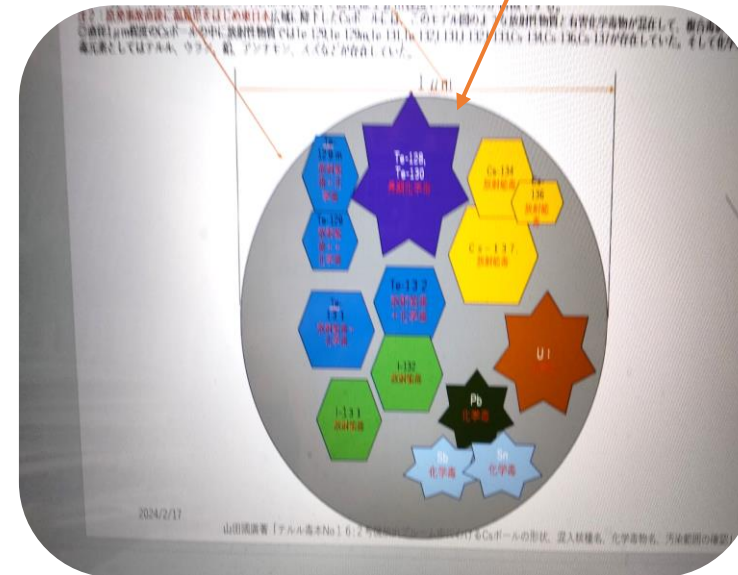


1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認

山田國廣著

1号機放出プルーム中のタイプBのCsボールと2号機放出プルーム中のタイプAのCsボールと呼ばれる微小粒子には放射性テルル (Te-129, Te-129m, Te-131m, Te-132), 放射性ヨウ素 (I-131, I-132, I-133), 放射性セシウム (Cs-134, Cs-136, Cs-137) と化学毒物の安定テルル (Te-128, Te-130), ウラン (U), アンチモン (Sb), スズ (Sn) などが混入し、東日本広域において大気、土壌、水、野菜等の「放射能毒物と化学毒物の複合汚染・複合影響」を起こしていた。



福島原発事故被害放射能毒・化学毒原因裁定を求める会

原発事故直後に1号機、2号機から放出されたホットパーティクルの形態分析論文の紹介

©Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident(福島第一原子力発電所事故の初期段階で放出された放射性粒子の形態の分析)：佐藤志彦他著「Geochemical Journal, Vol.52, pp.137 to 143, 2018」より以下の図をまとめて作成しました

• Type・A粒子の形態特徴

- FT (双葉) - 1 3は1Fから2.9kmの西方向の荒地
土壌から採取された粒子で2号機放出のType・A
でサイズが5 μm と小さい。
- NM (浪江) -14は1fから10.6km北西方向の水田から採取され
2号機放出粒子のType・Aでサイズが4 μm と小さい。
 - 「Type・Aは比較的穏やかな2号機の放射性プルームに
乗って3月14日の深夜から15日の早朝に放出された」と
著者の佐藤氏は説明している。

• Type・B粒子の形態特徴

- CF -01は1Fから2.3km北の双葉町郡山の舗装道路から採取
されたダストで、1号機放出のType・Bでサイズは100 μm と
大きく、中に無数の気泡が含まれている。
- NM (浪江) - 0 6は1Fから7.3km北西方向の水田土壌から採取され、
1号機放出のType・Bでサイズは50 μm と大きい。
- FT (双葉) -03は1fから6.5km北西の荒地土壌から採取され、
1号機放出のType・Bでサイズは50 μm とおおきい。
 - 「Type・Bは3月12日午後の1号機水素爆発で大きな
初速度が与えられて飛び出し、粒子の中に気泡が混入している」と
著者の佐藤氏は指摘している。

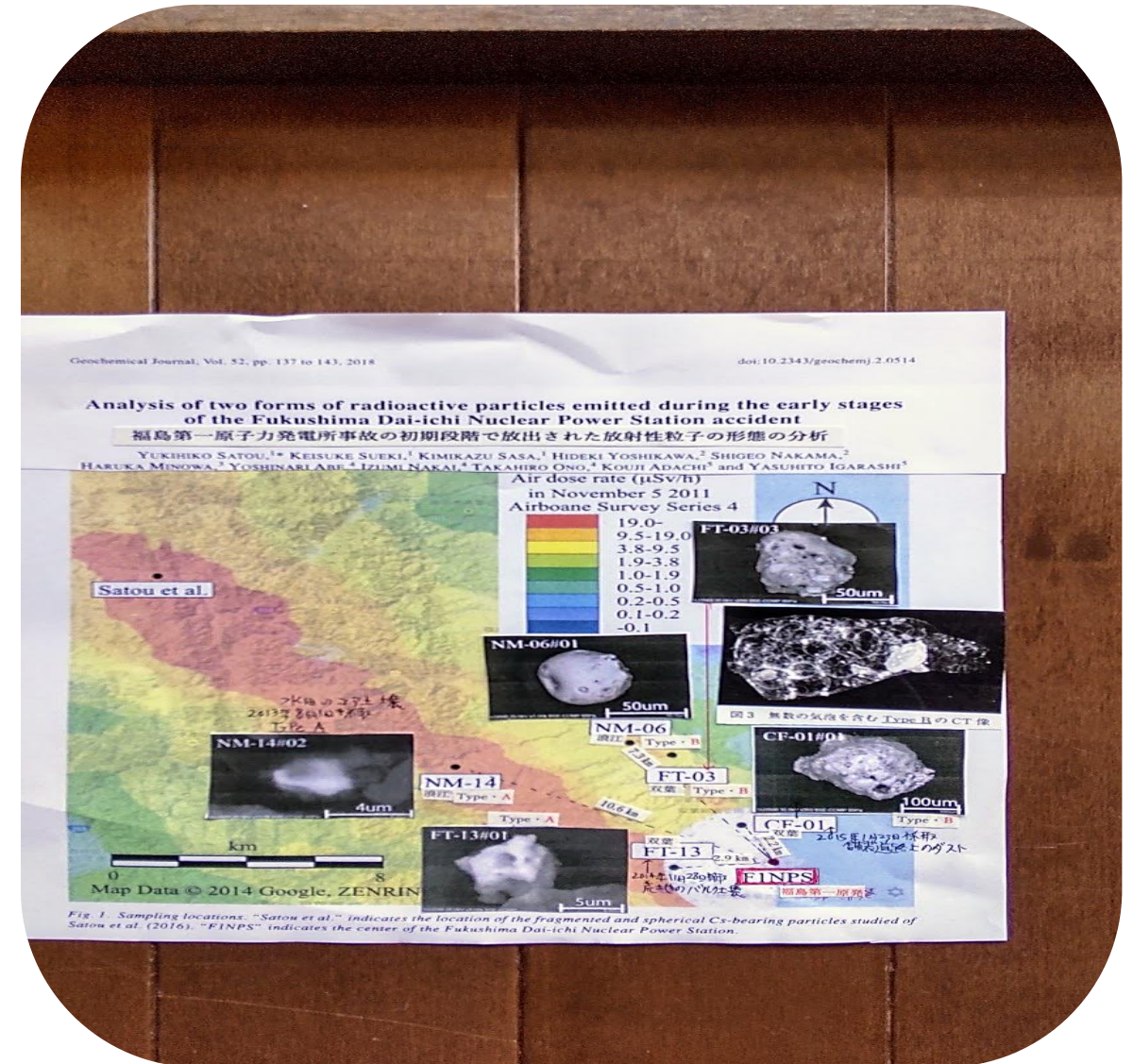


Fig. 1. Sampling locations. "Satou et al." indicates the location of the fragmented and spherical Cs-bearing particles studied of Satou et al. (2016). "FINPS" indicates the center of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station.

山田國廣著「テルル毒本No 15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

つくば市気象研究所の五十嵐康人さんたち研究グループによる報告論文の題名と要旨

- ①1号機由来の強放射性粒子を土壌から7点分離
- ②分離された粒子は $100\mu\text{m}$ くらいの歪な形状であり、2号機放出の直径数 μm で球形に近い形状のCsボールとは異なっていた。
- ③採取された粒子を、大型放射光施設スプリング8において放射光マイクロビームX線解析を行い、粒子中の微量元素の存在を置きらにした。

BUNSEKI KAGAKU Vol. 66, No. 4, pp. 251-261 (2017)
© 2017 The Japan Society for Analytical Chemistry

251

報 文

福島第一原子力発電所事故により1号機から放出された放射性粒子の放射光マイクロビームX線分析を用いる化学性状の解明

小野 貴大^{*1}, 飯澤 勇信¹, 阿部 善也^{*1}, 中井 泉¹, 寺田 靖子²,
佐藤 志彦³, 末木 啓介⁴, 足立 光司⁵, 五十嵐康人⁵

2011年3月の福島第一原発事故により、1号機由来の放射性物質が飛来したと考えられる原発北西地域の土壌から、強放射性の粒子を7点分離した。分離された粒子は $100\mu\text{m}$ 前後の大きさで歪な形状のものが多く、2号機から放出されたとされる直径数 μm の球形粒子(Csボール)とは明らかに異なる物理性状を有していた。これらの粒子に対して、大型放射光施設SPring-8において放射光マイクロビームX線を用いた蛍光X線分析、X線吸収端近傍構造分析、X線回折分析を非破壊で適用し、詳細な化学性状を解明した。1号機由来の粒子はCsボールに比べて含有する重金属の種類に富み、特にSrやBaといった還元雰囲気揮発性が高くなる元素が特徴的に検出され、粒子内で明確な元素分布の不均一性が見られた。粒子本体はCsボールと同様にケイ酸塩ガラスであったが、Feなど一部の金属元素が濃集した数 μm 程度の結晶性物質を含有していた。これらの粒子は3月12~13日に大気中に放出されたものであると考えられ、核燃料と格納容器との熔融がかなり早い段階で進行していたことが示唆された。さらに放出源の推定において、放射性物質自体の化学組成情報が放射能比に代わる新たな指標となることが実証された。

山田國廣著「テルル毒本No15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

1号機放出の粒子1～4と、2号機放出の粒子A及びバックグラウンドのマイクロビームX線解析結果の比較

図3：福島第一原発1号機から放出された4つの放射性粒子と2号機放出のA粒子とバックグラウンド対象粒子のSR- μ -XRF(マイクロビームX線解析)スペクトルの比較

