

平成29年度福島研究開発部門 成果報告会

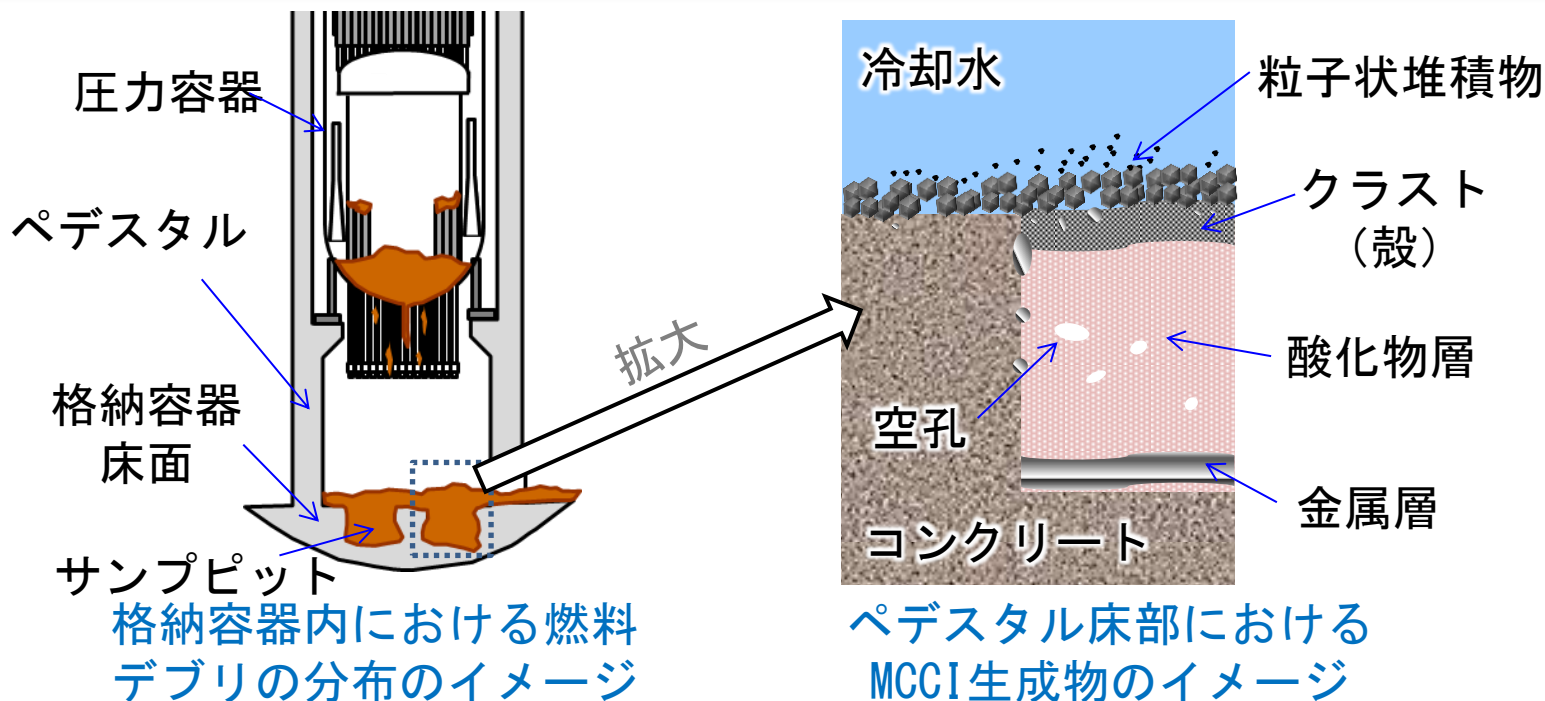
熔融燃料とコンクリートとの相互作用(MCCI) による生成物の相および硬さ： 大型試験からの知見

平成30年2月14日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉国際共同研究センター 燃料デブリ・炉内状況把握ディビジョン

