

# 福島第一原子力発電所の原子炉格納容器内等で採取された試料の分析

2019年5月30日

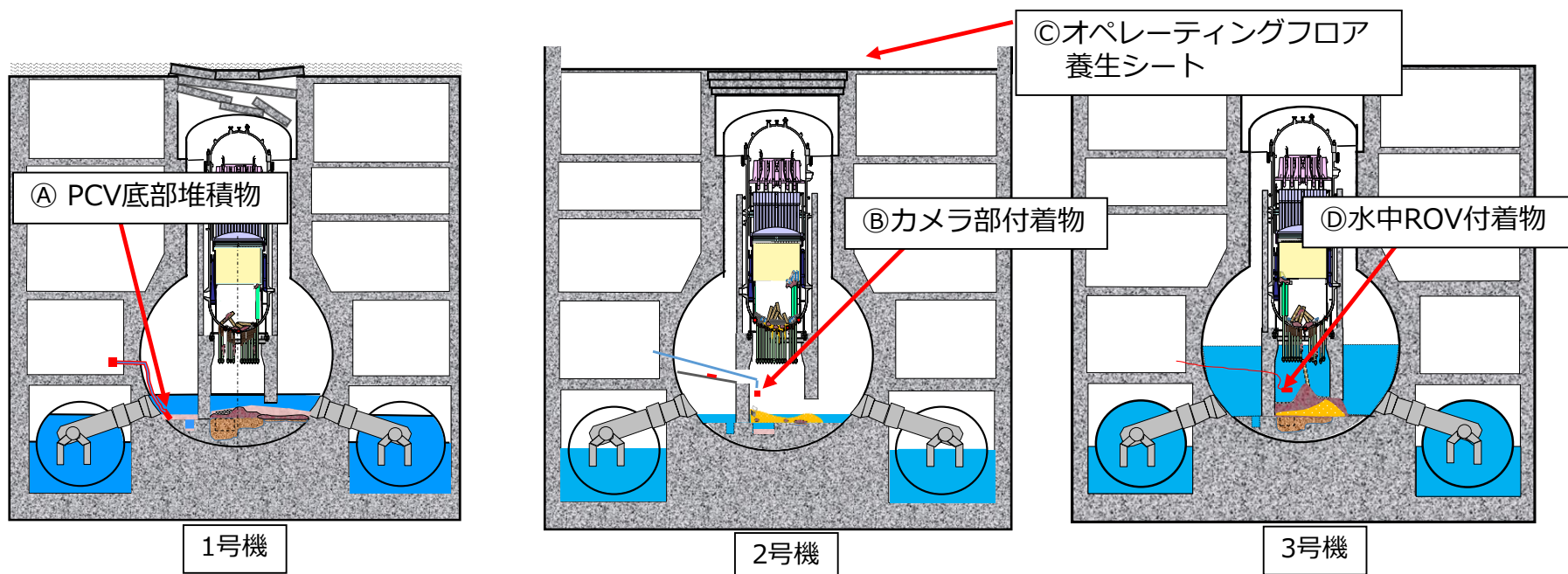
**TEPCO**

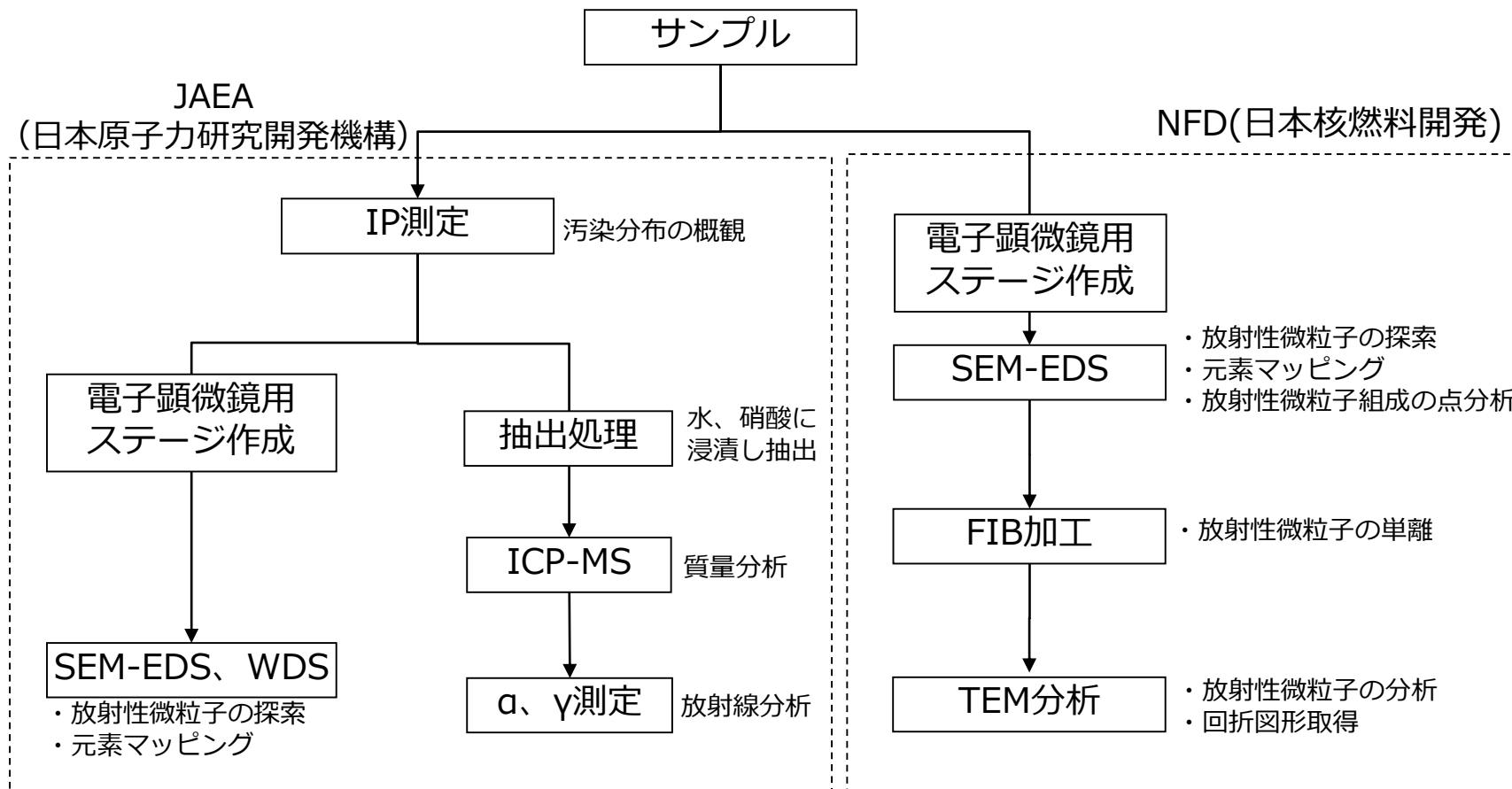
東京電力ホールディングス株式会社

本研究は、経済産業省「平成27年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金(総合的な炉内状況把握の高度化)」及び「平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業(燃料デブリの性状把握・分析技術の開発)」の研究の一部を含む。

- 福島第一原子力発電所では廃炉作業の進捗とともに、これまで高線量環境などの課題から取得が困難であった1～3号機原子炉格納容器（PCV）内からも、サンプルが取得されるようになってきている。
- これらのサンプルを詳細に分析することで得られる情報は、燃料デブリ分布や核分裂生成物（FP）の化学的特性に関する検討など、廃炉に役立つ知見となると考えられることから、東京電力HDは、廃炉・汚染水対策事業「総合的な炉内状況把握の高度化」、「燃料デブリの性状把握・分析技術の開発」と協働し、サンプル分析を進めてきた。
- 本報告では、2018年度に実施した電子顕微鏡（SEM/TEM）による分析結果について取りまとめた。

サンプル	概要	採取時期
① 1号機 PCV底部堆積物	格納容器底部の堆積物（浮遊物）を吸引し採取したもの	2017年4月
② 2号機 PCV内部調査装置付着物（カメラ部付着物）	格納容器内部調査で使用した、パンチルトカメラの表面を拭き取ったもの。ペDESTAL内上部から落下した水滴中の成分（微粒子）が付着している可能性	2018年1月
③ 2号機 原子炉建屋オペレーティングフロア養生シート	原子炉建屋最上階のシールドプラグ近傍にあった養生シートを採取したもの	2014年3月
④ 3号機 PCV内部調査装置付着物（水中ROV付着物）	3号機格納容器内部調査装置（水中ロボット）の表面を拭き取り採取したもの	2017年7月





