

# チェルノブイリの燃料デブリ、コリウム、 ホットパーティクルの研究：

V.G.フローピン・ラジウム研究所（KRI）の実績

**Boris Burakov**（ボリス・ブラコフ）

科学博士、研究室長

V.G.フローピン・ラジウム研究所 (KRI)  
サンクト・ペテルブルク、ロシア

電子メール: [burakov@peterlink.ru](mailto:burakov@peterlink.ru)



V.G.フローピン・ラジウム研究所の従業員160名は、チェルノブイリで1986年から1992年まで作業を行った。



## V.G.フローピン・ラジウム研究所 (KRI)

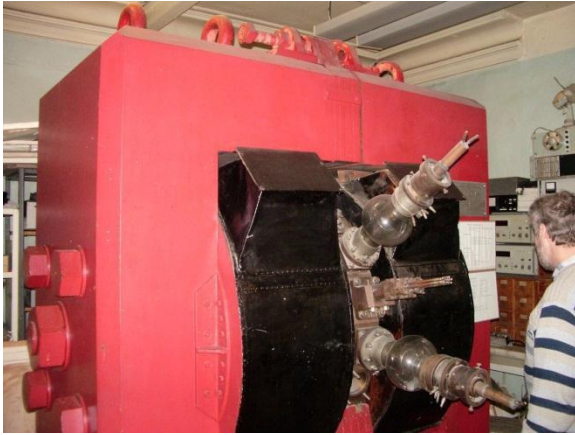
### 1922年以降の放射性物質の研究



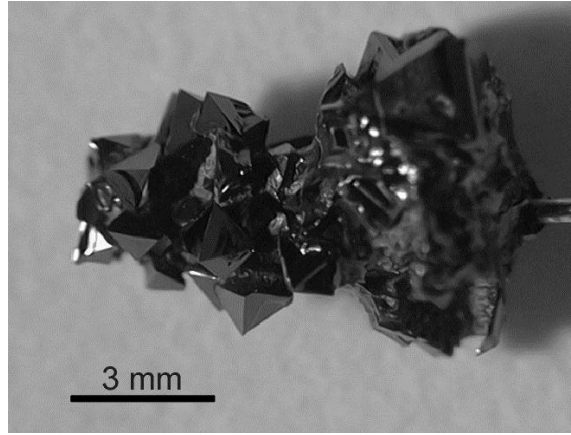
- ・1937年に初のヨーロッパサイクロトロンを建設
- ・1945年に得られたソビエトのPuを初サンプリング
- ・1945~1949年にソビエトのPuを抽出
- ・1986~1992年にチェルノブイリ調査(現在も実施)
- ・国際的な研究と訓練に利用するため、チェルノブイリの燃料デブリ、炉心溶融物、ホットパーティクルを独自に採取
- ・使用済み燃料及び液体高レベル廃棄物(HLW)を使用する研究のため、ホットセル設備を設ける
- ・アクチノイドを添加したセラミックスおよびHLWガラスの研究
- ・同位体の製造
- ・環境放射線モニタリング
- ・核廃棄物管理の分野における国際若手科学者の訓練



# V.G.フローピン・ラジウム研究所 (KRI)



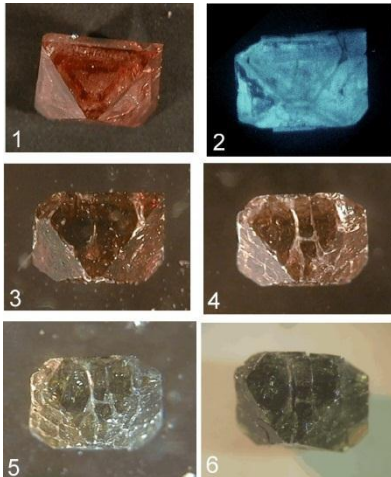
初のヨーロッパサイクロトロン(1937)



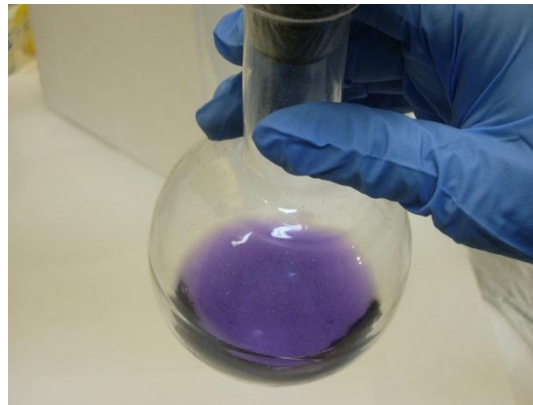
NpO<sub>2</sub>の結晶



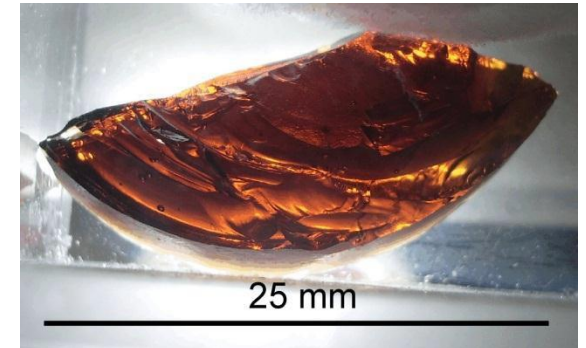
ホットセル設備



Pu-238を添加したジルコン結晶の放射線損傷効果



PuCl<sub>3</sub>の溶液



Pu-238を添加したホウケイ酸ガラス

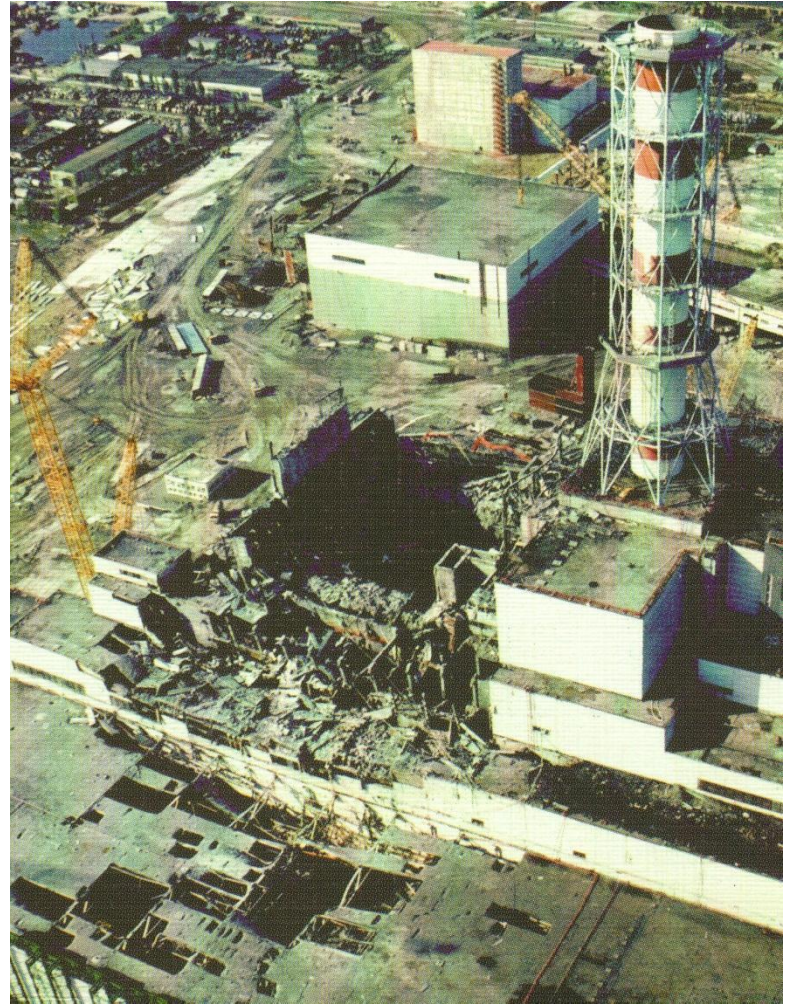
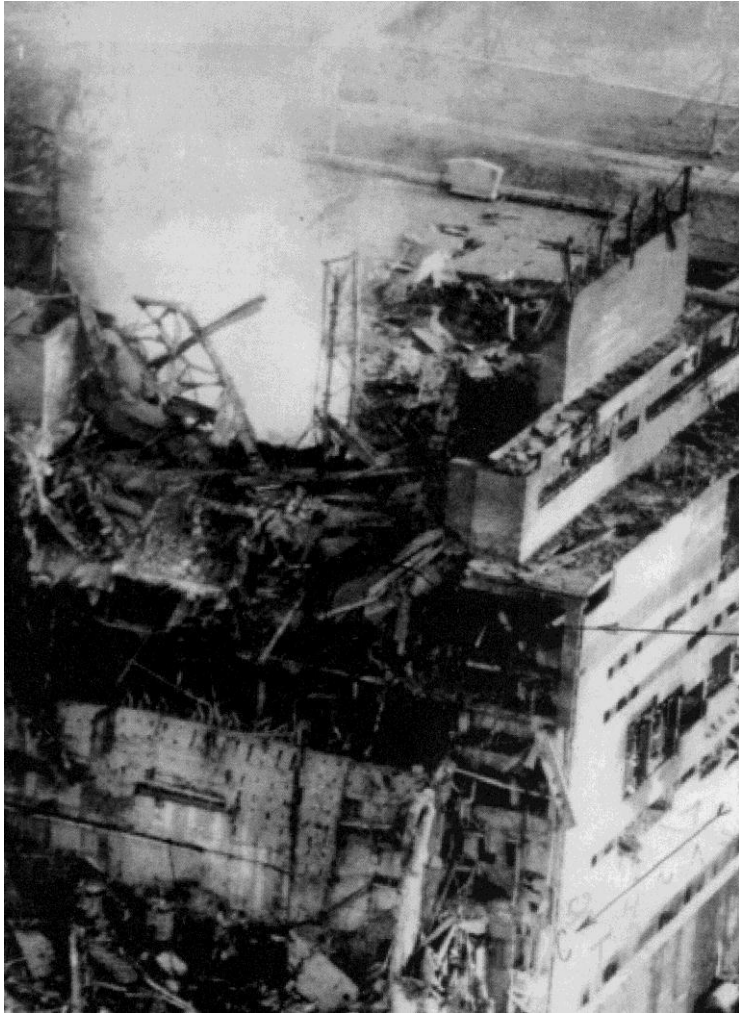
# 背景

## 基本情報

1. Chernobyl: **The Soviet Report**. Nuclear News, Vol.29, #13, Oct. 1986.
2. Боровой А.А. **Внутри и вне «Саркофага»**. Препринт КЭ ИАЭ, Чернобыль 1990. – *Borovoy A.A. Inside and outside “Sarcophagus”*. Issue of CE IAE, Chernobyl 1990 (in Russian).
3. Borovoy A.A., Galkin B.Ya., Krinitsyn A.P., Markushev V.M., Pazukhin E.M., Kheruvimov A.N., Checherov K.P. **New products formed by reaction of fuel with construction materials in the 4<sup>th</sup> block of the Chernobyl NPP**. Soviet Radiochemistry, **32**(6) (1990) 659-667.
4. Лебедев И.А., Мясоедов Б.Ф., Павлоцкая Ф.И., Френкель В.Я. **Содержание плутония в почвах европейской части страны после аварии на Чернобыльской АЭС**. Атомная Энергия, т.72, вып.6, июнь 1992, с. 593-598. – *Lebedev I.A., Myasoeodov B.F., Pavlotskaya F.I., Frenkel V.Ya. Plutonium contents in the soils of European part of USSR after accident at Chernobyl NPP*. Atomic Energy, Vol.72, #6, June 1992, pp. 593-598 (in Russian).
5. Киселев А.Н., Ненагляднов А.Ю., Сурин А.И., Чечеров К.П. **Экспериментальные исследования лавообразных топливосодержащих масс (ТСМ) на 4-м блоке ЧАЭС (по результатам исследований 1986-1991 годах)**. Препринт ИАЭ, Москва 1992 – *Kiselev A.N., Nenaglyadov A.Yu., Surin A.I., Checherov K.P. Experimental study of lava-like fuel containing masses (FCM) at 4<sup>th</sup> Unit of ChNPP (based on results obtained in 1986-1991)*. Issue of IAE, Moscow 1992 (in Russian).
6. Trotabas M., Blanc J-Y., Burakov B., Anderson E., Duco J. **Examination of Chernobyl samples. Impact on the accident scenario understanding**. Report DMT/92/309, SETIC/LECR-92/36, Report IPSN/93/02, Report RI-1-63/92, March 1993.
7. Pazukhin E.M., Fuel-containing lavas of the Chernobyl NPP 4<sup>th</sup> block – topography, physicalchemical properties, formation scenario. Radiochemistry **36**(2) (1994) 109-154.
8. Burakov B.E., Anderson E.B., Shabalev S.I., Strykanova E.E., Ushakov S.V., Trotabas M., Blanc J-Y., Winter P., Duco J. **The Behaviour of Nuclear Fuel in First Days of the Chernobyl Accident**. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX, Vol.465, 1997, 1297-1308*.
9. Burakov B.E., Anderson E.B., Strykanova E.E. **Secondary Uranium Minerals on the Surface of Chernobyl “Lava”**. *Mat. Res. Soc. Symp. Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX, Vol.465, 1997, 1309-1311*.
10. Burakov B.E., Shabalev S.I., Anderson E.B. **Principal Features of Chernobyl Hot Particles: Phase, Chemical and Radionuclide Compositions**. In S. Barany, Ed. *Role of Interfaces in Environmental Protection*, Kluwer Academic Publishers, 145-151, NATO Science Series, Earth and Environmental Sciences, Vol. 24. 2003.
11. Боровой А.А., Велихов Е.П. **Опыт Чернобыля, Часть 1**, Москва, 2012 – *Borovoy A.A., Velihov E.P. Experience of Chernobyl, Part 1, Moscow, 2012 (in Russian)*.
12. Nasirow R., Poeml P. **Gamma-ray spectrometry of Chernobyl ceramic samples**. Internal Report of JRC Institute of Transuranium Elements. Karlsruhe, 2013.

