



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。

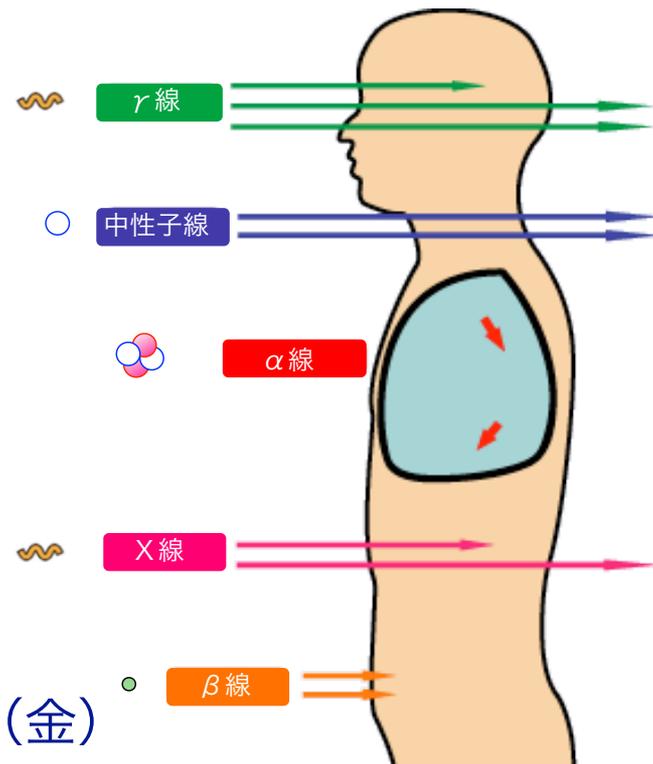
<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

放射線

を
科学的に
理解する

金曜5限
@ Zoom

2020 / 12 / 11 (金)



第10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 (化学分野3回目)

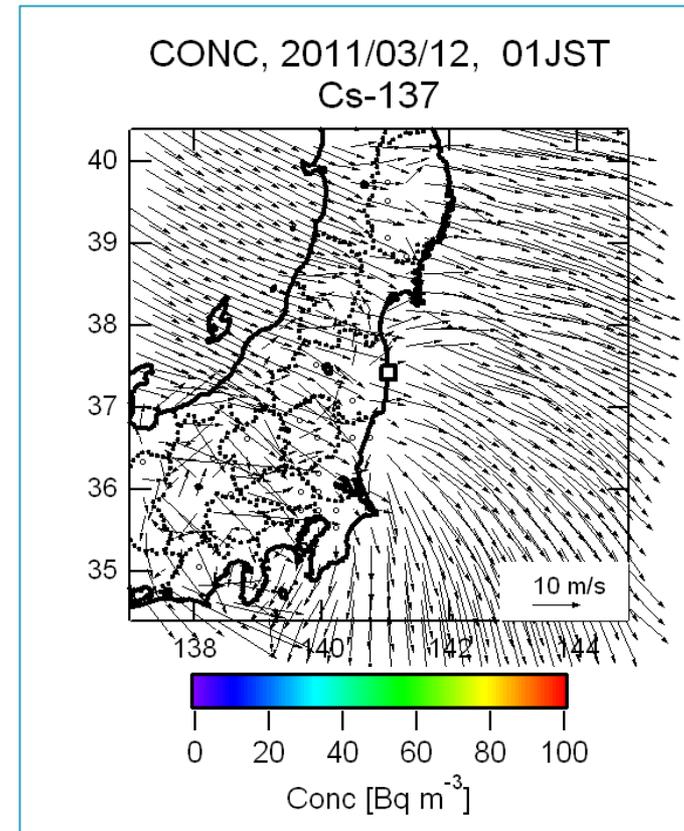
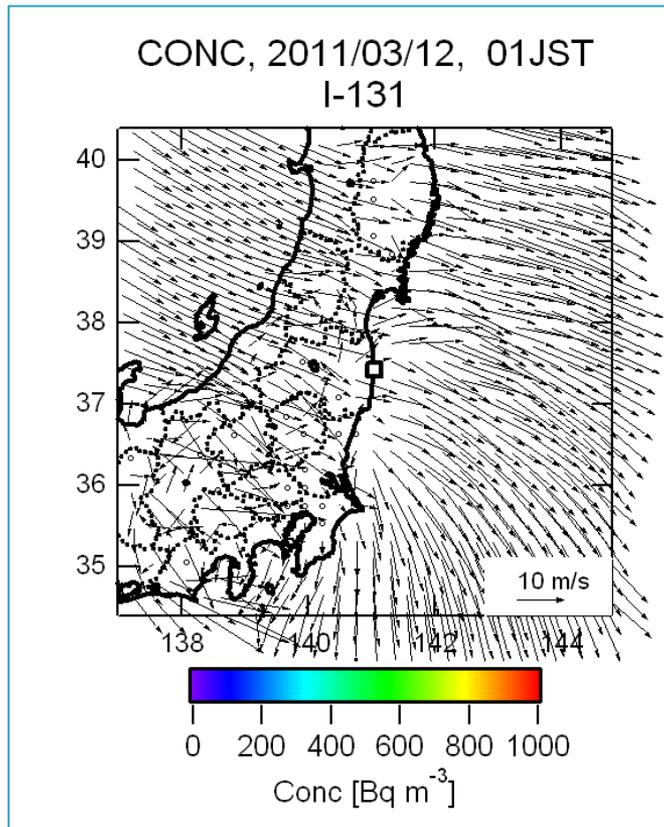
小豆川(しょうずがわ)勝見

はじめに

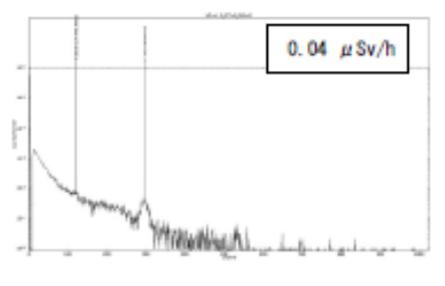
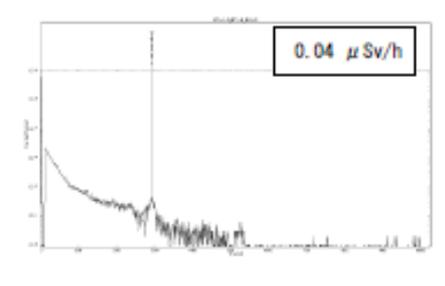
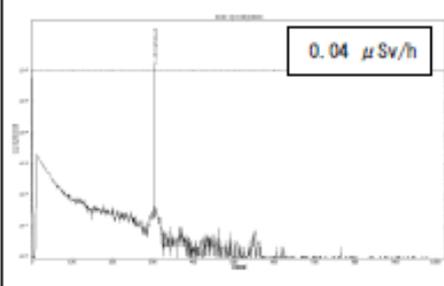
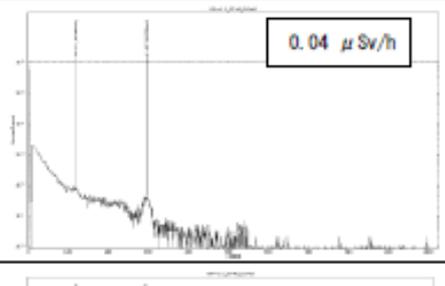
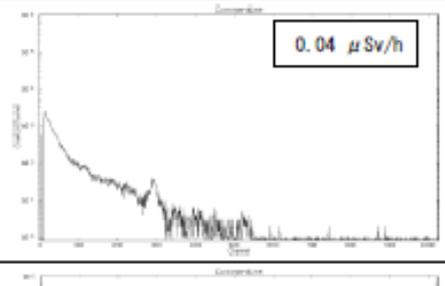
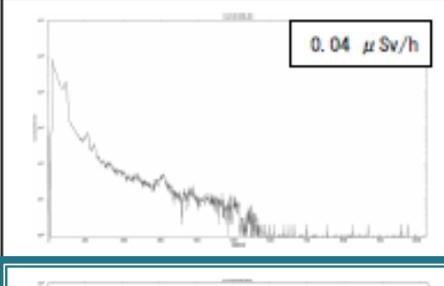
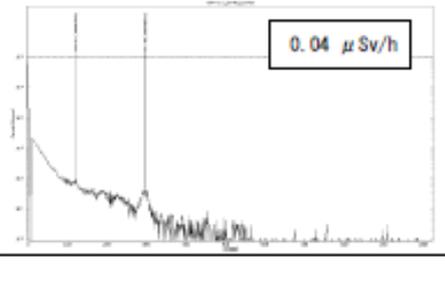
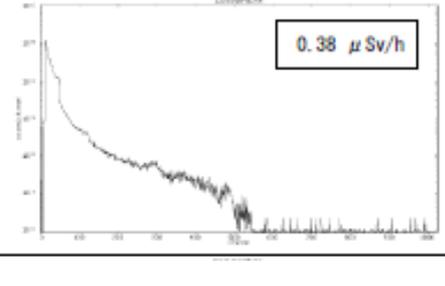
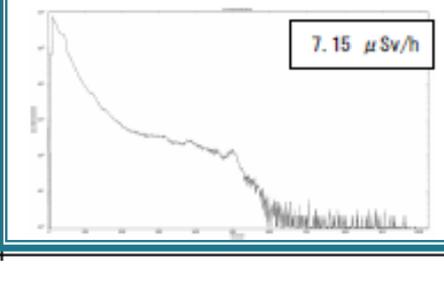
- ▶ 本日は化学最終回「今後の放射線量」
 - 「放射線の測定法」「実際の計測値、濃縮と拡散」。今日は「シミュレーションと将来の放射線量」。
- ▶ 放射性核種は沈着後にどのように環境中で移動するのか
 - 環境中では「核種」ではなく「元素」として振る舞う。
 - 放射性セシウムと放射性ストロンチウムはどう違う？
 - マクロな視点(航空機モニタリング)とミクロな視点(生活目線)の違い
- ▶ 無用な被ばくを避けるために...「除染」をやろう
 - 放射性セシウムの特徴を理解すれば、自然現象に勝てるか？
 - 効率的な除染方法はどうやる？

放射性物質の飛散

- ▶ 大半が海側に流れていますが、2011年3月15日や3月20日-21日には南方向にも放射性物質が拡散している



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)

