

新刊書籍 発売！ 2012年10月10日 刊行

「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著
中川恵一 執筆協力

丸善出版 本体 2500円+税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質《放射線物理学Ⅰ》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価《放射線物理学Ⅱ》
 - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥科学》
 - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など、多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は、東京大学教養学部で行われた講義をもとにし、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので、高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎 著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

2012年度冬学期 主題科目テーマ講義

放射線

を

科学的に

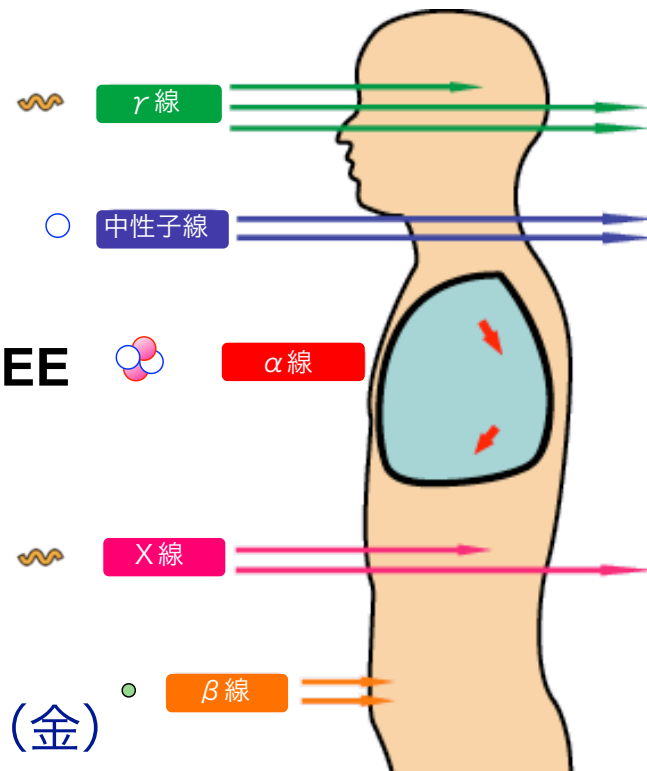
理解する

金曜5限

@ 21 KOMCEE

K402教室

2012 / 12 / 14 (金)



第10回

環境放射化学

シミュレーション・今後の放射線量

小豆川 勝見

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線を科学的に理解する

- 10/12 放射線入門 【鳥居】
- 10/19 放射線物理学 【鳥居】
- 10/26 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 2 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 9 放射線生物学 【渡邊】
- 11/16 放射線医療 【作美】
- 11/20 原子核物理学 【鳥居】
- 11/30 環境システム工学 【森口】
- 12/ 7 科学技術社会論 【藤垣】
- 12/14 環境放射化学 【小豆川】
- 12/21 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/11 放射線の利用 【渡邊】
- 1/25 放射線防護学・加速器科学 【鳥居】

担当教員

ゲスト講師

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

作美 明 《医学部附属病院放射線科》

森口 祐一 《工学部都市工学》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

藤垣 裕子 《教養学部広域システム》

放射線を科学的に理解する (化学分野3回目)

小豆川(しょうずがわ)勝見

はじめに

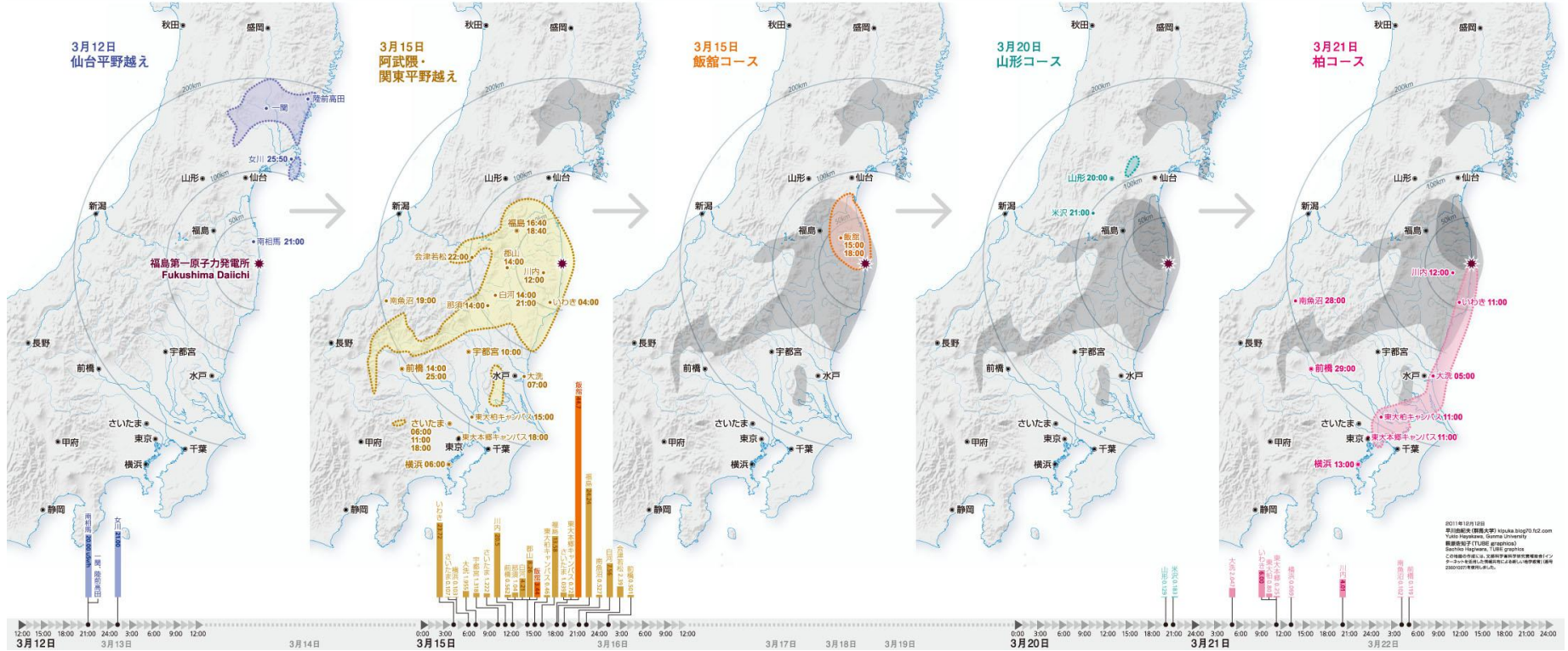
- ▶ 本日は化学最終回「今後の放射線量」
 - 化学1回目では「放射線の測定法」、化学2回目では「実際の計測値、濃縮と拡散」を講義してきた。今日は「シミュレーションと将来の放射線量」ということにテーマをおく。

- ▶ 放射性核種は今後どのように環境中で移動するのか
 - 環境中では「核種」ではなく「元素」として振る舞う。
 - 放射性セシウムと放射性ストロンチウムはどう違う？
 - マクロな視点(航空機モニタリング)とミクロな視点(生活目線)の違い

- ▶ 無用な被曝を避けるために...「除染」をやろう
 - 効率的な除染方法はどうやる？

複数のプルームによる汚染状況(空間線量率による推定)

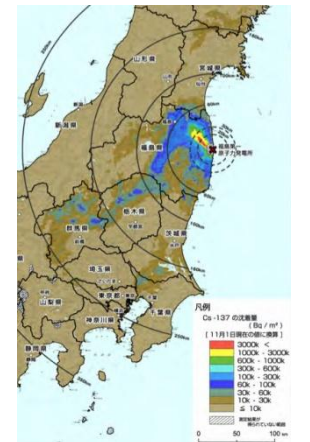
2011年フクシマ放射能汚染の日時 The date and time of radioactive pollutions from Fukushima Daiichi, 2011 0.25uSv/h以上の放射線量を示す地域が、いつ汚染されたかを図示した。



放射能汚染地図(早川由起夫(群馬大), 2011)

*現時点では、それぞれのプルームがどの炉から排出されたのかは正確に把握できていない...けども...

航空機モニタリング(文部科学省, 2011)



フォールアウト形式には2種類「乾性沈着」と「湿性沈着」

▶ 乾性沈着

- ガス状または粒子状の大気汚染物質(放射性物質を含む)が、雨や雪などに取り込まれる形ではなく、大気中から直接、地表や建物、湖沼・河川などに沈着すること。

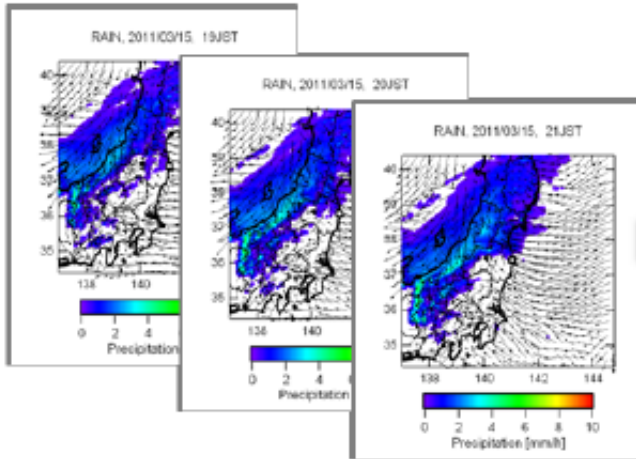
▶ 湿性沈着

- 雨、霧や雪など大気中にさまざまな形で存在する凝結態の水分を媒体にして、大気汚染物質等が地表に降下して沈着すること。
- 降水の生成過程で取り込まれるものをレインアウト、落下の過程で取り込まれるものをウォッシュアウトと呼ぶ。

大気シミュレーションモデル

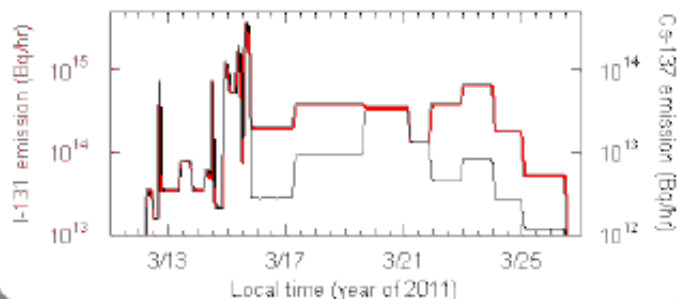
気象モデル(WRF)

3次元の風、降水量などの
気象要素を時間ごとに計算



発生源データ(JAEA)

I-131, Cs-137放出量(時間値)



化学輸送モデル(CMAQ)

3次元の放射性物質濃度を時間ごとに計算

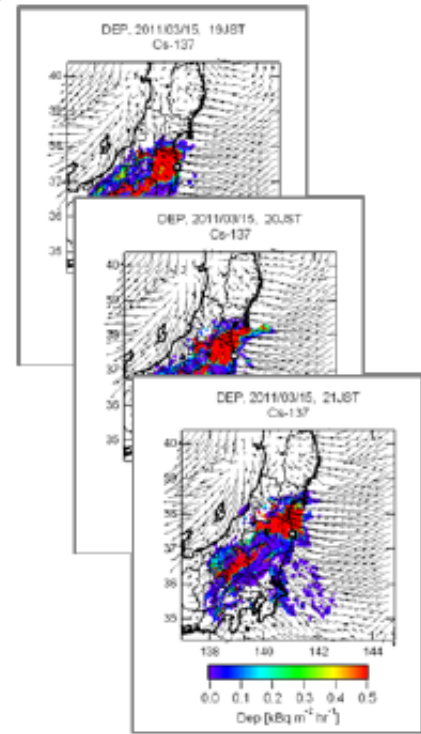
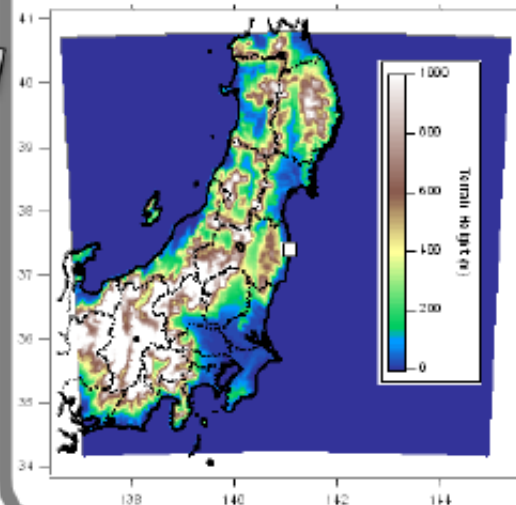
計算するプロセス

