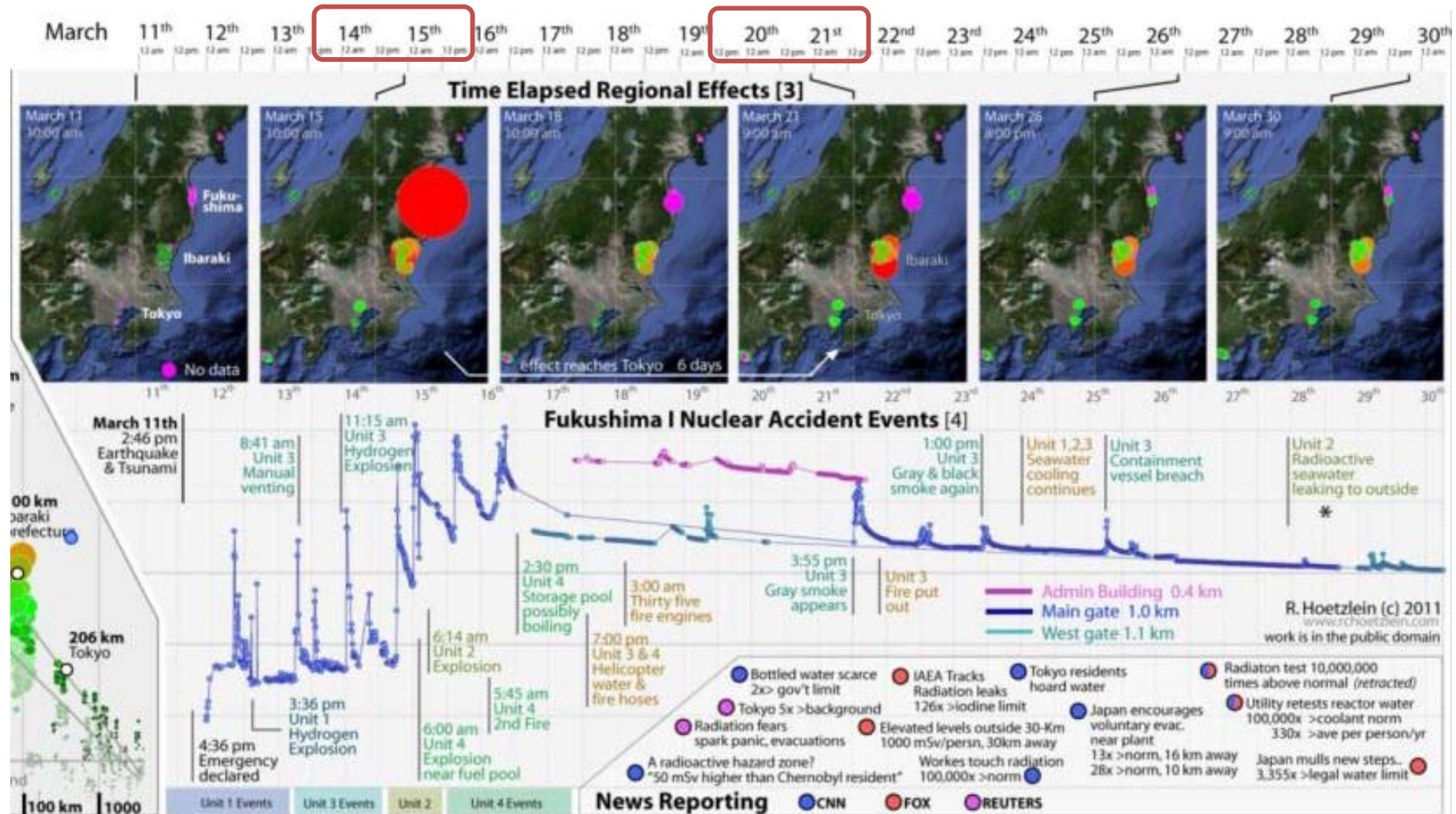


放射性物質に汚染された 廃棄物の問題

(独) 国立環境研究所

山田 正人

福島第一原発事故の経緯

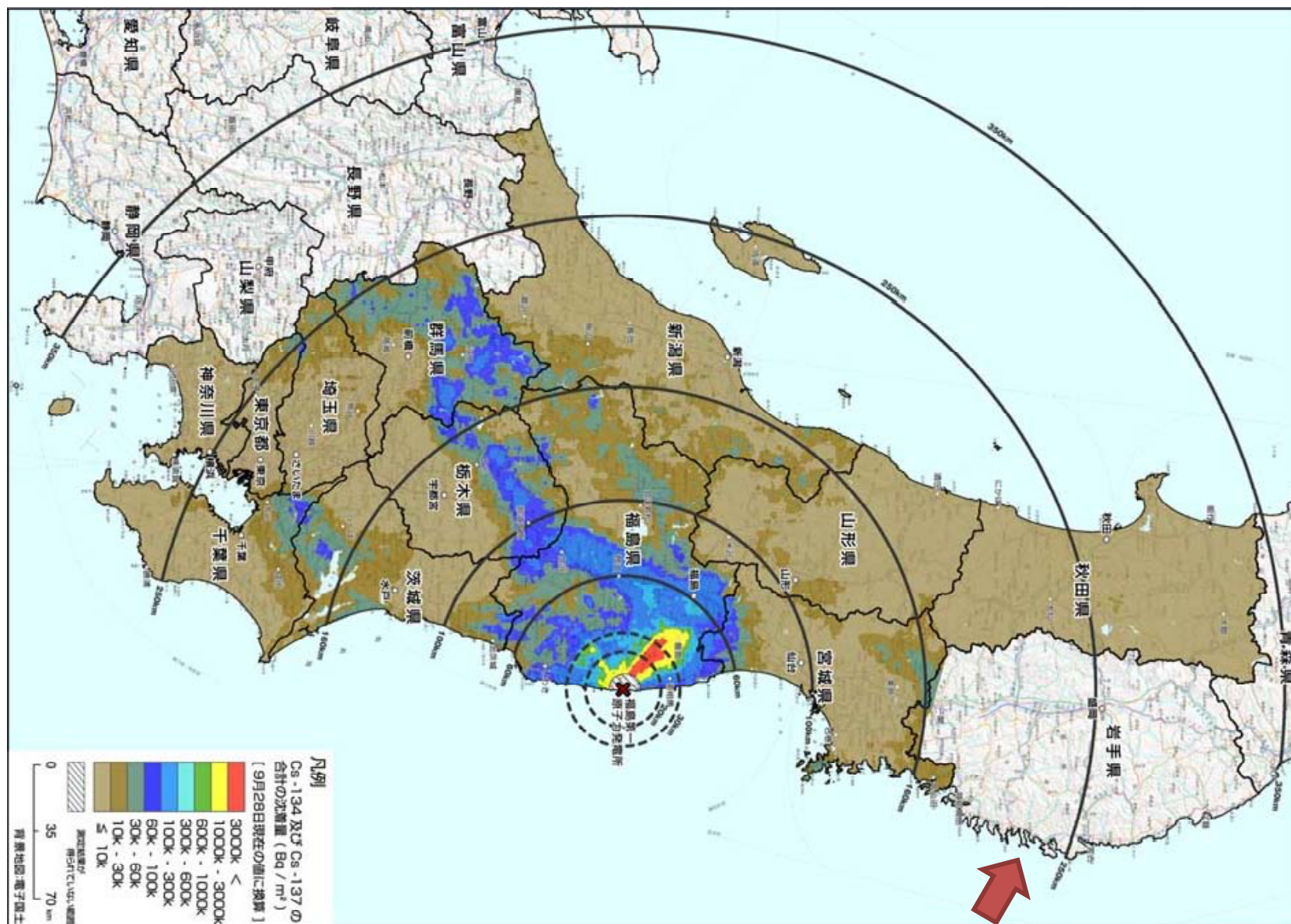


大気への放出核種と放出量 (MELCORによる推定)

核種	Xe-133	Cs-134	Cs-137	Sr-89	Sr-90	Ba-140	Te-127m	Te-129m
半減期	5.2 d	2.1 y	30.0 y	50.5 d	29.1 y	12.7 d	109.0 d	33.6 d
1～3号炉 合計	1.13E+19	1.75E+16	1.53E+16	1.96E+15	1.39E+14	3.13E+15	1.09E+15	3.33E+15
核種	Te-131m	Te-132	Ru-103	Ru-106	Zr-95	Ce-141	Ce-144	Np-239
半減期	30.0 h	78.2 h	39.3 d	368.2 d	64.0 d	32.5 d	284.3 d	2.4 d
1～3号炉 合計	9.69E+13	7.54E+14	7.50E+09	2.14E+09	1.67E+13	1.77E+13	1.15E+13	7.61E+13
核種	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Y-91	Pr-143	Nd-147	Cm-242
半減期	87.7 y	24065 y	6537 y	14.4 y	58.5 d	13.6 d	11.0 d	162.8 d
1～3号炉 合計	1.88E+10	3.23E+09	3.13E+09	1.25E+12	3.45E+12	4.08E+12	1.67E+12	1.02E+11
核種	I-131	I-132	I-133	I-135	Sb-127	Sb-129	Mo-99	合計
半減期	8.0 d	2.3 h	20.8 h	6.6 h	3.9 d	4.3 h	66.0 h	
1～3号炉 合計	1.59E+17	4.69E+14	6.77E+14	6.35E+14	6.35E+15	1.63E+14	8.77E+07	1.15E+19

