

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)」

最終報告

平成29年3月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

無断複製·転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

- 1. 全体計画
- <u>1.1 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」の目的と目標</u>

【燃料デブリ収納・移送・保管技術開発の目的】

スリーマイルアイランド原子力発電所2号機(以下、「TMI-2」)では収納缶を使用して燃料デブリの収納・移送・保管作業を実施。

収納作業は、原子炉圧力容器(以下、「RPV」)上部に作業台を設置、炉内で収納缶に燃料デブリを収納。

- ⇒TMI-2と比較した福島第一原子力発電所(以下、「1F」)の特徴
- ・燃料デブリが原子炉一次格納容器(以下、「PCV」)底部(ペデスタル内・外)にまで広がっていると考えられる。
- ・建屋が損壊していること。建屋内は、放射性物質で汚染されていて、高い放射線量の箇所もある。発電所内の収納缶の保管敷地面積も限られる。
- ・炉内に海水が注入された。MCCI反応(コンクリートと溶融炉心が反応)生成物等が含まれるなど、燃料デブリ 性状も異なる。
- 燃料の初期濃縮度、燃焼度が高い。
- ⇒燃料デブリ取り出し工法が大きく制約され、これに伴って収納缶に要求される条件もより詳細、高度となる。 さらに、燃料デブリの性状等も大きく異なるため、TMI-2の収納缶のままでは1F向けに適用不可。 一方で情報が限られており、高線量廃棄物を含めた物量など1F廃炉工事の全体を最適化する視点から、 収納缶設計条件を設定し、知見の更新を踏まえて都度反映することが重要。

(IRIDでは燃料デブリ取り出し工法PJ(以下、「工法PJ」)、燃料デブリ取り出し基盤技術PJ(以下、「基盤PJ」)、燃料デブリ性状把握PJ(以下、 「デブリ性状把握PJ」)、燃料デブリ臨界管理PJ(以下、「臨界管理PJ」等の関連PJとの連携体制を整備)

本事業は、IRIDの関連PJから収納缶PJへの要求条件(インプット条件)、収納缶PJから関連PJへの要求条件 (アウトプット条件)を関連PJと連携して調整・設定することで1Fの実情に適合した燃料デブリ収納缶及び収納 缶取扱い技術を開発する。

【開発全体の目標】

平成33年の燃料デブリの取り出しへ向けて、合理的な燃料デブリの収納・移送・保管方法を確立する。

1. 全体計画

1.2 ロードマップとの関係

平成33(2021)年中の初号機の燃料デブリの取り出しに向け、以下の工程で開発する。



廃炉・汚染水対策チーム会合 第39回事務局会議(平成29年2月23日) 資料に基づき見直し

2. 平成27~28年度実施内容の概要

【目的】

- 計画されている燃料デブリ取り出しモックアップ試験のプロトタイプとなる収納缶を準備する必要がある。 そのため、平成27-28年度は、収納缶の基本仕様、モックアップ試験用収納缶の仕様、収納缶用取扱装置の 仕様を確定する。
- (平成29-30年度は、主に安全設計の観点から設定した収納缶仕様を燃料デブリ取り出し検討側へ提示し、 フィードバックを収納缶に反映し、収納缶のプロトタイプを立案する。)

【実施内容】

- ①破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案
- 破損燃料輸送・貯蔵を調査し有効と考えられる既存事例を収集するとともに、関連PJや1F現場工事の最新の検討状況・知見の情報収集を行い、開発計画に反映する。

②燃料デブリの保管システムの検討

平成26年度の燃料デブリの保管コンセプトを現場の最新状況や関連PJからの情報、本事業で得られた知見を反映して見直す。また、関連PJや1F現場工事への要求事項を更新する。

③安全評価手法の開発

平成26年度に抽出した安全評価・対策技術の開発を行うとともに仕様(候補)を選定する。

④燃料デブリの収納技術の開発

燃料デブリ収納缶の設計要求事項を精査し、燃料デブリ収納缶の基本仕様を確定し、モックアップ試験用収 納缶の基本計画図を作成する。

⑤収納缶の移送・保管技術の開発

燃料デブリ取り出し設備、移送・保管設備とのインターフェースを整理し、収納缶用取扱装置(遠隔、自動操 作装置)の仕様を決定する。



3.実施結果(1/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

①海外調査の実施

- 1)ハンガリーPaks調査(平成27年9月17-18日訪問)
 - 訪問目的:収納缶の開発課題である未臨界評価条件、燃料デブリ乾燥、水素対策に関わる海外事例の収集。
- 得られた成果:
- ✓未臨界評価条件:燃焼度等のクレジットは不採用。燃料の最大初期濃縮度を設定する等保守的な条件を設定して収納缶 形状担保のみで未臨界を確保する等の設計の考え方に関する情報を得ることができた。(一案として収納缶設計に採用)
- ✓破損燃料の乾燥技術:乾燥技術確立のための手法として、模擬ペレット等を用いたコールド試験やウランを使用したホット 試験を系統的に実施した事例についての情報を得ることができた。(今後の燃料デブリの乾燥手法開発に活用予定)
 ✓水素逃し構造(Compensator):水素放出と汚染防止の相反する課題に対し、ガスを放出しつつ収納缶内の汚染水はプール
- 小素逸し構造(Compensator): 小素放出と汚葉防止の相及9 る課題に対し、ガスを放出し フラ収納出内の汚葉ホはノーカ への放出を抑制する独創的な配管構造(下図)についての情報を得ることができた。(保管方式案として今後検討) 2)IAEA調査(平成27年9月21-22日訪問)
- 訪問目的:有識者より収納缶開発に関わる助言等を得るための意見交換。
- ・得られた成果:収納缶開発がより有効なものとなる観点から、規制当局との対話や情報提供を早めの行うべき、燃料デブリの 最終形態が収納缶の重要な設計条件になるのでは、等の助言を得た。(今後の進め方の参考として活用)



Paks発電所でのMTG

注1):L. Szőke, Managing of the damaged fuel at Paks NPP, Meeting in Vienna on Management of Severely Damaged Spent Fuel And Corium 2-4 September 2013



3.実施結果(2/61)

- 3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案
- 3)米国(Pacific Northwest国立研究所(以下、「PNNL」), Hanford site)調査他(平成27年10月19-21日、24日 訪問)
 - ・訪問目的:収納缶の開発課題である放射線分解で発生する水素対策の一環として水素発生量を精査するための手法、 燃料デブリと共に回収されるスラッジに関わる知見情報、損傷燃料の乾燥/乾式保管に用いた 容器(Multi-Canister Overpack)の設計情報の収集。
 - ・得られた成果:
 - ✓PNNL:放射線分解モデル(水素の二次反応考慮)による水素発生量評価に関する最新知見を入手。(水素発生量評価 手法開発に関わる情報として活用)
 - ✓Hanford site:低温真空乾燥技術の情報(今後の燃料デブリの乾燥手法開発に活用予定)を入手。
 - ✓Multi-Canister Overpackの閉込め構造(溶接蓋等の構造検討に活用予定)を入手。
 - ✓スラッジの収納・移送・保管技術(今後、燃料デブリ性状に合わせた収納缶設計における参考情報として活用予定)を入手。
 ✓TMI-2燃料デブリ保管に関わった技術者との面談:水分の少ない条件における水素発生(エネルギー吸収)量精査手法の

詳細をレクチャーいただいた。(考え方を水素発生評価手法に反映。)



Hanford Site 低温真空乾燥装置

HEPA filter assembly

Rupture disk

出典:C. Miska, Hanford Cold Vacuum Drying, CHPRC-02756, October 19, 2015 DOE, N Reactor (U-metal) Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis, May 2000, Hanford Site Multi-Canister Overpack



3.実施結果(3/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

4) 英国Sellafield 調查 (平成 28 年 5 月 25-27 日 訪問)

訪問目的:収納缶の開発課題である未臨界評価条件、燃料デブリ乾燥、水素対策に関わる海外事例の収集。

得られた成果:

- 未臨界評価技術 :対象としている燃料やスラッジはウラン濃縮度が低く、輸送・貯蔵する上で臨界管理は課題となって おらず、特別な対応はしていない。
- 乾燥技術 : Magnox燃料の乾式保管の検討に資するため模擬燃料を用いたコールド試験や燃料の腐食等を模 擬するため多孔質コーティングを施した試験の情報を得た。(燃料デブリの乾燥の参考情報として活 用予定)なお、乾式保管自体は検討のみで未実施。
- 水素対策 :水素発生量の評価結果に基づく安全時間管理による運用や焼結フィルタ付のベント孔を設けた容 器の使用など水素対策に関する情報を入手。(水素対策に関わる運用管理の参考として活用予 定。)



注1): A.Allen, "Spent Fuel Contingency – Drying", IChemE Nuclear Fuel Cycle Conference, 24th April 2012

(http://www.icheme.org/~/media/Documents/Conferences/Nuclear%20Fuel%20Cycle/Conference%20Room%20Presentations/Tuesday/Spent%20Fuel%20Contingency%20-%20Drying%20Presentation%20-%20IChemE.pdf) 注2): C.Walsh, "Innovative approachies to optimise the management of higher activity radioactive wastes", 17 September 2014 (<u>https://www.iop.org/activity/groups/subject/nig/recent-events/file_65284.pdf</u>)



3.実施結果(4/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

5)米国Argonne国立研究所調查(平成28年9月26-27日訪問)

訪問目的:MCCIに関わる最先端研究機関の一つである米国Argonne研究所(以下、「ANL」)を訪問し、
 MCCI生成物の生成及び性状の把握に関する試験結果及び解析に関する情報の入手。

得られた成果:

- MCCI生成物性状:ANLで行われているMCCI生成物の生成及び性状の把握に関する試験結果及び解析 に関する情報を入手。(MCCI燃料デブリの移送・保管に関わる安全性評価等の参考情 報として活用。)
- 乾燥技術 : 燃料デブリの乾燥時間評価として、水分除去モデルに関する情報を入手。(MCCI燃料 デブリの乾燥に関わる参考情報として活用。)

3.実施結果(5/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

②検討の基本条件の設定(1/3)

本事業で設定する収納缶は、現時点で得られた燃料デブリ性状の情報や燃料デブリ取り出し工法からの要求事項に 基づき主に安全評価の観点から収納缶仕様を設定した。今後、工法PJ・基盤PJの成果やデブリ性状把握PJの成果 を反映して見直しを行う。

収納缶の形状を設定するにあたり、デブリ性状把握PJから提供された情報等に基づき、以下の条件を仮定した。

【燃料デブリの性状】

- ・燃料デブリ組成(MCCI生成物を除く): 二酸化ウラン(照射に伴うFPを含む)、ジルコニウム合金、ステンレス、低合金綱、 Ni基合金、コンクリート、B4C、海水
- ・塩分濃度:

最大100ppm程度(滞留水の塩素濃度10~20ppmを保守的に設定)

・ジルコニウム:

保守的に微量に金属状態で残留していると考える。(移送・保管手法等の検討で火災防止を考慮する。)

MCCI生成物の物性

上記燃料デブリにコンクリートが混合したもの(燃料デブリの熱で結晶水喪失、ガス発生等の反応があったと考えられるが、評価上はコンクリート成分の物理的混濁と仮定。(後述))

- ・燃料デブリの安定性(-20~300℃(窒素雰囲気)環境における安定性) 燃料デブリが内包する成分の気化等による大幅な体積変動、腐食物質や放射性ガスの大量放出等の安全に大き く影響する挙動は生じないとする。(上記環境において物質は安定化されていると想定。)
- ・形状
 塊状・粒状・粉状の固形物
- ・防錆剤/中性子吸収材 五ホウ酸ナトリウム、他



