

平成27～令和元年度国家課題対応型研究開発推進事業
廃止措置研究・人材育成等強化プログラム

福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析・
廃炉技術に関わる研究・人材育成

成果報告会(web)

研究代表者 国立大学法人福井大学
附属国際原子力工学研究所
所長・教授 宇埜正美

再委託機関 大阪大学、九州大学、京都大学、福井工業
大学、大阪府立大学、若狭湾エネルギー
研究センター、日本原子力研究開発機構

事業概要

課題目標

- ◆ 1F廃炉現場のニーズを踏まえた**中長期的視点での基盤研究**を実施
- ◆ 1F廃炉における課題解決に貢献できる高い知識と社会貢献意識を持った**広い専門分野の若手人材を継続的に育成**

基盤研究：課題設定のポイント

(1)廃止措置技術研究
多様に変化する状況
の中で**廃炉工程全体**
を俯瞰して**意思決定**す
るための手法を開発

- (1) 廃止措置技術コース
- ① 廃止措置技術研究(福井大)
 - ② 廃止措置技術セミナー(福井大)
 - ③ 廃止措置技術実習(福井大・若狭エネ研)
 - ④ 廃止措置国際セミナー(福井大)
 - ⑤ 廃止措置工学学生サミット(福井大)

(2)デブリ物性・分析研究
熱力学計算に基き**模擬**
燃料デブリを作成し、革新
的な分析手法を開発・使用
して**未知のデータ**を取得

- (2) 燃料デブリ分析コース
- ① デブリ物性・分析研究(各大学・機関)
 - ② 模擬燃料演習(阪大/府大、福井大/九大)
 - ③ 燃料デブリ実習(福井大・JAEA大洗)
 - ④ 臨界管理実習(京大炉・大阪大)

(3)廃炉技術開発研究
多様な分野の研究者
が**先進的技術**と産官学
連携により、1F廃炉の
課題解決に挑戦

- (3) 廃炉技術開発コース
- ① 廃炉技術開発研究(各大学・機関)
 - ② 非破壊検査実習(福井大)
 - ③ 放射線管理・計測実習(福井工大)
 - ④ 放射性核種分析実習(福井大)

(1)廃止措置技術コース①廃止措置技術研究

目的: 福島第一原子力発電所の廃炉を対象に、様々な条件下で進められる作業計画(シナリオ)のリスクを統合して評価する方法論の基盤を整備。

成果: WBSの作成、工程遅延と被ばくリスクを分析、廃棄物の潜在的危険度(HP)を評価し、1F廃炉シナリオ(WBS)に対応したリスク指標(工程遅延、想定外作業被ばく、廃棄物の潜在放射線危険度)を計算、リスク指標の俯瞰と分析。

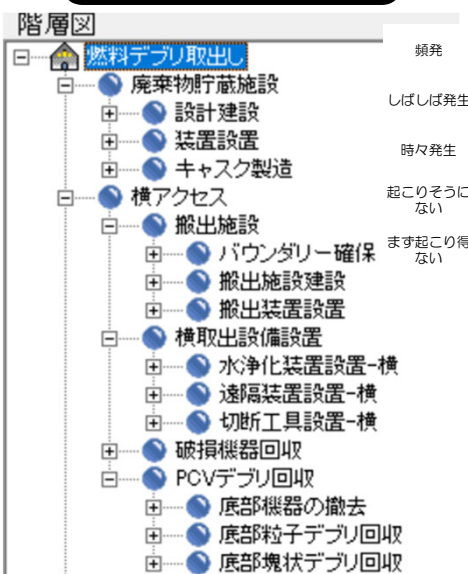
1F作業シナリオ
(WBS)

マトリックスを用いた
リスク評価モデル

作業を俯瞰した
リスク分析

作業毎のリスク評価

・リスクマトリックスを用いた
リスク指標の計算。()はリ
スク大となった作業の数



頻発	低	中 (3)	高 (1)	高 (2)	高 (3)
しばしば発生	低	中 (2)	中 (3)	高 (1)	高 (2)
時々発生	低	中 (1)	中 (2)	中 (3)	高 (1)
起こりそうにない	低	低	中 (1)	中 (2)	中 (3)
まず起こり得ない	低	低	低	中 (1)	中 (2)

