



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

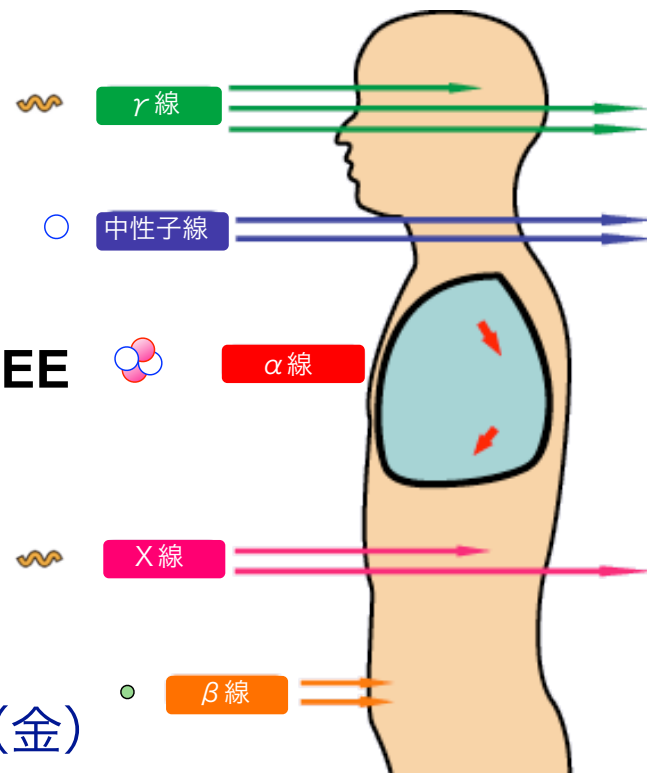
を  
科学的に  
理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)

K303教室

2015 / 11 / 6 (金)



第8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

- 9/18 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「放射線量の時間変化・濃縮と拡散」
- ▶ 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        | $3.4 \times 10^{18}$                   | $3.5 \times 10^{18}$                   | $4.4 \times 10^{18}$                   | $1.1 \times 10^{19}$                   |
| <u>Cs-134</u> | <u><math>7.1 \times 10^{14}</math></u> | <u><math>1.6 \times 10^{16}</math></u> | <u><math>8.2 \times 10^{14}</math></u> | <u><math>1.8 \times 10^{16}</math></u> |
| <u>Cs-137</u> | <u><math>5.9 \times 10^{14}</math></u> | <u><math>1.4 \times 10^{16}</math></u> | <u><math>7.1 \times 10^{14}</math></u> | <u><math>1.5 \times 10^{16}</math></u> |
| Sr-89         | $8.2 \times 10^{13}$                   | $6.8 \times 10^{14}$                   | $1.2 \times 10^{15}$                   | $2.0 \times 10^{15}$                   |
| <u>Sr-90</u>  | <u><math>6.1 \times 10^{12}</math></u> | <u><math>4.8 \times 10^{13}</math></u> | <u><math>8.5 \times 10^{13}</math></u> | <u><math>1.4 \times 10^{14}</math></u> |
| 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> |

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。



# 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

- ▶  $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ 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( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ (stable),  $^{137}\text{Cs}$ ...)
  - 燃料が $^{235}\text{U}$ で、原子炉のタイプが決まっていれば、おおよ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( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{239}\text{U}$ ...)
  - 高速増殖炉

# (参考)JCO臨界事故における核分裂生成物と放射化生成物(1)

Nakanishi *et al.*, *J. Environ. Radioactivity*, 50, 61-68, 2000

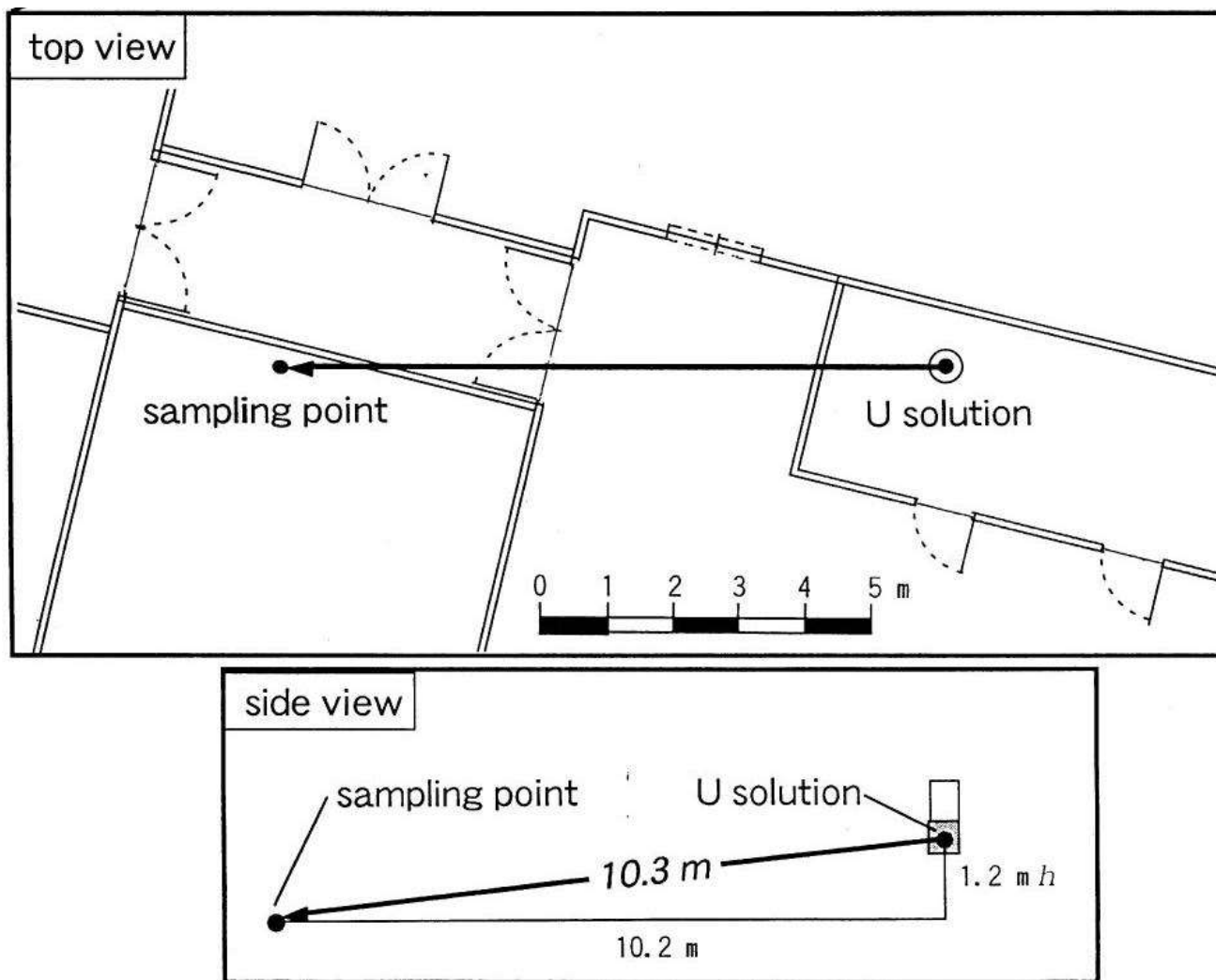











Fig. 1. The sampling location of the S-12L soil sample. The criticality phenomenon occurred in the “U solution”.

# (参考)JCO臨界事故における核分裂生成物と放射化生成物(2)

Nakanishi *et al.*, *J. Environ. Radioactivity*, 50, 61–68, 2000

Table 1

Residual neutron-induced radionuclides in the S-12L soil sample. The nuclides are arranged by half-life starting with the shortest

| Nuclide   | Half-life <sup>a</sup> | $E_{\gamma}$ (keV) <sup>a</sup> | Bq(at EOC <sup>b</sup> )/g-sample(dry) |                                 |
|---|------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
|  <sup>24</sup> Na    | 14.9590 h              | 1369                            | $(5.5 \pm 1.3) \times 10^1$            |                                 |
|  <sup>140</sup> La   |                        | 487                             | $(1.0 \pm 0.1) \times 10^0$            |                                 |
|   |                        | 816                             | $(1.1 \pm 0.3) \times 10^0$            |                                 |
|   |                        | 1596                            | $0.94 \pm 0.09 \times 10^0$            |                                 |
|   |                        | Mean                            | $(1.0 \pm 0.1) \times 10^0$            |                                 |
|  <sup>122</sup> Sb   | 2.70 d                 | 564                             | $(6.1 \pm 0.5) \times 10^{-1}$         |                                 |
|  <sup>59</sup> Fe    | 44.503 d               | 1099                            | $(3.3 \pm 0.3) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | 1292                            | $(3.3 \pm 0.3) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|  <sup>124</sup> Sb   | 60.20 d                | 603                             | $(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | 1691                            | $(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|  <sup>46</sup> Sc    | 83.79 d                | 889                             | $(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | 1121                            | $(5.0 \pm 0.2) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|  <sup>65</sup> Zn   | 244.26 d               | 1116                            | $(5.2 \pm 0.3) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | Mean                            | $(5.1 \pm 0.3) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|  <sup>134</sup> Cs | 2.062 yr               | 569                             | $(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | 605                             | $(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | 796                             | $(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | Mean                            | $(2.4 \pm 0.2) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|  <sup>60</sup> Co  | 5.2714 yr              | 1173                            | $(2.5 \pm 0.2) \times 10^{-2c}$        |                                 |
|   |                        | 1333                            | $(2.5 \pm 0.4) \times 10^{-3c}$        |                                 |
|   |                        | Mean                            | $(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-3c}$        |                                 |
|   |                        |                                 | Mean                                   | $(2.4 \pm 0.3) \times 10^{-3c}$ |



放射化



核分裂

<sup>a</sup>Firestone *et al.* (1996).

<sup>b</sup>EOC: end of criticality.

<sup>c</sup>The data are tentative because a check of the half-lives of the photopeaks must be further continued.

## (参考)放射化生成物の意味

- ▶ JOC事故では核分裂生成物も放出されたが、大量ではない
  - むしろ中性子が周辺に拡散したことが問題だった
  - 近隣住民の家の食卓にあった塩に含まれるNaが放射化した( $^{23}\text{Na} \rightarrow ^{24}\text{Na}$ )
  - 臨界した $^{235}\text{U}$ は多くても1mg程度
  
- ▶ 元素が放射化するためには、相当量の熱中性子線が必要
  
- ▶ 放射化生成物は炉の状態や性能を把握する良い指標となる

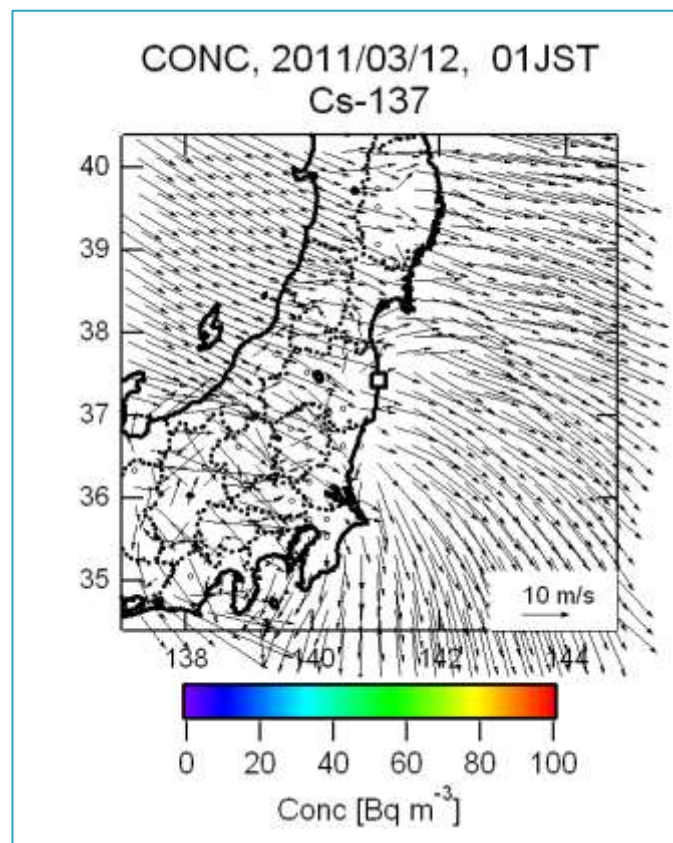
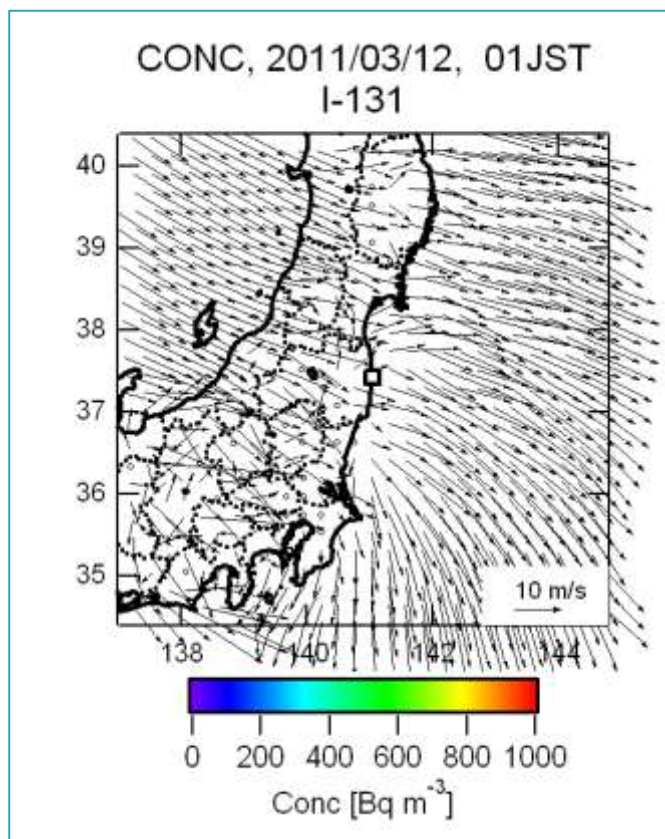
(CM)お手すきの際に、是非ご一読ください。(ウェブで公開、無料)

小森昌史, 小豆川勝見, 野川憲夫, 松尾基之,  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を指標とした福島第一原子力発電所事故に由来する放射性核種の放出原子炉別汚染評価, *分析化学*, 62(6), 475, 2013.



