ENEP Expert Program of Environmental Management and Prognosis of Nuclear Emergencies
原子力災害による環境・生態系影響リスクマネジメントプログラム

2. 環境中の放射性核種（2）原子力災害の歴史、環境への放出

CRiED アイソトープ環境動態研究センター

アイソトープ環境動態研究センター

（数理物質系）

末木啓介

1. 原子力について（核分裂現象、原子力発電所、核燃料再処理施設）
2. 兵器開発に伴う核実験と放射性物質の環境への影響
3. 原子力施設関連事故と放射性物質の環境への影響

1. 原子力について（核分裂現象、原子力発電所、核燃料再処理施設）

原子力の歴史

1938.12.核分裂の発見

（オットー・ハーン、フリッツ・シュトラスマン、
リーゼ・マイトナー、オットー・フリッシュ）

1939年核分裂における中性子の発生

（イレーヌとフレデリック・ジョリオ）

核兵器利用

1941.12.　マンタハッタン計画
1945.8.　広島・長崎
1954.3.1　ビキニ事件
～1962　大気圏内の核爆発実験

核拡散禁止条約
包括的核実験禁止条約

？

原子力の平和利用

1942.12.　人類最初の原子炉（エンリコ・フェルミ）
1951.12.　商業用原子炉
1956.　天然原子炉の存在を予言（黒田和夫）
1972.6　オクロ原子炉発見
1986.4　チェルノブイリ原子炉の事故

日本の電力の約30%を担っている

2011.3　東電福島第一原子力発電所事故

一旦は0%となっている

核分裂とは

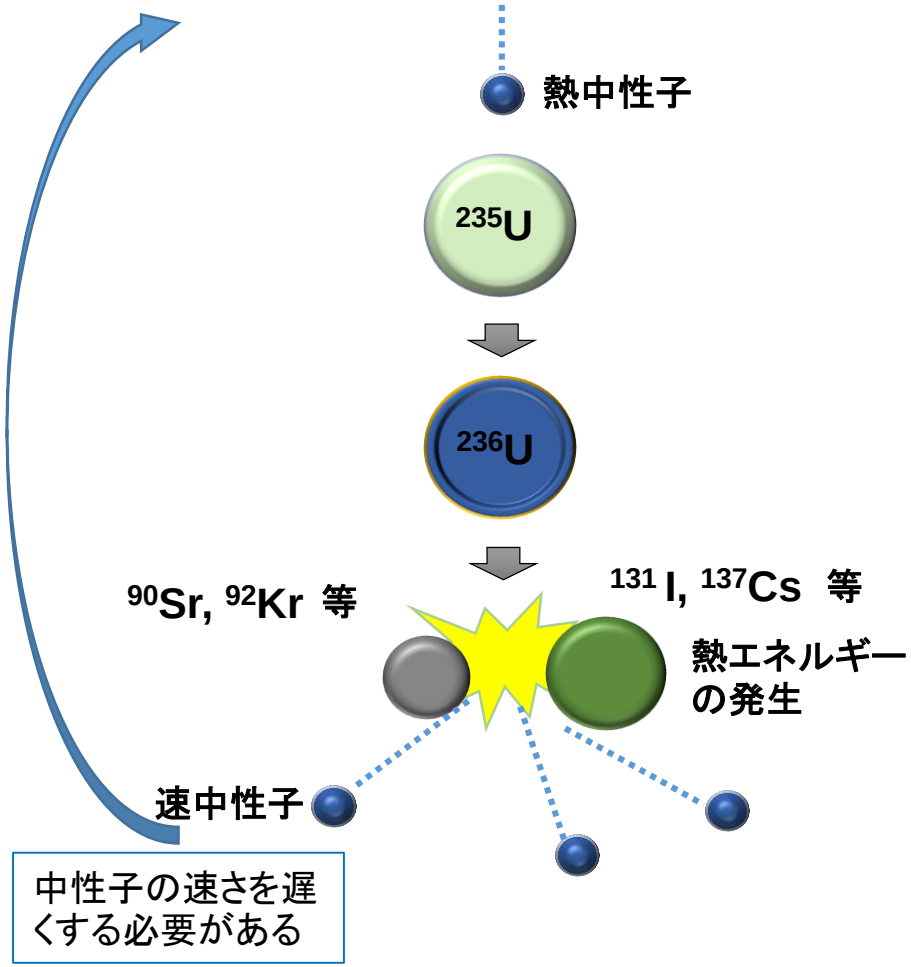
ウランやプルトニウムなどの原子核が、中性子を吸収することなどによってほぼ二つの原子核に分裂する現象

中性子の吸収による核分裂では、1核分裂あたり200MeV程度のエネルギーを放出する。このとき、2個または3個程度の中性子が発生する。

発生した中性子を次の核分裂で利用できるようにして、連鎖反応を継続させながら、放出されるエネルギーを利用する装置が原子炉である。

中性子を取り込んで核分裂を起こしやすい物質

ウラン235（天然に存在）
プルトニウム239（人工的に作る必要）
ウラン233（人工的に作る必要）



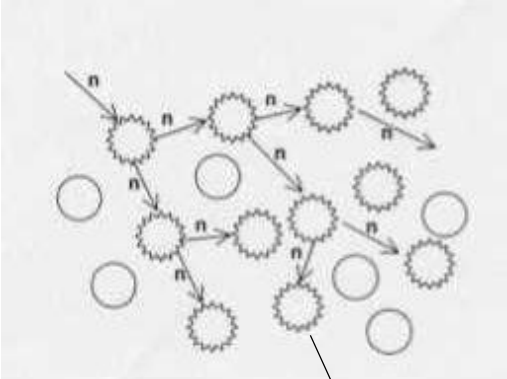
原子炉ができる条件

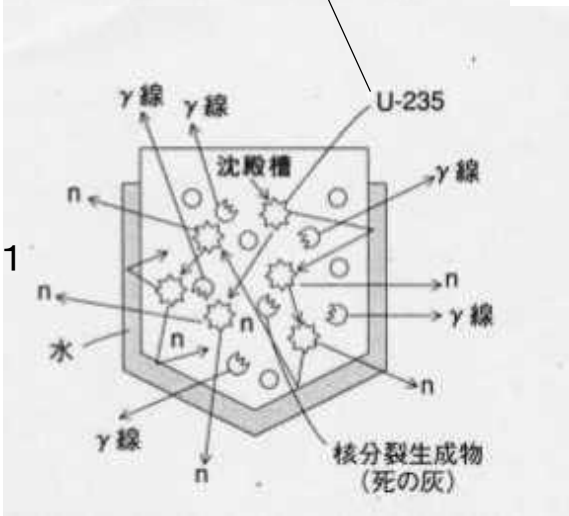
連鎖反応

倍増率kについて、

k = 第2世代の中性子の数 / 第1世代の中性子の数

基本的には、この値が1以上になると核連鎖反応は臨界に達した。





臨界への条件

無限倍増率（無限の広がりを持つ原子炉）k_∞は以下の式で表される、

$k_\infty = \eta\ \varepsilon\ p\ f$

η（$<\nu$）再生率（^{235}Uの核分裂に寄与する中性子）

ε　高速核分裂係数　（高速＋熱中性子核分裂）/熱中性子核分裂≒ 1

p　共鳴逃散確率　^{238}Uが中性子を吸収に使わない確率　≅　0.9

f　熱中性子利用率　熱中性子がウラン燃料に吸収される割合　0.9

実効倍増率k_{eff}

$k_{eff} = k_\infty P_r$

P_r　反射確率　原子炉は大きさが有限だからそこから中性子が出て行かない確率

$k_{eff} \geq 1$の時に核連鎖反応は臨界に達する。

20億年前に現在のガボン共和国オクロにおいて天然原子炉が生み出されていた。
アーカンソー大学の黒田和夫教授は1956年には天然原子炉の存在の可能性を指摘していた。

臨界した条件（具体例）

人類最初の原子炉（パイン、1942年12月2日）

^{235}U（0.72%）

36.6 tの酸化ウラン＋5.63 tの金属ウラン
＋3.96 mのCd棒13本＋350 t黒鉛ブロック

日本最初の原子炉（JRR-1、1957年8月27日 ）

^{235}U（20%）

26.3 Lの硫酸ウラニル（6.5 kg U)
＋まわりにグラファイト

JCOの事故（1999年9月30日）

^{235}U(18.8 %)

45 Lの硝酸ウラニル（16.6 kg U）
回りに冷却管(H_2O)

高速実験炉「常陽」用の燃料加工

表 8.3　日本国内で稼働している代表的な研究用原子炉

原子炉名	設置機関	所在地	熱出力 (MWt)	熱中性子束 a) (/cm²/s)	臨界	おもな目的 b)
JRR-3M c)	日本原子力研究所 d)	茨城県東海村	20	2×10^{14}	90.3	NAA, NRG, NS, IP
JRR-4	日本原子力研究所 d)	茨城県東海村	3.5	7×10^{13}	65.1 (98.7) e)	NAA, BNCT
JMTR	日本原子力研究所 d)	茨城県大洗町	50	5×10^{14}	68.3	MT, IP, NAA
KUR	京都大学原子炉実験所	大阪府熊取町	5	4×10^{13}	64.6	NAA, BNCT, NS, NRG

a) 利用可能な最大値.
b) NAA は中性子放射化分析，NRG は中性子ラジオグラフィー，NS は中性子散乱，IP は同位体製造，BNCT は中性子捕捉療法，MT は材料試験を表す.
c) JRR-3（1962 年 9 月臨界）が改造されたもの．M は "modified" を意味する.
d) 現 日本原子力研究開発機構.
e) 低濃縮（20%）後の臨界日（炉自身は改造されなかったので，炉の名称は変更されなかった）.

海老原充　著 「現代放射化学」 化学同人より

原子炉を構成する物質と変化

表 8.1　減速材，制御棒を構成する核種の核データ

核種	同位体存在度(%)	弾性散乱断面積(b)	捕獲断面積(mb)
減速材			
^{1}H	99.985	82	333
^{2}H	0.015	7.6	0.52
^{9}Be	100	7.6	7.6
^{12}C	98.90	5.6	3.5
^{13}C	1.10	4.8	1.4
^{16}O	99.76	4.2	0.19
^{18}O	0.20	4.3	0.16
制御棒 a)			
^{10}B	20		4017×10^{3}
^{113}Cd	12.22		20600×10^{3}
^{157}Gd	15.65		255000×10^{3}
^{177}Hf b)	18.606		307×10^{3}

a) 捕獲断面積は熱中性子に対する値.
b) ハフニウムは ^{177}Hf 以外の安定同位体でも ^{176}Hf（同位体存在度 5.26%）が 26b，^{178}Hf（27.28%）が 80b，^{179}Hf（13.62%）が 45b，^{180}Hf（35.08%）が 13b と，すべて 10b 以上の捕獲断面積をもつ.

表 8.4　加圧水型原子炉での核燃料物質の質量組成

構成核種	燃焼前(%)	燃焼後(%) a)
^{235}U	3.3	0.9
^{236}U		0.4
^{238}U	96.7	94.5
^{239}Pu		0.5
^{239}Pu 以外のプルトニウム同位体		0.4
ウラン，プルトニウム以外のアクチノイド		0.1
核分裂生成物		3.2

a) 燃焼度は 33000 MWd/t.

表 8.5　中性子吸収断面積の大きな核分裂生成物

核種	存在度 / 半減期	熱中性子吸収断面積(b)	核分裂収率(%) a)
^{135}Xe	9.10 時間	2600000	6.54
^{149}Sm	13.8%	40000	1.08
^{151}Sm	90 年	15200	0.419
^{157}Gd	15.65%	255000	0.0062

a) 熱中性子による ^{235}U の核分裂収率．対応する質量数の同重体に対する値.

表 8.2　核分裂性核種の核的性質

	^{233}U		^{235}U		^{239}Pu	
	熱中性子	速中性子	熱中性子	速中性子	熱中性子	速中性子
σ_f (b)	531	2.20	580	1.44	742	1.78
σ_c (b)	47	0.15	98	0.22	271	0.15
$\alpha=\sigma_c/\sigma_f$	0.089	0.068	0.169	0.15	0.366	0.084
ν	2.49	2.59	2.42	2.52	2.88	2.98
η	2.28	2.43	2.07	2.19	2.11	2.75

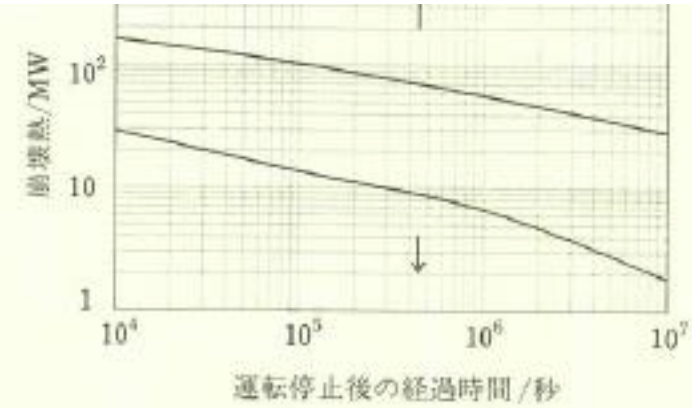
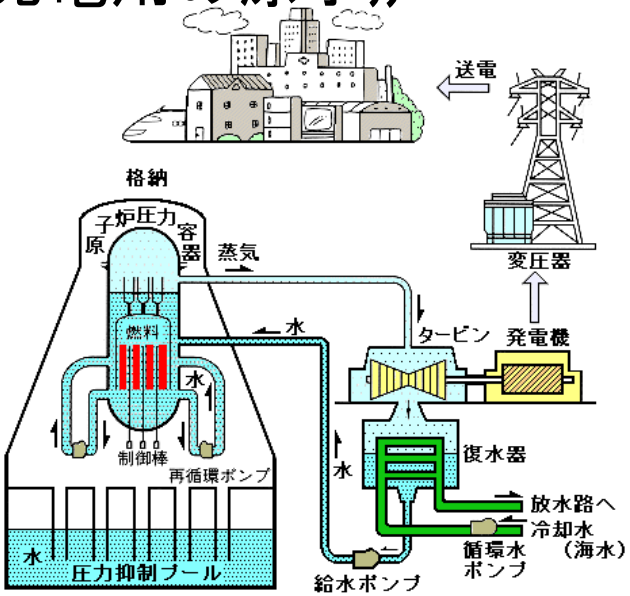


図 9.2　3 年間継続運転後の 1GW（熱出力 3GW）軽水炉の炉心からの崩壊熱

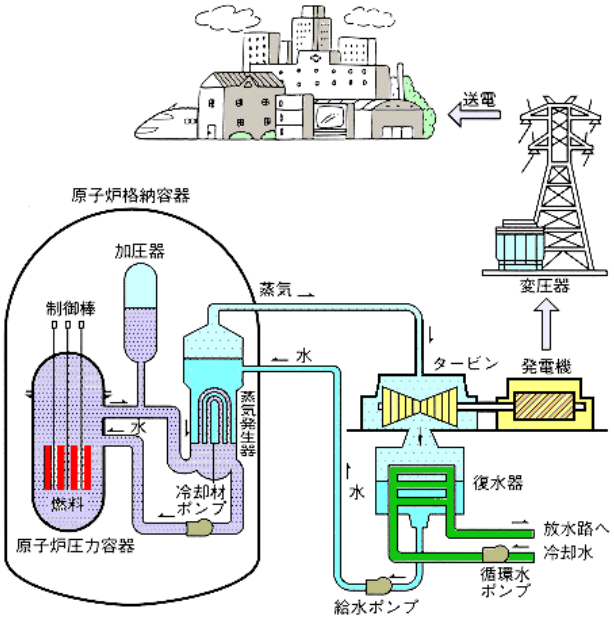
海老原充　著「現代放射化学」化学同人より

原子力発電用の原子炉



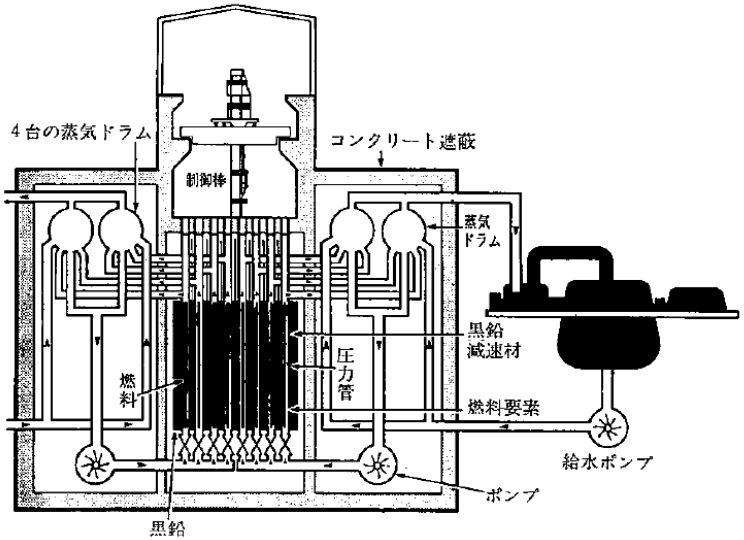
沸騰水型原子炉（BWR）原子力発電のしくみ

［出典］電気事業連合会（編）原子力図面集－1997年版－、p98



加圧水型原子炉（PWR）原子力発電のしくみ

［出典］電気事業連合会（編）原子力図面集－1997年版－、p99



PBMK沸騰水圧力管、黒鉛減速炉　　J. G. Collier et al., 中西重康　他　訳「原子力エネルギーの選択」コロナ社より

核分裂で何が生成する
必要なのは熱だけです

表　ウラン235・プルトニウム239の熱中性子による核分裂で生じる主な核分裂生成物

生成物	ウラン235の収率	プルトニウム239の収率	半減期
セシウム133	6.70%	7.02%	安定
ヨウ素135	6.28%	6.54%	6.57 h
ジルコニウム93	6.30%	3.80%	1.53 My
セシウム137	6.19%	6.61%	30.17 y
テクネチウム99	6.05%	N/A	211 ky
ストロンチウム89	4.73%	1.72%	50.53 d
ストロンチウム90	5.75%	2.10%	28.9 y
ヨウ素131	2.83%	3.86%	8.02 d
プロメチウム147	2.27%	N/A	2.62 y
サマリウム149	1.09%	1.22%	安定
ヨウ素129	0.543%	1.37%	15.7 My
キセノン133	6.70%	7.02%	5.2475 d

