

小島 英夫 (静岡大学) 訳

中性子と核エネルギー——歴史的なデータ—— A. キコイン (1992, No. 8, pp. 2-9)

放射性現象は今から100年前の1896年に発見されたが(A. H. ベクレル), 研究者たちの努力によって, それから数年のうちにそのすべての特徴が明らかになった。化学者にとって意外だったことは, 放射性元素が他の元素に変換することだった: ウランはトリウムに, トリウムはラジウムに, ラジウムはラドンに, など。原子は不変である, という昔からの確信は崩れてしまった。物理学者にとっての驚きは, 巨大なエネルギーが, 高速の正あるいは負の電荷をもった粒子や電磁波の量子として, 放射性元素の原子から放出されることだった。ところで, 原子がエネルギーを放出することは, 以前から知られていた: 光の放射に際して, また化学反応において, 原子からエネルギーが出てくる。しかし, それらのエネルギーは, 一原子当たり換算すると, いずれも数電子ボルト(eV)を超えなかった。一方, 放射性変換に際して放出されるエネルギーは, 一原子当たり百万電子ボルト(MeV)にも達した。

貯蔵庫か, 墓場か? 原子から放出される粒子の巨大な運動エネルギーは, 原子の中での巨大なポテンシャルエネルギーが原因だ, と考える以外に説明のしようがない。しかしそうだとすると, 原子の中には法外な相互作用が存在することになる。それを取り出して実用に供することが, 問題外であることは明らかだった。

自然界で放射性元素の原子に配分されているこのエネルギーは, 実際的な関心を殆ど引き起こさなかった。そのエネルギーは, 稀に, 少量の特別な元素から放射され, おまけにその放出を制御することは不可能だった。いくつかの医学的応用

は確かにすばらしかったが, それが実的に用いられたすべてだった。しかし, 放射性元素の原子の中に新たに発見されたエネルギーが存在するのであれば, それは他の元素の原子の中にも存在するに違いない。必要なことは, ただそのエネルギーを取り出すこと, いわゆる開放することである。それは可能だろうか?

ここで意見は二つに分れた。一方は, 原子(放射性原子ばかりでなく, すべての原子)はエネルギーの貯蔵庫で, それが放射性原子と同じ性質を持つ場合には, そこからエネルギーを取り出すことができる, と考える。他方は, 原子はエネルギーの墓場で, エネルギーはそこに安全に埋葬されており, そこから開放することは決して出来ない, と確信している。大多数の専門家はこう考えていた。

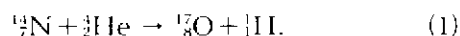
原子がどのような構造を持っているかを, 当時は誰も知らなかったことに注意する必要がある。分かっていたことは, 負の電荷を持った粒子——電子と, 正の電荷を持っていること以外は未知の粒子とが, 原子内に存在していることだけだった。原子の〈構造〉については, 推量だけが頼りだった。明らかなことは, 原子の構造と性質を知らなくては, 原子内エネルギーの論争は決して解決できないことだった。それゆえ, 原子構造の問題は, 長い間物理学の主要な問題であった。

今世紀の最も優れた物理学者たちが, この問題を解くために努力した。上に述べた二つの意見のどちらが正しいのかという問題は, 彼等の意識にはなかった。彼等はただ, 原子がどのような構造を持ち, その中でどのような過程が起こっているか, あるいは起こり得るか, という問題に対する

答えを探し求めた。今我々はその結果を知っているのだが、研究の目的は原子の奥深くに隠されているエネルギーが、どのように得られ、利用され得るかを探求することでもあった。A. S. ブーシェキンの有名な一節を思い出すと、次のように言うことができる；すべての物理学者は、今我々が原子力と呼んでいるエネルギーとの〈出会いに焦がれる囚われ人だった〉。物理学者はその〈焦がれる出会い〉に一步一步近づき、その結果は次のようにまとめられる。

