

この元素名は冥王星(Pluto)に由来する。ウランの後、二つ目の元素ということで、天王星(Uranus)、海王星(Neptune)の次の惑星にちなんだわけである。冥王星は1930年に発見された。元素名をプルチウム(plutium)とすべきかプルトニウムとすべきかでいろいろと議論があったのだが、結局、後のほうが響きがいいということで採用されたのである。元素記号も最初Plとすべきだという主張もあったが、発見者のチームが、Puのほうがいささか品の悪い発音となることから(!)こちらがいいと主張し、結局こちらに落ち着いた。

英語：plutonium、フランス語：plutonium、ドイツ語：Plutonium、イタリア語：plutonio、スペイン語：plutonio、ポルトガル語：plutónio、中国語：鈾

## 人体中のプルトニウム

---

人体に含まれるプルトニウム

---

人体中の全量      きわめてわずか(痕跡量)

---

プルトニウムは生物学的役割は何一つなく、原子核燃料施設や特別な研究所など以外では目に見えるほどの量に接することもまずない。それでも、原子力発電所の事故や、核兵器実験の結果として、環境中にプルトニウムが放出された結果、われわれの体の中には数原子程度のプルトニウムが存在している計算になる。プルトニウムの放出する $\alpha$ 粒子はきわめて危険ではあるが、その透過力は小さいから、薄い金属板一枚で遮断することが可能である。だから、プルトニウムを納めた容器を手を持って大丈夫だし、金属プルトニウムも相応の手袋をした上でなら扱うことが可能である。

酸化プルトニウムをうっかり服用してしまっても、もともと不溶性であるためにほとんど吸収は起こらない。経口摂取量の0.04%ほどが体内に吸収されるが、これは骨髄に集積して、わずかでも著しい脅威となる。

## 医療におけるプルトニウム

プルトニウムの同位体中、プルトニウム-238 ( $^{238}\text{Pu}$ ) は心臓ペースメーカーのエネルギー源として用いられている。

## 歴史

プルトニウムは1940年の12月14日、カリフォルニア州バークレイで、グレン・T・シーボーグ、アーサー・C・ワール、ジョセフ・W・ケネディの三人のチームによりつくられた。彼らはウラン-238 ( $^{238}\text{U}$ ) の原子核を重陽子(デューテロン、重水素の原子核)で衝撃して核反応を起こさせた。最初に得られたのはネプツニウムの同位体であったが、ネプツニウムは同じ年、何箇月前にすでに発見されていた。ここで得られた新しいネプツニウム同位体、ネプツニウム-238 ( $^{238}\text{Np}$ ) は半減期2日で $\beta$ 粒子を放出して壊変する。これは原子番号がさらに一つ増加した新しい元素、すなわち94番元素の生成を意味する。数箇月のうちにこの94番元素の基本的な化学的性質が調べられ、ウランとかなりよく似ていることが明らかにされた。

翌1941年の三月に、新元素発見を報告する論文が *Physical Review* 誌に投稿されたのだが、ただちに取り消しの手続きがとられた。これはもう一つのプルトニウムの同位体、 $^{239}\text{Pu}$  が核分裂性を持ち、連鎖反応によって核爆弾を製造可能であることが判明したからである\*。

最初に得られたプルトニウムの量はごくわずかで、裸眼で観察できるほどのものではなかったが、1942年の八月には充分目に見えるほどの量がつくられた。さらに数週間後には秤量可能な量(といってもわずか3 $\mu\text{g}$ ほど)となった。それでも1945年までには米国は数キログラムのプルトニウムを保有していて、原子爆弾3個を製造できるほどの量になっていた。

## 戦争とプルトニウム

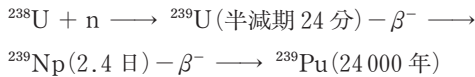
$^{239}\text{Pu}$  の原子核が熱中性子を捕獲すると、核分裂を起こし、同時に莫大なエネルギーを瞬時に発生する。この時にさらに数個の中性子を放出するが、これが近

---

\* 結局のところこの論文は1946年に掲載の運びとなった。

傍にある別のプルトニウム原子に捕獲されると、連鎖的に反応を起こし、さらに莫大なエネルギーと余分の中性子を鼠算的に生じることとなる。一秒の何分の一という短時間のうちにこの連鎖反応は制御できないほどの勢いとなり、大都会を完全に破壊するほどのエネルギーを放出することとなる。ただこのような激しい爆発を起こさせるためにはそれなりの“臨界質量”が必要である。