- ✓ 放出
- ✓ 輸送(移流/拡散)
- ✓ 沈着(乾性/湿性)
- ✓ 放射性壊変

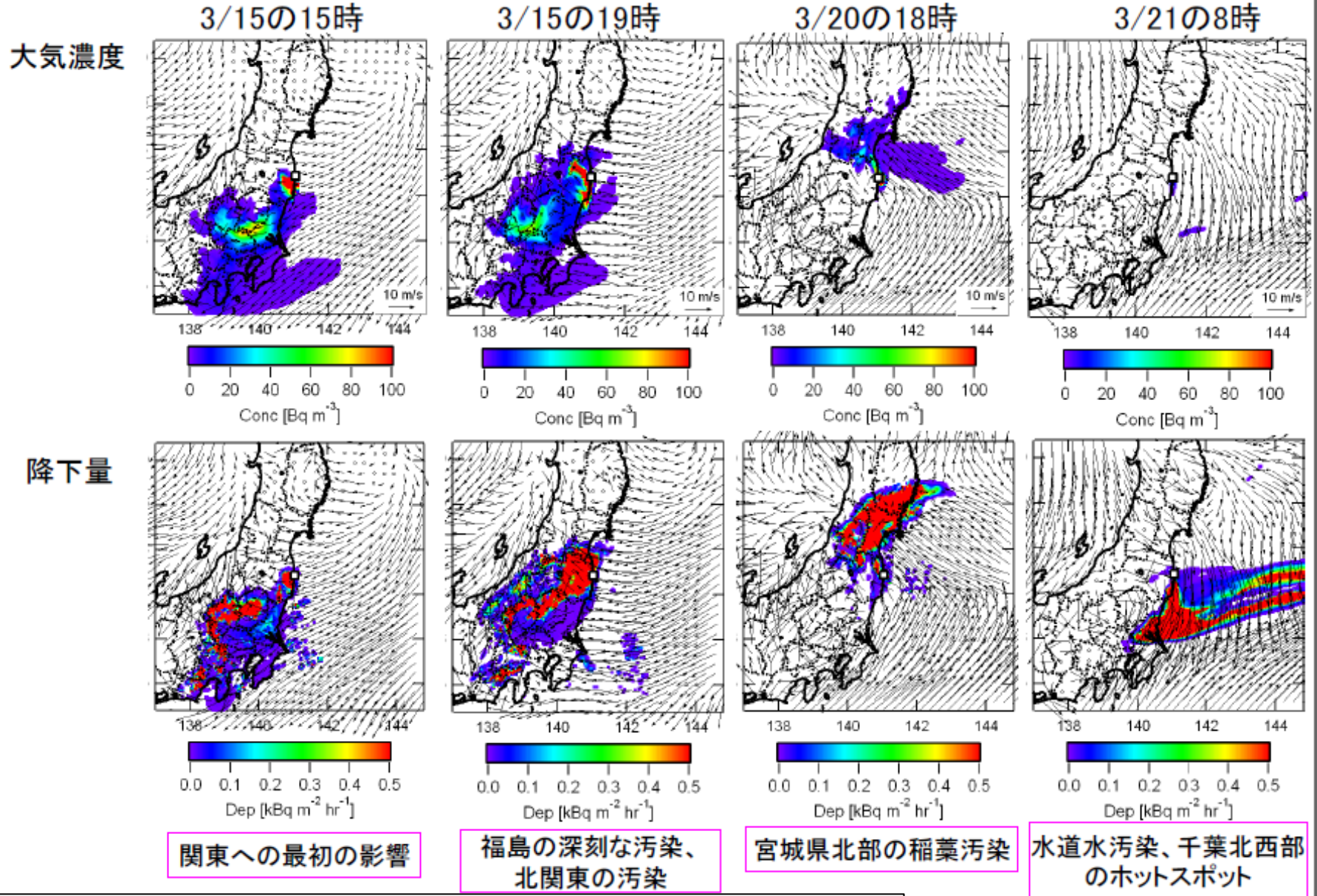
計算結果

I-131, Cs-137の
濃度・沈着量

計算領域



ホットスポットの生成メカニズム



放出量の比較

	方法	期間	^{131}I (PBq)	^{137}Cs (PBq)	^{133}Xe (EBq)
Chino et al. (JNST, 2011)	逆推計 (福島周辺)	3/12-4/6	150	13	---
JAEA (August, 2011)	逆推計 (福島周辺)	3/11-4/6	120	7	---
原子力安全・ 保安院 (June, 2011)	炉内解析	3/11-3/15	160	15	11
JAEA (Dec., 2011)	逆推計 (福島周辺)	3/11-4/30	124	9	---
Stohl et al. (ACPD, 2011) (ACP, 2012)	逆推計 (グローバル)	3/12-4/19	---	36 37	17 15

Cs-137の収支 (PBq)

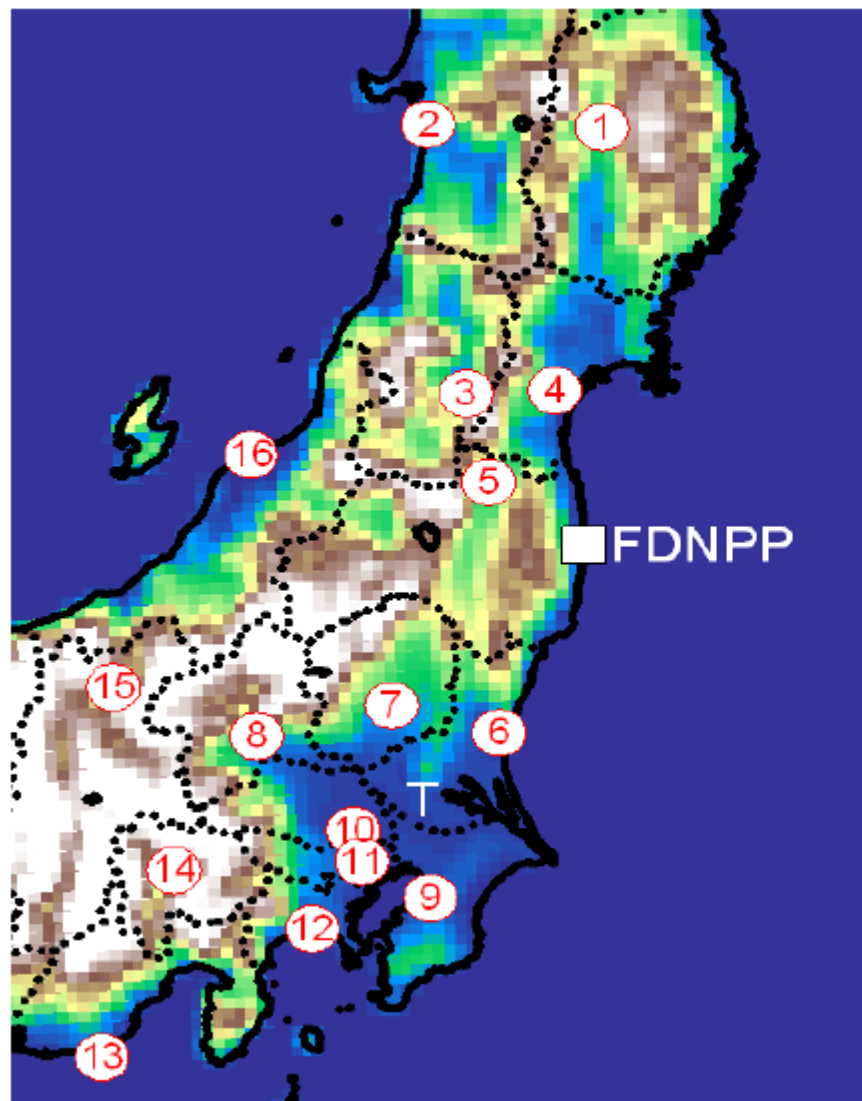
期間		放出量	陸上への 沈着量 ¹⁾	海上への 沈着量 ¹⁾	領域外へ の流出
3/11- 3/30	JAEA (August)	6.5	1.9 (28.9%) ²⁾	0.9 (13.5%)	3.7 (57.6%)
	JAEA (Dec.)	6.7	1.9 (28.6%)	0.9 (13.0%)	3.9 (58.4%)
	Stohl et al.	34.5	4.4 (12.9%)	4.0 (11.6%)	26.1 (75.5%)
3/11- 4/30	JAEA (Dec.)	8.8	2.2 (24.8%)	2.2 (24.7%)	4.4 (50.5%)
	Stohl et al.	35.8	4.5 (12.6%)	4.3 (12.0%)	27.0 (75.4%)

大原利真ら, 放射性物質の大気輸送・沈着 シミュレーションの現状と課題

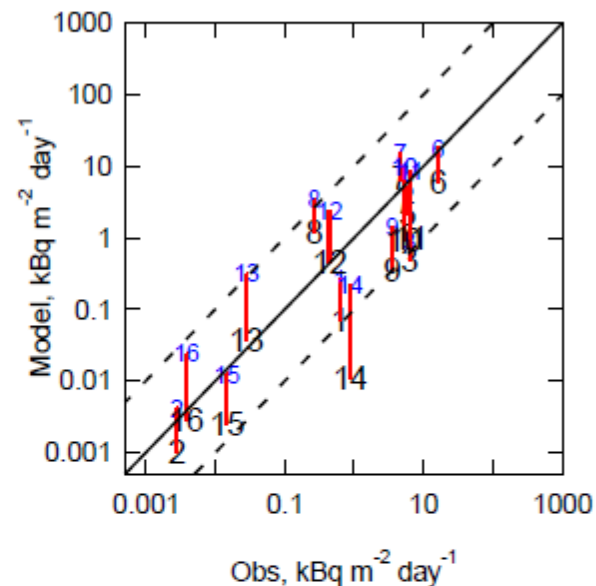
公開ワークショップ「福島第一原子力発電所事故による 環境放出と拡散プロセスの再構築」

1) 沈着量はモデル領域内の値、2) %は放出量に対する割合、

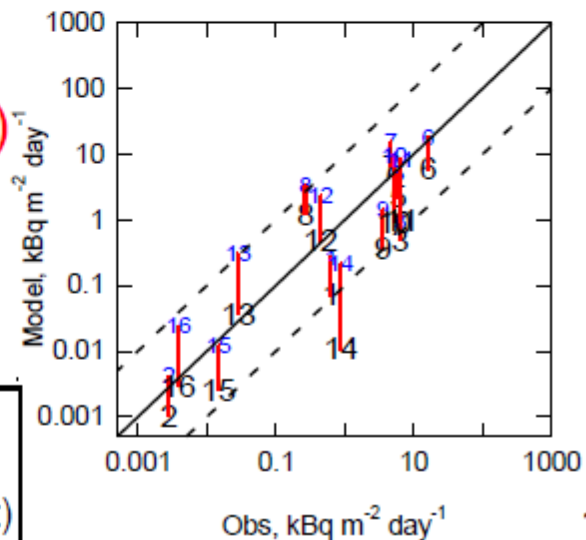
観測された降水量との比較(I-131)



JAEA
(8/18)

