

—連載講座—

やさしい科学
核融合と核分裂 (IV)

野口 駿 雄

前号で核融合反応について、地球の自然界では起こらない反応であることを述べたが、地球の自然界に存在する全ての原子は、恒星の中心部の高温、高圧（高密度）下で起こる水素原子核の融合反応に始まり、内部では最も安定した鉄の融合反応で最後となる。しかし、恒星の終焉である超新星爆発時の膨大なエネルギーによって、更に核融合反応が起こり、重い数々の原子核（原子）が誕生した。

宇宙が誕生した直後は、光速に近い速度で飛び回る素粒子が存在し、これらには質量が無かった。しかし、直ぐに、自由に飛びまわっていた素粒子は、突然鳥もちで捕らえられたようにまとわりつかれ、非常に動き難くなった。この動き難さが質量ということであり、鳥もちの役目をしたのがヒッグス粒子である。宇宙は、次第に温度を下げ、やがて動き難くなった素粒子は衝突して結合し、陽子や中性子を形成。更にこれらは原子や分子を作り、最終的には物質、空気、水、動植物、……人間などあらゆるものを構成し、現在の宇宙が存在するようになったとされている。すなわち、ヒッグス粒子の存在により質量をもった素粒子は、宇宙の各所で密集し、ガスや微粒子同士が衝突して大きくなって星が生れる。その初期は、大部分が最も単純な原子である水素（原子核）から出来ていた。微粒子の衝突の繰返しに始まり、次第に大きくなっていった星の中心部では高温、高密度（高圧）になる。その結果、中心部では水素の原子核同士が衝突して核融合反応が起こり、更に温度が上昇し、密度も増加する。水素の原子核が核融合反応により重水素又は三重水素を経てヘリウムの原子核になると思われるが、このときに膨大なエネルギーが生み出され、中心部では更に高温となり、自ら光り輝く恒星の光の源になる。水素の原子核からヘリウムの原子核が出来る核融合反応が、連続して行なわれている間は、恒星の安定期にあると考えられ、現在の太陽はこの安定期にある。

核融合反応の源になる水素の原子核が無くなり、次には、ヘリウム同士の核融合反応が起こり、炭素、酸素、ネオン、マグネシウム……鉄、と新しい原子核が誕生し、重い原子核は中心部へ沈んでゆく。核融合の結果、最後に鉄が出来、恒星の核を構成すると、恒星の中での核融合反応は終了する。中心部の温度は上昇し、恒星は赤味を帯びた大きな星へと変わっていく。終には自らの重力を支えられなくなり中心部に向かって崩壊してゆき大爆発を起こすが、中心から出た衝撃波は星の表面に達して非常に明るく輝く。所謂超新星爆発といわれる現象である。この超新星爆発時は、すさまじいエネルギーを生み出すので、鉄よりも更に重い様々な原子核が合成されて、周囲の宇宙空間に撒き散らされる。そして、これらの原子核は微粒子として宇宙空間を漂い、やがて、長い時間を掛けて再び集まっていく。この中から地球のように色々な原子の存在する惑星や衛星が誕生する。

3.2 核分裂反応

3.2.1 化学反応との発熱量の比較

ここでは、前項の核融合反応を含め、化学反応との比較について簡単に説明する。金属元素の場合、化学式で表すと原子価0が金属の状態、陽子（正の電荷を持った粒子）と電子（負の電荷を持った粒子）の数が等しく釣り合っている。酸などで溶解すると、最外殻電子（最も外側にある電子殻の電子をいい、イオンになったり、他の原子と結合したりするときに重要な役目をする）

—連載講座—

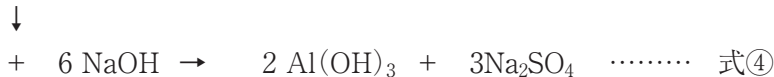
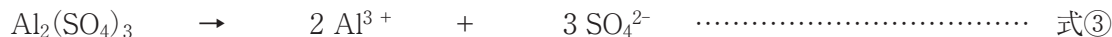
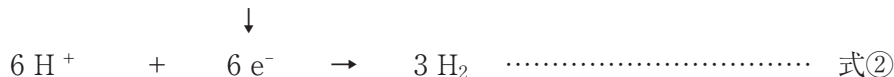
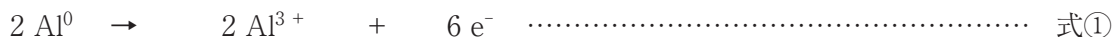
を放出してイオンになる。以上を一般式（イオン式）で表すと次のようになり、金属 M が溶解して X 個の電子を放出し、原子価 X の陽イオンになったことを意味する。



