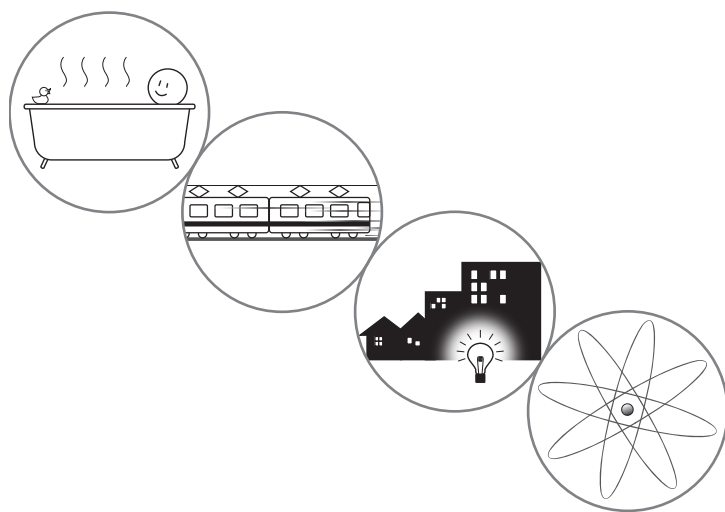


パネル展「放射線とエネルギーの科学」関連パンフレット

「エネルギー読本」

—原子エネルギーの理解に向けて—



企画・制作 千葉市科学館
監修 独立行政法人放射線医学総合研究所
協力 日本科学未来館

はじめに

このパンフレットは、パネル展「放射線とエネルギーの科学」に付随して作られました。同展の中心的なテーマの一つであるエネルギーについてより詳しく解説してあります。

読んでくださった皆さんに、「エネルギーへの関心を高め、科学的な理解をいっそう深めることにより、エネルギー問題について自ら考えていただくヒントを提供する」ことが、本書のねらいです。

当初は、地震のエネルギー、放射線とエネルギー、これからのエネルギー問題、なども扱おうとしましたが、膨大な量になるため、科学的なエネルギーの扱いに内容を絞りました。

震災以来、原子力発電の問題をきっかけに、エネルギーに関心を寄せる人々が増えています。このパンフレットは、そういった方々にエネルギーについて科学的観点からも考えていただく一助となる知識の提供を目指しました。また、理工系の大学受験生にとっても授業への理解が進むようにと心がけました。

一見ばらばらに見える現象が、エネルギーという観点から捉えれば統一的に説明できるという、深くて精妙な自然科学の一端を垣間見ていただければ望外の喜びです。

2011 年 8 月

編集者代表 千葉市科学館館長 大高 一雄

目次

はじめに

第1章 エネルギーとは何か

1. 1	エネルギーの定義	1
1. 2	いろいろなエネルギー	2
1. 3	エネルギー保存則	10
1. 4	水力発電とエネルギー保存則	12
1. 5	化学変化とエネルギー保存則	14
1. 6	お湯を沸かす	16
1. 7	原子核反応とエネルギー	19

第2章 原子エネルギーとは何か

2. 1	原子	20
2. 2	分子	24
2. 3	炭素原子のエネルギー	26
2. 4	炭素原子をばらばらに	29
2. 5	分子、物質とエネルギー	32
2. 6	原子核のエネルギーと核力	38
2. 7	原子エネルギーが大きい理由	39

あとがき

【計算してみよう】

1. 黒部川第四発電所の出力 13
2. スポーツドリンク1本のエネルギー 18
3. ウラン 235 と原子力発電所の出力 42

【コラム】

1. 豆が入った箱のエネルギーと内部エネルギー 9
2. 地震の発生と地震のマグニチュード 11
3. 電荷による力と万有引力の大きさ 23
4. 原子のエネルギーと取り出せる熱量 30
5. 不確定性原理 34
6. 原子の存在と量子力学 37
7. 原子核のエネルギーと質量欠損 43

第1章 エネルギーとは何か

1.1 エネルギーの定義

インターネットやテレビを通して毎日のように見聞きするエネルギーという言葉ですが、皆さんはどのように理解しているでしょうか。

物理学では、エネルギーを「物体が物理的な仕事をするのできる能力」と定義することが一般的です。

ここでいう仕事とは、物体に力を働かせて、物体を動かすことをいいます。力の大きさを F [N] (ニュートン)、物体が動いた距離を s [m] とすると、仕事 W は、

$$W = F s \text{ [J] (ジュール)}$$

と表せます。力の向きと動いた向きが同じときは正、反対のときは負と仕事を定義します。図1では、仕事が正と負の場合を区別しました。

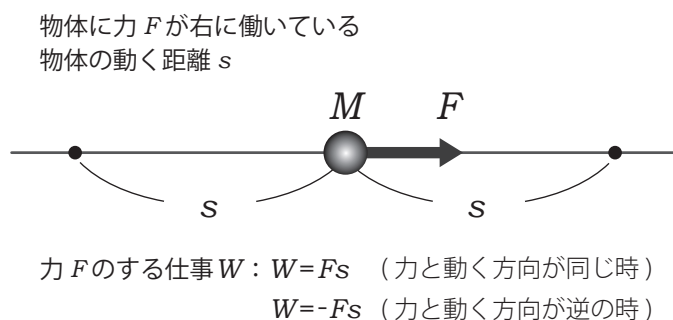


図1 右向きの力 F による仕事 W

エネルギーの単位は、仕事の単位をつかって表します。1 J の仕事ができる能力を持っているものは、1 J のエネルギーを持っているといいます。ジュールもニュートンも日常生活では、あまりなじみがありませんが、地上にある質量 1 kg のものに加わる重力（重さといってもいいですね。地球の引力の大き

さのことです) は約 9.8 N です。 $M \text{ [kg]}$ に加わる重力は $9.8 M \text{ [N]}$ です。 9.8 のことを g と書きます。ですから $M \text{ [kg]}$ にかかる重力は $Mg \text{ [N]}$ 。 g を 10 とみなすと、 1 N は 0.1 kg にかかる重力、ちょうど小型の卵 2 個くらいの重さ、あの感じが 1 N です。それを 1 m もち上げる仕事が 1 J 。

1.2 いろいろなエネルギー

エネルギーには注目する現象によって様々な形があります。

(A) 運動エネルギー

運動エネルギーは運動して勢いがあるものが持っているエネルギーのことです。勢いのあるもの、たとえば投手の投げたボールは物に当たると力を及ぼし動かします、つまり仕事をします。勢いはボールの速さに関係しますし、ボールの質量にも関係するのは日ごろ経験することです。

$M \text{ [kg]}$ のものが速度 $v \text{ [m/s]}$ (1 m/s は、毎秒 (1 sec) あたり 1 m 移動するという速度です) で動いているとき、 $\frac{1}{2} Mv^2$ で運動エネルギーが定義されます。勢いのエネルギーが M や v に関係するのは直感的にわかるとしても、なぜ $\frac{1}{2}$ をかけるのか、なぜ v を 2 乗するのか、は後回しにします (1.3 参照)。

次に位置エネルギーを考えます。

(B) 位置エネルギー

○位置エネルギーの例 (重力による位置エネルギー)

地上にあって静止している $M \text{ [kg]}$ の物体と地上から $h \text{ [m]}$ の高さの位置で静止している $M \text{ [kg]}$ の物体とではエネルギーが違います (図 2)。このような位置の違いで変わるエネルギーが位置エネルギーです。なぜエネルギーが違うのか、ここがポイントです。

図 2 で、地上の A 点から $h \text{ [m]}$ の高さの B 点までわれわれが物体を持ち上げるとします。この物体は $Mg \text{ [N]}$ の力で地球に引かれていますから、われわれは $Mg \text{ [N]}$ の力で引き上げます。もっと大きな力で引き上げると、下向きの

重力とつりあわないため、どんどん物体は速度がつき、 h [m] だけ持ち上げたときには運動エネルギーを持ってしまいます。A点とB点、この2地点でともに静止している物体を比べているので、 Mg [N] の力（本当はそれよりほんのわずかだけ大きな力）で引き上げるのです。こうして、われわれが Mgh [J] の仕事をしてはじめて物体は「静止した状態」でBに移ります。これだけの仕事をする、私たちの体が持っていたエネルギーはその分消耗します。そのエネルギーが h [m] だけ高い位置の物体に移ったと考えます。つまりA点の物体は Mgh [J] の仕事をされたのでそれだけエネルギーが高くなってB点で静止していると考えます。

同じことですが、われわれが消耗したエネルギー Mgh [J] がB点の物体に移ったのですから、（物体+われわれ）のエネルギーは、物体がA点にいてもB点にいても、変わらないのだと考えることもできます。これは一種のエネルギー保存則です（図3）。

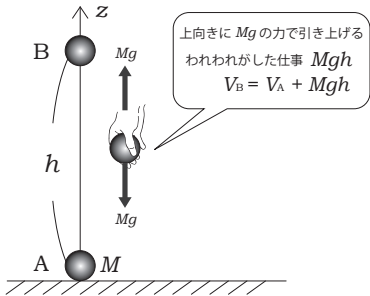


図2 重力による位置エネルギーの差

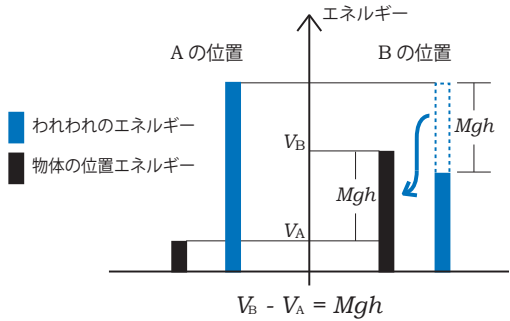


図3 われわれのエネルギーが移動

○位置エネルギーを決める

位置によるエネルギーの違いは物体に力が働いているから生じます。力が働いていなければ、図2のA点からB点までわれわれはエネルギーの消耗無しに物体を移せますので、A点でもB点でも位置エネルギーは同じです。こうやって、本来物体に加わっている力につりあう力を出して、物体を「静止したまま」移動させ、その仕事の大きさで2地点の位置エネルギーの違いを決めます。

どこか基準の点の位置エネルギーを0と決めておくと、そこから考える点まで、そっと物体を運ぶ仕事を計算して、その点の位置エネルギーの値が決まります。たとえば、 $M[\text{kg}]$ の物体の地上での位置エネルギーを0と決めると、 $h[\text{m}]$ 高い点での位置エネルギーは Mgh [J] です。図2、図3では、 V_A 、 V_B を A、B 二点それぞれの位置エネルギーの値としています。