無障 軽微 中程度 重大 致命的

分類	点数
Very High	5
High	4
Medium	3
Low	2
Very Low	1

$$\text{リスク指標} = \sum_i P_i + C_i$$

例

横アクセス HPの変化 工程遅延 想定外被ばく

横取出設備設置		41 (3)	45 (0)
破損機器回収	20.2* -> 18.6	10 (0)	29 (2)
PCVデブリ回収	27.6* -> 17.3	27 (0)	73 (4)

上アクセス

取出設備設置		13 (0)	75 (0)
RPVデブリ回収	27.6* -> 17.5	48 (0)	124 (7)
RPV撤去	20.2* -> 11.3	5 (0)	87 (6)

福島への貢献: 1F廃炉作業の計画検討及び作業管理に係るリスク分析の基盤として活用できる。
今後の展開: 1F廃炉シナリオの分析

★ "Study on strategy construction for dismantling and radioactive waste management at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" Nuclear Engineering and Design, Accept.

(1)廃止措置技術コース

②廃止措置技術セミナー（福井大研究所）

毎年2月後半頃 於 檜葉遠隔技術開発センター他、参加学生15～20名/年

- ・廃炉・環境修復・廃棄物管理およびそれらのシナリオに関する講義・討論（福井大研究所）
- ・1F廃炉現場・檜葉遠隔技術開発センター見学

★新規国際原子力人材育成事業により敦賀で継続

③廃止措置技術実習（福井大工学研究科、若エネ研）、廃止措置技術セミナーに続いて

- ・マニピュレータ動作の最適化実習
- ・VR施設などを用いた遠隔操作実習

④廃止措置国際セミナー（例年8月、9月頃） 招聘外国人：16名

例：平成30年度：CLADSとの共同開催で、「1F 事故の知見に基づく炉心溶融挙動と燃料破損現象の解明に関する基礎研究」（平成30 年度第2 回の福島リサーチカンファレンス）於J-Village他

- ・MELCORE 開発者の講演やメンターの指導の下での学生の英語による討論・発表

例：令和2年度 日韓学生セミナー 於 ウルサン科学技術大学

- ・福井大、KAERI、UNIST、KHU、北海道大学
- ・日本と韓国の廃止措置・廃棄物処分の現状の紹介と学生による研究紹介・討論

⑤廃止措置工学 学生サミット（NDEC-1～5、全機関合同、（毎年2～3月、NDEC-3以降「まなびの森」）参加学生数十名/年、参加人数150名前後/年

- ・廃炉研究に取り組む全国の学生・若手研究者の研究発表会、成績優秀者を表彰



(2)燃料デブリ分析コース① デブリ物性・分析研究

a. 模擬デブリ構成物質の機械的・熱力学的物性評価(大阪大学)

目的: 熱力学データベースを構築し、熱力学平衡計算による燃料デブリの相状態を予測する。また、燃料デブリ関連化合物を合成し機械的及び熱的物性を評価する。

成果: 燃料デブリを形成する可能性のある物質の中でこれまで物性が未知であった物質(特にボライドに着目)について熱力学平衡計算による燃料デブリの相状態の予測、及び燃料デブリの構成物質の物性把握

廃炉への貢献: デブリの相状態や物性についての基礎的なデータを取得。事故進展解析と連携し、デブリの位置等の具体的な情報とデブリの相状態や物性とを関連付け、廃炉に大きく資する

