



JAEA-Evaluation

2019-009

DOI:10.11484/jaea-evaluation-2019-009

平成 30 年度 研究開発・評価報告書  
評価課題 「東京電力福島第一原子力発電所事故の  
対処に係る研究開発」のうち  
「廃止措置等に向けた研究開発」  
(中間評価)

Assessment Report of Research and Development Activities in FY2018  
Activity: “Research and Development of the Technologies  
for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”  
(Interim Report)

福島研究開発部門

Sector of Fukushima Research and Development

December 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Evaluation

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

平成 30 年度 研究開発・評価報告書  
評価課題「東京電力福島第一原子力発電所事故の対処に係る研究開発」のうち  
「廃止措置等に向けた研究開発」  
(中間評価)

日本原子力研究開発機構  
福島研究開発部門

(2019 年 9 月 17 日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成 28 年 12 月 21 日内閣総理大臣決定）及びこの大綱的指針を受けて作成された「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」（平成 14 年 6 月 20 日文部科学大臣決定、平成 29 年 4 月 1 日最終改定）、並びに原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」（平成 17 年 10 月 1 日制定、平成 30 年 3 月 29 日最終改正）等に基づき、平成 30 年 11 月 27 日に「福島第一原子力発電所の廃止措置に係る技術等の研究開発」に関する事前評価を福島廃止措置研究開発・評価委員会に諮問した。

これを受けて、福島廃止措置研究開発・評価委員会は、委員会において定められた評価方法に従い、原子力機構から提出された第 3 期中長期計画期間（平成 27 年 4 月から平成 34 年 3 月）における研究開発計画に関する説明資料の検討及び各担当者による口頭発表と質疑応答を実施した。

本報告書は、福島廃止措置研究開発・評価委員会より提出された事前評価の内容をとりまとめたものである。

---

本報告書は、福島廃止措置研究開発・評価委員会が「国の研究開発評価に関する大綱的指針」等に基づき実施した外部評価の結果を取りまとめたものである。

福島研究開発部門 企画調整室（事務局）

東京事務所：〒100-8577 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 19 階

Assessment Report of Research and Development Activities in FY2018  
Activity: “Research and Development of the Technologies for Decommissioning of  
Fukushima Daiichi Nuclear Power Station” (Interim Report)

Sector of Fukushima Research and Development

Japan Atomic Energy Agency  
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo  
(Received September 17, 2019)

Japan Atomic Energy Agency (hereinafter referred to as “JAEA”) consulted an assessment committee, “Evaluation Committee of Research and Development Activities for Fukushima Decommissioning” (hereinafter referred to as “Committee”) for interim assessment of “Research and Development of the Technologies for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station” in accordance with “General Guideline for the Evaluation of Government Research and Development (R&D) Activities” by Cabinet Office, Government of Japan, “Guideline for Evaluation of R&D in Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology” and “Regulation on Conduct for Evaluation of R&D Activities” by JAEA.

In response to the JAEA’s request, the Committee assessed the R&D activities for the period of four years from April 2015. The Committee evaluated the R&D program based on the explanatory documents prepared by JAEA and its oral presentations with questions-and-answers by the Director General and the research division heads.

This report summarizes the results of the assessment by the Committee.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Decommissioning

---

This evaluation report presents the result of third-party evaluation conducted based on “General Guideline for Evaluation of Government R&D Activities” by Cabinet Office, Government of Japan”, etc.

(Secretariat) Planning and Co-ordination Office, Sector of Fukushima Research and Development



目 次

1. 概要	1
2. 福島廃止措置研究開発・評価委員会の構成	2
3. 審議経過	3
4. 評価方法	4
5. 評価結果（答申書）	5
付録（日本原子力研究開発機構 作成）	21

Contents

1. Outline	1
2. Evaluation Committee of Research and Development Activities for Fukushima Decommissioning	2
3. Status of Evaluation	3
4. Procedure of Evaluation	4
5. Results of Evaluation (Committee Report)	5
Appendix (documents prepared by Japan Atomic Energy Agency)	21

This is a blank page.

## 1. 概 要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成 28 年 12 月 21 日内閣総理大臣決定）及びこの大綱的指針を受けて作成された「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」（平成 14 年 6 月 20 日文部科学大臣決定、平成 29 年 4 月 1 日最終改定）、並びに原子力機構の「研究開発課題評価実施規程」（平成 17 年 10 月 1 日制定、平成 30 年 3 月 29 日最終改正）等に基づき、平成 30 年 11 月 27 日に第 3 期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」に関する中間評価を福島廃止措置研究開発・評価委員会に諮問した。

これを受けて、福島廃止措置研究開発・評価委員会は、平成 27～30 年度までの研究実績について、原子力機構から提出された説明資料の検討及び各担当者による口頭説明と質疑応答を実施し、審議の上、委員の意見を集約し、答申を取りまとめた。

本報告書の第 2 章では、福島廃止措置研究開発・評価委員会の委員構成を示した。

第 3 章では、評価委員会の開催日時及び主な議題について記載し、諮問から答申までの審議経過を示した。

第 4 章では、評価方法を示した。

第 5 章では、福島廃止措置研究開発・評価委員会により提出された答申を添付した。

また、付録として評価委員会で配付した資料を末尾に添付した。

2. 福島廃止措置研究開発・評価委員会の構成

福島廃止措置研究開発・評価委員会は、以下の 11 名の委員から構成されている。

委員長	井口 哲夫	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科量子工学専攻 教授
委員	小原 徹	国立大学法人東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 教授
	片岡 勲	学校法人金井学園福井工業大学 工学部機械工学科 教授
	小崎 完	国立大学法人北海道大学 大学院工学研究院 エネルギー環境システム部門 教授
	小林 正彦	東芝エネルギーシステムズ株式会社 原子力事業部 担当部長
	高木 直行	学校法人五島育英会東京都市大学 大学院共同原子力専攻 教授
	高橋 隆行	国立大学法人福島大学 共生システム理工学類 人間支援システム専攻 教授
	新堀 雄一	国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 教授
	西 高志	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 シニアプロジェクトマネージャー
	福田 俊彦	原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ 執行役員
	森島 誠	三菱重工業株式会社 パワードメイン 原子力事業部 炉心・安全技術部 主席プロジェクト統括

(委員は五十音順、所属・職位は委員会開催時のもの)

### 3. 審議経過

- (1) 理事長から委員長に対し、第3期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」に関する中間評価について諮問：平成30年11月27日
- (2) 第6回福島廃止措置研究開発・評価委員会開催：平成30年12月26日
- 委員の交代について
  - 委員長の選出（委員互選）
  - 諮問書の確認
  - 評価方法について
  - 廃炉国際共同研究センター（CLADS）における廃止措置研究の取り組みについて
  - 中間評価
    - ・燃料デブリの取出しに係る研究開発
    - ・事故進展挙動評価に係る研究開発
    - ・廃棄物処理・処分に係る研究開発
    - ・遠隔技術に係る研究開発
  - 櫛葉遠隔技術開発センターの運用及び大熊分析・研究センターの整備状況
- (3) 欠席委員への個別説明：平成31年1月10日、11日、17日
- 第6回福島廃止措置研究開発・評価委員会の内容について事務局より欠席委員に説明した。
- (4) 第7回福島廃止措置研究開発・評価委員会（中間評価）開催：平成31年2月9日
- 全体討議
- (5) 評価結果（答申書）のまとめ
- 上記の審議結果に基づき委員長が評価結果をまとめ、平成31年2月22日に答申した。

## 4. 評価方法

理事長からの諮問に基づき、研究開発を督励するとともに、経営資源を有効に活用して、研究開発成果の最大化及び業務運営の効率化を達成するための効果的な研究開発業務に資することを目的として中間評価を行った。

### 4.1 評価方法と評価の観点

#### 4.1.1 中間評価

各研究開発課題の平成 27～30 年度までの研究実績について、原子力機構から提出された説明資料の検討及び各担当者による口頭説明と質疑応答を実施し、原子力機構が実施した自己評価に対し、以下の観点から、その妥当性及び実績の評価を行った。

##### (1) 中間評価の観点

- 研究開発の進捗の妥当性
- 情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方などの見直しの必要性（継続、変更、中止等の決定）
- 効果・効用（アウトカム）の暫定的確認
- 研究資金・人材等の研究開発資源の再配分の妥当性
- その他（イノベーション創出への取組み（参考）、若手研究者の育成・支援への貢献の程度（参考）、国内外他機関との連携の妥当性（参考））

これらの観点から、機構の自己評価内容に対し、「評定」欄にて S・A・B・C・D の評定を行い、「評価理由／ご意見」欄に評価理由、意見を記入し、集計した。

各委員の評価結果を集計したものを基に、研究開発課題毎に審議の上、委員の意見を集約し、委員会としての中間評価結果を取りまとめた。

なお、出された意見については、各委員の専門的知見からによる意見であり、各委員の所属機関の意見ではない。

5. 評価結果（答申書）

平成 31 年 2 月 22 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
理事長 児玉 敏雄 殿

福島廃止措置研究開発・評価委員会  
委員長 井口 哲夫

研究開発課題の中間評価結果について（答申）

平成 30 年 11 月 27 日付貴発「30 原機（福）018」において諮問のありました第 3 期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」に関する中間評価を行った結果を別紙のとおりにお返しします。

別 紙：第 3 期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」に関する  
中間評価

以上

This is a blank page.



第3期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」に関する中間評価

1. 評価の概要について

福島廃止措置研究開発・評価委員会（以下「評価委員会」という。）は、日本原子力研究開発機構（以下、「機構」という。）が実施する第3期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」（他部門で評価される研究開発課題を除く）を対象とし、機構理事長からの諮問（平成30年11月27日30原機（福）018）に基づき、中間評価を実施した。

2. 福島廃止措置研究開発・評価委員会の構成

福島廃止措置研究開発・評価委員会は、以下の11名により構成される。

福島廃止措置研究開発・評価委員会委員

氏名	所属・職位
井口 哲夫	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科量子工学専攻 教授
小原 徹	国立大学法人東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 教授
片岡 勲	学校法人金井学園福井工業大学 工学部機械工学科 教授
小崎 完	国立大学法人北海道大学 大学院工学研究院 エネルギー環境システム部門 教授
小林 正彦	東芝エネルギーシステムズ株式会社 原子力事業部 担当部長
高木 直行	学校法人五島育英会東京都市大学 大学院共同原子力専攻 教授
高橋 隆行	国立大学法人福島大学 共生システム理工学類 人間支援システム専攻 教授
新堀 雄一	国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 教授
西 高志	日立GEニュークリア・エナジー株式会社 シニアプロジェクトマネージャー
福田 俊彦	原子力損害賠償・廃炉等支援機構 技術グループ 執行役員
森島 誠	三菱重工業株式会社 パワードメイン 原子力事業部 炉心・安全技術部 主席プロジェクト統括

（委員は五十音順、所属・職位は委員会開催時のもの）

### 3. 評価方法と評価の観点

機構が実施する各研究課題の自己評価に対し、その妥当性及び実績の評価を行う。

中間評価の観点

- (1)研究開発の進捗の妥当性
- (2)情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方などの見直しの必要性（継続、変更、中止等の決定）
- (3)効果・効用（アウトカム）の暫定的確認
- (4)研究資金・人材等の研究開発資源の再配分の妥当性
- (5)その他（イノベーション創出への取組み（参考）、若手研究者の育成・支援への貢献の程度（参考）、国内外他機関との連携の妥当性（参考））

評価区分（基準）

- S： 目的・目標・計画等に照らし、研究成果、取組等について諸事情を踏まえて総合的に勘案した結果、適正、効果的かつ効率的な研究開発運営の下で、「研究開発成果の最大化」に向けて特に顕著な成果の創出や将来的な成果の創出の期待等が認められる。
- A： 目的・目標・計画等に照らし、研究成果、取組等について諸事情を踏まえて総合的に勘案した結果、適正、効果的かつ効率的な研究開発運営の下で、「研究開発成果の最大化」に向けて顕著な成果の創出や将来的な成果の創出の期待等が認められる。
- B： 目的・目標・計画等に照らし、研究成果、取組等について諸事情を踏まえて総合的に勘案した結果、「研究開発成果の最大化」に向けて成果の創出や将来的な成果の創出の期待等が認められ、着実な研究開発運営がなされている。
- C： 目的・目標・計画等に照らし、研究成果、取組等について諸事情を踏まえて総合的に勘案した結果、「研究開発成果の最大化」又は「適正、効果的かつ効率的な研究開発運営」に向けてより一層の工夫、改善等が期待される。
- D： 目的・目標・計画等に照らし、研究成果、取組等について諸事情を踏まえて総合的に勘案した結果、「研究開発成果の最大化」又は「適正、効果的かつ効率的な研究開発運営」に向けて抜本的な見直しを含め特段の工夫、改善等が求められる。

評価は以下の方法で行った。

まず、機構の自己評価内容に対し、各委員がそれぞれ上述の観点から評価を行い、その結果について評価シートの「評定欄」にて SABCD のいずれかを記載するとともに、「理由／ご意見等欄」にその理由や意見を記入したものを集約した。

次に各委員の評価結果を集約したものを基に、研究開発課題毎に審議を行い、委員会としての評価結果をとりまとめた。

なお、出された意見については、各委員の専門的知見からの意見であり、各委員の所属機関の見解ではない。

#### 4. 研究開発課題の評価

##### 4. 1. 燃料デブリの取出しに係る研究開発

11名の委員全員がAと評定し、委員会としてAと評定した。以下に主な評価理由を付す。

- ・わが国のデブリ性状の研究を牽引している。
- ・燃料デブリ取り出しに係る研究については、全体的に見て①廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供は、ニーズを捉えた比較的著しい進捗をしている、②NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積は、研究を開始したばかりで今後に期待、③国内外の研究協力及び貢献は適切に進められていると評価される。
- ・廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供においては、可能な限りの研究開発についての議論が、第三者も含めた形で進められている。これらの議論を経て、新たにプロジェクト業務としての追加等を検討し、実施計画に編入させていることも高く評価できる。
- ・燃料デブリの特性把握の成果として取り纏められた「特性リスト」は、IRID 内の関連する各廃炉プロジェクトにおいて、取り出し工法の検討、加工工具の選定、収納缶設計等への基礎的な情報として活用され、顕著な貢献があったと認められる。また、プラント内線源・線量率分布評価手法の開発では、PCV 内 3次元線量率分布の予測手法を開発し、その結果を元に内部調査方法やデブリ取出し工法の最適化に顕著な貢献があったと認められる。
- ・1F 燃料デブリの一つの特徴である MCCI の生成に関してもその性状を模擬する試験を実施しており、その価値は高い。
- ・作業によって、保守性の見方（安全裕度）が異なることも念頭に、具体的なデータの利用方法も併せて提供されていることも、特筆できる一つの成果である。

また、今後の本研究開発への意見、期待として、以下のものがあつたため、参考にされたい。

##### 【廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供に係る意見】

- ・燃料デブリは極めて広範な性状の違いを持っており、それを予測することは極めて重要であるが、性状の大きな違いを前もって把握して、実際の廃炉工程に臨むことが重要である。

- ・1Fのコンクリート成分を用いた追加の大型MCCI試験は、デブリの流動を伴わない静的な試験であり、状況の違いに伴う特性への影響については、何らかの解説が必要と考えられる。
- ・燃料デブリに係る分析技術の開発について、実デブリを含む現場から採取された試料分析への適用性についてはまだ不透明な感があるので、想定される機器トラブルの洗い出しと対処法の事前検討が望まれる。
- ・トリプル四重極—ICP-MS や X 線 /  $\gamma$  線 CT の技術は有効性を認めるものの、現場からの実試料分析に対して、かなりハードルの高さを感じざるを得ない。今後取り出される多種多様な性状の燃料デブリに対して、分析技術の最適化とは何か（定義）を、改めてしっかり見極め、最終的な開発目標の設定を再確認しておくべきではないか。
- ・「燃料デブリ表面線量率評価手法の開発」については、現在東電が実施しているエンジニアリングに反映できるように早期にリリースされることが望まれる。また、現段階での評価式の有用性（利用の限界）についても示す必要があるように思われる。
- ・プラント内線源・線量率分布評価手法の開発については、ニーズに応じた結果の提示や 1F 炉内調査における助言を行っているが、それらの提示に対する IRID 等からのフィードバックへの対応を継続的に進めることが望まれる。
- ・「燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討」については、開発としては適切な進捗をしていると評価されるが、実際の現場適用性も含めた検討をさらに進める必要がある。
- ・統合型 NDA システムが最有望と提案されているが、現場から採取される多種多様な燃料デブリの性状ごとに適切な測定パラメータの設定やデータベースの準備等が必要となり、核物質管理に相応しい測定精度が望めない感がある。このような悲観論を覆すような創意工夫の提示を期待する。

**【NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積に係る意見】**

- ・NDF 廃炉重要研究 6 課題については、分科会で策定した研究開発戦略に従って研究を開始したところであり、継続して実施するとともに、成果に応じて戦略へのフィードバックが期待される。
- ・燃料デブリの経年変化プロセス等の解明や特殊環境下の腐食現象の解明について、成果の（当面策定された）研究開発戦略の中での位置づけや現段階での達成レベルが今一つ判然としない。研究開発戦略の全体像と個別に実施される研究課題の関連性及び達成目標等を明示されることが望まれる。
- ・デブリのような混合物からの溶出量について、各相の面積比と関連付けられることを指摘しているが、面積比という物理的な指標により、化学的な挙動をも示せるメカニズムについても明らかにしていく必要があるように思われる。また、特殊環境での腐食挙動については、濡れ乾きサイクルと腐食との関係に

については、表面の経時変化やサイクルのかけ方など複合的な視点での考察が望まれる。

【人材に係る意見】

- ・30代後半から40代の中堅クラスの研究者・技術員の負荷が過大になることが懸念される。現在のところ、可能な限り、他機関からの採用なども柔軟に積極的に進めているが、これら人材の仕事をサポートする体制や役割分担等による仕事量の軽減も必要となると思われる。また、中堅・若手人材が本分野の魅力を感じるインセンティブは何かということ、現在活躍している中堅・若手人材と意見交換して確認しておくことが必要ではないか。さらに、効率的な技術・ノウハウ等の継承のため、最新のIT技術を駆使した知識マネジメントシステムなどの構築にも注力することが望まれる。

【イノベーションに係る意見】

- ・イノベーション創出への取組みについては、1F 廃炉は未知の状況へのチャレンジであるため、ハードの開発に限定することなく、解析技術や評価技術にも広げて取り組むことを望む。
- ・本研究課題の場合、まず確実に信頼できる燃料デブリの分析や計量管理等が行える手法を整備することが優先されるべきで、イノベーション創出は二の次でよいのではないか。

【その他の意見】

- ・デブリ取扱いはネガティブなイメージもあるが、遠隔設備やロボットなど若手を引きつける内容も多々あるのでポジティブな側面も対外発信して若手研究者獲得も含めアピールしてほしい。あわせて、一般の方も極めて関心の高い分野であることから、非専門家にも分かりやすい情報提供も推進していただきたい。
- ・当初を上回る成果があった部分については、今後の開発計画で何等かの変更や反映（追加、前倒しなど）があってもよいように思われる。

4. 2. 事故進展挙動評価に係る研究開発

6名の委員がS、5名の委員がAと評定し、委員会としてSと評定した。以下に主な評価理由を付す。

- ・廃炉措置ロードマップに即した、廃炉工程への知見提供については、共通基盤データベースとして「炉内状況推定図」「FP・線量分布図」の成果物が提供され、廃炉プロジェクトの重要マイルストーンである「燃料デブリ取出し方針の決定（H29）」に向けた予備エンジニアリングに大きな貢献があった点は特に顕著な成果と認められる。

- ・研究成果が廃炉プロジェクトに大きく貢献したことが認められる他、シビアアクシデント挙動理解、解析コードの進展につながっており、効果と効用は1Fの廃炉に留まらず、一般的な原子力安全性の向上に対しても極めて高いと評価できる。
- ・内部調査、サンプリング、燃料デブリ取出しの設備設計においては、何か仮定を置かないと設計ができない。本研究の成果は設備設計のベースとなっており、成果の一部である号機ごとの炉内状況推定図も推定と確認された知見にまとめられており、ニーズが十分に考慮されているため、設備検討をする場合に使いやすい。このため特に顕著とした。
- ・専門家が集まるコアチームを設けて、1F 現場観測、事故時プラントデータ、各種模擬試験、シビアアクシデント解析、要素試験・モデル、データベースなど活用できる知見を集約し、総合評価を実施した上で、基盤データベース【炉内状況推定図】【FP・線量分布図】としてとりまとめて廃炉プロジェクトで活用されるという具体的な貢献があった。さらに、RPV 内部の状況の高度化に向けた研究を継続しており、顕著な成果が上がっていると評価される。安全性向上に向けた基盤研究として、炉心・燃料破損解析手法の高度化を進めており、それに関連して要素モデル・データベース・模擬試験等の研究開発を進め、中間的な成果を取りまとめ、今後公開する計画であり、国内外研究機関からの関心も高い顕著な成果を上げていると評価される。

また、今後の本研究開発への意見、期待として、以下のものがあつたため、参考にされたい。

**【廃炉措置ロードマップに即した廃炉プロジェクトへの知見提供に係る意見】**

- ・廃炉作業が進行していくにつれて、随時、現場からの新知見を取り込むことで、当初図を更新していくことになるが、迅速な対応が可能となる効率的な手法の検討・整備が必要ではないか。

**【事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究に係る意見】**

- ・本研究開発での個別事象の詳細な解析コードをとりまとめた、総合的なシビアアクシデントコードを機構においても開発することを是非検討されたい。
- ・解析コードに統計的な手法を取り入れた推定手法も検討できれば一層効果が大きいのではと考えられる。

**【原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究に係る意見】**

- ・特に機構内安全研究センターにおける公開された成果を中心に、廃炉国際共同研究センターの成果の共有が一層進むことが望まれる。研究基盤分野が共通な部分のある研究者間の意見交換などが進む体制整備も必要と思われる。
- ・原子力安全性高度化研究について、機構の研究成果に対する関心が国内外で高まっているとともに、1F 廃炉における今後の調査への期待も根強いものがあ



るため、これらに対応した研究体制を整備していくことが肝要である。また、今後、これらの成果物が論文公表だけでなく、解析コードとデータベースの公開により、技術普及（成果の社会還元）に繋がることを期待する。

【人材に係る意見】

- ・中間世代の人材不足はより積極的に改善を図り、将来に備えることが望ましい。
- ・若手、中堅の研究者の育成が継続的に進む仕組みについて、機構内外の意見を参考にしつつ、今後も見直していくことも必要になる。若手・中堅ともっと創意工夫のある取り組みについて直に意見交換してはどうか。また、中堅・若手の人材がこれまでの先達の技術や経験を容易に継承できる体制作りは重要で、直接指導もよいが、最新の IT 技術を駆使した知識マネジメントシステムなどの構築にも注力することが望まれる。

【国内外他機関との連携に係る意見】

- ・国内外他機関との連携に当たり、地理的な不便さは、かなりマイナスイメージと言わざるを得ず、特に長期滞在を強いられる学生等にとって負担となる。従って、短期滞在はしかたないとしても、現地に行かずに遠隔で実験等に参加できる選択肢も用意されると、新たな連携展開が期待できるのではないかと。

【その他の意見】

- ・燃料デブリ取り出しに係る研究開発と極めて関連が深いので、互いの情報を共有し、効果的かつ信頼性の高い研究をさらに進めてほしい。
- ・今後は、しばらく現場情報を獲得することが難しい RPV 内部やペDESTAL 底部深さ方向の知見の整備が望まれており、それに向けた体制整備が実施されていることは評価されるが、その際には、燃料デブリ性状把握プロジェクトにおける MCCI などの知見とも連携してより大きな成果に結びつけられるような進め方をすべきである。
- ・事故進展挙動評価に係わる分科会のように、廃炉現場ニーズと研究シーズの効率的なマッチングが必要と判断される研究課題が生じた場合にも、同様の機能を有する体制整備が望まれる。

4. 3. 廃棄物処理・処分に係る研究開発

10名の委員がA、1名の委員がBと評定し、委員会としてAと評定した。以下に主な評価理由を付す。

- ・考慮すべき因子が多数存在する分野の技術開発をニーズに合わせて着実に進めていることは高く評価できる。
- ・分析、放射能インベントリの推定については、処分安全上の重要な核種を選定して分析を進め、成果を多くの論文を通じて、また、Web等を通じて公表し、

さらに、水処理二次廃棄物に関しても、東京電力のニーズに応じて、分析データを適時に提供し、安全対策の実施に大きく貢献している。

また、処理については、水処理二次廃棄物への種々の固化技術の適用性を整備している。また、安定化が困難である陰イオンとなる核種の固化に関して、大きな成果を挙げつつある。他方、ジオポリマーによる固化体からの水素発生に関して、当分野への活用に資する成果を公表している。加えて、有力な処理技術であるセメント固化については、物性に関するデータの取得を継続し、的確な固化技術の提示を期待できる。これらの事業への積極的な取り組みや成果の着実な公表は高く評価できる。

- ・膨大な分析データベースの構築とそれに基づく放射能インベントリの推定方法の確立、スラリーの保管技術、セシウムの吸着技術、固化技術、処分技術に関して顕著な成果を挙げており、研究結果は内外の多くの学術論文誌、学会において発表されていることは高く評価できる。

また、今後の本研究開発への意見、期待として、以下のものがあつたため、参考にされたい。

#### 【分析に係る意見】

- ・燃料デブリ取り出しに係る分析作業も念頭に、大熊分析・研究施設の建設、整備の進捗を睨んだ中長期的な分析計画の立案が望まれる。また、分析計画を変更するにあたって、これまでの蓄積データにおける過不足性の確認と過去データとの繋ぎとなる代表観測ポイントのような分析試料は複数選んでおくべき。

#### 【保管に係る意見】

- ・クライアントの事情もあるかもしれないが、リスク低減を目指すなら、セシウム吸着塔や多核種除去設備スラリーを長期保管するという発想は止めて、先行的処理に進む努力をすべきではないか。

#### 【処理に係る意見】

- ・固化技術に関し、例えば、注目されているジオポリマーについては、水素発生量は大幅に低減されるものの、現状はベントが必要であり、必ずしも合理化にならないなどの状況もある。モノリス触媒と組み合わせるなど、今後の処理技術選定のアプローチの中では、実用に向けて、技術のインテグレーションやコスト低減も考慮した適用性評価が実施されることを期待する。
- ・Tc や Se の処理技術については開発の意義や必要性を定義されることを要望する。

#### 【処分に係る意見】

- ・Cs の移行を遅延する技術に関して、取得データおよび既往の知見を基に、より詳細なメカニズムへの言及も期待する。



【人材に係る意見】

- ・廃棄物の保管、処理・処分は社会的な周辺の住民の方々の関心も高いと考えられるので PA を考慮した研究や、人材の育成も重要であると考えられる。
- ・今後優秀な若手人材を確保するためには、この分野の研究は応用分野だけではなく基礎研究でも多くの研究成果を挙げられることや、外部機関との共同研究に携われることを、アピールするのが望ましい。また、国際的な共同研究も今後計画して、若手人材が、国際的に活躍できる環境を整えることが期待される。中堅・若手人材が本分野の魅力を感じるインセンティブは何かということ、現在活躍している中堅・若手人材と意見交換するなどして確認しておくことが必要ではないか。

【国内外他機関との連携に係る意見】

- ・限られた範囲の分野だけでなく、分析技術や情報処理技術など、他分野で進んでいる技術導入を目論んで、異分野研究コミュニティとの積極的な交流を図る努力も必要ではないか。

【その他の意見】

- ・今後、保管や処理技術について、処分側から、知見をより積極的にフィードバックさせることも重要になる。

4. 4. 遠隔技術に係る研究開発

8名の委員が S、3名の委員が A と評定し、委員会として S と評定した。以下に主な評価理由を付す。

- ・小型コンプトンカメラの開発は、最近急速に進展しており、現場の建屋内 3次元汚染測定ニーズも高く、実際に現場測定が計画されており、また、製品化も進めていることから、特に顕著な進捗があると評価される。
- ・予想を超える状況が起こる可能性に対して、多くの知見を収集し、状況に応じて研究開発の進め方を修正する方策が十分に準備されており、特に顕著な成果であると評価する。
- ・このような研究開発は、全てのものが簡単に現場適用まで到達できるものではなく、試行錯誤も必要であるが、これまでの段階でのアウトカムとしては、期待を大きく上回るものと評価される。
- ・小型コンプトンカメラ等による遠隔放射線計測、可視化技術、レーザーモニタリングと診断加工技術、ロボット技術のいずれもが、実際の廃炉工程が始まった場合に、十分に適用できる段階にあると判断され、特に顕著な成果の創出と評価できる。また、研究成果は多くの学術誌、国際会議、国内会議、研究会等で発表されており、高く評価されている。

- ・レーザー加工技術は、デブリや炉構造物の切断加工の有力な選択肢として、将来的な成果の創出が期待できる。
- ・1Fの廃炉のみならず、緊急時モニタリングや他の原子力施設の廃止措置分野での利用も可能な技術が開発されており、これらは極めて優れた成果として高く評価できる。

また、今後の本研究開発への意見、期待として、以下のものがあつたため、参考にされたい。

**【小型コンプトンカメラの開発に係る意見】**

- ・本分野の非専門家にも効果の分かり易い成果であるが故、過大な期待を抱かせている感もあり、これまでの研究開発過程で見出された課題（定量性、放射線分布再構成画像の歪み、隠れたホットスポット検知における位置不確定性など）を着実に克服して、真の適用限界を明確にし、平成31年度に目論まれている実用化（製品化）に繋げていただきたい。

**【 $\alpha$ 核種位置検出器の開発に係る意見】**

- ・1F現場での表面汚染検査における $\alpha/\beta$ 核種同定のために位置検出器を用いることの効用について、必要な性能や利用手順等、もう少し開発すべき仕様を整理しておくべきではないか。

**【バーチャルピンホールカメラの開発に係る意見】**

- ・バーチャルピンホールカメラの開発については、文部科学省英知事業の一環として、採択された事業であり、関係のPO等との連携により指向性などについても着実な進展が望まれる。また、臭化タリウム検出器は、室温で作動し、高検出効率、高分解能を持ち、 $\gamma$ 線相互作用位置を高い精度で決定できることから、今後、バーチャルピンホールとして、その1Fへの適用が期待される。
- ・先の話だが、本研究開発に投資すべきかの判断根拠となるバーチャルピンホールカメラの成立性（原理実証）の研究成果（シミュレーション計算による基本設計も含む）を早く示すべきではないか。また、フィージビリティスタディの位置づけの予算規模で、その成果は、センサー製作担当の東北大の努力にかかっていることは理解するが、センサー構造の設計検討（シミュレーション計算による特性予測）は、配分予算からも機構側が支援するべきではないか。

**【炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発に係る意見】**

- ・LIBSについて、1F現場での採用に至らない懸念事項（例えば、レーザーアブレーションによる試料飛散に伴うプローブ汚染、試料表面剥離によるS/N比変化と分析結果の再現性変動など）の克服に向けてさらに真摯に取り組まれ、より完成度の高いその場分析システムの実現と1F廃炉作業での活用を期待する。

【レーザー診断・加工技術の開発に係る意見】

- ・大型構造物の健全性評価のための非破壊検査技術として、レーザー超音波診断技術の有用性は明らかであるが、従来法に比べて、診断結果の信頼性評価が未だ不十分であり、本技術の診断精度や適用範囲を明確にしていく今後の研究実績の積み重ねを期待する。また、廃止措置のためのレーザー加工技術については、他にも国内外で関連研究例が少なくなく、これらとの連携強化により、1F 廃炉作業に向けた成果統合のような技術開発が望まれる。

【標準試験法の開発に係る意見】

- ・標準試験法の開発については、オペレータの技術向上に向けて必須となる操作の抽出とその十分性については、関係機関との継続的な連携により議論を今後さらに深めていくことも必要になると思われる。
- ・標準試験法については、今後も最新の現場情報や燃料デブリ取り出し作業の具体化に沿ったタイムリーなフィードバックが可能な試験場（あるいは方法）更新と柔軟な運用体制の構築を期待する。

【人材に係る意見】

- ・本研究開発のようなりモートセンシング、ロボット技術については、原子力以外の多くの分野でも技術者が不足しており、若く、優秀な人材の確保が難しい。基盤研究、基礎研究にも、研究開発資源を十分に配分して本研究開発の魅力を発信し、人材確保に役立てることが望ましい。

【その他の意見】

- ・本分野の研究は、基礎基盤的な個別シーズ技術の開発であり、目標が必ずしも明確ではなく、進捗状況の妥当性の評価が難しい課題が多い。ニーズに基づいた開発戦略や計画を明示した上で進めることを望む。
- ・常にニーズを先取りして、世界中のシーズ技術に対してアンテナを高くしておく必要があり、さらに1F廃炉関係者との連携を密にしていくことを期待する。
- ・特に比較的規模の大きい予算で実施されているものについては、廃止措置への貢献に対する期待も大きくなることから、開発の進捗のみならず、実用化の見通しや課題などをより明確にしていくことが望まれる。
- ・「燃料デブリの取出しに係る研究」、「廃棄物処理・処分に係る研究開発」、「事故進展挙動評価に係わる研究開発」にも極めて有用なものも多いため、他課題の研究者との情報共有を緊密に行うことが望ましい。また、多くの研究開発を行っているため、それらの統括、連携をより一層進めることが重要であると考えられる。

#### 4. 5. 総合的評価

4名の委員がS、7名の委員がAと評定し、委員会としてAと評定した。以下に主な評価理由を付す。

- ・評価したすべての分野で顕著または特に顕著な成果が得られていると評価した。設備設計や現場等のニーズを反映して研究開発を進めており、特に顕著とした内容は実際に活用され成果が得られている。また、全てで若手研究者の育成や研究者のモチベーションを考慮した対応が行われており、この点も高く評価される。
- ・福島廃止措置研究開発は、1F 廃炉現場への適用を目的にした基礎基盤研究であり、当初の計画を検討していた時には現場ニーズに時期的にも、内容的にも合わないテーマが散見されたが、最近では東電をはじめとした関係者とのコミュニケーションや連携も改善され、全体のプロジェクトへ大きく貢献する研究内容やニーズを的確に捉えた研究内容が多く見られる。また、基礎基盤研究という性格上、そのリードタイムを考慮して、1F 廃炉プロジェクトの先々のニーズを捉えて、やや革新的な研究にチャレンジすることも重要であり、その場合進捗状況や成果を踏まえて適時適切に方向修正することが求められるが、今回の報告の中ではそのような対応が適切に行われているケースが多いと感じられた。資金的にも経産省補助金事業、運営費交付金、文科省英知事業等さまざまな供給源を適切に活用して、人的リソースや関係機関との連携もうまく使って進めていると評価される。
- ・それぞれの項目の進展等について精査した結果、全体としておおむね顕著な進展をしていると評価できる内容であった。
- ・1F 廃炉作業の中長期ロードマップのスケジュール的に厳しい制約の下、当初漠然としていた数多くの現場ニーズに対し、中核研究機関として全日本的及び国際的な共同研究体制を構築・牽引する役割と責務を果たし、的確な成果を創出されていることは賞賛に値する。  
 現段階において、限られた研究資金とマンパワーを駆使され、部分的に特出しの S 評価に該当する研究成果もあるところながら、各個別研究における進捗度合いや得られている成果のインパクト度を総合的に勘案して A 評価とした。

また、今後の本研究開発への意見、期待として、以下のものがあつたため、参考にされたい。

#### 【人材に係る意見】

- ・若手の人材育成、人材確保のためには、応用研究のみならず、基盤研究・基礎研究に十分な時間を割くことが重要であり、これが若手の研究キャリアの向上につながる。また、国際共同研究の一層の推進が、国際的に活躍できる人材

の育成につながり、特に若手研究者のインセンティブとなると考えられる。今後とも、こうした研究開発の方向性を保つことが、廃炉を持続的にかつ成功裡に終了させることにつながると考えられる。

**【進め方に係る意見】**

- ・今後、廃炉作業の進捗に伴い様々なデータが得られる見込みであり、この反映についても考えてほしい。
- ・引き続き、このような取り組みを継続するとともに、東電をはじめとした関係機関あるいは機構内部とのコミュニケーションをさらに向上させて、より大きな成果をタイムリーに出していくことに期待する。
- ・今後とも、1F 廃止措置現場との連絡を密にして、1F 廃止措置が一日でも早く完遂されるよう積極的な研究開発への取り組みを期待する。
- ・今後も、廃止措置に向けた研究開発を主導的に推進していただきたい。
- ・今後、特に安全研究に関連してくる研究分野では、機構外のみならず機構内の連携も、機構内ルールの範囲内でさらに進むことが望まれる。基盤とする学術的背景を共通する研究員は多くあり、機構内での横の連携も、特に若手の育成にも重要と考える。

以上

This is a blank page.

付録

(日本原子力研究開発機構 作成)

This is a blank page.



参考資料 1

研究開発課題の中間評価について（諮問）

This is a blank page.

30 原機（福）018  
平成30年11月27日

福島廃止措置研究開発・評価委員会  
委員長 殿

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
理事長 児玉 敏雄

研究開発課題の中間評価について （諮問）

「研究開発・評価委員会の設置について」（17（達）第42号）第3条第1項に基づき、次の事項について諮問します。

記

〔諮問事項〕

- ・第3期中長期計画における「廃止措置等に向けた研究開発」に関する中間評価

以 上

This is a blank page.

参考資料 2

課題説明資料

資料 6-4 廃炉国際共同研究センター(CLADS)における廃止措置研究の取り組み

資料 6-5-1 燃料デブリの取出しに係る研究開発<sup>1</sup>

資料 6-5-3 事故進展挙動評価に係る研究開発<sup>2</sup>

資料 6-5-5 廃棄物処理・処分に係る研究開発<sup>3</sup>

資料 6-5-7 遠隔技術に係る研究開発

資料 6-5-9 櫛葉遠隔技術開発センターの運用状況

資料 6-5-10 放射性物質分析・研究施設の整備状況

---

<sup>1</sup> 経済産業省の平成 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）」、平成 28 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリ性状把握・処置技術の開発）」、平成 29 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のための分析・推定技術の開発）」の成果の一部を含む。

<sup>2</sup> 経済産業省の平成 27 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」、平成 28 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」の成果の一部を含む。

<sup>3</sup> 経済産業省の平成 26 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発）」、平成 28 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発）」、平成 29 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（先行的処理手法及び分析手法に関する研究開発）」の成果の一部を含む。

This is a blank page.



# 廃炉国際共同研究センター (CLADS) における 廃止措置研究の取り組み

平成30年12月26日

福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉国際共同研究センター



## JAEA福島研究開発部門の研究開発体制

### 福島研究開発部門

#### 福島研究開発拠点 (福島県)

##### 廃炉国際共同研究センター

国内外の英知を結集し、安全かつ確実に廃止措置等を実施するための研究開発と人材育成等

##### 楡葉遠隔技術開発センター

廃止措置推進に必要な不可欠な遠隔操作機器の開発及びロボット開発のための施設利用等

##### 大熊分析・研究センター

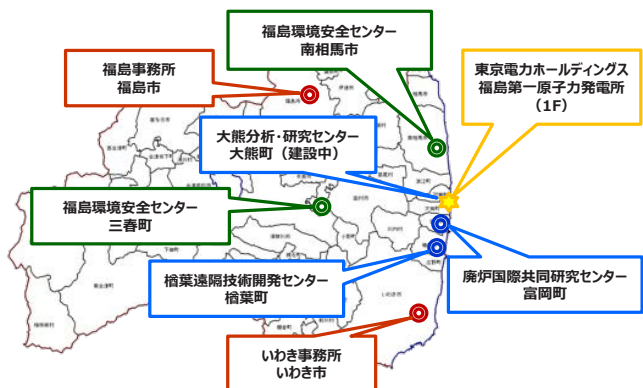
廃止措置推進に必要な不可欠な放射性物質の分析・研究を行う施設の整備等

#### 福島イノベーション・コースト構想の拠点 (廃炉分野)

##### 福島環境安全センター

環境における放射線状況の把握、環境回復に向けた研究開発

※福島環境安全センターは、福島県が整備した施設 (福島県環境創造センター) に、入居し活動



- 茨城県東海村 本部、原子力科学研究所、核燃料サイクル工学研究所
- 茨城県大洗町 大洗研究所
- 東京都千代田区 東京事務所

※茨城地区の核燃料・放射性物質の使用施設、照射施設等を活用



廃炉国際共同研究センター  
(国際共同研究棟)



楡葉遠隔技術開発センター



大熊分析・研究センター  
(完成予想図)



福島環境安全センター  
(福島県環境創造センター内)



## CLADS 一国内外の英知を結集する拠点一

- CLADSを中核とした基礎、基盤から応用までの連続的な研究開発を通じて、1 F 廃炉において直面する課題に貢献する。
- CLADSの本部を国際共同研究棟に設置し、廃炉の研究開発及び人材育成の拠点を構築。
- 国際共同研究棟は、国内外の大学・研究機関等が、共同研究のために利用できる施設。



<p>【東京電力ホールディングス・IRID・NDF】</p> <p>東京電力ホールディングス、 国際廃炉研究開発機構IRID、 原子力損害賠償・廃炉等支援機構NDF との連携、協力</p>	<p>【国内外の大学・研究機関・産業界】</p> <p>東京大学、東北大学、 東京工業大学等との連携講座 国際機関、米仏英国研究所等、民間 企業等との共同研究、情報交換</p>	<p>【福島県、環境省】</p> <p>福島県環境創造センター 福島県環境放射線センター 福島県ハイテクプラザ</p>
--	--	---



## 第3期中長期計画における取り組み内容

### (1) 廃止措置等に向けた研究開発

東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置及び廃棄物の処理処分に向け、政府の定める「東京電力（株）福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」（平成25年6月原子力災害対策本部・東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議。以下「廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」という。）に示される研究開発を工程に沿って実施する。また、NDFが策定する戦略プラン等の方針や、中長期的な視点での現場ニーズを踏まえつつ、人材の確保・育成も視野に入れた、燃料デブリの取り出し、放射性廃棄物の処理処分、事故進展シナリオの解明及び遠隔操作技術等に係る基礎基盤的な研究開発を廃止措置等に向けた中長期ロードマップの工程と整合性を取りつつ、着実に進める。

これらの研究開発で得られた成果により廃止措置等の実用化技術を支えるとともに、廃止措置等の工程を進捗させ得る代替技術等の提案につなげることにより、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等の安全かつ確実な実施に貢献する。また、事故進展シナリオの解明等で得られた成果を国内外に積極的に発信することにより、原子力施設の安全性向上にも貢献する。さらに、専門的知見や技術情報の提供等により、NDF等における廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支援する。

研究開発等の実施に当たっては、新たに設置する廃炉国際共同研究センターを活用して、国内外の研究機関、大学、産業界をはじめとする関係機関との連携を図り英知を結集させるとともに、機構の各部門等の人員・施設を効果的・効率的に活用し、中長期的な研究開発及び関連する活動並びに今後の原子力の安全を担う人材の育成を含め計画的に進める。





## 1F廃炉に係る研究開発における国際協力の進め方

東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置に係る研究開発とその成果の活用は、原子力機構にとって、国民や国内・国際社会全体から要請され、付託され、期待されている最も重いミッションである。

事故対応の中核的課題は廃炉であり、燃料デブリの取出し、放射性廃棄物の処理処分、事故進展シナリオの解明及び遠隔操作技術等に係る基礎基盤的な研究開発など、困難で重要な課題が山積している。これらの課題には、国内外の英知を結集して取り組まなければならない。

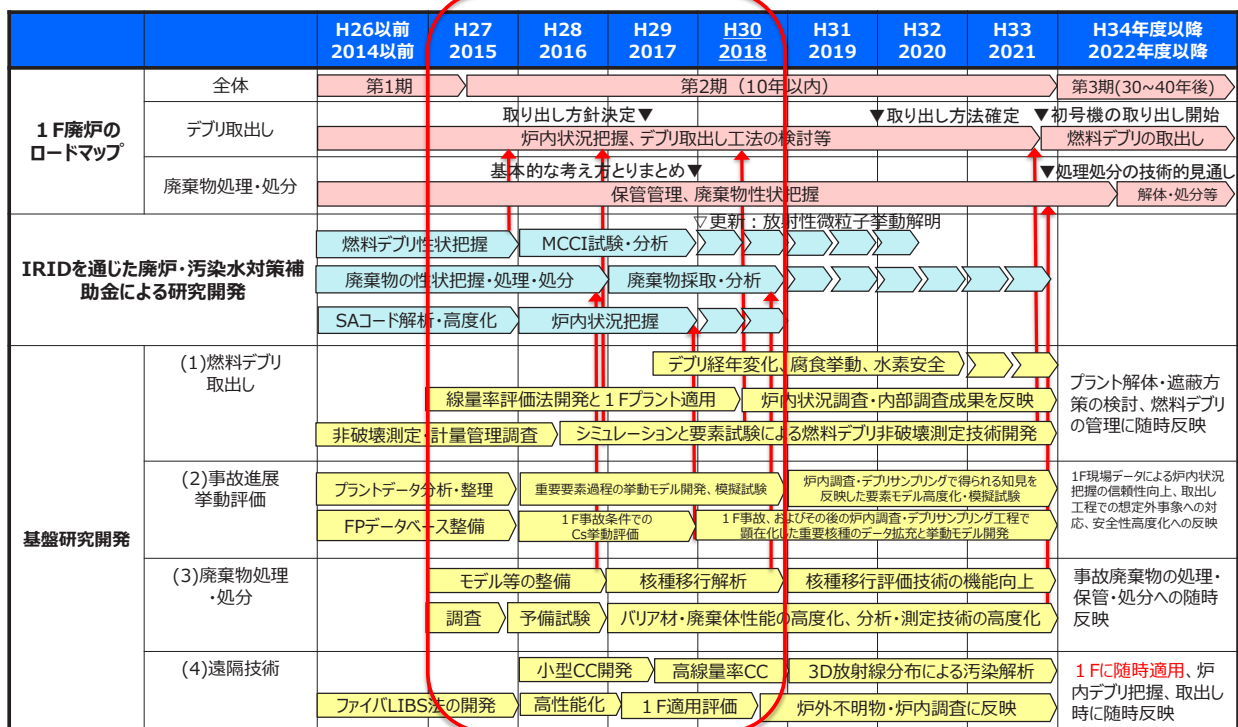
この研究開発で得られた成果、特に、事故進展シナリオの解明で得られた成果は、国内外の原子力施設の安全性向上に貢献し得るように、国内外に積極的に発信する。

この研究開発においては特に、廃炉国際共同研究センター(CLADS)を活用して、国内外の研究機関、大学、産業界を始めとする関係機関との連携を図り、共通の課題に直面している原子力先進国の英知と経験を結集させるとともに、中長期的な研究開発及び関連する活動を担う国際的に通用する人材の育成等を行う。

JAEA「国際戦略」より抜粋



## 1F廃炉作業のロードマップと研究開発の全体スケジュール





## 主な研究項目 (IRID補助事業、交付金基盤研究)

### IRID補助事業

「燃料デブリの性状把握」  
 「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」  
 「事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化」

基盤データの取得

将来展開に向けた先進技術開発の成果

### 交付金基盤研究

#### 燃料デブリ取り出しに向けた研究開発

- 3次元プラントモデルを用いた解析によるプラント内の線源分布と線量率分布の評価手法の確立
- 随伴FPy線測定とパンプ及びアクティブ中性子測定技術の適用性評価及びシステム概念検討

#### 事故進展シナリオの解明に向けた研究開発

- 事故時の燃料溶融移行挙動試験に関するプラズマ加熱技術の適用性評価及び試験装置設計
- シビアアクシデント解析コードによる試験条件検討
- セシウムの原子炉構造材への吸着挙動評価及びモデル化

#### 放射性廃棄物の処理処分にに向けた研究開発

- 迅速、簡易、自動化する分析法の開発
- 事故廃棄物インベントリ評価に必要な基礎データの整備
- 固化材、固化方法、固化体特性の評価手法の開発
- 処分安全評価に関わる基礎基盤データの整備・拡充
- 放射性核種の閉じ込め性能が高い人工バリア材料の開発
- 事故廃棄物の保管等に関する安全技術開発

#### 遠隔操作技術開発

- 仮想空間訓練システム及びロボットの開発・改造に活用するロボットシミュレータの開発・整備
- 建屋内環境状態を認識するためのセンシングデバイスの選定や収集データの処理手法に関する研究開発
- 燃料デブリの残留位置や形状、核種分布を計測可能なガンマ線検出器の開発



## 研究開発課題の対比

### 事前評価時のくくり

### 中間評価時のくくり

#### (2)事故進展挙動等の調査研究

- ①事故時熱水力挙動評価手法開発
- ②事故時の燃料損傷及び溶融評価
- ③構造材・圧力容器挙動評価
- ④放射性物質化学挙動評価

#### (1)事故進展挙動評価に係る研究開発

- ①炉内状況把握の高度化
- ②事故時熱水力挙動評価
- ③事故時の燃料損傷・溶融評価
- ④構造材・圧力容器挙動評価
- ⑤FP化学挙動評価技術開発・ホウ素の影響評価
- ⑥溶融コウム凝固挙動評価

炉内状況把握のための基礎研究として追加

廃炉・汚染水対策事業費補助金事業(国プロ)として追加

#### (5)廃棄物処理・処分に係る研究開発

- ①安全評価の信頼性向上に係る開発
- ②人工バリア材の高度化開発
- ③廃棄物性能の高度化開発
- ④分析・測定技術の高度化開発

#### (2)廃棄物処理・処分に係る研究開発

- ①分析、放射能インベントリの推定
- ②保管
- ③処理
- ④処分
- ⑤燃料デブリ保管時の水素安全対策

廃炉リスク安全研究のための基礎研究として追加

#### (6)遠隔技術

- ①災害対応ロボットの屋内実証試験に係る開発
- ②レーザー応用技術の開発
- ③放射線モニタリング技術の開発

#### (3)遠隔技術に係る研究開発

- ①搬運センター利用技術向上
- ②デブリ取り出し支援技術、レーザー診断技術
- ③炉内観察・廃炉を支援する技術

廃炉・汚染水対策事業費補助金事業(国プロ)として追加

#### (4)燃料デブリの計量管理方策の構築に係る研究開発

- ①燃料デブリ中の核物質量の評価・測定技術の開発
- ②合理的な計量管理方法の検討
- ③核燃料物質の分布状況の調査

#### (4)燃料デブリの取出しに係る研究開発

- ①模擬デブリによるデブリ性状の推定・分析技術開発
- ②燃料デブリ経年変化メカニズム等の解明
- ③放射性微粒子挙動の解明
- ④燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策検討
- ⑤プラント内線源・線量率分布評価手法の開発
- ⑥特殊環境下の腐食挙動

重要研究開発6課題の検討結果を受けて追加



## 国際共同研究棟の概要

- 平成28年4月に建設工事に着手し、平成29年3月に竣工、同年4月から運用開始
- 国際共同研究棟を計画通り年度内に整備し、富岡町の今後の地域振興に貢献

### 施設概要

用途 : 研究施設  
 構造・規模 : 鉄骨造、地上2階建て  
 建築面積 : 1,096㎡  
 延床面積 : 2,115㎡  
 高さ : 10.3m (屋上ルーバー12m)

### 主な設備

- ・走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型X線分光計
- ・多目的X線回折装置
- ・実験室 XAFS装置
- ・光ファイバーLIBS分析装置
- ・ガンマ線エネルギー分析装置
- ・蛍光イメージングリーダー
- ・顕微ラマン分光装置
- ・誘導結合プラズマ質量分析計
- ・制御棒プレート破損試験装置
- ・水蒸気雰囲気での急速昇温反応炉
- ・汎用クラスタ型並列計算機 等



国際共同研究棟の外観



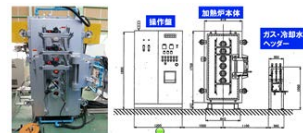
実験室XAFS装置



多目的試験棟の外観



ガンマ線エネルギー分析装置



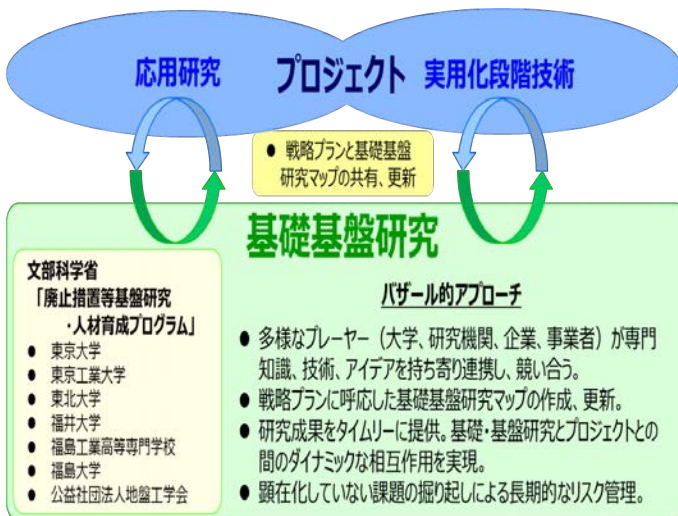
制御棒プレート破損試験装置



## 廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進 ～廃炉基盤研究プラットフォーム～

- 文部科学省公募事業採択者等と設置した「廃炉基盤研究プラットフォーム」を活用し、基礎基盤研究分野におけるシーズを廃炉へ応用していくための道筋をつける研究も着実に実施する。

### 1. 廃炉基盤研究プラットフォームの形成



廃炉基盤研究プラットフォームの形成

### 2. 国内外の研究者との国際ワークショップ開催

#### 『福島リサーチカンファレンス(FRC)』

廃炉研究関連分野における最高ステイタスの会議とすることを目指す。

(平成30年度開催実績)

- ① 廃棄物の分析技術開発に関する研究 (H30年6/19-21、参加者：約60名、海外7名)
- ② 1F事故の知見に基づく炉心溶融挙動の解明と燃料破損現象 (H30年9/18-20、参加者：約100名、海外2名)
- ③ 原子力施設における遠隔技術 (H30年10/30-31、参加者：約80名、海外5名)
- ④ 燃料デブリの性状把握に関する研究 (H30年11/5、参加者：約50名、海外12名)
- ⑤ 廃炉遠隔技術のための耐放射線化、運用技術及び計測技術の高度化の展望 (H30年11/26-28、参加者：約330名、海外27名)



富岡町「学びの森」





## 国際共同研究棟で実施する研究例

### CLADSが中心になって実施する研究例

テーマ：**レーザー遠隔分析技術に関する研究**

実施内容：分光分析原理の検証

期待成果：核燃物質を用いた実証研究への反映

テーマ：**放射線可視化検出技術に関する研究**

実施内容：密封線源による基本動作確認

期待成果：可視化センサの小型化高性能化

テーマ：**放射性微粒子の挙動解明に関する研究**

実施内容：微粒子確認と性状観察

期待成果：粒子起源・事故進展挙動解明への貢献

テーマ：**プラント内線源・線量率分布評価手法の開発**

実施内容：理論計算と実測値を組み合わせたPCV内線源・線量率分布評価手法開発

期待成果：最確評価手法の確立と1～3号機のPCV内線量率分布の推定

テーマ：**含水廃棄物の保管安全技術開発**

実施内容：放射線照射装置の導入による材料腐食研究、並びに廃棄物の水分蒸発挙動の解析（電中研共研）

期待成果：含水廃棄物の合理的な保管等の検討に必要な評価手法の提示

テーマ：**BWR炉燃料破損メカニズムの解明**

実施内容：制御棒ブレード破損試験、被覆管材の急速昇温試験

期待成果：制御棒ブレードやチャンネルボックスの破損メカニズムの解明とモデル化、1F炉内状況把握への知見提供

◆ 相互に効率的となる交流



◆ 試験装置・設備の共同利用

### 大学、その他機関が実施する研究

● **東京工業大学**

研究テーマ：亜臨界水洗浄と固相抽出を利用した環境系廃棄物からの放射性物質の回収・固化

● **東京電力**

研究テーマ：廃炉技術研究、廃炉技術情報発信、環境試料等の測定・分析

※文科省人材育成公募事業の採択機関やその他の大学等に対して国際共同研究棟での共同研究について引き続きアピールを実施

10



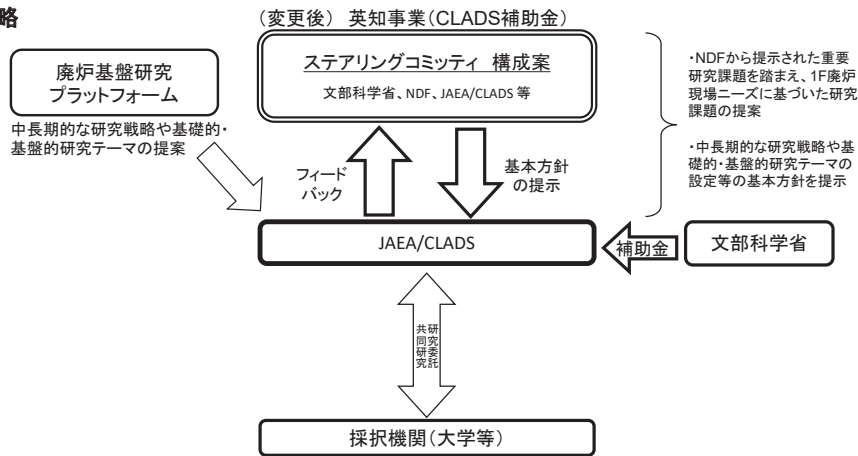
## 参考資料

11



## CLADSによる英知事業のスキームとメリット

### スキームの概略



### メリット

- ① JAEA/CLADSと国内外の大学・研究機関等との連携を強化した体制を構築することにより、国内外の研究者が有する有望なシーズについての知見や研究成果を我が国唯一の廃炉研究機関であるCLADSに集約するとともに、中長期的・一元的な拠点としての機能を高めることができる。
- ② これまで英知事業とCLADSでそれぞれ廃炉研究を実施してきたが、今回の体制変更により、CLADSとアカデミアとの連携強化を促進し、これまでのCLADSのみでは成し得なかった、アカデミアの広い英知を活用した横断的研究が可能となり、研究の広がりが期待される。
- ③ 1F廃炉は中長期的な取組が必要であることに鑑み、それらを支える研究開発・人材育成をCLADS主体で実施する体制を構築することにより、より安定的かつ継続的な中長期的取組を実施することが可能になる。

12

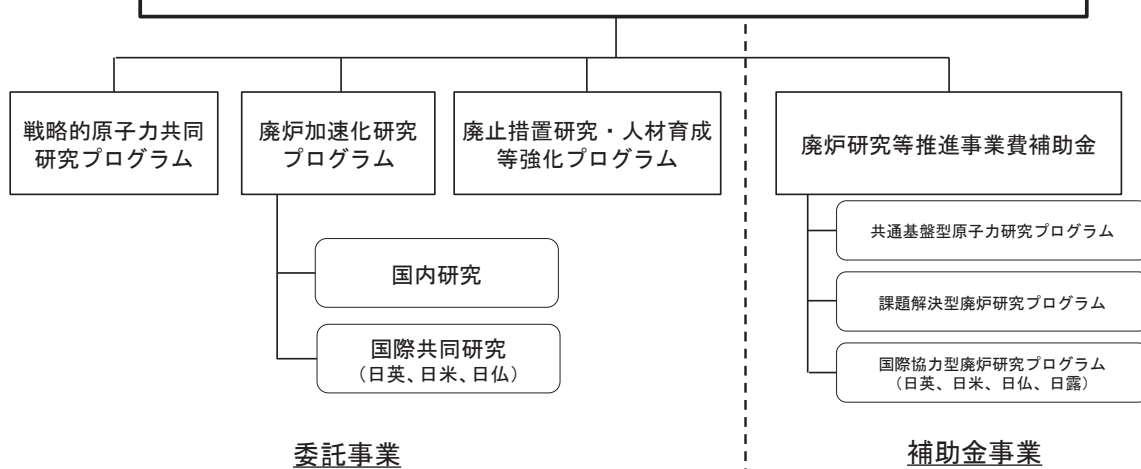


## 研究プログラム体制

### <英知事業の概要>

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原子力分野の課題解決に資するため、「東京電力(株) 福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン」(平成26年6月文部科学省)等を踏まえ、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させることにより、基礎的・基盤的研究や、産学が連携した人材育成の取組を推進。

### 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業



H29年度までの事業  
(H31年度まで継続)

H30年度からの事業

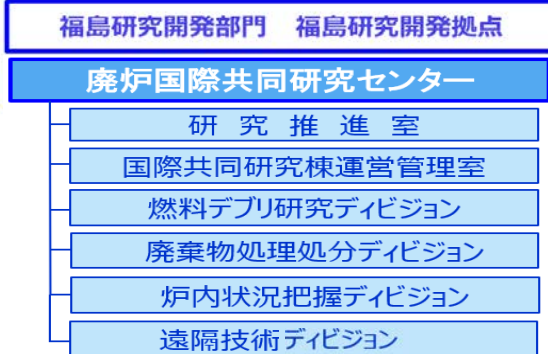
13



## CLADSでの具体的な取り組み

### (I) 国内外の英知を結集する場の整備

- 平成27年4月組織設置



CLADS : Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

### (II) 国内外の廃炉研究の強化

- 海外からの研究者の招聘
- 海外の研究機関等との共同研究
- 廃炉に必要な研究分野について、外部の研究者、専門家を含めたワーキンググループを形成し活動



東京電力福島第一原子力発電所の廃炉とシビアアクシデント研究のための材料科学ワークショップ2019（2019年7月10日～12日）

### (III) 中長期的な人材育成機能の強化

- 文部科学省「廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム」等での採択機関とともに、連携講座を開設し、異分野分析技術の統合、人材育成に取り組む
- 多様な人材を集めるためにクロスアポイントメント制度等を導入



### (IV) 情報発信機能の整備

- 国立国会図書館と連携し、国、東京電力、が発信する情報をIAEAの原子力事故情報分類に従って整理し、「JAEAアーカイブ（福島原子力事故関連情報アーカイブ）」として発信
- JAEAの研究成果を含む文献情報を発信



14



## 平成30年度計画における取り組み内容

### (1) 廃止措置等に向けた研究開発

**燃料デブリの取り出し**に向け、事故により燃料から放出された放射性物質の配管等への付着メカニズムに関する知見の取得を継続する。現場状況に即した燃料デブリの発熱・冷却評価のために、解析手法の妥当性確認及び改良を継続する。燃料デブリの取り出しを想定した線量評価手法を構築する。また、燃料デブリ中の核物質量の評価・測定技術開発については、光ファイバーとレーザーを組み合わせた測定技術の開発を進めるとともに、計量管理等に向けた各測定技術の適用範囲の評価結果を取りまとめる。

**放射性廃棄物の処理処分**に向け、処分の安全性評価の信頼性向上に係る開発、人工バリア材、廃棄体性能及び分析・測定技術の高度化開発並びに放射性廃棄物の保管等に関する安全管理技術の開発を継続する。

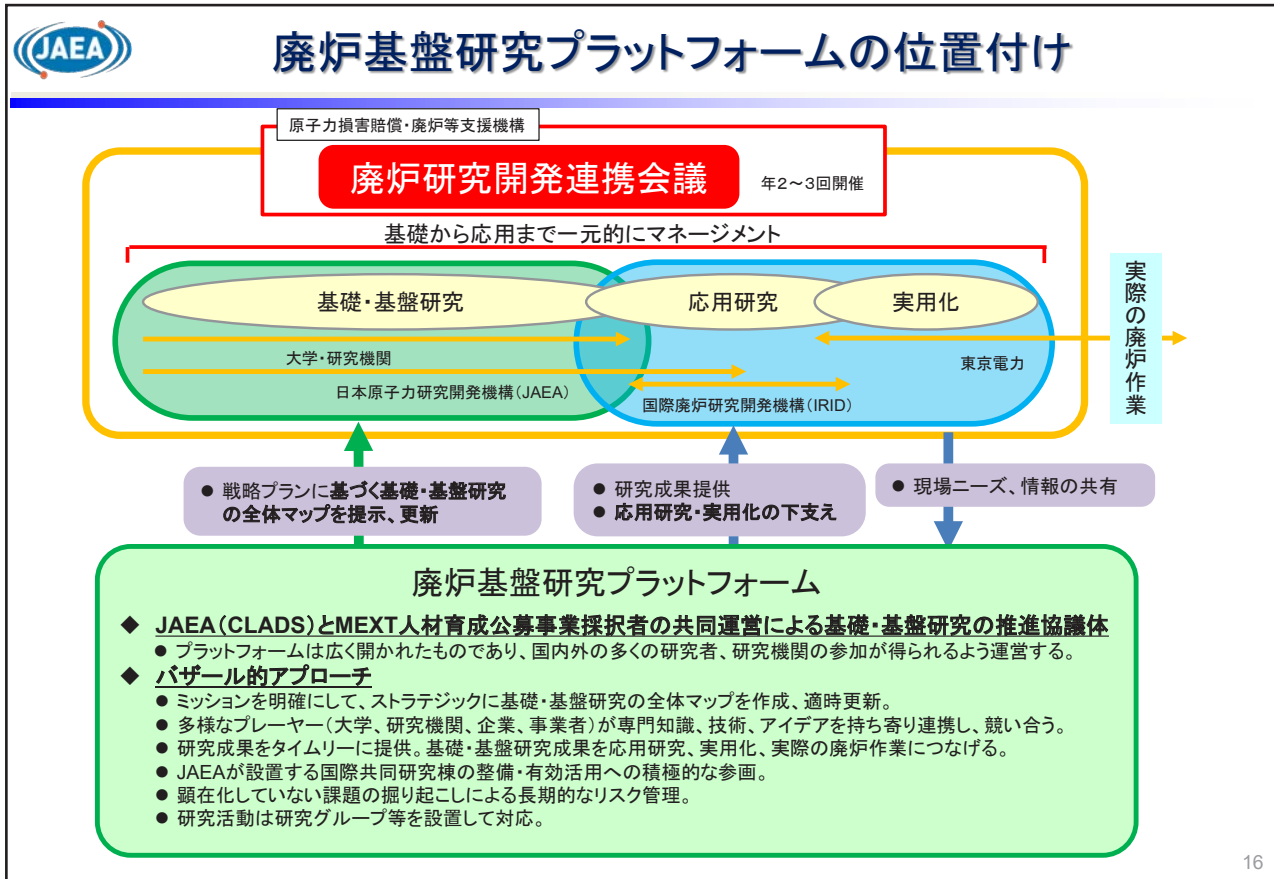
**事故進展シナリオの解明**に向け、事故時の燃料集合体挙動評価のためのデータ取得と解析コード改良を進める。圧力容器の破損箇所や破損時刻を推定するための手法及び格納容器の健全性評価に係るデータの整備を進める。

**遠隔操作技術開発**に向け、施設利用の高度化に資する標準試験法、ロボット開発に活用するロボットシミュレータ及び施設利用に係る遠隔基盤技術の開発等を引き続き進める。また、高線量率環境下での遠隔技術を用いた放射線計測及び放射線画像の解析手法の開発整備を進める。

これら研究開発で得られた成果を国内外に積極的に発信することにより、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等の安全かつ確実な実施及び原子力施設の安全性向上にも貢献する。さらに、専門的知見や技術情報の提供等により、NDF等における廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支援する。

**廃炉国際共同研究センター**は、廃炉研究の基礎基盤から応用までを総括するため、原子力機構の各研究拠点を活用し、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」(平成27年6月廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議)や社会のニーズを踏まえた研究プログラムを展開する。また、国内研究機関とともに設置した廃炉基盤研究プラットフォームを通じた基盤研究の推進及び福島リサーチカンファレンスの開催等により国内外の研究者が集結する場を構築する。


15




**福島リサーチカンファレンス(FRC)の開催実績**

開催日	開催テーマ	開催場所	参加者
H27年11月10日	CLADS廃止措置研究国際ワークショップ	東海村(いばらき量子ビーム研究センター)	128名、海外21名
H28年4月19-20日	廃炉に向けた耐放射性センサー及び関連研究に関する国際ワークショップ (R2SRT2016)	いわき市 (LATOV)	約100名、海外13名
H28年8月4-6日	廃炉のための放射線計測研究カンファレンス	楢葉町(サイクリングターミナル展望の宿「天神」)	56名、海外11名
H28年11月7-9日	事故廃棄物の安全管理に関する研究カンファレンス (RCWM2016)	いわき市 (LATOV)	約60名、海外9名
H28年11月24-25日	廃炉のための遠隔技術に関する研究カンファレンス	楢葉町(楢葉遠隔技術開発センター)	83名
H29年6月20-21日	廃止措置及び廃棄物管理におけるセメント系複合材料に関する研究カンファレンス (RCWM2017)	富岡町(学びの森)	約100名、海外6名
H29年7月5-6日	シビアアクシデント時の燃料・炉心破損に係る、材料科学、熱力学、シビアアクシデント解析とモデリングの専門家ワークショップ	富岡町(学びの森)	約100名、海外21名
H29年9月5-6日	燃料デブリの性状把握に関する研究と人材育成カンファレンス (ConFDeC2017)	富岡町(学びの森)	約50名、海外9名
H29年11月27-29日	福島第一原子力発電所の主要コンポーネントの腐食予測と緩和に関するカンファレンス	富岡町(学びの森)	約100名、海外10名
H29年11月29-30日	原子力施設における遠隔技術に関するカンファレンス	楢葉町(楢葉遠隔技術開発センター)	約50名
H30年3月4日	放射性セシウムの陸域環境や生態系における移行(第3回国際セシウムワークショップ)	三春町(福島県環境創造センター)	約100名、海外4名