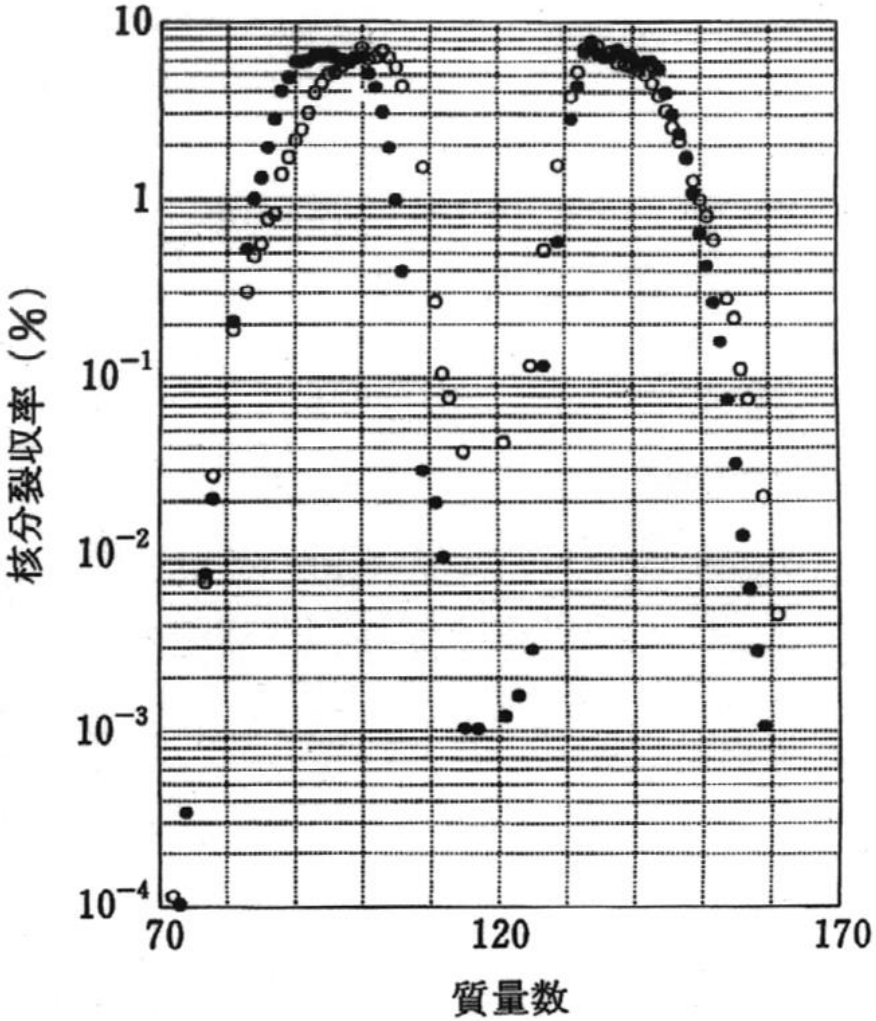


図　低エネルギー中性子による核分裂の質量分布
（●印は ^{235}U の熱中性子照射，○印は ^{239}Pu の熱中性子照射．E. A. C. Crouch, *At. Data Nucl. Data Tables*, **19**, 417 (1977) 中の数値を用いて作成）

原子力発電所を停止したときからの燃料中の放射能の時間変化（核分裂生成物）

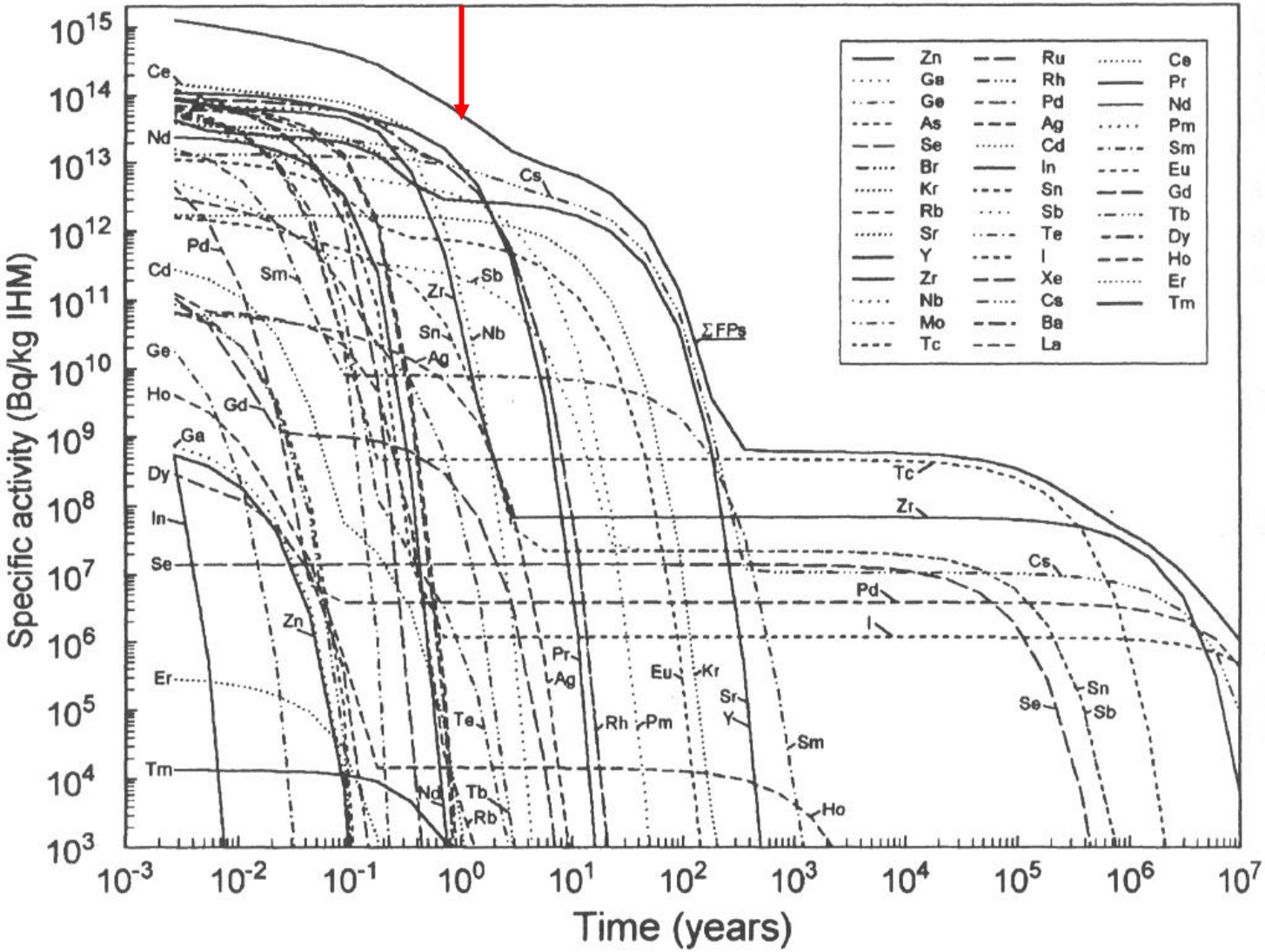


FIG. 21.7. Radioactivity of fission products per kg IHM in spent PWR fuel at 33 MWd/kg burnup. Inflexion points indicate the existence of several radioisotopes.

原子力発電所を停止したときからの燃料中の放射能の時間変化（アクチノイド元素）

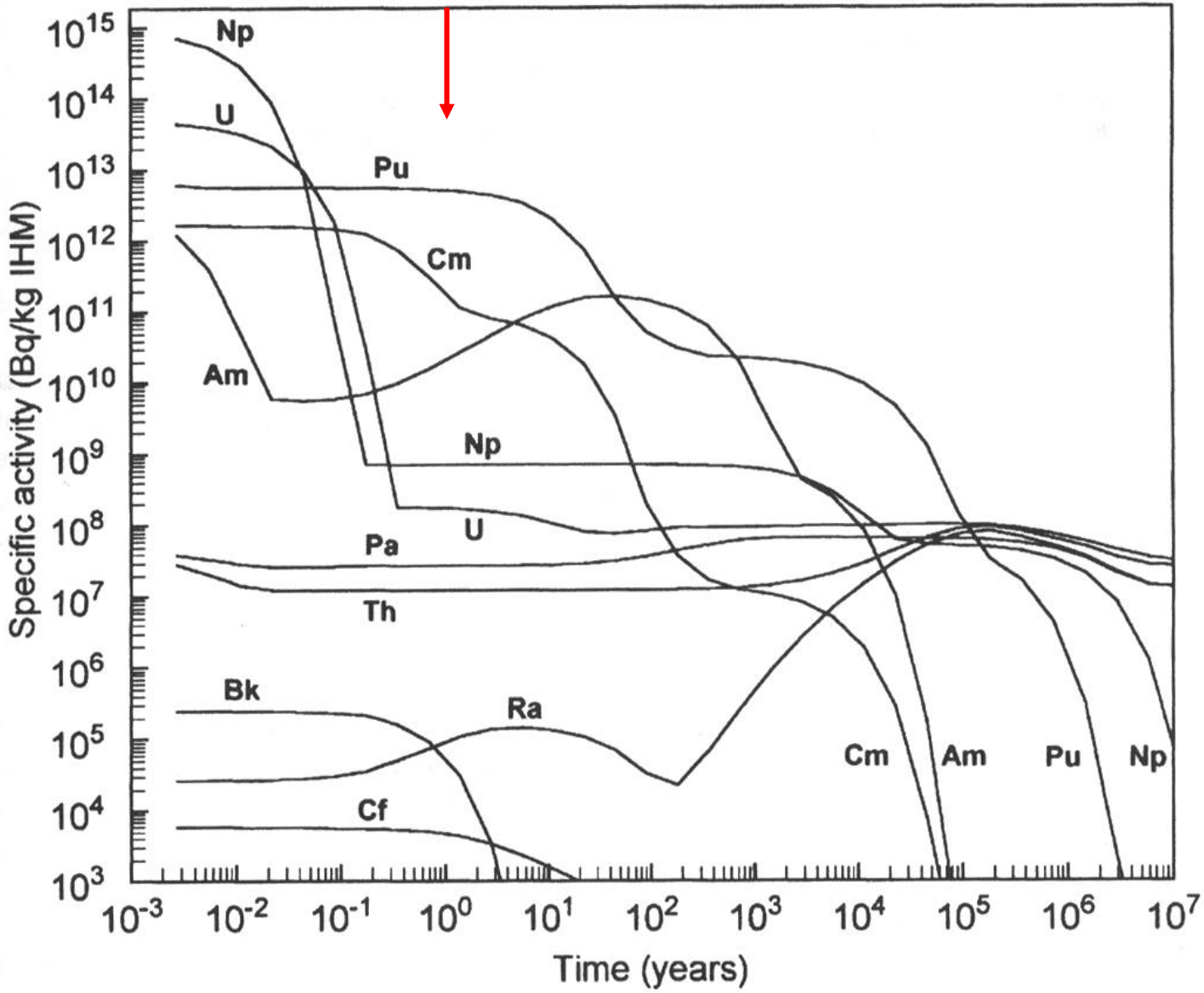
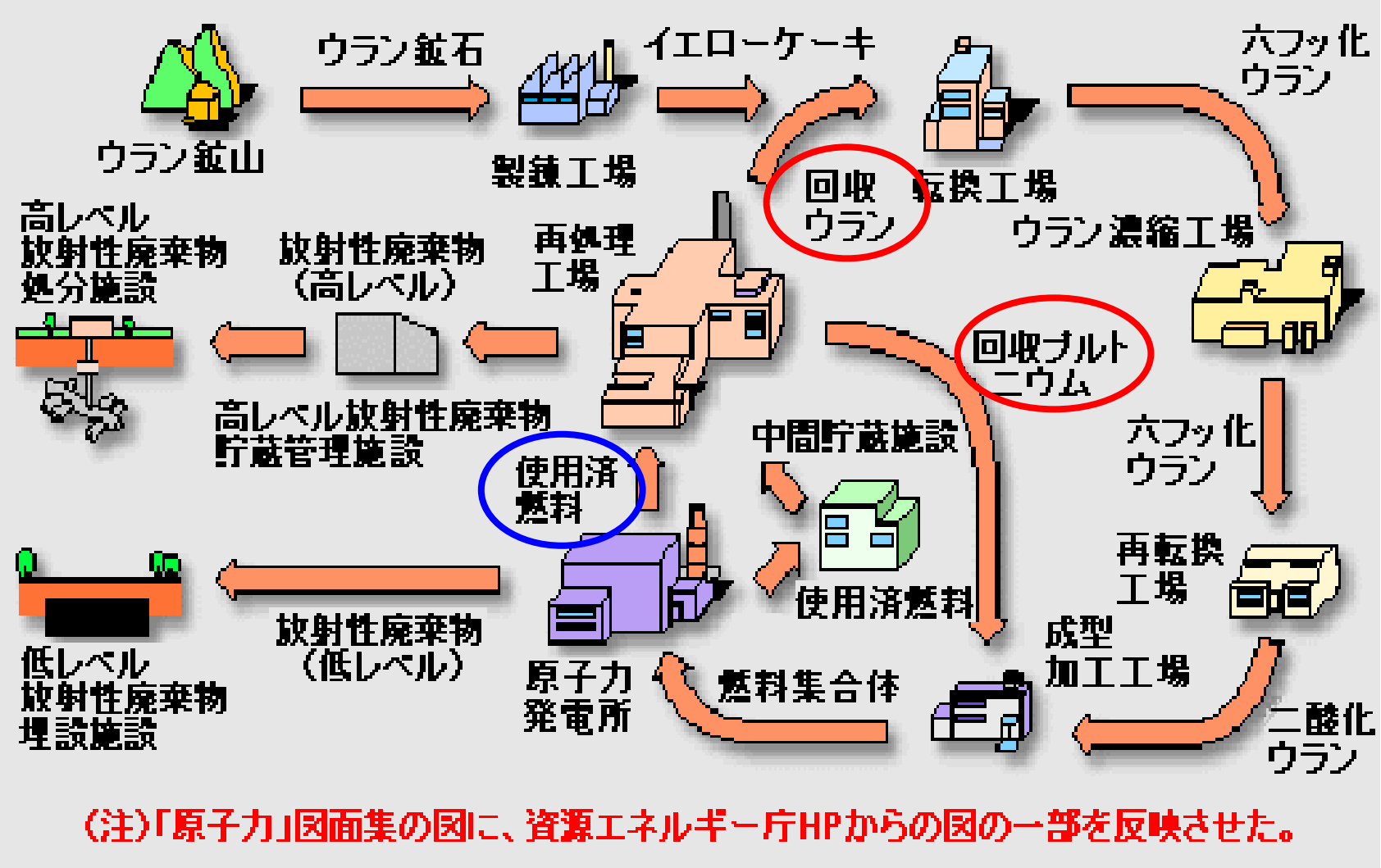


Fig. 21.8. Radioactivities of actinides and radium per kg IHM in spent PWR fuel after 33 MWd/kg burnup (see Tab. 21.2). Inflection points indicate the presense of several radioisotopes of the element.



