

プルトニウムという放射能とその被曝の特徴

京都大学 原子炉実験所 小出 裕章

．プルトニウムの危険性の根源

プルトニウムは天然には存在せず、人類が初めて作り出した放射性核種であり、かつて人類が遭遇した物質のうちでも最高の毒性を持つと言われる。その根拠は、プルトニウムがアルファ()線を放出すること、比放射能が高いこと、そして体内での代謝挙動にある。

．線による被曝

この世に存在するあらゆるものは、生命体を含め、原子・分子から成り立っている。分子は原子が結合したものだが、その結合のエネルギーは数電子ボルト(1個の電子を1ボルトの電圧に逆らって移動させるために必要なエネルギーが1電子ボルト)である。一方、放射線のエネルギーはキロ電子ボルトあるいはミリオン電子ボルトであらわされるように、分子が結合して生命体を形作っているエネルギーの千倍、百万倍というような桁違いのエネルギーである。生命体に放射線が飛び込んでくれば、分子はいともたやすくその結合を破壊される。

ただし、一口に放射線といっても、レントゲンが発見したX線のほか、 α 線、ベータ()線、ガンマ()線、中性子線、重粒子線と言うように多種多様な放射線がある。そして、それぞれ透過度が違う。X線や γ 線の正体は光子であり、透過度が大きい。そのため、X線や γ 線を放出する放射性核種が体外にあっても、人体は被曝する。また、 α 線を放出する放射能を仮に体内に取り込んだ場合には、一部の α 線は人体の外に飛び出して行ってしまいうし、人体に被曝を与える場合も希薄で広範囲に与える。一方、 β 線の正体はヘリウムの原子核で透過力が著しく弱く、紙1枚あれば遮蔽できる。したがって、外部被曝に関しては β 線が恐ろしいが、 α 線は問題にならない。逆に、 α 線を放出する放射能を体内に取り込んでしまえば、その放射能が存在しているごくごく近傍の細胞だけに濃密な被曝を与える。たとえば、プルトニウム(Pu239)の α 線のエネルギーは5.1ミリオン電子ボルト(MeV)であり、組織中の飛程はわずか45 μ mしかない。

物理・化学的に被曝を計る場合の単位は「グレイ」であり、物体1kgが放射線から1ジュールのエネルギーを得た場合に相当する。しかし、生物的には放射線の透過度が違うため、エネルギーを受ける密度が異なり、影響の発現にも差が出てくる。そこで、生物的な被曝を計る単位としては「シーベルト」を使うことにし、「グレイ」単位の被曝量に線質係数なる係数をかけて求めることになった。 α 線と β 線に対する線質係数は1であり、 γ 線に対しては20とするように定められている。すなわち、 α 線や β 線の場合には、「1グレイ」は「1シーベルト」であるが、 γ 線の場合には「1グレイ」は「20シーベルト」となる。つまり、同じだけのエネルギーを放射線から受ける場合でも、 α 線から受ける場合には β 線や γ 線から受けるよりも20倍危険なのである。

・比放射能

1895年11月、ドイツの物理学者レントゲンは陰極管（TVのブラウン管もその一種）の実験中に偶然、正体不明の放射線を発見した。人類が放射線を発見した最初であった。翌96年にはフランスの物理学者ベクレルがウランも謎の放射線を発することを発見した。つまり放射性物質の発見である。98年にはキュリー夫妻がポロニウム（キュリー夫人の祖国ポーランドにちなんで命名）とラジウムを発見した。

「ベクレル」や「キュリー」は放射能の強さを表す単位となっている。放射能の強さは決められた時間にくつの原子核が崩壊するかで測り、それを決めるのは原子核の質量数と崩壊定数（半減期とは逆数関係にある）である。1975年に放射能の国際単位は「ベクレル」とされたが、「ベクレル」は1秒間に1個の原子核が崩壊する時の放射能の強さを表す。「比放射能」とは重さ当たりの放射能の強さのことであり、質量数をM、半減期を $T_{1/2}$ で表した場合、ベクレルを単位とした比放射能は下の式で計算できる。

$$A [\text{ベクレル} / \text{g}] = \frac{1.32 \times 10^{16}}{T_{1/2} [\text{年}] \times M}$$

