

# 農作物への放射性核種の移行と分布

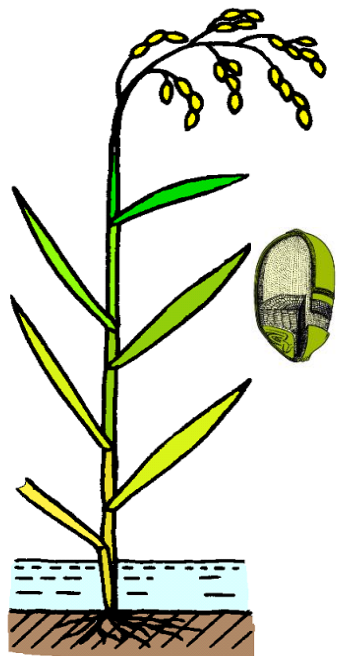
今後、重要な核種



環境科学技術研究所

塚田 祥文

$^{137}\text{Cs}$



## 本日の話題

- ▶ 放射性物質の発見から原子力の時代と環境放射能研究のあゆみ
- ▶ 環境中における放射性核種の動態と分布
- ▶ 土壌中放射性セシウムの存在形態
- ▶ 土壌から作物への放射性セシウムの移行
- ▶ 飲食物の新しい基準値

# 放射線の発見から原子力の時代へ

1895年: W. RöntgenによるX線発見

1896年: H. Beequerellによるウラン鉱石の発見

1898年: P. Curie & M. Curieによるラジウム・ポロニウムの発見

1902年: E. Rutherford & F. Soddyによる $\alpha$ ・ $\beta$ ・ $\gamma$ 線の発見

1934年: J. Curieが最初の人工放射性核種作成( $^{30}\text{P}$ )

1942年: アメリカのシカゴにおいて世界で初めての臨界(核分裂の連鎖反応を一定の割合で維持すること)に成功

1945年7月: アメリカで初めての原子爆弾の爆発実験に成功

1945年8月: 広島・長崎に原爆投下

1954年3月: 第五福竜丸事件(船員の被ばくと汚染マグロ)

1956年: イギリスのコールダホールにおいて世界ではじめて発電用原子炉が運転を開始

1956年8月: 我が国で初めての原子炉となるJRR-1号炉(東海村)の日本原子力研究所において着工(1957年8月27日に初臨界)

# 環境放射能研究のあゆみ

## 1940年代:保健物理学(Health Physics)の誕生

プルトニウムを扱う人達の放射線障害の危険度決定に関する課題を扱う学問

## 1945年:仁科博士による原爆被災地の影響調査

## 1950年前後:放射生態学(Radioecology)の誕生

環境に放出される放射性核種に関連する研究

## 1954年:第五福竜丸事件 ⇒ 水産物や農作物の放射能調査 (1954年~1960年代中頃:日本における環境放射能研究の創始期)

## 1955年:UNSCEAR{国連(放射線影響)科学委員会}発足(15カ国)

放射性降下物の問題を中心課題としての放射能影響に関する調査研究

## 1959年:放射性廃棄物処分に関する国際科学会議(モナコ会議)

IAEA・UNESCO共催、FAO後援

⇒公衆の放射線防護を目的として、広範(気象学、水文学、海洋学、生物学、農学、水産学、地球化学など)な環境放射能研究の幕開け

“環境放射能研究”を掲げて活動している学会

- ・IUR(International Union of Radioecology、環境放射生態学連合)
- ・日本保健物理学会、日本原子力学会、日本放射化学会など

## 主要な放射性核種(半減期)

### ●体内の放射性物質の量

(体重60kgの平均的な日本人の場合)

#### 天然放射性核種

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

出典：原子力安全研究協会「生活環境放射線データに関する研究」  
(昭和58年)

#### 人工放射性核種(例)

フッ素-18 (F-18)	110分
コバルト-60 (Co-60)	5.2年
ストロンチウム-90 (Sr-90)	29年
テクネチウム-99m (Tc-99m)	6.0時間
ヨウ素-125 (I-125)	59日
ヨウ素-131 (I-131)	8.0日
セシウム-134 (Cs-134)	2年
セシウム-137 (Cs-137)	30年
キセノン-133 (Xe-133)	5.2日

#### 天然放射性核種(例)

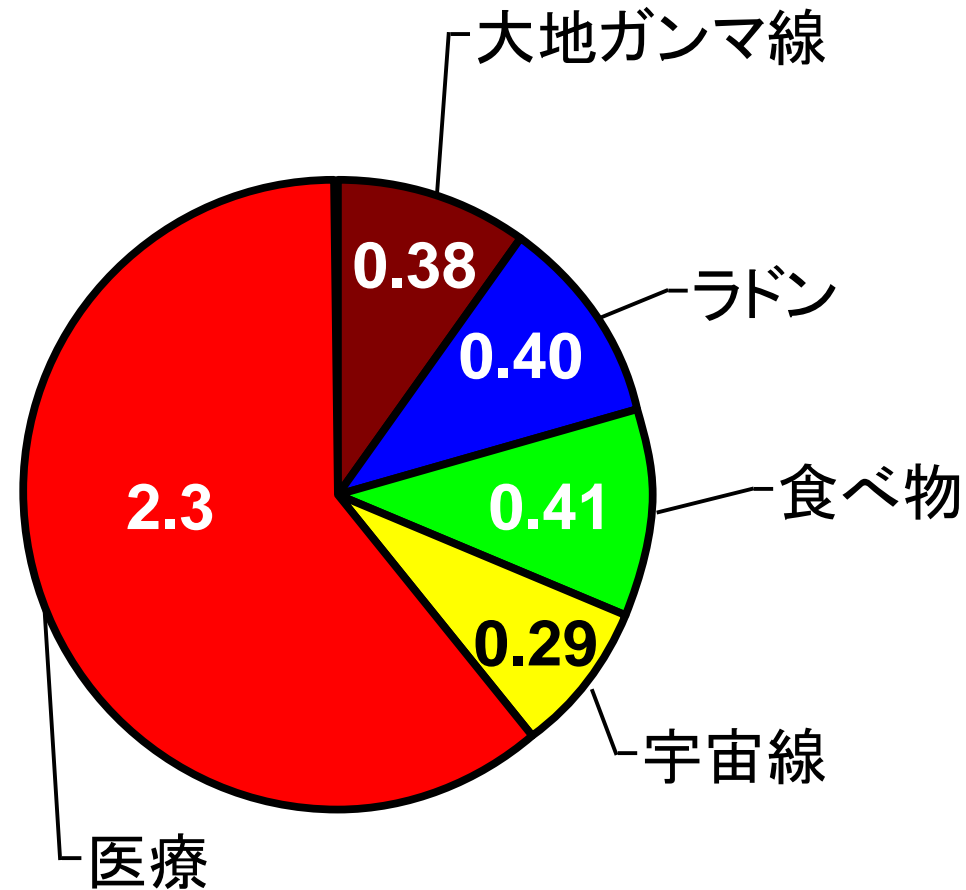
カリウム-40 (K-40)	12億年
炭素-14 (C-14)	5730年
ルビジウム-87 (Rb-87)	49億年
鉛-210 (Pb-210)	22年
ポロニウム-210 (Po-210)	140日
ビスマス-214 (Bi-214)	20分
ラドン-222 (Rn-222)	3.8日
ウラン-238 (U-238)	45億年
ウラン-234 (U-234)	7.0億年

# 日本人の平均年間実効線量 (mSv/年)

## 医療で利用される放射性核種の例

- ・前立腺がん治療: I-125
- ・バセドウ病治療: I-131
- ・血管造影: Tc-99m
- ・がん検査(ペット造影): F-18
- ・がん治療: Co-60
- ・脳腫瘍治療: 中性子
- ・温泉治療: Rn-222 (ラドン)

医療技術が進んだ先進国では、医療などによる人的行為によって受ける年間の実効線量は、自然放射線から受ける実効線量よりも高いことが知られている。

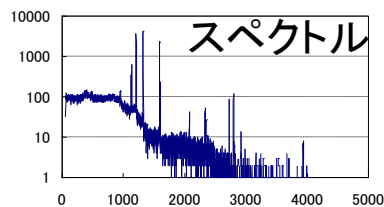
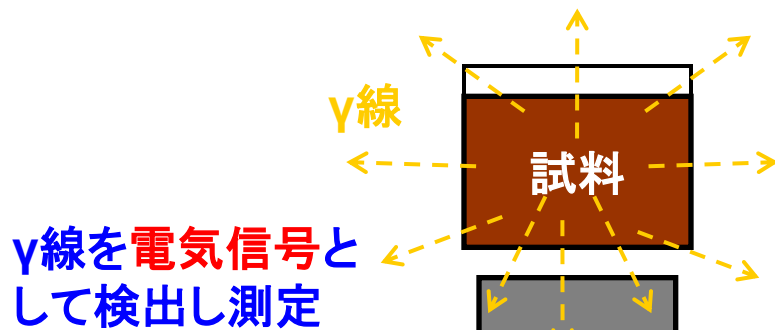


合計: **3.8 mSv/年** (医療を除く自然放射線: 1.5 mSv/年)

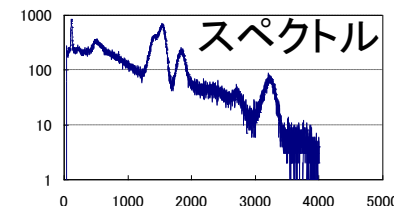
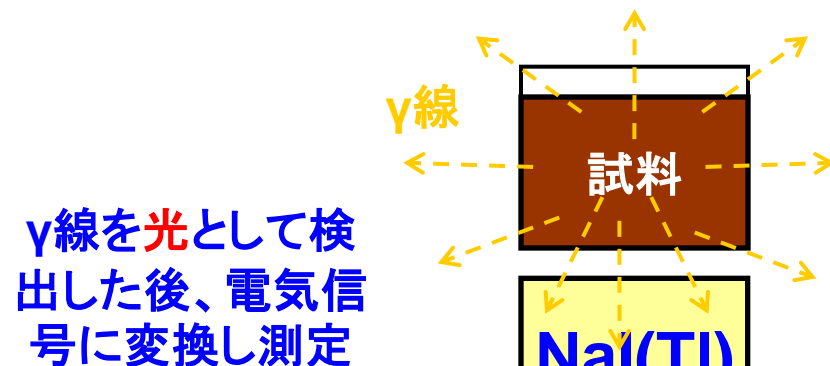


