



2025年10月9日
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
国立研究開発法人 理化学研究所

X線バーストでの元素合成過程の解明に前進

～原子核質量の精密測定によって合成過程の終わり方の問題に結論～

本研究成果のストーリー

● Question

宇宙で最も頻繁に起こっている爆発的天体現象のI型X線バーストの主なエネルギー源で、元素合成過程の一つである速い陽子捕獲過程がどのように終わるかは原子核データの不足から未解明でした。

● Findings

本研究では、速い陽子捕獲過程の終端の候補であるジルコニウム-ニオブ (ZrNb)・サイクルと呼ばれる閉じた反応サイクルでキーとなる短寿命不安定原子核モリブデン-84の精密質量測定を行い、ZrNb・サイクルが一般的なI型X線バーストの条件下では成立しないことを世界で初めて実験的に確かめました。

● Meaning

この研究では速い陽子捕獲過程がどのように終わるか、特に閉じた反応サイクルの存在に関して明確な結論を与えています。これはX線バーストのメカニズムの解明や元素の起源に関する議論を大きく前進させるものです。



120文字
サマリー

爆発的天体現象のX線バーストは速い陽子捕獲過程と呼ばれる原子核燃焼過程によって駆動されている。モリブデン-84を中心とした短寿命不安定核の質量測定からジルコニウム-ニオブ・サイクルがこの反応過程の終端ではないことを初めて実験的に明らかにした。

概要

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センターの木村創大研究員、和田道治名誉教授、国立研究開発法人理化学研究所の開拓研究所・上野核分光研究室、兼仁科加速器科学研究センター・核構造研究部のマルコ=ローゼンブッシュ研究員、および同低速 RI ビーム生成装置開発チームの石山博恒チームリーダーを中心とする国際共同研究グループは、理化学研究所の重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー (RIBF)」の超伝導 RI ビーム分離生成装置(BigRIPS) および低速 RI ビーム生成装置(SLOWRI)と多重反射型飛行時間測定式(MRTOF)質量分光器^(※1)を用いて、モリブデン-84 (^{84}Mo 、中性子数:42、陽子数:42)を中心とした不安定短寿命核の高精度質量測定に成功しました。これ

により、モリブデン-84 のアルファ粒子分離エネルギー^(※2) がこれまで知られていた傾向から予測される値より小さいことを発見しました。これは低アルファ粒子分離エネルギーの島^(※3) の存在を示す初めての実験的証拠となります。加えて爆発的天体現象である I 型 X 線バースト^(※4) の主なエネルギー発生過程である速い陽子捕獲過程^(※5) の終端の候補であった閉じた反応系の一つ、ジルコニウム-ニオブ・サイクルの可能性を否定し、速い陽子捕獲過程がモリブデン-84 を越えてより重い原子核を合成して進行することを初めて実験的に明らかにしました。

本研究の成果は、物理学の国際的な専門誌である「Physical Review Letters」に掲載されました。

研究グループ

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センターと国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センターを中心とし、

- 香港大学
- 立教大学
- 日本原子力研究開発機構
- 東京大学
- 九州大学
- ミシガン州立大学

(順不同)

からなる国際共同研究グループ

研究背景

I 型 X 線バーストは数秒から数十秒の間、X 線で爆発的に輝く天体現象です。これは中性子星と恒星から構成される連星系において中性子星の表面で周期的にみられます。恒星から放出されたガスが中性子星表面に降り積もり、中性子星の強力な重力によって圧縮されます。そして、ある圧力・温度の限界を超えると核反応が爆発的に進行します。この際に中性子星表面の温度が急激に上がり、X 線を放出して強く輝くのです。X 線バーストの観測と理論計算を比較することで中性子星の半径や質量に関する情報を引き出したり、核物質の状態方程式に制限をかけたりすることが可能です。