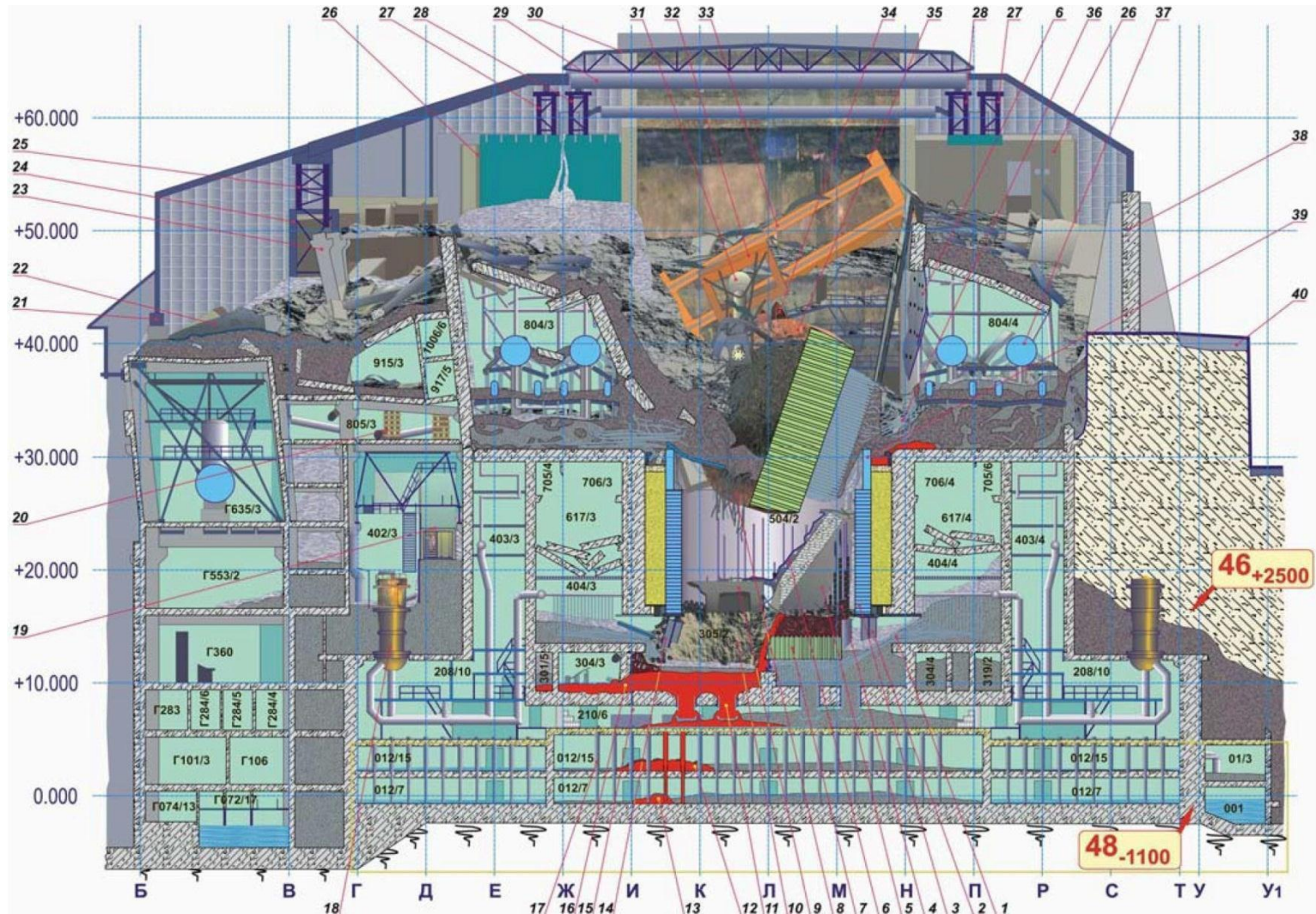


# 爆発後（当日） [11]





# チェルノブイリのシェルター一断面図 [11]



# 背景

## 一般情報

- 約3.5wt.%の使用済燃料が炉心から放出 [1,2]
- 約50kgのプルトニウムが旧ソ連欧州側に拡散[4]  
(チェルノブイリ4号機の全プルトニウム6wt.%に相当)
- 90wt.%以上の燃料がシェルター内に存在 [2]  
*この情報には議論の余地あり*
- 少なくとも11~15wt.%の（シェルター内）燃料が  
チェルノブイリの燃料デブリと関連 [5]  
*この情報には議論の余地あり*

## 背景 基本用語

- チェルノブイリの燃料デブリ：破損燃料、ジルコニウム被覆管及びケイ素化合物（コンクリート、砂、蛇紋岩）との間の高温での相互反応結果生成。ケイ素化合物富化コリウム（silicate-rich corium）ともいう。
- チェルノブイリコリウム：溶融した燃料含有材料。ケイ酸化合物の塊は含まない。
- チェルノブイリのホットパーティクル：高放射性固体粒子であり、大きさが1 $\mu$ m未満～数100 $\mu$ mのもの。

注：チェルノブイリのホットパーティクルには通常、ウランが含まれている（含まれない場合もある）



# 自然の溶岩



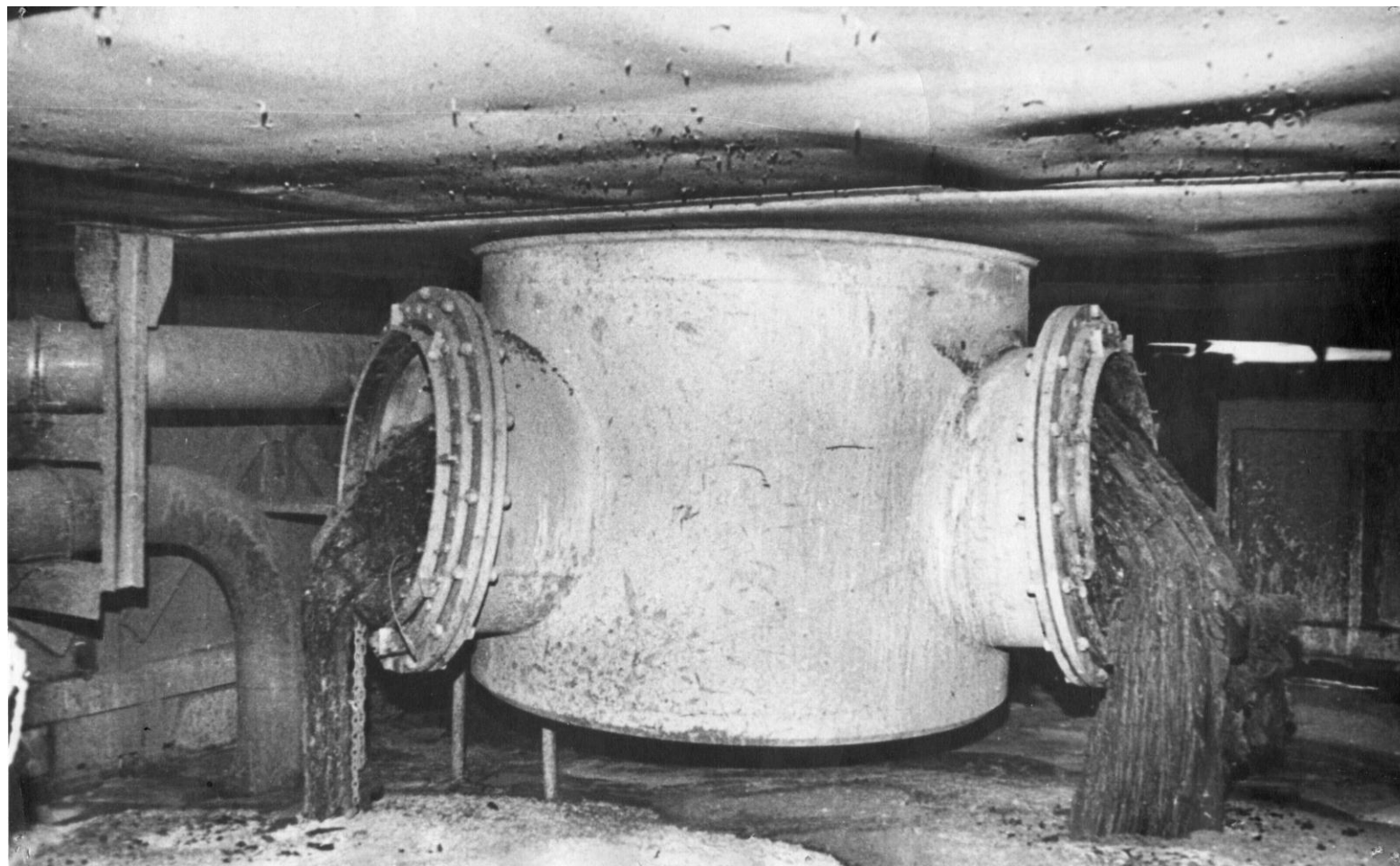
## 燃料デブリの流出、「象の足」 1990年 [2]

「象の足」の表面のガンマ線量は1990年当時、10Sv/hを超えていた。室内のガンマ線は6~7Sv/h





# 蒸気分配回廊 1990年 [2]





## 背景 一般情報

- チェルノブイリの燃料デブリは、初期のころ、非常に頑強であったため、1987年に「象の足」のサンプルを初めて採取した際には、マシンガン（AK-47）が使用された。 [2]
- 1990年、燃料デブリ塊の激減および自然崩壊が確認された。 [2]
- 同年には、燃料デブリ塊の化学的変質-二次ウラン鉱物の形成が確認された（**ウラニル相**）。 [6]

チェルノブイリの燃料デブリ表面に新たに形成された黄色の鉱物 1991年



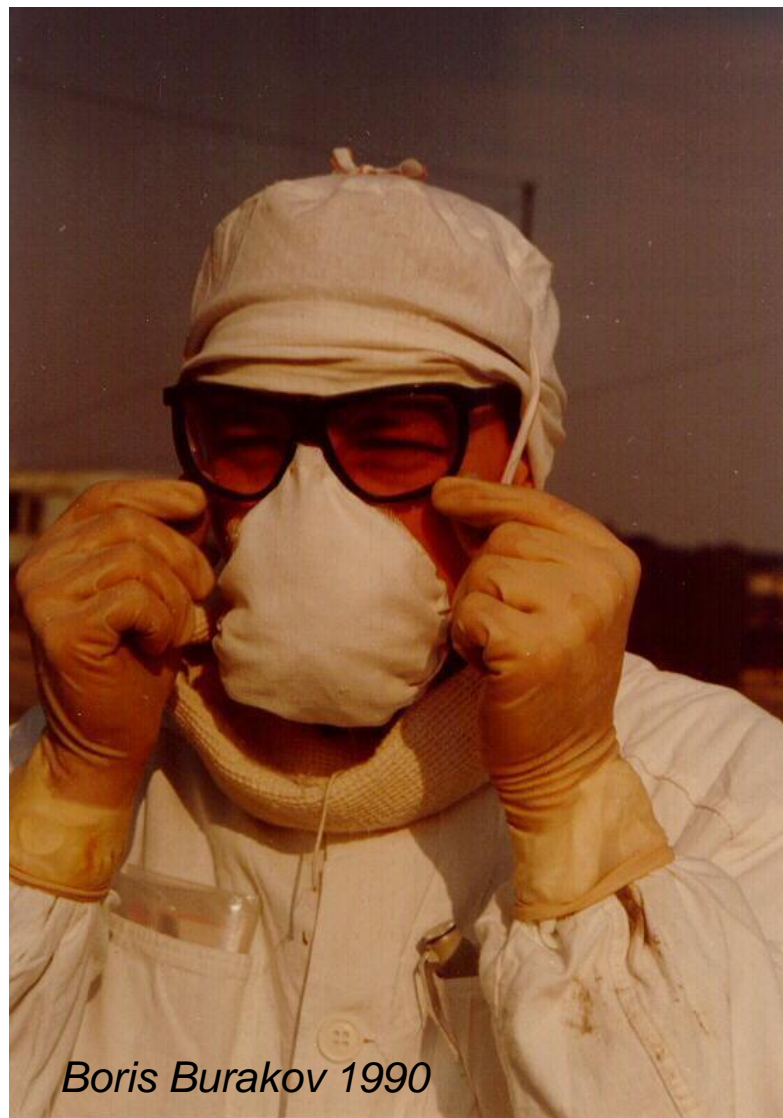
# チェルノブイリの燃料デブリのサンプル

## V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

- 燃料デブリのサンプルの多くは、1990年に複数の場所から収集された（手とハンマーのみ使用。サンプルリングに関わる人は全員、照射にさらされた。）。
- 異なるウラン相の含有物質を抽出するために一部の燃料デブリの塊（それぞれ数十立方センチ）をフッ酸に部分的に溶解した。