半減期がこの式の分母にあるように、半減期が短ければ比放射能が大きくなるし、半減期が長ければ比放射能が小さくなる。代表的な放射性核種について半減期と比放射能の関係を次頁の表に示す。キュリー夫妻が発見したラジウムは質量数が226で、その半減期は1600年、1グラムのラジウムがあれば、その放射能の強さは370億ベクレルである。つい最近までRa-226、1グラムが持つ放射能の強さを1キュリーと決めてきたのであった。

半減期が極端に短くなれば、放射能は極端に強くはなるが、その代わりすぐに消えてなくなってしまふ。逆に半減期が極端に長ければ、いつまでたってもなくなる代わりに、放射能は著しく弱くなる。放射性核種には右の表にも示すように多様なものがある。人間や人類にとって危険な放射性核種は、個体としての人間、あるいは類としての人類と同じ程度の寿命を持った放射性核種である。原子力発電所とは、放射能を製造する現場であり、被曝で問題になるのは比較的寿命の短い放射能であるが、再処理工場では、原子力発電所から運び込まれる前に寿命の短い放射能はなくなってしまっているため、寿命の長い核種が問題となる。

それぞれの放射能を体内に取り込んだ場合の被曝量などを次頁の下の表に示す。天然に存在する放射性核種のうち線を放出する核種の

核種	半減期
I-134	52.7 分
Te-129	1.2 時
Kr-87	1.3 時
I-132	2.3 時
Kr-88	2.8 時
Kr-85m	4.4 時
Tc-99m	6.0 時
I-135	6.7 時
Xe-135	9.2 時
Sr-91	9.7 時
Zr-97	17.0 時
I-133	21.0 時
Te-131m	1.3 日
Ce-143	1.4 日
La-140	1.7 日
Np-239	2.3 日
Y-90	2.7 日
Te-132	3.3 日
Xe-133	5.3 日
I-131	8.1 日
Ba-140	12.8 日
Cs-136	13.0 日
Ce-141	32.3 日
Te-129m	34.0 日
Ru-103	39.5 日
Sr-89	52.1 日
Y-91	59.0 日
Zr-95	65.2 日
Cm-242	162.9 日
Ag-110m	252.0 日
Ce-144	284.0 日
Ru-106	1.0 年
Th-228	1.9 年
Cs-134	2.1 年
Sb-125	2.7 年
Rh-102	2.9 年
Eu-155	4.9 年
Eu-154	8.5 年
Kr-85	10.7 年
H-3	12.3 年
Eu-152	13.0 年
Cd-113m	14.0 年
Pu-241	14.3 年
Cm-244	18.1 年
Cm-243	28.5 年
Sr-90	28.8 年
Cs-137	30.2 年
Pu-238	87.7 年
Sm-151	90.0 年
Am-242m	152.0 年
Am-241	433.0 年
Cm-246	4700.0 年
Pu-240	6570.0 年
Am-243	7370.0 年
Cm-245	8500.0 年
Pu-239	24100.0 年
Pa-231	32800.0 年
Th-230	80000.0 年
Tc-99	214000.0 年
U-234	245000.0 年
Pu-242	373300.0 年
Zr-93	1500000.0 年
Np-237	2140000.0 年
I-129	16000000.0 年
U-236	23420000.0 年
U-235	703800000.0 年
U-238	4468000000.0 年

代表はウランやトリウムであるが、同じ放射能当りで比べれば、線を放出する U-235, U-238 と Pu-239 では、ほぼその毒性も等しい。しかし、Pu-239 の半減期 24100 年は、U-235 (7 億年) や U-238 (45 億年) に比べて 4 桁も 5 桁も小さいため、重さ当りの毒性で比べるとプルトニウムが圧倒的に高くなり、人類が遭遇した最高の毒物とも