 <h2 style="text-align: center;">実施中の国際協力取り決め</h2>		
国	相手機関	技術的目標
アメリカ U.S.A	LBNL	コンプトンカメラによる放射線計測に関する解析技術に反映。
イギリス UK	国立原子力研究所 (NNL)	水分を含む固体廃棄物の処理・保管・輸送・処分における水素発生評価手法及び発生する水素に関わるベント要件について、英国の知見を調査する。
	ブリストル大学	環境中における放射性微粒子挙動の知見を1Fの事故進展挙動推定に反映する。
フランス France	フランス原子力・代替 エネルギー庁 (CEA)	照射済み燃料を用いた、BWR制御棒共存条件でのセシウムなどの放出試験データ拡充。FP化学挙動の基礎知見を取得。
		MCCI(熔融燃料-コンクリート反応)生成物の特性情報等を1F(福島第一原子力発電所)デブリ取出しへ反映するとともに廃炉における燃料デブリの特性に精通した研究者の育成を図る。
		大型MCCI試験時のMCCI生成物の生成形態や特性を1Fデブリ性状の推定、デブリ取出し計画等へ反映する。
ベルギー Belgium	ベルギー原子力研究 センター (SCK・CEN)	破損燃料の取扱い、保管及び保管に関わるR&Dの知見をデブリの取扱い・保管作業等に反映する。
フィンランド Finland	フィンランド技術開発セ ンター (VTT)	水素再結合触媒を用いた水素濃度低減技術の整備による廃棄物の輸送・保管方策の検討、並びにFP放出移行基礎実験及び解析によるFP化学挙動・分布評価に反映。
	ヘルシンキ大学	水素再結合触媒を用いた水素濃度低減技術の基盤整備を通して廃棄物の輸送・保管方策の検討に反映する。
ウクライナ Ukraine	原子力安全問題研究 所 (ISP-NPP)	チェルノブイリにおける燃料デブリに関する知見をデブリの保管作業等に反映する。
チェコ Czech Rep.	チェコ原子力研究所/ レズ研究センター (NRI/CVR)	コールドクルーシブル設備を用いた模擬デブリ凝固試験の実施。1Fで想定される遅い凝固過程での物理化学的な偏析に関する知見獲得。
国際機関	IAEA	各国の損傷燃料やコリウムの取扱いの知見をデブリの保管作業等に反映する。
国際機関	OECD/NEA (Nuclear Science Committee)	廃炉基盤研究における材料科学的な解析に活用できるように、国際熱力学データベースを整備する(TAF-ID)。1F事故進展のシナリオ解析に基づき、1Fデブリ特性やFP挙動の評価に、材料科学的な知見を提供(TCOFF:文科省の資金拠出型プロジェクト)。 備考:資金の一部を活用した、国際研究基金の設立と、それを用いたロシア研究機関あるいはアカデミーとの研究協力を準備中/に着手。

18

 <h2 style="text-align: center;">計画中の国際協力取り決め</h2>			
国	相手機関	技術的目標	取り決めの状況
国際機関	OECD/NEA (Committee on the Safety of Nuclear Installations)	SAREFの燃料デブリプロジェクトでは、実デブリ分析方法、目的等を議論することで、デブリのサンプリングや取出し作業の計画立案、作業安全の確保等へ反映する。	SAREF(福島第一原子力発電所事故後の廃止措置及び安全研究の可能性に関する上級タスクグループ)プロジェクトの後継として、燃料デブリ等の取扱いに関する研究テーマの提案(PreADES)。協定書について参加国の署名手続き中。(JAEAは2017.12月に署名)
		NEST(Nuclear Education Skills and Technology)プロジェクトの実施機関として、各国の若手研究者・技術者等を招へいし、原子力が直面している課題の一つである廃炉の課題解決に向けて、先進的な遠隔操作技術を中心に、学際的な領域の科学技術に係る実践的な教育実習を行うことにより、NESTの発展・強化を図る。	協定書について参加国の署名手続き中。JAEA/CLADS及び東京大学主催のNESTプロジェクトの一環として、セミナーや教育実習等を実施(2018.11.26-12.5)。
多国間	SAFEST 幹事機関:KIT(独) 参加機関: CEA,(仏) UJV(チェ コ), KTH(スウェー デン), AREVA(独), JRC(欧州), MTA- EK,(ハンガリー) SCK-CEN(ベルギー)	欧州で熔融燃料研究を推進する各機関とJAEAの間での、シビアアクシデント模擬試験設備及び試験データの情報交換。将来的な試験装置の相互活用等の検討。1F廃炉基盤研究を考慮した、シビアアクシデント研究ロードマップの共同策定。	欧州SAFESTへのJAEA/CLADSの加盟手続き完了(2018.9月)。 FRC等の場を利用した情報交換に着手。
アメリカ U.S.A	SRNL	燃料デブリ経年変化に及ぼす放射線分解等の影響評価に係わる基礎データを取得する。	Griffin CLADSシニアアドバイザーを窓口 に Fukushima Support Networkの一環として調整中。
	ANL	MCCI生成物の特性把握。	大型MCCI試験生成物のサンプルについて日本への輸送を検討中。

19

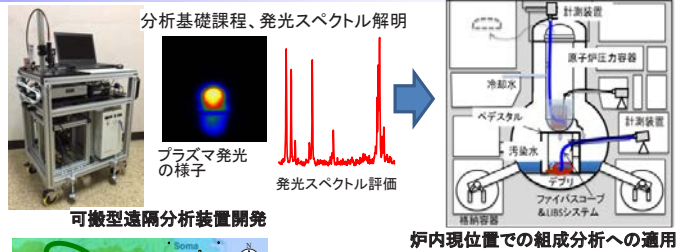




## 国際共同研究棟で実施する研究例(1)

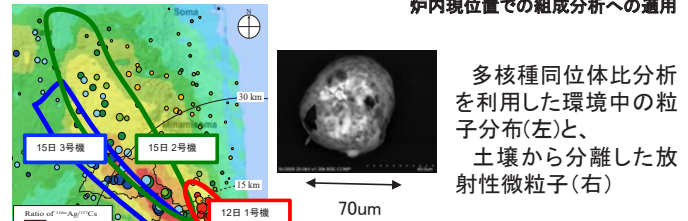
### レーザー遠隔分析技術に関する研究

実施内容：分光分析原理の検証  
期待成果：核燃物質を用いた実証研究への反映



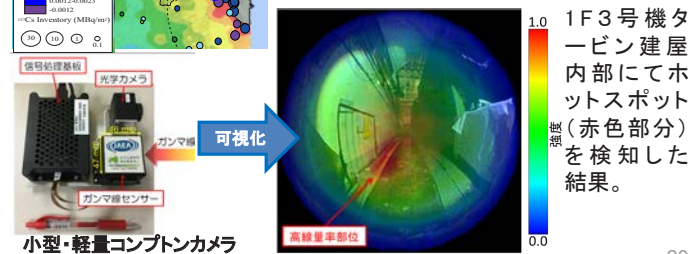
### 放射性微粒子の挙動解明に関する研究

実施内容：微粒子確認と性状観察  
期待成果：粒子起源・事故進展挙動解明への貢献



### 放射線可視化検出技術に関する研究

実施内容：密封線源による基本動作確認  
期待成果：可視化センサの小型 高性能化



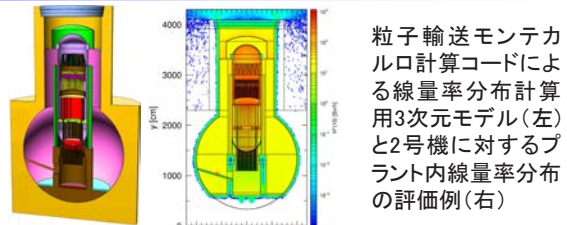
20



## 国際共同研究棟で実施する研究例(2)

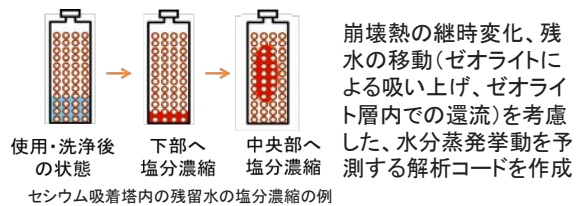
### プラント内線源・線量率分布評価手法の開発

実施内容：理論計算と実測値を組み合わせたPCV内線源・線量率分布評価手法開発  
期待成果：最確評価手法の確立と1～3号機のPCV内線量率分布の推定



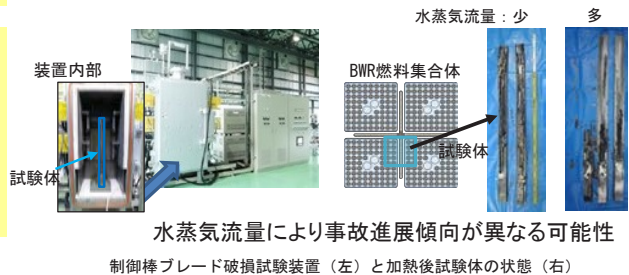
### 含水廃棄物の保管安全技術開発

実施内容：放射線照射装置の導入による材料腐食研究、並びに廃棄物の水分蒸発挙動の解析(電中研共研)  
期待成果：含水廃棄物の合理的な保管等の検討に必要な評価手法の提示



### BWR炉燃料破損メカニズムの解明

実施内容：制御棒ブレード破損試験、被覆管材の急速昇温試験  
期待成果：制御棒ブレードやチャンネルボックスの破損メカニズムの解明とモデル化、1F炉内状況把握への知見提供



21



## 富岡町における復興状況(平成30年12月現在)



避難指示解除前区域図(平成29年3月末時点)

【国際共同研究棟の立地概況】

- ・ 1Fから約10km (車での移動距離)
  - ・ 帰還困難区域を除く、避難指示の解除 (H29.4.1~)
  - ・ 空間線量率約0.172 $\mu$ Sv/h (H30.12.10)
  - ・ JR富岡駅から約2.5km
  - ・ JRいわき駅から約40km
  - ・ 電気、ガス、上水道は復旧済
  - ・ 平成30年度から小中学校再開
  - ・ 震災時の町の人口 約16,000人
  - ・ 現在の町人口13,069人 (11月末現在)
  - ・ 居住者826人(H30.12.1時点)帰還率約6.3%
  - ・ 将来の帰還の意向 (H30.8復興庁)
- 既に富岡町で生活5.2%、戻りたい9.9%  
戻りたいが戻ることができない18.4%、  
まだ判断がつかない16.8%、戻らない48.1%



## 燃料デブリの取出しに係る研究開発

平成30年12月26日

福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
 廃炉国際共同研究センター



### 第3期中長期計画における廃止措置等に向けた研究開発

#### (燃料デブリ取出し技術開発分野)

- 東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置及び廃棄物の処理処分に向け、政府の定める「廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に示される研究開発を工程に沿って実施する。
- NDFが策定する戦略プラン等の方針や、中長期的な視点での現場ニーズを踏まえつつ、人材の確保・育成も視野に入れた、燃料デブリ取出しに係る基礎基盤的な研究開発を着実に進める。
- 研究開発で得られた成果により、廃止措置等の実用化技術を支えるとともに代替技術等の提案につなげることにより、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等の安全かつ確実な実施に貢献する。
- また、燃料デブリ取出し研究で得られた成果を国内外に積極的に発信し、原子力施設の安全性向上にも貢献する。
- 併せて、専門的知見や技術情報の提供等により、NDF等における廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支援する。

【実施方針】核燃料物質や放射線計測等に関する専門的な知見を活かし、IRID補助事業（外部資金）の廃炉技術の実用化に即した研究と交付金による基礎基盤研究\*）を融合し1F廃炉の早期実現に向けて柔軟で効果的な技術支援を実施する。

\*）IRIDや東電などが実施困難な先端的な基礎研究や専門研究を実施する。研究はIRIDや東電などから廃炉作業に係るニーズを聴取しつつ進めていく。



## 第3期中長期計画における取り組み内容

### (1) 燃料デブリ取出し技術開発

- ◆ 燃料デブリの性状把握・分析技術の開発 (IRIDを通じた廃炉・汚染水対策補助金事業)
- ◆ プラント内線源・線量率分布評価技術の開発
- ◆ 燃料デブリの非破壊測定法と計量管理方策の検討
- ◆ 燃料デブリ経年変化メカニズム等の解明に関する研究
- ◆ 特殊環境下の腐食挙動に関する研究

項目	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度
IRIDの廃炉・汚染水対策補助金による研究開発	・模擬デブリを用いた性状把握 ・分析技術開発等(実デブリ分析準備)	・大型MCCI試験(CEA共研) ・分析技術開発等(実デブリ分析準備)	・大型MCCI試験(CEA共研) ・分析技術開発 ・実デブリ分析準備	・分析技術開発 ・実デブリ分析準備 ・放射性微粒子挙動の解明
プラント内線源・線量率分布評価技術の開発	・データ・コード開発と簡易モデルによる試解析 ・3次元モデルの構築	・最確線量率分布評価手法の開発と1Fへの適用	・実測値を反映した線量率分布評価 ・廃炉工法・工程を模擬したケーススタディ手法の開発	・最新の内部調査結果を反映したモデル改良による線量率分布の高精度化
燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討	・燃料デブリ非破壊測定技術の検討(シミュレーション手法の構築と試解析)	・非破壊測定技術のシミュレーション解析と適用性評価 ・合理的な燃料デブリ管理方策の検討と関連機関の支援	・デブリ弁別のための非破壊測定技術の適用評価と要素試験 ・合理的な燃料デブリ管理方策の提言と関連機関との連携	・統合型の非破壊測定技術の開発。 ・合理的計量管理システムの概念構築を関連機関への連携
燃料デブリ経年変化メカニズム等の解明			・研究開発戦略の検討 ・経年変化メカニズムの解明 ・総合的な経年変化予測	・燃料デブリ性状と環境条件のまとめとメカニズムの解明 ・総合的な経年変化予測
特殊環境下の腐食挙動			・MEXT英知事業「放射線環境下での腐食データベースの構築」を受託 ・研究開発戦略の検討	・冷却配管の流動条件下の腐食データの整備 ・放射線環境下での腐食データベースの構築

2



## 第3期中長期計画における取り組み内容

### (燃料デブリ取出し技術開発分野 その①)

#### ① 廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供

- ◆ 事故後の初期的な段階より、網羅的な燃料デブリ情報の収集・提供に努め、国プロの一員として廃炉戦略の初期段階の検討に貢献。
- ◆ 廃炉プロジェクトの要求ニーズに即してタイムリー\*)に燃料デブリの知見を提供、廃炉プロジェクトの推進に貢献 (炉内調査、デブリ取出し、収納移送保管、臨界安全、廃棄物管理、等)。  
\*) H29：燃料デブリ取出し方針の決定、H30：燃料デブリ取出し方法の確定
- ◆ “燃料デブリの基本情報”を「特性リスト」に集約提供し、各プロジェクトの設計に貢献、また「1F廃炉のための技術戦略プラン 2017」等に掲載。
- ◆ 複雑難溶性の燃料デブリに最適な分析技術を開発し、分析フロー、手順書を取り纏めた。
- ◆ 燃料デブリの最確な線量評価手法、プラント内線源・線量率分布の評価手法を開発し、燃料デブリ取出しや炉内状況把握に貢献。  
→IRID補助事業「燃料デブリの性状把握・分析技術の開発」
- ◆ 燃料デブリの収納保管、計量管理方策の確立に向けて、非破壊測定法と計量管理方策について有識者・専門家の議論を通じて、東電、NDF、IRID、IAEAへ技術提供した。  
→燃料デブリの計測および計量管理技術の開発

3





## 第3期中長期計画における取り組み内容 (燃料デブリ取出し技術開発分野 その②)

### ② NDF廃炉重要研究6課題に即した専門知見の集積

- ◆ **燃料デブリの経年変化とその挙動評価**に向けて、**専門家による分科会**を設立し、研究開発戦略の構築に着手。  
→ **燃料デブリの経年変化に関する分科会 (H29年度より)**
- ◆ **過酷な廃炉環境下における構造材の健全性の評価**に向けて、放射線の影響を中心に知見の集積、データベース化に向けて、**専門家による分科会**を設立し、研究開発戦略の構築に着手。  
→ **特殊環境腐食に関する分科会 (H29年度より) 及び、英知事業「特殊環境腐食に関する構造材の健全性評価」(H28年度より)**
- ◆ **廃炉工程における放射性微粒子の挙動評価**に向けて、国内外の英知を活用しつつ**専門家による分科会**を設立し、研究開発戦略の構築に着手。  
→ **放射性微粒子に関する分科会 (H29年度より) 及び、IRID補助事業「燃料デブリの性状把握・分析技術の開発 (H30年度より)**

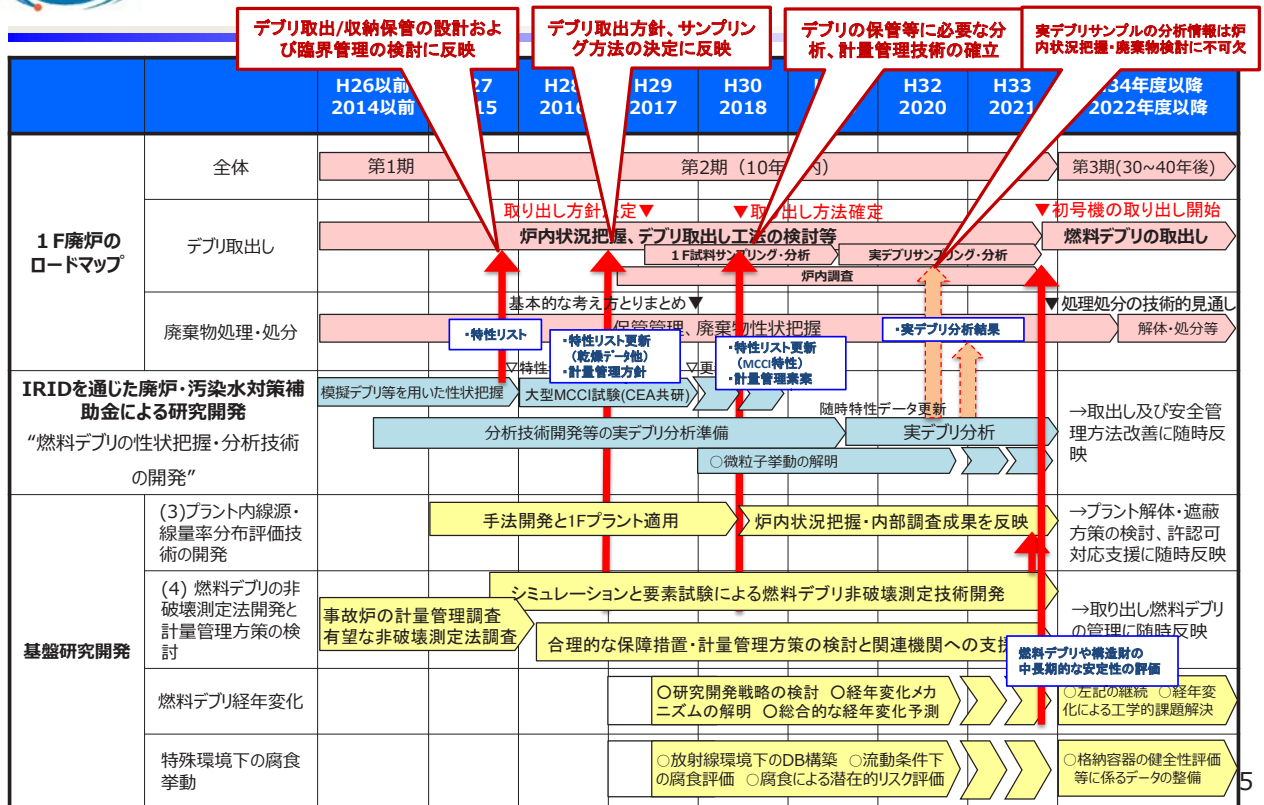
### ③ 国内外の研究協力及び貢献

- ◆ OECD/NEAのPreADESプロジェクトを主導、及びIAEA/CRP会合等に参画し、燃料デブリ等の知見の提供、**国際的な英知の結集、情報発信に貢献**。

4



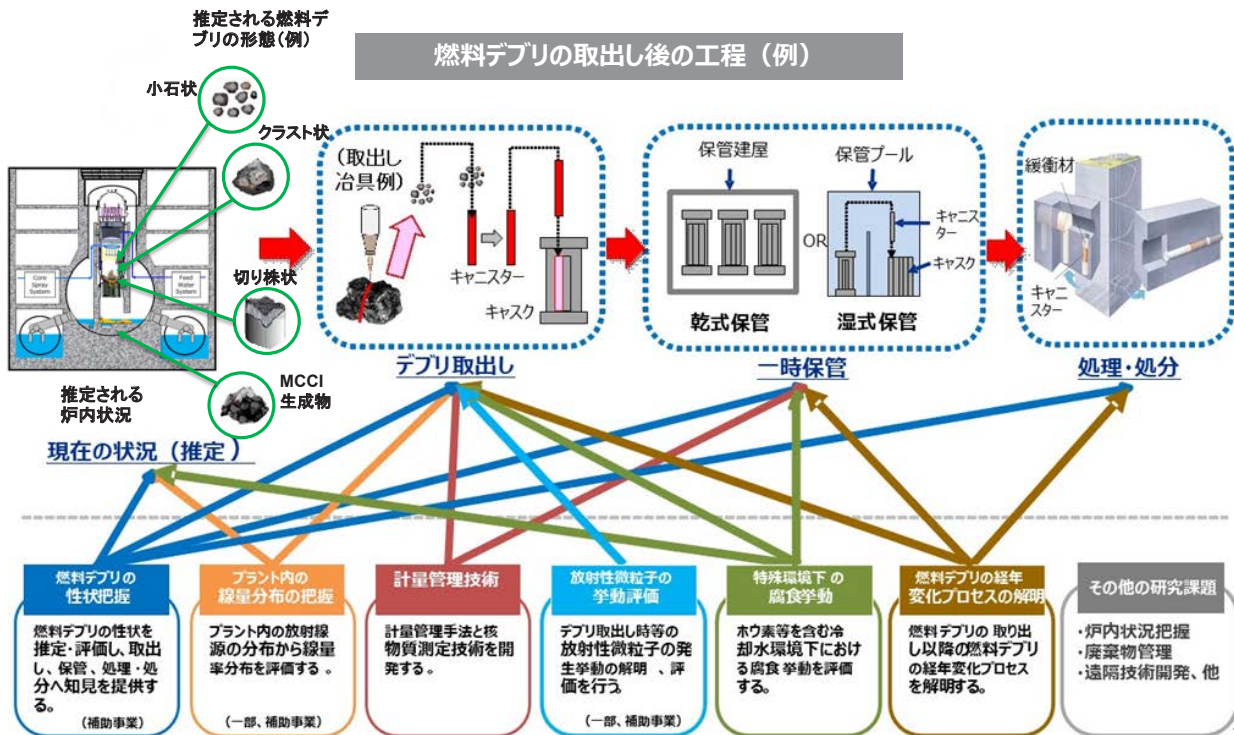
## 1F廃炉作業のロードマップと研究開発の全体スケジュール



5

# ① 廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供

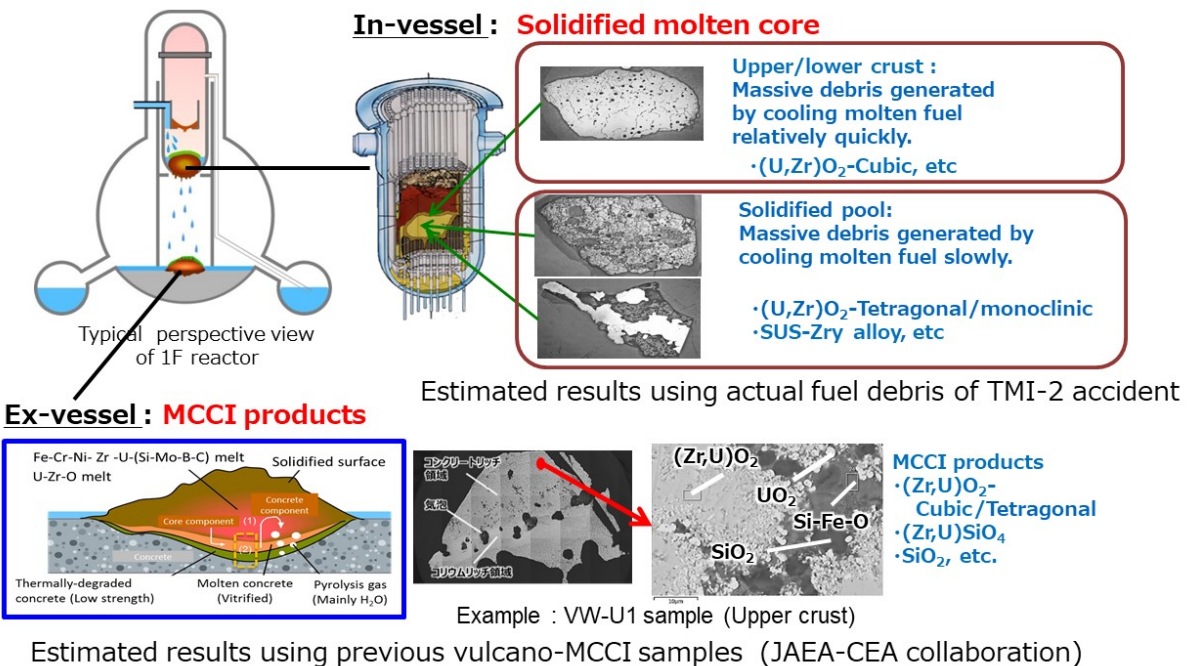
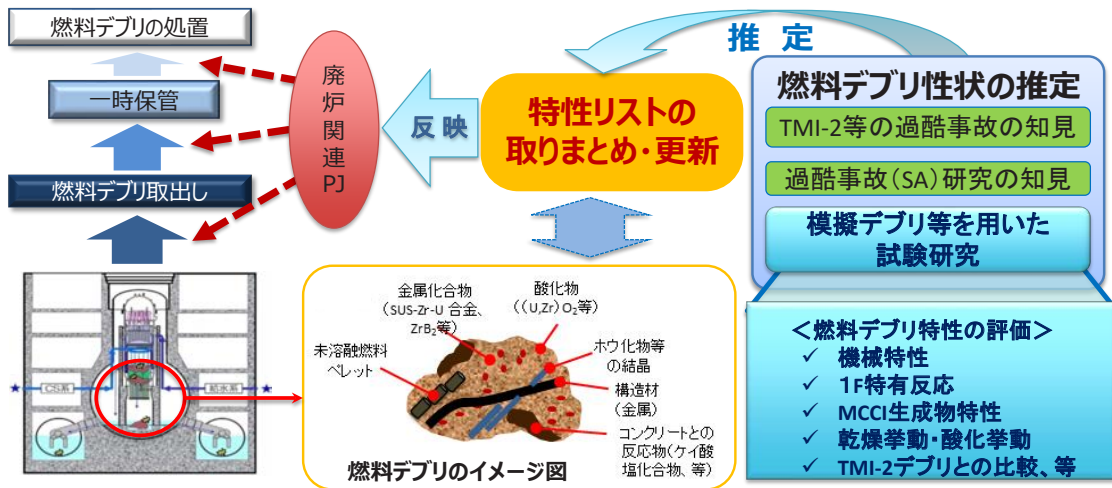
## 燃料デブリ取出しに関する研究開発の概要



## 【廃炉プロジェクトからのニーズ】

燃料デブリ取り出し、収納缶移送、保管等の技術開発を進める上で、**前提条件となる燃料デブリに関する基本情報の提供が不可欠**である。

- 燃料デブリ取出工具の設計、工法選定 ⇒ **位置、量、性状（硬度、靱性、弾性率等）**
- 収納容器の安全評価、乾燥プロセス設計 ⇒ **燃料デブリの気孔率、乾燥特性等**
- 取出しや収納保管時の臨界発生防止設計 ⇒ **燃料デブリ中のGd量、 $B_4C$ 濃度、気孔率等**
- 廃棄物の安全設計 ⇒ **燃料デブリの含有成分情報等**



【方針】 原子炉内で生成が予想される主要な燃料デブリに対して、模擬デブリ等を用いた試験研究等から特性を評価・推定し、“特性リスト”に集約しタイムリーに廃炉プロジェクトへ提供する。





# 成果：燃料デブリの性状把握に関する研究



### 模擬デブリによる評価

**(1) 焼結法**

$y\text{UO}_2 + (1-y)\text{ZrO}_2 \rightarrow (\text{U,Zr})_y\text{O}_2$

- Same as fuel pellet fabrication
- Melted, Coated, Pelletized, Sintered (Ar, ~1730°C)
- Additive:  $\text{Os}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$
- With control oxygen potential

**(2) アーク溶融法**

- Entire uniform heating
- Required metal rich conditions
- Simulated Core Debris, MCCI product
- ~3-9 samples

**(3) 集光加熱法**

- Concentrating light as heat source
- Erosion under thermal gradient conditions
- Vacuum atmosphere gas
- Small scale MCCI, Melting of (U,Zr)O<sub>2</sub>

**例) 燃料デブリ中のホウ素挙動の評価**

金属質部分 (合金+ホウ化物) (U,Zr)O<sub>2</sub> セラミック

1: Zr<sub>2</sub>, 2: (Fe,Cr,Ni)<sub>2</sub>B, 3: Fe-Cr-Ni, 4: (Fe-Cr-Ni)<sub>2</sub>(Zr,U)

断面全体像 金属質部分のSEM像及び元素マップ像

金属質部分に生成する相の熱力学平衡計算例

炉心デブリ中の生成相の傾向 (低酸素分圧条件)

式	$\text{B}_2\text{O}_3$ 質量割合	色
酸化セラミック	(U,Zr)O <sub>2</sub>	赤
金属質部分 (合金、ホウ化物、炭化物等)	(Fe,Cr,Ni) <sub>2</sub> (Zr,U) + Fe-Cr-Ni buffer	青
	Zr <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	黄
	(Fe,Cr,Ni) <sub>2</sub> B	緑
	ZrC	紫

### TMI-2デブリを用いた評価

上部クラストの例 (U,Zr,Fe,Cr)O<sub>2</sub>

下部クラスト

溶融プール

ポーリングによるコア採取の例 [7]

**例) 冷却時間によるデブリ組成への影響評価**

徐冷時: 微細入り交じり組織      急冷時: C単相組織

TMI-2デブリ

Zrリッチ T+M (U~0.21)      C単相 (U 0.68~0.87) ①

TMI-2デブリ (U,Zr,Fe,Cr)O<sub>2</sub>      C+T(+M) 微細入り交じり組織 (徐冷)

溶融固化 模擬デブリ (急冷)      C-(U,Zr,Gd,Fe,Ca)O<sub>2</sub> (U~0.66)      C-(U,Zr,Gd,Fe,Ca)O<sub>2</sub> (U~0.55)      C-(U,Zr)O<sub>2</sub> (U 0.3~0.4)

焼結+酸化焼鈍 模擬デブリ (徐冷状態を模擬)      C-(U,Zr,Gd,Fe)O<sub>2</sub> (U~0.68, O<sup>-</sup>/U~2.2)      3C-(U,Zr,Fe,Ca)O<sub>2</sub> (U~0.45)      C-(U,Zr,Fe,Ca)O<sub>2</sub> (U~0.26)

UO<sub>2</sub> ↔ UO<sub>3</sub> (U,Fe)O<sub>2</sub>      C+T-(U,Zr,Fe)O<sub>2</sub>      C+T-(U,Zr,Gd,Fe)O<sub>2</sub> 微細入り交じり組織

微小硬さ (GPa)

模擬デブリとTMI-2デブリの硬さデータの比較 10

**【アウトカム】** 1Fの燃料デブリに対する基礎的な特性情報を推定・評価し、特性リストへ反映。国際会議発表4件、論文3本、講義・講演6件。



# 成果：大型MCCI試験によるMCCI生成物の特性評価



**試験装置の断面図 (試験前)**

ZrO<sub>2</sub>製円筒 (φ25cm)

初期装荷物 (UO<sub>2</sub>+ZrO<sub>2</sub>+Zr+ステンレス)

高周波誘導加熱用コイル

コンクリート試験体 (H 50cm, φ 50cm)

**MCCI試験**

クラスト

- 固化した表面

熱劣化層

- 熱劣化部分は薄

粒子状

- 流出、飛散した粉末

気孔・成層化

- 低密度な溶融酸化物層で気孔が多く破砕やや難
- 高密度な溶融酸化物層で気孔が少なく破砕難

酸化物/金属層分離

- 金属が多い層で破砕難

複合相

- 各所で数mmの金属粒及びガラス相を含有

気孔・成層化

- コンクリート境界で気孔増加

空洞

コンクリート

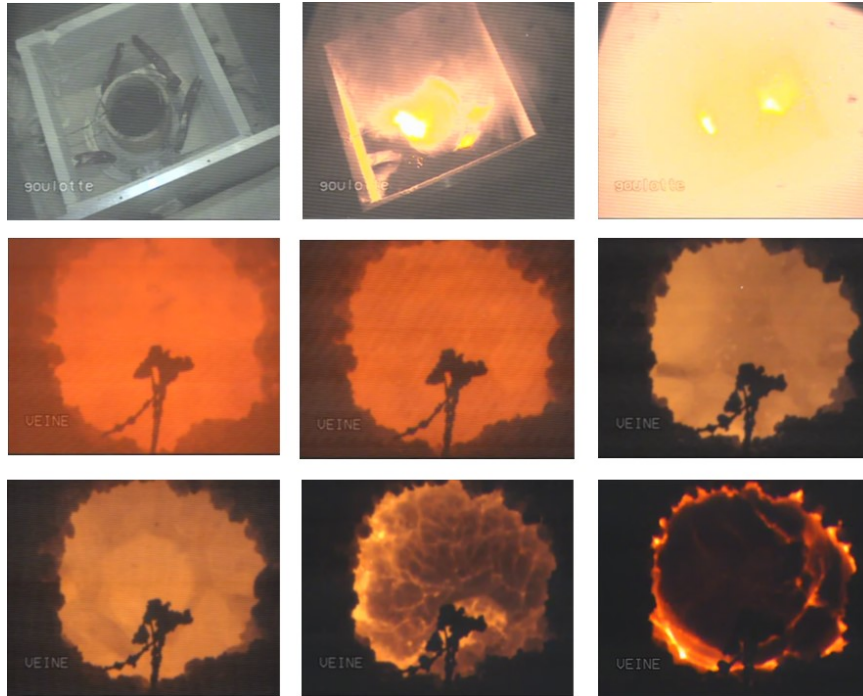
**試験後の断面図**

仏国CEAとの共同研究による大型MCCI試験の概要



VULCANO VF-U1  
2017.1.19

大型MCCI試験時の溶融状況



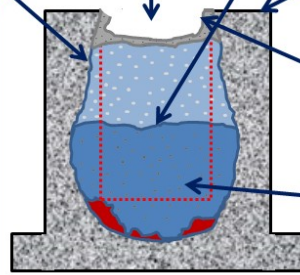
<解体時の知見>

デブリ外観は非常にポラスで脆く見えるが実際は非常に堅い

クラスト部は非常に堅く、打撃による破碎は困難

金属相の分離：酸化物と金属では異なる工具が必要となる可能性

熱劣化コンクリート層は脆いので、把持によるハンドリングに向かない

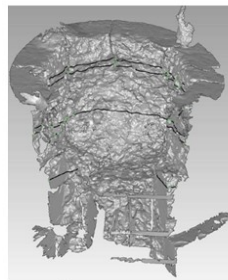
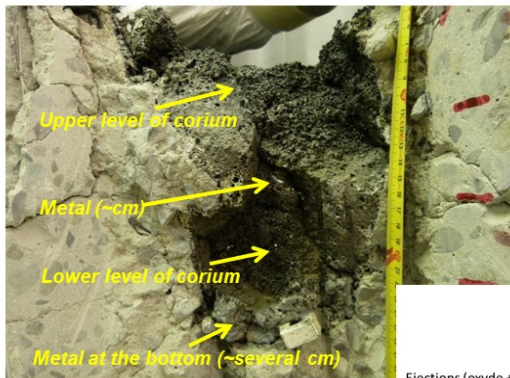


【アウトカム】 工学規模のMCCI生成物の解体時の重要知見をIRID、東電、NDF等へ提供。デブリ取出し時の工法検討等に反映。



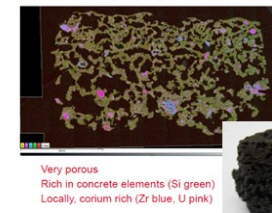
# 成果：大型MCCI試験によるMCCI生成物の特性評価

補助事業  
IRID



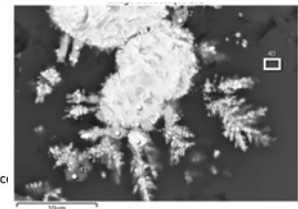
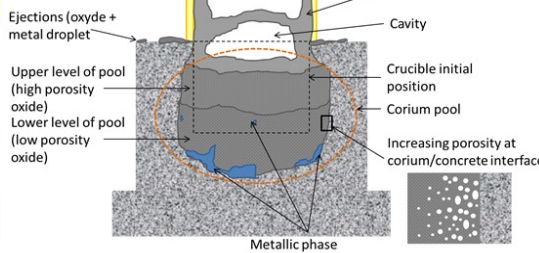
## <本試験でのMCCI生成物の特徴>

- ✓ 非常にポーラス。各部位には概ね~5mm程度の気孔が分布（多孔質）
- ✓ Siが主体（Ca,Alを含有）のマトリックス中に、U-Zr酸化物やCrを主体とする酸化物等が析出
- ✓ XRDによる化合物の同定結果：  
立方晶型( $U_{1-x}Zr_x$ )O<sub>2</sub>、正方晶型ZrO<sub>2</sub>  
スピネル相（FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>等）  
SiO<sub>2</sub>（クリストバライト）、他
- ✓ 底部境界における底部境界における金属層は、Fe主体の合金
- ✓ 採取箇所による顕著な硬さの変化は無し。



Upper Crust

Very porous  
Rich in concrete elements (Si green)  
Locally, corium rich (Zr blue, U pink)



Nodules (Zr<sub>0.5</sub>U<sub>0.5</sub>)O<sub>2</sub> & (Zr<sub>0.25</sub>U<sub>0.75</sub>)O<sub>2</sub>

【成果】 大型MCCI試験でも生成相、物性は基礎試験等からの想定と大きく変わらないことを確認。

【アウトカム】 MCC生成物の生成相、物性に関する重要知見を提供。国際会議発表3件（追加予定）、論文2本（追加予定）、原子力学会3件。NHK等の取材対応多数。



# Japanese NHK TV program coverage

補助事業  
IRID

1st : April 15-16, 2015 --> Broadcast on May 20, 2015, "NHK Special"

2nd : November 8, 2017 --> will be broadcast on February, 2018, "Science ZERO"



\*)その他、朝日新聞、読売新聞、等からの取材有り





## 成果：燃料デブリの分析技術開発

### 燃料デブリの溶解及び多元素分析手法の開発

補助事業  
IRID

#### ◆ 多元素分析手法の開発

- 燃料デブリはU,Zr, Fe等を主成分とする多様な元素を含む**難溶解性**の溶融固化物であり、**合理的な分析手法の確立が急務**。
- 各種溶解法の比較評価から**最適な溶解法と分析手順を確立**する。

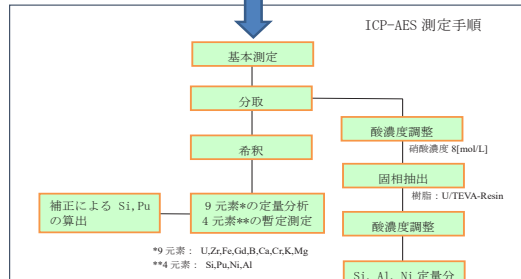
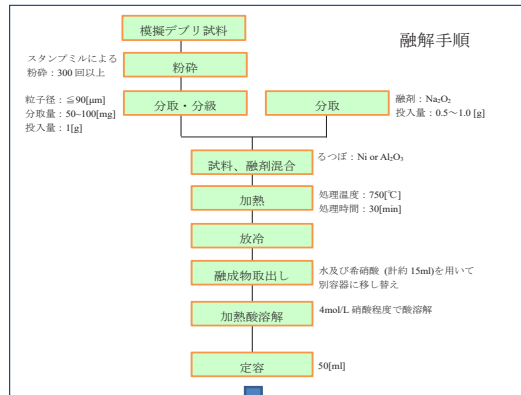
表1 MOX模擬デブリアルカリ融解分析結果 (例)

MOX模擬デブリ試料	Pu (wt%)	U (wt%)	Zr (wt%)
1回目	1.6	30.8	43.3
2回目	1.7	31.8	43.4
3回目	1.6	31.4	42.0
平均	1.6	30.9	42.9
Cv	1.5%	1.5%	1.9%

【成果】 MOX模擬デブリを用いて、アルカリ融解法の適用性を検証。また、多成分を含む燃料デブリ溶解法に対するICP-AESによる元素分析の適用性を検証。

【アウトカム】 難溶解性の燃料デブリに対する溶解方法と分析フローを開発。**原子力学会発表1件、国際会議1件。**

#### ◆ 過酸化ナトリウム融解法 (アルカリ融解法)



16



## 成果：燃料デブリの分析技術開発

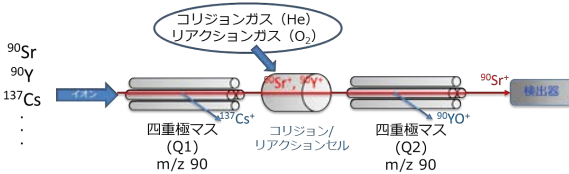
### ICP-MSによる多核種合理化分析手法の開発

補助事業  
IRID

#### ◆ 多核種合理化分析手法の開発

- ICP-MSを用いて、燃料デブリサンプル中に含まれる対象核種の分析を行う際には、サンプル中に含まれる他の核種が分析を妨害する。
- **トリプル四重極ICP-MS (ICP-QQQ-MS)** を適用することで、**同重体干渉を大幅に低減**する。
- **妨害イオンの影響度を評価、その除去方法を確立**する。

○ 新型ICP-MS (ICP-QQQ-MS: Agilent8900) の概要



#### 【成果】

- リアクションガスに対する測定対象核種 (安定核種で模擬) および妨害核種に対し、リアクションガスの効果を確認。  
→ **Ni-59, Pd-107, Cs-135以外の核種についてはリアクション (O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) の有効性を確認した。**
- 各測定対象核種 (安定核種で模擬) に適したリアクションガスを使用した時の検量線を作成し、導出した検出下限値を整理した。(表)  
→ **Sr-90以外の核種については、必要な検出下限値で測定が可能。**

表 各測定対象核種を模擬した安定核種に適したリアクションガス使用時の検出下限値一覧

測定対象核種	検出下限値 (ppb)	リアクションガス	基準線量相当濃度の最小値 (瓦線/トロンチン) (ppb)		妨害核種
			1/1	1/10	
Ni-59	1.37E-02 (Ni-58)	NH <sub>3</sub>	9.14E+02	9.14E+01	Co-59
Ni-63	1.37E-02 (Ni-58)	NH <sub>3</sub>	7.62E-01	7.62E-02	Cu-63
Se-79	2.10E-02 (Se-78)	O <sub>2</sub>	4.05E+01	4.05E+00	Br-79
Sr-90	2.07E-04 (Sr-88)	O <sub>2</sub>	8.28E-05	8.28E-06	Zr-90
Zr-93	1.13E-03 (Zr-90)	NH <sub>3</sub>	1.29E+03	1.29E+02	Nb-93 Mo-93
Mo-93	3.12E-04 (Mo-98)	NH <sub>3</sub>	3.09E-01	3.09E-02	Zr-93 Nb-93
Pd-107	6.11E-04 (Pd-105)	NH <sub>3</sub>	6.30E+04	6.30E+03	Ag-107
I-129	6.47E-03 (I-127)	O <sub>2</sub>	9.33E+01	9.33E+00	Xe-129
Cs-135	1.20E-04 (Cs-133)	O <sub>2</sub>	3.05E+02	3.05E+01	Ba-135
Sm-151	2.39E-04 (Sm-147)	NH <sub>3</sub>	5.23E+01	5.23E+00	Eu-151

( ) 内は試験に用いた安定核種

【アウトカム】 燃料デブリに対する多核種同時分析技術を確立できる見込み。**原子力学会発表3件、国際会議3件。**

17



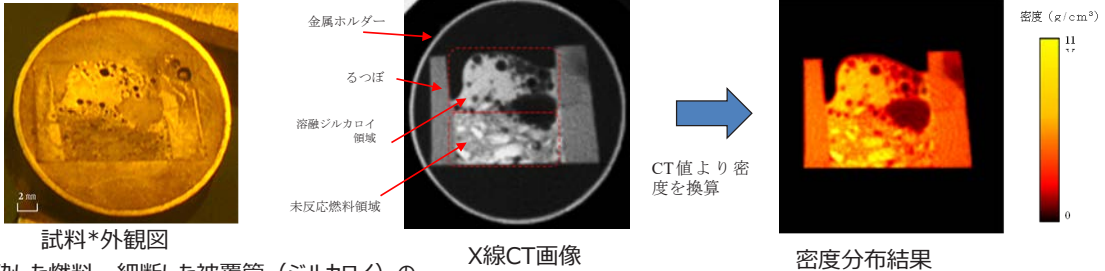
## 成果：燃料デブリの分析技術開発

### X線CTによる燃料デブリ分析技術開発

補助事業  
IRID

#### ◆ 燃料デブリ構成成分識別手法の構築

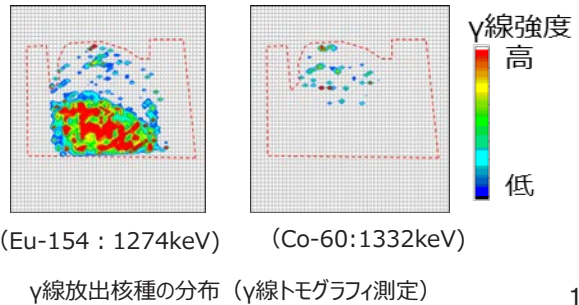
外観だけでは識別が困難な、燃料デブリ試料の構成成分の分布を非破壊の手法により把握することで、詳細な分析サンプルの採取箇所等を検討することで精度のよい分析が可能となる



試料：\*外観図  
試料：粉碎した燃料，細断した被覆管（ジルカロイ）の順でるつぼに入れて高温にて加熱

【成果】 X線CT画像からの密度分布とγ線トモグラフィ測定によるγ線放出核種の分布の組み合わせにより、燃料デブリの構成成分（燃料部、被覆管部）の識別できることを確認。

【アウトカム】 実デブリの構造解析に有効な構成成分の識別技術を確立。原子力学会発表1件、国際会議2件、論文1本執筆中。



## 成果：燃料デブリ表面線量率評価手法の開発

補助事業  
IRID

#### ◆ 燃料デブリ表面線量率評価手法

- 燃料デブリの取出し作業時の作業員等の被ばく管理・低減の観点から、燃料デブリの表面線量率の推定が重要である。
- 炉内の代表的な燃料デブリを選択し、燃料デブリ単体（他からの放射線影響を受けない状況）の表面線量率を評価する。

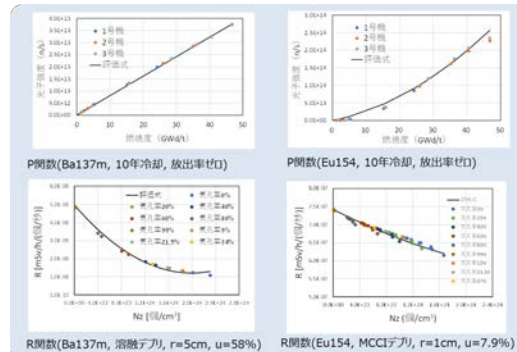
● 線源計算とPHITS計算を用いて、多様な性状パラメータを組み合わせた試行錯誤により、表面線量率を支配的に決定する最小パラメータを求め、関数フィッティングに基づく評価式を構築。（式1）

$$D_i = P_i(r, \rho, u, t) \cdot R_i(r, u, N_z) \quad (式1)$$

● 本評価式に対し、パラメータのケース数を増やして評価式を改良し、多様なケースでの燃料デブリの表面線量率を推定できるよう改良。（式2）

$$D(r, \rho, u, t, N_z, B, w_{Zr}, w_{Fe}) = \sum_i g_i (1 - f_i / 100) \cdot P_i(r, \rho, u, t, B) \cdot R_i(r, u, N_z) + \{g_{Co60}^{Zr} \cdot P_{Co60}^{Zr}(r, \rho, w_{Zr}, t) + g_{Co60}^{Fe} \cdot P_{Co60}^{Fe}(r, \rho, w_{Fe}, t)\} \cdot R_{Co60}(r, N_z) + g_{Sb125}^{Zr} \cdot P_{Sb125}^{Zr}(r, \rho, w_{Zr}, t) \cdot R_{Sb125}(r, N_z) \quad (式2)$$

ZrまたはFeに含まれる<sup>60</sup>Co線源寄与（<sup>59</sup>Co放射化）  
Zrに含まれる<sup>125</sup>Sb線源寄与（<sup>125</sup>Sn放射化）



直接計算との比較による検証終了

$D_i$	表面線量率(Sv/h)評価値	$f_i$	線源寄与核種 (Ba137m, Cs137, Cs134, Eu154, Sb125, Ru106, ...)
$P_i$	原子力発電所内環境(炉内)環境-FP放射-環境計算に基づくフィッティング式	$B$	線源パラメータ [GBq/g]
$R_i$	単位線量率による表面線量率の寄与度-PHITS計算に基づくフィッティング式	$g_i$	修正係数(標準値設定=1.0)
$i$	炉内環境中での放射線線量率の寄与度	$f_i$	事故時放出率[%] (溶融燃料FP放出試験PHEBUS-FPT4の結果を参考に標準値設定)
$r$	デブリ半径(cm)	$P_i$	核種の光子放出率関数 [個/秒] (標準値依存)
$\rho$	かさ密度(g/cm³)	$R_i$	核種毎の単位線量率による表面線量率の寄与度 [mSv/h/(個/秒)]
$w_{Zr}$	Zrの重量割合(%)	$w_{Zr}$	デブリ中のZr濃度 (wt.%)
$w_{Fe}$	Feの重量割合(%)	$w_{Fe}$	デブリ中のFe濃度 (wt.%)
$t$	経過時間(年)		
$N_z$	中性子線量率(個/cm²)		

【成果】 デブリ表面線量率の評価式を構築し、直接計算との比較による検証を実施。これを基にEXCELベースの簡易計算ツールを作成。多様な燃料デブリへの適用を考慮した評価手法を構築。

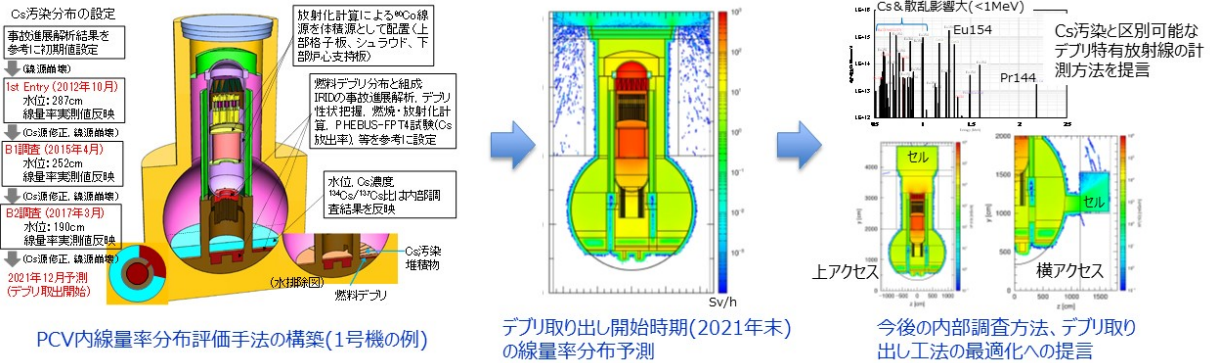
【アウトカム】 作業員の被曝管理に有効な計算ツールをIRID関係者に配布(H30年度内予定)。



## 成果：プラント内線源・線量率分布評価手法の開発

### ◆プラント内線源・線量率分布評価手法

- 破損および汚染された仮想的な1Fの3次元プラントモデルを構築して、廃炉工程における最も確からしい線源・線量率分布を推定可能とする。
- 燃焼・放射化計算、炉内状況把握、デブリ性状把握、内部調査による線量率実測値等の情報を活用。



#### 【アウトカム】

- 内部調査結果と整合するPCV内の3次元線量率分布の予測手法を開発し、デブリ取出開始時期の3次元線量率分布の予測値を世界で初めて示し、IRID、東電へ提供した。
- 従来の線量率測定に代わるデブリ探知に有効な放射線計測手法を提言、IRIDの次期内部調査技術の開発に反映された。
- PCV内導入機器の耐放射線性評価、今後の内部調査方法の最適化、初号機の廃炉工法・工程の具体化に貢献。
- 原子力学会発表8件、国際会議6件、論文3本。

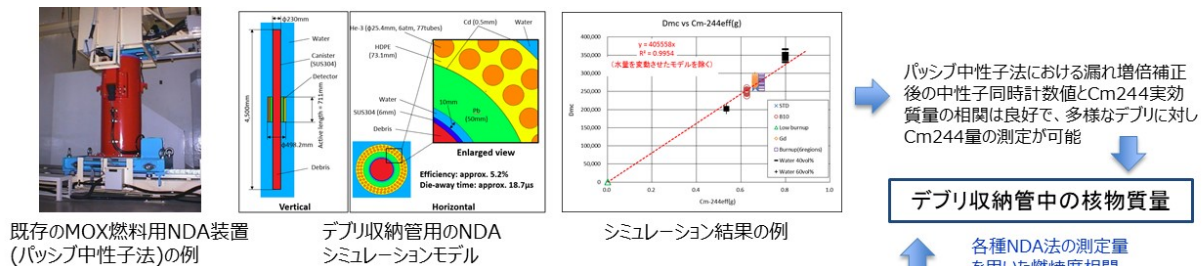
【今後の計画】 サンプルングデブリの分析結果や今後の内部調査結果を反映してモデルの精緻化を図る。



## 成果：燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討(1/2)

### ◆非破壊測定技術の開発

- 取り出した燃料デブリの保障措置及び長期安全管理のため、1F燃料デブリに適用可能な非破壊測定(NDA)技術を開発する。



#### 【アウトカム】

- 候補技術として、1)パッシブ中性子法(同時計数DDSI法)、2)パッシブガンマ法(随伴FPγ測定)、3)アクティブ中性子法(高速中性子問かけ法)、4)アクティブガンマ法(NIGS法)を検討・評価した。
- 多様な燃料デブリの性状や収納方法(組成、吸収材量、燃焼度、乾式/湿式保管)を想定したベンチマークモデルを開発し、放射線輸送シミュレーションにより核物質質量評価への適用性を評価した。その結果、これらの手法を組み合わせた統合型NDAシステムが最も有望であるとの結論を得た。
- 3次元インベントリ計算の結果を用いて、複数の非破壊測定量を組み合わせ、核物質質量を評価するために有効な燃焼度相関を取得した。
- 原子力学会発表7件、国際会議6件、論文1本。

【今後の計画】 核燃料物質使用施設の試験フィールドを整備し、統合型NDAシステム開発のための検証試験を実施する。更に、1Fデブリサンプリングの結果を基に燃焼度相関の実デブリへの適用性を評価、本評価手法の有効性を確認、最適化を図る。

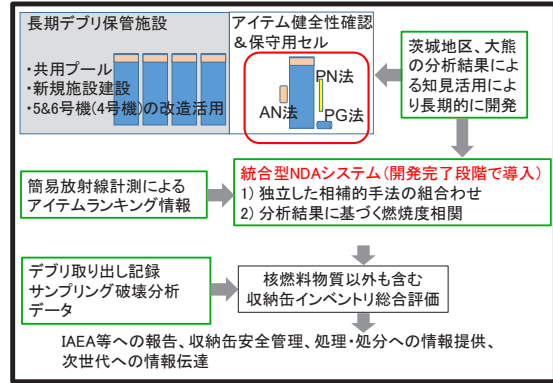
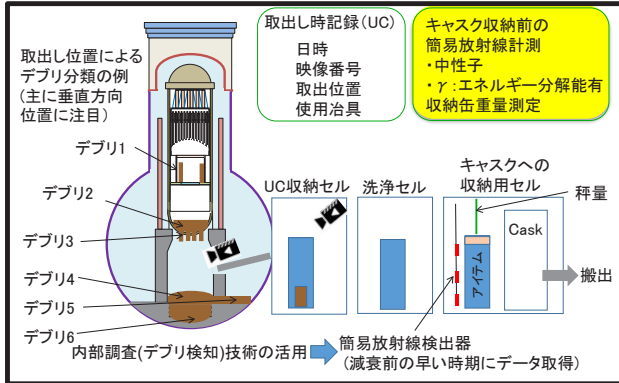




## 成果：燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討(2/2)

### ◆ 計量管理方策の検討

- 開発した非破壊測定技術を活用し、燃料デブリの取り出しから長期保管までの合理的な核物質の計量管理方策を提言する。



【ステップ1】 デブリ取出時における簡易測定と炉内核種平均インベントリによる暫定評価と収納缶の相対ランク付け

【ステップ2】 長期デブリ保管施設における統一型非破壊測定システムを用いた核物質量評価

#### 【アウトカム】

- NDF、東電、IRID、電中研、JAEAの専門家を集め、燃料デブリの非破壊測定技術と保障措置のための計量管理方策を議論し、計量管理の方針についてコンセンサスを形成。
- デブリ取り出しから収納缶の長期保管までの合理的な燃料デブリ計量管理方策をNDF、IRID、東電等の廃炉関係者に提案。

#### 【今後の計画】

簡易測定技術について、少量デブリサンプリングへの適用を評価し、関係機関と連携して計量管理方策の具体化を図る。



## 成果の集約： 廃炉プロジェクトへの貢献実績



関連プロジェクト	主要なニーズ	成果の反映
炉内状況把握	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各種デブリの形態・組成等の情報</li> <li>● デブリの表面線量</li> <li>● 1F炉内付着物の性状分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 基本的な情報は既に特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 線量率評価式を策定済み</li> <li>⇒ 平成30年より実施（平成29年度まで炉内状況把握P1で実施）</li> </ul> <p>☆ 1F事故進展シナリオの更新に反映</p>
サンプリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>● デブリに適用可能な分析技術・手法</li> <li>● デブリ内部構造、気孔率評価、等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ デブリ溶解法や多核種合理化分析法を開発、分析マニュアルを整備済み</li> <li>⇒ X-CT等による測定技術を開発、分析マニュアルを整備済み</li> </ul> <p>☆ サンプリング装置の設計、サンプリング方法の選定等に反映</p>
デブリ取出し	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各種デブリの機械的/熱的特性</li> <li>● MCCI生成物の特性</li> <li>● 取出し時のデブリの加工性</li> <li>● 加工用模擬デブリ試料の選定</li> <li>● 取出し加工時のダスト発生挙動</li> <li>● 気中・液中でのダスト挙動</li> <li>● デブリの経年変化挙動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 基本的な情報は既に特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 小型試験及び大型MCCI試験の情報を特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 大型MCCI試験の情報を特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 基本的な情報は既に特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 新規項目として平成30年度着手</li> <li>⇒ 新規項目として平成30年度着手</li> <li>⇒ 別事業での検討成果を反映</li> </ul> <p>☆ 取出し工法や装置の設計、取出し時の安全性評価等に反映</p>
収納・移送・保管	<ul style="list-style-type: none"> <li>● デブリ気孔率の把握（水素発生観点）</li> <li>● デブリの乾燥特性</li> <li>● 乾燥時のFP放出挙動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 基本的な情報は既に特性リストに反映済み</li> <li>⇒ デブリ乾燥特性を評価する基礎データを取得済み</li> <li>⇒ 中揮発性FPに関する蒸発挙動を評価中</li> </ul> <p>☆ 収納缶保管時の水素安全性評価、乾燥プロセス設計等に反映</p>
処理・処分	<ul style="list-style-type: none"> <li>● デブリの標準的な組成や特性情報</li> <li>● デブリの安定性（核種溶出率、等）他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 基本的な情報は既に特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 今後、廃棄物PJ側と調整を予定</li> </ul> <p>☆ 廃棄物の処理、処分に関する安全性評価に反映</p>
臨界管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>● デブリの標準的な組成や特性情報</li> <li>● MCCI生成物の特性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 基本的な情報は既に特性リストに反映済み</li> <li>⇒ 小型試験及び大型MCCI試験の情報を特性リストに反映済み</li> </ul> <p>☆ 取出しや収納保管時の臨界発生防止設計に反映</p>

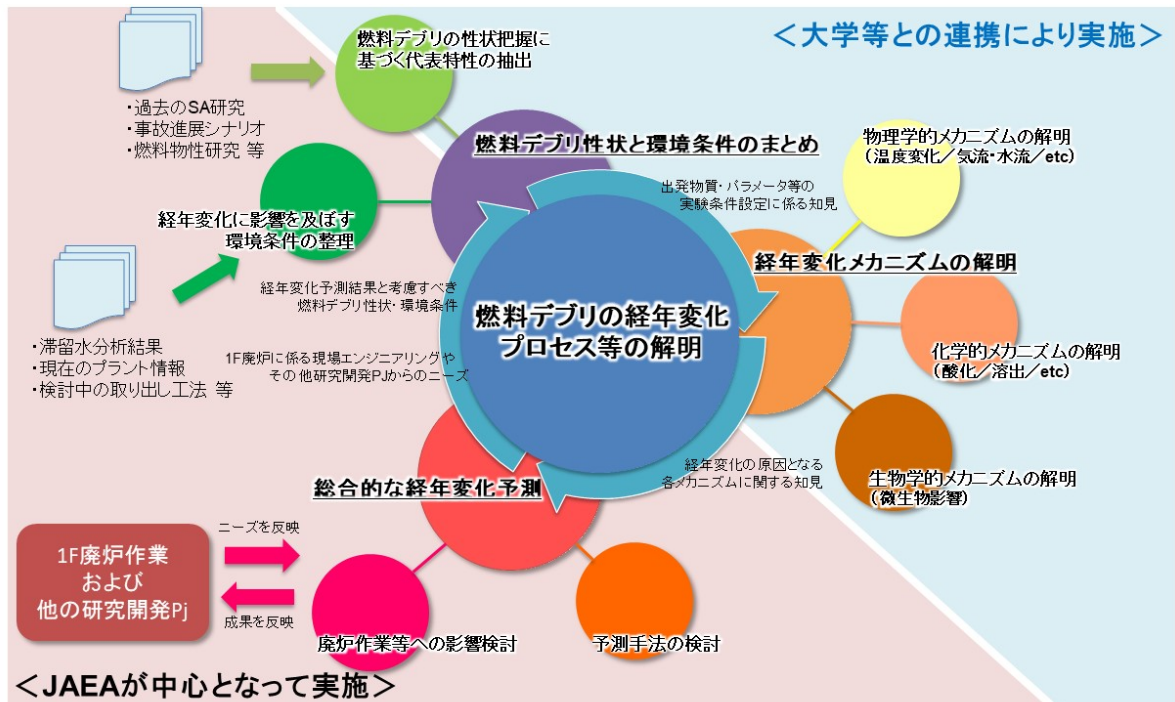
【アウトカム】 廃炉プロジェクトの設計・検討に貢献。



## ② NDF廃炉重要研究6課題に即した専門知見の集積



## 課題： 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明



重要研究課題「燃料デブリの経年変化プロセス等の解明」の研究開発スコープ



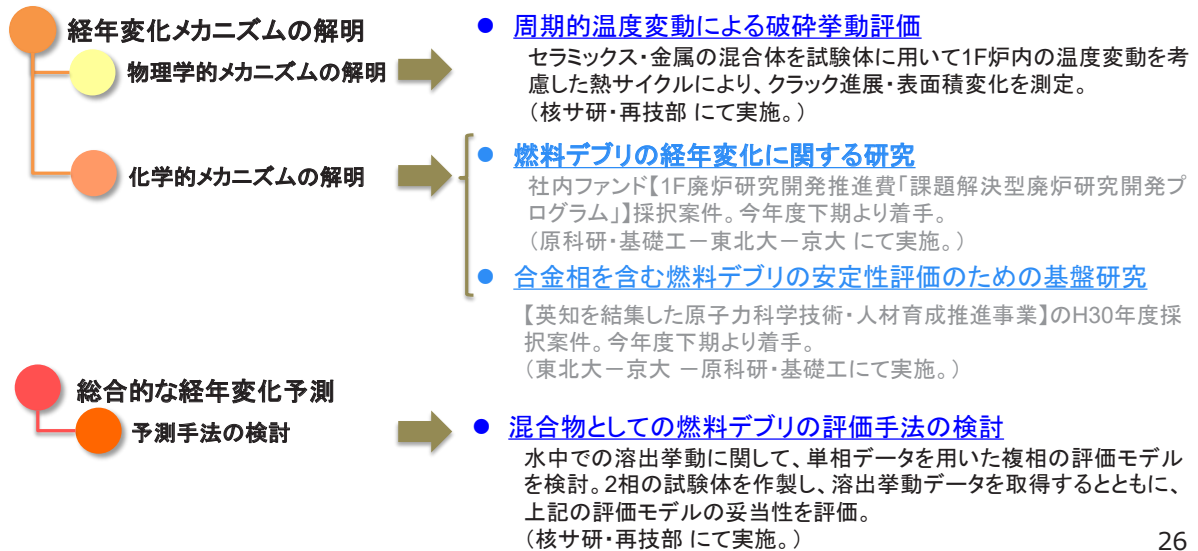
## 実施概要：燃料デブリの経年変化プロセス等の解明

【今年度までの取り組み】

### 重要研究課題「燃料デブリの経年変化プロセス等の解明」分科会の運営・研究開発戦略の策定

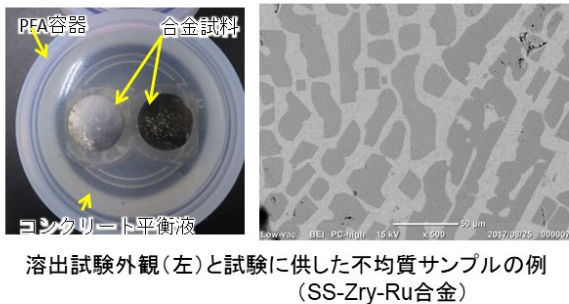
国内の大学(東北大、東大、東工大、阪大、福井大)および研究機関(電中研)と協力体制を構築し研究開発戦略を議論、東電HDやIRIDを含めた課題別分科会にて当面の研究開発戦略(前頁参照)を策定。

分科会における研究開発戦略に基づき、以下のR&Dを実施。

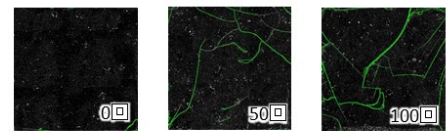


## 成果：燃料デブリの経年変化プロセス等の解明

### ◆ 2混合物としての燃料デブリの評価手法の検討

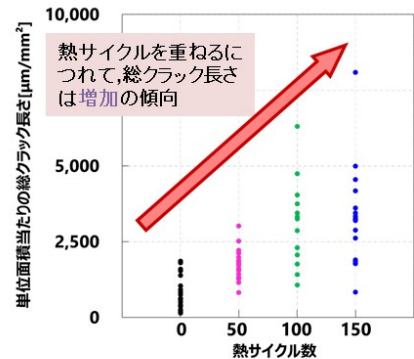


### ◆ 周期的温度変動による破砕挙動評価



熱サイクル前後のクラックの変化

(2値化処理後の画像。緑部分がクラック)  
(温度周期範囲225±25℃、いずれも異なるサンプルの画像)



熱サイクル数に対する単位面積当たりの総クラック長さ (温度周期範囲: 225±25℃)

【成果】

- 周期的温度変動による破砕挙動評価
  - ✓ 周期的温度変動(熱サイクル)の影響評価手法を考案。
  - ✓ 熱サイクルによる総クラック長さの増加を把握。影響を定量的に評価可能なことを確認した。(原子力学会で優秀講演賞を受賞)
  - ✓ 総クラック長さおよび表面積の関係について評価式を作成。
- 混合物としての燃料デブリの評価手法の検討
  - ✓ 不均質な物質に対する評価手法を検討・構築。
  - ✓ 面積比を用いることで、各相のデータから複合相の溶出量が概ね評価可能と見解を得た。

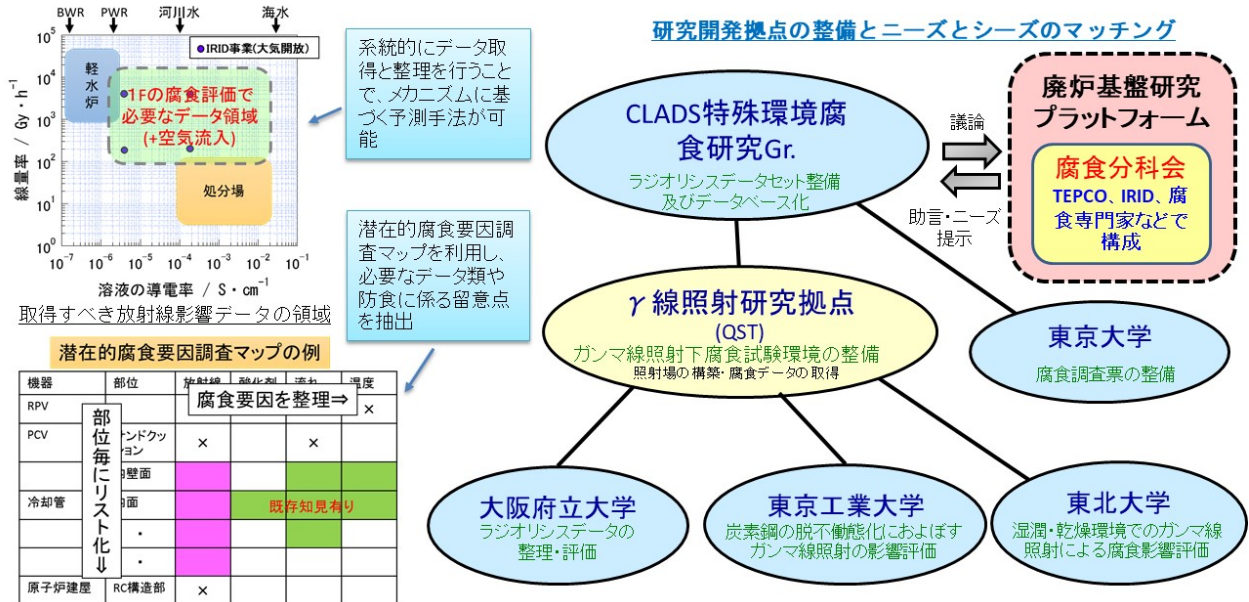
【アウトカム】燃料デブリの経年による表面積の変化および混合物の溶出に関して評価手法を開発し、変化予測手法の構築。原子力学会発表(1件)





