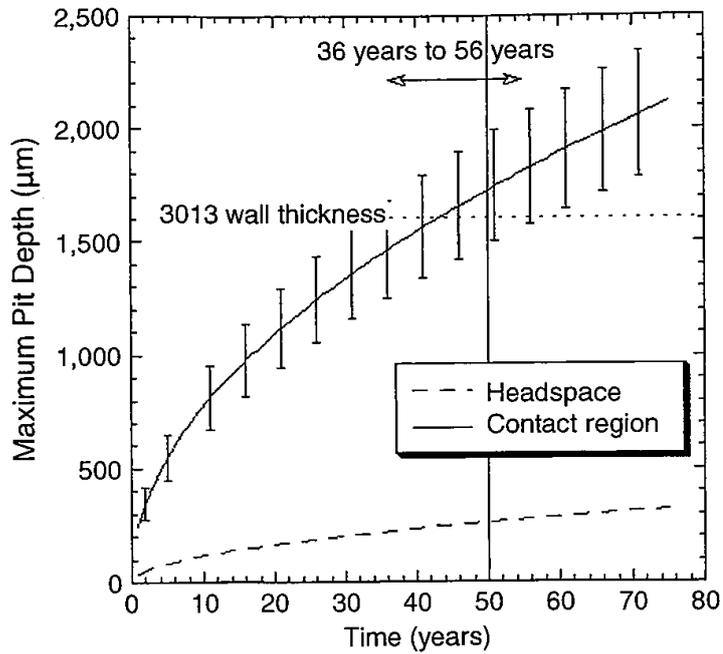


図 6.3-20 Pu 含有物質保管容器の孔食進展極値統計解析結果 [6-3-23]

b. 燃料デブリ中の MCCI 反応物による影響

MCCI 反応により、燃料デブリ中にはケイ酸塩やカルシウム成分が含まれている可能性がある。ケイ酸塩は腐食に対して抑制的に働く場合が多く、影響は小さいと考えられる。一方、カルシウムが塩化物となった場合、図 6.3-8 に示すように SCC 発生リスクのある相対湿度の領域を広げる可能性が考えられる。一方で、コンクリート間隙水や接触水は通常 pH11~13 のアルカリ性を示すため、MCCI 反応物と接した液膜の pH も高くなる可能性があり、鉄基材料にとっては防食的に働く可能性が考えられる。

c. 冷却水成分による影響

燃料デブリとともに収納缶に入る可能性のある冷却水成分として、臨界防止のための溶解性中性子吸収剤（五ホウ酸ナトリウムが主候補として検討されている）や鋼材の腐食抑制のための防錆剤成分がある。これらは鋼材の腐食に対しては抑制的に働くため、影響は小さいと考えられる。

d. 温度

キャニスタ外表面よりも燃料デブリ収納缶のほうが、温度条件が高く、腐食リスクが相対的に高くなる可能性がある。

e. 照射量

使用済燃料用のキャスクの外表面よりも燃料デブリ収納缶内面の照射量は大きくなる可能性があり、照射に起因した腐食リスクが高くなる可能性がある。

a. 水素発生量

水の放射線分解により発生する水素が収納缶内に蓄積していった場合、水素濃度の増加および圧力の上昇により水素ガス分圧が上昇することが予想される。気相側の水素ガス分圧が上昇すると金属中に溶解する水素が増加し（シーベルトの法則）、材料を脆化させる可能性がある（水素脆化）。図 6.3-21 に金属中の溶解水素濃度（at%）と 304 ステンレス鋼の機械特性（応力ひずみ線図）を示す。金属中の溶解水素濃度が高くなるほど、より脆性的になることがわかる。なお、図 6.3-22 に示すとおり、水素脆化感受性は鋼種により異なる（縦軸の

$\epsilon_f(H_2)/\epsilon_f(Air)$ が小さいほうが水素脆化感受性が高い) ほか、金属組織や硬さ、ノッチの有無など形状の影響によって変化する。

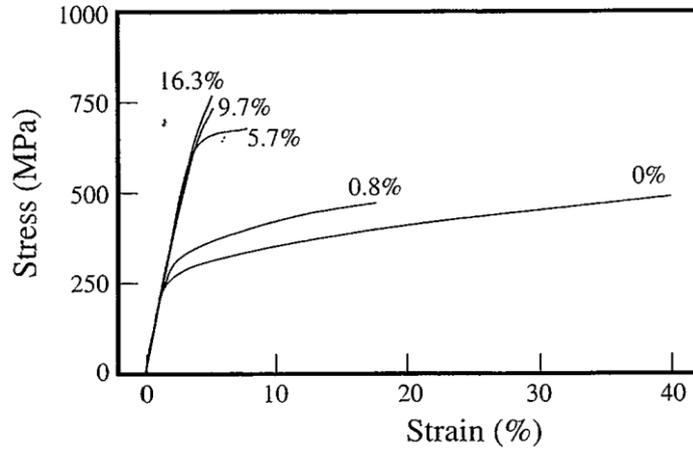


図 6.3-21 ステンレス 304 鋼の水素吸収量と機械特性の変化[6-3-22]

