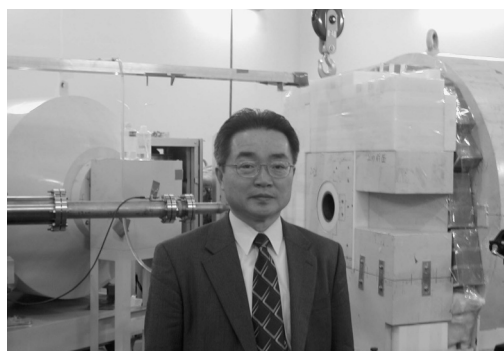




# 中性子を捉えて核心に迫る

## 井頭 政之 研究室 ~ 原子炉工学研究所



井頭 政之 助教授

この宇宙はビッグバンから始まったとされる。ビッグバン直後の原始宇宙は高エネルギーで、至る所で核反応が起こっていた。しかし次第にエネルギーは低下し、150億年の時を経て、恒星が、地球が、生命が生まれ、遂には人類が誕生した。

現世に至るまで、核反応は壮大なスケールを持つ宇宙での出来事であった。ところが私たち人類は、原子核を操り、かつては神の業とされてきた領域をも垣間見ようとしている。今回は井頭研究室で繰り広げられる、原子核物理の最先端を紹介する。



## 中性子捕獲反応と宇宙の元素合成

私たちの世界は多種多様な物質に彩られている。色彩に溢れ、無数の生命に満ちている。この多様性の根底を成すものは一体何であるのかという素朴な問いは、人類が知的好奇心を手にした時から常にあり続けたものである。古くは古代ギリシアの一元論に始まり、遂に人類はクォークにまで辿り着いた。そしてこの長い探究の旅路の中で、人類の好奇心は多方面に派生した。ビッグバン直後から現世に至るまでに、元素がどのように合成されてきたのかという問いもその一つである。

宇宙が誕生してから現在までに、元素がどの順序で合成されてきたのか、その過程はおおよそ解明されている。しかし一方で、宇宙創成から現世に至る各年代において、そこに存在していた複数の元素がどのような割合で存在していたのか、その比率の詳細は未だにわかっていない。

この構成比率を把握する上で手掛かりとなるのが、元素合成を司る核反応である。この核反応のデータが人類に残された唯一の手掛かりであると言える。それゆえに、宇宙の元素合成の詳細を研究している研究者にとって、核反応のデータが正確であることは、極めて重要なことなのだ。

井頭先生は世界屈指の精度を誇る測定機器を駆使して、これまでも精密なデータを数多く測定してきた。これらのデータは多方面に応用され、多大な信頼を得るに至った。このような経緯で井頭先生は、宇宙における元素の合成プロセスを研究している研究者の目にとまったのである。井頭研究室に白羽の矢が立ち、早速データの測定が始まった。

数ある核反応の中でも井頭先生は特に、中性子捕獲反応のデータ測定を行ってきた。この反応は、原子核が中性子を捕獲して線を発生させる反応である。中性子捕獲反応は、原子核に中性子が接近した時に必ず起こるというわけではなく、中性子の速さや原子核の種類に応じて、ある確率で捕獲が起こる。その確率は中性子捕獲断面積とよばれる。井頭先生はこの捕獲断面積を測定しているのである。

先生は今回、宇宙の元素合成時のエネルギーを持つ高速中性子の捕獲断面積を求めようとして依頼された。そこで、原子量の小さな原子核に高速中性子を照射して捕獲断面積を測定した。すると、思いがけない事実に遭遇したのである。



## v則に従う捕獲反応の実証

高速中性子の捕獲断面積は二つの方法で求められている。一つは直に高速中性子を使って捕獲断面積を測定する方法、もう一つは室温程度のエネルギー(0.025eV)を持つ低速中性子の捕獲断面積から高速中性子の値を予測する方法だ。

予測法と測定値が共に正しければこれらの値は一致するはずである。しかし、過去に求められた<sup>12</sup>Cと<sup>16</sup>Oの高速中性子の捕獲断面積ではこれらの値が大幅にずれていたのだ。そこで井頭先生は高速中性子を直接用いることによって、これらの原子核の中性子捕獲断面積を測定してみた。