# シェルター内への立ち入り前 1990年



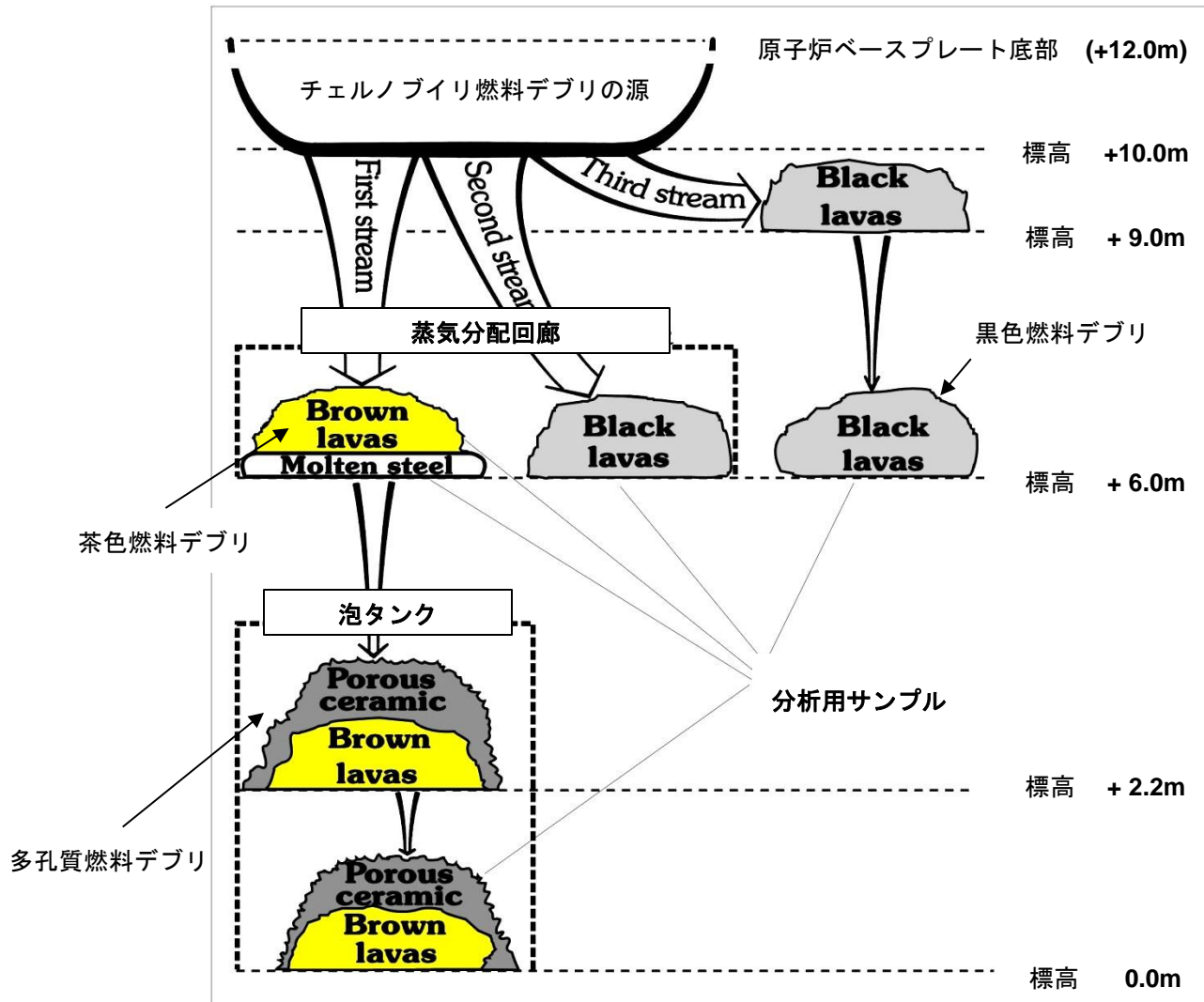
*Boris Burakov 1990*

# シェルター内：レニングラードへの輸送のために燃料デブリサンプルを梱包 1990年



写真：Boris Burakov (1990年)

# KRIシェルター内サンプリング図 [8]





# チェルノブイリの高放射性サンプルに関する 現行研究の目的

- **若手科学者への知見の伝承**
- 高放射性固体物の材料科学に関する個別の指導
- 原子力過酷事故とコリウムの挙動モデル化
- **福島原子力発電所におけるコリウムの特性モデル化**
- **HLWガラスと類似するチェルノブイリの燃料デブリ**
- コリウムと燃料デブリの化学変化により新たに形成された人工の不安定放射性の固体相
- 外観上、耐久性のある放射性核種が、主たる固体相として、新たに形成された、高い安定性を持つ結晶性の放射性固体相（燃料デブリ塊の含有物）

# 黒色燃料デブリのサンプル、「象の足」

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

1990年にサンプル採取、KRIにてラボ環境下で保管

2011年に一部の塊で部分的な自然崩壊が確認された（写真4）

写真：V. Zirlin、B. Burakov



# 茶色燃料デブリのサンプル、蒸気分配回廊

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

1990年にサンプル採取、KRIにてラボ環境下で保管

2011年撮影：V. Zirlin、B. Burakov





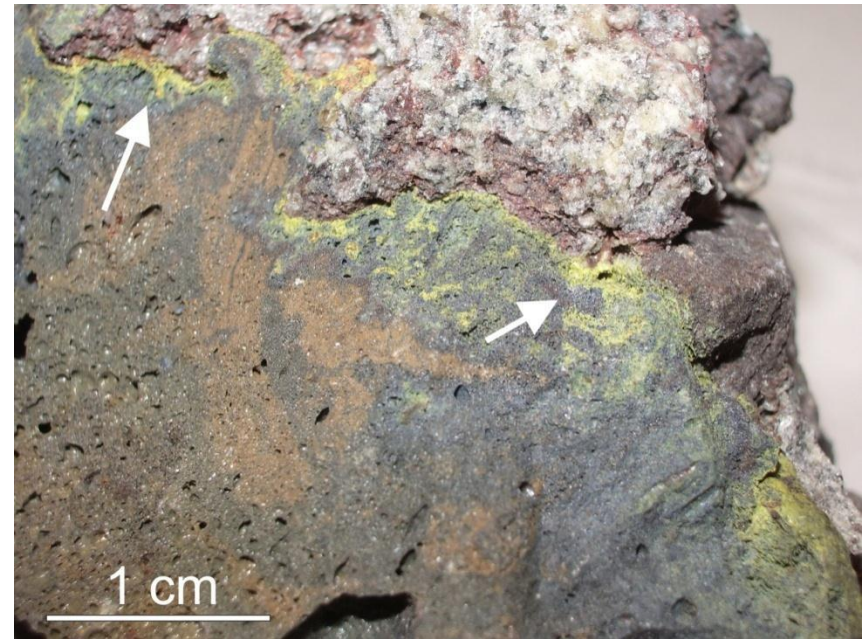
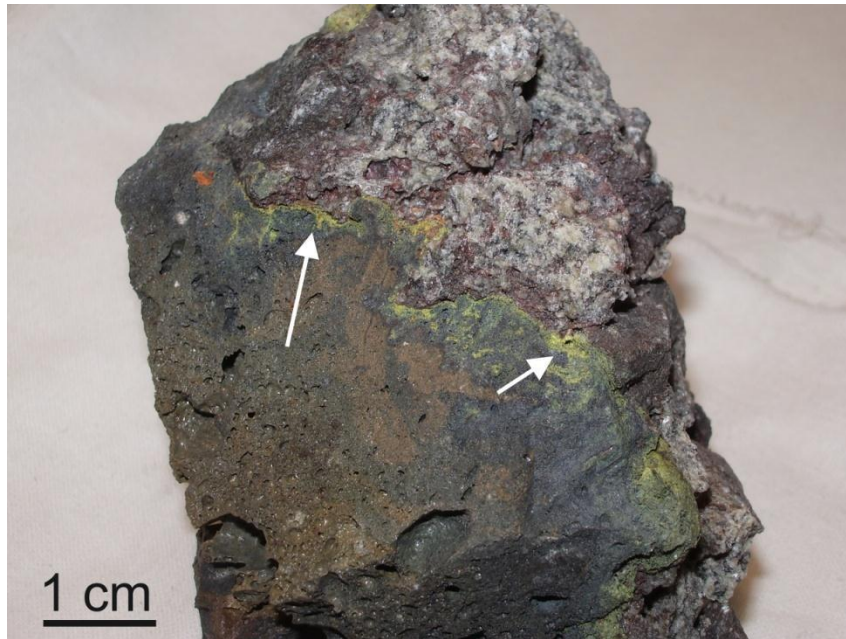
# 茶色燃料デブリのサンプル、305号室にて採取

