

<概要>

プルトニウム（Pu）はアクチノイド類に属する**超ウラン元素**で、プルトニウム234からプルトニウム246までの13種が主な**同位体**として存在するが、核燃料関連ではプルトニウム236、プルトニウム238、プルトニウム239、プルトニウム240、プルトニウム241、プルトニウム242の6種が重要になる。プルトニウム239はプルトニウムの研究開発時代から核兵器として、現在では**原子炉の使用済燃料**からの**回収プルトニウム**として注目されている。回収プルトニウムには各種のプルトニウム同位体が色々な割合で含まれ、組成は原子炉の型、燃料の種類、**燃焼度**によって異なる。この質的变化によってプルトニウム239が大部分を占める核兵器級プルトニウムとは異なり、このままでは核兵器用の材料になり得ない。

また、プルトニウムには非放射性同位元素は存在しない。ヒトへ体内摂取された場合、プルトニウム酸化物は非常に難溶性であり、消化管吸収性が極端に低く、血液中に入ることは極めて困難なので経口毒性は実際には問題にならない。プルトニウムの**吸入**による体内摂取許容限界は定められており、厳重な管理が要求される。

<更新年月>

2007年08月

<本文>

プルトニウム（Pu）は原子番号94の人工元素で、周期表でアクチノイド類に属する超**ウラン**元素である。プルトニウム234からプルトニウム246までの13種が主な同位体として存在するが、核燃料関連ではプルトニウム236、プルトニウム238、プルトニウム239、プルトニウム240、プルトニウム241、プルトニウム242の6種が重要になる。プルトニウム239は、ウラン238が中性子を吸収して生成するアルファ放射性核種（半減期約2万4千年）で、プルトニウムの研究開発時代から核兵器として、現在では原子炉の使用済燃料からの回収プルトニウムとして注目されている。

<平和利用のプルトニウムは原爆用プルトニウムとは形態と密度などが異なる>

プルトニウムは原子炉の使用済燃料を**再処理**することにより回収プルトニウムとして取り出される。回収プルトニウムには各種のプルトニウム同位体が色々な割合で含まれ、その組成は原子炉の型、燃料の種類、燃焼度により異なる。軽水炉ではプルトニウム239は60%程度である（**表1**参照）。最もプルトニウムを多く含む原子炉は高速増殖炉であり、それでもプルトニウムは最大30%を含むもので、しかもウランとの混合酸化物（MOX）の形態で核兵器用の物質とは全く異なる。日本における再処理工場からMOX燃料加工施設への流れでも、プルトニウムはウランと50/50の比率で混合され、核兵器用の材料にならない。

従って、プルトニウムの単体の存在は単体転換方式を採っているフランスなどからMOX燃料加工施設へ運ばれてくるものに限られている。しかしながら、MOX燃料加工施設は粉末（密度が最大3.5g/cc）およびセラミック・ペレット（密度が最大11g/cc）の取扱いに限られ、原爆用の金属（密度19.8g/cc）状に比べて、形態と密度がまったく異なり、直接に原爆用の材料にならない。

さらに、核物質については核燃料規制法などの放射線防護の上からの規制以外に、保障措置と呼ばれる**核物質防護**のための規制が並列的に存在する。これは核物質、特にプルトニウムを不当な手段で奪取されたり、盗み出され核兵器に転用されたり、脅しの手段として使われることを防止するためである。核物質は、日本国内の問題に留まらず、核兵器不拡散に関する条約（核不拡散条約、NPT）のもとで保障措置協定を国際原子力機関（IAEA）との間で締結することによっ

て、国際的な規制の下にある。一例として核燃料サイクル開発機構（現在、日本原子力研究開発機構）におけるIAEA査察実績を図1に示す。

＜プルトニウム数kgで原爆1個がつくられると言われるが＞

プルトニウムからエネルギーを取り出すには、核分裂を連鎖反応により持続させることが必要である（臨界）。臨界状態とするには体系と核分裂物質の一定量が必要であり、理想的な状態で最も少ない核分裂物質で臨界になる量を「最小臨界量」と言っている。プルトニウムの最小臨界量はウランに比較して小さく、米国臨界安全ハンドブックTID-7016によると、溶液状態で0.51kg（ウラン235、0.82kg）、金属状態で5.6kg（ウラン235、22.8kg）と示されている。このプルトニウムはプルトニウム239が100%の条件であり、計算上の値である。

原爆は溶液では成立しないので金属状に限られる。兵器級のプルトニウムはプルトニウム239が93%以上（表1参照）と言われており、金属プルトニウムをタンパー（濃縮しないウランなどが材料として用いられ、核分裂によって塊が急膨張するのを防ぎ、中性子反射体にもなる）で覆うと原爆1個には少なくとも5kg前後の兵器級プルトニウムが必要となることになる。さらに化学爆薬によるインプロージョン（爆縮＝内側に爆発させ、圧縮すること）によって、臨界質量を大幅に小さくすることができるが、この爆縮技術は、小さな丸い塊に圧縮が均等に行われる必要があるため大変に困難な技術といわれている。約1キロのプルトニウム239が核分裂すると、高性能火薬TNTに換算して、20キロトンの爆発となる。