# Ge半導体検出器とNaI(Tl)シンチレーション検出器による放射能測定の実験

## Ge半導体検出器



## NaI(Tl)シンチレーション検出器

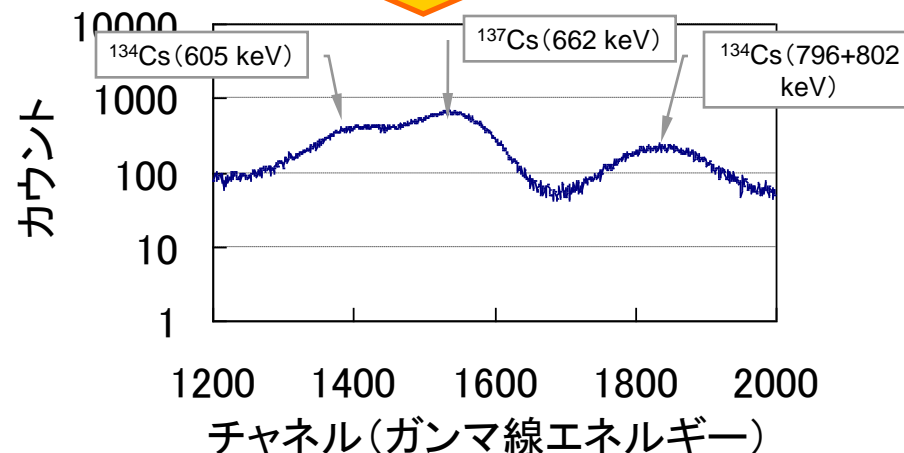
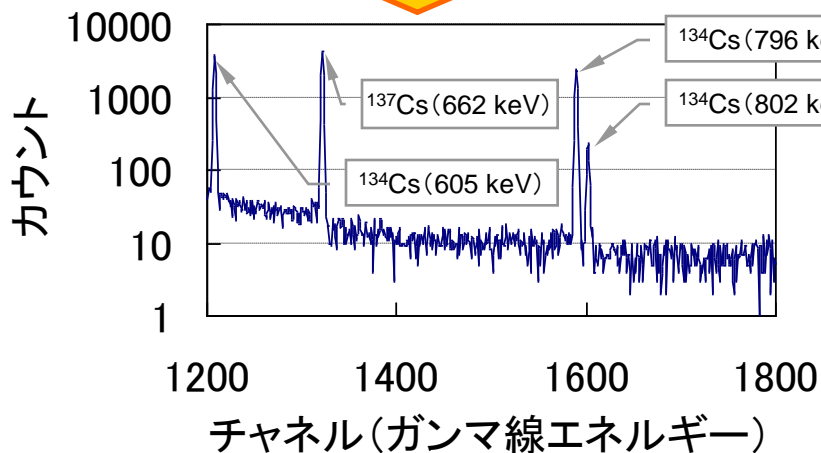
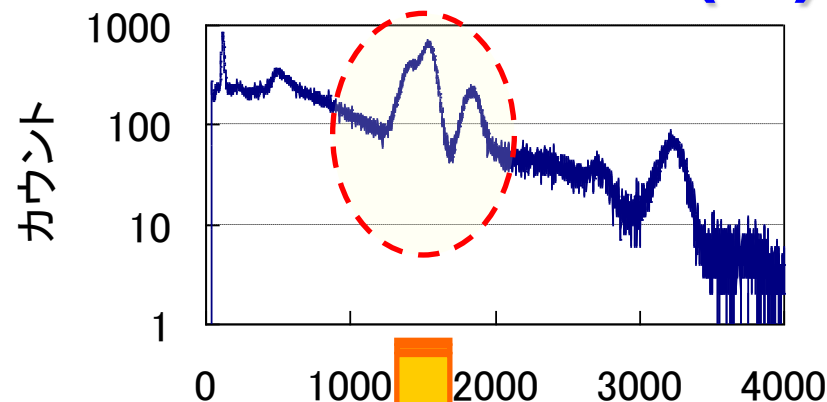
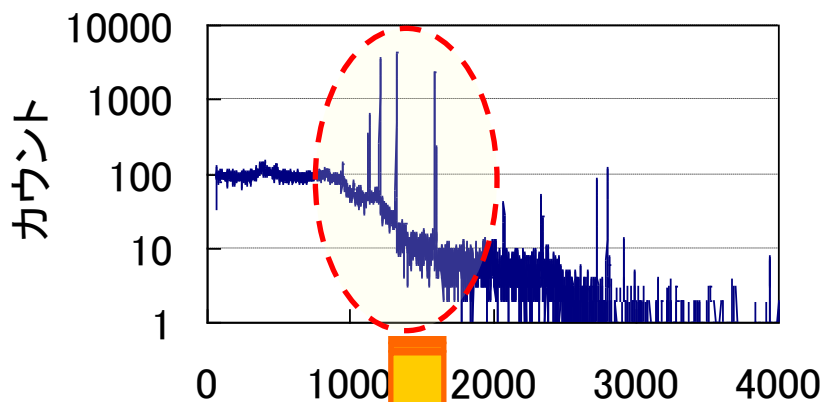


# 放射能測定機器の特徴

## Ge

原発事故後に福島県で採取した**土壌試料**の  
スペクトル(測定時間:7200秒)

