



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

3. 環境中の放射性核種(3) 原子力災害の歴史と、 環境への放出



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

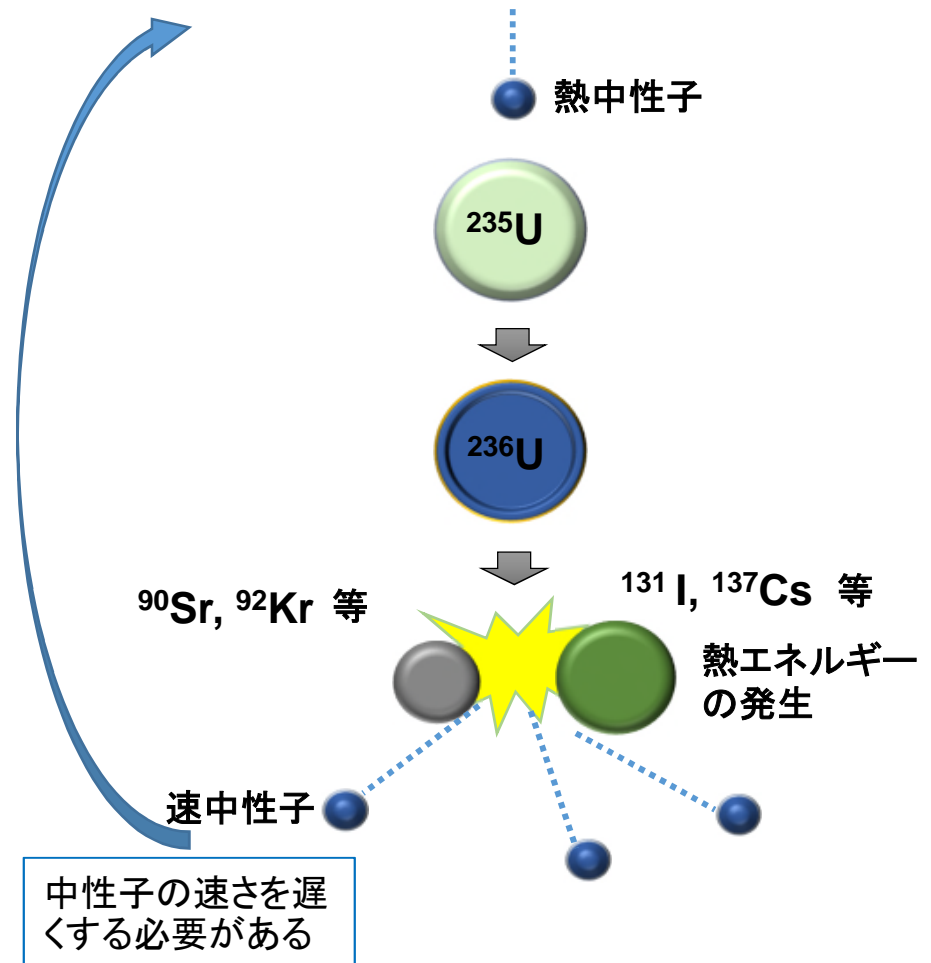
ウランやプルトニウムなどの原子核が、中性子を吸収することなどによってほぼ二つの原子核に分裂する現象

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)