一般に原子力発電から発生するプルトニウムの純度は、臨界の観点からは兵器級よりも劣る。プルトニウム239にプルトニウム241を加えた核分裂成分プルトニウムは約70%であり、これを通常原子炉級プルトニウムと言っている。原子炉級プルトニウムの最小臨界量は兵器級プルトニウムよりも増えることになり、図2の例から判るように、プルトニウム中の核分裂成分が100%から80%の減少に対して最小臨界量は約70%の増加となる。一方、1993年（平成5年）1月早々にフランスから「あかつき丸」で運ばれたプルトニウムは粉末状のもので、密度は高くとも3g/cc程度であり、図3から読めるようにプルトニウム中の核分裂成分が仮に100%としても最小臨界量は80kgとなる。

＜プルトニウム取扱い施設での臨界管理と臨界事故＞

原子力発電所は原子炉内核燃料の臨界を制御してエネルギーを取り出すプラントである（図4参照）。プルトニウムを取扱う施設全般では、臨界事故を未然に防止するための安全管理体制に特別の注意が払われている。実際の管理に当たっては、体系の質量制限、濃度制限、形状寸法制限などの技術的手法、並びに体系の相互併用が用いられる。これらは安全審査指針などの法により安全規制が施されているほか、誤操作などを回避するための安全管理体制が強化されている。

しかしながら臨界事故は、過去米国、英国において1958年から1978年にかけて表2のように報告されている。これらの事故の特徴は、ほとんどの場合ウランあるいはプルトニウムの回収工程で、またはインベントリ回収洗浄などの非定常作業中に起きている。事故の現象はダイナマイト爆発のように施設全体が破壊されることはなく、1次密封が壊れる程度の小さな爆発（バースト）であり、溶液の沸騰・飛散により自然に未臨界状態になり治まっている。しかし、付近にいる作業員は多量の放射線被ばくを受けることになる。

日本では、1999年（平成11年）9月30日、茨城県東海村の（株）ジェーシーオー東海事業所のウラン加工施設において臨界事故が発生している。臨界事故の直接原因は事業者の作業基準の逸脱行為であったが、再発防止の観点から「原子炉等規制法」を一部改正するとともに「原子力災害対策特別措置法」が制定され、原子力防災専門官・保安検査官が配置されるなど各方面にわたって安全管理の一層の強化が図られた。

＜原子爆弾をつくることは容易か＞

原子爆弾をつくるためには、最小臨界量以上のプルトニウム（又は高濃縮ウラン）の核分裂性物質を確保するに加えて、専門的知識および技術が必要である。爆弾をつくるにはプルトニウムの小片を単に寄せ集めても爆発はしない。適当な大きさの金属片を非常に早く合体させ、核反応が進行する間、中性子源の存在下でその合体の状態を維持することが必要である。このため起爆薬を注意深く配列するなどの複雑で高度の技術が要求される。また製造・取扱い上、発熱、中性子被ばく、ガンマ線被ばくなども考慮する必要があるため、原子爆弾をつくることは容易ではない。

＜プルトニウムの人体におよぼす影響は＞

プルトニウムは通常固体や液体で取り扱われ、気体にはならない。しかし、極微量エアロゾルやミストとして人体に摂取される可能性がある。プルトニウムの同位体はその全部が放射性で、非放射性的な同位元素が存在しないことから、純粋な化学毒性を一般の元素あるいは一般の化学物質と比較することは困難である。また通常物質は経口摂取の毒性が問題となるが、プルトニウム酸化物は非常に難溶性であり、更に消化管吸収性が極端に低く、血液中には極めて入りにくいので、経口毒性は実際上は問題にならない。一方、呼吸により体内に摂取された場合、肺にしば

らく留まるとともに血液を介して、主に骨、肝臓に集まるので、肺、骨および肝臓に有意な発ガンが認められないように判断基準の目安が設定されている。プルトニウムを取り扱う施設では、プルトニウムを体内に入れないために「グローブボックス」又は「セル」内でのみ取り扱い、それらの密閉性が損なわれた場合は、内部を負圧にしてプルトニウムがまわりの作業室に出てこないようにしている。

しかしながら、プルトニウムの人体影響は過剰被ばくが問題である。プルトニウムの人体での確実な障害例は報告されていないが、プルトニウムの安全性が問題になると、将来障害の発生が予想される可能性のある過剰被ばく例が注目されている。

放射線防護のための設備も体制も不完全であった1944年から1945年にかけて、米国では原子爆弾製造のためのマンハッタンプロジェクトが推進され、ロスアラモス研究所で過剰被ばく集団が発生した。この集団に関して継続的な追跡調査が発表されている。マンハッタンプロジェクトにおけるプルトニウム被ばく者中の死亡者（7人）の死因を表3に、作業者の身体負荷と死亡者の関係を図5に示す。このなかで肺がんが死亡原因とされる人はいずれも喫煙者であり、そのうち2例はプルトニウムの沈着量が少なく、肺がんの発生率は自然発生の変動の幅に入るものであると報告している。プルトニウム毒性の詳細な説明は原子力百科事典：プルトニウムの毒性と取扱いについて<09-03-01-05>参照。

（前回更新：2006年1月）

<関連タイトル>

[プルトニウム核種の生成 \(04-09-01-01\)](#)

[プルトニウム燃料施設の安全管理 \(04-09-01-02\)](#)

[世界の原子力施設における臨界事故 \(04-10-03-05\)](#)

[核兵器用のプルトニウムと高濃縮ウランの原子炉への転用 \(07-02-01-08\)](#)

