



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>

2016年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義



放射線

を
科学的に
理解する

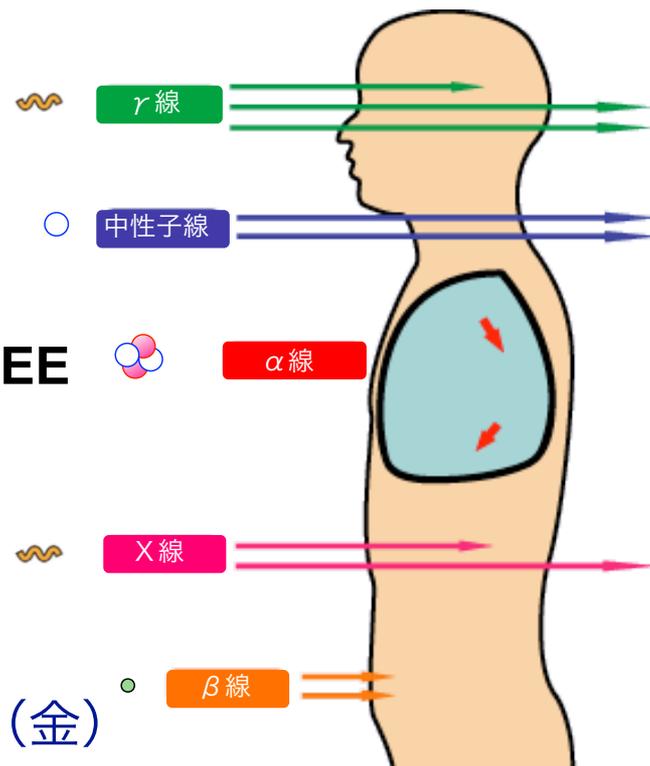


金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

2016 / 10 / 28 (金)



第5回

環境放射化学

放射線量の時間変化、放射性物質の濃縮と拡散

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

- 9/30 放射線入門 【鳥居】
- 10/ 7 放射線物理学 【鳥居】
- 10/14 放射線計測学 【小豆川】
- 10/21 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/28 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 4 放射線生物学 【渡邊】
- 11/11 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 12/ 2 原子核物理学・原子力工学
- 12/ 9 放射線医療 【芳賀】 【鳥居】
- 12/16 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/23 環境放射化学 【小豆川】
- 1/ 6 放射線の利用 【渡邊】
- 1/12 加速器科学・放射線防護学
(木曜振替) 【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2回目)

小豆川(しょうずがわ)勝見

はじめに

- ▶ 今日のテーマは「フィールドの中の放射性物質」
- ▶ 放出された放射性物質の種類と量
- ▶ フィールドワーク/装備と服装
- ▶ 環境中に拡散された放射能フォールアウト後にどうなる？
 - 福島第一原発周辺(0 - 35km圏内)
 - 「ホットスポット」の核種の挙動
 - 都内の身近な環境 - 駒場キャンパスでは？
- ▶ 化学の最終週ではSPEEDIなどの拡散シミュレーションとの比較を行います

放出された核種と放出量の予測(1)

▶ 原子力保安院(当時)の予測

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	2.2×10^{15}	2.3×10^{15}	4.5×10^{14}	5.0×10^{15}
Te-132	2.5×10^{16}	5.7×10^{16}	6.4×10^{15}	8.8×10^{16}

使用している燃料(UO₂ or MOX)、燃料の使用経過時間、放出経路によって値は異なる

放出された核種と放出量の予測(2)

使用している燃料(UO₂ or MOX)、経過時間、放出経路によって値は異なる

Ru-103	2.5×10^{09}	1.8×10^{09}	3.2×10^{09}	7.5×10^{09}
Ru-106	7.4×10^{08}	5.1×10^{08}	8.9×10^{08}	2.1×10^{09}
Zr-95	4.6×10^{11}	1.6×10^{13}	2.2×10^{11}	1.7×10^{13}
Ce-141	4.6×10^{11}	1.7×10^{13}	2.2×10^{11}	1.8×10^{13}
Ce-144	3.1×10^{11}	1.1×10^{13}	1.4×10^{11}	1.1×10^{13}
Np-239	3.7×10^{12}	7.1×10^{13}	1.4×10^{12}	7.6×10^{13}
Pu-238	5.8×10^{08}	1.8×10^{10}	2.5×10^{08}	1.9×10^{10}
Pu-239	8.6×10^{07}	3.1×10^{09}	4.0×10^{07}	3.2×10^{09}
Pu-240	8.8×10^{07}	3.0×10^{09}	4.0×10^{07}	3.2×10^{09}
Pu-241	3.5×10^{10}	1.2×10^{12}	1.6×10^{10}	1.2×10^{12}
Y-91	3.1×10^{11}	2.7×10^{12}	4.4×10^{11}	3.4×10^{12}
Pr-143	3.6×10^{11}	3.2×10^{12}	5.2×10^{11}	4.1×10^{12}
Nd-147	1.5×10^{11}	1.3×10^{12}	2.2×10^{11}	1.6×10^{12}
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}

放出された核種と放出量の予測(3)

使用している燃料(UO₂ or MOX)、経過時間、放出経路によって値は異なる

I-132	<u>1.3 × 10¹³</u>	<u>6.7 × 10⁰⁶</u>	<u>3.7 × 10¹⁰</u>	<u>1.3 × 10¹³</u>
I-133	<u>1.2 × 10¹⁶</u>	<u>2.6 × 10¹⁶</u>	<u>4.2 × 10¹⁵</u>	<u>4.2 × 10¹⁶</u>
I-135	<u>2.0 × 10¹⁵</u>	<u>7.4 × 10¹³</u>	<u>1.9 × 10¹⁴</u>	<u>2.3 × 10¹⁵</u>
Sb-127	<u>1.7 × 10¹⁵</u>	<u>4.2 × 10¹⁵</u>	<u>4.5 × 10¹⁴</u>	<u>6.4 × 10¹⁵</u>
Sb-129	<u>1.4 × 10¹⁴</u>	<u>5.6 × 10¹⁰</u>	<u>2.3 × 10¹²</u>	<u>1.4 × 10¹⁴</u>
Mo-99	<u>2.6 × 10⁰⁹</u>	<u>1.2 × 10⁰⁹</u>	<u>2.9 × 10⁰⁹</u>	<u>6.7 × 10⁰⁹</u>

※出典：原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故
について-（平成23年6月）原子力災害対策本部

注) Te-131m、Te-132、I-132、I-133、I-135、Sb-129、Mo-99 のデータに誤りが判明したため、下線のとおり
平成23年10月20日に訂正しました。

(復習)半減期と比放射能

- ▶ ^{137}Cs の場合、半減期は30.2年
 - 比放射能は 3.2×10^{12} Bq/g

- ▶ ^{131}I の場合、半減期は8.02日
 - 比放射能は 4.6×10^{15} Bq/g

$$A(\text{Bq/g}) = \frac{4.17 \times 10^{23}}{T_{1/2} \cdot m}$$

- ▶ ^{40}K の場合、半減期は12.5億年
 - 比放射能は 2.6×10^5 Bq/g

- ▶ ^{131}I の放出推定値は 1.6×10^{17} Bq、つまり



g分

原発から放出された放射性物質の量

大気中にまかれた量



地下水・海にまかれた量



プール一杯の水に角砂糖サイズの放射性セシウムが溶けていたら、約1000万Bq/kg

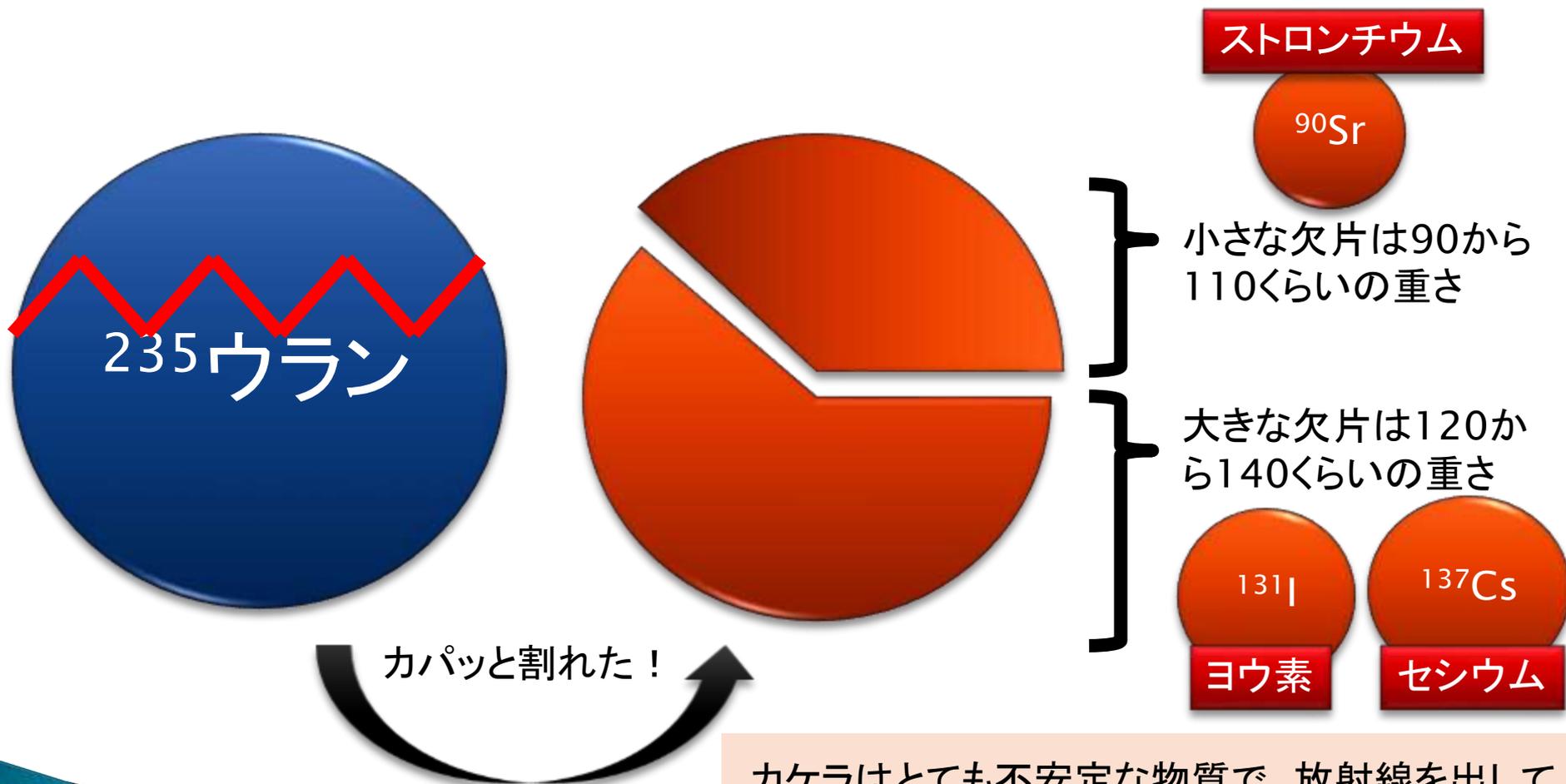
(参考)核分裂生成物と放射化生成物

- ▶ ^{134}Cs と ^{137}Cs の生成過程は全く異なる
- ▶ 核分裂生成物(Fission Product)...いわば燃えカス
 - 核分裂によって生成する核種(^{90}Sr , ^{131}I , ^{133}Cs (stable), ^{137}Cs ...)
 - 燃料が ^{235}U で、原子炉のタイプが決まっていれば、およそその核分裂生成物の収量(Yield)は予測できる。
- ▶ 放射化生成物(Activation Product)
 - 核分裂反応によって生じる高速中性子が減速材で減速され、熱中性子となり、これが中性子捕捉反応によって新たに生じる核種(^{134}Cs , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{239}U ...)
 - 高速増殖炉