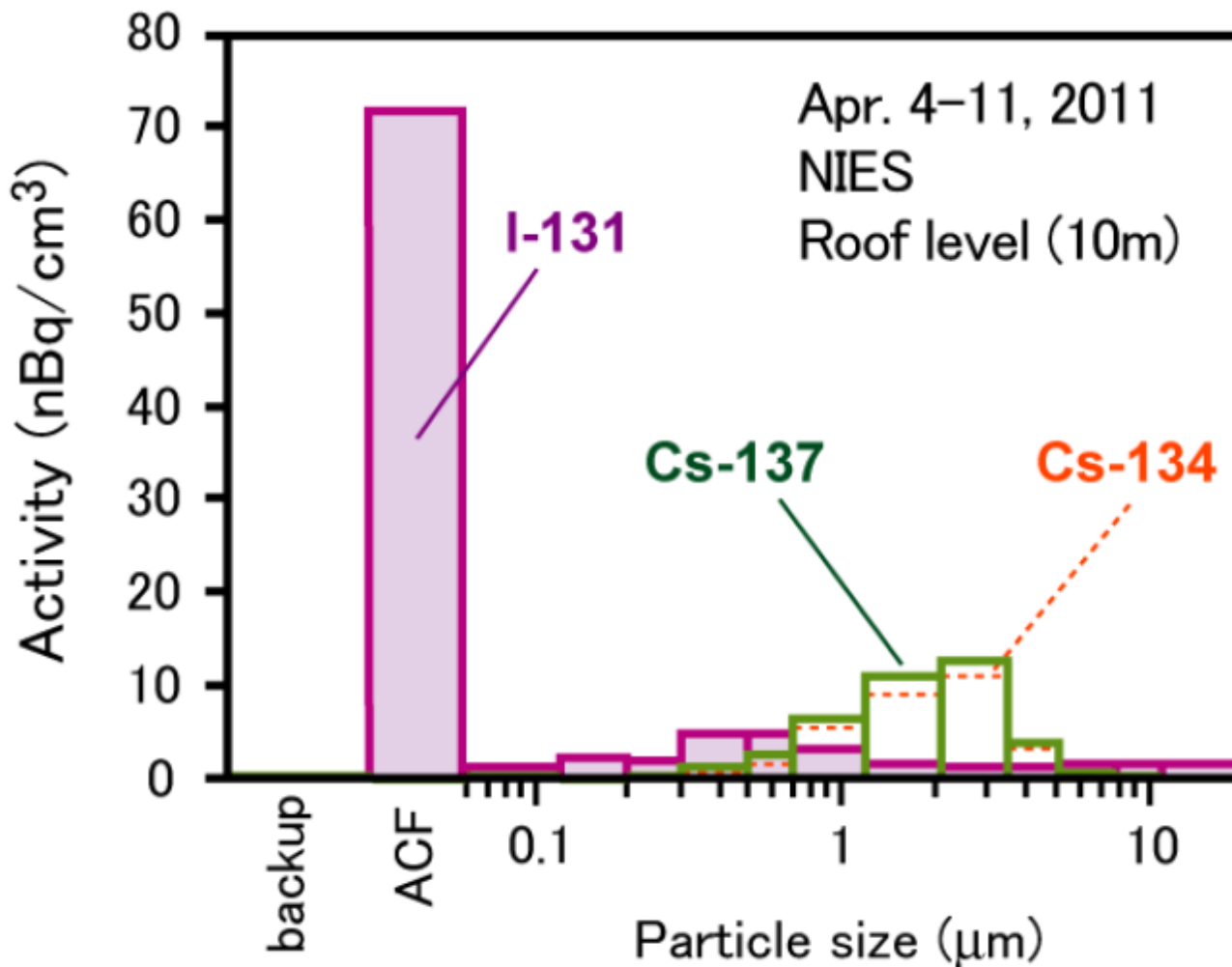


JAEA
(12/15)



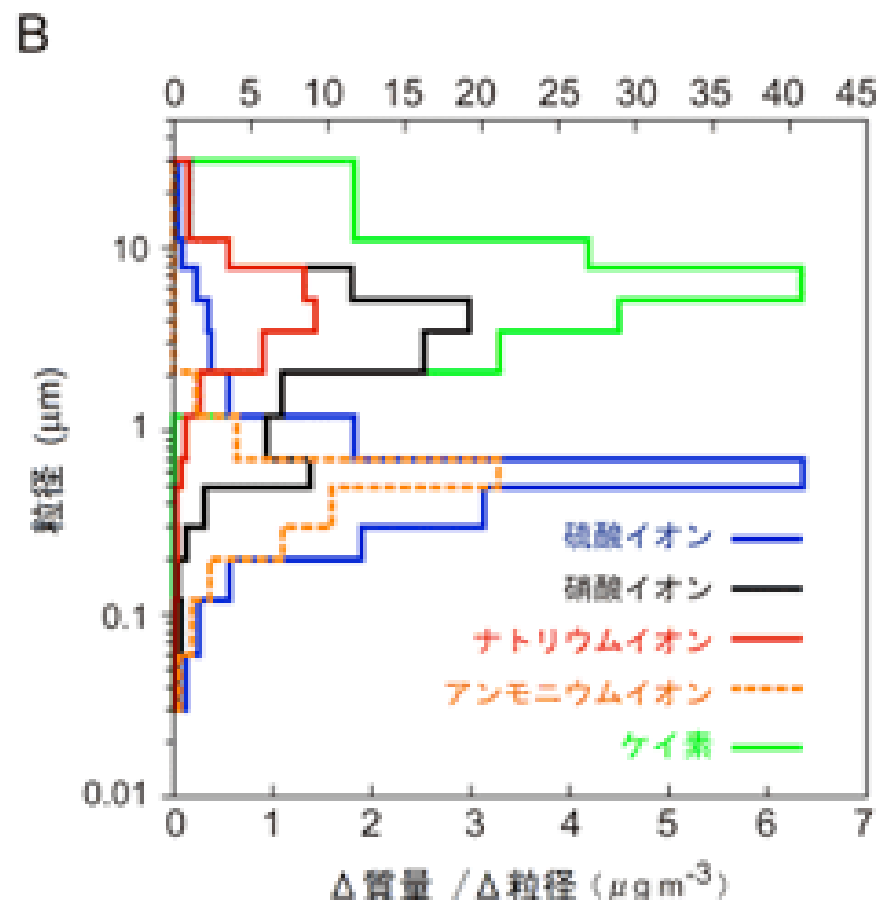
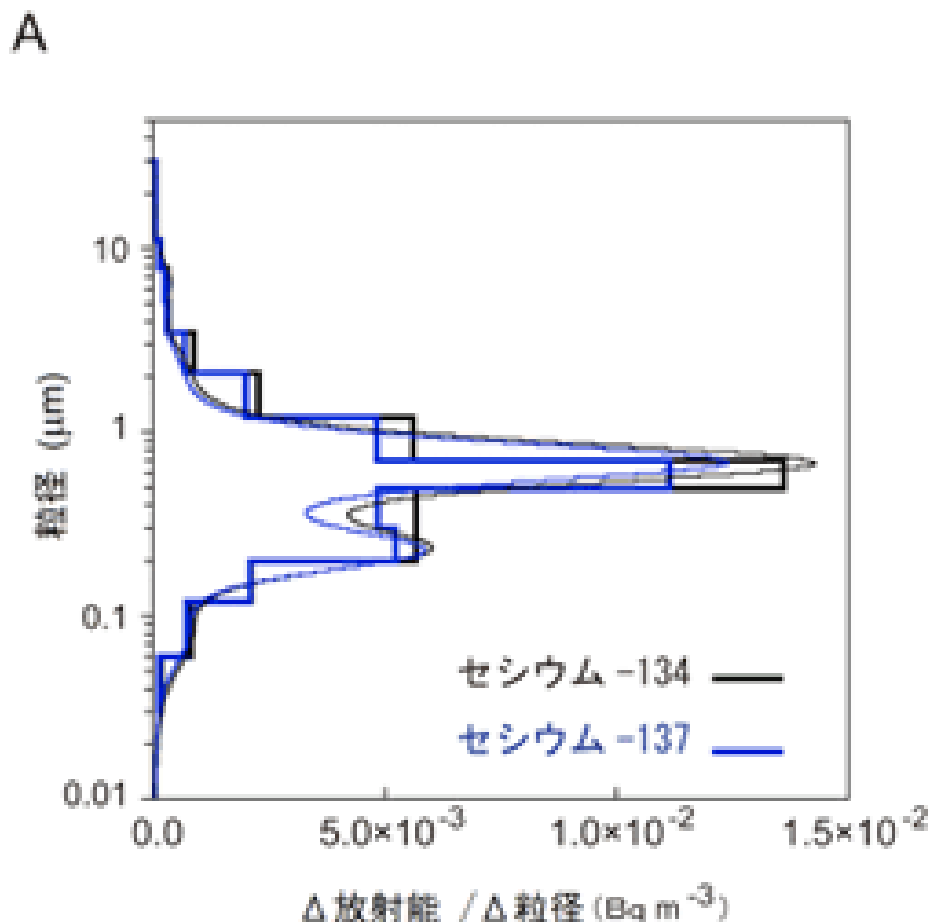
T Wet only
T Total
(— total-wet)

大気中の放射性核種の粒径分布



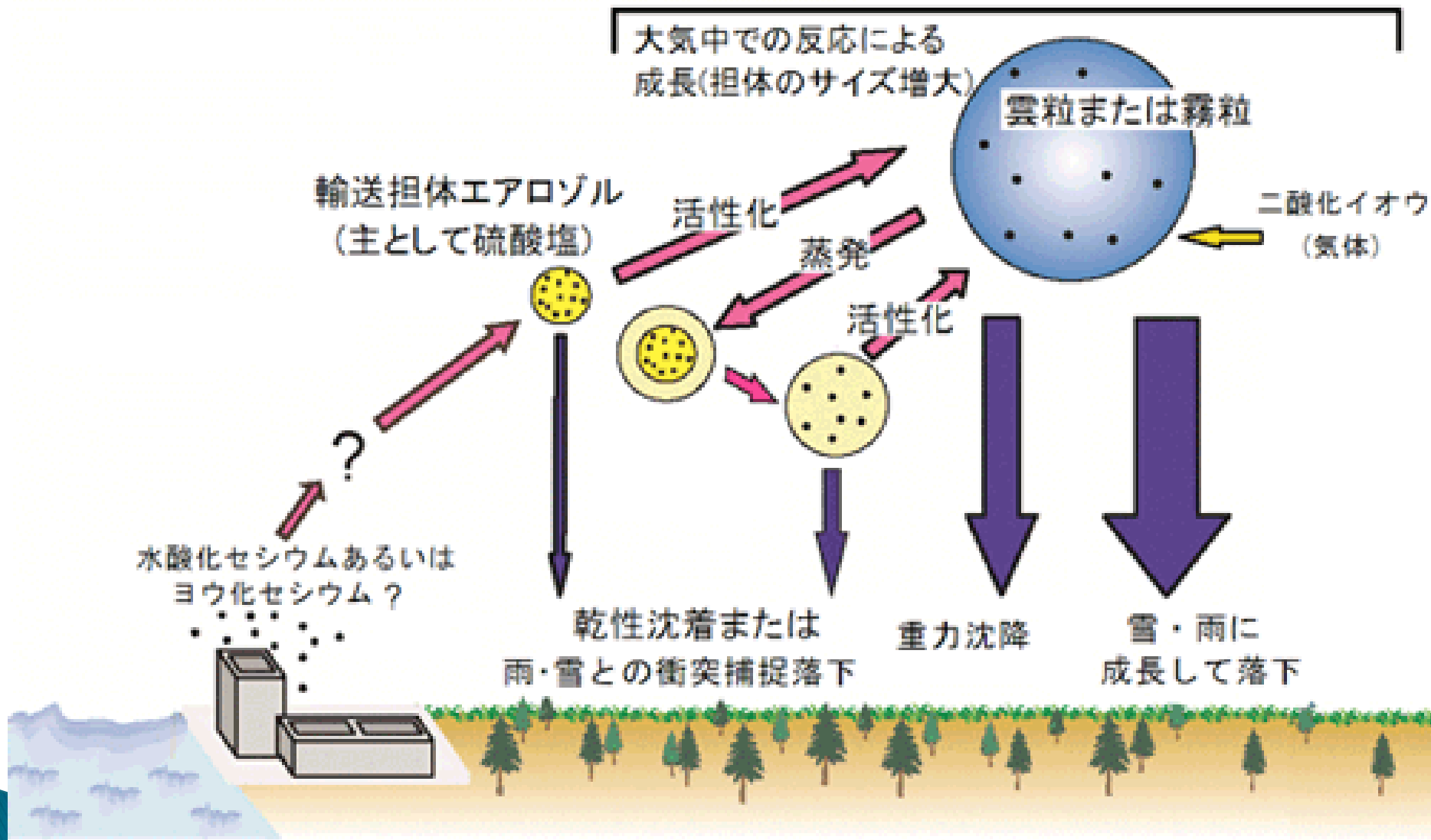
(国立環境研究所・田中敦主任研究員 提供)