## 課題：特殊環境下での腐食現象の解明

- 【目的】
- 廃炉作業工程における腐食リスクを評価し対応策を提案する。
  - リスク評価を定量的に進めるには、1Fの特異的な現象であるラジオリシスとその腐食影響データを先行的に取得し、データベース化を図る。



腐食分科会：既に8回実施し現場ニーズの把握に務めた。実機のリスク評価は今後の課題

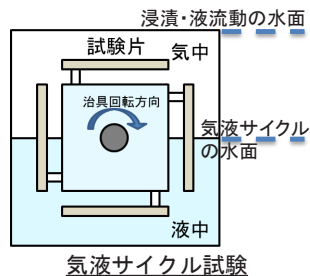


## 成果：濡れ乾きのある条件での腐食現象の解明

【実施内容】1F廃炉工程における腐食リスクの低減のため、時々刻々と変化する環境要因を十分に包含する環境条件におけるラジオリシスデータ及び腐食影響データを取得しデータベース化を図る。

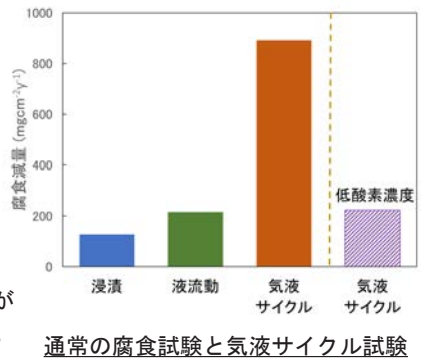
### ◆ 格納容器内の腐食状況と模擬試験の検討

- 1Fの内部調査では、格納容器の内面が冷却液に濡れている状況が認められた。
- この環境条件を再現する方法として、気液サイクル試験を考案し、試験を実施した。
- 試験は回転速度で流速を変化させ、また、格納容器内を再現するため、N<sub>2</sub>雰囲気や空気混入条件で試験した。



### ◆ 濡れ乾きサイクルによる腐食影響と酸素濃度

- 気液サイクル条件での腐食速度は浸漬や液流動条件より大きい。
- 腐食生成物の断面観察・分析により、気液サイクル条件では、さび層が気中での酸素の影響を受け反応が加速し、腐食が促進する。
- 低酸素濃度では、腐食が抑制される。



【アウトカム】腐食影響データに関して原子力学会、腐食防食学会で発表（2件）。日本原子力学会2019年春の年会で発表予定（2件）。成果は随時腐食分科会（東電等参加）で報告



## 成果：格納容器内条件下での腐食現象の解明

【実施内容】再臨界防止剤のホウ酸塩、塩化物イオン存在下における炭素鋼の不働態化挙動とガンマ線照射影響を評価し、格納容器壁面や気液界面での腐食挙動に対するガンマ線照射の影響を把握する。

### ◆炭素鋼の脱不働態化におよぼすガンマ線照射の影響評価

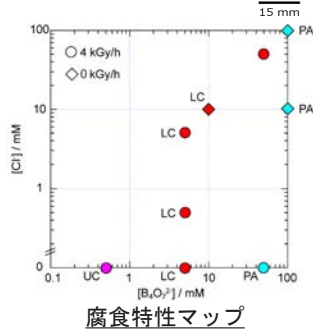
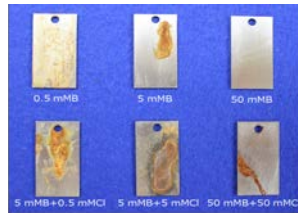
再臨界防止として、ホウ酸塩の利用が検討されている。

【成果】

ホウ酸塩と塩化物イオン存在下における炭素鋼の不働態化挙動とガンマ線照射影響を評価し、**腐食特性マップを作成した。**

ホウ酸塩  $[B_4O_7^{2-}]$  が増加するに従って、**全面腐食(UC)⇒局部腐食(LC)⇒不働態(PA)に変化する。**

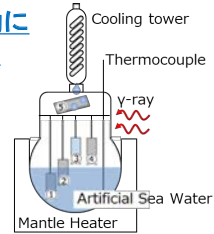
塩化物イオン  $[Cl^-]$  が増加するに従って、**脱不働態化することが分かった。**



### ◆湿潤・乾燥環境での腐食挙動におよぼすガンマ線照射の影響

試験片設置位置：

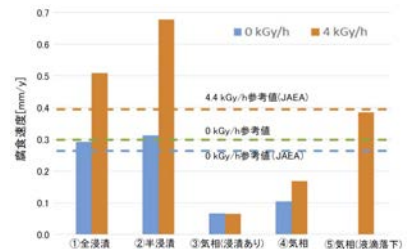
①全浸漬、②半浸漬、③人工海水浸漬あり、④なし、⑤上部からの液滴落下



【成果】

半浸漬、特に喫水部での腐食速度が全浸漬条件よりも大きい。液滴落下条件も含めて、**ガンマ線照射下では非照射下よりもさらに腐食速度が大きくなること**が分かった。

試験片設置位置および試験装置概要



各条件における腐食速度におよぼすガンマ線の影響

【アウトカム】Feイオンや $N_2$ 等の不純物の影響を考慮したラジオリシスデータ及び腐食影響データのデータベース化に着手。国内外のシンポジウム等(2件)原子力学会シリーズ発表予定(4件)。成果は随時腐食分科会(東電等参加)で報告。

30



補助事業  
IRID

## ③ 国内外の研究協力及び貢献

31



## 原子力機構内外との連携

補助事業

IRID

### ▶ 廃炉プロジェクトや他の研究開発との連携

- IRIDの各PJ(原子炉格納容器内部調査技術の開発PJ、総合的な炉内状況把握の高度化PJ、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発PJ、燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システム高度化／基盤技術開発PJ等)との燃料デブリ特性に関する情報提供、意見交換。
- 廃炉作業に携わる東京電力HD(株)、東芝ESS、三菱重工、日立GE、アトックスとの定期的な会合における、研究の進捗状況、成果等について意見交換。
- 東京大学等国内有識者による定期的に開催されている「燃料デブリ取出しに係るブレーンストーミング」での意見交換。
- 国内外の会議／報告会(第3回福島・チェルノブイリ・スリーマイルアイランド国際シンポジウム、日本原子力学会、IRIDシンポジウム、NDF戦略ワークショップ、等)での成果の報告及び有識者との意見交換。
- 【国際協力】仏国(CEA)、米国(ANL)とのMCCI・燃料デブリの特性把握に関する共同研究、情報交換を実施中。
- 【国際協力】OECD/NEAの「燃料デブリの性状把握に関する国際プロジェクト(PreADES)の中核機関として国内外機関の実施内容の検討、調整の主導的な実施。
- 【国際協力】IAEAのCoordinated Research Project「Management of Severely Damaged Spent Fuel and Corium」の第2回Research Coordinated Meeting(RCM)(2018.11.5～9)についてホスト機関として開催。

32



## 原子力機構内外との連携

### ▶ 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明に係る共同研究

- 国内の大学(東北大学、東京大学、東京工業大学、大阪大学、福井大学)や研究機関(電力中央研究所)等と協力体制を構築し研究開発戦略を議論、東京電力ホールディングスやIRIDを含めた課題別分科会にて当面の研究開発戦略を策定した。
- 上記の研究開発戦略に基づき、国内の大学(東北大学、東京大学、東京工業大学、大阪大学、福井大学)や研究機関(電力中央研究所)との共同研究計画中。
- 【国際協力】ウクライナ(ISP-NPP)、ロシア(KRI)とチェルノブイリLAVA等の経年変化に関する情報交換を実施中。

### ▶ 放射性微粒子研究に関する大学等への委託研究・情報交換

補助事業

IRID

- 東京大学へ、IRID「燃料デブリ性状把握・分析技術の開発PJ」における水中・気液界面における放射性微粒子挙動の採取・評価に関する委託研究・情報交換を実施予定(H30年度)
- 【国際協力】仏国(CEA、IRSN)とのデブリ切断時のダスト発生挙動に関する研究について、情報交換を開始、研究協力を締結予定。

### ▶ 廃止措置に関わる機器類の健全性評価に関する大学等との共同研究

- 量研機構、大阪府立大学、東京工業大学、東北大学、東京大学と、文科省英知事業「放射線環境下での腐食データベースの構築」を実施中(H29-H31年度)。
- 東北大学と、流動条件下の腐食に関する共同研究について実施予定。

33





## 国際的な研究協力と貢献

### ▶ JAEA/CLADS主導で、OECD/NEA/CSNIの国際プロジェクトを運営

#### PreADES (Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris)

補助事業



プロジェクト期間: 2017.6-2020.7、於: NEA/CSNI (Committee of Safety Nuclear Installation)

第2回会合(東京)7月4,5,6日

- 1F1~3号機内の情報を基にデブリの位置図等の「特性に係る整理表」及び「分析ニーズの整理表」に関する議論が実施された。

第3回会合(パリ)1月24,25,28,29日(予定)

- 特性に係る整理表の議論をとりまとめ、1F燃料デブリの特性に関する共通認識を構築する。
- 分析ニーズの整理表について議論を継続する。
- サンプルング、取出しに係る安全性調査及びホット施設での分析技術の調査について議論を行う。
- 参加機関: CEA, IRSN, DOE, EC-JRC, PSI, KAERI, KINS, SSM, NRC, CNL, EDF

### ▶ 1F燃料デブリ研究の知見をベースに、IAEA/CRP会合に参加、1Fの情報発信及び国際的な英知の結集に貢献

#### Coordinated Research Project 「Management of Severely Damaged Spent Fuel and Corium」(激しく損傷した使用済み燃料とコリウムの管理)

プロジェクト期間: 2016.5-2019.2 (延長の可能性あり)

- JAEA/CLADSでは「燃料デブリの特性評価に関する情報提供」を実施。
- 2018年11月 CLADSが第2回会合のホスト機関として福島(いわき・富岡)で開催。
- 参加国: 英国、露国、米国、EU、エジプト、韓国、ウクライナ、日本

34



## 成果: OECD/NEAとの連携 (PreADESプロジェクト)



補助事業

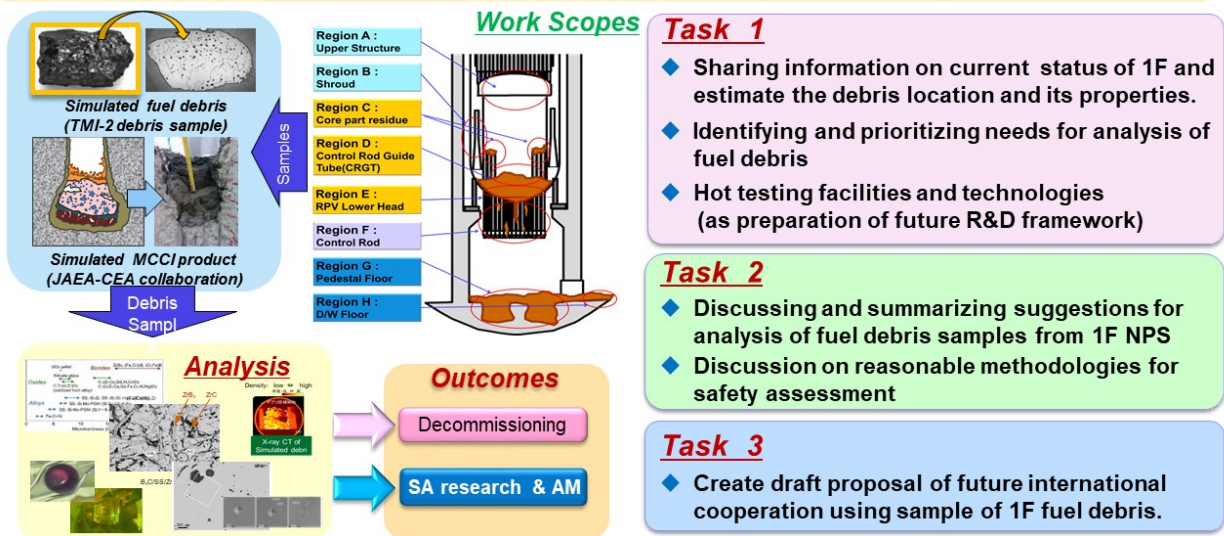


### \* PreADES (Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris)

(2017-2020 @NEA/CSNI)

#### Purpose

- Summarizing knowledge and expertise that contribute to understanding fuel debris characteristics
- Creating appropriate, optimal methodologies for future safety assessment on fuel debris sampling, retrieval



【アウトカム】TMI-2、チェルノブイリ、SA研究、模擬デブリ、等の知見を集約して、1F燃料デブリの性状推定の確度を高め、サンプル分析の必要性、優先度等の重要知見を1F廃炉に提供。

35



## まとめ

### ① 廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供

- IRID補助事業「**燃料デブリの性状把握・分析技術開発PJ**」を統括し、廃炉プロジェクトのニーズに即した“**燃料デブリの基本情報**”を“**特性リスト**”として提供し、各プロジェクトの設計・検討に貢献、廃炉関係者から高く評価された。また、模擬デブリの研究成果は多くの論文執筆を行った。
- **燃料デブリの分析技術**を開発し、デブリ取出し作業の鍵となる**1F実デブリ・サンプル分析の実現**に向けて技術基盤を確立した。
- 燃料デブリの“**線量評価手法**”及び“**プラント内線源・線量率分布の評価手法**”を開発し、**燃料デブリ取出しや炉内状況把握**に貢献。
- 燃料デブリの“**非破壊測定法**”及び“**計量管理方策**”を開発・構築し、東電等へ技術提供し、**収納保管、計量管理方策の確立**に貢献した。

### ② NDF廃炉重要6課題に即した専門知見の集積

- 中長期的な重要研究課題に即応して、“**燃料デブリの経年変化**”、“**過酷環境下での腐食挙動評価**”、“**放射性微粒子の挙動評価**”の分科会を立上げ、研究開発戦略の構築に着手した。

### ③ 国際協力および国際貢献

- **OECD/NEAのPreADESプロジェクト**を主導、**IAEA/CRP会合**に参画する等、**燃料デブリの知見の提供、国際的な英知の結集、及び1F廃炉情報の発信**に貢献。

36



## 別紙 参考資料

37

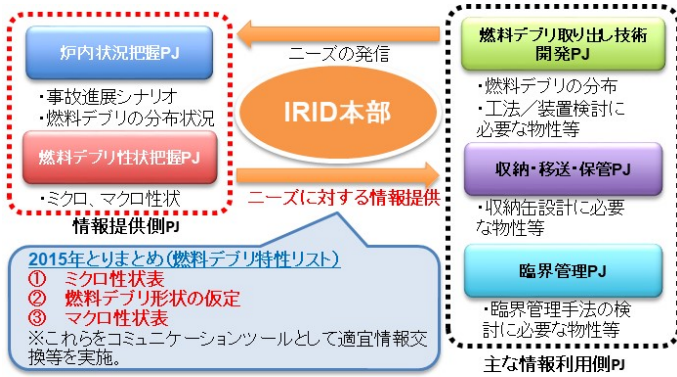


# 燃料デブリ特性リストの作成

補助事業  
IRID

## 【背景・目的】

- ◆ 関連各PJの立上げに伴い、各PJで必要となる「燃料デブリ性状」を再確認するため、IRID内に「**デブリ標準化会議**」を立上げて検討。
- ◆ 各PJからのニーズを確認し**必要な性状(主にマイクロ性状)**を設定した。
- ◆ デブリ標準化会議におけるニーズの具体化
  - ① 各PJでは、燃料デブリに対するイメージを掴めないとのコメントが多く、材料的な専門知識をもたない人にも分かり易いデブリの概略情報が必要。  
⇒ これに対して、**デブリの概略情報を示す資料「燃料デブリ形状の仮定」**を作成。
  - ② 取り出しや収納・移送・保管、臨界などの検討において、**マクロ的な視点からの性状データが必要**。  
マイクロ性状に加えて**マクロ性状の推定値が必要**。  
⇒ これに対して、**マクロ性状の推定値を示す表**を作成。



2015年のとりまとめまでに設定した燃料デブリ性状

分類	ニーズ調査の結果、設定が必要と考えられた燃料デブリ性状
マクロ性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 材質または相 ● 形状</li> <li>● 寸法 ● 気孔率(空隙率)</li> <li>● 含水率 ● 水素発生G値 ● 圧縮強度</li> <li>● U含有率(U重量/燃料デブリ全重量)</li> <li>● Pu含有率(Pu重量/燃料デブリ全重量)</li> <li>● Fe含有率(Fe重量/燃料デブリ全重量)</li> <li>● B含有率(B重量/燃料デブリ全重量)</li> <li>● Gd混合率 ● U濃縮度 ● 塩分濃度</li> </ul>
マイクロ性状	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 機械的特性: ビッカース硬さ、弾性率、破壊靱性</li> <li>● 熱的特性: 熱伝導率、比熱、融点</li> </ul>

38

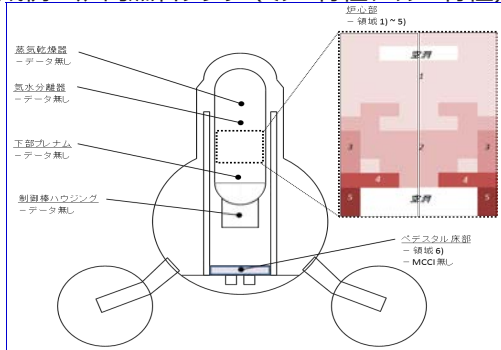
IRIDにおける各PJ間のコミュニケーション



# デブリ特性リストの整備 (全体概要)

補助事業  
IRID

## ◆ 作成例：炉内燃料デブリ (マイクロ特性、マクロ特性)



マイクロ性状(冷温停止後、室温付近での物性を想定)

分類	材質または相	理論密度 (g/cm³)	弾性率 (GPa)	破壊じん性 (MPa m¹/²)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/gK)	融点 (°C)	
酸化物	UO₂	11.0	5.9	193	0 - 15	10	0.28	2850
	ZrO₂-C	6.1	15	200	0 - 10	1 - 3	0.61	2700
	ZrO₂-T	5.9	11	200	0 - 10	1 - 3	0.61	(tr)
	ZrO₂-M	5.8	11	200	0 - 10	1 - 3	0.61	(tr)
	(U,Zr)O₂-C	6.1 - 11.0	5.9 - 11	200	0 - 10	1 - 3	0.28 - 0.61	2500 - 2850
	(U,Zr)O₂-T	5.9 - 7.4	5.9 - 11	200	0 - 10	1 - 3	0.51 - 0.61	(tr)
	(U,Zr)O₂-M	5.9 - 6.3	5.9 - 11	200	0 - 10	1 - 3	0.58 - 0.61	(tr)
	SiO₂	2.7	13	100	0 - 0.7	1.0	1.25	1710
	Al₂O₃	4.0	2	405	0 - 0.1	0.25	1.22	2000
	CaO-Al₂O₃-SiO₂(ガラス)	2.2 - 2.7	-	-	-	-	0.77	1600
	(U,Zr)SiO₄	4.6 - 4.9	-	-	0 - 0.2	0.45 - 0.82	0.82	2500
金属	Zn-2	6.5	2.4	100	0 - 20	23	0.28	1850
	α-Zr	6.5	2.4	100	0 - 20	23	0.28	1850
	Fe (austenite, γ-Fe)	8.0	2.2	200	0 - 200	80	0.44	1575 - 1535
	Fe (ferrite, α-Fe)	8.0	2.2	200	0 - 200	80	0.44	1575 - 1535
	Fe (martensite)	8.0	2.3	200	0 - 200	80	0.44	1575 - 1535
	Fe₃(Zr,U)	8.0	9	1500	0 - 20	80	0.37	1500
その他	B₄C	2.5	24	450	0 - 5.0	29	2.26	2450
	ZrB₂	6.1	22	440	0 - 20	24	0.60	3040
	Fe₃B	7.4	16	200	0 - 20	24	0.61	1380

マクロ性状(冷温停止後、室温付近での物性を想定)

領域	質量	材質または相	予想される形状	寸法	空隙率	含水率	H2発生G値	圧縮強度	U/Pu濃度	SUS混合率	B₄C混合率	Gd混合率	U濃縮度	塩分濃度
2) 中心部A		(U,Zr)O₂-C												
酸化物		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	クラスト、溶融酸化物、小岩石状デブリ				0 - 12		68	0.51	0.83	0.0043		
その他		B₄C												
3) 中心部B		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	クラスト、溶融酸化物、小岩石状デブリ				0 - 12		43	33	0.60	0.0027		
酸化物		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	クラスト、溶融酸化物、小岩石状デブリ				0 - 12		43	33	0.60	0.0027		
金属		Fe												
その他		B₄C												
4) 下部(炉心支持板)		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	クラスト、溶融酸化物、切り株状				0.50 (平均値)	50 (平均値)	0 - 250				1.87	0.10
酸化物		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	クラスト、溶融酸化物、切り株状				0.50 (平均値)	50 (平均値)	0 - 250				1.87	0.10
金属		Fe, Fe₃(Zr,U)							18	41.7	0.0071	0.0011		
その他		B₄C												
5) 下部(炉心支持板)		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	炉心支持板				0 - 11		0.61	98	0	0.00038		
酸化物		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	炉心支持板				0 - 11		0.61	98	0	0.00038		
金属		Fe												
6) ベジスタル座部		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	箱子状デブリ、構造物破片				0 - 16		40	13	0.011	0.0025		
酸化物		ZrO₂-M, (U,Zr)O₂-C/T	箱子状デブリ、構造物破片				0 - 16		40	13	0.011	0.0025		
金属		α-Zr, Fe₃(Zr,U)												
その他		B₄C, ZrB₂, Fe₃B												

## マクロ特性

(注1) 有効数字2桁 (注2) 予想される形状および寸法については、事故進展シナリオが不明な状態での概略推定による。 (補足) 2014年以降の民間JAEAとの協力によるMCCI関連試験によりMCCIに関する材質/相、空隙率に関するデータが取得できる見込み。(別添参照) H26年度実施項目に係る内容

39



◆作成例：炉内燃料デブリ（燃料デブリ形状の推定）

特性リスト(デブリ形状の仮定)#1

イメージ (形状)	概要
<ul style="list-style-type: none"> <li>上部プレナム周辺</li> </ul>	熔融または破壊した構造物。 主な化合物: Fe 大きさ: 数(m)未満
<ul style="list-style-type: none"> <li>未熔融の破壊燃料および構造物</li> </ul>	未熔融の破壊した燃料ピンおよび構造物。 主な化合物: $UO_2$ , Zr-2 大きさ: 数(cm)-数(m)
<ul style="list-style-type: none"> <li>粉状・小石状</li> </ul>	熔融した炉心材料が急冷され、小片になったもの。 主な化合物: $(U,Zr)O_2-C$ , $(Zr,U)O_2-T$ 大きさ: 数( $\mu$ m)-数(cm)

◆作成例：炉内燃料デブリ（燃料デブリ形状の推定）

特性リスト(デブリ形状の仮定)#6

イメージ (形状)	概要
<ul style="list-style-type: none"> <li>コリウム/コンクリート境界部</li> </ul>	熔融コリウムプールとコンクリートの境界部 主な化合物: $(U,Zr)O_2-C$ , $(Zr,U)O_2-T$ , $SiO_2$ , $(Zr,U)SiO_4$ 大きさ: 数(cm)-数(m)
<ul style="list-style-type: none"> <li>MCCI 概観 (実験室規模試験)</li> </ul>	(写真のみ)
<ul style="list-style-type: none"> <li>MCCI 生成物の下部境界</li> </ul>	到達温度の違いにより階層構造を形成 主な化合物: $SiO_2$ , Al-Ca-Si-O(glass), $(U,Zr)O_2$ 大きさ: 厚さ 数(mm)



## 成果：燃料デブリ性状の推定 1F炉内付着物の性状データの採取・評価

補助事業  
IRID

### 【目的】

1～3号機の内部調査等で付着あるいは採取された試料の分析を行うことで、燃料デブリの特性リストの拡充を図る。

「炉内状況把握PJ」にて、図1★印について基本データ取得

- ★1: 1号機D/Wには溶融燃料由来（TMIで確認されたものと同種）及び未溶融燃料由来と見られるU粒子が混在。既存測定ではMCCIの痕跡情報は得られていない。
- ★2: TIP内挿入物付着サンプル（炉心損傷初期の移行物と考えられる）にはU粒子は見られず、制御棒やチャンネルボックス由来と見られるものを検出。
- ★3: Cs含有物やさまざまな形状のU粒子が見られ、事故進展挙動把握のデータとして活用。

### 【今後の計画】

上記★印に加え、☆印の試料を対象として各種分析を実施し、既存データを含めた相互比較を通じて各ユニットのデブリの性状把握を図る。



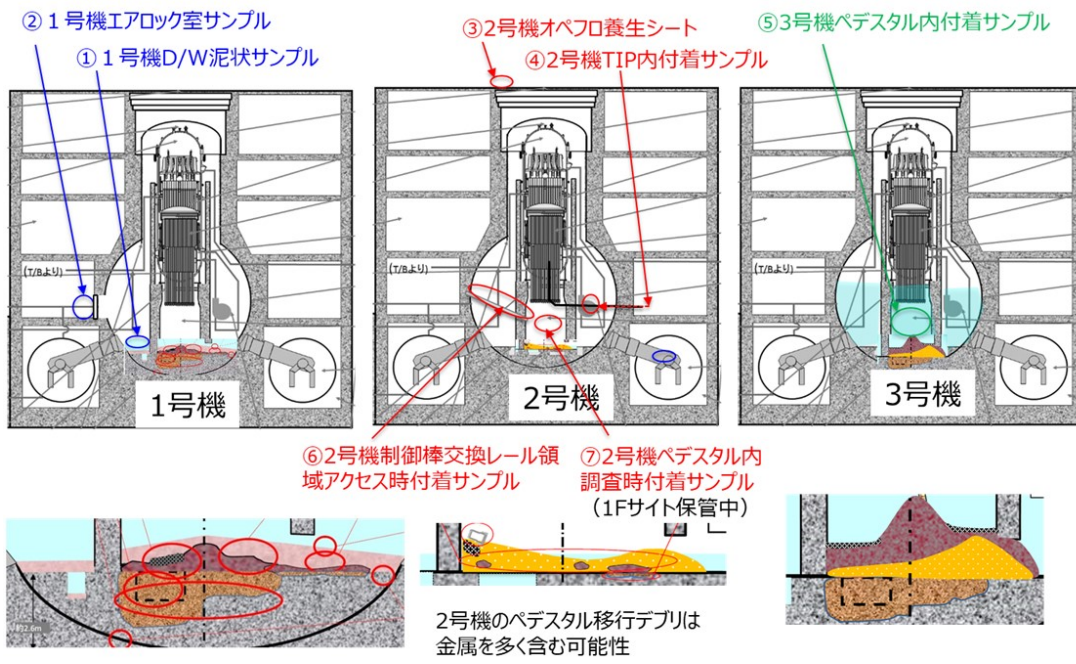
図1 1F試料分析のための試料採取位置



## 成果：燃料デブリ性状の推定 1F炉内付着物の性状データの採取・評価

補助事業  
IRID

これまでに採取された1F試料の部位と各ユニットのペDESTAL領域の状況推定



ペDESTAL領域の推定は「総合的な炉内状況把握の高度化PJ」（最新の東電アップデート（原子力学会2018年秋の大会）を含む）の成果から

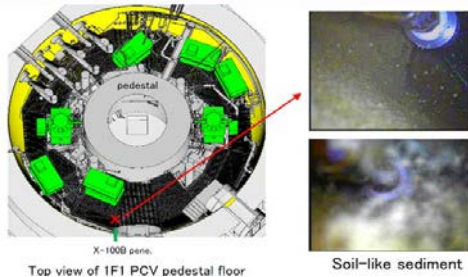




## 成果：燃料デブリ性状の推定 1F炉内付着物の性状データの採取・評価

補助事業  
IRID

[分析対象カテゴリ-Aの概要]



平成29年度の成果

ペDESTAL開口部から離れた位置の水の吸引により沈殿物を取得し概略分析を実施。Zr, Feなど炉内構造物成分を確認。

1uPCV④ 概観速報のまとめ



1号機の炉心燃料がペDESTALに移行する際には溶解燃料だけでなく、未溶解の燃料片のようなものが含まれていた可能性が示された。このことはペDESTAL移行デブリのエンタルピーが比較的良かった可能性を示唆するものであり、最終状態の燃料デブリもまた構造材の成分が溶け込んだ溶解後再固化燃料と未溶解燃料片が含まれる可能性がある。【炉内状況把握PJの見解】

平成30年度の展開

燃料デブリ性状に対する反映(仮定)

ICP-MSなどの詳細分析を実施し、当該沈殿物の組成や特徴を把握する。

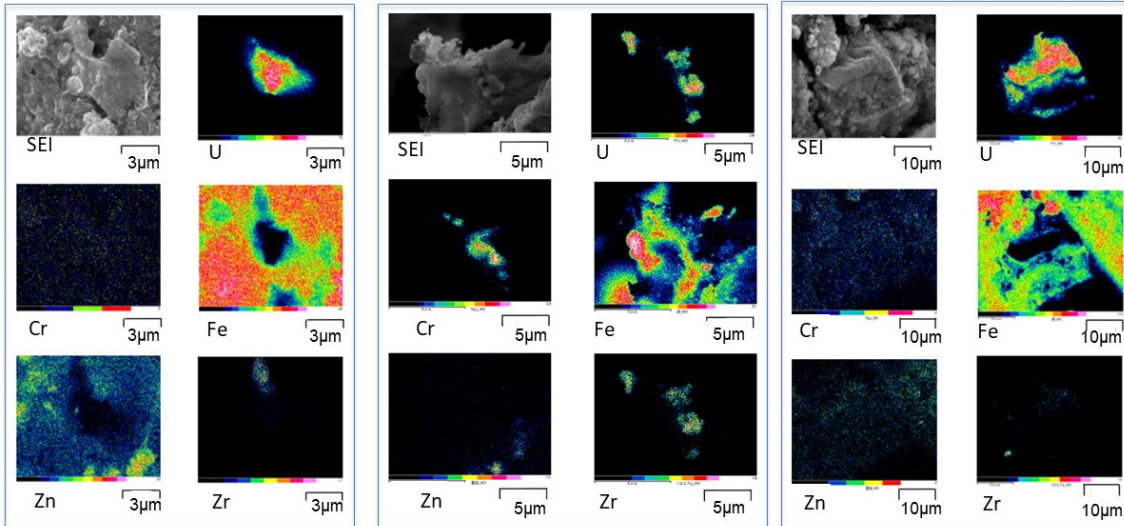
これにより、沈殿物の素性が分かる事によって、燃料デブリと構造材(Zr, Fe)等と相互作用、MCCI生成物などの可能性を推定する。



## 成果：燃料デブリ性状の推定 1F炉内付着物の性状データの採取・評価

補助事業  
IRID

平成30年度上期の実績：FE-SEM結果の比較(D/WあるいはペDESTAL領域の浮遊物と考えられる①、⑤、⑥)



①1号機泥状サンプル

⑥2号機制御棒交換レール領域サンプル

⑤3号機ペDESTAL領域サンプル

【アウトカム】

- ✓ 主成分であるFe中にU粒子が点在している点では1~3号機は共通と考えられる。
- ✓ サンプル数が限られるため代表性は不確かながら、2号機のUとZrの共存性が顕著に見られる。
- ✓ 本情報は炉内状況を解析する上で非常に有力な情報である。⇒炉内状況把握へ提供。



成果：乾燥熱処理における核分裂生成物の放出挙動評価

補助事業  
IRID

中揮発性FPの放出挙動データの取得・評価

1Fに特有な事象：

(FP放出挙動への影響の観点)

- ◆ 1F事故では燃料の**燃焼度が高く、FP含有量が多い**
- ◆ MCCIにより**コンクリートを含む燃料デブリ**が存在する

- TMI-2と同じ乾燥条件が適用できない可能性が高い
- 広い範囲での**基礎データの拡充が不可欠**

例：室温～1000℃強、程度（コンクリート含水量の乾燥を想定）

環境毒性の高い核種の選定

$$\text{環境毒性} = (\text{事故後10年後インベントリ [Bq]}) \times (\text{線量係数 [Sv/Bq]}) \dots (\text{表1})$$

また、以下の条件と**蒸気圧を比較**、影響度の高い化合物を抽出した。

- ◆ 全量放出しても問題のない核種 ⇒ 除外
- ◆ UO3よりも低蒸気圧の化合物条件 ⇒ 除外

**Ag, Te, 及び Te, Sn, Cdの酸化物が候補**

表1 環境毒性の高い核種<sup>1)</sup>の評価 (3号機)

核種	事故10年後の放射能[Bq]	線量係数 [mSv/Bq]	環境毒性 (被ばく量) [mSv]	生成が推定される化合物 <sup>2)</sup>	
1~6	Pu, Am, Cm			PuO <sub>2</sub> , AmO <sub>2x</sub> , CmO <sub>2x</sub>	
7	Sr90	1.42E+17	7.70E-05	SrO	
8	Cs137	1.91E+17	6.70E-06	Cs <sub>2</sub> O	
9~11	Am, Cm			AmO <sub>2x</sub> , CmO <sub>2x</sub>	
12	Y90	1.42E+17	1.70E-06	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
13~17	Eu, Pu, Pm, Cs, Cm			Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PuO <sub>2</sub> , Pm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cs <sub>2</sub> O, CmO <sub>2x</sub>	
18	Ru106	9.67E+14	3.50E-05	3.38E+10	Ru or RuO <sub>2</sub>
19	Ce144	3.15E+14	2.90E-05	9.14E+09	CeO <sub>2</sub>
20	Eu155				Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
21	Sb125	1.39E+15	3.30E-06	4.59E+09	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
22	Cd113m	3.41E+13	1.30E-04	4.43E+09	CdO
23	Sm151	8.54E+14	2.60E-06	2.22E+09	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
24	Te125m	5.17E+14	2.90E-06	1.50E+09	Te or TeO <sub>2</sub>
25	Am242				AmO <sub>2x</sub>
26	Ba137m	1.81E+17	1.00E-09	1.81E+08	BaO
27,28	Eu, Zr				Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub>
29	Tc99	3.15E+13	3.20E-06	1.01E+08	TcO <sub>2</sub>
30,31	Fe, Np				Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NpO <sub>2</sub>
32	Sn126	1.40E+12	1.80E-05	2.52E+07	SnO
33~40	H <sub>2</sub> , Ni, Co, Sn, Pm, Kr, U, Pr				H <sub>2</sub> , NiO, CoO, SnO, Pm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Kr, UO <sub>2x</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
41	Ag110m	2.37E+11	7.30E-06	1.73E+06	Ag
42~51	Sn, Rh, Sb, Np, Pr, Mn, Gd, Rh				SnO, Rh or Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NpO <sub>2</sub> , Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO, Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

- 1) 環境放出評価上厳しくなる核種  
具体的には、核種ごとに燃料デブリ中の放射能を線量計数で割った比率で比較
- 2) 過酷事故の条件で生成の可能性のある化合物



成果：乾燥熱処理における核分裂生成物の放出挙動評価

補助事業  
IRID

中揮発性FPの放出挙動データの取得・評価

1. Ag含有模擬デブリの放出挙動評価試験

<Ag単体>

- 等速度昇温試験  
約900[℃]から非常にゆるやかな放出が、1000[℃]以上で顕著な放出が確認された。(図2)
- 等温試験  
930[℃]～1300[℃]の範囲で放出速度 [mg/cm<sup>2</sup>・sec]を評価し、温度の関数として放出速度を得た。(図3)

<Ag含有模擬デブリ>

- Ag含有模擬デブリを製作する際、熱処理過程でAgが放出してしまうことが懸念された。
- タングステン製カプセルに密封して熱処理することで、Agを含有させた模擬デブリを製作することができた。(図4)

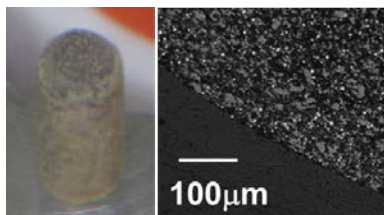


図4 Ag含有模擬デブリの外観写真(左)と金相写真(右)

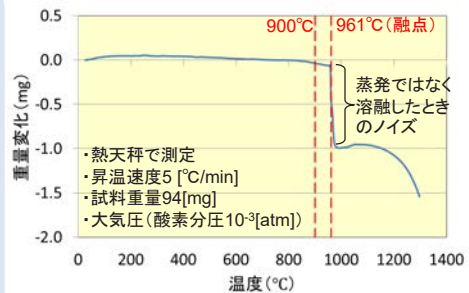


図2 等速度昇温によるAg単体の放出挙動

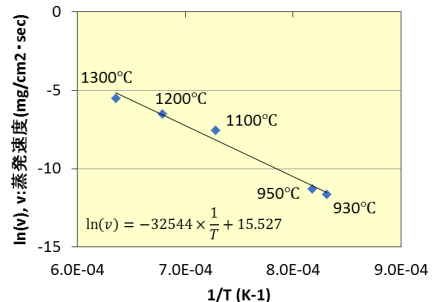
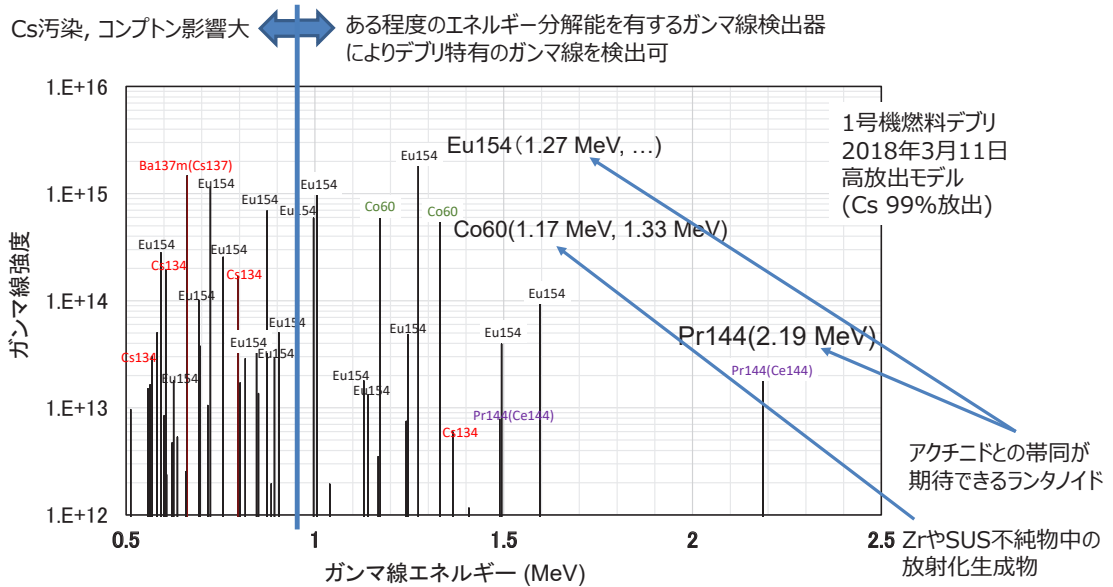


図3 Ag単体の放出速度の温度依存性



## デブリ検知や分別に有効なデブリ特有の放射線



従来の全エネルギー領域で積分された線量計の測定では、デブリの放射線とCs汚染による放射線を区別することは困難  
→以下のデブリ特有の放射線を測定することでデブリ検知は可能となる。

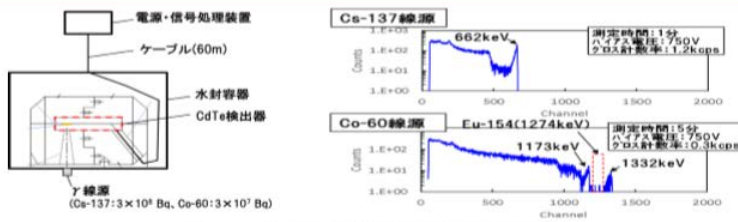
- 約1MeV以上のガンマ線：Eu154(8.6y), Co60(5.3y), Pr144/Ce144(285d), または積算計数率
- 中性子線：Cm244自発&誘起核分裂, アクチノイド( $\alpha, n$ )
- (n,g), (n,f)反応による高エネルギーガンマ線



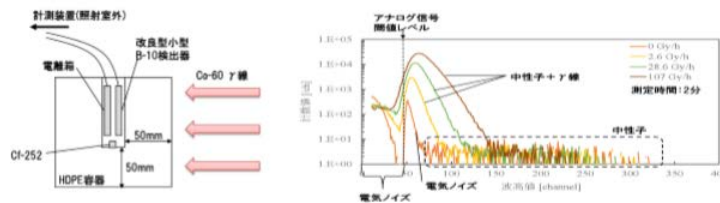
## 成果：次期内部調査用に開発が進められているIRIDのデブリ検知用測定器

デブリ検知方法の提言を受け、IRIDでは次期内部調査への適用を図るため、Eu154やCo60のガンマ線ピーク測定を狙ったエネルギー分解能を有するCdTe検出器とCm244の自発核分裂中性子の測定を狙ったB10検出器の開発が進められている。

### デブリ検知技術



(a) CdTe半導体検出器の単体試験結果例



(b) B10検出器の単体試験結果例

下記資料より抜粋

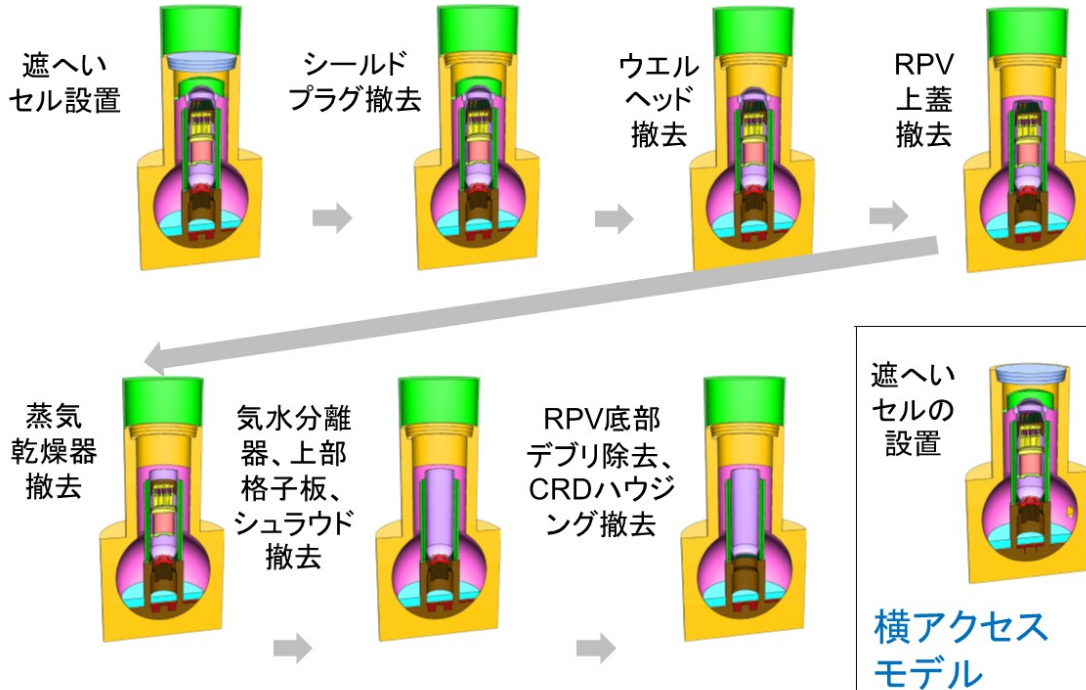
IRID 研究開発の現状 平成30年8月27日 国際廃炉研究開発機構 (IRID) 開発計画部 奥住 直明





## 成果： デブリ取り出し工法模擬（解析モデル）

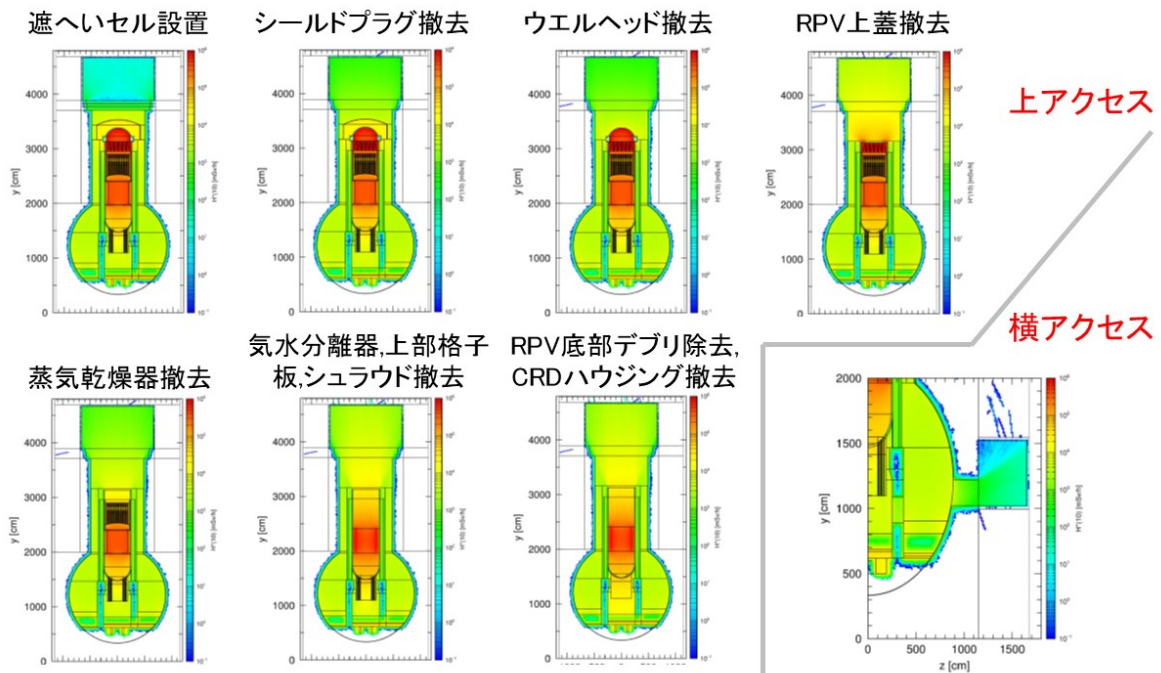
### 気中上アクセスモデル



50



## 成果： デブリ取り出し工法模擬（線量率分布変化）



燃料デブリ取り出し時における線量率分布変化の理解

→ 今後の廃炉工程の最適化, 内部調査への提言

51



成果：OECD/NEAとの連携（PreADESプロジェクト）



補助事業  
IRID

OECD/NEA Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris (PreADES)

(国内外の叡智の結集の一環として実施)

OECD/NEAの国際プロジェクトとして、燃料デブリを対象とした既存の知見を収集・整理し、1F廃炉に有効な分析プログラムやデブリの取扱いについて国際的な専門家、有識者を交えて議論を行う。得られた知見や改善に向けた提案は各国の安全研究、廃止措置技術開発等の加速に反映するとともに、分析プログラムやデブリの取扱いについての議論の結果については1Fの廃炉作業に直接反映できる。  
実施期間：2017年～2020年

●本プロジェクトのトピックス

1. 燃料デブリサンプル分析による性状把握（燃料デブリ性状の推定、国際共同研究のあり方、等）
2. サンプルング、取り出しに向けた環境整備における課題（線量評価、臨界安全、サンプル輸送等）

- Task-1 Joint study on fuel debris Characterization
- Task-2 Identifying needs and major issues for future fuel debris analysis
- Task-3 Planning of future international R&D framework



廃炉作業への貢献（アウトカム）

- 1F廃炉プログラムに対する課題や不足点の抽出し、改善に向けた提言が得られる。
  - 燃料デブリ性状の推定方法、分析手法 → 廃炉の改善に向けた分析項目の抽出できる
  - 燃料デブリのサンプルング方法、輸送方法、臨界安全 → 現行の燃料デブリの取扱いに対する合理化、安全性向上、管理方策等に繋がる知見が得られる



成果：OECD/NEAとの連携（PreADESプロジェクト）



補助事業  
IRID

Output image of Task 2-1

Task 2-1: Needs for fuel debris analysis

Analytical need is discussed with considering:

- Decommissioning
- SA research

(Task 1-1, 1-2)

Characteristic Table micro

Item	Priority	Analysis Method	Analysis Location	Analysis Time	Analysis Cost	Analysis Risk	Analysis Benefit
U-235	High	ICP-MS	Lab	Early	Low	Low	High
U-238	High	ICP-MS	Lab	Early	Low	Low	High
Plutonium	High	ICP-MS	Lab	Early	Low	Low	High
Other nuclides	Medium	ICP-MS	Lab	Late	Medium	Medium	Medium

(Task 2-1)

Analysis Table No.	Time Available	Region	Form	Target Object	Form	Objectives/Intention	Expected Results	Notes of analysis/evaluation
1	Sampling	On-site (Phase 1)	Structure	Shield	Shield	Shield assembly, Shield support structures	Shield assembly, Shield support structures	Shield assembly, Shield support structures
2	Sampling	On-site (Phase 2)	Structure	Shield	Shield	Shield assembly, Shield support structures	Shield assembly, Shield support structures	Shield assembly, Shield support structures
3	Sampling	On-site (Phase 3)	Structure	Shield	Shield	Shield assembly, Shield support structures	Shield assembly, Shield support structures	Shield assembly, Shield support structures

【目標】

- 1F廃炉に有効な分析ニーズ・課題を議論する。
- 分析項目の優先度付けを行い廃炉作業へ提言。

評価の観点：

- ・ サンプルング可能時期 ・ 反映先 ・ 効果大きさ
- ・ 実施の困難性(移送・分析) ・ 特性表等への充足度
- ・ 廃炉作業への貢献度 ・ SA研究への充足度、等。

Participant organizations will fill the table for available sample from early time to late time

-Analytical table-







JAEA Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris (PreADES) PreADES

PreADES: Expected Outcomes

- Collect information for improving knowledge for fuel debris characterization (Task-1)



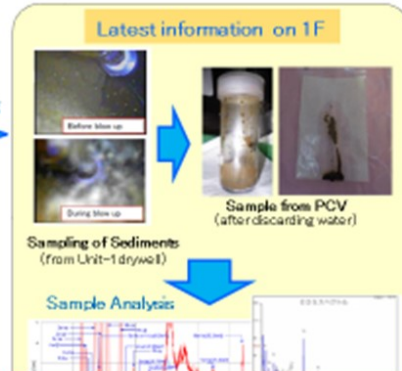
- Identifying debris analysis needs and major issues for future sampling (Task-2)

- Support 1F Debris Sampling Planning
- Improve Severe accident research knowledge



- Planning a future international R&D framework (Task-3)

JADS \*) Ref. From TEPCO's handouts



<1F実試料サンプルの分析結果の解析(一例)>  
 ・最新の1F試料の分析結果を元に議論を行い、そこから分かる知見を抽出し、廃炉やSAへの提言をまとめる。  
 ・今後必要な1Fサンプル(位置、種類、等)や分析内容について提言をまとめる重要度分類に追加して行く。  
 【アウトカム】  
 ・廃炉作業に有効な分析項目の情報を抽出する



## 事故進展挙動評価に係る研究開発

福島研究開発部門  
廃炉国際共同研究センター

原子力科学研究部門  
原子力基礎工学研究センター



### 第3期中長期計画における廃止措置等に向けた研究開発 (事故進展挙動評価分野、抜粋)

東京電力福島第一原子力発電所の「**廃止措置等に向けた中長期ロードマップ**」に示される研究開発を工程に沿って実施する。

NDF戦略プランや、中長期的な現場ニーズを踏まえつつ、人材の確保・育成も視野に入れた、**事故進展シナリオの解明に係る基礎基盤的な研究開発**を着実に進める。

廃炉基盤研究で得られた成果に基づいて、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等の安全かつ確実な実施に貢献する。

また、事故進展解析で得られた成果を国内外に発信し、**原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究にも貢献する。**

併せて、専門的知見や技術情報の提供等により、NDF等における廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支援する。



## 第3期中長期計画における取り組み内容

(事故進展挙動評価、その①)

### ① 廃炉措置ロードマップに即した、廃炉工程への知見提供

- ✓ 重要マイルストーン（**燃料デブリ取出し方針の決定（H29年度）**、**燃料デブリ取出し方法の確定（H30年度予定）**）に向け研究成果を集約し、廃炉プロジェクト（炉内調査、デブリ取出し、機器設計・開発、臨界評価、廃棄物、等）に知見提供した。
- ✓ 外部資金を獲得し、燃料デブリ取出し方針の決定に向けた、廃炉プロジェクトの基本設計に必要な基盤知見を【**炉内状況推定図、FP・線量分布図**】にとりまとめ、提供した。
  - IRID事業「総合的な炉内状況把握の高度化（H28-29年度）」**
- ✓ 燃料デブリ取出し方法の確定に向けた、廃炉プロジェクトのシステム設計に必要な基盤知見として、**炉内状況推定図等の高精度化**（外部からの期待が高い、圧力容器内部、及び、ペダスタル堆積物の深さ方向の高精度化）を進めている。
  - 1F推進費研究（H30年度より）**
- ✓ 中長期的な研究開発の有効な推進に向け、**多分野専門家の認識共有による課題の適切な抽出・選定と成果のレビュー**、および廃炉現場ニーズと研究シーズのマッチングに向けた専門家会議体を設立し、情報交換に着手した。
  - 廃炉研究プラットフォーム、事故進展研究分科会（H30年度より）**

2



## 第3期中長期計画における取り組み内容

(事故進展挙動評価、その②)

### ② 事故進展シナリオの解明に係る基礎基盤研究

- ✓ 要素モデル開発、データベース整備、各種模擬試験などの基礎基盤研究については、運営費交付金に基づき、以下の5項目に集約した研究を継続している。
- ✓ 併せて、1F模擬条件の解析・評価を行って、得られた知見をIRID事業等に集約し、炉内状況推定図等の評価に活用している。
  - (1) **事故時の熱水力挙動評価（基礎工）**
  - (2) **事故時の燃料損傷・溶融評価（基礎工・CLADS）**
  - (3) **構造材・圧力容器の挙動評価（基礎工）**
  - (4) **放射性物質の化学挙動評価（基礎工・CLADS）**
  - (5) **溶融コリウムの凝固挙動評価（CLADS）**
- ✓ また、1F現場データ（1Fサンプル、炉内調査、燃料デブリ）等を用いた、1F事故シナリオの詳細解明に着手した。
  - IRID事業「デブリ性状把握の高度化」知見の活用**

3



## 第3期中長期計画における取り組み内容 (事故進展挙動評価、その③)

### ③ 原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究

- ✓ 1F事故で顕在化した原子力安全に係わる研究課題は、燃料破損モデル・データベースの高度化、解析ツールの整備と公開、模擬試験の実施、等を通じて成果を公開し、国内外で広く活用してもらうように進めている。  
→METI事業「シビアアクシデント時の燃料破損・溶融解析手法の高度化」
- ✓ 経産省の軽水炉安全・人材育成ロードマップで、特に、設計基準を超える事象（DEC）について、解析コードの高度化、検証試験の実施、コードのV&V、継続的な基盤知見の補充が重要と評価された。併せて、解析コードをメンテナンスし、知見を継続的に補充する人材の確保・育成の重要性が指摘された。
- ✓ 顕在化した課題とは、
  - BWRのDEC条件での知見の不足
  - TMI事故に基づく典型的事故条件と異なる条件（例：1Fでの燃料崩落、下部ヘッド堆積・破損、MCCIなど）での事故進展に関する知見の不足
  - 新型燃料（事故耐性燃料等）のDEC条件での知見の不足 など
- ✓ 1F事故を背景に、基礎研究と安全研究への応用のブリッジが、国際的にも重要なテーマとなっており、JAEAは国際協力をリードしている。→TCOFF, SAFESTなど

4



## 1F廃炉作業のロードマップと研究開発の全体スケジュール

		H26以前 2014以前	H27 2015	H28 2016	H29 2017	H30 2018	H31 2019	H32 2020	H33 2021	H34年度以降 2022年度以降
1F廃炉の ロードマップ	全体	第1期		第2期（10年以内）						第3期（30～40年後）
	デブリ取出し	取り出し方針決定▼				▼取り出し方法確定				燃料デブリ取出し開始
	廃棄物処理・処分	基本的な考え方とりまとめ▼				処理処分の技術的見通し▼				解体・処分等
廃炉・汚染水対策補助金事業 (IRID事業、炉内状況把握の高度化)		MAAP, SAMPSON による解析、高度化 模擬試験		事故時データ分析、 事故進展解析 炉内状況評価 要素モデル		H29年度までは全ての知見をIRID事業 に集約し、廃炉関連PJに知見提供				H30年度以降は、炉内状況推 定図の向上に係る研究に知見 を集約し、かつ、事故進展解析 分科会でレビューを受けつつ、研 究推進、廃炉PJに知見提供
炉内状況推定図の精度向上 (1F廃炉推進研究、交付金H30～)						(6) RPV状況把握の高度化 廃炉基盤研究プラットフォーム、事故進展分科会				
廃炉基盤 研究 (交付金)	(1) 事故時熱水力 挙動評価	高圧条件下データ 取得		事故時熱水力挙動 評価手法構築		圧力容器内事故時 温度分布評価		軽水炉安全性向上への 随時反映		
	(2) 事故時の燃料 損傷・溶融評価	燃料損傷・溶融挙動 解析手法構築		溶融燃料落下 挙動解析		溶融燃料溶融・凝固・移行 挙動評価		軽水炉安全性向上への 随時反映		
	(3) 構造材・圧力容 器挙動評価	高温材料データ取得解 析手法構築		高温材料データ取得、下部ヘッ ド破損位置・サイズ評価		圧力容器内外溶融・破損・移行 挙動評価		炉内サンプル分析、軽水炉 安全性向上への随時反映		
	(4) 放射性物質化 学挙動評価	試験技術開発、 予備実験・解析		FP化学基礎実験、Cs化 学吸着挙動評価		FP化学基礎実験・解析による化学挙動デー タベース構築及びモデル高度化		炉内サンプル分析、軽水炉 安全性向上への随時反映		
	(5) 溶融コリウム凝 固挙動評価			凝固挙動データ取得		凝固試験・解析によるモデル高度化		炉内サンプル分析、軽水炉 安全性向上への随時反映		
経産省事業（SA時の燃料破損・溶融 過程解析手法の高度化）		材料科学的な知見が不足 している重要要素過程抽出		要素反応モデル整備、 熱力学データ拡充		解析手法実用化 解析検証データ拡充		軽水炉安全性向上への 随時反映		
国際協力 TCOFF, SAFESTなど				熱力学DBと要素反応モデル 知見拡充		熱力学DBと要素反 応モデル高度化		軽水炉安全性向上への 随時反映		

5



# IRID事業 「総合的な炉内状況把握の高度化 (H28-29年度)」

6



## 実施体制・ねらい

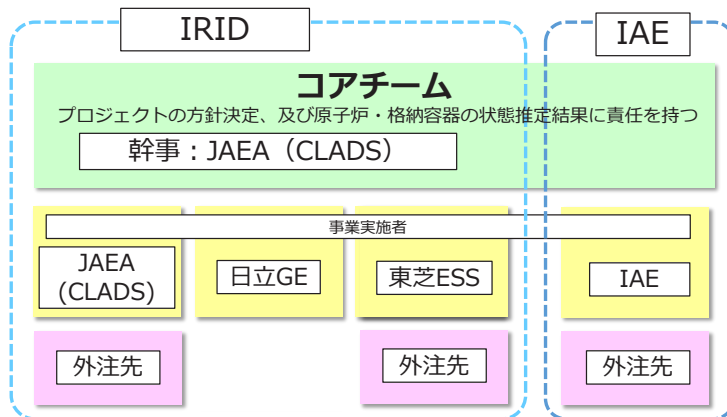


### 【背景・目的】

1Fの中長期的な廃止措置等にむけた取組を着実にを行うために、事故進展解析及びPCV内部調査等の他の研究開発の成果、事故時の圧力・温度等の測定データの分析、現場から得られた情報からの推定を活用し、**これらの情報を俯瞰的に統合することで炉内の状況を総合的に把握**することに資する。 → 専門家コアチーム（JAEA：幹事機関）に知見を集約

### 【参加機関】

IRID（組合員である①～③の会社を含む）と① JAEA(CLADS)、② 東芝ESS、③ 日立GE、IAEとの共同体制で実施した。JAEAは総括代表機関。

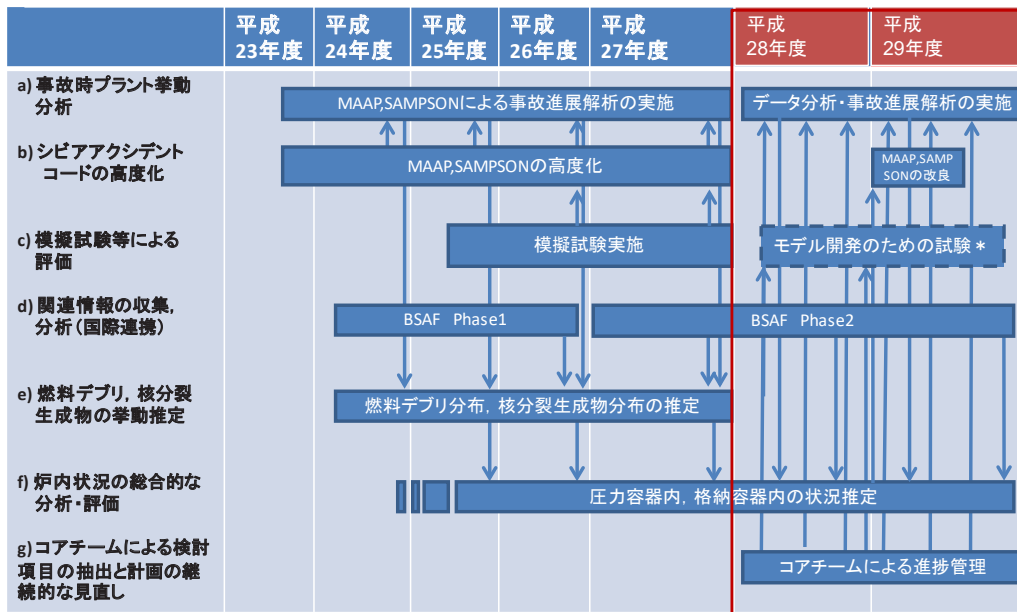


7





## H27年度までの経緯、実施項目、スケジュール



◎備考

H27年度以前は、解析モデル開発を中心とした要素研究にとどまり、1F廃炉に有用な知見がほとんど提供できていないと評価されていた。H28年度より、JAEAが事業に加わって事業をリードすることにより、事故進展挙動解析の成果が、廃炉関連PJの基本設計に直接有用となる知見として提供できたとして、外部から高く評価された。

\* 必要性を議論して判断



## 成果の概要、①コアチームによる総合評価



JAEA/CLADSに、原子炉・格納容器の状況推定・評価の結果に責任を持つ「**コアチーム**」を設置、JAEA、東電、IAE、東芝、日立GE、NFD、大学専門家による議論。

### (1) 炉内状況の総合的な分析・評価

- ・ 実機データ、過酷事故に関する知見等を踏まえ、評価作業の内容・方法を決定
- ・ 他PJ成果、本プロジェクトで抽出・収集・分析・評価された結果・情報等を活用し、原子炉・格納容器の状態に関する総合的な分析・評価を実施

### (2) 燃料デブリ・FP挙動及び特性の推定・評価 =>(1)に提供

- ・ SA解析コード、要素モデル等を用いて、事故事象について、感度解析、逆解析による推定・評価を行い、燃料デブリ・FPの位置・分布や性状に関する評価の不確かさを低減
- ・ FPの炉内構造物への固着特性などの化学特性に関する検討課題を設定し、重要元素であるセシウムについて、不足する知見を整理し、新たなデータ取得実験の必要性を検討

【アウトカム】 **情報集約図**、**炉内状況推定図**、**FP・線量分布図**を号機ごとにとりまとめ、IRID、TEPCO等に提供、**廃炉PJの予備設計の基本データベースとして活用**された。→事故進展挙動評価の成果が、具体的に**廃炉PJに大きく貢献した初めての事例**。また、SAFEST等の国際PJ、国際会議などで**日本からの情報発信**として成果を公開。また、**若手研究者を号機担当者**に据え、これをシニアが支援することで技術継承・人材育成を実施。

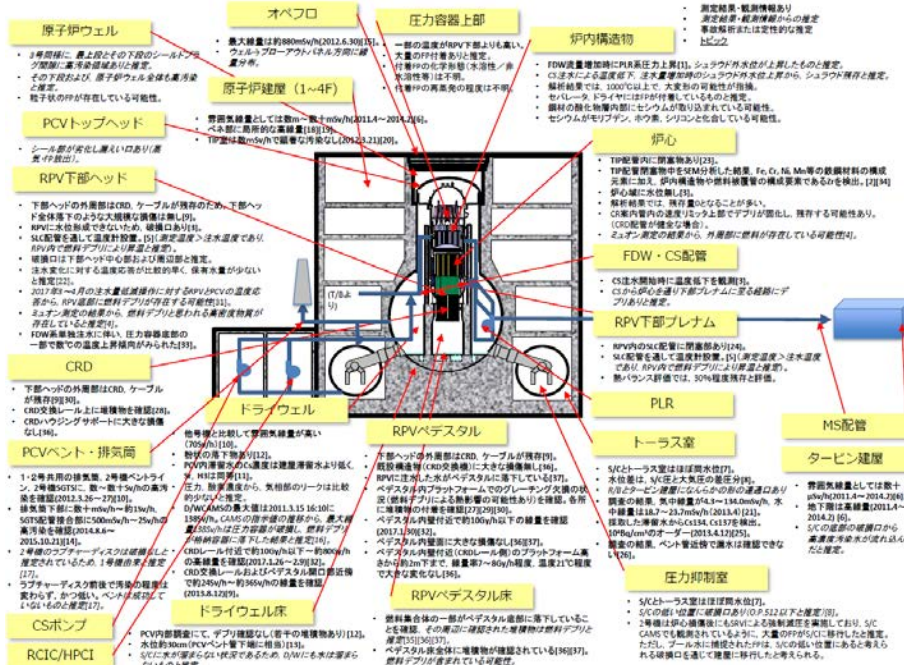
【今後の予定】 IRID事業は終了。交付金あるいは外部資金により、炉内状況把握の高度化を推進。



## 情報集約図 (例：2号機)



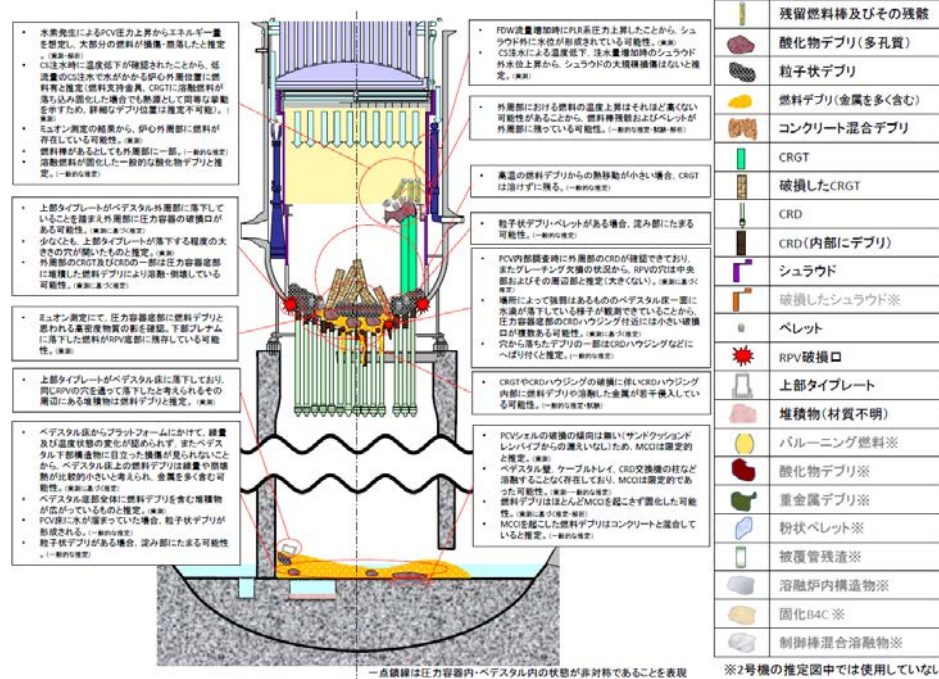
号機ごとに、圧力容器、格納容器、原子炉建屋の各所において、燃料デブリ分布の推定に繋がる情報を網羅的に集約した。併せて、総合評価において重要となるコメントを追記し、専門分野横断的に、全ての情報が俯瞰できるようにした。