測定の際には、まず発生させる中性子の数を算出しておく。そして中性子を試料に照射する。中性子捕獲反応が起これば原子核から線が発生するので、その数から捕獲反応の起こった数がわかる。照射した中性子数と線の数の比から捕獲反応の確率である捕獲断面積が算出できるのだ。

このようにして井頭先生が測定した結果、<sup>12</sup>Cと<sup>16</sup>Oに関しては、これまでの測定値や予測値と異なる値が測定されたのである(表)。

このずれの原因としてまず考えられるのがノイズである。捕獲されずに散乱された中性子や天然に存在する線などが検出器に入り込み、ノイズとして検出される。ノイズは捕獲反応による線の判別を困難にして測定精度を大幅に狂わせる。このノイズをいかに取り除くかが中性子捕獲断面積の測定を高精度で行う鍵なのだ。

井頭先生はノイズを取り除くための工夫として検出器を遮蔽体で囲むことにした(図1)。この遮蔽体には天然の線を遮断するために鉛を用いた。さらに先生は独自のアイデアで優れた遮蔽体を作ることになったのだ。<sup>6</sup>LiHの遮蔽体を線の取込み口に使い、ホウ素入りポリエチレンやホウ素入りパラフィン、カドミウムを組み合わせ検出器を取り囲んだ。この遮蔽体によって、散乱中性子を遮断できたのである。このことが井頭研究室の検出器をより高感度なものに取り替えることを可能にした。この検出器は従来のものに比べて弱い線まで正確に、かつそのエネルギーをはっきりと検出することができる。

この工夫から、井頭先生は自分の測定値に自信を持っていた。そこで井頭先生は従来の予測値を疑った。予測値が低速中性子の捕獲断面積から算出される際には1/v則というものが使われていた。1/v則とは捕獲断面積の大きさが中性子の速さで

30keVでの中性子捕獲断面積

	<sup>12</sup> C	<sup>16</sup> O
井頭先生の測定値	15.4±1.0	34±4
過去の測定値	200±400 <sup>(1)</sup>	0.2±0.1 <sup>(2)</sup>
従来の予測値※	3.2	0.17

0.025eVでの測定値から1/v則(後述)にしたがって予測したもの。(単位: μb)

- (1) J.H.Gibbons, R.L.Macklin, P.D.Miller, and J.H.Neiler (1961)
- (2) R.L.Allen and R.L.Macklin (1971)

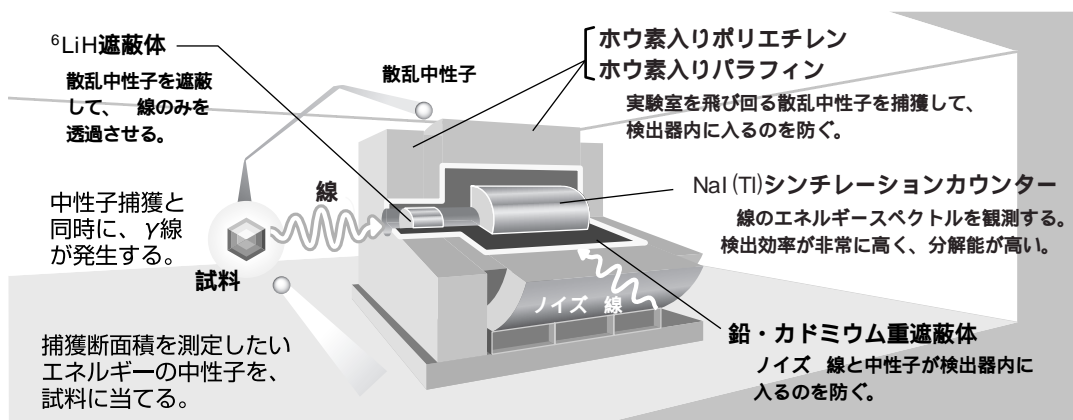


図1 検出器を取り囲む遮蔽体

ある $v$ に反比例するという法則である。先生が疑ったのはこの予測値の算出方法であった。

以前から $1/v$ 則に従う捕獲反応だけでなく $v$ 則に従う、つまり捕獲断面積が $v$ に比例する反応もあるということが理論的に予測されていた。

中性子が原子核に向かって入射する場合、その捕獲断面積は中性子が原子核内を通過する時間に比例する。遅い中性子ほど原子核からの作用を受けやすく、その結果として捕獲されやすいのである( $1/v$ 則に従う・図2A)。

