

廃止措置のための格納容器・建屋等信頼性維持と廃棄物処理・処分に 関する基盤研究および中核人材育成プログラム

(受託者) 国立大学法人 東北大学

(研究代表者) 原 信義 理事 (震災復興推進担当) / 大学院工学研究科教授兼任

(再委託先) 国立大学法人 福島大学、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

(研究期間) 平成26年度～30年度

1. 研究の背景とねらい

東北大学は東日本大震災からの復興・新生を先導することを歴史的使命であると考えており、平成25年に制定した全学ビジョン（里見ビジョン）の中でも「復興・新生の先導」を2大目標の一つとした^[1]。この目標を達成するための全学的取り組みの一つとして「福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置に向けた基礎・基盤研究と人材育成の推進」を位置付けている。

東北大学の伝統的な強みである材料分野のポテンシャルを活用すべく、工学系を中心としつつ広範な分野が連携した全学横断組織を形成し、さらに福島大学及び福島高専の専門家の協力を得て、基盤研究を推進し、また、その基盤研究プラットフォームの上に学生教育カリキュラムを構築して、長期にわたる安全な廃止措置をリードできる中核人材の育成を図っている。

2. これまでの研究成果

(1) 格納容器・建屋等の健全性・信頼性確保のための基礎・基盤研究

<研究項目：(1)-① 鋼構造物の防食と長期寿命予測技術>

実機格納容器用鋼材 SA738B に変性エポキシ樹脂を塗装し 1.1 MGy の γ 線を照射して、塗膜を劣化させた試験片を作製し飽和 NaCl 水溶液による腐食試験を行い、 γ 線を照射しても塗膜ふくれが顕著に増加することはないこと、1 M Na_2SO_4 水溶液中で γ 線照射材と非照射材の電極インピーダンスを計測し、 γ 線照射による電極インピーダンスの低下は計測されず、むしろ機械的に塗膜が剥離した部分が局部腐食的な侵食形態になる危険性を否定できないこと等の知見を得た。

冷却系配管の腐食寿命管理に資するため、流動下の腐食試験方法として回転円筒電極を用いた電気化学試験の妥当性を検討した。重量減量測定並びにターフェル外挿法により求めた腐食速度との比較を行い、分極抵抗測定によって求めた腐食速度の妥当性を実験で確認した上で（図1）、実機模擬水質中での流動下腐食速度評価技術を整備した。

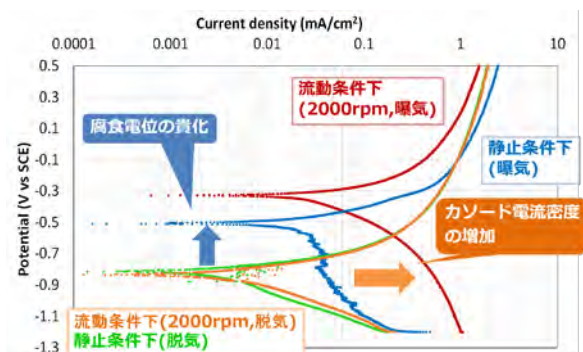


図1 回転円筒電極を用いた分極測定結果

<研究項目：(1)-② コンクリート構造物の長期性能評価技術>

建設時における構造物の特性把握のため、コンクリートの使用材料及び設計基準強度・かぶり厚さに関する調査、構造物に作用した外乱履歴として東日本大震災時に建屋に作用した高温履歴について調査を行うとともに、外乱が構造物に及ぼす影響の評価に関する基礎的検討として高温履歴を受けたセメント硬化体の諸物性の検討を行った。

最大 1500℃までセメント硬化体を加熱し、その相組成の変化を確認した（図 2）。これに加えて、加熱後のセメント硬化体を水あるいは塩水に浸漬させることで、セメント硬化体の相組成が変化することを明らかにした。他方で、セメント硬化体を加熱し、その後の吸水条件によってセメント硬化体の圧縮強度やビッカース硬度が異なる点についても明らかにし、これらの原因はセメント硬化体の相組成の変化やこれに起因して生じたセメント硬化体中のひび割れが主因である可能性が高いと考えられた。これらの物理的性質は使用したセメント種類や細骨材の有無により大きく異なることを明らかにした。

