IRID

平成28年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」 燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化

平成30年度最終報告

令和元年7月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)



- I. 研究の背景•目的
- II. 研究の目標
- Ⅲ. 実施項目とその関連
- IV. 実施スケジュール
- V. 実施体制
- VI. 実施内容
 - (1) 閉じ込め機能に関する技術開発
 - (2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発
 - (3) 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討
 - (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討



I.研究の背景・目的

【背景】

前期の事業では、福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた燃料デブリ・炉内構造物 (以下、「燃料デブリ」という。)取り出し時の工法・システムの検討を実施し、成立性に関わ る課題やリスクを抽出した。

【目的】

本事業は、抽出した課題を解決していくために、工法・システムの高度化に関わる技術 のうち安全確保上の課題である、「閉じ込め機能の確保」、「ダストの捕集・除去」、「α核 種(α線を放出する放射性核種の総称名。)のモニタリング」等の解決に対応し必要に応じ て要素試験を実施する。また、これらの技術開発の成果、および関連事業での検討結果 を反映し、被ばく、保守等の観点で、工法・システムの安全確保に関する最適化検討(前 期事業での検討項目の検討・評価の見直し、工法・システムの比較評価、燃料デブリ取り 出しに関連する全体シナリオ検討等)を行う。



I.研究の背景・目的(前期事業との関係)

本事業と前期事業の関係を下記に示す。 本事業の内容[下記(1)~(4)]の位置づけは、大きく2つ(下記①、②)に分類できる。



基盤技術PJと連携して課題の解決を図る。

Ⅱ.研究の目標

本事業では、工法・システムに関する安全確保上の課題である「閉じ込め 機能の確保」、「ダストの捕集・除去」、「α核種(α線を放出する放射性 核種の総称名。)のモニタリング」等の解決に必要な技術開発を行い、被ば く/保守性等の観点で、比較評価を行い、燃料デブリ取り出しの安全確保に 関する最適化検討を実施することにより、<u>工法・システムの概念検討を完了</u> をすることを目標とする。

実施目的を達成するための、実施内容毎の具体的目標を次紙以降に示す。

【本事業の主な実施内容(交付申請書ベース)】

(1) 閉じ込め機能に関する技術開発

(i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発

- (ii) 被ばく低減に関する技術開発※

(2) 燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(i)気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発

(ii)液相系の放射性物質の低減、除去対策の技術開発

(3) 燃料デブリ取り出しに伴う α 核種モニタリングシステムの検討

(i)気相中のα核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案

(ii)液相中のα核種の検出技術及びシステムの概念検討と開発計画の立案

└→ (4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

※被ばく低減を、工法・システムの最適化における指標の1つとして捉え、「(1)(ii)被ばく低減に関する技術開発」は (4)項と統合して検討を実施。[本報告資料の「Ⅳ. 実施内容」には、当該項目の個別項番なし。]

IRID

Ⅱ.研究の目標(全体の位置づけ)

> 燃料デブリ取り出しの全体検討プロセスにおける、本事業の範囲を下図に示す。 本事業では概念検討として成立することの確認までを行う。

(実機導入までには、更に各プロセスの検討を掘り下げる[詳細設計する]ことが必要)



図. 燃料デブリ取り出しにおける全体の検討フロー(深層防護レベル1)【縮小イメージ】



Ⅱ.研究の目標 [要素技術開発:実施内容(1)~(3)]

システムに関わる要素技術の開発については、既存の技術をベースに燃料デブリ取り出しへの 適用可否を判断するための知見を試験等により収集する。





Ⅱ.研究の目標 [要素技術開発:実施内容(1)~(3)]

(1)閉じ込め機能に関するお	支術開発
(i) 閉じ込め機能の確保のため の技術開発	建屋内、PCV内の差圧の管理条件が設定されていること。 閉じ込め機能確保のための差圧管理のシステム有効性、PCV内部での水素滞留防止 /火災爆発防止の有効性が確認されていること。 建屋/PCVの気密向上の対応策が検討され、有効性の確認がされていること。(終了 時目標TRL:レベル3)
(ii) 被ばく低減に関する技術 開発	燃料デブリ取り出し工事中あるいは事故発生時の更なる公衆や作業員の被ばく低減を目 指したシナリオ検討が構築され、推定被ばく量が評価されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
(2)燃料デブリ由来のダスト	の捕集・除去に関する技術開発
(i) 気相系の放射性物質の 低減・除去対策の技術開発	気相系の浄化機能に関して、安全確保および廃棄物低減を考慮し、効率的にダストを捕 集・回収する方法が検討されていること。 (終了時目標TRL:レベル3)
(ii) 液相系の放射性物質の 低減、除去対策の技術開発	液相系の浄化機能に関して、安全確保および廃棄物低減を考慮し、効率的に非溶解性 および溶解性の放射性物質(a核種)を捕集・回収する方法が検討されていること。(終 了時目標TRL:レベル3)
(3)燃料デブリ取り出しに伴	うα核種モニタリングシステムの検討
(i)気相中のa核種の検出技 術及びシステムの概念検討と 開発計画の立案	気相中のa核種のモニタリングに関し、既存技術によるモニタリングシステムが検討されている こと。燃料デブリ取り出しに向けた気相中のa核種モニタリングシステムの課題が抽出され、今 後の開発計画が策定されていること。(終了時目標TRL:レベル3)
(ii)液相中のa核種の検出技 術及びシステムの概念検討と 開発計画の立案	液相中のa核種のモニタリングに関し、既存技術によるモニタリングシステムが検討されている こと。燃料デブリ取り出しに向けた液相中のa核種モニタリングシステムの課題が抽出され、今 後の開発計画が策定されていること。(終了時目標 T R L : レベル 3)



Ⅱ.研究の目標 [工法・システム検討:実施内容(4)]

システム検討については、現時点の情報に基づき成立性の確認(7頁の検討フロー判断基準 を満足)することを目的として、概念検討を実施した。



Ⅱ.研究の目標 [工法・システム検討:実施内容(4)]

(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討

工法・システムの安全確保に関し、本事業における技術開発で得られた成果および他プロジェクトで得られた成果 を考慮した最適化検討がされていること。

(終了時目標 T R L:レベル4)

<補足> 技術成熟度(TRL)の定義

レベル	本事業に対応した定義	フェーズ
7	実用化が完了している段階。	実運用
6	現場での実証を行う段階。	フィールド実証
5	実機ベースのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階。	模擬実証
4	開発、エンジニアリングのプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施する段階。	実用化研究
3	従来の経験を応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来 経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階。	応用研究
2	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求 仕様を設定する作業をしている段階。	応用研究
1	開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。	基礎研究



Ⅲ.実施項目とその関連(実施項目間の関係)

放射線防護の達成の手段として、閉じ込め(放出抑制)の機能をシステムにより確保する必要が ある。本事業では、システム検討のインプット条件として重要な項目について要素開発を実施 し[実施項目(1)~(3)]、その結果を工法・システムに反映する[実施項目(4)]計画している。

インプット条件(特に成立性に関わる項目) ※インプット条件の一部は他事業と連携して設定



IRID

Ⅲ.実施項目とその関連(他研究との関係)

▶ 他事業と連携し、検討条件(安全の考え方、要素技術など)を共有する。





Ⅲ.実施項目とその関連(他研究との関係)

▶ 他事業との連携に関する実績を以下に示す。

No.	連携先	主な連携内容	連携方法※	本事業への(からの) 主なInput/Output
1	基盤技術PJ	・基盤技術PJで開発中の技術(全般)を、本事業の 工法検討に反映する。 ・基盤技術PJで開発中の技術(主に加工技術、局所 回収設備)をシステム検討に反映する。	PJ合同の打合 せを定期的に 実施(月1回)	Input:燃料デブリ加工による粒子発生量・粒 径など Output:加工技術開発時の採取データに関す る要求など
2	サンプリングPJ	・工法・システムを検討する上で、必要性のある情報 をサンプリングPJIこニーズとして提示する。		Input:サンプリング計画(PCV圧力など) Output:サンプリングのニーズ
3	臨界管理PJ	・安全の考え方など、共通で検討を進める。 ・機器/システムの取り合いがあるため、仕様の共 有(摺合せ)を実施する。	No.1、2の打合 せに適宜参画	Input:臨界管理に関わる安全の考え方、中性 子検出器仕様、システム仕様など Output:ガスモニタ検討条件(排気風量など)
5	内部調査PJ	・工法・システムを検討する上で、必要性のある情報 を内部調査PJにニーズとして提示する。 ・内部調査結果を工法・システムの検討に反映する。	必要に応じPJ 間の打合せを 実施	Input:内部調査結果(燃料デブリ位置など) Output:内部調査のニーズ
6	燃料デブリ性状 把握PJ 炉内状況把握PJ	・燃料デブリ加工時のα核種の挙動について、文献 等での調査を頂き(具体的な内容・取得時期は調整 中)、工法・システム検討に反映する。		Input:燃料デブリの組成、液相から気相への 移行率など Output:取り出し時の温度条件など
7	収納∙移送∙保管 技術PJ	・収納缶側のサイズ・水素対策上の制約等を工法検 討に反映する。		Input:収納缶仕様など Output:取り出し量など
8	水循環PJ	・PCV取水点に関する安全要求などを共有し、 遠隔施工技術の開発条件に反映する。		Input:取水点構成など Output:必要流量など
9	PCV補修PJ	・燃料デブリ取り出し時の安全要求などを共有し、 PCV補修(止水)計画と工法・システムの整合を図る。		Input:取り出し時の実現性が高いPCV水位、 PCV補修方法 Output:PCV圧力(差圧)、排気風量
10	耐震PJ	・燃料デブリ取り出し時のシステム構成や地震によ る波及的影響を共有し、安全シナリオを検討する。		Input:耐震評価結果、大型機器損傷の想定 Output:取り出し時のシステム構成