# 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 $^{131}\text{I}$ (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

|      |            | $^{131}\text{I}$ 補正值 |       | 規制値との<br>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 $^{131}\text{I}$ 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 $^{131}\text{I}$ 検出
  - ・ 時期・濃度ともに合理的

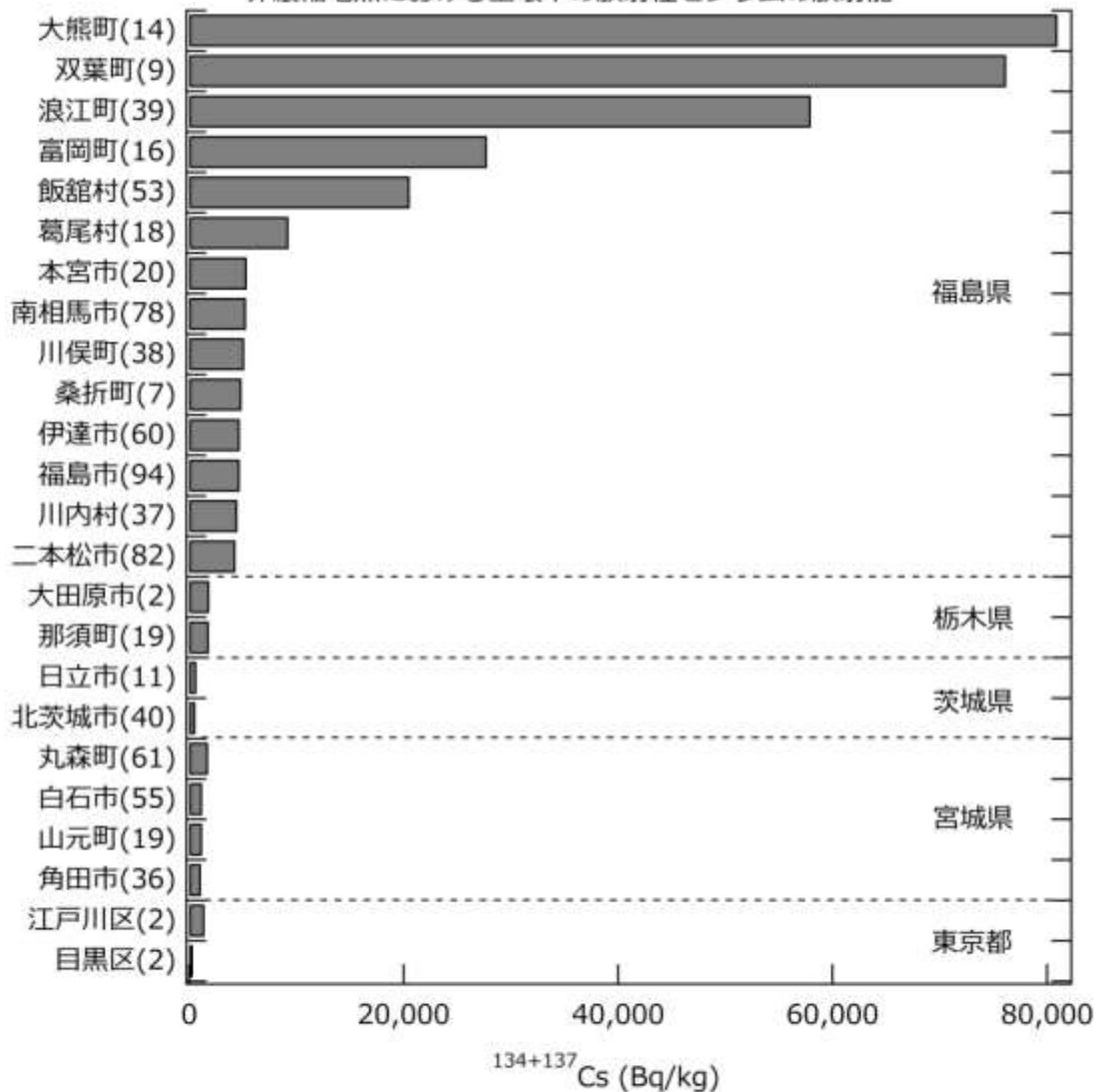


# 文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)



# 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。



# チェルノブイリ事故周辺の土壌表面

## ▶ $^{134}\text{Cs}$ + $^{137}\text{Cs}$ が卓越

- 1992年に採取したNovo Borovicky(チェルノブイリから北西150km)の土壌(事故から6年後) P.Carbol *et al*, *J. Environ. Radioactivity* 68, 27-46, 2003

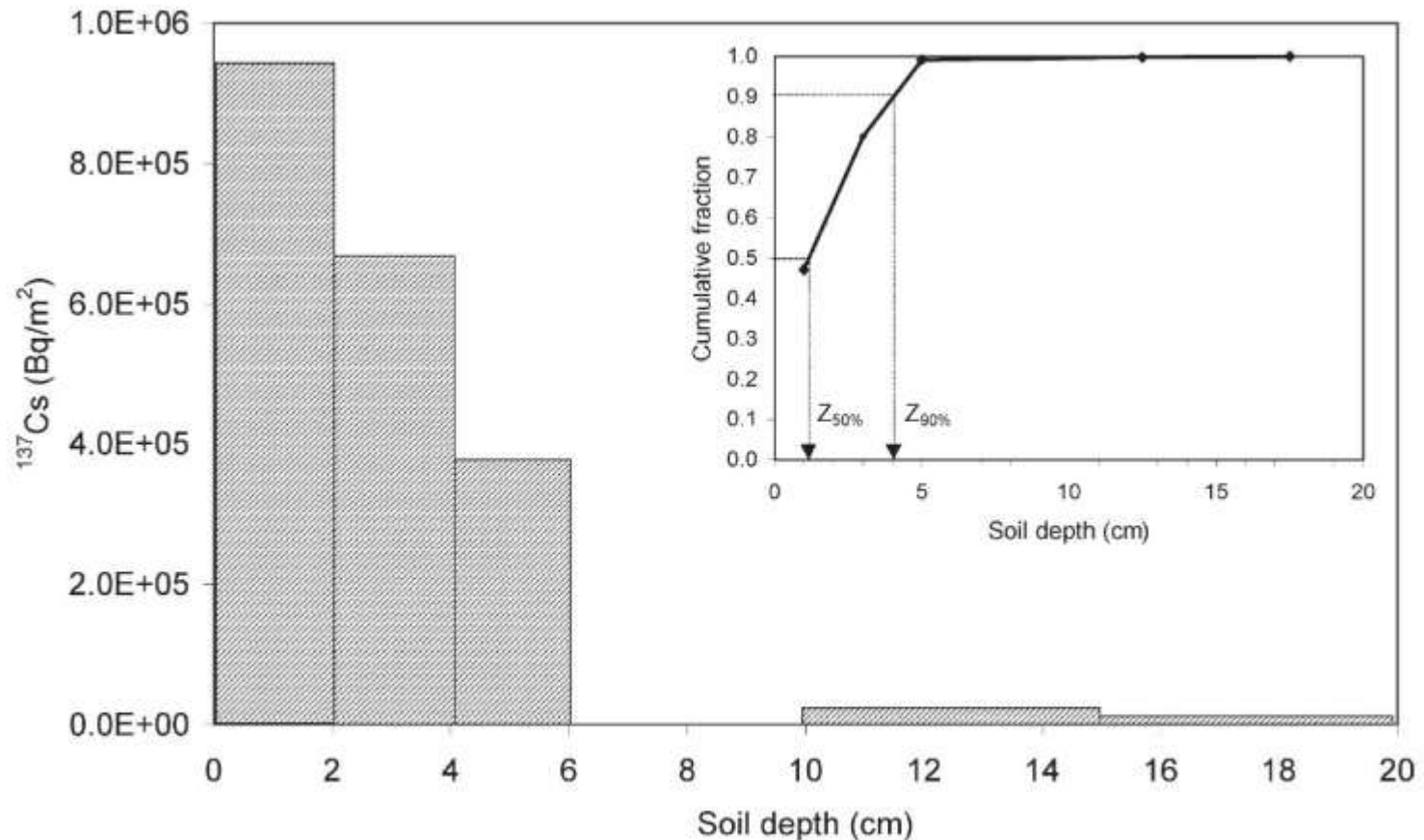


Fig. 1. Depth distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil profile. The inlaid figure shows the method used to calculate the  $Z_{50\%}$ - and  $Z_{90\%}$ -values.



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

The errors are given

放射性物質は土壌表面に強く吸着している  
日本でも同じ事なので、ここで改めて実演してみようと思います。

# 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30km)



2011年4月当時

# J-Village(第1原発の作業員の待機所)



2011年4月当時



# 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4.1km(熊川)



2011年4月当時

# 福島第一原子力発電所まで1.0km



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



# 帰還困難区域内を車両で走るとこんな感じ



2.2, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.2,

[http://www.youtube.com/watch?v=Vp\\_66fxAnZ8](http://www.youtube.com/watch?v=Vp_66fxAnZ8)

# 原発から3km圏内は嚴重警備+高空間線量



↑GM管で「OVER」表示は見たことがない

←東電によるサンプリング作業のご支援  
(2012年12月当時)



# 原発正門前の空間線量率(2011年4月10日当時)



# 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)



# 福島第一原子力発電所から8km北地点(12.4uSv/h)





# 空間線量率で示された値から「汚染」を評価する事はできない

- ▶ 多くの空間線量計にはエネルギー分解能がないので、核種を同定・定量することができない。
  - もともとは実験時に汚染検査用に使っていたもの。



日立アロカ社ウェブサイトより



HORIBA社ウェブサイトより



原子炉から取り出したサンプルの放射能  
(10/27, KUR)

