

CONTENTS

P1 巻頭言 P3 パルス中性子を用いた撮像技術 P10 ポリビニルアルコールの結晶構造 P12 企業紹介-(株)NAT
P13 活動報告 P14 お知らせ

JRR-3への期待

富士フィルム株式会社 解析技術センター
松井 高史

本年2月にJRR-3が10年ぶりに運転を再開し、7月に、長い間待ち望んだ定常中性子源からのビーム供給が再開されました。2011年3月の震災直後は、「JRR-3も被災したが損傷は軽微と聞き、研究用原子炉なのだから…」という、あまり根拠のない思い込みで1、2年待てば再開されるだろうと事態を楽観視していましたが、5年経ても再開される兆しが見えず、まさかこのまま廃炉にされてしまうのか?と心配した事もありました。しかし、此度晴れて再稼働となり、喜びと共に、この間の施設関係者の皆様の並々ならぬご尽力に深い感謝と敬意を表します。

私が、JRR-3を利用し始めたのは、2008年のことで、ちょうどJ-PARCが運転を開始した時期にあたります。弊社は2000年以降の写真フィルムの急速な市場縮小により、「第2の創業」を目指して様々な分野へと多角的な研究開発、商品化を進めていました。解析部門では、それまでの無機結晶材料主体の解析から、非晶質材料、ソフトマター、生体材料など、様々な機能性材料の解析が求められるようになり、私はSPring-8の産業利用ビームラインを利用して、アモルファスの中距離秩序構造を調べられる広角X線散乱(WAXS)の解析技術構築を進めていました。アモルファスの構造を調べるには散乱解析が非常に有効です。ただしX線散乱はq値依存性があり、広角になるほど散乱強度が減衰してS/Nが低下する、という欠点があります。そのような時、中性子散乱ではq値依存性が無いと聞いて、2009年3月にJRR-3のTAS-1にてアモルファスSe膜の中性子広角散乱測定を実施しました。X線では、測定後に数値処理をしてスペクトルから散乱強度の振動成分を抽出しますが、中性子では、まさに今、

角度スキャン測定をしているモニター画面に、そのまま明瞭な振動スペクトルが描かれていくのを見て、本当にq値依存性が無いのだ、と感激したのを覚えています。TAS-1での予備実験を経て、アモルファス構造解析の実験はJ-PARC/iMATERIAへと移行しましたが、別の課題についてJRR-3の利用が適していると、実験を検討しているうちに震災発生となりました。以来10年という年月が経ってしまいましたが、ようやくパルス中性子源J-PARCと、定常中性子源JRR-3の併用が叶うこととなりました。

最近では、有機系薄膜、或いは有機/無機複合系、分散系材料の構造情報を求められるケースが増えています。nmスケールの粒子分散状態や分子会合状態から、一次凝集、より大規模な高次凝集へと繋がる階層構造を詳細に把握することが、機能性材料の特性発現のメカニズムを解明するうえで不可欠となっています。このため、放射光、中性子を利用した小角散乱実験・解析を幾度か実施しています。中性子ではJ-PARCのiMATERIAやTAIKANを利用して参りましたが、JRR-3の運転再開により、同施設のSANS-Jなど小角散乱ラインの利用も視野に入っております。2施設の併用が可能となったことにより、単純なことではありますがマシンタイム確保の機会が増えるというのは大変ありがたいことです。JRR-3は、J-PARCや大型放射光施設の殆どが停止してしまう7月～9月の夏期においてビーム供給されることも大きな利点であると思います。また、JRR-3には超小角散乱実験が可能なPNOがあります。低エネルギー(=低q値)であっても透過性の高い中性子の特性をいかんなく発揮しているこのラインとSANS-Jとの併用によって、機能性薄膜中のnm～ μm に至る階層構造を一繋がりスペクトルで解析できるようになります。

産業利用促進の観点から申しますと、J-PARC茨城

県ビームラインが実施している随時課題募集のような、課題申請から利用までのタイムスパンが短い利用制度の検討も進めていただけたらと望んでいます。利用制度の改革には大変な労力がかかることは重々承知の上でのお願いですが、企業での研究開発、商品化のスピードに対応しようとすると、半年に一度の課題申請では、やはりリードタイムが長すぎます。JAEAではオープンファシリティープラットフォームの構築として、JRR-3とJ-PARCの窓口一元化が進められましたが、利用制度の一元化、共通化も進めていただけるとユーザーとしては利便性が向上します。ご検討して

いただければ幸甚です。

世の中のカーボンニュートラルの動きから、水素液化、水素吸蔵合金、燃料アンモニア、LiB材料、燃料電池、太陽電池などの技術開発、商品開発が今後ますます重点化されます。これらは軽元素主体、或いは系中の軽元素が重要な役割を果たす材料、即ち、「軽元素に強い」中性子にとって“キラーアプリ”となり得る材料が数多くあると思います。産業利用においても、JRR-3から多くの成果が生み出されることを期待しています。

J-PARC MLF産業利用報告会に参加して

日産化学株式会社
大野 正司

令和3年度J-PARC MLF産業利用報告会が、7/15（木）午後から7/16（金）にかけて開催されました。昨年度はコロナ禍で中止となりましたが、今年度はオンラインでの開催となりました。まずは、本会の企画・運営に携われた方々に感謝申し上げます。オンライン開催の利点・改善点については、他のオンライン学会等に共通する内容も多いかと思しますので、ここでは割愛させていただきます。

中性子産業利用推進協議会の参加企業・団体の業種は幅広いため、通常の一般的な学会とは異なり、本会は普段聴講する機会の少ない分野や分析手法の成果を知ることができる貴重な機会であると考えています。筆者はソフトマター系のサンプルを扱うことが多いため、「小角散乱／反射率」のセッションについては馴染み深い内容でしたが、「イメージング／ミュオン」に関しては全くの専門外です。しかし、具体的な事例を交えた講演を聞くことで、弊社における中性子利用の横展開について考えを巡らすよい機会となりました。来年度以降も他の測定手法について継続することで、新規中性子ユーザーの開拓と既存ユーザーの横展開といった中性子利用の裾野が広がっていくと思います。

中性子利用の裾野の拡大と共に、中性子利用成果のさらなる発展を考える上で、本年度はJRR-3が約10年ぶりに再稼働するという大きな節目を迎えます。初日に「JRR-3の現状と今後の産業利用」について講演がありました。JRR-3の運転再開は、ただ中性子を利用できる実験時間が増えるだけでなく、定常炉とパルス中性子源それぞれの特徴を活用した実験も可能になり

ます。長い休止期間の影響でJRR-3を利用したことのない企業研究者も多くなってきた現状の中、来年度以降の産業利用報告会では、JRR-3利用による成果報告や、J-PARC MLFとJRR-3の相補利用に関する今後の方向性についても議論が進むことを期待します。

今回の報告会を聴講して、コンソーシアムや包括的連携等の組織体組織の産学施設間連携の枠組みは多様化かつ深化し、成果を出すための環境整備は着実に進んでいると実感しました。本年度は主に「燃料電池」、「水圏機能材料」及び「材料開発を加速する先端分析事例」といった観点から、産業界・学術からの期待が示されました。産業界からの期待・要望と施設が提供できる技術に関する情報を年々蓄積・アップデートし、「産業利用の成果とは何か？」という難しい問題に対しても常に産業界と施設で議論しながら共通認識を持つことで、より明確な形の産業利用成果を社会に還元していくことが可能になると考えております。産業界だけでなく、施設・学術側にとっても産業利用を推進することによるインセンティブがより明確になって、中性子の学術及び産業利用が益々発展していくことを望んでおります。

未だにコロナ禍の先行きは不透明で、予断を許さない状況が続いています。企業では社会状況に応じて出張が規制されることも多く、中性子利用実験についてのスケジュール調整が難しくなっております。リモート測定や代行測定をはじめとするwith コロナ／after コロナ時代の中性子産業利用のあり方についてのさらなる議論も今後必要になってくるかもしれませんが、まずはいち早く現況が収束し、新しい中性子利用の幕が開けることを祈念致します。

