

廃炉に関する基盤研究を通じた創造的人材育成プログラム

—高専間ネットワークを活用した福島からの学際的チャレンジ—

(受託者)独立行政法人 国立高等専門学校機構 福島工業高等専門学校

(研究代表者)青柳克弘 化学・バイオ工学科

(再委託先)学校法人五島育英会 東京都市大学、国立大学法人 東京大学、
公立大学法人首都大学東京 東京都立産業技術高等専門学校、
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、株式会社タンガロイ

(研究期間)平成27年度～31年度

1. 背景とねらい(基盤研究と教育のプログラム)

福島第一原子力発電所の廃止措置は、今後40年以上の長期にわたるとされ、完遂には、原子力関係に加え、建設・環境工学、社会科学などの多分野の連携が必要で、これらの広範な領域の人材育成が長期にわたり必要となる。

福島高専は、廃止措置事業などに関する「研究開発を通じた人材育成」について、全国の高専間のネットワーク、また大学、研究機関、地元企業などからの支援と協力を頂ける関係を構築してきたが、これは学生の意欲、地域的要請(例えば、イノベーションコースト構想)等に応える基盤となっている。

この基盤を活用して本プログラムを進める。実施体制(図1)は、「研究開発」、「教育プログラム」、「JAEA 施設などの利用」の3本柱からなる。

本プログラムは、「研究開発を通じた人材育成」であるが、これに向けた導入として、海外サマースクール、廃炉創造ロボコンなどを進めている。



図1 廃止措置・人材育成のプログラムの3本柱

2. H28年度の成果(「研究開発を通じた人材育成」及び「教育プログラム」)

2.1 研究開発を通じた人材育成

6項目の課題を設定：(i)炉内遠隔操作機器開発、(ii)性状分析用遠隔操作機器の開発、(iii)廃棄物処分研究、(iv)性状分析及び遠隔操作法基盤技術開発、(v)炉内生成物推定、(vi)作業リスクの評価
これらの成果の幾つかについて概要を紹介する(関連が強い(ii)及び(iv)、(iii)及び(v)はまとめて示す)。

(i)炉内遠隔操作機器開発

デブリの切削法、小型の放射線計測器開発、それらを用いたサンプリング機器の概念検討などを内容とする課題である(システムインテグレーションまでを範囲)。

・レーザービームによるサンプリング法(長岡高専)

レーザー機器の適用法やサンプリング機器の開発を進めている。短パルス化(ピコ秒)が、水中加工性や熱衝撃破砕などで有効なことを示した(図2)。

・電気絶縁材料用放電加工法(産技高専)

デブリを想定して ZrO_2 等の絶縁材料も加工できる放電

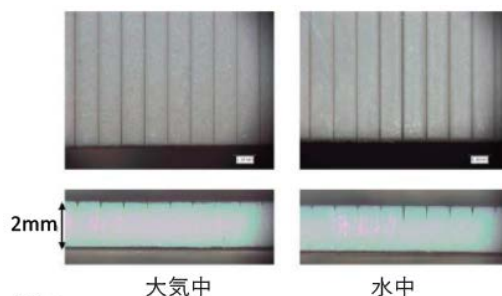


図2 水中加工の改善(ピコ秒パルスレーザー)短パルス化による水中での加工能力改善などを示した。

加工法と小型の機器を開発中。加工の効率/信頼性向上のため、加工中のその場観察を実現し、電流波形制御条件等の最適化を進めている(図3)。

- ・機械的な切削と材料強度特性の関係(茨城高専, 都城高専, タングロイなど)

工具(刃)の材質、形状の最適化、さらに機器の小型化などを進めている。切削挙動モデルの妥当性評価などのため、デブリ等の高硬度材切削では硬さと靱性が制御因子であることを確認(図4)。

- ・高線量場用の小型の放射線計測機器の開発(東京都市大)

小型 CdTe 素子を開発し、機器の耐放射線性評価などを進めている。さらに、高線量率時に生じるチャージアップによる分解能低下の対策としてリフレッシュ法(高圧の一時 OFF による)を見出した(図5)。