（注）「原子力」図面集の図に、資源エネルギー庁HPからの図の一部を反映させた。

図1　核燃料リサイクル概念図

[出典]電気事業連合会:「原子力」図面集-2000年版-（2000年10月）、p.139
および資源エネルギー庁HP(http://www.enecho.go.jp/index02.html)

核燃料リサイクルへ

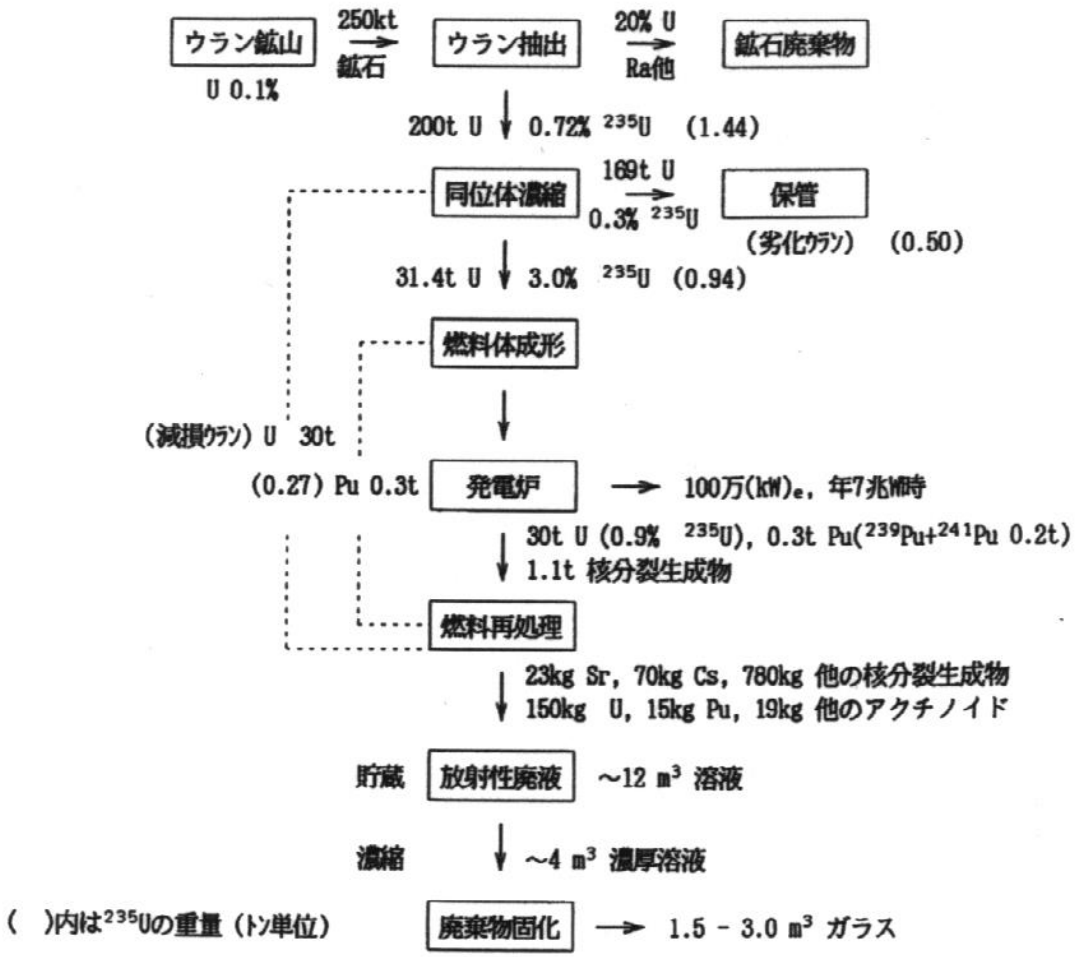


図　電気出力 1GW の軽水炉を 1 年間運転した際の物質の流れの概念図
(G. R. Choppin, J. Rydberg (1980) による)

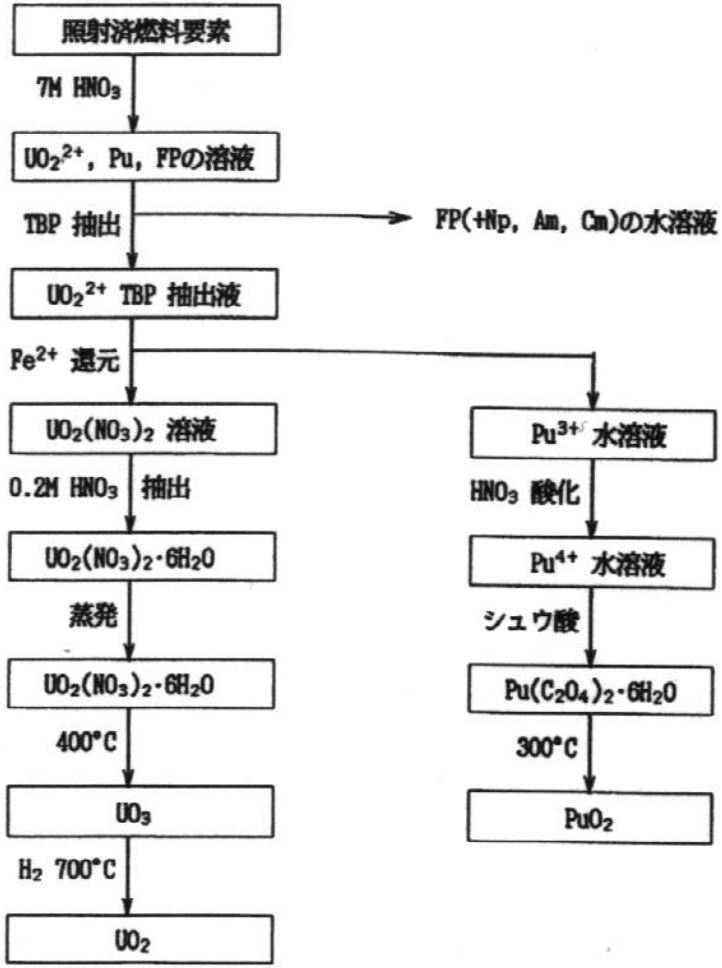


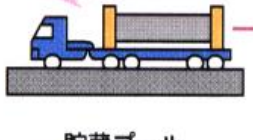
図　ピューレックス法による核燃料再処理
(N. N. Greenwood, A. Earnshaw (1984) による)

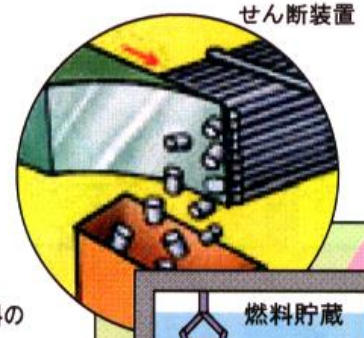
再処理の流れ（再処理工場）

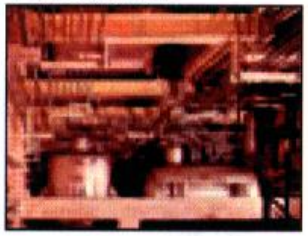
使用済燃料の受け入れ…原子炉で燃やした燃料は、がんじょうな容器（キャスク）に入れて再処理施設に運ばれてきます。
燃料貯蔵…使用済燃料を、プールの中でキャスクから取り出します。取り出した使用済燃料の熱をさまし、放射能が弱まるのを待つため、貯蔵プールにつけておきます。
せん断…貯蔵プールから取り出した使用済燃料を、集合体のまません断装置で5cmほどの長さに切りきざみます。
溶解…切った使用済燃料を、溶解槽の中で硝酸によって溶かします。
分離…溶かした使用済燃料を、ミキサセトラ（溶かした液と溶媒をかき混ぜ、再び分ける装置）でウラン・プルトニウムの溶液と核分裂生成物の溶液に分けます。
さらに、ウラン・プルトニウムを別々の溶液に分けます。
ウラン・プルトニウムの精製…ウラン溶液、プルトニウム溶液に含まれている不純物を取り除きます。

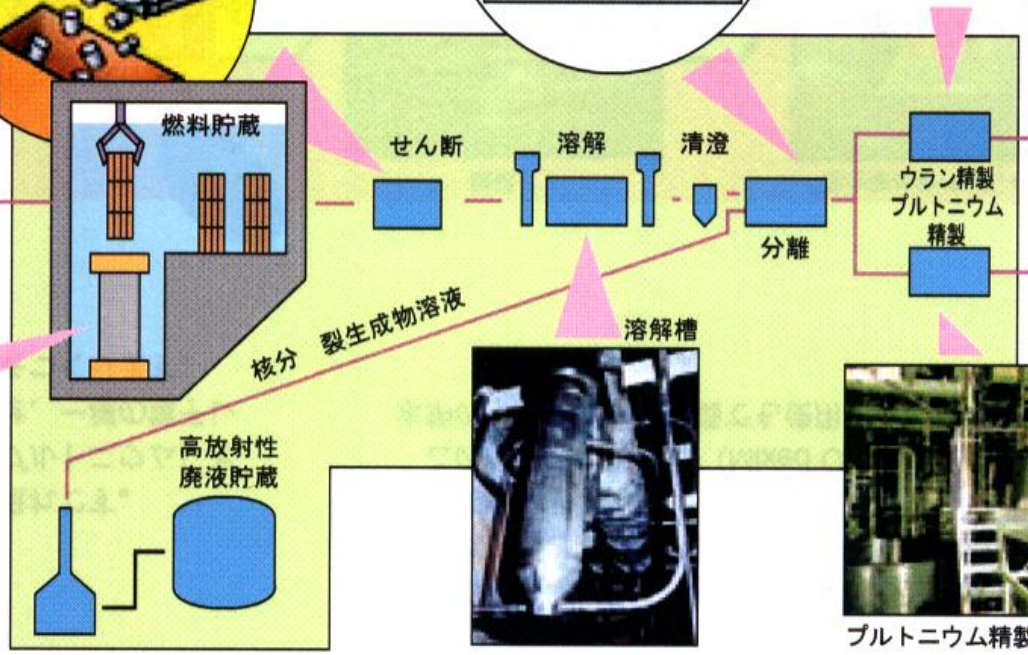
様々な操作で外界への放出の危険性がある

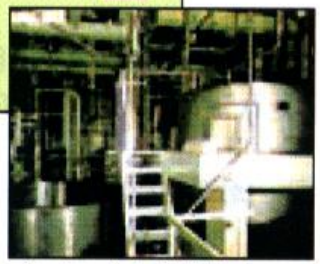
● 再処理の作業（軽水炉燃料）



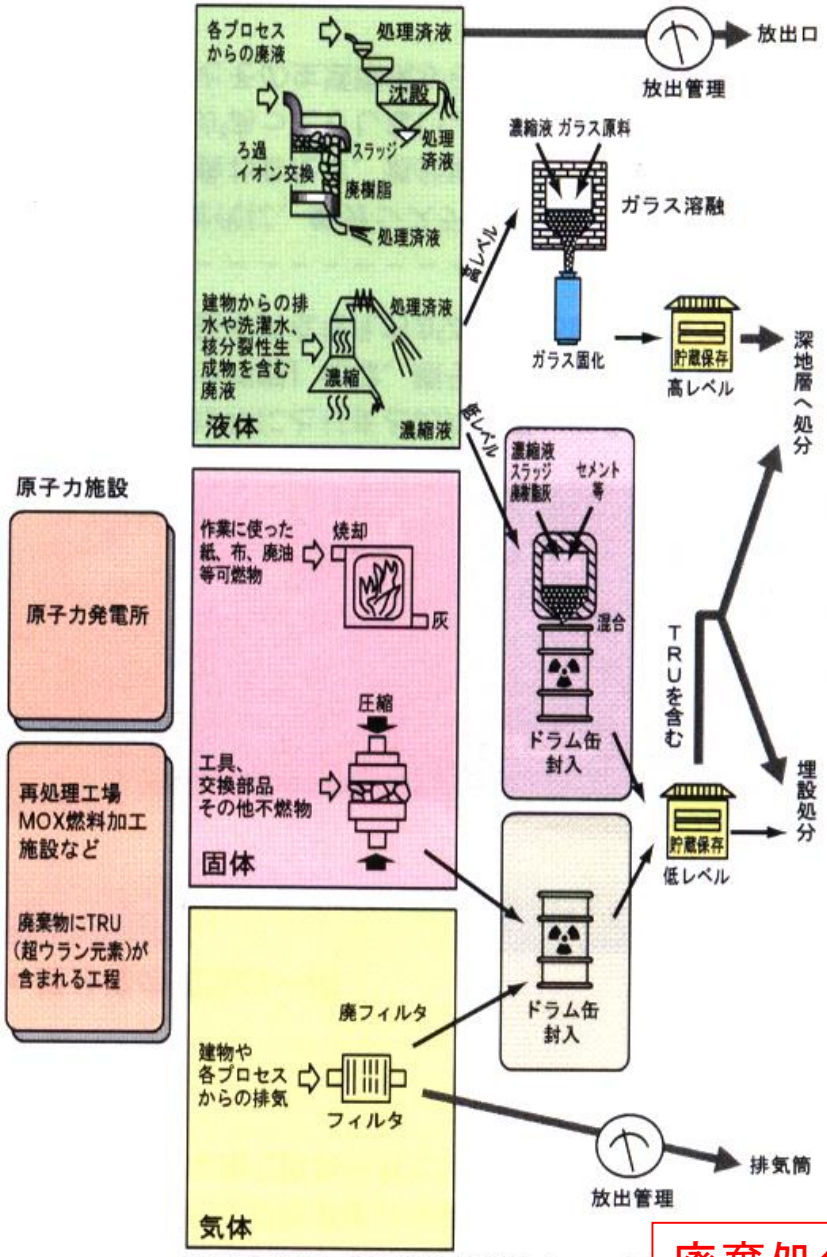








放射性廃棄物の処理の流れ



放射性廃棄物は、発生箇所や発生状況によって、含む
の種類や量、気体、液体、固体といった形態は様々です。

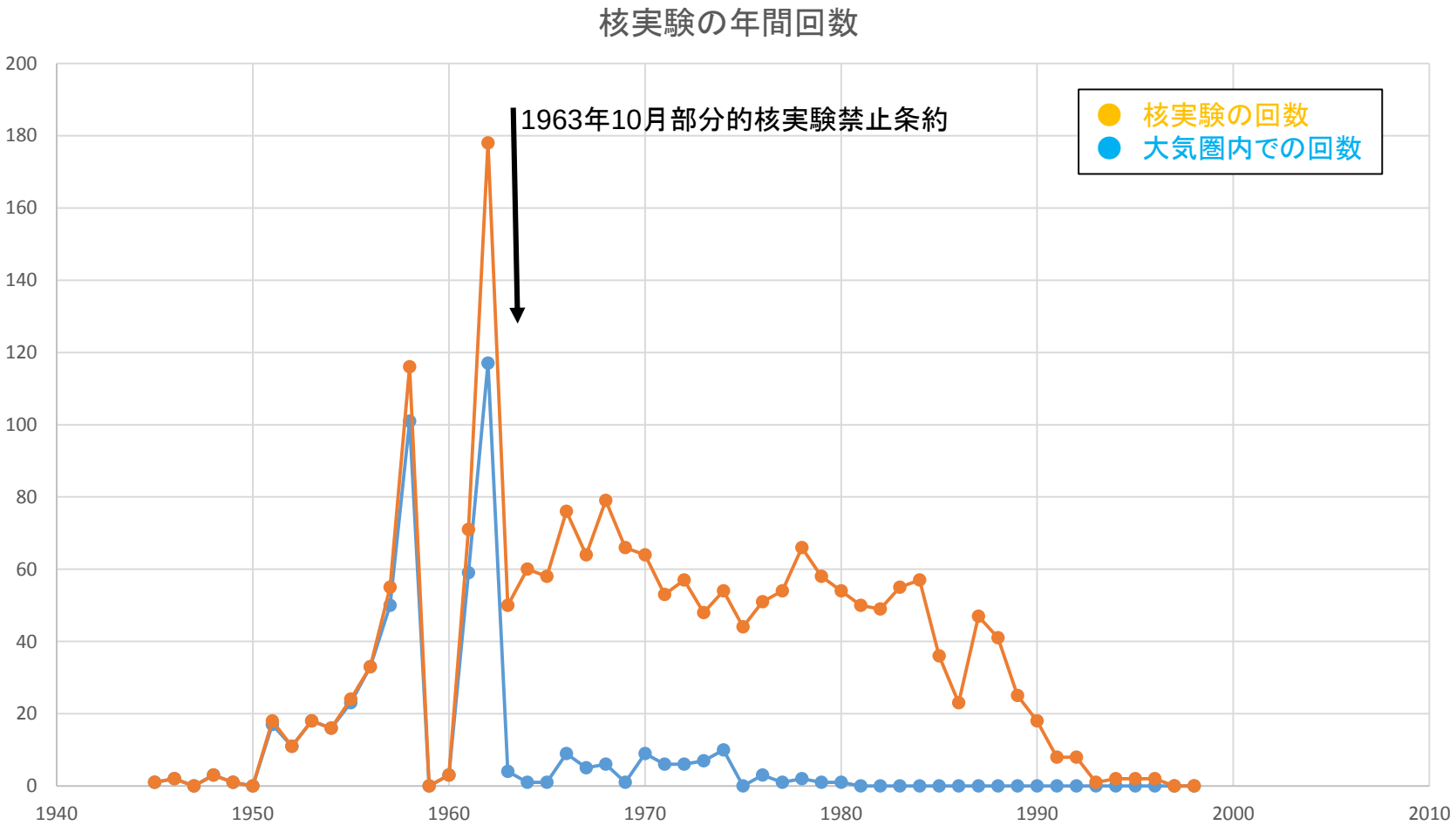
国内では、サイクル機構の東海事業所にあるガラス固化技術開発施設（TVF）が平成７年12月からガラス固化の開発運転に移行しました。ガラス固化された「高レベル放射性廃棄物」は、30～50年間地上の施設で貯蔵した後、地下の深い地層の中に処分すること（「地層処分」）が決まっています。処分場の建設・操業の計画は、2030年代から遅くとも2040年代半ばまでの操業を目途としています。

