

環境化学1

放射性核種と原子力の利用(その1)

—ウランとプルトニウム—

川 幡 穂 高^{1,2)}

1. はじめに

化石燃料の消費は資源保護も含めて21世紀の重要な課題となってきた(川幡, 2008)。電力はクリーンなエネルギーとして低炭素社会の中で中核となるエネルギーとして期待されている。1950年ごろには、水力発電、石油火力発電などで電力は供給されていたが、現在では、原子力、天然ガス、石炭が主要な発電源となっている。特に、原子力発電は全体の36%を占めており、発展が期待される中国、インド、ブラジルなどにおいて、大規模な原子力発電計画が発表されている。また、新規の原子力発電所建設を中断していたアメリカ合衆国においても、近年その見直しが話題となっている。このように、世界的に原子力発電が近年見直されている。

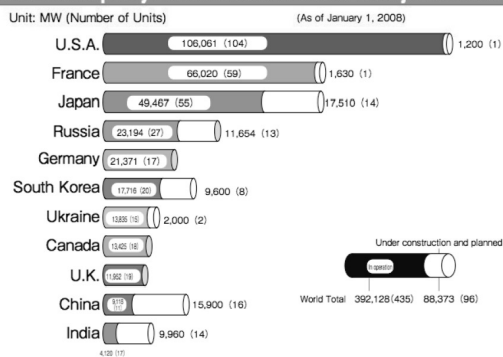
世界の原子力発電量の国別比較によると、アメリカ合衆国が第1位、次がフランス、日本は第3位となり、以下、ロシア、ドイツ、韓国、ウクライナ、カナダという

順番になっている(第1図)。欧米(フランスを除く)で原子力発電がこの十数年新規建設が抑制されてきた中で、日本は継続的に原子力発電を維持・発展させてきた。そのため、技術的なノウハウの蓄積が豊富であるため、今後の世界的な原子力発電の需要に応えるべく、大きな貢献が期待されている。現在、原子力発電所を建設し、維持・管理を行える総合原子力会社は、フランス、ロシアを除くと、東芝(米ウェスチングハウス・エレクトリック(WH)と連携)、日立(米ゼネラル・エレクトリック(GE)と連携)、三菱重工となっており、サブプライム問題による経済危機以後の産業の育成といった観点からも関心が集まっている。

原子力の利用は、上に述べたような長所と表裏一体で、核爆弾や原子力発電所の事故に象徴されるような、放射性化学物質の環境への暴露が懸念されてきた。広島と長崎への原爆投下、チェルノブイリ事故はその最たるものである。近年北朝鮮やイランなどにおいても核爆弾が開発されているらしいといったことが国連でも問題となり、ニュースにも大きく取り上げられている。

この小論は2編より構成されている。前編では、原子核分裂について、要点を科学的見地より系統的に整理する。特に、その原理を応用した核爆弾と原子炉で起こる核分裂反応について述べる。広島と長崎への原爆は、前者がウラン(U)、後者がプルトニウム(Pu)を使用しており、2つの元素でどの性質が同じで、どこが違うのか、といった点についてもふれる。後編では、核兵器の使用や原子力発電などに伴う事故により環境に暴露された放射性核種による汚染についてまとめる。特に、数十年前に太平洋で実施された大気核実験で環境に暴露された物質について、

Generation Capacity of Nuclear Power Plants in Major Countries

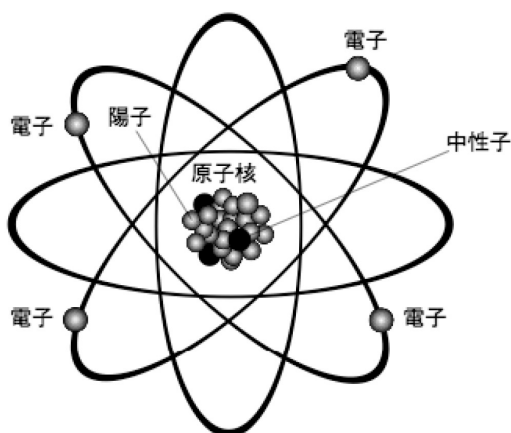


(Source) Japan Atomic Industrial Forum, Inc. "World Nuclear Power Plants 2007/2008"

第1図 世界の原子力発電量の国別の比較。

1) 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科・大気海洋研究所海洋底科学部門
2) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 環境化学, 放射性物質, ウラン, プルトニウム, 核爆弾, 原子炉, 広島原爆, 長崎原爆



第2図 原子の模式図. 化学的性質は陽子の数 Z で決定され, 中性子の数 N の違うものが同位体と呼ばれる.