IP: Imaging Plate(イメージングプレート)

SEM: Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡)

EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (エネルギー分散型X線分光法)

WDS: Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy (波長分散型X線分光法)

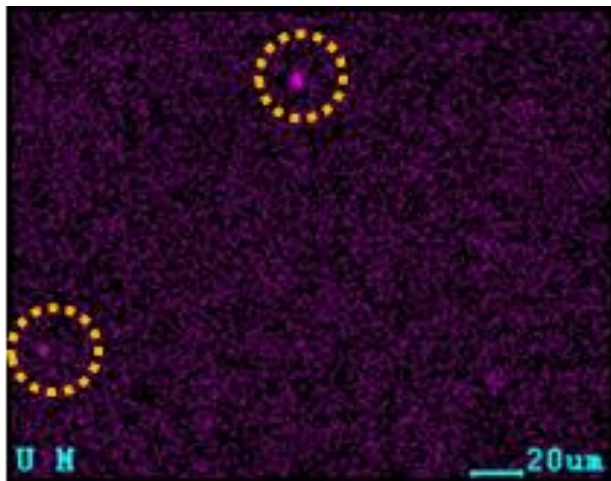
ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (誘導結合プラズマ質量分析)

FIB: Focused Ion Beam (集束イオンビーム)

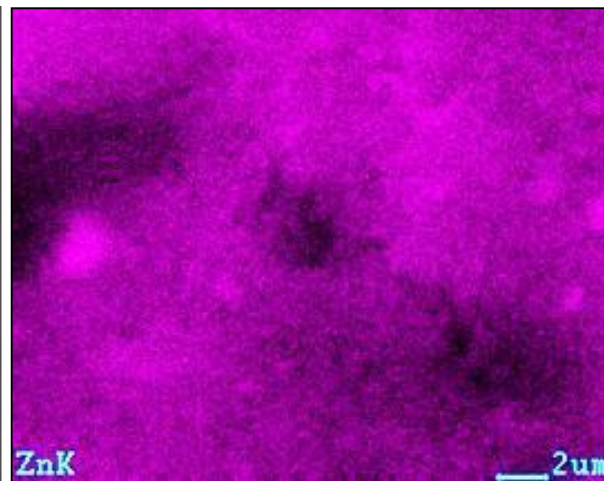
TEM: Transmission Electron Microscope (透過型電子顕微鏡)

SEM-EDSにより元素の含有量、分布を評価した。

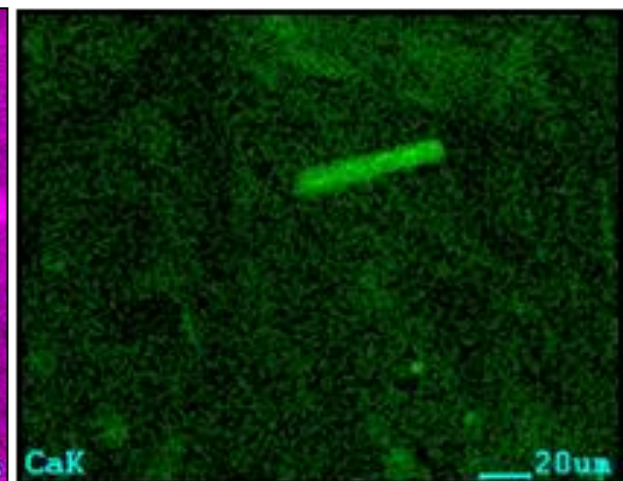
- Uは $\mu\text{m}$ オーダーの微小領域に点在する（左下図）。これは全号機共通の現象で、ウラン含有固体微粒子と考えられる。TEMによる分析を実施（次ページ以降）
- 鋼材成分(Fe, Ni, Cr)、塗膜成分(Zn)、鋳物成分(Ca, Si, Al)の含有状況は号機間で違いがある。例えば、
  - Znの含有は1号機（下図中央） $\gg$  3号機 $\gg$  2号機（今回不検出）の順。1号機では、顕著な塗膜の劣化が生じたと推察される。
  - 2号機のサンプルは鋳物成分の含有が多いが、繊維形状のCaとして検出されており、コンクリート由来の成分ではなく断熱材由来の成分である可能性がある（右下図）。



ウランは微小領域に点在  
(㊸2号機PCV内部調査)



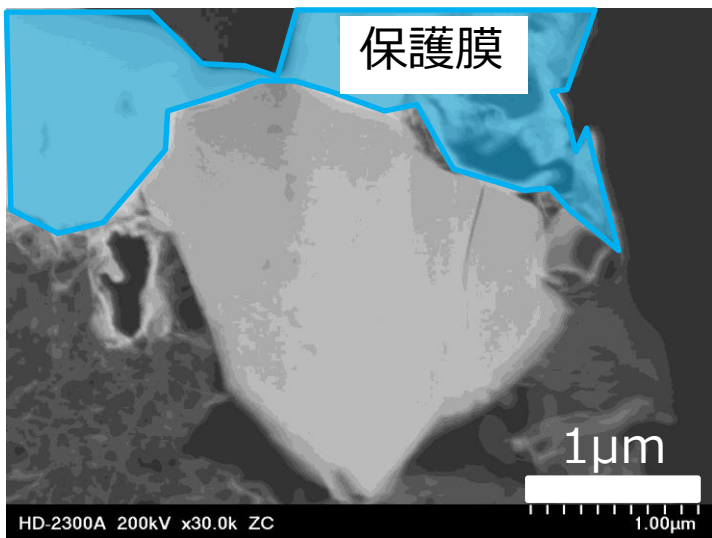
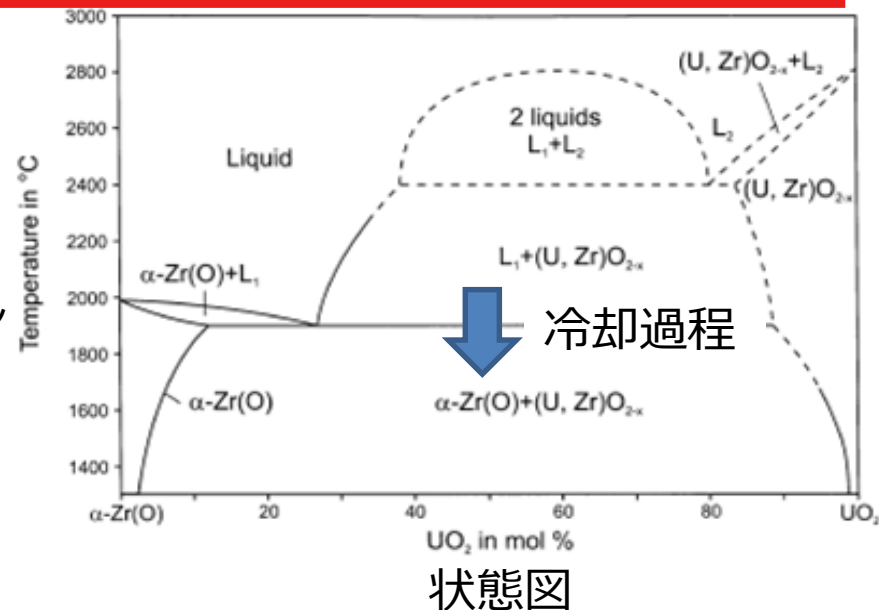
高濃度で検出された亜鉛  
(㊸1号機PCV底部堆積物)



