

## 第2章

# 核と放射線の科学

放射線防護のための知識を得るために、核と放射線の科学を理解する必要があります。理学部や工学部の物理や化学系の学生は、この科学に関して、さまざまな科目が用意されています。一方、核と放射線に直接関わり利用する医学系の学生には、必ずしも十分な基礎科学科目が用意されていないのが、現状です。

医学部の学生に対して、1～2単位の現代物理学の講義を行います。医療人のための本教科書では、核と放射線とを合わせて、0.5～1単位の講義くらいで簡単に済ませます。もし、これでは物足りない、もっと勉強したいならば、医学生用の教科書『核と放射線の物理 放射線医学と防護のための基礎科学』をお読みください。

- |                         |               |
|-------------------------|---------------|
| 2-1 放射線とはエネルギー          | 2-8 放射線装置     |
| 2-2 光子とアインシュタイン         | リニアック         |
| 2-3 原子の中心にある核           | ガンマナイフ        |
| 2-4 核の崩壊と放射能            | X線診断          |
| 2-5 半減期と放射能の減衰          | CT            |
| 2-6 線量の意味               | シンチグラフィとSPECT |
| 2-7 日常生活の線量と診療および事故時の線量 | PET           |
|                         | MRI           |
|                         | 2-9 核反応と加速器   |

## 2-1 放射線とはエネルギー

放射線とは何かをひとことでいえば、それはエネルギーです。エネルギーとは仕事をする能力のことです。さらに説明するならば、高いエネルギーを有する基本粒子が放射線です。

この宇宙はいくつかの基本的な粒子からできています。その粒子のことを基本粒子といいます。例えば、光は基本粒子のひとつです。それを光子といいます。基本粒子の日本の呼び名には、末尾によく子をつけます。他に、電子、陽子、中性子などがあります。電子と陽子は同じ電荷量を持っていますが、電子のほうが負で、陽子のほうが正です。一方、光子と中性子には電荷はありません。ノーベル物理学賞の小柴昌俊先生が測定に成功したニュートリノも基本粒子で、日本語では中性微子といいます。

野球の投手がボールを投げると、その速さは時速140キロメートルくらいです。これが衝突するとかなりの衝撃を与えます。相当なエネルギーがあるわけです。しかし投げられた野球ボールは放射線ではありません。このボールが基本粒子ではないからです。一方、放射線の一種である光子の速さは、秒速3億メートルです。1秒間に、地球を7回り半するほどです。そのエネルギーの大きさが、とてつもないことが想像されますね。

聖書の第1章「創世記」に「はじめに光あり」とあります。現代科学では、宇宙の最初には光子が充満していたことを理解しています。太陽からの光も放射線なのです。これら放射線が宇宙になれば、冷たい世界となってしまうのです。その秘密を科学者たちが解き明かし、技術者たちが人類のために利用できるようにしてきたのです。

がん治療に使用するリニアックからの放射線の正体は、実はこ

表2.1 いろいろな光子のエネルギー

可視光	2 ~ 3eV
診断用 X 線	数 10 ~ 100keV
治療用 X 線	数 MeV
ガンマ線	0.1 ~ 2MeV
リニアックの光子	0.1 ~ 数 MeV

の光の粒子である光子です。ただし、私たちが目にすることのできる可視光にくらべて、100万倍以上とエネルギーが高いので、見ることはできません。

放射線医学で使用する放射線のエネルギーは電子ボルトの単位で表現されます。英語では、エレクトロン・ボルト(eV)といいます。この物理的意味は、一個の電子が1ボルトの電位にある場合の、電子のエネルギーが1エレクトロン・ボルトです。私たちが使用している乾電池の電子のエネルギーは、この単位でいえば、1.5エレクトロン・ボルトです。

このエネルギー単位は、電子以外のエネルギーにも使用します。光のエネルギーも、この単位で計ることができます。例えば、可視光のエネルギーは2~3エレクトロン・ボルトになります。

核が放射する光子であるガンマ線のエネルギーは、百万倍の意味であるメガを付けて、およそ0.1~数メガ・エレクトロン・ボルト(MeV)です。

## 2-2 光子とアインシュタイン

診療で最も利用されている放射線は光子です。最初に、著名なノーベル物理学者であるアインシュタインが解明した、この基本

粒子の科学を説明します。

前節で、可視光からがん治療用のリニアックからの光子まで、エネルギーは低いか高いかの違いはあるけれども、どれも光子であることを見ました。その光子の発生の仕方は異なりますが、いかなる光子の速度も、空気中や真空中では、どれも同じ値 $c$ です。

$$\text{光速 } c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2 - 1)$$

これは驚きの真実です。この真理は、静止した光子は存在しないことも意味しています。他の基本粒子は、さまざまな速度を持ち得ますし、速度がゼロに近い静止状態もあるのですが、光子には、神様は、そうしたことを許していません。

