



# 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

## 「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・土壤肥料学》
  - 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、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

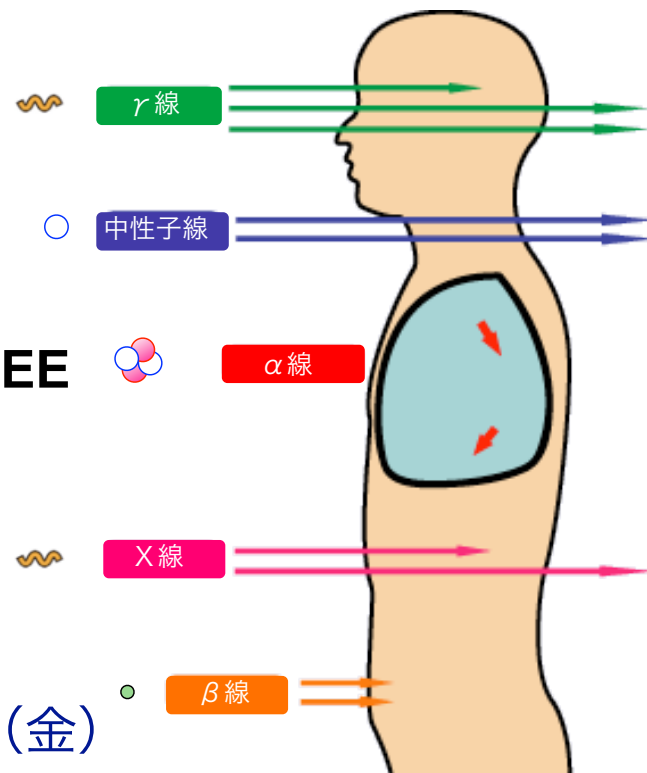
を  
科学的に  
理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)

K303教室

2015 / 11 / 13 (金)



第9回

## 環境放射化学

シミュレーションと将来の放射線量

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

- 9/18 放射線入門 【鳥居】
- 9/25 放射線物理学 【鳥居】
- 10/ 2 放射線計測学 【小豆川】
- 10/ 9 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/16 放射線生物学 【渡邊】
- 10/23 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 10/30 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 11/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 11/13 環境放射化学 【小豆川】
- 11/24 放射線医療 【芳賀】
- 11/27 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/ 4 放射線の利用 【渡邊】
- 12/11 加速器科学・放射線防護学 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

坪倉 正治 《医科学研究所》

芳賀 昭弘 《医学部附属病院放射線科》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

# 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」。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
  - 放射性セシウムの特性を理解すれば、自然現象に勝てるか？
  - 効率的な除染方法はどうやる？

# 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。

# 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			
			0.04 $\mu\text{Sv/h}$	0.04 $\mu\text{Sv/h}$	0.04 $\mu\text{Sv/h}$
	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			
			0.04 $\mu\text{Sv/h}$	0.04 $\mu\text{Sv/h}$	0.04 $\mu\text{Sv/h}$
	12. Mar 4:30 am				
			0.04 $\mu\text{Sv/h}$	0.38 $\mu\text{Sv/h}$	7.15 $\mu\text{Sv/h}$
	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)

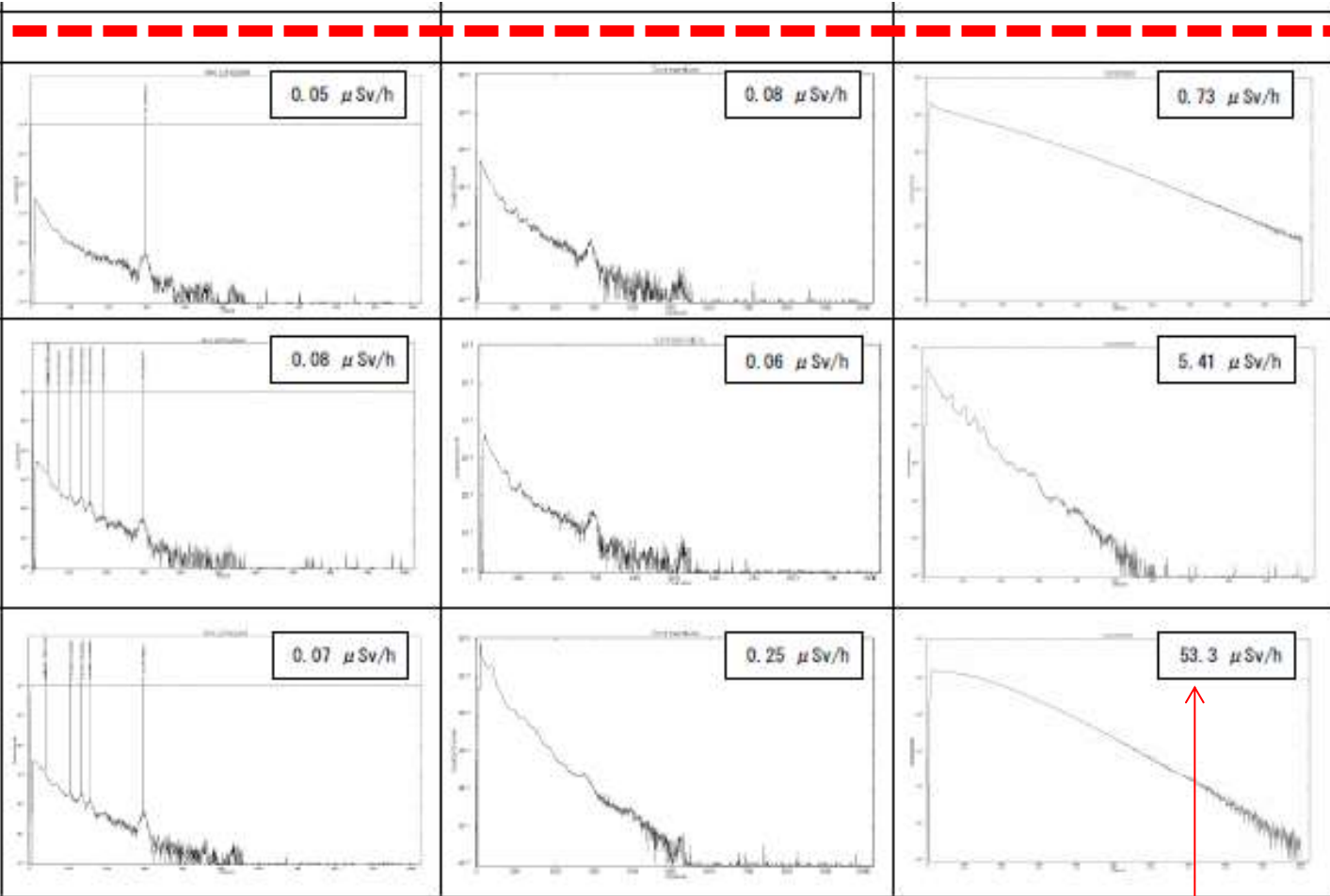
2.8km from plant  
(North-northwest)

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



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



# 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

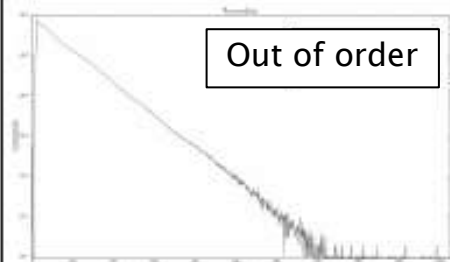
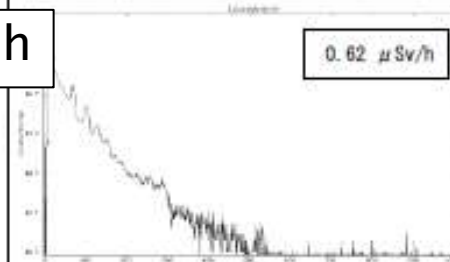
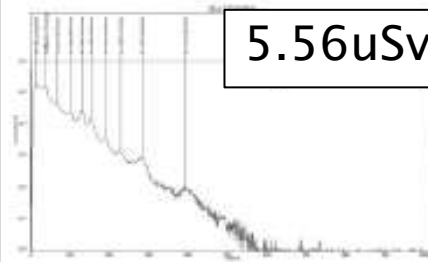
(vent at No.3)

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

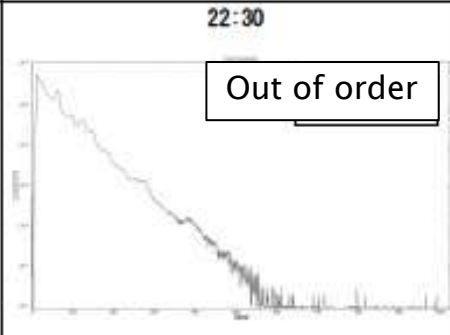
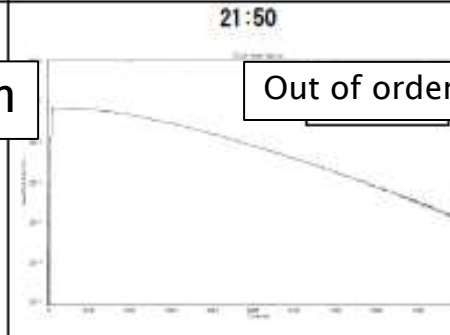
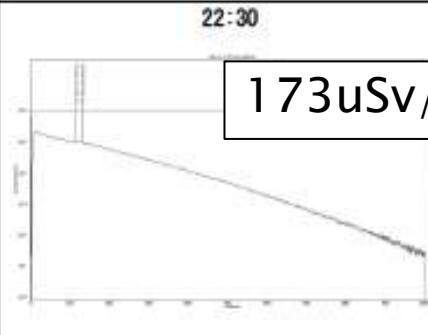
Hydrogen explosion  
at No.3

22:30

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

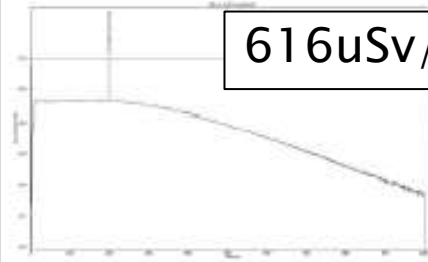


15. Mar. 04:00 am

Hydrogen(?) explosion  
at No.4 and No.2

10:30

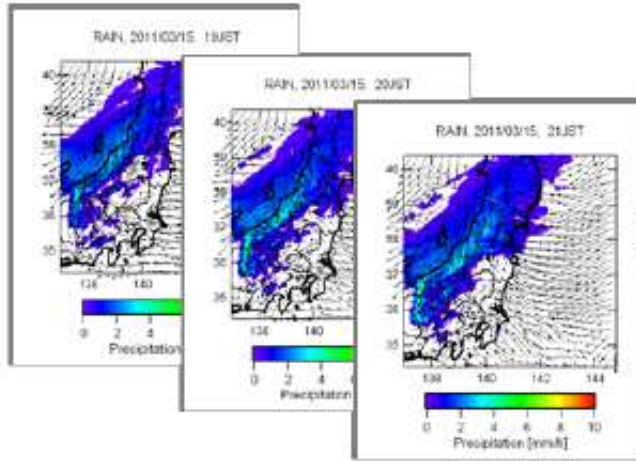
(大熊町大野で低エネルギー  
領域が飽和(測定可能上限を  
超過))



# 大気シミュレーションモデル

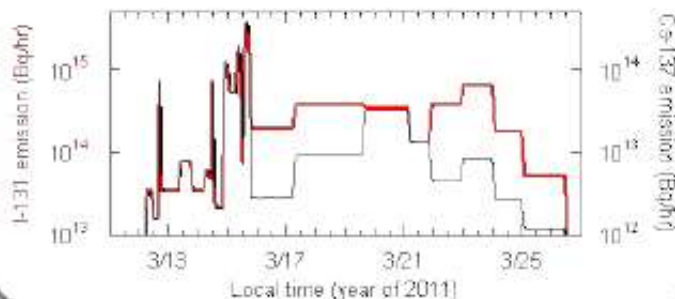
## 気象モデル(WRF)

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)

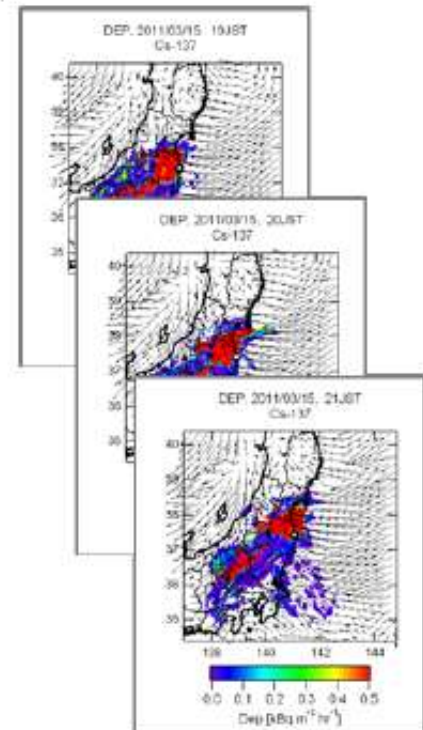
3次元の放射性物質濃度を時間ごとに計算

### 計算するプロセス

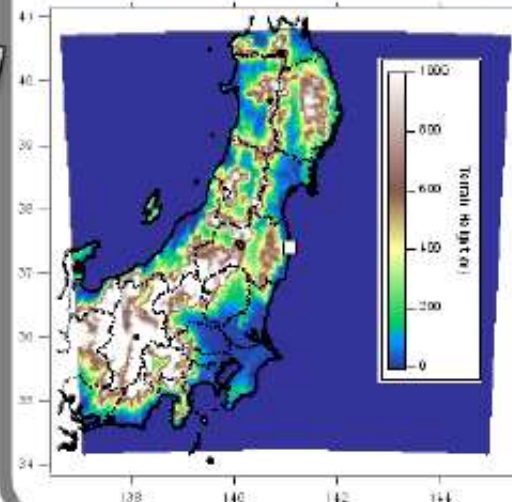
- ✓ 放出
- ✓ 輸送(移流/拡散)
- ✓ 沈着(乾性/湿性)
- ✓ 放射性壊変

### 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

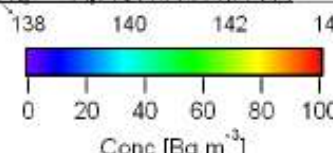
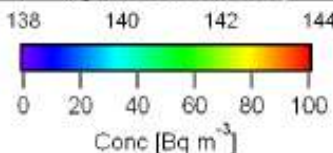
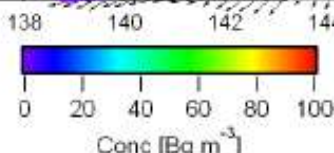
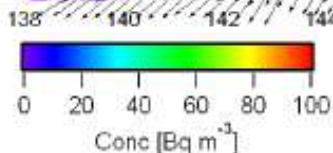
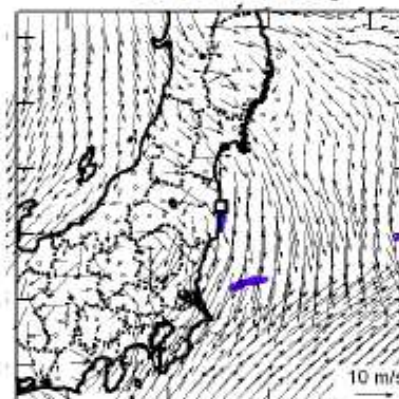
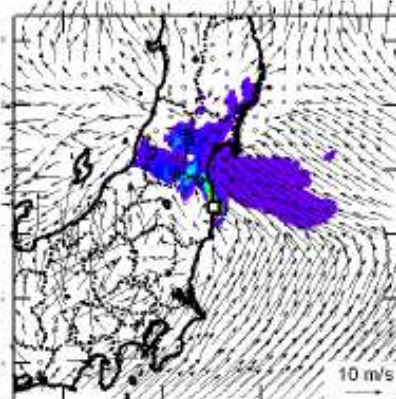
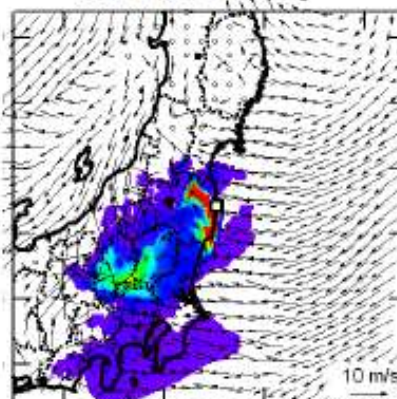
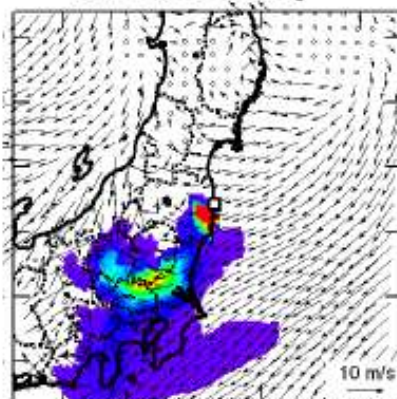
3/15の15時

