

「東京電力・福島第一原発事故による放射性物質の農地汚染とその対策」

北海道大学農学研究院
作物栄養学研究室
信濃卓郎



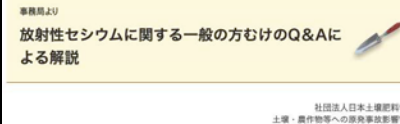
土と肥料の講演会 2021.05.22



震災前

震災後

天正ら（土壌肥科学会）
駒村ら（農環研）
塚田ら（環境科学研究所）
内田ら（放医研）
Smolder ら（ベルギー）
White ら（英国）



日本土壌肥科学会HPより

- 2011年11月24日 ▶ [日本農学会：東日本大震災からの農林水産業の復興に向けて―被害の認識と理解、復興へのテクニカル リコメンデーション―](#)
- 2011年06月10日 ▶ [津波関連情報（1）：津波・高潮による被害（1）](#)
- 2011年06月06日 ▶ [原発事故関連情報（7）：農業環境における放射能汚染の低減化に関する提言](#)
- 2011年06月01日 ▶ [原発事故関連情報\(6\)：森林生態系における放射性セシウム（Cs）の動態とキノコへの移行](#)
- 2011年05月18日 ▶ [原発事故関連情報\(5\)：セシウム（Cs）の植物移行とそのメカニズム](#)
- 2011年05月17日 ▶ [放射性セシウムに関する一般の方むけのQ&Aによる解説](#)
- 2011年05月10日 ▶ [原発事故関連情報\(4\)：水田環境における放射性核種の移行評価モデル](#)
- 2011年04月15日 ▶ [原発事故関連情報\(3\)：放射性ストロンチウム（Sr）の土壌－作物系での動きに関する基礎的知見](#)
- 2011年04月12日 ▶ [原発事故関連情報\(2\)：セシウム\(Cs\) の土壌でのふるまいと農作物への移行\(2013年改訂\)](#)
- 2011年03月28日 ▶ [原発事故関連情報\(1\)：放射性核種（セシウム）の土壌－作物（特に水稲）系での動きに関する基礎的知見](#)

日本土壌肥科学会HPより

取り組みの経緯－自己紹介

東京育ち、北海道で生活、福島初心者

1981年 北大入学

1990年 農学部作物栄養学研究室助手

2002-2008年 創成科学共同研究機構兼任

2008年 農研機構・北海道農業研究センターに転職

2013年 農研機構・東北農業研究センター福島研究拠点 農業放射線研究センターに異動

2019年 北海道大学大学院農学研究院に転職

東日本大震災－津波による 東電福島第一原発被害 (3.11)-----（ベント）

東電福島第一原発水素爆発 (3.12-3.15)

厚生労働省より食品と水に関する暫定基準値 (3.17)

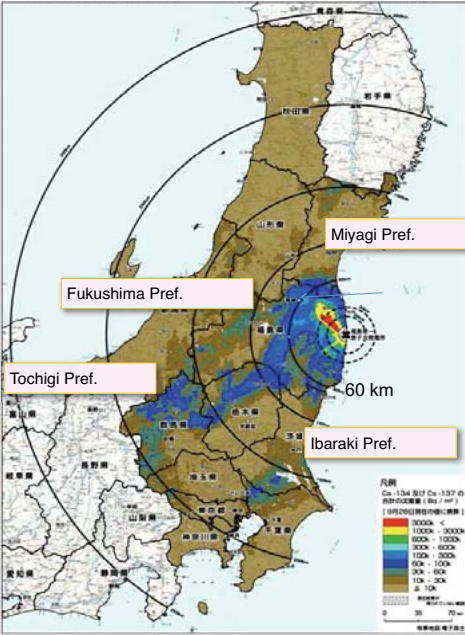
水、牛乳、ほうれん草で暫定基準値超えの報告(3.17-3.19)

汚染地域からの食品の出荷停止要請(3.21)

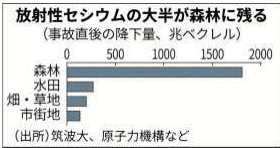
BBC News

放射性セシウムの拡がり

文部科学省による新潟県及び秋田県の航空機モニタリングの測定結果について(文部科学省がこれまでに測定してきた範囲及び新潟県及び秋田県内の地表面へのセシウム134、137の沈着量の合計)



原発事故により周辺80キロ圏内と阿武隈川流域には、2700兆ベクレル(2.7ペタベクレル)



[日経産業新聞2021年1月29日付]

震災当時の $^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs} = 1 : 1$

^{134}Cs : 47,872,900 Bq/μg
 ^{137}Cs : 3,204,560 Bq/μg
として計算すると

約53gの放射性セシウム($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$)
がこの地域に放出

2011年3月の福島での風景

放射性物質の飛散と降下が発生した時点での農地の状態が、その後の対策を考える上で重要。

水田は代掻き前。苗の準備前。

畑は牧草地、小麦畑を除けば播種前



http://www5b.biglobe.ne.jp/~jakot/hthy_3/

直接付着の影響

2011年3月の広葉樹、常緑樹



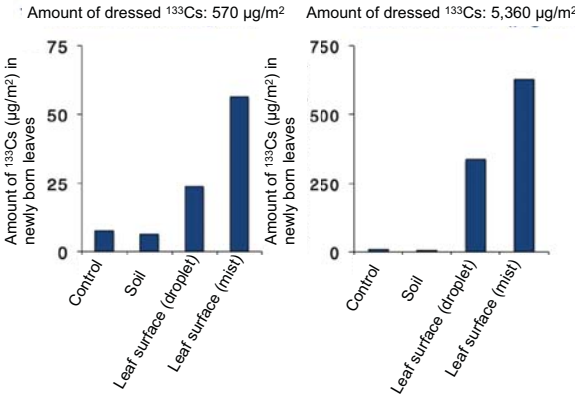
柿 (福島、3月2日)



茶園 (埼玉、3月)

茶樹の除染に向けて

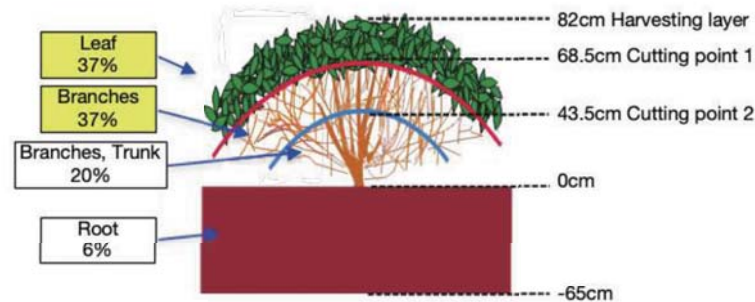
茶生産は2011年、広大な面積で中止になった。



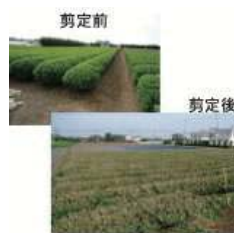
・放射性では無い、安定セシウムを用いて、土壌、植物体から葉への移行を調査した。

農研機構 野菜茶業試験場

茶樹の除染に向けて



(Kanagawa Pref.)

