



J-PARC エネルギー分析型 中性子イメージング装置 RADEN の現状



甲斐 哲也
Kai Tetsuya



篠原 武尚
Shinohara Takenao

(日本原子力研究開発機構)

1 はじめに

中性子ラジオグラフィ装置は、中性子ビーム利用を目的とした中性子源の多くに設置されており、主要な中性子利用法の一つとなっている。中性子ラジオグラフィ技術の基本原理は、レントゲン撮影のように対象物を透過した中性子の強度分布を画像として取得するという単純なものであるが、近年、中性子エネルギーによる透過率の変化を積極的に利用して、結晶情報、元素情報および磁気情報等の空間分布を取得するエネルギー分析型中性子イメージング技術の開発が進められている。

原子炉などの定常中性子源では、単色中性子のエネルギーを順に変えながら一連の中性子エネルギー依存透過像を取得し、そのエネルギー依存性を解析するという手法により、エネルギー分析型イメージングの技術開発が行われてきた。このような手法では、従来の中性子ラジオグラフィで用いられている検出器をそのまま使用できる利点があるものの、測定効率の低く、エネルギー分解能に限界があるという難点があった。一方で、加速器による短パルス中性子源で中性子飛行時間法を用いる手法の開発も行われている。短パルス中性子源を用いる手法は、

一度に広いエネルギー範囲の透過像を取得することができ、高いエネルギー分解能も容易に実現できることから、エネルギー分析型イメージングの主流になると期待されている。このような中、世界で初めて J-PARC (大強度陽子加速器施設、茨城県東海村) の短パルス中性子源にエネルギー分析型中性子イメージング装置“RADEN (螺鈿)”が設置され、2014年に最初中性子ビームの取り出しに成功した。

本稿では、RADEN の利用を検討する際に参考となる装置概要と、これまでに得られたテスト撮影の結果や利用状況について紹介する。

2 装置の全体構成

RADEN は、エネルギー分析型中性子イメージング装置として、本誌でこれまでに紹介があったブラッグエッジイメージング¹⁾、共鳴中性子イメージング²⁾、磁気イメージング³⁾といったパルス中性子の長所を活かした先進的な中性子イメージング技術開発の先駆けとなるだけでなく、国内の高性能中性子ラジオグラフィ/トモグラフィ装置の一つとして必要な役割を担うことを念頭に設計が行われた。後者の目的のため、測定対象に応じて最適な空間分解能、中性子強度及びビームサイズを選択するための複数のコリメータや、利用者による様々な実験装置

* 中性子応用専門委員会

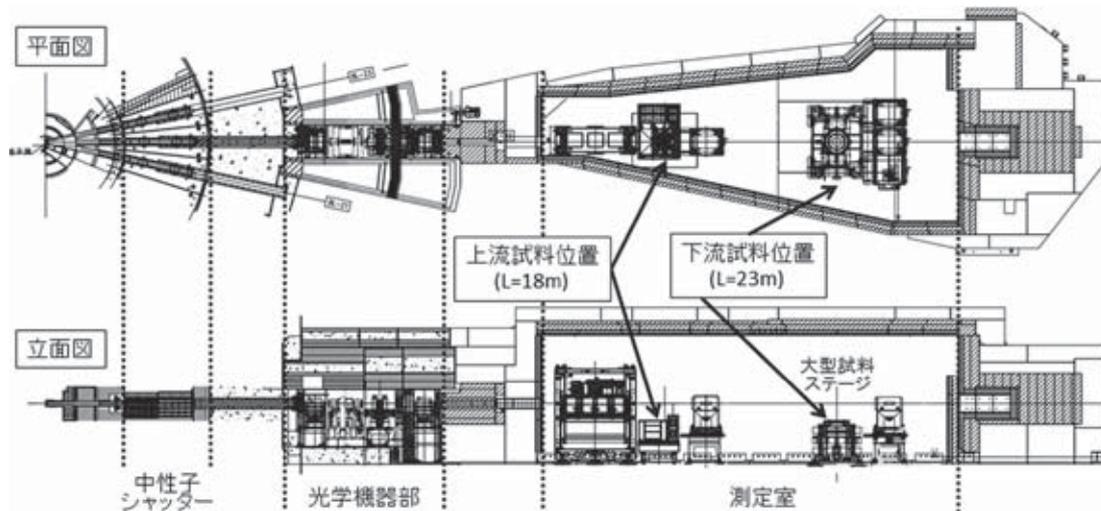


図1 エネルギー分析型中性子イメージング装置 RADEN の全体構成図

の持ち込みを想定した広い実験室空間が準備されている。図1にRADENの全体構成図を示す。図1の左端に位置する中性子源で発生した中性子は、中性子シャッター部、光学機器部を通じて測定室内に導かれ、実験に使用される。

