



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>

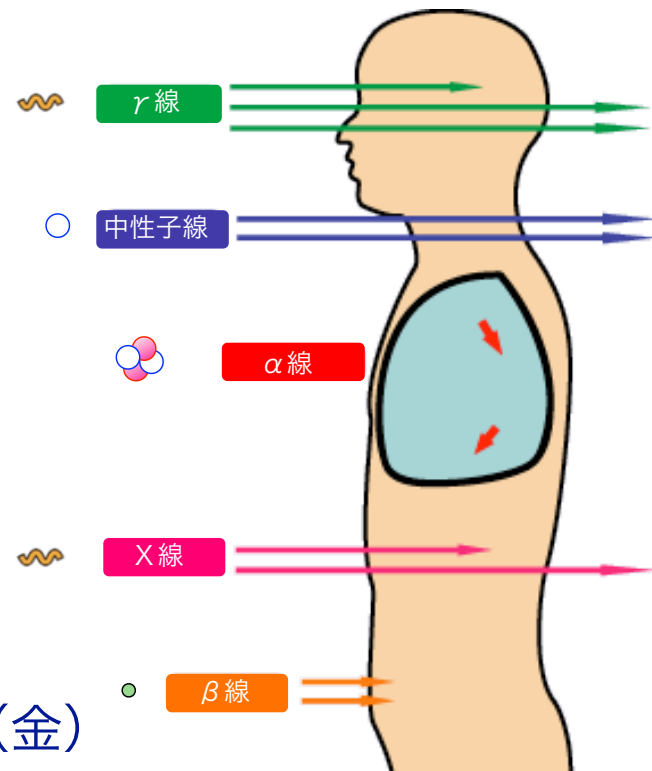
# 2020年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

## 放射線

を  
科学的に  
理解する

金曜5限  
@ Zoom

2020 / 11 / 6 (金)



第7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 (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
  - 放射性物質は「元素」として振る舞う＝化学
- ▶ フィールドワーク/装備と服装
- ▶ 落ちてきた放射性物質、どこへいく？
  - 駒場1キャンパスを例に

# 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	$3.4 \times 10^{18}$	$3.5 \times 10^{18}$	$4.4 \times 10^{18}$	$1.1 \times 10^{19}$
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	$2.2 \times 10^{15}$	$2.3 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^{14}$	$5.0 \times 10^{15}$
Te-132	$2.5 \times 10^{16}$	$5.7 \times 10^{16}$	$6.4 \times 10^{15}$	$8.8 \times 10^{16}$

使用している燃料(UO<sub>2</sub> 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(UO<sub>2</sub> or MOX)、経過時間、放出経路によって値は異なる

Ru-103	$2.5 \times 10^{09}$	$1.8 \times 10^{09}$	$3.2 \times 10^{09}$	$7.5 \times 10^{09}$
Ru-106	$7.4 \times 10^{08}$	$5.1 \times 10^{08}$	$8.9 \times 10^{08}$	$2.1 \times 10^{09}$
Zr-95	$4.6 \times 10^{11}$	$1.6 \times 10^{13}$	$2.2 \times 10^{11}$	$1.7 \times 10^{13}$
Ce-141	$4.6 \times 10^{11}$	$1.7 \times 10^{13}$	$2.2 \times 10^{11}$	$1.8 \times 10^{13}$
Ce-144	$3.1 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^{13}$	$1.4 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^{13}$
Np-239	$3.7 \times 10^{12}$	$7.1 \times 10^{13}$	$1.4 \times 10^{12}$	$7.6 \times 10^{13}$
Pu-238	$5.8 \times 10^{08}$	$1.8 \times 10^{10}$	$2.5 \times 10^{08}$	$1.9 \times 10^{10}$
Pu-239	$8.6 \times 10^{07}$	$3.1 \times 10^{09}$	$4.0 \times 10^{07}$	$3.2 \times 10^{09}$
Pu-240	$8.8 \times 10^{07}$	$3.0 \times 10^{09}$	$4.0 \times 10^{07}$	$3.2 \times 10^{09}$
Pu-241	$3.5 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{12}$	$1.6 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{12}$
Y-91	$3.1 \times 10^{11}$	$2.7 \times 10^{12}$	$4.4 \times 10^{11}$	$3.4 \times 10^{12}$
Pr-143	$3.6 \times 10^{11}$	$3.2 \times 10^{12}$	$5.2 \times 10^{11}$	$4.1 \times 10^{12}$
Nd-147	$1.5 \times 10^{11}$	$1.3 \times 10^{12}$	$2.2 \times 10^{11}$	$1.6 \times 10^{12}$
Cm-242	$1.1 \times 10^{10}$	$7.7 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{11}$
I-131	$1.2 \times 10^{16}$	$1.4 \times 10^{17}$	$7.0 \times 10^{15}$	$1.6 \times 10^{17}$

# 放出された核種と放出量の予測(3)

使用している燃料(UO<sub>2</sub> or MOX)、経過時間、放出経路によって値は異なる

I-132	<u>1.3 × 10<sup>13</sup></u>	<u>6.7 × 10<sup>06</sup></u>	<u>3.7 × 10<sup>10</sup></u>	<u>1.3 × 10<sup>13</sup></u>
I-133	<u>1.2 × 10<sup>16</sup></u>	<u>2.6 × 10<sup>16</sup></u>	<u>4.2 × 10<sup>15</sup></u>	<u>4.2 × 10<sup>16</sup></u>
I-135	<u>2.0 × 10<sup>15</sup></u>	<u>7.4 × 10<sup>13</sup></u>	<u>1.9 × 10<sup>14</sup></u>	<u>2.3 × 10<sup>15</sup></u>
Sb-127	<u>1.7 × 10<sup>15</sup></u>	<u>4.2 × 10<sup>15</sup></u>	<u>4.5 × 10<sup>14</sup></u>	<u>6.4 × 10<sup>15</sup></u>
Sb-129	<u>1.4 × 10<sup>14</sup></u>	<u>5.6 × 10<sup>10</sup></u>	<u>2.3 × 10<sup>12</sup></u>	<u>1.4 × 10<sup>14</sup></u>
Mo-99	<u>2.6 × 10<sup>09</sup></u>	<u>1.2 × 10<sup>09</sup></u>	<u>2.9 × 10<sup>09</sup></u>	<u>6.7 × 10<sup>09</sup></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。

(再掲)このタンクの中にあるトリチウム、多くても**数グラム**



このタンクの中にあるトリチウム、だいたい**数千兆ベクレル**



# (復習)比放射能...重さあたりの放射能

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

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

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

- ▶  $^{137}\text{Cs}$ の放出推定値は  $1.5 \times 10^{16}$  Bq、つまり  g分
- ▶  $^{131}\text{I}$ の放出推定値は  $1.6 \times 10^{17}$  Bq、つまり  g分

ただが「数キロ」分の放射性物質のために、**何兆円**もの回収コスト

環境中では、(放射性かどうかはさておき)、**元素の性質**が重要(=化学)

# Csの化学的性質

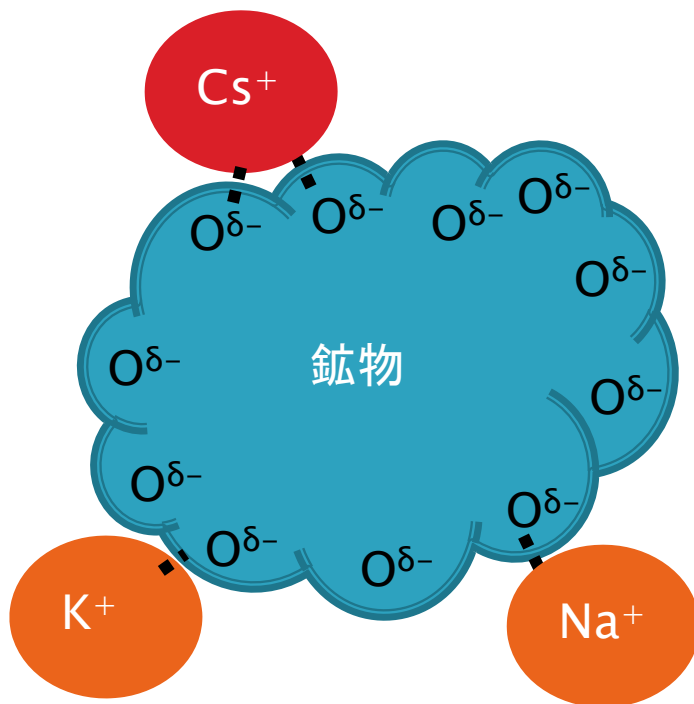
- ▶ 原子番号55、[Xe]  $6s^1$ 、アルカリ金属、イオン化傾向 **大**、典型元素
  - 他のアルカリ金属と似た挙動(環境中では単体で存在するわけではない)