その後の分布の変化などについてふれる.

2. 原子と原子核分裂

2.1 原子そして元素

化学反応に関与する最小の粒子は原子で, 陽子, 中性子, 電子から構成されている. 陽子は正電荷を, 電子は陽子と絶対値が同じ負電荷をもつ. 一方, 中性子は電荷がない. 陽子と中性子は質量がほぼ同じで, 原子は, 原子番号 Z と同数の陽子と電子をもっており, Z の値が元素の種類を決定し, その相対質量は質量数(= Z (陽子の数) $+N$ (中性子の数))と呼ばれる. Z が同じで N が異なったものは同位体と呼ばれるが, 化学的性質は Z で決定されるので化学的な差はほとんどない(第2図)(山口, 2007; 玉尾, 2007).

例えば, 炭素には3つの同位体が知られており, 安定同位体の ^{12}C (存在比98.888%)と ^{13}C (存在比1.112%)および放射性核種 ^{14}C (存在比 $1.2 \times 10^{-10}\%$)となるが, Z (陽子の数)は6である. また, ウラン238の場合には, 原子番号92(= Z), $N=146$ となる.

このように原子は, 陽子の数で決定されるが, 「元素」と呼ばれるものは, 同位体も含めて1種類の原子

から構成されている(ある程度の量の)物質である. 例えば, 純粋な鉄1gは鉄原子のみから構成されており, これは鉄元素となる. しかしながら, 水(H_2O)1gでは, 水素と酸素の原子が集まっているので, 元素ではない(川幡, 2009).

2.2 中性子と原子核に働く核力

原子は基本的に原子核と電子から, 原子核は, 主に陽子と中性子より構成されている. 陽子と中性子の重さは同じで, 電子の1,837倍となっている. 陽子はプラスに, 電子はマイナスに帯電しているが, 中性子は電荷をもっていない.

陽子は電荷をもっているので, 陽子間の電気反発力によって核はバラバラになってしまうはずである. また, 中性子同士あるいは陽子と中性子の間も, 接着するものが必要である. このような核子同士を強固に結びつける力は「核力」と呼ばれ, 核力は陽子の電気反発力を遙かに上回る引力となる. すなわち, 「陽子-陽子」, 「陽子-中性子」, 「中性子-中性子」に核力が働いているので, 原子核は保持されることになる. 一方, 「陽子-陽子」には電気反発力が作用するが, 中性子は電荷がないので, 「陽子-中性子」, 「中性子-中性子」には核力のみが働くということになる.

2.3 最大の天然存在元素であるウラン(U)

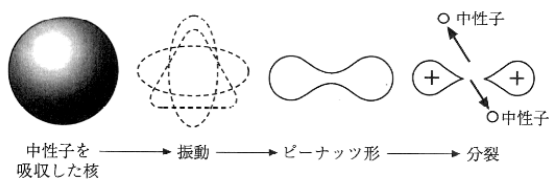
天然に存在する元素の中で, 最も重いものはウランである. それ以上の元素は「超ウラン元素」と呼ばれ, 人工的に作られたものである(註釈1). ウラン1つの原子核の中に陽子が92個も存在している. このような状態では, 電気反発力は大きく, 核をバラバラに壊そうとするので, ウラン核は基本的に不安定となる.

このことは, ウランはもともと不安定で, この性質が核爆弾に通ずることになるのである.

ウランには, 天然に3種類の同位体が存在しており, 第1表に掲げたように, 数億年~数十億年という長い半減期を示し, 放射性核種である. 地上に最も多く存在しているのは ^{238}U (存在比99.275%)である

第1表 ウランの同位体の性質.

同位体	Z(陽子の数)	N(中性子の数)	天然存在量(%)	放射壊変のタイプ	半減期(年)	壊変後の核種
^{234}U	92	142	0.01%	α	2.455×10^5	^{230}Th
^{235}U	92	143	0.72%	α	7.038×10^8	^{231}Th
^{238}U	92	146	99.28%	α	4.468×10^9	^{234}Th



第3図 核分裂現象の模式図。

が、原子力発電の燃料に使用されるのは²³⁵U(存在比0.72%)で、唯一天然に産出する核分裂核種として、核爆弾、原子力発電に利用されてきた。

2.4 核分裂反応 (Nuclear fission)

核分裂反応は、ウランのように、陽子あるいは中性子過剰核などの不安定で重い原子核が分裂反応を起こして、より軽い、原子番号の小さな2つ以上の元素に分解する反応である(第3図)。広義の核分裂反応では、