パルス中性子を用いた撮像技術

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター
篠原 武尚

はじめに

中性子イメージングは、中性子ビームを用いて観察対象内部を2次元／3次元的に非破壊で可視化する技術です。中性子の特徴には、高い物質透過能力や、軽元素に対する高い感度、同位体識別能力等があり、これまでの中性子イメージングではこれらの特徴を活用することでX線などの他の放射線では観察することが困難な構造や現象、たとえば水素やリチウム等の軽元素の分布や閉鎖空間内での挙動、金属等により構成される構造物の内部等を可視化する応用が行われてきました(図1)。また、中性子イメージングは主として研究用原子炉等の定常中性子源から得られる白色の大強度中性子ビームを利用して実施されてきました。しかし、近年の中性子源の強度増強や検出器を初めとする中性子実験に関する要素技術の性能向上により、中性子イメージングの効率が大きく向上し、新たな撮像技術の開発が展開しました。

その一つが単色中性子を用いたイメージングです。中性子には上述の特長の他に、物質波としての光学的性質やスピン磁気モーメントがありますが、これらによる中性子と物質との間の相互作用は多くの場合中性子エネルギー(波長)に依存し、白色中性子を利用したイメージングではこれらによる透過率の変化が平均化され、正確に捉えることができません。しかし、単色中性子を用いることで、相互作用によって生じる特徴的な透過強度の変化を効果的にコントラストに反映させることができ、単純な形状情報を超えて観察対象内部の結晶組織情報[1]や磁気情報[2]の空間分布を可視化することが可能となりました。さらに、中性子エ

ネルギーの選択／分析技術をイメージングに取り入れることで、位置毎に透過率スペクトルを解析することが可能となり、その結果、これらの情報を定量化することもできるようになりました[3]。本稿では、J-PARCの大強度短パルス中性子ビームを用いて筆者らが実施している可視化技術開発の現状と応用研究について紹介します。

パルス中性子を用いたイメージング

中性子イメージングについては、本季報においてすでに何度か取り上げていただいておりますが[4]、ここで簡単にその原理や特徴を説明します。中性子イメージングは、最も単純には医療用レントゲンのような観察対象によって吸収されずに透過した中性子線の強度分布を撮像した影絵のようなものです(図1参照)。このような静的な観察には、検出器には中性子を可視光に変換するシンチレータとCCDやCMOSカメラを組合せた撮像系を利用し、その視野範囲は数cmから数10cm角程度、空間分解能は視野範囲に応じて数10 μ mから数100 μ m程度が一般的です。カメラの動画撮像機能を用いれば、動的な挙動の撮像も可能ですし、観察対象を回転させながら撮像し、再構成することで3次元断層像を得るCTも行うことができます。

エネルギー選択型／分析型イメージングを行う場合、定常中性子源では中性子を単色化する機器(モノクロメータや中性子速度選別機)が必要となります。中性子エネルギー／波長を変化させながら撮像を行うことで、中性子透過率のエネルギー／波長依存性を場所ごとに得ることができます。一方、パルス中性子を利用すると、中性子エネルギー／波長をパルス中性子発生からの時間(飛行時間、Time-of-Flight(ToF))を

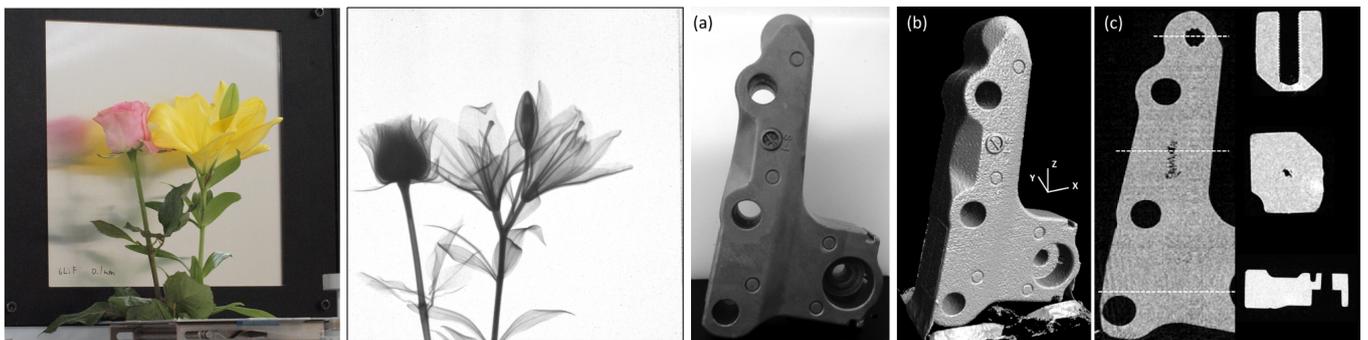


図1 中性子イメージングの例。左2つ:生花(写真、中性子透過像)。右3つ: 鋳造アルミニウム製自動車部品((a)写真、(b)CT再構成画像、(c)縦方向および横方向の断層像) [5]

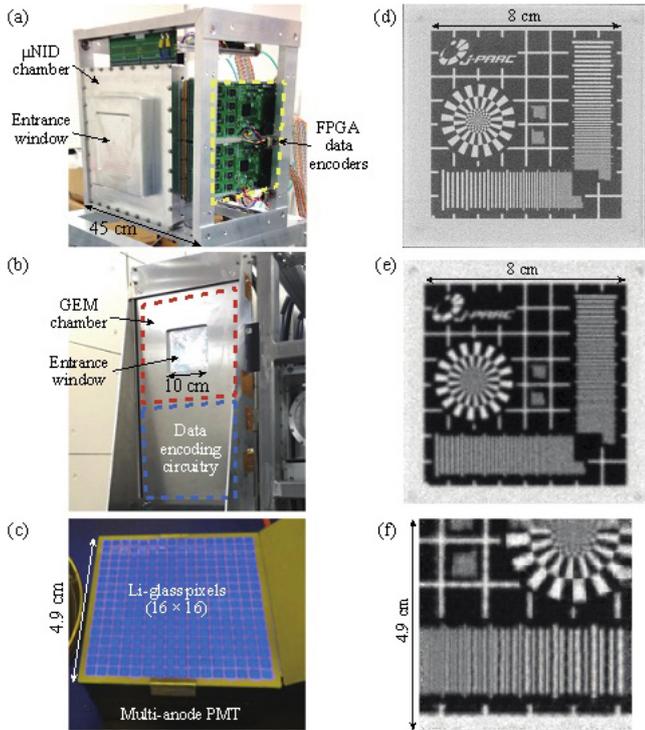


図2 RADENで使用されている飛行時間分析が可能な計数型中性子2次元検出器 [6]。(a)μNID検出器、(b)nGEM検出器、(c)LiTA検出器。(d)~(f)は、(a)~(c)の検出器を用いて得たテストパターン [7]の透過像。

用いて分析することができるため、飛行時間分解能を有する2次元中性子検出器(図2)を使用することで、効率良くエネルギー分析型イメージングを行うことができます。さらに、J-PARCのような短パルス中性子源施設では、定常中性子源よりも高いエネルギー分解能での実験ができるため、高精度な解析が可能となります。また、利用できる中性子エネルギー範囲も定常中性子源では熱~冷中性子(0.1eV~1meV程度)であるのに対して、熱外中性子(~数keV)まで利用することができるため、中性子共鳴吸収反応を用いた原子核種選択型イメージング [8] も実施することができます。

現在、エネルギー分析を利用した中性子イメージン

グ法として、以下のような手法が開発・実用化されています。

- ブラッグエッジイメージング [1] : 観察対象内部の結晶構造に起因する中性子の散乱の結果として生じる透過率の変化を利用します。結晶組織情報の空間分布を得ることができます。
- 共鳴吸収イメージング [8] : 共鳴吸収現象を利用して原子核種を識別し、その空間分布を得ることができます。吸収スペクトルの解析により原子核種の温度情報(ただし高温領域に限る)を解析することも可能です。
- 偏極中性子イメージング [2] : 偏極中性子を利用することで、磁場中での中性子スピンの状態の変化を偏極度の変化として解析し、中性子ビーム経路中の磁場分布の情報を得ることができます。中性子波長依存性の解析により磁場の方向と強度の情報を抽出することが可能です。
- 中性子位相イメージング [9, 10] : 物質波としての中性子が物体を透過する際に引き起こす位相の変化をTalbot-Lau干渉計を用いて検出し、画像のコントラストを得ます。その結果、吸収と比べて高い検出感度を得ることができます。また、観察対象による小角散乱を利用してμmスケールの構造の空間分布を得ることができます。