ウランが割れると、カケラができます

小学生向けの放射線の講義資料から抜粋

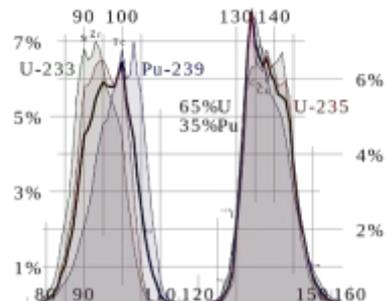
- ▶ 大きなカケラと小さなカケラができます



カケラはとても不安定な物質で、放射線を出して安定な元素に変わろうとします。
このようなカケラを「放射性物質」といいます。

ウランが割れると、カケラができます

小学生向けの放射線の講義資料から抜粋



**核分裂生成物
(fission product)**

ストロンチウム



小さな欠片は90から110くらいの重さ

**高速
中性子**



は120から140くらいの重さ



ヨウ素

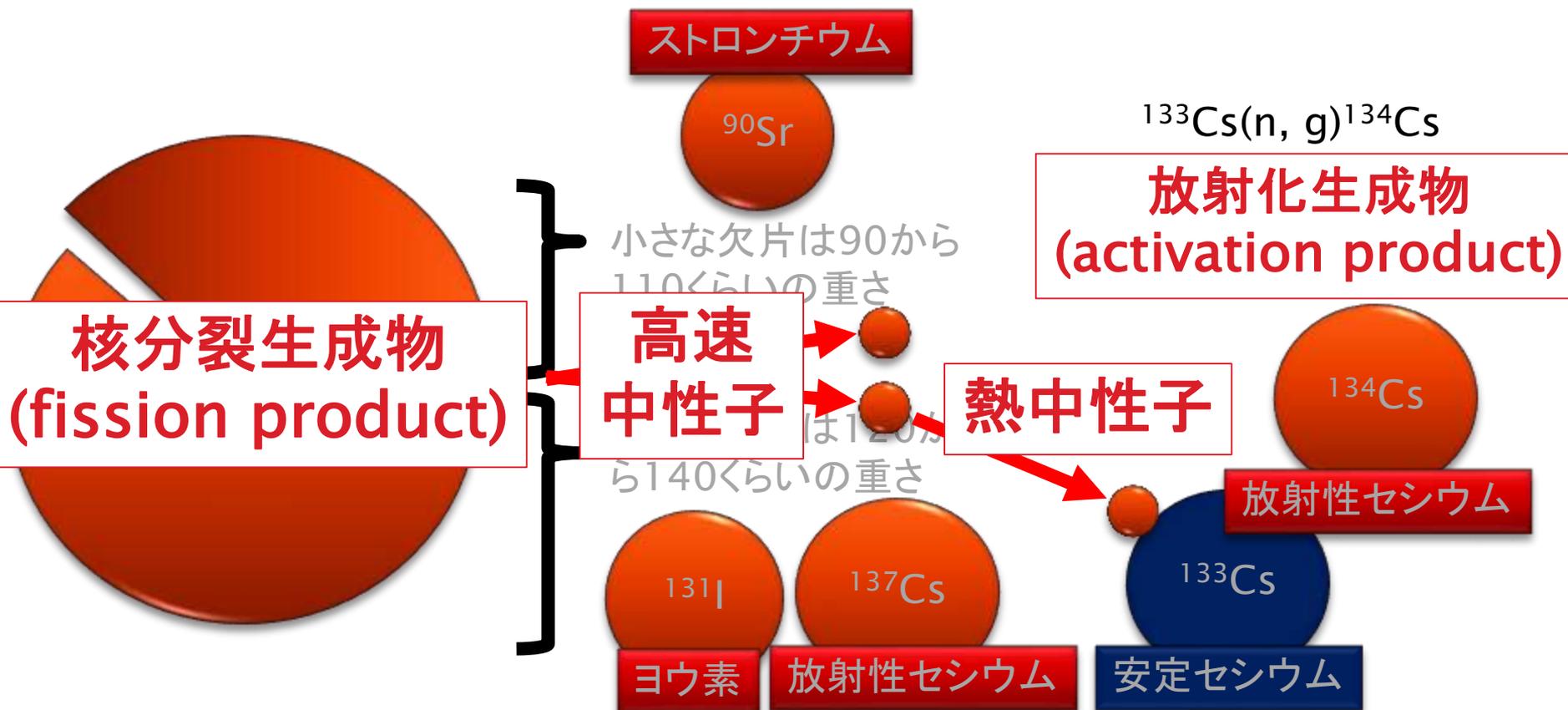


セシウム

カケラはとても不安定な物質で、放射線を出して安定な元素に変わろうとします。
このようなカケラを「放射性物質」といいます。

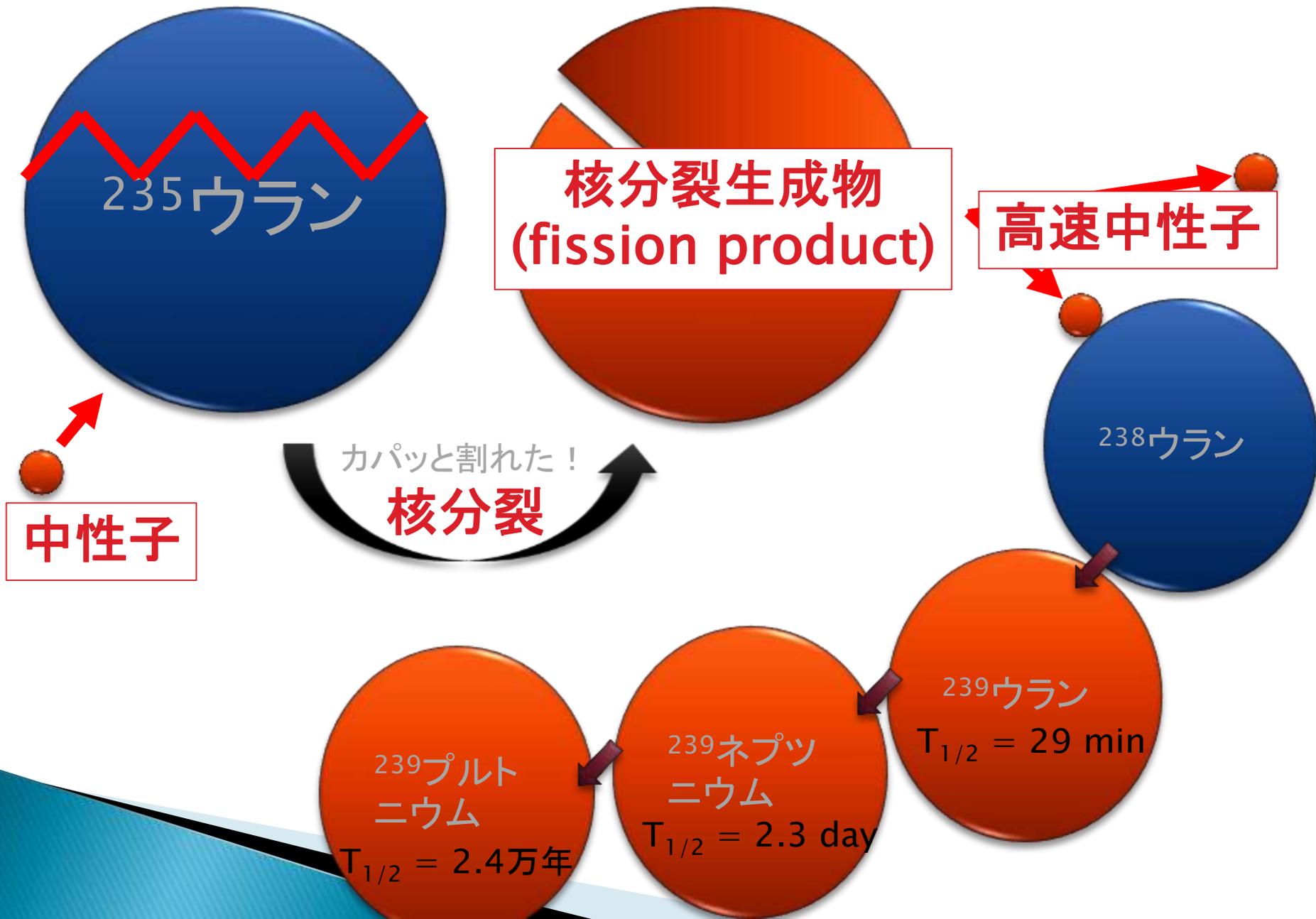
ウランが割れると、カケラができます

小学生向けの放射線の講義資料から抜粋



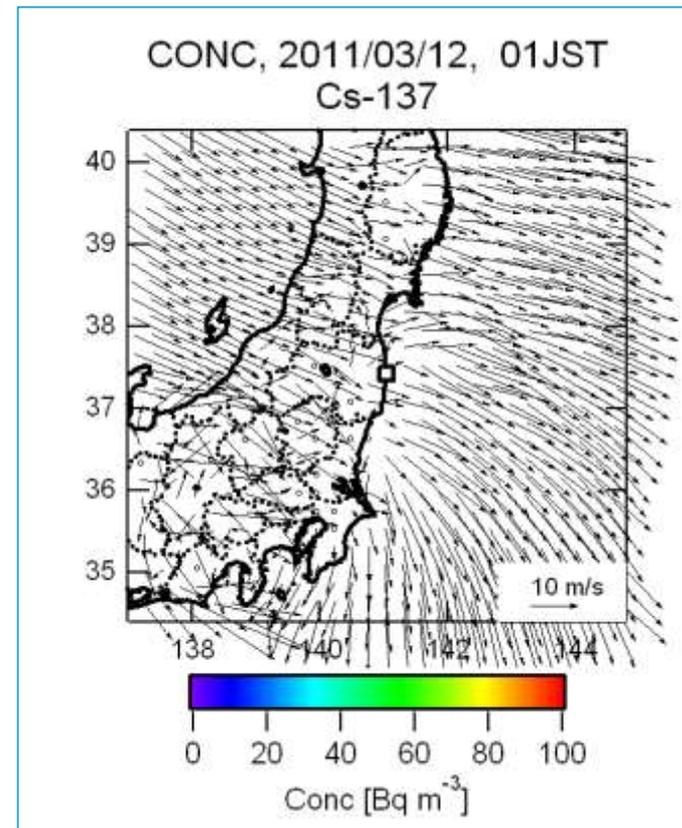
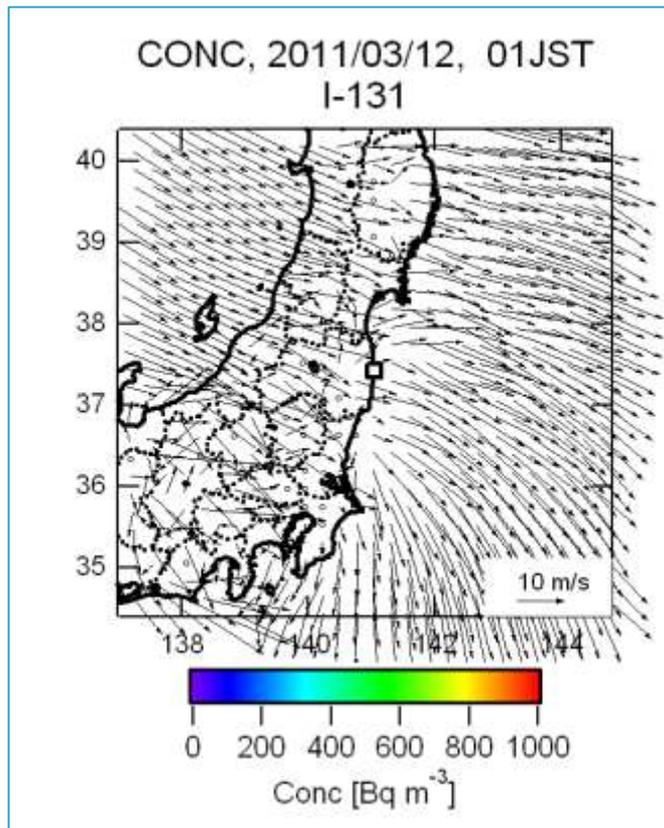
カケラはとても不安定な物質で、放射線を出して安定な元素に変わろうとします。このようなカケラを「放射性物質」といいます。

(余談)プルトニウム(^{239}Pu)の作り方



放射性物質の拡散

- ▶ 大半(約8割)が海側に流れているが、3/15や3/20-21には南方向に放射性物質が拡散している



駒場で収集した雨水中の ^{131}I (測定は2011年3月22-23日)

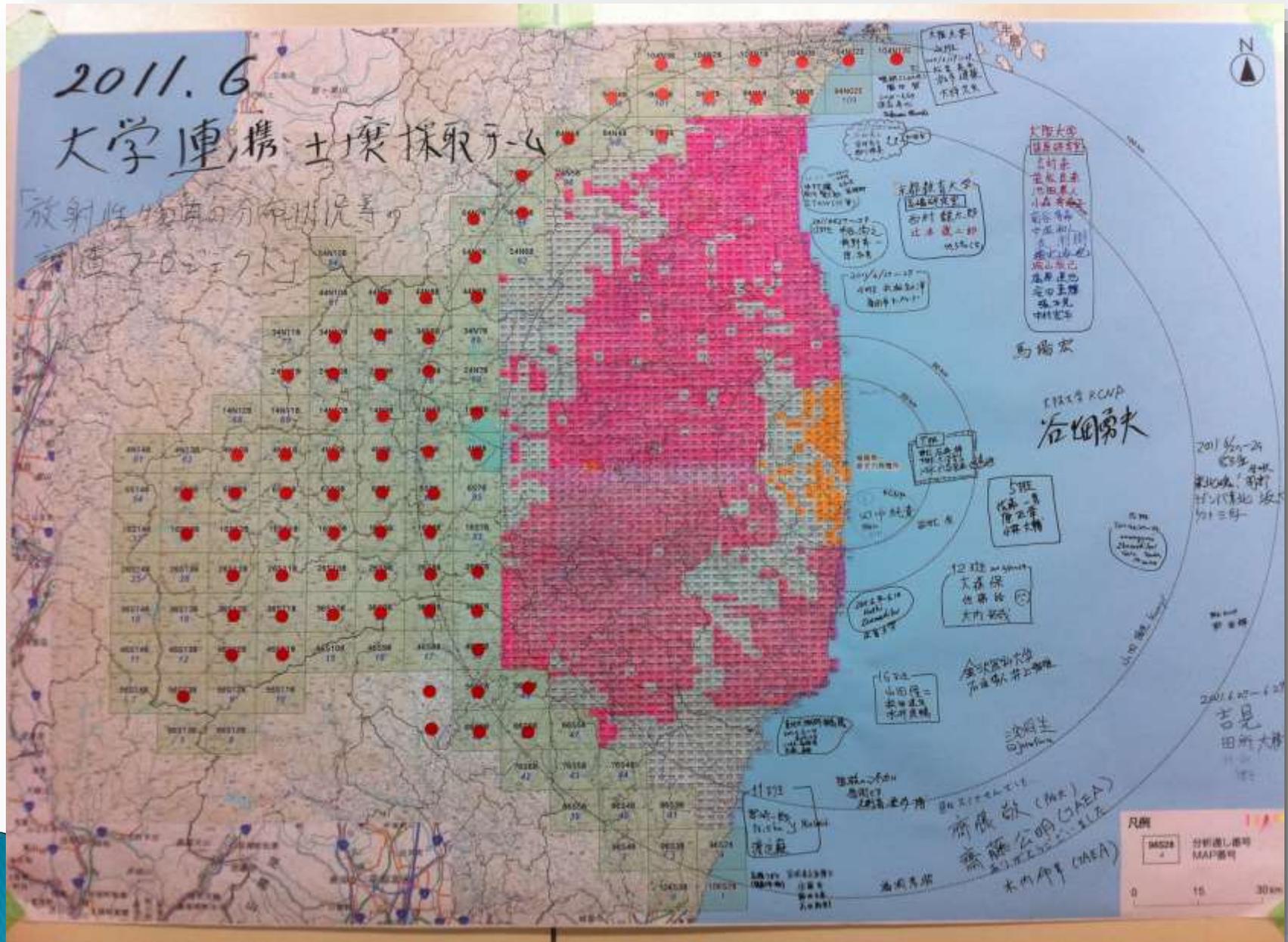
液体シンチレーションカウンタによる測定

		^{131}I 補正值		規制値との 比
		dpm	Bq/Kg	
水たまり	6号館前	4622	7703	25.7
水たまり	6-15,16号館間	1703	2839	9.5
水たまり	15,16号館前	6677	11130	37.1
水たまり	ドライエリア	4428	7382	24.6
水道水	RI実験施設	ND	ND	-