X 線バーストで起こる核反応にはいくつかの種類があり、主なものに「速い陽子捕獲過程 (*rp* 過程)」があります。*rp* 過程は、原子核が陽子を捕獲してガンマ線を放出する反応と、原子核内の陽子が中性子に変化する「ベータ崩壊」を、それぞれ少なくとも 1 回以上組み合わせて繰り返すことで、原子番号 (陽子の数) と中性子の数がほぼ等しい不安定な原子核を合成しながら進む元素合成過程です (図 1)。X 線バーストを理論的に解明するためには、反応に関係する原子核の性質に関する知識が必要です。しかし現状では必要な原子核の情報が不足しているため、*rp* 過程がどのように進むのか十分に理解されていません。

rp 過程の進み方についての未解明な問題の一つが *rp* 過程の「終わり」に関するものです。*rp* 過程は陽子を捕獲しながら進む反応です。陽子を捕獲して生成される原子核のアルファ粒子分離エネルギー (S_α) が小さいと、ガンマ線を放出する代わりに、陽子 2 つと中性子 2 つからな

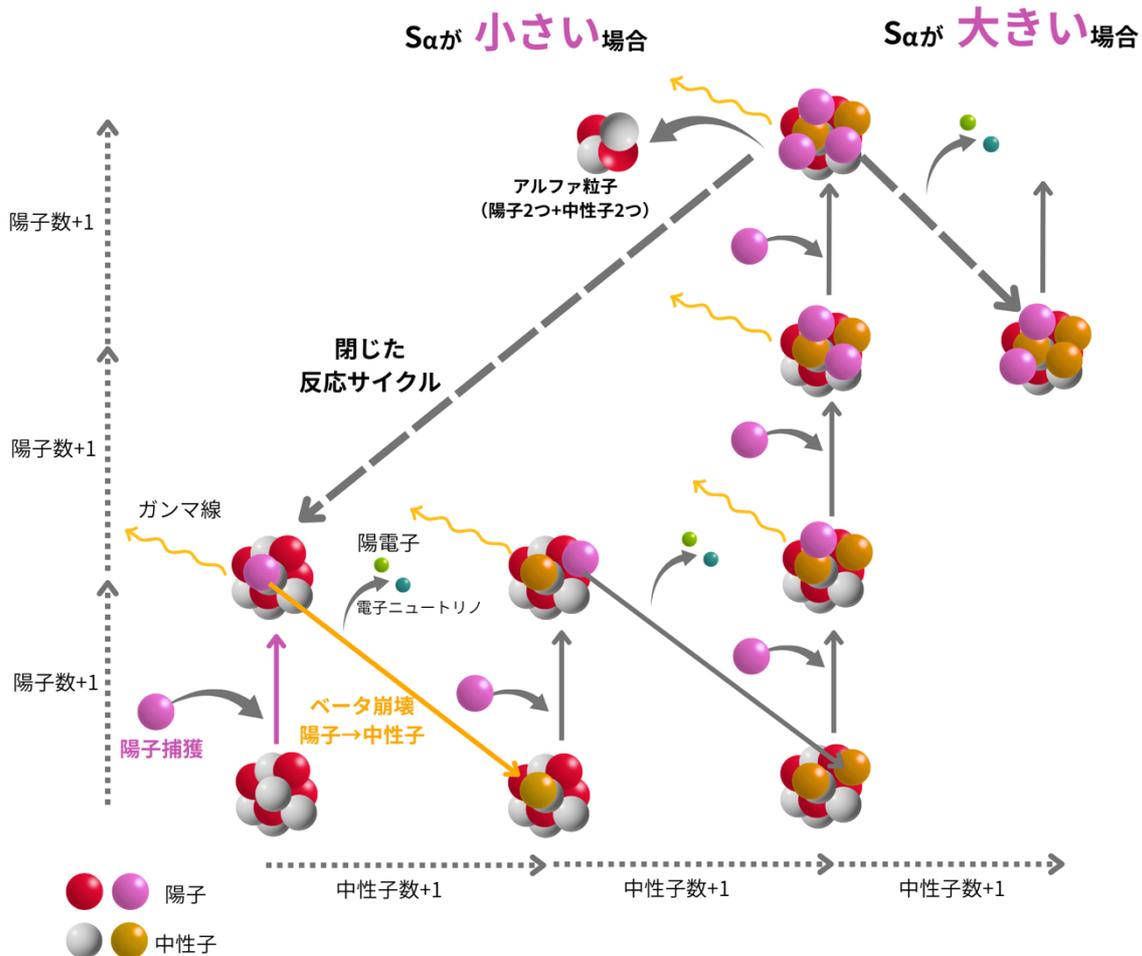


図 1 速い陽子捕獲過程の概略。 S_α が小さいとアルファ崩壊を起こして閉じた反応サイクルを形成し、速い陽子捕獲過程の終端となる。 S_α が大きいとベータ崩壊を起こし、より重い元素の合成に進む。