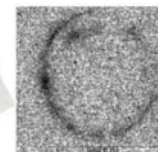


- 74%の放射性セシウムが上部に存在していることが明らかになった。

農研機構 野菜茶業試験場

Created by the report of MAFF (https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_choch/pdf/aiou_160422.pdf)

Section of peach branch



Radioactivity image by imaging plate

Trunk of peach tree

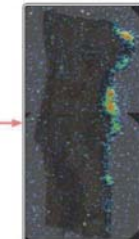
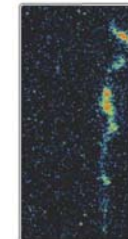


Image of radioactivity distribution by IP

Image of superposition

Image of optical micro-scope

福島県農業総合センター、東京大学

Source : Keitaro TANOI (2011), Other achievements of the Graduate School of Agricultural and Life Sciences, <https://www.a.u-tokyo.ac.jp/rp/tevent/20111119-9-slide.pdf>



手



高圧洗浄機

ぶどう、梨、桃、りんご、柿。。。。

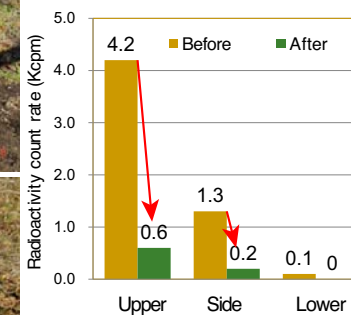
Created by the report of MAFF (https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_choch/pdf/aiou_160422.pdf)



http://tem.rakuten.co.jp/hana-online/shibugaki_atago/



Bark scraping and/or surface washing



10アールの果樹園の処理
5-10hrs 水1,000-3,000 L
除去片の表面への蓄積の問題が残る

福島県農業総合センター

Created by the report of MAFF (https://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/s_choch/pdf/aiou_160422.pdf)

樹体の表面線量は低下したが、収穫物（果実）への影響は不明

柿の木の樹体洗浄による果実と葉の放射性セシウム含有率低減効果

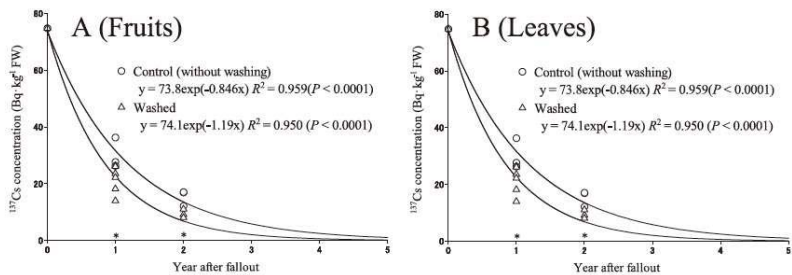


Fig. 2. Comparison of the exponential equation model of temporal changes in ¹³⁷Cs concentration in Japanese persimmon fruits (A) and leaves (B) by bark-washing decontamination. The equation was deduced by the least-squares method, using fruit (A) and leaf (B) data at harvest. Data for 2011 were from one sample combining five trees prior to washing. Data for 2012 were from three control trees and six washed trees. Data for 2013 were from three trees of each treatment in 2013 in Japanese persimmon 'Hachiya'. * and ** indicate significant difference between treatments at $P < 0.05$ and 0.01 by t -test.

Sato et al. 2016

植物体に付着した場合は可能な限り早急に除去することが体内での移行の抑制に効果的
(茶、果樹)

水稲、畑作物栽培を再開して良いのかどうか

避難指示が出ている地域は対象外として、
それ以外の地域での問題。

暫定基準値として一般食品 500 Bq/kg (厚生労働省、2011年)

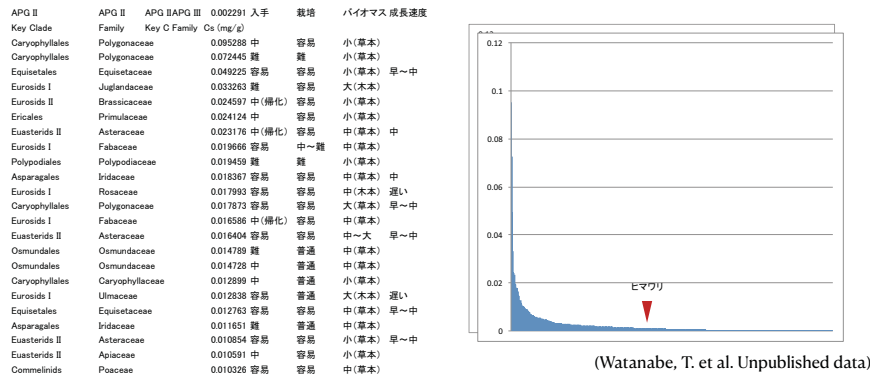


http://www.5b.biglobe.ne.jp/~jakot/hhy_3/

ファイトレメディエーション (ヒマワリ、牧草)

Csをヒマワリが特に吸収するという知見は必ずしも得られていなかったが

異なる600種の植物のCs含有率分布 (葉)



ヒマワリは生育量が多いが、セシウム含有率は必ずしも高くはない。

うまくいかなかった成果も成果。

0.05%しか回収できなかった。(ヒマワリ)