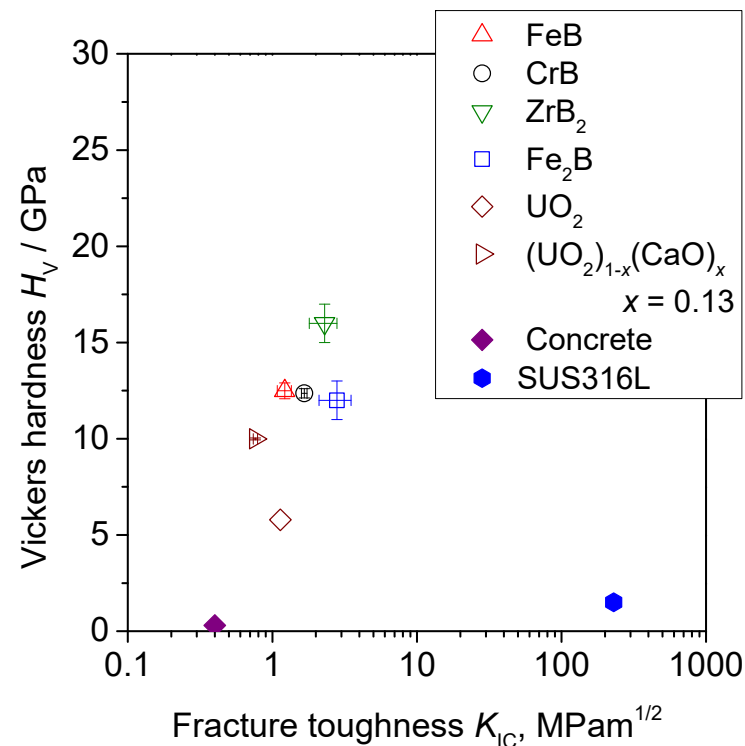
(NDEC) 研究奨励賞

- ・杉崎光之(M1)「Cr-Bの物性評価」
- ・中森文博(D3)「BWRにおける燃料デブリ
およびMCCI生成物の物性評価」
- ・岡田大輔(M2)「燃料デブリの金属相の物性評価と高温酸化挙動」

★F. Nakamori et al., J. Nucl. Sci. Technol. 2017.

★Y. Ohishi et al., J. Nucl. Sci. Technol. 2019.

★中森 文博 他, 日本原子力学会和文論文誌 2016.



(2)燃料デブリ分析コース① デブリ物性・分析研究



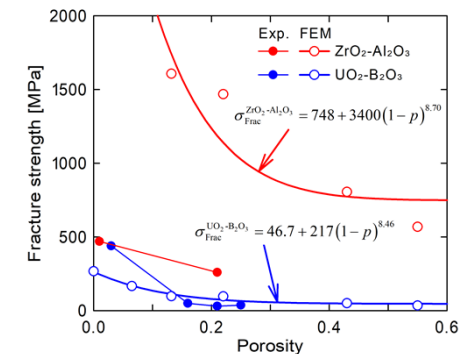
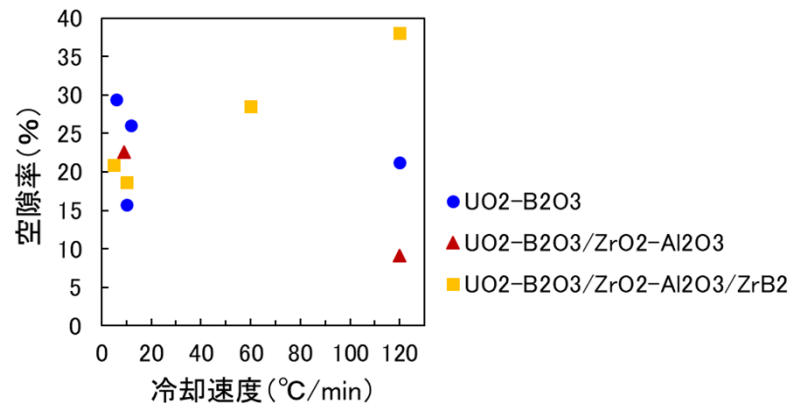
University of Fukui

b. 溶融固化体の空隙率と物性の相関(福井大学研究所、工学研究科、JAEA)

目的: 共晶反応を利用して空隙率の異なる**模擬溶融凝固デブリ**を合成し、その機械的性質の評価、X線CTを用いた空隙率評価、破壊挙動解析を用いて、**空隙率と破壊強度の関係**を評価する。

成果:

- ・ $\text{UO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{UO}_2\text{-B}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、...模擬溶融凝固デブリを合成、物性を測定し、空隙率と破壊強度の関係を評価。
- ・有限要素法を用いた破壊挙動解析による破壊挙動評価手法を確立し、 $\text{UO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、の静的圧縮強度の空隙率依存性を評価。
- ・X線CTによる模擬溶融凝固デブリの空隙率評価手法の確立



ZrO₂-Al₂O₃およびUO₂-B₂O₃の圧縮強度と空隙率の関係

廃炉への貢献: 空隙生成に伴う燃料デブリの機械的強度の低下を、X線CT測定より予測するための手法を確立。JAEAでは、X線CT応用法・解析法の研究を進め、1Fから取り出した実燃料デブリの性状把握及び計量管理等に貢献する。

