

大特集 ②

LLFP核変換

高レベル放射性廃棄物の 大幅な低減・資源化を目指す

TOPICS ⑮

- ・「理化学研究所 科学講演会2017 理研百年—新たなる百年へ—」を開催します！
- ・神戸地区一般公開のお知らせ

原酒 ⑯

飛鳥山の思い出の城



LLFP核変換

高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化を目指す

原子力発電で生じる高レベル放射性廃棄物は、

放射能が問題のないレベルに下がるまで、約10万年にわたり隔離して保管する必要がある。

現生人類（ホモ・サピエンス）の起源は約20万年前と推定されており、

10万年が人類にとっていかに長い時間スケールかが分かる。

内閣府 総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の一つとして、

「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」（藤田玲子プログラム・マネージャー）が実施され、

理研仁科加速器研究センター（RNC）から多くの研究者が参画している。

このプログラムでは、高レベル放射性廃棄物に含まれる「長寿命核分裂生成物（LLFP：Long Lived Fission Products）」を、

放射能のない安定な原子核や短寿命のものに核変換するとともに、

有用な元素を分離回収して資源として再利用することを目指している。

原子力発電は、核分裂しやすいウラン-235に中性子が衝突して核分裂が起きるときに発生するエネルギーで発電を行う。ウラン-235は核分裂してセシウムやパラジウムなどの「核分裂生成物」になるとともに、中性子が2~3個発生する。その中性子がさらに別のウラン-235に衝突して核分裂反応が持続する。

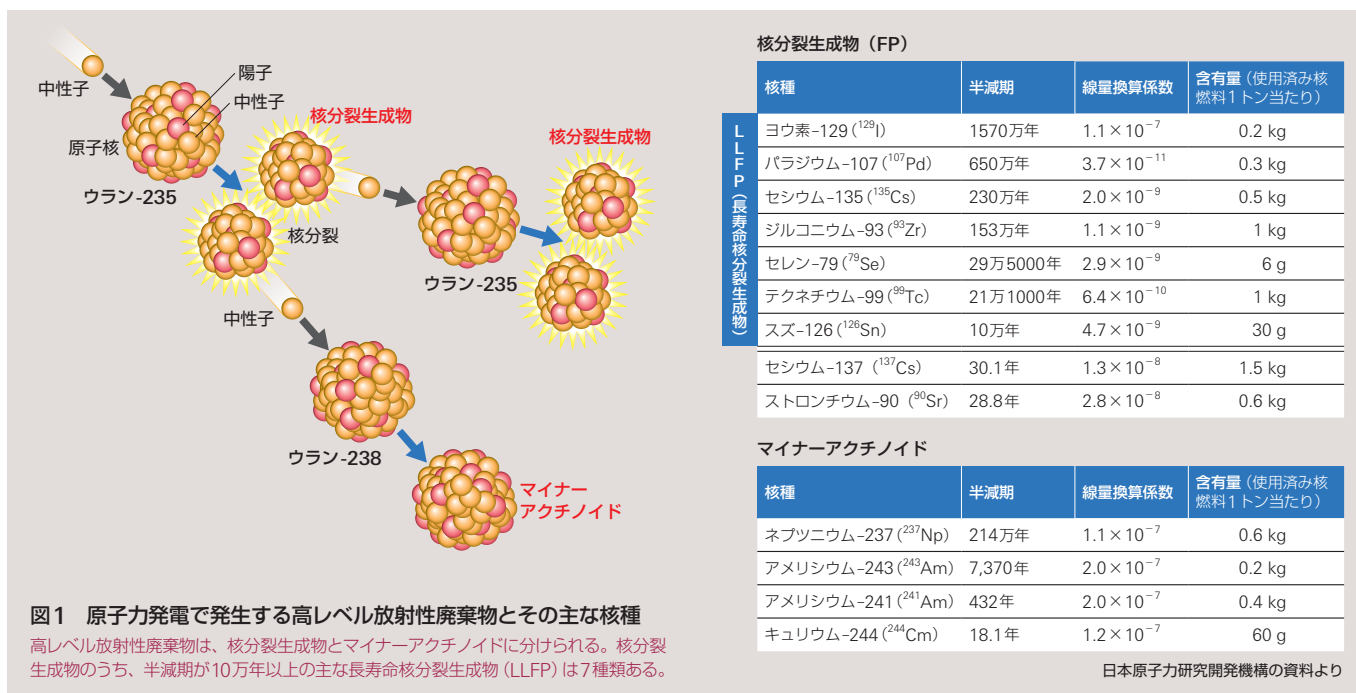
使用済み核燃料に含まれる高レベル放射性廃棄物は2種類に分けられる。一つは、核分裂生成物（FP）。もう一つは、核燃料中の核分裂しにくいウラン-238

などが中性子をつかまえて、ネプツニウムなどウランよりも重い元素になったもので、「マイナーアクチノイド（MA）」と総称される（図1）。

ここで物質の構成を簡単に見てみよう。原子は電子と原子核から成る。原子核は、プラスの電荷を持つ陽子と、電気的に中性の中性子が結合したものだ。陽子と中性子の数により、さまざまな種類の原子核（核種）が存在する。陽子の数（原子番号）が原子核の周りを回る電子の数に対応し、元素の種類と化学的性

質を決める。ただし、同じ元素でも、中性子数の違いにより質量数（陽子数+中性子数）が異なる同位体が複数存在し、放射能レベルや崩壊するまでの寿命が大きく異なるものがある。

「核変換」とは、ある核種を陽子や中性子の数が異なる別の核種に変換する反応だ（図2）。10万年にわたり隔離して保管する必要がある高レベル放射性廃棄物の毒性を低減するため、毒性が高く半減期（放射能を持つ核種の数が半分になる時間）が長いMAに中性子を当て



て核分裂させ、放射能のない安定な原子核（安定核）や、半減期が短い核種に変える核変換の研究が進められ、日本でも1980年代から行われてきた。

一方、核分裂生成物にも毒性が高く、半減期が10万年を超える長寿命のものが、それらは「長寿命核分裂生成物（LLFP）」と呼ばれる。このLLFPを核変換するための研究は、これまでほとんど行われてこなかった。

MAとともにLLFPも核変換しなければ、10万年隔離して保管する必要があるという高レベル放射性廃棄物の問題を、根本的に解決することはできない。

高レベル放射性廃棄物に含まれるLLFPのうち、主に問題となるのは7種類の原子核だ（図1右上）。そのうちの2種類（ヨウ素-129、テクネチウム-99）は、核分裂で発生する中性子を十分に減速させた熱中性子を当てれば核変換が起きやすいため、原子炉などで核変換させることが検討されており、その基礎的な核反応は十分調査されてきた。

一方、残りの5種類（パラジウム-107、セシウム-135、ジルコニウム-93、セレン-79、スズ-126）は、熱中性子では核変換が起きにくい。これら核種のほかの反応はよく理解されておらず、基礎データを取得する必要がある段階だ。

それぞれの核種を集めて標的をつくり、加速器施設でさまざまなエネルギーの陽子ビームなどを加速させて標的に当て、どのような核種に変わるか調べる必要がある。しかし、使用済み核燃料からLLFPを取り出し、核種ごとに分離してLLFPの標的をつくるには、多大なコストと時間がかかる。たとえ標的ができたとしても、高い放射能を持つため、実験に大きな困難を伴う。

LLFP核変換のための基礎データを取

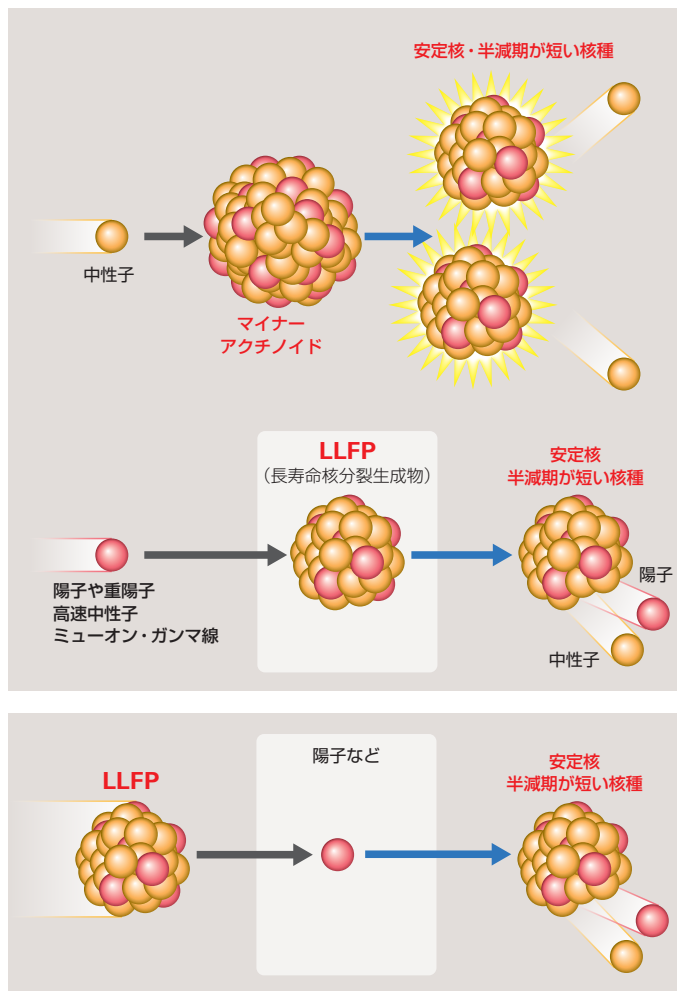


図2 核変換の概念図
高レベル放射性廃棄物のマイナーアクチノイドやLLFPに、中性子や陽子などのビームを照射して、陽子や中性子の数が異なる安定核や半減期が短い別の核種に核変換する。