各イメージング方法の詳細は日本アイソトープ協会刊行の「中性子イメージングカタログ/中性子施設ハンドブック」に詳しく説明されていますので、興味がある方はこちらをご覧ください [11]。

パルス中性子イメージング装置 RADEN

J-PARCの物質・生命科学実験施設(MLF)のBL22には世界で最初のパルス中性子イメージング専用装置(エネルギー分析型中性子イメージング装置RADEN)が建設され、2015年度より共用が始まりました(図3) [6]。RADENには以下のような特徴があります。

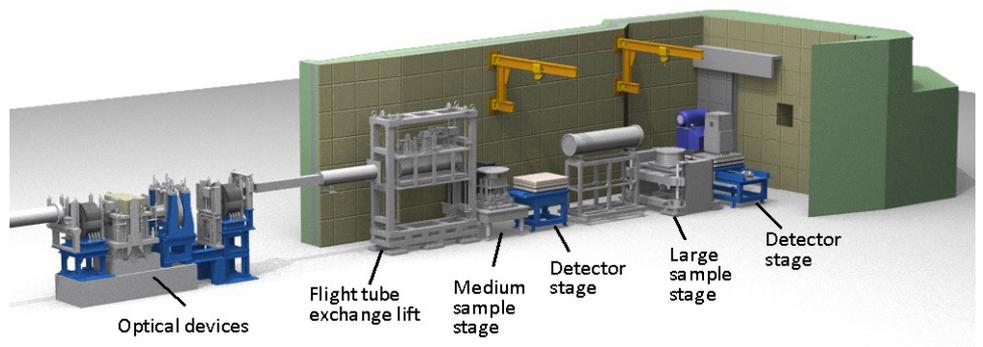


図3 RADENの外観写真(左)と実験装置概要図(右) [6]

- ・エネルギー分析型中性子イメージング装置：RADENはJ-PARCの短パルス中性子ビームの特徴を高度に活用してエネルギー分析型中性子イメージングを実用化し、本格的な応用研究を推進することを目的としており、先述の4つのイメージング手法のすべてを実施可能な世界で唯一の装置です。
- ・最先端の中性子ラジオグラフィ／トモグラフィ実験装置：次に、我が国の最新の中性子イメージング装置として、最先端の中性子ラジオグラフィ／トモグラフィ実験を実施可能な環境を提供します。たとえば、視野範囲と空間分解能を観察条件に応じて選択することができます。(具体的には、視野範囲は300mm角以下、空間分解能は10 μ m以上を選択できます。)また、観察対象の中性子透過率を考慮して、中性子エネルギー領域も選択可能です。さらに、広い実験空間を確保しているため、1m角程度の大型の試料や特殊な試料環境機器の使用、稼働条件下での撮像など、自由度の高い実験体系の構築が可能です。
- ・イメージング手法開発環境：中性子イメージングの高度化や新しいイメージング手法の開発に関する研究を行っています。特に、中性子検出器等のデバイス類の開発・高度化、撮像技術や解析技術の開発が積極的に行われています。RADENの広い実験空間と機器レイアウトの自由度の高さは、デバイス開

発や新しい実験アイデアの試験環境としては非常に有利です。

実験装置の詳細仕様については、RADENに関する参考文献[6]やMLFのホームページ[12]に掲載された情報を参考にしてください。

パルス中性子イメージング研究の実施例

J-PARCのパルス中性子を用いて実施された研究例をこれ以降に紹介いたします。

(1)ラジオグラフィ／トモグラフィ

RADENで実施された中性子ラジオグラフィ／トモグラフィの実験例として、ベントナイト混合土および砂への水の浸透の様子を可視化を紹介します(図4)。ベントナイト混合土は、その低透水性から人工バリア材としての応用が検討されている材料です。その低透水性の理解において、ベントナイト中の水の評価は重要であることから、マクロスコピックな水の挙動の把握が中性子を用いて3次元的に可能かどうかを調べました。図4に示す様に砂と比較してベントナイト内部への水の浸透は小さく、また、砂中の水は不均一ではあるものの、試料内部全体に渡って存在するのに対して、ベントナイトではアルミニウム容器との隙間に沿って外周部に水が多く存在する様子が確認できました。

(2)ブラッグエッジイメージング

エネルギー分析型イメージングの中で最も利用され

2次元透過像

3次元再構成像

断層像

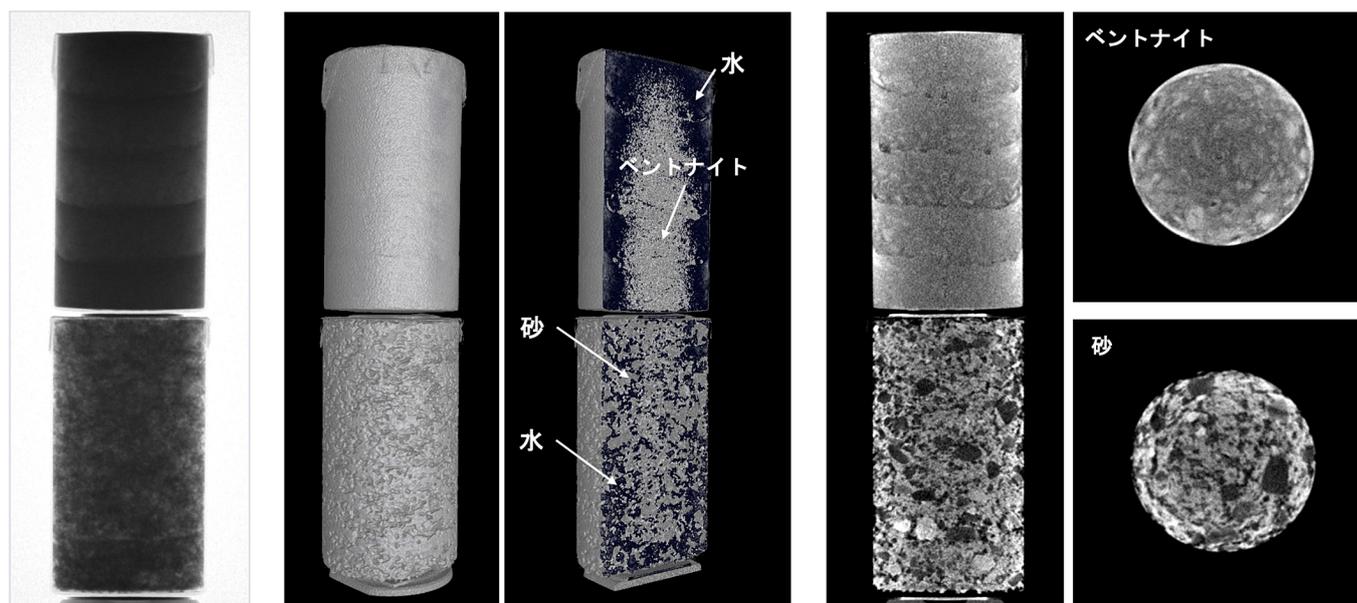


図4 ベントナイトおよび砂中の水の浸透の可視化結果。試料は上下に重ねて配置されており、上がベントナイト、下が砂です。それぞれの試料は円筒形状(直径20mm、高さ50mm)で、アルミニウム缶中に封じられている。左：2次元透過像(中性子透過率が高い方が明るい)、中央：3次元再構成像、右：最高製造から得られた断層像(中性子透過率が高い方が暗い)。断層像を見ると、ベントナイト試料では外側が明るく、水が多く存在していると考えられました。(協力：岩手大 大河原准教授、(株)日本原燃 太田様)