★A. Yusufu, M. and Uno J. Nucl. Mater 499 (2018) 175-181



(2)燃料デブリ分析コース① デブリ物性・分析研究

c. 燃料デブリからのFP放出・溶出挙動評価(福井大学)

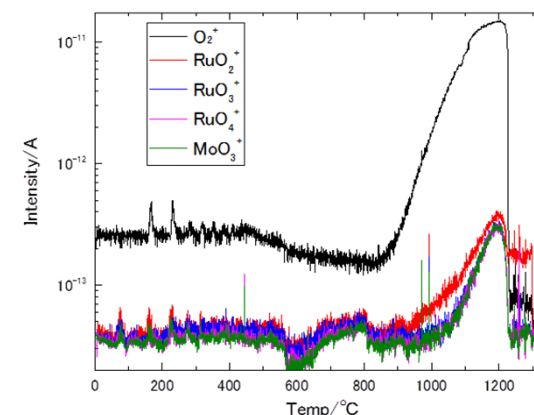
目的: 主要なFPの放出・溶出挙動を整理し、熱力学データや基礎的放出・溶出モデルを推定し、デブリ取出に資するデータを得る。

成果

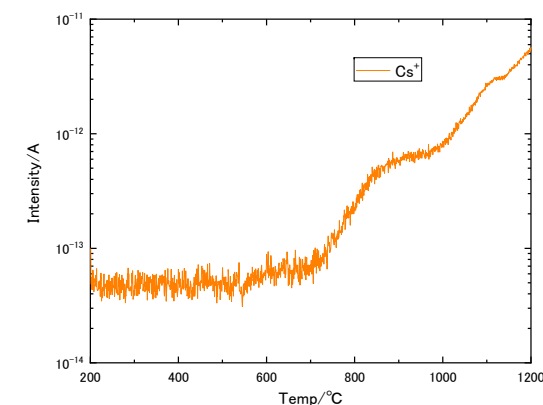
- ・デブリ加熱時に放出量の多いFPはCsおよびIであり、酸化状態ではRu酸化物も、溶融デブリ中にはCs, Iはほとんど残らず
- ・Cs・Iがデブリ中に残存している場合には溶出しやすい。
- ・事故時に放出されて構造材と反応したセシウムも浸水するとセシウムが溶出しやすく、700℃以上に加熱されると再放出される。
- ・ストロンチウムはジルコニウムと速やかに反応し溶出しにくい物質に

福島への貢献

今回のデータ(蒸発エンタルピー・分解のエンタルピー・溶解速度など)を冠水工法、非冠水工法時の条件での放射性FPの放出・溶出量の評価に



Ruの放出挙動(酸化状態では850℃以上で顕著)



構造材反応物からのCs再放出(700℃以上で顕著)

(2)燃料デブリ分析コース① デブリ物性・分析研究



University of Fukui

d. 燃料デブリの融点評価(九州大学)

目的:レーザー加熱法を用いて模擬デブリの融点を系統的に測定・評価する。併せて、計算化学による融解現象のミクロな解析を行う。

成果

- レーザー加熱法: 融点測定システムを構築。融点の精度にまだ改良の余地はあるものの CeO_2 - ZrO_2 系模擬デブリは、その低い放射率を考慮すると、2800K以上の融点、Fe酸化物、 SiO_2 の混入により熔融温度は低下
- 分子動力学法: 燃料デブリの現実的な融点評価が可能となるように、ポテンシャルパラメータを整備し、 CeO_2 (又は UO_2)- ZrO_2 系酸化物の融点を系統的に評価した。 CeO_2 及び UO_2 の融点を低下させる効果は、 ZrO_2 に比べてFe酸化物及び SiO_2 の方が大きいことを明に。

福島への貢献: 1F事故進展解析への貢献として、複雑な組織を持つデブリの融点評価に本手法を活用できる可能性がある。

★レーザー加熱法による融点測定法: 新たな展開として、高速度カメラを用いたより局所的な分析(位置分解能~数十 μm)を可能とする装置の開発*

* 原シス・放射性廃棄物減容・有害度低減技術研究開発・タイプA「マイナーアクチニド含有低除染燃料による高速炉リサイクルの実証研究」(代表: JAEA・加藤正人)