▶ 駒場雨水中から ^{131}I 検出

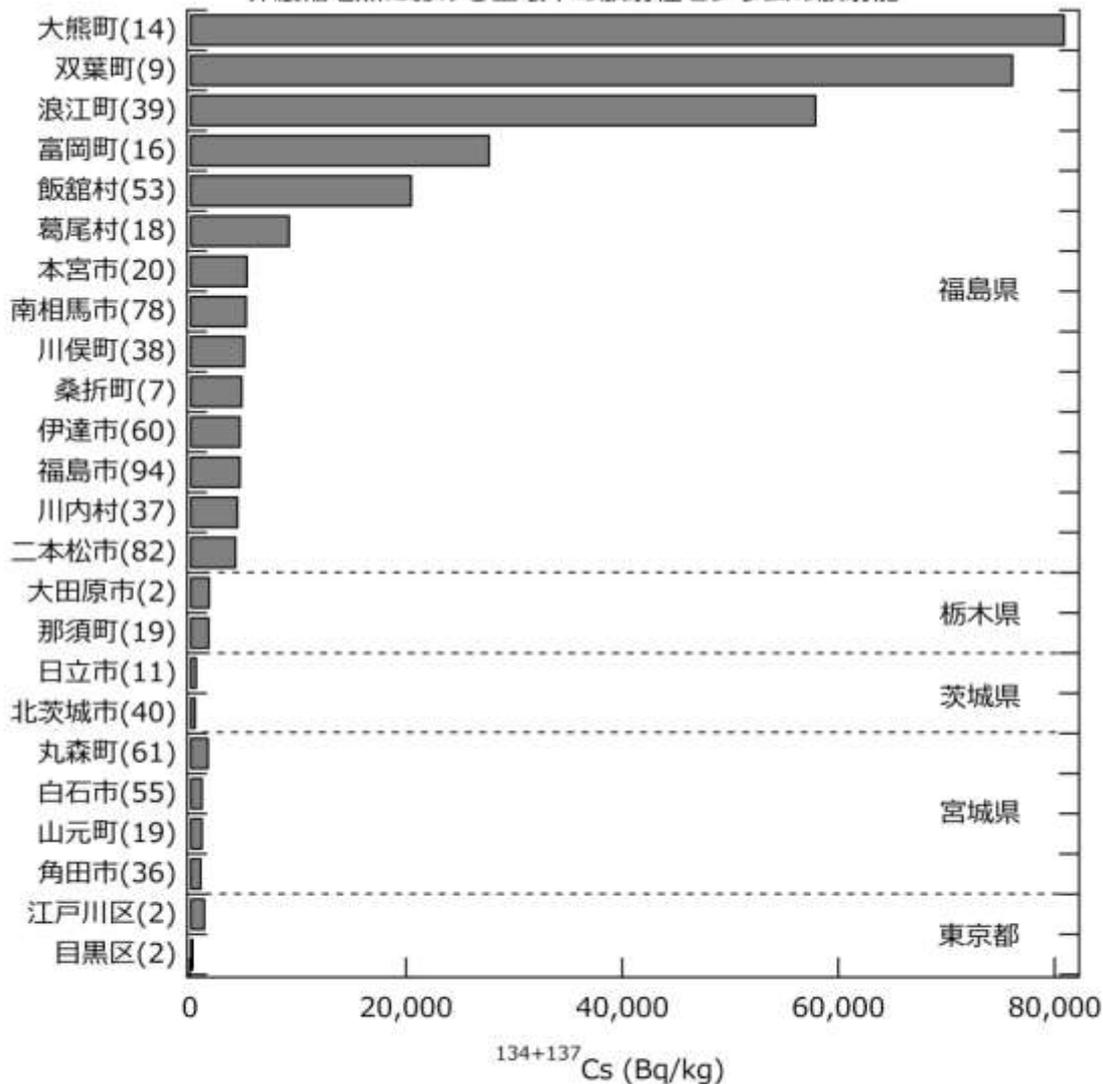
- 3/22は原発事故後、都内で初めてまとまった降雨があった
- 3/22に金町浄水場で $210\text{Bq}\cdot\text{Kg}^{-1}$ の ^{131}I 検出
 - ・ 時期・濃度ともに合理的

文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)



広域的な放射性セシウムの評価(文部科学省提供)+自分のデータ

非濃縮地点における土壤中の放射性セシウムの放射能



放射性セシウム($^{134}+^{137}\text{Cs}$ 合算値)
 測定点はすべて非濃縮地点
 それぞれ5-40点程度の平均値



大熊町でのサンプリングの様子

1. 市町村名の後の(カッコ)内の数字はサンプル数であり、ここではその平均値を示した。
2. 土壌サンプルの採取は2011年6月から7月であり、採取時点で半減期補正を行っている。
3. 文部科学省から提供された値に筆者の測定結果を加えた。

原発周辺のサンプリング地点と空間線量率(2011年4月9-10日)



原発周辺で観測された核種

^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , $^{110\text{m}}\text{Ag}$,
 ^{132}Te , ^{132}I , ^{140}Ba , ^{140}La ,
 ^{89}Sr , ^{89}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{239}Np ,
 ^{59}Fe

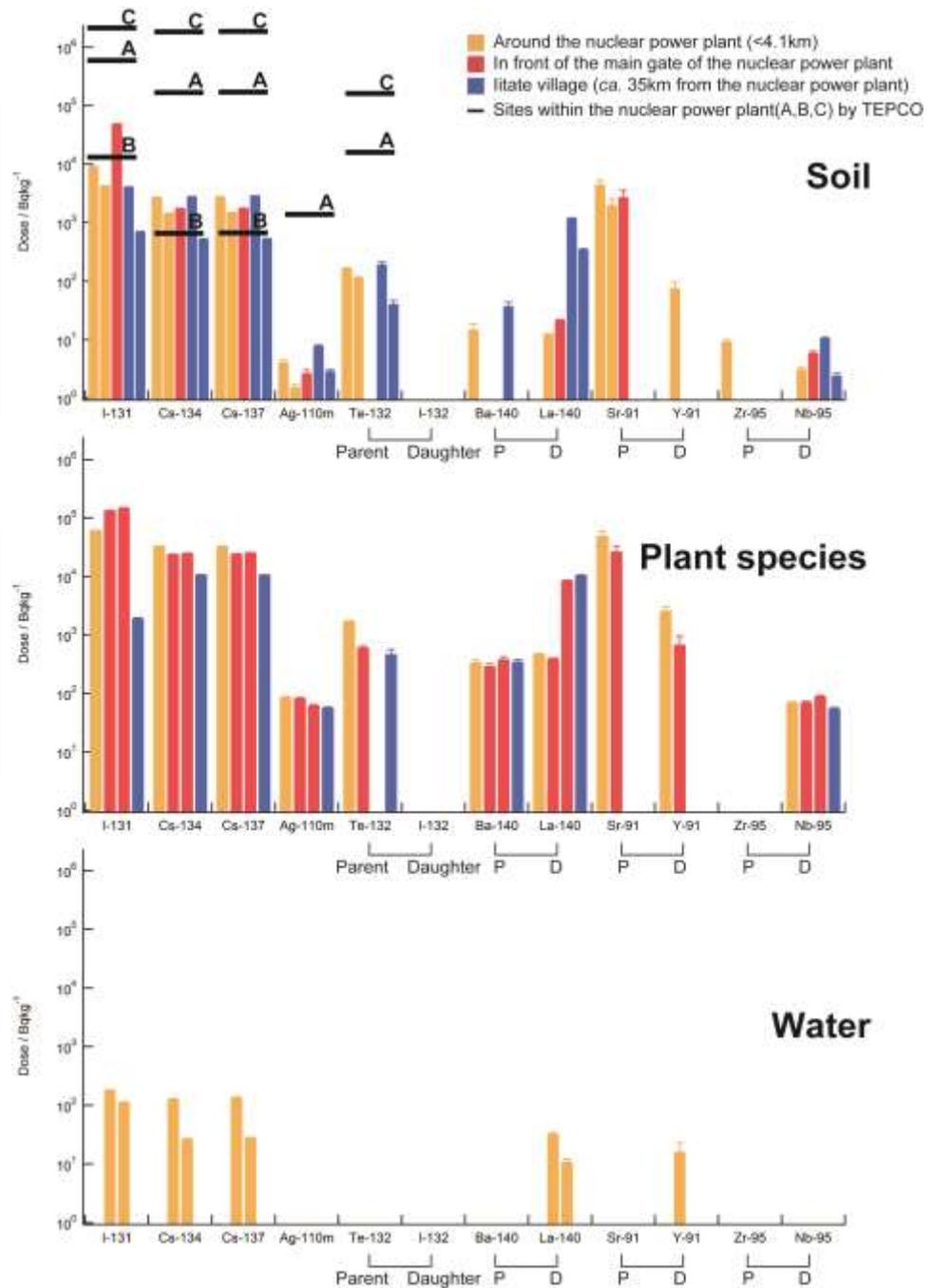
Shozugawa et al., 2012

^{125}Sb , $^{127\text{m}}\text{Te}$, $^{129\text{m}}\text{Te}$,
 ^{136}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{54}Mn ,
 ^{58}Co , ^{60}Co , $^{114\text{m}}\text{In}$