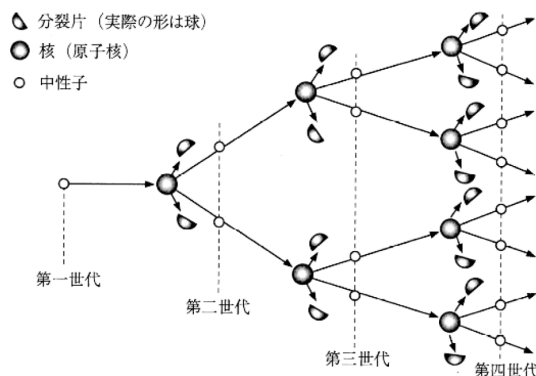
- ① 電子もしくは陽電子を放出してわずかに軽い核となる。
- ② α粒子(He核)を放出して少し軽い核となる。
- ③ 複数個のかなり軽い核となる。

この中で、①、②は、それぞれβ崩壊、α崩壊という原子核崩壊と呼ばれ、放射線を放出する。原子核分裂という意味では、一般的には③を指す(近藤, 1998; 高田, 2007)。

2.5 中性子と核分裂

中性子は電荷をもたないので、電気力は感じない。そこで、核から電気的な反発力あるいは引力を受けないので、核外から中性子がウラン核に近づいた場合、容易にウラン核に接近できる。すると、核力が働き始め、中性子はウラン核に吸収されてしまう。ウラン核が中性子1個を吸収すると、さらに不安定となり、核は振動し、核力で核子全部を核内に閉じ込めておくのが難しくなる。核内には陽子が存在しているので、プラスに帯電しており、電気反発力が働き、最終的に2つの原子に分裂してしまう。これが核分裂反応である。ちなみに、この際、核内に中性子が沢山あるので、核分裂に伴い、中性子が外部に放出される。ウラン原子の場合は、平均2.5個となっている。この「核分裂によって中性子が飛び出す」ということが連鎖反応の始まりとなる(第3図)。

このように核分裂を起こし、中性子が放出され、こ



第4図 核分裂連鎖反応の模式図。

の中中性子が別の核分裂性物質の原子核に吸収されると連鎖反応が起こる(山田, 2004)(第4図)。この過程は発熱反応なので、この連鎖反応と発熱反応の性質が合わさると、大量の熱を一度に生成することになる。

2.6 核分裂生成物質

天然に存在するウランには、核分裂を簡単に起こす²³⁵Uと起こさない²³⁴U、²³⁸Uが含まれている。²³⁵Uに中性子が1つ吸収されると、原子核は大変不安定になり、2つの原子核と高速中性子に分裂する。

代表的な核分裂反応としては以下のようなものがある。



このように、中性子を吸収した後、核分裂を起こす場合、その分裂の仕方は一通りでなく、幾つかの分裂パターンが知られており、核爆弾あるいは原子炉ではさまざまな核種が報告されている(第2表)。

上の式において、原子核に存在する質量数(=Z+N)は右辺と左辺とを、整数単位で計算すると等しくなる。これは電荷についても成立する。しかし、より詳細な測定では、原子核の質量は一般に陽子と中性子の質量の総和よりわずかに小さい。この質量差は質量欠損と呼ばれ、これは、分裂前と分裂後の質量の差は結合エネルギーの差に相当している。そして、核分裂時にこの質量差に相当するエネルギーが外部に放出される。上記の過程の質量差をエネルギーに換算すると、ウラン原子1つ当たり $3.2 \times 10^{-11}\text{J}$ となる。

第2表 分裂核に含まれる放射性核種と半減期.

放射性核種名	半減期
³ H トリチウム	12.3年
⁶⁰ Co コバルト60	5.3年
⁹⁰ Sr ストロチウム90	28.8年
⁹⁰ Y イットリウム90	2.7日
¹⁰⁶ Ru ルテニウム106	374日
¹⁰⁶ Rh ロジウム106	29秒
¹²⁹ I ヨウ素129	1570万年
¹³¹ I ヨウ素131	8日
¹³⁴ Cs セシウム134	2年
¹³⁷ Cs セシウム137	30年
¹³⁷ Ba バリウム137	2.55分
¹⁴⁴ Ce セリウム144	285日
¹⁴⁴ Pr プラセオジム144	17分
¹⁵⁴ Eu ユウロビウム154	8.6年
²⁴¹ Pu プルトニウム241	14.29年

