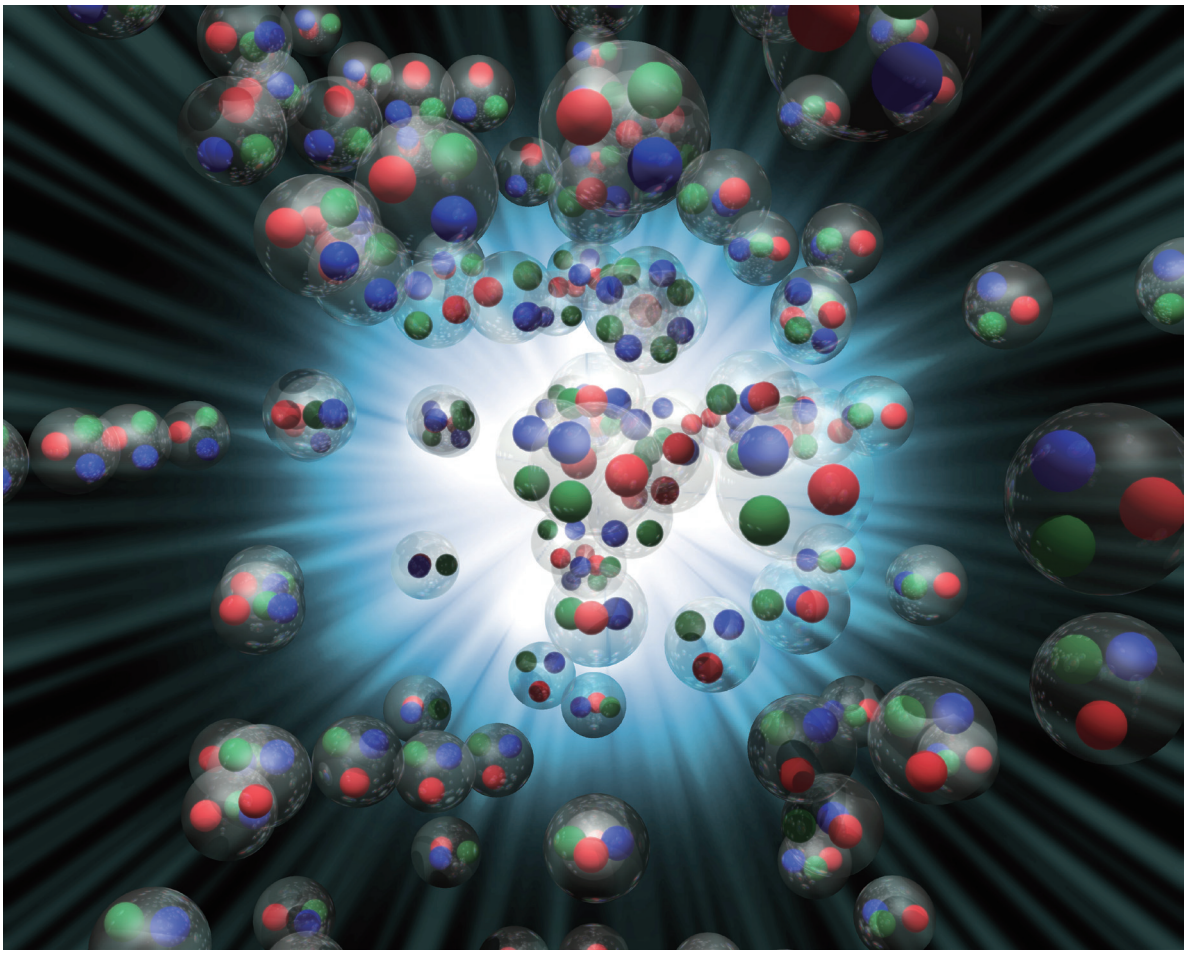
第１４章　原子力

皆さんは、エックス線検査をしていますか？現在健康診断では日常的にエックス線検査が実施されています。エックス線だけでなく、PET などのように、現在、放射線は検査や治療に非常によく利用されています。また、私たちの電力のかなりが原子力によって得られていますし、私たちのエネルギーの源である太陽のエネルギーも原子核のエネルギーで発生しているわけです。原子核は日常的にも重要になってきています。

私たちの世界観を作る上では、ミクロな世界ではどのような法則があるのか、また、どのような物質が根本的な物質なのかという問題が、重要になってきます。

原子力は、人類に益をもたらすと同時に、爆弾としての使用は生物の破滅に導く危険性を秘めています。このため、核の拡散を防ぐために、原子爆弾の製造で何が重要であるかを認識しておくことは、社会的にも重要なことです。　この章では、ミクロな世界でおこる原子核の法則について学んで行きましょう。



原子核の成り立ち

原子核の大きさは原子の大きさ（電子の軌道の大きさ）の数万分の一です。原子核は、**陽子**や**中性子**でできています。陽子は正の電荷を持ち、中性子には電荷はありません。これらの粒子の質量は電子のおよそ２０００倍です。つまり、原子核というのは、地上に重く、また小さいのです。

質量数と原子数とは？

原子核中に含まれる陽子の数を原子数あるいは**原子番号**と言います。原子番号はその元素の呼び方と直結しています。たとえばヘリウムと言えば、陽子の数が２つのものをさします。また陽子と中性子を合わせた数は、原子核の質量に直結しているので質量数と言われます。なお、自然界に通常に存在した最も重い元素はウランであり、ウラン２３８は質量数２３８で原子番号は９２です。

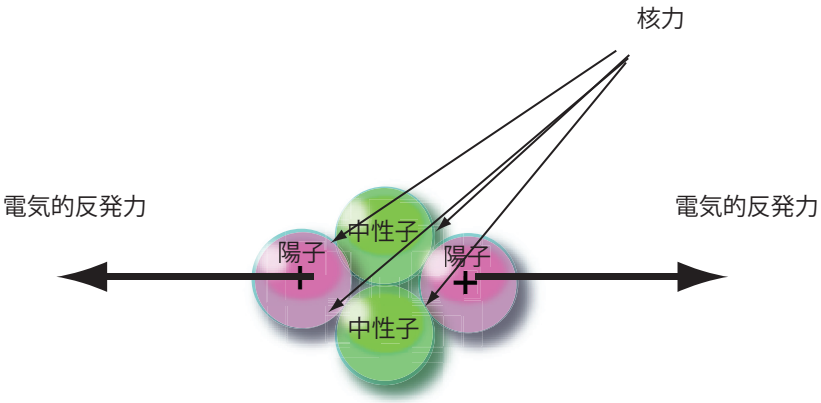
陽子や中性子を一緒にしている力は？

たとえば、ヘリウムの原子核は２つの陽子と２つの中性子でできています。しかし陽子は正の電荷を持っています。したがって陽子同士の間には、反発する力が働きます。しかも、その力の大きさはクーロンの法則により距離の二乗に反比例するので、原子核のように非常に小さな領域に陽子同士を引きつけるには非常に強い力が必要となるわけです。このように、原子核の陽子や中性子を結びつけている力を**核力**あるいは**強い相互作用**と言います。力はお互いに働くので相互作用ということを思い出してください。

核力はのり

核力はちょうどのりやセメントのようにしてまわりの核子を繋いでいます。そのため、電気的な力と異なり、あまり長距離には効果を及ぼしません。つまり、少し離れるとその力は非常に小さくなってしまうのです。

まず、陽子と陽子を結びつけようとすると、クーロンの法則で陽子と陽子は反発しあいます。核力は大変強い力なのですが、陽子の電気的な反発力が勝り、そのままではくっつきません。そこで、間に中性で電荷の力が働かない中性子を入れるとくっつきやすくなります。だいたい陽子１個につき中性子１個くらいの割合でくっつきます。たとえば、通常のヘリウムの場合、陽子２個に対して中性子２個が核力でのり付けされています。このように、中性子や陽子の電気的な反発力をゆるめ、核力でくっつきやすくする役割をしているのです。



ジェームス　チャドウィック (1891-1974)

ラザフォードの弟子であるイギリスの物理学者。1938 年に中性子の発見の功績によりノーベル賞受賞。

中性子の発見に関しては次のようないきさつがあります。ワルター・ボーテとその学生ベッカーが 1928 年にベリリウムにアルファ粒子を照射したとき、ガンマ線が放出されるかどうかについての研究をしていました。そして透過性のある放射線が出ると論文で報告します。イレーヌ・キュリーとその夫のフレデリック・ジョリオは、彼らの結果を自前の強度の強いアルファ線源を用いて検証してみることにします。そしてその放射線は、パラフィン紙から陽子をたたき出します。しかし、キュリーとジョリオはこの結果を、非常に高エネルギーのガンマ線によるものだと解釈したのです。しかもその衝突する確率は通常のガンマ線より３００万倍も大きくなければならなかったのです。まるでそれは、ピンポン球がボーリングのボールをはじき出すようなものです。この論文を読んだイタリアの物理学者、マヨラナは「何ともばからしい話じゃないか。あの二人は中性の陽子を発見したのに気づいていないんだ。」と言ったといいます。