(2) 燃料デブリ分析コース

②模擬燃料演習a. カリキュラムの実施、b. PIXEを利用した実習

(福井大学、大阪大学、九州大学、大阪府立大学) 参加学生数名/年

目的: 模擬物質を用いた実験と計算化学に燃料デブリ研究人材の育成

内容: 毎年8月下旬から9月上旬の2泊3日程度

・阪大・大阪府大グループによる模擬デブリの物性測定、PIXEによる分析

・福井大・九大グループによる模擬デブリの物性測定と計算による物性評価

★今後はJ-Actinetの実習活動の一環として、福井大、阪大、九大が中心となり実施していく予定

③燃料デブリ実習(JAEA、福井大学) 2～3名/年

目的: PIEについて一通の知識の習得

実施内容: 8月中旬、2泊3日程度で原子力機構大洗研究所にて、燃料の取扱い、X線CT、画像解析等に関する講義、施設見学及び実習

福島への貢献: カリキュラムや実習教材を利用し、燃料デブリ分析技術者の人材育成に活用していく予定



MS操作実習



(2)燃料デブリ分析コース

④臨界管理・未臨界度測定実習(京都大学・大阪大学) ～10名/年

目的: 京大炉で廃炉作業に必要な臨界管理・未臨界度測定の技術を習得

実施内容: 年度末に前半は未臨界の講義とシミュレーション実習(阪大)。後半は京大炉実習。

日時		内容	担当者
3月2日 (月)	午後	開講、手続き、保安教育、施設概要、施設見学	京都大学
		未臨界シミュレーション実習(1)	大阪大学
3月3日 (火)	午前	未臨界シミュレーション実習(2)	大阪大学
	午後	未臨界シミュレーション実習(3)	
3月4日 (水)	午前	未臨界シミュレーション報告会	大阪大学
	午前/ 午後	未臨界度測定実習(1) 講義・実験:臨界近接	京都大学
3月5日 (木)	午前	講義・演習:未臨界度測定手法入門	京都大学
	午後	講義・実験:放射化試料測定、U濃縮度測定	京都大学
3月6日 (金)	午前	実習報告会、閉講	京都大学、大阪大学

福島への貢献: 参加延べ人数は25名、その多くが原子力関連の事業者、メーカー、エンジニアリング会社等への就職あるいは原子力系大学院に進学

★今後も本実習の内容を各大学の学生実験及び講義に反映



(3)廃炉技術開発コース①廃炉技術開発研究

a. コンクリート健全性非破壊評価(福井大工学研究科)

目的:超音波探傷法によるコンクリート内鉄筋欠陥の非破壊検知手法の確立

成果:複数探触子による高速探傷については、一部再検討すべき点があるものの、概ね全体計画通りに研究が進み、コンクリート内鉄筋や欠陥の画像化手法を確立

福島へ貢献:長期に渡る廃止措置に鑑み、本研究の成果をコンクリート構造建屋の健全性評価に用いることができる

★T. T sunoda & K. Suzuki, Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges, pp.2385-2392, 2018.7.

★T. Tsunoda, K. Suzuki et al. 44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, V.37, AIP Conf. Proc. 1949, pp.040007-1-040007-12, 2018.5.

★2016年 角田貴也 他 土木学会第71回年次学術講演会 優秀講演者賞

★2019年 角田貴也 他 土木学会応用力学委員会 平成29年度応用力学講演賞受賞

b.原子炉解体ロボット技術探査(福井大工学研究科)