（ただし、 M^0 は金属、 M^{x+} は金属イオン、 X は放出された電子の数、 e^- は電子）

金属アルミニウムを例に取り説明する。

- (1) 下記化学式は、先ず、金属アルミニウム (Al^0) が 2 原子溶解して 6 個の電子 (e^-) を放出して、2 個の 3 価のアルミニウムイオン (Al^{3+}) になったことを表している (式①)。
- (2) 2 原子のアルミニウムが溶解して 6 個の電子を放出すると、水素 6 原子 (水素 3 分子) を生じ、電子が過不足なく消費されることになる。故に、(1) で 2 原子のアルミニウムを溶解したことにすると反応が成立する (式②)。
- (3) また、アルミニウムの化合物である硫酸アルミニウム [$Al_2(SO_4)_3$] は、水に溶解すると、アルミニウムイオン (Al^{3+}) と硫酸イオン (SO_4^{2-}) とに分かれる (式③)。
- (4) これに薄い水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液を加えると、水酸化アルミニウム [$Al(OH)_3$] (沈殿) と硫酸ナトリウムができる (式④)。



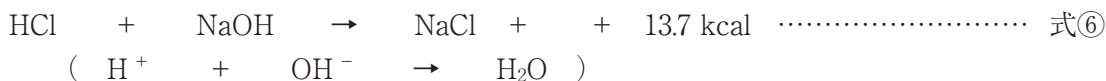
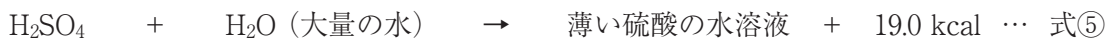
以上のように、化学反応では金属を酸に溶解する場合でも、イオン反応でも電子の授受により反応が行なわれるが、多くの場合強烈な発熱を伴う反応ではない。一方、原子核の融合反応では、電子の授受ではなく、原子核同士が結合して核内の中性子や陽子の数が増加する反応である。原子核内の陽子が増加するとそれに比例して同じ数の電子を引き寄せ、新しい原子となる。また、原子核の分裂反応では、二つの原子核を生じ、この場合もそれぞれの原子核内の陽子数に等しい電子を生じて新しい原子が誕生する。しかし、原子核融合反応にしても、原子核分裂反応にしても、原子の中心となる核を破壊することになるので膨大なエネルギーが発生することになる。

次に、物理的、化学的に生じる一般的な発熱量を、硫酸の溶解熱、中和熱、燃焼熱などを例に挙げて核融合反応や核分裂反応の発熱量と比較する。

濃い硫酸を水で希釈するときや、塩酸を水酸化ナトリウム水溶液で中和するときなど、発熱するのを経験する。

硫酸 (H_2SO_4) 1 モルが水で希釈されたときの発熱量 (溶解熱) を式⑤で示し、塩酸 (HCl) を水酸化ナトリウム水溶液で中和して 1 モルの水 (H_2O) を生じるときの中和熱を式⑥に示す¹⁾。中和反応の場合、希薄溶液では酸や塩基の種類に関係なく、反応は水素イオン (H^+) と水酸化物イオン (OH^-) との反応になるので発熱量はほぼ一定になる。

—連載講座—



以上のように、化学反応は水溶液中で簡単に行なわれることが多く（有機化合物の場合は少し異なる）、特に大きなエネルギーの吸収や放出も無い。

また、燃焼反応でも、プロパン（C₃H₈）1モルの燃焼を例に取り、反応式で示すと式⑦のようになる。



燃焼の場合、発光と発熱を伴うが、そのエネルギーは反応式に示したとおりである。

- 【参考(1) 1 J (1 ジュール) = 0.238889 cal ≐ 0.239 cal²⁾
 1 eV (1 電子ボルト) = 1.60219 × 10⁻¹⁹ J³⁾】

前号で述べた核融合反応では、高温、高圧（高密度）の中で原子核同士の衝突により、もとの質量より大きい原子核のできる変化を言うが、そのとき出来た新しい原子核の質量は、衝突したもとの原子核の質量の合計より少ない。この失われた質量に相当するエネルギーが光や熱として放出される。前号で述べた水素の核融合でヘリウムを生じる反応では、4.334 × 10¹²J⁴⁾ (1.036 × 10⁹ kcal) のエネルギーを放出する。

一方、核分裂反応では、例えば、天然ウラン中に存在し、もっとも大きい原子核をもつ 235 ウラン (²³⁵U) の原子核に、速度の遅い中性子（熱中性子という参考(2)）を照射すると 236 ウラン (²³⁶U) を経て、直ちに、元の原子核 (²³⁵U) の質量の約 1/3 ~ 2/3 の原子核 2 個ができる⁵⁾(式⑧)。また、このとき発生するエネルギーは、



