

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

(受託者) 国立大学法人福井大学

(研究代表者) 附属国際原子力工学研究所 安濃田良成

(再委託先) 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開発センター、日本原子力研究開発機構

(研究期間) 平成 27 年度～31 年度

1. 研究開発の背景とねらい

福井大学では、福島第一原子力発電所（以下、1F）事故の直後から、1F事故に係わる課題の解決無くしては、福井を始めとする我が国の原子力発電所の将来は無いという全学的な強い決意のもと、福井大学の強み・特色である原子力関連機関や国内外の大学と連携するとともに、平成 26 年度時点で国内の大学では唯一の体系化された廃止措置工学の授業を実施するなど、原子力防災や原子力施設の廃止措置に関する基盤研究と人材育成を重点的に推進してきた。また平成 26 年度の「西日本における 1F 廃止措置に係わる基盤研究・人材育成の拠点形成（FS）」事業において、JAEA、NDF、IRID、東京電力など多数の関係者から研究・人材ニーズを聴取すると共に、事業参加大学の学生を募り、1F 廃炉現場見学とセミナーを試行し、学生の 1F への関心と社会貢献意識が高いことを改めて確認した。また、福井大学とドレスデン工科大学との共催による日独シンポジウム「原子力施設廃止措置のための技術と教育」を実施するなど、積極的に国際協力を推進してきた。

平成 27 年度に正式に採択された本事業では、福井大学におけるこれまでの廃止措置教育研究の実績と FS 事業の成果を踏まえ、西日本の 6 大学・2 機関（それぞれ複数の部門）が連携し、1F 廃止措置現場のニーズを踏まえた「廃止措置技術」、「燃料デブリ分析」及び「廃炉技術開発」の 3 つの分野で基盤研究を実施するとともに、それらをベースとした 3 コースの人材育成カリキュラムを構築し、1F 廃止措置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することを目標とする。

2. これまでの研究成果

(1) 廃止措置技術に係わる研究と人材育成

廃止措置技術研究では、デブリ取出し作業シナリオを WBS（ワーク・ブレイクダウン・ストラクチャー）として構築し、冠水工法や完全空中工法の特徴を考慮した上で、想定した放射線源および線量率に基づき、放射線リスクを評価した（図 1）これらにより、冠水工法では格納容器補修作業のために完全空中工法より放射線リスクが高くなることなどが明らかになった。

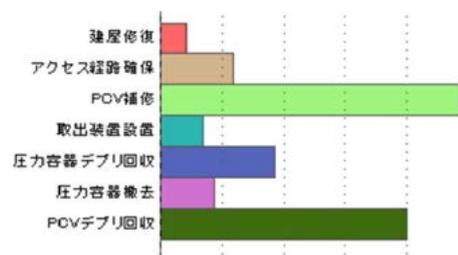


図 1 放射線リスクの計算例

平成 28 年度の廃止措置技術セミナーは、平成 29 年 2 月に檜葉町「展望の宿 天神」他で、全国の大学生・大学院生、20 数名を対象として開催した。廃止措置に関する講義を行うとともに、1F 廃炉現場や JAEA 檜葉遠隔技術開発センターを視察した。続いて、JAEA 檜葉遠隔操作技術開発センターにて、廃炉技術実習を行った。原子炉内の除染に必要なマニピュレータの動作の生成の原理に続いて、最適化の必要性を説明し、最短軌道計画プログラムを使った軌道の生成と CG 表示を通じた確認を行った。さらに、ロボット操作実習では若狭湾エネルギー研究センターが開

発したロボットレーザー除染機（試作機）について、動作原理などを講義形式で紹介した後、実機を用いた操作実習を行った。本年度も平成 30 年 2 月に開催する予定である。