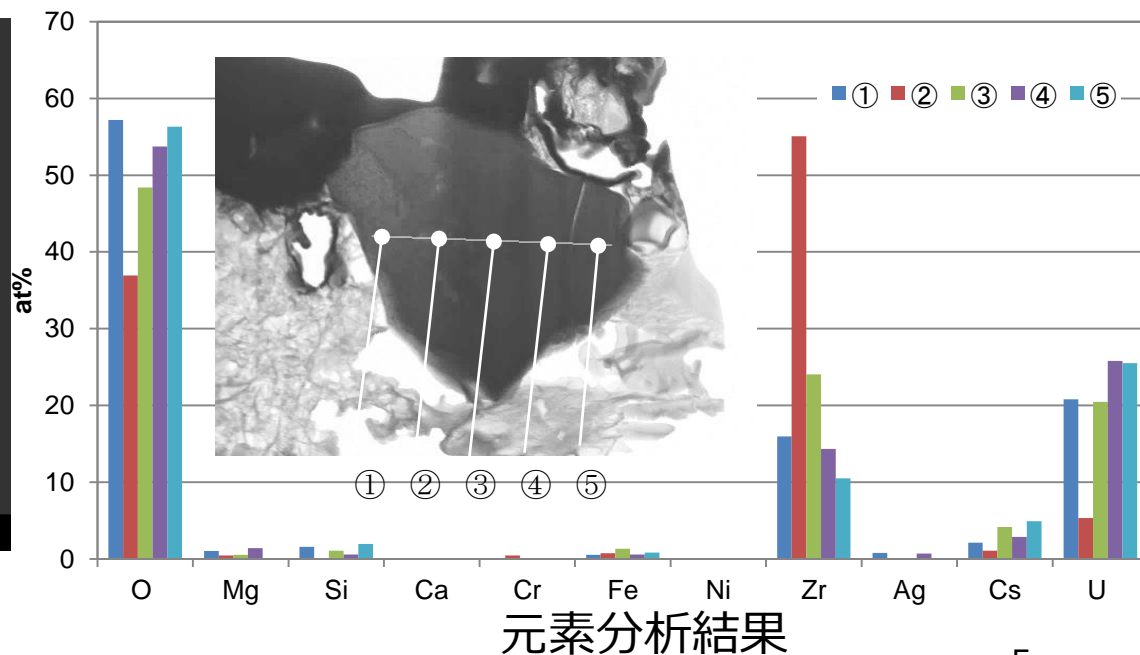
繊維形状のCa  
(㊸2号機PCV内部調査)

## 5. TEM分析結果 ①1号機PCV底部堆積物

- 1号機PCV底部堆積物から検出された粒子は約 $2\mu\text{m}$ であった（左下図）。
- $(\text{U,Zr})\text{O}_2$ 母相（右下図分析点①,③,④,⑤）内部に高Zr領域（分析点②）が確認された。
- 領域②は、冷却過程で $(\text{U,Zr})\text{O}_{2-x}$ から分離した $\alpha\text{-Zr(O)}$ 相と考えられる（右図）。

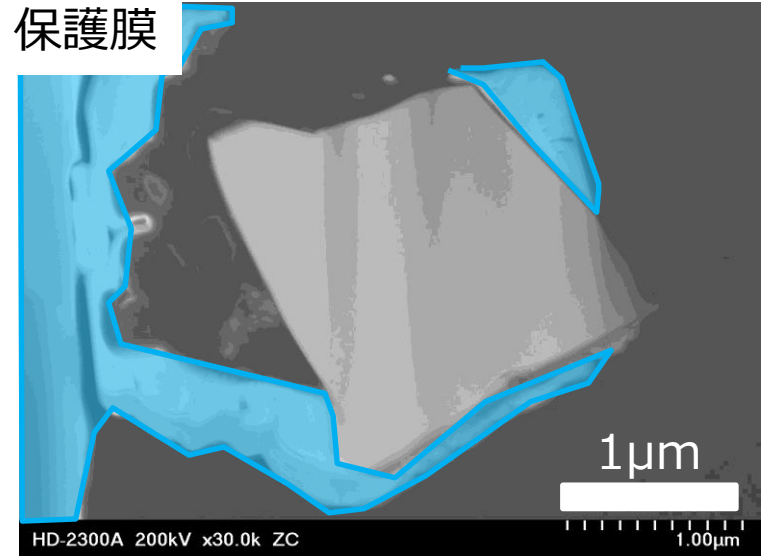


TEM像

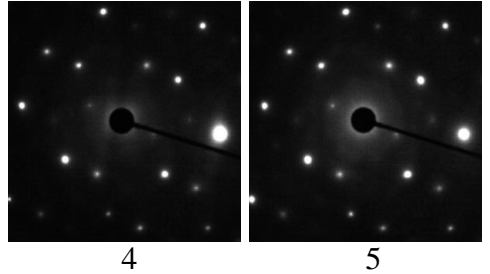
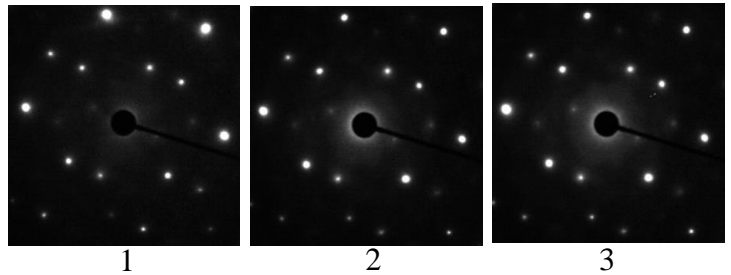


# 6. TEM分析結果 ②2号機 PCV内部調査装置付着物（カメラ部付着物） **TEPCO**

- 同様の粒子が2号機PCV内部調査カメラのスミアサンプルから検出された（右図）。
- この粒子の組成は比較的均一で、平均的には、 $(Zr_{0.64}, U_{0.36})O_2$ の組成と考えられる（右下図）。
- 電子回折の結果、正方晶の存在が示された（下図）。
- 高温から急冷された可能性が示唆される。