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



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

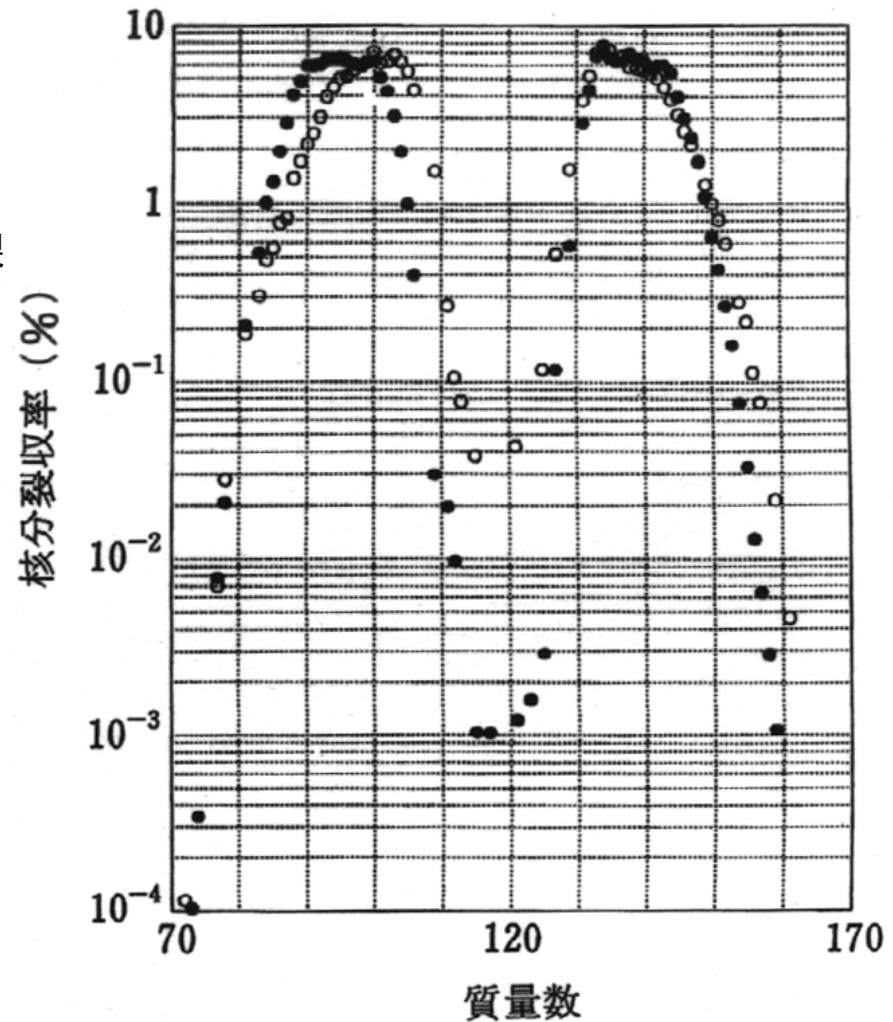


図 低エネルギー中性子による核分裂の
質量分布

(●印は ²³⁵U の熱中性子照射, ○印は ²³⁹Pu 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)