本年度の国際セミナーは、JAEA 廃炉国際共同研究センター（CLADS）との共同開催で、「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）」として、平成 29 年 9 月 5 日に富岡町文化交流センター「学びの森」、6 日に榎葉町「展望の宿 天神」において、廃止措置研究の促進と若手研究員の育成に焦点を置いて開催した。日本人学生 15 名、外国人研修生 7 名他が参加したが、日本人学生にあらかじめ 4 つのグループに分けてそれぞれのテーマで課題を与え、その回答について JAEA の若手研究者及び外国人留学生・研修生と議論し、最後に英語で日本人学生が発表を行い、外国人等と議論した。（図 2）



図 2 日本人学生の発表風景

平成 28 年度の学生サミットは、平成 29 年 3 月に東京工業大学にて、廃止措置基盤研究・人材育成事業の採択 7 機関合同で、「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス」（NDEC）を行った。口頭発表学生が 34 名、ポスター発表学生が 34 名、聴講学生が 11 名、教官等学校関係者が 34 名、文科省等から 25 名、産業会から 70 名が参加して開催された。本プロジェクトからは、九大から 1 名、阪大から 3 名、福井大から 2 名の学生が参加し、核種分析に関するセッションで阪大生が優秀発表賞、原子炉の廃止措置に関する研究で福井大生が優秀発表賞、燃料デブリ処理、放射性廃棄物処分に関するポスター発表で、阪大生が優秀ポスター賞をそれぞれ受賞した。本年度は東京大学が幹事校となり、平成 30 年 3 月 19 日に富岡町の「学びの森」で開催する予定である。

（2）燃料デブリ分析に係わる研究と人材育成

デブリ物性・分析研究では、大阪大学にて Zr-UO₂系及び(Fe-Cr-Ni)-B₄C の熱力学平衡計算を実施し、生成しうる相を予想し、酸素を固溶したジルコニウムやクロムホウ化物の合成と物性評価を行った。また、コアコンクリート反応によって生じる可能性がある化合物 ZrSiO₄について、計画を前倒して物性評価を行った。クロムボライドや ZrSiO₄のビッカース硬度は 15 から 17GPa 程度と硬い物質であることが明らかとなった（図 3）。

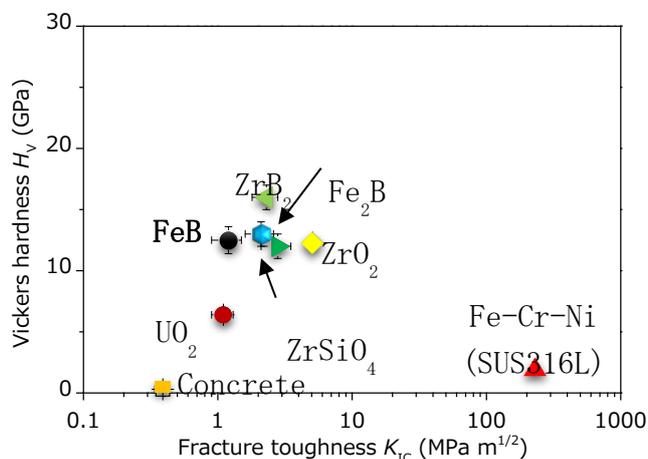


図 3 ホウ化物および ZrSiO₄ の硬度

福井大学と JAEA が共同で、UO₂と B₂O₃を（モル比 3.44:1）1800℃で熔融・固化して、密度 97～75 の%の空隙率の異なる 4 種類の試料を作成し、その密度を X 線 CT 撮像でも評価するとともに、静的圧縮試験等を行い、空隙率と機械的強度との相関を見出した。また、空隙率の異なる 8 種類の有限要素モデルを作成し、空隙を含む UO₂試験片の圧縮シミュレーションを実施した。

また、福井大学では、セシウム・ヨウ素など揮発性核分裂生成物（FP）を残したままの模擬燃料を作製し、その FP 放出および溶出試験を実施した。その結果、Sr が速やかに溶出することな

