

13 原子のエネルギー

13.1 物質の構造

私たちの身の回りの物質は、一体どのようにできているのでしょうか。仮説・検証といった手法の他に、物理学の場合には細かく分割して調べていく、という方法がよくとられます。その方法に則って、私たちの体について、その構造を調べてみましょう。

私たちの体について考えると、例えば「器官」とか「臓器」とかいったものに分割することができます。例えば心臓です。体の中で血液を体中に送り出すための器官であり、他の器官とは区別して考えることができます。では、心臓はどのような構造をしているのでしょうか。心臓の内部の弁や、心臓自身に血液をいきわたらせる動脈(冠状動脈)さらに、心臓を動かす筋肉である心筋などに分割して考えることができるでしょう。これらの組織は、それぞれ、細胞で構成されています。

では、細胞は何で構成されているのでしょうか。細胞膜、ミトコンドリア、核、原形質などで構成されています。これらは複雑なたんぱく質によって形成されています。たんぱく質はアミノ酸が結合したものです。そしてアミノ酸はいくつかの原子が結合したものです。原子が結合してできたアミノ酸のようなものは「分子」と呼ばれています。原子とか分子の考え方は、古代ギリシャのデモクリトスに見ることができます。しかし、きちんと提唱されたのは、今から200年ほど前、1811年のことです(アボガドロの分子説)。

それでは、原子の大きさはどれくらいでしょうか。説明してみましょう。実は、原子の大きさは、種類によるものの、大体0.1nm程度です。といっても、nm(ナノメートル)の意味が分からなければイメージが湧きませんね。nmのnは、kmのk、cmのcなどの仲間です。kが1000を表しているので、 $1\text{km} = 1 \times 1000\text{m}$ という意味になります。cは1/100を表しているので、 $2\text{cm} = 2 \times 1/100\text{m}$ という意味になります。nは、1/10億を表しているので、 $0.1/10\text{億m} = 1/100\text{億m}$ 程度、あるいは1/1億cmということになります。これでもイメージできないと思います。1cmの1万分の1の1万分の1程度、といった表現ではどうでしょうか。

それでは原子はどのような構造をしているのでしょうか。原子は原子核とそれを取り巻く電子で構成されています。一方、原子核はプラスの電荷を持ちます。原子の中のこうした構造がわかるようになったのは、ちょうど100年ほど前の1911年ごろのことです(トムソンの実験やラザフォードの原子構造モデル)。原子の中の原子核は、さらにその1万の1以下であることが知られています。1兆分の1cm以下の大きさということですね。

さて、原子にはいろいろな種類があります。水素原子、酸素原子、鉄原子、金の原子、セシウムの原子、ウランの原子などなどです。これらの原子は何が違うのでしょうか。それは、原子核の違いです。原子核は、主として、電気を帯びていない中性子と、プラスの電気を帯びている陽子とで構成されています。中性子と陽子は、電気的な違いはあるものの、同じくらいの質量を持っています。こうしたことがわかってきたのは、80年ほど前の1932年ごろのことです(チャドウィックによる中性子の存在の確認)。通常、原子核の陽子の数と、原子核の周りを取り巻く電子の数は同じです。そうして電気的には中性になっています。原子の周りの電子の数や状態が原子の性質を決めています。その性質に応じて原子同士が結合し、分子を作ることになるのです。

- 電子

マイナスの電荷。原子核に比べて軽い。陽子の数と一致。

- 原子核

プラスの電荷。電子に比べて重い。陽子と中性子からなる。

- 陽子

プラスの電荷。電子の数と一致。

- 中性子

電荷を帯びていない。陽子と同じぐらいの質量。

ここでいくつかの関連用語を整理しておきましょう。

原子番号

ある原子の電子の数、または陽子の数。原子の化学反応の性質は、原子の電子の数で決まっています。そこで、原子番号は原子の性質を決める重要な情報です。

質量数

陽子と中性子の数の合計を質量数といいます。電子は非常に軽いので、質量数は原子の質量に、ほぼ比例します。

元素

原子番号で分類された原子の種類を元素といいます。

同位体

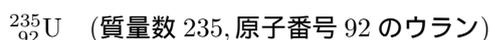
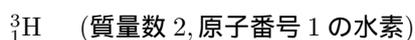
同じ元素でも、違う種類の原子がありえます。なぜならば陽子の数が同じでも中性子の数が違う場合があるからです。中性子の数が異なる原子を、互いに同位体といいます。

例えば、水素原子は、原子番号 1 ですから、陽子の数が 1 個の原子です。ところが、中性子の数が 0 個の場合 (質量数 1)、1 個の場合 (質量数 2)、2 個の場合 (質量数 3) があります。これらは互いに同位体です。

