

## BL22（エネルギー分析型中性子イメージング装置）評価報告

パルス中性子応用分科会 主査 浅野 等（神戸大学）  
副査 鈴木 淳市（CROSS）  
齊藤 泰司（京都大学）  
加美山 隆（北海道大学）  
日野 正裕（京都大学）  
兼松 学（東京理科大学）  
友田 陽（茨城大学）  
渡辺 賢一（名古屋大学）

### §1 はじめに

本中間評価報告書で取り上げる「エネルギー分析型中性子イメージング装置（RADEN）」は、世界最初の本格的なパルス中性子イメージング専用実験装置であり、J-PARCの物質・生命科学実験施設（MLF）のBL22ビームポートに建設された。2014年11月に放射線申請が認可されて装置が稼働し、2015年度からは一般利用課題を受け入れて共用実験を開始した。本中間評価報告書は、2014年度の稼働から約5年経過したことを受けて、「エネルギー分析型中性子イメージング装置」の現状を総合的に評価する「中間評価委員会」の中性子実験装置部会・パルス中性子応用分科会による評価結果をまとめたものである。

審査分科会では、まず、装置担当者が作成した中間評価調書に対して5つの評価項目、① 装置の建設・維持および技術開発などに関する事項、② 当初計画に対する装置性能の達成度（世界の類似装置を含めた位置づけを含む）、③ 利用者支援に関する事項、④ 得られた成果に関する事項、⑤ 今後の装置運営・管理・高度化および学術研究テーマに関する事項について事前評価を行うことで分科会委員の意見を集約した。その後、2020年12月7日にパルス中性子応用分科会を開催し、担当者に対するヒアリング審査を行った。本報告書は、事前審査評価結果、ヒアリング後の審議結果をまとめたものである。パルス中性子応用分科会としては、本中間報告書を参考にして、さらなる装置開発と装置活用の促進に励んで頂きたいと考えている。

### §2 装置の建設・維持および技術開発などに関する事項

RADENは世界初の本格的なパルス中性子イメージング専用実験装置であり、パルス中性子イメージングの特長である結晶・組織、ひずみ、磁場、元素、温度などに関する物理情報の3次元可視化技術として、ブラッグエッジイメージング（結晶組織情報）、共鳴吸収イメージング（原子核種、温度情報）、偏極中性子イメージング（磁場情報）の技術が開発されてきた。カウンティング型およびカメラ型二次元検出器システムの改良、磁気イメージングのためのパルス中性子対応3次元偏極度解析装置、中性子位相イメージング用Talbot-Lau干渉計などの整備が積極的に進められ、パルス中性子イメージング装置のトップランナーとして世界をリードするとともに、産業利用を含む様々な分野において広く利用されている。現在も継続して応用範囲を広げるための様々な能力向上やデバイス開発が進められており、世界的に高い評価を得ている。今後の装置の維持や1 MW化を考えると、大強度の中性子ビームを活かせる高効率・高分解能検出器が重要であり、RADENの能力を最大化するための鍵は検出器にあると考えられる。装置グループに検出器の専門家がいることは重要で、より高い性能をもつ検出器の技術開発が期待される。一方、今後、産業利用を進めるには、装置の開発・維持だけでなく、解析ソフトウェアの改良・開発も有効であろう。なお、研究炉JRR-3が停止している中、中性子ラジオグラフィにおいてもその能力が活用されている。

### §3 当初計画に対する装置性能の達成度（世界の類似装置を含めた位置づけを含む）

RADENは建設時、そして稼働後のデバイスやソフトウェアの開発によって、パルス中性子イメージング装置のトップランナーとして世界をリードする装置となっている。当初計画で予定されていたイメージング手法は全て実現されており、計画性能を十分に達成していると言える。装置内の測定機器の配置が一部計画とは異なっているが、実際の建設から生じた制約によるものであり、装置グループはその変更を十分にカバーして、さらには改良により計画以上の測定能力を達成したと言える。

近年、世界的にパルス中性子イメージングへの期待が高まり、海外の大型加速器中性子源施設には、例えば英国ISISのIMATビームラインがあるが、エネルギー範囲、分解能で優位性があるRADENの存在価値は高い。今後もエネルギー分析型中性子イメージング装置としては、MLFの中性子源の出力向上とも相まって世界をリードする装置であり続けることが期待できる。

### §4 利用者支援に関する事項

共用開始以降、産業利用を含めて、各期20課題程度の実験が実施されている。利用者支援においては、全ての課題に対して専門性の高い責任者を含む複数名の支援体制が整えられている。さらに、技術相談などにも積極的に対応しており、利用者の裾野を広げる活動が積極的に進められている。測定内容や測定対象物の自由度が大きいのもRADENの特徴であるが、そのために計測方法やソフトウェアによる物理情報の抽出において、利用者支援が必要となる。幅広い分野の利用者の様々なニーズに応える手法および実験環境が開発・整備され、装置担当者の専門性、蓄えた知識・経験を活かした支援により、RADENの特徴を活かした成果が創出されている。これが利用者数の増加に繋がっていると考えられる。

