

原子力の**本質**を探る

—第8回—

核反応エネルギー

NPO法人

ニュークリア・サロン

出澤 正人

桁違いに大きい核反応

持続可能な文明を支えるエネルギー源を核反応に移行せざるを得ない本質的な理由は、核反応エネルギーが化学反応エネルギーに比べて桁違い（六～八桁）に大きいからに他ならない。この相違が資源、環境に及ぼす便益を齎すと同時に、潜在的危険性の増加を伴うことになり、顕在化させない安全性を最高位において実用化を進めなければならない理由である。今回は、核反応エネルギーの巨大さを再確認する。

原子核はZ個の陽子とN個の中性子とから構成され、現在までに存在が確認されている原子核の数は約三〇〇〇である（図―1）。各々の原子核は核子（陽子と中性子）の数で指定される。原子核が単に陽子と中性子の集まりであるならば、その質量Mは陽子の質量のZ倍と中性子の質量のN倍の和となる。しかし、原子核は単に陽子と中性子が集まっただけではなく、それらが相互作用で強く結合している。一般に、二つ以上の粒子が相互作用して結合すると、全体の質量は元の核子の質量の合計より軽くなり、結合が強ければ強いほど質量は軽くなる。この質量の減少を質量欠損と呼ぶ。

アインシュタインの特殊相対性理論によって、質量はエネルギーと同等であり、この同等性は、良く知られた公式 $E=mc^2$ で表される。つまり、質量Mをエネルギーに換算するとEとなることを意味し、光速cの二乗が掛っているので小さな質量でも大きなエネルギーとなる。原子核内の複数の陽子と中性子が相互作用して結合すると質量欠損が生じ、質量欠損をエネルギーに換算したものが結合エネルギーである。原子核の結合エネルギーは核子の結合の強さの度合いを表し、その値は原子核の質量Mを質量分析器などによって精密に測定することで得られる。

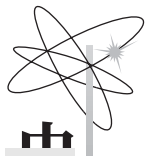
一核子あたりの結合エネルギーを測定したものを図―2に示すが、この図から分かるように、質量数が小さい原子核においては値にばらつきがあるが、質量数が二〇を超えると一核子あたりの結合エネルギーは大体一定で、約八^{メガ}電子^{ボルト}（MeV）となっている。次に、核反応エネルギーを具体的に数値で示してみよう。

水素が酸素と化合（燃焼）して水になる化学反応で発熱するが、一モルの水素が燃えると二八六^{キロ}ジュールの熱エネルギーが出る。炭素と酸素の化学反応では二酸化炭素となり、一モルあたり三九四^{キロ}ジュールの熱

が出る。一分子当たりの発熱量はアボガドロ定数で割り、水の分子一個当たり三・〇^{電子ボルト}、二酸化炭素の分子一個当たり四・一^{電子ボルト}のエネルギーが放出される。電子ボルトはエネルギーの単位で、電気素量eの電荷を持つ電子が一^{ボルト}の電位差の間で加速されて得る運動エネルギーの大きさである。

核融合しエネルギーを放出

これに対して、重水素の原子核（陽子と中性子が結合したもの）は重陽子とも呼ばれるが、二個の重陽子は核融合してエネルギーを放出する。二個の重陽子の融合の場合、重陽子の結合エネルギーの実験値は約二・二二四^{メガ}電子^{ボルト}であり融合する前二個の重陽子の結合エネルギーの合計は約四・四四九^{メガ}電子^{ボルト}である。一方、融合してできるヘリウム³の結合エネルギーの実験値は約七・七一^{メガ}電子^{ボルト}である。従って、融合した後の結合エネルギーの方が、融合する前の結合エネルギーの合計より7.719-4.449=3.27（MeV）だけ増加する。言い換えると、融合後には、生成された物質の質量の合計が、この結合エネルギーの増加分だけ減り、アインシュタインの質量とエネルギーの同等性にしたがって、その質量の



減少分がエネルギーとなり放出される。またウラン²³⁵は中性子を当てることで二つの原子核に分裂し、同時に二〜三個の中性子とエネルギーを放出する。ウラン²³⁵の分裂する前と分裂後の結合エネルギーの変化を見ると二四〇のあたりの原子核の一核子あたりの結合エネルギーは約七・五^{メガ電子ボルト}である。一方、その半分の質量の一二〇のあたりの原子核の一核子あたりの結合エネルギーは約八・五^{メガ電子ボルト}である。従って、ウランの原子核が二つに分裂すると、一核子あたりの結合エネルギーは約一^{メガ電子ボルト}増加し、その増加分だけ核分裂生成物の全体の質量が減り、減少した質量