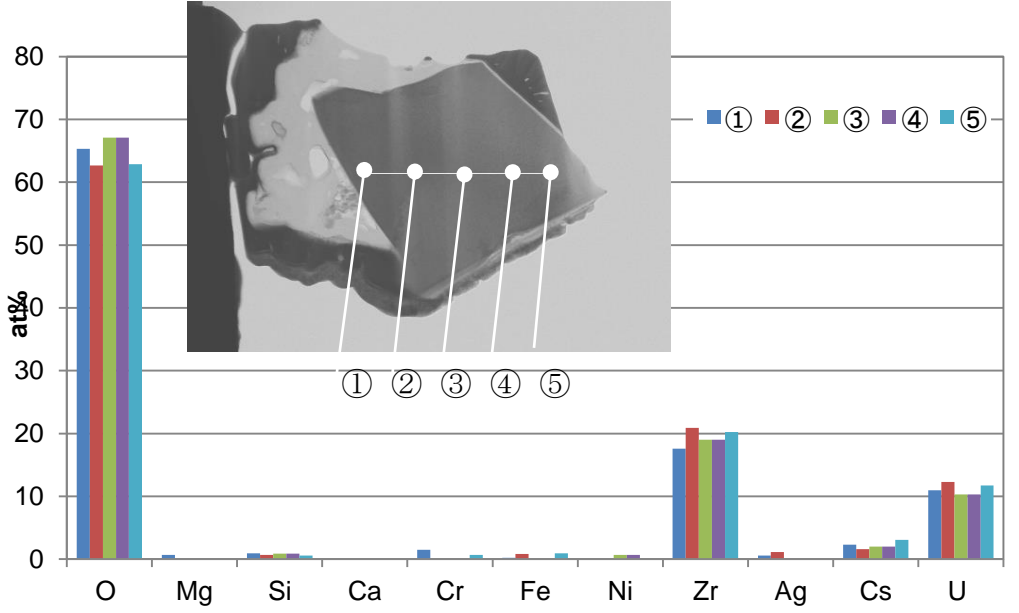


TEM像



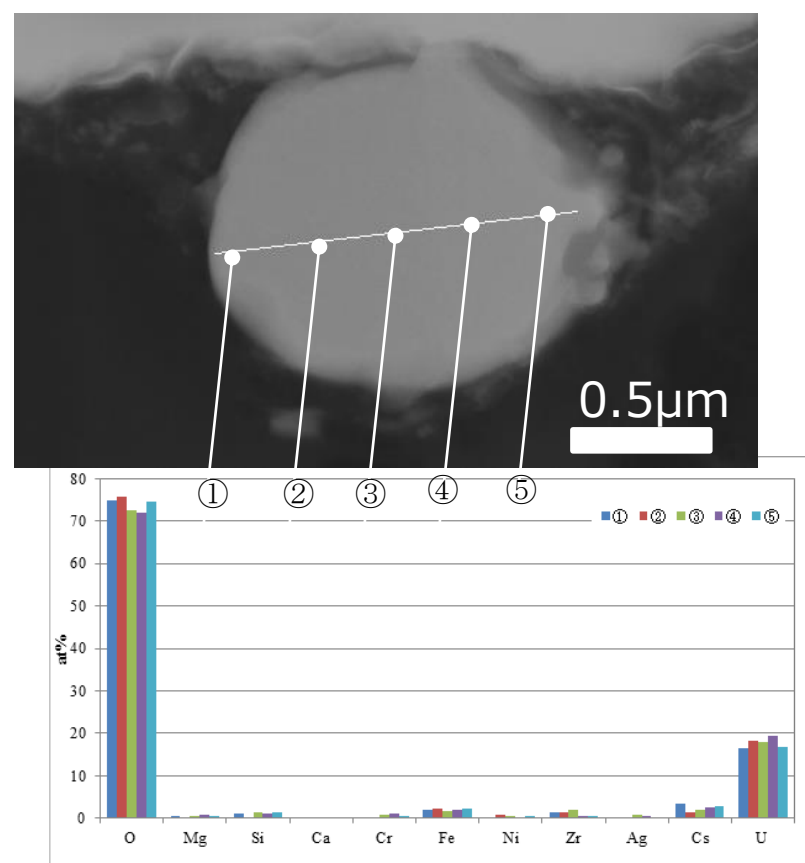
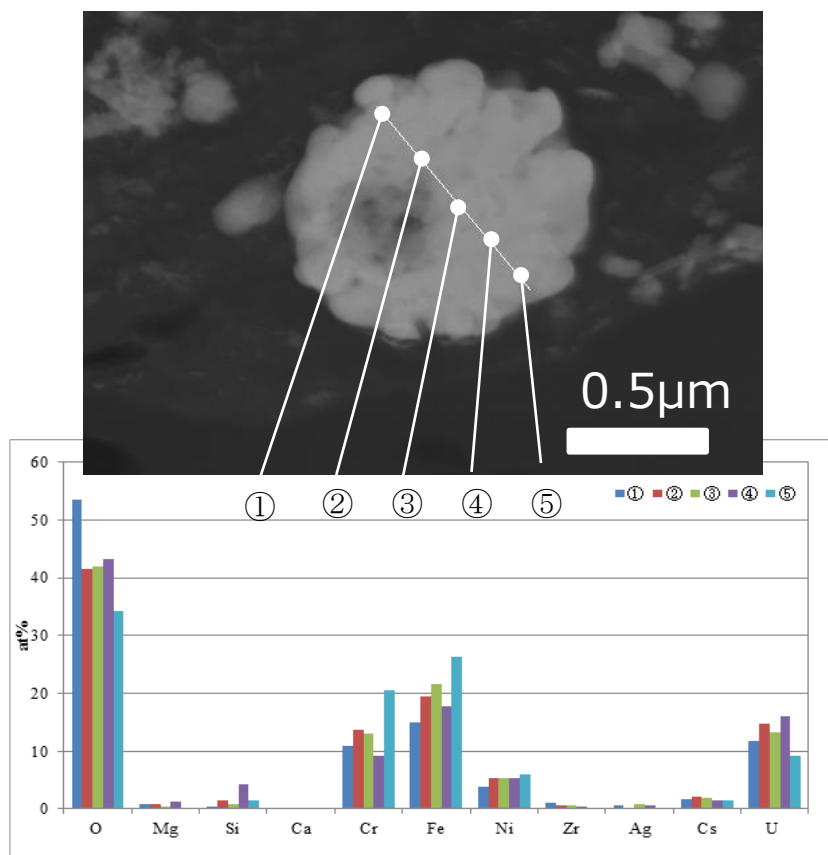
点1～5とも  
正方晶が存在

電子回折分析



元素分析結果

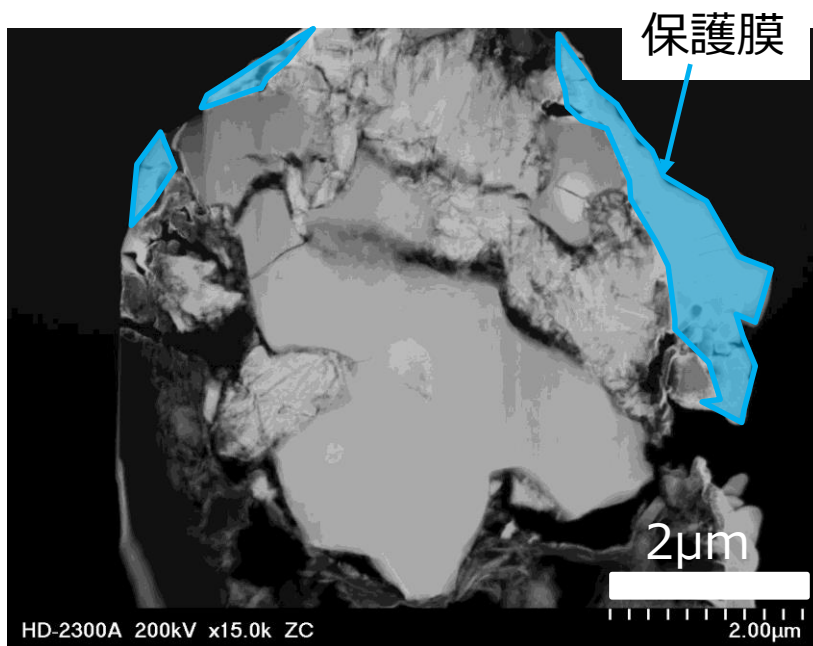
- 2号機最上階で採取したサンプルから、ほとんどZrを含まないUリッチ粒子が検出された（下両図）。
- 左図の粒子は、直径約100nmの粒子が凝集した2次粒子のように見える。
- 右図の粒子は、凝集粒子が結晶成長し緻密な球状となった粒子に見える。
- これらの粒子は、蒸発凝縮のメカニズムで生成した可能性が示唆される。Zrは難蒸発性であることから、蒸発凝縮で生成した粒子には存在量が少なくなると考えられる。



