



季刊誌

NO.16

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX 2021

インタビュー

多様な分析に負ミューオンを使えるようにするために

反保 元伸

ミュオン科学が切りひろく文化財科学の世界

● 貨幣の「色付」技術の進化、
青銅製品の原料のルーツを知りたい

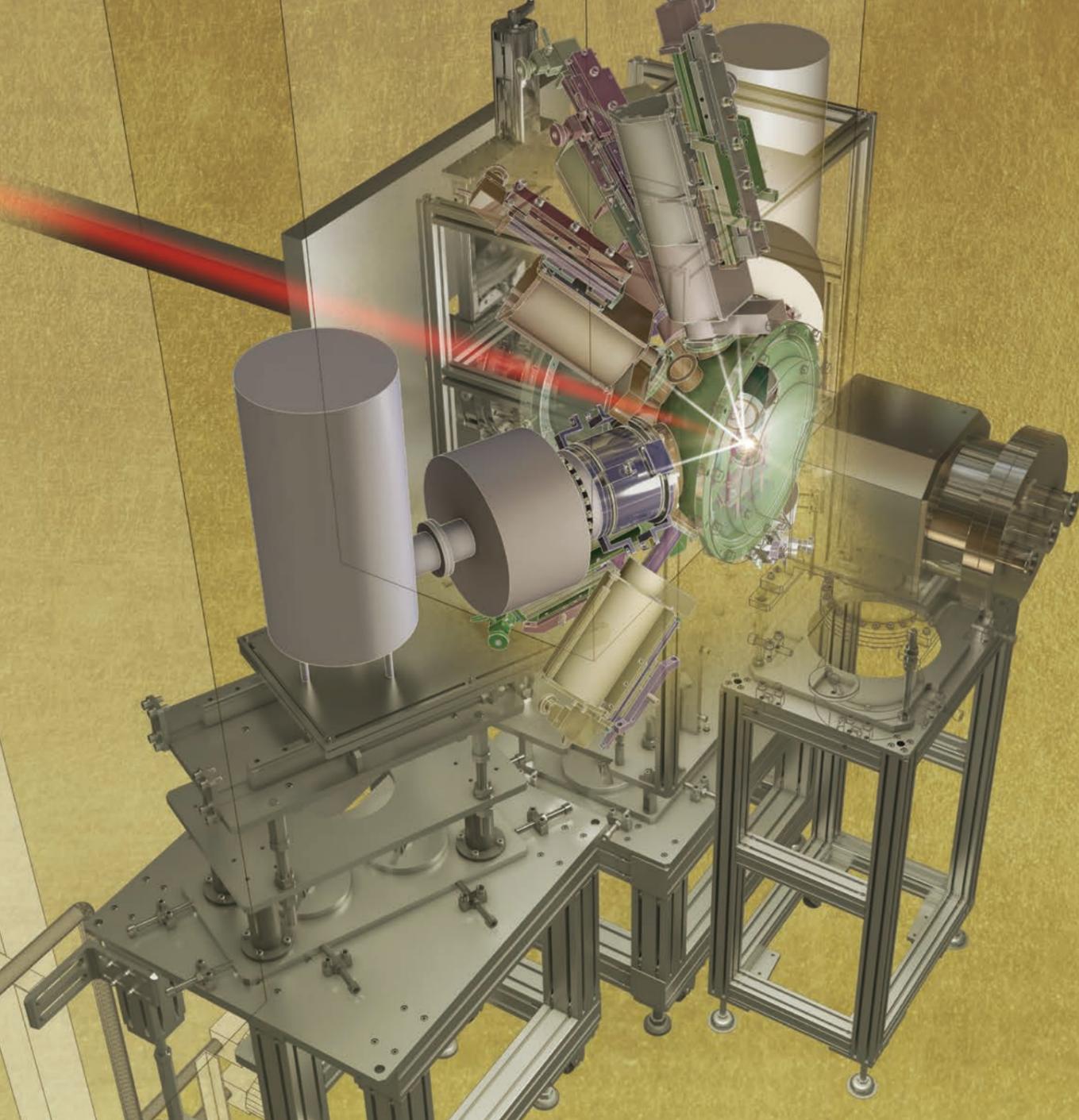
齋藤 努

● 医療文化財を次世代に繋ぐ挑戦

高橋 京子

特集

人文科学にも広がる J-PARCの 量子ビームの応用



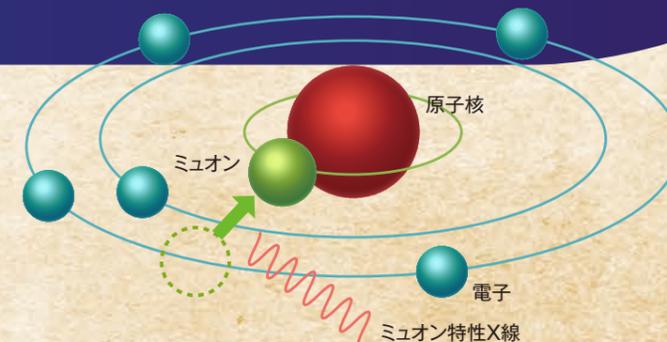
負ミュオン元素分析とは

物質を構成する原子の中の電子は、原子核の周りのとびとびのエネルギーの軌道を回っている。外側のエネルギーの高い軌道から内側の低い軌道に移って安定化するとき、その差分に相当するエネルギーを光として放出する。電子軌道のエネルギーは元素ごとに決まっているので、放出される光のエネルギーは元素に固有である。この原理を利用した蛍光X線分析などの非破壊元素分析の手法が用いられている。

負ミュオンは、負の電荷を持ち、電子と似た性質の素粒子だが、質量が電子の約200倍と重い。物質に負ミュオンを打ち込むと物質中の原子核に捕獲され、電子の代わりに負ミュオンが原子核の周りを回るミュオニック原子を形成する。電子よりも重い負ミュオンは、電子と比べて、原子核に

近づることができる。したがって、外側の軌道から内側の軌道に負ミュオンが移動する際に出される光（ミュオン特性X線）のエネルギーは高い。そのため、試料内部の深い場所から出される特性X線も試料の外側まで出てくることができ、検出器に導き測定できる。