[核実験 \(09-01-01-04\)](#)

[プルトニウムの毒性と取扱い \(09-03-01-05\)](#)

[プルトニウムの被ばく事故 \(09-03-02-09\)](#)

[日本の原子力防災対策の概要-考え方と体制 \(10-06-01-01\)](#)

<参考文献>

- (1) ANS：Q&A-Nuclear Power and the Environment（1976）
 - (2) 松岡理：プルトニウム物語-その虚像と実験-、テレメディア（株）（1992.6）
 - (3) 核燃料施設臨界安全管理編集委員会（編）：核燃料の臨界安全、（財）原子力安全研究協会（1984.12）
 - (4) 日本原子力産業会議（編）：核燃料の取扱技術'93年版（1992.11）
 - (5) 今井隆吉：プルトニウムと国際政治、日本原子力学会・核燃料研究連絡会報、No.18（1993.1）
 - (6) 松岡理：プルトニウムの安全性評価、日刊工業新聞社（1993.6）
 - (7) 日本原子力研究所核燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会 臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ：臨界安全ハンドブック第2版、JAERI 1340（1999.1.11）
 - (8) 電気事業連合会（編）：「原子力」図面集-1998年版-（1998年10月）
 - (9) 核燃料サイクル開発機構ホームページ：
 - (10) 原水爆禁止日本国民会議：原水禁ニュースNo.448、核問題入門（6）ウラン核爆弾とプルトニウム核爆弾（2004.5）、http://www.gensuikin.org/gnskn_nws/0405_2.htm
-

表1 核兵器級と原子炉級プルトニウム同位体重量比の例

単位：重量(%)

プルトニウム同位体	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	$^{241}\text{Pu}(\beta)$	^{242}Pu	合 計
核兵器級	0.07	93	7	0.7	—	100
沸騰水型原子炉(BWR)	1.7	52	28	12	6	100
加圧水型原子炉(PWR)	2	63	19	12	4	100
高速増殖炉(FBR)	0.03	74	23	3	0.5	100

[出典]松岡 理：プルトニウムの安全性評価、日刊工業新聞社(1993.6)、p.9-10

表2 欧米の核燃料施設における臨界事故

施設名 発生年月日	事故の概要と 全核分裂数	臨 界 時 の 状 況	警報発生の有無 と退避状況	事 故 現 場 の 線 量 率 状 況	臨界モニタの型式 とアラーム設定値	被ばく状況
ORNL Y-12 (Oak Ridge, Tenn.),米 1958.6.16	濃縮度90%U液が リークテスト用の水と 一緒に208リットルドラ ム缶に入り、臨界。 1.3×10^{18}	U水溶液 56.2リットル中 ^{235}U 2.5kgで臨界。出力スパイク 10^{16} 。プラトー出力 1.29×10^{18} (約3min)。 継続時間18min。 速へいなし。	現場で8人作業 中、事故と同時 に警報が吹鳴、 迅速な退避が行 われた。	事故直後、現場 より107m点で、 100mR/h以上、 3h後ドラム缶よ り30.5m点で 60mR/h。	GMモニター使用、 工場を中心より 24.4m点に8個設 置、アラーム設定 点は1mR/h、事故 後は3mR/hに変更。	8名被ばく 28.8～ 461rem
LASL (Los Alamos, N.Mexico),米 1958.12.30	廃液からPuを回収す る工程で、計量作業 のためPu含有液を処 理タンクに入れ攪拌し た時に臨界。 1.5×10^{17}	96.5cmφの850リットル処理槽。 Pu溶液160リットル中Pu3.27kg。 Puは溶媒側に分配、攪拌時に 臨界。出力スパイク 1.5×10^{17} 。 継続時間2sec。 速へいなし。	事故発生と同時 に警報吹鳴、全 員退避、付近に いた2名は救助 活動を行う。	事故直後、現場 より53.3m点の 臨界警報が吹 鳴。処理槽より 7.6m点で 20R/h。	電離箱使用、2個 以上の信号で警報 発生、内蔵線源に より故障検出ア ラーム設定は1と 10m R/h。	被ばく1名死 亡、 12,000rem 他2名は 53,134rem
ICPP (Idaho Falls, Idaho),米 1959.10.16	硝酸ウラニル(濃縮度 91%)をサンプリングの ため空気攪拌、サイ フォン作用発生、非 安全形状タンクへ移 送、臨界。 $\sim 4 \times 10^{19}$	18,900リットルのタンクに170g ^{235}U /リットル溶液 200リットルが 流入、全水溶液量800リットル、 ^{235}U 34.0kgで臨界。出力スパ イク 10^{17} 。 継続時間15～20min。 速へいあり。	貯留タンク区域 のベントラインを 通してプロセス 建屋空気汚染、 モニタ吹鳴、口 頭および電話に より退避。	退避時点で建屋 の外側および入 口西方119m点 で5R/h以上(放 射性ガスによ る)。	電離箱型検出器 20個の臨界警報 装置を設置。ア ラーム設定点は 20mR/h。	12名被ばく、 2～50rem
ICPP (同上),米 1961.1.25	蒸発缶の詰り物除去 作業中、非安全形状 部へ溶液が吹き上げ られ臨界。 6×10^{17}	蒸発缶上部の径は61cm非安 全形状。U液40リットル中 ^{235}U 8kgが吹き上げ、臨界。出力ス パイク 6×10^{17} 。 継続時間2～3min。 速へいあり。	臨界と同時に警 報吹鳴、手動で 緊急退避警報を 鳴らす。	事故直後の施 設内は、通常の バックグラウン ド。施設の風下 地点で放射性雲 により30mR/h。	同上。	251名被ばく、 γ線のみ、 0～55mrem
Hanford (Richland, Wash.),米 1962.4.7	施設洗浄作業中、床の サンプにたまったPu 液が非安全形状容器 に吸い上げられ臨界。 8×10^{17}	46cmφ、69リットル円筒容器。Pu 液46リットル、Pu1.5kgで臨界。 出力スパイク 10^{16} 。 継続時間37h。 速へいなし。	臨界警報吹鳴、 退避は迅速、事 故時容器の最も 近くにいた人は 1.5m～8m。	事故現場の線 量率は不明。ス タックより約 1,200Ci希ガス 放出。	234-5建屋にNaI検 出器10個よりなる 臨界モニタあり、ア ラーム設定点 500m R/h。	3名被ばく 19, 43, 110rem
UNC (加工工場) Wood River Junction,RI, 米 1964.7.24	ラベル誤認、濃縮Uを 非安全形状のメーク アップタンクに入れ、 臨界。 1.2×10^{17}	45.7cmφ、66cm深さの円筒容 器。0.54M Na_2CO_3 41リットル中 に11リットル中 ^{235}U 2.6kgを含む 液を入れ、臨界。出力スパイク 10^{17} 。 速へいなし。	警報吹鳴につい ては不明、事故 当事者は青白い 光と液の噴出を 見て退避。	事故直後タンク 付近は最高 100mR/hの サーベイでフル スケール、線量 の詳細は不明。		1名死亡、 骨盤 46,000rem 頭部 14,000rem 他2名被ばく
PRP (Windscale), 英 1970.8.24	Pu回収工程中、非安 全形状の容器に溶液 を移送し終わった時に 臨界。 1×10^{15}	61cmφ、68cm深さの容器。55g Pu/リットル液40リットルと6～7g Pu/リットル液50リットルとで臨界。 出力スパイク 10^{15} 。 継続時間5～10sec。 速へいあり。	臨界警報吹鳴、 全員迅速に退 避、被ばく検査 を受ける。	事故10min後、4 階の主コント ロール区域で 200mR/hスタッ クより約5mCi 放出。		2名被ばく 1, 2rem 以下
ICPP (Idaho Falls, Idaho),米 1978.10.17	高濃縮U回収工程中 洗浄用の硝酸アルミ ニウムが濃度低下 し、ウラン濃度上昇 で、臨界。 2.7×10^{18}	溶媒抽出工程第1サイクルカラ ムの硝酸アルミニウム濃度低 下、ウラン濃度22.2g/リットルで 臨界。遅発臨界。 速へいあり。	——	汚染なし。	設置中。	被ばくなし

