

3-1



原子はどのような構造になっているのか

—— 原子核と電子

ここでは原子力の話の中でも、土台になるテーマ、つまり原子核の構造とその反応について見ていくことにしましょう。

先に述べたように、すべての物質は原子からできています。原子は電子でできた雲、**電子雲**と、その電子雲の中心にある**原子核**からできています。

原子核は小さくて重い、すなわち密度の高い粒子であり、その質量(重さ)は原子の質量の99.9%以上を占めます。原子核反応を知るためには原子核を知らなければならず、原子核を知るためには原子を知る必要があります。

● 原子はどのような形？

原子はどのような形をしていると思いますか？ サイコロのような形でしょうか？ ビー玉のような形ですか？ それともヒトデのような形ですか？ まさかガンダムのような形をしていると思う人はいないでしょうが、原子の形は正確に言うとうわからないのです。

というのは、「原子を見たことのある人は誰もいない」からです。なぜ誰もいないのか、といえば、「原子を見ることはできない」か

らです。でも、「現代文明が未発達なので見ることはできない」という意味ではありません。

現代科学で微粒子の解明を支える量子論の前提とも言うべき大原則のために「原子を見ることはできない」ということになっているのです。今後、文化、技術がどれほど進歩しても、原子を直接観測することはできない、ということです。

この大原則を「**不確定性原理**」と言い、ドイツの理論物理学者のヴェルナー・ハイゼンベルクが発見しました。

この大原則のおかげで、私たちは原子の形を正確に知ることはできませんが、これまでの実験の結果によって、原子の形を推測することはできます。そこで前述のように、原子は電子でできた雲のような電子雲で囲まれた球状のものと考えられているのです。

● 原子の形と大きさがわかってきた

先のような事情のため、原子がどのような形で、どのような構造をしたものなのかという原子モデルは、昔から各種のタイプが考えられてきました。しかし、それらのモデルはどれも不完全であり、実験事実を正確に説明することはできませんでした。

そのような試行錯誤の結果、量子論に基づく量子論モデルが誕生しました。このモデルを用いると原子のすべての性質、反応を細大



ヴェルナー・ハイゼンベルク：量子力学の分野に大きな貢献をし、1932年にノーベル物理学賞を受賞。

(出所：ドイツ連邦公文書館)



漏らさず合理的に説明することができます。そのため現代では、このモデルが最も正しいものと考えられています。

それによれば、原子は複数個の電子 e からなる電子雲に囲まれた「球形の雲」のようなものと考えられています。電子は電荷を持った粒子であり、電子1個の電荷は -1 です。したがって z 個の電子からなる電子雲の電荷は $-z$ となります。電子の質量は無視できるほど小さいことがわかっています。

げんしりょくの窓

原子の形はわからない

不確定性原理とは量子論の基本的な原理であり、発見した人の名前、ヴェルナー・ハイゼンベルク(1901～1976)から「ハイゼンベルクの不確定性原理」と言います。

それは、「2つの量を同時に正確に決定することはできない」というもので、2つの量というのは、原子を考える場合には「位置とエネルギー」と解釈されます。

私たちが原子を構成する粒子、例えば電子のことを考えるときには、「どういう状態の電子」というように、電子の状態を指定しています。それはつまり、「電子のエネルギー状態を決めて」考えているということになります。したがって、この原理は結局、「電子の位置を決定することはできない」と言っていることになります。

原子は電子に囲まれているので、電子雲の形が原子の形ということになります。その電子の位置が決定できないということは、すなわち、「原子の形を正確に決定することはできない」ということになります。つまり、原子の形は原理的に「わからない」のです。

その電子雲の中心に1個の原子核が存在しますが、電荷は $+z$ であり、電子雲の電荷と相殺するので、原子は全体として電氣的に中性になります。

原子の直径は、概ね 10^{-10} m ($1 \text{ \AA} = \text{オングストローム}$)のオーダー(スケール)であり、原子核の直径は 10^{-14} mのオーダー、つまり原子の直径の1万分の1です。