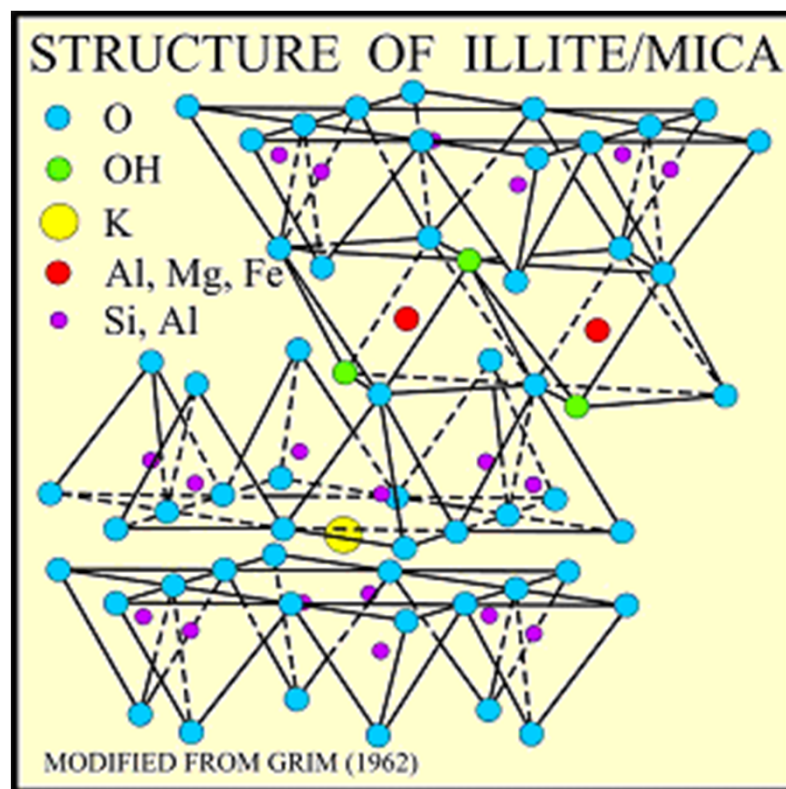
# 環境中ではCsはどこにいる？

- ▶ CsはCs<sup>+</sup>として存在
  - Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>と類似の挙動

イメージ



鉱物のひとつ、イライト/雲母の場合



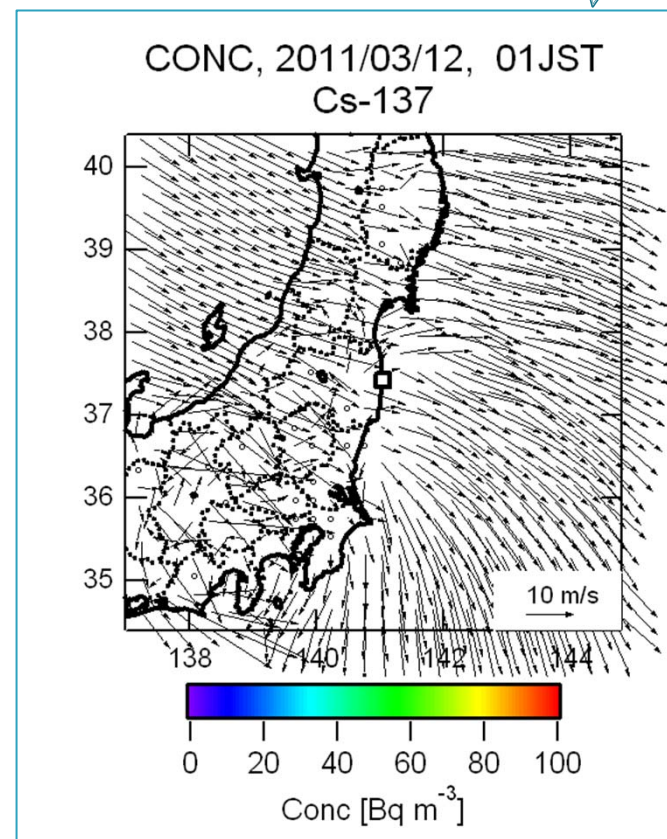
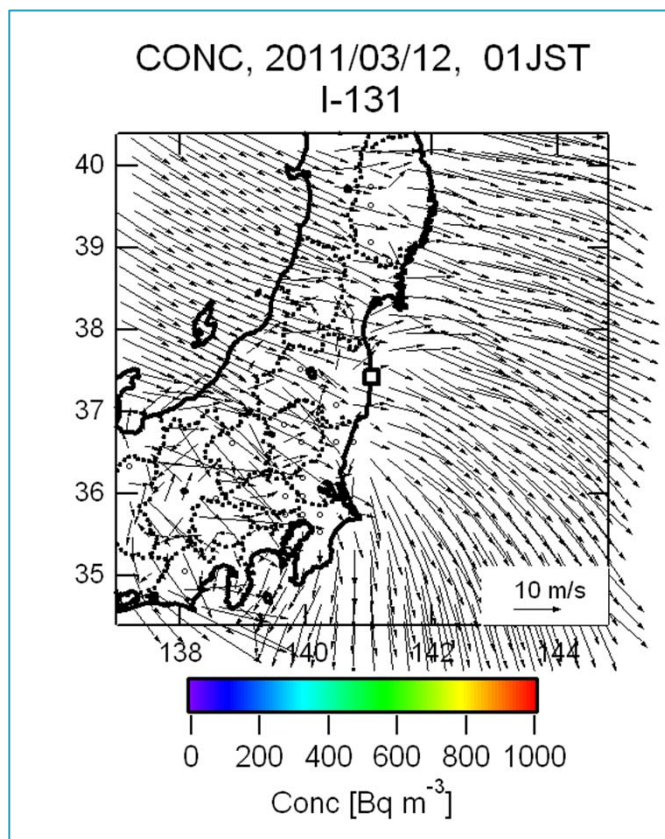
環境中では、降ってきた<sup>137</sup>Csは土の表面に存在している(=除染のヒント)

