

# 核燃料サイクルの安全性

## (2) プルトニウム及びその他放射性核種

東京工業大学 原子炉工学研究所  
原子力国際共同研究センター  
小澤正基

# 内 容

---

1. イントロダクション；放射性核種の環境挙動（福島NPP事故に関連して）
2. プルトニウム（Pu）
  - 同位体、利用
  - 兵器級と原子炉級
  - 環境Pu
  - 体内摂取・挙動
  - 生物学的影響
  - 被ばく事故例、除染
3. その他放射性核種の利用
4. プルトニウムは人類と共存できるか？
5. 課題についての双方向議論

# 福島第1原発事故；放出放射性核種

水

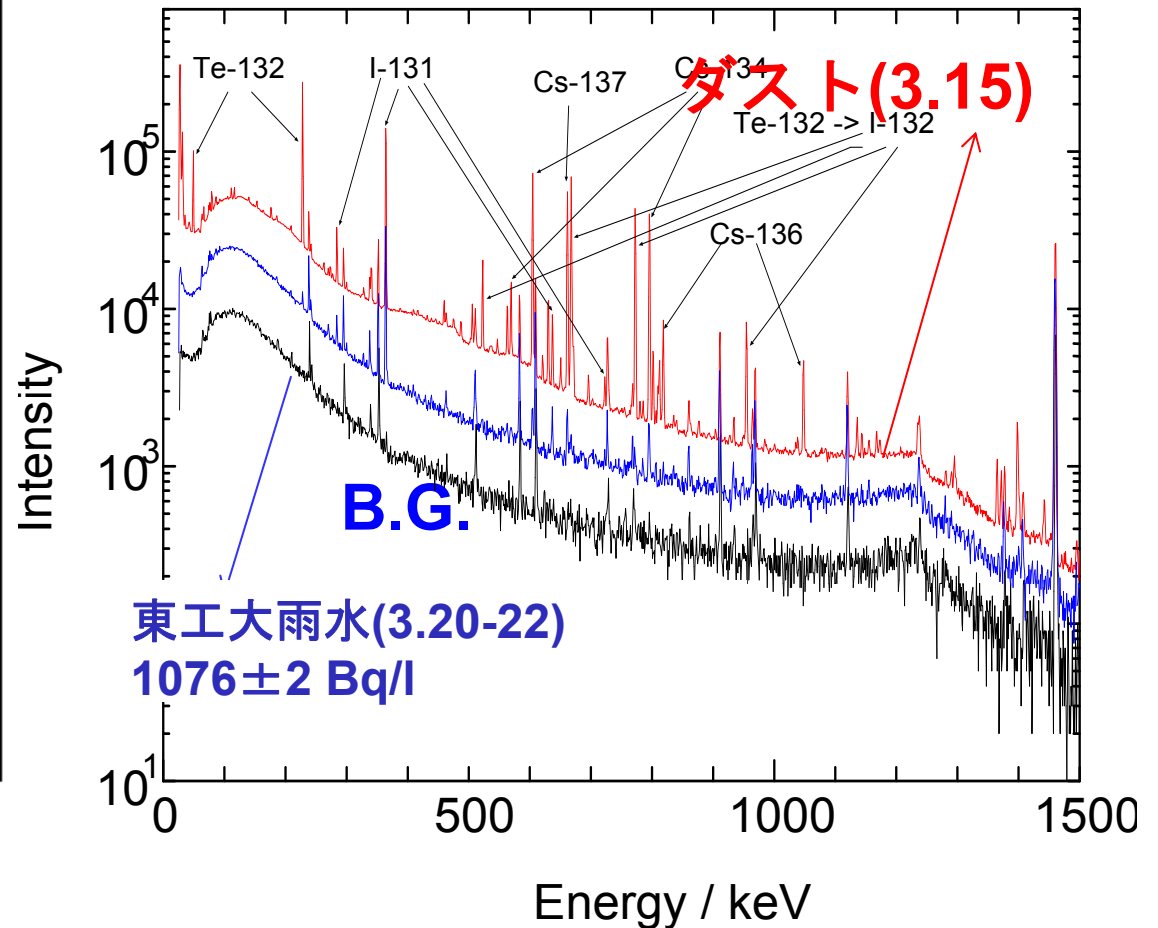
## タービン室汚染水の核種分析

Nuclides	Bq/cc		Percent of Inventory (dissolved ratio)
	Measured (by TEPCO)	Core Inventory	
Y-91			
Co-60	7.00E+02		
Tc-99m	2.50E+03	1.98E+07	0.013%
I-131	1.20E+06	9.93E+07	1.208%
Cs-134	1.80E+06	7.27E+07	2.474%
Cs-136	2.30E+04	1.01E+07	0.227%
Cs-137	1.80E+05	5.88E+07	0.306%
Ba-140	5.20E+04	2.51E+08	0.021%
La-140	9.40E+03	2.89E+08	0.003%
Ce-144	2.20E+06	4.07E+08	0.540%
合計	5.47E+06	1.21E+09	0.453%
I, Cs	3.20E+06	2.41E+08	1.329%

大気

## 東工大原子炉研における核種分析

\*  $^{241}\text{Am}$  ( $^{241}\text{Pu}$ ) は検出されず！



# FNPP環境汚染；飲料水（井戸水、水道水）の放射能（1）

(実測例； 白河・那須地域 3.15~4.18)

サンプルNo	形態	サンプリング					結果(速報)							
		採取地区	福島第一原発からの距離	日時	備考	採取範囲、量	測定試料				②放射線量；単位 $\mu\text{Sv/h} * \text{バックグラウンド} 0.08(\text{測定日時})$	③東工大原子炉研ZnS(Ag)+プラスチックシンチレー( $\beta$ 測定)。アロカ製 $\alpha/\beta$ 線自動測定装置 JDC-3301。 $\alpha$ はBG以下。放射性物質濃度；単位Bq/l 測定日：2011.3.25	ICP MS 元素分析	
0	蒸留水	東工大原子炉研(鈴木研究室)			3.11以前に調整		100ml				0.08(2011.3.23 11:45)			
1	水道水	白河市薄葉	78.8	3.15 AM10:00	白河病院近く。降雨前	500cc→30cc(測定量)→蒸発乾固	蒸発乾固紙				0.08(2011.3.23 11:45)	0.81±2.35		
2	水道水	白河市薄葉		3.18 PM8:00	白河病院近く。降雨後						0.08(2011.3.23 11:45)	30.7±2.35		
3	井戸水	那須町高久丙	95.5	3.20 AM8:30	御用邸近く						0.08(2011.3.23 11:45)	1.28±2.03	○	
4	私設水道水	那須町高久丙		3.27AM11:00								0±2(2011.3.31)		
5	地下水	那須町高久丙		3.27AM11:00								1.3±2.0(2011.5.2)		
6	町水道水	那須町高久乙	101.3	3.20 AM11:40	那須街道沿い						0.08(2011.3.23 11:45)	75.29±2.76		
7	井戸水	那須塩原市上中野	101.5	3.20 AM7:30							0.08(2011.3.23 11:45)	0±2(2011.3.29)	○	
8	井戸水	那須塩原市上中野		4.18 AM7:00								2.2±2.0((2011.5.2)		

## (2) 滞留水の放射能 (実測例 ; 日立、我孫子、東京地域 3.19-6.1)

Bq/l

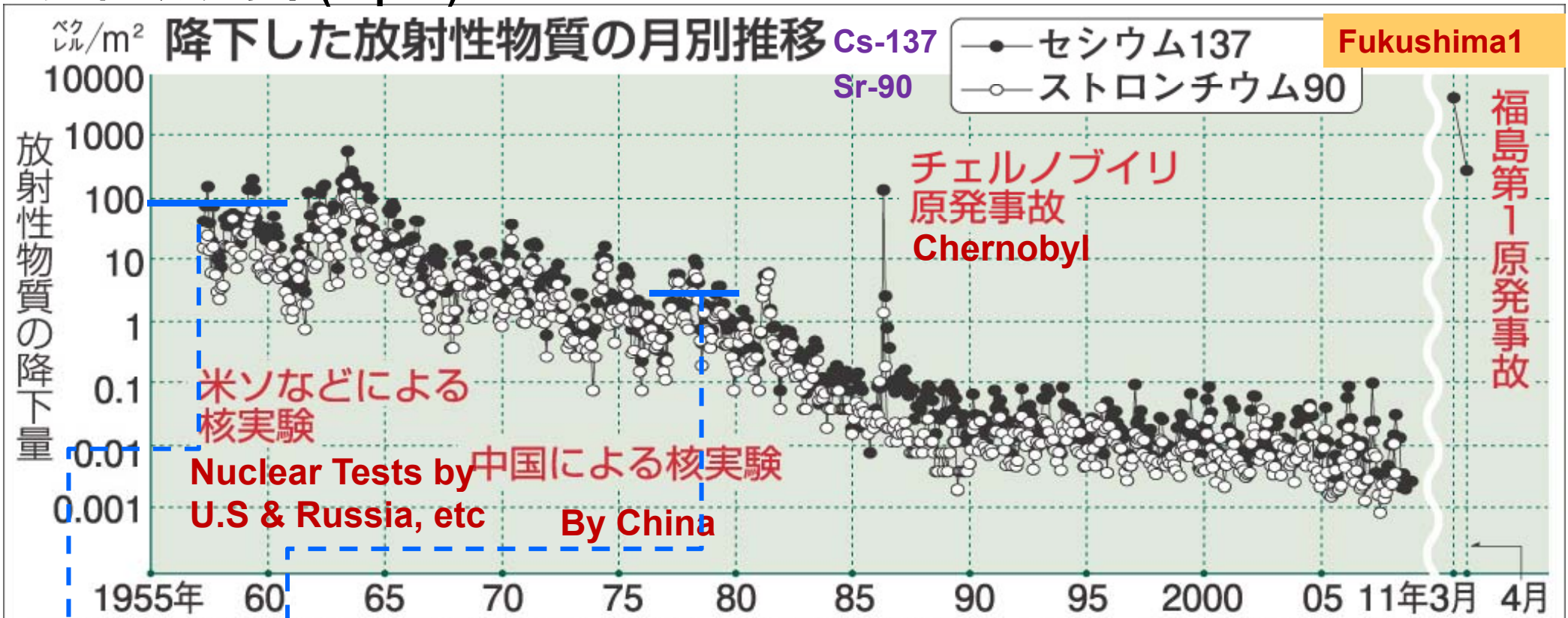
スミヤ	日立市東多賀町1-3-7 自家用車ルー	103.6	3. 19 15 時ごろ	3.11以降 洗車無	約 1.5mX0.5 m	スミヤ	2011.3. 22 要測定継続	131I, 137Cs 有為量	241Amは未検出	①約 0.3(2011.3.22 14時ごろ) ②0.19		
井戸水	日立市東多賀町1-3-7		3. 19 15 時ごろ		500cc→30cc(測定量)→蒸発乾固	蒸発乾固紙	2011.3. 23 要測定継続	未検出	241Amは未検出	0.08(2011.3.23 11:45)	12.7±2.2 (2011.3.29)	
井戸水	日立市東多賀町1-3-7		4.9 9時ごろ								0±2	
沼水	我孫子地区(手賀沼)	195.3	3. 19?		500cc→30cc(測定量)→蒸発乾固	蒸発乾固紙	2011.3. 23	未検出	241Amは未検出	0.08(2011.3.23 11:45)	2.6±1.5	
プール水(滞留水)	我孫子電中研		3.22									324.9±4.2
プール水(滞留水)	我孫子電中研		3.28AM11:35									263.3±4.0(2011.3.31)
プール水(滞留水)	我孫子電中研		4.4AM11:35									103.1±3.0
プール水(滞留水)	我孫子電中研		4.11AM11:25									31.3±2.3(2011.5.2)
プール水(滞留水)	清水窪小学校		6.1					γ FP核種未検出		3.5±3.3 (2011.6.6 17時から測定開始)		
雨水	東工大原子炉研	235.6	3. 20-22							1076±2		