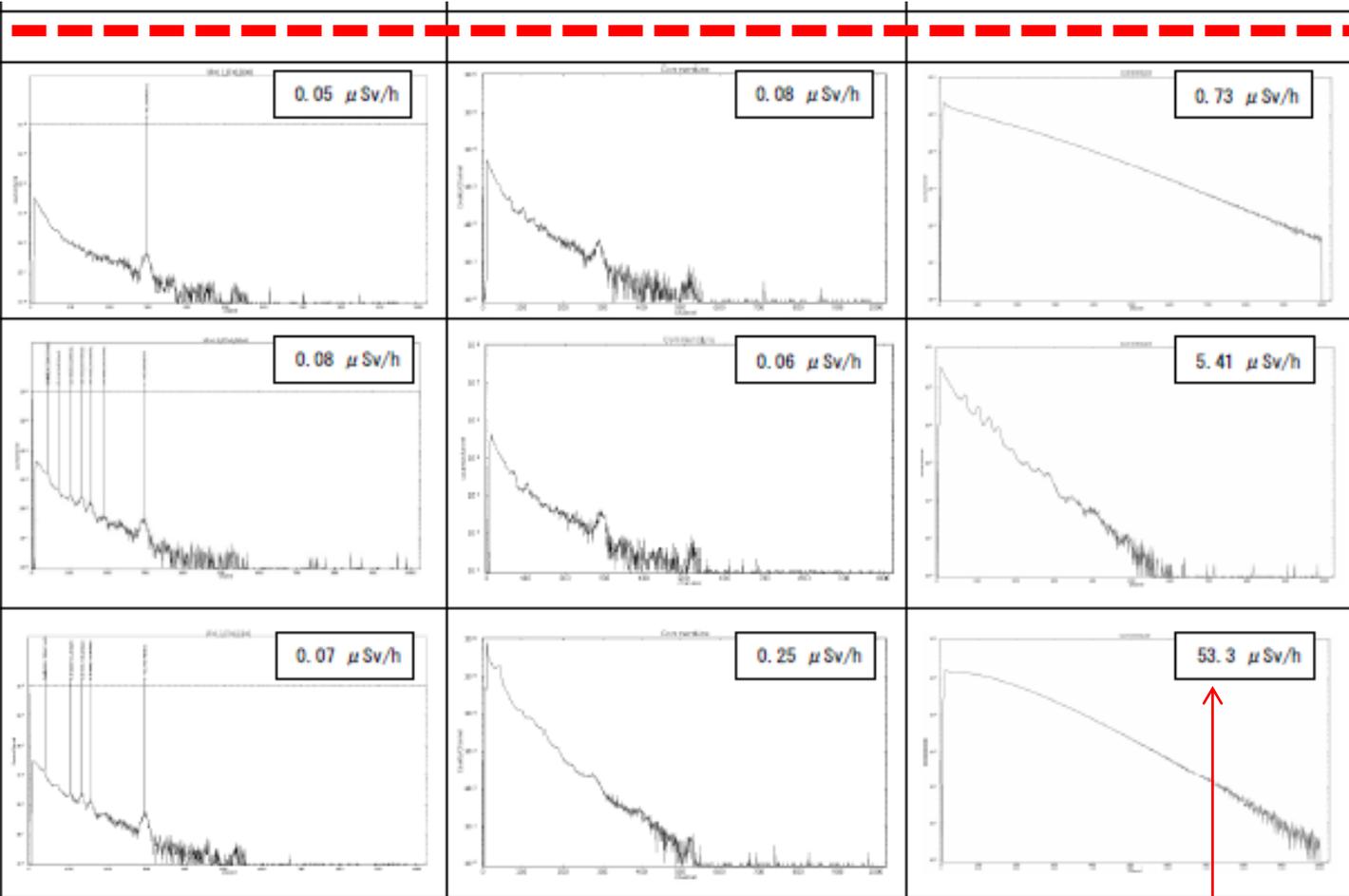
2.8km from plant
(North-northwest)

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



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)

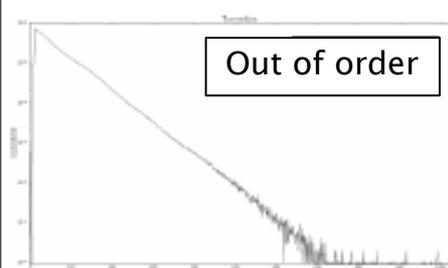
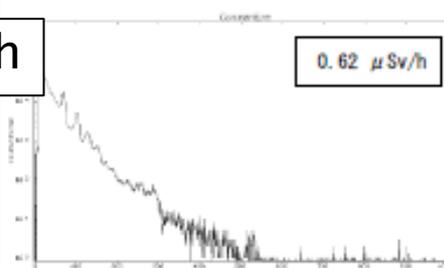
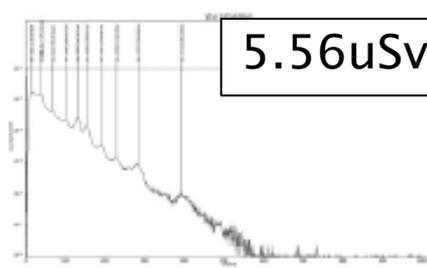
2.8km from plant
(North-northwest)

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)



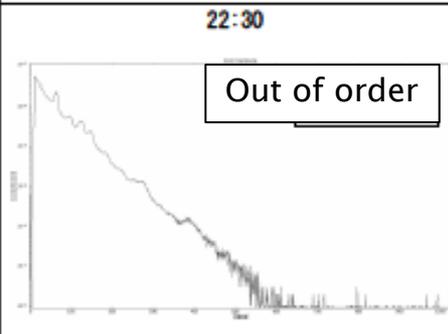
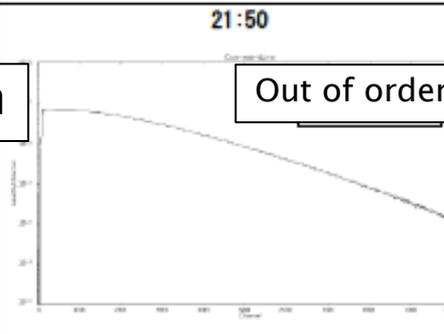
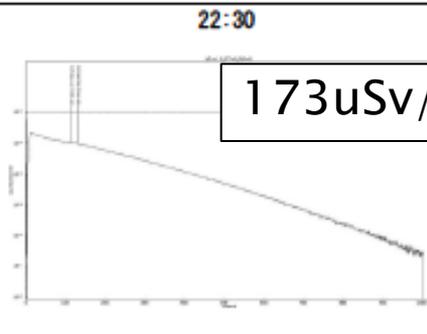
14. Mar. 11:00 am
Hydrogen explosion
at No.3

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)

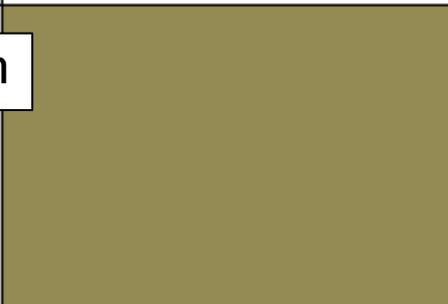
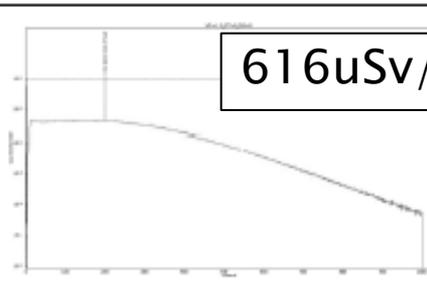
22:30



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))



フォールアウト形式には2種類「乾性沈着」と「湿性沈着」

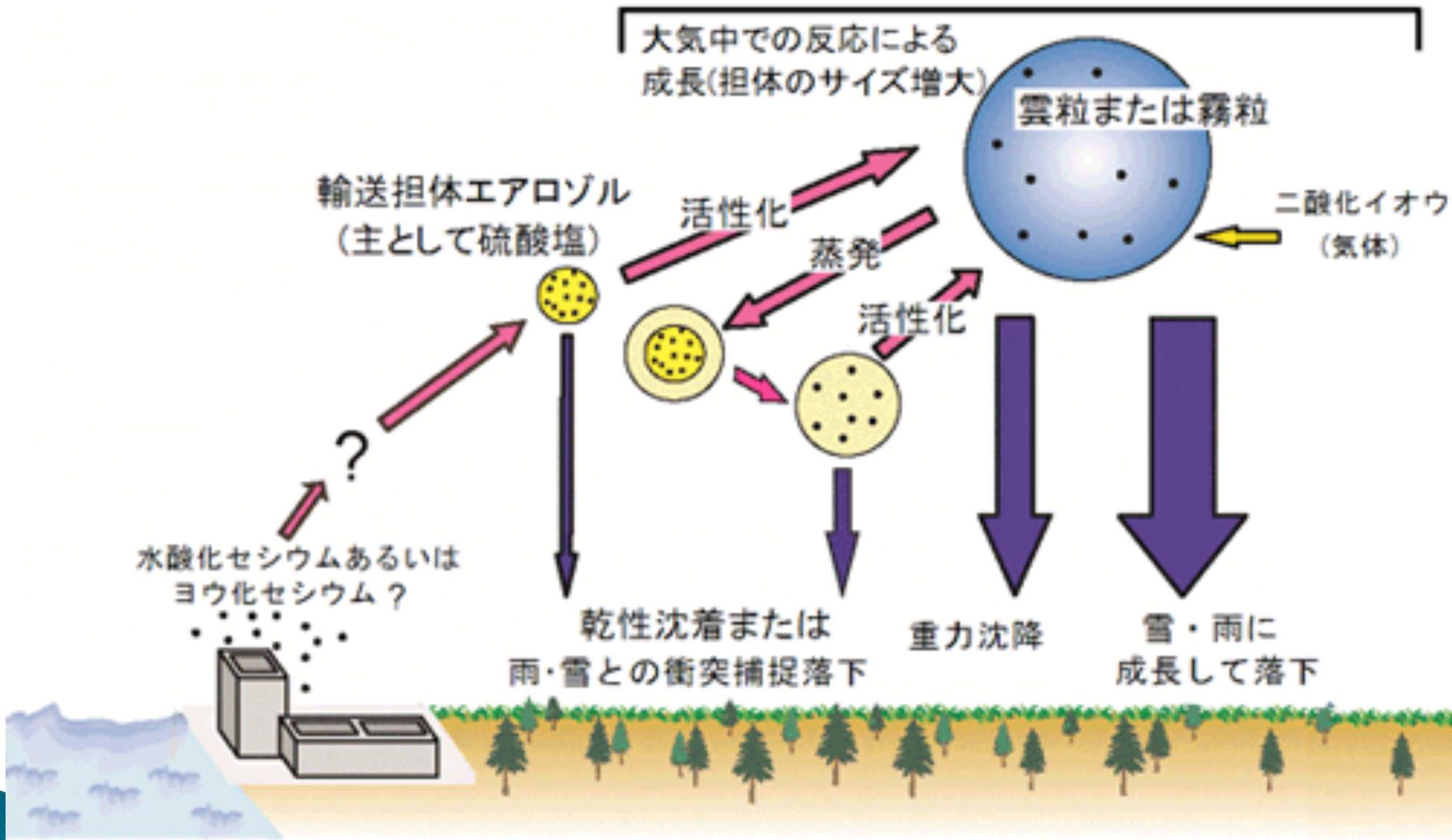
▶ 乾性沈着

- 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・河川などに沈着して除去されていくこと。

▶ 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して大気中から除去されること
- 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。