表2：SR- μ -XRF解析により検出された21元素の比較表

注1：1号機、2号機の粒子からはCsとともに高度化学毒物のTeが必ず検出されている。

注2：1号機、2号機の粒子からは中度化学毒物のSn(スズ)、Sb(アンチモン)が検出されている。

注3：高度化学毒物のU(ウラン)がいくつかの粒子から検出されている。

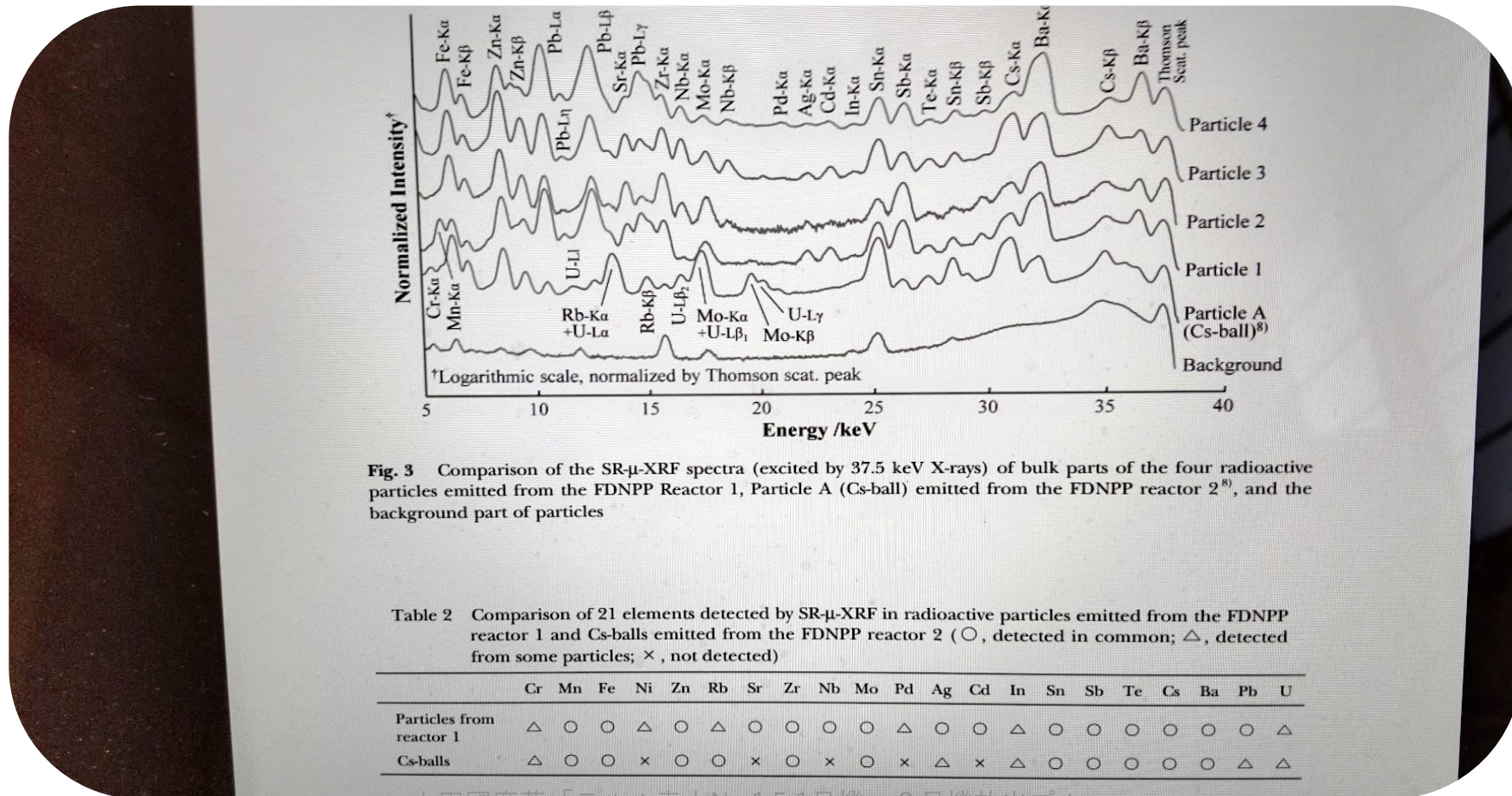


Fig. 3 Comparison of the SR- μ -XRF spectra (excited by 37.5 keV X-rays) of bulk parts of the four radioactive particles emitted from the FDNPP Reactor 1, Particle A (Cs-ball) emitted from the FDNPP reactor 2⁸⁾, and the background part of particles

Table 2 Comparison of 21 elements detected by SR- μ -XRF in radioactive particles emitted from the FDNPP reactor 1 and Cs-balls emitted from the FDNPP reactor 2 (○, detected in common; △, detected from some particles; ×, not detected)

	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	Pb	U
Particles from reactor 1	△	○	○	△	○	△	○	○	○	○	△	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△
Cs-balls	△	○	○	×	○	○	×	○	×	○	×	△	×	△	○	○	○	○	○	△	△

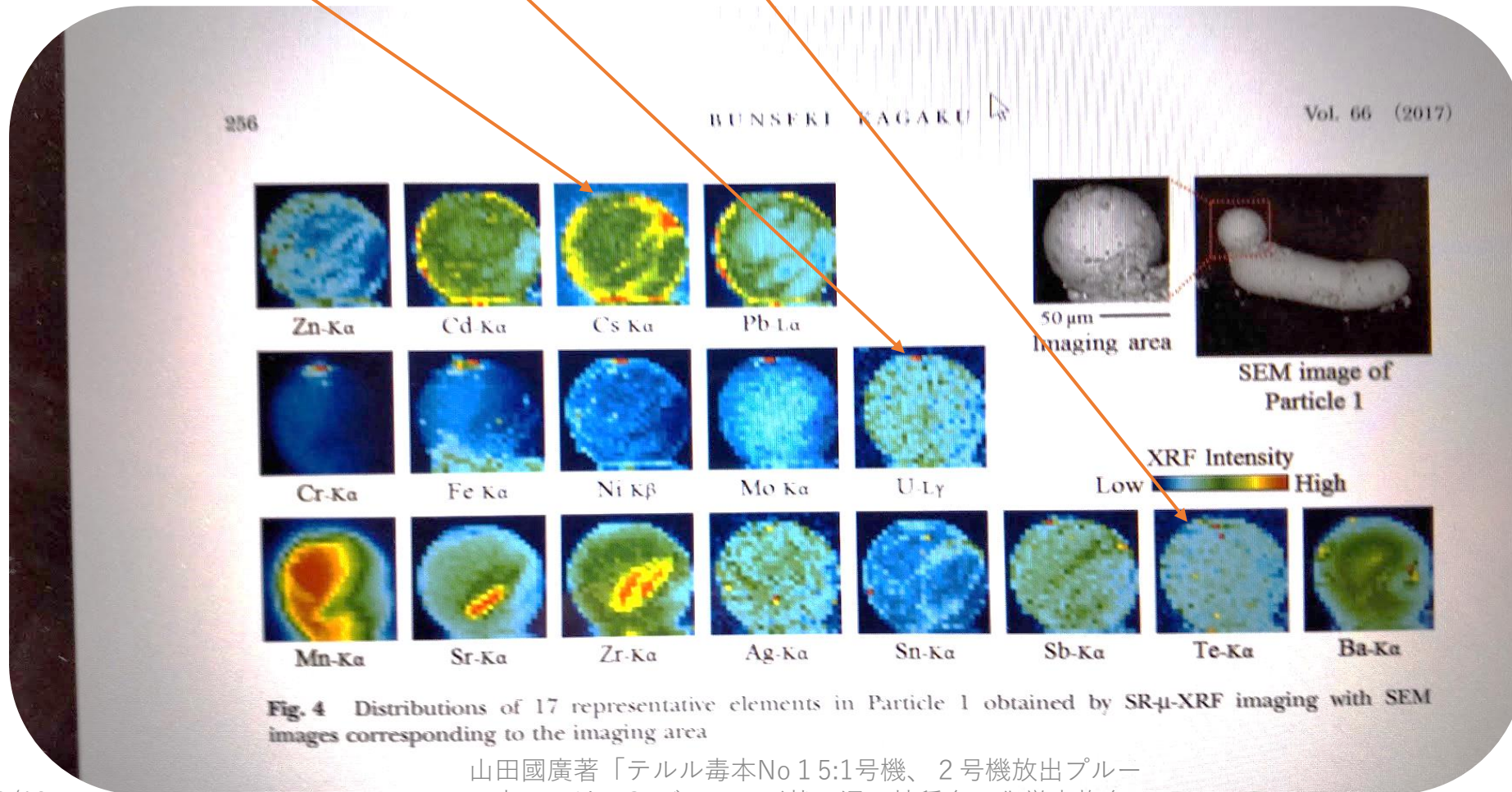
図4 : SR- μ -XRFによって得られた粒子1のSEM (電子顕微鏡) 映像の球状部分における17の元素のXRF強度のイメージング映像

注1 : XRF強度が高い部分は赤色 (元素の存在が多い) 低い部分は青色 (元素の存在量が小さい) で表示されている。

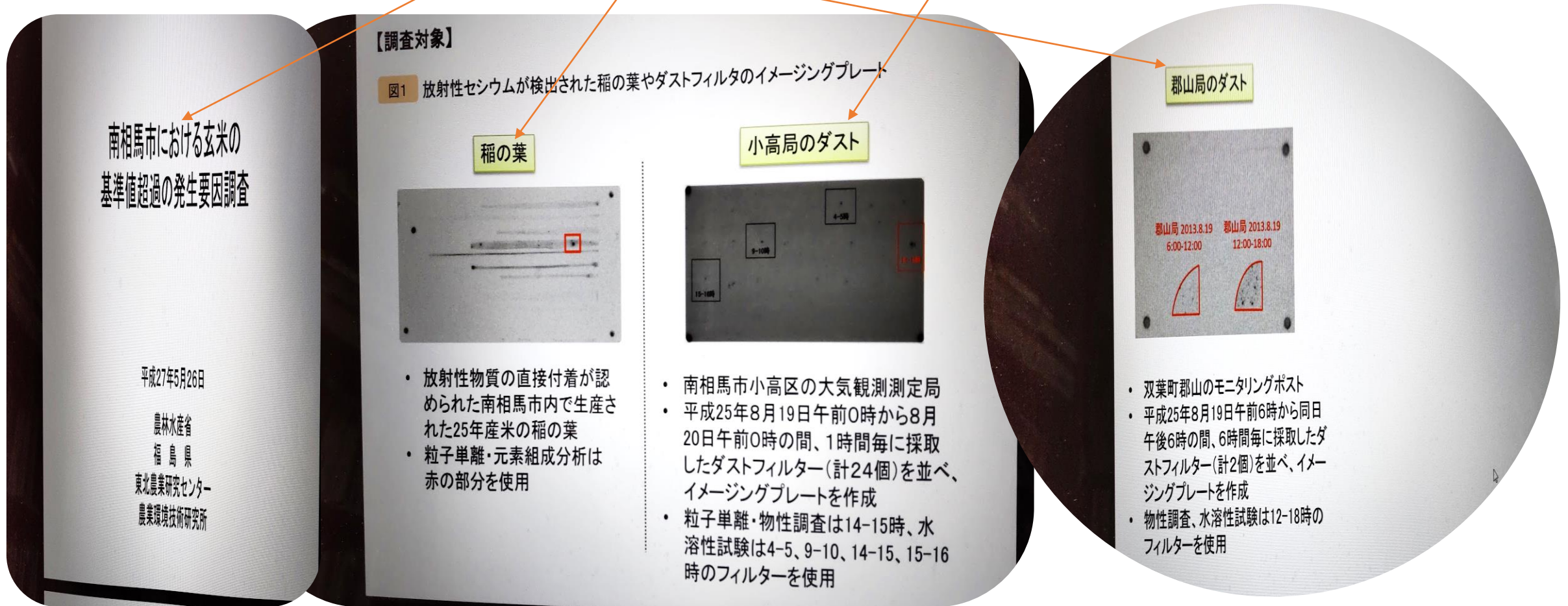
注2 : Cs (セシウム) は周囲部分に赤色、黄色があり、そこに多く存在している。

注3 : Te (テルル) は赤色、黄色、緑色部分が中心部分の散在している

注4 : U (ウラン) はTeと同様に中心領域に散在している。



左写真：農林水産省などが公表した「南相馬市における玄米の基準超過の発生要因調査（平成27年5月26日）」報告書の表紙
 中写真：放射性セシウムが検出された南相馬市で採取された稲の葉や南相馬市小高局のダストのイメージングプレート映像
 右写真：双葉町郡山局で採取されたダストのイメージングプレート映像
 出典：[URL:https://www.maff.go.jp>150526_youin_chosa](https://www.maff.go.jp>150526_youin_chosa)