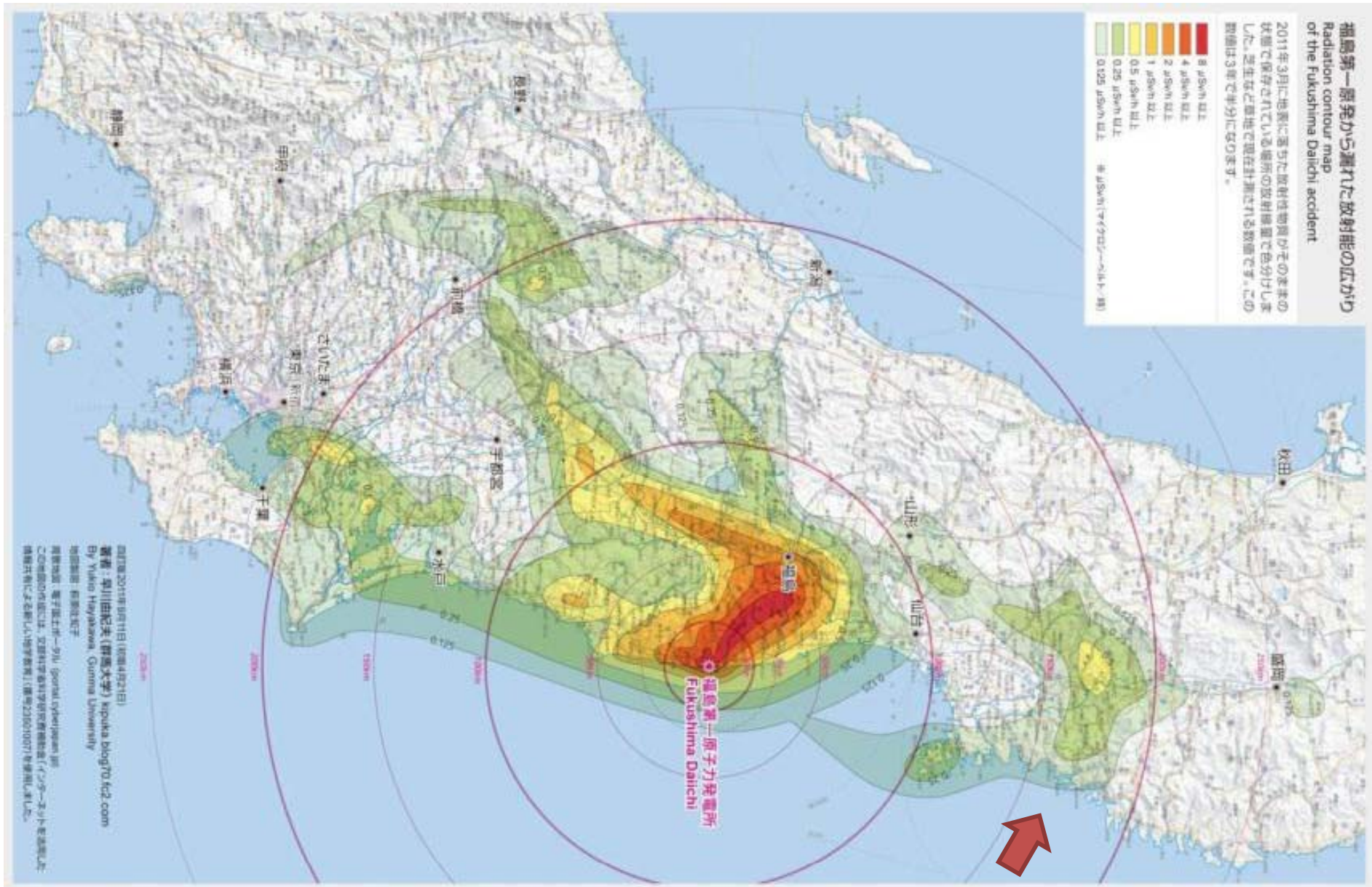
20110606_原子力安全・保安院_東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、
2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について

福島第一原発から漏れた放射能の広がり



20111012_文部科学省_文部科学省による新潟県及び秋田県の航空機モニタリングの測定結果について

福島第一原発から漏れた放射能の広がり



早川 (2011)

福島第一原発から漏れた放射能汚染ルートとタイミン グ

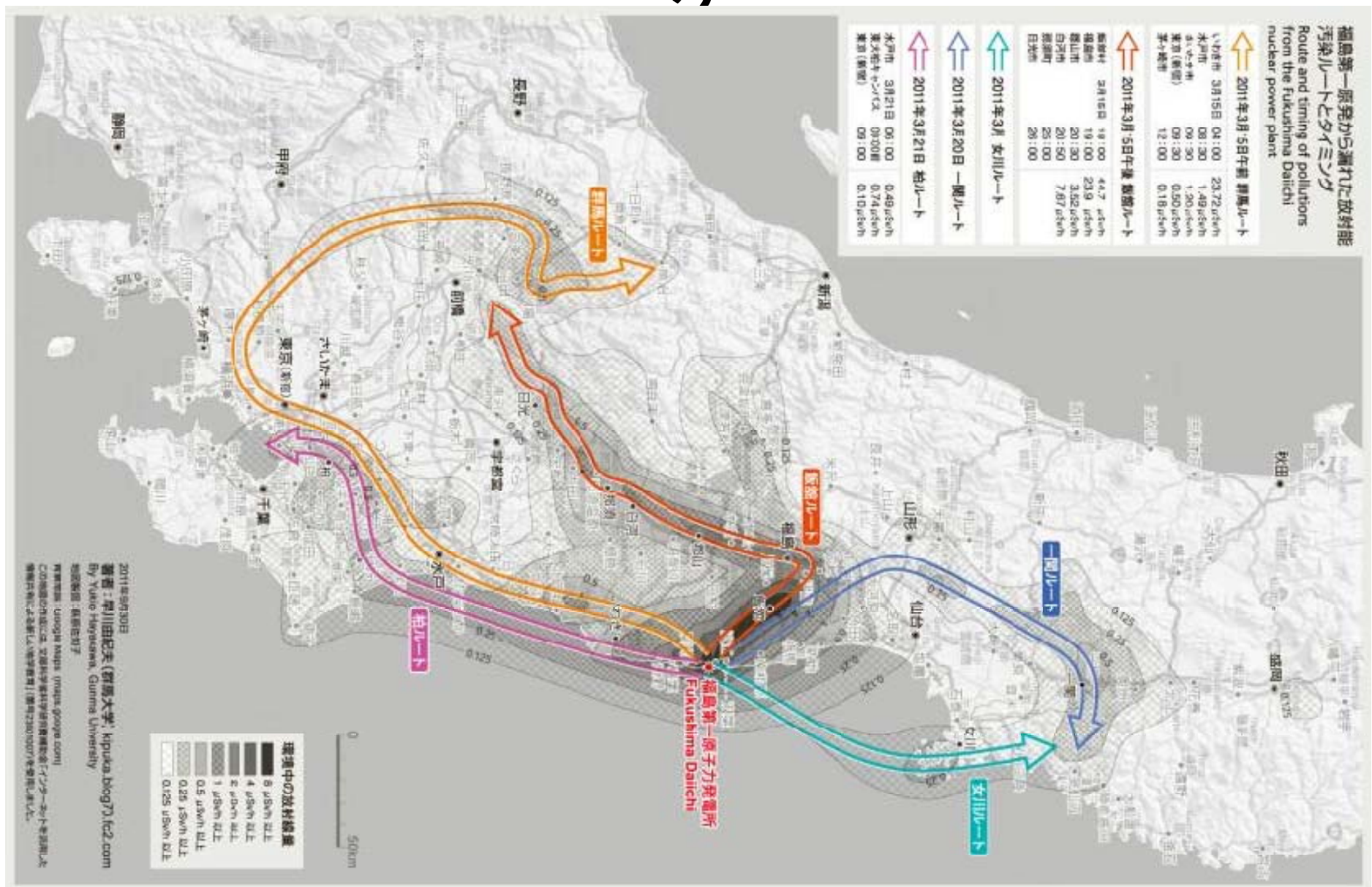
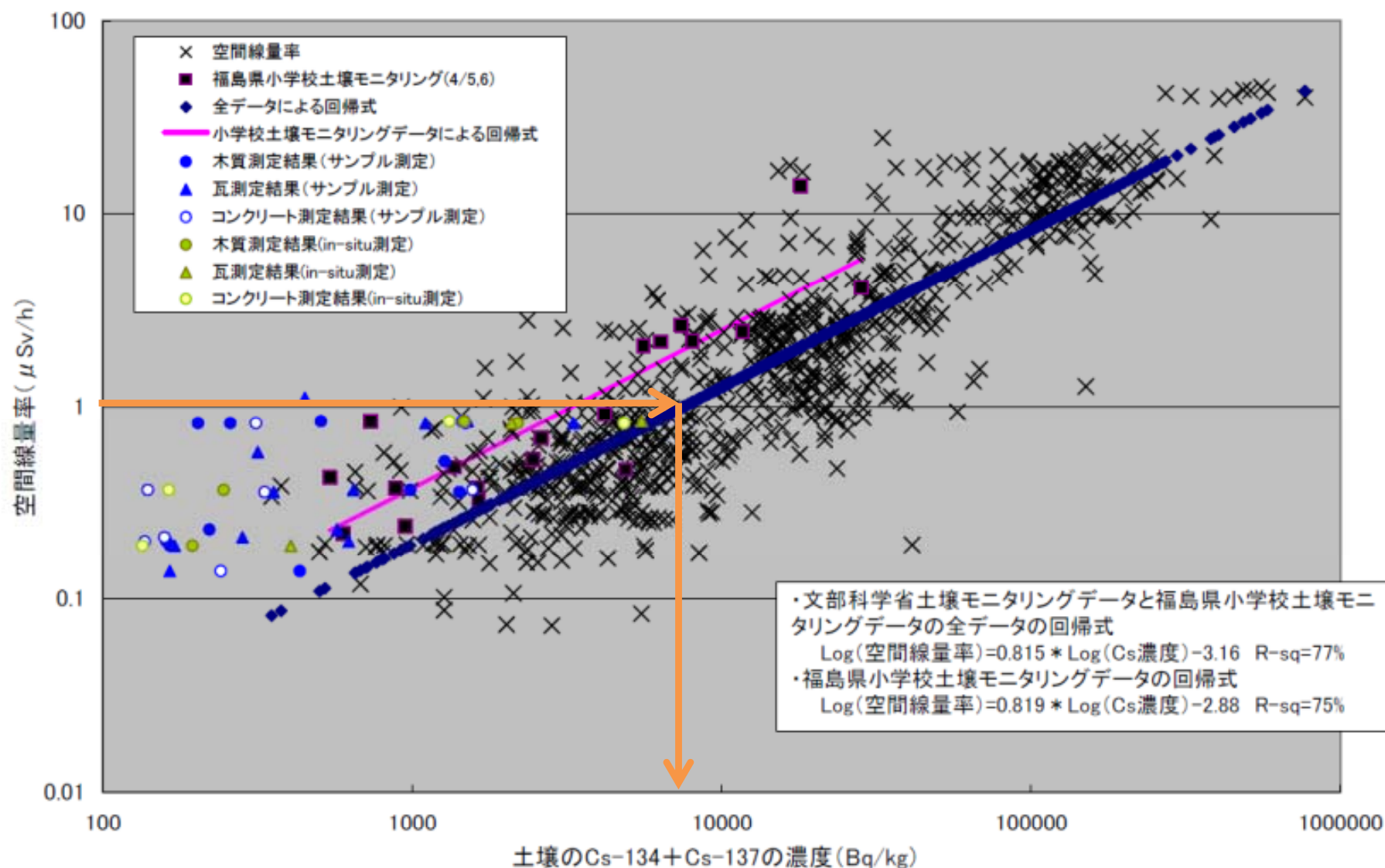


