

Quest for the Future

[未知への探究]

基礎科学ノート
Notes on Basic Science

Volume

30

No.1
November
2025

「ニュークリア×リニューアブル」で拓く新しい未来

Notes on Basic Sceince

〔基礎科学ノート〕

Volume

30

No.1
November
2025

Preface	日本の未来を拓く原子力～ブレークスルーを支える先端基礎研究の力	3
	門馬利行	
Special Interview	佐甲博之＋田村裕和	4-9
	物質が生まれ重くなる仕組みを解き明かし、宇宙の物質の謎にせまる理論をはじめて実証する。	
Research Teams	#1 ナノ材料デバイス化研究チーム	10-13
	重水素国産化への挑戦 エネルギーと産業を支える次世代基盤技術	
	#2 先端エネルギー物性研究チーム	14-17
	物質の力で切り拓く次世代エレクトロニクス ナノの世界から創る未来のエネルギー	
Frontier Research	#1 大規模シミュレーションで拓く核分裂の世界	18-19
	岡田和記 元素の極限を目指して	
	#2 物質の潜在能力を引き出す	20-21
	木保 基 先端微細加工が拓く超伝導研究の新地平	
	#3 陽子内部に働く力を解き明かす	22-23
	藤井大輔 核子中の凝縮エネルギーが生み出す閉じ込め圧力	
Essay	#1 Timothy Ziman	24
	#2 池田篤史	25
Topics	#1 「JAEA/ASRC × 水城高校」サイエンス講義	26
	#2 受賞/プレス発表	27

ASRCについて：

「先端基礎研究センター」(ASRC)は、原子力研究開発の課題に対して原理、現象の根源に立ち返ってこれを解決するとともに、一般の基礎科学との協調により、原子力の発展のみならず他の分野の開発をも先導する研究の発展を図ることを目的として、1993年に日本原子力研究所内に設立されました。その後、日本原子力研究開発機構(JAEA)の発足や量子科学技術研究開発機構の分離独立などの組織改変がありましたが、30年近い月日を経た今も、ASRCの設立理念は変わっていないと考えています。

現在は、「原子力先端核科学」と「原子力先端材料科学」の2分野・6研究グループと、両者をつなぐ先端理論物理研究グループの7つの研究グループを設定し、JAEAのビジョンが掲げるニュークリア×リニューアブル(原子力と再生可能エネルギーの融合)の実現に向けて、原子力科学における未踏分野の開拓を進め、新原理・新現象の発見、新物質・材料の創製、および革新的技術の創出を目指しています。

Preface

日本の未来を拓く原子力 ～ブレークスルーを支える先端基礎研究の力

門馬利行〔日本原子力研究開発機構 理事〕



原子力機構は、令和5年4月に職員が一丸となって目指すべきビジョン「ニュークリア×リニューアブルで拓く新しい未来」を掲げ、現在に至るまで多様な業務プロセスの改革に取り組んでいます。この背景には、我が国が直面しているエネルギーおよび社会構造の深刻な課題に対する強い危機感があります。

日本はエネルギー資源に乏しく、エネルギー自給率はわずか10%台にとどまっています。少子高齢化と経済の停滞が進行するなか、資源大国である米国や国境を越えて電力融通が可能な欧州諸国とは異なり、カーボンニュートラルの実現は、日本にとって極めて高いハードルです。そのため、再生可能エネルギーの最大限の導入に加え、原子力の安定的かつ安全な活用が不可欠であることが、最新のエネルギー基本計画にも明示されています。

しかし、日本は世界で唯一の被ばく国であり、さらに福島第一原子力発電所事故の記憶が未だ鮮明に残る中、原子力に対する国民の不信感は根強く残っています。

こうした課題を乗り越え、ビジョンの実現に向けて原子力の新たな価値を社会に提示していくため、我々は三つの柱に基づく研究開発を推進しています。

一つ目の柱「Synergy(シナジー)」は、ニュークリアトリニューアブルの相乗効果を追求し、エネルギーの安定供給と脱炭素の両立を図る研究であり、高温ガス炉の開発や劣化ウランを活用した蓄電池開発などが該当します。

二つ目の柱「Sustainable(サステナブル)」は、原子力そのものの持続可能性を高める取り組みであり、軽水炉の高度化、革新炉、核燃料サイクル、廃止措置や廃棄物の処理・処分などを通じて、エネルギーシステムとしての原子力の完成を目指します。これは、原子力発電に係る安全性や廃棄物問題への懸念を低減するものであり、その多くがゴールを明確化したプロジェクト型の研究開発です。

三つ目の柱は「Ubiquitous(ユビキタス)」です。これは、医療、農業、環境、宇宙、資源循環といった幅広い分野におい

て原子力技術を活用し、国民生活の質を向上させるとともに、原子力をより身近な存在として感じていただくことを目指します。医療用RIの供給や放射線育種といった既存の実用技術に加え、トポロジカル物性や量子材料、スピン熱電素子、グラフェンなど、最新の基礎物理の知見を活かした研究は、量子コンピュータの実現、データセンターの画期的な省エネルギー化、半永久電源や次世代半導体の開発などを導く、まさに社会に新たな価値をもたらす萌芽といえるでしょう。

また、エネルギーの観点でも、やや飛躍しすぎているかもしれませんが、放射線や熱を直接利用するエネルギー変換技術等の劇的な進化・応用により、従来の原子炉・タービン型の枠組みにとらわれない簡素でコンパクトな発電システムが実現すれば、原子力発電の“ムーンショット”になるでしょう。

ユビキタス研究に代表される、こうした革新的技術の実現に向け、我々が何より重視しているのが、先端基礎研究の力です。ブレークスルーとなる技術や発想は、日々の積み重ねと探究から生まれます。従来の延長線上ではない階段状の技術進化——その起点には、最先端の基礎研究があるのです。だからこそ、我々は研究者の皆様に、常に世界の最前線と接続された、真に先進的な研究を志していただきたいと願っています。

そのためには、国内外との交流を積極的に行い、異分野・異文化との対話を通じて視野を広げるとともに、研究体制そのものも柔軟かつ機動的に進化させることにより、より創造的で革新的な研究環境を継続的に創り出す必要があります。

原子力の新しい未来を切り拓くために、そして日本が持続可能で豊かな社会を築くために、原子力科学における先端基礎研究の果たすべき役割は、今後ますます大きく、そして重要になっていきます。皆様の果敢な挑戦と今後の研究成果に、心より期待を寄せています。

質量の起源を説明する“質量獲得機構”の証明に挑むハドロン物理学研究の最前線。
ハドロン原子核物理研究グループのマネージャー・佐甲氏と、
同グループのリーダーであり東北大学大学院理学研究科教授・田村氏に話を伺った。

[研究テーマ]

原子核内 Φ 中間子の K 中間子対崩壊における
偏極と分散関係による質量獲得機構の解明

佐甲 博之
Sako Hiroyuki

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 先端基礎研究センター マネージャー
原子力科学研究部門 J-PARC センター
筑波大学 数理物質科学研究科 客員教授

京都大学理学部物理学科卒業、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。
筑波大学助手を経て、ドイツ重イオン研究所 (GSI) で博士研究員として研究に従事。
その後欧州での研究を終え、2004年より「J-PARC」加速器の研究に従事。
2010年、ハドロン原子核物理研究グループの発足初期からメンバーに加入。現在は同グループのマネージャーを務める。

物質が生まれ重くなる仕組みを解き明かし、
宇宙の物質の謎にせまる理論を
はじめて実証する。



物理への興味は宇宙から。 宇宙の物質の謎に迫る理論の実証に挑む。

宇宙はビッグバンによって生まれた、という話を皆さん一度は耳にしたことがあるかと思います。また、宇宙の始まりについて考えて眠れなくなった、なんて人も少なくないでしょう。私も子どもの頃から、宇宙がどこまで広がっているのか、電磁力や重力はどのようなものなのかなど、自然の中の物質について興味を抱いていました。そしてそれが物理学という学問によって探究されていることを知ったのは高校生の頃。物理の授業を受けてますますその面白さを実感し、将来物理学の研究者になることを目指して京都大学理学部に進学しました。ちなみに京大は憧れていたノーベル物理学賞受賞・湯川秀樹氏の母校でもあり、物理学の研究者になるなら京大、というのは自分の中で揺るぎのないものでした。

大学で物理を学び始めると、一言で物理と言っても電磁気学、量子力学、熱力学などさまざまな分野があることを知

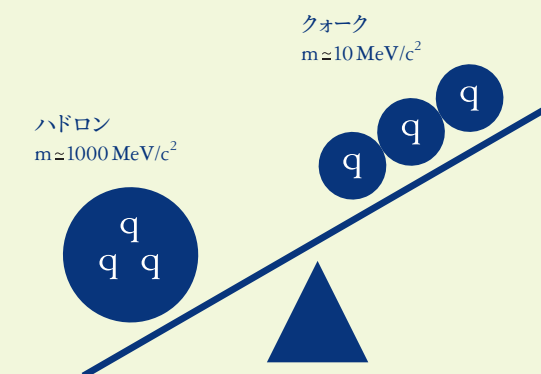
ります。細分化されつつも自然界で起きる数多の現象の法則を解き明かしたいという同じ目的のもとで研究が進んでいる奥深い学問。それが物理学なのだと思し、さらに興味が増したことを今も覚えています。

ここで一度話を宇宙に戻します。約138億年前ビッグバンによって誕生した宇宙は徐々に大きくなり、温度が下がり、さまざまな粒子を生み出したとされます。誕生の瞬間、ビッグバンから約1万分の1秒後までは、「クォーク」と呼ばれる素粒子が宇宙を自由に飛び回っていましたが、すぐに陽子や中性子といった粒子の中に閉じ込められました。これらのクォークの集合体である粒子を「ハドロン」と呼びます。ハドロンの中にいるクォークを直接取り出して観測することはできません。しかし、クォークが3つ集まり陽子や中性子を構成すると、質量が約100倍に増えることが理論的に示されています。この現象を「質量獲得機構」といい、その仕組みを説明すると考えられているのが、2008年にノーベル物理学賞を受賞した研究者・南部陽一郎氏の