小島ら, 2011,2012

^{241}Pu

Zheng et al, 2012



フィールドワーク

着てみよう！

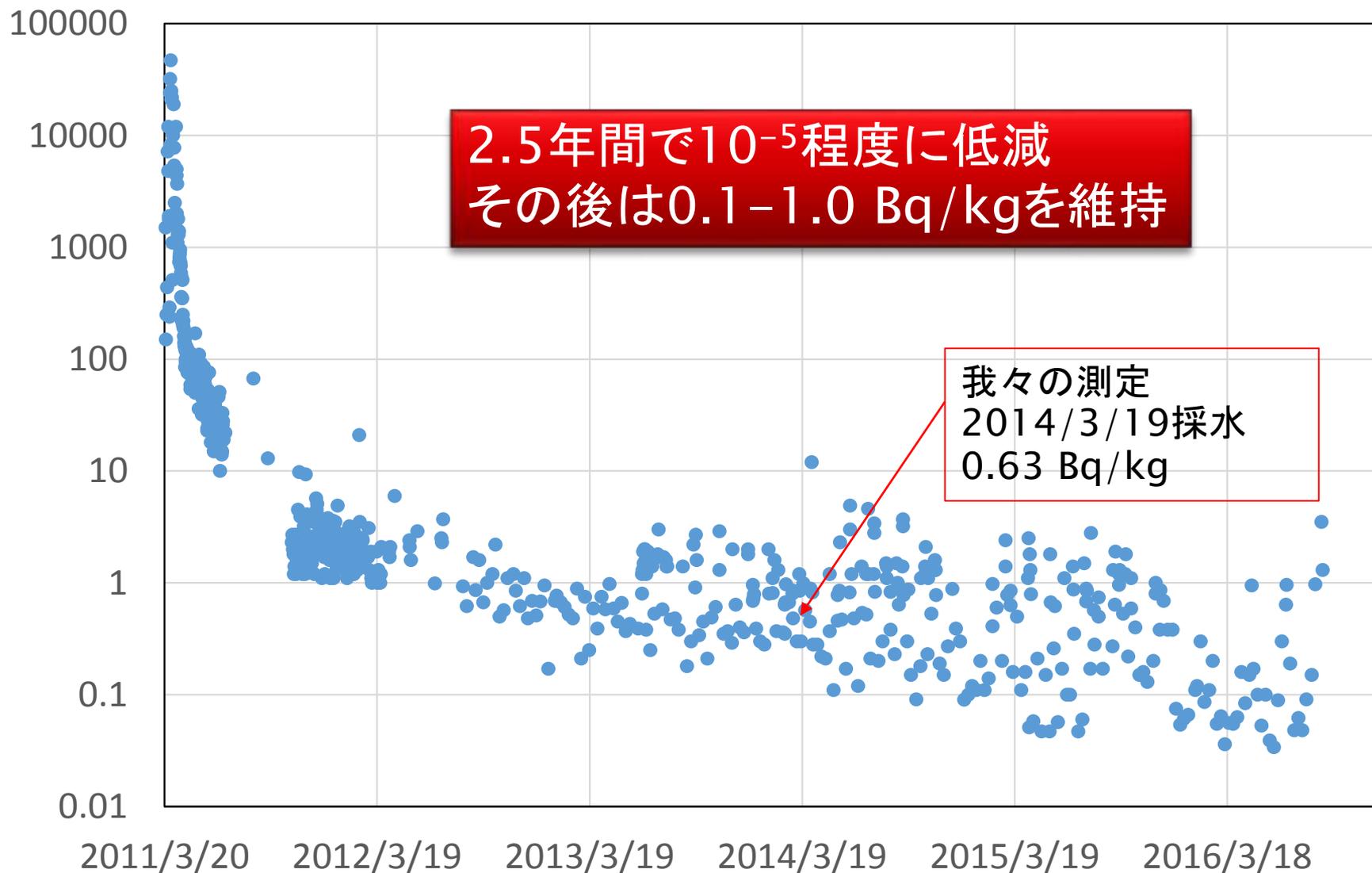


事故後3年後までの推移

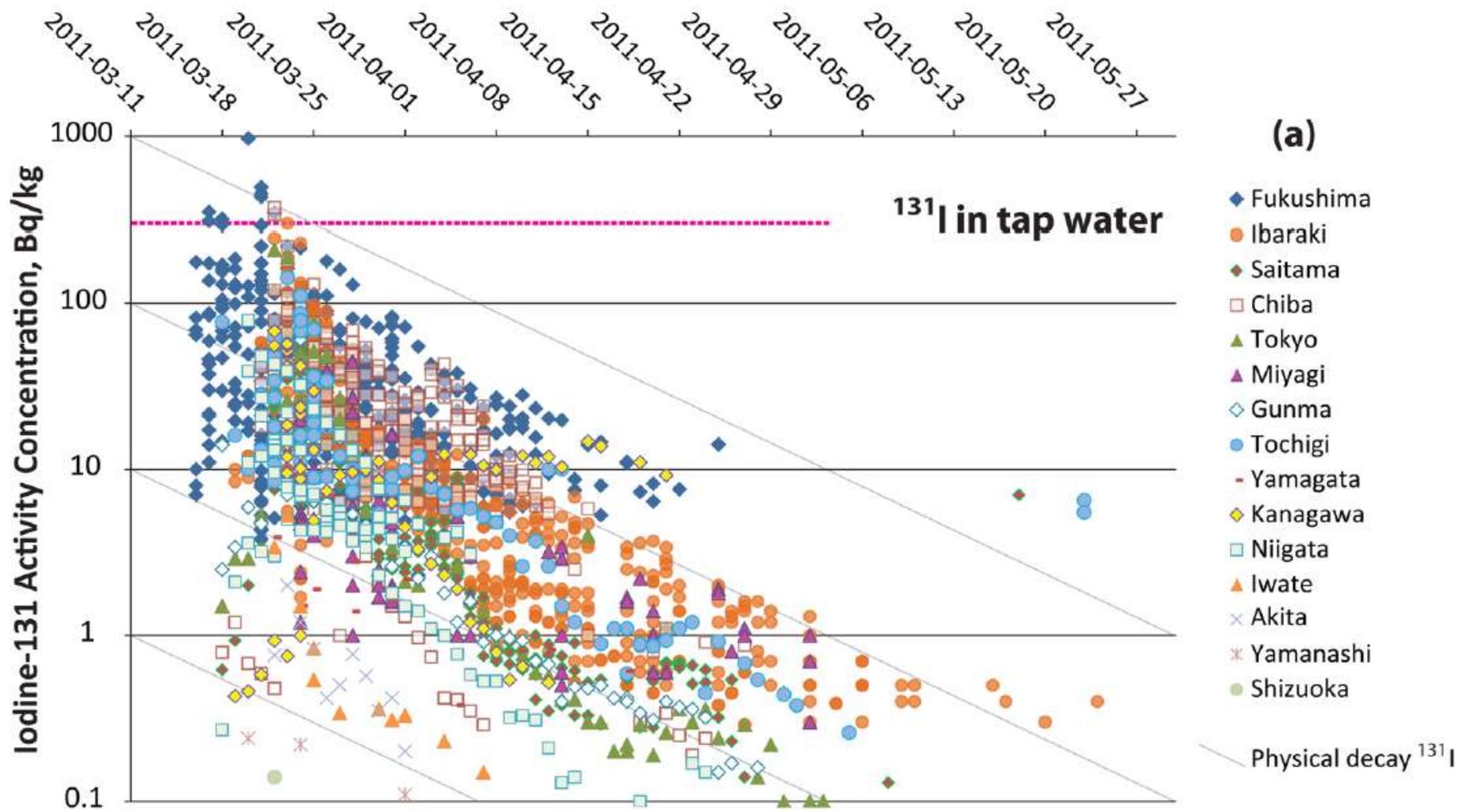
(環境)

原発港湾海水中の ^{137}Cs 濃度の推移

原発港湾海水における ^{137}Cs (Bq/L)

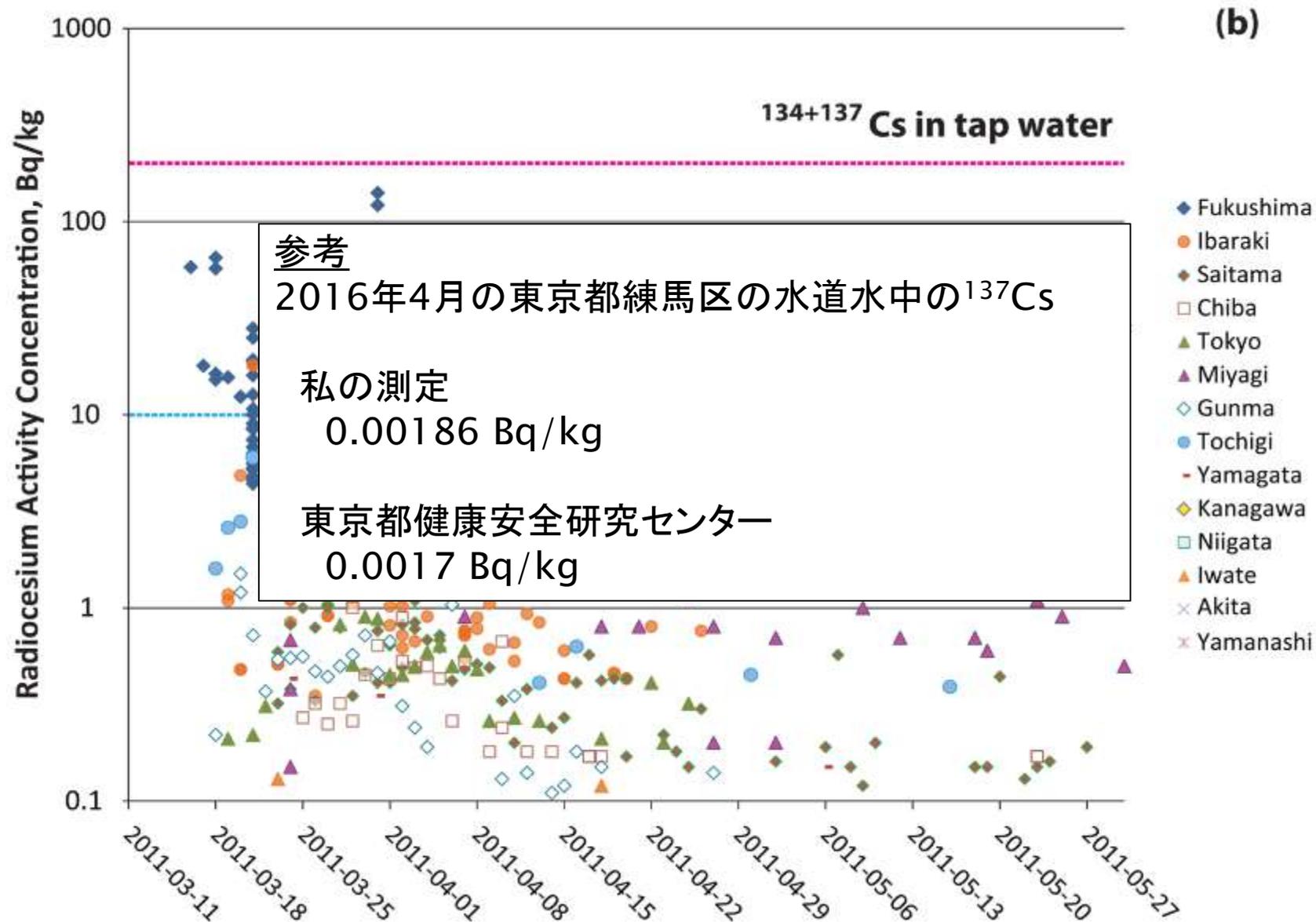


福島原発事故直後の水道水中の ^{131}I *



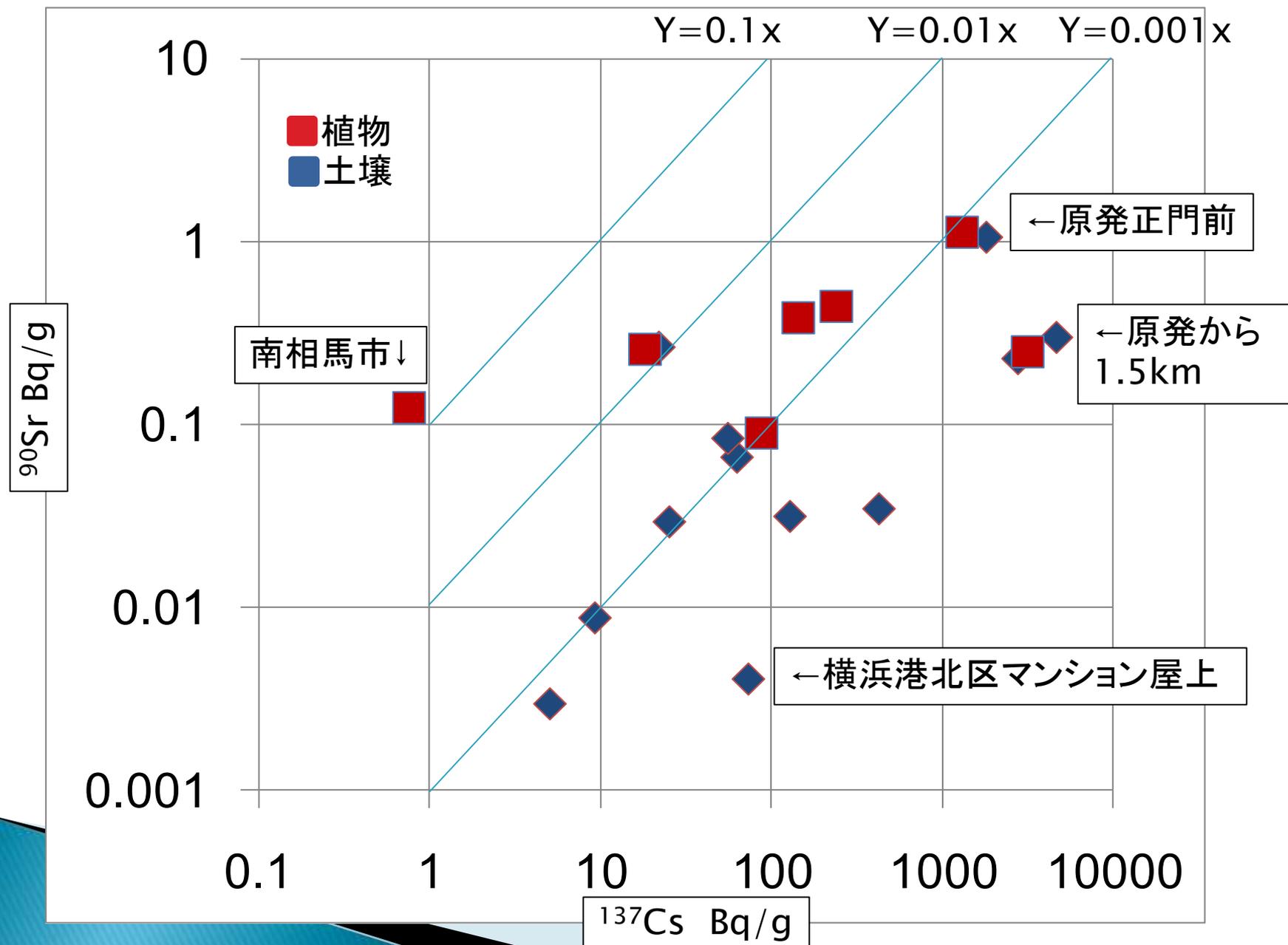
*S. Merz, K. Shozugawa, G. Steinhauser, Analysis of Japanese Radionuclide Monitoring Data of Food Before and After the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 49(5), 2875–2885, 2015.

福島原発事故直後の水道水中の $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}^*$



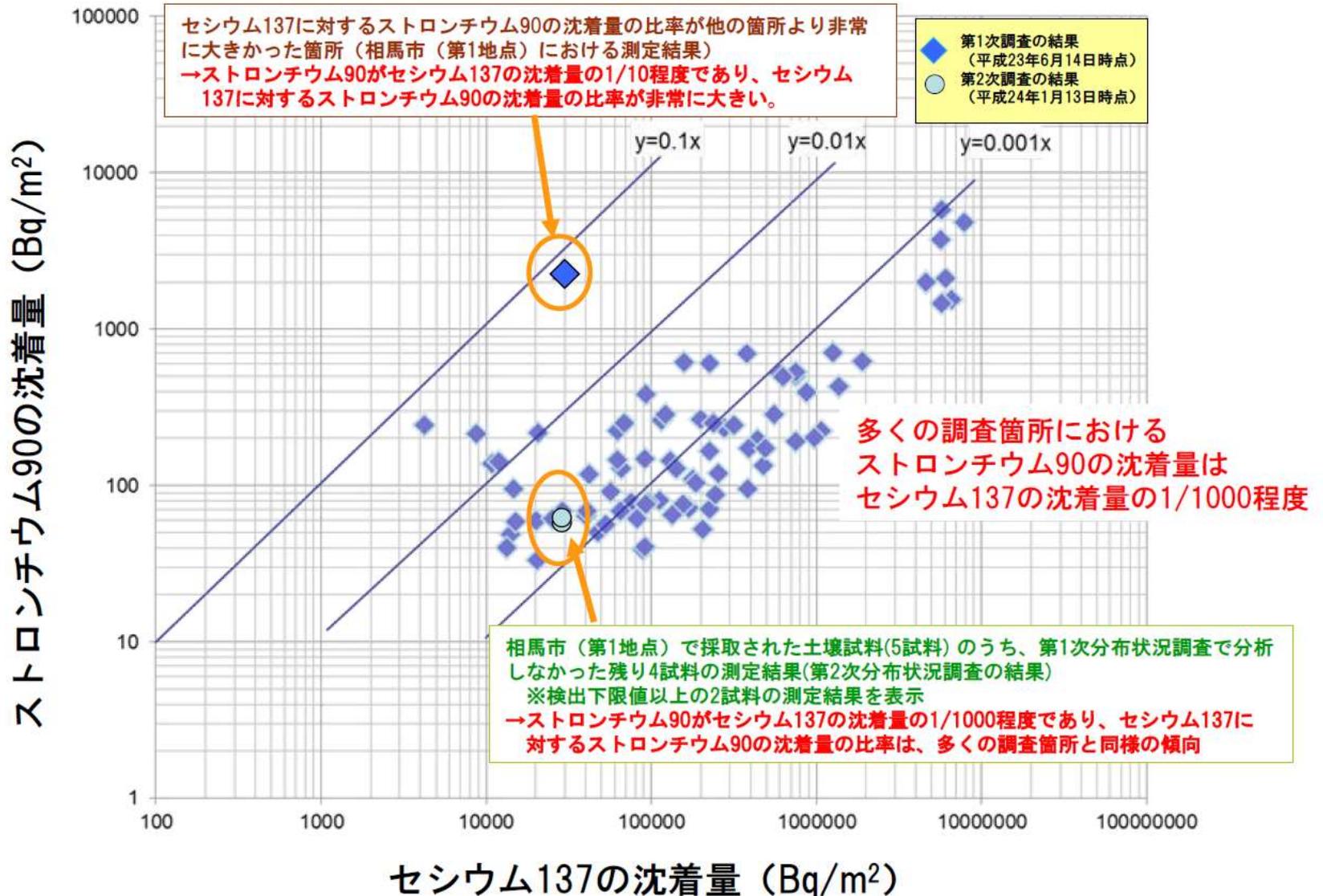
*S. Merz, K. Shozugawa, G. Steinhauser, Analysis of Japanese Radionuclide Monitoring Data of Food Before and After the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 49(5), 2875–2885, 2015.

