

CONTENTS

P1 金属材料研究会の中性子合同実験について P2 中性子イメージングを用いた玉軸受内グリースの流動性の観察 JRR-3 での軸受回転中のその場観察
P4 「宇宙線ミュオンで古墳を透視」プロジェクト P8 中性子回折技術の紹介 全固体フッ化物電池用固体電解質の中性子構造解析
P12 協議会の活動報告 P13 中性子源の現状 P14 施設からのお知らせ P14 今後の行事予定

金属材料研究会の中性子合同実験について

古河電気工業株式会社
佐々木 宏和

現在、中性子産業利用推進協議会の金属材料研究会主査を拝命しております。前主査である日本製鉄の谷山明さんによる研究会の方向性を引き継ぎ、金属メーカーが協力して行う中性子解析の合同実験を進めています。研究会の主査になりまして、合同実験の意味について考えてみると、一民間企業による中性子実験の難しさが根底にあります。中性子実験は、頻繁に実施できるものではなく、年単位での計画となるため、各社で実施すると、測定条件やデータ解析技術のノウハウ蓄積に長期間を要します。どんな実験でも同じで、一度の実験で所望の結果が得られることは少なく、何度も失敗して、その失敗を次の教訓に生かすことにより、最適な実験計画を立てることが出来ます。これが実験室系のX線解析であれば、そのサイクルを1日で複数回行えるため、数日も実験していれば、最適な実験条件に到達することができます。さて、中性子に関していえば、年に1回、多くて3回、といったところでしょうか。これを一企業で行っていると、最適な実験条件に到達するには2年、3年と経過してしまいます。これだけ実験しても、目的とする結果を得ることができなければ、中性子ビームの活用に失望してしまうことにもなりかねません。そこで、金属材料研究会の合同実験では、複数の企業で様々な金属材料を測定して課題を共有化し、測定条件やデータ解析のノウハウ構築を行います。また、長年中性子を使って金属材料を解析してきた先生方にも研究会に加わっていただき、これらのノウハウを伝授頂いています。

最初の合同実験は、金属メーカー4社が、様々な試料を持ち寄り2024年にiMATERIAで中性子小角散乱の測定を行いました。その実験には、豊橋技術科学大学の大場洋次郎先生に立ち会っていただき、その場で多くの示唆を与えていただきました。また、金属特有のデータ解析技術を伝授いただくために、北海道大学の沼正人先生には研究会にて小角散乱の解析方法を講義いただきました。次回は、TAIKANで測定すべく、準備を進めているところです。詳細については、研究会等で紹介しますが、様々な試料を測定することにより、いくつかの実験課題が見えてきました。これらの課題は、今後既存ビームラインの改良や新設ビームラインの設計に反映できるかもしれません。

さて、現在、金属学会における産学共創研究会として、量子ビーム解析技術研究会を立ち上げ中です。この研究会では、放射光も含めた量子ビームを対象としており、ここで様々な議論が交わされることでしょうか。このような活動を通じて、国内の量子ビーム解析技術の活性化を図ります。

最後に、個人的なことを少し話しますと、大学生の時にハドロン物理学の研究室に所属していました。J-PARCに来て、“ハドロン…”と聞きますと、若いころを思い出して、少し懐かしい気持ちになるものです。

中性子イメージングを用いた玉軸受内グリースの流動性の観察 JRR-3での軸受回転中のその場観察

ENEOS 株式会社

酒井 一泉、緒方 壘、内海 雄、橋本 益美

はじめに

近年、地球温暖化や異常気象による影響を肌身で感じられている方も多いと推察するが、上記の影響はいよいよ無視できない領域に突入しつつあるように思う。このため、省エネルギーをはじめとしたカーボンニュートラルに貢献する技術がますます重要度を増すものと考えられる。例えば、様々な機械部品で使用される転がり軸受に対しては、低トルク化や長寿命化といった環境に対する性能向上が必要とされている。転がり軸受の潤滑にはグリースが使用されることが多く、グリース起因の抵抗を低減することができれば、省エネルギーに貢献できる可能性が高い。グリースは増ちょう剤と呼ばれる固体を潤滑油中に分散させた半固体状のまたは固体の潤滑剤であり、増ちょう剤などの成分により特性が大きく変化する。

軸受内で発生する抵抗としては、軸受の構成部品である転動体(ボールやローラー)や保持器が軸受の回転時にグリースを掻き分ける際に発生する攪拌抵抗、転動体が軌道面を通過する際に発生する転がり粘性抵抗、転動体と保持器の摩擦抵抗に大別できるとされる¹。この中でも攪拌抵抗の占める割合が大きいとされ、これはグリースの流動性に大きく影響される。軸受内の攪拌状態としてチャーニングやチャネリングが知られている²。チャーニングは軸受の回転に伴い転動体によってグリースが常に攪拌される状態であり、チャネリングは軸受の軌道面にグリースの「わだち」ができ、グリースの攪拌が少なくなった状態である。自動車の雪道運転に例えれば、チャーニングが新雪状態でチャネリングが圧雪状態に近いとすれば、後者がより低い抵抗となるのが想像できると思われる。

このようなグリースの流動状態を理解し製品開発への指針とするためには可視化することが望ましい。筆者らはこれまでに大強度陽子加速器施設 (J-PARC) での中性子イメージングを用い、軸受回転試験後の軸受内部のグリースの分布状態を可視化し、軸受トルク(抵抗)との相関を見出した^{3,4}。しかしながら、グリースの分布状態の変化が軸受回転中のどの段階で起こるのかは明らかになっておらず、高速で回転する軸受に対し、その場観察を実施するには 25Hz 繰り返しでパ

ルス中性子が発生する J-PARC では困難であった。そこで、核分裂反応による定常中性子源を有する研究用原子炉 (JRR-3)⁵ を活用することで、軸受を回転させながら、軸受内部のグリースの分布状態の変化を観察し、その挙動について考察したので、以下に報告する。

実験方法

本研究では、グリースの増ちょう剤タイプの中でも使用実績が多いリチウム (Li) 系を対象に、複合 Li 石けん (グリース A) と単一 Li 石けん (グリース B) を比較した。軸受を用いたトルク試験ではグリース A の方が低トルクであることが確認されている。この結果から、グリース A ではチャーニング、グリース B ではチャーニング状態で潤滑されているものと推察される。

中性子による軸受回転試験後のコンピュータ断層撮影 (CT) 観察には既報³ の通り、J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) におけるエネルギー分析型中性子イメージング装置 (BL22, RADEN) を用いた。6204 軸受に試験グリースを封入し、2000min⁻¹ で 60 分回転させた後に、回転ステージ上に固定し 25Hz のパルス中性子ビームを照射、試料を透過した中性子を厚さ 0.10 mm の ⁶LiF/ZnS シンチレータスクリーンで可視光に変換した後、2048 × 2048 画素の冷却 CCD カメラで保存した。試料を 0° から 360° まで 0.6° 刻みで回転させて得た 600 枚の透過画像からフィルタ補正逆投影法を用いて 3 次元スライス画像を再構成した。

軸受回転試験中のその場観察には JRR-3 における

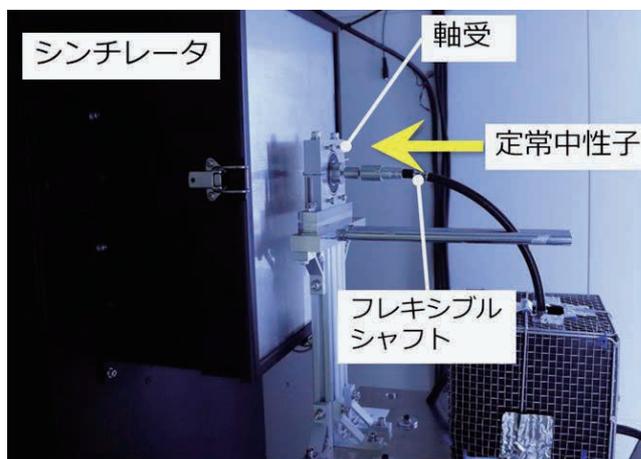


図 1. 軸受回転中の中性子イメージング観察方法

熱中性子ラジオグラフィー装置 (TNRF) を用いた。図 1 に示すようにグリースを封入した 6204 軸受の内輪にフレキシブルシャフトを接続し、所定の速度で回転させた状態で定常中性子を照射、試料を透過した中性子を厚さ 0.20 mm の $^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ シンチレータスクリーンで可視光に変換した後、1024 × 1024 画素の高速カメラで保存した。なお、グリースは軸受の保持器部分に塗布するが、回転の様子を把握しやすくするため、8 か所のうち、1 か所のみ塗布しないこととした。