放射性セシウムは硫酸塩として飛散...?@つくば市

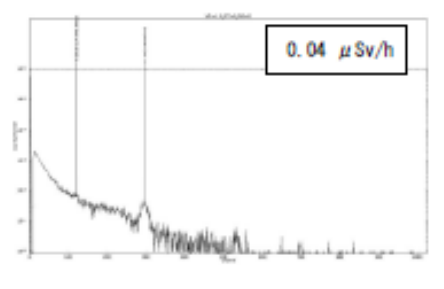
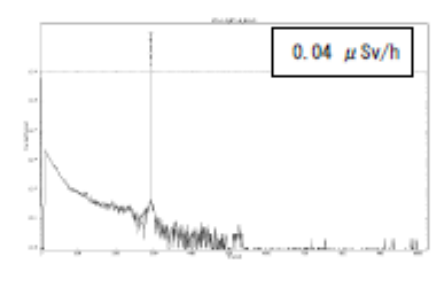
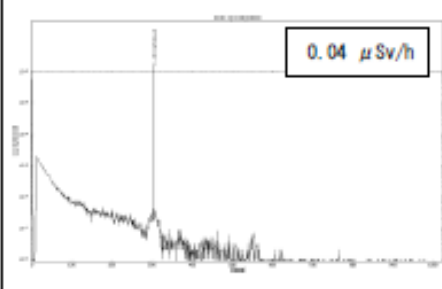
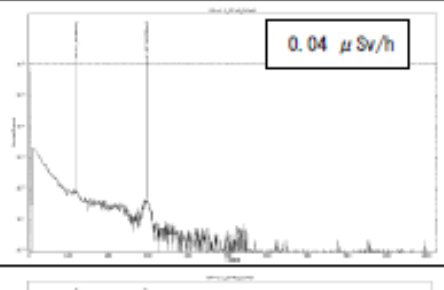
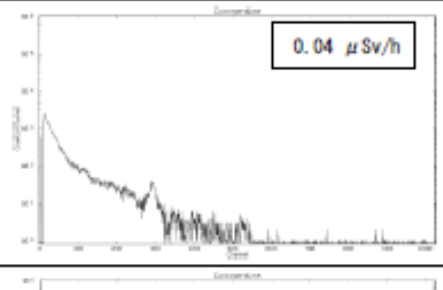
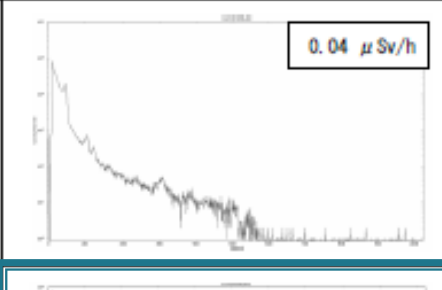
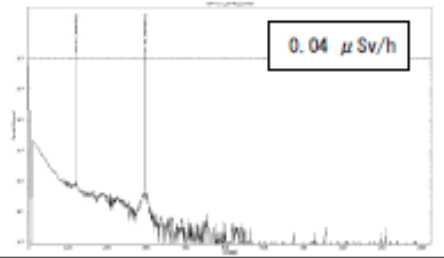
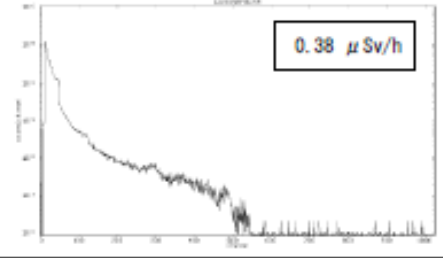
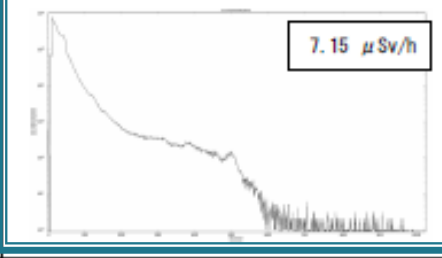


- ▶ 原子炉(軽水炉)から放射性セシウムが大気中に放出された直後はヨウ化セシウム(CsI)または水酸化セシウム(CsOH)が想定されている

汚染源から沈着までの過程



事故直後のモニタリングポストの変動(2011年3月11-12日)

			4.9km from plant (West-southwest)	1.6km from plant (South-southwest)	2.8km from plant (North-northwest)
日	時刻	主要事象			
					
	11. Mar 2:00 pm	(before Earthquake)			
	14:46	(地震発生)			
	15:35	津波第2波(約14m) 福島第一原子力発電所に到達			
					
	12. Mar 4:30 am				
					
	12. Mar 5:30 am				

1号機爆発前に北西方向に漏れている？

事故直後のモニタリングポストの変動(2011年3月12-13日)

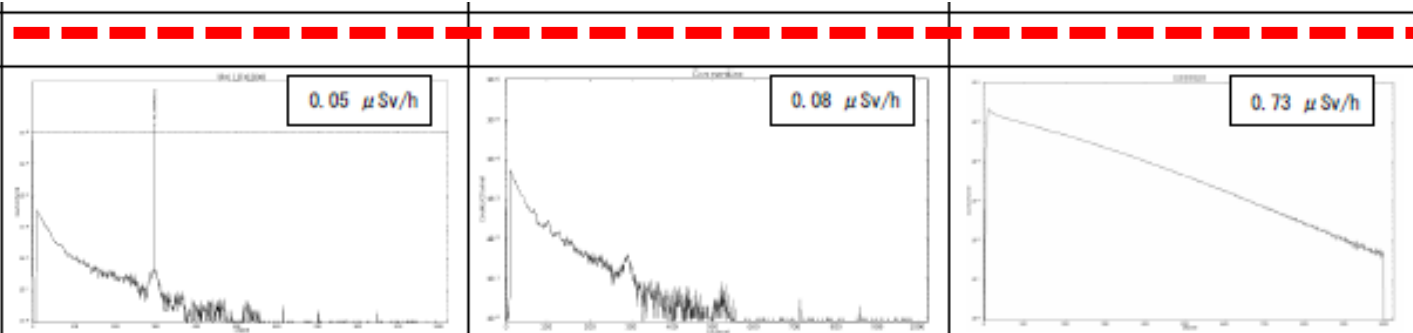
4.9km from plant
(West-southwest)

1.6km from plant
(South-southwest)

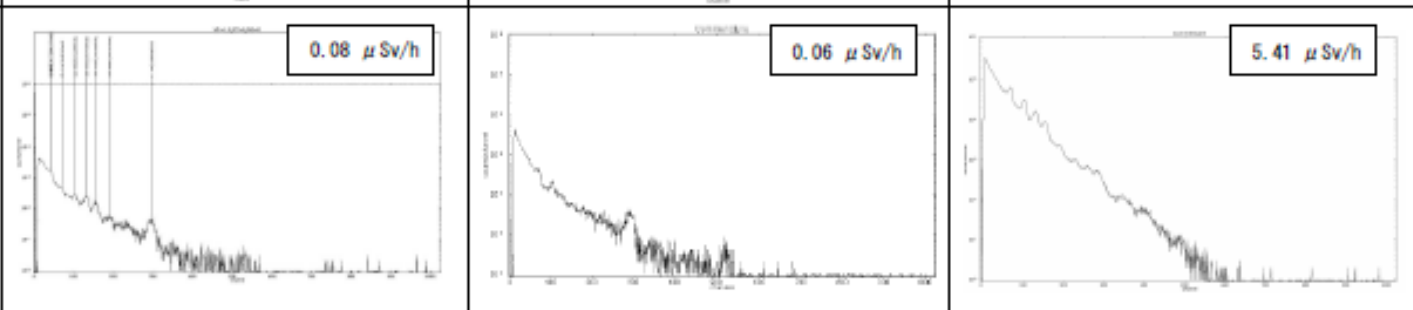
2.8km from plant
(North-northwest)

12. Mar 3:36 pm
(hydrogen explosion
at No.1 reactor)

15:40
が上昇、個別のピークが判別
不可能、18:20まで継続

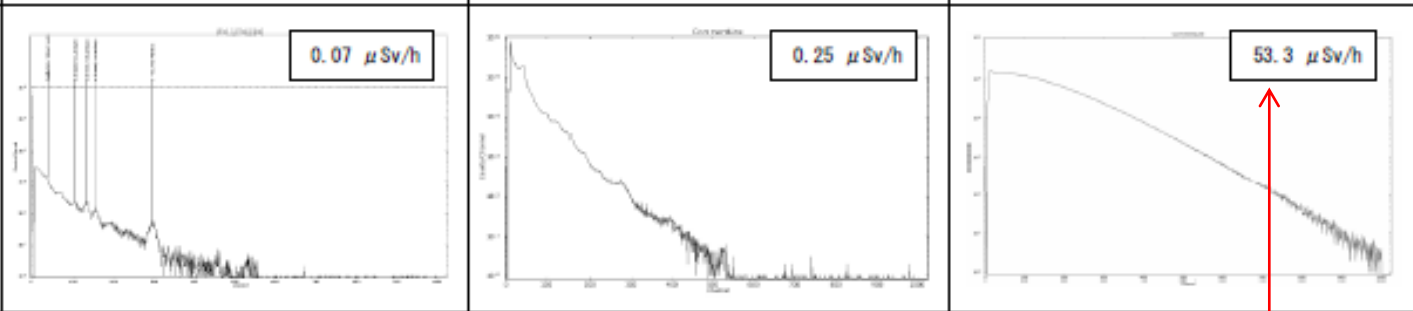


13日 0:00
(各地点で複数ピーク確認)



13. Mar 8:20 am

別



53.3uSv/h

事故直後のモニタリングポストの変動(2011年3月13-15日)

4.9km from plant
(West-southwest)

1.6km from plant
(South-southwest)

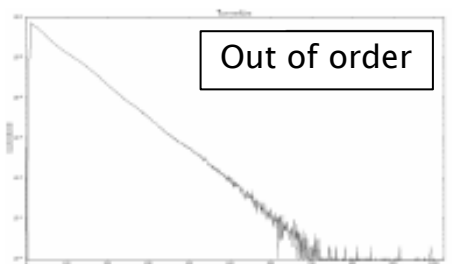
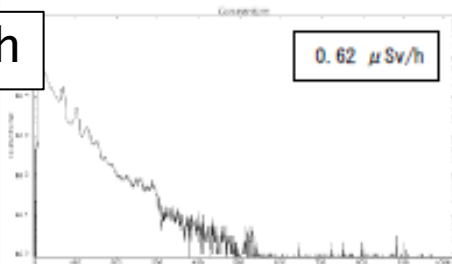
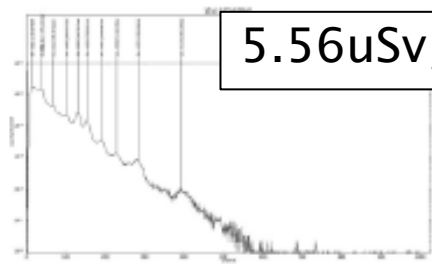
2.8km from plant
(North-northwest)

13. Mar 8:41 am
(vent at No.3)

13. Mar 11:00 am
(vent at no.2)

17:30

(大熊町大野でベースラインが上昇)