²³⁵U 1kg中には 2.56×10^{24} 個の原子核が含まれるので、これがすべて核分裂を起こすとおよそ 8.2×10^{13} Jのエネルギーが放出される。

最初にわずか1個の中性子をぶつけて、核分裂を起こして、その原子核より2~3個の中性子が放出され、それがまた、分裂を起こしていない原子核に吸収され、といったことを繰り返していく。最初の中性子がわずか1個であっても、この繰り返しが重なるトネズミ算的に中性子は増大して、30回繰り返すと中性子の数は5億個以上に達する。そして、核爆弾では、 10^{24} 個のウラン原子核の核分裂反応が1億分の1秒間という一瞬の間に起こると、この反応はもともと発熱反応なので、温度はいっきに1,000万度を超え、超高温となる。そして、元素は気化し、周囲の空気も膨張し、爆発現象となる。これは、当然、強烈な爆風を引き起こし、衝撃波が生じ、建築構造物をなぎ倒すことになる。

2.7 臨界量

核分裂反応によって生じた中性子の中には、ウラン核に吸収される前に逃げていってしまうものがあり、これは中性子漏れと呼ばれている。このような状況下で、中性子の数に不足が生じると、たとえウラン核が残っていても連鎖反応は最後まで持続しない。逆に、条件を整えて核分裂反応が持続する状態となった場合は、「臨界に達した」と呼ばれ、連鎖反応が継続される。核分裂物質の量が増えていくと、ある重量の所で内部の核分裂反応が臨界に達する。この量

は臨界量と呼ばれる。換言すると、臨界に達する核分裂物質の最少の質量が臨界量となる。

さて、ウランには同位体が存在しており、中性子を吸収して、核分裂を起こし、中性子を放出するのは、²³⁵Uである。天然には、前述したように3つの同位体が知られているが、天然ウランに0.72%しか含まれていない。²³⁸Uは天然ウランに99.275%含まれ、陽子、中性子数ともに偶数で安定している。そこで、臨界を起こさせるためには、むだな²³⁸Uを除去して、²³⁵Uを濃集する必要がある。

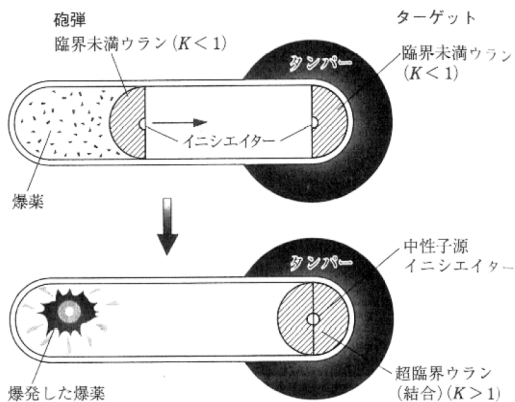
核爆弾の場合には、²³⁵U濃度をほぼ100%、原子力発電所の核燃料では3~5%に濃縮することが必要である。しかし、²³⁵Uも²³⁸Uも共に同一元素のため、化学的性質は全く同じなので、分離に際しては質量数が違うことを利用する物理的方法(例えば、遠心分離法、ガス拡散法、電磁分離法、レーザー法)などが採用されてきた。しかし、これには莫大な費用がかかる。

臨界量は、形状にも依存する。例えば、核分裂物質が薄い板状で存在している場合、内部で発生する中性子の多くが外部へ飛び出してしまい、核分裂反応には寄与しないので臨界に達するのが難しくなる。逆に、体積当たり最小の表面積となる球状の場合には、臨界量は最少となり、中性子が逃げないような球形ウランに覆いがある場合には、効率も改善される。臨界量は²³⁵Uの場合、5~15kgとされている。

広島市に投下された原子爆弾では、臨界量以下の半球の濃縮ウランが2つ用意され、2つの半球が合わさって球体となると臨界量になるようにセットされていた(山田, 2004) (第5図)。半球体には中性子を放出する装置があり、両半球は、最初離れているが、爆薬が爆発すると両半球は合体し、核分裂を開始し、1億分の1秒のうちに連鎖反応が終了し、瞬間的に温度は1,000万度になった。広島市に1945年8月6日8時15分に投下された原子爆弾は、地上600m上空で炸裂し、当時の広島市の人口35万人(推定)のうち約14万人が死亡した。

2.8 放射線の放出

放射能(Radioactivity)とは、放射線を出す能力を意味している(註釈2)。放射能の強さは、現在では1秒間に崩壊する原子核の数で表され、単位はベクレル(Bq)である。すなわち、原子核が崩壊する時に放射