^{90}Sr の挙動は今後極めて重要



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

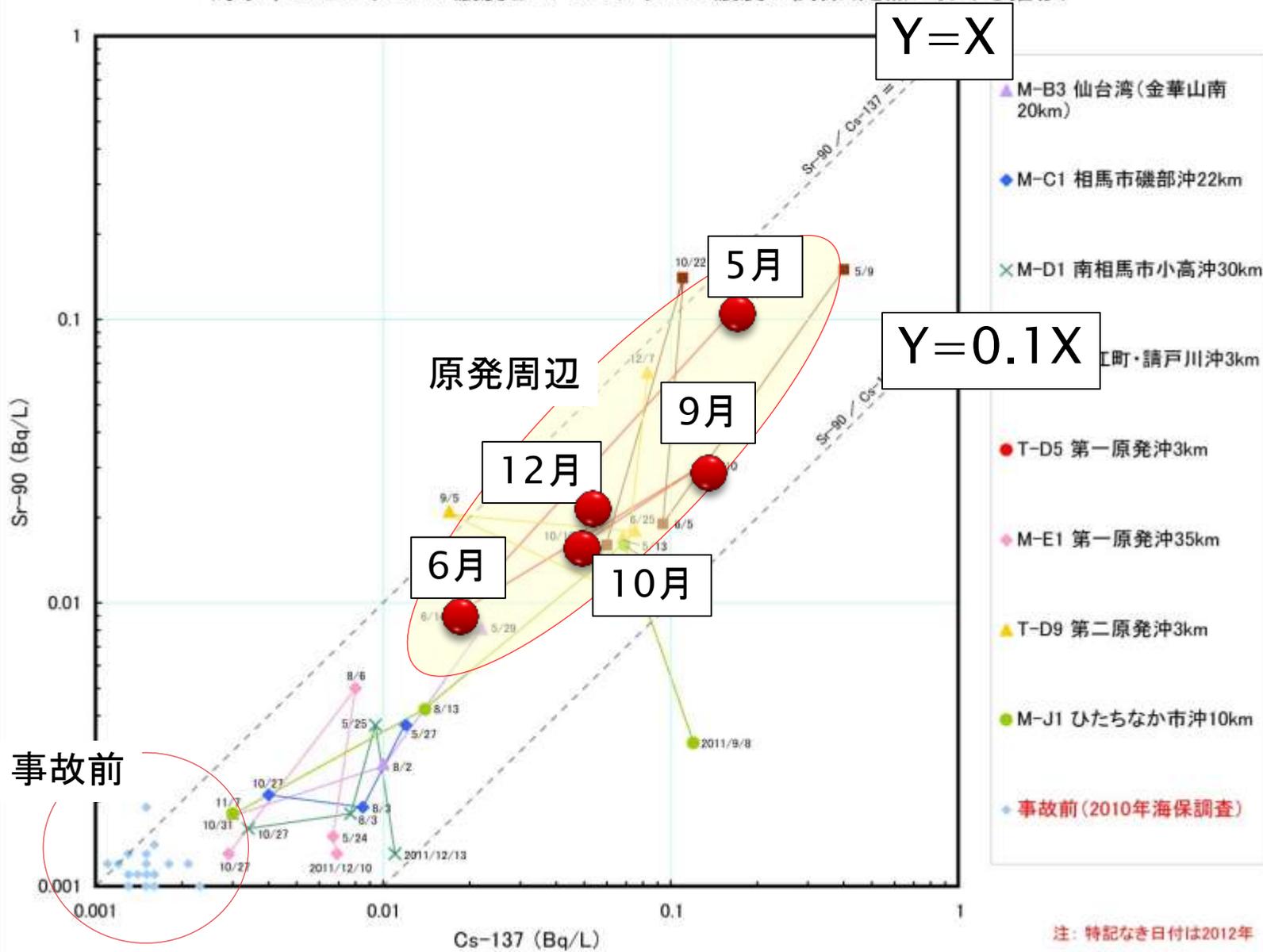


放射性ストロンチウム

- ▶ 土壌の ^{137}Cs に対する ^{90}Sr 放射能比($^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$)は 10^{-1} から 10^{-5} の範囲にある。おおむね 10^{-3} に集中する。放出源からの距離との相関はないことが特徴。
- ▶ 多くの報告は陸域(土壌、植物)の ^{90}Sr 。海水・海底土についてはまた異なる挙動が確認されているため、今後も慎重な測定が求められる。
- ▶ 来週、もっと面白い話をします。-これからの ^{90}Sr -

海水中の放射性ストロンチウム

海水中のセシウム137濃度とストロンチウム90濃度の関係(定点における推移)



注: 特記なき日付は2012年

(余談)汚染水

- ▶ 汚染水にもいろいろ。一番厄介なのはALPS後の濃縮水、一番汚いもので表面線量で約2 Sv/h。
- ▶ 含まれる核種は ^3H , ^{90}Sr , ^{125}Sb , ^{106}Ru , $^{134+137}\text{Cs}$ など
 - (例)平成25年4月11日 1F 地下貯水槽i北側 漏洩検知孔水

核種	濃度(Bq/L)
^{125}Sb	26,000
^{106}Ru	1,200
全 β (多くが ^3H)	25,000,000

出典:東京電力 地下貯水槽 分析結果(平成25年4月12日)

5/29測定分では ^3H として28,000 Bq/L



汚染水のタンク群

(余談)³Hの特徴



- ▶ ベータ線核種、ベータ崩壊後はヘリウムに
- ▶ 放出するβ線のエネルギーは非常に弱い($E_{\max}=18.6\text{keV}$)
- ▶ 半減期は12.3年

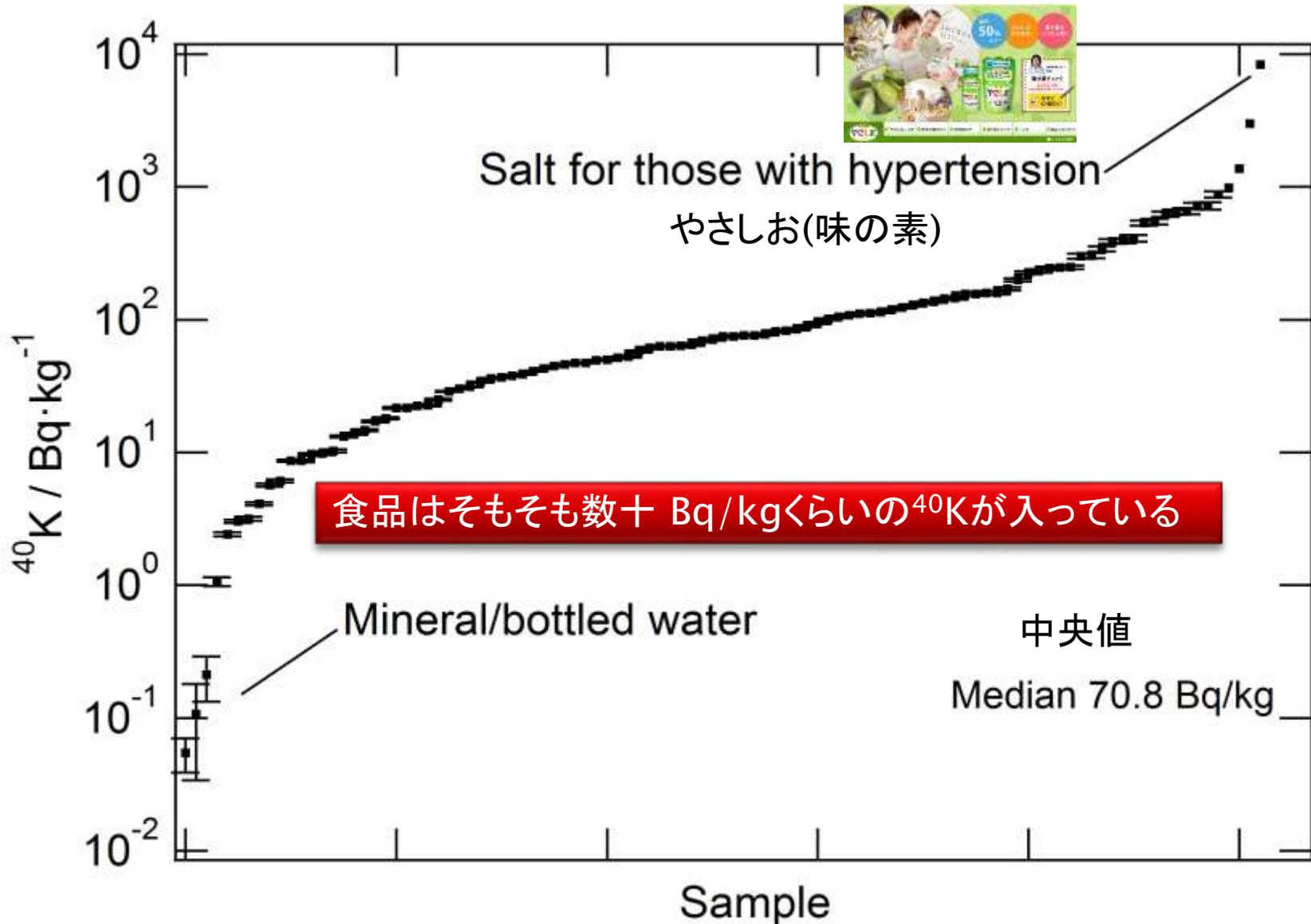
- ▶ 日本の降水には約1 Bq/Lくらい含まれている(出典:日本の環境放射線)
- ▶ 施設からの³H放出量
 - J-PARCの物質・生命科学実験施設なら、2010年度に 5.5×10^9 Bq(55億ベクレル)の放出量。(出典:J-PARC放射線管理年報(2011年度))
 - 福島第一原発なら、2009年度に(液体として) 2.0×10^{12} Bq(2兆ベクレル)の放出量。(出典:経済産業省,平成23年度原子力施設における放射性廃棄物の管理状況及び放射線作業従事者の線量管理状況について)気体については不明。
 - 六カ所村にある再処理工場から放出されている³Hは福島原発事故の数倍

- ▶ 「福島第一に(トリチウムの除去方法として)適用できるものは見つかっておらず、今後も引き続き調査を行う」(引用:福島第一原子力発電所のトリチウムの状況について)

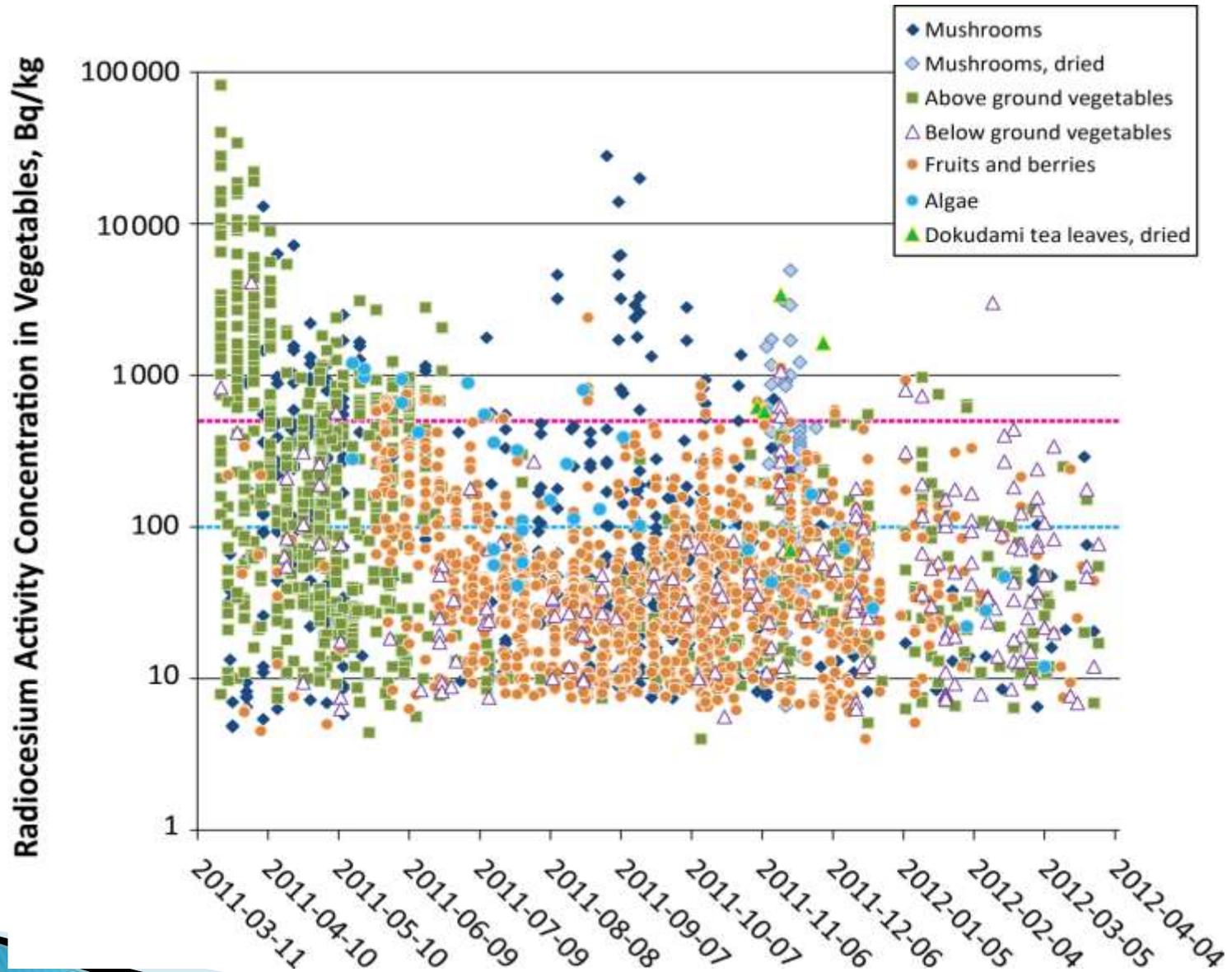
事故後3年後までの推移

(食品)