これまでは図2の状況で重力による位置エネルギーを考えてきました。図1のような、物体に力 $F[\text{N}]$ がはたらいている場合でも同じです。位置エネルギーが0の基準の点をきめ、そこから、物体をそっと運ぶのに必要な仕事を考える点での位置エネルギーになります。図1で、場所とともに力の大きさや向きが変わる場合、位置エネルギーの計算は面倒です。しかし、位置エネルギーの正負は、われわれがそっと運ぶ仕事为正か負かを考えればいいのですぐにわかる場合が多いです。

○力は位置エネルギーを小さくする向きに働く

図4に示すばねにつながった物体の位置エネルギーを考えてみましょう。ばねは、ばねの伸びに比例した大きさで物体に力を及ぼすのがふつうです（フックの法則）。ばねが伸びていないときの物体の位置を原点として、そこでの物体の位置エネルギーを0としましょう。ばねが伸びた位置（物体の位置 x が正）での位置エネルギーは正です。なぜなら、ばねが伸びるとばねは物体を元にもどそうとしますから、ばねの力に対抗して、われわれはそこまで物体を引っ張る必要があるからです。よって、われわれは正の仕事をします。

では、ばねが縮んでいる場合（物体の位置 x が負）ではどうでしょうか。われわれがそっとそこまで物体を動かすには、ばねを押し続けなければならない。なぜなら、ばねは縮んだとき物体を押しもどしますから。このときもわれわれはエネルギーを消耗します。以上で、ばねが伸びても縮んでも位置エネルギーは増えることがわかりました。図4の右半分はこの様子を示しています。

ばねを伸ばしたり縮めたりすることをイメージして、ばねが物体に及ぼす力がいつも原点(ばねの伸びが0の位置)に向いていることを感じ取ってください。原点で物体の位置エネルギーを0と取りました。だから「物体に働いている力はいつも位置エネルギーが小さくなる方向にはたらく」と言えます。このことは、ばねからの力だけでなく一般的に示すことができる大切な性質です。

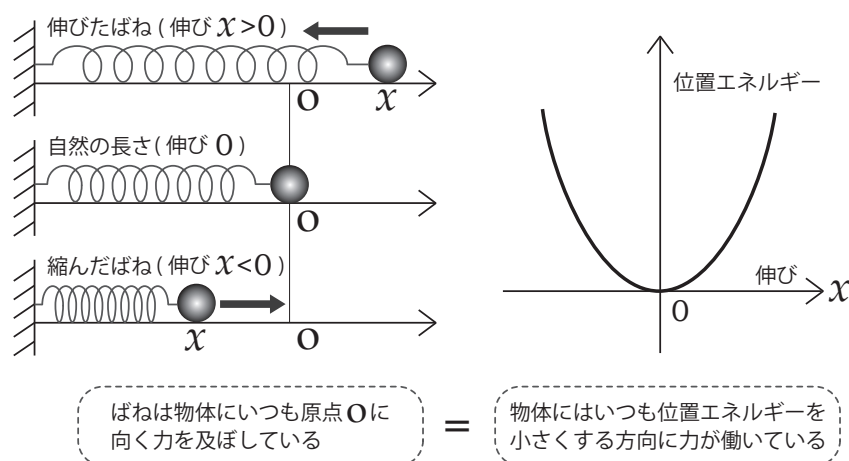


図4 ばねが及ぼす力の向きと位置エネルギー

(C) いろいろな名前のエネルギー

運動エネルギーと位置エネルギーを詳しく解説しました。それは、運動エネルギーと位置エネルギーが特別に重要だからです。電気が流れるとか、明かりをつけるとか、ポットでお湯を沸かすとか、それぞれの場合で、いろいろなエ

エネルギーが問題になります。電流やポットのお湯なども、どんどん細かく見ていくと、運動している原子、分子の集まりになってしまいます。それらの運動エネルギーと位置エネルギーに還元して考えることができるのです。

しかし、いちいち原子や分子に戻るのは大変ですので、より便利ないろいろな名前のついているエネルギーがあります。いくつか例を挙げましょう(図5)。

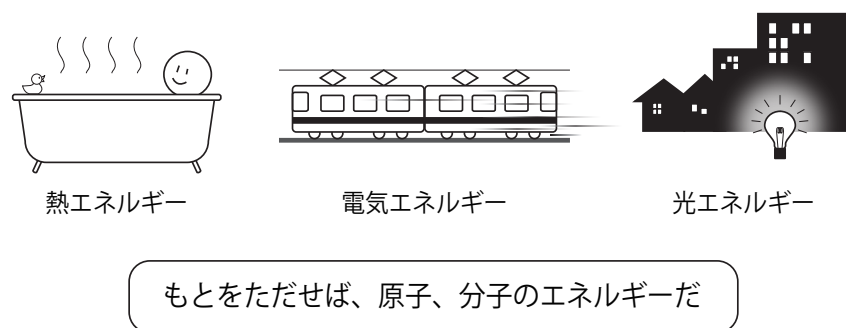


図5 エネルギーの3つの例

(1) 熱エネルギー

分子や原子が中で運動をしている物体が持つエネルギーのことです。熱量ともいいます。分子や原子は後で詳しく考えますが、物質は原子や分子という最小単位の集合体だと思しましょう。単位 [J] (ジュール) でその大きさを表せるのですが、生活感覚に密着するように、しばしば、熱エネルギーの単位として [cal] (カロリー) を使います。1 J = 約 0.24 cal、1 cal = 約 4.2 J という関係を使って、カロリーとジュールの換算ができます。

1 g の水を 1 °C あげるには 1 cal の熱量が必要です。例として、29 °C の水 1 g を 30 °C にすることを考えましょう。この水に含まれる水の分子の運動エネルギーは、後者の方が 1 cal だけ大きいのです。このために、29 °C の水にその分のエネルギーを外から与えないと、30 °C になりません。

コップに入った同じ質量の冷たい水と熱いお湯。両者の位置が同じなら位置エネルギーは同じ。ともに静止しているなら、運動エネルギーは両者ともゼロ。なのに、両者の熱エネルギーが違う。微視的にみれば、両者を構成する水の分子、その運動の激しさの違いが熱エネルギーの違い(=温度の違い)を決めています。

(2) 電気エネルギー

電気が持つエネルギー。電気ストーブで身体があたたまりますから、電気が流れると熱エネルギーが得られることが分かります。もとの電気はエネルギーを持っていることになります。100 V で使うと 60 W (ワット) の電球は、1 秒間に 60 J の仕事をしています。500 W の電子レンジは、1 秒間に 500 J の仕事をしています。仕事が無駄なく料理を温めるのに使われると仮定すると、1 秒間に 500 J の熱エネルギーを料理に加えていることになります。ジュールをカロリーに直せば、水の温度の上昇が計算されます。

(3) 光エネルギー

光が持つエネルギー。光は波であると同時に粒としても振舞います。ですから、ある瞬間の室内の光といった対象の光全体に含まれる光の粒のエネルギーの総量がその光エネルギーになります。しばしば、1 秒間にある面を通過する光エネルギーなどが問題になります。たとえば、太陽に向いた体の表面が1 秒間に受ける光のエネルギーは、その間に受ける光の粒のエネルギーの合計です。光の粒1 個のエネルギーは光の波長で決まることがわかっています。

(4) 化学エネルギー

物質の化学変化により変化したり発生したりするエネルギーのことです。分子や原子の組み合わせが変わる変化を化学変化といいます。化学エネルギーをしっかりと理解するためには、化学変化とは何かが分からないといけません。

(5) 原子や分子のエネルギー

上では質量 M [kg] の物体を 1 つのかたまりにして運動エネルギーと位置エネルギーを考えました。原子のエネルギーは、原子を構成する粒子全体の運動エネルギーと位置エネルギーから決まります。分子のエネルギーも同じようにして決まります。外見は静止していても、内部には運動している粒子がいる。それらの持つエネルギーが原子や分子のエネルギーです。

(6) 原子エネルギー

「原子のエネルギー」や「分子のエネルギー」と言うとき、原子核は、電荷を持った点と考えるのがふつうです。「原子エネルギー」は原子核の内部構造によるエネルギーをさします。「原子のエネルギー」と「原子エネルギー」は意味が違いますから注意してください。原子エネルギーを核エネルギーと呼ぶこともあります。原子核が複数の原子核に分裂したり、逆に複数の原子核が一つに融合したりするときに、外に取り出せるエネルギーのことです。原子核を構成している内部の粒子の運動エネルギーと位置エネルギーが分かれば、原子核のエネルギーが分かります。

原子、分子、原子核のエネルギーを考えるには、物やばねのエネルギーと違って、量子力学が必要になります。しかし、物やばねのエネルギーの理解をもとにして、量子力学による結果の大筋をつかめることが多いのです。このパンフレットもそう言う大筋の理解を目指しています。

【コラム】 1. 豆が入った箱のエネルギーと内部エネルギー

箱の中に豆が入っていて中が見えないとしよう。この箱が静止しているとき、箱のエネルギーは、豆も静止しているときに限って0です。中の豆が動いていれば、箱のエネルギーとして豆も考慮する必要があるのは当然です。このように外見は静止していてもなおかつ持っているエネルギーのことを内部エネルギーといいます。温度でその大きさが決まる熱エネルギーは、内部エネルギーの典型です。

2章で見るように、原子、分子、原子核のエネルギーは、内部の粒子のエネルギーですから内部エネルギーのようなものと言えます。

1.3 エネルギー保存則

「ある現象の前後で、その現象に関係する全てのエネルギーを合計は変化しない」、このことをエネルギー保存則といい、自然現象を支配するもっとも重要な法則です。電気が作られる前と後、車が走り出す前と後、地震が起きる前と後など、あらゆる現象において成り立ちます。図1に示す最も基本的な場合、運動エネルギーと位置エネルギーの値はそれぞれ時間とともに連続的に変化します。しかし、その和は運動中一定のままなのです。

○水を沸騰させて動力を得る

少し複雑な場合を考えましょう。石油や石炭を燃やして水を水蒸気にして、その蒸気の力を動力にするのは、(水+燃料)のエネルギーが外に向かって仕事をする動力に変化しているのです。100%のエネルギーが動力に変わるわけではなく、外に向かって無駄に放出される熱エネルギーや、摩擦として不必要な部分に逃げていってしまう摩擦エネルギーなどもあるはずです。

