

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原子力発電所事故の教訓を受け、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 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、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28年度を中心とした、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項目を実施している。

「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源、コリメータ、測定系までのビームラインの最適設計のための検討・調査を行い、本結果及び平成27年度に実施した中性子源・中性子輸送系の性能試験結果に基づき、中性子源・中性子輸送系の改良を行った。また、改良後の中性子源・中性子輸送系に対する試験を実施し、試料位置での中性子ビームの性能を評価した。

その結果、平成 29 年度に実施予定の実証試験に基づく測定システムの総合評価において所期の目的を達成できる見込みを得た（表 1）。

表 1 今回測定した中性子束と前回（昨年度）との比較

	前回	今回	今回/前回	max (6kW時)
	KURRI (/cm ² /μA/sec)	KURRI (/cm ² /μA/sec)		
thermal	2.16E+01	2.36E+02	10.92	4.72E+04
epi-thermal	3.40E+01	5.72E+02	16.81	1.14E+05

「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」では、これまでに構築した Self-indication 法による核種定量手法を適用し、核燃料模擬物質を用いた試験を実施した。さらに、核燃料模擬物質中の不純物核種が定量結果に及ぼす影響を低減するための解析手法の高度化について検討を行った。その結果、本手法の有効性を確認するとともに、核燃料核種について精度 1%で定量できる見込みを得た。また、上記「中性子源開発」において改良した中性子輸送系を用いて、Ta 試料に対する測定を行ったところ、ガンマ線の遮蔽性能が向上したことにより、高エネルギー側の共鳴でも厚さの違いが明確に区別できるようになった。

「パルス中性子イメージング技術の高度化」では、元素位置を特定するための中性子・X 線の相乗イメージング手法の開発と、相乗イメージングの CT 像への適用についての検討を行った。中性子・X 線の相乗イメージングは両者の透過能力の違いを利用して元素の特定を行う手法であり、これまでに開発したイメージ重畳法とこの手法を組み合わせることで 2 次元元素分布イメージの高空間分解能化に成功した（図 1）。中性子による情報の X 線 CT 像への付与について検討するため、複数方向からの中性子透過像の情報を X 線 CT 像にマッピングする手法について検討した。計算機シミュレーションによって、X 線 CT による 3 次元ボクセルデータ及び複数軸方向の中性子透過イメージに対して中性子・X 線の相乗イメージングを行うことで 3 次元のマッピングデータを作成し、空間分解能などの評価を行った。

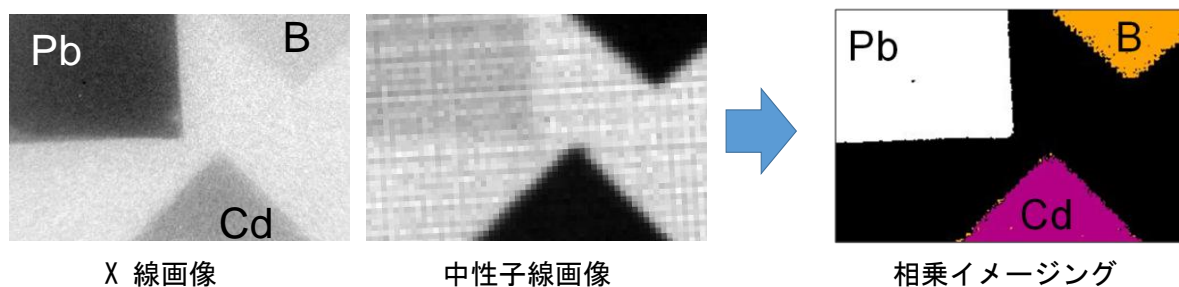


図 1 相乗イメージングによる元素分布図の作成

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、広いダイナミックレンジ有する X 線イメージ・インテンシファイアとカラーカメラを組み合わせた検出器の組み合わせ及び断層撮像用の

ステージ類を整備し、高エネルギーX線源による撮像が可能なステップ撮像装置を製作した。この装置におけるCT像の分解能を評価するため、0.1mmから1.5mm径の金属線を埋め込んだ試料を用意してCT像の撮像と再構成を行った。その結果、本事業における分解能の目標である0.4mmを上回る0.1mmサイズまでの形状認識に成功した(図2)。

また、京大ライナックで使用するために高精細中性子イメージング装置を整備し、同装置等を設置する検出器設置台を整備した。また、比較用の2次元中性子検出器の調査及び整備を実施し、高精細中性子イメージング装置の性能試験を実施した。