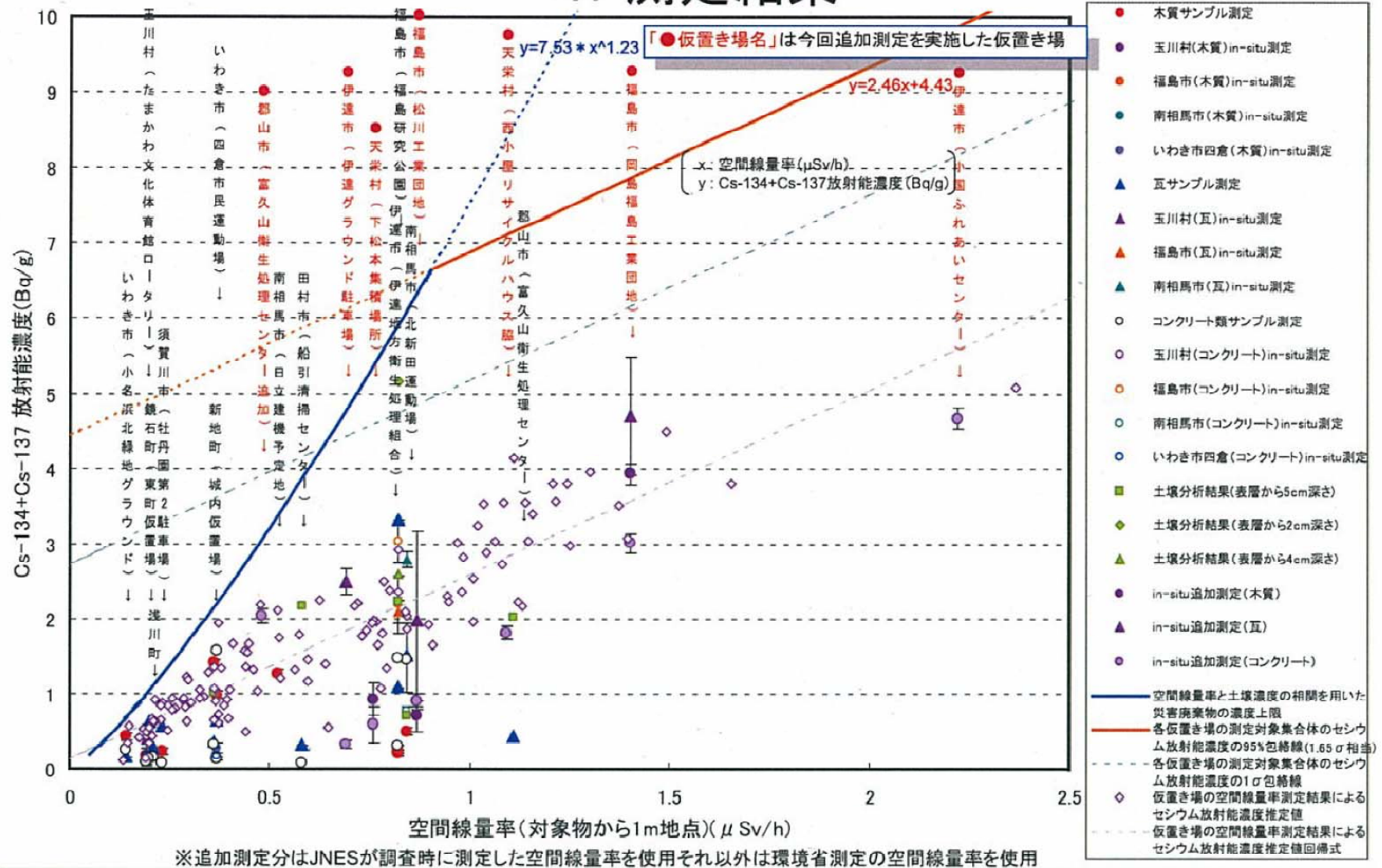
図4 土壌のCs放射能濃度と空間線量率の相関関係

(MEXTのWeb 4月1日～5月22日の土壌の全データ及び福島県小学校のデータ) (2011/6/1に換算)



仮置場における空間線量率と放射能濃度の関係

4. 測定結果



仮置場における空間線量率と放射能濃度の関係

放射性セシウム(単位: Bq/kg)		線量率 (μ Sv/hr)		元の試料(有姿ベース)			溶出液				
		数値	容積 (mL)	Cs134	Cs137	Cs合計	Cs134	Cs137	Cs合計	pH	EC
福島県内 仮置場	大谷石			14400	16200	30600	<12.5	<8.73	—	7.1	9.6
	大谷石以外 (セメントブロック)	0.72		2990	3470	6460	<9.87	<9.47	—	10.9	31.8
	大谷石以外 (スレート瓦)	0.33		3000	3550	6550	<8.27	<8.25	—	10.7	44.8
	木材	0.15		3480	4070	7550	<13.0	<9.81	—		
	トタン	0.43		4510	5020	9530	<6.46	<8.13	—	7.0	1.8
	石膏ボード	0.11		120	136	256	<6.54	<8.16	—	6.8	224
	瓦	0.25		597	672	1269	<8.70	<9.76	—	7.3	2.9
	塩ビ管	0.30		6560	7290	13850	32.6	36.5	69.1	6.8	5.2

採取試料



コンクリートブロック
 α : 0.08 cps, $\beta\gamma$: 280 cps



大谷石
 α : 0 cps, $\beta\gamma$: 440 cps



壁材 (木くず)
 α : 0.005 cps, $\beta\gamma$: 160 cps



スレート瓦
 α : 0 cps, $\beta\gamma$: 530 cps



トタン板 (金属くず)
 α : 0 cps, $\beta\gamma$: 280 cps



石膏ボード
 α : 0 cps, $\beta\gamma$: 170 cps



屋根瓦
 α : 0 cps, $\beta\gamma$: 280 cps



雨どい (プラ)
 α : 0 cps, $\beta\gamma$: 160 cps

仮置場における空間線量率と放射能濃度の関係

表2 遮蔽体内での接触による試料表面の線量当量率（陸前高田市）

	放射線量 [μ SV/h]	放射線量 BG 補正值 [μ SV/h]	BG 放射線量 [μ SV/h]
木質①	0.017	0.001	0.016
木質②	0.020	0.004	0.016
木質③	0.018	0.002	0.016
5mm 未満細塵①	0.020	0.004	0.016
5mm 未満細塵②	0.021	0.005	0.016
5mm 未満細塵③	0.018	0.002	0.016
紙類	0.017	0.001	0.016
繊維	0.023	0.007	0.016
プラスチック	0.019	0.003	0.016
わら	0.017	0.001	0.016
遮蔽体内 バックグラウンド	0.016	—	—