3/15の19時

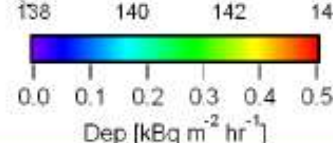
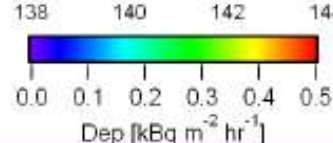
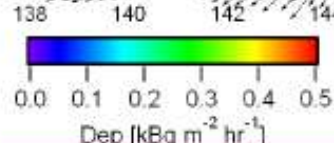
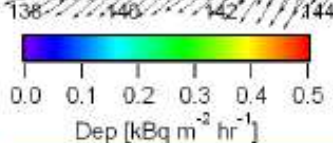
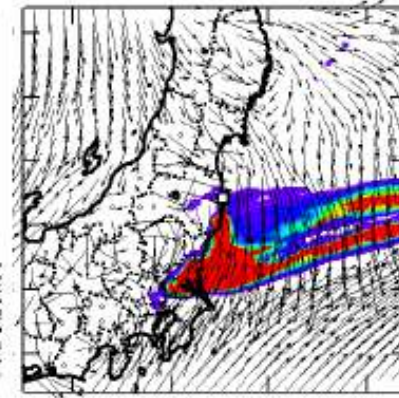
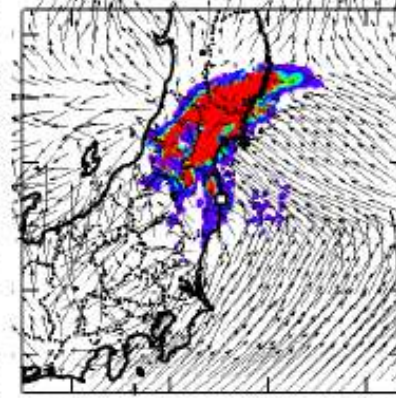
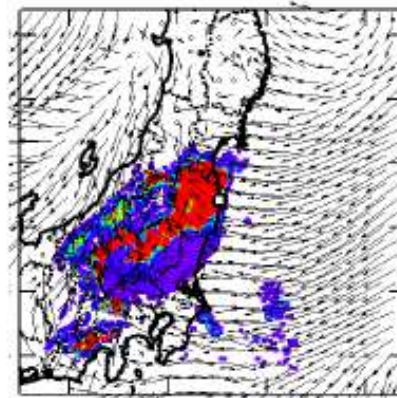
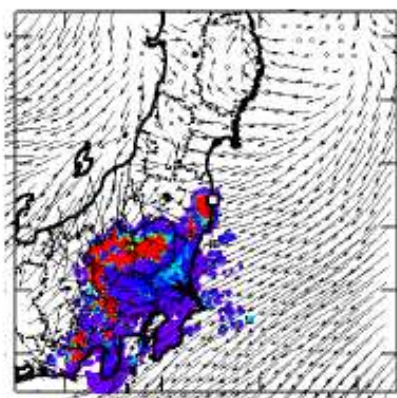
3/20の18時

3/21の8時

大気濃度



降下量



関東への最初の影響

福島の詳細な汚染、  
北関東の汚染

宮城県北部の稲葉汚染

水道水汚染、千葉北西部  
のホットスポット

# 放出量の比較

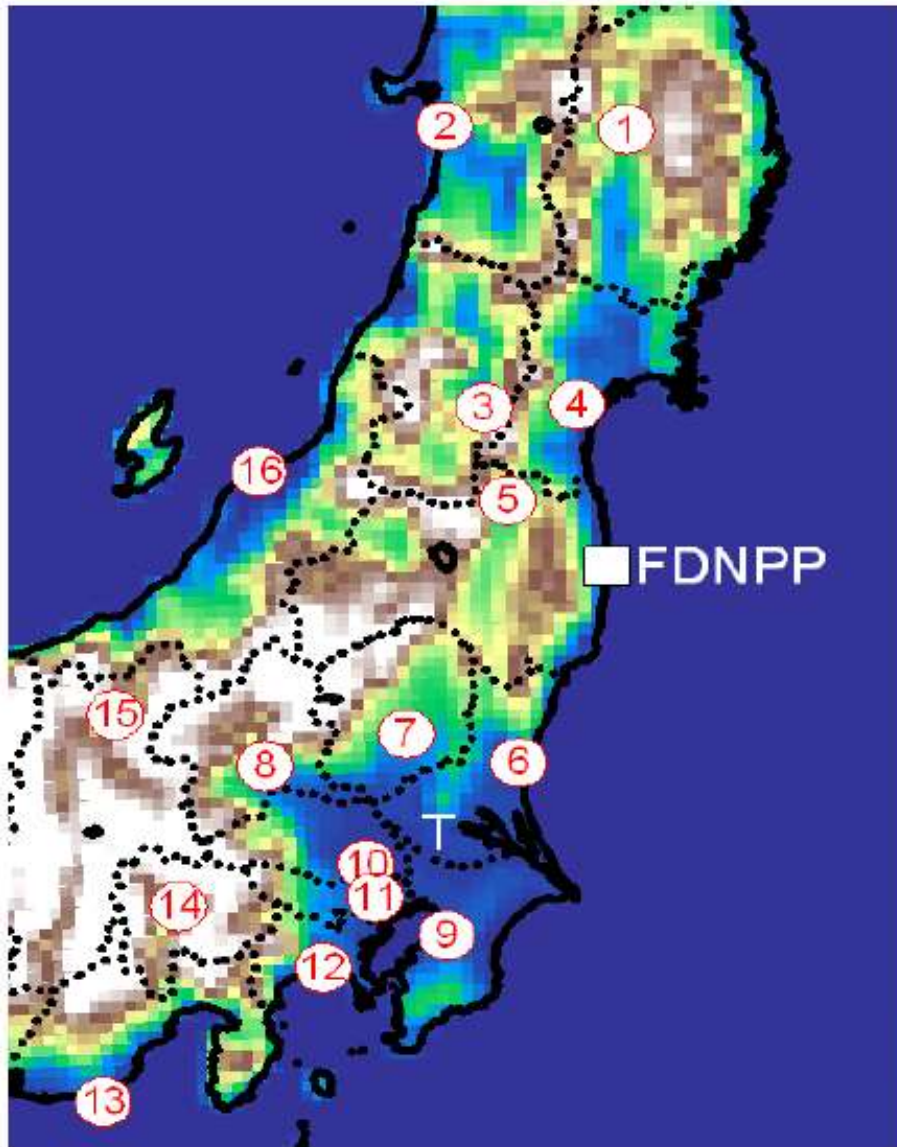
	方法	期間	$^{131}\text{I}$ (PBq)	$^{137}\text{Cs}$ (PBq)	$^{133}\text{Xe}$ (EBq)
Chino et al. (JNST, 2011)	逆推計 (福島周辺)	3/12-4/6	150	13	---
JAEA (August, 2011)	逆推計 (福島周辺)	3/11-4/6	120	7	---
原子力安全・ 保安院 (June, 2011)	炉内解析	3/11-3/15	160	15	11
JAEA (Dec., 2011)	逆推計 (福島周辺)	3/11-4/30	124	9	---
Stohl et al. (ACPD,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

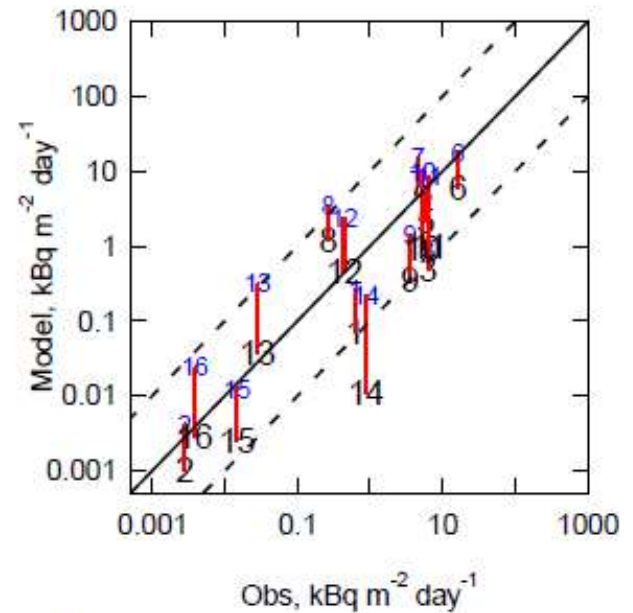
期間		放出量	陸上への 沈着量 <sup>1)</sup>	海上への 沈着量 <sup>1)</sup>	領域外へ の流出
3/11- 3/30	JAEA (August)	6.5	1.9 (28.9%) <sup>2)</sup>	0.9 (13.5%)	3.7 (57.6%)
	JAEA (Dec.)	6.7	1.9 (28.6%)	0.9 (13.0%)	3.9 (58.4%)
	Stohl et al.	34.5	4.4 (12.9%)	4.0 (11.6%)	26.1 (75.5%)
3/11- 4/30	JAEA (Dec.)	8.8	<b>2.2</b> (24.8%)	2.2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

1) 沈着量はモデル領域内の値、2) %は放出量に対する割合、

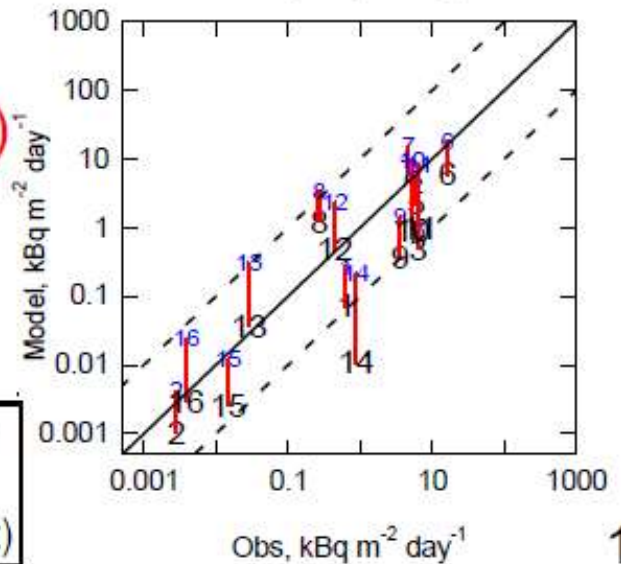
# 観測された降水量との比較(I-131)



JAEA  
(8/18)

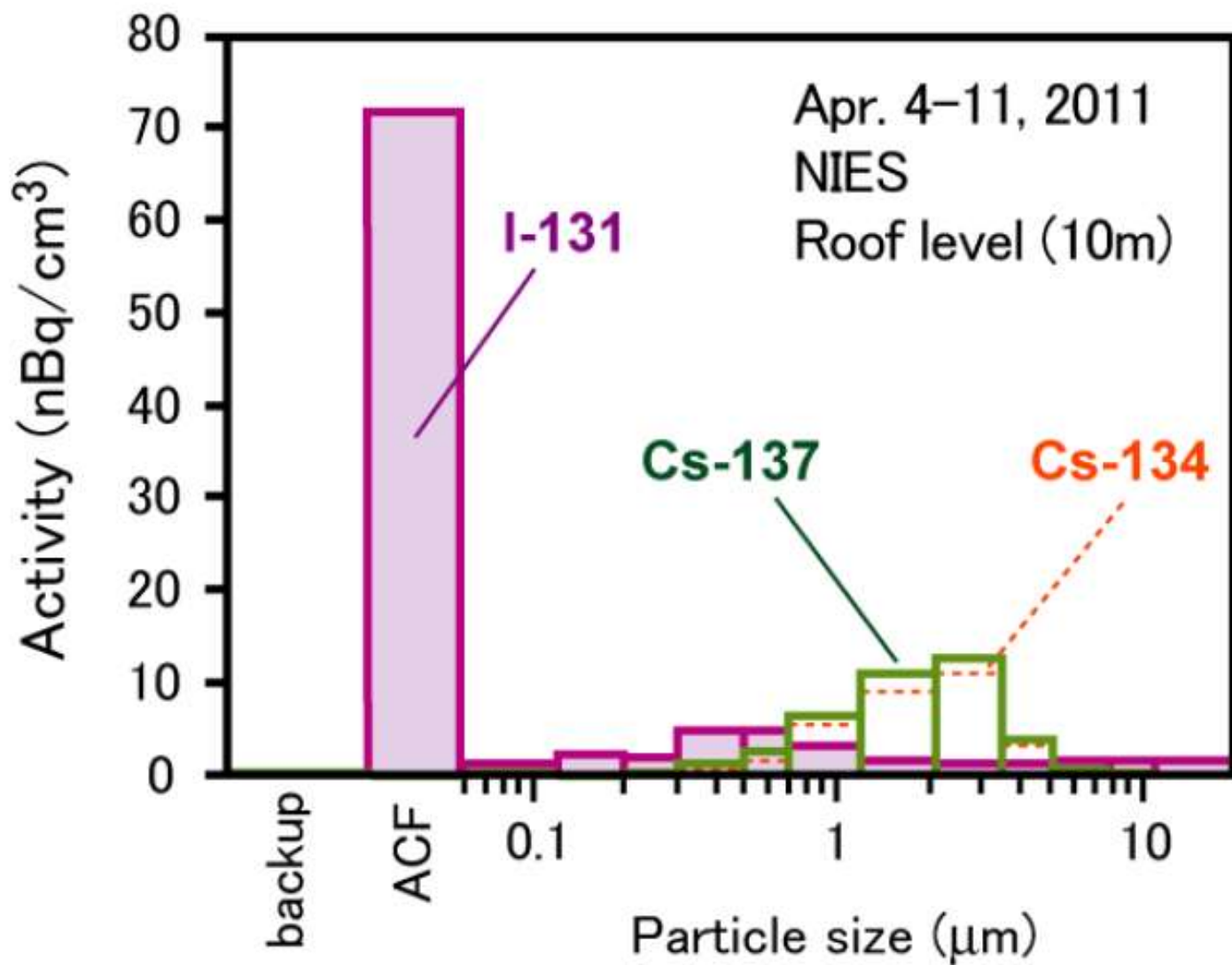


JAEA  
(12/15)

