

原子核物理が原子力の未来を切り開く

革新的高速炉に不可欠な「代理反応」実験を推進

千葉 敏

極限重原子核研究グループ

Satoshi Chiba

Research Group for Physics of Heavy Nuclei

原子炉の燃料であるウラン資源の枯渇の問題を解決するとともに、高レベル放射性廃棄物の問題を軽減できると期待される革新的高速炉。その研究開発に欠かせない「代理反応」の実験を、千葉 敏サブリーダーたちは推進している。代理反応とは、原子炉内でできる放射能の強い原子核など、直接測定することが困難な原子核と中性子の反応を、測定可能な別の核反応によって理解する方法である。千葉サブリーダーたちは、この代理反応が成り立つための条件を理論的に解明。さらに2010年度には、日本原子力研究開発機構(JAEA)のタンデム加速器施設で代理反応の実験を開始する。

工学と理学の垣根を越えて

「私が学生のころ、原子力は花形の研究分野でした。その後一時期、原子力の人気は低迷しましたが、資源の乏しい日本にとって原子力は必要なものだという信念のもと、私は研究を続けてきました。現在、原子力ルネサンスと呼ばれる時代が再来したことは、大変喜ばしいことです」

千葉 敏 サブリーダー (SL) は大学時代、工学部で原子炉や核融合炉の設計に必要な核反応を測定する実験に携わった。「原子力工学の中でも物理学に最も近い分野です。しかし、核反応のメカニズムについて疑問があっても、理学部の誰に尋ねればいいのか分からない状況でした」

日本の原子力研究開発の世界には、工学と理学の間に垣根がある、と千葉 SL は指摘する。「欧米では工学系と理学系の研究者がうまく協力して原子力の研究開発が推進されてきました。一方、日本では黎明期は別として、大学や研究所にいる理学系の研究者は原子力への関心が薄く、現在でも両者の交流はあまりありません。私はそのような状況にずっと危機感を抱いてきました」

1985年、旧・日本原子力研究所(現・JAEA)に入所した千葉 SL は、原子力工学の部門で研究を進めた後、1998年に先端基礎研究センターに移り、原子核物理の研究をより基礎的な視点から開始した。「工学から理学にわたる原子核の反応にかかわるテーマを、幅広く研究してきました。そこがほかの研究者と異なる私の特徴だと思います。原子核物理に立ち入ることは回り道に見えるかもしれませんが、ひいては原子力の利用に役立つはずです」

原子力の未来を開く革新的高速炉

陽子と中性子を結び付けて原子核をつくり、核反応を支配しているのが、核力だ。核融合や核分裂に伴う原子力のばく大なエネルギーも核力に由来する。「しかし、その肝心の核力が、いまだに完全には理解できていないのです。私は核力について理解するために、中性子星の研究にも取り組みました」

中性子星は重い星が一生の最後に見せる超新星爆発によってできる、ほとんどが中性子からなる天体だ。「その半径は10kmほどですが、質量が太陽の約1.4倍という超高密度天体です。中性子星の研究は、人間の持つ想像力を最大限に高めて、極限状態の核力が織り成す世界を探るプロセスです。それによってこれまで考えもしなかった核力の側面が見えてきました。そこから核反応メカニズムへアプローチすることで、実験では測定困難な原子核現象を理解することを目指しました。実は、それまでの研究テーマとあまりにも違い過ぎたため、この時期、論文はあまり書けなかったのですが、一種のブレイクストロミングから新しい知識と人脈が得られ、その後の研究を展開する上で掛け替えのない財産となりました。こういうことをできるのが、先端基礎研究センターのいいところです」

測定困難な原子核現象の理解は、革新的高速炉の実現にも不可欠である。革新的高速炉とは、原子炉の燃料であるウラン資源の枯渇の問題を解決するとともに、高レベル放射性廃棄物の問題を軽減できると期待されている次世代の原子炉だ。まずこの革新的高速炉について紹介しよう。

現在主流の原子炉である軽水炉では、スピードの遅い中性子(熱中性子)を、核分裂しやすいウラン235



千葉 敏 (ちば さとし)