# 環境中に拡散された放射性物質

# 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

どんな化学種で飛んでいるか想像してみてください



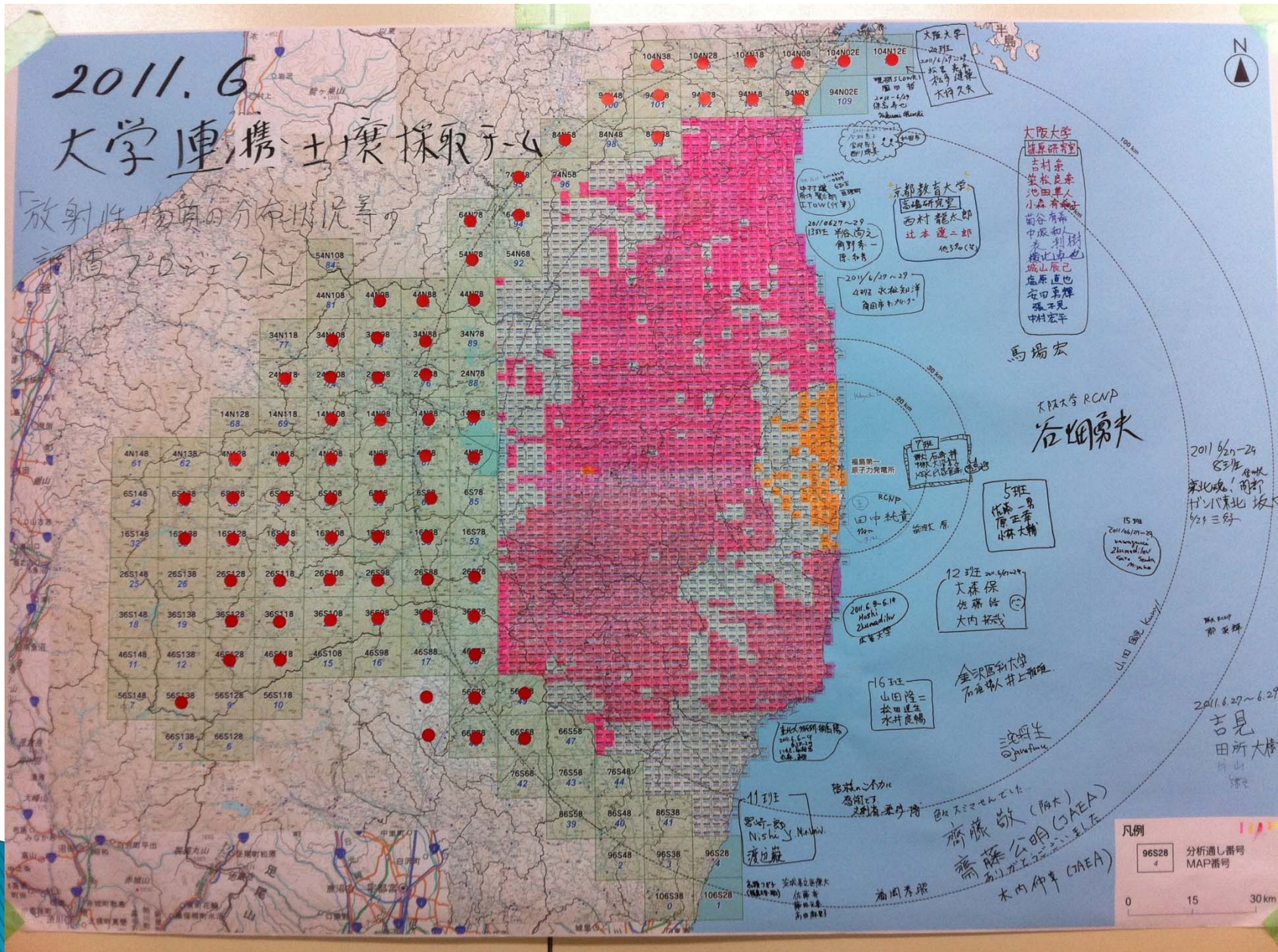
# 駒場で収集した雨水中の<sup>131</sup>I (2011年3月22-23日)

液体シンチレーションカウンタ\*による測定

		<sup>131</sup> I補正值(Bq/kg)	規制値との比
水たまり	6号館前	7700	25.7
	6-15,16号館間	2800	9.5
	15,16号館前	11000	37.1
	ドライエリア	7400	24.6
水道水	RI実験施設	N.D.	-
雨	1986年5月(!)の東京	500前後	

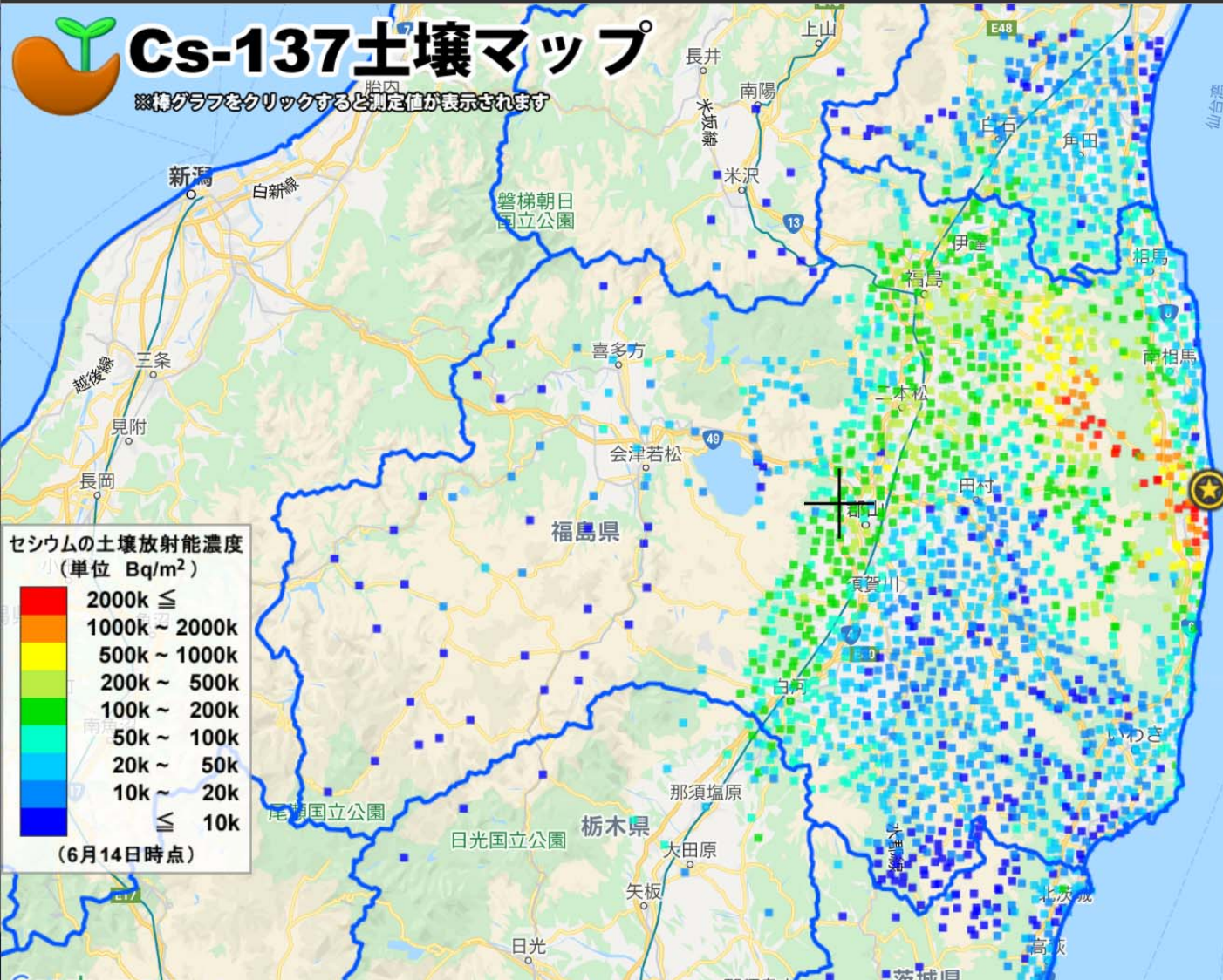
\*(復習)ヨウ素は崩壊するとき、ベータ線とガンマ線を放出する。液体シンチレーションカウンタはベータ線測定器。ベータ線がシンチレーターにぶつかると光を放つ。その光をカウントしてあげる機械。

