

モデリング手法(3)

～ 植物を介した移行 ～

Methods for modeling (3)

- Transfer around land plants -

生命環境系 / CRiED

古川 純

Faculty of Life and Environmental Sciences

Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics

Jun FURUKAWA



筑波大学生命環境系
Faculty of Life and
Environmental Sciences
University of Tsukuba



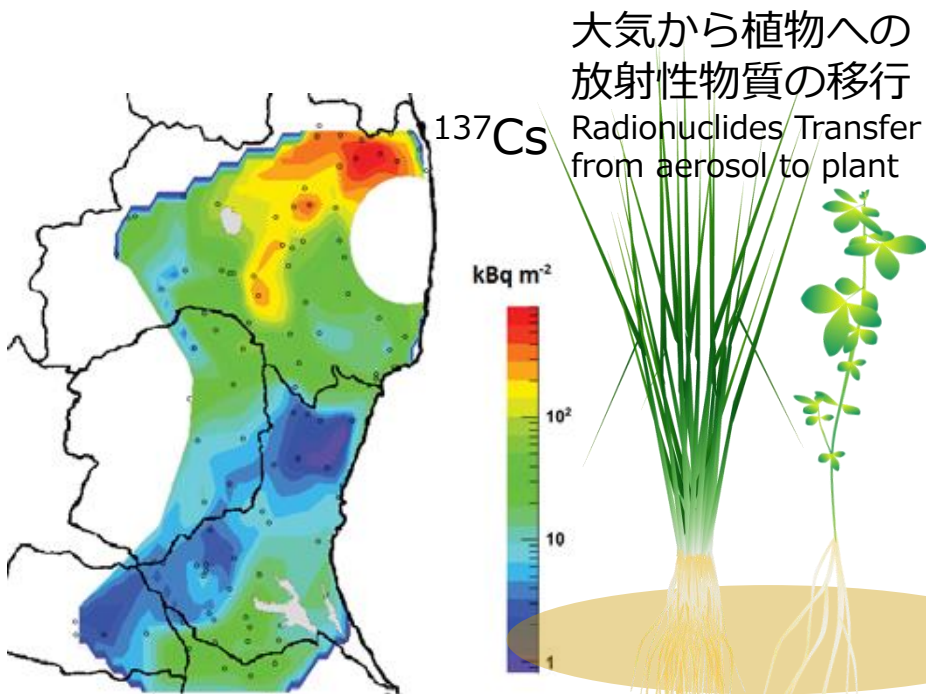
アイソトープ環境動態研究センター
CRiED Center for Research in
Isotopes and Environmental Dynamics

放射性物質の環境動態研究において 植物を中心とした移行を明らかにする

Identification of the transfer mechanisms around plants

放射性物質による汚染状況が明らかになるにつれ、環境中でどのように移行していくかという環境動態の解明に焦点は移りつつある

Radionuclides released from Fukushima Dai-ich Nuclear Power Plant spread to the environment and the environmental dynamics of radionuclides is now focused on.

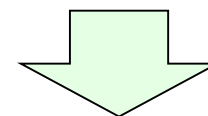


大気から植物への
放射性物質の移行
Radionuclides Transfer
from aerosol to plant

土壌から植物への
放射性物質の移行
Radionuclides Transfer
from soil to plant

Kinoshita et al. (2011)

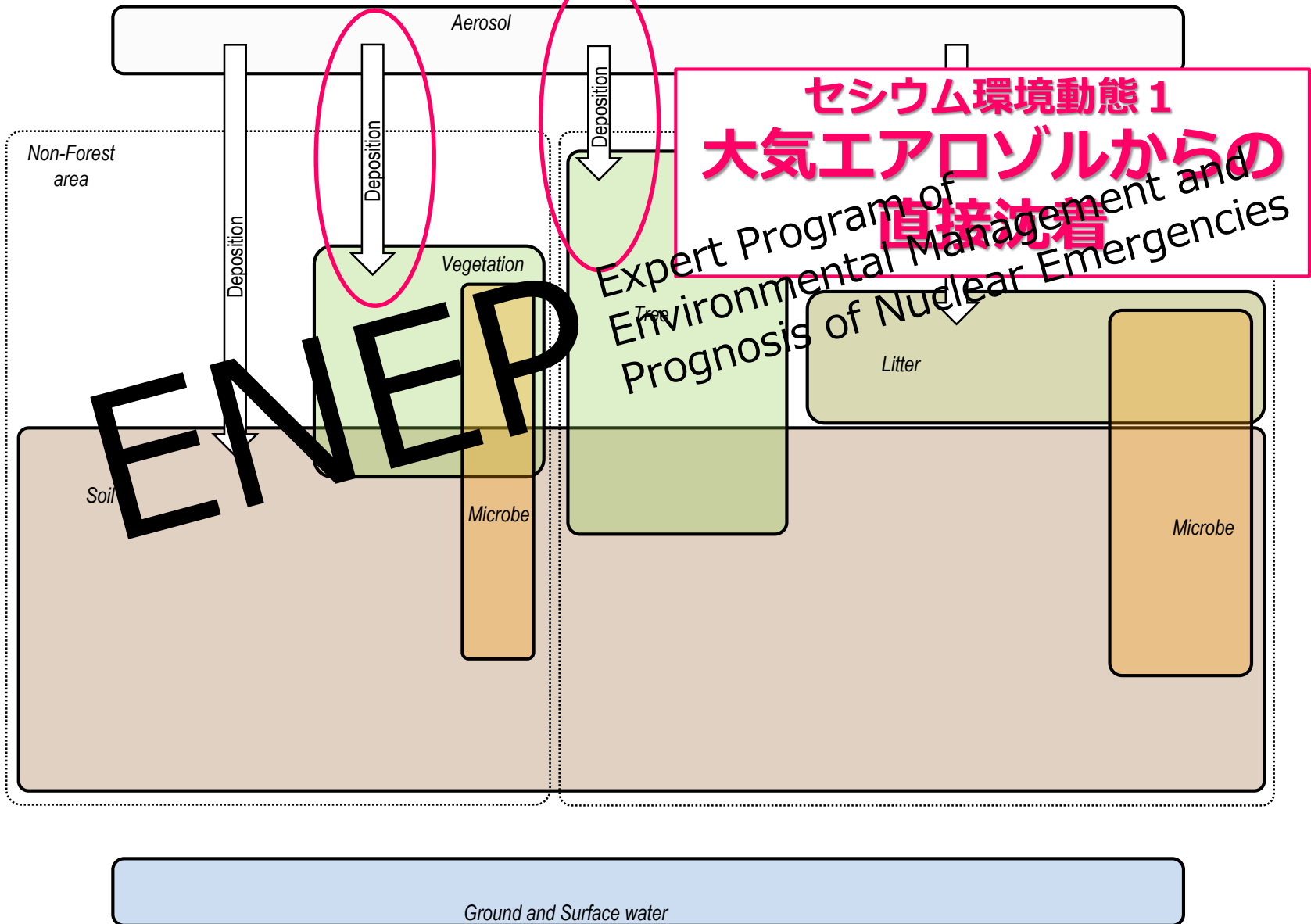
植物を中心とした移行過程の理解は放射性物質の動態解明の観点のみならず“生態系への放射性物質の入り口”として極めて重要 The transfer of ^{137}Cs around land plants is one of the most important steps for considering the influx of ^{137}Cs into ecosystem



植物の放射性物質取込み過程を明らかにし、植物への移行を抑制する手法を早期に開発することで、人間を含めた生態系への放射性物質汚染の拡大を、最小限にとどめる必要がある To minimize the spread of radionuclides contamination into ecosystem, including human-beings, identification of the transfer mechanisms of radionuclides around the plant and development of its reduction method is needed

陸域生態系における動態把握

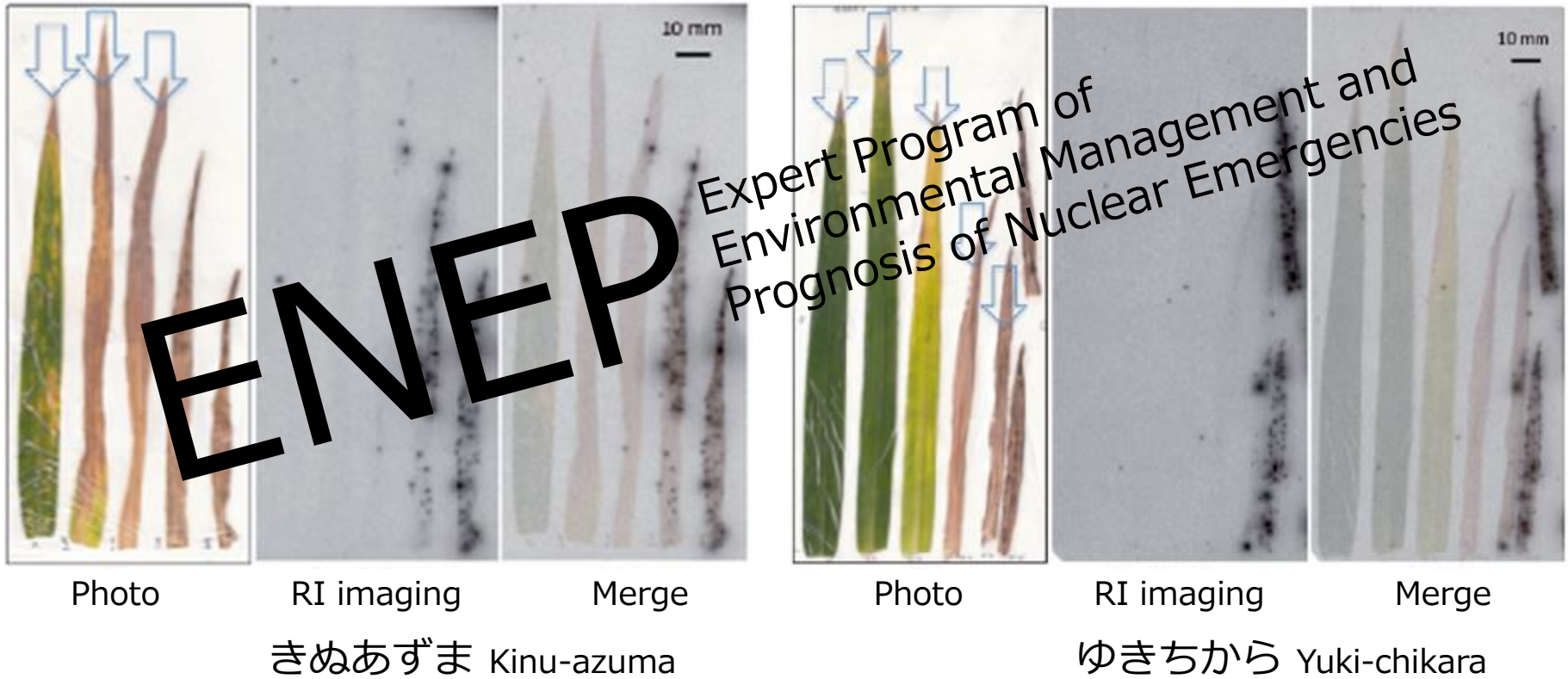
Dynamics of radioactive nuclides within terrestrial ecosystem



福島県でサンプリングされたコムギの汚染

Direct contamination of wheat

H23.5.26採取 Sampling at 26th May 2011



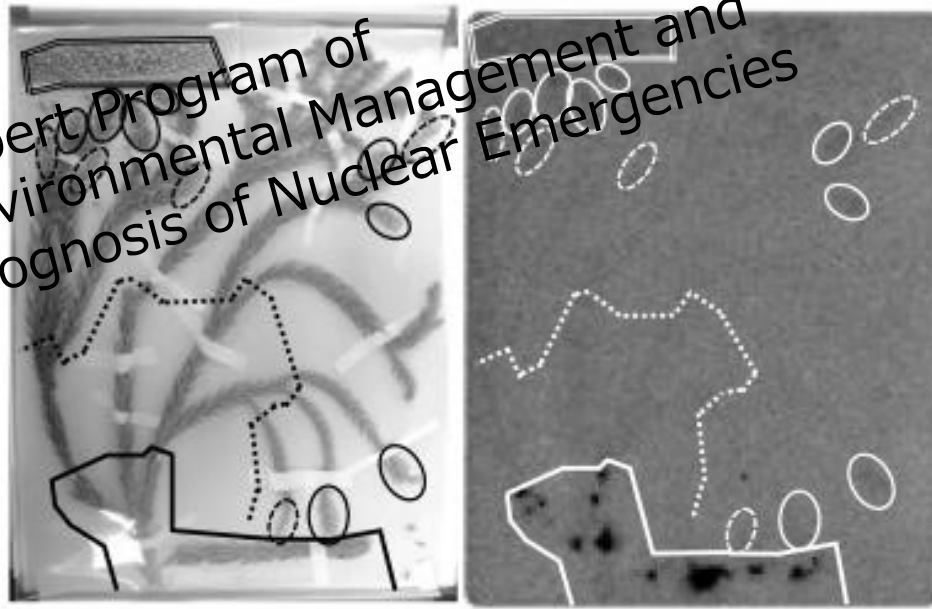
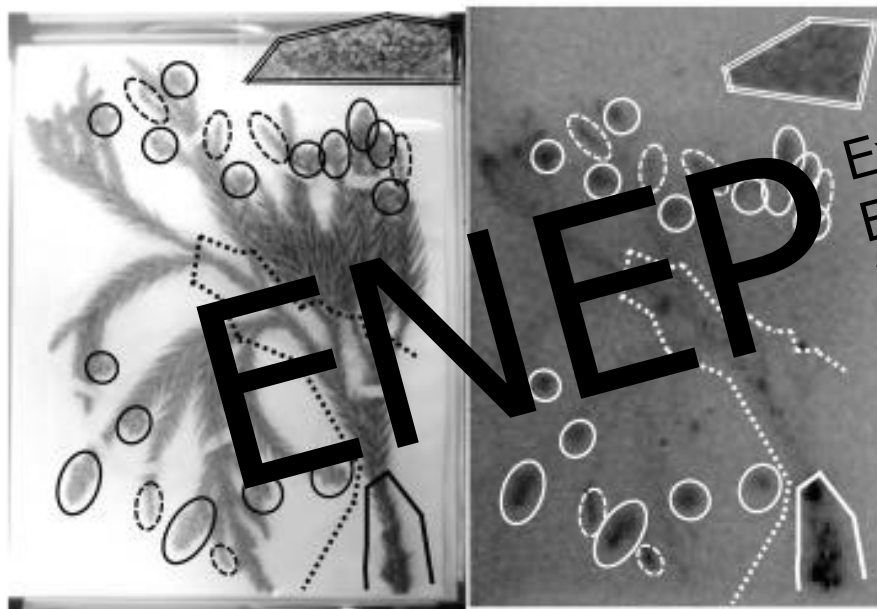
福島県でサンプリングされたスギの汚染

Radio-Cs contamination of sugi (*Cryptomeria japonica*)

H24.12.1-2採取 Sampling at 1st to 2nd Dec 2012

Futaba (01 Dec. 2012; 40.5 h)

Iwaki (02 Dec. 2012; 49.9 h)



Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies

¹³⁷Cs (kBq/kg)

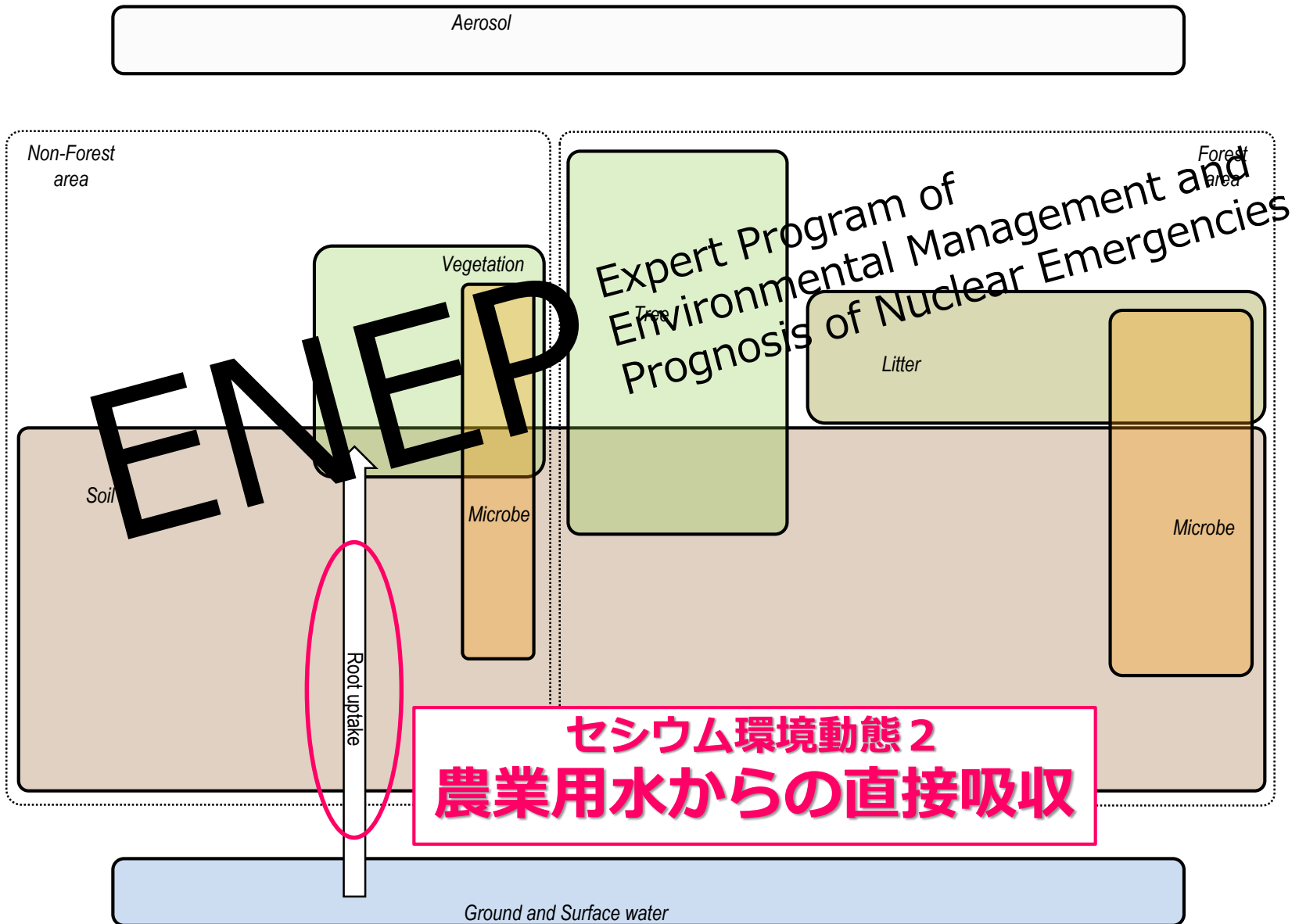
Pre-2010	2011	2012	Male flowers
7.3	3.1	2.5	5.5

¹³⁷Cs (kBq/kg)

Pre-2010	2011	2012	Male flowers
7.6	0.4	0.2	1.0

陸域生態系における動態把握

Dynamics of radioactive nuclides within terrestrial ecosystem



福島のニュース

[トップ](#) | [主要](#)

旧渋川村(二本松)コメ基準超 セシウム汚染 県調査

県は7日、二本松市の旧渋川村で生産されたコメから国の暫定基準値(50キログラムあたり500ベクレル)を超える780ベクレルの放射性セシウムが検出されたと発表した。県は同市に対し、旧渋川村のコメの出荷自粛を要請した。県の同日までの調査で、基準値を越えたのは計22戸の270点となった。

県によると、旧渋川村で生産された玄米を二本松市の8日に簡易分析器で調べたところ、基準値を超えた。市から連絡を受けた県が分析した結果、780ベクレルが検出された。白米は370ベクレルだった。

このコメが生産された水田は1.9アールで、30キロ入り35袋が収穫された。生産者の自宅や近隣農家に全量保管されている。同じ農家が別の水田で収穫した2895キロはライスセンターで保管され、いずれも出荷されていないという。

県は基準値を超えたコメが生産された水田周辺で収穫された玄米2点を調べたが、最大で53ベクレルだった。県は基準値を超えた原因究明に向け、栽培管理などを調べている。

旧渋川村の稲作農家は248戸。県は全戸調査を実施する。政府は、旧渋川村一帯のコメの出荷停止を8日にも県に指示する方針を固めた。

◇ ◇

県が全袋調査を実施している大波地区では7日までに、138戸の4693点を調べた。このうち、15戸の263点が基準値を超えた。また、全戸調査の対象地域では福島、伊達、相馬、いわき4市の10旧市町村の702戸、924点を調べ、6点が基準値を上回っている。