RC 造建屋構造部材である耐震壁について試験体の静的漸増载荷実験を行い、応答変形とひび割れなどの損傷状況、及び、耐力・変形性能・エネルギー吸収能力の関係を評価した。また、地震被災した RC 造建屋構造部材の性能低下に関して、予め異なるレベルの損傷（ひび割れなど）を発生させた試験体の静的漸増载荷実験を行い、損傷レベルと残存する耐震性能の関係を評価した。

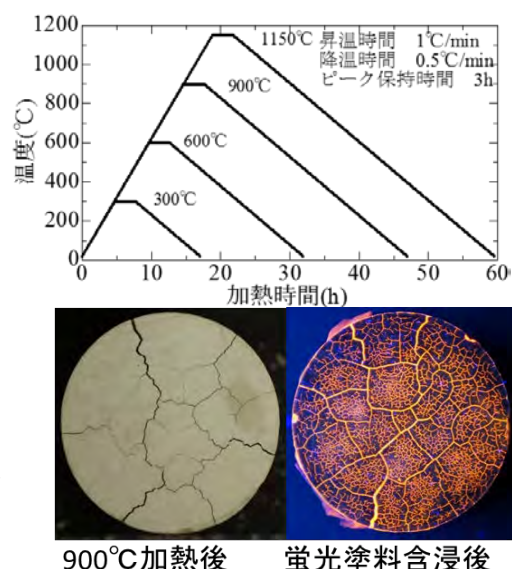


図 2 高温履歴のセメントペーストへの影響確認

<研究項目：(1)-③ 遠隔操作に対応可能な非破壊検査技術>

ECT 上置リモートフィールドプローブによる減肉・亀裂の検出を試み、プローブパラメータ、試験周波数を調整することにより、広域評価、裏面評価が可能であることを示した。また、超音波試験法の一つである EMAT を配管減肉モニタリングに適用するために、電磁超音波送信機構について検討を行うとともに、評価信頼性パラメータの検討を行った。さらに、実験と数値解析の結果を比較し、被検体底面の性状によるスペクトルの変化を数値解析により再現した。

テラヘルツレーザー光源を用いたイメージング技術でコンクリート埋設金属構造物の損傷及び腐食程度を非破壊でイメージングできる可能性があることがわかった。

<研究項目：(1)-④ 遠隔操作に対応可能な構造物補修技術>

コールドスプレー法による炭素鋼上への軟鋼粒子成膜ならびに SUS304 基材上への SUS304 粒子成膜に成功した。また、基材への低温プラズマ処理により、自然酸化皮膜が除去でき、成膜性（緻密性、成膜効率）の向上を確認した。

鋼の摩擦攪拌接合（FSW）を行うための接合ツール材を開発して、接合深さ 4mm 以上のフェライト鋼の FSW が可能であることを示し、FSW を水中の補修溶接に応用するために必要な水中 FSW で鋼を無欠陥接合するための接合因子、得られた継手の諸特性を評価した。