1957年、宮城県生まれ。工学博士。1985年、東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻博士課程中退。同年、日本原子力研究所研究員。2009年より極限重原子核研究グループ サブリーダー(主任研究員・研究主幹)。専門は本人の造語である“核反応理工学”。

に当てて核分裂を引き起こしている。その核分裂により約 2.5 個の中性子が発生し、ほかのウランの核分裂を引き起こす。このような連鎖反応が安定して起きる臨界状態を保つことで、発電に利用している。

ただし、天然ウランの中で核分裂しやすいウラン 235 は 0.7% にすぎず、残りの 99.3% は核分裂にくいウラン 238 だ。ウランも限りある資源である。経済的に採掘が可能だと確認されているウランの資源量を、現在の需要量で割った可採年数は約 100 年。現在、世界中で原子力発電所の新設が計画されており、ウランの需要は急増すると予想されている。このままでは、早期にウラン資源が枯渇してしまうおそれがある。

この問題を解決できる方法がある。それが高速炉だ。現在の軽水炉の燃料には、核分裂しやすいウラン 235 が 3 ~ 4.5% 含まれており、残りはウラン 238 である。核分裂により発生した中性子の一部はウラン 238 に吸収される。すると核分裂しやすいプルトニウム 239 に変わる。現在の軽水炉が生み出すエネルギーの約 3 分の 1 はプルトニウムの核分裂による。

一方、高速炉では、高速の中性子によってプルトニウム 239 の核分裂を引き起こす。それにより軽水炉での核分裂よりも多い約 3 個の中性子が発生する。このためウラン 238 をプルトニウム 239 に効率よく変換することができる。高速炉では、核分裂する量よりも多いプルトニウム 239 を生み出すことができると考えられている。このような高速炉は高速増殖炉と呼ばれ、JAEA では原型炉「もんじゅ」を建設して、研究開発を進めてきた。

高速炉によりウラン資源の利用効率は数十倍以上に向上し、人類は千年以上にわたり原子力を利用し続けることができると期待されている。「原子力を末永く利用するには、高速炉が絶対に必要なのです。その意味で、現在の原子力技術はまだまだ発展途上にあります」

原子力利用の大きな課題は、高レベル放射性廃棄物の処理だ。使用済み核燃料には放射能の強い核分裂生成物とともに、ウランなどが中性子を吸収することで、プルトニウムだけでなくネプツニウム、アメリシウム、

キュリウムなど、ウランよりも重い元素が含まれている。これらは「マイナーアクチノイド (MA)」と呼ばれる。MA には放射能が強く 100 万年を超えるような長い半減期を持つものがある。「MA をそのまま廃棄すると、後世に大きな負担を残してしまいます。軽水炉や高速炉の使用済み核燃料から MA を取り出し、ウランやプルトニウムとともに燃料に混ぜて核分裂させることで、廃棄物処理の負担を軽減しようというのが革新的高速炉です」

ただし、革新的高速炉の研究開発には、中性子と MA の反応データが不可欠だ。中性子が衝突したとき、それぞれの MA はどのくらいの確率で核分裂するのか。核分裂に伴い中性子を何個放出するのか。臨界状態に影響を与えるそれらのことが理解できなければ、どの種類の MA をどのくらいの量まで燃料に混ぜても革新的高速炉を安全に運転できるのかが分からない。

革新的高速炉の実現にとって、中性子と MA の反応は不可欠なデータなのだ。ところが、それを測定することは極めて困難である。「原子炉内でできる放射能の強い MA をすべて取り出して、中性子との反応を測定する実験は現実的には不可能です」