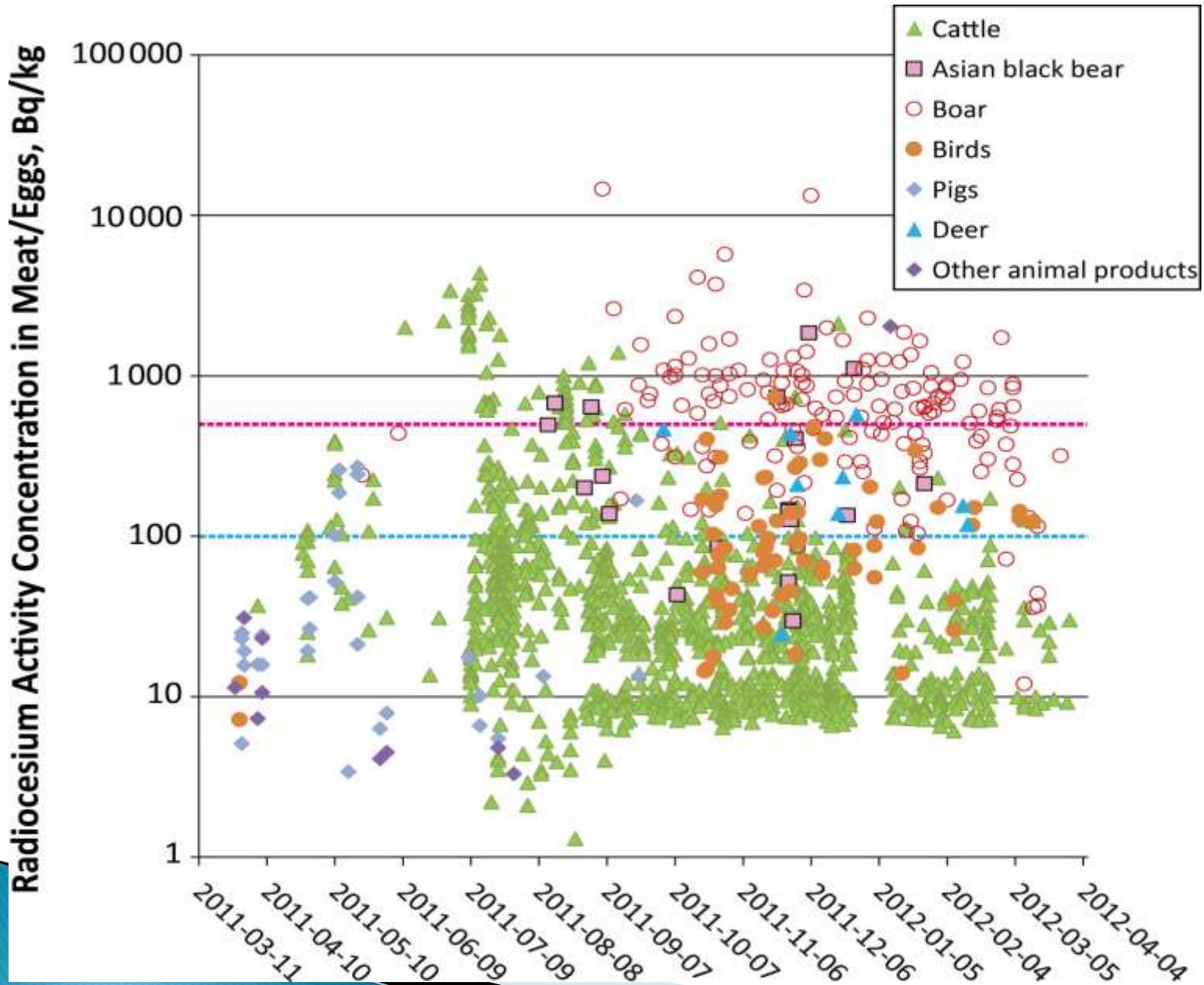
流通食品中の放射性カリウム(^{40}K ,天然核種)



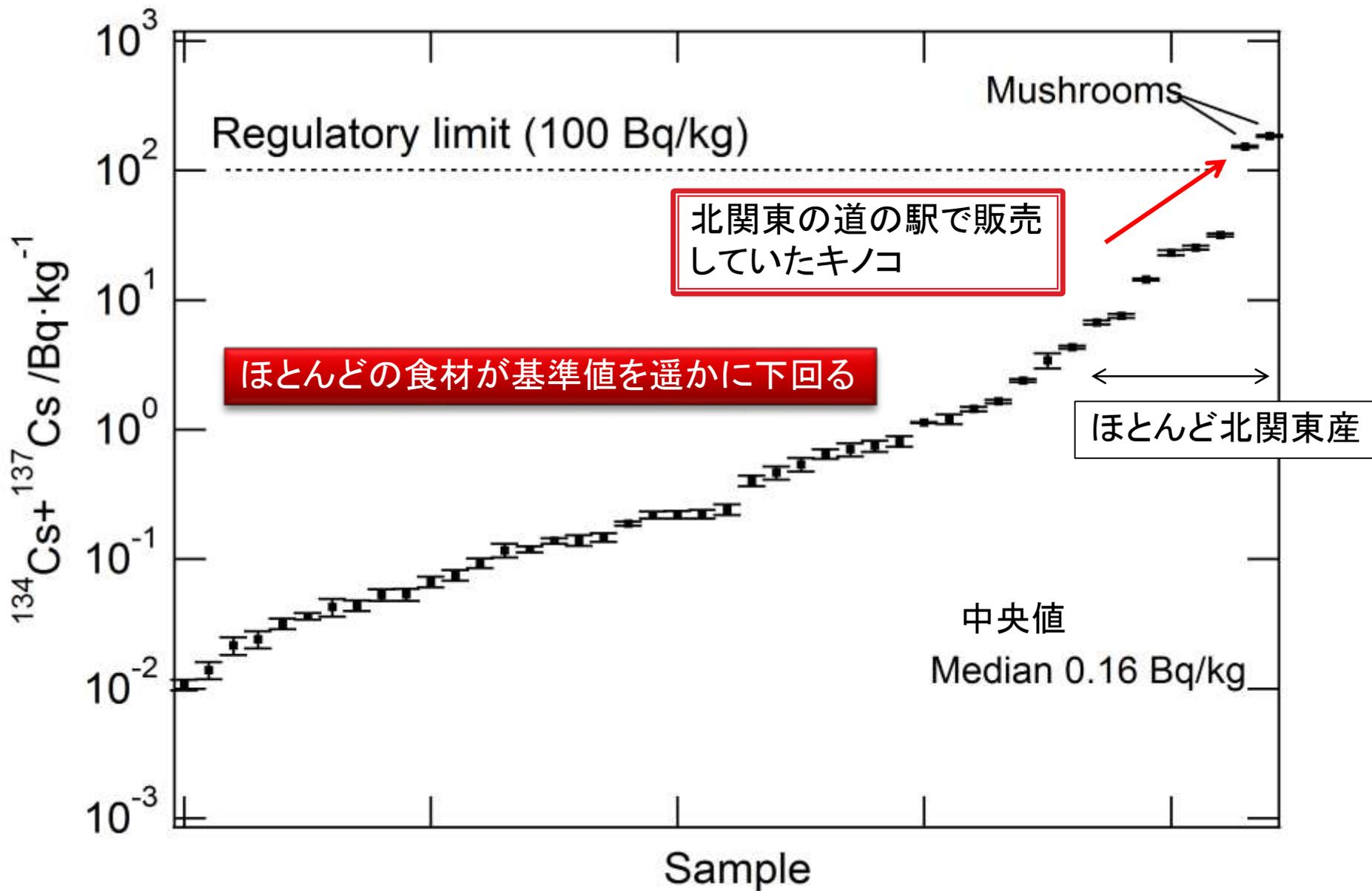
2011-2012年の食材中に含まれる放射性セシウム(福島・野菜)



2011-2012年の食材中に含まれる放射性セシウム(福島・肉)

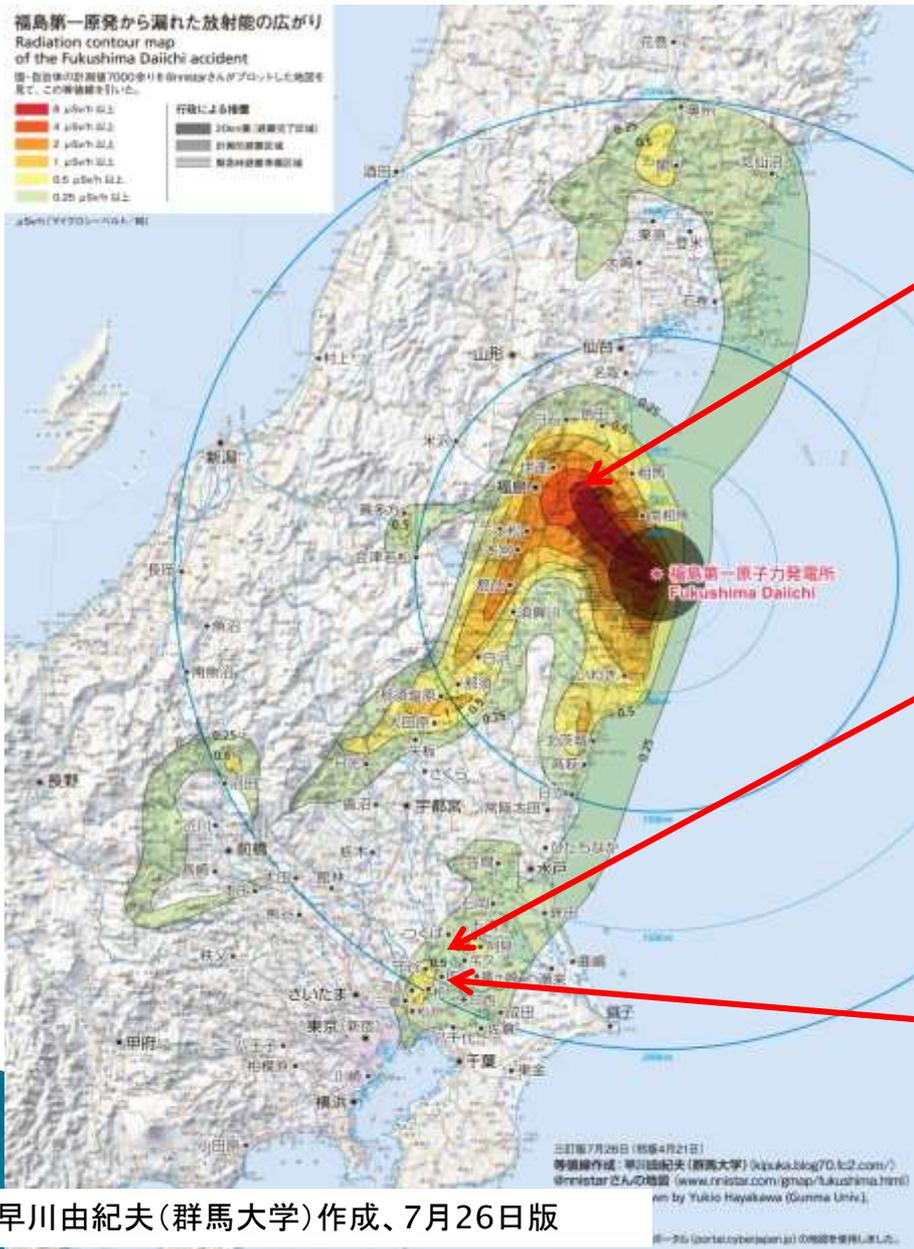


事故から3年後の流通食品中の放射性セシウム(福島県外)