もともとの(水+燃料)のエネルギーの総量が、動力として利用されるエネルギーと、放出されて熱や摩擦など無駄に消費されてしまうエネルギーの和に変化するのです。姿は変わっても総量は変わらないということです。

○正しく定義しないと、エネルギー保存則は成り立たない

変化の前後に姿を変えて現れるいろいろなエネルギーを、それぞれごとにきちんと定義しないと、変化の前後でのエネルギー保存則を示すことができません。質量が M [kg] で速度が v [m/s] で動く物体の運動エネルギーを $\frac{1}{2} Mv^2$ [J] で定義しました。これは、 $\frac{1}{2}$ が $\frac{1}{3}$ であつたらエネルギー保存則は成り立ちませんし、 v^2 は v^3 でもいいというわけにはいきません。また、位置エネルギーも「われわれがそっと動かす」などとかどいように解説したのは、そうやって位置エネルギーを定義しないとエネルギー保存則が成り立たないからです。

逆に言うと、エネルギー保存則が成り立つように、運動エネルギーと位置エ

エネルギーを定義したといってもいいのです。1.2(3)で触れた、光エネルギーや光の粒のエネルギーもそうやって決めていきます。

物や、原子や、光が関係するいろいろな現象を考えると、それぞれの現象ごとにエネルギー保存則が成り立っていることが示せます。どんなに複雑な現象でも、根本にそういうすっきりした法則性があること、そしてその詳細を学ぶこと、これが自然科学の魅力の一つでもあります。

われわれの生活も自然の法則に従っていると考えれば、人間の歴史はいろいろな形のエネルギーを人間に役立つ形に変化させる過程であったともいえます。

【コラム】 2. 地震の発生と地震のマグニチュード

東日本大震災は、東日本がのっている岩盤の下に太平洋からの岩盤がもぐりこみ、そのためにたまったひずみが解放されるときに発生したものです。ひずみがない状態では岩盤の一つの原子と隣り合った原子の間にはいろいろな力がつりあっていて、力が働いていません。図4のばねの伸びが0の状態と同じです。もぐりこむプレートの力によって原子はつりあっていた位置からずれ、仕事をされます。そしてその分だけ位置エネルギーが高まります（それをひずみエネルギーと呼びます）。

岩盤はひずみエネルギーがたまり過ぎると、こらえきれずに破壊します。破壊が起こった後の原子同士の位置はひずみがないときの状態に戻っています。たまった位置エネルギーが解放されて元のひずみなしの状態に戻ったのです。解放されるエネルギーの大きさが地震のマグニチュードを決めます。

この解放エネルギーは、震源地から四方に伝播する波のエネルギーに変わっていきます。地震波として観測される各地の波のエネルギーを震源を中心として合計（地球の内部に向かうエネルギーもあるでしょう）したものが解放エネルギーの大きさに等しいはずで、各地の地震波の解析を通してマグニチュードが決まるのは、エネルギー保存則を利用しているともいえます。

1.4 水力発電とエネルギー保存則

水力発電を例にしてエネルギー保存則を具体的に考えてみましょう。

水力発電では、ダムの水が導水管に沿って落下し、発電機内のコイルを回転させることにより、電気が発生します。いま、静止したダムの水が持つ位置エネルギーを A [J] としましょう。

落下した後の水は、位置エネルギー B [J] のほかに落下によって勢いが付いているので運動エネルギー C [J] を持っているのです。

さらに、水が発電機を通過した後は、水の位置エネルギー D [J]、運動エネルギー E [J] に加えて、発生した電気エネルギー F [J] を考えなければなりません。

ここで、各段階での摩擦熱を無視すれば、これらのエネルギーの間には、次の関係があります。

$$A = B + C = D + E + F$$

これが、水力発電におけるエネルギー保存則です。この様子を図6に示しました。(ただし、図6では摩擦熱も考慮しています)

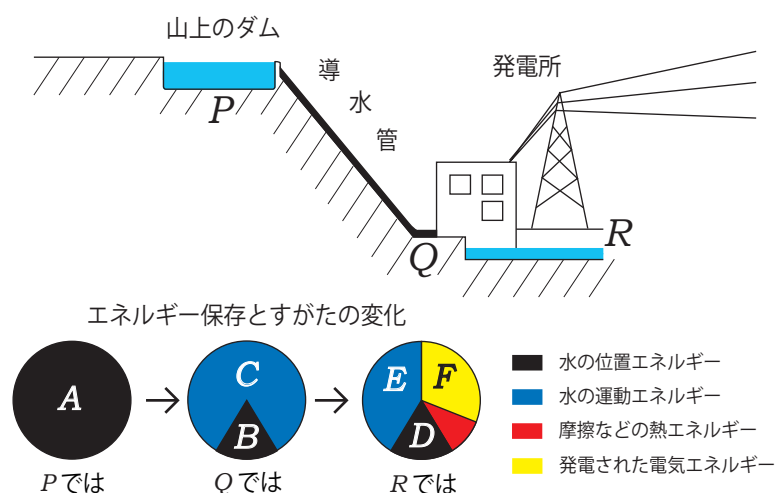


図6 水力発電とエネルギー保存則

【計算してみよう】 1. 黒部川第四発電所の出力

黒部ダムの水を利用する黒部川第四発電所の最大出力は 33.5 万 kW です（この問題では 30 万 kW とします）。水はダムから 500 m の高さを導水管で落下して発電に使われるとします。ダムから導水管に入るとき、水は運動エネルギーを持っていないとしましょう。また、発熱や摩擦などによるエネルギーのロスが一切ないと仮定します。最大出力時には、毎秒何トンの水がダムから導水管に流れ込んでいるでしょうか。

（答え）

30 万 kW は $30 \times 10^4 \times 10^3 = 3 \times 10^8$ W。1 秒間に落下する水の質量を M [kg] とする。この水が落ちはじめに持っていた位置エネルギー Mgh [J] が電気エネルギーに変わったと考えられるから

$$Mgh = 3 \times 10^8$$

$g = 10$ 、 $h = 500$ を代入して $M = 6 \times 10^4$ kg。1 t (トン) の水は 1000 kg だから、 $M = 60$ t。

関西電力の公表データによると、 $h = 545.5$ m、 $M = 72$ t だそうです。

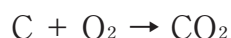
ちなみに、太陽光発電は 1 m^2 くらいの広さのパネルで 200 W の最大出力を持っています。また、風力発電では、最近では、半径が 50 m を超えて、最大出力が 2 MW（メガワット）の風車も作られています（ $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$ ）。黒部川第四発電所の最大出力をまかなおうとすると、太陽パネルでは 150 万枚、風車では 150 機が必要という計算になります。原子力発電所の出力は 1 ユニット（原子炉 1 つからなる発電システム）につき 100 万 kW 前後です。黒部川第四発電所の約 3 つ分です。

1.5 化学変化とエネルギー保存則

台所やお風呂でガスを燃やすと熱が得られることは日常経験していることです。燃える前のガスのほうが燃えた後のガスよりエネルギーが大きく、燃焼によってその差が熱エネルギーとして得られることを示しています。

このように、水力発電と同じように、化学変化でも反応の前後で物質が持っていたエネルギーの差を熱エネルギーとして取り出すことができます。

炭素と酸素が化合して、二酸化炭素ができる場合を例に取りましょう。物が燃えるときの典型的な反応です。この反応は化学反応式を用いて次のように表せます。



この式で C、O₂、CO₂ は炭素原子、酸素分子、二酸化炭素分子を表しています。酸素原子を表す記号 O につけた 2 は酸素原子が 2 個集まって酸素分子ができていることを表します。まだ、分子とは何も言っていないので、さし当たっては原子の集団と考えていきましょう。

いま、C 原子、O₂ 分子、および CO₂ 分子それぞれ 1 個が持つエネルギーを (C)、(O₂) および (CO₂) と (カッコ) つきで表し、それらの反応で発生する熱を Q [J] とすると、上の過程でのエネルギー保存則は、次のように表せます。

$$(C) + (O_2) = (CO_2) + Q$$

はじめのエネルギー (C) と (O₂) の和と反応の後の (CO₂) を比べ、反応前が大きいとき ((C) + (O₂) > (CO₂))、 Q は正になり、熱を取り出せます (図 7)。ただし、ここではエネルギーの差がすべて熱になる変化を考えています。前後で体積が変わったりする反応では、体積変化のための仕事としてエネルギーの一部が使われてしまいます。

原子や分子が 1 個だけかわる反応を扱いましたが、 N 個がかかわれば取り出せる熱量は N 倍になるだけです。 Q を理解したり、その大きさを計算したりするには、(C) や (CO₂) の意味、つまり、原子や分子のもつエネルギーの理解が必要になります。

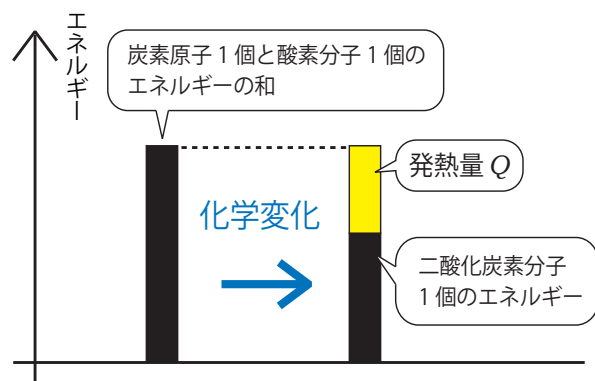


図7 化学変化と発熱

1.6 お湯を沸かす

水を温めることを考えましょう。水にエネルギーを与えて水分子の運動を激しくすること、それが水を温めることです。いま、2つの方法で、水の温度を上げてみましょう。

(1) ガスコンロで熱する

鍋の底をガスコンロで熱すると、ガスに含まれる炭素が酸素と反応して熱を出します。1.5で考えた反応です。ガスの燃焼によって発生したエネルギー Q [J] を受け取って、鍋を構成する原子が激しく振動します。鍋の中では、鍋の底に触れた水分子が、激しく振動している鍋の分子からエネルギーを受け取り、その分だけ水分子の運動エネルギーが増加します。激しく運動する水分子は、他の水分子と衝突することにより、鍋の中の水分子が全体として運動の激しさを増し、温められます (図8)。