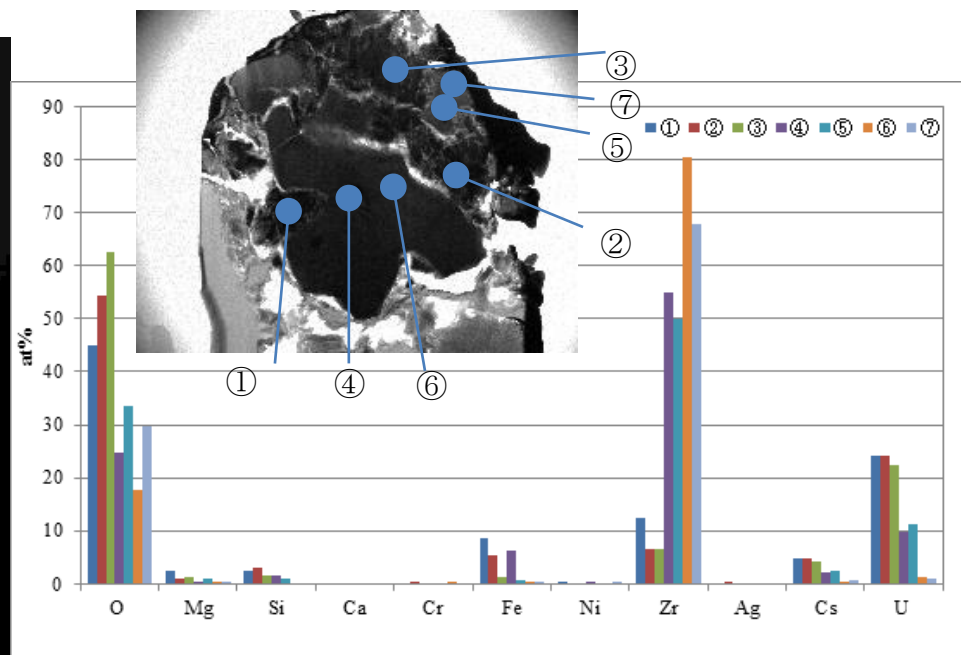
元素分析結果



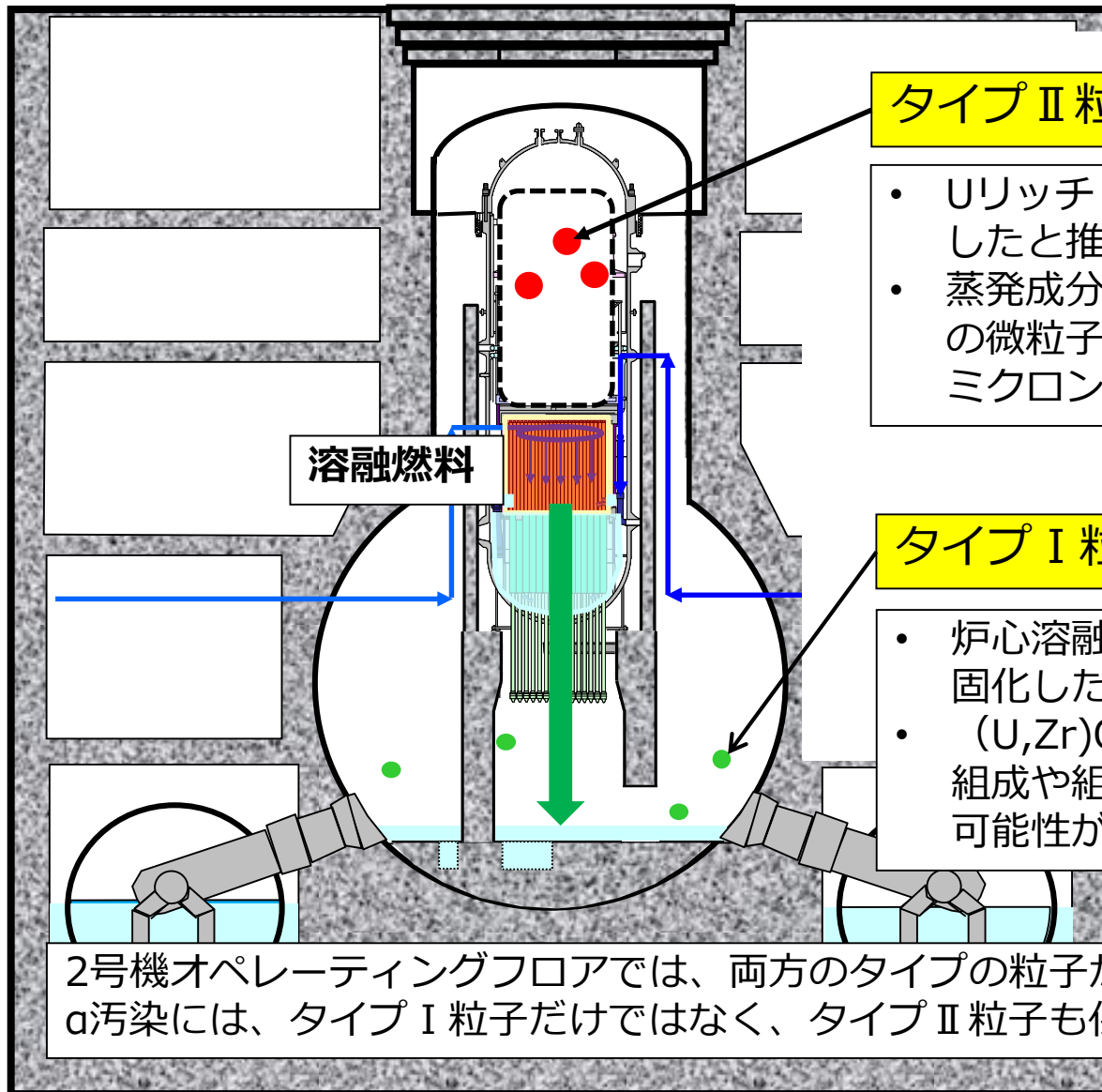
- 3号機PCV内部調査で使用した水中ROVのスミアサンプルから検出された粒子は、Zrリッチ領域とUリッチ領域が混在した組成であり、領域の境界に空隙が見られる（下図）。
- Zrリッチ領域は緻密であるのに対し、Uリッチ領域には微細な亀裂が見える。
- 炉心溶融物の冷却過程での相分離によって生じた組織とは異なる過程で生成した粒子である可能性がある。



TEM像



元素分析結果



## タイプ II 粒子 (蒸発・凝縮過程)

- Uリッチ (低Zr) 組成から蒸発過程が関与したと推定 (Zrは難揮発性)。
- 蒸発成分の凝縮によって100nmオーダーの微粒子が生成し、二次凝集過程を経てミクロン粒子に成長したと推定。

## タイプ I 粒子 (液滴固化過程)

- 炉心溶融物の落下時等に発生した飛沫が固化したものと推定。
- $(U,Zr)O_2$ 、 $(Zr,U)O_2$ 、 $\alpha-Zr(O)$ などの組成や組織は燃料デブリ本体に近い可能性がある。

2号機オペレーティングフロアでは、両方のタイプの粒子が見つかっており、建屋内の $\alpha$ 汚染には、タイプ I 粒子だけではなく、タイプ II 粒子も係わっている可能性がある。

# 10. TEM分析の結果の概要 (PCV内サンプル)

- サンプル毎に化学組成が異なっており、Uが主体の酸化物のもの、Zrリッチ酸化物を含むもの、 $\alpha$ -Zr(O)を含むものが見られる。
- 3号機のサンプルには空隙や微細な亀裂を伴うものがある。これらは他の号機で観察されている炉心溶融物の冷却過程において相分離したと見られるサンプルとは組織が異なっている。

	① 1号機PCV	② 2号機PCV	③ 3号機PCV
Uが主体 ( $UO_2$ 又は (U,Zr) $O_2$ )			
(U,Zr) $O_2$ +(Zr,U) $O_2$		2018年度分析 	
(U,Zr) $O_2$ + $\alpha$ -Zr (O)			

注：縮尺は図により異なる

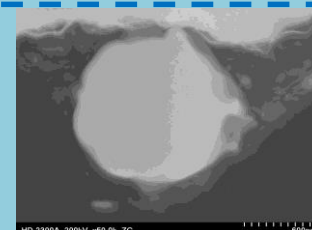
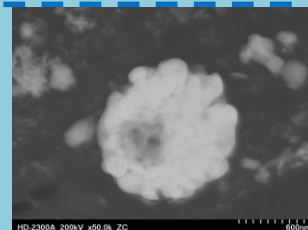
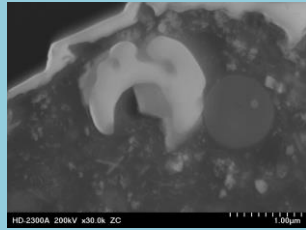
# 11. TEM分析の結果の概要 (2号機オペレーティングフロアサンプル) **TEPCO**

- Uリッチで、ほとんどZrを含まない粒子では、蒸発・凝縮過程で生成した可能性を示す球状の特徴的な粒子が観察されている (タイプ II)。
- Zrを相当量含む粒子は、炉心溶融物から派生した可能性があり、不定形のものも観察されている (タイプ I)。

## © 2号機原子炉建屋オペレーティングフロア

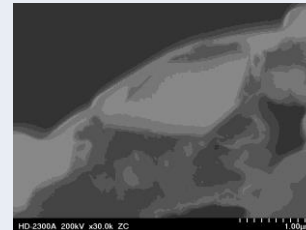
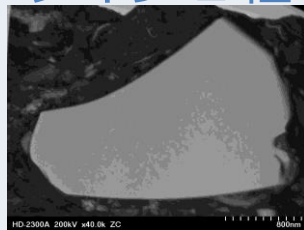
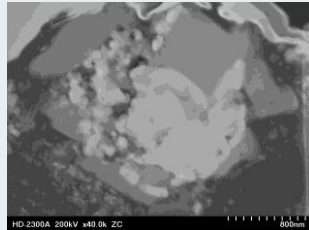
2018年度分析

Uが主体  
( $\text{UO}_2$ 又は  
( $\text{U,Zr})\text{O}_2$ )