- 1) 放射性核種 (Cs, 他) の水道水への移行は速い。一方井戸水 (地下水) はクリーンである (移行量が少ない、遅い。サンプリング時のクロスコンタミの可能性も)
- 2) 文献情報では放射能の大部分が地表面に留まる (Cs~20cm, Pu~5cm)
- 3) 原子炉研雨水の濃度は他に比べ高かったが、世界及び日本各地の放射能温泉水 (チェコ・ヤヒモフ (ボヘミア) 及び三朝 (鳥取) ) の約1/10程度である。ヤヒモフでは飲泉療法も取り入れられている。

\* 東工大測定の上記データは避難先地域 (例えば、那須地域) の皆様に大変感謝された

# 環境放射能(1955年以降の東京の月間フォールアウト)

フォールアウト(Bq/m<sup>2</sup>)



Release of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs to the atmosphere

- ✓1950-60年代； 現在 (“福島”以前) の1,000-10,000倍の環境放射能レベルだった  
→ その環境で育った子供 (つまり小生も該当) の寿命が特に短く、癌が多い、という報告はない！
- ✓1970年代後半； 中国の核実験の影響が顕著だった。当時、再処理工場の内部は外部 (東海村) よりずっとクリーンだった (エピソード)

# フォールアウト環境放射能(1985年)

## 核実験フォールアウトによる年間実効線量当量

1985年度日本；エネルギーレビュー1993, Vol.13, No.4  
 体外：地表土壌中の<sup>137</sup>Cs濃度測定値を用いて計算  
 体内：実測値に基づく

経路	核種	実効線量当量(ミリシーベルト/年)
体外	Cs-137	$0.25 \times 10^{-2}$
体内	C-14	$0.3 \times 10^{-2}$
	Sr-90	$0.12 \times 10^{-2}$
	Cs-137	$0.09 \times 10^{-2}$
	Pu-239, 240	$0.3 \times 10^{-2}$
	Am-241	$0.1 \times 10^{-2}$
合計		$1.2 \times 10^{-2}$

IAEA教育資料

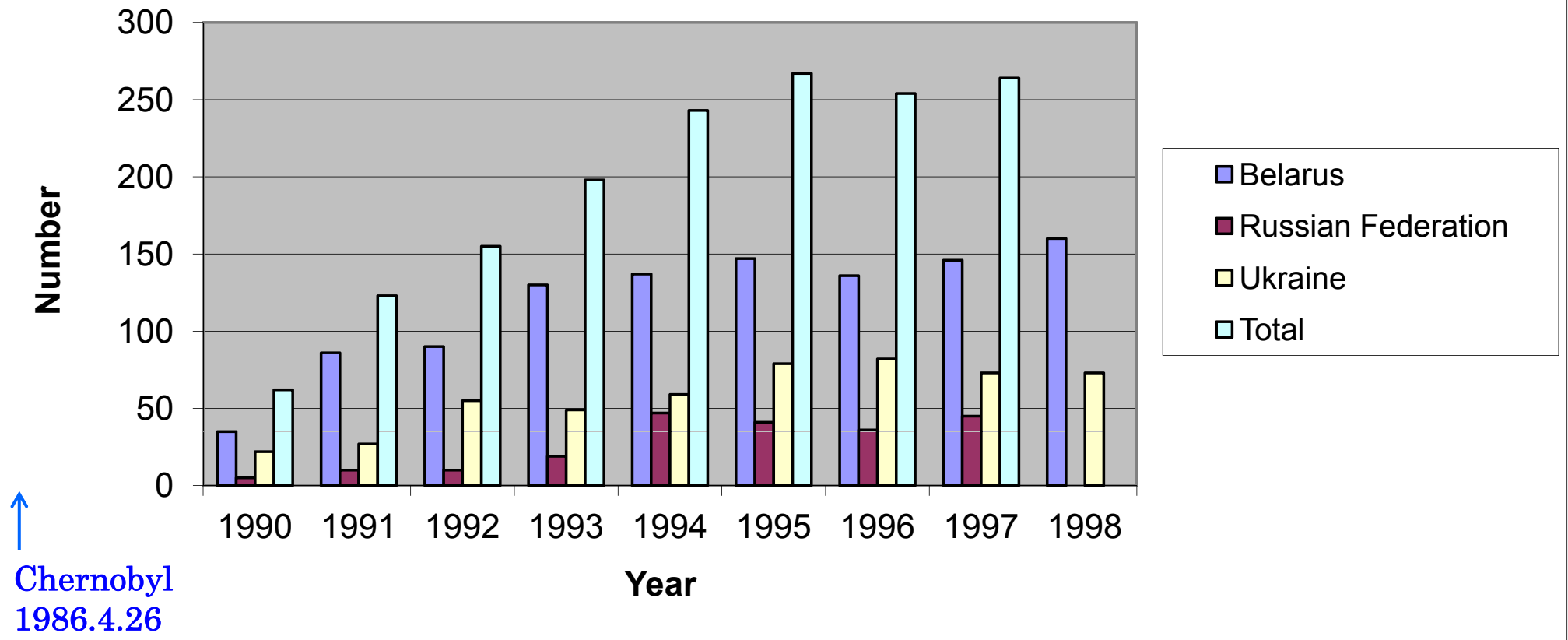
我々は年間どのくらい被ばくしているのか

線源	平均線量 (mSv)	範囲 (mSv)
自然バックグラウンド	2.4	1-10
医療診断	0.4	0.04-1
核実験	0.005	減少
チェルノブイリ	0.002	減少
原子力発電所	0.0002	減少

# チェルノブイリ原発事故による子供(0-17歳)の甲状腺癌発症の推移

## Thyroid cancer diagnosed up to 1998 among children 0-17 years at the time of the Chernobyl accident

✓ヨウ素-131を含んだミルクの摂取による。放射性セシウムの影響はなかった





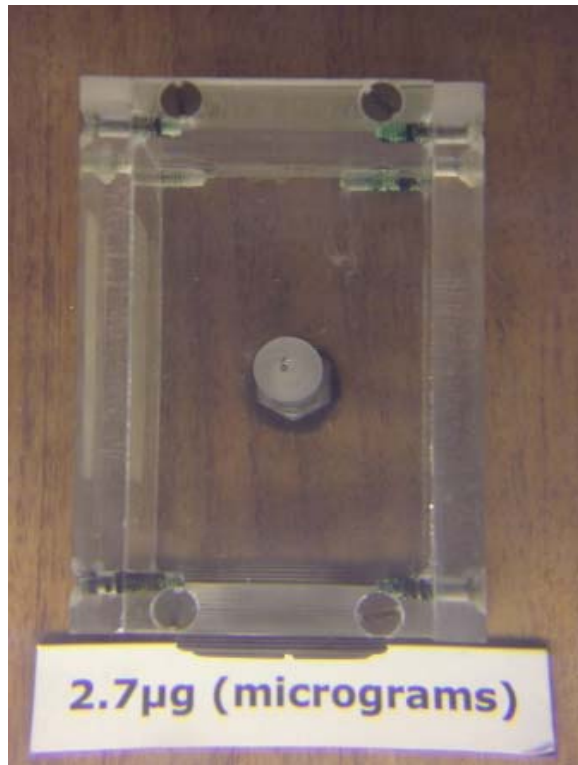
# 10年後に問題となる核種(一般論として)

