

大強度陽子加速器施設J-PARCを利用したサービス

長谷美 宏幸* 松澤 邦裕* 宮崎 利行*

Services for Use of J-PARC

Hiroyuki Hasemi*, Kunihiro Matsuzawa* and Toshiyuki Miyazaki*

大強度陽子加速器施設 J-PARC は大型の陽子加速器と実験施設群の総称であり、さまざまな種類の量子ビームを用いて、幅広い分野の実験研究が行われている。実験施設群の一つ、物質・生命科学実験施設 (MLF) では、中性子およびミュオンを用いて、物質科学や生命科学に関する実験研究が行われている。弊社では、この J-PARC MLF 中性子ビームラインの利用を支援するため、中性子実験コンサルティング・サービスを事業化している。本記事では、一般利用課題の申請が可能な中性子ビームラインについて、その用途やスペック、研究事例などを紹介する。また、一般的な公募への申請から実験の実施、成果の報告までの流れを説明する。最後に、中性子実験コンサルティング・サービスを紹介する。

Key word: J-PARC MLF、中性子回折、中性子非弾性散乱、中性子小角散乱・反射率測定、中性子イメージング、ひずみ・応力測定、中性子実験コンサルティング

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、茨城県那珂郡東海村にある国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構の敷地内に建設された。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構、JAEA) の共同プロジェクトで提案され、2008 年より利用が開始されている。陽子ビームを衝突させることで生成する 2 次粒子 (中性子、ミュオン、ニュートリノなど) を利用して、素粒子、原子核、物性、生命科学、原子力など幅広い分野における最先端の研究が行われている。特に、J-PARC において中性子を利用した実験を行うことのできる物質・生命科学実験施設 MLF (Material and Life Science Experimental Facility) に注目する。

2. J-PARC の概要

*アドバンスソフト株式会社 第 3 事業部
3rd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

2.1. J-PARC の加速器

J-PARC の加速器は、リニアック、RCS と呼ばれるシンクロトロン、MR と呼ばれるシンクロトロンの計 3 台で構成される。リニアックは全長 300 m の直線型加速器であり、陽子のエネルギーを 400 MeV まで加速して円型の RCS シンクロトロンへ供給する。RCS シンクロトロンの周長は 300 m であり、陽子は加速されながら周回することで 3 GeV に到達する。この陽子のうち 90% は MLF で利用し、残りは次の MR シンクロトロンへ供給される。MLF で受け入れる陽子ビームの出力は設計上 1 MW であり、2019 年度にこの出力を達成することを目標としている (2017 年度後期は 300~600 kW で運転予定)。MR シンクロトロンは周長 1600 m とさらに大型であり、陽子は最終的に 50 GeV に加速される。MR シンクロトロンの陽子ビームは、ハドロン実験施設およびニュートリノ実験施設で利用される。

2.2. J-PARC の実験施設

J-PARC 内で現在運用中の実験施設は、物質・生命科学実験施設 (MLF)、ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設の 3 施設である。また、計

画段階の実験施設として核変換実験施設がある。

MLF では、RCS シンクロトロンからの 3 GeV 陽子ビームを 25Hz (40 ミリ秒周期) で水銀ターゲットに照射し、2 次粒子として中性子およびミュオンを得る。生成してすぐの中性子は非常に高エネルギー (高速) のため、液体水素で満たされた減速材を通過させることで、回折散乱実験に適したエネルギー帯域に落とされ、幅広いエネルギースペクトルで構成される白色中性子となる。中性子ビームの 1 パルス当たりの強度は 1MW において 1.8×10^{13} n/sr/pulse が予定されており、現存する同様のアメリカやイギリスの大規模パルス中性子源と比較しても世界一の強度である。この中性子を 23 本のビームラインに分配しており、各ビームライン上には、さまざまな用途向けに特徴的な解析装置が設置されている。MLF における各中性子ビームラインおよび装置についての詳細は後述する。

ハドロン実験施設では、50 GeV 陽子ビームを 2 次粒子生成ターゲットに照射し、2 次粒子として K 中間子や π 中間子などを生成する。これらの 2 次粒子および陽子ビームは複数の実験エリアに輸送され、原子核反応や素粒子崩壊などに関するさまざまな実験が行われている。