図3 逆運動学法によるLLFP核変換
陽子などのビームをLLFP標的に照射するのは逆に、逆運動学法ではLLFPビームを陽子などの標的に照射して、核変換後にできる核種や量を調べる。

得する実験（以下、LLFP核変換の基礎実験）を可能にしたのが理研の重イオン加速器施設「RIビームファクトリー（RIBF）」を用いた「逆運動学法」だ（図3）。「LLFP標的をつくらずにLLFP核変換の基礎実験ができる逆運動学法のアイディアを聞いたときには、びっくりしました」と藤田玲子プログラム・マネージャー（PM）は振り返る。

「それは私たちがRIBFで日常的に行っている実験です」とRNCで核変換データ研究グループを率いる櫻井博儀グループディレクター（GD）は語る。櫻井GDたちはRIBFにおいて、ウラン-238のビームを標的に当てて壊して特殊な核種をつくり、その性質を詳しく調べる原子核物理学の基礎研究に資する実験を進めている。

「ウランビームを標的に当てて壊すと、さまざまな核種ができ、その中にLLFP核種も含まれています。調べたいLLFP核種を選び出して二次ビームとし、陽子

などを含む標的に当てれば核変換の基礎実験ができるのです」と櫻井GD。

陽子などのビームをLLFP標的に当てるのとは逆に、LLFPをビームにして陽子などを含む標的に当てるのだ。その逆運動学法ならば、使用済み核燃料からLLFPを取り出して標的をつくる必要はない。「このような逆運動学法によるLLFP核変換の基礎実験は、重イオンビームの強度が世界で最も高いRIBFでしか現実的にはできません」と櫻井GDは指摘する。

LLFPがどのような核種に変わったのかを効率的に測定するには、高いビーム強度が必要だ。つまりビームの中にたくさんの数のLLFP核種が含まれている必要がある。「RIBFで測定した1週間分のデータを、海外のほかの重イオン加速器施設で測定しようとする、ビーム強度が低いと数か月かかってしまいます」と櫻井GD。

パラジウム同位体を高効率で分離する レーザー技術を開発

櫻井GDが、LLFP核変換の実験を実施しようと考えたきっかけは、2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所の事故だった。「原子力発電は、原子核物理学から生まれた技術です。原子核物理学の研究者として責任を感じ、何かできることはないかと考えました」

櫻井GDは、RIBFによるLLFP核変換の実験計画を、文部科学省の原子力システム研究開発事業に申請した。「原子力工学分野のさまざまな人たちに、私たちの申請書を読んでいただきたいという気持ちで応募したところ、採択されました。日本原子力学会の会員ではない研究者の提案がこの事業で採択されるのは珍しいそうです」

2013～14年度、櫻井GDたちはセシウム-137とストロンチウム-90の核変換の実験をRIBFで進めた。セシウム-137とストロンチウム-90はどちらも、半減期は30年程度の核分裂生成物（FP）で、

寿命の点でLLFPには分類されないが、放射能レベルと発熱量が高く、核分裂生成物の中で大きな比重を占める。それと並行して藤田PMと櫻井GDたちは、LLFP核変換のための本格的な研究プログラムについて検討を進め、2014年度からImPACTの一つとして「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」を5年計画でスタートさせた。

日本では、使用済み核燃料からウランとプルトニウムを回収して燃料としてリサイクルする「核燃料サイクル」を進めるとともに、残り的高レベル放射性廃棄物についてはガラス固化する方針だ。日本には、すでに2万数千本のガラス固化体が存在している。それらを最終的に地下300 m以深に隔離して保管するというものだ（図4左）。

「私たちはそれに代わる処分法としてLLFP核変換を提案します。核変換により高レベル放射性廃棄物を安定核や半

減期の短い中低レベル放射性廃棄物にするとともに、資源として再利用します（図4右）。それが実現可能であることを示すために、五つのプロジェクトを進めています」と藤田PM。

プロジェクト1は、高レベル放射性廃棄物から核変換の対象となるパラジウム-107 (^{107}Pd) などのLLFPを分離回収する技術の開発だ。

化学的手法により特定の元素だけを分離することができる。ただし、同じ元素であっても質量数が異なる同位体が複数存在する。例えばPdであれば廃棄物中に7種類の同位体（質量数：102、104、105、106、107、108、110）が存在する（図5上）。その中で ^{107}Pd だけが半減期650万年の放射性同位体であり、残りの6種類は安定核だ。7種類の同位体は化学的性質が似ているため、化学的手法で ^{107}Pd だけを分離することは不可能である。質量数が大きく異なる同位体ならば、例えば遠心機などを利用して分離することができる。しかしPdのように質量数が連続した同位体を分離することは難しい。

半減期が長い同位体には、質量数が奇数のものが多い。廃棄物中のPdも質量数が偶数の同位体は全て放射能のない安定核である。米国の研究者たちが1980年、レーザーを使って奇数と偶数の同位体を分離する「レーザー偶奇分離法」を開発した。質量数が偶数のPdだけを分離回収できれば資源として再利用できる（図5下）。Pdは自動車の排ガス浄化の触媒などとして使われる貴重な資源だ。

藤田PMたちは、高レベル放射性廃棄物を大幅に低減するとともに、その一部を資源として再利用することを目指している。高レベル放射性廃棄物にはPd

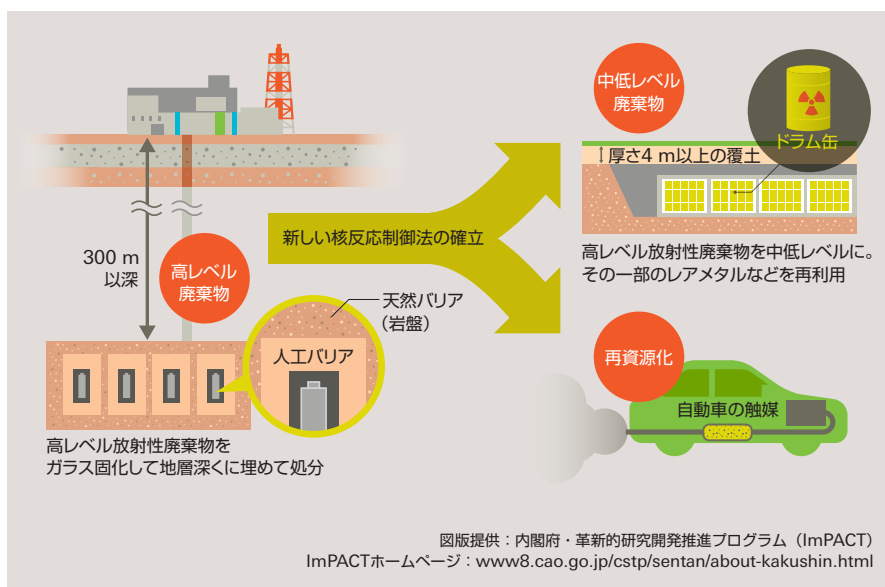
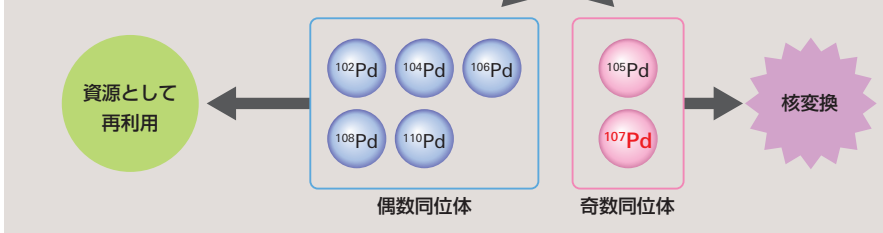


図4 高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化

日本では、使用済み核燃料からウランとプルトニウムを回収した後に残った高レベル放射性廃棄物をガラス固化して、最終的に地下300 m以深に隔離して保管する方針だ。LLFP核変換により安定核や半減期の短い核種に変える。それにより、安定核を資源として再利用したり、半減期の短い核種を中低レベル放射性廃棄物として処分したりすることができる。