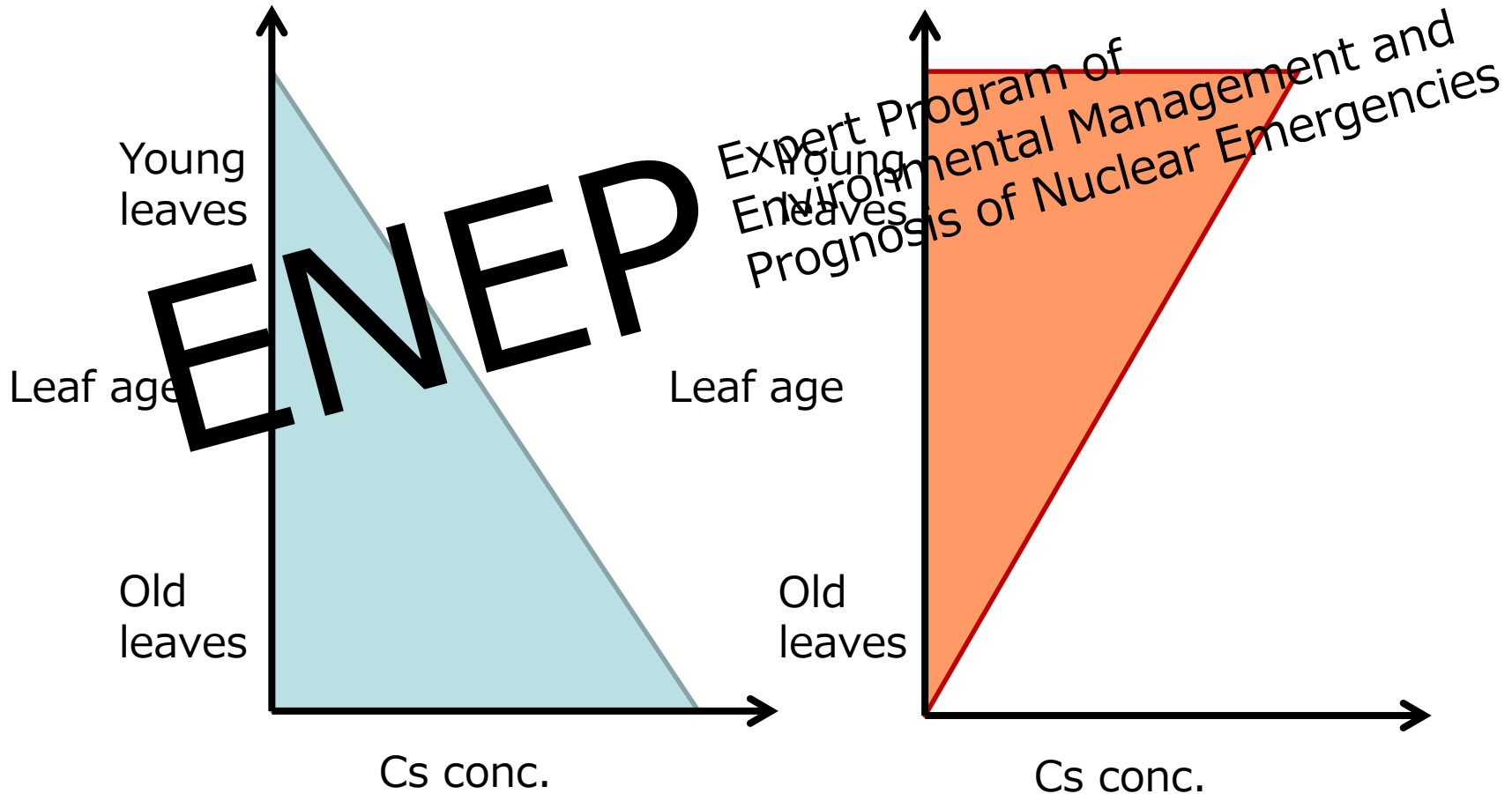
ENEP Expert program of Environmental Management and Prognosis of Nuclear Emergencies

規制値超過イネ中のセシウム蓄積パターン

Radio-Cs accumulation pattern in rice

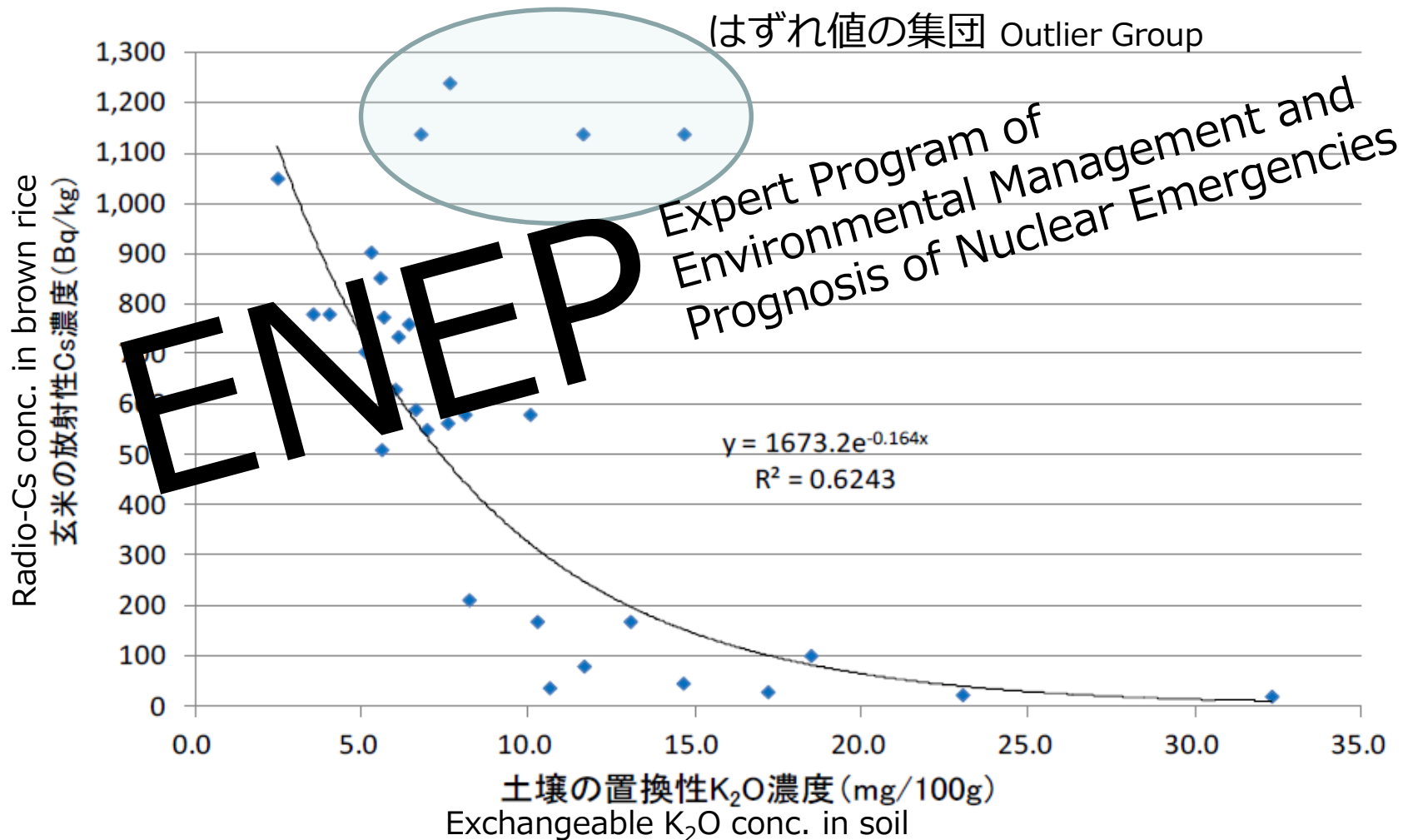
福島県農業総合センターのイネ
Rice harvested at controlled soil

玄米が規制値を超過したイネ
Rice contained excess conc. of Radio-Cs



土壤中置換性カリウム濃度と 玄米中セシウム濃度の関係

Relationship between soil exchangeable K conc. and Radio-Cs conc. in brown rice



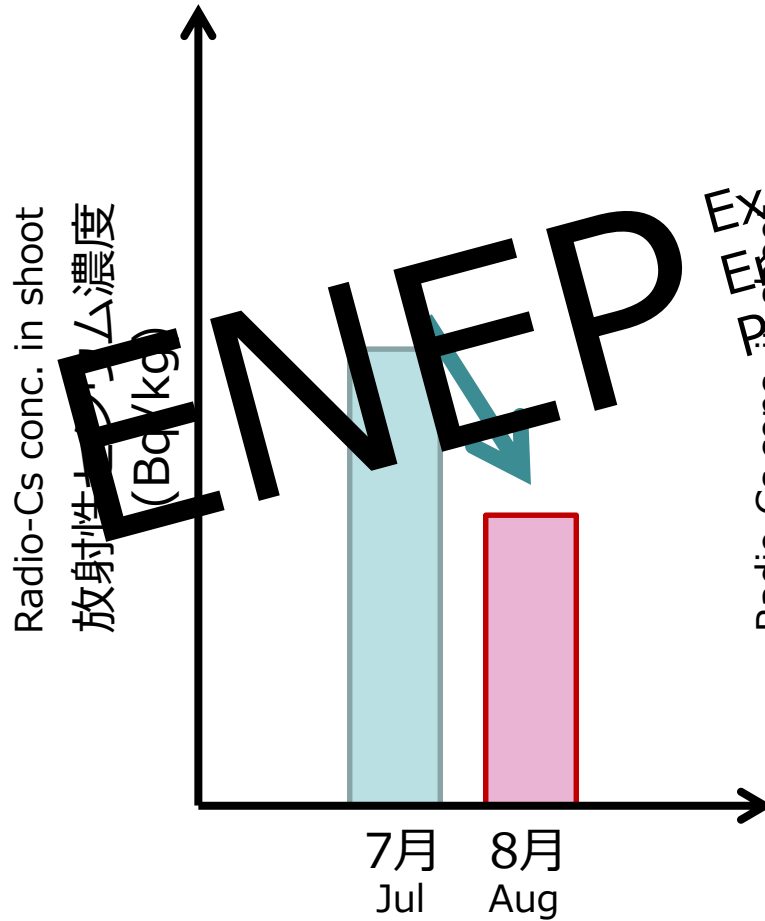
暫定規制値を超過した放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析 (中間報告) より
(福島県、農林水産省)

イネ茎葉中セシウム濃度の経時変化

Growth dependent Radio-Cs conc. in rice shoot

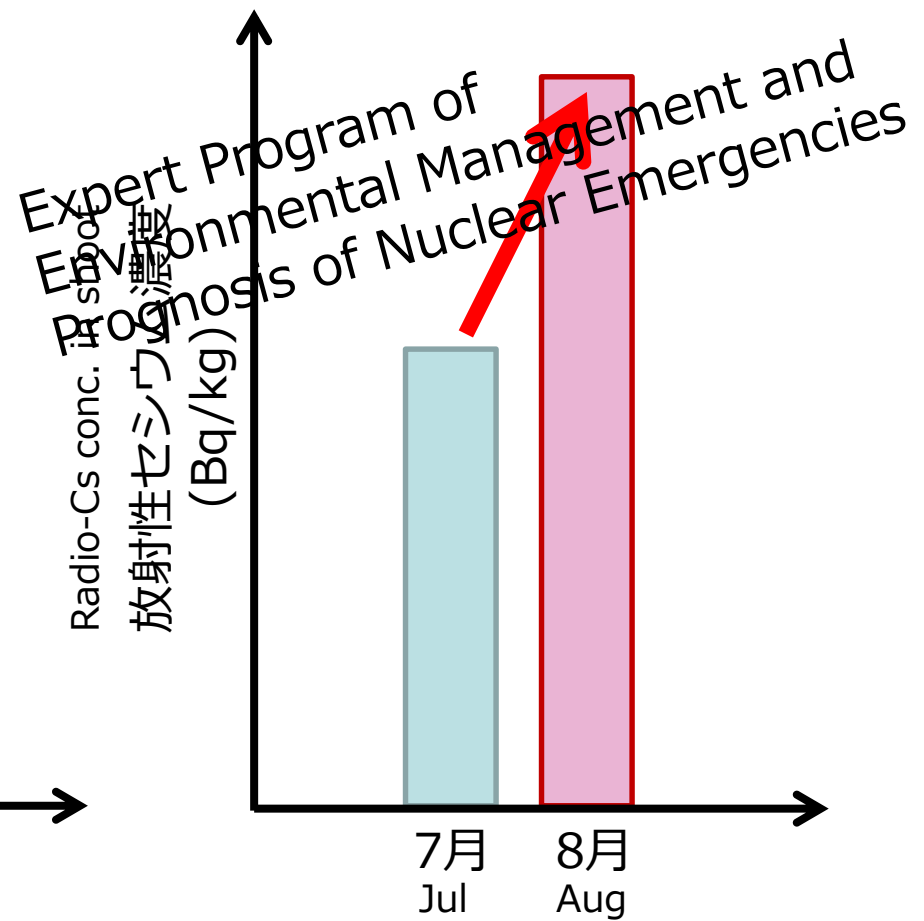
通常水田の例

Ex. of general paddy field



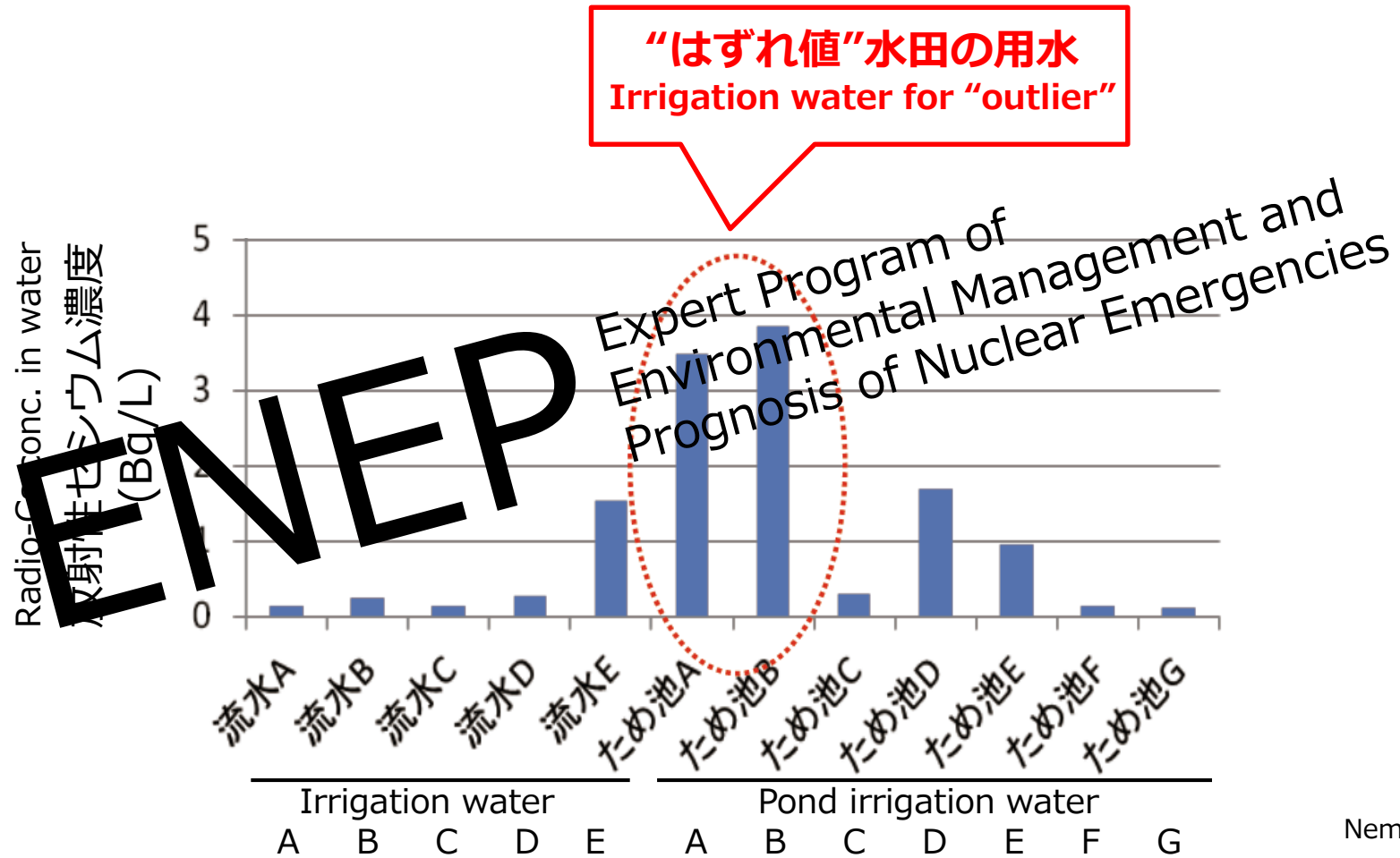
“はずれ値”水田の例

Ex. of “outlier paddy field”