回収した後の低濃度の放射性セシウムを含む大量の植物体の処理。

耕作により土壌が攪拌されることにより放射性物質が表層から作土層全体に広がる問題。



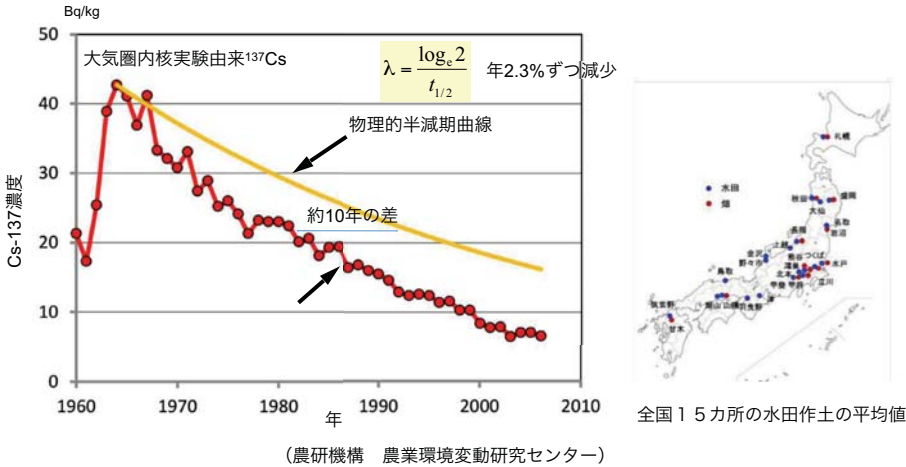
降下したセシウムを植物に回収させるよりも半減期を待ったほうが良いのでは。



ファイトレメディエーションによる放射性セシウム除去は非現実的である

表1 各種牧草による土壌からの放射性セシウム除去率(%)	
シロクロバー	0.01
アルサイクロバー	0.02
アカクロバー	0.02
バヒアグラス	0.02
アルファルファ	0.03
クサヨシ	0.04
オーチャードグラス	0.02
クリムソクローバー	0.05
エンバク	0.00
チモシー品種A	0.00
チモシー品種B	0.03
チモシー品種C	0.03
試験年2011-2012, 試験地飯野町, 30cm x 30cm 試験区, 反復 2	
信濃 グリーンテクノバンク2020	

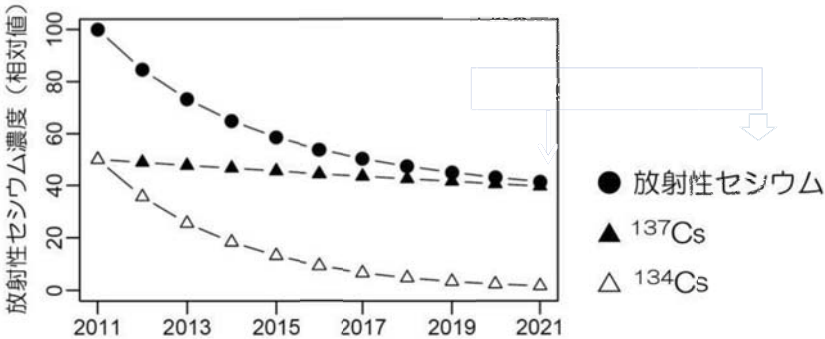
グローバルフォールアウト由来¹³⁷Cs濃度の推移



水田作土
→ 「実効的半減期」は、物理的半減期よりも短い

2011年の事故の放射性セシウムは

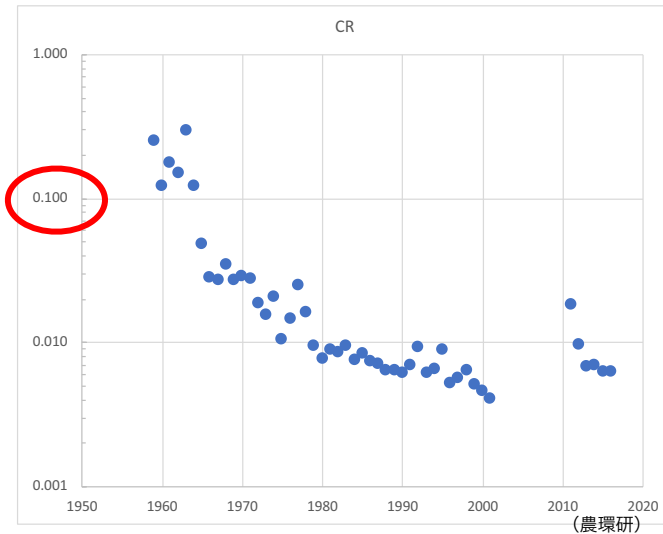
- 放射性セシウムの自然度減衰により、2017年の放射性セシウム濃度（¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計値）は、2011年の半分程度にまで減少する
- ただし、今後の減少速度は小さい



1960年～、全国各地での移行係数長期モニタリングデータ

(降水物の影響がある時は正確なTFとは言えない)

水稻玄米TF (平均値) の経年的な減衰



1960年頃をピークとするが、1980年まではロブノールでの大気圏実験が行われている。

水素爆発による放出は3/15で終わっている

5,000Bq/kg以下の土壌であれば水稲作付けは可能(2011年)

土壌から植物への移行-移行係数による評価

$$\text{移行係数} = \frac{\text{玄米の放射性核種の放射能濃度 (Bq/kg)}}{\text{土壌の放射性核種の放射能濃度 (Bq/kg)}}$$

土壌中の放射性物質の濃度から植物への放射性物質の濃度を推定するための係数 (Transfer Factor : TF)

TF計算例: 暫定基準値 (2011年)

可食部の放射性Cs濃度 500 Bq/kg

移行係数 = 0.1 ならば土壌のレベルは

土壌中の放射性Cs濃度 5000 Bq/kg

→ **TF ≤ 0.1**と考えると、**2011年4月、>5000 Bq/kg**の農地での作付け制限区域設定へ (**≤5000 Bq/kg**は営農可能)

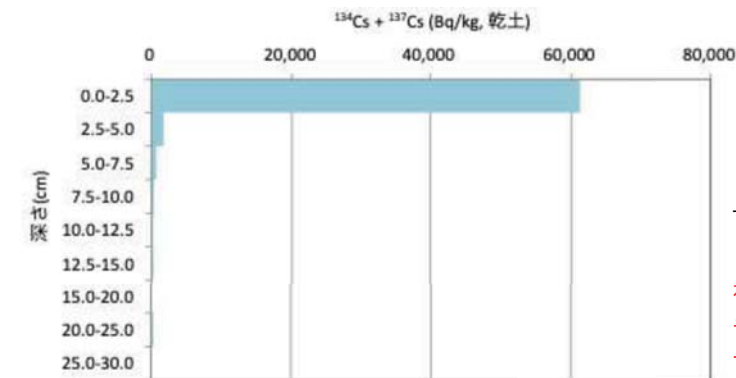
福島県は農業県 経済活動 (生活のため)

農地土壌が5,000Bq/kg以下の放射性セシウム濃度であれば栽培を行っても良い (原子力災害対策本部「稲の作付に関する考え方」— 2011.04.08)

注意: 2011年のみの基準であり、その後はこれは適用されていない。
(ただし、一度決めた基準は生き続けている)