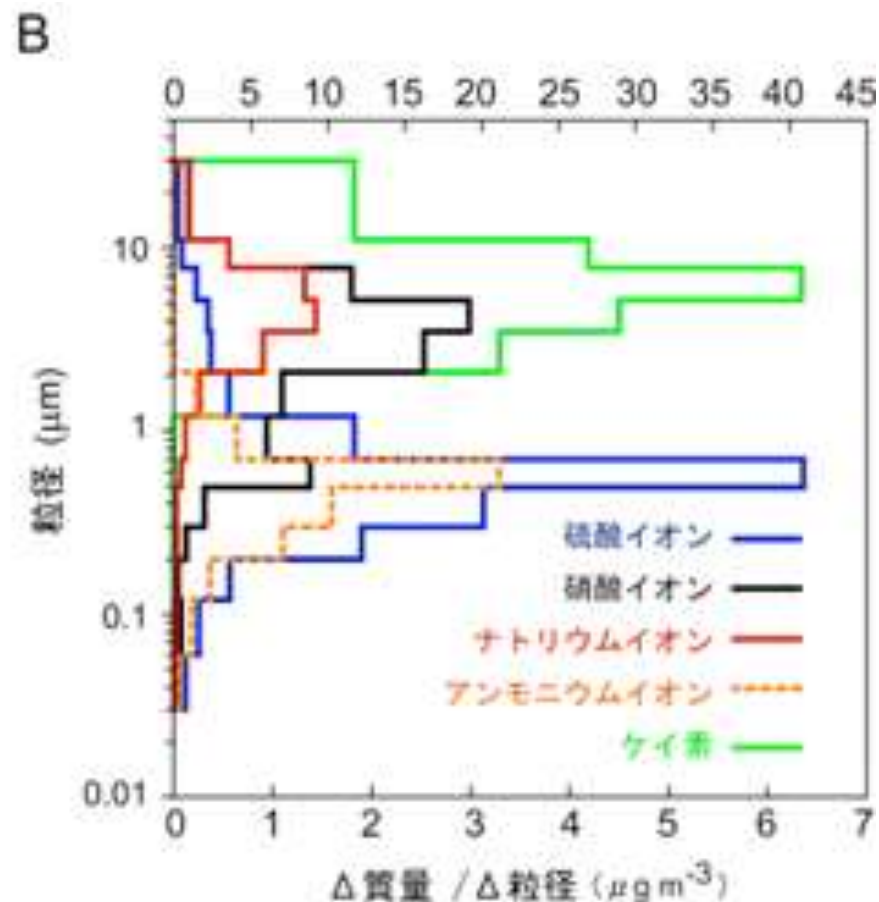
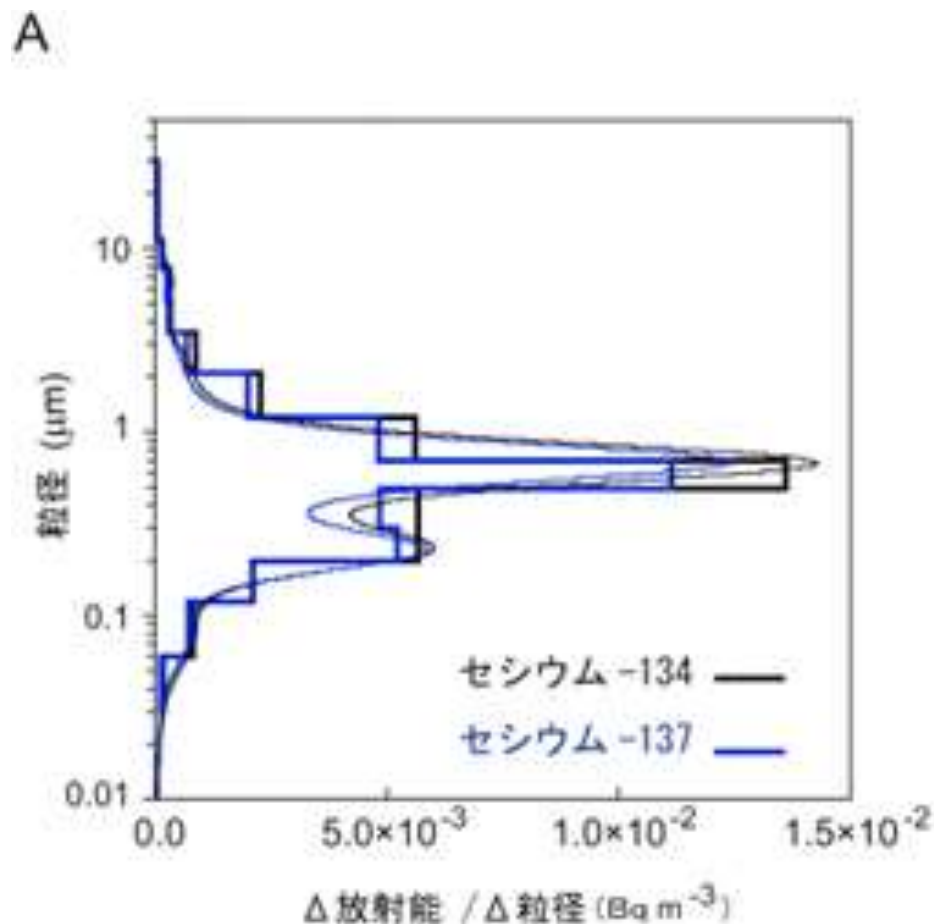


T Wet only  
T Total  
(— total-wet)

# 大気中の放射性核種の粒径分布



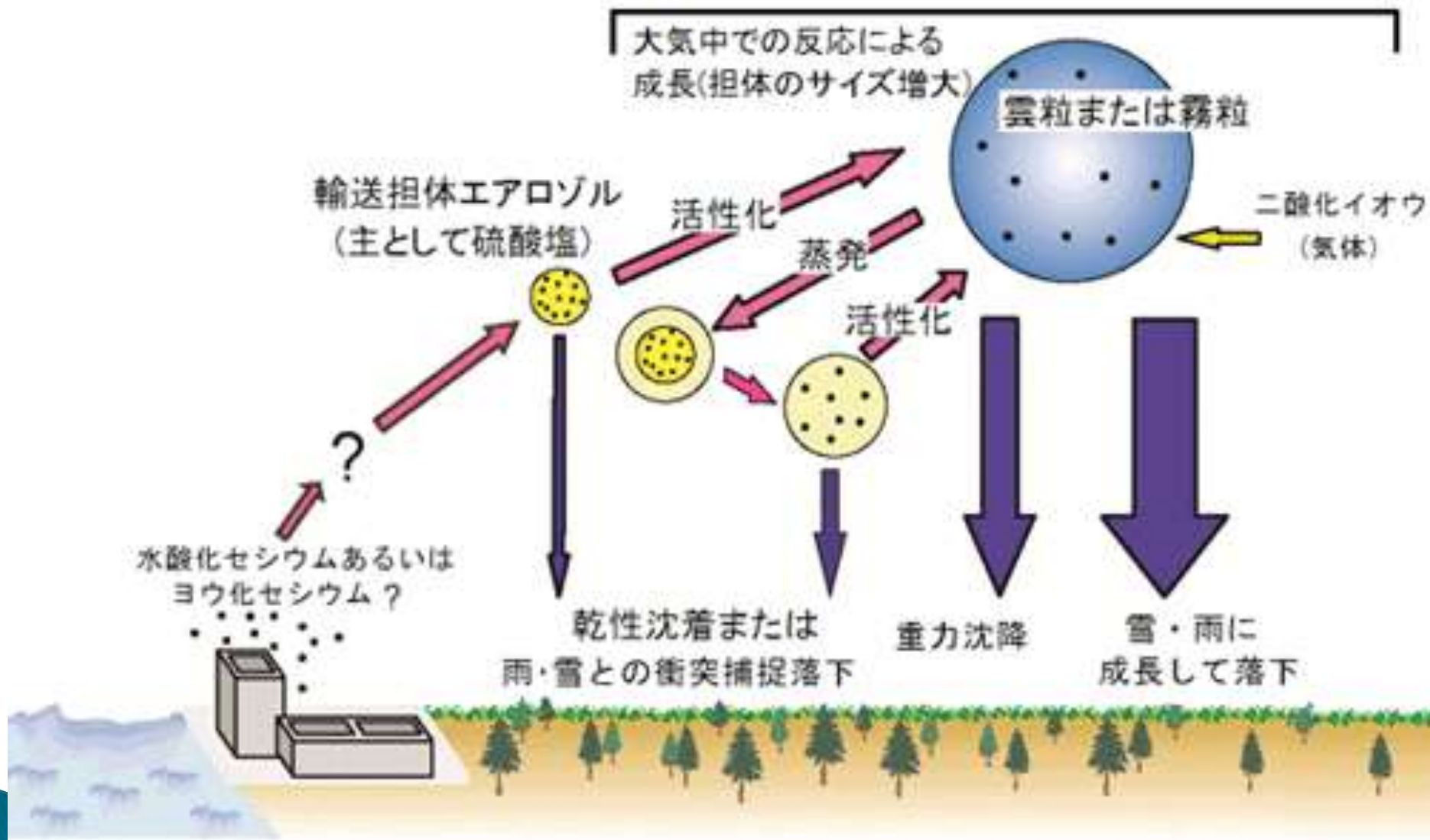
# 放射性セシウムは硫酸塩として飛散@つくば市



- ▶ 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( $\text{CsI}$ )または水酸化セシウム( $\text{CsOH}$ )が想定されている



# 汚染源から沈着までの過程



# 米の再汚染 - 綺麗になったはずの米から基準値超え

## 福島のニュース

福島 社会 原発事故・放射線

ツイート 213

いいね! 169

記事を印刷

## 福島・南相馬産のコメからセシウム検出 原発粉じん付着か

福島県南相馬市で昨年秋に収穫されたコメから国の基準値（1キロ当たり100ベクレル）を超える放射性セシウムが検出された問題で、農林水産省が福島第1原発のがれき撤去作業で生じた粉じんが原因の可能性があると指摘し、東京電力に防止策を求めていることが14日、明らかになった。



基準値超えのコメが収穫されたのは、原発から21キロほど離れた同市原町区太田地区の14カ所と20キロ圏内の同市小高区の5カ所。農水省が調査した結果、放射能濃度は、昨年8月中旬以降に出穂した穂などで局所的に高かった。

基準値超えの原因は現在も特定できていないが、農水省は同原発で昨年8月19日、3号機のがれき撤去作業の粉じん作業員2人が被ばくした事実に着目。粉じんが風に乗って飛散し、コメに付着した可能性があるとみて、ことし1月に原子力規制庁に相談。同3月、東電に原発の作業で放射性物質を外部に出さないよう要請した。

東電は今月中にも1号機のカバー解体に着手する予定。東電は農水省からの要請を認めた上で、「敷地外の影響は調べておらず、（コメ汚染との）因果関係を発表する立場にない。現場作業では散水や吸引などの対策を強化する」と説明する。

# 3号機のカレキ撤去中に起きたダスト飛散

## 1. 事象の概要

○昨年(2013年)8月19日、3号機オペフロ(原子炉建屋5階)上のカレキ撤去作業時に、

- ・免震重要棟のダストモニタで高警報発報(9:29)、高高警報発報(10:04)。
- ・東京電力は、構内全域での全面マスク着用を判断(10:12)。
- ・免震重要棟におけるダストサンプリング(9:50-10:10)により、高濃度セシウムを確認。
- ・敷地境界のモニタリングポスト(MP2)においても有意な変動を観測。



図 関係施設の位置

# SPEEDIの限界

## 放射性セシウムの降下量 —実測値と計算値—

[単位：Bq/m<sup>2</sup>]

地点	3号機からの距離	実測値※	計算値	計算値/実測値
双葉町(郡山)	3km	34,000	144	0.4%
浪江町(浪江)	9km	580	92	16 %
南相馬市(福浦)	13km	1,100	12	1.1%
南相馬市(馬場)	23km	123	20	16 %
南相馬市(原町)	25km	276	4	1.4%

※ 昨年8月の放射性セシウムの降下量の実測値(福島県「定時降下物モニタリング結果」より)

平成25年8月に高い実測値を示した双葉町(郡山)、南相馬市(福浦)の計算値が実測値に占める割合は0.4～1.1%であった。

# 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 $^{131}\text{I}$ 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	$3.4 \times 10^{18}$	$3.5 \times 10^{18}$	$4.4 \times 10^{18}$	$1.1 \times 10^{19}$
Cs-134	$7.1 \times 10^{14}$	$1.6 \times 10^{16}$	$8.2 \times 10^{14}$	$1.8 \times 10^{16}$
Cs-137	$5.9 \times 10^{14}$	$1.4 \times 10^{16}$	$7.1 \times 10^{14}$	$1.5 \times 10^{16}$
Sr-89	$8.2 \times 10^{13}$	$6.8 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$
Sr-90	$6.1 \times 10^{12}$	$4.8 \times 10^{13}$	$8.5 \times 10^{13}$	$1.4 \times 10^{14}$
Ba-140	$1.3 \times 10^{14}$	$1.1 \times 10^{15}$	$1.9 \times 10^{15}$	$3.2 \times 10^{15}$
Te-127m	$2.5 \times 10^{14}$	$7.7 \times 10^{14}$	$6.9 \times 10^{13}$	$1.1 \times 10^{15}$
Te-129m	$7.2 \times 10^{14}$	$2.4 \times 10^{15}$	$2.1 \times 10^{14}$	$3.3 \times 10^{15}$
Te-131m	<u><math>2.2 \times 10^{15}</math></u>	<u><math>2.3 \times 10^{15}</math></u>	<u><math>4.5 \times 10^{14}</math></u>	<u><math>5.0 \times 10^{15}</math></u>
Te-132	<u><math>2.5 \times 10^{16}</math></u>	<u><math>5.7 \times 10^{16}</math></u>	<u><math>6.4 \times 10^{15}</math></u>	<u><math>8.8 \times 10^{16}</math></u>
Cm-242	$1.1 \times 10^{10}$	$7.7 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{11}$
I-131	$1.2 \times 10^{16}$	$1.4 \times 10^{17}$	$7.0 \times 10^{15}$	$1.6 \times 10^{17}$



# 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

$^{131}\text{I}$ が大量に存在している時期

では、2011年12月の値は？

$^{131}\text{I}$ 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

$^{131}\text{I}$ が大量に存在している時期

では、2011年12月の値は？

$^{131}\text{I}$ は完全に崩壊済み

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

大熊町災害対策本部(月)

# 事故9ヶ月後の時点で放出されていた放射性物質(1号機)

## 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

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

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

### 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。

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

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階付出口		1号機原子炉建屋上部② (原子炉建屋大気取入口)		②核種別指示濃度限度 (Bq/m <sup>3</sup> ) (労働安全衛生法 放射線 業務従事者の呼吸する 空気中の濃度限度)	
	①核種濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	①核種濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	①核種濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)
I-131 (9/8日)	ND	-	ND	-	/	1E-03
Ce-134 (9/29日)	1.4E-04	0.07	ND	-	/	2E-03
Ce-137 (9/20日)	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 <sup>3</sup> ) (労働安全衛生法 放射線 業務従事者の呼吸する 空気中の濃度限度)	
	①核種濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	①核種濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	①核種濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)
I-131 (9/8日)	ND	-	ND	-	/	1E-03
Ce-134 (9/29日)	2.5E-05	0.01	ND	-	/	2E-03
Ce-137 (9/20日)	3.2E-05	0.01	ND	-	/	3E-03



# 事故9ヶ月後の時点で放出されていた放射性物質(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 <sup>3</sup> ) (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)
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)	①試料濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	①試料濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	①試料濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> )	倍率 (①/②)	
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

# 事故9ヶ月後の時点で放出されていた放射性物質(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)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{ダスト濃度 (Bq/cm}^3\text{)} \times \text{推定蒸気発生量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (4.2\text{E-3} + 5.0\text{E-3}) \times 0.58 \times 1\text{E6} \\ &= 5.3\text{E3 Bq/s} \\ &= \text{約0.19億Bq/時} \end{aligned}$$