核種名	質量数	半減期 [年]	重量当りの放射能
	M	T _{1/2}	A [ベクレル / g]
コバルト 60	60	5	42,000,000,000,000
クリプトン 85	85	11	15,000,000,000,000
トリチウム	3	12	360,000,000,000,000
ストロンチウム 90	90	29	5,100,000,000,000
セシウム 137	137	30	3,200,000,000,000
ラジウム 226	226	1,600	37,000,000,000
プルトニウム 239	239	24,100	2,300,000,000
ウラン 235	235	703,800,000	80,000
ウラン 238	238	4,468,000,000	12,000
トリウム 232	232	14,100,000,000	4,000

言われるようになったのである。単独の U-235 の場合、年摂取限度の値は 2mg (2000 μg) だし、U-238 の場合は 14mg (1 万 4100 μg) であることが表 2 から分かる。Pu-239 の場合には、その値が 0.000052mg (0.052 μg) であり、たしかに強烈な毒物であることが分かる。

	実効線量係数 [mSv/Bq]		実効線量係数 [mSv/g]		年摂取限度 (μg)	
	吸入	経口	吸入	経口	吸入	経口
H-3	0.000000018	0.000000018	6,400,000	6,400,000.00	0.16	0.16
Co-60	0.000017	0.0000025	710,000,000	100,000,000.00	0.0014	0.0096
Sr-90	0.000030	0.000028	150,000,000	140,000,000.00	0.0065	0.0070
Cs-137	0.0000067	0.000013	21,000,000	42,000,000.00	0.047	0.024
Ra-226	0.0022	0.00028	81,000,000	10,000,000.00	0.012	0.098
Th-232	0.012	0.000092	49	0.37	21000	2700000
U-235	0.0061	0.0000083	490	0.66	2000	1500000
U-238	0.0057	0.0000076	71	0.09	14000	110000000
Pu-239	0.0083	0.0000090	19,000,000	21,000.00	0.052	48

．不均等被曝の問題

その上、プルトニウムを含め線を放出する放射性核種を吸入する場合には、肺中での不均等被曝の問題が生じる。

ICRP は Publication26 の第 18 項で、線量当量 H を以下の様に定義している。

$$H = DQN$$

この式で D は吸収線量、Q は線質係数、N は「その他すべての修正係数の積」である。

線についての Q が 20 であることはすでに記した。問題は「その他すべての修正係数の積」とされ

た N である。この係数に対して ICRP は「現在のところ、委員会は N に 1 という値をあてている」と述べ、不均等被曝についても何の考慮も払わないとの態度を示している。

しかし、そんなことで本当にいいのだろうか？

粒径 1 μm、比重 10 の PuO₂ 粒子を考えると、その放射エネルギーは 0.0106Bq となる。その粒子 1 個を吸い込み、それが肺中のどこかに沈着した場合の被曝量を考える。Pu239 の α 線のエネルギーは 5.1MeV、組織中の飛程は 45 μm 程度である。言い換えれば、この粒子から被曝する肺の組織は粒子から半径 45 μm 以内のものだけであり、その重量はわずか 0.4 μg でしかない。そして、その他の肺の細胞はまったく被曝しない。一方、ICRP の評価方法では、1000g の重量を持つ肺全体で平均化した線量を計算する。両者の被曝量の計算結果を表に示すが、結果は 9 桁以上の違いとなる。もっとも、粒子が厳密に 1 箇所だけに固定されてまったく動かないということもありそうもなく、ギーサマンの評価によれば、およそ 65 μg 程度の細胞が被曝するという。その場合の評価も表に書き込んでおいたが、その場合でも ICRP の評価値とは 7 桁以上の違いがある。

	重量	Sv/年	比
45 μm 以内の細胞	0.38 μg	1.4 × 10 ⁴	2.6 × 10 ⁹
被曝組織（ギーサマンの評価）	65 μg	8.4 × 10 ¹	1.5 × 10 ⁷
肺全体の重量	1000g	5.5 × 10 ⁻⁶	1