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

1990年にサンプル収集、KRIにてラボ環境下で保管

2011年撮影：V. Zirlin、B. Burakov

ラボ環境下で二次ウラン鉱物の生成？



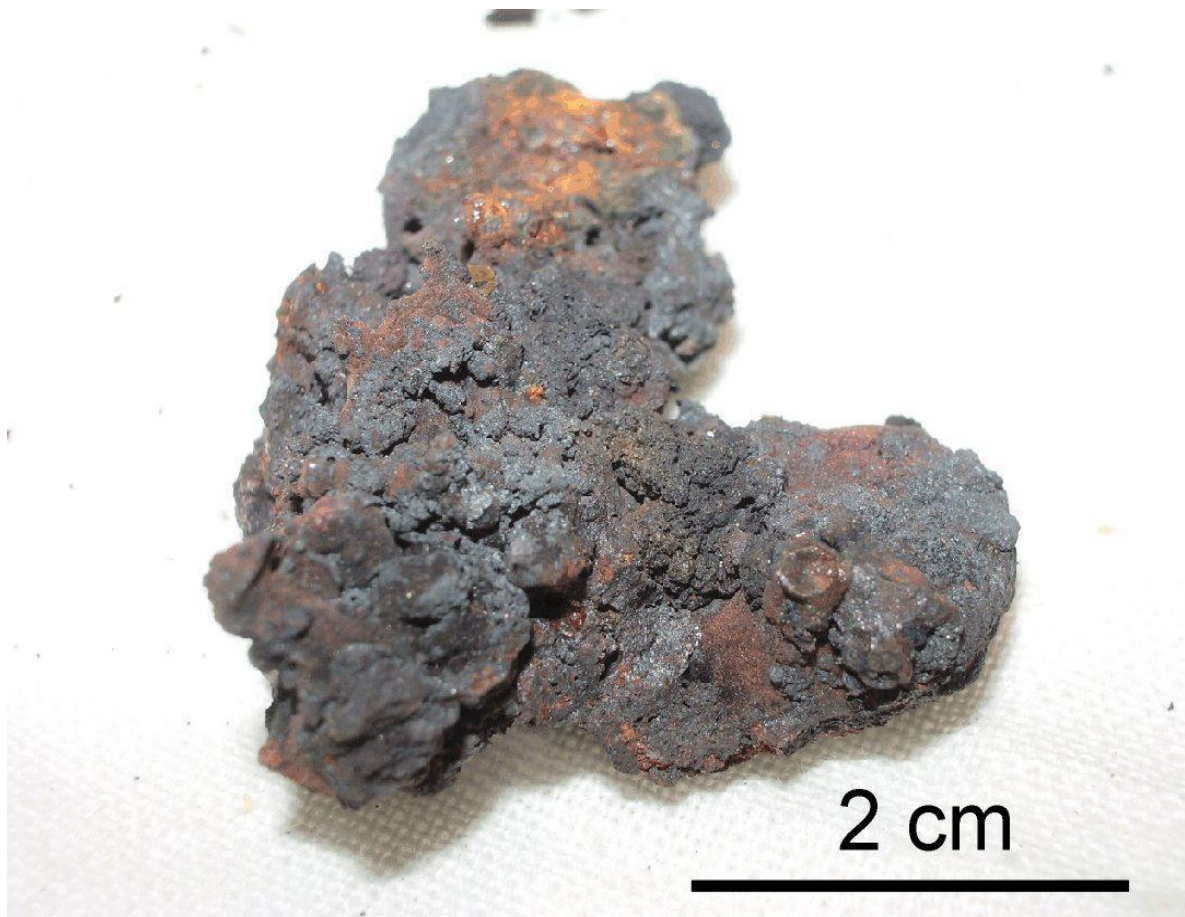
**KRIが所有するチェルノブイリサンプル  
の一部は調査が未了**

# コリウムのサンプル（溶融燃料/鋼混合物）、 305号室から採取

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

1990年にサンプル収集、KRIにてラボ環境下で保管

2011年撮影：V. Zirlin、B. Burakov





# コリウムのサンプル (鋼鉄製配管表面に付着した熔融燃料)、305号室

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

1990年にサンプル収集、KRIにてラボ環境下で保管

2011年撮影：V. Zirlin、B. Burakov

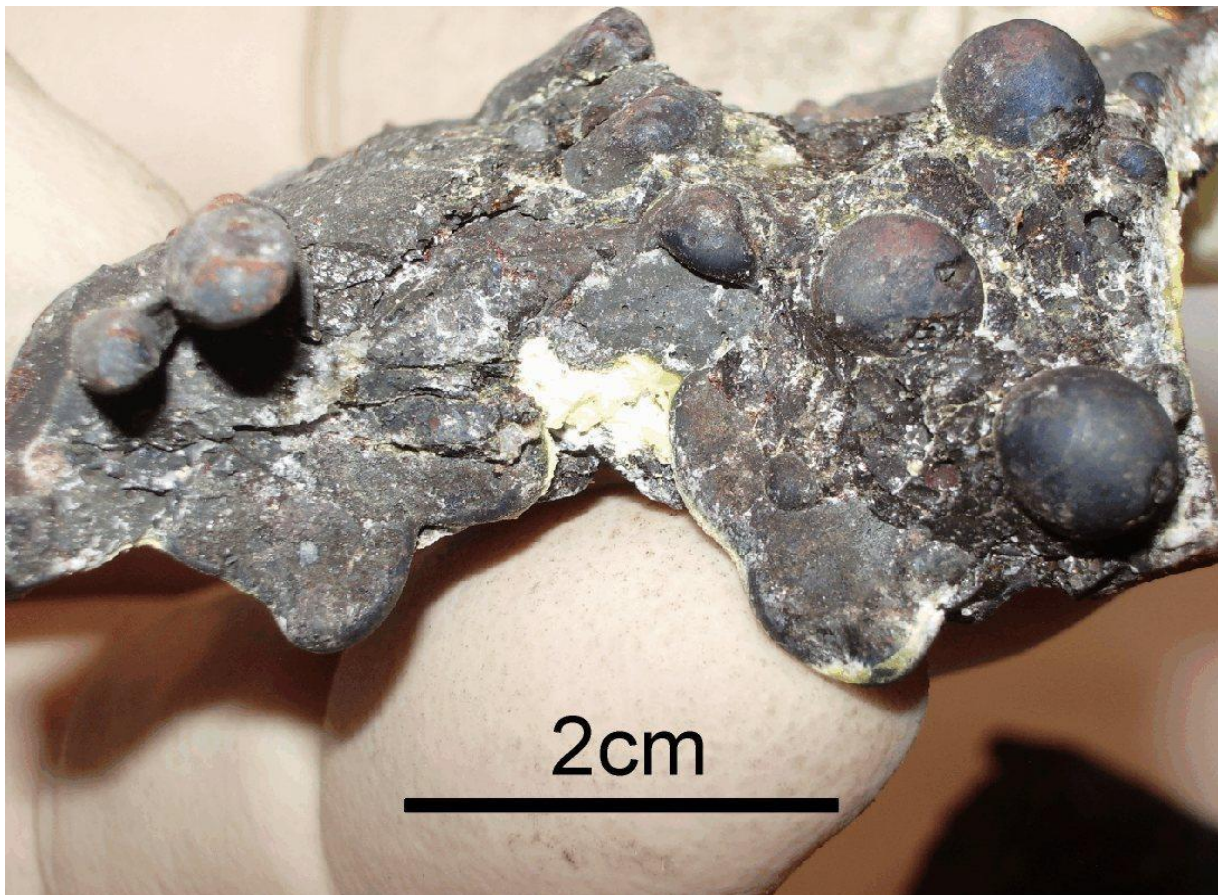


# コリウムのサンプル（溶融燃料/鋼混合物）、 「象の足」付近

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

1990年にサンプル収集、KRIにてラボ環境下で保管

2011年撮影：V. Zirlin、B. Burakov



# チェルノブイリのホットパーティクル のサンプル

V.G.フローピン・ラジウム研究所所有

- 1986年に4号機付近で採取した土壌サンプルから一部の微粒子と分離
- チェルノブイリの西側に放射能雲が拡散したエリア（4号機から0.5~12km）で1990~1991年に採取した土壌サンプルから大部分の微粒子を分離
- 燃料片と微粒子の一部は、1990年に石棺内で採取



# 「赤い森」-松の森林はチェルノブイリの放射性粒子によって枯れた 1986年6月

写真提供 *Dr. R.V. Arutyunyan (IBRAE, Russia)*





# ホットパーティクルの収集 1990年



*Boris Burakov, 1990*

# 土壌サンプルからのホットパーティクルの分離 [10]

V.G.フローピン・ラジウム研究所、収束照射ベータ・ガンマ線検出器を使用





# 分析方法

V.G.フローピン・ラジウム研究所

- 光学顕微鏡法
- SEM（BSEイメージング）
- 定量的・定性的EMPA（電子線マイクロアナライザ）
- 塊状のXRD（X線回折法）  
（二次ウラン鉱物、燃料デブリ塊から分離した鉱物包有物）
- **燃料デブリ塊から分離したホットパーティクル単体と  
鉱物包有物の精密XRD**
- **塊状分析試料とホットパーティクル単体のガンマ線スペクトロ  
メトリー**

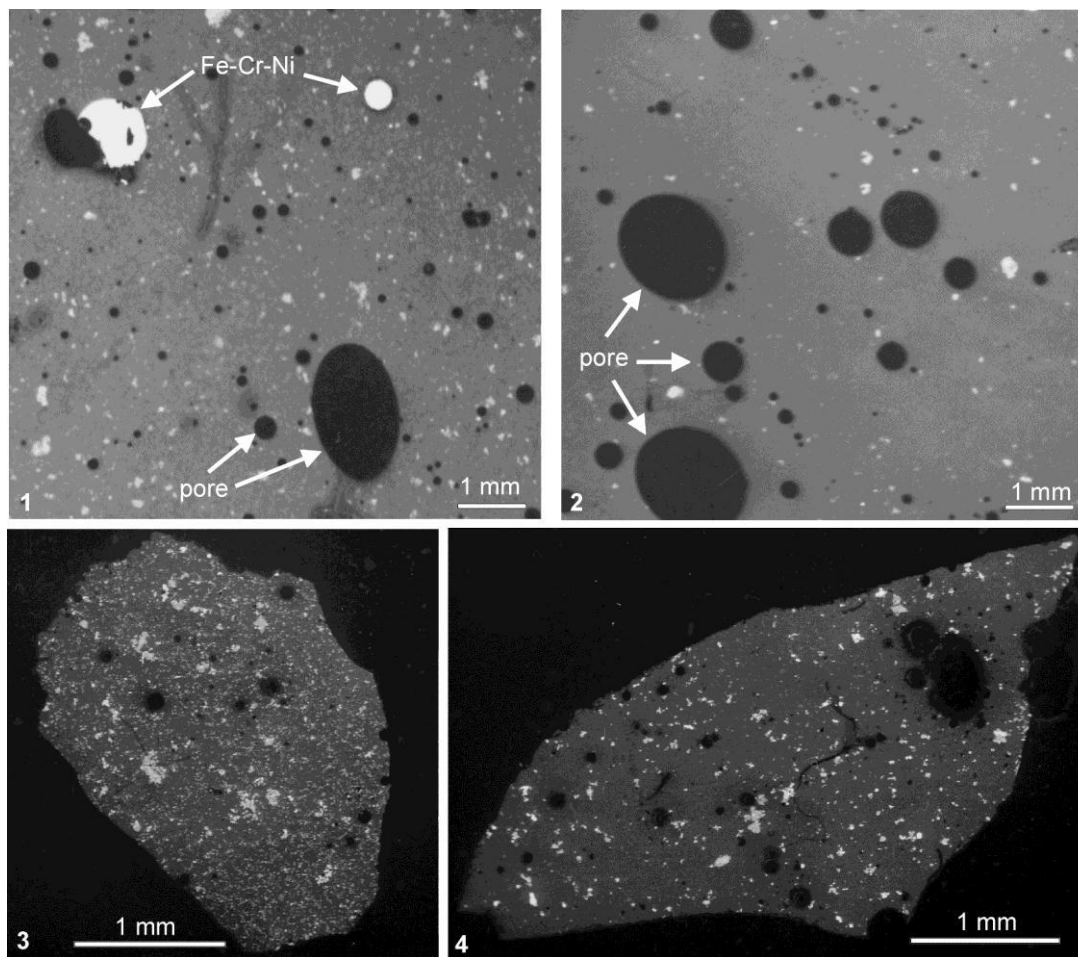
# チェルノブイリの燃料デブリ

V.G.フローピン・ラジウム研究所で  
得られた成果概要

# 研磨した燃料デブリサンプルの画像

1、2：光学顕微鏡法の反射光、3、4：SEM-BSE

- 1、3：蒸気放出回廊の茶色燃料デブリ、2：「象の足」の黒色燃料デブリ、  
4：蒸気放出回廊の黒色燃料デブリ





チェルノブイリの燃料デブリは  
ケイ酸塩**ガラス塊**と**含有物**から構成

# チェルノブイリデブリの構成放射性核種 2013年6月【12】

青色は1986年4月26日へ再計算した結果【3,7】

燃料デブリの種類	放射性核種, Bq/g						
	$^{137}\text{Cs}$	$^{144}\text{Ce}$	$^{154}\text{Eu}$	$^{244}\text{Cm}$	$^{241}\text{Am}$	$^{239,240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}$
黒色	$2 \cdot 10^7$ <i>(<math>2.3 \cdot 10^7</math>)</i>	$(2 \cdot 10^9)$	$5 \cdot 10^5$ <i>(<math>1.3 \cdot 10^6</math>)</i>	$5 \cdot 10^4$ <i>(<math>1.2 \cdot 10^7</math>)</i>	$1.2 \cdot 10^6$ <i>(<math>3.5 \cdot 10^7</math>)</i>	$8.2 \cdot 10^5$ <i>(<math>7.3 \cdot 10^7</math>)</i>	$4.3 \cdot 10^7$ <i>(<math>3.8 \cdot 10^7</math>)</i>
茶色	$4.1 \cdot 10^7$	$(2.1 \cdot 10^9)$	$1.2 \cdot 10^6$	$1.1 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^6$	$9.2 \cdot 10^5$

## チェルノブイリ燃料デブリの簡易化学組成(母材+含有物)【6,7】

燃料デブリの種類	組成内容, wt. %							
	U	Zr	Na	Fe	Mg	Ca	Si	Al
黒色	4 - 5	2 - 6	2 - 10	0.3 - 6	1 - 5	3 - 13	19 - 36	3 - 8
茶色	8 - 7	5 - 6	4	1 - 2	4	5	31 - 33	4

結晶相の混入を避けたチェルノブイリ燃料デブリのガラス状ケイ酸素母材の電子プローブ微量分析結果【6,8】

燃料デブリの種類	組成内容, wt. %								
	U	Zr	K	Na	Fe	Mg	Ca	Si	Al
黒色	2.7-4.0	3.1-3.7	1.4-2.7	0.4	0.3-6.7	1.2-3.2	5.1-7.2	28-37	2.7-4.4
茶色	2.0-2.4	2.4-2.9	1.2-2.3	0.6	0.2-0.4	3.5-4.4	4.5-8.2	37	2.8-4.0
多孔	2.9	4.0	2.3	0.5	0.2	4.5	7.5	35	3.8