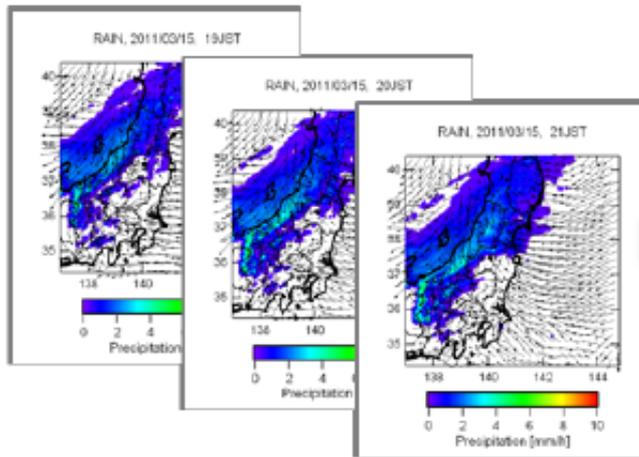
汚染源から沈着までの過程



大気シミュレーションモデル

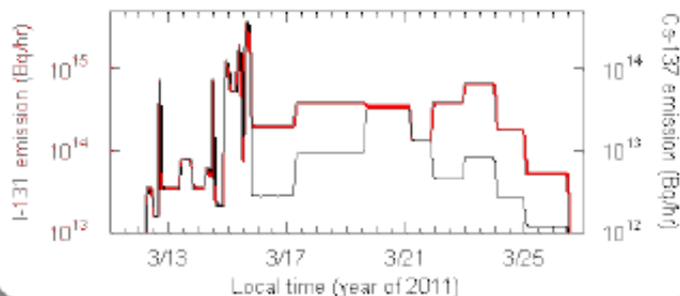
気象モデル(WRF)

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)

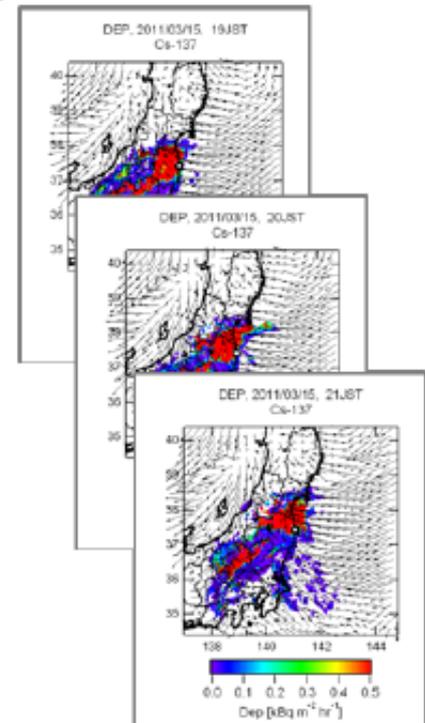
3次元の放射性物質濃度を時間ごとに計算

計算するプロセス

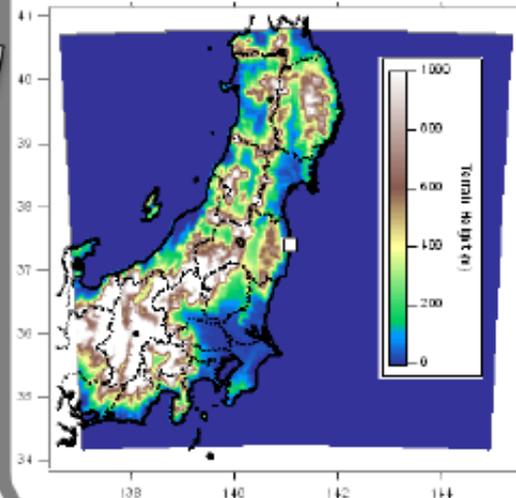
- ✓ 放出
- ✓ 輸送(移流/拡散)
- ✓ 沈着(乾性/湿性)
- ✓ 放射性壊変

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

すべてシミュレーション
(実測ではない)

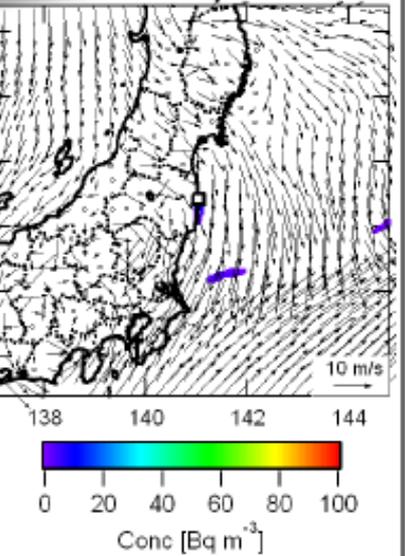
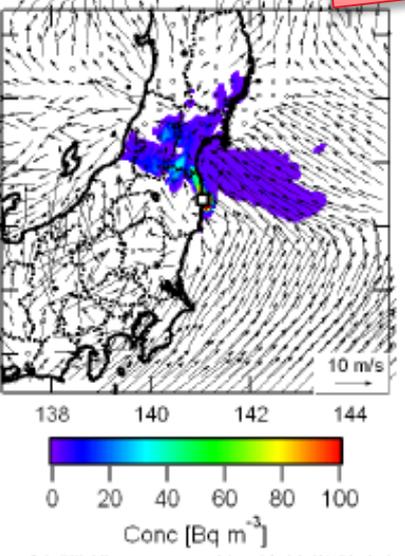
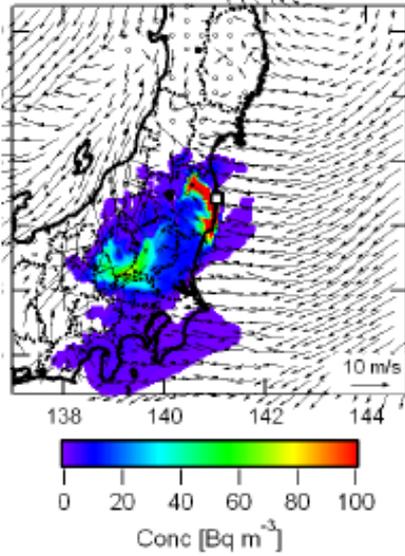
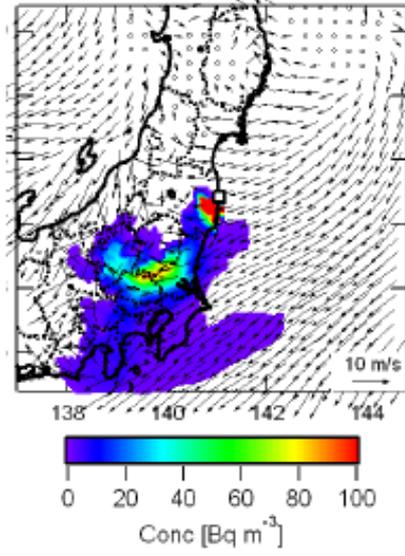
大気濃度

3/15の15時

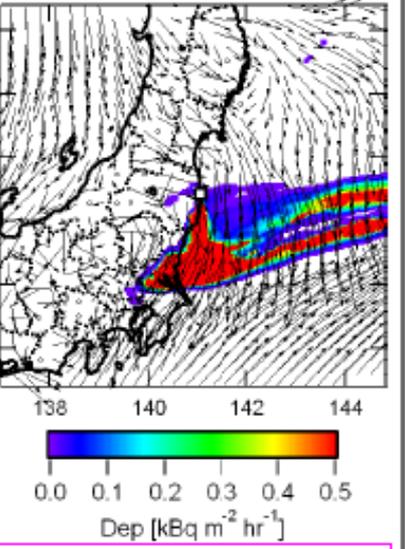
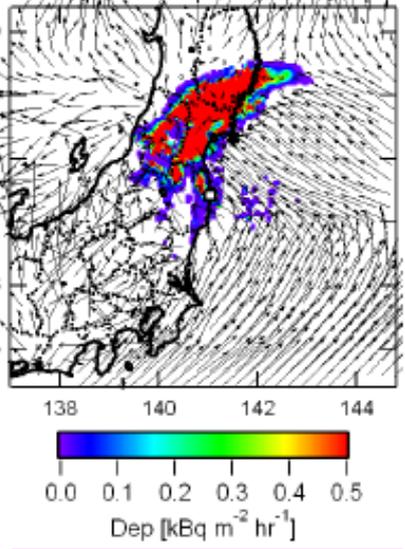
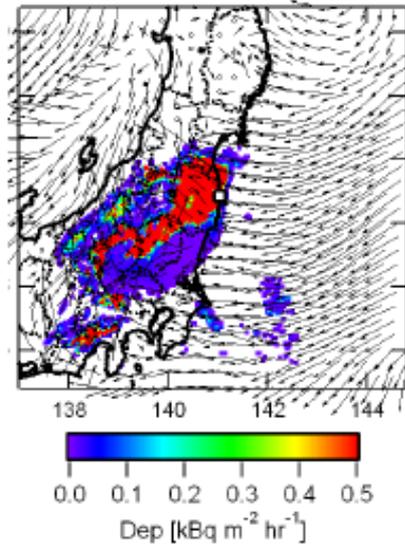
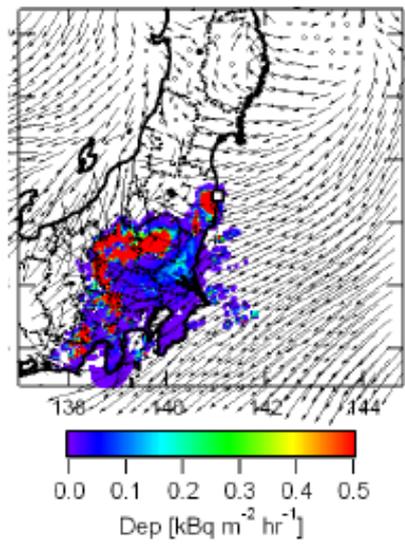
3/15の19時

3/20の18時

3/21の8時



降下量



関東への最初の影響

福島の深刻な汚染、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

^{137}Cs はどこに行ったのか？

すべてシミュレーション
(実測ではない)

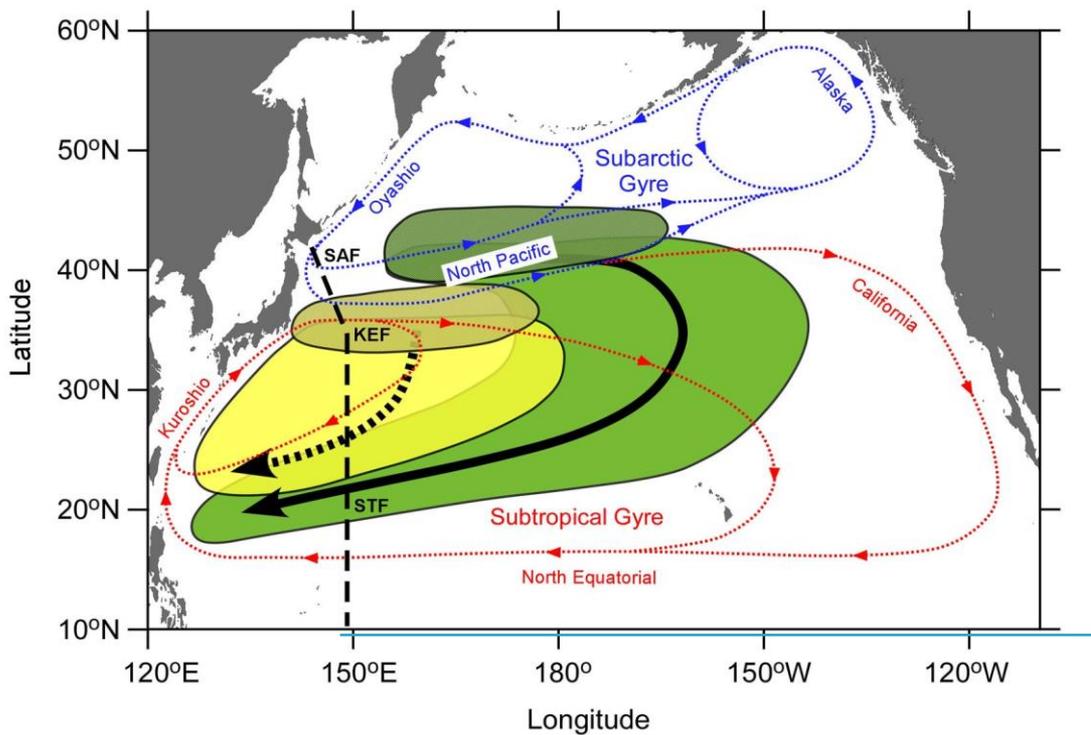
Table 1 Source estimates for ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi nuclear power plants