核種	半減期	運転後1年半(PWRのケース)		実効線量係数 (経口) mSv/Bq	運転後1年半 (経口) mSv/MTU	10年後 (経口) mSv/MTU
		g/MTU	Bq/MTU			
Sr-89	50.53d	40.17	4.32E+16	2.60E-06	1.12E+11	2.02.E-11
Sr-90	28.74d	398.9	7.45E+17	2.80E-05	2.09E+13	1.23.E-25
Y-91	58.51d	59.95	5.44E+16	2.40E-06	1.31E+11	2.17.E-08
Tc-99	2.11E5y	511	3.24E+11	7.80E-07	2.53E+05	2.53.E+05
Ru-103	39.26d	41.8	4.99E+16	7.30E-07	3.64E+10	3.76.E-18
Te-132	3.204d	4.552	5.20E+16	3.70E-06	1.92E+11	0.00.E+00
I-129	1.57E7y	102.3	6.69E+08	1.10E-04	7.36E+04	7.36.E+04
I-131	8.021d	7.773	3.57E+16	2.20E-05	7.85E+11	8.12.E-126
Cs-134	2.065y	46.56	2.23E+15	1.90E-05	4.24E+10	1.48.E+09
Cs-136	13.15d	0.4096	1.11E+15	3.00E-06	3.33E+09	9.26.E-75
Cs-137	30.04y	760	2.44E+15	1.30E-05	3.17E+10	2.52.E+10
La-140	1.678d	3.261	6.71E+16	2.00E-06	1.34E+11	0.00.E+00
Ce-141	32.50d	60.9	6.42E+16	7.10E-07	4.56E+10	7.09.E-24
Ce-144	284.9d	363	4.27E+16	5.20E-06	2.22E+11	3.09.E+07
Pm-147	2.623y	146.6	5.03E+15	2.60E-07	1.31E+09	9.31.E+07
Eu-154	8.593y	11.98	1.20E+14	2.00E-06	2.40E+08	1.07.E+08
Eu-155	4.96y	5.37	9.25E+13	3.20E-07	2.96E+07	7.32.E+06
Pu-238	87.7y	30.3	1.92E+13	2.30E-04	4.42E+09	4.08.E+09
Pu-239	2.41E4y	4750	1.09E+13	2.50E-04	2.73E+09	2.72.E+09
Pu-240	6564y	1210	1.02E+13	2.50E-04	2.55E+09	2.55.E+09
Pu-241	14.35y	596	2.28E+15	4.70E-06	1.07E+10	6.61.E+09
Am-241	432.2y	10.8	1.37E+12	2.00E-04	2.74E+08	2.70.E+08

Cs

Pu

# プルトニウム



最初の100  $\mu$ gのプルトニウム  
カリフォルニア大学バークレイ校UCBにて (2007. 9. 17)

G. Seaborg、等によって抽出され、計量されたプルトニウム  
(Pu-239) の最初のサンプル2.77  $\mu$ g (1942. 9. 10)  
“全ての始まり!!”

講義資料については以下2点の文献から引用している

- 1) 松岡理、“プルトニウムの人体影響と安全性”、電力中央研究所、平成5年11月11日
- 2) 松岡、安藤、小澤、高橋、小木曾、稲葉、二之宮、久松、“プルトニウムの安全性の基礎”、日本原子力学会誌、Vol.36, No.11, pp997-1020(1994)

# Puの同位体

代表的なプルトニウム同位体の性質

同位体	半減期	崩壊形式	比放射能(Ci/g)	比放射能(Bq/g)	核分裂	自発核分裂
Pu-236	2.85 年	$\alpha$	532.0	$1.97 \times 10^{13}$	—	—
Pu-238	87.7 年	$\alpha$	17.5	$6.34 \times 10^{11}$	—	+
Pu-239	24,100 年	$\alpha$	0.0613	$2.30 \times 10^9$	+	—
Pu-240	6,540 年	$\alpha$	0.226	$8.40 \times 10^9$	—	+
Pu-241	14.4 年	( $\beta$ )	112	$3.82 \times 10^{12}$	+	—
Pu-242	$3.76 \times 10^5$ 年	$\alpha$	$3.90 \times 10^{-3}$	$1.46 \times 10^8$	—	+
Am-241	433 年	$\alpha$	$3.25 \times 10^0$	$1.11 \times 10^{11}$	—	—

241Am Pu 貯蔵で 241Pu ( $\beta$ 放射体、T=433 年) から生成。貯蔵 Pu 製品から 241Am を分離し  $\gamma$ 線 (60Kev) 遮蔽を軽くする。Pu(IV)とはイオン交換法あるいは酸化物沈殿法で 241AmO<sub>2</sub>として分離。旧動燃ではPu スクラップから TRUEX 法 (CMPO) で高濃度 241Am を回収した。

# Pu;兵器級と原子炉級

## 核兵器級 Pu と原子炉級 Pu の同位体存在比の比較

核兵器級プルトニウム

原子炉級プルトニウム (MOX燃料)

同位体比	重量%	放射能%	線量寄与%	重量%	放射能%	線量寄与%
Pu-238	0.07	13.7	10.5	2	78.8	<u>55.7</u>
Pu-239	<u>93</u>	68.0	<u>56</u>	<u>61</u>	8.6	6.6
Pu-240	7	18.3	15	24	12.6	8.7
Pu-241	0.7	--	18.5	10	---	29.0
Pu-242	--	--		3	0.2	0.02

通常と同位体の存在比である重量表示は人体安全上では意味がない事に注意

## 核兵器級 Pu と原子炉級 Pu の性格の比較

指 標	核兵器級プルトニウム	原子炉級プルトニウム(MOX燃料)
同位体組成	$^{239}\text{Pu}$ が90数%以上	$^{239}\text{Pu}$ 60%程度
比放射能	$3.27 \times 10^9 \text{ Bq/g}$ (1.4)	$16.0 \times 10^9 \text{ Bq/g}$ (7.07)
放出放射線	殆ど $\alpha$ 線のみ	$\alpha$ 線 + $\gamma$ 線 (60KeV) + 中性子
線量寄与	$^{239}\text{Pu}$ が大半	$^{238}\text{Pu}$ が大半

主な用途 ; Pu-238→宇宙用原子力電池、核医学、Pu-239→核兵器

# ロシアにおける $^{238}\text{Pu}$ 及び $^{90}\text{Sr}$ の利用例



$^{90}\text{Sr}$  Battery (KRI)  
**23,000Ci  $^{90}\text{Sr}$  150W**



$^{238}\text{Pu}$  pacemaker (KRI)  
ca.150mgPuO<sub>2</sub>  
 $^{241}\text{Am}(n, \gamma)^{242}\text{Am}(\beta^-) \rightarrow ^{242}\text{Cm}(\alpha) \rightarrow ^{238}\text{Pu}$

旧フローピンラジウム研究所本部にて撮影

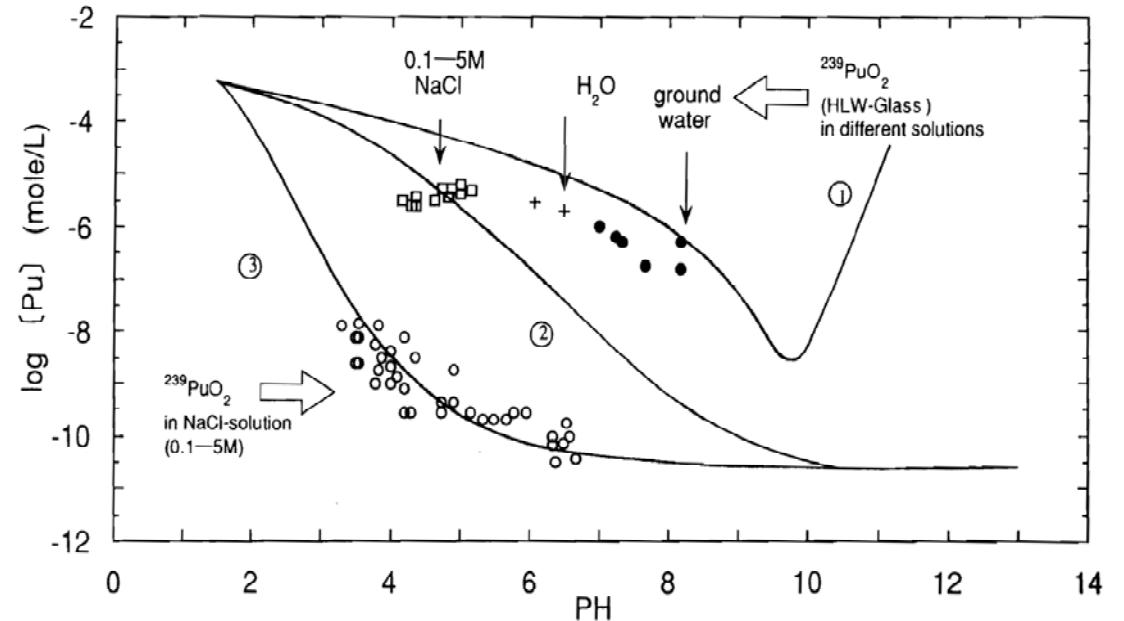
# Pu, TPUの利用

産業，民生機器に装備されているPuと超ウラン元素

装備機器	使用目的	核種名	存在形態	含有放射能量	備考
燃料電池	宇宙船用	$^{238}\text{Pu}$	酸化物	Max. 28万Ci	
鍍金厚み計	工業計測	$^{238}\text{Pu}$	酸化物	400 mCi	
心臓ペースメーカー	医療用	$^{238}\text{Pu}$	酸化物	2600 mCi	欧州及び米国
放射線厚み計	工業用	$^{241}\text{Am}$	酸化物	数から数十mCi	
煙探知器	民生用	$^{241}\text{Am}$	電着	1-10 $\mu\text{Ci}$	年間60万個
中性子水分計	工業用	$^{252}\text{Cf}$	酸化物	30-100 $\mu\text{Ci}$	
カルフォニウム線源	医療用	$^{252}\text{Cf}$	白金カプセル	1.34 mCi	臨床試験

# 環境中のPu、化学形態

- 天然Pu ( $^{239}\text{Pu}+^{244}\text{Pu}$ ) 数十 k g
- 原子力施設 (軍事) 漏出量 5~60 g
- 核兵器搭載機の墜落 400~450 g
- 放射性人工衛星電池 ( $^{238}\text{Pu}$ ) 約 1 k g
- 1962年までの核実験  
約3t ( $1.3 \times 10^{16}\text{Bq}$ )  
核実験放出の約3tのPuの内、1979年までに  
約0.2 g が人間に摂取された $\Leftrightarrow$ 74mBq/人に  
相当
- チェルノブイリ原子炉事故 約  $6 \times 10^{13}\text{Bq}$   
約15kg? 事故  
地域に堆積
- アイリッシュ海放出 BNFL1968~1973年  
 $^{238}\sim^{240}\text{Pu}$   $5.5 \times 10^{12}\text{Bq/y}$  (1973年)  
Pu(V)+(VI) の安定炭酸塩錯体で存在  
放出Puの96%がアイリッシュ海の堆積岩に  
沈着、固定。  
ラ・アークからの放出は極少
- Pu(IV)由来で多様な酸化状態 加水分解種  
カリフォルニア湖沼  $0.3\text{MCO}_3^{2-}$ 条件で炭酸塩錯体  
Pu(IV)で存在、濃度は約 $400\mu\text{Bq/l}$
- 地表層0~5cmでの移動の半減期は20~30年、地表層に  
大部分のPuが存在する
- 土壌~植物への移動係数 (乾燥重量値) ;  $5 \times 10^{-4}$