そしてチャドウィックは、いち早く出てくる放射線を水素やヘリウムなどに当て、その粒子が水素とほぼ等しい粒子であることを示したのです。

ノーベル賞委員会では、中性子発見に関しては、キュリーとジョリオももらうべきだという意見もあったのですが、ラザフォードは「中性子についてはチャドウィックだけだ。フォリオたちはあのとおりスマートだから近いうちに何か他のことでもらうことになるだろう」と言ったようです。実際彼らはその後人工放射能の発見でノーベル賞を受賞しました。

チャドウィックは、第二次大戦中にイギリスの技術者をアメリカに送り出すなど、アメリカの核計画にも関与していた。しかし、１９７０年の彼の手記にこうあります。

「私は、1941 年の春を覚えている。私は、核爆弾が可能であるだけでなく、不可避のものであることを知ったのだ。私は多くの眠れない夜を過ごしてきた。これがどんなに深刻な事態かをそのころから十分認識できたからだ。そのころから催眠薬を飲んだ。しかも、28 年たった今でも睡眠薬をやめることができないでいる。」（１９７０年の手記）人類の未来が大きく変わってしまうことを予想した心境はどんなだったのでしょうか？

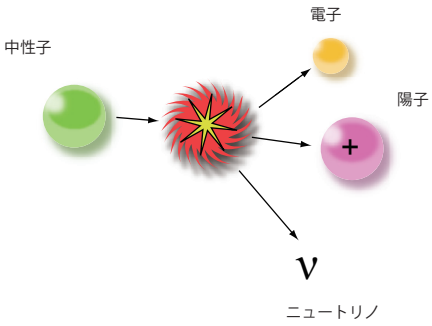
核子が大きな原子核だと？

2 階建てくらいの建築物と 10 階建ての高層建築では同じ強度では作れませんね。それは、地面に近い方には上の階からの重力がすべてかかってしまうからです。同様のことが原子核にも言えます。

核子の数が多くなって陽子の数が増えてくると陽子同士には力が働くのでより大きな電気的な反発力ができます。一方、核力はのりのように近辺にしか力を与えないので、より多くの中性子を必要とするようになってきます。そのため、大きな核子では安定に存在するためには陽子の数よりも多くの中性子を必要とします。核子 1 つあたりで平均して力が最も強いのが鉄です。そして、それ以上の原子核では、陽子同士の反発力がより強くなりくっつく力が弱くなっていくのです。ヘリウムや炭素などでは、陽子と中性子の割合は 1：1 ですが、ウランなどのように陽子の数の多い元素では、陽子と中性子の割合は 1 ： 1．4 程度となります。

寂しがり屋の中性子

中性子は単体でいると、非常に不安定です。原子核の中にいないときにはおよそ 11 秒で、陽子と電子そしてニュートリノに崩壊してしまいます。一方、周りに陽子がいるときには安定です。このような中性子の崩壊を、**ベータ崩壊**と言います。ところで、電磁相互作用は光子を媒介として起こりました。ベータ崩壊もまた、後で説明するように、力を媒介とする粒子によって引き起こされるので、力の一種と見なすことができます。この崩壊のために働く力は弱いので、**弱い相互作用**と言います。



中性子のベータ崩壊

放射性物質についての誤解

次の述べる放射性物質を放出する物質を放射性物質と言います。放射性物質について一番陥りやすい誤解は、放射性物質は前世紀になってから作られたものであるとする見方です。実際には、放射性物質は宇宙初期のころの星の爆発によって作られました。それは、本来鉄よりも原子番号の大きな原子は鉄よりも安定ではありませんので、通常の星では作り出すことが困難だからです。星の爆発によって出来たちりが、重力などの力で集まって地球などの惑星ができました。そのため、放射性物質は人類よりも遙か早くから存在し、地球内に非常に多く存在しています。現に、地熱の主な原因がこの放射性物質によるものであると言われています。

湯川秀樹（1907-1981）

日本の理論物理学者。パイ中間子の予言で有名。

地理学教授の息子として生まれましたが、1932 年に妻の家に陽子として入り湯川姓となりました。京都大学では同期の朝永振一郎と一緒に勉強したことがあります。湯川秀樹は大阪大学に職を得ましたがが、1935 年、核力が非常に小さい範囲でしか働かないことから不確定性関係により電子のおよそ２００倍の質量の粒子を予想しました。発表の当時は、そうした粒子は見つかっていなかったので一つの面白い可能性としか考えられていませんでした。そして、1945 年に対応する粒子であるパイ中間子が発見されました。その業績により 1948 年に日本人として発のノーベル賞を受賞しました。

エンリコ　フェルミ（1901-1954）

核物理学の創始者の一人であり、アメリカの核開発でも中心的な役割を果たしました。理論家であり実験家であり２０世紀では希有の物理学者です。

イタリアのローマに生まれ、１４歳のときから父の同僚から数学や工学関係の本を借り、瞬く間に数学の素養を身につけていきました。高校を卒業してピサの高等師範学校に入学するときに奨学金のための試験を受けます。それは「音の性質について」という高校卒業者のための試験として極めて一般的な問題でしたがが、彼はこれをまず棒の振動を例に取り、偏微分方程式をたて、固有振動数を求め、一般的にフーリエ解析を行うなどの議論を展開したようです。それを見た教員は「君はしょうらいすばらしい業績を上げるだろうと言うことはあらゆる点からみて請け合える」と言ったといいます。入学１年後にはすでに彼はピサでは相対論と量子論では随一の権威と見なされていました。電子などが排他原理にしたがうときの統計性に関しての問題をとき、「フェルミ統計」を発見し、26 歳でローマ大学の教授となります。1933 年にベータ崩壊の問題を理論的に解く手法を発見します。

その後、キュリーとジョリオの人工放射能の実験に触発されて放射性物質の実験的製造に着手し、４０種類以上の新放射線物質を作り出します。これらは、現在でも PET などトレーサー技術で使われているものです。核分裂では遅い中性子の方が反応が進むことを発見しました。そして、1938 年にノーベル物理学賞を受賞しました。また妻がユダヤ人のためムッソリーニの迫害を恐れてノーベル小授賞式出席後にアメリカに亡命します。

その後シカゴ大学で、核分裂の研究をし、核分裂のさいに中性子が放出されることを確認しましたが、連鎖反応の可能性をナチに知られることを恐れるジラードらに反対され公表しませんでした。その後、世界大戦中極秘の中の連鎖反応の実験的確認に成功し、原爆の実効性を示します。

また、フェルミはどんな問題に対しても複雑な解析を避け、簡単な解析を心がけたことで有名です。

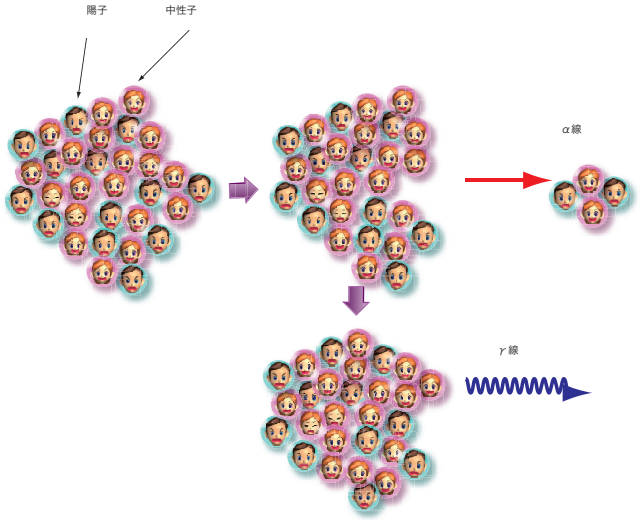
放射性崩壊とは？

放射線を放出し、原子核がほかの原子核に崩壊してしまうことを**放射性崩壊**と呼びます。このような崩壊がおこるときに重要になるのが、エネルギーと質量の等価性です。崩壊前の質量と崩壊後の質量を比べると崩壊後の質量の方が軽くなり、その残りは粒子の運動エネルギーとなります。つまり、崩壊後の質量の方が大きい場合には、崩壊は自然には起こりません。たとえば、中性子は陽子よりもわずかに重く、そのために中性子から陽子への崩壊がおこりますが、陽子から中性子への崩壊は起こりません。ただしが高速の電子が衝突した場合などには中性子になることがあります。