3.実施結果(6/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

②検討の基本条件の設定(2/3)

収納缶の形状を設定するにあたり、工法PJ・基盤PJなど関連PJの意見を踏まえて以下の条件を仮定した。

【燃料デブリの収納方法】

- ・塊状、粒状の燃料デブリ 掴む、すくう等の方法で回収して収納。
- ・粉体状の燃料デブリ
- フィルターカートリッジで吸着したものを塊状燃料デブリ収納缶へ収納する。 (粉状燃料デブリを効率的に回収する観点から、収納缶に収納できる大きさのフィルターカートリッジを前 提に検討し、回収の観点から課題抽出するため。)

なお、フィルターは焼結ステンレス網等の熱的安定性を有するものとする。

・収納場所

収納作業は非冠水とする。作業は、ホットセル等のバウンダリのある空間とする。

・燃料デブリの収納〜搬出要領
 燃料デブリの搬出は250-300kg/日とする。作業は半日を切削作業、半日を燃料デブリを回収、収納缶への収納・搬出作業に割り当てる。

【燃料デブリの移送方法】

- ・TMI-2の事例や使用済燃料で実績のあるキャスク方式での移送とする。
- ・移送容器への水張り要否、移送容器に対する制約条件は、技術検討に基づいて設定する。

3.実施結果(7/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

②検討の基本条件の設定(3/3)

IRID内有識者等との議論を踏まえて以下の条件を仮定した。

【燃料デブリの保管】

- ・保管方法
- 湿式保管:乾式保管設備建設に時間を要することも想定されるため既存プールの一時活用を想定して検 討する。
- 乾式保管:使用済燃料の保管方法として安全性に加えてメンテナンス等の運営管理面で合理的方法とされていることから、燃料デブリでも有利となる可能性が高く、最終的な保管方法とする。 海外では使用済燃料の保管にコンクリートキャスク等も実用化されているが、収納物に対する 要求に差異はないため、金属キャスクを代表事例として検討する。
- ・燃料デブリの乾燥
- 乾式保管の検討は、乾燥後も燃料デブリ内に水分が残留しているものとする。なお、乾燥できない可能 性を考慮しておけば完全乾燥の事例への展開は容易である。
- ・収納缶による燃料デブリの保管期間 50年(ロードマップで設定の燃料デブリの最終処理/処分決定までの30年間を包絡する期間として設定。 なお、使用済燃料乾式貯蔵施設では50年程度の保管期間と搬出入10年を想定して長期健全性に関する データが整備されており、参考とできる可能性あり。)

3.実施結果(8/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

③海外事例の分析、1Fへの適用性の検討(1/4)

前研究開発で提供を受けた海外情報や米国他の訪問で得られた情報を分析するとともに、1F固有の条件、他の関連PJとの調整 を踏まえて課題と取り組み方針を設定した。その結果、以下を中心に検討を進めることとした。

・未臨界: TMI-2、Paks等の手法を適用すると収納缶内径が220mm程度となって効率的な作業を阻害する可能性がある。
 ・水素対策: TMI-2で採用の収納缶閉じ込め構造では収納缶の収納が制限されて効率的な移送・保管を阻害する可能性がある。
 ・腐食: 1Fでは海水注入が行われたため、海外事例にはない腐食の観点からの検討が必要。

| | | 15済田への検討 | | |
|-----|--|---|--|--|
| 安日 | 仕様 | 考え方 | 「週日への検討 | |
| 未臨界 | 保守的設定で未臨界 (濃縮度2.98%) | 収納缶は単独での未臨界維持、複数となるラックや 移送容器内の配列条件はラックや移送容器の未臨 界機能とともに未臨界を維持する TMI-2の装荷燃料中の最大濃縮度のペレットを想定 した最適減速で未臨界を保証する 未臨界条件の緩和(燃焼度、水分量、燃料デブリの 組成等のクレジット)は採用していない | 未臨界評価条件等の考え方は流用可能(この 場合、収納缶径は220mm程度となる ⇒取り出し側の作業の制約となる可能性があ るためクレジット採用による収納缶径拡大を 検討する | |
| 除熱 | 収納缶外側の自然放熱で健全性 維持 (設計発熱量:100W/収納缶) | 発熱量が小さいので除熱のための特別な設計はな く建屋や取扱装置で収納缶雰囲気を保証 (燃料デブリの発熱量116W/ton) | 発熱量が小さいので適用可能と考えられる。 (一般的な使用済燃料と同レベル。1F-1は全 体平均(10年冷却):800W/ton、最高燃焼度 燃料:2.4kW/ton程度) | |
| 遮蔽 | 周辺の装置で遮蔽することで収 納缶に積極的に付与しない (胴厚6.35mm/底12.7mm) | 遮蔽機能は収納缶に付与せずに取扱装置や建屋 で確保することで収納缶の取扱性を向上させたと考 えられる | 考え方は流用可能 | |

出典: Nupac-125B安全解析書 ※: R. Schmitt 他, Historical Summary of the three mile island unit2 core debris transportation campaign DOE/ID-10400, 1993

IRID

3.実施結果(9/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

③海外事例の分析、1Fへの適用性の検討(2/4)

| | | 15済田への検討 | | |
|------|---|---|--|--|
| 安日 | 仕様 | 考え方 | | |
| 閉じ込め | 密封保証はしないが できるだけ閉じ込める (収納缶にゴム製Oリング設置) | 燃焼度が低く水素発生量も小さいので可能な範囲 で収納缶で閉じ込める。ただし、遠隔での取扱いの 観点から収納缶閉じ込め保証はせず、輸送容器で 閉じ込め保証 保管時は水素対流防止のためフィルターを介した 放出孔を設置 | TMI-2の収納缶構造では水素量が7倍となり、 耐圧強度アップや収納できる燃料デブリ量制 限が必要になる ⇒水素放出時の汚染抑制のためのフィルター 設置とともに水素量低減のため、水素発生 量の精査、水素触媒等を検討して対応する | |
| 構造強度 | 未臨界を担保 ・耐圧強度 : 150psi [※] (1.03MPa) ・落下 : 5.5m | ・耐圧強度:温度と水素発生で設定。 ・落下高さ:収納缶の取扱い上、最も厳しい衝撃が 負荷される条件から設定 | 耐圧強度: <mark>閉じ込めと同じ課題</mark> 落下高さ:収納缶の取扱高さの設定が必要 | |
| 水素 | 収納缶内に閉じ込める | 放射性物質閉じ込めの観点で収納缶内に閉じ込め る。そのために収納缶には耐圧強度を付与。触媒 は輸送中の安全裕度を増すために設置。 保管では放出孔より水素を放出 | 閉じ込めと同じ課題 | |
| 材質 | SUS304L(316L) | INLでの長期保管の観点から腐食しない材料として 選定。(文献によっては316の記載あり) | 1F燃料デブリから溶出が想定される塩素イオ ン等により腐食のリスクの検討が必要 ⇒収納缶にピンホール等の損傷が生じた場合 の影響を検討する。また、入手しやすい材料 の範囲で信頼性向上のための検討を行う | |
| 火災防止 | 配慮せず | サンプル燃料デブリの分析により火災の危険性が 低いことを確認。さらに、湿式保管時は缶内を冠水 または水抜き密封移送時はアルゴンガス雰囲気 (なお、乾式保管は空気) | 考え方は適用可能 | |

出典: R. Schmitt 他, Historical Summary of the three mile island unit2 core debris transportation campaign DOE/ID-10400, 1993



3.実施結果(10/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

③海外事例の分析、1Fへの適用性の検討(3/4)

| 一一 日 | | 15済田への検討 | |
|-------------|--|--|---|
| 安日 | 仕様 | 考え方 | 「週用への快討 |
| 収納缶長さ | PWR燃料長さ(3810mm) | 既存の燃料移送装置、キャスクの流用を考 慮した | 作業エリアの高さ制限の観点から短尺化が必 要である |
| 収納缶径 | PWR燃料の対角寸法 +Knockout型の流体効率 (356mm) | PWR燃料集合体の収納のため集合体断面の対角寸法の確保をベースとしたなお、Knockoutキャニスタの水流確保からす法を拡大した | 未臨界と同じ課題 |
| 収納缶肉厚 | 6.35mm(胴)/12.7mm(底) | 取扱い時の落下事故や内圧を考慮して設 定と考えられる。(ASME耐圧容器に適合す るよう設計) | 構造強度と同じ課題 設定の考え方は流用可能 |
| 収納缶シール | エラストマー | 150psi(約10気圧)を想定して設定。なお、 初号機は金属シールであったが漏れやすく エラストマーに変更 なお、気密漏えい試験は行っていないので 密封保証はない | 閉じ込めと同じ課題 (別途水素放出孔を設けた上で燃料デブリの 缶外放出抑制の観点で同仕様のOリングは有 効と考えられる) |
| 収納缶ドレン構造 | Fuel型:内面を角形にした際の胴と の隙間部にパイプを設置 Knockout & Filter:内部にパイプを 設置 | 初期段階では底板にドレンを設置する案も 検討された。その後、操作性の観点でドレン 管を設置して上方から操作できるようにした と考えられる | 燃料デブリ収納作業の観点で検証が必要 |

出典: R. Schmitt 他, Historical Summary of the three mile island unit2 core debris transportation campaign DOE/ID-10400, 1993



3.実施結果(11/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

③海外事例の分析、1Fへの適用性の検討(4/4)

| 一一 一一 | | 化溶田、介谷計 | | |
|----------------------------|--|--|---|--|
| 安日 | 仕様 | 考え方 | | |
| 収納缶 内部構造 (Fuel型) | 中性子吸収板で角形に成型。隙間は 低密度コンクリート充てん | 溶け残り燃料集合体の収納と未臨界維持を共存する観点から円筒胴内側に軽量コンクリートとBoral板(ボロン入り板)で角形に成型ただし、低密度コンクリートが乾燥時の障害となった | <mark>未臨界と同じ課題。</mark> BWR燃料体はPWRよりも小さいので角形成 型は不要 コンクリートは乾燥の障害になるの で適用しないほうがよい | |
| 収納缶 内部構造 (Knockout型) | 内 部 で 流 体 が 渦 を 巻くよう設 計 (140µmまでの燃料デブリ) | 遠心力の効果で燃料デブリを分離 | 未臨界と同じ課題 TMI-2では目詰まり等効率的な回収ではな | |
| 収納缶 内部構造 (Filter型) | Filter : フィルターを設置 (16µm以上 の燃料デブリ) | フィルターでろ過して燃料デブリを分離。なお、 メッシュの目詰まりからメッシュサイズを初期 の0.5µmから16µmに設計変更 | かったとの証言を踏まえて粉状燃燃料デブリ 形状に合致するかの回収能力の検証が必要 | |

出典: R. Schmitt 他, Historical Summary of the three mile island unit2 core debris transportation campaign DOE/ID-10400, 1993



3.実施結果(12/61)

3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

④保管方法の再確認

収納缶は、下記の保管方法を想定する。(乾式は金属キャスクを代表例として検討する。他の方式も技術的に同等で展開可能)



注1):原子力規制委員会HP(http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/chozou/)より