図5 パラジウム (Pd) の偶奇分離

高レベル放射性廃棄物中のパラジウムには7種類の同位体が存在する。そのうち放射能を持つのは¹⁰⁷Pdのみで、残りの6種は安定核だ。質量数が偶数と奇数の同位体を分離できれば、偶数の同位体は資源として再利用し、¹⁰⁷Pdを含む奇数の同位体だけを核変換の対象にすることができる。



以外にもロジウムなどのレアメタルが含まれている。また、LLFPを核変換することによっても有用な元素が生まれる。

「ただし、既存のレーザー偶奇分離法は、分離効率が非常に低いという試験報告がありました。高効率で分離する手法の開発を進めてくれるレーザーの専門家を知らないかと櫻井さんに尋ねました」と藤田PM。

「理研の緑川克美さん（光量子工学研究領域 領域長）に電話したところ、すぐに私の部屋にやって来て、具体的な話を聞かせてくれと言われました」と櫻井GDは振り返る。

緑川領域長が率いるアト秒科学研究チームの小林 徹 専任研究員たちがその開発を進めた。ある波長の偏光（光の電場と磁場が特定の方向に振動する光）を照射すると、質量数が奇数の同位体だけが偏光を吸収して高エネルギー状態に励起され、原子はイオン化する。偶数の同位体はその波長の偏光を吸収しないのでイオン化しない。レーザー偶奇分離法では、このような光吸収の選択則を利用して質量数が奇数の同位体と偶数の同位体を分離する。

「従来法では、イオン化が起きる一定以上の高エネルギー状態（イオン化連続状態）に電子を励起するために、原子吸収とは無関係な波長のレーザーを当てていました。それが、イオン化効率が低い原因でした。私たちはまず、効率的にイオン化が起きる特定のエネルギー状態（自動イオン化準位）を探し出しました。そして、共鳴励起により、その自動イオ

ン化準位に電子を効率よく励起できるレーザーの波長を選びました。それによりイオン化の効率を格段に向上させることができました」

そう説明する小林 専任研究員たちは2017年1月、既存法の1万倍のイオン化効率でパラジウム同位体を偶奇分離することに成功したと発表。その後、さらに効率化を進め、現在では既存法の10万倍の効率を達成している（詳しくは本誌次号10月号「研究最前線」で紹介予定）。

「その技術を海外の原子力関係者に紹介すると、皆さん目の色を変えて興味を示します。理研の研究力の高さを改めて実感しました」と藤田PM。

プロジェクト2は、このプログラムの目玉である核変換データの取得だ。核変換は、高速中性子やミュオンという電子の仲間、ガンマ線を用いる方法も考えられる。それらの実験もRNCで進められている。「ただし、近い将来に最も有望なのは、陽子や重陽子のビームを用いる手法です。ミュオンやガンマ線を使う手法の基礎研究を着実に進めるとともに、陽子や重陽子による核変換の実験を重点的に進めています」と藤田PM。その実験をRNC高速RIデータチームの大津秀暁^{ひであき}チームリーダー（TL）たちが進めている。

プロジェクト3は、反応理論モデル・シミュレーションの開発。核変換のような原子核の反応の予測は難しい。LLFPと陽子や重陽子があるエネルギーで衝突した後に、どのような核種がそれぞれどれくらいできるのか、現状のシミュ

関連情報

- 2017年1月10日プレスリリース
パラジウム同位体を選択的・高効率に分離するレーザー技術

レーションの予測とRIBFの実験データには食い違いが見られる。実験データをもとに予測精度の高い反応理論モデル・シミュレーションを開発する必要がある。一瞬のうちに起きる核変換の過程を理解するには、反応理論モデル・シミュレーションが不可欠だ。また、実験ではいくつかのエネルギーで衝突させる実験を行うが、その中間のエネルギーで衝突させたときの反応は、シミュレーションで予測するしかない。そしてLLFP核変換の実用化には、それぞれの核種に対してどのエネルギーで陽子ないし重陽子を衝突させるべきか、予測精度の高い反応理論モデル・シミュレーションによって導き出す必要がある。

プロジェクト4は、核変換システム・加速器要素技術の開発。「LLFP核変換用の加速器は、これまで設計されたことがありません」と櫻井GDは言う。LLFP核変換を効率的に行うには、陽子や重陽子がたくさん詰まった強度の高いビームが必要だ。「そのようなビームをつくるには、超伝導の加速空洞が必要です。LLFP核変換に不可欠な最も難しい加速器要素技術の開発に、RNC高効率加速空洞開発チームの坂本成彦^{なるひこ}チームリーダー（TL）たちが挑んでいます」と櫻井GD。

最後のプロジェクト5は、全体の成果を取りまとめ、LLFP核変換をどのように実用化するのか「プロセス概念」を提示することだ。「このプログラムの期限である2019年3月までに、皆さんに納得いただけるプロセス概念と、それを裏付ける実験データや研究成果を示します」と藤田PM。

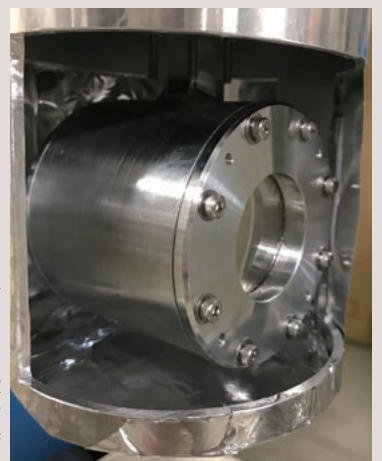
次から、プロジェクト2の大津TLとプロジェクト4の坂本TLたちの研究を紹介しよう。

RIBFでLLFP核変換の基礎実験を行う



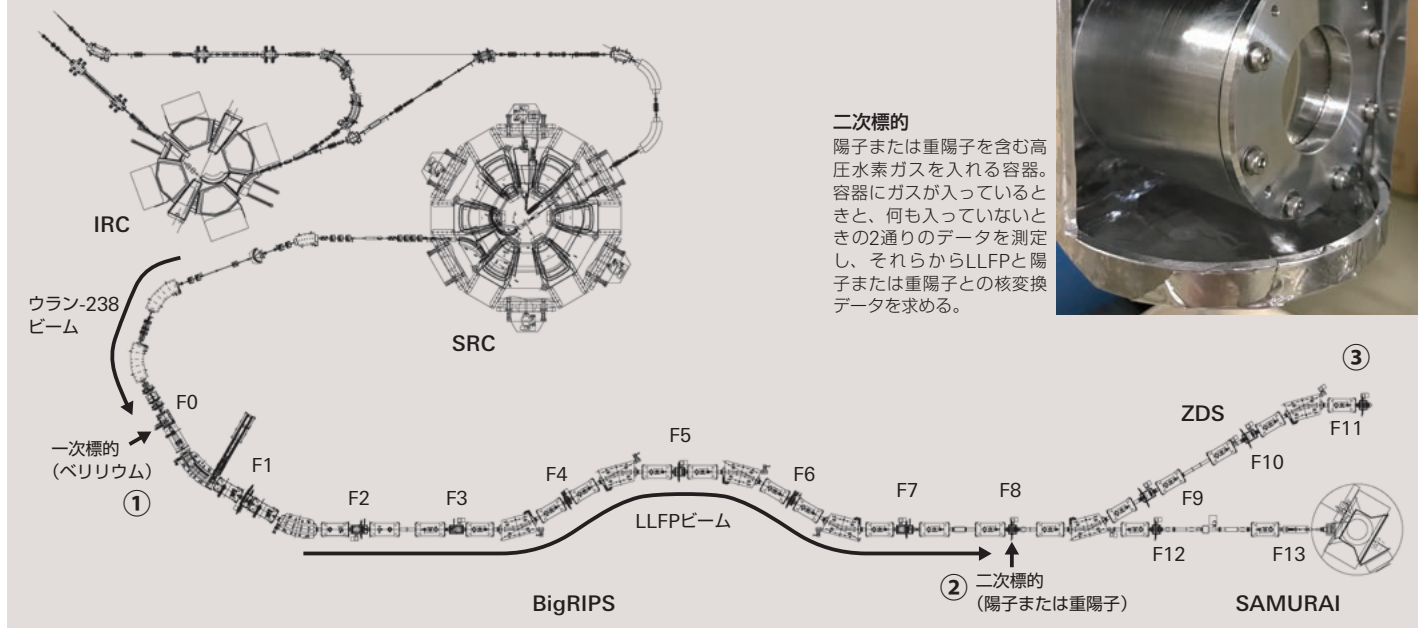
図6 ^{107}Pd 核変換のデータを取得するための逆運動学法による実験概要

中間段リングサイクロトロン (IRC) や超伝導リングサイクロトロン (SRC) など加速したウラン-238のビームを一次標的 (ベリリウム) に照射すると、さまざまな核種ができる (①)。それらを超伝導RIB生成分離装置 (BigRIPS) で識別・分離し、 ^{107}Pd をビームとして取り出す。 ^{107}Pd ビームを二次標的 (陽子または重陽子) に衝突させ (②)、ゼロ度スペクトロメーター (ZDS) や多粒子測定装置 (SAMURAIスペクトロメーター) で核変換後にできた核種を識別する (③)。