1 PBq = 313 g

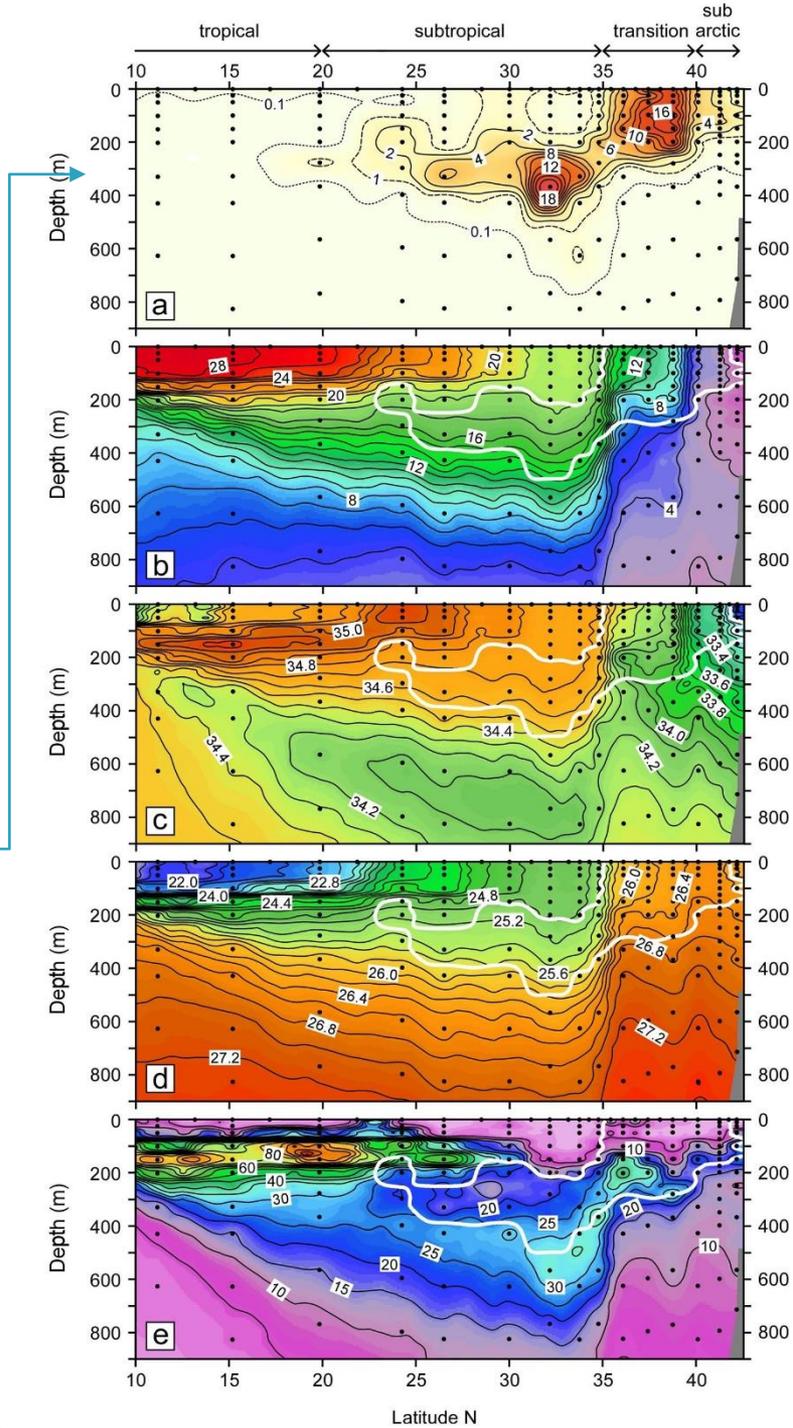
Reference	Total atmospheric fallout (PBq)	Atmospheric fallout on ocean (PBq)	Direct discharge to ocean (PBq)	Total in North Pacific (PBq)
Chino et al. 2011	13			
Katata et al. 2012	11			
Mathieu et al. 2012	20.6			
Stohl et al. 2012	36 (23–50)			
Terada et al. 2012	8.8			
Kobayashi et al. 2013	13	7.6	3.5	
Saunier et al. 2013	15.5			
Winiarek et al. 2014	19.3			
Katata et al. 2015	14.5	10.0	3.5	13.5
Kawamura et al. 2011		5	4	
Bailly du Bois et al. 2012		11.5	27 ± 15	
Estournel et al. 2012		5.8 ± 0.1	4.3 ± 0.2	
Tsumune et al. 2012, 2013			3.5 ± 0.7	
Charette et al. 2013			13.5 ± 2.5	
Miyazawa et al. 2013			5.6 ± 0.2	
Rypina et al. 2013			16.2 ± 1.6	
Aoyama et al. 2016	15.2–20.4	11.7–14.8		15.2–18.3
Inomata et al. 2016				15.3 ± 2.6
Tsubono et al. 2016		10.5 ± 0.9		16.1 ± 1.4

海洋に流れたセシウムはどこを回る？

実測

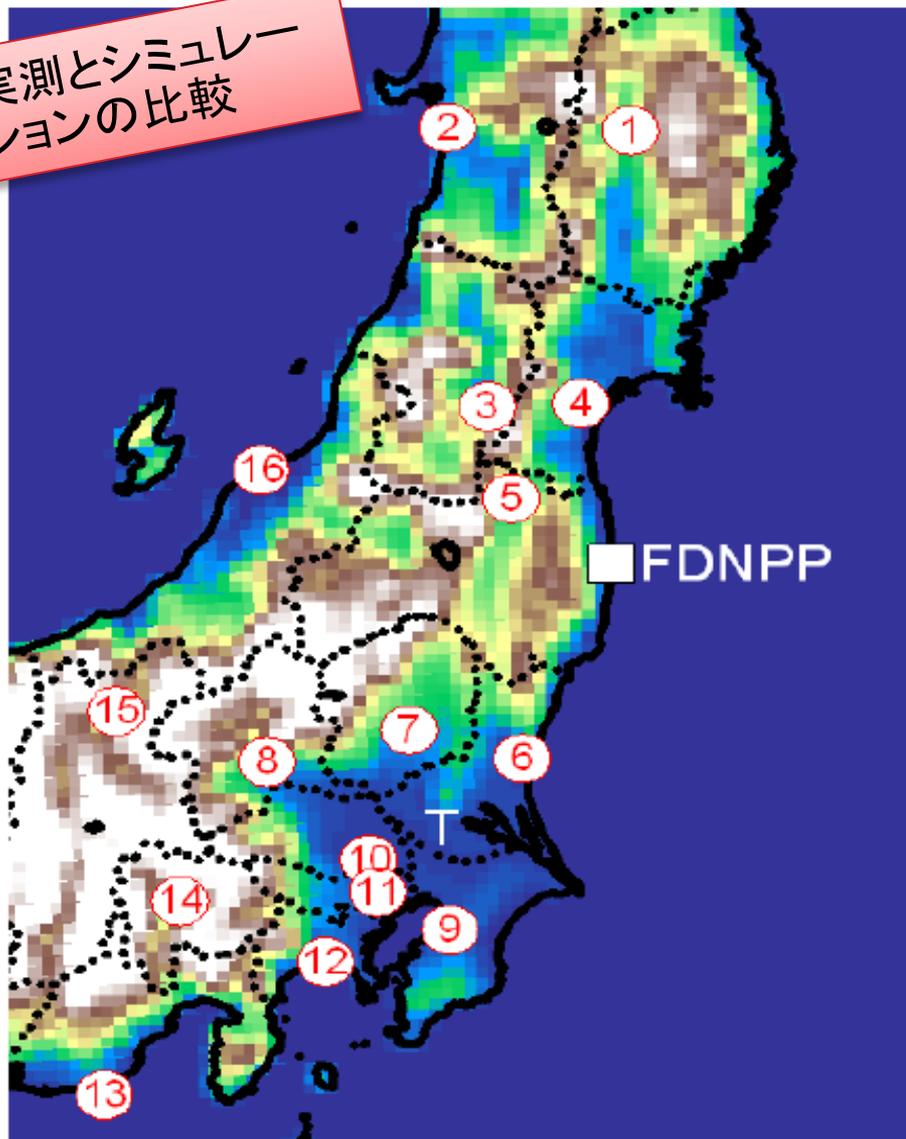


Kumamoto et al., Sci. Rep. 4, 4276 (2014)

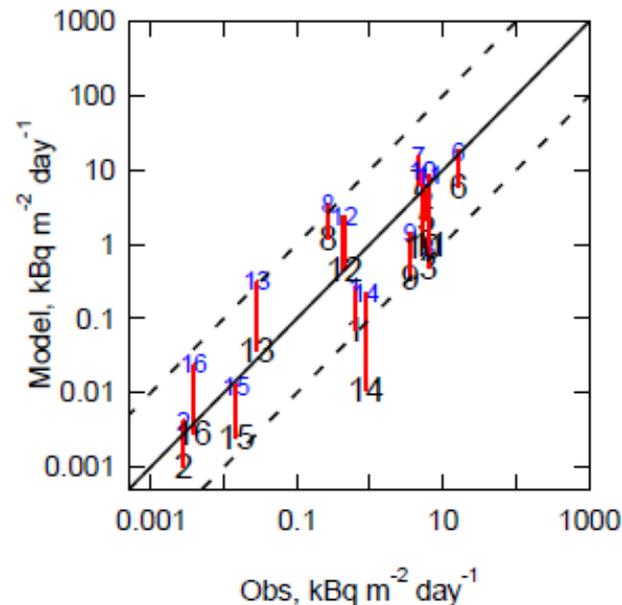


観測された降水量との比較(I-131)

