

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2022S01

課題名：高分解能チョッパー分光器による物質のダイナミクスの研究

実験代表者：伊藤晋一、益田隆嗣

種別：新規

ビームタイム配分： $\beta=50.3\%$

評価結果：5.0 ※ 5.0～1.0 の範囲から、0.2点毎で評点を記載

コメント：

2021年12月10日午後にオンラインで開催された HRC 研究会での説明に基づき、以下の評価を行った。

HRC は、装置責任者のリーダーシップのもと、明確な戦略にもとづき第1期、第2期において着実なグレードアップと、装置特性を生かした研究推進、テーマ開拓に成功している。かつ東大物性研との連携では、それぞれの強みの相乗効果が現れており、単独ではなし得ない分野拡大を進めている。その結果として、多数の特徴ある学術的成果を上げている。これまでの論文数が7、発表件数31(昨年19)からも、Activity が上昇傾向にあることがよくわかる。

今年度の研究会での報告では、いくつか感銘を受ける発表があった。スキルミオン物質  $\text{GdRu}_2\text{Ge}_2$  磁場誘起相でのダイナミクス測定、 $\text{RbFeCl}_3$  でのマグノン崩壊では HRC の高分解能を生かし、美しいダイナミクスデータが得られており、かつ理論家との連携も成功しデータ全体を定量的に説明することに成功していた。この理論とも強固に連携した研究が複数進められており、HRC の強みが最大限生かされている。これらの成果は非常に印象的で、当該分野でのサイエンスの進展はもちろん、それらの美しいデータの発表によりさらに先鋭的なテーマの呼び込みにつながるが大いに期待できる。

また HRC が世界の分光器の中でも特徴を示しているのは高精度のブリルアン散乱であり、装置グループ長年にわたり戦略的に高度化を進めてきている。その結果、粉末や多結晶試料であっても分散関係測定が可能となり、研究の裾野を拡大した。その一つの結果として、磁気小角散乱、ないし Low-Q 領域での磁気回

(様式：各年評価)

折実験に成功している。もちろん **HRC** は高分解能分光器ではあるけれど、世界一の性能を実現した結果、本来の使い方とは異なる分野に波及していく好例と評価できる。高エネルギー中性子を必要とする吸収断面積の大きい試料でのミクロスコピックな研究の地平を開いたという意味で、高く評価したい。

学術成果だけでなく、運営体制も高く評価したい。物性研と **KEK** の連携はさらに進化しており、それぞれの強みを有効に結合させ相乗効果が起きている。特に物性研の得意とする高圧、高磁場の極端条件下測定では特筆すべき多くの成果が上がっている。また、今回の研究会では、物性研の川名氏より、計算環境、制御環境の高度化について説明があったが、**KEK-DAQ** チームとの密接な連携のもと、継続的維持についての懸念が一つ解消されたように思う。**OS** のサポート停止に対しても、先手を打って対応済みで不安材料の解消に成功している。こういったことは外から見えにくいけれど、装置を長期にわたって維持、管理し、同時に高度化を進める上で、物性研—**KEK** 連携は欠かせないものであり、それが有効に機能していると評価する。

また、サイエンスそのものではないが、**HRC** の取り組みで感銘を受けたのは、**T0** 保守作業での放射線安全管理の説明である。作業員への被曝量を定量的に予想・管理し、作業員の立ち位置まで考えた作業計画により、被曝を最小限に抑えていた。これは表に出にくいことではあるけれど、放射線施設では最も重要なことであり、それを定量的に実行していることを高く評価したい。

以上のことから、特段の減点ポイントは見出せず、満点の評価としたい。

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2019S03

課題名：パルス冷中性子を用いた中性子基礎物理研究

実験代表者：三島 賢二 (KEK 物質構造科学研究所 特別准教授)

種別：継続

ビームタイム配分： $\beta=28.9\%$

評価結果：5.0 ※ 5.0～1.0 の範囲から、0.2 点毎で評点を記載

コメント：

### ● 総評

本課題は、先進的な中性子光学系の開発研究を基盤に、BL05 において多彩な中性子基礎物理を展開する研究課題である。中性子寿命や短距離重力は J-PARC での高強度パルス冷中性子の特徴を活かした素粒子物理の研究テーマである。また技術的なテーマとしては、中性子干渉計や重力ポテンシャルを用いた測定、エマルジョン測定器の応用、超冷中性子の輸送などの技術開発から先端的な成果が創出されている。2021 年度は、計画通りにビームラインの運転と課題遂行が行われた。査読付き論文が 2 報 (加えて 1 報査読中)、会議録が 2 報、出版されており、成果発表も順調である。