※全般、Input/Outに関わる内容については、IRID内の審議結果を共有。Input/Output条件については、考え方・出展と伴にリスト化して共有。







Ⅳ. 実施工程[工程表(2/3)]



燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化 実績工程表【平成31年3月時点】(2/3)





©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

Ⅳ. 実施工程[工程表(3/3)]



燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化 実績工程表【平成31年3月時点】(3/3) 平成29年度 平成30年度 備考 大分類 小分類 4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月 10月 11月 12月 1月 2月 3月 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリ 3. 「b. 開発計画の策定」に ングシステムの検討 ついては、必要に応じて 実施する計画である 概念検討 が、既存技術による対 気相中のα核種の検出技術及びシステ a. 概念検討 応の見込みを得たこと ムの概念検討と開発計画の立案 から、計画工程から削 「b. 開発計画の策定」については、 b.開発計画の策定 除。 必要に応じて実施する計画である Ŵ **_** まとめ が、既存技術による対応の見込み 4項^ c. まとめ を得たことから、計画工程から削除。 4項, 4項 概念検討 「b. 開発計画の策定」に ついては、必要に応じて ii. 液相中のα核種の検出技術及びシステ a. 概念検討 実施する計画である ム概念検討と開発計画の立案 が、既存技術による対 b. 開発計画の策定 「b. 開発計画の策定」については、 応の見込みを得たこと **~**... 必要に応じて実施する計画である ৢ から、計画工程から削 c. まとめ まとめ が、既存技術による対応の見込み 除。 4項· を得たことから、計画工程から削除。 V. 4項/ 4項 1項①、1項③ 1項①、② 3項 よい より 2項より 3項より1項より1項2より \geq 2項より1項よ н VV 4. 工法・システムの安全確保に関する最適 工法の最適化検討 化検討 a.工法の最適化検討 ----**X** T 1 b. システム最適化検討 4 システム最適化検討 🚺 まとめ c. まとめ 1項ii より 1項ii より 1項 ii へ※ ※1項 ii 「シナリオ検討」と「被ばく評価」 1項ii.へ※ および4頃は逐次連携を図る (煩雑となるため、1例のみ記載) RIDシレポジウム 中間報告会 主要なマイルストン 最終報告会 年度末報告会 交付決定 RIDシレポジウム中間報告会 (10/12)(4/16)(3/25)(8/3)(10/18) (8/2)

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

Ⅴ. 実施体制

	技術研究組合 国際廃炉研究開発機	⁶ 構
	国際廃炉研究開発機構(本部)	
東京電力ホールティンクス 株式会社	 ▶ 全体計画の策定と技術統括のとりまとめ ▶ 技術開発の進捗などの技術管理のとりまとめ 	5
r	<u>;</u>	
日立GEニュークリア・ エナジー株式会社	東芝エネルギーシステムズ株式会社	三菱重工業株式会社
 ・取出工法評価・要素試験の設計補助 (株式会社日立パワーソリューションズ) ・ダスト封じ込め試験 (株式会社日立プラントテクノロジー) ・気密性向上の技術開発(三井造船株式会社、 中外テクノス株式会社、清水建設株式会社) ・逆洗HEPA試験(Cavendish社[英国]) ・液体中粒子の除去性能試験 (みすず精工株式会社) ・ペデスタル補強工法(清水建設株式会社) 	 ・窒素封入流量変化/PCV差圧測定(新日本空調株式会社 ・バウンダリ内の負圧・気流分布解析(東芝プラントシステム 式会社) ・原子炉建屋の気密性向上対策案の検討および要素試験 島建設株式会社) ・被ばく評価に係わる設計助成(東芝テクニカルサービスイ) ターナショナル株式会社) ・逆洗可能な乾式集じん機の要素試験(新日本空調株式会社) ・逆洗可能な乾式集じん機の小型化(株式会社IHI) HEPAフィルタの遠隔交換技術の開発(新日本空調株式会社) ・田子設備へのホウ素影響確認試験(栗田工業株式会社) ・既存設備へのホウ素影響確認試験(栗田工業株式会社) ・既存設備へのホウ素影響確認試験(栗田工業株式会社) ・ 下存設備へのホウ素影響確認試験(栗田工業株式会社) ・ 下方設備への赤ウ素影響確認試験(東田工業株式会社) ・ 下方設備へのホウ素影響確認試験(東田工業株式会社) ・ 下方設備へのホウ素影響確認試験(東田工業株式会社) ・ 市方設備へのホウ素影響確認試験(東田工業株式会社) ・ 市方設備へのホウ素影響を認試験(東田工業株式会社) ・ 市方設備へのホウ素影響を認試験(東田工業株式会社) ・ 市方設備へのホウ素影響を認試験(東田工業株式会社) ・ 市方設備へのホウ素影響を認試験(東田工業株式会社) ・ 市方式のの最適化検討に係わる検討補助(東芝デヘロップメントエンジニアリング株式会社) ・ て法・システムの最適化検討に係わる設計助成(東芝デヘロップメントエンジニアリング株式会社) ・ 安全要求、安全設計に係わる設計助成(MPR社[米国]) 	 ・閉じ込め機能に関する検討助勢(MHIニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング株式会社) ・ダストの捕集・除去に関する検討助勢(MHIソリューション テクノロジーズ株式会社、中外テクノス株式会社、ニュー クリア・デベロップメント株式会社) ・ダストの捕集・除去に関する要素試験助勢(MHIソリュー ションテクノロジーズ株式会社) ・ダストの捕集・除去に関する要素試験助勢 液相粒子除去:液体サイクロン/バグフィルタ試験(富士 フィルター工業㈱)、MU膜試験(日本ポール株式会社応 用技術研究所)、粒子測定(ホソカワミクロン株式会社) 気相粒子除去:洗浄塔(株式会社 OKAMURA、ミウラ化 学装置株式会社) * エ法・システムの安全確保に関する最適化検討助勢(MH Iニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング 株式会社)

- Ⅵ. 実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析 1. 課題の整理

技術開発により解決すべき課題

- ●燃料デブリ取り出し作業により発生するダストの閉じ込めは、バウンダリ範囲の設定とそのバウン ダリに存在する開口に応じた排気を確保することによる負圧管理で行う方針。
- このバウンダリの設定と負圧管理による閉じ込め技術が成立するためには、以下の課題(1~ 3号機共通)を解決する必要がある。





Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発

- (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

2. 実施概要と位置付け

<技術開発の空間的な分類>

- ▶ 燃料デブリ取り出し時には、下図のような状況が 想定される。
- ▶ 本事業での取り組みを、空間的な分類に基づき 整理した結果を右表に示す。



図. 燃料デブリ取り出し時に想定される現象と取り組みの空間的分類

PCV全体(解析+実機試験[東電HDエンジニアリング])

課題	取り組み の分類	備考
①バウンダリに存在する 開口の情報が不明	実機試験 [東電HDエンジ ニアリング]	本事業では、開口情報推定の ための試験を提案 (東電HDで実施)
③PCV内の圧力勾配の把 握		<u>解析コード(集中パラメータモ</u> <u>デル、分布パラメータモデル)</u>
④工法毎のダストの拡散 予測	解析	<u>の使い分けについては、別紙</u> <u>参照。</u>
⑤水素の局所滞留の可 能性		

開口近傍(解析+要素試験)

課題	取り組み の分類	備考
②開口部におけるアウ トリークの防止	解析+要素試験	<u>局所模擬の解析を要素試</u> <u>験結果と比較することで</u> <u>コードの検証を実施</u>

トーラス室(解析)

課題	取り組み の分類	備考
⑤水素の局所滞留の可 能性	解析	



- Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i)閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析
- 3. 課題解決に向けた対応方針
- 前頁の課題に対して、目的とする設計に必要な情報をどのように取得するか対応方針を検討。
- ・技術開発の対象として、解析、要素試験、実機での確認に分類して整理。
- 解析、要素試験、実機確認の何れかで必要な情報を取得できる技術を確立することを目標とする。

課題	設計に必要な情報	解析	要素試験	実機確認	備考
①バウンダリに存在す る開口の情報	負圧維持に必要となる 排気風量を決定づけ る開口情報	(実機に存在する開 口情報は、解析では 取得不可)	(実機に存在する開 口情報は、要素試験 では取得不可)	開口情報推定のため の試験	
②開口部におけるア ウトリークの防止	局所的にもインリーク を担保可能な負圧値	(局所模擬の解析を 試験結果と比較する ことでコードの検証を 実施)	局所模擬の要素試験 で負圧管理値の妥当 性を確認	≪決定した差圧管理 値での運用≫	破損したバウンダリに対 する動的バウンダリの成 立性の確認のために実 施
③PCV内の圧力勾 配の把握	負圧管理の説明性の ために、局所的な圧力 の偏りがないことの確 認	PCV全体の圧力分布 を評価し、PCV全域 で必要負圧を担保可 能なことを確認	(実績のある解析コー ドで確認。)	≪代表点の圧力監視 ≫	
④工法毎のダストの 拡散予測	気相に浮遊するダスト の位置と粒径の推定 情報	PCV内のダスト挙動 解析でダスト分布を確 認	工法毎の発生ダスト情 報取得(基盤技術 PJ)	«ダスト濃度モニタリ ング»	局所回収とシステム側 での回収の線引きの確 認
⑤水素の局所滞留 の可能性	水素滞留箇所、掃気 に効果のある窒素流 量、封入場所	水素分布解析により 滞留発生箇所を評価 し、窒素封入量、場所 を検討。	(実績のある解析コー ドで確認。)	«排気水素濃度監 視。 局所の水素濃 度計測は困難»	

≪≫は燃料デブリ取り出し時の対応案





- Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i)閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析