電子軌道のエネルギーがとびとびであることは、高校から大学で学ぶ“量子力学”の教えるところであるが、質量が200倍重い負ミュオンが原子核の周りを回る描像は量子力学だけでは正しく記述できず、量子電磁力学などのより高度な理論が必要となる。“文”への応用が今まさに始まったこの分析法は、現代物理学に基づく“理の粋”といえる。興味を持った中高生、学部生の皆さんは、将来、この分野の研究に携わってみては？！



文化財を非破壊で分析したい

文化財の分析では、壊して調べることのできない貴重な資料が多い。これまでも放射光や電子線、中性子線を用いて文化財の非破壊分析が行われてきた。

負ミュオンのメリット

文化財によく適用される蛍光X線分析では、放出されるX線のエネルギーが低いので、試料内部の深い場所から出るX線は試料の外側まで出てくることができず、分析ができない。負ミュオンの特性X線はエネルギーが高いため、リチウムをはじめとした軽元素であっても極めて高い収率で検出が可能だ。しかも、試料表面だけでなく、内部の深い位置の成分を知りたい文化財の分析には有効だ。(囲み記事「負ミュオン元素分析とは」参照)

負ミュオン元素分析を可能にした J-PARC

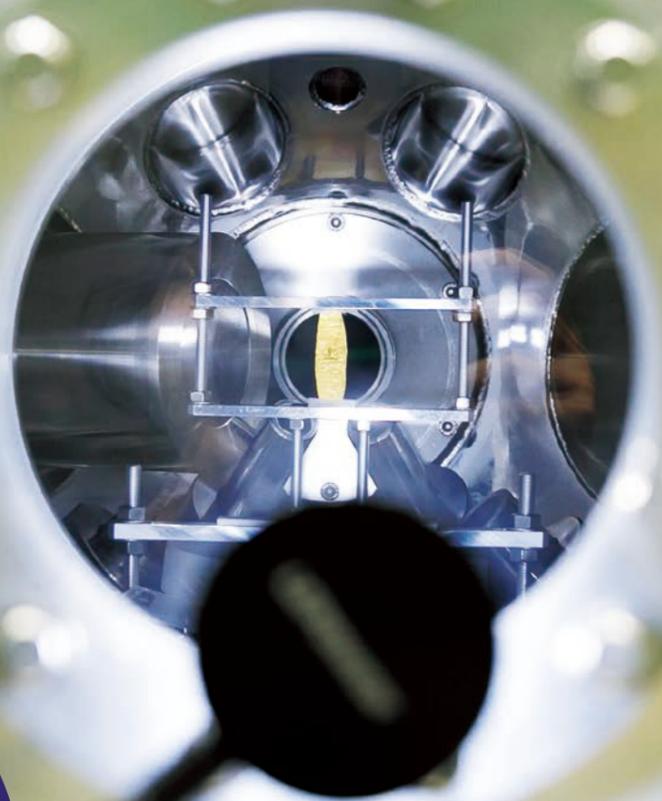
負ミュオン元素分析が有効な分析法でありながらこれまであまり行われてこなかった大きな理由は、従来のミュオン施設では大強度（粒子の数が多）の負ミュオンビームが得られなかったことだ。J-PARCでは、世界最高強度の負ミュオンビームをつくり、測定装置に導くビームラインの建設に成功し、文化財分析に貢献することが可能だ。