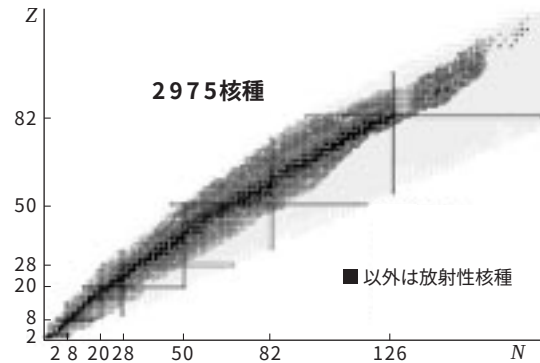


図-1 核図表

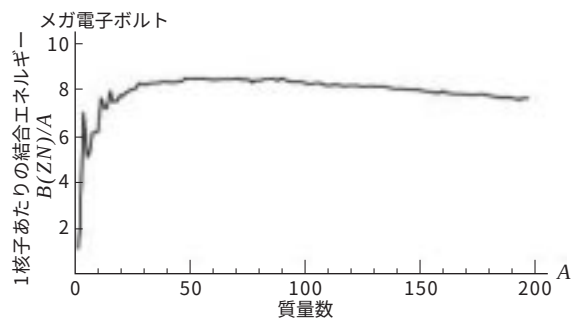


図-2 結合エネルギー

はエネルギーとなって放出される。一核子あたり約一^{メガ電子ボルト}のエネルギーが出るので合計すると約二〇〇^{メガ電子ボルト}以上となる。以上のように、通常の化学反応における燃焼では、一分子あたりの発熱は三〜四^{メガ電子ボルト}であるが、二個の重陽子が核融合すると三・二七^{メガ電子ボルト}であり、化学反応の約一〇〇万倍、また、一個の重いウラン²³⁵が核分裂すると約二〇〇^{メガ電子ボルト}以上のエネルギーが出るので化学反応の約一億倍にもなる。

期待される他分野での利用

このように、核反応エネルギーは、化学反応エネルギーの数一〇〇万倍〜数億倍にもなる。一回の核分裂で放出されるエネルギー約二〇〇^{メガ電子ボルト}は次のように配分される。核分裂片の運動エネルギー一六七^{メガ電子ボルト}、中性子の運動エネルギー五^{メガ電子ボルト}、ガンマ線五^{メガ電子ボルト}、核分裂生成物からの放射線一〇^{メガ電子ボルト}、中性微子一〇^{メガ電子ボルト}である。このうち、中性微子以外の大部分は原子炉内で最終的には熱の形に転換する。この熱は冷却材によって取り出され、軽水炉では、水を加熱し蒸気に変えて、火力発電と同じ仕組みで発電する。高速炉では、ナトリウムのような液体金属を冷却材とし、水と熱交換し水蒸気とする。

取り出す熱は、冷却材、構造材の

制約で使用温度が左右されるが、火力発電はこの半世紀の間に耐高温材料の開発を進め、効率は三四%から六〇%まで高めている。核反応エネルギーは利用する温度によって水素製造、製鋼、化学反応などへの利用も

期待される。核反応エネルギーの巨大大きさを、火力発電と原子力発電の必要とする燃料消費量の差で見てもよい。

一回の核分裂につき利用可能なエネルギーは約一九〇^{メガ電子ボルト}である。 $1\text{MeV} = 4.45 \times 10^{-20} \text{kWh}$ (キロワット時)であり、ウラン²³⁵一グラム中には $(6.02 \times 10^{23}) \cdot 235 = 2.56 \times 10^{25}$ 個の原子があるからウラン²³⁵一グラムが全部核分裂すれば $4.45 \times 10^{-20} \times 190 \times 2.56 \times 10^{25} = 2.16 \times 10^4 \text{kWh}$ となり、これが二四時間に行われるとして九〇〇キロワットの出力となる。原子力発電の熱効率はほぼ三三%であるから一〇〇万キロワットの電気出力では三三〇万キロワットの熱出力を必要とし、これにはウラン²³⁵約三・七^{キログラム}／日の消費となり、年間稼働率を八〇%とすれば、一・〇七^{トン}／年の消費となる。軽水炉では濃縮度約五%のウランであるので、年間二一^{トン}となる。

同規模の火力発電所では、石炭火力では石炭三六^{万トン}、石油火力とLNG火力ではそれぞれ石油一三八^{万キロリットル} (一三〇^{万トン})、天然ガス九七^{万トン}が必要となり、二酸化炭素はそれぞれ、六八三^{万トン}、五三三^{万トン}、四二五^{万トン}発生する。地球温暖化対策として核反応エネルギーへの転換が、必要な資源量と廃棄物の発生量の観点から如何に有効であるかが分かる。