# 文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)



# 測定結果 (409人で採取、340人で分析)

原発からの距離 63 km   空間線量   Cs-134   **Cs-137**   I-131   GE



地図   航空写真



ここで詳細が見られます





# 事故直後の様子を少しだけ

2011年4月初旬

# 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)

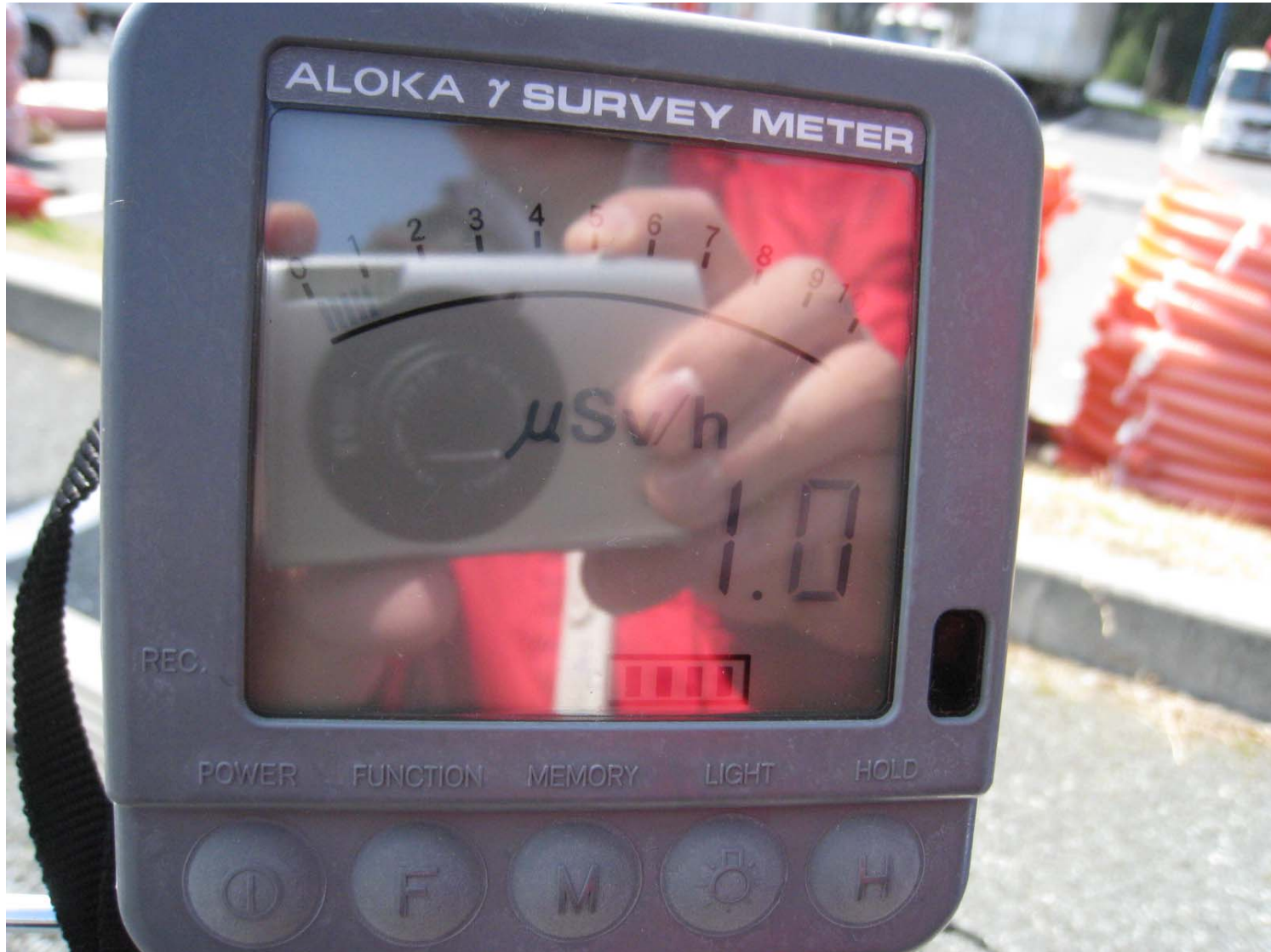


# 福島県いわき市内(福島第1原子力発電所まで約45km)



2011年4月当時

# Jビレッジ(第1原発の作業員の待機所)



2011年4月当時

# Jビレッジ正面玄関



# 2020年3月のビレッジ (トーチリレーの出発地点)



# 福島第2原子力発電所前(第一原子力発電所まで10km)



2011年4月当時

# 福島第1原子力発電所まで4.1 km



2011年4月当時



# 福島第一原子力発電所まで1.0 km



2011年4月当時

# 福島第一原子力発電所正門前の駐車場



2011年4月当時

# 原発周辺の様子-浪江町請戸地区(1)



## 原発周辺の様子-浪江町請戸地区(2)



# 動画



# 福島第一原子力発電所から8km北地点(12.4uSv/h)



# 浪江-南相馬市境界付近



# フィールドワーク



暑い！ただただ暑い！



# 壁に張り付いて水の採取



# 水汲み



# 採水



# 海に出てお魚釣り



# 検体の採取

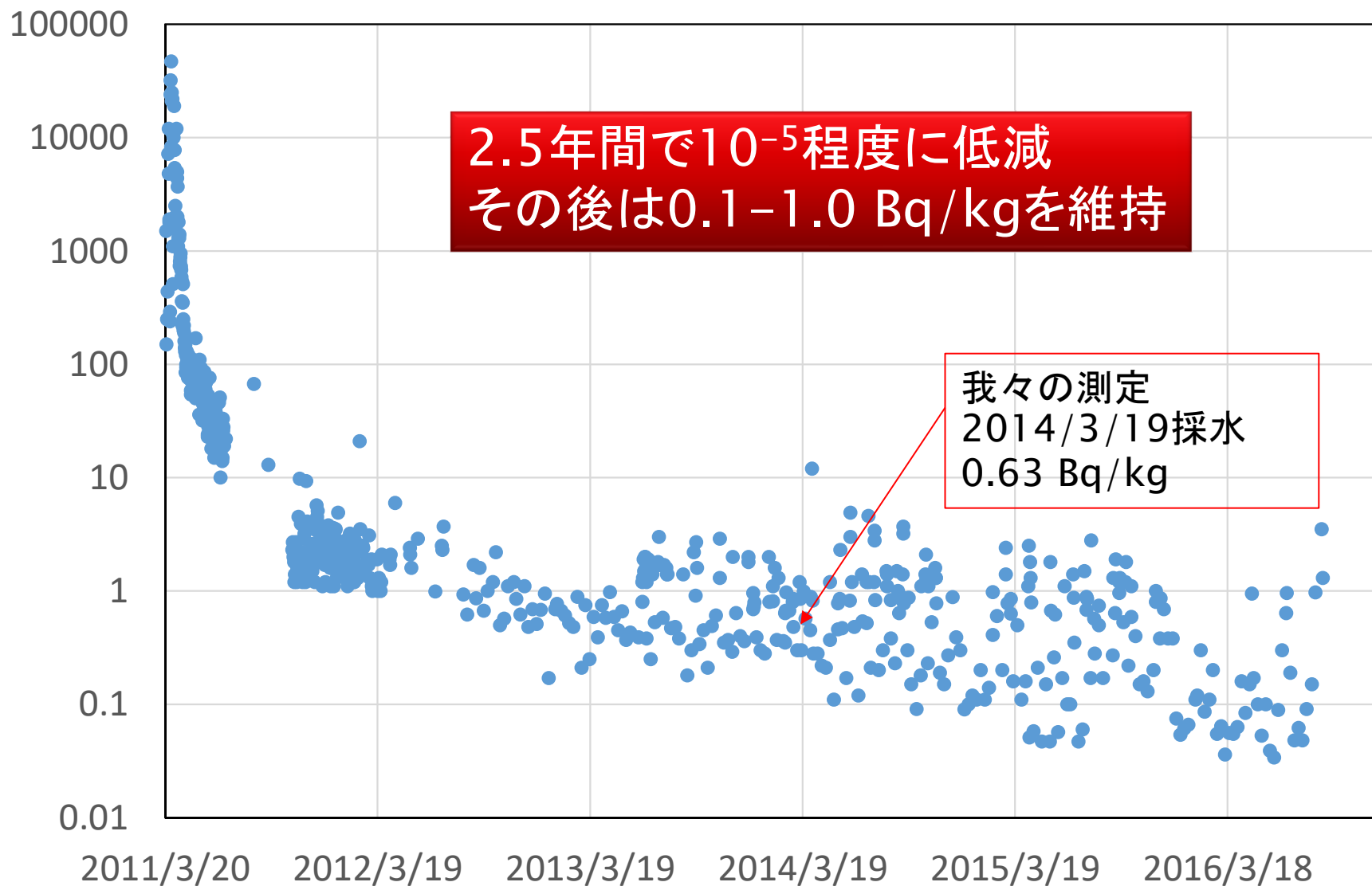


# 事故後3年後までの推移

(環境)