2.150 万 kcal で、石油の 200 L または石炭 3 t に相当する⁵⁾ 膨大なエネルギーを生み出す。

核融合や核分裂で生じるエネルギーは、通常の原子や分子間で起こる化学反応で生じるエネルギーとは大差があり、上記それぞれで生み出されるエネルギーを見ただけでも明らかなように、百倍や千倍程度の差ではなく莫大な差を生じていることがわかる。

- 【参考 (2) 中性子には、速度の速い高速中性子と速度の遅い低速の中性子（熱中性子と呼ばれる）がある。高速中性子は物質中を突き進むうちに種々の原子核と衝突して次第にエネルギーを失って行く。最終的には分子の熱運動と平衡状態になる。この状態になった中性子を熱中性子という。従ってこの熱中性子を、運動エネルギーの低い中性子、すなわち、低速中性をいう。多量に含まれる 238 ウランは高速中性子でのみ核分裂をおこすが、235 ウランは低速中性子および高速中性子により核分裂を起こす。原子炉では 238 ウランを用いるものもある。】

—連載講座—

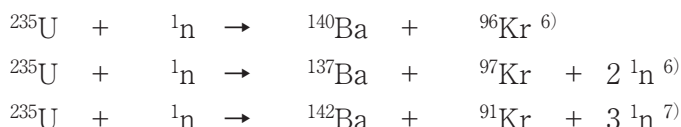
3.2.2 核分裂の連鎖反応と生成物

核分裂により生じる原子核は、条件により様々な種類になる。また、²³⁵ウランの核分裂で生じる中性子は2～3個放出される。2個の中性子が放出されたとすれば、この2個の中性子は2個の²³⁵ウランの原子核に衝突し、合計4個の中性子が放出される。4個の中性子は、更に4個の²³⁵ウランの原子核に衝突し8個の中性子が放出される。・・・という連鎖反応が繰り返されて瞬時に膨大な核分裂反応が進行し、莫大な熱エネルギーを放出する。また、核分裂により2個の原子核を生成するが、その質量の総和は、中性子が放出されたことにより、²³⁵ウランの質量より少なくなる。