3 主要機器の仕様と役割

3.1 中性子シャッター部

中性子シャッターは、中性子ビームの通る貫通孔を有した約15tの鉄ブロック（幅0.2~0.3m、高さ3.4m、ビーム方向長さ2m）が上下する構造となっており、実験装置室内への中性子ビームの供給と遮断を制御する。中性子イメージング装置では、平行度の高いビームが必要であるため、ビームライン中にピンホールコリメータを設け、そこからビームが進むにつれてビームサイズが広がる拡大光学系となっている。RADENでは、最大で300×300mm²のビームを得るため、線源に近いシャッター部にピンホールを配置する必要があった。一方で、ビーム面積や平行度よりも中性子強度を優先する実験では、線源からのビームを削ることなく実験装置室に導くことが要求される。既存の中性子シャッターの貫通孔は1本であったが、これらの条件を実験に応じて選択可能とするため、3本の貫通孔を有した中性子シャッターと交換した。2本の貫通孔には、それぞれ直径26mm、50mmのピンホー

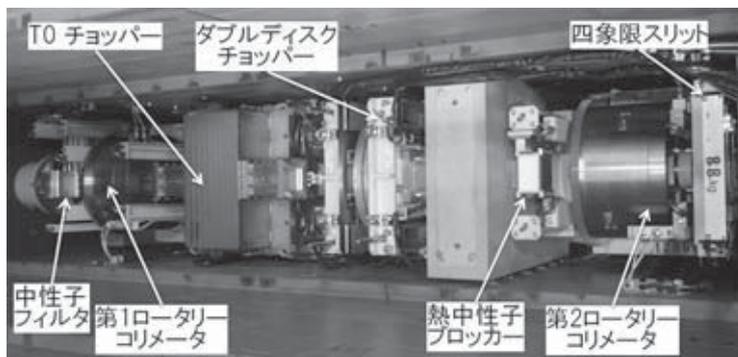


図2 上部から見たRADENの光学機器部

ルを設置し、ビーム平行度と中性子強度の要求によって選択することとした。1本の貫通孔にはピンホールを設置せず、中性子強度を最優先とする実験（ビームサイズは100×100mm²）に使用することとした。中性子シャッターの開/閉の動作時間は、使用する貫通孔により135、98、60秒である。

3.2 光学機器部

中性子シャッター部の下流に位置する光学機器部には、図2に示すように、上流から中性子フィルタ、第1ロータリーコリメータ、T0チョッパー、ダブルディスクチョッパー、熱中性子ブロッカー、第2ロータリーコリメータ、四象限スリットが配置されている。中性子フィルタは、ホウ素ガラス（2mm）、アクリル板（5mm）、カドミウム（1mm）、ビスマス（25~100mm）、鉛（25~75mm）を挿入することが可能であり、中性子強度の調整や中性子源からのγ線の抑制等に使用される。第1ロータ

リーコリメータでは、中性子シャッターで提供されるビームよりも更に高いビーム平行度が必要な実験を想定し、直径 15, 5, 2 mm のピンホールを備えている。中性子シャッターの機能と合わせて、選択可能な条件を表 1 に示す。TO チョッパーは、中性子源に陽子ビームが入射するタイミングに同期して回転するハンマー（インコネル製、108×108×300 mm³）により、 γ 線や高エネルギーの中性子を遮蔽する機器であり、ラジオグラフィ測定時の中性子/ γ 線比やカドミウム比の向上や実験室内のバックグラウンド抑制等の効果がある。ダブルディスクチョッパーは、独立して回転する 2 枚の円板により構成されている。円板上の中性子が透過する円周のうち 170° の範囲には ¹⁰B 濃縮炭化ホウ素が塗布しており、回転の位相を調整することにより、飛行時間分析でバックグラウンドとなる低エネルギー中性子の除去や、波長分解能 10% 程度の準単色中性子の供給に使用される。熱中性子ブロッカーは、3 秒程度でポリエチレン（厚さ 100 mm）と炭化硼素（厚さ 10 mm）で構成されるブロックを上下させる装置で、測定の一時的停止中に短時間でビームを遮断する。四象限スリットは、実験で必要とする範囲外の中性子ビームを遮蔽し、バックグラウンドを低減するために使用する。