5. 実施内容

- 課題を解決するための技術開発として解析、要素試験を組み合わせて実施。
- 気流分布予測、ダストの拡散予測、水素の局所滞留検討に適用可能な解析手法を概ね確立するとともに、 要素試験により放射性ダストの閉じ込めを担保可能な差圧条件を設定した。

【ダストの拡散予測実施例】

- 0.1kPa負圧化条件が保たれている状態において、切削燃料デブリを想定したダスト (粒子径1µm)を10時間連続注入する
- 重力沈降(沈着)のみをエアロゾル自然 除去モデルとして考慮。

エアロゾル注入



IRID

凡例 破断□

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

- Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i)閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析
 - 6. 閉じ込め機能の確保のための技術開発 最終成果

燃料デブリ取り出し作業により発生するダスト閉じ込め機能を確認するため、負圧条件下におけるPCV内流動挙動に対する下記4項目※の技術開発課題を摘出した。

2年間の補助事業において、課題を解決するため解析手法を選定し、その適用性を 検討した。

▶ 課題②:開口部におけるアウトリークの防止

要素試験:PCV模擬開口、負圧度をパラメータとして、開口部近傍や容器内の流況、模擬開口の圧損特性を把握した。流動の可視化(PIV測定)によりアウトリークが発生していないことを確認した最低負圧条件:50Paを限界負圧度に設定した。 解析:GOTHICコードによる実機PCV詳細モデルを整備し、各種の感度解析を実施。模擬開口の圧損特性に関しては、要素試験の傾向を概ね再現できた。

▶ 課題③: PCV内の圧力勾配の把握

実機PCV体系の詳細モデルを整備。

また、開口部位置を変化させ、PCV内圧力分布を評価。いずれのケースでも、PCV内で 大きな圧力差は形成されず、PCV全域で必要負圧を担保可能な見通し。

※課題①は本事業ではなく東電HDエンジニアリングで実施のため記載していない。



- Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i)閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析
- 6. 閉じ込め機能の確保のための技術開発 最終成果
 - ▶ 課題④:工法毎のダストの拡散予測
 - GOTHICコードのエアロゾル挙動評価モデルを用いて、燃料デブリ切断によるダストがPCV 内にどのように移行するかの試解析、並びにモデル検証を実施し、特に粒径の影響が大き いことを確認。
 - また、実機PCV体系では、重力沈降モデルを考慮することで排気系への移行やPCV内での沈着、漏えい口からのアウトリーク量を評価できること、並びに排気停止時に窒素供給を停止することによる放出放射能の抑制効果を評価できることを確認さらに、今後より現実的な評価を実施するための課題を摘出。
 - > 課題⑤: 水素の局所滞留の可能性
 - PCV内の水素拡散挙動、開口部からのインリークに伴う酸素濃度分布(排気停止時の 過渡状態含む)、トーラス室内の水素濃度分布の評価を実施。

GOTHICコードによる気流解析によって、PCV内形状、破損口位置など幾何情報 及び窒素注入、PCV排気などの風量及びその変化による流動、水素・酸素濃度分 布、ダスト挙動への影響の定性的特徴を把握できることを確認した。

以上より、燃料デブリ取り出し時における閉じ込め機能確保のため、窒素封入や PCV排気システムなどの系統設計に資する気流解析評価手法を確立した。



- Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i)閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析 7.成果に基づく設計適用領域

開発したモデルを活用し、一次バウンダリ内気相閉じ込め、水素対策のためのバウンダリ設計・空調システム・窒素注入系の系統設計・モニタリング要求に活用できる。破損口の位置・面積など解析条件に対して不確かさが存在するため、設計においては、不確かさを考慮しても保守的な設計がなされるよう留意が必要である。

【一次バウンダリの設計】

- > 一次バウンダリの破損口の位置・面積の影響・感度の確認
- > アクセス扉開閉の影響の確認
- ▶ 異常時を含めた一次バウンダリ開口面積が増加する場合の影響の確認

【空調システム・窒素注入系の系統設計】

- 排気位置、窒素注入位置の検討
- ▶ 系統仕様値やインターロックの検討

【モニタリング要求】

➤ モニタリング設置位置・設定値・検出遅れ許容時間の検討

- Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
- (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
- (a) ダスト閉じ込めに有効な差圧管理に関する要素試験、各バウンダリ内の負圧・気流分布等の解析 8. 課題への対応方針

【気流分布解析】

- 破損口の面積や位置情報については、早期の不確かさ低減は容易ではないと考えられる。これら不確かさ踏まえた設備設計を行えるように、開発したモデルを活用しながら検討する必要がある。
- GOTHICコードによるPCV気流解析モデルを構築したが、解析モデルの適用範囲拡大のためには、熱発生・移動及び一次バウンダリ外の流動からの影響等の評価するためのモデル化が有効である。これにより、均圧時の煙突効果や大気変動による漏えいの模擬などが可能となる。

【解析インプット条件の不確かさ低減】

IF実機における燃料デブリ切断時に発生するダストの粒径分布に大きな不確かさがあるとともに挙動への影響も大きい。この不確かさを、ステップバイステップで長期にわたって低減していくための方針について検討する必要がある。

【エアロゾルモデリングの開発】

▶ エアロゾルの再浮遊及び湿潤環境(凝縮等)での効果を含めた現実的なエアロゾル 挙動評価は、モニタリング精度向上(エアロゾル発生点から測定点までの挙動)等に おいて重要となり、これらについては、GOTHICコードのモデル検証も合わせて必要とな る。



- VI. 実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
 - (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
 - (b) 気密性向上対策の検討

①コンテナ構造のコンセプト検討

燃料デブリ取り出し時の気密性向上対策として、コンテナ構造のコンセプト案を検討した。

- 全体コンテナ:既存設備全体を覆うコンテナ
- 個別コンテナ:燃料デブリ取り出しセルの周りだけを覆うコンテナ
- SSC (Single Skin Container) : コンテナ壁面を一重のパネルで構築
- WSC(Double Skin Container):コンテナ壁面を二重のパネルで構築



- VI. 実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発
 - (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
 - (b)気密性向上対策の検討
 - ② 新規構造物に関する気密性向上対策の検討

気密や遮へい機能を持った増設建屋を新規構造物として原子炉建屋外に設置し、同様に気密や遮 へい機能を持ったアクセストンネルでPCVと接続することを検討中である。アクセストンネルに関する概 念検討を行い、工法の実現性を早期に見極めるための要素試験を実施する。

- 開発の目的
 - アクセストンネルの燃料デブリ取り出しへの適用性の確認。
 - ✓ アクセストンネルの設置作業手順の確認。
 - ✓ アクセストンネルの遠隔設置方法の確認。
- 解決すべき課題
 - アクセストンネルは重量物であるため、原子炉建屋の床荷重制限に適合している必要がある。
 - ▶ 重量物であるアクセストンネルを設置可能な手順を検討する必要がある。
 - ▶ 設置時の作業員被ばく等を考慮すると、アクセストンネルは遠隔で設置する必要がある。
- 得られる成果
 - ▶ アクセストンネルエ法の実現性。









©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



・位置調整用ジャッキを運転・制御しBSW開口部との相対位置並びに距離を把握した上で、マニュアルによる調整運転を実施し、所定精度内でアクセストンネルとBSWを接続する。

使用ジャッキ概略仕様 調整装置兼直線送り用ジャッキ(4 基) ・水平方向能力(1 基あたり):30kN 50kN(2種) ・送り出しストローク:1000mm ・鉛直荷重(1 基あたり):2000kN ・鉛直ストローク:230mm 位置調整用ジャッキ(2基) ・調整ストローク、X/Y±100mm ・鉛直荷重(1 基あたり):2000kN ・鉛直ストローク:230mm ※実重量で使用予定の装置と同等





- (b) 気密性向上対策の検討
 - 2 新規構造物に関する気密性向上対策の検討
 (3) 要素試験 一試験結果

 - 「直線部送出し」「BSW遠隔接続」の試験結果を示す。
- ■トンネルパーツの動作状況



■ジャッキ動作状況

■接続部の状態



項目	単位時間 [min]	繰返し回数 [回]	小計 [min]
直線送出(190mm)	1	40	40
盛替え(XY調整のみ)	2	32	64
盛替え(XY調整+推進)	10	7	70
直線送出(190mm)	1	2	2
直線送出(50mm)	1	2	2
盛替え	4	6	24
位置調整	1	3	3
		合計	205



Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発

- (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
 - (b) 気密性向上対策の検討
 - ② 新規構造物に関する気密性向上対策の検討

(4) 開発目標·結果

[TRL]

要素試験により工法の実現性確認を実施するものは、工法実現性の見極めがなされており、課題の抽出と開発計 画が策定されていること。(終了時目標TRL:レベル3)※

試験項目	開発目標	実現性に向けた判定基準	結果	判定
トンネルパーツ の送り出し	複数のシリンダー操作 により、トンネルパーツ を送り出す作業の実現 性を確認する。	トンネルパーツを計画位置まで送り出すこと が可能であること。	複数のシリンダーを協調制御して所定の位置への送り 出し作業が可能であった。(数ミリ単位でのインチング 操作が可能であった。)	良
狭隘開口にお ける曲面トンネ ルの送り出し	狭隘開口部に対し、曲 面トンネルパーツを送 り出す作業の実現性を 確認する。	曲面トンネルパーツを送り出すことが可能で あること。	狭隘開口部に干渉することなく、ほぼ設計値通り(誤差 ±2mm程度)に曲面トンネルパーツを送り出した。	良
遠隔作業監視	遠隔作業監視(カメラ、 照明の配置)に関する 実現性を確認する。	計画位置までの送り出し作業の監視が可能 であること。	カメラ、レーザを用いてアクセストンネル位置(基準線 とのズレ)、建屋壁との干渉(スキマ量の監視)、BSW 開口との距離、相対位置の作業監視が可能であった。	良
位置決め精度	BSWへの接続位置が 計画した位置に接続 することが可能か実現 性を確認する。	計画位置への接続精度が±50mm以内であ ること。 (BSWとの取り合い寸法隙間が約100mmで あるため±50mm程度の精度が必要となる)	目標±50mmに対し、±20mm以内の接続精度を確保し た。	良