ているのがブラッグエッジイメージングです。先述の通り、この方法は結晶組織構造というマイクロな情報のマクロな空間分布を可視化する際に利用でき、特に金属材料(鉄鋼やNi基合金など)の結晶相やひずみ、結晶子サイズ、配向状態の分布を調べることに応用されています[13]。最近は、付加製造技術(Additive Manufacturing (AM))によって製造された材料を対象とした実験が海外ユーザーを中心に積極的に進められています[14-17]。一例を図5に示します[18]。AMにより製作された材料は、その成長方向に対して異方的に強い微細組織が形成されることが知られており、その特性を制御・改質するためにレーザー加熱等の処理が行われます。この後処理による材料内部の均質化や組織制御の様子を調べるにあたって、ブラッグエッジ法は結晶組織の差異の空間分布を把握することができるため、非常に有効だと考えられています。また、ブラッグエッジの新しい応用として、ひずみの3次元分布を可視化する解析手法の開発が進められています。これは、ブラッグエッジによるひずみ解析とトモグラフィを組合せた技術で、鉄鋼や異種合金の残留ひずみ分布の解析が行われました[19, 20]。測定時間や分解能などの課題がまだ残っていますが、今後、様々な材料への応用が期待される技術です。

(3) 共鳴吸収イメージング

中性子共鳴吸収イメージングは、数eVから数10keVまでのエネルギーの熱外中性子と飛行時間分析を利用するため、J-PARCのような短パルス中性子の長所を特に有効に活かした実験の一つです。X線などの他の手法では分析することができない元素の定量や大きな観察対象物、高い物質透過能力を必要とする場合などに威力を発揮します。これまでの実験例の中には、たとえば自然鉱物(金単結晶)の研究[21]や金属カラム中での特定元素の分離・抽出プロセスの観察[22]などがあります。ここで、単結晶成長過程での微量元素の定量解析[23]について紹介します。放射線用シンチレータ結晶の開発は特に医療用途やホームランドセキュリティ用途として精力的に行われていますが、その開発スピードを加速し、実用レベルの結晶を製作する成長条件を決定するためには、成長過程の結晶を直接観察し、その場で評価することが効率的と考えられました。そこで、高温炉の中で加熱されている試料を中性子イメージングで観察する実験が行われました。その結果、融解過程や固液界面形状の観察とともに、共鳴吸収測定により組成分布をin-situで定量的に調べることが可能となりました(図6)。また、固相/液相中での微量添加元素の拡散や偏析の時間変化

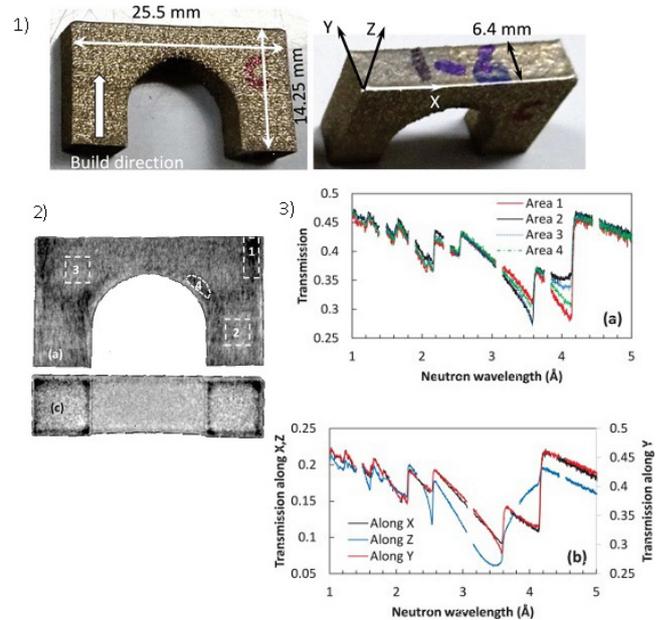


図5 付加製造技術により製作されたInconel合金のブラッグエッジイメージング結果。1) サンプル写真。2) ラジオグラフィ像。(a)および(b)は(111)エッジ近傍の波長(4 Å付近)、(c)は(311)エッジ近傍の波長(2 Å付近)で得た像。3) 2)で選択された範囲について得られたブラッグエッジスペクトル。Z方向(Building direction (成長方向))に沿って中性子ビームを通過させて得られたスペクトルだけが他の方向の結果と異なり、異方的に結晶組織が成長することがわかります。[18]Copyright (2021), with permission from Elsevier.

の評価も可能であることがわかり、結晶成長条件の決定に大きく貢献すると期待されています。同時に、熱～冷中性子領域での透過率スペクトルを利用し、結晶性を評価する試みも行われています。現在は、中性子イメージング実験専用のブリッジマン炉が開発され、様々なガンマ線用シンチレータ結晶の実験が計画されています。

(4) 中性子位相イメージング

中性子の干渉現象を利用した位相イメージングを実施するため、RADENにTalbot-Lau干渉計を整備しました。この干渉計は2枚の吸収格子と1枚の回折格子で構成されますが、パルス中性子の飛行時間分析を利用した波長分散型中性子位相イメージングを行うためにRADENの中性子スペクトルに最適化された格子を製作し、2020年度よりユーザー利用に提供されています。この干渉計では、通常の透過像とともに、微分位相像、ヴィジビリティ像を取得することができます。微分位相像は観察対象を透過することにより生じる中性子ビームの微小な屈折を検出し、輪郭や形状情報を強調して取得する(高感度化)のに対して、ヴィジビリティ像は極小角散乱を反映したコントラストを与

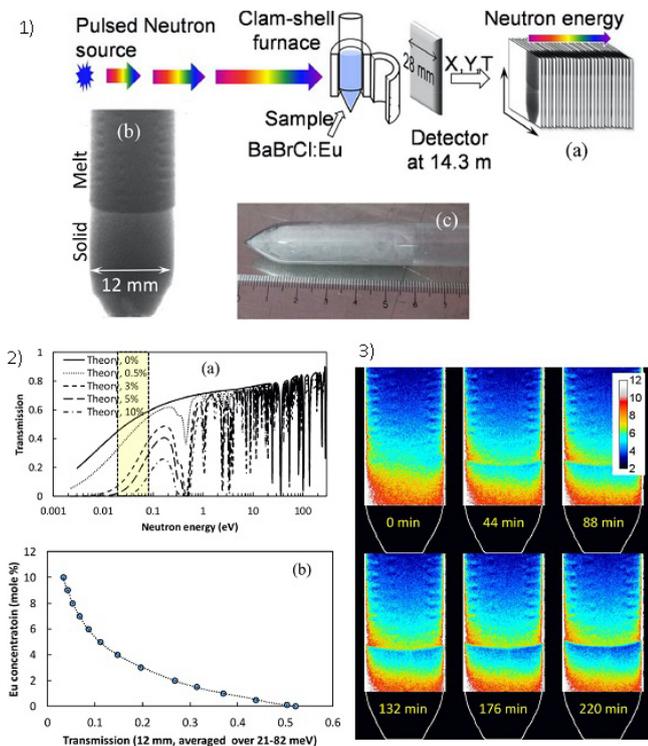


図6 共鳴吸収イメージングによるガンマ線用シンチレータ結晶 BaBrCl:Eu の成長過程の in-situ 観察。1) 実験の概要 ((a) セットアップと (b) ラジオグラフ、(c) 成長前のアンプルの写真)。2) (a) 共鳴吸収スペクトルと (b) Eu 濃度と中性子透過率の関係。3) スペクトルを解析して得た Eu 濃度分布の時間変化。[23] Copyright (2020), with permission from Elsevier.