第二次世界大戦中に米国では極秘の“プルトニウムプロジェクト”が進行していた。核兵器研究計画の一環であった。この結果として新元素の化学的性質はかなり広い範囲で明らかとなった。このような貴重な情報は、もともとのプロジェクトに対しては付随的なものでしかなかったが、とにかく他の元素からプルトニウムを分離して純粋に取り出すために必要とされたのである。1943年の末頃までに、オーク・リッジにパイロットプラントが建設されて、ウランからプルトニウム ( $^{239}\text{Pu}$ ) を下記の一連の核反応でつくることになった。



この計画が動き出した頃は、プルトニウムの生産量は一日あたり約1gほどであったが、どんどん増加することとなった。原子炉燃料棒のウランを六箇月使用後取り出して硝酸に溶かし、硝酸プルトニウムの形でウランと分離する。この形ならば、処理も運搬もずっと楽なのである。

1945年の春までには全体で数キログラムものプルトニウムが製造された。プルトニウムを使った最初の核爆発実験は、ニューメキシコ州の砂漠の真ん中のアラモゴルドで同年の7月16日に実施された。この実験では6kgのプルトニウムが用いられ、小さな通常の爆薬を周囲にセットして、いくつかの断片に分けてあったプルトニウムを一箇所にまとめて、連鎖反応を起こすのに必要な臨界質量を超えるようにした。同時にベリリウムとポロニウムを混ぜて中性子シャワーを起こさせ、核爆発のイニシエータとした。

第二番目のプルトニウム爆発は、コードネームを“ファットマン”と名付けられた爆弾を、1945年8月9日午前11時2分に米国空軍が長崎に投下したときに起きた。この時の爆発規模はTNT火薬の数千トン分に相当\*するもので、七万

\* 爆弾投下当時、TNT火薬22000トン相当だと報道されたのだが、これはどうも誇大宣伝であったようである。

## プルトニウム

人が死亡し、十万人以上が負傷した(最初の原子爆弾は<sup>235</sup>Uを使用したもので、コード名は“リトルボーイ”と呼ばれ、この三日前(8月6日)に広島に投下された)。第二番目のプルトニウム爆弾の投下は二日後に予定されていて、目的地は熊谷であった。だが爆弾の準備が整わなかったので、その代わりに従来の爆弾六千トンが投下されたのである。次の週に第二次世界大戦は終わり、8月17日の原子爆弾投下予定地であった小倉は危機を免れた\*。

日本帝国陸軍も自分で原子力兵器開発計画をもっていた。1990年代、第二次世界大戦中に行われた研究チームの最後の生き残りである鈴木辰三郎(1911~2001、後にいわき明星大学の学長となった)の語ったところに依ると、このプログラムは<sup>235</sup>Uを使っての原子爆弾製造を計画していたのだが、材料不足のために中断してしまったという。投下目的地は、1944年当時米国軍が日本から奪い取って、日本への空爆の基地としていたサイパン島であった。

もっと破壊力の大きな水素爆弾の起爆にもプルトニウム爆弾が用いられている。これによって、太陽の中で起きているのと同じような、重水素核と三重水素核との核融合が可能となるほどの高温を得るためである。核分裂で生じる熱があとの核融合に必要となるので、この種の爆弾は“熱核兵器”に分類される。水素原子が融合すると原子爆弾よりもはるかに大量の熱を発生するから、そのエネルギーはTNT換算で百万(メガ)トン以上になる。

## 経済・産業界におけるプルトニウム

人工的につくられている元素はいろいろあるが、その中でもっとも大量に生産されているのはプルトニウムである。核兵器としての用途があるからでもある。原子力燃料の再処理に伴う副産物としても得られる。理論的には将来これによる原子力発電所も可能であろう。年間生産量はおよそ五十トン、世界中に蓄積されている全量はおよそ一千トン以上になるだろう。これらは爆弾の形か、金属棒の形で保存されている。

---

\* プルトニウム爆弾投下の最初の予定地は小倉であった。だが、厚い雲に覆われていて目標が定められなかったので、第二の予定地である長崎に投下されたのである。もともとは三菱造船所(戦艦大和などをつくった)を標的とするはずだったのだが、北方に大きく外れて数マイルも北の浦上地区に爆弾が落下した。不幸にも浦上の天主堂近くで爆発が起きたため、日本最大のキリスト教徒の居住地域が一掃されてしまったのである。

