

# プルトニウムへのいざない

九州大学工学研究院環境システム科学研究中心

教授 古屋廣高\*

## 1. はじめに

我が国でも、軽水炉（LWR）でプルトニウム混合酸化物燃料（MOX 燃料）を装荷する計画が、始まろうとした矢先、核燃料サイクル開発機構もんじゅ建設所、アスファルト固化施設、ウラン燃料加工工場（JCO）で事故が相次ぎ、さらに原子炉装荷直前になって燃料製造会社（英國、BNFL社）のデータ捏造が発覚し、未だ実現に至っていない。

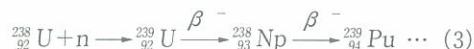
燃料サイクルの中心物質であるプルトニウムは、将来のエネルギー源として欠かせない物質であるが、ウラン燃料に比べ危険性が高く、世界的に論議が多い。そこで、プルトニウムの生い立ち、命名、一般的特性、利用の歴史、資源としての重要性、危険性等を分かりやすく解説する。なお、専門的用語については、文末に付録として簡単な説明を付け加えている。

## 2. プルトニウムの誕生と命名

プルトニウムは、第二次世界大戦の最中の1940年12月に、カリフォルニア大学BerkleyでSeaborg<sup>1)</sup>等によって発見された。彼等は、天然ウランを60インチサイクロotronの重陽子で照射し、次の核反応で、Pu-238を得ている。



ここで、nは中性子、 $\beta^-$ は $\beta$ 崩壊を意味する。その後、原子炉内でウランを中性子照射し、次の核反応により容易にPu-239が製造できることが分かり、原子爆弾の開発に結びついていった。



これらの発見及び研究開発は、当時世界大戦中であることから当然軍事機密とされ、戦後はじめて発表された。その後も、プルトニウムの研究は進展し、多くの同位体が発見され研究されている。

表1に、現在までに確認されているプルトニウムの主な同位体とその簡単な核的性質を示す。これらの核種の内で、Pu-238はアイソトープ電池電源、Pu-239はエネルギー資源として実用化され、また最も半減期の長いPu-244は地球誕生時に多数の元素の存在した証拠を示す地質学的価値があり、注目を集めた。

プルトニウムの名前の由来を考えると大変面白い。プルトニウム（Plutonium）という名前は、本来ウラン及びネプチウムが太陽の惑星である天王星（Uranus）、海王星（Neptune）から命名されたように、その外側に向かっての順序から冥王星（Pluto）の名前

\* (財)九州環境管理協会 理事

表1 プルトニウムの主な同位体とその特性

核種	半減期 (年)	$\alpha$ エネルギー (MeV)
Pu-236	2.87	5.763
Pu-237	0.12	5.6
Pu-238	88	5.4
Pu-239	24000	5.2
Pu-240	6580	5.2
Pu-241	13	$\beta$ 崩壊
Pu-242	$3.8 \times 10^5$	4.9
Pu-243	5(h)	
Pu-244	$7.6 \times 10^7$	4.6

に由来して、単純に名づけられた。これらの名前はすべてギリシャ・ローマ神話に現れる神々の名前であるが、Plutoという神の名前はプルトニウムが現在人間界で直面している姿をよく表現しているので興味深い。

ギリシャ・ローマ神話の天地創造の物語<sup>2)</sup>によれば、まず混沌(Kaos)の中から天(Uranus)と大地(Gaia)の神が誕生し、次いで時(Chronos)の神が生まれたとされている。やがて、クロノスとレアの間に6人の神々が誕生し、その内ゼウス(ローマ名でジュピター)は天を、ポセイドン(ローマ名でNeptune)は海を、ハデス(ローマ名でPluto)は地下(冥府)を分け合い、地上及びオリンポス山はすべての神々が共有したという。冥府(Pluto)には天国も地獄もあり、天国ならばエネルギー利用を、地獄ならば核兵器への利用とも解釈できる。さらに、地下の神は地下資源も意味し、ウランの原子核内(地下)に隠された貴重な資源であることも意味するので非常に興味深い。

### 3. プルトニウムの特徴

プルトニウムは、人間が多量に扱える人工元素としては、初めての元素であり、次のような特徴をもつ。

#### (1) 長所

◇ウラン(原子力)を長期間のエネルギー資源とすることができる。

◇長寿命のアイソトープ電池電源となる。

#### (2) 短所

◇ウランに比べ放射性毒性が強い。

◇核兵器に転用できる。

### 4. エネルギー資源としての利用

天然ウランの同位体組成は、U-235が0.7%でU-238が99.3%である。軽水炉で核分裂し燃焼させることができるのはU-235だけであるので、ウランだけ利用すると原子力炉の燃料としての資源は70~100年で枯渇する。