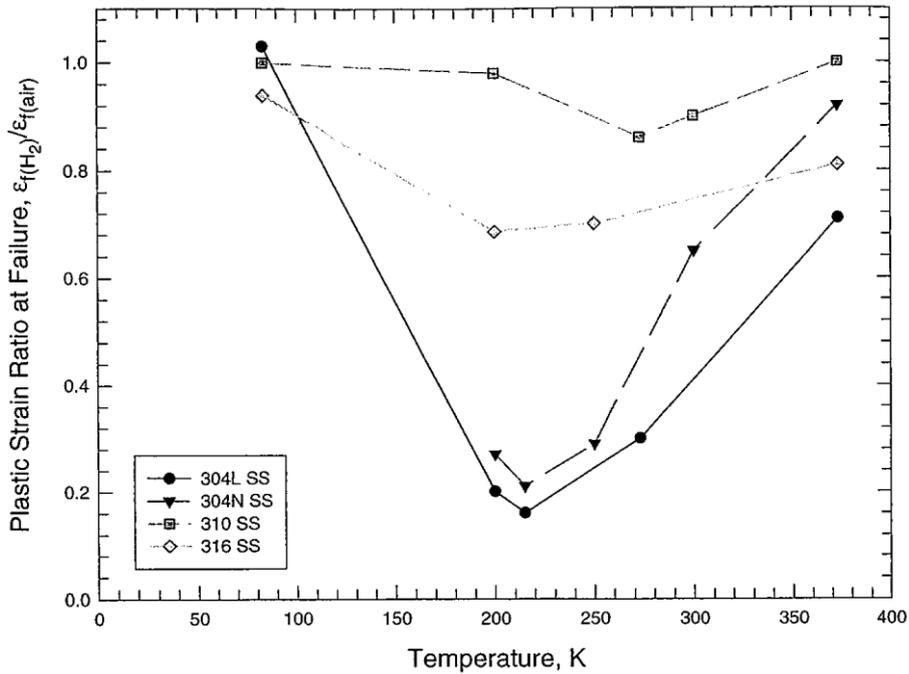


図 6.3-22 各種ステンレス鋼の水素脆化感受性と温度の関係[6-3-22]

6.3.5 燃料デブリ収納缶の健全性評価

6.3.5.1 キャニスタ外面

燃料デブリ収納缶のキャニスタ外面側は基本的にはコンクリートキャスクのステンレス鋼キャニスタの健全性評価を踏襲できるものと考えられる。すなわち、塩分を含む大気中における局部腐食と局部腐食起因の応力腐食割れ感受性を評価するものである。図 6.3-23 にコンクリートキャスクのキャニスタにおける応力腐食割れの評価ロジックを示した。また、図 6.3-24 に評価例を示す。燃料デブリ収納缶では温度や照射量が異なる可能性があるが、これらの既往の評価データやロジックが流用できるものと考えられる。

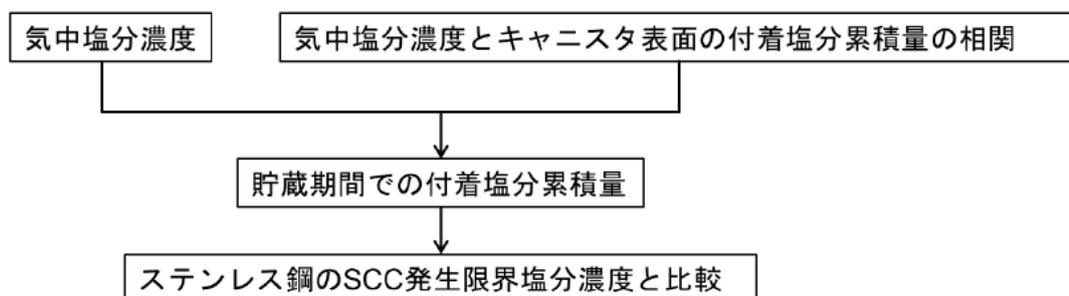


図 6.3-23 ステンレス鋼キャニスタの応力腐食割れの発生評価ロジック [6-3-26]

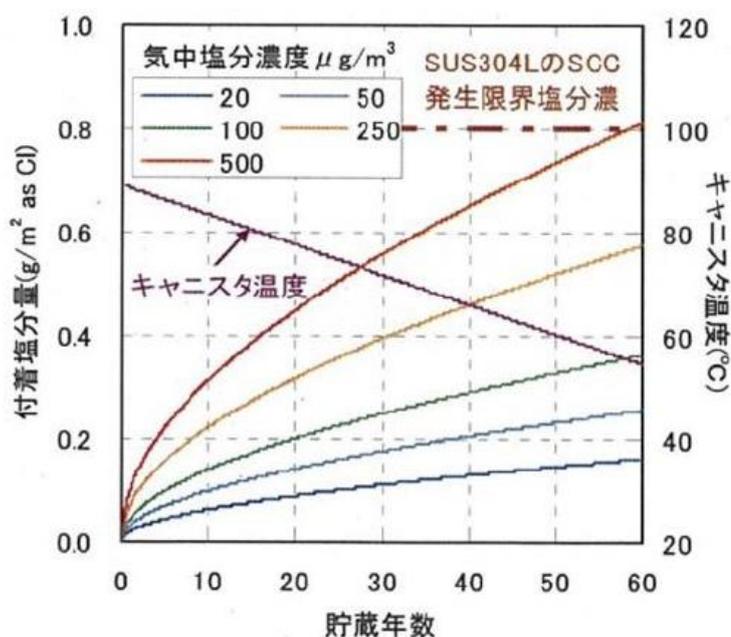


図 6.3-24 ステンレス鋼キャニスタの応力腐食割れの発生評価例 [6-3-26]

6.3.5.2 収納缶内面

収納缶内面も基本的には湿潤大気中における局部腐食や応力腐食割れを評価する必要があるが、外面側と異なり、経時的に付着塩分量が増加していくのではなく、初期に燃料デブリに付随して持ち込まれた塩分量で評価することになる。また、内面では水分の放射線分解により水素の発生、水素ガス分圧の上昇が予想されるが、爆発限界以下の濃度以下に維持するために、気相部のパージや触媒の導入が検討されていることから、水素脆化については評価外としてよいと判断される。燃料デブリ収納缶内面の健全性評価において考慮すべき点を以下に抽出した。

① 燃料デブリ成分による電位上昇の可能性

燃料デブリ成分が不確定であるため、広い電位領域をとることも想定して、電位に対する局部腐食（孔食、すきま腐食）や局部腐食を起点とした応力腐食割れ感受性を評価する必要がある。

② 燃料デブリとともに入る可能性のある海水成分の影響

燃料デブリと共に入る海水成分は湿潤大気環境の乾湿繰り返し条件で濃縮して高濃度になる可能性がある。

③ 燃料デブリとともに入る可能性のある防錆剤・中性子吸収剤の影響

防錆剤、中性子吸収剤の影響により、局部腐食や応力腐食割れの感受性領域が抑制側に变化する可能性がある。

④ 燃料デブリに含まれる MCCI 生成物による影響

MCCI やコンクリート成分が含まれた場合、液膜中の pH が上昇する可能性があり、局部腐食や応力腐食割れの感受性領域が抑制側に变化する可能性がある。

6.3.6 試験計画案策定

燃料デブリ収納缶特有の健全性評価に資するデータを取得するために、試験計画案を策定した。

6.3.6.1 燃料デブリ接触液膜模擬環境での局部腐食感受性評価

燃料デブリと接した液膜環境は 6.3.5.2 項に示したとおり、不確定要素を多く含み、幅広い液性を取り得る。そこで、収納缶で起こり得る範囲で環境条件をパラメータとして局部腐食の感受性領域を試験により明確にする。塩化物起因の応力腐食割れは孔食やすきま腐食等の局部腐食を