山田國廣著「テルル毒本No 15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

左上映像：南相馬市で採取された稲の葉ともみのスプリング8による元素分析結果

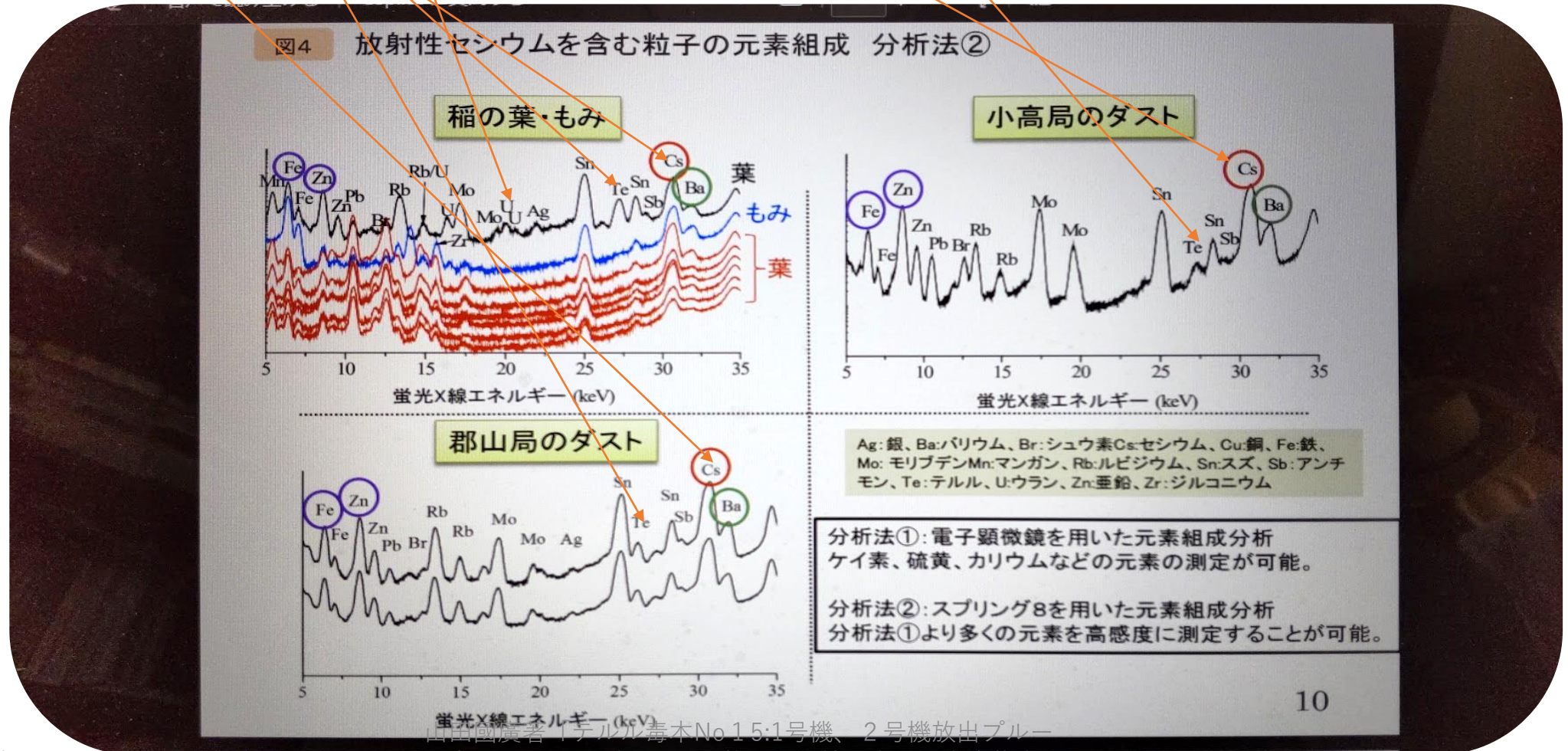
注1：Cs, Te,とともにU, Sn, Sbが検出されていた。

右上映像：南相馬市小高局のダストのスプリング8による元素分析結果

注2：CsとともにTeが、Sn, Sbが検出されていた。

右写真：双葉町郡山局で採取されたダストのスプリング8による元素分析結果

注3：CsとともにTeが、Sn, Sbが検出されていた。



4.3：つくば市の気象研の原発事故直後のTe-132,Te-129,Te-129m,I-131,I-132, I-133,Cs-134,Cs-136,Cs-137汚染濃度の時間変化

左映像：気象研究所の五十嵐康人氏らの発表した報告の題名「福島第一原発事故ごの初期に採取されらCs含有球状粒子の特性について」

出典：<https://pub.jaea.org/iaeameetings/cn224p/Session3/Igarashi.rdf> (2014年2月17日～21日にウィーンで開催されたIAEAシンポで発表された報告書)

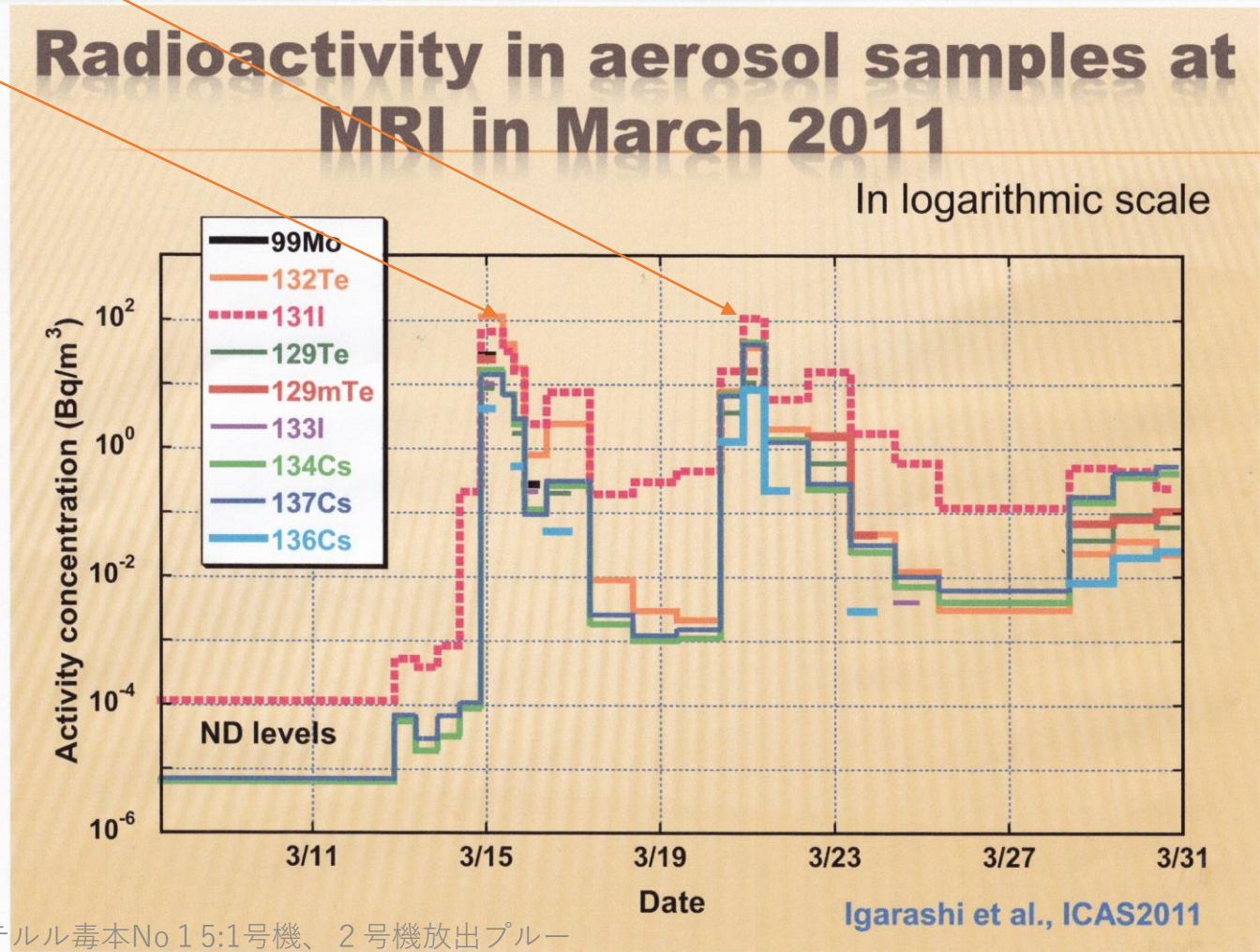
右映像：同報告書に掲載されている「つくば市にある気象研究所 (MRI) において2011年3月に採取された大気エアロゾル粒子の放射能汚染濃度 (Bq/m³) の時間変化：3月15日(プルーム1) 21日 (プルーム9) ころはTe-132,Te-129m,Te-129が高濃度で検出されてつされていた」

CHARACTERISTICS OF SPHERICAL Cs-BEARING PARTICLES COLLECTED DURING THE EARLY STAGE OF FDNPP ACCIDENT

Yasuhito Igarashi, Kouji Adachi, Mizuo Kajino & Yuji Zaizen



Atmospheric Environment and Applied Meteorology,
Meteorological Research Institute
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan
Corresponding author: yigarash@mri-jma.go.jp



山田國廣著「テルル毒本No 15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

4.3：つくば気象研で観測されたエアロゾル汚染の電子顕微鏡映像とイメージングプレート映像 ①気象研究所で原発事故直後に採取されたCsボールの電子顕微鏡写真映像とイメージングプレート像γ線スペクトル解析

Exploit for strong radioactive particle

Providing position data

IP imager

Low vacuum-low acceleration bias SEM with EDS mapping

Micro-manipulator

Pick up Extraction of the particle

Activity measurement with Ge detector

2011 March 15 9:20 - 15 15:20

Count rate (cps)

Energy (keV)

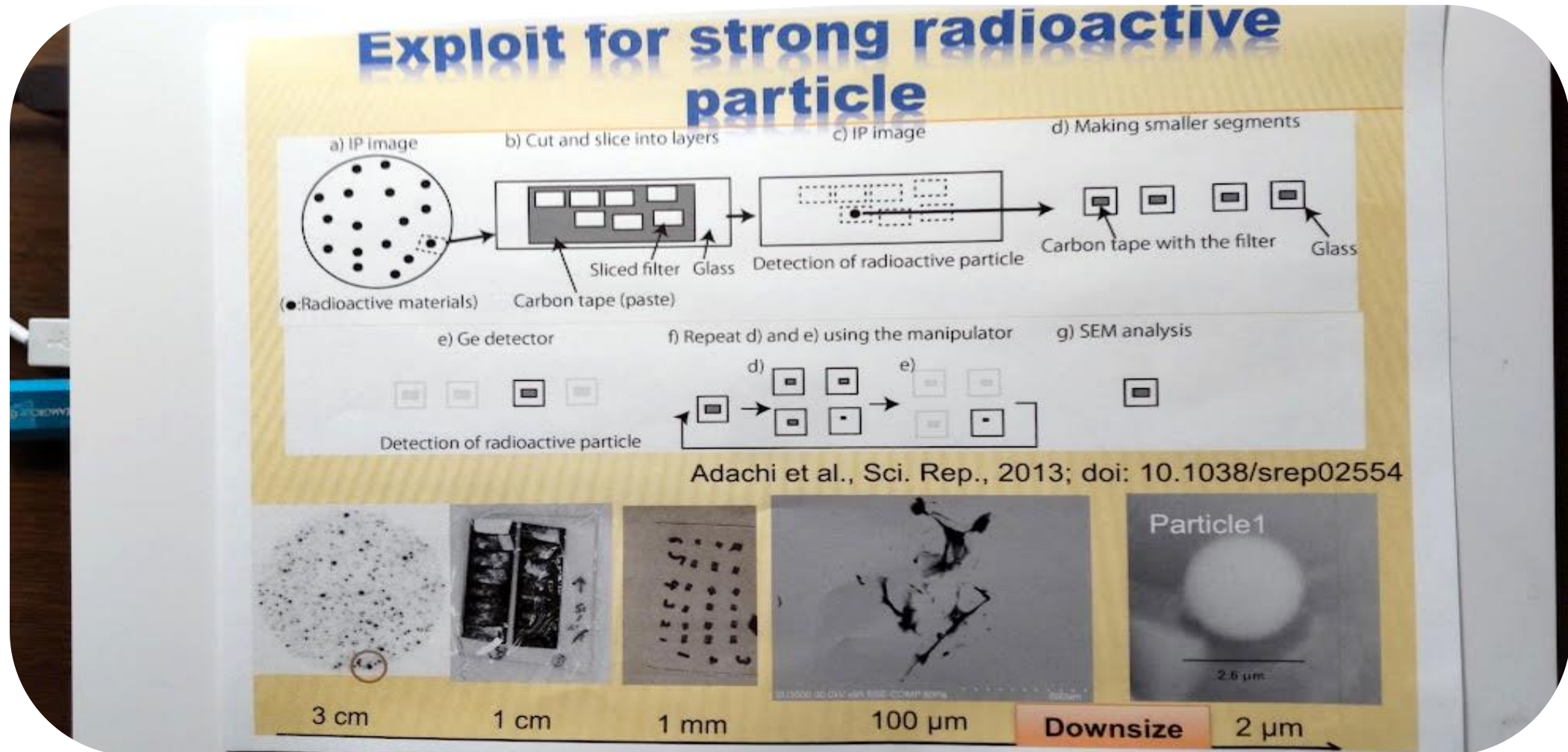
137Te 228 keV, 137I 364 keV, 60Co 604 keV, 137Cs 460 keV, 530 keV, 137Cs 601 keV, 608 keV, 137Cs 661 keV, 668 keV, 137Cs 778 keV, 796 keV, 137Cs 802 keV, 964 keV, 137Cs 1048 keV, 137Cs 1048 keV, Sum peaks, etc.