えるため、観察対象内部に存在する数 μm 程度の大きさの微細組織のマクロな分布を可視化します。このイメージング手法は、磁場に対する感度も有するため、過去には電磁鋼板の磁区の可視化へ利用されましたが [24]、最近、新たな試みとして、植物等への応用を開始しました。図7に茨城県農業総合センター生物工学研究所の協力を得て実施した梨のイメージング結果を示します。通常のイメージングでは図7 (c) に示すように主に水分量の場合ごとの違いにより画像のコントラストが得られます。一方、(d) に示すヴィジビリティ像では、(c) とは異なるコントラストが得られています。(d) に見られる黒い部分は果実中の維管束と呼ばれる組織に対応すると考えられることから、中性子位相イメージングのヴィジビリティ像には水分量の違いよりも植物の細胞組織やその状態の違いが反映されていると考えられました。今後、より詳細な解析により得られた画像の理解を深めることで、中性子位相イメージングの植物等への応用可能性を検討していく予定です。

(5) 産業利用

最後に産業利用によるイメージング実験例を紹介し

ます。RADENでは各期5課題程度の産業利用課題が採択されていて、申請課題数は増加傾向にあります。これまでに実施された課題の分野は自動車関係、電機、機械、化学素材、金属材料などです。

実験例の一つとして、車載エアコンの蒸発器内部における冷媒沸騰挙動の観察を図8に紹介します [25]。この研究は、自動車のエアコンユニットの小型化に向けて、冷媒沸騰挙動を理解することを目的としています。蒸発器は通常アルミ材で構成されているため、その内部を直接観察することは困難でした。そこで、冷媒が沸騰して液体から気体に変化することにより中性子透過率が変化することを利用し、図8左のような模擬ベンチを準備して J-PARC の繰返し周期 (25Hz) に同期した動的イメージングを実施しました。図8のように、蒸発器の流路内部においても液相と気相が中性子透過率の違いにより明瞭に判別可能であることが確認でき、さらに、液飛びや瞬時蒸発などの特異な挙動を捉えることができました。このような挙動は数値計算等では推定できないものであり、直接観察することで初めて把握できたものです。また、この実験では、赤外線カメラを用いたサーモグラフィを併用して、中性子による撮像と同時に蒸発器表面の温度の測定を行い、両者の関係を調べることも行いました。パルス中性子を用いた動的イメージングは撮像間隔が中性子の発生周期に制限されますが、このような大型の機器や

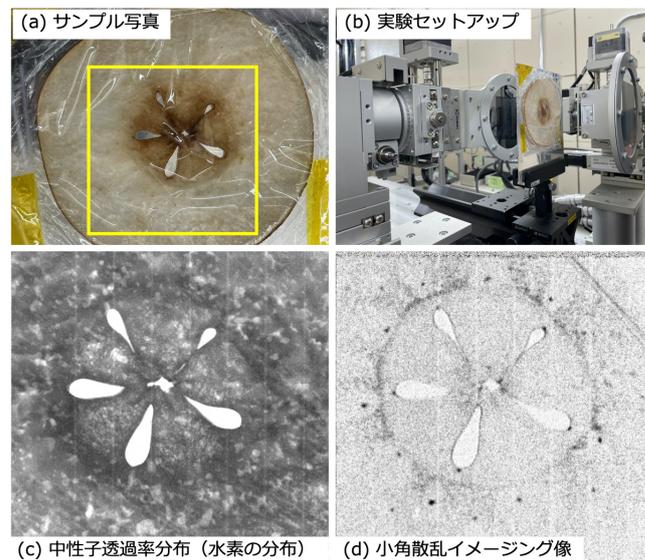


図7 位相イメージングによる梨の観察。(a) 試料写真、(b) 実験セットアップ風景、(c) 中性子透過率画像、(d) ヴィジビリティ像。試料は2mm厚にスライスされた後、テフロンフィルムでシールされています。画角は60mm×60mm。(c) は主に水分によりコントラストが得られているのに対して、(d) では試料の細胞組織の違いを反映していると考えられます。(協力：茨城県農業総合センター生物工学研究所)

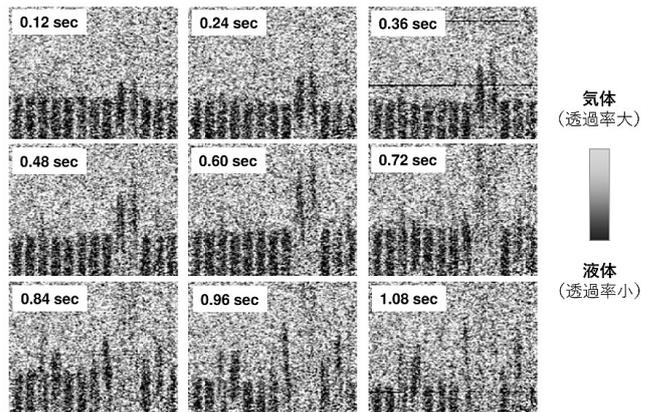
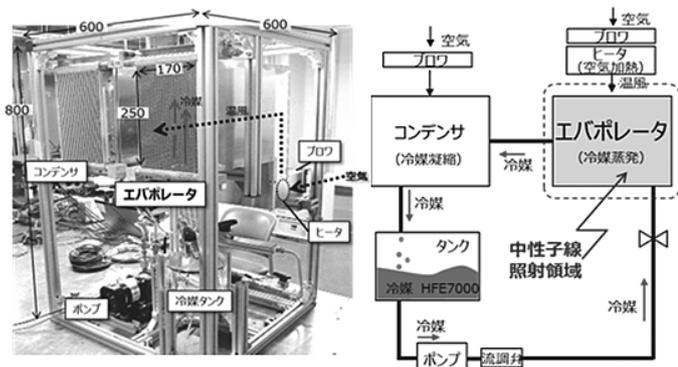


図8 車載エアコンユニットの蒸発器内部での冷媒沸騰挙動の観察。左が実験に使用した模擬ベンチの写真で、蒸発器には実際の車載ユニットの機器が用いられています。右が中性子による動的イメージングの結果で、液相／気相の界面は常に一定ではなく、瞬間的な蒸発や液飛びが発生していることがわかりました。[25] (波紋 Vol.28、No.2、97頁、図9より転載)

付帯設備を必要とする実験では、機器を自由に配置できるRADENの広い実験空間は大いに役立ちました。

産業利用課題では、稼働条件下での透過像の観察やトモグラフィによる3次元的な形状評価などが多く[26]、エネルギー分析を用いた実験はまだ少ない状況です。しかしながら、偏極中性子を用いた磁性材料研究やブラッグエッジによる鉄鋼材料研究などの利用も進んでおり、最近では水と氷における中性子相互作用のエネルギー依存性の違いを利用した水／氷の識別実験[27, 28]のような、中性子のエネルギー分析を有効に活用した実験も始まりました。今後、産業利用課題においてもエネルギー分析型イメージングが積極的に活用されていくことを期待しています。

RADENの利用状況と今後の展望

RADENは2015年度から共用利用を開始し、年間40程度の課題が実施されています。継続的な技術開発により着実にイメージングの性能や実験効率が向上し、世界の先端装置の一つとして認識されています。これまでは国内唯一の大型イメージング装置として活用されてきましたが、JRR-3の再稼働に伴い通常のラジオグラフィ／トモグラフィ実験は中性子強度が高いJRR-3のイメージング装置が主体になると推測されます。そのため、JRR-3のイメージング装置と強く連携し、RADENはよりパルス中性子の長所を活かした利用を集中して進めることになると思います。技術開発としては、10 μ mを切る空間分解能の実現や撮像時間の短縮といった高度化研究、新しいイメージング手法開発などを引き続き進めていく計画です。今後のRADENにおける中性子イメージングの展開にご期待いただければと思います。

本稿で紹介した研究例はRADENメンバーのサポートにより実施されました。また、位相イメージングに使用された干渉計は、JST ERATO百生量子ビーム位相イメージングプロジェクトにおいて開発されました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 岩瀬謙二, Isotope News, **725**, 7-11 (2014).
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201409_TENBO_IWASE.pdf
- [2] 篠原武尚, Isotope News, **732**, 9-14 (2015).
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201504_TENBO_SHINOHARA.pdf
- [3] Y. Kiyonagi, et al., J. Phys.: Conf. Ser. **340**, 012010 (2012).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/340/1/012010/pdf>
- [4] 中性子産業利用推進協議会季報 四季vol.26 (2015), vol.27 (2015), vol.38 (2018).
<http://www.j-neutron.com/pdf/Vol26.pdf>
<http://www.j-neutron.com/pdf/Vol27.pdf>
<http://www.j-neutron.com/pdf/Vol38.pdf>
- [5] Y. Matsumoto, et al., Phys. Procedia **88**, 162 (2017).
<https://www.sciencedirect.com/journal/physics-procedia/vol/88/suppl/C>
- [6] T. Shinohara, et al., Review of Scientific Instruments **91**, 043302 (2020).
<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5136034>
- [7] M. Segawa, et al., JPS Conf. Proc. **22**, 011028