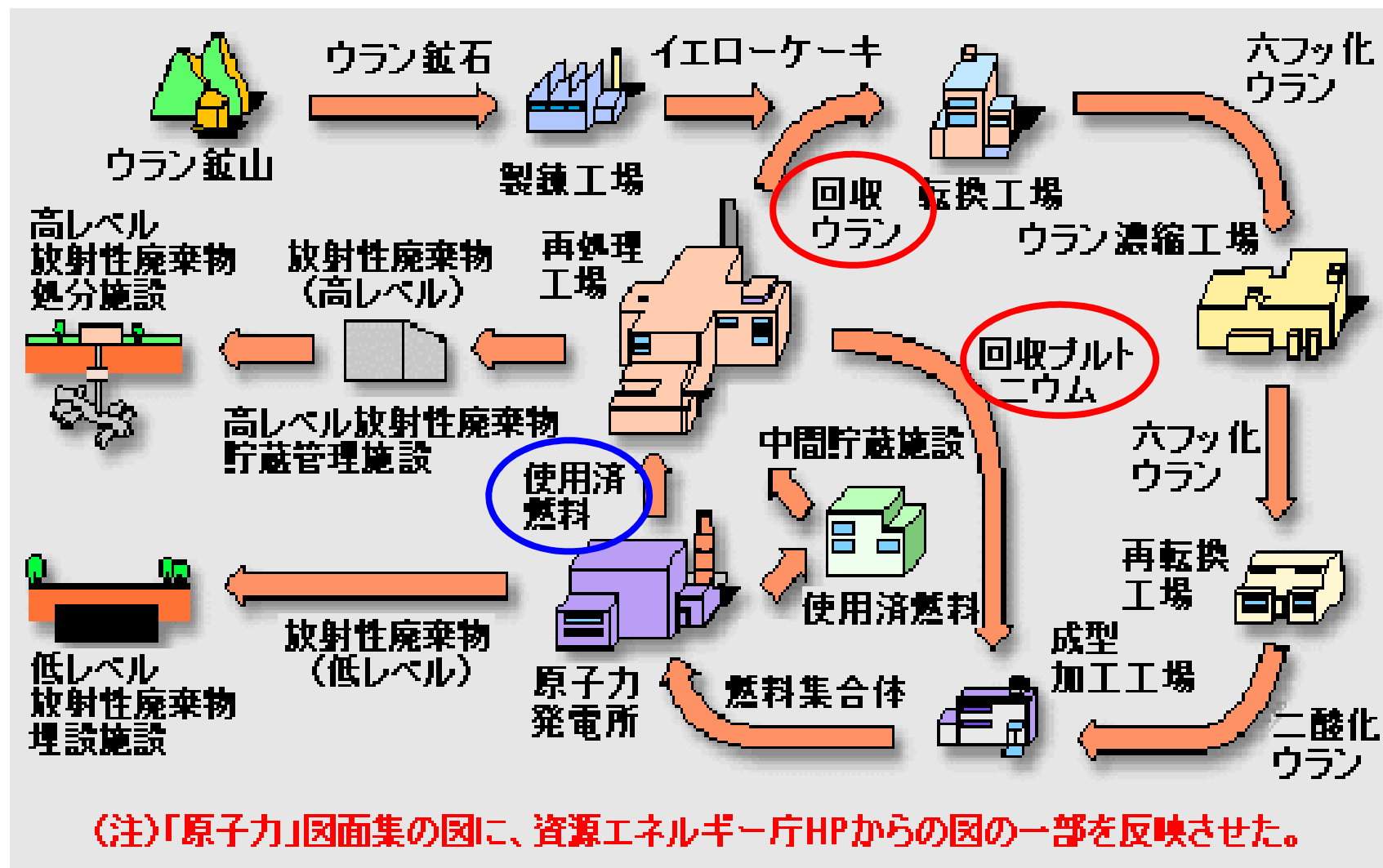