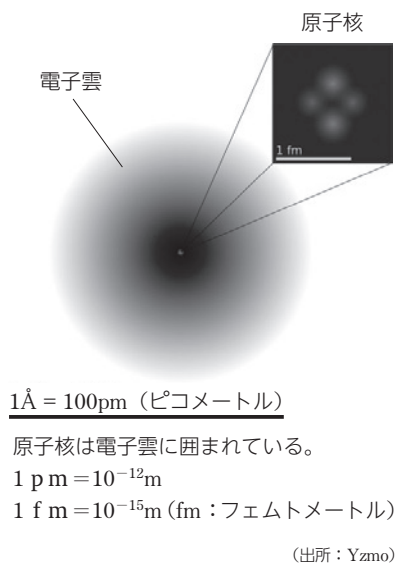
東京ドームを2つ貼り合わせた“巨大ドラ焼き”を原子とすると、原子核はピッチャーマウンドに転がるビー玉のような大きさということになります。原子核がいかに小さいものであるかということに注意してください。

● 明らかになった原子構造

原子は電子雲とその中心の原子核からなる、と言いましたが、このような原子構造が明らかになったのは20世紀に入ってからで、1913年以降のことです。

その10年前の1904年には第1章でも紹介したブドウパンモデルが提出され、そこではプラスに荷電したパン生地(現在の原子核に相当)の中に、マイナスに荷電した干しブドウ(電子)が散らばっ

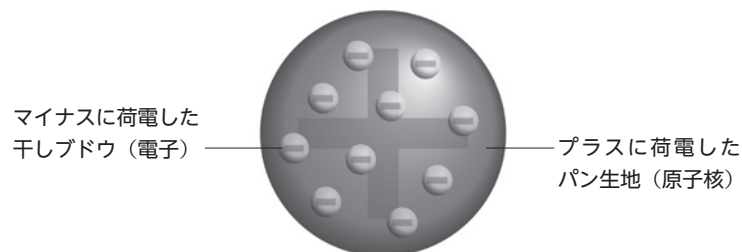
図 3-1-1 ● 原子の理論モデル



ているようなものと考えられていました。

このわずか10年の間、原子構造論は大いに進化したことがわかります。

図 3-1-2 • ブドウパンモデル

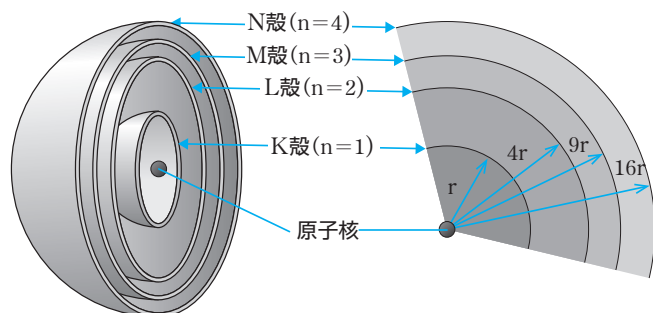


①電子殻

現代科学で原子構造という場合には、電子の所在と電子雲の形を言うことになります。

それによると、電子は原子核の周りに球殻状に何層にも重なって

図 3-1-3 • 電子殻の構造



存在する^{でんしかく}電子殻に入っているとされます。

各電子殻には量子数という正の整数 n がつけられ、電子殻の直径 r (n^2 に比例)、エネルギー E (絶対値が n^2 に反比例)、収容可能な電子数 N ($2n^2$ 個) などが量子数によって決められています。

②電子軌道

これらの電子は原子が反応する、あるいは各種測定も含めて外部と相互作用するときには、電子殻から電子軌道に移動します。

その軌道にはs軌道、p軌道、d軌道など、目で見えて楽しくなるような形のものが揃っています。

興味のある人は量子化学の本を開いてみてください。



電子殻は電子が入る部屋ではない

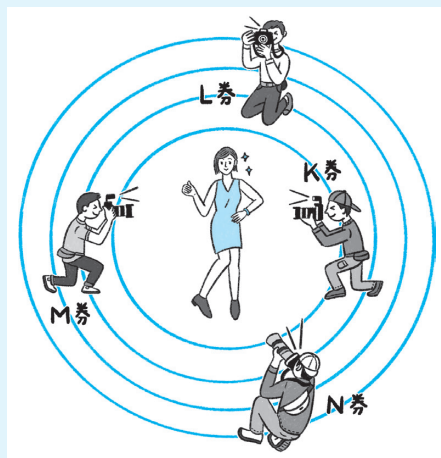
電子は電子殻に入ると言いましたが、このように言うとはよく問
い直されるのが、「それは原子核の周りに電子殻という部屋が用
意されているということか？ それならば、電子殻に入る電子が
ないときには、原子核の周りには電子殻という空き部屋が存在す
るということか？」ということです。