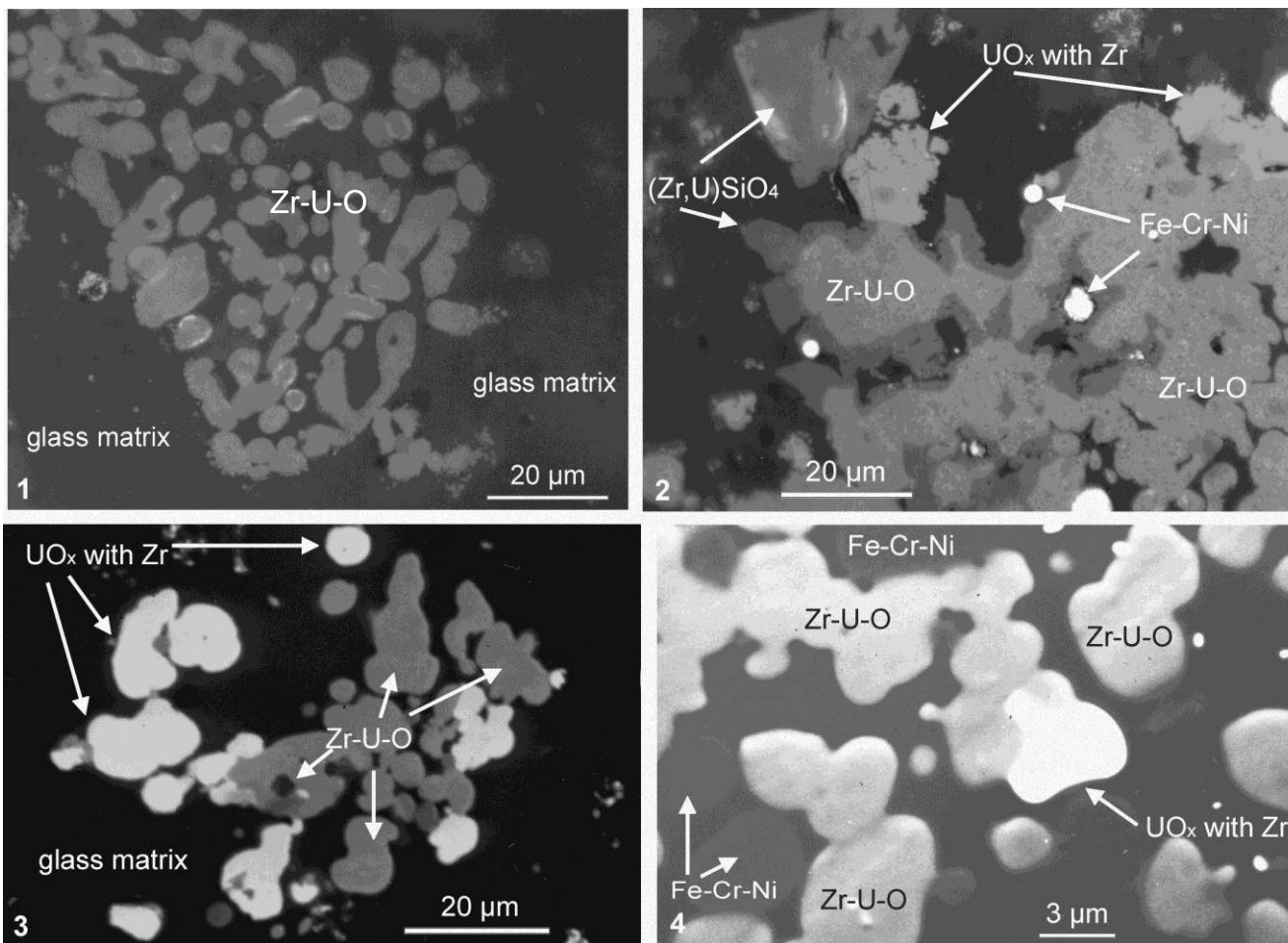
# チェルノブイリの燃料デブリの塊中の**含有物**

**多様な金属組織と化学組成！**

# 茶色燃料デブリの塊含有物 (蒸気分配回廊)

1、2：光学顕微鏡法の反射光、3、4：SEM-BSE

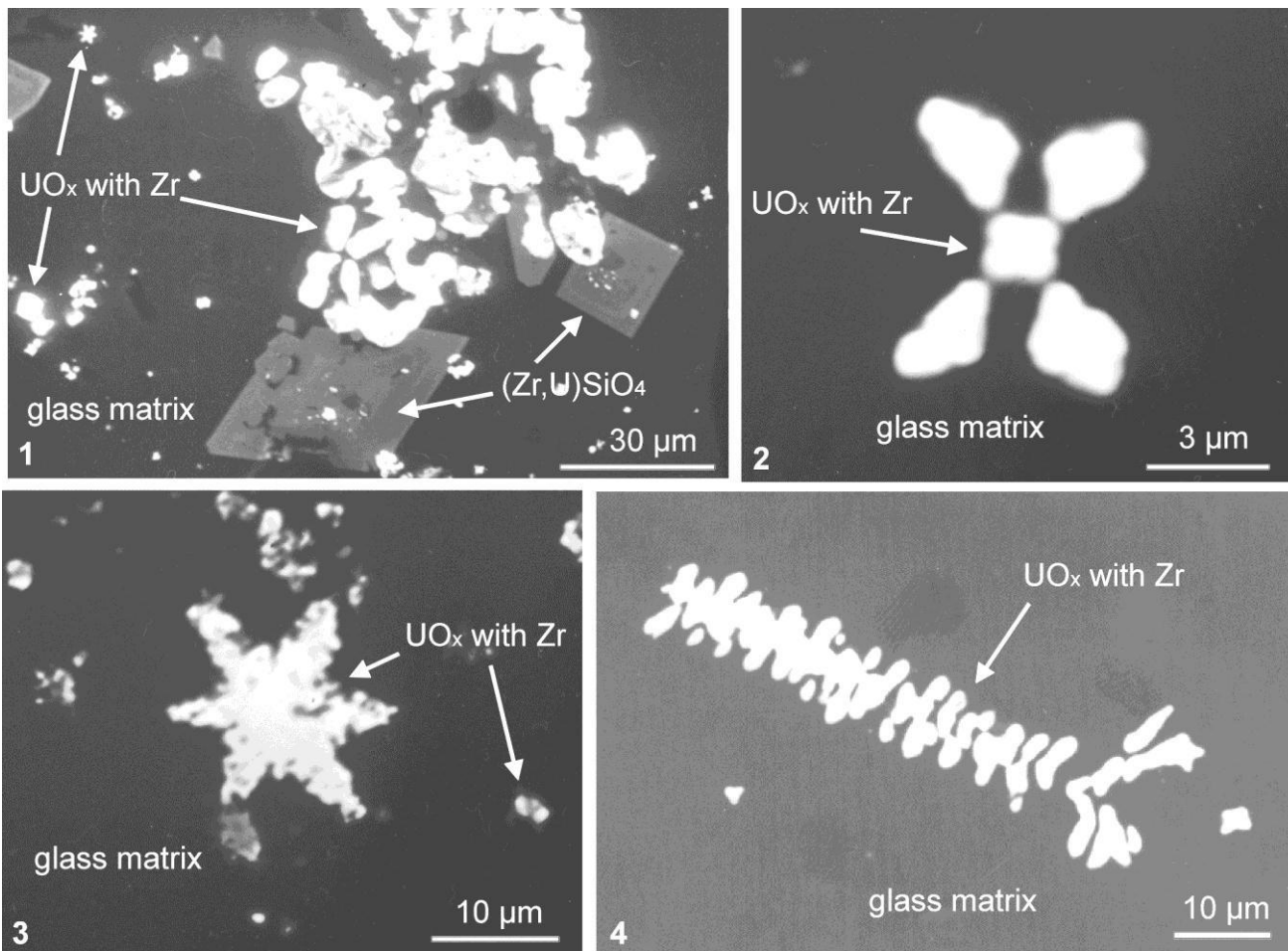
写真：Boris Burakov (1990~1991年)



# 黒色燃料デブリと茶色燃料デブリ塊中の含有物 SEM-BSE

- 1、2：蒸気分配回廊の黒色燃料デブリ、3：蒸気分配回廊の茶色燃料デブリ  
4：「象の足」の黒色燃料デブリ

写真：Boris Burakov（1990年）



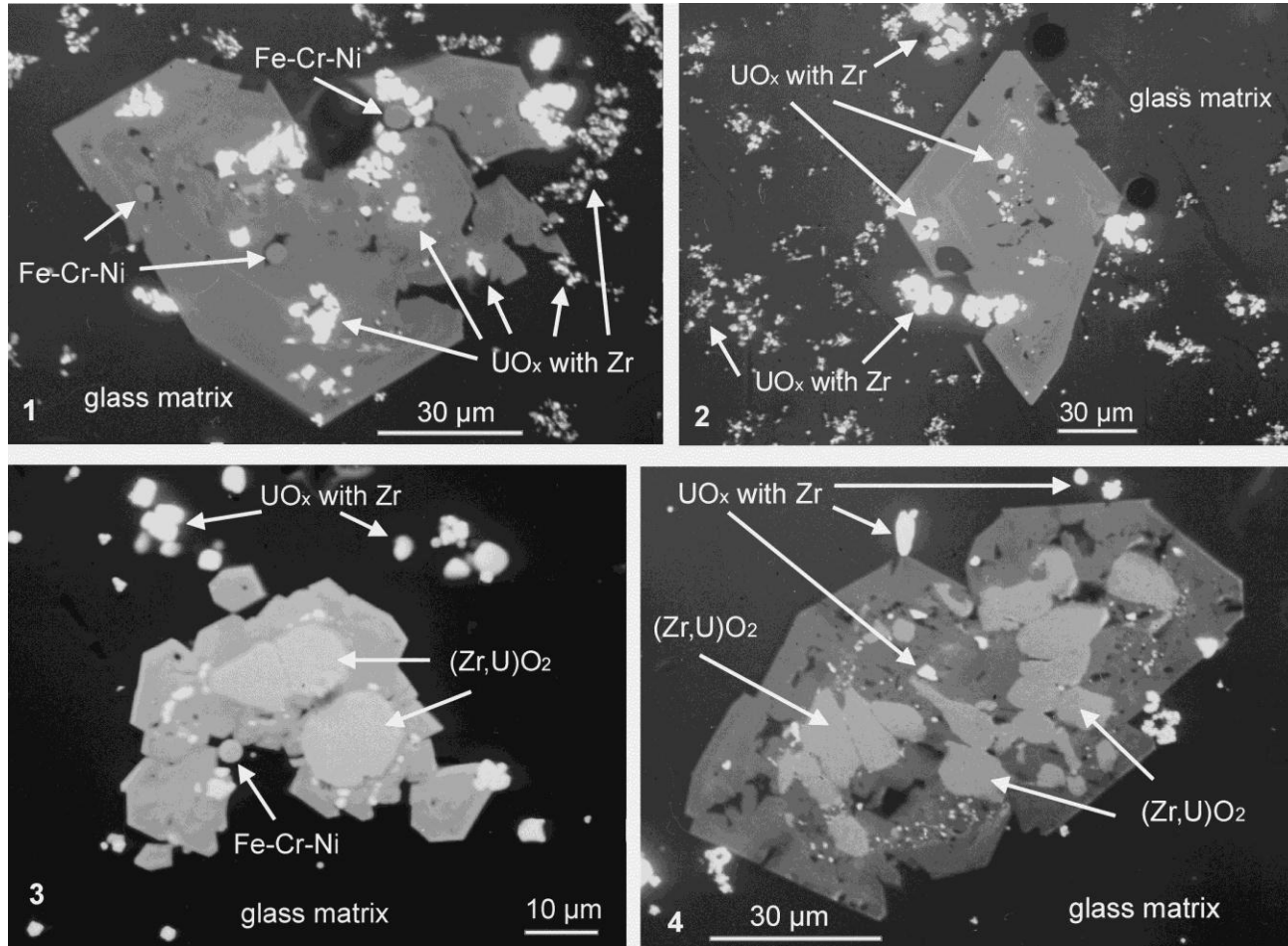
# 黒色燃料デブリと茶色燃料デブリ塊中の含有物

(蒸気分配回廊)

SEM-BSE

1、2：茶色燃料デブリ、3、4：黒色燃料デブリ

写真：Boris Burakov (1990年)





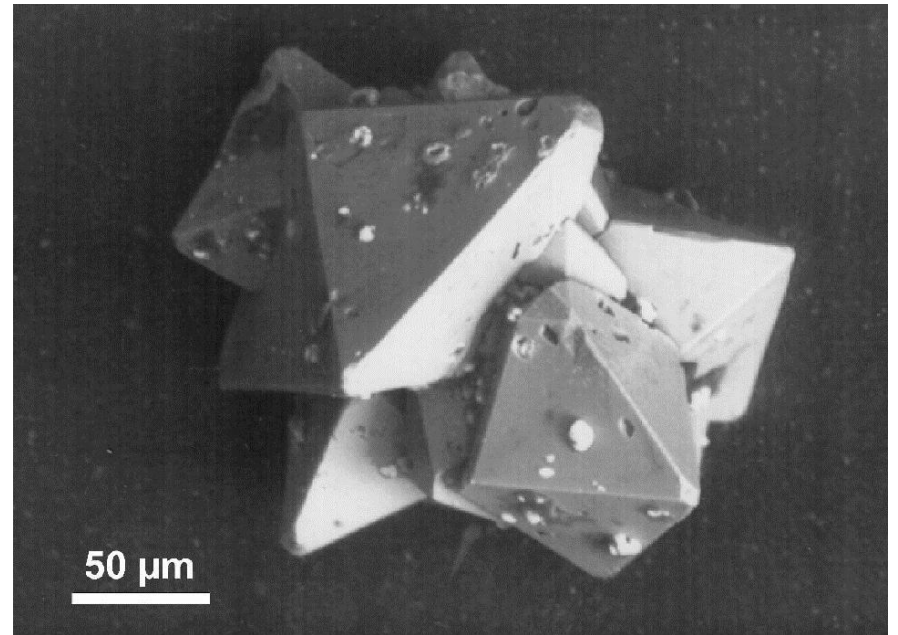
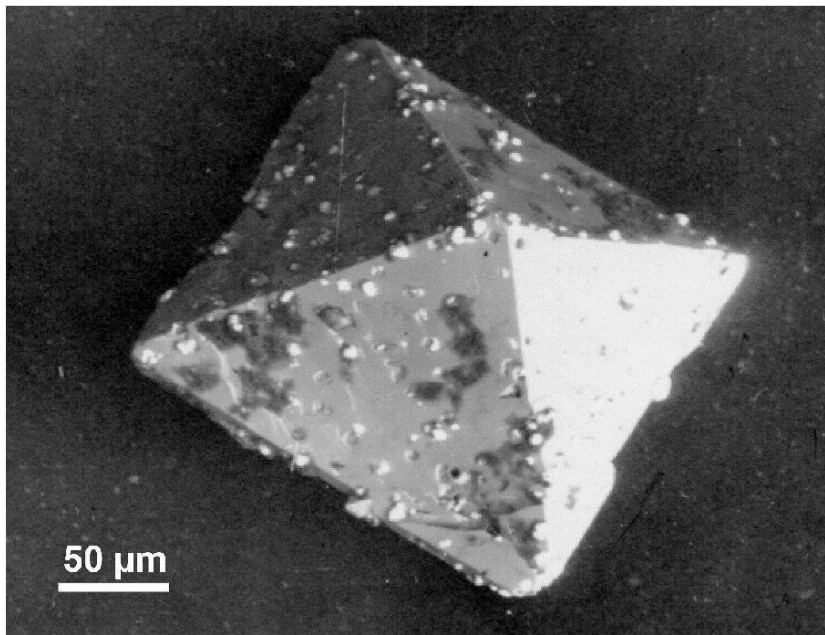
チェルノブイリに存在するあらゆる種類の燃料デブリは  
主に高濃度ウラン-ジルコン結晶  $(\text{Zr,U})\text{SiO}_4$