SU3500 15.0kV x1.00k BSE-COMP 30Pa 50.0um

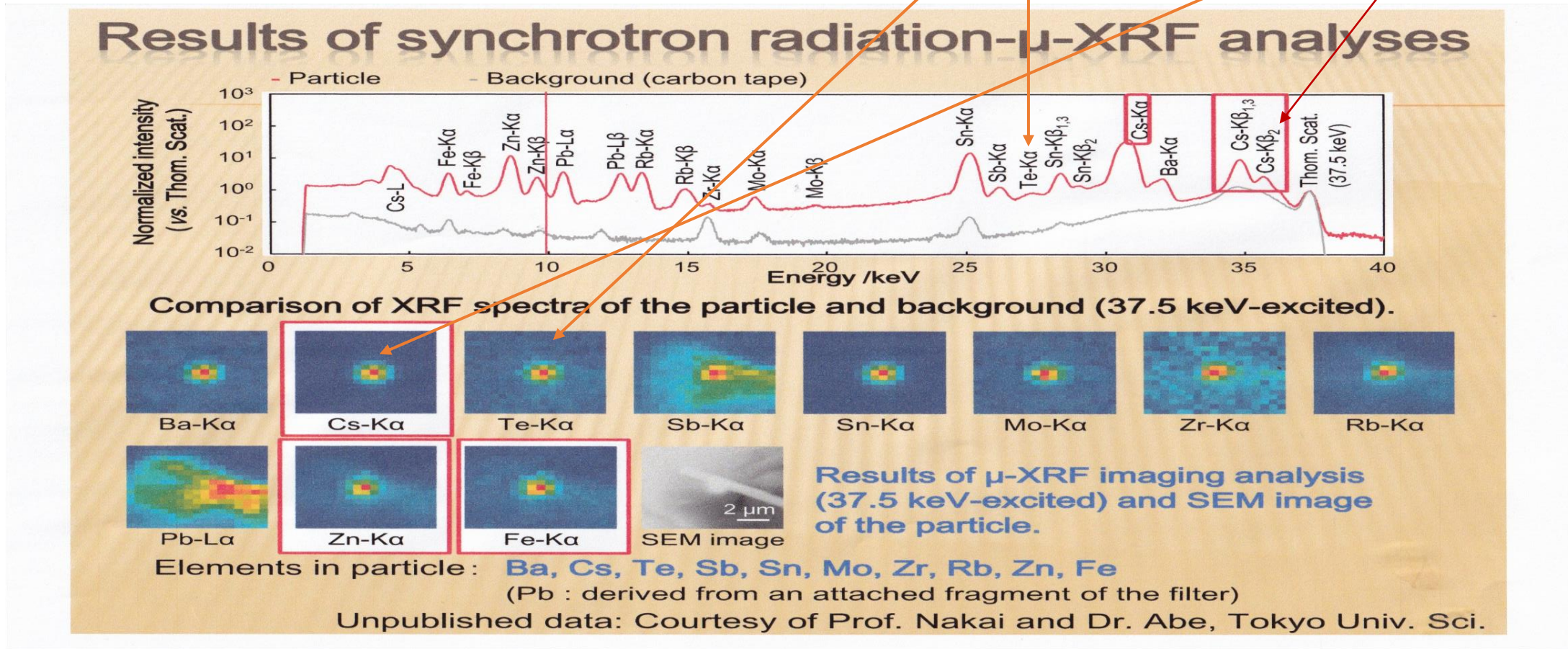
SPring-8 Nano-XRF

山田國廣著「テルル毒本No 15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

つくば市気象研におけるエアロゾル捕集用ガラス繊維フィルターから微小なCsボールを抽出する方法

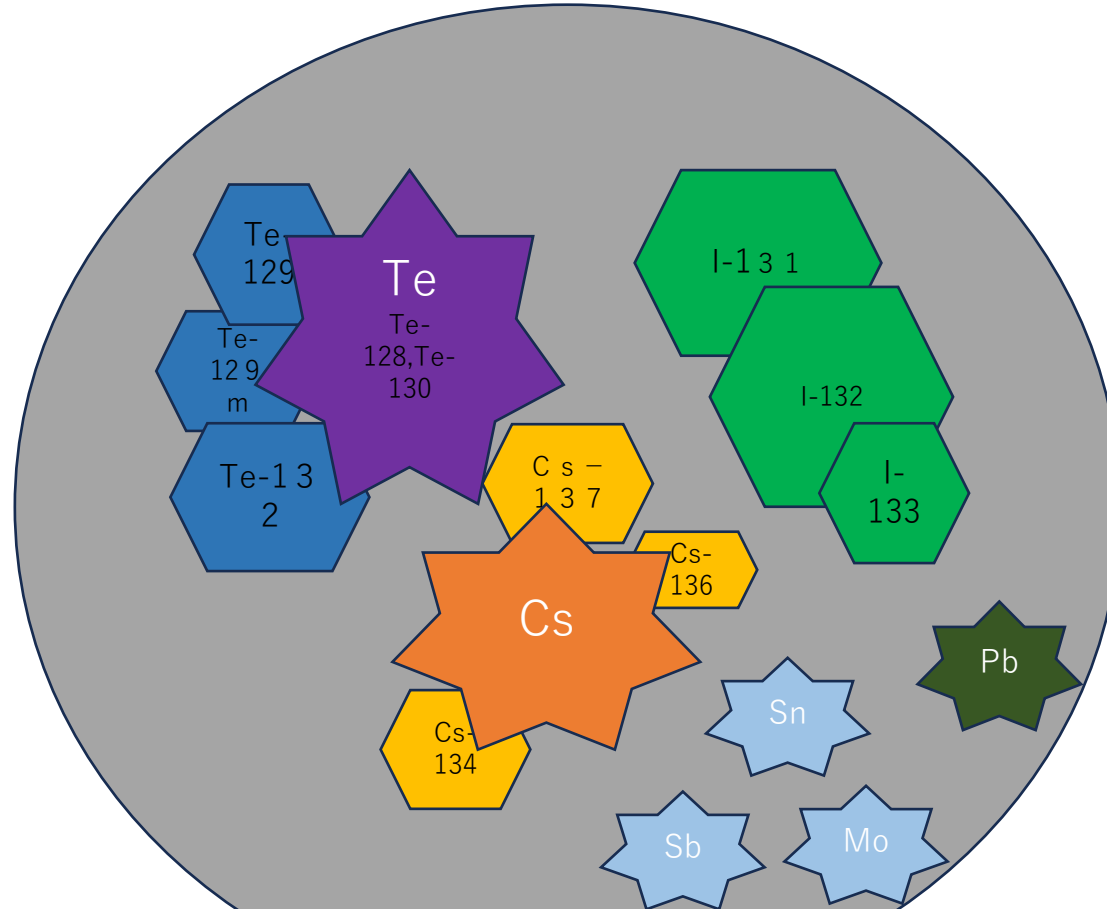


4.4：つくばの気象研で観測されたCsボールには、Csに比例して安定Tega検出されていた。
 ①放射光μX線ビーム解析によるCsボール内の半減期無限大毒物テルル（Te）の存在確認



つくば市気象研究所から2011年3月15日に採取されたCsボール内に存在している放射性テルル、放射性ヨウ素、放射性セシウムと多種の有害金属が日本で唯一、同時測定されていた貴重なデータである
注：化学元素として検出されTeの中には、Te-128,Te-130が質量的には多いがTe-129,Te-129m,Te-131,Te-132も入っている。

◎電子顕微鏡写真にあるように2号機放出プルームに混入していた直径数 μm 程度の球形Csボールの中に放射性物質ではTe-129,Te-129m,Te-131,Te-132,I-131,I-132,I-133,Cs-134,Cs-136,Cs-137が存在していた。そして化学毒を有する有害元素としてはテルル、ウラン、鉛、アンチモン、スズなどが存在していた。



山田國廣著「テルル毒本No15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

要旨 : 2011年3月の福島原発事故は大量の放射性物質が放出された。本研究では、東京圏を含む7つの監視所でSPM (浮遊粒子状物質) 採取フィルターテープ上に、1時間ごとに収集されたエアロゾルから、原発事故初期段階で放出された放射性物質の一種である放射性セシウムボール微粒子 (CsMPs) を分離した。エアロゾルからは直径1 μ m程度の球形で粒子あたり1Bq以下のCs-137でした。それらの物理特性および化学特性は、Cs-134/cs-137比などが以前に報告した結果とよく一致していた。本研究では、福島原発から放出されたCsMPが原発から250km以上離れた関東地方にもほぼ同様に降下していたことを実証した。3月15日早朝にかけてのプルームは福島原発2号機原子炉から放出されていたことも示した。CsMPに関して得られた関東広域分布の情報は、福島原発事故汚染が環境と人間の健康に及ぼす影響を評価することにやくだちます。