二次標的

陽子または重陽子を含む高圧水素ガスを入れる容器。容器にガスが入っていると、何も入っていないときの2通りのデータを測定し、それらからLLFPと陽子または重陽子との核変換データを求める。



ゼロ度スペクトロメーター (ZDS)
運動量分散焦点面F9付近



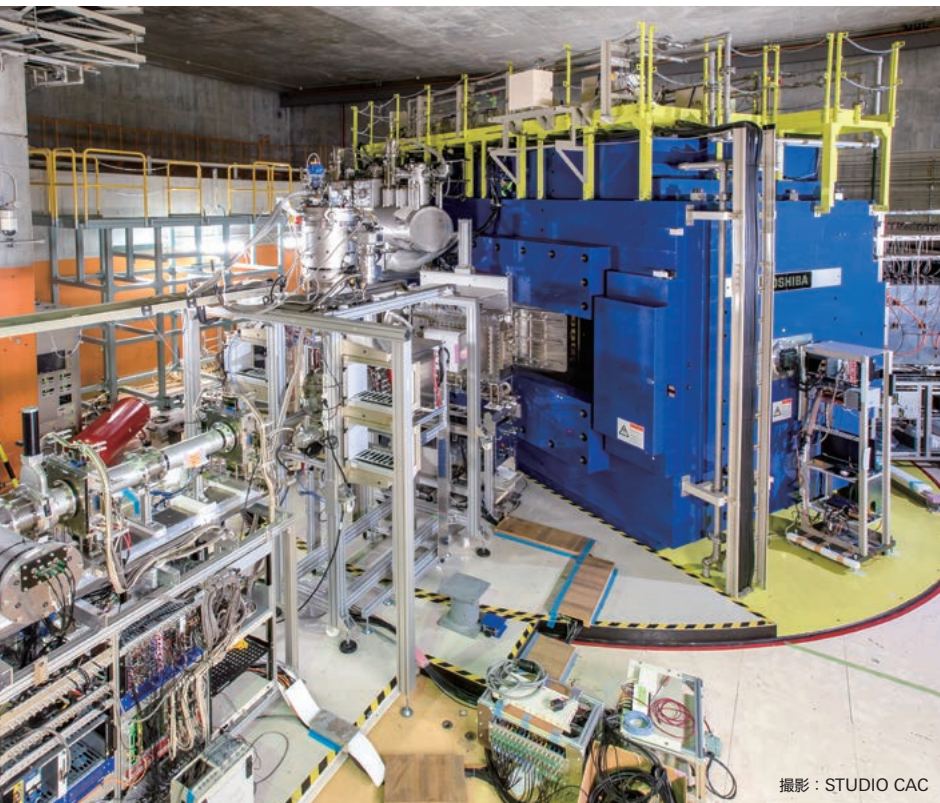
RIBFで、どのようにLLFP核変換の基礎実験を行うのか。まず、RIBFの超伝導リングサイクロトロン (SRC) などを使ってウラン-238のビームを光速の約70%まで加速し一次標的に当てる。「すると、ウランが核分裂を続ける原子炉と似た反応が起きて、さまざまな核種ができます。その中にパラジウム-107 (^{107}Pd) などのLLFP核種がわずかに含まれています。LLFP核種は、陽子や中性子の数が安定核と少しだけ異なる“安定核になり損ねた核種”です。そのLLFP核種の核反応を直接測定する取り組みは、それほど多くありませんでした」。RNC高速RIデータチームの^{ひであき}大津秀暁TLはそう説明する。

ウランビームを一次標的に当てて生まれるさまざまな核種の中から、目的のLLFP核種を超伝導RIビーム生成分離装置 (BigRIPS) で集めて二次ビームとし、それを陽子ないし重陽子を含む液体水素の二次標的に当てて核変換反応を行う (図6)。「二次ビームの強度は、ウランビームの1万分の1以下になります。大強度のウランビームをつくり出せるRIBFだからこそ、LLFP核変換のデータを効率よく測定できます」

大津TLたちは核分裂生成物の一種であるセシウム-137とストロンチウム-90の核変換の実験を行った後、ImPACTプログラムの一環として、半減期が650万年の ^{107}Pd の核変換の基礎実験に着手した。

核変換の実用化には、さまざまなビームエネルギーで実験を行い、核変換が起きる確率や、核変換後にできる核種とそれぞれの量を調べる必要がある。それを測定するのがゼロ度スペクトロメーター (ZDS) や多種粒子測定装置 (SAMURAIスペクトロメーター) という磁石などを並べた装置だ。

プラス電荷の陽子の数が多い核種ほど磁石で大きく曲げられる。一方、電荷を持たない中性子の数が増えると、逆に磁石で曲げられにくくなる。また、エネルギーが高いと曲げられにくい。磁石の前後で位置と通過方向を測定し、曲がる角度を決め、2点の通過時間から速度を決める。そして検出器でエネルギーがどれだけ減ったかを決める。これらの測定から、核種の陽子数と質量数を知ることができる。



撮影：STUDIO CAC

SAMURAIスペクトロメーター

パラジウム-107の核変換データの測定に成功

大津TLたちは、半減期が650万年のパラジウム-107 (^{107}Pd) を約200 MeV/uと100 MeV/uという2種類のビームエネルギーで、陽子ないし重陽子を含む二次標的に衝突させる核変換の実験を行った。100 MeV/uは光速の約40%の速さに相当する。

ビームを標的に照射しても、衝突せずに通り抜けるか、衝突しても核変換が起きないケースがほとんどで、核変換が起きる確率はたかだか0.1%程度だ。

「ビームエネルギーが低くなるほど核変換が起きる確率は高くなります。ただし、同じビームエネルギーならば陽子よりも重陽子の方が ^{107}Pd の核変換が起きる確率が高いことが分かりました」と大津TL。

100 MeV/uの ^{107}Pd ビームを重陽子の標的に当て、核変換が起きた場合にできる核種を見ると、63.5%が安定核、半減期1年未満の核種が19.5%、1年以上30年未満が9.3%、30年以上が8%以下という測定結果になった(図7左)。

半減期3万年以上の核種が6%あり、テクネチウム(Tc)の同位体が含まれている。Tcの同位体には安定核が存在せず、いずれも放射能を持つ。 ^{99}Tc は半減期が21万1000年のLLFPの一種でもある。

「 ^{107}Pd の核変換の実験結果を発表したところ、大きな注目を浴びました。核変換後にTcが予想外にたくさんできることに驚いた、という反響が多かったです」

核変換後にできた核種を、陽子数(元素の種類)を縦軸、中性子数を横軸にした核図表上にプロットして分布域を見ると、Tcは元の ^{107}Pd から遠い位置にある(図7右)。「現在の反応理論モデル・シミュレーションの予測は、元から遠い位置にある核種の数を実験データと何倍

も食い違うケースがあることが分かりました。LLFP核変換の実験には理論家の人たちにも立ち会ってもらい、どのようにデータを測定しているのか現場を見てもらっています。それにより、測定データを検討するときに議論がしやすくなりました」

ビームエネルギーが低いほど核変換が起きる確率は高くなり、また核変換が起きた後に ^{99}Tc などLLFPのような長寿命不安定核種ができる割合は、ビームエネルギーが低いほど少なくなることも分かった。核図表で見ると、ビームエネルギーが低いほど核変換後にできる核種の分布域が狭くなる。

大津TLたちは、LLFP核変換の基礎実験を北海道大学、東京大学、東京工業大学、立教大学、九州大学、宮崎大学、新潟大学などとの共同研究グループで進めている。

「LLFPの5種類の核種である、 ^{107}Pd 、セシウム-135 (^{135}Cs)、ジルコニウム-93

(^{93}Zr)、セレン-79 (^{79}Se)、スズ-126 (^{126}Sn)の核変換の実験を同時並行で進めています。 ^{107}Pd と ^{93}Zr については、ビームエネルギーが低い50 MeV/uの実験を2016年秋に行い、現在、測定データを解析しているところです。50 MeV/uの ^{107}Pd 核変換では ^{99}Tc はできなくなると予想しています。2017年度中には、さらに25 MeV/uの実験も計画しています」と大津TL。

低いビームエネルギーの実験は測定が難しくなる。標的内でビームが大きく減速したり止まったりする可能性が高くなるからだ。その対策として、50 MeV/uの実験では液体水素ではなく高圧ガス状の水素を標的にして、標的の厚さも薄くした。

「10~30 MeV/u前後で、核変換に使われる核反応の物理が劇的に変わります」と大津TLは語る。ビームエネルギーが50 MeV/uくらいまでは、LLFP原子核の中で外側を回っている中性子や陽子