これは、そのように説明するのが最もわかりやすいので、どの
教科書でもそう説明しているのですが、実はそうではありません。
電子殻というのは部屋ではなく、電子のエネルギー状態なのです。

例として、モデルさんの写真撮影会を考えてみましょう。この
場合のモデルさんは原子核です。そして撮影者は電子で、撮影会
の入場料がエネルギー E です。

モデルさんに最も近いところで撮影できるK券が最も高額です。
K券を購入した撮影者(電子)は、モデルさん(原子核)のすぐ近く
を好きなように動いて撮影することができます。L券、M券とな
るにつれて入場料は安
くなりますが、モデル
さんからは遠くなりま
す。

別に部屋が用意して
あるわけではありません。
ですから、電子が
いなくなったら原子核
の周りには何もなくな
ります。



4-1

 放射線と放射能は違うモノだと知っておこう

—— 放射線の種類と強度

新聞やテレビでご存じの通り、原子爆弾の話にはもちろん、原子炉の事故、放射線汚染食品など、原子核が関係したニュースにいつも出てくるのが「**放射線**」と「**放射能**」です。前に少し説明しましたが、この2つは似たような言葉であることから混同されがちですが、まったく異なった概念です。では、その違いはどこにあるのでしょうか？

● 核分裂で生まれる放射線の種類

原子核が分裂反応を行なうと、原子核の大きめの破片と、小さな破片、および高エネルギー電磁波が発生します。これらはまとめて**核分裂生成物**と呼ばれますが、そのうち、小さめの破片と電磁波を特に放射線と呼びます。

核分裂反応に限らず、すべての原子核反応で放射線は出てくるものと考えていいでしょう。一般に放射線は、生物の命を奪うことがあるほど危険なものです。

放射線には多くの種類がありますが、主なものとして **α 線**、 **β 線**、 **γ 線**、**中性子線**などがあります。それぞれを簡単に見てみましょう。

① α (アルファ) 線

ヘリウム原子(^4He)の原子核、つまり2個の陽子と2個の中性子、合わせて4個の核子の塊が高速で飛んでいるものを **α 線**と言います。ここで言う高速とは、新幹線の何倍(時速数百km、秒速何十m)というようなものではなく、光速の何分の1(秒速何万、何十万km)という超高速です。

② β (ベータ) 線

電子 e^- が光速に近い高速で飛んでいるものです。

③ γ (ガンマ) 線

α 線や **β 線**と違って粒子ではありません。 **γ 線**は波長が短く高エネルギーの電磁波です。レントゲン写真で使うX線(4-5節参照)や、宇宙線に含まれる高エネルギー電磁波、あるいは紫外線と同じものですが、原子核反応でできるものを特別に **γ 線**と呼んでいます。

④ 中性子線

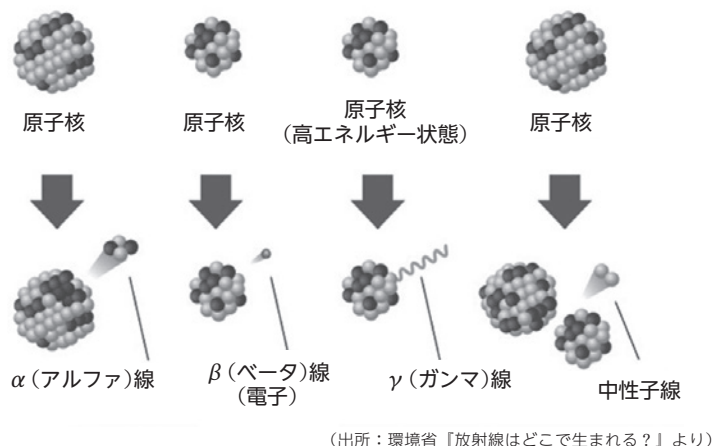
中性子が高速で飛んでいるものです。中性子は電荷も磁性も持っていないので、生体の中にほぼ無抵抗で入ってくるため非常に危険です。

