

次世代核燃料健全性評価のための非破壊分析技術の開発

(受託者) 国立大学法人京都大学

(研究代表者) 中島健 京都大学原子炉実験所教授

(再委託先) 国立大学法人北海道大学、学校法人五島育英会東京都市大学、アールテック株式会社、
国立大学法人名古屋大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

(研究期間) 平成26年度～29年度

1. 研究の背景とねらい

東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一事故の教訓を受け、次世代原子力システムは、長期的なエネルギー安定供給能力に加えて、原子力発電から発生する高レベル放射性廃棄物による環境負荷を低減し、高度な安全性を有するシステムであることが求められている[1]。そのような要求に答えるシナリオの一つとして、マイナーアクチニド (MA) を効率良く燃焼し、廃棄物の減容及び有害性の低減を図ることができる「MA 含有 TRU 燃料を用いた高速炉システム」[2]が有望視されている。ところが、最大5%の MA 含有率が想定されている TRU 燃料においては、崩壊熱による発熱量や線量率が高くなると予想されており[3]、燃料の製造、使用、輸送、貯蔵の各プロセスにおいて、厳格な除熱管理と高い放射線場における燃料の健全性評価が必要となる。しかしながら、多量の MA を含有することによる高い放射線や崩壊熱の発生があるため、従来の分析手法の適用が困難であり、非破壊で核燃料を定量する新たな手法の開発が求められている。

このようなニーズを受けて、本事業では、MA 含有 TRU 燃料の健全性評価のために、遮蔽容器に納められた直径約 10 mm の MA 含有 TRU 燃料ピンを対象として、パルス中性子源を用いて核種濃度、(熱特性、形状等の) 物性情報を定量、可視化する総合的な非破壊分析測定システムを開発し、その有効性を実証することを目標にする。研究開発項目としては、①核種濃度定量・可視化技術の高度化、②物性値の定量・可視化技術の高度化、③総合測定システムの開発、並びに、④実証試験に基づく測定システムの総合評価を実施する。これに加えて⑤研究推進として、各機関が連携を取りながら研究を推進していく。所定の目標を達成すれば、これまでは不可能であった当該燃料の内部状態に関する核的・物性的情報を非破壊で得られるようになり、多様な側面からの燃料健全性評価を実現できる。その結果、燃料の品質保証技術を高度化し次世代原子力システムの安全性向上につながることを目指す。

このような全体研究計画の下、初年度の平成26年度は④を除く各項目について研究計画を立案し、これに従い研究を実施した。本報告書では、当該年度に得られた主要な研究成果について概説する。

2. これまでの研究成果

2.1 核種濃度定量・可視化技術の高度化

本研究項目では、「中性子源開発」、「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」、並びに、「パルス中性子イメージング技術の高度化」の3項目を実施した。

「中性子源開発」では、さらに (1) 中性子源検討と (2) 中性子源・中性子輸送系整備の2項目に細分し、研究を進めた。(1) 中性子源検討では、本事業で行う中性子の共鳴吸収を利用した分析を行う実験に関連した代表的な電子加速器中性子源として、海外ではベルギーの IRMM (Institute for Reference Materials and Measurements) の GELINA (The Geel Electron LINear Accelerator Facility) とアメリカの RPI (Renssler Polytechnic Institute) の Gaerttner LINAC

Center、国内では北海道大学があり、これらについて調査を行った。また、これらを参考にして本事業に適した中性子ターゲット、減速材配置について検討した。その結果、ターゲットの電子ビームを受ける面はフラットの方が良いこと、減速材はターゲットに密着して設置するほうが良いことが分かった。この成果を受けて、京都大学原子炉実験所電子線形加速器（以下京大炉ライナック）の中性子源システムの整備のために、モンテカルロシミュレーションにより中性子源の検討及び設計を行った。この計算結果を元に中性子源システムとビーム導管を設計し、京大炉ライナックに設置した（図1）。



図1 京大炉に設置した中性子源システム

「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」では、indicator からの即発ガンマ線測定に用いる検出器、高圧電源及びガンマ線波高スペクトルを測定するためのデータ収集系を整備し、検出器システムの性能評価を行った。標準線源を用いて動作確認を行うと共に、線源-検出器表面間の距離を変えて検出効率測定を行った。その結果、線源-検出器表面の距離を5cmとした場合、実際の測定環境においては、デッドタイムを1%以下に抑えることができ、且つ、8%以上の検出効率が期待できることが分かった。