一方で、原子核付近に接近した中性子が原子核に引き込まれる場合には、その中性子と原子核の間に遠心力ポテンシャルという障壁が発生する。そのため遅い中性子はポテンシャルの壁を越えにくく、大半は散乱される。逆に速い中性子ほどポテンシャルを透過する確率が増え、捕獲されやすくなる( $v$ 則に従う・図2B)。

これまでの測定の対象は室温程度のエネルギーを持つ低速中性子が主であった。この場合は中性子の速さである $v$ が小さいために、中性子捕獲断面積は事実上 $1/v$ に比例していた。一方で、高速中性子の場合は $v$ が大きくなるために $v$ 則に従う捕獲反応の影響の方が支配的になる。しかしこの場合はノイズが大きいため、これまでは $v$ 則に従う捕獲反応の観測には至らず、 $v$ 則の可能性はないと考えられていた。先生はこの点に着目し、これまでとはむしろ逆に $v$ 則に従う捕獲反応の可能性を考えたのである。

そこで井頭先生は $v$ 則の存在を確認する実験を行った。 $1/v$ 則に従う捕獲反応と $v$ 則に従う反応では、発生する線の周波数が違う。この点に先生は注目した。各々の周波数に対応する捕獲断面積を、中性子の速さを変えてプロットした。すると前者が $1/v$ に、後者が $v$ に綺麗に比例したのである(図3)。このとき初めて $v$ 則に従う捕獲反応の存在が実験的に裏付けられたのだ。

このように $v$ 則の実証が可能になったのは、井頭先生自身が加速器や検出器の改良に自ら取り組んだからである。ほとんどの研究者の場合、加速器の改良を自分で行うことはない。井頭先生は実験装置に関して全てを知り尽くしているため、自分自身の目的に最適な工夫を実験装置に施し、精密な測定を行うことができた。このことが今回の $v$ 則に従う捕獲反応の実証に繋がったのである。

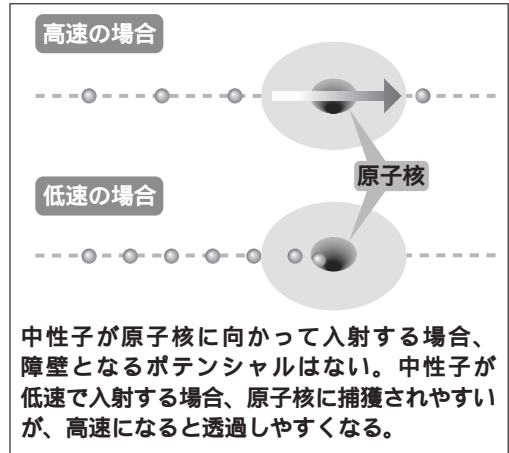


図2A  $1/v$ 則に従う捕獲反応

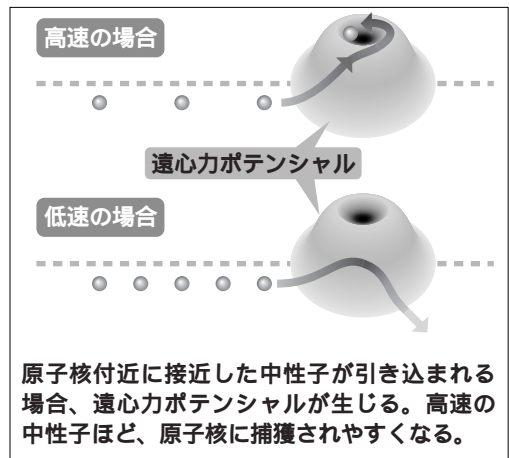


図2B  $v$ 則に従う捕獲反応

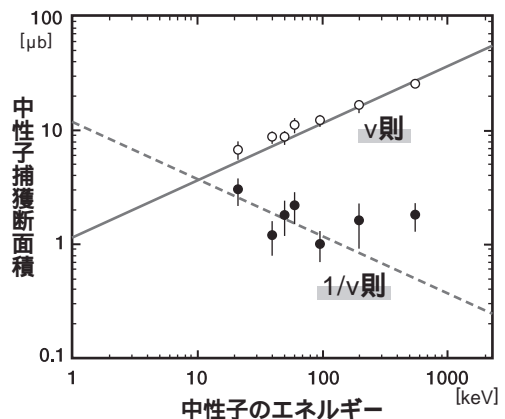


図3 中性子のエネルギーと捕獲断面積の関係



## 超ウラン元素の中性子捕獲断面積測定へ

原子力発電は、1980年代前半に次世代の発電方法として脚光を浴びた。しかし1986年にソ連(現ウクライナ)のチェルノブイリで大惨事が起き、私たちは、原子力発電が常に危険を孕んでいると思いい知ることとなった。そして日本でも、原子力発電を問題視する声が急速に高まっていく。