- ▶ 人体への影響(Sv)を正確に求めるためには、核種の存在量を明らかにすることが重要
  - 実効線量係数は核種(+性別、年齢)によって異なる。

# 原発周辺で観測された核種

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

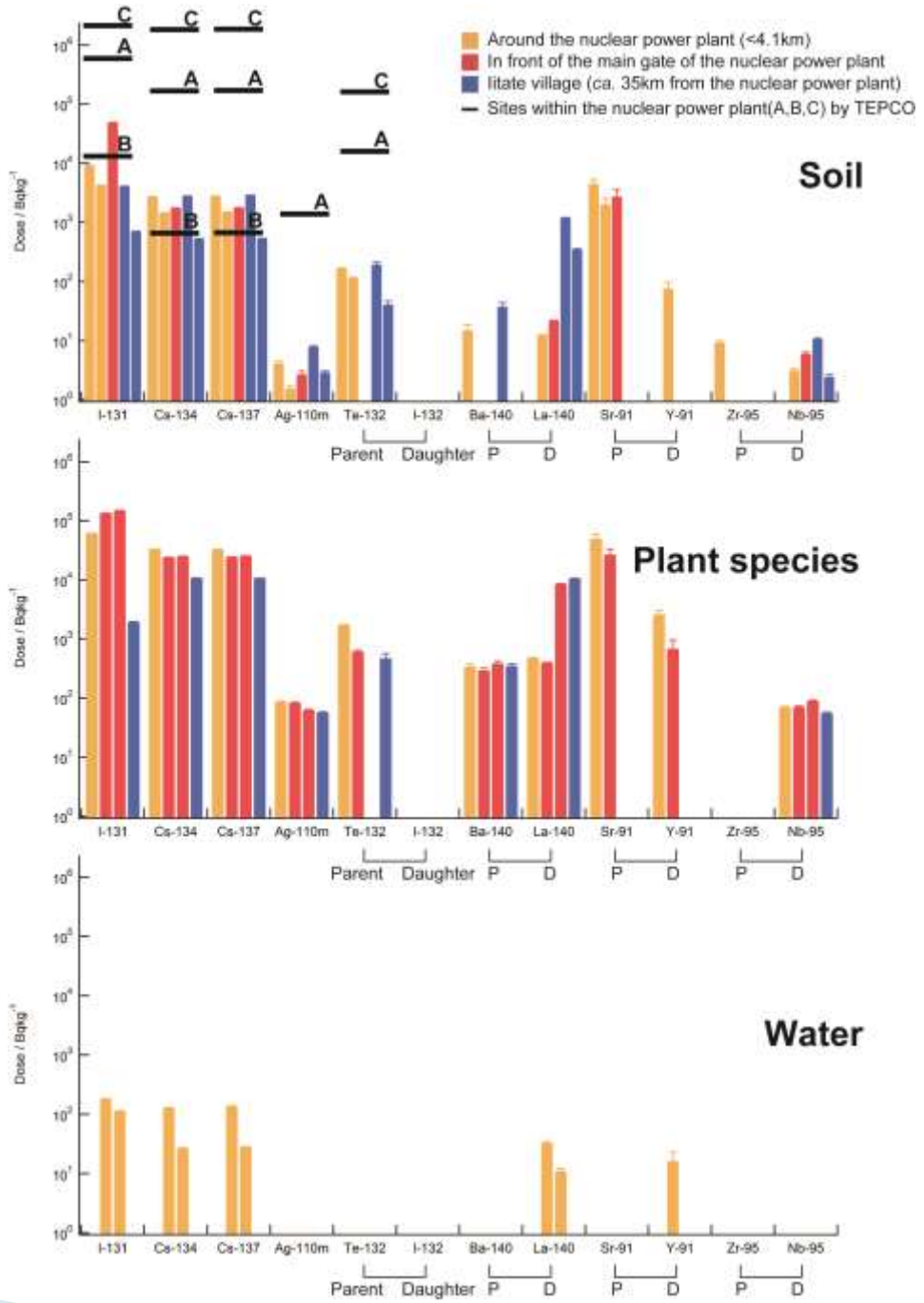
Shozugawa et al., 2012

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

小島ら, 2011,2012

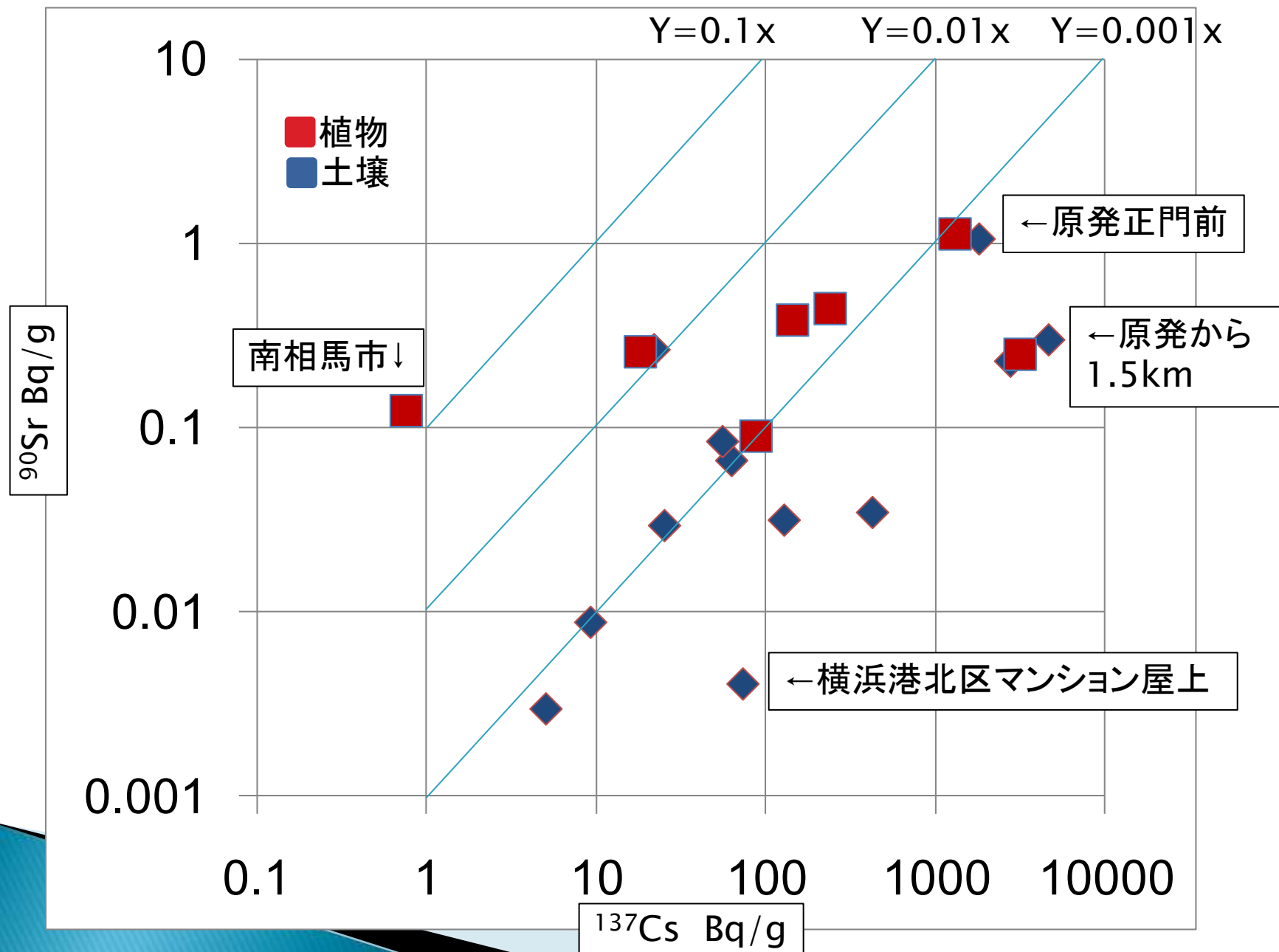
$^{241}\text{Pu}$

Zheng et al, 2012



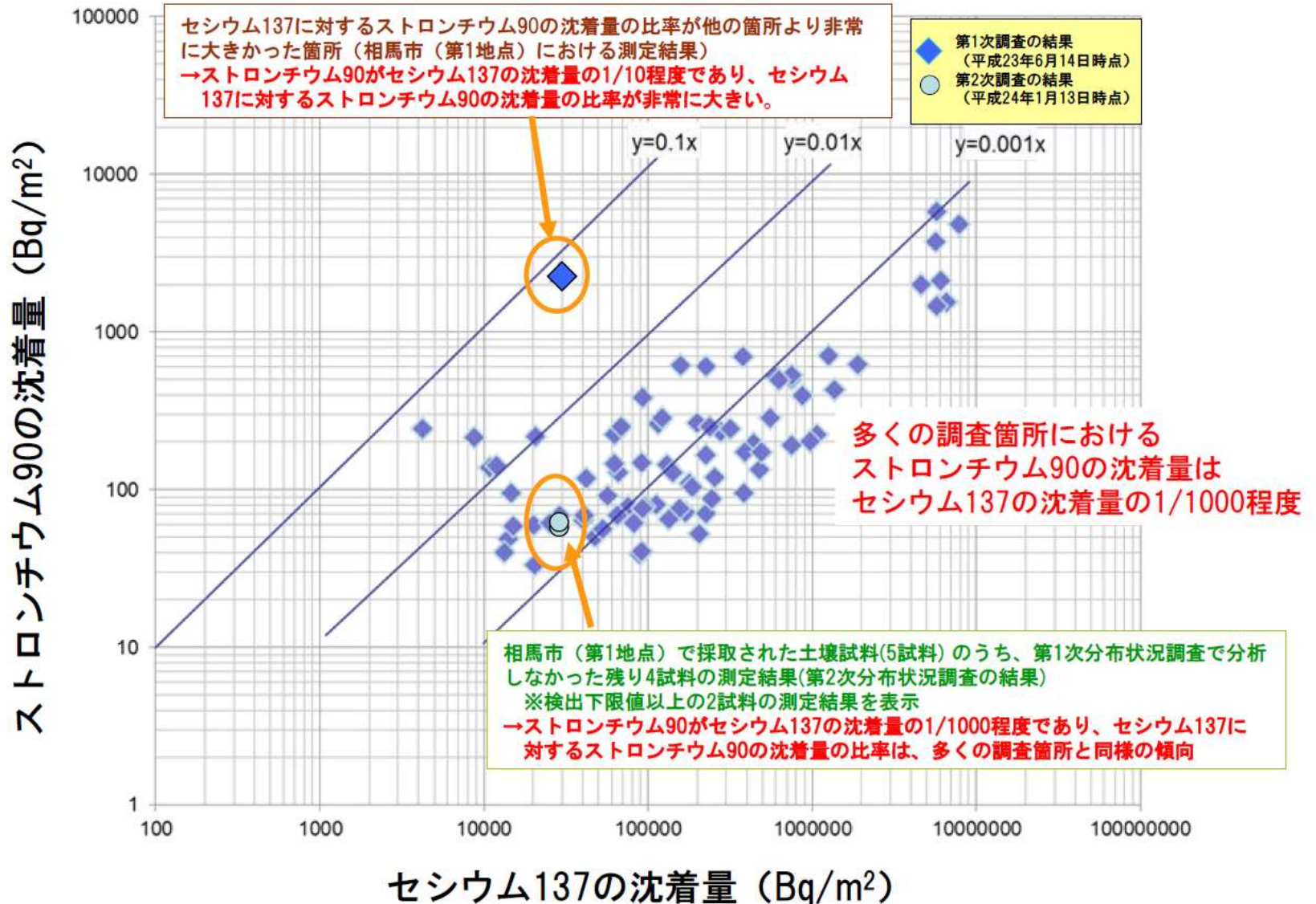


# $^{90}\text{Sr}$ の挙動は今後極めて重要



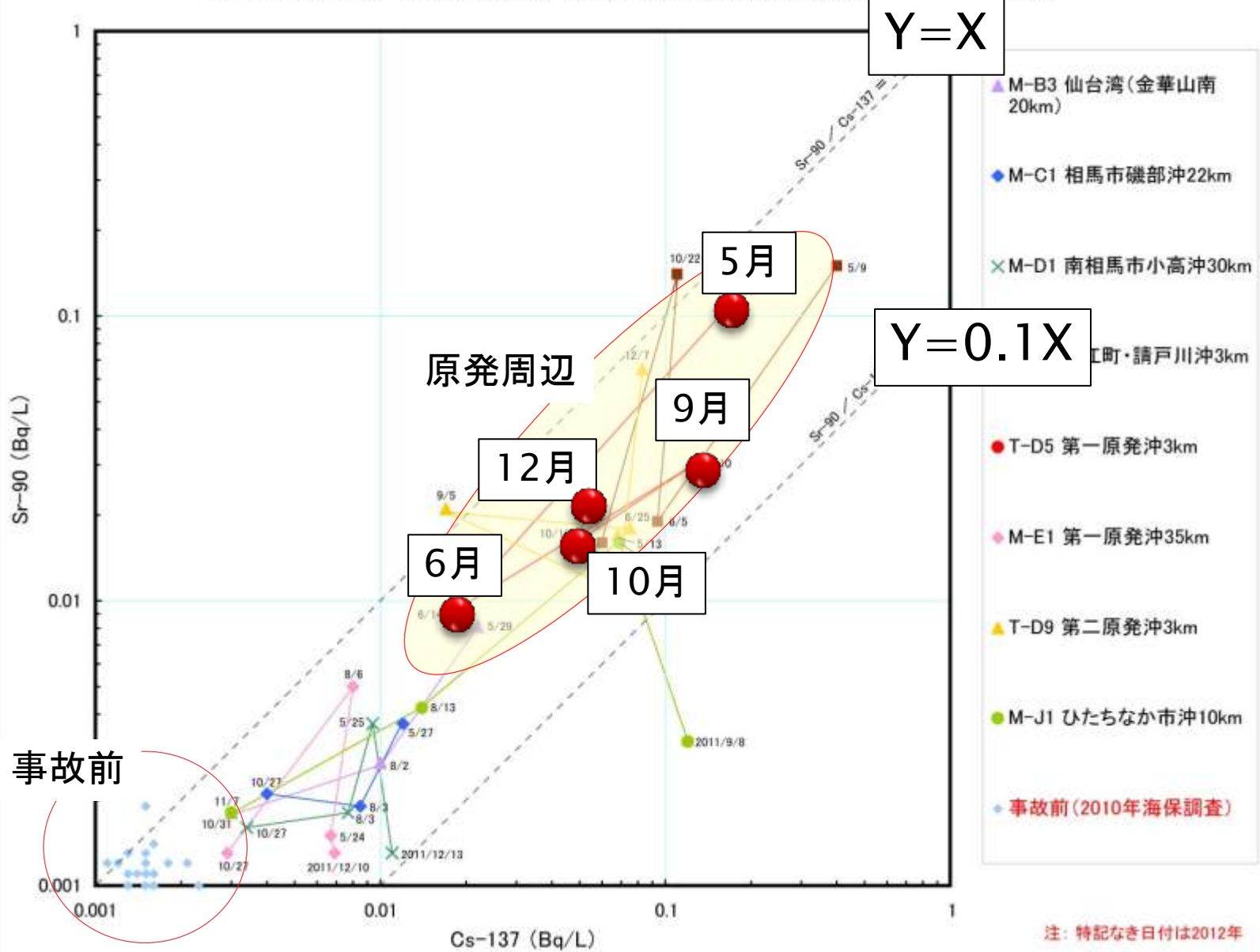
文部科学省による、①ガンマ線放出核種の分析結果、及び②ストロンチウム89、90 の分析結果 (第2次分布状況調査)について

