

原子核構造論から見た高速増殖炉

松崎昌之

1 原子核という階層

我々が認識する最大の空間スケールは宇宙の広がり — 約 10^{28} cm — である。宇宙には種々のスケールの構造があるが、その中の直径約 10^9 cmの惑星、地球に我々人間は住んでいる。人間を含め全てのものは 10^{-8} – 10^{-7} cmの大きさの原子からできている。原子の内部ではそれより5桁小さい 10^{-13} – 10^{-12} cmの原子核がほぼ全ての質量を担い、その周りに電氣的な力(今後電磁相互作用と呼ぶ)で束縛された軽量の電子が存在している。

原子核は、陽子と中性子(核子と総称する)が、(湯川秀樹によってその存在を予言された)パイ中間子を交換することによって作用する「核力」という力で結びつくことによってできている。核子を更にズームアップしてみると、クォークという基本粒子がグルーオンという粒子によって媒介される強い相互作用と呼ばれる基本的な力によって結びついていることがわかり、この視点からは核力は電氣的に中性な原子のあいだにはたらく van der Waals 力に類似のものと考えられるが、ここでは核子が基本粒子となるような分解能で物理現象を見る。

元素の周期表には、通常、原子番号=陽子数 (Z) が1のH (水素)から、109のMt (マイトネリウム)までの元素がその原子量と共に載せられている。(その後1999年までに $Z=110, 111, 112, 114, 116, 118$ の元素が人工的に作られた。)この原子量の値は自然界に存在する各元素の質量数 (A) = 陽子数 (Z) + 中性子数 (N) の、同位体比を重みとした平均値なのであるが、元素という概念は明らかに陽子と中性子を非対称に扱っている。これはもちろん物性物理学や化学といった電磁相互作用が主役をなす階層の科学では電子数=陽子数が本質的であることに由来する。¹しかし、強い相互作用が電磁相互作用を凌駕する原子核の世界では、中性子数の違いは陽子数の違いと同じ重要性を持つので、元素の周期表を Z, N の2変数による核図表に拡張して考えなければならない。

それでは Z, N で指定される原子核は何種類存在するのだろうか。原子核の中には安定に存在するものと、時間がたつと放射線を出して崩壊してしまうものがある(次章「電磁波と放射線」参照)。安定な原子核は約270種、不安定な原子核は約5000種存在すると予想されている。不安定核ビームと呼ばれる実験技術の進歩により、どんどん新しいものの存在が確認されてきているが、理論的には存在が予想されていても実験的には未確認のものが約3000種あると考えられている。Rutherfordの有核原子模型によって原子核の存在が確認されて約85年の月日がたつが、まだまだ未発見の原子核がたくさん存在するのである。原子核内の核子は、原子内の電子にとっての原子核のような中心を持たずに民主的に運動しているにもかかわらず、原子核の性質は陽子数、中性子数双方に関して原子の場合と同様に周期的に変化する。これが原子核の殻構造であり、原子核の安定性を決め、ひいてはビッグバン直後やその後の宇宙でどのように元素が合成されたかを決定するのである。

¹量子力学の世界では角運動量などの物理量とはびとびの値のみ許されるようになり、Fermi粒子と呼ばれる電子や核子は、その(スピン、及び原子内の電子の場合には原子核を中心として軌道運動する際の)角運動量で指定される一つの粒子状態には1個しか入れない。その結果、元素の性質は電子数に伴って周期的に変化する(殻構造)。例えば、He, Ne, Ar, ...は不活性など。それを表にしたのが周期表である。

2 原子核物理学から原子炉へ

2.1 核分裂・核融合

前節では原子核の殻構造という量子力学的な側面について述べたが、原子核の安定性を議論する際には、原子核を(帯電した)液滴と見なすことによって古典物理学の概念で理解できる側面もある。本節ではその視点で核分裂現象を見てみる。原子核の分裂または融合によってエネルギーが放出される機構を理解するためのキーワードは、Einsteinの関係式“ $E=Mc^2$ ”と“自然は低きを好む”である。核力は(核子同士が非常に接近した場合を除いて)引力であるから、 Z 個の陽子(1個の質量 M_p)と N 個の中性子(M_n)が互いに離れて存在するよりも結合したほうがエネルギーが低くなる、すなわち安定になる。このことは次の式で表される。

$$B \equiv (ZM_p + NM_n - M(Z,N))c^2 > 0.$$

ここで $M(Z,N)$ は原子核の質量、 c は光速、結合していないときといるときのエネルギー差 B を質量欠損または結合エネルギーと呼ぶ。質量の違ういろいろな原子核の相対的な安定度は、核子1個当りの結合エネルギー B/A が大きい原子核ほど安定である、と表現できる。図1より、 ^{56}Fe より重い核は分裂した方が、軽い核は融合した方が安定で、余ったエネルギーが放出されることがわかる。原子力発電や原子爆弾は核分裂、一方恒星や水素爆弾は核融合によってエネルギーを放出する。