回転試験後の CT 観察結果

まず、既報^{3,4}に示す通り、軸受に各グリースを封入し、2000 min^{-1} で 60 分間回転させた後の CT 観察を実施した結果を紹介する。軸受のアキシャル方向、ラジアル方向の中性子トモグラフィー像を図 2 に示す。黒色部は中性子の吸収が小さい金属部分、白色部は中性子吸収が大きいグリースまたは油分の存在を示す。アキシャル方向については、グリース A は主に保持器部に存在する一方で、グリース B では保持器部のグリースが少なかった。ラジアル方向については、グリース A の転動体への付着はごく僅かであり、転動体と内外輪との間隙が確認され、チャネリング状態に対応するものと考えられる。一方、グリース B では転動体に多くのグリースの付着が確認され、チャネリング状態と対応するものと考えられる。

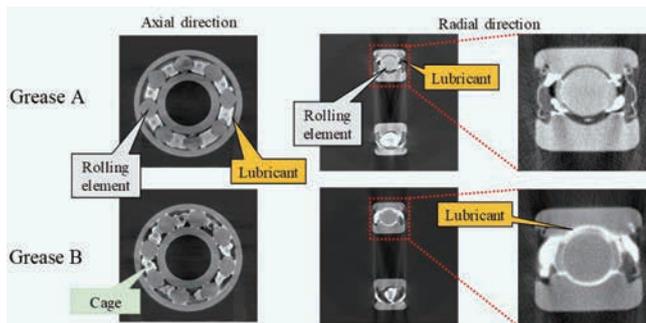


図 2. 軸受回転試験後の中性子 CT 観察³

回転中のその場観察

前述の通りグリース B が軸受全体に流動している状態は確認できたが、どの時点で流動し始めているかは不明である。その把握のため、各回転数における回転中の軸受に対しラジオグラフィー観察を実施した。なお、回転中観察では先に示した測定条件の制約により、CT 観察は不可能となる。それぞれの回転数で回転開始から 5 分経過した時 (2000 min^{-1} のみ 5, 30 分経過後) の中性子ラジオグラフィー像を図 3 に示す。

前項と異なり白色部は中性子の吸収が小さい金属部分を、黒色部は中性子の吸収が大きいグリースまたは油分を示すことに注意されたい。保持器部分の 1 か所のみグリースを充填せず空隙 (白色部) としたため、グリースの流動性や軸受の回転状態を把握しやすくなっており、紙面の都合上、回転中の様子を伝えることができないのが無念ではあるが、各回転数で回転中の様子が比較的鮮明に観察できることが確認された。

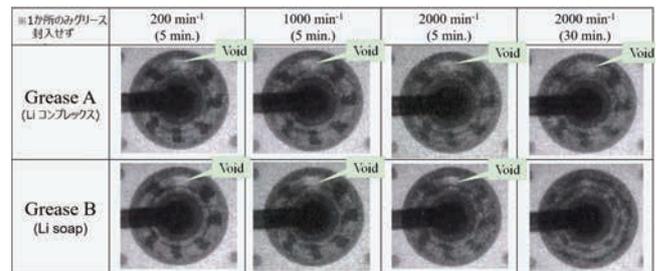


図 3. 軸受回転中の中性子ラジオグラフィー観察

グリース A およびグリース B とともに 200 min^{-1} 、1000 min^{-1} では空隙が残っており、グリースも保持器部に存在していることが確認された。一方 2000 min^{-1} の場合はグリース A では低回転時と同様の状態を維持しているのに対し、グリース B ではグリースが軸受内部全体に拡散、空隙が徐々に消失するとともにグリースと金属部のコントラストの差が小さくなる様子が確認され、回転開始から 30 分後には空隙の判別が困難となった。定常中性子源を用いることで、少なくとも 2000 min^{-1} での観察に対応できる撮像間隔・露光時間が確保でき、比較的鮮明な軸受回転中の動画像を得られることが確認された。

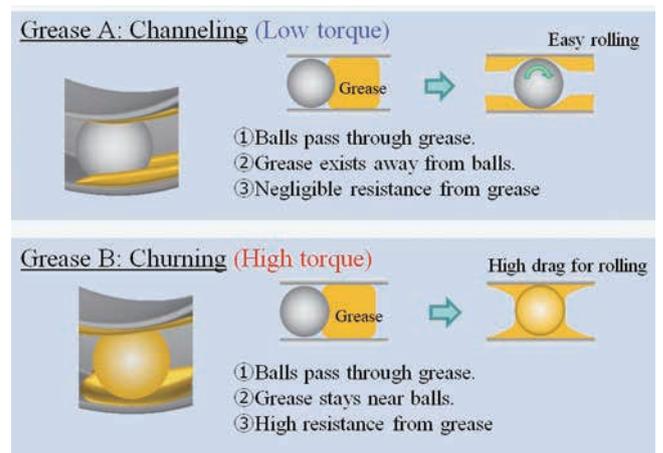


図 4. 各グリースの潤滑機構のイメージ³

潤滑メカニズム

今回得られた結果をもとに想定されるチャネリングおよびチャーニングに関する各グリースの軸受内部の潤滑メカニズムを図4に示す。グリースAの場合、軸受の回転に伴い転動体がグリースを押しよけるが、転動体に付着するグリースは限定的であり、大部分は保持器部分にとどまる。これにより、グリース起因の攪拌抵抗は小さいものとなり、軸受回転時におけるトルクは低減されるチャネリング状態と想定される。一方、グリースBの場合は、軸受回転時の転動体へのグリースの付着が多いため、回転時の攪拌抵抗の増加につながり、トルクが大きいチャーニング状態であると想定される。これにより、トルクが高いだけでなく、グリースが継続して転動体にせん断されることにより、グリースの軟化、軸受からの漏れにつながることも予想される。

おわりに

中性子イメージングにより、軸受内のグリースの流動状態の可視化が可能となり、静止状態においては三次元観察が、回転状態においては定常中性子源によるその場観察が有効であることが確認された。これら

の結果はグリースの製品設計において重要な知見となり、省エネルギーをはじめとしたカーボンニュートラルに貢献できると考えられる。

謝辞

本研究は課題番号 2019B0229 の下で J-PARC MLF の中性子イメージング装置 RADEN、および、JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィ装置 TNRF を用いて実施した。中性子イメージング測定を実施するにあたり、多大なる協力をいただいた CROSS の松本吉弘博士、JAEA の篠原武尚博士、甲斐哲也博士、栗田圭輔博士に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 新田ほか, *トライボロジスト*, **61**, 10, 699 (2016).
- [2] P. M. Lugt, *John Wiley & Sons*, 149 (2013).
- [3] K. Sakai, et al., *Tribol. Online*, **16**, 2, 146 (2021).
- [4] 木村ほか, *日本中性子科学会誌「波紋」*, **31**, 4, 162 (2021)
- [5] K. Kurita, et al., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2605**, 012005 (2023).

「宇宙線ミュオンで古墳を透視」プロジェクト

高エネルギー加速器研究機構 / J-PARC

藤井 芳昭

J-PARC では、東海村、茨城大学、東京都立大学と共同で、東海村にある古墳を宇宙線ミュオンを用いて透視するプロジェクトを進めている。本稿ではこのプロジェクトの概要や特色について紹介したい。

2017年に、宇宙線ミュオンを使ってピラミッドの内部を透視し、それまで知られていなかった小部屋を発見した、というニュースが流れたことを記憶されている方も多いと思う。このピラミッド探査は高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、名古屋大学など国内外 13 機関による共同プロジェクトで、その結果は *Nature* 1) 等にも発表されて大きな話題となった。この方法を用いて古墳の内部を透視しようというのが本プロジェクトである。

宇宙線とは

本プロジェクトの説明に移る前に「ミュオン」と「宇

宙線」について簡単に説明しておく。

ミュオンは素粒子の 1 種で、電子の仲間である。電子と同じ大きさの電荷をもつが電子の 200 倍ほどの重さを持ち、物質の貫通力が強いという特徴がある。「透視」というと X 線写真を思い浮かべるが、X 線が数 mm 鉄板で止まるのに対して、ミュオンは、そのエネルギーにもよるが、数 m から数百 m の鉄板を貫通する。この強い貫通力を生かして、ミュオンはさまざまな大規模建造物の透視に用いられつつある。

空からは「宇宙線」と呼ばれる粒子が降り注いでいる。これは宇宙に散在する星々や超新星爆発などで作られた粒子、主に陽子をはるばる地球までやって来たものである。ところが地球には厚い大気があり、この陽子は大気に邪魔されて地表までは届かない。大気中の窒素や酸素の原子核と衝突した陽子は核反応を起こし、図1のようにさまざまな二次粒子を作り出す。この時ミュオンも作られるが、ミュオンは貫通力が強いいため大気を突き抜けて地表まで到達する。これが宇宙線ミュオンである。