農業用水中の懸濁態¹³⁷Cs濃度

Concentration of suspended form of radio-Cs in irrigation and pond water

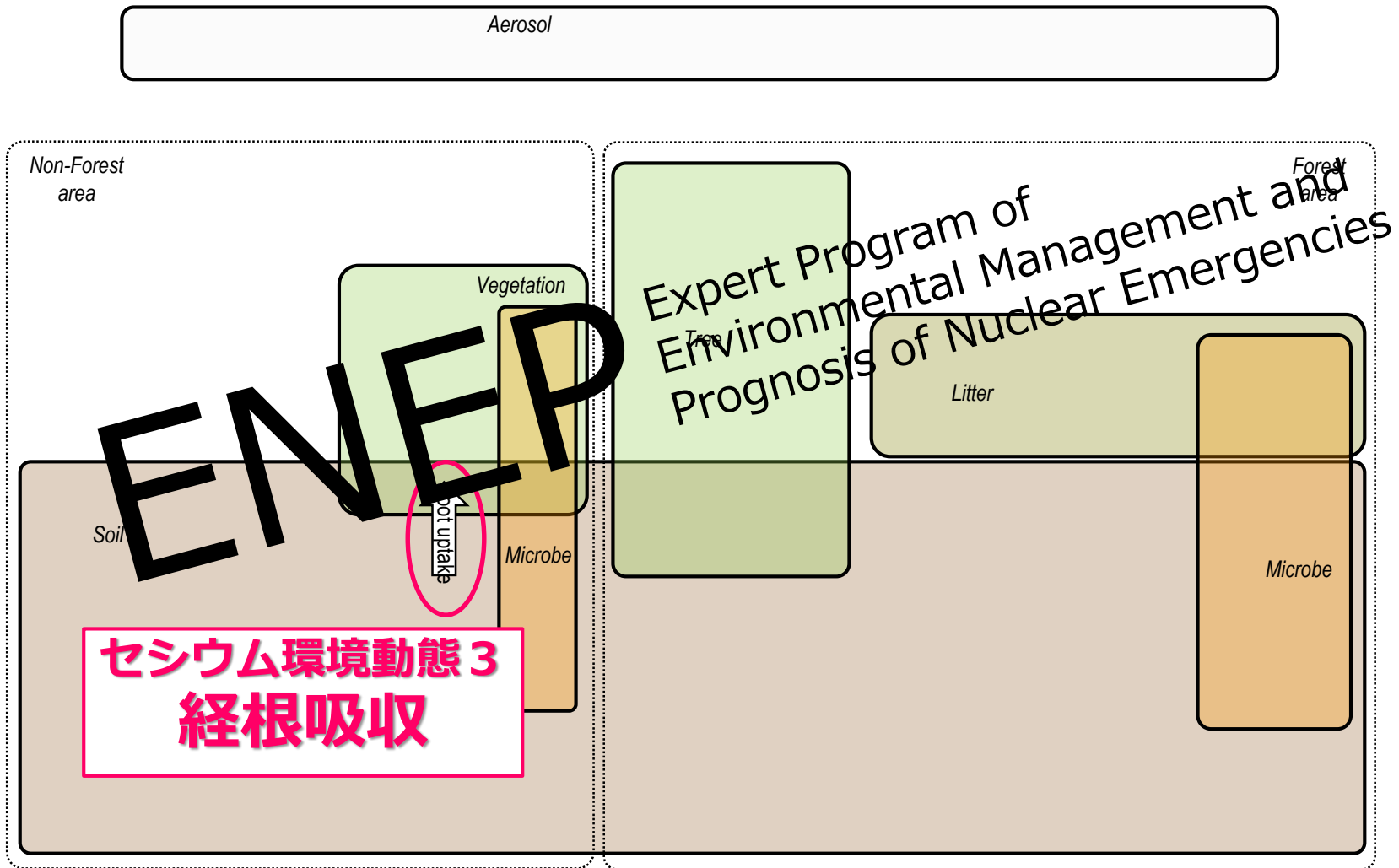


放射性セシウムの濃度の高い農業用水の流入が
玄米中セシウムの上昇に関与

Influx of radio-Cs contaminated irrigation water enhance its conc. in brown rice

陸域生態系における動態把握

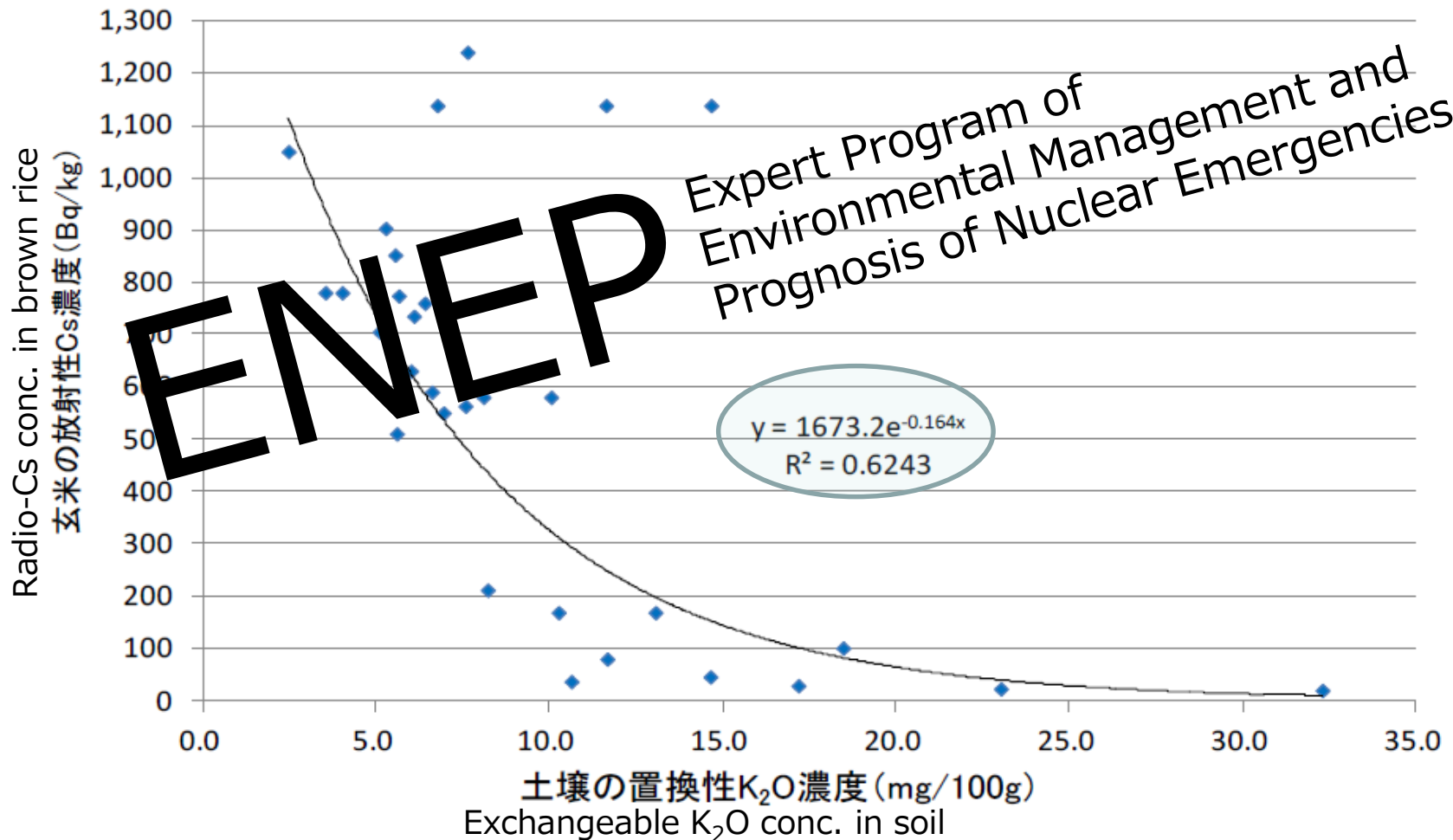
Dynamics of radioactive nuclides within terrestrial ecosystem



セシウム環境動態3
経根吸収

土壤中置換性カリウム濃度と 玄米中セシウム濃度の関係

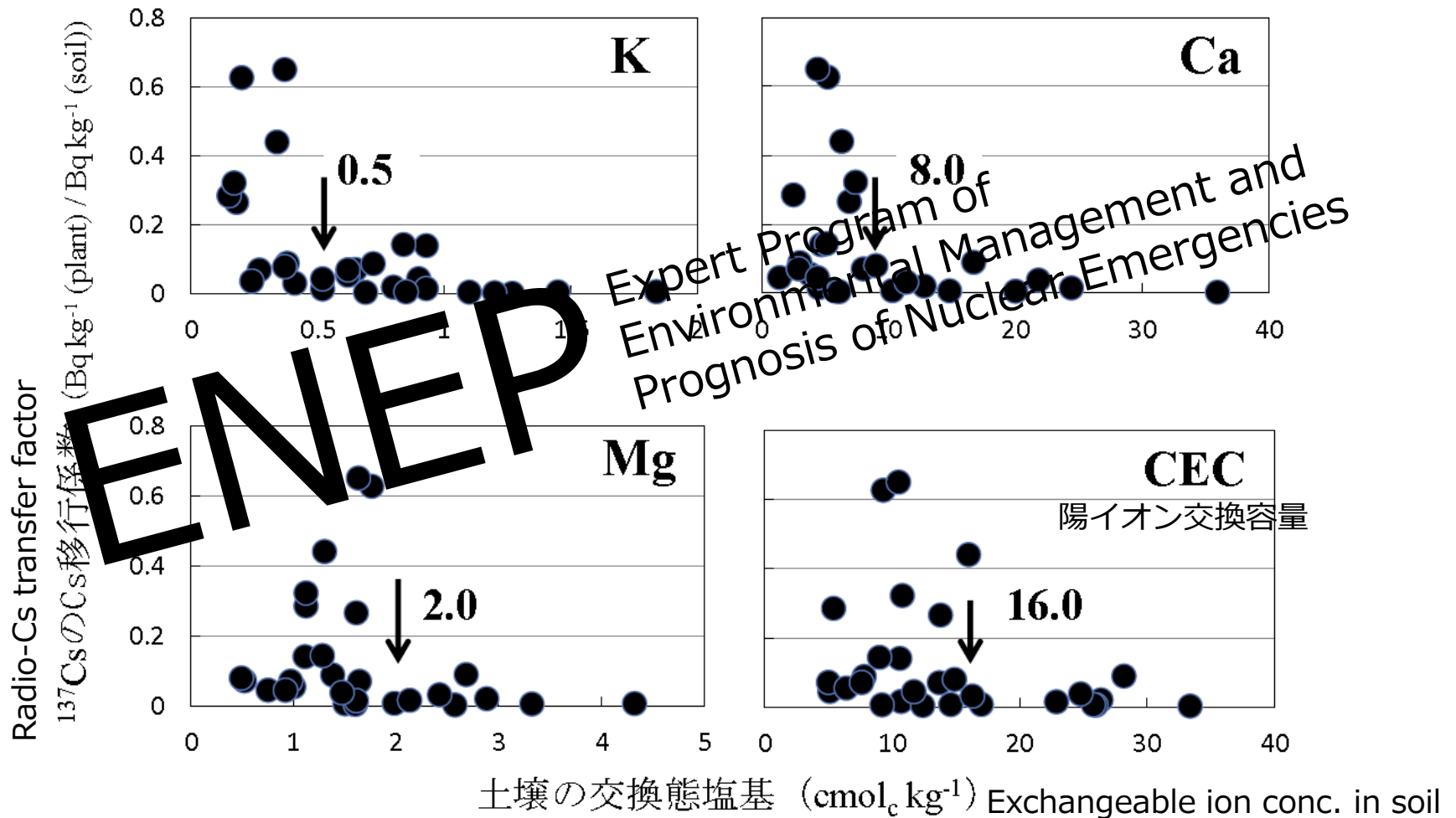
Relationship between soil exchangeable K conc. and Radio-Cs conc. in brown rice



暫定規制値を超過した放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析 (中間報告) より
(福島県、農林水産省)

土壤中のイオン濃度と¹³⁷Csの移行係数

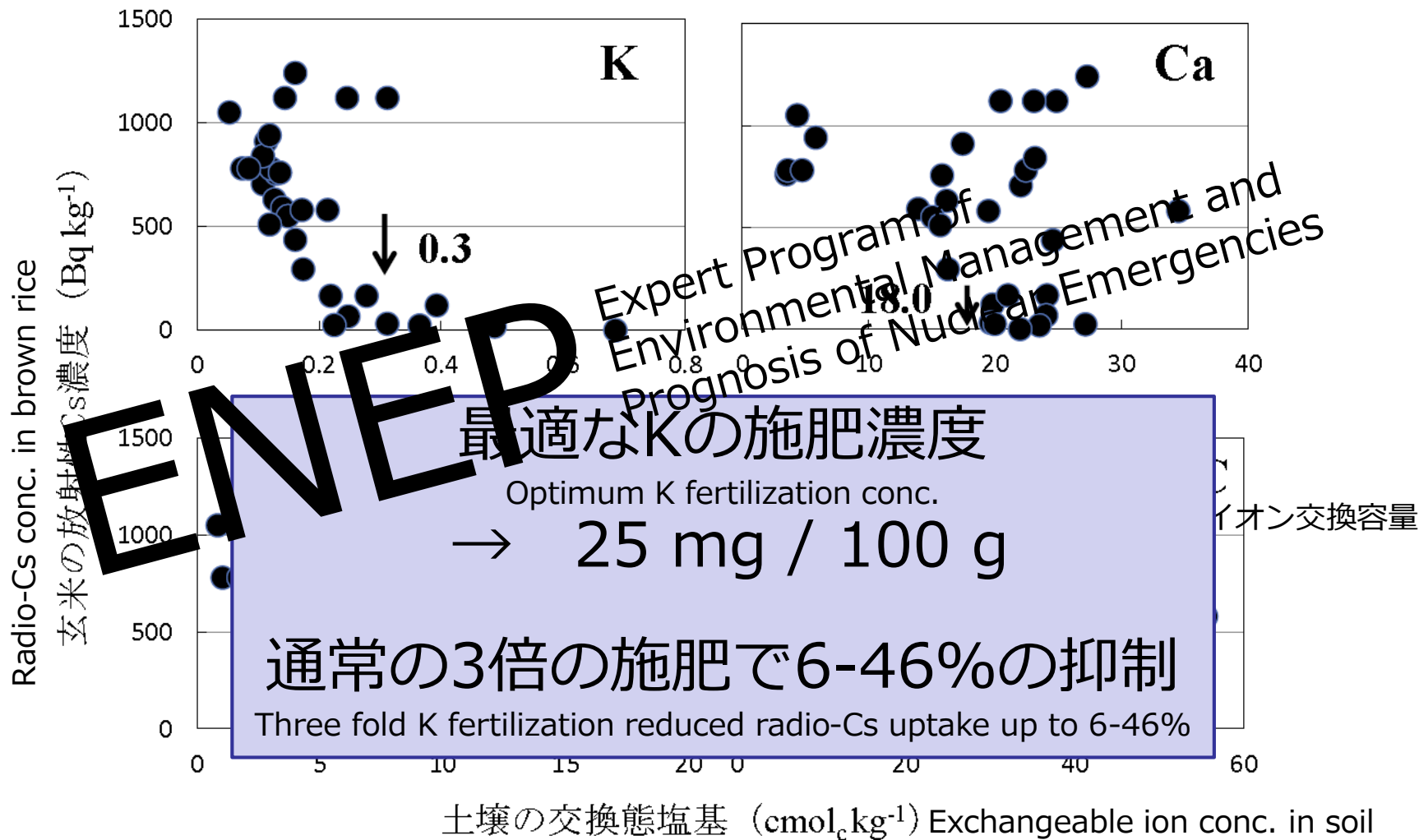
Exchangeable ion conc. in soil and transfer factor of ¹³⁷Cs



土壤の交換性塩基およびCECと¹³⁷CsのCs移行係数との関係
(Smolders et.al (1997) のデータから作図)

土壤中のイオン濃度と玄米中の¹³⁷Cs濃度

Exchangeable ion conc. in soil and ¹³⁷Cs conc. in brown rice

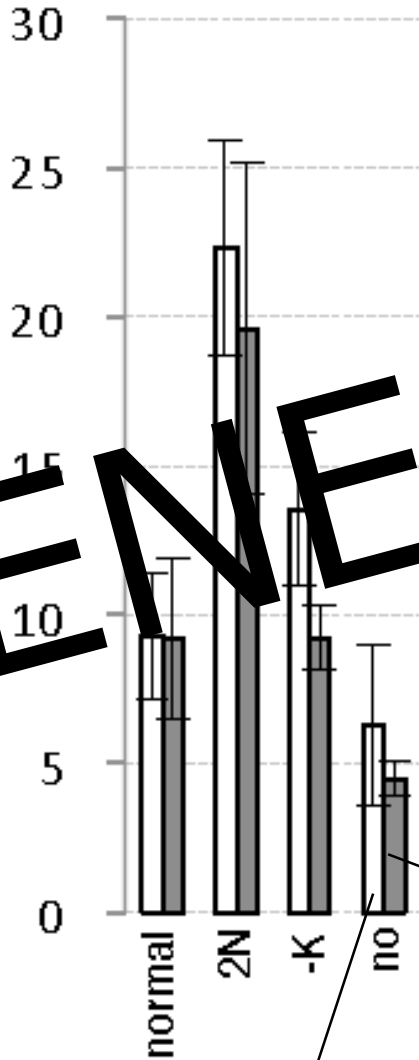


土壤の交換性塩基およびCECと玄米の放射性Cs濃度との関係
 (福島県・農林水産省 (2011) のデータから作図)

施肥のバランスとセシウム吸収

Radio-Cs uptake under high N condition

Radio-Cs conc. in brown rice (Bq/kg)



ENEPEP

normal : 通常の施肥量 Normal fertilization
 2N : 窒素施肥量2倍 Twice N
 -K : カリウム施肥なし Without K
 no : 施肥なし Without fertilization

コシヒカリ
Koshihikari

ヒトメボレ
Hitome-bore

福島県農林水産物モニタリングHP

Website to inform radionuclides contamination
in agricultural and marine products



新たな未来へ向けて再生し始めている福島の姿を
全国の皆様に伝えていきます。

基準値	ヨウ素 131 (Bq/kg)				セシウム 134・セシウム 137 (Bq/kg)				
	平成24年4月からの基準値では 設定されておりません。								
暫定規制値	飲料水	牛乳・乳製品	野菜類 (根菜・芋類を除く)	魚介類	飲料水	牛乳・ 乳製品	野菜類	穀類	肉・卵・魚・ その他
		300	300	2000	2000	200	200	500	500

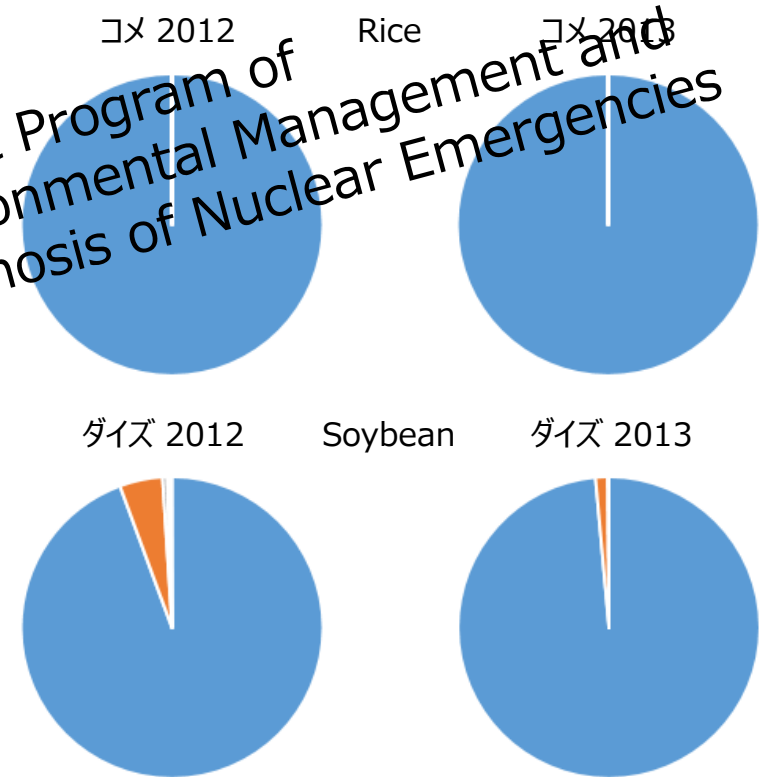
暫定規制値と基準値についてはこちらをご覧ください。

は基準値（平成24年3月以前は暫定規制値）を超過している農産物です。

品目	生産市町村名 (クリックで地図表示)	検出核種・濃度			サンプル 採取日	検出日
		ヨウ素 131	セシウム 134	セシウム 137		
大豆	大玉村 (旧大山村)	---	---	---	2014-11-19	2014-11-26
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	26.8	87.3	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	33.5	88	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	33.3	88	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	33.5	85.2	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	26.8	86.8	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	33.5	83.9	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	38.1	82.9	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	31.6	89.3	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	31.7	86.9	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	29.5	91.1	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	33.4	86.2	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	34.1	89.4	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	31.9	87.6	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	34.7	93.6	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	34.3	92.4	2014-02-04	2014-03-04
大豆	南相馬市 (旧石神村)	---	37.3	78	2014-02-04	2014-03-04

調査期間：2014年1月から12月

Expert Program of
Environmental Management and
prognosis of Nuclear Emergencies



■ -50 ■ 50-75 ■ 75-100 ■ 100-150 ■ 150-200 ■ 200-

Bq / kg

可食部にカリウムを多く貯める作物

Crops which accumulate potassium in the edible tissue

[kg]

順位	作物名	窒素	リン酸	カリウム	順位	作物名	窒素	リン酸	カリウム
1	タバコ	36.8	16.4	98.6	11	エダマメ	9.57	2.02	17.3
2	ナタネ	71.0	23.9	88.8	12	トウモロコシ	10.7	4.45	17.3
3	茶	131.6	36.2	7.3	13	露地メロン	9.08	2.02	15.7
4	インゲン	20.1	15.7	55.6	14	桑	12.5	2.13	10.5
5	アズキ	40.68	15.3	35.4	15	イネ科牧草	6.50	2.50	10.2
6	大豆	92	10.3	32.1	16	二条大麦	14.5	6.17	10.0
7	二条大麦	20.3	7.8	31.4	17	レンコン	8.0	1.80	9.13
8	小麦	25.2	9.5	31.1	18	ゴボウ	6.74	2.90	8.75
9	落花生	63.0	7.4	26.8	19	ハウレンソウ	4.63	1.29	8.51
10	水稻	18.7	9.25	26.4	20	コンパ牧草	6.25	2.20	8.38

注：穀類・豆類は乾燥子実

出典：尾和尚人：わが国の農作物の養分収支，(株)農業環境技術研究所（1996年）

マメ科の作物 ✓ は可食部に多くのカリウムを貯めている

Many legume crops ✓ accumulate potassium in their seeds

ミヤコグサ(*Lotus japonicus*)

マメ科のモデル植物 : Model plants for legume

ゲノム情報が利用可能 Genome information is available

分子生物学的手法が利用可能 Methods of molecular biology is available

リソースが充実 Highly prepared resources

金属集積の系統間差

Strain difference in metal accumulation

Miyakojima MG-20とGifu B-129の種子において、

Fe, Ni, Cu, Znの集積量に差 Fe, Ni, Cu and Zn accumulations

in seed are different between MG-20 and B-129 (Klein and Grusak 2009)