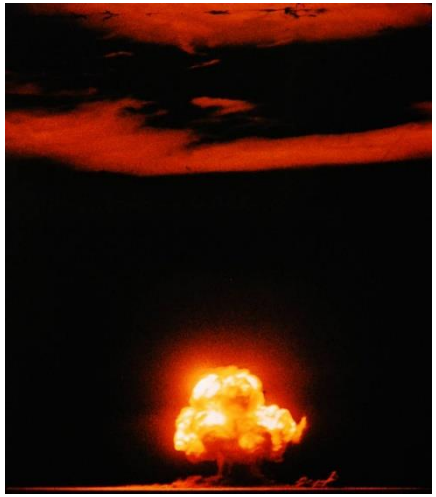
● 地層処分の概念

※「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が平成12年６月に公布され、同年10月には「原子力発電環境整備機構（原環機構）」が、処分事業の実施主体として認可、設立さ
施設の設置可能性を調査する区域」の公募を開始しました。

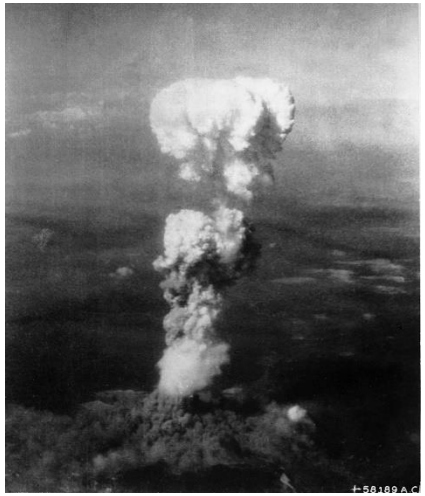
廃棄処分された放射性物質は安全に保管されるのか？

2.　兵器開発に伴う核実験と放射性物質の環境への影響

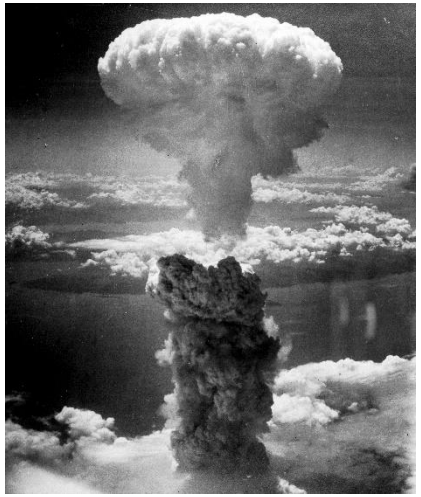




1945年7月ニューメキシコ
人類最初の核実験



1945年8月広島
世界初の実戦使用



1945年8月長崎
20世紀最後の実戦使用

1953年に行われたW9の発射実験。M65 280mmカノン砲を使用した。核出力は広島に投下されたのと同じ15kt。

1954年3月キャッスル作戦・ブラボー実験のキノコ雲

日本のマグロ漁船・第五福竜丸をはじめ約1,000隻以上の漁船が死の灰を浴びて被曝した。日本人船長らは犠牲となった。また、ビキニ環礁から約240km離れたロンゲラップ環礁にも死の灰が降り積もり、島民64人が被曝して避難することになった。

表２　　核実験により生成される放射性核種の種類

（Ｍｔ：ＴＮＴ換算メガトン）

放射性核種（半減期）	収率（%）	単位核爆発量あたりの生成量（ＰＢｑ／Ｍｔ）
^{89}Sr　(50.5 d)	2.56	590
^{90}Sr　(28.6 y)	3.50	3.9
^{95}Zr　(64.0 d)	5.07	920
^{103}Ru　(39.4 d)	5.20	1500
^{106}Ru　(368 d)	2.44	78
^{131}I　(8.04 d)	2.90	4200
^{136}Cs　(13.2 d)	0.036	32
^{137}Cs　(30.2 y)	5.57	5.9
^{140}Ba　(12.8 d)	5.18	4700
^{141}Ce　(32.5 d)	4.58	1600
^{144}Ce　(284 d)	4.69	190

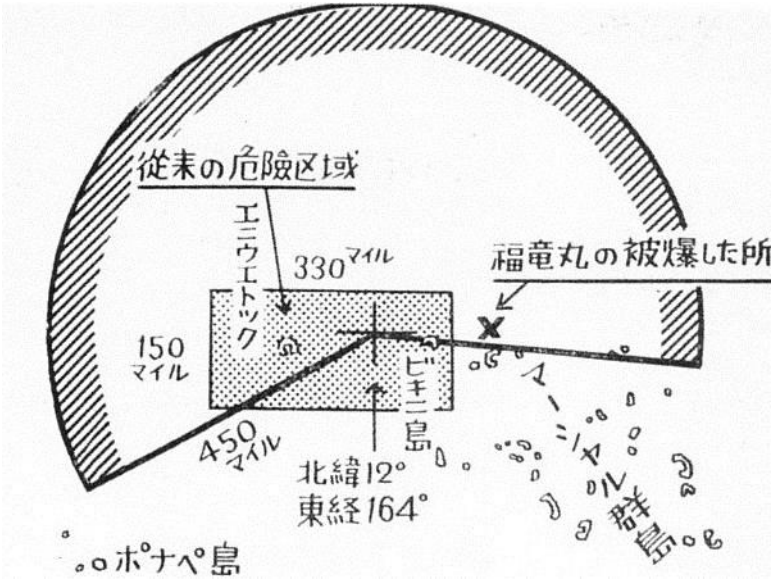
（Ｐ：10^{15}）

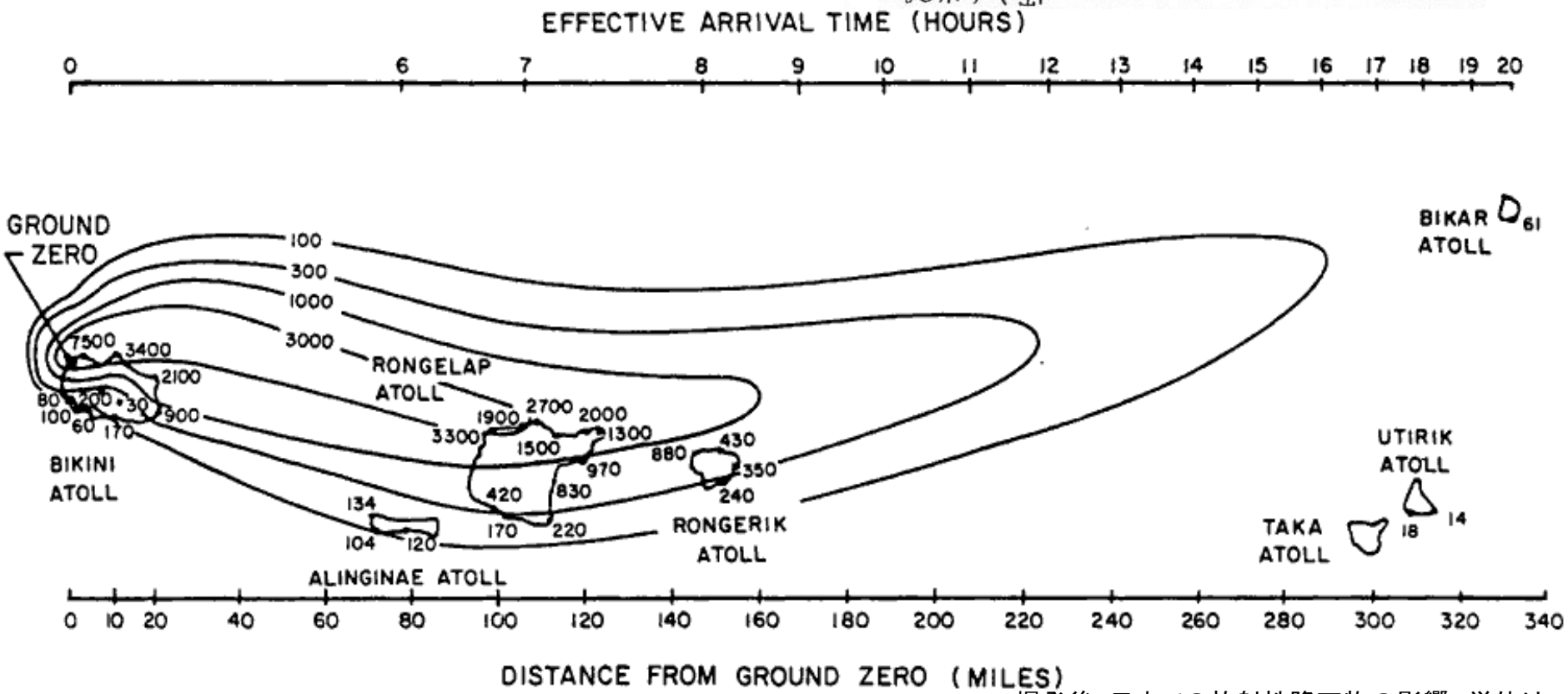
［出典］佐伯 誠道（編）：環境放射能，ソフトサイエンス社，（1984）

1945広島原爆　15kt、1945長崎原爆　21kt、
1954キャッスル作戦ブラボー　15Mt、1961ツァーリ・ボンバ　50Mt

米国キャッスル作戦ブラボー実験

1954年3月1日、第5福竜丸をはじめとする数百隻以上の漁船が被曝した。船上の灰の分析結果は3月1日時点で51.8GBq/gの濃度を持っていた。乗組員23名の2週間で受けた、外部被ばく線量は少ない人で1.7－2.2Gy、多い人で6.6－6.9Gyと評価された。ロンゲラップ環礁などにも放射性物質が降灰し、住民64人全員が1.75Gyの放射線により被曝した。





爆発後2日までの放射性降下物の影響、単位はR

グローバルフォールアウト (^{90}Sr, ^{137}Cs)

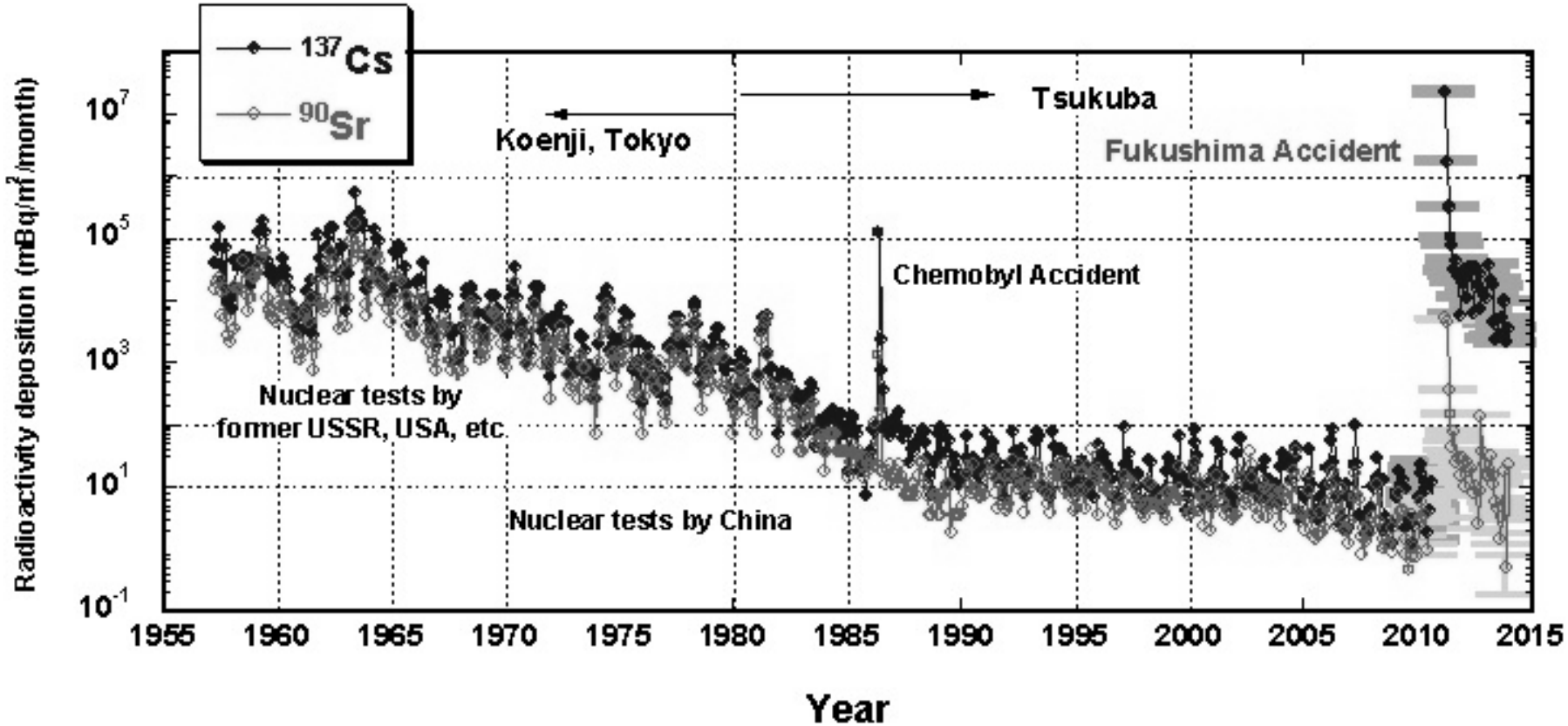


図1 Temporal variation in the monthly ^{90}Sr and ^{137}Cs depositions observed at MRI since 1957

1980年 ^{90}Srの世界全体で390 PBq (10^{15})
^{137}Csはその10倍程度

気象研究所の2013年「環境における人工放射能の研究」より

グローバルフォールアウト (^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl)

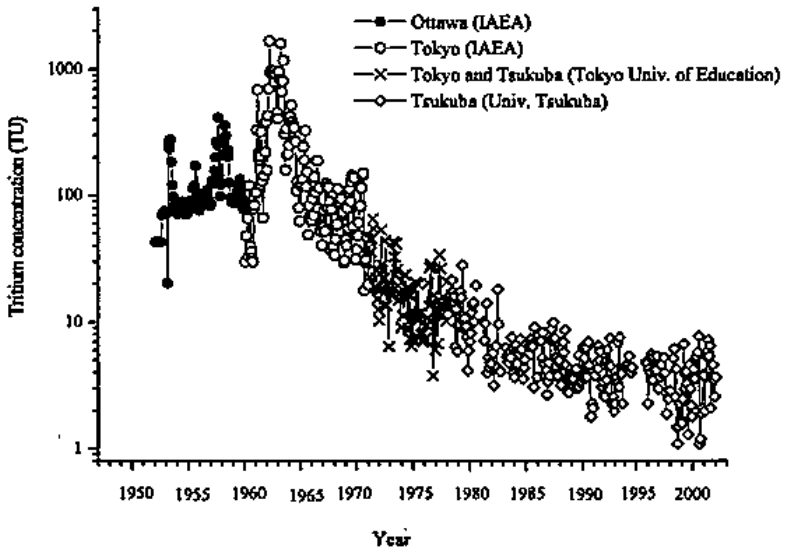


Fig.1 Secular variation of tritium concentration in precipitation at Tokyo (1961-1971), Tokyo and Tsukuba (1972-1978) and Tsukuba (1979-2002), and estimated value using liner regression function from Ottawa precipitation (1953-1960)

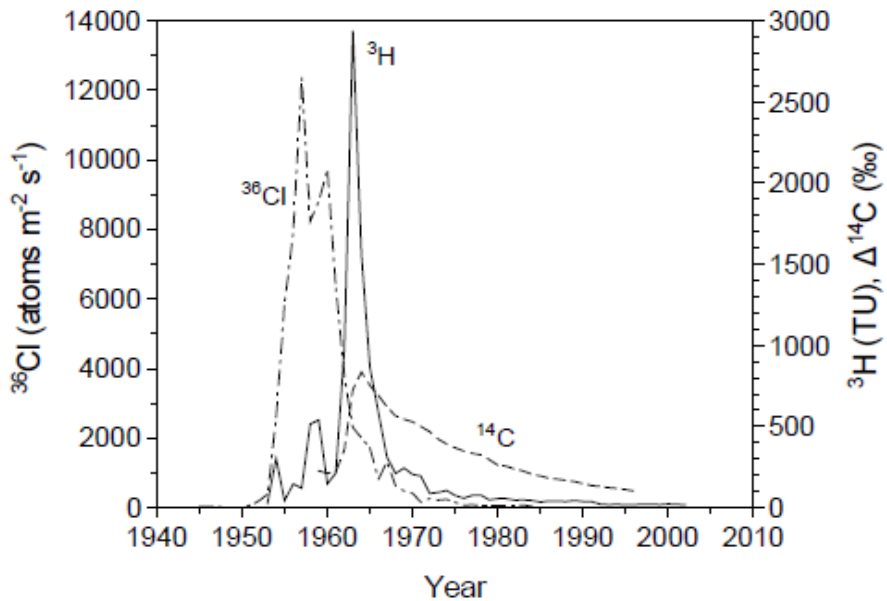


Figure 1. Atmospheric concentrations or fallout rates of bomb-derived environmental tracers (after [27]): ^{36}Cl fallout rates at the Dye-3 site, Greenland [11]; ^{3}H concentration in precipitation at Ottawa, Canada [28]; and atmospheric $\delta^{14}C$ record at Vermunt, Austria (1959–1983); and Schauinsland, Germany (1984–1996) [29].