一步一步 放射性現象の発見（および公表）から15年たった1911-1912年の間に、実験家 A. ラザフォードと理論家 N. ボーアによって、原子の構造に関する疑問は解かれた。いわゆる原子の惑星模型が作られた。それによると、原子は正電荷を持った原子核とその周りを取り囲む電子殻とからできている。また、1電子ボルトから数電子ボルトのエネルギーを発生する化学反応は電子殻内で生ずるが、物理学者を驚かせた数百万電子ボルトのエネルギーは、原子核の奥底から生まれる。したがって、普通それは原子（力）エネルギーと呼ばれているが、正確には原子核エネルギーと言うべきなのである。

第一次世界大戦後の1919年に、A. ラザフォードは放射性ポロニウム (^{210}Po) から放射されたアルファ粒子 (^4He) で窒素原子核 (^{14}N) を照射（爆撃）する、注目すべき実験を行った（このとき初めて物理学に戦争用語が用いられた。爆撃と同じ言葉が照射と訳される）。このとき、窒素原子核から高速の粒子が飛出し、それは水素原子核 (^1H) であることが分かった。この核反応は次の式で表される：



他の元素（ホウ素 B、フッ素 F、塩素 Cl、アルミニウム Al など、全体で13種）にアルファ粒子を照射したときにも、同様の反応が起こることが知られた。すべての場合に、照射された元素は水素原子核を放出した。

この実験について、ラザフォードは次のように言ったり、書いたりしている；この実験結果の重要な点は、すべての元素が構成粒子として、ラザフォード自身が1920年に発見し、陽子と名付けた水素原子核を含むことの発見であった。これは確



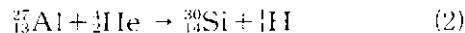
アーネスト・ラザフォード
(1871-1937).



ニルス・ボーア
(1885-1962).

かに真理である。これらの実験については、それが一つの元素の他の元素への最初の人工変換（窒素は酸素に、アルミニウムはケイ素に、など）であると言われ、書かれている。これもまた正しい。しかし我々にとって重要なことは、ラザフォードの実験において、原子から（正確にはその原子核から）エネルギーを取り出すために必要なことが明らかになった。つまりそのためには、原子核の中へ一個かそれ以上の余分の粒子を入れてやる必要があることが分かった。そのような核への〈侵略〉は非常に激烈な反応を引き起こし、核は高速粒子（一個とは限らない）を放出する。放出された粒子の運動エネルギーが、すなわち〈解放〉された核エネルギーなのである。

このように、窒素核にアルファ粒子が侵入すると、窒素核は陽子の放射でそれに応える。アルファ粒子は核からの反発力を受けるので、アルファ粒子が核に衝突するには十分のエネルギーを持つ必要がある。核エネルギーを実用に供しようとするれば、消費されたエネルギー、つまりアルファ粒子のエネルギーと、発生したエネルギー、つまり陽子のエネルギーを比較しなければならない。窒素の場合にこれを比較すると、過剰エネルギーは無く、消費エネルギーは発生エネルギーより大きい。しかし、上に挙げたアルミニウムの反応

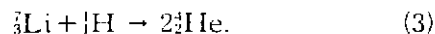


では、事情が反対になる。この場合、発生する陽子のエネルギーはアルファ粒子のエネルギーより 3MeV 多い。つまりこの燃焼反応において、各アルミニウム原子核は炭素原子の約百万倍のエネルギーを生ずる。問題は解決したかに見える。石炭、石油、ガスを燃す代りに、アルミニウムが燃料となる装置を設計し、建設することだけが問題である。おまけに、アルミニウムは地表に炭素の100倍も余計にある。しかし、そのような装置を

創ることは誰にもできなかつた。次のような問題があつた：電子電荷の2倍の量の正電荷をもつアルファ粒子は原子核から強い反発力を受け、ほんの少数が核に侵入できるだけなのだ。その数はたった10万分の1である。したがつて、この過程の効率は0.1%以下となる。このような低い効率に興味を抱く技術者は居ない。