しかしながら、休日にも利用者支援をせざるを得ないなど、マンパワーの不足が懸念される。装置グループにはパルス中性子イメージングの特長を活かした検出器開発を含むイメージング技術の開発が望まれるところであり、また、MLFとして産業利用を促進するのであれば、利用支援者を増やす、実験系と解析系に重心を置く利用支援者の育成など、装置グループ内の裁量を超えた次元のMLFとしての議論が必要であろう。

2021年にはJRR-3が運転を再開することから、中性子イメージングでのJRR-3との棲み分けや連携が求められる。

### §5 得られた成果に関する事項

エネルギー分析型中性子イメージングの特長を活かした研究として、ブラッグエッジイメージングを用いた日本刀の結晶組織構造解析、磁場イメージングによる運転中のモーター磁場の可視化、共鳴吸収イメージングによるマイナーアクチノイドの吸着過程の観察で大きな成果を挙げており、今後の展開も期待できる。産業利用を3割程度受け入れつつ、学術誌への投稿論文21編、国際会議プロシーディング 26編、解説記事11編、学位論文3編があり、着実に成果を挙げている。一方、産業利用の成果は現状では正当に評価されていないことが危惧される。産業利用は期待される場所であるが、その正当な評価がなされないと装置グループには不利になる。利用者支援の面でも産業利用者に対しては手厚い支援が必要で、装置グループの負担が大きくなる。「新規材料開発研究への応用」に関しては研究体制等も含めて今後の発展に期待したい。

### §6 今後の装置運営・管理・高度化および学術研究テーマに関する事項

エネルギー分析型中性子イメージング法はまだ端緒についたところであり、今後の発展が期待される。共用開始以降、各期20課題程度の実験が実施されているが、2021年に運転を再開するJRR-3の中性子ラジオグラフィ装置との棲み分けを考え、RADENとしては、エネルギー分析型イメージングの特長を活かし、社会のニーズを考慮した学術的研究を進めることが重要である。特に、物質科学、エネルギー材料分野から高い利用ニーズがあることから、エネルギー分析型イメージングで得られる定量データから物質や材料の物性を議論する研究の発展、そのための高空間分解能検出器の開発、データ解析およびシミュレーションソフトの開発が期待される。

心配されるのは装置グループの負担である。これは、中性子イメージングが他の手法でなし得ない可視化を可能とし、一見分かり易い結果が得られる反面、得られたデータを物理的に、そして定量的に分析、評価するには、高い専門性が必要であるためと考えられる。学術研究と人材育成の観点から大学の研究室との連携の強化、産業利用やお試し測定などの観点からは小型中性子源装置との連携の強化が装置運営・管理の合理化・効率化において有効と考えられる。

## §7 施設への要望

エネルギー分析型中性子イメージングの普及・発展のためには、高時間分解能化に加えて、高空間分解能化、高検出効率化および高計数率化が重要な要素である。検出器高度化の研究開発にさらに注力して進められる体制を整えて頂きたい。

エネルギー分析型中性子イメージングは新しい利用分野であるので、これまでの成果を活かして新規アプリケーションを開拓し、人材育成を意識した利用者の裾野を広げることが重要であるが、特に、エネルギー分析型中性子イメージングではデータ解析までを含めて装置グループの負荷が大きいので、イメージング経験者を増やし、自ら解析までできるヘビーユーザーを育成するためにも、全国的なネットワークを活用して、他施設、大学、企業と連携した協力体制を構築し、連携研究者を増やす活動を行なって頂きたい。

産業利用の促進は、RADENの装置グループだけの課題ではなく、他の中性子実験施設との共通の課題である。今後の発展、特に国内産業の振興のために、組織のコンセンサスを心得て広く連携することを検討頂きたい。

## §8 総評

RADENは世界初のパルス中性子イメージング専用装置として建設され、その後もカウンティング型およびカメラ型二次元検出器システムの改良、磁気イメージングのためのパルス中性子対応3次元偏極度解析装置、中性子位相イメージング用 Talbot-Lau 干渉計の整備などが進められており、様々な幅広いアプリケーションを実現可能な世界で唯一の装置として構築され、幾つもの特徴的な成果が創出されてきた。さらなる高度化には、検出器の開発、データ解析手法やソフトウェアの開発が求められる。これらの開発は、新たなアプリケーションの開拓や産業利用と並行して進めるのが理想であるが、マンパワー不足が心配される場所である。これまで RADEN で実施された産業利用課題には、必ずしもエネルギー分析型中性子イメージングは必要ではなく、定常中性子源、すなわち JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィ装置 (TNRF) の方が適していると考えられるものもある。今後、定常中性子源中性子ラジオグラフィとの棲み分けや連携が大きな課題となるであろう。これらの対策には、RADENの装置グループだけでなく、J-PARC、CROSSの組織としての対応が求められる。RADENは、TNRFとともに世界トップレベルの中性子イメージング装置であることに疑いはなく、それらの特長をさらに活かした研究および利用の展開に期待する。

以上