燃料デブリ取扱技術開発グループ
池内 宏知

- 1Fの1～3号機における過酷事故では、格納容器内において、溶融した炉心燃料(コリウム)と格納容器床面のコンクリートとの反応(MCCI)が発生。
⇒ 二酸化ウラン(UO_2)、ジルカロイ(Zry)、ステンレス鋼(SS)などの炉心材料が溶けてコンクリート成分と混ざり合い、様々な化合物が生成。
- これら化合物(MCCI生成物)の生成相や硬さ等の特性は場所に応じて異なることが予想され、このような「特性の不均質性」に関する情報は、取出し方法のバリエーションを推定するうえでは極めて重要。



課題

- 数か国の研究機関において、大型試験によるコンクリート浸食挙動やガス発生挙動に係る研究が実施されているが、以下の知見が不足。
 - ✓ 大型試験生成物の物性はほとんど調査されていない。
 - ✓ BWR体系(金属Zrやステンレス鋼が豊富に存在、玄武岩系コンクリートを使用、等)を想定した知見が不足。



目的

- MCCI生成物の特性(相状態や硬さ)の巨視的な不均質性を把握し、取出し方法検討に資する知見を提供。
- ✓ 過去に実施された大型MCCI試験サンプル(過去サンプル)の特性把握。
 - ✓ 1Fの炉心材料組成等を考慮した条件での大型MCCI試験の実施、および試験後サンプルの特性把握。

仏国・原子力代替エネルギー庁 (CEA) で過去に実施された大型MCCI試験で得られた試験サンプル (過去サンプル)、および大型試験設備を活用。

1F-1号機におけるMCCI条件の設定 (2014年度～2015年度)

コリウム・コンクリート初期組成の設定 (プラントデータ)

コンクリート浸食体積 (TOLBIAC-ICBによる計算)

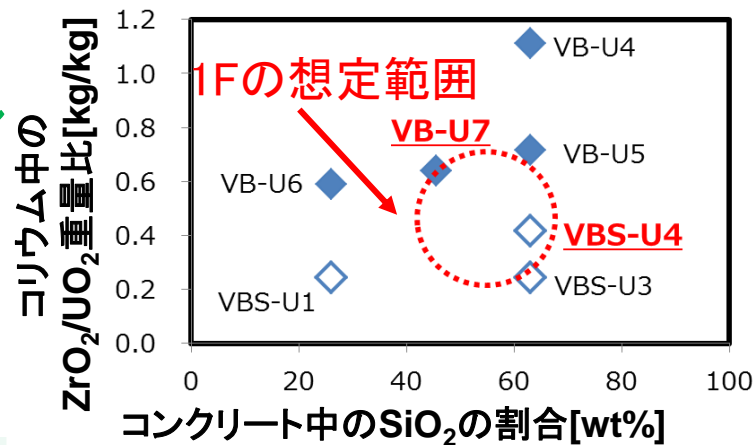
試験条件の設定

MCCI大型模擬試験 (VF-U1) (2016年度)

VF-U1試験生成物サンプルの物性把握 (2017年度) → 実施中

過去サンプルの選定

過去の試験サンプルの物性把握 (2014年度～2016年度)