目的:福井大学PBLにより、原子炉解体プロセスで使用するロボットの必要仕様(機構、制御手法など)についてまとめ、問題点抽出と解決策の提案させる。

実施内容:4年間で課題の抽出、設計、ダウンスケール模型の作成とロボット設計の提案書を作成

★国際ロボット博に若エネ研と共同出展、学生が実演

★引き続き、福井大PBLで

★地元企業(株)シマノとの共同研究実施中



試作機の操作模様

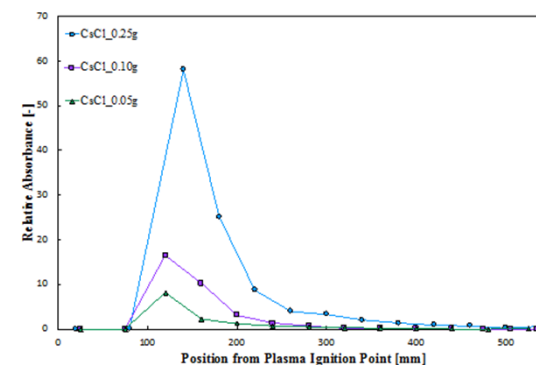
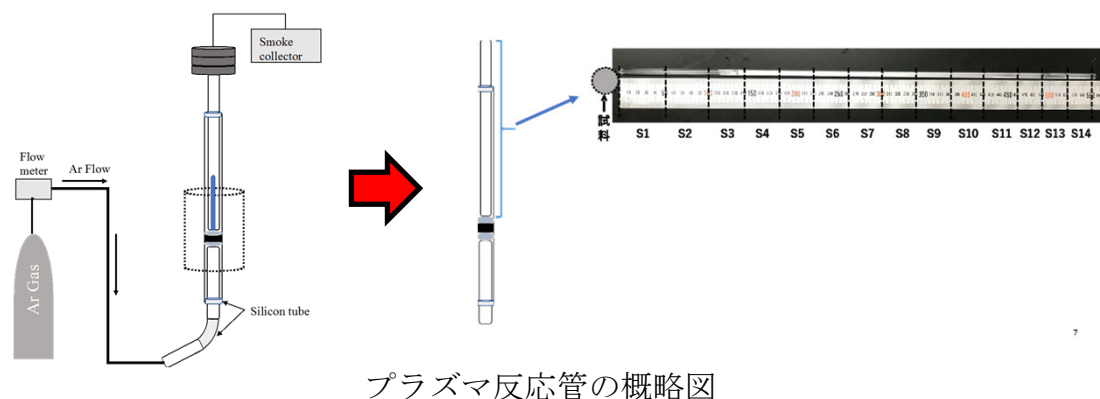
(3)廃炉技術開発コース①廃炉技術開発研究

d.アルゴンプラズマを用いたヨウ素、セシウム捕集技術開発(福井工業大学)

目的:アルゴンプラズマと静電捕集技術を組み合わせた、ドライプロセスによる放射性ヨウ素、セシウムの分離捕集技術を開発する。

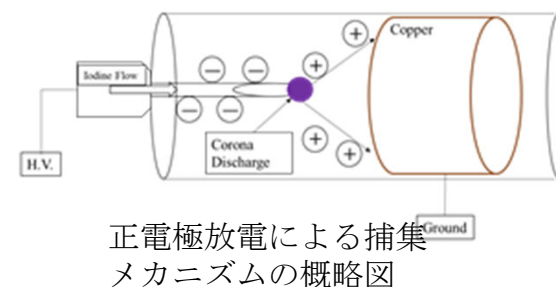
成果

- ・s-band大気圧マイクロ波放電装置を利用した大気圧下で作動するプラズマ発生システムと静電捕集技術を組み合わせヨウ素、セシウムの分離捕集技術を開発
- ・アルゴンプラズマによる放射性セシウムを含む土試料からのセシウム分離を行い、その定量化を行った。



セシウム分離後の挙動

★アルゴンプラズマによる放射性セシウムを含む土試料からのセシウム分離においてセシウムを99%以上除去することに成功、日本原子力学会 2021年春の年会において発表予定。



(3)廃炉技術開発コース①廃炉技術開発研究



c. マニピュレータの手先軌道計画(福井大学工学研究科)

目的: 除染用冗長自由マニピュレータの手先の軌道を最適化する手法を開発。

成果: コンピューター内で安川電機 MOTOMAN SIA20の関節角軌道の総距離を最短とする軌道最適化プログラムの開発と柱の凹凸面を含むような壁の評価

最適計算に基づく方法により逆運動学解の冗長性を解消した効率良い除染動作を計画するシステムを開発。

★今後、若エネ研の除染機にインストールを検討

d. 耐放射線性ロボットレーザー基礎技術開発(若エネ研)