るアルファ粒子の放出が起こります。つまり、陽子 2 つと中性子 2 つが減った原子核に崩壊します。この原子核は rp 過程のそれ以前の反応経路に位置しており、閉じた反応サイクルを形成します (図 1)。この反応サイクルが rp 過程の終端になると考えられており、終端となる場所にはいくつかの候補があります。それぞれ関係する原子核の元素名から NiCu (ニッケル-銅) サイクル、ZrNb (ジルコニウム-ニオブ) サイクルおよび SnSbTe (スズ-アンチモン-テルル) サイクルなどと呼ばれ、これまで議論されてきました。この中で NiCu サイクルと SnSbTe サイクルについてはどのような天体環境で成立するのかがよく分かっています。しかし、「ZrNb サイクル」についてはどのような天体環境で成立するのかが分かっていませんでした。これはアルファ崩壊を起こすと考えられているモリブデン-84 の質量が実験的に決定されておらず、 S_α が分からないためです。そのため一般的な X 線バーストにおける rp 過程で ZrNb サイクルが成立するか否かは長年の問題となっており、モリブデン-84 の質量値がこの問題を解決するための最後のピースでした。

研究内容と成果

モリブデン-84 はわずか 2.3 秒で崩壊する不安定な原子核のため、これまでその質量の測定が

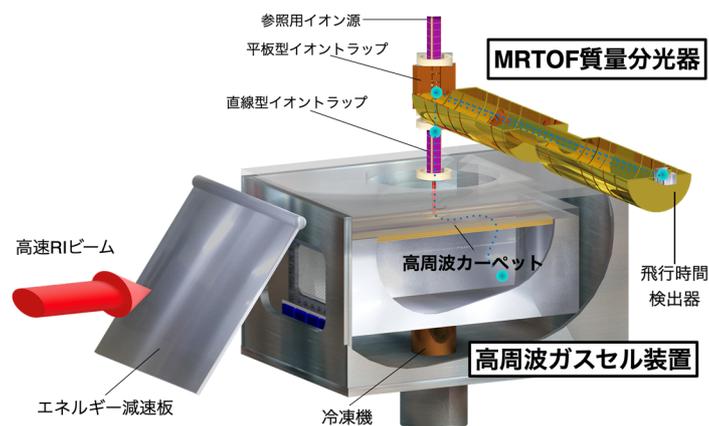


図 2 実験装置の概念図。

困難でした。また、 rp 過程の計算において特に影響が大きいことから、質量の測定精度の高さも求められ、X線バーストの理論計算の不確かさを抑えるためには $0.1 \text{ ppm}^{(\ast6)}$ (一千万分の一) 以上の高精度で質量を決めることが必要です。

本研究ではモリブデン-84 を中心とする短寿命原子核の精密質量測定を研究グループが近年実用化した多重反射型飛行時間測定式 (MRTOF) 質量分光器を使用して行いました。MRTOF 質量分光器は 10 ミリ秒程度の短い測定時間で複数の原子核の質量を同時に高精度で決定することができ、短寿命原子核の精密質量測定に最適な装置です。実験は理化学研究所の RIBF 施設、超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS の ZeroDegree スペクトロメーター下流に設置されている高周波ガスセル装置と MRTOF 質量分光器から構成される実験セットアップを使用して実施しました (図 2)。モリブデン-84 を中心とする短寿命原子核は、1 核子当たり 345 メガ電子ボルト^(\ast7) に加速したキセノン-124 のイオン・ビームをベリリウム標的に照射し、入射核破碎反応^(\ast8) によって生成しました。その後 BigRIPS によって目的の原子核だけを選別、測定装置に送りました。送られた短寿命原子核のイオン・ビームを高周波ガスセル装置で停止させて極低エネルギーのイオン・ビームに変換されます。ガスセルから引き出されたイオンは直線型イオントラップを通じて平板型イオントラップに送られ蓄積、冷却されます。十分に冷却されたイオンを高電圧で加速、MRTOF 質量分光器に入射し飛行時間を測定することで精密に質量を測定しました。