「パルス中性子イメージング技術の高度化」では、中性子共鳴吸収の測定に必要な高時間分解能を持った2次元検出器の試作を行った。実験機材の整備を進めるとともに、北海道大学のパルス中性子源を用いた飛行時間測定を実施することで、試作検出器システムの妥当性を検討した。その結果、試作システムで中性子が変換された光パルスの計数を行えること、重心計算による超解像度化が行えることが実証され（図2）、高時間分解能を持った2次元計測システムの一つとして利用可能であることがわかった。

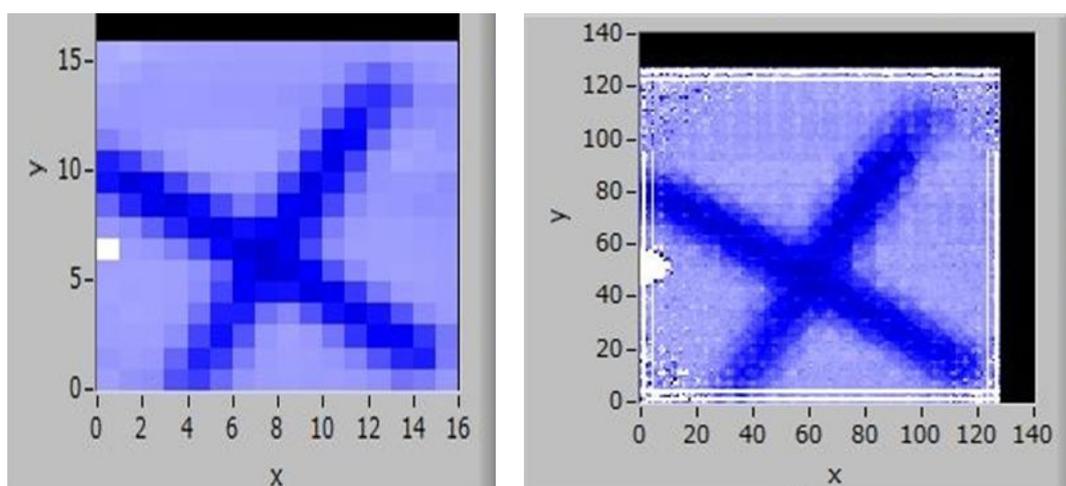


図2 256ch. マルチアノード光電子増倍管による重心計算被写体イメージ
（左：16×16、右：128×128）

2.2 物性値の定量・可視化技術の高度化

本研究項目では、「中性子・X線イメージングによる形状測定」「ドップラ効果を利用した温度分布測定」の2項目を実施した。

「中性子・X線イメージングによる形状測定」では、中性子飛行時間測定用検出器の2次元空間分解能を補うことのできる高空間分解能検出器の検討を行った。中性子イメージンテンシファイアと高感度・高空間分解能の民生用デジタルカメラを組み合わせた結果、空間分解能がラインペアチャートで0.1 mmを切る高空間分解能検出器を作製することができた。そして、パルス中性子ビームを使用した試験測定では、比較的低い感度と短い露出時間で鮮明な中性子透過画像を得ることができた。

「ドップラ効果を利用した温度分布測定」では、試料を安全且つ効率的に昇温させるための昇温装置の仕様の検討を行った。特に昇温範囲の決定に関しては、モンテカルロシミュレーションにより、 ^{238}U の20.87eV共鳴に対して温度上昇に伴う共鳴吸収量の積分値の変化を導出したところ、厚さ0.1cmの被検体に対しては、温度を室温から900Kに上昇させると共鳴吸収量は約30%増加する見通しが得られたため、昇温範囲を最高で900Kまでと設定した。また、測定に使用する検出器を適切に配置するための架台の整備を行った。

2.3 総合測定システムの開発

本研究項目では、「検出器システムの開発」「高解像度処理回路・多次元データ処理装置の開発」の2項目を実施した。

「検出器システムの開発」では、(1) 高エネルギー中性子及びX線用シンチレーション検出器等の開発と(2) LiTA中性子検出器システムの研究開発及び作製の2項目に細分した。(1) 高エネルギー中性子及びX線用シンチレーション検出器等の開発では、高エネルギーX線用シンチレータの素材としてGOS:Tbセラミックを選定し、約1mm角シンチレータを100mm×100mm×20mmにマルチバンドル化したシンチレータを試作した(図3)。このシンチレータを調整用カメラ、mPMT撮影するための光学系機器を収納し散乱X線から遮蔽する収納容器を製作した。高エネルギーX線での画像撮影により高エネルギー領域でもPb厚さ約20mmに対して1mmの輝度変化を画像として識別できることを実測確認した。また、エネルギー掃引型パルスX線高電圧回路の設計、製作及び評価を行い、当初のシステム仕様の開発、製作、検証が出来た。