また、本課題は 11 名の大学院生の研究テーマを供しており、大学院教育においても重要な役割を果たしている。このように BL05 の 3 本の特徴ある中性子ビームラインの整備拡充とともに、定常的に成果がでていくことは高く評価できる。

### ● 中性子寿命の精密測定

中性子の寿命は、宇宙初期のビッグバン元素合成を決める主要パラメータであることや素粒子標準理論の礎となるカビボ-小林-益川行列の  $V_{ud}$  項を直接測定することができることから、素粒子・原子核・宇宙の領域で重要な物理量である。

一方、実験ではビーム法と貯蔵法の異なる実験手法で測定結果が食い違っている。2021 年、ロスアラモス国立研究所で貯蔵法による新しい結果が発表されたことにより、矛盾は更に深刻になった (誤差の 4.6 倍)。これにより新しい測定方法を用いる本課題の重要性は更に高まった。2021 年度は、スピンドリフトチョッパー (SFC) のアップグレードにより中性子フラックスを約 3 得倍向上

(様式：各年評価)

することに成功した。目標の統計精度に達するまでに従来は 200 日のデータが必要であったところ、60 日に短縮できる見込みがたったことは大きな成果である。フラックスの増加に伴い、TPC 入口・出口にビームがヒットすることによる背景事象が増加することを確認した。今後はその抑制に取り組む計画であり、進展を期待したい。

- ソレノイド磁場を用いた中性子寿命測定

これまでの測定により明らかになった中性子-ガス散乱によるバックグラウンドを抑制するためソレノイド磁場中に測定装置 (TPC) を設置し、当該バックグラウンドを劇的に抑制する計画である。他用途で使われていた超伝導ソレノイド磁石を転用し、動作試験を終えた。TPC との統合試験、BL05 での動作試験も行い良好な結果を得た。今後は LiF の設置方法の最適化などを行う計画であり、2023 年度のデータ取得を目指して着実に準備が進んでいる。

- 中性子散乱による未知短距離力探索

近距離での重力の逆 2 乗則からの逸脱を調べることにより余剰次元などを始めとする未知の短距離力を探索できる。中性子を粒径 100nm 程度のナノ粒子に散乱させ、その断面積と形状因子から近距離重力相互作用を測定する。核散乱長の符号が異なるバナジウムとニッケルを核散乱長が相殺する割合で混合することにより核力の効果を抑制する。2021 年度はナノ粒子の生成試験を行い、粉末の形状測定を行った。今後は X 線小角散乱により運動量移行分布の測定を行う。BL05 では、2020 年の測定結果によると運動量移行が小さい領域の背景事象が環境 BG より 3 桁程度大きく、その要因特定と削減に取り組む。

また neutron whispering gallery という手法による未知短距離力の探索実験も計画されている。テスト実験にて凹面に加工されたシリコンミラーに中性子を沿わせたときの干渉縞が確認された。2022 年に物理実験を実施する予定である。

- 中性子干渉計

多層膜中性子ミラーを用いて中性子を 2 つの経路に分け、その片側に測定試料を挿入し位相差を測定することで、中性子と物質の間の相互作用を調べることができる。測定感度は中性子の波長と相互作用の距離に比例し、測定感度の向上が重要な課題となる。Beam Splitting Etalon (BES) に中性子を入射することで Jamin 型干渉計を構築し、BL05 にて干渉縞の測定や光路長の変化 (2 つの BES の間の角度) に応じて位相差が期待通り変化することを確認した上で、測定試料を挿入し核散乱長の測定を初めて実施した。その結果文献値とおおむね良い一致が見られた。今後は、多層膜スーパーミラーを用いることで測定精度や

(様式：各年評価)

安定性の向上を図り、拡散乱長の精密測定やカメレオン場などの未知相互作用の探索などの実験を計画している。

- 中性子  $^3\text{He}$  吸収断面積の測定

BL05 における中性子の寿命測定実験では、中性子の  $\beta$  崩壊だけでなく  $^3\text{He}$  の吸収を同時に測定することとしている。そのため  $^3\text{He}$  の吸収断面積の精密な値が必要であり、文献値の精度 0.13% を超える 0.1% の精度での測定が計画されている。吸収断面積は中性子の速度に反比例するため、中性子の速度の評価を行った。実際には、Si 結晶・YAG 結晶によりブラッグ散乱された中性子の TOF と波長の相関を調べ、TOF から計算される波長はブラッグ散乱角で決まる波長よりもわずかに長くなるが、モデレータ内の減速時間により説明される。現在、PHITS シミュレーションにより中性子エネルギーごとの TOF 分布の評価を進めている。今後、2022 年 2 月に  $^3\text{He}$  の吸収断面積の測定が実施される。

