



季刊誌

NO.18

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2024

インタビュー

大強度加速器で放射性廃棄物を減らす

前川 藤夫

J-PARCを利用した核変換のための核データ測定
ADSの核設計に資するデータの構築を目指して

岩元 大樹 明午 伸一郎

核変換研究を大きく前進させる実験施設設計画

斎藤 滋 明午 伸一郎

特集

J-PARCで進める
核変換研究

進める核変換研究

J-PARCで

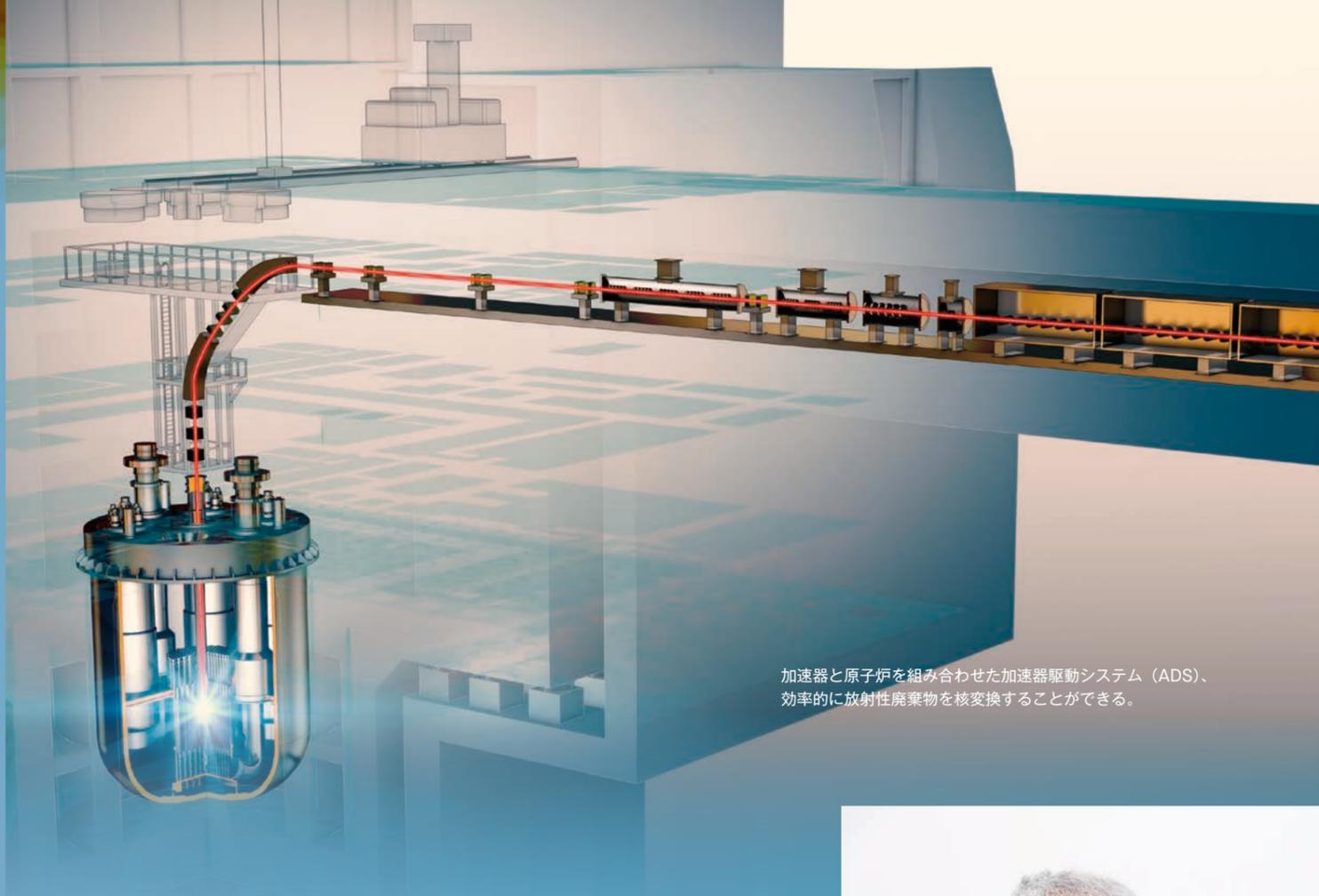
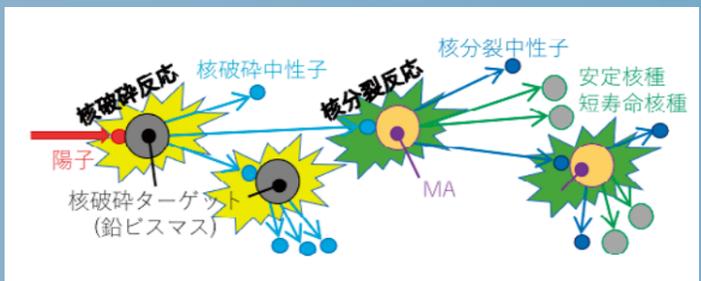
大強度加速器で