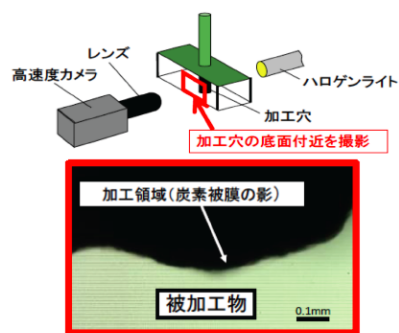


図3 絶縁材の放電加工条件最適化(その場観察)
加工電流波形と加工状態を比べ電流波形制御を最適化

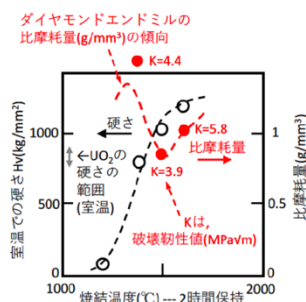


図4 刃とZrO₂の損耗比は硬さ/靱性に依存
硬さが減少しても靱性が高いと工具(刃)の磨耗が増加した

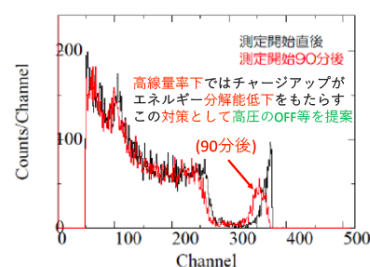


図5 高線量率下での分解能低下への対策
高線量下で生じるチャージアップの影響低減法を見出す

(ii) 性状分析用遠隔操作機器の開発及び(iv) 性状分析及び遠隔操作法基盤技術開発

微小/微量試料のホット分析方法、ホット用材料試験法、これらの効率的な実施などに必要になる、遠隔操作機器の開発を進めている。項目(i)などへの応用も視野に入れている。

これらのうちホットセル用の遠隔操作機器については、特に、耐放射線性の確保が重要と考えられ(原子力機構のメンバーの指摘)、受動素子のみによるアナログ式の静電容量型の距離計(図6(a))の開発を進めている。また、質量分析手法の改良、バーチャルリアリティ手法の適用検討なども含む活動である。

- ・微小試験片による強度評価法開発(茨城高専, 都城高専, 原子力機構など)

ホットラボ用の微小試験片材料試験法によるデブリ、残存機器の強度等の評価法、さらに遠隔操作型試験機を検討を進めている。デブリなどの不均質性の高い試料に対する、ホットラボの解析能力を向上させると期待される「ナノ硬さ試験法」の導入実現に向けて試料作製法等を提案(図6(b))。さらに、開発中の微小衝撃曲げ試験機の能力強化の一環として、温度範囲を拡大する改良を進めている(図7)。

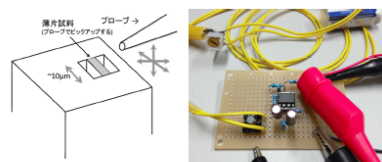


図6(a) ホット用距離計の開発(静電容量式)
受動素子のみによる耐放射線性アナログ式距離計
小型遠隔機器の「手」、「指」の操作性の改良など

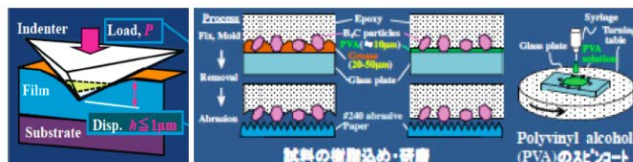


図6(b) ホットセル用ナノ硬さ試料の固定法改良
ナノ硬さ試験の導入による、ホット試験能力の向上を目指す

(iii) 廃棄物の貯蔵/処分及び(v) 炉内生成物推定

熔融燃料とコンクリートの反応生成物推定、廃棄物の固化方法(セメント固化等)の検討(以上、項目(iii))、さらに加熱後の構造物の残存強度の推定法などを扱う(以上、項目(v))。

固化方法については、ゼオライト入りセメント固化体の強度や

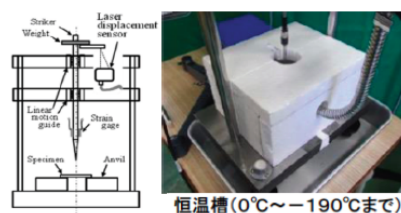


図7 微小曲げ試験機の試験温度を拡大
デブリ試料を想定した、20x1.5x1.5mmの微小な曲げ試験片の装置などを開発

イオンの拡散係数の評価などを、反応生成物については、熱力学計算コードなどの評価も進めている。

- ・ゼオライトの固化体(セメント)試作など

モデル材料としてのポルトランドセメントによる、ゼオライト入りセメント固化体を試作し、固化体の強度、分配係数などの測定を始め、さらに電気泳動法で拡散係数(塩化物)が低いことを示した(図8)