⑤ 重粒子線

炭素をはじめ、小さい原子核を線形加速器などで高速に加速したものです。主に人工でつくり、医療などに用います。



図 4-1-1 ● 放射線のいろいろ



● 放射線の強度を示す指標

放射性物質は放射線を放出しますが、放出される放射線の量やエネルギー（一般に言う放射能の強さ）は、放射性物質の種類や量によって変わります。

ひと口に放射線の量と言っても、見方によっていろいろあります。放射性粒子の個数もあれば、放射線のエネルギーもあります。また人体に与える被害の多少もあるでしょう。

ということで、放射線の強度を表すために 3 種類の指標が用意されています。

①放射線量：ベクレル (Bq)

1 秒間に何個の粒子が放出されるかを表した数値です。1 秒間に 1 個の粒子が放出されるときを 1 ベクレルと言います。したがっ

て放射線の種類やエネルギーはこの数値には関係しません。

1 モルの原子数は 6×10^{23} (6000 垓：1 垓 = 10^{20}) 個ですから、この数値は非常に大きくなることがあります。

②吸収線量：グレイ (Gy)

生体に吸収された放射線のエネルギー量を表す数値です。1 J (ジュール) / kg のエネルギーが吸収されたときを 1 グレイと言います。したがって、これも放射線そのものの種類には関係しません。

③線量当量：シーベルト (Sv)

同じエネルギーの放射線でも、放射線の種類によって人体に大きなダメージを与えるものと、それほどではないものがあります。例えば、α 線と β 線を比べると、大型の粒子である α 線のほうが 20 倍も有害です。この有害性の程度を線質係数と言います。主なものを表に示しました。

図 4-1-2 ● 放射線の有害の程度を表す線質係数

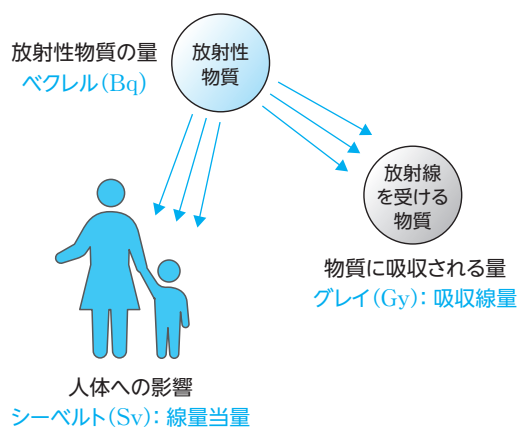
放射線	α 線	β 線	γ 線	中性子線	陽子線
線質係数	20	1	1	10	5 ~ 20

したがって人体に対するダメージを測るためには、吸収線量 (グレイ) に線質係数を掛ける必要があります。このようにして求められた数値が線量当量と言われるもので、放射線の生体に対する害を直接的に表す数値としてよく用いられます。



単位はシーベルトです。なお、シーベルトでは単位として大きすぎるので、実際にはその1000分の1のミリシーベルト(mSv)、あるいは、さらにその1000分の1のマイクロシーベルト(μ Sv)が用いられます。

図 4-1-3 ●放射線の3つの指標



(出所: 日本原子力研究開発機構『環境放射線モニタリング情報』より作成)

●放射線をどのくらい浴びたら人体に影響が出るか

原子炉関係の事故は起こっていなくても、地球内部の原子核崩壊や宇宙線によって、私たちは毎日のように放射線にさらされています。ただしそれは微々たる量です。

しかし、もし被曝量が増えたら、私たちにどのような影響が出るのでしょうか。

人体に対する放射線の有害性を、実験によって確かめるなどということはできるはずがありません。たまたま起こった事故の調査結果だとか、動物実験の結果などを基にして推定することになります。

ですから図 4-1-4 の数値はおよそのもので、出典によって数値は動きます。

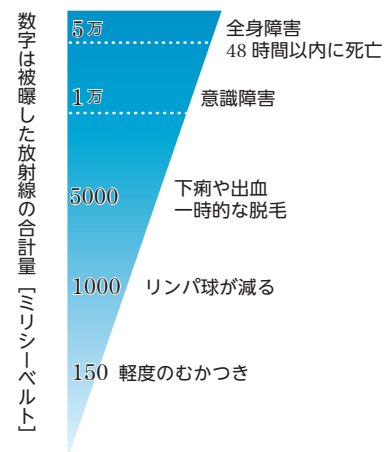
①安全限界

被曝量が100ミリシーベルト以下の場合には、健康への影響はほとんど見られないとされています。これは線量当量が1ミリシーベルト/時間の放射線が照射される場所なら100時間、すなわち約4日間生活したとしても、医学的な影響は出てこないということです。