1974 年に、タンプリンとコ克蘭はこの肺中の不均等被曝問題を取り上げて、「Radiation Standard for Hot Particle」と題する論文を発表した。彼らは、その粒子が沈着した周辺の細胞に 10Sv 以上の被曝を与えるような粒子を「ホットパーティクル」と定義し、そのような被曝を受けた細胞ががん化する確率を動物実験の結果から 1/2000 とした。当時職業人の年間許容被曝線量は 5rem / 年であり、この値は、がんになる危険度が 1/1000 という仮定から導かれたものであった。それに対応して ICRP が示していた、肺中のプルトニウムの最大許容沈着量は 16000pCi であった。それに対し、タンプリンとコ克蘭が考えた「ホットパーティクル」による不均等被曝の場合には、1 個 0.07pCi の放射能を持つホットパーティクル 2 個、つまり 0.14pCi で、がんになる危険度が 1/1000 になってしまう。

それゆえ、タンプリンとコ克蘭はホットパーティクルの吸入を問題にする場合の許容量を 115000 分の 1 (0.14/16000) に引き下げるよう求めたのであった。

．原子炉プルトニウムの問題

プルトニウムの同位体のうち何と言っても重要なのは、Pu-239 である。何故なら、それこそが長崎原爆の材料になり、今日の歴大な核兵器を支え、そして高速増殖炉の燃料になるといわれている核種だからである。しかし、被曝を問題にするならば、それだけ考えては足りない。何故なら、今日の軽水炉で生み出されるプルトニウムのうち Pu-239 が占める割合は重量で量って約 6 割、残りの 4 割はその他の同位体が占める。その中には Pu-239 に比べて半減期が短い核種がある、つまり比放射能の高い核種があるからである。

次頁の表に今日の軽水型原子力発電所で生じる代表的な組成の原子炉プルトニウムの危険度を示す。たとえば、Pu-238 は原子炉プルトニウム中でわずか 2 % しか占めず、Pu-239 の約 30 分の 1 である。しかし、その半減期が Pu-239 の半減期の 300 分の 1 であるため、比放射能は逆に 300 倍強く、結

原子炉 Pu の危険度

質量数	半減期	比放射能の比	使用済燃料中組成	1 m g 中の放射能	内部被曝				外部被曝	
					(平均)		線質係数	相対危険度	(平均)	相対危険度
	年		%	Bq	keV	keV			keV	
238	88	276	2	1.3×10^7	5474	-	20	5.9	0.017	11.7
239	24130	1	58	1.3×10^6	5142	-	20	0.58	0.008	0.6
240	6570	3.7	24	2.0×10^6	5142	-	20	0.88	0.028	3.0
241	14	1667	12	4.6×10^8	-	20.8	1	0.040	0.000	7.0
242	396300	0.06	4	5.5×10^3	4890	-	20	0.0023	0.019	0.0
				合計 1.6×10^7				7.4		22.3

果的に原子炉プルトニウムでは Pu-238 の 線強度は Pu-239 のものの 10 倍になってしまう。

六ヶ所再処理工場での最近の被曝

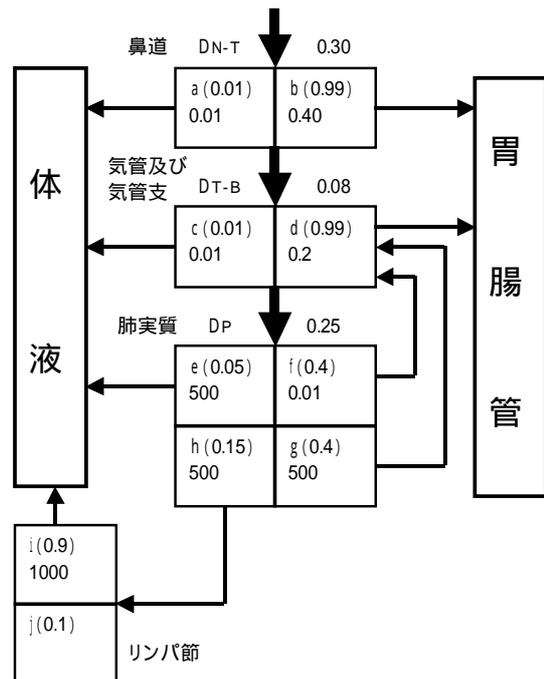
六ヶ所再処理工場では、アクティブ試験に入ってから以降、被曝事故が相次いでいる。特にプルトニウムの内部被曝は問題である。