- ・物理/化学的性質及び強度の推定 I[コンクリート](八戸高専、木更津高専、都城高専、福島高専など)

コンクリートを溶融金属などで加熱し、反応生成物、割れやポア発生、強度低下と水中養生の効果などを評価している。加熱による割れ検出の検討(図9)、加熱材中のポア、割れ発生の評価と、加熱後強度の関係評価などを実施した。

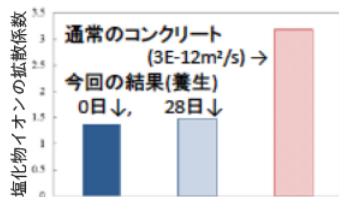


図8 試作セメント固化体中の拡散モデル固化セメントの提案、強度評価、分配比の検討等の一環として実施



図9 コンクリートへの鉄注入熱影響による強度特性変化の評価

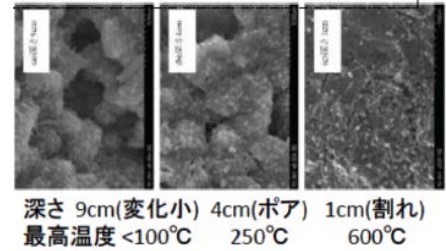


図10 加熱で生じたポアや割れ強度特性変化の解析も(テルミット法で加熱)

- ・物理/化学的性質及び強度推定 II[炉内機器等](八戸高専、原子力機構、福島高専他)

作業工程での残存機器への荷重の適当な範囲の推定(強度の限界等)、事故時の熱履歴の推定に向けた実験的な検討である。格納容器鋼への熱履歴による強度変化については、冷却速度が速い場合を除き、破壊靱性低下は限られること(図11(a))、また炉内機器材料(316 鋼など)については、照射+事故時加熱により形成される特徴的な微細組織から、事故時の最高温度などが推定可能なことを指摘した(図11(b))。

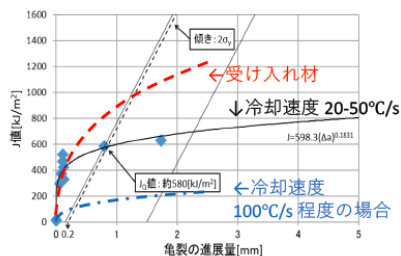


図11(a) 熱履歴後のPCV相当鋼の破壊靱性値冷却速度が10-20°C/sの場合 $J_Q \sim 600 \text{ kJ/m}^2$ に留まる

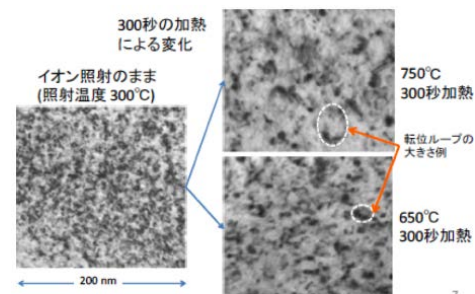


図11(b) 照射+加熱で形成された微細組織微細組織からの最高温度の推定可能性を示した

- (vi) リスク評価[社会科学的アプローチ](奈良高専、都城高専、福島高専など)

生活環境を含む、作業者の様々な環境条件が作業者の士気などを通して、作業安全性に影響を与える可能性がある。

このような視点から作業環境と作業安全性の関係について評価する活動である。

廃止措置作業の従事者への適用に先立ち、調査手法の最適化の一環として、高専学生1,240名とフランス技術短大生108名に対して原発の必要性、安全性などのアンケートを実施し、結果を解析し、調査法詳細の検討を進めている(図12 → アンケート結果の一例)。