しかし、原子炉内では(3)式に示す核反応が起きプルトニウムが発生する。奇数の質量をもつプルトニウム核種は核分裂するので、使用済燃料からプルトニウムを分離、抽出し新たな燃料として使えば、U-238が資源として利用でき、原子力の資源量は格段と増大し、1,000年以上は大丈夫である。

このように、使用済燃料からプルトニウムを取り出し繰り返し使うシステムを核燃料サイクルといい、図1に示す。

図2に、軽水炉でウラン燃料を、高速増殖炉でMOX燃料を、燃焼させたときの同位体組成変化を示す。軽水炉で3%濃縮ウラン(U-235が3%濃縮している)を燃焼させたときには、1%のU-235と1%のPu-239が生成するが、この燃料サイクルでは最初に装荷した燃焼可能な濃縮ウランの量(3%)に比べ使用済燃料

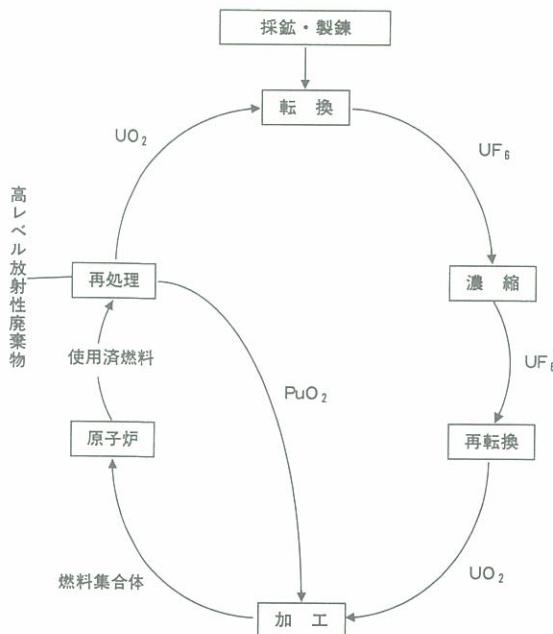
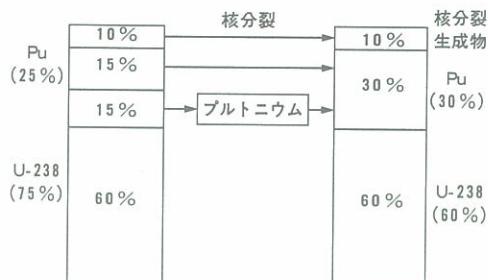


図1 核燃料サイクル

#### 高速炉におけるプルトニウムの生成



#### 軽水炉におけるプルトニウムの生成

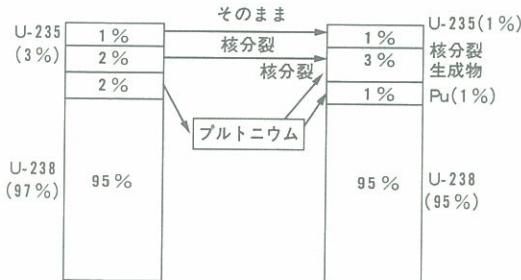


図2 軽水炉と高速増殖炉のプルトニウム転換率の違い

から取り出せる燃焼可能なU-235とPu-239の量(2%)は少ない。したがって、この核燃料サイクルを繰り返してもU-238は全部使えない。

一方、高速増殖炉で、25%のPu-239燃料を燃焼させると30%のPu-239が発生するので、燃料は増殖されるので、このシステムを利用すればU-238を非常に有効に使用することができます。

現在、高速増殖炉は経済的に不利であるのでMOX燃料を軽水炉で使うプルサーマル(原子炉内での中性子エネルギーが分子の熱振動のエネルギーとほぼ同じであることからこのように言われる)がプルトニウム利用の主流となっているが、今後、高速増殖炉の開発が進展すれば、資源の一層の有効利用が可能になる。わが国のようにエネルギー資源の乏しい国では、将来プルトニウムの高速増殖炉利用が望ましい。