※ 従来の経験を応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき 開発、エンジニアリングを進めている段階。



Ⅵ.実施内容(1)閉じ込め機能に関する技術開発

- (i) 閉じ込め機能の確保のための技術開発
 - (b)気密性向上対策の検討
 - ② 新規構造物に関する気密性向上対策の検討
 - (5) 課題に基づく開発計画

開発·検討結果	課題	課題への対応方針
概念検討 ・PCVとの接続方法検討	概念検討を実施したPCVとの接続方法について、遠隔施工性を検証する。	PCVとの接続方法要素検証 (次年度以降に検討する)
要素試験 ・トンネルパーツ送り出し ・狭隘開口における曲面送り出し ・BSWおよび機器ハッチとの遠隔接続 (位置決め) ・遠隔監視 	要素試験により送り出しの方法やジャッキの制御方法はおおむね確立。 ただし荷重集中するスライディング部の摩擦係数は、実機重量においても同等に確保する必 要がある。重量増加に伴う材料の弾性変形による送り出し性能に影響する可能性があるため、 当該部への材料選定や機構的な工夫を設計し、試験によるさらなる検証が必要。	重量物取扱要素検証 (次年度以降に検討する)
その他 ・アクセストンネル適用性拡大	アクセストンネルの"放射線の遮蔽性能"や"作業員被ばく低減に貢献する遠隔設置方法"を基 本に、廃炉工法上における適用場面の拡大(他号機適用、を検討する。例えば、アクセストン ネルの適用性と冗長性を確保することを目的に、遮蔽材料の可変化を検討する。	重量物取扱要素検証 (次年度以降に検討する)

Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

- 燃料デブリ取り出し時には、気相中/液相中に燃料デブリ由来のダスト(および溶解物)が流入する ため、システム検討に必要な情報の取得を進めている。
- 対象技術は大きく以下(i)~(iii)に分類され、2018年度に要素試験を実施した。

<開発技術の分類>

- (i) 気相系粒子除去技術^{※1}
- (ii) 液相系(非溶解性[粒子]) 除去技術^{※2}
- (iii) 液相系(溶解性) 除去技術*2

【目標】 燃料デブリ取り出し時に優位な技術選定、システム検討に反映するデータの取得

2017年度末:有効な型式の選定、システム検討 技術調査:技術マッピング作成、優位技術評価 要素試験:試験計画立案 システム検討:技術調査結果を踏まえたシステム検討 システム検討:技術調査結果を踏まえたシステム検討



※1 交付申請書ベースの実施内容(P.5)「気相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発」に対応

※2 交付申請書ベースの実施内容(P.5)「液相系の放射性物質の低減・除去対策の技術開発」に対応(非溶解性と溶解性除去技術の2つに分割)



Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(36)

- (i) 気相系粒子除去技術
- (a)気相系粒子捕集・除去に関する要素試験の目的及び対象



図. 燃料デブリ取り出し時の気相系システム(概念図※2)と要素試験の実施対象


Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

- (i) 気相系粒子除去技術
- (b) 気相系粒子捕集・除去に関する要素試験の一例

◆ろ過式集じん(前処理)の逆洗性能(差圧回復性能)試験



試験体 A / B/C (繊維径 2 µm、4 µm、6 µm^[*1]) の3種の金属フィルタメディア を試験した。

結果①:除去効率

試験体 A / B/Cにて、それぞれ99.09%、90.83%、57.85% (全て試験開始時) 結果②:逆洗性能

・試験体Bについては、差圧上昇速度(Pa/分)が最も緩やかで逆洗を繰返しても目 詰まり速度が早くならない良好な結果[*2]が得られた。

・試験体A、Cは差圧上昇速度(Pa/分)がBに比べ2倍程度早く、逆洗を繰り返すことで目詰まり間隔が短くなる。



IRID

逆洗性能が比較的良好である金属フィルタを製作可能であることがわかった。

[*1] 本試験は製作可能性の確認が目的のため、特に性能への寄与が大きいと推定される繊維径を変えた試験を実施。 [*2] 差圧上昇速度が増加しなければ、定期に逆洗に行った場合のフィルタ差圧は一定以下に維持されることになる。



37

金属フィルタ



Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

- (i) 気相系粒子除去技術
- (b)気相系粒子捕集・除去に関する要素試験の一例
 - ◆遠隔交換技術の試験装置





38)

交換用フィルタユニット



フィルタ遠隔交換装置

まとめ

・エアシリンダーを用いての遠隔交換装置の位置決め及び交換後の気密維持に問題ないことが確認できた ・交換装置内へのフィルタユニット搬入位置の要求精度の度合いが確認できた



Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

נזלו ניוין 🗙

39)

(i) 気相系粒子除去技術

(c) 気相系粒子捕集・除去に関する要素試験結果まとめ

大項目	小項目	まとめ	目標達成状況
前処理 技術	洗浄式集じん (棚段式洗浄塔) 除去性能取得	 ✓ 平均粒径8µmの粒子では、概ね除去効率90%達成で き、各パラメータに大きく影響せず、安定した除塵が可能 であることが解った。 ✓ 一方、平均粒径0.8µmの粒子では、除去効率の低下 が見られた。 	平均粒径0.8µmにおけ る試験パラメータ依存性 の確認、および廃液性 状の確認を以って達成。
	遠心式集じん (サイクロン) 除去性能取得	 ✓ 捕集性能について、比重・粒径・流量などをパラメータとした試験を行い、65~95%超の高い捕集性能を確認した。 ✓ 粒子の遠心式集じん内面への付着を確認した。 	これまで明確になってい なかった捕集性能や捕 集性能と比重・粒径・流 量等のパラメータとの関 係性の確認を以って達 成。
	ろ過式集じん (逆洗式乾式集じん機) 逆洗性能取得	✓ 前処理フィルタとして十分な捕集効率を持つ金属フィルタ にて、繰り返し逆洗後の差圧回復が可能であることを確 認できた	濾材の選定、逆洗によ るフィルタ差圧回復機能 の確認を以って達成。
最終処理 技術	HEPAフィルタ (金属メッシュ) 逆洗性能取得	✓ 各種模擬粒子に対して、99.950%以上の捕集効率と パルスジェットによる逆洗機能の有効性(長期的な差圧 の上昇抑制効果)を確認した。	流入が想定される粒子 条件に対する捕集効率 と逆洗機能の有効性の 確認を以って達成。
遠隔保守 技術	角型フィルタの 遠隔交換技術開発	✓ 遠隔交換操作によりフィルタユニット位置決めが可能であること、及び流路に接続後ノンリークであることが確認できた	遠隔交換操作、および 据付状態が良好である ことを以って達成。



Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(40)

- (i) 気相系粒子除去技術
- (d)気相系粒子捕集・除去に関する技術開発における今後の課題
 - ▶ 本事業の研究成果として、各粒子除去装置の実機適応性や発生廃棄物の性状について確認をすることができた。
 - ▶ 実機導入までの課題としては、以下が挙げられる。
 - ✓ 燃料デブリの加工特性(発生粒子量、粒径など)やサイト固有環境条件(海塩粒子、砂、 ホコリなど)の情報収集結果を踏まえてた、前処理装置の型式選定、付帯システムの検討
 - ✓ 逆洗後の集積粒子の排出方法の検討
 - ✓ 試験検査基準(原子力仕様など)への適用性確認

Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術 (a)液相系粒子捕集・除去に関する要素試験の目的及び対象



図. 燃料デブリ取り出し時の液相系システム(概念図※2)と要素試験の実施対象



Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術 (b)液相粒子捕集性能確認試験

- 原水槽に粒子を投入し、ポンプにより原水をフィルタ機器に通し、粒子を捕集する
- ・ 上流側と下流側のSS濃度差より粒子捕集率を評価する
- 粒子成分、流量などを変更し粒子捕集率への依存性を評価する



<u>粒子除去性能 比重依存性</u>

模擬剤	比重	粒子捕集率
炭化タングステン	15	45%
SUS316L	8	12%
ケイ砂	3	1%
混合※		20%

※:3種類の粒子を等質量混合

42

<u>粒子除去性能 流量依存性/粒径依存性</u>

粒径 流量	10 µm	100 µm
3 m³/h	7%	99%以上
10 m³/h	20%	99%以上

- 粒子比重が大きいほど粒子捕集率は高いというオートストレーナの原理通りの粒子除去性能を確認した
- スリットよりも大きな粒子はほぼ99%以上取り除けることを確認した

Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術 (c)液相粒子逆洗性能確認試験

- 通水試験後に逆洗を実施し、差圧、逆洗圧力の挙動より逆洗性能を評価する
- 逆洗水の発生量、逆洗水中に含まれる粒子の粒径分布などの逆洗水性状を評価する



- 逆洗によりフィルタ差圧は初期差圧程度まで回復することを確認した
- 逆洗水中に含まれる粒子は原水に含まれる粒子とほぼ同様の粒径分布であることを確認した

Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術 (d)液相系粒子捕集・除去に関する要素試験結果まとめ(1/3)