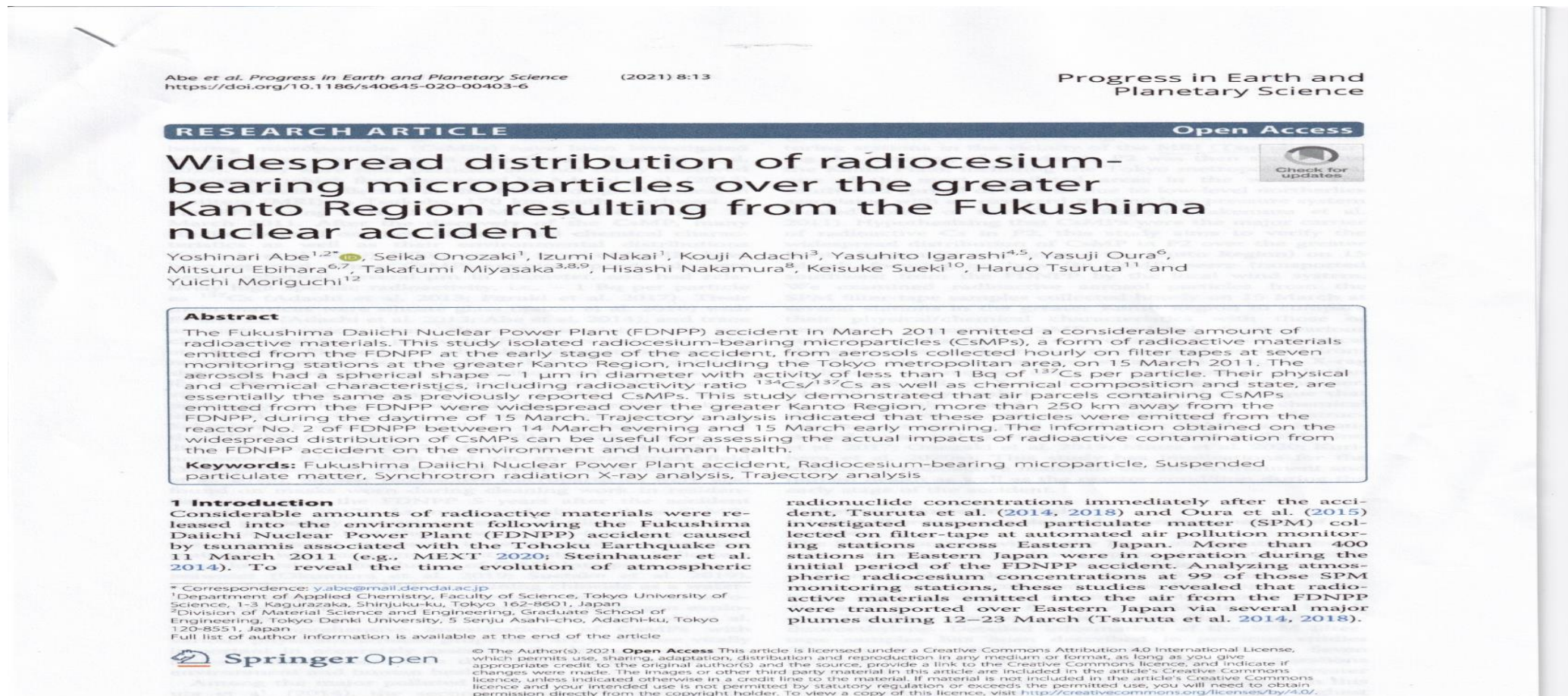
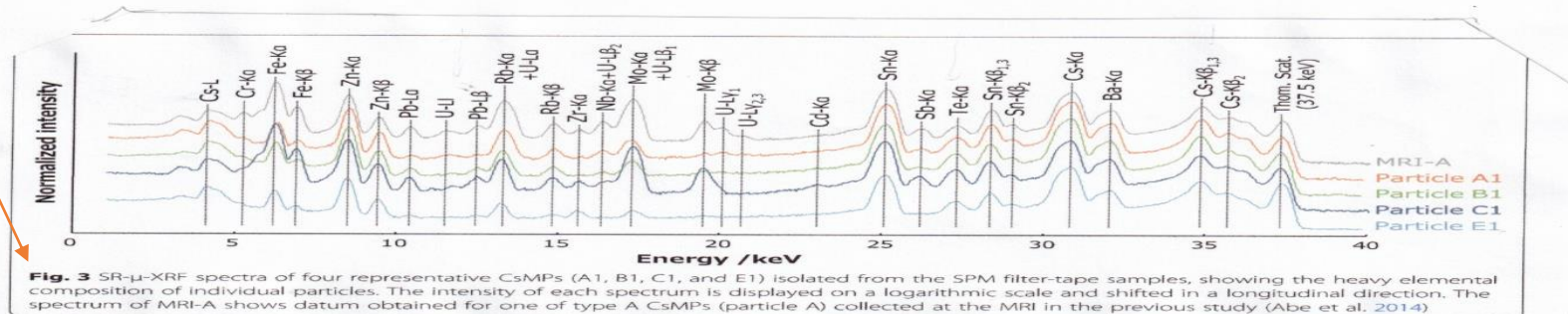
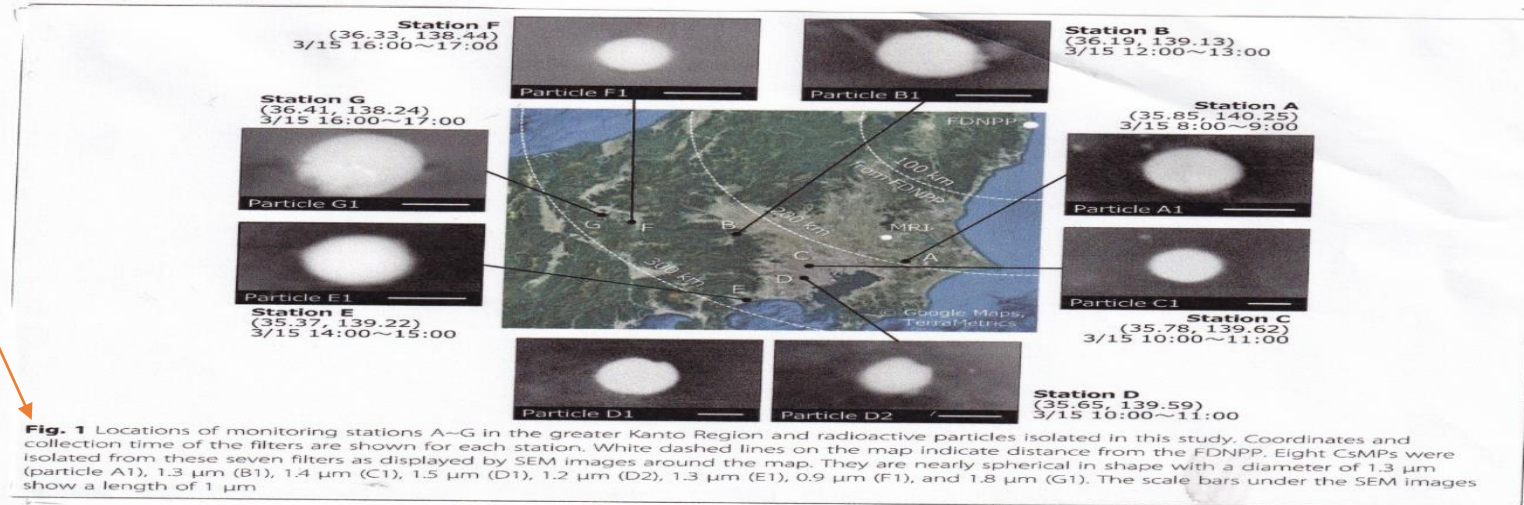


図1の説明文：関東地方のSPM観測所A~Gの位置と、今回分離されたCsPMの映像である。SPM観測所の座標（緯度、経度）とSPMろ紙収集時間が場所ごとに表示されている。8つの分離されたCsPMの電子顕微鏡写真が地図の回りに表示されている。それらはほぼ球形であり、直径は1.3 μ m(A1),1.3 μ m(B1),1.4 μ m(C1),1.5 μ m(D1),1.2 μ m(D2),1.3 μ m(E1),0.9 μ m(F1),そして1.8 μ m(G1)である。右下のスケールバーは1 μ m長さを示している。

図3の説明文：SPMろ紙から分離された4つの代表的なCsMP(A1,B1,C1,E1)のSR- μ -XRFスペクトルである。個々の粒子の重元素組成を示している。各スペクトルの縦軸の規格化強度は対数スケールで表示されている。MRI(つくば市気象研)で収集されたA型は、以前に研究で収集されたものを示している。



山田國廣著「テルル毒本No 15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

表1 SPMろ紙サンプルが採取された7か所の①位置（緯度、経度）②福島原発からの距離③SPMろ紙のサンプリング時間④Cs-137濃度（Bq/m³）⑤採取地点都市名

Stationの記号	①緯度	①経度	②福島原発からの距離（km）	③SPMろ紙のサンプリング時間帯	④Cs-137濃度（Bq/m ³ ）	⑤採取地点の都市地名
A	38.85	140.25	189	2011年3月15日8時~9時	22.1	千葉県印旛郡栄町須賀
B	36.19	139.13	218	2011年3月15日12時~13時	59.1	埼玉県本庄市児玉
C	35.78	139.62	229	2011年3月15日10時~11時	81.9	埼玉県和光市白子2丁目
D	35.65	139.59	236	2011年3月15日10時~11時	29.4	東京都調布市人間町
E	35.37	139.22	280	2011年3月15日14時~15時	29.3	神奈川県秦野市今泉
F	36.33	138.44	261	2011年3月15日16時~17時	22.1	長野県小諸市東雲2丁目
G	36.41	138.24	273	2011年3月15日16時~17時	32.8	長野県上田市常盤城5丁目

放射光マイクロビーム蛍光X線分析（スプリング8）により、関東地域SPM観測所の8つのCsボールおよびつくば気象研で採取されたCsボールから検出された元素名

注1:○印は検出された元素

注2:○印は元素化合物が「有害元素の急性毒性表、において高度毒性を有する」

注3:○印は元素化合物が「有害元素の急性毒性表、において中度毒性を有する」

注4:Zn,Rb,Mo,Sn,Sb,Te,Cs,が8つのCsボールから検出されたのは、それらが核分裂物質起源であることに由来している。

Csボール番号	採取場所	Cr	Fe	Zn	Rb	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	Pb	U
A1	千葉県印旛郡栄町須賀		○	○	○	○		○			○	○	○	○	○	○	○
B1	埼玉県本庄市児玉		○	○	○			○			○	○	○	○		○	○
C1	埼玉県和光市白子2丁目		○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○		○	
D1	東京都調布市人間町		○	○	○	○		○			○	○	○	○			
D2	東京都調布市人間町		○	○	○	○		○			○	○	○	○			
E1	神奈川県秦野市今泉		○	○	○	○		○			○	○	○	○		○	
F1	長野県小諸市東雲2丁目		○	○	○	○		○	○		○	○	○	○		○	○
G 1	長野県上田市常盤城5丁目		○	○	○	○		○		○	○	○	○	○			
MRI-A	つくば市学園都市：気象研究所	○	○	○	○	○		○			○	○	○	○		○	○

2011年3月15日に①埼玉県和光市理研和光研究所②東京都世田谷区都立産業技術センター③神奈川県茅ヶ崎市衛生研究所で採取されたプルーム2のダストサンプル中の放射能濃度 (Bq/m³) とCs-137比

採取場所	採取時間	大気放射能濃度 (Bq/m ³)										備考
		Te-129	Te-129m	Te-131m	Te-132	I-131	I-132	I-133	Cs-134	Cs-136	Cs-137	
埼玉県和光市理研和光研究所	2011年3月15日11時15分～11時45分	7.5	8	1.9	58	35	41	4.7	8.5	1.2	8.8	Te-129,I-132は都立産総研Cs137比に比例して算定
Cs-137比		0.9	0.9	0.2	6.6	4.0	4.7	0.5	1.0	0.1	1.0	
東京都世田谷区都立産業技術センター	2011年3月15日10時～11時	51	63	13	390	240	280	32	64	11	60	
Cs-137比		0.9	1.1	0.2	6.5	4.0	4.7	0.5	1.1	0.2	1.0	
神奈川県茅ヶ崎市、神奈川県衛生研究所	2011年3月15日	0.3	0.62	0.1	3.2	3.6	2.1	0.45	0.39	0.07	0.44	
Cs-137比		0.7	1.4	0.2	7.3	8.2	4.8	1.0	0.9	0.2	1.0	
和光市理研、都立産業技術センター、神奈川県衛研、3か所のCs-137比の平均値		0.8	1.1	0.2	6.8	5.4	4.7	0.7	1.0	0.2	1.0	

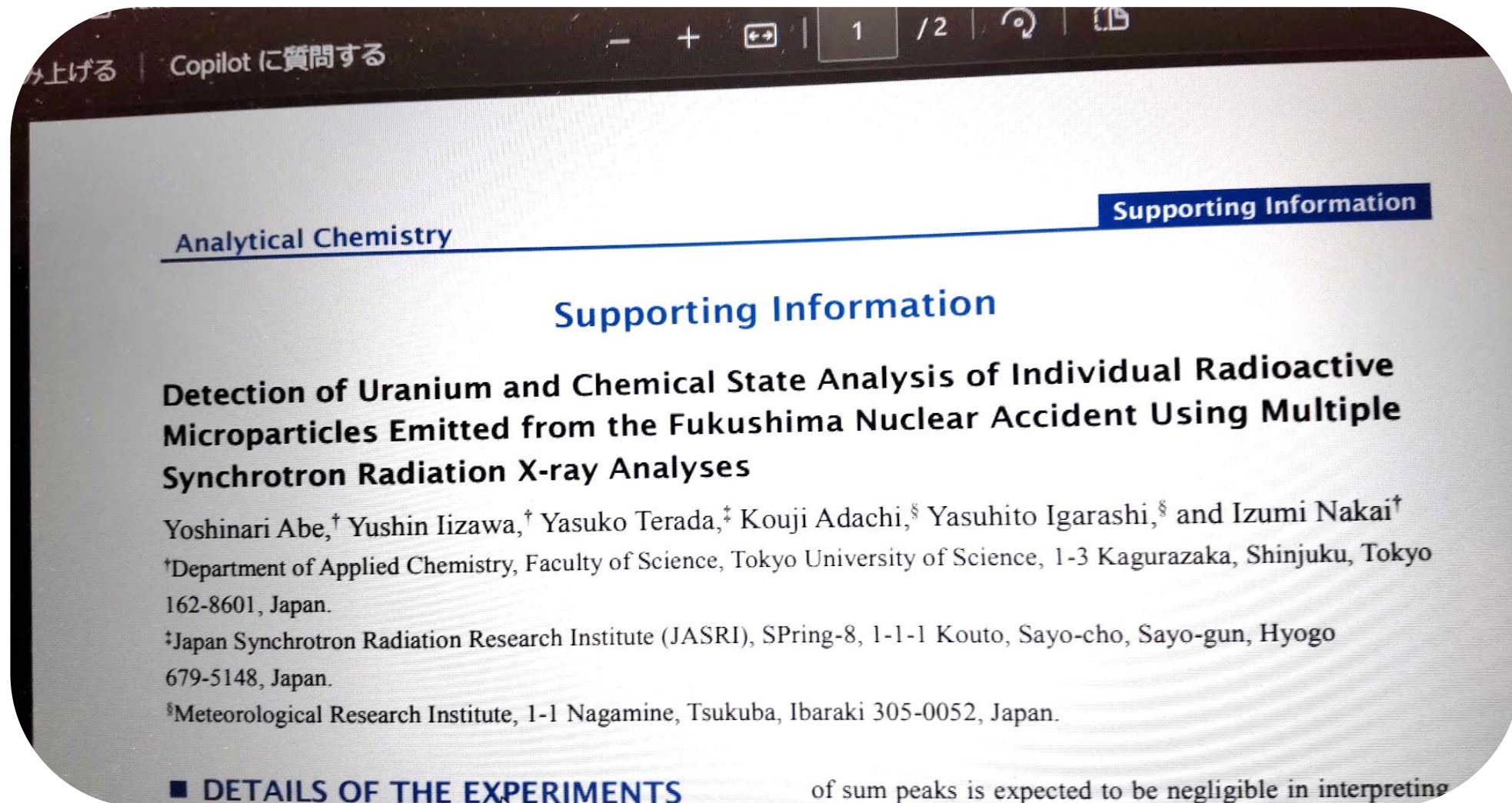
山田國廣著「テルル毒本No15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