濃縮ウランを用いた原子炉を稼働させるには、前もってずっとたくさんある $^{238}\text{U}$ を除いてやる必要がある。核燃料棒は著しく大量のエネルギーを発生するが、三年ほど継続使用した後は、棒の内部に生じている3%ほどの不純物を除去するための再処理が必要となる。こうして得られたウランとプルトニウムはまた核燃料として使用可能となる。

いわゆる“増殖炉”では、爆弾原料としてのプルトニウムを製造するのに、 $^{238}\text{U}$ に原子炉中性子を照射して $^{239}\text{Pu}$ を製造する。きわめて大量のプルトニウム爆弾がつくられたが、冷戦期間中はほとんどが使われることなく保存されている。その数は六万五千個以上、金属プルトニウムにすると二百トンにも相当する。今この核爆弾の解体処理が進行中であるが、問題はこのプルトニウムをどう扱うべきかである。厳重に保管して、ふさわしくない連中の手に落ちぬようにしなくてはならない。原子炉用の核燃料としても使用可能であり、そのような動きもゆっくりと始まってはいるのだが、政治、環境、経済などの諸問題が複雑に絡み合っているために、なかなか本式に動きだす段階には至らない。 $^{239}\text{Pu}$ は新しい世代の原子炉である“高速増殖炉”の燃料としても使える。この原子炉ではウランとプルトニウムの混合酸化物(MOX)を利用する。この燃料1トンあたりにして60kgのプルトニウムを含んでいるのだが、4年間の連続使用後、プルトニウムの四分の三は消費され尽くしてしまう。1gの $^{239}\text{Pu}$ から得られるエネルギーは石油1トンから得られるものよりずっと多い。

使用済みの核燃料棒に含まれるプルトニウムは、大部分が $^{239}\text{Pu}$ (約58%)、次いで $^{240}\text{Pu}$ (24%)、 $^{241}\text{Pu}$ (11%)、 $^{242}\text{Pu}$ (5%)、 $^{238}\text{Pu}$ (2%)の順である。このうち $^{238}\text{Pu}$ は電力源として利用されるが、そのためには別な方法で調製されたものが使われる。 $^{237}\text{Np}$ の中性子照射ですっと容易に得られるからである。この核種は他のプルトニウム同位体と同じように $\alpha$ 壊変をするのだが、他と違って $\gamma$ 線を放出しない。だから鋼鉄製のケーシングに納めてしまえば完全に安全が確保でき、これから得られる熱を利用して、深海用潜水服や宇宙探査機、心臓ペースメーカーなどに必要な電力を賄っている。

$^{238}\text{Pu}$ は、1971年のアポロ14号の月面探査において、月面上に設置した地震計(月震計)そのほかの観測装置の電源供給用に利用された。同じように1977年に打ち上げられた二機のヴォイジャー宇宙観測機の電源にも利用されている。こ

## プルトニウム

れらは、175年に一度毎に起きる外惑星観測の好機を利用して、10年以上かけて木星、土星、天王星、海王星を間近で観測し、莫大な数の画像を地球に向けて送ってきた。

$^{238}\text{Pu}$ とベリリウムの混合物は中性子源となるので、研究用に活用されている。

## 環境中のプルトニウム

環境に含まれるプルトニウム	
地 殻	痕跡量 プルトニウムは存在量最少の10元素中に分類される
土 壌	事実上皆無
海 水	事実上皆無
大 気	事実上皆無

プルトニウムはウラン鉱石中にきわめて微量ながら存在する。これは核分裂性の $^{235}\text{U}$ から放出された中性子が、はるかにたくさんある $^{238}\text{U}$ に吸収された結果生成するものである。吸収されて生じた $^{239}\text{U}$ は $\beta$ 壊変して $^{239}\text{Np}$ (半減期2.3日)となり、さらにもう一つの $\beta$ 粒子を放出して $^{239}\text{Pu}$ となる。 $^{239}\text{Pu}$ の半減期は24000年である。もっと質量数の大きな核種は逐次中性子捕獲によって得られる。バストネス石試料中から、地球創生時以来のプルトニウムが検出されている。環境面での脅威となるのはこのような微量の元来存在しているものではなくて、核爆弾や地上核実験で放出されたプルトニウムである。1963年に大間で締結された核爆発実験制限国際条約によって、厳しく禁止されたのだが、すべての核兵器保有国がこの条約を批准したわけではない。中でもフランスは、この条約の発効後長年に亘って何回も大気中核爆発実験を行い、1980年代になってようやく国際的圧力のもとに中止せざるを得なくなった。これ以外の国家群(中国、インド、イスラエルなど)もこの期間中に何回もの核実験を行っている。全部で少なくとも550回の大気中核実験がなされた。