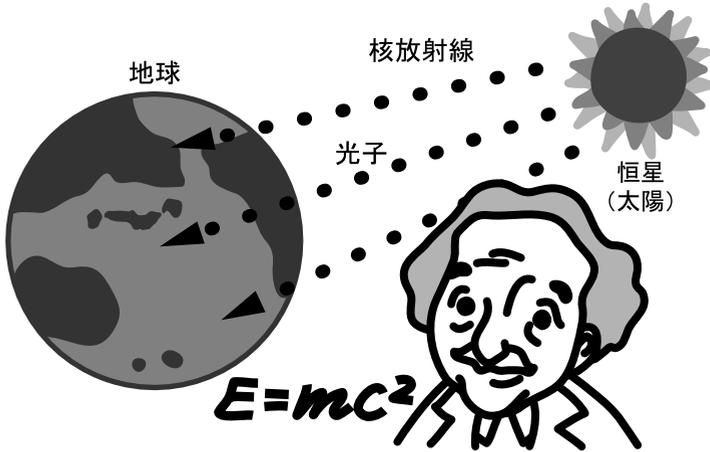
さらに、真空中では、宇宙で最も速い粒子は光子であるとするのが、アインシュタインの相対性理論です。この理論から、物質の質量がエネルギーと等価であることが予測され、その後の実験で証明されたのです。この理論によれば、質量 $m$ キログラムのエネルギー $E$ は、それに光速の2乗( $c^2$ )の積に等しい。

$$E = mc^2 \quad (2 - 2)$$

この理論で実際にエネルギーを発生している施設が、原子力発電所です。日本の1年間に消費される1次エネルギーの総量(2001年)は、アインシュタインの理論によれば、わずか240キログラムです。

放射線診断でも、この理論を直接利用した技術があります。それは、後で詳しく説明しますが、がんのPET診断です。電子の反粒子である陽電子が、がん組織内の電子と衝突して消滅し、エネルギーとして2個の光子となる物理現象が、人体内部で生じています。

陽電子および電子は、それぞれ同じ質量ですが、電荷の符号が、



正負と反対です。こうした関係を、粒子と反粒子といいます。

$$\text{電子および陽電子の質量エネルギー} \quad mc^2 = 0.511\text{MeV} \quad (2 - 3)$$

陽電子消滅により、0.511メガ・エレクトロン・ボルトのエネルギーを有する光子が真反対方向に2個放射されます。逆に、この2倍以上のエネルギーの光子が物質中で消滅すれば、陽電子と電子の対が発生するのです。

だいぶ放射線の科学的な意味が理解できたかと思います。光子以外にも放射線がありますので、それを学習するためにも、次に核の説明をします。

## 2-3 原子の中心にある核

水素とか酸素などの元素の正体は原子です。この原子の種類は、およそ110あります。それぞれの原子の真んかに核というもの

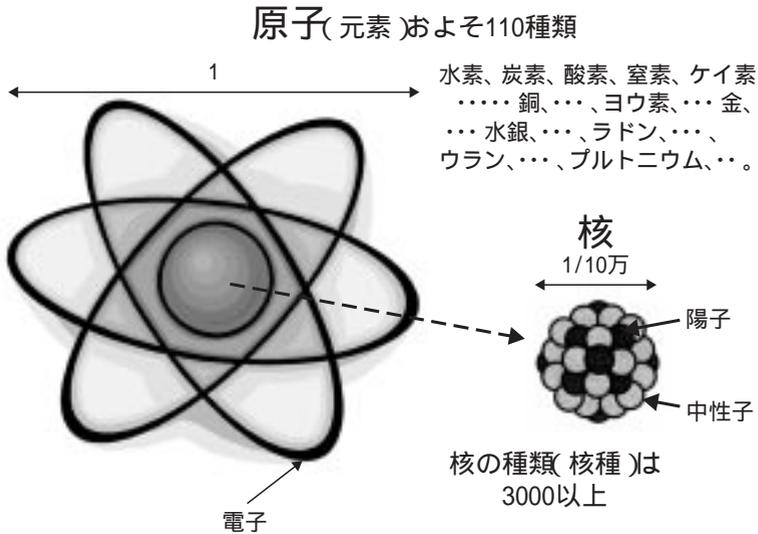


図2.1 原子と核の模型

があり、その周りを電子が回っています。核の直径がおよそ  $10^{-15}$  m、それに対して軌道電子は  $10^{-10}$  m くらいの半径で運動しています。この原子を野球場くらいに拡大してみると、グラウンドの中心に置かれた砂粒が核で、電子はその野球場の周囲を回るような大小関係になるのです。

核は基本粒子である陽子と中性子が強い力で結合した状態です。この核の大きさは、この原子のおよそ10万分の1と小さい。しかし、原子の重さの99.9パーセント以上を、この中心にある核が占めます。

各原子に名前が付いていますが、それらを区別するのは、その核内にある陽子の数です。例えば、水素、炭素、酸素の各原子の陽子数は、それぞれ1、6、8です。この数のことを原子番号といいます。原子には、核内の陽子数と同じ数の電子が存在しています。

陽子と中性子は核子と呼ばれています。陽子はプラス1の電荷 (+e) を持っています。一方中性子の電荷はゼロです。陽子と中性子の質量は、ほぼ同じ大きさです。軌道電子はマイナス1の電荷 (-e) を有し、その質量は、核子のおよそ1840分の1です。