放射性廃棄物を減らす

現在、J-PARCにおいて多くの優れた成果が創出されているように、大強度加速器は人類の知の探求から私たちの実生活に役立つ応用に至るまで、非常に価値の高いツールです。大強度加速器の将来の有望な応用の1つに、放射性廃棄物を減らす「核変換」技術があります。私たち核変換ディビジョンでは、核変換技術を開発するために、J-PARCを活用した基礎的な研究や、さらに核変換研究を大きく前進させるための新しい実験施設をJ-PARCに設置するための検討を進めています。

原子力発電所の運転に伴い生じる使用済み燃料を再処理し、ウランとプルトニウムを資源として取り出すと、高レベル放射性廃棄物が残ります。現在の日本のシナリオでは、廃棄物をガラスの中に封じ込め、さらにその外側に幾重かのバリアを設け、地中深くに地層処分する考えです。地層処分の安全性は確認されていますが、廃棄物の毒性は万年単位で残ることもあり、国内では地層処分場の選定が思うように進みません。この課題は、国内で原子力エネルギーを利用する妨げにもなっています。また、我々の世代が作り出した廃棄物を、できるだけ子孫に押しつけないようにしたいです。

こうした問題の解決手段の1つが、核変換技術です。核変換を行えば、高レベル放射性廃棄物に含まれる有害な元素を大幅に減らすことができます。これにより、毒性が残る時間を大きく短縮し、また廃棄物の体積も減少させることができ、地層処分の負担を飛躍的に軽減できます。核変換技術を開発すれば、原子力発電のネックである放射性廃棄物問題を大きく緩和できる見通しが立ちます。そして、二酸化炭素を排出する発電方式を順次原子力発電に置き換えることにより、2050カーボンニュートラルにも貢献することができます。

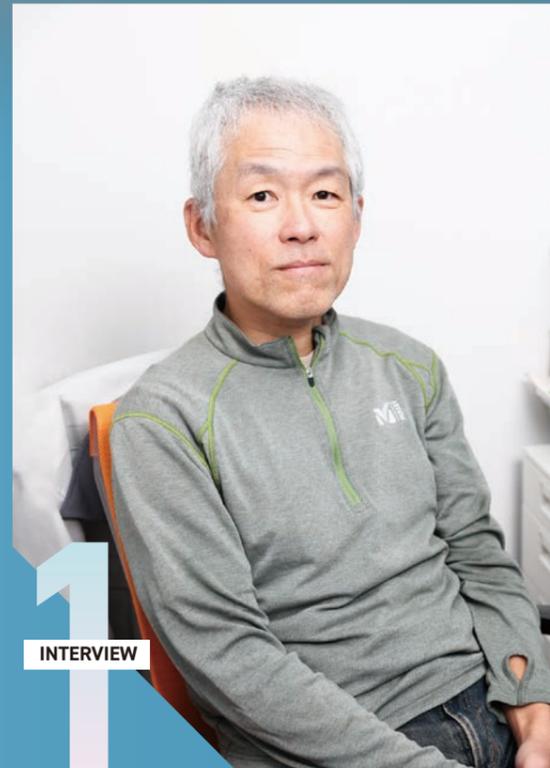


加速器と原子炉を組み合わせた加速器駆動システム (ADS)、効率的に放射性廃棄物を核変換することができる。

加速器駆動核変換システム (Accelerator Driven nuclear transmutation System, ADS)