▶ 粒子捕集性能

評価項目	系統	機器	結果・考察
		液体サイクロン	 ✓ データの無かった比重の大きな粒子(SUS、炭化タングステン(WC))に対して、除去効率のデータを取得、除去効率90%以上(DF>10)となる粒径が明らかとなった(SUS:60µm、WC:30µm、シリカ:100µm)。 ✓ これらの結果はサイクロンの基礎式に合致しており、設計検討に反映できるものと考える。
性能	粗取り	50μm オートストレーナ	 ✓ 粒径がスリット幅よりも小さい粒子の除去率は、比重の大きな炭化タングステンで45%であるのに対して比重の小さなケイ砂では1%となり、粒子の比重が大きいほど粒子除去効率が高いという、原理どおりの傾向が確認された。 ✓ 粒径がスリット幅よりも大きな粒子に対する除去効率は99%以上であることを確認した。 ✓ α核種除去の観点で粗取り設備は中取り設備の負荷低減に資することを確認した。

▶ 逆洗性能

評価項目	系統	機器	結果・考察
逆洗性能	中取り	金属焼結 フィルタ	 ✓ 逆洗による差圧の復帰傾向を確認した。 ✓ 粒径の小さい粒子が含まれるほど差圧上昇傾向が大きいことを確認した。これは粒径の小さい粒子でケーキ層が形成され、粒度断面積が減少するためと推察される。 ✓ 粒径の小さい粒子による差圧上昇を緩和するために適切なフィルタ孔径の選定が必要となる。
	最終処 理	MF膜	 ✓ SS濃度 300ppm、流量 10 L/minの通水条件において逆洗までの通水量が1000 L、逆洗後の通水初期差圧が約0.2MPa、2回の逆洗後にはほぼ初期状態まで回復することを確認した。 ✓ 比較的高いSS濃度にて長時間の処理が可能であることが確認でき、前段の設備で適切に負荷を低減することで、長期に逆洗等の操作無く使用できると予想される。
		UF膜	 ✓ 逆洗によって差圧は復帰傾向を示した。 ✓ 但し、逆洗回数の増加等によって、逆洗性能が劣化(逆洗後の初期差圧が上昇)する傾向 を示した。



Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術 (d)液相系粒子捕集・除去に関する要素試験結果まとめ(2/3)

> ドレン水・逆洗水性状

評価項目	系統	機器	結果•考察
	粗取り	液体サイクロン	 ✓ドレン水中の粒子の粒径分布(重量基準)は、大粒子の比率が増加、小粒子の比率が低下しており、沈降分離等による粒子回収率の向上が期待できる。 ✓ SS濃度が20倍に濃縮されたドレン水が処理流量の1/20量発生する。
ドレン水・ 逆洗水		50μm オートストレーナ	 ✓ドレン水中の粒子の粒径分布は、投入した粒子より大きくなるものの、オーダー的に有意差はなく、粒子の凝集はしていないと考えられる。 ✓ 粒径100µmの粒子は数分、粒径10µmの粒子は数十分以内に沈降する。
性状	中取り	金属焼結 フィルタ	✓ 逆洗水中の粒子の粒径分布は、投入した粒子とオーダー的に有意差はなく、粒子の凝集はしていないと考えられる。
	最終処 理	MF膜	✓ 逆洗水中の粒子の粒径分布は、投入した粒子とオーダー的に有意差はなく、粒子の凝集はしていないと考えられる。
		UF膜	✓ 逆洗水中の粒子の粒径分布は、投入した粒子とオーダー的に有意差はなく、凝集はしていないと考えられる。
ホウ酸 添加	-	-	 ✓ ホウ酸の添加により粒子の粒径が大きくなる傾向と、溶媒の粘度が上昇することが確認された。 ✓ 各機器の除去性能や逆洗性能等に対する影響は確認されなかった。

Ⅵ. 実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術 (d)液相系粒子捕集・除去に関する要素試験結果まとめ(3/3)

(46)

≻ 廃棄物発生量

評価項目	系統	機器	結果。考察
	粗取り	液体サイクロン	 ✓ 10m³/hの処理量に対し、回収SSを含むスラッジ廃液が0.5m³/h発生する。 ✓ 除去されるSSの全量がドレン廃液0.5m³/h中に濃縮含されており、後処理工程(脱水・乾燥等)が小型化できる。 ✓ 分離されたSSの一部がサイクロン底部(ドレン抜出部付近)に滞留するため、実機反映時には滞留防止の工夫を施す必要がある。
		50μm オートストレーナ	 ✓ ドレンを2日に1回実施した場合、ドレン水発生量は2.0E-02m³/yと試算される ✓ 処理対象水には粒径100 µmと10 µmの粒子が濃度100ppmで含まれていると仮定すると、スラッジ発生量は5.1E+06g/yと試算される
廃棄物 発生量	中取り	金属焼結 フィルタ	✓ 処理対象水のSS濃度を1ppmと仮定した場合、逆洗水発生量は255L/回、逆洗頻度は1日に1回、逆洗水のSS濃度は1000ppmと試算される
		バグフィルタ	✓ フィルタ廃棄物量は56本/年となる (スラッジを含めた廃棄物総容積:0.16m ³)
	最終 処理	UF フ ィルタ (逆洗有)	 ✓ 逆洗を2日に1回実施した場合、逆洗水発生量は1.3E+01m³/yと試算される ✓ 処理対処水には粒径1 µmと0.1 µmの粒子が濃度100ppmで含まれていると仮定すると、スラッジ発生量は8.8E+06g/yと試算される
		UF フ ィルタ (逆洗無)	✓ エレメント廃棄物量は10本/年となる(スラッジを含めた廃棄物総容積:1.3m ³)

Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発
 (ii)液相系(非溶解性[粒子])除去技術
 (e)液相系粒子捕集・除去に関する技術開発における今後の課題と対応方針

本事業の研究成果として、各粒子除去装置の実機適応性や発生廃棄物の性状について確認をすることができた。この成果を踏まえ、今後は今回得られたデータを活用し、液相系システムの具体化に向けた検討を進める必要がある。この液相系システム検討の具体化に向け、次年度の開発必要項目として以下が挙げられる。

- ✓ ドレン水・逆洗水の性状を考慮した収集システムの検討(次年度以降に検討する)
- ✓ 粒子収集後の抜出方法検討と抜出候補技術の適用性確認試験の実施
- ✓ 各粒子除去設備の実機設計に向けたドレン・逆洗開始(差圧)及び逆洗(流量・ 圧力)条件に関するデータ取得試験の実施
- ✓ 各粒子除去装置入口水質の実機条件設定に向けたデータ取得試験の実施

Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

(iii) 液相系(溶解性) 除去技術

(a) 液相系溶解性核種捕集・除去に関する要素試験の目的及び対象

- 燃料デブリ取り出し時のシステム(液相系)の 概念図を下段に示す。
- そのうち、昨年度検討により抽出した優位技 と整理した項目について、要素試験を実施。



除去性能の取得が必要な

図. 燃料デブリ取り出し時の液相系システム(概念図※1)と要素試験の実施対象



Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発

- (iii) 液相系(溶解性) 除去技術
- (b)液相系溶解性核種捕集・除去に関する要素試験の実施結果例

◆浸漬試験による一次スクリーニング結果

本試験の目的:文献調査等から選定したα核種を除去するための候補吸着材について、1F実機条件の液性状での吸着 データが不足している。 各システムパターンの液性状に対応した条件にて、Am除去性能に関する基礎データを取得する。



✓ PCVからの漏えいがない場合を想定した水質条
 件下にて、高いAm除去性能を示した活性炭、
 ケイチタン酸について、PCVからの漏えいがある
 場合を想定した条件においても、高いAm除去
 率を示すことを確認した。

PCVからの漏えい有の場合のAm吸着性能の把握 試験液条件 pH5~9、Clイオン200ppm、五ホウ酸ナトリウム0/7,000ppm





Ⅵ.実施内容(2)燃料デブリ由来のダストの捕集・除去に関する技術開発 (iii)液相系(溶解性)除去技術 (c)液相系溶解性核種捕集・除去に関する技術開発における今後の課題

▶ 燃料デブリ取り出し作業時の液相中に含まれる溶解性のa核種に対し、吸着による除去に適用可能な吸着材 を検討するために、Amを用いた除去性能確認試験により一次スクリーニングを行った。

- ▶ 浸漬試験による一次スクリーニングの結果、活性炭、ケイチタン酸塩など、既存の入手可能な吸着材にてAmを 比較的よく除去できる吸着材があることを確認した。
- ▶ 流通試験によって実機での処理と同様の流通試験を行い、通水初期のAm除去性能を確認した。
- ▶ 以上より、溶解性a核種のうちAmに対し、効率的に捕集・除去する手法として吸着を適用できる見込みを得た。

◆今後の検討・開発課題

◆今年度の成果

今後は、Am以外のa核種に対する吸着除去の適用可否を検討・評価していくとともに、溶解性a核種除去装置の 具体化に向けたデータ取得試験を進める必要がある。次年度以降の開発項目として以下が挙げられる。

- > Am以外のa核種(Pu、U等)に対する吸着除去の適用可否確認
- ▶ 長期流通試験による除去性能、通水差圧、廃棄物発生に関するデータの取得
- ▶ 除去対象であるa核種の1F実機条件での溶解状態に関するデータの拡充
- > 作業員被ばく低減を考慮した吸着材(吸着塔)交換技術の開発
- > a核種を捕捉した吸着材の保管・廃棄方法の検討



Ⅵ. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討

1. 検討の進め方

- ▶ 深層防護で設定した被ばく量の管理目標(公衆/作業者)を担保するためには、核種の濃度管理・監視が重要となる。
- IFの汚染環境下でも、βγについては既存技術での管理が可能な見通しであるが、α核種については吸入による被ばく量が大きく、BGの大きな環境での監視が困難であると考えられることから、本事業にて既存技術での対応可否を検討。