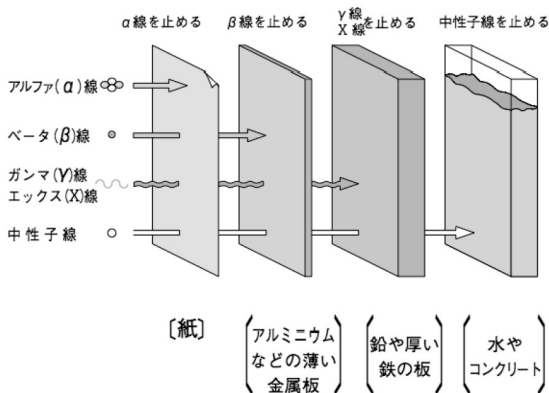


第5図 ガン式ウラン爆弾の模式図。

線が放出される。以前の教科書ではキュリー(Ci)が使用されていたが、これは、1gのRa(ラジウム)から、 3.7×10^{10} 個の α 線が放出される線量と等しい量となるので1Ciは 3.7×10^{10} Bqとなる。

次に放射線(Ionized radiation)とは、電離性をもつ高エネルギーの粒子線や電磁波を指している。具体的には、 α 線、 β 線、中性子線、電磁波(γ 線、X線など)などをあげることができる(第3表、第6図)。

ウランの原子爆弾の炸裂では、中性子線が放射される。また、 ^{235}U の核が幾つかに核分裂し、分裂核には、陽子と中性子が含まれるので、この分裂核の電



第6図 放射線の種類と透過能力。 α 線、 β 線は荷電粒子なので、それぞれ紙1枚で、厚さ数mmのアルミ板で遮蔽できる。一方、電磁波である γ 線は透過力が強く、厚さ10cmの鉛で防ぐことができる。中性子線はさらに透過力が強く、水やコンクリートの厚い壁に含まれる水素原子により遮断される。

荷はプラスとなる。これは、周囲の空気とぶつかると、空気分子は原子に分解し、この原子は分裂核より与えられた運動エネルギーを受け取り、電磁波を発生する。分裂核にはさまざまな種類があることは前述したが、これらは振動数の異なる電磁波、すなわちエネルギーの小さな方から赤外線(熱線)、可視光線、紫外線、X線、 γ 線などを放出する。

第3表 放射線の性質。

	性質	質量	電荷	壊変によって変化するもの	特徴
α 線	ヘリウム原子核(陽子2個、中性子2個)	有り	有り	$\Delta Z = -2, \Delta N = -2$	他の放射線と比べて重く、電荷も大きいので、物質にあたると電氣的に強く反応する。
β 線	電子	有り	有り	$\Delta Z = +1, \Delta N = -1$	核内の β 崩壊では、中性子が陽子に変化するので、中性子が1つ減り、陽子が1つ増える。
中性子線	中性子	有り	無し	$\Delta Z = 0, \Delta N = \text{減少}$	中性子過剰の核は β 崩壊を起こし、中性子が陽子に変化する機会が多いが、直接中性子を放出する場合がある。
電磁波		無し	無し		

電磁波

γ 線	10pmより短い波長			原子核内のエネルギー準位が下がる。	α 線、 β 線と比べると透過能力は高い。
X線	1pm~10nmの波長			電子軌道の遷移により発生する。	エネルギーは比較的高い。
紫外線	10nm~400nmの波長				化学的な作用を引き起こし、日焼けの原因となる。
可視光線	380nm~750nmの波長				人間の目で確認できる電磁波。
赤外線	700nm~1mmの波長				熱線とも呼ばれる。

次に分裂核同士、また、周囲の空気分子と衝突を繰り返す。このような状況下では、電荷をもった物質が加速・減速を繰り返すので、電磁波の量も大きくなる。電磁波はエネルギーをもっているため、人体が吸収すると、大きな影響がでる。原爆の強い赤外線(熱線)などは皮膚を焦がす。広島原爆で、焼け焦げた人が多数でたのはこのせいである。また、X線などはがんを引き起こす。また、分裂核(^{144}Ba , ^{94}Sr , ^{140}Xe , Cs , Nd , Mo)は猛烈な速度で飛び散るが、これらのほとんどは β 崩壊するので、放射能をもっている。分裂核は何回も β 崩壊を繰り返すが、短時間で崩壊するものは、それだけ高いエネルギーをもっているため危険である(近藤, 1998; 高田, 2007)。