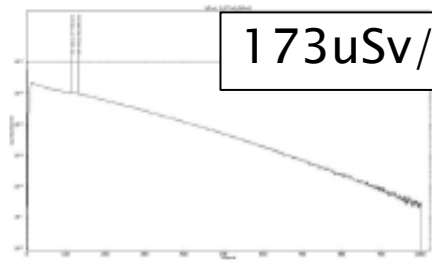
14. Mar. 11:00 am
Hydrogen explosion
at No.3

21:50

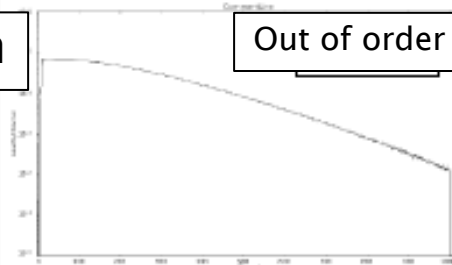
(大熊町大野と夫沢でベースラインがさらに上昇、個別のピークが判別不可能)

22:30

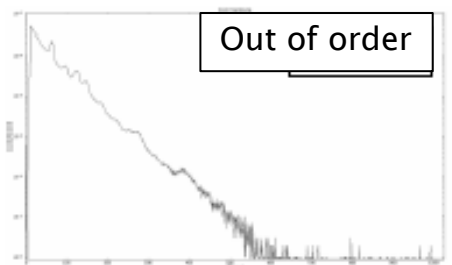
22:30



21:50



22:30

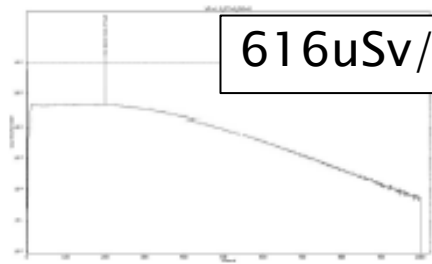


15. Mar. 04:00 am
Hydrogen(?) explosion
at No.4 and No.2

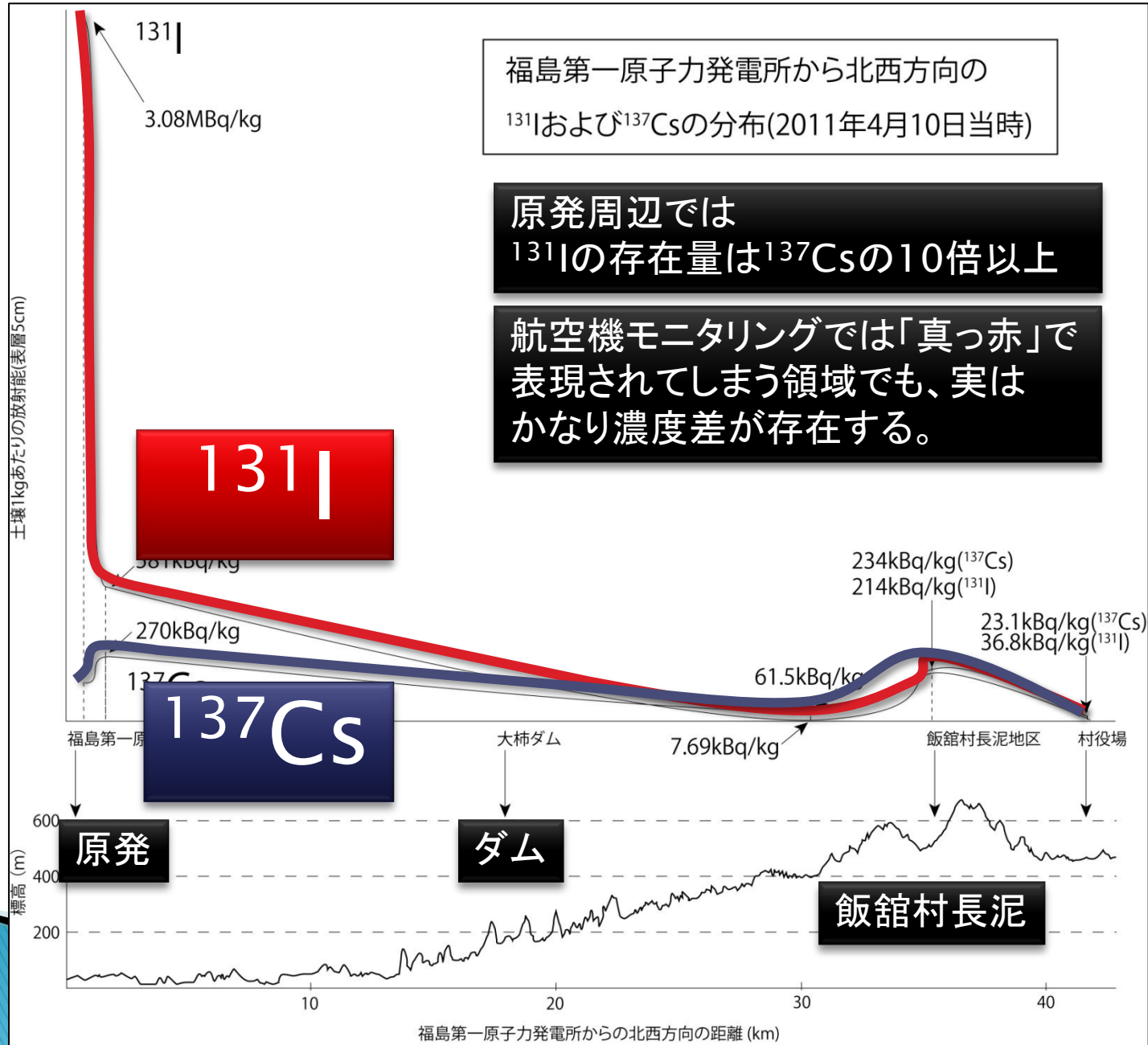
10:30

(大熊町大野で低エネルギー領域が飽和(測定可能上限を超過))

616 uSv/h



原発から北西方向(飯舘村方向)の核種分散(事故から1ヶ月後)



福島第一原子力発電所まで4.1km(大熊町熊川地区)



左の画像は2011年4月に撮影

^{131}I が大量に存在している時期

では、現在の値は...?

^{131}I は完全に崩壊済み

30 $\mu\text{Sv/h}$

大熊町災害対策本部

福島第一原子力発電所まで1.0km(大熊町夫沢地区)



左の画像は2011年4月に撮影

^{131}I が大量に存在している時期

では、現在の値は...?

^{131}I は完全に崩壊済み

50 $\mu\text{Sv/h}$

大熊町災害対策本部(月)

空間線量率が核種の崩壊に合わせて変動しない

- ▶ 圧倒的に存在していた¹³¹Iが既に崩壊済み。

解析で対象とした期間での大気中への放射性物質の放出量の試算値 (Bq)

核種	1号機	2号機	3号機	放出量合計
Xe-133	3.4×10^{18}	3.5×10^{18}	4.4×10^{18}	1.1×10^{19}
Cs-134	7.1×10^{14}	1.6×10^{16}	8.2×10^{14}	1.8×10^{16}
Cs-137	5.9×10^{14}	1.4×10^{16}	7.1×10^{14}	1.5×10^{16}
Sr-89	8.2×10^{13}	6.8×10^{14}	1.2×10^{15}	2.0×10^{15}
Sr-90	6.1×10^{12}	4.8×10^{13}	8.5×10^{13}	1.4×10^{14}
Ba-140	1.3×10^{14}	1.1×10^{15}	1.9×10^{15}	3.2×10^{15}
Te-127m	2.5×10^{14}	7.7×10^{14}	6.9×10^{13}	1.1×10^{15}
Te-129m	7.2×10^{14}	2.4×10^{15}	2.1×10^{14}	3.3×10^{15}
Te-131m	<u>2.2×10^{15}</u>	<u>2.3×10^{15}</u>	<u>4.5×10^{14}</u>	<u>5.0×10^{15}</u>
Te-132	<u>2.5×10^{16}</u>	<u>5.7×10^{16}</u>	<u>6.4×10^{15}</u>	<u>8.8×10^{16}</u>
Cm-242	1.1×10^{10}	7.7×10^{10}	1.4×10^{10}	1.0×10^{11}
I-131	1.2×10^{16}	1.4×10^{17}	7.0×10^{15}	1.6×10^{17}

現在原発から放出されている放射性物質(1号機)

昨年11月当時

評価方法 1号機 (その2)

①原子炉上部

カバーが設置され原子炉上部でのダスト測定が出来ないため、前回評価時(10/17)の数値を使用する。 **0.02億Bq/時**

②機器ハッチ内(11/4測定値)

実績よりオペフロ面ダスト濃度は機器ハッチ内ダスト濃度の約1/2

$$\begin{aligned} \text{オペフロ面ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} &= \text{機器ハッチ内ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} \times 0.5 \\ &= (1.4\text{E-}4 + 2.0\text{E-}4) \times 0.5 = 1.7\text{E-}4 \text{ Bq/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{オペフロ面ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} \times \text{機器ハッチ風量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E}6 \text{ (cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= 1.7\text{E-}4 \times 10.1 \times 1\text{E}6 = 1.7\text{E}3 \text{ Bq/s} = \text{約}0.06\text{億Bq/時} \\ &\sim 1.7\text{E-}4 \times 12.5 \times 1\text{E}6 = 2.1\text{E}3 \text{ Bq/s} = \text{約}0.08\text{億Bq/時} \end{aligned}$$

③カバー排気設備で除去される量(11/4測定値)

フィルター入口のダスト濃度に風量を乗じ放出量とした。

$$\begin{aligned} \text{排気設備除去量} &= \text{フィルター入口ダスト濃度 (Bq/cm}^3\text{)} \times \text{風量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E}6 \text{ (cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (2.5\text{E-}5 + 3.2\text{E-}5) \times 12.4 \times 1\text{E}6 = 7.1\text{E}2 \text{ Bq/s} = \text{約}0.03\text{億Bq/時} \end{aligned}$$

上記①+②-③で放出量を評価

$$\text{放出量(億Bq/時)} = 0.02 + (0.06 \sim 0.08) - 0.03 = \text{約}0.05 \sim 0.07\text{億Bq/時} \quad (\rightarrow 0.1)$$

1号機原子炉建屋上部における空气中放射性物質の核種分析結果(参考)

採取場所	1号機原子炉建屋上部① 機器ハッチ階工部4階出口		1号機原子炉建屋上部② (原子炉建屋大気入口)		②核種別指示濃度限度 (Bq/m ³) (労働者の作業時、放射線 業務従事者の呼吸する 空气中の濃度限度)	
	①核種濃度 (Bq/m ³)	倍率 (1/2)	①核種濃度 (Bq/m ³)	倍率 (1/2)	①核種濃度 (Bq/m ³)	倍率 (1/2)
I-131 (#9日)	ND	-	ND	-	1E-03	
Ce-134 (#29年)	1.4E-04	0.07	ND	-	2E-03	
Ce-137 (#30年)	2.0E-04	0.07	1.8E-05	0.01	3E-03	

採取場所	1号機原子炉建屋上部③ (カバー排気系フィルター入口)		1号機原子炉建屋上部④ (カバー排気系フィルター出口)		②核種別指示濃度限度 (Bq/m ³) (労働者の作業時、放射線 業務従事者の呼吸する 空气中の濃度限度)	
	①核種濃度 (Bq/m ³)	倍率 (1/2)	①核種濃度 (Bq/m ³)	倍率 (1/2)	①核種濃度 (Bq/m ³)	倍率 (1/2)
I-131 (#9日)	ND	-	ND	-	1E-03	
Ce-134 (#29年)	2.5E-05	0.01	ND	-	2E-03	
Ce-137 (#30年)	3.2E-05	0.01	ND	-	3E-03	

現在原発から放出されている放射性物質質量(2号機)

評価方法 2号機 (その2)

①ブローアウトパネル部での測定 (11/1測定値)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} \times \text{ブローアウトパネル部風量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (8.4\text{E-6} + 7.3\text{E-6}) \times 26.6 \times 1\text{E6} = 4.2\text{E2 Bq/s} = \text{約0.015億Bq/時} \\ &\sim (1.8\text{E-5} + 1.9\text{E-5}) \times 30.2 \times 1\text{E6} = 1.1\text{E3 Bq/s} = \text{約0.04億Bq/時 (}\rightarrow\text{0.1)} \end{aligned}$$