5000Bq/kg (土) を超過した圃場はなんらかの低減策が必要

土壌表面の放射性セシウム分布



3ヶ月経過。ほとんど下方への移動は無い。

わずかずつ移動する。
チェルノブイリの報告では平均として1cm/year程度

図1: 飯舘村伊丹沼の水田土壌の放射性セシウム濃度

2011.9.14農地土壌の放射性物質除去技術 (除染技術) について (農林水産技術会議)

www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm

営農再開が出来ない圃場の対策→除染

土壌と放射性セシウム

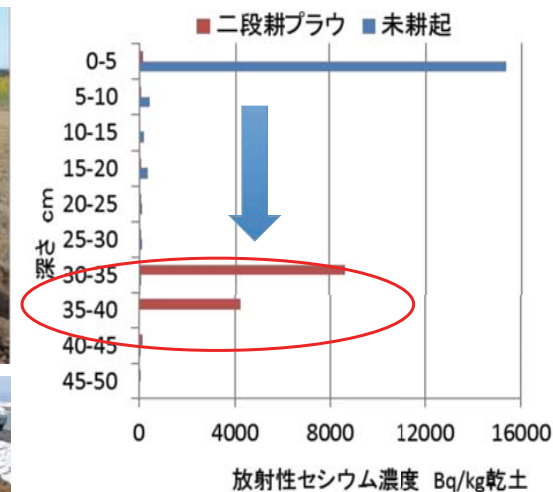
土壌に降下した放射性セシウムは粘土鉱物や有機物と吸着、結合して下層には降雨によってはほとんど移動しない。（植物にはわずかであるが移行する）

待っていても影響はなくなる（物理的減衰はある）。耕作をすると作土層（15cm）に広がり移動しない。

表層にあることの弊害

空間線量を高める→農作業者の外部被曝につながる
作物が吸収しやすい→消費者の内部被曝につながる

二段耕プラウによる表層土の埋却（反転耕、天地返し）



下層土の赤土が
表面を覆っている

農研機構・中央農研 (2012/10/26 檜葉町)

牧草の根の分布図ールートマットを形成する（例）



<http://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/ss/nkc/wadai/habomaikou03.jpg>

深いところに根は分布しない。養分の吸収は表層土壌を中心として。

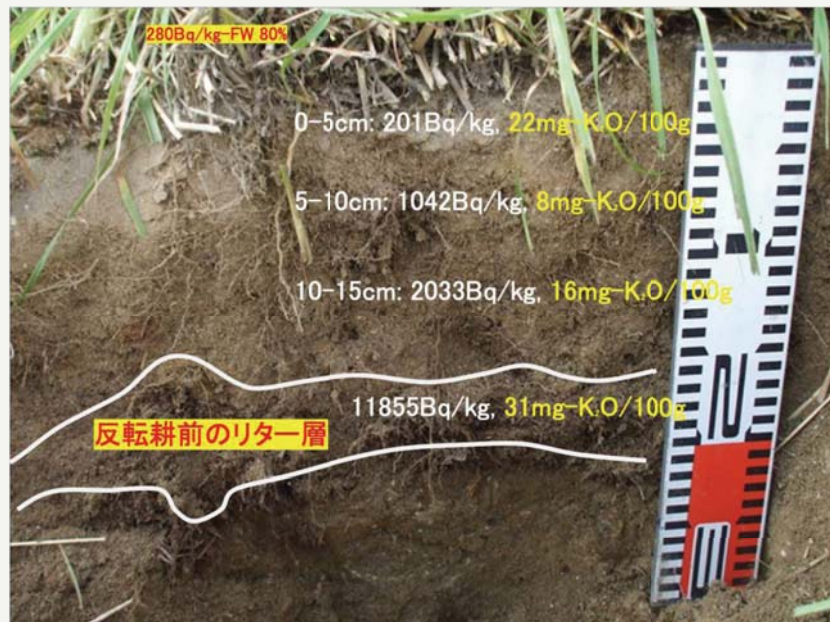
広範な草地で利用された。。。

除染後牧草地の牧草の放射性セシウムのモニタリング結果

Fiscal year	Examined field	50 Bq/kg 以下	50 - 100 Bq/kg	100 Bq/kg 超
2012	1,893 (100%)	1,578 (83.4%)	161 (8.5%)	154 (8.1%)
2013	18,158 (100%)	17,081 (94.1%)	725 (4.0%)	352 (1.9%)
2014	10,319 (100%)	9,999 (96.9%)	230 (2.2%)	90 (0.9%)
2015	10,999 (100%)	10,678 (97.1%)	176 (1.6%)	145 (1.3%)
2016	4,066 (100%)	3,898 (98.0%)	57 (1.4%)	25 (0.6%)

(農水省)





反転耕により下層土に移動した高濃度の層
対応策：十分なカリ、よく攪拌して反転耕

土壌の物理的除染（表土はぎとり）



福島県農業総合センター

環境省除染ガイドラインに採用

「農地除染対策の技術書」について<http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/>

農家には補償、作業は環境省主導の下でゼネコン関係



物理的除染の効果 (2011)

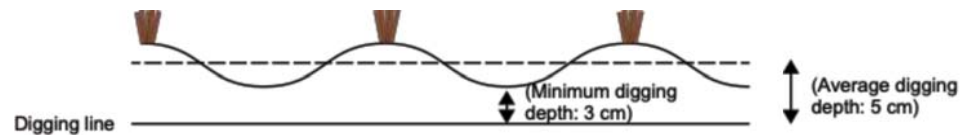
			処理前	処理後	減少率
物理的除染 (表層 4 cm)	放射能	Bq/kg	10,370	2,599	75
	空間線量	μSv/hr	7.14	3.39	53

MAFF (2011.9.14) summed up by (Togamura 2017)