## NaI(Tl)

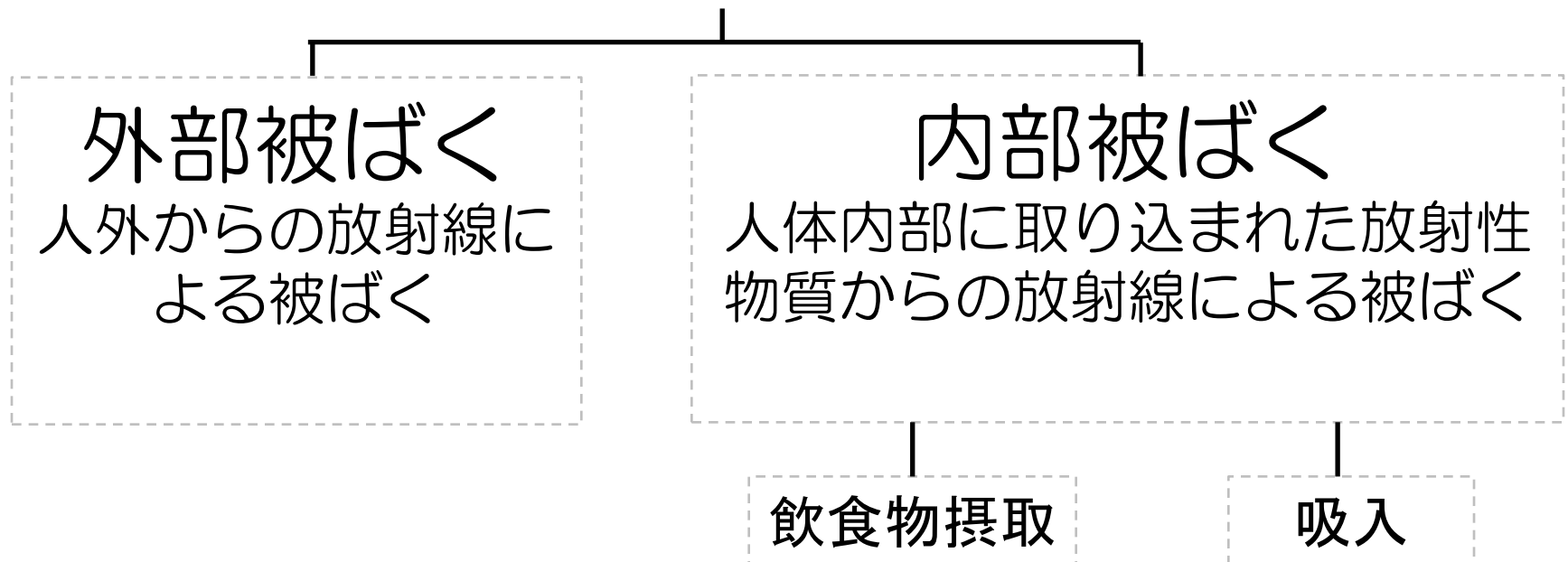


- ・エネルギー**分解能が高い**
- ・感度低い
- ・**維持管理が煩雑**(液体窒素冷却要など)
- ・高価

- ・エネルギー**分解能が低い**
- ・感度高い
- ・**維持管理が容易**(液体窒素冷却不要など)
- ・比較的安価

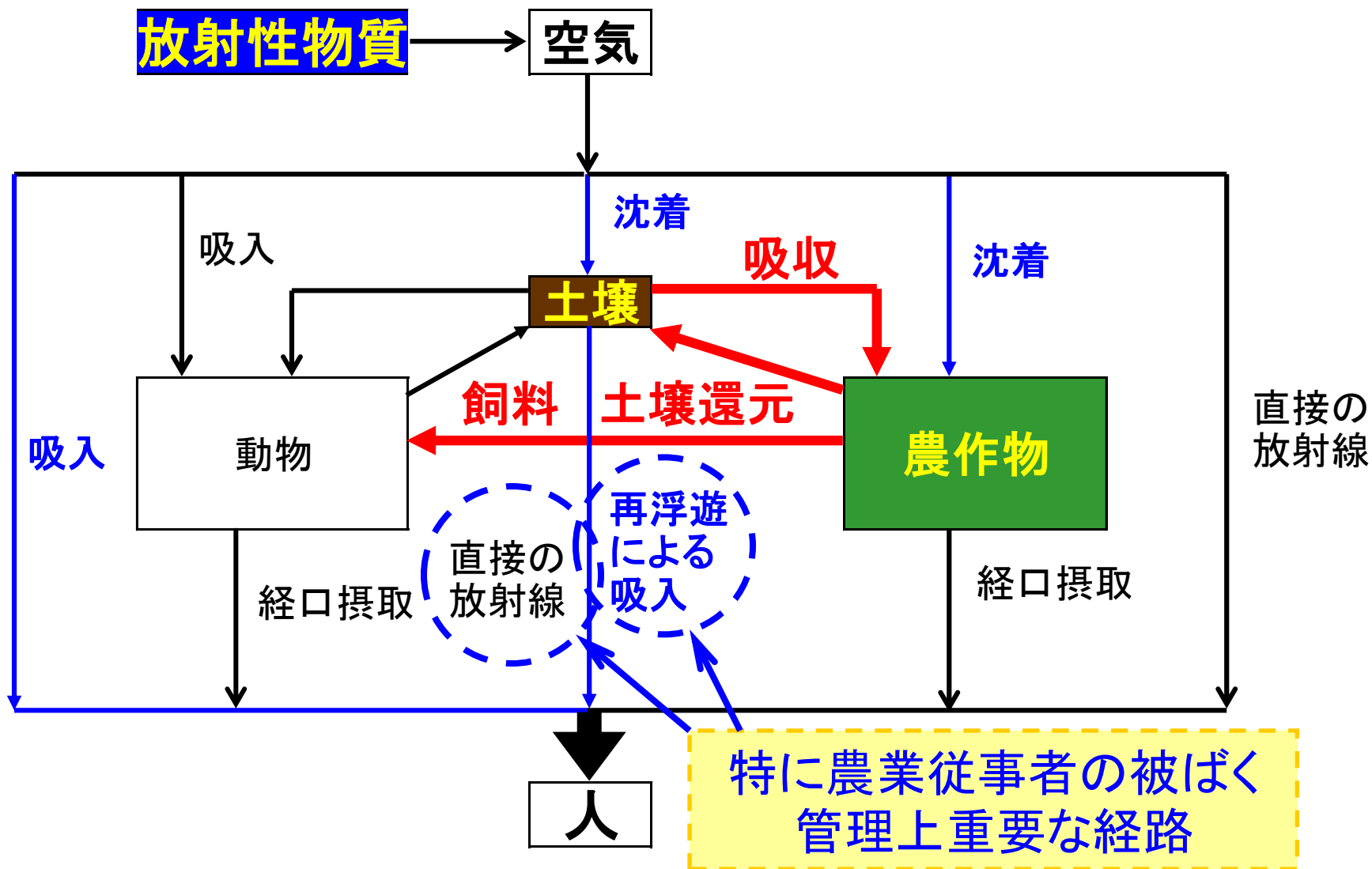
# 人体への被ばく

## 被ばく経路

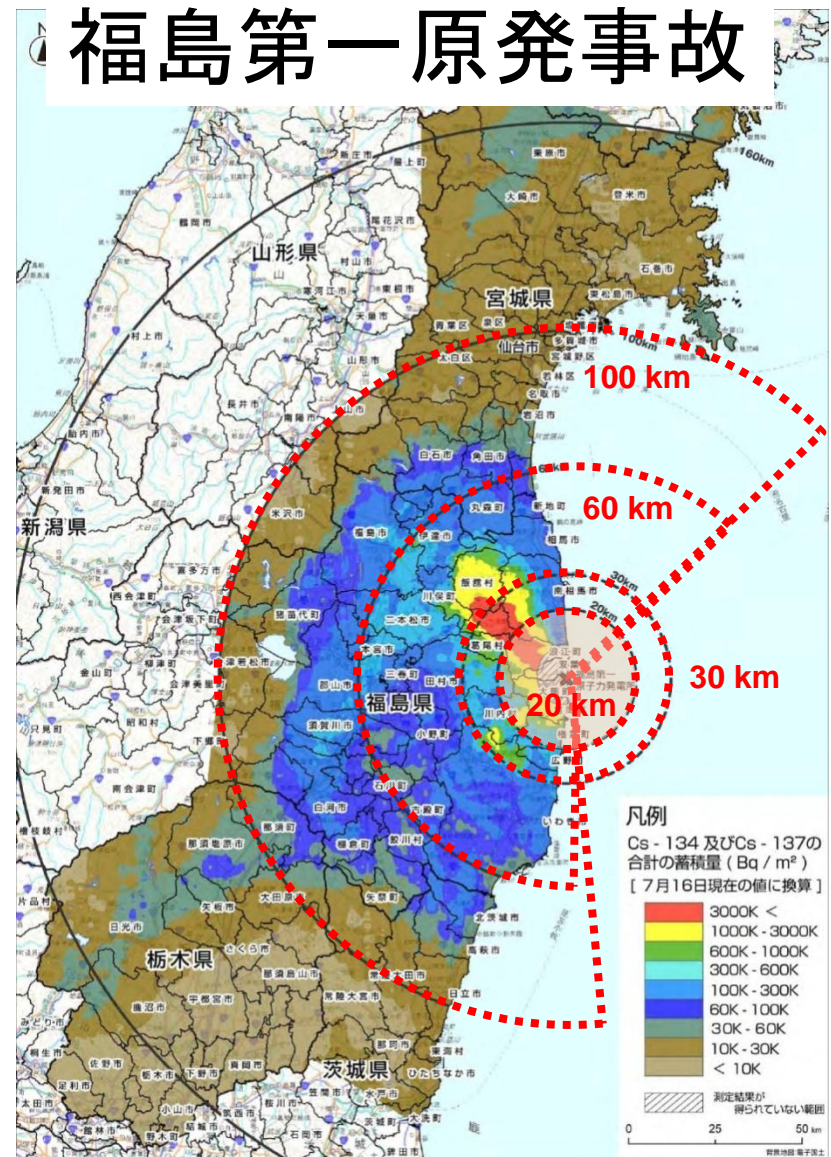
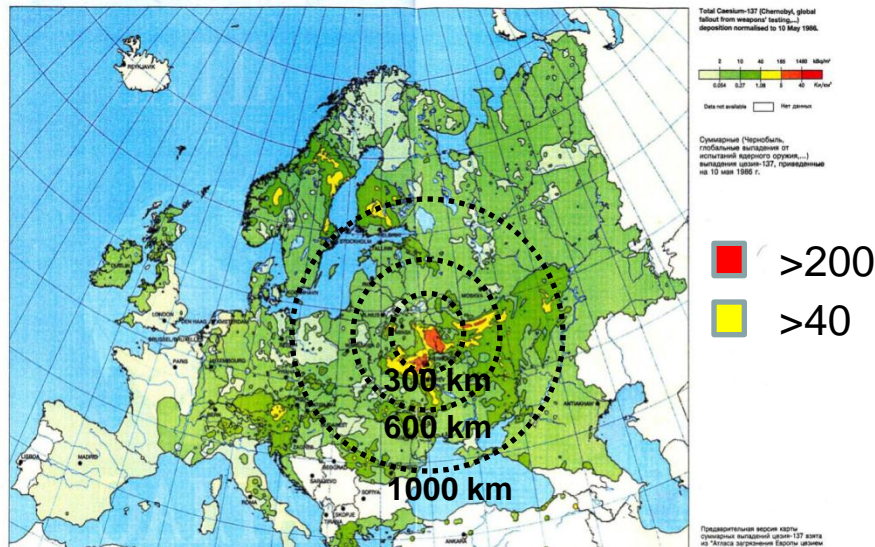




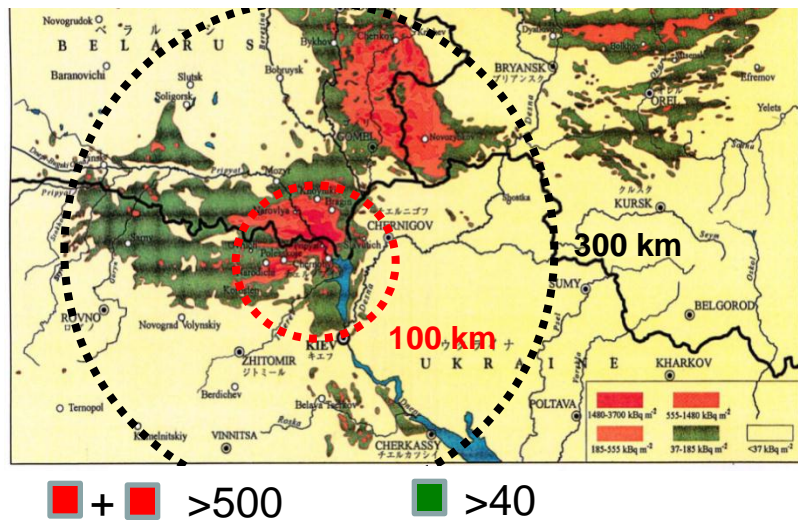
# 大氣中に放出された放射性核種と人との間の移行経路 (ICRP Pub.29から作成)