## 炉内状況推定図 (例：2号機)



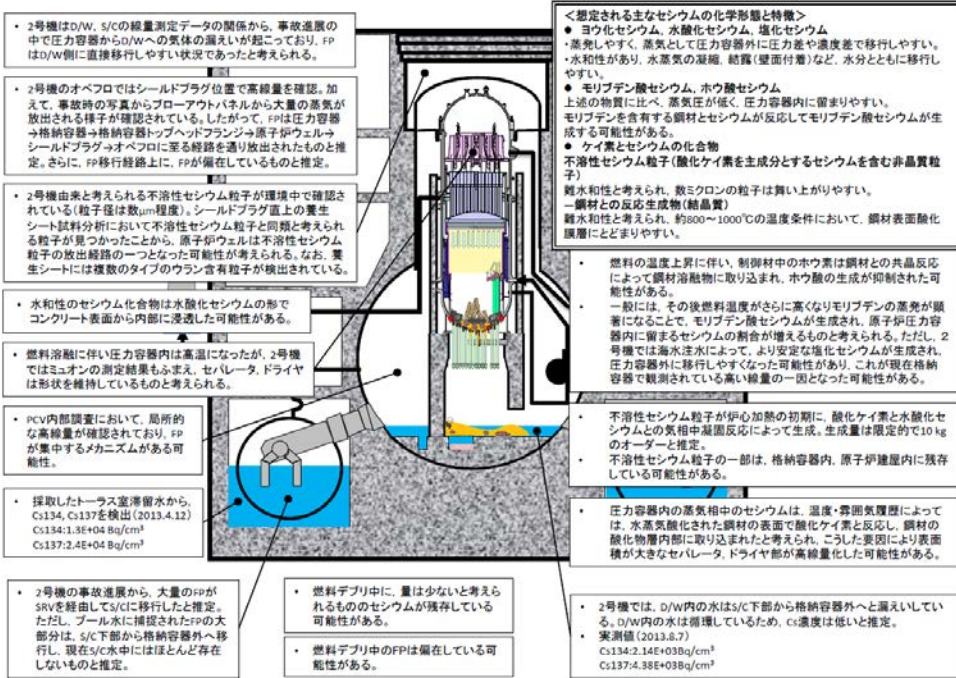
情報集約図に基づき、関連する解析や試験データ、文献などを加味して総合的に分析・評価することで、燃料デブリの分布とRPV・PCVの破損状態の推定図を作成した。→ 廃炉PJの基本設計の基盤データベース



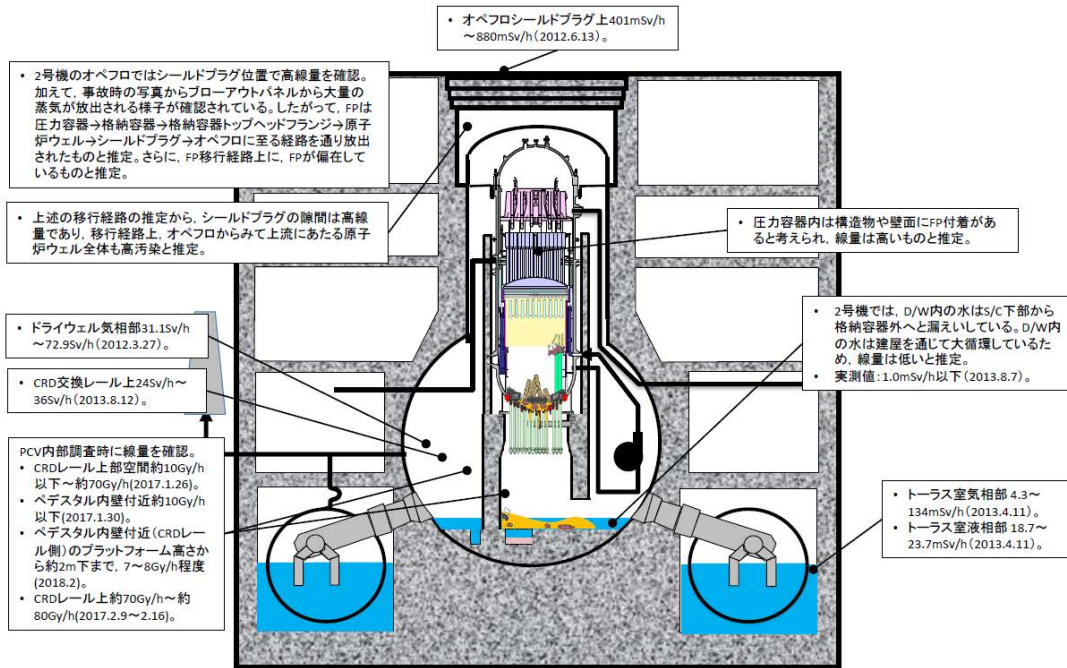


炉内状況推定図と同様の手法で、FP分布図を評価・整備した。除染作業に直接必要となるFP分布については、別図として整備。

※ 推定は、主な線源核種であるセシウムに着目



炉内状況推定図と同様の手法で、FP分布図を評価・整備した。除染作業に直接必要となる線量分布については、別図として整備。





## 成果の概要、②JAEAが主担当した要素課題



### (1) 炉心物質崩落時の事象推移解析

- 2、3号機で観測された圧力容器下部ヘッドの破損状態の顕著な差の解明に向けた、燃料デブリ崩落時の熱的特性の解析

### (2) バーチャル原子炉による逆問題解析

- 格納容器内の温度、圧力データの変遷に基づき、逆問題解析により燃料デブリの位置を推定

### (3) 模擬燃料集合体の加熱試験

- 上記解析研究に評価根拠を提示するための、2、3号機条件（温度勾配、雰囲気）での模擬燃料集合体のプラズマ加熱方式による破損試験

### (4) 下部ヘッドでの燃料デブリ成層化模擬試験

- BWR事故で想定される、SA解析で従来典型的とされた条件と異なる条件（下部ヘッド破損がより低温で発生、ジルコニウムとステンレス材の物量が相当多い）での下部ヘッド成層化概略挙動の解明に向けた模擬試験

### (5) セシウムと鋼材の反応機構の解明

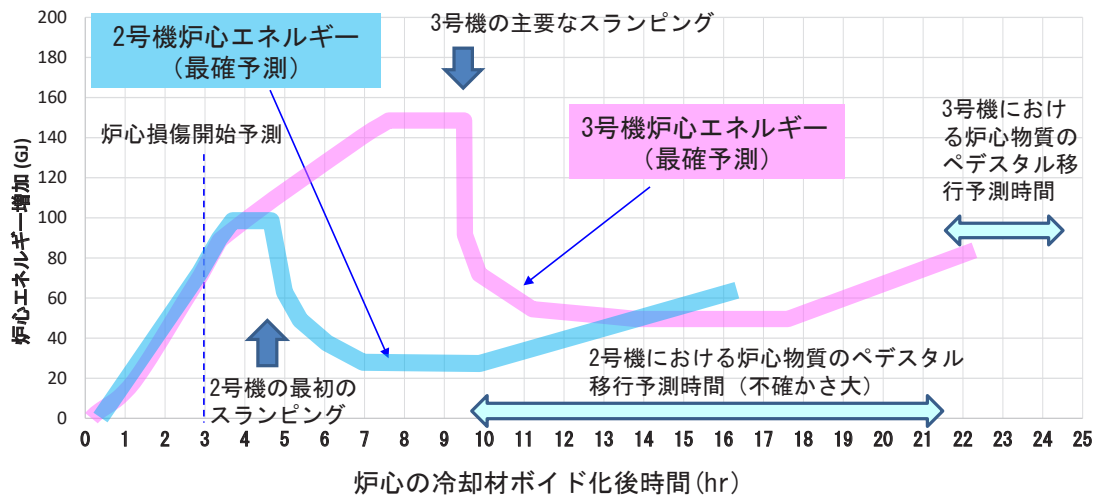
- 蒸発したセシウムと鋼材（構造物）の反応機構に係わる模擬試験、及び、セシウム化学データベースの整備と1F条件での評価

### (6) 1F現場サンプルの分析

14



## (1) 炉心物質崩落時の事象推移解析



様々なSA解析コード（MAAP、MELCOR、SAMPSON、SCDAPSIM）での事故伸展解析結果を比較し、併せて、事業で実施した模擬燃料集合体の加熱試験や、認可予算で実施した事故時プラントデータの分析の知見を踏まえ、**2号機、3号機における炉心エネルギーの増加を最確予測値として数値化**し、両者の燃料デブリの熱的な特性を客観的な形で示した。

【アウトカム】 炉内状況推定図における**2、3号機の下部ヘッド破損状態の違い**に係る重要知見を提供  
 （査読論文 1 件、国際会議発表 5 件、国内会議発表 5 件、NUMAT2018招待講演）

【今後の予定】 下部ヘッド破損の評価精度向上は、外部からJAEAに高い期待。1F推進費研究（H30～）で継続実施。

15



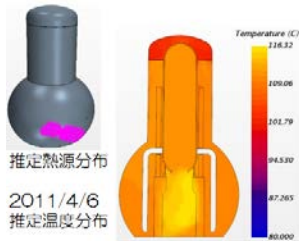
## (2) バーチャル原子炉による逆問題解析



**実施内容** 3次元CFDコード(StarCCM+)を応用し、バーチャル原子炉をコンピュータ上に構築、**事故後1カ月及び半年後の温度分布を評価**する事で、それに基づいた、プラント内燃料デブリ位置を推定した。

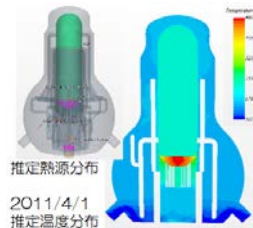
### 【1号機】

内部には熱源がほとんどないと推定される。一方で、安全弁近傍において、RPVからの過熱蒸気漏洩があり、RPVにある程度の熱源を想定する必要がある。



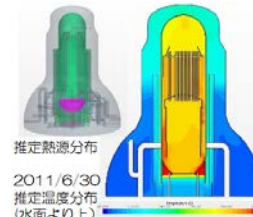
### 【2号機】

熱源はほぼRPV内部にあり、0.8MW程度(想定される全発熱の約25%)がペDESTALに存在すると仮定すると、定常状態及び過渡状態の温度分布を再現する事が出来た。



### 【3号機】

温度分布からは0.25~0.3MW程度の熱源が、RPV下部に存在している可能性が示唆された(想定される全発熱の25~30%)。計算では給水による除熱量が大きく、0.8MW(想定される全発熱の81%)以上と推定された。



【アウトカム】 炉内状況推定図における**燃料デブリ分布評価**に知見提供 (NDFより、廃炉作業に向けて、バーチャル原子炉による線量分布評価の提案あり検討中)

【今後の予定】 IRID事業は終了。外部資金により、バーチャル原子炉の研究継続を検討中。(解析主担当者の転籍により、現在中断)

16



## (3) 模擬燃料集合体の加熱試験



**目的** BWR体系の1Fでは、PWR体系のTMIと異なる事故進展事象の可能性が指摘されている。**BWR固有の炉心物質の崩壊・移行挙動**について検討に資する模擬試験を実施する。

**実施内容** BWR体系を模擬した試験体を用い、2号機の炉心物質スランピング(下部プレナムへの移行)時に炉心下部で想定される温度条件まで加熱した試験を実施した。



**破損燃料の下部への移行に係る、以下2点の重要知見を獲得**

### 【冷却ガスの破損炉心透過性】

破損燃料は部分的に閉塞形成。しかし、ガス透過性が維持される場合は溶融コリウムプール形成が遅れ、**固液混合状態で崩落**。

### 【崩壊燃料の下部支持構造領域への侵入】

固液混合状態の破損燃料は、炉心下部の支持構造部に入り込むのは困難な可能性。他方、制御棒溶融物の一部は容易に侵入。

【アウトカム】 炉内状況推定図における**下部ヘッド破損メカニズムに係る重要知見**提供(酸化物燃料デブリは完全に溶融せずに崩落→下部ヘッド破損→ペDESTAL移行する可能性を示唆)。**査読付きプロシーディング 2本、国際会議発表 1本、JAEA理事長表彰(本研究をけん引した若手を筆頭とする)**

【今後の予定】 必要性に応じて、CLADS二期工事などで大型試験装置設置を検討。

17





## (4) 下部ヘッドでの燃料デブリ成層化模擬試験 (H28のみ) IRID

### 【目的】

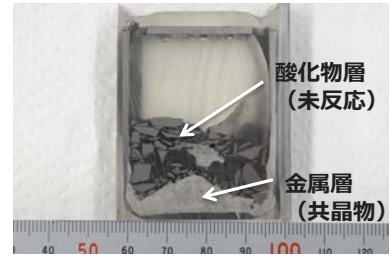
- 1号機MAAP解析結果  
デブリ平均温度1900℃（酸化物2100℃、金属1550℃、昇温速度5～6℃/分）で下部ヘッドが破損  
（下部ヘッドは、**金属のみが溶融し、酸化物は固体成分中心の段階で破損したと想定される。**）
- 反応過程で形成される中間生成物を考慮した溶融コリウムの成層化初期過程の模擬試験を実施し、SA解析コードで想定している典型的条件（**金属、酸化物の溶融・成層化**）が達成される前段階で、**金属溶融層のみが形成**され、下部ヘッド破損が進行する可能性を調査

### 【成果】

- MAAP解析で評価された温度条件では、酸化物が溶融する前にステンレス鋼とジルコニウムを主成分とし、金属ウランやホウ化ジルコニウムを少量含有する金属溶融層が下部プレナム底部近くに形成される。

これらのことから、

- 金属溶融層と構造材との共晶反応（約1340℃）により、**従来の評価結果より低い温度で、RPVに小破損が発生する可能性を示した。**
- SA解析で予想されているRPV破損段階では、酸化物層は固液混合状態であり、相当量の固体が残留していたと予想されることを示した。
- 酸化物層と金属層の界面領域に少量の金属ウラン、ホウ化ジルコニウム等の化学的に活性な成分が残留すると予想されることを示した。



試料断面の例  
（最高温度2100℃、昇温速度8℃/分）

【アウトカム】 炉内状況推定図における下部ヘッド破損メカニズムに係る重要知見（**2、3号機で予想される不完全な成層化**）提供。国際会議発表1本

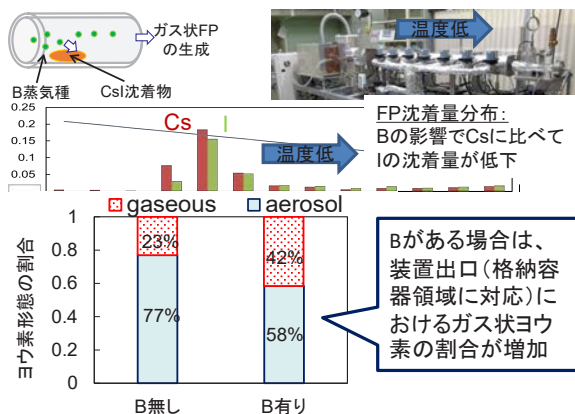
【今後の予定】 最重要課題として、1F推進費研究に引き継ぎ。原子力安全基盤研究としても重要度高と認識。



## (5) セシウムと鋼材との反応機構の解明 IRID

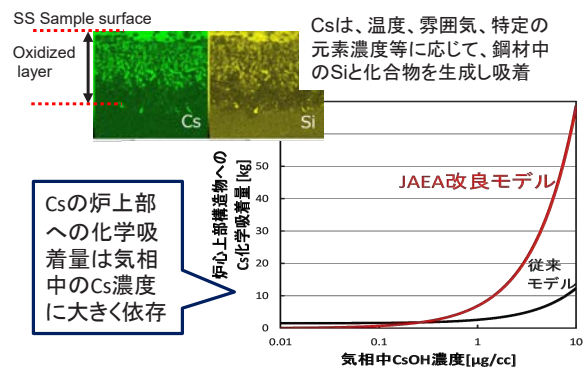
**目的** セシウム(Cs)の鋼材への吸着・再蒸発実験に基づき、吸着に係る化学的な条件を考慮可能なCs化学吸着モデルを構築して、SA解析コードの予測精度向上に反映する

### 実施内容① ホウ素(B)のCs化学への影響



Bが炉内に沈着したCsやIと化学反応を起こし、Cs、I等の環境放出タイミングに影響を与える可能性を指摘

### 実施内容② Cs化学吸着モデルの高度化



Csの構造材吸着メカニズムを解明し、既存モデルで評価できなかった雰囲気影響をモデル化することで、Cs吸着量の評価精度を一桁向上させた。

【アウトカム】 FP分布図におけるRPV上部構造物などの**構造材へのCs吸着可能性**に係る重要知見を提供。個別的研究成果は、交付金で実施したFP化学データベースに係る研究として論文発表（後述）

【今後の予定】 FP化学データベース研究として継続。Cs-Mo-I-B-O-Hの化学挙動は国際的にも重要度が高い。

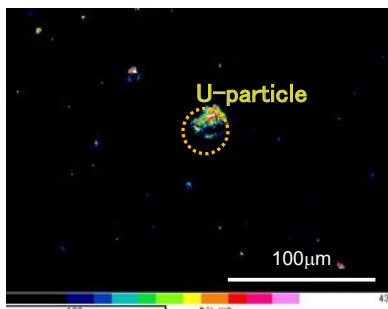


## (6) 1 F 現場サンプルの分析

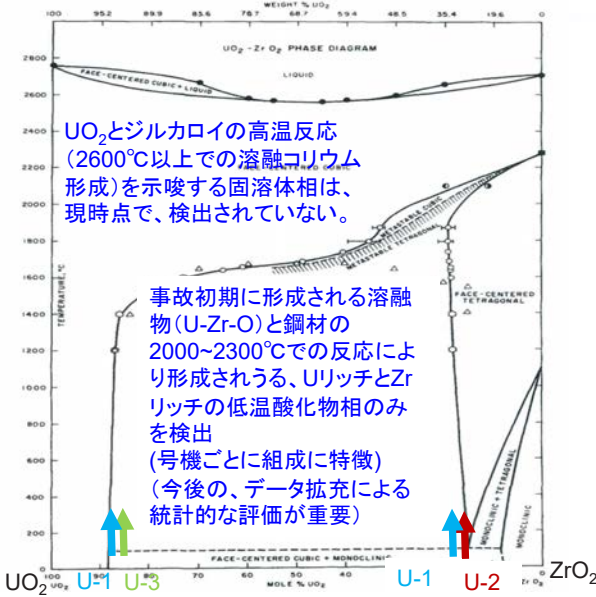
IRID

### 実施内容

現場サンプル(PCV堆積物、オペフロ養生シート片、等)の分析を行い、炉内状況把握や燃料デブリ特性評価に繋がる知見をとりまとめた。  
H30年度は、燃料デブリ性状把握の高度化事業において継続実施中。



3号機ペDESTALからの取得サンプル  
(ステンレス系マトリックス+U含有粒子)



UO<sub>2</sub> U-1 U-3 U-1 U-2 ZrO<sub>2</sub>  
ペDESTAL、D/Wで検出されたU粒子サンプルの組成

【アウトカム】 ペDESTAL、オペフロなどで検出されたU含有粒子の生成メカニズムに係る重要知見を獲得。事故進展解析の高精度化に向けた重要情報。成果は論文投稿予定、また、国際プロジェクト (TCOFF、PreADES) に知見提供。

【今後の予定】 燃料デブリ評価と事故進展解析のクロスカット課題として推進。国際的な注目度が高く、FRC開催予定。



1F 廃炉推進研究 (H30年度~)

事故進展解析分科会

事故進展シナリオの解明に係る基盤研究

- 運営費交付金に基づく研究 -



# 1 F 事故進展解析に関わる分科会 (H30～)

【実施内容】 廃炉工程ニーズに基づき、**1 F 事故進展解析に係わる研究の優先度・重要度**について機構内外の専門家により認識共有する。併せて、優先度評価の指標として**PIRTの改定**について検討する。

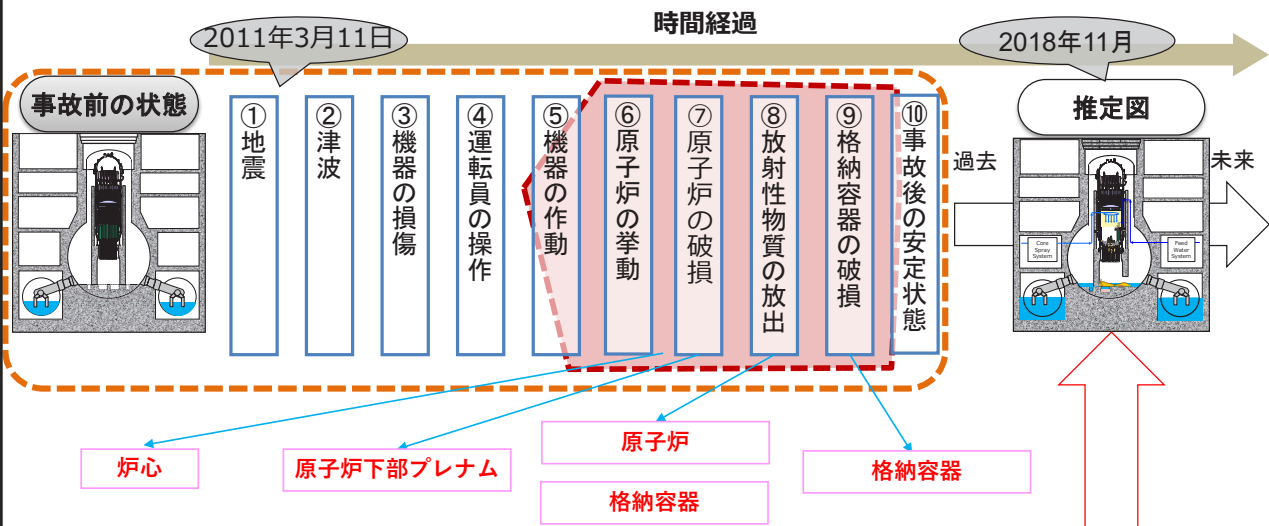
- 第1回分科会を2018年11月7日に実施。
- 現時点で想定される1 F 事故進展解析に係る重要課題を、現行のPIRTに加筆する形で、各委員の専門（シビアアクシデント解析、熱水力・流動、燃料・材料科学、機械・構造力学等）に基づき、年内目途で提案頂く。
- タスクフォースによる重要課題の分類・整理（年内目途）
- **機構内外の中堅・若手メンバーにより、抽出された重要課題の整理・優先度の予備評価を行う。**
- 第2回分科会を2019年3月上旬に実施予定。
- 炉内状況把握、事故進展解析に係る重要課題をとりまとめ、課題解決に向けた研究と、その成果の廃炉工程への具体的な適用について情報交換を継続する。
- **H31年度のPIRT改定の進め方**について認識共有を行う。

【今後の予定】 重要研究課題の抽出と**廃炉研究技術マップ**への反映  
PIRTの改定作業（H31年度）



## (参考資料) PIRT (優先度評価) とは

事故シナリオをいくつかの時間フェーズ及びプラントシステムに分割し、各フェーズ・各部位において主要な指標 (FoM : Function of Merit) を選定し、課題抽出を実施する。



既存のPIRTは、原子力学会「シビアアクシデント評価」研究専門委員会において熱水力における事象進展解析の課題抽出のため作成された。これにより、1000程度の現象が同定され、106個の重要かつ知識不足の現象が抽出された。1F現場データの反映や、材料科学・機械構造学的な挙動については抽出が十分でないとされている。

現場から得られた情報等



## H30年度からの新規取組み（H30.10～）

### ◎炉内状況推定図の精度向上に係る基盤研究（1F廃炉推進研究）

燃料デブリ取出し方法の確定、および、燃料デブリ取出し開始に向けた廃炉PJのシステム設計に必要で、かつ、外部からJAEAに対する期待が高い「RPV内部の破損状況、燃料デブリ分布・特性（特に2,3号機）」の評価精度を向上させ、炉内状況推定図を高精度化する。

#### [1] 2, 3号機RPVの燃料デブリ・構造材状況把握の高度化（伝熱・移行解析）

- ① 下部ヘッド破損条件の評価・・・事故時プラントデータの分析、下部ヘッド**伝熱条件**の解析・評価
- ② 下部ヘッドでの燃料デブリ・構造材の状態変化、及び、ペDESTAL移行挙動の評価・・・燃料デブリの**マクロな状態変化**と、**ペDESTAL移行**を解析・評価

#### [2] 2, 3号機燃料デブリの分布と特性の要素反応過程の評価（試験研究、要素解析）

- ① 制御棒・チャンネルボックス溶融とホウ素挙動の影響評価・・・燃料デブリ**堆積初期条件への影響**、ホウ素挙動の詳細解明
- ② 酸化物と金属の要素反応の解明・・・**酸化物デブリと金属デブリとの反応**検証データ
- ③ 下部ヘッドでの事故進展詳細評価・・・**溶融・成層化**の要素解析モデルの整備と解析

#### [3] RPV状況推定図の高精度化（総合評価）

24



## RPV状況推定図の精度向上（H30年度実施予定）

#### ① デブリ熱条件とペDESTALへのマクロ移行挙動の評価

目的・・・1F2, 3号機の下部ヘッドでの燃料デブリ・マクロ伝熱評価に着手するとともに、デブリ局所伝熱、圧力容器破損時のデブリ流出挙動予測方策を具体化する。

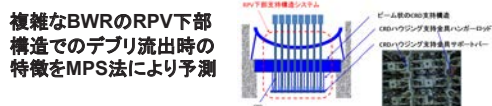
##### Step1: 下部プレナムデブリのマクロ伝熱評価



##### Step2: 下部プレナムデブリの局所伝熱評価



##### Step3: 圧力容器破損時のデブリ流出挙動予測

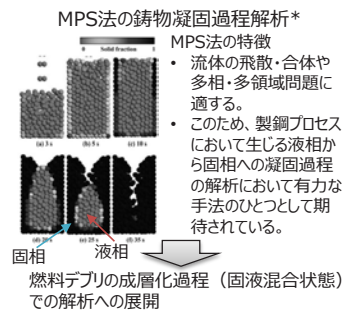
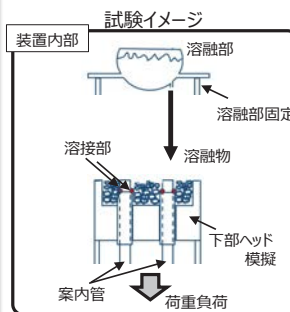


#### ② 燃料デブリの分布・特性の詳細評価

目的・・・下部ヘッドでの燃料デブリ挙動（不完全な成層化と下部ヘッド破損）について、機構論的に妥当な基本モデルを検討すると共に検証試験計画を具体化する。

➢ 富岡地区設置の制御棒ブレード破損試験装置を下部ヘッド破損試験が可能となるように改造する。

➢ 粒子法の1つであるMPS法を用いて、成層化過程解析への適応を検討する。



\* 平田ら、「凝固シミュレーション：マクロ伝熱・流体の数値解析の基礎」、ふえらむ、19 (2014).

【予想される成果と活用】 **下部プレナム伝熱条件の解析、成層化要素モデルの基礎検討**⇒2, 3号機の下部ヘッド破損の違いに係る知見。また、試験装置の改造設計⇒**JAEA技報執筆**。

【今後の予定】燃料デブリのマクロ・局所伝熱の定量化、デブリのペDESTAL流出挙動予測、並びにこれらの成果の論文化装置改造概略設計、J-PARCにおけるホウ素分析データの評価、粒子法の成層化過程解析への適応検討

25





## 事故進展シナリオに係る基盤研究 (1) 事故時の熱水力挙動評価

【実施内容】解析モデル、手法の改良・構築と事故時熱流動挙動を対象とした試験による検証データの取得により、炉心損傷時を含む、シビアアクシデント（SA）時の熱流動挙動を評価できる解析手法を開発し、**事故進展評価の初期値・境界条件の精度向上**に資する。

高圧力下での二相流計測手法の開発～ワイヤメッシュセンサ～

【計測原理】  
ワイヤ間に流れる電流値が、ワイヤ間に存在する蒸気の割合で異なることを利用して計測する  
\*ボイド率: 気相が占める時間割合

試験によるデータの取得、不確かさ評価を含めたデータの取扱いの検討を実施し、統計量を含むボイド率分布データベースを構築

燃料集合体内での熱水力挙動に対する適用性の確認

平均ボイド率

標準偏差値

1.1MPa,  $j=0.37\text{m/s}$ ,  $j_g=5.1\text{m/s}$

2.6MPa,  $j_g=3.2\text{m/s}$ ,  $j=0.54\text{m/s}$

0.0 Void Fraction[-] 1.0 0.0 Standard Deviation[-] 0.5

燃料集合体内での熱水力挙動に対する適用性の確認

平均ボイド率

z=270mm

z=170mm

z=70mm

0.0 0.3

事故時炉内状況評価への適用性を確認するため、高温高圧ボイド率分布計測試験を対象とした数値解析を実施

流路を流れる複雑な熱水力挙動の数値解析結果

【成果・アウトカム】高温高圧ボイド率分布計測試験によりデータベースを構築した。**1F事故初期の炉内熱水力挙動評価**への適用性検討を開始した。査読付き論文1件

【今後の予定】高温高圧ボイド率分布データベースを用いて、熱水力モデルの整備や二相流解析手法の検証を行う。また、構築したデータベースを公開する。⇒原子力安全基盤研究への展開 26



## 事故進展シナリオに係る基盤研究 (2-1) 事故時の燃料損傷・溶融評価

【実施内容】**炉内構造物溶融移行・堆積挙動に対する不確かさ低減**を目的に、重要事象である、制御棒溶融挙動とペDESTAL内の溶融物広がり・堆積挙動の機構論的な解析手法を構築し適用性を検討した。

SUS  
B<sub>4</sub>C  
B:78.3%  
C:21.7%  
Zry

中性子吸収材  
制御棒シース  
B4C-SUS  
共晶溶融物

原子炉  
対象領域  
原子炉格納容器  
溶融構造物  
溶融燃料  
サンプルピット

	溶融状態	凝固状態
燃料		
炉内構造物		

ペDESTAL内部への溶融物広がり・蓄積予備解析  
(色は成分を表す。ペDESTALへ落下したデブリの詳細な組成成分分布を得られる見通しを得た。1F炉内状況評価の不確かさ低減へ向けた貢献が期待できる。)

【成果・アウトカム】炉内状況の詳細解析におけるJUPITERコードの適用性を確認した。制御棒溶融挙動やペDESTAL内部への炉内溶融物広がり・堆積に関して、炉内状況把握精度の高度化に向けた知見を得られる見通しを得た。査読付き論文10件

【今後の予定】燃料デブリの組成に対して重要な各種物理モデルの導入の検討及び、得られたデータをもとに再臨界可能性の評価を実施 27





## 事故進展シナリオに係る基盤研究 (2-2) 1Fプラントデータの分析

【実施内容】燃料デブリ分布とその性状に関わる不確かさ低減を目的として、1Fプラントデータの詳細分析とシビアアクシデント解析コード（SCDAPSIM）による解析を実施、1～3号機の事故進展を詳細評価した。

### 1Fプラントデータの詳細分析

<3号機データ分析の例>

### SA解析コードによる解析評価

<2号機事故進展解析の例>

1～3号機事故進展を評価

【成果・アウトカム】 2号機と3号機の燃料デブリ熱条件の差(3号機>2号機)及びそのデブリ特性への影響を予測し、IRID事業における「炉内状況推定図」に重要知見として提供。IRID事業実施項目(3)との連携により、**H30年度理事長表彰「開発功績賞」受賞、他に学会発表3件**

【今後の予定】 1F廃炉推進研究に引き継ぎ、炉内状況把握の精度向上に貢献



## 事故進展シナリオに係る基盤研究 (安全研究センターと連携) (3) 構造材・圧力容器の挙動評価

【実施内容】1F(2,3号機)圧力容器内外のデブリ・構造材状況把握の高度化のため、下部ヘッド破損挙動予測手法を高度化する。特に、**超高温下の材料データベースの拡充、クリープ破損評価法の開発、核・熱流動・構造連成シミュレーション技術の開発**を行う。

高温引張試験機により拡充した超高温下での材料データベースを用いて、破損評価法を提案・検証

下部ヘッドに堆積した溶融燃・材料の加熱に伴うアブレーション挙動を予測する手法を開発

Kachanov基準による破損評価法

$$D = \int_0^t \dot{D}(t) dt$$

$D = 1$ で破壊

◆	1000°C, 12.6 MPa
▲	1000°C, 17 MPa
■	1000°C, 19 MPa
◆	1200°C, 4.5 MPa
▲	1200°C, 4.95 MPa
■	1200°C, 5.97 MPa
◆	1300°C, 2.27 MPa
▲	1300°C, 2.61 MPa
■	1300°C, 3.15 MPa

破断時間(予測)(h)

クリープ変形を伴う破損評価法の検証例

【成果・アウトカム】 高温域まで拡充した材料データベース等を用いて、クリープ破損評価法・アブレーション挙動予測手法を開発し、炉心溶融時の下部ヘッド破損挙動評価手法を高度化。査読付論文5件

【今後の予定】 下部ヘッド破損部から流下後の格納容器内拡散挙動評価手法の高度化に向けて、核・熱流動・構造連成解析手法を構築。⇒原子力安全基盤研究への展開



## 事故進展シナリオに係る基盤研究 (4) FP化学挙動評価技術開発・ホウ素の影響評価

【実施内容】 SA解析コードに適切なモデル/知見を提供し、1F炉内におけるFP分布の高精度化/精緻化に資するため、**FP化学挙動を評価してデータベースを構築する。**

継続的安全性向上、事故対策高度化等へも反映

課題: 大きな不確かさの低減:  
① FP化学挙動の取扱いがほとんど無い  
② 解析(空間)分解能低く局所効果考慮不可

FP放出移行再現実験・解析技術を開発し、FP化学データベースを整備

シビアアクシデント(SA)総合解析コード等による評価

1F-FP炉内分布

FP化学挙動データ/モデル/知見

(※1) 化学反応速度定数、FP化学モデル、エアロゾルモデル

FP化学データベースECUME構築

炉心～建屋における放出移行時のFP化学挙動・エアロゾル挙動の再現実験と解析を行い、Cs-I-Mo-B-O-H系のFP化学挙動データベース/モデル(※1)を構築

FP挙動に関する基礎知見

(※2) CFDをベースとして化学モデルを組み込み、FP挙動を詳細空間分解能で評価。再現実験の解析にも使用。

FP挙動詳細解析ツールCHASER開発(※2)

FP放出移行再現実験装置: TeRRa

FP化学挙動を解析

化学反応・エアロゾル挙動解析

データベースを整備

反応式	正反応		逆反応		
	A	n	A	n	A
$HO + CsI + M \rightarrow I-CsOH + M$	2.2295E+12	1.00	0.00	2.7170E+13	24.34
$I-CsOH + M \rightarrow I + CsOH + M$	2.7170E+13	0.00	21.68	2.2295E+12	1.00
$IO + HI \rightarrow I2 + HO$	1.0192E+07	0.68	61.14	2	
$I2 + CsOH + M \rightarrow HOI-CsI + M$	3.0808E+12	1.00			

化学反応データベース

再現実験技術を確立し、試験結果を解析することにより、セシウム、ヨウ素、ホウ素等を含む気相中におけるFP化学データベース(第1版)を構築

【成果・アウトカム】 SA解析コードによるFP評価の不確かさ低減により、安全・適切な1F廃炉計画策定に貢献(査読付き論文16件)、IRID事業のFP分布図に知見提供(前述)、国際協力(TCOFF)に重要知見提供。

【今後の予定】 FP化学データベース拡充を継続 ⇒ 原子力安全基盤研究への展開、国際協力重要課題

30

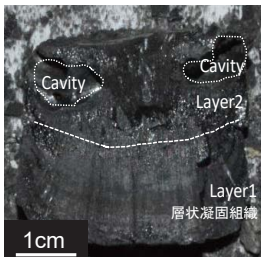


## 事故進展シナリオに係る基盤研究 (5) 溶融コリウムの凝固挙動評価

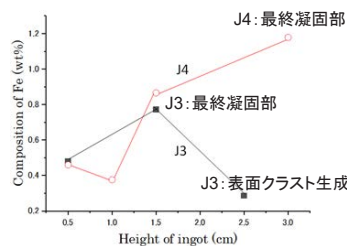
【実施内容】 燃料デブリ性状評価の精度向上のため、**溶融コリウム凝固試験**によるデータ拡充と、その知見に基づく**材料科学的な凝固挙動解析**手法開発を実施する。

実施内容① 溶融燃料の凝固試験評価

U-Zr-Gd-Fe-FP-O凝固試験



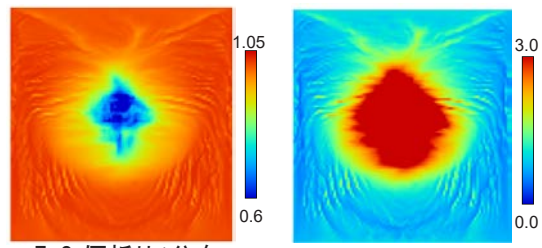
試料断面



Fe偏析状況

実施内容② 凝固偏析解析

UO<sub>2</sub>-30wt%ZrO<sub>2</sub>-10wt%FeO 凝固解析  
壁面4方向からの冷却



ZrO<sub>2</sub>偏析比\*分布  
\*: 最終濃度/初期濃度

FeO偏析比分布

最終凝固部での、キャビティ生成、Feの濃化を確認

凝固後期部での、FeOの濃化を確認

⇒ 英文論文2件執筆中(凝固試験、及び凝固解析モデル)、平成30年度末までに投稿予定

【アウトカム】 燃料デブリの徐冷時におけるキャビティ発生及び偏析挙動評価精度の向上  
⇒ 取得した知見をIRID事業に提示。また、チェコとの原子力研究協力モデルケース。

【今後の予定】 試験データ精査、及び多元系燃料デブリ凝固解析モデル妥当性評価

31



## METI事業 「シビアアクシデント時の燃料破損・溶融 解析手法の高度化 (H28-32年度)」

32



### 背景・ねらい

- ✓ 経産省の軽水炉安全・人材育成ロードマップで、安全解析手法の高度化は重要度◎と評価された。特に、設計基準を超える事象 (DEC) について、解析コードの高度化と検証試験等による基盤知見の継続的な拡充が重要と評価された。併せて、解析コードをメンテナンスし、知見を継続的に補充する人材の確保・育成の重要性が指摘された。
- ✓ 顕在化している課題とは、
  - BWR燃料集合体のDEC条件での挙動に関する知見の不足
  - TMI事故に基づく典型的事故条件と異なる、非典型的な事故条件 (1F事故で顕在化) での事故進展に関する知見の不足
  - 新型燃料 (事故耐性燃料等) のDEC条件での挙動に関する知見の不足                    等
- ✓ 非典型的な事故条件の例・・・水蒸気枯渇条件での燃料溶融 (Unit-2)、下部プレナムでの燃料デブリの不完全な成層化と相分離 (Unit-2,3) と固液混合物のペDESTAL移行 (Unit-3)、等。 #ただし、いずれも現状の観測に基づく推定。
- ✓ 現状のシビアアクシデント解析コードに組込まれている簡素化モデルでは、非典型条件について妥当な評価を行うことができない。非典型条件の解析では、現象論に立ち戻り、適切な知見拡充と要素モデル・データベース・解析コードの開発が肝要。

➔ 現行シビアアクシデント解析手法に対し、補完的に用いる現象論的な解析・評価手法の整備

33



# 事業の全体概要

## シビアアクシデント (SA) 解析コード

MAAP：産業界、MELCOR：規制  
 ASTEC：欧州（次世代）  
 SAMPSON：日本（次世代？）

主にTMI事故の知見等に基づいて設定された、**典型的な事故進展に関する総合的解析**  
 ・熱水力解析が中心、燃料溶融・破損解析プロトタイプシナリオに対する**簡素化モデル**  
 ・**典型的条件での総合的解析の条件では**、燃料溶融・破損事象の機構論的な解析の重要度は小さいとのコンセンサス

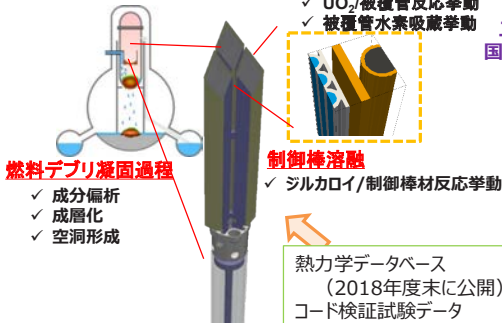
実際の事故では事故収束・遅延に向けて努力がなされ、様々な特殊条件で事故進展する可能性がある（1F2号機の水蒸気枯渇条件など）。規制委員会でも、規制項目ではないが材料の詳細特性について質疑がなされている（山中委員の水素吸蔵に対するコメントなど）。**簡素化モデルは、典型的でない条件の事故解析には適さない。起こりうる非典型条件についても、現象を理解し、対策を検討できるツールが必要。併せて、現象を深く理解することで、1F事故知見を安全文化の適切な醸成に向けて維持・継承できる（SAアーカイブ）。**

### プロトタイプ

**燃料破損・溶融詳細解析コード** 2018年度：ベータ版開発

機構論に基づいた要素過程モデルを組み込んだ  
 集合体レベルでの解析

- ✓ 起こりうる特殊な事故条件も解析可能
- ✓ 典型的事故条件からのずれの評価



ユーザー会議  
 国際機関委員会  
 でのレビュー

### 実用化

2019年度～：成果展開を通じた解析コード高性能化  
 具体的な解析例題の提示

#### 産業界等への成果展開

国内ニーズ  
 詳細解析コード\*：燃料製造メーカー、研究機関  
 熱力学データベース：日立GE、エネ総研、大学  
 \*現在、電力は担当者レベルで活用検討中

国際ニーズ  
 燃料溶融モデル：NRC/SNL（米国）  
 （改良MELCORへの一部組み込み）  
 下部ヘッド凝固・破損モデル：SAFEST（欧州）  
 （ASTEC要素モデルの高度化）

#### SAアーカイブ事業との連携（人材育成・技術継承）

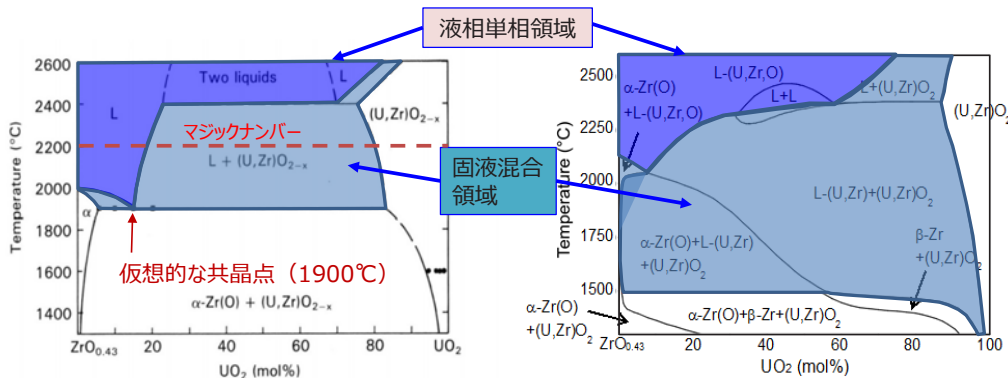
特殊な事故条件での事象を含めて、  
 体系的な技術解説資料作成への知見提供  
 SAを視覚イメージできる教育研修ツールとしての情報提供



## (参考) 現行の燃料/被覆管の共晶溶融モデルの適用範囲

- **現行のUO<sub>2</sub>/Zry共晶溶融モデル**（実反応と異なる仮想状態図に基づく）では、完全に液相化する領域は、平衡状態図と概ね一致する。しかし、**固液混合領域の範囲が大きく異なる**。従って、固液混合状態が影響する現象に対する解析精度が低い（破損燃料の移行、成層化、凝固、SA手前で事故が食い止められたケース、等）。
- また、現行共晶モデルでは共晶温度1900℃となるが、これは大型模擬試験の観測結果と整合しないため、**理論的根拠に基づかないマジックナンバー**約2200℃が、シビアアクシデント解析コードに広く組み込まれている（MAAP、MELCOR、ASTEC、SAMPSON、等）。

➔ **本事業成果（モデル・データベース）は、米国SNL（MELCOR）、仏国IRSN（ASTEC）、日本IAE（SAMPSON）等から、それぞれのSA解析コードの高度化に向けて、高い興味を示されてる。**



共晶溶融モデル（仮想状態図、簡素化モデル）

平衡状態図（機構論モデル）





## 開発スケジュール

年度	H28	H29	H30	H31	H32
フェーズ	プロトタイプコード			実用化（検討中）	
集合体レベルでの燃料破損・溶融詳細解析コードの整備	予備検討	モデル・熱力学データ組み込み		モデル・熱力学データ拡充、改良	
燃料破損・溶融の要素過程解析モデルの高度化	要素過程モデル高度化			要素過程モデル改良	
熱力学データベースの高性能化と拡充	熱力学データ高性能化・拡充			熱力学データ拡充	
詳細解析コードの整備に向けた知見の拡充	予備試験	検証データ取得		検証データ拡充	

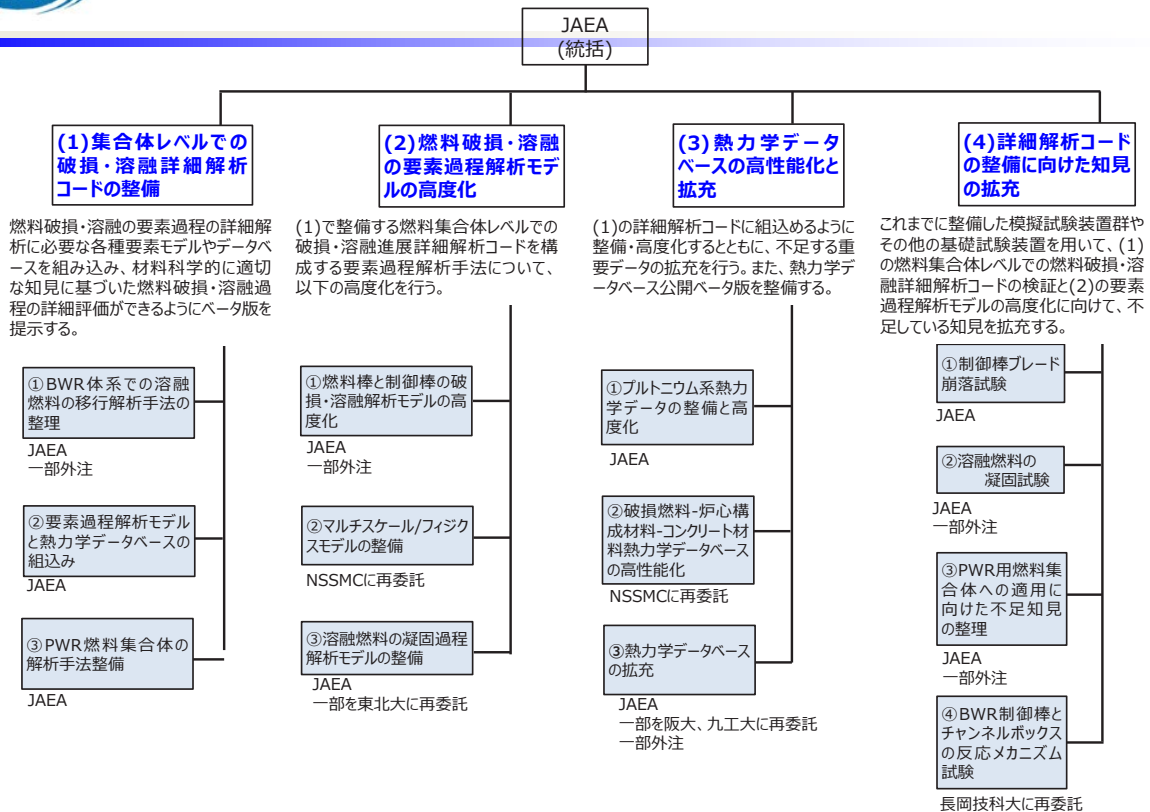
▼ベータ版公開 ⇒ ユーザー会議

▼SNL、IRSN等と組み込みに向けた情報交換

▼汎用解析コード公開



## 実施項目







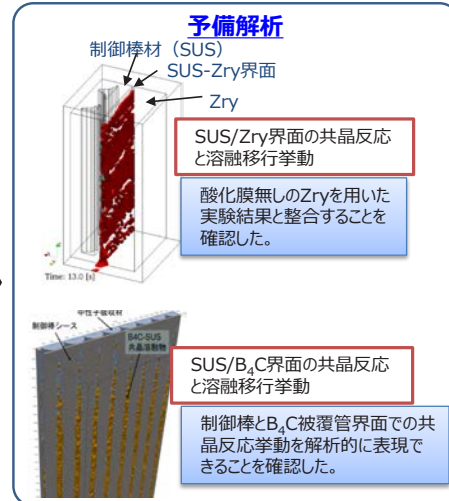
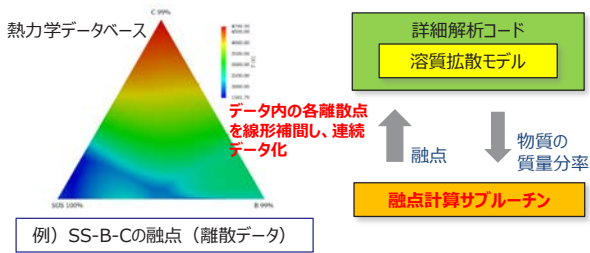
## (1) 集合体規模での詳細解析コードの開発

機構論に基づく燃料集合体レベルの燃料破損・溶融詳細解析コード(JUPITERコード)\*1整備

- ・ 3次元多相多成分熱流動解析コード
- ・ 複数成分からなる構造物の溶融・凝固、及びその流動挙動を流れの支配方程式を用いて機構論的に予測可能
- ・ 共晶反応など化学反応を要素モデルとして達成可能、及び大規模計算に対応

### 詳細解析コード

溶質拡散モデル、および熱力学データベースの組み込み



【成果】 非典型条件での燃料・制御棒の破損・溶融挙動を解析可能な、材料科学モデルに基づく**詳細解析コード (ベータ版) の公開**。査読付国際会議発表予定 (1件)。

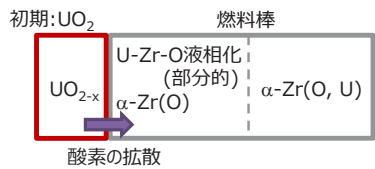
【今後の予定】 ユーザーニーズに基づく詳細解析コードの高性能化、**例題集の公開**。

38

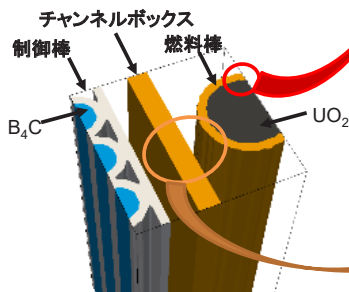


## (2) 燃料破損・溶融の要素過程解析モデルの高度化

### UO<sub>2</sub>/燃料棒溶融挙動



SA解析コードで用いられているUO<sub>2</sub>/燃料棒溶融温度での理論的根拠を提示。



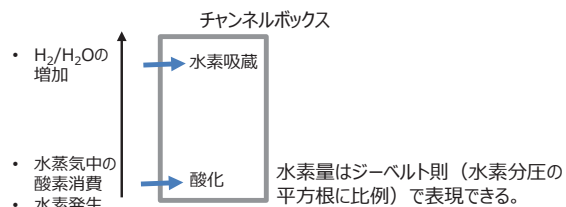
### ジルカロイ酸化膜の減少挙動

溶融制御棒(ステンレス, B<sub>4</sub>C) ZrO<sub>2</sub> チャンネルボックス



ZrO<sub>2</sub>表面の酸素ポテンシャルの低下により、ZrO<sub>2</sub>中酸素がZry中に拡散し、ZrO<sub>2</sub>膜が減少する。

### ジルコニウム合金の酸化・水素化挙動



【成果】 非典型的な条件下での事故進展挙動解析に必要な材料科学反応の要素モデルの整備と詳細解析コードへの組み込み。**論文投稿予定 (1件)**。

【今後の予定】 ユーザーニーズに基づく要素モデルの高度化、**例題集の公開**。

39



### (3) 熱力学データベースの高性能化と拡充

• **プルトニウム系**

PuO<sub>2</sub>とコンクリートの主要成分であるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の高温化学反応データ取得  
B<sub>4</sub>C存在下で、PuO<sub>2</sub>はAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と反応しPuAlO<sub>3</sub>を生成

• **破損燃料-炉心構成材料-コンクリート系**

核燃料データベース (JAEA) ならびに新日鐵住金のスラグデータベースを元に構築した、破損燃料及びコンクリートの主要成分酸化物 (UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系) とステンレス系酸化物 (Fe-Ni-Cr-O系)の熱力学データベース整備

• **BWR制御棒材とジルコニウムに対する酸素等の影響評価**

LOCAを超え、SAの手前の条件で最も材料科学的に重要である、BWR制御棒材とZrに対する酸素、水素、窒素 (Zr-Fe-O、Zr-Cr-O、Zr-Ni-O、Zr-O-H) などの影響評価

• **PWR制御棒材**

(Ag-In-Cd)-(Zr、あるいはステンレス鋼成分)の熱力学データの整備

【成果】原子力機構HPにおける**熱力学データベースの公開**。OECD/NEAのTAF-IDプロジェクト (国際汎用データベース) への**JAEA知見の反映**。

【今後の予定】ユーザーニーズに基づく熱力学データの拡充。評価事例集の公開。



### (4) 詳細解析コードの整備に向けた知見の拡充

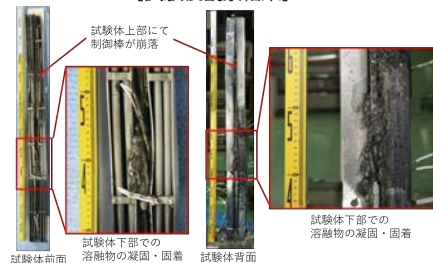
**凝固モデルと妥当性確認試験**

制御棒/シリカロイ反応モデルに対する詳細解析コードの検証データとして、燃料集合体レベルで水蒸気量や昇温速度、初期酸化膜の影響データを取得。

- 初期酸化膜により制御棒とチャンネルボックスの共晶は起きず、制御棒が先行溶融することを確認。



【試験後観察結果】

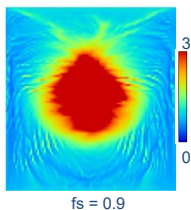


**凝固モデルと妥当性確認試験**

FeO偏析比(濃度/初期濃度)分布 (100mm x 100mm、上下左右4方向から冷却した計算)

成分: UO<sub>2</sub>-30wt%ZrO<sub>2</sub>-10wt%FeO

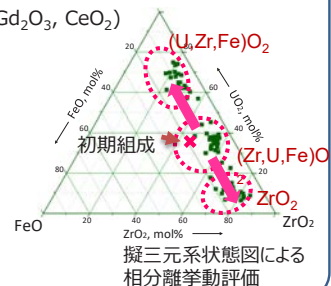
- 凝固進行とともに液相中のFeO濃度上昇。液相中のFeOは密度差により上部に流動、偏析する。
- 最終凝固部(右図では中心部)でFeO偏析が認められる。
- 凝固速度が速く、固液共存領域での対流が小さいほど偏析は抑制される。



fs = 0.9

成分: UO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, FeO, B<sub>4</sub>C  
FP酸化物(Cs<sub>2</sub>O, SrO, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>)  
冷却速度: 急冷、約5°C/min

- 生成相は状態図とおおよそ一致しており、(U,Zr)O<sub>2</sub>相、ZrO<sub>2</sub>相へFeOが固溶することを確認。
- 遅い冷却速度では(U,Zr)O<sub>2</sub>(ウリッチ)相が凝固初期部で成長し、全体に広がっていた。



【成果】試験データによる詳細解析コード (ベータ版) 及び要素モデルの妥当性・検証。試験データの論文投稿。**原子力学会誌論文投稿 (1件)**。

【今後の予定】詳細解析コード検証・妥当性データの取得を継続。国際協力への展開。



## 成果の活用

### ➤ 国内ニーズ

- ① SAの体系的な技術解説資料作成、SAをイメージできる実習・実験プログラムへの知見提供  
⇒ 経産省受託事業：SAアーカイブスの整備

### ➤ 国際ニーズ

- ① 現行SA解析コード（MELCOR、ASTEC、SAMPSON）の燃料溶融モデルの高度化への知見提供  
⇒ NRC/SNL、IRSN、IAEなどと、燃料破損・溶融挙動モデルの適切な単純化と機構の要素モデルのSA解析コードへの組込みについて情報交換開始
- ② 現行SA解析における共通課題（例：下部ヘッド破損モデル）への適切な境界条件（試験データ）の提示

**【方針】** ベータ版公開（H31年度機首）、ユーザーリクエストに対応しつつ、具体的な解析例題を公開・拡充し、実用化を進める。商業的にも成功している、材料科学解析コード（Thermocalc、FactSage、MICRESS等）や熱力学データベース（SGTE、malt2、TAF-ID、NUCLEA等）などの開発方針に準拠。

#一部不完全であっても、例題集を付属して、ベータ版公開を優先し、ユーザー視点で例題集の拡充、要素モデル・データベースの高度化を行う。

**【アウトカム】** 材料科学的根拠に立脚した燃料集合体レベルの燃料破損・溶融詳細解析コード（ベータ版）の公開（H31年度期首予定）、原子力学会誌1件（査読中）。  
事業で実施した大型模擬試験装置の整備と試験に関し、**H30年度理事長表彰（創意工夫功労賞、特賞）受賞。**

**【今後の予定】** 詳細解析コード・要素モデル・熱力学データベースの公開と高度化。  
外部ニーズに対応した例題集の整備・拡充、設備・コードの共同利用。

42



## 受賞・著作・国際協力・他

43



## 理事長表彰 創意工夫功労賞 特賞 (H30)

【件名】「1F事故を想定した制御棒破損機構解明手法の考案」

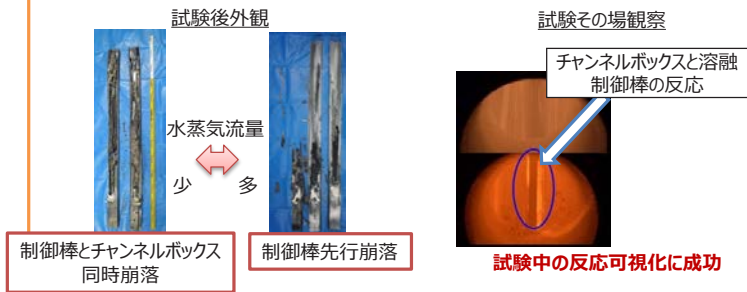
【業績の内容】

福島第一原子力発電所事故では、従来想定された典型的事故進展と異なる事象が進んだと推定されている。起こりうる非典型条件での燃料破損現象を解明するために、国内外に類をみない装置群(「制御棒ブレード破損試験装置」、「レーザー加熱装置」)を開発し、**廃炉国際共同研究センター(CLADS)の多目的試験棟(富岡地区)**に設置・整備した。本装置群の有用性・革新性に着目した欧州安全研究機関群との情報交換により、**SAFEST(Severe Accident Facilities for European Safety Targets)での研究協力を実現し**、機構の研究力を国際的に示した(欧州ニーズでの富岡施設利用に向けた第一歩)。BWR体系での燃料破損・溶融進展における要素過程モデルの構築や解析コード検証データとして活用できるように、SAの状況を視覚的にイメージ化できるようにした。

廃炉国際共同研究センター  
多目的試験棟内



### 試験データの例 - 水蒸気流量による制御棒破損の違い



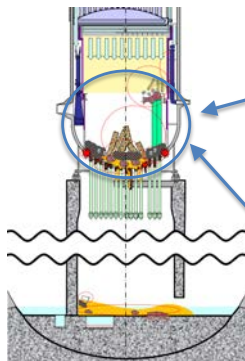
## 理事長表彰 研究開発功績賞 (H30)

【件名】「プラズマ加熱試験と事故進展評価による1F炉内状況の確定」

【業績の内容】

福島第一原子力発電所(1F)におけるデブリ取出し初号機と工法選定が平成30年度に予定されており、これに向けた**燃料デブリ分布など炉内状況の把握は喫緊課題**である。このような状況を踏まえ、機構に対して、IRID事業「総合的な炉内状況把握の高度化(平成28-29年度)」を総括し、廃炉PJに対して有効に活用できる情報提供が要請された。特に、調査困難で、かつデブリが相当に残留していると推定される**2、3号機の圧力容器(RPV)内部の推定・評価精度の向上**については、外部から機構に対する高い期待があった。そこで、事故時プラントデータの詳細解析と大規模模擬試験などの知見を組合せ燃料崩落時の炉心エネルギーを評価するという画期的な手法を考案し、炉内状況推定図に知見を反映した。

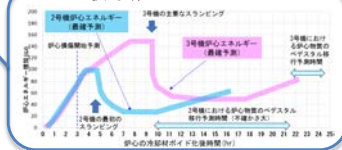
2号機 炉内状況推定図



模擬燃料集合体破損試験



最確炉心エネルギー



受賞の中心メンバー(機構+外部機関の連携)  
(この他、東芝、日立GE、大学関係者も参加)





## 特筆すべき成果物・著作

- I. Sato et al., Invited lecture, NUMAT2018, Seattle, US, 2018.  
→ IRID事業成果の公開
- M. Kurata et al., Phenomenology of BWR fuel degradation, J. Nucl. Mater. (2018).  
→ JNM誌で2018年から開始したレビュー論文企画の第一号論文
- M. Kurata, M. Osaka et al., Chapter 15 -Chemistry of Severe Accident, Advance of Nuclear Fuel Chemistry, Elsevier (2019) (in print).  
→ 最新の核燃料化学に係わる国際共同著作で、シビアアクシデントの化学の章をJAEA専門家が主著
- 永江、山下、白数、他、機構論的な集合体レベルでの燃料溶融解析ツール・データベース（ベータ版、H30年度末予定）
- K. Passamemetoglu, M. Kurata et al., State-Of-The-Art of Accident Tolerant Fuel for LWRs, OECD/NEA report (2018).