物理的除染（表土剥ぎ取り）は大きな効果がある
BUT

除染は完全な放射性物質の除去を意味してはいない

事故から半年後の物理的除染でも約4分の1の放射性物質が土壌に残存する。



→ 残存する放射性セシウムが農産物に移行しないようするための対策が必要

10月中旬、全部で1700か所に及ぶ放射能検査を終え、「安全宣言」が出された福島のコメ（10月31日）。

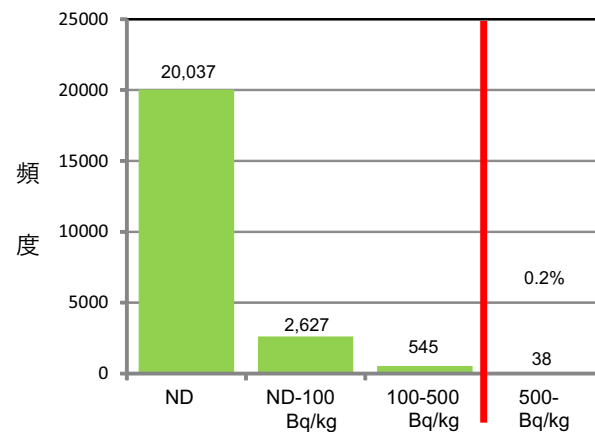
11月に暫定基準値超えの玄米の発見。。

正確な対策方針を明示できなかった研究者の責任は大きい



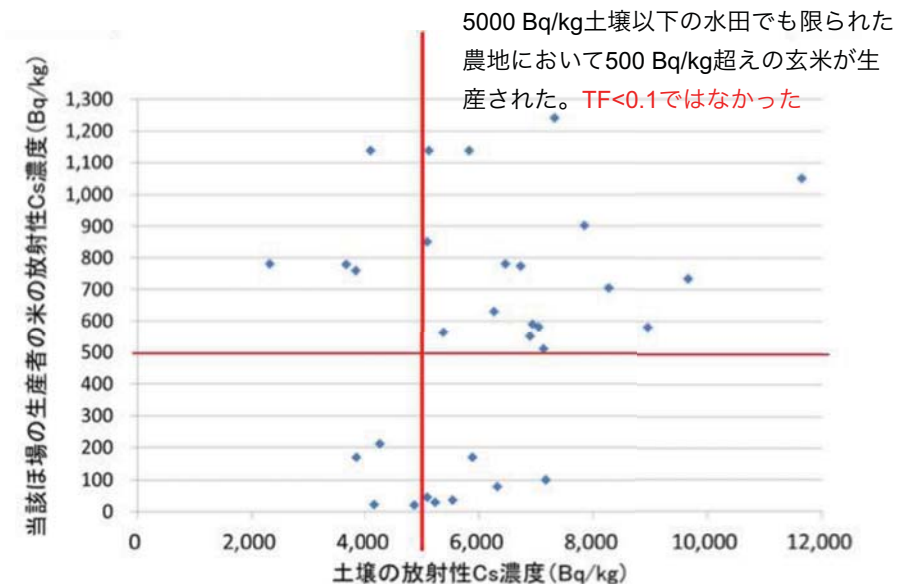
次の核事故への確実な対応へ

2011年度産の暫定基準値超過事例の発生



福島県における2011年産玄米の放射性Cs濃度（農林水産省，2012）

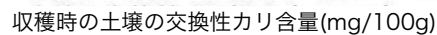
2011年の玄米生産における土壌と玄米の関係



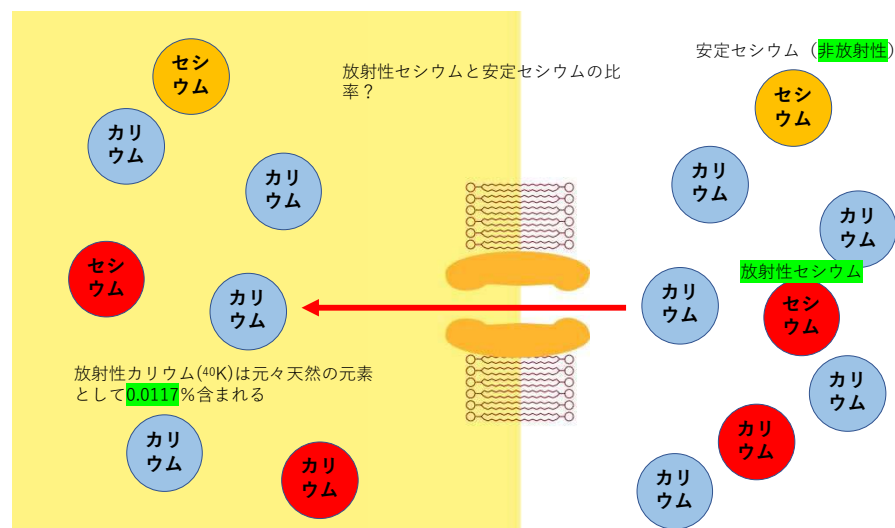
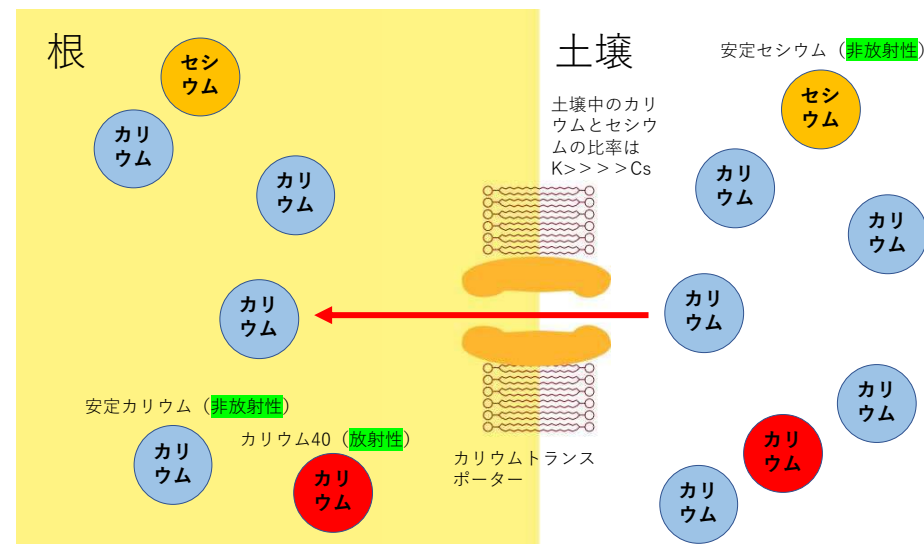
土壌及び米の放射性セシウム濃度の関係（福島県等，2011）

福島県の水稲の慣行的なカリの施肥
基準は15-20mgK₂O/100g

肥料は無駄に与えるものではない。
また、土壌からの養分の供給もある。
(カリウムならば、長石など)