表2 世界のプルサーマル利用の実績

国名	装荷年	装荷体数
アメリカ	1965~79	97
ドイツ	1966~	574
フランス	1974~	646
スイス	1978~	100
ベルギー	1963~	207
イタリア	1968~76	70
オランダ	1971~88	12
スウェーデン	1974	3
日本	1986~91	6
合計		1715

(1998年3月現在)

\* 装荷体数とは、原子炉に装荷される燃料集合体の数である。

\* 1集合体は約250本の燃料棒(直径約11mm×長さ4m)から構成される。

\* 100万kW発電する原子炉で約160体の集合体を装荷する。

軽水炉でのプルトニウム利用は、わが国では諸般の事情で遅れているが、ヨーロッパ諸国、特にフランス、ベルギーで活発である。スイス、スペインもプルサーマルを進めているが、ドイツではいち早く開始した後、現在はモラトリアムの時期に入っている。表2に、ヨーロッパ諸国でのプルサーマルの実績を示す。<sup>3)</sup>

わが国でも軽水炉ではないが、重水炉の新型転換炉ATRでは、多くに実績もあり現在も使用しつづけている。これに対して、アメリカ、スウェーデンでは、使用済燃料をそのまま処分する政策を採用している。

## 5. アイソトープ電池

宇宙探査及び軍事衛星には、長期間稼働す

る電源が必要である。

表1に示すように、88年の半減期を持つPu-238は、単位グラムあたりの $\alpha$ 崩壊による熱発生率が0.55W/gと高く、長期間のエネルギー源として適している。この熱を熱電交換により電気出力に変え、人工衛星の電源としている。表3に、これまで平和利用衛星に装備されたPu-238アイソトープ電池の実績を示す。<sup>4)</sup>

この他3年前打ち上げられた土星探査機カッシーニにも33kgのプルトニウムが搭載され、宇宙を飛行中である。表3の中で、月着陸を目指す途中に故障し、地球に引き返す映画、小説にもなった有名なアポロ13号に積み込まれた約11kgのPu-238は回収することができず、トンガ海峡に投棄された。もしこれが原子力

表3 人工衛星に搭載されたPu-238アイソトープ電池

宇宙計画	発射 (m/y)	燃料の形態	放射能 (Ci)		運命
			Pu-238	Pu-239	
Transit 4-A	6/61	Plutonium metal	1,800	1.3	In > 1,000 - yr, 地球軌道
Transit 4-B	11/61	Plutonium metal	1,800	1.3	In > 1,000 - yr, 地球軌道
Transit 5-BN-1	9/63	Plutonium metal	17,000	13	In > 1,000 - yr, 地球軌道
Transit 5-BN-2	12/63	Plutonium metal	17,000	13	In > 1,000 - yr, 地球軌道
Transit 5-BN-3	4/64	Plutonium metal	17,000	13	失敗, 再突入で燃焼
Nimbus B-1	5/68	PuO <sub>2</sub> microspheres	34,000	25	失敗, 容器回収
Nimbus 111	4/69	PuO <sub>2</sub> microspheres	37,600	28	In ~ 3,000 - yr, 地球軌道
Apollo 12	11/69	PuO <sub>2</sub> microspheres	44,500	33	月表面へ
Apollo 13	4/70	PuO <sub>2</sub> microspheres	44,500	33	失敗, 無傷で太平洋へ
Apollo 14	1/71	PuO <sub>2</sub> microspheres	44,500	33	月表面へ
Apollo 15	7/71	PuO <sub>2</sub> microspheres	44,500	33	月表面へ
Apollo 16	1/72	PuO <sub>2</sub> microspheres	44,500	33	月表面へ
Pioneer F	3/72	Plutonium molybdenum cermet	80,000	59.5	太陽系の外へ
Transit	9/72	Plutonium molybdenum cermet	24,000	18	In > 1,000 - yr, 地球軌道
Apollo 17	12/72	PuO <sub>2</sub> microspheres	44,500	33	月表面へ
Pioneer C	4/72	Plutonium molybdenum cermet	80,000	59.5	太陽系の外へ
Viking-1	8/75	Plutonium molybdenum cermet	42,000	31	火星の表面へ
Viking-2	9/75	Plutonium molybdenum cermet	42,000	31	火星の表面へ
Les 8/9	3/76	Pressed PuO <sub>2</sub>	280,000	208.4	In > 100,000 - yr, 地球軌道
		Total	941,600	700	

発電利用で起こったなら大問題になっていたことに違いない。

アイソトープ電池は長期間交換を必要としないことから、心臓のペースメーカーの電源として非常に適している。海外では実用化されている国もあるが、わが国ではまだ許可されていない。