⇒aモニタリングの進め方については、以下の流れで検討を実施した。





Ⅵ. 実施内容(3)燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討

2. aモニタリングの目的と深層防護レベル

監視パラメータのうち、α放射能濃度の監視が必要となる項目に対する深層防護レベルを以下の通り設定した。

〇:状態監視に使用するパラメータ

52

●:放出量監視に使用するパラメータ

灭姑		深層防護レベル				
不刑	監視ハリメータ	1 通常時	2 異常時	3 事故時		
	一次バウンダリ内(PCV内気相中) 放射能濃度	© * ²	0	ー (レベル3は二次バウンダリ側で対処)		
気相系	ー次バウンダリ排気放射能濃度 (フィルタ後段)	• * ¹	• * ¹	• * ¹		
义阳术	二次バウンダリ内放射能濃度	0	◎ (漏えい検知)	◎ ^{* 1} (一次バウンダリ機能喪失時)		
	二次バウンダリ排気放射能濃度 (フィルタ後段)	• * 1	• * 1	• * 1		
	PCV内水中放射能濃度	O* ³	0	ー (レベル3はトーラス室側で対処)		
液相系	トーラス室水放射能濃度	O* ³	0			
	排水内放射能濃度 (水処理系統後)	● * 1、4	0	ー (漏えい時の環境放出は堰等で防止)		
		注記 * 1:環境	への放出量監視	今田(二)市田		

* 2: 潜仕的なリスク低減の目標官埋に使用

*3:潜在的なリスク低減の目標管理に使用するかどうかは検討中

*4:環境へ排水する前に、タンク等に貯留した状態で分析することを想定。

IRID

Ⅵ. 実施内容(3)燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討

3. 既存気相系αモニタの適用性まとめ

測定レンジ・時間要求を考慮した主要な気相系αモニタの適用性の検討結果を示す。

<既存技術の性能目安>

①iCAM/MF[小型・小流量] 検知可能なa放射能濃度1.6×10⁻⁷ [Bq/cm³]:5分測定 ②BAI9100D[大型・大流量] 検知可能なa放射能濃度1.43×10⁻⁷ [Bq/cm³]:10分測定 ※設置場所のγ線のB.Gレベル:0.1[mSv/h]以下

測定場所	測定レンジ・時間要求	市販モニタ仕様	適用性
①PCV内雰囲気が監視可能 な場所	8.8×10 ⁻⁵ ~8.8×10 ⁰ [Bq/cm ³] (現状想定濃度 [PCV内ダストの全量放出が 公衆被ばく量に5mSvとなる値を含む]) 1~10分	iCAM/MF 1.6×10 ⁻⁷ 以上 5分測定 BAI9100D	
②排気端等の放出量が監視 可能な場所	2×10 ⁻¹⁰ ~8.8×10 ⁻⁵ [Bq/cm ³] (現状想定濃度〔公衆被ば〈量~8.4µSv/年〕) 1日~1週間	1.43×10 ⁻⁷ 以上 10分測定 BG 0.1mSv/h以下	\bigcirc
③1次バウンダリからの漏洩が 検知可能な場所	3.5E-06[Bq/cm3] (告示濃度の50倍 [全面マスクを考慮] ×1/10) 1~10分		△ (BG対策要)

- ▶ ②放出管理を行うフィルタ下流のダストモニタは計測時間が長くても問題ないため適合。
- ①PCV内雰囲気測定及び③1次バウンダリからの漏洩が検知可能な場所のaモニタについては、 aダストモニタ設置場所のγ線バックグランドを低減の課題がある。

IRID

53)

- Ⅵ. 実施内容(3)燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討
- 4. 液相系モニタリングの機能要求
 - 液相系のaモニタリングの機能要求は、排水中の管理基準値以下に液相系の放射 性物質濃度を低減することである。
 - 燃料デブリ加工に伴うダストを含む汚染水については、設計基準に組み込む想定事 象に対し、環境への放出を防止する方針(直接環境放出はしない)としている。
 - 液体の放出自体を防止することにより一般公衆・作業者及び環境を防護する方針であるため、浄化後の循環冷却水の管理基準値は設定するものの、PCVやトーラス室の循環冷却水については一般公衆・作業員の観点から直接的な制限値はない。
 - →機能要求及び液相系の設計方針を考慮して、液相系のaモニタリングの測定レンジ検 討を実施した。



Ⅵ. 実施内容

(3) 燃料デブリ取り出しに伴うα核種モニタリングシステムの検討

5. 検討結果まとめ

- 気相系・液相系の測定レンジ要求を設定し、既存技術(市販aモニタ)の適用性を検討した。
- 気相系のうち、<u>必須である「排気端等の放出量が監視可能な場所」でのモニタリングつ</u> いては、既存のaモニタリング技術で対応可能な見通し。
- 気相系のうち、「PCV内雰囲気が監視可能な場所」、「1次バウンダリからの漏洩が 検知可能な場所」でのモニタリングは、測定レンジ・時間を満足する見込みだが設置場 所のバックグランド線量低減を考慮する必要がある。(バックグランドの線量低減はエン ジニアリングで検討予定)
- 液相系については、既存のaモニタリング技術での連続監視は困難な見通しであるが、 液体中の濃度についてはレベル3までの作業者/公衆被ばくの観点での目標はなく、 測定時間の要求が長ければ手動分析での対応が可能。



- (i) 工法の安全確保に関する最適化検討
 - 1) 工法設計条件の検討

燃料デブリ取り出し工法に関する検討に必要な設計条件について整理し、最適化した。



IRID

(i) 工法の安全確保に関する最適化検討

2) スループットに関する分析

燃料デブリ取り出しのスループット検討例 (干渉物撤去のスループットも同様に検討)

57

今後の課題を洗い出すための試みとして、スループットを分析した。 分析に際し、加工が必要となる燃料デブリ量を解析値から性状ごとに仮定した。



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

- (i) 工法の安全確保に関する最適化検討
 - 2) スループットに関する分析



58

横アクセス工法における燃料デブリ取り出しに関して分析条件を設定した。

No.	項目	条件	備考
1	燃料デブリ取り出し期間目標	1号機:10年間、2号機:10年間、3号機:10年間	
2	年間燃料デブリ取り出し日数	200日間(作業日数以外はメンテナンス日とする)	
3	1日の燃料デブリ加工時間	10時間以内	
4	燃料デブリの量	総量が最も多い3号機を想定する。(CRD計装管付着:6ton [※] 、ペデスタル内:最大 222ton、ペデスタル外:最大146ton、合計:374ton)	横アクセスエ法の場合
5	燃料デブリ加エツール	 MCCI:チゼル加工、超音波コアボーリングなど。 CRD計装管付着:ディスクカッター、AWJ、レーザなど。 金属類付着:ディスクカッター、AWJ、レーザなど。 	
6	燃料デブリ加工速度	 チゼル加工、超音波コアボーリング:基盤技術PJの要素試験結果による。 ディスクカッター、AWJ、レーザ:干渉物撤去と同様の加工速度。 コアボーリング:3.25kg/h(2016年度試験結果) レーザガウジング:4.76kg/h(2016年度試験結果) 	
7	燃料デブリ回収方法	把持、すくうなどの実績がある回収方法を検討条件として適用し、要素試験結果も 考慮する。	
8	燃料デブリハンドリング速度	実績があるハンドリング方法を検討条件として適用し、要素試験結果も考慮する。	

※ 平成27年度の炉内状況把握PJによる検討結果。



- (i) 工法の安全確保に関する最適化検討
 - 2) スループットに関する分析



59

- :基盤技術PJで燃料デブリ加工試験実施

横アクセス工法における燃料デブリ取り出しスループットイメージを以下に示す。

No.	機器名称	経過時間	備考
1	燃料デブリ取り出し装置(加エツール)	燃料デブリ加工 焼 	*料デブリ加工 1日10時間 以内 以内
2	燃料デブリ取り出し装置(回収ツール)	回収ツールに交換 燃料デブリ回収	加エツールに交換
3	搬送システム1(赤エリア)	搬送	
4	閉じ込め装置1(赤/黄エリア)	UC→収納缶	
5	搬送システム2(黄エリア)	搬送	
6	閉じ込め装置2(黄/緑エリア)	収納缶→キャスク	
7	搬送システム3(緑エリア)	搬送	
8	搬出検査システム (表面汚染など)	検査	
9	搬出用トラック	▲ ▲ 搬出	搬出



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

- (i) 工法の安全確保に関する最適化検討
 - 2) スループットに関する分析

<u>燃料デブリ取り出しに関するスループットの分析結果(1/3)</u>

	重量 [ton]	加工 作業時間 [%]	回収 作業時間 [%]	搬出 作業時間 [%]	合計時間 [%]
CDR交換機	9.2	4.71	0.62	0.01	5.33
CRDハウジング	71.8	10.18	1.34	0.01	11.52
ペデスタル内塊状デブリ	111.0	34.35	4.63	3.99	42.97
ペデスタル内小石状デブリ	55.5	0.00	1.43	2.00	3.43
ペデスタル内粒状デブリ	55.5	0.00	0.18	2.23	2.41
ペデスタル外塊状デブリ	73.0	21.01	4.92	2.64	28.56
ペデスタル外小石状デブリ	36.5	0.00	2.23	1.32	3.55
ペデスタル外粒状デブリ	36.5	0.00	0.12	2.11	2.22
合計	449.0	70.25	15.45	14.30	100.00



横アクセスエ法での燃料デブリ
取り出しのスループット分析例
(PLAN−A [※] の場合)

60

- 吸引回収による粒状燃料デブリ回収作業は、 効率的で、短時間で作業が終わる。
- 回収ツールを使用した小石状燃料デブリの回 収作業も、比較的効率的
- 反面、燃料デブリの加工を伴う、CRD交換機、 CRDハウジング及び塊状の燃料デブリについ ては、回収作業に時間がかかり、非常に効率 が悪い。