沈着後の放射性物質の移動

原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



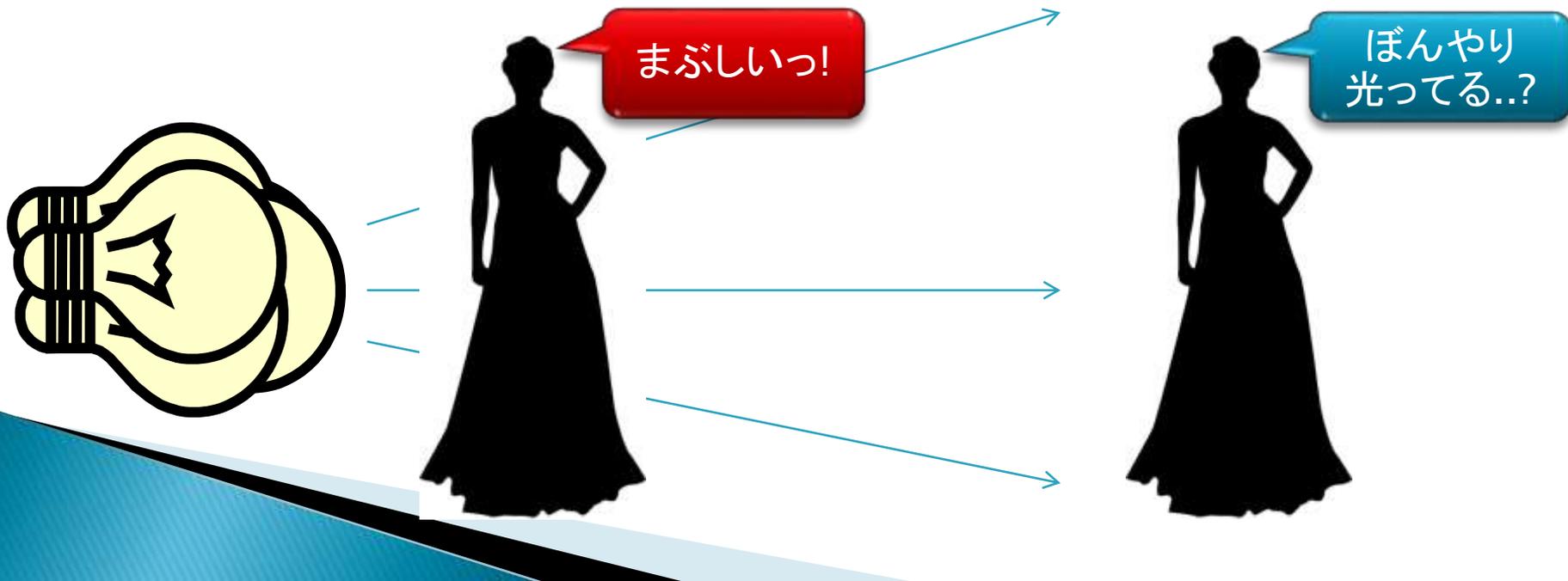
ホットスポットからの被ばく

▶ 基本

- 放射性物質がたくさんあれば、空間線量率も上がります。

▶ ホットスポット(点)からの被ばく

- 遠くにいると、光は分散するので、体にあまり当たりません。
- 近くにいると、光は集中するので、体に良く当たります。



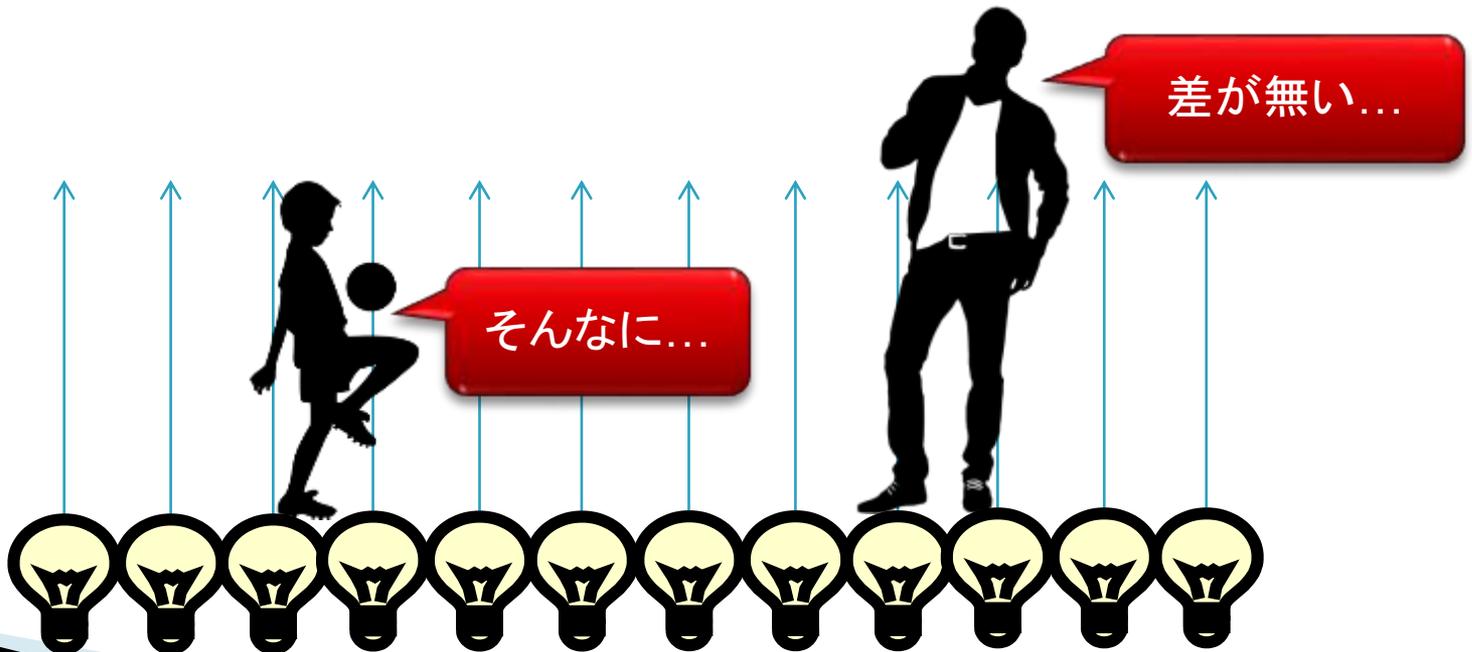
地面からの被ばく

▶ 基本

- 放射性物質がたくさんあれば、空間線量率も上がります。

▶ 地面(一様の汚染)からの被ばく

- 背の高い人も低い人も、あんまり変わりません。



現実の世界では

- ▶ ホットスポットと一様の汚染、両方が混在しています。
 - 線量計は、ホットスポットに近づかないと見つけにくい
 - 測る場所によって $0.23\mu\text{Sv}/\text{h}$ の閾を超えたり超えなかったり...



柏市における局所的な濃縮の例

高線量を確認した場所(排水溝の破損箇所)



濃縮の顕著な例-茨城県守谷市

守谷市雨水・下水幹線



住宅地からの雨水の処理



公園は雨天時の調整池として活用



雨天時



これまでに測定してきた守谷市内の
地点

市役所周辺(大柏)・プロムナード水路・城址公園・愛宕中裏手・郵便局・松ヶ丘・五反田川・みずき野・けやき台公園など...

放射性セシウムが集積している人工河川

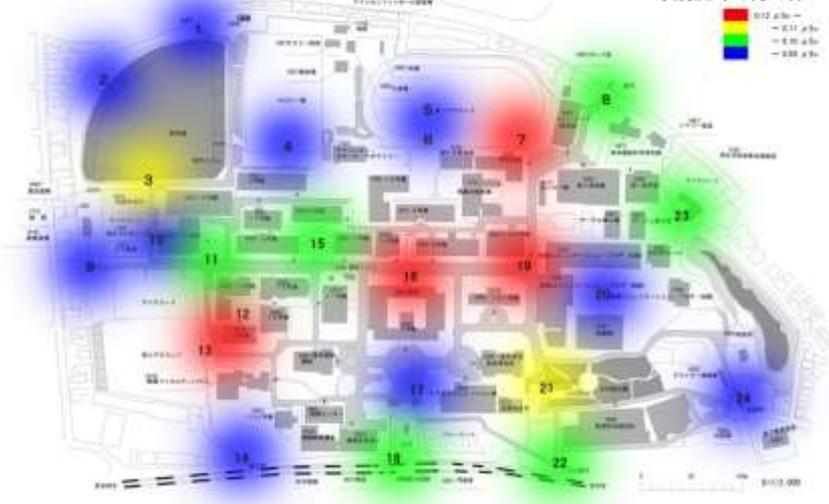
親水環境として整備されている



雨風による放射性物質の移動

駒場 | キャンパス空間線量マップ

平成23年 7月 1日



事故から4ヶ月後

駒場 | キャンパス空間線量マップ

平成24年 9月 4日



事故から1年6ヶ月後

空間線量率の減衰は放射性物質(主に ^{134}Cs)よりも早い。

舗装されている場所は、想定以上に速く雨風によって移動している。
「天然の除染」とも考えられる

国道6号線 道路脇(大熊町)



国道6号線は全面開通していますが、路肩は注意

過去最高の空間線量率(1.06 mSv/h@5 cm)



大熊町長者原地区

国道6号線から50m内側に入った場所

雨水で濃縮したと思われるが、明らかな痕跡がない

この草の上を踏んだ瞬間に車内の線量計が一斉に反応

20 μ Sv/h → 28 μ Sv/h

集まっているところ、見つけられますか？

- ▶ スポットを見つけるのは意外に難しいんです。
- ▶ 実際にこの場でトライしてみましよう。



まだらに散る放射性セシウム-線量マッピング

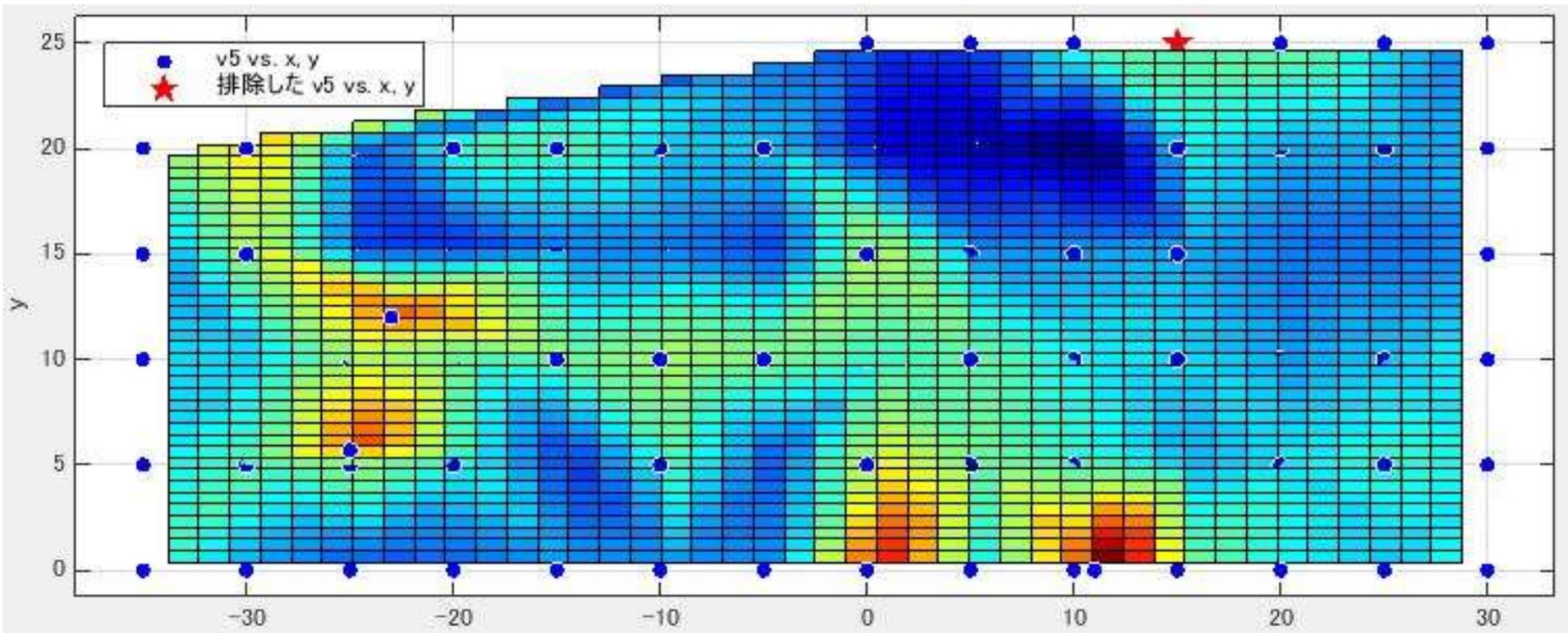
約2500m²(濃縮などの特異性がある公園ではない)



公園の中の線量のばらつき-線量マッピング測定

地上5cmにおける空間線量率(相対表示)