などを明らかにした。

九州大学では、デブリの融点測定のために、加熱用レーザーとしてロングパルスレーザーを導入、黒色 ZrO_2 (模擬 UO_2) に対して、積分球を使った放射率測定を可能にし、近赤外分光器を用いた方法も見通しを得た。一方、二体ポテンシャル関数を用いた分子動力学法 (MD 法) により、融点評価法として 2 相共存法、表面融解法、Isolated boundary condition 法を比較し、 UO_2 の融点が 200K 程度の間で一致することを明らかにした。

本年度の燃料デブリ実習は、平成 29 年 8 月 21～23 日に福井大学生 5 名が参加し、JAEA 大洗研究開発センターにて、ホットラボにおける照射済燃料の取扱い方法や燃料集合体試験施設の見学、さらに X 線 CT 装置の操作方法及び画像解析技術を習得させた。

平成 29 年 8 月 28 日～30 日には、福井大学にて福井大学他 5 名の学生を集めて模擬燃料演習を行った。まず、計算化学による物性評価について講義した後、分子動力学計算を用いて NaCl の融点評価などの実習を行った。さらに溶融・固化による方法で模擬燃料を作成し、その X 線回折および SEM/EDXA 分析を行った。

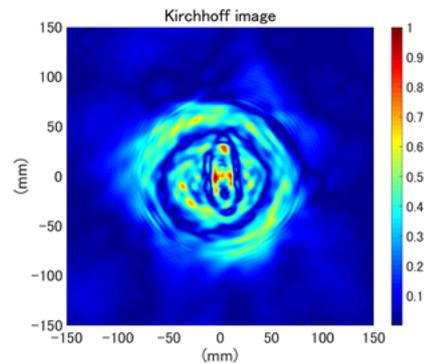
平成 28 年度の臨界管理・未臨界面度測定実習は、平成 29 年 2 月に、全国から参加した 8 名の大学生を対象に、京都大学原子炉実験所にて、未臨界面度評価シミュレーションコードを用いた未臨界面の炉物理に関する演習、及び京都大学臨界実験装置 KUCA において天然ウランを用いた未臨界面系を構築し、中性子とガンマ線の計測を行った。本年度も平成 30 年 3 月に開催する予定である。

(3) 廃炉技術に係わる研究と人材育成

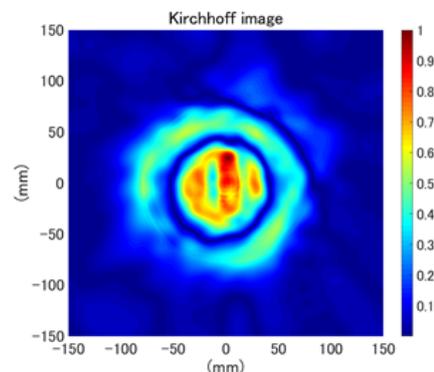
廃炉技術開発研究では、福井大学にて kHz オーダーの超音波を使用した探傷手法によりコンクリート構造の内欠陥を可視化するため、コンクリート内を超音波が伝搬する際に生じる波の減衰や散乱ノイズの影響を欠陥からの散乱波と区別する線形化逆散乱解析を行い、従来手法である開口合成法と比較して極めて形状再構成能の高い画像化に成功し、その成果は平成 27 年度土木学会全国大会 (2016 年 9 月於仙台市) にて優秀講演者賞を受賞した。さらに、欠陥形状の抽出に特化したオリジナル寄生フィルタをウェーブレット解析に付加することにより、コンクリート内の矩形欠陥及び D13 鉄筋の剥離状態について良好な画像再構成化に成功している。(図 4)

また、原子炉解体ロボット技術探査として、ロボット部品の必要要件をまとめ、1 F 燃料デブリ取出しに係る作業環境情報の収集を行なうとともに、高放射線環境で動作させるためのロボット部品の必要要件について調査した。この研究は、大学院工学研究科のカリキュラムで通年 4 単位のプロジェクト型学習 (PBL) として実施している。