## 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



# 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)



# 放射性ストロンチウム

- ▶ 土壌の $^{137}\text{Cs}$ に対する $^{90}\text{Sr}$ 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 $^{90}\text{Sr}$ 。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 $^{90}\text{Sr}$ -



## (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  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134+137}\text{Cs}$  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)   |
|-------------------------------|------------|
| $^{125}\text{Sb}$             | 26,000     |
| $^{106}\text{Ru}$             | 1,200      |
| 全 $\beta$ (多くが $^3\text{H}$ ) | 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 $^3\text{H}$ として28,000 Bq/L



汚染水のタンク群

# (余談)<sup>3</sup>H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<sup>3</sup>H放出量
  - J-PARCの物質・生命科学実験施設なら、2010年度に $5.5 \times 10^9$  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) $2.0 \times 10^{12}$  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<sup>3</sup>Hは福島原発事故の数倍

(余談)  $^3\text{H}$ たっぷりの水をGM計で測ってみましょう(↓)



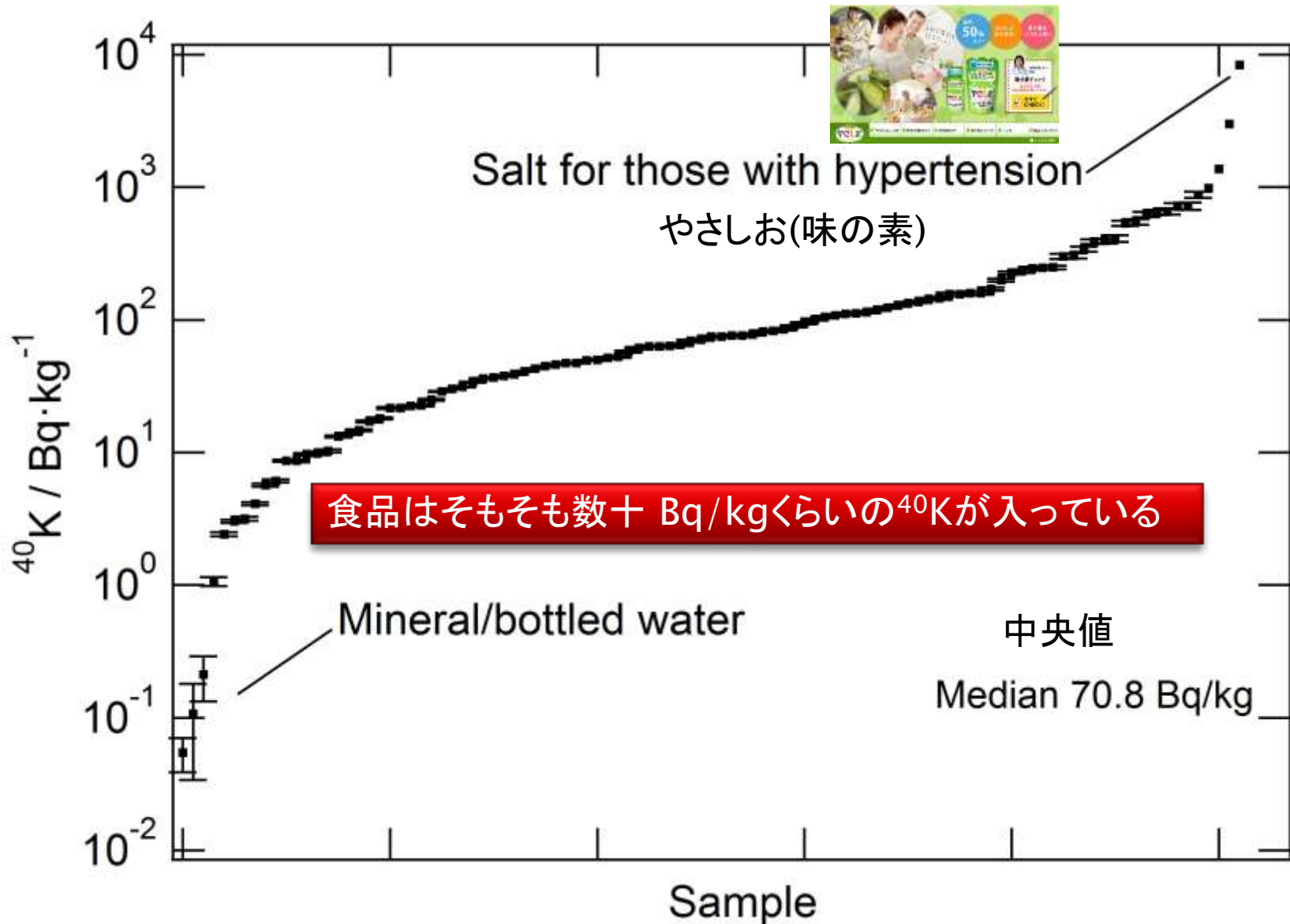
園田政務官 5・6号機の浄化した汚染水を飲み干す



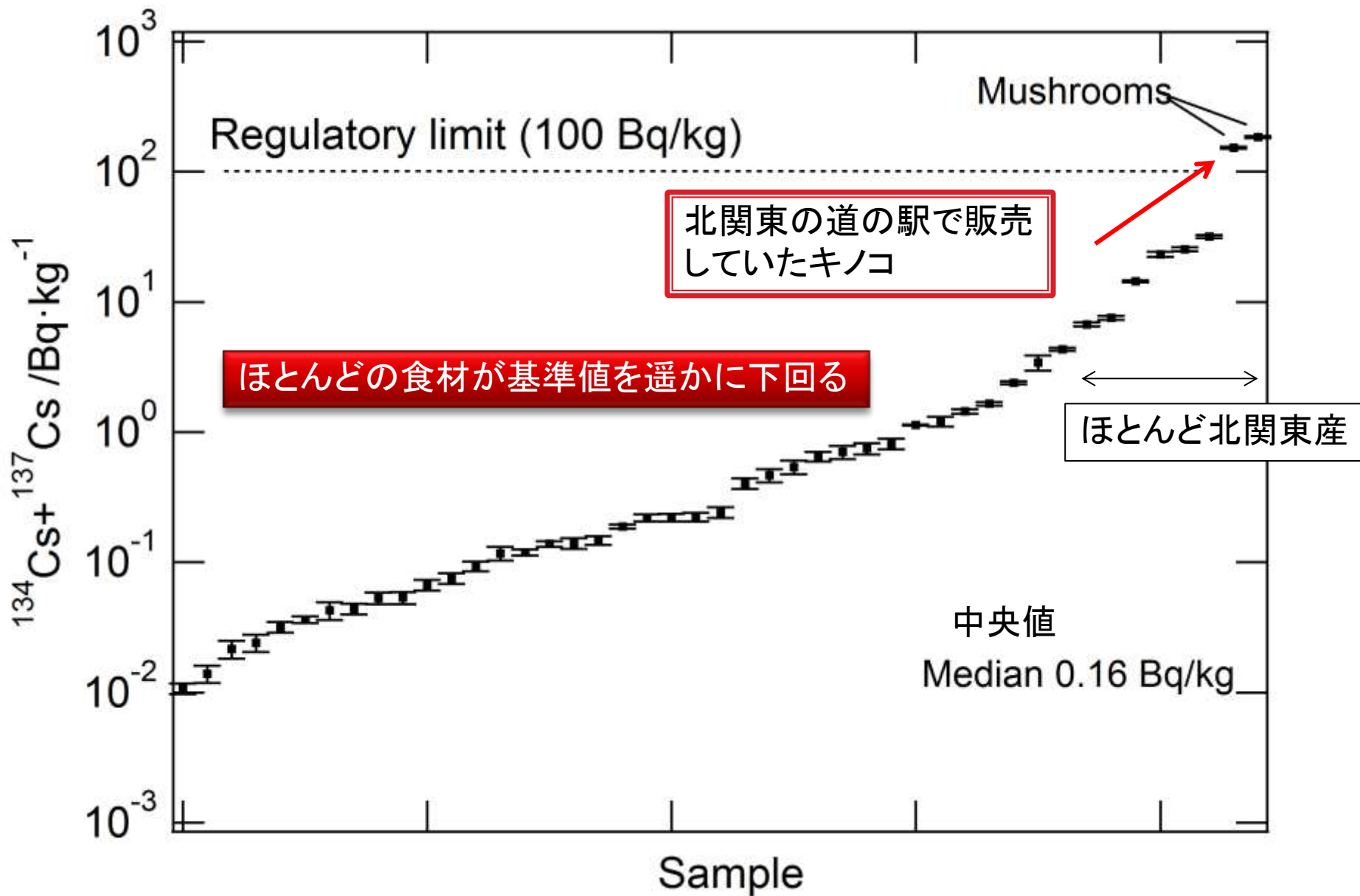
## (余談)<sup>3</sup>Hの除去方法

- ▶ 基本的に「ない」
- ▶ 「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)
- ▶ 一番単純な方法は、重たい水(トリチウム)と軽い水(普通の水)の蒸気圧の違いを利用した分離方法が挙げられる。
- ▶ 何にしても汚染水の量が多すぎて、現在の技術ではとてもとても分離できない。