理論「自発的対称性の破れ」です。南部理論によると、真空中にクォークと反クォークの凝縮が発生し、それとハドロンが反応することによって質量が生成されるといいます。しかしこの理論のハドロンの質量とクォークの凝縮の関係を精密に測定した人はいないのです。私たちはその変化を観察したい、南部理論が正しいということを証明したい。そして宇宙の始まりの謎を解き明かしたい。これからお話しする研究は、こうした背景から生まれました。

世界最先端の施設と世界初の手法で 数百倍の“崩壊”現象を捉える。

私が現在マネージャーを務めるハドロン原子核物理研究グループは、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)・原子力科学研究所の先端基礎研究センターを拠点とし、強い相互作用で結合した複合粒子であるハドロンと、ハドロンから構成されている原子核などを研究しています。具体的には、ハドロンや原子核を高温に温めたり、高密度に圧縮したりして、その変化を観測します。それにより、ハドロンがクォークからどのように構成されているのか、原子核がハドロンからどのように構成されているのか、構造を解明しようとしています。この研究を同機構で行う意義は、原子力発電のエネルギーの源となる核力の理解にも通じるからです。原子核を構成する陽子や中性子はハドロンの一種であり、それらを結びつける力の起源を



ハドロンの質量はそれを構成するクォークの100倍程度となる

知る私たちの基礎的研究は原子力の安全と発展に欠かせません。

私が現在取り組んでいる研究は、クォークと反クォークからなるΦ(ファイ)中間子の質量が、原子核中で本当に変化しているのか、どれほど変化しているのか、精密な数値を調べる実験を行っています。Φ中間子はとても壊れやすく、その壊れ方には大きく2つあります。1つは電気の性質を持つ軽い粒子のペアに分かれるパターン(電子対崩壊)、もう一つはK(ケイ)中間子という別の粒子のペアに分かれるパターン(K中間子対崩壊)です。Φ中間子の質量変化の研究は、この崩壊パターンのいずれかに着目し、Φ中間子崩壊前後の質量の変化を測定、評価するという流れで行います。

電子対は崩壊後に他の粒子との反応の影響を受けにくいので、Φの質量がより正確に得られると考えて、従来は電子対崩壊を測定していました。ところが、最新の理論研究でその影響はK中間子崩壊でも小さいということがわかってきました。



先端基礎研究センター マネージャー 佐甲博之氏



ハドロン原子核物理研究グループリーダー 田村裕和氏
(東北大学大学院理学研究科教授)

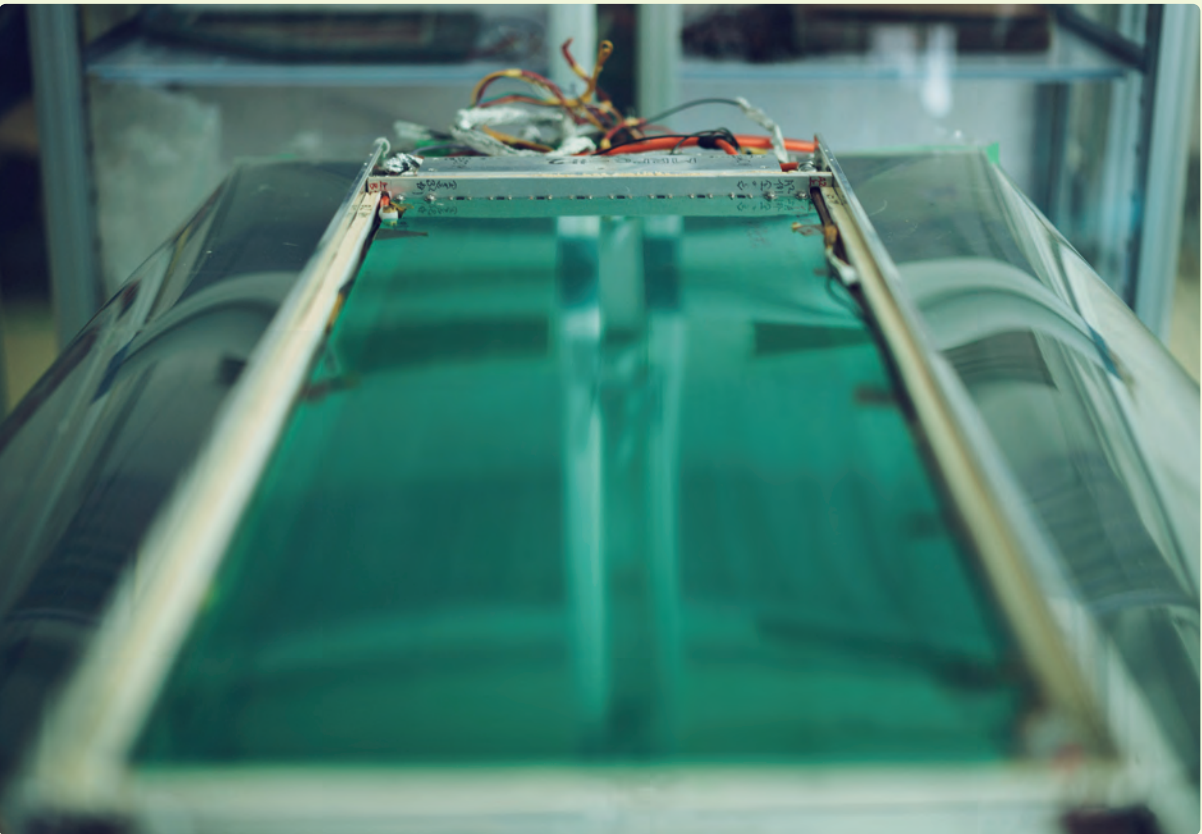
理論を確実に実証するためには、やはり崩壊の確率が圧倒的に高いK中間子崩壊を数多く測定したい。そこで私たちはK中間子対崩壊を精度よく測定する技術確立し、電子対崩壊の測定に比べ数百倍という規模の崩壊事象を測定しようとしています。研究ではまず、大強度陽子ビームを原子核標的に照射し、原子核内にK中間子を生成。その後起こるK中間子対崩壊を測定します。この質量の測定のとときに、世界初の試みとしてK中間子のスピン（小さな磁石）を同時に測ろうとしています。スピンの向きによって質量が異なるというとても不思議な現象が予想されていて、それも世界で初めて測定したいと思っています。

先ほど話に出てきた大強度陽子ビームの照射実験は、JAEAと大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で運営している大強度陽子加速器施設「J-PARC」内、ハドロン実験施設で行います。世界最高レベルの強さの陽子ビームを直接使ったり、さまざまな二次粒子へ変換したビームを使って研究を行うことができる世

界有数の施設です。こうした世界最先端の実験ができるのも、原子力施設を保有し管理するJAEAだからこそ可能なのです。

最先端だからこそ装置は独自で開発。
研究のすべてが“未来の当たり前”に貢献。

現在取り組んでいる研究で最終的に解き明かしたいことは、物質の重さがどうやってできているのか、物質はどのようにつくられているのかという、物理学の奥底にある疑問です。繰り返しになりますが、ハドロンは私たちの体や食べ物から、地球、宇宙までも構成している物質です。そのハドロンの質量はクォークレベルでつくられています。質量獲得機構の証明ができれば、宇宙学はもちろん、医学や工学など、さまざまな研究分野に波及していくでしょう。物理学とはそういう学問なのです。



崩壊したK中間子を識別するための検出器の1つ



独自開発の装置を多数設置している実験室にて



佐甲、田村両氏

私たちの研究とつながる話として、最近話題になっている「中性子星」をご紹介します。中性子星とは、重い恒星が超新星爆発、つまり進化の最終段階で起こす爆発の後、中心に残る半径10km程度の超高密度天体です。名前の通り、中性子（陽子とともに原子核を構成する電氣的に中性の粒子）を主成分としていて、原子から構成される通常の恒星とは大きく異なる性質を持っています。特に、太陽質量の約1.4倍もの物質が閉じ込められていて、その重力の強さは圧倒的といえます。この中性子星が1967年に発見されて以来、地球からの観測で大きさなどはわかってきましたが、中身を見ることができません。しかし強い重力によって密度が高まってくと、やがて原子核よりも高密度状態になり、本来は不安定なクォークの1種、ストレンジクォークという素粒子が自然に安定して発生するはず。さらにハドロンという塊がなくなり、本来閉じ込められているクォークが出てきて自由に飛び回るかもしれない。その姿を観測したい、ならば中性子星と同じ状態を地上につくり出せばいいんだ。というのが、私たちが次に取り組みたいと思っている研究テーマの一つで、「J-PARC-HI（ジェイパークハイ）」と名づ



多様な知識を持つ研究者同士の情報交換が新たなアイデアに繋がる

けた計画です。高エネルギー原子核衝突によって、宇宙における最高密度の物質を創り出すことができれば、その物性と相構造の解明を目指すことができるのです。

ハドロン物理学実験の研究は既存の装置を購入して進められるようなものではありません。新しい実験のために新しい装置、新しいシステムを開発するところからスタートします。今回も既存の検出器に新たな3種類の検出器を導入して進めています。長い時間と手間がかかりますが、確立した新技術や手法は、実験によって解き明かされる自然界の基本法則とともに、別の研究分野にまで波及し、“世の中の安全”、“未来の当たり前”に貢献していくと確信しています。

先端基礎研究センターでは研究者による一般の方向け講義や学生向け実習、J-PARCでは施設見学を行っているので、少しでも興味を持たれた方はぜひ足を運んでください。特に物理学や工学、宇宙科学に興味のある高校生や大学生の皆さん、一緒に宇宙の謎、質量の起源の実態を解き明かしてみませんか。



ナノ材料デバイス化研究チーム
Nanomaterial Device Research Team

重水素国産化への挑戦
エネルギーと産業を支える次世代基盤技術

- 保田 諭 Yasuda Satoshi[チームリーダー]
- 矢野雅大 Yano Masahiro
- 久保真治 Kubo Shinji
(大洗原子力工学研究所 高温工学試験研究炉部/バイオナラボ兼務)
- 佐川明美 Sagawa Akemi
(研究開発推進部研究推進課/バイオナラボ兼務)
- 島根江梨子 Shimane Eriko
- 片岡奈緒 Kataoka Nao
- 金澤広大 Kanazawa Takehiro