同位体は同じ割合で存在するものではありません。例えば水素の場合、中性子が一つもない、質量数が 1 であるような水素が圧倒的に多く存在しています。

先にお話ししたように、原子が他の原子とどのように結合するかは、原子の電子の数で決まります。そこで、同位体については、どれも同じような化学的な性質を持っています。同じ元素ならば同じように反応するということです。

原子番号と質量数がわかるような原子の表記方法があります。例えば次のような書き方です。



周期律

原子番号が増えるにしたがって電子の数も増えていきます。ところが、原子番号の順番 (当初は原子量の順に) に元素を並べたとき、周期的に似たような性質の元素が現れることがわかりました。このような性質を周期律といいます。

周期表

ロシア人の化学者であるメンデレーエフは、周期律を整理し、表にまとめました。

周期律に基づいて元素を並べて表に表したものを周期表と呼んでいます。周期表はプリントにして配布しました。

例えば、原子力発電所の事故で名前をよく聞くようになったセシウムを探してみましょう。すると、セシウムは、カリウムの下に書いてあることがわかります。これはセシウムがカリウムと同じような性質を持っていることを意味しています。カリウムは体の中にある元素で、日常生活の食事に取り込まれ、やがて排泄されます。したがって、セシウムも同様であると考えられます。それでは、ストロンチウムはどうでしょうか。ストロンチウムはカルシウムの下に位置する元素です。そこで、体内ではカルシウムと同様に振る舞います。カルシウムは骨になります。カルシウムは体内に取り込まれにくい元素として知られていますが、同時に、一度骨に取り込まれてしまうと、なかなか体外に排出されません。

こうしたことは原子力を考える上での重要な基礎知識になります。中学校で学習した内容もあると思います。これを機に復習してください。

13.2 原子の中に作用する力

原子の中には何種類かの力が作用しています。もっともわかりやすいのは電気の力です。電気は、プラスとプラスは反発し、マイナスとマイナスも反発します。そして、プラスとマイナスは引き合います。電子はマイナスの電荷を持っていますし、原子核はプラスの電荷を持っています。そこで、二つの電荷は引き合います。電子が原子から勝手に離れていかないのは、この力があるからです。

ここまでお話しすると、では、非常に小さい原子核の中にプラスの電荷を持った陽子がいくつも存在できるのはなぜだろう、と思うと思います。原子核の中では、非常に狭い範囲にいくつものプラスの電荷がひしめき合っています。プラスとプラスは反発しますから、非常に大きな反発力が発生しているはずですが、例えば磁石を考えてみてください。磁石は近づければ近づけるほど強い力で引き合ったり反発したりします。電気も同じように、近づけば近づくほどその力は大きくなります。非常に接近した原子核の中で、プラスの電荷を持った陽子同士は激しく反発するはずですが、それを狭い範囲に止めているのは、電気の力の反発を抑え込むような、もっと強力な力が作用しているからであると考えられます。このような、非常に強力な力は、核力と呼ばれています。この核力についての理論を唱えたのは日本人の物理学者湯川秀樹です。今からおよそ 80 年前の 1934 年のことです。

力とエネルギーは別の概念ですから区別しなければなりません。しかし、大きな力をもたらすのは大きなエネルギーです。例えば、原子核の中の状態が変化したりすることで、原子核をまとめている力の増減があると、エネルギーが発生します。この核力にかかわるエネルギーが原子力と呼ばれるエネルギーです。

しかし、そのような小さな範囲にある原子のエネルギーを、別の形のエネルギーとして取り出すことはできるのでしょうか。

13.3 核化学

放射性崩壊

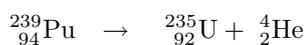
今からちょうど 200 年ほどまえ、ノーベル賞を受賞 (1902, 1911) したキュリー夫人 (マリー・キュリー) とその夫ピエール・キュリーは、ラジウムやポロニウムを発見 (1898) し、研究していました。このような物質が、当時の物理学者や化学者の注目を集めたのはなぜでしょうか。それは、それらが放射線を出すようになったからです。特定の物質から放射線が出る現象や、放射線を出す性質を放射能といいます。当時は、放射線を出す物質 (放射能を持った物質: 放射性物質) が次々と見つかりました。そこで、放射線が何であるか、ということや、何が放射線を出すのか、という問題が重要な課題でした。

放射線には、 α 線、 β 線、 γ 線があることがわかってきました。そして、 α 線の正体を突き止めたのもラザフォードでした。 α 線の正体は、ヘリウムという物質の原子核の高速な流れでした。その後、別の研究者によって β 線の正体は電子の高速な流れであることがわかり、最後の γ 線は強い電磁波であることがわかりました。