(注) 1rem = 0.01Sv

下記の出典をもとに作成した。

[出典] 日本原子力研究所核燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会 臨界安全性実験データ検討
ワーキンググループ:臨界安全ハンドブック第2版、JAERI 1340(1999.1.11)、p.164

表3 マンハッタンプロジェクトプルトニウム被ばく者中の死亡者(7人)の死因

死亡年齢	被ばく後年数	死亡時期	死亡原因	プルトニウムBq (nCi)	
				最終値	最大値
36	14	1959	心臓疾患	370(10)	590(18)
52	30	1975	自動車事故	670(18)	670(18)
62	37	1982	肺炎/心臓発作	260(7)	780(21)
71	40	1985	肺がん	520(14)	1150(31)
70	43	1988	心臓病(肺がん)	150(4)	410(11)
66	44	1989	肺がん	2550(69)	6960(188)
66	45	1990	骨のがん	560(15)	740(20)

[出所] Hempelmann, L. H., W. H. Langham, C. R. Richmond and G. L. Voelz., Manhattan Project Plutonium Workers: A Twenty-Seven Year Follow-Up Study of Selected Cases, Health Physics, 25, 461-479

[出典] 松岡 理: プルトニウムの安全性評価、日刊工業新聞社(1993.6)、p.146

(人・日)