ニュートリノ実験施設は、T2K ニュートリノ振動実験のための施設である。50 GeV 陽子ビームの 2 次粒子である π 中間子の崩壊により生成されたニュートリノは 295 km 離れたスーパーカミオカンデ (岐阜県飛騨市神岡町) に打ち込まれる。T2K 実験では、ニュートリノが施設間の地中を飛行する際の性質の変化「ニュートリノ振動」を観測することを目的としている。

3. MLF の中性子ビームライン・実験装置

MLF は 23 本の中性子ビームラインが敷設されており、現在そのうちの 20 本で実験が稼働している。図 1 は、MLF 内の第 2 実験ホールを撮影したものである。第 2 実験ホールには BL13 から BL23 までの 11 本が設置されている。相向かいには、第 1 実験ホールが存在し、BL01 から BL12 までの 12 本が設置されている。それぞれのビームラ

インは、設置・運営が JAEA、または KEK、大学、茨城県となっている。さらに JAEA 設置分のうち 7 本のビームラインについては JAEA と国内外の研究者が共同で利用できる共用ビームラインとなっている。J-PARC MLF で実験を行うためには実験課題申請を行い採択される必要がある。実験課題申請には複数の区分が設けられており、そのうちの新利用者支援課題以外の課題については共用ビームライン以外の実験装置についても利用可能である。次に JAEA 共用ビームライン、JAEA ビームライン、KEK ビームライン、茨城県ビームラインについて説明する。

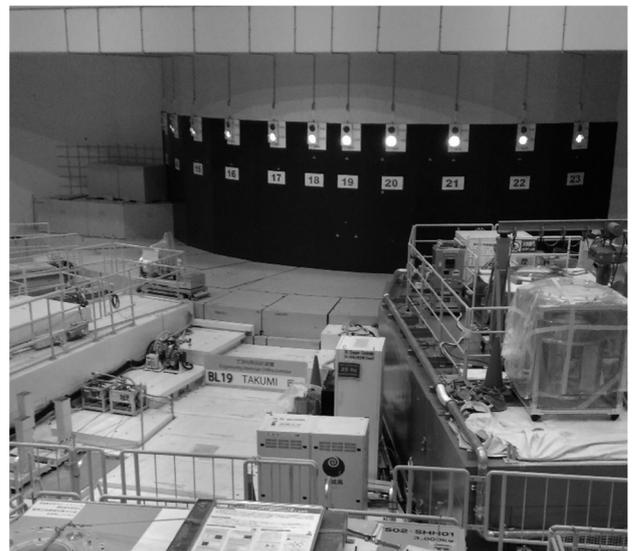


図 1 MLF 第 2 実験ホール内部の写真

3.1. JAEA 共用ビームライン

JAEA 共用ビームラインは BL01、02、11、15、17、18、22 である。このうち、BL01、02 は中性子非弾性散乱実験、BL11、18 は中性子回折実験、BL15 は中性子小角散乱実験、BL17 は中性子反射率測定実験、BL22 は中性子イメージング実験に用いられる。

3.1.1. 中性子非弾性散乱実験

中性子と物質との散乱は、散乱前後で中性子エネルギーの変化のない弾性散乱と、散乱の前後でエネルギーの受け渡しが発生し、中性子エネルギーの変化がある非弾性散乱に分けられる。非弾性散乱のうち、わずかなエネルギーのやり取りしか

しない散乱を特に準弾性散乱と呼ぶ。結晶格子の格子間隔程度の波長（0.1 nm オーダー）を有する中性子は、室温近傍のエネルギー（数 meV～数 10 meV）の熱運動する結晶中の原子・分子との衝突の際に中性子の運動量が大きく変化するため、原子・分子の運動状態の観測に適している。また、X線と比べて水素やリチウムに対する感度が高いため、たばく質の水素原子やリチウム電池内部の拡散現象の観測に適している。

BL01（装置名：四季）では、入射中性子のエネルギー範囲が 5～300 meV と他の非弾性散乱装置と比較して高いエネルギーの中性子を高効率で利用できることから、高温超伝導体、磁性体、誘電体、非晶質などにおける新奇なスピン・格子ダイナミクスによる微弱なシグナルを観測することが可能である。そのため、鉄系超伝導体や銅酸化物高温超伝導体などの磁気励起測定などが行われている[1][2]。