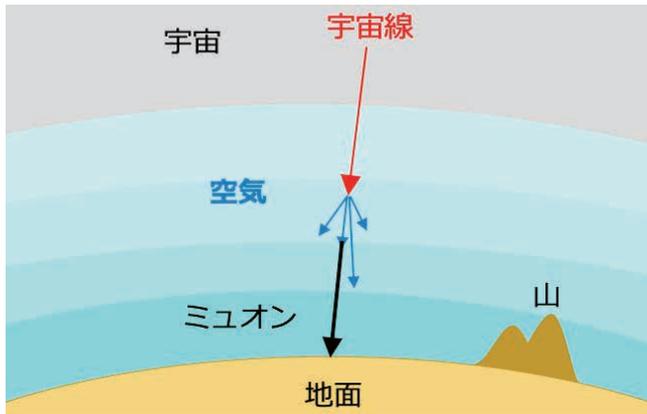


図1. 宇宙線ミュオンの出来方

本プロジェクトはこの宇宙線ミュオンを用い、その強い貫通力を活かして、数mから数十mの古墳の土盛を透視し、内部の構造、埋葬施設があるか、あるとしたらどこにあるかを古墳を掘り返すことなく探るものである。

プロジェクトの目的

古墳は貴重な文化遺産であるから、保存し、後世まで引き継いで行かなければならない。と同時に、その詳細を調査し、過去の地政学的な情報や権力構造、人々の暮らしぶりを解き明かしたいが、そのためには古墳の発掘調査を行ない、埋葬品を調べることが不可欠である。発掘そのものが古墳を傷めてしまう作業であるが、あらかじめ埋葬施設の場所が特定できていれば、ピンポイントでその発掘を行なうことができ、調査に伴う古墳への影響を最小限に抑えることができる。このような観点から、最近急速にその応用範囲を広げつつある「ミュオン透視」の技術を用いて古墳の透視調査を行ない、発掘調査の影響を最小限に抑えるという動きが始まっている。西日本においては、今城塚古墳²⁾や箸墓古墳³⁾などにおいて既にミュオン透視による古墳調査が進められているが、東日本においてはこの種の調査はまだ行われておらず、本プロジェクトが東日本初である。

東海村には約80ヶ所の古墳がある。このうち2番目に大きく、村指定文化財である「舟塚古墳群2号墳」を本プロジェクトの調査対象に選んだ。この古墳は私有地にあるが、所有者のご好意により、測定器の設置、運用の許可を頂いた。舟塚2号墳は長さ約75m、高さ約7mの前方後円墳で、図2に示すように周囲は開けており、測定器の設置、運用が比較的しやすい環境にある。過去に行われた古墳周囲の発掘調査では数々の貴重な出土品が得られており、出土埴輪から、造営年代は6世紀前葉～中葉ではないかと考えられてい

る。村指定文化財である本古墳への影響を最小限に抑えつつ、内部調査を行ない、古墳の詳細情報を得るためには、ミュオン透視による埋葬施設の位置の特定は極めて重要なステップであると考えている。



図2. 舟塚2号墳の空撮写真

本プロジェクトのユニークな点は、東海村およびその近隣市町村の児童生徒を主体に据え、専門家のアシストを得ながら、古墳の現地調査やミュオン測定器の製作などの中心的活動を児童生徒に担ってもらおうという点にある。もちろんいきなり児童生徒がミュオン測定器を作ることは無理なので、2023年度の前半には基礎講座を開催し、ミニ測定器製作の体験学習や古墳についての学習講座、東海村の古墳の現地見学会やJ-PARCの研究施設の見学会などを行なった。図3の写真は児童生徒が真崎古墳群の見学学習に参加し、交流館の学芸員の方々から古墳の種類や成り立ちについての説明を受けている時のものである。年度後半からは、いよいよミュオン測定器の実機を作る活動が始まっている。



図3. 参加児童生徒の古墳見学学習の風景

児童生徒を支える専門家は、東海村にあるJ-PARC

で最先端のミュオン研究や装置開発を進めている研究者、茨城大学でミュオンの研究や古墳の研究を進めている教員の方々、ピラミッドのミュオン透視や福島原子炉のミュオン透視を行なって来ている都立大学の教員、そして東海村の古墳調査を行なっている東海村「歴史と未来の交流館」の学芸員の方々といった、錚々たるメンバーである。

測定器概要・測定方法

さて、ミュオンによる古墳の透視の手法について説明したい。

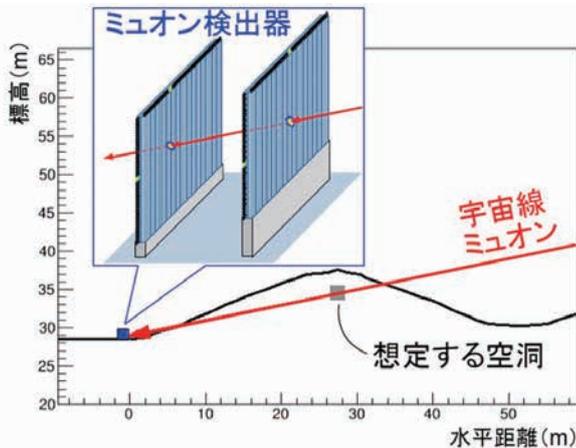


図4. 古墳を透過したミュオンの捕まえ方

宇宙線ミュオンはあらゆる方向から降ってくるが、古墳の透視に用いるのはほぼ水平方向に飛んでくるミュオンである。このミュオンが図4のように古墳を貫通し、古墳の横に置かれたミュオン測定器に入射する。この入射したミュオンの数と方向を測定する。古墳を貫通するミュオンの数は古墳の土壌の厚みによって変わり、土壌が厚ければ少なく、土壌が薄ければ多くなる。もし古墳の中に埋葬施設の空洞があればその分土壌は薄くなり、透過するミュオンの数は多くなる。

図4に示すように2面の測定器を用意し、各々の測定器でのミュオンの通過位置を測定することによりミュオンが飛来した方向を決める。その方向から飛来するミュオンの数の分布図をつくることにより、図5のような古墳の断層撮影図を作ることができる。この測定器を2セット用意し、古墳の周囲2ヶ所に設置して2方向からの測定を行ない、その情報を組み合わせることで、CT撮影のように埋葬施設の空洞の三次元的な位置を特定することができる。舟塚2号墳内部に2m x 2m x 2mの大きさの埋葬施設の空洞を想定した計算によると、50日の測定で測定されるミュオンの数は、空洞がある視線で $10,060 \pm 100$ 、空洞が無

い視線で $9,760 \pm 100$ となり、 3σ (99.7%)の有意度で空洞の有無を識別することができるという見込みりが得られた。わずかな差ではあるが検証可能な数であり、決め手は設計性能を実現できる測定器を作って稼働させる、という点にある。

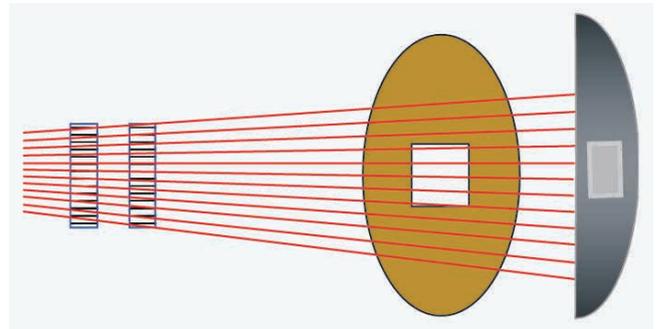


図5. 断層写真への投影

ミュオン測定器は、J-PARCで行われているニュートリノ振動実験T2Kで用いられていたPOD測定器(図6 a,b参照)の一部を譲り受け、部品を再利用して製作を進めている。T2K実験はJ-PARCで作ったニュートリノビームを295km離れたスーパーカミオカンデ測定器に打ち込み、295km飛行する間に生じる性質の変化を測定することにより、未だ謎の多いニュートリノの性質を詳しく調べるという実験である。J-PARC内に設置された前置検出器で出来立てのニュートリノの性質を、スーパーカミオカンデ測定器で295km飛行後の性質を測り、その両者の比較をおこなっている。前置検出器ではその高精度化を図り新型測定器への置き換えを進めており、POD測定器の