再処理工場
原子炉施設

Puのバルク取り扱い施設
ウラン濃縮工場

研究開発施設

数字上段():全世界
数字下段 :サイクル機構

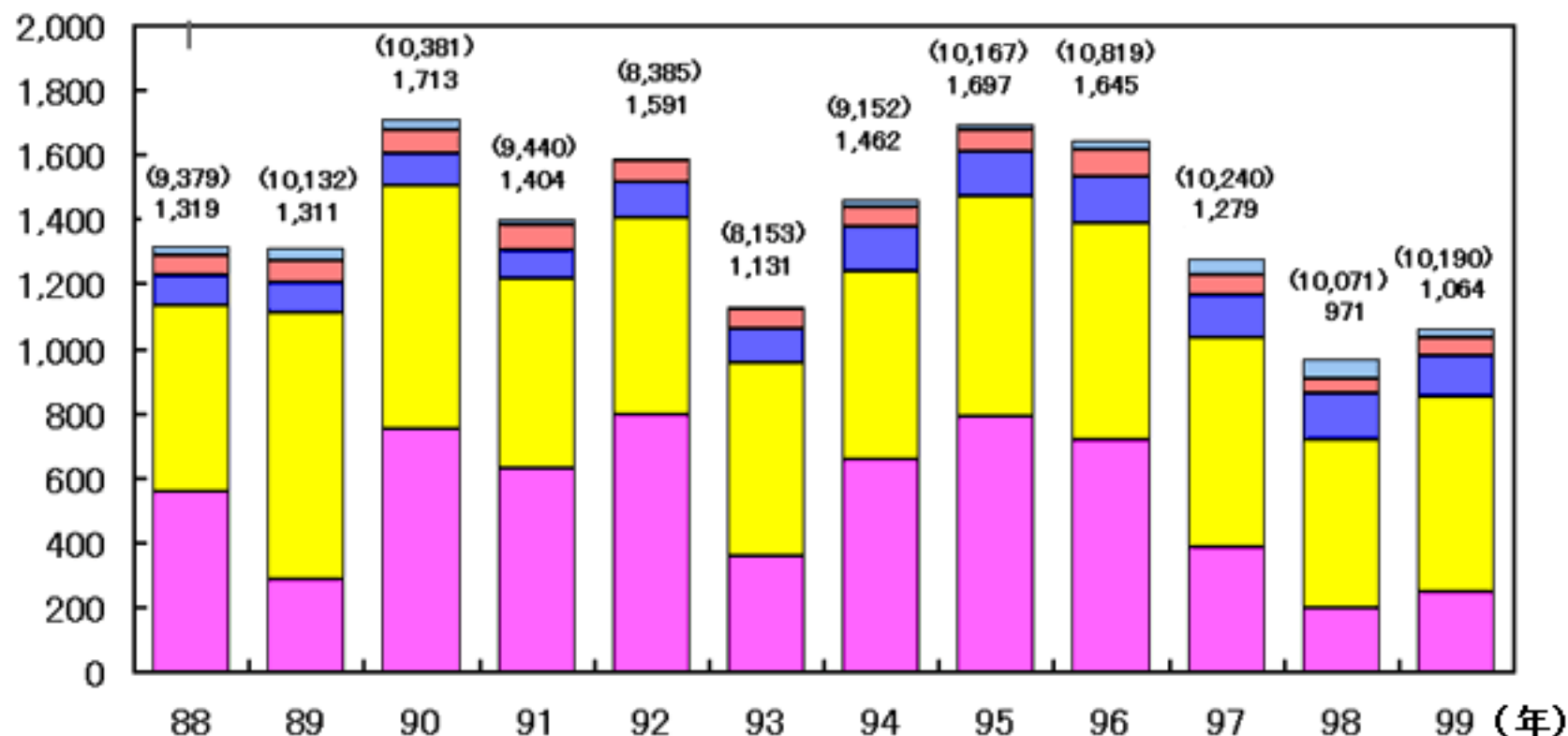


図1 IAEA査察実績

[出所]核燃料サイクル開発機構HP:<http://www.jnc.go.jp/kaihatu/hukaku/database/sg/1/index-j.html>