我々のチームは、従来の原子力技術である水素同位体科学と、ナノ材料作製技術および電気化学技術を融合し、先端材料・エネルギー・環境分野への応用を目指した研究を進めています。

その中で、半導体や医薬品、将来の核融合に欠かせない希少な水素の同位体「重水素(D)」を、国産で安定的かつ低コストで製造する技術を開発しています。

我々は、水を分解して「水素(H)」を作る電気分解装置を活用し、カーボンニュートラル実現に重要な水素を作るだけでなく、その過程でごくわずかに得られる重水素も回収する仕組みを構築中です。

重水素を効率よく回収する仕組みを基礎科学から解明し、回収効率を高めた材料開発の研究を進めています。これにより、カーボンニュートラルや国内産業の発展に寄与し、持続可能な社会の構築に貢献することを目指します。

我々のチームでは、ナノ材料の作製技術、電気化学、水素同位体科学といったコア技術を基盤に、先端材料、エネルギー、環境分野への応用を目指して、基礎研究から応用デバイスの開発まで一体的に取り組んでいます。その一環として、水素(H)と重水素(D)の同位体分離を可能にする新たな電気化学的手法の開発にも挑戦しています。

重水素は、陽子と中性子を1個ずつ持つ水素の同位体(水素は陽子1個のみ)で、天然水中に約0.015%しか存在しない希少元素です。かつては原子力発電の材料として使われてきましたが、近年では材料科学、情報通信、医療、エネルギーなど幅広い分野で重要性が増しています。たとえば、半導体デバイスや有機ELの寿命向上、光ファイバー通信の長距離伝送、医薬品の薬効持続化などに利用され、将来的には核融合炉の燃料としても期待されています。

現在、重水素は主に軽水(H₂O)から濃縮・精製されて重水(D₂O)として利用されますが、濃縮過程には多大なエネルギーが必要で、日本ではほぼ輸入に頼っているのが現状です。さらに、重水は原子力施設で利用可能なため、戦略物質として輸出入が厳格に管理されており、国際情勢の変化による価格変動や供給途絶リスクを常に抱えています。一方で、半導体や光ファイバー

製造は日本の重要な基幹産業であり、将来的には核融合の燃料としての利用も見込まれていることから、重水素を国内で安定的に製造・供給できる体制の確立は、国内産業の発展とエネルギー安全保障の両面で極めて重要となっています。

このような背景から、我々のチームでは、天然水から重水素を低コストで濃縮・精製し、産業用途に利用可能な高純度の重水を国内で安定的に製造するための基盤技術の開発に取り組んでいます。同時に、これらの技術を活用することで、国産重水素のサプライチェーンを構築するという壮大な目標の実現を目指しています。

この夢の実現に向け、私たちはPEM(高分子電解質膜)型電気化学デバイスに注目し、重水素の濃縮・精製技術の開発を進めています。PEM型デバイスは、陽極・陰極・固体電解質膜からなる三層構造で、コンパクトかつ安全性が高く、水の電気分解や燃料電池として利用される技術です(図1)。特にPEM型水電解は、余剰電力や再生可能エネルギーを利用し、二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源である水素を製造できるため、カーボンニュートラル実現の重要技術として世界的に導入が進んでいます。

我々は、このPEM型水電解による水素製造過程で副産物として得られる重水に着目し、それを効率的に

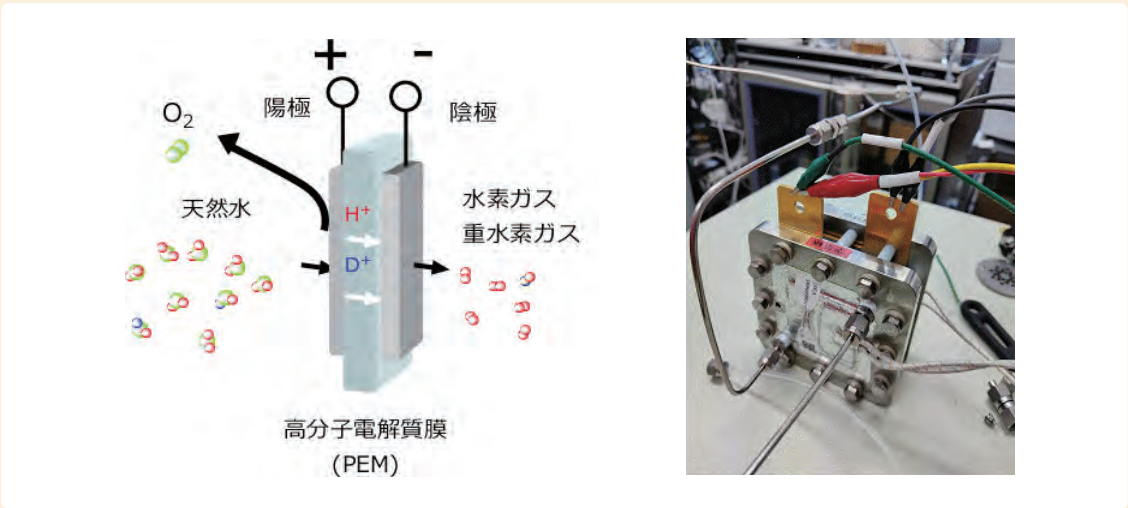


図1

図1:PEM型水電解システムの概念図と写真

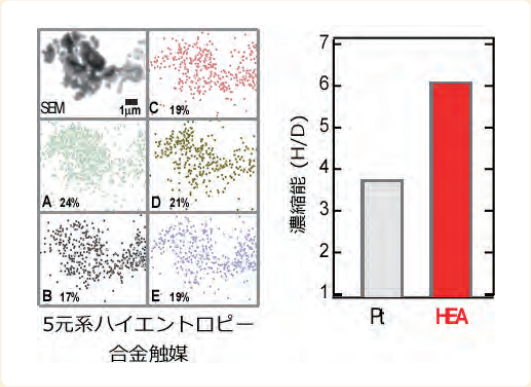


図2

回収することで、水素製造と同時に高付加価値な重水素を生産することを目指しています。日本政府は、水素の供給コストを2030年に30円/Nm³(Nm³は1気圧、0℃に換算した1m³のガス量)、2050年に20円/Nm³にすることを目標にしています。水素1Nm³の製造過程で理論的に得られる重水は目薬数滴分ですが、その価値は数十円分に相当します。この重水を副産物として回収し販売することで、水素製造コストを補いカーボンニュートラル社会の実現に貢献するとともに、重水素の国産化を実現することが可能であると考えています。

もちろん、すべての重水を回収することは技術的に容易ではありませんので、我々はこのPEM型水電解を改良し、少しでも多くの重水を効率的に回収する研究を進めています。PEM型水電解のプロセスでは、陽極に導入された天然水中の水分子(および微量の重水分子)が電解により酸素と水素同位体イオン(H⁺、D⁺)に変換され、これらのイオンがPEMを通して陰極で水素ガスおよび重水素ガスとして放出されます。この際、触媒の性質によって水素ガスが優先的に生成され、相対的に重水素ガスの放出が抑制されることで重水が濃縮される効果が得られます。すなわち、水素ガスへの変換選択性を高めることで、重水の濃縮効率も向上します。このような水素・重水素の変換選択性は、水素同位体と陰極の触媒との相互作用の強さに依存すると考えられており、その制御が重要です。我々はこの点に着目し、水素ガスへの変換選択性を高めるための新規触媒

の開発に取り組んでいます。特に、複数の金属元素を等モル比で組み合わせたハイエントロピー合金(High-Entropy Alloy: HEA)触媒に注目しています。最近では、特定の元素組成で合成したHEA触媒が、従来触媒と同様の水素同位体ガスの生成能力を維持しつつ、水素ガスへの変換選択性を高め、重水の濃縮効果を向上させることを実証しました(図2)。現在は、さらなる性能の向上を目指し、変換選択性の発現機構を解明するための第一原理計算に基づく理論解析も進めています。

しかし、その変換選択性の向上にも限度があるため、一部の重水素ガスは水素ガス中に混在して放出されてしまいます。このため、混在した少量の重水素ガスだけを再度液体の重水として回収する必要があります。古くから原子力分野で利用されてきた重水素ガスと水との間の化学交換反応を用いた回収法が知られていますが、我々はこの原理をPEM型電気化学デバイスに組み込み新たな回収技術の開発に成功しました。化学交換反応に電気化学反応を組み合わせると、従来法よりも回収効率が向上できるだけでなく大幅な小型化が可能であることを基礎的実験により明らかにし、現在は、さらなる検証を進めつつラボスケールの回収システムの開発を進めています。

さらに、産業用途の一つに高純度の重水素ガスが求められる場面がありますが、製造過程で重水素ガス中に水素ガスが不純物として混入する課題があります。これに対し、我々はPEM型電気化学デバイスを活用し新たな分離技術を開発しました。本技術では、二次元材料である単原子層グラフェン膜とその上に形成したパラジウム薄膜からなる二層構造からなる触媒を新たに開発しました。パラジウムは水素同位体ガスを電気化学的にイオン化する性質を持ち、グラフェン膜はH⁺をD⁺よりも選択的に透過する性質を持ちます。この触媒に水素と重水素の混合ガスを導入すると、電気化学的にイオン化したのち、グラフェン膜によってH⁺を選択的に透過することで、水素ガスの選択的除去が可能となります。初めに、我々は、未だ解明されていないグラフェン膜の選択的透過性の性質を実験と理論の両面