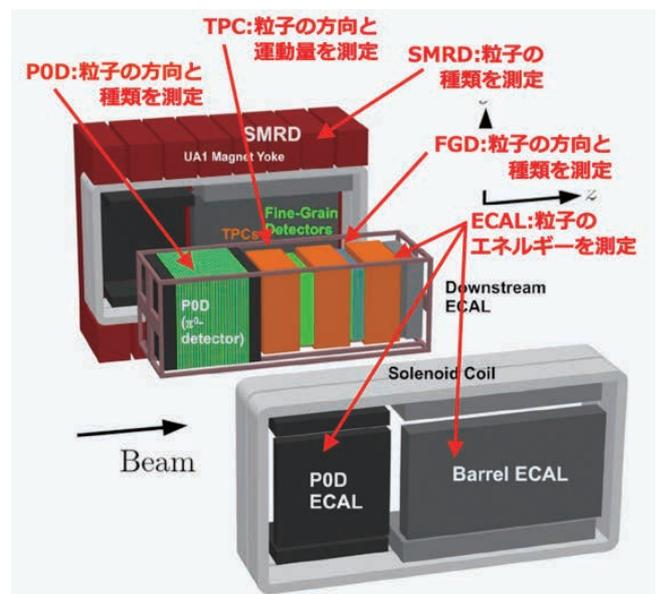


図6a. T2K前置検出器(置き換え前)とPOD測定器の役割

一部はより高性能の SuperFGD 測定器に置き換えられた。この置き換えにより取り出された POD 測定器を本プロジェクトのために譲り受け、一旦解体し、コンパクトな測定器に再構成している。

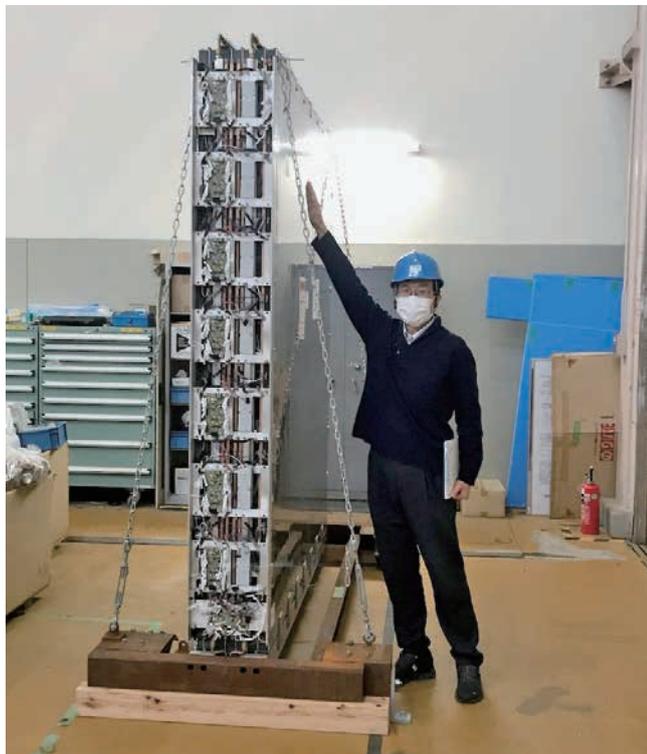


図6b. POD 測定器の外観

測定器の製作は、東海村および近隣市町村の小中高児童生徒が行なっている。児童生徒でもきちんと製作して安定して稼働させることができ、かつ危険因子を含まない測定器を用いなければならないという点が、本プロジェクトのもう一つのキーポイントである。POD 測定器はプラスチックシンチレータと光ファイバー、半導体光検出機の組み合わせで、ガスや高電圧を必要とせず、児童生徒でも扱いやすいものである。その測定原理は極めてシンプルなもの、図7は年度前半の体験学習で製作した簡易測定器の模式図であるが、実際のミュオン測定器の動作原理も同じである。プラスチックシンチレータをミュオンが通過すると、微弱な光が発生する。この光を光ファイバーで集めて、ファイバー端に取り付けられた光センサーに導く。光

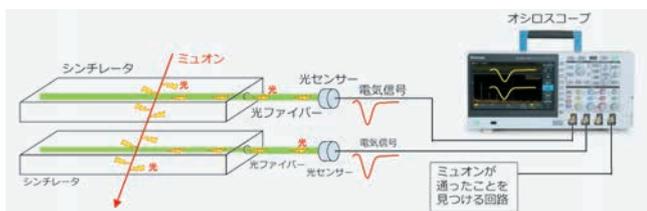


図7. 測定原理

センサーはこの光を電気信号に変え、それを読み出し回路で読み出す。体験学習ではオシロスコープで電気信号を読み出したが、実機では専用の読み出し回路を用いる。また、図8は参加者が運営スタッフの指導のもと簡易測定器を組み立てている様子である。



図8. 簡易測定器体験学習風景

このシンチレータの棒を多数並べて測定器面を構成し、どの棒から信号が生じたかを調べる。棒を縦方向に並べた面、横方向に並べた面の2面を組み合わせることにより、ミュオンの通過位置を決めることができる。この2面ペアを2組用意し、通過点2点を決め、その間を直線で結ぶことによりミュオンの飛跡を決めることができる。図9は参加児童生徒向けに作った、測定原理を示した模式図である。

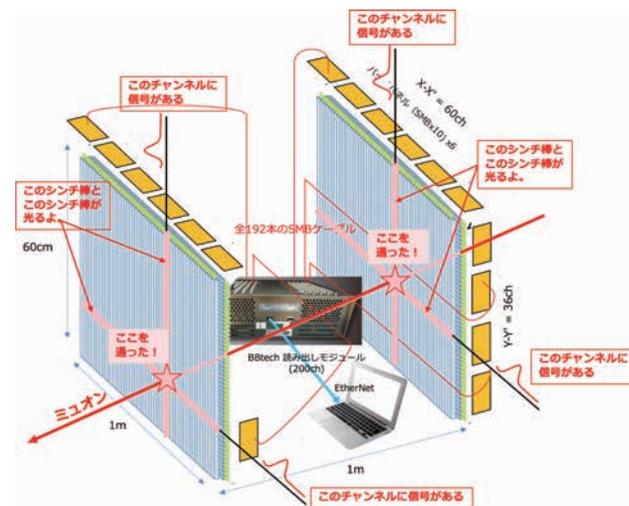


図9. 飛跡検出の原理

製作活動は月1回開催しており、11月、12月、1月の3回の活動で実機を製作する計画である。2月には宇宙線を用いた実機の動作試験を交流館内で行ない、うまく信号が読み出せれば、測定器完成となる。

完成した測定器を舟塚2号墳に設置する作業については現在具体的な案の策定中であるが、なるべく早く皆様に古墳透視の結果を報告できるよう、今後も児童生徒とともにプロジェクトを着実に進めていきたい。

本プロジェクトの進行状況については、東海村のホームページ
<https://www.vill.tokai.ibaraki.jp/soshikikarasagasu/kyoikuiinkai/shogaigakushuka/kouryuukan/hakubun/kofunproject/8705.html>
J-PARC のホームページ
<https://j-parc.jp/c/topics/TOPICS/index.html>
で随時報告しているので、合わせてぜひそちらもご参照下さい。

参考文献

- 1) K. Morishima et.al., Nature volume 552, pages386–390 (2017)
- 2) 稲葉望 et.al. <http://www2.kansai-u.ac.jp/hddi/pdf/inaba.pdf> など
- 3) https://www3.pref.nara.jp/bunkamura/kofun_to_uchu/ など

宇宙線ミュオンを用いた国プロ（2024年度開始）について：

宇宙線ミュオンは素粒子の一つで、①透過力が強く直線経路を有し、②真空中での光速とほぼ同じ速度で、③地球上のどこにいても昼夜を問わず一定の頻度で降り注ぐという特徴がある。これまで我が国では、非破壊で内部を観測できるというミュオンの特徴を生かして、直接内部を観測することが困難な火山等の自然現象の観測や、ピラミッドの調査といった考古学等への利用が行われてきた。特に日本列島は火山活動が極めて活発な地域であり、噴火予測等は重要な防災技術の一つであるため、噴火現象の解明に向けて、科学的な観測技術を高度化していく必要があると指摘されている。このように、ミュオンを利用した自然現象観測の高度化等は、自然現象のメカニズム解明のみならず、それによる防災対策の観点からも期待が高まっている。

また近年、我が国を中心に、発生制御の必要がない自然現象である宇宙線ミュオンの特徴を最大限活用した、新たな測位・時刻同期技術（PNT技術）等の応用への可能性が高まっている。

（JSTのKプログラム：宇宙線ミュオンを用いた革新的測位・構造物イメージング等応用技術」に関する研究開発構想（個別研究型）の構想の目的より
https://www8.cao.go.jp/cstp/anzen_anshin/20230310_mext_1.pdf

※URLをコピーするときは、スペース、改行記号を削除してください

中性子回折技術の紹介 全固体フッ化物電池用固体電解質の中性子構造解析

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 中性子科学研究系
森 一広
京都大学 成長戦略本部
福永 俊晴