放射性崩壊の代表的なものは？

放射性崩壊は歴史的に次のようなギリシャ文字をつけて表されます。

アルファー崩壊は、ヘリウムの原子核（２個の陽子と２個の中性子）を放出する崩壊です。最初はそれがヘリウムの原子核だとは解りませんでしたので、**アルファー粒子**と呼ばれていました。そのため現在でもこう呼ばれます。これは、核子の大きな原子核で、のり付けする中性子が不足している場合に、クーロン力の反発により核力のが耐えきれなくなって起こる現象です。核力のために陽子２つ中性子２つが比較的安定なため、ヘリウム原子核が破片として飛び出すことから起こります。



ベータ線は高速の電子です。これも発見当初正体がわかりませんでしたので、β線と呼ばれていました。これは、主に原子核中の中性子が陽子と電子とニュートリノとにかわり放出されます。ベータ線の放出は、原子核内で中性子の数が必要以上に多く、中性子が孤独な状態となると陽子と電子とニュートリノに崩壊することから起こります。たとえば、アルファー崩壊を起こすと、陽子が減り、中性子の数が過剰になる場合があります。このようなときに、β線を出して崩壊します。この崩壊を核子の**ベータ崩壊**と言います。

ガンマ線は非常に高い振動数の光、光子です。原子核がアルファ崩壊やベータ崩壊などで外部に放射線が飛び出して行くと、その反動で原子核は回転したりした状態となります。つまり、原子核もまた原子と同様に励起状態となるのです。このようにアルファ崩壊やベータ崩壊などにより原子核が励起した状態から基底状態に移るときにガンマ線が放出されます。原子の場合には放出されるのは紫外線や光などエネルギーが低いのですが、原子核の場合にはもっとエネルギーの高い光が放出されるのです。ガンマ線を放出する崩壊を**ガンマ崩壊**といいます。

このほかの放射線としては後に述べるように、核分裂や一部の核融合反応で中性子が放出されます。これを**中性子線**と言います。

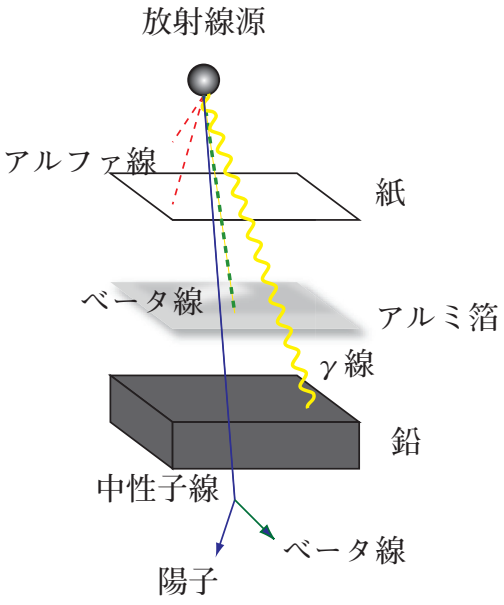
放射線の浸透力は？

放射線ごとに物質への浸透する力が異なります。

アルファ線は、ヘリウムの原子核なので比較的重い粒子です。そのため、ほかの原子に衝突すると、原子から電子をはねとばして、化学反応を起こさせる恐れがあり非常に危険です。しかし、プラスの電荷を持つため、分子中の電子などと引き合い、様々な分子の抵抗を受けてすぐに止まってしまいます。薄い紙などでも止まってしまいますが、通常の空気中でも空気中の分子の抵抗のため、数センチしか進めません。

β線はアルファ線よりも高速で放出されることが多いのですが、やはり電荷を持っているので、分子中の電子に衝突して止まりやすくなっています。このため、薄い金属などで止めることができます。

γ線は、電荷を持っていないので、紙や金属などでは止まりません。このガンマ線は、原子中の電子にあたって、電子を放出させ電離させます。この確率は比較的低いため密度の大きな鉛などにより止めることができます。



各種放射線の透過力

また、中性子線は、電荷を持たないのでやはり高い浸透力があり、原子核自体の組成を変え、また中性子により原子核を励起させてガンマ線を放出させる確率が高くなります。また浸透した物質内でベータ崩壊を起こし、大変危険です。

このように、浸透力はアルファ線＜ベータ線＜ガンマ線＜中性子線の順となります。

半減期１００億年って放射線は少ない？

放射性物質は、不安定で放射線を放出して崩壊していきます。放射性物質の半分が崩壊するまでにかかる時間を**半減期**と言います。たとえば半減期が 1 秒としますと最初に 32 個あったものが 1 秒後には 16 個になりまたもう 1 秒後にはこの半分になり 8 個次に 4 個また次に 2 個というように崩壊していくのです。

半減期が 100 億年というと一見非常に崩壊しにくいように思いますね。1 年はおよそ 30000000 秒で１００億年ではさらにゼロが７つつきますね。このため、半減期が１００億年というのは、秒にしてゼロのかずが１４個くらいになります。1 秒間に崩壊する数は全体のうち 1 00000000000000 分の 1 となりすごく少ないように感じますね。しかし、崩壊する分子がアボガドロ数程度あるとそれはゼロの数が２３個あります。すると、割合として 1 秒間に 10000000 個が崩壊します。したがって半減期が何億年というのは実は非常に多くの数の元素が崩壊しているということなんです。

放射性同位体とは？

陽子の数が同じで中性子の数が異なるだけの原子を**同位体**と言います。これは、周期表の同じ位置にいることから命名されました。例えば、通常の水素の原子核は陽子１つだけです。この同位体として、陽子と中性子からなるものは重い水素なので**重水素**と言われます。自然界の水素のうちには、重水素が０．９５パーセントほど含まれています。これが水の分子に含まれている場合、この水分子を**重水**と言います。この重水素はベータ崩壊などをするはほとんどなく、安定な水素の同位体です。また、陽子１つに対して中性子を２つもつ水素もあり、これは**三重水素（トリチウム）**と呼ばれます。このトリチウムは、必要以上に中性子があるので、不安定でベータ崩壊します。このように不安定で崩壊する同位体を**放射性同位体**と言います。

原子は正の電荷を持った原子核の周りに電子が回っています。原子が分子になるときには、この原子核は重く動かないので電荷だけが重要です。そのため、原子に中性子がいくつはいっているかは、化学結合などにほとんど影響を及ぼしません。このように、原子核の陽子の数が等しく、中性子の数が異なるものがあっても化学反応には影響しないのです。したがって、同位体では、質量以外には化学的性質はまったく同じなのです。

多くの核子がある場合、陽子間の反発力に打ち勝ってお互いにくっつけるためには多くの中性子が必要になることをみました。核子の数が多い同位体において、中性子の数が少ない同位体の場合、陽子の反発力が勝るため、反発力によりアルファ粒子が放出され、アルファ崩壊をします。一方、中性子が必要な数よりも多い場合、中性子がベータ崩壊を起こして陽子に転換されます。

また、核子の数が少なく、中性子の数が少ない場合には、今度はアルファ粒子は放出されません。これは核子全体に対して、アルファ粒子はかけらとは見なされないくらいの比率になるからです。そのため、今度は陽子が中性子と陽電子とニュートリノに変換する、ベータ崩壊を起こし、核子から陽電子を放出することによって電気的反発力を押さえます。たとえば、通常のフッ素は陽子が９個と中性子が１０個からなるフッ素１９ですが、陽子９つと中性子９個からなるフッ素１８では反発力を押さえるための中性子が足りません。そのため

フッ素１８→酸素１８＋陽電子＋ニュートリノ

と崩壊します。酸素１８は酸素の安定な同位体です。

このように、陽電子を放出する崩壊を**陽電子放出 (Positron Emittion)**、あるいは**ベータプラス崩壊**と言います。一般に陽電子崩壊を起こす率は大きく、崩壊の寿命は数十分から百分と短くなります。たとえば、フッ素１８の寿命は約１１０分です。

PET とは？

ここで言うペットとは猫などの動物のことではありません。PET(Positron Emittion Tomography) は、電子、陽電子の対消滅を利用した医療機器です。11C や、18F などの同位体は、ベータ崩壊によって陽電子を放出します。この陽電子の運動量は小さく、この陽電子は、原子内の電子と対消滅し、運動量の保存から、ほぼ反対方向に２つのガンマ線が放出されます。