土壌の交換性カリ含量と玄米の放射性セシウム濃度との関係（福島県等，2011）



必須元素 有用元素

必須元素

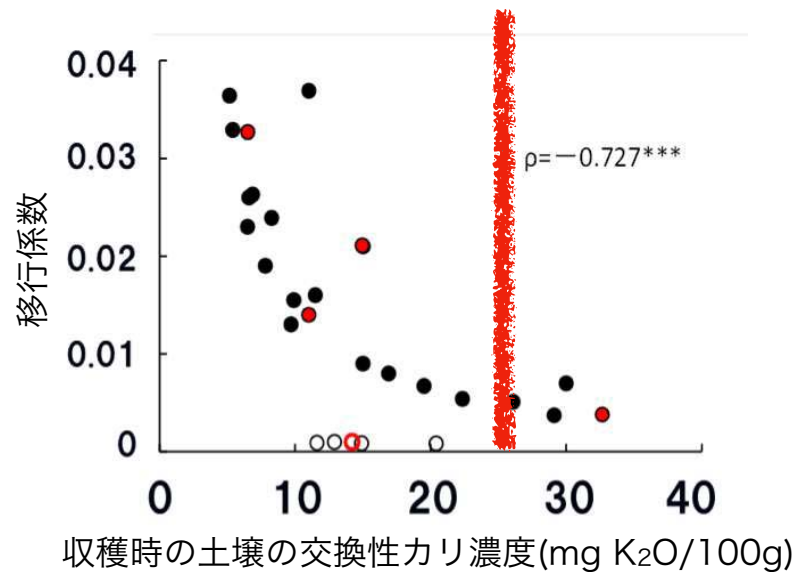
有用元素

1 H	2												13 B	14 C	15 N	16 O	17 F	18 Ne
Li	Be																	
Na	Mg	3											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc		4 Ti	5 V	6 Cr	7 Mn	8 Fe	9 Co	10 Ni	11 Cu	12 Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y		Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	58-71	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	90-103	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	113	114 Uuq	115	116 Uuh	117	

Lanthanoide (58-71)	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Actinoide (90-103)	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

Green	Essential mineral elements
Blue	Essential non mineral elements
Pink	Beneficial
Yellow	Well known toxic elements

113: Nh(nihonium) 115: Ts(tennessin)
117: Mc(moscovium) 118: Og(oganeson)



Kato et al. 2015

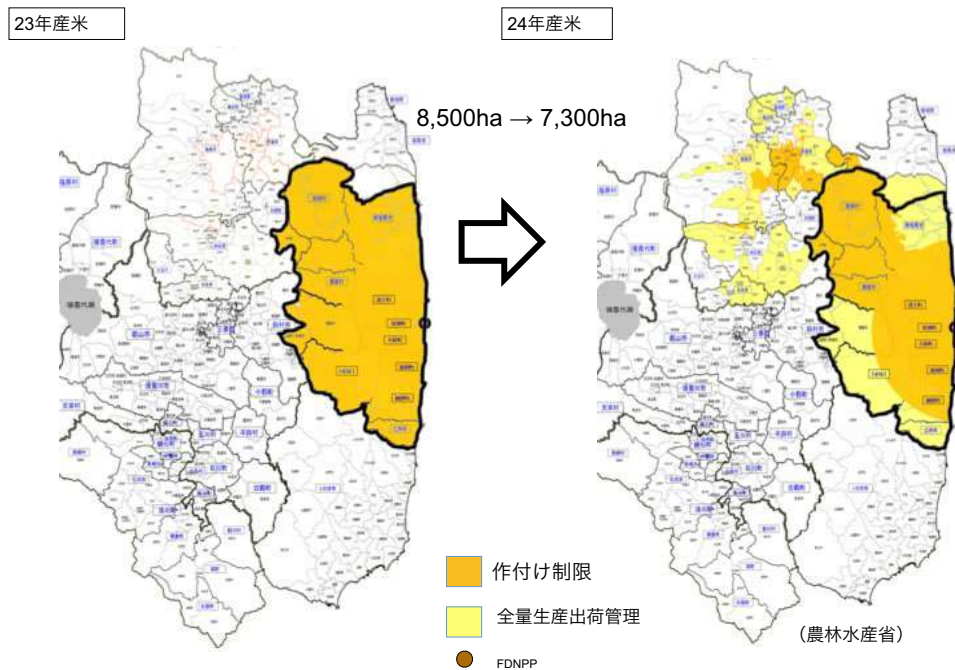
Source : Created by the report of NARO (https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/carc/027913.html)

Changes of the radioactive Cs concentration of **brown rice** after 2011.3.11 (30kg bag) (Fukushima prefecture)

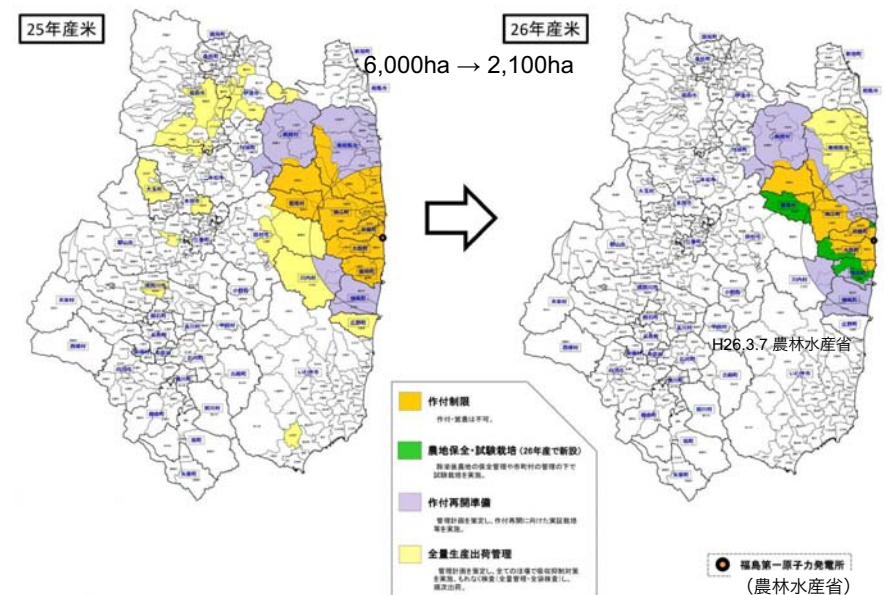
		≤ 50 Bq/kg	51-75 Bq/kg	76-100 Bq/kg	100 Bq/kg <	Monitored number
FY 2011	actual no.	20,295	364	219	311	21,189
	(%)	95.78%	1.7179%	1.0336%	1.4677%	100%
FY 2012	actual no.	10,343,548	1678	389	71	10,345,686
	(%)	99.98%	0.0162%	0.0038%	0.0007%	100%
FY 2013	actual no.	10,951,351	492	323	28	10,952,194
	(%)	99.99%	0.0045%	0.0029%	0.0003%	100%
Fy 2014	actual no.	11,014,636	1	1	2	11,014,640
	(%)	100%	0.00001%	0.00001%	0.00002%	100%
Fy 2015	actual no.	10,496,518	4	0	0	10,439,072
	(%)	100%	0.00004%	0%	0%	100%
Fy 2016	actual no.	10,264,859	0	0	0	10,264,859
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
Fy 2017	actual no.	9,976,522	0	0	0	9,997,652
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
Fy 2018	actual no.	9,251,056	0	0	0	9,251,056
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
FY 2019	actual no.	9,492,611	0	1	0	9,492,612
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%
FY2020	actual no.	318,429	0	0	0	318,429
	(%)	100%	0%	0%	0%	100%