加速器駆動核変換システム (ADS) とは、加速器と未臨界状態の原子炉を組み合わせたシステムのことです。臨界状態で運転する通常の原子炉とは異なり、未臨界状態の原子炉は陽子ビームを供給することで運転されますが、ビームを停止するとすぐに運転が停止する原子炉のことです。

我々が考えている ADS の設計例では、超伝導陽子加速器によりエネルギー 1.5 GeV、出力 30 MW (J-PARC の約 30 倍!) の大強度陽子ビームを加速し、これを未臨界炉心中心にある鉛ビスマス合金の標的に打ち込みます。陽子は鉛やビスマスの原子核と反応し、多くの中性子を作り出します。これらの中性子が標的の周りに配置した核変換したい物質と次々に反応を起こし、核変換が進みます。この未臨界炉心は直径と高さが共に約 10 m の大きなタンクに収められ、タンク内は液体の鉛ビスマス合金 (融点 125°C) のプールになっています。この液体鉛ビスマスをポンプで循環して炉心を冷却します。炉心では 800 MW の熱エネルギーが発生し、この熱により蒸気発生器で蒸気を発生させ、タービンを回して発電を行うことにより 270 MW の電力が得られます。そのうち 100 MW は自身の加速器運転で消費しますが、残りの 170 MW は売電することができます。つまり、ADS はゴミを燃やしながら発電もできるシステムと言えます。高レベル放射性廃棄物に含まれる物質の中で特に毒性が高く寿命が長い物質について、この設計の ADS 1 基で通常の原子炉 10 基から生成する量を核変換することができます。



INTERVIEW

日本原子力研究開発機構
J-PARC センター 核変換ディビジョン

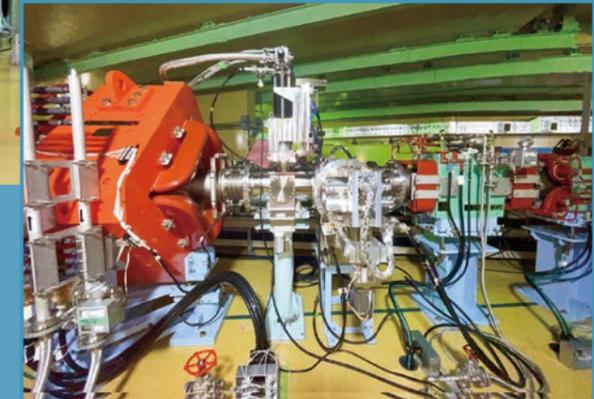
前川 藤夫



原子炉や加速器施設の設計では、内部で発生する核反応の影響を考慮する必要があります。これらの核反応に関する物理的な情報（データ）は、「核データ」として知られています。J-PARCは、ADS核設計のための核データの測定に最適な高エネルギー加速器施設です。

J-PARC を利用した 核変換のための核データ測定

ADS の核設計に資するデータの構築を目指して



核反応で作られた核種の生成量を測る

陽子ビームが加速器施設の構造材に当たると、放射能を持った様々な核種（原子核の種類）が生成します。これらの核種による被ばく線量を最小限に抑え、作業者が安全に作業を行うためには、陽子と材料を構成する原子核との核反応で発生する核種の量を正確に予測することが重要です。ADSは、J-PARCよりも約30倍の強度のビームを用いるため、より信頼性の高い核種生成量の予測が求められます。私たちは、この予測のための基礎的なデータとなる「核種生成断面積」と呼ばれる核データを測定しています。この実験では、標的とする薄い金属に陽子ビームを照射します。照射後、標的から放出されるγ線を測定し、細かく分析することで、核種生成断面積を得ることができます。

この実験では、J-PARCの3GeVシンクロトロン加速器を使用し、ADSの設計に必要な様々な標的に対して複数の入射エネルギーで核種生成断面積データの測定を行いました。J-PARCの高度なビーム測定技術により、他の国外施設の実験よりも精度の高い実験データ（平均測定不確かさ5%未満）が得られています。