過去の大型MCCI試験における組成条件

1F-1号機条件を考慮した、MCCI生成物特性の不均質性の把握

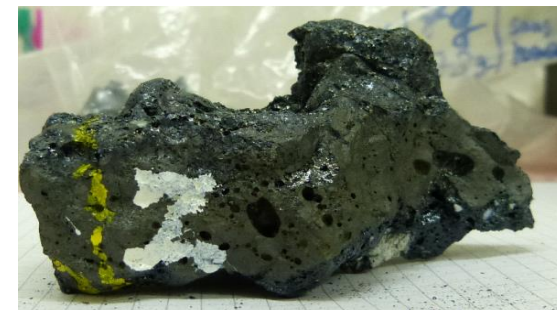
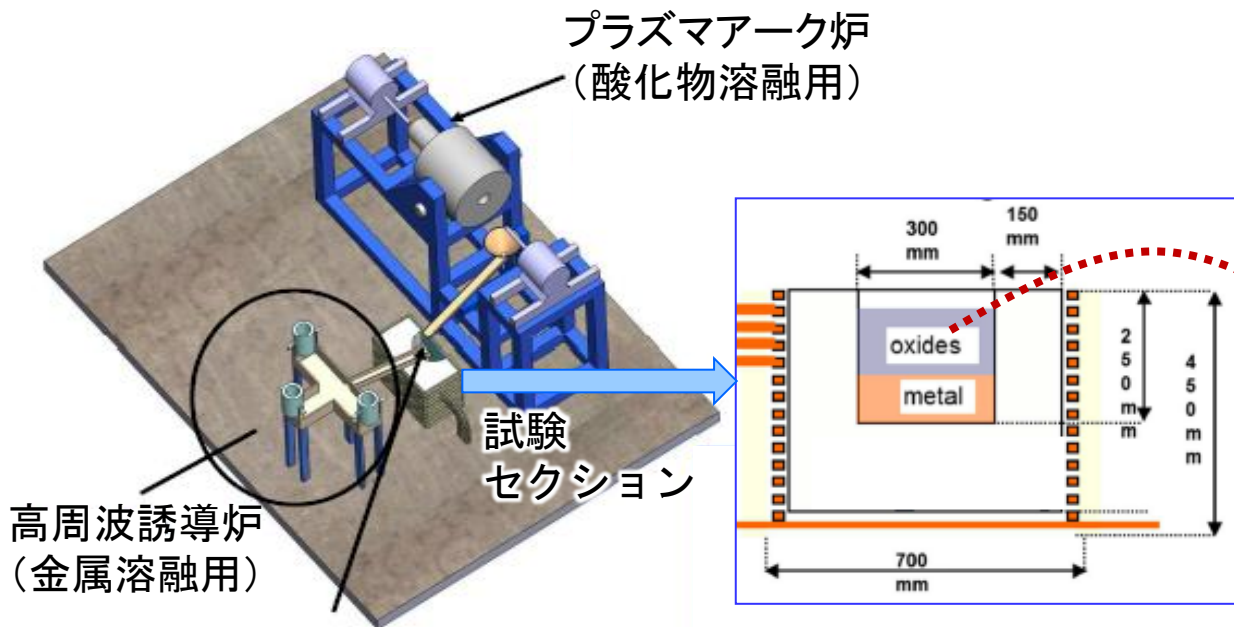


図 CEA・VULCANO施設

(Versatile UO₂ Lab for Corium Analysis and Observation)

試験サンプルの外観(例)