ジルコン結晶構造には最大10wt.%のウランが固溶体で混入！

# チェルノブイリの燃料デブリの高濃度ウラン-ジルコン $(Zr,U)SiO_4$

燃料デブリ塊において、フッ酸部分溶解した後に結晶が抽出された

写真：Boris Burakov（1990年）

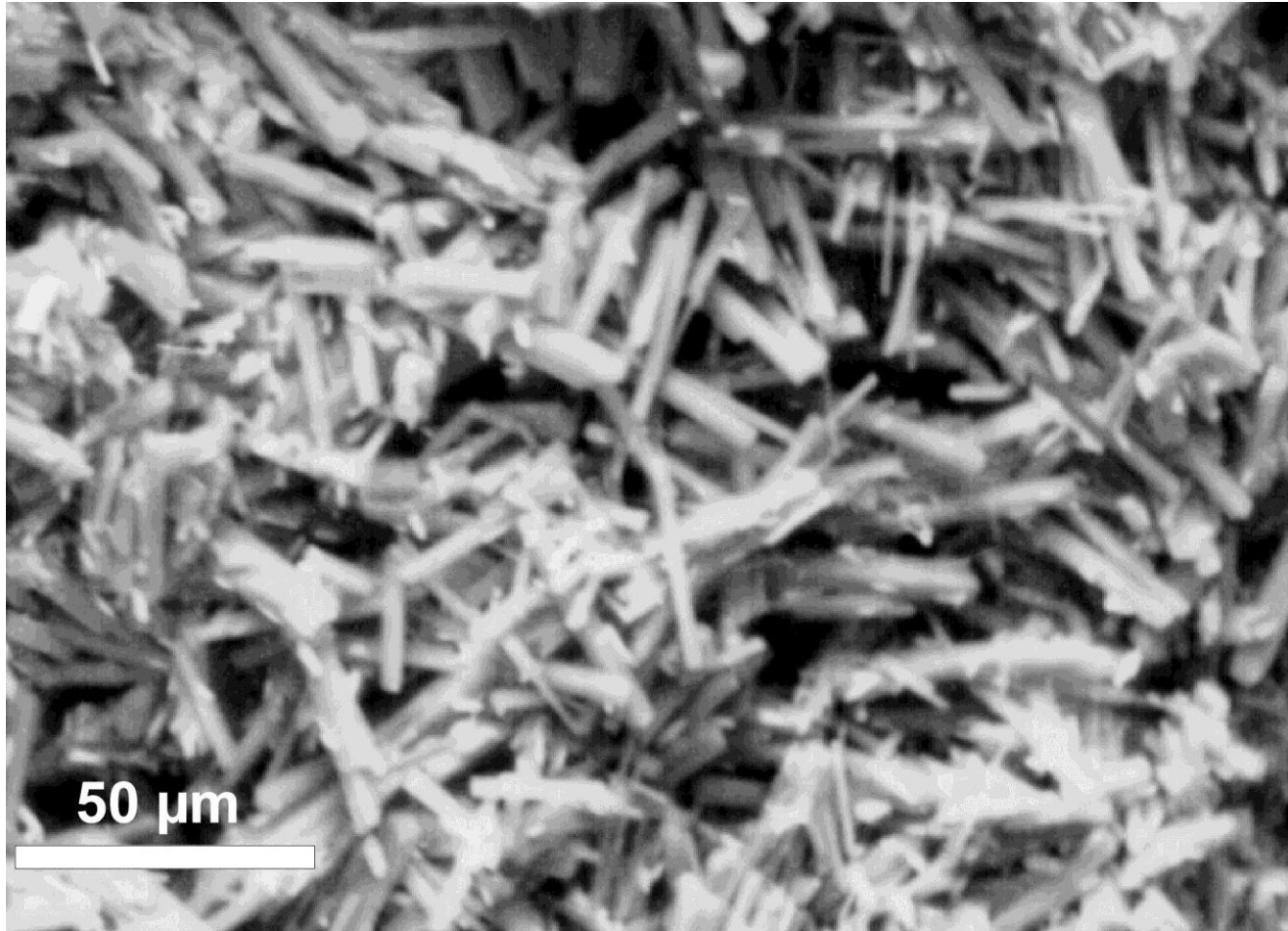


# チェルノブイリの燃料デブリ表面に新たに形成された 黄色の鉱物（1991年）



# チェルノブイリの燃料デブリ表面に新たに形成された 鉍物のSEM-BSE画像 [9]

写真: Boris Burakov (1990年)





# チェルノブイリの燃料デブリ表面に新たに形成された 鉍物の金属組織組成（粉末XRD解析 [9]）

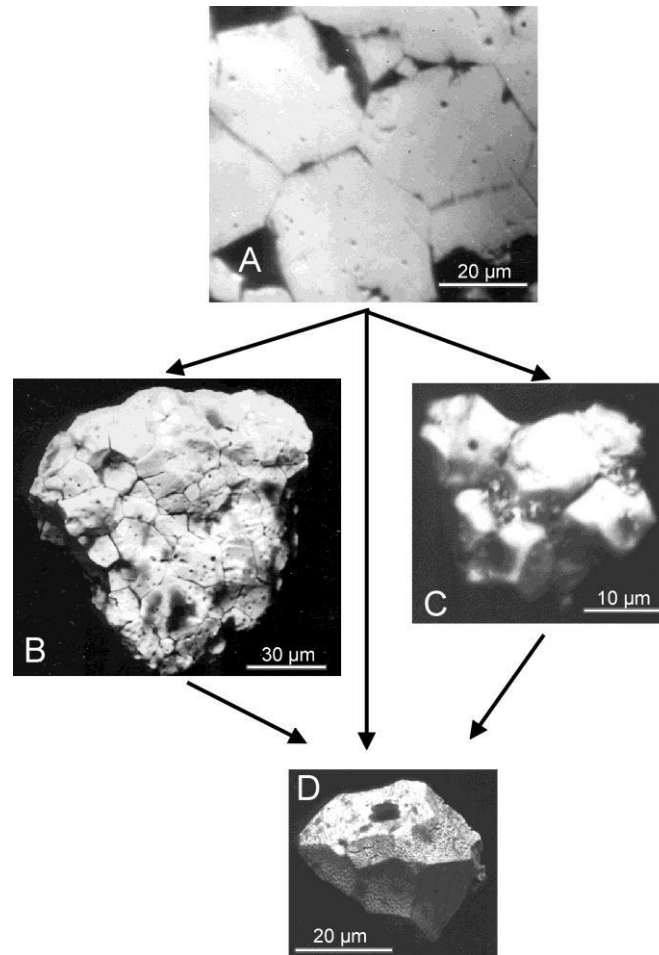
- $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{UO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Na}_4(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3$
- $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{UO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$
- $\text{UO}_2\text{CO}_3$

# チェルノブイリの ホットパーティクル

V.G.フローピン・ラジウム研究所で  
得られた結果の概要

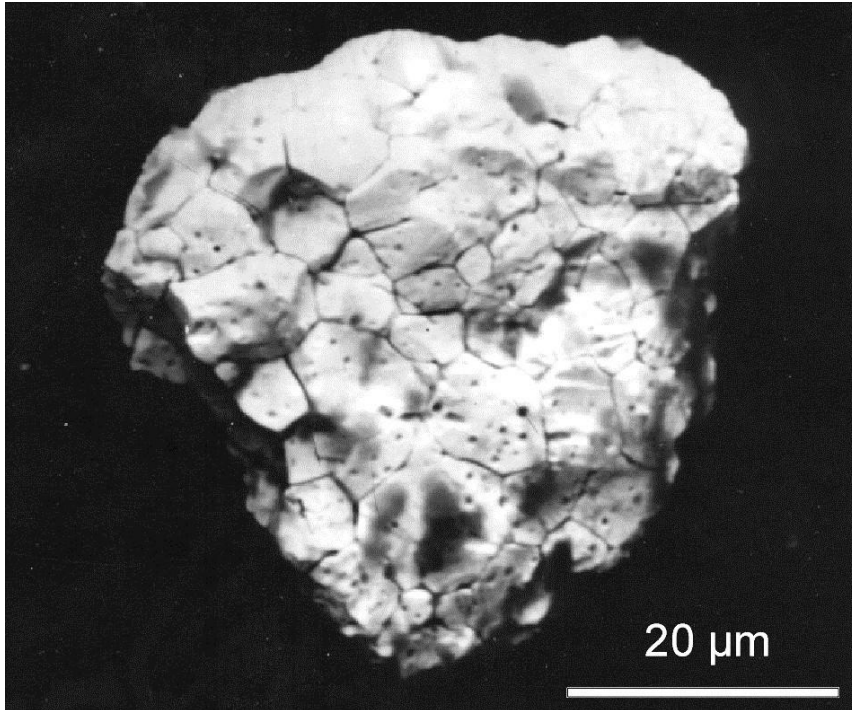
# 燃料組成 (UOx) の破碎片 (A)、ホットパーティクル (B、C、D) のSEM-BSE画像 [10]

粒界に沿って、自然崩壊する可能性あり

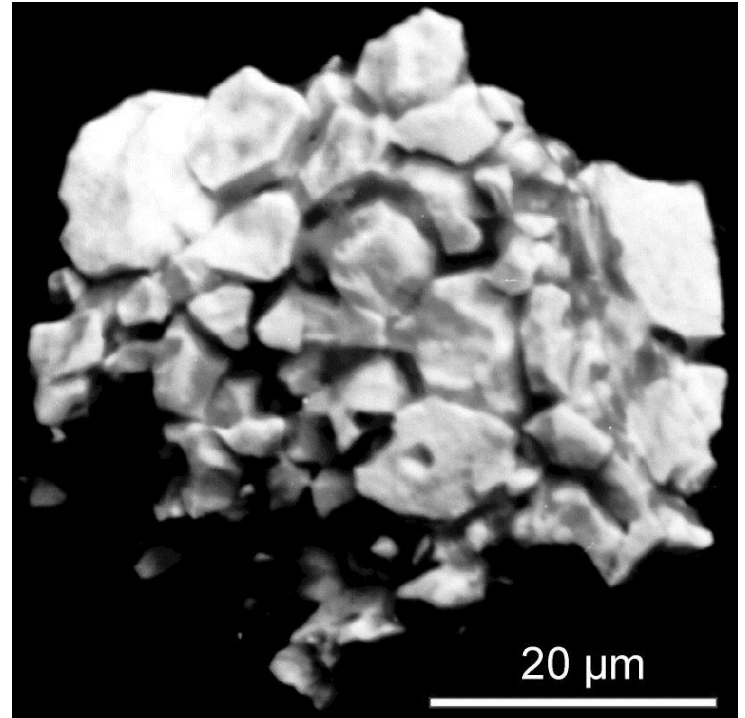


# 多結晶燃料 (UO<sub>x</sub>) のホットパーティクル (1990年収集)

写真 : Boris Burakov (1990年)