46



## 国内外との研究協力

- (1) 事故時熱水力挙動評価
  - 北大との共同研究を実施。
- (2) 事故時の燃料損傷・溶融評価
  - 筑波大に検証データ取得のための試験を委託。
- (4) 放射性物質挙動評価
  - 阪大・福井大・北大と、燃料中のFP物理化学状態評価に係る共同研究実施、及び学生受け入れ。
  - 仏国CEAと協力協定のもと、CEAのホット試験装置を用いたFP放出移行実験と解析に関する研究協力テーマを検討中。
  - フィンランドVTTと協力協定を締結して研究員を受け入れ、FP実験データのベンチマーク解析を実施（H29年度）。
  - 長岡技科大とのFP化合物ラマン分析データベース整備に関する共同研究を実施中。また、学生を受け入れホウ素影響に関する実験を実施中。
- (5) 溶融コリウム凝固挙動評価
  - チェコCVRとの協力協定の下、CVRにてコリウム凝固試験を実施（H28-29年度）。

また、GLADS補助金事業に向けて、水相を介したソースターム研究（東北大）、下部ヘッドでの燃料溶融解析モデル（東工大）などの予備検討をスタート。

47



## 国外との研究協力（OECD/NEA）

### ➤ JAEA/CLADS主導で2個のNEAプロジェクトを運営

- ① TCOFF（Thermodynamic Characterization of Fuel Debris and Fission Products based on Scenario Analysis of Severe Accident Progression at FDNPS）プロジェクト期間：2017.6-2019.12
  - **1F事故条件を参照**にした、破損燃料とFPの**材料科学的・熱力学的知見・データベースの高度化**
  - 高度化した材料科学的知見に基づく、**燃料破損・FP挙動要素反応モデルの高度化**
  - これらの材料科学的な知見に基づく、1F燃料デブリやFPに関する、今後の**デブリ取り出しに向けた材料科学的な課題と解決策の検討**
  - 参加機関・・・CVR(チェコ)、CEA,IRSN(仏)、KIT(独)、KAERI(韓)、デルフト大(蘭)、NITI,KRI,IBRAE,SPSU(露)、KTH,SSM(スウェーデン)、PSI(スイス)、JRC(EU)、NRC(米)、電中研、東工大、JAEA(日) JAEAはテクニカルアドバイザーとして、TCOFFタスクの推進、国内機関とTCOFFメンバーの連携を担当。プロジェクト議長：倉田デビジョン長。
- ② TAF-ID（Thermodynamics of Advanced Fuels –International Database）プロジェクト期間：2011.6-2020.12
  - **国際汎用熱力学データベースの共同開発**（先進燃料及び軽水炉破損燃料及びFPが対象）
  - 各国が提供したニーズと要素知見に基づき、プロジェクトで雇用した**専従技術者によるデータベース整備**
  - プロジェクトで雇用したポストドク研究員による軽水炉破損燃料に係わる重要不足データの取得
  - 参加機関・・・CEA(仏、議長国)、DOE(米、副議長国)、NNL(英)、UOIT(加)、KAERI(韓)、デルフト大(蘭)、JRC(EU)、電中研、JAEA(日) JAEAは日本代表機関として、TAF-IDタスクの推進担当。

48



## 国外との研究協力（SAFEST）

### ➤ SAFEST側の要請により、2018年に加盟

SAFEST（Severe Accident Facilities for European Safety Targets）プロジェクト期間：2015.1-2018.12

- 溶融燃料挙動の解析モデル整備・知見拡充に向けた、**試験設備の有効利用**
- 欧州各研究機関の試験設備をリスト化し、EDFなどのユーティリティや、IRSNなどの安全研究機関との、ユーザーニーズとの効果的なマッチングを行う。
- 欧州安全研究設備群の1F廃炉基盤研究への展開、CLADSの1F廃炉基盤研究設備群の欧州安全研究への展開の双方ニーズに基づき、情報交換を実施。
- 2018.12のプロジェクト終了後には、KIT、KTHなどと共同利用に向けた個別の情報交換を継続予定。
- 参加機関・・・KIT(独、幹事機関)、UJV(チェコ)、CEA(仏)、ANP(独)、KTH(スウェーデン)、SCKCEN(ベルギー)、MTA-EK(ハンガリー)、JRC(EU)、JAEA(日、2018より)
- CLADS設備群の仕様と主な研究成果を提供。欧州-日本の溶融燃料研究ロードマップを共同整備（共同で論文執筆）。CLADS担当者：岡本センター長、倉田デビジョン長、永江GL。

49



## まとめ

- ✓ **廃炉措置ロードマップに即した、廃炉工程への知見提供**について、IRID事業を総括・牽引し、重要マイルストーンである「燃料デブリ取出し方針の決定(H29)」に向けた廃炉工程の基本設計に対し、共通基盤データベースとして、「**炉内状況推定図**」「**FP・線量分布図**」を提供した。これは、事故進展挙動解析の研究成果が、有効に廃炉現場に提供された初めての事例として、国内外から高く評価された。（招待講演、理事長表彰、など）
- ✓ さらに、次の重要マイルストーンとなる「燃料デブリ取出し方法の確定(H30目途)」及び「燃料デブリの取出し」に向け、機構に対する期待が高い「**圧力容器の推定図の高度化**」及び「**中長期研究課題の優先度検討**」に即応して、新たな研究プロジェクトと事故進展挙動解析に係わる分科会を立上げ、研究体制を整備した。
- ✓ **事故進展シナリオの解明に係る基礎基盤研究**については、要素現象メカニズム解明・モデル/データベース整備について5分野で研究進展し、多くの論文執筆を行った。得られた成果は、上述の廃炉工程への知見提供に集約し、推定図の評価に活用した。（論文投稿）
- ✓ **原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究**では、国内外で1F事故で顕在化した研究課題に基づく研究開発が進んでいる。機構/CLADSはこの分野で、経産省受託事業を獲得し、先見的に研究開発を進めており、その成果は、国内外で注目されている。**施設の共同利用、開発した要素モデル・データベースの商用SA解析コードへの組込みと実用化**に向けた情報交換が進んでいる。（国際共同著作、レビュー、理事長表彰、など）



## 廃棄物処理・処分に係る研究開発

平成30年12月26日

福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉国際共同研究センター

1



## 報告の内容

- ◆ ロードマップ、それに基づく計画
  
- ◆ 主要な成果
  - 分析、放射能インベントリの推定
  - 保管
  - 処理
  - 処分
  
- ◆ 参考
  - その他の研究開発
  - 発表・研究協力の実績
  - 実施体制

2





## 中長期ロードマップの方針

- ◆ 廃棄物対策の基本的考え方\* (研究開発に係る箇所抜粋。一部修文)
  - 固体廃棄物の処理・処分の検討を進めていくために、核種組成、放射能濃度等の**性状を把握**することが必要。
  - 発生した固体廃棄物については、その性状を踏まえて安全かつ合理的な**保管・管理**を行う。
  - 固体廃棄物をより安全に保管・管理するため、処分の技術的要件が決定される前に、安定化・固定化するための**処理(先行的処理)**の方法を合理的に選定する手法を構築し、先行的処理の方法を選定する。
  - 固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発を効率的に進めていくため、**性状把握、処理、処分の研究開発の各分野の連携を密にする**。各分野の検討状況や課題を共有し、固体廃棄物の管理全体を俯瞰した上で、必要な研究開発課題を確認しながら進めていく。



2021年度頃までを目処に処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通しを示す。

\* 平成29年9月26日改訂。

3





## 廃止措置等に向けた研究開発の取り組み

- ◆ 第3期中長期計画
  - 東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置及び廃棄物の処理処分に向け、政府の定める「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」(平成25年6月原子力災害対策本部・東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議。以下「廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」という。)に示される研究開発を工程に沿って実施する。また、NDFが策定する戦略プラン等の方針や、中長期的な視点での現場ニーズを踏まえつつ、人材の確保・育成も視野に入れた、燃料デブリの取り出し、**放射性廃棄物の処理処分**、事故進展シナリオの解明及び遠隔操作技術等に係る基礎基盤的な研究開発を廃止措置等に向けた中長期ロードマップの工程と整合性を取りつつ、着実に進める。
  - これらの研究開発で得られた成果により廃止措置等の実用化技術を支えるとともに、廃止措置等の工程を進捗させ得る代替技術等の提案につなげることにより、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等の安全かつ確実な実施に貢献する。また、事故進展シナリオの解明等で得られた成果を国内外に積極的に発信することにより、原子力施設の安全性向上にも貢献する。さらに、専門的知見や技術情報の提供等により、NDF等における廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支援する。
- ◆ 平成30年度計画
  - 放射性廃棄物の処理処分に向け、**処分の安全性評価の信頼性向上**に係る開発、**人工バリア材、廃棄体性能及び分析・測定技術の高度化**開発並びに**放射性廃棄物の保管等に関する安全管理技術**の開発を継続する。

4

**JAEA 廃炉のロードマップと廃棄物に関する研究開発の全体工程**

		H26以前 2014以前	H27 2015	H28 2016	H29 2017	H30 2018	H31 2019	H32 2020	H33 2021	H34年度以降 2022年度以降
1F廃炉の ロードマップ	全体	第1期		第2期 (10年以内)						第3期(30~40年後)
	デブリ取出し	取り出し方針決定▼				▼取り出し方法確定				▼初号機の取り出し開始
	廃棄物処理・処分	基本的な考え方とりまとめ▼				▼処理処分の技術的見通し				燃料デブリの取出し
分析	試料の採取分析、インベントリ評価等	廃棄物試料の採取・分析、インベントリ評価、分析技術開発		採取・分析						
	(4)分析・測定技術の高度化開発	高度化検討	条件の把握	測定条件の最適化、適用性評価						
保管	(5)長期保管方策の検討	2次元プログラムの改良と検証			プログラムの3次元化					
処理	廃棄体化技術の調査・試験	廃棄体技術調査、廃棄体化基礎試験、スラリー安定化		技術絞り込み						
	(3)廃棄体性能の高度化開発	調査・検討	固化技術開発	廃棄体作成試験、閉じ込めメカニズム解明研究						
処分	処分概念の検討	処分概念の特徴把握、新たな処分概念等の検討		海外調査						
	(1)安全評価の信頼性向上に係る開発	モデル等の整備、核種移行評価		予察解析	解析	核種移行評価技術の機能向上				
	(2)人工バリア材の高度化開発	調査・試作	基本性能試験	バリア材収着・拡散試験、容器腐食試験						

 基盤研究開発（番号は当初計画のもの）  
 IRIDを通じた廃炉・汚染水対策補助金による研究開発

**JAEA 研究開発テーマ**

**分析・インベントリ推定**

1. 廃棄物の分析
2. 放射能インベントリの推定
3. 分析技術<sup>a)</sup>
  - ✓ ゼオライトによる長半減期核種の吸着
  - ✓ 構造材料の汚染機構
  - ✓ 難測定核種分析のための化学分離技術
  - ✓ メスバウアー分光による化学状態分析

a) 前ページの「(4) 分析・測定技術の高度化開発」に対応。

**処理<sup>c)</sup>**

7. 水処理二次廃棄物の固化技術
8. 長半減期陰イオン核種の固化
9. ジオポリマー固化における水素の発生
10. セメント固化の物性推定

- ✓ コンクリート系廃棄物除染・処分に係る研究

c) 前ページの「(3) 廃棄体性能の高度化開発」に対応。

**保管**

4. 多核種除去設備スラリーの保管
5. セシウム吸着塔の保管<sup>b)</sup>
6. 放射線分解による水素の発生機構

b) 前ページの「(5) 長期保管方策の検討」に対応。

**処分**

11. 安全評価手法<sup>d)</sup>
12. 化学物質による移行挙動への影響<sup>d)</sup>
13. 人工バリア材料<sup>e)</sup>

d) 前ページの「(1) 安全評価の信頼性向上に係る開発」に対応。  
 e) 前ページの「(2) 人工バリア材の高度化開発」に対応。



## 分析・インベントリ推定

7



## 分析、放射能インベントリの推定に関する主な成果

- ◆ 現在までに約380の試料を分析、データを廃炉・汚染水対策チーム会合に24件報告した。
  - 処分安全上の重要な核種を選定して分析を行い、従来法がない場合には手法を開発して適用した。
  - ウェブで利用可能なデータベースを構築、公開した。
- ◆ 特に、保管上の課題が見出された水処理二次廃棄物に関しては、東京電力の必要に応じて、分析データを適時に提供し、安全対策の実施に貢献した。
- ◆ 分析データを利用して、放射能インベントリを推定するため、核種の汚染挙動を検討し、次のことを明らかにした。
  - 濃度に関して<sup>137</sup>Csとの相関を見出し、これを利用して汚染の過程を表すパラメータ(滞留水や建屋内外の空気への核種の移行割合など)を求める方法を開発した。
- ◆ 廃棄物の情報や分析データが長期間にわたり漸増することを踏まえ、データの増加により変化する統計パラメータを考慮して推定する方法の適用が必要であると考えられた。
- ◆ 分析技術の改良に関し、レーザーアブレーション(LA)-ICP質量分析法の開発を進め、従来法と同等の精度で<sup>107</sup>Pdを迅速簡便に定量することに成功した。また、マイクロチップ分析において、高効率な流路の形状を見出した。

表 発表の実績

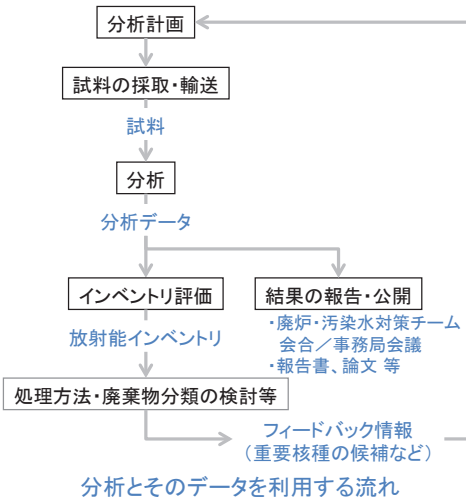
論文	国際会議	国内会議	その他
9*	6	25	18

\* 受理・印刷中の2件を含む。

8

# 1. 廃棄物の分析 - 分析と得られたデータを利用する流れ -

- ◆ 2011年度から廃棄物・汚染物の分析を継続して実施している。
- ◆ 東京電力から入手、また、自ら採取した試料を下記分析施設に輸送し、放射能のほか、研究開発に必要な分析を行っている。
  - 茨城に所在する原子力機構(原科研、核サ研、大洗)、NDC社、NFD社
- ◆ 得られた分析データは、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議にて報告、公開している。
- ◆ 分析の中長期的な計画を検討し、関係者と共有して進めてきている。



分析した試料の数

分類	点数
瓦礫	94
汚染水	130
汚染水処理二次廃棄物	9
可燃物	5
土壌	13
植物	128

分析とそのデータを利用する流れ

# 1. 廃棄物の分析 - 分析データの活用 -

- ◆ 分析データの蓄積に伴い、核種の相関が明らかになりつつある。
- ◆ 分析データを検索できるウェブサイト“FRAnDLi”を作成、本年3月に供用を開始した。データは随時追加している。

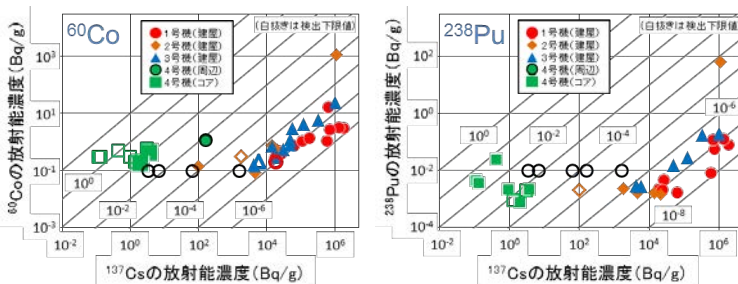


図1 原子炉建屋内及び周辺で採取した瓦礫試料から検出された核種の濃度 ( $^{137}\text{Cs}$ に対するプロット)<sup>\*1</sup>

\*1 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第60回)資料から引用。  
\*2 <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>



図2 分析データを検索できるウェブサイト“FRAnDLi”<sup>\*2</sup>

**アウトカム** 現在までに約380の試料を分析、データを廃炉・汚染水対策チーム会合に24件報告した。また、水処理二次廃棄物の分析データを安定化等の検討のために東京電力へ適時に提供した。濃度に関して $^{137}\text{Cs}$ との相関が見出された。データベースを構築、公開した。

**今後の予定** 分析を継続し、データを蓄積していく。それを元にして、核種の汚染挙動の整理、類型化を進めていく。



## 2. 放射能インベントリの推定 - 解析的なインベントリ推定方法の開発 -

- ◆ 現在分析できない汚染物を含めて、放射性核種の含有量(インベントリ)を推定するために、解析的なモデルの検討を進めている(図1)。

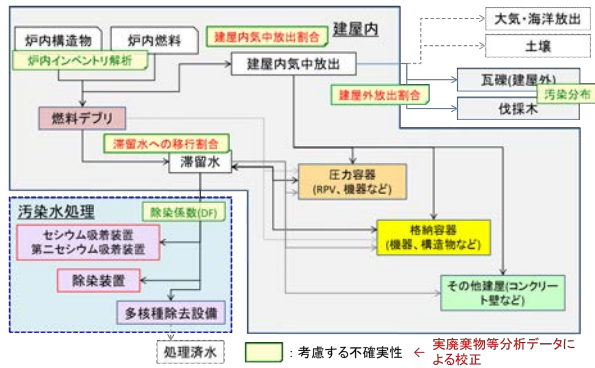


図1 解析的モデルの全体像

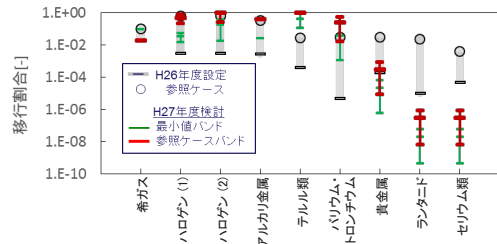


図2 滞留水への移行割合に対して分析値を導入して不確実さを低減し、効果を比較する例

**アウトカム** 汚染の過程を表すパラメータ(滞留水や建屋内外の空気への核種の移行割合など)について、当初は文献値から引用していたところ、分析データを利用して改善し、推定の不確実性を低減できた(図2)。

**今後の予定** 得られた分析データを順次反映しつつ進めている。

## 2. 放射能インベントリの推定 - 汚染ふるまいと分析データの代表性・統計処理 -

- ◆ 分析データをもとに核種の移行ふるまいを検討し、元素の類型化(グループ化)を試みた。
- ◆ 廃棄物の放射能濃度を決定する従来法の適用は困難であるとみられ、新たな方法の開発が必要であるため、従来の頻度分布的な方法によらない方策の探索に着手した。

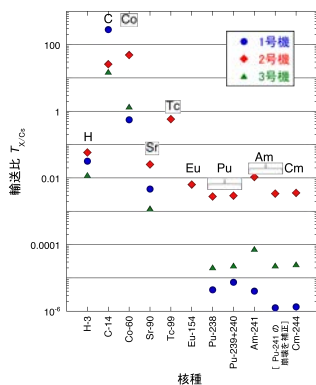
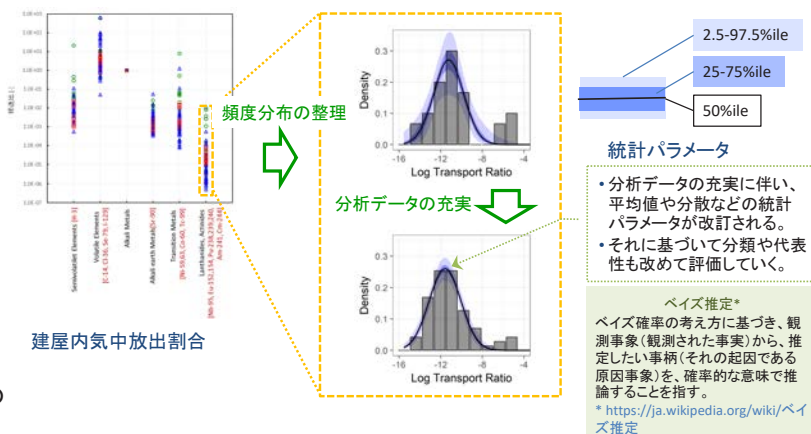


図1 建屋内にて採取した瓦礫(1と3号機の1階、床塗膜(2号機の5階)への輸送比



**アウトカム** 濃度比を規格化した量(「輸送比」と呼ぶ)を用いて類型化が可能であることを見出した(図1)。廃棄物の情報や分析データが長期間にわたり漸増することを踏まえ、データの増加により変化する統計パラメータを考慮して推定する方法の適用が必要であると考えられた(図2)。

**今後の予定** ベイズ(Bayes)統計の援用を検討していく。



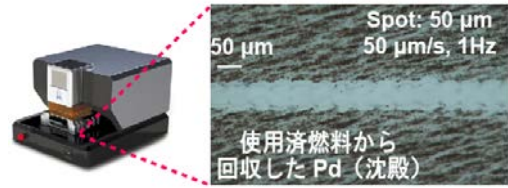


### 3. 分析技術

## レーザーアブレーション(LA)-ICP質量分析による迅速化

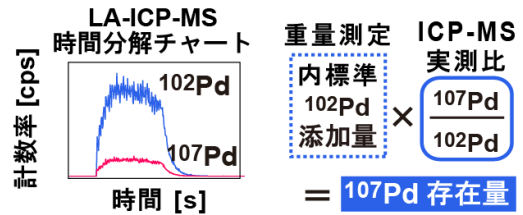
#### 研究開発の目的、目標

- ◆ ICP-MS は、長半減期の核種を分析する上で、放射線測定の測定に比べて、より低い濃度を検出できる場合があり有用である。
- ◆ 廃棄物は固体の分析が中心であり、前処理として必要な溶解操作を省略することが可能となれば、分析を迅速化し、かつ作業者の負担を軽減することができる。
- ◆ このためにLA-ICP-MS の開発が重要である。



#### 実施内容

- ◆ 代表的な難測定核種である  $^{107}\text{Pd}$  を対象として、溶液試料から回収したPd沈殿をLA-ICP-MSで前処理なしで直接測定する手法を検討、実証を進めている。



使用済燃料溶解液から回収したPd沈殿の  
LA-ICP-MSによる直接測定と定量原理

**アウトカム** 使用済燃料溶解液から回収したPd沈殿をLA-ICP-MS測定し、従来法と同等の精度で $^{107}\text{Pd}$ を迅速簡便に定量することに成功した。

**今後の予定** 他の難測定核種分析へ展開を図る。

13



### 3. 分析技術

## - マイクロチップ分析による被ばくの低減 -

#### 研究開発の目的、目標

- ◆ 分析に伴う廃棄物や被ばく低減のために、微小スケール化・自動化に適したマイクロチップ技術が有用である。難測定核種の分析のために高度な化学分離操作が望まれる。

#### 実施内容

- ◆ 吸着樹脂カラムを組み込んだマイクロチップではイオンの吸着率 50%、溶出率 20%と低効率であった(図1)。流路形状を改良した設計・製作を行い、実試料への適用性を検討している。



図1 従来のマイクロチップ  
(流路は幅: 1 mm、深さ: 20 μm、長さ: 8 mm の矩形)

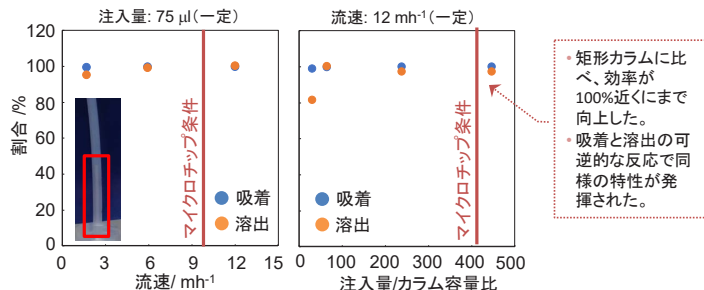


図2 円形に改良した流路の性能  
(内径: 0.3 mm、長さ: 16.5 mmの円形カラム)

**アウトカム** カラム形状が吸脱着効率に与える効果を確認し、円形カラムの採用により可逆的であり、100%に近い高い効率を得られること明らかにした。

**今後の予定** 改良型マイクロチップを設計・製作し、性能を実証し、実試料に適用する。

14



## 保管

15



## 保管に関する主な成果

- ◆ 多核種除去設備からのスラリーの保管に関して、容器 (HIC) のたまり水事象の直接的原因である水位上昇の再現に成功し、スラリー内の気泡発生に伴う水位上昇メカニズムを提案した。この成果は、東京電力により、特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会に報告され、たまり水発生の対策の検討へ適時に反映された。
  - また、より安全性を高める方策として、水素の再結合触媒を改良するとともに、実験と解析によりその基本的な有効性を示した。
- ◆ セシウム吸着塔の管理に関しては、長期間にわたる保管の間に、塔内の残水が蒸発、塩分が濃縮され、容器が腐食する事象が残余のリスクとして考えられる。4分の1規模スケールの実験と解析により、現在の保管方法により腐食環境が緩和される可能性を示す結果が得られた。また、実物を用いた模擬試験により、その傾向を確かめている。
- ◆ 水素発生の安全に関する基礎的な知見として、海水中のハロゲン化物イオンによるOHラジカルの捕捉反応を明らかにするとともに、吸着塔の3次元のγ線スキャン手法を計算科学的に開発した。

表 発表の実績

論文	国際会議	国内会議	その他
2	1	21	4

16



## 4. 多核種除去設備スラリーの保管 - 水素発生に伴う水位上昇事象の解明 -

- ◆ 多核種除去設備 (ALPS) から排出された炭酸塩スラリーの保管容器 (高性能容器; HIC) で発生したたまり水の原因究明に取り組み、模擬炭酸塩スラリーのCo-60 ガンマ線照射試験を迅速に実施し、水素発生による水位変化等を検討した。

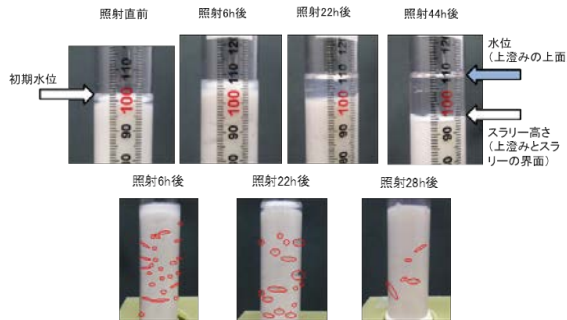


図1 模擬炭酸塩スラリーの照射実験の様子 (8.5 kGy/h)  
水位上昇(上)とスラリー内の気泡の蓄積(下)

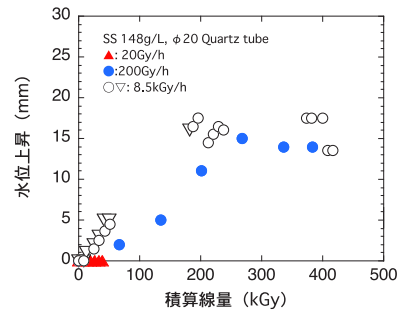


図2 積算線量と水位上昇の関係  
(固形分濃度 148g/L、室温、大気)

**アウトカム** HIC のたまり水事象の直接的原因である水位上昇の再現に成功し、スラリー内の気泡発生に伴う水位上昇メカニズムを提案した。この成果は、東京電力により、特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会に報告され\*、たまり水発生対策の検討へ適時に反映された。

\* HIC上のたまり水発生原因と対策の検討・実施状況, 第1回特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会, 資料4, 平成27年12月4日。

今後の予定 詳細なメカニズムについて東京電力の要請に基づき検討中。論文の投稿準備中。

17



## 4. 多核種除去設備スラリーの保管 - 水素濃度の上昇を抑制するための水素再結合 -

- ◆ 保管容器内での水素濃度上昇を抑制するため、「無電力で受動的に動作すること」、「装置が簡素で設置も容易であること」等を条件に、水素の再結合反応 ( $H_2+O_2\rightarrow H_2O$ ) を触媒によって加速する技術について、触媒の開発とその有効性の評価を進めている\*。
- ◆ 従来の再結合触媒よりも性能を強化し、耐放射線性を有する軽量、低コストなモノリス型触媒を開発している。

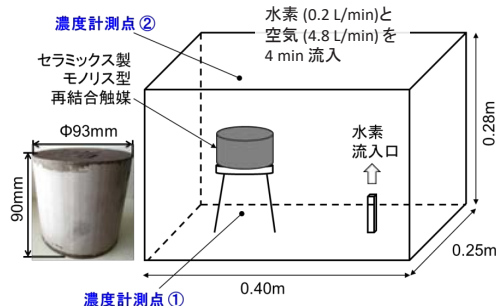


図1 再結合触媒(モノリス型)の有効性を検証する実験の概要\*

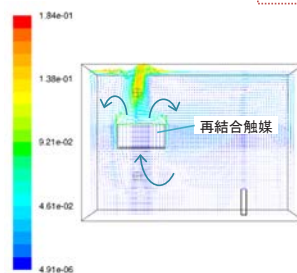


図2 水素流入開始から800秒後の水素速度分布の解析結果

\* 水素濃度の経時変化の解析結果は水素導入時には過大に評価しているものの、以後は実験値をよく再現できた。

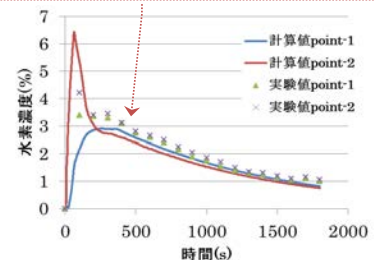


図3 水素濃度の経時変化

\* 井上雅弘らの報告(“触媒を用いた室内の水素集積防止に関する研究,”安全工学研究発表会(2016)した試験データを利用している。

**アウトカム** 水素の再結合触媒を改良するとともに、実験と解析によりその基本的な有効性を示した。成果は、東京電力の廃棄物の保管管理計画に資するよう提供した。

今後の予定 廃棄物保管容器を模擬した小型モデル実験結果のシミュレーションにより、再結合触媒の実機保管容器への適用性の検証を進める。長岡技術科学大学との共同研究として実施していく。

18

### 5. セシウム吸着塔の保管 - 水分の蒸発・残留挙動に関する実規模試験 -

- ◆ 保管中の使用済みセシウム吸着塔は、崩壊熱による水の蒸発と塩分濃縮ともなう容器腐食が懸念される。実物のSARRY吸着塔を用いて、崩壊熱を模擬した加熱試験を行い、残水の蒸発、塩分濃度挙動を調べている。データは、水分蒸発解析コードの検証データとして用いている。

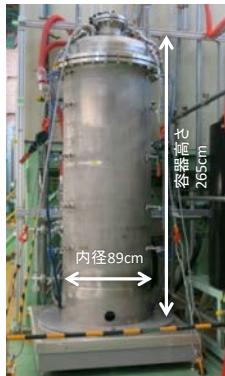


図1 セシウム吸着塔 (SARRY) 試験体

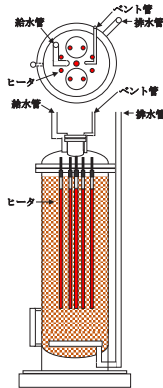


図2 ゼオライトを加熱するヒータの配置

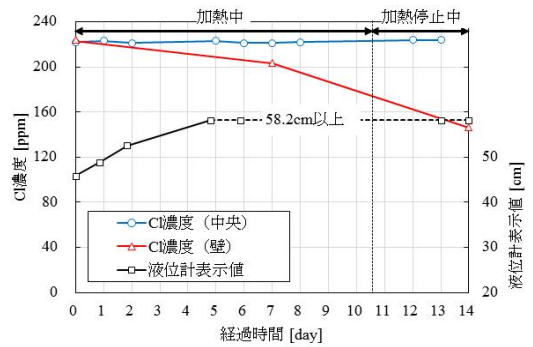


図3 加熱に伴う水位と塩分濃度の変化

**アウトカム** 継続した加熱において容器壁面の残水塩分濃度が低下しており、現在の保管方法により腐食環境が緩和される可能性を示す結果が得られた。H27年度理事長表彰研究開発功績賞を受賞した。

**今後の予定** 容器最深部の塩分濃度低下を確認するため、長期の加熱試験を継続、完了する。

### 5. セシウム吸着塔の保管 - 水分蒸発挙動解析コードの開発 -

- ◆ 長期間にわたり保管を継続するとみられるセシウム吸着塔を対象として、崩壊熱による水分の蒸発と塩分濃縮に伴う容器腐食に対処するため、容器内の水分蒸発挙動を予測する解析コードの開発を進めている。
- ◆ 1/4規模可視化模型試験(電中研実施)のデータを利用して、モデルの妥当性を検証しつつ進める。

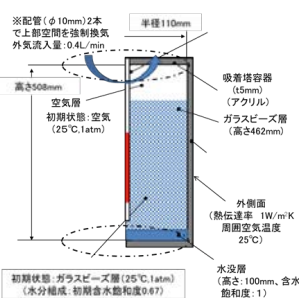


図1 1/4規模可視化模型計算モデル

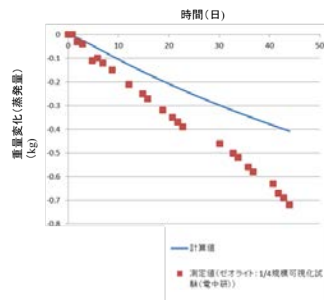


図2 ガラスビーズを充填した場合の試算

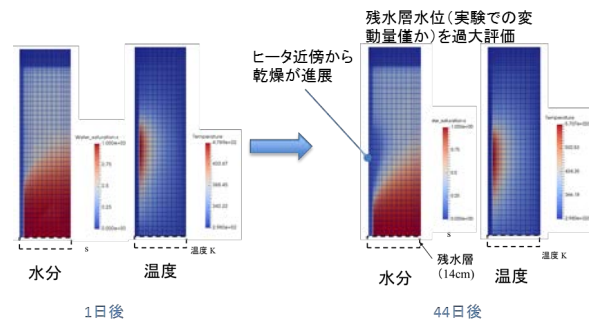


図3 毛管圧力による自由水移動モデルでの試算

**アウトカム** 実験データ(ガラスビーズを充填した単純系)と解析を比較し、ゼオライトに対して蒸発量が小さい可能性を見出した。塔内の水の分布を試算し、データを支持することを確認した。

**今後の予定** ゼオライト中での水分・塩分挙動のモデル化を進めるとともに、プログラムの3次元化を行う。実規模加熱試験条件での計算、及び実機吸着塔での蒸発挙動試算へと進めていく。電中研との共同研究を継続する。





## 6. 放射線分解による水素の発生機構 - 水素発生等の放射線分解挙動の解明 -

- ◆ 廃棄物水素管理等に有用な科学的基礎となる、複雑系放射線分解モデルの構築(多相多成分系、複合放射線場)を目指し、定常・パルス照射実験及び解析を実施している。また、線量等評価に関して、評価技術提案や放射線環境評価を目指し、計算化学的手法を検討している。

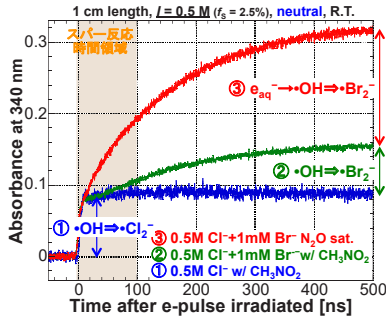


図1 パルスラジオリシス法による海水中のハロゲン化物イオンによるOHラジカルの2段階捕捉の観測(100 ns以降は均一反応)

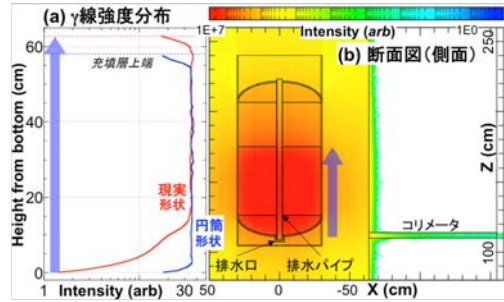


図2 汚染水処理吸着塔(TMI-2のSDSベッセル)の高さ(軸)方向のγ線スキャンニング模擬

**アウトカム** 均一反応計算で解明の困難な、海水中のハロゲン化物イオンによるOHラジカルの2段階捕捉を明確にした。TMI-2の事例を模擬して、廃吸着塔の3次元のγ線スキャンニング手法を計算科学的に開発した。

**今後の予定** 電子ビームやX線照射による放射線分解実験、海水系の反応の塩濃度補正データ取得、水中廃棄体の放射線環境解析を継続して進める。

21



## 処理

22





## 処理に関する主な成果

- ◆ 水処理二次廃棄物への種々の固化技術の適用性を確認し、基礎データを蓄積した。
- ◆ 固化技術を選定する手法の検討に関して、技術調査を進めつつ、検討の進め方をおおよそ取りまとめた。
- ◆ 安定化が困難である陰イオンとなる核種の固化に関して、廃棄物からテクネチウム(VII)を効果的に回収できる条件を見出した。また、セレン(IV, VI)、ヨウ素(V)を水相から効率的に回収する方法を開発した。
- ◆ ジオポリマーによる固化体からの水素発生に関して、水素の発生・拡散・再結合過程を考慮したモデル式により、含水率・形状と水素放出量との相関を説明することに初めて成功した。
  - ジオポリマー技術に関する調査報告書(JAEA-Review)のダウンロード数は5000を超えており、本分野の活性化に貢献した。
- ◆ セメント固化による固化体の性状推測技術に関して、技術のデータを取得、蓄積した。

表 発表の実績

論文	国際会議	国内会議	その他
3*	3	7	1

\* 投稿中の1件を含む。

23



## 7. 水処理二次廃棄物の固化技術 – 種々の固化技術の適用性 –

- ◆ 汚染水の処理で生じた二次廃棄物は、従来、処理の経験がないため、将来の実施に向けて技術の選定を準備する必要がある。国内外の廃棄物処理に適用実績のある固化技術を対象として、模擬試料を用いた固化試験を行い、固化の可能性を確認し、課題を抽出した。(図1、2)
- ◆ また、ジオポリマーとして知られるアルカリ活性化材料(Alkali-Activated Materials; AAM)は新しい技術であり基礎データを継続して取得している。(図3)

廃棄物分類	固化技術						
	セメント	ジオポリマー	ガラス	溶融	焼結	ペレット成形	
スラッジ・スラリー類	AREVA スラッジ	ALPS 鉄共沈スラリー 炭酸塩スラリー					
無機系吸着材	KURION H (ゼオライト)	SARRY IE-98 (ゼオライト)					
	ALPS フェロシアン化合物	酸化チタン	チタン酸塩セメント 固化試料 (充填率40%)	炭酸塩スラリー・ ガラス 固化試料 (充填率20%)	チタン酸塩 焼結・ ペレット成形 固化試料		
	高性能ALPS Sb吸着材	キレート樹脂	チタン酸塩 ジオポリマ 固化試料 (充填率40%)				
	高性能ALPS Csコロイドフィルタ	樹脂系吸着材					
有機系吸着材	高性能ALPS Siコロイドフィルタ						

図1 固化の可能性を検討した対象の廃棄物と固化技術

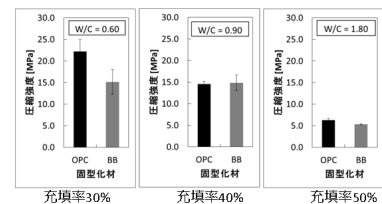


図2 固化技術の評価例(圧縮強度データ)

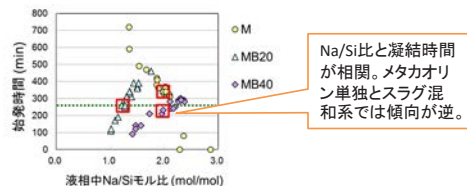


図3 AAM固化のデータ(固化始発時間の例)

**アウトカム** 水処理二次廃棄物への種々の固化技術の適用性を確認し、基礎データを蓄積した。

**今後の予定** 文献調査と実験的な調査を組み合わせ、継続的に実施していく。

24

## 7. 水処理二次廃棄物の固化技術 - 処理技術を選定するアプローチの検討 -

- ◆ 固化技術を選定するにあたり、廃棄物の性質と処理技術の特性を考え合わせて、多角的な評価が可能な手法が必要である。そのようなアプローチの確立を目標として、評価すべき指標などを検討している。

図1 廃棄物性状、固化技術の整理に関するイメージ

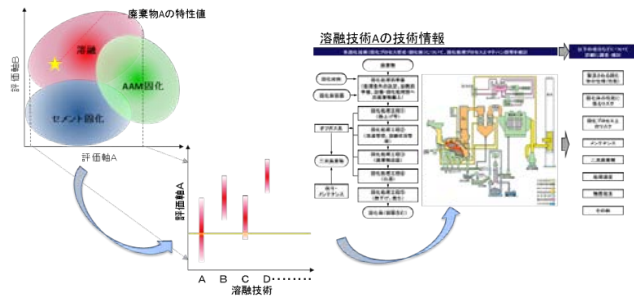


図2 廃棄物の性質と固化技術の特性を組み合わせて評価する流れ(案)

**アウトカム** 調査を進めつつ、検討の進め方をおおよそ取りまとめた。

**今後の予定** 技術選定に係るニーズを調べ、これを加味した上で、選定に必要となるデータの抽出、影響の評価等の実施の方法を検討していく。

25

## 8. 長半減期陰イオン核種の固化 - 使用済み吸着材からの Tc 回収 -

- ◆ 陰イオン形となる長寿命放射性核種 ( $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{79}\text{Se}$ ) を対象に、使用済み吸着材からこれら核種を回収・濃縮し固化する方法を開発する。

$^{99}\text{Tc}$   $2 \times 10^5$  y       $^{129}\text{I}$   $1.6 \times 10^7$  y       $^{79}\text{Se}$   $3 \times 10^5$  y

- 第1の選択的回収濃縮では、汚染水処理施設の使用済み吸着材から核種を選択的に回収し濃縮する。
- 第2の転換では、1で濃縮した核種を固化に適した化学状態(例えば無機固体)に転換する。
- 第3の固化では、2で転換した核種を安定に固化する。

- ◆ Tc の還元・共沈法による転換技術開発
  - Tc(VII)の模擬元素としてRe(VII)を用いた検討を行い、還元反応により沈殿する条件を検討した。
  - Tcを用いて実証を進めた。

**アウトカム** 弱酸性～中性水溶液中での Mn(0)による還元により、大気条件、還元条件のいずれにおいても、Tc(VII)を効果的に回収できることを見出した。(図)

**今後の予定** Tc に関する成果を取りまとめた論文の執筆を継続し、完成させる。その他、陰イオンの選択的回収法の開発を継続する。

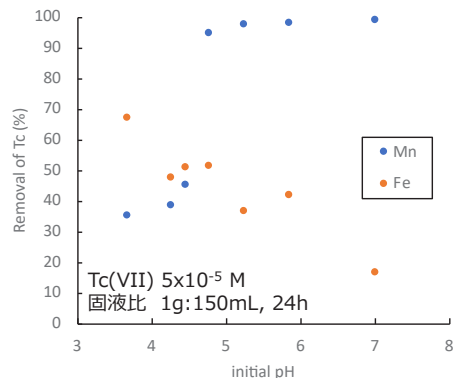


図 大気条件におけるMn(0)とFe(0)によるTc(VII)の還元回収

26



## 8. 長半減期陰イオン核種の固化 - SeとIの回収、固化方法の探索 -

- ◆ Se・Iの共沈法による転換技術開発
  - 陰イオン回収材として、溶解度が極めて低いバライト( $BaSO_4$ )による回収を検討している。
  - 共沈条件を変化させることにより、Se(IV), Se(VI), I(V)の回収率への影響を調べた。

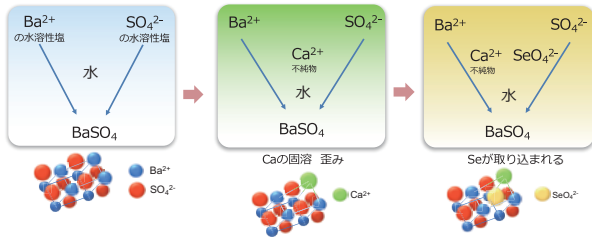


図 バライトに陰イオン種が取り込まれる機構

- ◆ 固化技術開発
  - 近年着目されているジオポリマーは、陰イオン閉じ込め能がないことが実験的にわかっている。
    - 水溶液の形で陰イオンを加えたジオポリマー固化体から陰イオン浸出率が高い。
    - 陰イオン吸着材料であるハイドロタルサイトに陰イオンを吸着させた試料を加えたジオポリマー固化体からの陰イオン浸出率が高い。
  - 陰イオンを取り込んだバライトの純水中浸出試験で陰イオンが浸出し(~16%)、その低減が課題であった。

**アウトカム** Se(IV)、Se(VI)、I(V)を水相からバライト相中に効率的に回収する方法を開発した。また、陰イオンを含むバライトをリン酸イオンで処理すると、陰イオンの浸出が抑制される(~2%弱)ことを見いだした。

**今後の予定** 陰イオンを含むバライトをリン酸ジオポリマーで固化する方法の閉じ込め性能向上を検討する。改良型ジオポリマー固化体は特許出願に向けた準備、安定化機構の検討を進める。27



## 9. 固化体からの水素の発生 - ジオポリマー固化体の検討 -

- ◆ 新しい技術であるジオポリマー固化に関し、水処理二次廃棄物を固化する最適条件を求めため、研究動向を調査した。水素発生等の放射線照射効果を評価する手法を確立し、水素低減策を提示するため、実験と解析手法を検討している。
- ◆ 固化体からの水素放出量を解析的に評価するため、実用的なPRDモデル\*の構築を進めている。

\* 発生 Production、再結合 Recombination、ガス拡散 Diffusion.



図1 ジオポリマー固化体の断面 (ゼオライト粒子を20wt%含有)

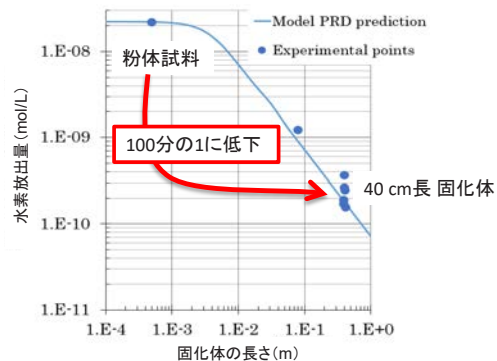


図2 固化体高さ和水素放出量の関係(実線はPRDモデルによる予測)

**アウトカム** 水素の発生・拡散・再結合過程を考慮したPRDモデル式により、含水率・形状と水素放出量との相関を説明することに初めて成功した。ジオポリマー技術に関する調査報告書(JAEA-Review)のダウンロード数は5000を超えており、本分野の活性化に貢献した。

**今後の予定** PRDモデルの改良を継続する。検証試験のために仏国CEAとの協力を検討する。28



## 10. セメント固化の物性推定 - 物性データの実験的収集 -

- ◆ セメント系材料による固化処理は、有力な処理技術である。しかしながら、処理の条件は経験や試験を踏まえて、事前に実用的な条件の範囲を明確にする必要があり、効率的に固化処理条件を探索、確立するために、セメント系材料の物性、廃棄物と混合した時の物性の変化を理解しなくてはならない。
- ◆ そこで、セメント系材料のプロセス物性及び安定性に関するデータ(固型化材料の反応性、粘性、凝結時間等)を取得し、評価している。

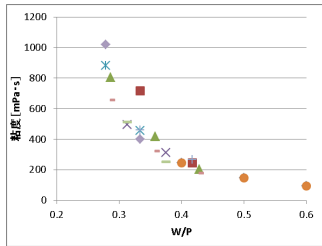


図1 廃棄物を含むセメント系材料の粘性の変化に関するデータの例(水粉体比による粘性の変化)

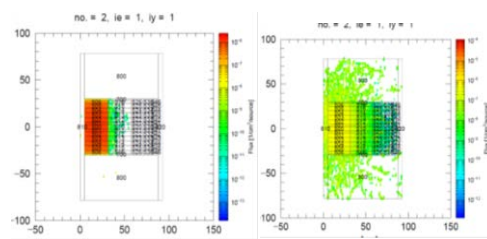


図2 放射線シミュレーション(phits)による発熱(吸収線量の評価)の解析例

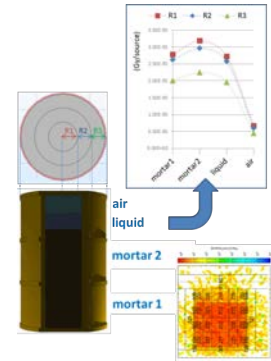


図3 放射線と熱の解析例

**アウトカム** セメント固化技術のデータを取得、蓄積した。

**今後の予定** 発熱、線量の影響に関する調査を継続する。塩類、保管環境等が低温処理固化体に与える影響評価に係る検討を進める。



処分





## 処分に関する主な成果

- ◆ 新たな処分概念に基づいて、廃棄物処分の安全評価を行うため、評価技術の整備を進めた。処分概念ごとに異なる配置、透水性、水理等の因子による核種移行挙動への影響を定量的に把握できる評価技術と事例を整備した。
- ◆ 処分安全に影響を与える廃棄物中の有害物質について、核種収着挙動への影響の関連性等を整理した。
- ◆ 処分安全に影響するガスの発生に関して、金属材料の腐食に伴うガス発生速度データを一部取得した。
- ◆ Csの移行を遅延する技術に関して、固化の助剤としてシリカヒュームの使用が有効であることを確認した。

表 発表の実績

論文	国際会議	国内会議	その他
4*	3	5	-

\* 受理・印刷中の3件を含む。

31



## 11. 安全評価手法 - 多様な処分概念に対応する評価技術、事例の整備 -

- ◆ 今後検討される様々な処分方法の特徴に起因する水理、物質移行等への影響を明らかにし、安全評価に反映させるため、より実際の(三次元)な解析評価技術と影響等に係る事例情報を整備する。
- ◆ 従来の処分概念は様々な案を検討する基礎であることから、様々なレイアウト変更や大幅な処分概念の変更を対象とした影響評価が可能となるよう、モデル等を整備している。(表1)
- ◆ 処分施設の特徴を考慮した三次元的な評価技術及び評価事例の検討・蓄積を進めている。(表2、図1)

表1 整備したモデル等

既存概念モデルベースで変更を可能とした内容	坑道、人工バリア、処分容器、岩種、定置方式/間隔、廃棄体寸法
新規概念を想定し構築したモデル	異なる種類・放射能濃度の廃棄物混在等に着目した集積配置及び不均質配置

表2 影響等評価した評価事例モデル等

廃棄体のレイアウト変更モデル	処分坑道内での放射能濃度が異なる廃棄物の地下水流動の状況等に応じた不均質な配置等のモデル
処分概念や形状の変更モデル	処分施設アクセス坑道の埋め戻し材料としての瓦礫等の利用、地下でのサイロ型処分等のモデル

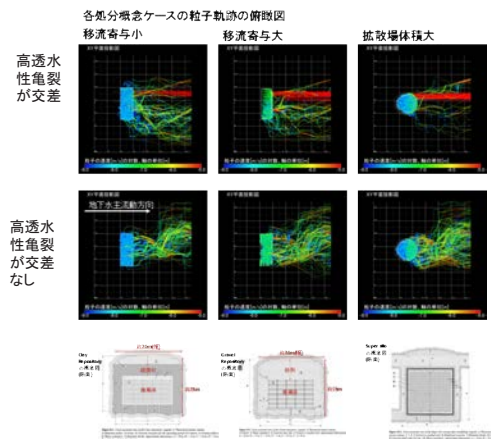


図1 サイロ型処分での廃棄体周辺領域が移流場の場合と拡散場の場合での移行経路の違いの評価事例

**アウトカム** 処分概念ごとに異なる配置、透水性、水理等の因子による核種移行挙動への影響を定量的に把握できる評価技術と事例を整備した。

今後の予定 処分概念等の検討を踏まえた評価モデルや事例の拡充を進め、今後実施する安全評価に技術を提供していく。

32



## 12. 化学物質による移行挙動への影響 - 物質と収着影響の関係整理と収着影響の評価 -

- ◆ 事故により発生した廃棄物には、処分時に放射性核種の収着挙動に直接的、間接的に影響を及ぼす物質が含まれる可能性があることを想定すべきである。そのような廃棄物を処分する安全性を評価するためには影響の考慮が必須となる。
- ◆ このため、影響を及ぼす可能性のある物質を抽出し、影響を及ぼすメカニズムを整理するとともに、それら物質によるデータ量に応じた収着挙動への影響度を示すパラメータ(収着低減係数:SRF)を検討している。

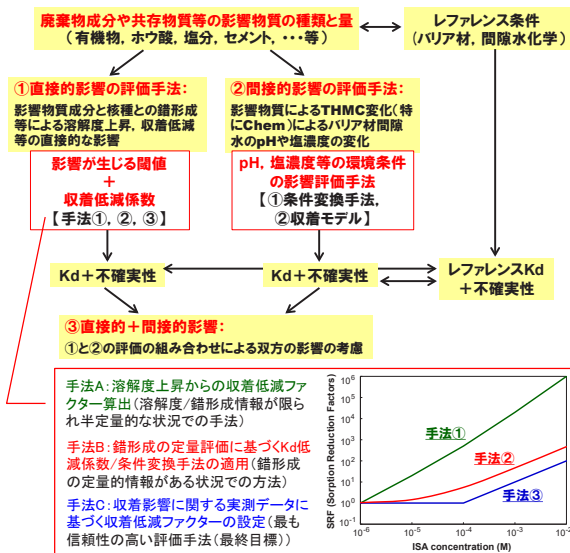


図1 影響物質による効果の検討方法(収着低減の例)

- ◆ 想定される廃棄物から、影響を及ぼす可能性のある物質と、影響の伝播、影響評価手法、影響データ等(図1)について検討している。影響が大きいと推察される6物質を抽出し、その直接的影響(①)に係る不足データ取得とデータの過不足に応じた評価手法(図1の手法A~C)を検討している。
- ◆ また、国内外の既存情報を調査・整理している(図2)。

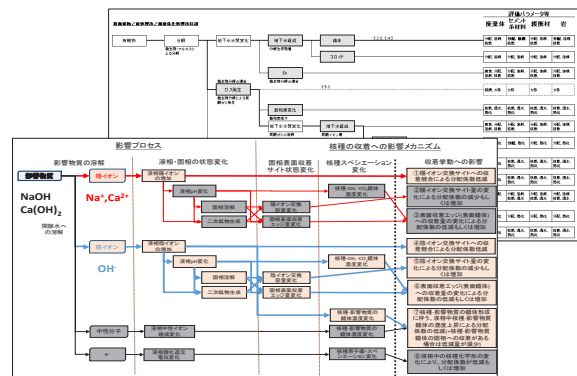


図2 影響プロセスと核種相互作用に係る情報の関係性の整理例

## 12. 化学物質による移行挙動への影響 - 物質と収着影響の関係整理と収着影響の評価 -

- ◆ 既存データが有用である海水(NaCl)、炭酸塩及び有機物(イソサッカリン酸)については、評価に不足するデータを取得しつつ、手法Cを用いた評価を実施し、核種の収着低減係数に対して影響が発現する閾値を導出している。(図3)
- ◆ 既存データが少ないホウ酸、フェロシアン化物及び硫酸塩についても、順次データの取得し、取得したデータに応じた評価を実施
  - ホウ酸がペントナイト収着へ与える影響は、Cs、Sr、Np(V)についてははみとめられなかった(図4)。
  - U(VI)の収着はホウ酸濃度の依存性があり、炭酸濃度にかかわらずホウ酸濃度とともに収着が小さくなる(図5)。

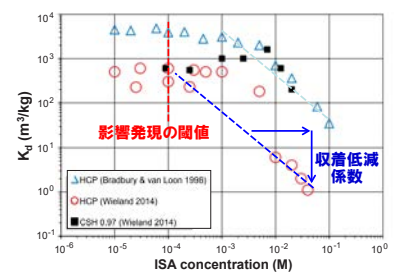


図3 収着低減係数の評価事例 (Amに対するイソサッカリン酸の影響)

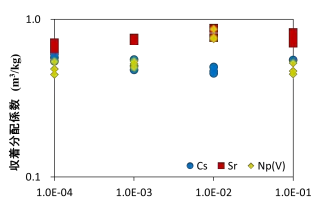


図4 ホウ酸がペントナイト収着へ与える影響

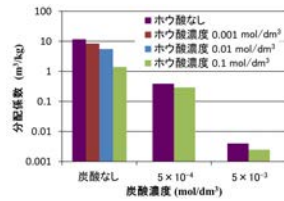


図5 炭酸共存下でのU(VI)の分配係数のホウ酸濃度依存性(pH9.3)

表1 物質毎の評価適用を目指す手法

物質	既存情報	目標適用手法
有機物	○	B+C
海水	◎	C
ホウ酸	×	A+C
フェロシアン化物	×	A
炭酸塩	○	C
硫酸塩	△	A or B

**アウトカム** 廃棄物中の有害物質と核種収着挙動への影響の関連性等を整理した。

**今後の予定** 不足するデータ拡充を図りつつ、情報量に応じた収着影響手法を策定する。表1に示す適用手法により各化学物質による影響評価手法を構築し、導出した収着低減係数を安全評価のインプットデータとして提供していく。



## 12. 化学物質による移行挙動への影響 - 金属廃棄物からのガス発生速度 -

- ◆ 高放射性の金属廃棄物には地層処分を検討すべきものがありうる。地層処分環境では水素発生型腐食が重要となり、ガス発生により処分場内圧上昇を招き安全性能が悪化する恐れがある。この可能性を評価するために、金属腐食に伴うガス発生速度データが必要である。
- ◆ 原子炉格納容器内から取り出される金属廃棄物を想定し(表1)、発生ガス量を測定する試験を実施している(表2、図1)
- ◆ データの再確認試験を現在実施している(表2)。



図1 アンブルを用いたガス発生試験

表1 対象金属

炭素鋼	SM400B
ステンレス鋼	SUS304L XM-19
ジルカロイ鋼	ジルカロイ2 ジルカロイ4
インコネル	X-750

表1 試験条件等

対象金属	原子炉格納容器内に使用される主要な6種(表1)
浸漬溶液	pH12.5、10:セメント系材料の利用を想定
保管温度	50°C: 地下1000m程度の想定地温
ガス測定時期	1、3、8、12か月
試験方法	ガラスアンブルによる方法(図1, 本田ほか, 1999)

表3 再確認試験状況

金属	pH12.5				pH10			
	1月	3月	8月	12月	1月	3月	8月	12月
SM400B	●	●	●	●	○	○	○	●
SUS304L XM-19	●	●	●	●	○	○	○	●
ジルカロイ2	●	●	●	●	●	●	●	●
ジルカロイ4	●	●	●	●	○	○	○	●
X-750	●	●	●	●	○	○	○	●

○: 試験終了、●: 再試験準備中

**アウトカム** 金属材料の腐食に伴うガス発生速度データを一部取得した。

**今後の予定** 再試験データ取得後、一連のガス発生速度を再評価する。得られたデータは安全評価に提供していく。他材質、試験条件下でのデータ取得についても、必要性に応じて試験を実施する。

35



## 13. 人工バリア材料 - Cs の移行を遅らせる -

- ◆ セシウムは約 30 y の半減期であり、環境中への移行を遅らせることができれば、安全の向上や合理的な処分方策の実現に役立つ。そこで、主として放射性セシウム(Cs)に汚染された廃棄物を想定して、コストにインパクトを与えずにCsの移行遅延性能を高めたセメント系材料を検討している。

表1 試験条件等

期待する効果	パラメータ
Csの吸着性能向上	Si含有鉱物質混和材3種 + 低アルカリセメント*
間隙率低減 (拡散効果低減)	W/C比=30%、50%

\* フライアッシュ (FA)、高炉スラグ (BFS)、シリカヒューム (SF)、低アルカリセメント (HFSC)

浸漬試験条件	図1参照
測定方法	Cs濃度分布測定 (EPMA)
付帯試験	Cs吸着性、間隙率分布測定



図1 浸漬試験の方法

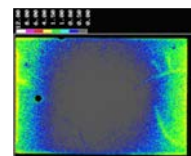


図2 EPMAにより分析したCsの濃度分布

セメントペースト硬化体と溶液との接触面からのCsの濃度分布より、見掛けの拡散係数(D<sub>a</sub>)を算定し、Csの移行遅延性能を評価。

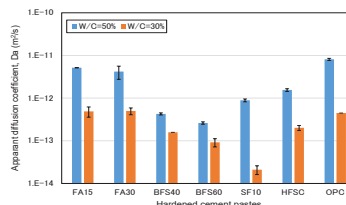


図3 算定されたCsの見掛けの拡散係数

- SF10%混合 (SF10)、W/C=30%のセメントペースト硬化体のDaが最小。
- SF混合によるCs吸着性向上に加えて、微細な間隙が連結した間隙構造であることが確認され、CsのDa低減に大きく影響したことが示唆。

**アウトカム** Csの移行遅延性能向上にシリカヒュームの使用が有効であることを確認した。Srについても一定の性能向上がみとめられた。

**今後の予定** 人工バリアに求められる性能条件に対して、施工可能性(流動性、強度等)の観点からも条件を満足するシリカヒューム等の混合条件の抽出を必要に応じて実施する。

36



## 参考 その他の研究開発



## 2. 放射能インベントリの推定 - ゼオライトによる長半減期核種の吸着 -

- ◆ 使用済みのセシウム吸着塔は線量が高く試料採取が困難である。放射能インベントリの推定を汚染水の分析を用いて行っているが、長半減期核種は保守的な設定せざるを得ず、改善が望まれる。
- ◆ そこで、ゼオライトへの分配係数 ( $K_d$ ) データを取得し、吸着塔内のインベントリの評価に提供する。
- ◆ 代表的な元素(表1)を対象に、多様な汚染水条件、ゼオライト種のデータ取得している。次の手順を想定している。
  - バッチ法吸着試験により分配係数データを得る。(図1)
  - カラム試験によりデータを得る(図2)。実際の吸着塔に近い条件で破過曲線を取得し、バッチ法により取得した実測値の適用性を評価する。

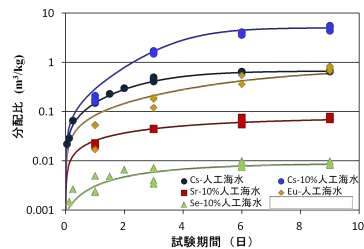


図1 バッチ吸着試験結果(実線は粒子内拡散を考慮した解析)

表1 元素グループから選定した対象とする元素(□)

元素 Gr	元素 <sup>(1)</sup>	参照ケース		
		KURION	SARRY	除染装置
Halogens	H, C, Cl, I	1.0E+01	1.0E+00	1.0E+00
Alkali metals	Na, K, Rb, Cs	1.0E+03	1.0E+03	1.0E+03
Tellurium group	S, Se, Sb, Te, Hg	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+01
Barium, Strontium	Be, Ca, Sr, Ag, Cd, In, Sn, Ba, Ra	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+01
Noble metals	Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd	1.0E+01	1.0E+00	1.0E+01
Lanthanides	Si, Y, Zr, Nb, La, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Tl, Pb, Bi, Po, Am, Cm, Bk, Cf, Es	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+01
Cerium group	Ce, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+01

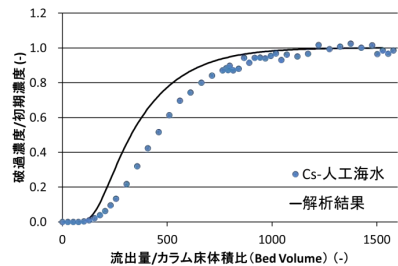


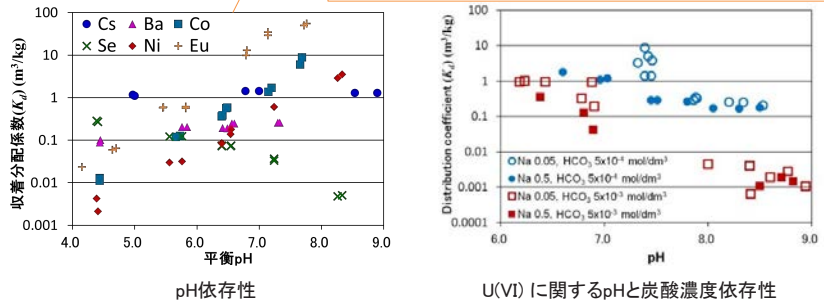
図2 カラム試験におけるCsの破過曲線及び解析結果の例

## 2. 放射能インベントリの推定 - ゼオライトによる長半減期核種の吸着 -

- ◆ セシウム吸着塔が処理する汚染水は、海水や地下水の混合や構造材料等との接触により、様々な成分を含むことを想定しなければならない。そこで、pH、Na イオン、炭酸イオンを含む溶液を用いて分配係数  $K_d$  のデータを取得している。

表1 試験条件等

対象核種	Cs、Se、Sr、Ni、Eu、Am、Th、U、Np
pH	4~9
塩濃度	0.05、0.5 mol/dm <sup>3</sup> (Na)
炭酸濃度	5 × 10 <sup>-4</sup> 、5 × 10 <sup>-3</sup> mol/dm <sup>3</sup> (HCO <sub>3</sub> )



• 吸着の機構は、Cs、Ba等はイオン交換による吸着が支配的であると見られるのに対し、Ni、Eu、アクチニドは単純なイオン交換によらないものと見受けられた。  
• Ni、Eu、アクチニド核種の吸着量を評価するには、汚染水中の炭酸濃度などの影響を考慮した評価が必要と考えられる。

図3 多様な汚染水条件下におけるゼオライトへの核種の吸着分配係数データ例

**アウトカム** 代表的な元素の分配係数データをバッチ法により収集し、蓄積した。また、カラム法による吸着試験を行い、モデルとの比較を行い、上記元素の挙動の推定を可能とした。

**今後の予定** 得られたデータを利用した推定方法を検討する。

## 2. 放射能インベントリの推定 - 構造材料の汚染機構に関するモデル -

- ◆ 原子炉建屋内に滞留する汚染水は、下流のデータに比べてPuの濃度が高い。燃料デブリが冷却水と接触して、水に移行した成分が、構造材や汚染水中に存在するスラッジ(固形物)へ移行する可能性が示唆される。模擬実験や分析等によりPuの挙動を検討している。
- ◆ 環境を模擬するため、文献調査、分析データ整理を行い、試験条件を設定し、Pu等の構造材及びスラッジへの吸着試験を実施している。

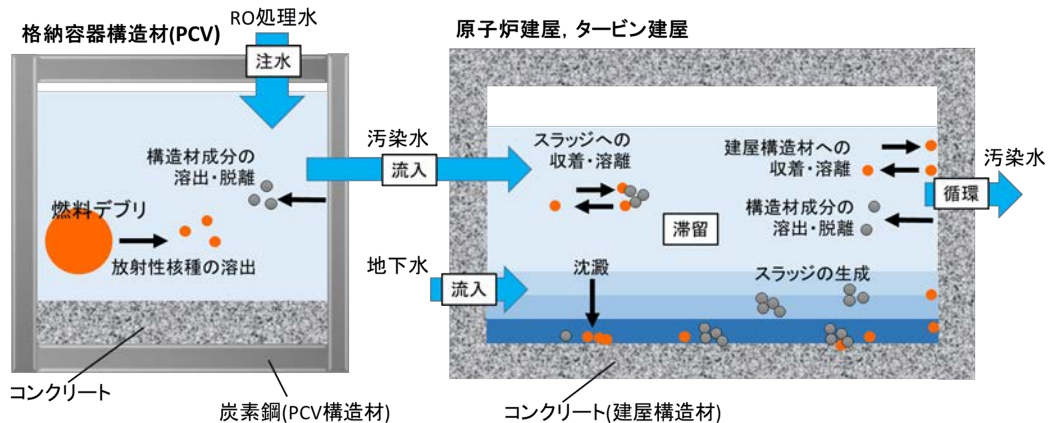


図1 コンクリートと汚染水の性状に関する知見の整理





## 2. 放射能インベントリの推定 - 構造材料の汚染機構に関する調査と試験研究 -

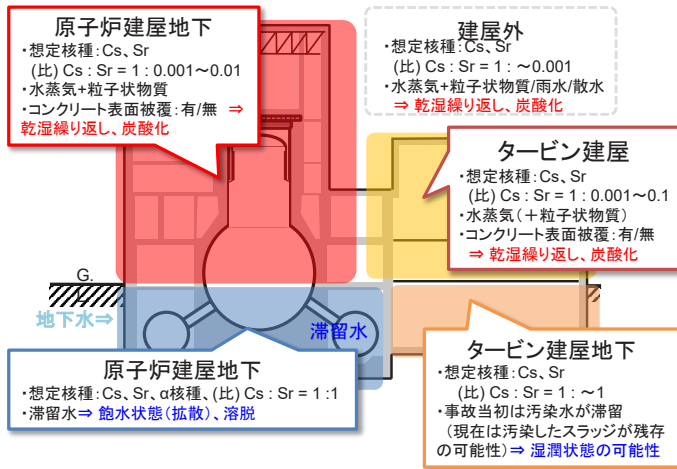


図1 コンクリートと汚染水の性状に関する知見の整理

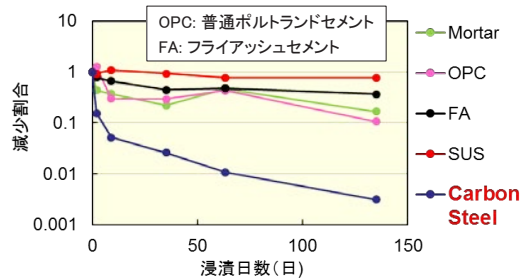


図2 構造材へのPu収着試験  
(浸漬に伴うPu濃度の減少)



図3 錆が付着した炭素鋼

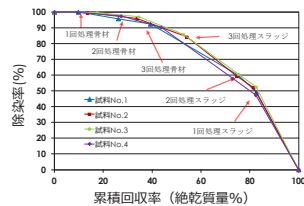
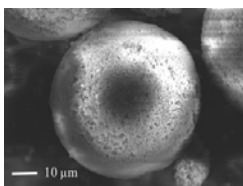
**アウトカム** 原子炉格納容器等の構造材である炭素鋼について、Pu溶液浸漬時にPuの顕著な濃度減少を確認した。浸漬により炭素鋼表面には錆が生じており、錆の生成過程での収着が疑われる。

今後の予定 模擬物質の調製、収着試験、構造解析を実施していく。



## 3. 分析技術 - 難測定核種分析のための化学分離技術 -

- ◆ 廃棄物処分における重要核種の候補である<sup>151</sup>Smはベータ核種であり、化学的に他の核種と分離した上で測定することが必要となる。<sup>151</sup>Smと他の希土類核種の相互分離が困難であるため、この方法を確立することを目指して実験研究を進めている。



架橋度 [%]	15
4級化率 [%]	99.1
陰イオン交換容量 [meq·g <sup>-1</sup> ]	4.99
添着率 [%]	18

図1 SiO<sub>2</sub>担持型ピリジン型陰イオン交換体の構造

多孔性SiO<sub>2</sub>粒子に4-ピニルピリジンとジビニルベンゼンの共重合体を添着重合させて3級ピリジン型陰イオン交換体を作成し、その後、強塩基化反応により4級ピリジン型陰イオン交換体を得た。

27番目のフラクションにおける各元素の存在比率と全体の回収率

	La(III)	Nd(III)	Sm(III)	Eu(III)	Y(III)
存在比率 [%]	0	0	98.0	2.02	0
回収率 [%]	105	102	94.4	83.8	85.6

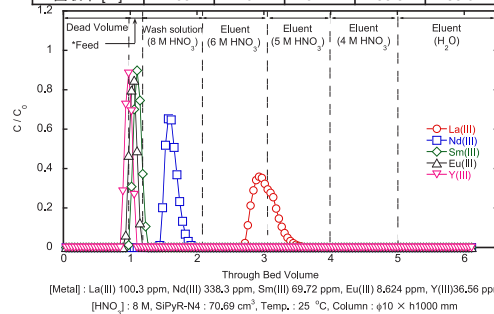


図2 カラム法による Sm 分離試験の結果

**アウトカム** 過去の知見\*を参考にピリジン型陰イオン交換体を選定し、硝酸濃度に対する吸着分配係数の特性を把握し、カラム法での分離条件を求めた。模擬処理水を用いたカラム試験により、Sm(III)を他の希土類元素から分離できる条件を見出した。

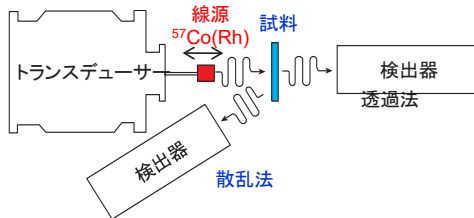
今後の予定 定常的な分析方法への適用を目指し、実証的な分析へと展開していく。

\* T. Arai, et al., J. Alloys and Compounds, 408-412, 1008-1012 (2006).



### 3. 分析技術 メスbauer分光による化学状態分析

- ◆ 汚染の機構を検討する上で、化学状態の分析技術が重要である。構造材など鉄含有廃棄物の汚染を対象として、散乱法によるメスbauer分光技術の開発を進めている。



<sup>57</sup>Feの原子核がγ線を共鳴吸収することにより化学状態分析が可能

- ・価数 (アイソマーシフト)
- ・配位・結合状態 (四極子相互作用)
- ・磁性 (磁気相互作用)

散乱法の利点

- ・γ線が透過しない厚い試料の測定が可能
- ・試料表面の測定が可能

図1 メスbauer分光法の概要

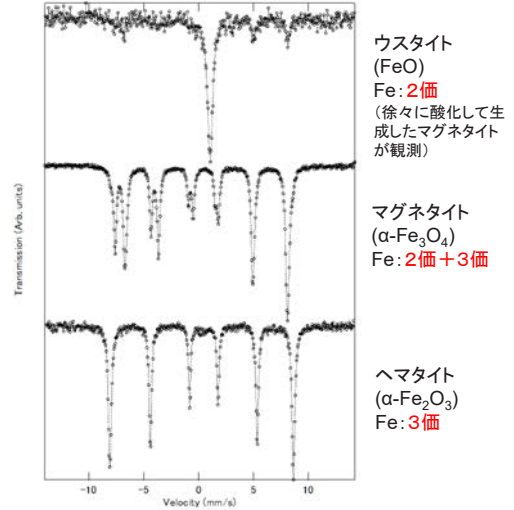


図2 酸化鉄のメスbauerスペクトル

アウトカム 鉄含有廃棄物へ適用可能な散乱法を開発した。

今後の予定 溶液試料、構造材試料表面の分析への応用を進めていく。



### 除染・処分 - コンクリート系廃棄物除染・処分に係る研究 -

- ◆ コンクリート系廃棄物低減への貢献を目指し、除染時の範囲・方法の選定や処分時評価の基礎となるコンクリートと核種の吸着等に係るデータ整備と、廃棄物の減量に貢献する技術の適用性を評価した。
- ◆ Cs収脱着挙動の濃度依存性、核種のコンクリートへの浸透、パルスパワーによる骨材の再利用可能性を検討した。

#### Cs収脱着挙動の濃度依存性

- ・ 使用されるセメント種や液中の塩濃度によらず、液中Cs濃度が高いほど吸着しにくい。
- ・ また、吸着時の液中Cs濃度が低いほど湿式除染の効果は低く、逆に処分時のCsの固定・移行遅延効果は高い。

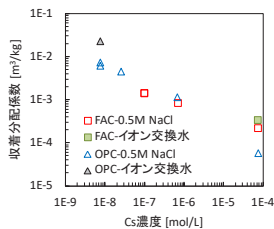


図1 吸着に対するCs濃度の影響

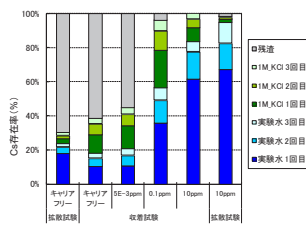


図2 湿式除染の吸着時Cs濃度の影響

#### 核種のコンクリートへの浸透

- ・ 汚染は比較的表層にとどまっている。
- ・ 核種及び汚染水との接触時間によってはより深層まで汚染が拡大している可能性がある。

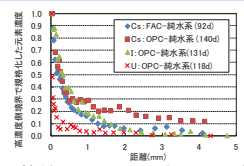


図3 核種のコンクリート中への浸透

#### パルスパワーによる骨材の再利用

- ・ 3回のショットで骨材回収率5~6割、Cs残存率は1~2割 (図5)。

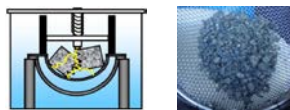


図4 パルスパワー概念図(左)と分離された骨材(右)

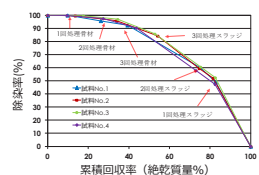


図5 コンクリート材の回収率とCsの除染率

アウトカム セシウムの除染に関して、吸着時の条件がその後の移動や除染に影響を与えることを見出した。パルスパワー法による骨材の回収について、回収率とCs除染率の関係を明らかにした。

今後の予定 初期の計画を終了しており、必要に応じて検討していく。



## 参考 発表・研究協力の実績

H27(2015)からH30(2018)年度現在まで

45




## 発表の実績 分析、放射能インベントリの推定

■	凡例
◆	論文
●	国際会議
●	国内会議
-	その他

- "Determination of  $^{129}\text{I}$  in the accumulated radioactive water and processed water of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," Asako Shimada et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., 303(2), 1137–1140 (2015).
- "Inventory Estimation of  $^{137}\text{Cs}$  in Radioactive Wastes Generated from Contaminated Water Treatment System in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," Jun Kato et al., E-Journal of Advanced Maintenance, 7(2) 138–144 (2015).
- "Estimation of the Inventory of the Radioactive Wastes in Fukushima Daiichi NPS with a Radionuclide Transport Model in the Contaminated Water," Atsuhiko Shibata et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 53(12), 1933–1942 (2016).
- "Development of an extraction chromatography method for the analysis of  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ , and  $^{93}\text{Mo}$  in radioactive contaminated water generated at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," Asako Shimada et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., 310(3), 1317–1323 (2016).
- "福島第一原子力発電所において採取した瓦礫試料の放射化学分析," 佐藤義行 ほか, 保健物理, 51(4), 209–217 (2016).
- "Radioactive Contamination of Several Materials following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident," Yoshikazu Koma et al., Nuclear Materials and Energy, 10, 35–41 (2017).
- "Safe and rapid development of capillary electrophoresis for ultratrace uranyl ions in radioactive samples by way of fluorescent probe selection for actinide ions from a chemical library," Tomoko Haraga et al., Analytica Chimica Acta, 1032, 188–196 (2018).
- "Determination of  $^{107}\text{Pd}$  in Pd purified by selective precipitation from spent nuclear fuel by laser ablation ICP-MS," S. Asai et al., Analytical and Bioanalytical Chemistry, in Press.
- "Sorption Behavior of U, Np and Am on Zeolite," Takamitsu Ishidera et al., Progress in Nuclear Science and Technology, accepted.
- ◆ "Transport Behavior of Radionuclides into the Accumulated Water at the Fukushima Daiichi NPS," Yoshikazu Koma et al., ICONE-23, 2141, 17-21 May 2015, Chiba, Japan (2015).
- ◆ "Inventory Estimation of several Radioactive Wastes Generated from Contaminated Water Treatment System in Fukushima Daiichi NPS Based on Analytical Data of Contaminated Water," Yoshihiro Meguro et al., Annual Meeting of the International Network of Laboratories for Nuclear Waste Characterization (LABONET), 10–13 November 2015, Bratislava, Slovakia (2015).