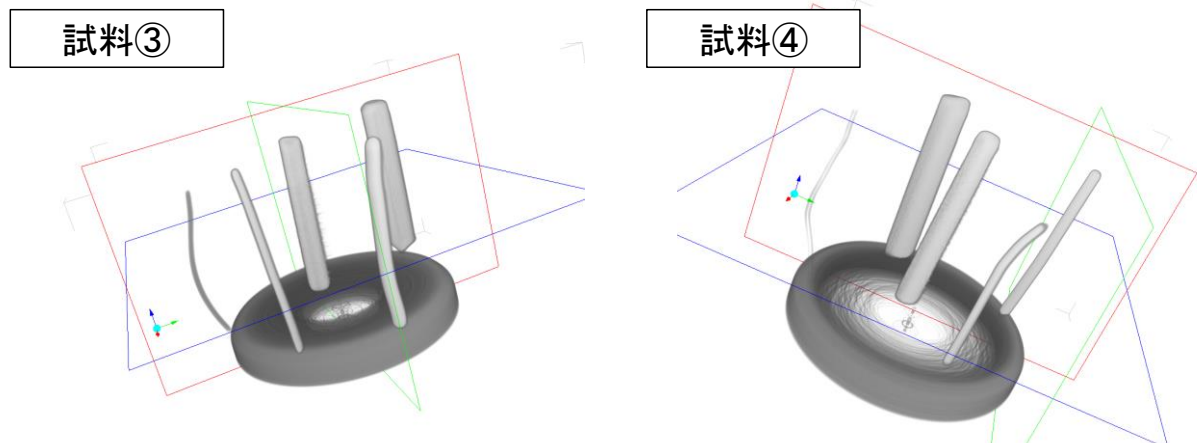


図2 X線CT像の再構成データの可視化
アルミニウム母材中のTa線(0.1mm~1.5mm径)を撮像したデータ

「ドップラ効果を利用した温度分布測定」では、計算機シミュレーションにより、温度分布を有するウラン板に対して中性子共鳴吸収分光法を適用し、ドップラ効果の解析を行うことで2次元の温度分布イメージを作成した。この試料に対して数値シミュレーションでX線透過イメージを作成し、平成27年度に開発したマッピング手法により温度分布情報をマッピングした。その結果、X線透過イメージの分解能を有する温度分布イメージを作成することができた。

また、平成27年度に製作した被検体昇温装置を用いて、ドップラ効果を利用した温度分布測定の予備試験を実施した。更に、得られた知見を基に平成29年度に予定している総合試験における測定パラメータについて検討した。その結果、測定パラメータについては個々の共鳴による透過中性子束の歪みを測定するのではなく、その積分量を測定することとした。

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」「制御システムの開発」の3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、検出効率向上を目的として平成27年度に開発した高エネルギー中性子検出器の改良を行った。更に同検出器と計測ユニットとのマッチングを実施した。また、平成27年度に引き続きエネルギー掃引型パルスX線装置について制御装置の製作を実施した。その結果、京大ライナックにおいて改良した検出器

と 256ch マルチチャンネル光電子増倍管、LiTA12 2次元測定回路系とのマッチング試験を行い、高エネルギー中性子までの反応確認、特定核種に対応する共鳴吸収という中性子時間分布(TOF)測定に必要な機能を持つことを明らかにした。一方、「LiTA 中性子検出器システムの研究開発及び作製」では、LiTA 中性子検出器システムをシリコン受光素子 (MPPC) でも使用できるように研究開発し、更にピクセルごとにゲインを調整できる改良を行い、開発したシステムが設計通りに動作することを確認した。

「高解像度化処理回路・多次元データ処理装置の開発」では、前年度製作した「多次元データ処理装置」と「制御表示ソフトウェア」および検討中の「高解像度化処理法」の性能を放射線源を用いて評価した。また、mPMT に代わり MPPC を用いる装置を製作し、性能改善を試みた。また、そこで得られた知見をもとに、京都大学原子炉実験所や北海道大学で、パルス中性子源を用いた実験を行い、総合測定システムの性能取得実験を行った。

「制御システムの開発」では、学会等において調査を実施し、得られた知見を基に総合測定システムの設計を行った。設計に基づき機器の制御に適したワークステーションを選定し整備した。更に総合測定システムの中性子・X線測定装置に適したデータ収集系を選定し整備した。その結果、整備したワークステーション及びデータ収集系を用いて京大炉ライナックで総合測定システムの制御が可能であることを確認した。

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、委員会等を開催した。平成 28 年度は、5 月、9 月および 12 月に全体会合を行い、特に 9 月全体会合の際には、京都大学原子炉実験所において核燃料物質に特化した非破壊分析法に関する専門委員会を開催し、本事業以外の参加者と共に本事業について有意義な議論を実施した。

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、これまでの 3 年間で、各項目について要素技術開発を行うとともに、システム構築に必要となる重要なデータを取得してきた。最終年度となる平成 29 年度は、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完成させるとともに、オールインワンシステムを構築し、総合実証試験を実施する。

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。