# 放射性セシウムの表層汚染マップ(kBq/m<sup>2</sup>)

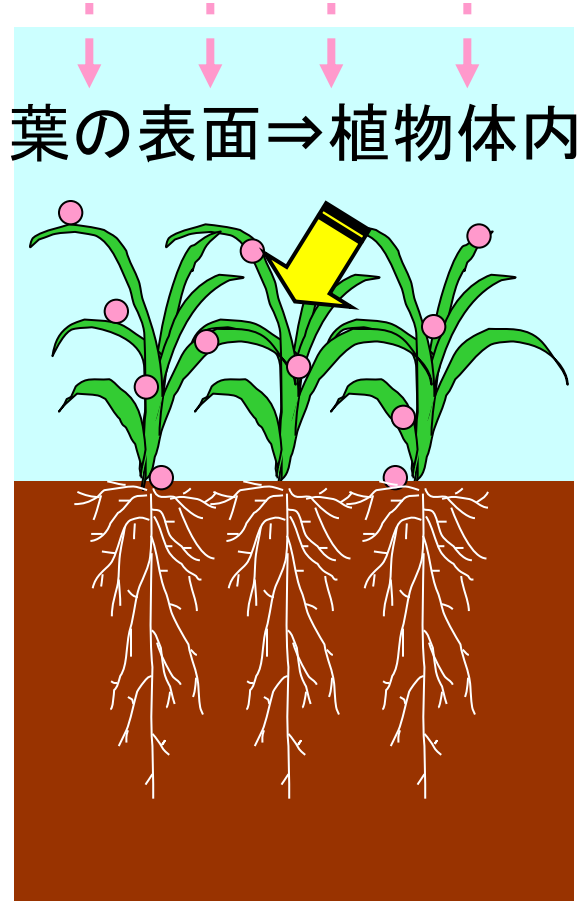


## チェルノブイリ原発事故



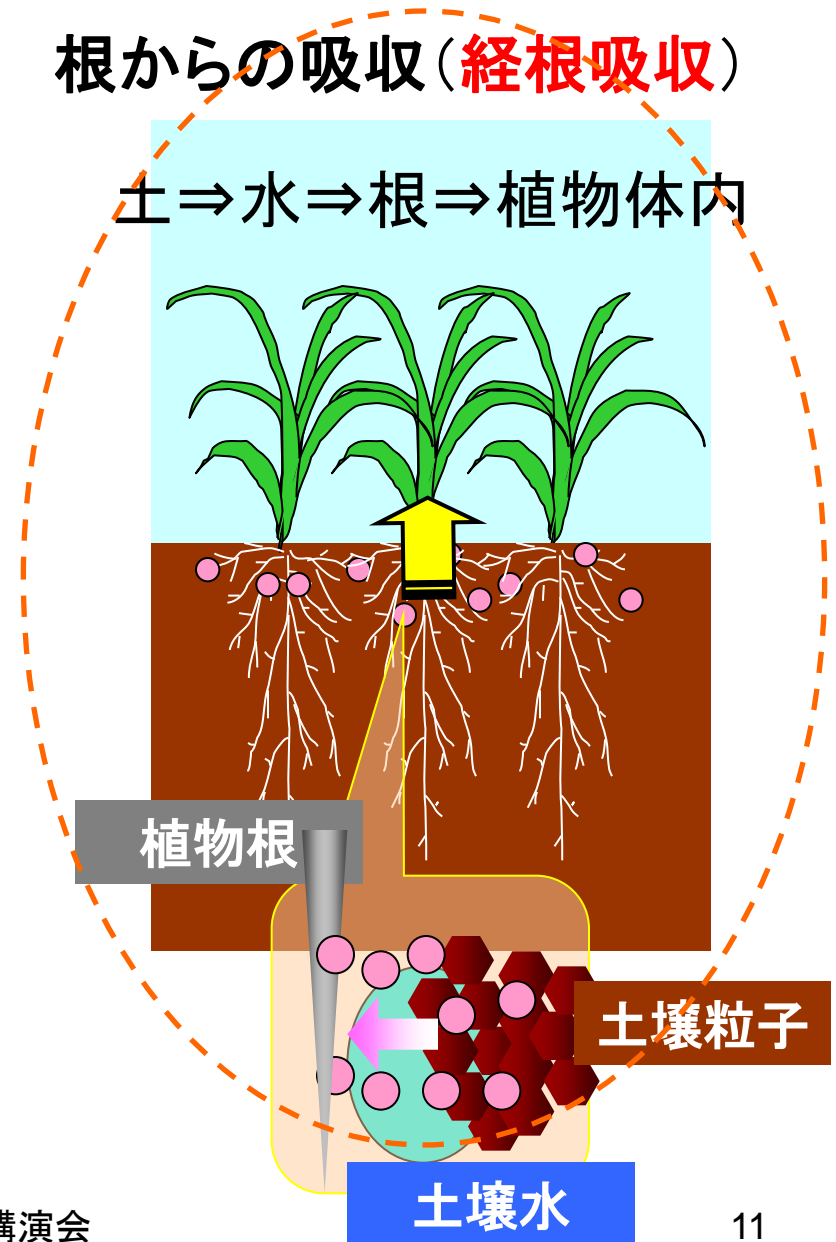
# 植物へ吸収される放射性核種の移行経路

## 葉からの吸収(葉面吸収)

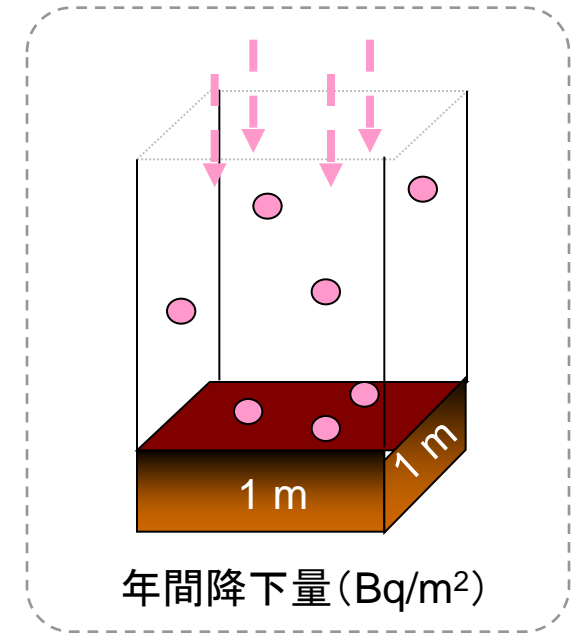
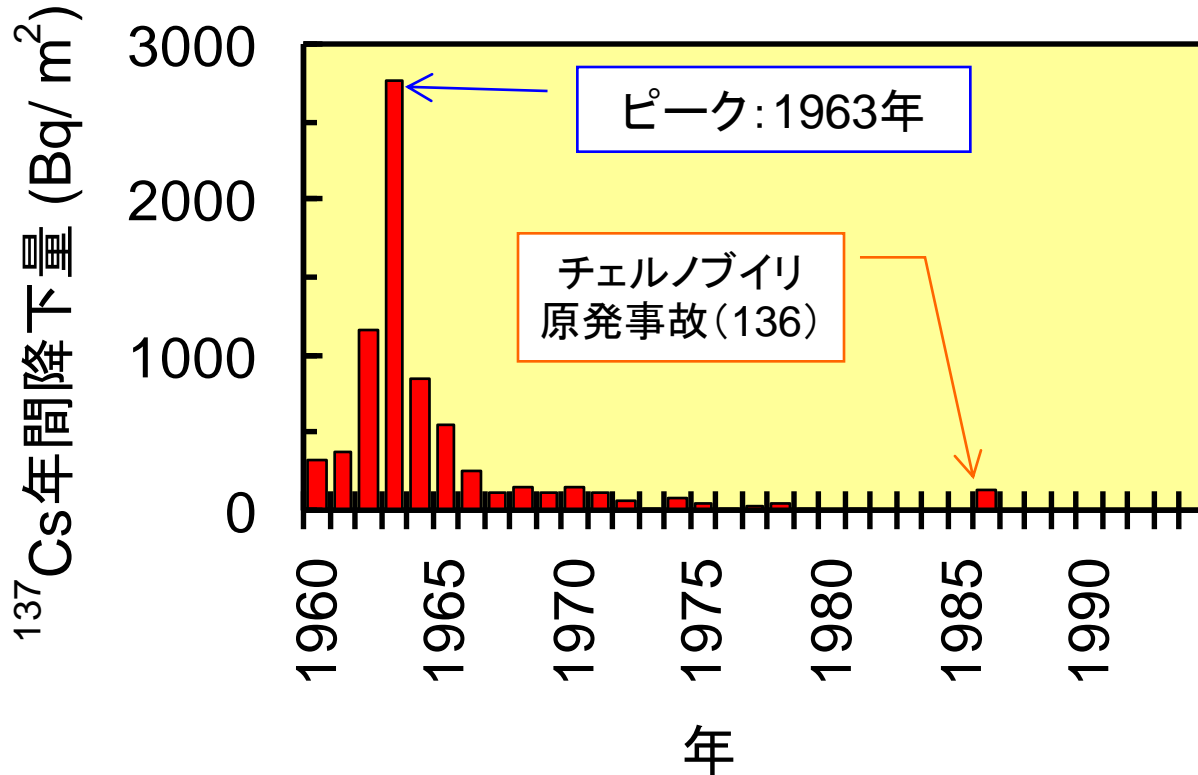


● 放射性核種

## 根からの吸収(経根吸収)



# 青森市における1960-1994年の $^{137}\text{Cs}$ 年間降下量の推移

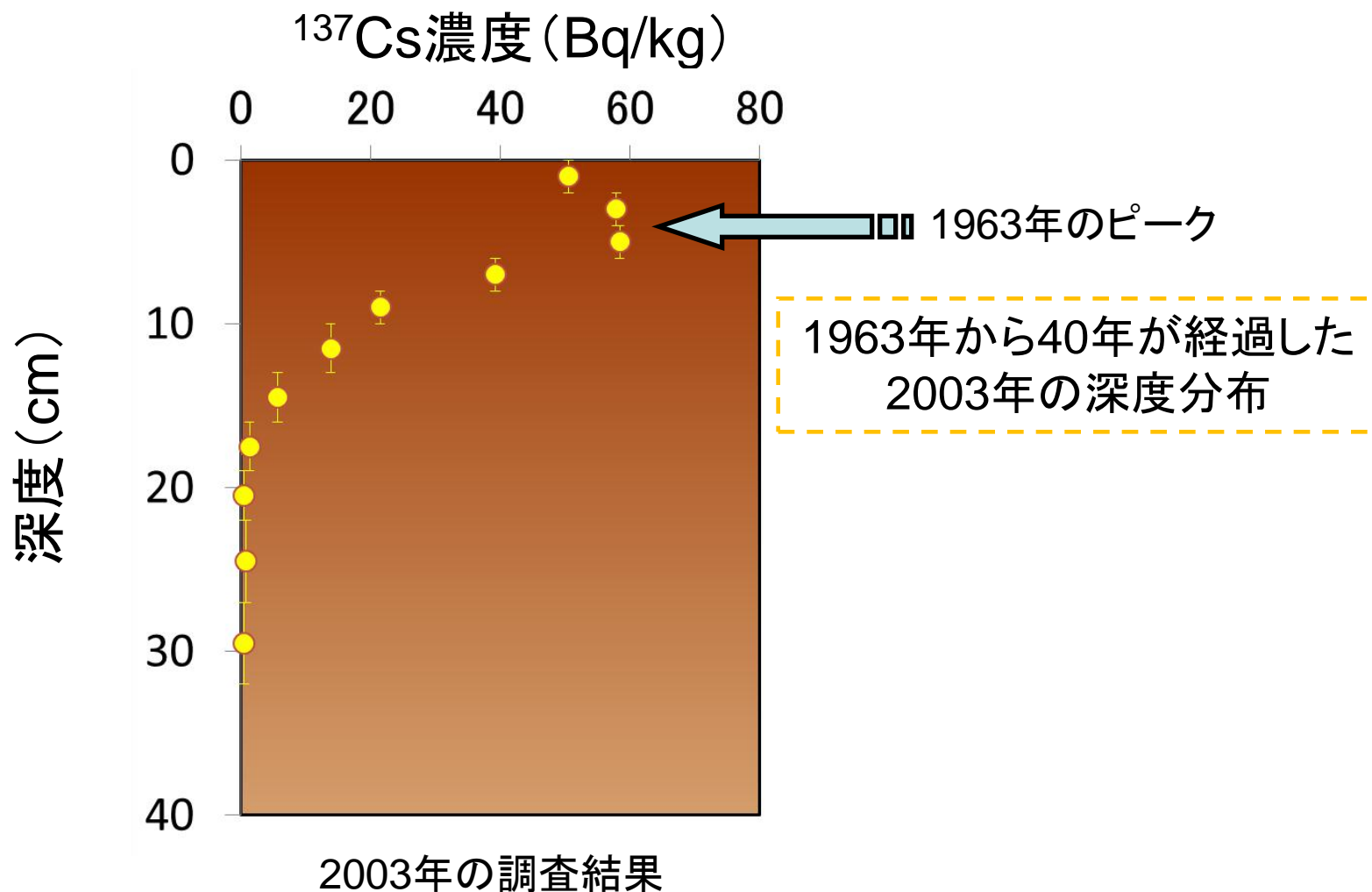


(Hiroseら、1987; Aoyamaら、1991; NIRS、1979-1997から作成)

フォールアウト $^{137}\text{Cs}$ : 大気圏核実験由来の放射性 $^{137}\text{Cs}$ は、  
土壌に沈着後数十年が経過

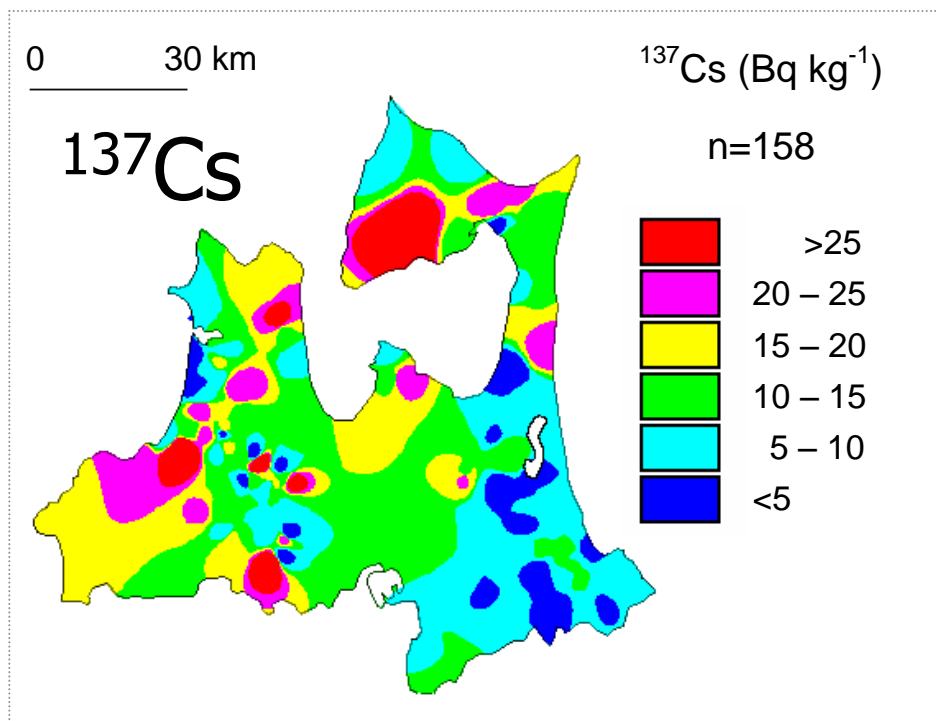


# 青森県六ヶ所村未耕地における 2003年の土壌中 $^{137}\text{Cs}$ 濃度鉛直分布



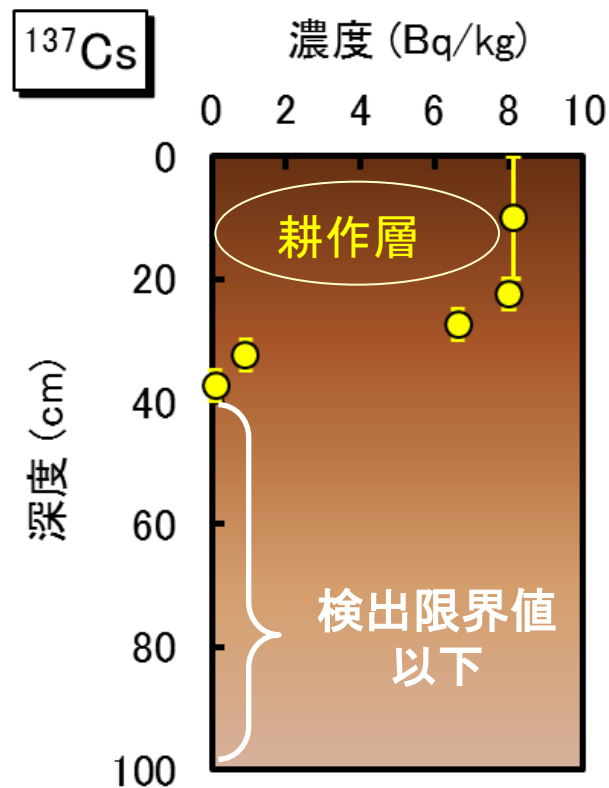
# 青森県における耕作土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 濃度分布

青森県内の耕作土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 濃度を  
基に作成した県内濃度分布



1999年～2002年の調査結果  
平均値: 11 Bq/kg  
(土壤中 $^{40}\text{K}$ 濃度: 280 Bq/kg)