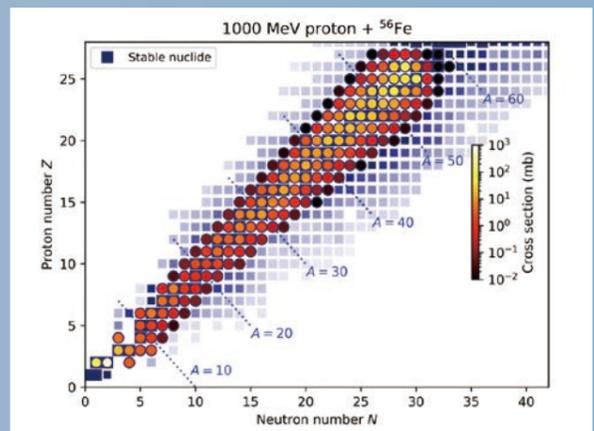
INTERVIEW
2

日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター 核変換ディビジョン
岩元 大樹

さらなる信頼性向上に向けて

J-PARCで収集した実験データを用いて、核種生成断面積を予測する核反応物理モデルの検証と、AIの中核技術として知られる機械学習を用いた新たな予測法の開発も行っています。

約3000点の実験データを学習して予測される、1GeV陽子入射鉄標的の核種生成断面積。横軸と縦軸は、それぞれ生成した核種を構成する中性子と陽子の数を表す。J-PARCで収集したデータも、開発した機械学習モデルの訓練データとして使用している。



材料の損傷量を測る

高エネルギーの粒子が材料に当たると、材料を構成する原子が元々あった位置から弾き出され、放射線損傷を引き起こし、材料が劣化します。大強度の陽子ビームを使用するADSの設計では、ビームに晒される機器の放射線損傷を評価する必要があります。評価の指標として「原子当たりの弾き出し数(dpa)」が一般的に用いられます。dpaは、原子の弾かれやすさを表す「弾き出し断面積」を基に計算されますが、この断面積の実験データは限られており、特にADS設計で重要なGeVエネルギー領域に関するデータが不足していました。

そこで私たちは、弾き出し断面積を測定する実験装置を開発しました。この装置を用い、試料にGeVエネルギーの陽子ビームを照射し、試料の金属格子中に生成した損傷による微小な電気抵抗の変化を観測し、この値から鉄や銅などの材料の弾き出し断面積を導出しました。この装置に

は冷凍機が取り付けられ、損傷が原子の熱運動によって元の状態に戻るのを防ぐことができるのが特徴です。特に鉄の実験データはGeVエネルギー領域で世界初のものであり、学会等で高い評価を受けました。

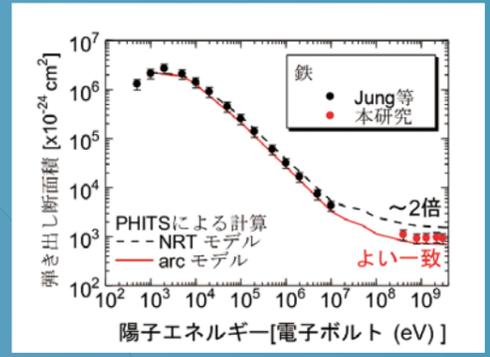
材料損傷のメカニズムを探求する

これまで、弾き出し断面積の計算にはNRT(Norgett-Robinson-Torrens)モデルが使用されてきました。NRTモデルは、低エネルギー領域で実験結果をよく再現することが知られていましたが、GeVエネルギー領域で我々が測定した実験結果と比較すると、2倍から3倍ほど過大に評価することが明らかになりました。そこで欠陥再結合(arc)モデルと呼ばれる新しい物理モデルを使用して弾き出し断面積を計算したところ、その計算値は実験結果と誤差内で一致したことから、arcモデルの妥当性が示されました。これらの研究成果は、ADSやJ-PARCのような高エネルギー加速器施設などで使われる材料の放射線損傷評価の精度向上に貢献することが期待されます。