次に考えられた方法は、原子核に照射する粒子として、アルファ粒子の代りに、電荷が半分で、したがつて核からの反発力が小さくなる陽子を使うことだつた。ところが、エネルギーを得るのが〈無料〉だつたアルファ粒子にたいして、陽子には始めに運動エネルギーを与える必要がある。そのためには強力な電場がなければならない。こういう訳で、荷電粒子の加速装置が考えられた。

今から60年ほど前の1932年に、加速器から飛出した陽子が、核を照射するために初めて使われた。ただちに目覚ましい成果が達成された。イギリスのラザフォードの弟子のD. コッククロフトとE. ウォルトン、およびハリコフのA. バリテル、A. レイブンスキー、K. シレニシコフが、リチウムと陽子の核反応を起こさせ、ラザフォードのアルファ粒子の実験に〈対抗〉した。彼等が研究した反応は次の式で表される：

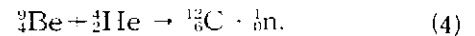


リチウムは2個のアルファ粒子に変換されるが、その際に注目を引いたのは、発生したエネルギーが17.2MeVであることだつた。反応を起こすための陽子のエネルギーは約100keVであつたから、エネルギーの余剰は約17MeVであつた。

それにも拘らず、陽子も核エネルギーの実用化の問題を解決しなかつた。理由はアルファ粒子の場合と同じだつた。陽子も核から反発力を受け、数十万分の1が核に侵入し、反応に寄与するだけだつた。他方で、加速はすべての陽子にたいして行なわれ、ほとんどの陽子はそのエネルギーでリチウムの標的を加熱するだけである。

同じ1932年に、すべての物理学者にとつても、今考えている核エネルギーの問題にとつても重要な、もう一つの発見が行われた。D. チャドウィック(彼もラザフォードの弟子である)は、自分の研究と他の物理学者の実験の解析から、ベリリウムをアルファ粒子で照射したとき、質量が陽子の質量とほぼ同じで、電荷を持たない、未知の粒

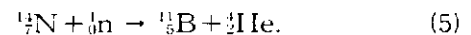
子が発生することを明らかにした。チャドウィックはその粒子を中性子と名付けた。チャドウィックの反応は次の式で表される：



中性子(記号は ${}^1_0\text{n}$)は、原子核の、第二の(陽子の次の)構成要素であることが分かつた。

中性子の発見は、核エネルギーの利用可能性の期待を蘇らせた。中性子は電荷を持たないから核から反発力を受けず、核内に容易に入り込む。実際、中性子を陽子のように加速することは出来ない。しかし、中性子を加速する必要もないことは明らかである。遅い中性子は速い中性子より容易に核に侵入するので、かえつて減速する必要があるくらいである。遅い中性子は核の近くに存在する時間が長く、引力である核力によつて核内に引き込まれる機会が大きいことがその理由である。

中性子は、直ちに原子核研究の〈武器〉として取り上げられた。実際、中性子は陽子やアルファ粒子より有効なことが分かつた。数十万分の1ではなく、たとえば百分の1の中性子が空素核に侵入し、反応を起こす：



このとき放出されるアルファ粒子のエネルギーは、反応を引き起こす中性子のエネルギーより百万倍も大きい。

これで核エネルギーを取り出すことが出来ると思われた。しかし、問題はそう簡単に解決しないことが分かつた。陽子と違って、原子核の外で中性子が自由な状態で存在することはない。中性子は放射性粒子である。それは半減期約15分でベータ粒子(電子)を放出して陽子に変換する。つまり、核を射撃するために中性子を使うには、その〈使用〉の直前に核から取り出さなくてはならない。それには、例えばアルファ粒子をベリリウムに照射したときの反応を利用すればよい。しかし上に見たように、それらの反応は効率が低く、中性子が少ししか得られないので、この方法で技術的に、エネルギー効率の良い装置を作ることは問題外である。この逆説的な状況は、次のように言える：豊富にある粒子(アルファ粒子や陽子)は多量のエネルギーを得るには適していない。エネルギーを得るのに適した粒子(中性子)は天然には存在せず、それを多量に得ることは出来ない。このような事情は、原子核がエネルギーの貯