格納容器ガス管理システム出口での測定 (11/2測定値)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} \\ &\quad \times \text{システム流量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (2.8\text{E-5} + 4.3\text{E-5}) \times 0.004 \times 1\text{E6} = 0.28 \text{ Bq/s} = \text{約0.00001億Bq/時} \end{aligned}$$

希ガス (11/2測定値)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{希ガス濃度(Kr-85)(Bq/cm}^3\text{)} \times \text{システム流量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= 9.5\text{E2} \times 0.004 \times 1\text{E6} = 3.8\text{E6 Bq/s} = \text{約137億Bq/時 (}\rightarrow\text{140)} \end{aligned}$$

2号機原子炉建屋上部における空气中放射性物質の核種分析結果(参考)

採取場所	2号機原子炉建屋上部① (ブローアウトパネル中央西向)		2号機原子炉建屋上部② (ブローアウトパネル中央北向)		2号機原子炉建屋上部③ (ブローアウトパネル下部)		②炉規則告示濃度限度 (Bq/cm ³) (別表第2第四欄 放射線 業務従事者の呼吸する 空气中の濃度限度)
	①試料濃度 (Bq/cm ³)	倍率 (①/②)	①試料濃度 (Bq/cm ³)	倍率 (①/②)	①試料濃度 (Bq/cm ³)	倍率 (①/②)	
試料採取日時刻	平成23年11月 1日 11時23分～13時23分		平成23年11月 1日 11時23分～13時23分		平成23年11月 1日 11時23分～13時23分		
検出核種 (半減期)							
I-131 (約8日)	ND	-	ND	-	ND	-	1E-03
Cs-134 (約2年)	1.5E-05	0.01	1.8E-05	0.01	8.4E-06	0.00	2E-03
Cs-137 (約30年)	1.7E-05	0.01	1.9E-05	0.01	7.3E-06	0.00	3E-03

現在原発から放出されている放射性物質(3号機)

評価方法 3号機 (その2)

①原子炉建屋上部 (11/10測定値)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{ダスト濃度 (Bq/cm}^3\text{)} \times \text{推定蒸気発生量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (4.2\text{E-}3 + 5.0\text{E-}3) \times 0.58 \times 1\text{E6} \\ &= 5.3\text{E}3 \text{ Bq/s} \\ &= \text{約}0.19\text{億Bq/時} \end{aligned}$$

②機器ハッチ (11/9測定値)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} \times \text{機器ハッチ開口部風量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (1.9\text{E-}4 + 2.3\text{E-}4) \times (0.31 \times 5.6 \times 5.6) \times 1\text{E6} \\ &= 4.1\text{E}3 \text{ Bq/s} \\ &= \text{約}0.15\text{億Bq/時} \end{aligned}$$

合計：約0.19億Bq/時 + 約0.15億Bq/時 = 約0.34億Bq/時 (→0.4)

3号機原子炉建屋上部における空气中放射性物質の核種分析結果(参考)

採取所	3号機原子炉建屋上部⑤ (原子炉上北東側(下方))		3号機原子炉建屋上部⑥ (原子炉上北東側(上方))		3号機原子炉建屋上部⑦ (原子炉上南東側(下方))		3号機原子炉建屋上部⑧ (原子炉上南東側(上方))		②月報(告示濃度限度 Bq/m ³) ※放射能測定値 放射線 測定器の検出する 空気中の濃度限度
	採取日時	平均濃度 (Bq/m ³)	検出率 (%)	平均濃度 (Bq/m ³)	検出率 (%)	平均濃度 (Bq/m ³)	検出率 (%)	平均濃度 (Bq/m ³)	
I-131 (9/9日)	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	1E-03
Co-134 (9/9日)	4.2E-03	2.1	1.8E-03	0.90	6.1E-04	0.31	3.2E-04	0.13	2E-03
Co-137 (9/9日)	5.0E-03	1.7	2.2E-03	0.77	7.2E-04	0.24	4.2E-04	0.15	2E-03

現在の1-3号機の放出見積量(放射性セシウムとして)

- ▶ 原子炉建屋上部での測定結果による放出量については、それぞれの数値を切り上げて、以下の通り合計
 - 1,2号機:約0.1億Bq/時
 - 3号機;約0.4億Bq/時
 - 合計:約0.6億Bq/時
- ▶ 現時点におけるセシウムの放出量として、海上では風向の変動により測定値が上下すると考え、原子炉建屋上部での測定結果による評価値を採用
 - 放出量:約0.6億Bq/時を採用 **事故当時から比較すれば1万分の1以下**
- ▶ 放射性希ガスは2号炉で140億Bq/時が継続して放出されている
 - 1号炉、3号炉もほぼ同様と推定。

「点」として汚染から「面」としての汚染へ

- ▶ 都市域の効率的な排水システムが「面」の汚染を生む
 - 親水公園など雨水に親しむことができる環境が結果的に問題に
 - 「除染」はどう対応する？(2回目の講義課題にもちょっと関連)
- ▶ 核種の移動そのものは都市域/農村域、どちらにしても発生する
 - 農村域での核種の移動速度はゆっくり
 - 福島原発周辺のフォールアウト量は異常に高い
 - 何年後にピークを迎える...？

濃縮の例:

守谷市内の水路における放射性セシウムの濃縮*

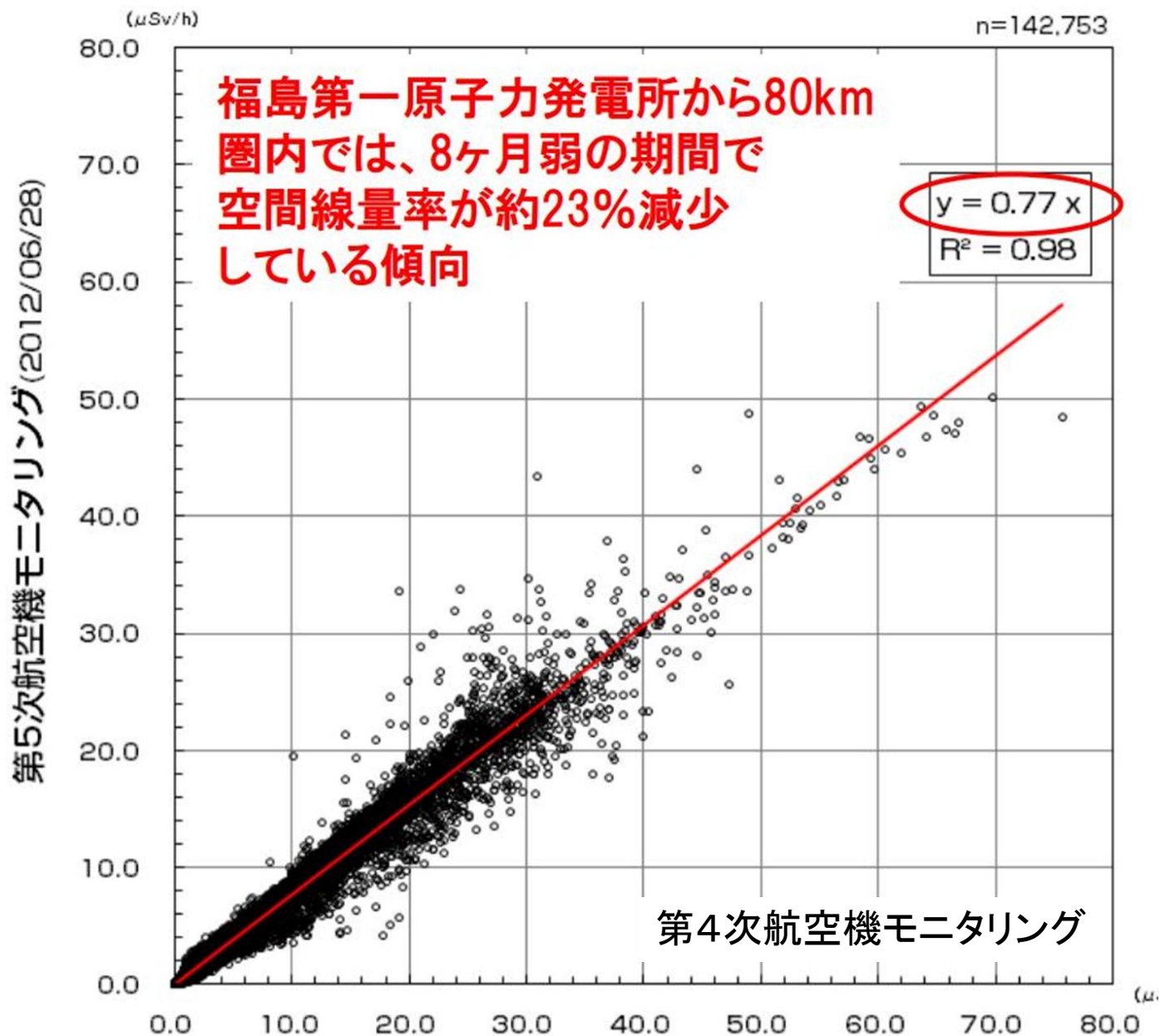
堆積物・表層5cm

地点	場所	放射性セシウム(Bq/kg)	空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	立ち入り規制
1	民有地	17,200	2.04	無
2	民有地脇水路	43,700	1.49	無
3	水路A1	12,500	1.45	無
4	水路A2	18,700	1.90	無
5	水路B1	9,060	0.60	無
6	水路B2	14,400	1.04	無
7	貯水池脇公園	71,400	2.72	無(一部有り)
8	水路C	14,700	3.25	無
9	水路D	15,200	1.91	有
10	水路E1	30,500	1.75	有
11	水路E2	28,200	3.70	有
12	水路F	13,500	1.30	無

*小豆川勝見, 科学, 岩波書店, 印刷中

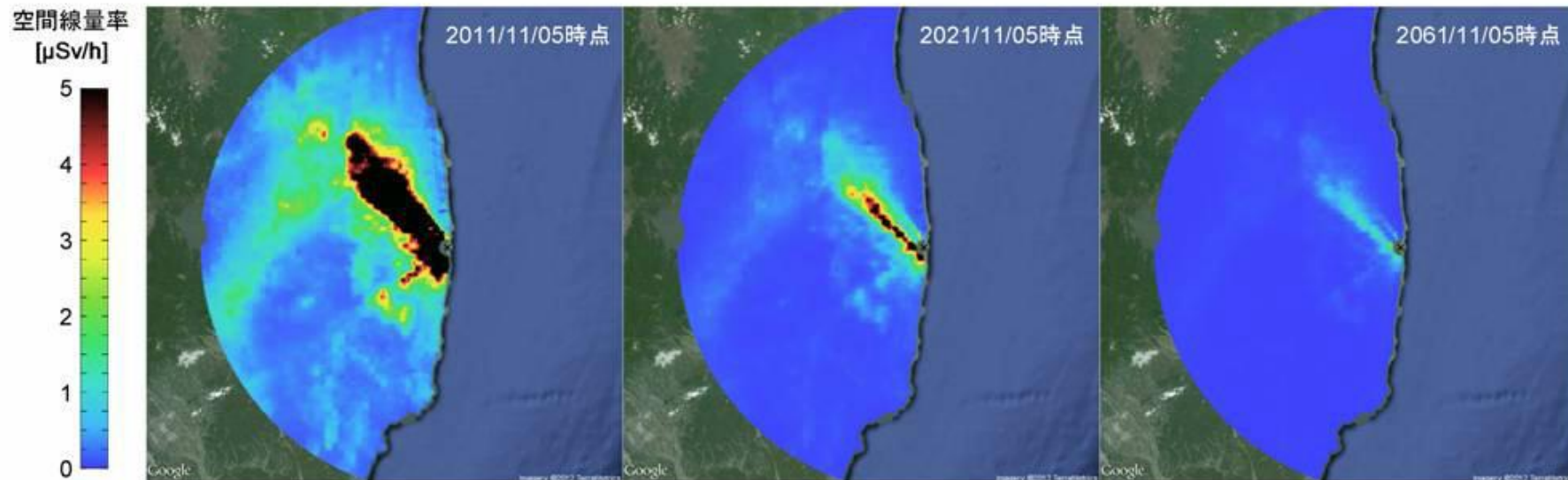
この場所の場合、少なくとも放射能が低減する傾向はない。

理論値よりも早く空間線量率が減衰している



将来の空間線量率の予測値

(試算) 2021/11/05, 2061/11/05時点における空間線量率の予測値
(RASCAL 3.0.5^[2]で採用されている自然要因による空間線量率の低減効果を仮に見込んだ場合)



- ✓ 物理的半減期による¹³⁴Csと¹³⁷Csの減少に伴う、空間線量率の減衰効果を考慮
- ✓ 風雨等の自然要因により地表面の放射性核種数密度が減少することに起因した空間線量率の低減効果として、RASCAL3.0.5^[2]で使用されている文献^[3]の式を適用
- ✓ 時間の経過に伴って空間線量率分布の相対的な形は変化しないと近似
 - 実際には放射性核種の移動/拡散により、空間線量率分布の相対的な形は変わり得る

出典:

[1] 放射性物質の分布状況等調査データベース, <http://radb.jaea.go.jp/mapdb/>

[2] RASCAL 3.0.5: Description of Models and Methods, NUREG-1887, (2007).