人文科学にも広がる J-PARCの量子ビームの応用

J-PARC 加速器が作り出す量子ビームの応用は、理工系科学の分野にとどまらない。物質・生命科学実験施設 (MLF) で生み出す負ミュオンビームを文化財の非破壊元素分析に使用し、人文科学の分野に新たな知見をもたらすことがわかってきた。本号では、J-PARC ミュオン実験施設 (MUSE) で始まった“文理融合研究”にフォーカスする。

貨幣の深さ方向の成分分布や
薬瓶と内容薬両方の成分特性が知りたい！

多様な分析に
負ミューオンを
使えるようにするために



Interview

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン

反保 元伸 研究員

文化財の非破壊分析において、試料中の見たい深さを見られることが、重要なポイントだ。そのために必要な速さのミュオンビームを測定装置に導入する必要がある。さらに、限られたビームタイムの中で多数の測定を行えるように、1回の測定にかかる時間を短くすることが要求される。そのために必須なのが、大強度ビームと、検出器でできるだけ多くの特性X線を捉えること。J-PARC ミューオンセクションの反保氏は5年の歳月をかけて技術開発に取り組み、必要な条件のミュオンビームを測定装置に輸送するビームラインとX線検出器を整え、文化財分析が本格始動した。これまでのその道のりから今後の展望まで、お話を伺った。(聞き手：J-PARC 広報セクション)