蔵庫ではなく墓場だと考えた人が正しいように思われた。

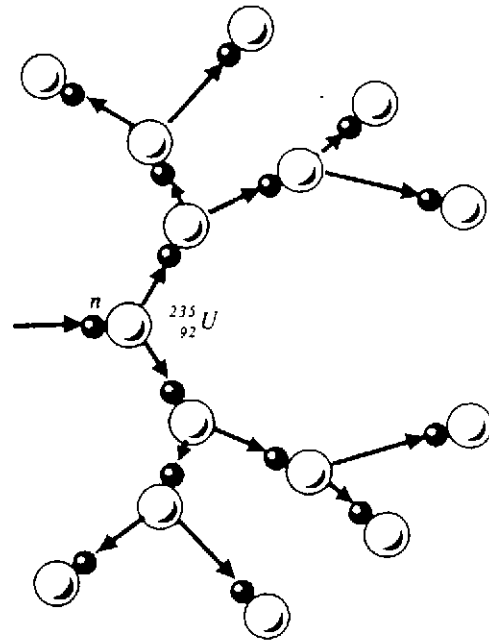
1938年に、O. ハーンと F. シュトラスマンは重要な発見をし、1939年に L. マイトナーがそれを理解し、説明した。それは次のようなことである：中性子をウラン核に照射したとき、ウランは他の原子核の反応とは全く異なる反応をする。つまり、数百万電子ボルトのエネルギーを持った1-2個の粒子を放出するのではなく、中性子を吸収したウランはそれぞれ80MeVのエネルギーを持つ二つの分裂片(核)に分裂する。そのときウラン核の分裂片はベータ放射性を示し、分裂片のほぼ160MeVのエネルギーに加えて、ベータ粒子とそれに伴うガンマ線のエネルギー約40MeVが生ずる。したがって核分裂を起こしたウランの原子核一個当たり200MeVのエネルギーが生ずる。これは核過程のレベルから見ても驚くべき量である。この爆発を引き起こす中性子は非常に遅く、ほとんどエネルギーを持たないののである。

この注目すべき現象自体は、核エネルギーを利用する問題の解決の役に立たなかった、というのは、以前からの問題である中性子をどこで調達するかが未解決だったからである。自然がしかしながら、この問題に回答を与えた。同じ1939年に多くの研究者(その中にはF. ジョリオ-キュリーもいた)が、ウラン原子核の分裂片は過剰な中性子を含んでおり、分裂毎に2-3個の中性子を放出することを明らかにした。そのうちの何個かは分裂の瞬間に放出されるが、何個かは少し遅れて放出される(遅延中性子と呼ばれる)。すると、よく言われるように、分裂中性子が他の核の分裂を引き起こすことになる。

このようにして、ウラン核の分裂に際しては、待望の核エネルギーだけでなく、多量に得ることが難しかった待望の中性子までが得られることが分かった。いわゆる連鎖反応を起こすには、ウラン試料中の核の一つが1個の中性子を放出し、それが次の核分



フレデリック・ジョリオ-キュリー (1900-1958).