注2)(財)原子力安全研究協会「コンクリートキャスク貯蔵方式を中心としたキャニスタ系使用済燃料中間貯蔵施設の安全設計・評価手法について」より 注3):貯蔵専用キャスクを使用 注4):建設中(輸送・貯蔵兼用キャスクを使用予定) 注5):ガラス固化体を保管

3.実施結果(13/61)

3.2 燃料デブリの保管システムの検討

収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能の設定

| 安全機能 | | 必要となる安全機能 |
|----------------------------|------|--|
| 未臨界 | | 未臨界の維持 |
| 冷やす | 除熱 | 安全阻害要因(有毒ガス発生等)が生じない <mark>燃料デブリの上限温度を</mark> 設定し、当該温度に達しないよう取扱う |
| 日にいよて | 遮蔽 | 放射線による作業員や公衆の被ばく防止 |
| 闭し込める | 閉じ込め | 放射性物質の放出による <mark>作業員や公衆の被ばくの防止</mark> |
| | 構造 | 取扱い等を考慮し、必要な安全機能を維持するための <mark>適切な構造強度</mark> |
| 止める、穴や す、閉じ込め る、の安全機 | 水素 | 燃料デブリからの放射線により水の放射線分解で発生する <mark>水素の爆</mark> <mark>発防止</mark> (構造強度維持の前提) |
| 能を維持するために必要な | 経年劣化 | <mark>保管中の腐食</mark> に対する構造強度他の <mark>維持</mark> (構造強度維持の前提) |
| 1) 灵 月 ビ | 火災防止 | ジルカロイ等の <mark>粉体金属による火災防止</mark> (構造強度維持の前提) |



3.実施結果(14/61)

0.2 燃料デブリの保管システムの検討 収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能分担(検討を踏まえて見直した。)

| 安全機能 | | ᇌᇵᇊᄪ | 安全機能分担 | | *:+ |
|-----------|------|---|--------|-----|--|
| | | (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) | 収納缶 | 他機器 | 有ん刀 |
| 未臨界 | | 未臨界の維持 | 0 | 0 | 未臨界条件である幾何形状の維持は取扱モー ド共通の容器(収納缶)で取扱ったほうが合理 的なため。(燃料デブリの詰替は大がかり) 配列時の未臨界は他機器で行う。 |
| 冷やす | 除熱 | 収納缶、燃料デブ リ他の <mark>物性の担保</mark> | | 0 | 発熱量は同レベルの使用済燃料以下であり静 的な自然冷却で収納缶を冷却できるので特別 な除熱装置等は設けない。 |
| 閉じ込め る | 閉じ込め | 作業員や公衆の被 ばく防止 | | 0 | 収納缶には水素滞留防止口を設ける。実運用 における汚染拡大防止のためにフィルターを設 置するが、バウンダリとしての頑健さの観点で 安全評価上は閉じ込め機能は付与しない。 |
| | 遮蔽 | 作業員や公衆の被 ばく防止 | | 0 | 収納缶に遮蔽機能を付与すると重量が増え、取 扱機器の大型化や保管効率の低下につながる こと、TMI-2でも同思想は実績があり想定する 取扱フロー上大きなデメリットが認められないた め。 |

安全機能の分担は、燃料デブリ性状や収納缶の取扱要領の影響を受けるため見直す可能性がある。



3.実施結果(15/61)

3.2 燃料デブリの保管システムの検討

収納・移送・保管システムに備えるべき安全機能分担

| 安全機能 | | 設計目標 | 安全機能分担 | | * - + |
|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-----------|-----|---|
| | | | 収納缶 | 他機器 | 令ん刀 |
| その他 | 構造 | 安全機能を維持す るための <mark>構造強度</mark> | 0 | 0 | 収納缶の取扱機器等の合理化のため最小限の 強度が維持できるようにする。また、他機器で |
| (止める、 冷やす、 閉じ込め る機能の 維持) | 材料健全性 | 構造強度他の <mark>維持</mark> | 0 | 0 | 収納缶への荷重条件や腐食条件を緩和する。 |
| | 水素 | 水の放射線分解で 生ずる水素の爆発 防止 | 〇 (触媒) | 0 | 収納缶内の空間は小さく水素濃度が上昇する ため収納缶外部に放出できる構造として他機器 で掃気等を行う。 |
| | 火災防止 | 残留ジルコニウム による火災防止 | | 0 | 収納缶に不活性雰囲気、冠水状態の維持は付 加できない。(閉じ込め機能を有してないため) |

安全機能の分担は、燃料デブリ性状や収納缶の取扱要領の影響を受けるため見直す可能性がある。

3.実施結果(16/61)

3.2 燃料デブリの保管システムの検討

燃料デブリの収納、湿式での保管、乾燥、乾式保管までの基本的な安全機能分担を安全評価手 法等に関わる検討結果を踏まえて再整理し、TMI-2と比較することで妥当性を確認した。 ・燃料デブリの収納~搬出

閉じ込め以外は1Fと同じ考え方。

TMI-2は収納缶自体をバウンダリとするモードがあるが1Fの収納缶は水素滞留防止口を 設けるため収納缶だけでなく外側のセル等と併せて合理的なバウンダリを設定する。

| 中个 | 长线 台上 | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | TMI-2 | 1F | |
|------|-------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----|----------------|
| 女全機能 | | 这 訂日 係 | 収納缶 | 他機器 | 収納缶 | 他機器 |
| 未臨界 | | 未臨界の維持 | 収納缶単体 | プールラック (収納缶配列時) | I | 司左 |
| 冷やす | 除熱 | 収納缶、燃料デブリ 他の <mark>物性の担保</mark> | 自然冷却 | 建屋空調/ プール冷却設備 | I | 司左 |
| 閉じ込め | 閉じ込め | 作業員や公衆の被 ばく防止 | 内側:収納 缶内冠水 (冠水時) | 内側:工具扉(非冠水時) 外側:建屋 | なし | 内側:セル 外側:建屋 |
| る | 遮蔽 | 作業員や公衆の被 ぱく防止 | なし | エ具遮蔽または プール水と、建屋 | なし | 建屋と セル |



3.2 燃料デブリの保管システムの検討 ・燃料デブリの湿式移送/保管 閉じ込め以外は1Fと同じ考え方。 TMI-2の湿式保管の建屋はバウンダリ機能がなく缶内冠水のみをバウンダリとしている。 なお、ガスは環境に放出。

1Fでは建屋にバウンダリ機能を設け収納缶内のガスも処理して排出、排出状況を監視。 TMI-2 **1**F 安全機能 設計目標 収納缶 他機器 収納缶 他機器 収納缶複数配列の場合 収納缶単体 未臨界 未臨界の維持 移送容器バスケット/ 同左 の場合 プールラック 移送容器自然冷却/ 収納缶、燃料デブ 冷やす 除熱 自然冷却 同左 リ他の物性の担保 プール冷却設備 移送:なし 移送:移送容器/建屋 同左 内側: 作業員や公衆の 閉じ込め 内側: セルや 被ばく防止 閉じ込め 保管: プール 缶内冠水、 なし る 缶内冠水 ベント管 外側:建屋 気体処理 作業員や公衆の 移送容器/建屋/プー 遮蔽 なし 同左 被ばく防止 ル水

IRID

Sinternational Research institute for Nuclear Decommissioning

3.2 燃料デブリの保管システムの検討 ・燃料デブリのな燥/乾式保管 閉じ込め以外は1Fと同じ考え方。 TMI-2の湿式保管は収納缶とキャニスタのフィルタ経由でガス排出。 1Fではベント管接続時の汚染等を考慮して外側の建屋等にもバウンダリ機能を設けてガ ス処理する。監視も実施。

| 中マ | 长终去比 | | TMI-2 | | 1F | |
|-----------|------|------------------------------------|---------|-----------------|--------|--------------------|
| 女王饿肥 | | 这訂日 惊 | 収納缶 | 他機器 | 収納缶 | 他機器 |
| 未臨界 | | 未臨界の維持 | 収納缶単体 | バスケット (配列) | 同左 | |
| 冷やす | 除熱 | 収納缶、燃料デブリ 他の <mark>物性の担保</mark> | 自然冷却 | 貯蔵モジュール | 同左 | 保管容器 |
| 閉じ込め る | 閉じ込め | 作業員や公衆の被 ばく防止 | フィルタ注1) | キャニスタ (フィルタ) | (フィルタ) | 気体廃棄物処理設備 /保管建屋 |
| | 遮蔽 | 作業員や公衆の被 ばく防止 | なし | 貯蔵モジュール | なし | 保管容器 |

注1):Filter型収納缶は収納缶内部のフィルタがその機能を担保するとし、ベント/ドレン孔へのフィルタの取り付けはなし。





IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

- 3.実施結果(20/61)
- 3.3 安全評価手法の開発(①未臨界状態の維持機能評価)
- 移送・保管の課題である以下を検討

1)収納缶内径拡大の検討

- 核燃料物質の保管や移送では、「いかなる状態でも未臨界を維持すること」が必須。 再臨界リスクを払しょくできないと移送や保管効率が極端に低下する。
 - ・臨界時の発熱、放射線に対応する除熱性能、遮蔽性能が必要⇒除熱設備、遮蔽装置が巨大。
 ・臨界を監視/制御する設備が必要⇒中性子検出装置/ホウ素注入設備や制御棒等が必要。
- 上記より、燃料デブリの搬出は、未臨界は保証された条件だけで達成する必要がある。 TMI-2の方法に準じた手法に基づく内径設定。
 - ・収納缶径、缶に設置する中性子吸収材の位置や量⇒製造管理できるため保証条件。
 - ・収納缶内に燃料デブリの濃縮度の高い部分のみが入る可能性⇒リスクありとして考慮。
 - ・収納缶内で水との最適減速状態になる可能性⇒リスクありとして考慮。
 - 上記考え方を1F収納缶に当てはめると内径220mm程度となる。
 - ⇒未臨界状態を維持するための収納缶基本内径として成立するが、作業性の観点から 内径拡大要望あり。
- 内径400mmの収納缶(作業性向上を狙ったもの)の効果的な未臨界保証条件を検討。

2)湿式保管におけるプール水喪失対策の検討

● 使用済燃料の貯蔵と同様に、燃料デブリの湿式保管では、収納缶内に水が残留した状態でのプ ール水喪失事故条件での未臨界維持要求を想定して対策を検討。

IRID

| Ţ | 3.実施結果(21) 3.3 安全評価手法(1)収納缶内径拡大の 本パラメータ(組成、水分 見実的な運用で内径400m | /61) の開発(①未臨界状態の維持 ための保証条件の検討 、中性子吸収材、幾何形状)条件 1mを実現するため、今後、関連P | No.24 機能評価) 牛に基づき、単一条件で内径400mm達成条件を算出。 Jと連携して合理的な組合せ条件を検討する。 |
|---|--|--|--|
| | シナリオ | 未臨界維持の成立の条件 (収納缶内径400mmの条件) | 評価 |
| | 1.燃焼/混入物等の組 成の考慮 | 濃縮度約1.7wt%以下 | 燃焼度考慮での炉内の平均の濃縮度は約1.9wt% で他の混入物の考慮要。⇒臨界管理PJで組成合理 化の可能性を検討しており知見を取り込む。 |
| | 2.水量制限 収納前の水切りまた は乾燥処理の実施 | 水分量8vol%以下 (水分偏在) 水分量30vol%以下 (均一分布) | 収納缶取扱い過程で冠水リスク除去が必要。水分 量の保証方法が課題。(均一分布の前提は不均一 にならない保証方法が課題。)⇒本研究で水切り 試験で可能性を検討。 |
| | 3.中性子吸収材添加 (切削後の燃料デブリ 形状に応じて選択) | ホウ素水等で浸漬: ホウ素濃度B3000ppm以上 非溶解性吸収材の投入: B₄C約0.08wt%以上 | 収納前に燃料デブリをホウ素水に浸漬する等が必要。五ホウ酸ナトリウムの溶解度から効果ある。 ⇒臨界管理PJ、工法PJ・基盤PJで中性子吸収材の 適用性検討が行われており連携。 |
| | | 収納缶内部に中性子吸収材 を配置(9分割格子) | 燃料デブリを入れる間口は小さくなる⇒エ法P」・基 盤P」と連携し小さなサイズの燃料デブリ用の収納 缶にする等、運用面から検討。 |
| | 4.燃料デブリ幾何形 状(大きな塊状燃料 デブリのみを収納) | 燃料デブリの形状制限 (400mm以上の塊で収納) | 燃料デブリの粒径が小さくなると臨界評価上厳しく なる。⇒エ法PJ・基盤PJが評価する取り出し形状の 知見を取り込む。 |