トリチウム濃度(Tu)は水素原子10^{18}個中にトリチウム原子1個が含まれるとき

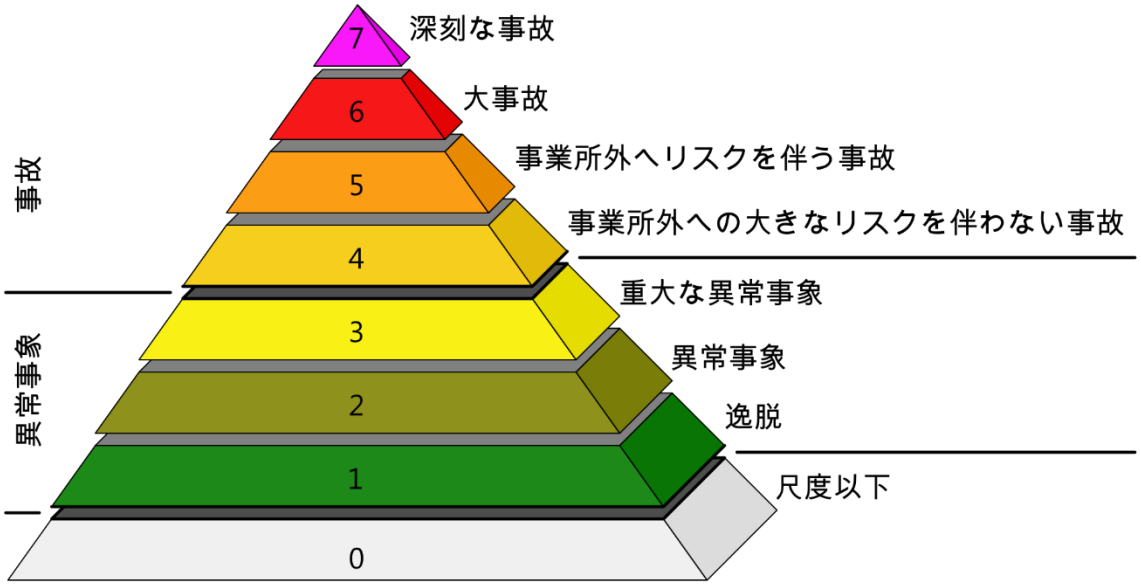
1 Tu = 0.118 Bq/L

核分裂生成物ではなく、周辺の環境に存在する原子との核反応で生成する。

薮崎　ら、筑波大学陸域環境研究センター報告 N0.4 119-124 (2003) より

３．原子力施設関連事故と放射性物質の環境への影響

原子力発電所などで事故が発生した場合には、国際原子力事象評価尺度 (INES) による影響度の指標が「レベル0」から「レベル7」までの8段階の数値で公表される。日本の原子力事業者はINESレベル4以上に限って「事故」と呼んでいる。



３．原子力施設関連事故（INESレベル4以上）

1940年代

- 1945年8月21日　デーモン・コア事故（アメリカ合衆国ニューメキシコ州ロスアラモス）
- 1946年5月21日　デーモン・コア事故（アメリカ合衆国ニューメキシコ州ロスアラモス）

1950年代

- 1952年12月12日 チョーク・リバー研究所、原子炉爆発事故（カナダ、オンタリオ州）/INESレベル5
- 1958年5月24日 チョーク・リバー研究所、燃料損傷（カナダ、オンタリオ州）/INESレベル?
- 1957年9月29日　ウラル核惨事（ソ連、現ロシア）/INESレベル6
- 1957年10月7日　ウィンズケール原子炉火災事故（イギリス）/INESレベル5 - ウィンズケール施設は現在のセラフィールド施設
- 1958年10月25日 臨界暴走、人員の被ばく（ユーゴスラビア（現セルビア）、ヴィニツァ）/INESレベル?
- 1959年7月26日 サンタスザーナ野外実験所、部分的炉心溶融（アメリカ合衆国カリフォルニア州）/INESレベル?

1960年代

- 1960年4月3日 ウェスチングハウス社実験炉、炉心溶融（アメリカ合衆国ペンシルベニア州）/INESレベル?
- 1961年1月3日　SL-1爆発事故/INESレベル4
- 1964年7月24日 燃料施設での臨界事故（アメリカ合衆国ロードアイランド州ウッドリバージャンクション/INESレベル?
- 1966年10月5日　エンリコ・フェルミ炉炉心溶融（アメリカ合衆国ミシガン州）/INESレベル?
- 1966-1967年冬（日付不詳）ソ連初の原子力砕氷船レーニン（原子力砕氷艦）、冷却材喪失事故（場所不詳）/INESレベル?
- 1967年5月 チャペルクロス原子力発電所、部分的炉心溶融（スコットランド）/INESレベル?
- 1969年1月21日 実験炉の爆発事故（スイス、ヴォー州）/INESレベル?

1970年代

- 1970年12月、デュポン社サバンナリバー核兵器工場のC炉の炉心融解の事故（米国、サウスカロライナ州/ INESレベル？
- 1977年2月22日 ボフニチェ発電所 (en:Bohunice Nuclear Power Plant)A1炉の燃料溶融事故（チェコスロバキア、現スロバキア）/INESレベル4
- 1979年3月28日　スリーマイル島原子力発電所事故（アメリカ合衆国ペンシルベニア州）/INESレベル5

1980年代

- 1980年3月13日 サン＝ローラン＝デ＝ゾー原子力発電所２号機の燃料溶融、放射性物質漏洩事故（フランス、オルレアン）/INESレベル4
- 1983年9月23日 臨界事故（アルゼンチン、ブエノスアイレス）/INESレベル4
- 1986年4月26日　チェルノブイリ原子力発電所事故（ウクライナ）/INESレベル7
- 1986年5月4日 en:THTR-300燃料損傷事故、（西ドイツ、現ドイツHamm-Uentrop)/INESレベル?
- 1987年9月　ゴイアニア被曝事故（ブラジル）/INESレベル5

1990年代

- 1993年4月6日 セヴェルスク(トムスク-7)、爆発事故（ロシア連邦トムスク州）/INESレベル4
- 1999年9月30日　東海村JCO臨界事故/INESレベル4

2000年代

- 2005年11月 ブレイドウッド原子力施設（en:Braidwood Nuclear Generating Station）での放射性物質漏洩（アメリカ合衆国イリノイ州）/INESレベル?
- 2006年3月11日 フルーリュス放射性物質研究所ガス漏れ事故（ベルギー）/INESレベル4

2010年代

- 2011年3月11日　福島第一原子力発電所事故/INESレベル7

再処理施設における火災・爆発事故

再処理施設は、多量の可燃物、爆発物を取り扱う施設ではないが、有機溶媒、有機希釈剤、リン酸トリブチル（TBP）の硝酸錯体/硝酸ウラニル錯体、水素ガス、ジルコニウム粉末等が火災・爆発の可能性のあるものが多く、実際に起こっている。

- ウインズケール再処理工場
  1973年9月26日　酸化物燃料前処理施設のセル内の発火で発生した放射性エアロゾルが操作室側まで流出して運転員らが被ばくした。10 Sv 1名、1.4−0.3 Sv 10名

- サバンナバレー再処理工場
  1953年1月12日　硝酸ウラニル溶液の蒸発濃縮中に蒸発缶が爆発。運転員が負傷
  1975年2月12日　薬品の混合ミスから可燃性ガスが発生し、引火して爆発した。運転員2名が軽傷

- トムスク再処理工場
  1993年4月6日　抽出工程の調整タンクが破裂さらに爆発した。敷地外へ放射性物質が放出された。Pu 3.7×10^{10} Bq、β γ放出核種 1.5×10^{12} Bq

- キシュテム再処理工場　→　ウラル核惨事

- ハンフォードプルトニウム回収施設
  1997年5月14日　試薬の貯槽で爆発。試薬の長期間の貯留による濃縮が原因。

- ラアーグ再処理工場
  1980年4月15日　電気系統による火災発生

- ユーロビチウムプラント
  1981年12月15日　中レベルの放射性廃液をアスファルト固化する際に自然発火。環境へ放出された放射能はβ・γで 2.85×10^{6} Bqと推定された。

- 東海再処理工場
  1997年3月11日　アスファルト固化施設で火災発生。37名が0.4-1.6 mSv被ばく。環境への放射性物質の放出は、セシウム137の放出量として1～4 GBqの範囲と評価された。

チョーク・リバー研究所 （カナダ、オンタリオ州）

1952年12月12日 原子炉爆発事故　INESレベル5

NRX炉で装置のプログラムと人為的ミスから、燃料棒が過加熱により融解した。原子炉と建物は水素爆発により大きな損傷を受け、原子炉容器が壊された。4500tの放射能汚染水が流れでて、370 TBqの放射性物質がオタワ川に放出された。

NRX and Zeep buildings, Chalk River Laboratories, 1945

1958年5月24日 燃料損傷　INESレベル?

NRU炉の建物で火災があり、いくつかの燃料棒が過加熱した。ウランが火事に会い、燃料棒が破損して、建物全体が汚染した。

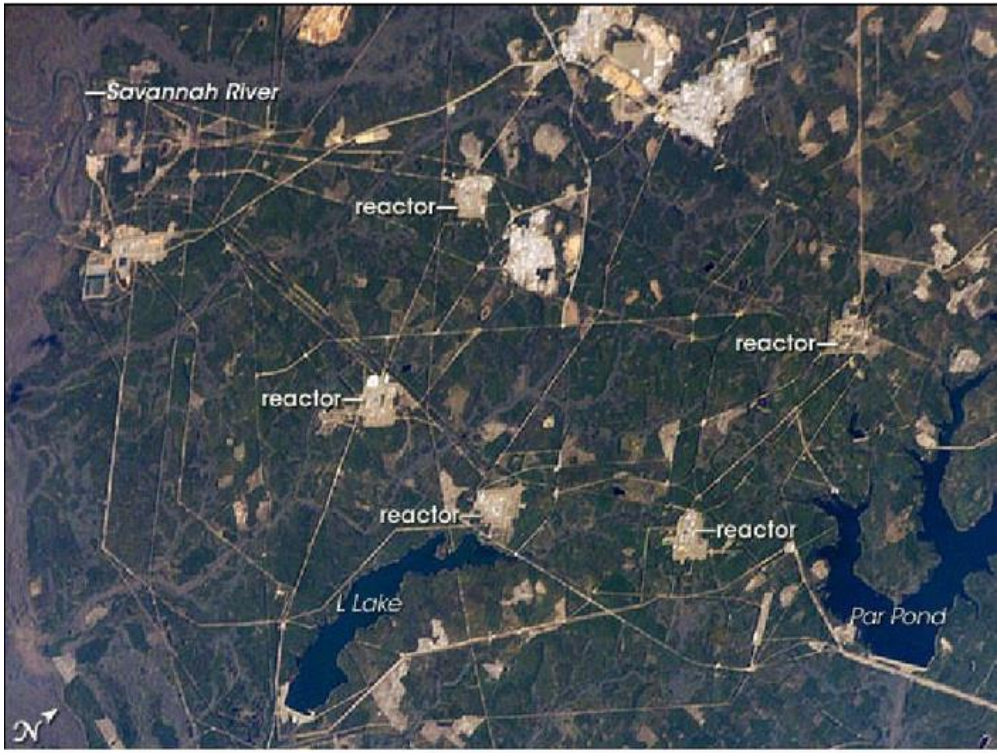
Chalk River Laboratories seen from the Ottawa River.

サバンナリバーサイト

米国南カロライナ州にある、核兵器製造用の原子炉と再処理工場が存在する。

1970年12月C炉において、通常運転中に冷却水が流れなくなり過加熱を起こして停止したが、運転員が数回再起動をして燃料融解を引き起こした。

スリーマイル島事故以前での最大の事故であったと言われている。



Savannah-river-site.JPG

ENEPキックオフシンポジウム
Prof. T. Hinton
Environmental effects of operating the Savannah River Site:
A nuclear production facility

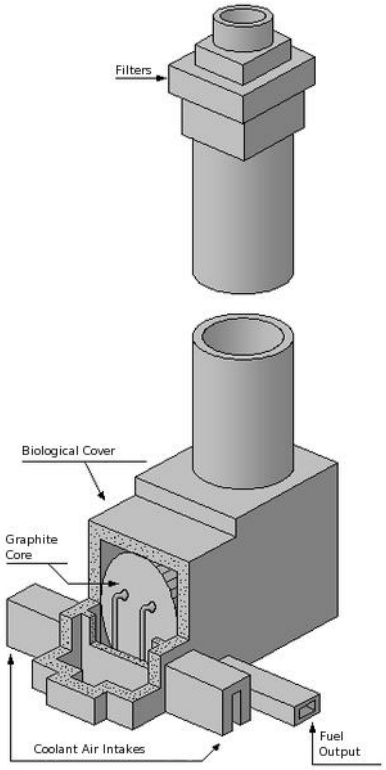
ウィンズケール原子炉火災事故（Windscale fire）

INES レベル5

1957年10月10日に起きた英国史上最悪の原子力事故

ENEPキックオフシンポジウム
Prof. K. Kelleher
The impact of Sellaffield discharges on environment

1950-2000年の間に21回の重大な事故を起こしている。上記以外にレベル4が5回、レベル3が15回発生している。

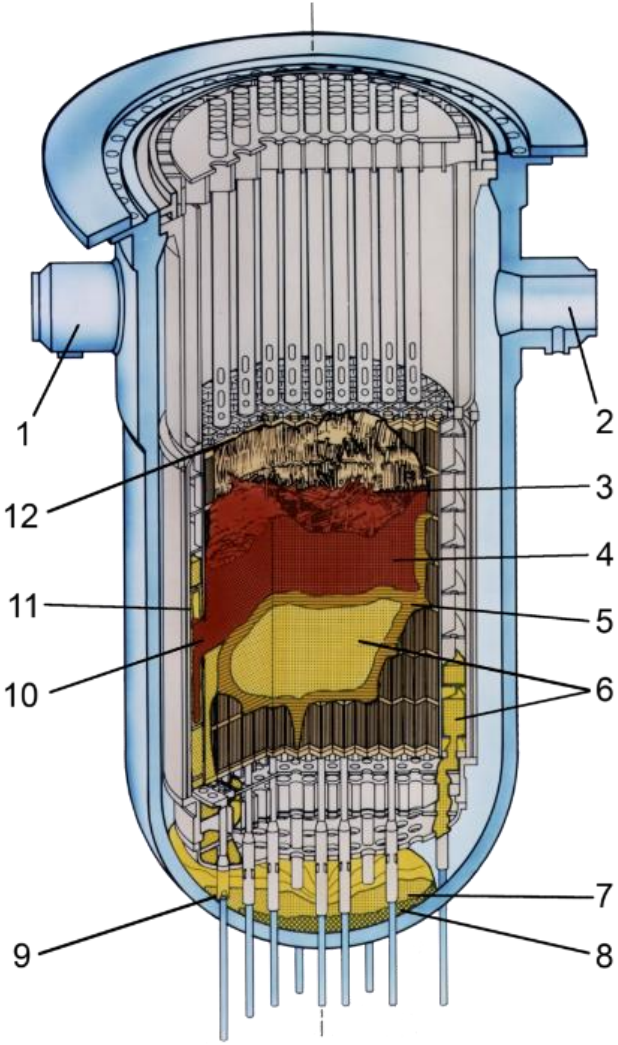


ウィンズケール原子炉の断面図
Filter: フィルタ
Biological Cover: 炉心シュラウド
Graphite core: 黒鉛の炉心
Coolant Air Intakes: 冷却空気取入口
Fuel Output: 燃料取出口

