

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 物質工学科

(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事業は、今後40年以上の長期にわたるとされる。事業の完遂には、炉安全などの原子力関係の各分野に加えて、建設・環境工学、材料工学、電気・電子・情報工学、機械工学、社会科学などの様々な分野の連携が重要である。従って、これらの広範な領域にかかる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による(26校の国立高専などが参加)、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いる。これは地元である福島の復興への学生の指向、地域の要請(例えば、イノベーションコースト構想)などに応える基盤を形成する(文科省の「原子力に依存しないエネルギーと安全・安心な社会を目指す地域復興人材育成事業」、「廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム」のフィージビリティスタディー事業などを受託してきた)。

この基盤を用い、「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」を進める。実施体制は、図1のように「研究開発」、それを支える「教育プログラム」、実践的な教育研究の場としての「JAEA施設などの利用」の3本柱からなる。

過酷事故で損傷を受けた機器の廃止措置を行うには、(a) 損傷の状況を把握し、(b) 安全性を確保しつつ放射性物質及び放射性物質で汚染された機器の取りだしを含む建屋及び機器の解体を行い、(c) 生じた廃棄物を安定に処分/貯蔵する必要がある。本プログラムでは、廃止措置にかかわる「研究開発を通じた人材育成」を行うが、これら(a)-(c)に資する技術基盤の課題のうちから実現性なども考慮し、炉の損傷状態を探る化学的及び物理的プローブと高温熱影響、発熱性放射性廃棄物のより安全な貯蔵と処分などの研究から社会科学的手法までを含む6項目の課題を設定し、これらに関する「研究開発を通じた人材育成」を効果的に進めるために、廃炉創造学修プログラム、複合型インターンシップ、高専海外サマースクール及び廃炉創造ロボットコンテストを行っている。



図1 廃止措置・人材育成のプログラムの3本柱

2. これまでのプログラムの成果(「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

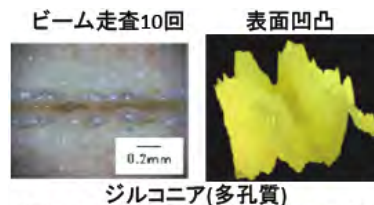
6項目の研究開発課題は、(i) 炉内遠隔操作機器開発(デブリサンプリングに向けた機器などを対象)、(ii) 性状分析用遠隔操作機器の開発(ホットラボでの微小サンプル解析機器などを対象)、(iii) 廃棄物処分研究(発熱性廃棄物のセメント固化などの条件を対象)、(iv) 性状分析及び遠隔操作法基盤技術開発(ホ

ットラボ用マンマシンインターフェイス、迅速核種分析法などを対象)、(v) 炉内生成物推定(溶融燃料-コンクリート反応、コンクリート及び鋼材への事故時の熱影響評価など)、(vi) リスク評価(作業安全性とモチベーションの関係など)である。これらの成果の幾つかについて概要を紹介する。

(i) 炉内遠隔操作機器開発

難切削材料(デブリなど)の切削法、小型の放射線計測機器の開発から、それらを用いたサンプリング機器の概念検討、モックアップ試作などまでを範囲とした課題である。

- ・レーザービーム法によるサンプリング法の検討(長岡高専)
モルタル、コンクリート、ジルコニア等へのレーザービーム照射部の評価を行い、溶融物の効果的な除去が加工の効率化に重要なこと、さらにビームパルスの違い(例えば、15ps で9W と100ns で29W を比較)と、溶融を伴う加工及び熱応力発生を伴う割れ発生の条件の関係を明らかにした(図2) [1]。



- ・電気絶縁材料用放電加工法(都立産技高専)
導電性皮膜の加工中の形成により、電気伝導度が低い材料を加工する方法を開発した[2]。加工条件の最適化に向けて石英ガラスを加工し、その際の放電状況の可視化を実現するシステムを構築した(図3)。これにより加工時の電圧、電流と放電及び加工の状態についての知見の蓄積が進んでいる。
- ・機械的な切削と材料強度特性の関係(八戸高専、茨城高専、タンガロイなど)

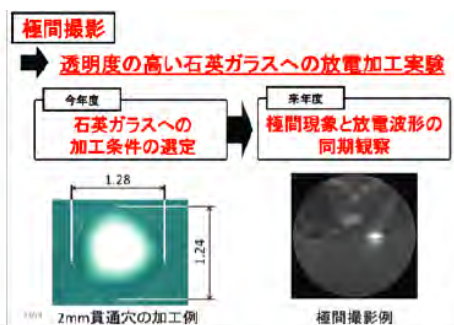


図3 放電画像と波形最適化(石英ガラス試料)