3.3 安全評価手法の開発(①未臨界状態の維持機能評価 パラメータ評価結果(1/3)) 収納缶形状(内径および高さ)と臨界安全上の収納缶内水量の制限値サーベイ結果(一例)を示す。

10mm厚のステンレス鋼



収納缶内のUO₂と水が均一分布である場合の収納缶内平均水体積率に対する収納缶内径評価

- 収納缶内の水分量を制限することで、臨界安全上、収納缶内径を拡大できる⇒ユニット缶(以下、「UC」)による水切り試験
 へ展開
- ・ 燃料デブリ(UO2)と水が均質・均一状態、収納缶水体積率が35vol%以下のとき、臨界安全上、収納缶内径400mmにできる

IRID

3.3 安全評価手法の開発(①未臨界状態の維持機能評価 パラメータ評価結果(2/3)) 収納缶形状(内径および高さ)と臨界安全上の収納缶内水量の制限値サーベイ結果(一例)を示す。



収納缶内のUO。と水が不均一分布である場合の収納缶内平均水体積率に対する収納缶内径評価

- 収納缶内寸高さ1500mmの場合、収納缶内の全水体積率が8vol%以下であれば、臨界安全上、内径400mmにできる
- 収納缶内の水分量の実現性は、UCによる水切り試験結果、燃料デブリ性状(気孔率範囲)、充填率等から継続検討が必要

IRID

3.実施結果(24/61) No.27 3.3 安全評価手法の開発(①未臨界状態の維持機能評価 パラメータ評価結果(3/3))

収納缶内径を達成する臨界安全上の収納缶内中性子吸収材量のサーベイ結果(一例)を示す。



溶解性中性子吸収材の収納缶内径に対する影響評価

- ・ 収納缶内の水が50vol%以上の場合、ホウ素濃度が3000ppmあれば、臨界安全上、収納缶内径を400mmにできる

 く課題>
- 燃料デブリ取り出し用中性子吸収材の収納缶への最低投入量は保証できない⇒収納缶専用設備の成立可否
- ・ 非均質の評価体系モデルの限界で、収納缶内の水が50vol%以下の影響評価が不明⇒継続検討(予定)



3. 実施結果(25/61) 3. 3 安全評価手法の開発(①未臨界状態の維持機能評価)

1)収納缶内径拡大のための保証条件の検討(ユニット缶(以下、「UC」)による水切り検証試験概要) 未臨界管理上の水分量制限の適用性を確認するため、UC残水量、水切りの必要時間を評価した。 粒径5mm以上の燃料デブリ:短時間で目標水切り量を達成できる可能性がある。 粉状燃料デブリ:目標水切り量達成は困難な可能性があり、他の手法と組合せが必要。



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

3.3 安全評価手法の開発(①未臨界状態の維持機能評価) 2)プール水喪失事故対策 プール水喪失事故対策として、平成26年度にプールラック構造を検討したがより簡易な方法として、 収納缶内に予め投入すべきホウ素濃度を評価した。



プール水喪失事故対応として溶解性中性子吸収材(例えば五ホウ酸ナトリウム)の投入効果が確認できた。 なお、溶解性中性子吸収材は径拡大にも効果があるため工法PJと連携し、収納缶運用要領を調整していく。

IRID

3.3 安全評価手法の開発(②構造強度の評価) 1)構造評価の考え方

既存の輸送容器の例を参考に、静的評価を用いた収納缶に適した構造強度評価手法 と評価基準の考え方を設定。



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

3.3 安全評価手法の開発(②構造強度の評価) 2)評価方法の妥当性確認

1/3スケールモデルによる検証試験を実施し、検証試験や試験解析(動解析)注1)との 比較により、静的評価手法により発生応力および変形量を保守的に評価可能。



図 静的弾性解析と動解析注)による応力比較結果

図 静的弾塑性解析と動解析による変形量比較結果

注1):検証試験では応力は測定できないため、検証試験に対する動解析を比較対象とした。

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

3.実施結果(29/61)

3.3 安全評価手法の開発(②構造強度の評価)3)まとめ

成果

- ・収納缶の構造強度評価の考え方として、落下事象のような塑性域に至るような事象に 対しては、応力評価に加え、変形量評価により、健全性を確認することを提案した。
- ・変形量評価においては、静的弾塑性解析を用いることで収納缶の変形量を保守的に 評価できることが分かった。
- ・現状の収納缶取扱いフローから想定した落下事象(9m垂直落下)に対しても、胴部の 変形量はわずかであり、現設計で許容範囲を満足できる見通しを得た(今後、許容変 形量は臨界評価に基づいて設定する)。

課題

- ・落下角度が大きい場合や水平落下事象への静的弾塑性解析や変形量評価の適用性
- ・落下事象等における収納缶内部での燃料デブリ粒子の挙動の影響
- ・収納缶に内部構造(中性子吸収材、粉状燃料デブリのフィルタなど)を設置した場合の
 内部構造の落下事象等に対する健全性(未臨界性)評価

3.実施結果(30/61)

3.3 安全評価手法の開発(③材料の経年劣化の評価)(1/4)

材質と許容できる腐食環境を評価

- ・炭素鋼は中性近傍の水質が前提。(全面腐食挙動となり腐食量(時間)管理できるが水質管理が課題。)
- ・不動態被膜による腐食防止は、塩素イオン、過酸化水素の影響が大きい上、燃料デブリに含まれる化学物質の 知見は限られており腐食の可能性を完全に払拭することは困難。⇒まずは一般的な材料採用を前提としたシ ナリオを検討した。

| | 湿式環境 | 半乾式環境 | 乾式環境 |
|--|---|---|---------------------|
| 炭素鋼 (全面腐食の腐食量管理ま たはアルカリによる不動態 皮膜) | 水質が中性近傍では腐食量管理ができる がアルカリ雰囲気(五ホウ酸ナトリウム添加)では不動態皮膜が形成されてすき間腐 食等の局部度食発生のリスクが喜くなる | 塩化物イオンの局所濃縮により局部腐食発 生のリスクは湿式よりも高くなる。 | 腐食発生の 可能性は(い |
| 炭素鋼+オーステナイト 系ステンレス鋼(炭素鋼 の犠牲防食または二重防 ^{御)} | 内面に炭素鋼を設置することでSUS316Lの すき間部で犠牲陽極として作用する。炭素 鋼の減肉の知見の蓄積が必要だが内面を 不活性雰囲気にするので進行は小。 | 犠牲防食有効範囲が限定されるため、リスク あり。なお、炭素鋼で内面前面を覆うことがで きれば初期は炭素鋼と同様のリスクはある がSUSとの二重防御で健全性維持の可能性 あり。 | |
| オーステナイト系ステン レス鋼(不動態皮膜) | 過酸化水素0.4ppm程度で塩化物イオン10pp ⇒アルカリ環境では孔食への耐性が向上す | m程度まで抑制する必要がある。 る知見もあり。 | |
| ニ相ステンレス鋼 (不動態皮膜) | SUS329J4Lでは過酸化水素10ppmで塩化物 | イオン20ppm程度まで抑制する必要がある。 | |
| ニッケル基合金 (不動態皮膜) | 過酸化水素85ppmで塩素100ppm程度まで耐 (インコネル625 [™] :外挿による類推) | 性が期待できる。 | |
| チ タン及びチタン合金 (不動態皮膜) | 100ppm程度の低塩化物イオン濃度条件での 高く、すき間腐食発生の可能性は低い。 (チタンは水素脆化に対する感受性が高い材料だが、50年の使 |), Ti-Gr.12の 耐すき間腐食性はNi基合金より 語期間では影響はないと推察。(評価要) | |

塩化物イオン及び過酸化水素の発生環境における腐食評価

参考:滞留水の塩素濃度:20ppm程度 別途実施の水の放射線分解試験では40ppm超の過酸化水素が発生

なお、半乾式環境における塩化物イオンの濃縮は不確定性を含んでおり検証が必要。(定性的に湿式よりも厳しい)

3.実施結果(31/61)

- 3.3 安全評価手法の開発(③材料の経年劣化の評価)(2/4)
 - 安全シナリオに対する更なるバックアップデータ

以下の2点より、万が一、腐食(ピンホール等の局部腐食)による収納缶からの漏えい が発生した場合でも、必要な安全機能が維持されることを確認。

- ・収納缶から燃料デブリ漏えい時の未臨界評価への影響
- 収納缶外に放出された燃料デブリが未臨界に影響するにはかなり余裕がある。※ ※評価基準 (k_{eff}≦0.95)と臨界条件(k_{eff}=1.00)の差(0.05)に相当する燃料デブリ量
 - ✓燃料デブリが移送容器内に均一に分布する場合の相当濃度:約100kg/m³
 - ✓燃料デブリが移送容器内に凝集する場合の相当堆積高さ:約170mm
- ・燃料デブリ漏えい時のプール冷却浄化系設備への影響

収納缶はプール水により強制冷却されるので基本的には腐食が発生しない環境が維持される。

万一、収納缶に局部腐食が発生してもプール水冷却浄化系によって、塩素イオンは除去されるのでプール他の健全性は維持される ほか、収納缶から放出された放射性物質も除去される^{注1)}ので必要 な安全機能は維持される。



No.34

中部電力株式会社プレスリリース 浜岡原子力発電所5号機で 2011年5月14日海水流入により、 復水貯蔵槽内張り材(ステンレス鋼) に発生した孔 事象発生時の塩化物イオン約430ppm

注1):福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 2.3使用済燃料プール設備、2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備。



3.実施結果(32/61)

3.3 安全評価手法の開発(③材料の経年劣化の評価)(3/4) 前頁に記載の通り、万が一、腐食による収納缶からの漏えいが発生し た場合でも、必要な安全機能が維持されることは確認できたがさらに損 傷リスクの低減策を検討した。

1. 一般的材料(炭素鋼、オーステナイト系ステンレス鋼)の腐食挙動の知見

(a)炭素鋼

全面腐食挙動に対する知見は充実。ただし、全面腐食すると蓋開放 作業等の制約となる。(不採用)

(b)オーステナイト系ステンレス鋼

すき間腐食

IRID

- ⇒可能性あり。ただし、アルカリ環境下や犠牲防食で局部腐食発生 <u>を抑制できる可能性があり有効性次第で効果的な腐食リスク低減</u> ができる。
- 2. 湿式環境/半乾式環境での保管を想定したオーステナイト系ステン レス鋼の耐食性向上検討の観点から要素検証を実施。
 - オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316系)+五ホウ酸ナトリウムの局部腐食
 耐性の検証

⇒アルカリ環境下での局部腐食に対する環境条件を明確にする。 (孔食電位、腐食すき間再不動態電位の測定)

 オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316系)+炭素鋼での犠牲防食機構
 ⇒収納缶形状をある程度限定した評価が必要。(選択肢ではあるが 収納缶形状を固めてから判断する。)

注1):H. P. Leckie, "A Contribution to the Applicability of Critical Pitting Potentials", Journal of the Electrochemical Society, vol.117, no.9, 1152-1154(1970).