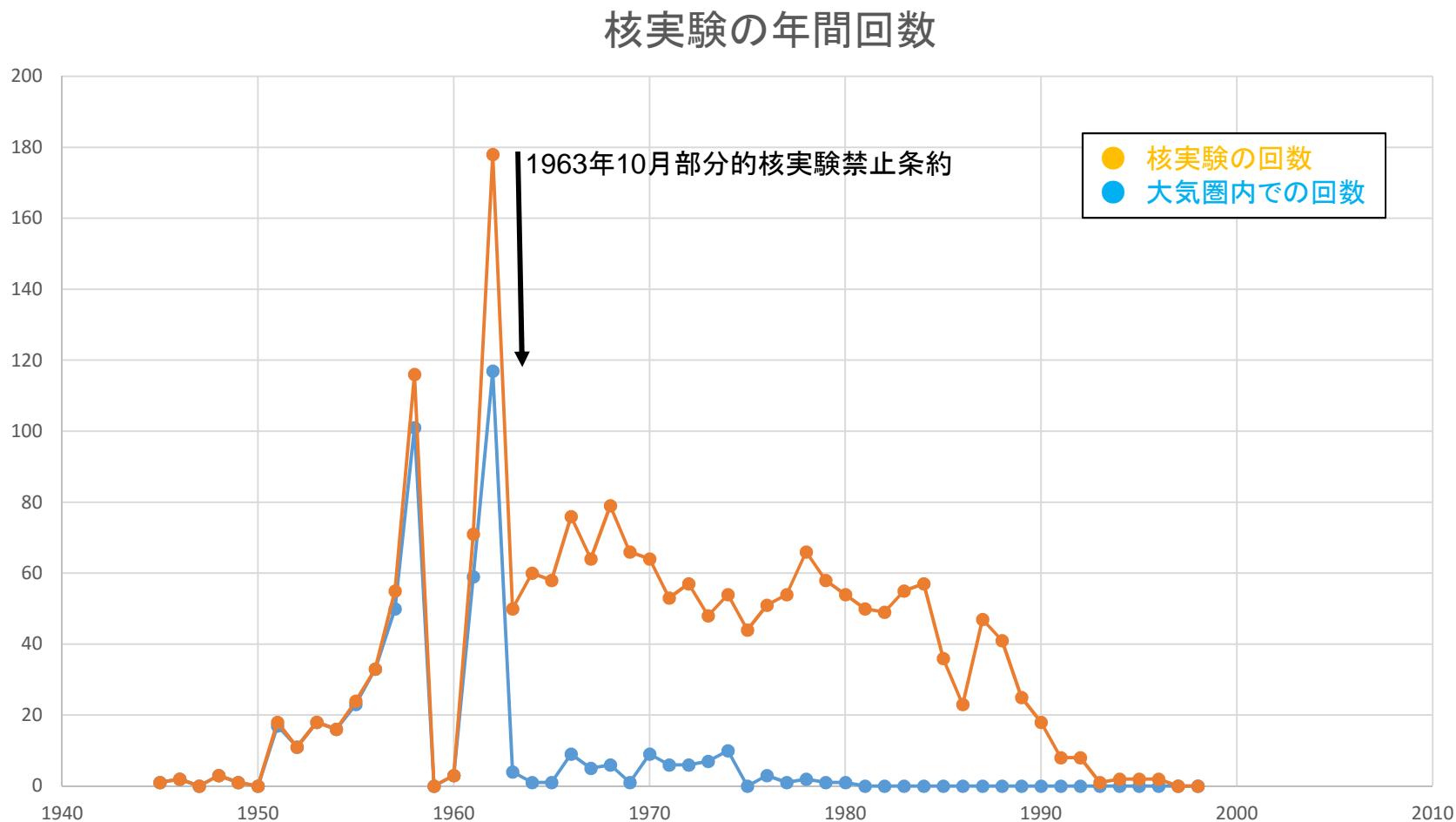