## 6. プルトニウムの危険性

### (1) プルトニウムの放射性毒性

プルトニウムは、物理的半減期（放射能が半減する期間）も生物学的半減期（体内で存在量が半減する期間）も人の寿命に比べると格段と大きいので、体内に摂取すると非常に危険である。

国際放射線防護委員会（ICRP）勧告に基づいて制定されたわが国の法規では、人間の体内摂取制限基準値は約 $0.1\mu\text{g}$ である。この量は、もし1gのプルトニウムが均等に人間に吸収されたとしたら、ほぼ東京都人口数の人間が制限基準値に達することを意味する。このことからこれほど危険な物質はないと原子力反対派が主張する。

しかし、よく考えてみるとこの基準値はほぼ成人の1日当りのダイオキシンの体内摂取制限基準値とほぼ一致する。わが国では、毎年約2kgのダイオキシンが大気中に放出されていると言う。

プルトニウムは、一般に酸化物として使われるがその密度が $11\text{g/cm}^3$ と非常に重く、水にもきわめて溶け難いことから、環境中に放出されたプルトニウムはほとんど拡散せず、均等に分布することは考え難い。

このことを支持する1つの証拠がある。第2次大戦後の冷戦時代、地球の北半球の大気中では数多くの核実験が繰り返された結果、4ト

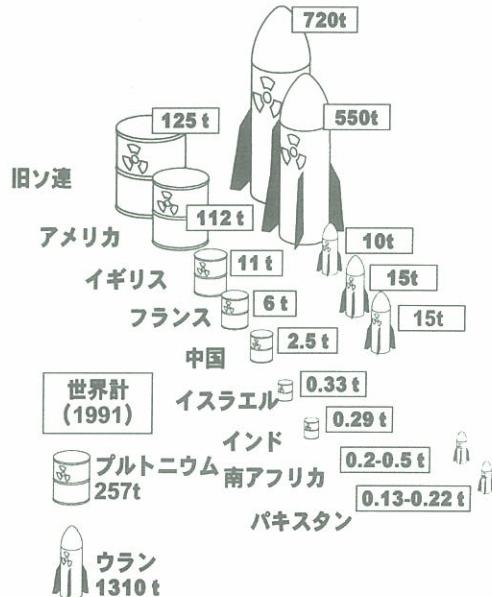


図3 各国が保有していると考えられている核兵器用濃縮ウランとプルトニウム

ンを越すプルトニウムが大気中に放出された。この量を、全世界の人口60億人で割ると $0.07\text{mg}/\text{人}$ となり、体内摂取制限基準値の約700倍に達する。こうした状況にも拘わらず、全世界の各地で測定されている人体中のプルトニウムの濃度は基準値の1000分の1以下である。<sup>4)</sup>

こうした理由から、プルトニウムは慎重に扱えば他の危険物に比べ突出した大きな危険性はない。

### (2) 核兵器利用

原子力には、核兵器利用の影が常につきまとう。冷戦時代米ソ両大国をはじめとする強国は核兵器の高度化と量産で競争した。

図3に各国が保有していると考えられている高濃度ウラン（U-235の濃度は95%以上）とプルトニウムの量を示す。<sup>5)</sup>冷戦終了後アメリカ及び旧ソ連だけでも各々50トン以上のプルトニウムが余剰になっているといわれ、その

処理処分方法が世界的に論議されている。

核兵器の拡散を防止し、やがて廃絶するの人は人類に与えられた大きな課題である。このため、国際原子力機関を基軸として核不拡散条約が締結され、核保有国では核兵器の削減が求められ、不保有国では核物質（Th, U, Pu）の査察が行われ 10mg 程度までの量が監視されている。

しかし、この条約に参加しない国（インド、パキスタン等）も出現したり、核保有国の核兵器削減がなかなか進まないのが現状であるが、わが国などが中心となり国際世論を喚起し、少しずつよい方向に前進している。

## 7. Pu-244 を巡る地質学的話題

地球誕生時には、その高エネルギーを源としてあらゆる元素が生成し、その内で半減期の長い核種だけ残ったと考えられている。このため、約 7,600 万年という非常に長い半減期を持つ Pu-244 は、地球誕生 46 億年後の今も地球上に存在するのではないかと多くの地質学者が考え、その存在を確認するため多くの努力が払われた。しかし、半減期の約 60 倍という時間を経ているため、ついに発見できなかった。