2.9 分裂核と死の灰

広島原爆の場合、爆心地では地表の温度は3,000~4,000℃、爆風による圧力は爆心地から500mの場所で 19t m^{-2} に達した。また、爆発後、巨大なきこの雲が広島上空にたちどまり、西向きの風によって北西部に流れていき、「黒い雨」を降らせた。その中には、「死の灰」が混じっていた。

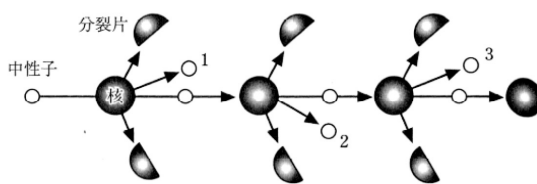
分裂片には、 ^{90}Sr , ^{140}Xe , ^{89}Kr , ^{144}Ba , ^{139}I , ^{95}Y などが含まれている。この中で、 ^{90}Sr は、半減期28.8年で β 崩壊して ^{90}Y に変わる。産業的には、原子力電池の放射線エネルギー源として使われているが、体内に入った場合には、骨はリン酸カルシウム($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)より構成されるため、Caのサイトを置換して、骨に沈着する。これにより、 ^{94}Sr は人体内で β 線源として、長期間にわたって放射線を出し続け、造血機能あるいは遺伝子に支障をきたし、放射線障害に至る。この障害は原爆症と呼ばれ、爆弾の炸裂から長期間経ても継続し、現在でも人々を悩ませている。

3. 原子力発電とプルトニウム(Pu)爆弾

3.1 原子力発電でのPu生成

核爆弾は、核分裂連鎖反応を瞬間的に終了させ、莫大なエネルギーを放出させるものである。これをゆるやかに放出させようとしたのが、原子炉で、原子炉で得られた熱エネルギーで電力を発電するのが、原子力発電所である。

核分裂の際に核より放出される中性子はエネルギーをもっているため、これを減速する必要がある。こ



番号1、2、3のついている中性子は制御棒に吸収され分裂を起こさない

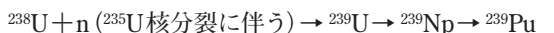
第7図 原子炉内での核分裂連鎖反応の制御。

れに用いられるのが、純水である。水分子は H_2O と表示されるが、この中の水素原子に中性子が衝突すると、通常の水中の水素原子は陽子が1つである(^1H)ため中性子が陽子にぶつくと、重さが同等なために減速する。水を構成する水素には、この他に陽子と中性子が合わさった重水($^2\text{H}=\text{D}$)がある。前者と後者の原子を含んだ水は、それぞれ軽水および重水と呼ばれ、両方減速材となる。この軽水を減速材に用いた原子炉は「軽水炉」と呼ばれている。なお、減速材にはこの他に黒鉛(C)も用いられる。

減速しても核分裂連鎖反応が継続すると、中性子は増加するので、これを一定に保持するには、吸収剤が必要で、これにはカドミウム(Cd)などから構成される制御棒が原子炉に挿入される(第7図)。このような状態でコントロールされた中性子は熱中性子(thermal neutron)と呼ばれ、減速されるが、そのスピードは原子炉の温度と密接な関係がある。

原子力発電所の核燃料では ^{235}U 含有量が3~5%なので、核燃料の97~95%は原子炉内で分裂を起こさない ^{238}U から構成されているということになる。しかし、この ^{238}U は、熱中性子を吸収して、 ^{239}U となり、これは中性子が多すぎるために不安定となり、その後2回 β 崩壊し、ネプツニウム(Np)を経由して、下の式のように最終的にPuになる(第8図)。

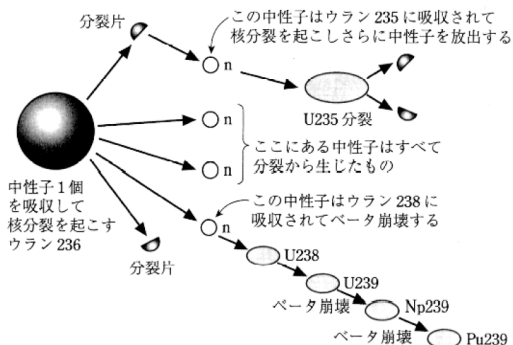
β 崩壊 β 崩壊



ウランの核爆弾では ^{235}U が100%であるから ^{239}Pu は生成しないが、原子力発電所の原子炉には ^{238}U が沢山あるので、 ^{239}Pu が生成する。なお、通常軽水炉型原子炉で、燃料棒を取り替える時点でのPu含有量は1%程度である。