図1 核燃料リサイクル概念図

[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>)

2. 兵器開発に伴う核実験と放射性物質の環境への影響



大気圏内で核実験を行うことによって、核分裂生成物等が環境中に放出される。放射性物質による環境汚染の観点から核実験の大気圏内での中止を米ソで進め、部分的核実験禁止条約を締結する。当初フランスおよび中国が参加していない。

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 (50.5d)	2.56	590
⁹⁰ Sr (28.6y)	3.50	3.9
⁹⁵ Zr (64.0d)	5.07	920
¹⁰³ Ru (39.4d)	5.20	1500
¹⁰⁶ Ru (368d)	2.44	78
¹³¹ I (8.04d)	2.90	4200
¹³⁶ Cs (13.2d)	0.036	32
¹³⁷ Cs (30.2y)	5.57	5.9
¹⁴⁰ Ba (12.8d)	5.18	4700
¹⁴¹ Ce (32.5d)	4.58	1600
¹⁴⁴ Ce (284d)	4.69	190

(P: 10¹⁵)

[データ参照]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

グローバルフォールアウト (^{90}Sr , ^{137}Cs)

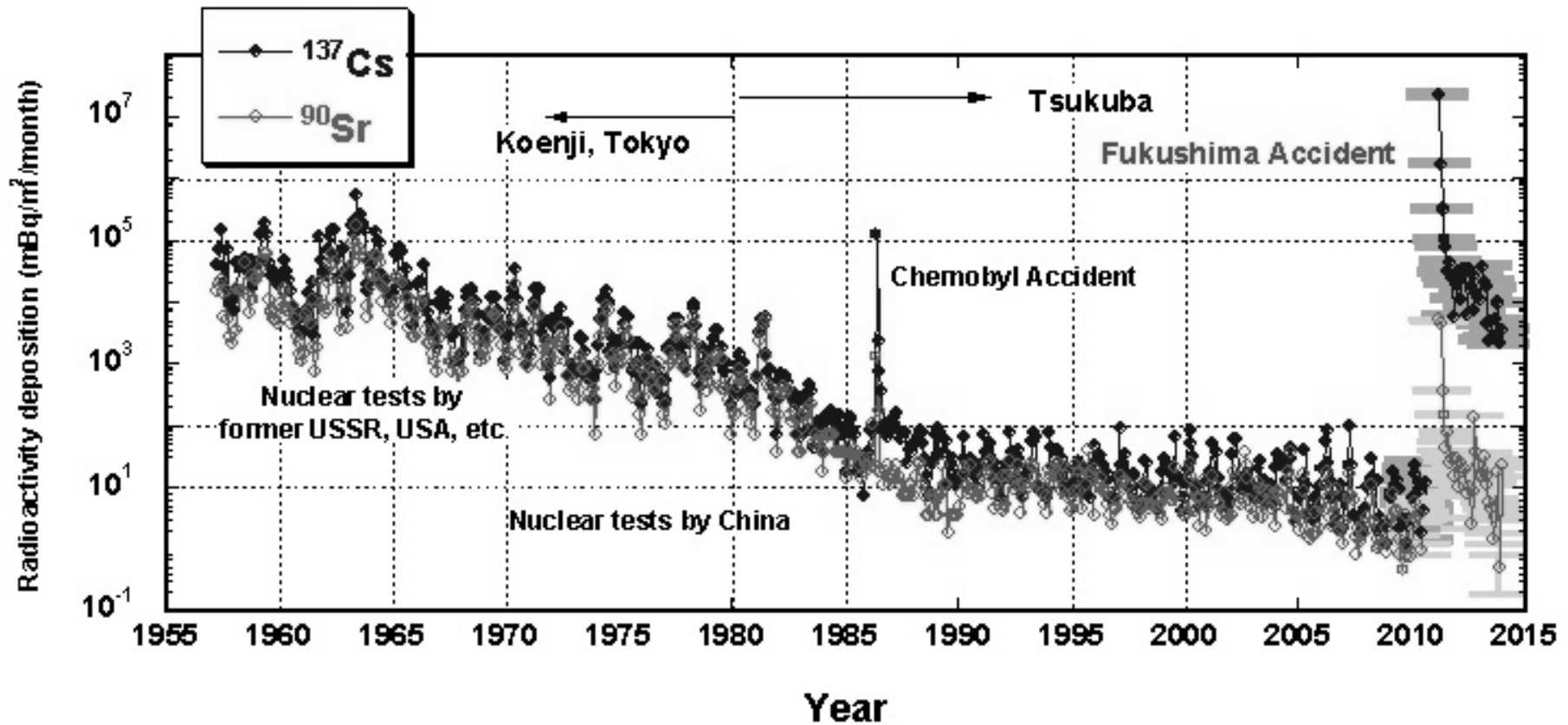


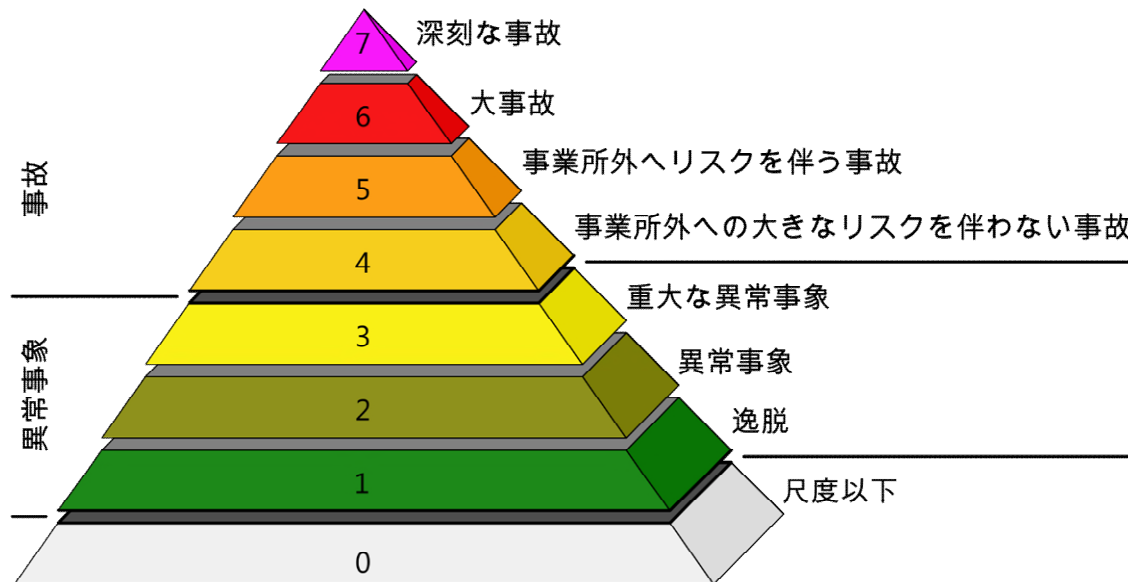
図1 Temporal variation in the monthly ^{90}Sr and ^{137}Cs depositions observed at MRI since 1957