<研究項目：(1)-⑤ 廃止措置時のリスクに関する調査>

事故炉の廃止措置時に考慮しなければならないリスクあるいはハザードを具体的に抽出する方法について検討し、具体的なリスク源、ハザード源について調査した。

(2) 燃料デブリの処理と放射性廃棄物の処分に係る基礎・基盤研究

<研究項目：(2)-① 燃料デブリ-コンクリート系の相関係と放射性核種溶出挙動把握>

燃料及び被覆管の主成分を含む燃料デブリとコンクリートペDESTALとの反応を模擬したセメント成分の系について還元雰囲気下での高温反応による生成物の性状を評価するため、ウラン(UO_2)、 ZrO_2 、セメント成分として CaO や SiO_2 を還元雰囲気下で高温加熱処理を行い、相関係を調査した結果、 UO_2 - CaO 系の $1300\sim 1400^\circ\text{C}$ という限られた条件でのみ UO_2 と CaO が一部反応したが、 UO_2 - CaO - SiO_2 系、 UO_2 - ZrO_2 - CaO 系、 UO_2 - ZrO_2 - CaO - SiO_2 系においては UO_2 との反応は確認されなかったため、還元雰囲気下で 1600°C 以下の条件においては UO_2 と被覆管、コンクリート系材料は別相であると考えられた。また、コンクリート成分を含む模擬デブリについて海水への放射性核種の溶出実験を行った結果、いずれの条件においてもウランについては Ca 、 Zr 等と固溶はせず、 UO_2 としてその大部分が存在しているとみられた。次に高い溶出率を示した核種はアルカリ土類金属であり、一般に海水への溶解度が高い ^{85}Sr で 9.6% であった。アクチノイド及びランタノイドの溶出率は、 $\text{U}(4.5\%)>\text{Pu}(2.7\%)>\text{Am}(1.0\%)>\text{Np}(0.4\%)>\text{Eu}(0.2\%)$ であった(図3)。

各元素の溶出率自体はいずれのアクチノイド及びランタノイド元素についてもウラン-ジルコニウム-コンクリート(還元系)模擬デブリの溶出率は、ウラン-ジルコニウム系模擬デブリの溶出率よりも大きくなることが確認された。

<研究項目：(2)-② セメント系材料によるウラン化学種閉じ込め効果の評価と処分システムの提示>

浅地から深部の幾つかの処分環境を想定すると、ウランの安定な化学種についてセメント影響による高 pH 化及び深度による酸化還元電位の違いを考慮する必要がある。そこで、本研究では熱力学ソフト FactSage を用い、最新の熱力学データベース (FactPS 等からデータを追加) により計算し、各条件における溶解度制限固相を整理した。その結果、酸性で pH10 の条件ではカルシウムシリケート水和物(CSH)系結晶固相の出現があり、ゲル相はより広範な出現が期待されることが明らかになった。CSH はセメント系材料の主成分であることから、本研究では、さらに、ウラン共存下におけるセメント系材料の安定性の把握を実験的に行った。実験条件としては、地下の処分場において利用するセメントが、その間隙水に溶出し、地下水との混合により、最大で pH13.5 の地下水を生成することや、埋設環境における 2 次鉱物としての Ca/Si モル比が 1.0 以下の CSH の生成を考慮した。これまでの結果は、セメント系材料が、地下冠水環境において劣化して、 Ca/Si モル比が比較的低い CSH が生成すると、ウラン 6 価は加水分解のみならず、CSH と化学的な相互作用を示し、ウランのコロイドによる移行を抑制することを示唆した(図4)。