目的: JAEA櫛葉遠隔技術開発センターの模擬施設やIT技術を活用し、高線量下や閉所での除染ロボットに必要な要件の確認・評価を行う。

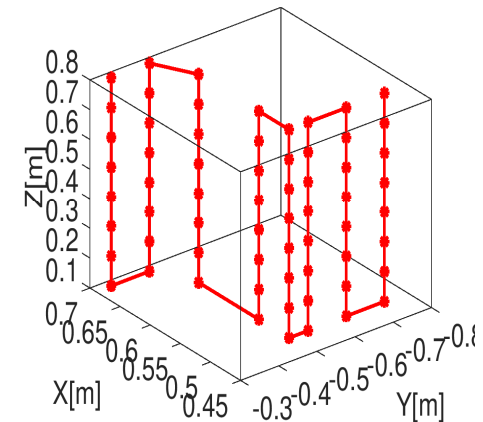
実施内容:

- ・若エネ研で試作したロボットレーザー除染機(安川電機 MOTOMAN SIA20)のJAEA櫛葉での福島第1建屋内部を想定した状況での走行試験
- ・同施設所有のモーションキャプチャによる仮想現実空間(VR)技術を利用し、非放射線曝露下での模擬放射線曝露環境による照射線量評価

福島への貢献: VRによる被曝作業線量の評価は安全な作業の効率化に

★2019国際ロボット展での好評価と実現場適用へのアピール

★この除染用ロボットシステムへの軌道計画法の搭載の方法の検討



計画した軌道の例

(3) 廃炉技術開発コース

② 非破壊検査実習(福井大工学研究科) 年末～年度末 十数名/年

目的: 各種非破壊検査手法の原理、長所・短所の知識を備えた人材の育成

実施内容: 疲労き裂導入の鋼製試験片に対する浸透探傷と超音波探傷のき裂開口幅、き裂深さの評価

★受講生の増減に対応するため工大から超音波探機

★今後はJNEN夏季実習

③ 放射線管理・計測実習(福井工大)

年末～年度末 十数名/年

目的: 除染技術に必要とされる化学・放射化学に関する実践的知識の習得

実施内容: 管理区域入退室、検出器の原理・操作、自然放射能等の測定

★管理区域の入退室の実習

★福井工大正規カリキュラム、基盤工学実験

★新規国際原子力人材育成イニシアティブ事業(福井大代表)でのアイソトープ実習



(3) 廃炉技術開発コース

④ 放射性核種分析実習 前期/後期数日程度、医学部学生：工学部学生

目的：福井県原子力環境監視センター・医学部との協働による医療関係者の放射線教育

実施内容

- ・ 福井県原子力環境監視センター（6日）、座学、試料調整、放射線測定、核種分析測定、敦賀市周辺の放射線測定
- ・ 国際原子力工学研究所（1日）放射線影響の座学、
- ・ 福島でのグループワーク

福島への貢献：廃炉作業中の事故を想定した医療従事者の放射線教育

★正規カリキュラムでの継続

★サーベイメータのデジタル化等新しいシステムの導入

実習日程、実習場所およびカリキュラム

（毎週各金曜日）

月/日	午 前 (9:00～12:00)	午 後 (13:00～16:00)
5/10 敦賀	9:30開始（～11:30） 担当：田賀所長、中條研究員 ・ 原子力行政の概要 ・ 環境放射線モニタリングの概要	13:00二州健康福祉センター集合 担当：辻研究員、村上主事、北野主事 ・ 施設見学（二州健康福祉センター、観測局、敦賀防災センター）
5/24 敦賀	担当：辻研究員、北野主事 ・ 環境放射線テレメータシステムの概要 ・ テレメータシステム操作実習	担当：松井研究員、中條研究員、北野主事 施設見学 ふくいスマートデコミッション技術実証拠点
5/31 敦賀	担当：島田主任研究員 ・ 福島第一原発事故の影響 ・ 原子力防災対策および緊急時モニタリングの概要 担当：四方主事 ・ モニタリング情報共有システム（ラミセス）の概要	担当：中條研究員、四方主事、北野主事 ・ 走行サーベイ測定実習 ・ ラミセスを用いた確認実習 ・ 可搬型モニタリングポスト測定実習 ※ 2チームに分かれて交互に実施
6/7 福井	担当：玉柿主任研究員 ・ 放射線・放射能概論 ・ 天然放射能概論、特に Rn 系核種	担当：加藤主事 ・ ガンマ線核種分析実習① ダストの採取、魚の前処理および測定
6/14 福井	担当：神戸研究員 ・ 積算線量測定実習① TLD測定の概要、測定の準備 ・ スترونチウム測定の概要	担当：松井研究員 ・ プルトニウム測定の概要 担当：村上主事 ・ サーベイメータ測定実習 遮蔽効果、距離減衰の測定、汚染検査
6/21 敦賀	9:00～16:30：中條研究員、村上主事、北野主事 ・ 施設見学（原子力機構ふげん、原子力機構もんじゅ） 午前：原子力機構ふげん（9:30～11:30）、午後：原子力機構もんじゅ（13:30～15:30）	
6/28 福井	担当：神戸研究員 ・ 積算線量測定実習② TLD測定、評価	担当：加藤主事 ・ ガンマ線核種分析実習② 測定結果の解析 担当：村田所長、中條研究員 ・ 研修のまとめ