BL02（装置名：DNA）では、生体高分子やソフトマターなどの機能性材料中の原子、分子、スピンのナノ秒オーダーの運動を測定するために、数マイクロ eV という非常に高精度のエネルギー分解能での測定が可能である。産業界との連携の例として、自動車用ゴムタイヤの性能改善がある。中性子準弾性散乱を用いてタイヤゴムの架橋剤となるシリカ周辺のポリマーの構造と運動性能、そしてタイヤゴムとしての物性との関係について評価するのに用いられ、従来品よりも耐摩耗性を 51%向上させた製品の開発に貢献している[3]。

3.1.2. 中性子回折実験

中性子回折実験は、結晶構造を特定するために利用される。原理は、基本的には X 線回折法と同様であるが、中性子回折では水素など特定の原子に強く反応することや、電氣的に中性のため透過能力が高くバルク材にも適用できる、といった特徴がある。

BL11（装置名：PLANET）では、それらの特徴を活かし、高圧下における氷などの結晶や液体、ガラスの構造解析が行われている。高温/低温高圧状態を作り出すためにさまざまな圧力発生装置

が導入されており、最大 20 GPa、温度範囲 77–2000 K の広い温度・圧力範囲での実験が可能である。最近では高温高圧力下の鉄中に高濃度で溶けた水素の位置や量を中性子回折実験により決定することに成功しており、この成果により各種鉄鋼材料の高品質化や高強度化に向けた研究への貢献が期待されている [4]。

BL18（装置名：千手）は、特殊試料環境下で単結晶回折実験を行う装置であり、極低温や磁場などの複合環境下における結晶中の水素原子位置や磁気構造を高い精度で決定することができる。通常では数 mm 角という巨大な単結晶試料が必要であるのに対し、BL18 では 1 mm³ 以下のサイズの単結晶で構造解析が可能となっている。

3.1.3. 中性子小角散乱実験

中性子小角散乱では、ブラッグ反射の条件を満たさないような非常に小さな角度（ $2\theta < 3^\circ$ 程度）での散乱にも測定範囲を広げることで、さらに大きなスケール（サブナノからマイクロにわたるスケール）の平均構造を観測することが可能となる。

BL15（装置名：大観）では、中性子小角散乱および広角散乱を利用して金属材料や磁性材料、ソフトマター、たばく質などのサブナノからマイクロスケールの平均構造を観測することを目的としている。

3.1.4. 中性子反射率測定実験

中性子反射率測定では、中性子が物質の表面で反射される際の干渉の様子を観察することで、物質表面から深さ方向に対し数ナノ～数 100 ナノメートルのスケールで膜の厚さや界面の粗さ、密度の分布などを測定することが可能である。

BL17（装置名：写楽）では、機能性薄膜材料や生体膜材料などを対象とし、それらの材料の機能発現機構を界面の構造から解明することを目的としている。中性子は磁気モーメントを有しているため、いわば小さな磁石のような性質を持っている。BL17 では、この中性子の磁石の向き（スピン）を揃えた偏極中性子ビームを利用することが可能である。この偏極中性子を用いることで物

質界面の磁氣的性質に関する情報を得ることができる。

3.1.5. 中性子イメージング実験

中性子イメージングは、中性子を用いて対象物の透視画像を撮影する手法である。X線におけるラジオグラフィ撮影と同じ原理であり、中性子と物質との相互作用の確率によって撮影画像のコントラストが決定され、内部の形状を非破壊で知ることができる（これを中性子ラジオグラフィと呼ぶ）。

BL22（装置名：螺鈿）では、この一般的な中性子ラジオグラフィ撮影に加え、中性子エネルギーごとに透視画像を撮影することで中性子透視画像のエネルギー依存性を測定することができる。

（これをパルス中性子イメージングと呼ぶ。）中性子透視画像のエネルギー依存性を解析することで、対象物の形状のみならず、結晶組織情報や核種、温度、磁場の空間的な分布を取得することが可能である。BL22では、MLFで最大サイズ（ $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ）のビームが用意されており、広範囲のイメージング画像を撮影できるだけでなく、大中小さまざまな試料ステージを利用して中性子ビームの入射角度を変えながら撮影することができる。パルス中性子イメージングの一種にブラッグエッジイメージング[5]という手法がある。これは中性子透過スペクトル中に現れる結晶構造に起因したブラッグエッジと呼ばれるパターンを解析することで、材料中の結晶構造・結晶相・集合組織・結晶子サイズ・ひずみなどの情報を取得する手法であり、BL22では、数 mm 厚の鉄鋼材料に対してこれらの結晶組織情報の分布を、 10 cm 角のサイズ、分解能約 1 mm で取得することが可能である。