- 中性子物理のための要素技術開発

臭化銀結晶の粒径を微細化した原子核乾板の開発が行われている。 $^{10}\text{B}_4\text{C}$  をシリコンにスパッタリングすることで、高い位置分解能を有する中性子の検出器として利用することができる。BL05 において原理実証実験が行われ、 $0.6\ \mu\text{m}$  以下の分解能を有することが示され、重力場により量子化された超冷中性子の分を ILL で測定した。さらに BL05 で水晶振動子のイメージングの実験を行い、 $30\ \mu\text{m}$  ほどの径のワイヤーを確認することができた。今後も未知短距離の研究や中性子イメージングなどの応用が期待される。

また、TRIUMF にて中性子電気双極子モーメントを測定する TUCAN 実験の UCN 偏極解析に用いられる鉄薄膜の反射率の評価、UCN ガイドの透過率測定も BL05 で行われ、来年から開始される UCN 生成に向けた準備が続けられている。

- 中性子ビームを利用した教育活動

京都大学の学部生が、ニュートン力学に従って中性子が落下する様子を調べたいという興味から、KEK 加速器科学インターンシップの支援のもと BL05 において実験が行われた。京都大学から持ち込んだ MA-PMT を用いて、鉛直方向に絞った中性子ビームの到達位置を測定したところ、飛行時間との明確な相関を確認することができ、重力加速度を精度よく決定することができた。BL05 は学部生による学生実験を実施する環境としても適しており、今後も重力ポテンシャルによる干渉の観測が計画されている。

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2019S05

課題名：SuperHRPD を活用した機能性物質の構造科学研究

実験代表者：森 一広 (KEK 物質構造科学研究所 教授)

種別：継続

ビームタイム配分： $\beta=48.4\%$

評価結果：4.6 最優先で行うべき課題である。

コメント：

SuperHRPD は、世界最高の超高分解能と実用的な強度・S/N 比を誇る粉末中性子回折装置であり、その特性を活かして他の装置では観測できないような微細な変化から **Symmetry Breaking** (対称性の変化) を発見し新しい科学的知見につながる事ができる。これまでに、分解能向上・バックグラウンド低減・試料環境場の開発整備を重ね、幅広い研究に活用され多くの研究成果を挙げている。近年は、スタッフの減少と新型コロナという二重の困難な状況にも関わらず、装置の維持管理・改善を続け、先導的プロジェクト研究においても優れた成果を挙げている。

### 1. 装置の性能を最大限に引き出す先導的実験手法・解析手法の開拓及び機器開発

2008年のビーム受入以来、着実な性能改善の努力の結果、世界最高の超高分解能( $\Delta d/d=0.0365\%$ )と実用的な強度・SN 比が実現している。特に、加速器出力が2021年度は700kW 増強され、目標値1MW が視野に入ってきたことで、BS バンクの一部のみを使う超高分解能モードや複数のチョッパー条件を用いて d レンジを変えた測定などが可能となり、本装置の特長が一層活かされる条件が整いつつある。

一方で、ファーストビームから13年が経過して経年劣化への対策が必要となっている。特に、2022年度での調査・交換が計画されている真空散乱槽の真空窓の交換は耐用年数や安全性の観点からも適切である。また、2023年度以降に予定されている、長尺ビームのガイド管のクリーニングとアラインメント作業も必要である。

装置の更なる高度化には、当初計画の高分解能検出器への交換や、バックグラウンド低減のためのラディアルコリメータの設計・製作も求められ、2023年度

(様式：各年評価)

以降に計画されている。後述するように、現在のマンパワーでは、更なる高度化への注力は限られ、2022年度は真空槽窓の改修に専念するという判断も理解できる。

試料環境の整備は、SuperHRPDの優れた性能を活かして、多くの物質・材料に適用するには欠かせない。特に、環境の僅かな変化に伴うSymmetry Breakingを発見するには、温度・磁場・圧力などの環境を精密に制御する必要がある。これまでに、冷凍機やマグネットの整備により、0.9Kまでの低温、14Tまでの磁場の測定をユーザーに開放してきた。またバナジウム高温炉の改修や、新たなクライオファーンエスが運用開始され、相転移挙動の精密な実験も容易になった。未だ、精度的な課題もあるが、着実な改善を期待したい。また、試料環境機器の導入に伴うバックグラウンド増加に対応した改良や、将来的には偏極中性子回折への準備調査も必要である。

これまでのRietveld法を中心とした解析法を、更にZ-Code(Z-Rietveld, Z-MEM, Z-3Dなど)としてソフトウェア整備され、順次改良を進めつつ講習会等でユーザーに普及しており高く評価できる。また、グラフ理論による指数付けソフトウェアConographやZ-Rietveldにポーリー解析を導入され、研究会では一般ユーザーによる活用例も紹介された。今後は、更に異方性歪み解析や磁気構造解析におけるSDR法などを取り入れる事が計画されており期待できる。

