

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併任

(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使命と考えており、平成 25 年に制定した全学ビジョン (里見ビジョン) ⁽¹⁾ の中でも「復興・新生の先導」を 2 大目標の一つとした。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、工学系を中心とした広範な部門が連携した全学横断組織を確立し、福島大学及び福島高専の専門家の協力を得て、長期を要すると言われている福島第一原子力発電所の廃止措置を念頭に原子炉格納容器や建屋等の長期信頼性維持と放射性廃棄物の処理・処分にに関する基盤研究を推進するとともに、その基盤研究のプラットフォーム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に取り組んでいる ⁽²⁾。

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 の孔食発生挙動を、塩化物イオンを含む pH 7.0 と 8.0 のホウ酸緩衝液中で動電位アノード分極曲線により評価した。その結果、アルカリ化は腐食の局在化を引き起こす恐れがあることが分かった。また、塩化物イオン濃度が 0.1 M のホウ酸緩衝液中での自然浸漬状態でのすき間腐食挙動を調査した。その結果、 Na_2WO_4 、 Na_2MoO_4 あるいは Na_2HPO_4 を添加すると、すき間腐食の侵食深さが大幅に小さくなるを見いだした。今後、腐食抑制剤が、板厚方向への腐食成長を抑制するメカニズム解明と効果的な添加条件の解明を行う。

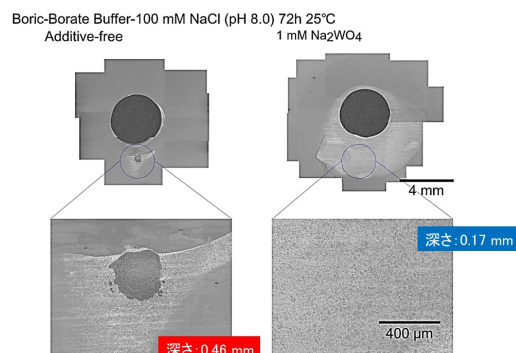


図 1 すき間内の侵食状況の比較
(左：腐食抑制剤なし、右：0.001M Na_2WO_4 添加)

回転電極装置と実機配管の流動条件の比較を行うために、フェリシアン化物イオンの拡散限界電流測定を行い、回転速度を物質移動係数へ換算した。物質移動係数は、回転速度の 0.7 乗に対して直線関係が得られ、従来知見と整合する結果を得た。さらに、炭素鋼を対象として、流動下での均一腐食領域・不動態維持領域・局部腐食領域の環境条件をマッピングした。溶存酸素濃度と回転電極の回転数を変数として、試験片表面への溶存酸素の供給の観点から腐食モードが整理できる可能性があることを示した。

<研究項目：(1)-② コンクリート構造物の長期性能評価技術>

地震被害を受けた RC 造建屋の構造的な性能評価のため、その主要構造部材である耐震壁について

試験体の静的漸増載荷実験を行い、剛性・耐力・変形性能・エネルギー吸収能力などの低下、及び、応答変形とひび割れなどの損傷状況を検討した。載荷実験結果に基づき、曲げ破壊先行型耐震壁の損傷度と変形の関係を定量的に把握し、各損傷レベルに応じる剛性低下率を調べた。剛性低下率を検討した結果、同損傷レベルにおいてはせん断破壊先行型耐震壁の剛性低下率と概ね同様に推移し、せん断破壊先行型耐震壁のそれを準用することで安全側で評価できることが確認された。また曲げ破壊先行型耐震壁において、せん断及び曲げひび割れ幅から推定したせん断変形と曲げ変形の和によって経験最大変形が概ね推定可能であることが解った。

高温がセメントペーストの細孔構造に及ぼす影響を把握すべく、水蒸気吸着試験を行いセメントペーストに作用した温度と細孔構造の変化の関係を検討した。その結果、加熱によりゲル空隙は減少するが、その後の水の作用で加熱温度が 600℃以下であればゲル空隙は回復することが確認された。また、拡散セル試験によりセメントペーストに作用した温度と塩化物イオン移動抵抗性の関係を調べたところ、ゲル空隙が回復しても一度ゲル空隙が減少（収縮）した場合には、塩化物イオン移動抵抗性は大きくなってしまふことが解った。

高温がコンクリートの塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を調べるため、コンクリートに各種の高温履歴を与えた場合の塩化物イオン浸透状況を検討した。その結果、600℃加熱の場合、試験体の全体に塩化物イオンが浸透し、セメント硬化体部分でも、高温の場合は相対的に浸透量が大きくなることが確認された。