表1 災害廃棄物(燃焼物)種類別の放射能濃度（陸前高田市）

種類	木質	紙類	繊維類	プラスチック	わら	細塵 (<5mm)
放射能濃度 (Bq/kg)	69	38	1,480	510	177	134

仮置場における空間線量率と放射能濃度の関係

表4 遮蔽体内での接触による試料表面の線量当量率（宮古市）

	放射線量 [μ SV/h]	放射線量BG補正值 [μ SV/h]	BG放射線量 [μ SV/h]
木質①	0.018	0.002	0.016
木質②	0.017	0.001	0.016
木質③	0.018	0.002	0.016
5mm未満細塵①	0.021	0.005	0.016
5mm未満細塵②	0.021	0.005	0.016
5mm未満細塵③	0.019	0.003	0.016
紙類	0.019	0.003	0.016
繊維	0.019	0.003	0.016
プラスチック	0.017	0.001	0.016
わら	0.017	0.001	0.016
遮蔽体内 バックグラウンド	0.016	—	—

表2 災害廃棄物（燃焼物）種類別の放射能濃度（宮古市）

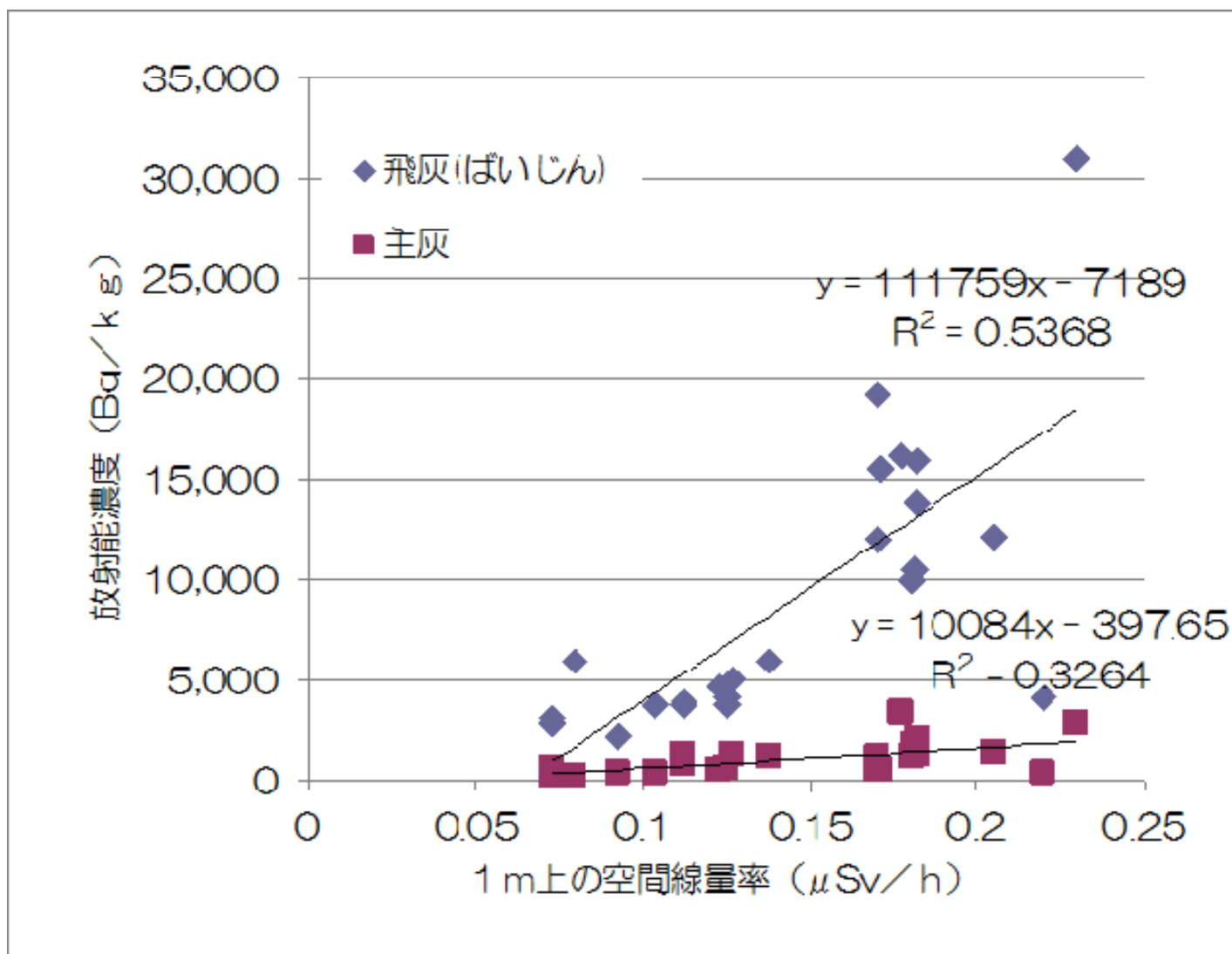
種類	木質	紙類	繊維類	プラスチック	わら	細塵 (<5mm)
放射能濃度 (Bq/kg)	70.7 ^{※1}	22.8 ^{※2}	41.0 ^{※2}	42.0	39.0 ^{※2}	39.6