では、あらゆる原子核は放置しておけば分裂または融合して ^{56}Fe になってしまうのかというところではない。球形に近い基底状態にある原子核を分裂させるには、図2の矢印のように少しエネルギーを与えて変形させ、ポテンシャルの山を越えさせる必要がある。このエネルギーは化学反応での活性化エネルギーにあたるものである。一旦山を越えれば、分裂することによって莫大なエネルギーを放出する。

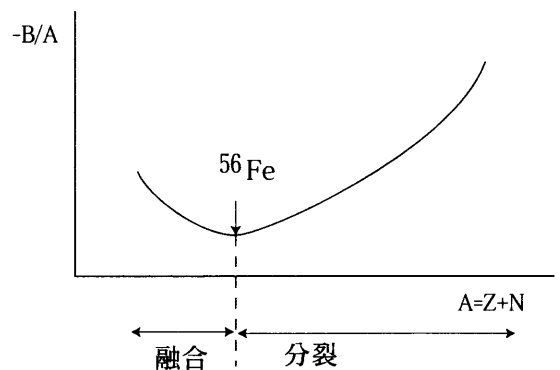


図1 核子1個当りの結合エネルギー曲線の概念図。

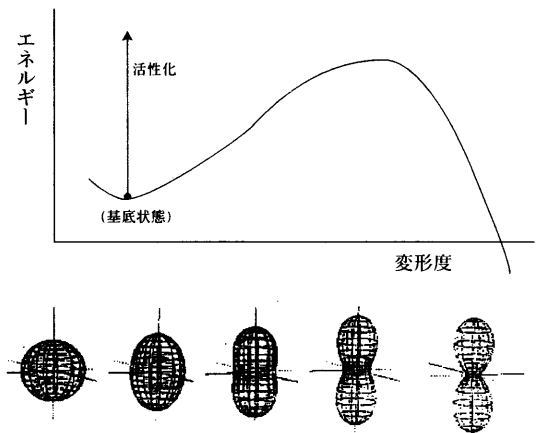
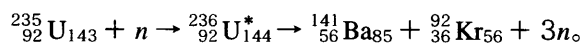


図2 核分裂に対するポテンシャル・エネルギー曲線の概念図。
(荒金玲子, 福岡教育大学1993年度卒業論文より修正して転載。)

2.2 連鎖反応

上で述べた活性化エネルギーを与えるには、原子核に中性子を吸収させる。例えば



すなわち “ ^{235}U (ウラン) が燃える” というのは、中性子を1個吸収して活性化した ^{236}U (親核) が核分裂することを意味するのである。反応後の原子核 (娘核) は大きな運動エネルギーを持っているので、これらが物質 (冷却剤: 通常の軽水炉の場合は水) に衝突して熱を発生するのである。

持続的にエネルギーを取り出すためには、核分裂反応が続けて起こらなければならない。そのためには反応後に放出される(上の例では3個の)余剰中性子を活用する必要がある。最初の反応で生じた中性子を(減速して吸収させやすくした上で)次の ^{235}U に吸収させるのである。この連鎖反応は ^{235}U “燃料” が十分な量(臨界量)あれば続く。この連鎖反応を人間の制御のもとに行わせるのが原子炉であり、濃縮 ^{235}U を用いて爆発的に行わせるのが原子爆弾である。

2.3 ^{235}U と ^{238}U

天然のウランは “燃える” ^{235}U が0.72%、 “燃えない” ^{238}U が99%以上という同位体比を持つ。この “燃える”、 “燃えない” の違いはどこから来るのだろうか。上述の “燃える” とは詳しくは、運動エネルギー ~ 0 の遅い中性子(熱中性子)を吸収して核分裂することであり、熱中性子を吸収することによって得るエネルギー B_n とポテンシャルの山の高さ E_f との関係が図3のようになっているため、 ^{238}U は燃えないのである。

B_n や E_f の同位体による違いを理解するには原子核構造論の詳しい知識が必要になるが、 “燃える”、 “燃えない” を分けている B_n の約2割の差は、2つずつ対になると安定になるという対相互作用が中性子間にはたらくことによる。この相互作用は、金属の超伝導の原因となる相互作用と同じ性質のものである。(第1章「超伝導と極低温の世界」参照。)