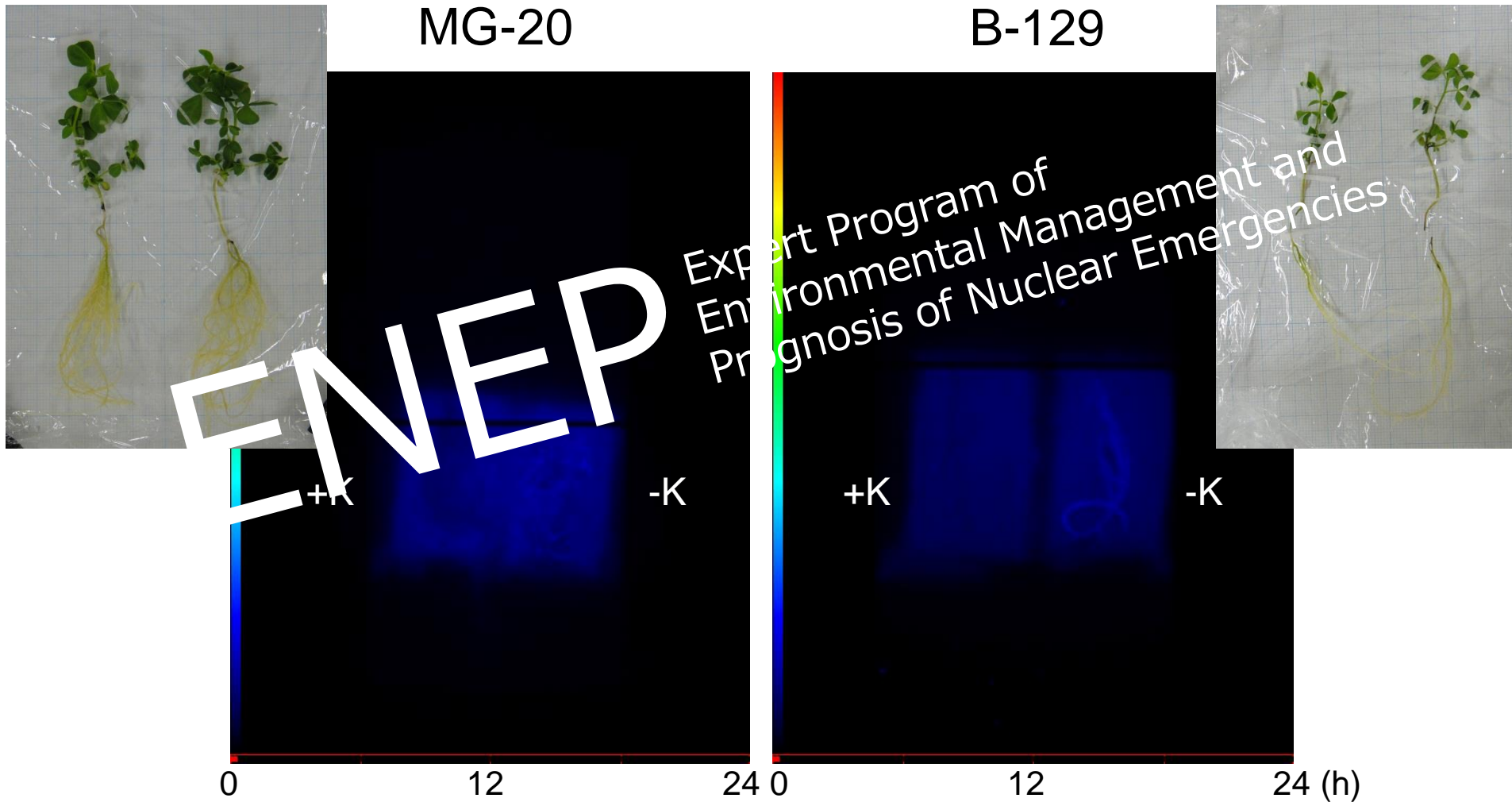
MG-20



B-129

ミヤコグサにおけるK欠乏の ^{137}Cs 吸収への影響

Effect of K starvation on ^{137}Cs uptake and translocation in *L. japonicus*



吸収試験前3日間のK欠乏処理により ^{137}Cs の吸収量が増加

K starvation for 3 days enhanced ^{137}Cs uptake

カリウム輸送系を介したセシウムの輸送

Translocation of ^{137}Cs mediated by K^+ transport systems

Inward K^+ channel

AKT1, KAT1, KST1 etc.

High-affinity K^+/H^+ symporter

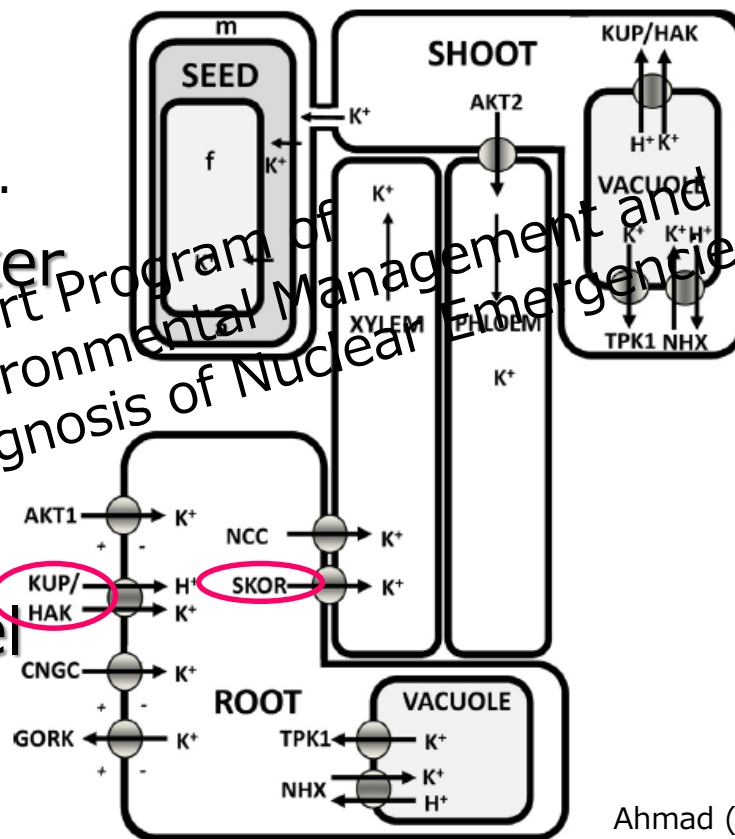
KUP1, HAK5 etc.

High-affinity K^+ transporter

HKT1 etc.

Non-selective cation channel

CNGC, GLR etc.



Ahmad (2014)

カリウム欠乏により活性化される輸送系の解明が必要

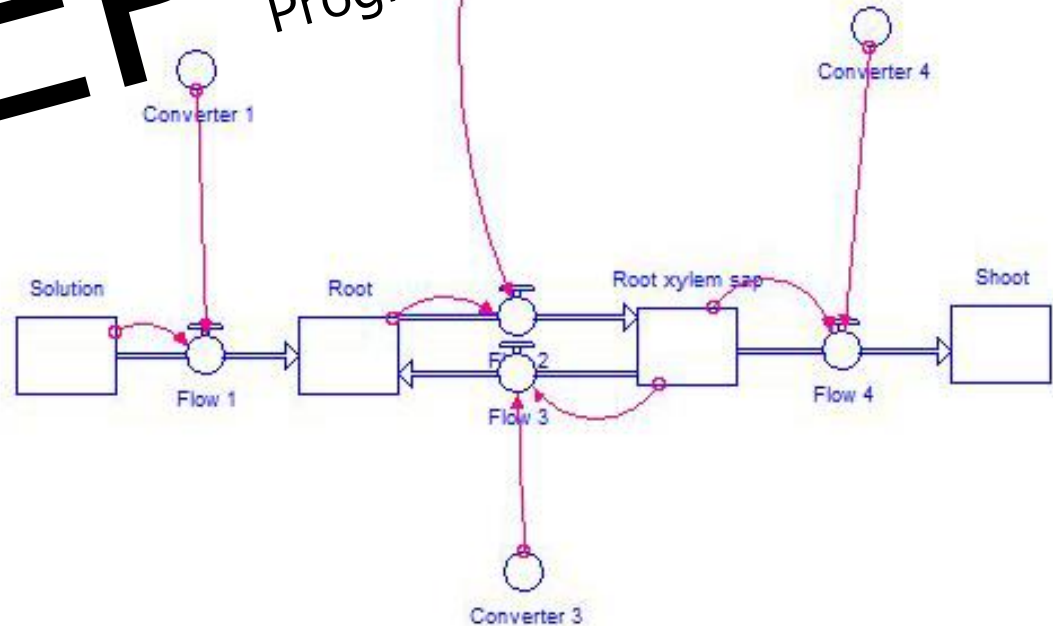
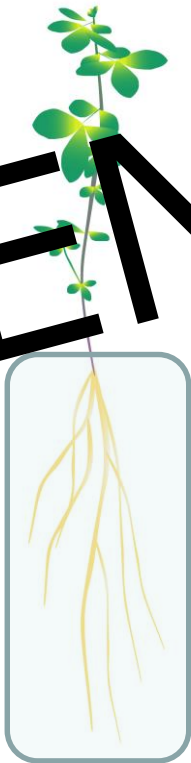
Identification of Cs translocation system activated by the K deficiency

亜鉛を対象とした コンパートメントモデルによる 輸送活性評価

Estimation of Zn transport activity using compartment model in plant

ENEP

Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies



ミヤコグサの亜鉛集積特性

Zinc accumulation in *L. japonicus*

Element	Accession	Concentration ($\mu\text{mol} / \text{g D.W.}$)				Element	Accession	Concentration ($\text{nmol} / \text{g D.W.}$)			
		Shoot		Root				Shoot		Root	
		Average	S.D.	Average	S.D.			Average	S.D.	Average	S.D.
Na	MG-20	5.7	1.3	17.2	2.9	Mn	MG-20	513.7	19.0	617.8	76.9
	B-129	18.7	8.3	54.3	24.0		B-129	85.1	72.4	2109.6	738.3
Mg	MG-20	129.6	6.5	6.0	10.2	Fe	MG-20	195.5	122.2	1905.9	247.1
	B-129	121.1	10.0	14.3	11.4		B-129	810.8	80.6	3254.2	473.6
P	MG-20	22.9	10.8	52.5	30.1	Ni	MG-20	23.0	10.5	30.8	7.9
	B-129	25.3	6.0	43.0	42.0		B-129	45.1	14.6	79.8	20.4
K	MG-20	112.4	69.7	1949.4	94.8	Cu	MG-20	50.1	7.1	63.2	5.9
	B-129	1041.4	95.7	1586.4	152.4		B-129	96.5	9.5	135.1	28.3
Ca	MG-20	353.0	15.4	69.3	2.3	Zn	MG-20	594.2	79.6	529.5	36.8
	B-129	302.7	45.4	70.2	6.1		B-129	1215.4	164.9	936.3	288.2

播種後水耕栽培にて4週間

Grown with hydroponics for 4 weeks

1/10 Hoagland's 水耕液

1/10 Hoagland's solution

明期: 16 h、温度: 23°C

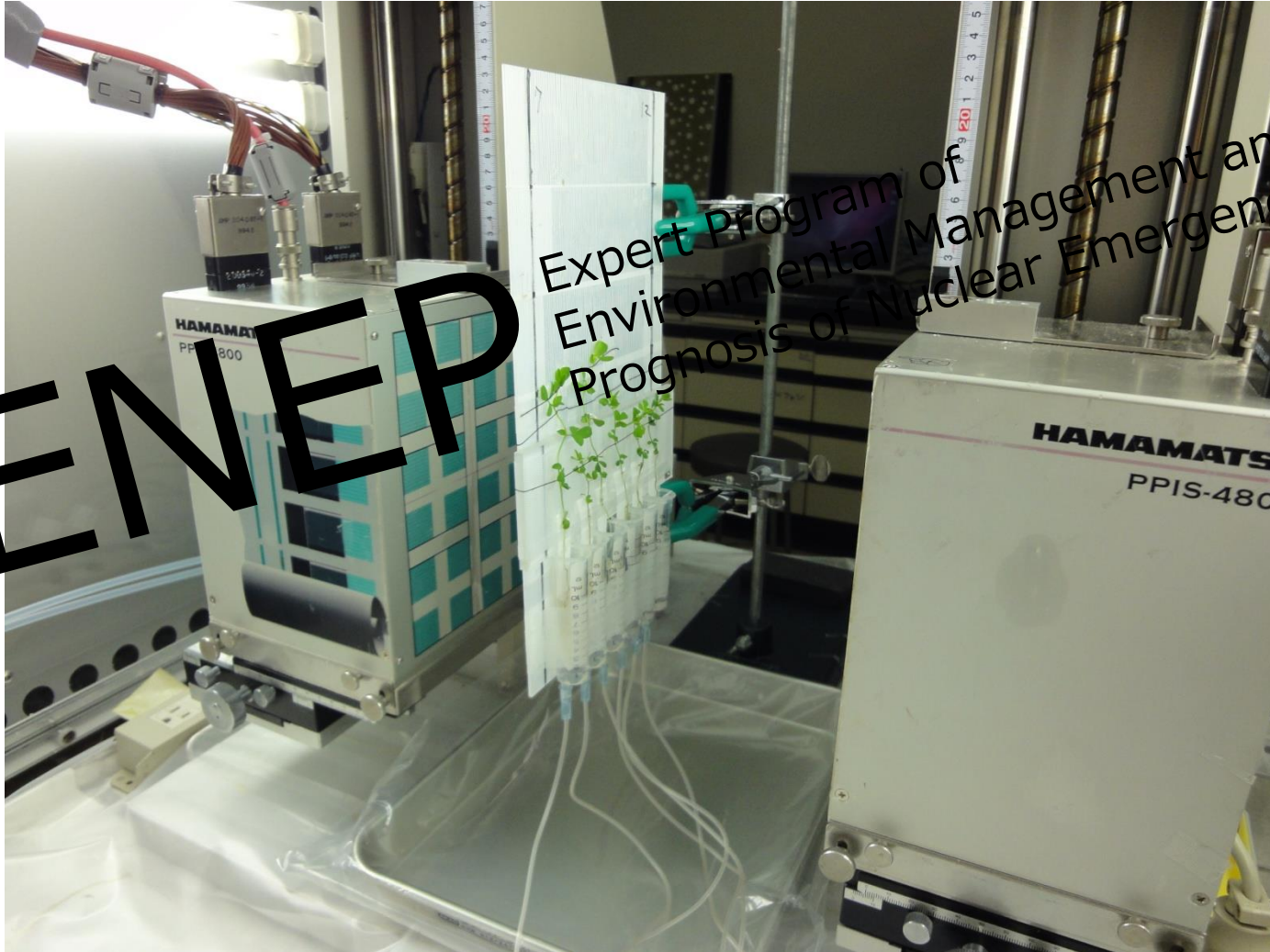
Light : 16 h, Temp. 23°C

→

ICP-AESによる元素測定

Measurement of element concentration
with ICP-AES

Positron Emitting Tracer Imaging System (PETIS)