3.2 ^{239}Pu の核分裂

^{239}Pu に含まれる陽子は偶数(94)、中性子は奇数(145)なので、偶数-奇数の関係となり、不安定な核



第8図 ウラン238よりプルトニウム239が生成するプロセス。

である。そこで、²³⁵Uのように核分裂を起こしやすい、²³⁹Puが中性子を吸収すると、核分裂を起こし、結果として平均2.8個の中性子が放出される。²³⁵Uの場合には平均2.5個であったので、²³⁹Puの方が²³⁵Uより核分裂連鎖反応では効率的である。

Puが核爆弾の原料としてウランよりも適している点として、以下の点があげられる：①原子力発電所を稼働して、電力を得ながら副産物として²³⁹Puを得られる。②²³⁹Puを化学的に処理して効率的に濃集して回収できるので、ウランのように物理的濃集プロセスに多額のお金がかかることもない(註3)。③核分裂連鎖反応時に、Uよりも中性子の放出効率が高い点があげられる(山田, 2004) (第9図)。

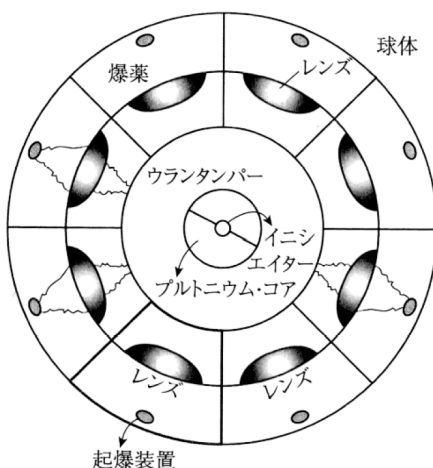
最初に実戦で使用されたプルトニウム型原子爆弾は、1945年8月9日11時2分に長崎市に投下されたもので、人口24万人のうち7万4千人が死亡した。

3.3 プルサーマル、高速増殖炉、再処理工場

²³⁹Puは²³⁵U同様に、熱中性子を吸収して、核分裂反応を起こす。実際、現在の軽水炉でも、発電量全体に占めるPuによる発電量は約30%となっている。

プルサーマル(註4)とは、²³⁹Puをより積極的に燃料として活用しようという考えで、熱中性子により²³⁵Uと²³⁹Puの核分裂を利用する。UとPuが両方が混じった特殊な混合酸化物(MOX=Mixed Oxide)燃料(Pu含有量は4~9%)を用いるので、発電量全体に占めるプルトニウムによる発電量は約50%と増える。

さらにこの原理を発展させたのが、消費した以上に燃料を生むということで計画された高速増殖炉である。この場合、熱中性子でなく高速中性子を用いて、中性子を²³⁸Uに捕獲させて²³⁹Puを生成する確率を高



第9図 プルトニウム爆弾の模式図。

める。高速増殖炉でのMOX燃料内のPu含有量は約20%である。なお、福井県敦賀市にある高速増殖炉の原型炉もんじゅで、原子炉には直接関係はないが、炉心を冷却し熱エネルギーを取り出す金属ナトリウム漏洩事故が起こって以来、高速増殖炉開発とプルサーマル計画は中断して現在に至っている。

さて、軽水炉の原子炉を運転していると、時間の経過とともに①²³⁸Uの含有量が下がり、②核分裂に伴う分裂核の濃度が増加し、③生成したキセノン原子核などは中性子を吸収してしまうので、原子炉の効率を下げてしまう。不純物を除いて、²³⁸Uや²³⁹Puを抽出し、濃度を上げて、MOX燃料を作れば、全体として燃料を効率よく燃やすことができる。プルサーマル発電はこのMOX燃料を利用した発電である。

3.4 劣化ウラン弾

核兵器などに必要なのは、²³⁸Uではなく²³⁵Uである。そのため、天然ウランより²³⁵Uに富んだ濃縮ウランを取り出す必要がある。²³⁵Uを抽出していく課程で、同位体組成が変化していく。残留物は「カス」として、より²³⁸Uに富んだウランとなるが、これは「劣化ウラン」と呼ばれている。

劣化ウランの比重は非常に重く(約19)、鉄の2.5倍、鉛の1.7倍である。よって、これを混ぜて合金を作り、砲弾として用いると、大きさおよび速度が同じ条件では、より大きな運動エネルギーが得られるので、対戦車用の砲弾の芯などに使用すると貫通力が増す。