このような風潮の中、最も注目を集めた問題の一つが、青森県六ヶ所村の核廃棄物問題である。核廃棄物は放射能を持つ超ウラン元素(ウランより原子量の大きな元素)を含み、人体に有害である。これを放射線が漏出しないように処理する方法が以前からの大きな課題であった。

放射性廃棄物を保管する際には通常の場合、遮蔽して地下深くに埋蔵する措置がとられる。半減期の短い原子核の場合は瞬く間に安定な原子核へと崩壊するので、放射線を完全に遮断できる遮蔽体で囲めば十分だ。ところが、放射性廃棄物の中には数百年から数百万年に渡って放射線を発し続ける原子核もあり、この場合は放射能が完全に衰える前に遮蔽体の方が劣化してしまう。これでは漏出した放射線源が地下水などに取り込まれ、私たちの生活圏にまで達する危険性がある。

この問題を打開するために超ウラン元素の原子核を変換し、半減期を操作する必要がある。その変換技術に欠かせないのが中性子捕獲断面積の値である。最も効率よく変換するためにはどの速さの中性子を照射すればよいのか、またどれだけの量を照射すればよいのか、それを教えてくれるのが中性子捕獲断面積なのだ。しかし超ウラン元素の捕獲断面積を得るのは容易ではない。

廃棄物には様々な超ウラン元素が混在しているが、それらを分離、精製することは極めて難しく、混在した状態で測定せざるを得ない。従来の検出器では、特定の原子核からの線を他と区別できず、新たな検出器の開発が望まれていた。

そこで、井頭研究室を中心として今、一つのプロジェクトが始まっている。それは全立体角Geスペクトロメータという装置を開発し、それで超ウラン元素の中性子捕獲断面積を測定しようというものだ(図4)。この装置には線の周波数をはっきりと測定できる機器と、弱い線でも検出できる機器が試料の周囲に配置してある。

これによって超ウラン元素の試料に含まれる不純物からの線と測定したい原子核からの線を判別できる。さらに散乱中性子や天然線のノイズが入っても、それらを識別し、取り除いて考えることができるのだ。

東工大の井頭研究室をはじめ、このプロジェクトには10もの研究機関が参加している。現在は検出器の開発を行っている段階だ。今年度の初めまでには検出器の開発を終え、超ウラン元素の捕獲断面積の測定を始めることになっている。

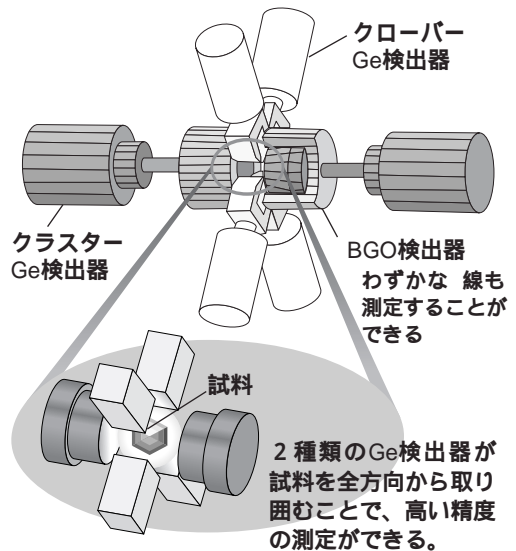


図4 全立体角Geスペクトロメータ

井頭研究室に初めて取材に伺った時、加速器や検出器を実際に見せていただいて本当に感動しました。研究内容も非常に興味深く、取材を重ねるごとに興味が増していきました。

今回、この記事執筆するにあたって、井頭先生には大変お世話になりました。お忙しい中重なる取材にも快く応じてくださった井頭先生に厚く御礼申し上げます。(瀬戸口 由加)