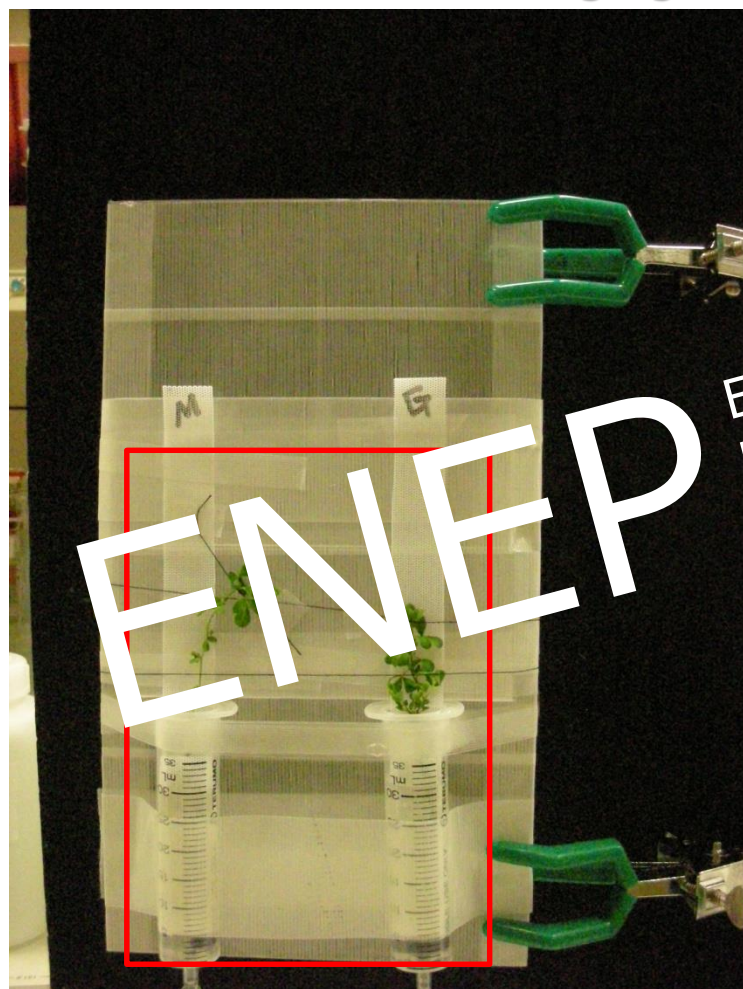


ENEP

Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies

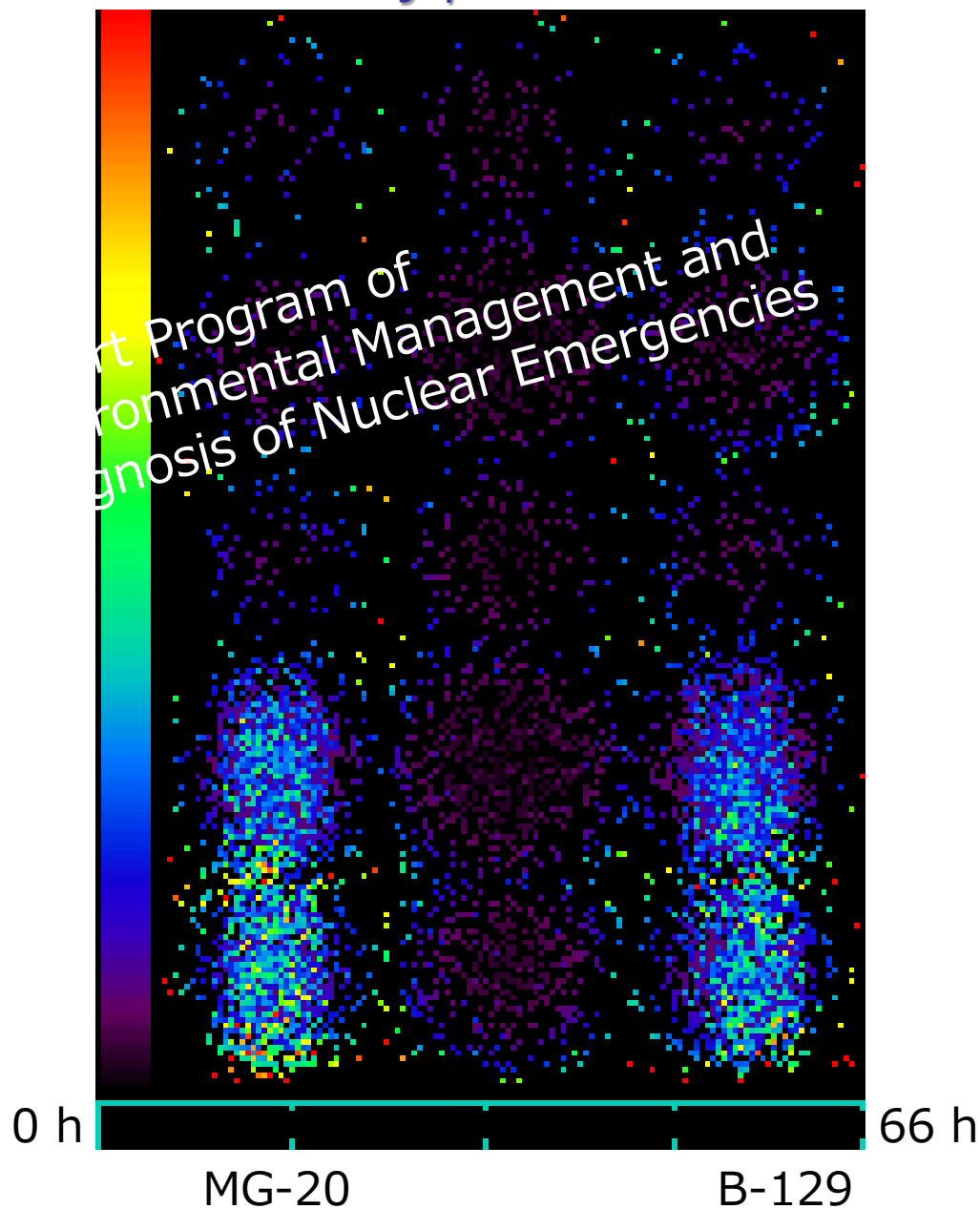
ミヤコグサにおける亜鉛の輸送

Real-time imaging of zinc transfer in *L. japonicus*



MG-20

B-129



^{65}Zn 局在の時間変化

Time dependent Zn-65 distribution in *L. japonicus*



亜鉛の輸送速度に系統間差

Zinc transfer activity is differed between two cultivars

原因遺伝子の探索

Searching for the responsible genes

B-129

MG-20

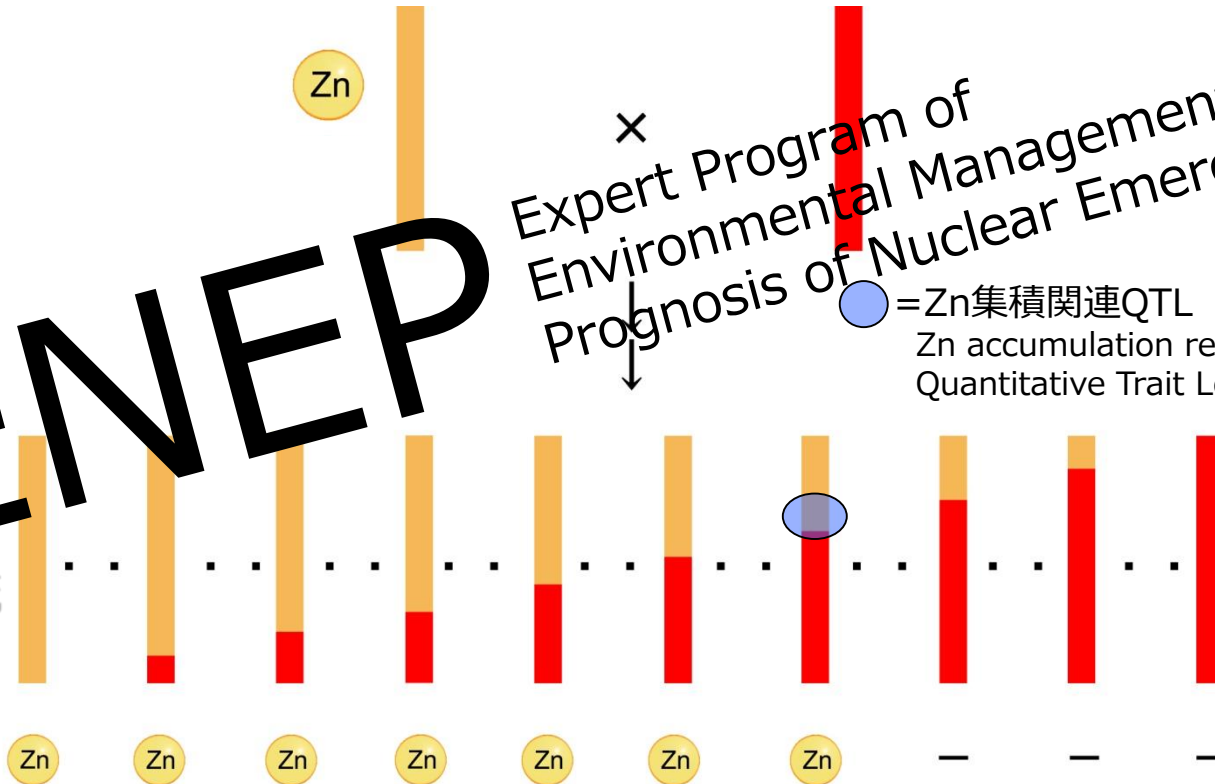
Zn

Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies

● = Zn集積関連QTL
Zn accumulation related
Quantitative Trait Locus

ENEPEP

ミヤコグサ
組換え自殖系統
L. japonicus
recombinant
inbred line



遺伝子型

Genotype

表現型

Phenotype

ミヤコグサ組換え白殖系統

L. Japonicus recombinant inbred line

#1

~

#205



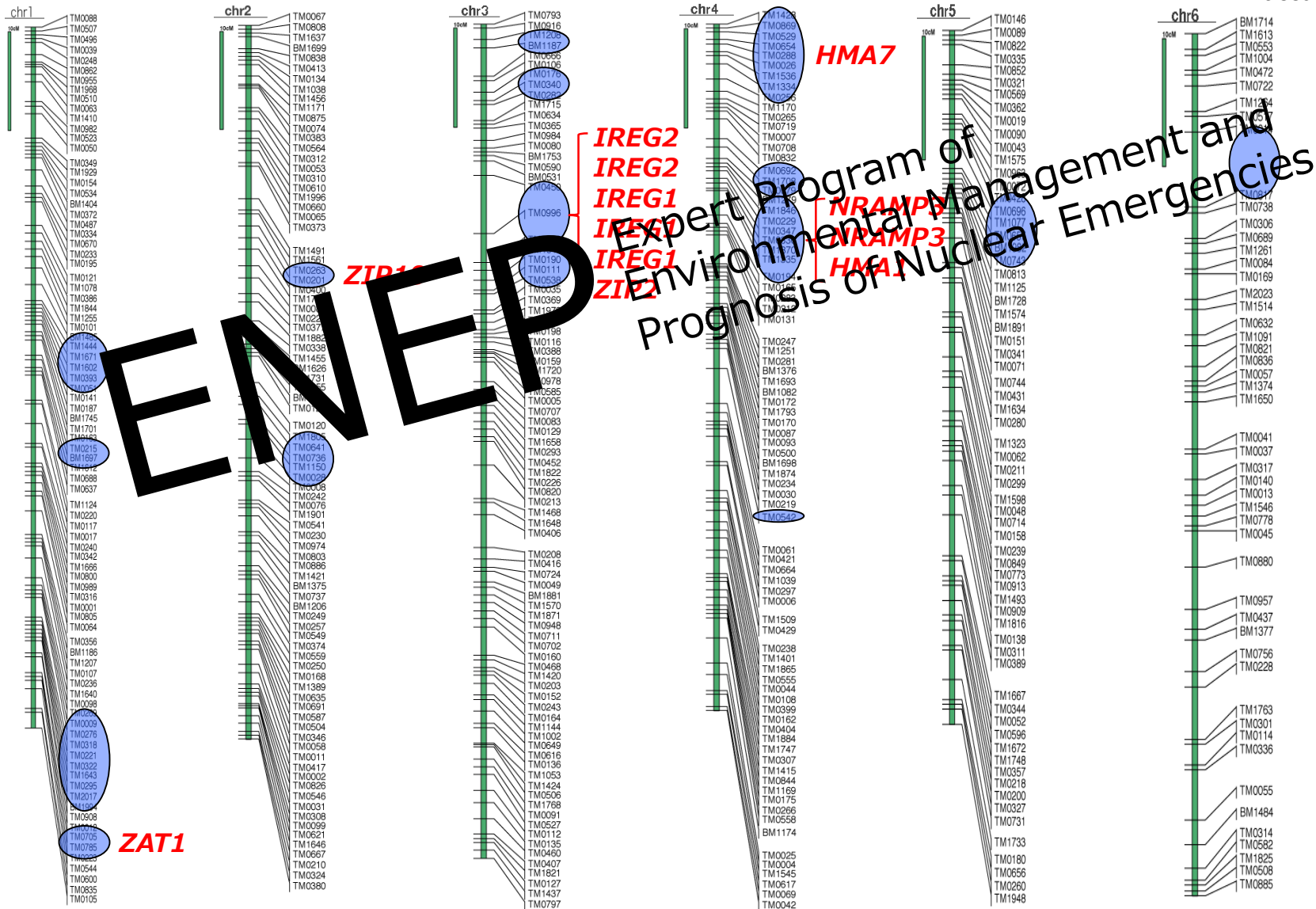
Expert Program of Environmental Management and Prognosis of Nuclear Emergencies

ENEP

地上部亜鉛集積関連遺伝子座

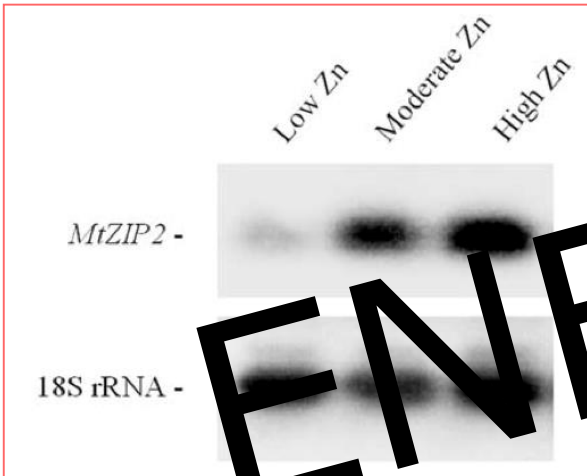
QTLs related to shoot Zn accumulation

● = 地上部Zn集積関連QTL
QTL related to shoot Zn accumulation



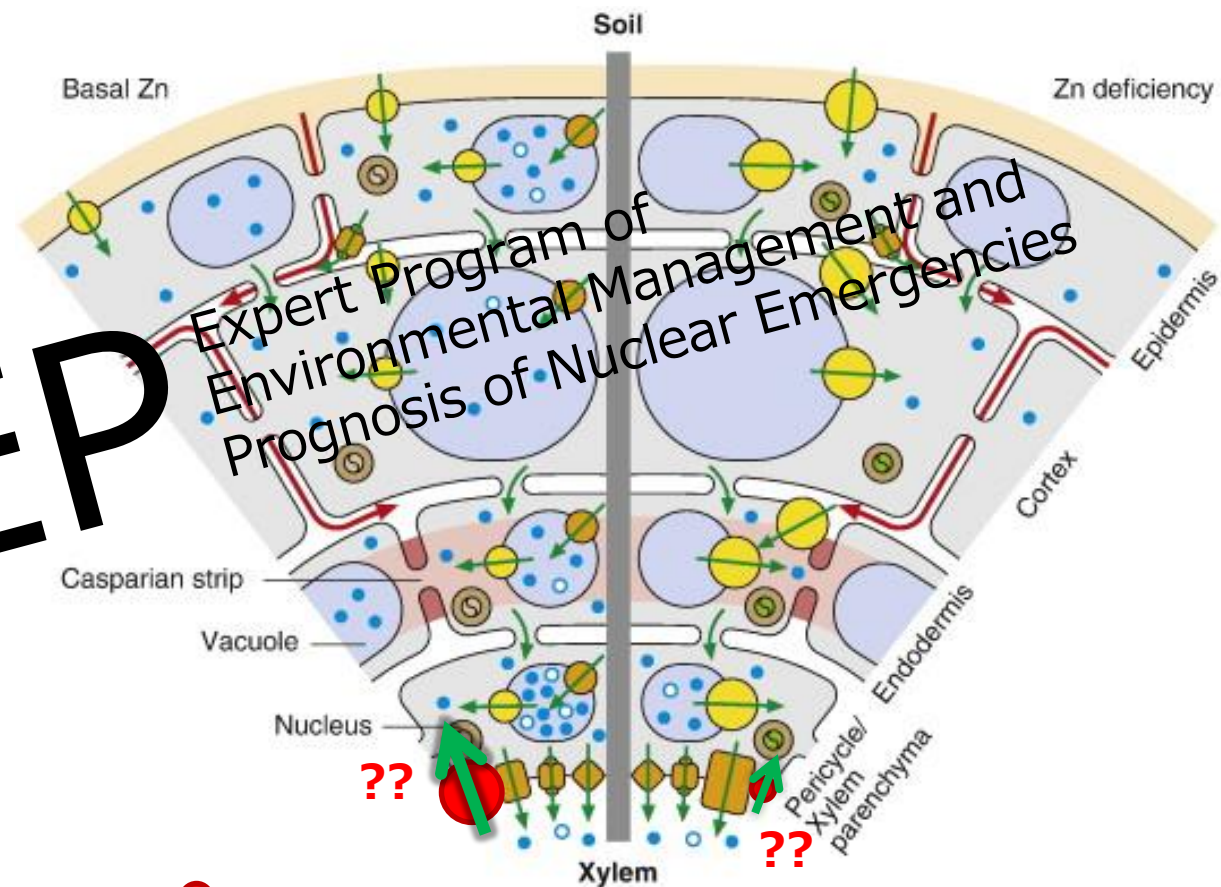
亜鉛輸送におけるZIP2の機能推測

Estimation of ZIP2 function in Zn transfer in plant



Burleigh et al. (2003)

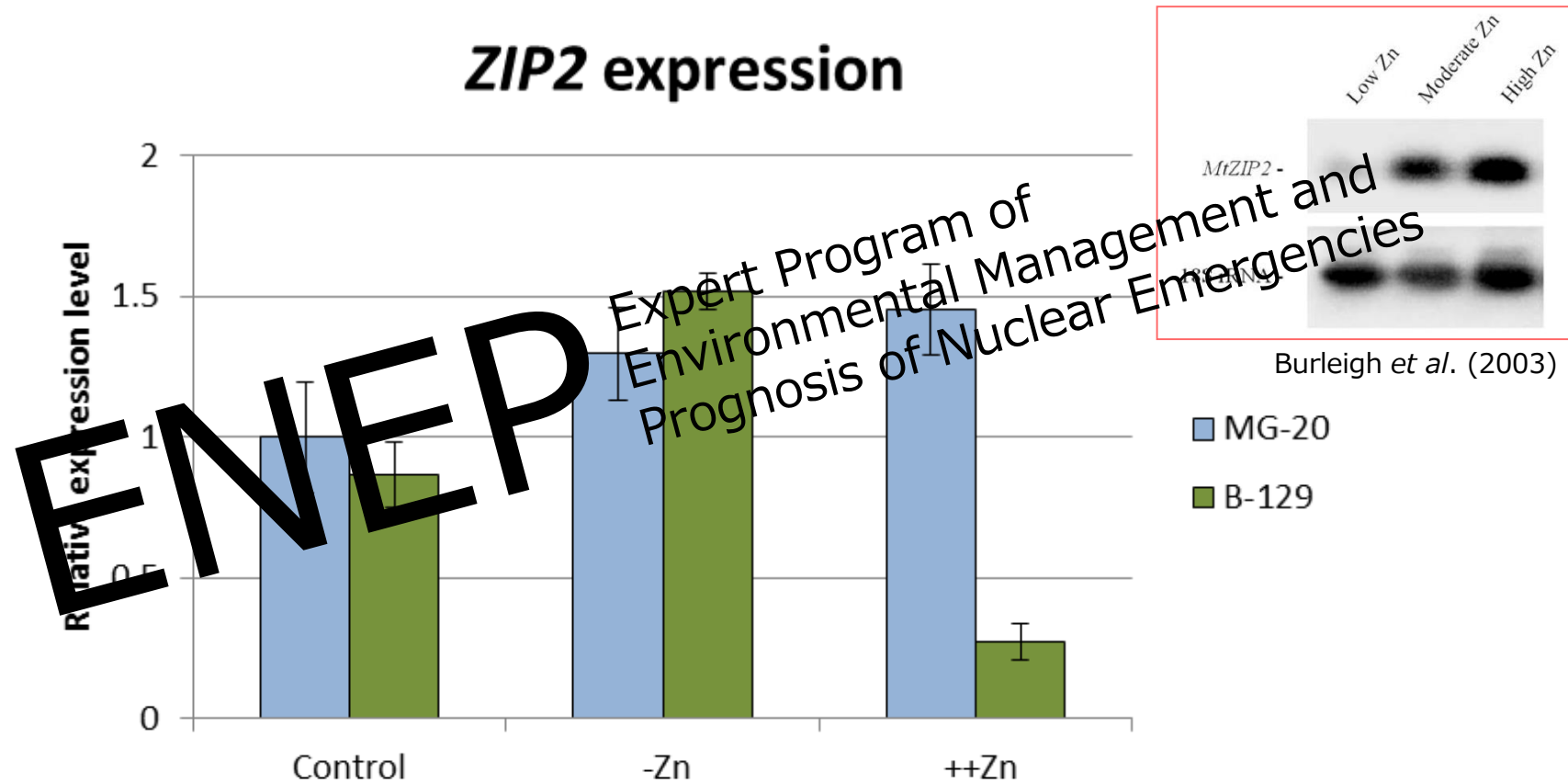
ENEPEP



- ZIP2
- Zn transporter
- HMA2
- ◆ HMA4
- ⊞ PCR2
- ⊙ Inactive bZIP19, bZIP23
- ⊙ Active bZIP19, bZIP23
- Bound Zn
- Free Zn²⁺
- Apoplastic Zn flux
- Symplastic Zn flux

亜鉛欠乏/過剰条件下におけるZIP2発現

ZIP2 expression under deficiency or excess of Zn



ENEPEP

Expert Program of Environmental Management and Prognosis of Nuclear Emergencies

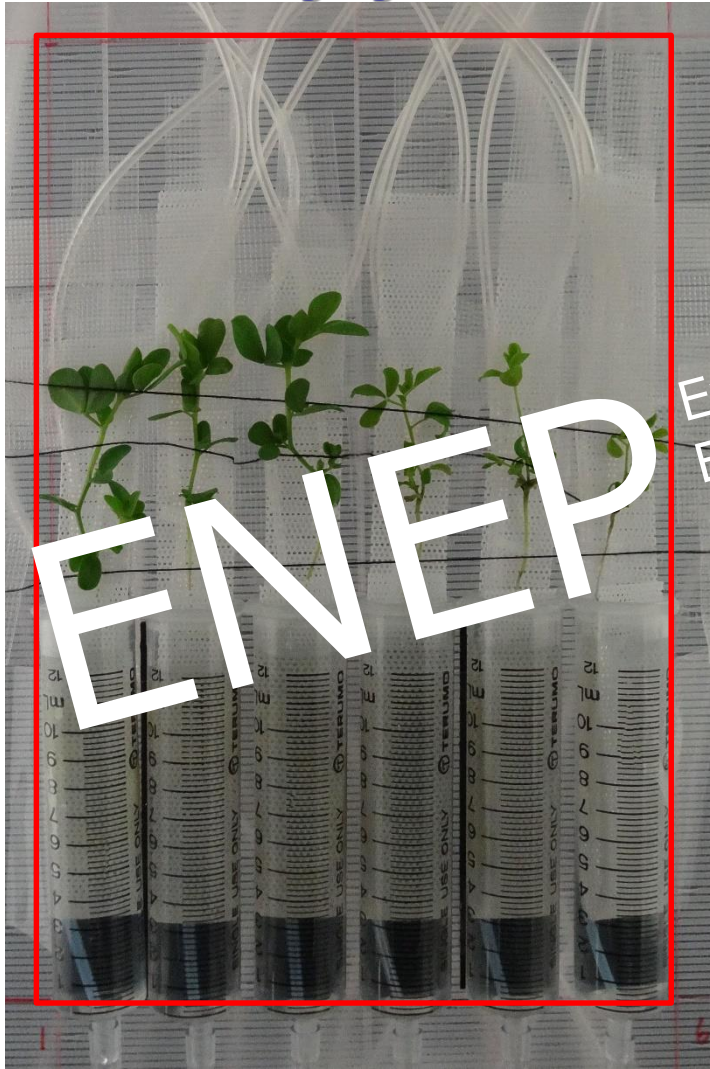
コントロール : Control:
1/10 Hoagland's Sol.
(0.4 μ M Zn)
for 4 weeks