46



## 発表の実績

### 分析、放射能インベントリの推定

凡例

- 論文
- ◆ 国際会議
- 国内会議
- その他


---

- ◆ “Inventory Estimation for Accident Waste Generated at the Fukushima Daiichi NPS,” Yoshikazu Koma et al., International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management, ID153, Vienna, Austria, 21–25 November 2016.
- ◆ “Characterization of Carbonate Slurry Generated from Multiple Radio-Nuclides Removal System in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” Yuhei Fukuda et al., ICAPP 2017, Paper 17077, April 24-28, Fukui and Kyoto, Japan (2017).
- ◆ “Sorption Behavior of U, Np and Am on Zeolite,” Takamitsu Ishidera et al., ACTINIDES 2017, MoB-9, July 9–14, Sendai, Japan (2017).
- ◆ “Direct measurement of 107Pd from spent nuclear fuel by laser ablation ICP-MS,” S. Asai et al., The 7th Asia-Pacific Workshop on Laser-Ablation and Micro-Analysis, October, Beijing, China (2018).

- “福島第一原子力発電所の事故に伴う水処理二次廃棄物の性状調査, (1) 多核種除去設備スラリーの粒度分布測定,” 福田裕平 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I10 (2015).
- “同上, (2) 多核種除去設備スラリーの放射化学分析,” 比内 浩 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I11 (2015).
- “多核種除去設備の二次廃棄物に関する分析方法の検討, (1) フェロシアン化合物の分析前処理方法の検討,” 荒井陽一 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I12 (2015).
- “福島第一事故廃棄物のインベントリ評価手法の開発, (3) 評価手法開発の概要,” 大井貴夫 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I13 (2015).
- “同上, (4) 瓦礫の汚染,” 駒 義和 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I14 (2015).
- “同上, (5) 汚染水処理二次廃棄物の分析結果に基づく評価手法,” 加藤 潤 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I15 (2015).
- “同上, (6) 汚染水処理二次廃棄物の解析的な推定手法,” 杉山大輔 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I16 (2015).
- “同上, (7) 汚染水処理二次廃棄物のインベントリ評価手法の比較,” 目黒義弘 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I17 (2015).
- “同上, (8) ゼオライト中の核種収着分配係数の評価,” 石寺孝充 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I18 (2015).
- “福島第一原子力発電所の事故に伴う水処理二次廃棄物の性状調査, (3) 多核種除去設備スラリーの性状分析,” 福田裕平 ほか, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2I06 (2016).
- “多核種除去設備から発生した炭酸塩スラリーの放射線分解による水素発生,” 荒井陽一 ほか, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2I22 (2016).
- “福島第一原子力発電所の事故に伴う水処理二次廃棄物の性状調査, (4) 既設および増設多核種除去設備スラリーの性状比較,” 福田裕平 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 1E15 (2016).
- “同上, (5) 高性能容器に収納されている炭酸塩スラリーの分析,” 福田裕平 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 1E16 (2016).

47



## 発表の実績

### 分析、放射能インベントリの推定

凡例

- 論文
- ◆ 国際会議
- 国内会議
- その他

---


- “福島第一事故廃棄物のインベントリ評価手法の開発, (9) 分析データに基づく核種移行に関する考察,” 駒 義和 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 1E18 (2016).
- “同上, (10) 解析的推定における不確実性低減方法の検討,” 杉山大輔 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 1E19 (2016).
- “Direct measurement of Pd-107 in Pd metal recovered from spent nuclear fuel with laser ablation ICP-MS,” 浅井志保 ほか, RSC Tokyo International Conference 2017, Chiba, Japan (2017).
- “原子力発電所で使われた燃料からのパラジウムの回収と定量,” 浅井志保, 日本分析化学会第66年会, レアメタル研究懇談会, 東京 (2017).
- “福島第一原子力発電所で採取された放射性廃棄物中のPd-107分析法の開発,” 佐藤 義行, 徳永 貴仁 ほか, 日本原子力学会「2017年春の年会」, 1H05 (2017).
- “福島第一事故廃棄物のインベントリ評価手法の開発, (11) 原子炉建屋内汚染状況の解析的な推算方法の検討,” 杉山 大輔 ほか, 日本原子力学会「2017年秋の大会」, 3A18 (2017).
- “同上, (12) 各号機の汚染水中の放射性核種濃度推移のモデル化,” 柴田 淳広 ほか, 日本原子力学会「2017年秋の大会」, 3A19 (2017).
- “同上, (13) 解析的推算方法への統計論的アプローチ導入の検討,” 杉山 大輔 ほか, 日本原子力学会「2018年秋の大会」, 2G07 (2018).
- “同上, (14) 汚染水水質の変化が核種のゼオライトへの収着に及ぼす影響,” 石寺 孝充 ほか, 日本原子力学会「2018年秋の大会」, 2G08 (2018).
- “福島第一原子力発電所内滞留水中の放射性核種の構造材への移行, (1) Cs, Sr, Niの移行挙動,” 栗飯原 はるか ほか, 日本原子力学会「2017年秋の大会」, 3A17 (2017).
- “放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する基礎研究(概説),” 丸山一平 ほか, 第7回 環境放射能除染研究発表会, S9-4 (2018).
- “使用済燃料から回収した金属パラジウムのLA-ICP-MSによる同位体測定,” 浅井志保 ほか, 日本分析化学会第67年会, 仙台 (2018).

- “廃棄物試料の分析結果” 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議. (15件)
- “東京電力福島第一原子力発電所から発生する滞留水・処理水及び瓦礫等の分析結果, 水分析結果(2014年度版)および瓦礫等分析結果(2014年度版)の公開,” 浅見 誠 ほか, JAEA-Data/Code 2015-020 (2015).
- “東京電力福島第一原子力発電所において採取された汚染水および瓦礫等の分析データ集,” 浅見 誠 ほか, JAEA-Data/Code 2017-001 (2017).
- “福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集.” <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>

48





## 発表の実績

### 保管


凡例

- 論文
- ◆ 国際会議
- 国内会議
- その他

---

- “シビアアクシデント後対策のための水の放射線分解研究の展開,”永石 隆二, RADIOISOTOPES 66 (11), 601-610 (2017).
- “Analytical studies of three dimensional evaluation of radionuclide distribution in zeolite wastes through gamma scanning of adsorption vessels”, Taichi Matsumura et al., Nucl. Sci. Eng., 192 (1), 70-79 (2018).
  
- ◆ “Irradiation experiments of simulated carbonate slurry”, R. Nagaishi, et al., EFCOG Nuclear and Facility Safety Workshop, ANL, USA, (2016).
  
- “水素挙動解析システムの構築に向けた取組み,”寺田 敦彦, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, C32 (2015).
- “核種分離系での硝酸水溶液の放射線分解の硝酸及び線質依存性の評価,” 永石隆二, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, E16 (2015).
- “廃ゼオライト長期保管方策の検討, (8) SUS 容器の外部加熱によるゼオライト乾燥試験,” 山岸 功 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I08 (2015).
- “同上, (9) 可視化モデルの内部加熱による乾燥試験,” 宇留賀和義 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, I09 (2015).
- “HIC模擬炭酸塩スラリーの照射実験, (1) 試験概要,” 山岸 功 ほか, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2I19 (2016).
- “同上, (2) ガンマ線照射下での模擬炭酸塩スラリーのガス保持挙動試験,” 本岡 隆文 ほか, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2I20 (2016).
- “同上, (3) 模擬炭酸塩スラリーの放射線分解挙動に関する研究,” 永石 隆二, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 2I21 (2016).
- “廃ゼオライト長期保管方策の検討, (10) SARRY 吸着塔のセシウム吸着分布試験,” 佐藤博之 ほか, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 3I01 (2016).
- “同上, (11) ゼオライトの保水性能評価,” 有坂 真 ほか, 日本原子力学会「2016年春の年会」, 3I02 (2016).
- “フェロシアン化合物高温処理時のCs及びシアン化水素の放出挙動,” 田代信介 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 3F10 (2016).
- “廃棄物等の水分蒸発挙動解析コード開発にむけた取組み,” 寺田 敦彦 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 2K20 (2016).
- “海水及びその濃厚系での水の放射線分解のプライマリ収量の実験的評価,” 永石 隆二 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 3C04 (2016).

49



## 発表の実績

### 保管


凡例

- 論文
- ◆ 国際会議
- 国内会議
- その他

---

- “HIC模擬炭酸塩スラリーの照射実験, (4) ガンマ線照射前後の模擬炭酸塩スラリーの性状について,” 本岡 隆文 ほか, 日本原子力学会「2017年春の年会」, 1L10 (2017).
- “塩化物水溶液系の放射線分解生成物の物質収支の評価,” 永石 隆二ほか, 日本原子力学会「2017年春の年会」, 2I07 (2017).
- “1F汚染水処理・廃止措置のための放射線研究の展開,” 永石 隆二, 低温工学・超電導学会 2018年度第2回材料研究会 (2018).
- “水素挙動統合解析システム構築の取組み,” 寺田 敦彦, 2017 年度日本機械学会年次大会, J0110202 (2017).
- “廃棄物長期保管容器内に発生する可燃性ガスの濃度低減技術に関する研究開発, (6) 水素濃度低減シミュレーション,” 寺田 敦彦ほか, 日本原子力学会「2018年春の年会」, 1O13 (2018).
- “固体共存水溶液系での過酸化水素 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) の熱分解の速度評価,” 永石 隆二ほか, 日本原子力学会「2018年春の年会」, 2M02 (2018).
- “ゼオライトの塩水吸い上げ挙動,” 宇留賀 和義 ほか, 日本原子力学会「2018年秋の大会」, 2G01 (2018).
- “海水由来のハロゲン化物イオンによる水酸化ラジカル捕捉の塩濃度依存性の評価,” 永石 隆二 ほか, 日本原子力学会「2018年秋の大会」, 3C11 (2018).
- “廃棄物等の水分蒸発挙動解析コード開発に向けた取組み,” 寺田 敦彦ほか, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2018, I223 (2018).
  
- “Studies on Radiolysis Behavior of Carbonate Slurry under Co-60 Gamma-ray Irradiation,” R. Nagaishi et al., “QST Takasaki Annual Report 2015,” QST-M-2, p. 94 (2016).
- “Gas Retention Behavior of Carbonate Slurry under Gamma-ray Irradiation,” T. Motooka et al., *ibid*.
- “HIC上のたまり水発生の原因と対策の検討・実施状況,” 第1回特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会, 資料4, 平成27年12月4日.
- “高放射性ゼオライト吸着材の保管時健全性評価手法の開発,” 平成27年度理事長表彰研究開発功績賞.”

50



## 発表の実績

### 処理


凡例

- 論文
- ◆ 国際会議
- 国内会議
- その他

---

- “Effective Removal of Selenite and Selenate Ions from Aqueous Solution by Barite,” Kohei Tokunaga et al., Environ. Sci. Technol., 51 (16), 9194–9201 (2017).
- “Study on coordination structure of Re adsorbed on Mg–Al layered double hydroxide using X-ray absorption fine structure,” Kazuya Tanaka et al., J. Porous Materials (2018). <https://doi.org/10.1007/s10934-018-0634-z>
- “Adsorption mechanism of  $\text{ReO}_4^-$  on Ni–Zn layered hydroxide salt and its application to removal of  $\text{ReO}_4^-$  as a surrogate of  $\text{TcO}_4^-$ ,” Tanaka et al., submitted.
  
- ◆ “Fundamental study of conditioning of wastes generated from several contaminated water treatment devices in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” Yoshihiro Meguro et al., The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem), 15–20 December 2015, Hawaii, USA (2015).
- ◆ “Approaches of Selection of Adequate Conditioning Methods for Various Radioactive Wastes in Fukushima Daiichi NPS,” Y. Meguro et al., International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management, ID 139, Vienna, Austria, 21–25 November 2016.
- ◆ “Hydrogen production of Zeolite A containing geopolymers,” V. Cantarel, et al., NUWCEM 2018 (2018).
  
- “汚染水処理二次廃棄物の廃棄体化技術の検討, (4) 無機固型化材による模擬スラリーの固化試験,” 佐藤 淳也 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, E04 (2015).
- “模擬ALPSスラリー固化体を対象とした電子線照射時における水素ガスの評価,” 佐藤 淳也 ほか, 第10回高崎量子応用研究シンポジウム, 2P-21, 平成27年10月8–9日, 高崎量子応用研究所 (2015).
- “ALPS廃棄物を模擬した無機固化体を対象としたγ線照射時における水素ガスの評価,” 佐藤 淳也 ほか, 第10回高崎量子応用研究シンポジウム, 2P-22, 平成27年10月8–9日, 高崎量子応用研究所 (2015).
- “汚染水処理二次廃棄物のジオポリマー固化試験, (1) 模擬スラッジの固化試験,” 佐藤 淳也 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 2F10 (2016).
- “汚染水処理二次廃棄物の圧縮成型及び焼結固化試験, (1) 汚染水処理二次廃棄物の現状と焼結固化試験概要,” 佐藤 淳也 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 3F11 (2016).
- “同上, (2) 圧縮成型と焼結固化試験,” 佐藤 淳也 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 3F12 (2016).
- “同上, (3) 焼結固化体の浸出性評価,” 佐藤 淳也 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 3F13 (2016).
  
- “Geopolymers and their potential applications in the nuclear waste management field; A Bibliographical study,” V. Cantarel et al., JAEA-Review 2017-014 (2017).

51



## 発表の実績

### 処分

凡例

- 論文
- ◆ 国際会議
- 国内会議
- その他

---

- “パルスパワー技術によるコンクリート瓦礫の除染・再利用に関する研究,” 坂本浩幸 ほか, 日本原子力学会和文論文誌, 17(2), 57–66 (2018).
- “Retention of Uranium in Cement Systems: Effects of Cement Degradation and Complexing Ligands, Michael Ochs ほか, Progress in Nuclear Science and Technology, (受理・印刷中).
- “Sorption Parameter Setting Approaches Considering Perturbation Effects for Radioactive Waste Disposal : Sorption Reduction Factors for Organics,” 館幸男 ほか, Progress in Nuclear Science and Technology, (受理・印刷中).
- “Diffusion and Sorption Behavior of HTO, Cs, I and U in OPC Mortar,” 赤木洋介 ほか, Progress in Nuclear Science and Technology, (受理・印刷中).
  
- ◆ “Retention of Uranium in Cement Systems: Effects of Cement Degradation and Complexing Ligands,” Michael Ochs et al., ACTINIDES 2017 (2017).
- ◆ “Sorption Parameter Setting Approaches Considering Perturbation Effects for Radioactive Waste Disposal : Sorption Reduction Factors for Organics,” Y. Tachi et al., ACTINIDES 2017 (2017).
- ◆ “Diffusion and Sorption Behavior of HTO, Cs, I and U in OPC Mortar,” Y. Akagi et al., ACTINIDES 2017 (2017).
  
- “福島原発事故で発生したコンクリート廃棄物の評価, (1) コンクリート中の核種の拡散・収着特性の評価,” 赤木洋介 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, E06 (2015).
- “同上, (2) パルスパワー放電によるコンクリート瓦礫の除染試験,” 坂本浩幸 ほか, 日本原子力学会「2015年秋の大会」, E07 (2015).
- “放射性廃棄物処分の人工バリアシステムからの核種放出に対する近似解析解の導出とシステムの応答特性の把握, (1) 2重の拡散媒体を有する人工バリアシステムからの核種放出に対する近似解析解とその応答特性,” 大井貴夫 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 1D04 (2016).
- “同上, (2) 浅地中ピットおよびトレンチ処分の処分施設からの核種放出に関する近似解析解の導出とその応答特性,” 大井貴夫 ほか, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 1D05 (2016).
- “ベントナイトに対する核種の収着挙動に及ぼすホウ酸の影響,” 石寺孝充 ほか, 日本原子力学会「2017年秋の大会」, 2H12 (2017).

52



## 研究協力の実績

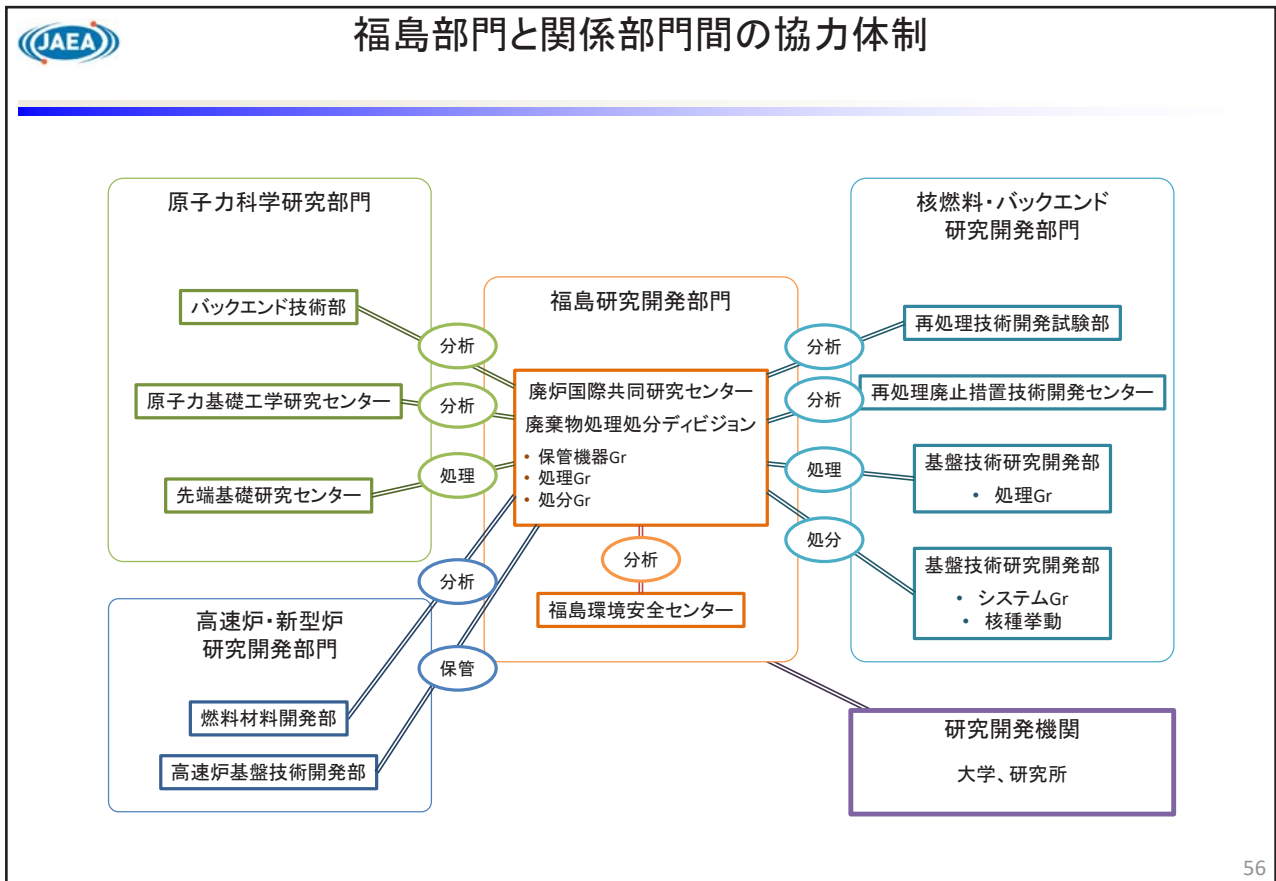
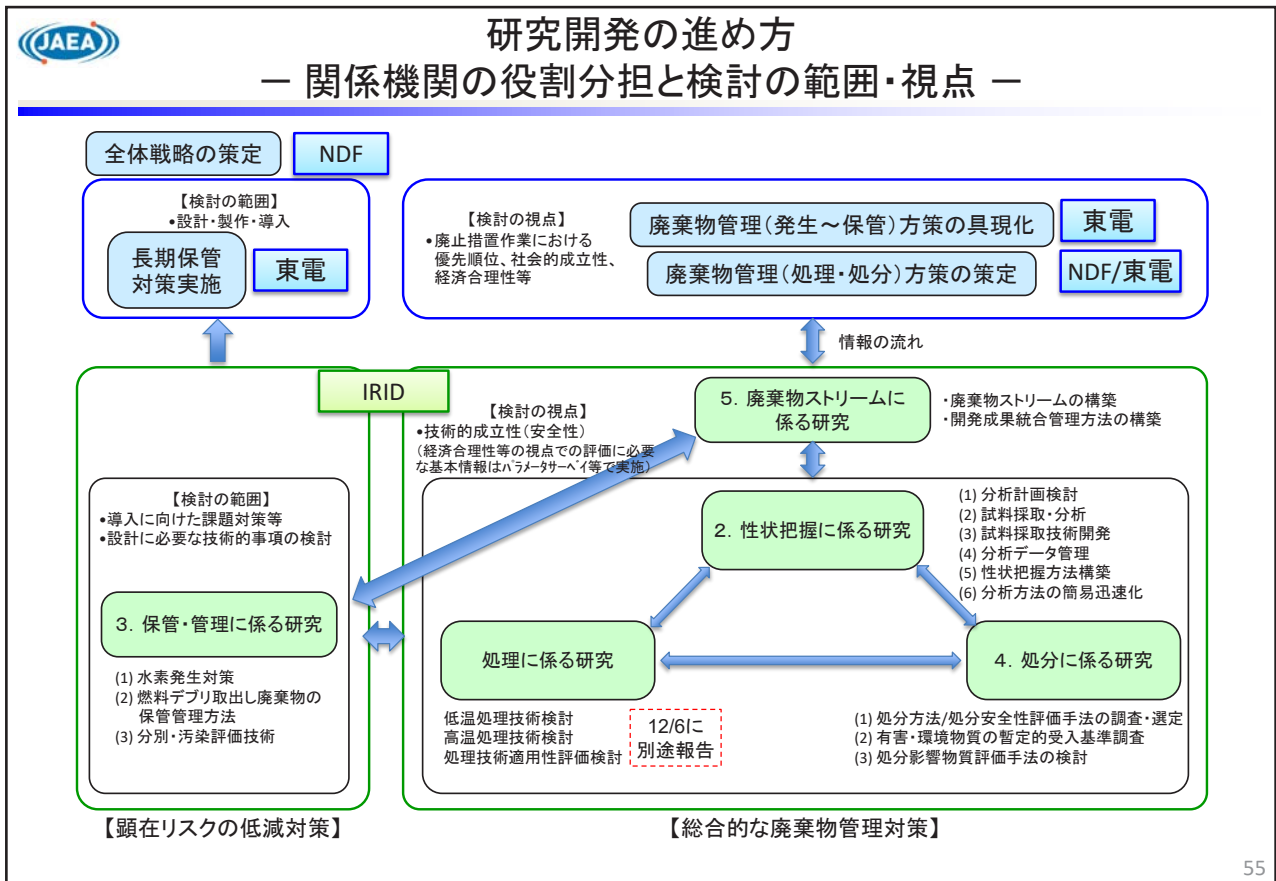
- ◆ 受託事業
  - 発電所隣接サイト外領域における放射性核種の環境動態特性に基づくサイト内放射性核種インベントリ評価に関する研究, 京都大学等と協力 (H27～29年度)
  - 廃棄物長期保管容器内に発生する可燃性ガスの濃度低減技術に関する研究開発 (H28年度～実施中)
  - 汚染コンクリートの解体およびそこから生じる廃棄物の合理的処理・処分の検討, 北海道大学等と協力 (H28年度～実施中)
  - 放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究, 名古屋大学等と協力 (H29年度～実施中)
- ◆ 補助事業
  - 固体廃棄物の処理処分に関する研究開発 (H26年度～実施中)
- ◆ 共同研究
  - マイクロチップを用いた簡易迅速化、東工大
  - 両性イオン交換体による重金属の分析、芝浦工大
  - パルスラジオリシス法による非均質場等での過度現象の解明、阪大
  - 浸水したジルカロイ酸化生成物表面の放射線分解挙動の解明、長岡科技大
  - ラマン分光法によるジオポリマー分析、長岡科技大
  - 照射環境下の吸着材等の耐放射線性評価及び機能材料の創製、東北大
  - 水分蒸発挙動解析コードの開発、電力中央研究所
  - 垂臨界水洗浄と固相抽出を利用した固体廃棄物からの放射性物質の回収・固化、東工大
- ◆ 委託研究
  - 解析的評価手法によるインベントリ評価に係る手順の構築、電力中央研究所
  - 水素等のガスを発生する廃棄物の管理技術、英国NNL

53



## 参考 実施体制

54







## 遠隔技術に係る研究開発

平成30年12月26日

福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉国際共同研究センター  
櫛葉遠隔技術開発センター



### 第3期中長期計画における取り組み内容

#### 【廃止措置等に向けた研究開発】

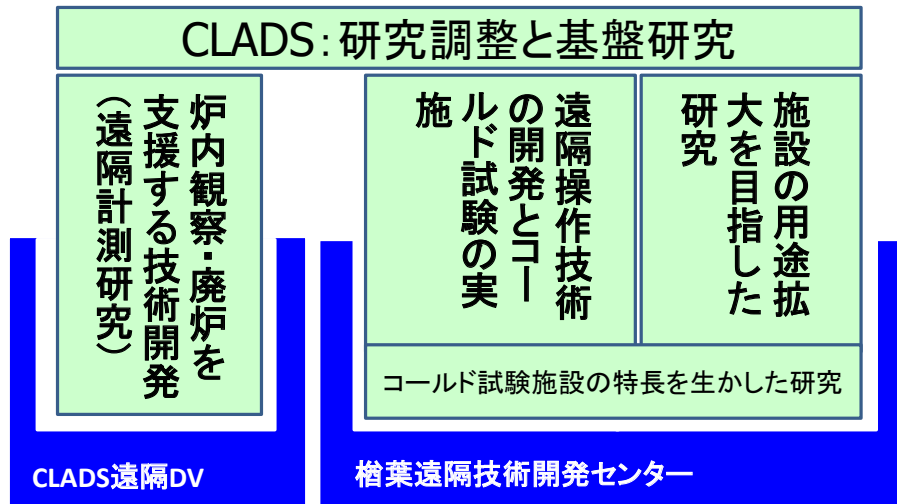
東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置及び廃棄物の処理処分に向け、政府の定める「東京電力（株）福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」（平成25年6月原子力災害対策本部・東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議。以下「廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」という。）に示される研究開発を工程に沿って実施する。また、NDFが策定する戦略プラン等の方針や、中長期的な視点での現場ニーズを踏まえつつ、人材の確保・育成も視野に入れた、燃料デブリの取り出し、放射性廃棄物の処理処分、事故進展シナリオの解明及び遠隔操作技術等に係る基礎基盤的な研究開発を廃止措置等に向けた中長期ロードマップの工程と整合性を取りつつ、着実に進める。

これらの研究開発で得られた成果により廃止措置等の実用化技術を支えるとともに、廃止措置等の工程を進捗させ得る代替技術等の提案につなげることにより、東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等の安全かつ確実な実施に貢献する。また、事故進展シナリオの解明等で得られた成果を国内外に積極的に発信することにより、原子力施設の安全性向上にも貢献する。さらに、専門的知見や技術情報の提供等により、NDF等における廃炉戦略の策定、研究開発の企画・推進等を支援する。



## 福島部門における廃止措置に係る遠隔技術研究の体制

共通基盤である遠隔技術の研究開発について廃炉国際研究開発センター（CLADS）を1F廃炉推進の基盤技術となる遠隔技術研究開発の中核として位置づけ、各センターの特長を活かして成果活用の調整を行い、1F廃炉に貢献していく。

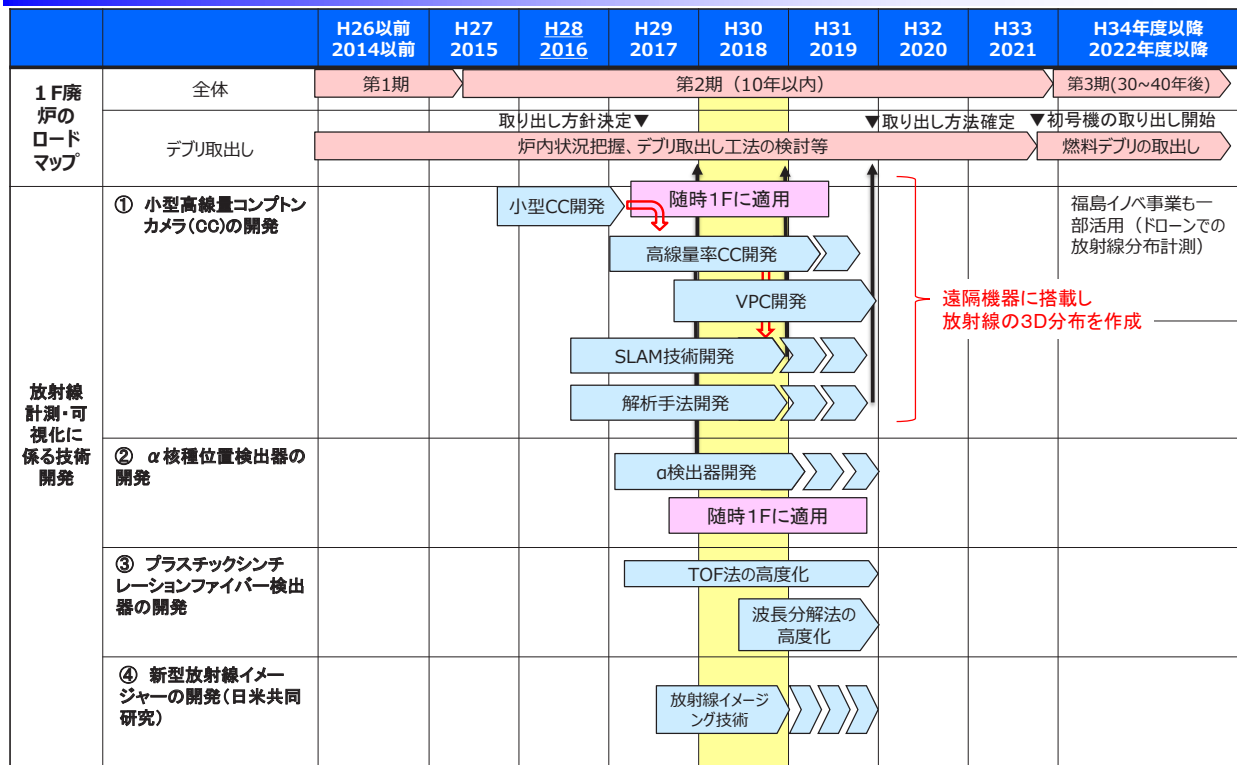


## 福島部門における遠隔技術の研究開発

1F廃炉と環境回復に係る共通基盤である遠隔技術の開発成果の最大化を目指し、研究状況（基盤、要素、実証）や使用環境を踏まえて廃炉へ貢献する。

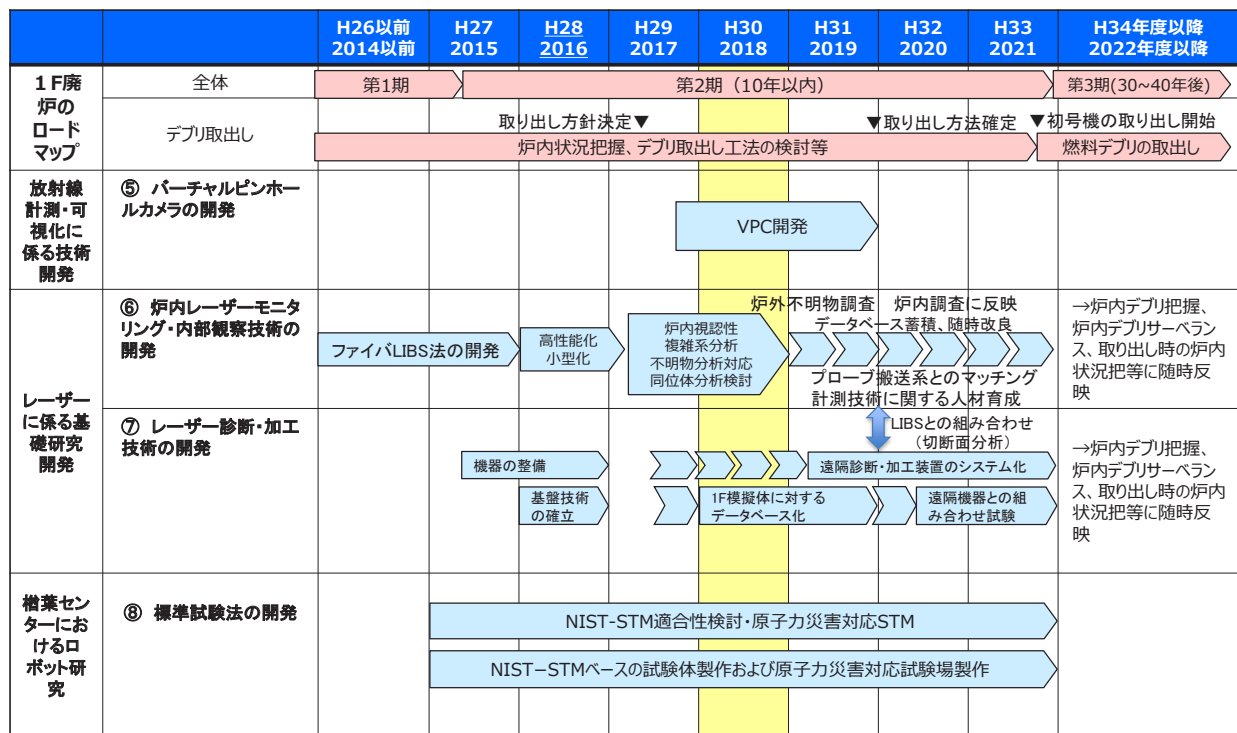
研究開発課題	研究分野	主要研究テーマ	研究開発部署	特徴	
炉内観察・廃炉を支援する技術開発	放射線計測・可視化技術	① 小型高線量率コンプトンカメラ	CLADS (遠隔技術ディビジョン)	遠隔計測研究	
		② $\alpha$ 汚染計測			
		③ プラスチックシンチレーションファイバー検出器の開発			
		④ 新型放射線イメージャーの開発(日米共同研究)			
		⑤ パーチャルピンホールカメラの開発			
	レーザー技術	⑥ レーザー内部観察 (LIBS)			
		⑦ レーザー診断・加工技術			
遠隔操作技術の開発と施設の用途拡大に向けた研究	ロボット技術	⑧ 標準試験法の開発	櫛葉遠隔技術開発センター	コールド施設の特長を活かした研究	

JAEA (1) 炉内観察・廃炉を支援する技術のスケジュール (1)



4

JAEA (1) 炉内観察・廃炉を支援する技術のスケジュール (2)



5



## ① 小型高線量率コンプトンカメラ (1)

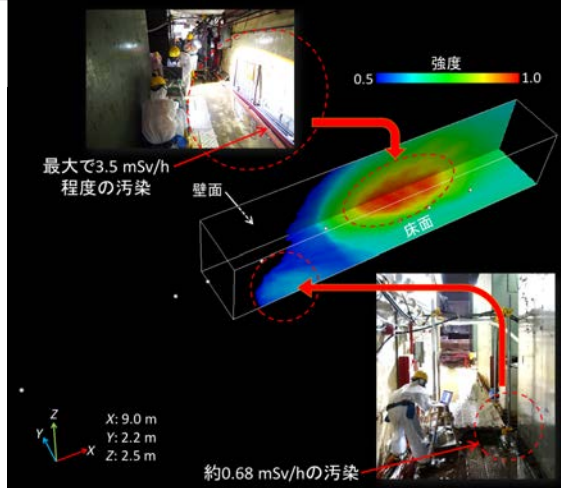
### 【実施内容】

- 小型軽量コンプトンカメラを1F建屋内測定で行うべく東電と調整し1Fタービン建屋内で測定を行い、建屋内の高線量率エリアの3次元放射線イメージング撮影に成功した。
- また、同コンプトンカメラをドローンに搭載して1Fサイト内の上空からホットスポットを可視化することができた。



小型軽量コンプトンカメラ

建屋内作業環境の放射線分布測定のために製作した小型軽量コンプトンカメラ（重さ680g）。これを架台に置いたり、ドローンに搭載し、放射線分布のイメージングを行う。



1F3号機T/B内での測定風景と3D放射線イメージング測定結果例（関連成果についてプレス発表済み 2017/09/11）

Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 55, pp. 965-970 (2018)



## ① 小型高線量率コンプトンカメラ (2)

### 【実施内容】

- 小型・軽量コンプトンカメラで1F原子炉建屋（1号機）内測定を行うべく東電と調整し、クローラーロボットに搭載して遠隔にて高線量率エリアの3次元放射線イメージング試験を実施した。

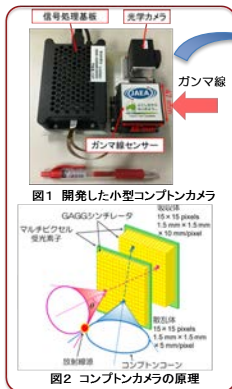


図1 開発した小型コンプトンカメラ

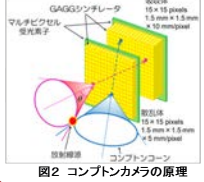


図2 コンプトンカメラの原理

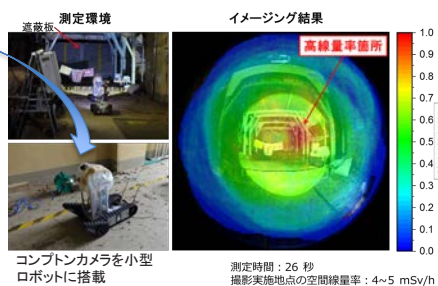


図3 1号機原子炉建屋における実証試験の様子。遮蔽板右側の隙間からのガンマ線ストリーミングを遠隔で検知。

Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 56, pp. 801-808 (2019)

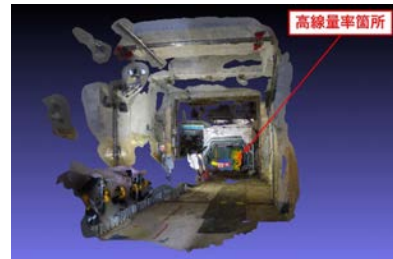


図4 フォトグラメトリで再構築した原子炉建屋内部の3次元モデルに、ガンマ線ストリーミングのイメージを投影して作成した3次元放射線分布マップ。

【成果】原子炉建屋内に存在するホットスポットを遠隔にて3次元的に可視化することに成功し、この成果をプレス発表にて公開した。併せて、H29年度に実施した3号機タービン建屋内の放射線イメージング試験成果についてもプレス発表を実施した。後者は廃炉・第46回汚染水対策チーム会合／事務局会議で報告するとともに、H30年度原子力機構理事長表彰 研究開発功績賞【特賞】を受賞した。  
論文：受理4件、解説論文2件、投稿中2件、プレス発表2件（NHK「サイエンスZERO」で特集される）

【今後の予定】100 mSv/hまでの動作を可能とする装置改造と、小型クローラーロボットとの組み合わせにより、未だ測定が実施されていない原子炉建屋の調査への適用を目指した試験を東電と調整している。また、東電と共同で3号機1階の汚染源の調査を計画している。

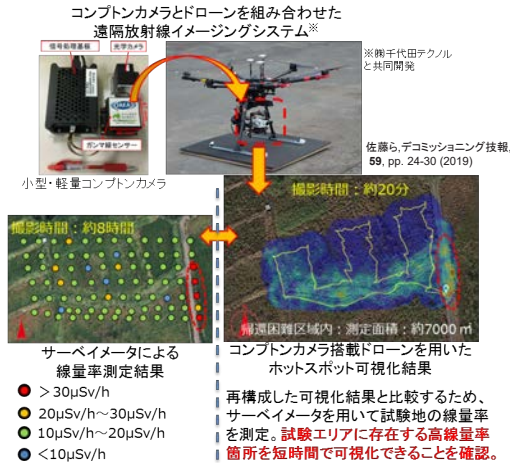




## ① 小型高線量率コンプトンカメラ (3)

### 【実施内容】

- 小型・軽量コンプトンカメラを搭載したドローンを用いて、福島県帰還困難区域及び1F構内廃棄物置場における遠隔での放射線イメージング試験を実施した。本成果はイノベーション・コースト構想補助金事業の一環で開発したシステムによる成果である。



【成果】 福島県帰還困難区域及び1F構内廃棄物置場における遠隔でのホットスポット可視化に成功した。  
論文：受理3件、特許出願1件【特願2018-173023】

【今後の予定】 ドローンにコンプトンカメラを搭載した遠隔放射線イメージングシステムについて、H31年度に民間企業からの販売されることとなっている。福島県帰還困難区域や1F構内における遠隔かつ迅速な広域放射性物質分布測定だけでなく、原子力防災ツールへの提供に資するものである。

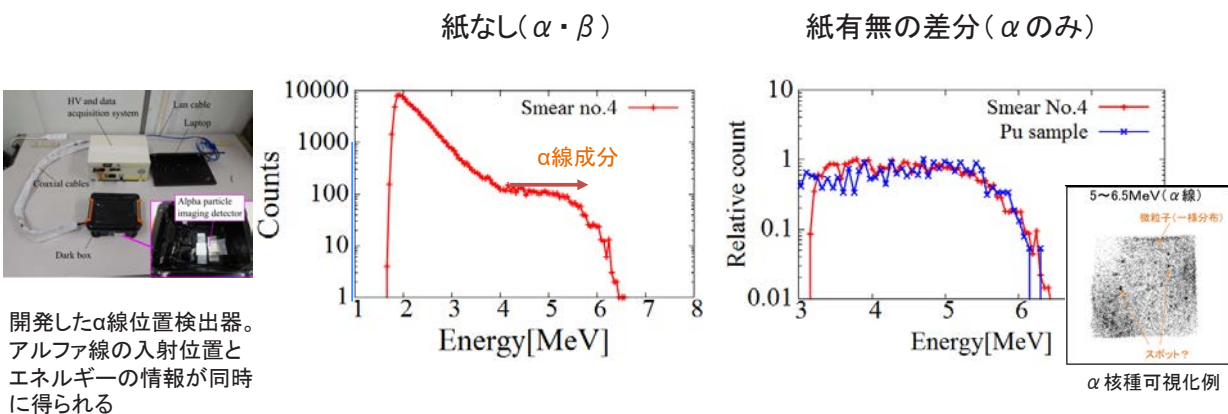
8



## ② $\alpha$ 汚染の計測(1)ー $\alpha$ 線スペクトルの測定結果

### 【実施内容】

東電と共同で1F建屋内作業環境における $\alpha$ 粒子の分布性状を調査するために $\alpha$ 核種位置検出器（薄型GAGG-SiPM）を用いて $\alpha$ 核種のスペクトル、粒子分布の継続調査を行った。



### 【成果】

論文：受理2本（計測手法、1F測定（Sci. Rep.誌（東電担当者も共著））、投稿中1本（ $\alpha$ ダストモニタ）。本検出器は $\alpha$ 核種分布とエネルギー情報が一度に得られ、作業員の放射線防護の迅速評価に有効となる

### 【今後の予定】

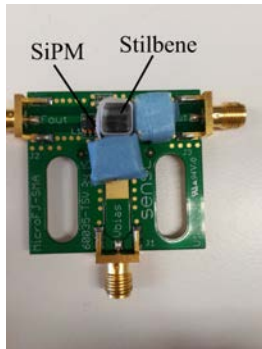
試料採取と測定を継続する。空気試料の採取も可能なよう準備中。また、 $\alpha$ ダストモニタの製作を行い、人工核種と天然核種(ラドン)の迅速分別評価を行う。

9

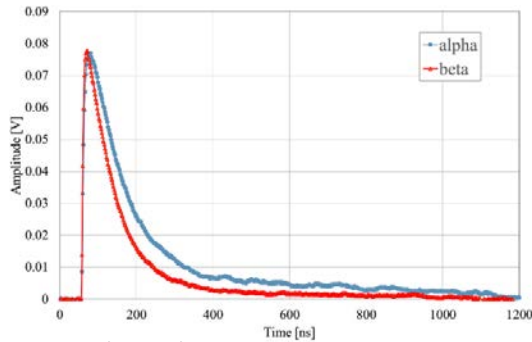


## ② α汚染の計測(2) — αβ弁別型検出器の製作

前頁に示した測定結果で、α核種とβ核種が試料中に同時に存在していることが明らかとなった。そこで、1回の測定でα核種とβ核種が同時に検出可能な測定器の開発を行う。



α β 弁別型検出器  
(ミシガン大学で製作)



α線とβ線の出力電圧波形の違い  
(α線の方がテールが大きいため、これを利用して両者を弁別する)

【成果】 論文：1本作成し投稿準備中。  
【今後の予定】 位置検出器と組み合わせてα・β位置検出器の開発を行い、α・β核種が混在するIF現場での試料測定を試みる。

10

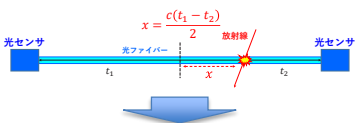


## ③ プラスチックシンチレーションファイバー (PSF) の高線量率環境への応用

【実施内容】 IF高線量率環境の放射線分布測定、特に狭隙部での適用を目指し、プラスチックシンチレーションファイバー (PSF) の高線量率環境での動作試験を実施した。

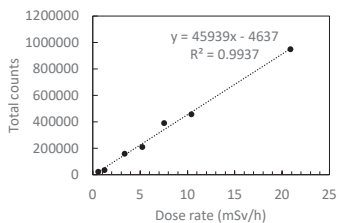
### Time-of-Flight (TOF) 法による放射線分布測定

シンチレーション光のファイバー両端への到達時間差から放射線入射位置を決定

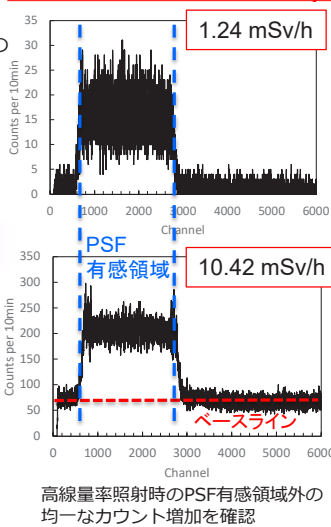


### ガンマ線照射場で高線量率特性試験

#### 線量率線形性 (1mmΦ×1)

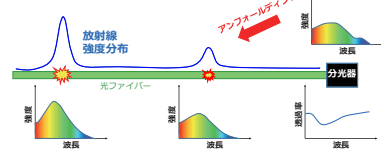


### 照射場全体照射結果 (Preliminary)

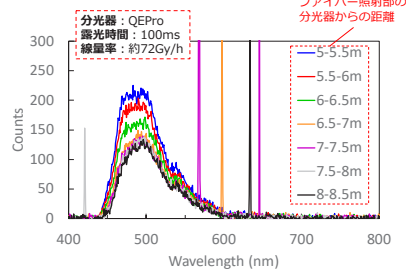


### 波長分解法による放射線源分布測定 (片側読み出し)

分光器で観測される波長スペクトルから波長毎の透過率の違いを利用して放射線の入射位置を逆推定する。



### 発光波長スペクトル測定結果例 (アンフォールディング前)



【成果】 ガンマ線照射場においてTOF法の線量率線形性、センサーのパイルアップ特性を確認した。加えて、発光波長スペクトルの測定による新方式の放射線分布測定法 (波長分解法) の原理検証試験を実施した。  
【今後の予定】 TOF法の高線量率環境下でのパイルアップ補正法の検討、波長分解法の原理検証試験を継続する。

11



## ④ 新型放射線イメージャーの開発

【実施内容】米国LBNL（ローレンス・バークレー国立研究所）と共同で新型放射線イメージャーの開発、画像再構成技術の開発を行う。

**Radiation measurement in the bldgs. of the FDNPS (1F)**  
JAEA

- Compact Compton camera
- LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)
- Photogrammetry
- Robot/Drone

Y. Sato et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 55, pp. 965-970 (2018)

(国研)日本原子力研究開発機構、プレスリリース資料より転載  
平成30年8月28日

**SDF (Scene Data Fusion) Technology in the Environment**  
LBNL

- Real-time 3D maps onboard
- 3D gamma-ray imaging
- Multi-sensor data fusion
- Localization and Mapping Platform

Hotspots Found

Complex 3D Environment Forest Contamination Mapping

**SDF in the High Dose-Rate Fields of 1F**

**FDNPS**

**Full 3-D mapping, contextual data fusion, and visualization of radiation in the high dose-rate fields**

*FDNPS: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*

【成果】昨年11月9日にLBNLが開発したイメージャーを1Fに持ち込み、実証試験を行った。

【今後の予定】来年1月/2月にLBNL研究員が富岡町のGLADS国際共同研究棟に滞在し、1F建屋内高線量率場での画像再構成技術についてJAEA開発技術との比較評価、及び線量率が高い場所での低汚染部位の汚染評価のための計測実験を行う。

12



## ⑤ バーチャルピンホールカメラの開発

【実施内容】高線量率環境下において動作可能な小型半導体を用いたバーチャルピンホールカメラの開発を行う。文科省：英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃炉加速化研究プログラム(国内研究)平成29年度新規採択課題であり、原子力機構、東大、東北大の共同研究として平成30年1月中旬より開始した。

従来型Pinhole Camera

- 重いコリメータが必要  
→現場での利用に制約
- 視野角に制限  
→現場で使いにくい

Virtual Pinhole Camera (VPC)

- 指向性検出器を用いるためコリメータが不要  
→現場での利用に制約
- 特定の方向から入射したガンマ線に対して高い検出効率を有する高アスペクト型指向性検出器により高線量率場での核種弁別とイメージングを可能とする画期的なアプローチ
- 指向性検出器群の焦点を仮想的なピンホールとして用いるため広い視野角をもつ

東北大学が開発に成功した高純度TlBrガンマ線センサーを利用

- Geの21倍の光電吸収
- 100 μmと極薄でも動作
- ピーク対コンプトン比が良好
- 高ガンマ線バックグラウンド下でも核種同定可能

平成30年度実施分

- 結晶育成
- 検出器試作・評価
- 照射試験実施(名大・原科研)

Counts vs Pulse Height (channel number)

<sup>137</sup>Cs spectra

3.2% FWHM

Depth corrected spectrum

2.5% FWHM

試作したTlBr検出器で取得した<sup>137</sup>Csガンマ線エネルギースペクトル

【成果】試作したTlBr検出器を用いて<sup>137</sup>Csガンマ線のエネルギースペクトルを取得し、662 keVガンマ線の光電ピークの確認。

【今後の予定】TlBr検出器をアレイ状に配置して、バーチャルピンホールカメラを構築する。指向性検出器の試作を行っており（現在、2手法で試験）、今後照射場での1F高線量率環境を模擬した動作試験を経て、次年度に1F構内で実証試験を実施する計画である。

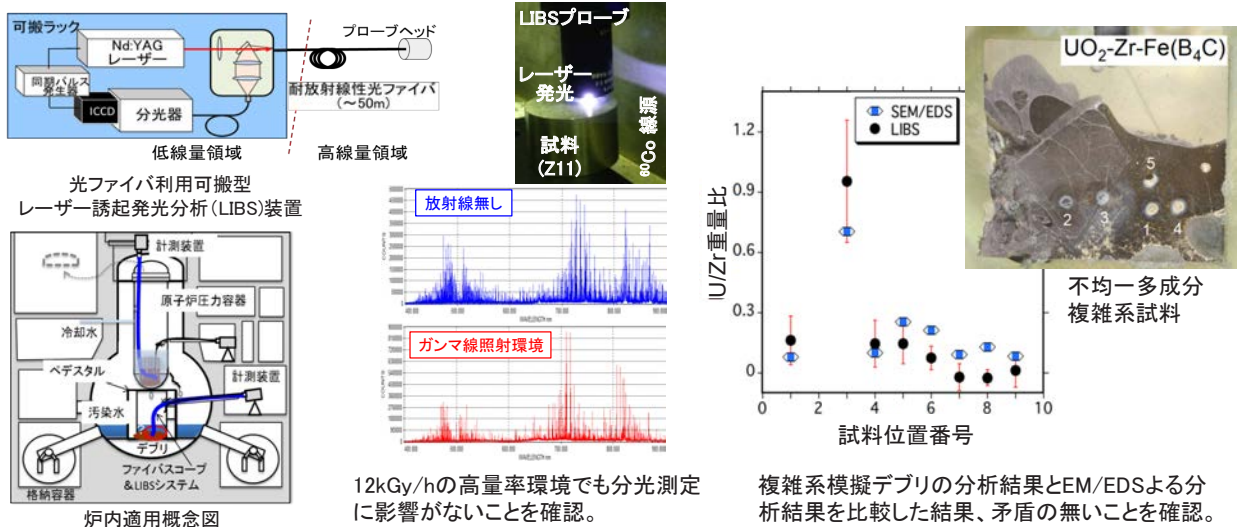
13





## ⑥ 炉内レーザーモニタリング・内部観察(LIBS)技術開発

**【実施内容】** 光ファイバ利用可搬型LIBS分析装置の基本形を開発し、50mの遠隔性、気中・水中でのU、Zr混合物等の分析性、10kGy/hでの分析性能、2MGyの耐放射線性を実証した。標準試料による検量線を不均一多成分複雑系U含有模擬デブリの分析に適用し、SEM/EDSによる測定結果と比較した結果、矛盾の無いことを確認した。



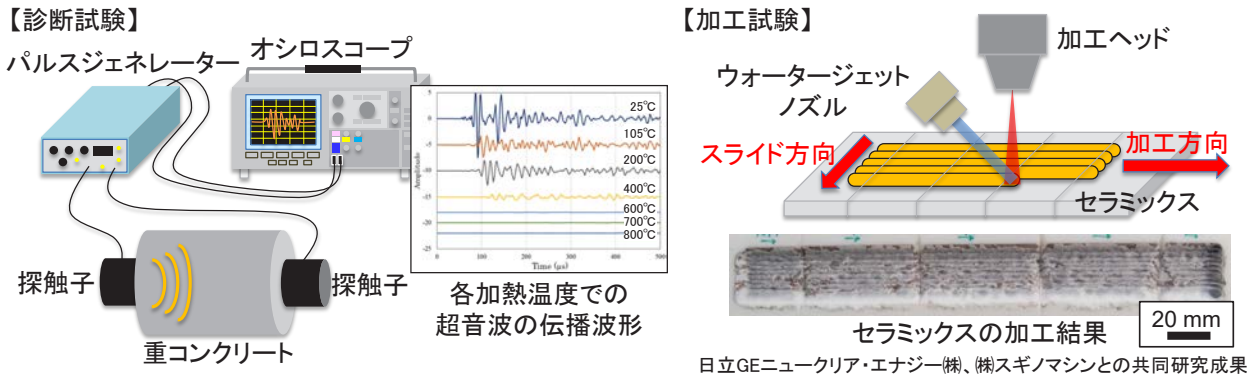
**【成果】**  
 ○東京電力HDの実施するデブリサンプリング事業への協力  
 遠隔性、耐放射線性の観点から、次期マクロ量サンプル時のセル内サーベランス技術として具体的検討を進めることとなった。  
 ○報告等  
 学術論文: 7報、解説: 1報、JAEA-Research: 3報、英知事業・先端計測事業等報告: 6報、国内・国際会議等発表: 約70件等



## ⑦ レーザー診断・加工技術の開発

**【目的】** レーザーを用いた炉内構造物の劣化状態、強度等の健全性評価を目的とした診断技術の開発及び、炉内構造物、燃料デブリ等の取出しを目的とした加工技術の開発を行う。

**【実施内容】** レーザー診断結果の妥当性評価に不可欠な、加熱重コンクリート(室温から800°Cまで)の超音波伝播波形を探触子により取得した。また、レーザーとウォータージェットを組み合わせたはつり除去加工では、従来実施した金属に加え、セラミックスに対する加工性特性を取得した。



**【成果】** レーザー診断結果の妥当性評価により、遠隔・非接触でコンクリート構造物の熱劣化を評価できる見通しを得た。また、金属及びセラミックスに対する加工特性評価により、炉内構造物や燃料デブリ等の加工に適用可能となる見通しを得た。  
 理事長表彰研究開発功績賞: 1件、プレス発表: 1件、論文: 2件(内1件は査読中)、学会: 9件 等

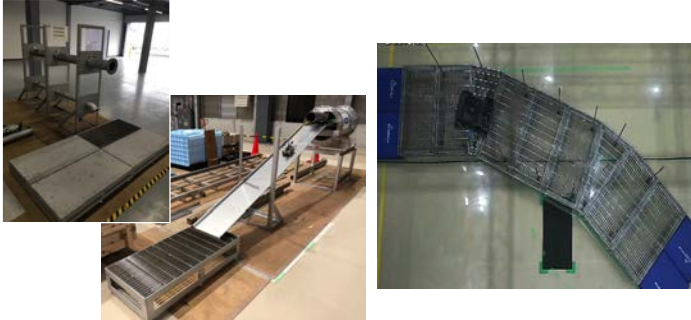
**【今後の予定】** 診断では、各加熱温度と機械的強度の関係を評価し、遠隔・非接触で熱劣化部の強度を予測可能とする。加工では、単位時間あたりの加工量の向上や加工時に発生する加工屑の発生量等を評価し、それらを回収するシステムの構築を検討する。



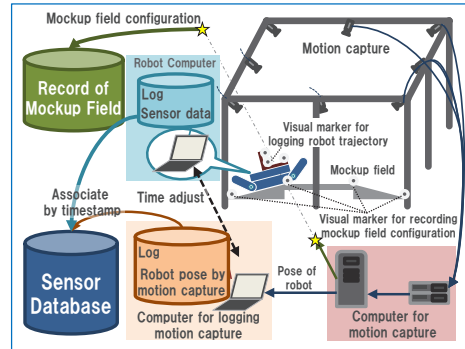


## ⑧ 標準試験法の開発

【実施内容】原子力災害対応遠隔操作機器のための標準的な試験方法の設計・開発を実施し、遠隔操作機器技術の開発および操作者の操縦技術向上に貢献する。



PCV内部アクセスおよびクレーチング環境を模擬した試験場の開発



地図作成技術SLAMの性能評価の枠組み

【成果】1F原子炉建屋内で実施された遠隔機器による調査作業の内容および環境について分析を行い、PCV内部アクセスやグレーチング路面の環境を模擬した試験場の開発を行った。開発試験場で遠隔操作ロボットを用いた実験を通じて評価方法について検討を行った。また、ロボットによる地図作成技術SLAMの性能評価を行う枠組みの設計を行い、評価用センサデータベースの構築を試みた。

【今後の予定】遠隔操作ロボットによる燃料デブリ等の試料サンプリングおよび搬送作業のための試験場・試験法の設計および開発を行う。



# 楢葉遠隔技術開発センターの運用状況

平成30年12月26日  
 福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
 楢葉遠隔技術開発センター

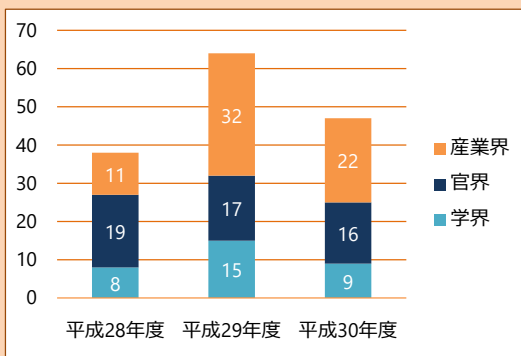
## 1. 平成30年度の利用状況(11月末時点)

### 利用状況

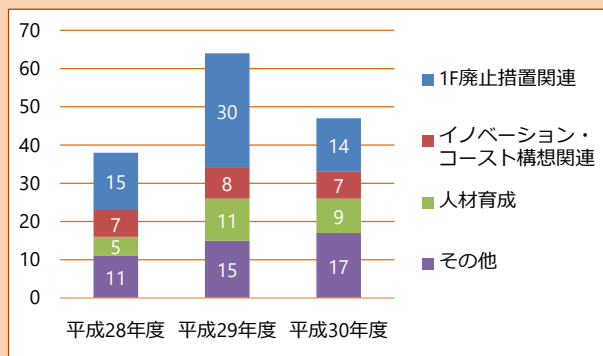
平成30年度 利用件数：47件  
 参考 平成29年度 利用件数：64件  
 平成28年度 利用件数：38件

○内訳 利用終了：26件  
 利用中：8件  
 利用予定：13件

### 利用件数-利用者区分別



### 利用件数-目的別



利用状況は11月末時点のため、現時点で平成29年度より少ないが、利用予定案件も考慮すると平成29年度と同水準の利用件数になると見込んでいる。また1F廃止措置の推進に寄与する利用としてIRID、東京電力ホールディングスによる利用も見込まれている。

## 2. 人材育成等に係る利用(11月末時点)

昨年度に引き続き、廃炉創造ロボコン等のイベントを継続して実施

平成30年度											
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
		The Green Program ▽ ▽The Green Program		▽サマースクール(東大) ▽サマースクール(福島高専)				▽第3回廃炉創造ロボコン ▽展示実演会			The Green Program ▽

### The GREEN Program-福島高専 (6月1日, 8月3日, 3月)

目的：福島県の文化や、1F事故の現状と復興について知見を得るツアー  
 内容：施設見学、遠隔技術開発に関する講義等  
 JAEAの協力：遠隔技術開発に係る講演、VR及びロボットシミュレータ利用に係るサポート

### サマースクール-福島高専 (8月23日)

目的：廃炉創造ロボコンへの事前検討  
 内容：廃炉創造ロボコンの競技フィールド事前確認、ロボットシミュレータの講義と利用  
 JAEAの協力：競技フィールドの説明及びロボットシミュレータに関する講演、サポート

### サマースクール-東京大学 (8月20日～22日)

目的：文科省  
 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム  
 内容：講義、VR等を利用したグループディスカッション  
 JAEAの協力：VR及びロボットシミュレータ利用に係るサポート

### 第3回廃炉創造ロボコン-福島高専 (12月14日～15日)

目的：文科省  
 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム  
 内容：廃炉に関する基盤研究を通じたロボットコンテスト  
 JAEAの協力：運営者への技術サポート及び運営サポート

### 福島県内企業・大学 廃炉・災害対応ロボット関連技術 展示実演会-福島県ハイテクプラザ (12月20日)

目的：福島県廃炉・災害対応ロボット研究会の会員企業や大学等の技術や製品、取組等を展示・実演  
 内容：1F廃炉・除染等に関連する事業者、災害対応に関する事業者、研究機関及び行政機関関係者に対し、参加団体らが特徴ある技術や製品、取り組みを紹介  
 JAEAの協力：VRシステムの見学ツアーの実施及び運営サポート

2

## 3. バーチャルリアリティシステムの利用

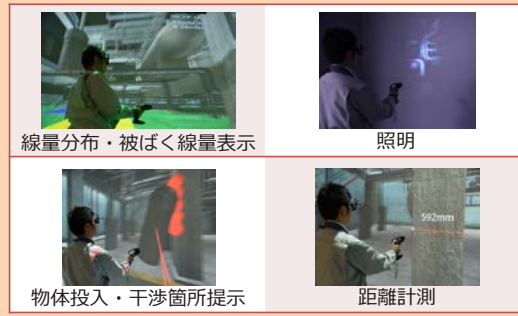
目的：東電1Fの廃止措置に向けて、高線量の作業現場における現場作業員の事前教育・反復訓練作業関係者による現場状況の共有及び作業計画の検討・立案等への環境の提供

現状：東電1F1号機～3号機(地下階、1階)の閲覧利用、内部調査に備えた2号機原子炉建屋1階、格納容器内部地下階等のCADデータの整備、格納容器貫通部(X-6ペネ)周辺、ペDESTAL等のVRデータの整備

今後：最新の内部調査結果等をもとにデータを整備する。またニーズを踏まえ、機能拡張等システムの高度化と環境データの整備を図る。



CAVE型4面スクリーン バーチャルリアリティシステム



線量分布・被ばく線量表示

照明

物体投入・干渉箇所提示

距離計測

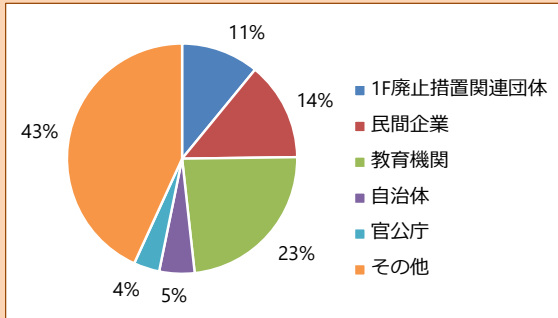
主な機能

3

## 4. 広報等の活動実績(11月末時点)

### 視察・見学実績

- 視察・見学件数：280件 (総件数1,102件)
- 来訪者数：延べ3,917名 (総人数 14,463名)



来訪者数割合

### 県内(福島県)学校等への理解促進活動

- 県内学校からの見学受入(5件・162名)  
施設設備の見学及びVRシステム体験から、廃止措置の現状について理解促進を図る
- 施設公開(7月29日)  
1F廃止措置、福島復興への貢献について広く一般の方への理解促進を目的に実施

### イベント出展実績

各種イベント出展において、概要説明パネルやロボットを出展し、利用促進活動を実施

日時	イベント名	場所
6月4日～5日	ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2018 in Kitakyushu	北九州国際コンベンションゾーン
7月11日	とちぎロボットフォーラムセミナー	栃木県庁東館
9月5日～7日	第36回日本ロボット学会学術講演会	中部大学春日井キャンパス
9月29日	ふたばワールド2018 inなみえ	浪江町地域スポーツセンター
10月10日～12日	RADIEX 2018	科学技術館
10月17日～21日	World Robot Summit 2018	東京ビッグサイト
11月3日	磐陽祭2018	福島工業高等専門学校
11月6日	施設利用相談会(主催)	檜葉遠隔技術開発センター
11月22日～23日	ロボットフェスタふくしま2018	ビッグパレットふくしま
12月13日～15日	SI2018	大阪工業大学 梅田キャンパス





# 放射性物質分析・研究施設 の整備状況

平成30年12月26日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
福島研究開発部門  
福島研究開発拠点 大熊分析・研究センター

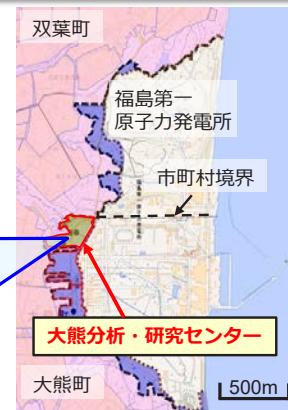


## 1. 大熊分析・研究センターの概要

1

### ■ 放射性物質分析・研究施設について

- 廃止措置等に向けた放射性廃棄物の処理・処分のため、放射性廃棄物や燃料デブリ等の性状の分析・評価や保管中の安全性の評価などに関する技術開発を行う施設。
- 施設管理棟、第1棟、第2棟の3つの建物から成り、施設管理棟は本年3月から運用を開始し、約40名の従業員が勤務している。第1棟（2020年度末頃運用開始予定）は建設工事中であり、現在1階部分の躯体工事を実施中である。第2棟は詳細設計を行っており、中長期ロードマップにおける燃料デブリ取出しの方針であるステップ・バイ・ステップのアプローチの方針に合わせて適切なタイミングで分析が開始できるように整備を進める。



<敷地全体配置図>



## 2. 施設管理棟について(1/2)

2

### ■ 建築概要

延床面積：4,786m<sup>2</sup>、地上4階建  
 主要構造：鉄筋コンクリート造、杭基礎  
 用途：居室、分析作業のモックアップ（ワークショップ）

- 平成28年9月7日に施設管理棟の起工式を実施、建築工事開始。
- 平成30年2月28日竣工引き渡しを受け、平成30年3月15日から運用開始。
- 今年度中に模擬鉄セル・模擬グローブボックス中に装置類を搬入設置する予定。



施設管理棟



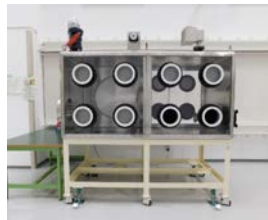
マニプレータ



施設管理棟 開所式  
(平成30年3月15日)



ヒュームフード



模擬グローブボックス



模擬鉄セル



## 2. 施設管理棟について(2/2)

3

### ■ OECD/NEAの専門家会合を平成30年11月26日に開催

施設管理棟にて、国際機関OECD/NEA\*1（経済協力開発機構原子力機関）のレガシー廃棄物や事故廃棄物等の特性評価に着目したプロジェクトの第1回専門家会合（EGCUL\*2）が開催された。本会合では各国における最新の知見や経験等を共有するとともに、福島第一原子力発電所の放射性廃棄物を対象とした日本での取組みに対する各国からの技術的提案と、それら廃棄物に対する特性評価に関する具体的な対策について、2年間かけて議論が進められる。

\*1 Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency (OECD/NEA)

\*2 Expert Group on Characterization Methodology of Unconventional and Legacy Waste (EGCUL)



大熊分析・研究センターご視察

○フランス、ルウェー、ロシア、イギリス、ウクライナからの専門家、国際原子力機関IAEA、OECD/NEAの他、経済産業省、原子力規制庁、原子力損害賠償・廃炉等支援機構NDF、東京電力、JAEA等の国内機関から関係者・専門家が会合に参加



### 3. 第1棟の概要

4

#### ■ 建築概要

延床面積：9,672m<sup>2</sup>、地上3階建、主要構造：鉄筋コンクリート造、杭基礎  
用途：鉄セル室、フード室、グローブボックス室、測定室等

○平成29年4月から建設工事開始。

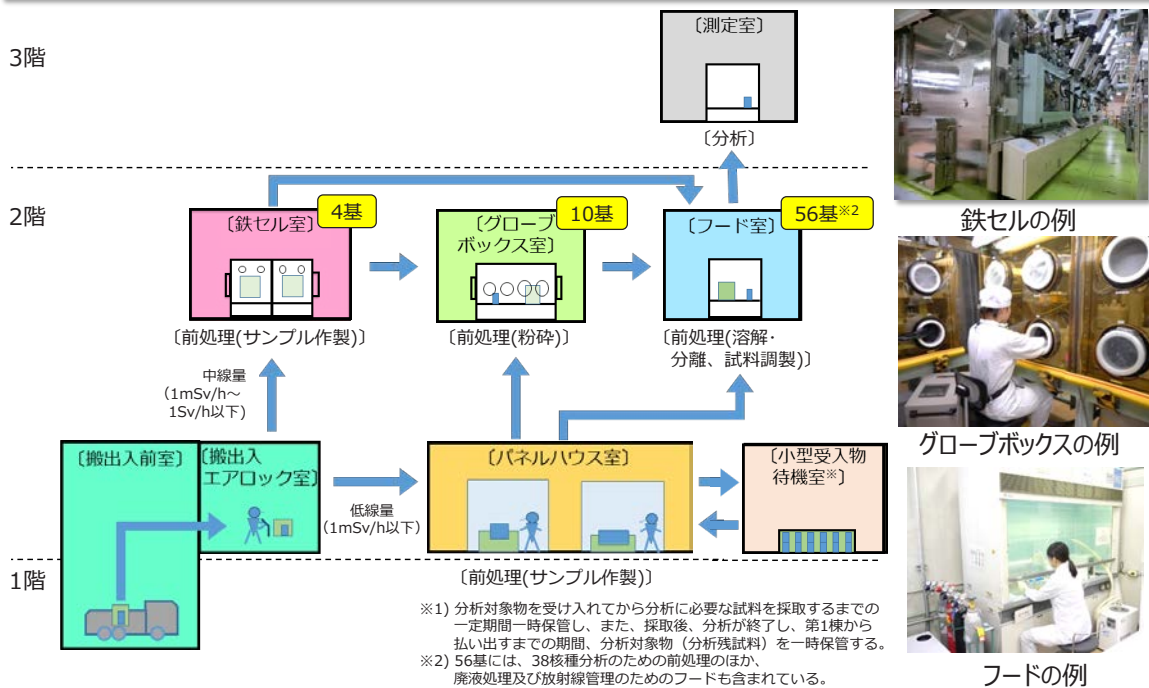
第1棟では、放射性廃棄物（中低線量のがれき類や水処理二次廃棄物）の処理処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し等を得るための38核種分析等を実施する。そのための分析手順と分析装置を設計し、試料動線、建屋レイアウトを定めた。



### 4. 第1棟の試料動線

5

■ 表面線量率が1mSv/hを超えるものは鉄セルで、それ以外はパネルハウス室にて前処理を行う。



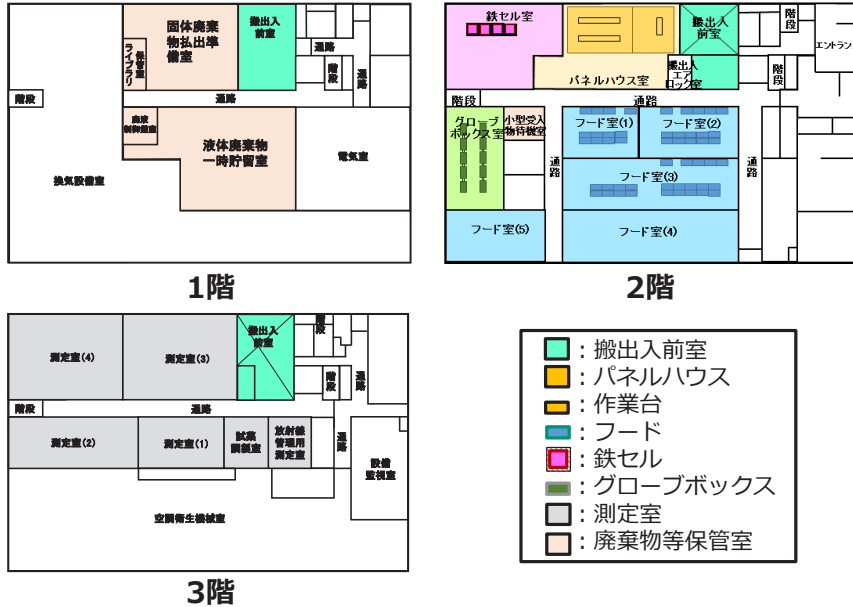




## 5. 第1棟の建屋レイアウト

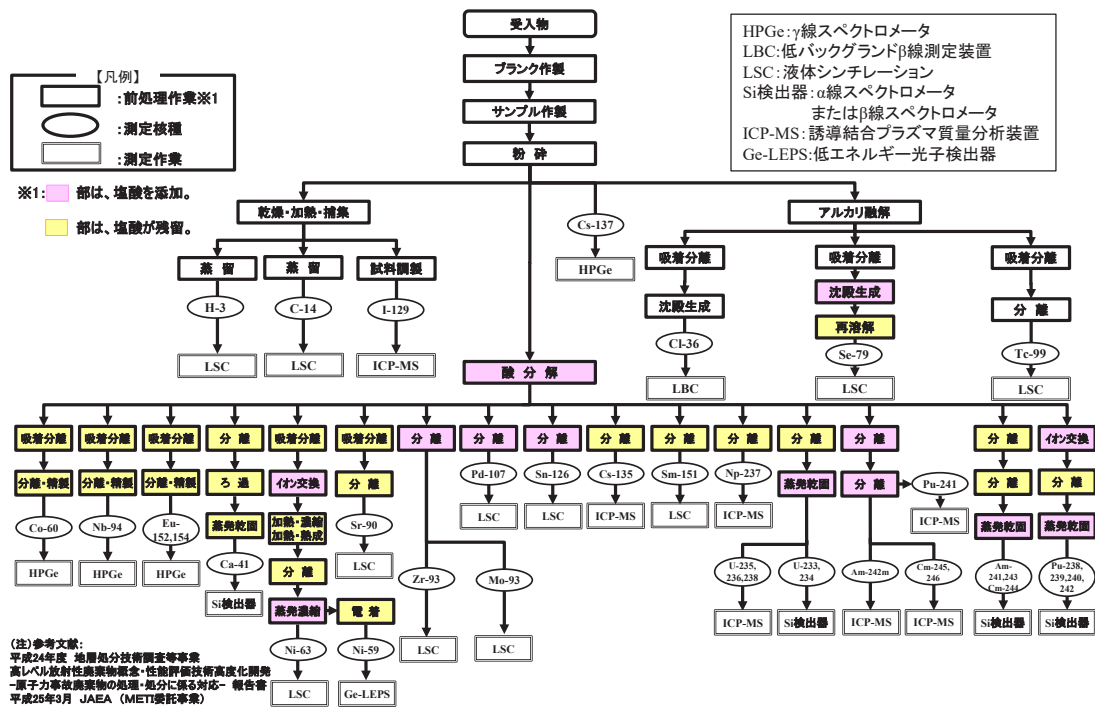
6

■ 分析試料は、1階の搬出入前室で受入れ、2階で前処理を実施し、3階で測定を行う。  
 将来の試料増加に備え、鉄セル、フードを増設できるように予備的措置を実施する。



## 6. 第1棟における38核種分析フロー(案)

7







## 7. 分析技術者の確保・育成

8

### ■ 分析技術者の確保・育成

- 第1棟・第2棟の運用開始に備え、機構内に放射能分析・物性分析のための技術者を事前に養成しておくことが必須である。
- 原子力科学研究所・核燃料サイクル工学研究所・大洗研究所において、若手技術者の現場における分析技術研修を実施中である。今後新入職員を対象に研修を充実拡大させてゆく。

### 短期的課題

#### 1. 分析技術者の育成

- 指導者、育成場所の確保
- 合理的な育成システムの構築
- 分析技術の高度化、合理化による必要技術者数の削減

#### 2. 分析技術の開発

- 多核種の分析に対応した前処理の合理化技術開発
- 測定の自動化技術開発

### 中長期的課題

#### 3. 分析技術者の技量の確保

- 分析技術者認定制度

#### 4. 長期間にわたる分析技術者の確保

- 育成計画の改訂

#### 5. 分析データの品質保証体制強化

- 品質保証体系への取り込み
- 分析技術の標準化
- 分析能力の確認

This is a blank page.

