

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、MAの崩壊熱による発熱量や線量率が高くなる [3]ため、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、従来の分析手法は、高い放射線や崩壊熱の発生があるため適用が困難であり、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10mm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及び物性情報(熱特性、形状等)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としている。研究項目としては、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、があり、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、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、平成26年度、27年度の2年間において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「中性子源検討」と「中性子源・中性子輸送系整備」の2つに細分し、研究を進めた。本項目では、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を行い、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。さらに、数値計算によってターゲットサイズ、材質、形状の検討と中性子輸送系のコリメータ計算を行い、計算手法の妥当性を評価することが

できた。これらの知見を基に、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）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。これらを用いて実験を行ったところ、現在の京大炉ライナックのスペックで最大 3.8×10^4 [n/cm²/s] の中性子束が得られることが分かった。

「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」では、ガンマ線測定系の整備を行うとともに、同測定系を用いた Self-indication 法による核種定量のための予備試験を実施した。厚さ 0.5mm と 1.0mm の Ta 板に対する透過中性子を厚さ 0.3mm の Ta 板の indicator を用いて飛行時間（TOF）測定を行ったところ、40eV 以下のエネルギー領域で 6 本の共鳴ピークを観測した。4.28eV、10.36eV、13.95eV の共鳴に対して、試料の厚さと Net Area Ratio の関係（計量線）を求め、実験値との比較を行ったところ、4.28eV と 10.36eV については良い一致を示し、本手法の適用性が確認できた。

「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 TOF 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。また、これまでの知見を基に、高位置分解能ガス検出器である GEM 型検出器と試作した中性子/X 線両イメージングに使用可能な高効率型検出器を用いて、北大ライナックの熱中性子源において中性子測定実験を行い、中性子共鳴吸収分光法に必要な熱外中性子の飛行時間分析に関する特性をそれぞれの検出器について評価した（図 1）。

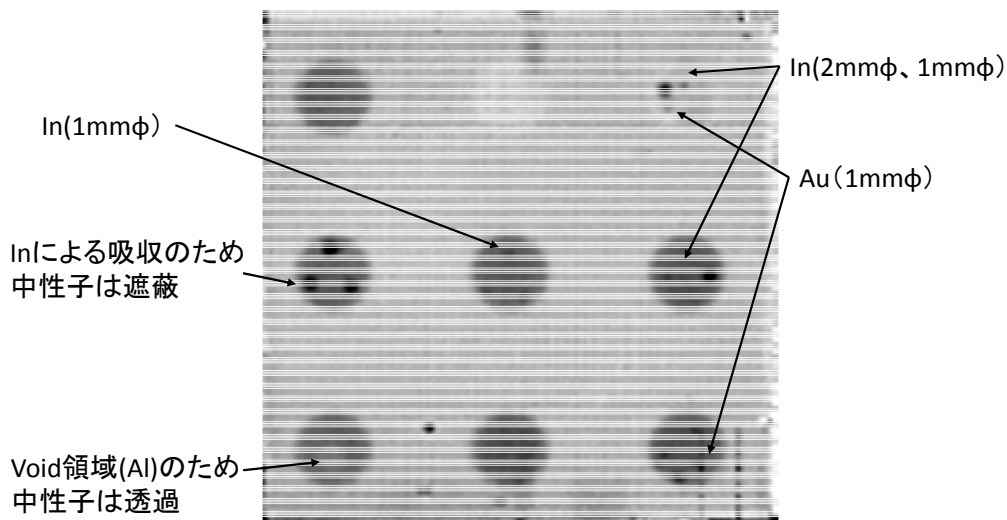


図 1 GEM による $15\text{mm}\phi \times 5\text{mm}\phi$ の $\text{Bi}_2\text{O}_3+\text{Nd}_2\text{O}_3$ 模擬サンプルの熱中性子領域におけるイメージング

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、X 線イメージングで得られるような高空間分解能の情報をもとにした低空間分解能情報への位置情報の付加について、計算機シミュレーションにより検討した。モンテカルロ・シミュレーションにより求めた高精細 X 線画像と中性子に

よる低空間分解能の密度分布に対して、相互情報量を用いた位置合わせ法を適用した結果、高精細 X 線画像と同等な空間分解能を有する物理量分布画像を取得することに成功した。次に、実験として、中性子イメージンシファイアとデジタルカメラを組み合わせた高精細検出器を用いて取得した X 線画像および中性子画像への同手法の適用を行ったところ、コントラストの異なる両画像に対しても本手法が有効であることが確認できた (図 2)。