関東地域7か所の2011年3月15日SPMろ紙のCs-137濃度 (Bq/m³) と実測された3か所のCs-137比から再現算定した放射性テルル、放射性ヨウ素、放射性セシウムの大気放射能濃度 (Bq/m³)

採取場所	資料採取日時	SPMから測定されたCs-137濃度 (Bq/m ³)	Te-129	Te-129m	Te-131m	Te-132	I-131	I-132	I-133	Cs-134	Cs-136	Cs-137
千葉県印旛郡栄町須賀	A	22.1	17.4	24.8	4.8	150.0	119.0	103.9	15.4	21.5	3.5	22.1
埼玉県本庄市児玉	B	59.1	46.5	66.4	12.8	401.2	318.3	277.9	41.2	57.5	9.4	59.1
埼玉県和光市白子2丁目	C	81.9	64.4	92.0	17.7	555.9	441.1	385.1	57.1	79.7	13.1	81.9
東京都調布市人間町	D	29.4	23.1	33.0	6.4	199.6	158.4	138.2	20.5	28.6	4.7	29.4
神奈川県秦野市今泉	E	29.3	23.0	32.9	6.3	198.9	157.8	137.8	20.4	28.5	4.7	29.3
長野県小諸市東雲2丁目	F	22.1	17.4	24.8	4.8	150.0	119.0	103.9	15.4	21.5	3.5	22.1
長野県上田市常盤城5丁目	G	32.8	25.8	36.8	7.1	222.6	176.7	154.2	22.9	31.9	5.2	32.8
和光市理研、都立産業技術センター、神奈川県衛研、3か所のCs-137比の平均値⇒			0.8	1.1	0.2	6.8	5.4	4.7	0.7	1.0	0.2	1.0

山田國廣著「テルル毒本No15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

つくば市気象研究所のAbe Yoshinariらの研究グループが「Analytical Chemistry (化学分析) 雑誌」で公表した論文の題名「福島原発事故で放出された個々の放射性微小粒子の放射光マイクロビームX線解析によるウラニウム検出と化学性状分析」
文献：<https://pubs.acs.org/doi/abs>



図S1. 「粒子A,粒子B,粒子Cの放射光マイクロビームX線解析によりイメージ分析結果 (SEMは電子顕微鏡映像)」
 注1: 粒子1, 粒子2では Cs, TeとともにUが検出されている。

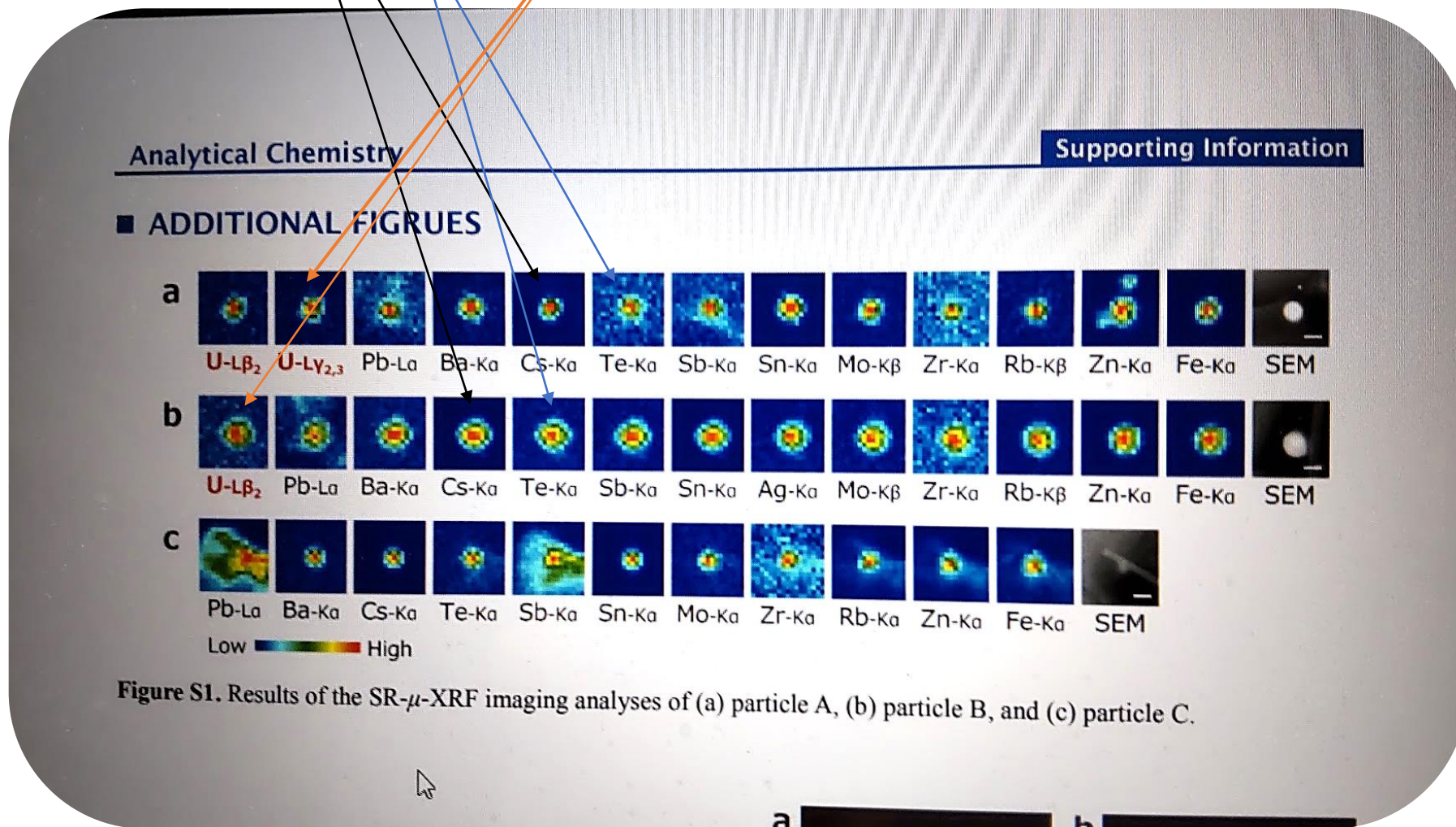


Figure S1. Results of the SR- μ -XRF imaging analyses of (a) particle A, (b) particle B, and (c) particle C.

図S4: 放射光マイクロビームX線解析によって福島原発原子炉内と周辺装置から検出された14の重要元素

注1: 核分裂産物から検出された元素: U

注2: 核分裂物質として検出された元素: Rb, Zr, Mo, Ag, Sn, Sb, Te, Cs, Ba

注3: 核燃料被覆管から検出された元素: Zr, Sn

注4: 圧力容器構造から検出された元素: Zn

注5: 冷却水から、検出された元素: Zn

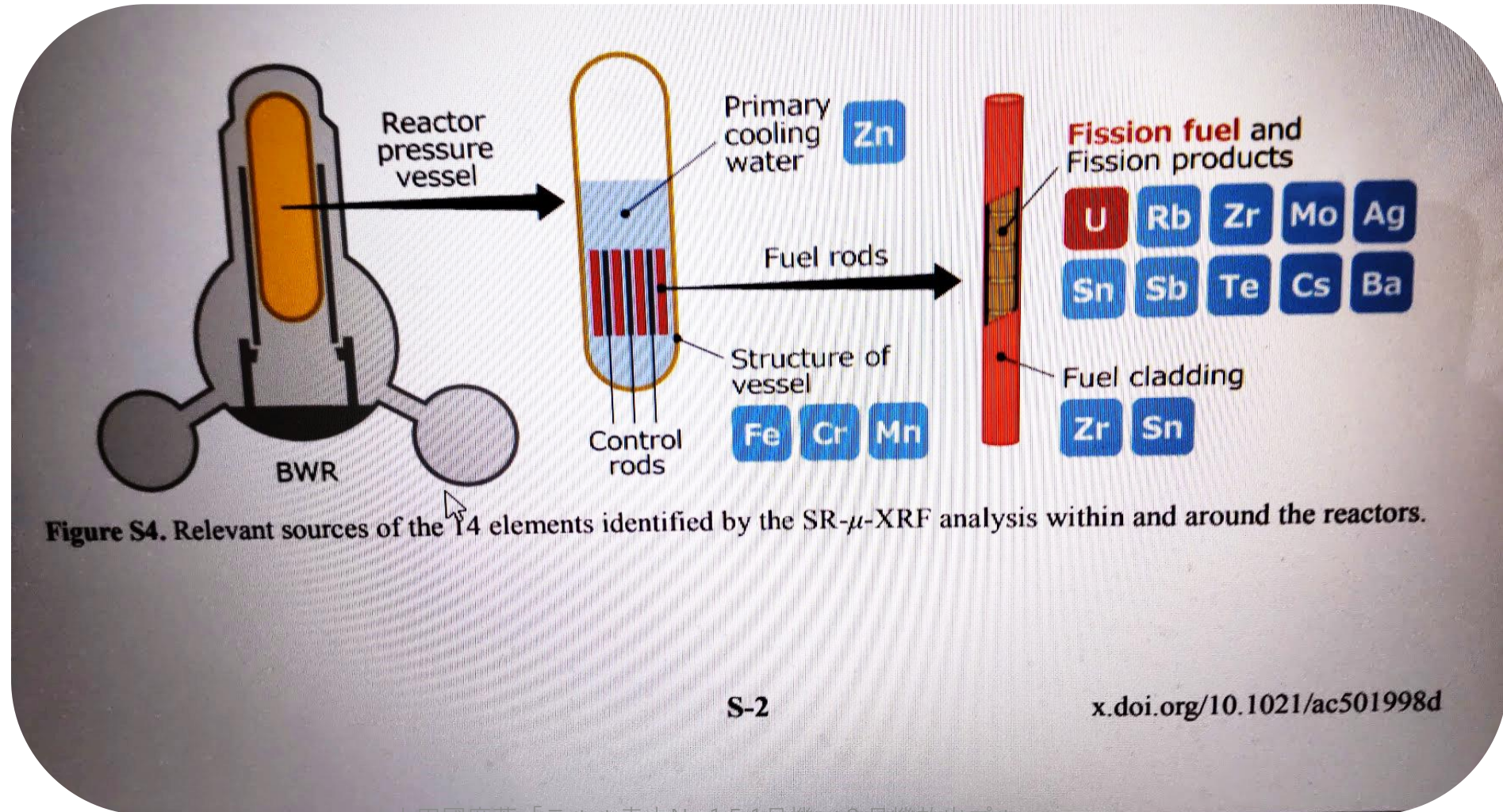


Figure S4. Relevant sources of the 14 elements identified by the SR-μ-XRF analysis within and around the reactors.

