

季刊誌

J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complex

No. **2**

2016 冬

W I N T E R

特集

中性子で「見る」

中性子イメージングの新しい未来

<http://j-parc.jp>



特集

中性子で「見る」 中性子イメージングの新しい未来

中性子線はX線と同じように物質を透過する能力に優れている。その能力を活かして、レントゲンのように中性子線で物質の内部を透視する「中性子線ラジオグラフィ」が古くから行われてきた。

近年の測定・解析技術の進歩により、観測対象物質の内部の構成元素の情報、結晶組織の情報、さらには物質内部の温度や磁場

の情報など、物質を原子レベルで見るだけでなく、物理的な状態の空間的な分布を画像化することも「中性子イメージング」の領域として広がってきている。そして、その技術を支えているのがJ-PARCの強力なパルス中性子源だ。

本号では、近年活動領域が拡大しつつある「中性子イメージング」について特集する。

監修・協力：篠原武尚(J-PARCセンター)

例えば、目の前に中身の見えない物質があるとき、その物質を壊さずに中の情報を知るにはどうすればよいだろうか。一つの手段は、X線を使ってレントゲン写真を撮影することだ。X線の透過性により、対象物の内部を非破壊で観察することができる。

中性子イメージングは、X線を用いたレントゲン撮影と同様に、中性子線を用いて対象物の透過像などを得る手法だ。物質を透過するときに、X線は原子核の外側にある電子と相互作用するので、電子の数の少ない軽元素を観察することは難しい。一方、中性子線は原子核と相互作用し、吸収・散乱される。したがって、X線では識別することができない水素

やリチウムなどの軽元素でも、中性子線では“見る”ことができる。

同じ対象物に対して、X線と中性子線では見えるものが異なるので、両者を相補的に用いることで、より詳細に対象物を解析することが可能になる(写真1)。

一方で、中性子線でしか見えない世界もある。例えば鉄の組織を調べるとき、X線だと表層の数マイクロメートルしか見えないが、中性子線だと数センチメートルの厚さでも透過して見ることができる。また中性子線では鉄の結晶の情報を可視化することもできる。鉄は圧延することで結晶構造が伸びたり、加熱・焼入れすることで結晶格子が変わる。産業用に鉄鋼を加工する際に、鋼材の部位ごとに不均質になる結晶情報を一度に検査するには、パルス中性子を使ったイメージングが非常に役に立つ(写真2)。

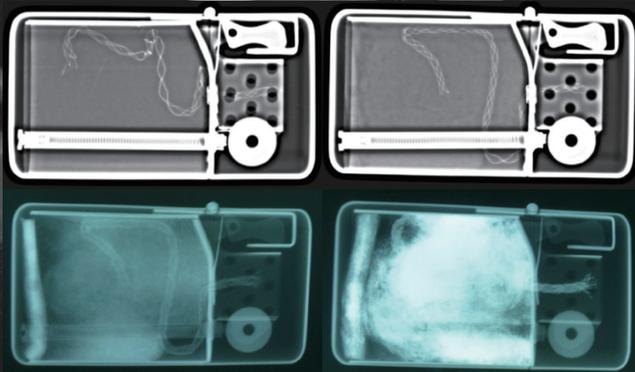


写真1: オイルライターのX線ラジオグラフィ(上段2枚)と中性子線ラジオグラフィ(下段2枚)。X線は、金属に対する吸収が大きいので、金属部品が白くはっきり写るが、オイルの有無は識別が困難。中性子線では、金属は透過しやすいのでコントラストが小さいが、オイルは分子中に水素を含有するので、有無を明瞭に識別できる。