Zn欠乏 : Zn deficiency:
1/10 Hoagland's Sol.
without Zn (0 μ M)
for 4 weeks

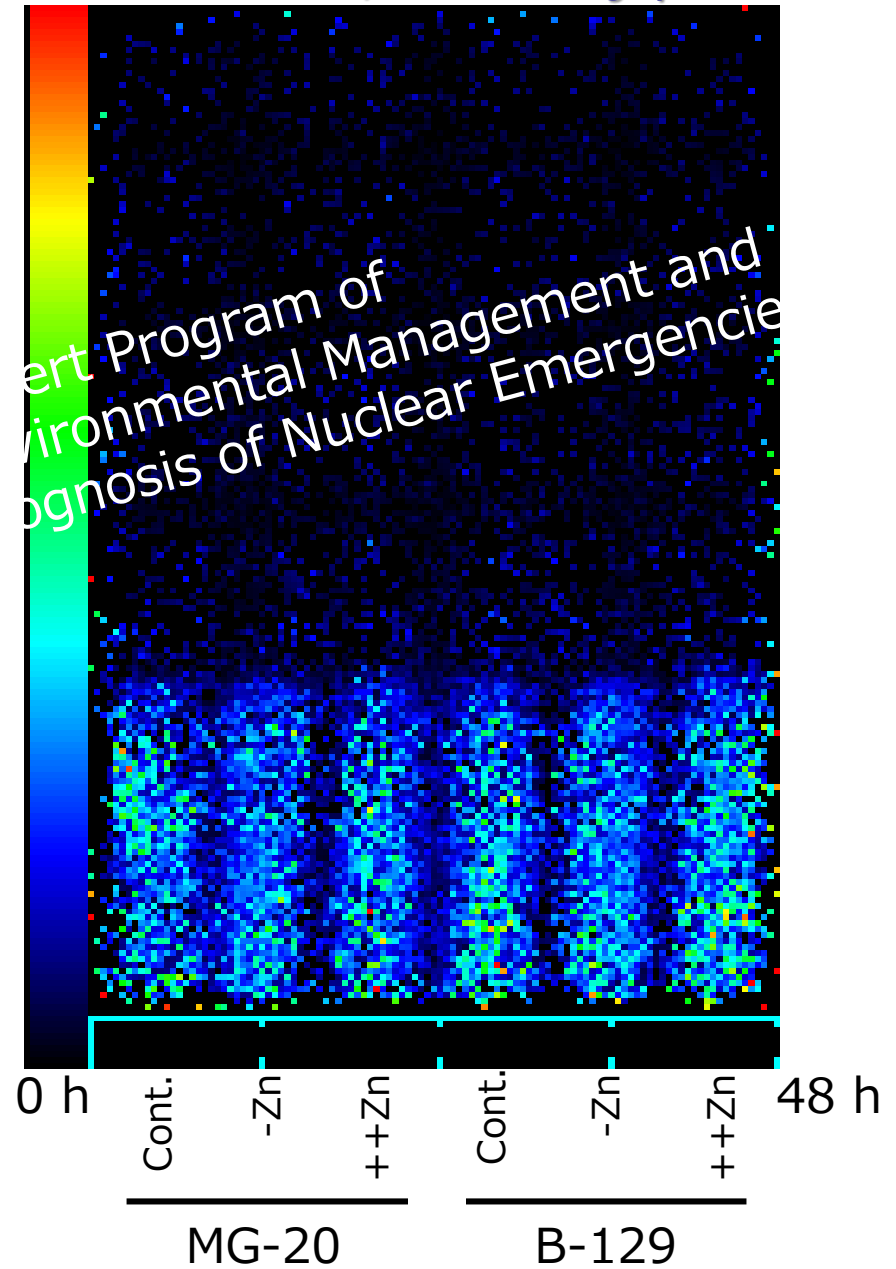
Zn過剰 : Zn excess:
1/10 Hoagland's Sol.
with 40 μ M Zn
for 4 weeks

亜鉛欠乏/過剰ミヤコグサにおける亜鉛輸送

Real-time imaging of zinc transfer in Zn deficient/excess *L. japonicus*

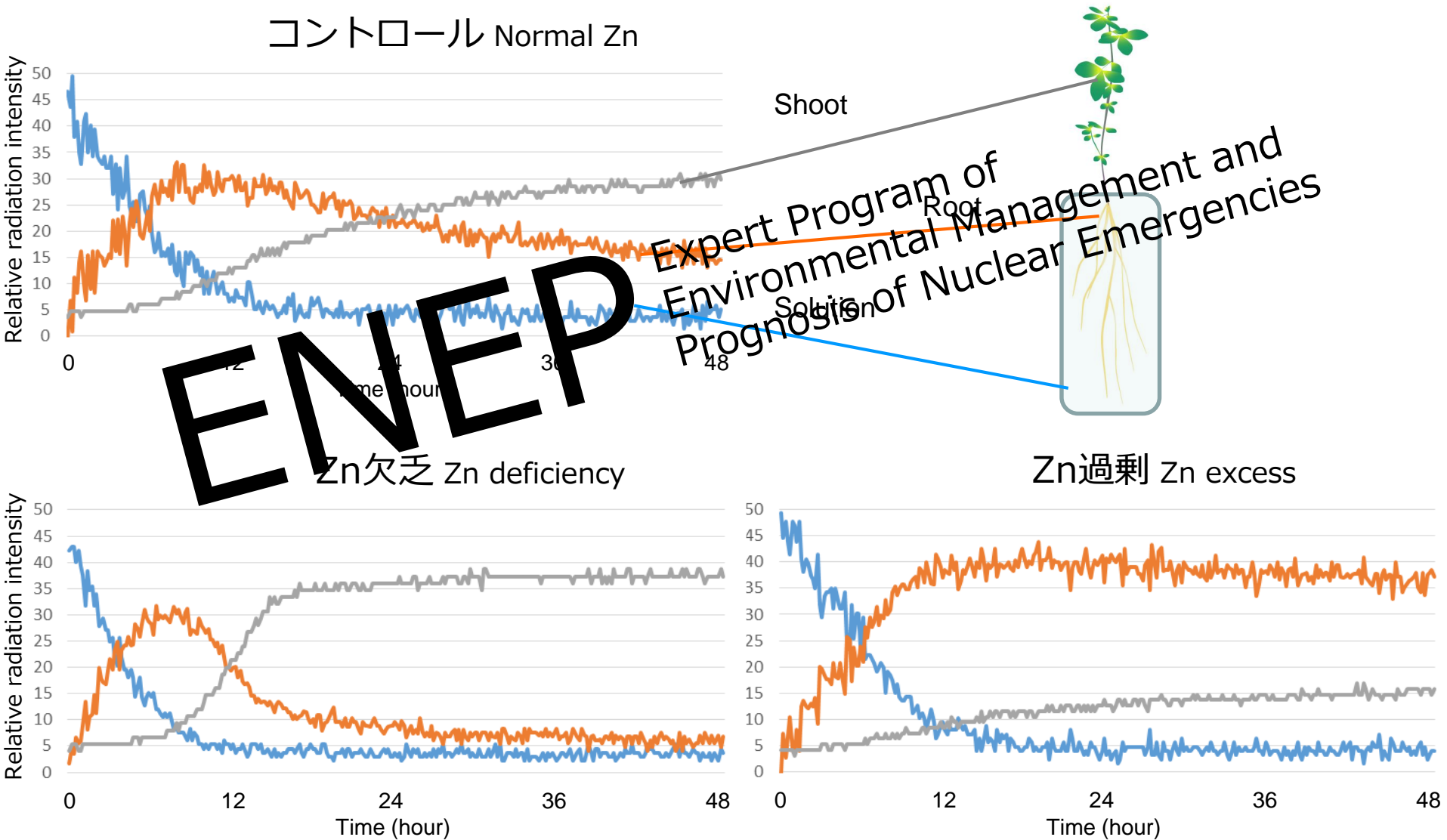


Cont. -Zn ++Zn
MG-20
Cont. -Zn ++Zn
B-129



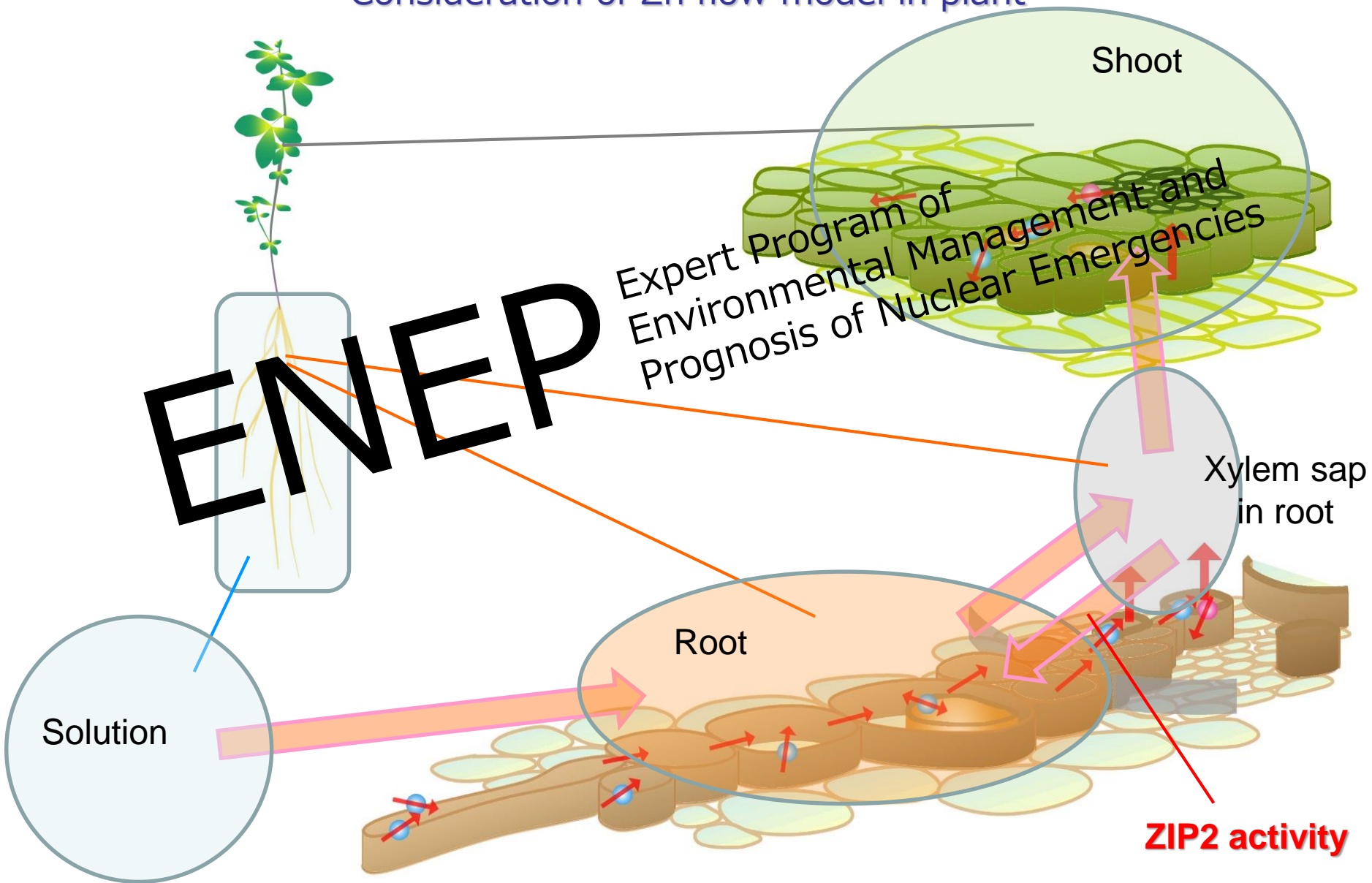
亜鉛欠乏/過剰植物の亜鉛輸送を数値化

Quantifying of zinc transfer in Zn deficient/excess *L. japonicus*



亜鉛フローモデルの検討

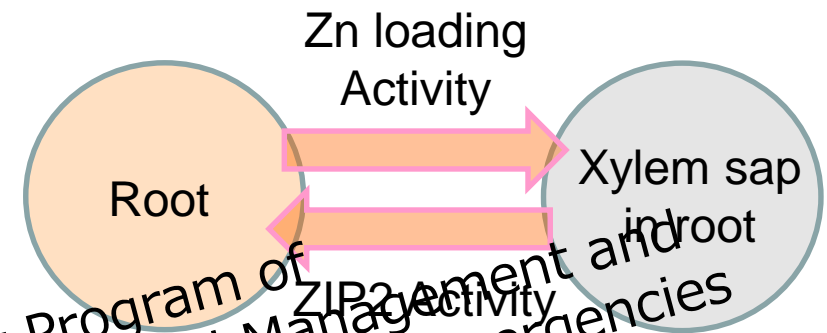
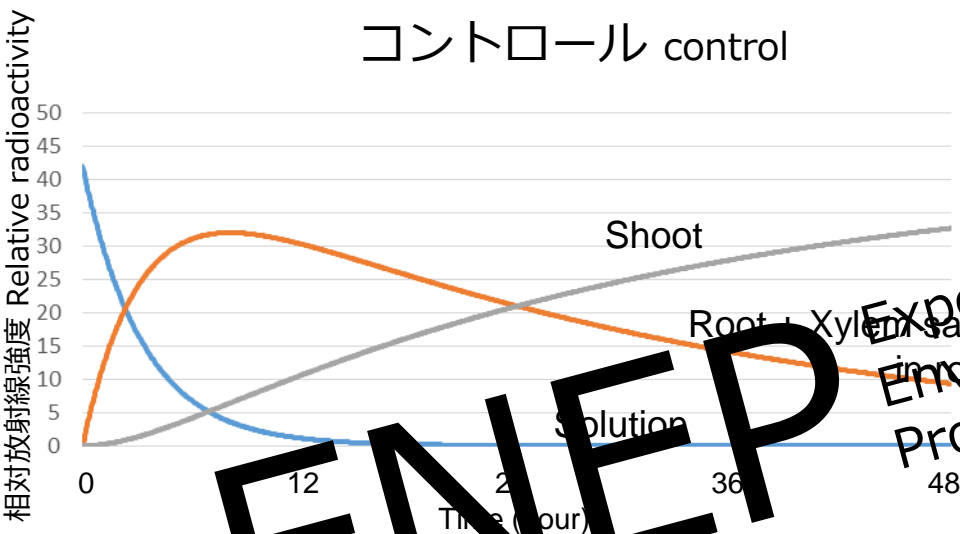
Consideration of Zn flow model in plant



導管への亜鉛輸送活性予測

Estimation of Zn loading activity into xylem sap

コントロール control



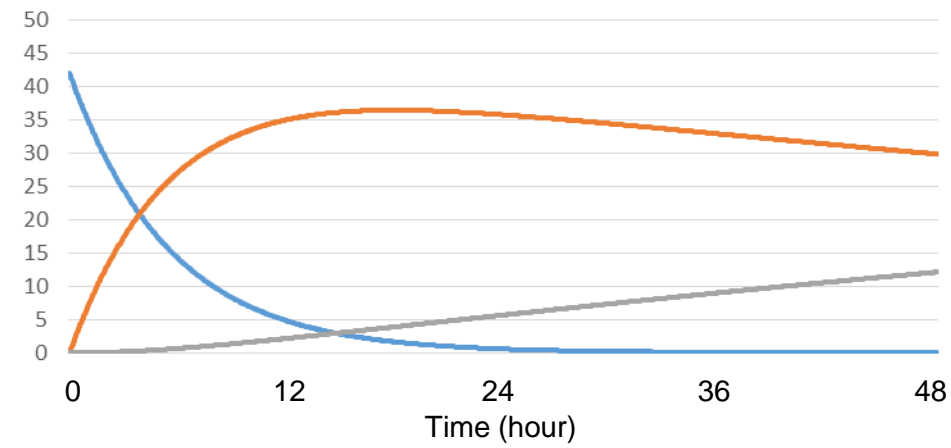
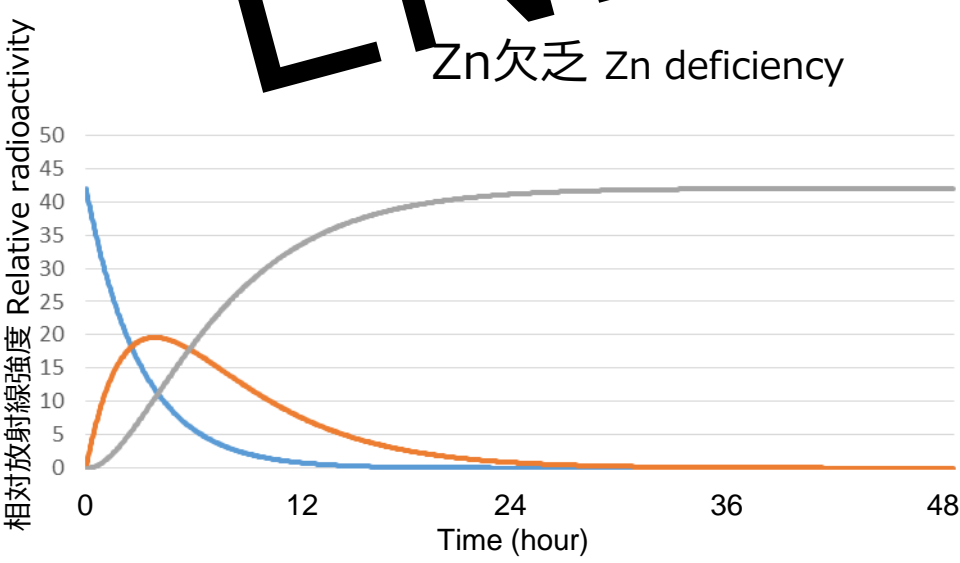
ENEP

Expert Program of ZIP2 element and environmental management and prognosis of nuclear emergencies

	ZIP2	Zn loading
Control	1	1
Zn deficiency	1.67	4
Zn excess	0.28	0.05

Zn欠乏 Zn deficiency

Zn過剰 Zn excess



導管への亜鉛輸送活性の系統間差

Inter-strain difference in Zn xylem loading

導管内への亜鉛の予測輸送活性

Estimated Zn loading activity into xylem sap

ZIP2発現量に基づいたモデルシミュレーションによる

導管への亜鉛輸送活性

Zn loading activity into xylem sap as estimated with model simulation method based on the ZIP2 expression data.

Strain	Treatment	ZIP2	Zn loading
B-129	Control	1	1
	Zn deficiency	1.67	4
	Zn excess	0.28	0.05
MG-20	Control	1.11	1
	Zn deficiency	1.44	1.05
	Zn excess	1.61	0.38

B-129系統でより積極的な輸送活性の制御がなされている

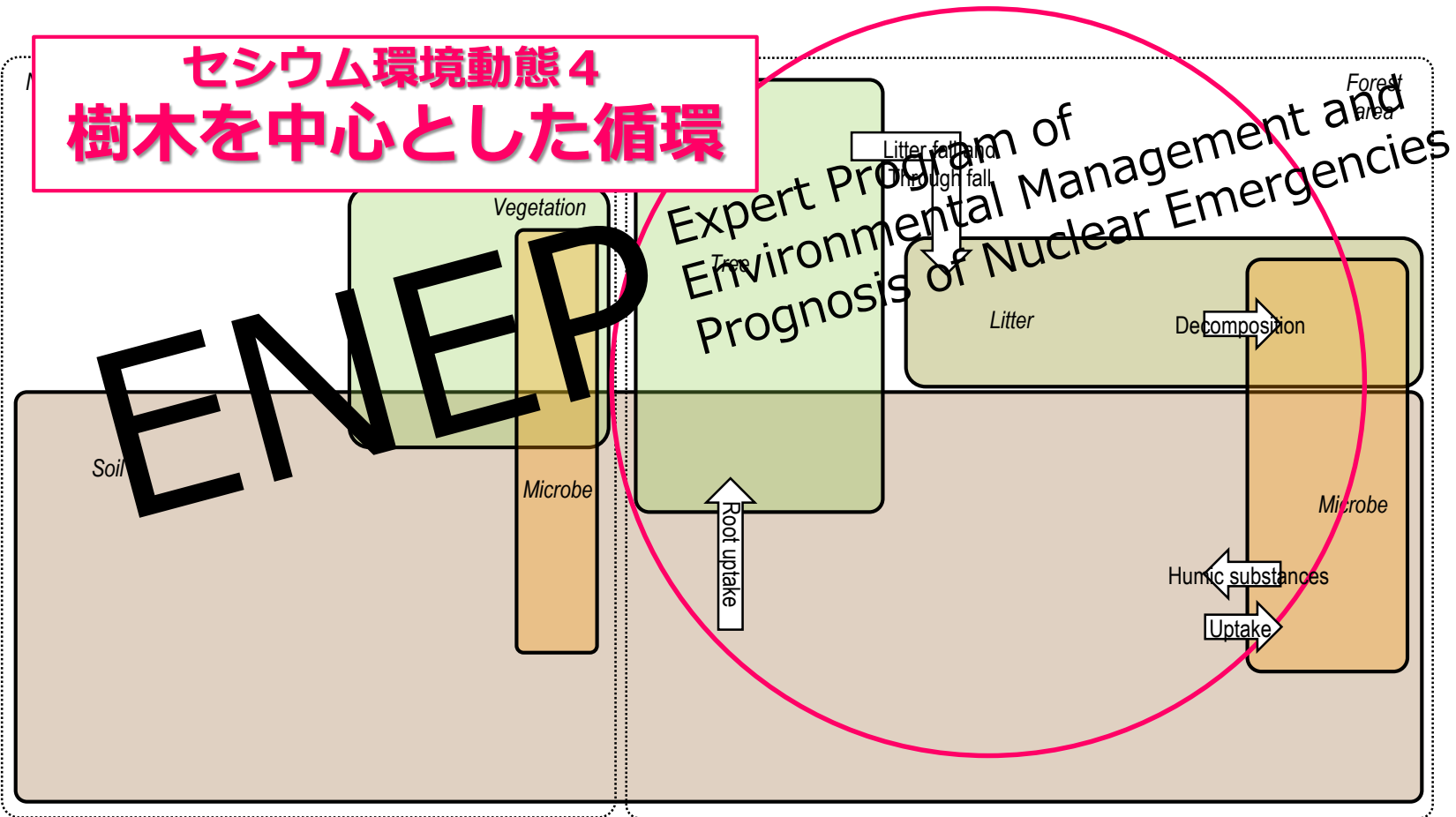
Highly regulated Zn transfer in B-129 strain was suggested