模擬デブリの例として、安定化ジルコニアの焼結条件を調整し、強度特性に違いを与えた試料について、硬さと靱性値を Palmqvist 法(Vickers 硬さ試験を用いる)などにより測定し(図4)、切削性との関係性を評価すると共に、他の加工法における靱性値の影響を含めて検討した。

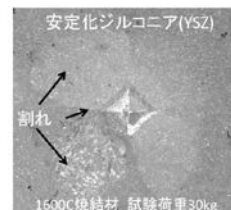


図4 模擬デブリの硬さ/靱性測定

- ・高線量場用の小型の放射線計測機器の開発(東京都市大、富山高専)

小型の CdTe 化合物半導体素子を用いた検出システムなどを開発し、例えば、ホールの易動度が低く、 $\mu\tau$ 積が小さいことなどに起因するエネルギー分解能の劣化への対策として、ホールの遅さに起因する波高のずれをデジタル波形処理により補正し、エネルギー分解能を向上させるなどを進めた(図5) [3]。

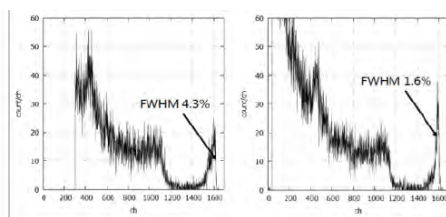


図4 補正後スペクトル(右)とアナログ機器での結果

(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

主に、微小な試験片、微量な試料などを対象にした、ホット施設での分析、試験の方法、遠隔操作機器の原型開発、遠隔操作の基盤技術などの開発に関する課題である。

- ・MALDI-TOF-MS による放射性ストロンチウムの迅速分析(茨城高専)

難分析核種である ^{90}Sr の迅速な分析方法として、ジリコピン酸をマトリクス分子に用いた MALDI-TOF-MS による分析方法の開発を進めている。このうちジリコピン酸と各種イオンとの結合条件を NMR にて評価し、Ca イオンとの相互作用を検出すると共に、他のイオンについても検討を進めた(図6)。

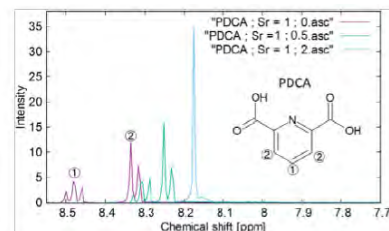


図6 Srの相互作用によるピーク位置の変化

- ・微小な試験片による強度評価法(長野高専、都城高専、原子力機構など)

ホットラボなどで用いる微小試験片材料試験法について、溶融/凝固した燃料、残存機器などへの適用を考慮し、試験方法、遠隔操作型の試験機器の検討を行っている[4]。微小試験片衝撃試験法、引張試験法などの実験的な評価を実施すると共に、ホットラボの状況評価、さらに微小試験片技術自体の特徴評価も実施した(図7)。

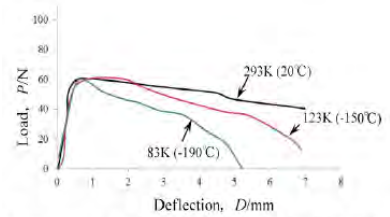


図7 微小試験片の衝撃荷重-変位曲線

- (iii) 廃棄物処分研究及び(v) 炉内生成物推定

溶融燃料とコンクリートの反応生成物の推定、この化学形を考慮した廃棄物の固化方法の検討(セメント固化の場合など)、さらに加熱後の構造物の残存強度の推定方法などを課題とする。



図8 加熱で生じた試料中の割れ

- ・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)

様々な温度までの加熱を電気炉で、或は、溶融した鉄との接触にて行い、応力-歪み曲線の変化を評価した。500°C以上の加熱で強度は大幅に低下するが、最大強度を示す歪み量は増加した。また、生じた割れ形状の評価も行った(図8)。さらに、加熱後に水中での養生による強度回復も評価した(600°Cまでの加熱の場合、回復は比較的良好)(図9)[5]。

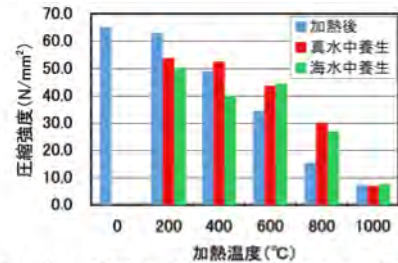


図9 水中養生による加熱後強度の回復

- ・物理/化学的性質及び強度の推定 II[炉内機器](八戸高専、長野高専、都城高専、原子力機構、福島高専など)

格納容器鋼などに熱履歴を与え、強度、微細組織の変化などを測定し、将来行われるサンプルからの熱履歴推定や機器の残存強度推定の可能性を評価している(図10)[6]。格納容器材料は、冷却速度が速い場合を除けば破壊靱性の