低  高

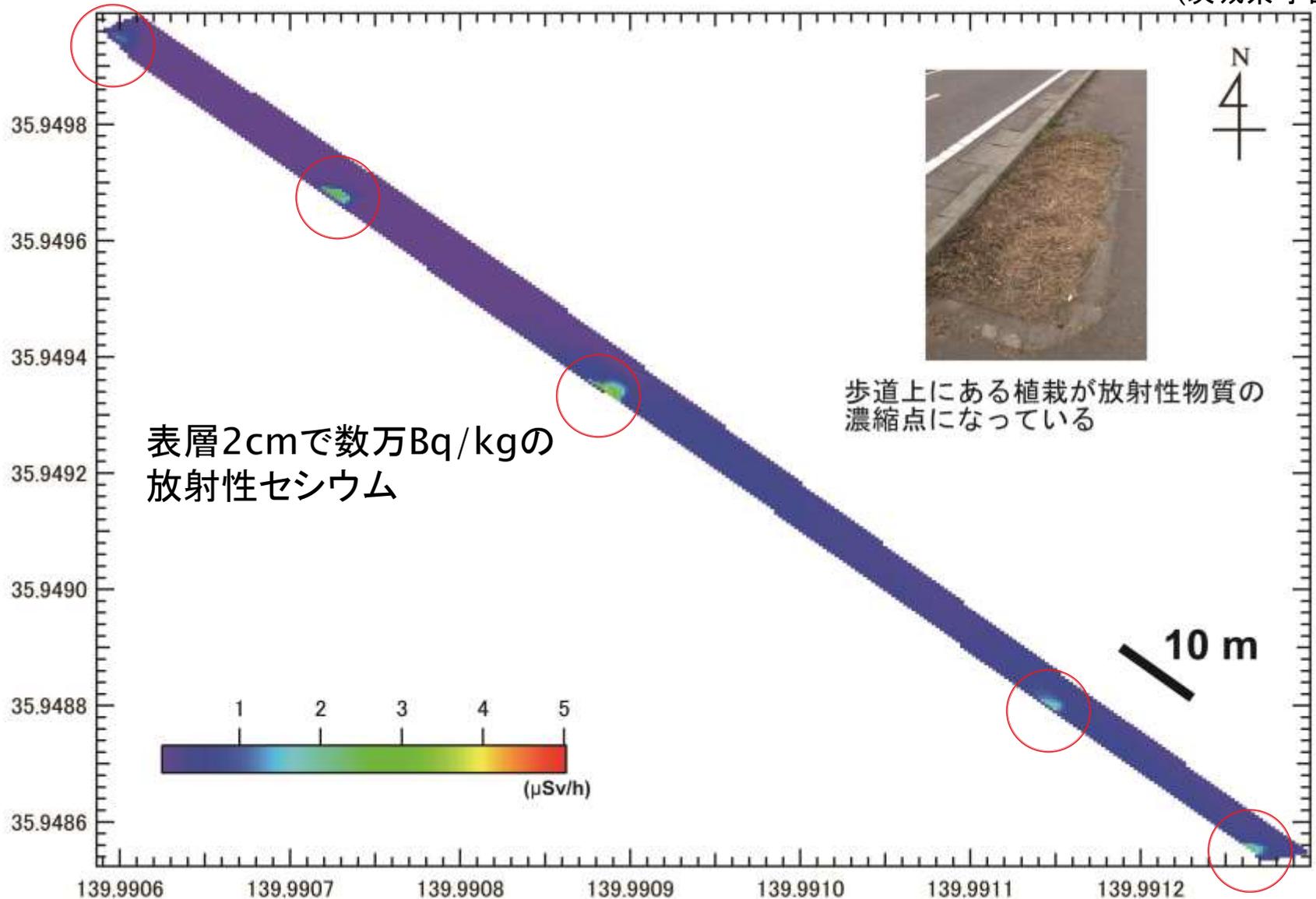


僅かに削れている場所や
吹き溜まりに、放射性物質
が集積しやすい



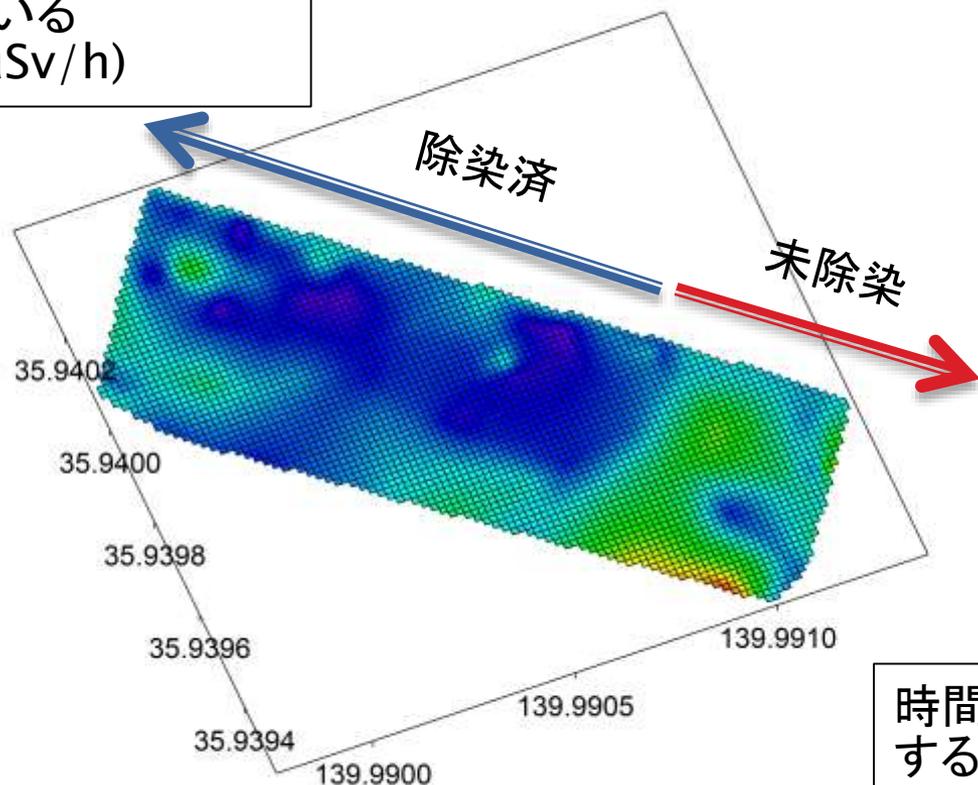
歩道上の植栽には放射性物質が濃集

(茨城県守谷市)



除染の効果の検証

緑色以上が除染基準を
超過している
($>0.23\mu\text{Sv/h}$)



公園の放射性セシウムの分布

高空間分解能を有した空間線量率
測定を行うことで除染の効果を検証

現在、様々な場所でこのような
マッピングを行っています。

(例)
文京区内の公立小学校
茨城県守谷市内の公園・水路
大学キャンパス内

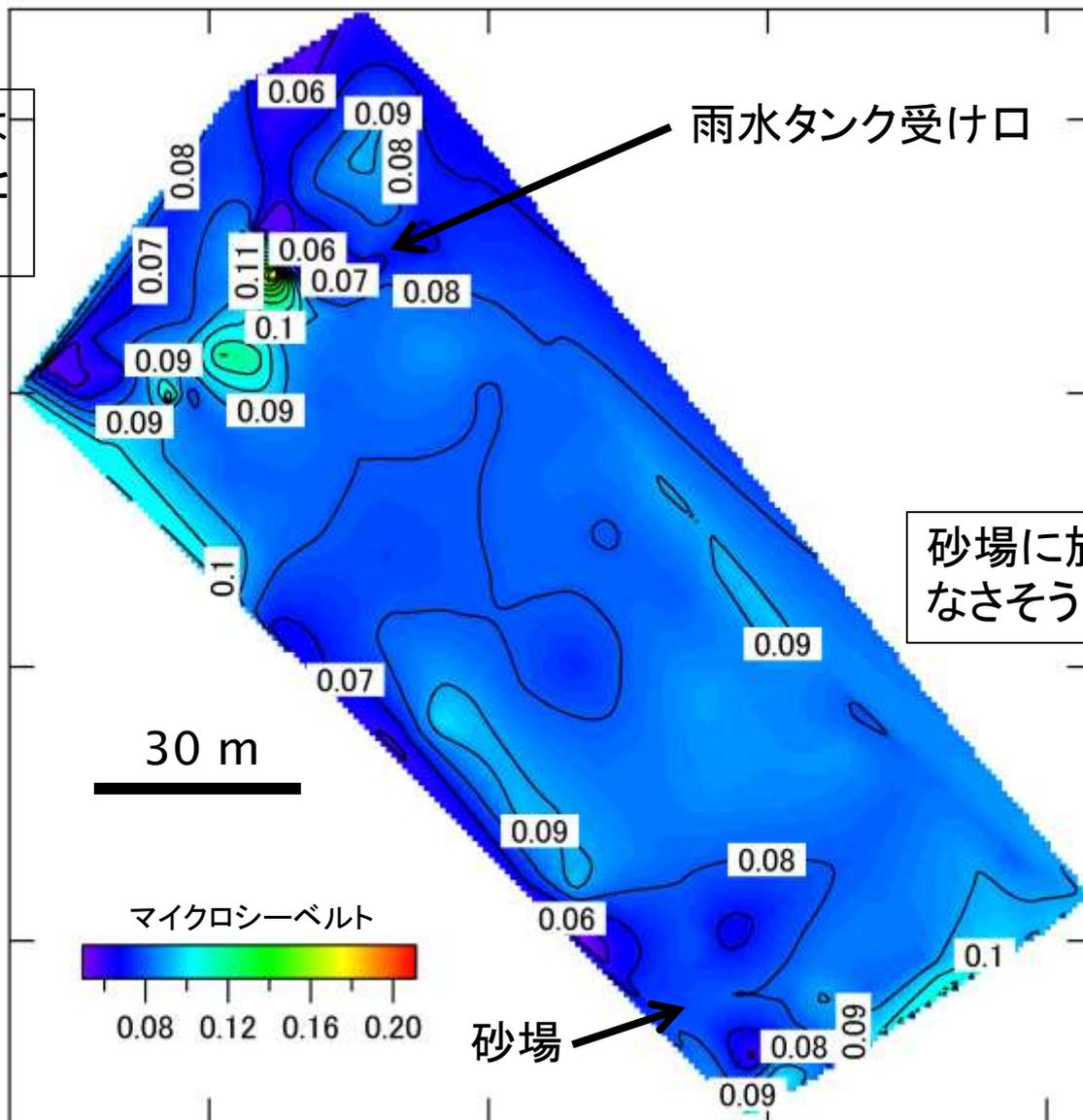


時間とともにその場所の線量が変化
する様子をトレース

(例)
あのホットスポットは今後どうなる？
この場所は除染が必要？不必要？

文京区の公立小学校のグラウンド

雨水を流すところでは
放射性物質がちょっと
集まっていそう

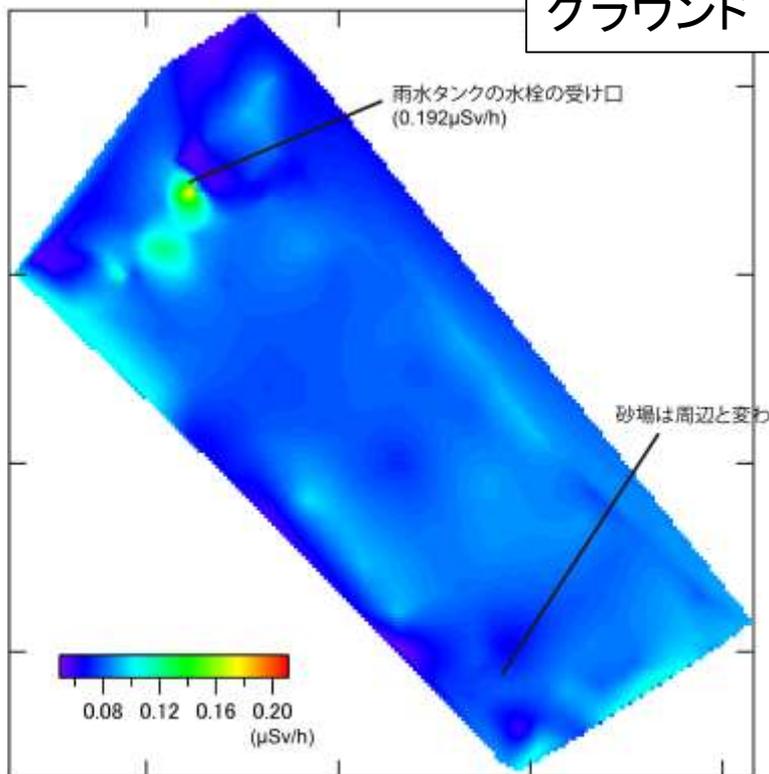


砂場に放射性物質は
なさそう

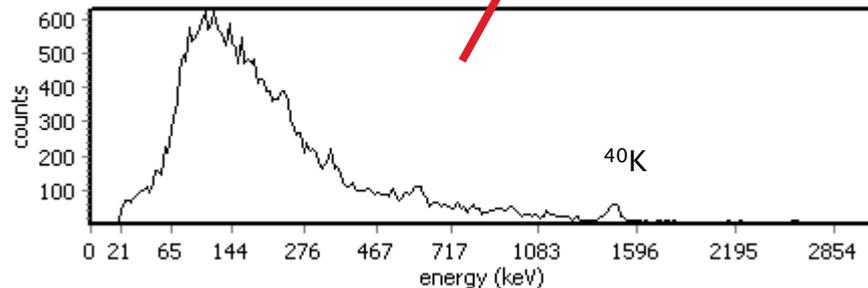
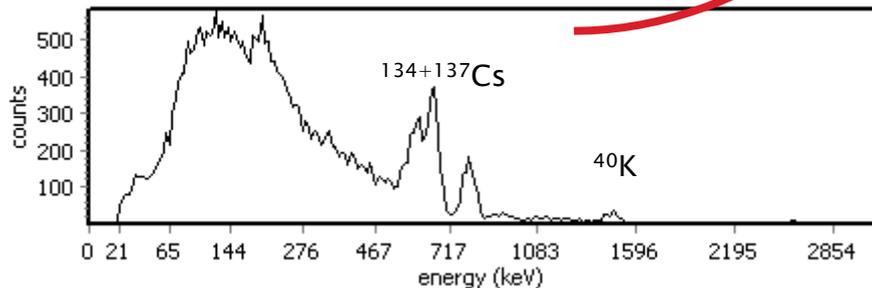
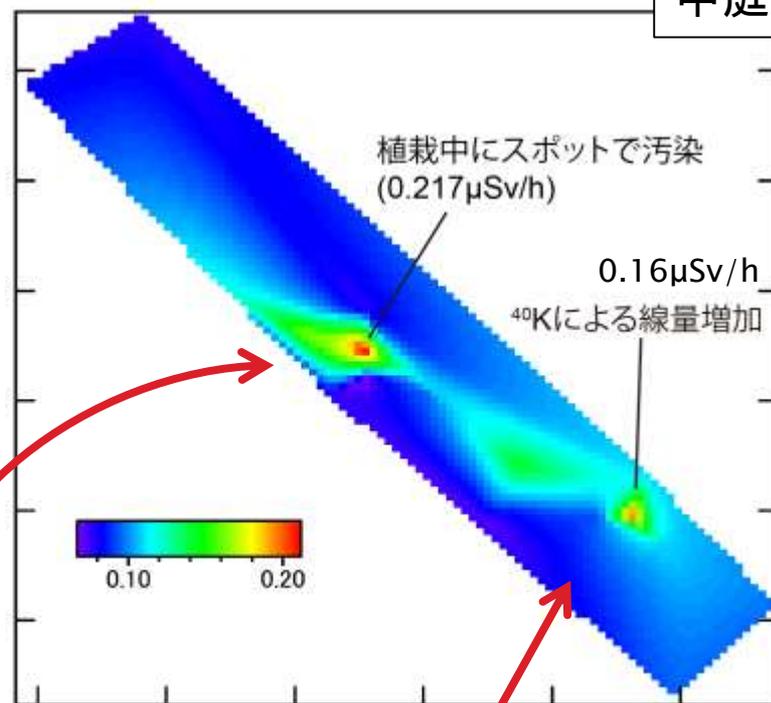
都内小学校での測定(同じ値でも意味は違う)

低線量の場合、NORMからの寄与が無視できない

グラウンド



中庭



課題(化学分野#2)

- ▶ 本講義では茨城県守谷市の「都市濃縮」を例に挙げ、雨樋の「ホットスポット」から河川への「ホットエリア」へと放射性物質が移行している状況を解説した。
- ▶ 拡散が進めば進むほど、濃縮も進行する(ところもある)。拡散・濃縮の速度は局所的な環境に依存するので、指標を立てにくい。
- ▶ 放射性セシウムの化学的性質を考慮した上で、1)都市濃縮が発生しやすい地形に居住している方には、どのような被ばく管理体制が有効であるか、2)帰還困難区域内の将来をどう考えたらよいか、考察してみてください。