劣化ウラン弾が命中すると運動エネルギーが熱エネルギーとなり、先端温度は1,200℃を超え、溶解温度に達する。その際、劣化ウラン微粒子が粉塵となって周囲にまき散らされる。これを無意識に吸入すると、体内にウランが吸収される。命中しない場合であっても、着弾の衝撃で、粉塵が舞い上がると、周囲の土壌を汚染し、最終的に一般市民もウランを吸入してしまう。

この小論の第1表でも示したように、ウランの同位体はすべて放射性核種であるので、 ^{238}U も ^{235}U も半減期 4.468×10^9 年、 7.038×10^8 年で α 線を出して、壊変している。劣化ウランでは、天然ウラン鉱石よりも ^{235}U 含有量が少ないため、劣化ウランの放射能は 14.8 Bq mg^{-1} で、天然ウランの 24.8 Bq mg^{-1} よりも低くなっている(IAEA, http://www.iaea.org/NewsCenter/Features/DU/du_qaa.shtml#q3)。いずれにしても、ウランは放射性核種で α 崩壊するために、体内に入ると、体内被ばくを受けることになる。

劣化ウラン弾が最初に大規模に使用されたのは、1991年に勃発した湾岸戦争で、その後、1992年のボスニア・ヘルツェゴビナ紛争、1999年のコソボ紛争でも使用された。特に、ボスニア・ヘルツェゴビナ紛争において、国連より平和維持のために派遣された兵士、帰還兵、住民の間で、原因不明の体調不良の訴えが相次ぎ、白血病などを発症した例も報告され、これらの健康被害は「バルカン症候群」と呼ばれている。さらに、湾岸戦争においても同様の報告がされているが、今のところ厳密な因果関係については、確定していない。

4. まとめと要約

- ①ウランの天然存在比は ^{238}U が99.275%、 ^{235}U が0.72%で、後者が核爆弾や原子力に利用されてきた。
- ②ウラン核分裂反応では、電荷をもたない中性子が原子核に接近し、核力が働き、中性子が核に吸収されて、核が不安定となり、複数の分裂核に分解し、最終的に中性子を外部に放出する。
- ③核分裂連鎖反応が継続するための最小量は、臨界量と呼ばれ、 ^{235}U では5~15kgが必要である。核爆弾では ^{235}U 濃度がほぼ100%、原子力発電所の核燃料では ^{235}U 濃度は3~5%に濃縮されている。

- ④核爆弾では、核分裂連鎖反応が一瞬の間(1億分の1秒間)に起こり、発熱反応により温度は $>1,000$ 万度となり、爆発現象を起こし、建築構造物をなぎ倒し、放射線も放出される。
- ⑤分裂核からも何十年にわたって放射線が放出されるため環境が悪化する。
- ⑥Puは ^{238}U が中性子を取り込むことで、生成される。分離が容易なことから核分裂連鎖反応が効率的であるため核爆弾により適している。プルサーマル、高速増殖炉などは、このPuを原子力発電に利用しようとするものである。

謝辞：本稿を準備するにあたって、科学研究費補助金基盤研究(S)22224009および東京大学交付金を使用した。図は<http://www.fepec.or.jp/>(電気の情報広場)から拝借した。ここに感謝します。

註釈1 ウラン鉱石中で、 ^{238}U が中性子を吸収し、 β 崩壊して ^{239}Pu が極微量に存在することが報告されている。

註釈2 新聞などでは慣用的に、放射能という言葉が「放射能をもつ物質」という意味で使用される場合がある。

註釈3 原子炉内で ^{240}Pu (^{239}Pu が中性子を吸収)も微量に生成するが、基本的に ^{239}Pu が主要核種である。

註釈4 プルサーマルとはプルトニウム(Plutonium)のブルと軽水炉(Thermal reactor)を繋げた和製英語である。

引用文献

- 川幡穂高(2008):地球温暖化問題とエネルギー 資源問題-今世紀の課題-。地質ニュース, 641.
- 川幡穂高(2009):海洋地球環境学-生物地球化学循環から読む。東京大学出版会, 280p.
- 近藤宗平(1998):人は放射線になぜ弱いのか。ブルーボックス, 148p.
- 高田 純(2007):核爆発災害。中公新書, 274p.
- 玉尾皓平(2007):周期表。教育社, pp155東京.
- 山田克哉(1996)原子爆弾? その理論と歴史。ブルーボックス, 472p.
- 山田克哉(2004):核兵器のしくみ。講談社現代新書, 222p.
- 山口潤一郎(2007):元素の基本と仕組み。秀和システム, pp319東京.

KAWAHATA Hodaka (2011): Environmental Chemistry 1- Use of atomic energy and radioactive nuclides.

<受付:2010年4月13日>