はじめに

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は、NEDO事業の1つとして電気自動車用革新型蓄電池開発（RISING3）を2021年度から5年計画で実施している [1]。本事業は、電気自動車駆動用革新型蓄電池の実現に向けた事業であり、京都大学を中心とし、RSING（2009–2015年

度）およびRSING2（2016–2020年度）を経て、現在のRISING3へと引き継がれている。RISING3では、フッ化物電池と亜鉛負極電池の2種類の蓄電池をターゲットとし、研究開発が進められている。本事業の最も大きな特徴の1つとして、放射光X線や中性子線など量子ビーム利用に逸早く着目し、大型放射光施設（SPring-8）や大強度陽子加速器施設 物質・生命科学実験施設（J-PARC MLF）のような国内大型実験施設に蓄電池研究専用の計測装置を建設したことが挙げられる。これにより、量子ビーム実験から得られた知見を迅速に蓄電池研究開発へフィードバックすることが可能となる。J-PARC MLF内では、RSING事業において高エネルギー加速器研究機構（KEK）と京都大学

が連携し、ビームライン9番 (BL09) に蓄電池研究用特殊環境中性子回折装置スピカ (SPICA) が建設された [2]。BL09 SPICA では、リチウムイオン電池に加えて、燃料電池やフッ化物電池、亜鉛負極電池等に関する中性子構造科学研究を強く推進しており、定期的に優れた論文成果を公表している [3-6]。本稿では、SPICA の概要について触れた後、最近の研究成果として全固体フッ化物電池に使用するフッ化物イオン導電性固体電解質 (CaF_2)_{0.48}(BaF_2)_{0.52} の構造研究について紹介する [7]。

特殊環境中性子回折装置スピカ (SPICA)

図1にSPICAの概要を示す。SPICAは、中性子線源から52mの位置に設置されており、楕円型中性子スーパーミラーガイド管を導入することで、高分解能 (0.1%以下) を維持させながら大強度中性子ビーム束を併せもつ中性子回折装置である。また、試料から検出器までの距離を2mに固定し、特に水平面内では広い散乱角 (2θ) を網羅できるように³Heガス一次元位置敏感型中性子検出器 (PSD) が連続的に配置されている。図1に示すように、背面バンク ($150^\circ \leq 2\theta \leq 175^\circ$) では高分解能回折データが取得可能のため、精密結晶構造解析 (リートベルト解析や最大エントロピー法 (MEM) など) に利用されている。一方、90度バンク ($60^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$) では特殊環境周辺機器を利用した中性子回折実験に加えて、広い逆空間領域 (Q 領域) を観測できることから局所構造解析 (二体分布関数 (PDF) 解析や逆モンテカルロ (RMC))

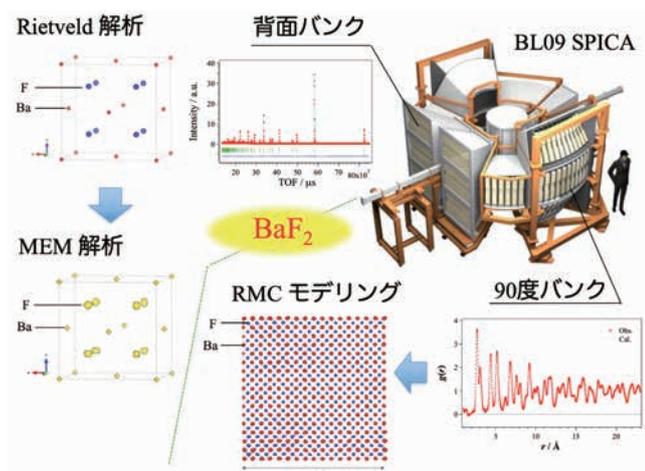


図1. BL09 SPICAの概要。背面バンクおよび90度バンクで測定した BaF_2 の回折データ。背面バンクではリートベルト法および最大エントロピー法 (MEM) による解析例、90度バンクでは二体分布関数 (PDF) データを用いた逆モンテカルロ (RMC) モデリングによる解析例を示している。

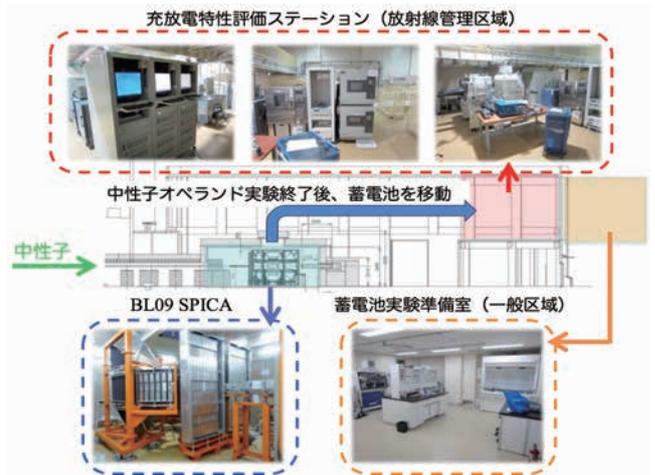


図2. BL09 SPICA周辺に隣接されている充放電特性評価ステーション (放射線管理区域) および蓄電池実験準備室 (一般区域)。

モデリングなど) への利用も試みられている。

加えて、SPICAは“空間”をコンセプトに設計された装置でもある。例えば、SPICAはMLFの中に専用建屋を有しており、世界に類を見ない蓄電池実験準備室を一般区域および放射線管理区域にそれぞれ併設している (図2を参照)。これにより、現地での蓄電池構築・解体作業および特性評価試験 (充放電評価試験やインピーダンス試験など) のようなラボ実験と中性子回折実験を同じ空間 (場所) で長期的に行うことが可能である。特に最近では、SPICAに隣接する蓄電池実験準備室 (放射線管理区域) を「充放電特性評価ステーション」と名付けて整備を進めている。ここでは蓄電池特性として重要なサイクル特性に着目し、SPICAで充放電下中性子回折実験 (所謂、中性子オペランド実験) が終了した直後、蓄電池を充放電特性評価ステーションへと移動し、次の中性子オペランド実験まで継続して充放電特性評価試験を実施することができる。また、遮蔽体内部にも広い実験空間が確保されており、様々な周辺機器が設置できるように配慮されている。さらに、装置本体の中心部に取り付けられている真空散乱槽を取り外すことで、直径2mの空間を確保することができ、大型の蓄電池や機材の持ち込みにも対応している。

フッ化物イオン導電性固体電解質の構造研究例

全固体フッ化物電池の高エネルギー密度化実現において、高電圧下 (例えば、3V以上) での利用が重要となる。その際、高電圧を負荷しても分解しない高い耐久性をもつ固体電解質が必要となる。フッ化カルシウム (CaF_2)、フッ化ストロンチウム (SrF_2) およびフッ化バリウム (BaF_2) は高耐還元性物質として

知られているが、その反面、イオン伝導率が極めて低いことから、そのまま固体電解質として利用することができない。一方、メカノケミカル法により $\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x}\text{F}_2$ 準安定物質を合成することが可能で、イオン伝導率が CaF_2 や BaF_2 と比較して数桁以上上昇することが報告されている [8]。興味深い点は、Ca および Ba の価数は共に 2 価であることから、 CaF_2 や BaF_2 と同様、 $\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x}\text{F}_2$ の場合でもフッ素欠損や余剰フッ素は皆無であると考えられていたが、予想に反してイオン伝導率が劇的に向上していることである (図 3 を参照)。この原因を構造学的観点から解明するため、SPICA を利用した中性子回折実験を実施した。

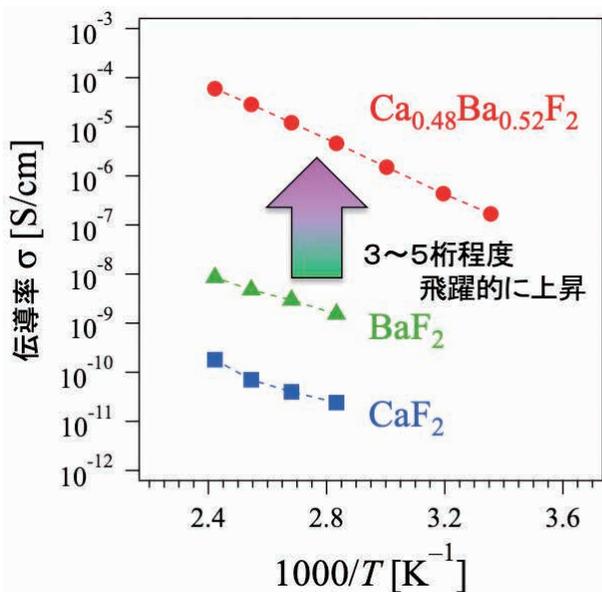


図 3. $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質および CaF_2 、 BaF_2 のイオン伝導率の温度変化。