# 流通食品中の放射性カリウム( $^{40}\text{K}$ ,天然核種)

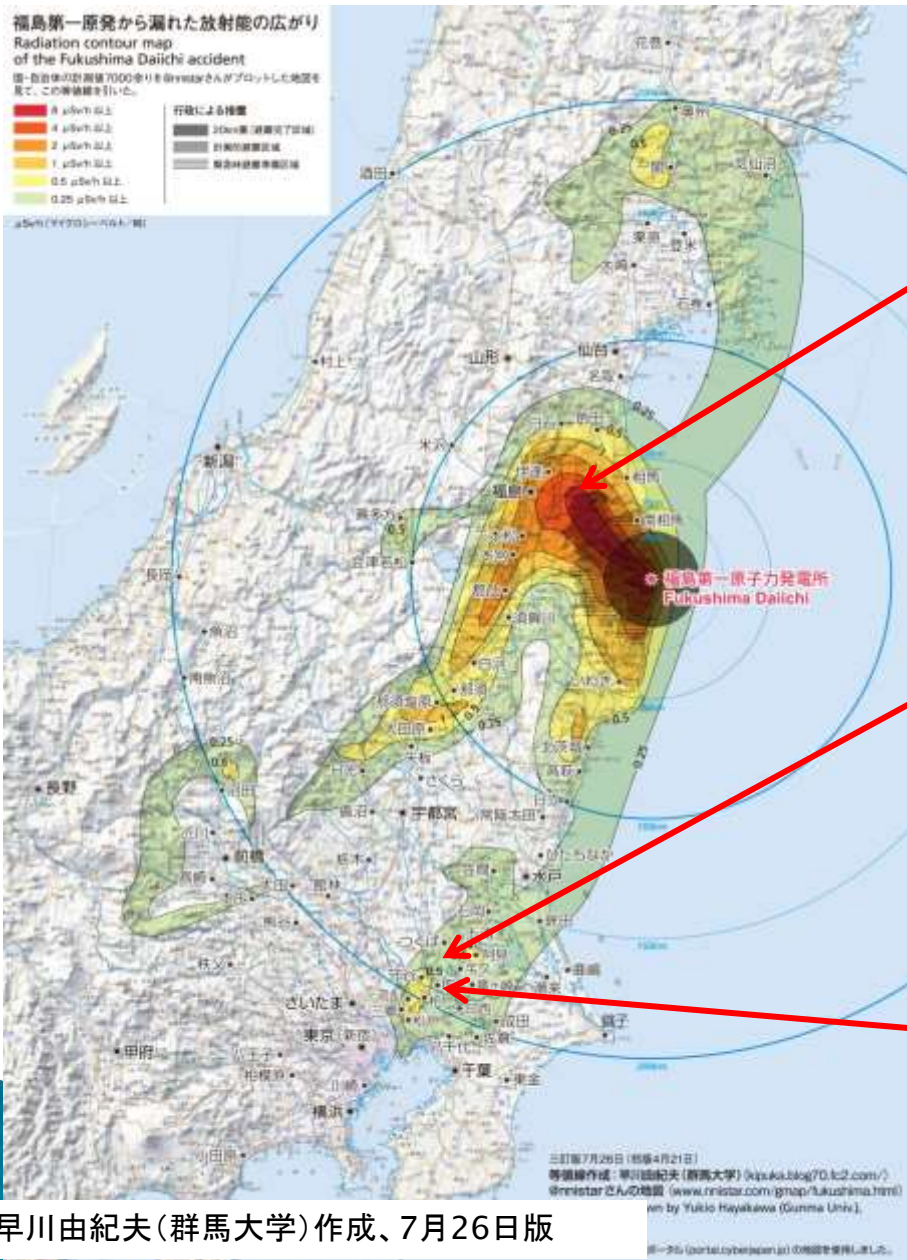


# 流通食品中の放射性セシウム(福島県外)





# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



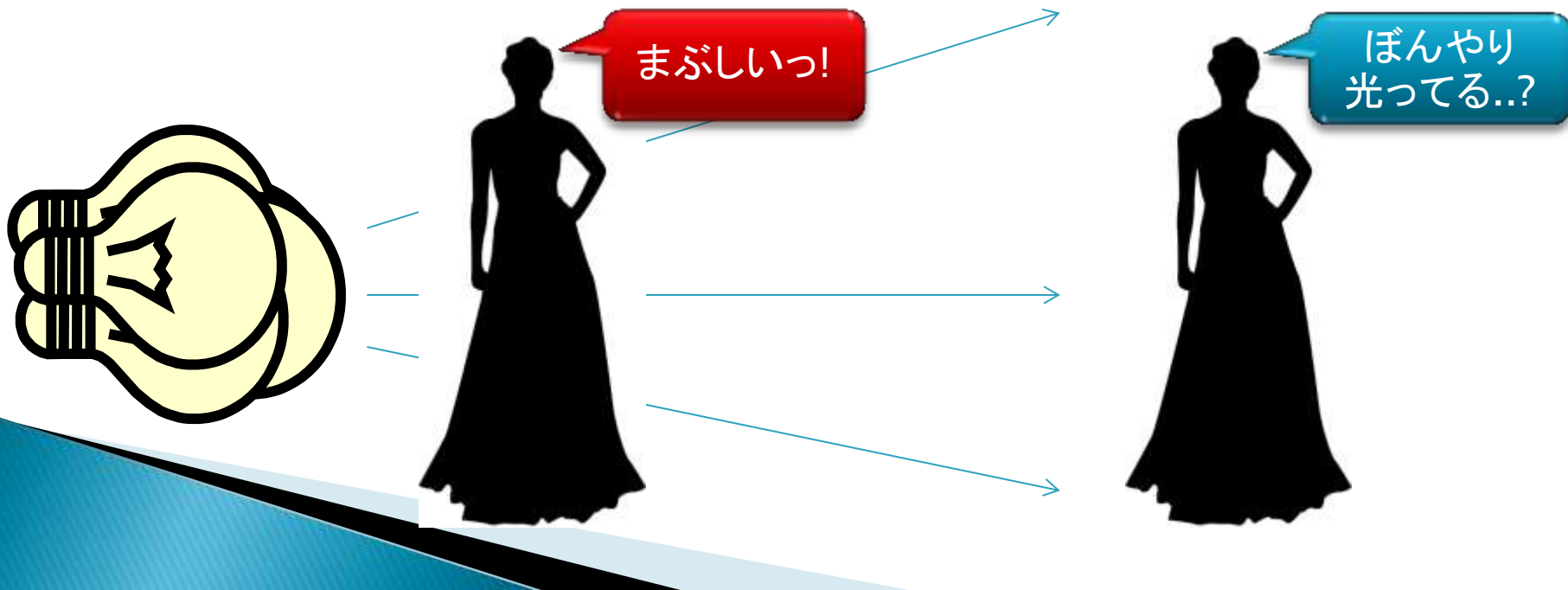
# ホットスポットからの被ばく

## ▶ 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。



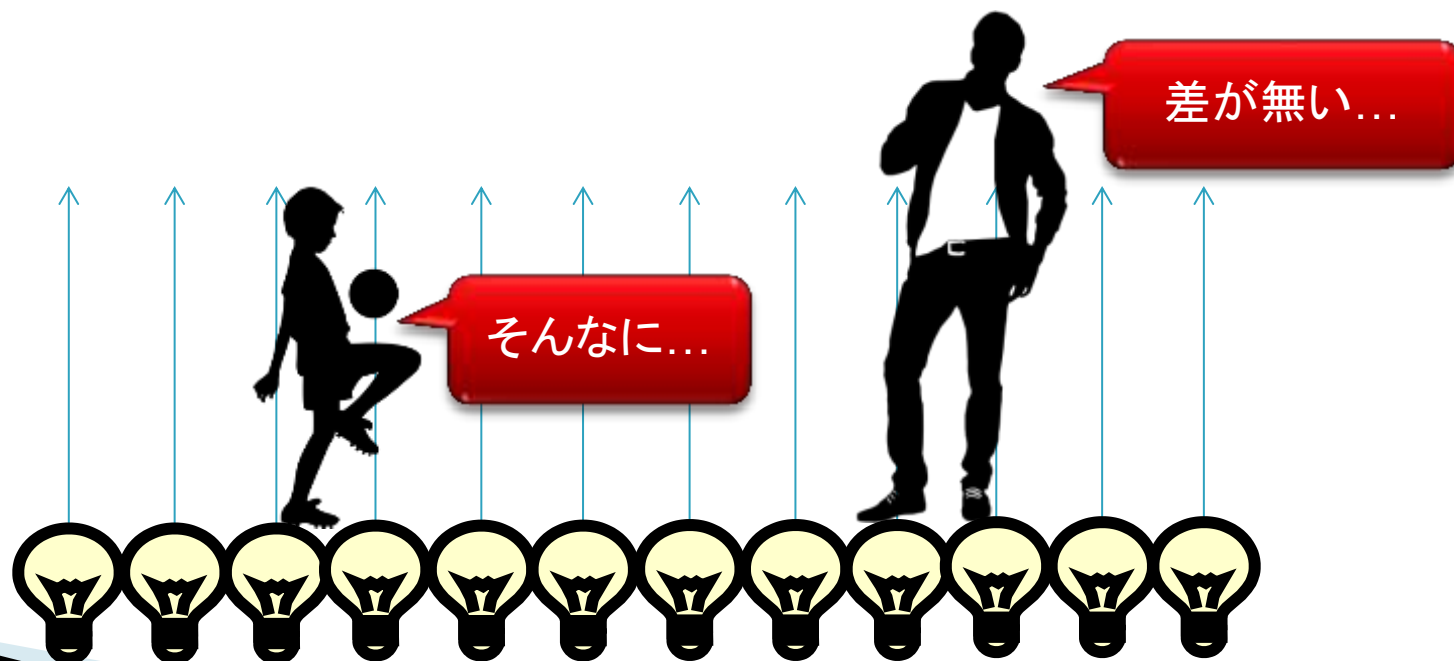
# 地面からの被ばく

## ▶ 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。

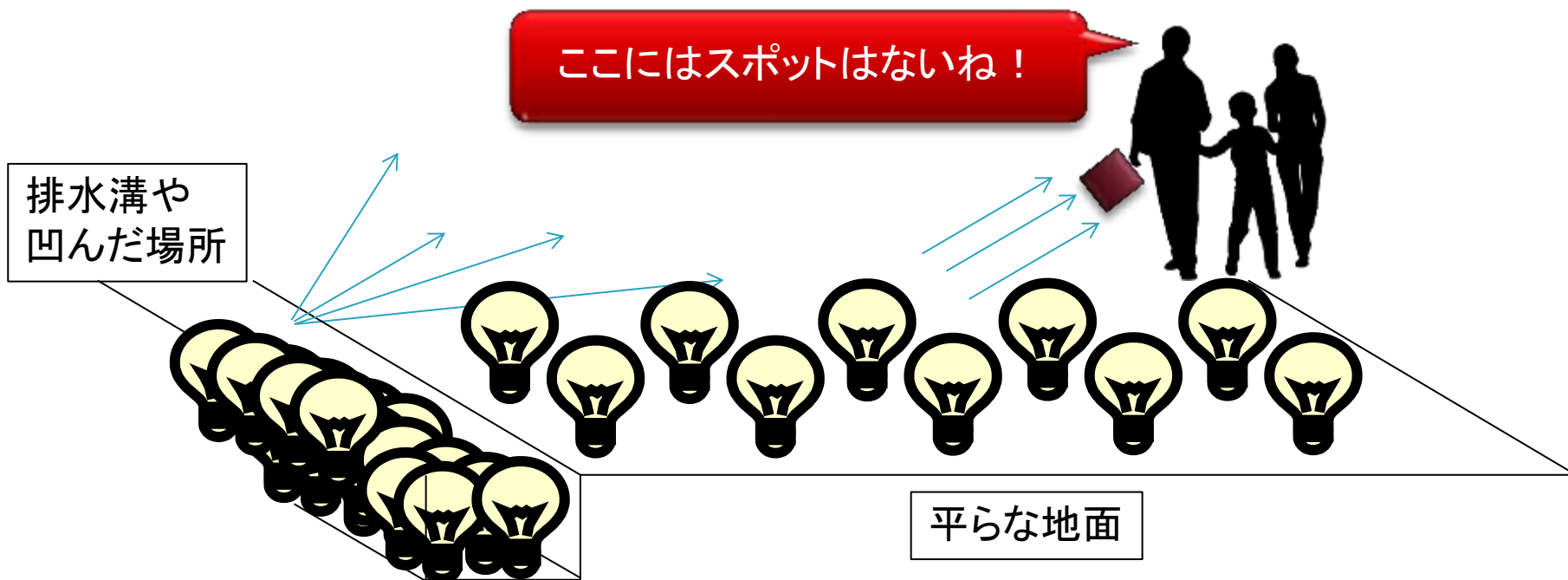
## ▶ 地面(一様の汚染)からの被ばく

- 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...





## 「ホットスポット」の北端(茨城県守谷市)

|    | 場所   | $^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg) | $^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg) |              |
|----|------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| 1. | 幼稚園  | 雨樋直下                      | 215,150 ±804              | 251,700 ±914 |
| 2. | 幼稚園  | 園庭中央                      | 793 ± 21                  | 924 ± 24     |
| 3. | 幼稚園  | 園庭端遊具下                    | 10,530 ± 88               | 12,300 ±103  |
| 4. | 一般家庭 | 庭土                        | 2,609 ± 50                | 3,050 ± 57   |
| 5. | 里山1  | 湿地帯                       | 9,990 ± 89                | 11,570 ±108  |
| 6. | 里山2  | 湿地帯                       | 15,340 ±101               | 17,910 ±102  |

- ▶ 濃縮地点では0.2MBq/kg( $^{137}\text{Cs}$ )の放射能
  - ▶ 飯舘村長泥で得られた値(0.07MBq/kg)を越える
- ▶ 風雨や排水によって徐々に濃縮
  - ▶ どこまで濃縮するのか、現時点では不明

# 「ホットスポット」の南端(東京都江戸川区)

| 場所               | $^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg) | $^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg) |
|------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1. 公園中央          | 713 ± 28                  | 700 ± 27                  |
| 2. 1.の公園排水溝      | 11,220 ± 129              | 13,390 ± 152              |
| 3. 公園(吹きだまり)     | 6,510 ± 122               | 6,420 ± 117               |
| 4. 水再生センター(排水溝脇) | 6,780 ± 124               | 6,810 ± 120               |
| 5. 公園(吹きだまり)     | 2,926 ± 58                | 3,453 ± 67                |

- ▶ 江戸川区全体に700Bq/kg程度の $^{137}\text{Cs}$ がフォールアウト
  - 目黒区では300-350Bq/kg( $^{137}\text{Cs}$ )
- ▶ 江戸川区でも排水溝などで濃縮
  - 風雨や排水によって濃縮することは地点を選ばない

# あちらこちらで濃縮のニュースが

## ▶ 横浜でストロンチウム検出 福島第1原発100キロ圏外では初

- 横浜市港北区のマンション屋上の土砂などの堆積(たいせき)物から、放射性物質のストロンチウム90が民間の検査機関の測定で検出され、横浜市が同区の土砂について検査を実施していることが12日、横浜市への取材で分かった。近く結果が報告される。福島第1原発から100キロ圏外で検出されるのは初めて。(MSN産経ニュース10月12日報道)

## ▶ 高線量の柏、高濃度セシウム検出 原発由来？土壤が類似

- 千葉県柏市の市有地で毎時57.5マイクロシーベルトの高い空間放射線量が測定された問題で、市は22日、現場の地下30センチの土壤から1キロあたり27万6千ベクレルの放射性セシウムを検出したと発表した。濃度の高さを重くみた文部科学省は、23日に現地に専門家らを派遣し、土壤の状態や周囲の状況、他にも高い線量の場所があるかどうかなどを調べる。(朝日新聞10月22日報道)

# 横浜市の例

## 横浜市港北区のマンション屋上の堆積物について

横浜市港北区のマンション(5階建て)の屋上の溝の堆積物を集めて核種分析しました。





# 柏市の例

## 高線量を確認した場所(排水溝の破損箇所)



# 放射性セシウムが集まる「濃縮」とは

▶ 2011年12月12日「NHKクローズアップ現代」



毎週月-木曜放送 総合 午後7時30分-午後7時56分(再放送はありません) **NHK ONLINE**

ホーム 放送予定 これまでの放送 ウェブ特集 動画 スタッフの部屋 番組紹介

これまでの放送

No.3133 2011年12月12日(月)放送

知られざる“都市濃縮”

### 新興都市で異変が

福島第一原発からおよそ180キロ。人口6万人余りの新興都市茨城県の守谷市です。市民の依頼を受け放射性物質の測定を行っている東京大学助教の小豆川晴見さんです。これまでのホットスポットより高い放射線量が検出されたと聞き駆けつけました。