営農再開をしている水田の集計

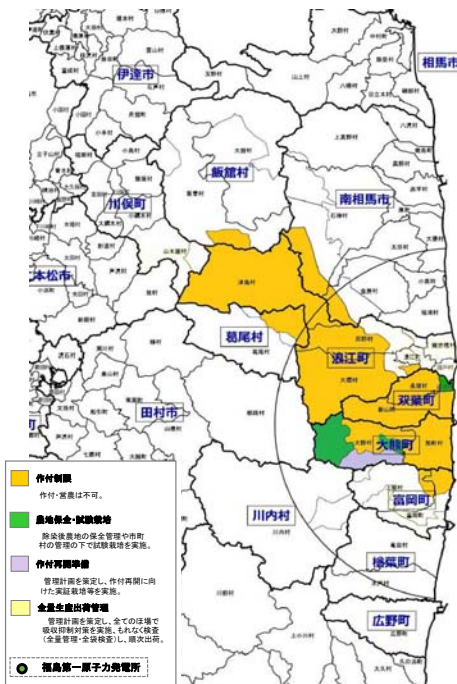
米作付け制限区域 (平成23、24年)



米作付け制限区域 (平成25、26年)

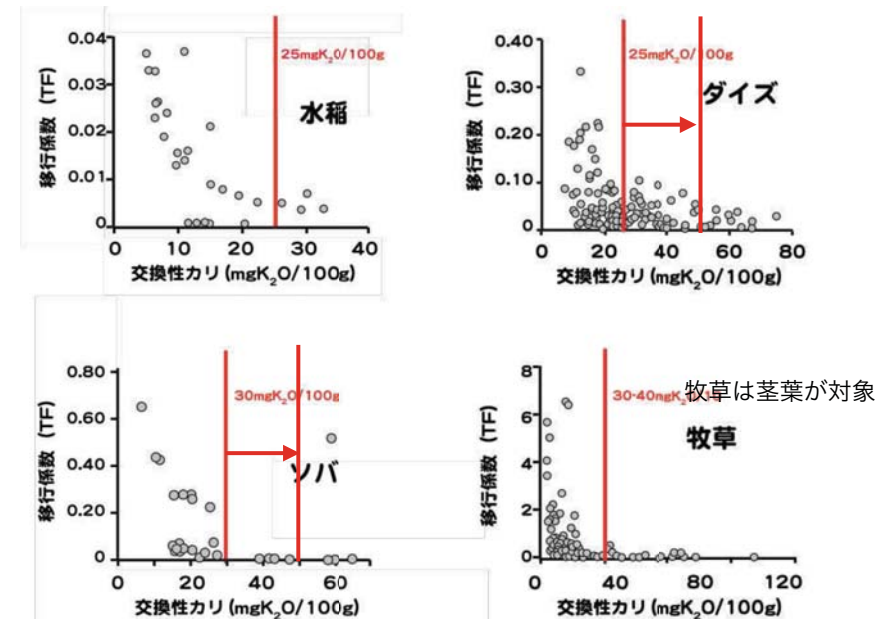


令和2年産米の作付制限等の対象地域



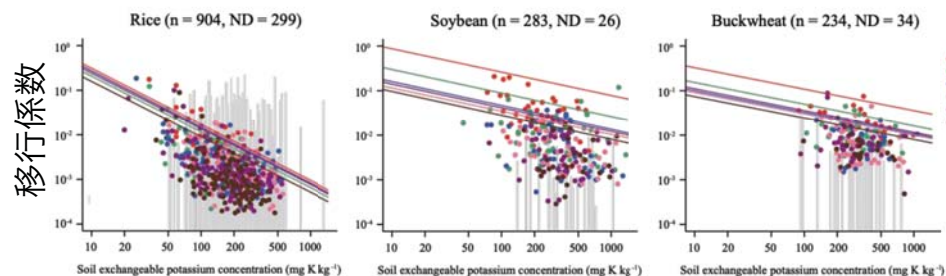
(農林水産省)

移行係数の作物間差による抑制対策の違い



(ダイズ、ソバの放射性セシウム濃度が高くなる可能性のある地域では50mgK₂O/100gを目標とする)

移行係数の年次間差



収穫時の土壌の交換性カリ濃度(mg K₂O/100g)

Tagami, Sato, Shinano, et al.
2020 IAEA-TECDOC

最初は大きく低下するが、その後の変化は小さい

その他の農作物に関して

TABLE 4.36. SOIL TO PLANT RADIOCAESIUM ACTIVITY CONCENTRATION RATIOS CR (KG SOIL DM / KG PLANT FM) OF AFTER THE FDNPP ACCIDENT IN 2011 AND 2012 (cont.)

Plant species	Year	N ^a	Mean ^b	GSD ^c	Minimum	Maximum
Root crops						
Japanese radish	2011	1	2.0×10^{-3}	n.a.	n.a.	n.a.
Japanese radish	2012	1	1.8×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Turnip	2011	1	1.5×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Turnip	2012	1	8.8×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Carrot	2011	1	7.7×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Carrot	2012	1	4.1×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Burdock	2012	1	5.4×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
IAEA TRS 472 (kg DM/kg DM)		81	4.2×10^{-2}	3.0	1.0×10^{-3}	8.8×10^{-1}
Tubers						
Taro	2011	1	2.2×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Taro	2012	1	8.7×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Yacon	2011	1	1.2×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Sweet potato	2011	2	4.4×10^{-3}	n.a.	3.4×10^{-3}	5.3×10^{-3}
Sweet potato	2012	2	1.4×10^{-3}	n.a.	8.7×10^{-4}	1.9×10^{-3}
Potato	2011	1	6.9×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
Yamanoimo	2012	1	2.8×10^{-3}	n.a.	n.a.	n.a.
IAEA TRS 472 (kg DM/kg DM)		138	5.6×10^{-2}	3.0	4.0×10^{-3}	6.0×10^{-1}
Seeds						
Sunflower	2011	5	7.6×10^{-3}	2.1	3.1×10^{-3}	1.8×10^{-2}
Rapeseed	2011	5	1.9×10^{-3}	2.7	5.9×10^{-3}	4.1×10^{-1}
Perilla	2012	2	3.3×10^{-3}	n.a.	2.5×10^{-3}	4.1×10^{-3}
Maize						
Grain	2011	1	4.3×10^{-4}	n.a.	n.a.	n.a.
IAEA TRS 472 (kg DM/kg DM)		67	3.3×10^{-3}	3.0	3.0×10^{-3}	2.6×10^{-1}