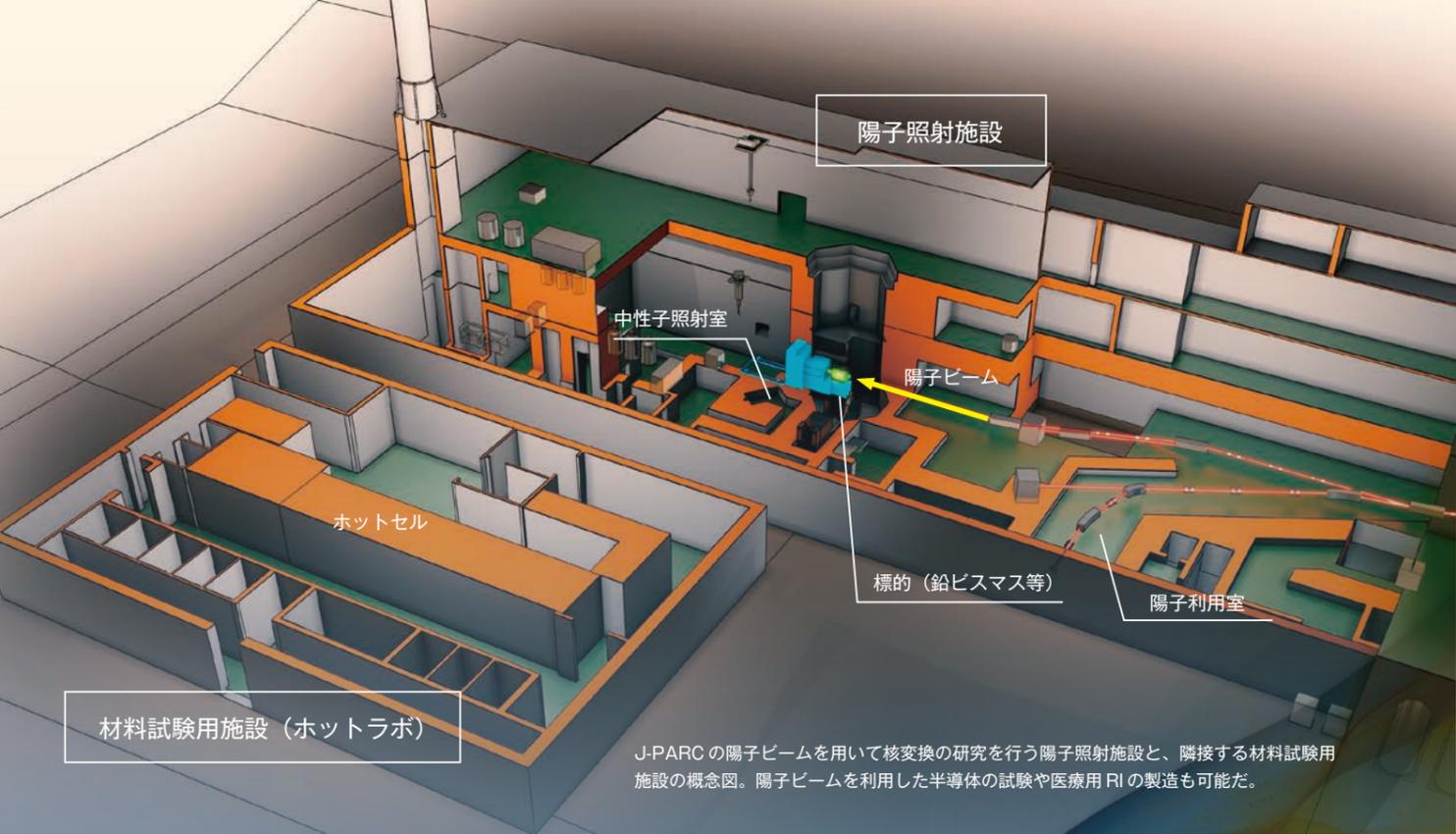


日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター 核変換ディビジョン
明午 伸一郎

INTERVIEW
3



鉄と銅の弾き出し断面積。点は実験値であり、そのうち赤点がJ-PARCで取得した実験データを表す。黒線と赤線はそれぞれNRTモデルとarcモデルによる計算値を表す。