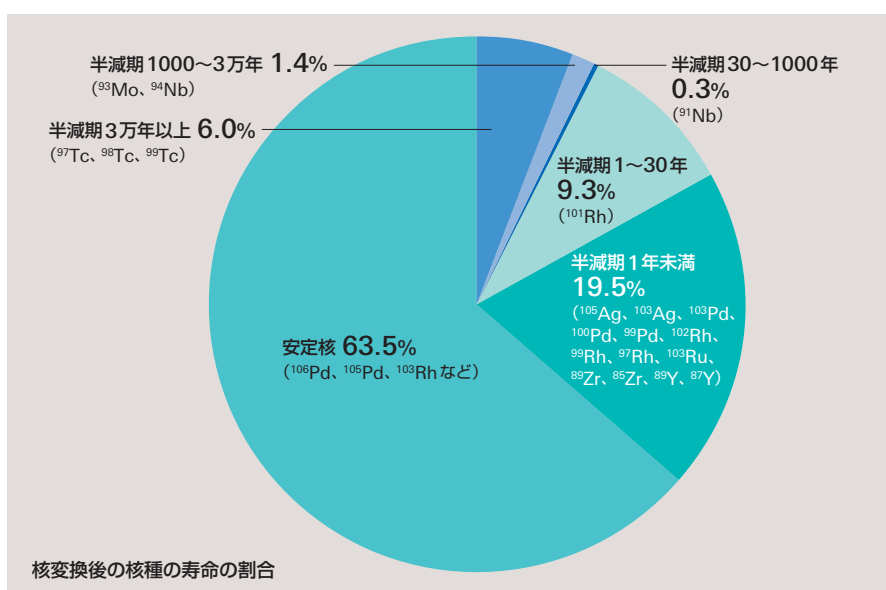


図7 100 MeV/uの ^{107}Pd ビームと重陽子による核変換後の核種

陽子数46、中性子数61の ^{107}Pd を核変換した後にできた核種のうち、半減期が3万年以上の割合が6.0%。その中に ^{99}Tc などテクネチウムの同位体が含まれている。ビームエネルギーを低くすることにより核変換後にできる核種の核図表上の分布域は縮小し、 ^{107}Pd から遠いテクネチウムの同位体はできなくなると予測される。

関連情報

- 2017年2月13日プレスリリース
パラジウム-107の核変換
- 2016年2月19日プレスリリース
放射性廃棄物の処理問題解決への第一歩



大津秀暁チームリーダー

を、飛んできた陽子や重陽子をはじき飛ばすようにして核反応が進む。ビームエネルギーがより低い10~30 MeV/uになると、飛んできた陽子や重陽子をLLFPの原子核が全体で受け止めて核反応が進む過程が支配的になる。

このImPACTプログラムでは25 MeV/uまでの実験が予定されているが、核変換の物理の理解を深め、反応理論

モデル・シミュレーションの予測精度をさらに向上させるには、より低いビームエネルギーでの測定も可能な限り行った方がよい、と大津TLは指摘する。「ただし、ビームエネルギーが低くなると、二

次標的を通過した後のビーム自身や、反応生成物の核種のエネルギーももちろん低くなります。ZDSで反応後の核種を同定するには、いくつかの検出器を通過させる必要がありますが、その途中で止まってしまう、十分な測定ができなくなるでしょう。これを克服する別の測定手法のアイデアはありますが、その手法開発は簡単ではありません」

核変換の実用化において、ビームエネルギーをどのように設定すべきか。RIBFの実験データをもとに反応理論モデル・シミュレーションの予測精度を向上させ、LLFPの核種ごとに最適なビームエネルギーを設定する必要がある。

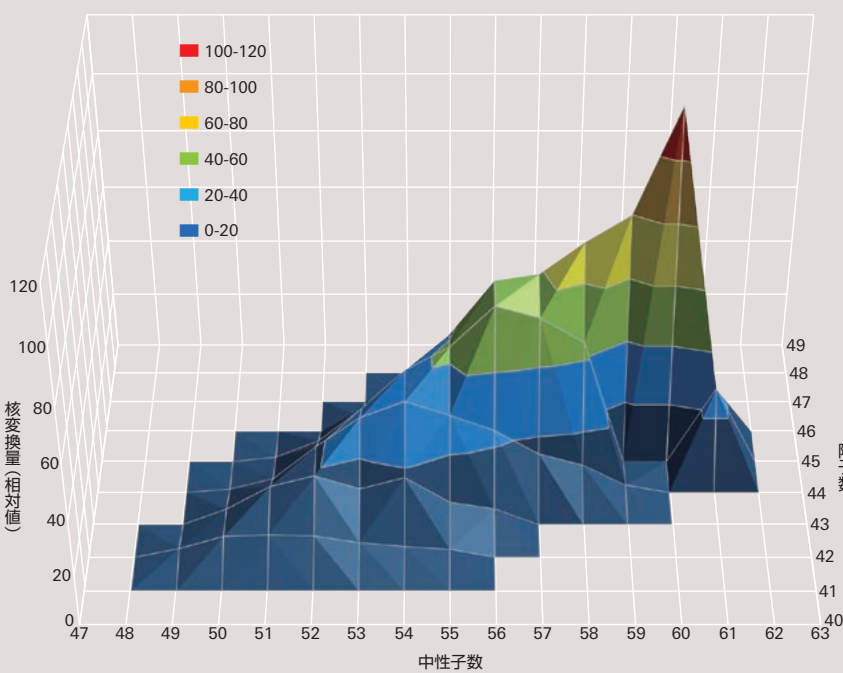
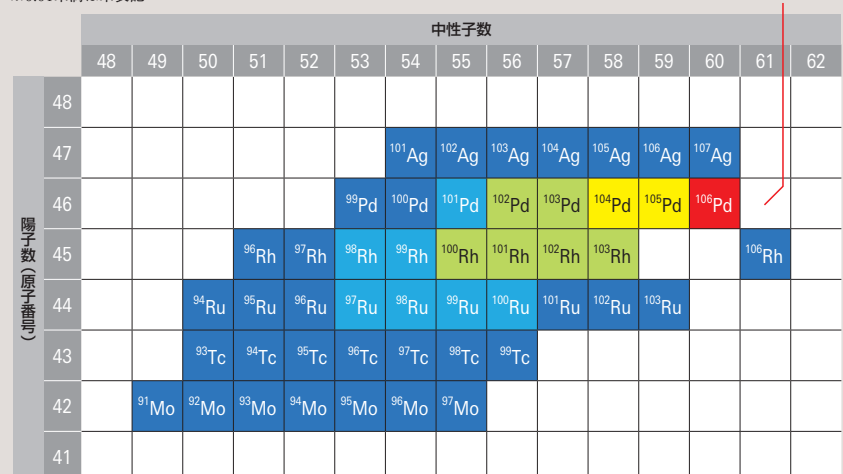
「ビームエネルギーだけでなく、標的へのビームの当て方も工学的な工夫が必要です。標的の中で核変換された核種はすぐに取り出し、まだ核変換されていないLLFPにビームが効率よく当たるようにする必要があります」

東日本大震災の後、RIBFでの実験はしばらく中断された。「その間、震災後の3月下旬から7月まで、私は被災地の福島県川俣町やいわき市に行き、放射線量の計測を行いました。そのときの経験が、LLFPを対象とする原子核物理の実験を続けるモチベーションの一つになっています」と大津TL。「LLFP核変換の実用化は容易ではありませんが、研究を続けていくべきです。核変換の手法やビームの当て方など、まったく新しいアイデアが生まれてくる可能性があります」

※MeV/u：原子核を構成する陽子・中性子1個当たりの運動エネルギーを示す単位。

核変換後の核種の核図表上での分布 (重陽子 100 MeV/u の場合)

※0.01未満は未表記



LLFP核変換に不可欠な 大強度ビームをつくり出す

LLFP核変換を効率的に行うには、陽子や重陽子のイオンがたくさん詰まった強度の高いビームが必要だ。イオンビームは、速度が比較的遅い加速の初期段階での取り扱いが難しい。「そこで、高い加速能力を持った加速器を導入することにより、短時間に速度を効率的に上げる装置の開発を目標にしました」と、RNC高効率加速空洞開発チームの坂本成彦なるひこTLは語る。

たくさんの数のイオンを含む低速ビームほど空間電荷効果^{ぼくだい}が大きい、すなわちイオン同士が電氣的に反発してビームが

空間的に広がりやすくなる。ビームが広がると、限られた加速器の空間を通る間に壁にぶつかったり、加速のタイミングから外れたりして、加速の途中に失われてしまう。

「それを避ける方法は二つ。単純化して言えば、一つは、ビームが広がっても壁にぶつからないように直径が大きな加速空洞をつくること。もう一つは、ビームが広がる前に必要な速度まで一気に加速することです。大きな加速器は建設コストが莫大になってしまいますので、経済性を考えれば、できるだけコンパクトな加速空洞で一気に加速することが望まれます」