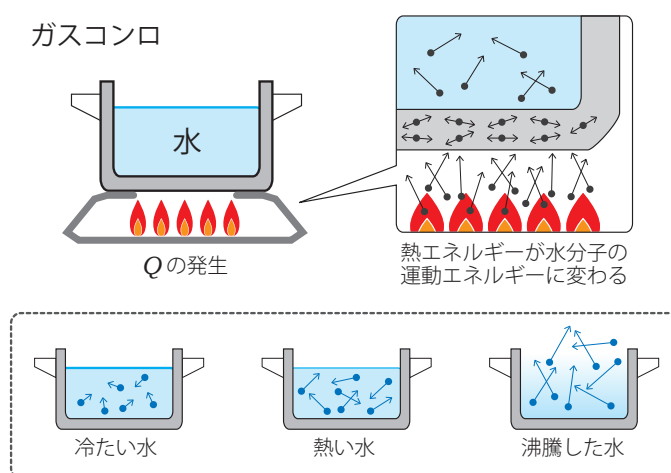


図8 鍋でお湯を沸かす

(2) 電子レンジを用いる

電子レンジに水の入ったコップを入れると、マグネトロンという装置から放出された電磁波が、コップ内の水分子に吸収されます。電磁波は電場と磁場が波の形で真空や物質中を伝わるものです。光（可視光）は、電磁波のうち、人の目を感じられる振動数（周波数）の範囲（約 $10^{14}/\text{s} \sim 10^{15}/\text{s}$ ）にある電磁波のことです。電子レンジで使われる電磁波は、振動数がもっとずっと小さな（約 $10^9/\text{s}$ ）マイクロ波と呼ばれる領域の電磁波です。

水の分子の上を波が通り過ぎることをイメージしましょう。波の山が来て谷が来て、又山が来て、谷が来て、という具合に水分子は毎秒約 10^9 回も揺さぶられます。この振動数は水分子内での原子の振動数（固有振動数）に近いように選ばれています。このため、外からの揺さぶられに共鳴（共振）し、水分子が激しく振動し、運動エネルギーが増加します。これが電磁波の吸収です。水分子が含まれていないものは、電子レンジで有効に温めることはできません。

電子レンジの電磁波も粒として振る舞います。その粒が水の分子に吸収されると考えるのも正しい考え方です。

(1)、(2) どちらの場合も、発生したり吸収されたりしたエネルギーが水分子の運動の激しさ、すなわち熱エネルギーに変換され、水の温度が上昇する点では同じです。

熱エネルギーが空気や水を構成する原子や分子という粒の運動エネルギーの総和であること、電磁波もまた粒であることを考えると、微視的にはエネルギーの移動や姿の変化は、第1の粒から第2の粒に、時には第3の粒を介しておきるといえそうです。こういう単純化した理解が実は正しいのです。(1) のガスコンロの場合、鍋の原子の振動を介してガスの熱エネルギーが水に移動します。鍋の原子の振動も粒として振舞うことが量子力学によって分かっています。ガスと水の分子はその粒を作ったり、受け渡ししたりしているのです。

【計算してみよう】 2. スポーツドリンク 1 本のエネルギー

スポーツドリンクが入った 500 ml のペットボトルがあります。ラベルには、1 本あたり 150 kcal（キロカロリー）と書かれています。これは、このスポーツドリンク 1 本が持つエネルギーを示しています。このスポーツドリンク 1 本分のエネルギーで、500 ml 入りのペットボトルを何 m 持ち上げられるでしょうか。ただし、 $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$ とし、1 kg の物体を 1 m 持ち上げるのに 10 J のエネルギーが必要であるとし、また、500 ml 入りのペットボトルの質量は、500 g であるとし、

（答え）

スポーツドリンク 1 本分のエネルギー E [J] は、

$$E = 150 \text{ kcal} = (1.5 \times 10^5) \times 4.2 \text{ J} = 6.3 \times 10^5 \text{ J}$$

となります。

500 ml 入りペットボトルは $500 \text{ g} = 0.5 \text{ kg}$ ですから、1m 持ち上げるのに、5 J のエネルギーが必要です。したがって、500 ml 入りのペットボトルを持ち上げることができる高さ h [m] は、

$$h = \frac{E}{5} = 1.26 \times 10^5 \text{ m} = 126 \text{ km}$$

あまり実感がわからないので、今度は、このスポーツドリンクを 1 本飲んでどのくらい山登りができるか考えましょう。体重を 50 kg とします。この体重を H [m] 持ち上げるとすると、位置エネルギーは

$$50 gH = 500 H$$

だけ増加します。これがボトル 1 本のエネルギーで供給されたとすると

$$500 H = 6.3 \times 10^5$$

$$\text{よって } H = 1260 \text{ m}$$

体を持ち上げるのに必要なエネルギーは、単なる体を持っている位置エネルギーの増加分だけではすまない（平地を歩くだけでも空腹になる）ので、現実の値は、おそらくこの数分の 1 だろうと思われます。

1.7 原子核反応とエネルギー

原子核がほかの原子核や粒子との衝突によって、別の種類の原子核に変わることを原子核反応といいます。

たとえば、次の反応を考えてみましょう。



これは、原子炉の中で起きている反応の一つで、ウラン 235 の原子核に中性子（式のなかで n が中性子です）が衝突して、ウラン 235 の原子核が、バリウム 141 の原子核とクリプトン 92 の原子核と 3 個の中性子に分裂する過程を表しています。ここに現れる数字は原子核を構成する陽子と中性子の数の合計を表しています。陽子とか中性子とか説明なしに使っていますが、2.1 で説明します。いまは、この 2 種類の粒子が集まった塊が原子核であると考えておけば十分です。そう考えると、この式は前節の炭素と酸素から二酸化炭素ができる化学反応と変わりません。

いま、ウラン 235 の原子核や中性子などが持っているエネルギーを 1.5 と同じように (^{235}U) 、 (n) などと（カッコ）つきで表し、発生する熱を Q [J] としましょう。この原子核反応でのエネルギー保存則は

$$(^{235}\text{U}) + (\text{n}) = (^{141}\text{Ba}) + (^{92}\text{Kr}) + 3(\text{n}) + Q$$

となります。

反応の前後のエネルギーの差から、この原子核反応では大きな正の Q が得られるのですが、本質は化学反応のときと同じだと分かります。原子核反応の方がずっと大きな Q を取り出せるという点だけが違います。

次章からは、原子核反応ではどうして大きなエネルギーが取り出せるのかを詳しく見ていきます。

第2章 原子エネルギーとは何か

2.1 原子

原子は、物質を細かにしていったときに残る最小の単位だと考えましょう。

原子の中心には、正の電荷をもつ原子核があり、負の電荷を持つ電子がその周りを回っています。これが原子の素朴なイメージですが本質的に正しいイメージです。図9にいくつかの原子のイメージを示しました。

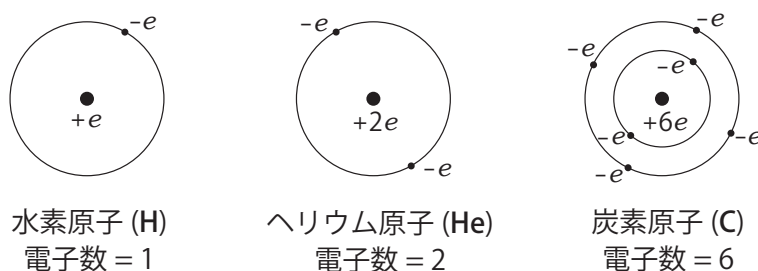


図9 いくつかの原子のイメージ

○電子と原子核

原子の大きさは、原子の種類によって異なりますが、およそ1 nm (ナノメートル)、つまり 10^{-9} m くらいです。これは、高性能電子顕微鏡で見えるか見えないかの大きさです。

電子が周回する中心にある原子核の大きさは、原子の1万分の1から10万分の1くらいの大きさです。こんなに原子核が小さいことは、記憶にとどめておきたいことです。このため、原子の大きさというときは、電子が周回する半径の大体の大きさをさすのが普通です (半径の値は、はっきりこうだと決められません。コラム5参照)。

原子核は正電荷をもっていますが、これは、陽子という粒子をもっているためです。陽子の電荷を $+e$ [C] (クーロン) と表すと、電子の電荷は $-e$ [C]

です。これは、陽子と電子の電荷は符号が逆向きで大きさが等しいことを意味しています。 e の大きさは、実験の結果から、およそ $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ であることがわかっています。ちなみに、1 A（アンペア）という電流は、電線の断面を1秒間に1 Cの電荷が流れること、つまり、電子が毎秒 10^{19} 個も通過していることを表しています。 e がそれほど小さな値であるともいえます。

陽子1個の周りを電子1個が周回している原子が最も簡単な原子、水素、です。正電荷の原子核によって、負電荷の電子は引力を受け、その引力と、遠心力がつりあって周回するのです。地球の周りを月が周回するのと似たイメージです。

○陽子、中性子と原子核

原子核には陽子のほかに陽子と重さがほぼ等しく、電荷を持たない中性子も含まれています。原子核を構成する粒子という意味で、陽子と中性子をあわせて核子と呼びます。水素原子のなかにも、（陽子1個＋中性子1個）の原子核の周りを電子1個が周回しているもの（重水素）や（陽子1個＋中性子2個）からなる原子核の周りを電子が周回している水素（三重水素）もあります。

原子力発電での燃料として使われるウラン 235 は、陽子が92個、中性子が143個からなる原子核（核子の総数が235個）を持っています。陽子と中性子は、電子と比べて約1800倍の質量をもっています。したがって、原子の質量は、ほとんど原子核の質量で決まっています。図10に、電子、陽子、中性子の性質をまとめました。

電子	陽子	中性子
大きさ：なし（壊れない） 質量：約 10^{-30}kg 電荷： $-e$ ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)	大きさ：有限（壊れる） 質量：電子の約1800倍 電荷： $+e$	大きさ：有限（壊れる） 質量：陽子とほぼ同じ 電荷：0