※1……データの一部が検出下限値以下であったため、検出下限値と仮定して平均値を算出した。

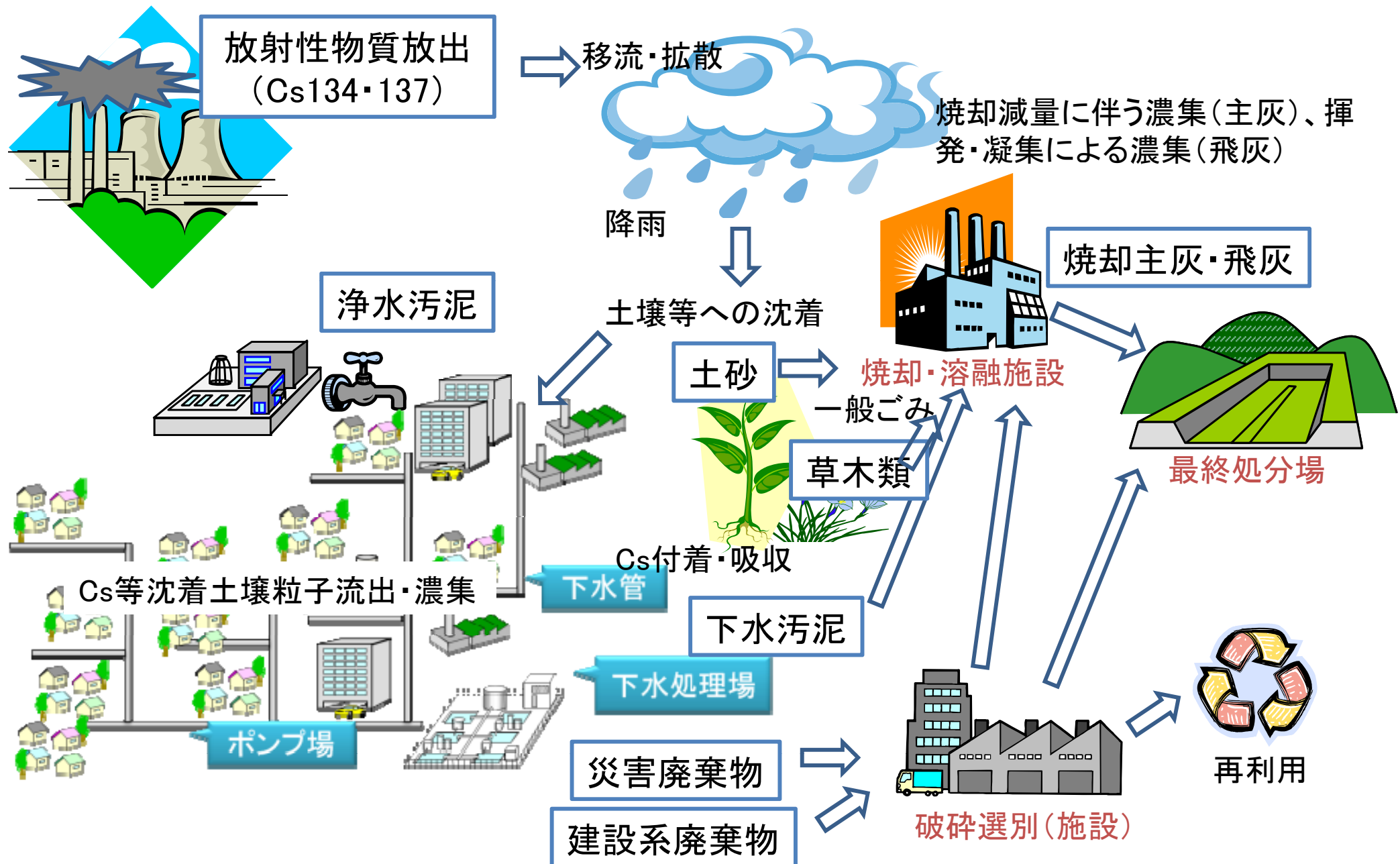
※2……検出下限値以下であったため検出下限値と仮定した。

災害廃棄物安全評価検討会（第5回）資料

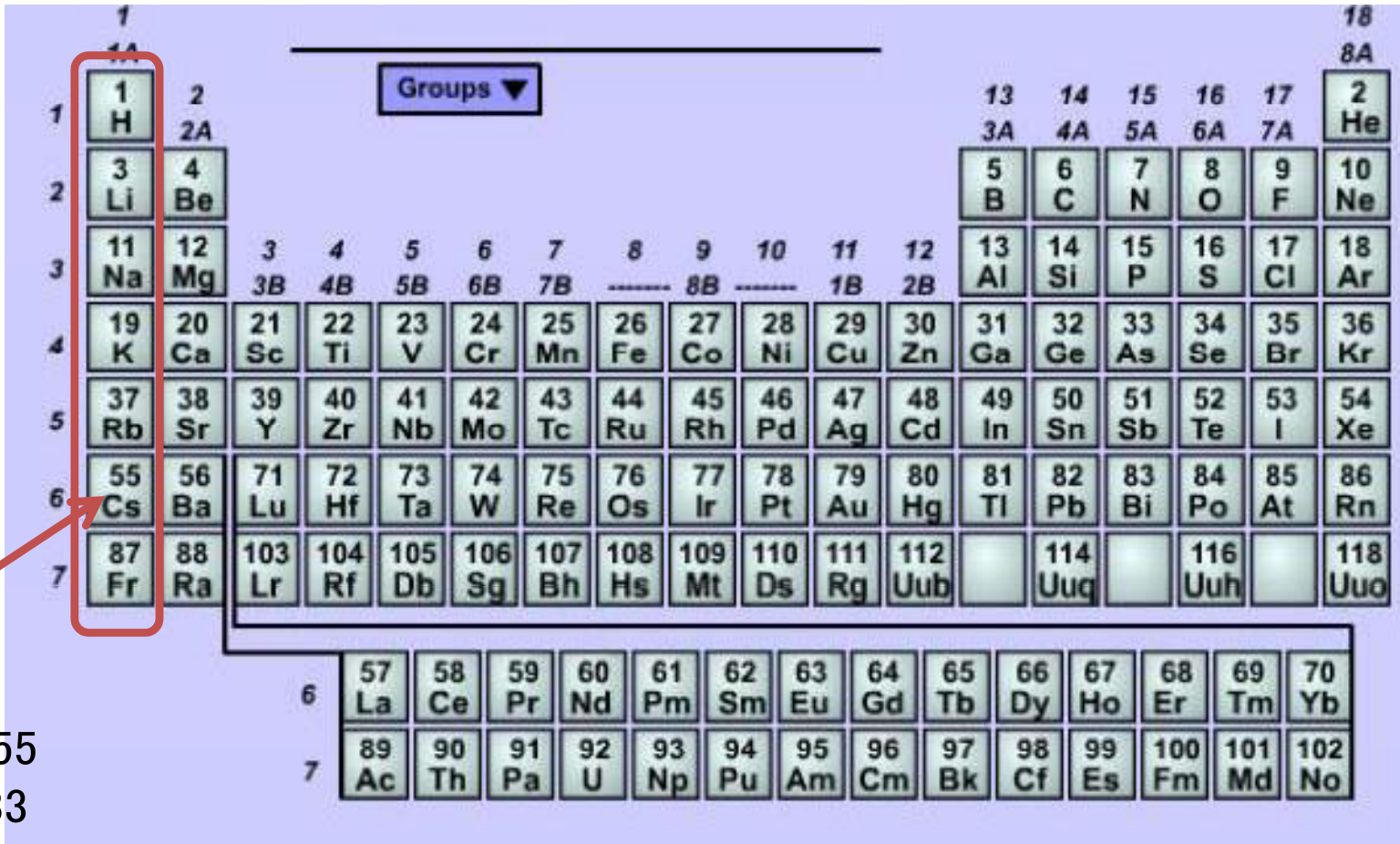
市町村の空間線量率と焼却灰濃度の関係 (茨城県データ)



放射性物質を含む廃棄物等の問題の構造



セシウム(Cs)



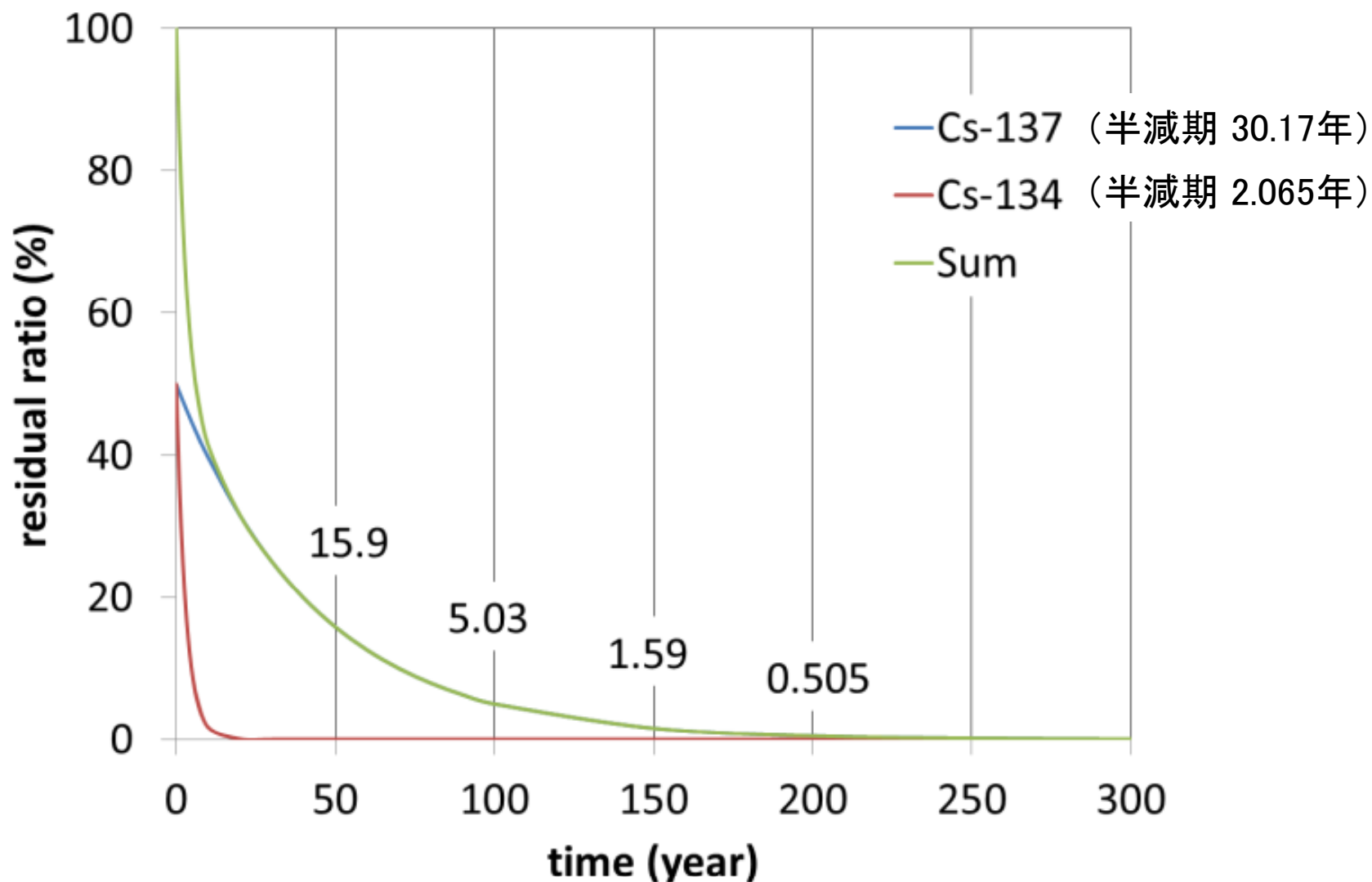
Periodic table showing the position of Cesium (Cs) in the 6th period, 1st group (alkali metals). The element is highlighted with a red box, and a red arrow points to it from the text below.