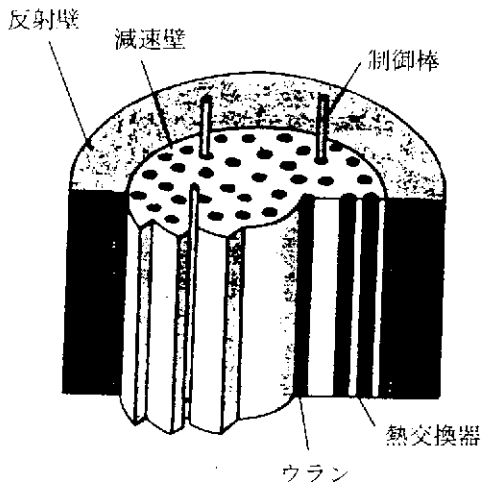


重い核の連鎖分裂反応

裂を引き起こせば十分である。そして実際には、最初の核が2個の分裂片に分れ、2個(または3個!)の中性子が生ずる。中性子は速やかに他の2個の核に吸収されてそれを分裂させ、4個の中性子が生ずる。それが4個の核に吸収されて8個の中性子を生ずる。8個の中性子を吸収した核は16個の中性子を生ずる。雪崩のように(しかし比較を絶した速さで)分裂片と中性子の数は増加する。確かに中性子の一部は連鎖反応の過程で失われる。ある中性子は次の核に出会う前にウラン試料から飛出してしまい、他の中性子は核に侵入しても分裂を起こさない、などなど。しかし、多かれ少なかれ連鎖反応は起こり、それは爆発的な性質をもつ。ウランの一片は灼熱の球になる。

しかし、自然は物理学者にもう一つの思いがけぬプレゼント、障害のプレゼントを取っておいだ。上に説明した、巨大なエネルギーを持つウランの分裂片と分裂中性子という連鎖反応の確かな可能性は、いわゆるウランの軽い同位核²³⁵Uだけに当てはまる。しかし天然ウランにはこの同位核はたったの0.7%しか含まれていない。重い同位核²³⁸Uは中性子を吸収して、中性子を過程から取りのけることによって、連鎖反応の流れを攪乱させるだけである。同位元素を分離する、つまり天然ウランから軽い同位元素を取り出すという困難な問題が、物理学者に課せられた。

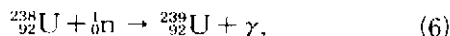
ここで、天然ウランを使っても連鎖反応を起こすことが可能なことが明らかになった。その方法



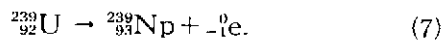
原子炉の中心部(概念図)

は、ウラン-235 の分裂中性子がウラン-238 には吸収されないように工夫することだった。それは、高速で生まれた分裂中性子を、遅い中性子にすることで可能となった。E. フェルミは、ウランと黒鉛を組合わせた特別な装置を設計し、建設することでそれを実現した。黒鉛は、中性子を減速するだけで吸収しないという特性を持つ。約50年前の1942年12月2日に、フェルミはシカゴにおいて、核反応炉と呼ばれるようになった装置(当時はコトルと呼ばれた)を使って、歴史上初めて連鎖反応を実現した。それは偉大な成功だった：制御核分裂反応を実現する方法が発見されたのだ。当時の厳しい報道管制の条件下で、このニュースは次のような電信となって伝えられた：〈イタリアの航海士が新世界に到達し、原住民と友情溢れる出会いをした〉(1942年はコロンブスがアメリカを発見したときから450年目であり、彼はフェルミと同じくイタリア人だった)。フェルミの成果はロシアでも I. V. クルチャトフによって、1946年の同じく12月に再現された。

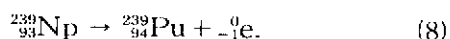
興味深いことに、原子炉の中にある、ウランの重い同位元素は、連鎖反応の単なる邪魔物ではない。一定のエネルギーの中性子が ^{235}U 核と衝突すると、ガンマ線 γ を放射してそれを同位核 ^{236}U に変換する：