図 各環境におけるオーステナ れ よ テンレス鋼(SUS304)の 孔食電位^{注1)}

No.35

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning
3.実施結果(33/61)

3.3 安全評価手法の開発(③材料の経年劣化の評価)(4/4)

孔食電位測定結果



図 腐食すき間再不動態化電位測定結果(SUS316, 40℃)

図 50℃,中性食塩水環境における各種ステンレス鋼の 再不動態化電位の塩化物濃度依存性^{注1)}

五ホウ酸ナトリウムを添加することで、19ppm as CI条件における酸素発生電位である930mV vs. SSEより高い970mV vs. SSE以上で4Hr以上保持しても、すき間腐食発生の兆候が認められなかった。[※]少なくとも 19ppm as CI以下では、五ホウ酸ナトリウム添加によりすき間腐食感受性を示さないことが確認された。 課題

- 五ホウ酸ナトリウムは未臨界維持にも有効で、工法PJ・基盤PJや臨界管理PJと連携して調整。
- 乾燥環境では安全評価に影響が少ない程度の損傷状態であることの検証。
- 移送時の環境に対するSCCの影響評価

IRID

注1):松橋亮,柘植信二,田所裕,鈴木亨, "海水系環境中におけるステンレス鋼のすきま腐食寿命測定",新日鉄技報,第389号,pp.62-72.(2009).

3.実施結果(34/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価)1)実施内容(1/2)

平成27年度検討から以下の2つの課題に対する試験を実施。

- ・気相部の空気の放射線分解に起因した液相pH変化の水素発生への影響 (ケース:1-①)
- 気液比の依存性に対する再確認(気液比50%~900%の中間値の測定)
 (ケース:1-②)

| ケース | 温度 | 希釈人工海水濃度 (塩化物イオン濃度)[mol/L] | ヨウ化物イオン濃度 [mol/L] | 気液比 (気相部体積/液相部体積)[%] | 気相部雰囲気 |
|-----|----|-------------------------------|----------------------|-------------------------|------------------|
| 1-① | 云泪 | 2 8 × 10-3 | 0 | 900 | アルゴンガス +20%酸素 |
| 1-2 | 至温 | 至温 2.8×10 ⁻³ | 1 × 10 ^{−4} | 500 | 空気 |

表 気相部窒素の存在割合の影響および気液比の影響の確認試験マトリクス



3.実施結果(35/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価)

1)実施内容(2/2)

MCCI生成物およびコンクリート等の収納缶への同伴に伴う、水素発生への影響確認として、コンクリートからの溶出成分の影響を確認。

溶出成分としてCa(OH₂)を添加し、試験を実施。また、アスペクト比などの影響も合わせて確認。

| | 希釈人工海水濃度 | | 制御 | 即因子 | |
|-----|------------------------|----|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| | (塩化物イオン濃度) [mol/L] | pН | 気液比 (気相部体積/液相部体積)[%] | アスペクト比 (容器外径/容器高さ) | ヨウ化物イオン濃度 [mol/L] |
| 2-① | | | 50 | 0.08(小) | 0 |
| 2-2 | | 8 | 500 | 0.14(中) | 1 × 10 ⁻⁵ |
| 2-3 | | | 900 | 0.30(大) | 1 × 10 ⁻⁴ |
| 2-④ | | | 50 | 0.14(中) | 1 × 10 ⁻⁴ |
| 2-5 | 2.8 × 10 ^{−3} | 10 | 500 | 0.30(大) | 0 |
| 2-6 | | | 900 | 0.08(小) | 1 × 10 ⁻⁵ |
| 2-⑦ | | | 50 | 0.30(大) | 1 × 10 ⁻⁵ |
| 2-8 | | 12 | 500 | 0.08(小) | 1 × 10 ⁻⁴ |
| 2-9 | | | 900 | 0.14(中) | 0 |

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

3.実施結果(36/61)

IRID

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価)2)試験方法

平成27年度と同様、試液を入れ密閉した容器に外部からγ線を照射、圧力の変化から見かけのG値をもとめた。





3.実施結果(37/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 3)空気の放射線分解による硝酸生成の影響

気相部をアルゴンガス+酸素20%として窒素を除いた条件では、見かけのG値は~0に 低下(平成27年度の大気存在下では約0.2)。気相部で空気の放射線分解により窒素が 酸化される。気相部の割合が大きい場合、生成した酸化物が溶解することで液相のpH が低下し、水素発生に影響を与える可能性が示唆された。

⇒気相部を設ける場合の置換ガスの選定に反映。

| 気相部条件 | 気相部の窒素:酸素 の割合 | 圧力変化[MPa] /吸収線量 [kGy] | 試験水重量 [kg] | 気相部体積 [m ³] | 気液比 [%] | G値 [個/100eV] | 備考 |
|------------------|------------------|--------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------|-----------------|----------------|
| アルゴンガス +酸素20% | ~0:2 | $(6.9 \pm 3.2) \times 10^{-6}$ | 0.033 | 2.91 × 10 ⁻⁴ | 900 | ~0 | 平成28年度 試験結果 |
| 大気 | 約8:2 | 8.9 × 10 ^{−6} | 0.034 | 3.04 × 10 ^{−4} | 900 | 0.21±0.01 | 平成27年度 試験結果 |

表 気相部窒素の存在割合の影響確認試験結果

3.実施結果(38/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価)4)気液比の影響

水素発生の見かけのG値の気液比依存性を確認した結果、一部、発生ガス量が少なく 誤差の大きな試験条件では約0.6との結果も得られたが、2σの誤差を考えると従来 知見の純水の初期G値0.45から大きく変わることはなかった。



図 見かけのG値の気液比依存性



3.実施結果(39/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 5)コンクリート等からの溶出成分の影響(1/2)

水素発生の見かけのG値のコンクリート等からの溶出成分の影響を確認した結果、 一部、発生ガス量が少なく誤差の大きな試験条件では約0.6との結果も得られたが、 2σの誤差を考えると従来知見の純水の初期G値0.45から大きく変わることはなかっ た。

| ケース | 圧力変化[MPa] /吸収線量[kGy] | 試験水重量[kg] | 気相部体積[m³] | 気液比[%] | アスペクト比 (容器外径/容器高さ) | G値[個/100eV] |
|-----|-------------------------|-----------|-------------------------|--------|-----------------------|-----------------|
| 2-① | 1.1 × 10⁻⁵ | 0.222 | 1.12×10 ⁻⁴ | 50 | 0.08(小) | 0.01 ± 0.01 |
| 2-2 | 1.5 × 10⁻⁵ | 0.058 | 2.88 × 10 ^{−4} | 500 | 0.14(中) | 0.20 ± 0.05 |
| 2-3 | 2.7 × 10⁻⁵ | 0.044 | 3.92 × 10 ^{−4} | 900 | 0.30(大) | 0.65 ± 0.55 |
| 2-④ | 2.1 × 10 ^{−4} | 0.228 | 1.14 × 10 ⁻⁴ | 50 | 0.14(中) | 0.28±0.01 |
| 2-5 | 3.4×10⁻⁵ | 0.074 | 3.66 × 10 ^{−4} | 500 | 0.30(大) | 0.46±0.01 |
| 2-6 | ~0 | 0.034 | 3.05 × 10 ^{−4} | 900 | 0.08(小) | 0.00 ± 0.07 |
| 2-⑦ | 1.2 × 10 ^{−4} | 0.291 | 1.46 × 10 ⁻⁴ | 50 | 0.30(大) | 0.16±0.01 |
| 2-8 | 6.0 × 10 ⁻⁷ | 0.056 | 2.82 × 10 ^{−4} | 500 | 0.08(小) | 0.01 ± 0.36 |
| 2-9 | ~0 | 0.034 | 3.07 × 10 ^{−4} | 900 | 0.14(中) | ~0 |

表 コンクリートからの溶出成分の影響確認試験結果



3.実施結果(40/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 5)コンクリート等からの溶出成分の影響(2/2)

タグチメソッド注1)を用い、水素発生に影響を与える因子を整理した。その結果、

①水酸化カルシウム濃度(pH)が高いほど水素発生は抑えられる

②ヨウ素濃度が低いほど水素発生は抑えられる

③気液比が大きいほど水素発生が抑えられる ④容器内径が小さいほど水素発生が抑えられる

が分かった。



パラメータ 図 タグチメソッド望小特性による要因効果図(240kGy(想定輸送期間10日間の推定線量)での圧力)

注1):タグチメソッドとは、通常品質工学で用いられる手法で、製品開発や設計上のパラメータ依存性を特定することができる技法。

IRID

水素発生が小さく

3.実施結果(41/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 6)実際のコンクリートを想定した影響評価(1/2)

収納缶にコンクリートが収納されることから、水素発生に対するコンクリート形態の影響を試験で確認。

炉心溶融~注水、将来の乾式保管のための乾燥処理を想 定し、照射試験を実施。

試験パラメータの概要

 コンクリートが水でぬらされたもの
 2①を乾燥処理したもの
 ③加熱溶融/再固化したコンクリートが水でぬらされたもの
 ④③をさらに乾燥処理したもの
 比較のため、以下も実施
 ⑤コンクリートからの溶出液
 ⑥炭酸カルシウム溶液

なお、乾燥処理は300℃(1日、3日)で行った。 (300℃はコンクリートの結晶水が残留する温度)

RID



1200℃加熱後のコンクリート試料の外観写真 (溶融、再固化したもの)





3.実施結果(42/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 6)実際のコンクリートを想定した影響評価(2/2)

結果

- ·300℃の乾燥処理を行ったものから有意な水素検出はなし。
- ・G値は全て0.45以下であった。
- ・結晶水のG値は0.01以下であった。

以上より、水素発生評価として先に行った水溶液で得られたG値と同等として扱えると考えられる。 結晶水から水素発生はなく、コンクリートも乾式保管できる可能性がある。(乾燥法等の詳細は今後検証要)





3.実施結果(43/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 7)水の吸収エネルギーの精査

水素発生量の精査の一環として、水の吸収エネルギーに依存することから水が吸収するエネルギーを精査 粒子径が小さいほど水が吸収するエネルギーが増える。TMI-2コアサンプリングの燃料デブリ粒度分布にあてはめると総エネル ギーの1/5程度と、粒度の設定が水素発生の精査に有効と判明。 なお、燃料デブリの粒度の影響を受けることから、今後、工法PJ・基盤PJと連携して燃料デブリ破砕条件での粒度等の反映が 必要。



IRID

3.実施結果(44/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価(水素ガス対策の検討)) 8)触媒/水素吸着合金の仕様整理