図10 電子、陽子、中性子の基本量

原子の1万分の1から10万分の1くらいのとても小さな領域に、複数の陽子と中性子がひしめいている、というのが原子核のイメージです（図11）。

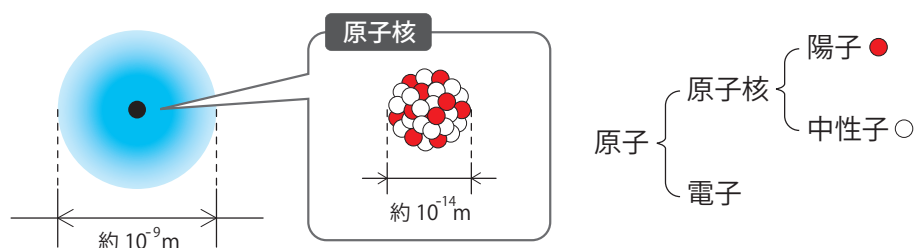


図11 原子と原子核

○原子の種類

原子核に2個の陽子が含まれている原子、ヘリウムを考えてみましょう。この原子の原子核の周りには2個の電子が周回しています。これは、電子が2個周回すると原子全体の電荷が、原子核の電荷 $+2e$ と電子の電荷 $-2e$ が相殺されて0になるため、原子が安定しているからです。もし電子が3個周回していたとすると、原子核の正電荷はすでに2個の電子で相殺されていますから、3個目の電子は原子核から安定な引力を得て周回することができません。

同様に、原子核に3個の陽子を含む原子には、3個の電子が、4個の陽子には4個の電子が、という具合に、水素から始まって、およそ100種類の原子が知られています。原子には電子の数（＝陽子の数）に応じて、H（水素）、He（ヘリウム）、Li（リチウム）…と名前がつけられ、それぞれを元素とよび、H、He、C（炭素）、O（酸素）のように元素の英語名の頭文字を使った元素記号をもっています。1.5で酸素分子を O_2 と表しました。酸素原子が2個からなっている分子を意味します。

これら約100種の原子を電子数の順に並べたものが周期律表です。原子は、周期的な性質のほか、磁石を作る、金属を作る、反応しにくいといった電子の数による個性もあります。それらの性質はほぼ完璧に理解されています。

【コラム】 3. 電荷による力と万有引力の大きさ

正や負の電荷が引き合ったり反発しあったりする力（電磁気的な力という）は万有引力と比べて桁違いに大きいです。たとえば電子 2 個の負電荷（ $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）による電磁気的な反発の力と 2 電子の万有引力（ m （電子の質量） $= 10^{-30} \text{ kg}$ ）の大きさの比は 10^{42} 倍も前者のほうが大きい。

電子と陽子の間に働く原子内部の電磁気的な引力の大きさは 10^{-10} N くらいです。地上では電子も mg の重力を受けていますが、その大きさは、約 10^{-29} N 。これらのことから、原子や分子や電子の運動では粒子相互の万有引力や地球からの重力は全く無視してよいことがわかります。

2.2 分子

原子がいくつか結合して分子ができます。

2つの原子が結合するというのは、もともとはそれぞれの原子核の周りを独立に周回していた電子が、原子核の間の距離が小さくなると互いの原子核を行き来しあうようになることをいいます。イメージとしては、図12に示すように、分子を構成する二つの原子核の周りを電子が周回するようになります。このような電子を介した2個以上の原子の結合を化学結合といいます。O₂、CO₂など、1.5で出てきた分子の表し方は、それぞれの分子を構成する化学結合した原子の種類と数を示しています。

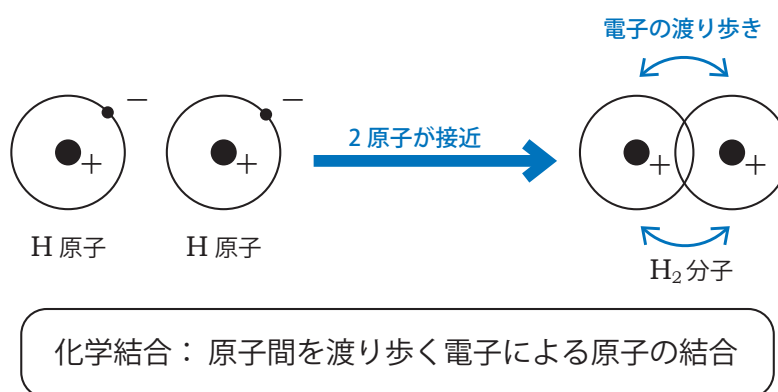


図12 化学結合による分子の形成

ここでは2原子からなる分子を考えましたが、構成する原子の数が100、1000…という大きな分子もあります。これらが高分子とよばれます。そして、グループ内の原子や分子の組み合わせがもっとずっと大きくなったものが物質です。物質の性質の違いは化学結合する原子の数や種類の違いで決まることになります（図13）。

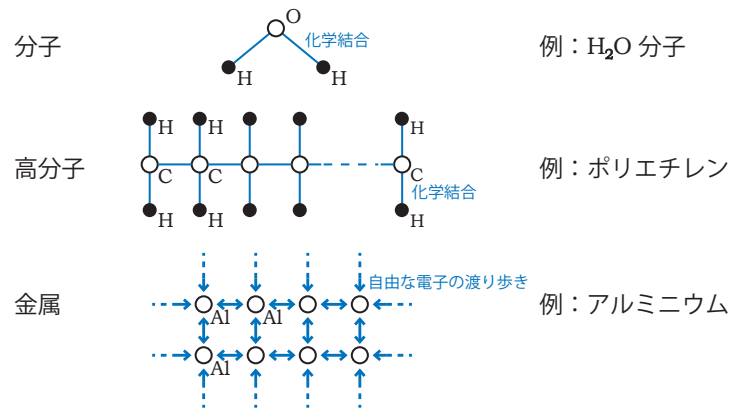


図 13 分子、高分子、物質のイメージ

ここまで、電子が原子核を周回して原子を作り、それらが結合して分子を、分子が集まって物質を構成する様子を見てきました。

では、電子や陽子がばらばらの状態で宇宙空間に存在するのではなく、原子としてまとまって存在するのはなぜなのでしょう。さらに、原子が分子を構成し、物質を構成するのはなぜなのか、なぜそのほうが安定なのでしょう。次からは、原子や分子のエネルギーについて詳しく考えながら、その秘密をのぞいてみましょう。そうやって原子のエネルギーになじんで、原子エネルギーを理解していきます。

2.3 炭素原子のエネルギー

原子1個が持っているエネルギーとは一体何でしょうか。ここでは、炭素原子のエネルギーを例にとって考えてみましょう。

炭素原子は、6個の陽子を含む原子核の周りを6個の電子が周回しています。いま、原子核を1点に静止させてしまうと、静止した $+6e$ の電荷のまわりを、6個の電子が周回していると考えることができます。太陽の周りを6個の惑星が公転している状況と同じイメージです。このとき、炭素原子はどんなエネルギーをもっているのでしょうか。

(1) 電子の運動エネルギー K

電子は原子核の周りを周回していますから、電子の質量を m [kg]、速さを v とすると運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ [J] をもっています。これは、必ず正の量ですから、6個の電子についての運動エネルギーの和 K [J] も、正の値になります。6個の電子の速度 v [m/s] は、大体同じくらいのものだと思っていてもいいでしょう。

(2) 電子の位置エネルギー U_1 と U_2

6個の電子は原子核に引っ張られながら原子核の周りを周回していますから、位置エネルギーをもっていると考えられます。

○原子核の引力による位置エネルギー U_1

ここで、原子核から十分に離れた位置にある電子の位置エネルギーを0としましょう。さあ、電子の持っている位置エネルギーを考えましょう。1.2で与えた位置エネルギーの定義から、原子核から無限の遠方にある6個の電子を原子内の位置まで我々がそっと運んでくるのに必要な仕事が6個の電子の持つ位置エネルギー U_1 になります。

電子は原子核に近づくと次第に強く原子核に引かれますから、無限の遠方からそっと運ぶには、電子を原子核と反対側に引っ張りながら原子核の方に近づけないといけません。これは図1で仕事が負の場合に当たります。

同じことですが、考え方を変えて、原子内の電子を位置エネルギーが0の無限遠点までそっと運ぶことを考えましょう。原子核に引かれている電子を原子核から引き離していくのですから、われわれは正の仕事をしなければいけません。正のエネルギーを加えた結果、位置エネルギーが0になるのですから、元の位置の電子の位置エネルギーが負であることがわかります。

この結論は、「物体は位置エネルギーが減る向きに力を受けている」という1. 2 (B) で述べたことを思い出すと理解できます。電子がどこにいても原子核の方向に引力が働いているのですから、原子核に近いほど位置エネルギーは小さくなるのです (図 14)。

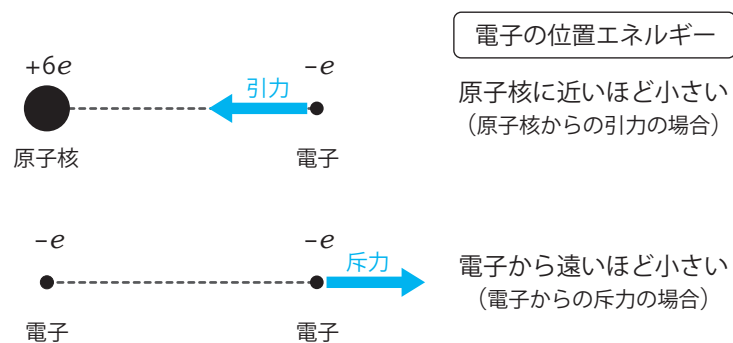


図 1 4 引力と斥力による電子の位置エネルギー

6 個の電子すべてに対し引き離し作業を繰り返すのですから、 U_1 は、負となります。

○仲間の電子からの斥力による位置エネルギー U_2

6 個の電子は互いに反発しあっているため、仲間の電子の反発力による位置エネルギーも持っています。電子同士が十分に離れた位置にあるときの位置エネルギーを 0 とすれば、有限な距離にいる 2 個の電子の位置エネルギーは、距離が近ければ近いほど正で大きくなります。

2 地点 x_1 と x_2 に 2 個の電子をそっと持ってくるとき、われわれはどれだけ仕事をするでしょうか。まず 1 個の電子を x_1 に持ってくるには全然仕事がいりません。何の力も働いていないからです。 x_1 に電子がいる状態で、それによって反発力を受けている 2 番目の電子を x_2 まで持ってくるには正の仕事をしないといけません。そういうわけでこの電子対の持っている位置エネルギーは正になるのです。

こうして対の電子がいるところに第 3 の電子を無限の遠方から所定の位置まで運ぶ、第 4 を運ぶ…。こうやって、電子同士の反発力による位置エネルギー U_2 が正であることがわかります (図 14)。