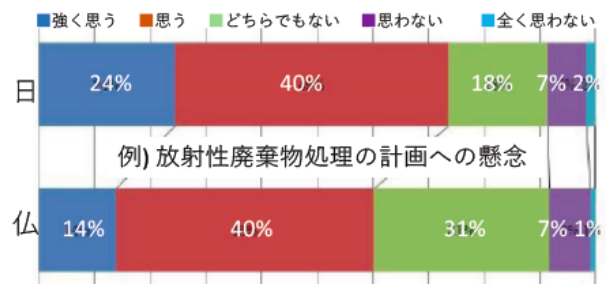


図12 日仏の高専生などへのアンケート調査調査手法としてビッグデータ解析なども比較を実施。評価結果の質の点から、対象を絞ったアンケート法を採用

2. 2 教育プログラム

(i) 廃炉創造学修プログラム

学生に廃止措置分野への興味を持たせることを目的とし、全学科全学生を対象に、講義、インターンシップなどを行う教育プログラムを整備する。講義はそれぞれ1単位の選択科目とし「原子力発電基礎(1年生)」、「放射線基礎(2年生)」、「廃炉ロボット概論(3年生)」、「廃炉と社会(3年生)」、「廃炉工学(4年生)」、「原子力事故総論(5年生)」を開講した。本年度は合計で390名の学生が受講している。

(ii) インターンシップ

福島第一原子力発電所の廃止措置現場の業務を経験してもらうために、5日間の日程で福島第一原子力発電所でのインターンシップを実施し、福島高専から4名、茨城高専から2名の学生が参加した。参加した学生からは「敷地内の全域で厳重な装備が必要な危険な場所と思っていましたが、現在は敷地のほとんどが一般の作業服で作業ができることや、作業時の安全性の確保がしっかりと考えられている労働環境となっていることを知りました。様々な機械が稼働している発電所で安全に機械を操作することに関しては、自分の学んでいることが活かせるのではないかと思います。」と言った感想が聞かれた。

また、原子力機構の夏季休暇実習生として6名が研修に参加し、福島第一廃止措置関連の研究・技術開発について学んできた。

(iii) 高専海外サマースクール

海外での廃止措置、環境回復などの技術を理解するため全国の高専から6名を選抜し、9月に5日間、米国で実施した。今回はカリフォルニア大学バークレー校とハンフォードを訪問した。カリフォルニア大学バークレー校ではProf. Kai Vetterとの研究討論、ローレンス・バークレー国立研究所の概要説明、放射線計測に関する研究室見学などを行ってきた。ハンフォードではThe REACH museumで地域の歴史を、Bリアクター見学で核開発の歴史を学習し、さらにkurion社でガラス固化、トリウム除去技術に関して学習すると共に技術者との交流を行った。

(iv) 廃炉創造ロボコン

ロボット製作を通じて高専生に廃炉に関する興味を持たせ、併せて課題発見力・課題解決力を養うと同時に画期的なアイデア発掘のために廃炉創造ロボコンを実施した。平成29年12月15日、16日に原子力機構櫛葉遠隔技術開発センターにおいて、モックアップ階段と標準ステップフィールドを使ったコンテストを実施した。国公立高専15校から16チームが参加した。課題は福島第一原子力発電所内を想定し、暗闇で放射線量が高くロボットを直視して操作することができないなどの環境とした。課題は昨年度と同じとし失敗から一つでも多くのことを学ばせるようにした。従来のロボットコンテストは異なり、参加者を対象として9月に櫛葉サマースクールを開催し、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所の視察を行い、原子力発電所の構造や福島第一原子力発電所の現状について理解を深めた。また、原子力機構櫛葉遠隔技術開発センターでは福島第一原子力発電所で使用されたロボットに関する講義を受けた。昨年は課題をクリアしたチームはゼロであったが、今回はモックアップ階段で3チーム、標準ステップフィールドで1チームの合計4チームが課題をクリアした。

3. 今後の展望

溶融燃料との反応、加熱などによる材料の状態変化、デブリ加工法、分析法などの基盤研究を展開している。今後は、これらの成果を基に、課題によっては機器の試作(モックアップ)などに進む。教育プログラムでは、海外サマースクールや福島第一原子力発電所インターンシップ、廃炉創造ロボコンを継続して実施し廃止措置分野へ進学、就職する学生を継続して輩出する。また、講義のe-learning化を検討し、全国の高専生が聴講できるような環境整備を進めて行きたい。

4. 参考文献

[1]S.Nakamura, T.Miura and M.Tsuta, “Straight Through Hole Drilling in Machinable Ceramics” , J. of Laser/MicroNanoengineering, 8(2015)101