起点として起こるため、孔食やすき間腐食の発生の指標となる孔食電位及び再不動態化電位を測定することとする。装置の概要図を図 6.3-25 に示す。

① 供試材料：SUS304 鋭敏化材、 SUS316L

② 試験条件（パラメータ）

-塩化物濃度：3 水準程度

-防錆剤添加：有無

-中性子吸収剤添加：有無

-コンクリート接触成分：2 水準程度

-温度条件：3 水準程度

③ 評価項目

-孔食電位

-すきま腐食再不動態化電位

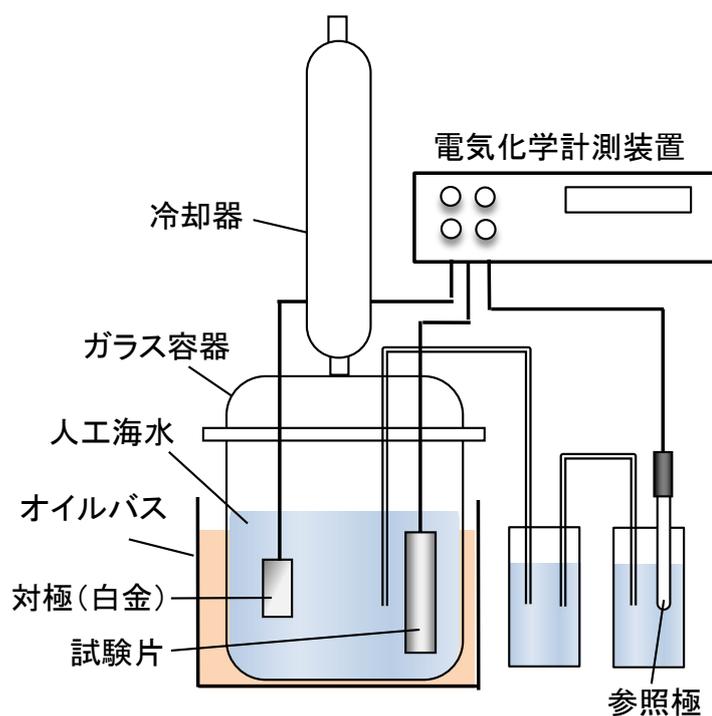


図 6.3-25 電気化学試験装置図

6.3.6.2 燃料デブリの接触を考慮した SCC 感受性評価試験

照射影響および酸化性の燃料デブリ成分の存在により、電位が上昇し、通常の付着塩環境よりも局部腐食感受性や局部腐食起因の応力腐食割れ感受性が高まる可能性がある。したがって、このような酸化性雰囲気模擬した付着塩環境における SCC 試験を実施する。4点曲げ試験片および治具例を図 6.3-26 に示す。

① 供試材料：SUS304 鋭敏化材、SUS316L

② 試験条件（恒温恒湿度）

-塩分付着量：3 水準程度

-酸化性化学種の付着：有無

-温度/湿度条件：3 水準程度

-応力負荷：4点曲げ試験（試験時間：2000 時間）

0.2%耐力相当、0.2%耐力×1.5 倍相当

③ 評価項目

-割れ発生有無、割れ発生時間、孔食発生有無



図 6.3-26 4点曲げ試験片および治具例

6.3.7 参考文献リスト

- [6-3-1] 国際廃炉研究開発機構 (IRID) : 平成 26 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリ収納・移送・貯蔵技術の開発)」進捗状況説明資料 (2015)
- [6-3-2] TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis, DOE/SNF/REP-084 (2003)
- [6-3-3] 鷺谷忠博, 荻野英樹, 高野公秀, 矢野公彦, 鍛冶直也, “燃料デブリの特性に関する研究概要,” 著: 日本保全学会 第 12 回学術講演会 (2015)
- [6-3-4] 深谷祐一, 第 60 回材料と環境討論会講演集, 腐食防食学会, A-101 (2013).
- [6-3-5] 東京電力株式会社, “柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉 火災防護について,” 東京電力株式会社 (2014)
- [6-3-6] EL-SAYED A. HEGAZY, TADAO SEGUCHI, SUEO MACHI, “Radiation-Induced Oxidative Degradation of Poly(vinyl Chloride),” Journal of Applied Polymer Science, 第 卷 26, p. 2947 (1981)
- [6-3-7] 日本原子力研究開発機構, 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る廃止措置及び環境回復への原子力機構の取組み (2015 年版), 日本原子力研究開発機構 (2015)
- [6-3-8] 国際廃炉研究開発機構 (IRID) : 「燃料デブリ臨界管理技術の開発」
- [6-3-9] 国際廃炉研究開発機構 (IRID) : 「压力容器/格納容器の健全性評価技術の開発」
- [6-3-10] 独立行政法人日本原子力研究開発機構「リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備長期健全性等試験のうち実環境下でのキャニスタの腐食試験等) 事業」平成 25 年度報告書 (2014)
- [6-3-11] 独立行政法人日本原子力研究開発機構「リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備長期健全性等試験のうち実環境下でのキャニスタの腐食試験等) 事業」平成 25 年度報告書 (2015)
- [6-3-12] 元田慎一, 篠原正, 鈴木揚乃助, 辻川茂男, “海洋性大気に曝露したステンレス鋼の発錆におよぼす付着海塩量と相対湿度の影響”, 材料と環境, 50, pp.162-169 (2001)
- [6-3-13] 大中紀之, “Q&A ステンレス鋼の大気腐食割れ”, 材料と環境, 42, pp.604-605 (1993)
- [6-3-14] 篠原正, 押川渡, 元田慎一, “ACM センサによる環境腐食性評価”, 材料と環境, 54, pp.375-382 (2005)
- [6-3-15] 庄司三郎, 大中紀之, 古谷保正, 斉藤隆, “ステンレス鋼の大気腐食割れに及ぼす湿度の影響、防食技術, 35, p.559 (1986)