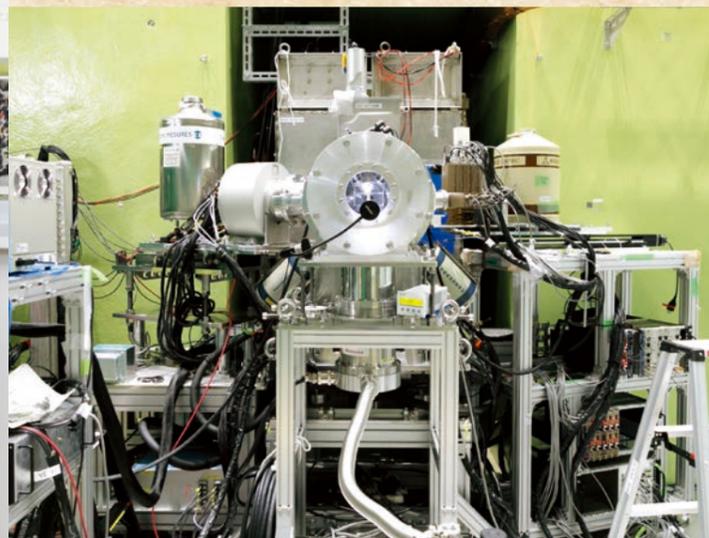


欲しい速さのミュオンビームを 測定装置に導入するために

ミュオンの速さが分かれば、試料中で止まる深さは正確に計算できる。ミュオンの速さが速いほど試料の奥深くまで入って止まるので、止めたい深さに対応する速さのミュオンビームをつくる必要がある。「J-PARC では RCS 加速器で加速された3 GeV という高いエネルギーの陽子からミュオンを生成します。これは、エネルギーが高いほうがミュオンの親粒子である π 中間子を生成しやすいからですが、 π 中間子が崩壊してできるミュオンも、エネルギーの高い(=速さの速い)ものが多くできます。試料の表面近くの浅いところでミュオンを止めたい場合には、速さの遅いミュオンが必要ですが、つくられるミュオンビームの中に、速さの遅いものは多くは含まれていません。こうした速さの分布を持ったビームの中から、欲しい速さのミュオンだけを取り出して、測定装置に運ぶのです。」と、反保氏は説明してくれた。ミュオンは電荷を持つので、磁場をかけると力を受けて曲がり(フレミングの左手の法則)、速さが速いほど曲がり方が大きくなる。これを利用して、ある特定の速さのミュオンを取り出すことができる。さらに、取り出した欲しい速さのビームを測定装置のところまで運ぶ際にも、進路を曲げたり、広がろうとするビームを絞り込んだりするために、電磁石を使用する。電磁石は全部で17台。「それぞれの電磁石の磁場の強さや磁場を発生させるタイミングなどの条件を最適に決めることで、最適な条件のビームを測定装置まで輸送します。1番目の電磁石の条件はこう、2番目はこう、……と、17台について決めていくのを、以前は手動で行っており、非常に時間がかかっていました。」と反保氏は語った。これをコンピュータプログラムで自動で行うシステムが開発され、別のビームラインには導入されていた。反保氏は、このシステムを当該のビームラインに適用できるように改良し、導入した。

ビームモニターを開発

電磁石調整の自動化に当たり重要なのは、ビームモニターだ。ビームラインには17台の電磁石があり、ビームを輸送する磁場をつくる電流値を上流から順に調整する。調整した結果、ビームが絞れて強度が強まっているかをモニターし、その結果をフィードバックして、電流値を変えていく。これを繰り返して、17台の電磁石を最適な条件に設定するのだ。従来は、ミュ



オンビームがシンチレータという検出器に入射して発する光を撮像することで、ビームの分布形状をモニターしていた。反保氏は、形状とともに、ミュオンによる発光の総量についてもすばやく測定できるオンラインモニターを開発した。「いままでは分布形状を手動で解析して調整を行っていたので、時間がかかり、限られたマシンタイムの中では微調整しかできませんでした。発光総量をオンラインで瞬時に自動化プログラムに取り込むことにより、ハイスピードで大幅な変更調整ができるようになりました。その結果、ビームの形状を効率良く最適化することができるようになりました。」と反保氏。

たくさんの特性X線を捉えて 短時間で測定したい

もう一つ、測定にかかる時間を左右する大きな要素が、X線検出器だ。負ミューオンによる非破壊元素分析では、試料にミュオンを当てた際に出される特性X線のエネルギーを測定する。特性X線は四方八方に出るので、そのうちのなるべく広い領域(立体角)を検出器で覆って効率良くX線を捉えれば、短時間で十分な信号強度を得ることができる。しかし、問題もある。X線検出器の一つであるゲルマニウム半導体検出器で2つのX線を計測することを考えてみよう。ゲルマニウム(Ge)半導体は2つのX線のエネルギー差が小さい場合でも大きな電気信号の差を生じるので、エネルギー分解能が高く、比較的近いエネルギーの特性X線を出す元素同士を区別するのに有利である。しかしこの半導体は電気信号の処理に時間がかかる。2つのX線がほぼ同じタイミングで入るような立体角にすると、一つのX線処理中に次のX線が入ってきて区別できなくなることが起こり、測定ができない。現在のJ-PARCにおけるミュオンビームの時間幅はGe半導体検出器の信号処理時間よりもはるかに短い。したがって、半導体検出器にはミュオン1パルスにつきX線が1個入るような立体角で検出器を設置してやる必要がある。そこで、Ge検出器を多数配置でき、ビーム強度に応じて、検出器を試料に近づけたり遠ざけたりできる測定システムの設計にした。さらに、大型放射光施設SPring-8から、小さな素子を並べた100素子の検出器のお古を譲り受けることができ、これを使用できるシステムを2020年末に構築した。こうして、ビームライン電磁石の調整の自動化、X線検出器の工夫の双方により、測定時間が短縮されることは、限られた割り当て時間の中で様々な測定を行いたいJ-PARC ユーザの研究者にとって、大きなメリットだ。

開拓者としての思い

「ミュオン生成標的で作られたビームをとりだすビームラインは、1本しかなく、しかも、調整が不十分でした。今後、さらに測定時間を短縮して、多くの文化財やその他のあらゆる試料について、限られたビーム使用時間の中でいかに多くの測定を行えるようにするかを検討できるところまでようやく来ました。ここからが勝負です。」このように熱く語る反保氏の活躍により、J-PARCのミュオンで、ますます多くの測定が可能になっていくことだろう。