[3] L. R. Anspaugh, et al., "Movement of Radionuclides in Terrestrial Ecosystems by Physical Processes," Health Physics, **82**[5], pp. 669-679 (2002).

放射性セシウムが集まってきちゃう場所で除染をやってても...

追加資料：除染後の再汚染の可能性を示すデータ

小学校通学路(現在は他ルートに変更したため、使用されていない)におけるスポット汚染の実績
(すべて地表での測定)

- ・8月13日 放射線量率を測定
- ・10月9日 除染作業実施 前後に放射線量率を測定
- ・11月24日 放射線量率を再度測定

単位： $\mu\text{SV/h}$ 一部は記録する都合上、小数点2ケタ以下を四捨五入

通学路および測定箇所



場所と特徴	8/13	10/9 (除染前)	10/9 (除染後)	11/23
1(平坦)	1.023	1.5	0.5	
2(平坦)		0.7	0.35	
3(くぼみ)		2.0	0.36	0.459
4(傾斜途中)	1.680	2.1	0.26	0.223
5(平坦)		0.7	0.24	0.243
6(くぼみ)	2.693	4.6	0.3	0.744 (※)
7(わずかな傾斜途中)		1.2	0.24	
8(平坦)		1.5	0.6	0.252
9(傾斜途中)		4	0.5	1.437
10(傾斜下端)		1.4	0.6	0.804
11(傾斜下端)		1.0	0.5	0.731

(※)12/11に再測定、測定場所を約10cmずらしたところ、1.109を検出

元々放射性物質が集まりやすいためにホットスポット化した場所は、除染しても周囲の放射性物質が再度集まりやすい。
(平坦な場所や傾斜途中の場所は一度清掃すると土砂の再蓄積は起きにくく、その場合は線量率は再上昇しない)
局地的に線量が高い場所の除染を優先することは、効率面、コスト面で最良の手法ではない可能性がある。

将来の予測は放射性セシウムだけでいいのか...?

▶ 代表的な長半減期核種:

- ^{134}Cs 半減期2年
- ^{137}Cs 半減期30年
- ^{90}Sr 半減期28年
- ^{239}Pu 半減期24000年
- ^{241}Pu 半減期14年

▶ 環境中では(よっぽどのこと、たとえば高温, 高圧条件でもない限り)同位体間で挙動に違いはない

- 福島由来の ^{134}Cs と ^{137}Cs は環境中で同じように動く。

▶ 今後、放射性物質はどうなる?

同位体の中で差が生じない理由- 土壌中のセシウムの吸着サイト(特にFES)

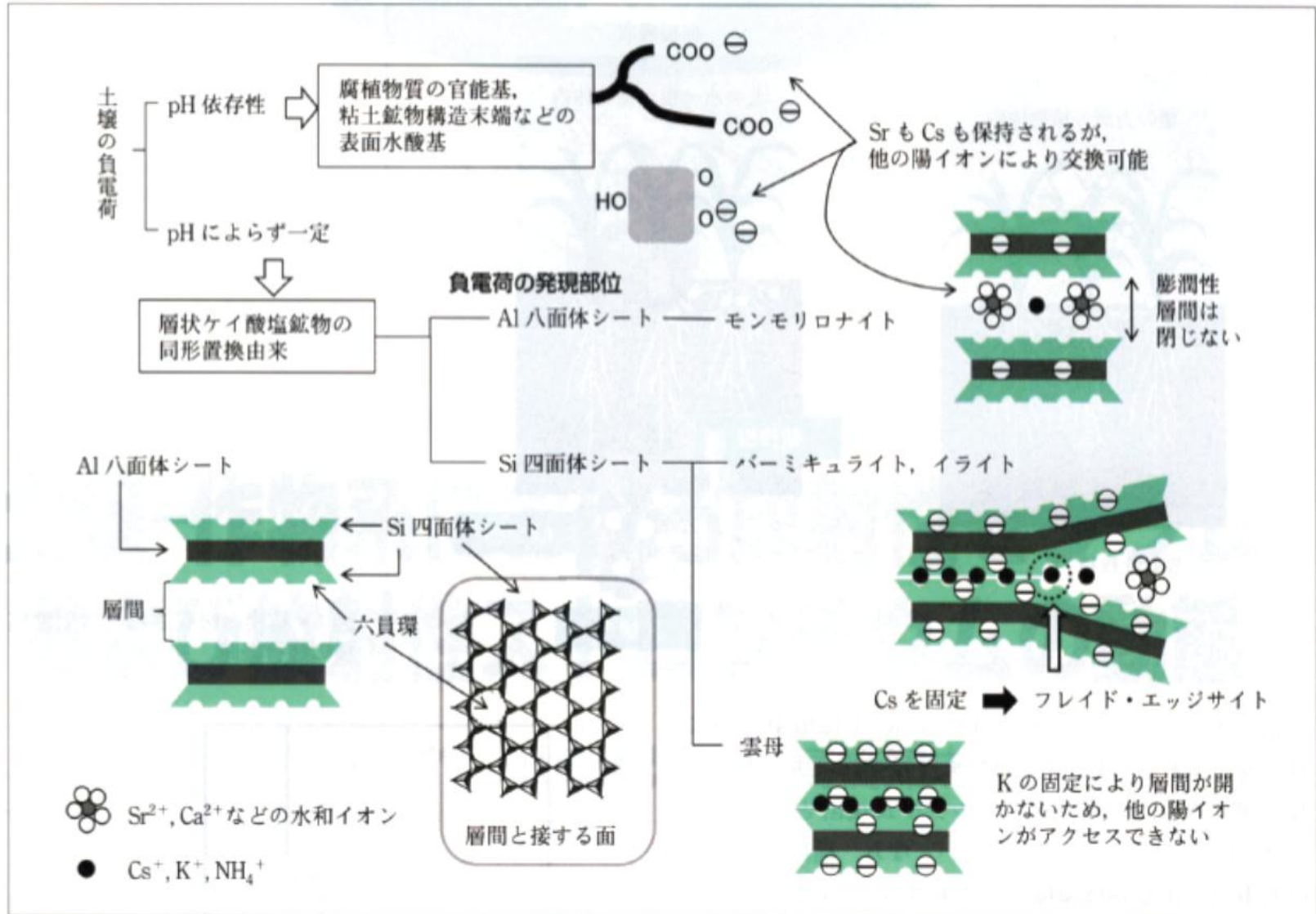


図3 ■ 土壌の負電荷への Cs, Sr 保持メカニズム

核種毎の土壌中の拡散(チェルノブイリから150kmの土壌)

P.Carbol *et al*, *J. Environ. Radioactivity* 68, 27–46, 2003

Table 2

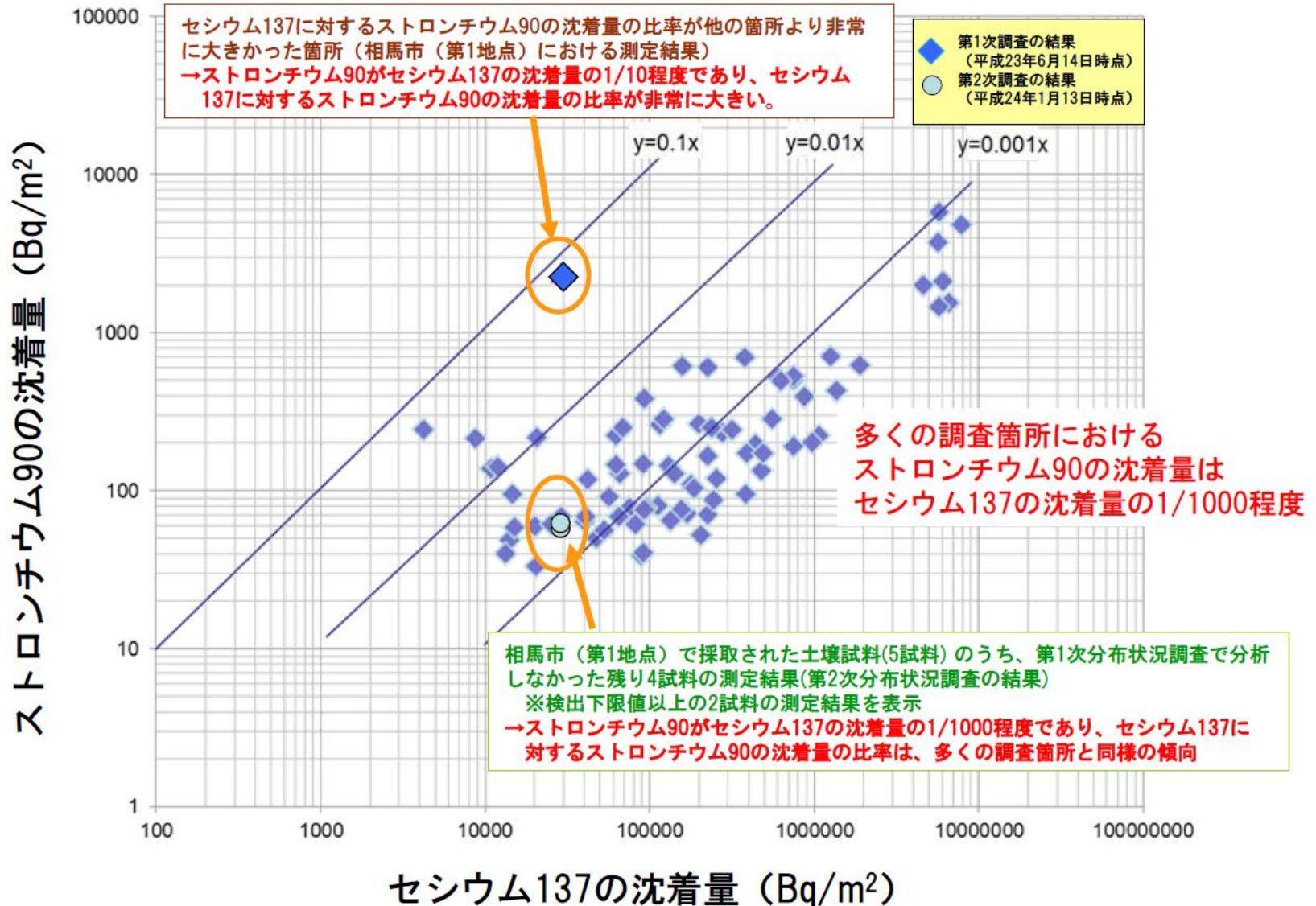
Radionuclides determined in the soil

Radionuclide	Humus	0–2 cm	2–4 cm	10–15 cm	15–20 cm
<i>Surface deposition (kBq/m²)—recalculated to April 1986</i>					
⁶⁰ Co	n.d.	1.7 ± 0.3	n.d.	n.d.	n.d.
¹²⁵ Sb	23.2 ± 3.1	15.5 ± 1.8	21.3 ± 3	n.d.	n.d.
¹³⁴ Cs	423 ± 40	307 ± 29	173 ± 18	n.d.	n.d.
¹³⁷ Cs	754 ± 70	530 ± 50	303 ± 29	10.9 ± 1	3.14 ± 0.3
¹⁵⁴ Eu	0.64 ± 0.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<i>Deposit (Bq/m²)—recalculated to April 1986</i>					
²³⁴ U	n.m.	135.4 ± 15.4	157.2 ± 24.2	n.m.	n.m.
²³⁸ U	n.m.	132.4 ± 15.2	142.4 ± 23.8	n.m.	n.m.
²³⁴ U/ ²³⁸ U		1.02 ± 0.16	1.10 ± 0.25		
²³⁸ Pu	10.4 ± 0.9	<11.2	<6.6	n.m.	n.m.
^{239,240} Pu	34.4 ± 2.5	22.0 ± 0.7	21 ± 1.1	n.m.	n.m.
²⁴¹ Pu	n.m.	2540 ± 300	n.m.	n.m.	n.m.
²³⁸ Pu/ ^{239,240} Pu	0.30 ± 0.03				
²⁴¹ Pu/ ^{239,240} Pu		115 ± 14			
<i>Surface deposition (Bq/m²)—date of measurement (2000)</i>					
²⁴¹ Am	n.m.	34.6 ± 5.1	n.m.	n.m.	n.m.