参考資料 3

評価シート

This is a blank page.



研究開発課題名:「燃料デブリの取出しに係る研究開発」

自己評価内容	
評 定	評価の観点に対する理由
A	<p>(1) 研究開発の進捗状況の妥当性</p> <p>燃料デブリの取出しに係る研究について、</p> <p>①廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供 ②NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積 ③国内外の研究協力及び貢献 の 3 項目に大別して評価する。</p> <p>①廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供</p> <p>1) 燃料デブリの性状把握</p> <p>・燃料デブリの性状の把握については、燃料デブリの取り出しに不可欠な基本的情報として、事故後の初期段階から網羅的な燃料デブリ情報の収集・提供に努めてきた。</p> <p>・具体的には国の各廃炉プロジェクトからの様々なニーズに対し、文献調査、模擬燃料を用いた試験、実際の TMI 燃料デブリを用いた試験、海外の研究機関との共同試験等を実施し、情報を取得している。</p> <p>・得られた燃料デブリの基本情報は「特性リスト」として取りまとめるとともに、適宜、各廃炉プロジェクトに提供し、各廃炉プロジェクトが定められた期限内に行う事業(例、平成 29 年の燃料デブリ取り出し方針決定、平成 31 年度の燃料デブリ取り出し方法の確定に向けた検討、等)に反映されていることから、進捗は妥当である。</p> <p>・また、国内に研究フィールドが無い MCCI 生成物の特性把握に関して、いち早く仏国 CEA や米国 ANL から情報を収集し、1F 炉内の事故進展や燃料デブリ組成の解析評価等の議論を通じて、仏国 CEA との MCCI 研究の共同研究を締結し、CEA での過去の試験サンプルの分析からその傾向を解析評価するとともに、その理解の上で、1F の RPV 内燃料デブリの状況を推定し、1F のコンクリート成分を用いた大型 MCCI 試験を行い、平成 29 年には特性リストへ MCCI 生成物の特性情報を追記できたことは、著しい進捗に値する。</p> <p>2) 燃料デブリに係る分析技術の開発</p> <p>・燃料デブリの取り出しに着手する前に燃料デブリを少量採取し、分析を行うこととされており、この分析を円滑に実施するために必要な技術開発を進めている。</p> <p>・具体的には、難溶解性の燃料デブリに対するアルカリ融解法の開発、燃料デブリ中に含まれる多種多様な元素の効率的な分析を目指すトリプル四重極 ICP-MS を用いた多核種合理化分析法の開発、X 線 CT 画像による密度分布と <math>\gamma</math> 線 CT による <math>\gamma</math> 線放出核種分布から燃料デブリの構成成分を識別する手法の開発等を進め、2020 年から行われる燃料デブリ分析に適用できる見通しを得ている。よって、進捗状況は妥当である。</p> <p>3) 燃料デブリ表面線量率評価手法の開発</p> <p>・燃料デブリの取り出し作業に先立ち、燃料デブリの表面線量率を適切に推定しておくことは、作業時の作業員等の被曝を低減し、管理するために不可欠であることから、燃料デブリ単体の表面線量率の評価式を考案するとともに、これを容易に適用できるツールの開発を進めている。</p> <p>・本年度は PHITS による計算結果との比較検証を経て評価式を完成させるとともに、使い易い EXCEL®を用いたツールとして年度内に関係者に配布する見通しである。これらのことから大きな進捗であると考えられる。</p> <p>4) プラント内線源・線量率分布評価手法の開発</p> <p>・1F の廃炉を進めるにあたって重要なプラント内部の線源・線量率分布の推定を可能とするため、燃焼・放射化計算を基本とし、炉内状況把握 PJ やデブリ性状把握 PJ の情報、さらに内部調査による線量率実測情報等を活用し、評価手法の開発を進めている。</p> <p>・この結果として、内部調査結果と整合する PCV 内 3 次元線量率分布の予測手法を開発し、IRID、東電に提供した。</p> <p>・また、燃料デブリを検知する手法として、従来の線量率測定に代わって、燃料デブリ特有の放射線を計測する方法を提言し、IRID の次期内部調査技術の開発に反映された。</p>

・本件については、約3年間で1F炉内評価に適用できるモデルを構築したことは著しい進捗に値すると考える。

5) 燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討

- ・燃料デブリの取り出しは 2021 年に着手される計画である。取り出した燃料デブリは適切に計量管理される必要があることから、1F 燃料デブリに適用可能な非破壊測定技術を開発している。
- ・これまでの検討から、4 つの非破壊評価技術(パッシブ中性子法、パッシブγ法、アクティブ中性子法、アクティブγ法)を組み合わせた統合 NDA システムが最も有望であるとの結論を得た。
- ・今後は試験フィールドを整備し、検証試験を実施するとともに、1F 燃料デブリサンプリングの結果を基に実燃料デブリへの適用性を評価し、最適化を図る計画であることから、進捗状況は妥当であると考ええる。

②NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積

- ・NDF が抽出した 1F 廃炉の重要研究開発課題のうち、燃料デブリの経年変化プロセス等の解明、特殊環境下の腐食現象の解明、及び廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明の 3 課題について研究を進めている。
- ・これらの課題についてはそれぞれ平成 29 年度に大学、東電、IRID、NDF、機構等の専門家からなる分科会を立ち上げ、研究開発戦略の検討を進めている。
- 1) 経年変化プロセス等の解明については、分科会の研究開発戦略に基づき、周期的温度変動による破砕挙動評価や混合物としての燃料デブリ評価手法の検討に着手した。
- ・今後は研究開発戦略に基づき、国内の大学や研究機関との共同研究を進める計画である。
- 2) 特殊環境下の腐食現象の解明については、平成 28 年度に英知事業に採択され、γ線照射下腐食試験環境の整備やラジオリスデータセットの整備を進めるとともに、腐食挙動に及ぼすγ線照射の影響に関する評価に着手している。
- 3) 放射性飛散微粒子挙動については、平成 30 年度より、東京大学への委託研究として水中・気液界面における放射性微粒子挙動に関する試験に着手するとともに、仏国(CEA、IRSN)とのデブリ切断時のダスト発生挙動について情報交換を進めており、研究協力につなげる計画である。

③国内外の研究協力及び貢献

➤ 燃料デブリの性状把握・分析技術開発

- ・IRID 組織の中で他のプロジェクト(以下、PJ)と密接な連携を図っている。特に、原子炉格納容器内部調査技術の開発 PJ、総合的な炉内状況把握の高度化 PJ、燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 PJ、燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法・システム高度化／基盤技術開発 PJ 等とは、燃料デブリ特性に関する情報の共有を図っており、非常に良好な連携が図れていると考える。
- ・OECD/NEA/CSNI の国際共同プロジェクト(PreADES)では機構/CLADS が主導して運営している(副議長、事務局を機構/CLADS 職員が務めている)。また、IAEA の Coordinated Research Project「Management of Severely Damaged Spent Fuel and Corium」に対し、ホスト機関として招聘を実施する等、国際社会への情報発信、英知の結集にも積極的に貢献している。

➤ NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積

- ・研究開発課題ごとに分科会を設置し(経年変化分科会、放射性粒子挙動分科会、腐食分科会)、研究開発の進め方について、大学や研究機関から分野を越えて参加を募集し、斬新的な意見交換も踏まえて新しい研究体系の構築に務めている。この中で、CLADS は中核研究機関として、活動を牽引、総括する立場をとり、研究フィールドの横断的な利用と人材交流等の企画立案も行っている。
- 1) 燃料デブリの経年変化に関する東京工業大学との連携では、微生物に関しての知見を有する東京工業大学と 1F 廃炉に関する知見やニーズに詳しい機構が協力・連携することにより、高いシナジー効果が発揮されつつある。(チェルノブイリでの微生物調査を計画中。本件は将来的な 1F の微生物調査の布石となる)
- ・また、東北大学および京都大学との連携では、原科研の第 4 研究棟における研究協力を実施中であり、アクチノイドに関する基礎科学や金属冶金など、関連学問に通じた大学の知見を加えることで専門性の高い研究成果が見込まれる。
- 2) 特殊環境下の腐食現象の解明に関する東北大学や QST 等との連携では、金属腐食に関する高い技術力

<p>をもつ大学と放射線研究を専門とする QST、アクチノイドの知見を有する機構が連携することで、放射線と流動条件下での腐食を評価することで、より廃炉環境に即した実用的な解析結果が期待できる。</p> <p>・上記以外の連携例として、東京電力や IRID、NDF などの 1F 廃炉関係者とは定期的に議論を行い、廃炉ニーズの理解と反映の仕方を模索している。一例として、1～3 号機の内部調査結果の理解とその後の調査戦略などの議論に参加し、デブリ分析、放射線計測等の観点から、有益な意見・指摘を行っている。また、このような機会を通じて、お互いの信頼関係の構築、協力体制の強化が図られているといえる。</p>
<p>(2) 情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方の見直しの必要性(継続、変更、中止等の決定)</p> <p>①廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供</p> <p>1) 燃料デブリの性状把握、2) 燃料デブリに係る分析技術の開発、3) 燃料デブリ表面線量率評価手法の開発</p> <p>・IRID・NDF/東電と適宜連絡を取りつつ、状況の変化を的確に捉え、研究の進め方、成果の反映等を行うとともに、IRID での IDR 評価や年 2 回の外部有識者による評価委員会等を行い、進捗状況等について、適宜、経産省等関係機関とも協議して実施している。</p> <p>・具体的には、1F 建屋内サンプルの分析、実デブリ分析の準備検討、等について、新たにプロジェクト業務としての追加、等に関する要望を受けて、適切な実施方法を模索しつつ実施計画に編入させている。</p> <p>4) プラント内線源・線量率分布評価手法の開発</p> <p>・燃料デブリの性状把握の研究や東電、NDF、IRID 等と連携を図りつつ、IRID 等のニーズに応じた線量評価結果の提示や、1F 炉内調査時に対する助言等を行った。</p> <p>②NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積</p> <p>・研究開発課題ごとに分科会を設置し(経年変化分科会、放射性粒子挙動分科会、腐食分科会)、研究開発の進め方について広く意見を求めている。</p> <p>・また、東京電力や IRID、NDF などの 1F 廃炉関係者と定期的に議論を行い、状況変化を確認するとともに、内部観察結果や最新の炉内状況に関する情報などを適宜取り込み推進することとしている。</p>
<p>(3) 効果・効用(アウトカム)の暫定的確認</p> <p>①廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供</p> <p>1) 燃料デブリの性状把握</p> <p>・燃料デブリの性状把握においては、模擬燃料デブリを用いた試験等から 1F で生成された燃料デブリの性状を推定し、取りまとめた。また、仏国 CEA との共同研究として模擬燃料デブリ、熔融燃料及びコンクリートの反応(MCCI)試験後の MCCI サンプルから、機械的特性データを取得した。これらのデータは燃料デブリ特性リストに反映し、IRID 内の関連する他の廃炉・汚染水対策事業の PJ(燃料デブリ取り出し PJ、収納保管 PJ 等)へ迅速に提供し、取り出し工法の検討、取り出しに用いる工具の選定、取り出した燃料デブリの収納缶設計等における基礎的な情報として用いられ、燃料デブリの取り出しに著しい貢献をした。</p> <p>・また、燃料デブリに関する研究成果を「燃料デブリの特性リスト」に集約し、関係機関に提供したことから、NDF の技術開発戦略プランや東電、IRID、等の廃炉研究に多大な貢献をした。</p> <p>・この「特性リスト」は炉内の各部位で想定される燃料デブリの特性について、一定の範囲を持って示していることが特徴であり、各特性値の使い方は、利用者によって異なることから、実際の利用に当たっては、利用 PJ 側からその用途をヒアリングしつつ、適切な利用方法の「処方箋」を与える形で情報提供を行っている。一例として、「空隙率」はデブリの組成や冷却速度等の要因によって大きく値が異なるものの、再臨界防止の観点では保守的に大きい値を利用することになるが、一方でデブリ取出し装置開発では空隙率の低い条件(高硬度)を保守的に採用する必要がある。このように「特性リスト」は単にリストを配布するだけに留まらず、情報利用側と PJ 間連携を密に行い、データの取得条件や試験範囲などの背景情報も加えつつ、利用側が適切な値を選定できるように相談・助言を行っている。このような PJ 間のコミュニケーションを通じてデブリ情報を伝達することで、各 PJ からの信頼と評価を得ており、これが廃炉 PJ における当 PJ に対する高い評価に繋がっている。</p> <p>2) 燃料デブリに係る分析技術の開発</p> <p>・燃料デブリの分析手法として ICP-MS を用い多核種合理化分析法の開発を進め、同法で重要なリアクションガスによる干渉核種の除去について多くの核種について有効であることを確認した。</p> <p>・また、燃料デブリ試料のアルカリ融解法、X 線 CT 及び <math>\gamma</math> 線 CT による燃料デブリ構成成分識別手法についても開発を進め、適用の見通しを得た。</p>

・これらの技術は、燃料デブリの分析に不可欠な技術であり、今後の適用が期待される。

3) 燃料デブリ表面線量率評価手法の開発

今回開発した評価ツールは、燃料デブリの表面線量率を適切に評価することが可能であり、また、EXCEL®を用いていることから誰もが容易に使用することができるものである。平成 30 年度末には東電等の関係機関に配布する計画であり、燃料デブリの取り出しにあたり、その作業計画において被曝量を推定する際に、大いに活用され、安全の確保、作業の合理化に多大な貢献が図れると期待される。

4) プラント内線源・線量率分布評価手法の開発・これまでに実施された内部調査結果と整合する PCV 内の 3 次元線量率分布の予測手法を開発し、1～3 号機に適用してデブリ取り出し開始時期の 3 次元線量率分布の予測値を世界で初めて示した。また、従来の線量率測定に代わるデブリ探知に有効な放射線計測手法を 1F 廃炉関係者に提言しており、IRID 内の次期内部調査技術の最適化に反映されるなど、PCV 内導入機器の耐放射線性評価、初号機の廃炉工法・工程の具体化に多大な貢献をしたと考える。

5) 燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討

・1F デブリ収納缶に適用可能な非破壊測定技術の開発を進め、中性子測定やガンマ線を用いた 4 つの非破壊測定法を組み合わせた統合型 NDA システムがもっとも有望であることを確認し、核物質量を評価するために有効な燃焼度相関を取得した。本法は 1F の核物質管理に不可欠であることから、着実な実用化を図る。

②NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積・いずれの研究テーマについても近年立ち上げたところであり、今後成果を出しつつ 1F 廃炉におけるニーズとのマッチングを図っていくことが期待される。

(4) 研究資金・人材等の研究開発資源の再配分の妥当性

➤ 研究資金

本研究分野については廃炉・汚染水対策事業(エネ庁補助事業)の“燃料デブリ性状把握”を中核として、燃料デブリに関する性状把握や分析技術、放射性微粒子の挙動解析等の研究を進めている。ここで得られた成果については、IRID、NDF、東電等のニーズに対応する形でタイムリーに情報の提供を行っている。

また、燃料デブリの経年変化や特殊環境腐食については、運営費交付金や英知事業の公募研究の外部資金を獲得して研究を進めており、上記の補助事業では実施が困難な基礎基盤的な研究に特化する形で研究を進めている。

更に、実デブリサンプルの分析、1F 現場サンプルの分析等については、その成果を炉内状況把握及び廃棄物処理処分の研究者らとも密接に連携して実施して行くことが重要である。また、燃料デブリの「特性リスト」については、MCCI 特性の集積により一定の完成度には達しているものの、今後、MCCI サンプルを始めとする 1F 実試料の分析結果を反映し、適宜、情報のフィードバックと改定作業を実施して行く。

このように、本研究分野については、廃炉補助事業、運営費交付金、文科省公募、等の多様な資金を適切に調整しつつ研究開発を推進している。

これらの研究資金の概算を以下に示す。

◎廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供について

IRID 補助金事業(平成 24-30 年度)、約 4 億円/年(総額)、うち機構分約 3 億円/年)、平成 31 年度以降も、燃料デブリ等のサンプル分析、放射性微粒子の挙動解析、等を中心に実施して行くことで、プロジェクトニーズに即した貢献を実施して行く。

◎NDF 重要研究 6 課題に即した専門知識の集約に係わる基礎基盤研究について

運営費交付金予算

◎原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究について

文部科学省の英知事業「特殊環境腐食に関する構造材の健全性評価」(平成 28-平成 31、3 か年計画、約 1 億/3 か年)文部科学省の日英公募事業「(平成 28-平成 31、3 か年計画、約 1 億/3 か年) また、加えて、燃料デブリの経年変化や材料腐食研究等の基礎基盤的な研究については、GLADS 補助事業等の外部資金の獲得を検討している。

➤ 人材

プロジェクトや基礎研究を牽引すべき中間世代が不足する中、機構内での人材の確保、中途採用による研



<p>           究員や技術員の確保、外国人研究者の補充等により、当面の人材を確保している。            特にプロジェクト経験者が少ないことから、研究課題の掘り起こし、成果集約の方法論など、研究開発全体を俯瞰的に統括できるプロジェクトマネジャーの育成が急務である。これに対して、公募事業や、分科会、OECD/NEA プロジェクトなどの主導的な運営を通じて、30 代後半から 40 代の数少ない中堅クラスの研究員・技術員に対して OJT を通じた技術継承・人材育成を行っている。            また、今後は実デブリの分析等、ホット試験研究が増えてくる傾向にあり、施設現場とも連携しつつ経験と知識をバランスよく備えた若手人材の育成を目指していく。         </p>
<p>           (5)その他            ○イノベーション創出への取組み            ・本研究課題における成果は、いずれも 1F 廃炉における注目が高く、廃炉作業の検討において大きなインパクトを与えることが明白であるが、イノベーション的な要素は少ない。一方で、燃料デブリの分析技術や非破壊計測、計量管理技術などについては、イノベーション創出の要素はある。燃料デブリは通常の分析技術や非破壊計測技術の適用が困難な複合成分からなる熔融固化体であり、既存の知見から脱した新しい発想による技術開発が必要である。これに対して、CLADS 補助事業や国際協力を通じて、国内外の専門家を集めた議論を進めている。昨年は米国ロスアラモス国立研究所と合同で核物質計量に関する専門家会合を実施しており、若手研究者にとって新しいインスピレーションを得る機会となった。また、次年度には FRC による専門家会合を計画しており、イノベーションに繋がる研究開発の議論の場としたい。         </p> <p>           ○若手研究者の育成            本研究分野は、核燃料物質の知見をベースとして事故解析、廃棄物管理、放射線計測・分析技術、放射線管理、核燃料再処理等の原子力研究の横断的な知見を必要とする。具体的には、デブリ性状把握、分析・計測技術等の廃炉に直結したプロジェクト的な研究部分と科学的な挙動評価・解析、メカニズム解明を主体とする基礎基盤研究からなる。このような 2 つの側面を有する研究では、若手やシニアの能力をバランスよく育成する上で効果的な研究分野である。            IRID 補助事業、OECD/NEA、IAEA 等では、次世代のプロジェクトリーダーとなる中堅クラスの研究者の育成を行う最適な機会であり、リーダーとしてプロジェクト運営能力を磨くと同時に対外的なプレゼンスを示す絶好の機会である。            一方、重要 6 課題に対応した「デブリ経年変化の挙動評価」、「放射性微粒子の挙動研究」、「特殊環境腐食挙動評価」については、若手研究者が中心となり、それをシニアが支援する形を取ることで、原子力学会等での優秀講演賞の獲得や英国ブリストル大からの招待講演、外来研究員の依頼などの要請を受けることに繋がっている。            また、仏国 CEA との MCCI 協力においては、4 年間の協力期間中で計 3 名の若手(30 代)研究が社内留學生試験に合格し、1 年間の留学経験を積み、プロジェクトとは独立した個々の研究者として、専門家との議論と共同研究を通じて研究経験を積んだことは、研究能力の向上のみならず、英語力向上、幅広い人脈形成等、今後の研究活動に多大な影響を与える結果となり、研究者として大きな自信と成長に繋がっている。            さらに、シニア世代が積極的に大学等での特別講義、学会や各種セミナーでの講演、新聞・TV・雑誌のプレス対応等を実践することにより、学生や一般の方に対する廃炉への理解の促進に貢献しているとともに、このようなシニア世代の積極的な活動については、若手研究員への大きな啓蒙と刺激に繋がっている。            大学と共催した FRC では、CLADS 内の他部署(炉内状況把握ディビジョン)と連携して、機構の若手がファシリテーターとして、学生を交えた小テーマ毎のチームを形成、議論をリードすることで、英語による説明、ディベート能力を高めるとともに学生と国外研究機関の専門家や若手研究者との交流の場を設けることで、研究の面白さを認識してもらう機会を創出している。         </p> <p>           ○国内外他機関との連携の妥当性            「(1) 研究開発の進捗状況の妥当性 ③ 国内外の研究協力及び貢献」の欄に記載         </p>



研究開発課題名:「事故進展挙動評価に係る研究開発」

自己評価内容	
評 定	評価の観点に対する理由
S	<p>(1) 研究開発の進捗状況の妥当性 事故進展挙動評価に係わる研究開発は、 ①廃炉措置ロードマップに即した廃炉プロジェクトへの知見提供 ②事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究 ③原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究 の3項目に集約して推進している。</p> <p>① 廃炉措置ロードマップに即した廃炉プロジェクトへの知見提供 1F事故で顕在化した重要課題(制御棒破損、炉心ガス透過性、下部ヘッド破損、燃料デブリ凝固、等)や、外部機関から機構に対する期待が高かった事故時プラントデータの詳細分析について、研究課題を改編・追加し、詳細な取り組みを進めた。さらに、事故進展挙動解析に係わる要素研究(後述②)の知見や、1F現場データの知見等を加味した評価を進めた。 獲得した知見の廃炉プロジェクトへの効果的な提供に向けて、平成 28～29 年度に、総括代表機関として IRID 補助金事業【総合的な炉内状況把握の高度化】を受託し、プロジェクト内に多分野専門家による【コアチーム】を設置し、機構の新規知見、1F 現場データ、国内外の関連研究、等の成果を全て活用し、外部機関の専門家と連携した総合評価を行った。評価結果は、喫緊の重要マイルストーンである【燃料デブリ取出し方針の決定(平成 29 年度)】に向けた予備設計において廃炉プロジェクト側が活用しやすい基盤データベース【炉内状況推定図】【FP・線量分布図】としてとりまとめ、重要成果物として提供することができた。事故進展挙動評価の研究成果が、初めて具体的に廃炉プロジェクトに貢献した成果として、国内外で高く評価された。 今年度は、次の重要マイルストーンである燃料デブリ取出し方法の確定、及び、燃料デブリの取出し開始に向けて実施される廃炉プロジェクトのシステム設計に向けて、外部機関から機構に対する期待が特に高い、まだしばらく内部調査が困難な【圧力容器の炉内状況】に係わる推定図の高度化について新たな研究プロジェクトを立ち上げるなど、廃炉の現場ニーズを適切に反映した研究を継続している。</p> <p>②事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究(事故進展挙動評価に係わる分科会) シビアアクシデント事故進展の解析では、複雑な現象が重畳するだけでなく、シナリオごとに注目すべきプラント部位や事象が異なるため、課題の的確な分類と効果的な研究開発の進捗の重要性が、国内外で広く認識されている。外部から機構に対しても、貴重な研究資源を有効に活用しつつ、成果をタイムリーに廃炉現場に提供できる研究開発技術マップの整備が期待されている。今年度中に、廃炉研究プラットフォームの下に事故進展研究の分科会を立上げ、国内の広い分野の専門家の観点で、事故進展シナリオに係わる重要課題の抽出とその廃炉現場へのデリバリーの議論ができる環境を整備することができた。現在、1F現場で新たに取得された知見等も考慮しつつ、重要課題の抽出作業を進めている。年度内には一次的な課題抽出を行い、次年度は PIRT と言われる重要度分類評価を進める計画である。このような場を通じて、事故進展挙動解析に係わる機構の研究成果が、第三者レビューを経つつ、直接廃炉プロジェクトにデリバリーされる体制を整備できた点は評価できると認識している。</p> <p>②事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究(要素研究) 以下の5つの研究分野に集約し研究開発を進めた。(1)事故時熱水力挙動評価、(2)事故時の燃料損傷・溶融評価、(3)構造材・圧力容器挙動評価、(4)放射性物質化学挙動評価、(5)溶融コリウム凝固挙動評価。 さらに、6つ目の研究分野としてH30年度に、外部から機構に対する期待が高い(6)RPV 状況推定図の精度向上に係わる研究を立上げ、予備解析と試験計画の具体化を行った。以下に実施概要をまとめる。</p> <p>(1)事故時熱水力挙動評価・・・高温高圧ボイド率分布の計測試験により整備したデータベースの、1F 事故初期の炉内熱水力挙動評価に向けた適用性検討を開始した。査読付き論文を執筆するなど予定通りの成果が得られている。</p> <p>(2)事故時の燃料損傷・溶融評価・・・基礎工との協力で開発中の JUPITER コードに対し、炉内溶融物などの物性や挙動要素モデルを組み込み、今後の 1F 内部調査の結果を反映しつつ、炉内状況把握の高度化に向</p>

	<p>けた知見が得られる見通しを得た。なお、本課題は先進的な燃料損傷・溶融解析手法を開発するものであり、若手中心に 10 件以上の投稿論文を執筆するなど、基盤研究としての成果は当初予定通りと認識している。さらに、1Fプラントデータの詳細分析により、下部ヘッドに崩落した時点での燃料デブリ熱条件の差と下部ヘッド破損への影響を予測し、上述の IRID 事業に知見提供した。これは、IRID 事業で取得した炉心ガス透過性に係わる知見とともに、2、3 号機の炉内状況推定図における重要な判断根拠となり、その成果は平成 30 年理事長表彰、研究開発功績賞に繋がった。</p> <p>(3)構造材・圧力容器の挙動評価・・・基礎工及び安全研究センターと連携し、拡充した材料データベースを用いて、クリープ破損評価やアブレーション挙動予測などの手法を開発し、炉心溶融時の下部ヘッド破損挙動の評価手法の高度化を着実に進めている。本分野は、原子力安全研究において、国際的に専門家の認識が一致する重要研究分野であり、査読付き論文 5 本執筆するなど、着実に成果が挙がっている。</p> <p>(4)放射性物質化学挙動評価・・・現状、シビアアクシデント解析コードに、FP 化学挙動の知見はほとんど組み込まれておらず、国際的に認識が一致する重要研究分野となっている。FP 放出移行再現実験装置 (TeRRa)を整備し、体外的に高く評価される実験データを多く取得、論文執筆すると共に、これらを用いた FP 化学挙動データベースの開発を着実に進めている。成果の一部であるセシウムと鋼材との反応に係わる知見は、上述の IRID 事業における FP 分布推定図の重要な判断根拠となった。また、セシウム-ヨウ素-モリブデン-ホウ素-酸素-水素のデータベースは、OECD/NEA の TCOFF プロジェクトなど、国際協力に広く活用されている。</p> <p>(5)溶融コリウム凝固挙動評価・・・従来ほとんど知見がない、溶融燃料(コリウム)凝固時の挙動は、国際的に専門家の認識が一致する重要課題である。チェコ CVR と共同で貴重な模擬試験データを取得すると共に、製錬分野の解析手法を応用し、基本解析モデルを整備した。模擬試験データで見出されたウランとガドリウムの同伴性は、1F 燃料デブリの再臨界評価に向けた重要知見として活用されている。</p> <p>(6)RPV 状況推定図の精度向上・・・内部調査が困難で、外部から機構に対する期待が高い本研究テーマに関しては、燃料デブリが相当量残留していると予想されている 2、3 号機について、伝熱・燃料デブリ移行解析と試験研究・要素反応解析、及びそれらに基づく総合評価からなる、新たな研究プロジェクトを平成 30 年度に立ち上げ、研究開発に着手した。内部調査で観察された 2、3 号機の下部ヘッド破損とペDESTAL 堆積物の違いの解明に向けた新たな知見獲得と評価信頼性の向上を目指している。</p> <p>③原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究</p> <p>今後、1F知見を活用した原子力安全性向上の基盤研究推進が重要となると予想される(諸外国では、既に、主にこの観点での研究開発が進捗している)。国内においても軽水炉安全・人材育成ロードマップにおいて、この分野の研究の重要性が指摘されている。機構は、先見的に、平成 28 年度から、経産省の原子力安全基盤高度化事業【シビアアクシデント時の燃料破損・溶融過程解析手法の高度化】を受託し、燃料破損要素モデルや熱力学データベースの整備、検証模擬試験などを進めている。本事業の中間成果として、燃料集合体レベルでの機構論的な燃料破損・溶融解析ツールのベータ版、および組み込まれている要素モデルやデータベースのベータ版を公開し(平成 31 年度期首)、国内外の関連研究で活用してもらえようように整備する予定である。</p> <p>これらの研究成果に着目した国内外研究機関から、以下のような情報交換・研究協力の打診が来るなど、当初想定した以上の成果が挙がっていると認識している。(i)米国サンディア国立研究所、仏国 IRSN、国内のエネ総研から、機構の燃料破損・溶融要素モデルの、MELCOR、ASTEC、SAMPSON への組み込みに向けた情報交換、(ii)欧州 SAFEST から、機構の模擬試験装置群の欧州ニーズでの共同利用に向けた情報交換、(iii)豪国 ANSTO から、事故耐性燃料の事故時ふるまいに関する基盤情報交換、など。</p> <p>なお、本事業で実施した大型模擬試験、及び、関連試験施設群の富岡地区への整備は、富岡地区で初めて整備した大型試験装置であること、その装置仕様が革新的で国内外研究機関から注目され、共同利用の道筋を拓いたこと、などの観点で、平成 30 年度機構理事長表彰、創意工夫賞特賞を受賞した。</p> <p>(2) 情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方の見直し(継続、変更、中止などの決定)</p> <p>① 研究成果の廃炉現場へのデリバリー方法</p> <p>廃炉基盤研究の分野では、平成 27 年度までに、事故進展挙動評価に関する知見を総合評価し、廃炉プロジェクトに対し直接活用できる成果物としてデリバリーする必要性が指摘されていた(平成 27 年度までは、事故進展挙動評価に係わる IRID 事業は、モデル整備に力が置かれ、十分な成果物を得られていないと評価されていた)。そこで、平成 28～29 年度に、機構が総括代表として IRID 補助金事業【総合的な炉内状況把握の高度化】を受託・牽引し、そこに国内専門家を集結したコアチームにおいて総合評価を行う体制を整備した。これにより、平成 29 年度時点で活用できる全ての知見を網羅し、【燃料デブリ取出し方針の決定</p>
--	---

	<p>(平成 29 年度)】に向けた廃炉工程基本設計に対し、【炉内状況推定図】【FP・線量分布図】を提供した。これは、事故進展解析で得られる知見が始めて、廃炉関連プロジェクトに対し、直接活用できる成果物として提供された初めての重要成果として、国内外の関連機関から高く評価された。</p> <p>平成 30 年以降は、現場で随時取得されるアドホックな知見等を活用した【炉内状況推定図】【FP・線量分布図】の高精度化が要請されている。特に、まだしばらく現場データが取得できない RPV 内部やペDESTAL 堆積物の深さ方向の知見については、解析研究に頼らざるを得ず、外部から機構に対する期待が高い。当面は平成 31 年度に予定される燃料デブリ取出し方法の確定、さらにそれ以降の燃料デブリ取出し開始に向けた廃炉関連プロジェクトのシステム設計に対し、高度化した推定図を提供することが期待されている。このような外部状況の変化を勘案し、今年度、機構内の廃炉研究プラットフォームの下に事故進展研究分科会を立上げ、課題の重要度評価が第三者のレビューを受けつつ行える体制を整備した。分科会には、NDF、IRID、東電、メーカー、大学なども参加いただき、評価結果が直接廃炉関連プロジェクトにデリバリーできるように整備すると共に、研究課題の優先度評価を進める体制を整備した。</p> <p>② 原子力安全性高度化研究への展開</p> <p>諸外国研究機関では、1F 廃炉基盤研究への直接の興味は薄れつつあり、1F で得られた知見を活用した原子力安全性向上の基盤研究が大きく進捗している。国内においても、1F 廃炉と原子力安全性向上の基盤研究相互の連携がますます重要となってくると考えられる。規制側の安全研究については、機構の安全研究センターが受け皿となり、着実に研究を進捗している。これに対し、燃料・プラントメーカーや電力会社など産業界の観点での原子力安全研究については、今後の整備が必要と認識している。CLADS は、従来より、経産省受託事業として開発・推進の観点での基盤研究を進めており、その成果物は、国内外の原子力安全研究機関などから注目されている。これらの成果物を実際に外部機関で活用してもらうことで実用化を進めることが肝要である。今後、国内外の研究動向と歩調を合わせつつ、機構の研究成果物を公開し、国内外のプロジェクトに活用してもらう体制を整備する必要がある。</p>
	<p>(3) 効果・効用(アウトカム)の暫定的確認</p> <p>① 廃炉措置ロードマップに即した廃炉プロジェクトへの知見提供</p> <p>事故進展挙動解析に係わる研究成果を、廃炉プロジェクトにタイムリーに有効な形で提供するため、IRID 事業を受託し、さらにコアチームを設けて、平成 29 年度時点で活用できる全ての知見(1F 現場観測、事故時プラントデータ、各種模擬試験、シビアアクシデント解析、要素試験・モデル、データベースなど)を集約して、専門家横断での総合評価を行った。評価結果は、喫緊の最も重要なマイルストーンである【燃料デブリ取出し方針の決定(平成 29 年度)】に向けた廃炉プロジェクト各工程での予備設計で活用しやすい基盤データベース【炉内状況推定図】【FP・線量分布図】としてとりまとめて提供し(資料 6-5-3 P10~13)、予備設計の設計根拠及び不確かさ検討に活用された。これは、事故進展挙動評価の研究成果が、初めて具体的に廃炉プロジェクトに大きく貢献した成果として高く評価された。</p> <p>特に、事業内で機構が主担当した、炉心物質崩落時の事象進展においてとりまとめた 2、3 号機の崩落時炉心エネルギーの違い(資料 6-5-3 P15)と模擬燃料集合体の加熱試験の結果(資料 6-5-3 P17)は、これら号機の下部ヘッド破損状態の評価結果を取りまとめる上での最重要知見となったことは高く評価できる。この成果は、国際会議 NUMAT2018 で招待講演に採用されるなど、国際的にも高く注目された(資料 6-5-3 P47)。さらに、平成 30 年理事長表彰にも繋がった(資料 6-5-3 P46)。また、センウムと鋼材との反応機構の解明(資料 6-5-3 P19)は、FP 分布図の重要な評価根拠を提示したとして外部から高く評価された。1F 現場サンプルの分析(資料 6-5-3 P20)においては、サンプルが形成された過程の化学状態を逆解析することで、熔融燃料とステンレス鋼の液相を介した反応の可能性を推定するなど予想以上の成果が挙げられている。</p> <p>今年度からは、次の重要マイルストーンである燃料デブリ取出し方法の確定、及び、燃料デブリの取出し開始に向けて実施される廃炉プロジェクトのシステム設計に向けて、外部機関から機構に対する期待が特に高い、まだしばらく内部調査が困難な【圧力容器の炉内状況】に係わる推定図の高度化について、新たな研究プロジェクト(資料 6-5-3 P24~25)を立ち上げるなど、廃炉の現場ニーズを適切に反映した研究を継続している。本研究を通じた推定図の高度化に対しては、東電や NDF からの期待が高いと認識しており、着実に成果を上げることで、廃炉プロジェクトに具体的に知見提供するだけでなく、将来的な外部資金獲得の可能性にも繋がると認識している。</p> <p>② 事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究 (研究課題の優先度を評価する体制の整備、分科会立上げについて)</p> <p>シビアアクシデント事故進展挙動解析に係わる研究課題については、廃炉推進機関を含めた、多分野横断</p>



した専門家による重要課題・優先度に関するコンセンサス構築と、その 1F 廃炉現場へのデリバリー方法とタイミングに関するとりまとめについて、外部から機構に対する要望が強い。これに対し、今年度中に、廃炉研究プラットフォームの下に事故進展研究の分科会を立上げ(資料 6-5-3 P22~23)、議論を進める環境を整備することができた。さらに、年度内には一次的な課題抽出を行い、次年度は PIRT と言われる重要度分類評価を進める計画である。この活動は、機構に対する外部からの要求・期待にタイムリーに応えることができたものであり、東電、NDF、IRID、メーカー、大学、研究機関などから幅広い専門家に参集いただけただけことは高く評価できる。

(要素研究について)

- (1)事故時熱水力挙動評価、(2)事故時の燃料損傷・溶融評価、(3)構造材・圧力容器の挙動評価では、実施した模擬試験や整備したデータベース等に基づき、革新的な解析手法群(シビアアクシデント時の熱流動挙動評価手法(資料 6-5-3 P26)、溶融物の広がり・堆積挙動解析手法(資料 6-5-3 P27)、クリープ破損評価手法・アブレーション破損挙動予測手法(資料 6-5-3 P29))を整備した。これらは、数多くの論文執筆に繋がった。
- (2)事故時の燃料破損・溶融評価の一環として実施した 1F プラントデータの分析(資料 6-5-3 P28)は、圧力容器内部と水位計の事故時水位の違いに初めて着目することで、実測値を補正し、シビアアクシデント解析コードの予測結果と事故時プラントデータの整合性を示した研究であり、上述の IRID 事業における総合評価の重要知見となった。本研究も理事長表彰受賞の一部を構成している。
- (4)放射性物質化学挙動評価(資料 6-5-3 P30)では、国際的に重要研究テーマとして認識が一致する FP 化学データベースの高度化に向けて、海外からも注目され共同研究立上げにも貢献している FP 放出移行再現実験装置(TeRRa)を整備し、系統的にデータ取得とモデル化を進めている。これらの成果は数多くの論文執筆に繋がりと、海外からの注目度も高い。成果の一部であるセシウムと鋼材との反応に係わる知見は、上述の IRID 事業における FP 分布推定図の重要な判断根拠ともなった。また、セシウム-ヨウ素-モリブデン-ホウ素-酸素-水素のデータベースは、OECD/NEA の TCOFF プロジェクト(資料 6-5-3 P49)など、国際協力を広く活用されている。
- (5)溶融コリウム凝固挙動評価(資料 6-5-3 P31)も、国際的に認識が一致する重要課題である。チェコ CVR と共同で模擬試験データを取得すると共に、製錬分野の解析手法を応用し、基本解析モデルを整備するなど、着実に成果が挙がっている。特に、模擬試験データで見出されたウランとガドリニウムの同伴性は、1F 燃料デブリの再臨界評価に向けた重要知見として活用されている。

### ③原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究

1F 事故で顕在化した、炉心・燃料破損解析手法における高度化課題(特に BWR 炉心)については、これまでの研究により、主に要素モデルの開発について論文投稿を行うなどで体系的に成果を公開してきている。機構は、先見的に、経産省受託事業において、要素モデル・データベース・模擬試験等の研究開発を進めている(資料 6-5-3 P32~42)。今年度末に、本事業の中間成果として、燃料破損・溶融に関する解析ツール・要素モデル・データベースを整備し、ベータ版として公開し、外部機関の実用に供する計画である。研究成果に着目した国内外研究機関から、以下のような情報交換・研究協力の打診が来るなど、本研究は、当初想定した以上の成果が挙がっていると認識している。(i)米国サンディア国立研究所、仏国 IRSN、国内のエネ総研から、機構の燃料破損・溶融要素モデルの、MELCOR、ASTEC、SAMPSON への組込みに向けた情報交換、(ii)欧州 SAFEST から、機構の模擬試験装置群の欧州ニーズでの共同利用に向けた情報交換、(iii)豪国 ANSTO から、事故耐性燃料の事故時ふるまいに関する基盤情報交換、など。

なお、本事業で実施した大型模擬試験、及び、関連試験施設群の富岡地区への整備は、富岡地区で初めて整備した大型試験装置であること、その装置仕様が革新的で国内外研究機関から注目され、共同利用の道筋を拓いたこと、などの観点で、平成 30 年度機構理事長表彰、創意工夫賞特賞を受賞した(資料 6-5-3 P45)。

### ○ 国際協力、国際プロジェクト

1F 事故を契機に、事故進展挙動解析の分野では、基礎研究と応用開発との認識共有の重要性が国際的に指摘され、OECD/NEA において、機構が議長および技術アドバイザーとして牽引している TCOFF プロジェクトが進展している。TCOFF における意見交換において、機構の様々な研究成果を周知することで、上述の国際的なシビアアクシデント解析コード開発機関からの、燃料破損・溶融モデルやデータベースに関する情報交換・問合せに繋がっていることは高く評価できる。また、国際共同で執筆されたシビアアクシデントの化学に関する重要著作を、機構研究員が主筆した(資料 6-5-3 P47)ことや、燃料分野で最も著名な学術誌 J.Nucl.Mater. で 2018 年から開始されたレビュー論文企画の第一号として、機構研究員がノミネート



	<p>され、BWR 燃料破損の現象論を執筆(資料 6-5-3 P47)したことも、この分野での機構プレゼンスを高めたものとして評価できる。分野は異なるが、これらで獲得した機構の高い研究専門性に対する国際的な信頼醸成に基づき、OECD/NEA の EGATFL プロジェクト(軽水炉事故耐性燃料の開発動向)において、プロジェクトのタスクリーダーとしても活動した(資料 6-5-3 P47)。</p> <p>SAFEST は溶融燃料の知見拡充とモデル化・検証を目的とした、欧州大でのプロジェクトである(資料 6-5-3 P48)。機構が富岡地区に整備した試験装置群の革新性・先見性に着目し、将来的な共同利用に向けた情報交換を進める目的で、平成 30 年度に、SAFEST に加入した。制御棒の破損や事故時のジルコニウムの詳細挙動などに係わる具体的な情報交換が進められている。</p> <p>○人材育成</p> <p>上述の IRID 事業では、機構の若手研究者を最も評価が難しい 2 号機の号機担当者にノミネートし、総合評価を牽引させると共に、東電、メーカーなどの外部機関担当者とのネットワークを構築させることができた。これは OJT として極めて有効であったと認識している。また、1F サンプル分析や 1F 事故時プラントデータの分析など、経験が重要となる研究項目では、シニアの解析過程に若手・中堅を同席させ、技術力の継承に努めた。METI 事業においては、模擬試験や要素モデル開発は、若手・中堅研究者に立案から実施・評価までの流れとして担当させ、かつ、試験と解析の連携も主体的に運営させた。これらの人材育成活動も効果的に機能し、理事長表彰獲得の要因となったと認識している。</p> <p>さらに、研究グループ内に外国籍研究者が 30%程度存在していることを活かして、月一度程度の頻度で、英語による成果の相互レビューを実施し、若手・中堅の英語による成果報告と質疑の機会を増やす活動を進めている。</p> <p>(4) 研究資金・人材などの研究開発資源の再配分の妥当性</p> <p>① 研究資金</p> <p>本研究分野に関しては、運営費交付金予算により、要素研究を実施し、今年度からは喫緊課題である RPV 下部ヘッドでの炉内状況把握の評価精度の向上を進めている。また、事故進展挙動解析分科会を運営している。原子力安全性向上については、外部資金(経産省受託事業)で進め、得られる成果のうち 1F 廃炉に活用できる知見は、随時、廃炉関連プロジェクトに提供している。また、【炉内状況推定図】の高度化については、着実に成果を挙げることで、将来的な外部資金獲得を目指す。これまでに実施した研究における研究資金の概算を以下に示す。</p> <p>○廃炉措置ロードマップに即した廃炉プロジェクトへの知見提供について</p> <p>IRID 補助金事業(平成 28-29 年度、約 8 億円/年(総額)、うち機構分約 4 億円/年)</p> <p>平成 30 以降は、運営費交付金予算で着実に、炉内状況推定図等の高度化を進めつつ、外部資金の獲得を目指す。</p> <p>○事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究について</p> <p>運営費交付金予算</p> <p>平成 30-32 年度の三か年計画で 1F 廃炉推進研究費を機構内の競争的資金として獲得(約 1 億/3 か年)</p> <p>○原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究について</p> <p>経産省安全基盤高度化事業(平成 28-32、5 か年計画、平成 28 年度約 1 億、平成 29-30 年度約 1.8 億、平成 31-32 年度約 1 億(見込み))</p> <p>事業で整備した試験設備群を用いて(機構資産とした上で)、国内外ニーズでの基礎研究(軽水炉事故耐性燃料の高温腐食試験、国内メーカーニーズ、など)による新たな外部資金獲得を検討中</p> <p>② 人材</p> <p>研究の要素課題を実際に牽引する中間世代(40 歳前後)が不足しており、機構内での人材確保、任期付き研究員のテニユア採用、外国人研究者の補充、などで、当面の人材を確保している。事故進展解析に関しては、事故事象を、熱水力、材料科学、機械工学などの観点で総合的に俯瞰して評価・解析する能力が不可欠であり、現状では、2~3 名のシニア研究者が研究を牽引しつつ、若手・中間世代に研究力の継承をはかっているところである。シニア世代は、国際プロジェクトをリード、重要著作・論文執筆、招待講演依頼等で、国際的にもプレゼンスを示すことができているが、中間世代の確保と実績作り、効果的な技術継承は喫緊課題と認識している。中堅世代に、各種プロジェクトでタスクのリードを担当させる等の OJT に加え、国際会議などで受賞を目指すなど、知名度を上げていく作業も重要と認識している。</p> <p>(5) その他</p> <p>○ イノベーション創出への取り組み</p>
--	--

<p>1F 廃炉基盤研究における事故進展解析研究それ自体には、現状イノベーション的な要素はほとんどない。一方で、前述したように、1F 事故進展解析の過程で顕在化した課題について、要素モデルやデータベースを整備し、開発・推進側の原子力安全研究に展開していくことについては、イノベーション創出の要素があると認識している。この分野は国際協力の注目度も高い。具体的には、以下が挙げられる。</p> <p>(1)炉心・燃料破損・溶融解析手法の高度化・・・現状の解析手法は TMI 事故の解析に基づく“典型的な”事故条件に対応できるように簡素化モデル化し整備されており、1F で発生したような“非典型的な”条件での事故進展を十分に評価することはできない。想定を超えた“非典型”条件では、基礎原理に立ち返って検討することが重要である。機構で開発している非典型的条件も扱える要素モデル・データベースを適切に簡素化して、商用のシビアアクシデント解析コードに組み込む、などで実用化することが期待される。</p> <p>(2)1F 事故以降の流れとして、設計内事故 (LOCA、RIA) 条件を超え、シビアアクシデントに至るまでの条件での解析・評価の重要性が、シビアアクシデントに比べてより発生確率が高い重要事象として指摘されている。機構で整備を進める解析手法は、この分野にも適用できると考えられる。この観点では、燃料・プラントメーカーや電力との連携が重要である。特に、軽水炉事故耐性燃料などでは、LOCA を超える高温条件での評価が十分でなく、基盤データ拡充に関し、機構に対して外部からの高い期待がある。この分野で予備的に取得した試験データは、国際会議で高く注目された。</p> <p>○若手研究者の育成・支援への貢献の程度 本研究分野は、多分野を横断した視点と、軽水炉技術を俯瞰できる基礎知見を必要とするため、次世代研究者の育成に好適な分野と認識している。具体的には、1F への具体的な知見提供および研究設備の整備を若手中心でシニアが支援する形式で進め、今年度 2 件の機構理事長表彰に繋がった(1 件は特賞)。また、OECD/NEA プロジェクト、あるいは、機構内の事故進展解析分科会などでは、具体的なタスク運営を次世代研究者に担当させ、プロジェクト運営能力、ニーズとシーズのマッチング、国内外研究者人脈の構築、などで人材育成に大きく貢献していると認識している。タスク運営をリードさせ、そこに次世代研究者の研究成果を入れ込んでいくことで、次世代研究者に成功体験をもたせ自信をつけさせると共に、機構若手・中堅研究者の研究力を国内外に発信・宣伝する活動を進めている。</p> <p>○国内外他機関との連携の妥当性 認可予算に基づく研究に関する国内大学との協力では、機構の研究インフラに学生を受け入れ、試験研究の実務を担当してもらうなどで、次世代育成につなげる観点で共同研究を進めている。また、FRC を大学と共催し、機構の若手、学生と国外研究機関の若手・シニアの交流の場を設けることで、この分野の研究の面白さ、有用性、国際交流を認識してもらう活動を進めている。国外研究機関との協力では、機構が有しない試験インフラや解析ツールを使った試験・解析を外部機関に実施してもらうことで明確に役割分担を定めている。他方、機構内(富岡地区等)に従来にない性能を有する試験装置群を整備し、FRC 等の機会にこれを広く周知する活動を展開している。これは、SAFEST への加盟などで将来的には国際共同利用にも展開できると認識している。また、それぞれの研究協力では、初年度に予備的検討を行って、実現可能性を評価した上で取り組むと共に、年度ごとに随時研究計画の見直しを行っている。</p>
---

研究開発課題名:「廃棄物処理・処分に係る研究開発」

自己評価内容	
評 定	評価の観点に対する理由
A	<p>(1) 研究開発の進捗状況の妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物管理の主要な分野である、分析、保管、処理及び処分の研究開発を進めている。2021 年の目標を達成するためには、それぞれの分野を並行して取り組む必要があり、連携を密にして取り組んでいる。</li> <li>・技術レベルは、現場に適用する技術から、基礎・基盤的な技術までのスペクトルがある。保管は現場に適用する必要性が高く、一方、処理と処分は相対的に基礎的である。また、分析はそれぞれの研究開発に必要な情報を適時に提示するとともに、将来に備えて着々と蓄積する必要がある。このような特性に配慮して、研究開発の進捗を管理してきている。</li> <li>・研究開発の進捗はおおむね計画通りである。事業者である東京電力の緊急な必要性に対しても、計画を適宜見直して対応することができた。</li> <li>・英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業、廃炉・汚染水対策事業に関しても、実施計画に沿って着実に進めている。</li> </ul>
	<p>(2) 情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方の見直しの必要性(継続、変更、中止等の決定)</p> <p>① 分析、放射能インベントリの推定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・分析方法に関しては、処分安全上の重要な核種を選定して、手法の開発を進めてきた。一方で、分析データの蓄積に伴い、分析対象核種の見直しを行い、分析方法の整備に関しても対象を再検討する予定である。</li> <li>・分析の対象とする試料に関しては、蓄積された分析データに基づいて、放射性核種の汚染挙動を検討し、優先度を検討しながら進めている。ここで、廃炉・汚染水対策の関係者の意見を反映している。</li> <li>・分析の計画に関して、大熊分析・研究施設の建設、整備の進捗に合わせて、中長期的な展望を検討している。</li> </ul> <p>② 保管</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・セシウム吸着塔の管理に関しては、当面の安全な保管方策が定まったことから、長期的な観点からの検討(塔内に残留する水の蒸発挙動)に絞り検討を進めている。</li> <li>・多核種除去設備スラリーの保管に関し、リスク低減の重要性が指摘されたことから、東京電力の要望に合わせ、水素の発生・管理に関する研究を加速して進めている。</li> </ul> <p>③ 処理</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃炉・汚染水対策プロジェクトにおいて、リスクの高い水処理二次廃棄物が処理対象として重要であり、そこに注力して進めてきた。</li> </ul> <p>④ 処分</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分技術の開発目標が後退したことに伴い、上記の処理技術を検討する上で技術的に整合する処分概念を念頭に検討を進めている。</li> <li>・処分安全上重要と考えられる核種を検討し、分析計画に反映している。</li> </ul>
	<p>(3) 効果・効用(アウトカム)の暫定的確認</p> <p>① 分析、放射能インベントリの推定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・現在までに約 380 の試料を分析、データを廃炉・汚染水対策チーム会合に 24 件報告した。処分安全上の重要な核種を選定して分析を行い、従来法がない場合には手法を開発して適用した。また、得られたデータは、ウェブで利用可能なデータベースを構築、公開した。特に、保管上の課題が見出された水処理二次廃棄物に関しては、東京電力の必要に応じて、分析データを適時に提供し、安全対策の実施に貢献した。(資料 6-5-5 P. 9、10)</li> <li>・分析データを利用して、放射能インベントリを推定するため、核種の汚染挙動を検討し、次のことを明らかにした。濃度に関して <math>^{137}\text{Cs}</math> との相関を見出し、これを利用して汚染の過程を表すパラメータ(滞留水や建屋内外の空気への核種の移行割合など)を求める方法を開発した。廃棄物の情報や分析データが長期間にわたり漸増することを踏まえ、データの増加により変化する統計パラメータを考慮して推定する方法(ベイズ統計、推定)の適用が必要であると考えられた。(資料 6-5-5 P. 11、12)</li> <li>・分析技術の改良に関し、レーザーアブレーション(LA)-ICP 質量分析法の開発を進め、従来法と同等の精度で <math>^{107}\text{Pd}</math> を迅速簡便に定量することに成功した。また、マイクロチップ分析において、高効率な流路の形</li> </ul>

	<p>状を見出した。(資料 6-5-5 P. 13、14)</p> <p>② 保管</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・多核種除去設備からのスラリーの保管に関して、容器 (HIC) のたまり水事象の直接的な原因である水位上昇の再現に成功し、スラリー内の気泡発生に伴う水位上昇メカニズムを提案した。この成果は、東京電力により、特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会に報告され、たまり水発生の対策の検討へ適時に反映された。(資料 6-5-5 P. 17)</li> <li>・また、より安全性を高める方策として、水素の再結合触媒を改良するとともに、実験と解析によりその基本的な有効性を示した。(資料 6-5-5 P. 18)</li> <li>・セシウム吸着塔の管理に関しては、長期間にわたる保管の間に、塔内の残水が蒸発、塩分が濃縮され、容器が腐食する事象が残余のリスクとして考えられる。4分の1規模スケールの実験と解析により、現在の保管方法により腐食環境が緩和される可能性を示す結果が得られた。また、実物を用いた模擬試験により、その傾向を確かめている。(資料 6-5-5 P. 19、20)</li> <li>・水素発生の安全に関する基礎的な知見として、海水中のハロゲン化物イオンによる OH ラジカルの捕捉反応を明らかにするとともに、吸着塔の 3 次元の <math>\gamma</math> 線スキヤニング手法を計算科学的に開発した。(資料 6-5-5 P. 21)</li> </ul> <p>③ 処理</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・水処理二次廃棄物への種々の固化技術の適用性を確認し、基礎データを蓄積した。(資料 6-5-5 P. 24)</li> <li>・固化技術を選定する手法の検討に関して、技術調査を進めつつ、検討の進め方をおおよそ取りまとめた。(資料 6-5-5 P. 25)</li> <li>・安定化が困難である陰イオンとなる核種の固化に関して、廃棄物からテクネチウム(VII)を効果的に回収できる条件を見出した。また、セレン (IV、VI)、ヨウ素(V)を水相から効率的に回収する方法を開発した。(資料 6-5-5 P. 26、27)</li> <li>・ジオポリマーによる固化体からの水素発生に関して、水素の発生・拡散・再結合過程を考慮したモデル式により、含水率・形状と水素放出量との相関を説明することに初めて成功した。ジオポリマー技術に関する調査報告書(JAEA-Review)のダウンロード数は 5000 を超えており、本分野の活性化に貢献した。(資料 6-5-5 P. 28)</li> <li>・セメント固化による固化体の性状推測技術に関して、技術のデータを取得、蓄積した。(資料 6-5-5 P. 29)</li> </ul> <p>④ 処分</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・新たな処分概念に基づいて、廃棄物処分の安全評価を行うため、評価技術の整備を進めた。処分概念ごとに異なる配置、透水性、水理等の因子による核種移行挙動への影響を定量的に把握できる評価技術と事例を整備した。(資料 6-5-5 P. 31)</li> <li>・処分安全に影響を与える廃棄物中の有害物質について、核種収着挙動への影響の関連性等を整理した。(資料 6-5-5 P. 33、34)</li> <li>・処分安全に影響するガスの発生に関して、金属材料の腐食に伴うガス発生速度データを一部取得した。(資料 6-5-5 P. 35)</li> <li>・Cs の移行を遅延する技術に関して、固化の助剤としてシリカヒュームの使用が有効であることを確認した。(資料 6-5-5 P. 36)</li> </ul> <p>(4) 研究資金・人材等の研究開発資源の再配分の妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・運営費交付金による予算は 2 億円弱で推移しており、年度の当初に研究の重要度や進捗を参考として、予算を再配分して進めた。対象としては、原子力科学研究部門(原子力基礎工学研究センター、先端基礎研究センター)、核燃料・バックエンド研究開発部門(再処理技術開発試験部、再処理廃止措置技術開発センター、基盤技術研究開発部等)を含み、各部門からの寄与を最大化している。</li> <li>・補助事業は平成 29 年度まではおよそ 5 億、平成 30 年度はおよそ 8 億円である。補助及び受託事業の実施にあたっては、所定の成果を着実に得るために、社内外の関係者の協力体制を構築し、計画を着実に履行した。社内は、バックエンド部門、原子力科学部門と高速炉部門が協力する体制を構築し、必要な予算を適切に配分し、各部門の専門家の総力を結集している。特に、分析の実施に関しては、許可を得ている 3 拠点の使用施設を最大限に活用した。</li> <li>・外部資金としては、文部科学省事業の 2 件に参画し、うち「コンクリート汚染機構」については、核燃料・バックエンド研究開発部門(再処理技術開発試験部)との協力を構築して、推進した。</li> </ul> <p>(5)その他</p> <p>○イノベーション創出への取組み</p>
--	---



	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事故に伴う廃棄物は、運転に伴う廃棄物と発生の仕方や性状、物量が異なっている。このため、廃棄物管理の方策は従来の技術をそのまま適用することは合理性が小さいと考えられる。研究開発の進展により、放射性廃棄物管理の技術にイノベーションをもたらす可能性があり、それを目指して取り組んでいる。</li> <li>・一般の産業へフィードバックする技術は今の所見出されていないが、イノベーションの可能性を念頭に置きつつ研究開発を進めている。</li> <li>○若手研究者の育成・支援への貢献の程度</li> <li>・基礎技術として身につけるべきものを体得させつつ、チャレンジが必要なテーマに取り組ませている。この時、熟練者がサポートをするように配慮している。研究開発の成果は、現場への適用や発表に結びつくので、意欲を維持する上でも役立っている。</li> <li>○国内外他機関との連携の妥当性</li> <li>・研究テーマに応じて、主に国内の大学等の研究機関と連携(共同研究や委託研究の実施)している。</li> <li>・また、文部科学省の事業(「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」)について、積極的に大学等と連携して応募、研究を推進してきている。</li> </ul>
--	---