資料提供：住重試験検査株式会社

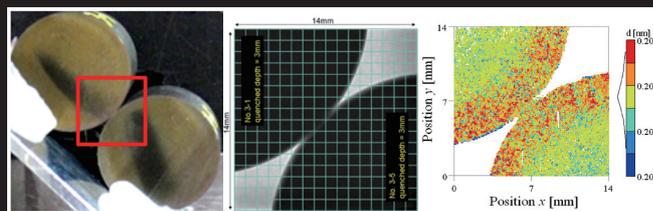


写真2: 焼入れ深さ3mmの中炭素鋼丸棒の測定。左図: 試料、中央図: 中性子ラジオグラフィによる単純な透過像、右図: パルス中性子を用いたプラグエッジ解析。右図では、焼入れにより生じるマルテンサイトと呼ばれる組織が試料の表層に局在していることが分かる。

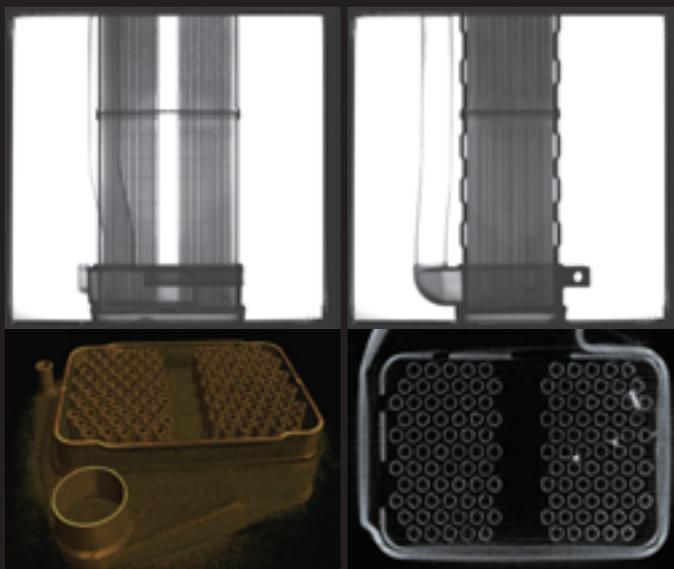
中性子イメージングの産業利用

中性子は物質透過能力が高く、水素などの軽元素を含む物質の可視化を得意とするので、機械装置の内部の観察に適している。例えば、自動車のラジエーターや航空機やロケットの部品の観察、エンジンオ

イルや配管中の液体、さらには燃料電池内の水の挙動の可視化ができる。また、機器を稼働した状態での観察もできるため、中性子イメージングは産業界の研究開発に大いに貢献できる技術である。



J-PARC の中性子イメージング装置 RADEN で測定中の自動車のラジエーター。背後の黒色ボックスが中性子検出器。



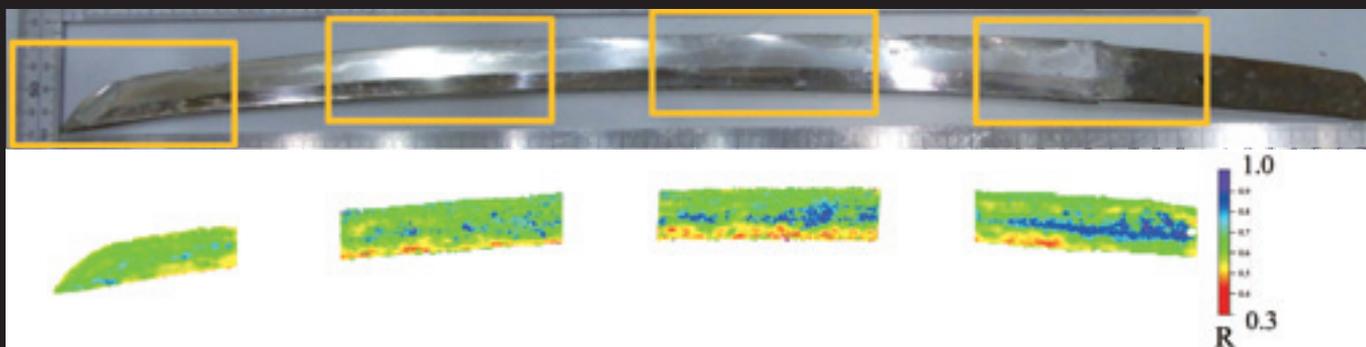
上段 2 枚は中性子線による透過像。下段は CT 再構成して得られた立体画像 (左) と断層像 (右)。CT 再構成像からラジエーター内部の配管の様子がよく分かる。
資料提供：放射線利用振興協会 (RADA)