- 曲線 ①  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  溶液中の  $^{239}\text{PuO}_2$  の溶解特性  
 ②  $\text{NaClO}_4(1\text{M})$  溶液中の  $^{239}\text{Pu}$  水酸化物の溶解特性  
 ③  $\text{NaClO}_4(1\text{M})$  溶液中の  $^{239}\text{PuO}_2$  の溶解特性

種々の溶液(塩化ナトリウム, 純水, 地下水)における  
 $^{239}\text{PuO}_2$ (単体および模擬ガラス固化体中)の溶解度

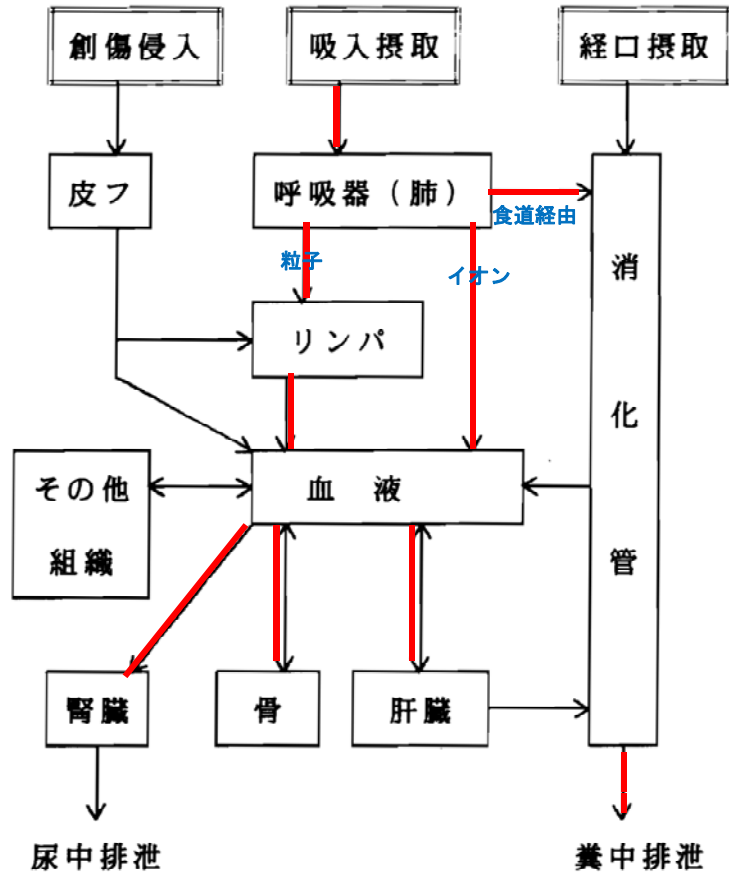
# Puの体内摂取；吸入

- ・ Puエアロゾルの吸入摂取が最も重要。実効線量係数も2ケタ大きい
- ・ PuO<sub>2</sub>や (U, Pu) O<sub>2</sub>は難溶のため肺、肝臓、骨に長期間滞留する。微小粒子の吸入が最も危険
- ・ 転移速度は極めて遅い。
- ・ 硝酸塩は酸化物に比べ肺からの移行は速い。動物実験では酸化物では肺癌、硝酸塩では骨癌

職業人の場合；  
外科的切除が有効

22,000

139.93 (牛乳0.07, 肉0.2, 野菜130, 魚0.06, 飲料水0.6)



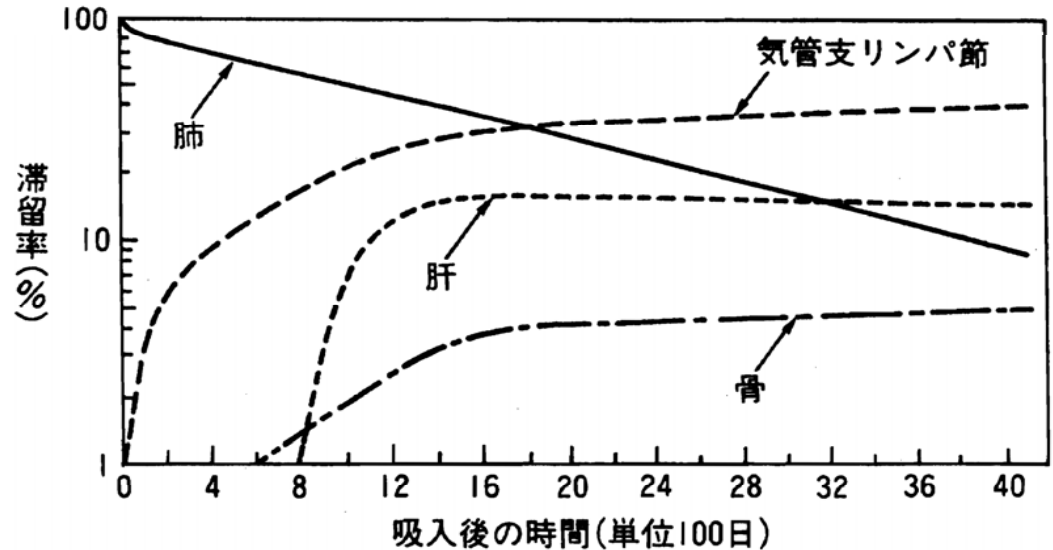
Puの摂取経路と生体内での挙動の概要

主な核種の1 Bq 摂取による線量

放射性核種・放射性核種群 <sup>a)</sup>	摂取の線量係数 [mSv Bq <sup>-1</sup> ] (預託実効線量の換算係数)	
	吸入	経口
<sup>131</sup> I (短寿命同位体)	1.1×10 <sup>-5</sup>	2.2×10 <sup>-5</sup>
<sup>90</sup> Sr (ストロンチウム同位体)	3.0×10 <sup>-5</sup>	2.8×10 <sup>-5</sup>
<sup>137</sup> Cs (T>10dの核種)	6.7×10 <sup>-5</sup>	1.3×10 <sup>-5</sup>
<sup>134</sup> Cs	9.6×10 <sup>-5</sup>	1.9×10 <sup>-5</sup>
<sup>241</sup> Am (プルトニウムおよび超Pu同位体)	2.7×10 <sup>-2</sup>	2.0×10 <sup>-4</sup>
<sup>129</sup> I	5.1×10 <sup>-5</sup>	1.1×10 <sup>-4</sup>

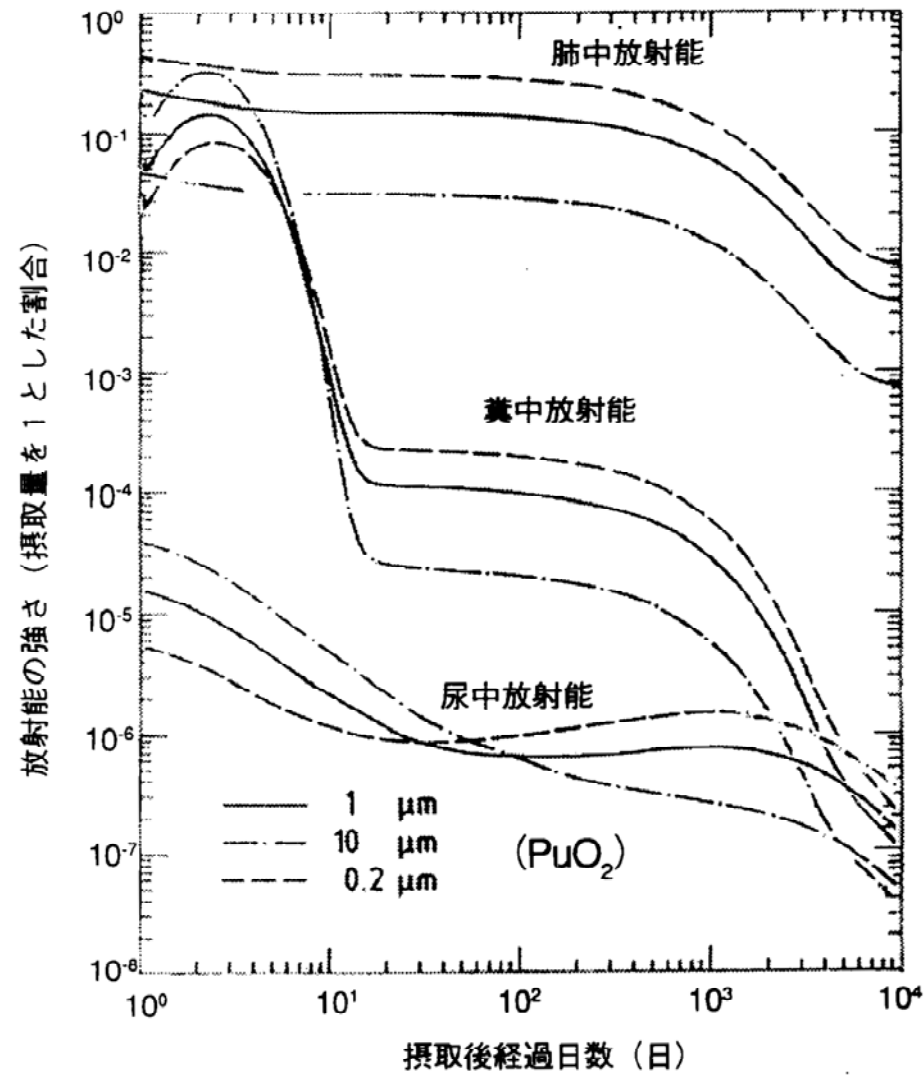
<sup>a)</sup> 食料品の限界値の設定では、個々に「代表核種」として記載した核種が全核種群におおよそ当てはまる