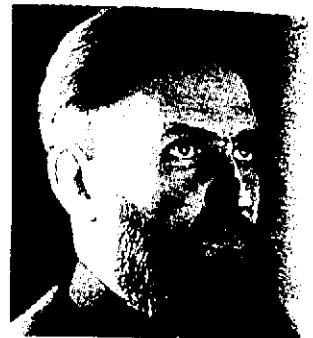
ウランの新しい同位核は放射性で、ベータ粒子を放射してネプツニウム元素の核に変換する：



このネプツニウムもまた放射性で、プルトニウムに変換する：

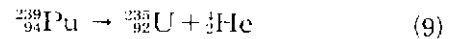


エンリコ・フェルミ (1901-1954)



イーゴリ V. クルチャトフ (1903-1960)

しかも、ウランからプルトニウムへの変換は迅速に進む： ^{235}U と ^{239}Np の半減期は小さく、それぞれ23分と2.3日である。プルトニウムの同位核は、アルファ粒子を放射して ^{235}U に変換する：



この発見は幸運であるように見える：有害な重いウランが、連鎖反応に必要な軽いウランに変換するのである。しかし、この放射性プルトニウムの半減期は約24000年であり、この変換を利用することは待ち切れない。しかし、待つ必要はないことが分かった： ^{239}Pu は ^{235}U とよく似た性質を持っていて、連鎖反応を起こすのに用いられる。原子炉は、エネルギーの源であるだけでなく、核燃料(と分裂生成物)の源でもある。

純粋な ^{235}U を分離する研究も年々進んだ。物理学者は大戦までに、同位元素を分離することに成功していた。しかし、実験室レベルで開発された方法では、純粋な同位元素を百万分の1グラムの程度しか得られなかった。科学的研究にはそれで十分だったが、連鎖反応の実現には1キロから10キログラムの軽い同位元素が必要だった。つまり、〈生産〉を10億倍に高める必要があった。2万人の労働者、技術者および専門家——物理学者や化学者——がこの問題に取り組んだ。1945年に、必要な量のウランが集められ、核エネルギーはその爆発的な方式で解放され——核兵器が出現し、それはアメリカ人によって日本のヒロシマとナガサキの空襲に用いられた。ロシアでも、ウランの同位元素を分離する問題は同様に解決され、最初の原子爆弾の実験が1949年になされた。

原子核はエネルギーの貯蔵庫か、墓場かという問題は、このように解決された。原子核は間違い無くエネルギーの貯蔵庫であるが、それには非常に堅固な鍵が掛かっている。しかし、この鍵には合い鍵がある。それが中性子である。

何が良くて、何が悪いのか？ この小文では、原子物理学と原子核物理学の発展を、核エネルギーを取り出し、利用するという問題の解答を探求する物語として描いてきた。実際には、第二次世界大戦まで物理学者自身がこのような問題を意識したことはなかった。かれらは、自然の探求者として、原子を研究し、それから原子核を研究したが、それはどのような法則がそこで成り立っており、どのような現象がそこで起こっているかを知るためであった。それらの法則と現象は、核エネルギーの解放と利用の可能性を明らかにし、それが間もなく人々の生活に、国の政策に、強権的に入り込んで来たのである。すでにそのエネルギーは非常に大量に用いられている！

自然法則や科学的な発見について、それが良いか悪いかと語ったり、論争したりすることは意味がない。しかし核エネルギーについては、すでに半世紀にわたって、この種の論争が続けられている。例えば、核兵器は大量殺戮の兵器であり、それは人類の文化と人類自体の滅亡を孕んでいると言われる。それは真実であり、核兵器は確かに悪である。

しかしながら一方で、核兵器が第三次世界大戦を予防する役割を担っていることも忘れてはならない。確かに、いま世界は、戦争の武器としての核兵器を禁止する方向へ向かって進んでいる。だが、核爆弾を平和的に、有用な目的に用いることも可能であろう。例えば、地下核爆発を深い地層の石油を採掘するのに利用できるかも知れない。世界大戦の予防、核爆発の平和利用は、明らかに「良い」と評価される。