3.2. JAEA ビームライン

JAEA 共用ビームライン以外の JAEA ビームラインは BL04、10、14、19 である。このうち、BL04 は核データ測定および即発ガンマ線分析、BL10 は中性子源特性試験・デバイス開発、BL14 は中性子非弾性散乱実験、BL19 は中性子回折実験に

用いられる。

BL19（装置名：匠）は、共用ビームラインの2つの回折装置とは異なり、材料内部のひずみや応力を測定することを目的とした中性子回折実験装置である。おおよそ 0.5 nm までの格子面間隔の測定が可能であり、分解能 ($\Delta d/d$) は $0.2 \sim 0.4\%$ である。また、装置内部には高温/低温環境で材料の引張試験を行うことのできるシステムが設置されており、材料を引っ張ったり加熱したりしながら回折ピークの測定を行うことで変形や熱処理による微小组織・構造変化を評価することが可能である。

3.3. KEK ビームライン

KEK ビームラインは BL05、06、08、09、12、16、21 である。このうち、BL05 は基礎物理実験、BL06、12 は中性子非弾性散乱実験、BL08、09、21 は中性子回折実験、BL16 は中性子反射率測定に用いられる。

BL09（装置名：SPICA）は機能性材料や蓄電池などの実用デバイス内の構造を調べる中性子回折実験装置である。特色として、動作中の電池内部の構造変化をリアルタイムで測定するシステムを構築した。このシステムを用いて、リチウムイオン電池内部の正極・負極の構造が充放電によってどのように変化するのか、リアルタイムで観測した事例では、充放電時に不均一かつ非平衡に進行する電池反応を世界で初めて観察することに成功している[6]。

3.4. 茨城県ビームライン

茨城県ビームラインは BL03、20 であり、両ビームラインともに中性子回折実験用の装置である。BL03（装置名：iBIX）は、有機物質・タンパク質などの単結晶構造を精密に解析するための中性子回折装置であり、BL20（装置名：iMATERIA）は、粉末試料を中心として材料の結晶構造を広い d 範囲で解析できる高能率汎用中性子回折装置である。茨城県ビームラインの独自の特色として、産業界を対象とした課題募集が年間を通じて行われている点や、BL20 では試料を郵送し装置グ

ループが測定を代行する、メールインサービス課題が設けられている点が挙げられる。

4. MLF で実験を行うための手続き

MLF の中性子ビームラインを利用した実験を行いたいと考えた場合、一般的な課題申請の手続きと、採択後の実験の流れをまとめる。

4.1. 課題申請・審査

MLF を利用するためには課題公募期間中に申請を行い、審査を経て採択される必要がある。応募資格は国内外の大学、民間企業および公的研究機関などに所属する研究者に与えられている。中性子実験用装置の場合、課題の申請区分は複数あるが、ここでは一般課題（短期）と新利用者支援課題について説明する。これらの課題については MLF で得られた成果を公表することを条件に無償でビームを利用できる「成果公開型」と1日約300万円のビーム利用料を支払うことで成果を占有できる「成果非公開型」の2種類の利用種別が設けられている。一般課題では利用者は MLF で稼働しているすべてのビームラインを利用することができる。一方、新利用者支援課題は中性子利用の新規参入者を支援する目的の制度であり、実験課題の申請書、実験終了報告書の作成の相談・指導、実験とデータ解析のサポートを総合科学研究機構（CROSS）が行ってくれるという特徴がある。ただし、MLF のビームラインのうち CROSS が運営を担っている共用ビームライン（7本）のみ利用可能である。

課題の申請と審査の流れについて説明する。公募は年2回、それぞれ5月ごろと11月ごろとなっており、採択課題の有効期限は原則半年である。また、応募書類等の記述に際して言語は英語を原則とするが、新利用者支援課題応募者と一般課題において応募者（実験責任者）が産業界（民間企業）に所属している場合、産業利用課題という扱いになり日本語での申請も受け付けている。利用の相談窓口は、一般課題については J-PARC ユーザーオフィス、新利用支援課題については CROSS である。そこから利用するビームラインの装置担