②被害発生

被曝量が150ミリシーベルトに達すると、むかつきを感じ始めます。そして1000ミリシーベルト、すなわち1シーベルトに達すると、健康被害が出てきます。

図 4-1-4 ●症状として現れる被曝量



つまり、血液中のリンパ球が減少し始めます。リンパ球は免疫機構の中心になって働く細胞ですから、リンパ球が減少すると免疫力が落ちます。すなわち体の抵抗力が落ちて、軽度の感染症でも症状が重くなり、命に関わる可能性があります。

③ 甚大な被害

5000ミリシーベルト、すなわち5シーベルトになると、直接の症状、すなわち下痢や出血、あるいは一時的な脱毛症状が出ます。こうなるとかなり重症です。

さらに増えて10シーベルトになると、意識障害が出ます。50シーベルトになると、全身障害が出て48時間以内に死亡すると言われています。

● どうすれば放射線から身を守るか

危険な放射線から身を守る手段を^{しゃへい}遮蔽と言います。放射線の種類によって、簡単に遮蔽できるものと、遮蔽が困難なものがあります。

① α 線

α 線の粒子は放射線の中で最も大きく重いものです。ですから α 線を受けたら体の被害は大きくなります。しかし一方、 α 線は大きくて重く、その上電荷を持っていますから体内に飛び込む能力は高くありません。

α 線を防ぐのは簡単です。エネルギーにもよりますが、アルミ箔、あるいは皮膚でも防ぐことができます。ただし線源が体内に入って内部被曝になったら大変です。内臓の中で α 線が照射さ

れるのですから防ぐ手立てはありません。

2006年に亡命ロシア人がロンドンの鯔バーで、 α 線源のポロニウム(Po)が入った鯔を食べさせられて亡くなったのは、ポロニウムから放射された α 線による内部被曝によるものと言われています。

② β 線

物質を透過する力は弱いので、厚さ数mmのアルミ板や厚さ1cmほどのプラスチック板で遮蔽できると言われます。しかし、 β 線が物質に当たる(衝突する)とX線(γ 線)を放出するので、X線に対する防御も必要になります。

③ γ 線

γ 線は電磁波で、紫外線やX線と同じものですが、それよりはるかに高エネルギーなことが多く、大変に危険です。

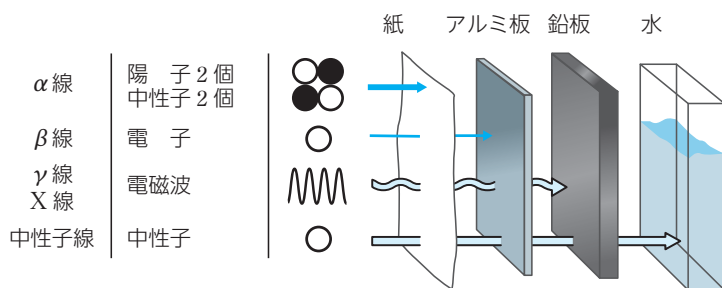
電磁波ですから透過力が強く、コンクリート、鉄板、鉛板などで本格的に防御する必要があります。鉛が最も有効ですが、それでも10cm程度の厚さが必要と言われていますから、一般人が遮蔽することは困難です。頑丈なコンクリート建築物や地下鉄の構内などに避難する必要があります。

④ 中性子線

中性子は非常に危険です。電荷を持っていないので、すべての物質中をスルスルと素通りできます。そのため、中性子線を遮蔽するのは非常に困難で、すべての放射線の中で最も厄介なものと考えられています。



図 4-1-5 ● 放射線の透過力



ところが意外なことに、水が有効な遮蔽材になります。使用済み核燃料を冷水プールに浸けて保管するのは、冷却の意味もありますが、中性子線遮蔽の意味もあります。これについては後に原子炉の節で説明します。