変化なし

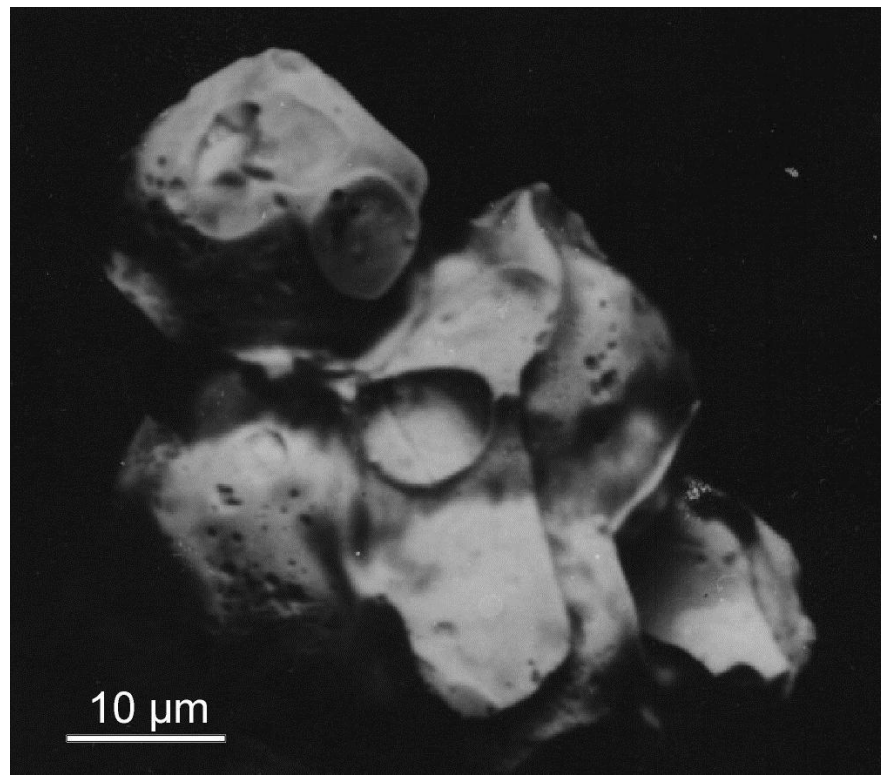
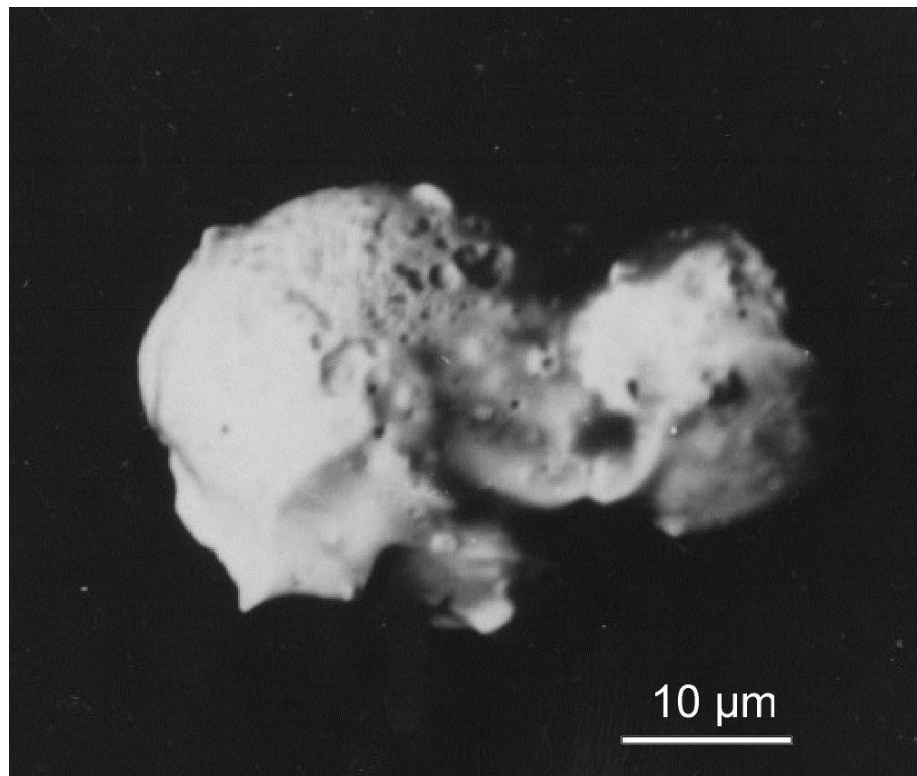


変化あり ???  
粒界に沿って溶解?



# 溶融形態 (?) が見られる燃料ホットパーティクル (**UOx**)

写真 : Boris Burakov (1990年)

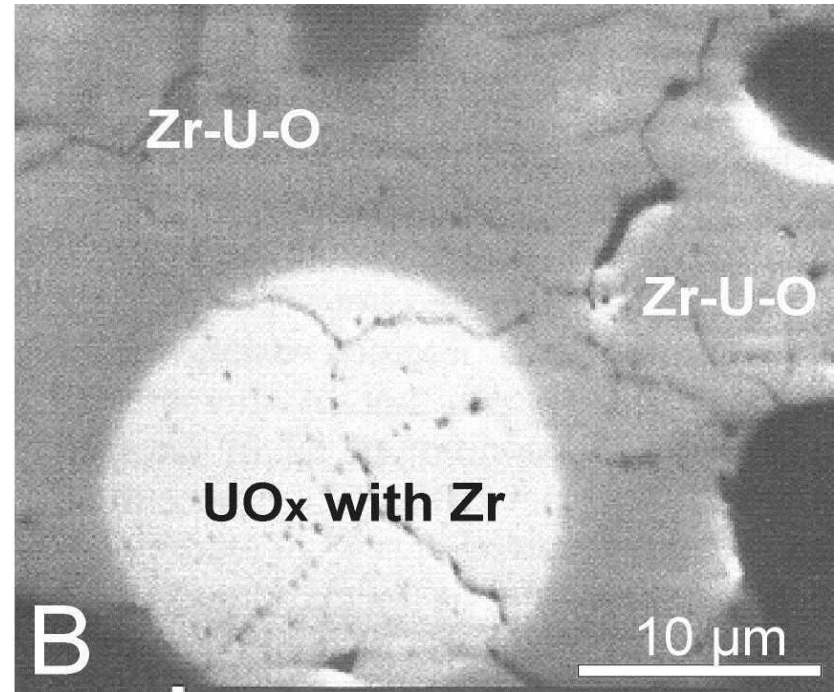
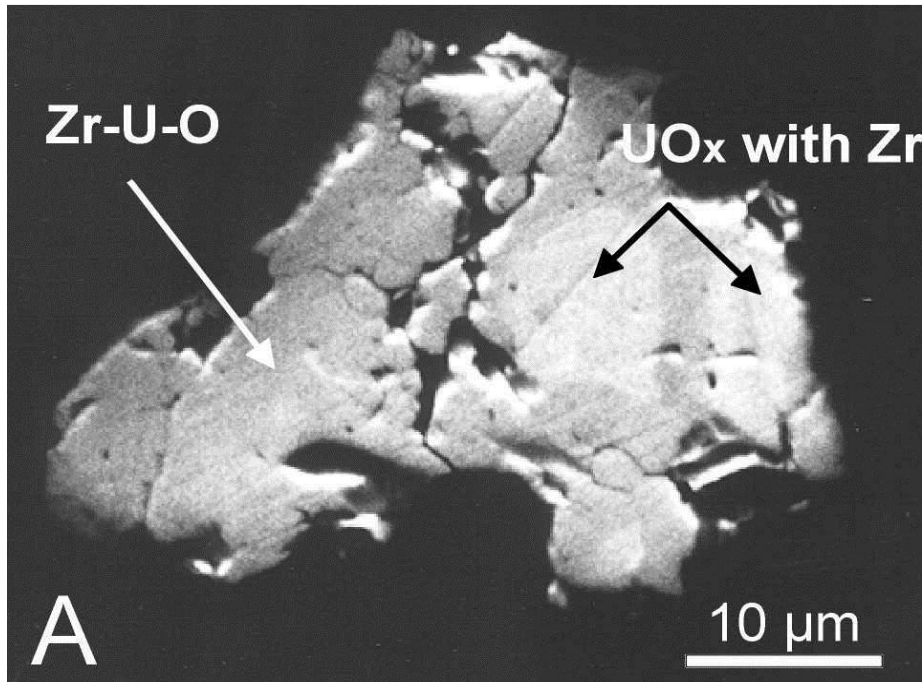


**Zr-U-O**や**ジルコニウム含有UO<sub>x</sub>**などの金属組織でも  
ジルコニウムを含むホットパーティクルを確認

放射能雲が西側拡散したエリアの数箇所ですべて全粒子の最大**40%**

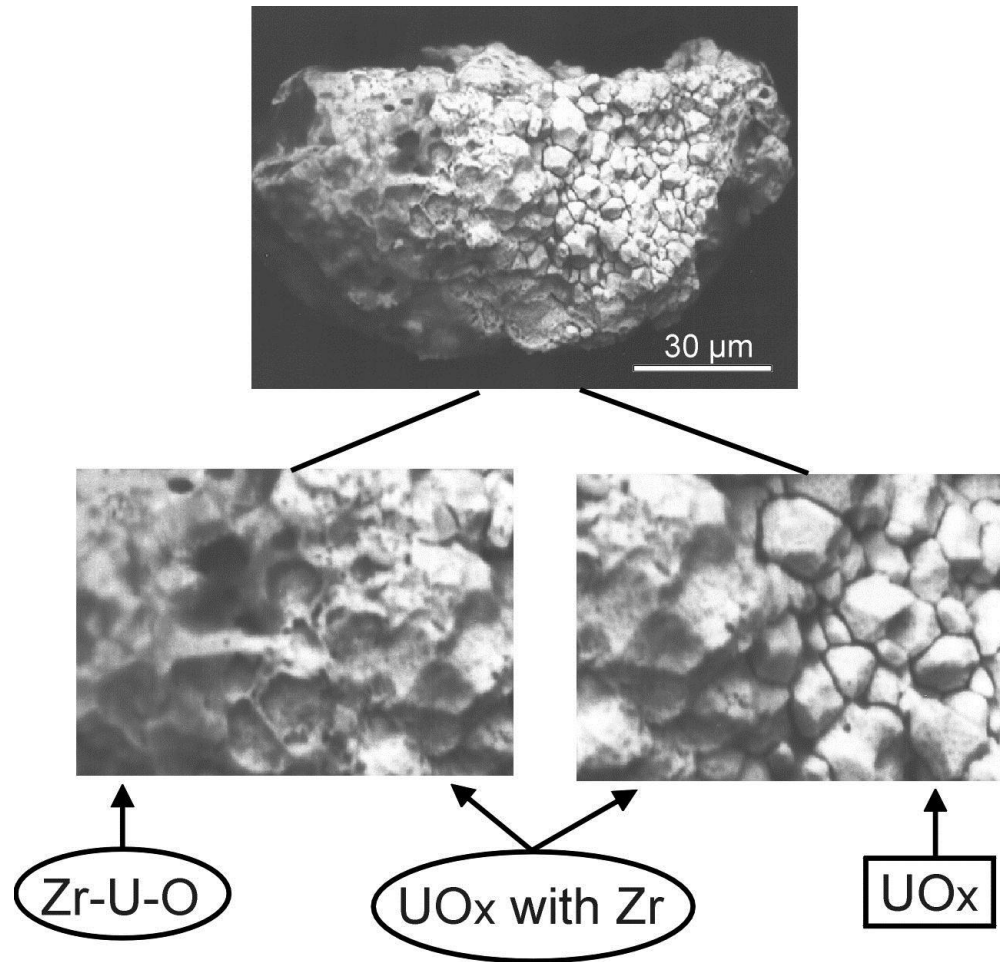
# 多相ホットパーティクル [10]

研磨したSEM-BSE 断面図



# 多相ホットパーティクル [10]

## SEM-BSE 画像





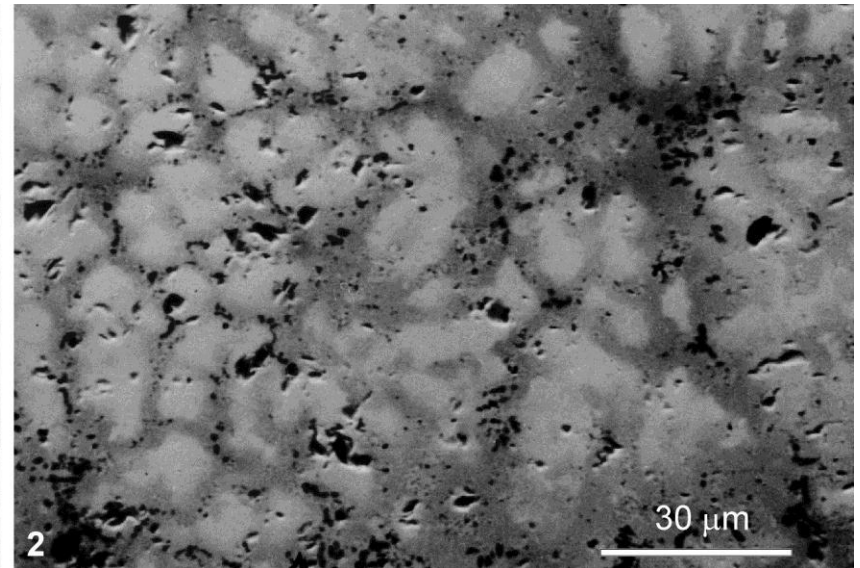
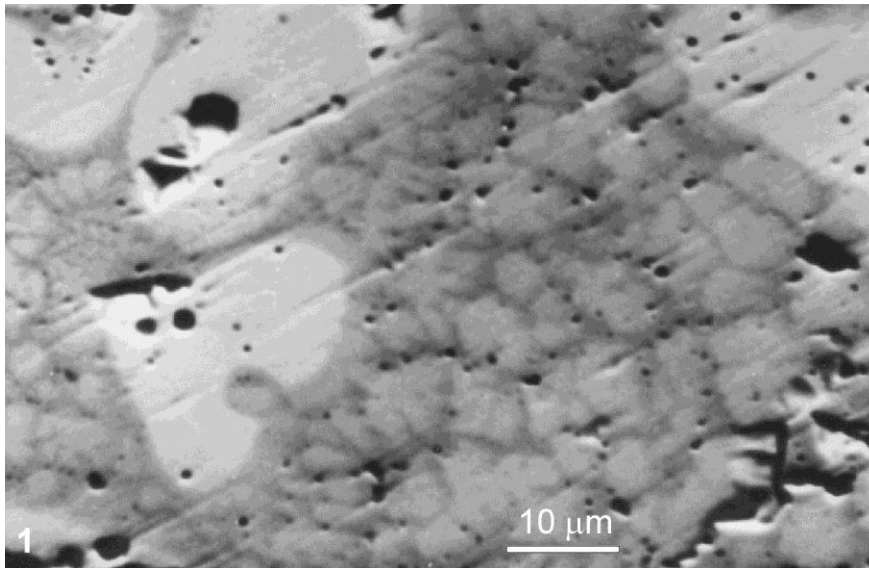
金属ジルコニウムの急速酸化が反応プロセスを妨げるため、  
大気中では、燃料（**UOx**）とジルカロイ  
（ほぼ純粋な**金属ジルコニウム**）の反応は生じない。