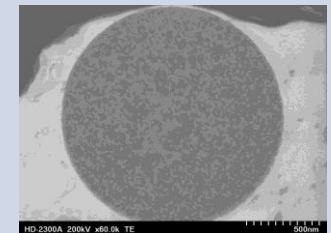


タイプ II 粒子

( $\text{U,Zr})\text{O}_2$   
+ ( $\text{Zr,U})\text{O}_2$



Feが主体



注：縮尺は図により異なる

ウラン含有粒子に着目したSEM-TEM分析を実施し、以下の知見を得た。

ウラン含有粒子には、炉心溶融物から派生した粒子（タイプⅠ）や、蒸発凝縮過程で生成した粒子（タイプⅡ）と推定されるものが存在することが確認された。

- 燃料デブリにはタイプⅠ粒子と同様の組成、組織を持つものがある可能性がある。
- 建屋内の $\alpha$ 汚染（アクチニド挙動）には、タイプⅠ粒子だけでなく、タイプⅡ粒子も関わっている可能性がある。

現在、ペDESTAL内の燃料デブリからの少量サンプリングについての検討を進めている。今回実施したような格納容器内等のサンプル分析の結果、及び、分析を通じて得られるサンプル取扱いの経験は、こうした燃料デブリサンプルの分析や取扱い方法の検討に活用していくものと考えている。

試料名	試料の詳細
XM17013	2号機TIP案内管閉塞物
XM17023	
XM170313	
XM170412	
XM17082	
XM17093	2号機原子炉格納容器内部調査装置付着物 (制御棒交換レーン領域アクセス時)

試料名	試料の詳細
XM17102	3号機原子炉格納容器内部調査装置付着物
XM18011	2号機原子炉格納容器内部調査装置付着物 (ペDESTAL領域アクセス時カメラ部付着物)
XM18021	2号機原子炉建屋オペレーティングフロア壁面スミア
XM18031	
XM18041	
XM18051	2号機原子炉建屋オペレーティングフロア床面スミア

参考2～5までの測定結果に関する注記

**γスペクトル測定:**

(1) <LOD (Limit of detection) : 検出限界未満

**αスペクトル測定:**

(1) 試料毎の検出効率の補正は実施していない。

(2) <LOD (Limit of detection) : 検出限界未満

(3) 5.1MeV、5.4MeV及び5.7MeVのピークをそれぞれPu-239、Am-241及びCm-244と仮定し、スペクトルから定量した時の値である。5.1 MeV及び5.4 MeVのピークは、それぞれPu-239+Pu-240及びPu-238+Am-241の混合ピークであり、燃焼燃料に含まれる核種毎の放射能の計算結果(西原ら、2012)から、混合ピークを構成する核種間では放射エネルギーに大きな差はない。そのため、α線核種の含有量を過少評価しないために、比放射能が小さいPu-239及びAm-241で定量を実施した。5.7 MeVのピークはCm-243+Cm-244の混合ピークであるが同計算結果(西原ら、2012)から、Cm-244の放射エネルギーがCm-243の放射能よりも2桁大きいことから、5.7 MeVのピークはCm-244で定量を実施した。

※(西原ら、2012):西原ら."福島第一原子力発電所の燃料組成評価", JAEA-Data/Code 2012-018, 2012.

**ICP-MS測定結果:**

(1) <LOQ (Limit of quantitation) : 定量下限未満

(2) 下線部付きの数値は検量線を超え、外挿により評価しているため、参考値とする。

(3) 表に示す質量数以外の多数の質量数においても、有意なカウントが得られたが、分子イオンを検出している可能性が高い、または、複数の元素を検出しているために定量値を示すことができないとの理由により、表中に記載しなかった。

試料	浸漬条件	γ線分析核種 (ng)										α線分析核種 (ng)		
		Mn-54	Co-60	Rh-106	Sb-125	Cs-134	Cs-137	Ce-144	Eu-154	Eu-155	Am-241	Pu-239	Am-241	Cm-244
XM17013	水浸漬	< LOD	$6.5 \pm 0.9 \times 10^{-3}$	< LOD	< LOD	$2.7 \pm 0.5 \times 10^{-3}$	$3.9 \pm 0.4 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$8.9 \pm 0.6 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	$2.6 \pm 0.2 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	$4.1 \pm 0.8 \times 10^{-3}$	$5.1 \pm 0.5 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$1.36 \pm 0.09 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD
	浸漬後試料	$2.0 \pm 0.1 \times 10^1$	$4.4 \pm 0.3 \times 10^1$	< LOD	< LOD	$1.5 \pm 0.1 \times 10^1$	$2.3 \pm 0.2 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD	$1.7 \pm 0.2 \times 10^1$			
XM17023	水浸漬	< LOD	$6.1 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	< LOD	< LOD	$5.9 \pm 0.9 \times 10^{-3}$	$8.3 \pm 0.8 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$3.9 \pm 0.3 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	$3.7 \pm 0.2 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	$2.4 \pm 0.7 \times 10^{-3}$	$3.0 \pm 0.3 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$8.0 \pm 0.6 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	浸漬後試料	$3.3 \pm 0.2 \times 10^1$	$7.3 \pm 0.4 \times 10^1$	< LOD	< LOD	$9 \pm 1 \times 10^2$	$1.2 \pm 0.1 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD	$2.7 \pm 0.2 \times 10^1$			
XM170313	水浸漬	< LOD	$2.9 \pm 0.6 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	$3.4 \pm 0.5 \times 10^{-3}$	$5.0 \pm 0.5 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$7.6 \pm 0.5 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	$1.6 \pm 0.2 \times 10^{-2}$	< LOD	< LOD	$2.1 \pm 0.6 \times 10^{-3}$	$3.8 \pm 0.4 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$5.9 \pm 0.4 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	浸漬後試料	< LOD	$4.5 \pm 0.3 \times 10^0$	< LOD	< LOD	$2.2 \pm 0.5 \times 10^{-2}$	$2.7 \pm 0.3 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD	$5.3 \pm 0.3 \times 10^1$			
XM170412	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	$8.4 \pm 0.8 \times 10^{-2}$	$1.1 \pm 0.1 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD	$9.8 \pm 0.7 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	$6.1 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	< LOD	< LOD	$1.7 \pm 0.2 \times 10^{-2}$	$2.2 \pm 0.2 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD	$1.7 \pm 0.1 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD
	浸漬後試料	$4.5 \pm 0.4 \times 10^1$	$3.7 \pm 0.2 \times 10^0$	< LOD	< LOD	$6.3 \pm 0.6 \times 10^1$	$9.0 \pm 0.8 \times 10^1$	< LOD	< LOD	< LOD	$1.4 \pm 0.1 \times 10^1$			
XM17082	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	$5.3 \pm 0.7 \times 10^{-3}$	$7.4 \pm 0.7 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$6.1 \pm 0.4 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	$5.3 \pm 0.7 \times 10^{-3}$	$9.2 \pm 0.9 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$9.7 \pm 0.7 \times 10^0$	$2.8 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-2}$	< LOD
	浸漬後試料	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	$2.5 \pm 0.3 \times 10^{-2}$	$4.8 \pm 0.4 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD	$6.1 \pm 0.4 \times 10^1$			
XM17093	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	$6 \pm 1 \times 10^{-2}$	< LOD	< LOD	< LOD	$1.9 \pm 0.2 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	$1.5 \pm 0.2 \times 10^{-2}$	$1.7 \pm 0.2 \times 10^{-8}$	$1.7 \pm 0.2 \times 10^{-2}$	$4.8 \pm 0.6 \times 10^{-3}$	$5.7 \pm 0.6 \times 10^{-1}$	< LOD	$1.0 \pm 0.3 \times 10^{-2}$	$5.7 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	$2.2 \pm 0.2 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	浸漬後試料	< LOD	$3.5 \pm 0.2 \times 10^{-1}$	$3.2 \pm 0.2 \times 10^{-7}$	$3.9 \pm 0.3 \times 10^{-1}$	$1.6 \pm 0.2 \times 10^{-1}$	$2.5 \pm 0.2 \times 10^1$	$8.9 \pm 0.5 \times 10^{-1}$	$1.6 \pm 0.1 \times 10^1$	$4.2 \pm 0.2 \times 10^0$	$6.4 \pm 0.4 \times 10^2$			
XM17102	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	$3.1 \pm 0.5 \times 10^{-3}$	$5.5 \pm 0.5 \times 10^{-1}$	< LOD	< LOD	< LOD	$5.5 \pm 0.4 \times 10^0$	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	$2.0 \pm 0.2 \times 10^{-2}$	< LOD	$4.2 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	$1.5 \pm 0.2 \times 10^{-2}$	$2.0 \pm 0.2 \times 10^0$	$1.1 \pm 0.1 \times 10^{-2}$	$2.1 \pm 0.1 \times 10^{-1}$	< LOD	$6.1 \pm 0.4 \times 10^1$	$5.5 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-5}$
	浸漬後試料	< LOD	$4.8 \pm 0.3 \times 10^{-1}$	$1.7 \pm 0.1 \times 10^{-6}$	$7.1 \pm 0.4 \times 10^0$	$1.1 \pm 0.1 \times 10^1$	$1.8 \pm 0.2 \times 10^3$	$5.2 \pm 0.3 \times 10^{-1}$	$1.50 \pm 0.09 \times 10^1$	$3.9 \pm 0.2 \times 10^0$	$9.5 \pm 0.6 \times 10^2$			