- スループットの改善に向けては、今後、燃料デ ブリの加工、切削作業を効率的に行う加工方 法確立が必須。
- 吸引回収等の効率的な燃料デブリの回収方 法については、今後、要素試験等により成立 性を検証し、回収技術の確立が必要
- 塊状、小石状、粒状燃料デブリの構成比率は 想定値であるため、内部調査などの結果を反 映し、見直しが必要
- ※ PLAN-Aの詳細は、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・炉内構造物取り出し工法・システムの高度化事業」平成28年度 最終報告書および平成28年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システムの高度化」平成29年度成 果報告参照。



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

- (i) 工法の安全確保に関する最適化検討
 - 2) スループットに関する分析

燃料デブリ取り出しに関するスループットの分析結果(2/3)

0% 5% 4% 2% _3% 9% 14% 11% ■ C R D 交換機 29% ■ C R D ハウジング ■ペデスタル内塊状デブリ ■装置搬出入 ■ペデスタル内小石状デブリ ■加工作業時間 ■把持及びツール位置決め ■ペデスタル内粒状デブリ 76% ■ペデスタル外塊状デブリ ■加工、切断 43% ■回収作業時間 2% ■ペデスタル外小石状デブリ 燃料デブリ回収 3% ■搬出作業時間 ■ペデスタル外粒状デブリ ■ツール交換 ペデスタル内塊状燃料デブリの 燃料デブリ取り出し作業時間の比率 ペデスタル内塊状燃料デブリの 加工・回収作業時間の内訳 取り出し作業時間の内訳 0%※ 0% • ペデスタル内外の塊状燃料デブリ 塊状燃料デブリを の取り出し作業に時間がかかる。 12% 効率的に加工する 塊状燃料デブリは、その加工、切断 • 29% 方法の開発が必要 作業に時間がかかる。 CRD交換機、CRDハウジングに ■装置搬出入※ ■加工作業時間 作業員のマニピュ 12% ■把持及びツール位置決め ついては、干渉物と同じ傾向で、 レータ操作を支援 ■回収作業時間 ■加工、切断 純粋な干渉物の加工・切断作業 するための操作支 88% ■燃料デブリ回収 ■ 搬出作業時間※ 1% よりも、加エツールの位置決めや 援ツールの様なも ■ツール交換 対象物の把持等の作業やツール のが必要 CRDハウジングの CRDハウジングの の交換作業などに多くの時間が 取り出し作業時間の内訳 加工・回収作業時間の内訳 かかる。

注記:上記の分析結果は、仮定に基づくものであり、今後の検討・要素試験結果を踏まえ、見直す計画です。

横アクセス工法での燃料デブリ

取り出しのスループット分析例 (PLAN-Aの場合)

🥊 ※ CRDハウジングの搬出作業時間は約0.09%のため本グラフでは0%とした。同様な理由から、装置搬出入時間も0%とした。

- (i) 工法の安全確保に関する最適化検討
 - 2) スループットに関する分析

燃料デブリ取り出しに関するスループットの分析結果(3/3)



収納缶の搬出-2:収納缶セル内の収納缶搬出作業

燃料デブリの搬出作業時間の内訳 注記:上記の分析結果は、仮定に基づくものであり、今後の検討・要素試験結果を踏まえ、見直す計画です。 **構アクセス工法での燃料デブリ**

取り出しのスループット分析例 (PLAN-Aの場合)

- Ⅵ.(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討
 - (i)工法の安全確保に関する最適化検討
 - 2) スループットに関する分析

スループット分析結果からの考察

<u>本分析結果の考察</u>

- スループットを占める大半は、加工作業に要する時間であった。
- 今回実施したスループット分析の範囲では、設定した目標作業期間10年の達成が困難である見通しとなった。
- 作業時間の大半を占める加工作業の減少に向けた技術開発が必要であり、燃料デブリの詳細分類と 分類結果に応じた加工方法の検討や、加工作業に要する時間短縮のための操作支援ツールの開発、 加工作業を減らした取り出し工法の検討等、加工作業に要する時間短縮に向けた開発を行っていく計 画である。
- 回収容器の大きさの影響についても別途分析を行った結果、UCの容器サイズを大きくすれば、移送回数が減ることになり、作業期間が短くなることが分かった。

スループットに影響があるインプットに関する考察

- 本分析においては、干渉物を単純化しており、変形などを考慮していない。内部調査結果などにおいて 変形などを確認し、その結果を分析にフィードバックすることで、精度の高い分析が可能となる。
- 燃料デブリの性状および機械的性質は、加工方法や未臨界処置に影響を及ぼす。そのため、今後実施される検討やサンプリング結果を反映していく必要がある。
- 本分析においては、搬出にともなう検査を実施する条件としているが、搬出までに、仕分け、乾燥、検査や手順の追加要求があった場合は、移送速度が加工と回収速度を下回りボトルネックになる可能性がある。
- 本分析にあたっては燃料デブリ性状ごとの質量を仮定しており、塊状のデブリの割合が増えた場合には作業期間が延びる要因となる。そのため、燃料デブリの分類結果に応じた加工方法の開発等が重要となる。



63)



▶「システムの最適化検討」については、前期事業の概念をベースに、上流条件からの見直しを実施。(左記は検討フローのうち、システム関連箇所を簡略化したもの)

▶ 次紙以降には、システム検討のうち、特に重要な 項目として、以下内容を要約。

- a) 深層防護の適用方針
- b) 機能要求とシステム構成の対応
- c) 被ばく評価結果(まとめ)
- ▶ 本事業で検討するシステムは、被ばく評価結果 が判断基準を下回ることの確認を持って、概念 検討としての目標を達成する。

a) 深層防護の適用方針

影響度の高い事象の発生の可能性を低減するためにも、機器のランダム故障、人的過誤に起因 する異常な過渡、事故を想定した軽水炉の事象発生の可能性に応じた深層防護を1F燃料デブリ 取り出し時に適用することは有効

防護レベル	定義	頻度レベル
レベル1	通常運転からの逸脱の防止 安全上重要な施設の故障の防止	レベル2相当事象の発生可能性を低減 するため、出来るだけ通常状態に留まるた めの層を設定する。
レベル2	通常運転からの逸脱の検知及び制御	レベル3相当事象の発生可能性を低減す るため、異常状態が発生しても十分影響 が小さくなるよう抑制するための層を設定 する。
レベル3	設計基準で想定する事象の制御	設計上許容できる影響に抑制するための 層を設定する。本層(レベル3)の事象発 生の可能性は、通常起こりえないレベルに 低減する。

1F燃料デブリ取り出し時の各防護レベルの定義



a) 深層防護の適用方針

1F燃料デブリ取り出し時における各深層防護レベルの判断基準

防護レベル	判断基準 ^{※1} (公衆被ばく線量)	判断基準 ^{※2} (作業員被ばく線量)
レベル1	0.1mSv/年	100mSv/5年、50mSv/年
レベル2	0.1mSv/事象	10mSv/事象
レベル3	5mSv/事象	100mSv/事象

※1 軽水炉の深層防護レベルにおける許容線量等を参考に判断基準を設定

- レベル1:平常時の一般公衆の線量限度に対して1/10となる値を適用
- レベル2:本レベルで発生の可能性のある事象に対して許容線量として、有意なリスク上昇がないように設定
- レベル3:安全評価指針における事故時の判断基準線量を適用
- ※2 法令で定められた線量限度に基づき設定

b) システム設計への安全設計進捗反映

- ・ 各レベルの安全要求(1~④)に対応する環境制御システムの構成案を下表に示す。
- ・ 赤字の構成をベースとし、その他の構成をオプションとして記載する方針。
- 検討したシステム構成について、気相系システムのベース条件を代表して次紙以降に示す。

		レベル1 レベル2		レベル3	レベル4 (参考)
状態の定義		通常状態	異常時	事故時	防災
防護上の目的		通常運転からの逸脱の防止 安全上重要な施設の故障の防止	通常運転からの逸脱の検知 及び制御	設計基準で想定する事象 の制御	被ばく影響緩和
	①気相漏えい防止	PCVガス管理系	非常用PCVガス管理系	二次バウンダリガス排気系※1	
系統	②液相漏えい防止 (PCV漏えいなし)	冷却水循環系(D/W側)	冷却水循環系(S/C側)	非常用トーラス室排水系*1	機動的対応
	②液相漏えい防止	冷却水循環系(D/W側)	冷却水循環系(S/C側)		及目的反
	(PCV漏えいあり)	トーラス室排水系	監視設備 レベル1の補助設備 (設備異常に対する対処設備)		
構成	③臨界防止 ^{※2} (実機の反応度 余裕 小)	中性子吸収材(溶解性)	監視設備	非常用木ウ酸水注入系 *1	
		中性子吸収材(非溶解)	レベル1の補助設備 (設備異常に対する対処設備)		
	③臨界防止 ^{※2} (実機の反応度 余裕 大)	水位制御設備 ※中性子吸収材なし	中性子吸収材(溶解性or非溶解) 水位制御設備		
	④崩壊熱除去	冷却水循環系(循環冷却)	非常用冷却系(循環冷却)	非常用冷却系*1	

※1 レベル3として独立の設備。必要に応じて、可搬式設備の活用を検討。(建屋に設置可能な物量や、不確実さへの対応などを考慮して判断) ※2 臨界近接監視については、各レベルに対し中性子監視系/FPガス監視系を号機ごとに選択



Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 b)システム設計への安全設計進捗反映

- 安全要求に基づいて検討した気相系システムの全体構成(深層防護レベル1~3)の概 念図を以下に示す。
- 各レベルの安全要求を具体化・細分化した機能要求と、システム構成の対応を次紙以降に 示す。

気相系システムの概念図(全体) [圧力制御:再循環方式]