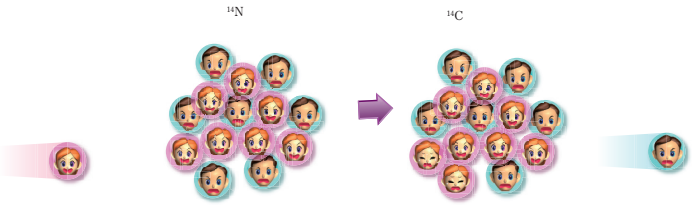
検出器はリング上に置かれて、ガンマ線を多数検出することで放出された場所を特定して行きます。癌による部位では、その活動により糖の代謝レベルが高く、アミノ酸を多く必要とします。そこでアミノ酸に含まれる炭素を放射性同位体にして、患者に投与しますと、その同位体はガンの箇所に集中します。また、フッ素 18 は、グルコースの OH 基の一つをフッ素 18 とした、フルデオキシグルコース (FDG) として用います。FDG の化学的性質はグルコースとほぼ同じで、体内ではグルコースとして扱われます。そのため、FDG を患者に投与すると、グルコースを多く必要とする腫瘍に集まります。こうした放射性の同位体からは、陽電子が放出され、それが、電子と衝突しガンマ線を放出します。このように、PET を用いて見ると腫瘍を発見できるのです。このように、X 線撮影や CT スキャンなどは臓器の形態などの変化を測定して幹部を特定するのに対して、PET では、血流や代謝などの臓器の働きを測定して幹部を特定します。そのため、PET では、外見だけでは一見わかりにくい異常を発見できるといった優れた特徴があります。また PET は、脳や心臓、肺などの臓器における働きの異常を発見するのに有効な方法でもあります。

これら陽電子を放出する同位体は、一般的に寿命が短いのです。たとえば、11C: で 20 分、18F は、110 分などです。。そのため、これらの放射性同位体を製薬会社などであらかじめ用意しておくことができませんので、投与する直前に病院内でこれら同位体を生成する必要があります。このためには、病院で放射性物質を作るための粒子加速器が必要となります。たとえば、フッ素１８は、酸素（水）に高エネルギーの陽子を衝突させ、酸素中の中性子を陽子でたたき出し、中性子が陽子で置き換わることによって作られます。このように、放射性物質を作るのに費用がかかり、PET 検査は一般に高価になってしまうという難点があります。

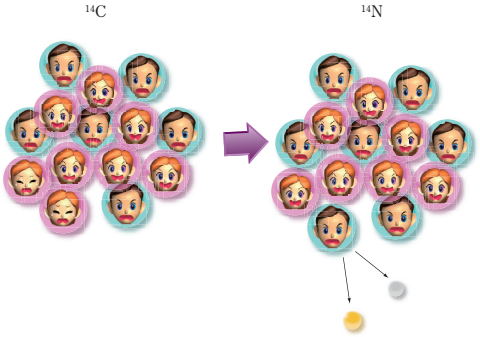
ウラン２３８とは？

ウランの同位体として有名なのがウラン２３８です。これは放射性同位体です。これは、陽子と中性子の数を合わせたものが２８３で、ウランは原子番号が９２でこれは、陽子が９２個であることを表しています。またウラン２３５も放射性同位体ですが、こちらの方がさらに速く崩壊してしまいます。

炭素による年代測定



宇宙には、高エネルギーの陽子や電子が飛び回っています。そのため、地球にも高エネルギーの陽子が落下してきます。これが大気の上層部の散乱により、反応してさまざまな粒子を作り出し、中性子などを作り出します。中性子は空気中の窒素に衝突して、炭素の同位体、炭素１４を作ります。この炭素１４は、大気中ではほとんど二酸化炭素の中にあります。その割合は非常に小さいものだが、この炭素１４の崩壊と宇宙線による生成とが釣り合い、一定の割合で大気中に存在します。ちなみに、炭素１４の半減期は５７３０年です。この同位体でできた２酸化炭素は、植物の光合成に使われますので、植物中の炭素にも同じ割合で同位体が存在します。また、動物は植物より炭素をとりますので、ほとんどすべての生きている生物では、炭素１４の割合は同じになります。しかし、生物が死にますともう炭素をとることができないので、崩壊により炭素１４の割合が減少していきます。したがって、生物の炭素中の炭素１４の割合を調べることにより､生物の生きていた年代を測定することができるのです。たとえば、炭素１４の割合が半分ならばそれは今から５７３０年前ということができます。ただし、炭素１４の大気中の割合はいつの時代でも一定であったという保証はありません。時代により１５パーセントの揺らぎがあったと思われています。そのため、炭素を用いての年代測定では、あまり高い精度の測定は困難です。



トレーサー技術としての放射性同位体

物質が伝搬していく過程を追跡していく技術を**トレーサー**と言います｡放射性同位体は、放射線を放出するのでこのトレーサーとしてうってつけです。細胞などでは、一般に色がついているわけではなく、見たい物質を染色して物質を追跡していく必要がありました。しかし、染色する物質を見つけるのは一般的には困難です。そのため、見たい分子の一部の原子を放射性同位体としておくと、その位置は放射線の発生する位置として特定できるのです。また先に見た PET などもこのトレーサー技術の一つです。放射線の利用によりサイエンスや医療技術は非常に進歩してきたのです。

放射線と人体

放射線は空気中にもありますが、体内にもあるのです。カリウム 39 の同位体、カリウム４０は放射性です。このカリウム４０は体内におよそ２０ミリグラム含まれています。この量のカリウム４０は、一秒間におよそ 4000 個のベータ線を放出しています。ただし、エネルギーは比較的小さく影響は軽微です。

放射線は生物細胞の組成を変更したり、破壊したりするため、細胞の正常な機能を失わせます。放射線の生物作用で著しいのは DNA の損傷である。損傷した DNA のほとんどは、修復あるいは死滅しますが、致命的でない場合には DNA 情報が変化したまま、細胞分裂が起こり、突然変異を起こします。

ベータ線とガンマ線は、人体を透過しやすいので、人体全体に影響を及ぼしやすくなります。一方、アルファ線は、透過しにくいのですが、その粒子は重いため、吸収されるエネルギーは大きくなります。中性子線もまた、生物に与える効果は大きいのです。このように、放射線をただ単にその放射線の個数だけで判断するのは適当ではありません。そのため、**ある物質が放射線から与えられるエネルギーを吸収線量**といいます。その単位を**グレイ (Gy)** と言います。１ｋｇの物体に１ジュールの放射線が吸収されたとき、１グレイとなります。ただし、放射線の種類によって体内への影響がことなります。たとえば、アルファ線は非常に重いため体内の DNA などを損傷させやすく、同じ吸収線量でも、エックス線やベータ線の約２０倍の威力があります。このため、単に吸収線量だけでは、生体に及ぼす影響を表すことはできません。放射線が生体に及ぼす影響を表すのが**線量当量**であす。この単位は**シーベルト（Sv）**です。たとえば、エックス線による１グレイの吸収でしたら、そのまま１Sv とします。また、アルファ線による１グレイの吸収線量でしたら、その影響がエックス線の２０倍ということで２０シーベルトとします。

起源	年間放射線量 (mSv) ミリシーベルト
地面	0.15
空気や水	0.3
宇宙線	0.4
木やコンクリート	0.5
空気中のラドン	1.3
作業	一回あたりの放射線 (mSv)
胸部エックス線検査	0.05
歯のエックス線検査	0.02
CT 検査	6.9
ラドン温泉	0.01/ 時間

生物	致死放射線量 (Sv) シーベルト
昆虫	100
バクテリア	50
ラット	8
人間	5

日常生活の放射線

私たちは日常的に放射線にさらされています。しかし、通常の放射線量では健康被害はほとんどありません。

1Sv 程度の放射を短時間に受けると、一時的に白血球が減少します。そのため、吐き気や疲労感を受けます。3Sv 以上の放射を受けると、白血球が一時的に死滅します。このため、下痢や髪の毛が抜けたりし、感染症にかかります。5Sv では半数が死に至ることになります。

放射線治療

放射線が DNA を破壊したり、吸収したりしやすいことを見ました。この性質を治療に利用することができます。ガンなどの悪性腫瘍では、腫瘍に放射性物質を注射したり、照射したりします。放射線治療の利点としては、放射線は吸収されやすいので癌患部以外への影響が少なくて済むのです。特に、切除などの困難な部分については、この放射線治療は抗ガン剤などと並んで有効です。

放射線の照射で注意したいのは、アルファ線やガンマ線などの放射線で照射されても照射された部分が放射性物質に変わることはないということです。崩壊などで得られた放射線にはそのようなエネルギーはなく、通常は放射線により原子核の電子をイオン化し、他の分子との化学反応をさせてしまうことです。このため、DNA 分子の組成が変わり DNA が破壊されるのです。ただし、DNA の修復機能があるため、通常は DNA を大きく破壊したときに死滅させることができます。