文化財を自然科学的に調べたい——現在、齋藤氏が取り組むテーマは、大きく2つ。1つは、日本の江戸時代の金貨、銀貨の裏に潜む当時の技術の進歩を知ること。もう1つは、日本で銅が採れなくなっていた中世の青銅製品の原料のルーツを知ること。分析化学を専門とする立場から、様々な自然科学の分析手法を駆使して切り込む。中でも、試料内部を非破壊で見られるミュオンは、夢のような有用技術だという。“文”と“理”をつなぐ最前線で活躍する齋藤氏に、お話を伺った。



日本には、独自に進化した伝統医薬（生薬：天然の薬物）の文化と今に通じる世界水準の東西融合医療がある。生薬学は薬学の始まりの学問であり、文化人類学的要素を持つ。生薬学を専門とする高橋氏は、これを国内外に示し、後世に伝えるために、博物学的医薬品（生薬標本類）に特化した温故知新の研究を進めている。文化財の新たなカテゴリーに医療・薬物を挙げ、歴史考証と自然科学的解析に立脚した「医療文化財」の研究分野を確立しようとする高橋氏に、お話を伺った。



提供：高橋
ミュオン測定対象薬瓶

Interview

国立歴史民俗博物館

齋藤 努教授

ミュオンで貨幣の「色付」技術の変遷に迫る

江戸時代の小判（金貨）には銀が、丁銀（銀貨）には、銅が混ぜられている。価値ある貨幣に見せかけて、安価に製造する工夫である。それを実現したのが「色付」と呼ばれる表面処理の技術だ。

小判は、表面を薬品で処理することによって、銀だけが溶けて表面から除かれる。丁銀の場合も同様に、表面から銅だけを取り除く。「小判も丁銀も、江戸時代を通じて金／銀の濃度が変遷しているのですが、それとともに色付けの技術も変わっていったのが、一番知りたいことです。」と齋藤氏。小判を調べた時には狭い範囲で小判の表面を削りながら内部の成分を測定したが、丁銀は、できれば削らずに内部を分析したい。ミュオンで可能かもしれないと聞き、測定してみたところ、非破壊のままで、表面ほど銀が多くなっていくようすをみてとることができた。

表面処理技術としては、梅酢を使う方法が記録に残されている。ただ、美術工芸品にはほかの手法が古くから使われていたことも知られている。「今後、合金のテストピースをこれらの方法で表面処理し、実際の丁銀と比べることで、当時の具体的なやり方の解明に迫れると考えています。」と語ってくれた。

青銅製品のさびの内側も見られる！

中世の青銅製品は、中国から輸入された渡来銭を鑄つづけてつくったという説がある。銅、スズ、鉛の合金である青銅の成分比を調べれば、原料が渡来銭由来であるのか、推測できる。そのためには、さびた表面の内側のもともとの成分を、削ったり壊したりせずに調べる必要があった。ミュオンで青銅製の経筒や青銅鏡の成分比を測定したところ、資料間のばらつきが小さいことが分かり、成分比のばらつきが大きい渡来銭は原料に

ならなかった可能性が示された。今後も別の青銅資料の測定を重ねていくという。

ミュオンへのさらなる期待

「深さ方向の多数の位置で測定したいことに加え、文化財は同一個体内での不均一性、個体間差が大きい。割り当てられた有限の時間でできるだけ多く測れるように、1回あたりの測定時間を短くしてほしい。」そのための、X線検出器の増設と、ミュオンビームのさらなる大強度化への期待の大きさが伺えた。また、中国の秦や日本の飛鳥時代にはすでに、現在の10円玉程度の小さな貨幣が使われていた。そのくらいの小さな資料が測れるようになると、調べたいものは爆発的に増えるという。「ミュオンビームを小さい試料にあてると、得られる信号は弱くなりますが、検出器を増やせば、対応できるようになるのだそうです。」と、期待を寄せる。