米国においては、不必要となった核爆弾から回収したプルトニウムを酸化物としてガラス状固体にし、ネヴァダ州のユッカマウンテン地区(ラス・ヴェガスの北東およそ200 km)に埋蔵することとした。中性子吸収能力の大きなカドミウムとガドリニウムを含むホウケイ酸ガラスに酸化プルトニウムを混融させて一本約二トンほどの棒状に成形している。酸化ガドリニウムジルコニウム(ジルコン酸

ガドリニウム)の利用も提案されていて、これによると3000万年もの間プルトニウムを不活性状態に保存可能であるという。こうしてできたガラス状の棒をステンレス鋼のケースに収め、地中深く(深度およそ4000m)に掘った洞穴中に格納し、出入り口はすべてコンクリートで固く封じてしまうという。だが、遠い未来において容器がゆっくりと腐食し、地下水によってどこか別の洞窟に運ばれて、核爆発を起こしうる臨界質量に達するのではないかと危惧する人たちもいる。しかし、酸化プルトニウムはあらゆる酸化物の中で溶解度最低のものであることを考えると、この怖れはやはり杞憂であろう。何しろ百万リットルの水にプルトニウム一原子が辛うじて溶解可能だというのだから。

## 化学的性質

データファイル	
元素記号	Pu
原子番号	94
原子量	244.0642 ( <sup>244</sup> Pu)
融点	640 °C
沸点	3330 °C
密度	19.8 kg / L (19.8 g / cm <sup>3</sup> )
	液体プルトニウムのほうが高密度なので、固体プルトニウムは液体プルトニウム状に浮かぶ
酸化物	PuO <sub>2</sub> , このほかにもいろいろな酸化物が知られている

金属プルトニウムは銀白色で放射性をもつ。周期表ではアクチニド元素に属している。金属は空気中で135 °Cに加熱すると発火するし、四塩化炭素と接触すると爆発する。金属プルトニウムの小塊は、 $\alpha$ 粒子を放出するために、触れてみると熱を感じる。大きな塊は水を沸騰させられるほどの熱を放出する。金属プルトニウムを調製するには、フッ化プルトニウムを金属リチウムか金属バリウムとともに1200 °Cに加熱還元する。金属プルトニウムは酸素や水蒸気、酸とは反応するがアルカリには侵されない。プルトニウムはウランやトリウムと並ぶ核分裂性を示す元素である。

現在もっとも豊富に存在しているプルトニウムの同位体は<sup>239</sup>Puである。この半減期は24000年である。もっと長い半減期の同位体として<sup>244</sup>Pu(半減期8000万年)と<sup>242</sup>Pu(半減期37.6万年)がある。全部で十九種の同位体が知られているがみな放射性をもち、半減期はずっと短い。前にも触れた<sup>238</sup>Puは半減期88年

プロトアクチニウム

である。

### 意外なエピソード

酸化プルトニウムは金属プルトニウムよりも40%ほど大きな体積を占める。これは金属プルトニウムの貯蔵の際の大問題である。1983年のことであるが、米国のニューメキシコ州にあるロス・アラモス国立研究所で、金属プルトニウム2.5kgを納めた金属製容器の密封が完全に気密ではなかったために、内部にゆっくりと酸素が侵入して酸化プルトニウムが生じたのである。以後10年以上の年月の間、粉塵<sup>じん</sup>となった酸化プルトニウムが孔から漏れ出して、ポリエチレン製の外袋の中にたまっていた。プルトニウムの放射能にさらされたポリエチレンは放射線分解のために劣化<sup>もろ</sup>して脆くなり、水素を発生したのである。これがプルトニウムと反応すると、酸化の触媒として働くからさらに酸化プルトニウムが生成することとなる。一度ポリエチレンの保護袋が破裂したら、大量の酸素が供給されることになるから酸化はもっと迅速に進むだろう。幸いなことに大事には至らぬうちに発見されたのだが、もしもっと長時間放置されていたとしたら、外側の保護容器も破損して、全貯蔵システムがプルトニウムで強く汚染されることになっていたであろう。



この元素名はアクチニウムの前にギリシャ語の“第一”を意味する接頭辞 protos をつないだものである。この元素の壊変によってアクチニウムが生じることがわかったために名付けられた。この元素はまた“プレヴィウム”や“ウラン X<sub>2</sub>”などと呼ばれたことがある。どちらも半減期の著しく短い同位体を発見した研究者の付けたものである。だが結局もっとも長い半減期の同位体に対してのプロトアクチニウム(protoactinium)という名称が選