試料	浸漬条件	γ線分析核種 (ng)				
		Co-60	Sb-125	Cs-134	Cs-137	Eu-154
XM18011	水浸漬	< LOD	< LOD	$2.1 \pm 0.4 \times 10^{-4}$	$3.8 \pm 0.9 \times 10^{-2}$	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	$8.6 \pm 0.9 \times 10^{-3}$	< LOD
	浸漬後試料	$1.9 \pm 0.3 \times 10^{-5}$	< LOD	< LOD	$7.9 \pm 0.8 \times 10^{-4}$	$4.6 \pm 0.4 \times 10^{-5}$
XM18021	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	$4.8 \pm 0.8 \times 10^{-3}$	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	$3.9 \pm 0.8 \times 10^{-3}$	< LOD
	浸漬後試料	< LOD	< LOD	$2.0 \pm 0.7 \times 10^{-6}$	$2.9 \pm 0.4 \times 10^{-4}$	< LOD
XM18031	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	$7 \pm 1 \times 10^{-3}$	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	< LOD	$1.2 \pm 0.4 \times 10^{-4}$	$2.7 \pm 0.3 \times 10^{-2}$	< LOD
	浸漬後試料	< LOD	$2.5 \pm 0.2 \times 10^{-4}$	$5.7 \pm 0.6 \times 10^{-5}$	$1.01 \pm 0.09 \times 10^{-2}$	< LOD
XM18041	水浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
	硝酸浸漬	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
	浸漬後試料	< LOD	< LOD	< LOD	$1.6 \pm 0.2 \times 10^{-4}$	< LOD
XM18051	水浸漬	< LOD	$5 \pm 2 \times 10^{-4}$	$1.7 \pm 0.2 \times 10^{-3}$	$3.1 \pm 0.3 \times 10^{-1}$	< LOD
	硝酸浸漬	$1.3 \pm 0.3 \times 10^{-3}$	$5.3 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	$4.4 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	$7.4 \pm 0.7 \times 10^0$	< LOD
	浸漬後試料	$1.3 \pm 0.1 \times 10^{-3}$	$9.1 \pm 0.5 \times 10^{-2}$	$4.8 \pm 0.4 \times 10^{-2}$	$8.4 \pm 0.8 \times 10^0$	< LOD



参考 4/5 : ICP-MS分析結果 (イオン交換水、 単位:ng)