### ②機器ハッチ (11/9測定値)

$$\begin{aligned} \text{放出量(Bq/s)} &= \text{ダスト濃度(Bq/cm}^3\text{)} \times \text{機器ハッチ開口部風量(m}^3\text{/s)} \times 1\text{E6(cm}^3\text{/m}^3\text{)} \\ &= (1.9\text{E-4} + 2.3\text{E-4}) \times (0.31 \times 5.6 \times 5.6) \times 1\text{E6} \\ &= 4.1\text{E3 Bq/s} \\ &= \text{約0.15億Bq/時} \end{aligned}$$

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

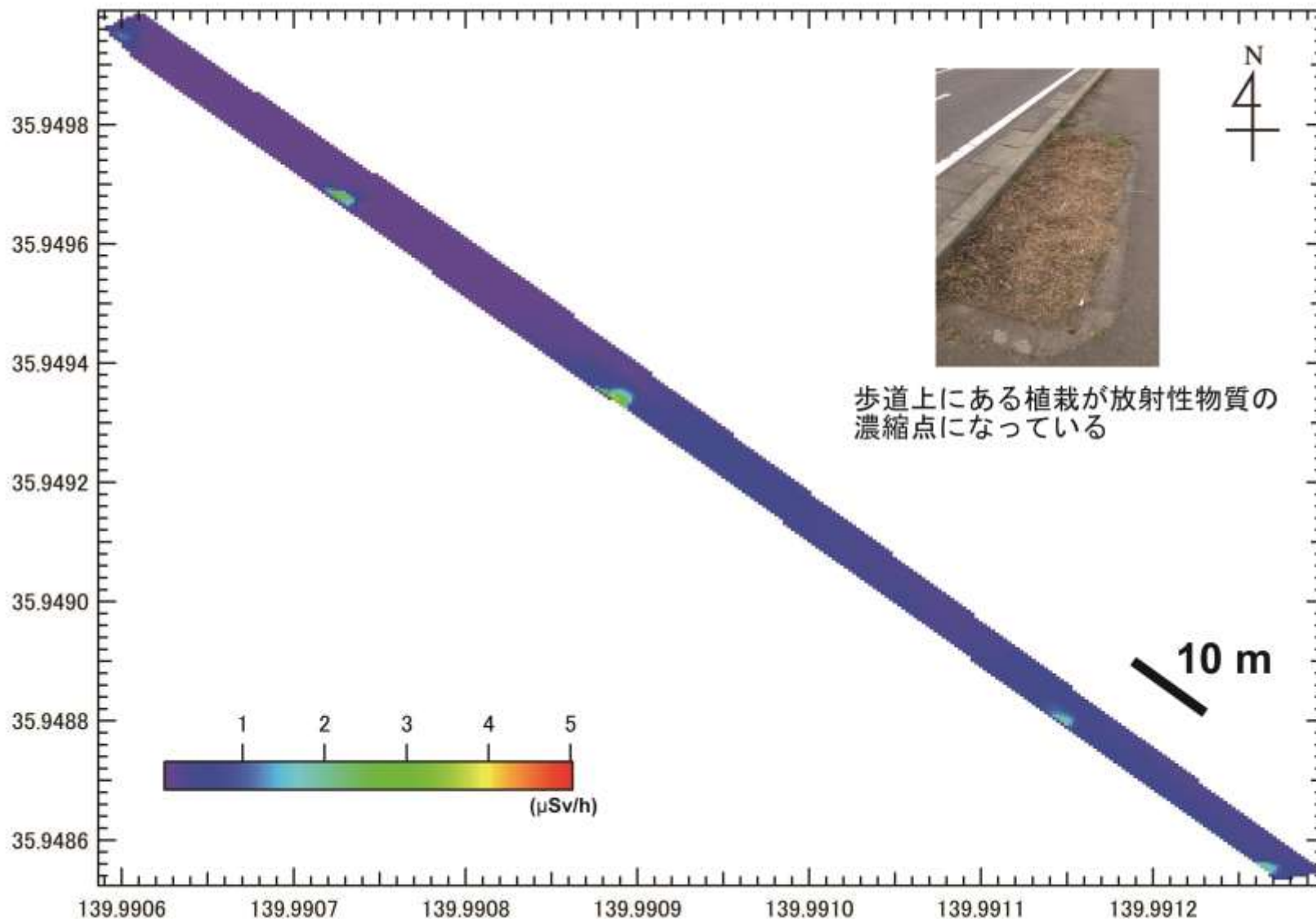
3号機原子炉建屋上部における空气中放射性物質の核種分析結果(参考)

採取場所	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 (原子炉上北東側(下方))		3号機原子炉建屋上部⑧ (原子炉上北東側(上方))		②汚染指示濃度現度 Bq/an ①放射線測定機 放射線 測定器からの検出する 空気中の濃度現度
	採取日時	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	採取日時	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	採取日時	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	採取日時	平均濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )	
I-131 (9/9日)	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	1E-03
Qe-134 (9/9日)	4.2E-03	2.1	1.8E-03	0.90	6.1E-04	0.31	3.9E-04	0.19	2E-03
Qe-137 (9/30日)	5.0E-03	1.7	2.3E-03	0.77	7.3E-04	0.24	4.9E-04	0.15	3E-03

## 事故9ヶ月後の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。

# 小規模な移動の例 -歩道上の植栽への濃縮-



## 「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...？

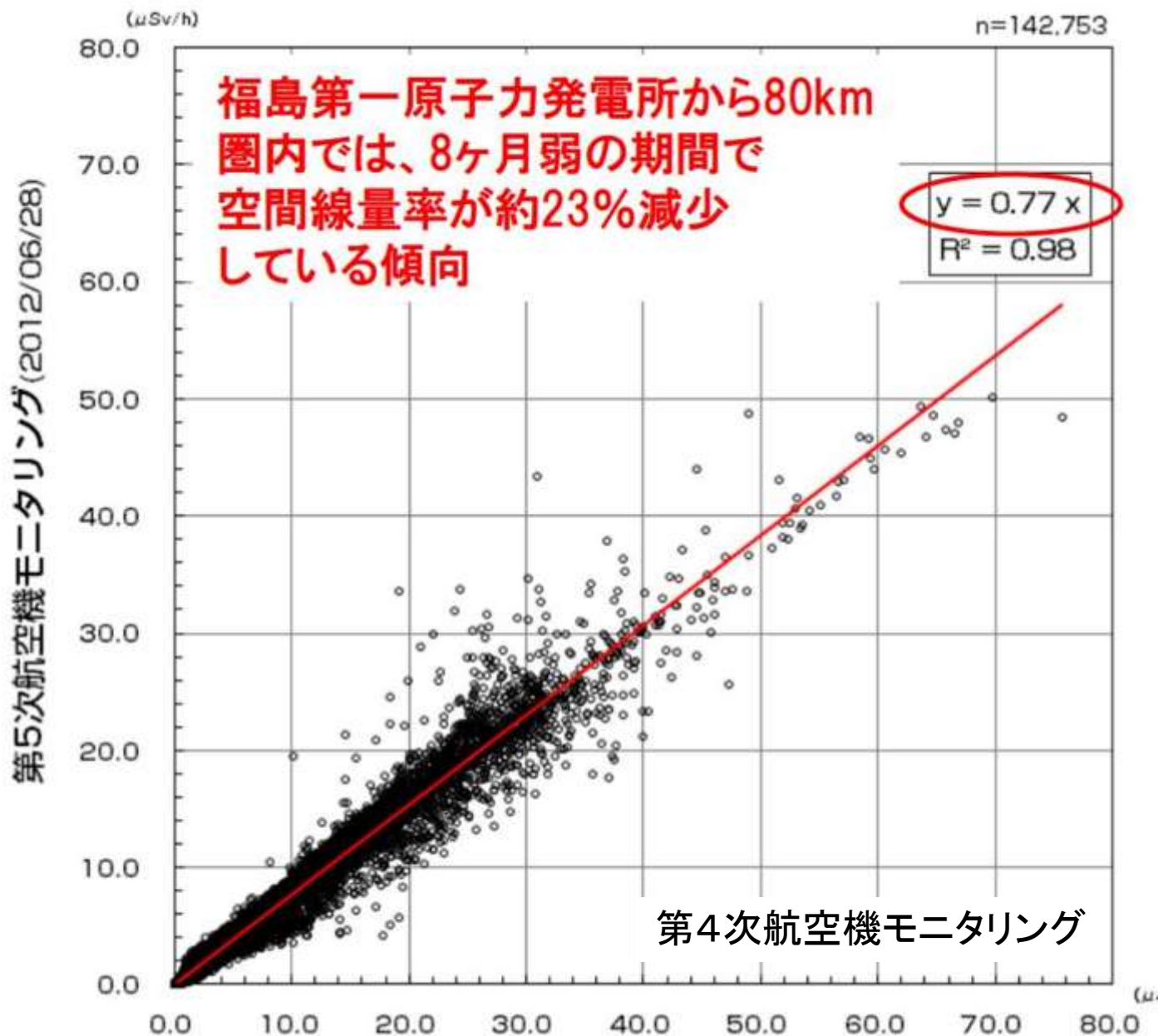
# (再掲)濃縮の例:守谷市内の水路における放射性セシウムの濃縮\*

堆積物・表層5cm

地点	場所	放射性セシウム(Bq/kg)	空間線量率(μSv/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

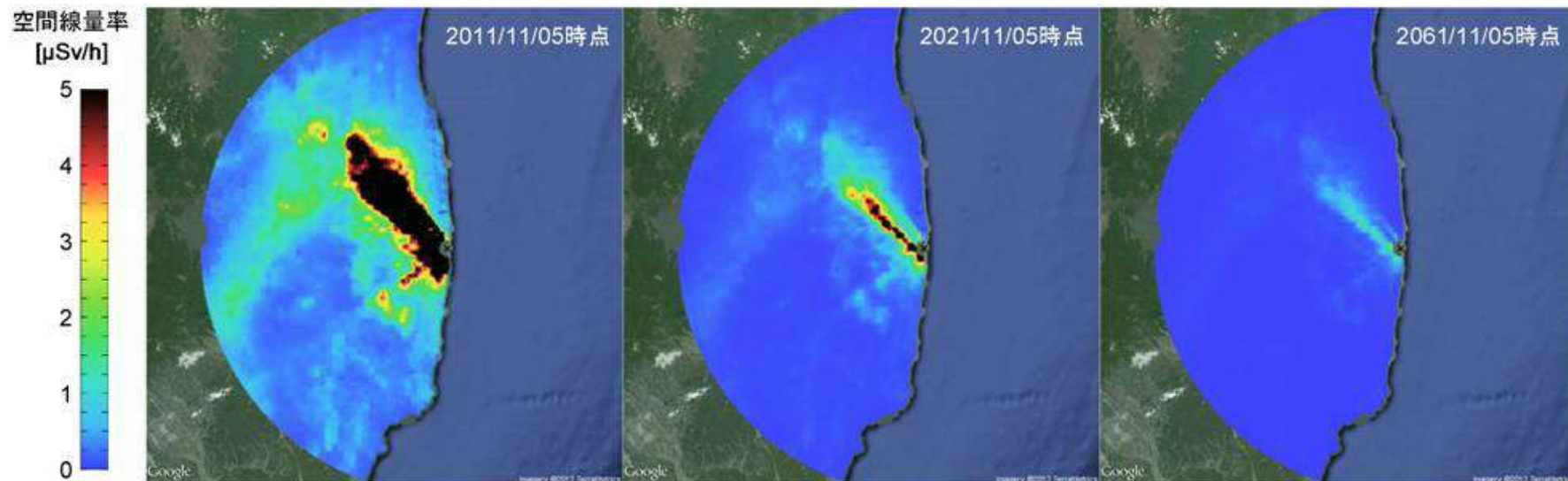
\*小豆川勝見, 科学, 82(10), 1059-1062, 岩波書店, 2012

# 理論値よりも早く空間線量率が減衰



# 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<sup>[2]</sup>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 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ 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<sup>[2]</sup>で使用されている文献<sup>[3]</sup>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:  $\mu$ 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:

- $^{134}\text{Cs}$       半減期2年
- $^{137}\text{Cs}$       半減期30年
- $^{90}\text{Sr}$         半減期28年
- $^{239}\text{Pu}$       半減期24000年
- $^{241}\text{Pu}$       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 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ は環境中で同じように動く。