ヘリウムの原子核は陽子 2 個中性子 2 個で構成されています。ある一つの原子の原子核からヘリウムの原子核が飛び出すとどうなるでしょうか。原子核を構成する粒子の数が 4 つ減るので、残った原子核は 4 つ減ります。また、電気についてもプラスの電荷は 2 つ減ります。このように、 α 線を出して原子核が変化することを崩壊と言っています。 α 線を出すときには、マイナスの電子が飛び出すだけなので、原子核を構成する粒子の数は変わりません。ただ、プラスの電荷が一つ増えることになります。ベータ線を出して原子核が変化することをベータ崩壊と呼んでいます。 β 線の場合には、質量の変化もほとんどなく、また、電荷についても変化がありません。そこで、原子核については変化がありません。 β 線を出して原子核の様子が変化することを崩壊と言っています。これらの原子核の変化をまとめて、原子の放射性崩壊と呼んでいます。

このように、原子核は放射性崩壊によって原子核の種類が変わることがわかりました。こうした原子核の変化によってエネルギーが発生します。

ときどき、アルファ崩壊やベータ崩壊を化学式のように書き表すこともあります。たとえば、原子炉の中で生成され、人の肺の中に入ると肺がんを引き起こすので猛毒として知られるプルトニウムのアルファ崩壊は次のように書くことができます。



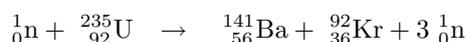
また、同様に、原子炉の中で生成され、人体に取り込まれるとカリウムと同様に筋肉組織などに入り込みやすい ${}^{137}\text{Cs}$ セシウムは次のように書くことができます。



e^{-} と書いたのは電子 (β 線) です。数が合うように考えると、 ${}_{-1}^0e^{-}$ と書いてもいいかもしれませんが。ちなみに、ベータ崩壊した後に生成される Ba (バリウム) は、すぐに崩壊を起こしてガンマ線を放出するものが多いです。そこで、このガンマ線を検知することで ${}^{137}\text{Cs}$ の存在がわかります。

核分裂

ある条件下では、原子核が二つから三つに分裂することがあります。これを核分裂と呼んでいます。原子炉内で発生する核反応の代表例が核分裂です。原子炉内では、 ^{235}U (ウラン 235) に中性子がとらえられることで発生します。この核分裂についても、同様に、化学式のように書き表してみましょう。

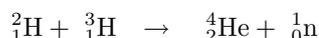


一般に、核分裂は激しい現象で、分裂した後の原子核がどのようなものになるのか、きちんと決まっているわけではありません。

ところで、錬金術が化学の基礎になったことは以前にお話ししたと思います。錬金術とは金以外の物質を合成して金を作るという技術です。これは現代の言葉で表現すると、ある原子から金の原子を作ることに挑戦していたわけです。しかし、それは実現しませんでした。ところが、核分裂反応を起こすことによって、ウランから様々な原子を作ることができるようになりました。もちろん、意図的に金原子だけ作ることはもちろんできませんので、錬金術とは言えません。しかし、人類は一つの原子から別の原子を作る方法を知ったわけです。核分裂反応が発見されたのは 1938 年のことでした。

核融合

その他にも核融合と呼ばれる反応があります。これは、例えば水素原子からヘリウム原子ができる反応です。核分裂が重い原子核が分裂して軽い原子核になったのとは対照的に、軽い原子核同士が結合して重い原子核になる現象です。その反応は複雑ですが、たとえば、次のような反応も含まれています。



太陽の中では、まさに、水素からヘリウムが生成される反応が起きていると考えられます。人類は核融合反応を用いた発電を試みていますが、今のところ全くうまくいきません。

13.4 物質とエネルギー

1905 年のアインシュタインによる相対性理論は、一つの驚異的な結果を示していました。それは、質量はエネルギーと等価であるという結論です。具体的に、質量 m の物体は次の式で表されるエネルギー E と等価になります。

$$E = mc^2$$

ここで c は光の速度です。この式が意味することは何でしょうか。例えば何らかの反応で、物質の質量が変化することがあれば、その質量の変化量に応じてエネルギーが発生することを意味します。

実際、核分裂では、反応の前後で 0.1 % 程度質量が減ります。この減った分がエネルギーとして放出されます。例えば、東京電力の 1 日の発電量を

$$3000 \text{ 万 kW} \times 24 \text{ 時間} \simeq 2.6 \times 10^{15} [\text{J}]$$

としましょう。すると、おおよそ、30kg の ^{235}U を核分裂させればまかなえます。

核融合の場合はどうでしょうか。太陽の中での反応をすべて考えると、反応の前の水素からヘリウムに変わったとき、おおよそ 0.7% の質量が減ります。そこで、東京電力の 1 日の発電量は、4kg 程度の水素の核融合反応でまかなうことができます。

さらに、もしも反物質と呼ばれるものを用いることができれば、質量のすべてをエネルギーに変えることができます。簡単な計算では、日本の 1 年間の発電量は、わずか 40kg の質量でまかなうことができることになります。

タンカーで原油を沢山輸入して発電していることを考えると信じられないくらい少ない物質でエネルギーをまかなえる計算になるので、人類がその魅力に引かれるのは理解できなくもありません。