吸入プルトニウムの体内転移の状況  
犬の場合





# 吸入Puの排出



$^{239}\text{Pu}$ 吸入後の肺中沈着量および排泄放射能の変化( $\text{PuO}_2$ の場合)<sup>(13)</sup>

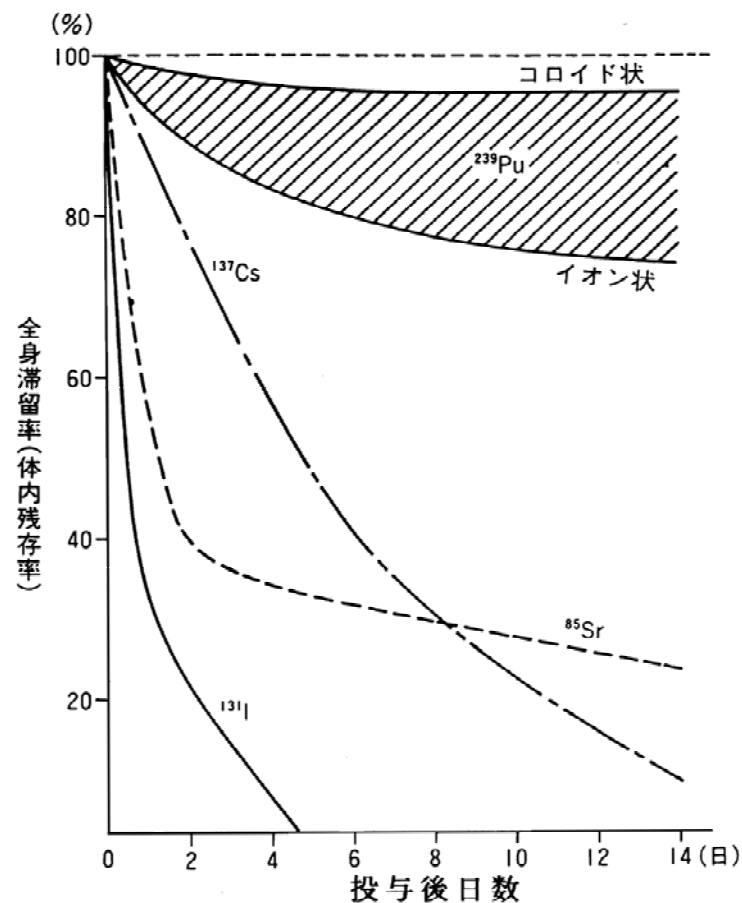
# Puの体内挙動；経口

- ・経口摂取後、消化管からの吸収は他核種に比べ著しく小さく（酸化物の場合、 $<0.01\%$ ）、速やかに排出。従って食物連鎖による人体移行は殆ど無視できる
- ・一方、血液中のものは人体に長く留まり、体外への排泄は他核種にくらべ著しく少ない（ $f$ 元素に共通の性質）
- ・超ウラン元素は骨格と肝臓に沈着
- ・生物学的半減期は骨格中で約50年と長期。肝臓は約20年

放射性核種の消化管からの吸収率

放射性核種	消化管からの吸収率 ( $f_1$ )	
$^3\text{H}$ (THO)	1.0	(100%)
$^{60}\text{Co}$	0.3	(30%)
$^{90}\text{Sr}$	0.3	(30%)
$^{131}\text{I}$	1.0	(100%)
$^{239}\text{Pu}$ (酸化物, 水酸化物)	$1 \times 10^{-5}$	(0.001%)
$^{239}\text{Pu}$ (硝酸塩)	$1 \times 10^{-4}$	(0.01%)
$^{239}\text{Pu}$ (その他の化合物)	$1 \times 10^{-3}$	(0.1%)
$^{239}\text{Pu}$ (公衆) 化合物に無関係	$1 \times 10^{-3}$	(0.1%)

主要核種の投与後の全身滞留率の変化 (マウス)



# Puの生物学的影響

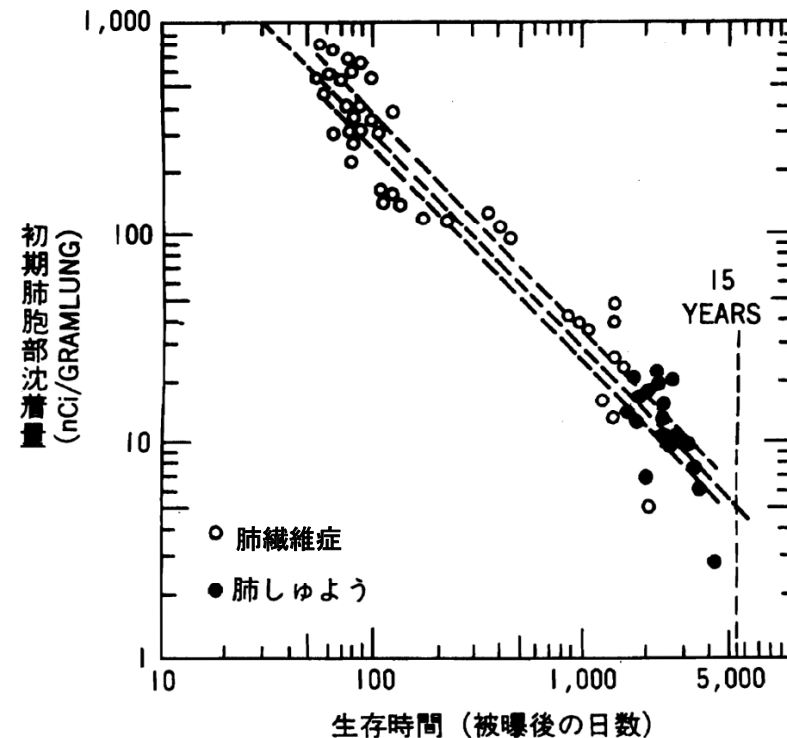
- ・体内分布と $\alpha$ 線の生物作用
- ・骨親和性核種 (Ra, Srと同様)。骨表面に分布。骨癌発生の可能性が高い
- ・犬での吸入実験では大量摂取では肺線維症、少量摂取では肺癌の発症
- ・人体に予想される障害は急性毒性ではなく、吸入摂取による発癌と推定

核種のアルファ放射体の発がん毒性の比較  
(ビーグル犬での静脈注射適用)

放射性核種 ( $\alpha$ 放射体)	骨肉腫のリスク (%/Gy)	毒性比 $\pm$ S.D (Ra=1.0)
$^{239}\text{Pu}$	75.7 $\pm$ 13.8	16.6 $\pm$ 4.5
$^{241}\text{Am}$	24.8 $\pm$ 5.6	5.4 $\pm$ 1.6
$^{224}\text{Th}$	38.6 $\pm$ 7.4	8.5 $\pm$ 2.3
$^{225}\text{Ra}$	8.96 $\pm$ 1.62	2.0 $\pm$ 0.5
$^{226}\text{Ra}$	4.56 $\pm$ 0.91	1.0

ヒト癌とPuの因果関係についての  
医学上の証明は未だない

$^{239}\text{Pu}$  酸化物吸入後の生存曲線と死因 (ビーグル)



# LD<sub>50</sub>

半数致死量（はんすうちしりょう、median lethal dose）； “Lethal Dose, 50%” LD<sub>50</sub>  
物質の急性毒性の指標、致死量の一つ。投与した動物の半数が48時間以内に死亡する用量。通常は動物の体重1kg当たりの投与重量mg（mg/kg）で表示

## LD50による急性毒性の分類

グループ	毒性の強弱	LD50 (mg/kg体重)	有害物質 ラット・経口投与
6	超猛毒	5以下	メチルHg(4)
5	猛毒	5～50	As化合物(45～48)
4	異常に強い	50～500	Cd化合物(27～225) 6価Cr化合物(12～400) Pb化合物(120～150)
3	比較的強い	500～5000	Fe化合物(440～1000) Al化合物(3730～3810) クロロホルム(1000～2000)
2	僅少	5000～15000	PCB(1300～11300) トリクロロエチレン(7200) テトラクロロエチレン(13000)
1	事実上無毒	15000以上	

Pu (3000, 犬への経口投与)

# Puの急性毒性 (LD<sub>50</sub>)

- ・ Puの急性毒性の評価は困難
- ・ 経口摂取（通常の物質の場合）との比較ができない（消化管吸収率が低いため） \* 経口ではLD<sub>50</sub>: 3000というデータがあるが・・・
- ・ 化学毒性効果の検討ができない
- ・ Puの急性毒性は30日以内に50%が死亡する場合。即死ではなく、造血器障害と肝障害による
- ・ 通常の物質の場合、連続経口微量投与法を用いる

## 高毒性物質とプルトニウムの急性毒性 (LD<sub>50</sub>) との比較

物質の種類	LD <sub>50</sub> の値	投与経路	対象試験動物
ボツリヌス毒素	0.005 μg/kg	腹腔注	マウス
ジフテリア毒素	0.1 μg/Kg	腹腔注	マウス
ストリキニーネ	500 μg/Kg	腹腔注	マウス
青酸カリ	0.7 mg/Kg	経口	ヒト
青酸カリ	10 mg/kg	経口	ラット
メチル水銀	7 mg/kg	経口	モルモット
亜砒酸	1000 mg/Kg	経口	ヒト
プルトニウム（硝酸塩）	0.3 mg/Kg	静脈注	イヌ
	1.4 mg/Kg	静脈注	ラット