図2:開発したハイエントロピー合金触媒の元素分布イメージと従来触媒との濃縮能の比較

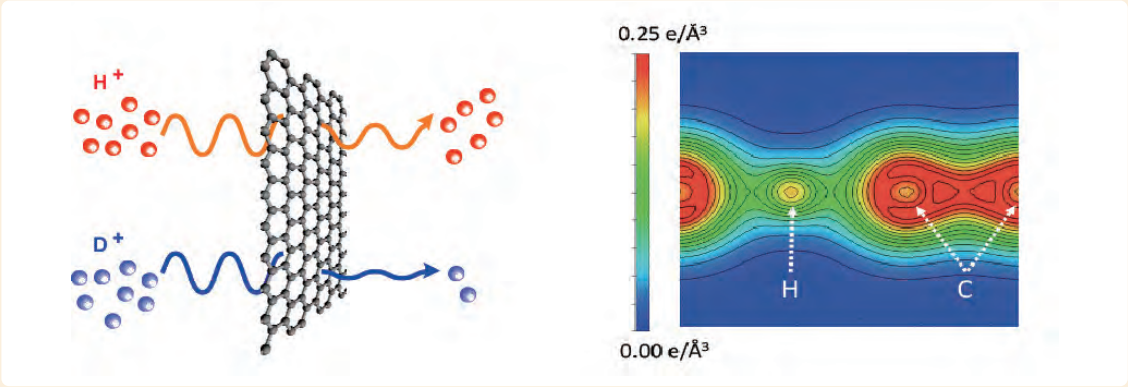


図3

から検証した結果、透過過程においてイオン間の質量差に起因する量子トンネル効果が主要因であることを明らかにしました。さらに、この分離技術をラボスケールのPEM型電気化学デバイスに組み込むことで、実際に重水素ガス中の水素ガスを選択的に除去可能であることを実証しました。

このように我々は、PEM型電気化学デバイスを活用して水素と重水素の同時製造を実現し、重水素の国産化と安定供給を可能にするサプライチェーン構築に向けて、要素技術の研究開発を着実に進めています。今後は、得られた知見をもとに基礎的観点から要素技術のさらなる性能向上を図りつつ、関連企業との連携を深め、社会実装に向けた開発を加速させていく予定です。

本研究は、従来の原子力技術である水素同位体科学と、先端的な材料・電気化学技術を融合し、進化させた次世代原子力研究であり、機構が掲げる「ニュークリア×リニューアブル」の理念に沿うものです。カーボンニュートラル社会の実現や国内産業の発展、さらには次世代エネルギー社会の構築に貢献しうるので、持続可能な社会の実現に向けた技術基盤の確立につながることを期待されます。

チームリーダーの自己紹介

私はこれまで、産業技術総合研究所および北海道大

学において、ナノ分析技術、ナノ材料合成、電気化学などの分野で研究を進め、2017年より本機構に所属しています。ナノ材料の基礎的な物性評価に取り組む中で、水素同位体科学に関心を持つようになり、これまでに培ってきた知識や技術を活かして、水素と重水素の分離技術に関する研究に取り組んでいます。

研究者を志すようになったきっかけは、量子効果が顕著に発現するナノの世界の面白さに惹かれたことです。水素同位体はまさにそのような量子効果が顕著に現れる系であり、大変興味深く感じながら研究を進めています。

また、国立研究機関において社会実装に関する研究に触れてきた経験から、現在取り組んでいる成果についても、産業界との連携を通じて社会に還元していきたいと考えています。



(写真左から) 矢野雅大研究員、佐川明美イノベーションコーディネータ、保田諭チームリーダー、久保真治研究主席、金澤広大研究開発アシスタント

図3:量子トンネル効果により、重水素イオンよりも水素イオンがグラフェン膜を優先的に透過する様子を示す概念図とその理論計算結果



先端エネルギー物性研究チーム
Advanced Energy Materials Research
Team

物質の力で切り拓く
次世代エレクトロニクス
ナノの世界から創る未来のエネルギー

- 吉川貴史 Kikkawa Takashi[チームリーダー]
- 船戸 匠 Funato Takumi (日本学術振興会 特別研究員PD)

現代の電子機器や情報技術の進展には、物質の構造や性質を解き明かす物性物理学の貢献が欠かせません。

しかし、エネルギー変換の分野では、その可能性をまだ十分に引き出せていないのが現状です。

私たちのチームは、物性物理学とエネルギー技術を組み合わせ、原子を構成する“電子”や“原子核”が示す私たちの直感に反した不思議な性質（例えばスピンと呼ばれる自転のような性質）や物質内部の規則的な構造（結晶格子）を活かした、新しいエネルギー変換原理の創出を目指しています。

最先端の薄膜生成技術やナノ微細加工に加え、当機構が保有する巨大な加速器を駆使し、物質の構造やエネルギー変換のメカニズムを精密に分析したりすることで、これまでになかった物質機能を開拓します。

私たちの身の回りにあるすべての物質(図1a)は、目に見えないほど小さな「原子」からできています(図1b, 1c)。そのサイズは、なんと1ミリメートルの1,000万分の1(=約0.1ナノメートル)ほどしかありません。さらに原子は、その中心にある「原子核」と、その周りを回る「電子」によって構成されています(図1d, 1e)。この構造を身近な例にたとえるならば、太陽の周りを惑星が公転している太陽系のようなイメージが近いかもしれません(図1c)。

このような極小の世界では、私たちの直感が通用しない「量子力学」が重要なルールとして登場します。量子力学とは、極めて小さな世界における物質のふるまいを支配する物理法則であり、私たちの常識や日常的な感覚では想像もつかない現象を数多く説明します。たとえば、電子や原子核が持つ「スピン」と呼ばれる性質が挙げられます。スピンとは、身近な例でい

ば地球の自転のようなものですが、実際には回っているわけではなく、量子力学的な“性質”として存在します(図1d, スピンは慣例的に矢印で表現されます)。こうした物質の性質を量子力学の観点から理解し、物質が外部からの刺激(電気、光、熱、振動など)に対してどのように応答するかを明らかにする分野は「物性物理学」と呼ばれており、現代物理学の中心的な分野のひとつとなっています。

実はこのスピンこそが、私たちの身の回りにある「磁石」のもとになっている性質です。磁石は、冷蔵庫にくっついているような大きなものから、コンピューターの中にある微小なものまで、さまざまな形で使われています。最新のナノテクノロジーを駆使すれば、10ナノメートル程度(1ミリメートルの10万分の1)の小さな磁石の膜を作製することができ、これが情報を記録・保持するために重要な役割を果たしています。磁石の

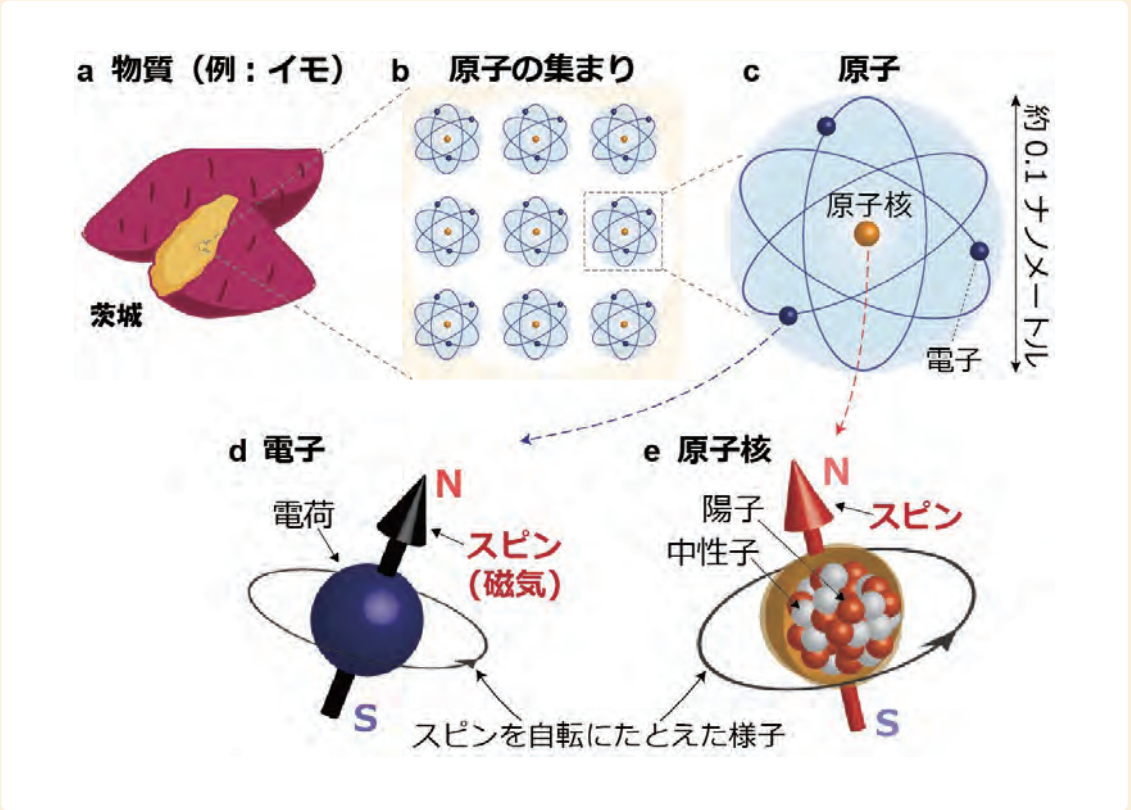


図1

図1: 物質の階層及び電子・原子核の模式図

N極とS極の向き(図1d)によって、0と1のデジタル情報を記録できるのです。こうした技術はクラウド上のデータ保存など、現代の情報社会を支える柱のひとつとなっています。

このような微小な磁石や電子のスピンを利用する最先端の研究分野が「スピントロニクス」です。スピントロニクスは、電子の「電荷」の性質に加えて「スピン」に注目した学術分野であり、21世紀に入って急速に発展してきました。従来のエレクトロニクスでは、電子の流れである「電流(図2a)」を制御することで、情報のやり取りや記録を行ってきましたが、スピントロニクスでは、電子の持つスピンの流れ、すなわち「スピン流」を制御して利用します。これは図2bのように原子サイズの小さな磁石が固体中を流れるようなイメージであり、量子力学に根ざした新しいアプローチです。スピン流を使うことで微細な磁石のN極とS極の向きを反転させ、情報の書き込みを極めて省エネルギーで行うことができます。このため、エネルギー消費の少ない磁気メモリ(MRAMなど)への応用が進められています。

さらに驚くべきことに、スピン流は発電にも使えることがわかってきました。たとえば、ある種の磁石を熱源の上に載せるだけで、スピン流が生まれ、それを電流に変換することで電気を取り出すことのできる「スピンゼーベック効果」が挙げられます。このデバイス構造は、原子炉など高い放射線環境でも使用でき、排熱な