高周波加速空洞でイオンを加速する仕組みを簡単に見てみよう(図8)。一方にプラスの電位、もう一方にマイナスの電位を加速ギャップに発生させると、プラスの電気を帯びた重陽子などのイオンは、マイナス電位へ引き寄せられて加速する。ただし、そのままでは、マイナス電位を通り過ぎた次の加速ギャップでイオンは引き戻されてしまう、つまり減速されてしまう。そこで、ビーム速度に合わせてタイミングよくプラスとマイナス

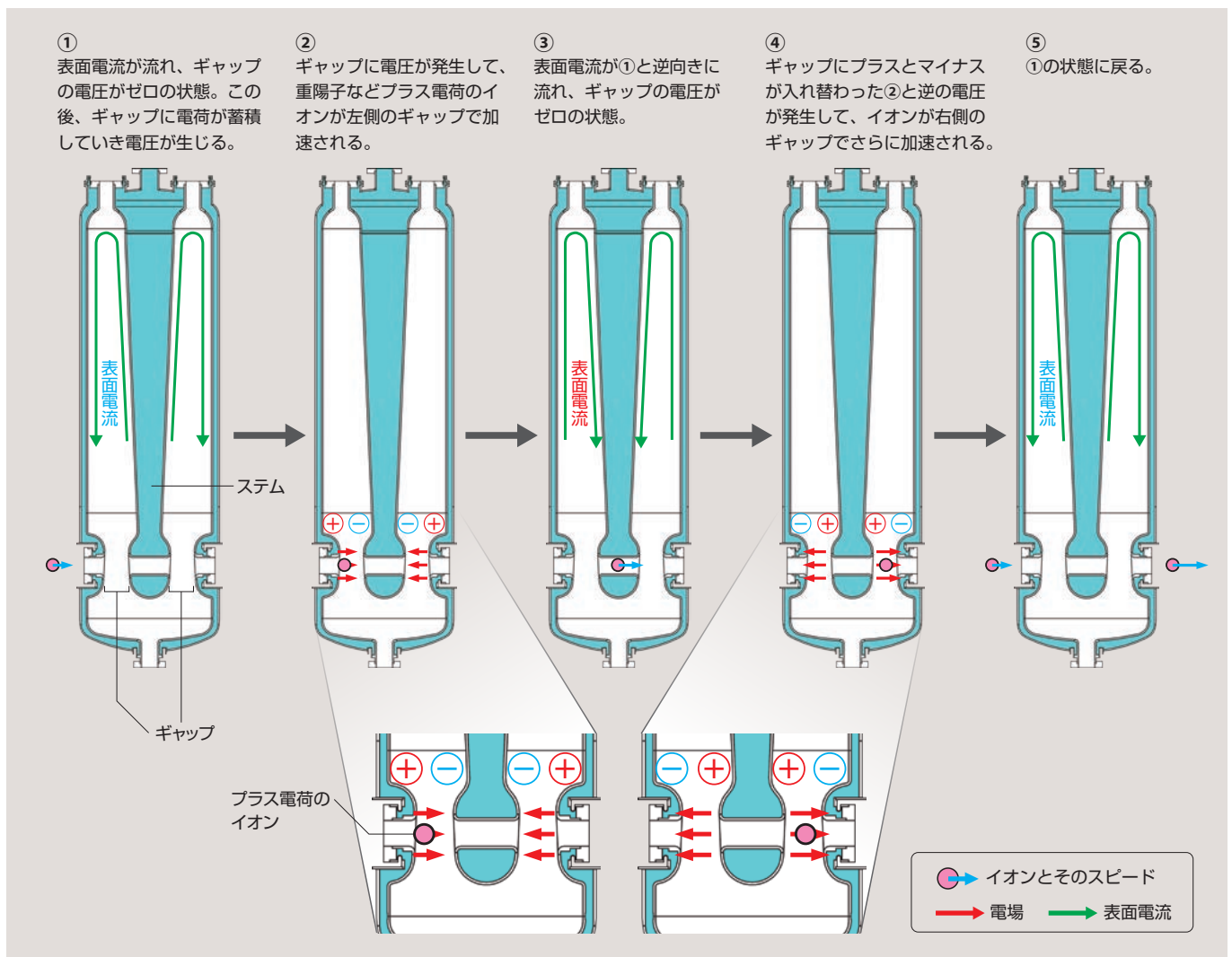


図8 加速空洞によってイオンを加速する原理

の電位を入れ替えるようにすれば、連続してイオンを加速できるというのが高周波加速の仕組みである。

このとき、発生させる加速ギャップの電圧が高いほど、イオンの加速エネルギーも高くなる。一方で、電圧を上げるとその2乗に比例して空洞での発熱が大きくなるという性質がある。「現在のRIBFの線形加速器の加速空洞は銅で作られています、大きな交流を流すと電気抵抗によって発熱するため、大流量の冷却水で冷却しています」

さらに大きな電流を銅に流すと発熱で銅が溶けてしまうため、実用上400 kV程度の電圧が上限だ。しかし、LLFP核変換用には、1,000 kV程度の高い電圧でイオンを一気に加速する必要がある。

「そこで、発熱量が極端に少ない超伝導の空洞をつくる必要があります。超伝導材のニオブは、液体ヘリウム温度で抵抗率が、常温の銅に比べて10万分の1という夢のような材料です。ところが、実際に加速空洞を製作するのはとても難しいのです」と坂本TL。

高性能の加速空洞は、供給した電力を無駄にすることなく大電圧を発生させて、そのプラスとマイナスを特定の周期で切り替えることで大強度ビームを一気に加速する。それは、軽くたたくと共振して大音量で特定の音色が出る楽器のようなものだ。加速空洞の場合も、共振により特定の周期でプラスとマイナスが切り替わる大電圧を効率よく発生させるには、空洞のサイズと形が重要だ。

今回製作したニオブの超伝導空洞は、高さが約1 m、直径が30 cm。円筒形の中に、ステムと呼ばれる共振装置が取り付けられている。このような形状の空洞を、いわゆる**鍛金**で精度よく製作することが求められる。ボルトや合金による溶



図9 真空容器に入った超伝導加速空洞

撮影：STUDIO CAC

後列左から、高効率加速空洞開発チームの渡邊 裕 専任技師、坂本成彦チームリーダー、須田健嗣 仁科センター研究員。
前列左から、大関和貴 技師、山田一成 専任技師。

接を用いないのは、超伝導空洞の内面の状態によってその性能が大きく左右されるためである。また、空洞内での発熱を極小化し、高い電場を発生させるために、電磁場解析計算により空洞の形状の最適化を行った。その際、製作の容

易さと精度も考慮する必要がある。

高効率加速空洞開発チームの山田**かずなり** 専任技師がシミュレーションを繰り返して、加速空洞の最適な形を描き出した(図8・図10)。

超伝導加速空洞の製作に成功

超伝導はある温度以下で電気抵抗がゼロになる現象だ。「ただし、ゼロになるのは超伝導コイルなどに直流を流す場合です。超伝導材料でつくった加速空洞の壁の表面に流れる交流電流には、わずかな発熱が生じます」

坂本TLたちは加速空洞の超伝導材料として純ニオブ材料を選択。その電気抵抗の理論値は2.2ナノ（10億分の1）オームだ。銅の電気抵抗は2.3ミリオームなので100万分の1の低さだ。ただし、実際に製作する装置は、2.2ナノオームの10倍程度の表面抵抗が目標値となる。「材料や溶接の段階でほかの金属が混入したり、表面に凹凸傷やほこりがあったりするだけでも表面抵抗の原因となり

ます。そのため、钣金の手法を用いることにより、ねじを1本も使わず機械加工した部品を電子ビームで溶接して組み立て（図11）、ほこりがないように徹底的に洗浄します。溶接による縮みで設計値からサイズや形がずれてしまう可能性もあります。そうするとチューニングがずれた楽器のように、ほかの加速空洞との調和が取れなくなってしまいます」と山田 専任技師は説明する。

部品のプレス成形や溶接はメーカーが担当したが、チームのメンバーが組み立ての各段階で検査し、修正指示を出しながら加速空洞を製作していった。

加速空洞へ大電力を供給する方法も難しい。超伝導の加速空洞は真空容器

に入れ、4 K（約-269℃）の極低温に冷やす。その真空容器の外側は室温だ。電力を供給するために外側から極低温の加速空洞へカプラーという装置を差し込む（図10左）。

効率よく大電力を供給するには、カプラーの電気抵抗を低くして発熱を抑える必要がある。ただし、電気抵抗を低くするために電気伝導率を高めると、熱伝導率も高まるため、外部の室温の熱が加速空洞へ流入しやすくなる。

大関和貴 技師が、「外部から流入する熱を減らしたい」「電気抵抗による発熱を減らしたい」という原理的に両立が難しい要求のバランスを取り、最適な電気伝導率を導き出してカプラーの設計・開発を行った（図10右下）。また、真空窓と呼ばれる部品が、冷却により割れてしまうと空洞内にごみが混入し、空洞の性能を下げることが懸念されることから、液体窒素や液体ヘリウムを用いて十数回冷却・昇温試験を行って真空の漏れが起こらないことも確かめた。