食品照射

食品に、原子が電離されるくらいの放射線を用いて処理することを食品照射と言います。食品照射は、食品に含まれる細菌やウイルス、また虫を殺し、食品を長持ちさせることができます。エックス線やガンマ線、電子線を照射された細菌やウイルス、虫などは、DNA を破壊され、死ぬことになります。紫外線でも、表面の皮膚の DNA が破壊されますが、内部には届きません。エネルギーの高い X 線などは貫通力が高いため、食品内部のウイルスでも破壊することができるわけです。

アメリカ合衆国を始め、カナダ、EU、韓国、中国など多くの国では、香辛料の出荷時における殺菌処理の代わりに食品放射が認められています。また、アメリカではハワイやフロリダからの果物についても食品照射による殺菌が認められるようになってきました。

現状では、食品照射による放射線被害はほとんどないと言えるでしょう。おそらく、出荷時の殺菌剤による化学処理よりも人体に与える影響は少ないでしょう。アメリカや、東南アジアからの果物には、非常に強い殺菌剤が使用されます。さもないと日本の店頭にならんだ果物は腐っているでしょう。特に東南アジアでは、発ガン性物質の疑いのある殺菌剤の使用が認められている国もあるのです。中国などのように、食品照射を多く行うのも、自国内の農薬の乱用を防止する手段にもなるでしょう。こうした状況で、日本でも食品照射を認めてよいのかどうかの議論がなされていくことになるでしょう。日本では現在、ジャガイモへの使用が認められています。ジャガイモに照射すると、DNA の損傷により発芽を防止することができるのです。これから、照射による殺菌をどのようにしていったらよいのでしょうか？殺菌剤による処理か、食品照射による処理か、果てまた処理されないウイルスのいる果物のどれがいいのか、議論の分かれるところでしょう。

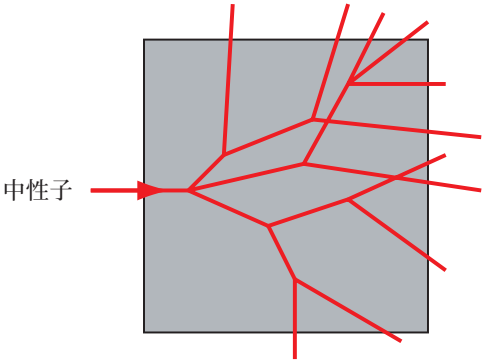
核分裂とは？

放射性崩壊によりエネルギーが得られます。またこれは、地熱の主な発生原因と思われています。このような放射性崩壊から短時間にエネルギーを得ることができるのが**核分裂**です。これは原子力発電に使われており、当初は爆弾として使われました。ここでは、この核分裂反応について学んでみましょう。

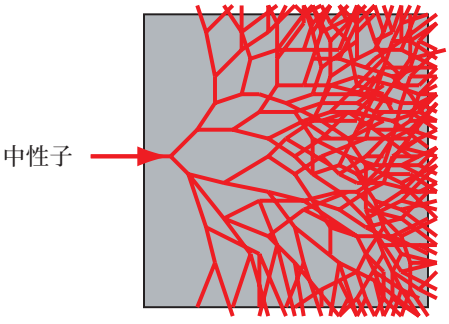
原子核の中では強い力によって、陽子の間の電荷による反発力が押さえ込まれています。このため中性子がのりの役割をしていましたね。ウランではウラン２３８が比較的安定です。しかし、ウラン２３５では安定になるための核力を得るための中性子の数がやや少なく、押さえ込む力が反発力よりもわずかに勝っている状態です。このウラン２３５に中性子をぶつけると、それは２つの部分に分裂します。つまり、アルファー崩壊では陽子２つ中性子２つののり付けされた破片が飛び出るのに対して、核分裂では中性子の衝突により、ほぼまっぷたつに割れてしまうのです。ちなみに、なぜ中性子がよいのかというと、電荷を持った陽子は電気的反発力のため近寄れないためです。このように、大きな核子が幾つかの核子に分裂することを核分裂と言います。分かれた核子のエネルギーは非常に大きく、お互いは非常に大きな電気的反発力で分裂し、高速で運動します。また分裂により小さな核子になり電荷が小さくなるため、のりの働きをしている中性子で要らないものがでてきます。よって核分裂では核力として必要なくなった中性子が放出されます。核分裂により、高速の中性子が飛び出すので、これはほかのウラン２３５に衝突し、またそれが多量の中性子を生み出し次々と核分裂をします。これを**連鎖反応**と言います。

この連鎖反応は火事に似ています。一軒の家で火事が発生してもその火花が他に燃え移らなければ火事はそれだけですんでしまいます。また、家が密集していると、隣に燃え移りまたその火でつぎつぎに燃え移って行きます。火事を規制するには、江戸時代に行われたように燃えない空き地を作ると延焼を食い止めることができます。核反応では、中性子の速度やウランの濃度を調節することにより連鎖反応のスピードを調整したり、連鎖反応を止めるたりすることができます。ちなみに、天然でのウランには、ウラン２３５は全体の１３９分の１しか含まれていません。それでもウラン鉱石は手に持つと暖かいようです。ウラン２３５の濃度が、数パーセントくらいにすると、反応により摂氏１００度以上の温度となり、水を沸騰させることができます。

濃度を上げたり、体積を増やしたりして連鎖反応が起こることを**臨界**と言います。



ウラン 235 の濃度が
薄く小さい場合
中性子は連鎖反応前に外に出て行く



ウラン 235 の濃度が濃いか
サイズが大きい場合
中性子は連鎖反応していく

リゼ　マイトナー (1878-1968)

ウイーンでユダヤ人家族に生まれました。核分裂の発見でノーベル賞を受けることになるオットーハーンと核分裂の研究をしていましたが、ナチスの手を逃れるためスウェーデンに渡ります。そこで、それまでやっていた研究の結果を受け取ります。そして、ハーンとシュトラスマンの結果に対して、核分裂という解釈を与えることに成功しました。

第２次世界大戦中、ドイツ主導の元で行われたノーベル賞委員会では、ドイツ人のハーンとシュトラスマンにノーベル賞が授与され、ユダヤ人のマイトナーは受賞しませんでした。ノーベル賞は受賞しませんでしたが、マイトナーは核分裂の発見者としての資格は十分でしょう。

ロバート　オッペンハイマー (1904-1967)

第２次大戦中にマンハッタン計画を指揮し、「原子爆弾の父」と言われる理論物理学者。非常に秀歳で、化学を専攻しハーバード大学を３年で卒業すると、イギリスのキャベンディッシュ研究所でニールスボーアの元で理論物理学に転向しました。研究は量子力学の手法から、中性子星、そしてブラックホールが現実に存在することを示唆する研究など幅広い秀歳でした。

核分裂についての情報をオッペンハイマーに伝えたときのある物理学者の言葉は以下の通りです。「最初、オッペンハイマーに核分裂を見つけようとしていることを伝えたら、「それは絶対不可能だ！」といくつかの理論的理由をあげて反論していた。その後、核分裂の実験的兆候を彼に見せたら、彼は 15 分間考えて納得し、これから中性子が必ず放出され、それは爆弾や電力に使われるということを数分の間に次々に話した。彼の思考がいかに早く巡っていき、正しい結論に到達する速さに目を丸くした。」