## ▶ 今後、放射性物質はどうなる？

# 土壌中のCsやSrの吸着サイト

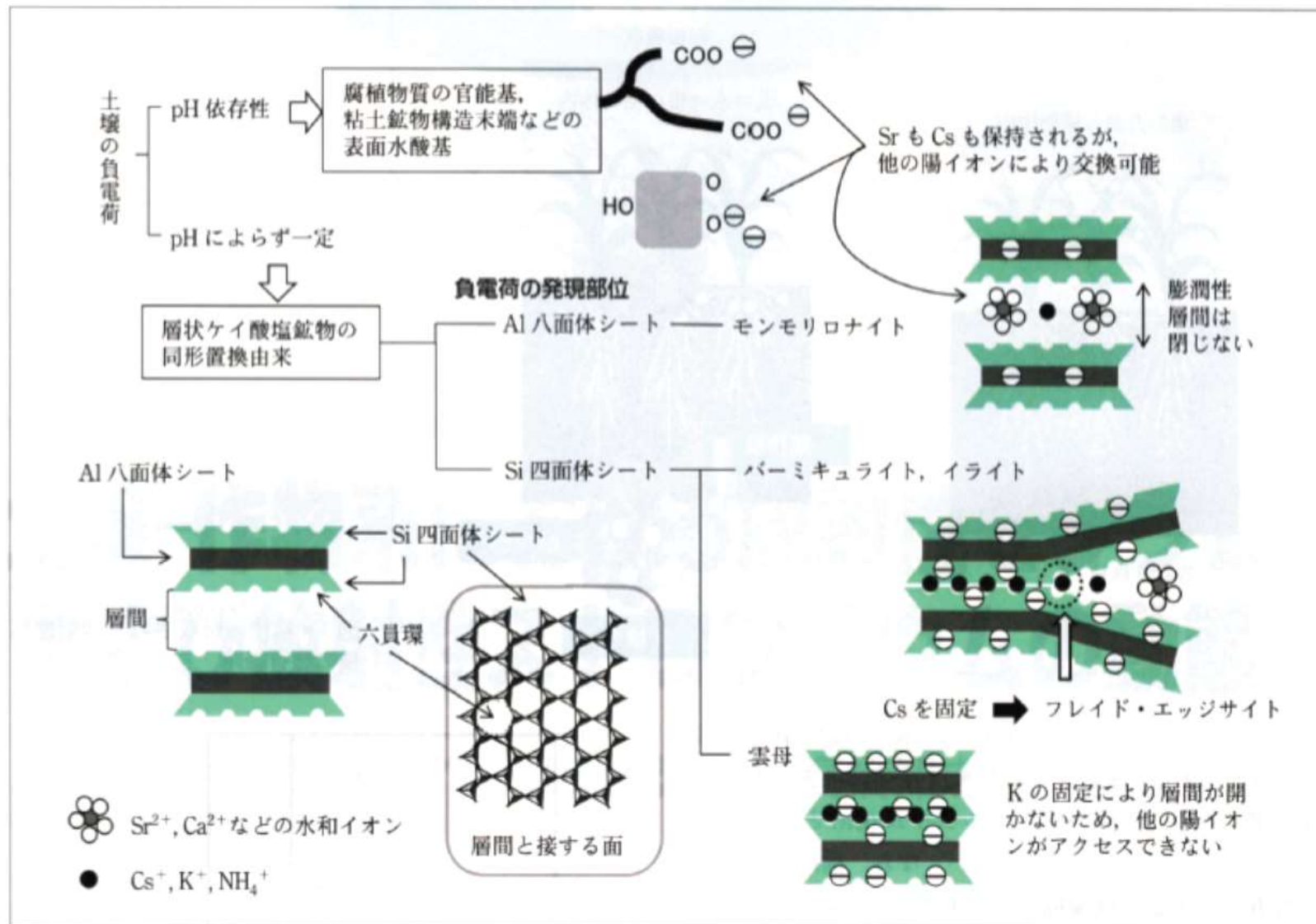
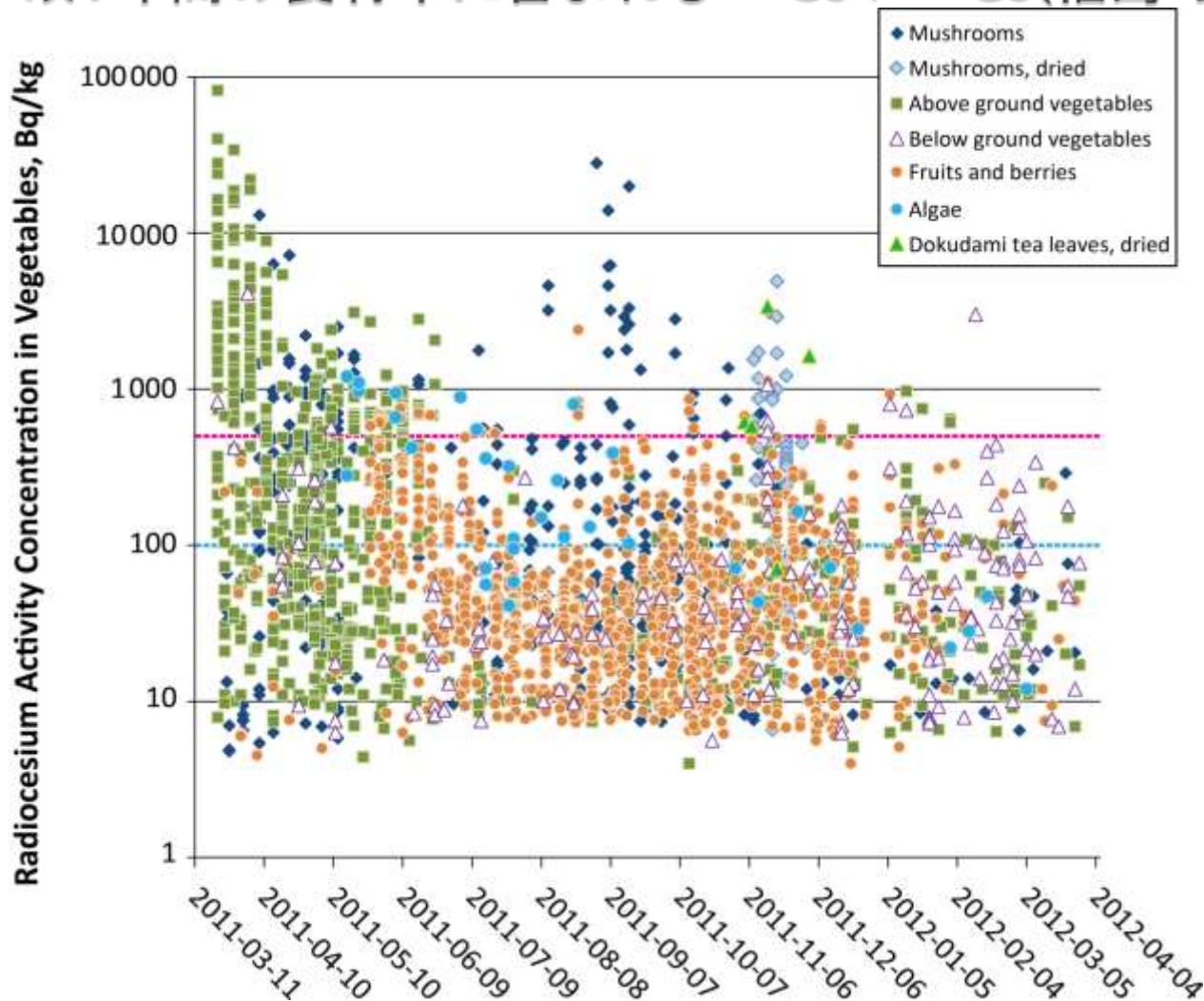


図3 ■ 土壌の負電荷への Cs, Sr 保持メカニズム

# 将来を予測するための「ビッグデータ」

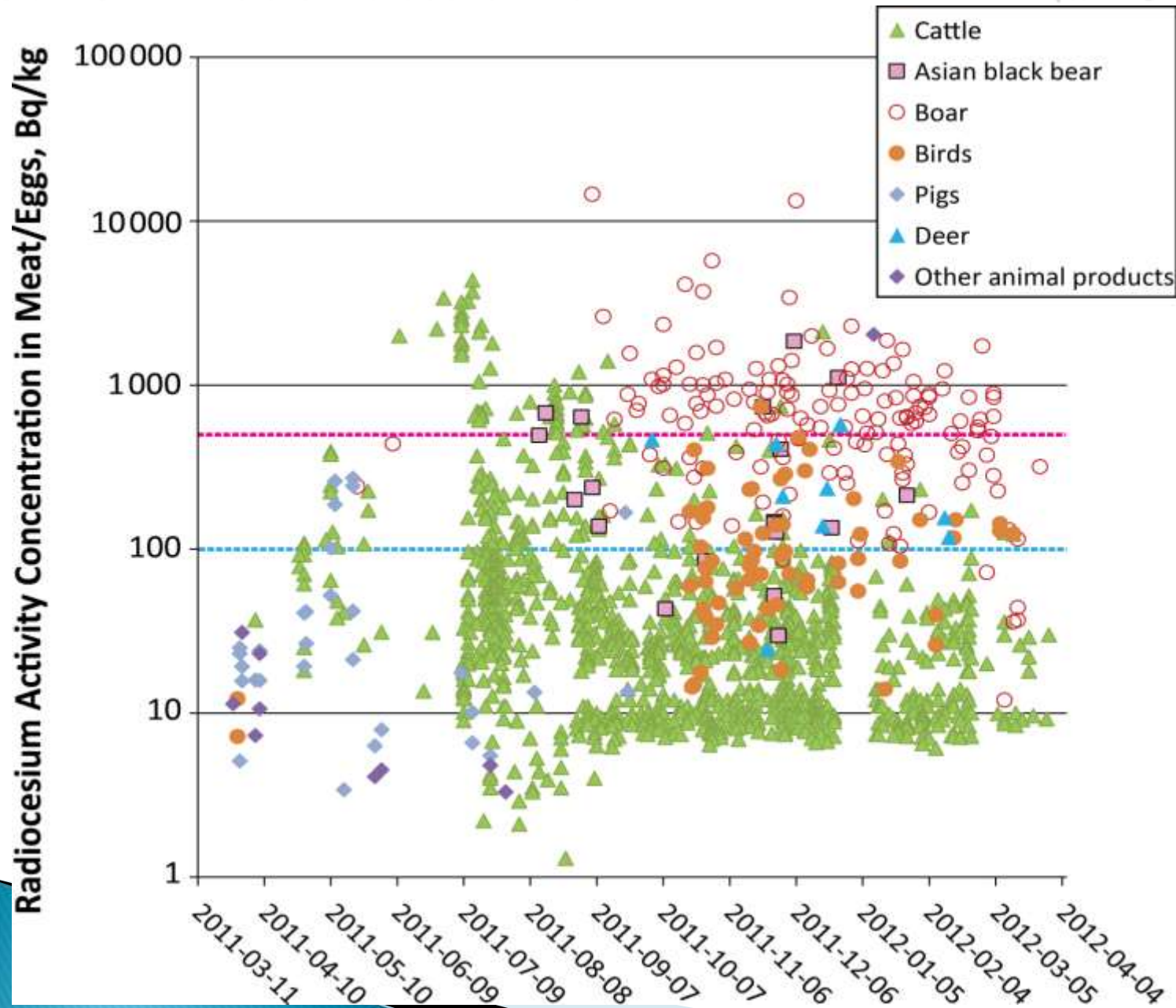
- ▶ 解析に使ったデータ量(測定値)は90万以上。日本で公開されているほぼすべてのデータを突っ込んだ(はず)
- ▶ 最大のポイントは今後の「 $^{90}\text{Sr}$ の動き」。
  - 現在の一般食品の基準値は、 $^{90}\text{Sr}$ など原発由来のすべての放射性物質を考慮したうえで、 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の合計値が100Bq/kgです。
    - 年間の「追加」被ばく量が誰でも1mSv/年以下になるように設定された値。

# 原発事故1年間の食材中に含まれる $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ (福島・野菜)



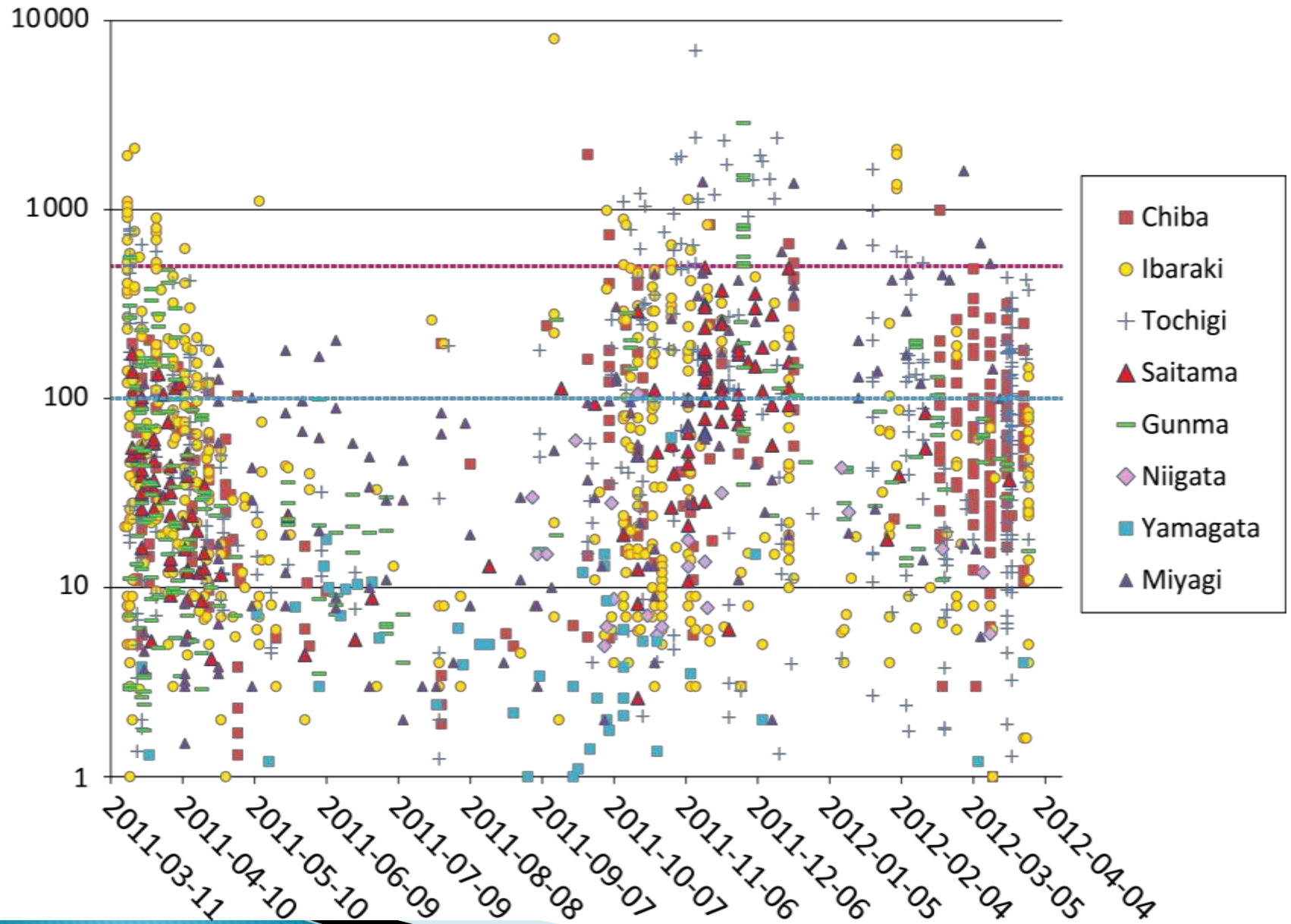
**Fig. 1.** Radiocesium ( $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ ) activity concentrations in vegetables and vegetarian produce from Fukushima prefecture sampled over the period 2011-03-11 until 2012-03-31. The provisional regulatory limit for vegetables, cereals, meats, eggs, seafood and other foodstuffs (500 Bq/kg; valid until 2012-03-31) is indicated by the dotted magenta line. For information purposes, the new regulatory limit (100 Bq/kg; valid from 2012-04-01) is indicated by the dotted light blue line.