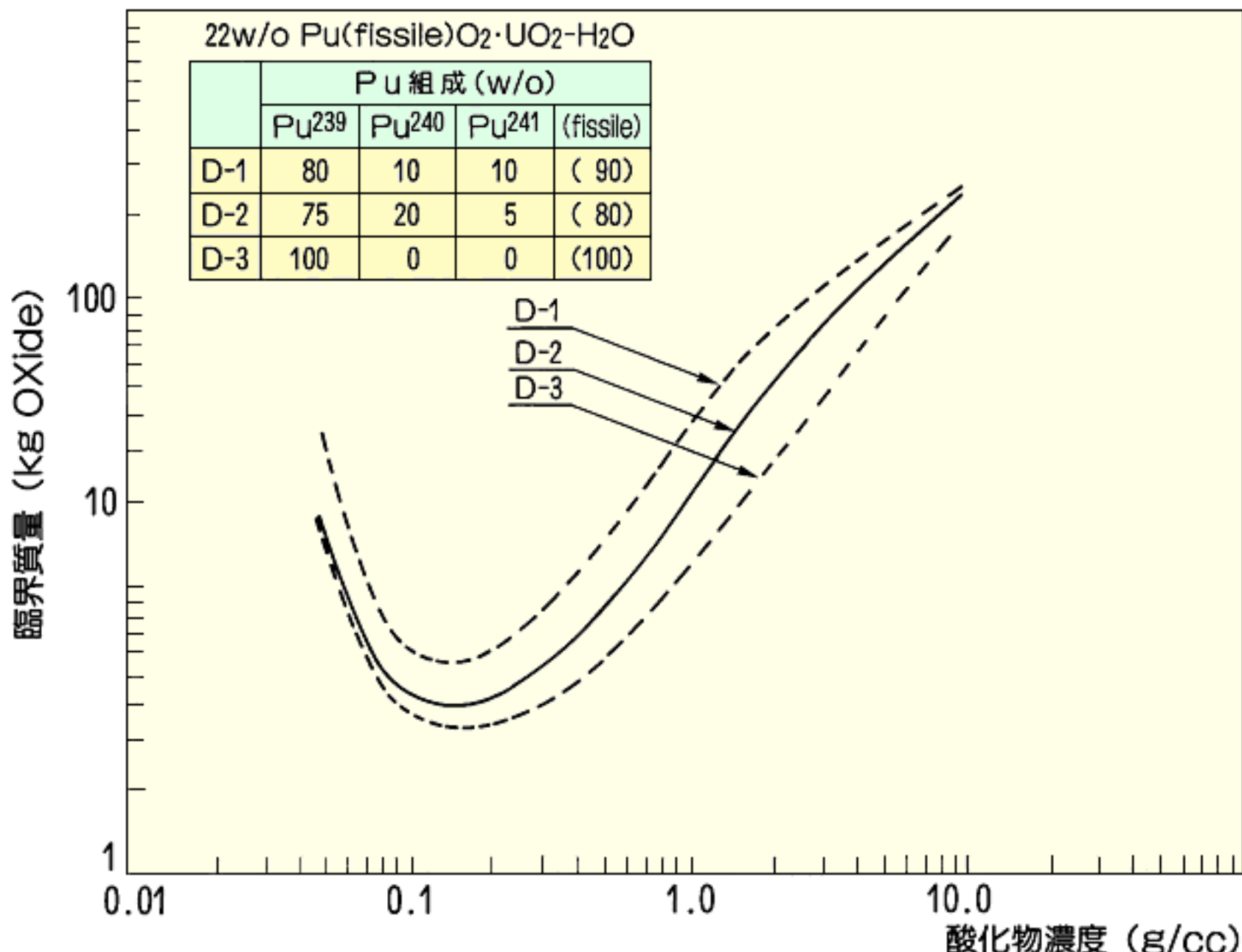


図2 22w/o PuO₂·UO₂-H₂O系の臨界量

[出典]日本原子力産業会議(編):核燃料の取扱技術'93年版(1992.11)

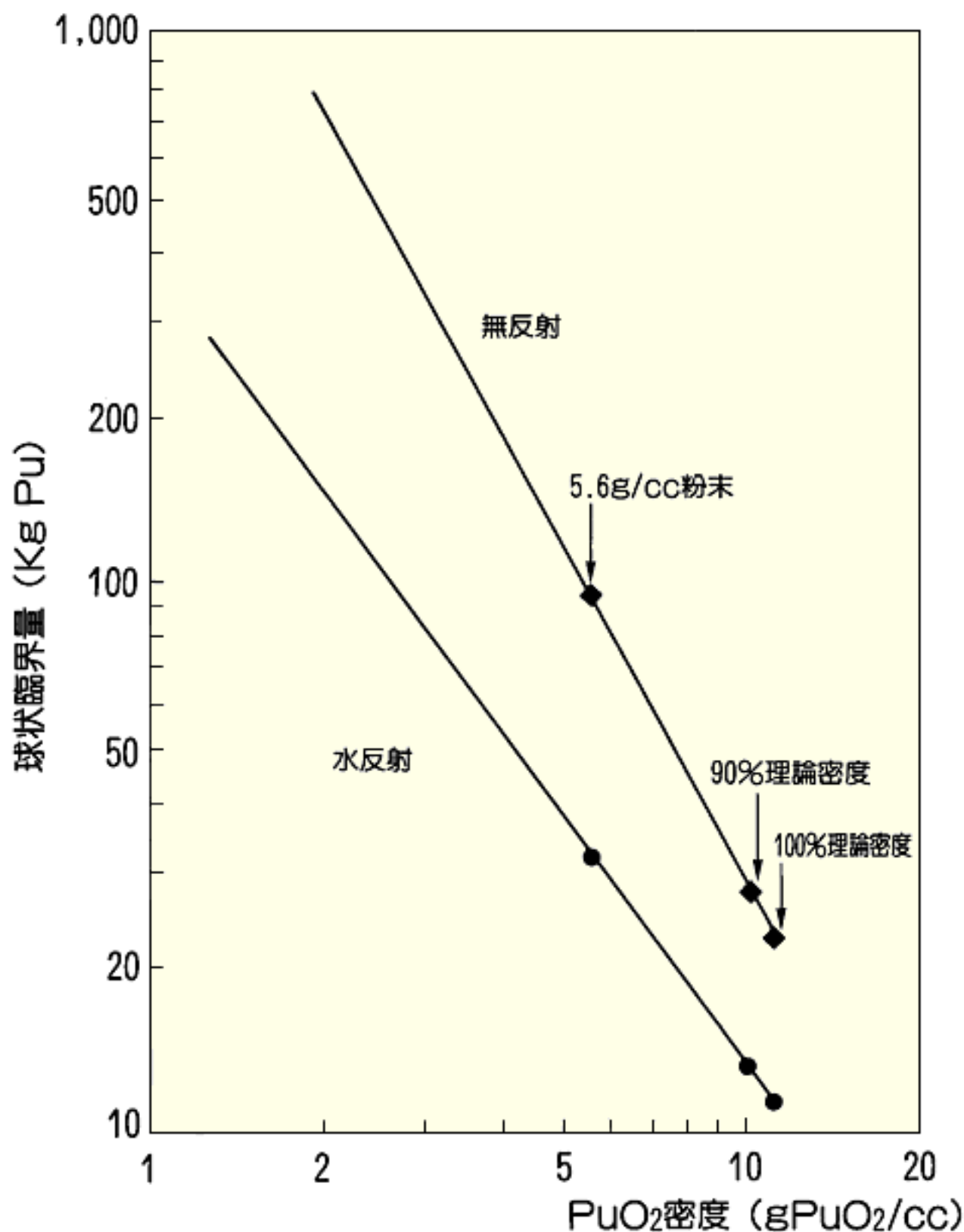
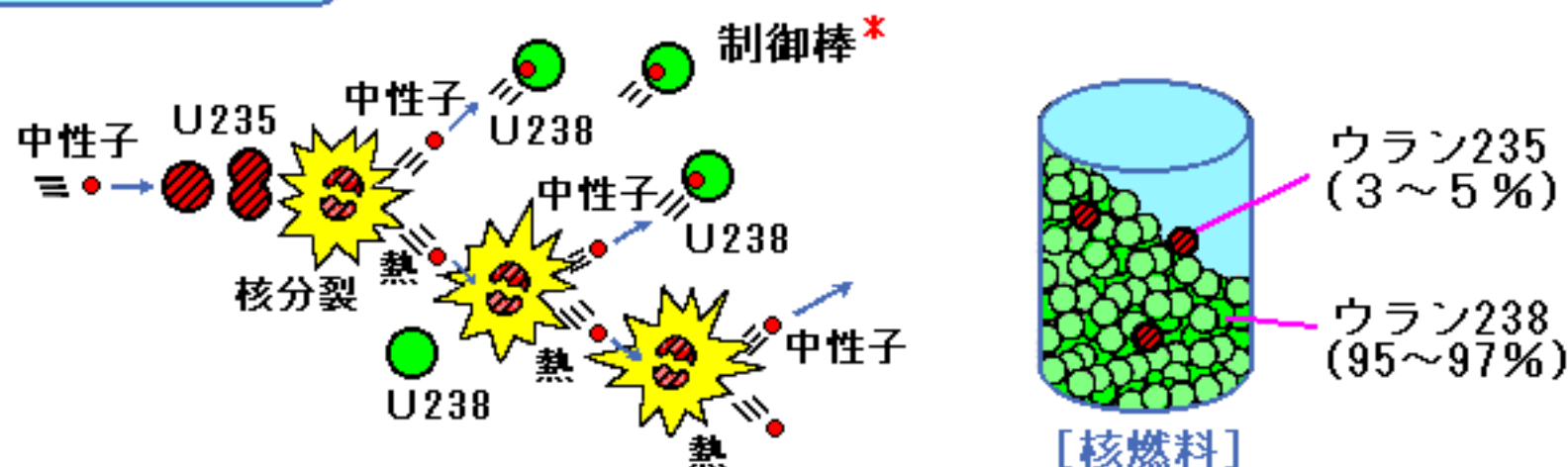