陸域生態系における動態把握

Dynamics of radioactive nuclides within terrestrial ecosystem

Aerosol

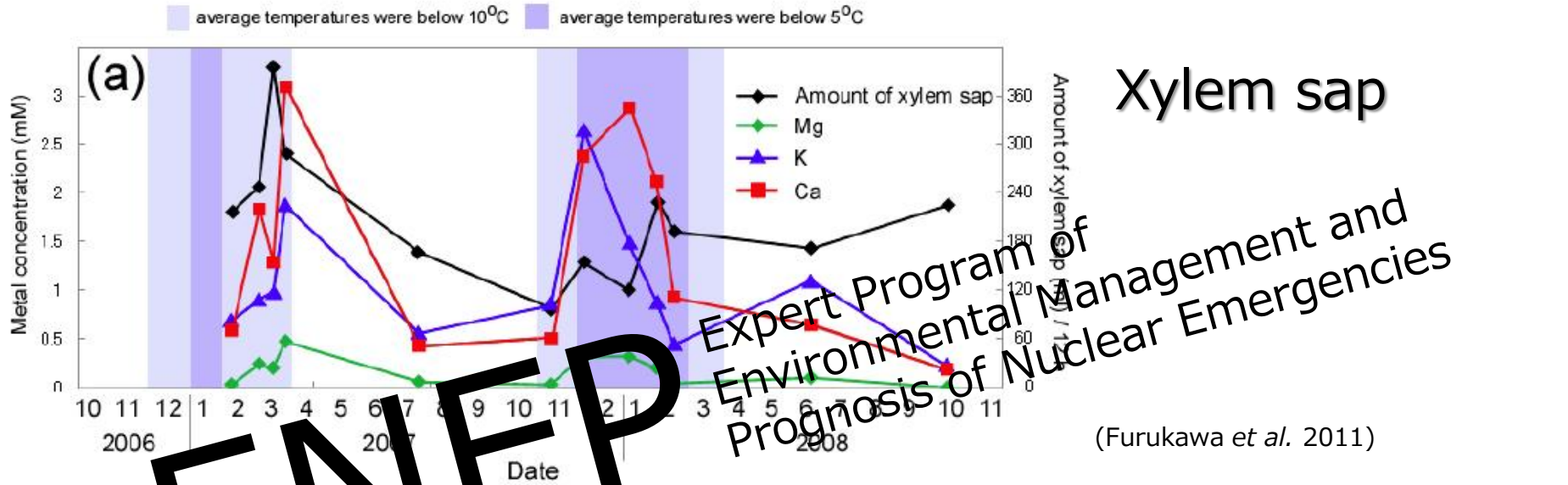
セシウム環境動態4 樹木を中心とした循環



Ground and Surface water

樹木における金属濃度の季節変動

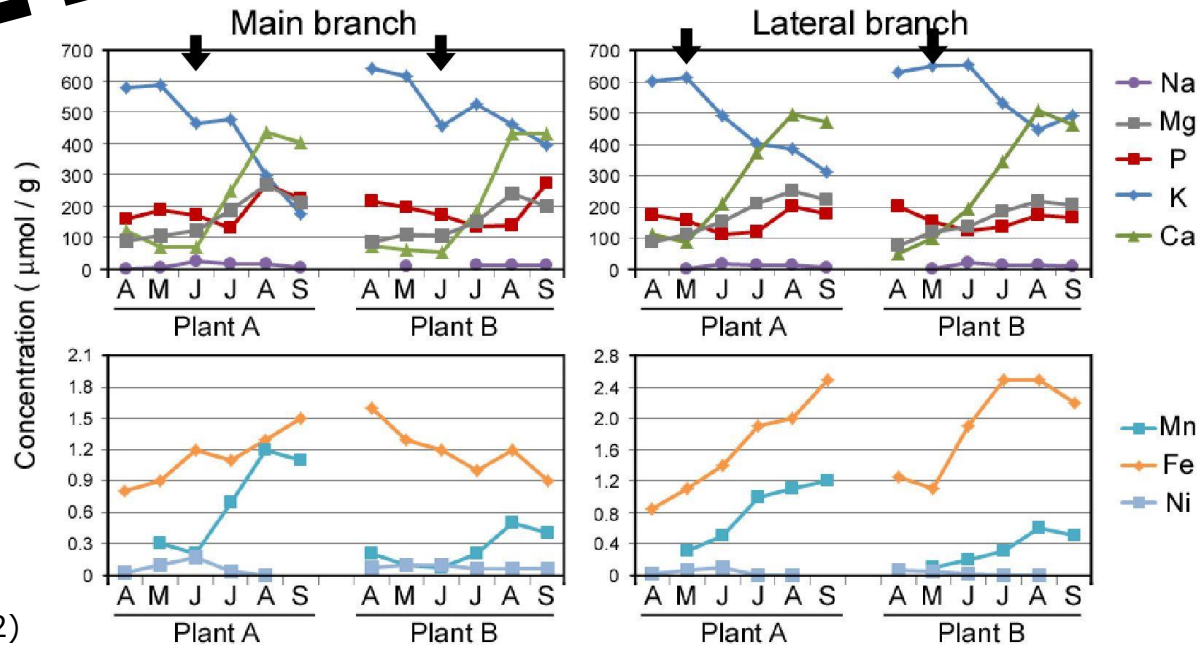
Seasonal change of metal concentrations in tree



ENEPEP

Leaf

↓ : 休眠芽形成



ポプラ

Poplar

Hybrid aspen T89 (*P. tremula* x *tremuloides*)

樹木における分子生物学のモデル植物

A model plant for genome studies in woody plant

ゲノム情報が利用可能
Genome information is available

分子生物学的手法が利用可能
Molecular biological approach

挿し木によるゲル栽培での継代が可能
Cutting propagation with gel culture

葉への高いセシウム移行
High Cs transfer into the leaves

(Technical reports of IAEA; No,472)

ENEP

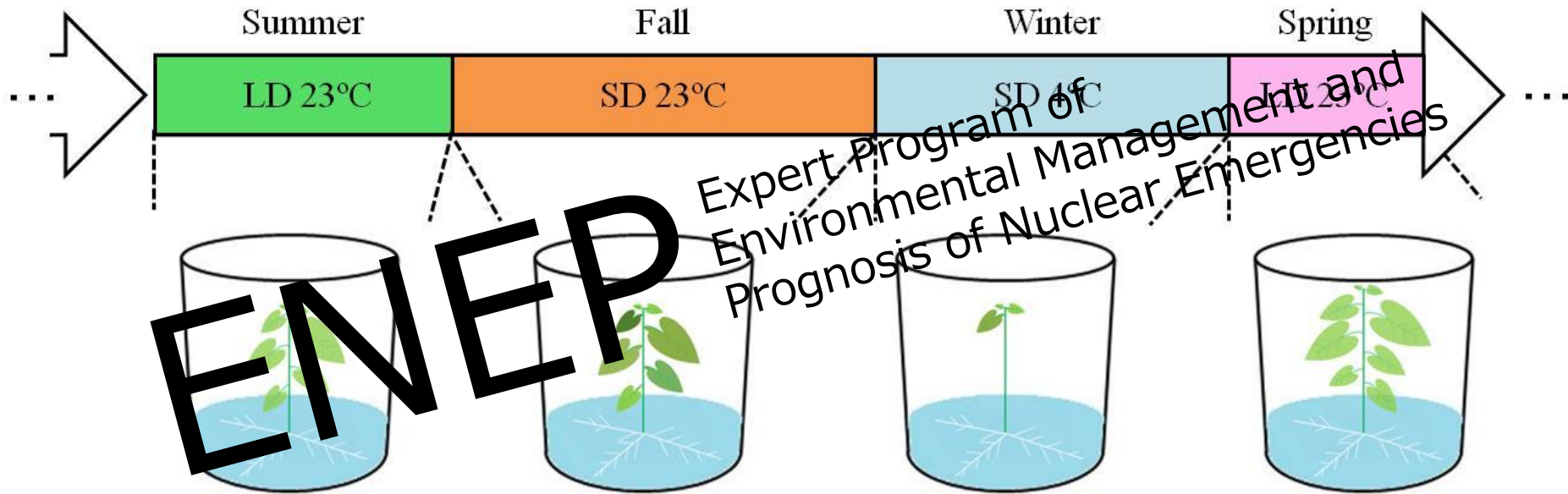
Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies



Bar = 5 cm

樹木の疑似年間サイクル栽培

Artificial annual environmental cycle



SD0 (=LD3)	SD 2week	SD 4week	SD 6week	SD 8week	SD 10week	4°C 1week	4°C 2week	4°C 4week	LD 2week
SD 0	SD 2	SD 4	SD 6	SD 8	SD 10	4°C 1	4°C 2	4°C 4	LD 2

LD condition (light/dark : 16/8 h), SD condition (light/dark : 8/16 h)

^{137}Cs を用いた局在解析

Localization analysis using ^{137}Cs

挿し木後3週間長日条件下で栽培

Poplar grown up during 3 weeks under LD condition (light/dark, 16/8 h; 23°C)



長日あるいは短日処理

LD or SD treatment



放射性セシウムをゲルあるいは葉面に投与

Radiocesium ($^{137}\text{CsCl}$ with 0.1 μM $^{137}\text{CsCl}$) was added to the gel or applied to leaf with paper disk

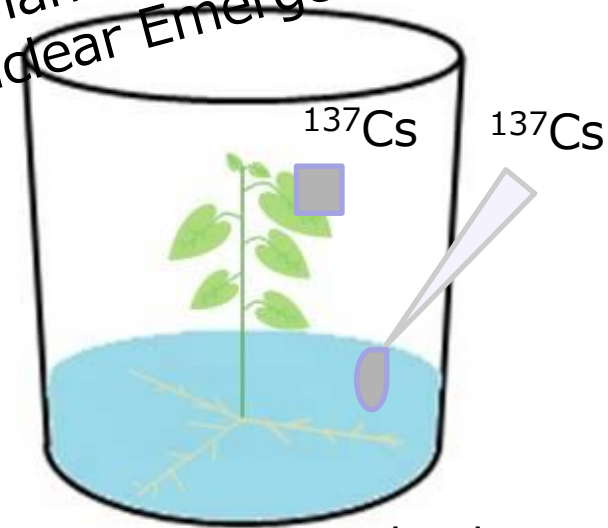


A) ^{137}Cs 局在解析 ^{137}Cs distribution analysis

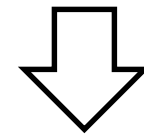
B) ^{137}Cs 定量 ^{137}Cs measurement

Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies

ENEPEP



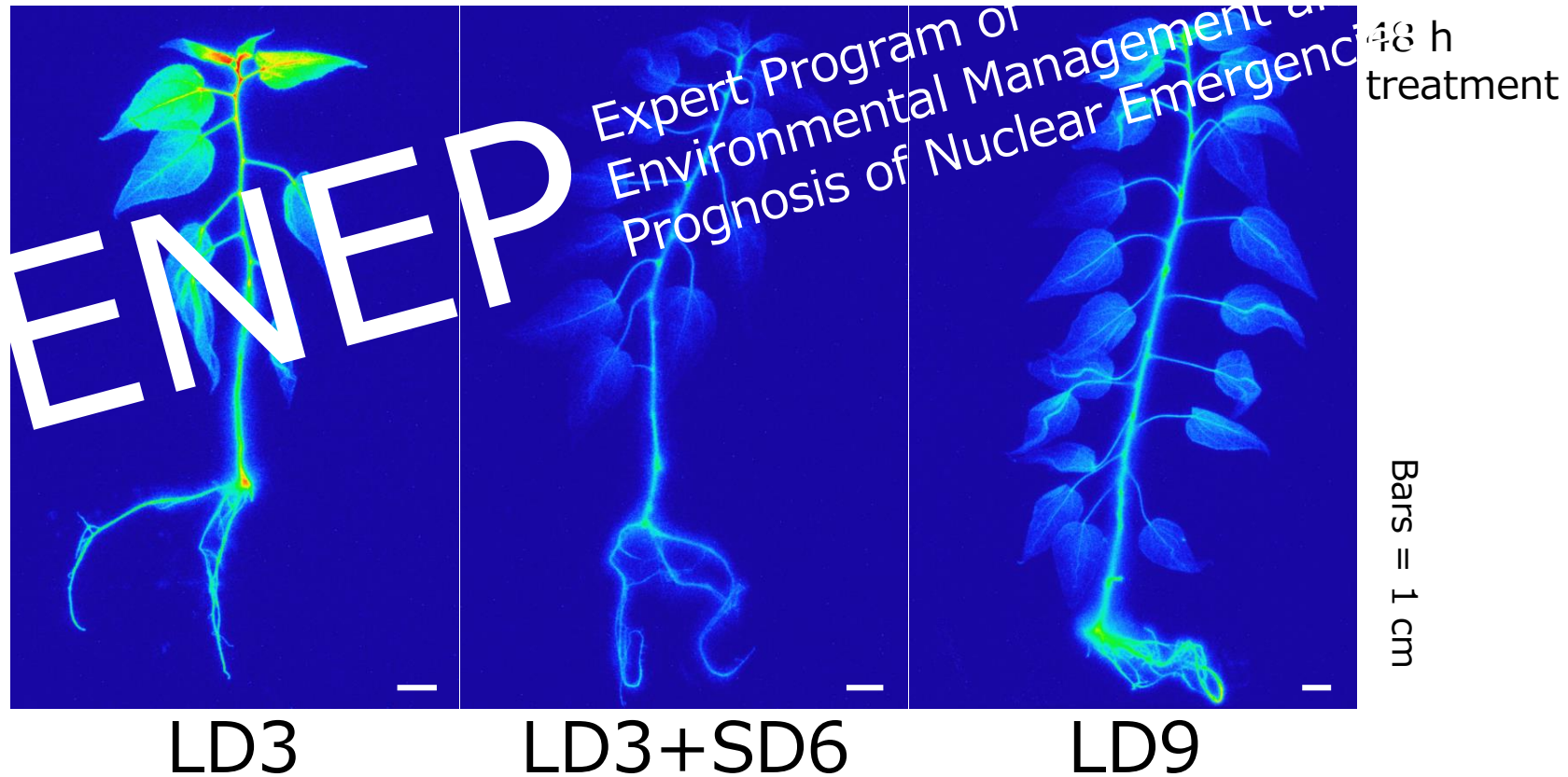
Gel culture



BAS Imaging & Gamma counter

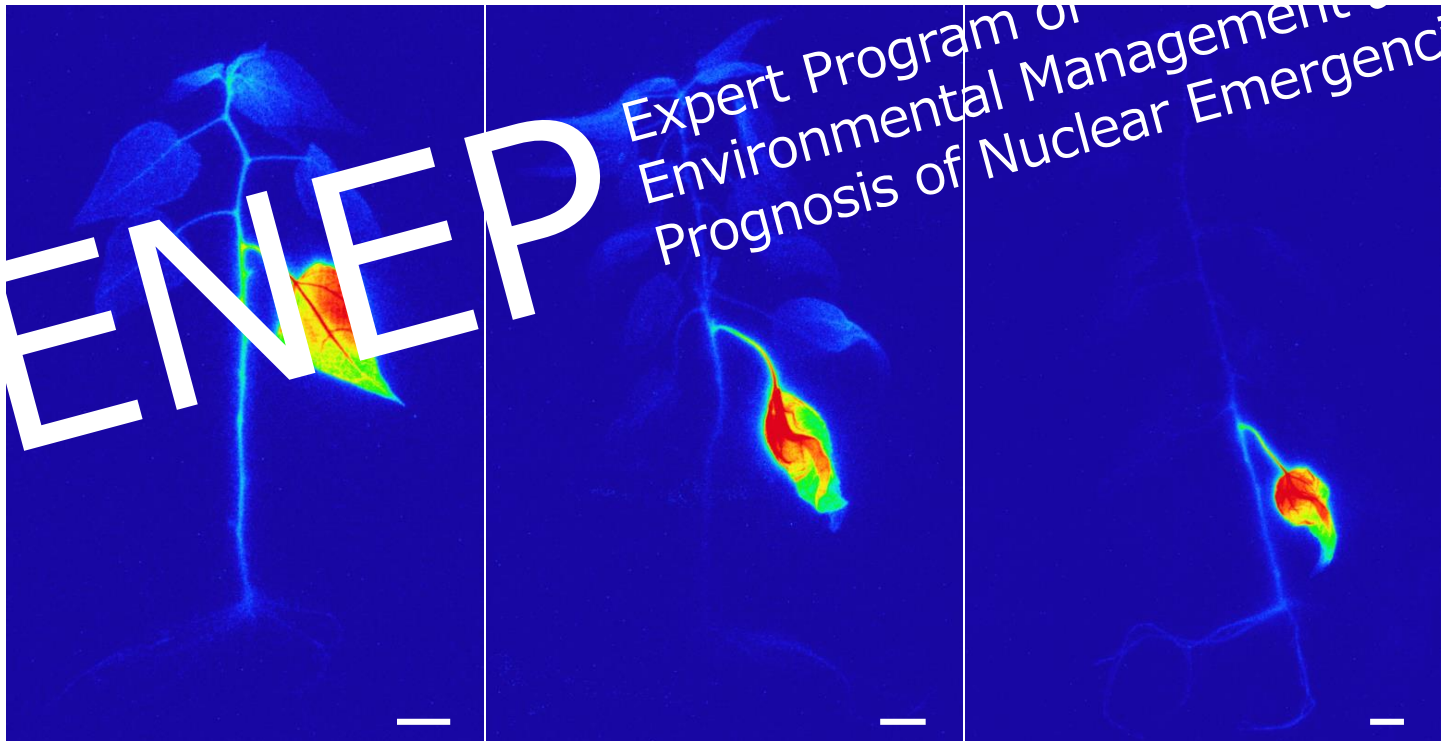
経根吸収によるセシウムの局在解析

Cesium localization in poplar through root absorption



葉面吸収によるセシウム の局在解析

Cesium localization in poplar through foliar application



48 h treatment

Bars = 1 cm

LD3

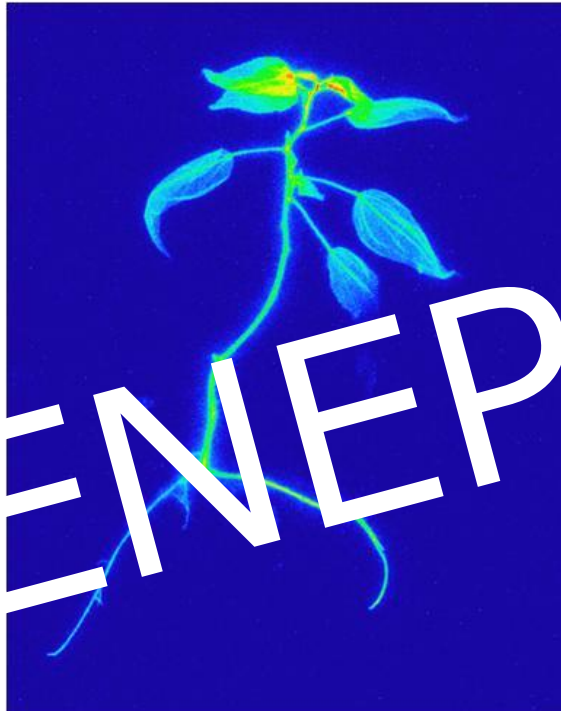
LD3+SD6

LD9

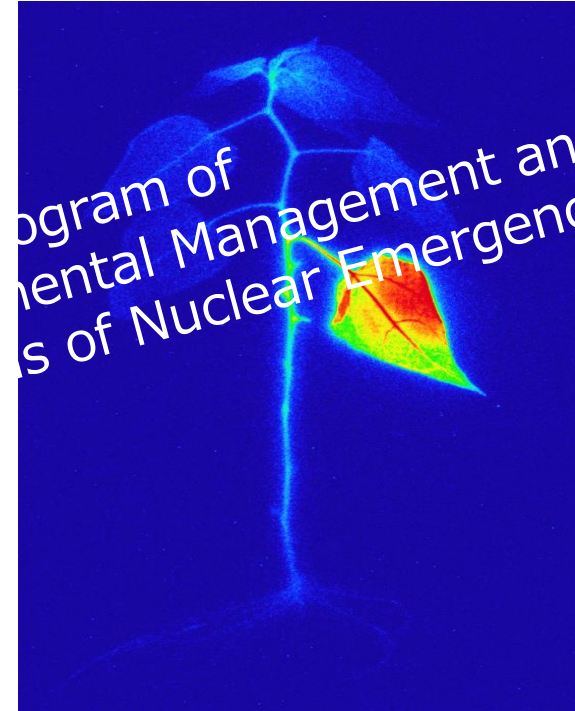
セシウム輸送機構の候補

Candidate Cs transport mechanisms in poplar

Root absorption



Foliar application



48 h
treatment

根からの栄養吸収 Nutrition absorbed by root

→ **導管輸送** Xylem transport

養分の回収 Nutrition retrieved

→ **篩管輸送** Phloem transport

カリウム輸送系を介したセシウムの吸収と輸送

Uptake and translocation of ^{137}Cs mediated by K^+ transport systems

Inward K^+ channel

AKT1, KAT1, KST1 etc.