The errors are given for 1σ counting uncertainty. n.d., not detected; n.m., not measured.

文部科学省による、①ガンマ線放出核種の分析結果、及び②ストロンチウム89、90 の分析結果 (第2 次分布状況調査)について

第1次分布状況調査におけるセシウム137に対するストロンチウム90の沈着量の比率



文科省の見解

- ▶ ストロンチウム90 の沈着量の変動要因の確認のため、第1 次分布状況調査の結果について、セシウム137 に対するストロンチウム90 の沈着量の比率の変動状況を確認したところ、別紙9 に示すように、多くの調査箇所におけるストロンチウム90 の沈着量はセシウム137 の沈着量の1000 分の1程度であることが確認された。
- ▶ ただし、相馬市(第1 地点)における測定結果(第1 次分布状況調査で測定)のように、ごくまれにストロンチウム90 の沈着量がセシウム137 の沈着量の10 分の1程度まで変動している場合があることが確認された。

相馬市(第1 地点)周辺で採取された土壌試料の測定結果に関する考察

- ▶ 今回の調査では、第1 次分布状況調査でSr-89、90/Cs-137が最も大きかった調査箇所である相馬市(第1 地点)周辺における放射性ストロンチウムの沈着状況を確認するため、昨年6月に採取した土壌試料13 試料について、今回、新たにストロンチウム89、90 の沈着量を測定したが、これらの箇所ではストロンチウム89 は不検出であり、検出されたストロンチウム90 の沈着量についても、第1 次分布状況調査において相馬市(第1 地点)で測定されたストロンチウム90 の沈着量に対して、約50分の1～約25 分の1程度と非常に小さい値であった。
- ▶ このことから、相馬市(第1 地点)周辺の地域的な特徴として、放射性セシウムに対する放射性ストロンチウムの沈着量の比率が特別に高いということはなく、放射性ストロンチウムの土壌への沈着の状況が、放射性セシウムよりもバラツキが大きいことが確認された。

除染の問題点



- ▶ 「減容化」・「高濃縮」化が鍵！

- ▶ 大規模プラント・重機を使った除染
 - 表層土壌を重機でかき集め、同敷地内に埋立
 - 線量低減には繋がるが、すべての除染に適した方法ではない
 - 高コスト
 - 除染の順番待ちが発生

- ▶ 手作業、泥さらい、立ち入り規制

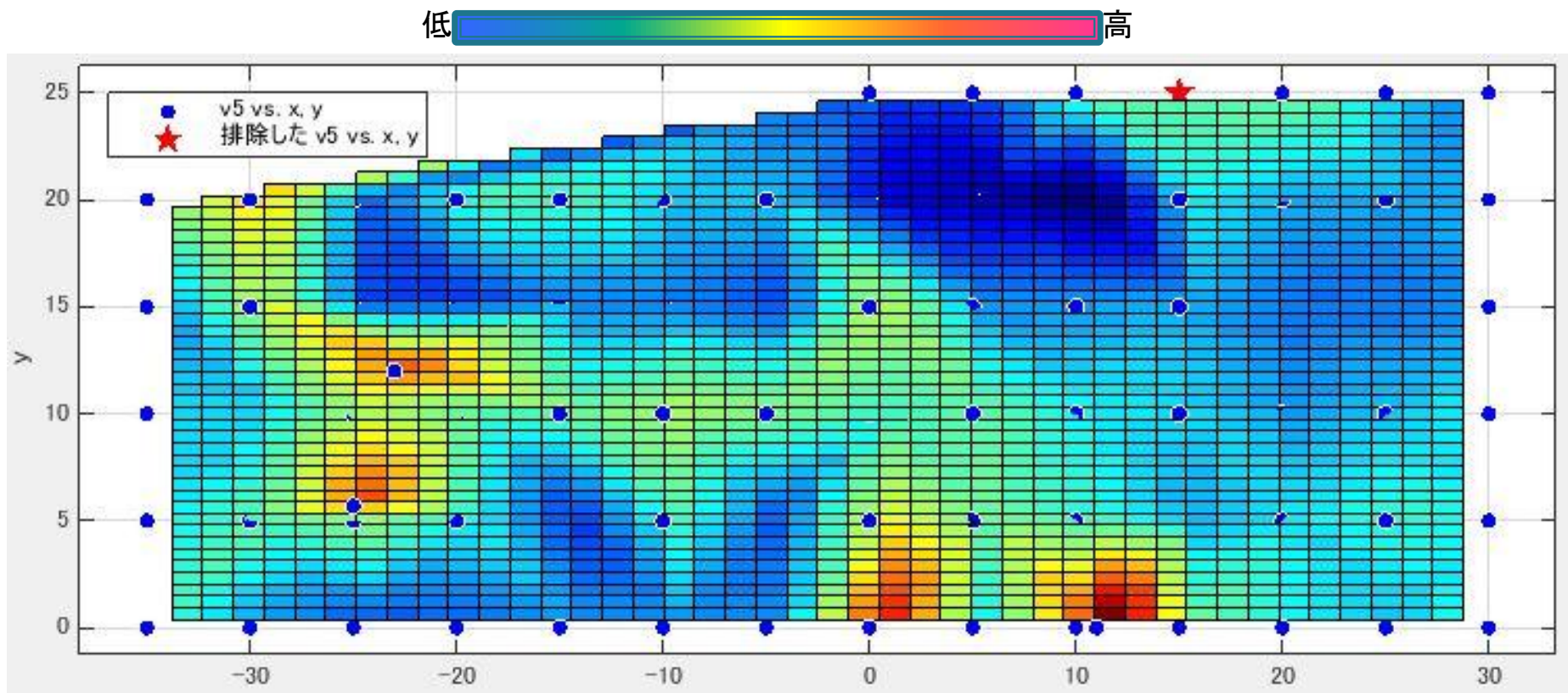
- ▶ より簡単に、線量の低減ができないものか...？

除染対象とした公園(茨城県守谷市)

約2500m²(濃縮などの特異性がある公園ではない)



地上5cmにおける空間線量率(相対表示)

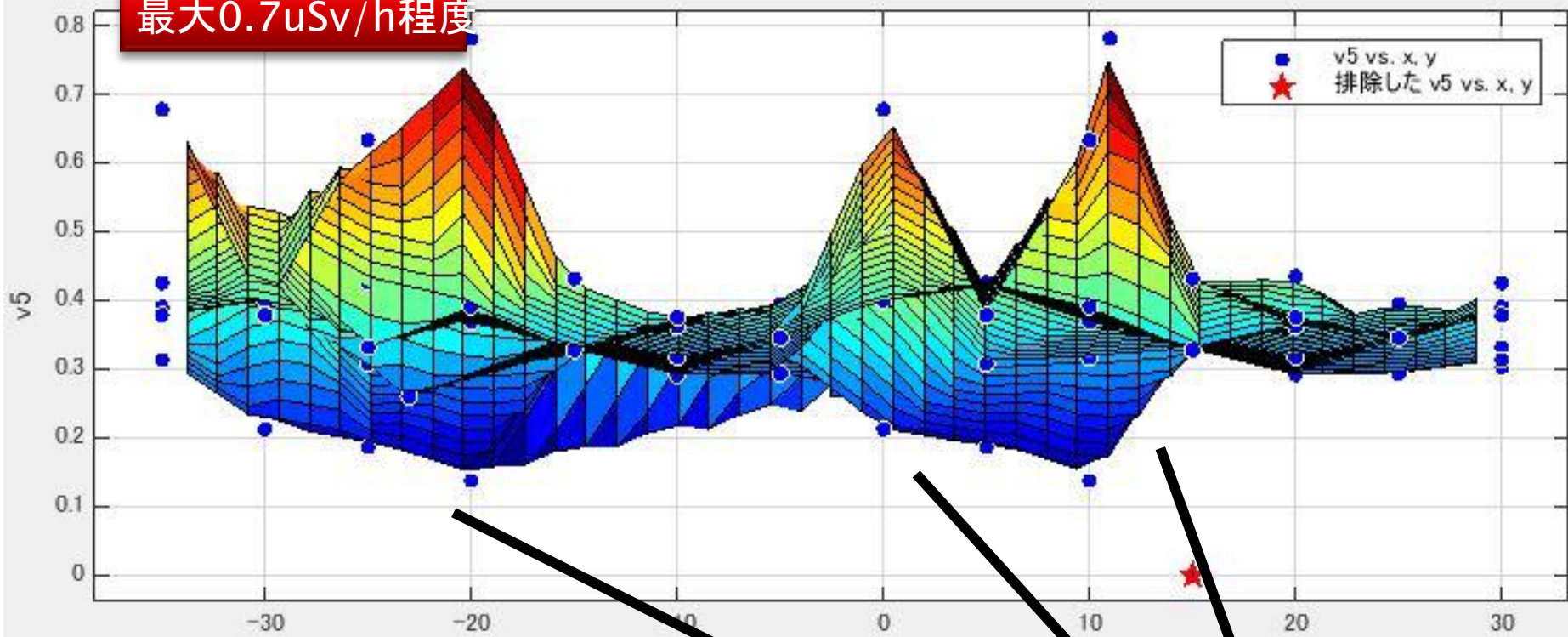


僅かに削れている場所や
吹き溜まりに、放射性物
質が集積しやすい



地上5cmにおける空間線量率

最大0.7 μ Sv/h程度



地表面が「土」、あるいは「遊具」直下で
空間線量率が高くなる



化学講義のさいごに

- ▶ 福島第一原子力発電所の1-4号機は廃止(廃炉)になりますが、事故を完全に収束させるには数十年単位の時間を要します。
- ▶ あまりに難しい課題ですが、廃炉に向けた新しい技術を研究・開発していく必要があります。
- ▶ 原発から遠く離れていても、(人体への影響はともかく)長く付き合い合わせるを得ない案件です。
- ▶ この講義でお知らせしたことには、(測定原理以外は)まだまだ不確定要素が含まれています。
- ▶ 継続して関心を持ち続けて下さい。

化学分野からの課題#3

- ▶ 大気拡散モデルによる放射性物質のシミュレーションと、実試料での放射能の測定値の間には、1桁程度の違いが生じてしまう。この原因を考察せよ。
- ▶ 今後長い期間にわたって、風雨による放射性物質(放射性セシウム)の濃縮・拡散が続くことになる。このことを踏まえた上で、あなたが除染の計画立案者であったとしたら、どのようなプランを提案するか。