

BL06 (中性子共鳴スピネコー分光器群) 評価報告

分光分科会 主査 佐藤 卓 (東北大学)
副査 中島 健次 (JAEA)
長尾 道弘 (NIST)
杉山 正明 (京都大学)
中島 多朗 (東京大学)
中村 充孝 (JAEA)

§ 1 はじめに

本中間評価報告書は J-PARC MLF BL06 に設置された「中性子共鳴スピネコー分光器群」(以下 VIN ROSE) に関するものである。VIN ROSE はパルス中性子源に設置された共鳴型中性子スピネコー分光器としては世界初のものであり、数ある J-PARC MLF の装置の中でも極めて特色のある装置である。VIN ROSE は 2012 年に J-PARC MLF における装置建設が認められ、その後 2014 年 4 月にビーム受け入れ、2017B 期より共同利用開始と順調に建設が進められてきた。本評価は同装置がビーム受け入れからほぼ 5 年(実際には 6 年強)経たことにより、MLF が設置装置に対して定めた中間評価として実施されたものである。

本装置の審査分科会では、まず事務局より提供された審査資料にもとづいて事務局提案の 6 項目に関して各委員が事前に評価を行った。また、それらの意見を集約していく過程でさらにいくつかの事項について詳細に理解する必要性が生じたため、装置担当者への質問リストを提示し、ヒアリング審査時に回答することを求めた。その後令和 2 年 12 月 14 日に装置担当者に対するヒアリング審査を実施、同日連続して本分科会を開催し集中的な審議を行った。審査においては上述の 6 項目を中心に、幅広い観点から VIN ROSE の現状と今後を議論した。本報告書はその審議結果をまとめたものである。なお、VIN ROSE の特殊性を鑑み、技術開発および装置運営的な観点に多少重点を置いて議論を進めたことをここに付記する。

本分科会としては、本報告書の内容が VIN ROSE の今後の運営と開発に活かされ、世界で初めてのパルス中性子源共鳴型スピネコー分光器の実現という名誉を確立すること、さらには、VIN ROSE による新しいサイエンス創出がなされることを強く期待するものである。

§ 2 装置の建設・維持および技術開発などに関する事項

最初に、世界で初めてのパルス中性子共鳴型スピネコー分光器群の開発に挑戦し、計画する二台のうちの一(台) (MIEZE 型) に関しては実用レベルの性能を達成していることに対して、分科会は大きな敬意を表する。中性子スピネコー法の源流がヨーロッパにあり、日本を除くヨーロッパ外のスピネコー装置はヨーロッパからの輸入品という状況が続く中、VIN ROSE が国内で独自に開発されたことは、我が国の中性子スピネコーコミュニティの長い歴史と不断の努力の結実であり、極めて高い評価に値する。また開発コストがパルス中性子源に設置される分光器としては驚異的に低いことも特記される点である。

本装置は BL06 ビームラインを湾曲ガイド管を用いて 2 本に分岐し、エネルギー分解能(フーリエ時間)の異なる 2 種類のスピネコー装置(MIEZE 型スピネコー装置および NRSE 装置)を配置するという構成を取っている。それぞれのビームラインはモデレータを直視しないうへ、サンプル位置中性子束に関しては概ね予想(計算)通りであり、質の高いビーム輸送系が実現できていると判断される。一方で、現時点ではガイド管から発生するガンマ線がノイズ源となっている。特に NRSE の集光ガイド管からのガンマ線の MIEZE 検出器への混入により両分光器の同時運用が妨げられており、改善が望まれる。

パルス中性子源における高性能 MIEZE 型スピネコー実現の鍵の一つに共鳴スピネフリッパーがあるが、VIN ROSE グループでは非空芯電磁石による定常磁場増強と空芯コイルによる直交 RF 磁場を組み合わせることにより高周波共鳴スピネフリッパーを実現している。この結果当初計画を上回る 800 kHz での運転を達成している。また、同時にパルス中性子 MIEZE 型スピネコー法の定式化にも成功し、実際に実験と比較検証が行われている。検出器に関しても、MPPC 検出器の開発が行われて

おり近日中に大面積化が達成できるとされている。このように MIEZE 型スピネコー分光器に関しては大凡実用の域に達したと判断される。

NRSE 分光器に関しては開発段階とのことであるが、後述する回転楕円体集光ミラーの開発等に着実な進展が見られている。一方、ドイツのグループにより提案された longitudinal NRSE は中性子偏極を中性子進行方向と平行にすることで装置の磁場補正を容易とし、高分解能化が可能とされる。今後、longitudinal 型に変更することでフーリエ時間 100 ns 以上を実現するなど野心的な計画が立てられている一方で、実現に向けては開発項目もまだ多いと理解した。