# 原発事故1年間の食材中に含まれる $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ (福島・肉)

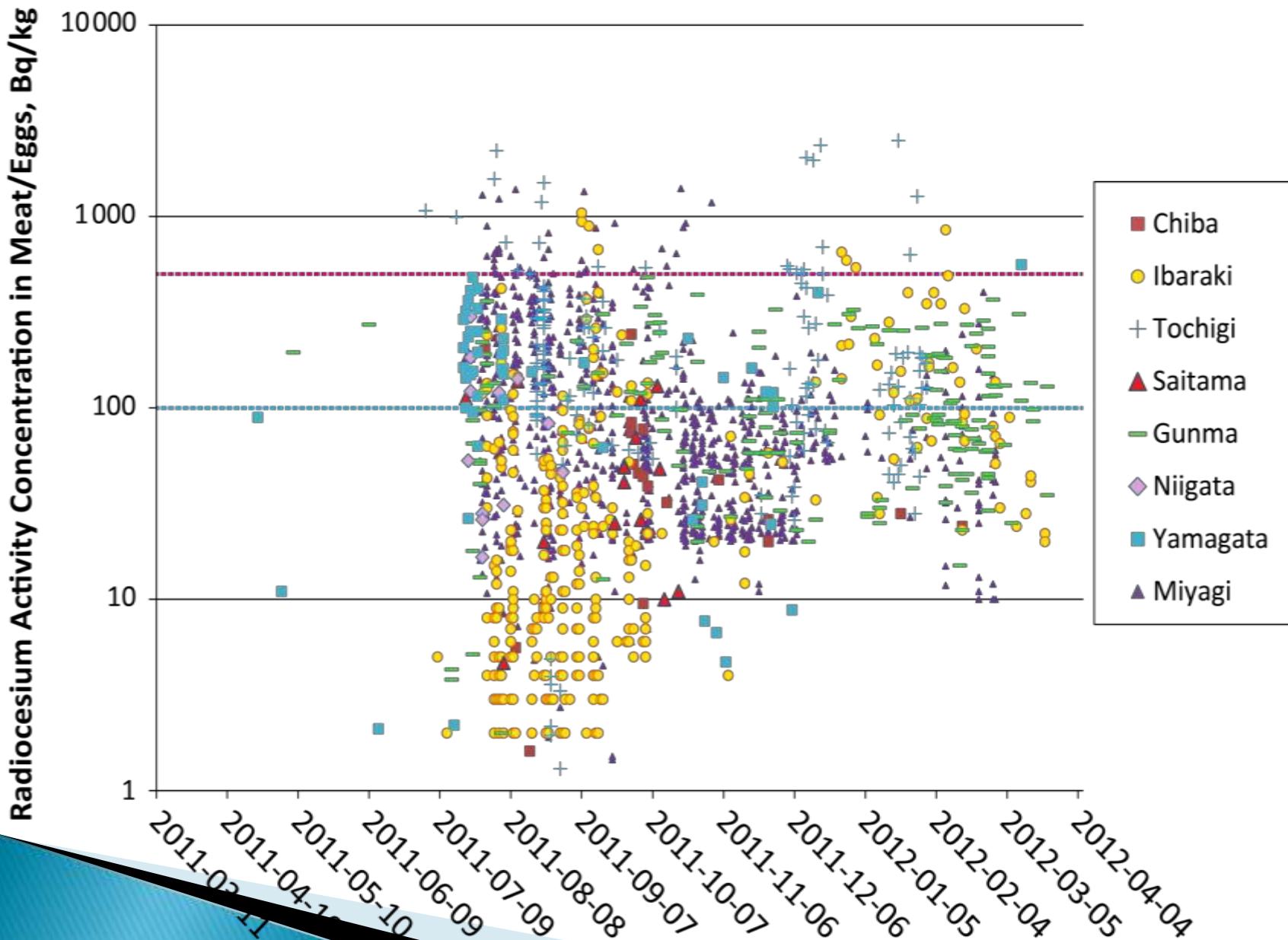


# 福島県外の「野菜」に含まれる $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$

Radiocesium Activity Concentration in Vegetables, Bq/kg



# 福島県外の「肉」に含まれる $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$

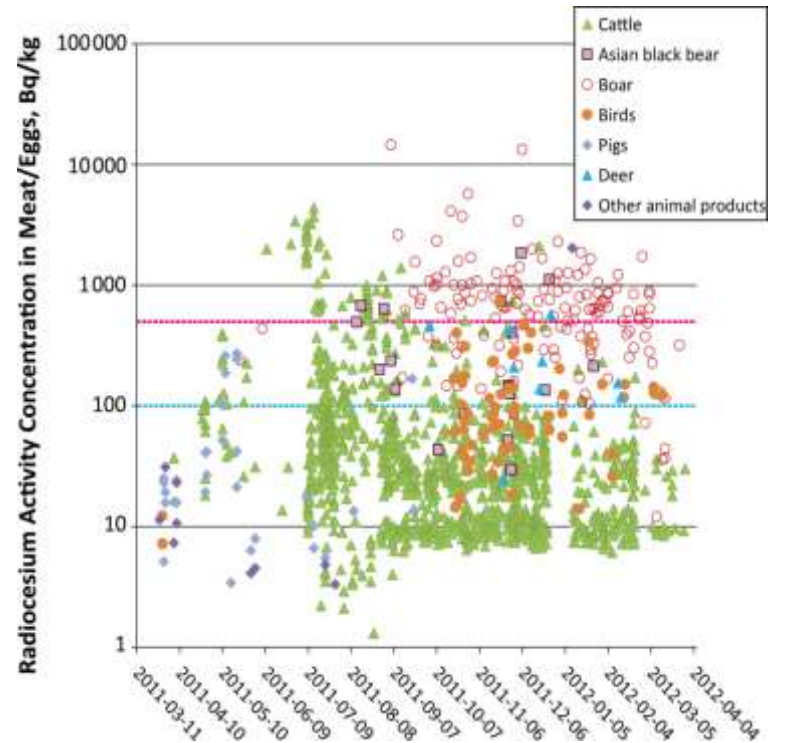
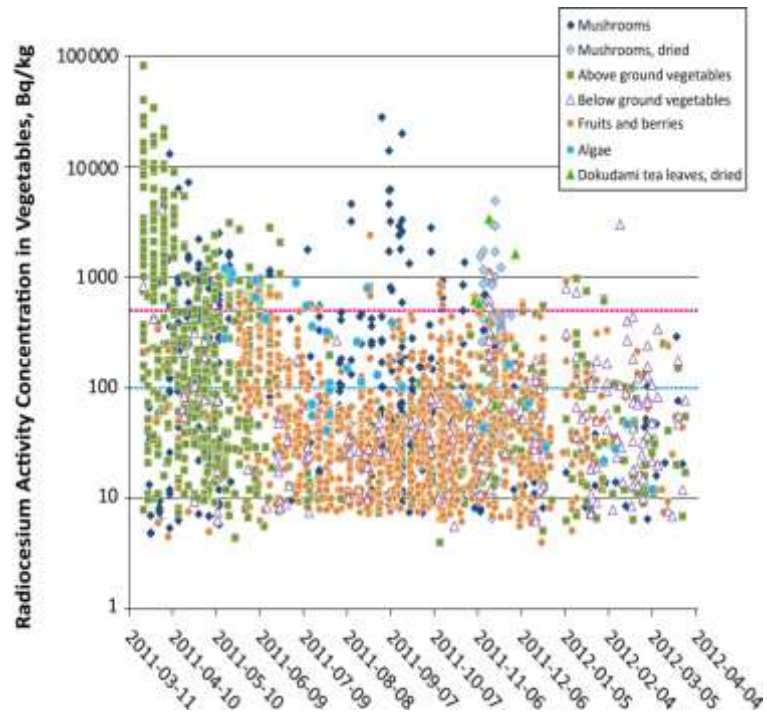




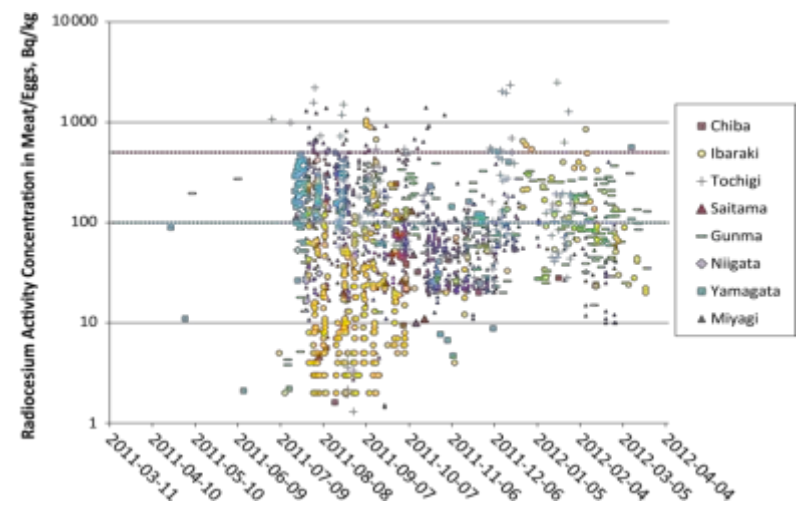
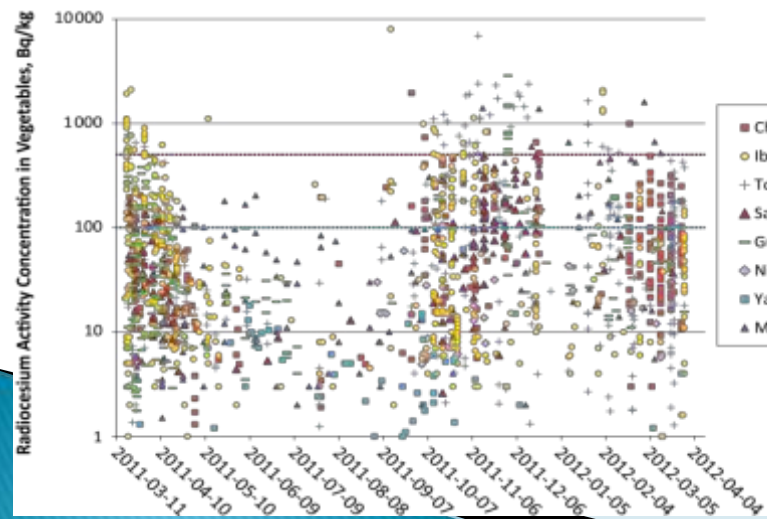
# 野菜

# 肉

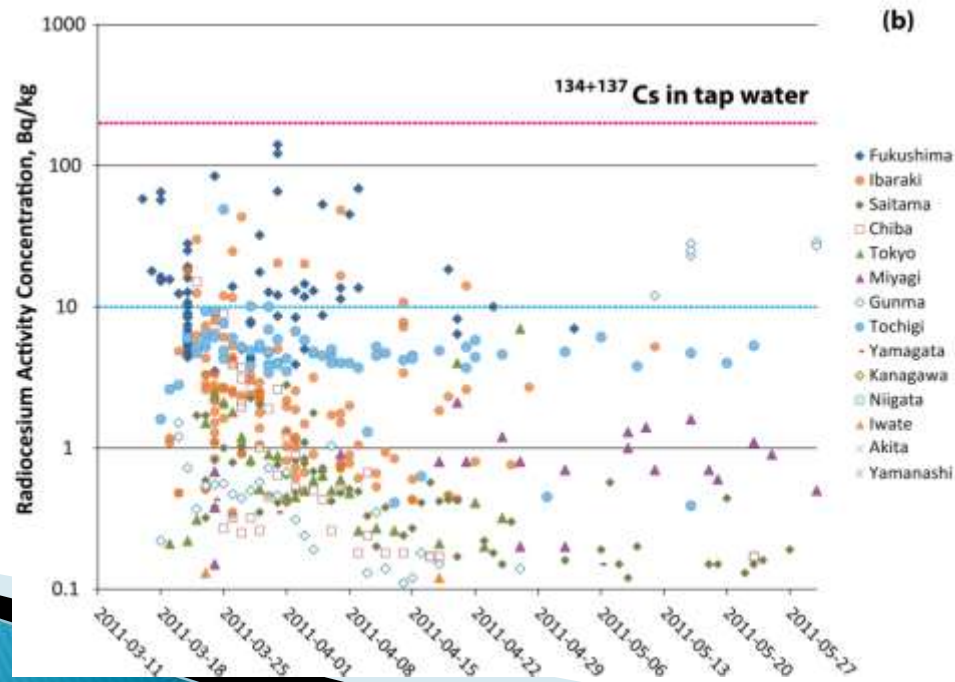
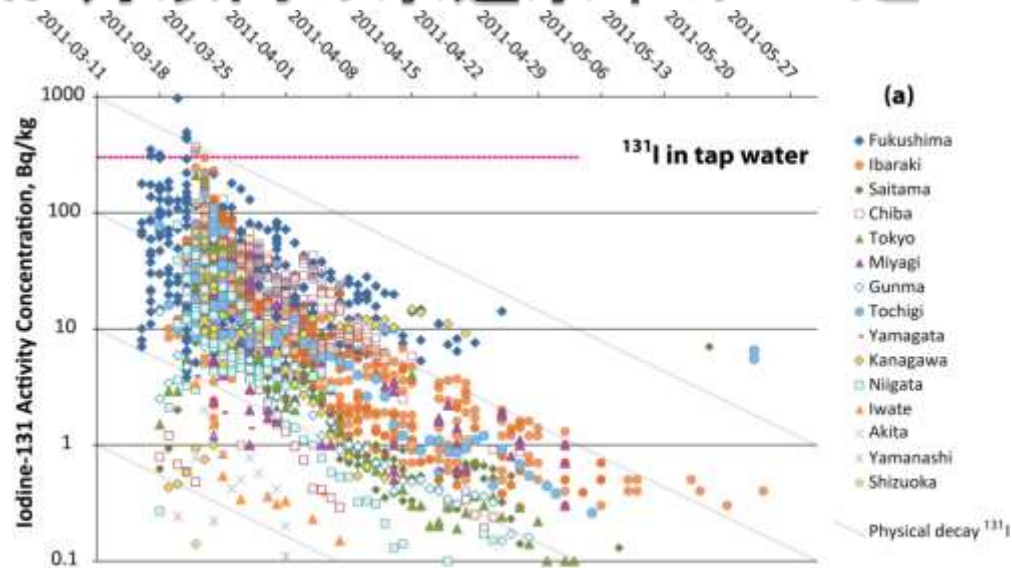
福島