図 4 は、背面バンクで測定した 573 K での $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質の中性子回折データである。本研究では、メカノケミカル法に代わって新たに熱プラズマ法を導入し、 $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質を作製した。これにより、 $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ (主相) 以外の物質 (副相) の割合を 2% 以下まで抑制し、良質な試料を得ることができた。図 5 は、リートベルト解析および MEM 解析によって可視化した $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質の結晶構造および核密度分布である [9-11]。結晶構造 (蛍石型構造) と核密度分布を比較した結果、中心位置 (1/2 1/2 1/2) より少しずれた場所に存在する格子間サイト (\square_{F}) を特定し、「 $-\text{F}-\square_{\text{F}}-\text{F}-$ 」間を結ぶフッ化物イオン伝導経路を明らかにした。

さて、結晶構造解析より得られた原子変位パラメータから F の配置が乱れていることが推測されたが、より具体的な F の位置を調べるため、90 度バンクで

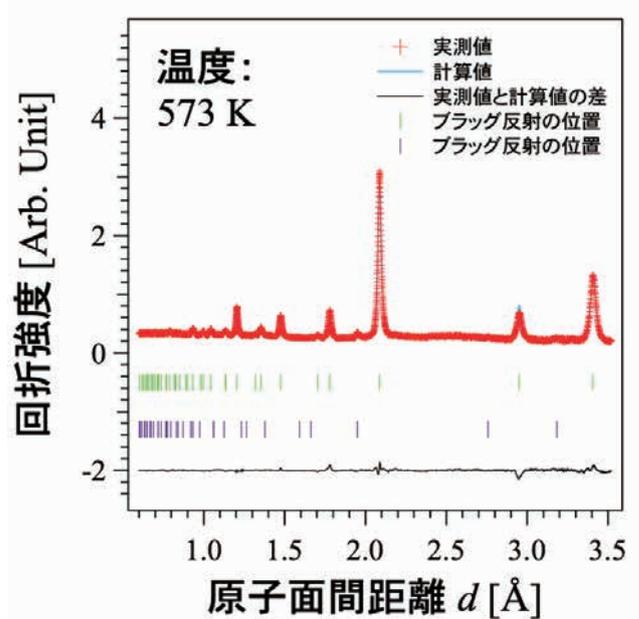


図 4. $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質のリートベルト解析の結果 (573 K)。緑の縦棒は $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 相 (主相)、紫の縦棒は微量の副相 (2% 以下) を表している。

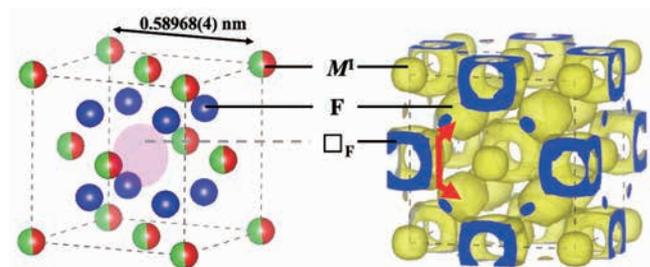


図 5. 573 K における $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質 ($M' = \text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}$) の結晶構造 (左) と核密度分布 (右)。赤線は「 $-\text{F}-\square_{\text{F}}-\text{F}-$ 」間を結ぶフッ化物イオン伝導経路。 \square_{F} は格子間サイトに相当する。

得られた PDF データを用いて RMC モデリングを実施した [12,13]。図 6 は RMC モデリングにより得られた CaF_2 、 BaF_2 および $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質の原子配列である。図より、 CaF_2 および BaF_2 の場合、Ca、Ba および F 原子が規則正しく配列しているが、 $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質では原子配列が乱れている様子がわかる。これは、有効イオン半径が小さい Ca (= 0.112 nm) と有効イオン半径が大きい Ba (= 0.142 nm) が混合したことで構造歪みを誘発し、それにより F の位置も局所的に乱れたと考えられる [14]。最終的に結晶構造解析および局所構造解析を同時に行うことで、図 7 に示すような $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質のフッ化物イオン伝導モデルを提案することに成功した。これにより、「 $-\text{F}-\square_{\text{F}}-\text{F}-$ 」イオン伝導経路内において CaF_2 や BaF_2 では見られなかった F の原子配列の乱れが、伝導経路内のイオン流れ (イオン伝導率)

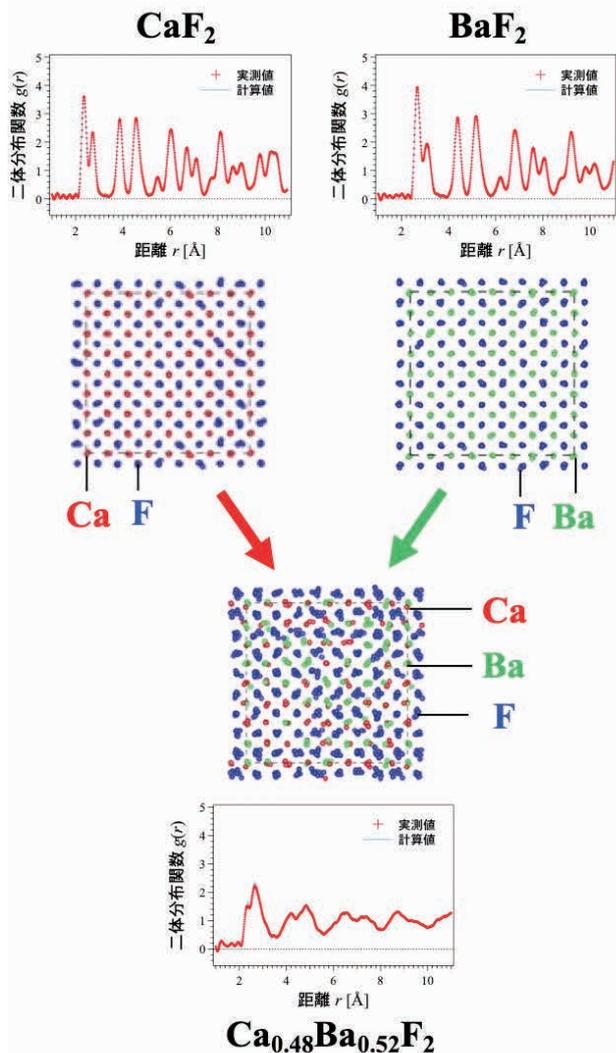


図6. $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質および CaF_2 、 BaF_2 のRMCモデリングの結果と原子配列(室温)。

の向上に大きく寄与していることを明らかにした。

また並行して、小川らにより $\text{Ca}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{F}_2$ 固体電解質を対象とする機械学習ポテンシャルを用いた分子動力学計算や点欠陥計算等が実施された [15]。その結果、陽イオンのサイズの違いにより結晶内に生じた格子歪みの影響により、フッ化物イオンの伝導を媒介する点欠陥の濃度が著しく増大し、イオン伝導率の向上が引き起こされていることが示された。イオン伝導率を向上させる従来の方法として、価数の異なる陽イオンを添加し、フッ素欠損(点欠陥)や余剰フッ素を導入する方法が用いられている。さらに本研究により、同じ価数であるが有効イオン半径が大きく異なる陽イオンを原子レベルで混合させることでイオン伝導率を向上させる新たな手法が見出された。今後、これらの手法の融合により、高電圧下で利用可能な新たなフッ化物イオン導電性固体電解質が多数見出されるものと期待される。

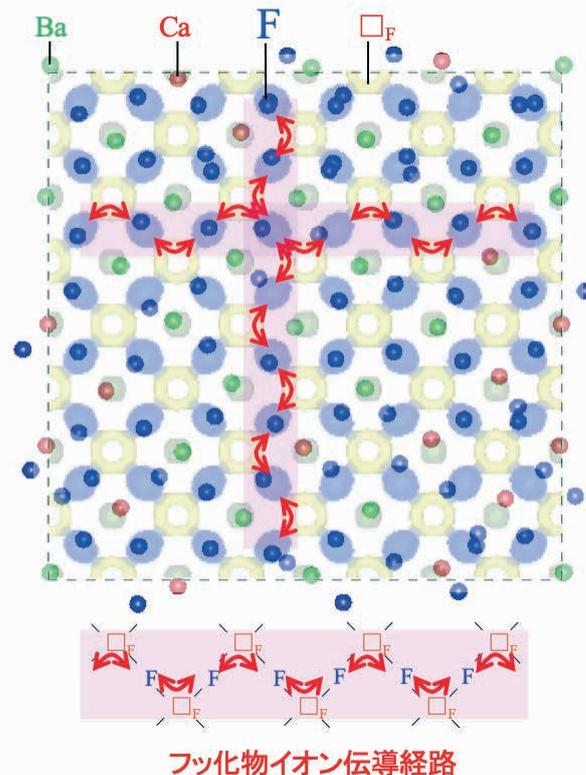


図7. $\text{Ca}_{0.48}\text{Ba}_{0.52}\text{F}_2$ 固体電解質のフッ化物イオン伝導経路と原子配列の乱れを重ね合わせたイオンの流れのイメージ図。赤線は「 $-\text{F}-\square_{\text{F}}-\text{F}-$ 」間を結ぶフッ化物イオン伝導経路。