^a the number of data

^b depending on data availability, either GM (geometric mean) for N≥3 or AM (arithmetic mean) for N=2 or single value

^c geometric standard deviation for samples with N≥3

^d not applicable

IAEA-TECDOC-1927
(2020)

	2016		2017	
	茎葉 ¹³⁷ Cs濃度 (Bq/kg)	単位根量あたり茎 葉 ¹³⁷ Cs量(Bq/g)	茎葉 ¹³⁷ Cs濃度 (Bq/kg)	
ダイズ	243.1 ± 14.6	1.66 ± 0.21	126.6 ± 21.4	
ルーピン	555.8 ± 114.7	6.98 ± 1.38	1165 ± 72.8	
	+	*	**	

Kubo et al. submitting

マメ科は移行係数が高い。これまでの調査からルーピン がその中でも顕著。
同じ土壌のカリウム条件への応答（移行係数）がかなり大きい。



2020年

マメ科の移行係数の高い理由の一つとして考えていること

動画像：光合成産物の動態



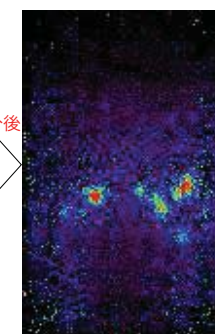
PETIS

根への転流

分泌物

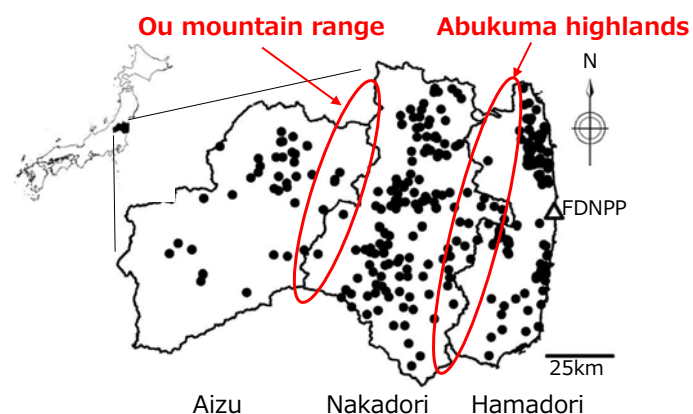


80分後



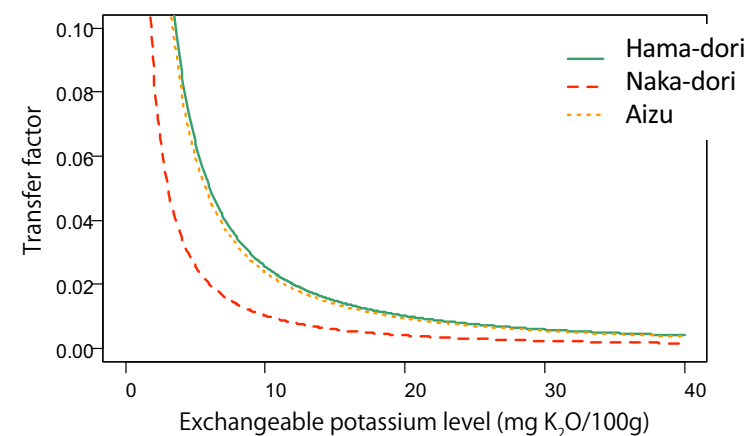
Yin et al. Sci. Rep. 2020

- 1) Improve the prediction model of optimal potassium level to sufficiently decrease the radioactive Cs concentration in the harvest product in different areas of Fukushima prefecture.



558 observations from 321 paddy fields in total
from 2012 to 2015

(Yamamura et al., 2018)



(Yamamura et al. 2018)

Area is able to be divided by Phosphorus absorption coefficient (Nakadori < 1,000 mg P₂O₅/100g, Hamadori and Aizu > 1,000 mg P₂O₅/100g)

・除染 **≠** 震災によって飛散した放射性物質が完全に除去された。
交換性カリ濃度を一定水準以上に高めるという科学的手法でなんとか抑制している。

（移行抑制対策は当面続ける必要がある）

・リスクは複合的に発生する。土壌、降下物、水などを総合的に判断する必要がある。未解明のメカニズム：作物間移行係数の違い、土壌による移行係数の違い、放射性Csの局所的分布の影響, etc.

謝辞

・書ききれないので。。。

・福島での6年間だけに絞ってみて

・東北農研福島研究拠点 全員

・農研機構、本部、農環研、畜草研、作物研、食品研、中央農研

・福島県農業総合センター、本部、果樹研、浜再生研

・京都府立大、つくば大、福島大、秋田県立大、量研機構、環境化学技術研究所、IAEA

・北海道大学。。。

震災当初から継続して被災地の復興に取り組む研究者の方々

2021年11月5日
福島県 パルセいいざか

日本土壤肥料学会主催シンポジウム
「原発事故から10年ーこれまで・今・これからの農業現場を考える」

（全て仮題です）

「土壤肥料学会からの挨拶」

「はじまりは地震と共に：成果を繋ぐ研究の進展」

「農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について」

「汚染農地の除染ー福島県の取り組みと問題点」

「動きにくいセシウムの2つのかたち」

「作物を放射能汚染から守る黄砂の力」

「カリウム肥料を撒くことの効果ー水稻ー」

「ダイズの放射性セシウム濃度が高い理由」

「水稻におけるセシウムの吸収と体内での動き」

「これから歩む道」

「総合討論」

「閉会の言葉」

波多野隆介（土壤肥料学会前会長）

塚田祥文（福島大学）

前島勇治・高田裕介・神山和則（農研機構）

齋藤 隆（福島県農業総合センター）

山口紀子（農研機構）

中尾 淳（京都府立大学）

藤村恵人（農研機構）

二瓶直登（東京大学）

古川 純（筑波大学）

信濃卓郎（北海道大学）

妹尾啓史（東京大学）



ご清聴ありがとうございます