以上、(1)、(2) から、6 個の電子のエネルギーの総量 E [J] は、

$$E = K + U_1 + U_2$$

で表されることが分かります。(量子力学によるきちんとした議論では、他にも考慮すべき寄与がありますが、無視できるくらい小さいためにここでは省略します。) E は運動エネルギーと位置エネルギーの和からなっています。地上で投げ上げたボールの全エネルギーが、運動エネルギーと地球の重力による位置エネルギーの和からなっているのと同じです。

2.4 炭素原子をばらばらに

○原子のばらばら状態

6個の電子を原子核から無限遠方に引き離し、かつ、6個の電子のそれぞれも互いに無限に引き離して静止させている状況を考えましょう。この状態を原子のばらばら状態と呼びましょう。

この状態では、電子は静止していますから、運動エネルギー K [J] は0です。原子核からの引力による位置エネルギー U_1 [J]、電子による反発による位置エネルギー U_2 [J] は、この状態で0であるとしてその正負を議論しました。よって、ばらばら状態の炭素原子のエネルギーは $K = U_1 = U_2 = 0$ すなわち E [J] は0です。

○ばらばら状態より原子でいるほうが安定

実際にはこのようにばらばら状態にはならないで、炭素原子はこの世界に存在しています。

これは、ばらばら状態でいるよりも、電子が原子核の引力を受けてその周りを周回し、炭素原子を構成している方がエネルギー的に安定であることを意味しています。炭素原子が1個だけ存在するのであれば（あとは、まったくの無の世界）、ばらばら状態の炭素原子は、エネルギー保存則からいっても、永遠にばらばら状態のままです。

現実には、そうではなくて、動き回っている炭素原子もいれば他の原子もいるし、光も存在するし、飛び回っている電子もいる。これらと、ばらばら状態の炭素は衝突して動き出したり、光の粒を吸収したり放出したりします。こうやって、はじめばらばら状態だった炭素原子のエネルギーは増えることも減ることもあり得ます。その確率を計算すると、エネルギーを減らす過程の確率が大きいことが分かっています。もしも炭素原子にとって、ばらばら状態のエネルギーより低いエネルギーの状態が可能であれば、やがて必ずその状態に落ち着くのです。ですから、現実の（ばらばら状態でない）、炭素原子のエネルギー E は

負の値をとっていることがわかります。

○原子の E の値が計算できる

原子のエネルギー E が具体的にどのような負の値をとるか、電子が原子核からどのくらい離れて周回しているか、などのことは、量子力学で計算できます。現実の炭素原子のエネルギーがばらばら状態からどのくらい低いかが分かれば、その分のエネルギーを（光の粒を吸収させるなどして）与えることで、逆に炭素原子をばらばら状態にすることができます。そういう実験と一致する数値的な予言が可能なのです。ここでは、このことを認めて、ばらばら状態でのエネルギーを 0 としたとき、エネルギーが負になっている状態が現実の原子なのだと考えてください。

【コラム】 4. 原子のエネルギーと取り出せる熱量

原子のエネルギーと化学反応で取り出せるエネルギーのおおよその大きさを考えましょう。

電子が複数個（ Z 個とする）周回していても化学反応に関係するのは隣の原子に移動しやすい電子だけです。周回半径が一番大きな電子を考え、この電子を反応電子と呼びましょう。中心には原子核の電荷 $+Ze$ [C] がありますが、仲間の $(Z - 1)$ 個の電子が内側に周回しているので、原子核の電荷は打ち消され、反応電子は $+e$ の原子核の周りを周回している水素原子の電子と同じだと考えましょう。この電子の周回半径を、原子の大きさの典型、 1nm ($= 10^{-9}\text{ m}$) としましょう。 $+e$ の原子核の引力による位置エネルギーは約 -1.5 eV (エレクトロンボルト) になります（計算は省略） ($1\text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}\text{ J}$)。マイナスにしたのは本文で議論したとおりです。運動エネルギーは、正の値ですが、大体 1 eV 程度。絶対値で比べると位置エネルギーも運動エネルギーも大体同じ程度になるのが普通です。両者の和が反応電子のエネルギーです。これは負にならないといけませんが、その絶対値は大体 1 eV 程度になります（ 0.6 とか 3.2 といった値を大体 1 程度の量とみなしています）。(続く)

内側を周回する残りの ($Z - 1$) 個の電子は、原子核との距離も近いし仲間の電子による原子核の電荷の打ち消しも小さいので、受ける引力もずっと強い。また、引力が強くなれば、周回の手数も速くなって運動エネルギーも大きくなる。したがってそれらの電子のエネルギーの絶対値は反応電子の 10 倍、100 倍、 Z が大きいと 1000 倍以上にもなります。しかしそれらは原子の内側にいて化学反応にはかわりません。

化学反応で取り出せるエネルギーとして、反応電子のみを考慮すればよいとなれば、反応の前後に現れる原子や分子のエネルギーはいずれもマイナス数 eV 程度の量だということになります。反応の前と後でそれらを足し引きすれば、取り出せるエネルギーは数 eV 程度のものだという結論になります。

原子や分子がアボガドロ数 ($\approx 6 \times 10^{23}$) の個数が集まると数 g の質量になります (1 モルの質量)。炭素原子は 12 g、酸素分子は 32 g といった具合です。計算を簡単にするために、1 原子、1 分子から取り出せるエネルギーを 1 eV だと仮定すると、1 モルからとりだせるエネルギーは

$$6 \times 10^{23} \text{ eV} = 6 \times 10^{23} \times (1.60 \times 10^{-19}) \text{ J}$$

です。これは約 10^5 J。カロリーになおすと 24 kcal。1 モルを大体 25 g とすると 100 g で約 100 kcal の熱量が取り出せます。栄養表によると、100 g の食物のもつカロリーはこれくらいのもが多いようです。

2.5 分子、物質とエネルギー

分子や物質を構成する原子の中の一部の電子は、1つの原子核の周りを周回するのではなく、分子を構成する複数の原子核の周りを回っています。そうやって原子を化学結合することによって、てんでばらばらな原子の集団でいるより、エネルギーから見ると得をしているのです。

では、なぜ、分子や物質を形成したほうがエネルギーが低くなるのでしょうか。生物も、つまるところ原子や分子の集まりですから、この問いは、なぜ我々はここにいるかという人間の存在の根源の問題にも通じる大問題ですね。

○第一の理由（不確定性原理）

一つ目の理由は、量子力学で証明できる不確定性原理から説明できます。（不確定性原理については、コラム5参照）

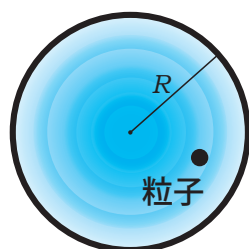
1個の原子核を周回する場合と比べて、2個の原子核の周りを回ったほうが、電子の運動範囲は大きくなります。したがって、電子が取り得る位置の範囲が大きくなります（電子の位置の測定値のばらつきが大きくなる）。右向きにも左向きにも電子は運動するので運動量の平均値は0とみなせます。位置のばらつきが大きくなると、0の周りでいろいろな値をとる運動量のばらつきは、不確定性原理により、より小さくなります。このことは、運動エネルギーがそれだけ小さくなることを意味します（図15）。

運動エネルギーは、分子全体のエネルギーに対してプラスの寄与をしていますから、電子が2個の原子核を周回したほうが、全体的にエネルギーが低くなる傾向があるということになります。3個、4個とたくさんの原子をめぐるほど、1個の電子の運動エネルギーは小さくなる傾向を持ちます。

広い範囲を運動するようになると1個の原子核の周りを常に周回しているのに比べ原子核からの引力は弱くなりそうです。しかし、位置エネルギーが損をした分（引力による位置エネルギーは負ですから、引力が弱いほど位置エネルギーは高くなる。このことを損をすると呼んでいます）を運動エネルギーの減

少（これは得）が補って、結果的に全体的には得をしています。そのようにして、原子はばらばらに独立しているよりも、化学結合して分子を作りたがるのです。

半径 R の球に閉じ込めた粒子



運動量 = 質量 × 速度

● 粒子の位置の測定

{

 その平均：0 (+ x にも- x にも存在)

 ばらつき： R 程度

● 粒子の運動量の測定

{

 その平均：0 (どちら向きにも運動)

 ばらつき： $\frac{h}{R}$ 程度 (h : プランク定数)

図 15 電子が動ける範囲 R [m] と運動量の関係

○第2の理由（パウリの排他律）

もう一つの理由は、電子は2個の電子が同じ位置を占められないという性質を持っていることによります。これをパウリの排他律と呼びます。電子という同種の2粒子が区別できないことに起源をもつ純粋に量子力学的な性質です。

電子同士が、互いに近づくことを避けるこの排他的な性質のために、分子や物質など多くの電子からなる系では、電子同士の反発が弱くなります。その結果、系全体のエネルギーが低くなり、より安定になるのです。電子間の反発力は位置エネルギーに正の寄与をしていましたから、反発力が弱くなるとエネルギーが低くなる（得をする）のです。

分子の形成にとってもこの性質は重要ですが、金属では特に顕著です。金属は自由に原子の間を歩き歩く電子が、各原子につき1個、とか2個いて、これらが電流を担っています。典型的な金属では1 cm³中にこれら自由な電子が10²³個も存在しています。これらの自由に動ける莫大な数の電子の間の反発の力は金属の不安定化を導きそうですが、不確定性原理とパウリ排他律が安定化に寄与していることが分かっています。このことは、物質やわれわれがここにいること自体が量子力学で初めて理解できるということですね。

【コラム】 5. 不確定性原理

原子や分子の世界では物事が確率的にしか分かりません。しかし、その確率は量子力学によって、定量的に、かつ実験結果とも一致する予言が可能です。量子力学の基本をなす概念に、数学的に証明できる不確定性原理というものがあります。

ある粒子に対して、その粒子のどんな状態でも、位置と運動量とを同時に正確に決定することは不可能なのです。これを不確定性原理といいます。「正確に決定する」とはどういうことか理解しないといけません。

陽子1個からなる原子核の周りを電子1個が周回している水素原子を例に考えてみましょう。陽子の位置を原点にとって電子の位置を考えます。

測定によって電子が点として観測され、その位置を正確に知ることができます。そうやって今電子が同じ点にいるとわかっている水素を1万個用意して、1万人の測定者が1秒後の電子の位置を測定したとしましょう。すると測定値はある確率に従ってばらばらな値になるのです。それぞれの位置に見出す確率が予言できるのですから、粒子の位置の平均の値について、実験とも一致する予言は可能です。しかし、各観測者の測定位置は平均値の周りにばらついてしまう。こういう意味で電子の「位置が正確に決まらない」のです。これは、個々の観測者の測定方法が完璧でないからそうなるのではなく、自然とはそう言うものだということです。1万人の測定者を想定しましたが、その都度同じ状態の電子を用意して誰かが1万回測定しても同じことです