さて、同じ原子でも、異なる核が存在していることが発見されました。この核の種類を核種といいます。現在、およそ3000の核種が発見されています。核種は核内の陽子数と中性子数で区別されます。この陽子数と中性子数の和の数が質量数といわれます。

通常、核種を元素名と質量数の組み合わせで呼びます。例えば、炭素11、酸素15、コバルト60とかです。これらの核種は、病院の放射線科で診断や治療に利用されています。3000種のなかの大多数の核種は、放射線を出します。これらを放射性核種といいます。私たちの体のなかにも放射性核種があります。炭素14とか、カリウム40です。

核からの放射線のことを核放射線といいます。その実体は、光子、電子、陽子、中性子、あるいは陽子と中性子がいくつか結合した塊です。それらが、高いエネルギーを持って核から飛び出てきます。そのエネルギーは、蛍光灯の明かりのおよそ100万倍のエネルギーを持っています。

## 2-4 核の崩壊と放射能

不安定な核種である放射性核種はいつのまにか自然消滅します。私たちの財布のお金がいづの間にか消えてなくなっていることに似ています。お金・エネルギーを有効に利用したり、無駄使いしたりです。エネルギーを余分に持った核というのは、そのエネルギーを失って、エネルギーを出さない別な核種になります。はじ

めの放射性核種は消滅するのです。

放射線はエネルギー、エネルギーはお金とすれば、放射線を出す核は、お金の入っている財布のようなものです。たとえ話ですが、そのようなことです。

放射線のほかに、放射能という言葉があります。これはお金を使う速さのようなことです。ここに100万円ある財布が2個あります。2人の主婦の夏子さんと秋子さんが、それぞれこの財布を持っているとします。夏子さんは、毎日、好きなお買い物に、どんどん使ったので、100日で持ち金がなくなっていました。一方、堅実な秋子さんは、少しずつしか使わなかったので、1000日間その財布が利用できたのです。

夏子さんと秋子さんの財布では、お金の使われる速さが違ったため、結果、ゼロ円になるまでの時間・日数に差が生じました。それぞれの財布を核種とすると、それらのお金の使われる速さが放射能となるのです。時間あたりになくなる、すなわち崩壊する割合を放射能というのです。どちらも、財布の中身が多いうちは、消費生活は比較的活発ですが、次第に消費は穏やかになるのです。

給料日直後は消費生活は活発ですが、日を追ってドンドン不活発になります。皆さんも給料日直前には、消費生活が不活発になりませんか。

## 2-5 半減期と放射能の減衰

最初は核がたくさんありますが、ある時間経ったら半分になったとしましょう。それまでの時間を半減期といいます。半分に減るまでの時間ということです。さらに半減期の時間が経過しますと、最初の4分の1になります。そしてどんどん核が減っていくと、

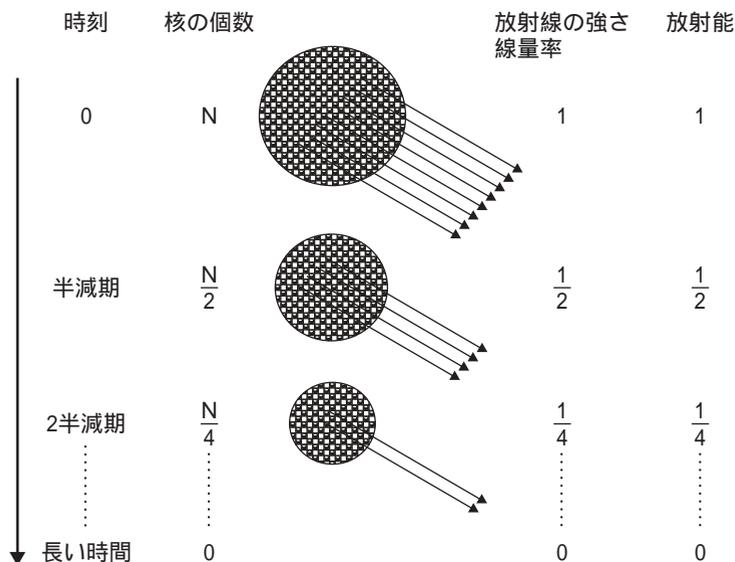


図2.2 不安定な核種は崩壊して消滅する。それに伴い、核放射線・放射能の強さも弱まる。

最後ゼロ個になります。こうして、長時間経つと放射性核種は消滅します。病院の放射線科で使用する放射性核種である、コバルト60、イリジウム192、炭素11の半減期は、およそ7年、74日、20分です。

先に述べました放射能を厳密に言えば、1秒間に壊れる核の個数のことを放射能といいます。1秒間に1個の核が壊れるような量があったら、それを放射能が1ベクレル(Bq)あるといいます。その1千倍で、1千ベクレルの放射能です。成人の日本人の体内には、カリウム40核種が、およそ4千ベクレルあるのです。カリウムは食塩に含まれていますので、体内にあって当然なわけです。塩分は、人体に必要な成分ですが、とりすぎはいけません。放射性核種も体内にあって問題ない量があるのです。このことを、次に