中性子イメージングの文化財・考古学への応用

中性子線は非破壊で対象物を分析できるので、破壊することができない貴重な文化財や古美術などの分析にも応用できる。

例えば、日本刀は鉄でできているが、複数の結晶組織の複合体であり、パルス中性子イメージ

ングによって非破壊で結晶組織の分布や結晶格子サイズ、歪みなどを分析でき、製造法の歴史や産地による違いを知る手がかりとなる (P5~対談参照)。



ブラッグエッジ解析による日本刀の結晶配向マップ

- (青) ・ 茎 (柄の部分)、刀身中心に等方的な結晶：
金属組織にあまり塑性加工が与えられていない。
- (緑) ・ 刃部は一樣な繊維集合組織：
刃側は鍛錬が繰り返行われ、加工が均一である。
- (赤) ・ 峰側に強い繊維集合組織：
峰側は峰を形づくる際の加工があり、その加工によって結晶配向に異方性が現れる。

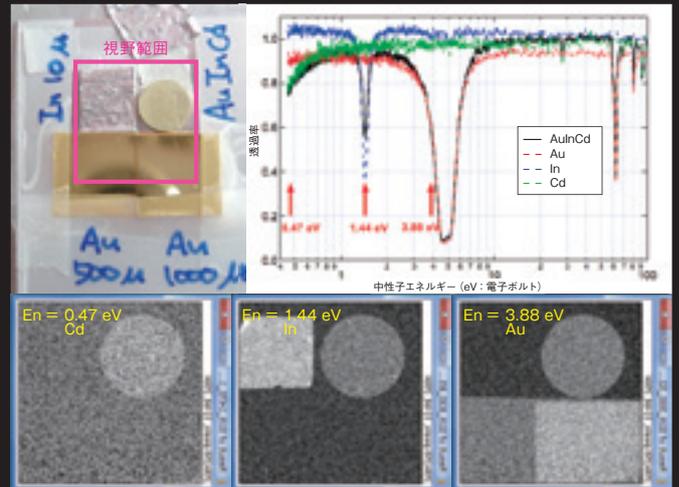
ブラッグエッジ法：

中性子のブラッグ回折によって起こる中性子透過率の変化を利用した方法。結晶構造、結晶格子サイズ、ひずみ、異方性、集合組織等の結晶に関する情報を位置ごとに解析することができ、鉄鋼材料の評価や新しい構造材料の開発などを中心に応用研究が進められている。

パルス中性子イメージング

イメージングに使用する中性子源には、従来の原子炉を利用した定常中性子源の他に、近年では加速器をベースにしたパルス中性子源が加わった。J-PARCでは、1秒間に25回の一定間隔で中性子が発生するので、発生した時間を基準として、検出器までの飛行時間 (Time of Flight ; TOF) を測定すると、TOFに対応した中性子のエネルギーを知ることができる。

これにより、中性子の物質に対する透過率のエネルギー依存性を精密に調べることができ、観察の対象物の結晶構造の違い (ブラッグエッジ法) や構成する元素や温度の空間的な分布 (共鳴吸収法)、さらには空間や物質中の磁場の分布 (偏極中性子法) を調べることができる。これらは、物質の中の様々な物理的・化学的な情報がどのように分布しているかを画像として取得する、最新の中性子イメージング手法 (エネルギー分析型中性子イメージング) である。