量子力学の基本になる方程式は、電子がどこにいるかの確率を決めてくれます。この方程式は、波の動きを決める方程式に似ています。電子がいる確率をその位置の色の濃さで表すとします。すると、この方程式は時間と場所とともにかわる雲の色の濃淡を表すようなものになります。(続く)

上の例で言えば、はじめ一点にあった黒い点が、時間とともに濃淡が広がる感じですが、それが波の形を支配する方程式と似ていると言われるとそんな気もしなくはないでしょう。このことを、電子は点であって点でない、雲みたいなものだ、波として振舞う、位置は正確にわからない、などというのです。

電子の速度もおなじです。測定すれば、速度のある値が正確に得られます。その速度の値を得る確率は位置と同じように、上に述べた基本方程式の解から予言できるのです。速度も観測の平均値は予言できても、実際の個々の観測値はその周りにある確率ではらつくののです。

以下では、速度と質量の積で定義される運動量を考えます。粒子の位置を数多くの回数観測して、そのデータの x 座標のばらつき Δx と、運動量を測定してその x 成分のばらつき Δp_x とが、理論的にも実験的にも決まります。観測値のばらつきと呼んでいますが、位置や運動量そのもののばらつき、あいまいさとみてよいでしょう。平均値のまわりに大きくも小さくも両側にばらつきますが、その目安の Δx と Δp_x は正の量で定義しましょう。このとき、 Δx と Δp_x の間には、

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

という関係が成り立つことを証明できます (y や z 成分も同じです)。これが、不確定性原理の数学的な表現です。 h はプランク定数と呼ばれる量子力学で基本的な量なのですが、大切なことはこの不等式の右辺が0でないことです。 h について深入りはしないでこのポイントだけに注意しましょう。この不等式は水素原子ばかりでなくどのような系の電子についても成立します。

$\Delta x = \Delta p_x = 0$ の場合は、電子は位置も速度も誰が測ってもぴったり同じ値が出るすっきりした粒子の運動状態です。しかし、この不等式の左辺がゼロになるのですから量子力学ではそんな電子の状態はないということになります。ある時刻に電子の位置と速度を同時に指定する、ニュートン力学ではありふれたことは、実はやってはいけないこととなります。その時刻に $\Delta x = \Delta p_x = 0$ が成り立つ状態を指定することになるのですから。

ある系の電子の Δx が0だとします。このとき、この不等式によれば、

$$\Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \div 0$$

つまり Δp_x は無限大になります。0で割るのは気持ち悪いですが、0でなくても、 Δx が小さくなると Δp_x がそれに応じて大きくなるのが元の不等式からわかります。(続く)

$\Delta x = 0$ という極限は、電子がある一点にしかいない（誰が測定してもそこにいる）という電子の状態を意味しています。こういうとき、運動量（速度といってもよい）はどんな大きな値も取れる、ということを意味しています。すごい速度で同じ位置で運動する確率を持っているということになります。

粒子は所詮その運動領域のどこかに存在しているのですから、狭いところを運動している電子の Δx が系のサイズにしたがって小さくなるという状況が考えられます。原子、分子の世界がそうだとと言えます。原子や分子の大きさの中に、電子の位置は限られます。それが小さな空間であればあるほど、運動量は、大きな範囲のばらつきをもつことになります。運動エネルギーが大きな値をとる確率があることになりますから、運動エネルギーの平均値そのものが大きくなることを意味します。結論は、狭い空間を運動している電子ほど高速で運動している、ということです。この結論を図 16 に改めて書きました。ここまで電子を対象にして考えてきましたが、不確定性原理は、粒子一般に対して成り立つ基本原理です。原子核という極微の世界を運動する陽子や中性子をも支配しています。

不確定性原理

粒子が運動する空間が狭い程

運動量がより大きくなり得る = 運動エネルギーの平均がより大きい

図 16 不確定性原理のポイント

【コラム】 6. 原子の存在と量子力学

原子のエネルギーのうち、原子核の引力による位置エネルギーは2.3で見たように、電子が原子核に近づけば近づくほど、小さくなります。このため原子核の周りを周回する電子のエネルギーは、軌道半径がどんどん小さくなるといくらでも小さくなりそうな気がします。

20世紀初頭にいろいろな原子モデルが提唱されましたが、電子の半径が小さくなるといくらでも原子のエネルギーが低くなることは、原子が安定に存在できないことを意味します。究極的な安定状態は、電子が原子核と合体することを意味するからです。電子が引力と遠心力でつりあって原子核の周りを周回していても、光を出して（加速度運動する電荷は必ず光を出すことが証明できます）その分だけエネルギーが減った状態に変わっていきます。いくらでも低いエネルギーの状態があるのであれば、やがてそこに落ちて着く、というわけです。古典的な原子モデルは、この疑問に答えられなかったのです。

不確定性原理とパウリの排他律は、量子力学の2つの大きな柱ですが、電子の軌道半径が0になって原子がつぶれる（周回する電子が同じ点に集まってしまう）ことがないことを保証しています。さらに、軌道が小さくなって、位置エネルギーが小さくなっても、不確定性原理から運動エネルギーが増加しだして、両者がバランスする最低のエネルギーの状態がありそうだということを示唆しています。実際に、この予想が正しいことは、量子力学で示せます。この最低エネルギー状態を基底状態といいます。

基底状態にいる電子は、いくら周回による加速度運動（等速で運動していてもカーブしていれば加速度運動です）をしていても、エネルギー保存則を満たす低いエネルギーの状態がないのだから、光を放出することができず安定に運動し続けるのです。

2.6 原子核のエネルギーと核力

2.4では、原子核を静止した1点として扱い、原子核の内部については考えませんでした。ここでは、原子核の内部に立ち入ってそのエネルギーについて考えてみましょう。

○原子核の不思議

正電荷を持つ陽子同士は、原子核という狭い空間では、互いの距離が極めて小さいためものすごい力で反発しあっているはずです。また、中性子は電荷を持たないから、陽子からは、引力も反発力も受けないはずです。であるのに、なぜ、陽子同士は反発しあわないのか、なぜ、中性子は陽子とあたかも対を組むようにして原子核を構成しているのか。陽子同士、陽子と中性子の間に、電荷による力をはるかに凌駕するような引力が働いていると考えざるを得ません。

○核力という引力の存在

この引力を核力といいます。核力は湯川秀樹による中間子論によって初めて明らかにされた力です。

この核力という引力が核子間に働いていることを認めれば、原子核のエネルギーとして何を考えればよいか分かります。陽子と陽子の間に働く正の電荷同士の反発力は、核力に比べて取るに足りない大きさであることが分かっています。そのことに注意すると、原子核のエネルギーは、核子間に働く引力、核力、による位置エネルギーと核子が動き回ることによる運動エネルギーの和を考えればいいことが分かります。原子の場合には、正負の電荷の引力や斥力による位置エネルギーの和を考えました。原子核の場合は、それらは無視でき、圧倒的な大きさの核力による引力を考えることになります。

2.7 原子エネルギーが大きい理由

これまでいろいろ準備してきました。いよいよ最後のテーマ、原子核分裂によって得られるエネルギー、原子エネルギー（核エネルギー）です。

原子エネルギーが莫大な大きさを持つ本質的な理由は、原子核が極めて小さいからです。

○不確定性原理による運動エネルギーの莫大さ

不確定性原理によって、狭い世界に閉じ込められていればいるほど、粒子の運動エネルギーの値は莫大です〔図 15、16〕。

原子核の大きさは電子の周回半径よりはるかに小さいです（図 11 参照）。したがって、不確定性原理により、原子核内でそれぞれの核子の運動量は、原子内の電子の運動量より 1 万倍から 10 万倍くらいも大きな値をとり得ることになります。運動エネルギーは速度の 2 乗に比例しますから、運動量の 2 乗に比例することになります。

かくして、原子核の内部で、核子の運動エネルギーは電子の運動エネルギーに比べると莫大なものになっているのです。運動エネルギーは正の寄与をします。では、負の寄与はどうか。

○核力による位置エネルギーも莫大

そのような莫大な速度で運動している陽子や中性子がどうして原子核という狭い世界から抜け出ないか。激しい運動をしている陽子と中性子を原子核内にとどまらせている核力という粒子間の引力は、すごい力だということになります。この引力による位置エネルギーの莫大な大きさの得が、運動エネルギーの正の莫大さを打ち消しているのです。そのため陽子と中性子が無限の距離にばらばらに存在している状態より、ごくごく狭い空間に集まって原子核を構成するという低いエネルギーの状態になっているのです。

つまり、運動エネルギーが大きい分、それだけ核力という引力による負の位

置エネルギーも莫大なのです。この位置エネルギーの得が運動エネルギーの損に打ち勝つと言うストーリーは、電子が原子核から無限に離れたばらばら状態より、原子核の周りを周回する原子の中に安定に存在できたのとまったく同じ事情です。違うのはいろいろなエネルギーの大きさの違いだけです。

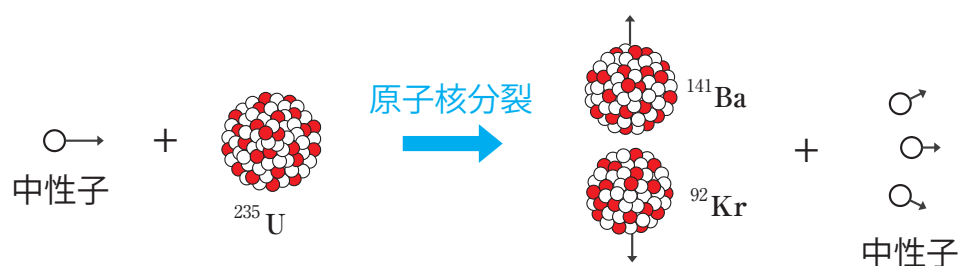
○原子の束縛エネルギーと原子核の結合エネルギー

原子の場合、ばらばら状態に比べてどれだけ原子を構成したほうが安定かというエネルギー（原子のばらばら状態のエネルギーを0としたときの原子のエネルギーの絶対値のこと）を束縛エネルギーと呼びます。原子核の束縛エネルギーに当たる、核力による安定化のエネルギーを結合エネルギーと呼びます。運動エネルギー、位置エネルギーのスケールが違うことに応じて、原子核の結合エネルギーは、原子の束縛エネルギーの10万倍、100万倍の大きさを持ちます。原子の束縛エネルギーの大きさについてはコラム4参照。