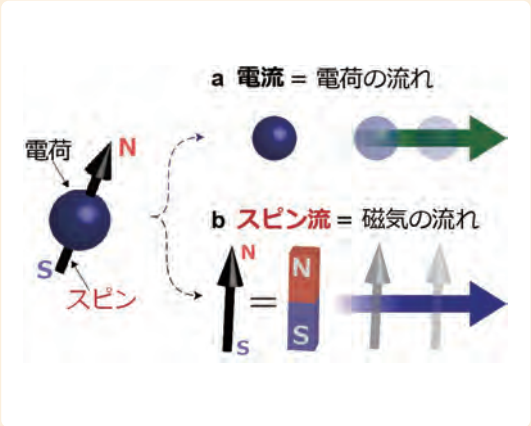


図2

図2: 電流とスピン流の模式図

どの熱エネルギーを電気に変換し、熱発電を可能にします。日本原子力研究開発機構(以下、当機構)は、この研究を推進する拠点として広く認知されています。このような試みは、当機構が進めているNXR「ニュクリア×リニューアブル(=再生可能エネルギー利用技術)で拓く新しい未来」の取り組みとして、機構での重要なミッションのひとつとなっています。

そして、私たちのチームが注目しているもうひとつのスピンの存在があります。それが「核スピン(図1e)」です。電子がスピンを持つと同様に、原子の中心にある原子核もスピンを持っています。核スピンは、電子スピンよりも非常に長い時間その状態を保つことができるという特徴があります(これを「スピン緩和時間が長い」といいます)。この性質を利用して、物質の内部の性質を調べる技術が「核磁気共鳴(NMR)」であり、医学で広く使われています。私たちの体の中にある核スピンを利用して、検査したい部位の状態を詳細に画像として映し出すことができます。原子核というと、原子核の崩壊を利用した原子力発電や放射線など、大がかりなイメージを持つかもしれませんが、しかし実際には、原子核は私たちの体の中にもあり、身近な存在なのです。

そして私たちの研究では、この核スピンを新たな方法でエネルギー変換に利用しようとしています。実際に当チームリーダーの吉川らは「核スピンゼーベック

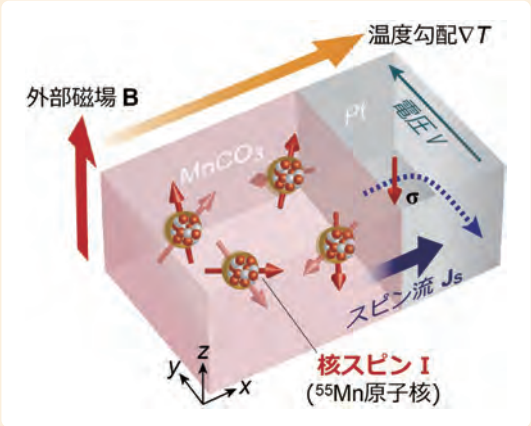


図3

図3: 核スピンゼーベック効果の模式図
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24623-6>

効果(図3)」と呼ばれる、核スピンを利用した初の熱発電の実証に成功しています。これは、従来の電子スピンや電荷による発電では実現が難しかった、絶対零度(-273.15℃)近くの超低温でも発電できる技術です。こうした低温環境は、宇宙空間や量子コンピューターで必要とされる超低温環境であり、このような条件にも原理的に適用できる魅力的な現象といえます。

現在当チームでは、これまでの研究をさらに発展させ、単にエネルギーを変換するだけでなく、「貯蔵」や「制御」といった応用へと広げようとしています。最近、当チームが所属する先端基礎研究センターでは、新しい原理で駆動されるインダクタ(電気エネルギーを蓄える原理)の理論提案も行い、スピントロニクス技術と組み合わせることで、より効率的で革新的なエレクトロニクスの実現を目指しています。従来のエレクトロニクスでは主に電子の電荷が中心的な役割を果たしてきましたが、私たちはスピンという新たな自由度を電子と同じくらい自在に操れるようにすることを夢見ています。これは夢のような技術ですが、理論的な裏付けと実験の積み重ねによって一歩ずつ進めていきたいと考えています。もしこれが可能になれば、情報処理の効率が飛躍的に向上し、電子機器がもっと省エネで高性能になるかもしれません。また今後私たちは、当機構の持つ大型加速器設備を活用し、物質にビームを照射することで新たな機能を引き出す研究も進めていく予定です。これにより、既存の材料に新たな性質を目覚めさせ、デバイス開発につなげていきたいと考えています。

私たちのチームは2024年に立ち上がったばかりであり、まさに本格的な研究に着手したところです。今年の2月には、船戸博士という強力なチームメンバーも加入しました。船戸博士は理論物理学で博士号を取得し、企業での応用研究を経て基礎研究に戻ってきた研究者です。現在はバリバリ実験を進め、活躍しています。こうした多様な背景を持つメンバーと共に、実験と理論を融合させた研究を進め、新しい現象の発見や応用技術の開発を目指しています。

当チームでは、目に見えない世界の“しくみ”をイメージしながら探求し、未来の社会を支える技術を創り出す日々を楽しみつつ、このような未来志向の基礎研究を通じて、最先端の科学を開拓していきたいと考えています。

チームリーダーの自己紹介

1991年に生まれ、高校まで神奈川県で過ごしました。もともと宇宙や天文などの物理の世界に興味を抱いて東北大学に進学しましたが、学部生の時に会った物性物理学の魅力に引き込まれていきました。特に3年生のときに受けた齊藤英治教授(当時当センターのグループリーダーも兼任)の授業をきっかけに、スピントロニクスという新しい物理・工学の分野に強く惹かれ、卒研時から齊藤研究室に所属して研究を始めました。それ以来、2018年の博士号の取得を経て、東北大学・東京大学齊藤研で助教として6年半にわたり研究・教育に従事してきました。そして2024年10月に現職に着任しました。これまで積み重ねてきた研究経験やスキルが私の原動力となっています。今後は原子力機構の研究者とより連携し、新たな科学技術の可能性を切り拓きたいと考えています。



(写真左から) 吉川貴史チームリーダー、船戸匠研究員

大規模シミュレーションで拓く核分裂の世界

元素の極限を目指して

岡田和記 Okada Kazuki

119番以降の新元素探索や長寿命超重元素である「安定の島」の発見は、原子核物理学の大きな目標です。その鍵を握る「核分裂」は複雑で、核分裂研究には理論シミュレーションが不可欠です。私は、世界でも類を見ない6次元ランジュバン方程式による大規模分裂シミュレーションを実施し、この課題に挑んでいます。この計算によって、これまで解釈が難しかった ^{258}Md の核分裂測定データを再現し、実験の強力な裏付けを提供しました。今後はさらに系統的な分裂シミュレーションを実現させ、核分裂機構の解明に迫ります。

2016年11月、113番元素が日本の名前に由来する「ニホニウム」と命名され、大きな話題となりました。現段階の周期表には118番まで元素が並んでいますが、現在も多くの研究者が、人

類未踏の119番以降の元素生成を目指し、大規模な研究に取り組んでいます。また、これまで見つかった超重元素は、ミリ秒やマイクロ秒といったごくわずかな時間で崩壊してしましますが、理論的には原子番号の大きい領域に「安定の島」と呼ばれる、長寿命超重元素が存在するという予測があります。ここに到達することは、原子核物理学における大きな目標の一つです。

超重元素の主要な崩壊モードは核分裂です。原子核が長く存在できるかどうかは、この核分裂に対する安定性が鍵を握っています。しかし、核分裂は

非常に複雑な物理現象で、原子核の種類ごとに多様な様相を見せます。例えば、超重元素より少し軽いアクチノイド元素の一つ、100番元素フェルミウム(Fm)では、非常に興味深い核分裂現象が知られています^[1]。中性子数が156個の ^{256}Fm は、核分裂片の一方が軽く、もう一方が重い「非対称分裂」が主に観測されます。ところが、ここから中性子をわずか2つ増やした ^{258}Fm では、非対称分裂が激減し、代わりに二つの核分裂片がほぼ同じ(129+129)になる「対称分裂」が高い割合を占めるようになります。このように、核分裂

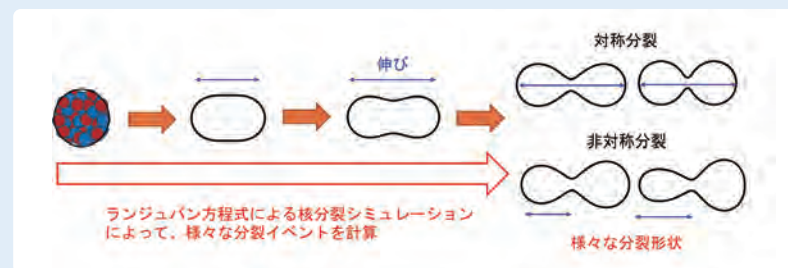


図1

図1: 核分裂過程の概念図。

Reference

- [1] D. C. Hoffman et al., Phys. Rev. C 21, 972981, (1980).
[2] K. Nishio K. Okada et al., Phys. Rev. C 111, 044609 (2025).