渡邊 裕 専任技師は、超伝導関係の設備を担当する。「超伝導空洞は、液体ヘリウムに浸けてその性能を測定することになるため特殊な設備が必要となります」。理研にはその設備がなく、協力を依頼した高エネルギー加速器研究機構（KEK）がある茨城県つくば市に通い詰めて、試験設備を完成させた。

須田健嗣 仁科センター研究員が、加速空洞の性能を測定する測定装置の開発と試験を担当した（図12）。「電力の供給を切った後、空洞に蓄えられた電力が失われるのにかかる時間が長いほど性能の高い加速空洞だといえます。1回たたくと、いつまでも音が鳴り続ける響きの良い楽器のようなものです。発熱が少ないほど、振動が持続するというわけで

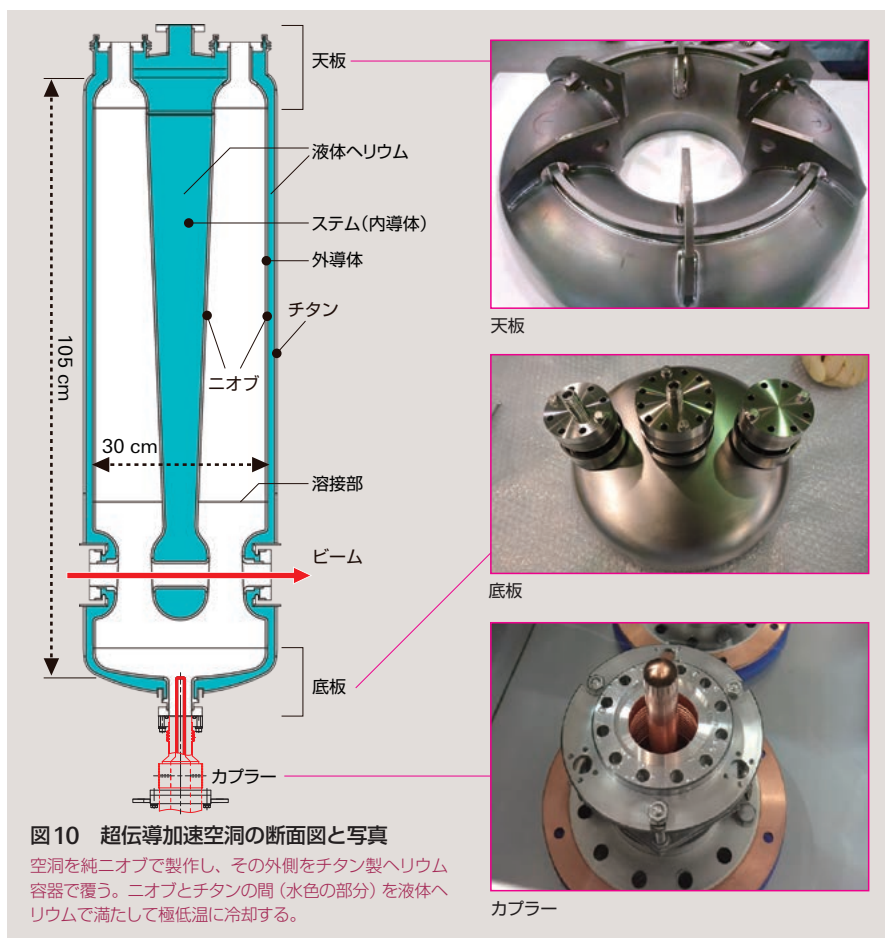


図10 超伝導加速空洞の断面図と写真

空洞を純ニオブで製作し、その外側をチタン製ヘリウム容器で覆う。ニオブとチタンの間（水色の部分）を液体ヘリウムで満たして極低温に冷却する。

す。私たちが製作した加速空洞は、電力の半減時間が1.28秒と長く、目標とした高い性能を示しました」

「1台目でこの性能を達成できたことは奇跡に近いと思います」と坂本TLは強調する。「私たちが製作した超伝導加速空洞は、従来の銅を用いた常伝導のものに比べて消費電力が数百分の1以下で、最大1,600 kVの高電圧を発生させることができます」

成功の要因は何か。「電子の超伝導加速空洞を製作した経験を持つKEKの方々から多大なるご協力を頂きました。また、私たちはRIBFで、誰もやったことのない実験や新しい装置の開発を続けてきました。その経験が加速空洞の開発にも役立ちました」

坂本TLたちは、LLFP核変換に不可欠な超伝導加速空洞を日本において製作できることを実証した。

そして坂本TLたちは現在、製作した超伝導加速空洞を使ってLLFP核変換のための実験を進めるとともに、その技術を基礎研究に生かす計画だ。113番元素「ニホニウム」を合成・発見したRNCでは、119番元素・120番元素の合成・発見を目指している。そのために坂本TLたちは、超伝導加速空洞を新たに設計して量産する計画だ。そのため、理研内にクリーンルームや性能試験施設を設置する作業を進めている。そのようなインフラ整備を渡邊 専任技師が進めている。

「2019年には、複数の超伝導加速空洞を稼働させて実験を開始する予定です」と坂本TL。「超伝導加速空洞を長期間稼働させる経験は、LLFP核変換の研究にもフィードバックできるはずです。日本加速器学会は『社会に役立つ加速器』を標榜（ひょうぼう）しています。私たちが研究を進めるモチベーションの根幹には物理に対する好奇心がありますが、基礎研究で開発した加速器技術で、LLFP核変換など社会のさまざまな分野に貢献していきたいと思います」

図12 超伝導加速空洞の性能試験

高エネルギー加速器研究機構（KEK）の施設で行われ、目標の性能を達成していることが確かめられた。



ステム（内導体）と天板を溶接



ステムと外導体を溶接

図11 超伝導加速空洞の組み立て（溶接）

基礎研究から新しい技術を生み出し LLFP核変換の実用化を目指す

藤田玲子PM・櫻井博儀GDに聞く

撮影：STUDIO CAC

—このImPACTプログラムは、海外でも注目が高いそうですね。

藤田：私は今年4月にスウェーデンを訪ねました。同国では、使用済み核燃料をそのまま容器に入れて直接処分する方針です。その研究開発においてスウェーデンは世界をリードしている国です。その関係者から「高レベル放射性廃棄物を少しでも減らすことは重要なので、一緒に議論していこう」と言われました。

原子力発電の推進に賛成か反対か、あるいは核燃料サイクルか直接処分かにかかわらず、後世の負担を減らすために核変換の研究は重要です。

—このプログラムのもう一つの大きな目標は、高レベル放射性廃棄物の一部を資源として再利用することですね。

藤田：例えば、使用済み核燃料には1,000 kg当たり1 kgほどのパラジウム(Pd)が含まれています。パラジウムは自動車の排ガス浄化の触媒に使われるなど重要な資源です。Pdのレーザー偶奇分離を行い質量数が偶数のパラジウム同位体を分離回収しても、レーザーが当たっていなかった部分が混入して極微量の ^{107}Pd が含まれる可能性があります。人体に影響のない放射能レベルにするには、 ^{107}Pd をどこまで減らすべきか、マウスを使った実験を京都大学に進められています。

—LLFP核変換を実用化していくには何が必要ですか。

藤田：日本の原子力工学は、海外の基礎研究に基づく工学技術を輸入し、それを改良することで世界トップレベルの原子力技術を築きました。基礎研究から始めてまったく新しい技術を生み出すことや、ほかの分野のアイデアを検討することには消極的でした。

このプログラムでは、LLFP核変換の



藤田玲子プログラム・マネージャー（右）と櫻井博儀グループディレクター

データをRIBFで測定する基礎研究から始め、理学と工学の融合を図り、さまざまな分野のアイデアを検討して新しい技術を生み出し、LLFP核変換を実用化しようとしています。

実際に理研の人たちから、さまざまなアイデアが提案されました。現在、RNC大強度標の開発チームの奥野広樹チームリーダー（TL）たちは、 ^{107}Pd 標的の製作に挑み、そこに重陽子ビームを照射する実験を行うことを目指しています。 ^{107}Pd ビームを重陽子の標的に照射する逆運動学法による測定データと一致するかどうか検証する実験で、当初は予定していなかったものです。

理研の研究者たちは「できません」と言わないところがすごいですね。原子力工学の若手も大いに刺激を受けています。

—基礎研究を進める理研にとっては、このプログラムに参画することによどのようなメリットがありますか。

櫻井：私個人は今まで、研究成果を論文で発表することしかしてきませんでしたが、特許が重要なことを認識しました。コンセプト特許を取得し、LLFP核

変換が可能なことを世界に示し、国際原子力機関（IAEA）を巻き込んで日本が主導的に実用化を進めていく、という藤田さんの方針です。学ぶべき点が多いですね。

理研の多くの研究者がこのプログラムに積極的に参加しているのは、社会に役立つと思っているからです。また、基礎研究にも大きなメリットがあります。超伝導加速空洞の技術を、119番元素や120番元素の合成・発見に利用するように、LLFP核変換の研究から生まれたアイデアや技術は、原子核物理学の基礎研究にも役立ちます。LLFP核変換の実用化のように目標が高く難しい応用研究ほど、基礎研究へフィードバックすることができるのです。