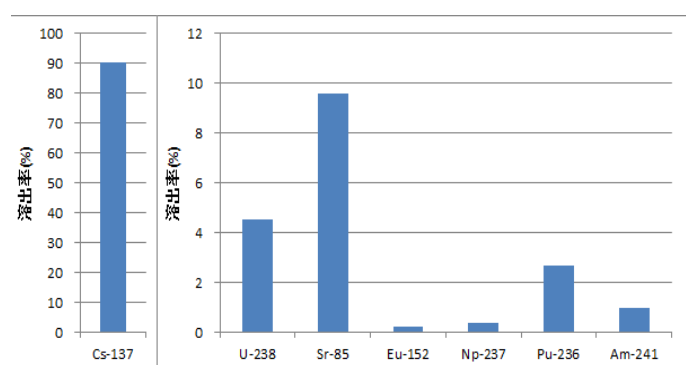


図3 U-Zr-コンクリート(還元系)模擬デブリから海水への各核種の溶出率

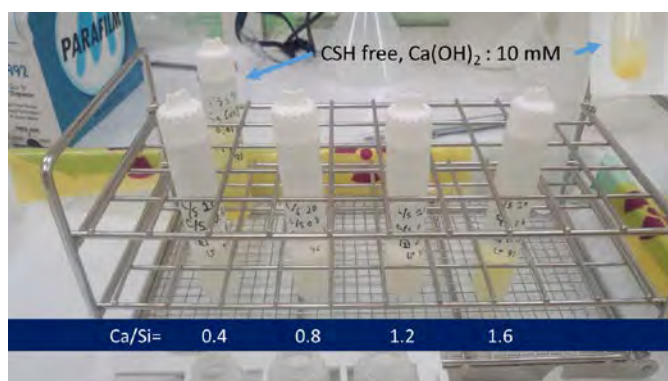


図4 U(VI)とCSHとの相互作用実験結果(遠心分離後の様子)

<研究項目：(2)～③ 市民との対話に基づく社会的受容性醸成の実践>

本研究項目では、昨年度の Web アンケートの結果に基づき廃炉に関する市民の認識に関する基本調査として首都圏を対象にしてフォーカスグループインタビュー（FGI）を実施し、FGI が一般市民の廃炉措置に対する考え方を明らかにする上で有効に機能することが確認できた。無作為に抽出した方をインタビュー対象としているので様々な考え方を持つ人がいたが、極端に考えを持つ人に引っ張られることもなく、自分の意見・考えを発言していたことが確認できた。

(3) 教育プログラムの構築

- ・教育カリキュラム「原子炉廃止措置工学プログラム」を確立し、本プログラムに基づく教育を開始した。
- ・本事業の人材育成委員会を発足させ、本委員会で審議の上、修了証授与制度を確立した。
- ・「原子炉廃止措置工学概論/特論」の講義内容を具体化し、集中講義を実施した。
- ・外部専門家との意見交換を実施する場として設置した「専門家会議」を、人材育成の場として活用することも考慮し、その運営方法を確立した。学生には主体的参加を促し、外部専門家との専門的討論を通じて異分野の専門家、産業界の専門家と高度なコミュニケーションができる場、すなわち研究と廃炉現場とをつなぐ貴重な場とすることができた。
- ・産学連携セミナー・シリーズ、施設現地調査（福島第一およびその他の原子力発電所、デブリ等分析施設、緊急時支援施設、廃炉実施中の事業所等）を企画、実施した。また、廃止措置 R&D インターンシップ研修の枠組みを構築し、実施した。
- ・人材育成を目的とした学生研究発表会（次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス）を企画、提案し、本事業の他採択機関から賛同を得、持ち回りで継続実施することとなった。その第 1 回を本学青葉山キャンパスで実施した。

3. 今後の展望

本事業では、初年度において研究面での基本的な準備を整えた後、本格的な研究に取り組んでおり、これまで順調に当初計画通りの成果をあげている。また、人材育成面でも教育カリキュラム「原子炉廃止措置工学プログラム」を開設するなど、人材育成の仕組みが整うだけでなく、当初計画に無かった人材育成のための学生研究発表会「次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス」を立ち上げるなど、計画を上回る成果をあげている。

上記を踏まえ、本事業の研究成果が福島第一原子力発電所の現場等で実際に適用されることを目指し、昨年度から同発電所の現状や今後の計画を従来以上に意識して研究を進める努力を続けている。今後は関係者との詳細な意見交換を通じて具体的な適用対象の候補を明確にし、焦点を絞った効率的な研究を実施していく予定である。また、この研究活動を行うに当たっては、国内外の研究機関との連携を深め、東北地方における研究拠点として求心力を高められるよう努力していく予定である。人材育成面では、このような研究活動への積極的な参画を学生に促し、研究を通じた人材育成活動を従来以上に活性化していく予定である。

4. 参考文献

[1] 里見ビジョン（SATOMI VISION 2013）

（http://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/president/01/president0101/SATOMI_VISION_2013.pdf）