測定が困難な中性子と MA の反応を、別の核反応によって理解するための方法、それが代理反応である。

これまでの仮定は間違っていた！

それでは、代理反応について紹介しよう。中性子と MA の反応により、それらが合体した複合核が瞬間的

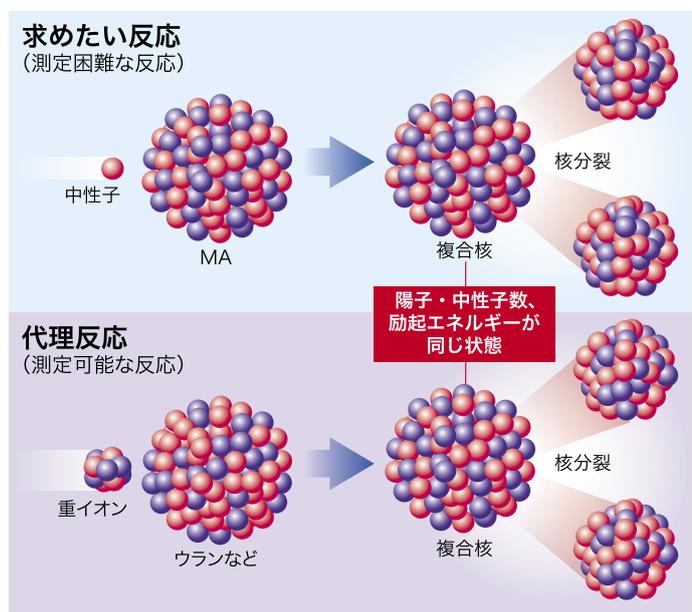


図1 代理反応

にでき、すぐに壊れて核分裂が起きる。中性子と MA の反応でできる複合核と同じ陽子・中性子数、励起エネルギーを持つ複合核を、重イオンを加速してウランなどの標的核に当てることによって作り出し、その核反応を測定する。それにより中性子と MA の核反応を理解しようというのが、代理反応だ (図 1)。

そもそも代理反応を行える研究機関は世界的にも限られている。「取り扱いに注意が必要なウランや MA を標的核として扱える技術と加速器実験施設があるのは、日本では唯一、JAEA だけなのです」

代理反応の実験は、米国とフランスの研究グループにより先行的に行われてきた。しかし、千葉 SL たちには両国にはない強みがある。代理反応の実験に最適な大型タンデム加速器を擁していることだ。「代理反応では、ぶつける重イオンビームを構成するそれぞれの重イオンの速度が高い精度でそろっている必要があります。タンデム加速器は、高い電圧を発生させて重イオンを加速する静電加速器なので、きれいに速度がそろった重イオンビームをつくることができます。しかも JAEA のタンデム加速器は、さまざまな元素の重イオンビームをつくり出すことができます。まさに、代理反応にうってつけの装置なのです」

千葉 SL たちの代理反応の実験は、文部科学省の「原子力システム開発事業」に採択され、3年計画の実験を2009年度からスタートした。「まず私たちは、どのような条件で代理反応の実験を行えば中性子と MA の反応を理解することができるのか、それを理論的に検討することから始めました」

ポイントは、反応の途中でできる複合核の陽子・中性子数と励起エネルギーが同じならば、その後に起きる核分裂の確率 (核分裂断面積) などと同じとなるのか、という問題だ。「米国やフランスの研究グループは

それが同じだという仮定のもとに、代理反応の実験を進めてきました。しかし私たちは、その仮定が間違っていることを明らかにしました」

なぜ、仮定は間違っていたのか。「原子核は、励起エネルギーのほかに、スピンとパリティという物理量を持ちます。この三つの物理量が原子核のあらゆる振る舞いを支配しています。これまで米国とフランスでは、スピンとパリティの影響を無視して実験を進めてきたのです。しかし私たちは、スピンとパリティにより核分裂の確率が変化することを明らかにしました」

代理反応が成り立つ条件を発見

標的核に当てる重イオンビームの速度を調整することで、複合核の励起エネルギーは任意の値を実現できる。しかしスピンとパリティの値はコントロールすることができない。

では、どのような条件で代理反応を行えば、中性子と MA の反応を理解することができるのか。その条件を理論的に導き出すことにも、千葉 SL たちは成功した。「その条件は少し複雑なのですが……」と、千葉 SL は図を描きながら説明してくれた (図 2)。

ある種類の MA と中性子の反応を A、別の MA と中性子との反応を B とする。MA の反応の多くは測定困難だが、一部には測定可能なものがある。ここでは反応 A は測定困難で、この核分裂確率を知りたいとしよう。一方、反応 B は測定可能で、例えば 42% の確率で核分裂することが知られているとする。「それぞれの反応の途中でできる複合核 A と複合核 B の陽子・中性子数が偶数か奇数か、原子核の形、励起準位の分布などが似ていれば、スピン・パリティの分布も似ていると考えることができます」