## 2. 先導的プロジェクト研究

全国からの多くの研究者が参加して、磁性体、高温超伝導体、鉛フリー強誘電体、熱電材料、固体フッ化物電池材料、マルチフェロイック材料、有機・無機ハイブリッド、冷凍材料など、多くの先導的プロジェクトが計画・推進され、基礎研究のみならずエネルギーや環境応用につながる成果も得られている。とりわけ、SuperHRPDの超高分解能を活かして、他の手法では検出不可能な回折線の微妙な変化を見だし、詳細な解析技術を用いて、全く新しい知見を得た研究がなされている。一例として、本年の研究会では、X線では検出できなかったフェロイクス物質での新たな相転移に伴う構造変化が測定・報告された。またフッ化物電池につながる層状フッ化物材料のフッ素の移動に必要な中間サイトの発見と詳細な解析も報告された。その他、多くの優れた研究成果が得られており、今後もSuperHRPDの特性を活かした世界最先端の研究成果を期待したい。

## 3. その他

建設後15年、ほぼ同じ人的体制を維持してきたが、近年では大幅に研究者が入れ替わり、人員も削減されたため、装置メンテナンスや研究支援においてマン

(様式：各年評価)

パワー不足は否めない。本年度、新たに 1 名の教授を採用したことで大きく改善される事を期待するが、本来の装置性能を引き出して世界トップクラスの研究成果を発信するには、更なる人的支援や人材育成が必要である。中性子粉末回折装置については、iMATERIA, SPICA, SuperHRPD などの横断的連携をすすめ、ソフトウェアの共通基盤整備や人材育成などで互いに効率化が進められており、これは高く評価できる。しかし、1 で述べた装置の老朽化対策や性能向上、更には新型コロナ以降に一層高まったリモート実験等への要求に答えるためには、更なる人員の補充が必要と判断される。



(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2019S06

課題名：高強度中性子全散乱法による機能性材料の規則-不規則構造解析

実験代表者：池田一貴

種別：継続

ビームタイム配分： $\beta=44.7\%$

評価結果：4.4

コメント：

BL21 NOVA は、全散乱装置として世界トップクラスの性能を有しており、本 S 型課題申請はその能力を活用しさらに発展させていく研究を総合的に推進する目的で実施されている。物質・材料研究の基礎領域をカバーする NOVA の維持・推進を目指す本課題は确实かつ持続的に維持発展されるべきものと言える。本課題では、1MW が視野に入る J-PARC/MLF の大強度を活かす全散乱測定を目指して、3つのキーワード「微小試料」、「短時間測定」、「精密解析」を掲げている。これらは大強度施設の全散乱装置として妥当な方向性であり、申請グループ内のサブテーマも各々これらのキーワードに沿って実施されている。

NOVA の運用に関しては、2020B から 2021A 期のコロナ禍における実験実施の困難さにもかかわらず少ない人数で Fast Track を含めた外部利用のサポートを続けてきたことは評価すべき点である。2021B 期で申請数や採択数もコロナ以前の平常に戻りつつあり、KEK と大学による NOVA グループがまたよく協力して NOVA の運営を進めて欲しい。NOVA グループは以前から大学協力者と繋がりが深く KENS の精神を継承しているグループであり、大学側としても MLF との協力の仕方を試行する場となると考えられる。

NOVA グループ内の研究では、「液体・非晶質物質構造解析」、「水素系物質構造解析」、「磁気構造解析」が進められており、各サブグループともテーマ毎に解析と考察が着実に進展している。いずれの研究においても NOVA の 3つのキーワードに関連させた特徴を持っており、微小試料や短時間測定で得た実験データの解析に、数値計算や第一原理計算、RMC、MD による構造シミュレーション、磁場計算による磁気 PDF シミュレーション等を組み合わせて精密化を図っている。さらに放射光、X 線や IR 等のマルチビーム化による構造解析も行っており、様々な組み合わせの中での中性子利用の方策も進めている。

(様式：各年評価)

NOVA のハードウェアについては、MLF 共通機器の利用を可能にする計画も進められており、運用の人手や経費の面で負担軽減が期待される。一方で、海外とのラジアルコリメータの開発がコロナ禍でスローダウンせざるを得ない状況にあることは残念である。また、偏極実験への検討とテスト実験も進められているが、こちらはかなり難しい実験と解析になるので引き続き開発を進めることが重要である。