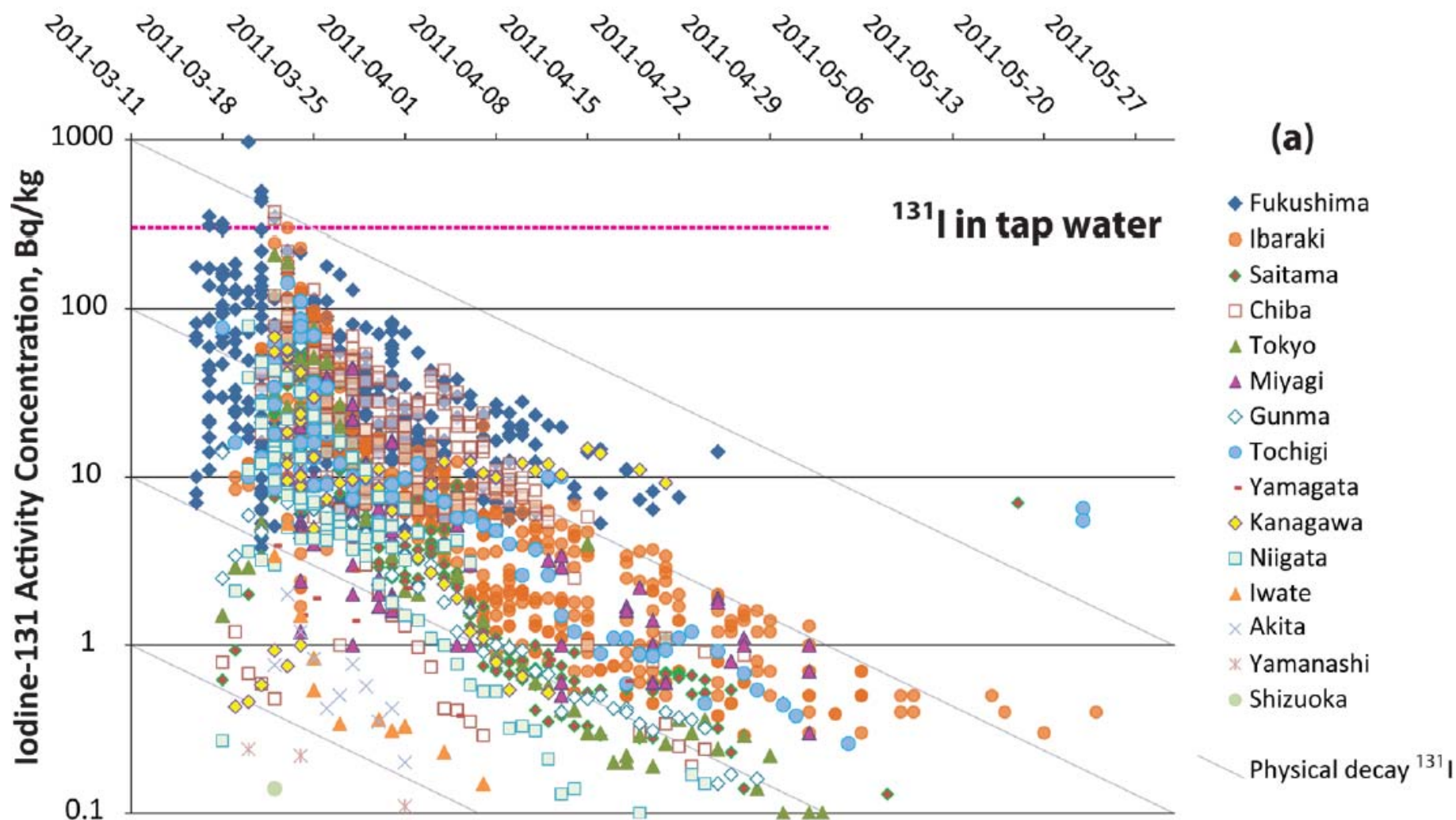
# 原発港湾海水中の $^{137}\text{Cs}$ 濃度の推移

原発港湾海水における $^{137}\text{Cs}$  (Bq/L)