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

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。

INESレベル7



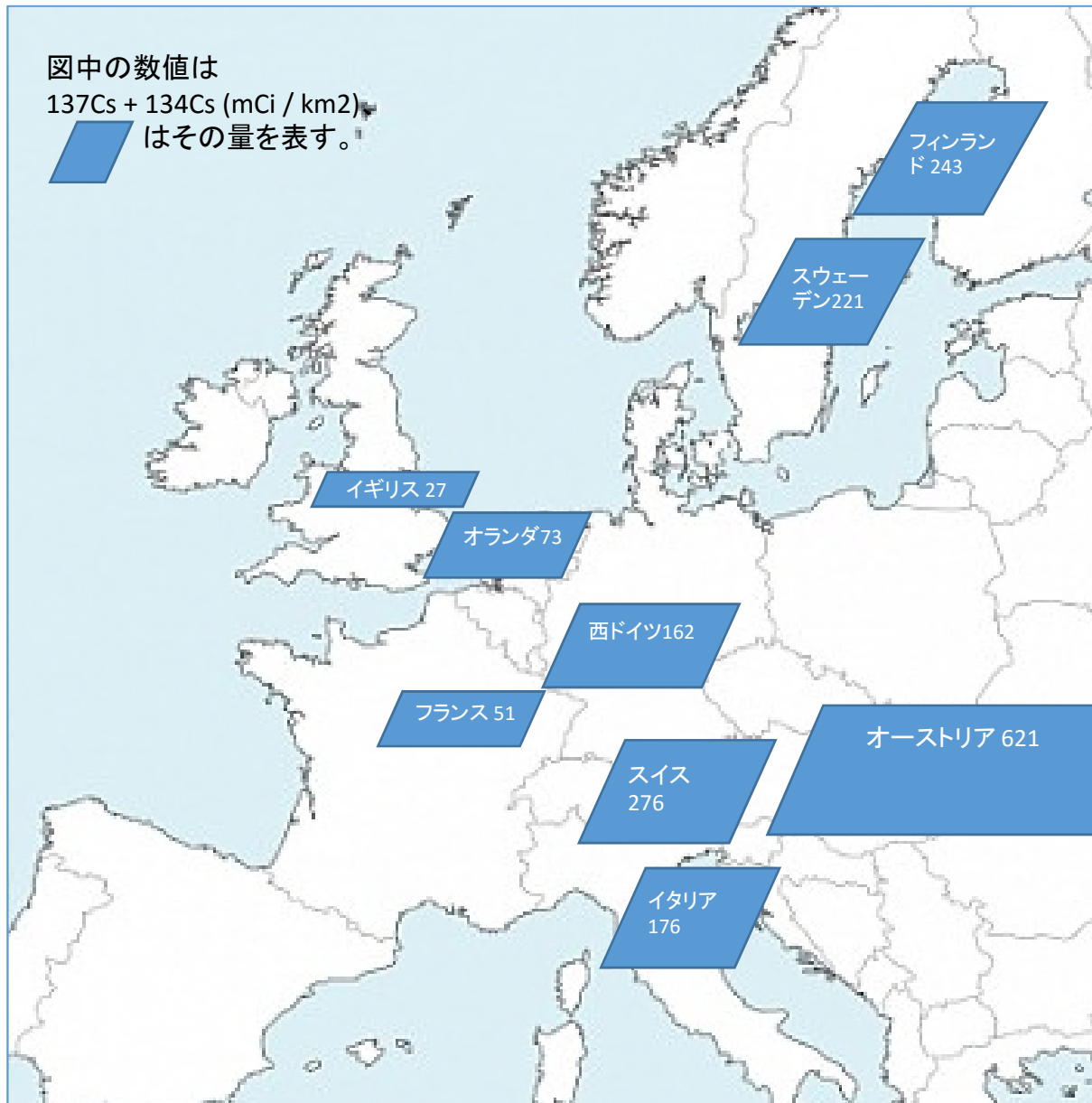
図9 チェルノブイリ原子力発電所3、4号炉(1986年5月9日撮影)
資料提供:タス通信

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



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



	$^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$	
	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

日本: 3.5
 1963年 日本(東京)における
 ^{137}Cs の降下量: 52 (mCi / km²)

[データ参照]市川龍資:放射線科学、31、45-52 (1988)

Areas of Europe contaminated with ^{137}Cs (km²)