実験の結果、中性子数 (N) と原子番号 (Z) が同じである「 $N=Z$ 核種」ルテニウム-88、モリブデン-84、加えてイットリウム-78 の核異性体状態^(\ast9) の質量を世界で初めて実験的に決定できました。また質量が実験的に知られているニオブ-83 とイットリウム-79 についてはより高精度の測定を行って質量値の不確かさをこれまでの $162 \text{ keV}^{(\ast7)}$ と 80 keV から 10 keV 程度まで一桁程度低減させることができました。

測定で得られた質量値から rp 過程での ZrNb サイクル形成に関する重要な物理量であるモリブデン-84 の S_0 を初めて実験的に決定しました。図 3 は、中性子数と陽子数の差 ($N-Z$) に対して、モリブデン (Mo) 同位体の S_0 をルテニウム (Ru), テクネチウム (Tc), およびニオブ (Nb) の同位体の S_0 とともに示しています。モリブデン以外の三つの元素の系列については実験的に知られている範囲において $N-Z$ に対して単調に変化していますが、モリブデンについてはモリブデン-84 ($N-Z=0$) において $N-Z > 0$ での S_0 の推移の傾向に比べて優位に小さい値になっていることが分かります。これは、モリブデン同位体系列において、 $N-Z \leq 0$ の領域に低アルファ粒子分離エネルギーの島が存在することを示す世界で初めての実験的証拠になっています。

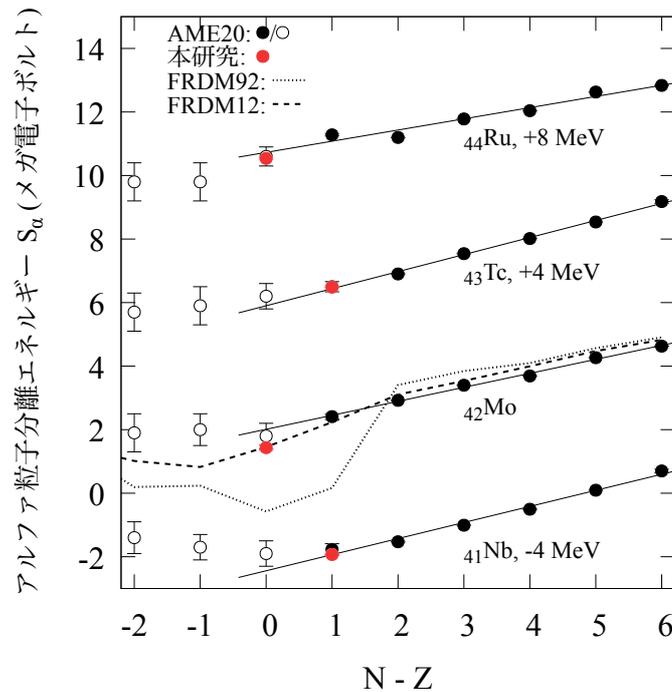


図 3 中性子数と陽子数の差 $N-Z$ に対する、Ru、Tc、Mo、および Nb 系列のアルファ粒子分離エネルギー。Mo 以外は見やすさのため縦軸方向にずらして表示してある。黒丸と白丸はそれぞれ文献 (AME20^(※10)) による過去の実験値とその外装値を示し、赤丸は今回の測定値を表している。既知の AME20 データを用いた線形近似の結果を目安として実線で表示している。Mo については、原子核の理論模型である FRDM92 および FRDM12 による予測値をそれぞれ点線と破線で示している。

しかしこのモリブデン-84の S_α の値は ZrNb サイクルの形成という面では大きく、不十分です。そのため本実験の結果から ZrNb サイクルは rp 過程の終端にはなりえないと結論することができます。

また、実験で得られた新しい質量値の rp 過程に対する影響を見るため、X 線バーストのシミュレーションを行いました。図 4 に X 線バーストで合成されて残る核種 (原子核の種類) の存在量分布のシミュレーション結果を赤丸で示します。従来の文献値 (AME20^(※10)) の不確かさによる存在量分布の変動幅を灰色の帯で示しています。赤丸の誤差棒は本実験で得られた質量値に由来する不確かさを表しており、質量数 80 から 90 の範囲でシミュレーションによる存在量の不確かさを大きく低減できていることが分かります。これは本実験によって rp 過程の理論計算の精度が大きく向上したことを表しています。