- (2018).
<https://journals.jps.jp/doi/pdf/10.7566/JPSCP.22.011028>
- [8] 甲斐哲也 : Isotope News, **727**, 16-19 (2014).
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201411_TENBO_KAI.pdf
- [9] F. Pfeiffer, et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 215505 (2006).
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.96.215505>
- [10] Y. Seki, et al., Europhys. Lett. **123**, 12002 (2018).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/123/12002>
- [11] 日本アイソトープ協会 : 「中性子イメージングカタログ／中性子施設ハンドブック」
<https://www.jrias.or.jp/report/cat1/218.html>
- [12] <https://mlfinfo.jp/ja/bl22/>
- [13] Y. Su, et al. Scientific Reports **11**, 4155 (2021).
<https://www.nature.com/articles/s41598-021-83555-9.pdf>
- [14] M. Morgano, et al., Addit. Manuf. **34**, 101201 (2020).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221486042030573X>
- [15] M. Busi, et al, Addit. Manuf. **39**, 101848 (2021).
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860421000130?dgcid=rss_sd_all
- [16] A.S. Tremsin, et al., Addit. Manuf. **46**, 102130 (2021).
<https://www.sciencedirect.com/journal/additive-manufacturing/vol/46/suppl/C>
- [17] F. Grazzi, et al, Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali **32**, 463-477 (2021).
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12210-021-00994-2.pdf>
- [18] A.S. Tremsin, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1009**, 165493 (2021).
<https://www.sciencedirect.com/journal/nuclear-instruments-and-methods-in-physics-research-section-a-accelerators-spectrometers-detectors-and-associated-equipment/vol/1009/suppl/C>
- [19] A.W.T. Gregg, et al., Phys. Rev. Applied **10**, 064034 (2018).
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.10.064034>
- [20] J. N. Hendriks, et al., Phys. Rev. Materials **3**, 113803 (2019).
<https://journals.aps.org/prmaterials/abstract/10.1103/PhysRevMaterials.3.113803>
- [21] A.S. Tremsin, et al., Scientific Reports **7**, 40759 (2017).
<https://www.nature.com/articles/srep40759.pdf>
- [22] Y. Miyazaki, et al., JPS Conf. Proc. **33**, 011073 (2021).
<https://journals.jps.jp/doi/pdf/10.7566/JPSCP.33.011073>
- [23] A.S. Tremsin, et al., Acta Materialia **186**, 434-442 (2020).
<https://www.sciencedirect.com/journal/acta-materialia/vol/186/suppl/C>
- [24] B. Betz, et al., Phys. Rev. Applied **6**, 024024 (2016).
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.6.024024>
- [25] 布施卓哉、他、波紋 **28**, 94-98 (2018).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hamon/28/2/28_94/_pdf/-char/ja
- [26] たとえば、株式会社エネオスによるベアリング研究などがあります。
<https://www.eneos.co.jp/company/rd/intro/lubricants/eco.html>
- [27] M. Siegwart, et al., Rev. Sci. Instrum. **90**, 103705 (2019).
<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5110288?journalCode=rsi>
- [28] Y. Higuchi, et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **23**, 1062 (2021).
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/cp/d0cp03887c>

田代 孝二¹、日下 勝弘²

¹豊田工業大学

²茨城大学フロンティア応用原子科学研究センター

重要な汎用性高分子の一つであるポリビニルアルコールの結晶構造が提案されて以来、今日に至る1世紀の間、構造の是非について様々の論争がなされてきた。今回、X線回折および中性子回折データの統合的解析により、結晶構造をついに確定することができた[3]。

合成高分子の結晶構造は、その物性制御のための基本的構造情報として不可欠である。ほとんどの合成高分子の場合、結晶構造解析にはX線回折データを用いるのが一般的である。しかし低分子有機化合物の単結晶と根本的に異なり、合成高分子の回折データは、回折点の一つ一つが幅広く、かつ数が少ない。全ての回折点を集めても多くて数十個程度である。苦心の果てに構造モデルを構築しても、真の意味で信頼に足る構造であるのかどうか疑問が払拭されない。出来る限り、異なる種類の実験データを集め、その構造をサポートすることが必要となる。

このような事情は、ポリエチレンやポリプロピレンなど汎用性高分子についても例外ではない。中でもポリビニルアルコール(PVA, $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})-]_n$)は、1924年にドイツで合成され、1939年に日本で繊維化に成功、1950年に工業化された合成高分子であり(糊クラレ「ビニロン」)、今も膨大な量が利用されている。PVAは高温の水に可溶性結晶性高分子である、と言う点では特異である。その水溶液は、水酸基を有する紙やコンクリートとの接着性が極めて高く、卑近な例では洗濯のりや郵便切手の裏のり、建築ではコンクリート補強繊維として利用されている。小学校で人気のある実験として、PVA水溶液にホウ砂を混ぜゴム毬のようなスライムを作るのがある。PVAの水酸基とホウ酸とは化学結合によって安定な架橋を作る。この原理を利用し、がん細胞に添加するホウ素化合物の量と保持時間を増大させる格好の補助成分としてPVAが注目されており、中性子照射によるマウス大腸癌の消失に成功した由である[1]。また、エチレンとビニルアルコールのランダム共重合体(糊クラレ「エバル」)は酸素透過をほぼ完全に抑え、マヨネーズなどの食品包装フィルムとして欠かせない。PVAは水に可溶であるが、融点近くで熱処理を短時間施すとむ

しろ水に難溶性材料になる。結晶化度が大きく増大したことが原因である。熔融状態から紡糸すると、水分透過性に富んだ高強度繊維になる。このようにPVAは水と関わりの強い結晶性高分子であり、結晶領域の振る舞い、そして分子鎖集合状態についての深い理解が欠かせない。

PVAの結晶構造に関する検討は1930年代から始められたが、1948年にイギリスのC. W. Bunn博士によって結晶構造がようやく提案された[2]。図1に、その構造を示す。向かい合った分子鎖が水素結合でしっかりと結び付けられている。この結晶構造の妥当性については、様々の角度から検討がなされてきたが、必ずしも十分に強い説得力が得られないまま、「確からしい」ものとして世界中で使われ、そして今日に至っている。「確からしい構造」という表現は、甚だ心許ないのではあるが、そのような不確かさが付きまとう事情は、上記の如くX線回折データが決して豊かではなく、精度の高い構造解析を極めて困難にせしめていることに由来する。X線にだけ頼ってはいけぬ。他の観点から確認せよ！

我々は、X線をサポートする独立した手法として広角中性子回折に着目した。高度に配向させた全重水素化PVA試料を作成し、3号炉設置のBIX-3およびJ-PARCのiBIXを用いて広角中性子回折データ収集を行った。驚いたことに、長年に亘って世界中で利用されてきた上述の結晶構造では中性子回折データが上手く再現できないことが分かった。

同じ状況はPVAのヨウ素錯体についても見出された。良く知られているように、PVAフィルムを引き伸ばしヨウ素水溶液に浸漬すると、いわゆる偏光板が得られる。液晶テレビやサングラスを始めとし、日常生活の中でも不可欠なものである。偏光板の原理を理解する上で最も基本的なPVA-ヨウ素錯体の結晶構造について、我々はX線データ解析を慎重に行い、一つの構造モデルを提案した。ところが、その錯体構造は、実測の中性子回折データを全く再現できない！X線は電子によって散乱され、電子数の多い原子ほど散乱の力は強い。圧倒的に電子数の多いヨウ素イオンが高分子鎖の炭素原子位置を見えなくしてしまったのである。

このように、X線回折データ解析によって提案されてきたPVAおよびPVA-ヨウ素錯体の結晶構造では、いずれも中性子回折データの再現ができない。様々の試行錯誤を繰り返した挙句、結晶構造に乱れを導入す