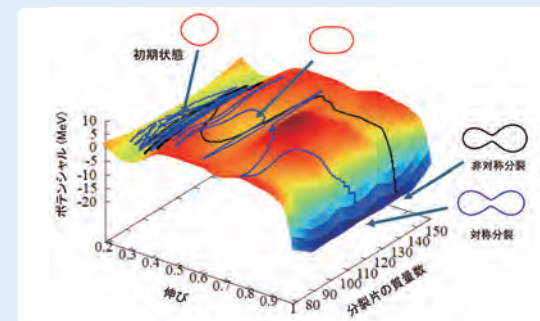


図2

の様相は陽子数や中性子数のわずかな差によって劇的に変化することがありますが、その詳細なメカニズムは未だ解明されていません。また超重元素の領域では、そもそも元素生成自体が難しく、十分な実験データを得られないのが現状です。こうした背景から、詳細な物理の解析や実験に先駆けた予測を提供する核分裂シミュレーションが、極めて重要な役割を担うと考えられます。

私が行っている分裂シミュレーション手法を簡単に紹介します。原子核は多数の核子(陽子と中性子)から構成されますが、それら全ての動きを計算することは現代の科学技術では不可能です。そこで、原子核を一つの「塊」と見なし、その変形を考えることで、核分裂過程を記述します。図1で示されているように、原子核は最初球に近い安定な形をしています。徐々に引き伸ばされ、やがて中央にくびれができ、最終的に二つに分裂します。この運動を、式で表現します。具体的には、原子核がゆっくりと変形する間、内部の個々の核子は非常に素早く運動していますが、この核子の細かな動きが原子核変形に及ぼす影響を「ランダム力(乱数)」として近似的に取り入れることで、変形に対する運動方程式が確立します。これをランジュバン方程式と呼び、分裂シミュレーションで用いられる基礎的な方程式になります。計算例は図2

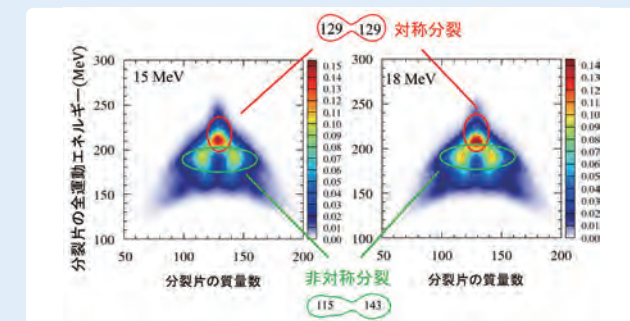


図3

に示されています。原子核変形に対するポテンシャルを用意し、その上でランジュバン方程式を解くと、乱数の効果でふらふらと動き、やがてポテンシャルの山を越え、分裂に達します。1つ1つの分裂結果は乱数に依るため、およそ100,000イベント程この計算を行い、結果を分布として評価します。

実際の計算では、原子核の伸びだけでなく、先ほど述べた非対称性や、核分裂片自体の変形といった、多数の形の自由度を同時に考慮した多次元ランジュバン方程式を解きます。このような複雑な計算は、紙とペンで解くことは事実上不可能であり、高性能なコンピュータによる大規模計算が不可欠です。私は、世界でも類を見ない6次元という非常に多くの自由度を扱ったシミュレーションを実現しました。1つの分布データを得るために、日本原子力研究開発機構のスーパーコンピュータを用いて、約1週間にわたる計算を行います。

最近の研究成果の一例として、 ^{258}Md (メンデルビウム)の核分裂シミュレーションが挙げられます。日本原子力研究開発機構のタンデム加速器で我々のグループが ^{258}Md の核分裂データを測定しましたが、その詳細なメカニズムの解釈が難しい状況にあり、核分裂シミュレーションを実施したところ、結果の解釈を大きく推し進めることとなりました^[2]。図3は ^{258}Md

核分裂の分布を表しており、横軸は分裂片の質量数、縦軸は全運動エネルギーを表します。図から、エネルギーの高い対称分裂と、よりエネルギーの低い非対称分裂という、性質の異なる2つの分裂モードが混在していることが一目でわかります。さらに、原子核の内部エネルギーを増加させると、非対称分裂の割合が明らかに増えることを明らかにしました。これらは実験と良い傾向の一致を示しており、実験データの妥当性を裏付ける良い成果となりました。このように物理現象に実験と理論の両面からアプローチできるのは、我々の研究グループが持つ最大の強みです。今後はさらに様々な原子核に対して分裂シミュレーションを実現させ、核分裂機構を明らかにします。

本研究で挑戦している核分裂シミュレーションは、既知の原子核の理解を深めるだけでなく、人類未踏の原子核の世界を理論的に探求する強力なツールとなります。例えば、実験が極めて困難な119番以降の超重元素や「安定の島」周辺核種の寿命・崩壊様式を予測し、効率的な元素合成実験への指針に迫ることができます。またこうした知見の蓄積は、マイナーアクチノイドを活用した新型炉の提案や放射性核物質の核変換技術の向上といった、原子力分野の課題解決に資する学術的基盤となることも期待されます。

図2: 分裂シミュレーションの一例(^{236}U)。原子核変形に対するポテンシャル上で、ランジュバン方程式と解いた結果である。青線のイベントは原子核が均等に分かれる対称分裂、黒線のイベントは軽い核と重い核に分かれる非対称分裂に達している。

図3: ^{258}Md 核分裂の分裂片質量数-全運動エネルギー分布。励起エネルギーは15 MeV(左)と18 MeV(右)。計算結果から、対称分裂と非対称分裂のそれぞれ平均的な形状が示されている。



物質の潜在能力を引き出す 先端微細加工が拓く超伝導研究の新地平

木俣 基 Kimata Motoi

ごく低い温度で電気がまったく抵抗なく流れる「超伝導」。電気を無駄なく使えるこの性質は、省エネ技術はもちろん、量子コンピュータのような次世代技術にもつながるとして注目されています。なかでも私たちが注目するのは、磁石のような性質もあわせ持った特別な超伝導体です。これまで見たことのない電子の性質が、そこに潜んでいると考えられています。

その謎に迫るため、私たちは特別な技術で育てられた非常にきれいな結晶を用いて髪の毛よりもずっと細い微小デバイスを作り、電子の動きを精密に観察します。こうした研究から、物質に眠る“隠れた力”を引き出すことができます。

—— 極小世界での新たな発見を未来の技術へつなげる —— それが私たちの挑戦です。

電気を流すとき、私たちはふだん「電気抵抗」というものに直面しています。これにより、通常の物質に電流が流れると熱が生じ、電気エネルギーの一部が失われてしまいます。スマートフォンのパソコンが熱を持つのは、まさにこのためです。ところが、特定の物質を非常に低い温度に冷やすと、電流が全く抵抗なく流れる「超伝導」という不思議な現象が起こることがあります。

超伝導は、電力の損失がゼロになるという夢のような性質を持つため、省エネ技術への応用が期待されるだけでなく、近年では量子コンピュータの基本素子を形作る性質としても注目されています。超伝導では二つの電子がペアとなり、「クーパー対」と呼ばれる新しい状態を作ることによって波のような性質を持つことで電気をロスなく運ぶことができます。

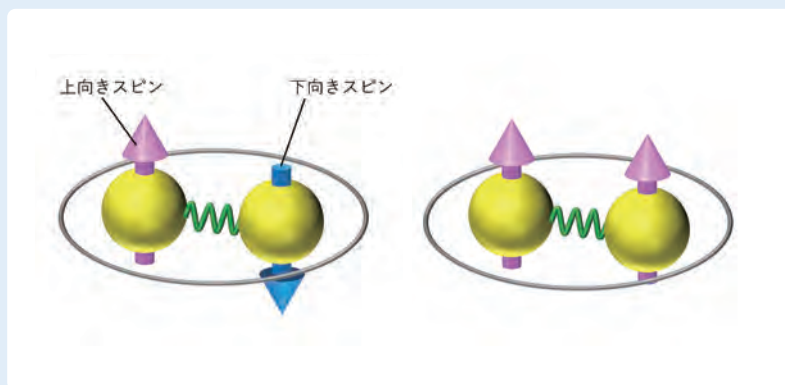


図1

図1: スピン一重項クーパー対(左)とスピン三重項クーパー対(右)の概念図。

私たちは、そうした超伝導の中でも、磁石のような性質をあわせ持つ、非常に珍しいタイプの現象に注目しています。このような性質の物質は「スピン三重項超伝導体」と呼ばれます。

これまでよく知られている通常の超伝導では、電子のスピン(電子の持つ磁石のような性質)が互いに反対方向を向いてペアを組むため、スピンは打ち消しあってしまいます。ところが特殊な超伝導体では同じ向きのスピン同士がペアを作るため、磁石の性質が残ります。このような特殊な状態が実現することで、外部からの磁場に強かったり、トポロジと呼ばれる数学で記述される性質を持つなど、“新しい超伝導”が生まれると考えられています。

このようなスピン三重項超伝導を示す物質は非常に珍しく、これまで自然界の中にほとんど知られていませんでした。ところが最近になり、ウランを含む化合物の超伝導体が、スピン三重項超伝導であることを示す新しい実験結果が次々と見つかっています。私たちはその中の一つ、 UTe_2 という物質に着目し、非常に高い純度で育てられた結晶から微小デバイスを作り、電子のふるまいを精密に観察するという研究を行っています。

この「微小デバイス」を作るために活用しているのが、FIB(Focused Ion Beam: 集束イオンビーム)と呼ばれるナノスケールの加工技術です。FIBは、非常に細いイオンビームを使い、物質の表面を高精度に削ったり切ったりすることができる装置で、微細な電子回路やセンサーをつくる最先端技術の一つ

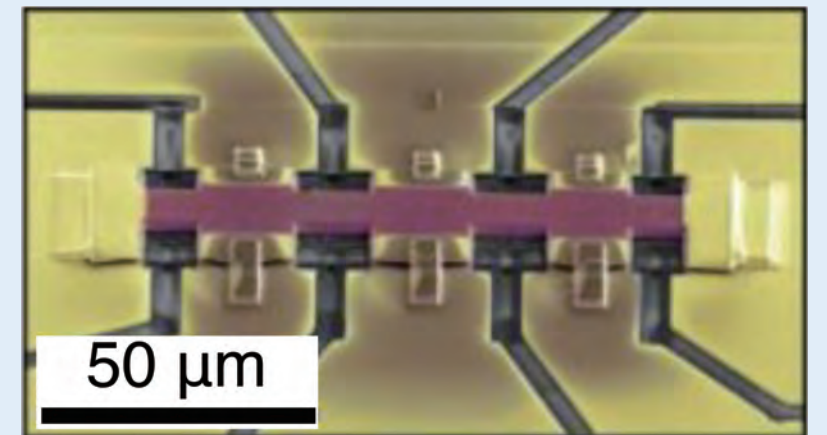


図2

です。私たちはこの技術を使って、超品質の UTe_2 の結晶から髪の毛よりもずっと細い素子を削り出し、そこを流れる電流の性質を調べています。

その結果、この物質が通常の超伝導とは異なる「スピン三重項超伝導」であることを示すさまざまな兆候が見えてきました。たとえば、非常に強い磁場をかけても超伝導が壊れない、複数の異なる超伝導状態が現れるといった現象です。さらに今後の目標は、このような特殊な超伝導体が量子コンピュータの中核になる性質(マヨラナ準粒子)を持っているのではないか? という期待の電子状態をとらえることにあります。