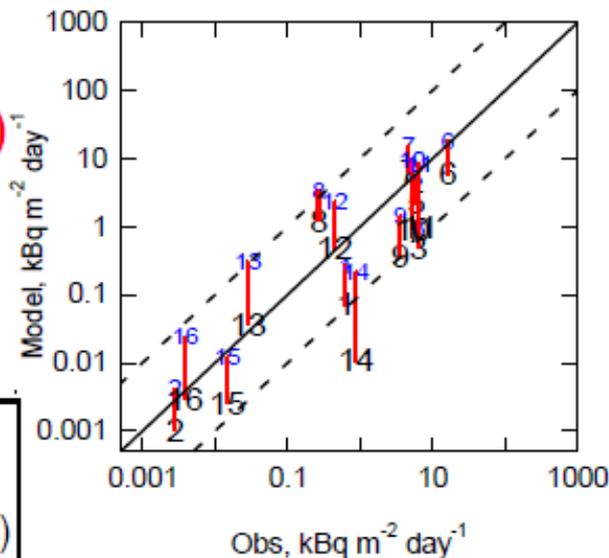
実測とシミュレーションの比較



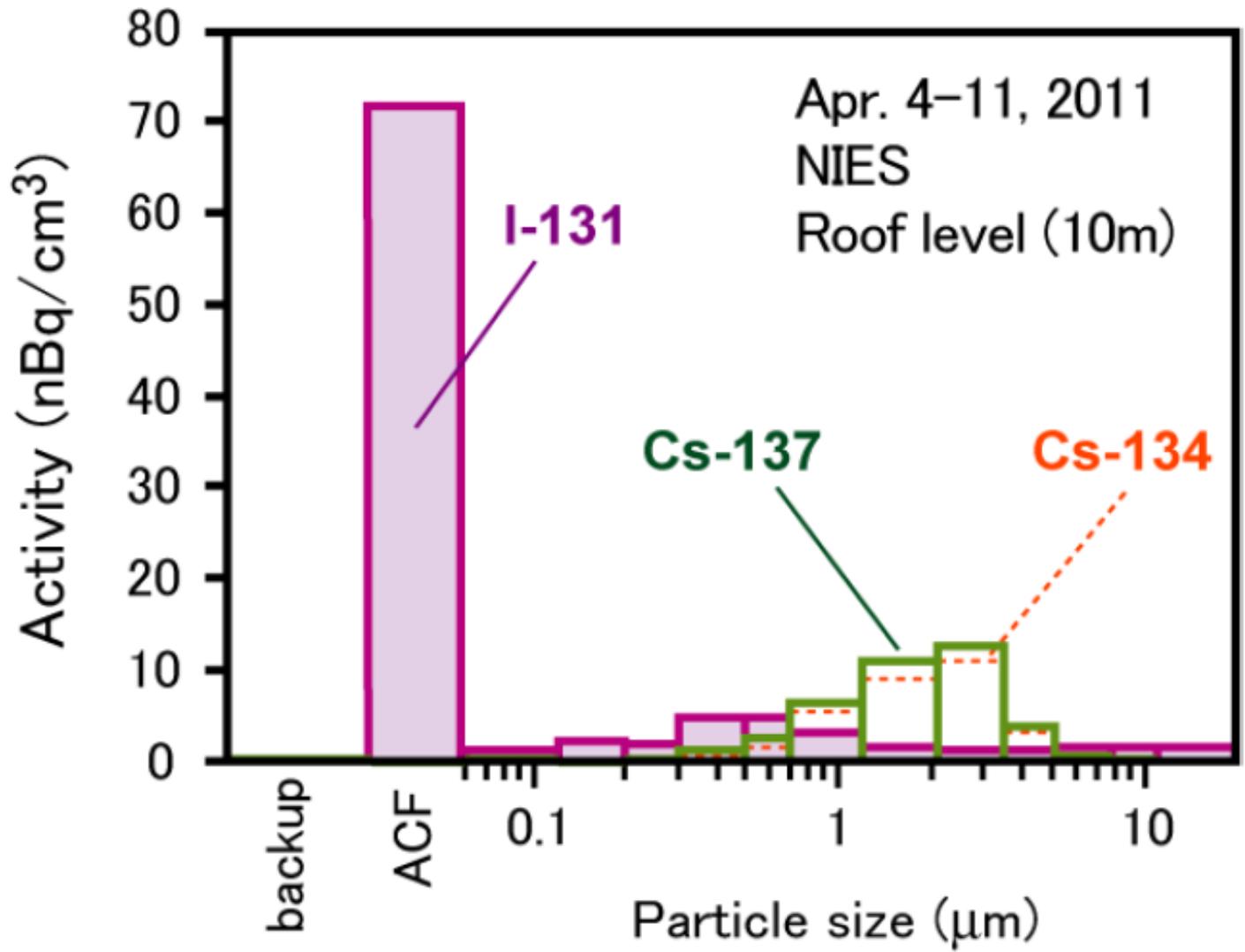
JAEA
(8/18)



JAEA
(12/15)

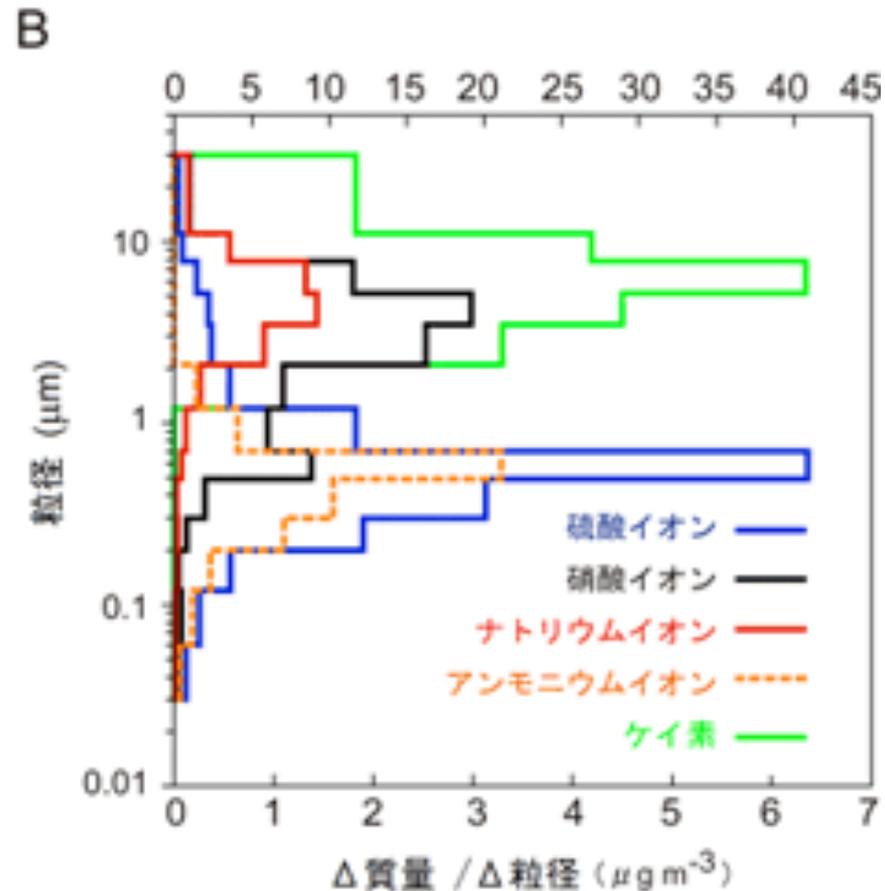
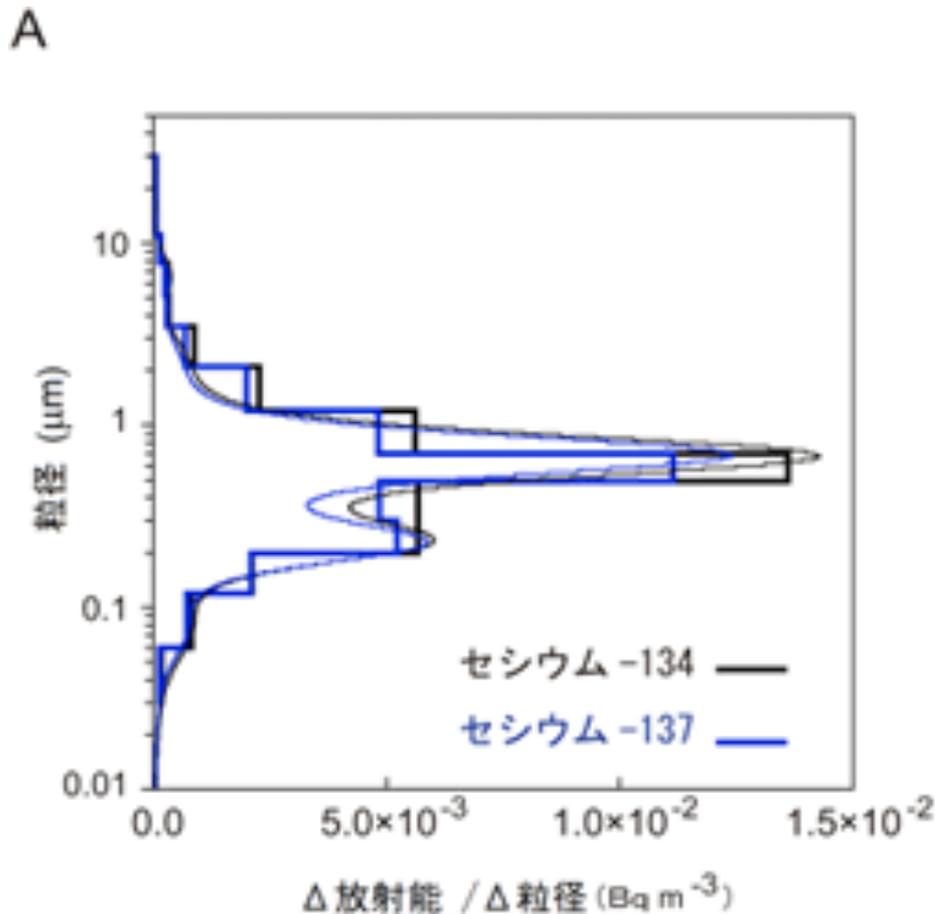


大気中の放射性核種の粒径分布



放射性セシウムは硫酸塩として飛散@つくば市

実測



- ▶ 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

粒子状の放射性物質 マイクロパーティクル

実測



水にも溶けない
酸にもアルカリにも強い
1個当たり数Bqの放射能
3/15の東京飛来の大半がこれ

米の再汚染 - 綺麗になったはずの米から基準値超え

まだ続く拡散事案

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が作業員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

まだ続く拡散事案

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

シミュレーション(SPEEDI)の限界

実測とシミュレーションの比較

放射性セシウムの降下量 —実測値と計算値—

[単位 : Bq/m²]

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。

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:

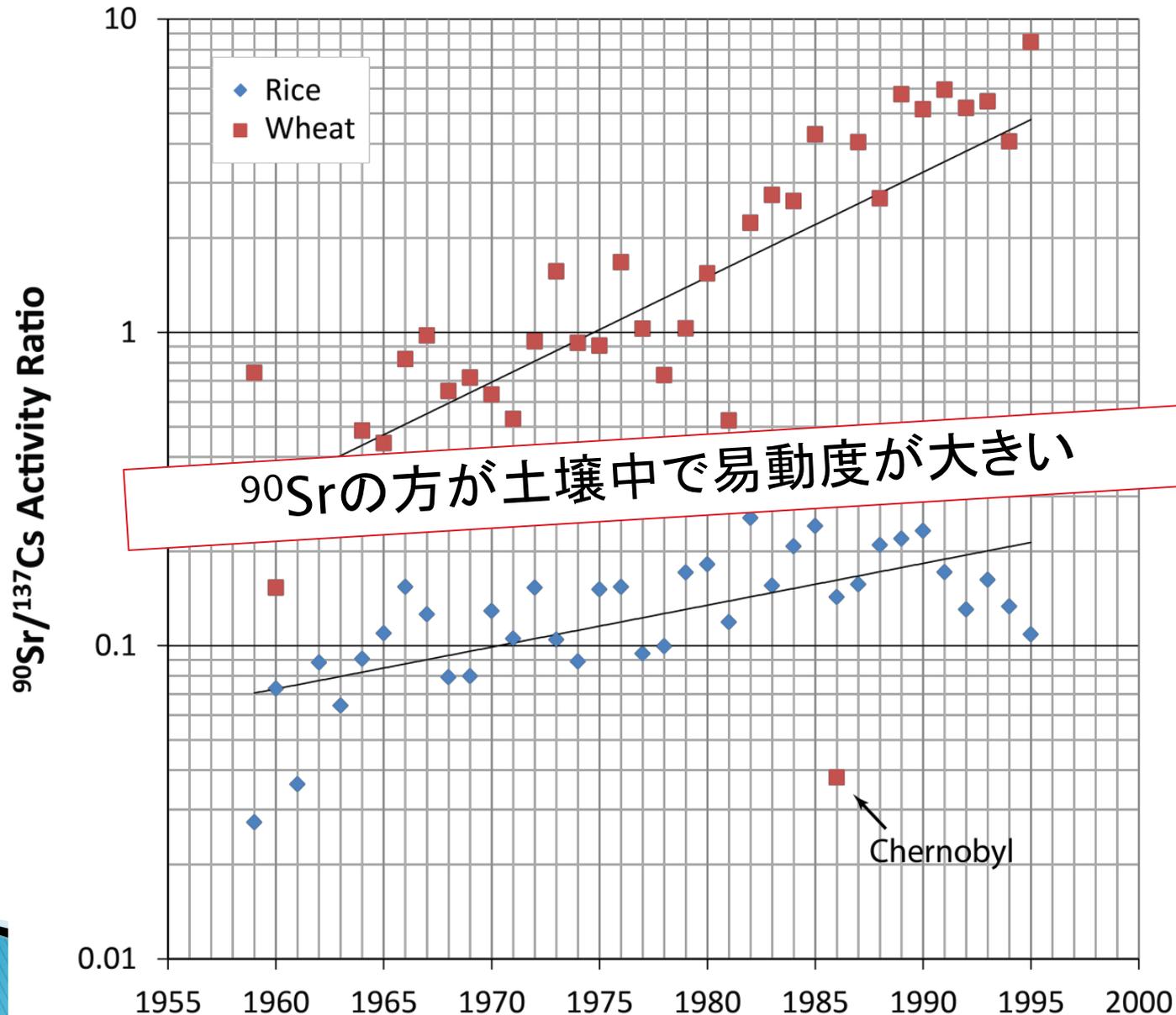
- ^{134}Cs 半減期2年
- ^{137}Cs 半減期30年
- ^{90}Sr 半減期28年
- ^{239}Pu 半減期24000年
- ^{241}Pu 半減期14年
- ^3H 半減期12年

▶ 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？

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



「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？
- ▶ 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...？

土壌中のCsやSrの吸着サイト

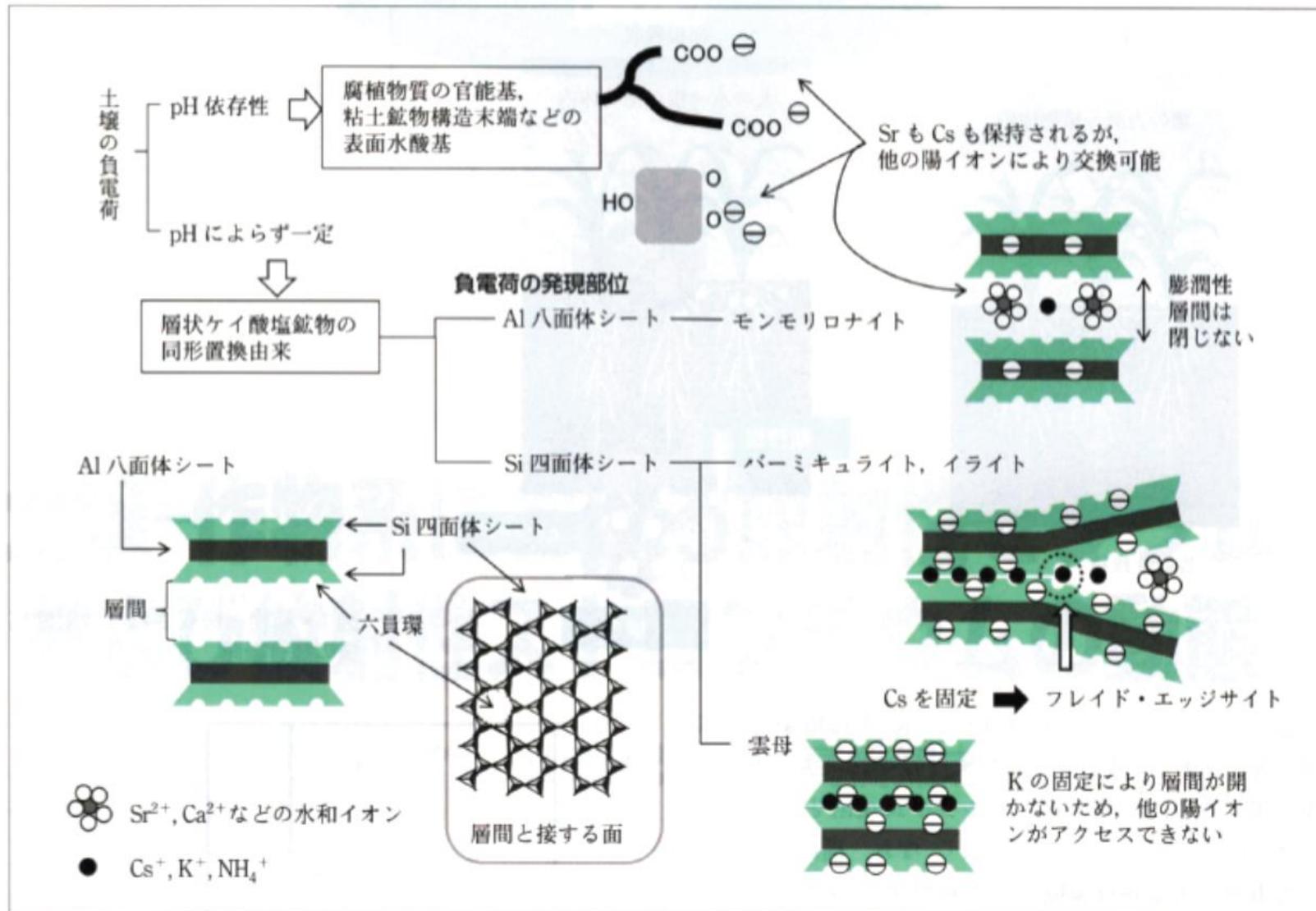
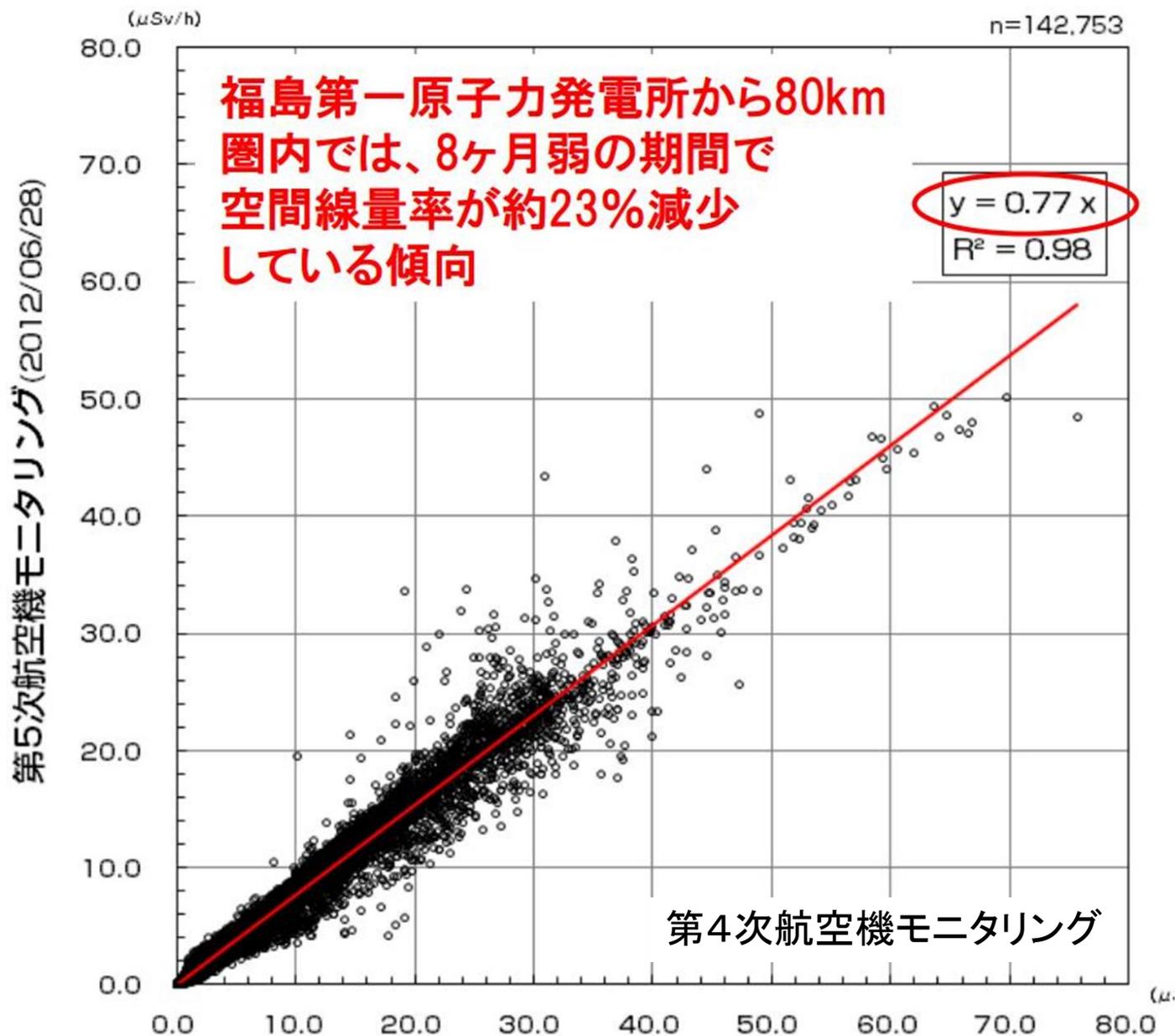


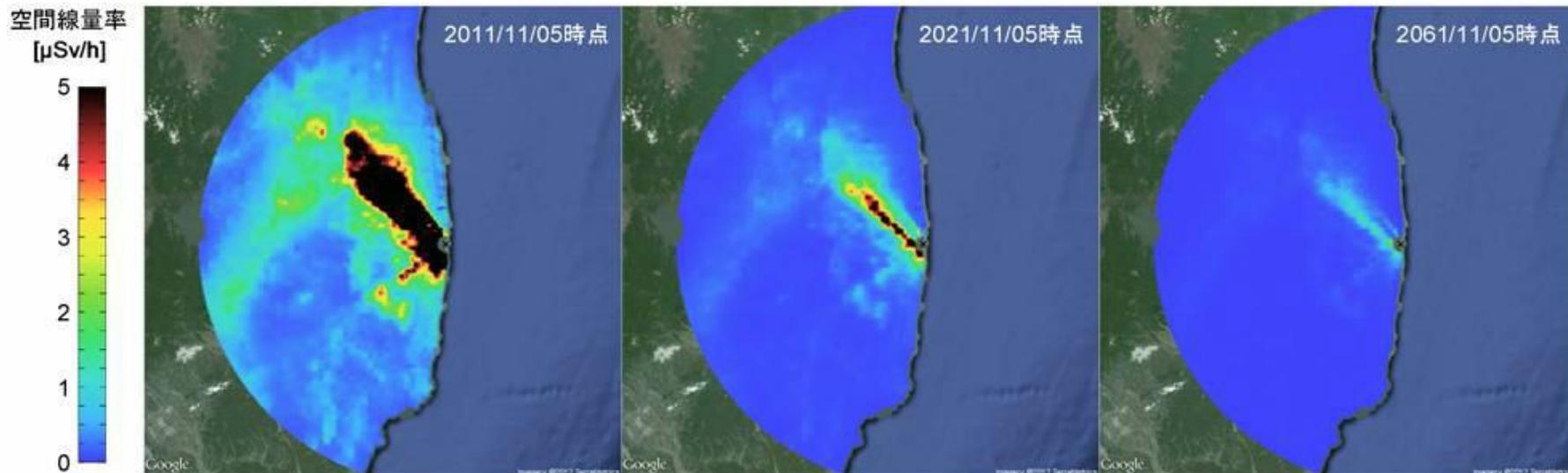
図3 ■ 土壌の負電荷への Cs, Sr 保持メカニズム

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^[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 ^{134}Cs と ^{137}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^[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/>