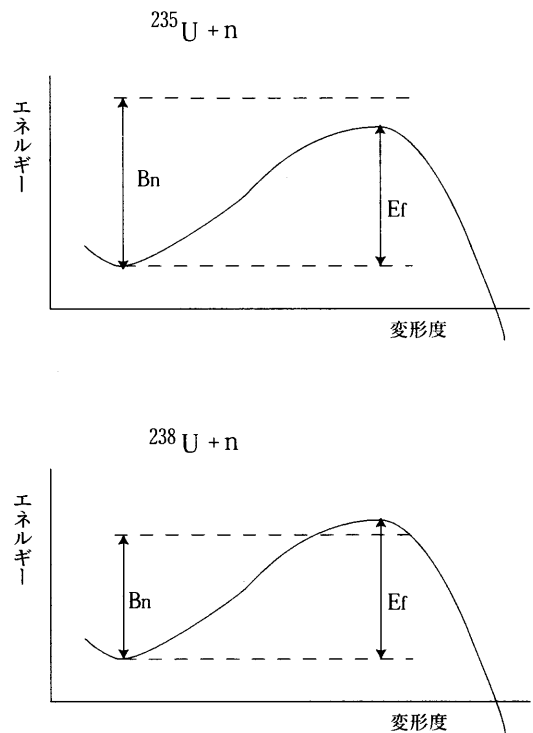
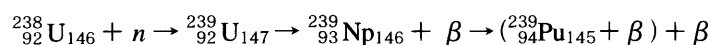


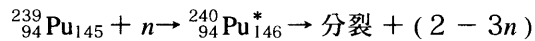
図3 “燃える” ^{235}U と “燃えない” ^{238}U のエネルギー曲線の違いの概念図。

2.4 高速増殖炉

“燃えない” ^{238}U を “燃える” ^{239}Pu に変換して原子燃料を生成するための原子炉が高速増殖炉である。 ^{235}U が燃えた後の余剰中性子を燃えない ^{238}U が吸収すると



という2段階のベータ崩壊が起こる。生成物の ^{239}Pu (プルトニウム) は $B_n > E_f$ の “燃える” 原子核である。そこで ^{239}Pu と ^{238}U の混合物に中性子を照射すると



という反応が起こる。最右辺の生成中性子は

- 高速のまま次のサイクルに
- ${}^{238}\text{U}$ に当てて ${}^{239}\text{Pu}$ を生成

に利用される。 ${}^{239}\text{Pu}$ の生成量が使用量より多い場合を“増殖”という。 ${}^{235}\text{U}$ の埋蔵量には限界があることから高速増殖炉は「夢の原子炉」とも言われてきたが、1) ${}^{235}\text{U}$ の埋蔵量は当初予測よりも多いことがわかって建設・保守コストの高い高速増殖炉は経済的に引き合わなくなったこと、2) 冷却剤に水の代わりにナトリウム(空気に触れると発火する)を使わなければならないことによる危険性(例、1995年のもんじゅでのナトリウム漏れ事故)、3) ${}^{239}\text{Pu}$ には軍事転用のおそれがあること、等の理由からヨーロッパ諸国は既に高速増殖炉から撤退しており、現在では日本のみがかたきりしない態度を取り続けている。なお、3) に関しては反応率を調整することによりプルトニウムを増殖せずに消費することも可能(その意味で高速増殖炉とは言わずに高速炉と言うことが多くなっている)であるが、本来の開発目的からははずれる。また、余剰 ${}^{239}\text{Pu}$ を消費するための方法として、MOXというウランとの混合燃料の形で通常の軽水炉で燃やすプルサーマルという方法も近年は検討されている。

3 終わりに

以上で見てきたように、原子炉内で起こる核反応の素過程は十分理解されており、それを如何に安全に制御するかが工学・技術の問題である。それに関する議論は著者の守備範囲を越えるものであるのでここでは立ち入らない。最近も原子力産業で残念な事故が起こり、原子力自体に対する種々の議論が活発化している。どのような立場に立つにせよ、感情あるいは政治に流されることなく、科学的な態度で考察を行うことが最も重要であろう。

参考文献

- [1] 八木浩輔, “原子核物理学” (朝倉書店)
- [2] 飯田博美, 安斉育郎, “放射線のやさしい知識” (オーム社)
- [3] 鈴木穎二, “核エネルギーの世界” (東京電気大学出版局)
- [4] 原子力資料情報室, “原子力市民年鑑99” (七つ森書館)