- [6-3-16] 庄司三郎, 大中紀之, “室温におけるステンレス鋼の大気腐食割れに及ぼす湿度および塩化物の種類の影響、防食技術, 38, pp.92-97 (1989)
- [6-3-17] 「腐食・防食ハンドブック」腐食防食協会
- [6-3-18] A. Machiels, ” Climatic Corrosion Considerations for Independent Spent Fuel Storage Installations in Marine Environments”
- [6-3-19] 辻川茂男, “オーステナイトステンレス鋼の塩化物応力腐食割れにおけるすきま腐食の役割”, 材料と環境, 47, pp.2-14 (1998)
- [6-3-20] L. H. Song, L. S. Kim, “Effect of H₂O₂ on the corrosion Behavior of 304L Stainless Steel” , Journal of the Korean Nuclear Society, 27(4), p.453 (1995)
- [6-3-21] 中原正大, 高橋克, “化学工場におけるオーステナイト系ステンレス鋼応力腐食割れ事例の研究”, 腐食防食’ 86, p.213 (1986)
- [6-3-22] M. Pourbaix, “Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions” (1963)
- [6-3-23] R. S. Lillard, D. G. Kolman, M. A. Hill, M. B. Prime, D. K. Veirs, L. A. Worl, P. Zapp, “Assessment of Corrosion-Based Failure in Stainless Steel Containers Used for the Long-Term Storage of Plutonium-Based Salts” , Corrosion, 65(3), pp.175-186 (2009)
- [6-3-24] D. G. Ulmer, C. J. Alstetter, “Hydrogen Effects on Material Behavior” , Minerals Metals and Material Society, p.421 (1990)
- [6-3-25] G. R. Caskey, “Hydrogen Degradation of Ferrous Alloys” Noyes Publications, p.822 (1985)
- [6-3-26] 白井孝治, 三枝利有, 笹原昭博, 服部隆利, 松村卓郎, S. L. Morton, “15年間貯蔵されたVSC-17型コンクリートキャスクの経年変化実測試験”, 電力中央研究所報告:N08057 (2009)

7. 課題の整理及び試験計画の策定

7.1 課題の整理

表 7.2-2 に真空乾燥、臨界安全、水素ガス生成及び腐食について本調査で得た主要な結果とそれらを踏まえた規制審査で注意すべき事項を抽出した、

(1) 事故事象の選定

事故事象の選定は、3.2 項にて実施している。

(2) 公衆及び従事者の安全に及ぼす影響

公衆及び従事者の安全に及ぼす影響は、3.2 項にて実施している。

7.2 試験計画の策定

表 7.2-2 に真空乾燥、臨界安全、水素ガス生成及び腐食に対する課題と対応（試験項目）を合わせて記載した。各試験計画の詳細は、各々各章に記載したとおりである。概略工程を表 7.2-1 に示す。

表 7.2-1 概略工程

	1 カ年	2 カ年	3 カ年
1. 収納缶に係る真空乾燥試験			
収納缶製作	製作設計		
		製作	
真空乾燥装置	装置設計		
		製作	
小型試験	試験/試験後のシュミレーション		
実規模大真空乾燥試験		▽装置据付・調整	
		試験/試験後のシュミレーション	
			評価
2. 臨界安全	解析計画		
		パラメータスタディ	
		管理基準の 検討	
3. 水素ガス生成評価試験			
試験装置	装置設計		
水素ガス生成試験		製作	
		試験	
		管理基準の 検討	
4. 収納缶/キャニスタに係る 腐食・SCC試験			
試験装置	装置設計		
腐食/SCC試験		製作	
		試験	試験（長期試験）
			管理基準の 検討

表 7.2-2 調査結果の概要とそれを踏まえた規制審査上の注意事項ならびに課題と対応について (1/2)