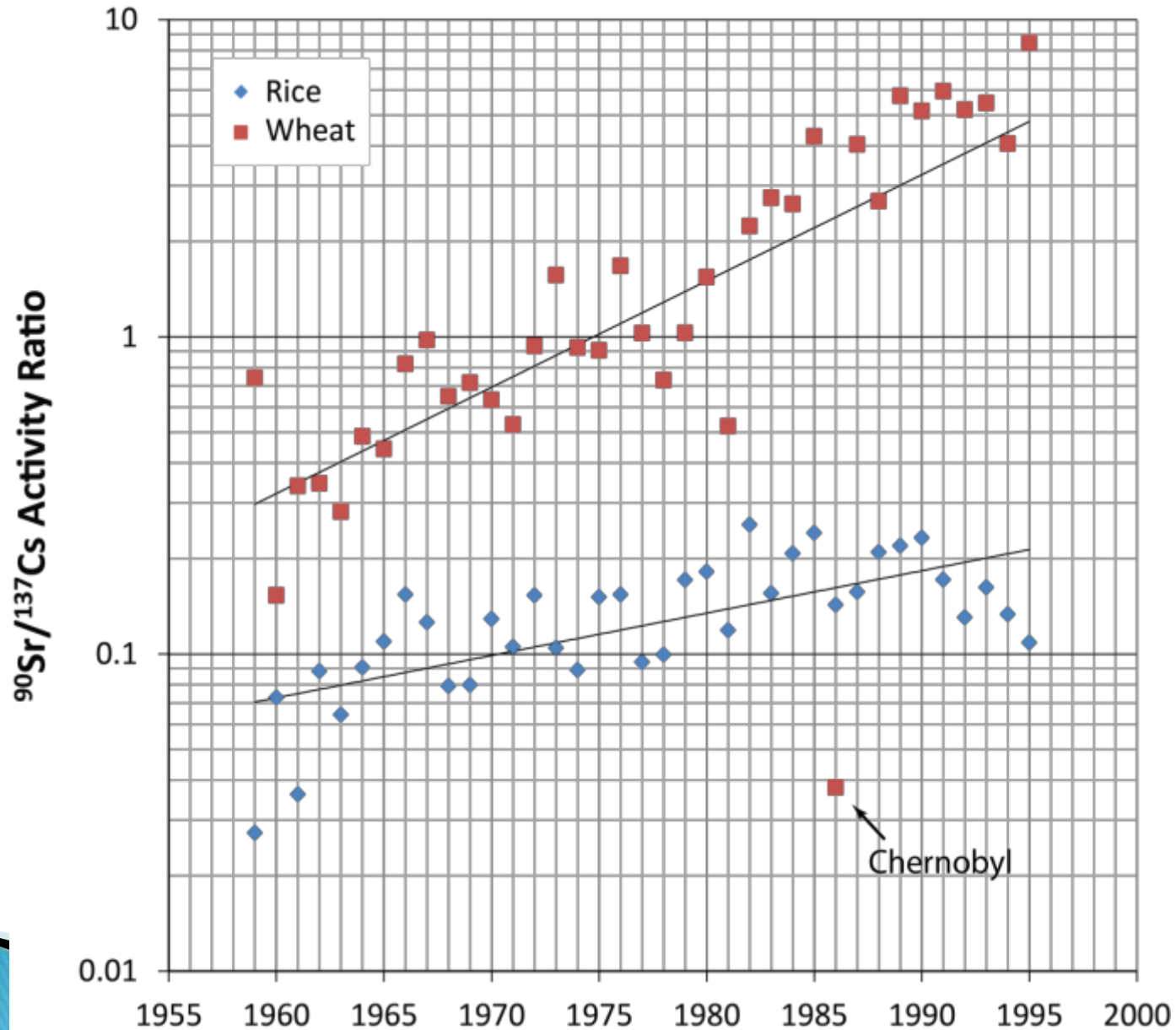
福島  
県外



# 事故から4か月以内の水道水中の $^{131}\text{I}$ と $^{134}+^{137}\text{Cs}$



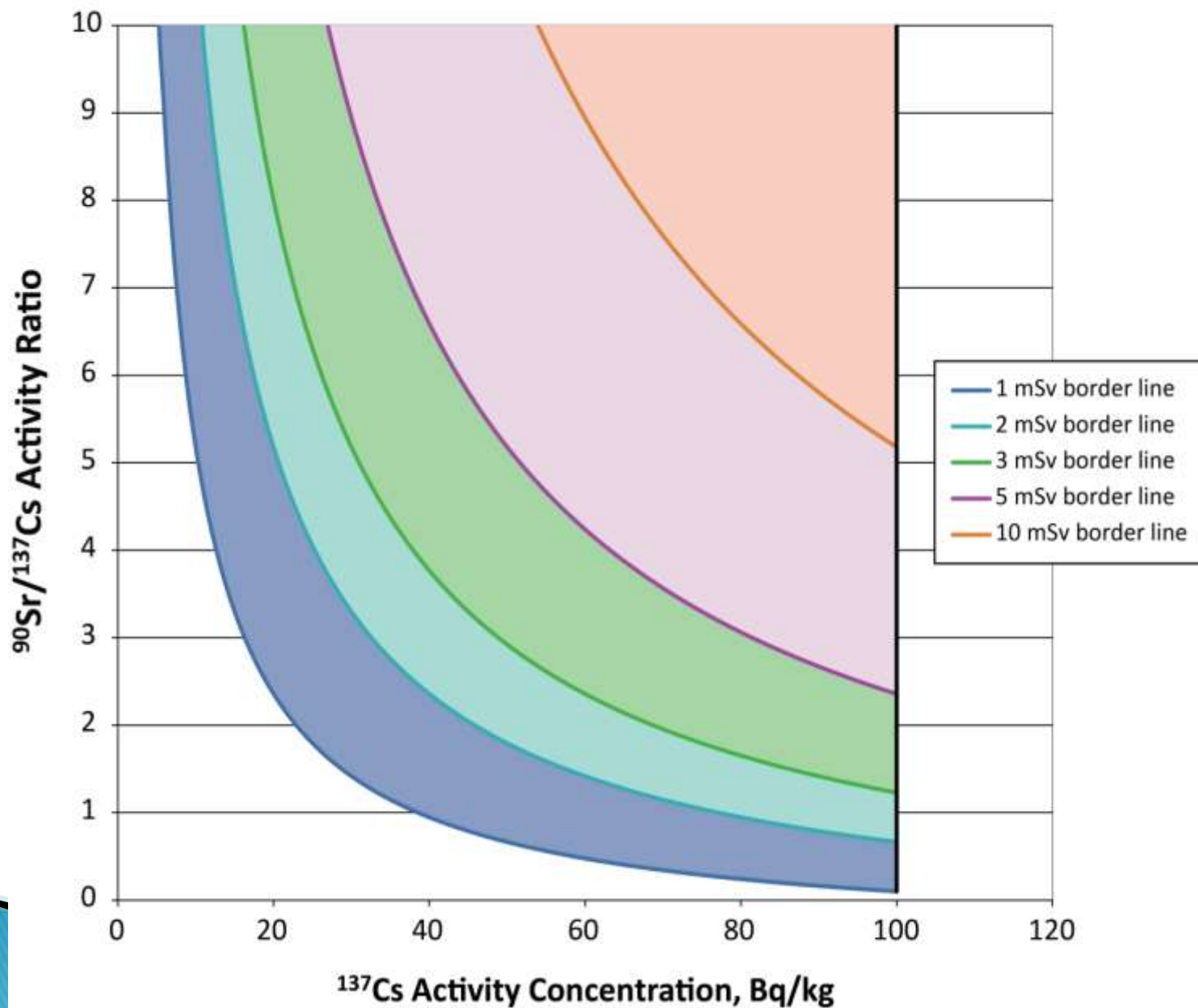
# 核実験以来の国内の $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 比の推移(米と小麦)



## $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 比の経年変化がもつ意味

- ▶  $^{90}\text{Sr}$ が $^{137}\text{Cs}$ と比較して相対的に移動しやすい
  - 福島原発事故による $^{90}\text{Sr}$ の沈着量は $^{137}\text{Cs}$ と比較して極めて少ない。しかし、易動度を考慮しないと今後大きな問題が生じる
- ▶ チェルノブイリ原発事故では、放出比を次のように決定している。
  - $^{90}\text{Sr}:^{106}\text{Ru}:^{134}\text{Cs}:^{137}\text{Cs} = 5.2:4.3:25.9:64.6$ .
  - 暫定基準値(福島事故から1年以内)はこの放出比を用いて、5mSv/年(経口)を超えないように食品の基準値が定められていた。
  - $^{90}\text{Sr}$ は放射性セシウムの10%以下、と仮定してきた。
- ▶ 現在の基準値は以下の放出比を採用している。
  - $^{238+239+240+241}\text{Pu}:^{90}\text{Sr}:^{106}\text{Ru}:^{134}\text{Cs}:^{137}\text{Cs} = 0.000002:0.003:0.02:0.92:1$ .
  - $^{90}\text{Sr}$ は放射性セシウムの0.16%しかない。つまり、この値で現在の放射性物質の基準値が決められている。
- ▶ ここでもう一度前のグラフを見ていただきたい

# $^{90}\text{Sr}$ のmobilityを考慮して、比から被ばく量に換算



# 除染とは



- ▶ 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
  
- ▶ 「減容化」・「高濃縮」化が鍵！
  
- ▶ より簡単に、線量の低減ができないものか...?

# 福島大学の放射能汚染 2011年3月24日



Area Measured	Baseball Field ①	Soccer / Rugby Field ②	Central Area Consisting of Interlocking Bricks ③	Classroom L4 ④	Administration Building ⑤
Date					
	2011/03/24	2011/03/24	2011/03/24	2011/03/24	2011/03/24
	6.50 $\mu$ SV/h	6.07 $\mu$ SV/h	4.42 $\mu$ SV/h	0.20 $\mu$ SV/h	1.56 $\mu$ SV/h

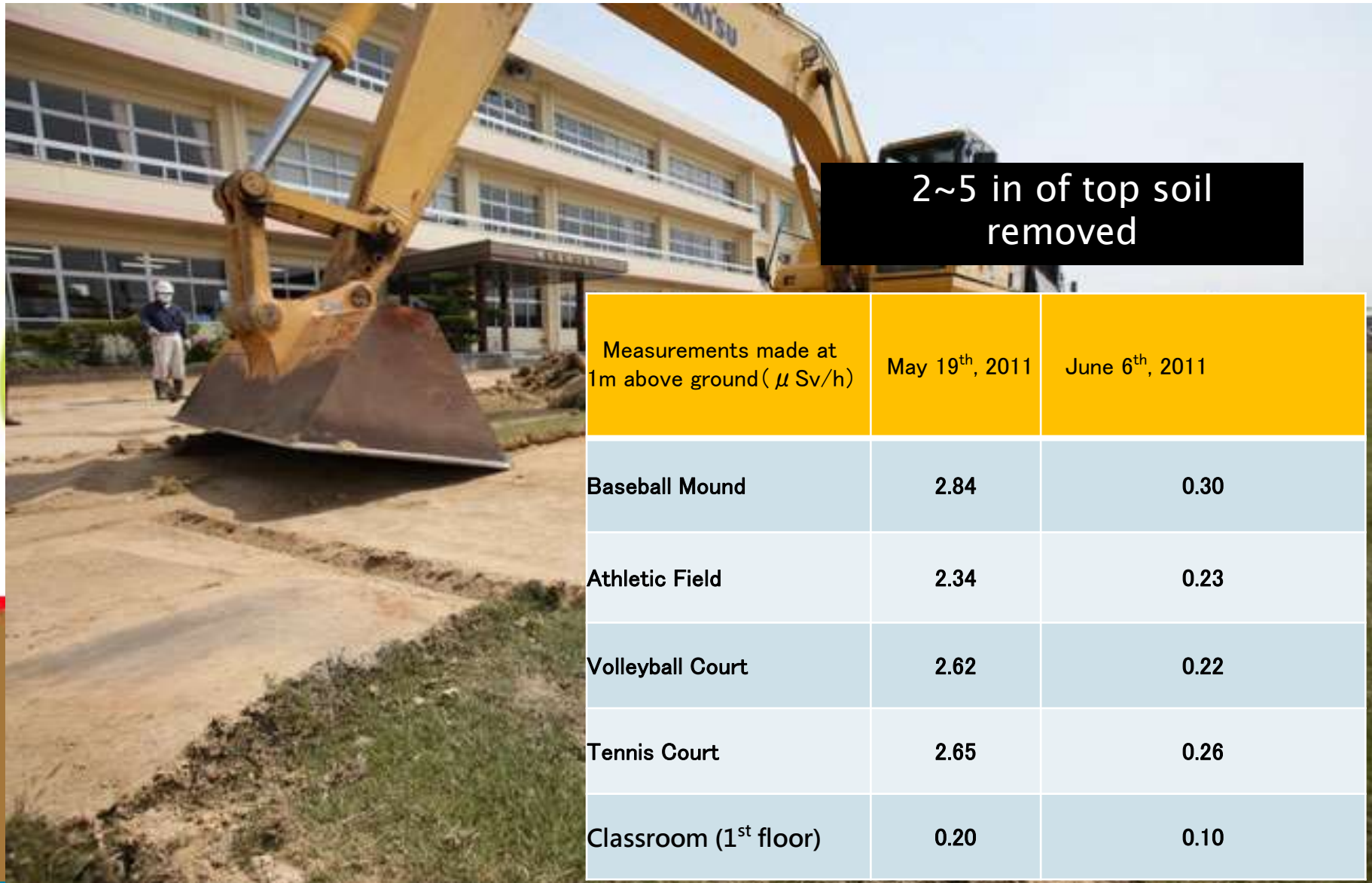
※ 地上高1mの計測値

# 福島大学キャンパス内の除染





# 表土はぎ取りによる除染



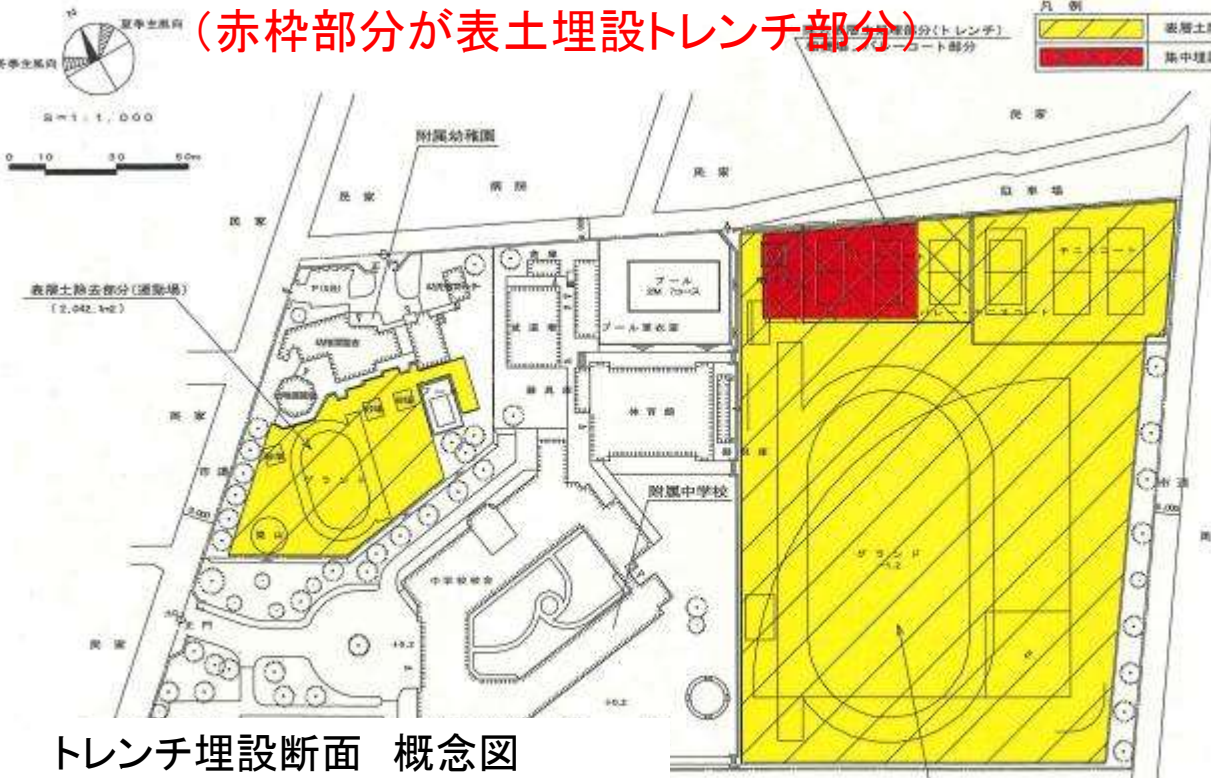
2~5 in of top soil removed

Measurements made at 1m above ground ( $\mu$ Sv/h)	May 19 <sup>th</sup> , 2011	June 6 <sup>th</sup> , 2011
Baseball Mound	2.84	0.30
Athletic Field	2.34	0.23
Volleyball Court	2.62	0.22
Tennis Court	2.65	0.26
Classroom (1 <sup>st</sup> floor)	0.20	0.10

# キャンパスの除染: 表土入替工事 表土埋設トレンチ場所

(赤枠部分が表土埋設トレンチ部分)

凡 例	
	表層土除去 (t=5cm)
	基中埋設処理 (t=1.5m)



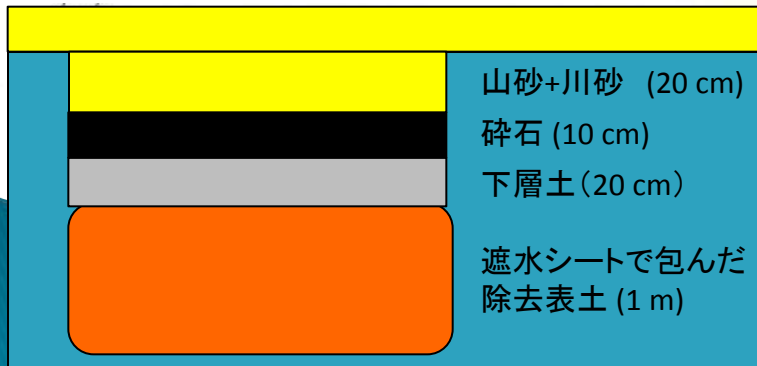
5/27遮水シートで表土被覆作業



6/8施行後のトレンチ上部  
(野外バレーボールコート)