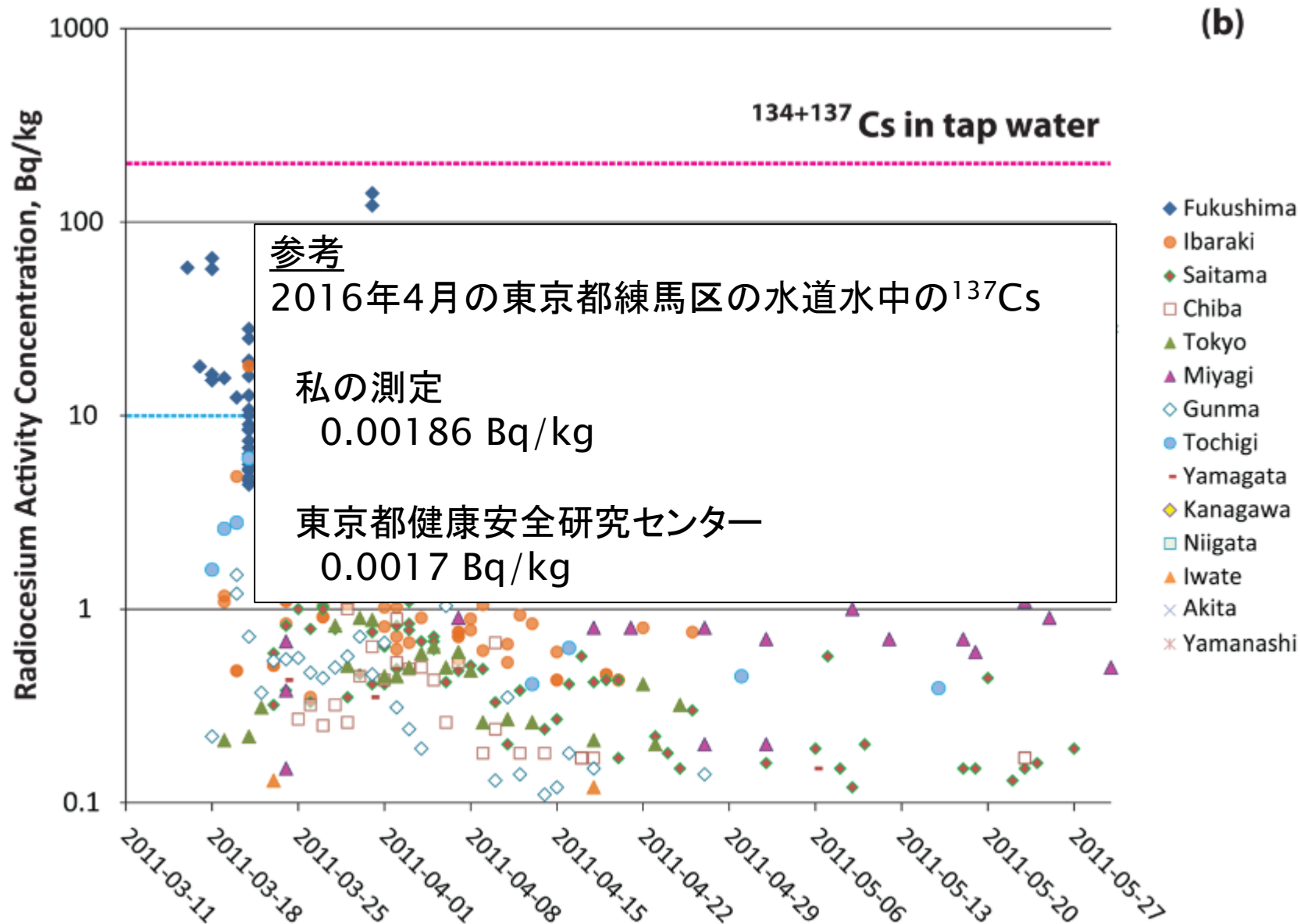


# 福島原発事故直後の水道水中の $^{131}\text{I}$ \*



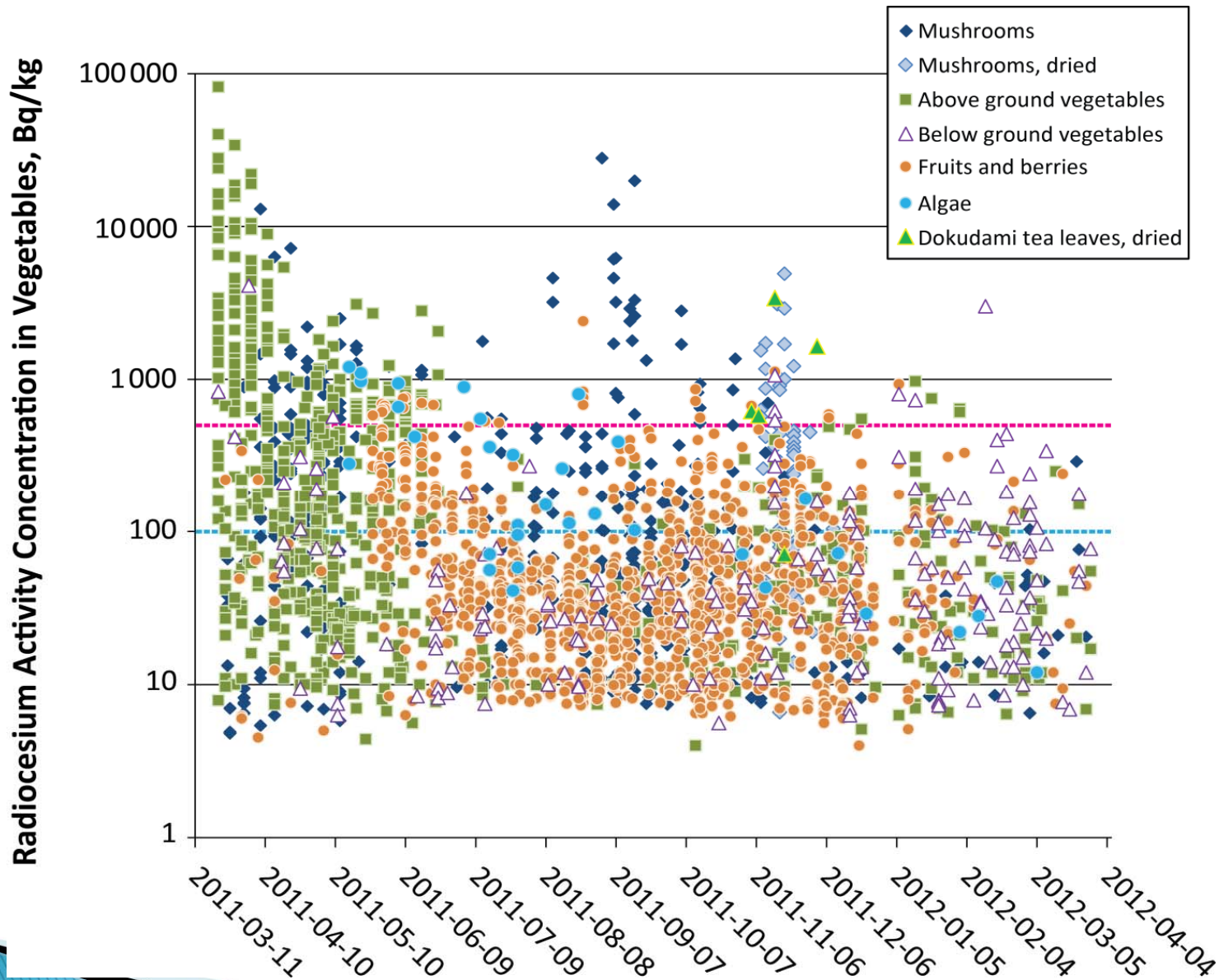
\*S. Merz, K. Shozugawa, G. Steinhauser, Analysis of Japanese Radionuclide Monitoring Data of Food Before and After the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 49(5), 2875–2885, 2015.

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

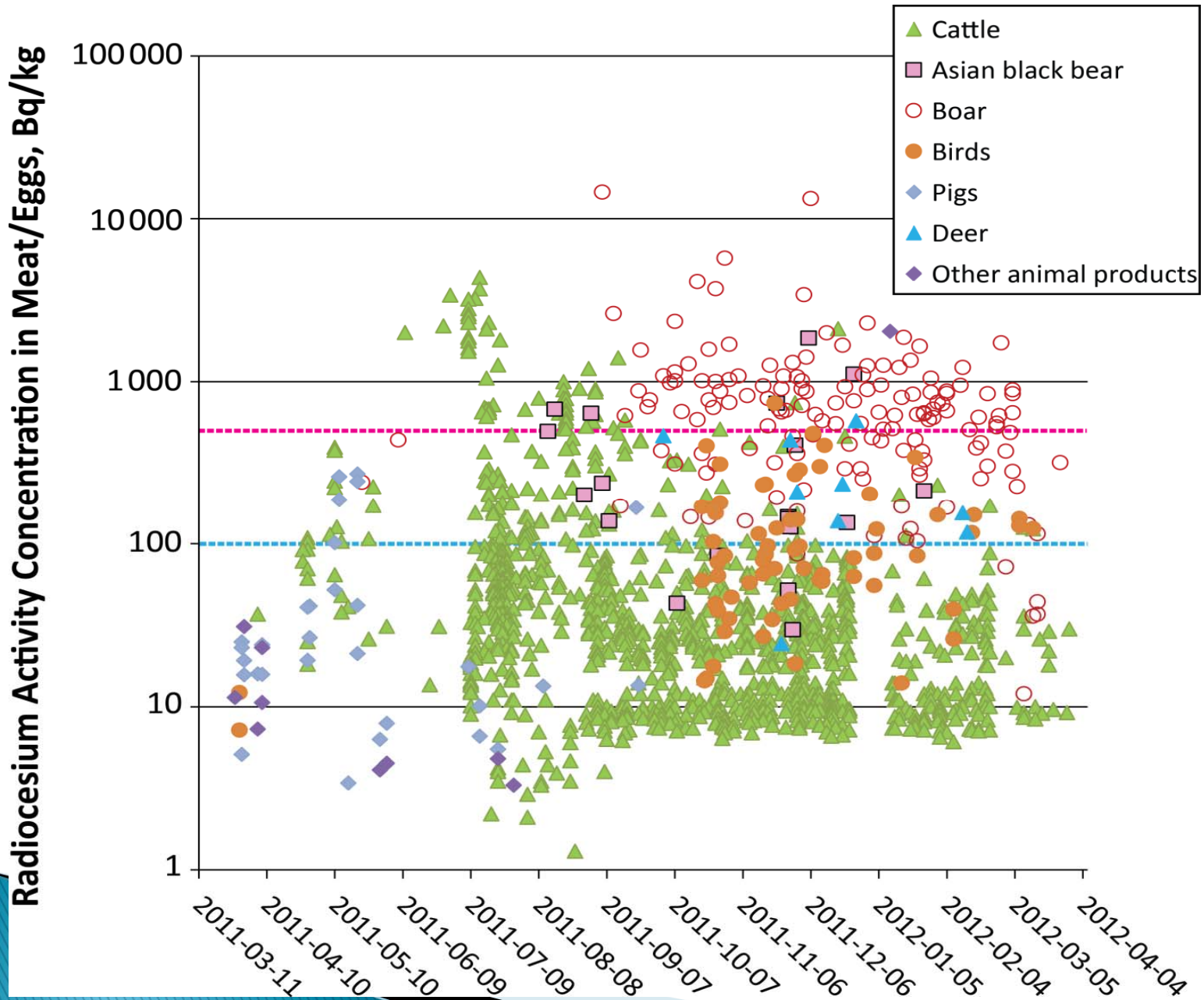


\*S. Merz, K. Shozugawa, G. Steinhauser, Analysis of Japanese Radionuclide Monitoring Data of Food Before and After the Fukushima Nuclear Accident, *Environmental Science & Technology*, 49(5), 2875–2885, 2015.