全体として、本課題では NOVA グループの大きな目標である「微小試料」、「短時間測定」、「精密解析」に沿って、各サブテーマでそれぞれの研究に応じた数値計算や第一原理計算、MD、RMC シミュレーションを使った解析が進められており、それぞれで一層進んだ結果が得られたことで、テーマ毎に着実に成果が出てきている。次の期待としては、それぞれの研究手法を NOVA グループ内で共有し相互に取り入れていくことであり、各分野で NOVA グループならではの見地に立った新しいブレークスルーに繋がるのではないだろうか。

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2019S07

課題名：中性子共鳴スピネコー分光器群 (VIN ROSE) によるスローダイナミクス研究

実験代表者：遠藤 仁

種別：継続

ビームタイム配分： $\beta=50.3\%$

評価結果：4.6

コメント：

J-PARC MLF の BL06 に設置された中性子共鳴スピネコー分光器群 (VIN ROSE) は、パルス中性子源における本格的な共鳴型スピネコー分光器として世界初の装置であり、Modulated intensity by zero effort (MIEZE) と Neutron resonance spin echo (NRSE) の二種類の分光器で構成される。いずれも物質のダイナミクスを観測する装置で、パルス中性子の特徴を活かした広い時空間領域の効率的な測定の実現に向け、本邦の独創性の高い技術を結集し、集光ミラー、検出器、共鳴スピネフリッパーなどの開発が進められている。

本 S1 型実験課題に関わる研究会は、2021年12月15日(水)に、Zoom によるオンラインで開催された。実験責任者であった小田達郎氏が2021年9月に東大物性研に異動したことに伴い、実験責任者を引き継いだ遠藤仁氏 (KEK) より、VIN ROSE 全体の現状について初めに説明がなされた。2020年12月に実施された中間評価において、今後の装置運営・管理・高度化について優先順位をつけて行うことを強く推奨されたことを受け、2021年度は MIEZE 型分光器の高度化および同分光器による研究が優先して実施された。中島多朗氏 (東大物性研) が行う磁気スキルミオン相からの小角散乱を観測するために、4K GM 冷凍機および 0.6T 電磁石の設置に伴い、カメラ長を 1.7 m に伸ばしたことで、low- $q$  分解能 ( $q \sim 0.005 \text{ \AA}^{-1}$ ) および最長フーリエ時間 ( $t \sim 10 \text{ ns}$ ) とともに大きく向上したことが報告された。また、MIEZE-反射率測定により、炭素薄膜で観測された MIEZE シグナルの  $q$  依存性は、同分光器による界面ダイナミクスの評価の可能性を示唆するものであり、他の薄膜試料を用いた検証が進行中であることが紹介された。今後、行われる装置開発として、MIEZE 分光器検出器増強・高度化、NRSE 分光器集光ミラー、MIEZE 分光器試料位置下流偏極解析

(様式：各年評価)

環境整備を行うことが示された。

次に、小田氏からは、MIEZE 分光器の高度化の一つとして確立した、広い検出面上でのスピネコーシグナルの位相補正法についての説明がなされた。この成果は、最近、Nucl. Instrum. Methods A に論文として報告された。また、JRR-3 に設置された Mezei 型中性子スピネコー分光器 iNSE の復旧スケジュールが示された。この iNSE と VIN ROSE の相補利用により、広い時空間領域のダイナミクスを観測可能な環境が国内に整うことは、さまざまな物質研究において意義深く、両分光器間での有機的な連携が進むことを期待したい。

奥平琢也氏 (名大理) は、 $^3\text{He}$  中性子スピフィルターの開発現状を紹介し、FOM を考慮したガス圧とガラスセルの最適化により、NMR で偏極率の時間変化をモニターする必要があるが、Ex-situ の SEOP システムでも 2~3 日の連続使用が十分に可能であることを示した。このコンパクトな Ex-situ システムは、MIEZE の試料位置下流に設置されるスピアナライザーとしても適し、スピフリップ散乱の識別への活用が期待される。また、細畠拓也氏 (理研) は、位相補正デバイスとして、従来技術では不可能であった大型回転楕円ミラー (長さ 900 mm、直径 300 mm、54 分割) の製作について、独自に開発したニッケルリンめっきの精密加工による回転楕円ミラー基板の量産状況を説明した。当初想定していなかったニッケルリンめっきの経時硬化や長期保管による表面汚染などの量産上の課題はすでに解決済みである。ただし、スーパーミラーを作製する京大複合研のイオンビームスパッタ装置の不調により、製作工程が遅れ気味の状況である。

また、丸山龍治氏 (JAEA) の磁気層間結合存在下での自発磁化発現メカニズムの探索として非鏡面反射による Fe/Ge 薄膜の磁気散乱の観測、小田氏が代理で報告した中島多朗氏 (東大物性研) の CoZnMn 合金の磁気スキルミオン相からのらせん磁気構造に由来する小角散乱の観測について報告がなされた。いずれも MIEZE の特長が存分に活かされた研究であり、論文化にはデータの蓄積が必要であるが、レベルの高い同分光器における代表的な成果となることが期待される。