研究開発課題名:「遠隔技術に係る研究開発」

自己評価内容	
評 定	評価の観点に対する理由
S	<p>(1) 研究開発の進捗状況の妥当性</p> <p>① 小型コンプトンカメラの開発</p> <p>・1F 建屋内環境状態を認識するためのセンシングデバイス及び収集データの処理手法に関する研究開発を行い、建屋内放射線イメージャー(小型コンプトンカメラ)を用いて放射性物質分布の 3 次元マッピングが可能であることを確認する等、高線量環境、特にあらゆる方向からの散乱線が多い 1F の建屋内において汚染の 3 次元分布の再現・把握を可能にする顕著な成果を創出した。平成 29 年度に実施した 3 号機タービン建屋内内部における数 mSv/h の局所的な汚染を検知した結果について、東京電力 HD と共著で論文が受理されるとともに、これをオープンアクセス化して広く情報提供を行った。併せて、平成 29 年度末に実施した 1 号機原子炉建屋内内部におけるコンプトンカメラ搭載陸上ロボット(バックボット)を用いた遠隔での計測においても、原子炉建屋深部からのガンマ線ストリーミングを可視化することに成功しており、この結果についてプレス発表を実施した。さらには、東京電力 HD と共著で論文投稿を行った。これらの測定試験により、建屋内の高線量率エリアにおいて汚染源分布の可視化技術の確立に向けて大きく進展した。今後、これまで人が立ち入っていないより高線量率のエリアの計測に向けてコンプトンカメラのさらなる高線量率対応と、位置認識装置(3D-LiDAR)との組み合わせを進める。</p> <p>原著論文(4 件)、解説論文(2 件)、招待講演(2 件)、プレス発表(2 件)、受賞(3 件、内 1 件は平成 30 年度理事長表彰【特賞】研究開発功績賞)</p> <p>・遠隔機器により取得した 1F サイト内の 3 次元実画像及び放射線データを用いて、放射性物質の分布を 3 次元的に可視化する技術を開発している。福島県イノベーション・コースト構想事業の一環として、帰還困難区域においてコンプトンカメラ搭載ドローンを用いて上空から移動しながらの撮影を行い、地表面に沈着したホットスポットの可視化試験を行った。地表の地形データと放射線イメージを重ね合わせることで、3 次元的に放射性物質の分布を可視化する手法について、特許出願を行った。</p> <p>原著論文(3 件)、招待講演(1 件)、受賞(1 件)</p> <p>・東京電力 HD からは、本研究による建屋内 3 次元汚染分布測定技術について期待されており、1 月末に 3 号機での測定が予定されている。</p> <p>・その他企業、研究機関からも本技術の利用申し込みがあり、次年度製品化をメーカーと進めている。</p> <p>② <math>\alpha</math> 核種位置検出器の開発</p> <p>平成 29 年度(平成 29 年 12 月～平成 30 年 2 月)に、1F 原子炉建屋内で東京電力 HD によって採取されたスミヤ試料の <math>\alpha</math> 粒子の 2 次元分布、エネルギースペクトルの測定を行なった結果、<math>\alpha</math> 粒子がプルトニウム(Pu)であることを特定するとともに、粒子径が核燃料サイクル工学研究所のプルトニウム燃料施設で測定されているものより極めて小さいことを確認していた。本年度は、これらの結果をまとめた論文が東京電力 HD と共著で受理され、現在、東京電力 HD とプレス発表を実施すべく調整を進めている。今後、作業員の放射線防護の最適化に向けて東京電力 HD と協議し、高バックグラウンド環境下での簡便な <math>\alpha \cdot \beta</math> 測定法の開発研究を行う。</p> <p>原著論文(3 件)</p> <p>③ プラスチックシンチレーションファイバー(PSF)の高線量率環境への応用手法検討</p> <p>平成 29 年度から 30 年度にかけて、PSF に飛行時間法を適用したシステム(TOF-PSF)の 1F 高線量率環境での放射線分布測定への応用可能性検証を目的とし、ガンマ線照射場を用いた高線量率照射試験を実施した。線量率線形性の確認や偶発同時計数の補正法を検討し、1F 高線量率環境へ適用する上での課題を抽出した。平成 30 年度は更なる高線量率環境での放射線分布測定法の確立を目的とし、TOF-PSF に代わる手法として分光器を用いて PSF からの発光波長スペクトルを読み出して波長毎の透過率の違いを利用して放射線の入射位置を逆推定する手法(波長分解法)を考案し、名古屋大学との共同研究の枠組みで原理検証試験を開始した。今後は TOF-PSF の偶発同時計数補正法の検討及び波長分解法の原理検証試験を引</p>

き続き名古屋大学との共同研究の枠組みで実施する。

④ 新型放射線イメージャーの開発(日米共同研究)

機構は上述の通り高線量環境下での放射線イメージャーの開発を行っている。米国ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)は定線量環境での画像再構成技術で世界のトップクラスの研究を行なっていることから、高線量環境下で放射線イメージングの高度化を図るために平成 29 年度から共同研究を行なっている。平成 29 年度には 1F 廃棄物コンテナ置き場において双方の検出器を用いて比較試験を行った。測定時間が短かったこともあり(一時立入者として入域したため)、両者は必ずしも一致しておらず、その課題を抽出し改善するために LBNL 研究者を富岡に派遣し 1F で試験測定することを計画している。

⑤ バーチャルピンホールカメラの開発

廃炉作業を円滑に進めるため福島第一原発建屋内の高線量率環境下において迅速に場の放射線状況を測定・可視化することを目的とし、高密度・高エネルギー分解能を有する臭化タリウム(TlBr)半導体を母材としたバーチャルピンホールカメラシステム及び、これをドローン等の遠隔機器に搭載することによる遠隔放射線イメージングシステムを構築するため、高密度・高エネルギー分解能で放射線イメージングが期待される臭化タリウム(TlBr)半導体を用いた小型半導体検出器を製作し、高線量率環境下においても汚染分布を可視化するためのセンサーを開発し、多数の本センサーを用いた高指向性検出器をバンドルした小型軽量かつ高位置分解能で計測できるバーチャルピンホールカメラ(VPC)の回路、システムを開発する。本件は、文科省の英知事業「廃炉加速化研究プログラム」として採択され平成 30 年 1 月より東北大学(TlBr センサーの開発)、東京大学(検出システムの開発)との共同研究として行っている(機構は放射線画像の再構成と位置認識を担当)。平成 30 年度は検出器製作に用いる高純度 TlBr 大型結晶の育成を目標とした。前年度に引き続き、TlBr 素材の帯域精製方法による純化を行った。精製した素材の中で高純度と考えられる先端部分を切り出した。結晶育成の坩堝となる石英管に高純度 TlBr 素材を真空封入した。現有の電気炉を用いて垂直ブリッジマン法により大型 TlBr 単結晶の育成を行った。また、指向性検出器の製作を行うために育成した結晶を用いて TlBr 検出器の試作を行った。試作した検出器のガンマ線スペクトル応答特性を測定し、育成した TlBr 単結晶を評価した。上記の検出器製作の知見を用いて、検出器の構成、検出器形状などを検討し指向性検出器の製作を行った。研究開始から 10 ヶ月程度であるが、検出器の試作特性を把握し、所期の目標を達成した。今後、指向性検出器の特性を把握するため、2 種類の方法で方向特性の検証を行い、最適化を図る。

⑥ 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発

耐放射線性光ファイバーを活用したレーザー誘起発光分光法(LIBS)による炉内デブリ等の遠隔直接分析法の研究開発では、U、Zr 混合酸化物、水中での分析等の原理実証により原理的適用性を確認するとともに、現場持ち込みを考慮して機器の軽量化、コンパクト化と分析性能の向上を図った可搬型 LIBS 装置を完成させ、光ファイバーも含め MGy に及ぶ高累積線量のみならず 10kGy/h の高線量率環境でも信号挙動に著しい変化が見られないことを確認し、炉内分析の成立性を実証した。本装置を NFD(大洗)との共同研究に適用し、NFD の研究施設において模擬デブリ試料(Zr/U 酸化物等)の分析を行った結果、Zr、U 酸化物標準試料による検量線の取得は無論のこと、これを用いて、不均一多成分複雑系模擬デブリに適用し、SEM/EDS による分析結果と一致することを確認した。これは定量サーベランス分析の信頼性を実証する成果であり、炉内デブリ分布計測の実現性を示す上でも注目に値する。さらに、レーザーアブレーションプルームの動的挙動の可視化に成功し、共鳴吸収分光による U、Pu の主要同位体分析を可能とした。LIBS との組み合わせにより、元素組成のみならず、同位体組成の遠隔分析が可能であることを示した。以上の成果は、学会発表のみならず、随時 NDF、東京電力 HD、関連企業などとの協議においても提供されている。

東京電力 HD、関連企業が平成 31 年度に実施予定の微量デブリサンプリング事業における輸送前サーベランス技術候補として NDF から推薦され、LIBS と共鳴吸収分光との組み合わせ技術について具体的な検討がなされた。しかし、 $^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$  比の計測が困難なこと、実績、経費負担の観点から見送られ、小型 XRF を使用する方向性が出された。一方、次期マクロ量サンプル時のサーベランスについては、高い耐放射線性と遠隔操作性が求められることから、今後も東電、関連企業と協力して検討を続けることとなった。本件は、廃炉事業への直接的な貢献として評価に値するものと考えられる。

⑦ レーザー診断・加工技術の開発

<p>レーザー診断においては、パルスレーザー照射による超音波発生、発生した超音波のレーザー非接触計測手法を確立するとともに、これを熱変性重コンクリート試料に適用し、レーザー誘起超音波伝播速度が熱変性温度に依存して遅くなることを実証した。さらに、レーザー光により得られた結果の妥当性を評価するため、加熱重コンクリートの超音波伝播波形を既存技術である探触子により取得した。これらの得られた知見については、原子力学会の企画セッションでの推薦に基づく講演等を行い、原子力関係の関係者が集う学会で技術の提示と課題に関する議論を深めた。レーザー診断技術については、より高温に加熱された重コンクリートの熱劣化の評価において優れた成果が出ていると考えられる。</p> <p>日立 GE、株式会社スギノマシンとの 3 機関の共同研究では、東京電力 HD 福島第一原子力発電所の廃炉作業における「炉内構造物及び燃料デブリ等の取り出し工程」に適用可能なレーザー加工技術手法として、レーザー光とウォータージェット(噴射水)の組合せによるはつり除去技術の研究開発を実施した。従来、レーザー加工で生じるドロス排除にはガス噴流が用いられるが、デブリ加工では汚染拡散につながることから、ガス噴流に代わって噴射水を用いてドロス排除をおこない、空気中の汚染拡散性を抑制する意欲的な試みである。噴射水の使用法の最適化により、効率的な切断のみならず、はつり加工性もあることから、三者共同特許出願に至った。金属試料における有効性を実証した成果により、平成 29 年度理事長表彰(研究開発功績賞)を取得している。さらに、金属に加え、炉内構造物や燃料デブリ等を想定し、セラミックスに対する加工特性の評価を行い、本技術の高い有用性を確認した。また、加工量の評価に向けて、長岡技術科学大学との共同研究により、原子力機構の大型計算機を利用した解析手法の開発を実施し、固体表面を液体が一定の厚さで流れる 3 次元の沸騰モデルを作成し、はつり除去加工の実験との比較・検討を行える可能性を得た。</p> <p>レーザー加工技術については、金属、セラミックス等の対象物を表面より削り取ることが可能な点で優れた成果が出ていると考えられる。解析も並行して実施することで、パラメータの最適化に必要な条件を評価しようとする試みは、拡張性を考慮すると評価に値する。</p> <p>⑧ 標準試験法の開発</p> <p>1F 事故後の原子炉建屋内外で行われた遠隔操作機器やロボットによる廃炉作業の経験から、迅速にタスクに応じた高性能なロボットの開発、オペレータの操作習熟度の向上を支援するための技術として、廃炉作業環境を想定したロボットの性能評価や比較、オペレータの訓練を行うための標準試験法について開発を行っている。具体的には、原子炉建屋内でのロボットによる調査・情報収集タスクの作業記録の分析を行い、原子力プラント内の特徴であるグレーチングや縞鋼板による走行環境を模擬した試験場や現場で発生したロボットのケーブル干渉トラブルの現象を再現する試験場等について設計、開発を行った。また、近年の格納容器内調査についても作業分析を行い、ペネトレーション、貫通孔、CRD レール、プラットフォーム、水環境等の遠隔操作ロボットのアクセスルートに要素として存在した環境の特徴を考慮に入れた試験場の設計、開発を行っている。開発された試験場上で評価用の遠隔操作移動ロボットを用いて検証実験を行うことで、妥当な試験環境を提供できることを確認している。さらに最近ではロボットに搭載するセンサーによって収集されたデータから地図を作成するとともに自己位置を推定する計算技術の性能評価を行うための試験方法の枠組みを提案し、複数の時系列センサーデータに基づいた評価用データベースの構築への試みとして、基礎的な検証用データベースを構築し、評価が可能であることを示した。開発を行った試験場や試験の枠組みを用いることでロボット技術の性能評価を行うための標準試験法についても立案、設計を進めている。</p>
<p>(2) 情勢変化に対応した研究開発の目的・目標、進め方の見直し(継続、変更、中止などの決定)</p> <p>① 小型コンプトンカメラの開発</p> <p>本研究開発は東京電力 HD に加えて国内の廃炉に関連する機関から高く評価され、さらなる展開を期待されている技術である。東京電力 HD の現場からのニーズを常に取り込みながら、1F 建屋内部に飛散・沈着した放射性物質を 3 次元的可視化するシステムの開発を継続している。本研究は放射線イメージング、遠隔操作技術、環境センシング技術といった異分野融合から成るものであり、放射線測定分野において今後世界的主流になるであろう複合技術を先取りして、かつ世界的に類を見ない 1F という過酷環境で成果を創出している稀有な例である。具体的には、1F のタービン建屋や原子炉建屋内部の高線量率環境において、ホットスポットの 3 次元的可視化に成功しており、調査が成されていない原子炉建屋深部の測定を今後実施すべく東京電力 HD と調整を進めている。加えて、平成 31 年度中にはシステムの製品版を完成させて、その翌年度からは 1F 作業現場の作業者が現場で活用するというゴールを設けている。</p> <p>② <math>\alpha</math> 核種位置検出器の開発</p>



<p>本研究で開発した<math>\alpha</math>核種位置検出器は、市販の検出器では得られない<math>\alpha</math>核種の情報を複数得ることができ、その情報は現場の放射線管理や内部被ばく評価に極めて有効となる。昨年度、東京電力HDと協力し現場で採取されたスミヤ試料を<math>\alpha</math>核種位置検出器で測定を行った結果、<math>\alpha</math>核種の粒径がMOX加工施設のものとは異なる。<math>\alpha</math>核種に加え<math>\beta</math>核種も存在し、その粒径分布が<math>\alpha</math>核種と異なる。といった新しい知見が得られた。両者とも内部被ばくの観点から重要な情報である。そこで、これらの特徴を明らかにするための新しい放射線計測技術を今後開発する。具体的には、①高位置分解能<math>\alpha</math>線位置検出器の開発、②<math>\alpha/\beta</math>弁別型放射線検出器の開発、である。①は英知事業の枠組みで東北大学等と共同で開発を進めている。②はミシガン大学でプロトタイプの検出器開発を既に実施している。平成31年度もこの開発を継続し、開発の目途が立ち次第、1F現場での試験を行っていく。さらに、①と②はどちらかという床面や設備のいわゆる表面汚染が対象であるが、①や②の技術を応用した空気モニタリング装置の開発も同時に進めていく。</p> <p>③ プラスチックシンチレーションファイバー(PSF)の高線量率環境への応用手法検討 現在、東電からは水中の放射線分布の計測の要望が出されており、PSFの特長でもある水中計測にも取り組み、陸上狭隘部の計測のみならず、これまでの成果を踏まえつつ研究を進展させていきたいと考えている。</p> <p>④ 新型放射線イメージャーの開発(日米共同研究) 平成29年9月より31年3月まで行うこととしている。本研究で得られた成果をもとに、平成31年度予定されている英知事業の日米研究で発展させたいと考えている。</p> <p>⑤ パーチャルピンホールカメラの開発 本研究開発は、廃炉国際共同研究センター内は勿論、文科省英知事業で行っており、POから本研究の有用性についてご意見をいただき、ご意見も反映させつつ実施しており、その必要性はより高まっている。今後も実現に向けて研究開発を継続していくことが妥当である。</p> <p>⑥ 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発 本研究開発は、廃炉国際共同研究センター内は無論のこと、NDF、東京電力HD(関係企業を含む)との協議、文科省英知事業においては、PO、PDの意見も反映させつつ実施しており、その必要性はより高まっていることから、今後も実現に向けて研究開発を継続していくことが妥当である。廃炉事業への具体的導入に向けた技術開発は無論のこと、今後は、導入に向けてのコーディネーター的な役割の強化が必要となっていくと考えられる。</p> <p>⑦ レーザー診断・加工技術の開発 レーザー超音波診断においては、作業者の安全の観点から非接触で遠距離から対象物の評価が行える手法の一つとして注目されており、今後も継続した研究開発が必要と考える。 加工時に発生する粉塵の評価においては、CEA等の研究機関での研究が進んでおり、これらの知見も基にし、加工性能の向上を図るとともに、粉塵の飛散防止についても継続して研究を行う必要があると考える。粉塵特性については、平成30年度より英知事業(代表:東京大学)においても取得する。</p> <p>⑧ 標準試験法の開発 本研究開発は、廃炉作業での特徴的な環境やトラブルが実際に起こった環境等を抽出して設計、開発する必要があることから、今後も現場での遠隔作業についての情報収集を行うと共に、必要に応じて東京電力や作業の実施企業の方々にインタビューを行っていく必要があると考えている。</p>
<p>(3) 効果・効用(アウトカム)の暫定的確認</p> <p>① 小型コンプトンカメラの開発 1Fの廃炉を進めるうえで、建屋内外に飛散した放射性物質の分布を迅速に把握することは、作業者の被ばく線量の低減及び除染計画の立案のために重要である。本研究では1Fサイト内における実証試験を積み重ね、1F建屋内部の高線量環境下において円滑に放射線分布を測定可能であり、かつ可搬性に優れた小型・軽量コンプトンカメラを開発した。加えて、従来のガンマカメラが放射性物質の位置や拡がりを2次元的に捉えるものであり、放射性物質を3次元的に可視化できないという欠点を克服するために、多視点からの測定データを統合し放射性物質の分布を3次元可視化する技術を開発した。</p>

東京電力 HD の協力を得て 1F3 号機タービン建屋内部で実証試験を実施し、比較的線量率が高い環境下 (0.5 mSv/h)において、10 秒で数 mSv/h のホットスポットを可視化できることを実証した。さらに、可搬性を生かして短時間で多視点から汚染を測定することにより、1F 建屋内部でホットスポットを 3 次的に画像再構成することに初めて成功した。さらに、平成 30 年 3 月にはコンプトンカメラや 3 次元レーザー距離計等を東電所有の陸上ロボット(パックボット)に搭載して 1 号機原子炉建屋に投入し、5 mSv/h 以上の高線量率環境においてホットスポットを遠隔にて 3 次的に可視化できることを実証した。

これらの研究成果はプレス発表を行い、新聞、雑誌、テレビ等多数のメディアに取り上げられ、原子力機構が開発した技術が廃炉の最前線で実証されていることを広く周知するに至った。加えて、1F 建屋内部で得られた成果を、1F 廃炉の方針や進捗管理が議論される「廃炉・汚染水対策チーム会合(経済産業省主催)」において発表し、機構の 1F 廃止措置への高い貢献を示した。本開発は、1F 建屋内の放射性物質分布を迅速に把握する手法として注目されているが、小型軽量のコンプトンカメラはドローン等の遠隔機器に搭載できることから、これらと組み合わせることにより緊急時モニタリングや他の原子力施設の廃止措置分野での利用も考えられ、関連する問い合わせも少なくない。放射線測定と環境測定及び遠隔機器との組み合わせは、今後の原子力の放射線計測の新たな流れを形作る技術であり、本研究開発の意義は大きい。

原著論文(7 件)、解説論文(2 件)、招待講演(3 件)、プレス発表(2 件)、受賞(4 件、内 1 件は平成 30 年度理事長表彰【特賞】研究開発功績賞)

#### ② α 核種位置検出器の開発

平成 29 年度(平成 29 年 12 月～平成 30 年 2 月)に、1F 原子炉建屋内で東京電力 HD によって採取されたスミヤ試料の測定を α 核種位置検出器で行った α 粒子の 2 元分布、エネルギースペクトルの情報から α 粒子がプルトニウム(Pu)であることを特定するとともに、粒子径が核燃料サイクル工学研究所のプルトニウム燃料施設で測定されているものより極めて小さいことを確認し、これらの結果をまとめた論文が東京電力 HD と共著で受理された(論文 2 件:検出器の基本的な性能試験と 1F 試験)。この成果は 11 月に行われた福島リサーチカンファレンスでも発表した。この研究と並行して行ってきた高位置分解能 α 線イメージング装置開発については、機構萌芽研究の枠組みで以前より進めてきており、2018SORMA の国際学会で発表するとともに、最近論文として公開された。さらに新しいダストモニタの開発の論文を現在投稿しており現在査読中である。

#### ③ プラスチックシンチレーションファイバー(PSF)の高線量率環境への応用手法検討

研究を開始したばかりであり、日本原子力学会で 2 件を発表している。一方、東京電力 HD からはこれまでの環境分野を含めた PSF の計測成果から水中測定の検討依頼が来ており、本研究の有用性が期待できる。

#### ④ 新型放射線イメージャーの開発(日米共同研究)

機構と共同研究先の米 LBNL との 1F での共同測定は 1 回だけであり、時間が短かったこともあり、その成果は論文等になっていない。平成 31 年 1 月/2 月に LBNL 研究者が富岡に来て、1F での測定を予定しており、その成果を論文等でまとめる予定にしている。

#### ⑤ パーチャルピンホールカメラの開発

現在、機構では GAGG シンチレータを用いたコンプトンカメラを開発している。本研究は、今後招来する高線量率場での放射線イメージングのオプションとして開発している。TIBr 半導体は小型軽量でシンチレータより高エネルギー分解能が期待できるため、散乱線が多い高線量率場での小型放射線イメージャーの開発が期待できる。開発からまだ時間が経っていない(10 ヶ月)ので、具体的な成果がまだであるが、平成 31 年度に 1F で実証試験を目指している。なお、現段階での成果については国際会議(IEEE)等で 3 回報告を行っている。

#### ⑥ 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発

廃炉への貢献としては、NDF、東京電力 HD(協力メーカーを含む)との協議を進め、サンプリングデブリのサーベランス技術の候補として挙げられる等、具体的協議が進んでいる。微量デブリサンプリング事業では採択されなかったが、次期マクロ量デブリサンプリング事業に向けた協議は始まっている。本件は特に、廃炉事業における活用を前提としている点で研究開発結果の実用化を図るもので、成果のアウトカムとして評価に値する。具体的には先に述べたホットセル内マクロ量デブリのサーベランスへの適用が考えられているが、

並行して、サンプリングの妥当性評価に不可欠な炉内デブリ分布情報の取得に向けた応用についても協議を進めていく予定。

学会等の発表については、学術専門誌への掲載の他、LIBS 関連技術開発について、レーザー誘起ブレイクダウン分光に関するアジア国際会議(ASLIBS2016)、LIBS 国際会議(LIBS2018)、福島第一廃炉国際フォーラム(NDF 主催)、レーザー学会シンポジウム招待講演、応用物理学会シンポジウム招待講演、鉄鋼協会国際セッション招待講演、日本原子力学会秋の大会、春の大会でのシリーズ発表並びに春の大会企画セッション等での発表等の場において、炉内その場分析に関する最新の知見を国内外に提供することができた。特に ASLIBS2016 会議では、LIBS 技術の廃炉への応用に関する特別セッションを国際共同研究棟(富岡)で開催し、廃炉への適用の重要性を国内外の研究者に提示することができた。

LIBS 及び関連技術に関して 2015 年の以降、学術論文:7 報、JAEA-Research:3 報、解説:1 報(予定)、英知事業報告書:4 報、国際会議・国内会議等発表:約 70 件等となっている。

#### ⑦ レーザー診断・加工技術の開発

レーザー診断は、従来技術である探触子による超音波診断の適用が困難な狭隘部や高所、高放射線環境等の危険箇所での計測において利用価値が高く、長期に及ぶ廃炉工程での簡易迅速な構築物健全性の遠隔計測法の一つとして原理的実証段階にあると判断される。本手法は、廃炉は無論のこと、橋梁、トンネルなどの大型建築物の健全性評価にも適用できる可能性があることから、特に国土強靱化政策等への活用を前提に国内から注目されている。

レーザー加工は、金属、セラミックス等を対象にした基礎的な加工性能を基に実用化へ向けた装置の試作を行っており、特にウォータージェットとの組み合わせによる加工技術は、加工性能の向上のみならず、レーザー加工時の最大の問題であった汚染拡大防止法の有効な方法として位置付けられる。今後、発生粉塵の粒径分布などを明らかにしていくことで、デブリや構造物の切断加工技術として確立していくことが期待できる。学会等の発表については、学術専門誌への掲載の他、レーザー学会、電気学会、原子力学会等での招待講演を行っており、学術論文:3 報、JAEA-Research:2 報、国際・国内会議等発表:約 30 件等となっている。

#### ⑧ 標準試験法の開発

従来災害対応ロボットの試験場。試験法については開発例があったものの、原子力災害対応や廃炉作業に特化したロボットの試験場や試験法については存在せず、遠隔操作技術やロボット技術の研究開発者が保有する技術を廃炉技術分野に参入するための性能評価の手法を提供するものとして期待されている。これまでに、システム化技術に関する国際会議(SI2017)、原子力施設におけるロボット技術の利用に関する国際ワークショップ、ユビキタスロボティクス技術に関する国際会議(UR2018)、原子力施設のための遠隔技術に関する FRC、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会、日本ロボット学会学術講演会、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会等において講演を行い、成果や研究開発動向について原子力技術分野以外にも含めて知見を提供した。開発技術およびシステムは、ディビジョンメンバーによる 1F 原子炉建屋で実際に計測を行うことで有用性についての検証・評価も行われているとともに、今後の研究開発における課題の抽出も行われている。2015 年度以来、解説記事 1 件、招待講演 12 件、国際会議 4 件、国内口頭発表 7 件を行っている。

計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会においては、1F 廃炉作業に資する遠隔技術についてのセッションを企画することで、ロボット技術やシステム化技術の研究開発者との今後の相互協力関係構築につながる議論の機会や 1F の現状に関して情報共有する場を設けた。これにより原子力分野以外の研究者、技術者へ廃炉分野への関心を高める効果があった。

#### (4) 研究資金・人材などの研究開発資源の再配分の妥当性

##### ① 小型コンプトンカメラの開発

1F 廃炉作業を円滑に進めるためには、各種コストの削減とともに作業者の被ばく低減が求められている。本研究では、この両方に貢献すべく精力的に研究開発を行い、約 2 年という短期間で(3)アウトカムに記載する成果を上げた。国のロードマップでは 2021 年に初号機の燃料デブリの取り出し開始が予定されているが、そのためには建屋内の線量率低減が極めて重要であり、効率的な除染や機器撤去のためには放射性物質分布を面的に把握できる本手法の開発が急務となっている。平成 30 年 12 月の時点で、実際に東京電力 HD から測定を依頼されるなど、確実に 1F での実用化に向けて進展している。(3)アウトカムに記載した成果において、1F サイトにおける実質的な成果を得るための資金は運営費交付金であり、成果の創出に係ったメンバーは 10 人前後と少人数ながら、平成 30 年度理事長表彰研究開発功績賞【特賞】を受賞するなど原子力機



構を代表する極めて顕著な成果を創出した。

②  $\alpha$  核種位置検出器の開発

本研究開発はこれまでは研究の芽出し的要素が多かったため、科研費(約 3,500 千円)や機構の萌芽研究(約 5,000 千円)等の資金をベースに進められてきた。しかし今後着実に研究開発を進めていくためには運営費交付金での実施が妥当と考えられる。(2)項で記載した通り、「高位置分解能  $\alpha$  線位置検出器の開発」は英知事業の資金で進めていく。

人材は約 3 名で進めてきたが、今後もこの人数が妥当と考えられる。

③ プラスチックシンチレーションファイバー(PSF)の高線量率環境への応用手法検討

本研究は機構内で 1F の瓦礫などがある狭隘な場にセンサーを挿入し放射線分布の把握するために、少額で高線量率場での適用性について研究を行っていたが、平成 30 年度より名古屋大学との共同研究で分光法用いた研究も開始した。予算は、運営費交付金である。

④ 新型放射線イメージャーの開発(日米共同研究)

本研究は平成 29 年 9 月～平成 31 年 3 月まで行っており、運営費交付金より 1,500 ドルを LBNL に支出した。機構の研究費は①のものを使用している。平成 31 年度は今年度の成果を勘案して決定する。

⑤ バーチャルピンホールカメラの開発

英知事業(平成 29～31 年度)の経費は平成 29 年度:18,590 千円(内機構:2,600 千円)、平成 30 年度:19,890 千円(内機構:2,600 千円)、平成 31 年度:19,890 千円(内機構:3,900 千円)である。主としてセンサー開発なので、多くはセンサーを製作する東北大学に配分している。

⑥ 炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発

本研究は、基礎基盤的技術開発については、運営費交付金を、連携を重視した連携的な研究開発は、英知事業を中心とした外部資金を適用している等、研究開発段階に応じた配分により、効率的に実施している。さらに、本技術は廃炉事業そのものと深くかかわることから、廃炉事業への適用については、東京電力 HD からの資金提供を前提として協議を進めており、基礎基盤技術の廃炉事業への適用に関するモデル事業としての試みも計画されている。

⑦ レーザー診断・加工技術の開発

レーザー加工の基本特性については、共同研究を中心に運営費交付金で実施していくことが妥当と判断している。これに加え、デブリ等の切断で重要となる粉塵特性については、平成 30 年度より英知事業(代表:東京大学)において取得する計画としており、重点テーマへの資金充当が図られている。

⑧ 標準試験法の開発

これまで運営費交付金予算によって原子炉建屋内で作業を行う遠隔機器開発や操縦訓練への寄与を意識して要素研究開発を実施しており、遠隔技術のためのモックアップ施設等を設立、運営している原子力機構での試験環境提供を想定して、予算については現状の枠組みを継続することが望ましいと思われる。

(5)その他(遠隔ディビジョン全体)

○ イノベーション創出への取り組み

小型コンプトンカメラの開発は、1F だけでなく様々なフィールドでの測定、応用について機構内外からの依頼が多数きており、放射線イメージング技術の要望が大きいことを認識している。そのコンプトンカメラ(放射線イメージャー全体に言える)の弱点である、2 次元分布から放射線源の絶対量の評価、ダイナミックレンジ、測定面積等の問題を解決すべく 3D-Lidar 等の SLAM 技術との組み合わせにより、より精度の高い 3 次元分布の作成を目指している。この技術は、一部ながら成功しており、移動測定による広域測定評価法については特許出願を行っている。今後、他の課題も SLAM 技術等の異分野技術の融合により、放射線イメージングの新たな分野を、1F 測定を通じて開発研究を目指している。そのためにも様々なフィールドでの適用経験の拡大が重要と考えており、現在、東電をはじめとした機関からも利用の要望が来ていることから、メーカーからの販売を平成 31 年度に計画しており、それを通じてより利便性の高いもの、高度な計測法の創出を行いたいと考えている。



LIBS に代表される炉内レーザーモニタリング技術開発では、放射線計測に依らずに、炉内でのデブリ等の直接サーベランスを実現しようとする本研究自体がイノベーション的技術開発である。放射線環境下におけるマクロ量サンプルデブリのサーベランス、ホットセル内での詳細分析前のサーベランス、炉内のサーベランス、デブリ取り出し時のモニタリング、取り出し後の炉内サーベランス等、廃炉においてもその適用は広範囲に及ぶ。併せて、分光手法の開発、データ解析手法の開発等は、産業・学術分野で求められている迅速サーベランス(SUS に代表される有用廃棄物の種別回収、製鉄現場での熔融鉄品位のその場分析、海洋資源探査、惑星物質探査等)にも広く適用できることから、世界的視野に立った LIBS 技術のブレークスルーに貢献できる。また、共鳴分光による同位体計測は、核物質の管理のみならず、廃棄物等の難測定核種分析によるイベントリ評価や、放射性微粒子の個別分析、宇宙塵に代表される極微量分析(同重体干渉の無い同位体顕微鏡)といった技術創出にも貢献できる。

レーザー診断・加工の成果は、遠隔・非接触で行える技術であり、福島第一原子力発電所の廃炉における健全性確認は無論のこと、国土強靱化対策で今後極めて重要となるトンネルや橋梁に代表される大型建造物の危険箇所における迅速な健全性確認など、一般産業分野においても大きなインパクトを与えるものと期待される。また、レーザー加工技術については、従来のガス噴流に代わって噴射水を用いてドロス排除をおこない、効率的な加工を実現する技術で、はつり加工性もあることから、特許出願中である。本技術の適用範囲は廃炉にとどまらず、一般管理物質、迅速加工に適用できる可能性が高く、レーザー加工法のブレークスルーに貢献できる。

その他にも、異分野技術との融合が必要と考えている。今後、1F で重要となるであろう $\alpha$  計測や LIBS 等についても同様であり、現場での利用から新たな技術開発に展開していきたいと考えている。

#### ○若手研究者の育成・支援への貢献の程度

当ディビジョンの研究者は若手が多く、それぞれが研究を行うとともに、国内外の会議や研究会等に参加している。それには異分野の会合も含まれており、積極的に参加している。また、学位を取得していない研究者には、社会人博士課程への入学を支援しており、平成 30 年度に 1 名が同課程に入学している。

さらに、対外的には、大学(高専を含む)の夏季実習生の受け入れ経験もあり、若手育成にも貢献している。人材育成については、LIBS 技術開発並びにレーザー共鳴分光による同位体分析に関連し、仏国リサーチフェロー 1 名(退職後 IAEA 保障措置技術者)、博士研究員 2 名(うち 1 名は退職後 LIBS 関連大学助教)を受け入れ、レーザー分光関連の研究者育成に貢献した。また、連携重点研究を中心とした人材交流を積極的に図り、特研 2 名を受け入れ、博士後期課程への進学や、学位取得のサポートをする等、若手研究者の育成を支援した。その他、大学においては、「レーザー利用遠隔分析技術の基礎から廃炉に至る研究」に関して、特別講演や特別講義も実施しており、若い人材の意識向上にも貢献している。これらは、最先端のレーザー遠隔分析技術開発の原動力となるだけでなく、研究者育成の面でその貢献は極めて大きいといえる。博士研究員などの大学等へ人材供給は、共同研究をはじめとした連携に直結し、この効果は計り知れない。

#### ○国内外他機関との連携の妥当性

放射線計測分野では、米国 LBNL との共同研究により、放射線計測と画像の再構成の融合を図っている。LBNL は放射線画像解析では世界のトップクラスの研究機関であり、彼らの解析技術と機構の高線量場での計測の融合は、新たな計測の場の拡大に貢献するものであり妥当と考える。また、国内研究機関とも、新たなシンチレータ、半導体開発では東北大学と、シンチレーションファイバー技術では名古屋大学と共同研究を進めており、国内の先端技術を有する研究機関との共同研究は妥当であると考えられる。

炉内レーザーモニタリング技術開発では、機構が研究代表として進めている文部科学省廃炉加速化プログラム「先進的光計測技術を駆使した炉内デブリ組成遠隔その場分析法の高度化研究」を活用し、QST、京都大学、自然科学研究機構分子研、マジニアリング(株)と連携し、ロングパルスレーザーの活用、マイクロ波支援による信号増倍効果並びにレーザー発振器自体を炉内へ導入する「マイクロチップレーザー-LIBS の成立性」について研究を広げている。特にマイクロチップレーザーについては、10kGy/h の高線量率環境下においてもレーザー発振が確認され、50m を超える超長尺遠隔分析の可能性が示唆された。ウラン含有不均一多成分複雑系模擬デブリ試料による実証試験は、日本核燃料開発(株)(NFD)との共同研究により実施され、LIBS 技術の適用性試験に活用されている。他機関との連携により LIBS 技術の開発が加速されたものと判断される。また、本研究の推進も含め、LIBS による炉内観察技術開発は広範囲な人材育成・基礎基盤研究の推進に貢献するものであり、徳島大学、京都大学、東北大学等と協力して国内 LIBS 研究を先導し、その中心的役割を担っている。特に ASLIBS2016 国際会議では、LIBS 技術の廃炉への応用に関する特別セッションを

国際共同研究棟(富岡)で開催しており、学会活動への貢献も極めて大きい。加えて、JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムにおいて、レーザー共鳴電離と SIMS を組み合わせた微粒子の同位体マッピング技術開発(代表:工学院大)に参加し、工学院大学、名古屋大学、日本中性子光学(株)等との連携により、放射性微粒子に含まれるセシウム中の同位体分布計測に成功しており、微粒子分析分野や難測定核種分析分野においても連携の効果は大きい。

レーザー診断においては、超音波伝播特性は機構が実施し、その基本となる探触子による超音波伝播特性については長岡技大が行うなど、専門分野での役割分担を明確にして連携しており、妥当と考える。また、レーザー加工において、数値解析については長岡技大が、装置の部分試作については(株)スギノマシンが、実機への構想については日立 GE が、試験計画及び実施については機構が行うなど、役割分担を明確にして連携しており、その効果は大きいと考える。平成 30 年度からは英知事業に参加することにより、東京大学やレーザー総研等、連携先が拡大している。

This is a blank page.

参考資料 4

福島廃止措置研究開発・評価委員会における  
意見と機構の措置



This is a blank page.

福島廃止措置研究開発・評価委員会における意見と機構の措置

答申書意見	機構の対応措置
<b>総評</b>	
<p><b>【人材に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・若手の人材育成、人材確保のためには、応用研究のみならず、基盤研究・基礎研究に十分な時間を割くことが重要であり、これが若手の研究キャリアの向上につながる。また、国際共同研究の一層の推進が、国際的に活躍できる人材の育成につながり、特に若手研究者のインセンティブとなると考えられる。今後とも、こうした研究開発の方向性を保つことが、廃炉を持続的にかつ成功裡に終了させることにつながると考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・若手研究者及び技術者の採用では、新卒採用時に基礎基盤研究要素の高い業務に従事させるように配慮しております。また、その一環として、原子力基礎工学研究センター等の研究グループに配属、又は兼務させ、基礎研究の熟練した研究員の指導を受けさせ、研究者としての資質形成の土台を築くなどの工夫をしております。さらに、二国間研究協力などを用いて海外留学を積極的に推進し国際的な研究者の育成に取り組んでおります。加えて、福島リサーチカンファレンス等国際会議に積極的に参画させ、国際的に活躍できる研究者育成を実施しております。</li> <li>今後、これらの活動を積極的に実施し、若手研究者の育成に貢献したいと考えております。</li> </ul>
<p><b>【進め方に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今後、廃炉作業の進捗に伴い様々なデータが得られる見込みであり、この反映についても考えてほしい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東京電力ホールディングス株式会社（東京電力 HD）、技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID）、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）等と連携することで、廃炉の各作業段階で得られる情報やデータ及びニーズをタイムリーに基礎基盤研究活動に活用できるよう、当機構内外の組織的な連携を目指します。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・引き続き、このような取り組みを継続するとともに、東電をはじめとした関係機関あるいは機構内部とのコミュニケーションをさらに向上させて、より大きな成果をタイムリーに出していくことに期待する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上述の対応に加えて、当機構の研究成果を東京電力福島第一原子力発電所（1F）廃炉に直接的に活かせるよう、廃炉国際共同研究センター（CLADS）内に新たな1F廃炉連携のためのチームを発足させ、東京電力HD、関係機関とのコミュニケーションの向上を</li> </ul>

	図ります。
<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後とも、1F 廃止措置現場との連絡を密にして、1F 廃止措置が一日でも早く完遂されるよう積極的な研究開発への取り組みを期待する。</li> <li>・今後も、廃止措置に向けた研究開発を主導的に推進していただきたい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上述の新チームの発足等により 1F 現場との連絡は密になるものと思料します。</li> <li>・英知事業や廃炉基盤研究プラットフォームを推進して、産官学と協力しつつ廃止措置に向けた研究開発を主導的に推進していく所存です。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後、特に安全研究に関連してくる研究分野では、機構外のみならず機構内の連携も、機構内ルールの範囲内でさらに進むことが望まれる。基盤とする学術的背景を共通する研究員は多くあり、機構内での横の連携も、特に若手の育成にも重要と考える。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全研究分野では廃炉研究と密接に係る部分も多く、御指摘の当機構内の横の連携についても、既に検討を開始したところ です。</li> </ul>
<b>①燃料デブリの取り出しに係る研究開発</b>	
<p>【廃炉プロジェクトのニーズに即した専門知見の提供に係る意見】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料デブリは極めて広範な性状の違いを持っており、それを予測することは極めて重要であるが、性状の大きな違いを前もって把握して、実際の廃炉工程に臨むことが重要である。</li> <li>・1F のコンクリート成分を用いた追加の大型 MCCI 試験は、デブリの流動を伴わない静的な試験であり、状況の違いに伴う特性への影響については、何らかの解説が必要と考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・御指摘のとおり、事前に性状の違いを把握しておくことが重要であり、その観点で、今後も燃料デブリの特性に関する研究開発を進め、特性の把握に努めます。</li> <li>・仏国原子力・代替エネルギー庁（CEA）での熔融炉心コンクリート相互作用（MCCI）試験ではコンクリート上への熔融物の流下操作は実施していませんが、MCCI 時にはコンクリートの熱分解に伴う激しいガス発生や熱対流による激しいランダムな攪拌が確認されています。このため、静的環境とは言えないものの、その性状の違いについては力学的な影響について検討を進める予定です。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料デブリに係る分析技術の開発について、実デブリを含む現場から採取された試料分析への適用性についてはまだ不透明な感があるので、想定される機器トラブルの</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 31 年度は、実際に 1F 燃料デブリの分析に先立ち、その準備を行うこととしており、この準備の中で新たに開発した分析技術について、IRID 等廃炉関係者と議論しつ</li> </ul>

<p>洗い出しと対処法の事前検討が望まれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>トリプル四重極—ICP-MS や X 線/γ 線 CT の技術は有効性を認めるものの、現場からの実試料分析に対して、かなりハードルの高さを感じざるを得ない。今後取り出される多種多様な性状の燃料デブリに対して、分析技術の最適化とは何か（定義）を、改めてしっかり見極め、最終的な開発目標の設定を再確認しておくべきではないか。</li> </ul>	<p>つ、実際の燃料デブリへの適用を想定した機器トラブルの洗い出しと対処法の検討を進めてまいります。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>各技術開発について、最終的な開発目標の設定を再確認します。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>「燃料デブリ表面線量率評価手法の開発」については、現在東電が実施しているエンジニアリングに反映できるように早期にリリースされることが望まれる。また、現段階での評価式の有用性（利用の限界）についても示す必要があるように思われる。</li> <li>プラント内線源・線量率分布評価手法の開発については、ニーズに応じた結果の提示や 1F 炉内調査における助言を行っているが、それらの提示に対する IRID 等からのフィードバックへの対応を継続的に進めることが望まれる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IRID の承認を得て表面線量率の評価ツール（EXCEL®）とマニュアル（適用範囲情報を含む。）を 1F 実務関係者に早期配布するべく準備を進めております。また、評価方法や適用範囲等に関して記述した詳細な報告書の執筆を進めており、承認が得られた段階で公開する予定です。</li> <li>プラント内線源・線量率分布評価手法の開発については、NDF からのご依頼により止水事業にも反映できるよう Suppression Chamber (S/C) 部を含めた改良に着手しました。また、IRID との意見交換は頻繁に行っており、今後の内部調査結果やサンプリングデブリの分析結果を反映することにより予測精度の向上を図る等、フィードバックへの対応を継続的に進めてまいります。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>「燃料デブリの非破壊測定技術開発と計量管理方策の検討」については、開発としては適切な進捗をしていると評価されるが、実際の現場適用性も含めた検討をさらに進める必要がある。</li> <li>統合型 NDA システムが最有望と提案されて</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまでは、当機構の役割分担から長期的対応方策を検討してきましたが、直近の現場ニーズにも応えるため、容器収納前に格納容器 (PCV) 内でデブリ・廃棄物仕分けをする技術開発にも着手しました。また、市販の非破壊分析 (NDA) 装置改造の検討やその実証試験を目指した核燃料物質を使用する試験フィールドの整備（許認可）も進める所存です。</li> <li>多様な性状や組成が予想され、中性子吸収</li> </ul>



<p>いるが、現場から採取される多種多様な燃料デブリの性状ごとに適切な測定パラメータの設定やデータベースの準備等が必要となり、核物質管理に相応しい測定精度が望めない感がある。このような悲観論を覆すような創意工夫の提示を期待する。</p>	<p>剤の設置も検討されている 1F デブリの大型収納缶を対象とする NDA 技術の開発は極めてハードルが高いことから、革新的な手法開発や複数手法の統合は必須と考えております。今後は国内外の研究機関や大学等とも具体的な課題を共有し、英知を結集して課題解決を目指します。</p>
<p><b>【NDF 廃炉重要研究 6 課題に即した専門知見の集積に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NDF 廃炉重要研究 6 課題については、分科会で策定した研究開発戦略に従って研究を開始したところであり、継続して実施するとともに、成果に応じて戦略へのフィードバックが期待される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 廃炉基盤研究プラットフォームや NDF 分科会を通じて、大学との協力により今後の 1F 廃炉作業に必要な研究開発を実施していき、戦略へのフィードバックの観点から、得られた成果を NDF 等廃炉関係者に提供してまいります。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明や特殊環境下の腐食現象の解明について、成果の（当面策定された）研究開発戦略の中での位置づけや現段階での達成レベルが今一つ判然としない。研究開発戦略の全体像と個別に実施される研究課題の関連性及び達成目標等を明示されることが望まれる。</li> <li>• デブリのような混合物からの溶出量について、各相の面積比と関連付けられることを指摘しているが、面積比という物理的な指標により、化学的な挙動をも示せるメカニズムについても明らかにしていく必要があるように思われる。また、特殊環境での腐食挙動については、濡れ乾きサイクルと腐食との関係については、表面の経時変化やサイクルのかけ方など複合的な視点での考察が望まれる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• これらの研究は中長期的な廃炉への影響を睨んだ基礎研究であり、今後、個別研究の影響度を評価しつつ、現在作成中の“基礎・基盤研究の全体マップ”等の研究開発戦略の中で位置づけを整理、達成目標等の明確化を図る予定です。</li> <li>• 化学的なメカニズムについては、平成 30 年度より 1F 推進費や英知事業などで取り組んでおり、順次成果が出るものと考えています。</li> <li>• また、濡れ乾きサイクルと腐食について、御指摘のように研磨したままの試験材以外に、事故時の条件を考慮した高温酸化皮膜を付けた試験材や、現在までの経年劣化を模擬した鍍付き試験材などを検討していく予定です。また、回転サイクルはあくまでも探索的な試験で、今後は液を流動させた条件、表面の水膜厚さを制御した条件での試験を進めてまいります。</li> </ul>
<p><b>【人材に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 代後半から 40 代の中堅クラスの研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 各年代に応じてバランスの取れた人材配置</li> </ul>

<p>員・技術員の負荷が過大になることが懸念される。現在のところ、可能な限り、他機関からの採用なども柔軟に積極的に進めているが、これら人材の仕事をサポートする体制や役割分担等による仕事量の軽減も必要となると思われる。また、中堅・若手人材が本分野の魅力を感じるインセンティブは何かということ、現在活躍している中堅・若手人材と意見交換して確認しておくことが必要ではないか。さらに、効率的な技術・ノウハウ等の継承のため、最新の IT 技術を駆使した知識マネジメントシステムなどの構築にも注力することが望まれる。</p>	<p>が必要と認識しております。そのため、キャリア採用等を積極的に行っていきます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・サポート体制については、労働者派遣職員の活用等、アウトソーシング可能な業務の振り分けも検討します。</li> <li>・中堅・若手人材との意見交換については、部門内で若手職員の交流会を開催し、CLADS の若手研究者も参加して自由闊達な意見交換を行うようにしており、その中で得られた生の意見を人材育成の取組にも反映してまいります。</li> <li>・効率的な技術・ノウハウ等の継承のため、最新の IT 技術を駆使した知識マネジメントシステムなどの構築も検討します。</li> </ul>
<p><b>【イノベーションに係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・イノベーション創出への取組については、1F 廃炉は未知の状況へのチャレンジであるため、ハードの開発に限定することなく、解析技術や評価技術にも広げて取り組むことを望む。</li> <li>・本研究課題の場合、まず確実に信頼できる燃料デブリの分析や計量管理等が行える手法を整備することが優先されるべきで、イノベーション創出は二の次でよいのではないかと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・イノベーション創出への取組については、すでに、燃料熔融要素モデル、下部ヘッド破損モデルなどで、原子力安全研究へのフィードバックが見込まれる課題が出てきており、国内外研究機関と情報交換を進めております。</li> <li>・多様な性状や組成が予想され、中性子吸収剤の設置も検討されている 1F デブリの大型収納缶を対象とする NDA 技術の開発は極めてハードルが高いことから、革新的な手法開発や複数手法の統合は必須と考えます。今後は国内外の研究機関や大学等とも具体的な課題を共有し、英知を結集して課題解決を目指します。</li> </ul>
<p><b>【その他の意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・デブリ取扱いはネガティブなイメージもあるが、遠隔設備やロボットなど若手を引きつける内容も多々あるのでポジティブな側面も対外発信して若手研究者獲得も含めアピールしてほしい。あわせて、一般の方も極めて関心の高い分野であることから、非専門家にも分かりやすい情報提供も推進し</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・若手人材の獲得も見据えつつ、一般の方への分かりやすい情報発信を目指す所存です。</li> </ul>

<p>ていただきたい。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当初を上回る成果があった部分については、今後の開発計画で何等かの変更や反映（追加、前倒しなど）があってもよいように思われる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・当初計画時の想定を上回る成果があった部分については、今後の研究開発計画の中で、工夫・改善を図る所存です。</li> </ul>
<p><b>②事故進展挙動評価に係る研究開発</b></p>	
<p><b>【廃炉措置ロードマップに即した廃炉プロジェクトへの知見提供に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃炉作業が進行していくにつれて、随時、現場からの新知見を取り込むことで、当初図を更新していくことになるが、迅速な対応が可能となる効率的な手法の検討・整備が必要ではないか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東京電力 HD とは、現場データが取得されるタイミングなどで頻繁に情報交換を実施しております。</li> <li>・御指摘のように IRID 事業で炉内状況推定図等をまとめ上げた際に設けたコアチームのような専門家集団が必要と認識しており、当機構内部だけでなく、NDF、IRID、東京電力 HD も交えて意見交換を継続しております。</li> </ul>
<p><b>【事故進展シナリオの解明に係わる基礎基盤研究に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本研究開発での個別事象の詳細な解析コードをとりまとめた、総合的なシビアアクシデントコードを機構においても開発することを是非検討されたい。</li> <li>・解析コードに統計的な手法を取り入れた推定手法も検討されれば一層効果が大きいのではと考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CLADS と原子力基礎工学研究センターで協力し、多相多成分詳細熱流動解析コード JUPITER を中核ツールとして、燃料集合体レベルでの機構論的な解析コードの整備を進めております。炉心規模では、MELCOR、MAAP、SAMPSON 等の総合型シビアアクシデントコードが既に開発されており、まずはこれらとの情報交換から進めてまいります。</li> <li>・御指摘いただいた統計的な手法については、これから次第に蓄積されてくる現場データの活用により、推定手法の精度向上が可能になると認識しておりますので、検討を進めます。</li> </ul>
<p><b>【原子力施設の安全性向上に向けた基盤研究に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・特に機構内安全研究センターにおける公開された成果を中心に、廃炉国際共同研究セ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シビアアクシデント全般については、当機構全体で検討する課題と認識しており、安</li> </ul>

<p>ンターの成果の共有が一層進むことが望まれる。研究基盤分野が共通な部分のある研究者間の意見交換などが進む体制整備も必要と思われる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子力安全性高度化研究について、機構の研究成果に対する関心が国内外で高まっているとともに、1F 廃炉における今後の調査への期待も根強いものがあるため、これらに対応した研究体制を整備していくことが肝要である。また、今後、これらの成果物が論文公表だけでなく、解析コードとデータベースの公開により、技術普及（成果の社会還元）に繋がることを期待する。</li> </ul>	<p>全研究センター等を含めて CLADS から働きかけてまいります。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>原子力安全研究に関する国内の適切な研究体制の整備の必要性は強く認識しており、経済産業省、文部科学省、NDF、IRID、東京電力 HD などと情報交換を進めてまいります。また、国外については、経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）のプロジェクトなどを通じ、情報交換を継続します。</li> <li>データベース、要素モデル、解析コードの公開は平成 31 年度期首から、ベータ版として、実施する予定です。ユーザー会議などにより、具体的ニーズを収集し、適切に実用化と成果の公開を進めます。</li> </ul>
<p><b>【人材に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>中間世代の人材不足はより積極的に改善を図り、将来に備えることが望ましい。</li> <li>若手、中堅の研究者の育成が継続的に進む仕組みについて、機構内外の意見を参考にしつつ、今後も見直していくことも必要になる。若手・中堅ともっと創意工夫のある取り組みについて直に意見交換してはどうか。また、中堅・若手の人材がこれまでの先達の技術や経験を容易に継承できる体制作りは重要で、直接指導もよいが、最新の IT 技術を駆使した知識マネジメントシステムなどの構築にも注力することが望まれる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各年代に応じてバランスの取れた人材配置を目指します。このため、キャリア採用等を積極的に行います。</li> <li>若手・中堅との意見交換については、部門内で若手職員の交流会が開催され、CLADS の若手研究者も参加して自由闊達な意見交換が行われており、その中で得られた生の意見を人材育成の取組にも反映してまいります。</li> <li>中堅・若手の人材育成等については、いずれも当機構全体で検討する重要課題と認識しており、まずは、研究現場において、具体的な成功体験を与えていくことが重要と考えております。</li> <li>効率的な技術・ノウハウ等の継承のため、最新の IT 技術を駆使した知識マネジメントシステムなどの構築も検討してまいります。</li> </ul>
<p><b>【国内外他機関との連携に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>国内外他機関との連携に当たり、地理的な</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内外他機関との連携に当たっての地理的</li> </ul>



<p>不便さは、かなりマイナスイメージと言わざるを得ず、特に長期滞在を強いられる学生等にとって負担となる。従って、短期滞在はしかたないとしても、現地に行かずに遠隔で実験等に参加できる選択肢も用意されると、新たな連携展開が期待できるのではないか。</p>	<p>な不便さは、当機構全体の課題と認識しており、遠隔で実験等に参加できるようにするのは難しいかもしれませんが、実験等の立案に当たって短期滞在中に参加できるように工程作成に留意してまいります。</p>
<p><b>【その他の意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料デブリ取り出しに係る研究開発と極めて関連が深いので、互いの情報を共有し、効果的かつ信頼性の高い研究をさらに進めてほしい。</li> <li>今後は、しばらく現場情報を獲得することが難しい RPV 内部やペDESTAL 底部深さ方向の知見の整備が望まれており、それに向けた体制整備が実施されていることは評価されるが、その際には、燃料デブリ性状把握プロジェクトにおける MCCI などの知見とも連携してより大きな成果に結びつけられるような進め方をすべきである。</li> <li>事故進展挙動評価に係わる分科会のように、廃炉現場ニーズと研究シーズの効率的なマッチングが必要と判断される研究課題が生じた場合にも、同様の機能を有する体制整備が望まれる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料デブリの性状把握と 1F 事故進展解析の連携が、今後重要になってくると認識しております。また、対外的な要望も強いと認識しており、CLADS 内での連携を強化して、より大きな成果に結びつけられるよう、効果的かつ信頼性の高い研究をさらに進めてまいります。</li> <li>事故進展挙動評価以外にも、廃炉現場ニーズと研究シーズの効率的なマッチングが必要と判断される研究課題が生じた場合には、必要な機能を有する体制整備を図ります。</li> </ul>
<p><b>③廃棄物処理・処分に係る研究開発</b></p>	
<p><b>【分析に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>燃料デブリ取り出しに係る分析作業も念頭に、大熊分析・研究施設の建設、整備の進捗を睨んだ中長期的な分析計画の立案が望まれる。また、分析計画を変更するにあたって、これまでの蓄積データにおける過不足性の確認と過去データとの繋ぎとなる代表観測ポイントのような分析試料は複数選んでおくべき。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>大熊町の放射性物質分析・研究施設での分析に備えて、中長期的な分析計画の立案と、その計画に基づいた試料の採取・保管の着実な実施や、分析手法の標準化が必要となります。これらを当機構内及び外部関係者と調整して進めてまいります。燃料デブリに関しては、少量の試料採取が検討されており、採取資料の分析には茨城地区の分析施設を当面利用することが想定されます。当機構の茨城地区の分析施設を利用する可</li> </ul>

	<p>能性も視野に、資源の有効利用の観点から、計画の際に配慮いたします。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・今後分析する試料の決定に当たっては、既存のデータとの関係を念頭に検討いたします。</li> </ul>
<p><b>【保管に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・クライアントの事情もあるかもしれないが、リスク低減を目指すなら、セシウム吸着塔や多核種除去設備スラリーを長期保管するという発想は止めて、先行的処理に進む努力をすべきではないか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在のロードマップでは、御指摘のとおり、長期保管を想定して中間的な処理を行う想定であります。現時点では処分の方法と廃棄体の仕様が決定されておらず、廃棄体を製造した場合には、将来的に手戻りが発生する可能性が生じます。保管と処分の双方に適合する処理技術を目指して検討を進めてまいります。</li> </ul>
<p><b>【処理に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・固化技術に関し、例えば、注目されているジオポリマーについては、水素発生量は大幅に低減されるものの、現状はベントが必要であり、必ずしも合理化にならないなどの状況もある。モノリス触媒と組み合わせるなど、今後の処理技術選定のアプローチの中では、実用に向けて、技術のインテグレーションやコスト低減も考慮した適用性評価が実施されることを期待する。</li> <li>・Tc や Se の処理技術については開発の意義や必要性を定義されることを要望する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素の発生を前提とした廃棄物の管理は、御指摘のとおり、技術の組み合わせ、コストへ配慮しながら進めてまいります。</li> <li>・Tc と Se の固定化は、長半減期核種の処分に係る技術方策の多様性を得るために進めております。処分場を具体的に想定しかねる現状におきましては、基礎的に意義のあるテーマであると考えておりますが、その必要性も含めて検討してまいります。</li> </ul>
<p><b>【処分に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Cs の移行を遅延する技術に関して、取得データおよび既往の知見を基に、より詳細なメカニズムへの言及も期待する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・御指摘のとおり、移行挙動を定量的に検討する上で、そのメカニズムについても検討を深めてまいります。</li> </ul>
<p><b>【人材に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物の保管、処理・処分は社会的な周辺の住民の方々への関心も高いと考えられるの</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物管理の社会的な受容性は、事故廃棄物のみならず、既往の放射性廃棄物と密接</li> </ul>

<p>でPAを考慮した研究や、人材の育成も重要であると考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>今後優秀な若手人材を確保するためには、この分野の研究は応用分野だけではなく基礎研究でも多くの研究成果を挙げられることや、外部機関との共同研究に携われることを、アピールするのが望ましい。また、国際的な共同研究も今後計画して、若手人材が、国際的に活躍できる環境を整えることが期待される。中堅・若手人材が本分野の魅力を感じるインセンティブは何かということを、現在活躍している中堅・若手人材と意見交換するなどして確認しておくことが必要ではないか。</li> </ul>	<p>に関連する問題であると認識しております。社会的に受け入れられる方策の検討も進めてまいります。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本分野の研究開発は、御指摘のとおり、基礎と応用の組み合わせが重要であります。人材育成の観点から、基礎研究分野の内容や重要性、国際協力の推進についてアピールするよう検討いたします。また、その際に、現在活躍している中堅・若手人材等の生の意見を反映することを検討いたします。</li> </ul>
<p><b>【国内外他機関との連携に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>限られた範囲の分野だけでなく、分析技術や情報処理技術など、他分野で進んでいる技術導入を目論んで、異分野研究コミュニティとの積極的な交流を図る努力も必要ではないか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術的な障壁が高いテーマに取り組む場合、従来のアプローチを着実に進めることは重要であります。御指摘のとおり原子力や廃棄物以外の分野の知見を取り込み融合させることによりブレークスルーを達成することが期待されます。従来からの視点にとらわれず検討を進めてまいります。</li> </ul>
<p><b>【その他の意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>今後、保管や処理技術について、処分側から、知見をより積極的にフィードバックさせることも重要になる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在のところ、長期的な保管のために先行的処理が検討されています。廃棄物管理の全体を考えて、処分側からのフィードバックを活用してまいります。</li> </ul>
<p><b>④遠隔技術に係る研究開発</b></p>	
<p><b>【小型コンプトンカメラの開発に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本分野の非専門家にも効果の分かり易い成果であるが故、過大な期待を抱かせている感もあり、これまでの研究開発過程で見出された課題（定量性、放射線分布再構成画像の歪み、隠れたホットスポット検知における位置不確定性など）を着実に克服して、真の適用限界を明確にし、平成31年度に目</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまでの研究開発過程で見出された定量性の課題についても取り組んでおり、建屋内の3次元分布測定する中で、絶対値（線量率、汚染密度）との比較評価を進めております。</li> <li>現在、高線量率用のコンプトンカメラを製作し、特性評価試験を進めております。今</li> </ul>

<p>論まれている実用化（製品化）に繋げていただきたい。</p>	<p>後、1F に投入する中で適用性を評価してまいります。これまで、1F からは従来の測定器では分からなかったホットスポットや線源分布を検出しており、今後の工事計画に重要となる情報を提供しており、課題も抽出してきております。今後、これらの課題を一つ一つ明らかにしながら適用限界を明示ししつつ、利用範囲を拡大していきたいと考えております。</p> <p>なお、実用化に向けて、メーカーとも協議しており、平成 31 年度に実証機を製作し、販売していく予定です。</p>
<p><b>【<math>\alpha</math> 核種位置検出器の開発に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1F 現場での表面汚染検査における <math>\alpha</math> / <math>\beta</math> 核種同定のために位置検出器を用いることの効用について、必要な性能や利用手順等、もう少し開発すべき仕様を整理しておくべきではないか。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\alpha</math> 線検出器の性能についてはこれまでも試験研究を行い、感度特性を把握しております。しかし、ユーザーインターフェイス等で弱いところがあるため、東京電力 HD と協議しており、現場適用を目指して、仕様を決めつつあります。また、東京電力 HD から本件に関する期待も高く、優先度を見極めながら、廃炉の進展に貢献したいと考えております。</li> </ul> <p>また、<math>\beta</math> 線測定器は、平成 31 年度に実験を重ね、イメージング化を目指します。</p>
<p><b>【バーチャルピンホールカメラの開発に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>バーチャルピンホールカメラの開発については、文科省英知事業の一環として、採択された事業であり、関係の PO 等との連携により指向性などについても着実な進展が望まれる。また、臭化タリウム検出器は、室温で作動し、高検出効率、高分解能を持ち、<math>\gamma</math> 線相互作用位置を高い精度で決定できることから、今後、バーチャルピンホールとして、その 1F への適用が期待される。</li> <li>先の話だが、本研究開発に投資すべきかの</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文部科学省英知事業におけるバーチャルピンホールカメラの開発については、平成 29 ～平成 31 年度の研究として実施しております。平成 29 年度は平成 30 年 1 月末から実施しており、平成 30 年 12 月の説明時においては、十分な成果と言えない段階でした。現在、照射試験を行い高線量率（<math>\sim 10</math> mSv/h）環境での測定可能性を得つつあります。PO とも相談しつつ平成 31 年度に 1F で試験を行うよう準備しております。</li> <li>センサー製作は東北大学で実施しておりま</li> </ul>



<p>判断根拠となるバーチャルピンホールカメラの成立性（原理実証）の研究成果（シミュレーション計算による基本設計も含む）を早く示すべきではないか。また、フィージビリティスタディの位置づけの予算規模で、その成果は、センサー製作担当の東北大の努力にかかっていることは理解するが、センサー構造の設計検討（シミュレーション計算による特性予測）は、配分予算からも機構側が支援すべきではないか。</p>	<p>すが、検出器のコンフィグレーション、測定手法は当機構が解析（シミュレーション計算）するとともに当機構の照射施設を用いて高線量率場での特性評価を行い、また、文部科学省英知事業の予算をセンサー製作に重点配分することで支援しています。今後とも、東北大学、東京大学と打合せをしながら、研究を進めてまいります。</p> <p>さらに、当機構は 3D-LIDAR（Light Detection and Ranging）との比較研究を進めており、実際の放射線計測との融合を進めております。</p>
<p><b>【炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>LIBS について、1F 現場での採用に至らない懸念事項（例えば、レーザーアブレーションによる試料飛散に伴うプローブ汚染、試料表面剥離による S/N 比変化と分析結果の再現性変動など）の克服に向けてさらに真摯に取り組まれ、より完成度の高いその場分析システムの実現と 1F 廃炉作業での活用を期待する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー誘起ブレイクダウン分光（LIBS）技術及び関連分光分製技術については、ウラン（U）含有多成分不均一模擬デブリによる実証試験や高線量場での分光結果の提示等により、性能限界や短所も含めその有用性について具体的説明をしてきており、理解が深まっております。加えて、炉内その場分析や遠隔分析の必要性に関する意識も高まっており、少量採取デブリのサーベランス技術として具体的導入に関する議論も始まっております。並行して、当機構の指導の下に、東京電力 HD 発注でメーカーが装置を納入可能となるような装置供給体制についても検討を進めております。</li> </ul> <p>今後のデブリ採取計画や炉内状況調査の進展に応じて、現場での試験を進めつつ、使える技術として完成度を上げていく計画です。</p>
<p><b>【レーザー診断・加工技術の開発に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>大型構造物の健全性評価のための非破壊検査技術として、レーザー超音波診断技術の有用性は明らかであるが、従来法に比べて、診断結果の信頼性評価が未だ不十分であ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザー診断については、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）等において培った技術を基盤技術とし、非接触遠隔サーベランスという切り口で廃炉へ活用</li> </ul>

<p>り、本技術の診断精度や適用範囲を明確にしていく今後の研究実績の積み重ねを期待する。また、廃止措置のためのレーザー加工技術については、他にも国内外で関連研究例が少なくなく、これらとの連携強化により、1F 廃炉作業に向けた成果統合のような技術開発が望まれる。</p>	<p>を図っております。目的に応じた性能評価が必要であり、従来の接触型の評価法との比較を行いつつ、信頼性に関する評価を進めます。</p> <p>また、レーザー加工については、文部科学省英知事業を始めとして、産学との共同研究、当機構内での組織縦断的な技術高度化連携研究等を進めており、廃炉で求められる基盤技術の強化を図ります。</p> <p>現時点では、廃炉工程において具体的な適用計画はありませんが、成果をまとめつつ、東京電力 HD と適用性について打合せを継続し、連携を進めてまいります。</p>
<p><b>【標準試験法の開発に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>標準試験法の開発については、オペレータの技術向上に向けて必須となる操作の抽出とその十分性については、関係機関との継続的な連携により議論を今後さらに深めていくことも必要になると思われる。</li> <li>標準試験法については、今後も最新の現場情報や燃料デブリ取り出し作業の具体化に沿ったタイムリーなフィードバックが可能な試験場（あるいは方法）更新と柔軟な運用体制の構築を期待する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発した標準試験法については、順次情報公開していくこととしており、ユーザーによる試行を通じた意見の集約、反映を行うことで効果ある試験法として確立していきたいと考えております。</li> <li>現在、現場での作業実施環境や今後のデブリ取り出しの過程で必要な作業を想定した標準試験法の開発に取り組んでおり、檜葉遠隔技術開発センターにおいて開発された試験法を順次提供していくための準備を進めております。</li> </ul>
<p><b>【人材に係る意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本研究開発のようなリモートセンシング、ロボット技術については、原子力以外の多くの分野でも技術者が不足しており、若く、優秀な人材の確保が難しい。基盤研究、基礎研究にも、研究開発資源を十分に配分して本研究開発の魅力を発信し、人材確保に役立てることが望ましい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>人材育成については、リサーチフェロー1名（退職後、国際原子力機関（IAEA）保障措置技術者へ就任）、博士研究員2名（うち1名は退職後関連研究大学助教へ就任）を育成しました。また、連携重点研究を中心とした人材交流を積極的に図り、特別研究生2名を受け入れ、博士後期課程への進学や、学位取得のサポート等、若手研究者の育成を支援しました。</li> </ul> <p>その他、大学においては、特別講演や特別講義も実施しており、若い人材の意識向上</p>

	<p>にも貢献しております。</p> <p>今後も連携研究、特別研究生制度、大学などでの広報活動を活用し、継続的な人材育成・確保を図ります。</p>
<p><b>【その他の意見】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本分野の研究は、基礎基盤的な個別シーズ技術の開発であり、目標が必ずしも明確ではなく、進捗状況の妥当性の評価が難しい課題が多い。ニーズに基づいた開発戦略や計画を明示した上で進めることを望む。</li> <li>・常にニーズを先取りして、世界中のシーズ技術に対してアンテナを高くしておく必要がある、さらに 1F 廃炉関係者との連携を密にしていくことを期待する。</li> <li>・特に比較的規模の大きい予算で実施されているものについては、廃止措置への貢献に対する期待も大きくなることから、開発の進捗のみならず、実用化の見通しや課題などをより明確にしていくことが望まれる。</li> <li>・「燃料デブリの取出しに係る研究」、「廃棄物処理・処分に係る研究開発」、「事故進展挙動評価に係わる研究開発」にも極めて有用なものも多いことから、他課題の研究者との情報共有を緊密に行うことが望ましい。また、多くの研究開発を行っているので、それらの統括、連携をより一層進めることが重要であると考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本分野は東京電力 HD の個別ニーズに応え、今後生起するであろう課題について対処していくための技術開発をしていく必要があると考えております。そのためにも東京電力 HD 担当者と綿密に議論を重ね、研究課題を提示して行きたいと考えております。</li> <li>・そのためにも、国内外の研究テーマ、特に海外の先進的な研究に携わる研究者とも情報交換しております。こうした研究を 1F の廃炉に適用していくため、軽重を勘案しながら円滑に進めてまいります。</li> <li>・予算規模の大きい課題については、関係機関と調整しながら、実用化を目指します。現在も、その方策を関係機関と検討しております。</li> <li>・御指摘のとおり、CLADS 内の連携強化に努めてまいります。</li> </ul>

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