両分光器の制御系は現時点では LabView による制御となっているが、検出器大型化の段階で EPICS と DAQ-Middleware の組み合わせに更新予定である。解析には ROOT が使用されている。これらのソフトウェアは現時点では J-PARC の他の多くの装置とは異なる選択である。この点に関しては分科会の分析を § 7 に記す。

§ 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）

MIEZE 型スピネコー分光器に関しては、当初計画における波数範囲 $0.01 < Q < 3.5 \text{ \AA}^{-1}$ 、フーリエ時間 $0.1 \text{ ps} < t < 11 \text{ ns}$ に対して、現状では波数範囲 $0.02 < Q < 1.5 \text{ \AA}^{-1}$ 、フーリエ時間 $0.1 \text{ ps} < t < 3 \text{ ns}$ を達成している。この中で波数範囲に関しては検出器の面積の問題であり、今後速やかに拡張されると思われるので本質的な問題ではない。一方、フーリエ時間に関しても上記の現状値は 200 kHz 運転時のものであり、すでにテスト的に達成できている 800 kHz 運転では十分に当初目標が実現されると考えられる。したがって、現時点での達成度は完全ではないが目標値の達成には十分な目処が立っていると判断される。

一方、NRSE 分光器に関しては現時点で完成に至っておらずその意味では、現時点では当初計画を達成できていない。しかしながら、このことは当該分光器群のような極めて挑戦的な装置に関しては十分に起こりうる結果であり、むしろ NRSE 分光器の実現に向けた様々な新しい要素を実現させていることを評価すべきである。回転楕円体集光ミラーの開発等によりフーリエ時間の目標値が当初計画の 50 ns から 100 ns へと長時間化されており、さらに longitudinal 型による 100 ns 以上のフーリエ時間の実現等の挑戦的な検討も進んでいる。すなわち、発展的な新たな挑戦による目標達成の遅延であると捉えることができる。

世界の類似装置との比較として第一に挙げられるのは、同じくパルス中性子源である米国 SNS に設置されたスピネコー装置であろう。また、世界的なフラッグシップ装置としては原子炉設置型ではあるが ILL の IN15 が挙げられる。これらの装置と現状の VIN ROSE を比較することはなかなか難しい。具体的には、VIN ROSE においては MIEZE 型のみが実用化されているという現実があるが、MIEZE 型はそもそも高エネルギー分解能（長フーリエ時間）を目指すものではなく、その意味でフーリエ時間等の比較では原理的に見劣りするからである。このようなフラッグシップ装置との比較は NRSE 分光器が完成し、VIN ROSE 分光器群としてフルスペックになった時点で行うのが良いと判断する。

一方で、すでに実用の域に達している MIEZE 型分光器をフーリエ時間という観点を離れて他のスピネコー装置と比較すると、高い波数空間分解能、高い測定効率（試料位置フラックス）、試料位置での磁場自由度等の極めて大きな利点がある。特に試料位置で磁場環境が比較的自由に使用できることは、世界の実現されているスピネコー装置のほぼ全てがよって立つ Mezei 型スピネコー法には無い特徴であり、磁性体等の固体物理学におけるスローダイナミクスの研究に非常に強力である。短いフーリエ時間はこの目的にはあまり不利益にならず、むしろ高い波数分解能がより有利さを増強する。この意味で、MIEZE 型分光器は世界の類似装置の中でも十分に特徴的な装置であると判断する。今後、様々なサイエンスケースに応用されることによって、同種の空間時間分解能を要する他の高分解能非弾性散乱分光器（背面反射型など）との比較も可能であろうが、現時点ではそれを論じる十分なデータが存在しない。

§ 4 利用者支援に関する事項

年間に平均的に約 7 件という共同利用課題申請数はそもそも非常に少なく、さらに採択課題数を見ると年間平均約 5 件となる。数字だけを見ると共同利用に十分に供されているとは言いがたい。他方、VIN ROSE の装置メンバーとしては、装置責任者 1 名および大学グループからの 2 名がアクテ