—このプログラムの期限は2018年度です。その後の展望をお聞かせください。

藤田：さらに低いビームエネルギーによるLLFP核変換の基礎実験など、まだやるべき基礎研究が残っています。さらに5年間、今回と同様の体制で研究を進め、LLFP核変換を実証する施設の基本設計図を描くべきだと考えています。

（取材・執筆：立山 晃／フotonクリエイト）

「理化学研究所 科学講演会2017 理研百年—新たなる百年へ—」を開催します！

開催日時	11月3日(金・祝) 14:00~17:00 (13:00開場)
開催場所	丸ビルホール(東京都千代田区丸の内2-4-1 丸ビル7階)
参加方法	<p>事前申し込み制・先着順(定員400名、参加費無料) ※未就学児のご参加はご遠慮ください。 ※WEB、電話、FAXによる参加登録受け付けは10月25日(水)正午まで。「往復はがき」での応募は10月25日消印有効。ただし、定員に達し次第締め切り。 ※WEB登録の場合は登録完了メールの受信、FAX登録の場合は返信FAX、往復はがき応募の場合は返信はがきの到着をもって登録確認。登録確認の返信FAX・はがきが未着の場合は電話でお問い合わせください。 ※往復はがきではない、通常はがきでの応募は無効。 ■WEB http://www.riken.jp/pr/events/events/20171103/ ■TEL 048-467-9954 FAX 048-462-4715 ■往復はがき送付先 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1 理化学研究所広報室「科学講演会」係宛て ※電話の場合は①参加者氏名(読みがな)、②年齢、③職業、④連絡のつく電話番号、⑤お住まいの都道府県、⑥イベント情報の入手先を伺います。FAXの場合は①~③⑤⑥は同じ、④に返信を受け取るFAX番号を記載し送信ください。往復はがきの場合は①~⑥(連絡先④は電話もしくはFAXを指定)を明記ください。</p>

プログラム ※時刻などは変更となる場合がございます。あらかじめご了承ください。

14:00	開会のあいさつ 有信睦弘 理事
14:05~14:25	今後百年の礎を築き、未来を拓く 松本 紘 理事長
14:25~15:10	新しいリンパ球の発見 茂呂和世 統合生命医学研究センター 自然免疫システム研究チームリーダー
15:10~15:30	休憩
15:30~16:15	人工知能研究の現状とこれから 杉山 将 革新知能統合研究センター長
16:15~17:00	数理学による知の統合と展開 初田哲男 数理創造プログラムディレクター
17:00	閉会のあいさつ 有信睦弘 理事

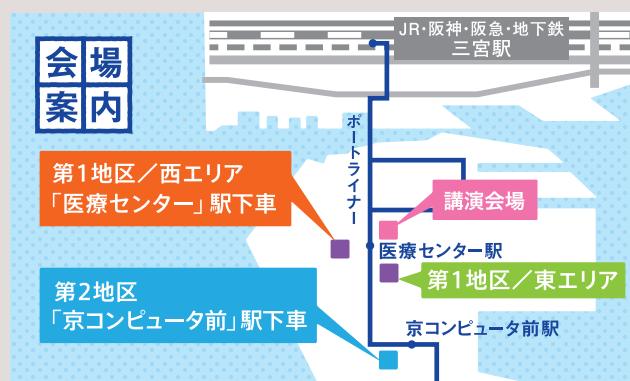
※会場ロビーにて「科学道100冊」展示および理研グッズ販売も実施します。

問い合わせ 理化学研究所 広報室
TEL 048-467-9954 E-mail event-koho@riken.jp

神戸地区一般公開のお知らせ

神戸地区の理化学研究所は、今年も「一般公開」を開催します。同日に、神戸医療産業都市の関係施設(大学、研究機関、企業)の公開も行われるほか、高校生を対象とした講演会とトークセッション「サイエンスアゴラ in KOBE」も神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホールで実施されるなど、盛りだくさんの内容となっております。

当日は、各会場において、研究現場の公開や施設の見学ツアー、科学の不思議が分かる体験型イベント、講演会など、子どもから大人まで興味を持っていただけるようなさまざまな催しを行います。詳細はWEBページをご覧ください。



日時 2017年10月14日(土) 10:00~16:30 (入場は16:15まで)

場所 **理化学研究所神戸第1地区**
(最寄駅: ポートライナー「医療センター」駅)
西エリア
多細胞システム形成研究センター
生命システム研究センター
東エリア
ライフサイエンス技術基盤研究センター
健康生き活き羅針盤リサーチコンプレックス推進プログラム
講演会(会場): 臨床研究情報センター

理化学研究所神戸第2地区
(最寄駅: ポートライナー「京コンピュータ前」駅)
計算科学研究機構

問い合わせ 神戸第1地区 (TEL: 078-306-0111)

神戸第2地区 (TEL: 078-940-5555)

<http://www.kobe.riken.jp/openhouse/17/>

飛鳥山の思い出の城

岩野恵子 いわの・けいこ

仁科加速器研究推進室 副主幹

子どもが生まれてぐっと身近になった存在がある。厳密に言えば、長らく遠ざかっていて再び親しくなった存在、児童公園である。よく行くのは、やはり近所の児童公園だ。休日のちょっとした空き時間をつぶすのに世話になっている。遊具はブランコ、すべり台、鉄棒だけの何の変哲もない児童公園であるが、子どもは十分楽しめるようだ。振り返れば、私もいつも決まった公園で飽きもせず遊んだものだった。とはいえ、ほかにない魅力的な遊具を前にしたら、子どもも大人も気分が上がる。通りすがりの児童公園に珍しい遊具を見掛けたら素通りはできない。時間と心に余裕があれば、思い切って立ち寄る。それが無理なときは、今度来てみようと思い記憶にとどめる。

私の思い出の中にも、記憶に残る特別な遊具がある。飛鳥山公園の白亜のお城すべり台だ。私は8歳まで東京都北区滝野川で育ったので、近所の飛鳥山公園にはよく連れていってもらった。徳川8代将軍 吉宗がつくり上げた桜の名所、飛鳥山公園である。その一角に児童エリアがあった。そのエリアが理研の創設にも関わった渋沢栄一の邸宅跡だということを、ずっと後になってから知った。ひょっとしたら邸宅跡を意識してつくられたのかもしれないが、児童エリアの中心に、真っ白なコンクリート製のお城すべり台があった。その大きさといい、存在感といい、遊具として群を抜いていた。児童エリアには、ほかにゾウのすべり台、コンクリートの動物群などの遊具があり、SL車両も置かれていた。

数年前に子どもを連れて何十年かぶりに飛鳥山公園を訪ねた。児童エリアに足を踏み入れると、そこには懐かしい光景が広がっていた。お城のすべり台は相変わらず白く輝き、威風堂々たる姿である。ゾウのすべり台も動物群もSLも健在だった。驚きと感動で自然と顔がほころんだ。その後も何度か遊びに行き、変わらぬ遊具群の充実ぶりに感激していたが、雰囲気を変えずに変化はしているよう



写真1・飛鳥山公園のゾウのすべり台と動物群



写真2・飛鳥山公園のお城すべり台と筆者近影(右)。左上は筆者2歳のころ。

だ。今回、原稿を書くに当たって幼少期の写真を見返し、改めて訪ねたところ、動物群の色と配置が若干違っていることに気付いた。この空間の持続性は、おのおのの遊具が、塗り替えや補修、パーツ交換によりイメージを変えないように、きちんと維持管理されているために実現していた。この当たり前の事実に関心、感動を新たにしました。

あと数年もしたら、私と児童公園はまた疎遠になるだろう。大人になって再び足を踏み入れた児童公園では、子ども時代の追体験ができただけでなく、大人目線故の新しい発見もあった。新しい遊具のほとんどはプラスチック製で、木製のアスレチック遊具ですら老朽化するとプラスチック製に置き換えられていくこと。それ故レトロなコンクリート製遊具の重厚感がいっそう際立つが、コンクリート製遊具とて老朽化にはあらがえないこと。しかし、それでも飛鳥山公園の遊具群は、この先何十年も変わらず子どもたちを楽しませ続けるに違いない。

創立百周年記念事業への寄附金のお願い

創立百周年(2017年)の記念事業へのご支援をお願いします。

問合せ先 ● 理研 外部資金室 寄附金担当

Tel: 048-462-4955 Email: kifu-info@riken.jp

理研 寄附金
Support RIKEN

理化学研究所 創立百周年
RIKEN 100th Anniversary



http://www.riken.jp/