# 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)



私たちの測定例(2013-2016年の調査)

## 山の中の食べ物は注意が必要

山の中のきのこ、いのししなどには、  
放射性セシウムが多く含まれることがある

基準値 100 Bq/kg



山に生えていたきのこ  
414 Bq/kg(浪江町)  
4670 Bq/kg(浪江町)



猪ジャーキー  
37.6 Bq/kg(伊豆)

私たちの測定例(2013-2016年の調査)

## 福島県産の食材の例



見知らず柿(会津市)  
0.39 Bq/kg



りんご(福島市)  
2.0 Bq/kg



海藻(福島市)  
不検出  
( $< 1.7$  Bq/kg)

基準値(100 Bq/kg)を超えるものは、ほとんどありません

# 私たちの測定例(2013-2016年の調査)

## 飲み物は？



牛乳の基準値: 50 Bq/kg

- 明治乳業「おいしい牛乳」 0.33 Bq/kg
- 酪王乳業「酪王牛乳」 0.094 Bq/kg
- 福島乳業「福ちゃんのおいしい牛乳」 0.32 Bq/kg



不検出

(< 0.007 Bq/kg)



不検出

(< 0.009 Bq/kg)



ココアパウダー  
0.28 Bq/kg



アクエリアス(粉)  
不検出  
(< 0.10 Bq/kg)

# 私たちの測定例(2013-2016年の調査)

## お菓子は？

基準値 100 Bq/kg



0.091  
Bq/kg



0.20 Bq/kg



不検出  
( $< 0.12$  Bq/kg)



0.99 Bq/kg



不検出  
( $< 0.045$  Bq/kg)



不検出  
( $< 0.09$  Bq/kg)



不検出  
( $< 0.25$  Bq/kg)



0.033 Bq/kg



# 私たちの測定例(2013-2016年の調査)

## ごはんは？

基準値 100 Bq/kg

白米

0.56 Bq/kg



カレー粉

0.041 Bq/kg



麺

(福島県産小麦粉使用)

不検出

(< 0.05 Bq/kg)



粉末スープ

(伊達鶏がら)

不検出

(< 0.2 Bq/kg)