セシウム
原子番号55
質量数 133

	CAS	式量 g/mol	密度 g/cm ³	相	水への溶解度 g/100mL	融点 °C	沸点 °C
塩化セシウム CsCl	7647-17-8	168.36	3.99	固体	162	645	1295
ヨウ化セシウム CsI		259.81	4.51	固体	44	621	1277±5

放射能はなかなか減らない

放射能濃度が1/10に減衰するまで約70年かかる



放射性セシウムの崩壊曲線

放射性物質は極めて微量

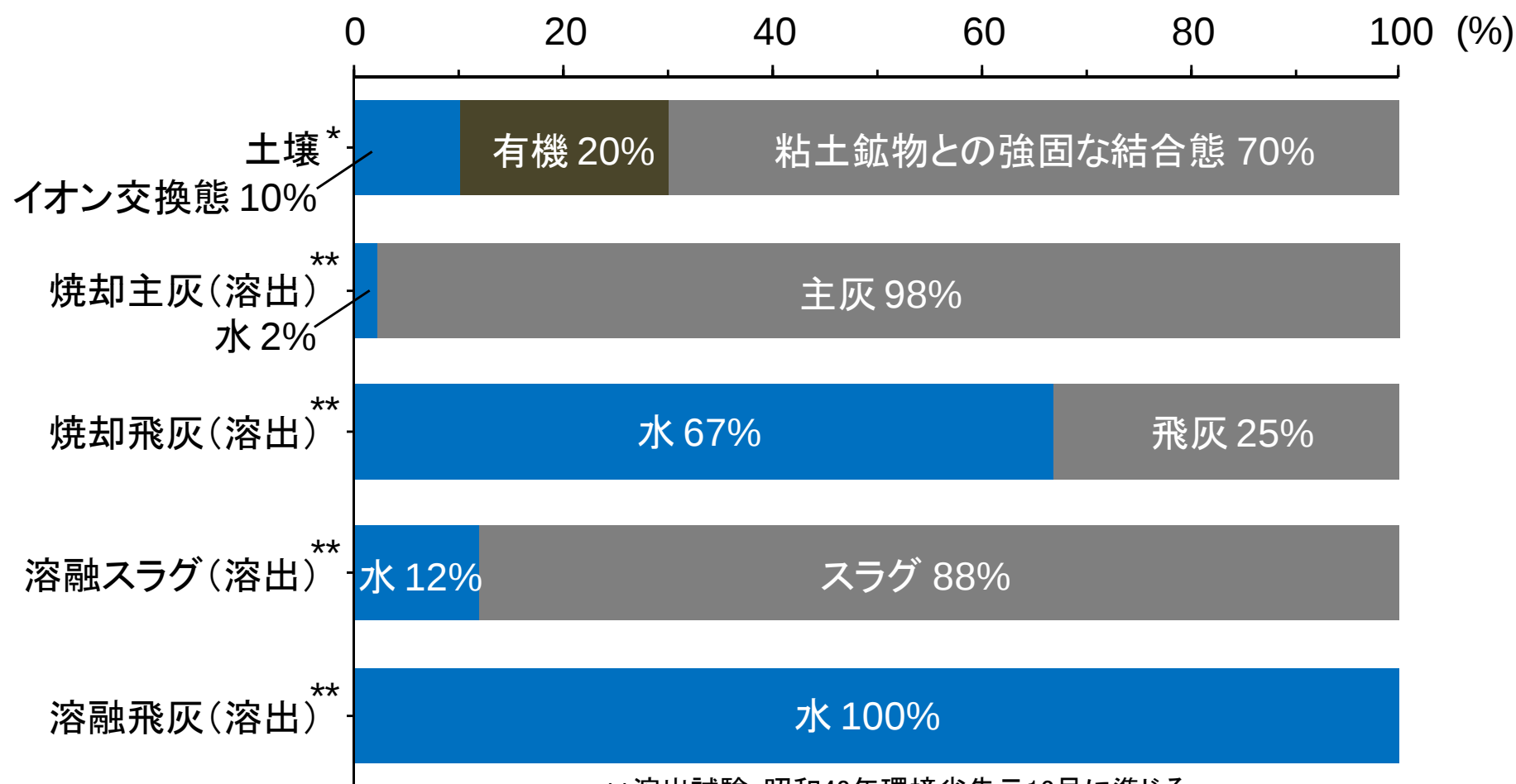
8,000 Bq/kg ($^{134}\text{Cs}:\text{}^{137}\text{Cs}=1:1$) $\rightarrow$ 1.364 ng/kg

放射性核種	半減期	T (sec)	M/B (mol/Bq)	
Sr-90	28.9y	9.1×10^8	2.2×10^{-15}	
I-131	8.0day	6.9×10^5	1.7×10^{-18}	
Cs-134	2.1y	6.6×10^7	1.6×10^{-16}	$2.1 \times 10^{-14} \text{ g/Bq} = 21\text{fg/Bq}$
Cs-137	30y	9.5×10^8	2.3×10^{-15}	$3.2 \times 10^{-13} \text{ g/Bq} = 320\text{fg/Bq}$

f:フェムト 10^{-15} 、ちなみに 10^{-12} はピコ(p)

セシウムは水に溶けやすい

塩化セシウムの水への溶解度(25℃): 65.55 %(wt)



**溶出試験: 昭和48年環境省告示13号に準じる

50g/500mLを6時間反復振とう後、0.45 μ mメンブレンフィルターでろ過

日の一致した試料3日分を分析

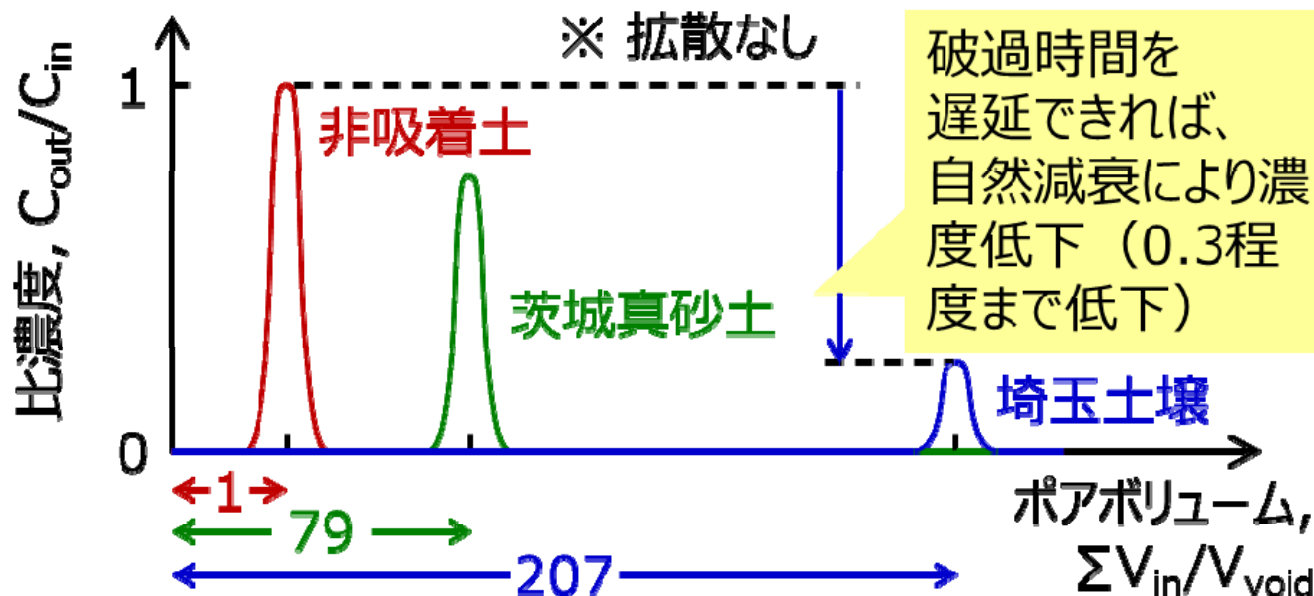
*Tsukada ら(2008) Journal of Environmental Radioactivity, 99, 875-881.