ることで、この矛盾を解消できることに気づいた。図2に、こうして提案したPVAの結晶構造を示す[3]。結晶は、いくつものドメインからなる。個々のドメインにおける分子鎖充填構造はBunn博士によって提案されたものと本質的に同じであるが、ドメイン同士の境界で単位格子の半分に相当するズリが110面に沿って生じ、全体として乱れたドメイン集合構造になっている。このように、X線および中性子に可干渉な統計的乱れ構造の導入により、ようやくPVAおよびPVA-ヨウ素錯体の結晶構造解析に決着をつけることが出来た。振り返れば、最初の構造が発表されて凡そ90年が経っている。

ここで強調したいのは中性子回折実験の役割である。X線回折データだけを用いた構造解析では、例えば、これまで以上に優れたX線データが得られたとしても、恐らくはBunnの構造を塗り替えるほどに画期的なデータにはなり得ないと想像できる。X線と中性子の有機的結合があったからこそ、1世紀に及ぶ難題に決着をつけることが出来たのである。我々合成高分子屋も、これまで以上に広角中性子回折データの重要性に目覚めるべきである。

ところが残念なことに、世界的に眺めても、合成高分子の結晶構造解析に中性子回折データを利用する研究者は、ほんの一握りである。その最も大きな理由は、どうしても重水素化した高分子試料が必要なことである。筆者らは、iBIXを利用して数多くの合成高分子の広角中性子回折データ収集を行ってきている。軽水素のついた高分子、つまり通常手に入る合成高分子をそのまま用いると、軽水素の中性子に対する非干渉性散乱が圧倒的に強いために、構造解析に耐え得る回折データを得ることが殆ど出来ていないのが現状である。それに比べると重水素の干渉性散乱強度は炭素核のそれに匹敵しており、X線データと同様の解析が可能となる。如何に合成が困難であっても全重水素化試料を確保せねばならないのである。残念ながら筆者らには重水素化合物合成の能力はない。高分子合成技術に長けた企業との共同研究が必要となる(PVAの場合、株式会社クラレくらしき研究センターが救いの手を伸べてくれた)。かくして全重水素化試料、しかも、その高度配向・高度結晶化試料が得られると、後はiBIXの出番である。飛行時間法での測定であるために、多少なりとも試料のセッティングには知恵が必要であったが、中性子ビームパワーの強

さが質的に優れた回折データ取得に役立った。iBIXシステムは元来、蛋白質の単結晶構造解析用に設計されたものである。J-PARCでの実験を開始した当初は、筆者ら自身も、合成高分子の構造研究にどれほど役立つのか半信半疑であった。しかし経験を深めるにつれて様々の解決策が編み出され、合成高分子の結晶構造解析に対するiBIXの有用性が高まっている。

ここではPVAの構造解析における中性子回折データの重要性について述べたが、PVAは、ほんの一例に過ぎない。ポリプロピレンやナイロンの結晶構造も、残念ながら未だに確定されているとは言い難い。PVAの場合のようなX線と中性子の連携が、果たして他の汎用性高分子についても上手く行くのかどうか？ネバーエンディングストーリーは、また別のページから始まっている。

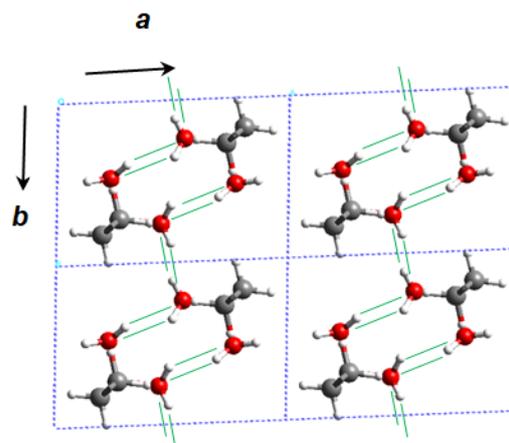


図1 PVAの結晶構造。緑色の線は分子間水素結合を示す(C. W. Bunn [2])

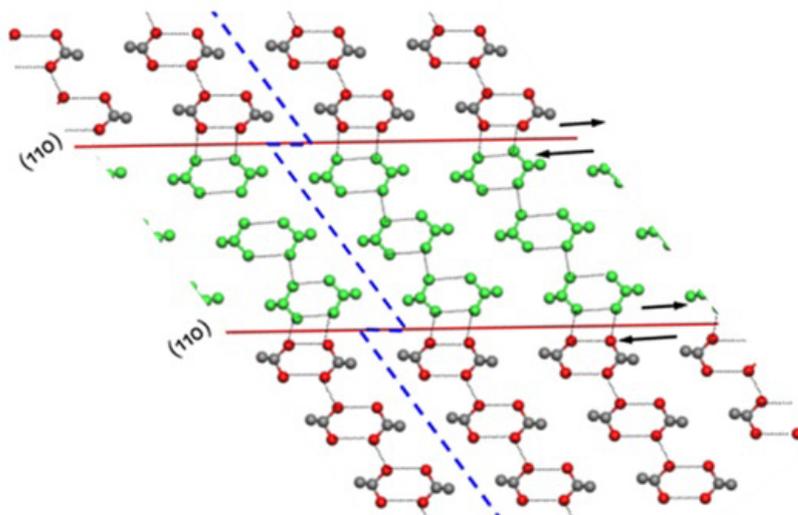


図2 PVAの新しい結晶構造モデル(110面に沿ってドメイン間での滑りが起こっている)[3]

- [1] 朝日新聞(2020年1月23日号)
- [2] C. W. Bunn, *Nature*, **161**, 929 (1948).
- [3] K. Tashiro *et al.*, *Macromolecules*, **53**, 6656 (2020).

中性子産業利用協議会には、研究支援を事業としている企業様にもご参加いただいております。
本号から何回かに分けて、そのような企業様の紹介記事を掲載させていただきます。

企業紹介 株式会社NAT



株式会社NATは、那珂核融合研究所のトカマク核融合実験炉JT-60の運転を支援する事業を行う企業として、平成元年10月に創立されました。爾来、「先端技術をもって科学技術の発展に寄与・貢献し、社会と国民の皆様の生活の維持・向上に役立つこと」を企業理念とし、「核融合技術」や「加速器技術」、「レーザー技術」といった3つの先端科学技術分野を中心とした研究開発支援事業を展開しています。そして、「先端科学技術を支援する専門技術者集団」をキャッチフレーズに、お客様の技術的な要望に応えることができる技術者を派遣する会社です。以下に当社の主要な業務内容を紹介いたします。

核融合技術分野では、量子科学技術研究機構の那珂核融合研究所及び六ヶ所核融合研究所にて核融合技術開発に関する支援業務を展開しています。那珂核融合研究所では、最近完成したJT-60SA（超伝導磁石を用いたトカマク核融合実験炉）の運転・保守業務や、国際熱核融合実験炉(ITER)に用いられる機器開発の技術支援業務を行っています。また、六ヶ所核融合研究所では、14MeV中性子の照射施設用陽子加速器開発に向けたIFMIF/EVEDA加速器の運転・保守業務等を行っています。

加速器技術分野では、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の各陽子加速器の運転・保守業務や、物質・生命科学実験施設における中性子源の運転・保守業務、中性子やミュオン実験施設の実験支援業務等を行っています。また、仙台市に建設中の次世代放射光施設では、加速器開発や建設に付随する作業の支援業務を行っています。

レーザー技術分野では、大阪大学レーザー科学研究

所の激光XII号、LFEXペタワットレーザー等のレーザー施設の運転・保守業務、レーザー技術開発支援業務、そして、量子科学技術研究機構 関西光科学研究所の高強度レーザー J-KAREN等の運転・保守業務やレーザー技術開発の支援業務を行っています。

さて、中性子にかかわる業務としては、先に紹介したように、J-PARCの加速器運転業務から物質・生命科学実験施設における中性子源の運転・保守業務、中性子実験施設の実験支援業務となるわけですが、内容は多岐に及んでいます。中性子実験施設にかかわる業務に焦点を当てると、水素モデレーター用冷凍機の運転・保守業務(写真1)、水銀ターゲットの交換業務(写真2)、中性子ミラー成膜作業(写真3)、その他、中性子実験装置での実験準備作業、各ビームラインの保守としてチョッパーの調整やビームラインアライメント作業、さらに、ユーザー持ち込み試料の安全性確認業務等々、様々な支援業務を行っています。物質・生命科学実験施設の実験ホールに行けば、当社の社員を目にすることができるでしょう。