J-PARCの新しい中性子減速材素材として開発中のAuInCd (金 - インジウム - カドミウム) 合金の共鳴吸収法による均一性評価試験。左上が試料の写真。下の3枚の画像は各金属固有の中性子を強く吸収するエネルギー (Cd = 0.47 eV, In = 1.44 eV, Au = 3.88 eV) で撮影したもの。丸いAuInCd合金は、すべてのエネルギーの画像で写っていることから、この合金が3種すべての金属元素を含み、均一に分布していることが分かる。これはパルス中性子イメージングだからこそ得られる画像である。また、右上グラフの中性子透過率のエネルギー依存性を解析すれば、含有されている元素の種類と量を定量的に評価できる。

共鳴吸収法:

ある特定の中性子エネルギーにおいて起こる元素固有の共鳴吸収現象を利用した方法。吸収量から元素の種類と量を定量的に評価できる他に、エネルギー依存性が急峻に変化するため、その線幅から原子核の熱運動 (つまり温度) の情報を解析することができ、元素選択型イメージング、温度分布イメージングに利用することができる。

偏極中性子法:

中性子を持つ特徴であるスピンを利用した方法。スピンの向きの揃った中性子 (偏極中性子) を利用し、磁場によるスピンの変化をエネルギーごとに調べることで、物質中や空間中の磁場の分布を可視化するだけでなく、その強さと向きを解析することができる。

世界初のパルス中性子専用 エネルギー分析型中性子イメージング装置 BL22 螺鈿 -RADEN-



BL22 螺鈿 -RADEN-

螺鈿 (RADEN) は、J-PARCの物質・生命科学実験施設 (MLF) の22番目のビームライン (BL22) に設置された、世界初のパルス中性子イメージング専用装置だ。先端的なパルス中性子イメージング実験が可能で世界唯一の実験装置のため、2014年11月の運用開始以降、海外からも積極的に利用されている。

RADENは、電気モーターや車載用二次電池、様々な機械部品、鉄鋼材料といった産業利用だけでなく、材料科学研究や植物観察を始めとする農学研究等の幅広い分野で利用され始めている。また、高性能な中性子画像検出器や新しいイメージング手法の開発も進められており、さらなる技術の高度化に向けた研究開発がなされている。

鬼柳善明さん

日本中性子科学会会長



中性子で「見る」世界

池田裕二郎さん

J-ARC 前センター長

ユーザーの立場として、中性子利用技術の開発に長く携わってきた中性子科学会会長の鬼柳善明氏。施設側の立場として、世界レベルの中性子実験施設の建設に携わってきた前 J-ARC センター長の池田裕二郎氏。お二人に、J-ARC の強力なパルス中性子源の利用で新たな展開を迎えている「中性子イメージング技術」の将来について、お話を伺いました。

■中性子を使った“イメージング” —中性子イメージングについて教えてください

鬼柳 ラジオグラフィのような伝統的な手法で透過イメージを撮影するクラシカルなイメージングと、最近発達してきたパルス中性子を使ったイメージングとで、少し様相が違ってきます。伝統的なイメージングでは、中性子が水素を含んだものの撮像が得意なので、例えば機械や装置、燃料電池などの中の水素を含んだ物質、つまりオイルや水などの分布を見ることができます。

—最新のパルス中性子ではどのようなものが見えますか

鬼柳 パルス中性子を使った“飛行時間法 (Time of Flight, TOF法^{*1})”を使うと、中性子のエネルギーや波長に依存して、透過率が出せます。透過率は結晶や、構成する物質ごとに特徴があるので、対象物のいろいろな情報を引

き出せます。また、あるエネルギー領域では中性子の共鳴吸収^{*2}という現象があり、各元素によって特徴的な中性子の吸収が起こるので、共鳴の起きたエネルギーをきちんと測定することによって、中にどんな元素が含まれているかを知ることができます。重めの元素が識別しやすいです。応用例としては、合金の中に微量元素がきちんと入っているかを調べるなどができます。もう一つ注目しているのは、温度による中性子の共鳴幅の変化の解析で、非接触でサンプルの温度測定に応用することも期待しています。