**当センター測定結果、水への溶出率(%) = 溶出量/含有量 $\times$ 100、固体への残存率は100% - 溶出率

セシウムは土壤に保持される？

予備的な検討なので数字は信用しないでください

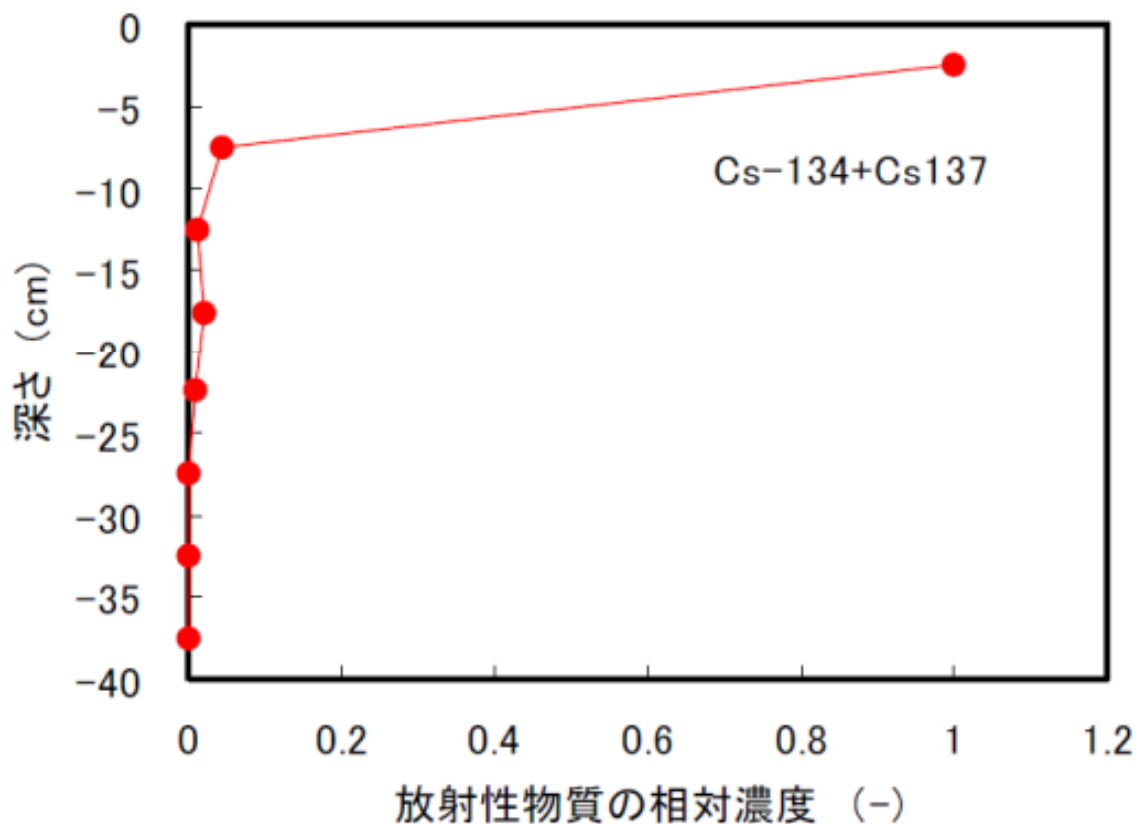
「第五回災害廃
棄物安全評価検
討会」資料より



	分配係数 (mL/g)	遅延係数	降雨量 1,800 mm/yrのうち、600mm/yrが 浸透したときの、0.5m厚の覆土を ^{137}Cs が通 過するのに必要な時間 (yr)
珪砂5号	4.52	28	7
埼玉土壤	34.4	207	52
茨城真砂土	13.0	79	20
ベントナイト	64.1	386	97