BBC News 4 Nov. 2014

スリーマイル島原子力発電所事故　INESレベル5

1979年3月28日、アメリカ合衆国東北部ペンシルベニア州のスリーマイル島原子力発電所で発生した重大な原子力事故



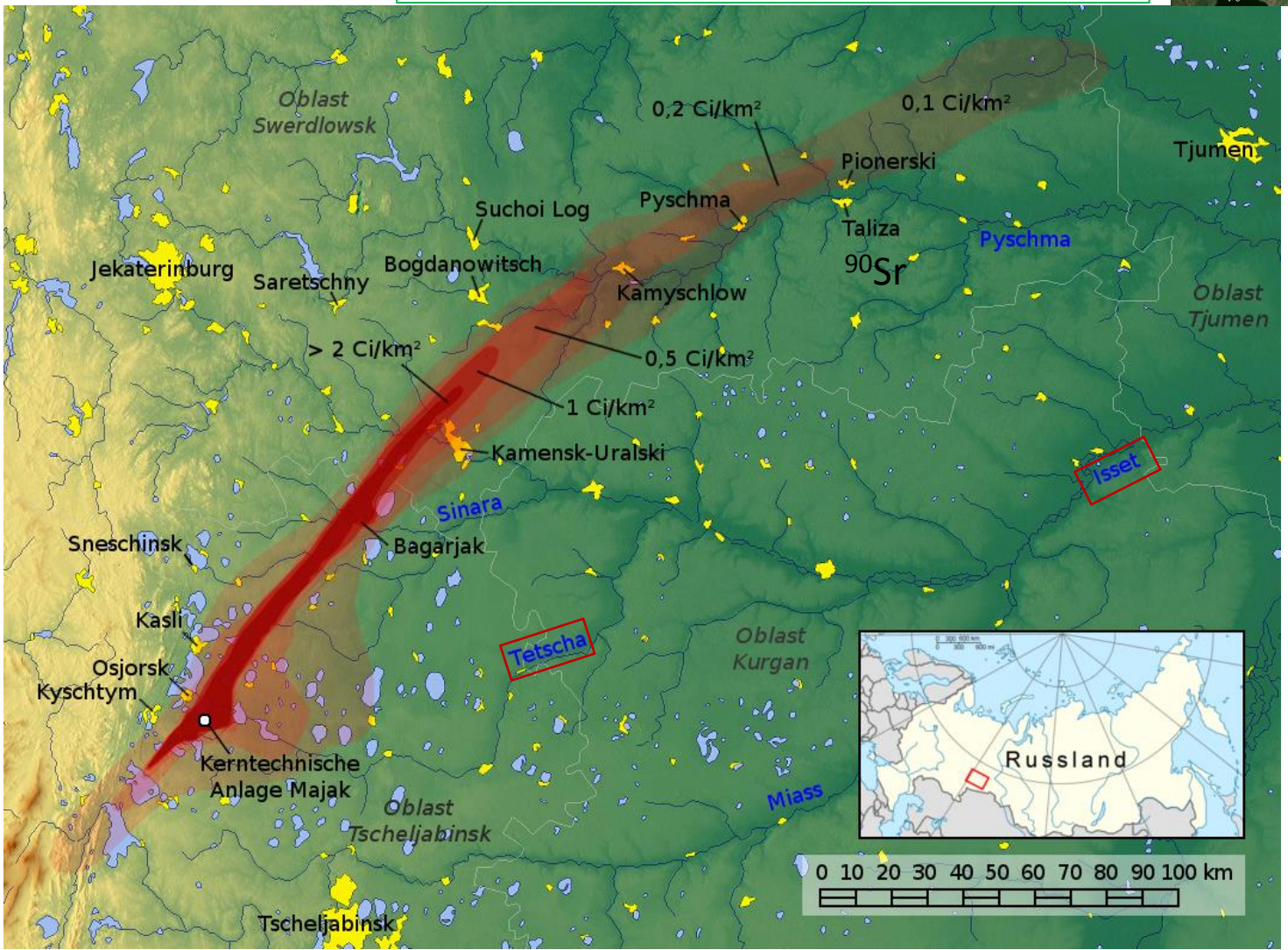
事故終息後の炉心の状態

スリーマイル島原子力発電所。中央手前の二つのドームが原子炉建屋で、その左隣の白い建物が制御室を含むタービン建屋である。奥に見える二基の塔状構造物は放熱塔。

ウラル核惨事　INES レベル6

1957年9月29日、ソ連ウラル地方チェリャビンスク州マヤーク核技術施設で発生した原子力事故（爆発事故）

ENEPキックオフシンポジウム
Prof. A. Konoplev
Radioactive water contamination and its dispersal in South Ural (Mayak area)



INESレベル7

図9　チェルノブイリ原子力発電所3，4号炉（1986年5月9日撮影）

資料提供：タス通信

チェルノブイリ原子力発電所事故

1986年4月26日1時23分（モスクワ時間 ※UTC+3）にソビエト連邦（現：ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所4号炉で起きた原子力事故

旧チェルノブイリ発電所のパノラマビュー(2013年6月) 左側からNSCの半分(リフト作業中)、4号機、3号機、2号機、1号機

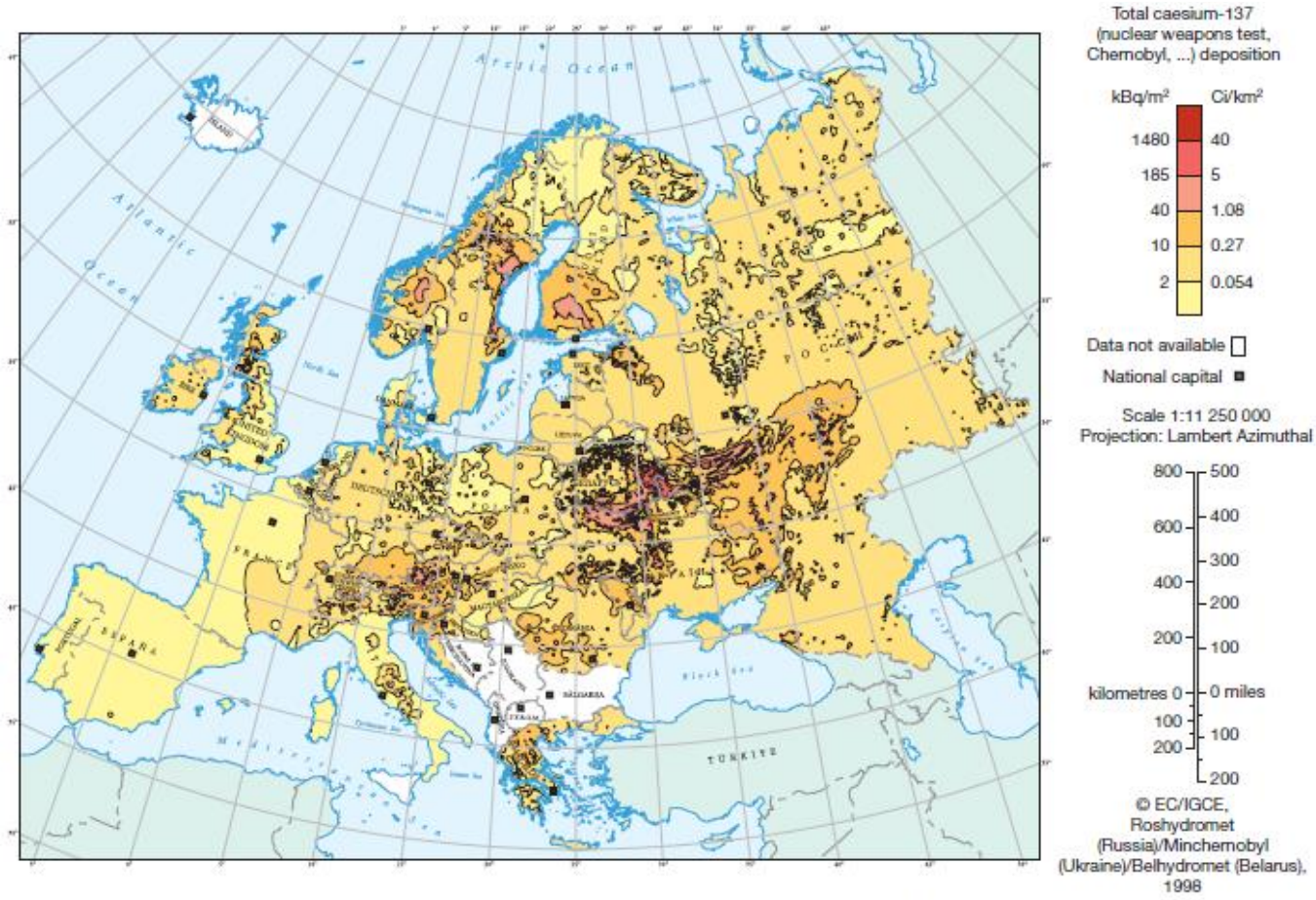
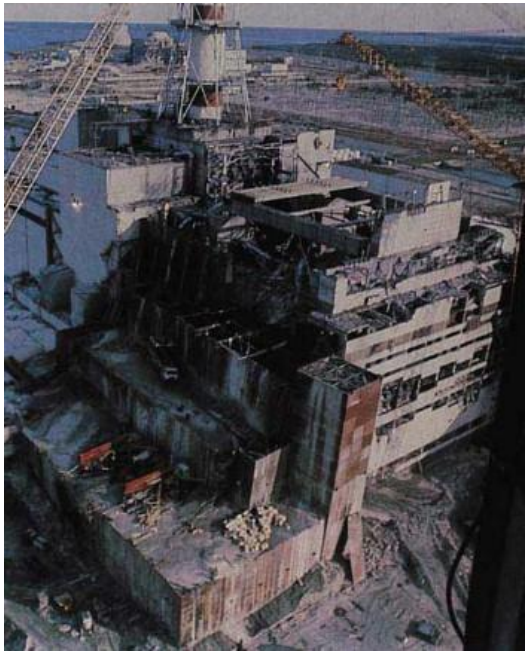


FIG. 3.5. Surface ground deposition of ^{137}Cs throughout Europe as a result of the Chernobyl accident [3.13].

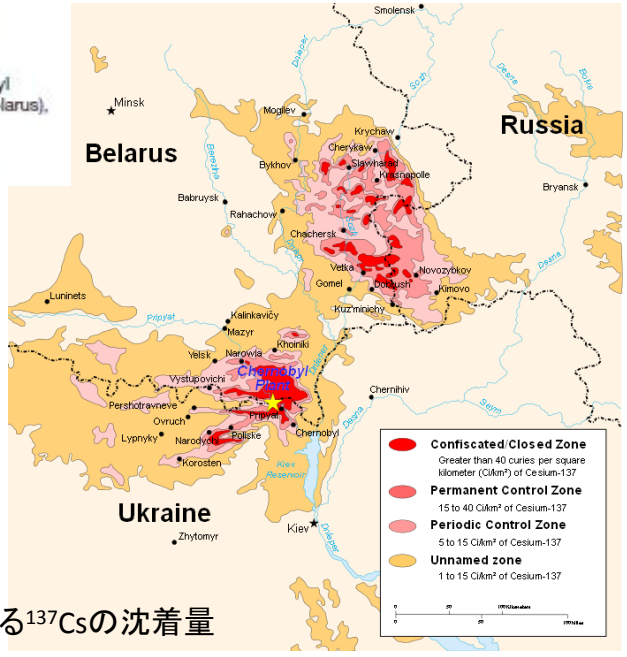
チェルノブイリ事故によるヨーロッパ周辺における^{137}Csの沈着量　*IAEA*　Pub1239



チェルノブイリ原発事故直後

チェルノブイリ基準 (^{137}Cs)

37 — 185 kBq/m^2	Unnamed Zone
185 — 555 kBq/m^2	Periodic Control Zone
555 — 1480 kBq/m^2	Permanent Control Zone
1480 — kBq/m^2	Confiscated/Closed Zone



チェルノブイリ周辺における^{137}Csの沈着量

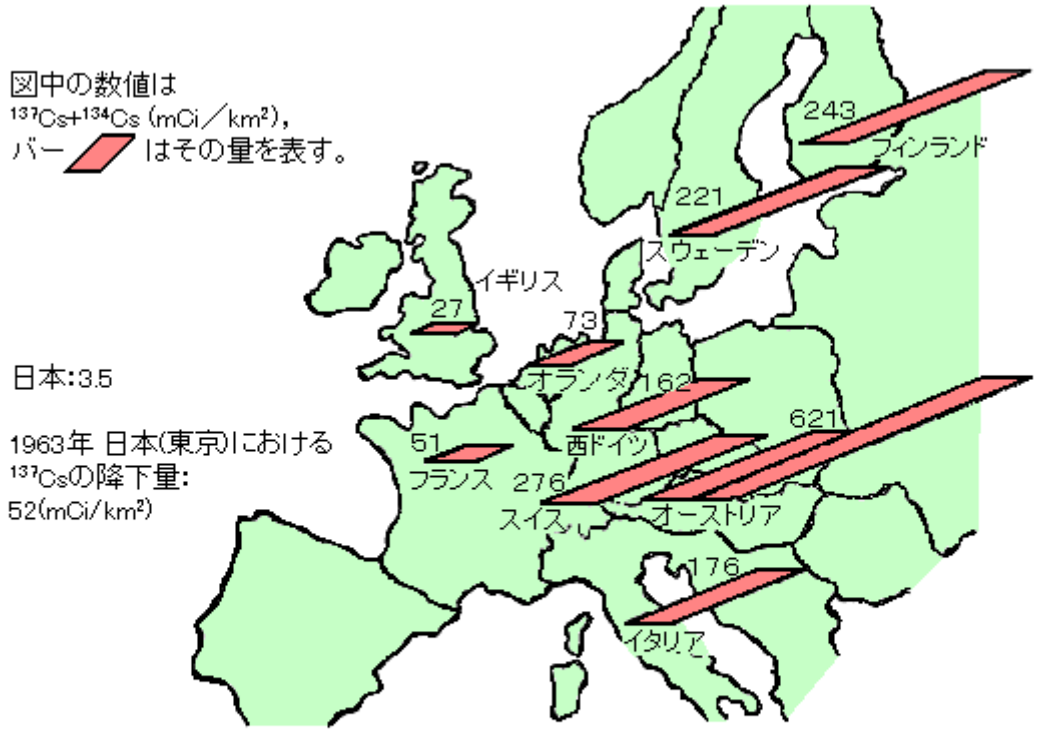


図2　チェルノブイル事故によりヨーロッパ各国に降下した放射性セシウム(^{137}Cs + ^{134}Cs)

[出典]市川龍資:放射線科学, 31, 45－52(1988)

	$^{137}Cs+^{134}Cs$	
	mCi/km^2	kBq/m^2
オーストリア	621	22.98
フィンランド	243	8.99
スウェーデン	221	8.18
イタリア	176	6.51
西ドイツ	162	5.99
スイス	276	10.21
オランダ	73	2.70
フランス	51	1.89
イギリス	27	1.00
日本	3.5	0.13
1963年日本	52	1.92

Areas of Europe contaminated with ^{137}Cs (km^2)

Country	37–185 kBq/m²	185–555 kBq/m²	555–1480 kBq/m²	+1480 kBq/m²		Total Area
Belarus	29900	10200	4200	2200	22.4%	207560
Ukraine	37200	3200	900	600	6.9%	603500
Russia	49800	5700	2100	300	0.34%	17095242
Sweden	12000	-	-	-	2.67%	449964
Finland	11500	-	-	-	3.40%	338400
Austria	8600	-	-	-	10.25%	83870
Norway	5200	-	-	-	1.35%	385199
Bulgaria	4800	-	-	-	4.33%	110910
Switzerland	1300	-	-	-	3.15%	41290
Greece	1200	-	-	-	0.91%	131957
Slovenia	300	-	-	-	1.48%	20273
Italy	300	-	-	-	0.10%	301338
Moldova	60	-	-	-	0.18%	33843
Totals	162160	19100	7200	3100		

チェルノブイリ事故によるベラルーシ・ウクライナでの甲状腺がんの発生について
^{131}Iによると考えられる

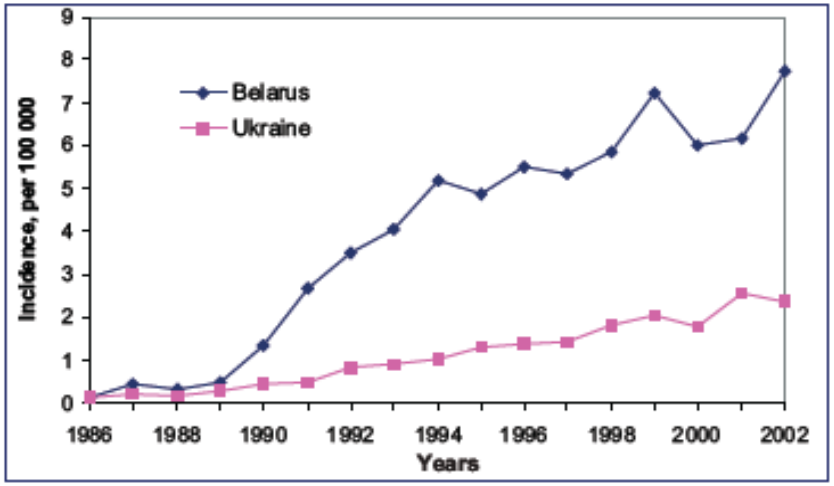
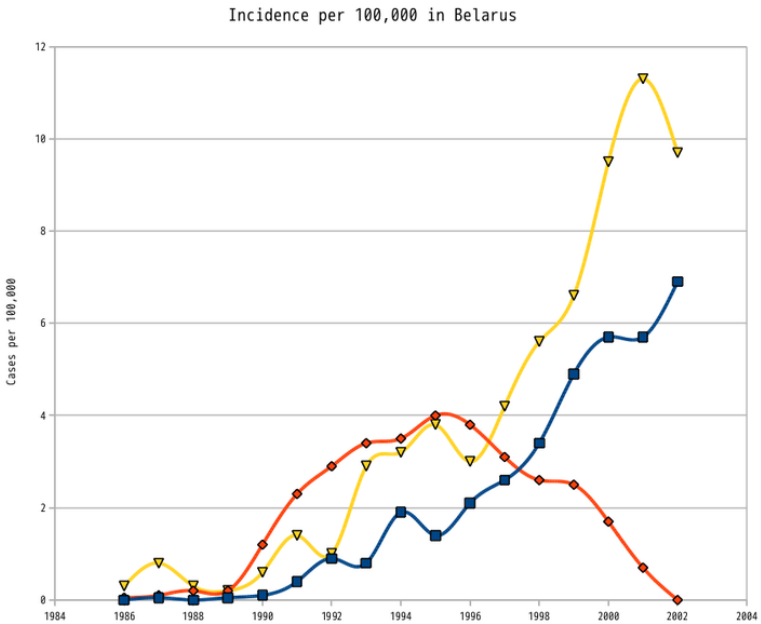


FIG. 3. Incidence rate of thyroid cancer in children and adolescents exposed to ^{131}I as a result of the Chernobyl accident (after Jacob et al., 2005).