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

(68)

b)システム設計への安全設計進捗反映

:レベル3

:レベル2

:レベル1 :上記以外

気相系レベル1の機能要求との対応(システム関連抜粋)

	安全要求	防護レベル	機能要求	識別
気相中の故財性物質の安			管理基準値以下に一次バウンダリ(PCV/セル)内放射性物質濃度を低減すること	1
全基準で許容される以上の漏えい防止	レベル1	安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の一次バウンダリからの漏えいを動的バウンダリにより防止すること		
	漏えい防止		動的バウンダリを維持するための排気に対して、安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の環境への放出を防止すること	3
	核反応による異常な放射 性物質の生成防止	レベル1	管理基準値以下に反応度レベルを低減すること	
	金属粉じんと酸素の反応に より火災が発生しない条件 を維持すること	レベル1	(A案)酸素濃度を管理基準値以下にするとともに、金属粉じん濃度の上昇を抑制すること (B案)金属粉じん濃度の上昇を抑制すること ⇒本資料では(A案)の構成	5
	可燃性ガスによる火災爆発 が生じないように可燃限界 以下に維持すること	レベル1	窒素置換により管理基準値以下に一次バウンダリ内の水素濃度を低減すること	6
	プラント状態を把握するため に監視すること	レベル1	環境への放射能放出を管理するための監視機能を有すること	7
	※動的機器は多重化を前提(図では省略) ⑤: インリークにより流入する酸素を、金属粉じん火災を防止可能な濃度に希釈 の: ・ かきせた 分照に たい発生する 水素 が 持ちた 小 可能 か 濃度に 希釈 (2: フィルタ通過後のガスをPCV内に循環し PCV内の放射能濃度を、希釈・減衰 (窒素注入・インリークによる十分に希釈がされる場合 [ワンス・スルー方式] では、②、⑤、⑥の設備と同			
				理系
[窒素供給系 N2供給設備	インリーク 微負圧	前処理設備 → HEPA → 排風機 排気ロへ 振出へセル 「窒素雰囲気」(窒気雰囲気) (窒気雰囲気) (窒気雰囲気) (窒気雰囲気) (窒気雰囲気) (空気雰囲気) (空気のか回気) ((口)) (((U))) (((U)))	>

 PCV負圧維持に必要な排気量を確保 (圧力制御機能を含む場合は再循環ラインを含む) ④:希ガスモニタによる未臨界状態の監視

⑦:放射線モニタによる放出放射能の監視

Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 b)システム設計への安全設計進捗反映

気相系レベル2の機能要求との対応(システム関連抜粋)

安全要求	防護レベル	機能要求	識別
気相中の放射性物質の安 全基準で許容される以上の 漏えい防止		安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の一次バウンダリからの漏えいを動的バウンダリにより防止すること	1
		動的バウンダリを維持するための排気に対して、安全基準で許容される以上の気相中放射性物質の環境への放出を防止すること	2
核反応による異常な放射性	レベル2	気相、液相漏えいに対してレベル2で要求される線量基準以内の放射性物質の放出となるよう臨界を防止すること	3
物質の生成防止	レベル3	臨界発生時に速やかに核反応を停止できること。	4
可燃性ガスによる火災爆発 が生じないように可燃限界 以下に維持すること	レベル2	ー次バウンダリ内水素濃度が、レベル1の管理基準値を越えた場合において、代替設備により窒素置換により水素濃度を低減できること	5
プラント状態を把握するため に監視すること	レベル2	環境への放射能放出を管理するための監視機能を有すること	6



IRID

Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 b)システム設計への安全設計進捗反映

気相系レベル3の機能要求との対応(システム関連抜粋)





©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

異常事象の抽出(1/3)

【異常事象抽出における通常時(レベル1)の想定条件】

通常時においては、バウンダリ機能が維持しており、バウンダリからの漏えいはないことを前提するする。また、通常運転継続により、配管ダクト内の汚染等線源の移動がある場合にも、設備対策により、漏えい及び遮へい対策は実施済みであることを前提条件とし、異常事象の抽出を行う。

【異常時(レベル2)/事故時(レベル3)の被ばく評価検討】

- 安全要求毎に設定した機能要求を実現するための対策をイメージし、深層防護レベル1の機能の喪失を仮定した事象をレベル2、レベル2の機能の喪失を仮定した事象をレベル3とし、異常事象の要因となる具体的な事象(事象シナリオ)を抽出。
- 異常状態(空調停止等)に応じた各放出経路(一次バウンダリから二次バウンダ リへの漏えい割合等)の漏えい割合を設定し、事象シナリオ毎に環境中への放出 経路を考慮し放出割合を算出し、被ばく評価を実施。


Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

異常事象の抽出(2/3)

- 安全要求毎に設定した機能要求に基づき、その機能の喪失を異常事象を抽出。
- 意図した機能の喪失以外の異常な事象(機器の落下等)を想定する。(今後更なる抽出が必要)
- 設備の設計進捗により、事象シナリオは増加することとなり、それに伴って本抽出フローを繰り返すことによって事 象抽出のブラッシュアップを図る。



IRID

Ⅵ. 実施内容(4) エ法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

異常事象の抽出(3/3)

バウンダリ構成概略図と故障想定箇所

- 閉じ込め機能に対する設備設計と事象抽出の整合性を確認し、抽出した異常 事象に漏れがないかを確認。
- 下図の①~10での異常(漏えい・性能低下等)を想定した被ばく評価を実施。



※1:レベル1の設備について、レベル1を超える状態でのバウンダリは当該隔離弁まで。 ※2:レベル2も類似の構成のため、代表してレベル1を記載。



Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

被ばく評価結果(レベル2)



Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討 c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

被ばく評価結果(レベル3)



Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討
 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討
 c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

被ばく評価結果のまとめ(気相)

・ 各深層防護レベルの判断基準と被ばく評価結果(気相)

	公衆被ばく線量		作業員被ばく線量	
防護レベル	判断基準※1	評価結果	判断基準※2	評価結果
レベル1	0.1mSv/年	~8.4µSv/y (燃料デブリ取り出し時の 排気による被ばく)	100mSv/5年、 50mSv/年	_ (必要遮へい厚に関する試算)
レベル2	0.1mSv/事象	~56µSv/事象	10mSv/事象	~0.39mSv/事象 ^{※3、4} (退避時の被ばく)
レベル3	5mSv/事象	0.56mSv/事象 ^{×5} (1次バウンダリからの 漏えい時)	100mSv/事象	

※1 軽水炉の深層防護レベルにおける許容線量等を参考に判断基準を設定

※2 法令で定められた線量限度に基づき設定

※3 ベースケース、全面マスク有、PCVからの漏えい流量:1m³/hを想定した場合。

※4 ベースケース、全面マスク有、大漏えい対策なし(PCVからの漏えい流量:1000m³/hを想定)の場合は、390mSv/事象。

※5 2次バウンダリがない場合は、56mSv/事象



Ⅵ. 実施内容(4) エ法・システムの安全確保に関する最適化検討
 (ii)システムの安全確保に関する最適化検討
 c)異常事象の抽出と被ばく評価結果

被ばく評価結果のまとめ(液相)

• 各深層防護レベルの判断基準と被ばく評価結果(液相)

	公衆被ばく線量		作業員被ばく線量	
防護レベル	判断基準*1	評価結果	判断基準※2	評価結果
レベル1	0.1mSv/年	ー (通常時の漏えいなし。 水処理設備の目標は告示 の放出濃度限度以下)	100mSv/5年、 50mSv/年	ー (必要遮へい厚に 関する試算)
レベル2	0.1mSv/事象	~3.2×10 ⁻³ µSv/事象	10mSv/事象	ー (漏えい水から気相への放射性 - 物質の移行には時間が掛かる ことから、退避可能と想定)
レベル3	5mSv/事象	3.2µSv/事象 (2次バウンダリ外への 漏えい時)]	100mSv/事象	

※1 軽水炉の深層防護レベルにおける許容線量等を参考に判断基準を設定

※2 法令で定められた線量限度に基づき設定



Ⅵ. 実施内容(4) 工法・システムの安全確保に関する最適化検討(ii)システムの安全確保に関する最適化検討

d) まとめ

- ・① 安全要求毎に設定した機能要求に基づき、その機能の喪失やそれ以外の意図しない を異常(機器の落下等、今後更なる抽出が必要)を想定したシナリオの整理し、被 ばく評価を行った。
- ② 被ばく評価にあたっては、1 F 特有の状況を考慮した被ばく評価手法の検討も行った。 (気体漏えい時の作業者の退避に伴う時被ばく、液体漏えい時の気相移行を考慮した被ばく)これにより、漏えい時の安全目標を達成するために必要な濃度条件を確認した。
- ③ 燃料デブリ取り出し時の環境制御システムについて、最後の確認プロセスである被ばく 評価結果が判断基準を下回る結果となったことで、概念検討としての目標達成の見込 みを得た。【現状の纏め】
- ④ 事象シナリオや被ばく評価に用いている種々のパラメータについては、実機条件の想定 に起因した不確実さを含むため、大規模取り出しまでに得られた知見(加工時の飛散 率等を含む)や設備の詳細設計を反映して見直しが必要。【今後の課題】





No.	用語	
1	1F	福島第一原子力発電所
2	PCV	原子炉格納容器
3	RPV	原子炉圧力容器
4	CRD	制御棒駆動機構
5	D/W	ドライウェル
6	S/C	サプレッションチェンバー
7	BSW	生体遮へい壁
8	MCCI	溶融炉心ーコンクリート相互作用
9	GOTHIC⊐—ド	汎用熱流動解析コードの1つ(開発元はEPRI/ZACHRY)
10	Am	アメリシウム(燃料デブリ中に含まれる放射性核種のうち、プルトニウムと並び被ばく影響の注意が必要な核種)