住宅地に隣接するこの公園。国が除染の目安としている値の6倍近い放射線量が検出されました。「1.3マイクロシーベルトくらいです。」

守谷市が定期的に行っている測定結果によると、市内のほとんどの場所では放射線量が下がっています。

しかし10月この公園を測定すると広い範囲で除染の目安を上回る高い値が検出されたのです。小豆川さんは土壌を採取し、調査。1キログラム当たり2万6000ベクレルという高い放射性セシウムが検出されました。

「福島第一原子力発電所の半径20キロ以内の警戒区域の中にあるような値が、とどころで確認されるというのがやっぱり衝撃的。どうしてこの値が出たのか分からぬ。」

**●放射性物質集める都市のメカニズム**  
都市に放射性物質を集めるメカニズムがあるのではないかと。



# 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...

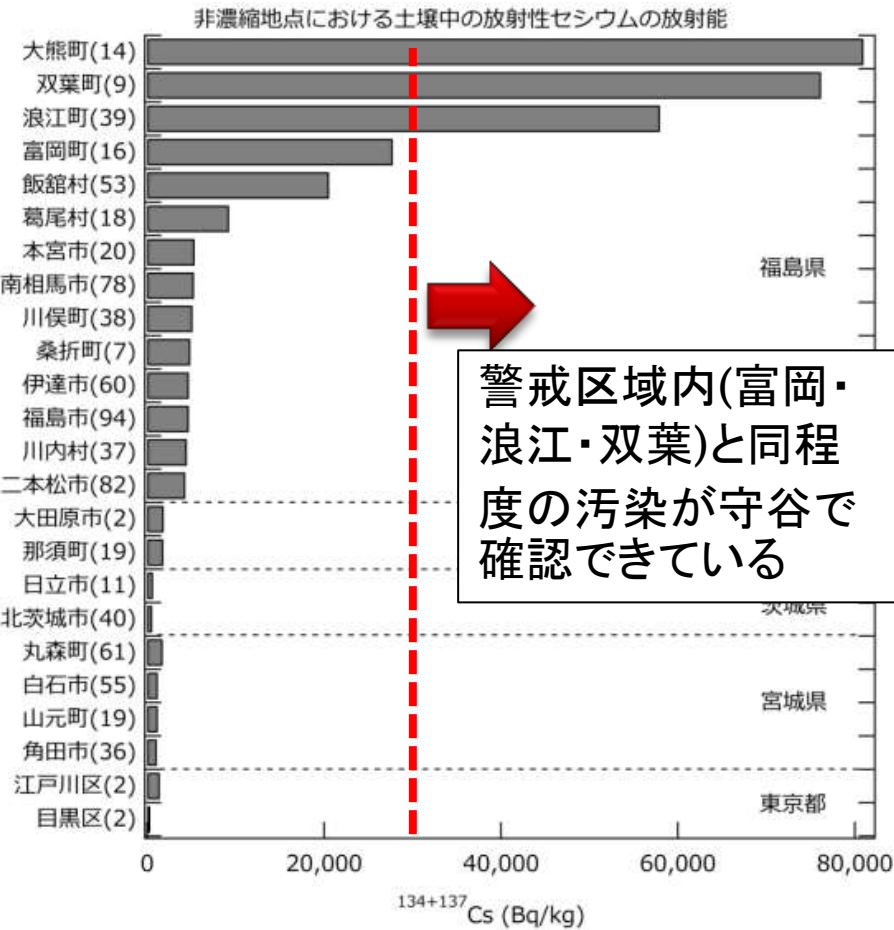
# 放射性セシウムが集積している人工河川

親水環境として整備されている





# 水路における放射性セシウムの濃縮\*



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。

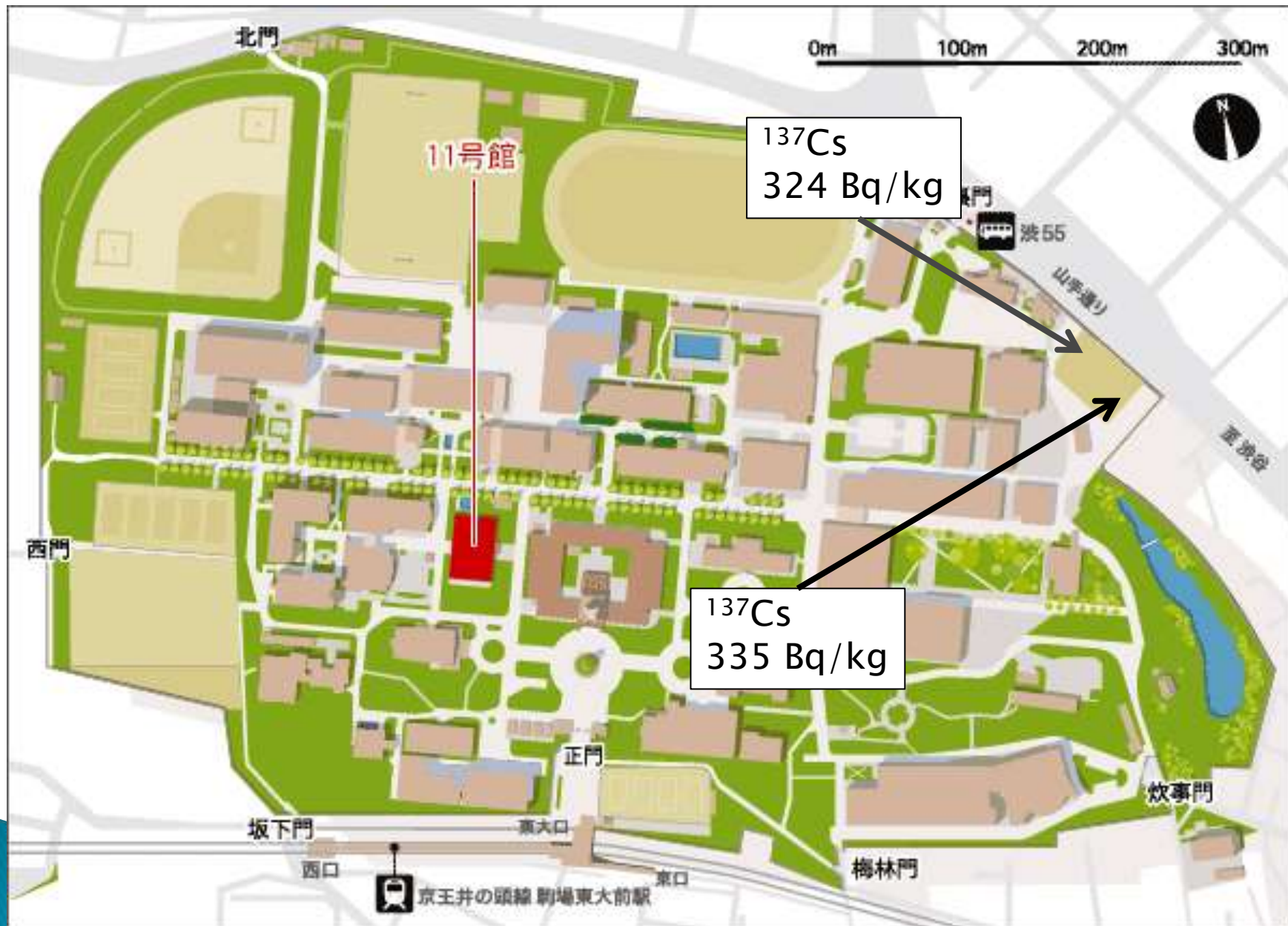
堆積物・表層5cm

| 濃度 (Bq/kg) | 空間線量率 (μSv/h) | 立ち入り規制  |
|------------|---------------|---------|
| 17,200     | 2.04          | 無       |
| 43,700     | 1.49          | 無       |
| 12,500     | 1.45          | 無       |
| 18,700     | 1.90          | 無       |
| 9,060      | 0.60          | 無       |
| 14,400     | 1.04          | 無       |
| 71,400     | 2.72          | 無(一部有り) |
| 14,700     | 3.25          | 無       |
| 15,200     | 1.91          | 有       |
| 30,500     | 1.75          | 有       |
| 28,200     | 3.70          | 有       |
| 13,500     | 1.30          | 無       |

\*小豆川勝見, 科学, 岩波書店, 印刷中

いわゆる「ホットスポット」ではなく水路全体が「ホットエリア」として汚染されている

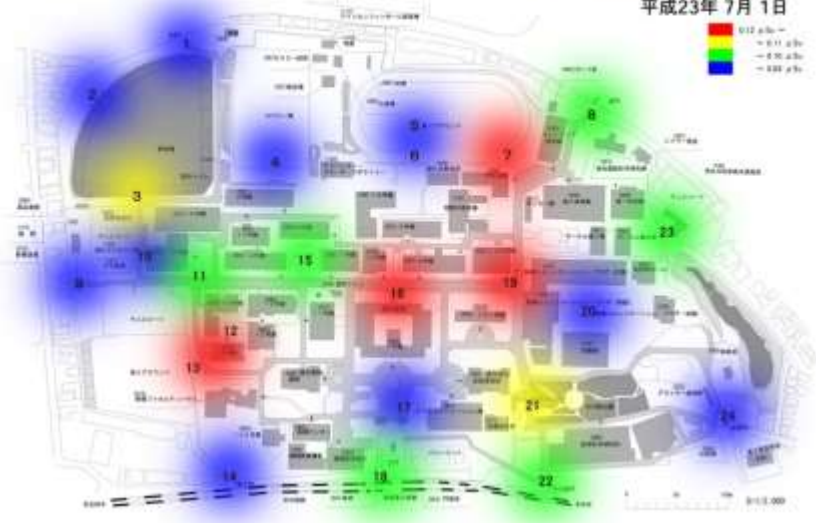
# 駒場キャンパス内の環境試料中の放射能



# 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

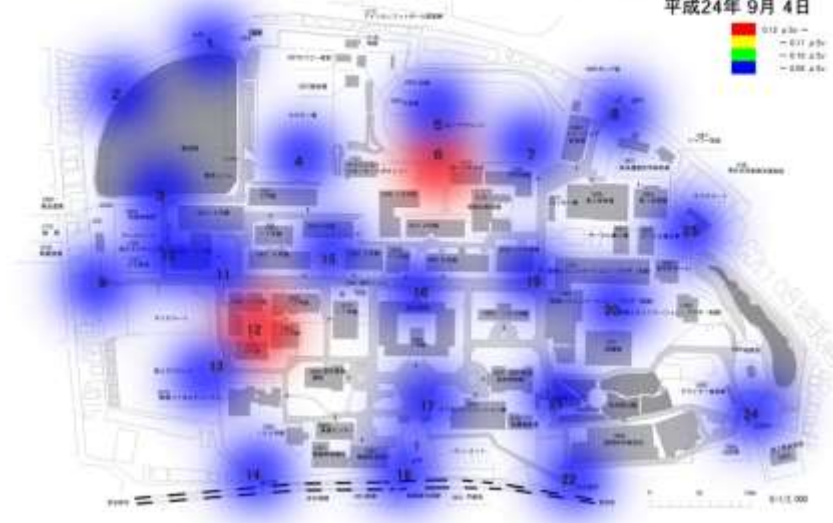
平成23年 7月 1日



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 $^{134}\text{Cs}$ )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  $\mu$ Sv/h → 28  $\mu$ 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2500m<sup>2</sup>(濃縮などの特異性がある公園ではない)

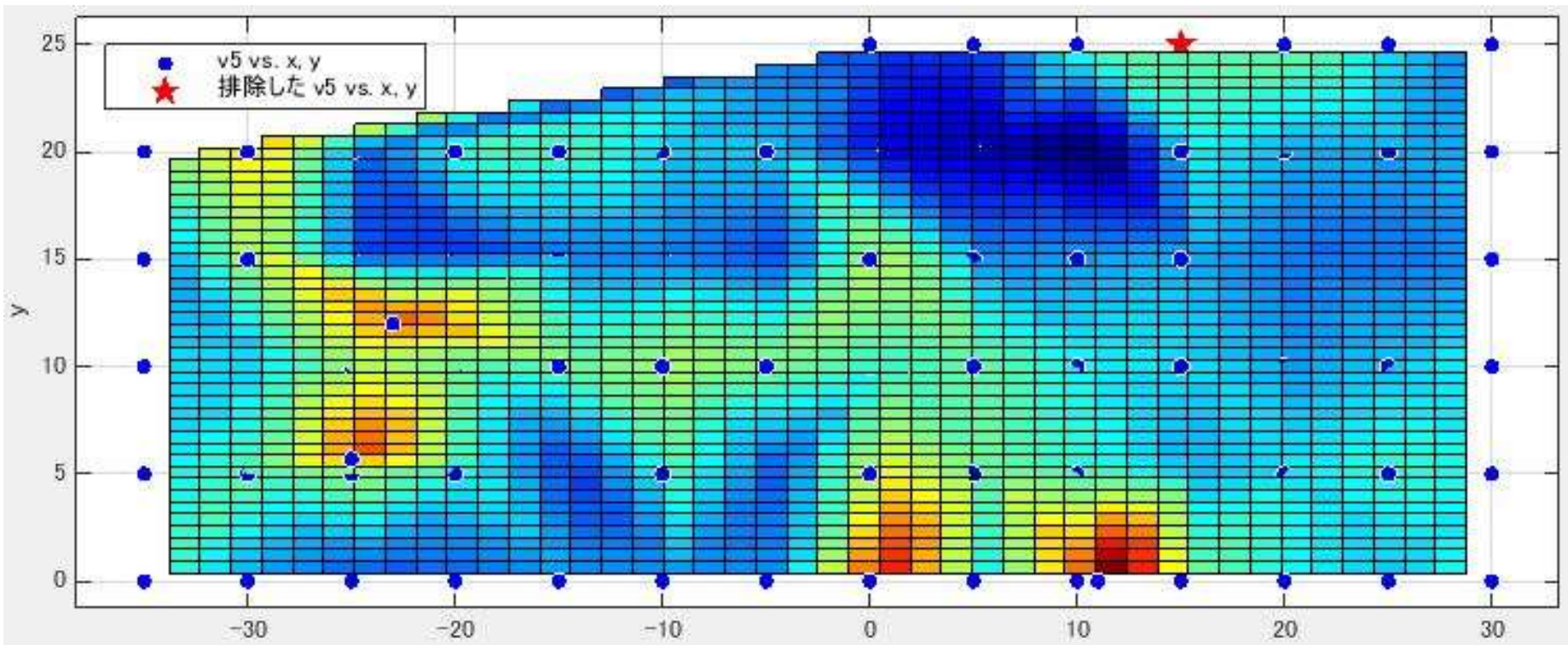




# 線量マッピング測定結果(2012年バージョン)

地上5cmにおける空間線量率(相対表示)