“文”と“理”の間で

齋藤氏は、国立歴史民俗博物館内の考古学、文献史学等、他分野の研究者と共同で、文化財科学の研究を行っている。いろんな分析手法を組み合わせ、いろんな分野の「知りたい」に迫るアプローチを提案できるのが、齋藤氏の強みだ。「文系と理系の人がお互いを理解するのは、けっこう難しい。蛍光X線分析は青銅資料の表面のさびの部分しか測れないので、参考程度にしかならないのですが、文系の人の中には、さびの部分と内部の違いがよくわからず、その値が正確だと思っている人もいます。ミュオンなら、さびた資料の内部が測れることを理解してほしいが、ハードルは高い。同様に、J-PARCの人にも、もっと文系の研究の進め方に対する理解を深めてほしい。」と語る齋藤氏は、まさに“文”と“理”の仲立ちに日々取り組んでいる。J-PARCのミュオンビームラインが文理融合研究にますます貢献していくために欠かせない人物の1人として、活躍に期待する。

薬瓶と内容薬両方の成分を知りたい！

大阪大学には、江戸時代の蘭医学者・医師、緒方洪庵の薬箱が子孫から寄贈され、現在に伝わる。「洪庵の薬箱に遺された収納薬物研究が示す、最先端の蘭方と既存の治療薬で、当時の感染症（コレラ・インフルエンザ）治療に尽力した姿は、今まさに COVID-19 のパンデミックの脅威にさらされる我々への示唆に富んでいます。」と、高橋氏は語る。薬箱は医師の診療カバンで保存目的仕様でないため、150年以上の経年劣化により大半の薬容器のふたが開かなくなっていた。壊さずに、内容薬の成分を知りたい。容器劣化への影響はないのか。材質や成分解明に基づく恒久的な保存環境の最適化が次世代への継承のカギとなる。

“文”と“理”の手法を駆使して

開かずの薬瓶のふたには、「甘」1文字の洪庵独自の略号が書かれている。まずは、洪庵執筆の刊行書を中心にその関連文献を網羅的に調査し、1000近い医薬品名の中から「甘」の字を含む医薬品をスクリーニングする。候補を絞り込んだ結果、甘汞〔塩化水銀 (I) Hg_2Cl_2 〕であると推測した。次に、自然科学的分析による検証だが、液体クロマトグラフィーや遺伝子解析など破壊や消費を伴う分析は今や許されず、非破壊分析が求められる。蛍光X線解析で瓶容器が鉛カリガラスと判明したが、薬の成分はわからない。そこで、初めて人工ミュオンビームを医療文化財に適用することに挑戦した。

ミュオンで薬瓶と内容薬の両方の測定に挑む！

大学至宝の持出許可は容易でない。そこで、既知成分の博物学的医薬品（昭和初期の医薬品：昇永錠）を用いて、ミュオンビームのエネルギーや照射時間を検討し、測定可能な実験条件を探った。「ミュオンビームの透過性の高さから瓶容器と内容薬両方の成分測定に初めて成功し、有用性を確信しました。」

と高橋氏。本命（甘汞）の開かずの薬瓶は、短時間で測定して持ち帰らなければならない制約がある。「ビーム測定後に、資料が放射化してすぐに持ち出せなくなる可能性について、J-PARCの専門家の方々が気を遣ってくれました。また予試験の成果から、高エネルギーでビーム照射ができ、事前の蛍光X線解析で確認した外側の薬瓶由来のケイ素 Si、鉛 Pb のほかに、水銀 Hg と塩素 Cl が検出され、内容薬の成分は文献検証から推測したとおり塩化水銀 (I) Hg_2Cl_2 であることが裏付けられました。」こうして、J-PARC のミュオンで課題を達成できた。

医療文化財科学を確立したい！

高橋氏は昨年3月で定年退職を迎え、現在、招へい教授として活動中である。「文化財の次世代への継承はその理念のみならず、保存環境の最適化と劣化遅延・修復技術の確立なくしては達成できません。今後、文系／理系の若手研究者が共に文化財資料研究を進めていける相互理解と社会環境づくりを支援したい。これまで自分がやってきた成果を講演や本の執筆などで発信することが私の宿題です。」と、今後の夢を語ってくれた。そして、「ミュオンは医療文化財の新たな価値を発見できるツールになると信じています。おもしろいよ、謎解きのこの世界！」と、次世代の研究者にエールを送ってくれた。