Thyroid cancer incidence in children and adolescents from Belarus after the Chernobyl accident.
Yellow: Adults (19–34)
Blue: Adolescents (15–18)
Red: Children (0–14)

Summary of average accumulated doses to affected populations from Chernobyl fallout

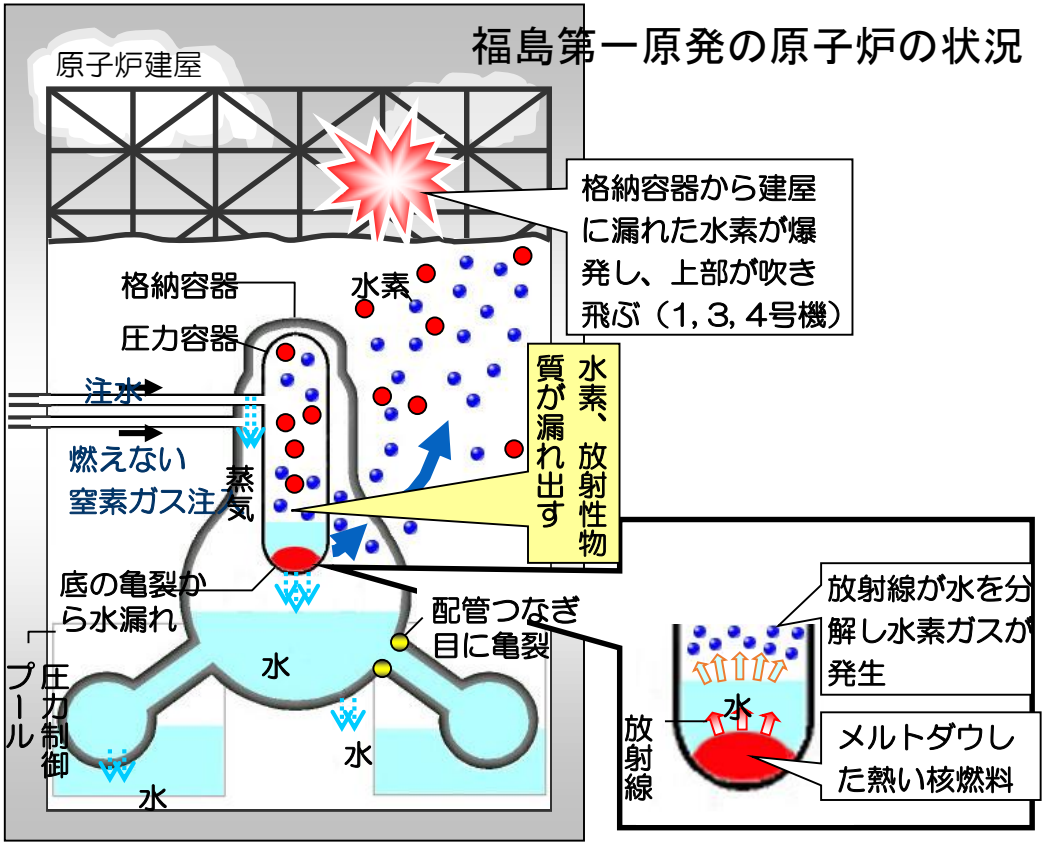
Population category	Number	Average dose (mSv)
Liquidators (1986–1989)	600 000	~100
Evacuees from highly-contaminated zone (1986)	116 000	33
Residents of "strict-control" zones (1986–2005)	270 000	>50
Residents of other 'contaminated' areas (1986–2005)	5 000 000	10–20

福島第一原子力発電所事故

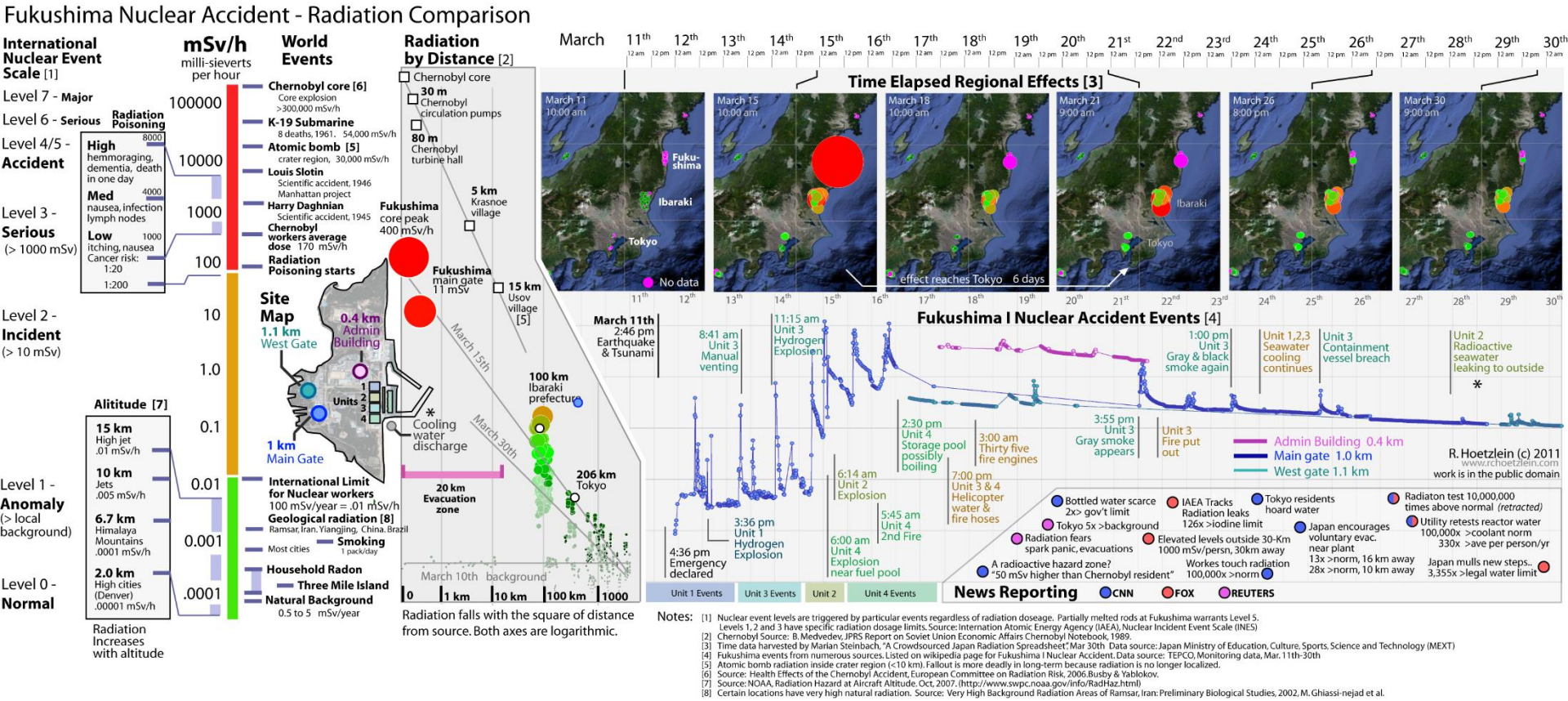
INES レベル7

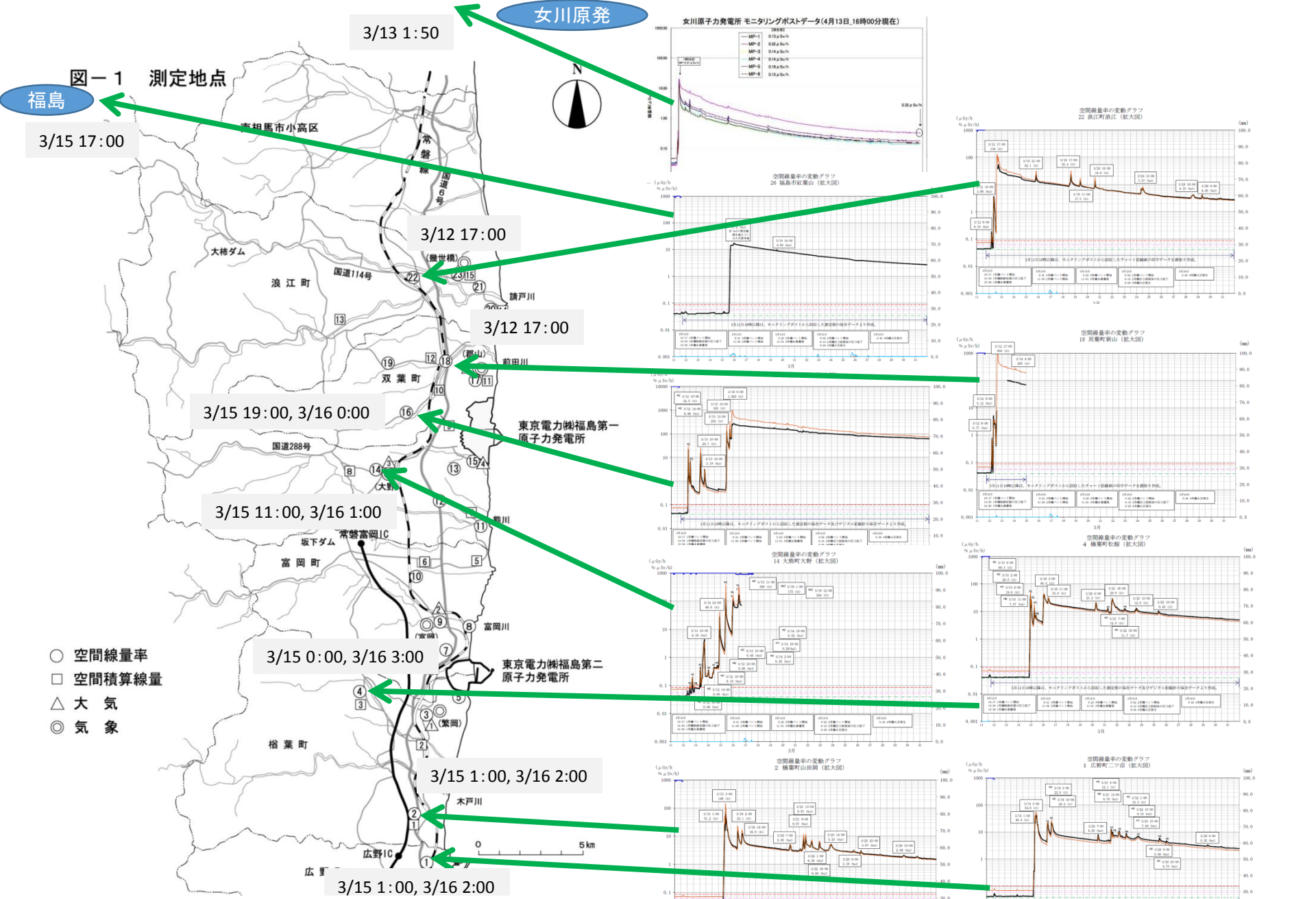
2011年3月11日14時46分の本震からの東北地方太平洋沖地震による地震動と津波の影響により、東京電力の福島第一原子力発電所で発生した炉心溶融など一連の放射性物質の放出をともなった原子力事故

2011年3月16日撮影
左から4号機、3号機、2号機、1号機



2011年3月30日まで福島第一原子力発電所事故によって放出された放射線との様々な比較表
（※左から「国際原子力事象評価尺度」「放射線濃度（mSv/h）」「原子力に関する世界的事故」「放射線と距離」「福島第一原子力発電所事故と時系列事象（3月11日 - 3月30日）」）