水素対策となる触媒を抽出。触媒の再結合性能の観点からの成立性を検討

| メーカー | 触媒成分など | 性状 | 使用条件 | 備考 |
|------|-------------------------------|-------------------------|--|---|
| A社 | パラジウム(Pd)系 | ·φ3~5球状 | ・温度∶常温~400℃ ・圧力∶常圧~ ・GHSV∶1,000~5,000h ⁻¹ | ・酸素を含むガス中の微量 の水素の処理 |
| | 白金(Pt)系 | ・φ4~6球状 150L×50Hハニカム | ・温度:200~400℃ ・GHSV(球):≦30,000h ⁻¹ ・GHSV(ハニカム): 5,000~50,000h ⁻¹ | ・活性と耐熱性に優れる。 |
| | パラジウム(Pd)系 | ·φ4~6球状 | •温度∶200~450℃ •GHSV:≦30,000h ⁻¹ | |
| | パラジウム(Pd)系 (アルミナ担体) | ・2.5CDS型押出し | ·温度∶200~450℃ ·GHSV∶≦30,000h ⁻¹ | |
| B社 | 白金(Pt)系 | ·φ3球状 | | |
| | パラジウム(Pd)系 | 不明 | | ・蒸気中の水素の酸化 |
| C社 | 白金(Pt)系 | ・ハニカム | ・推奨入口温度:350℃~ | ・耐ハロゲン触媒 |
| D社 | 白金(Pt), パラジウ ム(Pd)などの貴金属 | ・ハニカム ・φ3~5(球状) | | |
| E社 | 白金(Pt)系/メタルハ ニカム(Fe-Cr-Al) | ・メタルハニカム | ▪温度∶常温(水素) ▪GHSV∶30,000~60,000h ⁻¹ | ・金属で構成された触媒構 造体のため,落下等の物理 的強度が高い。 |

代表的な触媒の仕様

GHSV:Gas Hourly Space Velocity (1時間あたりのガス供給流量に対する触媒体積) 1Fにおける平均的な燃料、TMI-2の粒度を想定した試算では必要となる触媒量はGHSV:1,000 h⁻¹程度 の触媒でも1cm³以下であり水素対策に有効な手段になる結果を得た。

3.実施結果(45/61)

RD

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価(水素ガス対策の検討)) 9)収納缶内の流動の検討

実際の触媒では、触媒に対して対象とする水素が供給される必要があるため、流動について検討を行った。

⇒現実的な水素発生量を考えると拡散だけでもかなりの有効性が期待できるため、

対流の具体的効果は今後、工法PJ・基盤PJと連携し燃料デブリ粒度や収納方法の検討結果を反映する過程で検討する。

| | 拡散 | 拡散と対流 | 対流(1) | 対流(2) |
|----------|--|--|--|---|
| 処理できる水素量 | 小 | 中 | 大 | 大大 |
| 考え方 | 収納缶内の水素の拡散効果 のみで水素濃度を管理 | 収納缶と燃料デブリ部の すきまを利用して対流する ことで触媒に水素誘導す る | 内外温度差による対流で 触媒内を水素が通過する | 水素触媒の反応発熱に よるドラフト効果も利用し て触媒内を水素が通過す る |
| 概略構造 | 燃料デブリを収納缶内にほぼ すきまなく入れる 触媒 燃料デブリ | 燃料デブリと収納缶内に 対流のための隙間を確保 し水素を触媒のある空間 に誘導する | 整流板の端部に触媒を設 置して上昇したガスが触媒 内を通過するよう配置 整流板 | 触媒出ロ側に延長部を設けて触媒内を通過するガス量を増加させる |
| 検討結果 | 平均的な燃料を想定した試算 では水素濃度は水素爆発下 限界以下となったが、燃料条 件次第で超えることも予想 | 効果的な対流効果を得る には隙間として20mm程度 必要 | 必要な隙間として20mm程 度必要。なお、触媒の圧損 が課題 | 触媒設置部に一定高さの 空間を設けることにより、 対流(1)よりも効果が期待 できる |

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

3.実施結果(46/61)

3.3 安全評価手法の開発(④水素ガス発生に対する評価) 10)まとめ

成果

- ・ γ線照射下において、1F条件(海水およびヨウ素、コンクリート)での水素ガス発生の初期G値 (見かけのG値)は、発生ガス量が少なく誤差の大きな試験条件の下で最大では約0.6となるが 2σの誤差を考えると従来知見の純水の初期G値0.45から大きく変わることはなかった。
- ・気相部の置換ガスによっては、水素発生に影響を与える可能性がある。
- パラメータ試験により、水素発生に与える要因を明らかにできた。今後の水素ガス対策に適用していく。
- ・コンクリート中の自由水および結合水の影響について、乾燥をおこなうことにより、有意な水素 ガス発生がなかった。
- ・水素対策技術(水素再結合触媒)が、実運用上、手法として有効となる<mark>可能性</mark>を得た。

課題

・見かけのG値0.45を超える可能性がある条件の精査(気相部での反応の影響など)

α線の影響確認

- ・1F燃料デブリを考慮した乾燥条件の適正化
- 水素対策技術の燃料デブリの取り出し方法(粒度他)、収納缶形状を考慮した適用性の検証。
 粒度等の不確定条件に対し実運用で合理的に有効性を確保する手法の確立。

IRID

3.実施結果(47/61)

3.4 燃料デブリの収納技術の開発(①収納缶設計要求事項の精査)

1) 収納缶の安全評価の観点からの収納缶仕様への要求事項

| 項目 | 安全評価からの制約条件 | 収納缶仕様への要求事項 |
|-----------------|--|---|
| 未臨界 | 未臨界維持可能な条件を担保すること。 (1)ペレット最高濃縮度のUO₂と水の最適減速状態を考慮 して、k _{eff} ≦0.95。 (2)収納缶内の燃料デブリ及び水の分布状態と内水量の 制限、中性子吸収材添加に対応した収納缶寸法。 | ①収納缶内径220mm。 (燃料デブリおよび水の収納制限なし) ②収納缶内径400mm、高さ1500mm。 (不均一分布を想定すると水体積率8vol%以下の保証が必要等運用上合理的な方法の選択が前提) |
| 除熱 | 崩壊熱等による温度上昇による燃料デブリの変質及びFPガ ス量増加を抑制可能な温度(TMI-2の知見では300℃)にす ること。 | 特段の配慮することなく対応可能な見込み。ただし、材 料の健全性評価時の温度条件に考慮。 (移送容器・空調等の他機器で除熱担保) |
| 遮蔽 | 作業員被ばく及び公衆被ばくの低減の観点から必要な遮蔽 性能を有すること。 | 特段の配慮することなく対応可能な見込み。 (移送容器・建屋等の他機器で遮蔽担保) |
| 閉じ込め | 放射性物質の閉じ込めが可能なバウンダリを設けること。 | 特段の配慮することなく対応可能な見込み。 (安全評価上の閉じ込め機能はつけない※) ※ただし、実運用上の汚染拡大抑止の観点で フィルター等の放出量を低減する |
| 構造 | 未臨界維持の形状保証のための収納缶の取扱モード/想定 事故に対する強度を有すること。 | 収納缶の胴厚さ:10mm程度(約9m程度の落下) より高い取扱いでは緩衝体の設置を検討。 |
| 水素 | 水素爆発が発生しない濃度(4%以下)に管理すること。 | 密封移送時、水素再結合触媒等の水素対策[※]を設置。 ※平均的な燃料条件であれば対応できる可能性あり。 |
| 経年劣化 (材料健全性) | 移送・長期保管中に大きな腐食をしない材料であること。 | SUS316L 現実的な収納缶内外の環境(水、塩素、温度等)の観点 で安全評価に影響しない見込み。 |
| 火災防止 | ジルコニウム等の金属成分の火災が起こらないこと。 | 特になし。(密封移送時、収納缶内は不活性雰囲気又 は冠水状態) |

3.実施結果(48/61)

3.4 燃料デブリの収納技術の開発(①収納缶設計要求事項の精査)

2) 取扱い及び他機器との機能分担を考慮した効率的な収納の観点からの要求事項

| 取扱い | 収納缶取扱いの観点からの制約条件 | 収納缶仕様への要求事項 |
|-----------------|--|--|
| 収納~移送容 器への装荷 | 想定される取扱いからの制約条件は以下の通り。 (1)燃料デブリ取り出し工法及び建屋寸法を考慮して、 取扱いが可能な収納缶寸法であること。 (2)高線量環境を考慮し、遠隔操作に対応した 収納缶形状であること。 (3)収納缶取扱時に想定される取扱モード/想定事故 に対する健全性を維持できる構造であること。 (4)移送容器に収納可能な収納缶寸法であること。 (5)移送容器内での安全機能を維持できること。 | (1)・内径: Ø220mm及びそれより大きい内径を有する 収納缶形状を検討すること。 ・高さ: 2000mm以下(全高) (2)・収納缶/収納缶蓋/UCは遠隔用取扱装置で 取扱い可能な構造であること。 ・蓋収納缶蓋は遠隔用取扱装置で蓋締め可能な 構造であること。(ボルト構造は実績あり) (3)想定される大きな荷重が発生する収納缶落下等で 構造健全性を確保できる緩衝構造などを有する 構造であること。 (4)代表的なキャスク仕様を考慮した寸法とすること。 (5)建屋及び移送容器との機能分担を考慮した構造 とすること。 |
| 保管施設まで の移送 | (1)移送中の安全機能を維持できること。 (2)保管施設内での取扱いが可能であること。 | (1)基本的な安全機能は移送容器で担保する思想とし、 必要に応じて水素対策の構造を有すること。 (2)保管施設内の取扱装置仕様に対応した形状とすること。 |
| 保管 | (1)保管設備(キャスク等)に収納可能な収納缶寸法であること。(2)保管中の安全機能を維持できること。 | (1)既存の代表的な保管設備を考慮した寸法とすること。 (2)基本的な安全機能は保管設備で担保する思想とし、 必要に応じて水素対策の構造を有すること。 |
| その他 | (1)水素対策等のために乾燥処理が可能な構造 であること。 (2)計量管理を考慮した設計であること。 (3)最終処分を考慮した設計であること。 | (1)乾燥装置と取り合いが可能なドレン孔等を有すること。 (2)計量管理方法に対応した構造(ID番号付与等) であること。 (3)現時点では最終処分方法は不明なため、考慮しない。 |



3.実施結果(49/61)

3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶)

1) 収納缶の内径と高さの検討

- ①収納缶の開発は安全評価手法を中心として検討。検討条件は 不確定性を有するためパラメータ幅を広く設定して検討。
- ②今後、工法PJ・基盤PJと調整を図りつつ収納缶構造仕様を固めていく必要がある。遠隔での操作性などの要求と安全機能を満足させることが必要。
- ③関連PJとのインターフェイスが密接で収納缶の他の部位設計に も影響大な収納缶の内径と全高さについて以下を代表例として 検討を進めた。
 - 内径:約220mm(最高濃縮度ペレットも未臨界維持可) 約400mm(将来の臨界組成条件の緩和を想定)
 - 全高さ:約2000mm(燃料デブリ取り出しで考えられる 最大(内寸高さ1500mm程度))



No.52

収納缶の基本形状案

3.実施結果(50/61)

- 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 2) 蓋構造の検討
 - 2)-1蓋への要求事項
 - 遠隔操作を考慮した蓋構造に対する要求仕様を検討。
 - ⇒遠隔操作による作業性と燃料デブリ片を放出しない閉じ込め性(それを担保する構造強度含む)が必要。