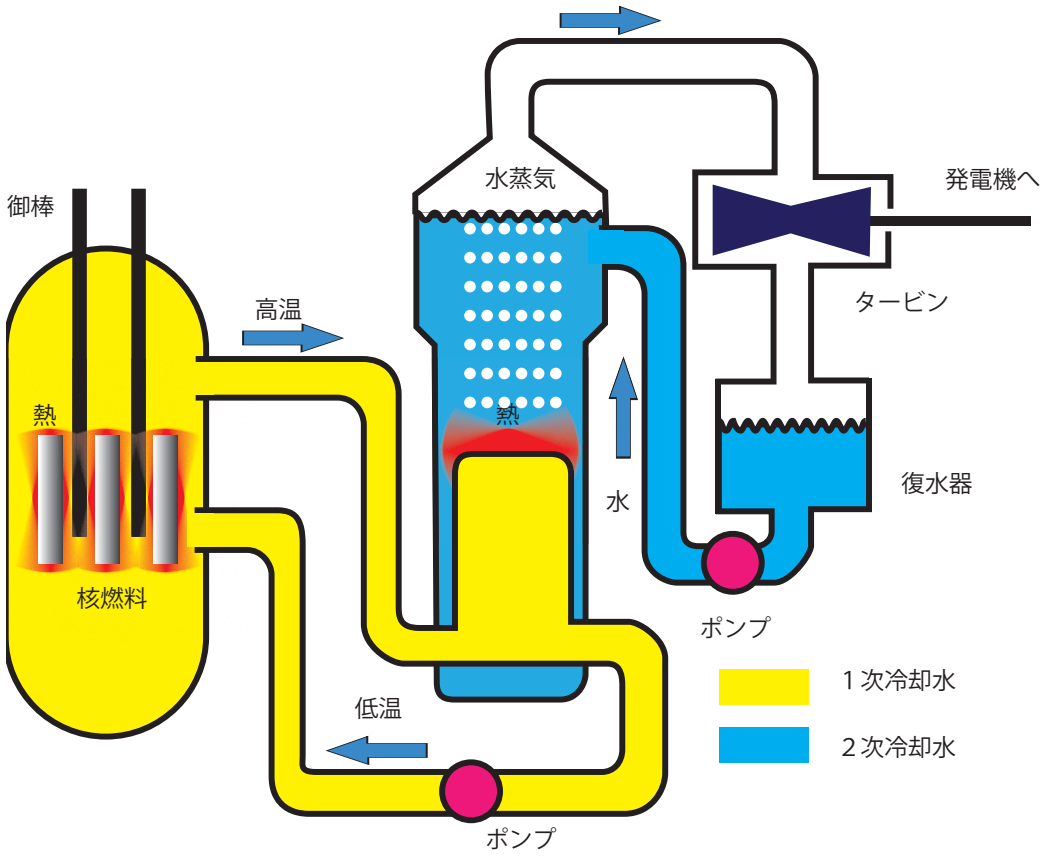
マンハッタンプロジェクトは、第２次大戦中に原子爆弾を作るために企業やアメリカ、イギリスなどの研究者や技術者を統括していくプロジェクトでした。どういった組織なのか隠すために目的が名前からわからないようなニックネームがつけられ、「マンハッタンプロジェクト」となったようです。軍事機密に属し、議会にも秘密にされました。ルーズベルト大統領の急死によって引き継いだトルーマン大統領でさえ、大統領になって初めてマンハッタンプロジェクトを知ったとされます。ほとんど信じられないほどの破壊力の爆弾が数ヶ月後に完成すると聞かされたとされたようです。オッペンハイマーはマンハッタンプロジェクトを指揮し、原子爆弾を作ることに成功したのですが、大戦後に核兵器を世界で共有することを唱えるなどしていました。そして家族が共産党員だったこともあり、公職をすべて追放されました。1947 年にプリンストン高等研究所にもどり、政治と距離をおいた研究生活を送りました。

原子力発電

原子力発電では、ウラン２３５の濃度を数パーセントの低濃縮ウランを用います。また、中性子の速度を調整する部分があります。これにより、連鎖反応の速度は、原子爆弾よりもはるかに小さくなります。原子力によるエネルギーにより水を熱してこれによりタービンをまわして発電するわけです。

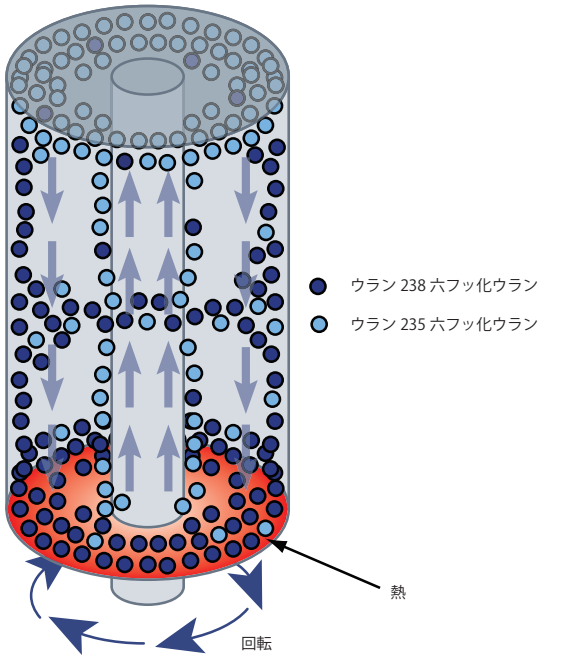
ウラン２３５の核分裂により放出された中性子の一部は、中性子の速度が速いとウラン２３８に衝突してくっつき、ウラン２３９になります。これは、中性子が多い状態なのでベータ崩壊して、最終的に**プルトニウム**２３９となります。このプロトニウムはウラン２３８同様に中性子により核分裂を起こします。そのため、ウラン２３５の核分裂の中性子により新たな核燃料が作られます。これを高速な中性子で核分裂を起こす原子炉を**高速増殖炉**と言います。高速増殖炉では、プルトニウムを作るのには、高速な中性子が必要ですが、実際の核分裂にするのには、低速の中性子の方が、ウランの近くにいる滞在時間が長いために反応しやすいのです。そのため、あらかじめプルトニウムを燃料として用いて、熱によって運動する低速の中性子によって核分裂を起こす形式の原子炉も有効です。この形式の原子炉を**プルサーマル**と言います。

プルトニウムは、原子炉により作られるので、これを再処理し、高濃度にすると核爆弾を製造することが可能となります。プルトニウムはウランと化学反応の性質が異なるため、化学的に分離が可能です。このため、プルトニウムの濃縮はウラン２３５の濃縮より容易なことなのです。最近では、パキスタンがこの方法で原子爆弾を製造しました。核保有の危険性のある国に対して、原子炉を作らせないようにしようとする理由がここにあるのです。



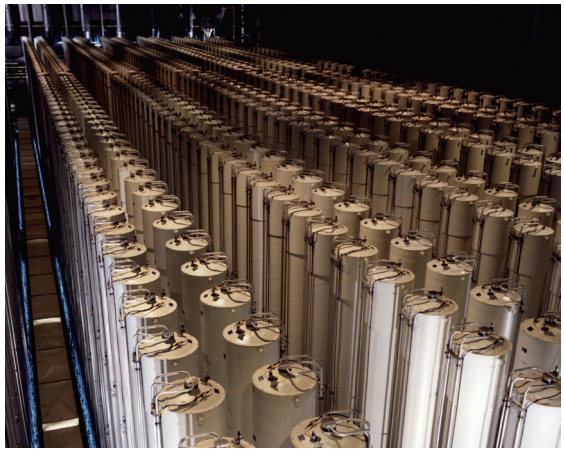
ウラン濃縮

先に見たように、連鎖反応を起こすには、ウラン２３５の濃度を上げる必要があります。ウラン２３５をウラン２３８から分離することです。このウラン２３５の濃度を上げることを**ウラン濃縮**と言います。発電に使われるウランは通常３％から５％の**低濃縮ウラン**であり、原子爆弾原子爆弾に使われるのは、９０％以上の**高濃縮ウラン**です。



ウラン濃縮の方法としては、幾つかの方法があります。たとえば次の原理を利用します。
ウランは天然ではシリコンなどと同様に酸化した状態で存在します。この二酸化ウランは、固体です。ウランなどの重い分子を気体にするには、分子間力を弱める必要があります。このため、ウランをフッ素と結合させた六フッ化ウランとすると、テフロン加工と同様に分子間力が弱いため約６０℃で気体となります。

ウラン 235 による六フッ化ウランとウラン 238 による六フッ化ウランでは質量の差がわずかです。このため、遠心分離によって分離しても一回の遠心分離では濃度はごくわずかしか増加しません。このため、遠心分離器を直列にし、遠心分離を千回ほど繰り返すと、３％くらいの低濃縮ウランとなります。また、遠心分離の他に、底を熱して対流を起こし、軽いウラン 235 六フッ化ウランを上部に集める方法も併用するタイプもあります。　このように分離は気体で行われるため軽くてわずかな分離しかできません。低濃縮ウランでなくさらに濃度の高い高濃縮ウランとするにはウラン濃縮の行程を非常に多く繰り返す必要があり、高度な設備が必要になります。これには国家的レベルの費用が必要です。