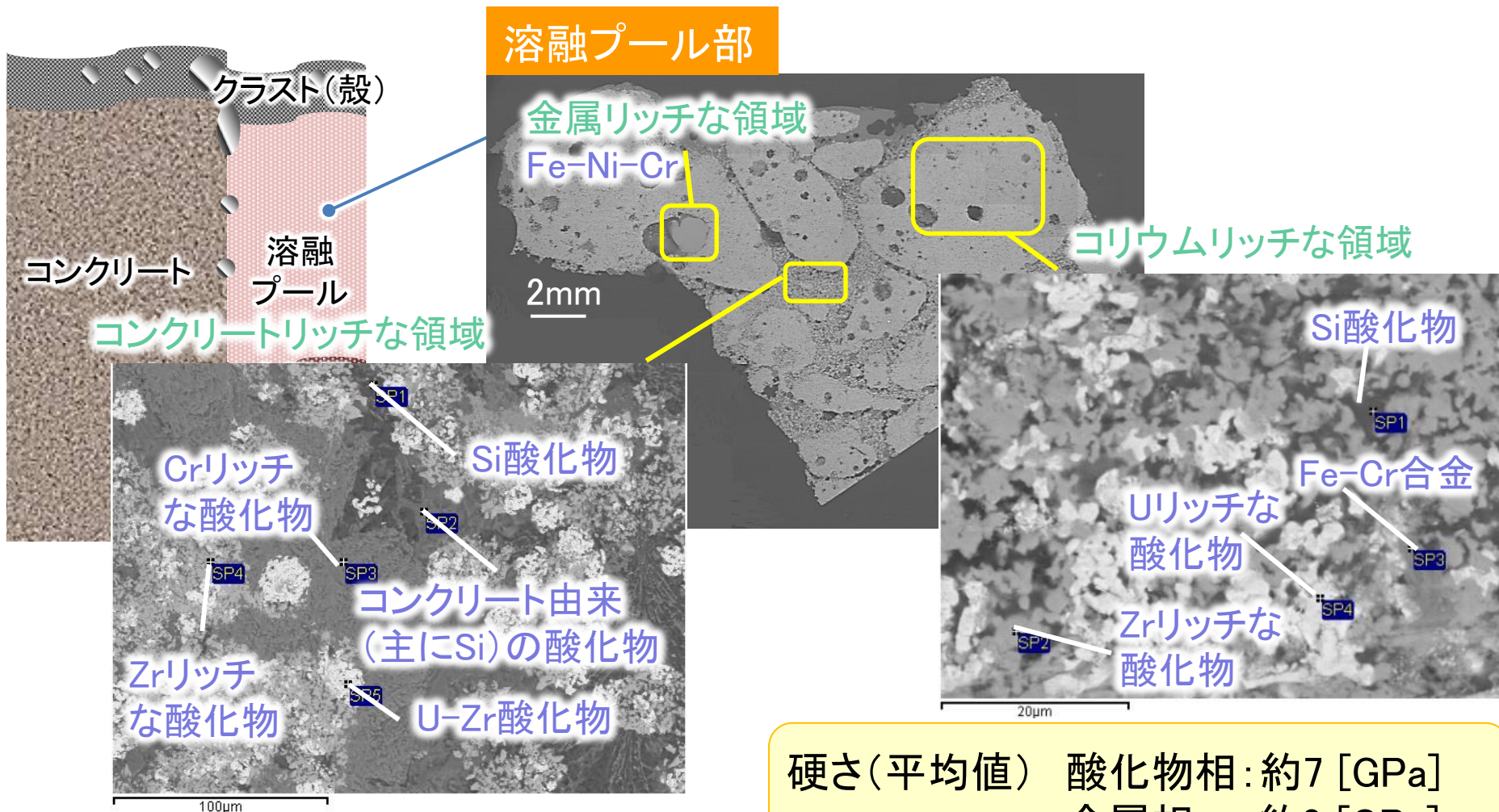
過去サンプルの選定基準

MCCIによる溶融物の組成が、1F想定に極力近い試験を選定。

- ✓ コリウムの組成: ZrO_2/UO_2 比がBWRと同等程度。
- ✓ コンクリート組成: シリカ(SiO_2)リッチなもの。
- ✓ コリウム/コンクリート浸食体積比: 1F 1号機を対象とした解析で求められた値(約1.6^[1])に近い。

[1] Kitagaki et al., ACTINIDE2017.

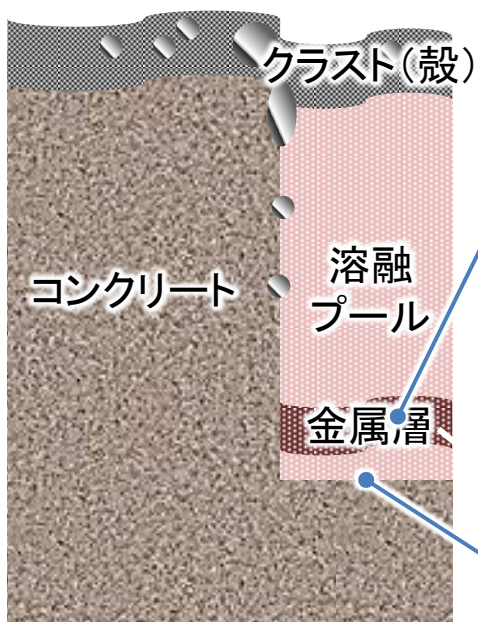
VBS-U4試験：酸化物($UO_2+ZrO_2+SiO_2$) 35kgおよび金属(SS) 24 kgの溶融物を、シリカ質コンクリートに投入。^[2]