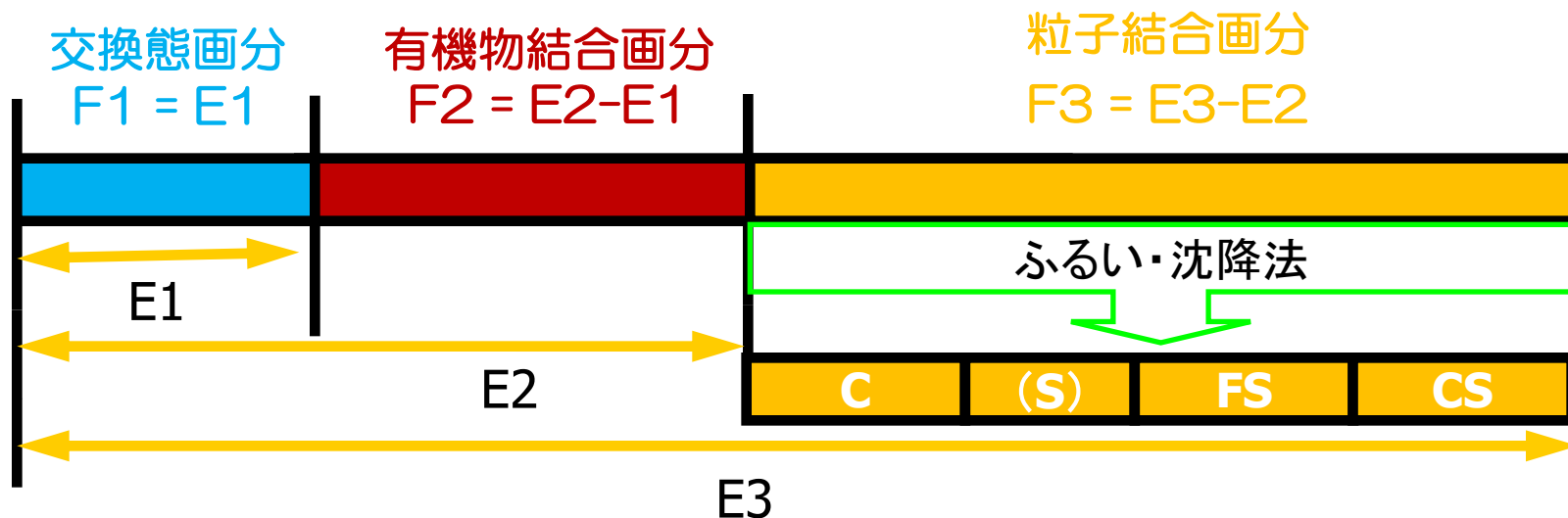
十和田市藤阪における  
 $^{137}\text{Cs}$ 鉛直分布の例



2001年の調査結果



# 土壤中における放射性 $^{137}\text{Cs}$ の存在形態



## 抽出形態画分

- E1: 1M酢酸アンモニウム
- E2: 過酸化水素+硝酸+酢酸アンモニウム
- E3: 全濃度

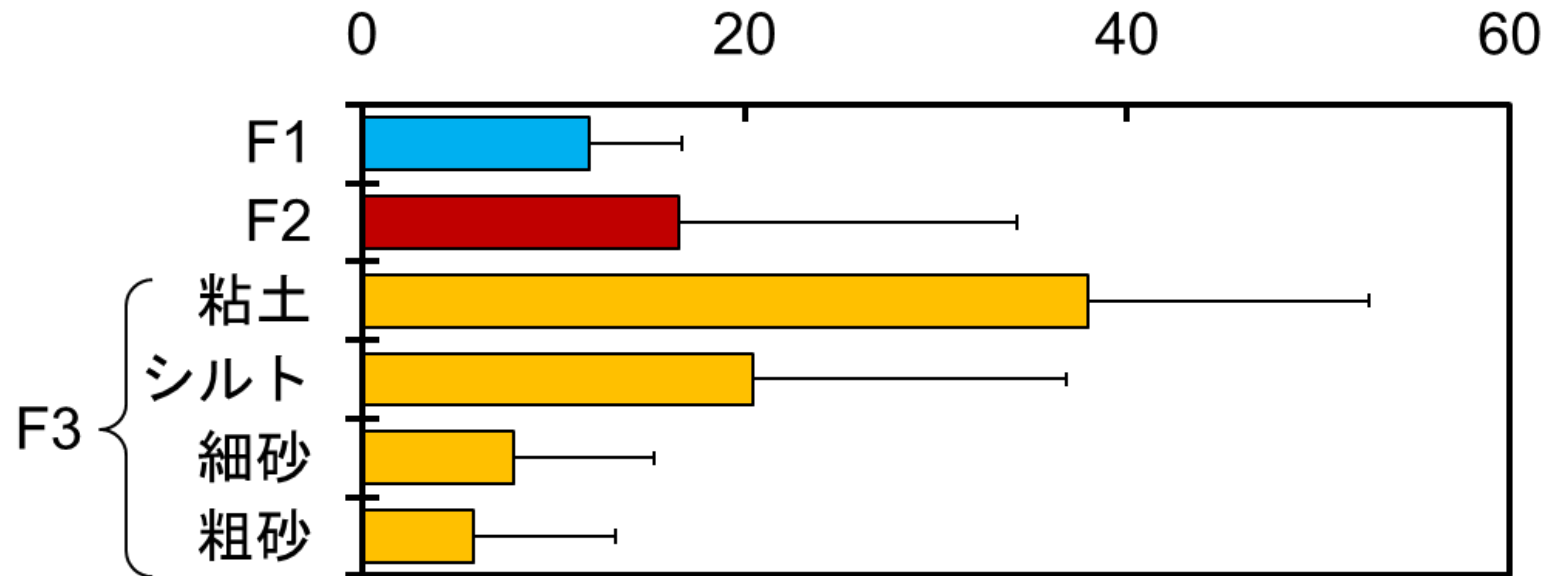
## 粒径分布

- C: 粘土 (< 0.002 mm)
- S: シルト (0.002 ~ 0.02 mm)
- FS: 細砂 (0.02 ~ 0.2 mm)
- CS: 粗砂 (0.2 ~ 2 mm)

# 土壤中フールアウト $^{137}\text{Cs}$ の存在形態分布

分析土壌: 11試料

存在割合 (%)

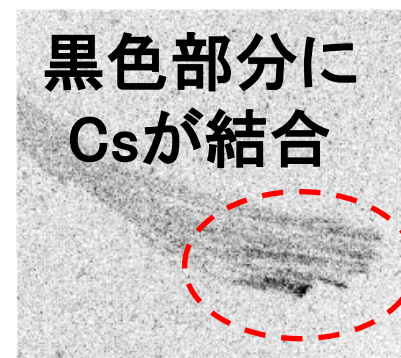
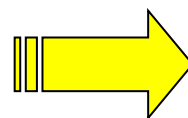
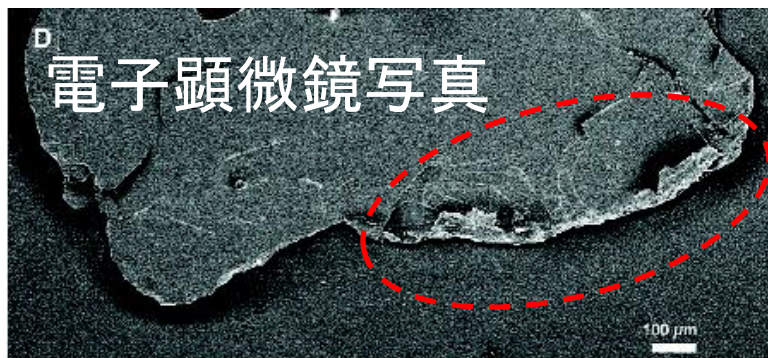
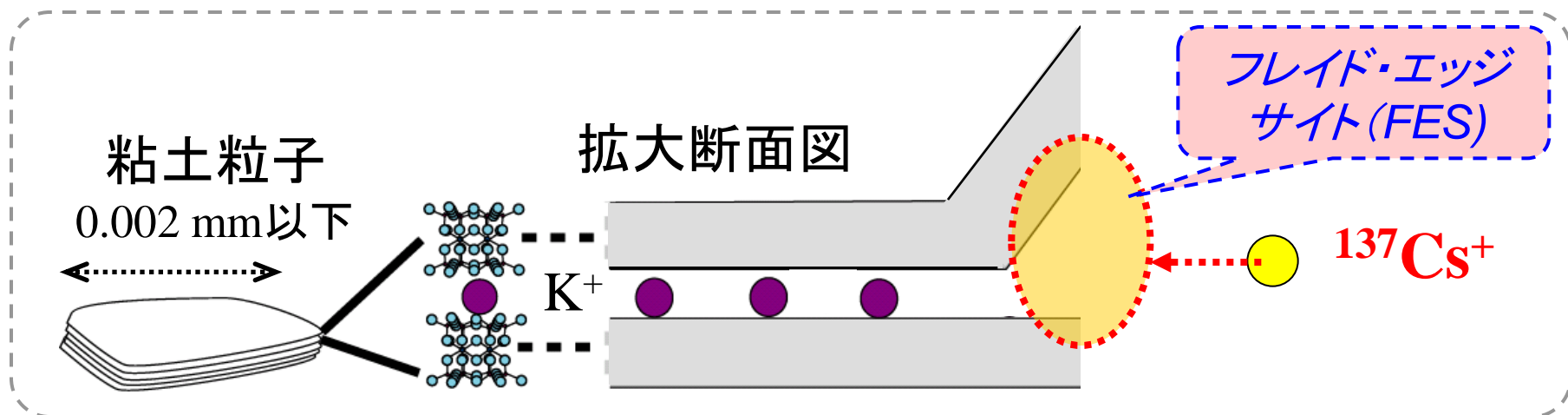


F1 (比較的溶けだしやすい部分; 交換態) : 12%

F2 (有機物と結合している部分; 有機物結合態) : 16%

F3 (粒子中に存在している部分; 粒子結合態) : 72%

# なぜ土壌の粒子中に $^{137}\text{Cs}$ は強く結合するか



# 土壌－農作物(可食部)の 移行係数(Transfer factor、TF)の定義

$$TF = \frac{\text{農作物中放射能濃度 (Bq/kg)}}{\text{土壌中放射能濃度 (Bq/kg)}}$$

学術的には農作物中濃度を乾燥重量を基準として移行係数を表示する場合が多い。農林水産省のホームページなどでは、新鮮重量を基準として表示されているので、新鮮重量に対する乾燥重量割合で換算する必要がある。なお、土壌中濃度は乾燥重量を基準とする。

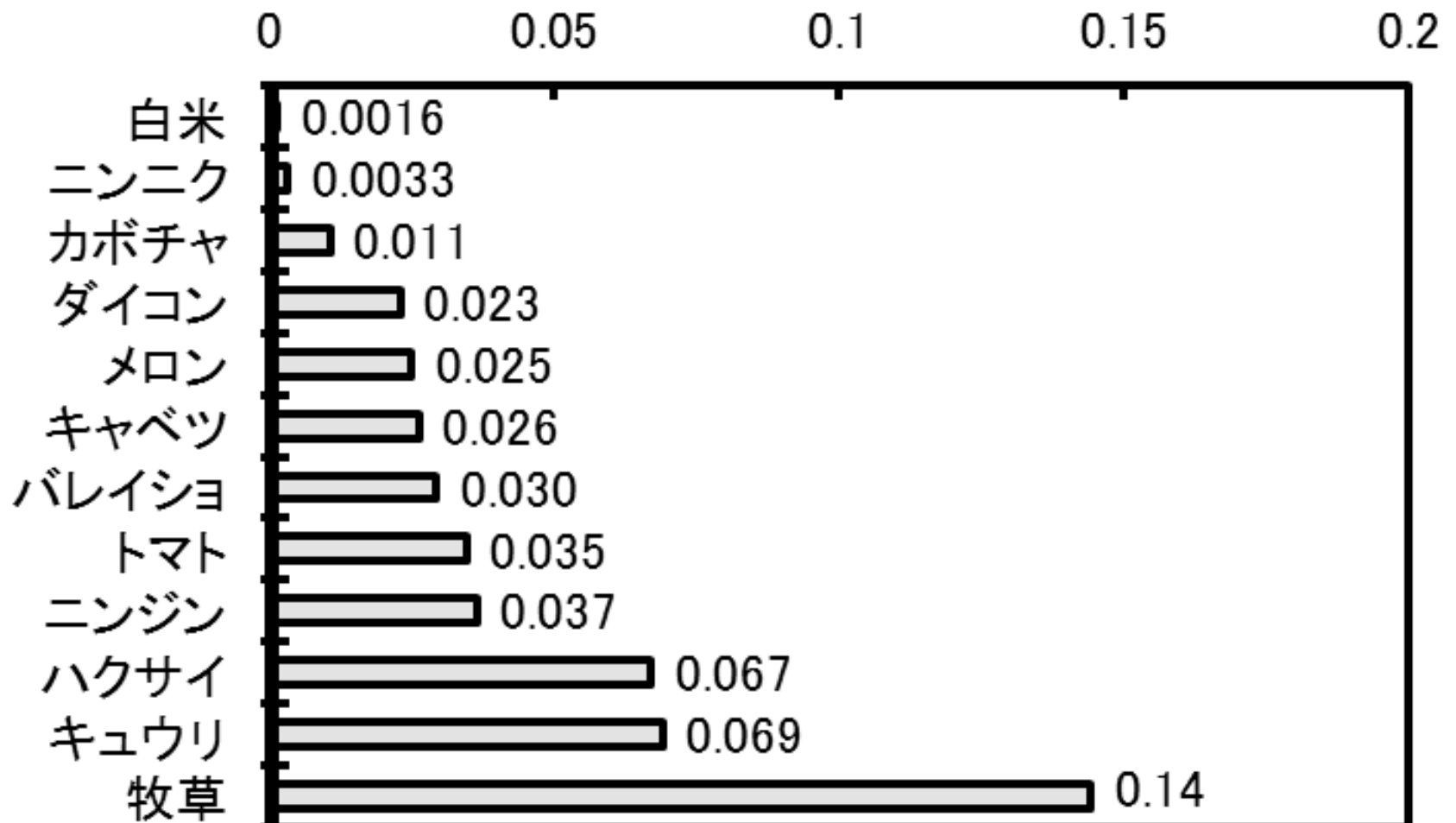
(例) 乾燥重量を基準とした移行係数が0.1で、乾燥重量割合が0.2の場合:

$$\text{新鮮重量の移行係数} = 0.1 \times 0.2 = 0.02$$

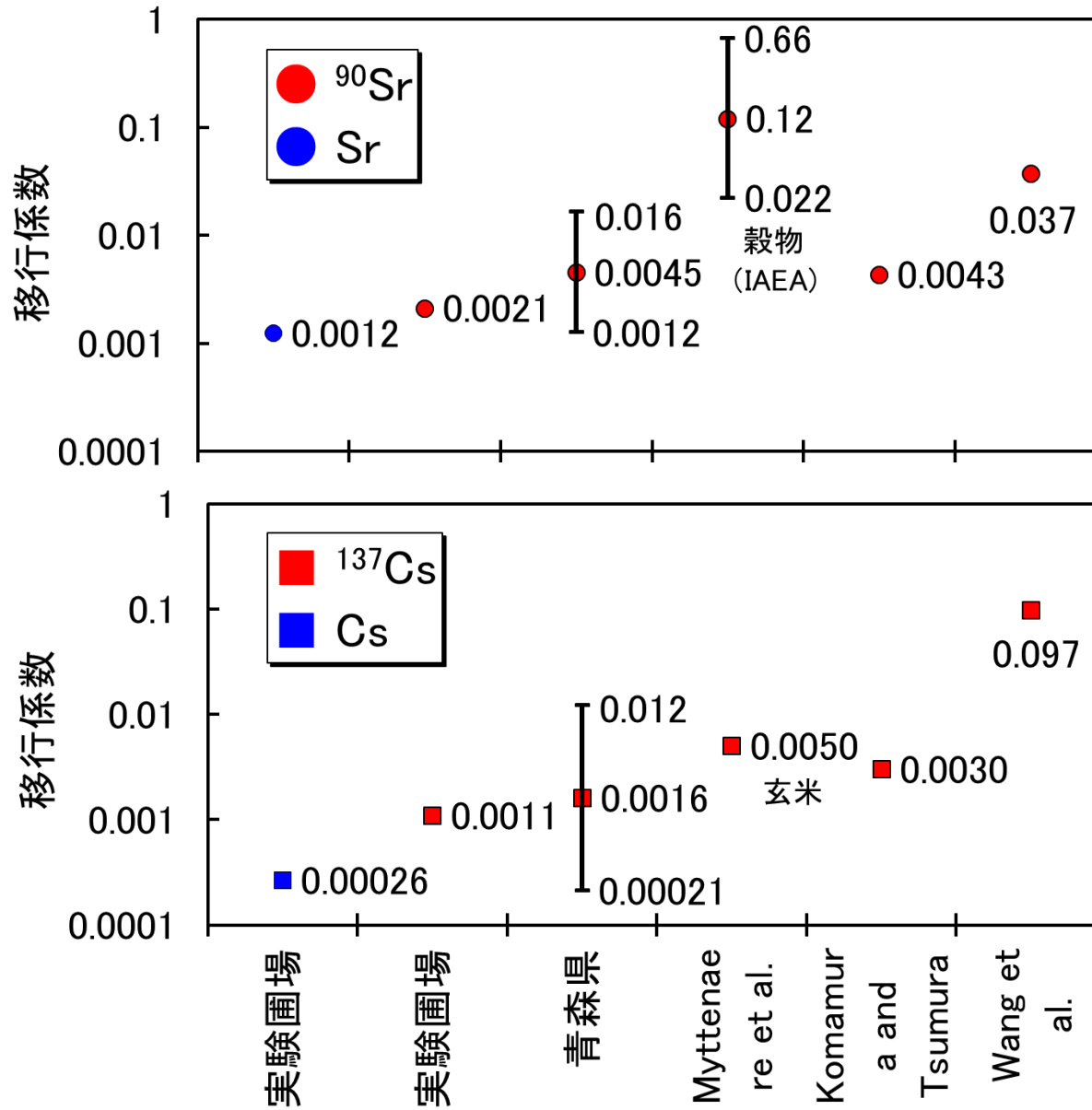
となり、新鮮重量から求めた移行係数は、乾燥重量の移行係数の5分の一となる。

# 土壌から農作物(可食部)への $^{137}\text{Cs}$ 移行係数

$^{137}\text{Cs}$ 移行係数(乾物)



# 土壌—白米間の $^{90}\text{Sr}$ および $^{137}\text{Cs}$ の移行係数



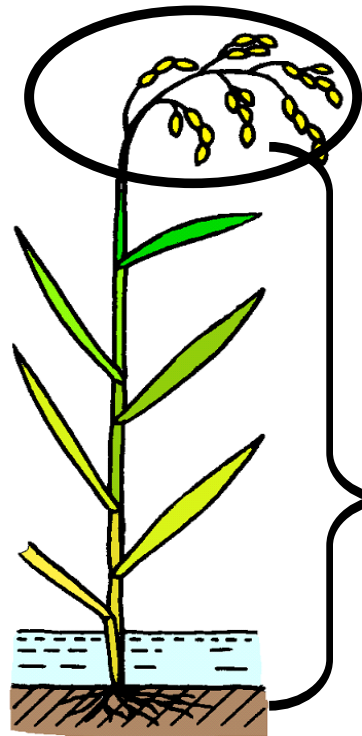


# 福島原発事故前・後の作物(可食部、生)中<sup>137</sup>Csと<sup>40</sup>K濃度

農作物	試料数	平均値		
		<sup>137</sup> Cs	<sup>40</sup> K	
		Bq/kg 生		
米				
白米	20	0.022	7	19
根菜類				
ダイコン	13	0.028	6	64
ニンジン	9	0.042	15	114
バレイショ	26	0.11	29	116
葉茎菜類				
ハクサイ	6	0.074	14	68
キャベツ	8	0.038	9	66
ニンニク	14	0.019	6	157
果菜類				
キュウリ	11	0.040	14	66
カボチャ	6	0.017	13	115
トマト	21	0.032	10	71
果実的野菜				
メロン	8	0.060	14	89