図3 乾燥PuO₂の密度による臨界量の変化
(²⁴⁰Puなし)

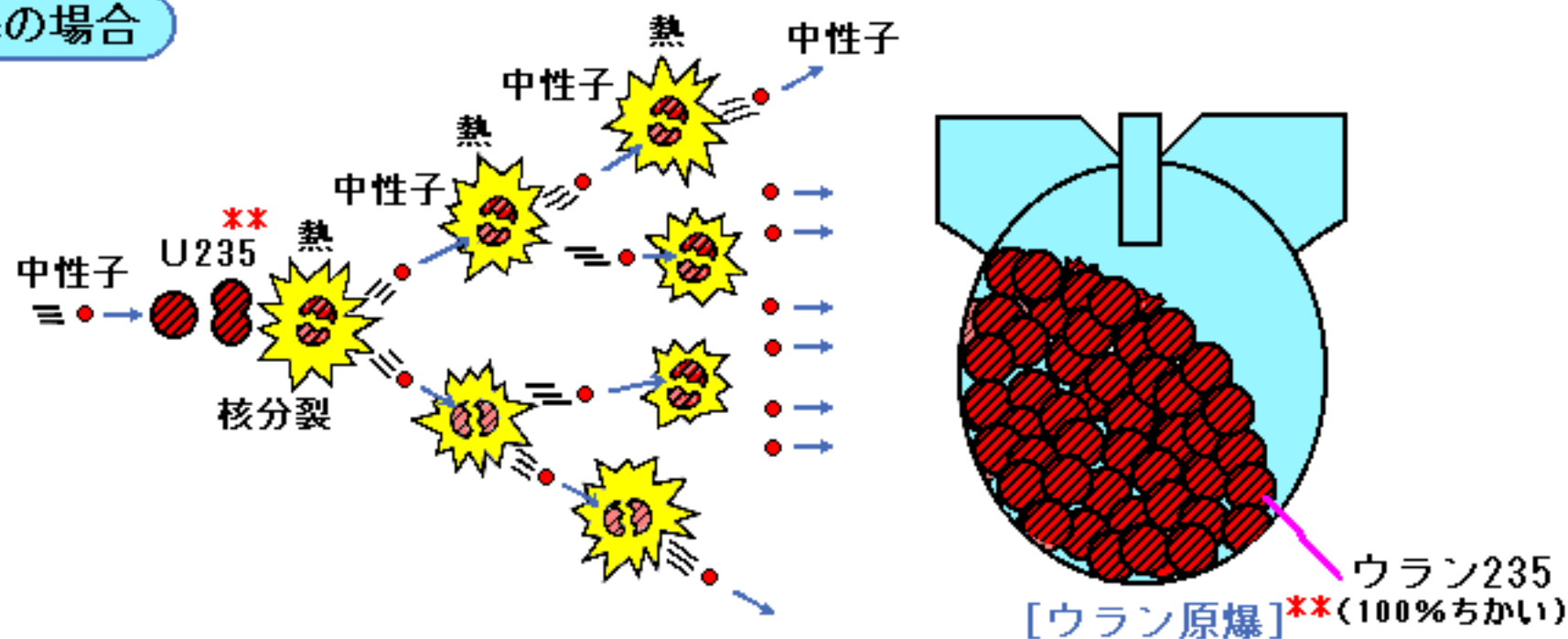
[出典] 日本原子力産業会議編、核燃料の取扱技術'93年版(1992.11)