ところが、思ぬところでその証拠が見つかった。アーカンソー大学の黒田等<sup>6)</sup>は、パサモンテ隕石中のキセノン（Xe）の同位体組成を測定したところ、この組成は Pu-244 が自発核分裂したときの組成とほぼ一致した。

隕石は地球誕生時の地球と同じ地質成分をもっていると考えられるので、隕石中に存在するということは地球にも誕生時に Pu-244 を始め多くの核種が生成し、それらが放射性崩壊で消滅したことを見ている。残念ながら、この証拠は、地球上の岩石中では風化の

ため観察できない。

## 8. まとめ

産業革命以来、人類は化石燃料からエネルギーを得て、それまでの時代に比べ革新的に生活環境を向上させてきた。20世紀に入り、飛行機、自動車、半導体が出現し、エネルギーの使用量は年々増大し、特に第2次大戦後にはその増加速度が大きくなっている。この結果、人類は大気中の炭酸ガスが増加し、地球温暖化という課題に直面している。

これとは別に、化石エネルギー資源にも限界があり、このままの消費が続けば石油、天然ガスは約 50 年、最も豊富な石炭でも 200 年で枯渇すると予想されている。

これに対して、原子力では炭酸ガスの放出もなく、プルトニウムを利用すれば資源量も長期間の利用に耐え得る。高レベルの放射能が発生すること、核兵器転用があること、等の問題も多いが克服できない課題ではない。50 年、100 年という長期間のエネルギーの安定供給を考えると、現在の技術水準ではプルトニウムを利用する核燃料サイクルしか考えられないのが現状である。

こうした状況を考えると、プルトニウム利用に伴う 1 つ 1 つの課題を人間の英知を持って解決して、次世代にプルトニウム利用技術を引き継いでいく事が重要である。

## 参考文献

- 1) G.T.Seaborg et al., Phys.Rev., 69 (1946) 366
- 2) 野上弥生子「ギリシャ・ローマ神話」岩波文庫
- 3) 科学技術庁「原子力白書」平成 10 年版
- 4) 松岡理「核燃料サイクル関連核種の安全評

価」、日刊工業新聞

- 5) 「Disposal of Weapon Plutonium, Approaches and Prospects」 Edited by E.R.Merz and C.R.Walter, NATO ASI Series 1.Disarmament Technology – Vol. 4
- 6) M.W.RoWe and P.K.Kuroda, J.Geophys. Rev., 70 (1965) 709

## 用語の解説

### 軽水炉

普通の水を冷却材及び減速材（中性子のエネルギーを減速させる材料）として使用する原子炉で、加圧水型炉（PWR）と沸騰水型炉（BWR）がある。九州電力、関西電力等はPWRを、東京電力、中国電力等はBWRを利用している。これに対して重水（D<sub>2</sub>O）を減速材に、普通の水を冷却材に使う原子炉を重水炉という。日本の新型転換炉（ATR）、カナダのCANDU炉がこれにあたる。

### 高速増殖炉

液体ナトリウム金属を冷却材とする原子炉で、中性子が減速されないので中性子密度（中性子束）が軽水炉に比べ2~3桁大きく、U-238のPu-239への転換率が軽水炉に比べ大きい。日本では、常陽、もんじゅ、フランスではフ

エニックスがこの炉に相当する。

### MOX燃料

Mixed Oxide Fuelの略称で、UO<sub>2</sub>とPuO<sub>2</sub>の固溶体燃料 ((U, Pu)O<sub>2</sub>) をいう。

### 核分裂

U-235、Pu-239等の核種に中性子が当たると原子核が2つに分裂し、約2個の中性子が飛び出し多量のエネルギーが放出する現象をいう。核分裂で発生する中性子が次々と新たな核分裂を起こす（連鎖反応）ことを臨界と呼び、原子炉のエネルギー発生の原理となる。

### プルサーマル

MOX燃料を軽水炉、重水炉で利用することをいう。軽水炉、重水炉での中性子のエネルギーが分子の熱振動のエネルギー(0.25eV)と同程度あることからこのように呼んでいる。これに対して、高速増殖炉での中性子のエネルギーは1MeVと大きい。

### 濃縮ウラン

U-235同位体濃度を天然ウランより大きくなしたウランを言う。たとえば3%まで高めたウランのことを言う。濃縮方法としては、熱拡散法、遠心分離法、レーザー法等がある。