ィブに活動するメンバーであるが、この合計 3 名という数字は本分光器群の開発要素の質・量や実験解析の特殊性等を鑑みるに共同利用遂行に十分とは到底言えない。特に中性子スピンエコー法は装置開発・実験実施の難しさもさることながら、データ解析も手探りの部分が多く残っており、装置担当者がデータ解析まで参加し十分な議論を行うことでのみ成果に結びつくものとする。この意味で、J-PARC MLF における特色ある装置の一つとして成功するためには、利用者支援の拡充は喫緊の課題であると言える。

当分科会の議論では本件に関して即効性のある解決策は見いだせなかったが、次のような点については検討に値するものと思われる。

1. KEKの制度である S 型課題グループをより実質的なものとし、外部のパワーユーザーを育成・取り込むことにより実質的な装置グループを増強すること。
2. 中性子スピンエコーが有用と考えられる種々のコミュニティーへの宣伝を通してパワーユーザーを育成すること。ここでは、すでに成果が出始めている固体物理（磁性）分野が喫緊の候補となるであろう。
3. MIEZE型の稼働が始まり成果の出始めているこの時期が本装置の将来を決める最も重要な時期であるとの認識のもと、施設側の多方面からのサポート（ポストドクの優先的配分、ソフトウェアサポート、建設資金の優先配分等）を至急検討すること。（財政等の事情によりスタッフ増強等の恒久的措置が難しい場合においても、上述の非恒久的措置の実施・拡充を検討頂きたい。）

同時に、MIEZE型分光器の特色をより際立たせるためには試料環境の充実が強く望まれるところである。装置グループでの努力（冷凍機・電磁石導入等）も見られるが、MLF 全体としてのサポートが強く望まれる。

§ 5 得られた成果に関する事項

パルス中性子源に設置された初めてのMIEZE型スピンエコー分光器の実現という大きな困難を克服したことが最も大きな成果であり、それは ToF-MIEZE分光法の検証論文として結実している。また、NRSE装置に関しても、その必須技術の一つである回転楕円体中性子集光スーパーミラーの開発に目処が立つなど成果が得られている。両分光器に重要な開発要素として大面積検出器の実現があるが、これも MPPC 検出器の開発が進んでおり、大いに期待できる。これら以外にも多くの開発要素をほぼ全て独自に達成してきたことは大きな成果である。

一方で、開発要素が多いこともありいわゆる一般的な意味でのサイエンティフィックな成果は残念ながら決して多くない。しかしながら、最近出版された MnSi の常磁性-スキルミオン相転移領域における磁気揺動の変化の観測は、サイエンティフィックに興味深いだけでなく、磁性コミュニティーにスピンエコー法の可能性を気づかせる大きな可能性を秘めているという点で高く評価される。特に、スキルミオン相が有限磁場で形成する相であることから、MIEZE 型でのみ可能な実験であることは特筆すべきであろう。さらに、スキルミオン磁気揺動研究においては高い波数分解能の特徴を利用して磁気構造と運動の空間分布が観測されているが、この点はこの装置の特色としてコミュニティーに認識されると思われる。一般に、中性子反射率測定における鏡面反射では非弾性散乱成分はほとんどないというのが通説である。しかし、高い波数分解能で高エネルギー分解能実験を可能にする MIEZE 型は、中性子反射率測定領域での非弾性散乱測定の可能性を示唆するデータを提供している。これは新しい科学研究を予感させる萌芽的な成果であり、今後の進展が期待される。総じて、サイエンティフィックな成果は現時点では限られているが、適切なテーマ選択と人的・財政的資源投資により複数分野での質的に新しい成果が創出される可能性を感じさせるものであった。

§ 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

現在の人員で MIEZE型分光器の改良を進めながら NRSE 分光器の開発を完了させ、さらに共同利用に対し十分なユーザーサポートを行いながら、解析環境を充実することは不可能である。したがって、分科会は何らかの優先順位をつけて今後の装置運営・管理・高度化を行うことを強く推奨する。どのような優先順位をつけるかは装置グループの主体性が問われるところであるが、スピンエコーコミュニティーと密な議論をすることでコミュニティー全体として健全な発展を目指すことを

分科会としては希望する。また、サイエンティフィックな成果創出と装置開発のバランスを十分に考慮し、中性子コミュニティだけでなく広くサイエンスのコミュニティに認知される装置になることを切望する。また、VIN ROSE と JRR-3 に設置されている iNSE の相補利用の議論についても積極的に行っていただくことを期待する。JRR-3 再稼働後の iNSE の運転状況が明らかになった時点で、コミュニティ全体として議論を進める必要があるであろう。