この反応 A と B に対応する代理反応の実験を行う。

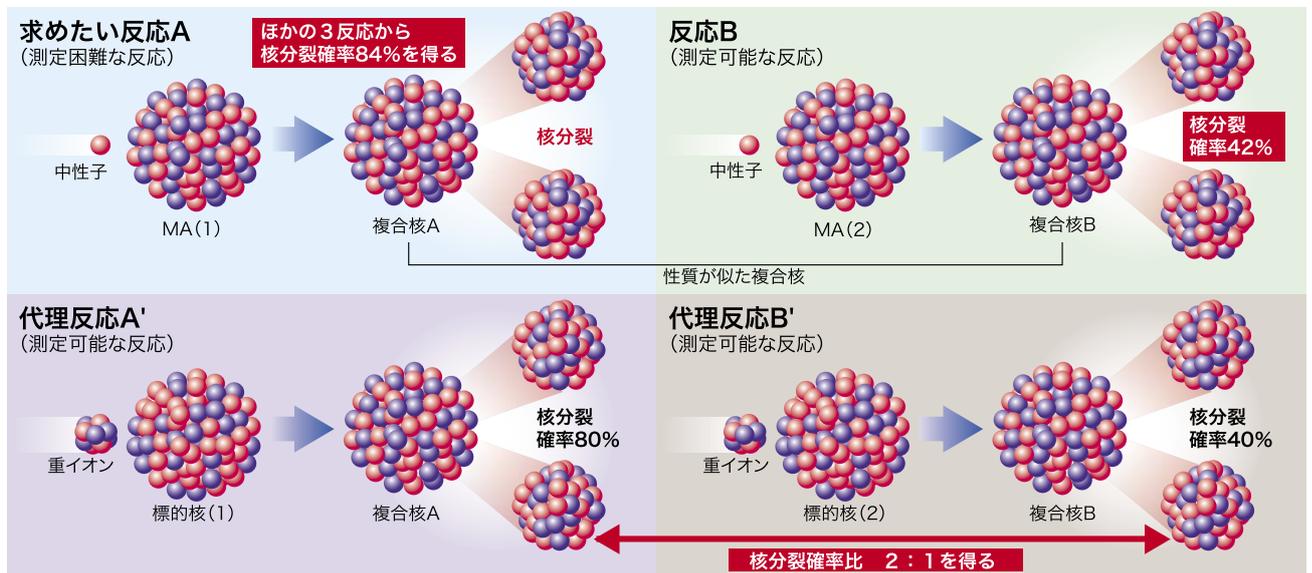


図2 代理反応が成り立つ条件

例えば、反応 A と同じ複合核を生成する代理反応 A' で測定された核分裂する確率が 80%、反応 B と同じ複合核を生成する代理反応 B' の核分裂確率が 40% と測定できたとする。A' と B' の核分裂確率の比は 80% : 40% = 2 : 1 だ。「中性子反応 A と代理反応 A' で生成されるのは、同じ複合核でもスピン・パリティ分布はずいぶん違っています。反応 B と B' も同様です。しかし、A' と B' (両方とも代理反応) のスピン・パリティ分布は、両者の構造や反応機構が似ていればほぼ同じになります。驚くべきことに、この条件のもとでは、代理反応 A' と B' の核分裂確率の比と、中性子による反応 A と B の場合の比が等しくなることを、私たちは理論的に明らかにしたのです。それによって、どのような条件で実験をすればよいかも分かってきました」

すなわち、この例でいえば、A' と B' の核分裂確率の比は 2 : 1 なので反応 A と B の比も同じく 2 : 1。反応 B は 42% なので、反応 A の核分裂の確率は 84% だと導き出せる。いったんこの情報を得ることができれば、原子炉設計の計算で必要な反応 A の核分裂の確率を求めることは簡単である。

「この代理反応の成立条件が正しいかどうか、これから実験で検証していきます」。千葉 SL たちは、2010 年度から JAEA のタンデム加速器施設で、酸素 18 などの重イオンビームをウランの標的核に当てる代理反応の実験を開始する予定だ (図 3)。酸素 18 から標的核に 1 個ないし 2 個の陽子や中性子が吸収されたり、逆に MA の陽子や中性子が酸素 18 に引き抜かれたりすることで、さまざまな代理反応を実現できる。さらにプルトニウムやキュリウムを標的核として用いることで、革新的原子炉の設計に必要な中性子と MA の反応のほぼすべてを、代理反応で調べることができる。