3.3 測定室

測定室は、様々な大きさの試料や周辺装置を実験で使用可能となるよう、出来る限り広い空間（ビーム軸方向長さ 12 m, 幅 1.3 m~5.1 m, 床から天井まで 3.8 m）を確保した。最も上流部分には、磁気イメージングを行う際に使用する様々な機器と、その他の実験時に使用する中性子飛行管とを切り替えるための昇降機構があり、短時間で実験のセットアッ

プを切り替えることが可能となっている。測定室には、2 か所の試料位置を設けており、上流側（線源からの距離 L=18m）には耐荷重 600 kg の中型試料ステージを、下流側（L=23m）には耐荷重 1 t の大型試料ステージを設置している。これらの試料ステージ上には、可搬型で耐荷重 10 kg の小型試料ステージを設置して使用することも可能である。試料の重量やビームサイズによる条件の他、中性子強度を優先した実験では上流試料位置を、エネルギー分解能を優先した実験では下流試料位置を選択することとなる。それぞれの試料位置の上部天井は、取り外し可能な遮蔽ハッチとなっており、大型の試料や関連機器を施設のクレーン（7.5 t, 30 t）を使って搬入可能な設計となっている。

3.4 中性子イメージング検出器

試料を透過した中性子の 2 次元分布を画像化する中性子イメージング検出器は、カメラ型と計数型に大別される。エネルギー分解を行わない中性子ラジオグラフィ測定で主に使用するカメラ型は、ZnS/⁶LiF 等をアルミ板に塗布したシンチレータと CCD カメラ等による光学撮像系を組合せた装置で、国内外の中性子ラジオグラフィ施設で一般的に使用されている。カメラ型の最大視野は 300×300 mm で、空間解像度は視野を CCD カメラのピクセル数で割った値となるが、実験条件によって視野を小さくして解像度の高い測定が可能である。これまでにインジケータ等を使って 0.2 mm 程度までのパターンを弁別できることが確認されており、今後は機器の最適化を進めて更なる高分解能を目指す予定となっている。この他、東芝電子管デバイス社製の中性子カラー II.⁴⁾ を使用した検出器システムの調整も進められている。

表 1 RADEN で選択可能なビーム平行度 (L/D), ビームサイズ, 及び強度比の一覧

		中性子シャッター			第 1 ロータリーコリメータ		
		なし ^{a)}	50	26	15	5	2
ピンホール直径 (mm)							
上流試料位置 (L=18 m)	ビーム平行度 (L/D)	180	298	520	667	2,000	5,000
	ビームサイズ ^{b)} (mm)	100	173	221	91	113	120
下流試料位置 (L=23 m)	ビーム平行度 (L/D)	230	398	720	1,000	3,000	7,500
	ビームサイズ ^{b)} (mm)	100	250	300	144	173	181
相対中性子強度		100	30	9.6	5.3	0.59	0.09

a) 100×100 mm² 貫通孔, b) 矩形ビームの 1 辺の長さ

計数型の中性子イメージング検出器では、GEM⁵⁾、 μ NID⁶⁾、リチウム (⁶Li) ガラスピクセル検出器⁷⁾ が利用可能である。これらの検出器は、空間分解能や視野の大きさではカメラ型に及ばないものの、高い時間分解能を有しており、飛行時間分析法による中性子エネルギー分析型イメージングに不可欠な検出器である。それぞれの検出器が、空間分解能、検出効率や最大計数率に特長を持っており、実験の目的によって、最適な検出器を選択して使用している。これらの検出器は、今後も開発を継続して性能向上を図る計画である。