低  高



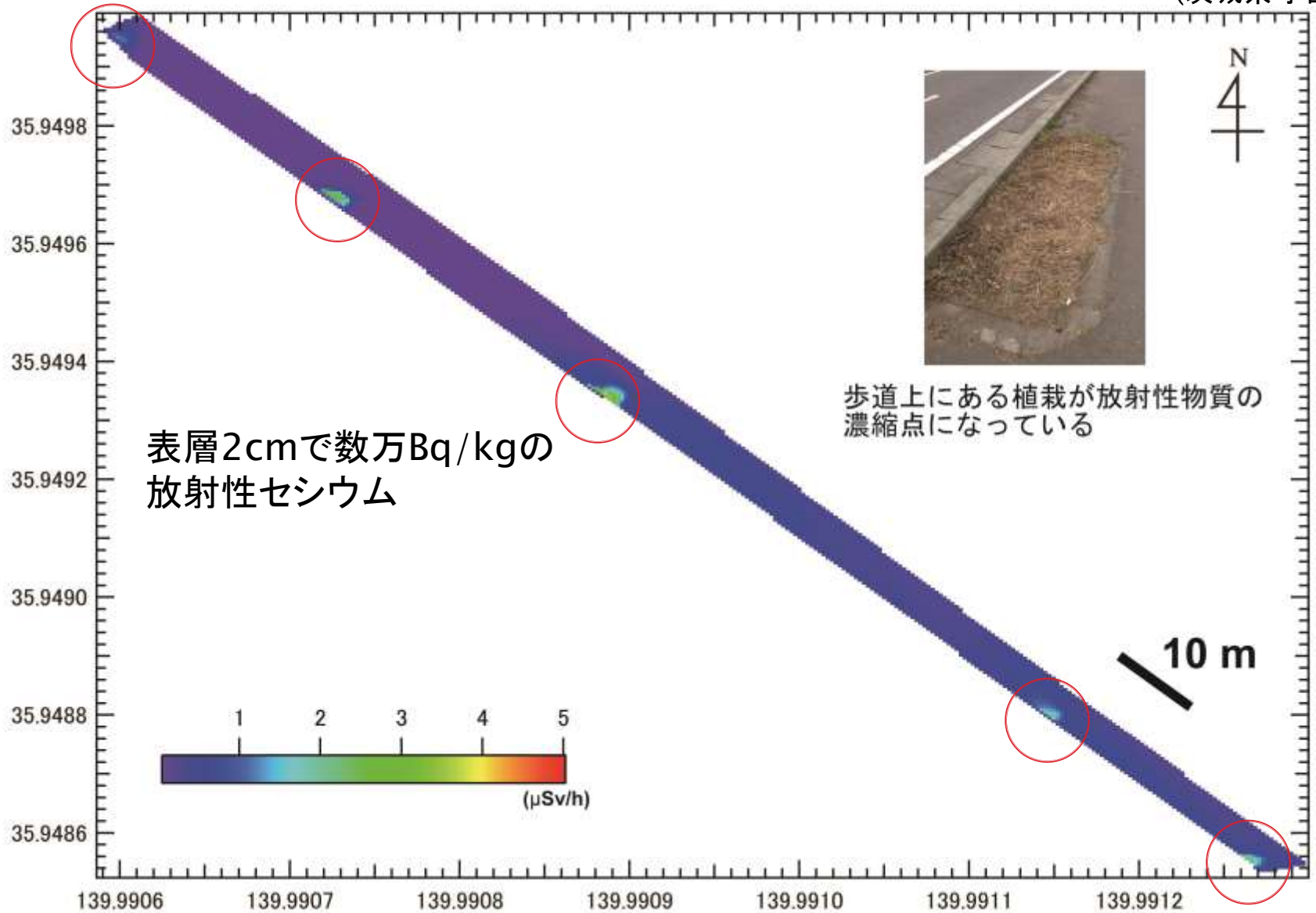
僅かに削れている場所や  
吹き溜まりに、放射性物質  
が集積しやすい





# 歩道上の植栽には放射性物質が濃集

(茨城県守谷市)



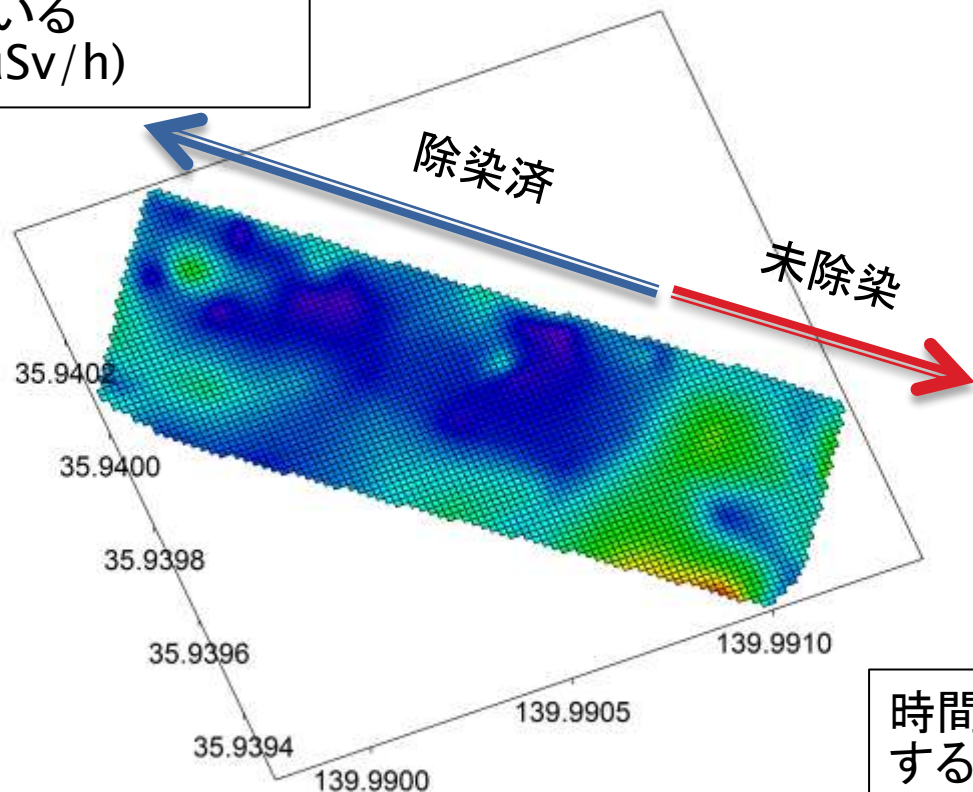
# 河川敷にたまる放射性物質(2014年測定)