池田 イメージングとは“視覚化”です。中性子は透過力の高さが利点で、サンプルの中身の位置や形状、物質の分布状態の視覚化から始めて、将来的には温度分布や磁場など、サンプルの状態まで視覚化しようとしています。J-ARCを作る時に、中性子を使ってモノの中を見るということが念頭にあっ

たので、それがようやく花が開きはじめた今のこの状況を嬉しく思います。

■中性子研究のきっかけ —どうして中性子の研究に携わろうと思ったのですか？

池田 大学の研究室が中性子を使って原子核の研究をする施設でした。発生させた中性子を何かに当てて行く私の研究はその頃から始まっています。その後、原子力研究所 (現 JAEA) に入って核融合のエネルギー源になる、14 MeV (140万電子ボルト) のエネルギーを持つ DT プラズマ^{*3}から出てくる中性子の実験を20年ぐらいしていました。その後、J-ARCに関わるプロジェクトに参加したのですが、そのとき最初に出会った人が鬼柳先生でした。その頃から一緒に実験をしてきています。

鬼柳 素粒子を実用の世界で役立てたいと思い、北海道大学の原子工学科に入学したら、たまたま中性子の先生が

いらっしゃって、その研究室に入りました。ちょうど北大に電子加速器をベースにした小型中性子源ができて、それを使って中性子実験を始めました。固体メタンを使った冷中性子源の開発や、出てきた中性子で様々な物質を調べるための中性子分光器の開発ですね。その後、高エネルギー物理学研究所（現KEK）にKENS^{*4}ができて、そこに固体メタンの冷中性子源を設置したり、北大で開発した分光器をセットしたりしていました。そうこうしているうちに、J-PARCのずっと前身の計画であるGEMINI計画や大型ハドロン計画^{*5}が始まったので、新たに大型施設用の中性子源の開発を始めました。

■BL22「螺鈿-RADEN」 世界初のパルス中性子専用イメージング装置

—RADENについて教えてください

鬼柳 RADENはパルス中性子源にできるイメージング装置としては世界初のものです、非常に特徴のある装置になると考えました。RADENを使ったイメージングでは、これまでとは違った全く新しい情報を出せるようになります。そしてその情報は産業界や大学などの研究に役に立つだろうと思います。現在、ヨーロッパ核破砕中性子源施設でもRADENに非常に似たイメージング装置が作られていて、今までとは違った形の中性子イメージングが世界に認められてきています。その先駆けが

RADENです。

RADENの建設前から、J-PARCの人たちにはこの方法に非常に興味を持っていただいて、建設時も自分たちのテーマとして一生懸命取り組んでくれました。

池田 同じものは作りたくないというのはありますね。どこでもそうですが、違うことをやりたい。

鬼柳 普通の中性子の散乱装置では、世界のどこかに似た様な雛形があるのですが、RADENの場合は前例がないので、その分いろいろ考えなければいけないこともあったので、大変だったけれど、皆さんには楽しんでいただけたと思っています。

—RADENで何をみたいですか

鬼柳 いろいろなものを見てみたいですが、世の中を驚かせるようなことを期待しています。特に、材料開発に役に立つようになればいいなと思っています。

池田 材料を加工している最中の場所ごと時間ごとの集合組織の変化がリアルタイムで見えると、情報量がものすごく増えます。そうすると、自動車メーカーや他の産業のメーカーも開発する目が違ってきます。そういう情報がまず出てくるといいですね。

—RADEN開発で大変だったこと

鬼柳 ベースの部分は結構研究していたので、本質的に困ったことはないです。ただ、いまだに課題なのは検出器

です。J-PARCの高強度の中性子をフルに受けられる様な検出器がほしいです。

池田 検出器はRADENだけではなくすべての装置の基本的な悩みです。

鬼柳 RADENの検出器には中性子が直接当たります。このため、条件が余計に厳しく、他の装置に比べて検出器への要求はものすごく高い。ただ世界的にいろんな検出器を開発しようという動きもあり、良い検出器ができるとまた別のイノベーションが起きるので、非常に期待しています。