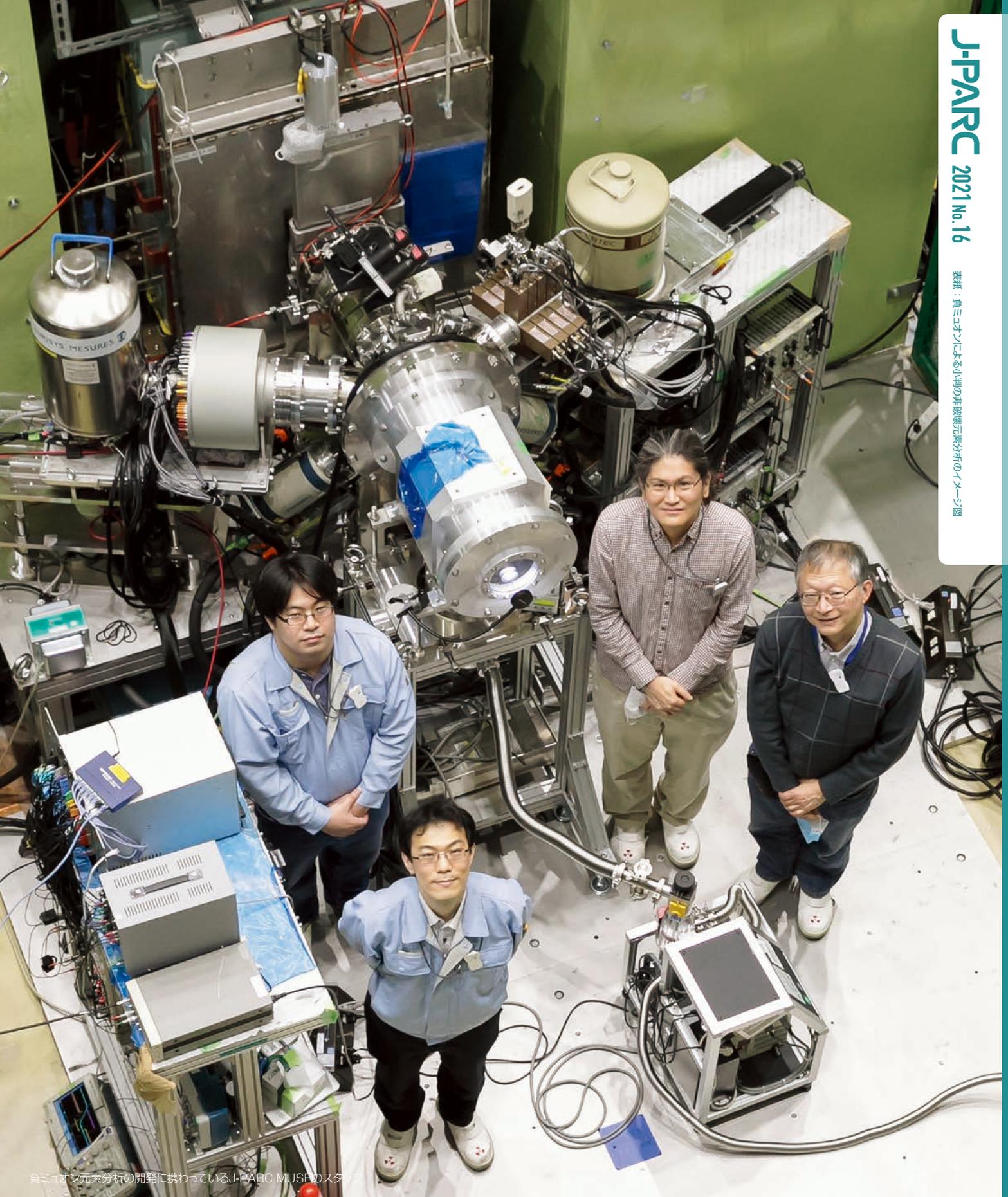


提供：高橋、緒方洪庵使用薬箱（右）壮年・（左）晩年期

Interview

大阪大学総合学術博物館／
適塾記念センター

高橋 京子招へい教授



負ミュオン元素分析の開発に携わっているJ-PARC MUSEのスタッフ

ご意見、ご感想をお待ちしております。 ✉ web-staff@j-parc.jp

< 編集後記 >

"理の粋"ともいえる負ミュオン元素分析が文化財科学の分野に知見をもたらすためには、その間をつなぐ、様々な立場の方々の努力があることを垣間見ることができました。そして、私達、広報セクションは、そうした研究の現場と読者の皆様の間をつなぎ、これからもJ-PARCの研究の魅力をお伝えしていきます。