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。

# 除染の効果の検証(2013年バージョン)

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？

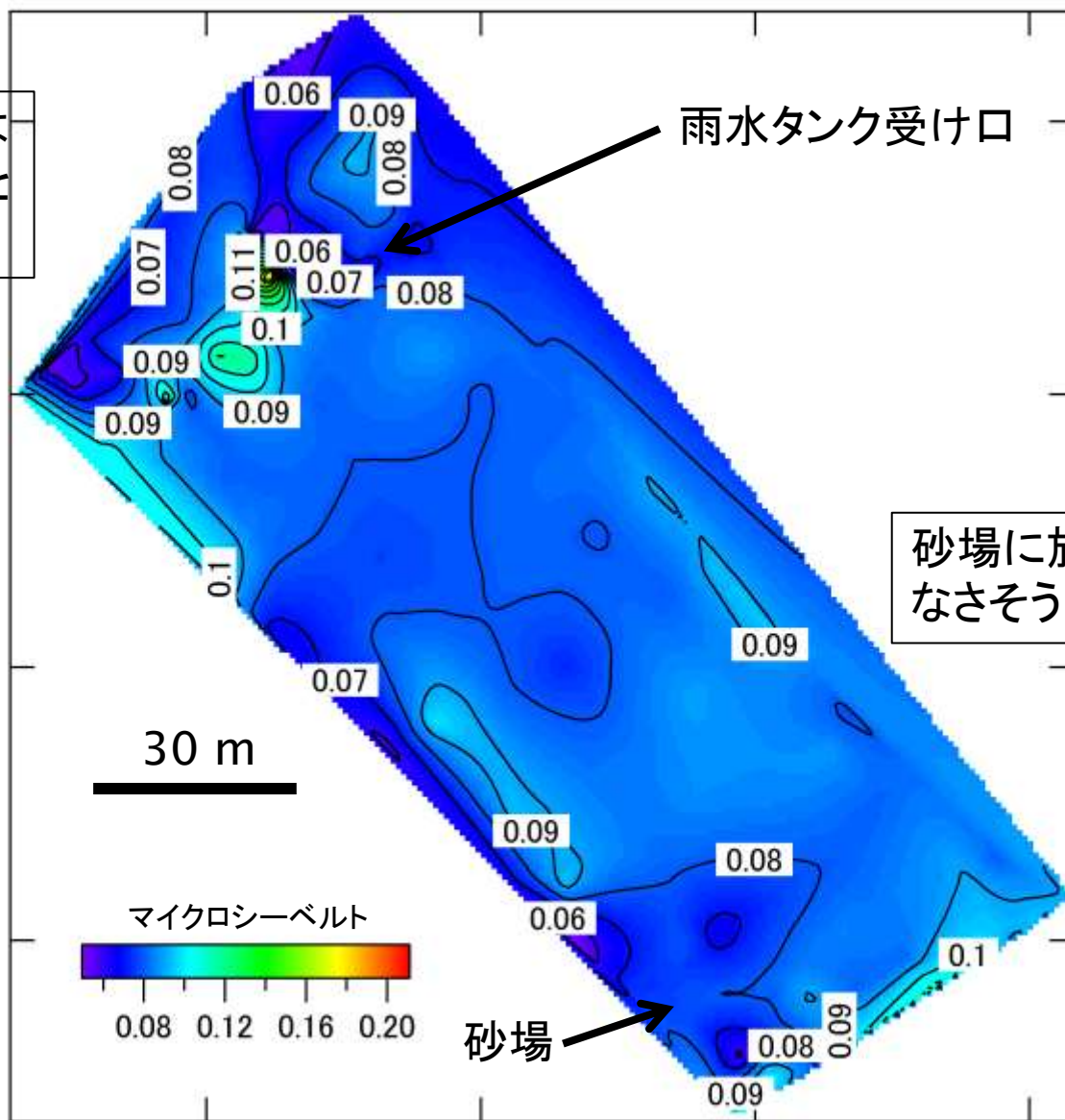


# 文京区の公立小学校のグラウンド

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

雨水タンク受け口

砂場に放射性物質は  
なさそう

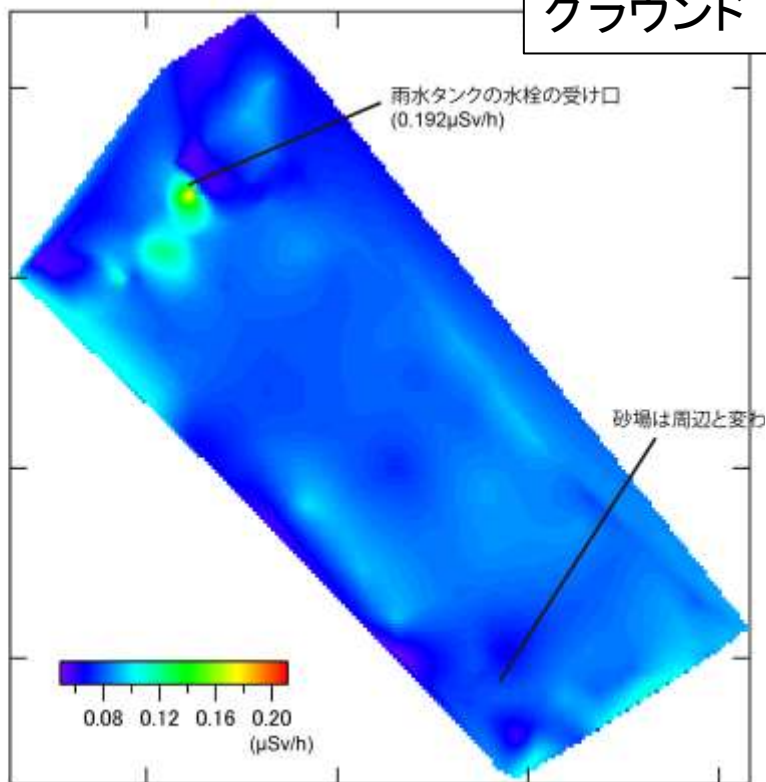




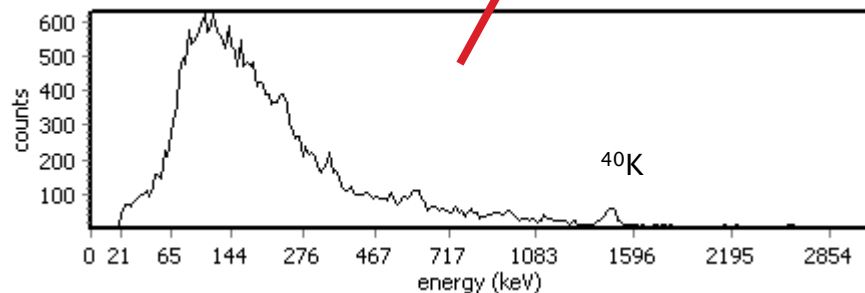
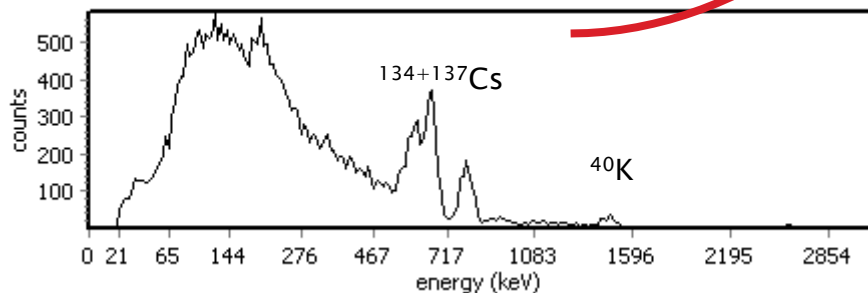
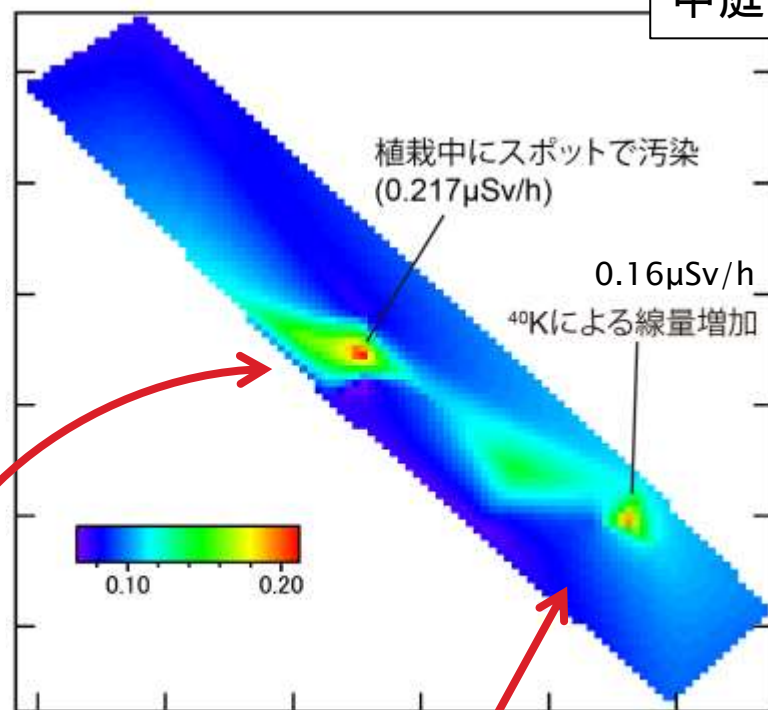
# 都内小学校での測定(同じ値でも意味は違う)

低線量の場合、NORMからの寄与が無視できない

グラウンド

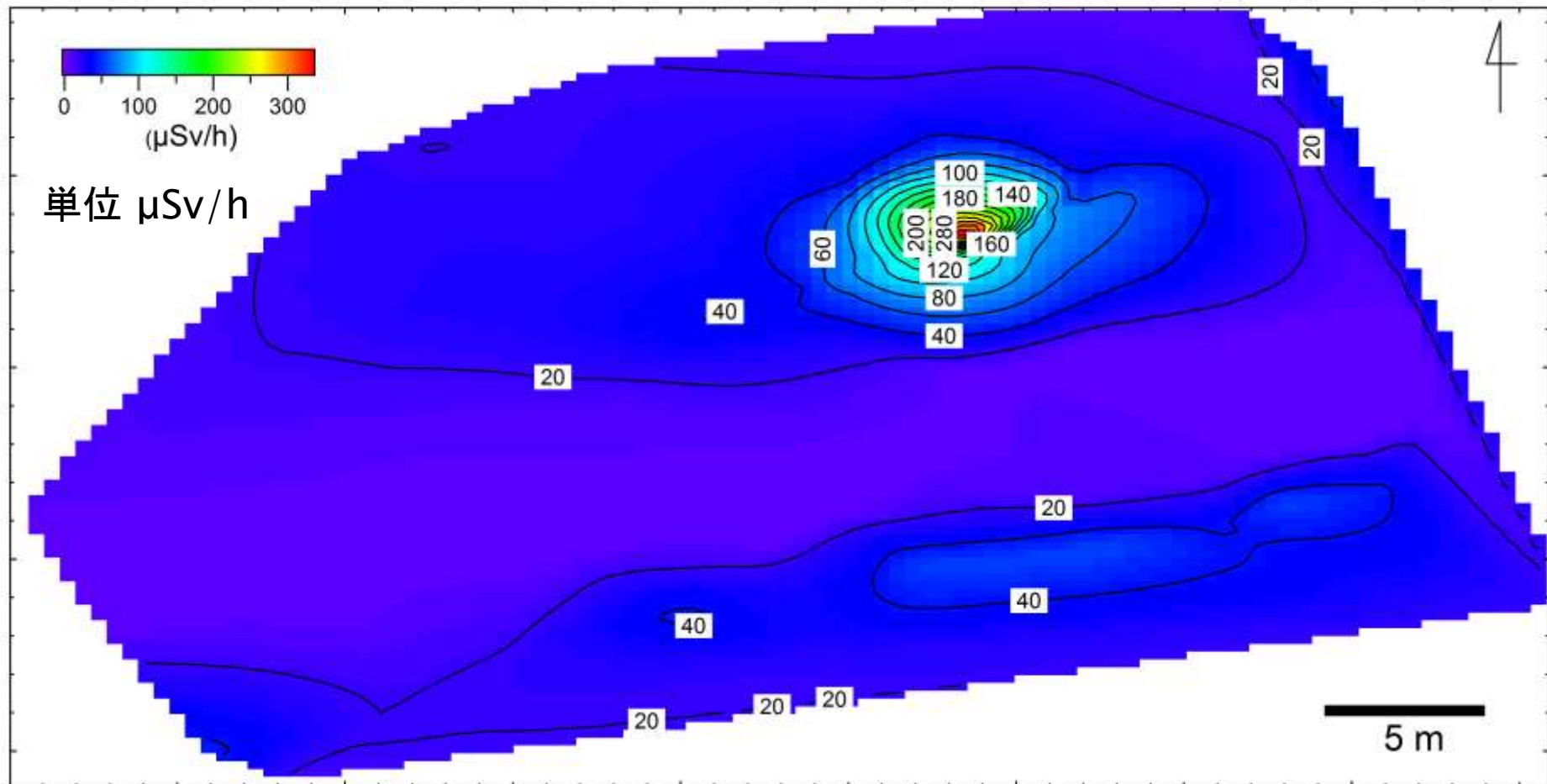


中庭



# 原発正門1.5km地点の水溜まり(原発周辺での例)

(2014年3月測定)



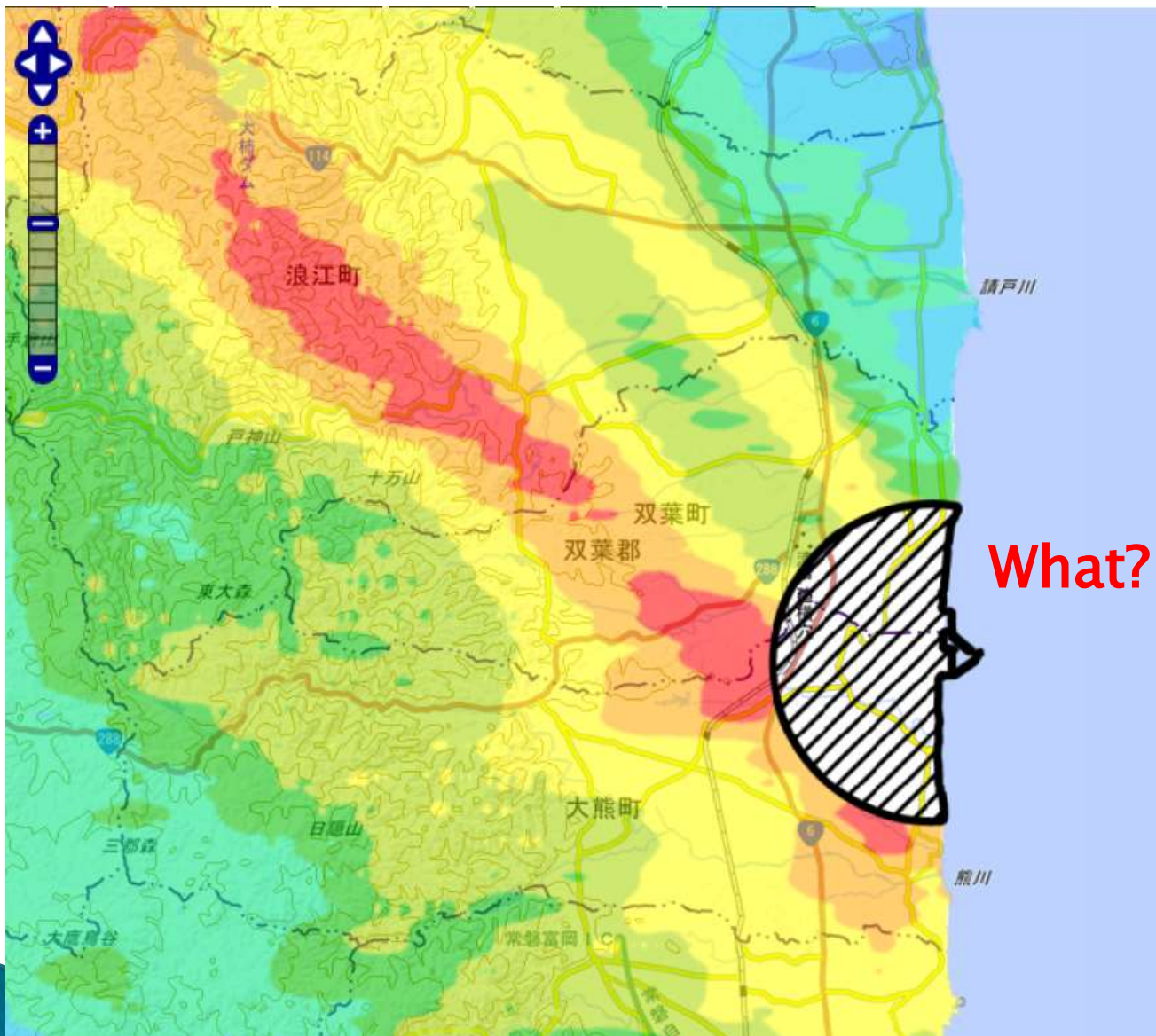


# ロギングシステムの開発(赤丸が除染基準超過)

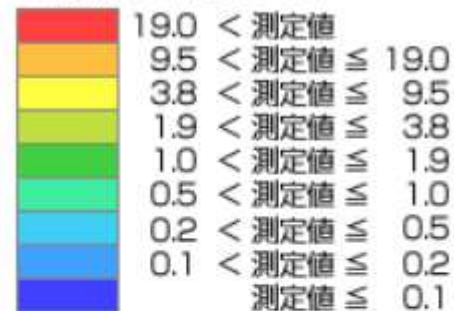




# 航空機モニタリング(2013年)による地表面の測定



地表面から1mの高さの  
空間線量率(  $\mu\text{Sv/h}$  )



■ 測定結果が  
得られていない範囲

※本マップには天然核種による空間線量率が含まれています。

※年間の日常生活に換算した場合  
例えば、 $1.0\mu\text{Sv/h}$ は、年間約 $5\text{mSv}$   
など。詳細はこちら

※福島第一原子力発電所から80km圏外の  
測定結果は、事故32か月(平成25年11月  
19日時点)の値に減衰補正。風雨等の自然  
環境による放射性物質の移行の影響  
は考慮していません。

※実線で囲われた白色の領域は積雪の  
あった箇所を表しています。

What?

## 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。