S-2

[x.doi.org/10.1021/ac501998d](https://doi.org/10.1021/ac501998d)

広島衛研ニュースで紹介されていた「有害金属の急性毒性：LD50の毒性評価表」

注1：テルル化合物、ウラン化合物、クロム化合物、カドミウム、鉛などは高度毒性（LD50が1～10 mg/kg）の評価であった。

注2：高度毒性のテルル（4価）は $TeO_2, TeCl_4, H_2TeO_3$ 、ウラン（6価）は UO_3, UF_6, UCl_6

注3：鉛（Pb）、アンチモン（Sb）、スズ（Sn）は中等ド毒性である。

本文

衛研ニュース／食品中の重金属について

＜記事内容＞

ページ番号：0000000225 更新日：2020年12月7日更新

重金属について

重金属とは、比重が4以上の金属元素とされています。一般に軽金属と呼ばれるナトリウム等のアルカリ金属、カルシウム等のアルカリ土類金属や、ミニウムを除く約60種類の金属が重金属に相当します。

例えば、カドミウム、鉛、亜鉛、銅、マンガン、鉄、コバルトなどです。重金属と聞くと、人体に有害で危険な物質というイメージがあると思いますが一般的に、重金属は毒性が強いものが多く、微量であっても繰り返し摂取すると体内で蓄積されて有害です。

ただし、重金属は有害であるばかりではありません。元素には、生元素あるいは生体元素と呼ばれる生物にとって大変重要な役割を持つものがあります。次の表に示すものがそれらで、生物体を構成している11種の主要元素と、生命維持に必須とされている15種の微量元素です。この微量元素のうちケイ素、フッ素、ヨウ素を除く12種の元素は重金属なのです。

表のサイズを切り替える

生元素(生体元素)(※1)	
主要元素(成人1日必要量が100mg以上)	水素、炭素、窒素、酸素、リン、硫黄、塩素、ナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウム
微量元素(成人1日必要量が100mg以下)	鉄、亜鉛、銅、マンガン、バナジウム、クロム、ニッケル、コバルト、ヒ素、セレン、モリブデン、スズ、ケイ素、フッ素、ヨウ素

(※1)「衛生試験法・注解2020,日本薬学会編,204(2020)」より引用

また、食品に含まれる有害元素はその存在形態によって毒性が大きく違うため、元素の存在量だけで議論することはできません。

例えば、無機ヒ素は毒性が高いにもかかわらず、ジメチルアルシノ酸やアルセノシュガー等の有機ヒ素化合物は毒性がはるかに低いということが分っています。参考までに、有害元素の急性毒性量を次の表に示します。

表のサイズを切り替える

有害元素の急性毒性(※2)		
LD50(mg/kg)(注1)	元素名	
高度毒性 1～10	経口(注2)	ヒ素(3価)、黄リン、プルトニウム(4価、6価)、セレン(4価)、テルル(4価)、タリウム(1価)
	静注(注3)	プルトニウム(4価、6価)、テルル、ベリリウム、カドミウム、クロム(6価)、水銀、鉛、硫黄(-2価)、ニッケル(6価)、バナジウム(5価)
中等度毒性 10～100	経口	カドミウム、銅、フッ素、水銀、鉛、アンチモン、ウラン、バナジウム
	静注	金、バリウム、カルシウム、セリウム、コバルト、フッ素、ガリウム、カリウム、マグネシウム、マンガン、モリブデン、ニオブ、ニッケル、プラセオジウム、白金、アンチモン、スズ、タンタル、トリウム、ニオン、亜鉛
わずかな毒性 100～1000	経口	アルミニウム、ホウ素、バリウム、鉄、インジウム、モリブデン、タンタル、トリウム、タングステン
	静注	鉛、ジルコニウム ホウ素、クロム(3価)、ゲルマニウム、ランタン、リチウム、レニウム(7価)、ストロンチウム、イットリウム、亜鉛
比較的無害 1000以上	経口	臭素、塩素、セシウム、ヨウ素、ナトリウム、ルビジウム、カルシウム、カリウム、ランタン、レニウム(8価)

(※2)「衛生試験法・注解2020,日本薬学会編,431(2020)」より引用

(注1) 50%Lethal Doseの略で半数致死量のこと。ある化学物質を実験動物に投与した時、その実験動物の半数が死亡する量を表す。例えば、LD50=10mg/kgとは、体重1kgあたり10mg投与すると半数が死ぬ事を示している。

(注2) 口から投与すること。

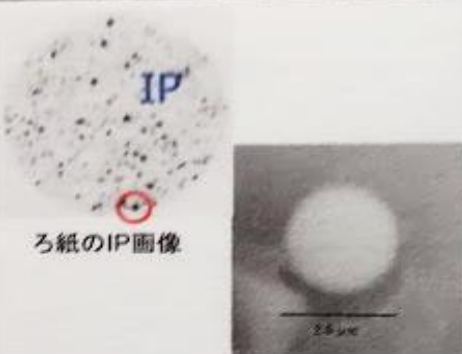
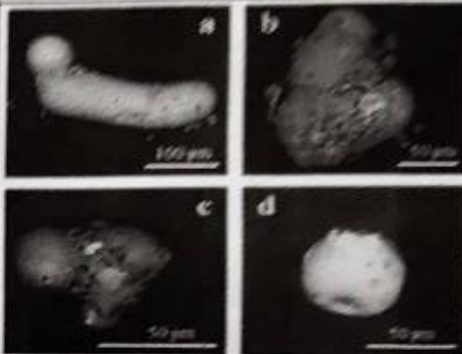
(注3) 静脈注射により投与すること。

2種類の不溶性Csボールのと特徴

注1：Aタイプは2号機放出プルームから降下したSPMから採取

注2：Bタイプは1号機放出プルームから降下した土壌表面の粒子から採取

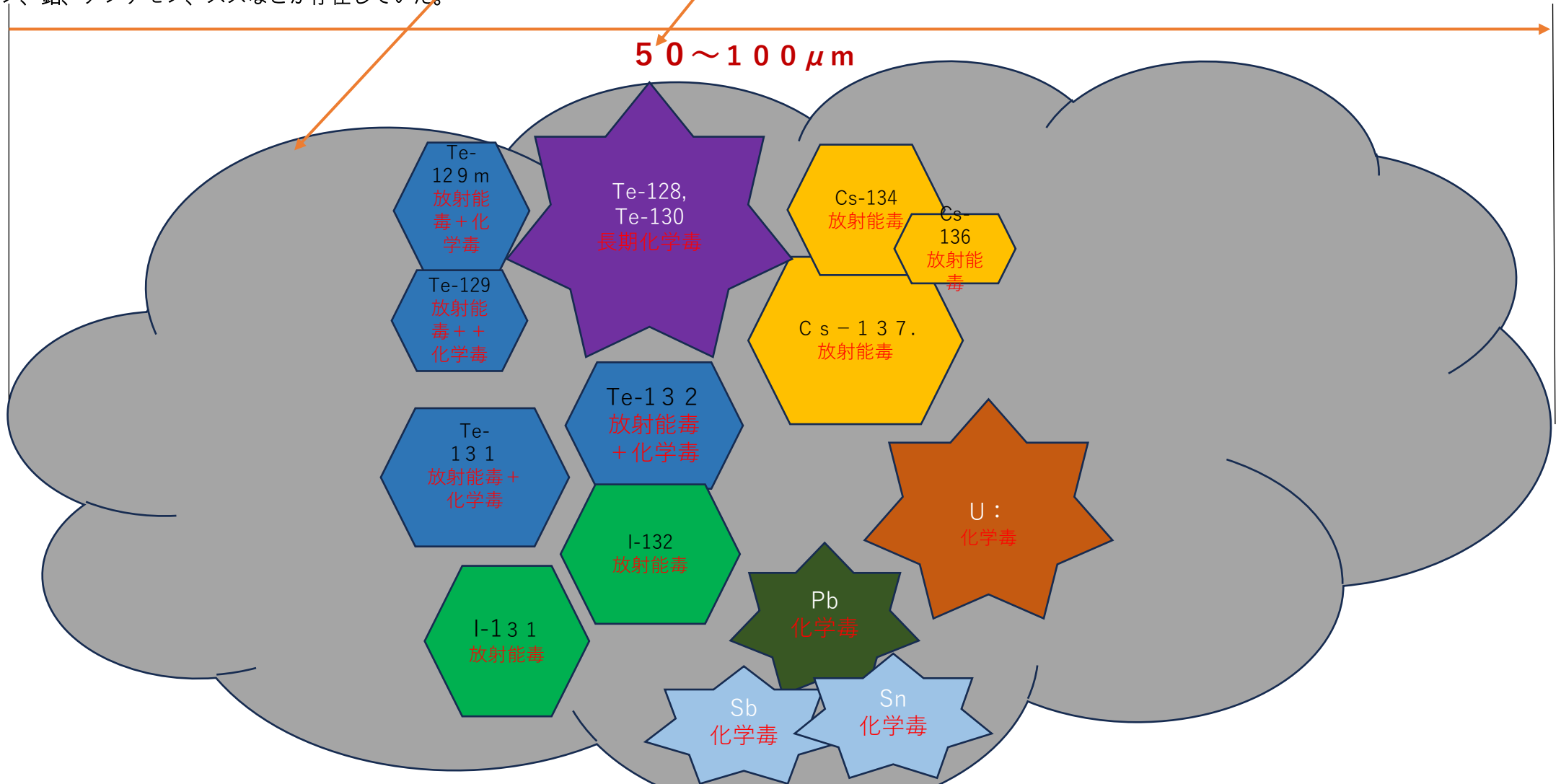
出典：日本保健物理学会シンポジウム「福島事故後の不溶性粒子の検出の地域分布と拡散予測」、森口祐一（東京大学大学院工学研究科）研究会大代表者、より

2種類の不溶性セシウム粒子の特徴		
	Aタイプ(仮称)	Bタイプ(仮称)
参考画像	 <p>ろ紙のIP画像</p> <p>出典：足立(気象研)ら(2013)</p>	 <p>出典 小野(理科大)ら(2017)</p>
粒径	0.数μm~数μm	数十μm~
1粒子あたりの放射能	0.数Bq~数百Bq	数十Bq~数千Bq
比放射能	10 ¹¹ ~10 ¹² Bq/cm ³ 程度	10 ⁸ ~10 ¹⁰ Bq/cm ³ 程度
形状	主に球形だが非球形も存在	主に非球形だが球形も存在
Cs-134/Cs-137比から推定される放出源	2号機	1号機
推定される放出時期と到達範囲	2011年3月14日深夜~15日午前 関東広域~福島県	2011年3月12日 北~北西側の帰還困難区域等

山田國廣著「テルル毒本No 15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

1号機放出プルーム採取されたCsボール内は形状がいびつで直径は50~100 μm と2号機放出Csボールに比べて大きく、その中に存在している放射性テルル、放射性ヨウ素、放射性セシウムと多種の有害化学毒元素の実測値による複合汚染モデル図

注：原発事故直後、1号機放出プルームは浜通り北側を汚染し、プルーム中のCsボールには、このモデル図のような放射性物質と有害化学毒物が混在して、複合毒影響与えていた。
◎直径1 μm 程度のCsボールの中に放射性物質ではTe-129,Te-129m,Te-131,Te-132,I-131,I-132,I-133,Cs-134,Cs-136,Cs-137が存在していた。そして化学毒を有する有害化学毒元素としてはテルル、ウラン、鉛、アンチモン、スズなどが存在していた。