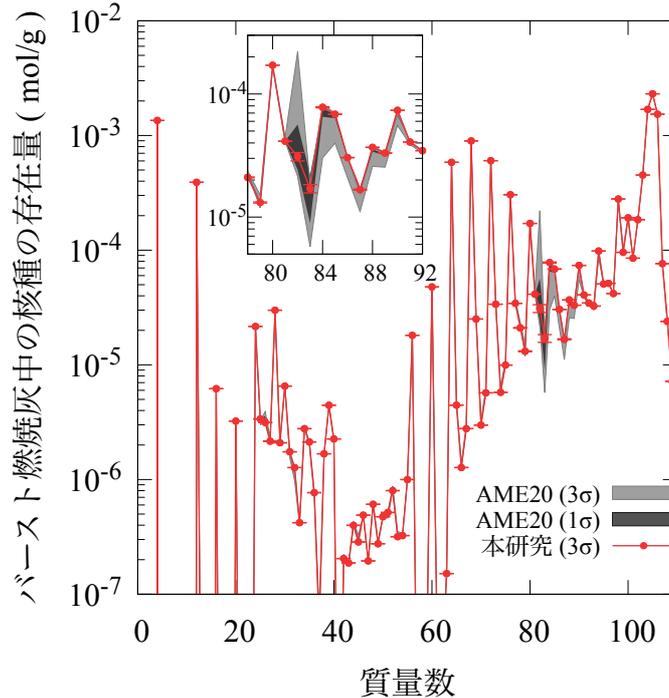


図 4 シミュレーションによる X 線バースト燃焼灰中の核種（合成されて残る核種）の存在量分布。灰色と濃い灰色の帯は、4 つの核種 (^{88}Ru 、 ^{84}Mo 、 ^{83}Nb 、 ^{79}Y) に対して文献値 (AME20) の不確かさ (3σ と 1σ ^(※11)) の範囲での質量値を変化させた場合の存在量の変動範囲を表す。赤丸の誤差棒は本研究で得られた質量値を 3σ の範囲で変化させた場合の存在量の変動範囲に対応している。

本研究の意義

天体現象と原子核反応は密接に関係しており、その中でも X 線バーストは核データの違いが直接観測量に表れるケースになります。X 線バーストに関する理解はコンピューター・シミュレーションの発達により大きく前進しています。しかし、シミュレーションに用いられる核データの整備には加速器を使用した原子核実験が必要なため未だ不十分な状態です。本研究の結果はこの中でも重要なピースを埋めたもので、X 線バーストの解明を大きく前進させるものです。また、速い陽子捕獲過程は元素合成過程の一種であり、X 線バーストだけではなく超新星爆発などの他の天体現象でも起きている可能性が議論されています。X 線バーストは中性子星表面の非常に重力が強い環境下で起きており、銀河の化学進化への寄与はほとんどないと考えられていますが、超新星爆発の場合は残骸が宇宙空間に広がります。そのため速い陽子捕獲過程への理解の向上は一部の天体現象の解明に止まらず、身の回りにある物質の起源の解明にも資するものとなっています。

用語解説

1. 多重反射型飛行時間測定式 (MRTOF) 質量分光器

一対の静電イオンミラーで構成されておりイオンを一定のエネルギーで一定距離飛ばし、その飛行時間からイオンの質量を測定する装置。実際の測定ではイオンをイオンミラー内で数百回往復させ、飛行時間は 10 ミリ秒 (1 ミリ秒は一千分の 1 秒) 程度になります。これにより一千万分の 1 程度の質量の違いを見ることが可能で、また同時に複数種類のイオンの測定を行うことができます。

2. アルファ粒子分離エネルギー、 S_α

原子核からアルファ粒子（ヘリウム-4 原子核、 ${}^4\text{He}$ 、 $N=Z=2$ ）を取り出すのに必要なエネルギー。この値が小さいほどアルファ粒子が放出されやすくなります。