ウラン濃縮施設　遠心分離を繰り返す

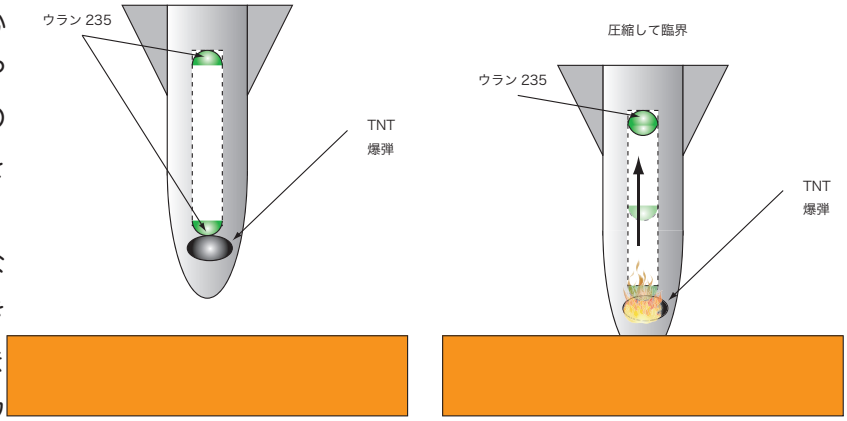
一方、プルトニウムは原子炉で生成されることを見ました。原子炉などで生成されたプルトニウムも、核分裂させるためにはその分離と濃縮が必要となります。ウラン濃縮の場合、化学反応の等しいウラン 235 とウラン 238 の分離ですので、濃縮は困難です。一方、プルトニウムでは、ウランの中に混じったプルトニウムを取り出すので、化学反応の違いにより分離することが可能です。そのため、分離作業そのものはプルトニウムの方が容易です。最近では、パキスタンや北朝鮮などがこのプルトニウムを用いた原子爆弾を製造しています。

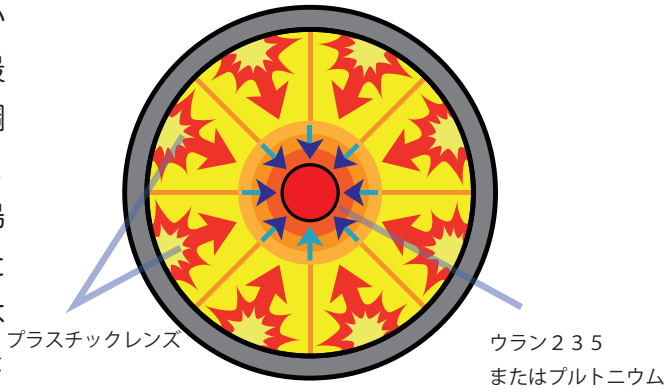
そのため、このウラン濃縮やプルトニウム濃縮こそが、原子爆弾製造の鍵になるのです。

原子爆弾

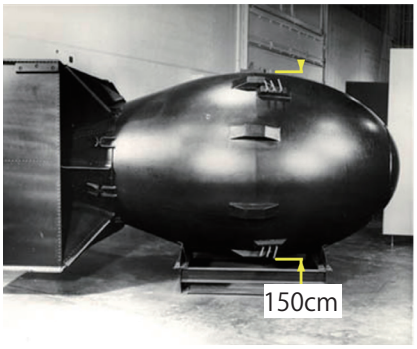
核爆弾は、放射能被害をもたらし、その使用は悲惨な結果をもたらします。核爆弾の拡散を防止するためにも、核爆弾の製造に最も重要なことは何かを知っておくことは非常に重要です。

原子爆弾の構造は簡単に言うと図のようになっています。連鎖反応を起こす前の濃度や大きさのウランを２つ用意して、ＴＮＴ火薬などで圧縮して密度を濃くし、臨界に達し連鎖反応をおこさせます。ちょうど拳銃に似ていますので、この方式を**ガンタイプ**と言います。ただし、連鎖反応が中心から起こると、ガンマ線やエックス線が放出され、そのエネルギーで外側のウランを吹き飛ばします。そのため、連鎖反応がそれ以上起こらなくなって、ウランだけをまき散らすだけになってしまいます。したがって、すべてのウランをどのように効率よく爆発させるかというのはなかなか困難な問題です。最も簡単には、外側に中性子を跳ね返す鋼鉄で覆って、内部でできるだけ効率よく核分裂を起こさせます。それでも、広島に落ちた原爆は非常に大きな物であったのにもかかわらず、本当に爆発したのは中心部分のウランだったと言われています。このため小型化のために、効率よくウランを爆発させる実験を行う必要があるというわけです。この改良は企業秘密というよりも国家秘密であるので詳しくはよくわかりません。また、中心部に中性子線を放出する物質を電気的に制御して放出させて爆発させるタイプもあります。





長崎に落とされた原子爆弾では、外側から一様に押さえつけて燃焼させる**インプローシブ（爆宿）タイプ**が使われました。爆発により爆発の初期にプルトニウムなどを比較的長い時間中心に押さえつけておくことができるため、燃焼効率がよく小型化ができます。このため、現在ではこの爆縮が原子爆弾の主流です。



長崎に落とされた原子爆弾　通称 fat man と同じ性能の現在の小型原子爆弾

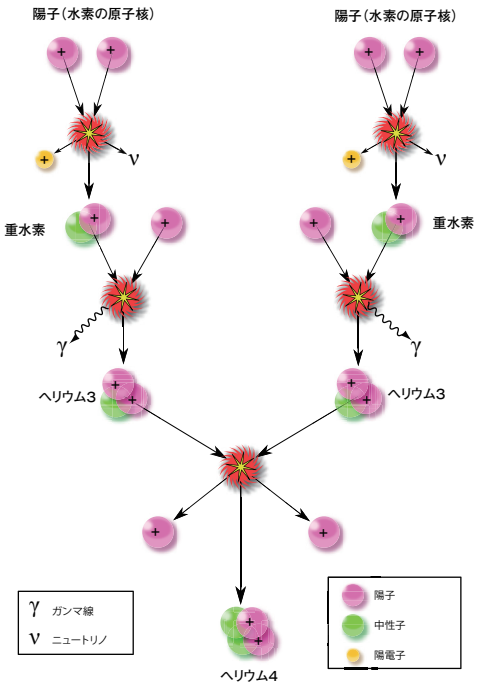
放射性廃棄物

核分裂では、ウラン２３５がおよそまっぷたつに割れますが、ウランは大所帯なため割れ方が様々です。要らない中性子を放出しますが、それでも壊れたもののうちほとんどはまだ放射性同位体です。たとえば、ストロンチウム９０はアルカリ土類金属で、セシウム１３７、１３９はアルカリ金属で、周りの物質と激しく化学反応します。また、ヨウ素129 や 131 などは、ハロゲン元素で化学反応をしやすく、体内に摂取されると長期間にわたって体内にとどまります。またクリプトン８５は大気中に出ますと、化学反応をしないで大気中に長い間とどまることになります。ストロンチウム９０の半減期はおよそ２８年で、セシウム１３７は３０年、クリプトン８５は１１年でヨウ素１２９は１６年ですからそれらは比較的短期で無害化します。しかし、セシウム１３５などは半減期は２００万年、テクネシウム９９は２０万年ほどのため、無害化するには数千年かかります。そのため、それら放射性廃棄物を入れておく容器は最低１万年の耐久性が必要です。しかし、人類の歴史の長に匹敵するので、本当にそんなに長い間持つのを確かめた人はいませんね。

放射性廃棄物をどうするかについては、基本的には地中に埋める案が有力であり、ドイツなど諸外国で試みられています。しかし、日本では火山や地震の活動など不定な部分が多くどこに埋めたらよいかについても議論が必要です。もし、容器が破壊されてしまうようなことがあれば健康被害とともにその処理にさらに莫大な費用がかかることになります。そのため、短期的に見ると原子力発電は、他の発電よりも安価であっても、長期的に見たコストには不確定性があるのです。

核融合とは？

私たちのエネルギー源として最も大きいのは太陽です。たとえば、石油なども過去の植物の光合成によってできたものですね。そのため、化石燃料も太陽のエネルギーの産物と言えます。この太陽のエネルギーを生み出しているのが**核融合反応**です。核融合反応では、水素からヘリウムに変わっていくプロセスなどが起こり、核融合反応では核力によって非常に強く引きつけられるときに生じる大きなエネルギーが外に放出されます。ただし、核力はセメントのように非常に近い距離にしか働かないことを思い出してください。引き合う力が起こるようにするためには、核力が働くように陽子同士の距離を非常に近づける必要があります。しかし、核子は正の電荷に耐電していて、そのお互いの反発力はクーロンの法則により距離の二乗に反比例します。クーロン力に打ち勝つには、非常に速いスピードで衝突する必要があります。運動エネルギーは温度に比例しているため、非常に高い温度で、かも、衝突が頻繁に起きるような密度が必要となり、のため非常に大きな圧力が必要になります。太陽では、１秒間に６億５千７百万トンの水素が６億５千３百万トンのヘリウムに変わり、のこりの４百万トン分の質量が、エネルギーに変換されて放出されています。その中心温度はおよそ一千五百万度と推定推定されています。このような反応のために高い温度と密度が必要なのは通常の化学反応による燃焼と同様ですが、それらの燃焼のエネルギーや温度は桁がはるかに異なります。核融合反応を地上で起こすのには、高温、高圧の水素をどのようにして閉じこめるかが一番大きな課題です。それは、圧縮しようにも温度が高く容器とするすべての物質が溶けてしまうからです。