**炉心の爆発後にZr-U-O溶融物が形成される条件はない**

# Zr-U-O溶融の形成

- 1) チェルノブイリの原子炉（爆発前）のコリウム – 実際のホットパーティクルの塊
- 2) 室内実験（真空中2600°Cで溶融） :  $\text{Zr} + \text{UO}_2$  – 合成サンプル

写真 : Boris Burakov (1990年)



# チェルノブイリ燃料デブリおよびホットパーティクル中に 確認された結晶質ウラン相

- **立方晶 $\text{UO}_x$**  : 化学量論 $\text{UO}_2$ と同様 ( $a = 5.462\text{-}5.473 \text{ \AA}$ )
- **立方晶 $\text{UO}_x\text{-Zr}$**  (0.5~20 wt.% Zr) (5.468から5.318  $\text{\AA}$ に減少)  
化学組成 :  $(\text{U}_{0.985}\text{Zr}_{0.015})\text{O}_2\text{-}(\text{U}_{0.895}\text{Zr}_{0.105})\text{O}_2$   
一部のホットパーティクルには、より多くのZrが含まれる (最大 $(\text{U}_{0.56}\text{Zr}_{0.44})\text{O}_2$ )
- **正方相Zr-U-O** : 多様な化学組成、 $(\text{Zr}_{0.86}\text{U}_{0.14})\text{O}_2$ から $(\text{Zr}_{0.89}\text{U}_{0.11})\text{O}_2$ まで
- **ウランを含む単斜晶系ジルコニア** (最大6 wt.%のウラン) : 多様な化学組成、 $(\text{Zr}_{0.995}\text{U}_{0.005})\text{O}_2$ から $(\text{Zr}_{0.967}\text{U}_{0.033})\text{O}_2$ まで
- **未確認の構造を持つ固溶体** :  $(\text{Zr}_{0.56}\text{U}_{0.44})\text{O}_2$ 、 $(\text{Zr}_{0.68\text{-}0.71}\text{U}_{0.32\text{-}0.29})\text{O}_2$ 、 $(\text{Zr}_{0.75\text{-}0.77}\text{U}_{0.25\text{-}0.23})\text{O}_2$ 、ホットパーティクル中のみ
- **ウラン-ジルコン**、 $(\text{Zr}_{0.95}\text{U}_{0.05})\text{SiO}_4\text{-}(\text{Zr}_{0.90}\text{U}_{0.10})\text{SiO}_4$   
(バルク濃度 :  $a = 6.617$ 、 $c = 5.990 \text{ \AA}$ )

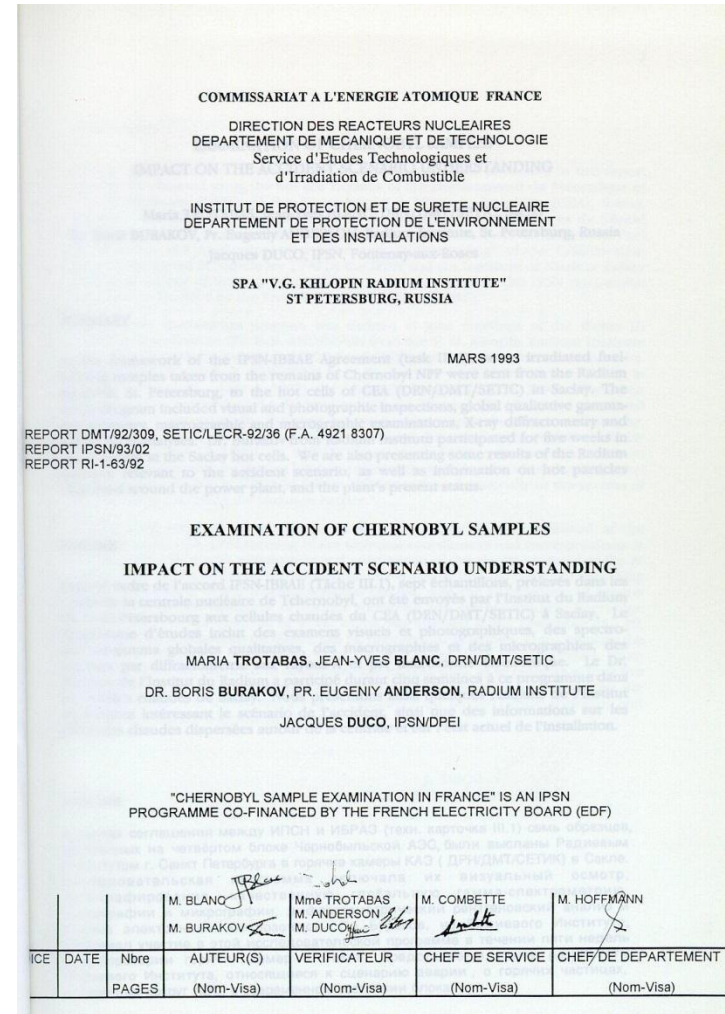
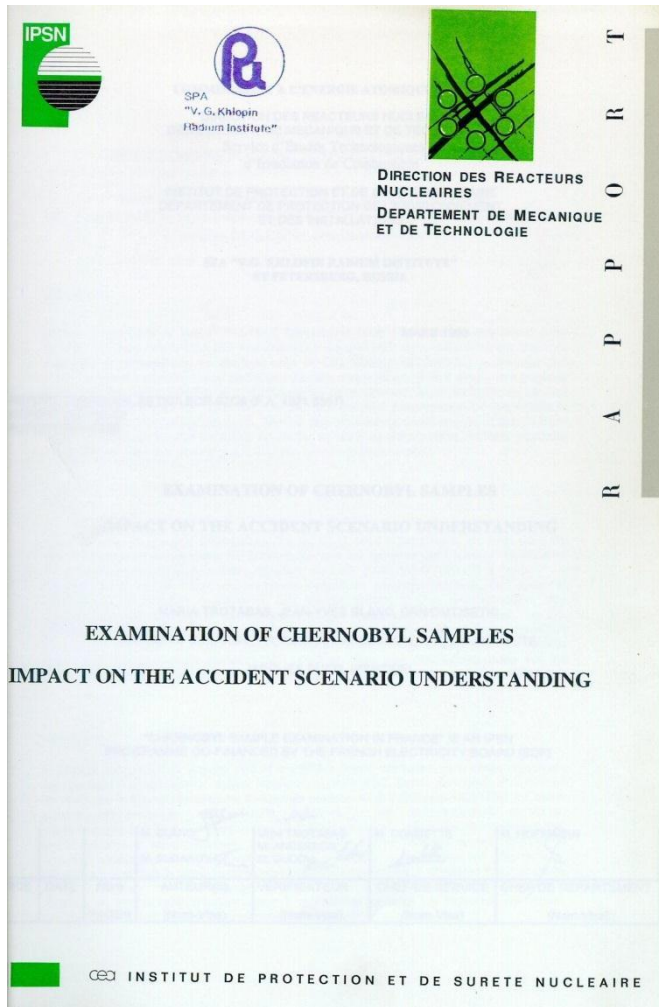
# 結論

- 核燃料とジルカロイ被覆間の高温（2600° C～）反応が、チェルノブイリでは炉心局所の**爆発前**に生じた。
- チェルノブイリ事故の結果、固体の高放射性物質が形成され、一部が拡散した。それらの物質は多様な金属組織と化学組成を有しており、**環境中の挙動が異なる**。
- チェルノブイリのコリウムは、活発な化学的変質が継続している。
- **チェルノブイリ**の材料研究の成果は、（黒鉛原則沸騰水路（RBMK）に限らず）**様々なタイプの原子炉における過酷事故のモデル化に活用できる**。
- **チェルノブイリ**の材料研究の成果は、**セラミック廃棄物形態などの先進耐久性材料の開発に活用できる**。



# KRIのチェルノブイリ燃料デブリとホットパーティクルの研究における協力

# チェルノブイリ燃料デブリにおけるKRIとフランスとの協力 1991～1993



# 2004年から現在に至るまでのチェルノブイリの燃料デブリとホットパーティクルの研究におけるKRIとドイツの協力

- Geisler T., Burakov B. E., Zirlin V., Nikolaeva L., and Poml P. **A Raman spectroscopic study of high-uranium zircon from the Chernobyl “lava”**. Eur. J. Mineral., (2005),17, pp. 883-894.
- P. Pöml, B. Burakov, T. Geisler, C.T. Walker, M.L. Grange, A.A. Nemchin, J. Berndt, R.O.C. Fonseca, P.D.W. Bottomley, R. Hasnaoui, **Micro-analytical uranium isotope and chemical investigations of zircon crystals from the Chernobyl “lava” and their nuclear fuel inclusions**. J. Nucl. Mater., (2013) Vol. 439, pp. 51-56.
- P. Pöml. P., Burakov B., **Study of a “hot” particle with a matrix of U-bearing metallic Zr: Clue to supercriticality during the Chernobyl nuclear accident**. J. Nucl. Mater. (2017), Vol. 488, pp. 314-318.
- ITUとKRIの同意書の枠組みにおいて、現在、黒色及び茶色のチェルノブイリの燃料デブリの二つの小片がITUによって調査されている。

# 2012年から現在までのチェルノブイリの燃料デブリとホットパーティクルの研究におけるKRIとロシアの協力

- *Batuk O.N., Conradson S.D., Aleksandrova O.N., Boukhalfa H., Burakov B.E., Clark D.L., Czerwinski K.R, Felmy A.R., Lezama-Pacheco J.S., Stepan N. Kalmykov S.N., Moore D.A., Myasoedov B.F., Reed D.T., Reilly D.D., Roback R.C., Vlasova I.E., Webb S.M., Wilkerson M.P. Multiscale Speciation of U and Pu at Chernobyl, Hanford, Los Alamos, McGuire AFB, Mayak, and Rocky Flats. J. Environmental Science and Technology, (2015) pp. 6474-6484.*
- *Vlasova I., Shiryayev A., Ogorodnikov B., Burakov B., Dolgopolova E., Senin R., Averin A., Zubavichus Y., Kalmykov S. Radioactivity distribution in fuel-containing materials (Chernobyl “lava”) and aerosols from the Chernobyl “Shelter”. Radiation Measurements, 83 (2015) 20-25.*
- *Shiryayev A.A., Vlasova I.E., Burakov B.E., Ogorodnikov B.I., Yapaskurt V.O., Averin A.A., Pakhnevich A.V., Zubavichus Y.V., Physico-chemical properties of Chernobyl lava and their destruction products. Progress in Nuclear Energy, 92 (2016) 104-118.*
- *チェルノブイリの「燃料デブリ」及びホットパーティクルの研磨済微小サンプルは、KRI/ミシガン州立大学研究所 (MSU)/ A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistryの協力のもと、共同で分析されている。*



# 2017年2月にチェルノブイリ「燃料デブリ」のサンプルを用いた 中性子検出器の試験(“PDC UGR”JSCによって開発された) を実施

KRIとロシアパイロットとウラン黒鉛原子炉の廃炉実証センターとの共同  
作業”JSC(“PDC UGR2 JSC)



# KRIの協力提案

- 燃料デブリとコリウムの調査、取り出し、処理、最終廃棄に関するコンサルティング
- 福島原子力発電所のコリウムの材料研究参画
- チェルノブイリの高放射性サンプル（燃料デブリ、コリウム、ホットパーティクル）を用いたKRIでの日本人研究者の研修
- 福島原子力発電所のホットパーティクルの共同調査、抽出および研究

# 謝辞

- *KRI*の同業者の方々: Mr. Zirlin V.A., Mrs. Nikolaeva L.D., Dr. Krinitsyn A.P., Dr. Pazukhin E.M., Mr. Shabalev S.I., Dr. Pleskachevskiy L.A., Dr. Pakhomov S.A.
- Dr. Britvin S.N (サンクトペテルブルク大学 学生)
- モスクワ大学放射性化学部の同業者の方々:  
Prof. Kalmykov S.N., Dr. Vlasova I.E. and Dr. Petrov V.G.
- ドイツの同業者の方々: Dr. Philipp Poml (ITU, カールスルーエ)、  
Prof. Thorsten Geisler (ライン・フリードリヒ・ウィルヘルム大学ボン)
- Dr. Shiryaev A.A. (モスクワ、ロシア科学アカデミー、*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry*)

今回のフォーラムにご招待して頂いた、CLADS、JAEA 鷺谷様、  
NDF 中川様に心より感謝申し上げます！

ありがとうございました