「核反応により中性子を引き抜かれた酸素 16 を測定することで、複合核の励起エネルギーを測定します。核分裂確率は、核分裂生成物を測定することで導き出します。さらに核分裂によって発生する中性子数の測定や、MA が中性子を吸収する際に発生するガンマ線の測定も行いたいと考えています。それは臨界状態にかかわる重要なデータですが、そのような測定は米国やフランスも行ったことのない、世界初のチャレンジングな実験です。それらをすべて実現するには、最低でも 5 ~ 6 年かかるでしょう」

工学と理学の懸け橋に

代理反応は原子力だけでなく、元素合成の謎を探る原子核物理からも大きな期待を寄せられている。鉄よりも重い元素の多くは、超新星爆発に伴い合成される

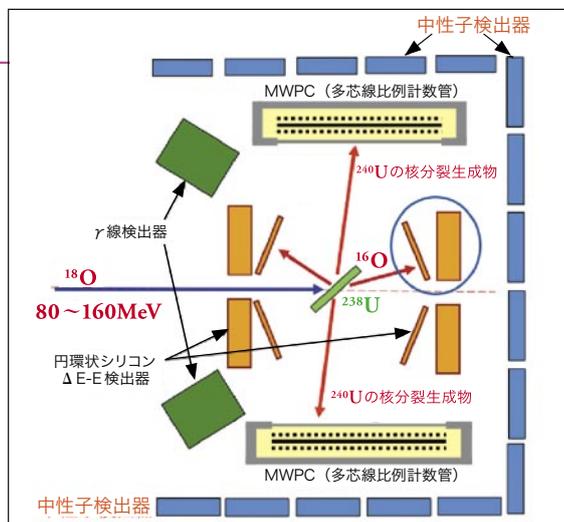


図 3 代理反応の実験装置の概念図

と考えられている。地球上のウラン資源も、超新星爆発の遺産である。しかしその元素合成の仕組みがよく分かっていない。「安定核が中性子を吸収して不安定核となり、それがすぐに崩壊して陽子数が増えた重い元素の原子核ができます。このような元素合成の過程を解明するには、中性子を吸収した不安定核の反応を理解する必要があります。しかし、不安定核はすぐに崩壊してしまうので測定が困難です。そのような不安定核の反応の理解にも代理反応が有効です」

代理反応の実験は、工学と理学の懸け橋となるだろう。「私が先端基礎研究センターで原子核物理の研究を開始して十数年になります。その間、数多くの物理学者と知り合うことができました。そのネットワークを駆使して、タンデム加速器やこれまで築いてきた重イオン実験技術、原子核の理論を総動員しなければ、代理反応の実験は成功しません。工学と理学の垣根を取り払い、原子力利用に役立てることを目指してきた研究の集大成が、この代理反応の実験なのです。そして、JAEA はこの研究を中心となって遂行できる施設、人的資源を有する国内唯一の機関です。そのミッションを果たすために、何としてもこの実験を成功させなくてはなりません」

(取材・執筆：立山 晃)

Nuclear physics breaks a new frontier of nuclear energy
-Surrogate reaction method to measure indirectly nuclear data necessary for development of innovative fast reactors-

Dr. Satoshi Chiba, sub-leader of Research Group for Physics of Heavy Nuclei, has initiated a project called "surrogate reaction method". This is an experimental technique to measure indirectly neutron nuclear data of nuclei for which direct measurement is difficult or practically impossible due to, e.g., their short half lives. In this method, the neutron cross sections is determined by creating the same compound nuclei as desired neutron reactions by using different reactions, mostly multi-nucleon transfer reactions. This method will enable us to determine neutron cross sections of a number of nuclei inevitably important for development of innovative fast reactors. They have found an important criteria for the neutron and surrogate reactions become equivalent, which makes the surrogate reaction method to work effectively. The experiments to verify this criteria and actual data production will be carried out at Tokai tandem-accelerator facility from fiscal year of 2010.