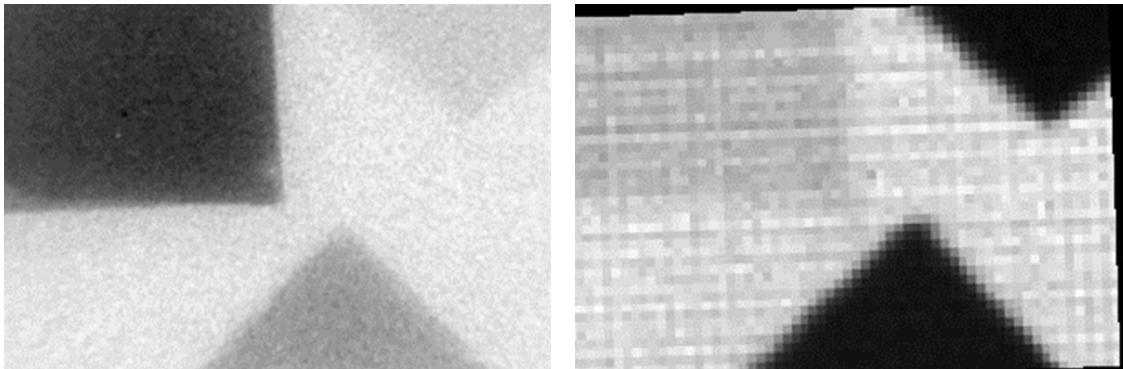


図 2 位置合わせ用試料の X 線透過率画像 (左) と
高精細画像に対する低分解能画像の位置合わせ後の画像 (右)

「ドップラ効果を利用した温度分布測定」では、概念設計を基に被検体昇温装置を製作し、同装置を京大炉ライナックに設置して特性試験を実施した。その結果、被検体温度を 200°C まで昇温させることが可能であることを確認した。さらに、長期運転中において被検体温度に数°C 以上の変動は無く、昇温装置は安定して運転可能であることが確認できた。

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」「高解像度化処理回路・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、「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「LiTA 中性子検出器システムの研究開発及び作製」の 2 つに細分した。

「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 角シンチレータをマルチバンドル化したシンチレータを試作した。このシンチレータと調整用カメラ、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。また、中性子用シンチレーション検出器として、エピサーマル領域までの中性子に十分な感度を得ることが可能な B₄C 蒸着薄膜とプラスチックシンチレータを積層した 2 次元構造のシンチレーション検出器を設計・製作した。入射口径 50mm×50mm に 2500ch のセクター構造を持つシンチレータで、マルチフォトマル (mPMT) と組合せて時間分解 2 次元測定が可能な検出器とした。同検出器と「LiTA 中性子検出器システムの研究開発及び作製」において新たに作製した京都大学用の LiTA12e システムを組み合わせ、京大炉ライナックで中性子測定試験を実施したところ、0.5msec (12m で約 3eV) 以降の時間領域での中性子測定が可能なが示された。一方、 γ 線に対しても感度を持っており、B や Cd による中性子遮蔽効果測定時に中性子反応後の γ 線が分離されずに同時測定される問題点が判明した。

「高解像度化処理回路・多次元データ処理装置の開発」では、高解像度化処理回路の開発に資するために、簡素な実験体系として使用が予定されている棒状のプラスチックシンチレータと同じ形状のシンチレータを1本使用し、それを紫外線LEDでパルス状に発光させ、この発光源を2次的に移動させることのできる模擬信号発生器を作成した。同発生器を用いた試験の結果、mPMT測定信号の解像度を向上させる手法として、信号の重心演算処理が有望であるとの結果を得た。さらに、より解像度を向上させる手法として、1画素（ピクセル）以下の範囲で移動した画像を組み合わせるサブピクセルシフト法の適用性を検討した（図3）。その結果、サブピクセル法を実現するためには、被検体をシフトさせる方法が適していると判断し、そのための高解像度化回路を製作した。

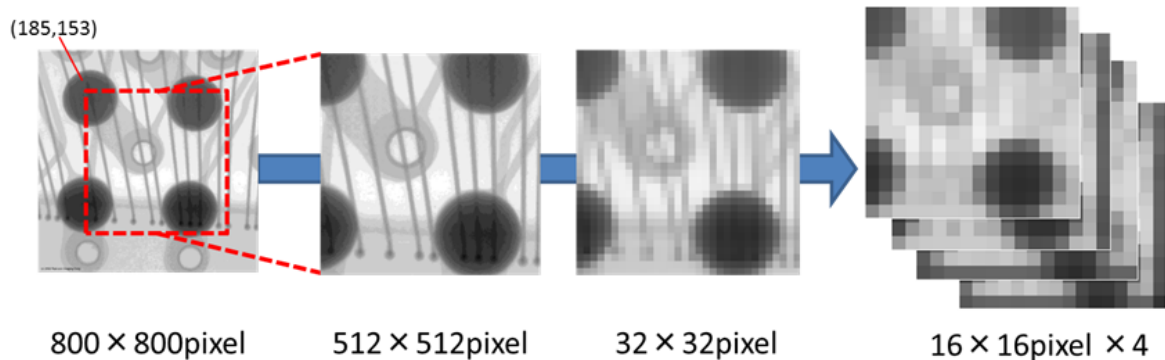


図3 模擬測定画像の生成

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回は東京都市大学、第2回は京都大学原子炉実験所、第3回は京都大学東京オフィスでそれぞれ行い、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。また、京都大学原子炉実験所において、非破壊分析技術に関する専門研究会を実施し、非破壊分析に係る多くの研究者と活発な議論および情報共有を行うことができた。

3. 今後の研究

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むとともに、システム構築に必要な重要なデータを取得することができた。今後は、これまでに得た知見、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を実施する。

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。