池田 そのトレンドはとても大事で、次代のJ-PARCを担うに一つの目玉になるのが、究極のイメージング。実空間でモノを見るということです。あとは3次元トモグラフィ^{*6}。イメージングの違う世界が拓けてきます。

鬼柳 中性子の3次元トモグラフィでは、普通のCTと同じようにサンプル中の物質の形状を可視化するだけでなく、結晶相が違うものが入っていても、その情報をきちんと3次元で可視化できます。

あと、個人的な感想ですが、外国からの方がユーザーに多いので、もっと日本人にも利用してほしいですね。

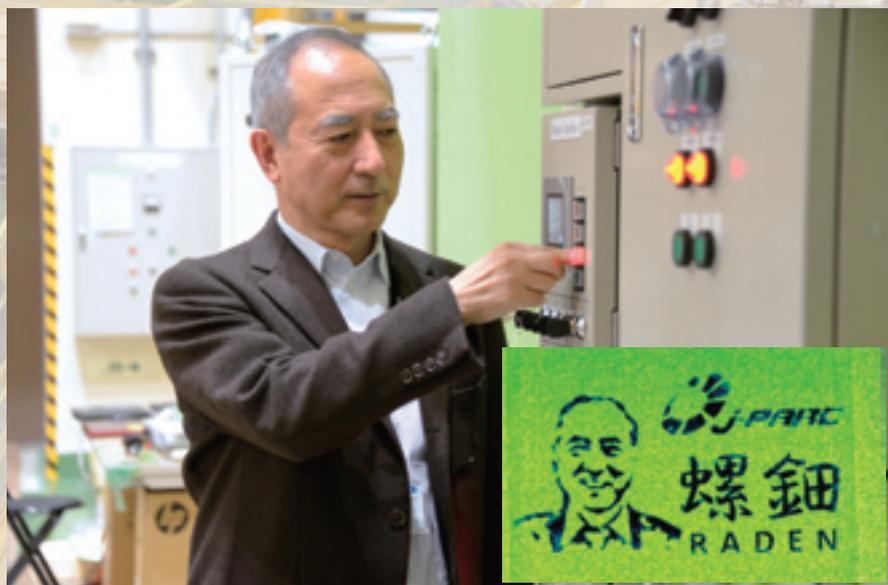
池田 ユーザーの開拓という意味でもね。鬼柳先生は徳川ミュージアム^{*7}ともつながりがあって、古美術や刀剣などにも分野を広げていらっしゃいます。

—刀のイメージング

鬼柳 自分が剣道をやっていたせいか、刀のイメージングは面白いです。刀剣は古美術なので壊すことができません。そこで今、銘の入った刀を一振り中性子イメージングで見ているのですが、焼入れの状態や刀身の中の集合組織の状態や結晶格子のサイズなど、位置依存で全体を測定することで、刀の作り方が見えてきます。

硬さの情報や集合組織の分布の仕方などで作り方の情報を解析することで、品質や刀の出来の良し悪しも分かる様になると思います。いろいろな刀を調べることで、産地や時代の情報も明らかにしていきたいですね。

池田 硬さや作る過程などが浮き彫りになってくると、今後の工業や生産業に何か新しい知見が出てくるかもしれません。



RADENのファーストビーム出射時、装置の開閉シャッターを押す鬼柳氏。そのときに撮影した画像には、中性子吸収材で鬼柳氏の似顔絵が描いてある。

鬼柳 刀の作り方って伝承されてない部分もあるんですね。昔の失われた技術を、今の刀鍛冶さんたちが苦労して探求されている。その辺を明らかにできれば、昔の良い技術を今の技術にも反映できるかもしれない。そういうことができれば、非常に嬉しいですね。