表 収納缶蓋構造に対する要求仕様案

| 項目 | 要求事項 |
|------|--|
| 取扱い | 水中および気中での遠隔操作による蓋締め・蓋開放が可能であること。 |
| | 作業性の観点から、蓋の回転など簡易な動作で蓋締めが可能であること。 |
| 閉じ込め | 燃料デブリ片を外部に放出しないこと。 |
| 構造 | 収納缶の転倒等による衝撃を受けた場合においても、蓋の外れや破損 が起こらないこと。 |
| | 収納缶の内圧に対して健全性を維持できること注1)。 |

注1):収納缶は密封性を要求しないものの、蓋の構造設計のための条件として一定の内圧に耐えることを要求する。



3.実施結果(51/61)

- 0. 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 2) 蓋構造の検討
 - 2)-2収納缶蓋構造の比較
 - 複数の収納缶蓋構造案を比較・検討。
 - ⇒ボルト構造(A案)、溶接構造(B案)は実績ある形状として候補。
 - なお、作業性向上の観点から取付け方法が容易で構造が単純なC案も検討。



表 蓋構造案の比較

注1): DOE/SNF/REP-084, "TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis", U.S. Department of Energy, September 2003

IKID

3.実施結果(52/61)

- 0. 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 2)蓋構造の検討
 - 2)-3まとめ

成果

- ・収納缶蓋構造に対する要求事項を整理した。
- TMI-2で実績あるボルト構造、溶接構造を候補としつつ、より取付け方法が容易な蓋構造を提案した。

課題

・取付け方法が容易な蓋構造の荷重に対する健全性、操作性の確認



3.実施結果(53/61)

- 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 3)収納缶胴構造の検討
 - 3)-1緩衝構造の比較・検討

落下時の荷重低減策の一つとして、既存収納缶の緩衝構造設計例を比較・分析。 ⇒構造が単純なDOE(スカート型)タイプについて検討を実施。



IRID

3.実施結果(54/61)

IRID

3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 3)収納缶胴構造の検討

3)-2緩衝構造の有効性確認試験(1/3)

緩衝構造を試設計、1/3スケールモデルによる有効性確認試験を実施。

| 項目 | | 試験体1−1 (Φ220mm相当、 緩衝構造あり) | 試験体1-2 (Φ220相当、 緩衝構造なし) | 試験体2 (Φ400mm相当、 緩衝構造あり) | | 360 |
|--|----------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------|
| | 内径[mm] | 76.6 | 76.6 | 133 | | |
| 収納缶本体 | 高さ[mm] | 713. 4 | 706.4 | 624.6 | ->-<082.6 mm | ±∆E 340 |
| (蓋含む) | 板厚[mm] | 3.0 | 3.0 | 3.4 | 収納缶試験体1-1:21.1kg ——→ | 1484 |
| | 底板厚さ[mm] | 10.3 | 3.4 | 16.6 | | |
| ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | 高さ[mm] | 103 | - | 133 | | |
| · 收 王 1书 是 | 板厚[mm] | 1.03 | - | 1.33 | 朝性 ストッパー | |
| 重量[kg] | | 21.1 | 20.6 | 58.4 | | |
| 落下高さ[mm] | | 9 | 9 | 9 | | * |
| 落下角度[°] | | 0(鉛直落下) | 0(鉛直落下) | 0(鉛直落下) | | |
| 試験温度 | | 室温 | 室温 | 室温 | u - K±ル-+++>□□□ | 021 |

表 試験体仕様および試験条件



Ÿ

試験体系

3.実施結果(55/61)

- 0. 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 3)収納缶胴構造の検討
 - 3)-2緩衝構造の有効性確認試<u>験(2/3)</u>



3.実施結果(56/61)

- 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 3)収納缶胴構造の検討
 - 3)-2緩衝構造の有効性確認試験(3/3)

緩衝構造がない試験体と比較、緩衝構造の有効性を確認。 ⇒9m落下事象に対して、荷重の低減効果により、収納缶胴部に発生するひずみが弾性範囲内 に低減



図 有効性確認試験における荷重の時刻歴

図 有効性確認試験における収納缶胴部の周方向ひずみの時刻歴



3.実施結果(57/61)

- 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 3)収納缶胴構造の検討
 - 3)-3まとめ

成果

- ・落下事象に対する緩衝構造の有効性を確認した。
- ・緩衝構造の設計要因を明らかにし、設計の考え方を整理。確認試験結果との比較により、設計の妥当性を確認した。
- ・緩衝構造を適切に設けることで、現状の収納缶取扱いフローから想定した落下事象 (9m落下)に対して、収納缶胴部に発生する応力を弾性範囲内に収めることができる ことがわかった。

課題

・落下角度が大きい場合の緩衝構造の有効性の検討



3.実施結果(58/61)

0. 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 4)収納缶形状案

4)-1収納缶の基本仕様

粉状、粒状燃料デブリは、フィルターカートリッジで塊状燃料デブリ収納缶に収納する方針で検討を進めることとしたため、共通化。 モックアップ用収納缶も現時点では共通とする方針で検討。

| 項目 | | 仕様 | 備考 |
|----|---|------------------------------------|--|
| 材質 | オーステナイト (SUS316L) | 系ステンレス鋼 | 腐食への信頼性向上に五ホウ酸ナトリウ ム添加が有効。(No.36参照) |
| 寸法 | 内径 | 【ケース1】 220mm 【ケース2】 400mm | 【ケース1】は未臨界条件の制約なし。 【ケース2】は収納缶内の水分量の制限な どの未臨界条件保証を前提に検討。 |
| | 板厚 | 10mm | 構造評価結果に基づく。 |
| | 全高 | 2000mm以下 | 工法PJ・基盤PJ側からの要求 |
| | 緩衝構造 | 300mm (スカート構造) | 落下事象の評価結果に基づく。 |
| 構造 | 以下の構造を有すること。 ・ドレン孔/ベント孔 ・蓋は手回しによる回転での蓋締付を行う等、遠隔操作 可能な冶具や収納缶吊具に対応した構造 ・UC(【ケース1】及び【ケース2】の収納缶内に収納できる 寸法、メッシュ径:4mm) ・水素再結合触媒 ・水素ガスパージ用フィルター | | ・蓋構造はNo.54の蓋構造比較結果に基づく。 ・UCの形状は、No.28水切り試験結果に基づく。 ・水素再結合触媒の効果はNo.47の検討結果に基づく。なお、収納缶内の配置検討は、工法PJ・基盤PJとの調整が必要。 ・水素ガスパージ用フィルターの仕様は、工法PJ・基盤PJと運用なども考慮した調整が必要。 |

IRID

3.実施結果(59/61)

- 0. **No.62**3. 4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶)
 4) 収納缶形状案
 - 4)-2収納缶の基本形状(1/2)

実績あるボルト、未臨界課題のない基本形として設定



今後、合理的に収納・移送・保管する観点から工法PJ・基盤PJの検討結果を設計に反映する。



3.実施結果(60/61)

0.2017 No.63 3.4 燃料デブリの収納技術の開発(②収納缶の基本仕様及びモックアップ試験用収納缶) 4)収納缶形状案

4)-2収納缶の基本形状(2/2)

つめ付インテグラル型の蓋形状を前提に ϕ 220mmと ϕ 400mm(未臨界条件保証が条件)を策定



今後、合理的に収納・移送・保管する観点から工法PJ・基盤PJの検討結果を設計に反映する。



3.実施結果(61/61)

3.5 収納缶の移送・保管技術の開発(取扱装置の開発/設計) 取扱装置の基本形状 吊具例を以下に示す



吊具の例

今後、合理的に収納・移送・保管する観点から工法PJ・基盤PJの検討結果を設計に反映する。





- ・収納缶は、現時点で得られた燃料デブリ性状の情報や工法PJ・基盤 PJからの要求事項に基づき主に安全評価の観点から収納缶仕様を 設定した。
- ・今後、今回の検討結果を踏まえて、工法PJ・基盤PJ他と調整し、
 燃料デブリ取り出し・収納・移送・保管を合理的に行う観点から調整を
 行い、全体最適の観点から結果を設計にフィードバックする。
- ・また、収納缶の設計変更や取扱い条件を踏まえて、収納缶の構造等の安全性や取扱い性の検証を実施する。

4.まとめ(参考)

今後も安全上の要求事項、燃料デブリ性状の知見、最適化の要求など条件が変動する。 開発する収納缶をプロトタイプとし、収納缶設計のプロトコルを整備することで条件変更 に柔軟に対応する。



5.開発進捗状況

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発





5. 開発進捗状況

No.68

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

| 宇佐山家 | マイルストーン | | 泽守作道 | 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一 | 计内体 | 供去 |
|---|---------------------|-----------|------|---|-----|----------------------------------|
| 天爬内谷 | 項目 | 計画時期 | 连风扒沉 | - 安凶 | 刘心束 | 加方 |
| 1.破損燃料輸送・貯蔵 | 研究計画立案 | 平成27 5/E | 完了 | | | 計画は適宜見直し |
| に味る調査及び研究 計画立案 | 破損燃料輸送・貯蔵に係る調 査 | 平成28 3/E | 完了 | | | Paks、米国PNNL調査 を実施 |
| | 計画見直し・追加調査 | 平成29 3/E | 完了 | | | 追加で英国Sellafield 、 米国ANL調査を実施 |
| 2.燃料デブリの保管シ ステムの検討 | 燃料デブリの保管システムの 検討 | 平成28 3/E | 完了 | | | 最新知見に基づき継 続的に見直し |
| | 燃料デブリの保管システム見 直し | 平成29 3/E | 完了 | | | 必要に応じて実施 |
| 3.安全評価手法の開 発 | 感度概略評価#1 | 平成27 10/E | 完了 | | | 収納缶からの燃料デ ブリ漏えい影響評価 |
| (1)未臨界状態の維持 機能評価 | 感度詳細評価#2 | 平成283/E | 完了 | | | 収納缶径評価 |
| | 評価条件設定のための検討 | 平成29 2/E | 完了 | | | 試験/実施内容は感度 評価や調査結果に基 づいて設定 |
| ②構造強度の評価 | 構造評価条件更新 | 平成27 11/E | 完了 | | | |
| | 構造強度評価 | 平成28 3/E | 完了 | | | 試験結果を解析で評 価 |
| | 落下事象他対策検討 | 平成289/E | 完了 | | | 緩衝構造の検討 |
| | 確証試験 | 平成293/E | 完了 | | | 緩衝構造の有効性確 認を実施 |



5. 開発進捗状況

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

| Ν | 0. | 69 |
|-----|----|----|
| ÷ 1 | | |

| 中华中郊 | マイルストーン | | ***** | 西田 | | /# * |
|--|---------------------------|-----------|-----------------------|----|-----|-----------------|
| 天爬内谷 | 項目 | 計画時期 | 莲 队 仄 况 | 安因 | 对心策 | 偏考 |
| 3.安全評価手法の開発 ③材料の経年劣化の 評価 | 候補材選定 | 平成27 10/E | 完了 | | | |
| | 候補材の評価(腐食試験) | 平成29 3/E | 完了 | | | |
| ④水素ガス発生に関す る評価 | 水素発生概略評価 | 平成28 3/E | 完了 | | | |
| | 水素発生追加評価 | 平成29 2/E | 完了 | | | |
| | 水素再結合候補材選定 | 平成28 6/E | 完了 | | | |
| | 水素再結合材性能試験の予備 検討 | 平成29 2/E | 完了 | | | |
| 4.燃料デブリの収納技 術の開発 ①収納缶設計要求事 項の精査 | 要求事項見直し、コンセプトの 見直し方針策定 | 平成27 8/E | 完了 | | | |
| ②収納缶基本仕様の 設定 | 収納缶の基本仕様設定 | 平成28 11/E | 完了 | | | |
| | モックアップ試験用収納缶計画 図案 | 平成29 3/E | 完了 | | | |
| 5.収納缶の移送・保管 技術の開発 ①取扱いフロー検討 | フロー案策定 | 平成27 10/E | 完了 | | | |
| ②取扱装置基本仕様 の設定 | 取扱装置基本仕様の設定 | 平成29 3/E | 完了 | | | |