核分裂反応炉は、原子力発電所で(原子力という呼び名は不適切だが)エネルギーを得るために使われており、この50年間に広く利用されてきた。多くの国で消費される全エネルギーの20-40%を供給しており、フランスでは70%にも達する(ロシアでは約10%である)。原子力発電所は煙を出さず、大気を汚染しない。それは石炭、石油、天然ガスなどの、貴重な化学原料を保護する。燃料としてのそれらの地下資源は枯渇する危険があり、早かれ遅かれ無くなってしまふ。核エネルギーの導入は現代の人類にとって最適に行われ、これは良かったことだろう。

しかし、原子力発電所の稼働は、人類にとって

新時代のコンピュータ総合誌

隔月刊

Computer Today

5月号・特集 偶数月18日発売/定価930円

インターネット情報発信技術総覧

Java/OpenDocとCyberdog/インターネットを賑わす情報発信技術/Netscape Navigator2.0とHTML/Netscape Communication Serverのインストール

連載 或る文明の終曲

月刊誌

数理科学

6月号・特集

毎月20日発売/定価980円

複雑系——生成と崩壊のダイナミクス

生成-崩壊のダイナミクス	金子 邦彦
脳における生成と崩壊のダイナミクス	津田 一郎
自発的な状態間遷移	池田 研介
進化における生成と崩壊のダイナミクス	池上 高志
大自由度分子系のゆらぎ、構造、進化	笹井 理生
均衡の経済学から生成と崩壊のダイナミクスへ	安富 歩
Population dynamicsで見られる無限個の	茶碗谷 毅
アトラクタの共存	志田 典弘
分子クラスターにおける生成と崩壊のダイナミクス	木本 昌秀・伊藤 久徳
気象におけるパターン生成・崩壊のダイナミクス	

別冊・数理科学

B5・定価1900円

次元

- | | |
|--------------|----------------|
| ◎ I. 次元とは何か | ◎ IV. 相対論と次元 |
| ◎ II. 幾何学と次元 | ◎ V. ミクロの世界の次元 |
| ◎ III. 曲面と次元 | ◎ VI. 絵画と次元 |

〈数理科学・臨時別冊〉

B5・予価1900円

数理科学における逆問題

C.W.グロエッチュ著、金子・山本・滝口共訳
第1章・入門/第2章・第一種の積分方程式によりモデル化される逆問題/第3章・微分方程式に於けるパラメータの評価/第4章・逆問題の数学的背景/第5章・逆問題の幾つかの方法/第6章・逆問題の注釈付きの参考文献

サイエンス社

〒151 東京都渋谷区千駄ヶ谷1-3-25 ☎(03) 5474-8500
インターネットホームページ
<http://www.bekkoame.or.jp/saiensu>

新しい公害である放射能と結びついている。分裂片は強い放射能を持っているからである。その危険の深刻さは、チェルノブイリの事故で明らかになった。確かに、これは良いとは言えない。核エネルギーの利用の可能性を開いた物理学者は、全く危険なしに研究をしてきた訳ではない。何よりも必要なことは、原子力発電所の制御室に、良く訓練された、誠実な人々を配置することである。

もう一つの記念日 核エネルギーを利用するもう一つの可能性が40年前に開かれた。1952年に太平洋のビキニ環礁で、アメリカ人は熱核爆弾、すなわち水素爆弾の最初の爆発実験を行った。その後まもなく、ロシアでも同じ実験が行われた。核エネルギーを得るこの方法は、上に述べたウラン-プルトニウム法とは、多くの点で正反対である。ウラン型の場合、反応の〈張本人〉は中性子であるが、最終的な〈産物〉は高温である。熱核法では反対に、すべては非常な高温の発生に始まり、中性子は反応の産物の一つである。ウラン法における〈主役〉は、メンデレーフの周期表の終わりの元素の原子核であるが、熱核法ではその最初の元素の原子核である。