Country	37–185 kBq/m ²	185–555 kBq/m ²	555–1480 kBq/m ²	+1480 kBq/m ²		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		

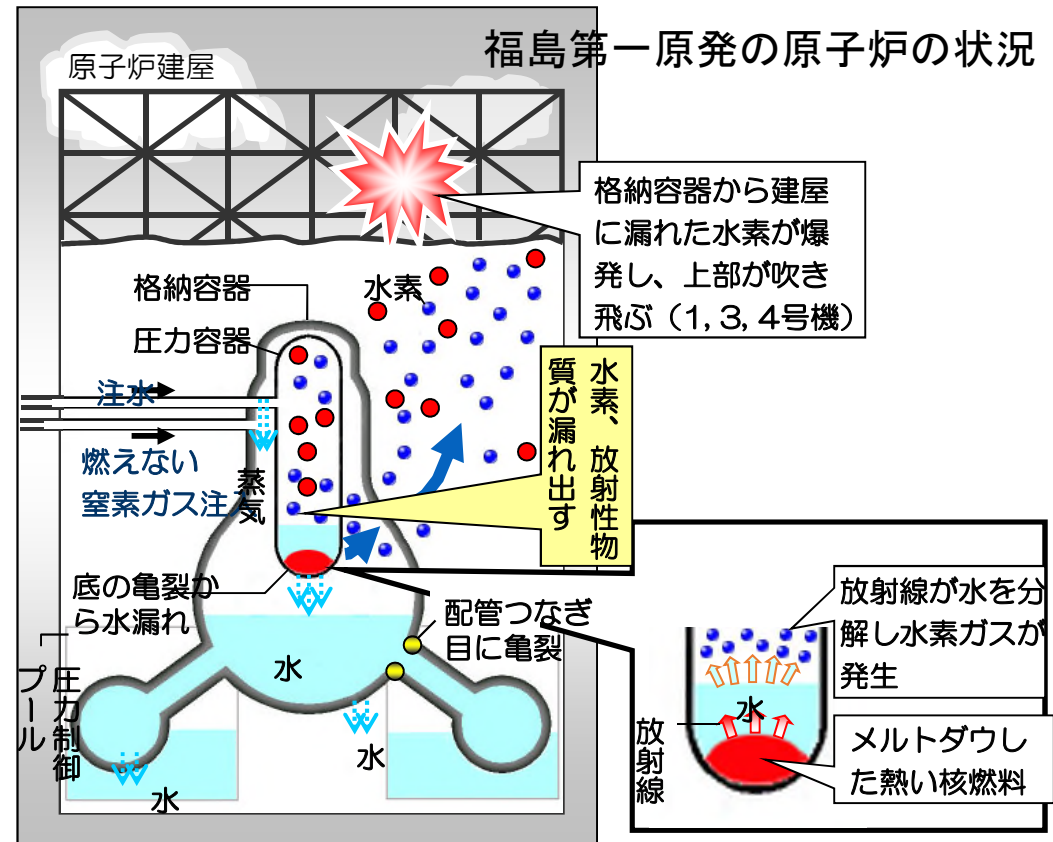
福島第一原子力発電所事故

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

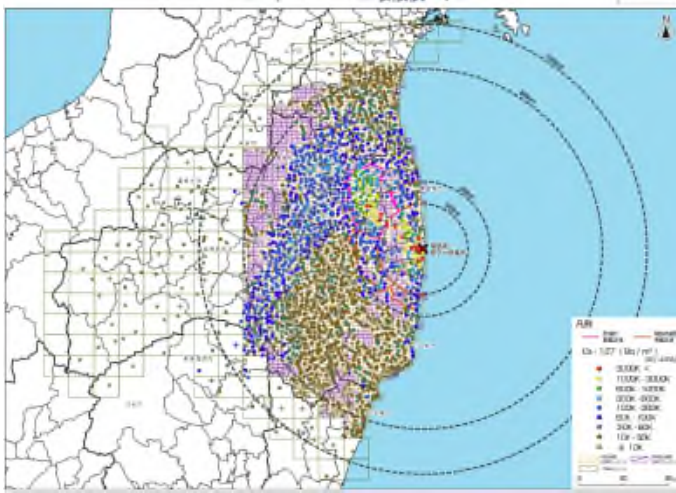


2011年3月16日撮影
左から4号機、3号機、2号機、1号機



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

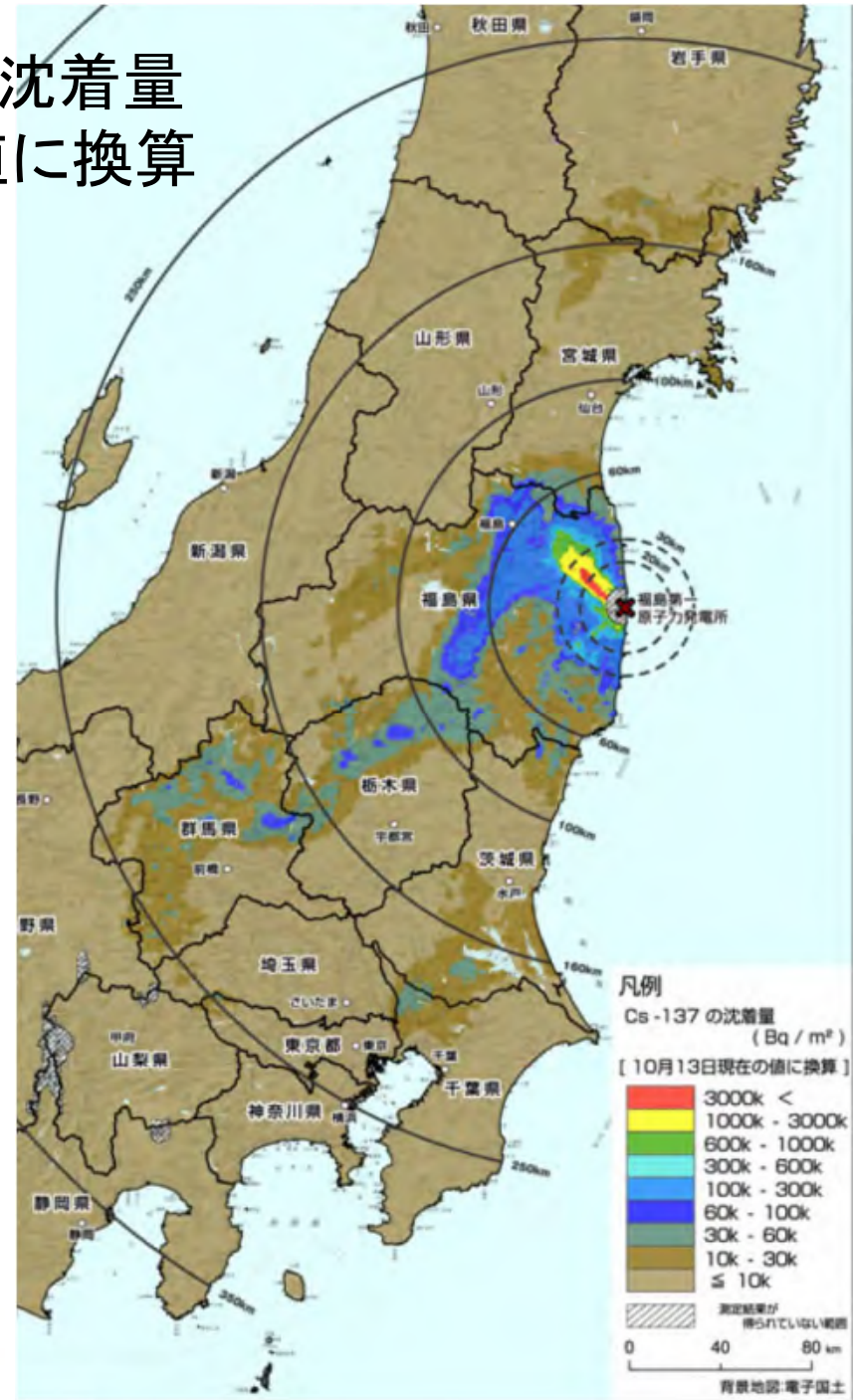
^{137}Cs の土壤濃度マップ



土壤濃度マップは他に ^{134}Cs 、 ^{129}mTe 、 ^{110}mAg
 ^{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



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エネルギーの比較

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
プラセオジウム143 (^{143}Pr)	13.6日	β		0.0041		
ネオジウム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および放出割合の比較

放射性核種	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)	
	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 (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