\* 土壌中<sup>137</sup>Cs濃度を5000 Bq/kgとした時の作物中濃度予測値。

# イネの部位別利用



可食部

白米

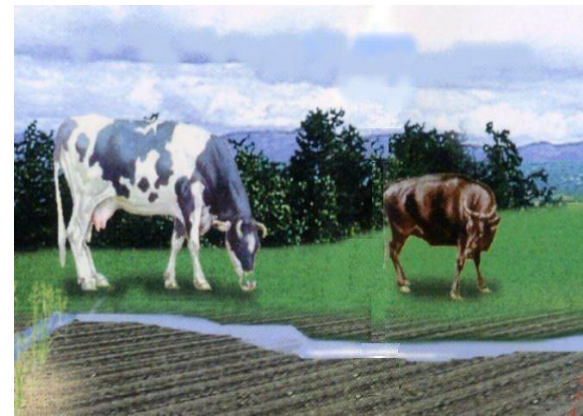
非可食部

ヌカ

モミガラ

ワラ

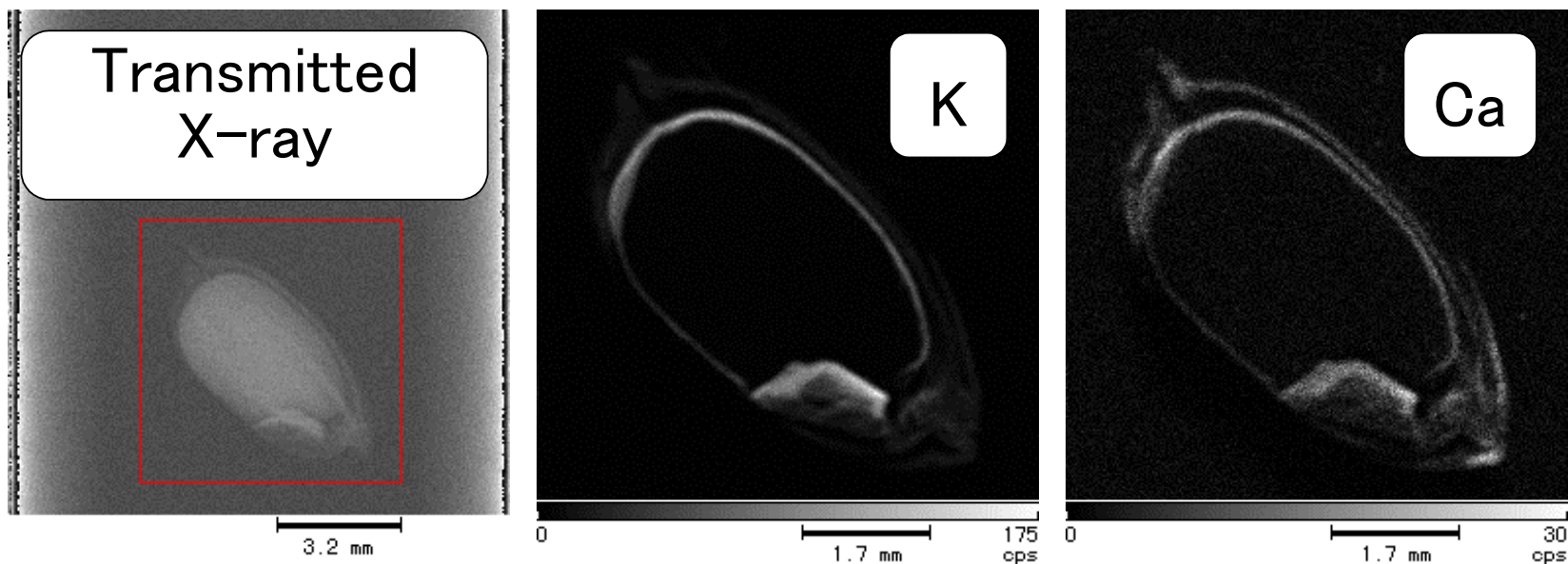
主食



飼料、堆肥

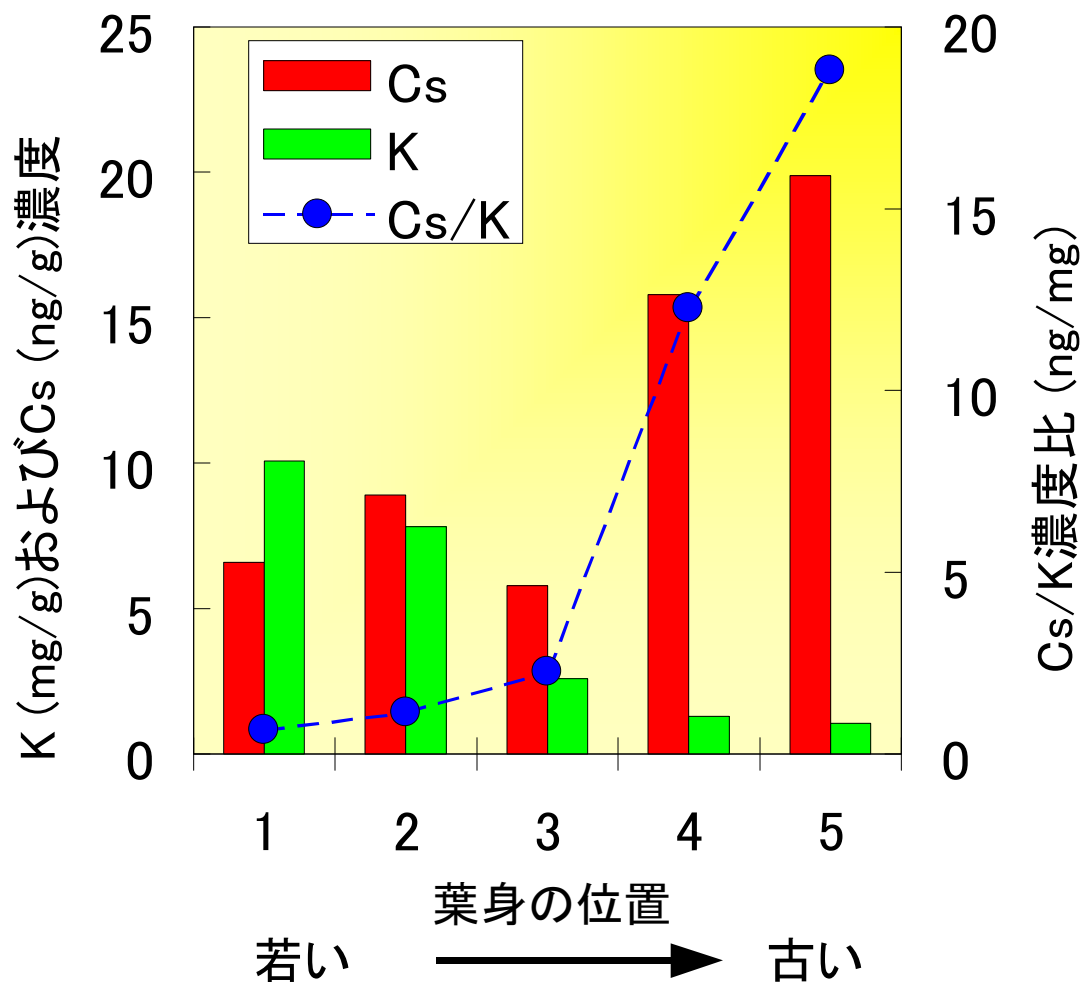
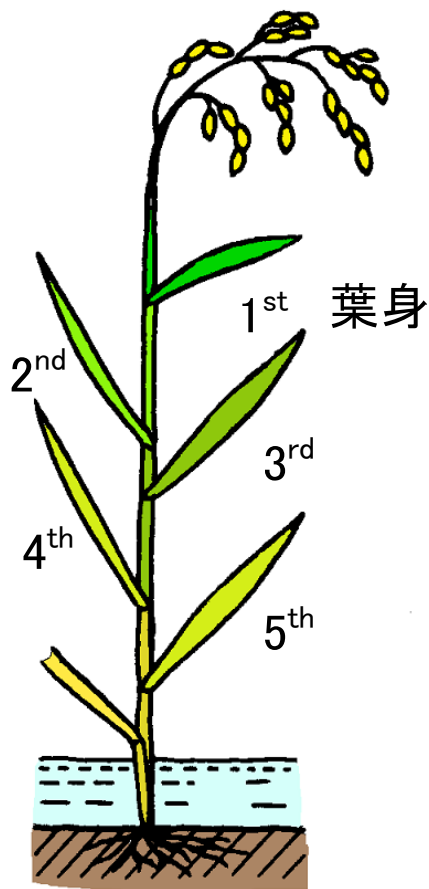
# X線分析顕微鏡によるイネ種子部のX線透過図、 KおよびCa相対濃度

(白色部が濃度の高い部位)



# イネ葉身中KおよびCs濃度分布

KとCsは同じアルカリ金属に属し、性質は比較的類似？



# 土壤中濃度を1.0とした時のイネの部位別 $^{90}\text{Sr}$ および $^{137}\text{Cs}$ 相対濃度

$^{90}\text{Sr}$

$^{137}\text{Cs}$

モミガラ: 0.051

モミガラ: 0.0049

白米: 0.0021

白米: 0.0011

ヌカ: 0.062

ヌカ: 0.0094

玄米: 0.0081

玄米: 0.0019

モミ: 0.016

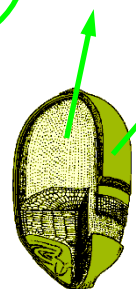
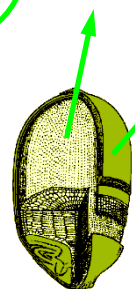
モミ: 0.0025

ワラ: 0.21

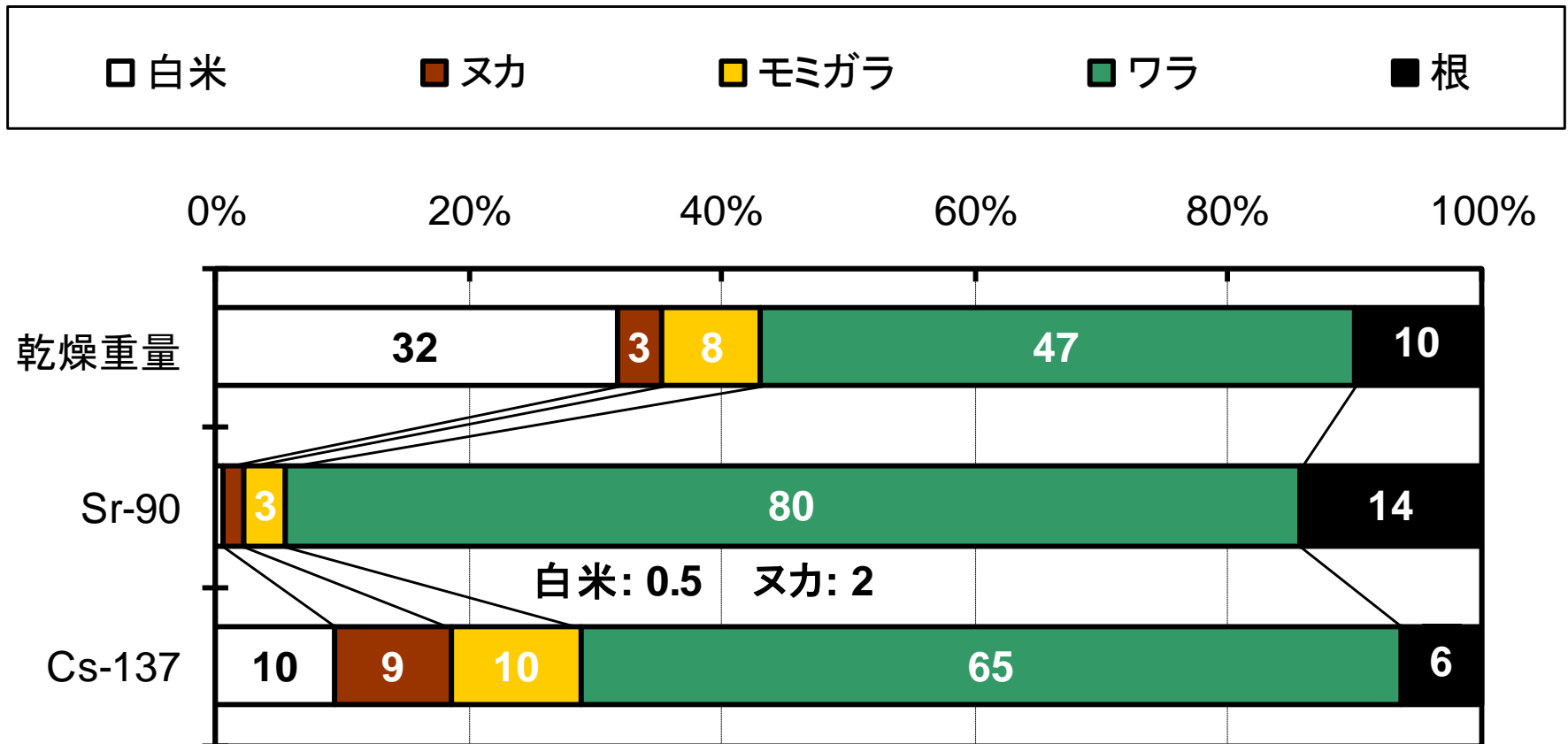
ワラ: 0.0050

根: 0.18

根: 0.0023



# 収穫時におけるイネ部位別の乾物重量、 $^{90}\text{Sr}$ および $^{137}\text{Cs}$ の存在割合





# 単位面積当たりの<sup>90</sup>Srおよび<sup>137</sup>Cs存在量(Bq/m<sup>2</sup>)

ヌカ:

0.017 / 0.0020

モミガラ:

0.031 / 0.0023

白米:

0.0053 / 0.0021

玄米の収量; 0.5 (kg/m<sup>2</sup>)

ワラ:

0.79 / 0.015

土壌: 890 / 700

1 m x 1 m x 20 cm depth

**<sup>90</sup>Sr/<sup>137</sup>Cs**

## 除去率 (R)

$$R (\%) = \frac{C_b}{C_s} \times 100$$

$C_b$ ; イネの部位別含量 (Bq/m<sup>2</sup>)

$C_s$ ; 表層土壌の含量 (0-20 cm、  
Bq/m<sup>2</sup>)

# 土壌表層からイネに吸収される $^{90}\text{Sr}$ および $^{137}\text{Cs}$ の割合(除去率)

試料	除去率 <sup>a</sup>	
	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$
	%	
イネ部位別区分		
白米	0.00059	0.00031
ヌカ	0.0019	0.00029
モミガラ	0.0035	0.00033
ワラ	0.088	0.0021
地上部	0.094	0.0030

<sup>a</sup> 表層土壌0~20cmから作物に移行する割合.