評価項目	調査結果の概要	規制審査上の注意事項	課題	対応案 (試験計画)
(1) 真空乾燥	<p>燃料デブリ収納缶の真空乾燥システムの概念設計を行い、現在の知見から適当な仮定を置いて乾燥特性を予測した。</p> <p>約 25h で収納缶内の水量を 5kg 程度まで減らせる結果を得た。</p>	<p>①真空乾燥時の安全管理</p> <p>1) 臨界安全 満水状態が k_{eff} 最大になるとは断定できないので、真空乾燥過程でとり得る水量、燃料デブリ形状・配置を考慮して未臨界性を評価する必要がある。</p> <p>2) 放射性物質放出 (被ばく管理) 燃料デブリから放出されるガス及び微粉状の放射性物質を評価し、さらに真空乾燥過程での監視法を整備する必要がある。 また、真空乾燥過程で放出される放射性物質には燃料デブリに混在する健全燃料棒の破損による可能性も考慮する必要がある。</p> <p>②残水量の評価、判定法 真空乾燥後の収納缶内の残水量は、貯蔵時の臨界安全や収納缶内面腐食 (SCC) の観点から制限値を決めなければならない。 また、真空乾燥の残水量の評価法も必要である。真空乾燥で計測されるのは除去される水分量なので、残水量を把握するには、真空乾燥前 (脱水後) に収納缶に含まれる水量を予測する必要がある。</p>	<p>①真空乾燥時の臨界安全評価法</p> <p>②真空乾燥時の放射性物質管理法</p> <p>③真空乾燥要領と判定基準</p> <p>1) 燃料デブリの乾燥特性の把握 2) 燃料デブリの熱物性の把握 3) 初期水量の予測</p>	<p>・真空乾燥時臨界解析</p> <p>・真空乾燥試験 (実規模試験) (試験計画は 4.2 項参照)</p> <p>・真空乾燥試験 (小型試験、実規模試験) (試験計画は 4.2 項参照)</p> <p>・実燃料デブリ調査</p>
(2) 臨界安全	<p>TMI-2 の例を参考に、収納缶の仕様を設定し臨界安全を確保する要件について検討した。</p> <p>①収納缶仕様 210mm 角の B-SUS セル (肉厚 6mm) を持つ内径 320mm (肉厚 6mm) の SUS 円管</p> <p>②未臨界性</p> <p>1) 収納缶単体 (水中孤立系) $k_{eff}=0.854 < 0.95$ で未臨界維持できる。</p> <p>2) ボールト貯蔵体系 ・収納缶 12 基を装荷したキャニスタをピッチ 3.5m で正方配列 ・収納缶の B-SUS セル内側を満水として、セル外側と円管の間の空隙をボイドとすると、$k_{eff}=1.12 > 0.95$ で臨界となる。</p> <p>3) 収納缶水量制限値評価 ②で $k_{eff}=0.95$ となる収納缶内 (B-SUS セル内側) の水量を次の 2 つのモデルでサーベイした。 ・下部堆水モデル : 水量=13.8kg ・水一様分布モデル : 水量=80.2kg</p>	<p>①収納缶を群配列して乾式貯蔵する場合の臨界安全 燃料デブリ装荷性の観点から中性子吸収材を収納缶の外周部に置く設計を採用する場合は、湿式貯蔵よりも臨界安全上厳しくなる可能性がある。燃料デブリ収納部の水量を制限するか、あるいは中性子吸収材の外側 (隣接収納缶との間含む) に中性子減速材を置くことが必要になる可能性がある。</p> <p>②燃料デブリ収納缶の臨界安全評価法 以下を考慮した適切な (保守側な結果を与える) 臨界解析を行う必要がある。 ・燃料デブリの形状、配置の多様性 ・MCCI 生成物やコンクリート片、あるいは構造物等 (ステンレス鋼、酸化ジルコニウム等) の反応度効果 (存在比や形状、配置によっては減速材や反射体効果により正の反応度効果をもたらす可能性有) ・水分布のモデル化 ・UO_2 や MCCI 生成物等の形状、配置の多様性と合わせて水分布の多様性 (局部集積、均一分布 他) の反応度に及ぼす効果 ・キャニスタ内収納缶の水量不均一効果 ・キャニスタ姿勢 (横置きと縦置き) の影響</p>	<p>①k_{eff} に影響する諸因子の影響確認</p> <p>・燃料デブリ形状、寸法不均一性 ・MCCI 生成物、コンクリート片構造物等の混入効果 ・格子均質化の影響 ・水分布の効果 ・キャニスタ内収納缶の水量不均一効果 ・キャニスタ姿勢 (横置きと縦置き) の影響</p>	<p>・貯蔵時臨界解析 (6.1 項参照)</p>

表 7-1 調査結果の概要とそれを踏まえた規制審査上の注意事項ならびに課題と対応について (2/2)

評価項目	調査結果の概要	規制審査上の注意事項	課題	対応案 (試験計画)
(4) 水素ガス生成	<p>収納缶内の残水の放射線分解による水素ガス生成量を、既存知見を用いて評価した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 収納缶内空気相体積率 90% ・ 水素濃度は約 100 時間で爆発点 (水素濃度 4%) を超える。 	<p>① 収納缶を密封設計とする場合は、残水量を限りなくゼロに近づけない限り、貯蔵中 (~60 年) に水素濃度が爆発点 (濃度 4%) を超えることが予想される。すなわち、水素再結合剤 (触媒) を導入しない限り収納缶の密封設計は成立しないと判断される。</p> <p>② 収納缶をパージ設計とする場合でも、パージ頻度や連続パージの場合でも不測の事態により排気通路が閉塞する可能性が考えられるため、精度が高い水素ガス生成量方法を整備しておくことが重要と思われる。</p> <p>③ 水素再結合剤 (触媒) を導入する場合は、その長期的性能を確認する必要がある。(長期使用による触媒表面積の縮小による触媒活性低下が考えられる。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水の放射線分解モデルの精緻化 ・ 燃料デブリ混在物 (ケーブルの絶縁物等) の影響 <ul style="list-style-type: none"> ・ 触媒の性能確認 (長期的な触媒活性低下傾向の把握) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素ガス生成試験 (試験計画は、2.1 項参照) <ul style="list-style-type: none"> ・ 触媒試験 (試験計画は、2.1 項参照)
(3) 腐食	<p>(内面腐食)</p> <p>以下の要因による腐食、応力腐食割れ (SCC) が考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 水の放射線分解により生成する H₂O₂ ・ 燃料デブリ中に含まれる酸化 Pu や酸化性 FP ・ 水中の可溶性中性子吸収材 (真空乾燥時の析出の影響=伝熱障害等) 	<p>燃料デブリには、左記のようなステンレス鋼の腐食、SCC を引き起す潜在要因が含まれる可能性があるため、これらの影響を把握しておくことが必要と考えられる。</p>	<p>燃料デブリによる収納缶内面腐食、SCC</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 腐食試験 (試験計画は、6.2 項参照)
	<p>外面腐食</p> <p>コンクリートキャスク (キャニスタ) と同じ (大気応力腐食割れが懸念される。)</p>	<p>コンクリートキャスク (キャニスタ) と同様の注意が必要である。なお、ボルト貯蔵の場合は、キャニスタ (収納缶) がボルト収納間内に保管されるので、直接海塩粒子を含む外気から隔離することも可能。</p>	<p>—</p>	<p>—</p>

8. まとめ

東京電力福島第一原子力発電所1～3号機の燃料デブリを貯蔵するための燃料デブリ専用の貯蔵施設の設置を想定し、キャニスタを用いた乾式貯蔵システムに係る調査を実施するとともに貯蔵システム全体を明確にした。

- ・燃料デブリの特性調査及び設計上の考慮すべき事項（安全機能の考え方、配置、設備、運用様態）をまとめた上で、乾式貯蔵システムの仕様設定を行った。
- ・燃料デブリを収納する収納缶及び収納缶を収納するキャニスタの基本仕様の設定を行い、主要仕様のまとめ及び設定根拠を整理した。
- ・燃料デブリを収納した収納缶の乾燥方法について調査し、真空乾燥システムの仕様をとりまとめ乾燥方法と判定基準の設定根拠を整理した。
- ・主要課題と考えられる未臨界評価、水素ガス生成評価、腐食評価の各安全評価を行い、中性子実効倍率が最大となる燃料デブリ形状や配置をサーベイするとともに、キャニスタの基本仕様を決定した。また、収納缶内に残存する水の放射線分解によって生成する水素ガス量を評価した。さらに、収納缶内の残留水、燃料デブリに含まれるFP及び海水塩分等による収納缶の腐食評価を行った。
- ・成果を踏まえ、燃料デブリの乾式貯蔵の安全確保上、規制要件に係る課題抽出、事故事象の選定及び、試験計画案の策定を行った。