■中性子の産業利用

—海外では中性子イメージングの産業利用が多いですが、日本ではどうでしょう？

鬼柳 イメージングを商業的にやっているところは、住重試験検査だけです。

—どういふモノを見ているのですか

鬼柳 火工品^{※8}が多いです。JAXAのロケットに使用している。火工品は全数検査しています。

中性子イメージングの撮像が簡単であれば、産業界にももっと興味を持っていただけるのですが…

池田 例えば、僕は今、理化学研究所で小型中性子源^{※9}に携わっているのですが、研究室クラスの中性子源で簡単に撮像できるって分かっていただけで、サンプルは増えていくと思います。

鬼柳 安価でメンテナンスしやすい加速器ができれば、研究室スケールの中性子源はもっと普及していくと思います。それはとても期待しているところです。

池田 J-PARCで培われている中性子に関わる技術は、今後の小型中性子源の発展を支えるものと信じています。

鬼柳 J-PARCの様な大型中性子源があって、小型の中性子源もあってというのが非常に良いバランスだと思います。J-PARCだけだとカバーできる人数も実験テーマの数も限りがあります。いろんなことをやろうと思ったら、小型中性子源も巻き込んで、場所的にも分野的にも広げて行くことが必要です。小型中性子源の限度を越えるところはJ-PARCの能力を活かしていく。J-PARCはまさにそのためにある装置ですので。

■将来の中性子装置

—今後、どのような中性子の装置を作りたいですか

池田 中性子のサイエンスは、強度が制限になっているので、強度が強ければ強いほどサイエンスは明るくなりま

す。今の1メガワットから、次の世代では何桁も高い線源を提供したい。とはいえ、全体で何百メガワットとは行かないので、ある方向での輝度がめざましくなるのだと思います。そのためには中性子の減速材や検出器など、すべてのものが関わってきます。

サイエンスとしてもいろいろな夢があります。分子構造など、いわゆる顕微鏡として、実空間でモノを見たいというのもその一つです。

鬼柳 J-PARCの建設時、さまざまな分光器に合うように今の減速材を作ったわけですが、装置群を分けて、それに特化した輝度の高い中性子源を作るなど、まだ工夫はあると思います。それから、今は冷中性子源までですが、さらにエネルギーを低くしたときに、どういうサイエンスが出てくるのか。それに応じた別の中性子源を考えるというのがあります。

中性子の下流側にはさまざまな装置がありますが、まだ中性子顕微鏡というのは存在しません。これができればもっと細かいところが見えるので、面白いかもしれません。

■次世代の研究者に期待すること —中性子科学分野を担う次世代の研究者に何を期待しますか

池田 全て何をするにしても、面白いことがいっぱい詰まっています。チームラインごとにならなくなって世界一になる。そのことを常に念頭において、自分がやらなければ、その分野の研究が成り立たないという意識で前に向かって欲しいですね。

用語解説

※1 飛行時間法

中性子はエネルギーの違いで速度が変わる。その性質を利用し、サンプル-検出器間の中性子の飛行時間を観測し、中性子の波長を精密に決定することで、サンプルの性質を詳細に調べることができる。

※2 共鳴吸収

特定の入射エネルギーのときに中性子の吸収が著しく大きくなる現象。一般的に中性子の入射エネルギーが数eV(電子ボルト)~数keV(キロ電子ボルト)の範囲で見られる。共鳴吸収反応は原子核の構造によるので、核種ごとに吸収の生じる中性子エネルギーが異なる。

※3 DTプラズマ

重水素(Deuterium)と三重水素(Tritium)の混合プラズマ。

※4 KENS

陽子シンクロトロンを利用した世界初の実用パルスポレーション中性子源。

鬼柳 中性子イメージングの分野では、長い間、単にX線イメージングと同じような手法が取られてきましたが、最近は磁気情報など様々な新しい情報が出せるようになってきました。常に今じゃなくて、次の段階を目指して、自分たちで工夫しながら、装置・手法の開発を続けていってほしいと思います。応用についても、やはり自分たちの面白いと思うことをどんどん見つけて出して、発展させていってほしい。特に装置は、実際にその場にいる人でないと開発できない。その人たちが開発し続けなければ、早晚旧態的な装置になってしまうので、ぜひ頑張ってもらいたいと思います。