すなわち、

$$\text{核分裂前の質量} - \text{核分裂後の質量の総和} = \text{放出されたエネルギー}$$

になる。²³⁵ウラン（原子番号92）の核分裂反応の一例を反応式1に示し、上述のように²³⁵ウランが充分存在し、制御されない場合の核分裂の連鎖反応を図1に示す。



反応式 1 ²³⁵U の核分裂の一例

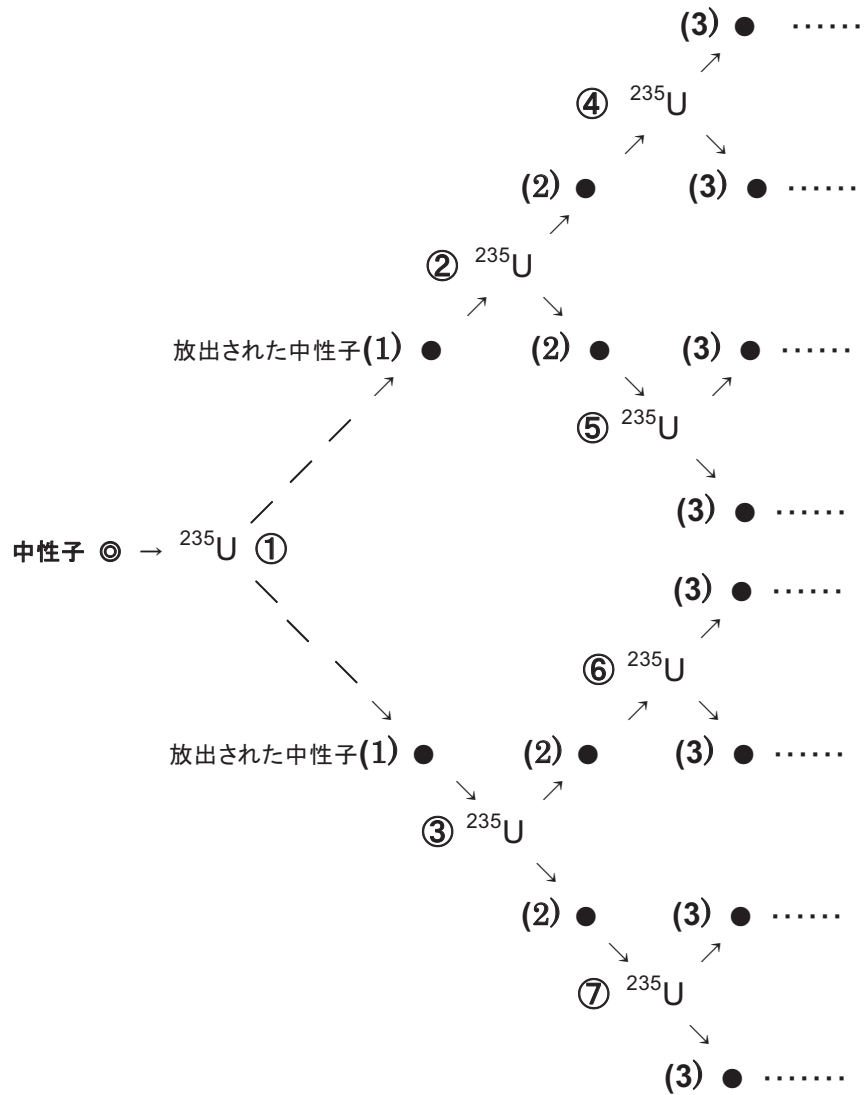
核分裂を、順を追って記述すると次のようになる。

- 1) 最初の**中性子** ① が①の²³⁵ウランに照射されると、反応式1で示したように、2個または3個の中性子(1)が放出される。図1では2個の中性子が放出された場合について示した。
- 2) その2個の中性子は、それぞれ②および③で示した2個の²³⁵ウランに照射される。
- 3) 従って二回目には、(2)で示した合計4個の中性子が放出される。
- 4) 更に、これらの中性子は、④～⑦に示した4個の²³⁵ウランに照射される。
- 5) その結果、三回目には(3)で示した8個の中性子が放出される。

以上、図1のように連鎖反応は続き、ウランの核分裂と中性子の放出が続く。即ち、連鎖反応は、最初の1個の中性子が照射された後、2、4、8、16、32、64、128・・・と中性子の放射が続く。

この連鎖反応は²³⁵ウランの量が非常に少ないと起こり難くなる。何故なら、放出された中性子が次のターゲットである²³⁵ウランの原子核に当たる確立は極端に少なくなる。また、²³⁵ウランが非常に多いと連鎖反応が限りなく起こり、制御が出来なくなって膨大なエネルギーを放出する(原子爆弾の場合)。天然のウラン鉱には²³⁸ウランが99.28%、²³⁵ウランが0.72%、²³⁴ウランが0.0057%存在している。これをそのまま使うと、²³⁵ウランが非常に少ない為、即ち、どの方向に照射されるかわからない、しかも非常に小さな中性子を、甲子園の中の1匹の蟻に当てるようなもので殆ど不可能に近い。従って、²³⁵ウランを約2～3%にまで濃縮すると適度な連鎖反応(原子炉では制御棒を入れて中性子を吸収し、核分裂反応が進みすぎないように制御されている)が行なわれるようになる。

—連載講座—



(²³⁵U の核分裂により 2 個の中性子が放出されたと仮定する)
 中性子源より放出された中性子 : ◎, ²³⁵U より放出された中性子 : ●

図 1 ウランの核分裂による連鎖反応

238 ウランと 234 ウランは、高速の中性子を吸収して核分裂するが、低速中性子では核分裂を起こすまでに至らない。235 ウランは高速中性子でも低速中性子でも吸収して核分裂するが、速度の遅い中性子が用いられるのは、速度の遅い中性子ほど原子核に吸収されやすい為である。また、核分裂した際は、高速の中性子を生じるが、原子炉内では重水などの減速材を用いて減速されると同時に、放出された全ての中性子が核分裂に使われないよう制御棒を用いて制御されている。減速材や制御棒については次号で述べる。235 ウランが核分裂した場合に生成する元素は、約 40 種類に及び、同位体としての数は 200 種類以上になる。また、235 ウランが分裂すると、235 ウランの質量数の 1/2 より少し軽い 85 ~ 102 の原子核と質量数の 1/2 より少し重い 130 ~ 149 の原子核⁷⁾の 2 種類を生成する。核分裂により生成した核種は、その多くがβ崩壊^{参考(3)}により崩壊し、安定な原子核(原子)になる。次に、その一例を示す[カッコ()内の時間・日・年は半減期を示す]⁸⁾。

—連載講座—

【参考(3) β 崩壊とは、元の原子核内の中性子が陽子と電子に変化して電子が放出される。その結果、新たに出来る原子核は、中性子数が1減少し、陽子数が1増加するため、中性子数と陽子数の合計は変わらないが原子番号が1増えた原子の原子核になる。No. 281 会誌 p3 参照。】