おわりに

本稿では、BL09 SPICA の概要および SPICA を利用した最近のフッ化物イオン導電性固体電解質の構造研究について紹介した。中性子回折技術が、RISING3を含む、我が国の革新型蓄電池の開発をさらに加速させる一助になることを期待して末筆としたい。

本研究は NEDO RISING3 (JPNS21006) および JSPS 科研費 (23H01720, 23K26413) の助成を受けたものです。また中性子回折実験は、KEK 大学共同利用および J-PARC MLF (Proposal No. 2019S10) において実施しました。実施に際しては、京都大学の佐藤和之 研究員、安部武志 教授、ファインセラミックスセンターの小川貴史 主任研究員、桑原彰秀 主席研究員、KEK 物質構造科学研究所の南波薫 研究支援員、ソン スンヨプ 特任助教、齊藤高志 特別准教授より多大なご支援を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] RISING3 公式ホームページ：
<https://www.rising.saci.kyoto-u.ac.jp/>
- [2] M. Yonemura, K. Mori, T. Kamiyama, T.

- Fukunaga, S. Torii, M. Nagao, Y. Ishikawa, Y. Onodera, D. S. Adipranoto, H. Arai, Y. Uchimoto, Z. Ogumi, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2014, **502**, 012053.
- [3] S. Taminato, M. Yonemura, S. Shiotani, T. Kamiyama, S. Torii, M. Nagao, Y. Ishikawa, K. Mori, T. Fukunaga, Y. Onodera, T. Naka, M. Morishima, Y. Ukyo, D. S. Adipranoto, H. Arai, Y. Uchimoto, Z. Ogumi, K. Suzuki, M. Hirayama, R. Kanno, *Sci. Rep.*, 2016, **6**, 28843.
- [4] F. Takeiri, A. Watanabe, K. Okamoto, D. Bresser, S. Lyonard, B. Frick, A. Ali, Y. Imai, M. Nishikawa, M. Yonemura, T. Saito, K. Ikeda, T. Otomo, T. Kamiyama, R. Kanno, G. Kobayashi, *Nat. Mater.*, 2022, **21**, 325–330.
- [5] Y. Li, S. Song, H. Kim, K. Nomoto, H. Kim, X. Sun, S. Hori, K. Suzuki, N. Matsui, M. Hirayama, T. Mizoguchi, T. Saito, T. Kamiyama, R. Kanno, *Science*, 2023, **381**, 50–53.
- [6] K. Mori, A. Mineshige, T. Saito, M. Sugiura, Y. Ishikawa, F. Fujisaki, K. Namba, T. Kamiyama, T. Otomo, T. Abe, T. Fukunaga, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2020, **3**, 2873–2880.
- [7] K. Mori, K. Sato, T. Ogawa, A. Kuwabara, S. Song, T. Saito, T. Fukunaga, T. Abe, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2024, **7**, 7787–7797.
- [8] B. Ruprecht, M. Wilkening, S. Steuernagel, P. Heitjans, *J. Mater. Chem.*, 2008, **18**, 5412–5416.
- [9] R. Oishi, M. Yonemura, Y. Nishimaki, S. Torii, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, T. Morishima, K. Mori, T. Kamiyama, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2009, **600**, 94–96.
- [10] R. Oishi-Tomiyasu, M. Yonemura, T. Morishima, A. Hoshikawa, S. Torii, T. Ishigaki, T. Kamiyama, *J. Appl. Crystallogr.*, 2012, **45**, 299–308.
- [11] Y. Ishikawa, J. Zhang, R. Kiyonagi, M. Yonemura, T. Matsukawa, A. Hoshikawa, T. Ishigaki, S. Torii, R. Oishi-Tomiyasu, T. Kamiyama, *Physica B: Condens. Matter*, 2018, **551**, 472–475.
- [12] R. L. McGreevy, *J. Phys. Condens. Matter*, 2001, **13**, R877 – R913.
- [13] O. Gereben, P. Jóvári, L. Temleitner, L. Pusztai, *J. Opt. Adv. Mater.*, 2007, **9**, 3021 – 3027.
- [14] R. D. Shannon, *Acta Crystallogr.*, 1976, **A32**, 751 – 767.
- [15] T. Ogawa, K. Sato, K. Mori, S. Kobayashi, H. Moriwake, Y. Ikuhara, A. Kuwabara, *J. Mater. Chem. A*, 2024, **12**, 31173–31184.

協議会の活動報告

◆電池材料研究会

2024年12月23日に航空会館901号室でハイブリッド開催した。佐々木巖主査(豊田中研)が開催趣旨を説明し、電池研究で使用されている代表的な中性子線を用いた計測技術/装置/施設の現状と今後についてビームサイエンティストより4件の講演がありました。空間及び時間分解能などの仕様について施設側と産業界で活発に意見交換ができました。参加人数は63名(IUSNA会員25名、非会員企業13名、大学教員10名、研究機関11名、講師4名)でした。

◆有機・高分子材料研究会

2025年1月20日に東北大学青葉山新キャンパス

SRIS棟1FでNanoTerasu・中性子連携利用フォーラムとしてハイブリッド開催しました。研究会の開催前にNanoTerasu見学会が設定されました。水素原子を検出可能な中性子計測により、高い国際競争力を持つ有機・高分子材料を開発し、持続可能な世界を実現するビジョンを掲げ、中性子と放射光X線(特に軟X線とテングダーX線)を相補的に利用するという開催趣旨が大野正司主査(日産化学)から説明がありました。ものづくりから食品研究、食品素材に関して中性子及びX線の利用例が紹介され、活発な議論が交わされました。参加人数は96名(IUSNA会員18名、非会員企業42名、大学教員10名、学生4名、研究機関16名、講師6名)でした。

◆磁性材料研究会

2025年1月24日に東北大学片平北門会館 2階エスパスでハイブリッド開催しました。梅津理恵主査(東北大学)が開催趣旨を説明し、前半では熱電材料と軟磁性材料の開発事例、後半では、中性子と放射光の相補利用による局所構造解析の最新事例が報告されました。参加人数は34名(IUSNA会員9名、非会員企業5名、大学教員7名、学生2名、研究機関7名、講師4名)でした。

◆小型中性子施設活用研究会 2024年度研究会・見学会

2025年2月12日に研究会をリーガロイヤルホテル新居浜でハイブリッド開催し、13日に見学会を開催しました。藤原健主査(産総研)が開催趣旨を説明後、住友重機械工業、理研、産総研、青森県量子科学センターより、各施設の特徴と利用例などの紹介がありました。また、集合組織解析に関する研究事例の講演がありました。見学会では、住重アテックス(株)のサイクロトロン5号機中性子源を見学し、利用状況について説明頂きました。参加人数は36名(IUSNA会員10名、非会員企業15名、研究機関4名、講師7名)でした。

中性子源の現状

物質・生命科学ディビジョン長
大友 季哉

現在、J-PARC物質・生命科学実験施設(MLF)は、中性子源の設備で発生した不具合により長期間の停止を余儀なくされています。ここでは不具合の概要と原因、及び対策についてご報告いたします。

中性子源は加速器で3GeV、1MWまで加速した高エネルギー且つ大出力の陽子ビームを水銀標的に照射することで水銀原子核に核破砕反応を生じさせ、多量の中性子を生成します。水銀では約500kWの発熱が生じるため、水銀ポンプを用いて常時循環させ熱交換器で冷却します(図1)。2008年のMLF施設運転開始以来、強い放射線場で使用し続けて来た水銀ポンプですが、電動モーター(90kW)の絶縁抵抗が徐々に低下し、使用の継続が困難となったため、長期メンテナンス期間中の2024年11月に電動モーターと一体のポンプ本体を新規品へ交換しました。交換時は水銀をドレンしますが、ポンプ内には強い放射能を帯びた核破砕生成物や水銀が付着するため、水銀ポンプの交換作業は全て遠隔操作を用いて行います。水銀ポンプに接続する水銀配管(150A)との接続も、金属Oリングシール材を設置したフランジボルトを遠隔操作で締付けて気密性を確保します(図2)。交換作業は問題無く完了し、12月9日にMLFのビーム運転を開始しました。初めての水銀ポンプ交換後であるため、慎重にビーム出力を上げながら試験運転を行ったところ、MLFの排気塔で放射能濃度を監視しているモニター値が正常時より高くなる傾向を示したため、ビーム運