以上より、VIN ROSE では、MIEZE 分光器による装置開発、研究を軸として、概ね予定通りに、S1 型実験課題が遂行されていることが認められた。MIEZE で実施されている研究についても、論文化にはさらにデータの蓄積を必要とするが、いずれもレベルの高い新しいサイエンスの開拓につながることを期待される。NRSE 分光器についても、まだ開発要素が多く残されてはいるが、早期の立ち上げを期待したい。これらのことより、本 S1 型実験課題は継続して実施すべきと評価できる。ビームタイムについても、開発要素が多いことから、MIEZE 分光器に 35 日、NRSE 分光器に 45 日で、またそれぞれの開発状況に

(様式：各年評価)

応じて前者は研究に、後者は開発・調整に優先的にチームタイムが使われることも妥当である。

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2019S09

課題名：偏極中性子散乱装置 POLANO による交差相関物理の解明

実験代表者：横尾哲也

種別：継続

ビームタイム配分： $\beta=79.9\%$

評価結果：4.6 ※5.0～1.0 の範囲から、0.2 点毎で評点を記載

コメント：

全体としては POLANO で偏極非弾性中性子散乱実験を昨年度末までに実現できるとの話があったが、まだ実現できていないのは残念である。しかし、順調に入射側の  $^3\text{He}$  中性子スピフィルターが設置されたことは特筆すべき点である。今後、出射側のスピフリップパーまたは  $^3\text{He}$  中性子スピフィルターが開発されると4つのモードでの測定が可能になる。この困難な課題についての対策が今後の最重要課題となろう。

基本的な測定条件は、最大中性子入射エネルギーは、100 meV、最大運動量遷移は、 $12 \text{ \AA}^{-1}$  と明確な数値で紹介された。これで最大エネルギー遷移は、70 meV 程度となる。競争相手である米国 SNS の偏極中性子非弾性散乱装置 HYSPEC の最大エネルギー遷移は 18 meV であり、その値は遥かに凌駕している。一方で、仏国 ILL の IN20 でも、現在最大エネルギー遷移 100meV を標榜している。

次に、昨年度はヘルムホルツコイルの発熱が問題になっていたが、適切に解決されていた。試料環境として、トッローディング式のクライオスタットで温調の早い安定もこの12月で実現できるとのことだった。計算環境にも配慮がなされており、偏極非弾性中性子散乱実現後の、4つのモードでの測定結果で互いに演算することも検討されており、実現が楽しみである。また  $^3\text{He}$  検出器がまだ十分に設置されていないが、今年度で1つのユニットが補充されるとのことで、KEK から予算的な配慮もされている点は良かった。1つのオプションである相関チョッパーは、非弾性散乱ではあまり強度の増大を期待できないことから、それほど急ぐ必要のない機器であろう。

すでに非偏極非弾性中性子散乱実験で共同利用を開始しているが、順調に申請課題が増えてきている。非偏極実験でも、ユーザーの要望に沿って実験ができていることは、そのまま偏極実験が開始されたときにもユーザーの受け入れを

(様式：各年評価)

スムーズに開始できることを示している。コロナウィルスのパンデミックで、海外の申請を受け入れることができていないのは残念だが、2021B 期からは代行実験も行うということで、益々の活発な POLANO の活躍が期待される。

海外との協定として、11月9日に開催された ANSTO-J-PARC MoU workshop で、偏極技術をテーマとして議論され、その注目度の高さが伺われた。ANSTO 側も協力に積極的な印象を持った。今後、質の高い国際共同研究・技術開発がされることを期待したい。このように試料環境、計算環境など総合的に開発を進めており、偏極非弾性中性子散乱測定が一般課題として漏れなく始められるように注力されている点は高く評価できる。

入射側の中性子スピフィルターでは、NMR を用いて、常時  $^3\text{He}$  の偏極度をリモートでモニターできるとのことだった。現在、 $\phi 60\text{mm}$ ,  $L 92\text{mm}$  のスピフィルターも、今後、 $\phi 70\text{mm}$ ,  $L 89\text{mm}$  へ口径を広げる予定とのことだった。 $^3\text{He}$  の圧力も  $26\text{atm.cm}$  と十分高く、高い偏極度を期待できる。特に、レーザーで常時、偏極度を維持することができ、通常必要となる偏極度による強度補正が必要ないとのことで、測定精度を上げる重要な開発ができたことに感心した。赤外線レーザーのアライメントも終了したようで、今後の測定が楽しみである。心配な点は、試料散乱後の中性子スピフィルターである。バナナ型 GE180 ガラスセルが、まだ出来ていない。これから数年は、東北大多元研での加工に依存できるが、その後は未定という問題もある。ちなみにこれはすでに ANSTO でも問題になっているとのことだった。一方で、ILL の最新の PASTIS-3 では、Si と接着剤を用いたバナナ型中性子スピフィルターセルで、 $^3\text{He}$  スピン(2.3 bar)の緩和時間 109 h を達成した[1]。このようなガラスに固執しない新しいスピフィルターセルの開発も重要であろう。