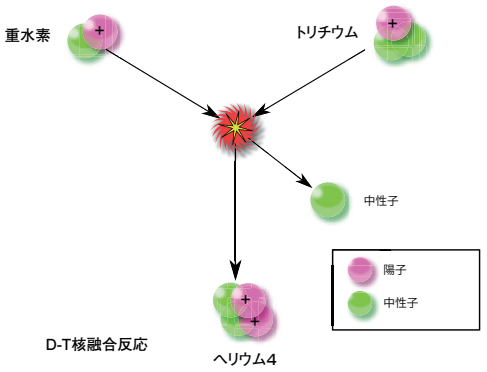
太陽内部でも起きている核融合
水素からヘリウムに変換されていく

星の核融合反応は、水素からヘリウムと次第に重い元素を生成していき、核子あたりの平均エネルギーの最も小さな鉄まですすみ、そこで止まります。

太陽の核融合と人工の核融合

太陽の核融合は要旨から重水素が作られる時に、要旨が中性子に変換するというベータプラス崩壊が必要になります。一般に、こうした反応は時間がかかり比較的ゆっくりとした核融合となります。後の章でも取り上げますが、太陽は非常に体積が大きいので、ゆっくりとしたプロセスであっても全体として大きなエネルギーとなります。
また、太陽の中では図のように水素原子核がヘリウムに変わって行くプロセスが起こり、その過程では中性子が放出されません。そのため、もし人工太陽ができれば、放射性廃棄物のないエネルギー源が可能となります。

しかし、ベータ崩壊を伴うとゆっくりとしたペースになるため、地上での核融合には適していません。したがって、ベータ崩壊を含まない核融合が望ましいわけです。最も低温度でできる核融合反応は、３重水素（トリチウム）とヘリウム３からヘリウム４ができる核融合です。そして、現在このような核融合の実現に努力しています。温度は１億℃以上にしなければなりませんが、容器はこの温度では溶けてしまいます。そのため、磁場などで高温度高密度状態を閉じこめる工夫が検討されています。



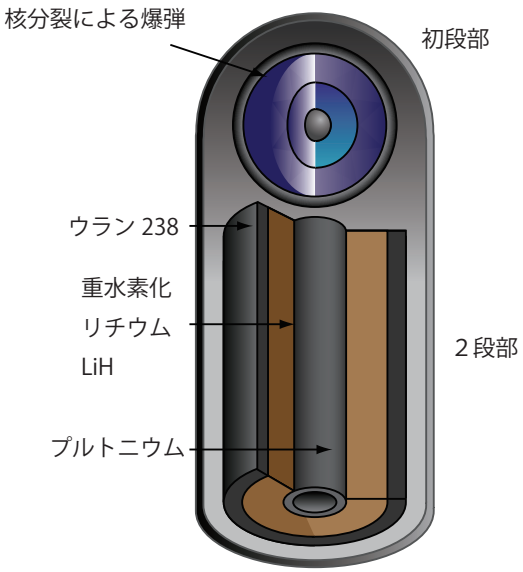
重水素とトリチウムの核融合
弱い相互作用を必要としないので核融合はしやすいが、中性子が放出される

また、図のように重水素とトリチウムの核融合では中性子が放出され、多大な放射性廃棄物が生産されてしまいます。核融合が現実に可能となれば、水から大量のエネルギーを取り出せ、また放射性物質をほとんど作らない夢のエネルギー源となるでしょう。ただし、現在のところ実用化のめどはたっていませんが、石油やウランなどの資源か限られているため人類がこの後数千年繁栄を続けるためには、核融合の実用化は将来必要になってくるでしょう。

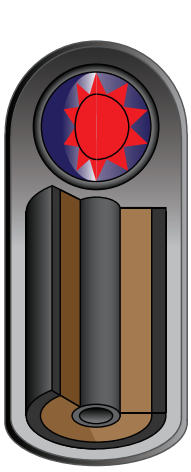
水素爆弾とは？

後の章で説明するように大要は核融合でエネルギーを放出しています。のように恒常的というのは難しいのですが、瞬間的になら地上でも核融合を起こすことができます。それは、高温高圧を作り出すことは、核分裂によって可能となります。つまり、核分裂によって起こる高温高圧により、一瞬ではありますが重水素をヘリウムに変える核融合を起こさせることができます。これを利用したのが**水素爆弾**です。図は初期の水素爆弾の構造を表しています。３重水素を核融合に用いるのが一番都合が良いのですが、自然界には非常にわずかにしか含まれません。そこで、まず原子爆弾により核融合を起こさせ、発生したガンマ線によって高温高圧状態を作り出します。またそれによってできた中性子により再び核分裂を起こさせ、重水素の核融合反応を起こさせる仕組みです。現在では、核実験により、もっと簡略化や小型化が進んでいると見られますが、国家機密であるのでわかっていません。

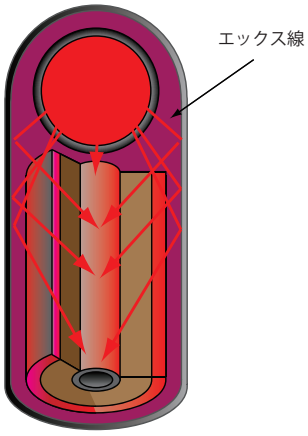
水素爆弾の利点はなんでしょうか？原子爆弾では、ある一定以上のウラン２３５やプロトニウムが集まると臨界になり、核分裂が始まってしまいます。このため、威力をある程度以上にするのは困難になります。一方、核融合は、重水などは通常は核融合を起こす危険性はありません。そのため、臨界という性質がないため、その威力を原子爆弾以上にすることができるのです。



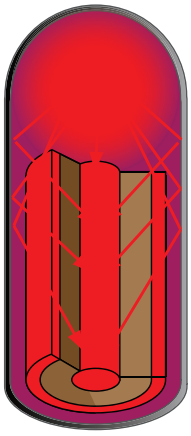
水素爆弾の構造



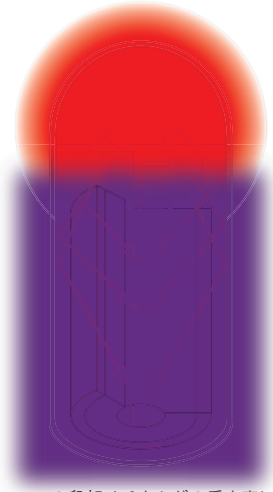
原子爆弾爆発



２段部中心部コアの
プルトニウム核分裂



２段部中心部コアの
プルトニウム核分裂
周辺部ウラン 238 が
中性子によりプルトニウムとなり



２段部リチウムが３重水素に核分裂
し、外側と内側の爆発により圧縮
３重水素、重水素の核融合始まる

エドワード　テラー (1908-2003)

ハンガリー人理論物理学者で、「水爆の父」として知られる。ドイツで研究していたが、ニールスボーア研究所などを経て、アメリカに渡り、マンハッタン計画に加わりました。加わった動機については手記にこうあります。「ドイツの科学力は世界のトップレベルであり、ナチが原子爆弾を製造した場合におこることははっきりしている。もし、自由の国の科学者たちが兵器を作らなければ、自由は失われる。自分の現在の研究の興味よりも原子爆弾を優先すべきである」これがその頃の多くの研究者に共通の信念であったのでしょう。

テラーは水素爆弾の可能性を思いついたがこれと独立に 1941 年に京都大学の萩原九太郎により核分裂による核融合爆弾の可能性が指摘されていました。

マンハッタン計画では水素爆弾の理論的な研究を行ったが結局うまくいかず、戦後になってスタニスワフ・ウラムと共に実用に耐えるモデル、テラー・ウラムデザインを作成しました。原理は本文の説明の通りですが、詳細は国家機密で不明です。生涯核計画の推進者でした。1982 年アメリカ国家科学賞受賞。

また、ソ連でも水爆が作られましたが、スパイがどの程度関与していたのかについては議論が分かれています。

1952 年、最初の水素爆弾実験、原子爆弾の１０００倍の破壊力

キーワード

陽子、中性子、原子数、質量数、核力、強い相互作用、ベータ崩壊、弱い相互作用、放射性崩壊、アルファ崩壊、ベータ崩壊、ガンマ線、中性子線、半減期、同位体、重水素、重水、放射性同位体、陽電子放出、ペット、トレーサー、吸収線量、グレイ（Gy）、線量当量、シーベルト（Sv）、核分裂、ウラン２３５，連鎖反応、臨界、プルトニウム、高速増殖炉、プルサーマル、ウラン濃縮、原子爆弾、ガンタイプ、インプローシブ（爆縮）、核融合反応、水素爆弾