さらに、マニピュレータの手先軌道計画として、より



既存離散マザーウェーブレット



寄生的離散ウェーブレット

図 4 逆散乱解析の欠陥再構成結果の比較

効率の良い平面の除染動作を計画できる最短軌道プログラムを作成し、また軌道計画を行う対象も、実際の除染ロボットに搭載されている安川電機 MOTOMAN-SIA20 とし、そのリンクの長さや各関節の可動範囲などの運動学パラメータを動作計画の条件として利用出来るようにした。

福井工業大学では、s-band 大気圧マイクロ波放電装置を使用し、アルゴンプラズマ中で海藻灰からヨウ素を抽出する手法を開発した。さらに、土壌を模擬したヨウ化セシウムからセシウムの分離捕集を試み、アルゴンプラズマ反応管中の各元素の蛍光 X 線分析測定を行い、その挙動を明らかにした。本研究で開発したヨウ素、セシウムの捕集技術は、I R I D シンポジウム 2016 (2016 年 8 月東京大学)、第 59 回放射線化学討論会 (2016 年 9 月、量子科学技術研究所高崎研) 及び日本原子力学会 2016 秋の大会 (2016 年 9 月久留米) において報告し、高い評価を受けた。

若狭湾エネルギー研究開発センターでは、ロボットの操作のために必須である CCD や CMOS 等の Si 半導体系画像素子の 1 Gy~10k Gy レベルにおける耐放射線性を評価するため、断続的にしか積算線量を測ることができないガラス線量計や、GM 管などの電離放射線検出器および積算電流として検出可能な電離箱などの検出器を相補的に利用して、耐放射線性に劣る Si 系素子と高い耐放射線性が謳われる SiC 系素子の積算線量域での耐放射線性評価を行うための準備作業を行った。また、高線量作業環境におけるロボットの滞在時間を短縮するため、より簡便な運転操作を目指してロボットのアーム制御プログラムの改良も行った。さらに、JAEA 檜葉遠隔技術開発センターの VR (仮想現実) 技術を利用して、事前に設定した作業環境線量率分布とロボット動作データからロボットの積算被曝線量評価が可能であることを確認した。

本年度の放射線管理実習は、平成 29 年 11 月 13、14 日に福井工業大学にて、福井工大と福井大の学生合計 20 名を対象に、放射性核種の分離や放出する放射線の種類に応じた放射化学的手法等、廃止措置に必要な化学・放射化学に関する実習及び講義を行った。続いて 15 日には、福井大学にて、各種非破壊検査手法の原理や特徴の講義と実際の疲労き裂が導入された鋼疲労試験片を用いた超音波探傷試験等を行う非破壊検査実習を行った。

また、本年度の放射線核種分析実習は、平成 29 年 5 月 19 日~6 月 30 日の週 1 日 (合計 7 日) の日程で福井大の医学部看護学科学生 5 名と工学研究科の学生 3 名 (合計 8 名) を対象に実施した。福井県原子力環境監視センターでの研修の一部に、被ばく影響に関する座学と検出器の特性の違い (比較測定) を理解するための実習を組み込んだ。

3. 今後の展開

(1) 廃止措置技術に係わる研究と人材育成

燃料デブリ取出しに向けた総合的なシナリオ評価研究を行うとともにこれまでのアンケート結果を踏まえてより効果の高いセミナーを実施する。

(2) 燃料デブリ分析に係わる研究と人材育成

より複雑な模擬デブリの合成と物性測定を行うとともに、これまでのセミナー実績を踏まえてより効果の高いセミナーを実施する。

(3) 廃炉技術に係わる研究と人材育成

より完成度の高い非破壊検査、除染ロボット、Cs, ヨウ素回収技術の開発を行うとともに、より多くの非原子力学生からの廃炉人材育成を行う。