■若い皆さんへ

—読者の若い世代へのメッセージをお願いします

池田 中性子はとにかく面白いです。ぜひ使って、イメージを見てください。「物理」というのは、物の有り様、つまり物の理(ことわり)です。それを視覚化するというので、何にでも興味を持てる、そういう素材が中性子にはあると思います。

鬼柳 中性子はあまり馴染みのない粒子ですが、それを使って様々な研究ができますし、まだまだ多くの応用分野がある筈です。そういう所にぜひトライしていただきたいですね。

※5 GEMINI計画・大型ハドロン計画

ともに過去に立案された大型陽子加速器計画。これらの後継計画が現在のJ-PARCである

※6 3次元トモグラフィ

CTスキャンのように断層撮影を行い、サンプルの内部情報を立体的に可視化する手法。

※7 徳川ミュージアム

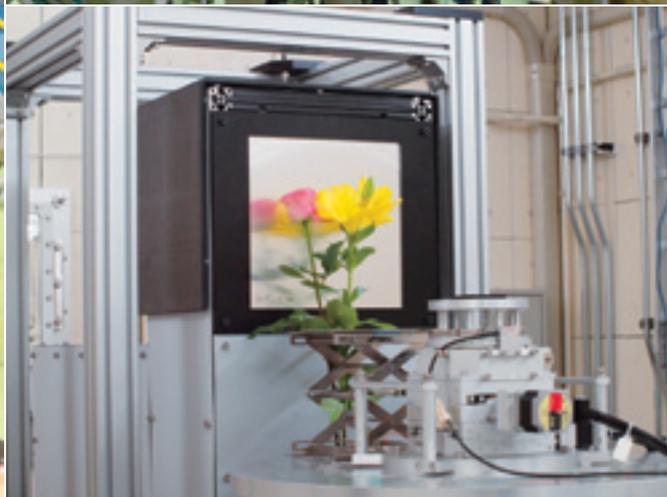
水戸市にある博物館。水戸徳川家伝来の美術品や工芸品、古文書類を収蔵・展示している。

※8 火工品

火薬を利用するように加工した製品。ロケットの場合は、起爆管や分離ボルトなど、固体ロケットブースターや衛星などの切り離し時に使用する。

※9 小型中性子源

理化学研究所が開発した普及型的小型中性子源システムRANS(RIKEN Accelerator-driven Neutron Source)。中性子線利用に最適な金属材料や軽元素を扱うものづくり現場への普及を目指している。



2014年11月7日、RADENはファーストビームを迎えた。左の写真はそれを祝した記念撮影風景。ビームライン番号「22」の上の赤シグナルがビームの開始を示している。 右上の写真では、ファーストビームにより得られる画像を関係者が待っている。パソコン画面を覗きこむ鬼柳氏の姿も確認できる。右下は表紙画像を撮影した時のRADEN装置内部の様子。



鬼柳 善明 (きやなぎ よしあき)

1973年 北海道大学工学研究科原子工学専攻修士課程修了
 1973年 北海道大学助手
 1979年 同上講師
 1993年 同上助教授
 1995年 教授
 2011年 退職、その後、特任教授などを経て、
 2013年 名古屋大学工学研究科の特任教授、現在に至る
 この間、J-PARCも含む加速器中性子源開発、中性子分光器開発に従事、
 最近はハルス中性子イメージングやBNCT中性子源の研究に注力

池田 裕二郎 (いけだ ゆうじろう)

1949年 高知県生まれ
 1979年 名古屋大学工学研究科博士課程満了
 1979年 日本原子力研究所入所
 2001年 J-PARC、MLF建設グループリーダー
 2012年 J-PARCセンター長
 2015年 J-PARCセンターアドバイザー