研究項目でも、理研の優れたグループとの共同研究ができており、 $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$  パイロクロア化合物で、スピカイラル項の温度変化が丁寧に測定され、結果も出てきているようで、今後の偏極実験につながるものと期待される。

先導的プロジェクト研究は、昨年コメントを参考に、スピ流に関する角運動量の流れの検出が新たに入れられた。理論的には、新しいカイラル項をもったスピ励起が提案されていることから、世の中の流れに遅れないように、新しい高エネルギー偏極中性子の世界を POLANO で先導していただきたい。その意味で、POLANO の偏極非弾性中性子散乱実験が実現した時点で、理論家を含めたサイエンスの議論に重点をおいた研究会を開催することをぜひ勧めたい。

参考文献

[1] David Jullien et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1010 (2021) 165558.

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2019S10

課題名：機能性材料の機能性と反応の構造科学研究

実験代表者：齊藤 高志

種別：継続

ビームタイム配分： $\beta=85.4\%$

評価結果：4.6 ※ 5.0～1.0 の範囲から、0.2 点毎で評点を記載

コメント：

本課題の評価は 2021 年 12 月 20 日に開催された S 型課題研究会 (2019S10) での発表およびこれに先立って提出された研究計画書に基づいて行なった。

SPICA は蓄電池研究の推進を目的とした世界初のビームラインとして NEDO 事業によって設計・建設された装置であり、現在は NEDO 事業の後継事業である RISING3 プロジェクト「電気自動車用革新型蓄電池開発事業」(令和 3 年度～令和 7 年度)に参加し、革新電池材料および革新電池の開発に向けて構造科学的研究を積極的に進めている。2020 年度以降の装置グループ人員不足により、装置開発、整備には当初予定からの若干の遅れはみられるものの、これまでヒドリドイオン導電性材料や全固体電池フッ化物伝導体などを次世代の固体二次電池材料に繋がる優れた構造研究に成果を上げており、課題内容には SDGs への大きな寄与が期待される。このような観点から評価を 4.6 とした。

以下に 1) 装置関係の技術開発、2) 装置性能を生かした先導研究、3) 来年度以降の研究計画について評価内容を説明する。

1) 試料周辺環境の整備については、cryo-furnace での最高到達温度を 700K まで向上させたことにより、これまで困難であった電池材料物質の構造相転移の観測が可能となっている。一方、2018 年度に製作されたバナジウム炉についてはサンプルロード製作など実用化に向けて準備中であり、1000°Cまでの高温測定の実現に期待したい。測定データの質向上に向けた整備としては、ラジアルコリメータの導入によるバックグラウンド低減を試みており、コリメータの材質・空間分解能改善や視野制限型回折測定技術の高度化に向けて今後のさらなる検討が望まれる。測定技術の面では、蓄電池充放電 *operando* 測定の高度



(様式：各年評価)

化を進めている他、小角散乱バンクの整備により全散乱測定へと広げた観測領域を PDF 解析、RMC モデリングによりマルチスケール構造解析することを計画している。これについては専門知識を有するスタッフの確保が望まれる。また、大面積の検出器を利用した中性子ブラッグエッジイメージング技術の開発に取り組んでおり、電池反応過程の新たな視点での観測手法として独自性の高い展開が期待される。

2) ポスト・リチウムイオン電池として固体フッ化物シャトル電池の構造研究に取り組んできている。全散乱測定と RMC モデリングの組み合わせによるフッ化物イオン伝導経路の可視化や、フッ化物以外のアニオンを含む複合アニオン化合物の構造解明などフッ化物シャトル電池の材料開発に大きく貢献する成果が得られており、将来性の高い研究課題である。また、アニオンとしてヒドリド (H-) を電荷担体とする導電体ヒドリドイオン導電性材料の物質合成とその結晶構造解析の研究も革新型蓄電池探索として高く評価される研究テーマである。ヒドリドは高速拡散が期待されることから激しい開発競争が行われている中、先の S 型課題研究会ではアニオン配列とその占有率がイオン導電率を左右する研究結果や、アニオン秩序化により高伝導相である高温相が低温安定化することを明らかにした研究内容が報告されており、この物質に対する SPICA の高い有効性が示されている。その他、アルジロダイト型硫化物電解質の新物質探索、ナノ構造を制御したリチウム・ナトリウムインサージョン材料の創成、N ドープした Li 含有黒鉛の結晶構造と Li 含有量に伴う構造変化など、リチウムイオン電池の高性能化を目指す研究も継続して進められており、利用開発グループの精力的な研究活動のもとで今後、さらなる展開が期待される。