トレンチ埋設断面 概念図



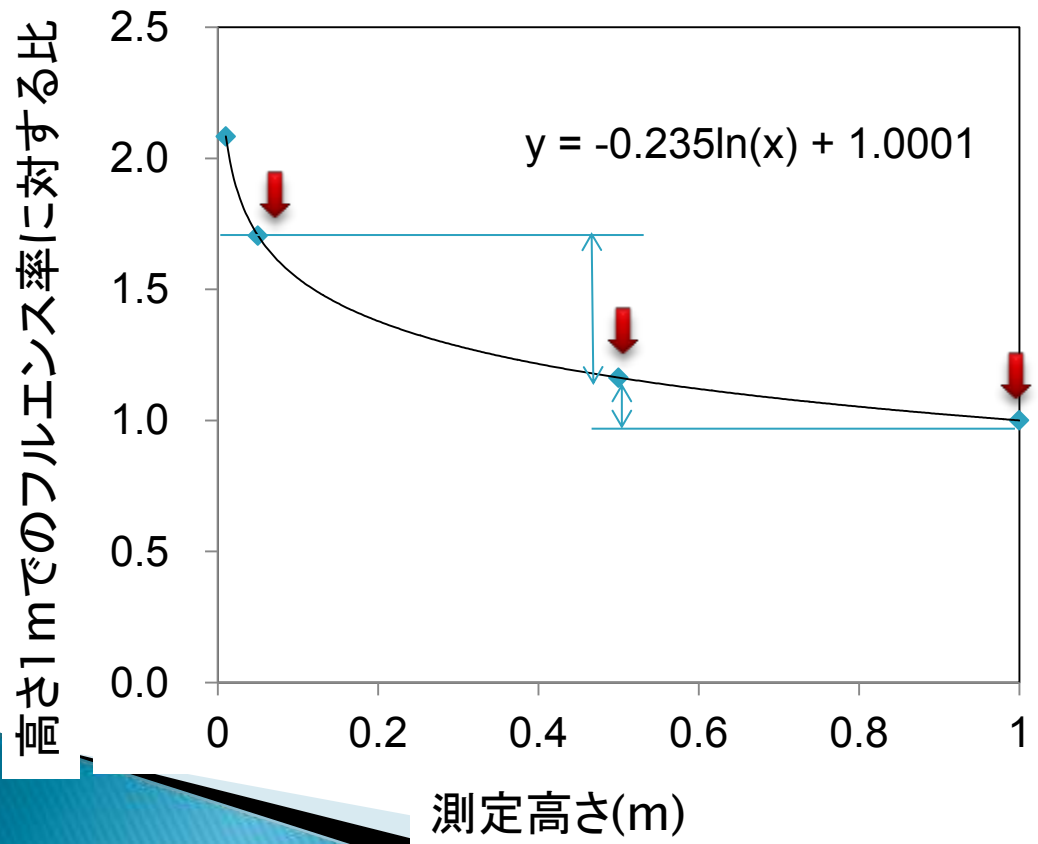
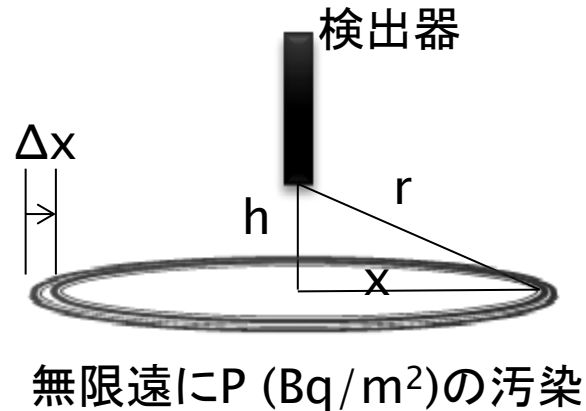
工期: 5月22日(日)~6

# 環境省による除染基準は $0.23\mu\text{Sv}/\text{h}$

- ▶ この場合の測定高さは $0.5 - 1.0\text{ m}$ 
  - $0.5\text{m}$ は小学校以下及び特別支援学校の場合
  - $1.0\text{m}$ はその他の場合(実際には自治体側の判断による)
- ▶ 正直、この基準を越える/越えないことに興味関心はない。
  - 追加外部被曝 $1\text{ mSv}/\text{年}$ が基準
  - 追加  $1\text{ mSv}/\text{年} = [0.19\ \mu\text{Sv}/\text{h} \times (8\text{時間} + 0.4 \times 16\text{時間})] \times 365\text{日}$
  - 自然放射能は $0.04\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ と一律に計算。なので、線量計では $0.23$ が基準
  - 実測値とのズレで現在問題になっている。
- ▶ 計算上 $0.5\text{m}$ で測ろうが $1.0\text{m}$ で測ろうが大差はない(面線源なので)
  - ただ、実際に $0.5-1.0\text{m}$ で測定していたら空間分解能が悪すぎる

# 測定高さと粒子フルエンス率の関係

$$\dot{\Phi} = \int_0^\infty \frac{e^{-\mu_{air}r} \cdot \eta P}{4\pi r^2} \cdot 2\pi r dx \cong \frac{\eta P}{4} \ln \left[ \left( \frac{L_{air}}{h} \right)^2 + 1 \right]$$



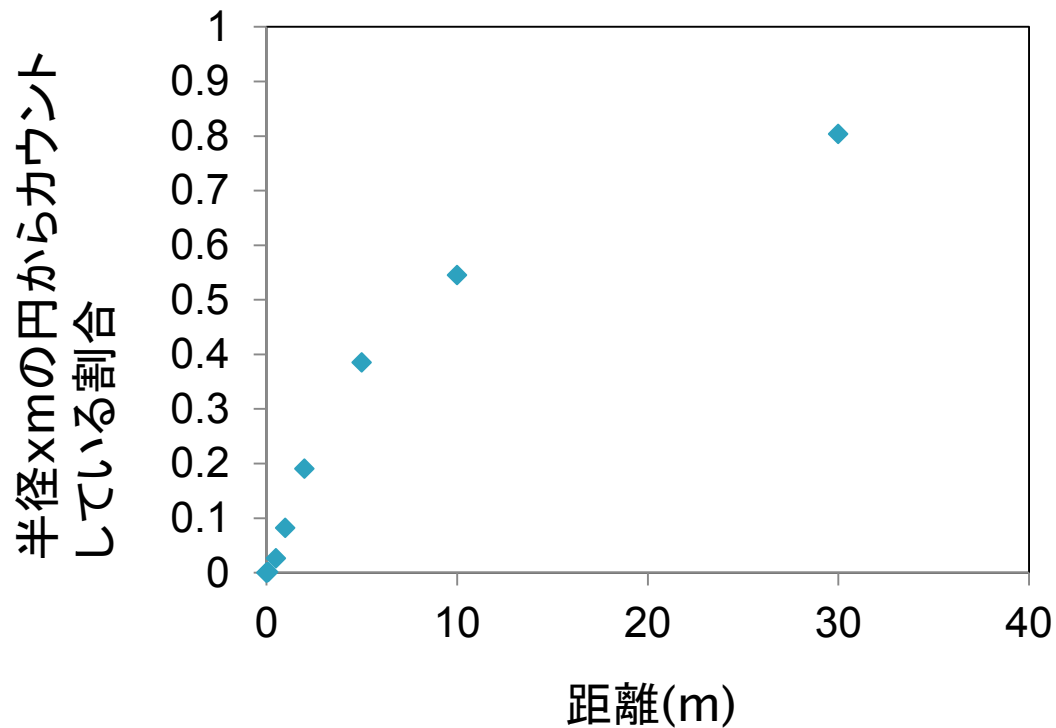
粒子フルエンス率は空間線量に(理論上)比例

コンプトンによるビルトアップは考慮に入れていない(入れられない)ため、厳密な解ではない

ただし、計算上、1mと0.5mでは16%しか差が生じないのに対して、1mと0.05cmでは70%の差が生じる。

# 1 mの高さで測定した場合

- ▶ 半径1 mの円内からの $\gamma$ 線( $^{137}\text{Cs}$ )をカウントしている割合は全体の8%程度
- ▶ 半径10 mで54%程度。半径30 mで80%程度。
  - つまり、どんなに足下を除染しても周りを綺麗にしないと意味がない



\*0.661 MeVの減衰長  
69m(空気中)で計算

現実的にはその散らばりは「一様ではなくまだら」であり、スポットも小さい。

# 「換算係数」は避難計画・除染費用に直結する大問題



**福島民報**  
2013年 10月 16日 (水)

会津 12~18時 60% 中通り 12~18時 50% 浜通り 12~18時 50% Googleのカスタム検索



記事データベース | 事業ガイド | 出版ガイド | ふくしますい〜つ | ふくしまこだわりら〜めん | English | 各種お問い合わせ

トップ ニュース スポーツ あぶくま抄 論説 E! 新聞 伝次郎クラブ お買い物 住まい 就勝ナビ 企業情報 ご購読

## 東日本大震災

ツイート 233 いいね! 1,116 チェック 気になる 16

### 第四部 岐路に立つ除染(6) 1ミリの呪縛 換算係数 実測と隔たり

平成25年度までに予算計上された国の除染関連費用は1兆5351億円に上る。最終的に県内の除染にどれだけの費用がかかるか。

国が概算すら示さない中、茨城県つくば市にある産業技術総合研究所(産総研)の研究グループは7月末、県内の除染費は最大で5兆1300億円に上るとする試算結果を公表した。

「除染後に放射線量はどれくらいになるのか。何ができて、何ができないのか。生活設計を立てられない住民のために、国は予算の大枠を示してきちんと説明する必要がある」。産総研フェローの中西準子(75)は試算の狙いを



### カテゴリー

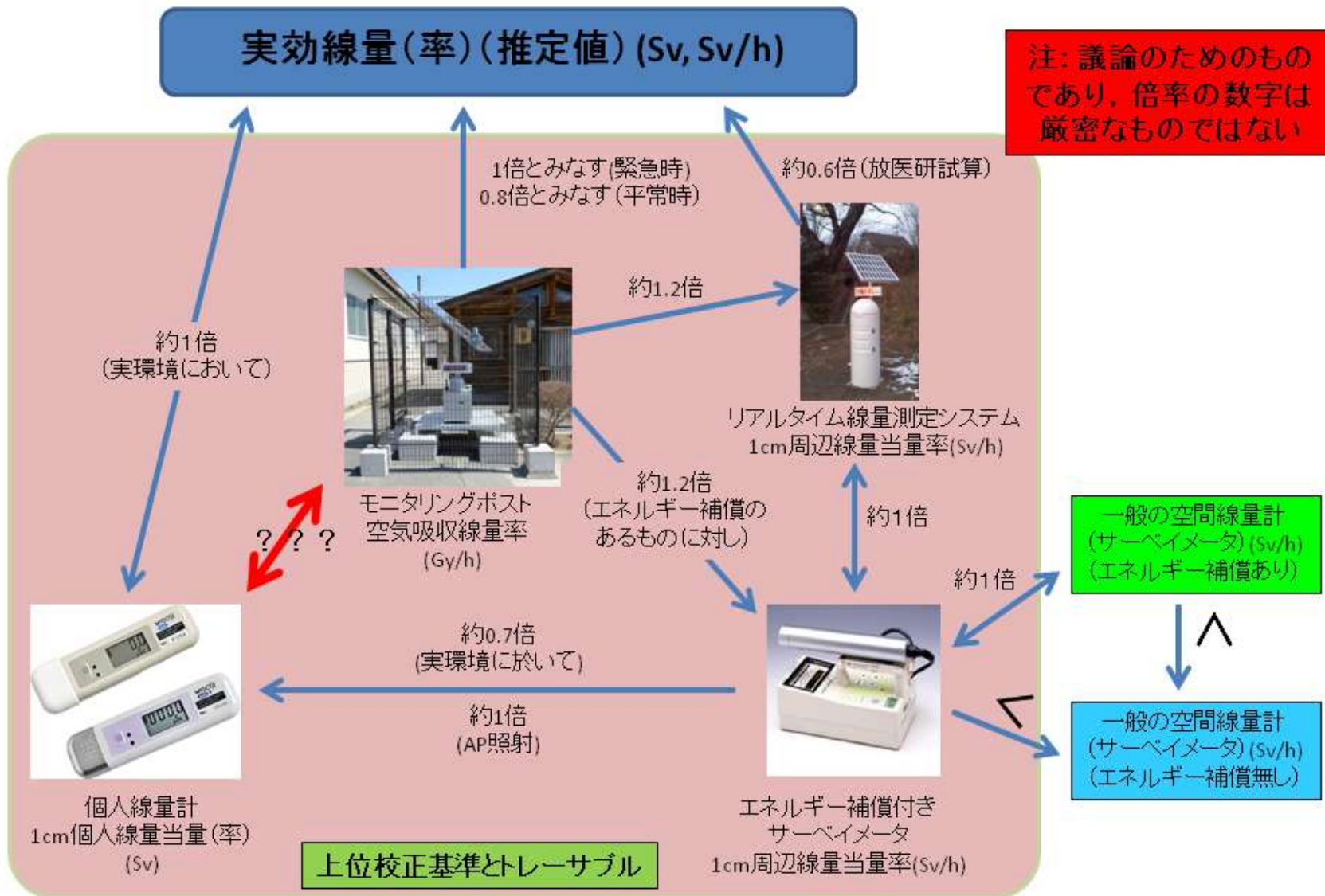
- 震災から2年7カ月 [4]
- 震災から2年6カ月 [65]
- 連載・再起2013 [36]
- 連載・今を生きる [491]
- 放射線 放射性物質 Q & A [97]
- あなたを忘れない [135]
- 3.11大震災・断面 [360]
- 3.11大震災・検証 [35]
- 原発事故関連死 [74]
- ベクレルの嘆き 放射線との戦い [85]
- 福島第一原発事故 [2653]
- 食の安全 求めてベラルーシ・ウクライナの挑戦 福島市派遣団同行 [3]
- 震災から2年5カ月 [14]
- 震災から2年4カ月 [14]
- 震災から2年3カ月 [15]
- 震災から2年2カ月 [11]
- 震災から2年1カ月 [10]
- 3.11大震災・福島と原発 [169]

# 遮蔽の問題だけではなく測定機間のトレーサビリティも問題に

実効線量, MP, 空間線量, 個人線量

実効線量(率)(推定値) (Sv, Sv/h)

注: 議論のためのものであり, 倍率の数字は厳密なものではない

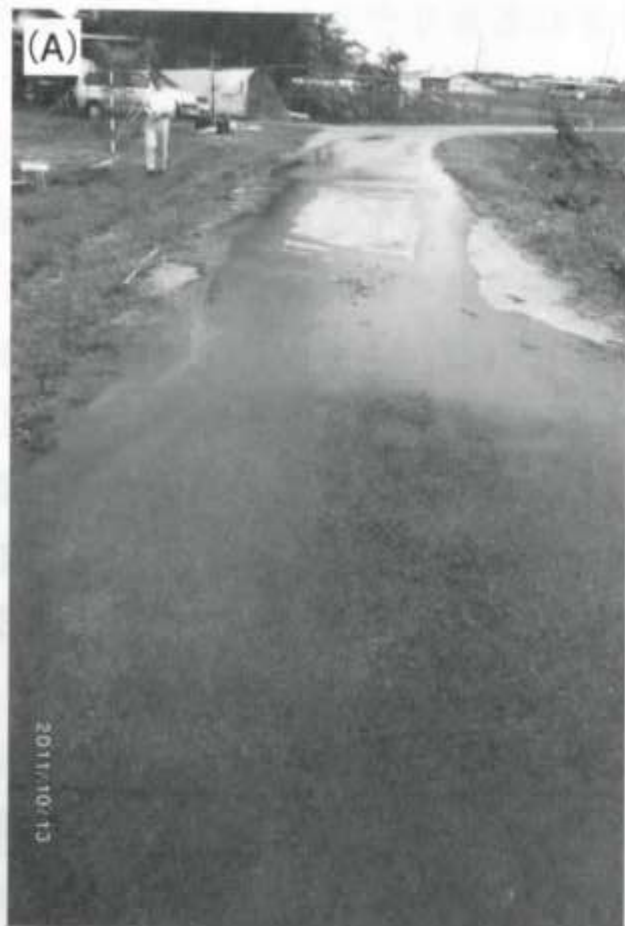


# 飯舘村・長泥地区(帰還困難区域)にある仮置き場





# 過酸化水素水を使った舗装道路の除染例



除染前後でガンマ線量を50%程度低減  
田崎和江(金沢・名誉教授)



図 10 アスファルトの農道における過酸化水素による除染作業

(A) 福島県南相馬市の農道：手前は未処理，奥の白い部分が処理後。

(B) 3.5%過酸化水素溶液を撒いた瞬間の様子。泡は酸素である。

# (余談)都内公立小学校での放射線授業



資料の作成にはものすごく気を遣った。タイトルは「放射線の測り方と気をつけること」

# 化学講義のさいごに

- ▶ 福島第一原子力発電所の1-6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

- ▶ 福島原発事故では、拡散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、少なくとも1桁程度の違いが生じてしまっていた。
- ▶ 1. この原因を考察してみてください。
- ▶ 2. 避難の判断に役立たせる事故初期の拡散予測モデルとはどうあるべきか、放射性貴ガス( $^{133}\text{Xe}$ など)、放射性ヨウ素( $^{131}\text{I}$ など)、放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ など)の主な核種の化学的特性や半減期に触れながら考察してみてください。