付録-1 燃料デブリ収納缶臨界解析結果の拡散理論計算との比較

1. SCALE 解析値と拡散理論による計算値との比較

収納缶は、その半径が約 10cm 前後と中性子の平均自由行程の数倍程度しかない小さな体系であり、境界面付近の中性子束変化が収納缶全体に及ぶので拡散理論による扱いは誤差が大きい。そのため、精度の高い評価を行うには輸送理論に依らざるを得ない。

それでも、拡散理論のパラメータを適切に調整すると大体の傾向は捉えることが可能である。

SCALE にて計算された収納缶の実効増倍率 (k_{eff}) が、拡散理論によってどの程度の精度で再現できるかを以下に考察した。

① 収納缶単体（水中孤立系）の k_{eff}

収納缶の燃料デブリ+水領域を均質な円柱体系で近似すると拡散理論による k_{eff} は次式で与えられる。(添付 1 参照)

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} / (1 + (1 - \beta) \times MB^2) \quad (1)$$

M : 移動面積 (cm²)

B²: 幾何学的バックリング

$$B^2 = (\pi/H)^2 + (2.405/R)^2$$

H : 円柱高さ (= 収納缶全長)

R : 円柱半径 (= 収納缶等価半径)

β : 収納缶外表面の中性子反射係数 (アルベド)

ここで、R は次式で計算する。

$$R = 2 \times \text{燃料領域の断面積} / \text{燃料領域の内法長さ (平均弦長の 1/2 に相当)}$$

計算体系の寸法を以下に示す。

項目	ケース 1	ケース 2
H(cm)	391	391
a 内面辺長 (cm)	16	21
R 等価半径 (cm)	8	10.5
B ² 幾何学的バックリング (cm ⁻²)	9.04E-2	5.25E-2
M 中性子移動面積 (cm ²)	30※	

※添付 1 参照

β は、高速群と熱群の 2 群で考える。すなわち、

$$\beta = \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{22} + \beta_{21}$$

添え字の 1 は高速群、2 は熱群をあらわす。たとえば β_{11} は収納缶から漏えいした高速中性子が外部で散乱によって高速中性子のまま再び収納缶に入射する確率をあらわす。(以下、同様) β_{21} は明らかにゼロで、 β_{22} もゼロと近似できる。(外周に設けた B-SUS 板で漏えいする熱中性子はすべて吸収されると仮定する。) また、同じく B-SUS 板が外部で熱化されて収納缶に入射する中性子をすべて吸収するとすれば、 β_{12} もゼロとなる。つまり、残るのは β_{11} のみとなる。

$$\beta = \beta_{11} \tag{2}$$

以上の考察から、収納缶外周に設置する B-SUS 板は中性子の漏えい率を増加させる役割を果たすことが理解できる。(完全な吸収板は、熱中性子だけでなく入射する中性子をすべて吸収するものでその場合は、 $\beta=0$ とすればよい。これは、外部を真空とした場合と等価である。) これより、燃料領域の外面に置く中性子吸収材の効果は β という境界条件を導入することで評価できることがわかる。 β_{11} は、B-SUS を考えないで燃料領域の周りを水反射体で囲む体系に拡散理論を用いて計算でき、その値は次のとおり。(添付 1 参照)

$$\beta_{11} = 0.54$$

この値を用いて(1)により収納缶半径 (R) と k_{eff} の関係を計算した。図 1 にその結果を示す。また、SCALE (輸送理論コード) による解析値と比較すると表 1 のようになる。

表 1 収納缶単体 (水中孤立系) の k_{eff} (SCALE と拡散理論の比較)

項目	ケース 1(内面 16cm 角)	ケース 2(内面 21cm 角)
k_{∞} (無限増倍率)	1.53	1.53
k_{eff} (SCALE)	0.668	0.853
k_{eff} (拡散理論)	0.68	0.89

以上のように拡散理論による k_{eff} は、輸送理論解を約 3% Δk 程度の誤差で再現することがわかる。拡散理論の k_{eff} が過大評価しているのは、結局体系からの中性子漏れ量を過小評価しているためである。つまり、収納缶の外部境界付近では中性子の異方性が強いために拡散理論では漏えい量を正しく評価できないことによる。

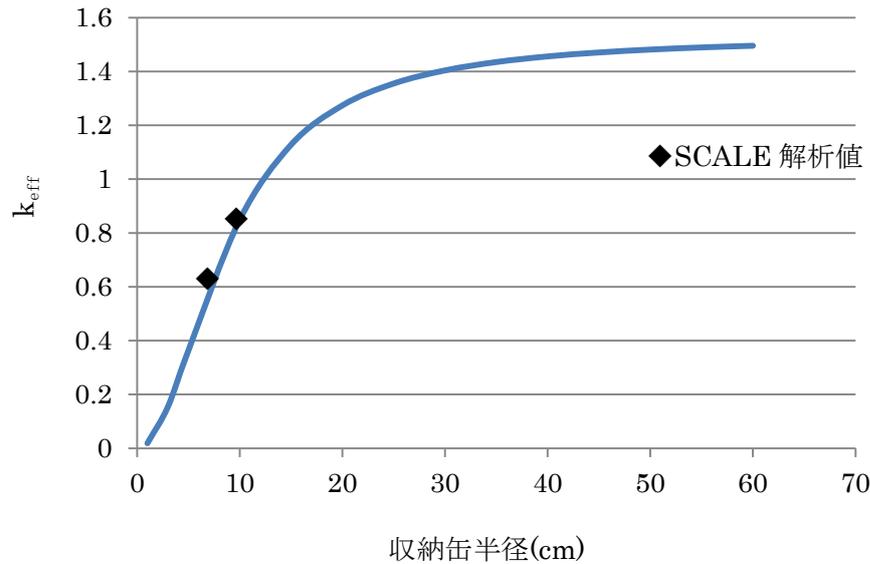


図1 収納缶半径と k_{eff} の関係 (SCALE と拡散理論の比較)