J-PARCの陽子ビームを用いて核変換の研究を行う陽子照射施設と、隣接する材料試験用施設の概念図。陽子ビームを利用した半導体の試験や医療用RIの製造も可能だ。

陽子照射施設の多目的利用

陽子照射施設に導かれる陽子ビームは、ADSの研究開発以外にも様々な利用が可能です。私たちはこの陽子ビームのポテンシャルを最大限まで引き出し、広い分野で利用できる施設の検討を進めています。

近年、加速器の目覚ましい発達により、数十MWの大強度加速器の実現も夢では無くなりましたが、ビームを受ける機器の材料がその大強度ビームに耐えられないことが課題であり、加速器の大強度化には材料の放射線損傷研究が不可欠です。そこで、一般的に長期間を要する放射線損傷研究のための照射試験をできるだけ効率的に行えるように、陽子照射施設の隣に材料試験用の施設（ホットラボ）を設置することを検討しています。ホットラボでは、引張試験や電子顕微鏡観察など、様々な材料の照射後試験を行います。J-PARCの他の施設で使用した機器の試験にも活用でき、機器の交換頻度低減等によって、より効率的なJ-PARC施設の運営を目指します。

半導体の目覚ましい進歩により、自動車などの自動運転が発展を遂げています。一方、半導体に宇宙からやって来る中性子が入射すると、核反応を起こして半導体が誤動作することが大きな問題になっています。そこで陽子照射施設において、宇宙から来る中性子とよく似たエネルギー分布を持つ世界最大強度の中性子照射場を設け、半導体の試験を行うための検討を進めています。

さらに、がん治療に有効な α 線を放出するアクチニウム-225 (^{225}Ac) が世界的に着目されており、欧米では資源として豊富に存在するトリウム-232 (^{232}Th) に高エネルギーの陽子を照射し、核反応で ^{225}Ac を製造しています。陽子照射施設でも本手法を適用して ^{225}Ac を製造し、医療福祉へ貢献するための検討を進めています。

本実験施設の提案は、日本学術会議の提言「未来の学術振興構想（2023年度版）」において、「量子ビームを用いた極限世界の解明と人類社会への貢献」の一つのテーマとして掲載されました。また、ユーザーコミュニティを2022年に立上げ、コミュニティとの議論でさらに魅力ある施設を目指します。

核変換研究を

大きく前進させる実験施設計画

ビームを受ける材料の開発を加速する陽子照射施設

ADSのビーム窓などの構造材は、陽子ビームや核分裂反応で生じた中性子による極めて高い線量を持つ照射環境で使われるため、詳細な放射線損傷の研究が必要です。また、500℃の高温で液体の鉛ビスマスを標的ならびに炉心冷却材として用いますが、高温の鉛ビスマスは腐食性が高いため、鉛ビスマスが材料に対してどのような影響を与えるのか評価が必要です。さらに鉛ビスマス中にわずかに溶け込む酸素の量（溶存酸素濃度）が材料の腐食速度を大きく変えるため、絶妙に溶存酸素濃度をコントロールする必要があります。したがって、ADSの環境を模擬した、つまり高い線量場で鉛ビスマス中の溶存酸素濃度をコントロールしながら構造材に陽子ビームを照射した試験を行い、照射に強く腐食しにくい材料の開発を行う必要があります。ADSの材料開発のため、これまで私たちは、海外の研究者と協力し、スイスの加速器施設（ポールシェラー研究所）で、鉛ビスマス標的を用いた材料照射試験を行ってきました。ただし、この試験では温度を高くしたり照射量を大きくしたりすることが難しく、まだまだ開発する課題が沢山あります。陽子照射施設を用いてこれらの課題に取り組むことは、ADSの開発において重要な役割を果たします。

INTERVIEW

4

日本原子力研究開発機構
J-PARCセンター 核変換ディビジョン

齋藤 滋





核変換ディビジョンのスタッフ

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 >

大強度加速器は真理の追求のためのツールと思われがちですが、実際には私たちの実生活に役立つツールでもあります。その一つが、本号で取り上げたカーボンニュートラルにも貢献することができる加速器駆動核変換システムです。これからも季刊誌を通して、J-PARCから生まれた様々な成果をお届けします。