注力すべき学術テーマに関しては、現時点で実用化されている MIEZE 型の特色を活かすことを第一に考えるべきであり、この観点から可能性として挙げられる分野としては固体物理（磁性）関係となるであろう。幸運なことに、現在スキルミオン等の比較的大きな（比較的遅い）スピン構造のダイナミクスが磁性コミュニティの興味の対象の一つとなっており、MIEZE型分光器の活躍は大いに期待されるところである。

長期的視点に立った場合、NRSE 分光器の実現によるフーリエ時間の拡大は対象とするサイエンス（ソフトマターや生物）を考えた場合極めて重要である。装置提案時期とは異なり、現時点では世界のスピネコー装置のフーリエ時間のスタンダードは 300 ns 以上へと伸びている。したがって、NRSE装置の今後の開発においてはこのようなフーリエ時間長時間化を念頭に置く必要がある。また、今後のNRSEの開発にあたっては、MIEZE分光器での成功例（MnSiの磁気揺動観測）が参考になる可能性がある。すなわち、具体的な測定対象テーマ（物質）を設定し、それらの測定の実現を目標と設定することで装置完成への推進力が得られる可能性がある。測定対象テーマ設定においては、ソフトマターコミュニティとの連携（加えて、他の高分解能非弾性散乱グループとの連携）が必要になるが、VIN ROSEグループにはこのような連携を主導することを期待する。

分科会は今後の共同利用の推進および装置開発にあたって装置のベンチマークの必要性を強く認識した。同種の試料を世界の複数の装置で測定・比較する等のベンチマークを行うことで VIN ROSE の特徴がより明らかになり、今後の共同利用・開発の方針策定に有用であると考え、ぜひとも実施されたい。（MnSi の測定結果は原子炉 MIEZE との比較を可能にしたという意味でも有意義であると理解している。）また、スピネコー装置だけでなく、例えば DNA 等の背面反射型装置との比較を行うことも重要であると判断する。比較の際はエネルギー分解能や強度等だけでなく試料環境自由度や波数分解能等多角的に行うのが良いと考える。

ヒアリングにおいては NRSE 分光器の今後の開発において海外のグループとの協力関係構築が謳われていたが、分科会としてはこの考えに大いに同意する。VIN ROSE グループはこれまで極めて多彩な独自開発を進めてきていることから、それらの成果に興味を持つグループとの間での実質的な協力関係が構築できると思われる。さらに、その協力関係を通じて日本独自開発装置である VIN ROSE の世界への発信となるとも期待される。

§ 7 施設への要望

中性子科学的な観点から見ると VIN ROSE は J-PARC MLF の看板装置と成長することが期待される。したがって施設に対しては今後の十分な運営・財政支援を要望する。特に、分科会としては、VIN ROSE が現在その最も重要な時期を迎えていると判断する。このタイミングで複数の大きな学術的成果を創出すること、さらにはユーザビリティを増強し共同利用者を失望させないこと、また、十分な投資のもと共同利用に必要な装置および試料環境を達成することは、コミュニティのクリティカルマスを形成するのに重要であると判断する。したがって、§ 4.5 に記した本装置へのサポートをぜひとも検討いただきたい。

VIN ROSE に限ったことではないが、J-PARC MLFではソフトウェアのバラエティが豊かである。もちろんこれは悪いことばかりではないが、複数のソフトウェアが別々のグループによってサポートされているということは人的資源の観点からは多少残念でもあるし、ユーザビリティにも問題が生じる。MLF マネジメント層においては、共用10年を経て成熟期を迎える J-PARC MLF として、個々の装置の特殊性を十分に考えた上でソフトウェア環境のあるべき姿を議論し、長期的視野に経ってある程度の収束を考える時期ではないだろうか。これは、試料環境等にも言えることであろう。

§ 8 総評

パルス中性子共鳴型スピネコー分光器群という前人未到の装置開発に挑戦し MIEZE 型分光器を

実用化したこと、特にほぼすべてを極めて少人数の装置グループで独自開発し、完成に漕ぎ着けたことに分科会は再度深い敬意を表す。一方で、NRSE 分光器の開発・共同利用・成果創出という意味でこれからが正念場である。コミュニティとの建設的な議論、施設の的確なサポート、および国際的な協力のもと、J-PARC を代表する特色のある分光器群として育ち、本質的に新しいサイエンスの創出が近い将来なされることを大いに期待する。

以上