	Li-6	Li-7	B-10	B-11	Na-23	Mg-24	Mg-25	Mg-26	Al-27	Ca-43	Ca-44	Ti-49	V-51	Cr-52	Cr-53	Mn-55	Fe-56
XM17013	5.5×10 <sup>-1</sup>	4.0×10 <sup>0</sup>	5.1×10 <sup>1</sup>	2.2×10 <sup>2</sup>	1.9×10 <sup>4</sup>	1.7×10 <sup>3</sup>	1.8×10 <sup>2</sup>	2.1×10 <sup>2</sup>	4.6×10 <sup>2</sup>	7.4×10 <sup>0</sup>	1.7×10 <sup>2</sup>	3.3×10 <sup>-1</sup>	3.3×10 <sup>-1</sup>	8.1×10 <sup>1</sup>	8.6×10 <sup>0</sup>	1.8×10 <sup>1</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>
XM17023	< LOQ	5.8×10 <sup>0</sup>	4.7×10 <sup>1</sup>	2.0×10 <sup>2</sup>	1.9×10 <sup>4</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	3.0×10 <sup>2</sup>	3.5×10 <sup>2</sup>	1.0×10 <sup>3</sup>	1.2×10 <sup>1</sup>	3.2×10 <sup>2</sup>	4.6×10 <sup>-1</sup>	5.6×10 <sup>-1</sup>	7.5×10 <sup>1</sup>	8.7×10 <sup>0</sup>	4.6×10 <sup>1</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>
XM170313	< LOQ	2.5×10 <sup>0</sup>	4.7×10 <sup>1</sup>	1.9×10 <sup>2</sup>	1.9×10 <sup>4</sup>	1.7×10 <sup>3</sup>	1.8×10 <sup>2</sup>	2.0×10 <sup>2</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>	6.7×10 <sup>0</sup>	1.5×10 <sup>2</sup>	< LOQ	3.4×10 <sup>-1</sup>	3.7×10 <sup>1</sup>	4.2×10 <sup>0</sup>	8.1×10 <sup>0</sup>	< LOQ
XM170412	< LOQ	5.2×10 <sup>0</sup>	4.4×10 <sup>1</sup>	2.1×10 <sup>2</sup>	2.2×10 <sup>4</sup>	1.8×10 <sup>3</sup>	1.9×10 <sup>2</sup>	2.1×10 <sup>2</sup>	8.5×10 <sup>2</sup>	6.9×10 <sup>0</sup>	1.6×10 <sup>2</sup>	2.9×10 <sup>-1</sup>	2.0×10 <sup>-1</sup>	1.1×10 <sup>1</sup>	< LOQ	1.0×10 <sup>1</sup>	< LOQ
XM17082	< LOQ	2.7×10 <sup>0</sup>	4.9×10 <sup>1</sup>	2.1×10 <sup>2</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	4.3×10 <sup>3</sup>	4.7×10 <sup>2</sup>	6.0×10 <sup>2</sup>	1.2×10 <sup>3</sup>	2.1×10 <sup>1</sup>	5.6×10 <sup>2</sup>	5.2×10 <sup>-1</sup>	7.8×10 <sup>-1</sup>	1.4×10 <sup>1</sup>	< LOQ	6.3×10 <sup>1</sup>	< LOQ
XM17093	1.1×10 <sup>0</sup>	7.9×10 <sup>0</sup>	6.7×10 <sup>1</sup>	2.5×10 <sup>2</sup>	1.3×10 <sup>3</sup>	1.6×10 <sup>3</sup>	1.8×10 <sup>2</sup>	2.0×10 <sup>2</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>	3.5×10 <sup>0</sup>	3.6×10 <sup>1</sup>	4.8×10 <sup>-1</sup>	9.5×10 <sup>-1</sup>	2.8×10 <sup>1</sup>	2.5×10 <sup>0</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	< LOQ
XM17102	2.4×10 <sup>1</sup>	2.9×10 <sup>2</sup>	1.2×10 <sup>2</sup>	5.2×10 <sup>2</sup>	3.0×10 <sup>4</sup>	3.2×10 <sup>3</sup>	3.5×10 <sup>2</sup>	4.0×10 <sup>2</sup>	1.1×10 <sup>3</sup>	1.7×10 <sup>1</sup>	4.5×10 <sup>2</sup>	5.7×10 <sup>-1</sup>	1.0×10 <sup>0</sup>	2.0×10 <sup>1</sup>	< LOQ	4.2×10 <sup>1</sup>	< LOQ
	Fe-57	Co-59	Ni-60	Ni-61	Ni-62	Cu-63	Cu-65	Zn-66	Zn-67	Zn-68	Sr-84	Rb-85	Sr-86	Sr-88	Y-89	Zr-91	Mo-95
XM17013	3.2×10 <sup>1</sup>	< LOQ	1.2×10 <sup>1</sup>	9.6×10 <sup>-1</sup>	1.7×10 <sup>0</sup>	2.8×10 <sup>1</sup>	1.1×10 <sup>1</sup>	2.9×10 <sup>1</sup>	< LOQ	2.0×10 <sup>1</sup>	< LOQ	3.2×10 <sup>0</sup>	4.0×10 <sup>0</sup>	3.2×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	1.5×10 <sup>2</sup>
XM17023	4.7×10 <sup>1</sup>	1.8×10 <sup>0</sup>	3.6×10 <sup>1</sup>	2.4×10 <sup>0</sup>	4.6×10 <sup>0</sup>	1.8×10 <sup>1</sup>	7.4×10 <sup>0</sup>	2.9×10 <sup>1</sup>	< LOQ	1.9×10 <sup>1</sup>	< LOQ	2.8×10 <sup>0</sup>	7.4×10 <sup>0</sup>	6.1×10 <sup>1</sup>	< LOQ	2.8×10 <sup>0</sup>	1.8×10 <sup>2</sup>
XM170313	1.6×10 <sup>1</sup>	< LOQ	7.0×10 <sup>0</sup>	6.3×10 <sup>-1</sup>	1.0×10 <sup>0</sup>	2.1×10 <sup>1</sup>	9.2×10 <sup>0</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	2.9×10 <sup>0</sup>	3.9×10 <sup>0</sup>	3.2×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	1.6×10 <sup>1</sup>
XM170412	1.4×10 <sup>1</sup>	< LOQ	6.1×10 <sup>0</sup>	7.0×10 <sup>-1</sup>	8.8×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	5.6×10 <sup>0</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	4.9×10 <sup>0</sup>	4.2×10 <sup>0</sup>	3.3×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	7.4×10 <sup>1</sup>
XM17082	3.8×10 <sup>1</sup>	1.5×10 <sup>0</sup>	8.0×10 <sup>0</sup>	1.4×10 <sup>0</sup>	1.3×10 <sup>0</sup>	2.1×10 <sup>1</sup>	1.0×10 <sup>1</sup>	2.0×10 <sup>2</sup>	2.6×10 <sup>1</sup>	1.2×10 <sup>2</sup>	8.4×10 <sup>-1</sup>	4.2×10 <sup>0</sup>	1.2×10 <sup>1</sup>	9.5×10 <sup>1</sup>	1.7×10 <sup>-2</sup>	< LOQ	2.5×10 <sup>0</sup>
XM17093	9.7×10 <sup>0</sup>	< LOQ	7.0×10 <sup>0</sup>	5.5×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	3.6×10 <sup>1</sup>	1.5×10 <sup>1</sup>	5.9×10 <sup>1</sup>	7.7×10 <sup>0</sup>	3.8×10 <sup>1</sup>	< LOQ	3.1×10 <sup>0</sup>	4.8×10 <sup>0</sup>	4.0×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ
XM17102	3.3×10 <sup>1</sup>	2.6×10 <sup>0</sup>	4.1×10 <sup>1</sup>	2.4×10 <sup>0</sup>	5.5×10 <sup>0</sup>	3.0×10 <sup>1</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	7.8×10 <sup>1</sup>	1.1×10 <sup>1</sup>	5.1×10 <sup>1</sup>	< LOQ	6.2×10 <sup>0</sup>	8.4×10 <sup>0</sup>	7.0×10 <sup>1</sup>	1.5×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	2.5×10 <sup>0</sup>
	Mo-97	Mo-98	Mo-100	Pd-105	Ag-109	Cd-110	Cd-111	Sb-121	Sb-123	Cs-133	Ba-134	Ba-135	Ba-136	Ba-137	Ba-138	La-139	Ce-140
XM17013	8.9×10 <sup>1</sup>	2.3×10 <sup>2</sup>	9.3×10 <sup>1</sup>	< LOQ	4.7×10 <sup>-2</sup>	< LOQ	1.9×10 <sup>-1</sup>	1.0×10 <sup>0</sup>	6.8×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	3.7×10 <sup>-1</sup>	1.2×10 <sup>0</sup>	1.2×10 <sup>0</sup>	2.4×10 <sup>0</sup>	1.5×10 <sup>1</sup>	8.5×10 <sup>-1</sup>	< LOQ
XM17023	1.1×10 <sup>2</sup>	2.7×10 <sup>2</sup>	1.1×10 <sup>2</sup>	1.9×10 <sup>0</sup>	1.1×10 <sup>-1</sup>	2.1×10 <sup>0</sup>	1.4×10 <sup>0</sup>	5.9×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	< LOQ	7.5×10 <sup>-1</sup>	2.4×10 <sup>0</sup>	2.3×10 <sup>0</sup>	4.9×10 <sup>0</sup>	2.4×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ
XM170313	8.9×10 <sup>0</sup>	2.3×10 <sup>1</sup>	9.5×10 <sup>0</sup>	< LOQ	1.9×10 <sup>-2</sup>	< LOQ	< LOQ	5.8×10 <sup>-1</sup>	3.9×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	4.2×10 <sup>-1</sup>	1.6×10 <sup>0</sup>	1.0×10 <sup>0</sup>	2.8×10 <sup>0</sup>	1.4×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ
XM170412	4.5×10 <sup>1</sup>	1.1×10 <sup>2</sup>	4.7×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	6.4×10 <sup>-1</sup>	6.2×10 <sup>-1</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	5.5×10 <sup>-1</sup>	5.7×10 <sup>0</sup>	1.2×10 <sup>0</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ
XM17082	1.5×10 <sup>0</sup>	3.9×10 <sup>0</sup>	1.4×10 <sup>0</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1.8×10 <sup>0</sup>	1.7×10 <sup>0</sup>	< LOQ	1.7×10 <sup>0</sup>	6.7×10 <sup>0</sup>	5.9×10 <sup>0</sup>	1.1×10 <sup>1</sup>	6.8×10 <sup>1</sup>	7.8×10 <sup>-1</sup>	< LOQ
XM17093	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1.4×10 <sup>0</sup>	1.5×10 <sup>0</sup>	< LOQ	7.0×10 <sup>-1</sup>	2.2×10 <sup>0</sup>	2.3×10 <sup>0</sup>	3.2×10 <sup>0</sup>	2.1×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ
XM17102	2.0×10 <sup>0</sup>	< LOQ	1.9×10 <sup>0</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	6.1×10 <sup>0</sup>	4.3×10 <sup>0</sup>	< LOQ	1.1×10 <sup>0</sup>	4.0×10 <sup>0</sup>	3.5×10 <sup>0</sup>	6.8×10 <sup>0</sup>	4.3×10 <sup>1</sup>	7.7×10 <sup>-1</sup>	9.4×10 <sup>-1</sup>
	Nd-144	Nd-146	Gd-155	Gd-156	Gd-158	Gd-160	Pb-206	Pb-207	Pb-208	U-234	U-235	U-236	U-238				
XM17013	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	3.7×10 <sup>1</sup>	3.4×10 <sup>1</sup>	7.9×10 <sup>1</sup>	< LOQ	5.1×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	4.1×10 <sup>1</sup>				
XM17023	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	6.0×10 <sup>0</sup>	6.0×10 <sup>0</sup>	1.4×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ				
XM170313	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1.6×10 <sup>1</sup>	1.6×10 <sup>1</sup>	3.7×10 <sup>1</sup>	< LOQ	2.3×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	1.8×10 <sup>0</sup>				
XM170412	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	5.0×10 <sup>0</sup>	4.7×10 <sup>0</sup>	1.1×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ				
XM17082	< LOQ	1.6×10 <sup>-1</sup>	4.1×10 <sup>-1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1.6×10 <sup>1</sup>	1.5×10 <sup>1</sup>	3.4×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ				
XM17093	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1.5×10 <sup>1</sup>	1.4×10 <sup>1</sup>	3.1×10 <sup>1</sup>	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ				
XM17102	1.2×10 <sup>-1</sup>	2.7×10 <sup>-1</sup>	2.2×10 <sup>-1</sup>	4.5×10 <sup>-1</sup>	5.3×10 <sup>-1</sup>	2.7×10 <sup>-1</sup>	8.3×10 <sup>0</sup>	8.1×10 <sup>0</sup>	1.8×10 <sup>1</sup>	3.7×10 <sup>-1</sup>	1.3×10 <sup>1</sup>	2.6×10 <sup>0</sup>	7.1×10 <sup>2</sup>				