②ボルト貯蔵体系の k_{eff} (収納缶内水量による影響)

収納缶内の水位を下げて水量を減少させた場合の k_{eff} の変化を拡散理論を用いて計算する。

収納缶下部に水が溜まり上部に水が存在しない状態は、水がある領域のみを増倍系と考えて、それより上部は外部（非増倍系）と見なしてもそれほど悪い近似ではない。

つまり、(1)で水位を円柱高さ H と置き換えることで水位低下の影響を B^2 の増加による体系からの中性子漏えい量の増加と考える。

(1)の B^2 を横方向の漏えい成分 Br^2 と軸方向の漏えい成分 Bz^2 に分解し、各々について反射係数 β を導入する。

$$\begin{aligned}
 B^2 &= (1 - \beta_r) \times Br^2 + (1 - \beta_z) \times Bz^2 \\
 &= (1 - \beta_r) \times (\pi/H)^2 + (1 - \beta_z) \times (2.405/R)^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ケース2について、(3)でパラメータ β_r と β_z を調整して、SCALE 計算で求めた k_{eff} と比較した結果を表2に示す。

表 2 収納缶内水位と k_{eff} の関係 (SCALE と拡散理論の比較)

項目	SCALE (輸送理論)	拡散理論
β_r (横方向反射係数)	—	0.77
β_z (軸方向反射係数)	—	0.1
実効増倍率 (k_{eff})		
水位 25cm	0.872	0.856
30cm	0.905	0.923
35cm	0.930	0.969
40cm	0.950	1.000
45cm	0.966	1.024
391cm (満水)	1.120	1.12

ここで、 β_r 、 β_z は、SCALE 計算値と比較的よく合うように適当に調整した値である。

β_r (0.77) が前述の孤立系の計算で用いた値 (0.54) より大きいのは、収納缶が群配列しているため、ある収納缶から漏出する中性子の一部が隣の収納缶に入射するためである。また、 β_z は上部が乾いた UO_2 が充填しているため、小さな値になると考えられる。

図 2 に両者を比較した。ここでも、体系からの中性子漏えい量の評価の違いによる拡散理論と輸送理論の差があらわれている。

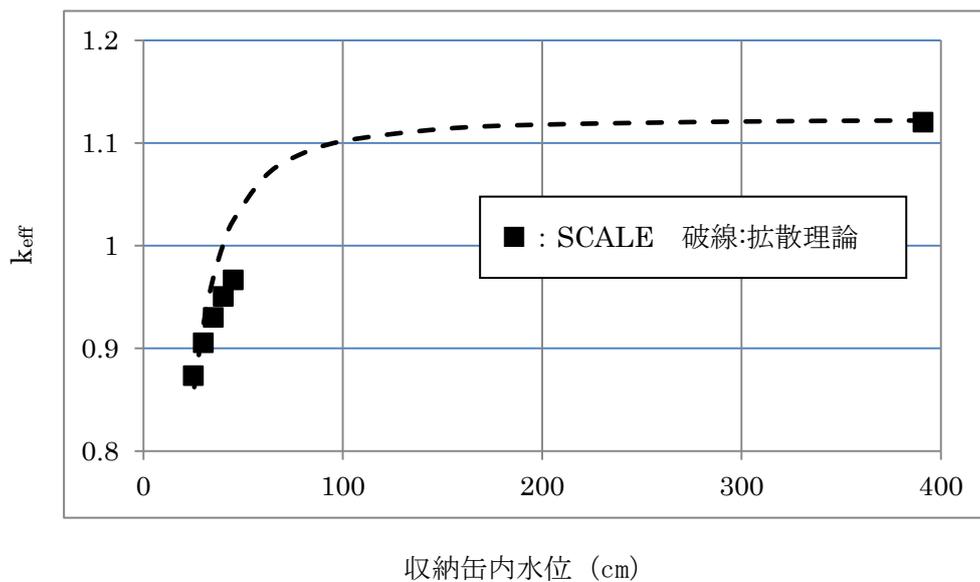


図 2 収納缶内水位と実効増倍率の関係 (SCALE と拡散理論の比較)

2. まとめ

- 燃料デブリ収納缶の k_{eff} について、SCALE 計算（輸送理論）と均質体系での拡散理論による計算値を比較した。両者の間には、数% Δk 程度の差があるが、定性的な傾向は大体一致している。
- 収納缶の外周に設置する中性子吸収材（B-SUS 板）は、収納缶からの中性子漏えいを増加させる効果を持ち、それは収納缶外面の境界条件（中性子反射係数）を適切に与えることで比較的良い精度で評価できる。
- また、ボルト貯蔵での収納缶管群配置体系の k_{eff} についても、収納缶単体での外面境界条件（中性子反射係数）を用いて概略の評価ができることを確認した。

添付1 燃料デブリ収納缶の中性子拡散パラメータ

燃料デブリ収納缶の中性子拡散パラメータ（2群）を導出する。

収納缶を高さ H 、半径 R の円柱でモデル化する。（右図）

（単位は cm）

k_{eff} は、次式で定義される。

$$k_{\text{eff}} = Wf / (Wa + WL) \quad \text{①}$$

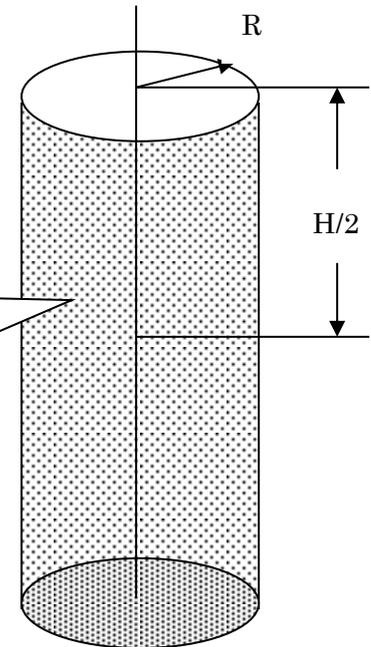
Wf : 核分裂による生成中性子数

Wa : 吸収による損失中性子数

WL : 収納缶から漏出する中性子数

（いずれも単位時間当たり）

燃料デブリ(UO₂)+水
 k_{∞} =無限増倍率



①を次のように変形する。

$$k_{\text{eff}} = Wf / Wa \times 1 / (1 + WL / Wa)$$

$$= k_{\infty} / (1 + WL / Wa) \quad \text{②}$$

$$k_{\infty} = Wf / Wa \quad (\text{無限増倍率})$$

ここで、収納缶が裸(反射体が無い)場合、 WL / Wa は

$$WL / Wa = MB^2 \quad \text{③}$$

となり、②は

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} / (1 + MB^2) \quad \text{④}$$