# 沈着後の放射性物質の移動

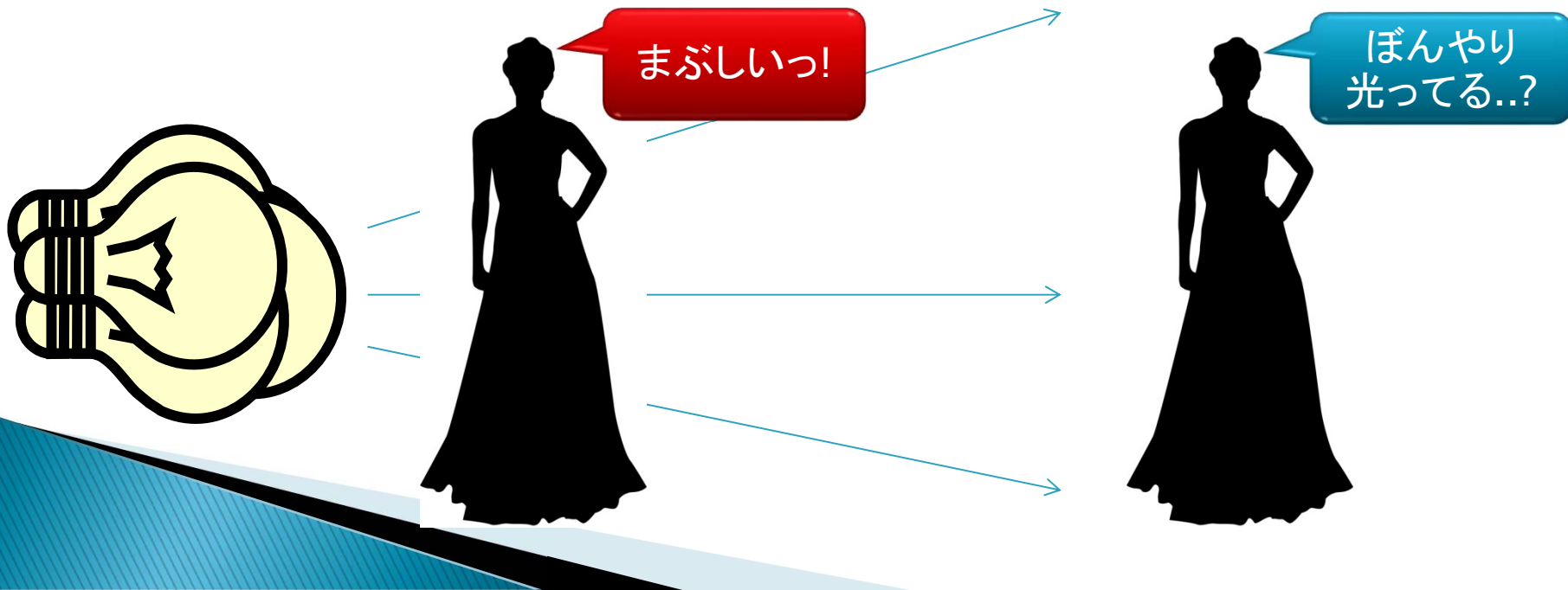
# 放射性物質が集まると、スポットができます

## ▶ 基本

- 放射性物質がたくさんあれば、被ばく量も空間線量率も上がります。

## ▶ ホットスポット(点)

- 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。



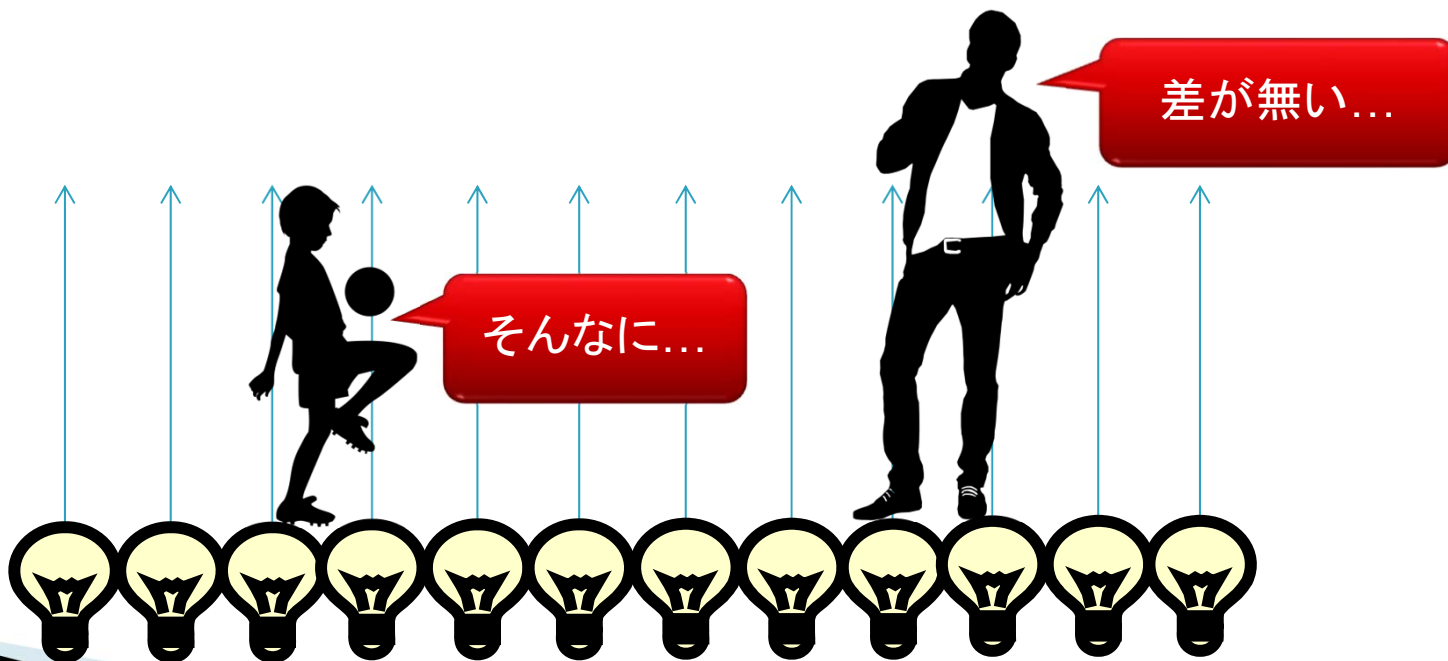
# 一様に汚染された地面からの被ばく

## ▶ 基本

- 放射性物質がたくさんあれば、被ばく量も空間線量率も上がります。

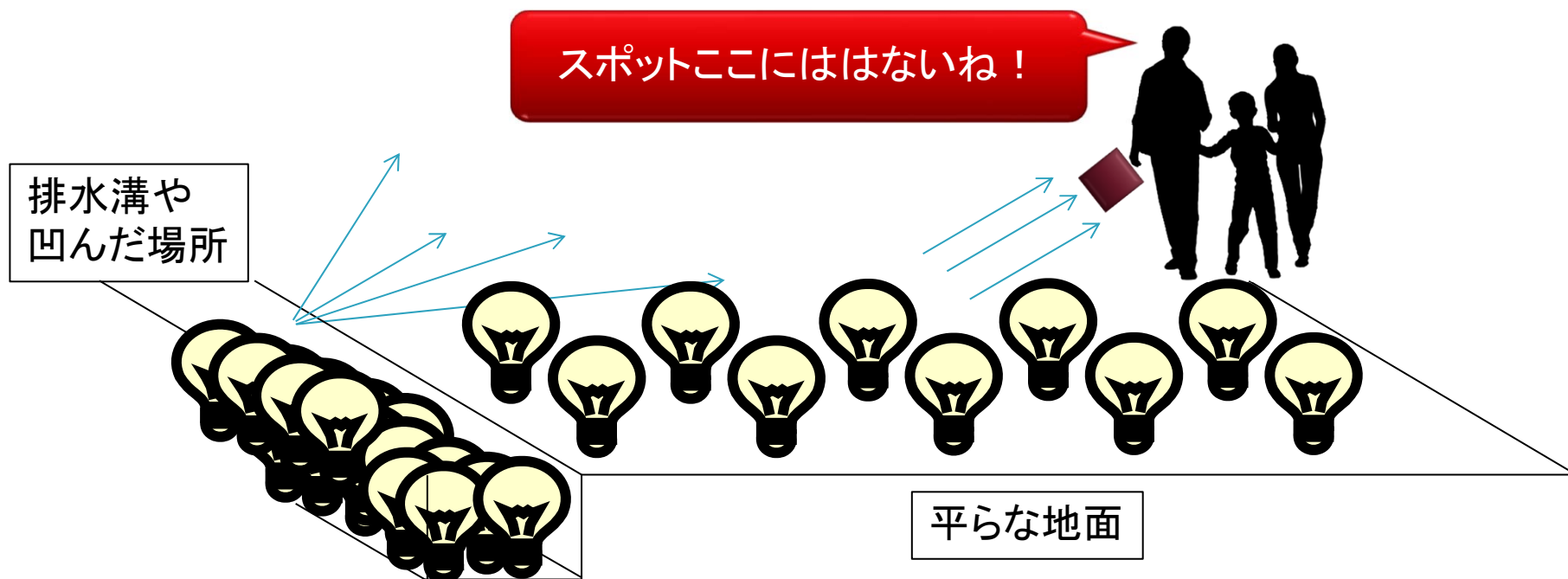
## ▶ 地面(一様の汚染)からの被ばく

- 背の高い人も低い人も、あんまり変わりません。



# 現実の世界では放射性物質は偏って存在

- ▶ ホットスポットと一様の汚染、両方が混在しています。



# ホットスポットの例



# 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



# 河川敷にたまる放射性物質



(2014年測定)

住宅地の空間線量率はすべて除染基準以下。  
放射性セシウムは河川に集積している。

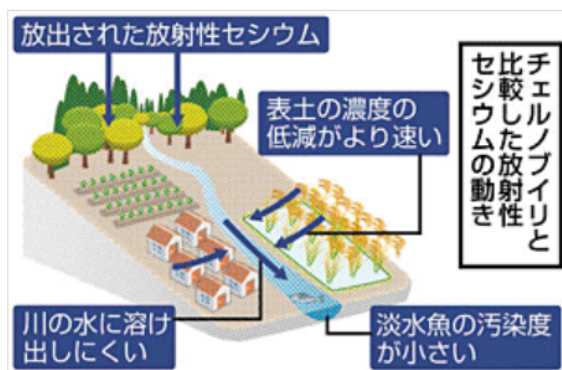


# チェルノブイリよりもガンガン移動する...なぜ？

[ホーム](#)[県内ニュース](#)[全国・海外](#)[スポーツ](#)[社説](#)[連載](#)[観光](#)[グルメ](#)[▼ 福島民友ニュース](#)

## 福島県内「環境回復」...大幅に速く チェルノブイリと『比較』

2020年10月28日 08時55分

[いいね! 288](#)[シェア](#)[ツイート](#)

筑波大や福島大、日本原子力研究開発機構（JAEA）などの研究者でつくる国際研究チームは28日、東京電力福島第1原発事故で県内（陸地）に放出された放射性物質の減少速度が旧ソ連のチェルノブイリ原発事故後よりも大幅に速いことが分かったとの研究成果を発表した。

放射性セシウムが時間の経過とともに地下に浸透していく速度はチェルノブイリ周辺の2～4倍に上った。日本はチェルノブイリ周辺よりも雨が多く地形の傾斜が急であり、水の循環が速いことに加え、日常生活が続けられたこと、除染が行われたことなども影響した。

研究チームは28日付で英科学誌ネイチャーのオンライン専門の姉妹誌「ネイチャー・レビューズ・アース&エンバイロメント」に発表。「福島環境回復を取りまとめた成果の決定版として世界に広く発信することができた」としている。

原発から80キロ圏内の陸上と阿武隈川流域での放射性物質の動きに関する210本以上の論文を検証し、地面や河川、森林での放射性物質の動きのメカニズムを調べた。水田の表土2センチの放射性セシウムの濃度は事故後3年で7～9割減少した。チェルノブイリ周辺の草地などと比べて減るのが速く、空間放射線量や河川の放射性セシウム濃度の低減にもつながった。

淡水魚汚染も小さく

出典 福島民友新聞(2020年10月28日付)

criteo 広告の停止

この広告について  
報告する

Ad choices ▶

# NHKニュース@福島県では毎日、空間線量率をお知らせ



## 課題(化学分野#2)

- ▶ 環境中に飛散した放射性物質は、化学的性質(吸着・脱離)、および物理的(半減期・雨風による移動)によって、時間とともに事故直後から状況が異なってくる。
- ▶ あなたが福島原発事故の除染の責任者であると仮定する。科学的に最も効率の良い除染の方法は何か、放射性物質の化学、物理それぞれの特徴に触れながら提案して欲しい。
  - なお、予算、人的リソースなど科学以外の要素はすべて度外視で構わない。