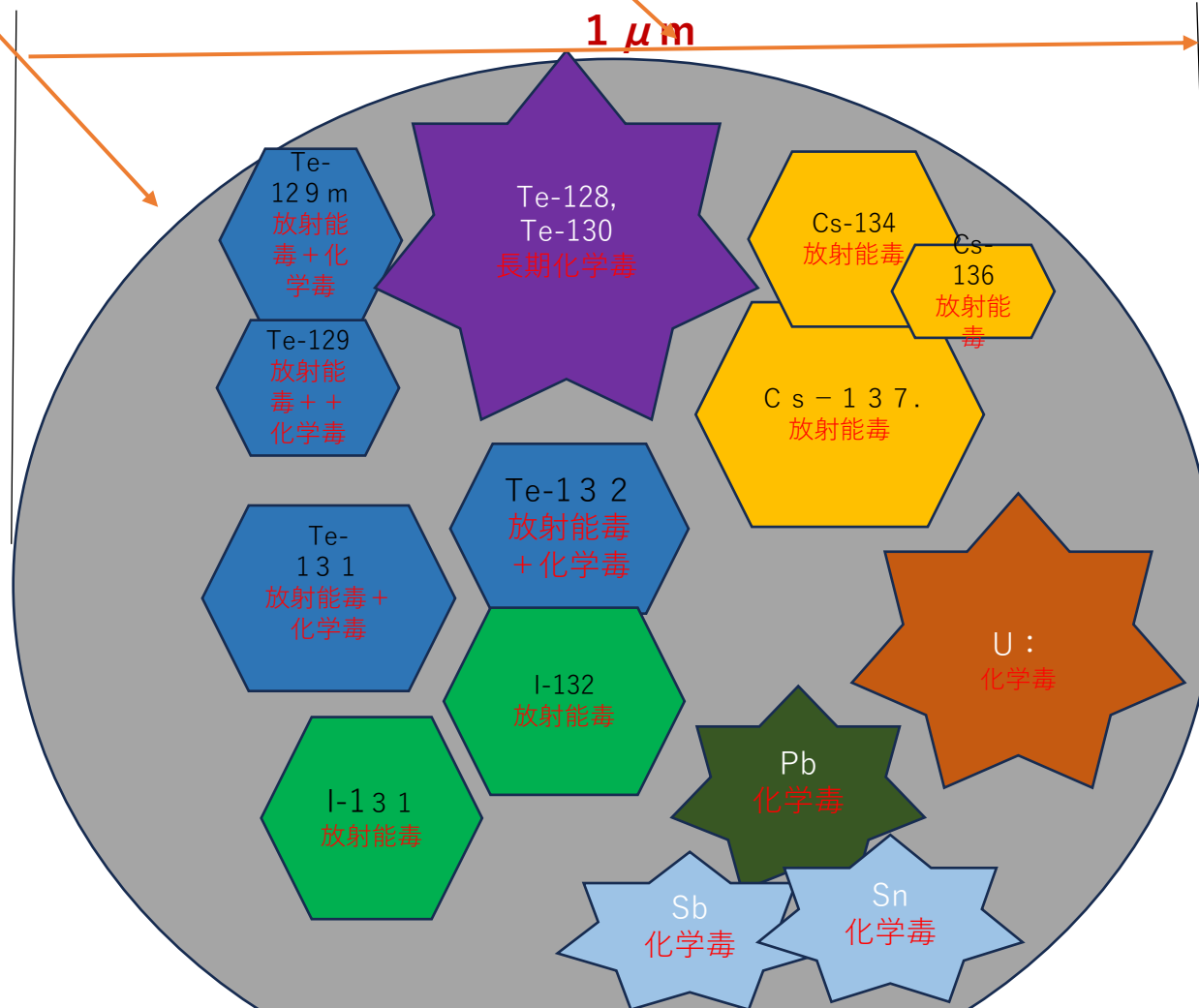


山田國廣著「テルル毒本No15:1号機、2号機放出プルーム中におけるCsボールの形状、混入核種名、化学毒物名、汚染範囲の確認」

東日本広域のSPMから採取された2号機放出プルーム中のAタイプCsボールに存在している放射性テルル、放射性ヨウ素、放射性セシウムと多種の有害化学毒元素の実測値による複合汚染モデル図

注1：AタイプCsボールの外形は球状に近く直径は1 μm 程度と小さいのが特徴です。

注2：原発事故直後に福島県をはじめ東日本広域に降下したCsボールには、このモデル図のような放射性物質と有害化学毒物が混在して、複合毒影響与えていた。
◎直径1 μm 程度のCsボールの中に放射性物質ではTe-129, Te-129m, Te-131, Te-132, I-131, I-132, I-133, Cs-134, Cs-136, Cs-137が存在していた。そして化学毒を有する有害化学毒元素としてはテルル、ウラン、鉛、アンチモン、スズなどが存在していた。



福島原発事故後に放出された9本のプルームのうちP1の汚染範囲では1号機放出のタイプBのCsボールであり、P2~p9の汚染範囲では2号機放出のタイプAのCsボールである。

Nakajima et al. Progress in Earth and Planetary Science (2017) 4:2
DOI 10.1186/s40645-017-0117-x

Progress in Earth and Planetary Science
地球と惑星科学の進歩

福島第一原発事故直後に放出された9本のプルームを特定した重要論文の題名
「福島第一原発事故により放出された放射性セシウムの空気流れのモデル図」

Model depiction of the atmospheric flows of radioactive cesium emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident



Teruyuki Nakajima^{1,2*}, Shota Misawa¹, Yu Morino³, Haruo Tsuruta^{1,4}, Daisuke Goto³, Junya Uchida¹, Toshihiko Takemura⁵, Toshimasa Ohara³, Yasuji Oura⁶, Mitsuru Ebihara⁶ and Masaki Satoh¹

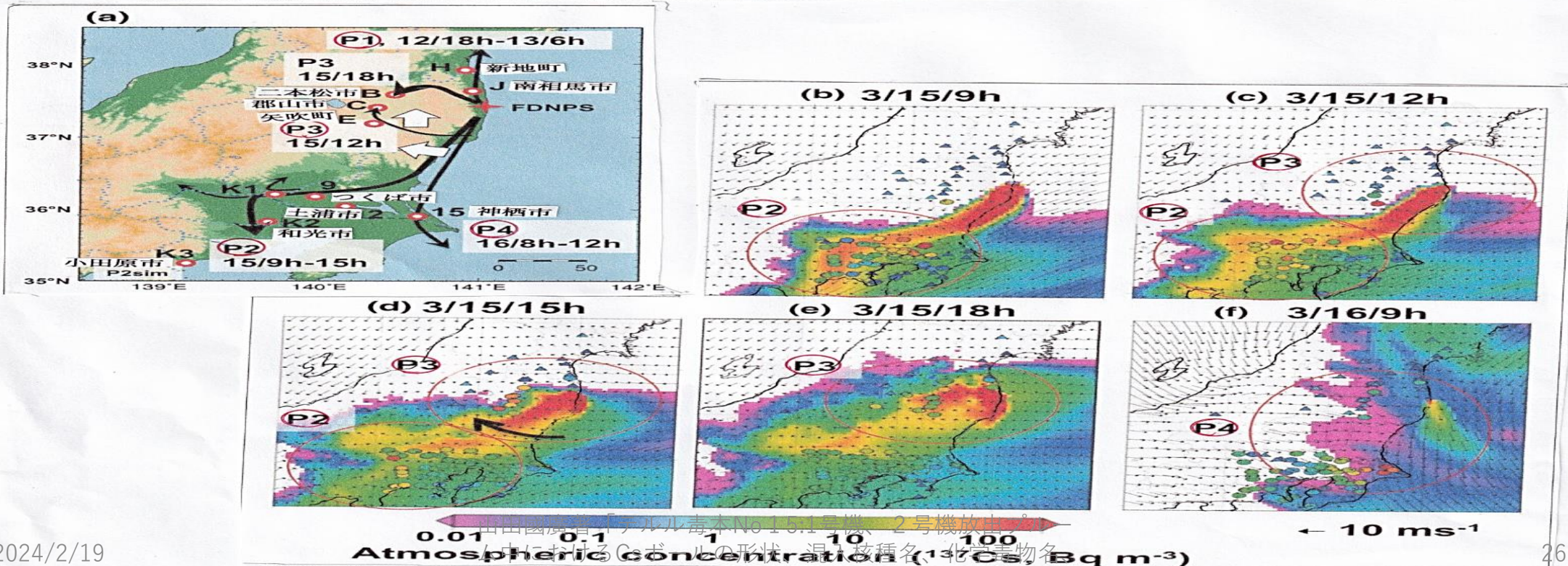


図9 a-f: 3月15日9時から3月16日9時のCs-137濃度 (Bq/m³) 空間平均値の観測値 (カラーの円で表示) の汚染マップ。矢印は風のベクトル図。太い矢印はP3の移流軌跡を示している。

福島原発事故後に放出された9本のプルームのうちP1の汚染範囲では1号機放出のタイプBのCsボールであり、P2～p9の汚染範囲では2号機放出のタイプAのCsボールである。

Fig. 15 本研究で明らかにされたプルーム P2,P3,P4,P5,P7,P8,そして P9 の大気移流経路の模式図。太い矢印はそれぞれのプルームの一般的な移流傾向を示している。

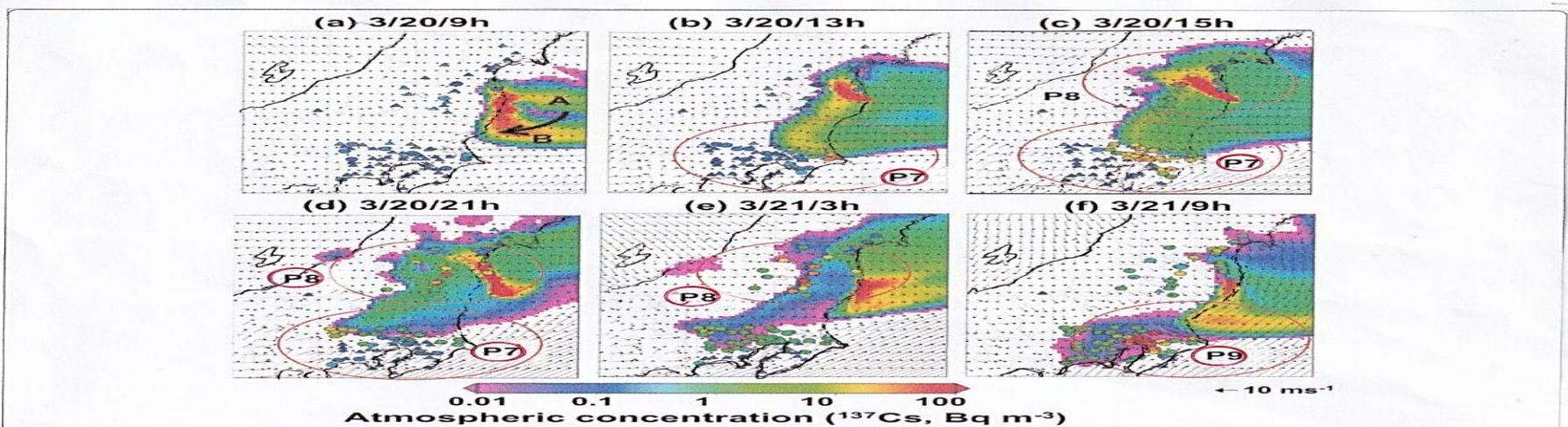
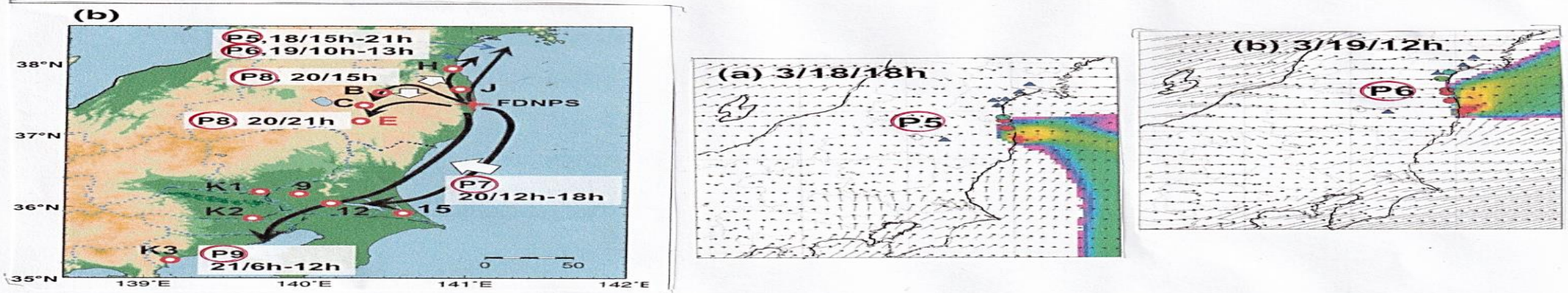


図 13a-f: 3月20日9時から3月21日9時のCs-137濃度(Bq/m³)空間平均値の観測値(カラーの円で表示)の汚染マップ。矢印は風のベクトル図。太い矢印はP7の移流軌跡を示している。