High-affinity K^+/H^+ symporter

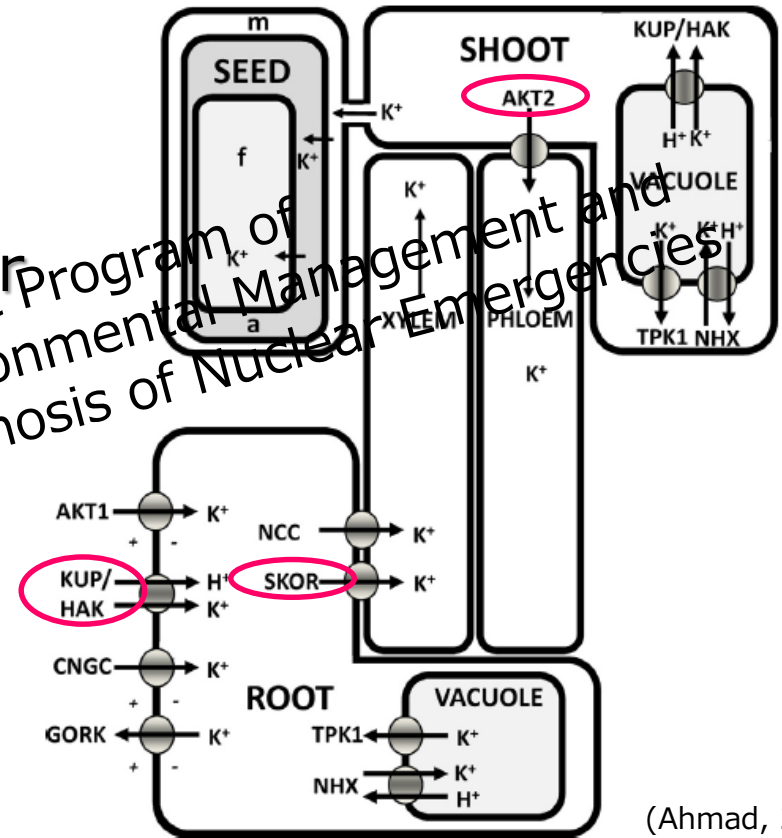
KUP1, HAK5 etc.

High-affinity K^+ transporter

HKT1 etc.

Non-selective cation channel

CNGC, GLR etc.



(Ahmad, 2014)

日長の変化により活性化される輸送系の解明が必要

Identification of Cs translocation system activated by the change of day length

疑似年間サイクルにおけるSKORの発現

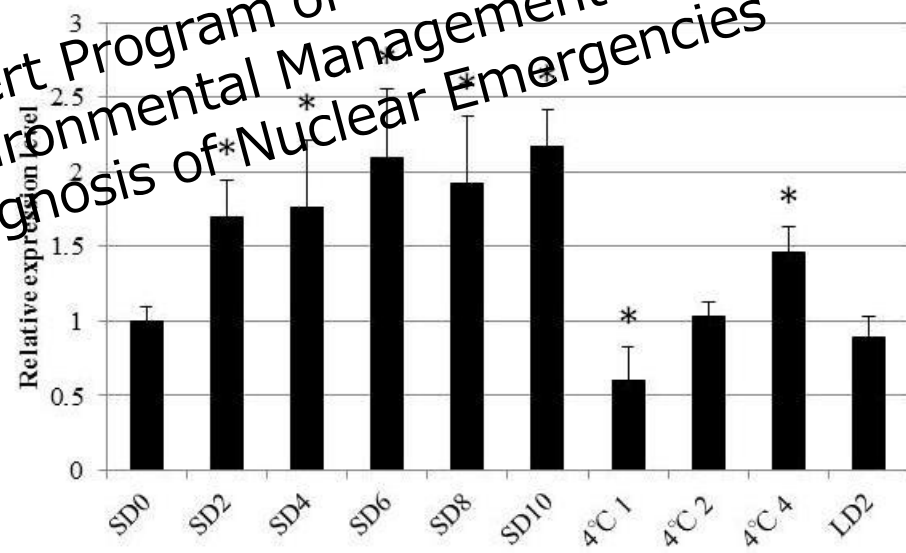
PttSKOR-like2 gene expression in artificial annual environmental cycle

PttSKOR-like2 Expression

Upper shoot



Expert Program of
Environmental Management and
Prognosis of Nuclear Emergencies



* <math>P < 0.05</math>
(normalized by SD0 condition)

***PttSKOR-like2*は短日と低温で誘導される**

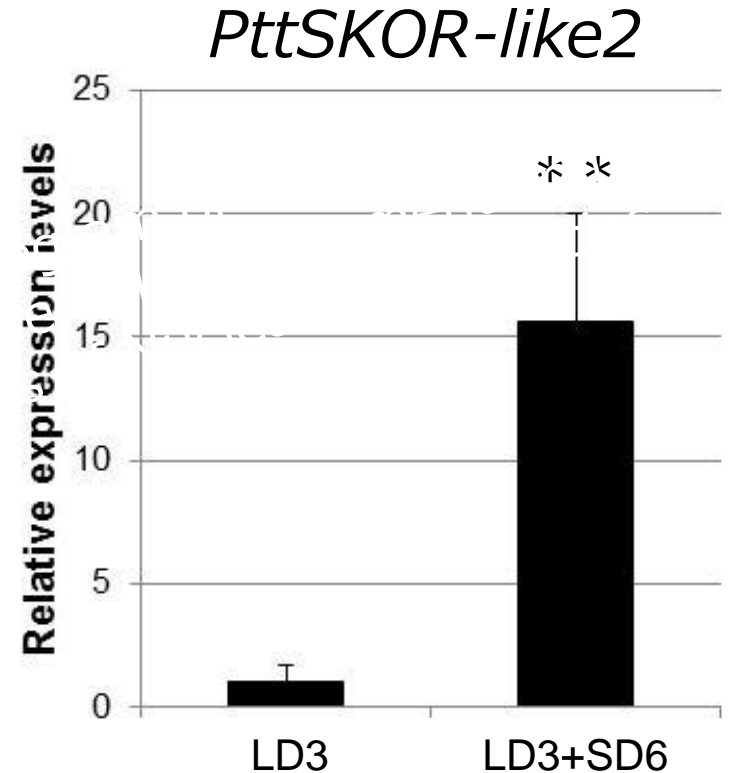
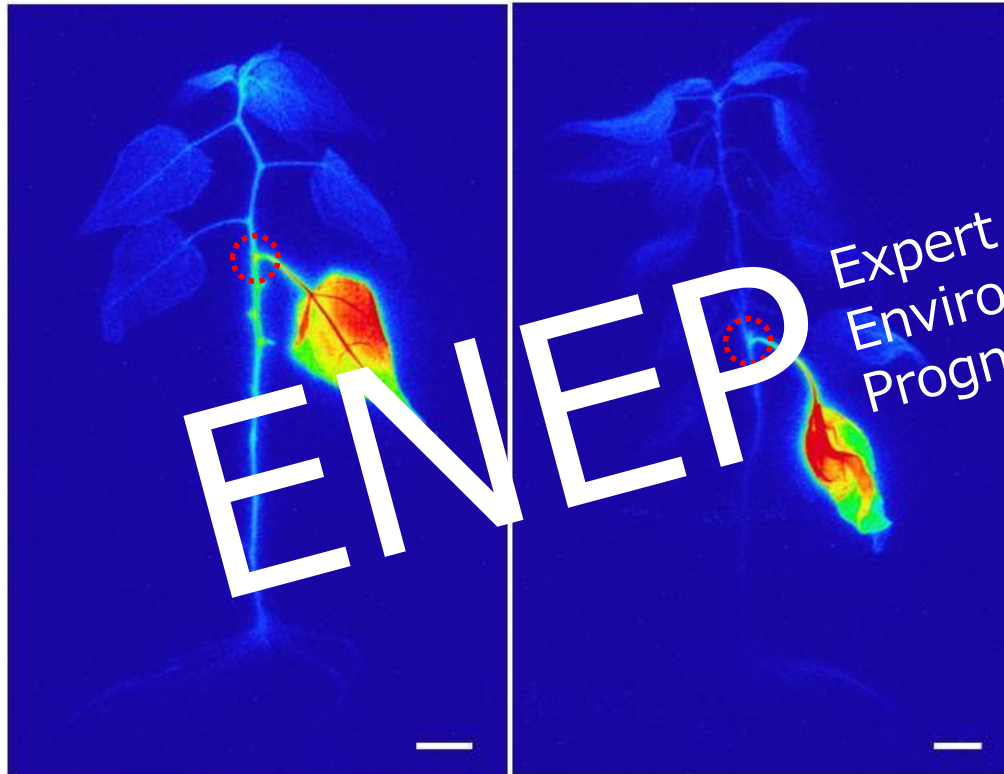
PttSKOR-like2 expression was up-regulated by
short-day and low-temperature condition in poplar

節における*PttSKOR-like2*の発現誘導

Induction of *PttSKOR-like2* expression in node

LD3

LD3+SD6



** < 0.01

SD処理により節で*PttSKOR-like2*の発現が誘導される

PttSKOR-like2 expression was up-regulated by short-day condition in node

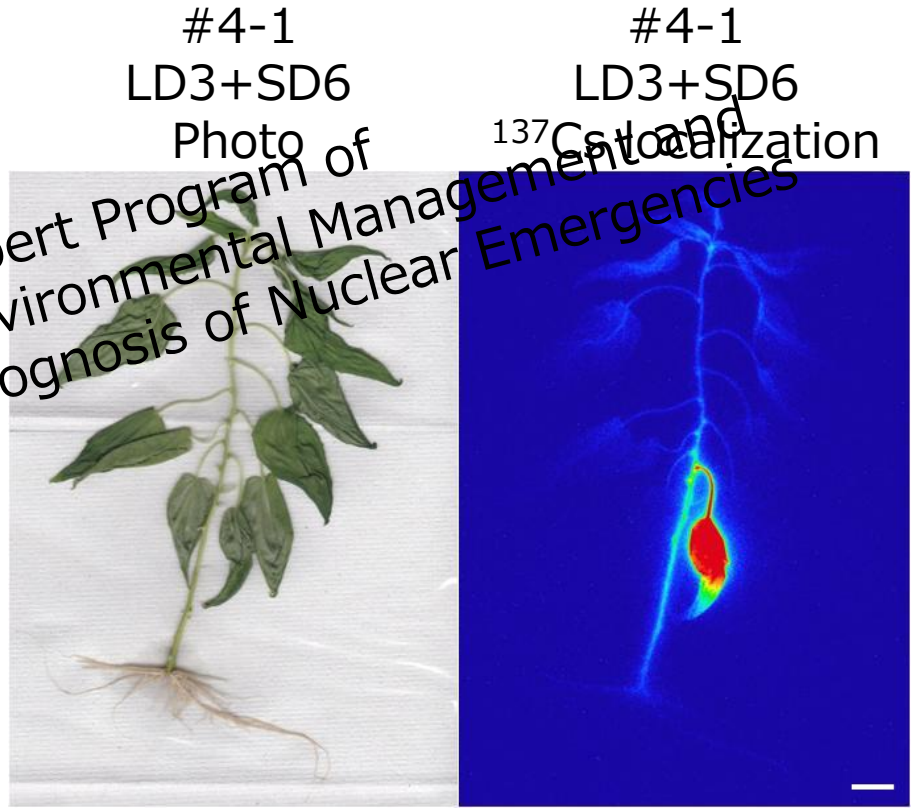
→ 節で*PttSKOR-like2*が導管へ乗せ換え？

PttSKOR-like2 was suggested to be involved in xylem loading of Cs in the node

SKOR発現抑制体における¹³⁷Cs動態

¹³⁷Cs behavior in *PttSKOR-like2* suppression line

PttSKOR-like2 expression in leaf

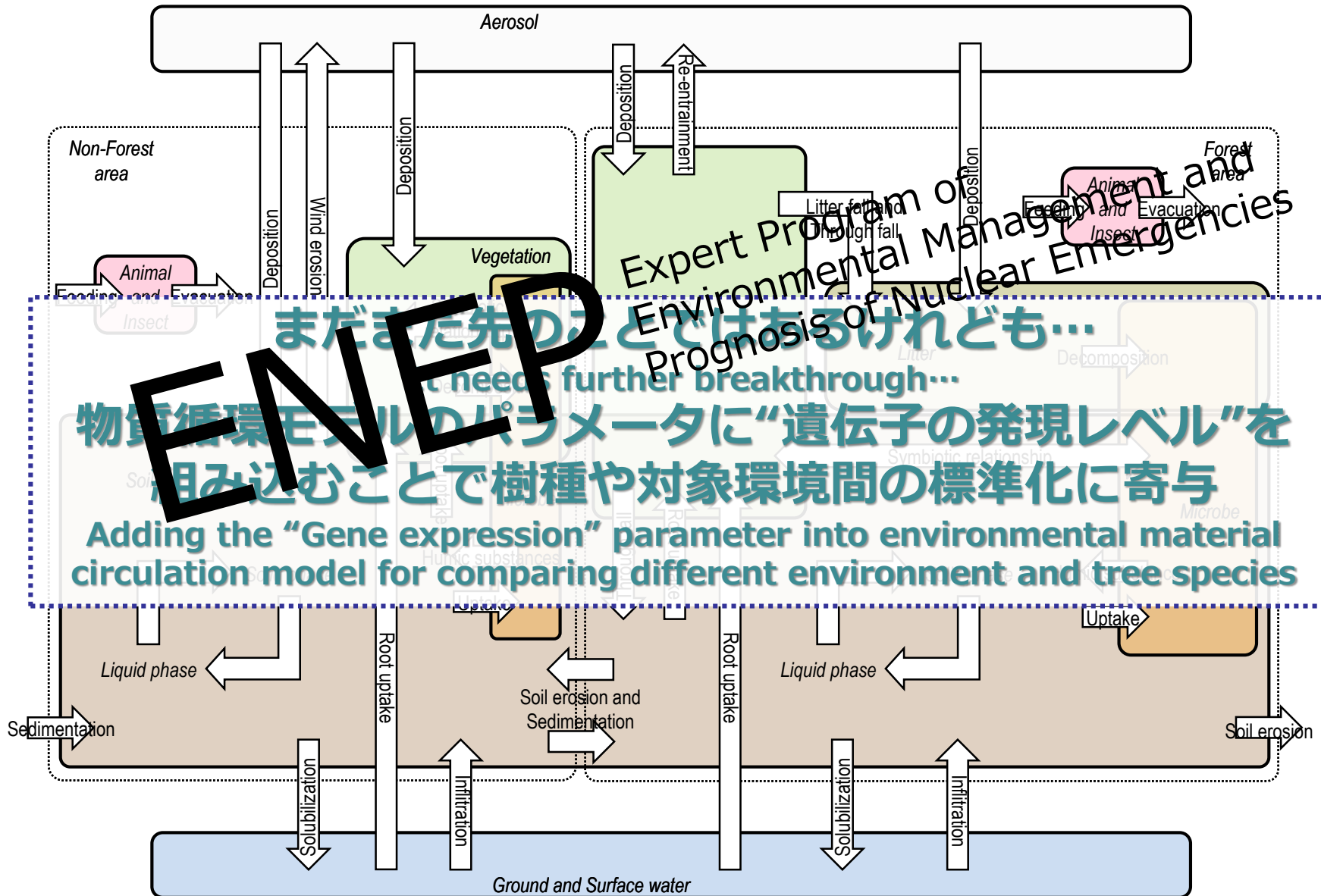


**SD環境にも関わらず、*PttSKOR-like2*の発現抑制体では
主に処理葉よりも下部へセシウムが輸送された**

In the *PttSKOR-like2* suppression line, ¹³⁷Cs was transferred to the lower part in spite of short-day condition

陸域生態系における動態把握

Dynamics of radioactive nuclides within terrestrial ecosystem

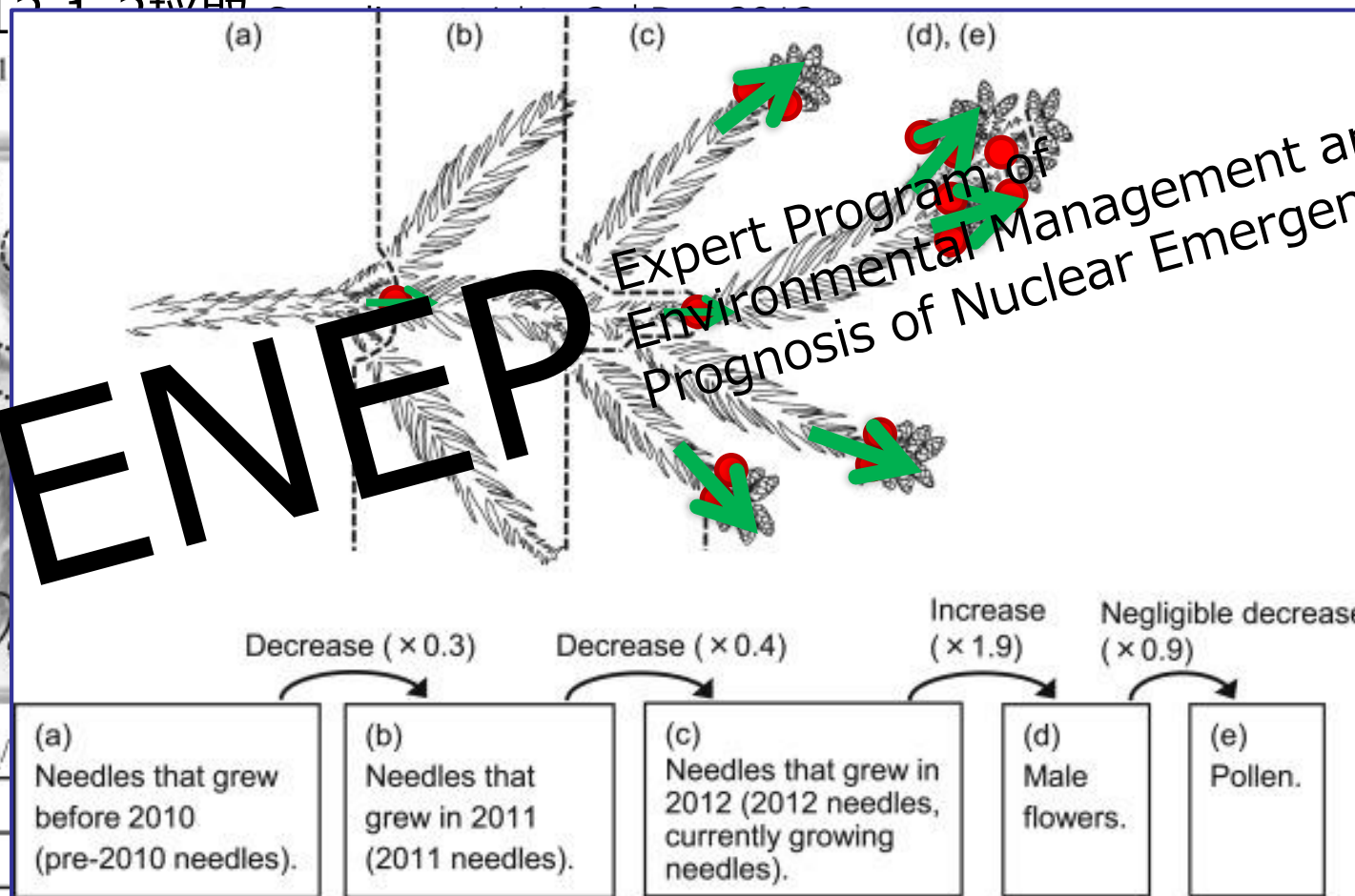


福島県でサンプリングされたスギの汚染

Radio-Cs contamination of sugi (*Cryptomeria japonica*)

H24.12.12 採取

Futaba (01)



Gene expression ● ● ●●●

Estimated Cs flow → → →