4 RADEN でのテスト実験

ビームサイズの大きさを活かした中性子イメージングのデモンストレーションとして、車載ラジエータのコンピュータ断層 (CT) 撮影を行った際の様子を図 3 (a) に示した。ラジエータの断面は 150×150 mm で高さは 400 mm (冷却配管部のみ) であったため、下部から 300 mm までの範囲を対象とした。測定時の L/D は 720、陽子ビーム出力は 400 kW で、ラジエータを回転させながら 0.6° 毎に 3 分の撮影を行ったのち、コンピュータ演算により 3 次元イメージを再構築した。得られた結果を 3 次元表示した図 3 (b) では、ラジエータの筐体 (ステンレス製、厚さ 2 mm) 内に配列された 128 本のらせん形状の冷却配管 (ステンレス製、内径約 8 mm、肉厚 0.4 mm) を確認することができる。また、図 3 (c) に示すある断層の画像では、何かの破片のようなものを確認することができる。大面積のビームが利用できることにより、このような比較的大きな試料であっても、容易に中性子ラジオグラフィ/トモグラフィを行うことが可能である。

中性子エネルギー依存イメージング法の一つである中性子共鳴吸収イメージングは、元素に固有の共鳴エネルギーで中性子の吸収が急激に増加することを利用して、特定の元素の分布を強調したイメージングを行う方法である。図 4 で車載用のリチウムイオン電池 (外形: 110×92×14 mm) の共鳴吸収イメージング

を行った例である。図 4 (a) は中性子エネルギーを区別しない中性子ラジオグラフィ像で、リチウムイオン電池内の水素やリチウムなどにより大部分の中性子が散乱・吸収されるため、内部の構造を可視化することは出来ていない。図 4 (b) は、コバルトの共鳴エネルギー (132 eV) で中性子透過像を得たもので、図 4 (a) と比較して黒く影になっている部分の面積が小さいことが分かる。図 4 (b) では、電極材料に使用されているコバルトの密度分布に対応した画像が得られていると考えられる。図 4 (c) では、図 4 (a) 及び (b) 中の A, B, C 部における中性子透過率をエネルギーの関数として示した。共鳴吸収を確認できなかった 10 eV 以下では、飛行時間分析の時間幅を 1 μ s から 50 μ s に変更して、データのばらつきを軽減して表示している。C 部では、コバルトの他にもマンガンの共鳴 (341 eV) を確認できる。マンガンも電極材料として使用されている材料であり、コバルトと同様に、元素分布を強調したイメージングが可能であることが分かった。一般的な中性子ラジオグラフィで使用される冷・熱中性子領域では、A 部と B 部ともに中性子透過率が 10% 以下で差異も小さいため、内部の構造を可視化することは困難である。このような条件であっても、中性子共鳴吸収イメージングを行うことにより、内部の

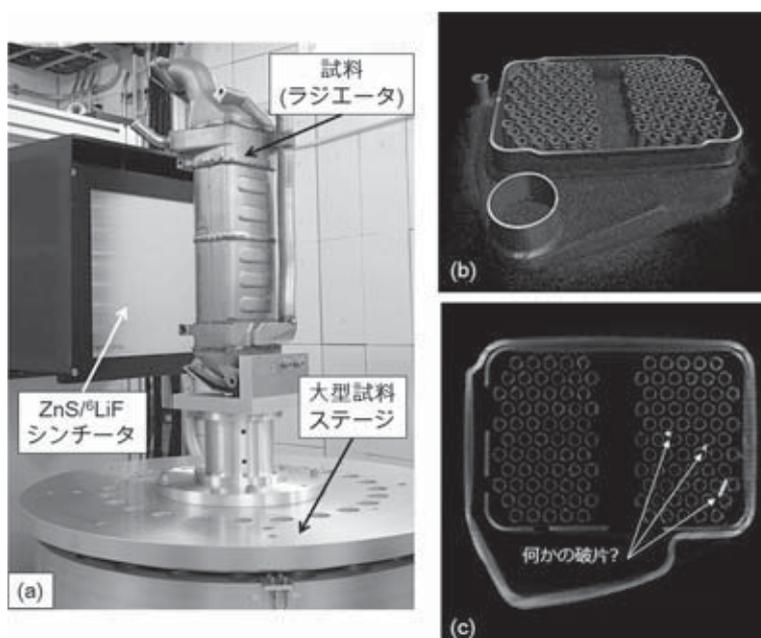


図 3 (a) 車載ラジエータの中性子コンピュータ断層撮影 (CT) の様子, (b) 3 次元再構築画像, (c) 断層画像
試料提供・測定協力: 放射線利用振興協会