核生成物の自然崩壊の一例，【 】内は自然崩壊の説明

$^{129}\text{I} \rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 1570 \text{ 万年}) \rightarrow ^{129}\text{Xe}$ (安定)①
 【ヨウ素(^{129}I) が β 崩壊して原子番号 1 つ多いキセノン(^{129}Xe)を生成】

$^{133}\text{Cs} \rightarrow (\text{中性子捕獲}) \rightarrow ^{134}\text{Cs}$
 $\rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 2.07 \text{ 年}) \rightarrow ^{134}\text{Ba} \rightarrow (\text{電子捕獲}) \rightarrow ^{134}\text{Xe}$ (安定)②
 【セシウム(^{133}Cs) が中性子を捕獲して中性子の 1 つ多いセシウム(^{134}Cs)を生成】
 【 (^{134}Cs) が β 崩壊してバリウム(^{134}Ba)を、更に電子を捕獲してキセノン(^{134}Xe)を生成】

$^{85}\text{Br} \rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 2.9 \text{ 分}) \rightarrow ^{85}\text{Kr} \rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 10.7 \text{ 年}) \rightarrow ^{85}\text{Rb}$ (安定)③
 【臭素(^{85}Br) が β 崩壊して原子番号 1 つ多いクリプトン(^{85}Kr)を、更に β 崩壊してルビジウム(^{85}Rb)生成】

$^{135}\text{Xe} \rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 9.14 \text{ 時間}) \rightarrow ^{135}\text{Cs} \rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 230 \text{ 万年}) \rightarrow ^{135}\text{Ba}$ (安定)④
 【キセノン(^{135}Xe) が β 崩壊して原子番号 1 つ多いセシウム(^{135}Cs)を、更に β 崩壊してバリウム(^{135}Ba)を生成】

$^{147}\text{Nd} \rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 12 \text{ 日}) \rightarrow ^{147}\text{Pm}$
 $\rightarrow (\beta \text{崩壊} \cdot 2.62 \text{ 年}) \rightarrow ^{147}\text{Sm}$ (安定) $\rightarrow (\alpha \text{崩壊} \cdot 1060 \text{ 億年}) \rightarrow ^{143}\text{Ce}$ (安定)⑤
 【ネオジム(^{147}Nd) が β 崩壊して原子番号の 1 つ多いプロメチウム(^{147}Pm)を生成】
 【 (^{147}Pm) が β 崩壊してサマリウム(^{147}Sm)を、更に α 崩壊してヘリウムの原子核を放出し、セリウム(^{143}Ce)を生成】

以上のように、放射性元素が α 崩壊や β 崩壊など自然崩壊して放出するエネルギーは核分裂で放出されるエネルギーよりも小さい。また、崩壊する速度は半減期 (No. 280 会誌、p4 参照。例えば、 10^6 個あった放射性原子が、半分の 5×10^5 個に減り、放射能の強さが半分になる期間) で表され、秒単位から億年単位以上かかるものもある。

参考資料

- 1) 宮本健郎：エネルギー工学入門 太陽・原子力・核融合，培風館，1996.
- 2) 奥田四郎，室園荘一：地球の資源と環境 第二版，開成出版，1994.
- 3) 図詳ガッケン・エリア教科事典 第7巻 地球・宇宙，学研，1977.
- 4) 図詳ガッケン・エリア教科事典 第12巻 物理，学研，1977
- 5) 小西誠一：エネルギーのおはなし，財団法人日本規格協会，1995

引用資料

- 1) 長島弘三：新ベストコース 基礎からの理科 I，学研，p165，1982
- 2) 長倉三郎，渡邊啓，竹内敬人他9名：化学 I B，東京書籍，p136，1997

—連載講座—

- 3) 高田誠二, 単位と単位系, 共立出版, p102, 1985
- 4) 奥田四郎, 室園荘一: 地球の資源と環境 第二版, 開成出版, p72, 1994
- 5) 奥田四郎, 室園荘一: 地球の資源と環境 第二版, 開成出版, p64, 1994
- 6) 宮本健郎: エネルギー工学入門 太陽・原子力・核融合, 培風館, p91, 1996
- 7) 小西誠一: エネルギーのおはなし, 財団法人日本規格協会, p59, 1995
- 8) http://www.e22.com/atom2/images/fission_yield.pdf

【訂正】

No. 283 会誌 p 2

図2の反応式の1行目、+記号と→記号が脱落



図2の反応式の5行目、→記号が脱落