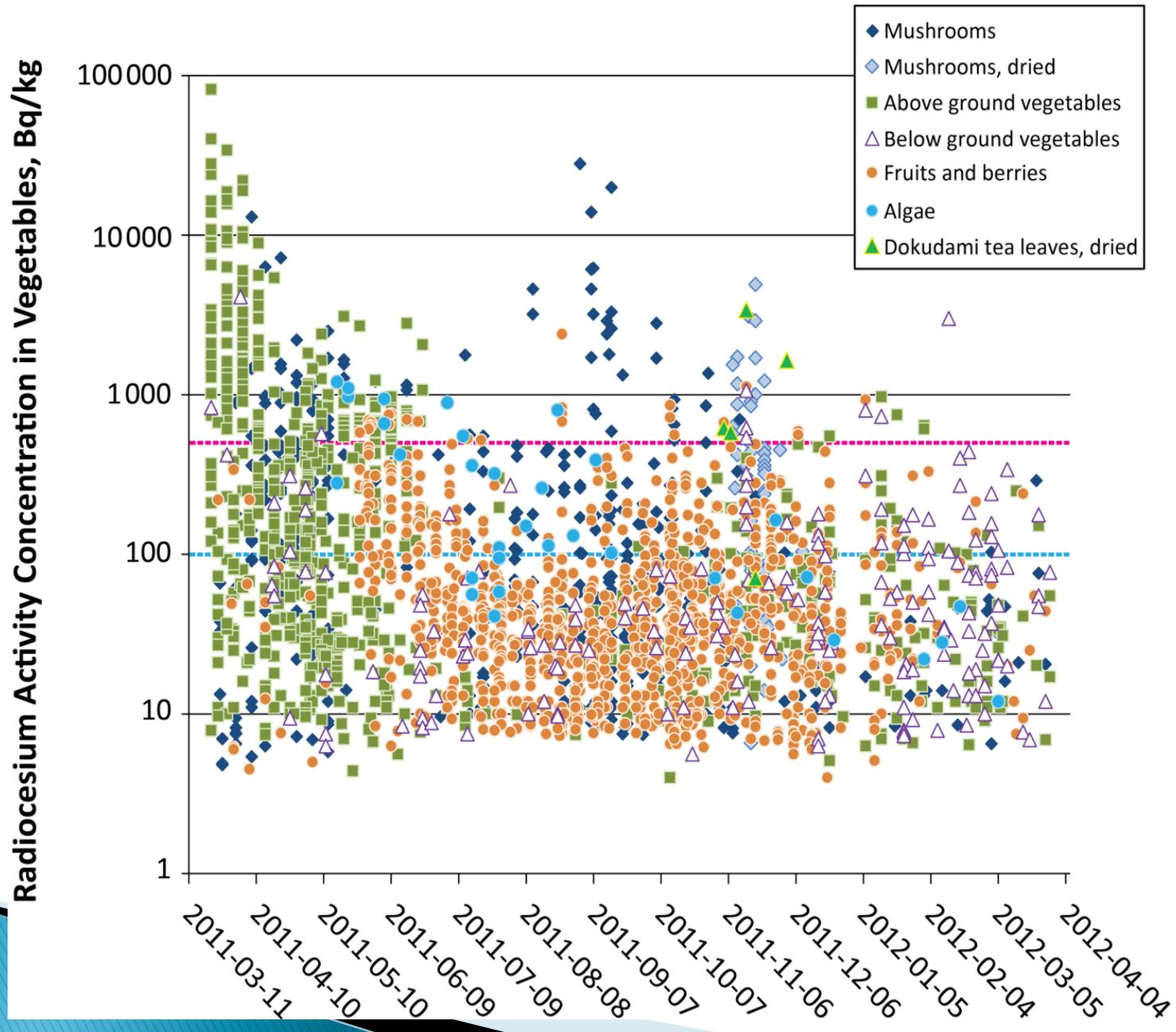
[2] RASCAL 3.0.5: Description of Models and Methods, NUREG-1887, (2007).

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

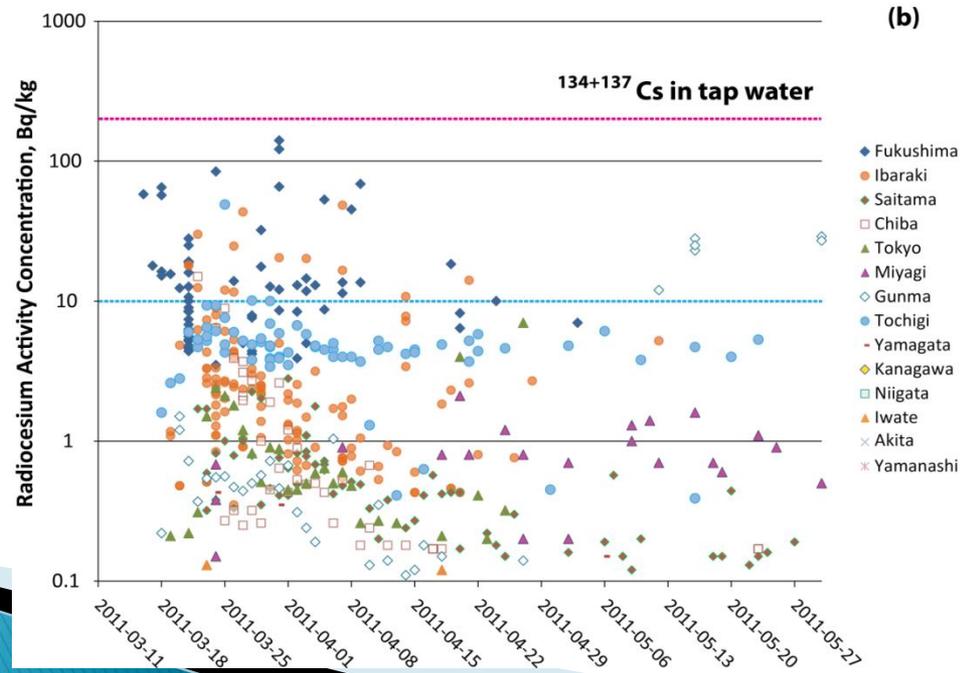
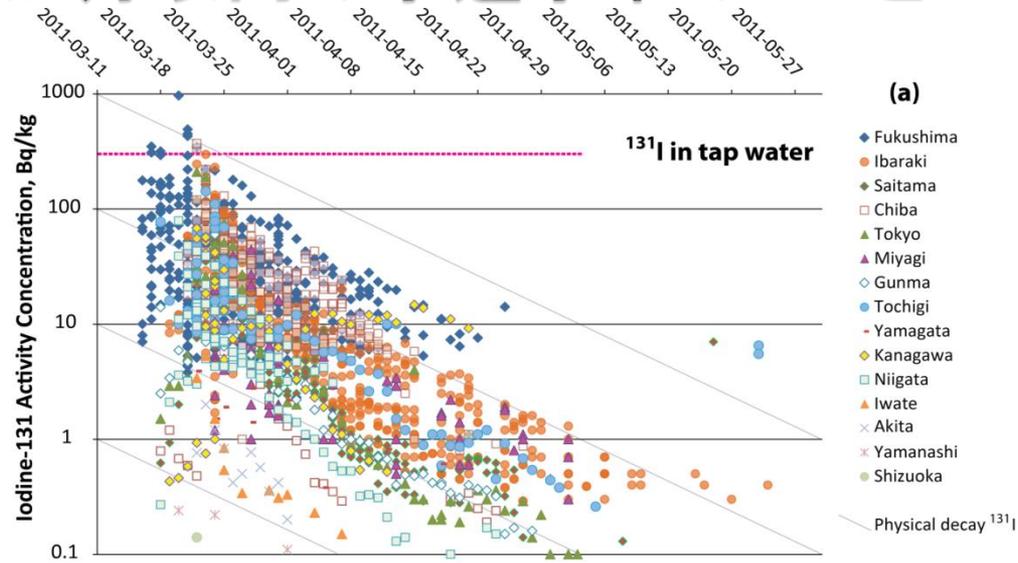
将来を予測するための「ビッグデータ」

- ▶ 食品を例に、これまでの動態から将来を予測
- ▶ 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}Sr の動き」。
 - 現在の一般食品の基準値は、 ^{90}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}Cs と ^{137}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)