平成31年度 人材育成事業の年度全体概要

項目 \ 日程	4～6月	7～9月	10～12月	1～3月
(1) 廃止措置技術コース ② 廃止措置セミナー(1F炉、楢葉) ③ 廃止措置技術実習(楢葉)	楢葉 20名×4泊5日	敦賀廃止措置セミナー 9/10(月)	R2年2/17(月)～21(金) 1F炉見学・廃止措置セミナー 廃止措置技術実習	
④ 廃止措置国際セミナー(韓国)		韓国 20名 8/12(月)～14(水)		NDEC-5 富岡 R2年3/19(木)
⑤ 廃止措置工学学生サミット(富岡)				
(2) 燃料デブリ分析コース ② 模擬燃料演習(福井大、九大) ③ 燃料デブリ実習(JAEA大洗) ④ 臨界管理・未臨界度測定実習(京大炉)	福井 5名 大洗 3名	8/29(木)～30(金) 8/19(月)～21(水)		R2年3/2(月)～3/6(金)
(3) 廃炉技術開発コース ② 非破壊検査実習(福井大文京) ③ 放射線管理・線量計測実習(福井工大) ④ 放射性核種分析実習		福井 4名 敦賀・福井(8名)、福島 10名	熊取 8名×4泊5日 R2年2/29日(土) R2年1/14(火)、1/28(火)	
		前期数回	後期数回	



(2) 燃料デブリ分析コース① デブリ物性・分析研究 その後

デブリ物性・分析グループ(福井大、阪大、九大)

これまでの研究で、燃料デブリがどのような物で、その物性がどのようなものかが評価できた。(純粋な物質の物性)

- 実際の燃料デブリは未知な混合物であり、生成条件により、燃料デブリの組成・構造は変化する。
- 炉内の場所のどのような割合の混合物か？

⇒CLADS主体で、参加機関を追加し「燃料デブリ研究における事故進展解析と核燃料の専門家連携について」会合

・事故進展挙動解析からの燃料デブリ合成条件⇔それを模擬する模擬燃料デブリ合成と物性評価

熔融固化体の空隙率と物性の相関(福井大学、JAEA)

- X線CT画像取りこまず(解像度が不足、...数十 μm)
- 破壊は仮定(結晶粒内で破損？粒界で破損？)

⇒SPring-8を用いた模擬デブリの破壊試験による変形・破壊挙動解析手法の確立(JAEA所内公募・1F推進費)

- SPring-8での応力下でのX線CT(μm の解像度)

人材育成事業の継続

■ 継続するセミナー(○:本年度も実施(予定)、×:コロナの影響により中止)

(1) 廃止措置技術コース

② 廃止措置技術セミナー(福井大)...新規国際原子人材育成イ事業:○

⑤ 廃止措置工学学生サミット...CLADS支援の下、NDECとして:○

(2) 燃料デブリ分析コース

② 模擬燃料演習(福井大、阪大、九大)...J-Actinet実習として:×

③ 燃料デブリ実習(JAEA)...所内教育でのカリキュラム・テキストの利用

④ 臨界管理実習(京大、阪大)...カリキュラム化を検討

(3) 廃炉技術開発コース

② 非破壊検査実習(福井大)...JNEN実習:×

③ 放射線管理・計測実習(福井工大)...正規カリキュラムにて継続:×

新規国際原子人材育成イ事業:×

④ 放射性核種分析実習(福井大)...正規カリキュラムにて継続:×