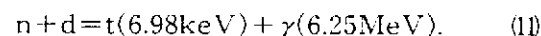
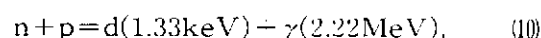
もう一つの違いがある。上に説明したように、ウラン核反応炉が最初に作られて、3年後に核爆弾(原子爆弾)が作られた。熱核融合の場合には水素爆弾は40年前に作られたが、制御核融合炉は多くの国の物理学者の努力にも拘らず、今までのところ成功していない。しかし、熱核エネルギーが21世紀あるいはその次の世紀のエネルギーであることは疑いない。この小文の読者で物理学に進む若い諸君の中から、熱核融合炉を研究し、作り上げる人が出ることを期待したい。確実なことは、21世紀にはすべての読者が熱核エネルギーの恩恵を受けているだろうことである。

常温核融合の7年——訳者の補注

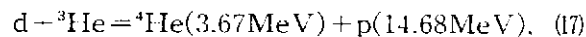
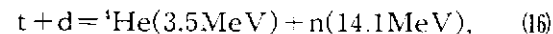
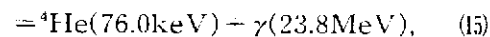
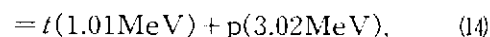
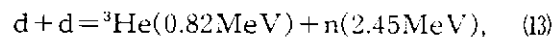
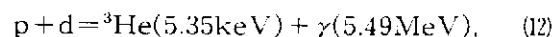
1989年に、当時アメリカ在住のイギリス人フライシュマン達は、パラジウムに多量の重水素 ${}^3\text{H}$ を吸蔵させたとき、莫大な熱(過剰熱)が発生することを発見した。それ以来、多くの系で常温核融合が起ることが確かめられた。反応粒子としては、重水素のみならず軽水素 ${}^1\text{H}$ が有効である。母体としては、パラジウムのほかに、チタン、ニッケルなどの金属、 SrCeO_3 などのセラミックス、 LaNi_5 などの化合物等々、水素同位体を多量

に吸蔵する金属や合金や化合物、および組成に水素を含む化合物がある。電気分解では、Li, Kなどのアルカリ金属が電解質として用いられる。生成物は、過剰熱、中性子、トリチウム、ガンマ線、ヘリウムなどが単独に、あるいは同時に観測される。これは明らかに、これらの重水素や軽水素を含んだ固体中で、核融合反応が起こっていることを示している。高温での核融合反応である熱核融合にたいして、これらの現象は常温核融合と呼ばれる。

宇宙線によって大気上層で作られた中性子 n は、大気中でエネルギーを失って地表に達するので、地表には熱エネルギー程度のエネルギーを持った環境中性子が多量に存在する。常温核融合を説明する一つの考え方では、この低エネルギーの環境中性子が固体中で重要な役割を演じている。つまり、これらの固体中で、低エネルギー中性子が重水素核や軽水素核、アルカリ原子核と融合して高エネルギーの核反応生成粒子が生じる：



条件に恵まれたときには、ここで生じた高エネルギーの重水素核(重陽子) d や三重水素核(三重陽子) t が、連鎖反应的に次の核融合反応を起こすと考えられる：



これらの反応で生じたガンマ線や粒子は、固体中でエネルギーを失うとそのエネルギーは過剰熱として観測される。

このような考え方で、不可解と思われていた常温核融合現象が説明できそうなことが分かってきた。常温核融合の全体像は依然明らかになっていないが、ここでも中性子が重要な役割を演じている可能性が高い。もし、常温核融合の物理が明らかになり、融合炉の建設が実現すれば、原料は無尽蔵にあるので、エネルギーの供給問題は解決される。残るのは使用の社会的制御の問題だけとなるだろう。常温核融合は21世紀の科学である。

(訳 こじま ひでお)