原子力発電の場合



* 制御棒（ボロン、カドミウムなど）は中性子を吸収し核分裂連鎖反応を制御する。

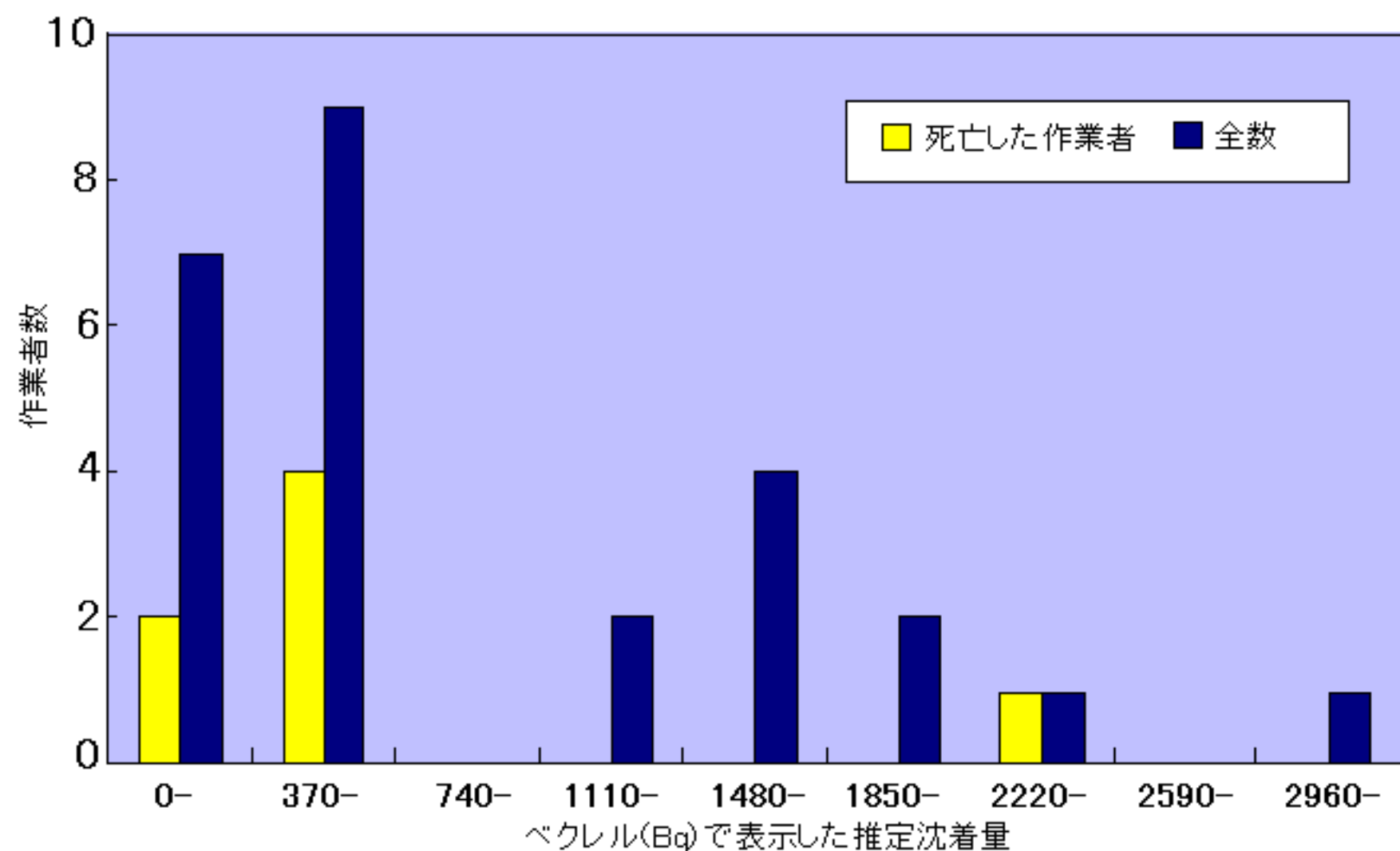
原爆の場合



**プルトニウム原爆の場合はウラン235の代わりにほとんどプルトニウム239で構成される。
下記の出典をもとに作成した

図4 原子力発電と原爆の原理の違い

[出典] 電気事業連合会(編):「原子力」図面集—1998年版—(1998年10月)、p.80



[出所] Hempelmann, L. H., W. H. Langham, C. R. Richmond and G. L. Voelz.,
 Manhattan Project Plutonium Workers: A Twenty-Seven Year Follow-Up Study of
 Selected Cases, Health Physics, 25, 461-479

図5 26名のマンハッタン作業者におけるプルトニウムの沈着量分布

[出典] 松岡 理: プルトニウムの安全性評価、日刊工業新聞社(1993.6)、p.146