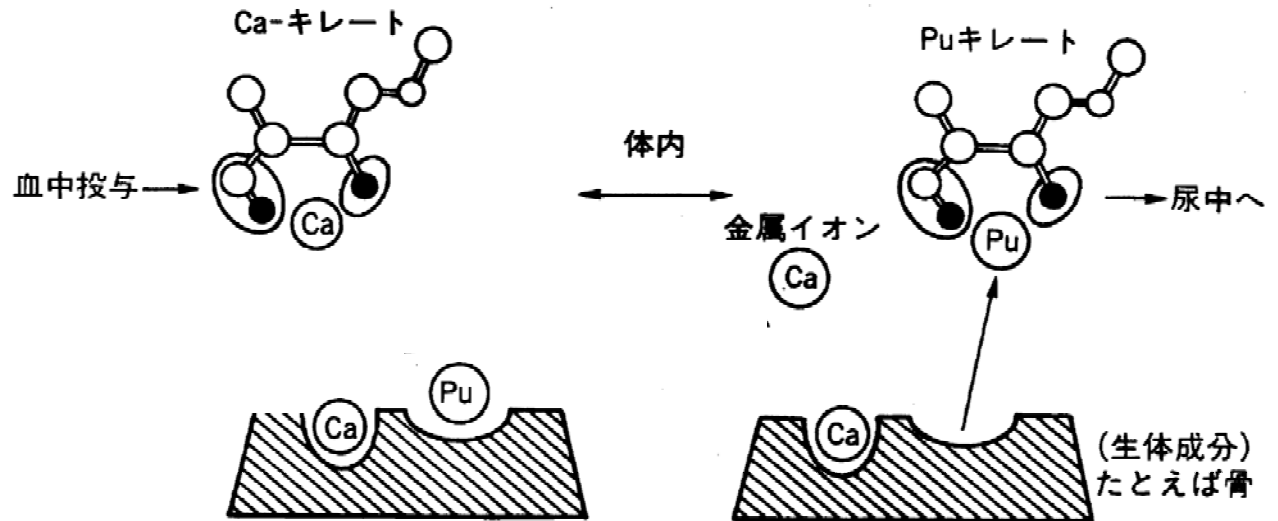
注：Puは硝酸塩の静脈注射であることに注意

# 放射性核種の急性毒性LD<sub>50</sub>(30day) ラットへの可溶性塩の静脈注射 (松岡データ)

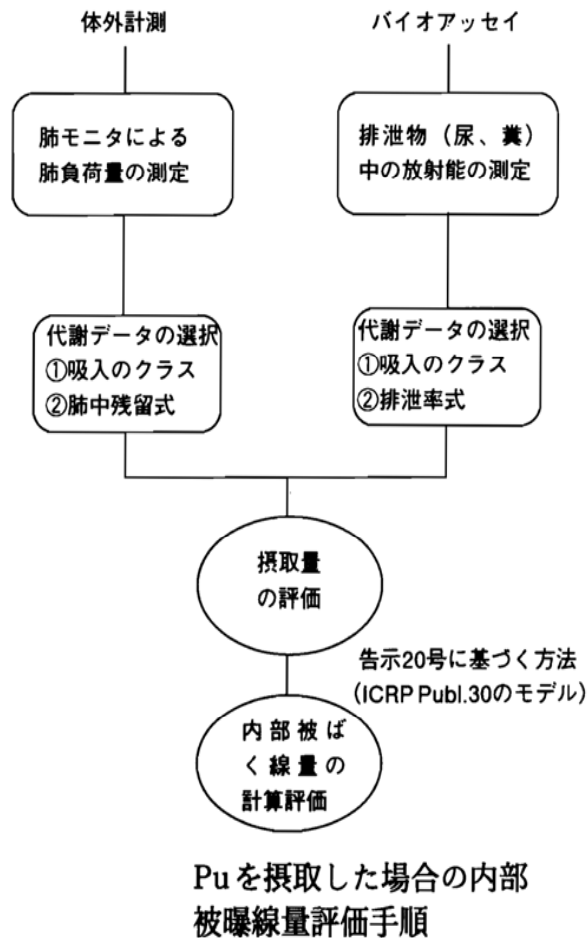
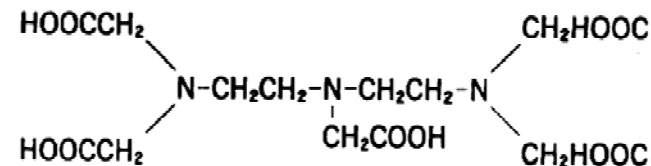
90Sr	3.5 $\mu$ Ci/g 体重
137Cs	20.0
144Ce	3.4
----	
237Np	0.003
239Pu	0.05
241Am	0.11
244Cm	0.11
252Cf	0.015

# 体内Puの除染

## キレート剤によるプルトニウム除去の原理



## 代表的キレート剤(DTPA)の化学構造



- ・ 吸入汚染では肺洗浄が有効。キレート剤との併用
- ・ Pu排泄； Ca, Zn-DTPA錯体の連続投与で排泄を促進。 体内でPu-DTPA錯体が形成され血液、腎臓、肝臓、胆汁から腸へ排出
- ・ 錯体のLD<sub>50</sub>； DTA>EDTA>DTPA>TTHA>HEDTA 毒性発現はZn欠乏によるDNAやRNAの合成障害が原因

# Pu被ばく事故例

マンハッタンプロジェクトPu被曝者中の死亡者（7人）の死因

死亡年齢	被曝後年数	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	骨がん	560(15)	740( 20)

(硝酸Pu吸入事故)

<sup>239</sup>Pu 事故過剰被曝者の集計

(中国核工業部事故)

- ・ Pu由来の死亡例はない。Pu由来として断定された障害例もない
- ・ ハンフォードのAm事故時、被ばく者に1 g/day以上でDTPAを静脈注射や経口で投与した。副作用なく、<sup>239</sup>Puや<sup>241</sup>Amの80%近くを除去できた。
- ・ 米国TRU被ばく者国家登録（数千名）の内、220の解剖事例では発癌は見出されず
- ・ ヒト癌とPuの因果関係についての医学上の証明は未だない

事故日	年齢	性別	化学型	被曝方式	摂取量	倍数*	治療処置	事故
(1964)	48	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	1,126 Bq	X2.25	Ca-DTPA	A
(1964)	43	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	996 Bq	X1.99	Ca-DTPA	A
(1964)	50	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	499 Bq	X0.99	Ca-DTPA	A
(1964)	22	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	<400 Bq	13年後急性白血病死		A
(1964)	50	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	291 Bq	X0.58	Ca-DTPA	A
(1968)	48	M	<sup>239</sup> Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	吸入	5600 Bq	X11.2	Ca-DTPA	B
(1973)	37	M	<sup>239</sup> Pu金属	創傷	700 Bq	X1.4	Ca-DTPA	C
(1976)	38	M	<sup>239</sup> Pu金属	創傷	1.1x10 <sup>6</sup> Bq	切除	Ca-DTPA	D
(1977)	36	M	<sup>238</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入+汚染	7,000 Bq	x8.6	Ca-DTPA	E
(1977)	43	M	<sup>238</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入+汚染	6,500 Bq	x8.2	Ca-DTPA	E
(1977)	28	M	<sup>239</sup> Pu(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	吸入	39,500 Bq	x197.5	Ca-DTPA	F
(1978)	40	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	81,000 Bq	X162	Ca-DTPA	G
(1979)	36	M	<sup>239</sup> Pu+FP	廃液に接触	(創傷汚染)		Ca-DTPA	H
(1985)	43	M	<sup>239</sup> PuO <sub>2</sub>	吸入	5,900 Bq	X11.8	Ca-DTPA	I
(1985)	42	M	シュウ酸 <sup>239</sup> Pu	吸入	2242 Bq	X4.48	Ca-DTPA	J

\* 倍数は年摂取限度 (ALI) = 500 Bq として計算されている。現行は300 Bq



## 結論として

- 1) 人間で予想される障害（確実な障害例はない）は急性毒性ではなく、吸入摂取による発癌と推定されるが、Pu独特のものでなくTRUに共通したものである

<sup>239</sup>Puの年間摂取限度ALI(annual limit of intake)

職業人の吸入 625Bq (357 $\mu$ g)

公衆 31.3Bq (17.5 $\mu$ g)

- 2) Pu is hazardous but not dangerous (有害ではあるが危険ではない) リスクとベネフィットのバランス

# 他放射性核種の利用

# ヤヒモフ温泉（チェコ・ボヘミア）におけるラドン療法

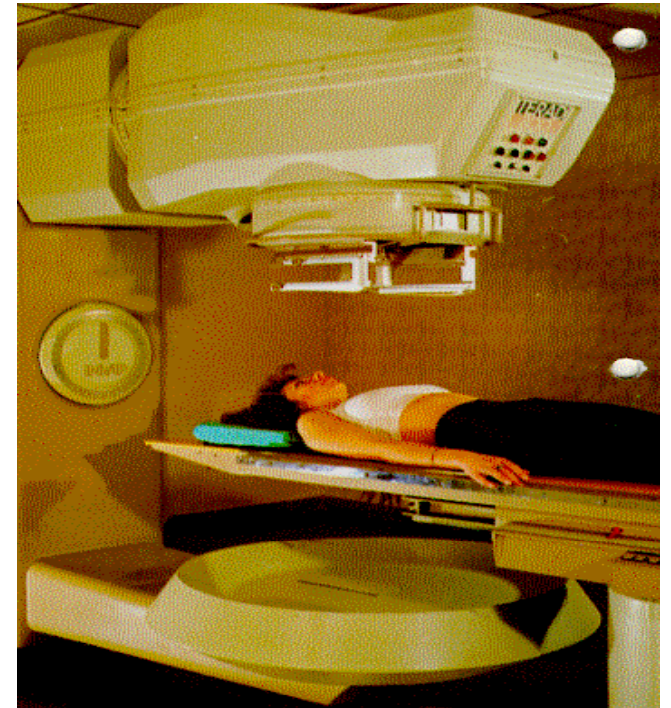


- 1906年、Radon Spa創設
- 現在Radium Palace, Akademik Behounek, Curieをはじめ10軒ほど療養施設。
- 吸入、飲泉、入浴治療
- 神経痛、リウマチ患者などが対象
- 湧出量毎分300ℓ、36.2℃、10.5kBq(Rn-222)\*/ℓの源泉を利用。  
\* $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$  ( $\alpha$ 壊変, $\gamma$ ) ,半減期3.8235日,U系列
- 36℃、3.5-4KBq/ ℓに調整した温泉水により、週6回、一回20分の治療。
- 温泉療養の品質管理はISO 9001:2000や（独）TuF（2001年取得）で認定。
- 25種類の医療プログラム; Radon galvanic bath, X-ray therapyなど。
- リスクの説明 ; ”3週間の治療による被ばく量は一回のX線撮影による被ばく量とほぼ同等。体内の放射能は20分で1/2が排出、数時間後には痕跡さえなくなる”

*Radon ,the Healing Source Deep from the Earth  
(Motto) Radon is energy, Energy is life*

# 医療利用

- 主な放射能 (核医学):
  - テクネチウム-99m - 癌診断
  - ヨウ素-131 - 甲状腺治療
- 主な放射線源 (放射線治療):
  - コバルト-60、イリジウム-192、セシウム-137
- X線 診断
  - 総合内科
  - 歯科