# まとめ $^{137}\text{Cs}$ -

1. 土壌中での移動は遅かった。
2. 土壌中の細かな粒子(粘土)に多く含まれていた。
3. 土壌から作物への移行は、時間の経過に伴って減少した。
4. 農作物の種類、土壌の種類などによって移行率(移行係数)は異なった。
5. イネ中 $^{137}\text{Cs}$ 濃度は、部位によって約10倍の違いがあった。
6. 白米中 $^{137}\text{Cs}$ 濃度が部位の中で最も低く、移行係数は0.001であった。
7. 白米中 $^{137}\text{Cs}$ の存在割合はイネ全体の10%であった。白米を除く非可食部に90%が存在していた。
8. 表層土壌からイネ地上部へ移行する $^{137}\text{Cs}$ の除去率は、おおよそ0.003%であった。

# 暫定規制値を超えたイネについて

## イネへの放射性セシウムの移行の特徴:

- ▶ 土壌からイネへの移行は低い
- ▶ 水からの移行率は高い(イネ以外にも、クレスンなど)  
水からの移行 >> 土壌からの移行
- ▶ 陸稲に比べ水稻のイネ中濃度は高い

## 状況:

△ イネの暫定規制値を超えた水田は、山間部に多い

⇒ 森林から放射性セシウムを含む水が水田に供給された可能性がある。  
または、森林の落ち葉、木片などから由来している可能性もある。

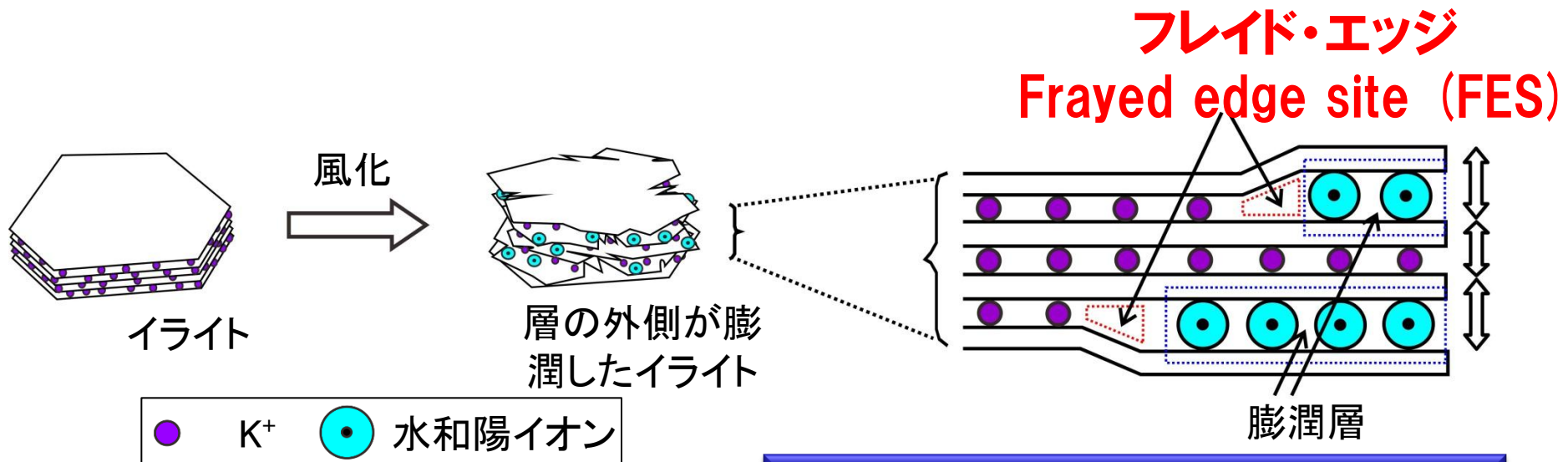
△ カリウム肥料の使用量が比較的少ない

⇒ 通常の圃場管理より極端に少ないカリウムの施用量であれば、セシウムの吸収率が高くなった可能性がある。

△ 根が浅い

⇒ 水中の放射性セシウムの吸収を促進する可能性がある。

# 土壌への放射性Csの捕捉



FESに結合した放射性セシウムは、植物への移行が困難

FESにおけるイオン選択性  
 $Cs^+ \gg NH_4^+ > K^+$   
1000 : 5 : 1

FESの測定は煩雑 ⇒ FESに代わる指標値

# 放射性セシウム捕捉ポテンシャル (和訳：塚田・中尾・武田・山口) (Radiocaesium Interception Potential, RIP)

フレイド・エッジにおけるCsのKに  
対する吸着選択係数 (≒1000)

土壌1kgあたりの  
フレイド・エッジ量

$$\begin{aligned} \text{RIP (mol/kg)} &= K_c^{\text{FES}} (\text{Cs-K}) \times [\text{FES}] \\ &= \frac{\text{FES吸着Cs量}}{\text{溶液Cs濃度}} \times \frac{\text{溶液K濃度}}{\text{FES吸着K量}} \times [\text{FES}] \\ &= K_D^{\text{Cs}} \times (\text{溶液K濃度}) \end{aligned}$$

(FESの指標)

||  
 $K_D^{\text{Cs}}$

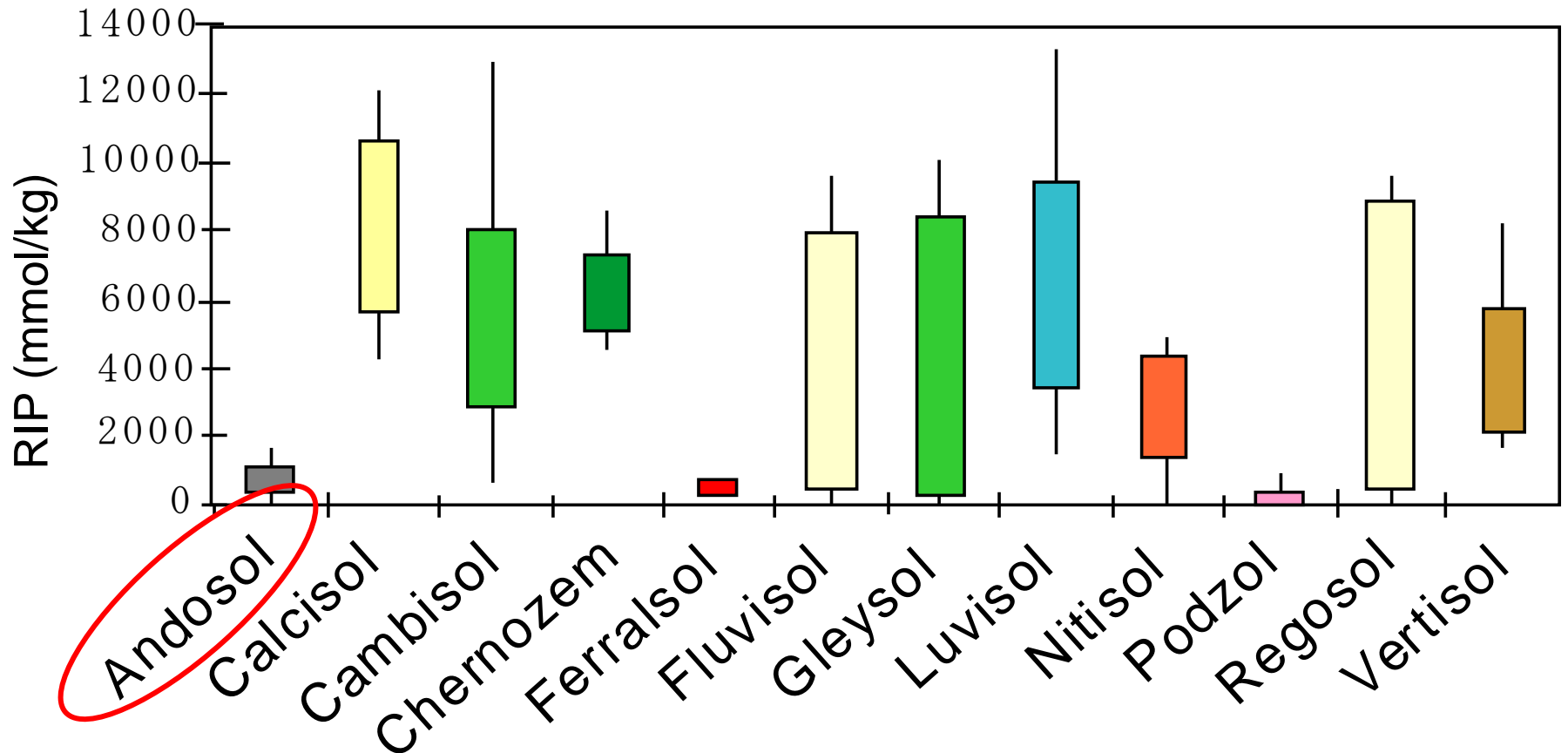
[FES]

● Cs, K の吸着がFESのみで起こると仮定  
(FESはK<sup>+</sup>で、それ以外の交換サイトをCa<sup>2+</sup>で飽和)

- 放射性Csアイソトープを用いて、**固液分配係数 ( $K_D^{\text{Cs}}$ )** を測定  
(Cremers et al., 1988, Nature), (Wauters et al., 1996, Appl. Geochem.)



# 世界の土壌のRIP



(Vandebroek et al., 2012, Journal of Environmental Radioactivity)

# 農作物の放射性セシウム濃度を減らすための対策

## 土壌側から働きかける方法

### 1. 取り除く

- 表土除去
- 微粒子の除去

### 2. 薄める

- 耕起
- 深耕

### 3. 閉じ込める

- 天地返し
- 資材施用

## 植物の特性を利用した方法

### 1. 品種の選択

### 2. 施肥

- カリウム欠乏でセシウム吸収量が増加
- アンモニウムを含む肥料は、土壌のセシウムを動きやすくする可能性

## その他

### 1. 水の管理

# 食品中の放射性物質に係る 規格基準の設定について

平成23年12月22日  
薬事・食品衛生審議会食品衛生分科会  
放射性物質対策部会

## 経緯

食品安全委員長が平成23年10月27日に厚生労働大臣に対して、食品健康影響評価を答申した。これを受けて、食品中の放射性物質に関する新たな規格基準の設定について、10月28日、厚生労働大臣より薬事・食品衛生審議会長あてに諮問がなされるとともに、放射性セシウムについて食品から許容することのできる線量を**年間5ミリシーベルトから1ミリシーベルトへ引き下げる**とする基本的な考え方が提案された。

# 暫定規制値と新しい基準値の考え方

暫定規制値の考え方：追加的な実際の被ばく線量について適用

放射性セシウム（放射性ストロンチウムの寄与を含む）：年間5ミリシーベルト

暫定規制値下で実際の流通食品の調査結果から求めた年間の被ばく線量：  
0.002～0.02ミリシーベルト

新しい基準値の考え方：

合理的に達成できる限り線量を低く保つ ⇒ 年間1ミリシーベルトに引き下げ

コーデックス委員会の食品の介入免除レベル：年間1ミリシーベルト

WHOの原発事故後の状況にも使用可能な飲料水の基準：年間0.1ミリシーベルト

コーデックス委員会とは：国際食品規格委員会

# 新しい基準値の対象核種と食品区分

## 対象核種:

半減期が1年以上の核種すべて;  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$

⇒ 合計して年間1ミリシーベルトを超えないように放射性セシウムの基準値を設定

## 食品区分:

食品区分の設定に当たっては、①個人の食習慣の違い(摂取する食品の偏り)の影響を最小限にすることが可能であること、②国民にとって分かりやすい規制となること、③食品の国際規格を策定しているコーデックス委員会などの国際的な考え方と整合することを考慮。

⇒特別な配慮が必要と考えられる「**飲料水**」、「**牛乳**」及び「**乳児用食品**」は区分を設け、それ以外の食品を「**一般食品**」年、全体で4区分とした。

# 新しい基準値の年齢区分等

## 小児の期間の配慮:

小児の期間については、放射線の影響を受けやすい可能性を言及

⇒ 暫定規制値で管理した場合の実際の被ばく線量は、1～6歳で年間0.135ミリシーベルト(この値は事故直後の放射性ヨウ素の影響含む)。今後の、小児の年間被ばく線量は、自然放射線による食品からの内部被ばく線量の地域差などと比較しても大きくない。「乳児用食品」及び「牛乳」を設けることで、小児の期間の放射線防護を優先的に行うことが適当。

## 基準値を計算する際の年齢区分等:

年齢区分を「1歳未満」、「1～6歳」、「7～12歳」、「13から18歳」、「19歳以上」の5つに細分化し、更に、食品の摂取量や摂取パターンには男女差も診られることから男女を区分。

# 「一般食品」の基準値の計算結果：年齢区分別の限度値

年齢区分	限度値 (Bq/kg)	
	男	女
1歳未満	460	
1～6歳	310	320
7～12歳	190	210
13～18歳	120	150
19歳以上	130	160
妊婦	—	160
最小値	120	
<b>基準値</b>	<b>100</b>	

流通する食品の汚染割合を「一般食品」については50%と仮定



# 新しい基準値（放射性セシウム）

食品区分	基準値（Bq/kg）	備考
飲料水	10	WHOが示した飲料水の放射性セシウムのガイダンスレベル
一般食品	100	
牛乳	50	子どもの摂取量が多い食品であることを考慮し、「一般食品」の基準値の2分の1
乳児用食品	50	

ご清聴ありがとうございました。

最後に：無用な被ばくを低減化することは重要な課題であるが、数値に惑わされて過剰な対策をとるのではなく、科学的な知見を踏まえた対処が必要である。



秋の十和田湖

2012\_4\_4&5\_9

土と肥料の講演会

Autumn in the Towada Hachimantai National Park in Aomori, Japan

41