※ 遅延係数 = $1 + (\text{乾燥密度} \times \text{分配係数}) / \text{体積含水率}$

図6 土壌中のCs濃度の深度分布



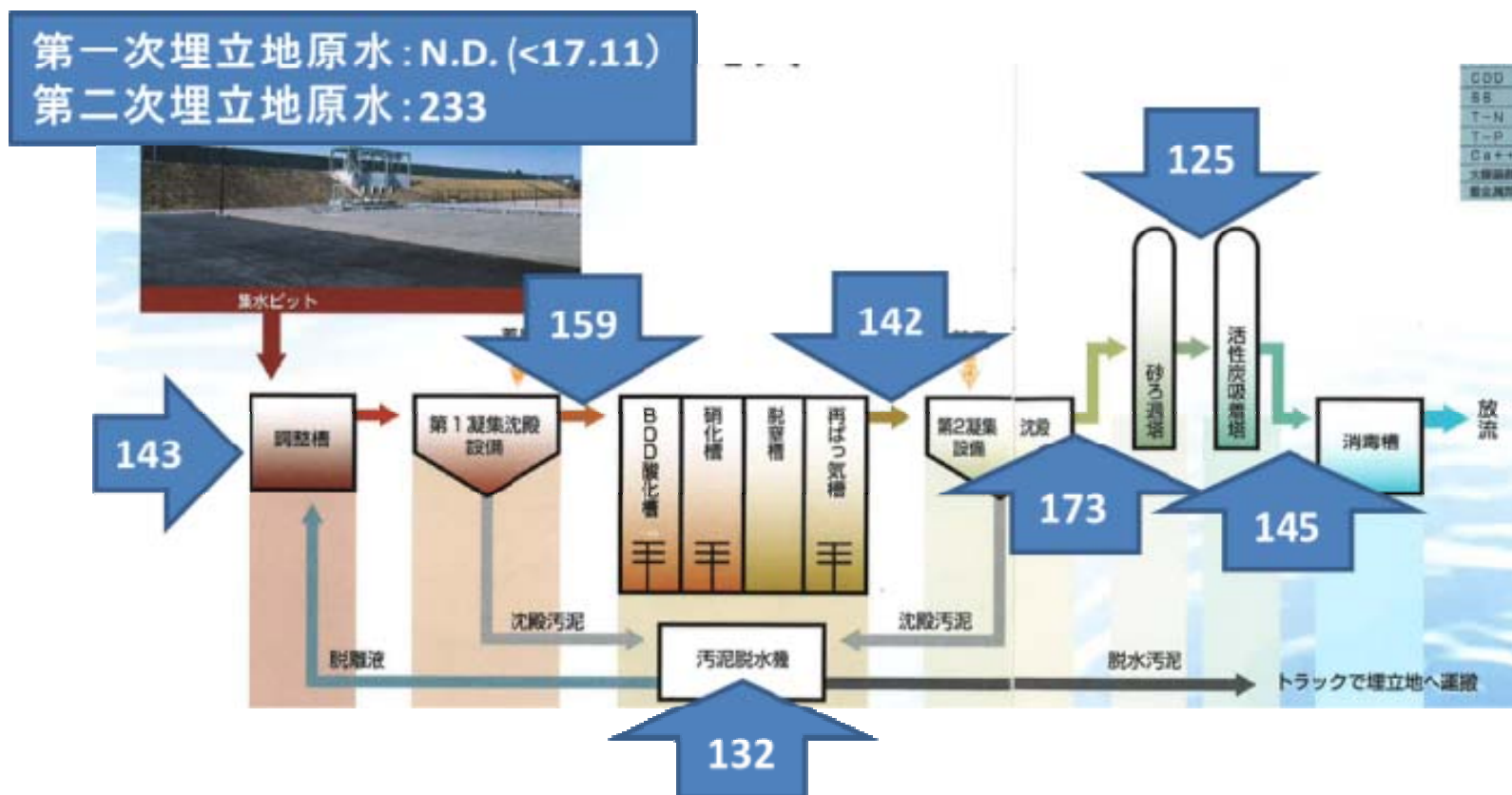
*) 0～5cmの濃度を1とした相対濃度を、測定地点5ヶ所で平均した。

**) 1ヶ所については、5～10cmで一旦濃度が低下した後～20cmまで濃度上昇が見られたが、地質の状況の特殊性によるものと見られるため、平均から除外した。

水処理では除去されにくい

ゼオライト／イオン交換／逆浸透等の高度処理が必要

$^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$, Bq/L



浸出水処理工程における放射性セシウムの挙動

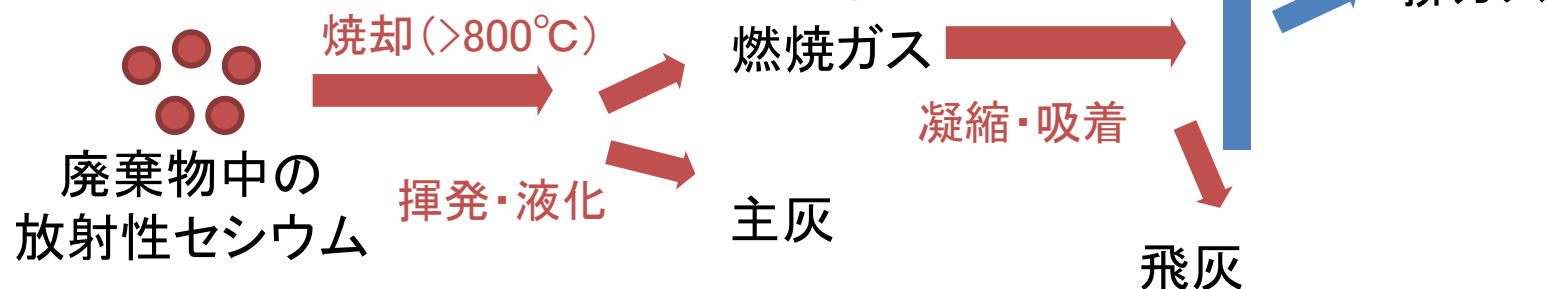
焼却施設では煤じんと同じ挙動をする

除去率 バグフィルター:99.9%以上 電気集塵機:98.6~99.8%

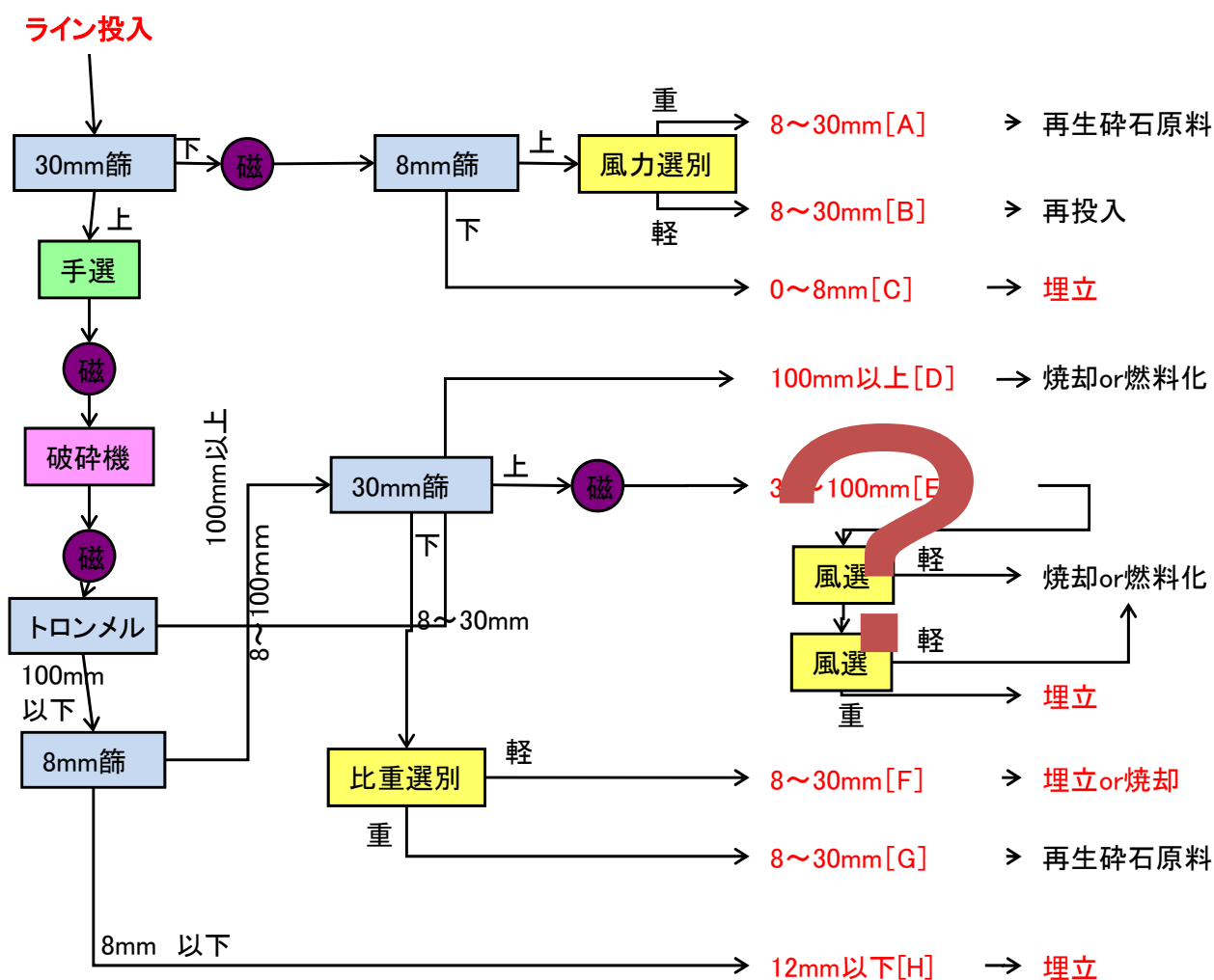
施設名	焼却主灰 (Bq/kg)		焼却または溶融飛灰 (Bq/kg)		燃発出口排ガス (Bq/r-3)		焼却ごみ混入総量 当たり除去率 (%)		排ガス移行総量 あたりの除去率 (%)		主要排ガス処理 設備、他
	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	
伊達地方衛生 処理組合	6.100	6.900	36.000	39.000	0.630	0.690	99.76	99.76	99.82	99.82	電気集塵機、2工 段は災害廃棄物 先入
	4.700	5.200	36.000	39.000	1.400	1.500	99.55	99.55	99.36	99.36	
須賀川地方保 健環境組合	2.200	2.500	3.900	4.300	0.340	0.350	99.50	99.50	98.57	98.57	電気集塵機、2工 段は災害廃棄物 先入
	2.500	2.800	15.000	16.000	0.360	0.350	99.74	99.74	99.60	99.60	
福島市あらか わクリーンセン ター	6.500	9.400	37.000	41.000	<0.045	<0.03	99.99<	99.99<	99.98<	99.98<	バグフィルター
	9.800	11.000	35.000	38.000	<0.038	<0.025	99.99<	99.99<	99.98<	99.98<	
いわき市北部 清掃センター	436	541	6.090	7.290	<0.77	<0.65	98.33<	98.33<	97.94<	97.94<	バグフィルター、灰 沈降機/22採取、排 ガス8/2採取
杵市南部ク リーンセンター	388 (スラグ)		60.800		<2		98.44<		98.38<		バグフィルター

計算条件

可燃ごみ1トンあたりの焼却排ガス量(r-3)	5.000
可燃ごみ1トンあたりの焼却主灰量(kg)	100
可燃ごみ1トンあたりの焼却飛灰量(kg)	30
可燃ごみ1トンあたりの溶融飛灰量(kg)	10
可燃ごみ1トンあたりの溶融スラグ量(kg)	60



破碎選別工程での挙動は？



質量の移行率

埋立
(57%)

ライン投入
(100%)

骨材(23%)

—回收鉄 (5%):

焼却・燃料 (16%)

有機物の移行率

埋立 (27%)

ライン投入
(100%)

—骨材 (4%)

—回收鉄0%

焼却・燃料
(69%)

鉛の移行率

埋立 (55%)

ライン投入
(100%)

骨材(32%)

—回收鉄(1%)

— 燒却・燃料12%

放射能濃度埋立基準の根拠

- **8,000 Bq/kg(2011/6/23)**
 - 8,000 Bq/kg(8 Bq/g)の廃棄物をそのまま埋立処分する場合の**作業者の被ばく線量**は0.78mSv/yと計算され、原子力安全委員会による作業者の目安である1mSv/yを下回っている。このように、8,000 Bq/kgは作業者の安全も確保される濃度レベルであり、原子力災害対策本部において別途検討された上下水処理等副次産物の取扱いと同じである。
 - なお、この値は、1日8時間、年間250日の労働時間のうち半分の時間を廃棄物のそばで作業すること、1日の作業の終了時の覆土である即日覆土を行わず、中間覆土のみ行うことを仮定して計算されている。
 - 廃棄物のそばでの作業時間を減らせば、被ばく量を削減することができる。また、埋め立てた後にすぐに覆土を行えば、埋め立てられた廃棄物からの被ばく量を削減することができる。
- **100,000 Bq/kg(2011/6/16:下水汚泥)**
 - RIクリアランス報告書を基に、**跡地を居住等の用途に供しないこととした場合に周辺住民の受ける線量**が $10\mu\text{Sv/年}$ 以下である放射能濃度を評価した。
 - 覆土厚50cm、跡地の滞在時間200時間/年、処分場閉鎖から10年後、覆土以外の遮蔽なし、覆土0.5mの直下に厚さ10mの脱水汚泥等の層があると仮定した計算。

放流水線量限度

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則及び同規則に基づく線量限度等を定める告示

- ^{134}Cs : 60Bq/L
- ^{137}Cs : 90Bq/L
 - 複数の核種が存在する場合は各核種の(濃度／基準)比の合計値が1を超えないこと
 - 三月間についての平均濃度
- 根拠: 70年間の飲用(経口摂取)で1 mSv/yr 未満

排ガス	
^{134}Cs : 20Bq/m^3	
^{137}Cs : 30Bq/m^3	

クリアランスレベル(リサイクルの基準)

表1 主要な放射線核種のクリアランスレベルおよびBSS免除レベルのまとめ (Bq/g)

核種	半減期	クリアランスレベル(Bq/g)						BSS免除レベル	
		原安委	RI汚染物	IAEA	RP89	RP113	RP122 Pt.I	濃度(Bq/g)	数量(kBq)
I-129(参考)	160000000年	0.7	-	-	1	0.1	0.1	0.01	100
I-131	8.0日	-	10	-	-	-	-	0.01	1000
Cs-134	2.1年	0.5	0.1	0.1~1	1	0.1	0.1	0.1	10
Cs-137	30年	0.8~1	0.1	0.1~1	1	1	1	0.1	10
Pu-238	88年	-	-	-	1	1	1	1	10
Pu-239	24000年	0.2~0.4	-	0.1~1	1	0.1	0.1	1	10
Pu-240	6600年	0.2~0.4	-	0.1~1	-	-	-	1	1

「放射性物質として扱う必要がない物」を区分するクリアランスレベルは**0.01mSv/年** (10 μ Sv/年)である(原子力安全委員会)。また、現行の廃棄物処理法では「放射性物質およびこれによって汚染された物」を廃棄物の定義から除外している。この限りにおいて、「0.01mSv/年以下の物」が廃棄物として該当すると考えられる。

クリアランスレベルは「自然界の放射線レベルに比較して十分小さく、また、人の健康に対するリスクが無視できる」レベルとして、以下2点を満たすように設定された。

- (i) 自然界の放射線レベル2.4mSv/年(世界平均)の100分の1以下にする。
- (ii) 個人が行動を決定する際に考慮に入れないリスクレベル(10⁻⁶/年)に相当する線量0.1mSv/年を、行為、評価経路等の重畳を考慮し、その10分の1とする。

藤森(2011)

放射能汚染廃棄物の処理処分の流れと要検討事項