マヨラナ準粒子は、粒子と反粒子が同一というとても珍しい性質を持ち、これを使うとノイズに強く、エラーが起きにくい量子計算が可能になると期待され、世界中で注目されています。ただし、このマヨラナ準粒子は非常にデリケートで、人工的に作られたデバイスでは安定して存在させることが難しいとされています。しかし、

もし結晶そのものが持つ性質として自然にマヨラナ準粒子が現れているとすれば、まったく新しい道が開けます。私たちの研究は、そんな“自然が作った量子の舞台”を利用して、量子テクノロジーに革新をもたらすことを目指しています。

これまで超伝導は、電気を損失なく伝えるという側面ばかりが注目されてきました。私たちの研究は、その超伝導を異なる視点から捉え、これまで見えなかった電子の潜在能力を引き出そうとするものです。とくに、将来の量子コンピュータにつながる特性を、実際の物質の中で発見することが一つの目標です。もしこの研究が進展すれば、エネルギー利用の高効率化だけでなく、より高速かつ高精度な情報処理を可能にする新しいデバイスの開発など、未来の暮らしを支える幅広い応用が期待されます。本研究は、原子力科学の普遍性を切り拓くとともに、基礎研究が将来の技術革新を生み出す揺るぎない土台であることを示しています。

図2: FIBで作製した微細素子の電子顕微鏡像。赤い部分が UTe_2 単結晶。



陽子内部に働く力を解き明かす 陽子中の凝縮エネルギーが生み出す閉じ込め圧力

藤井大輔 Fujii Daisuke

原子力科学の基礎は陽子や中性子(核子)とそれを結びつける核力です。核子は、より小さなクォークとグルーオンと呼ばれる素粒子の複雑な相互作用の結果として形成されます。従来は、この相互作用の複雑さのために、核子内部において素粒子の間でどのような力が働き、安定した核子という構造を作り出すかを解明することは極めて困難と考えられてきました。しかし、近年、核子内部に働く圧力が実験的に測定可能となりました。この圧力分布は素粒子の複雑な相互作用の結果形成される核子内部の力の分布であり、核子とそれを支える力の本質に迫る新たな手がかりが得られました。私はこの圧力分布の起源を理論的に解明し、核子中のクォーク-グルーオン凝縮に由来するエネルギーが核子の安定な圧力を生むことを示しました。この研究成果は、核子と核力の理

解の深化を通して、原子力科学の発展に資する可能性を秘めています。

陽子内部にひしめく無数の素粒子

原子力科学の基礎は、陽子や中性子(核子)と、それを結びつける核力です。かつて、核子はそれ以上分割できない素粒子(自然界の最小単位)と考えられていましたが、現代では、核子やその仲間であるハドロンは、クォークとグルーオンという素粒子から構成されていることが明らかになっています。とりわけ核子は、3つのクォークからなるとされていますが、実はこれらのクォークの質量を足し合わせても、核子全体の質量のわずか数%にしかありません。では、残りの質量はどこから来るのでしょうか。実は、核子の内部では粒子が絶えず生成と消滅を繰り返しており、そのようなダイナミックな過程の中で、クォークやグルーオンの運動エネルギーや、

クォーク対(クォークとその反粒子の対)やグルーオンの凝縮によって生じるエネルギーが、大部分の質量を生み出していることが判明しています(図1)。

陽子内部にはどのような力が働いているのか？
かつて湯川秀樹は、核子の間にパイ中間子と呼ばれる粒子が交換されることで、核子を結びつける核力が生まれると提案し、日本人初のノーベル賞を受賞しました。湯川の間接子論は、原子核を構成する核子同士がパイ中間子を吸収・放出することで力を及ぼしあう仕組みを説明します。こうした「粒子の交換によって力が生じる」という考え方は、現代の素粒子論でも基本的な枠組みとなっています。現代では、核子と核力の背後には量子色力学(QCD)という基礎理論が存在することが明らかとなっています。QCDの枠組みにおいては、核力もクォークやグルーオンの交換によって説明されま

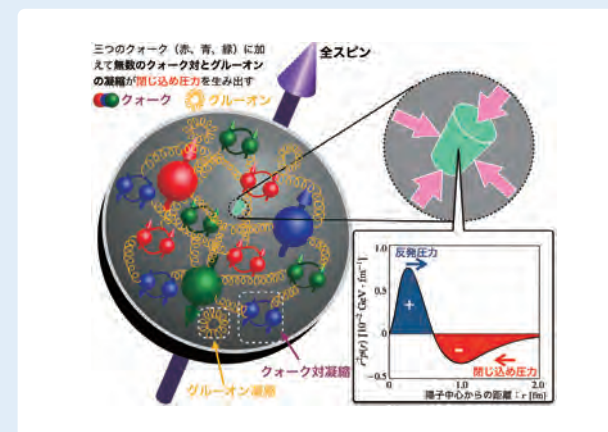


図1

す。また、核子の内部でも同様の仕組みにより力が発生し、クォークとグルーオンが核子中に閉じ込められていると予想されています。

しかし、核子は、絶えず生成・消滅する多数のクォークやグルーオンからなる多体系であり、それらすべての粒子間で起こる相互作用を追跡し、核子内部に働く力の全体像を理論的に捉えることは極めて困難であると考えられてきました。従って、現代科学をもってしても、陽子が安定に存在する理由を完全に説明することはできていません。

2018年初めて測定された陽子内部の圧力

2018年、米国ジェファーソン研究所(JLab)の加速器を用いた電子散乱実験において、高エネルギー電子ビームで陽子から放出される光子を精密に検出し、その散乱データを解析することで、内部の圧力分布が初めて測定されました。その結果、中心部では外向きに約 10^{35} Paに達する、現在自然界で観測された中で最も巨大な圧力が働き、周縁部ではそれを押し留める内向きの“閉じ込め圧力”が働くことが明らかとなりました(図1)。この圧力分布は、無数のクォークとグルーオンの複雑な相互作用の結果として、核子内部の観測者が感じる力の分布であり、この力のつり合いが核子の安定性を支えていると考えられます。

さらに、米国ブルックヘブン国立研

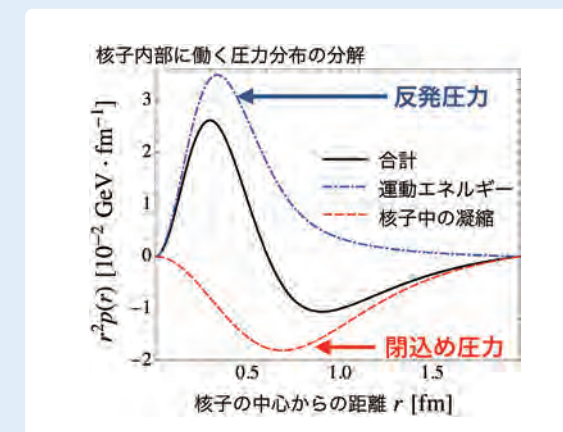


図2

究所に建設中の電子-イオン衝突型加速器(EIC)は2030年頃の運転開始が予定されており、運転開始後はより高い精度で同様の解析が可能となり、核子内部の圧力構造に関する理解はさらに深まることが期待されます。

陽子を支える力の正体：

陽子中の凝縮エネルギー

光子を通して核子内部の圧力を間接的に測定することが実験的に可能となりました。そして、この実験過程を理論的に記述することで、核子内部の圧力を計算することができます。したがって、複雑な相互作用の結果形成される核子内部の力の分布を理論的に調べることができます。この力の分布を理論的に調べることで、核子が如何にして安定に存在し得るかについての理解を深めることができるかもしれません。

しかし、現在までのところ、なぜそのような力の分布が核子内部に発生するかを調べた仕事は限られています。そこで私は、この力の分布の起源を理論的に調べることで、核子の安定性を支えるメカニズムに迫りました。ここでは最近の私の研究成果を一つ紹介します。私は、核子内部の圧力分布を、理論的に首尾一貫した方法で、クォークやグルーオンの運動エネルギー、および核子中のクォーク対凝縮とグルーオン凝縮に由来するエネルギーといった異なる起源からの寄与に分解する

ことに成功しました。その結果、クォークを核子内部に閉じ込める“閉じ込め圧力”が、核子中のクォーク対凝縮とグルーオン凝縮に起因するエネルギーによって駆動されていることを明らかにしました(図2)。これまでは質量生成への寄与で注目されていた凝縮由来のエネルギーが、実は核子の圧力バランスにも決定的役割を果たすことを示しました。

さらに、パイ中間子においても同様のメカニズムを確認しました。これらの結果は、このメカニズムがハドロンに共通の普遍的性質である可能性を示唆します。

核子内部の圧力構造の解明は、クォークとグルーオンの複雑な相互作用の結果生じる力の本質を理解する手掛かりとなります。核力もこれらの素粒子の相互作用の結果生じる力であるから、本研究を通して、原子力科学の基礎である核子と核力の本質に迫る道が拓かれました。さらに、我々の解析は原子核内部の圧力へも適用可能であり、EIC実験では原子核内部の圧力測定が一つのテーマとして掲げられています。原子核内部の圧力の性質の理解が進めば、我々の研究は将来的に核融合や核分裂に役立つ知見をもたらす可能性があります。このような核子や核力の根本的な理解は、次の世代の原子力科学の礎を築くものです。

図1: 陽子内部の模式図

図2: 核子内部に働く圧力とその分解



Timothy Ziman
(ティモシー ザイマン)

Institut Laue-Langevin, Senior Scientist
(ラウエランジュバン研究所、上級研究員)

Reimei program - a personal appreciation

I have the good fortune to have benefitted from the Reimei program since its inception in 2010 by Sadamichi Maekawa (the 4th Director of the ASRC). I have witnessed at first hand its success in maintaining the ASRC of the JAEA, not only as a center of excellence in its own research, but as the hub of an international network of collaborating scientists in productive contact. The many Reimei conferences record its success, and also reflect the more profound achievement of maintaining a large community of people and stimulating innovation. One of the key advantages of the Reimei program has been the flexibility in organizing joint meetings involving different projects: this has lead to new interfaces, for example between actinide science and spintronics, appearing before anywhere else in the world. From a personal viewpoint, the programs with which I have been directly associated started from neutron scattering and magnetism, with a particular interest in relevance to spintronics. Meeting Prof. Uemura's muon project through a joint Reimei meeting in Tokai in 2011 lead to contact

国際共同研究は、グローバルな視点から多様な専門性を融合し、新たな学術的価値を創出する基盤です。今回は、スピン-エネルギー科学研究グループと長年にわたり共同研究を行っている Ziman 氏にご寄稿いただきました。

with muon beam science, and collaborations which continue today. I found the annual assessment meetings, where representatives of all the projects were present, enlightening in giving a broader view of the many challenges relevant to the work of the ASRC within the JAEA. One very efficient aspect of the Reimei program has been its flexibility - from the beginning, the exchange of scientists and equipment between Grenoble, Los Alamos and Tokai contributed enormously to experimental collaboration in heavy-fermion and actinide studies. In organizing international meetings the same flexibility meant we could leverage the Reimei project, using its resources as seed money to attract larger means. This was used in Grenoble to strengthen ties between neutron users of JRR-3, J-PARC and the ILL interested in spintronics, and in Ireland at a meeting on New Excitations in Spintronics, organised in 2019 with Mike Coey. While the impetus was the Reimei project, we could then attract enough European funding to cover European travel and all local expenses. I like to think that the successful recruitment of a postdoctoral participant, then in Germany, subsequently to a permanent position at the ASRC owed something to the memorable meeting in Connemara. After the most recent joint workshop in Tohoku we arranged for young neutron researchers, on their first visit to Japan, to see the sources in Tokai. I hope the Reimei projects can continue to be as fruitful for international collaboration for the next generation as they have been for mine.