<研究項目：(1)-③ 遠隔操作に対応可能な非破壊検査技術>

電磁超音波試験法に基づくモニタリングシステムを構築し、福島第1原子力発電所において性能評価を行っている（図2）。あわせて、配管減肉をオンラインで評価するための信号処理法を検討するとともに、システムの設計を行っている。

コンクリート埋設金属構造物の腐食レベル、及びコンクリート自体の強度形成過程がテラヘルツレーザを用いて非破壊診断できることが分かった。テラヘルツイメージング測定により、0.5 mm 幅の欠陥が検出できる。また、テラヘルツを現場に適用するための要素技術であるテラヘルツ導波路の製作技術を開発した。

また、検査の遠隔化に関しては、検査機器を運搬する移動ロボットが階段を滑落せず安定して昇降できる技術を開発した。これは階段側方の壁にロボットを意図的に触れさせることによりロボットの運動を拘束し、人間が手すりを使用するのと同様に滑落防止と進路修正の効果を得るものである。

<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（図3）の低エネルギー化について研究を推進しており、レーザーによる基材表面へのテクスチャリング処理を施した。その結果、同様のスプレー条件においても付着効率を顕著に向上させることに成功した。この結果から、基材の表面性状を制御することによって低エネルギー化できる可能性を示すことができた。

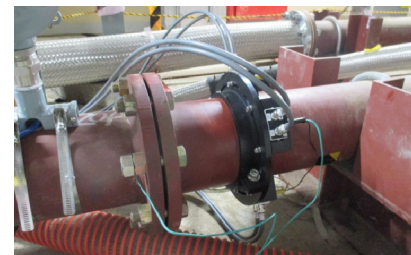


図2 配管に設置した電磁超音波センサ

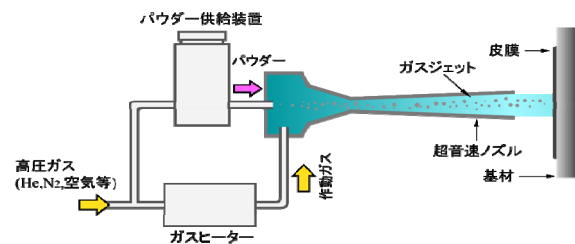


図3 コールドスプレー

また、摩擦撹拌接合（FSW）（図 4）を用いた鋼構造物の補修技術に関する研究も実施している。鍍付いた鋼の水中 FSW が可能であり、また幅 3mm 以下の開口欠陥を FSW 施工で除去できることを示し、得られた継手の材料組織と諸特性を評価した。

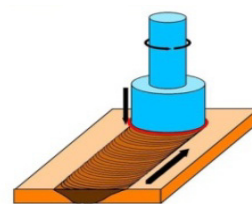


図 4 摩擦撹拌接合

<研究項目：(1)-⑤ 廃止措置時のリスクに関する調査>

事故炉廃止措置時におけるハザード源を念頭に、時間軸に沿って変化する廃止措置現場の状況を想定したリスク管理の在り方や考え方を調査・検討した。

(2) 燃料デブリの処理と放射性廃棄物の処分に基礎・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>

福島第一原子力発電所 1～3 号機で生じた燃料デブリの取り出しを行うためには、原子炉内における燃料デブリの性状の把握を行うことが重要である。そこで燃料及び被覆管の主成分を含む模擬デブリとコンクリートの系について、酸化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 を酸化雰囲気下で高温加熱処理を行い、相関係を調査した。実験結果から、本実験条件の中で最も単純な UO_2 - CaO 系においては 1200～1600 °C での加熱において UO_2 と CaO が反応して $CaUO_4$ 相や Ca_2UO_5 が生成したが、 SiO_2 が加わると $CaUO_4$ 相や Ca_2UO_5 は確認されなかった。また、 ZrO_2 が加わることによっても $CaUO_4$ の生成する温度条件は 1200～1400 °C となった。これらは SiO_2 や ZrO_2 が UO_2 と固溶体を生成することで、 UO_2 と CaO の反応を抑制していると考えられる。実際の福島第一原発で生じた燃料デブリは、 UO_2 と被覆管成分(Zr)、コンクリート系材料(CaO , SiO_2)の反応であるため、 UO_2 と CaO のみの反応は考えにくく、少なくとも SiO_2 は共存していると考えられる。そのためこれらの結果から、酸化雰囲気下で 1200°C において UO_2 が酸化した U_3O_8 相が一部存在するが、1200～1600°C の条件においては UO_2 と被覆管、コンクリート系材料は主に UO_2 固溶体相として存在していると予想される。