3. 低アルファ粒子分離エネルギーの島

モリブデン同位体において、アルファ粒子分離エネルギー（ S_α ）が既知の傾向からは外れ、小さな値を示す領域のこと。かつては質量数 85 以上の核種にそのような領域が存在すると考えられていましたが、その後の実験結果で否定され、長らく「存在しない」とみなされてきました。原子核物理学では核図表上のある特定の物理的特徴を示す限られた領域を「島」と慣用的に呼んでいます。

4. I 型 X 線バースト

中性子星と恒星の連星系において中性子星の表面で起こる爆発的天体現象。伴星から中性子星に流れ込むガスが中性子星表面に降り積り、強力な重力によって圧縮されて、ある圧力・温度条件を超えると原子核反応が爆発的に進行します。この際に中性子星表面の温度が上がり、X 線で強く輝くため X 線バーストと呼ばれます。

5. 速い陽子捕獲過程（ rp 過程）

宇宙の高温環境で原子核が次々に陽子を捕獲し、陽子捕獲とベータ崩壊を繰り返すことで進行する元素合成過程です。

6. ppm

ppm は百万分の一を表す単位（parts per million）。人間の体重（60 kg）を基準にとると 0.1 ppm は髪の毛数本分の重さ（6 mg）に相当します。

7. 電子ボルト

エネルギーの単位。1 電子ボルトは 1 個の電子が真空中で 1 ボルトの電位差で加速されたときに得るエネルギーを表します。1 キロ電子ボルト = 1,000 電子ボルト。1 メガ電子ボルト = 1,000,000 電子ボルト。

8. 入射核破碎反応

安定な原子核から不安定な短寿命原子核を作り出す方法の一つ。高エネルギーの原子核を標的に衝突させ砕くことで一度に様々な原子核を生成することが可能な方法です。

9. 核異性体状態

原子核には最も安定な基底状態とそれよりもエネルギーが高く不安定な励起状態が存在します。この励起状態の中で寿命が長い準安定的な状態を核異性体状態と呼んでいます。

10. The Atomic Mass Evaluation 2020（AME20）

原子核の質量について実験データをもとに評価された値をまとめた論文、その 2020 年版。原子核質量の標準値として採用されることが多い。

11. 不確かさ（ σ ）

σ は実験値の不確かさ、あいまいさ（標準偏差）を表す記号。 μ を実験値とすると $\mu \pm 1\sigma$ の範囲であれば 68.3%、 $\mu \pm 3\sigma$ の範囲であれば 99.7% の確率で真の値がその範囲内に存在することになります。

謝辞

本研究は主に日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業 17H06090, 20H05648, 22H01257, 22H04946, 25H01273, 19K14750, 21K13951, および 23K13132 の助成を受けて行われました。

論文情報

- タイトル

Precision Mass Measurements around ^{84}Mo Rule Out ZrNb Cycle Formation in the Rapid Proton-Capture Process at Type I X-ray Bursts

- 著者

S. Kimura, M. Wada, C.Y. Fu, N. Fukuda, Y. Hirayama, D.S. Hou, S. Iimura, H. Ishiyama, Y. Ito, S. Kubono, K. Kusaka, S. Michimasa, H. Miyatake, S. Nishimura, T. Niwase, V. Phong, M. Rosenbusch, H. Schatz, P. Schury, Y. Shimizu, H. Suzuki, A. Takamine, H. Takeda, Y. Togano, Y.X. Watanabe, W.D. Xian, Y. Yanagisawa, T.T. Yeung, M. Yoshimoto, and S. Zha

- 雑誌

Physical Review Letters 135, 152701 (2025)

- DOI

doi.org/10.1103/2dyn-q7wp

お問い合わせ先

<研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所 和光原子核科学センター 教授 渡邊裕
Tel: 048-466-1125
e-mail: yutaka.watanabe@kek.jp

国立研究開発法人 理化学研究所
仁科加速器科学研究センター 低速 RI ビーム生成装置開発チーム チームリーダー 石山博恒
Tel: 048-462-1111
e-mail: hironobu.ishiyama@riken.jp

<報道担当>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室
Tel: 029-879-6047
e-mail: press@kek.jp

国立研究開発法人 理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247
e-mail: ex-press@ml.riken.jp