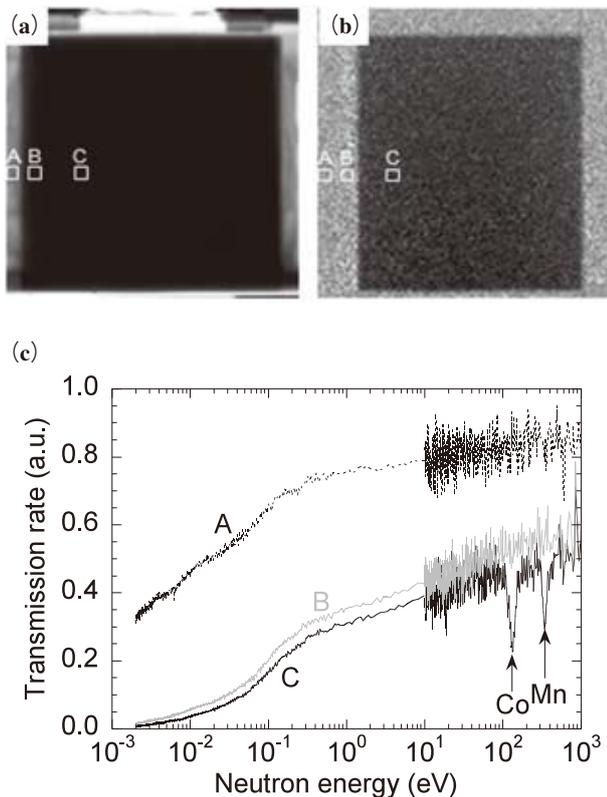


図4 (a) リチウムイオン電池の中性子ラジオグラフィ像、(b) コバルトの共鳴エネルギー (132 eV) における共鳴吸収ラジオグラフィ像、(c) A, B, C 部における中性子透過率のエネルギー依存性

構造を可視化できることが分かった。ブラッグエッジイメージングや磁気イメージングについてもテスト実験だけでなく、一般課題での利用が進められている。

5 利用状況と今後の展望

RADEN では、2015 年 4 月からの 2015A 期より一般利用者による課題公募の受付を開始した。2015A 期には、トライアルユースを合わせて 10 件の応募があり、7 件を採択 (うち 1 件は応募者都合によりキャンセル) して実験を実施した。6 件のうち 1 件は、ビーム利用料金を支払って成果を占有す

る“成果非公開利用”であり、RADEN の有用性が認められた一例と考えられる。2015B 期は中性子源のトラブルで公募を行わなかったが、2016A 期には 18 件の課題応募があった。このうち産業界からの応募は 6 件と、比較的高い割合であった。

広く一般的に利用されている中性子ラジオグラフィ/トモグラフィと比較して、エネルギー分析型の中性子イメージング法は歴史が浅いため、継続的な応用例の開拓が必要である一方で、これからの大きな発展が期待されている。RADEN 装置グループでは、一般利用と並行して、信頼性の向上や測定の効率化、応用例の開拓等を継続的に行う予定である。

謝辞

RADEN の設計から建設においては、装置提案者の名古屋大学鬼柳善明教授を始めとして、国内外の多くの中性子イメージング関係者などにご協力頂いたことを感謝いたします。中性子イメージング技術の開発及び機器整備の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (S) (課題番号 23226018, 代表: 鬼柳善明)、及び文部科学省受託研究 光量子融合連携研究開発プログラム「実用製品中の熱、構造、磁気、元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」(代表: 篠原武尚) の支援の下で行われました。

参考文献

- 1) 岩瀬謙二, *Isotope News*, **725**, 7-11 (2014)
- 2) 甲斐哲也, *Isotope News*, **727**, 16-19 (2014)
- 3) 篠原武尚, *Isotope News*, **732**, 9-14 (2015)
- 4) K. Nittoh, C. Konagai, M. Yahagi, Y. Kiyonagi, T. Kamiyama, *Physics Procedia* **69**, 177-184 (2015)
- 5) S. Uno, T. Uchida, T. Murakami, *et al.*, *J. Instrumentation* **7**, C05003 (2012)
- 6) J.D Parker, K. Hattori, H. Fujioka, *et al.*, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A* **697**, 23-31 (2013)
- 7) H. Sato, O. Takada, S Satoh, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi, *Nucl. Instr. Meth. A* **623**, 597-599 (2010)