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



除染とは

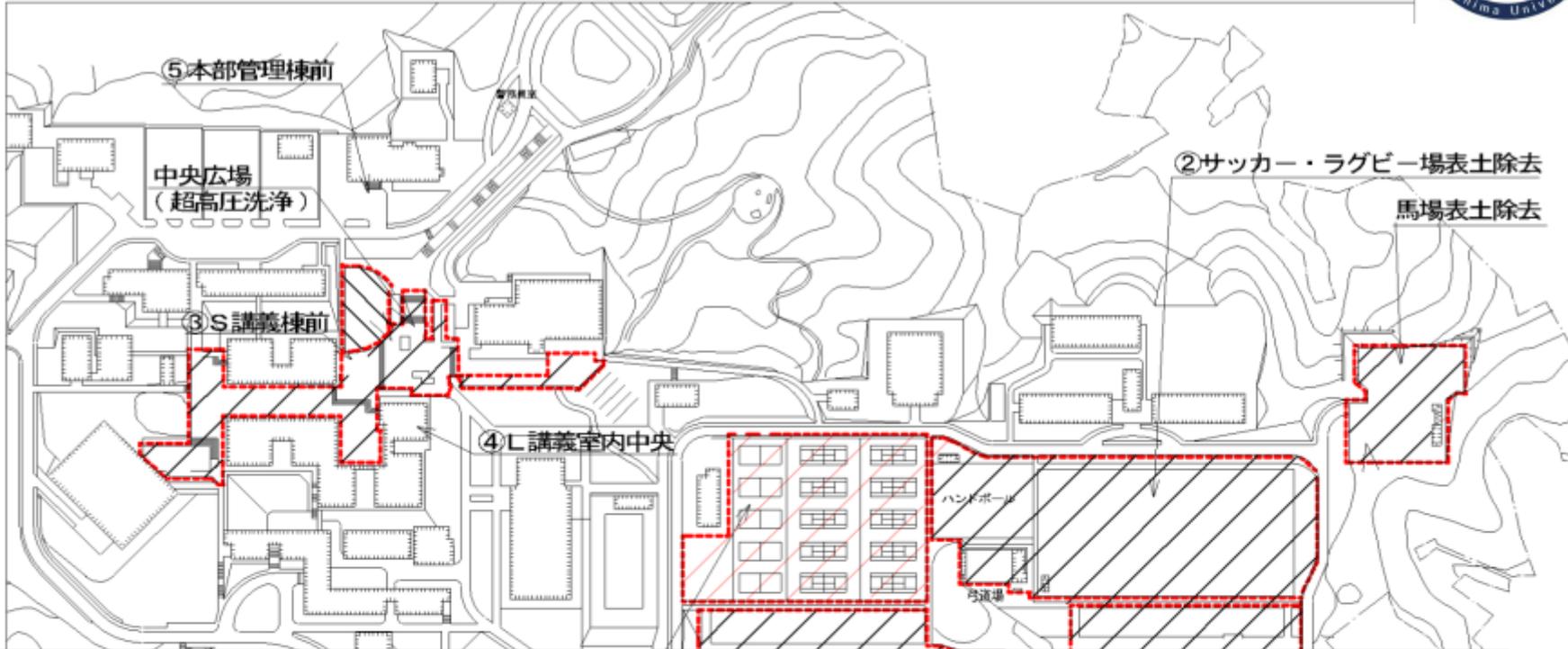


- ▶ 表層のセシウムをその場から取り除く
 - 重機を使って表層の土をかき集める
 - 土からセシウムだけを取り除くには超高コスト
 - 土ごと保管する

- ▶ 除染基準は $0.23 \mu\text{Sv/h}$ 、避難指示解除は $3.8 \mu\text{Sv/h}$
 - (運用方法は各自治体によって若干異なります)

- ▶ 「減容化」・「高濃縮」化が鍵！

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	6.50 μ SV/h	6.07 μ SV/h	4.42 μ SV/h	0.20 μ SV/h
		1.56 μ 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

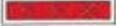


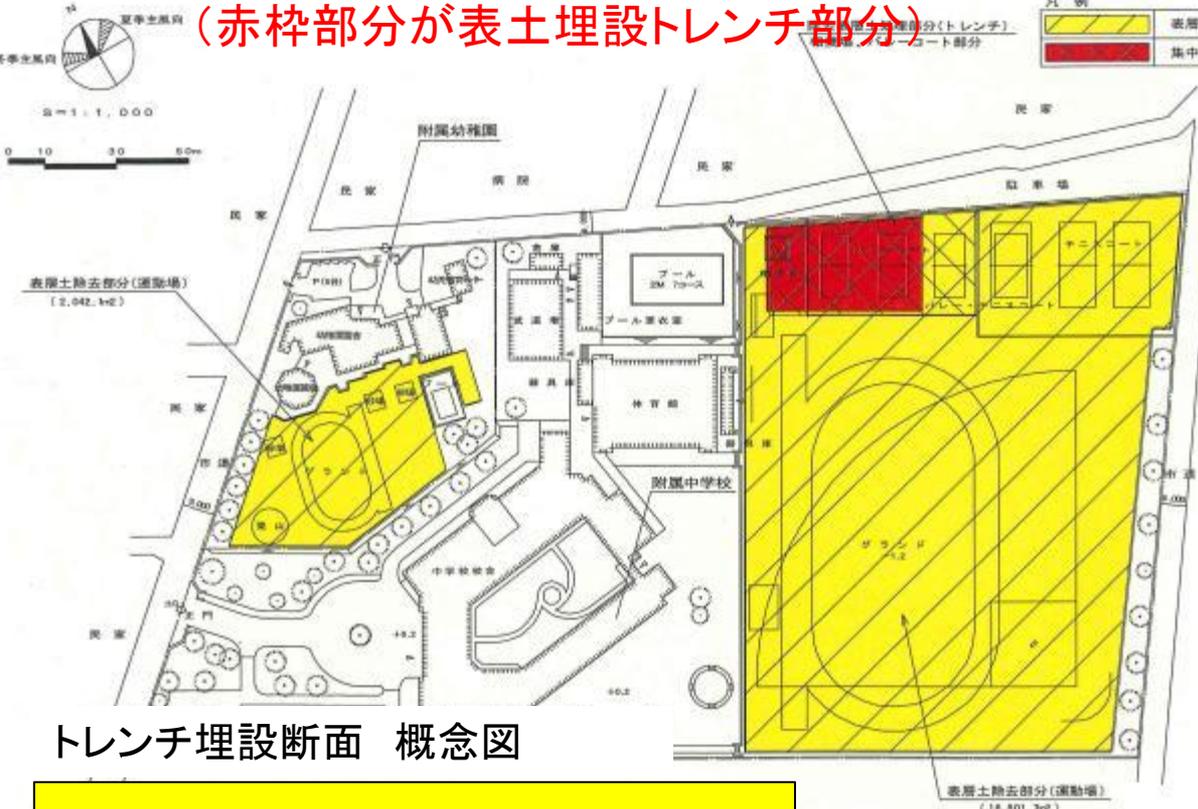
Measurements made at 1m above ground (μ Sv/h)	May 19 th , 2011	June 6 th , 2011
Baseball Mound	2.84	0.30
Athletic Field	2.34	0.23
Volleyball Court	2.62	0.22
Tennis Court	2.65	0.26
Classroom (1 st floor)	0.20	0.10

土壤表層の除去

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)
	集中埋設処理 (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



福島県内の汚染土壌仮置き場

この1袋(約1トン)に含まれている放射性セシウムは
約0.000000001g

この袋、福島県内で約2200万袋

土壌汚染土
一時保管場所
NO.1



中間貯蔵施設建設現場@大熊町・帰還困難区域

穴を掘って一時的に(2045年まで)保管
その後、県外で最終処分



現在までに約1400万袋持ち込み、残り800万袋くらい

このタンクの中にあるトリチウム、10グラム程度



情報の伝え方、受け取り方、社会情勢、理解を阻む因子が複数存在

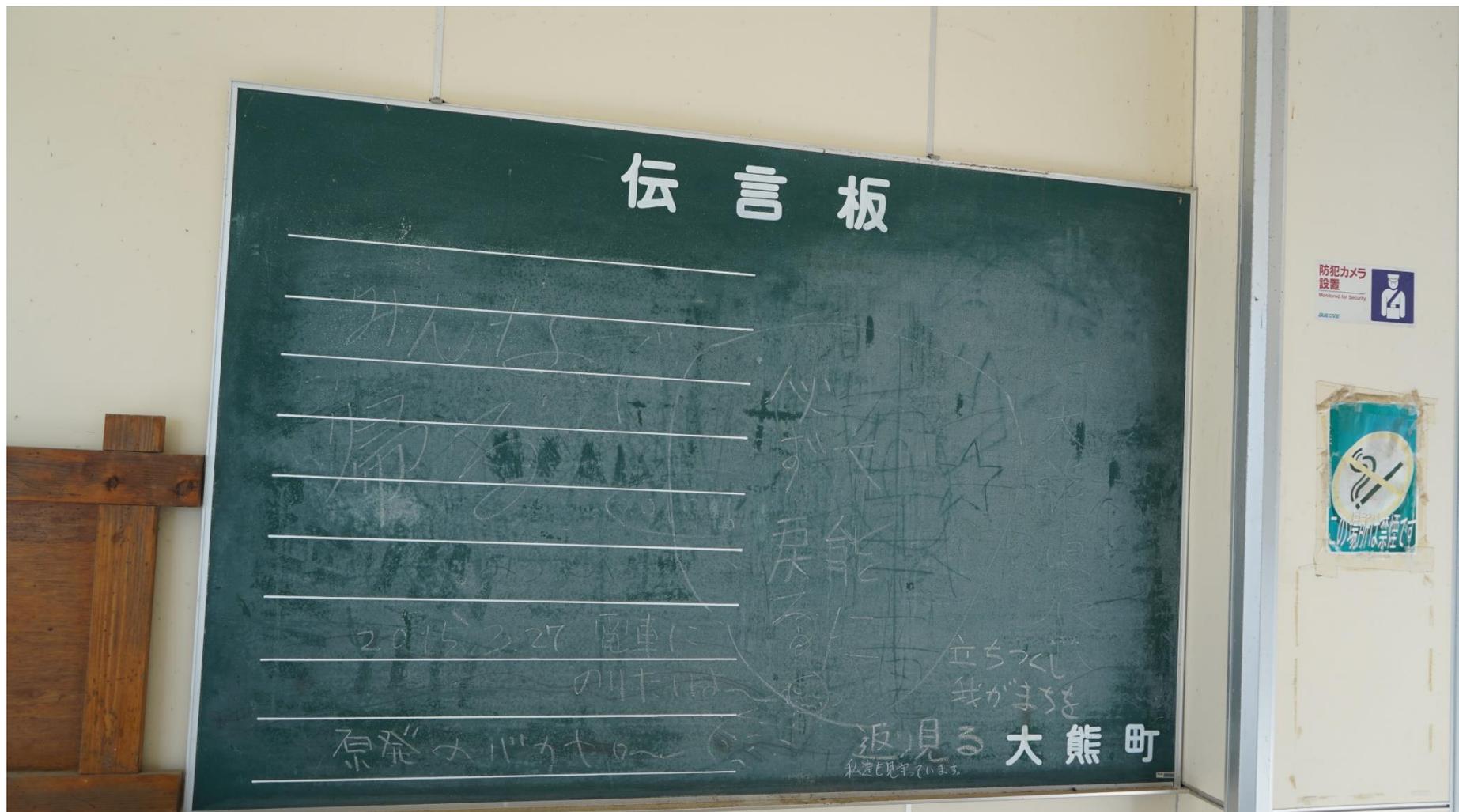
このタンクの中にあるトリチウム、数千兆ベクレル

JR大野駅(福島第一原子力発電所に最も近い駅)

2020年3月に開通



駅構内の伝言板



避難指示解除直前の様子



家の中の除染

帰還する方に家の中の汚染調査



都内公立小学校での放射線授業

延べ10000人突破!



2 Bq/kgのリンゴ、みなさんならどうする？



福島市産のリンゴを用意しました。放射性セシウムは2 Bq/kgです。講義で習ったことをベースに議論してみましょう！

- A**
- ▶ 「たった2 Bq/kgでしょ？このリンゴ1個を食べた時の放射性セシウムによる被ばく量は0.007 μ Sv(*)。だから全く問題ない！」

*計算、合っています

- B**
- ▶ 「被ばく量が低いことは分かるけど、青森産とか、福島県産以外のリンゴもスーパーでは手に入る。わざわざ購入する意味はあるの？」

みなさんのAとBの意見の割合は...？

東京都 文京区一般市民(n=50), 2019年9月

あなたなら2ペクレルのリンゴを...

購入する/食べる

 10%

買わない/食べない

 90%

福島原発事故がおきた福島市でオリンピック？

オリンピック会場の空間線量率測定

福島市・あづま球場(東京オリンピック会場のひとつ)



化学講義のさいごに

- ▶ 福島第一原子力発電所は廃止(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。
- ▶ 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。
- ▶ 考え方は、人それぞれ。でも科学に基づかない意見があることを見抜いて。
- ▶ 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}Xe など)、放射性ヨウ素(^{131}I など)、放射性セシウム(^{134}Cs , ^{137}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。