✓ これら放射線源、核医学用放射性核種は原子炉や加速器で作る！

# テクネチウム-99m – 核医学診断



- 放射性医薬品 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ （癌診断薬）は $^{99}\text{Mo}$ （放射性核種）から作る
- テクネチウムの高錯体形成能を利用し、種々の診断薬が合成されている
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は短半減期（6時間）の $\gamma$ 核種で、壊変して $^{99}\text{Tc}$ （長寿命 $\beta$ 核種）になる
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は体内に摂取後、血流を介して移動し、腫瘍に集積する。大部分は速やかに排泄される
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ から放出される $\gamma$ 線を利用して血流の状態や腫瘍の位置、大きさを特定する
- 1964年から実用化されている
- $^{99}\text{Mo}$ は毎日空輸され、成田空港から各地の病院へ運ばれる（我国では製造されていない）

産経新聞より引用

**放射性薬剤を過剰投与**

甲府の病院 子供84人、基準20倍も

甲府市立甲府病院で平成11年から今年まで、腎臓病検査を受けた15歳以下の患者に日本核医学会の投与基準を上回る放射性物質「テクネチウム」を含む検査薬を静脈注射していたことが病院への取材で分かった。病院総務課によると、患者145人のうち84人に基準を超える量を投与。基準の約10倍を投与された患者が41人、20倍以上の患者もあり、必要量以上の被曝にさらされたことになる。

放射線の動きを撮影し病気の有無などを調べる1時間程度の検査。男性放射線技師が学会の成人の推奨投与量185mCiを20倍超える量で投与した。技師は「子供は動き回ることがあり、より短時間で鮮明な画像を得られるよう量を多くした」と説明した。院内で「投与量が多いのでは」と疑問の声が上がりが調査していた。技師は放射性医薬品の投与記録に実際より少ない使用量を記載。小沢克良院長は記者会見で不適正な管理を認め、技師の行為は「改竄に当たる」と述べた。

山梨県は8月31日に立ち入り検査。放射性医薬品記録簿の使用量、残量の記載が不正確として口頭では正を求め行政指導をした。

# $^{99m}\text{Tc}$ によるイメージング

前立腺癌疾患部の可視化  
( $^{99m}\text{Tc}$ 投与)

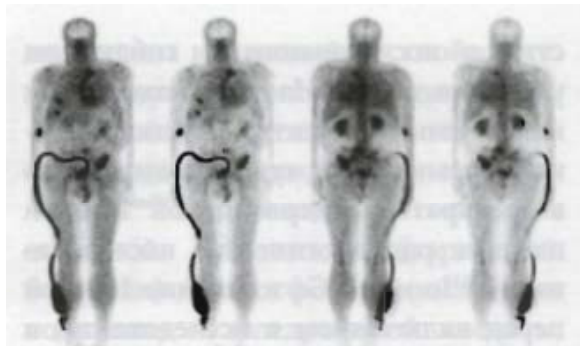


Рисунок 4. Визуализация очагов поражения скелета с Резосканом,  $^{99m}\text{Tc}$  у больного РПЖ на фоне лечения препаратом золедроновой кислоты в течение 2 месяцев

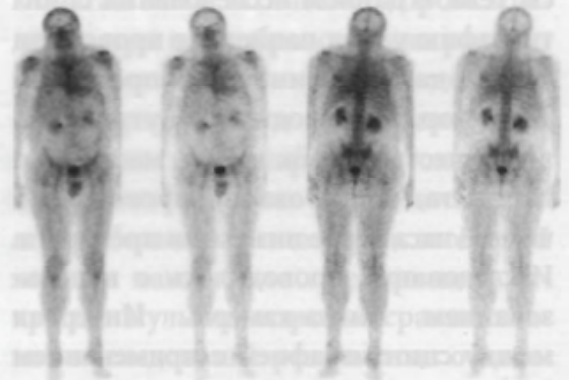


Рисунок 5. Прекращение накопления Резоскана,  $^{99m}\text{Tc}$  в очагах поражения скелета у того же больного РПЖ на фоне лечения доцетакселом и препаратом золедроновой кислоты в течение 8 месяцев

同患者 (前立腺癌) ( $^{99m}\text{Tc}$ 投与)

転移点の可視化  
( $^{99m}\text{Tc}$ 投与1時間後)

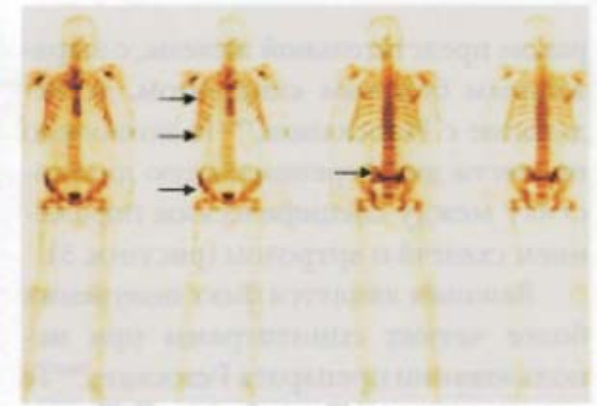


Рисунок 2. Визуализация метастатических очагов с препаратом Резоскан,  $^{99m}\text{Tc}$  через 1 час

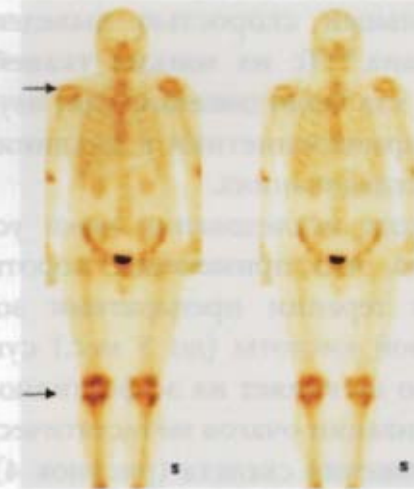


Рисунок 3. Типичная картина артроза, выявленная при сканировании с Резосканом,  $^{99m}\text{Tc}$  через 1 час

関節症の例  
( $^{99m}\text{Tc}$ 投与1時間後)

Новый радиофармацевтический препарат Резоскан,  $^{99m}\text{Tc}$  в диагностике патологических изменений скелета у больных раком предстательной железы より引用

# 核医学診断における内部被ばく ( $^{99m}\text{Tc}$ のケース)

$$E = I \cdot e$$

E : 内部被ばくによる実効線量 (mSv (ミリシーベルト) )

I : 吸入摂取した放射性同位元素 (Bq (ベクレル) )

e : 吸入摂取時の実効線量係数 ( $^{99m}\text{Tc}$  (テクネチウム99m) :  $2.0 \times 10^{-8} \text{mSv/Bq}$  (ミリシーベルトパーベクレル) )

成人の基準投与量 (日本核医学会 ; 産経新聞(2011.9.5 報道による) ) ;  
185メガベクレル ( $185 \times 10^6 \text{Bq}$ ) / 回

よって被ばく線量Eは、

$$E = 185 \times 10^6 \times 2.0 \times 10^{-8} \\ = 3.7 \text{ mSv}$$

今回、10~40倍投与したと  
すると推定被ばく量は  
37~148mSv

核医学検査による大人の平均放射線被曝[KI86]

検査	核種	適用放射能 [MBq]	吸収線量 [mGy]		
			生殖線	骨髄	検査または決定器官
甲状腺シンチグラフィ	$^{99m}\text{Tc}$	40	0.15	0.2	4 (甲状腺)
	$^{131}\text{I}$	2			1000 (甲状腺)
	$^{123}\text{I}$	8			40 (甲状腺)
腎シンチグラフィ	$^{99m}\text{Tc}$	200	0.3	0.5	5 (腎臓)
	$^{131}\text{I}$	20			18 (膀胱)
肝シンチグラフィ	$^{99m}\text{Tc}$	50	0.1	0.4	60 (膀胱)
					240 (甲状腺)
	$^{198}\text{Au}$	5			3 (脾臓)
					60 (肝臓)
20 (脾臓)					
肺シンチグラフィ	$^{99m}\text{Tc}$	80	0.1	3	4 (肺)
	$^{131}\text{I}$	10			20 (肺)
すい臓シンチグラフィ	$^{75}\text{Se}$	10	25	25	60 (肝臓)
					35 (すい臓)

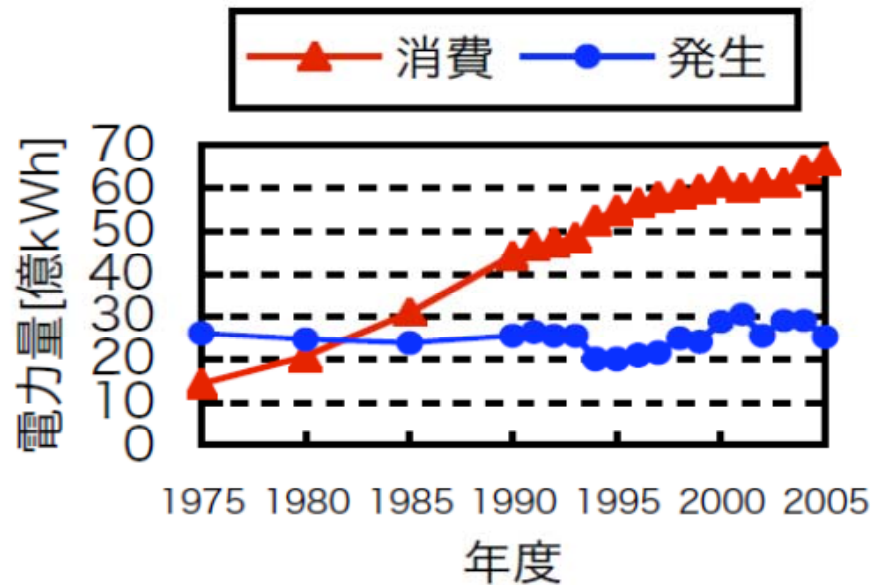
# プルトニウムは人類と共存できるか？

- 論点

- ✓ 天然 $\alpha$ 放射性核種との長い共存関係
- ✓ 人工 $\alpha$ 放射性核種の民生利用、社会受容性
- ✓ 大量Pu制御技術の工学的実績
- ✓ 同等の危険度の物質の社会受容性
- ✓ 地球環境汚染 CO<sub>2</sub>問題（原子カルネッサンス）
- ✓ エネルギー資源（<sup>235</sup>U、化石燃料）、資源地政学的視点
- ✓ 核テロ、兵器転用への懸念 ⇒ P<sup>3</sup>計画（東工大での研究）