さらに、ウラン-ジルコニウム-コンクリート成分を含む燃料デブリが冷却水と接触した際の、アクチノイド核種の溶出を調べたために、上述の模擬デブリにアクチノイドトレーサーを添加し、海水への放射性核種の溶出実験を行った。その結果、 ^{237}Np については溶出率が検出下限の 0.01 % を下回り、最も高い溶出率を示した U についても、最大で 0.04 % 程度で、アクチノイド溶出は抑制されていることが分かった。

<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>

本課題では、昨年度に継続し、処分システム構築における多量のセメント系材料の利用を考慮して、高アルカリ環境下における 6 価ウランと劣化したセメント系材料との相互作用を冠水環境内において検討した。図 5 に実験結果の一例として、U(VI) が CSH と共存した場合に蛍光スペクトルを示す。左図が 30 日間養生したもの、右図が 2 時間養生したものである。図 5 からわかるように Ca/Si モル比が比較的小さい場合 Ca/Si 比 < 1.0 において、500～600 の波長において明らかなピークが観察される。

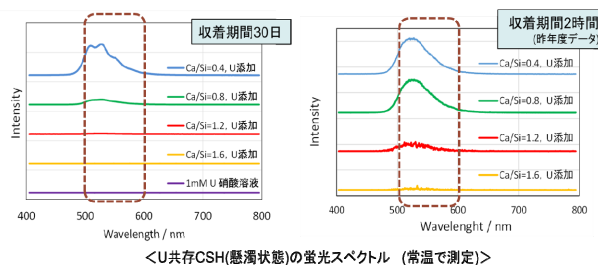


図 5 カルシウムシリケート水和物と共存した場合の U(VI) による蛍光スペクトル

これはウランフェン $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{HSiO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ によるものと推定され、その沈殿物は緑色を呈する。この鉱物は Ca/Si 比が 0.5 で安定である。Ca/Si モル比が低い場合、白色の沈殿になった理由としてはウランフェンによる沈殿が生じ、CSH（白色）と混合したためと考えられる。U-Si-Ca 系鉱物にはいくつか種類があるため、今後も FactSage による熱力学計算の結果とあわせて生成鉱物を検討していくとともに、これらの知見を安全評価に組み入れる方法を検討する。

<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>

フォーカスグループインタビューの結果として、一般市民の廃炉措置に対する関心・理解のレベルは、想像以上に低いと言うことが明らかになった。社会受容の問題は本廃炉措置事業において社会受容を担当する一部の研究者の問題として捉えるだけではなく、他の研究者も含めた問題として考える必要がある。今年度は一般市民との対話を通じて研究者側の社会リテラシーを向上させる試みを行い、その成果を確認する。

(3) 教育プログラムの構築

平成 27 年度に開設した教育カリキュラム「原子炉廃止措置工学プログラム」とその修了証授与制度は順調に運用され定着した。また、人材育成の一環と実施している原子炉施設現地調査や産学官連携セミナーも同様である。

本事業では学外の各専門分野の専門家や廃止措置技術開発機関等の技術者との議論に学生の主体的参加を促し、専門的視点・知識、異分野専門家との高度コミュニケーション・協働能力などを涵養するため専門家会議を開催しているが、この活動に学生が積極的に参加し研究発表を行ったり専門的議論に加わったりするなど、本活動が機能するようになった。

本学から提案し毎年度開催することとなった、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）は、これまで 2 回実施された。今年度は福島県富岡町で 3 月 19 日に開催されるので、学生及び教員が参加する予定である。

(4) 研究推進

プロジェクトの全体が円滑に進むように事業を推進するとともに、全体のとりまとめを実施した。

3. 今後の研究

本事業開始以来、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、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。この甲斐あって、開発技術の一部が同発電所で検証を実施しつつあるなど、成果が出始めている。今後とも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、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するとともに、このような研究活動に学生の積極的な参画を促し、研究を通じた人材育成を行っていく予定である。

4. 参考文献

- (1) 里見ビジョン (<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/vision/01/vision02/>)
- (2) 東北大学における廃止措置研究・人材育成等強化プログラム (<http://dec.tohoku.ac.jp/>)