プルトニウムを呼吸で取り込んだ場合、肺中でのどのように挙動するかについては、モデルを決めて予測する以外にないが、国際放射線防護委員会が採用してきた呼吸器系モデルは右の図のようなものである。「鼻道 (N-T)」、「気管及び気管支 (T-B)」、「肺実質 (P)」に到達する割合をまず仮定し、それぞれの領域に到達したもののうちある割合はある半減期を持って胃腸管や体液に移行していくと考えるのである。胃腸管に出たものは便として体外に出て行くし、体液に出たものは、ある仮定した速度で、尿に出て行くことになる。

体内に入ってしまった 線核種を体外から測定することはできないので、尿や便の中に出てきた核種を調べるしかないが、それが正しい情報を与えるか否かは、膨大な仮定のもとに作られたモデルの妥当性による。しかし、放射性核種もその化学形、取り込む時の粒径が違えば、それぞれの部位に到達する割合、排泄される割合が違ってしまふし、さらに言うならば、生物体としての個性

ICRP-26 による呼吸器系モデル

酸化プルトニウムのような不溶性でクラス Y に分類される放射能に対する場合について、それぞれのコンパートメントにおける分布割合（上段の括弧の中）と、半減期（下段）を示した。



も大きく影響する。尿や便の分析から得られる情報など、大きな誤差を持ったものでしかない。

今回の事故では信じがたい出来事が次々と思っている。たとえば、

分析する試料中に3価の状態のプルトニウムがどれほどあるかを調べるのが目的であり、そのためには大部分を占めるはずの4価のプルトニウムをまず除去する作業が必要であった。ところが、その作業がまったく行われずに、大量の4価のプルトニウムを含んだままの試料が測定試料作成係に送られてしまった。

それを受け取った測定試料作成係は、4価のプルトニウムを除去した試料であるかどうかまったくチェック機構を持っていなかった。

本来は放射能測定のプロであるはずの測定試料作成係は、放射能強度が強すぎると測定器が応答しなくなる性質を持っていることを知らずに、歴大なプルトニウムを含んだままの試料を無造作に次の測定係に引き渡した。

それを受け取った測定係もずさんな取り扱いでプルトニウムを飛散させて、自分自身を含めて汚染を生じさせた。何と19歳の「協力会社」の社員であった。

分析すべきもとの廃液試料中にはプルトニウムが4mg/ml含まれていたと言う。4mgの原子炉プルトニウムの中にはPu-239が約500万ベクレル、Pu-238がその10倍の5000万ベクレル、Pu-240も約800万ベクレル、合計で6000万ベクレルを超える線放出核種が含まれていた。それを100倍に希釈した測定では900,000cpmの線を計測したとのことで、計測効率を30%とすれば、作成した試料には3,000,000dpmの線放出核種が含まれていた、すなわち、5万ベクレルである。そうなれば、100倍に希釈した試料の約0.1mlを焼き付けたことになる。実際の廃液の性状や分析の現場を私は知らないが、操作としてはほぼ納得できる（古川路明さんからのご教示を受け原燃の報告書を読み返したところ、焼付けに使った試料の量は0.2mlとなっていた）。原液のまま焼き付ければ、その100倍の放射能を含むし、計数もそれにつれて多くなるはずであるが、何と原液から作った試料での計数は4800cpmでしかなかったという。つまり、これは放射能が強すぎ、測定器の不感時間が長くなり過ぎたため、測定器が死んでしまっていたのである。放射線測定に携わる者としてまず第一に知っていなければならない知識である。

4価のプルトニウムを除去すべき作業を行わなかったのは「協力会社」の社員であった。測定試料作成係には日本原燃の社員も含まれていたようだが、多数は協力会社社員であった。さらに、不幸にして被曝した人は、上にも書いたように弱冠19歳の「協力会社」社員であり、放射線測定の経験はどんなに長くても1年しかないし、おそらくはほとんど知識がなかったのだろう。再処理工場において放射能の分析作業は必須であり、もともと日本原燃が自分の仕事として行うべきものである。それを下請け化することがそもそも間違っている。