### 3) 来年度以降の研究計画

上記のイオン導電性材料に対する先導研究を進める他、イオン導電性と強誘電性を併せ持つシリケート化合物  $A^+B^{5+}Si_2O_7$  (A:  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , B:  $Nb^{5+}$ ,  $V^{5+}$  etc.) の多機能性について、その微視的メカニズムを局所構造及び精密構造解析の両面から解明する研究が提案されている。この系も含めて、新規機能性物質における部分置換や欠陥などの局所構造に対する解析手法として MEM の詳細な定量解析法や PDF および RMC 解析の確立を目指しており、構造解析ソフトウェア (Z-Code) の自動解析機能の整備と合わせ、近い将来にはソフト面においても充実した研究環境が実現すると期待される。

これまでの装置グループによるハード・ソフト面での充実化への努力がユーザーの定着や成果の蓄積として現れており、グループメンバーの実績が高く評

(様式：各年評価)

価される。ここ数年での装置グループメンバー交代や少人数化が危惧される  
ところではあるが、来年以降、新たなグループメンバーのもとでより幅広い材料研  
究分野が開拓されていくことを望んでいる。

(様式：各年評価)

## 評価報告書

2021年12月22日 中性子共同利用実験審査委員会

課題番号：2018S12

課題名：パルス偏極熱外中性子の利用

実験代表者：清水裕彦

種別：継続

評価結果：4.8（最優先で行うべき課題である）

コメント：

J-PARC MLF という世界最高強度でかつ短パルスの熱外偏極中性子ビームを用いた素粒子物理実験を主として、広く偏極中性子ビームを利用するサイエンス展開を加速する独創的な計画である。

中性子が原子核に共鳴吸収されて複合核状態になるとき、特定の原子核においてパリティ(P)対称性の破れが格段に増幅する現象が存在する。この現象に着目し、未だ未発見の時間反転対称性の破れ(CP対称性破れ)を測定し、素粒子標準模型を超える新物理探索に繋げる挑戦的な計画である。これは、J-PARC MLFで供給される高強度熱外中性子ビーム、中性子ビーム及びターゲットとなる原子核の非常に高度な偏極技術と精密測定によって初めて実現できる研究である。広く国際的な共同研究グループを形成し、先端的な実験手法の開拓及び機器開発を行い、それを通じた論文等の成果発信と人材育成が非常に活発に行われており、最優先で進めるべき課題であると評価する。

我々の宇宙のように物質優勢であるためには、小林・益川理論によるCP対称性の破れより、もっと大きくCP対称性が破れている必要があり、この大きな対称性の破れを説明するために、超対称性理論をはじめとする様々な素粒子論のモデルが提唱されている。このCP対称性破れを理解するために、中性子、ミュオン、電子等の永久電気双極子能率(EDM)測定が盛んに試みられているが、EDMとは異なり偏極熱外中性子ビームと偏極核ターゲットとの複合核状態を用いての本課題は、それらとは相補的であり、かつ独創性も非常に高いと考える。

実験代表者の強いリーダーシップによって、専用のビームラインがない現状でもBL04等の既存のビームラインを用いて、戦略的にターゲットとなる原子

(様式：各年評価)

核の探索を行い、精密な実験手法・解析方法の開拓及び機器開発を行うことで、それらの結果を論文等にまとめ、人材育成にも繋げている。

実際、 $^3\text{He}$  偏極技術の高度化は、本課題のような素粒子物理実験だけではなく、広く中性子ビームを利用した物質・生命科学研究にも展開され、そちらでも成果を上げている。また国際共同研究グループ NOPTREX を組織し、大阪大学核物理研究センター(RCNP)とも連携して、本課題の CP 対称性の破れ探索を軸に、より広い視点で偏極核ターゲットの開発を進めている。

特に  $^{139}\text{La}$  偏極ターゲットや  $^3\text{He}$  偏極技術に関しては、既にビームライン建設に十分な知見を得ており、検出器を含めてビームラインデザイン準備も進めており、理想的な場合で必要な測定時間も見積もれている。ただ、ビームライン建設着手に大きな力を注ぐよりも、現在の戦略的な偏極核ターゲットの探索や熱外偏極中性子制御・検出技術の向上を継続し、J-PARC MLF への一般課題申請等と合わせて本計画の実現可能性を上げ、引き続きパルス偏極熱外中性子の利用を広げることを含めて成果を出していくことの方が、より適切に思われる。