図10 格納容器鋼(類似材)熱処理

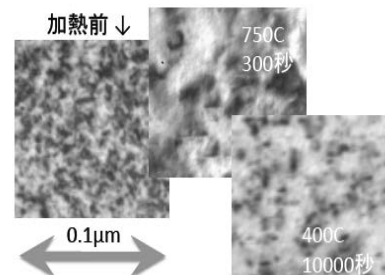


図11 加熱による微細組織変化(316鋼照射材)

低下は少なく、炉内機器材料(例 316 鋼)の照射後微細組織については、温度-保持時間への依存性の定量化を進めた(図11)。

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

アンケートなどによる評価手法の検討として、廃止措置作業への従事者への適用に先立ち、全国の高専学生 1,240 名とフランス技術短大生 108 名に対して原子力発電所の必要性、安全性などへのアンケートを実施した。フランスの学生との意識の違いは見受けられなかった。(図11)。

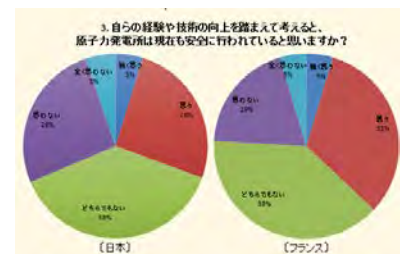


図12 原発の必要性などの日仏でのアンケート

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する。全学科を対象に、講義、インターンシップ・研修を行う。これまで「廃炉と社会(3年生)」、「廃炉工学(4年生)」、「放射線基礎(2年生)」、「廃炉ロボット概論(3年生)」を開講。後者2つは夏休みに実施し、各々の受講数は60及び100名。今後、「原子力発電基

礎(1年生)、「原子力事故総論(5年生)」を開講する。

(ii) 複合型インターンシップ

廃止措置の効率的な実施には、自治体や住民の関係は重要である。廃止措置に関わる企業、研究所、大学などでのインターンシップを行い、引き続き、いわき市、大熊町、双葉町、富岡町、楡葉町、福島県などの自治体で、各々5日間のインターンシップを行っている。企業などでは技術的な知見を、自治体では住民とのコミュニケーションなどを経験し、これらの重要性を理解し、スキルを身につける。今年度は、いわき市の原子力対策課及び福島第一原発で実施。



図13 Hanfordに関する研修

(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、全国高専から6名を選抜し、9月に23日間、米国ハンフォードで実施した。The REACH museumで地域の歴史を、Bリアクターなどで核開発の歴史を、さらにkurion社のガラス固化、トリチウム除去技術を対象に研修を行った。また、PNNLの研究開発について、加えてパブリックインボルブメントの講義を受けた。



図14 B reactorの見学

(iv) 廃炉創造ロボットコンテスト

ロボット製作を通じ、廃炉に関する興味を持たせ、併せて課題発見/解決を体験的に教育する。本年12月3日に原子力機構の楡葉遠隔技術開発センターにて、標準ステップフィールドなどを使ったコンテストを行う。国公立高専13校から15チームが参加予定で、9月には楡葉でサマースクールを行った(福島第一原発の見学、楡葉のセンターでの受講など)。

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。これらへの導入となる教育プログラムでは、廃炉ロボットコンテストを含む幅広い学年での学修課程を整備する。

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
- [2]D. Hanaoka, R. Ito and Y. Fukuzawa, “Electrical Discharge Mechanical Surface of the Insulating ZrO₂ Ceramics”, JAMDSM, JSME, 5(2011)372
- [3]K. Ishihara, K. Takagi, H. Minato, J. Kawarabayashi, H. Tomita, S. Maeda, T. Naka, K. Morishima, T. Nakano, M. Nakamura, T. Iguchi, ” Selective Fast Neutron Detection under Intense Gamma-ray Fields with Novel Nuclear Emulsion Technology”, Radiation Measurements, 55(2013)79
- [4]R. Arishima, T. Uchimura, T. Higashi, A. Takahashi, N. Yamamoto, T. Toyohiro, Y. Todata, ” Mechanical Properties of Pure Fe Fabricated by Severe Plastic Deformation”, 6th Int. Symp. On Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, (2011)175
- [5]林久資, 緑川猛彦: 高温加熱を受けたコンクリートの再養生による強度回復, 土木学会第71回年次学術講演会 V-369, pp. 737-738, 2016. 9
- [6]S. Jitsukawa, et al., ” Development of Models for Irradiation-induced Changes to Microstructure and Stress-Strain Relations of Austenitic Steels”, ASTM STP1547(2011)208