池田篤史
Ikeda-Ohno Atsushi

先端基礎研究センター・耐環境性機能材料科学研究グループ

私は2023年に、JAEA内異動で前所属・福島研究開発部門・廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）から先端基礎研究センター（ASRC）に移りました。CLADS・ASRCの前は、複数の海外研究機関・大学で延べ10年間、研究職に身を置いてきました。（経歴参照）

当たり前ですが、研究職に就く／就いている理由は、人それぞれだと思います。私の場合、1986年に当時のソビエト連邦（今のウクライナ）で起きたチョルノービリ*原発の過酷事故に幼心ながら衝撃を受け（当時小学校2年生）、そこから漠然と原子力に関心・興味を持ち始めました。その後、原子力専攻のある大学を志望して大学受験をしましたが、不勉強が祟って（当たり前ですが）不合格になり、化学系専攻のある大学に何とか滑り込みました。この“苦い経験”で一念発起、大学学部在学中は真面目に勉強し、大学院から原子力専攻のある大学に編入できました。大学院では、原子力と化学の両方が関係する「放射性物質の化学」の研究に取り組み、その後、2019年にCLADSに入るまで、放射性物質の基礎化学・環境化学に関する様々な研究に従事しました。CLADSでは、福島第一原子力発電所の廃炉作業を“化学的観点”から支える研究開発活動に参画しました。このCLADSでの職務を通して、自分は「基礎科学研究に強い興味がある」という事を再認識し、JAEAの内部異動制度を利用して現在の先端基礎研究センターに移り、現在に至ります。

上述のように、これまでの当方の学歴・職歴にはかなりの紆余曲折があります。それでも、当方が今日まで研究職

このエッセイでは、「研究に興味がある」「研究職を目指してみたい」と思う若い方々を主な読者層に想定し、センターの研究者にご自身の経歴と、研究職を選んだ理由をご紹介します。

を続けている（続けられている）のは、研究という仕事が自分の性に合っているから、だと思います。どんな職業でも同じですが、仕事を始めるには「解決すべき課題」が必要です。この課題に対し、専門知識・技術を駆使して学術的・科学的な解決策を模索するのが“研究”だと、私は考えます。研究における解決策の模索は、AIが発達している現在でも、人間が頭を捻って試行錯誤する「根本的頭脳労働」です。この頭（時には体も）の試行錯誤はなかなか大変な作業ですが、当方の粘着質な性格とは割と相性が良いようです。

話は脱線しますが、当方は趣味でクライミングをしています。ここからは完全な私見ですが、クライミングと研究は非常に似ています。クライミングでは、まず登りたいルート（課題）を決めます。そして、どのような道順・手順で、どのように体を動かせば（解決法の模索）、最終的なゴール（解決策）に辿り着けるかを、文字通り「頭と体で試行錯誤」します。このクライミングにおける一連の試行錯誤は、研究の試行錯誤と根本的には同じものだと、私はいつも感じています。

以上を踏まえ、研究に興味のある人は、試しに近くのクライミングジムを訪ねてはいかがでしょうか？あなたがクライミングにハマるようであれば、研究者／研究職に向いているかも



池田篤史プロフィール

2001年	明治大学 理工学部 工業化学科 卒業
2006年	東京工業大学大学院 原子核工学専攻 博士課程修了・博士号取得
2006-2008年	ドイツ・Forschungszentrum Dresden-Rossendorf、博士研究員
2008-2011年	JAEA（量子ビーム応用研究部門）、博士研究員
2011-2012年	ドイツ・Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf、任期付研究員
2012-2014年	オーストラリア・University of New South Wales / Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO)、Joint Research Fellow
2014-2019年	ドイツ・Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf、Group leader / Principal investigator
2019-2022年	JAEA (CLADS)、グループリーダー／研究主幹
2023年-現在	JAEA (ASRC)、研究主幹

* 英語では Chernobyl (チェルノブイリ) と綴られるが、ウクライナ語では Chornobyl (チョルノービリ) となる。

「JAEA/ASRC × 水城高校」サイエンス講義

当センターでは、2025年度より地元高校である水城高等学校と協力し、複数回にわたるサイエンス講義を開催しています。地域の高校生たちを対象に、基礎科学や原子力エネルギーの世界を「楽しく」「わかりやすく」体験してもらうことを目的としています。身近な実例や実験を通して、科学の面白さを感じてもらえる講義を目指しています。

2025年度は全7回の講義が予定されており、これまでに第1回から第4回までの講義が実施されました。

第1回 [開催日: 2025年6月14日]

磁性材料とエレクトロニクス
講師: 高梨 弘毅 (先端基礎研究センター長)



第2回 [開催日: 2025年7月12日]

核図表で見る原子核の世界
講師: 小浦 寛之 (研究推進室長)



第3回 [開催日: 2025年8月30日]

超伝導の不思議—電子の世界を解き明かす—
講師: 徳永 陽 (強相関アクチノイド科学研究グループリーダー)



第4回 [開催日: 2025年9月27日]

放射線で探る素粒子の世界
— 原子力とニュートリノの長く深い関係 —
講師: 長谷川 勝一 (ハドロン原子核物理研究グループ 研究主幹)



JAEA では、地域とのつながりを大切に、引き続き未来を担う若者への支援に取り組んでまいります。また、学校の要望に応じて出張講義や施設見学なども積極的に受け付けていますのでお気軽にご相談ください。

申し込み先: 〈大学等への公開特別講座〉 <https://www.jaea.go.jp/kouza/>

受賞

第19回日本物理学会若手奨励賞 (領域3) (一般社団法人日本物理学会)
荒木 康史 研究副主幹 (スピン-エネルギー科学研究グループ) が第19回 (2025年) 日本物理学会若手奨励賞 (領域3) に選ばれました。受賞対象は「スピントロニクスにおける量子幾何効果の理論構築及び検証」です。

2024年度日本中間子科学会「学会賞」 (日本中間子科学会)
髙本 亘 研究主幹 (表面界面科学研究グループ) が2024年度日本中間子科学会「学会賞」を受賞しました。受賞対象は「 μ SR法による重い電子系超伝導体の磁性と超伝導に関する研究」です。

第46回本多記念研究奨励賞 (公益財団法人本多記念会)
吉川 貴史 チームリーダー (スピン-エネルギー科学研究グループ・先端エネルギー物性研究チーム) が第46回本多記念研究奨励賞を受賞しました。受賞対象は「準粒子ダイナミクス・原子核に基づくスピントロニクスの開拓」です。

プレス発表 (2024年1月—2025年8月)

- 真空と物質、「無」と「有」が織りなすエネルギーを統一する公式を発見
— 極小デバイス開発につながる薄膜状物質内部の基礎原理を解明 —
- 「スピン半導体」の動作速度の限界を超える新発見
— 反強磁性体の従来磁石材料に対する工学的優位性を世界で初めて実証 —
- カゴメ金属の特異なホール効果の起源を解明 — 移動度スペクトル解析で捉えた高移動度キャリアの役割 —
- 土壌中の放射性セシウムを「塩」×「真空」でスピード除去 — 新発見の「高速イオン交換」現象 —
- 100℃以下の熱も高密度で蓄えられるナノシートを開発
— 低温廃熱の回収・再利用によりカーボンニュートラル実現貢献へ —
- 新しい「核分裂」の発見! 99番元素アインスタイニウムが導く元素の世界
— 超重元素の存在限界と宇宙での元素合成の理解へ —
- ♪ 磁石を回すと磁石がふたつ ♪ — 手作りの量子系、高精度量子演算に道 —
- 音波の新しい伝播現象を発見 — 次世代の通信技術への展開に期待 —
- 中性子線とナノテクノロジーを武器に「悪魔のつくった表面」を制御する
— セラミックスの製造技術の課題を克服し、排ガス浄化触媒に新しい未来を! —
- 磁石に潜む「電子の宇宙」の室温制御に成功 — 新規量子スピンデバイス実現に繋がる基礎原理に迫る —
- 大地の謎に迫る! 土中に含まれる金属の秘密とは?
— 分子スケールのシミュレーションと観測が解き明かす土の性質 —
- 鋼鉄の品質管理・日本刀など文化財の非破壊分析も/ 鋼鉄中のわずかな炭素を素粒子で透視する
— ミュオンによる新しい非破壊微量軽元素分析法の開発 —
- スピン三重項超伝導体の電子対状態を解明 — 超流動ヘリウム3と似た前例のない超伝導状態 —
- 放射性廃棄物を「宝の山」に — 蓄電池・発電利用、白金族元素回収



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 / Tel: 029-282-6980 / Fax: 029-282-5927 / <https://asrc.jaea.go.jp>

Advanced Science Research Center Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan / Tel: +81-(0)29-282-6980 / Fax: +81-(0)29-282-5927 / https://asrc.jaea.go.jp/asr_eng