と書ける。

$1 / (1 + MB^2)$ は、核分裂で発生した中性子が収納缶から漏出しない確率と解釈でき、 B^2 は幾何学的バックリング、 M は中性子移動面積で次式であらわされる。

$$B^2 = (2.405/R)^2 + (\pi/H)^2 \quad \text{⑤}$$

$$M = L_1^2 + L_2^2 = D_1 / \Sigma_1 + D_2 / \Sigma_2 \quad \text{⑥}$$

L_1 : 高速中性子の拡散距離 = D_1 / Σ_1

L_2 : 熱中性子の拡散距離 = D_2 / Σ_2

D_1 : 高速中性子の拡散係数

D_2 : 熱中性子の拡散係数

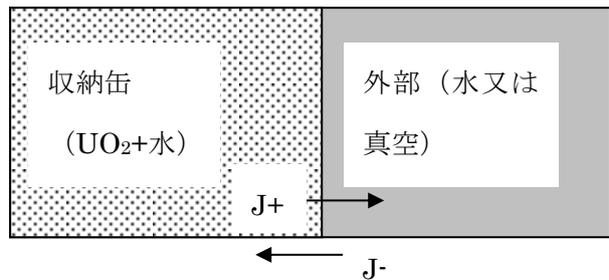
Σ_1 : 高速中性子の吸収+除去 (散乱) 断面積

Σ_2 : 熱中性子の吸収断面積

周りに反射体(水)がある場合は、収納缶から漏出する中性子数 WL は反射体の特性に依存する。これを見積もるために、収納缶 (燃料デブリ+水) と外部 (反射体) の一次元平板体系を考える。

J_+ : 収納缶から外部へ出てゆく中性子数

J_- : 外部で散乱され収納缶に戻る中性子数



J_-/J_+ は反射係数 (アルベド) で、 β であらわす。 β を β_{11} 、 β_{12} に分けてそれぞれ以下に定義する。

β_{11} = 収納缶から漏出した高速中性子のうち、高速中性子のまま収納缶に戻る割合

β_{12} = 収納缶から漏出した高速中性子のうち、反射体で減速されて熱中性子となって収納缶に戻る割合

$$\beta = \beta_{11} + \beta_{12} \quad (7)$$

なお、熱中性子の漏出は無視する。外部が真空の場合は、 $\beta=0$ となる。 $\beta=1$ の場合は、正味の漏出数がゼロで $k_{\text{eff}} = k_{\infty}$ となる。

β_{11} 、 β_{12} は解析的に求めることができ、反射体の厚さが無限に大きい場合は次式であらわされる。

$$\beta_{11} = (1 - 2Dr_1Kr_1) / (1 + 2Dr_1Kr_1) \quad (8)$$

$$\beta_{12} = 4Dr_1Kr_1^2 / ((1 + 2Dr_1Kr_1) \times (1 + 2Dr_2/Kr_2) \times (Kr_1 + Kr_2)) \quad (9)$$

Dr_1 、 Dr_2 : それぞれ高速群、熱群の反射体 (水) の拡散係数

$Kr_1 = \sqrt{(\Sigma_{r1}/Dr_1)}$: Σ_{r1} は、反射体の高速中性子の除去断面積

$Kr_2 = \sqrt{(\Sigma_{r2}/Dr_2)}$: Σ_{r2} は、反射体の熱中性子の吸収断面積

この β を用いて、漏出中性子量を次のようにあらわす。

$$WL^* = WL(1 - \beta) \quad (10)$$

WL : 反射体が無い場合の漏えい中性子数

WL* : 反射体付 (β がゼロでない) の場合の漏えい中性子数

③④⑩から、 k_{eff} は以下のように k_{∞} 、 $B^2(R)$ (収納缶半径) の関数) 及び β によってあらわすことができる。

$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} / (1 + (1 - \beta) B^2 M) \quad \text{⑪}$$

$$B^2 = (2.405/R)^2 + (\pi/H)^2$$

付表 1 に収納缶に適用する上式のパラメータを示す。

付表 1 計算に使用する諸定数

パラメータ	値
H(cm)	400
k_{∞}	1.4 *1
M(cm ²)	30 *2
D_{r_1} (cm)	0.75 *3
D_{r_2} (cm)	0.16[6-1-15]
Σ_{r_1} (cm ⁻¹)	0.03 *4
Σ_{r_2} (cm ⁻¹)	0.02[6-1-15]
β_{11}	0.54
β_{12}	0.15

*1 BWR 使用済燃料輸送容器の安全解析書で用いる $k_{\infty}=1.3$ にデブリの形状効果と被覆管の反応度効果を考慮した。

*2 文献[6-1-15]の BWR 炉心の移動面積= $7.3^2 \approx 60$ を温度補正した値(高温と常温の水密度比 0.7 の 2 乗=0.5 を乗じた)

3 $D=1/(3 \Sigma_{tr})$ $\Sigma_{tr}=\Sigma_t - \mu^ \Sigma_s \doteq \Sigma_s (1 - \mu^*)$ $\Sigma_s \doteq N_0 \times \sigma_{Hs}$
 μ^* (散乱核余弦の平均)= $2/(3A)=2/3$ ($A=1$) $N_0=6 \times 10^{23}/18 \times 2$ $\sigma_{Hs}=20 \times 10^{-24}$
より、 $\Sigma_s=1.33$ $\Sigma_{tr}=1.33(1-2/3)=0.44$ $D=1/(3 \times 0.44) = 0.75$

*4 文献[6-1-15]より、水の τ ($\doteq D_1/\Sigma_1$)= $26 \rightarrow \Sigma_1=D_1/26=0.75/26=0.03$