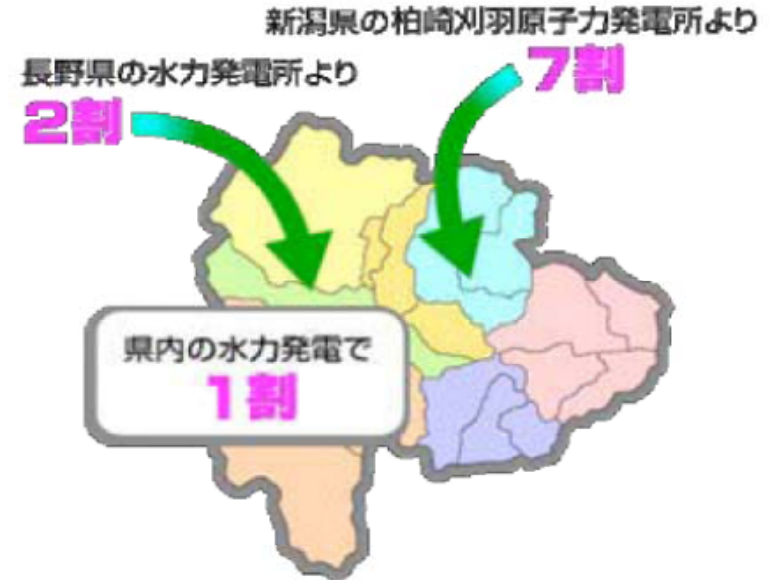


# 山梨県は日本の縮図



## 山梨県の電力需給の推移

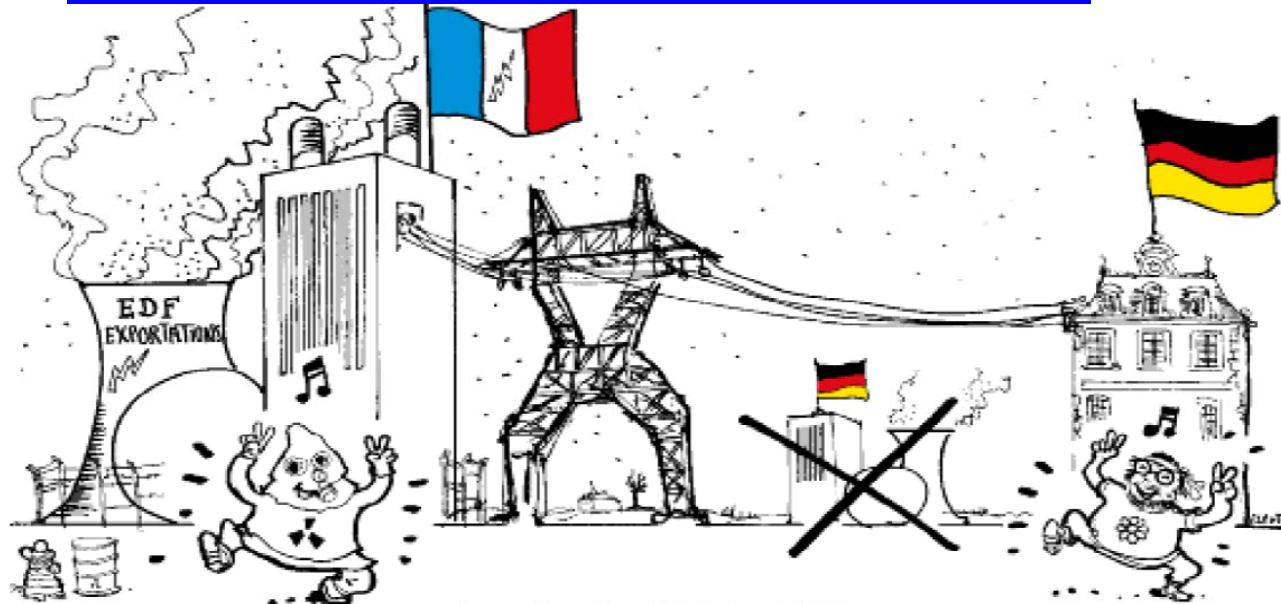
出典：やまなしの統計  
2005年度における山梨県の電力自給率は38%です。



## 電力ピーク時の電力供給

出典：東京電力山梨支店  
過去の最大電力は135万kW (原子力発電所1基分)です。

# フランスのエネルギー戦略



Le Monde, 15 juin 2000

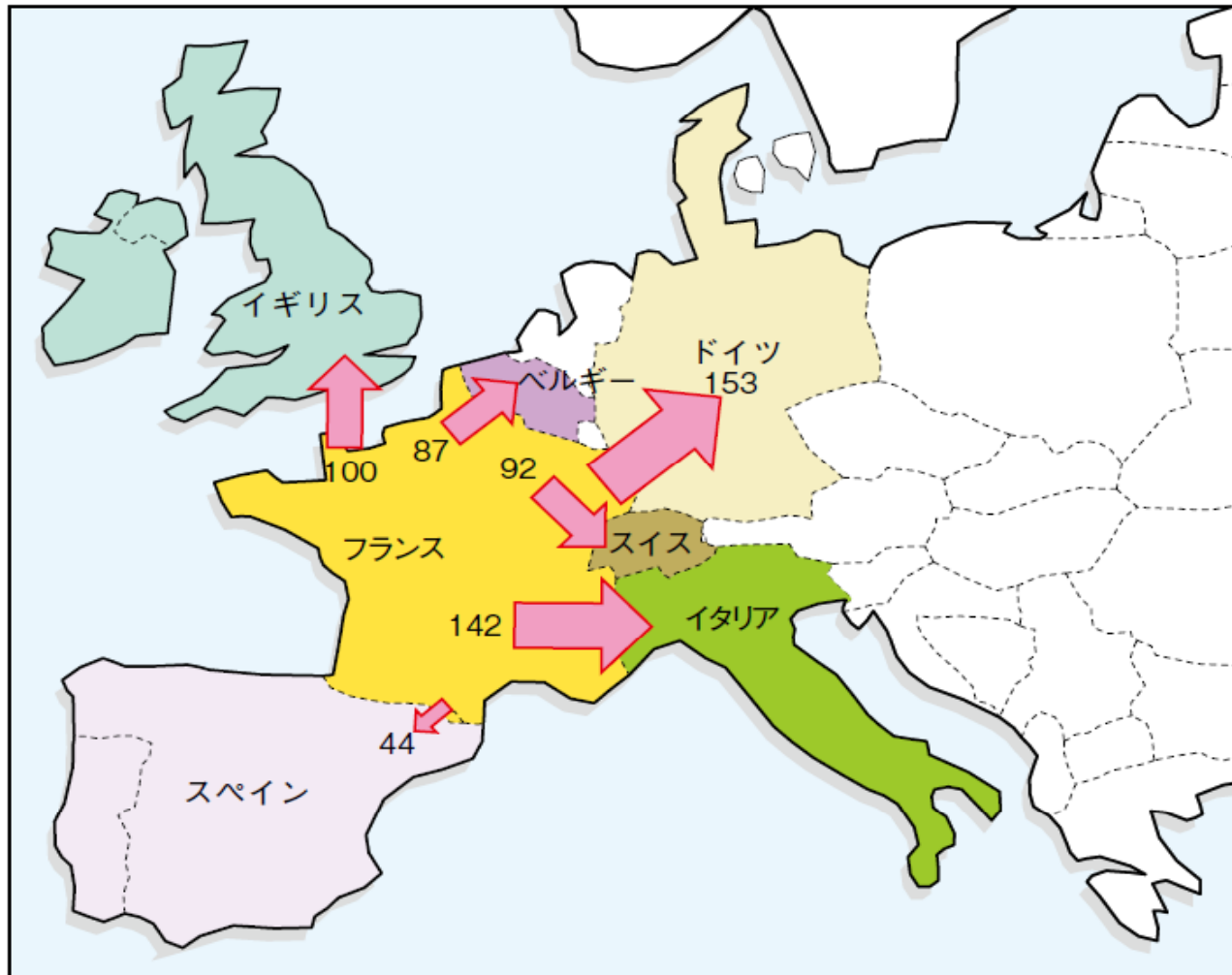
フランスのエネルギー（原子力）戦略（「フランスの何が優秀か」1980.11から）

- 1) エネルギーの他国依存がある限り、1国の独立はありえない（ドゴール大統領）
  - 2) エネルギーの自立なくして、国民生活の発展、福祉の向上はない（ナショナルセキュリティにおけるコンセンサス）
  - 3) 原子力プラントを国産化でき、核燃料サイクルを確立できる技術力
  - 4) “先進国は原子力、化石燃料は途上国”、の棲み分け論
  - 5) 原子力（科学）の優位性は他国に明け渡さない。手工業（マエストロ）の原理
  - 6) 反対派の理性に訴える説得方式
- ✓ 独創を重んずる。先見性。強い自立精神、不和雷同しない気質。エリート主導。他人（国）を信用しない（科学技術、エネルギー、防衛、食料自給、・・・）
  - ✓ フランスは一旦立てた計画は変えようとはしない。ドイツは途中ですぐ修正する

# フランスを中心とした電力の輸出入

(2006年)

単位：億kWh



フランスからの輸出電力量 (A)	618億kWh
フランスの発電電力量 (B) (送電端)	5,491億kWh
輸出比率 (A/B)	11%

(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。

出典：海外電気事業統計2008年版

# まとめ

## ■我々は常に自然放射線にさらされている。人体も放射能をもつ

- 年間平均2.4mSv。世界的にも1～10mSvの範囲。この範囲であれば。

## ■人類は放射線と共生し、広く恩恵も受けている

- 放射性医薬品、CT、PET検診、温泉 ⇔ “リスク”と“クスリ”  
メリット(癌の特定)とデメリット(被ばく)のバランス。

## ■放射線は恐れるものではないが、注意しなければならないものである

## ■原子力について

- エネルギーは、食料、防衛と並び国家の盛衰を担う。原子力は石油など他エネルギー源に対する安全保障。脱原子力(炉)は放射線・RI治療の放棄か？メリットとデメリットを冷徹に評価し、ロジカルに判断する
- 原子力は制御できる技術。もし危険と考えたなら原子力施設(核燃料再処理工場)の間近に30年間は住まなかったろう