当者が紹介され、課題申請（研究背景、目的、実験と解析の方法、希望するビームタイム）について打ち合わせを行う。課題の申請は J-PARC 課題申請システムから行い、申請内容は専門分野ごとに学術的な価値などを審査する課題審査と安全性および技術的可能性の確認が行われる（なお、成果非公開型課題については安全性および技術的可能性の確認のみである）。課題の採否はメールで通知され、Approved（実験実施が認められビームタイムが配分された）、Reserved（実験実施は認められたが、ビームタイムが配分されず、キャンセル待ちの状態）、Not Approved（実験実施が認められなかった）のいずれかの審査結果が送付される。

4.2. 課題採択から実験の実施

課題が採択された後は、利用者支援システムで各種手続きを行う。手続きの種類としては MLF で実験するための手続き、実験準備室などの付帯設備を使用するための手続きがあり、これらは実験責任者および共同実験者がそれぞれ行う必要がある。まずは装置責任者および MLF 側と実験の日程について調整を行う。実験の日程が確定したら、実験2週間前までに実験責任者および共同実験者は J-PARC のユーザー登録と用務登録、放射線管理区域で作業するための認定登録依頼書兼管理区域立入許可願の提出、J-PARC 入構申込書の提出を行う必要がある。なお、認定登録依頼書兼管理区域立入許可願には、放射線管理手帳に記載された中央登録番号の記入が必須であり、あらかじめ各ユーザーが所属する事業所において、放射線業務従事者としての適切な管理と運用が行われている必要がある。さらに実験責任者は誓約書や利用実験従事者届の提出、試料の持込申請や実験機器の持込・使用届の提出も行う必要がある。これらの手続きについて認定登録依頼書兼管理区域立入許可願以外はすべて利用者支援システムを通じてオンラインで行うことができる。また、希望者は宿泊施設の宿泊予約をこの期間内に行うことができる。その他、J-PARC 入構前に必要な手続きとしては、安全講習の予約、希望者は

実験準備室の手配などがある。

J-PARC へ来所した際にはまずユーザーズオフィスにおいて安全講習の受講、入構のための ID カードや OSL バッジなど必要な貸出品の受け取りを行う。それらがすべて完了したのち原研構内への入構、MLF および放射線管理区域への立ち入り、実験への参加が可能となる。

4.3. 実験終了後

実験の終了後には貸出品の返却および報告書の提出が必要となる。実験終了報告書は利用者支援システムを通じて速やかに行う必要がある。加えて成果公開型課題の場合、実験終了報告書の承認翌日から 60 日以内に MLF 実験報告書を提出する必要がある。実験報告書では実験で用いた試料や実験方法、実験により得られたデータ・結果について記述する。また、論文や講演などによる成果発表の予定についても併せて記述する。その後、実際に成果発表を行う際には MLF の実験装置を利用した旨を明記する義務がある。

5. 中性子実験コンサルティング・サービス

アドバンスソフトでは、2010 年より J-PARC MLF からの機器制御や、データ取得、データ解析に関するソフトウェア開発の受注を開始し、2017 年 11 月時点までに 39 件を受託している。開発したソフトウェアの利用対象となるビームラインは、共用ビームラインを中心に 10 本以上と多岐にわたる。これらの経験を活かし、J-PARC MLF 中性子ビームラインにおけるトータルサポートを目的としたコンサルティング・サービス事業を行っている。実験の計画立案、実施、中性子実験装置の性能等についての技術的なご相談や、課題申請、利用手続き等の事務的なご相談にも対応する。また、中性子実験に限らず、実験・研究全般のコンサルティング・実務サポートも行っている。

6. まとめ

J-PARC MLF の各種ビームラインについて、その用途やスペック、研究事例などを紹介した。また、一般的な公募への申請から実験の実施、成果

の報告までの流れをまとめた。最後に、J-PARC MLF 中性子ビームラインを対象とした中性子実験コンサルティング・サービス事業を紹介した。

参考文献

- [1] http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/monthly_reports/2017_05.html
- [2] http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/monthly_reports/2017_01.html
- [3] http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/monthly_report/2016_10.html
- [4] A. Machida, et al., Nature Communications, **5** (2014) 5063.
- [5] H. Sato, et al., Material Transactions, **52** (2011) 1294.
- [6] S. Tominato, et al., Scientific Reports, **6** (2016) 28843.

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)