○ウラン 235 の核分裂と原子エネルギーの取り出し

ウラン 235 の原子核は92個の陽子と143個の中性子からなっています。ウラン 235 の原子核に減速させた低速の中性子を当てると原子核が分裂します（高速の中性子は瞬間的にターゲットを通り過ぎてしまい分裂の確率が小さい）。

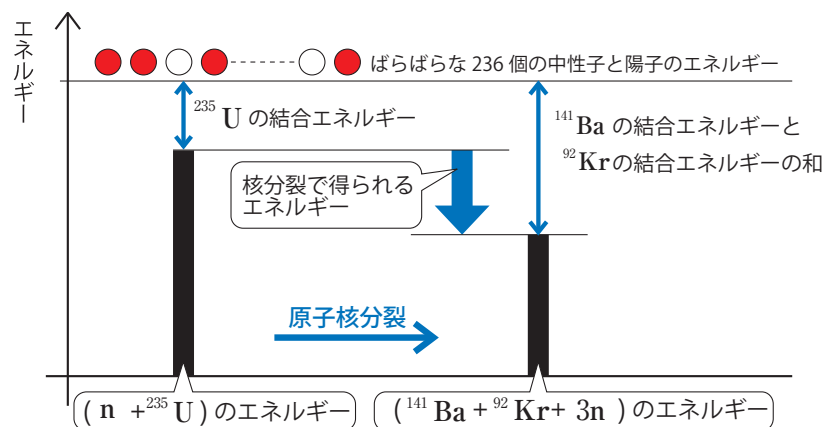
1.6で考えた次の典型的な原子核分裂の過程を考えてみましょう（図17）。



分裂前は 236 個の中性子と陽子があります。そのエネルギーは、236 個の核子のばらばら状態より ^{235}U の結合エネルギー分だけ低くなっています。衝突する中性子は、ばらばら状態でも左辺の状態でもエネルギーは変わらないとしています。

分裂後のエネルギーは、 ^{141}Ba と ^{92}Kr の原子核のエネルギーと 3 個の中性子の和です。3 個の中性子のエネルギーはばらばら状態と変わらないとすると、分裂後のエネルギーは 236 個のばらばら状態のエネルギーより ^{141}Ba の結合エネルギーと ^{92}Kr の結合エネルギーの 2 つの和の分だけ小さな値をもっていることになります。図 18 は、分裂の前後の原子核の結合エネルギーの差から原子エネルギーの大きさが決まることを示しています。

こうしてウラン 235 の場合は、核分裂で得られるエネルギーは核子 1 個あたり約 1×10^6 eV (エレクトロンボルト) 程度だということがわかります ($1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$) (コラム 7 参照)。原子や分子の化学反応から得られるエネルギーは、原子や分子 1 個当たり数 eV です (コラム 4 参照)。



【計算してみよう】 3. ウラン 235 と原子力発電所の出力

^{235}U 235g 中には、 6×10^{23} 個（アボガドロ数）の ^{235}U 原子があります。

核子 1 個当たり核分裂で得られるエネルギーを $1 \times 10^6 \text{eV}$ とします。

- (1) 1g の ^{235}U が全部核分裂すると、得られる原子力エネルギーは何 J でしょうか。
- (2) その原子エネルギーが無駄なく使われると仮定します。0 度の水を 100 °C まで上げるとすると 1 g の ^{235}U で何 t の水の加熱が可能でしょうか。
- (3) 福島第一原子力発電所の第 6 号機の出力は 110 万 kW です（100 万 kW として計算します）。1 日のフル稼働で何 g の ^{235}U が消費されているでしょうか。

(答え)

- (1) $(6 \times 10^{23}/235) \times 235 \times \{(1 \times 10^6) \times (1.60 \times 10^{-19})\}$ J の原子エネルギーを取り出せることになります。これを計算すると、約 10^{11} J になります。はじめの（カッコ）は 1g 中の ^{235}U の原子核の数です。最後の {カッコ} は核子 1 個あたりの原子エネルギーの値（単位は J）です。

- (2) $1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal}$ ですから、1 g の ^{235}U から得られる熱量は約 $2 \times 10^{10} \text{ cal}$ ですね。0 °C の水を 100 °C まで上げるには 1 cm^3 の水に対して 100 cal 必要ですから、100 で割ると 100 °C にできる水の量が g の単位で得られます。 $1 \text{ t} = 1000 \text{ kg} = 10^6 \text{ g}$ です。よって 0 度の水 200 t を 100 °C まで上げることができます。

1g というのは、ふっと吹くと軽く吹き飛ばす量ですから原子エネルギーの莫大さがわかりますね。

ちなみに、原子の中の電子が持っている運動エネルギーや、位置エネルギーは電子 1 個について数 eV です。したがって、燃焼とか化学結合による物質の生成にともなって得られるエネルギーも、電子 1 個について数 eV 程度です（コラム 4 参照）。これは、 ^{235}U の核子 1 個から得られるエネルギーの 100 万分の 1 の程度だとわかります。

このため、核子のエネルギーや原子力として得られるエネルギーを議論するときは、電子のエネルギーは十分無視することができるのです。

- (3) 1 日は 86400 秒。これを 10 万秒（ $= 10^5$ 秒）として計算しましょう。100 万 kW の出力は毎秒 10^9 J のエネルギーを作っているということです。1 日では 10^{14} J 。(1) で計算したように 1 g の ^{235}U から得られるエネルギーは 10^{11} J でしたから、答えは $10^{14}/10^{11} = 1000 \text{ g} = 1 \text{ kg}$

【コラム】 7. 原子核のエネルギーと質量欠損

相対性理論によると、静止している質量 m [kg] の物体は $E = mc^2$ [J] というエネルギーを持っています。 c は真空中の光の速度で $c = 3 \times 10^8$ m/s です。速度 v [m/s] で運動する質量 m [kg] の物体の運動エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$ でした。日常的な速度は $v = 10$ m/s (100 m の世界記録) 程度ですからその違いは文字通り桁が違います。

考えている原子核を構成する核子の総数を A 、そのうち陽子の数を N_p 、中性子の数を N_n とします ($A = N_p + N_n$)。ばらばら状態での陽子と中性子の質量を M_p と M_n とすると、ばらばら状態での原子核のエネルギーは

$$E(\text{ばらばら}) = (N_p M_p + N_n M_n) c^2 = M(\text{ばらばら}) c^2$$

です。最初の等式の(カッコ)の中は、ばらばら状態で持っている全質量 M (ばらばら) です。原子のばらばら状態を考えたときには $E(\text{ばらばら})$ は 0 でした。今度は相対論的にエネルギーを考えているので、たとえ、静止していても(質量) $\times$ (光速の2乗) になっています。

核力が働いて A 個の核子が集まり原子核を構成しているときのエネルギー E (原子核) は、このエネルギーより結合エネルギー分だけ低くなっています。すなわち

$$E(\text{原子核}) = E(\text{ばらばら}) - \text{結合エネルギー}$$

この原子核のエネルギーを

$$E(\text{原子核}) = M(\text{原子核}) c^2$$

と表して、原子核の質量 M (原子核) を定義します。そうすると原子核はばらばら状態と比べて

$$\Delta M c^2 = \text{結合エネルギー}$$

で決まる ΔM だけ質量が軽くなっていることになります。

この ΔM ($= M(\text{ばらばら}) - M(\text{原子核})$) のことを質量欠損といいます。

質量欠損の値が分かれば結合エネルギーの大きさが分かることになります。原子核の質量は質量分析で正確に測ることができるので実験的に質量欠損すなわち結合エネルギーが分かります。

原子核が分裂することによって得られるエネルギーを質量欠損を基にして考えましょう。関係する原子核の質量を原子核分裂の前と後で求めます。これは分裂前と後に存在する全ての原子核のそれぞれの質量欠損が分かれば求まります。核分裂の前後で全質量がどれだけ軽くなったか、その質量の差に c^2 をかければ、それが原子核分裂で得られるエネルギーです。

^{235}U の核分裂では、質量欠損の値から原子核 1 個当たり、約 200 MeV のエネルギーが得られることが分かっています (1 MeV = 10^6 eV)。核子が約 200 個関与するので、核子 1 個当たり約 1 MeV の原子エネルギーが得られることになります。この値が 2.7 の最後に書いたことです。

あとがき

エネルギーを、いろいろな例を挙げながら、そしてねらいを原子や原子核のエネルギーに置きながら解説してきました。量子力学にも触れたこのパンフレットが、これを偶然手にした人々にとって、読みやすい内容ばかりではないことは認めなければなりません。小冊子という限られたスペース、それに、我々の限られた能力のため、このパンフレットは、「広く一般の方々へ」というはじめの意図からずれた部分も含むものとなりました。しかし、意識的にエネルギー問題を考える人々が増えました。そういうの方々にとって、科学的な思考をする一助になるものかどうか、あるいは、理工系進学を志す大学受験生にとって、教室や教科書の教えをより深く理解する一助になるものかどうかは、このパンフレットの存在意義にかかわると思っています。読者諸兄の感想とご意見をお待ちしています。

2011 年 8 月 編集者一同
(代表 千葉市科学館館長 大高一雄)

謝辞

このパンフレット作成に関連して、多くの方々にご協力をいただきました。
最後にそれらのお名前を記して感謝の意を表します。

監修： 放射線医学総合研究所

イラスト： 瀧山愛（千葉大デザイン学科）

渡邊理恵（千葉大デザイン学科）

パンフレットへのコメント：

小川建吾（千葉大名誉教授）

渡辺正（東京情報大学名誉教授）

津久井雅史（千葉大学准教授）

エネルギー読本

—原子エネルギーの理解に向けて—

2011 年 9 月 29 日 初版印刷

2011 年 9 月 30 日 初版発行

企画・制作 千葉市科学館

大高 一雄（編集責任者）

〒260-0013 千葉市中央区中央 4-5-1

電話 043-308-0511（代表）

e-mail : energy@kagakukanQ.com

印刷・製本 凸版印刷株式会社