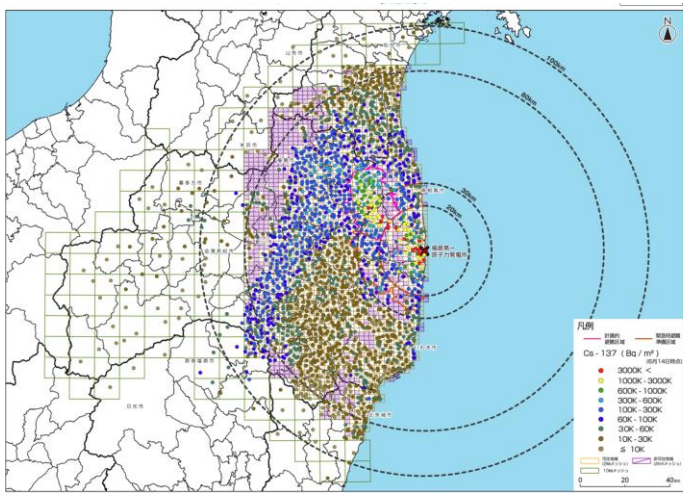




汚染はどのように時間とともに進んだのか
福島県環境放射線モニタリング　オフラインで

航空機モニタリングによる、^{137}Csの沈着量
2011年10月13日現在の値に換算

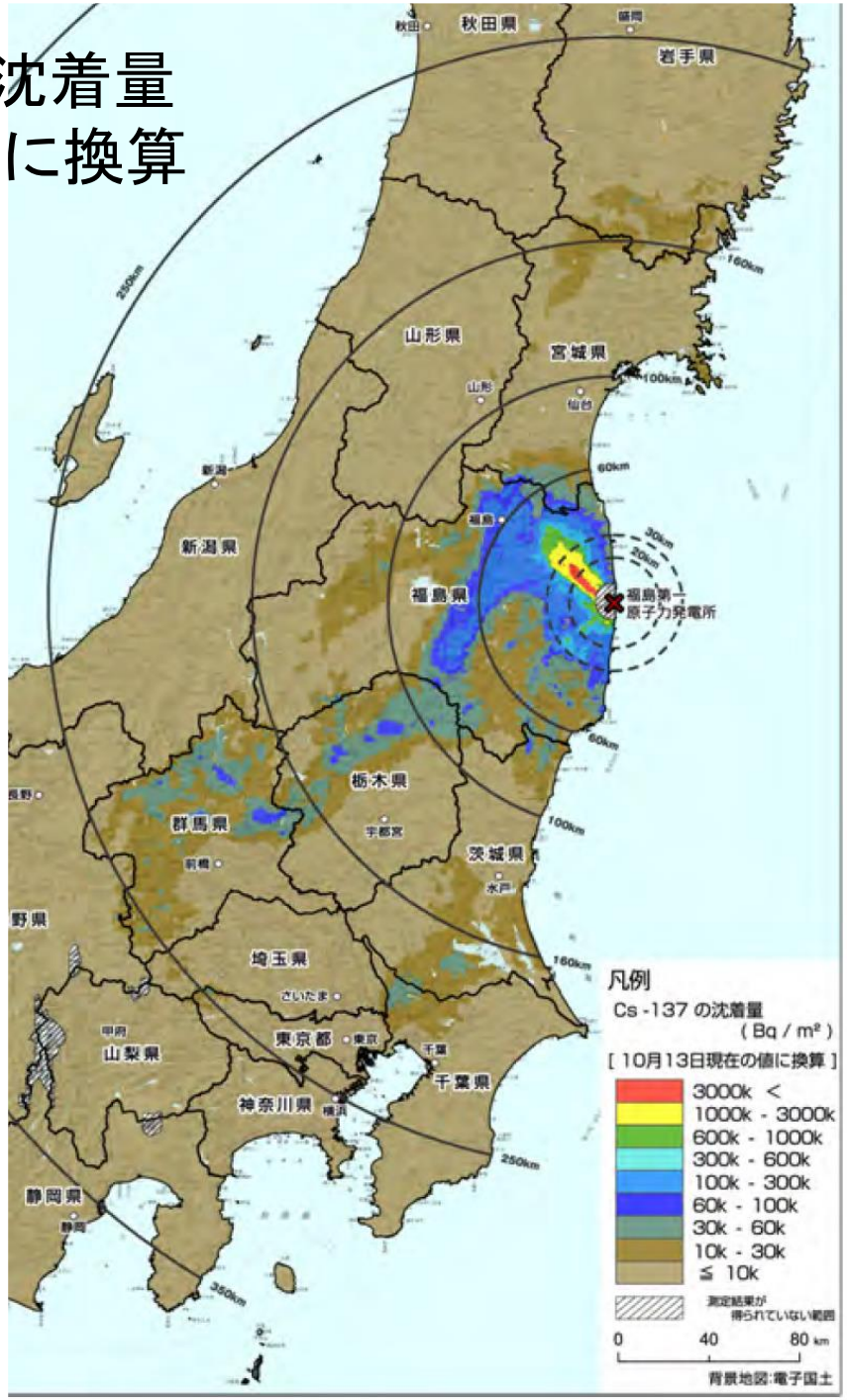
^{137}Csの土壌濃度マップ



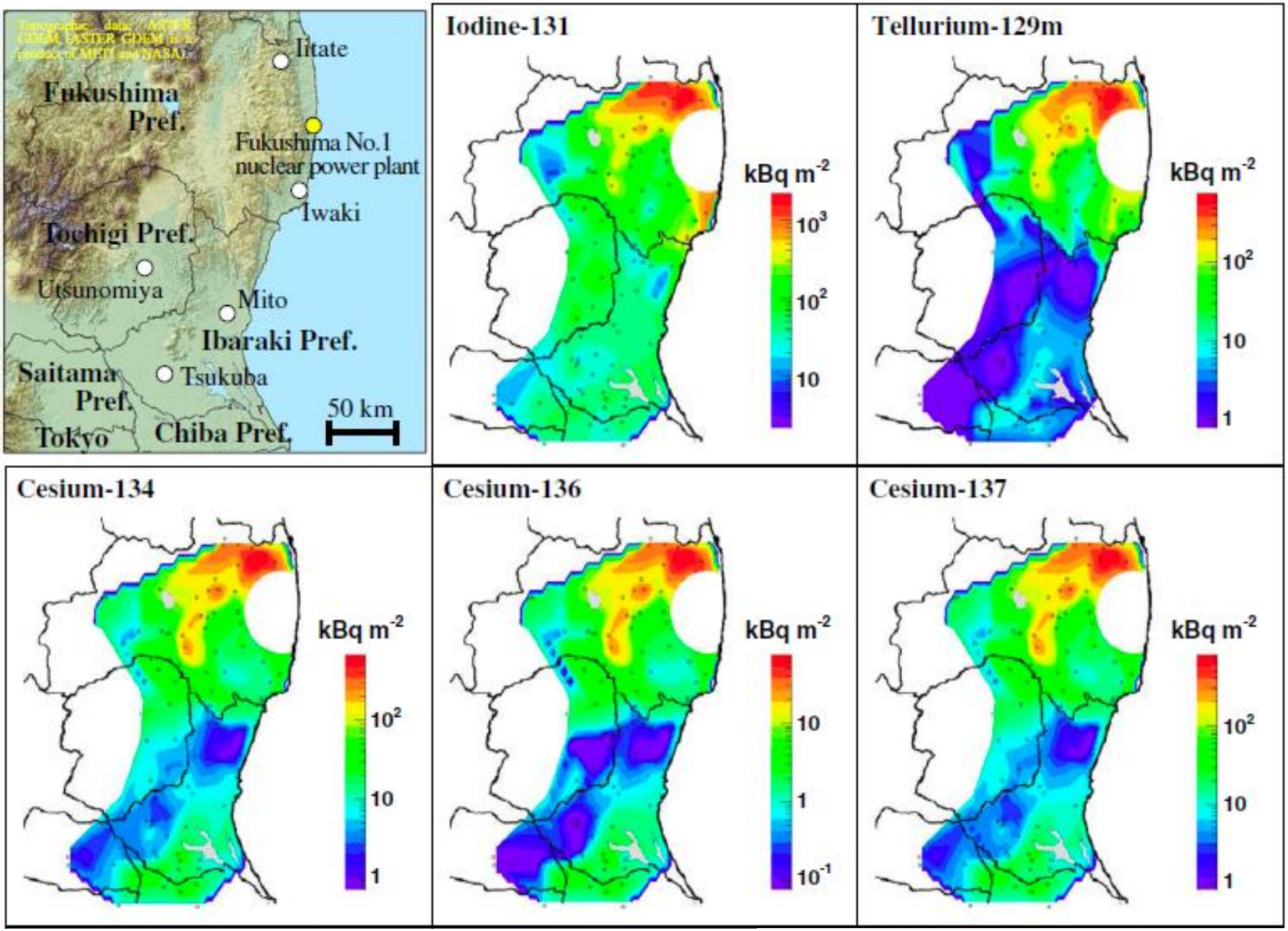
土壌濃度マップは他に^{134}Cs、^{129m}Te、^{110m}Ag
^{131}Iは後に^{129}I測定を含めて復元

チェルノブイリ基準 (^{137}Cs)

37 – 185 kBq/m^2	Unnamed Zone
185 – 555 kBq/m^2	Periodic Control Zone
555 – 1480 kBq/m^2	Permanent Control Zone
1480 – kBq/m^2	Confiscated/Closed Zone



放射性核種による沈着量分布の違い



N. Kinoshita et al., *PNAS* 2011 108(49) 19526-19529

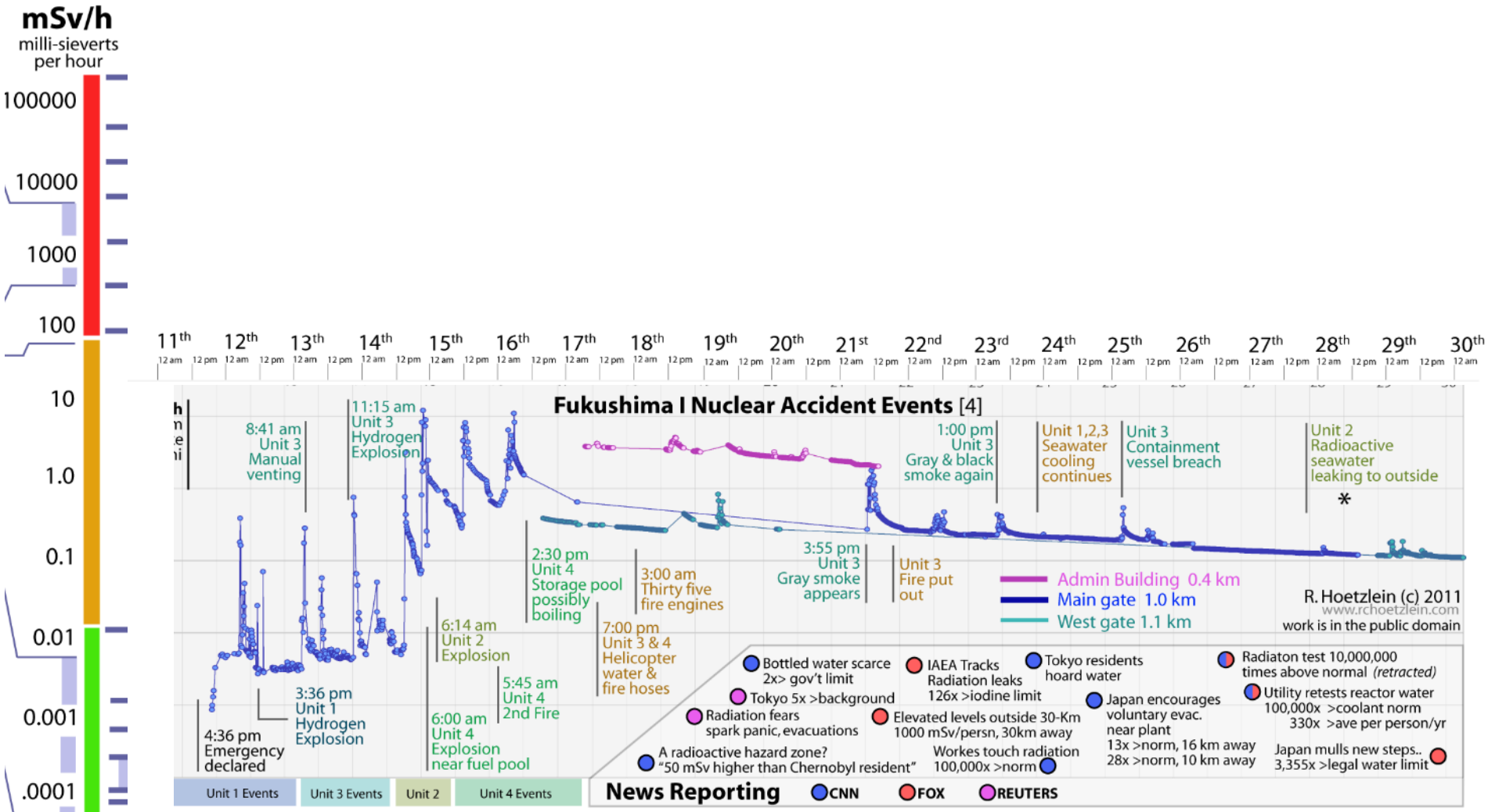
原爆および原発事故によって放出された放射性物質の放射能の比較

放射性核種	半減期	主な崩壊モード	放射性物質の放出量 / [10^{15}Bq]			
			チェルノブイリ	福島第一原発	広島原爆	
					SCOPE	NISA
希ガス						
クリプトン85（^{85}Kr）	10.72年	β	33	-		
キセノン133（^{133}Xe）	5.25日	β	6500	11000	140	
揮発性元素						
テルル127m（^{127m}Te）	109.0日	β		1.1		
テルル129m （^{129m}Te）	33.6日	β	240	3.3		
テルル131m （^{131m}Te）	30.0時間	β		5		
テルル132（^{132}Te）	3.204日	β	～1150	88		
ヨウ素131（^{131}I）	8.04日	β	～1760	160	52	63
ヨウ素132（^{132}I）	2.3時間	β、γ		0.013		
ヨウ素133（^{133}I）	20.8時間	β、γ	910	42		
ヨウ素135（^{135}I）	6.6時間	β、γ		2.3		
セシウム134（^{134}Cs）	2.06年	β、γ	～47	18	-	
セシウム136（^{136}Cs）	13.1日	β	36	-		
セシウム137（^{137}Cs）	30年	β	～85	15	0.1	0.089
中度の揮発性元素						
ストロンチウム89（^{89}Sr）	50.5日	β、γ	～115	2		11
ストロンチウム90（^{90}Sr）	29.12年	β	～10	0.14	0.085	0.058
ルテニウム103（^{103}Ru）	39.3日	β、γ	>168	0.0000075		23
ルテニウム106（^{106}Ru）	368日	β	>73	0.0000021		1.1
アンチモン127（^{127}Sb）	3.9日	β		6.4		
アンチモン129（^{129}Sb）	4.3時間	β		0.14		
バリウム140（^{140}Ba）	12.7日	β	240	3.2		71
難揮発性元素						
イットリウム91（^{91}Y）	58.5日	β、γ		0.0034		11
ジルコニウム95（^{95}Zr）	64日	β	84	0.017		14
モリブデン99（^{99}Mo）	2.75日	β	>72	0.0000067		
セリウム141（^{141}Ce）	32.5日	β	84	0.018		25
セリウム144（^{144}Ce）	284日	β	～50	0.011		2.9
プラセオジム143（^{143}Pr）	13.6日	β		0.0041		
ネオジム147（^{147}Nd）	11.0日	β		0.0016		
ネプツニウム239（^{239}Np）	2.35日	β	400	0.076		
プルトニウム238（^{238}Pu）	87.74年	α	0.015	0.000019		
プルトニウム239（^{239}Pu）	24065年	α	0.013	0.0000032		
プルトニウム240（^{240}Pu）	6537年	α	0.018	0.0000032		
プルトニウム241（^{241}Pu）	14.4年	β	～2.6	0.0012		
プルトニウム242（^{242}Pu）	376000年	α	～0.00004	-		
キュリウム242（^{242}Cm）	162.8日	α	～0.4	0.0001		
合計			11904	11212	192	222

代表的な核種における炉心インベントリーおよび放出割合の比較

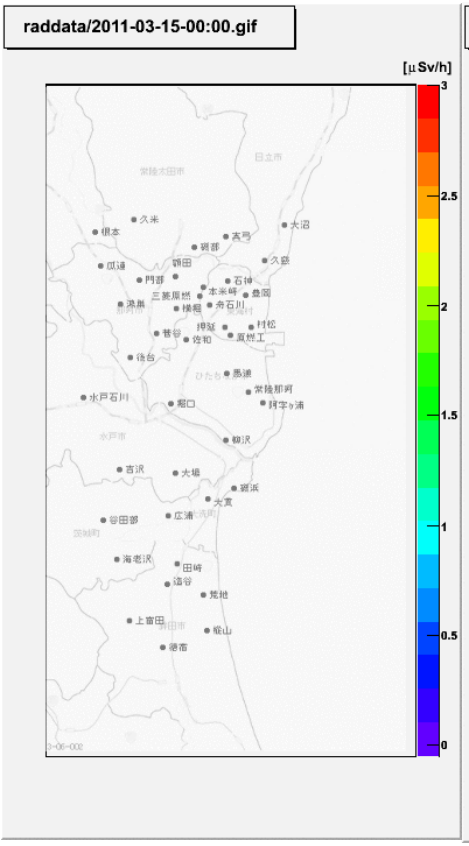
	チェルノブイリ原発4号機		福島第一原発（1 - 3号機の合計）	
放射性核種	ヨウ素131	セシウム137	ヨウ素131	セシウム137
炉心インベントリー（10^{15}Bq）	3200	280	6100	710
放出量（10^{15}Bq）	about 1760	about 85	160	15
放出割合（%）	50-60	20-40	2.6	2.1

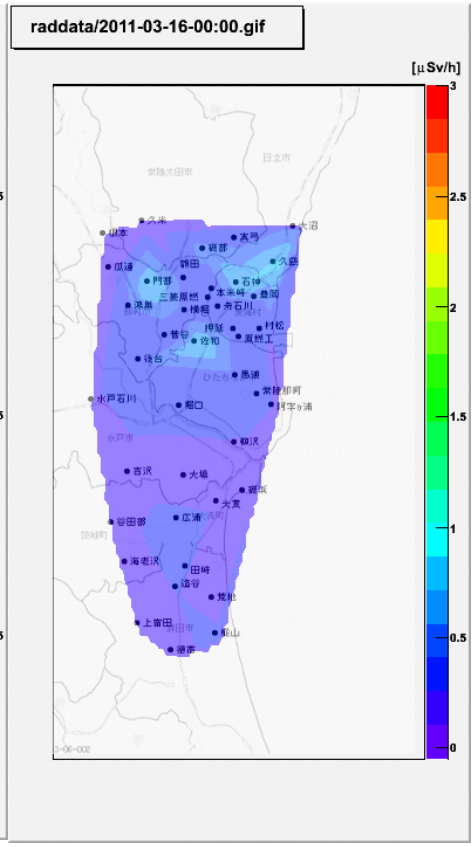
東京電力福島第一原子力発電所敷地周辺での放射線量率の変化

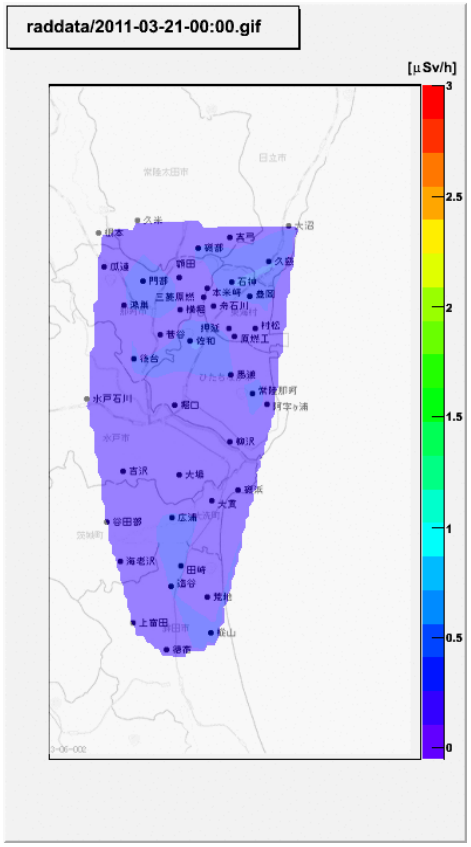


Notes:
[1] Nuclear event levels are triggered by particular events regardless of radiation doseage. Partially melted rods at Fukushima warrants Level 5. Levels 1, 2 and 3 have specific radiation dosage limits. Source: Internation Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Incident Event Scale (INES)
[2] Chernobyl Source: B. Medvedev, JPRS Report on Soviet Union Economic Affairs Chernobyl Notebook, 1989.
[3] Time data harvested by Marian Steinbach, "A Crowdsourced Japan Radiation Spreadsheet", Mar 30th Data source: Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT)
[4] Fukushima events from numerous sources. Listed on wikipedia page for Fukushima I Nuclear Accident. Data source: TEPCO, Monitoring data, Mar. 11th-30th
[5] Atomic bomb radiation inside crater region (<10 km). Fallout is more deadly in long-term because radiation is no longer localized.
[6] Source: Health Effects of the Chernobyl Accident, European Committee on Radiation Risk, 2006.Busby & Yablokov.
[7] Source: NOAA, Radiation Hazard at Aircraft Altitude. Oct, 2007. (http://www.swpc.noaa.gov/info/RadHaz.html)
[8] Certain locations have very high natural radiation. Source: Very High Background Radiation Areas of Ramsar, Iran: Preliminary Biological Studies, 2002, M. Ghiassi-nejad et al.

公表されたデータから再現された放射線量の時間変化







天気図のように見せれると判断できるようになる？

http://ag.riken.jp/u/mon/anim.html

放射線による人体への影響

外部被ばくの影響を考慮した
帰還困難区域、居住制限区域の設定