【補足-1】体制図(平成29年2月28日現在)



【補足-2】実績と今後の課題(1/4)

| 実施内容 | 実績 | 今後の課題 |
|------------------------------|---|----------------|
| 1.破損燃料輸送・貯蔵に係 る調査及び研究計画立案 | | |
| ①海外調査 | | |
| •未臨界評価技術 | Paks、Hanford Siteにおける収納缶の臨界評価条件や臨 界管理方法の情報入手 ・米国INLにおけるプール保管時の収納缶の臨界評価内 部レポートを入手 ・英国Sellafieldでの手法を調査 | ・未臨界評価技術の検討に反映 |
| •乾燥技術 | Paks/Hanford Siteの乾燥設備の概略系統図やPaksでは乾燥技術確立のためアプローチ等の情報を入手 英国Sellafieldでの検証情報を調査 米国ANLよりMCCI生成物の乾燥に関する情報を入手 | ・今後の乾燥装置検討へ反映 |
| ・水素ガス対策技術 | Paksの水素逃し構造を用いた収納缶の設計情報を入手 米国PNNL/HanfordSiteの水素発生量評価手法やスラッジの水素滞留対策に関する知見を入手 英国Sellafieldの廃棄物容器等の水素対策情報を入手 | ・水素ガス対策に反映 |
| ・その他 | ・Paks、Hanford Siteの収納缶の設計情報を入手 ・Hanford Siteのスラッジ取扱技術 ・米国ANLよりMCCI性状に関わる情報の入手 | ・収納缶形状に反映 |
| ②計画立案 | ・研究計画の立案実施 | |
【補足-2】実績と今後の課題(2/4)

| 実施内容 | 実績 | 今後の課題 |
|-----------------------|--|---|
| 2.燃料デブリの 保管システムの検討 | | |
| ①湿式保管システム | ・原子炉建屋では乾燥作業場所の確保が困難と想定し、 主案としてベント式で一時湿式保管、長期的な乾式保管 に移行するフローを設定 | ・関連PJの動向に基づき、保管コ ンセプト案や保管するフローを 更新 |
| ②乾式保管システム | ・湿式保管や原子炉建屋から収納缶が持ち込まれ、施設内で乾燥することを想定。 ・また、完全乾燥の確立に時間を要することを想定しベント式保管を前提にフローを設定 | ・ベント式保管を採用する場合の 収納缶設計に対する課題の抽 出とその対策の検討 ・密閉式保管を実施するための 課題の整理とその対策の検討 |
| ③MCCI生成物の保管 | ・加熱したコンクリートを乾燥させた結果、水素発生はほぼ 見られず、乾式保管への適用可能性が示された ・多少の損傷を前提とする設計ではMCCI固有の空隙や偏 在等の腐食に対して影響は少ないと判断された | ・乾式保管へのシナリオ構築 |

【補足-2】実績と今後の課題(3/4)

| 実施内容 | 実績 | 今後の課題 |
|-------------------|--|---|
| 3.安全評価手法の開発 | | |
| ①未臨界状態の維持機能 評価 | ・設計評価基準および燃料条件の緩和を検討し、収納缶からの燃料デブリ漏えい等の臨界感度評価を行い、収納缶内径を220mm(平成26年度と同じ)とする案を提案 ・収納缶径の拡大のための条件検討(パラメータサーベイ)として収納缶内の不均一性の影響や収納缶内部に中性子吸収材を入れた場合の効果を評価 | ・収納缶内径拡大のための水切り 検証試験を実施し、収納物粒径、 収納量、浸水等の影響評価を実施 ・収納缶内の不均一性の影響に ついて追加の臨界パラメータ サーベイを検討 |
| ②構造強度の評価 | ・収納缶本体を対象とした静解析による構造強度評価手法の妥当性を確認 ・落下事象に対して臨界防止機能に対する健全性を達成できる見通しを得た ・また、緩衝構造を設置することにより、収納缶胴部を弾性範囲内とすることが可能と出来る見通しを得た | ・蓋構造の構造健全性の確認 ・実機による検証 |
| ③材料の経年劣化評価 | ・塩素イオン等の収納缶内環境を想定し候補材の抽出を 行った ・損傷を前提に材料の選定を行った。 ・五ホウ酸ナトリウムの場合、耐腐食性が向上することが 確認された | ・損傷を前提にしていることから五 ホウ酸ナトリウムを採用しない場 合の損傷状態を確認する ・移送環境での塩化物SCCの影 響を評価 |



【補足-2】実績と今後の課題(4/4)

| 実施内容 | 実績 | 今後の課題 |
|----------------------|--|--|
| ④水素ガス発生に関する 評価 | ・γ線照射下において、1F条件(海水およびヨウ素、コンク リート)を考慮しても、水素ガス発生の初期G値(見かけの G値)は、概ね0.45と考えてよい結果が得られた ・コンクリート中の自由水および結合水の影響について、 300℃×1日程度の乾燥をおこなうことにより、水素ガス 発生に大きく影響しない結果を得た | ・α線の影響確認 |
| ・水素ガス触媒等の対策 | 水素触媒にかかわる情報収集/候補の選定 ・現実的な水素発生の結果、触媒の再結合の処理能力として十分対応できることが確認された | ・収納缶内の流動詳細検討、被 毒による阻害要因に対する耐性、 収納缶全体を観点からの触媒に よる水素対策の有効性の確認 |
| 4.燃料デブリの収納技術の 開発 | | |
| ①収納缶設計要求事項の 精査 | ・基本となる内径、高さの検討範囲に基づきの安全評価等 ヘフィードバックし要求事項としてまとめた | ・燃料デブリの収納~保管を合理 的に行う観点から工法PJ・基盤 PJと連携して妥当性を検証 |
| ②収納缶基本仕様の設定 | ・収納缶基本形状案の設定 | ・関連PJと連携して見直しを実施 |
| 5.収納缶の移送・保管技術 の開発 | | |
| ①取扱いフロー検討 | ・フローを検討し、収納缶の取扱条件案の設定 ・収納缶の基本構造を設定 | ・工法PJ・基盤PJと連携して妥当 性を検証 |
| ②取扱装置基本仕様の設 定 | ・取扱装置の基本設計案 | ・①に基づき、取扱装置の基本設計の実施 |
| IRID | | ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning |

【参考】収納缶の例(TMI-2の例)

TMI-2では、収納物の状態に応じた3種類の同一外形(3810H× Ø355.6mm)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。 本事業では工法PJ、基盤PJ等の関連PJと連携して1F向けの収納缶仕様(形状等)を決定する。



R. Schmitt 他, Historical Summary of the three mile island unit2 core debris transportation campaign DOE/ID-10400, 1993 より図[Core debris canisters]を和訳



【参考】燃料デブリの収納・移送・保管の概要(TMI-2の例)



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

【参考】想定される1F燃料デブリとTMI-2燃料デブリとの比較

| 燃料デブリの収納・移送・保管の観点から、1F燃料デブリとTMI-2燃料デブリの比較をすると下表のとおりとなる。 大きく異なる点は以下のとおり。 ・1F燃料デブリのほうが燃焼度と濃縮度が高い ⇒放射線、崩壊熱大及び反応度高 ・1F燃料デブリはコンクリートとの溶融生成物が存在すると推定 | | | | |
|--|--------------|---|------------------------------|--|
| | | 1F燃料デブリ | TMI-2燃料デブリ | |
| 燃焼度(炉 | 心平均) | 約25.8GWd/t ^{注1)} | 約3.2GWd/t ^{注2)} | |
| 濃縮度(バ | ンドル平均(最大)) | 3.7 wt% ^{注1)} | 2.96 wt% ^{注2)} | |
| 冷却期間() | 表 短) |) | | |
| 燃料デブリ存在位置 →燃 リ・ が | | 圧力容器内及び格納容器内(推定) ⇒燃料構造材・炉内構造物に加え、コンク リートや計装ケーブル等との溶融生成物 が存在すると推定 | 圧力容器内 ⇒燃料構造材・炉内構造物との溶融生成物 | |
| 収納物量 | 燃料デブリ重量 | — | 134.4t ^{注3)} | |
| | (燃料集合体重量) | 3基合計で約450t以上 ^{注4)} | 約122t ^{注2)} | |
| | (ウラン重量)(未照射) | 3基合計で約260t以上 ^{注5)} | 約82t ^{注2)} | |
| その他 | | 炉内に海水を注入 | _ | |

注1):「JAEA-Data/Code 2012-018 福島第一原子力発電所の燃料組成評価、2012.9、JAEA」より1F-1の値

注2):「DOE/SNF/REP-084 TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis、2003.9、U.S. Department of Energy」より

注3):「G. Lassahn, Uranium and Plutonium Content of TMI-2 Defueling Canisters, EG&G internal technical report, September 1993」より

注4):炉心装荷体数×300kgで算出

注5):福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書(1号、2号、3号、4号、5号及び6号原子炉施設の変更) 本文及び添付書類、平成9年12月、東京電力株式会社



【参考】燃料デブリの保管方法(湿式保管案)

No.78

開発にあたり昨年度検討した保管システムについて全体的な位置づけを再評価。

湿式保管の特徴:湿式保管は、プール水自体を遮蔽材として利用とともに、収納缶内部からの燃料デブリのサンプリングに対応しやすい。



【参考】燃料デブリの保管方法(乾式保管案)

乾式保管の特徴:腐食等に有利で長期保管に適する。



各保管方法を踏まえたまとめ

・燃料デブリの安定な保管には乾式保管が適するが、初期段階は不完全乾燥状態での保管が現実的選択である。

・なお、保管施設・設備の準備などを考えるとごく初期段階に既設プール等を活用した湿式保管も選択肢となる。

・また、保管後も燃料デブリの分析等のニーズがある場合、乾式保管では燃料デブリのサンプリング作業等が大掛かりとなるので、
 少量の湿式施設(あるはホットセル)の併設が有効となる可能性がある。

【参考】収納缶の径と作業性の検討

収納時の作業性の観点からの検討 ⇒Φ220mm以上あれば収納作業の効率化が期待できる



ボーリング方式で採取した燃料デブリを収納
 内径100mm:0.5
 内径108mm:0.65
 内径121mm:0.69
 内径150mm:0.78
 ⇒現状検討されているボーリング径(50mm)の場合、効率的な収納にはφ150mm以上必要。





切り株燃料を収納 内径213mm:0.64 内径336mm:0.51 内径425mm:0.64 内径637mm:0.64 ⇒切り株燃料を収納(15cm(約14cm+α)) φ220mm程度以上の内径が必要



【参考】収納缶の径と保管効率の関係(試算)

金属キャスク/コンクリートキャスク(横型サイロ)/ボールト(集合タイプ)による乾式保管の観点からの検討 ⇒Φ600mm以上の場合、内径変更に対して柔軟に収納数を変更できないため保管効率が低下する。



一般的な100トン級の乾式キャスク/コンクリートキャスクの内径は1600-1800mm程度 保管容器径に対して収納缶径が大きいと、保管容器内径の変更に対して柔軟な収納数変更ができない。

IRID