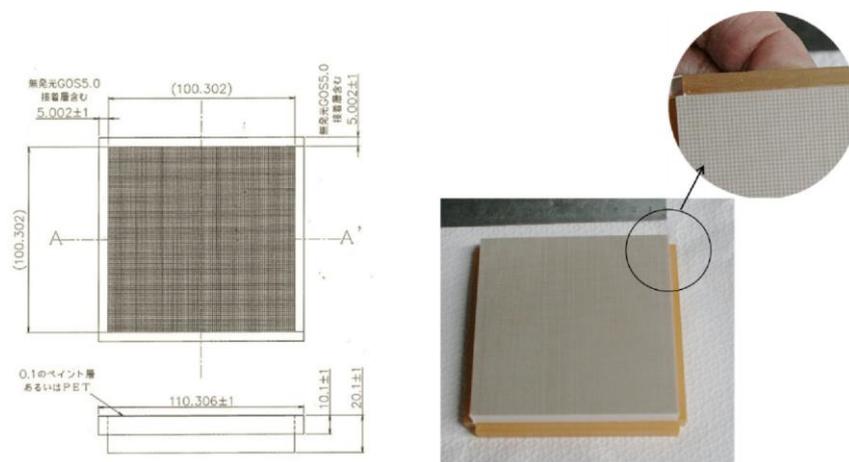


図3 試作したシンチレータバンドル寸法図と試作品写真

(2) LiTA 中性子検出器システムの研究開発及び作製では、光学系機器の設計製作と LiTA 検出器システムを製作し、北大ライナックを用いて LiTA12e 検出器システムの動作検証を行った。

「高解像度化処理回路・多次元データ処理装置の開発」は、高解像度化処理回路の製作に資するために、簡素な実験体系でシンチレータからの光信号をマルチフォトマルで取得して模擬画像データとし、そのデータをもとにソフトウェアにより適切な反応位置導出のためのアルゴリズムの開発を行った。レンズ系でシンチレータの発光面の像をぼかし、複数のフォトマルで受光して重心処理を行うと、どの程度空間分解能が改善されるかを実験的に検証するために、図4のような模擬信号発生器、レンズ、マルチフォトマルからなる実験体系を構築した。その結果、ピントを合わせた状態ではフォトマル1個の受光部の有効面積が空間分解能の上限となるが、ぼかした像を用いて重心計算を行うことにより、ピントを合わせた状態よりも空間分解能を上げることが可能であるとの見通しが得られた。また、そのアルゴリズムをハードウェアにより実時間で行うための画像処理ボードを選定して購入した。

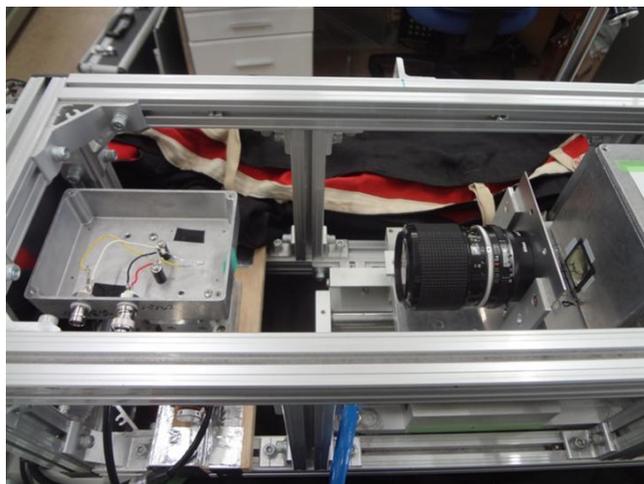


図4 模擬画像データ取得のための実験体系

2.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目における情報共有及び意見交換を密にして研究を進めるために、全体会合を3回開催した。第1回は京都大学原子炉実験所、第2回はアールテック株式会社、第3回は北海道大学でそれぞれ行い、各分野の研究者が積極的に情報共有することで、本研究を着実に推進した。

3. 今後の展望

次世代燃料の健全性評価のための総合的な非破壊分析測定システムを開発するために、各項目について要素技術開発が進捗した。今後は、これまでに得た知見や整備した測定装置や評価手法を用いて、各要素技術をさらに発展させ、総合実証試験に向けたオールインワンシステムの構築に向けて準備を進めている。

4. 参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第7回会合 資料1「今後の原子力政策について」、p. 45、平成25年10月、資源エネルギー庁。
- [2] 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会、原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会（第12回）資料1「もんじゅ研究計画（案）」、平成25年9月25日。
- [3] 敦賀原子力夏の学校「核燃料サイクル～FBRサイクル～」、平成19年9月10日～14日、講演資料、滑川卓志。