J-PARCのような施設では、先端科学の発展に寄与する業務を実施しているのので、社員にとってモチベーションの高い業務を実施できる機会が多いようです。実際、加速器や核融合、レーザーに興味があるから入社してきたという社員がほとんどです。

当社は「お客様第1主義」を掲げ、お客様の要望をよく聞いて、お客様と当社がWin-Winの関係で業務ができる努力を絶えず行うことを基本としています。



写真1 水素モデレーター用冷凍機の運転作業



写真2 水銀ターゲットの交換作業



写真3 中性子ミラー成膜作業

我々が支援した業務がお客様の成功につながったとしたら、それが当社及び社員にとっての大きな喜びです。

当社は、J-PARCを始め様々な先端科学施設での業務を展開しており、逆に、先端科学施設以外での業務はほとんどないといった特徴を持つ会社です。国内ではめずらしい会社だと思います。今後も、お客様と業務遂行の喜びを分かち合えるよう社員一同努力して参りたいと思います。どうぞ宜しくお願い致します。

株式会社NAT：茨城県那珂郡東海村村松字平原
3129番地45
URL：<http://nat-web.com/>

活動報告

◆J-PARC MLF 産業利用報告会開催 (2021年7月15～16日)

本年のJ-PARC MLF 産業利用報告会を2021年7月15日(木) 13:00～17:30と7月16日(金) 9:25～18:00の予定でZOOM Webinarによるリモート会議で開催しました。

今回の報告会では、「MLFの産業利用への取組を振り返り、今後の方向性を示す」ことを目的として、これからの3年間は「中性子やミュオンで何が見えるか、今後何が見えるようになるか」をテーマとして開催することにしました。このための視点として、

- ①(産業界)利用の現状、施設に何を望むのか、必要な技術とは何かを示す
- ②(施設側)施設が提供できる技術とその限界を示す
- ③(共同研究グループ) MLFで始動した共同研究の成果を示す
- ④研究用原子炉JRR-3との協調や産業利用について報告する

を視点としてプログラムが編成されています。

2日間で、施設からの現状報告4件、産学連携活動に基づく成果報告7件、小角散乱/反射率による成果報告4件、イメージング/ミュオンによる成果報告4件のほか、特別セッションとして「水圏機能材料の創成と計測」プロジェクトについての報告2件、特別講演2件が行われました。また、2日目にはポスターセッションを設け、38件の発表(うち、MLF以外からの発表11件)を行いました。いずれの報告、セッションでも活発な議論が行われ、初日は大幅に予定時刻を超過する程でした。

参加者は2日間でのべ352名(内、企業からの参加は150名)でした。多くの方にご参加いただくことができ、リモート開催のメリットを生かすことができました。

なお来年度のこの報告会は2022年7月14日(木)～15日(金)に開催を予定しています。

◆金属材料研究会を開催(2021年7月27日)

2021年7月27日に金属材料研究会を開催しました。今回は話題提供として古河電気工業(株)の佐々木宏和様と、日本原子力開発機構の大場洋二郎様にご講演をお願いし、それも踏まえて、固溶にともなう変化について議論を行いました。結論を得るためにはまだ議論が必要な状況ですが、継続して議論を進めていく予定です。今回の出席者は16名、うち会員企業7名、大学2名、研究機関7名でした。なお、次回開催は12月20日を予定しています。

◆有機・高分子材料研究会を開催 (2021年8月3日)

2021年8月3日に有機・高分子材料研究会を開催しました。今回は、JAEA熊田高之様に「顕微鏡でもX線でもなくなぜ中性子小角散乱法なのか?」と題してご講演いただき、中性子小角散乱法の意義についてご紹介いただき、出席者間で議論を行いました。今回も講演は1題として議論の時間を長くするようにしましたが、議論の時間に余裕を持てることは意義あったと思います。参加者は30名、うち、協議会会員企業11名、一般企業2名、大学教員4名、大学学生2名、研究機関11名でした。

◆初級Z-Code講習会を開催 (2021年8月2日～31日オンデマンド開催)

本年の初級Z-Code講習会、事前に講師の先生方の講演を収録した映像を特設サイトに掲載し、それを見て学習いただく、オンデマンド方式での開催としました。期間は2021年8月2日から31日までとし、81名からの参加がありました。うち、協議会参加社12名、一般企業2名、大学教員19名、大学学生35名、研究機関13名でした。1か月間のアクセスは約500あり、オンデマンド方式の利点を生かすことができたと考えています。

お知らせ

◆2021年度中性子実験技術基礎講習会(レベル1講習会)開催(2021年10月21日)

中性子実験技術の初心者の方を対象に中性子実験技術の基礎的事項を紹介し、中性子実験施設(J-PARC MLF、JRR-3等)での実験計画立案や課題申請に役立てていただくことを目的として、中性子実験技術基礎講習会(レベル1講習会)を開催します。

開催日時: 2021年10月21日(木) 9:35~17:00

開催方法: Zoomによるリモート会議

参加申込: 2021年10月15日(金)までに下記の申込フォームからお申し込みください。

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdSxwEOEr-ue3EUTZMSf6RplmoakxZzRzrsFYiZ1cO3MdoFw/viewform>

詳細は、協議会WEBサイトでご確認ください。

<http://www.j-neutron.com/cat59/post-232.html>

◆CBI研究機構 量子構造生命科学研究所/中性子産業利用推進協議会 生物・生体材料研究会合同シンポジウム「生体分子の動的挙動解析への挑戦 試料調製から解析まで」(2021年10月29日)

本年の「生物・生体材料研究会」をCBI研究機構 量子構造生命科学研究所との合同シンポジウムとして開催いたします。

開催日時: 2021年10月29日(金) 9:00~12:00

開催方法: Zoomによるリモート会議

参加申込: 2021年10月22日(金)まで下記Google

Formで受付

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfkM3nkKjl-WW5FUcwxeWOrl8ifr654EFklArNQA7cLGIJbtw/viewform>

詳細は、協議会WEBサイトでご確認ください。

<http://www.j-neutron.com/cat59/1029.html>

◆国立科学博物館の企画展「加速器」開催中(2021年7月13日~10月3日)

国立科学博物館では企画展「加速器」を開催しています。J-PARCとKEK つくばキャンパスにある大型加速器施設を中心に、日本の加速器の発展の歴史や、加速器の初歩から宇宙の謎をさぐる最先端研究、身近なところで利用されている研究成果まで、わかりやすく紹介しています。

<https://www.kahaku.go.jp/event/2021/07/accelerator/>

国立科学博物館の開館日、料金、入館方法(事前予約方法)については、同館のサイトでご確認ください:
<https://www.kahaku.go.jp/>

◆金属材料研究会開催(2021年12月20日)

通算第3回目の本研究会を2012年12月20日(月)13:00~15:00に開催します。これまでの研究会での議論を更に継続して、金属材料の新たな中性子による解析法の可能性についてデータに基づき議論を行います。なお、本研究会への民間企業からの参加は中性子産業利用推進協議会参加企業に所属されている方に限定しています。

◆リンクのご案内

中性子・ミュオン利用ポータルサイト: <https://jrr3ring.jaea.go.jp/jjoin/>

J-PARC: <http://j-parc.jp/c/index.html>

J-PARAC MLF (Meet@MLF): <https://mlfinfo.jp/ja/>

J-PARAC MLF (Meet@MLF) 成果検索: <https://mlfinfo.jp/ja/reports/published.html>

J-PARC センター ユーザーズ オフィス: <http://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: <http://is.j-parc.jp/MLFuser/>

茨城県県内中性子利用連絡協議会: <http://www.htc.co.jp/neutron/>

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)・

富安 啓輔(日産アーク)・原田 久(ヤマハ発動機)

事務局 日比 政昭・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:

<http://www.j-neutron.com/siki.htm>

中性子産業利用推進協議会(IUSNA) 季報「四季」【21年・秋】Vol.52

発行日 2021年9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センター D201

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

<http://j-neutron.com/>