転を停止しました。水銀ポンプ交換時に締結した水銀配管フランジの気密性能が不足していると考えられたため、12月から1月にかけて複数回にわたり遠隔操作によりフランジボルトの増し締めを行い、ビーム試験を実施しましたが、状況が改善しませんでした。これら作業の過程で、気密性能が不足しているのは金属Oリングシール材が不均一に締結されていることが原因である可能性が高いことが判明したため、改めてフ

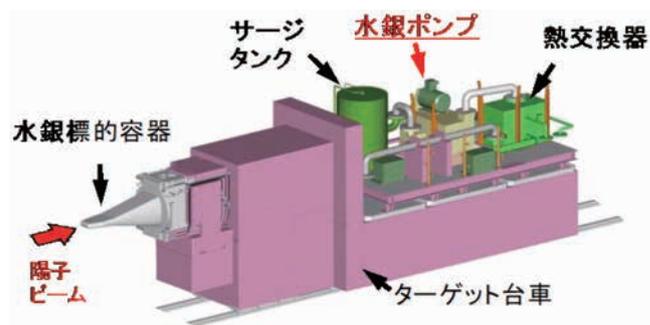


図1. 水銀循環系概要

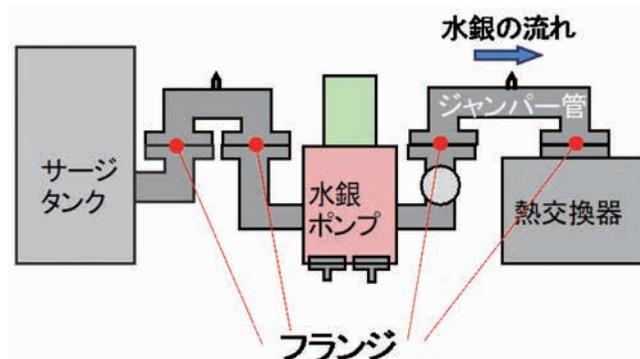


図2. 水銀ポンプ周辺の配管とフランジ

ランジのモックアップを用いた遠隔操作試験等で均一にシール材を締結する方法の検討を行いました。その結果、遠隔操作方法や作業手順の改良で目標を達成で

きる目途が得られたため、3月中に水銀ポンプの水銀配管フランジのシール材を交換して均一に締結し、4月に利用運転を開始する予定で作業を進めています。

施設からのお知らせ

◆ J-PARC MLF

2025A期の課題審査結果は以下のとおりです。

申請数：363件(中性子312件、ミュオン50件、その他1件)

採択数：187件(中性子157件、ミュオン29件、その他1件)

企業からの申請数：21件(中性子20件、ミュオン1件)

企業の採択数：17件(中性子16件、ミュオン1件)

2025B期の公募(短期・1年、優先課題、産業利用促進課題、長期課題)はいずれも4月に行われる予定です。

詳しくはMLFホームページをご参照ください。

<https://mlfinfo.jp/ja/user/proposals/>

◆ JRR-3

2024年度の供用運転は、2025年4月4日で終了します。

2025年度の供用運転は、2025年4月14日から11月14日まで連続して7サイクルの運転を行います。その後、年度末まで定期事業者検査期間となります。

2025年度の第2回施設供用の課題募集(追加募集)を2025年5月に実施する予定です。

運転状況はじめ関連情報等は、JRR-3 ユーザーズオフィスのホームページをご参照下さい。

<https://jrr3uo.jaea.go.jp/index.htm>

◆ 茨城県ビームライン

産業利用課題を常時公募しております。

希望する実験時期の公募スケジュールをご確認いただき(希望する実験時期により締め切りが異なります)、募集要項をお読みの上、ご応募ください。

直近は第2回募集(6月に実験実施予定)で締切は令和7年4月15日(火)12:00です。

詳細は茨城県ビームラインのウェブサイト

https://www.pref.ibaraki.jp/sangyo/kagaku/tyusei/procedure_industrial_use.html

をご覧ください。



※中性子・ミュオン実験のご相談はJ-JOINまで。秘密厳守でお受けしています

<https://jrr3ring.jaea.go.jp/jjoin/>

※URLをコピーするときは、スペース、改行記号を削除してください

今後の行事予定

日時	会議名	場所	その他
2025年 4月22日	中性子構造生物学研究会	オンライン開催	
7月2日 ～4日	PAQMAN(Polarisation Analysed QENS: Modelling and data ANalysis)	Sola Strand Hotel (Norway)	https://indico.uis.no/event/52/
7月6日 ～10日	ICNS2025	Bella Center (Denmark)	https://www.icns2025.dk
7月11日	Advanced computer simulations methods for neutron scattering instruments	Technical University of Denmark	https://indico.ess.eu/event/3718/
7月13日 ～18日	International Symposium on Metallic Multilayers (MML2025)	University of Leeds (UK)	https://iop.eventsair.com/mml2025
7月17日	中性子産業利用推進協議会総会	秋葉原コンベンションホール	

日時	会議名	場所	その他
7月17日 ～18日	中性子産業利用報告会	秋葉原コンベンションホール	
7月20日 ～25日	The 16th International Conference on Muon Spin Rotation, Relaxation and Resonance (μ SR2025)	St. John's Newfoundland (Canada)	https://indico.triumf.ca/event/537/
7月28日 ～31日	MLZ Conference 2025: Neutrons for Fusion and Nuclear Applications	Conference House Fürstenried Palace (Germany)	https://indico.frm2.tum.de/event/540/
7月31日 ～8月1日	31 st Center for High Resolution Neutron Scattering (CHRNS) "Summer School on Methods and Applications of Neutron Spectroscopy"	NIST Center for Neutron Research (USA)	https://www.nist.gov/ncnr/chrns/education-and-outreach/chrns-summer-school-neutron-scattering
10月7日 ～9日	JCNS Workshop 2025 Trends and Perspectives in Neutron Scattering: Quantum Materials, Theory and Experiments	Tutzing (Germany)	https://iffindico.fz-juelich.de/event/20/
10月27日 ～31日	Munich Quantum Matter Days	Institute of Advanced Studies (Germany)	https://indico.frm2.tum.de/event/539/

※URLをコピーするときは、スペース、改行記号を削除してください

◆リンクのご案内

中性子・ミュオン利用ポータルサイトJ-JOIN : <https://jrr3ring.jaea.go.jp/jjoin/>
 J-PARC : <https://j-parc.jp/c/index.html>
 J-PARAC MLF (Meet @ MLF) : <https://mlfinfo.jp/ja/>
 J-PARAC MLF (Meet @ MLF)パンフレット : <https://mlfinfo.jp/ja/reports/published.html>
 J-PARC センターユーザーズオフィス : <https://is.j-parc.jp/uo/ja/index.html>
 茨城県中性子ビームライン : <https://www.pref.ibaraki.jp/sangyo/kagaku/tyusei/bl-top.html>
 J-PARC MLF 成果検索 : <https://mlfinfo.jp/ja/publications.html>

JRR-3 : <https://jrr3.jaea.go.jp/>
 JRR-3 Twitter : https://twitter.com/JAEA_JRR3
 JRR-3 ユーザーズオフィス : <https://jrr3uo.jaea.go.jp/>
 (一財)総合科学研究機構(CROSS)中性子科学センター : <https://neutron.cross.or.jp/ja/>
 J-PARC MLF 利用者懇談会 : <https://is.j-parc.jp/MLFuser/>
 いばらき量子線利活用協議会 : <https://www.ibaraki-quantum.com/>

日本中性子科学会 : <https://www.jsns.net/>
 日本中性子科学会「国内の中性子実験施設」 : <https://www.jsns.net/facilities/>
 日本中間子科学会 : <http://jmeson.org/>

季報「四季」編集委員会

委員長 杉山 純 (CROSS)

委員 勅使河原 誠 (J-PARC)、佐野 亜沙美 (J-PARC)、水沢 多鶴子 (CROSS)、
坂本 直紀 (旭化成)、佐々木 宏和 (古河電工)

事務局 小室 又洋、綿引 美知枝 (中性子産業利用推進協議会)

※「四季」のバックナンバーは下記のサイトでご覧いただくことができます : <https://j-neutron.com/siki.html>

中性子産業利用推進協議会 (IUSNA) 季報「四季」【25年・春】Vol.66

発行日 2025年3月25日

発行元 中性子産業利用推進協議会

〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方162-1 いばらき量子ビーム研究センター D201

TEL:029-352-3934 FAX:029-352-3935 E-mail:info@j-neutron.com

<https://j-neutron.com/> (2022年2月1日よりURLを変更しました)

本誌掲載物の著作権は著者が保有します。本誌の複写、転載等に際しては著者の許可が必要です。