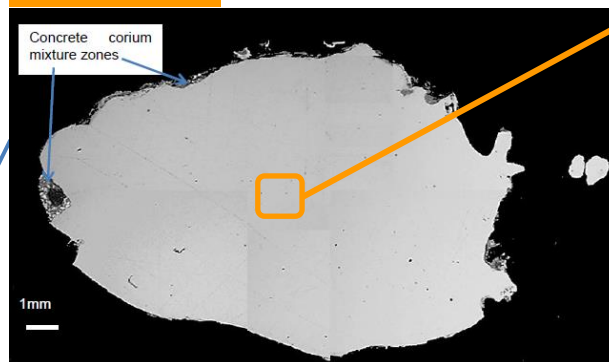
硬さ(平均値) 酸化物相: 約7 [GPa]
金属相: 約3 [GPa]

[1] Kitagaki et al., ACTINIDE2017. [2] Journeui et al., Nucl. Eng. Technol. 44, 261.

VBS-U4試験(続き)



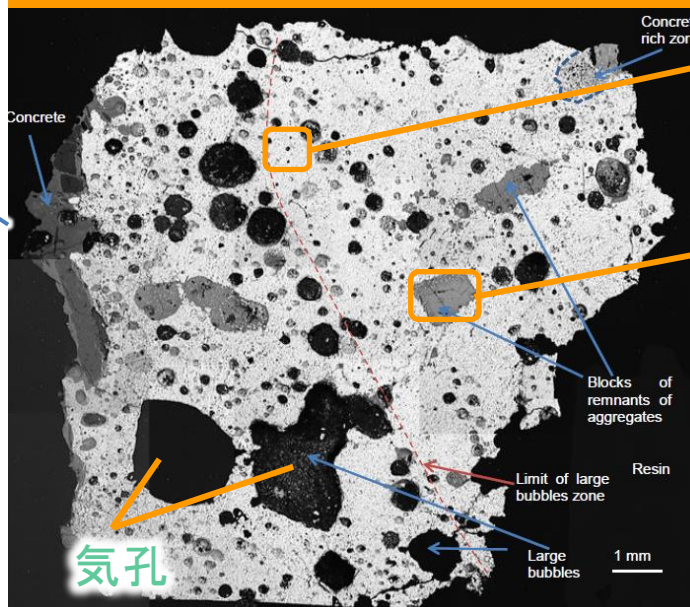
金属層



合金相:
Fe-Ni-Cr合金

硬さ(平均値)
約 4 [GPa]

コリウム/コンクリート底部境界



コリウムリッチ領域:
Fe-Si酸化物,
ZrSiO₄, (U,Zr)O₂

骨材:
Si-Fe-Ca酸化物

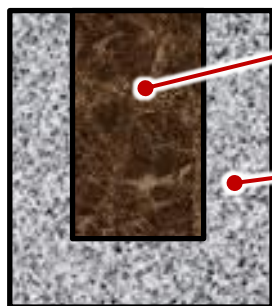
硬さ(平均値)
約7~11 [GPa]

[1] Kitagaki et al., ACTINIDE2017.

過去サンプル(VBS-U4試験)特性の不均質性に 係る知見(まとめ)

- コンクリート底部境界付近では、溶融プール部と比較すると $ZrSiO_4$ が顕著に生成。
- 金属相は、下部でブロック状に析出するほか、酸化物相中にも分散して析出。
- 硬さは、金属層部分で低く、コンクリート底部境界付近で高い(生成する化合物の違いの影響が大きいと考えられる)。

VF-U1試験 (VULCANO Fukushima: Uranium 1)
 - 1Fの炉心材料組成を考慮した条件(多量のZr、玄武岩系コンクリートの使用)での大型MCCI試験を実施。



- 模擬炉心材料: 1F 1号機における炉心材料の平均組成を想定。(表1)
- コンクリート: 1F 1号機の原子炉建屋コンクリートの組成を目標に、富士川産および阿武隈川産の骨材(図1)を用いて新たに作製。

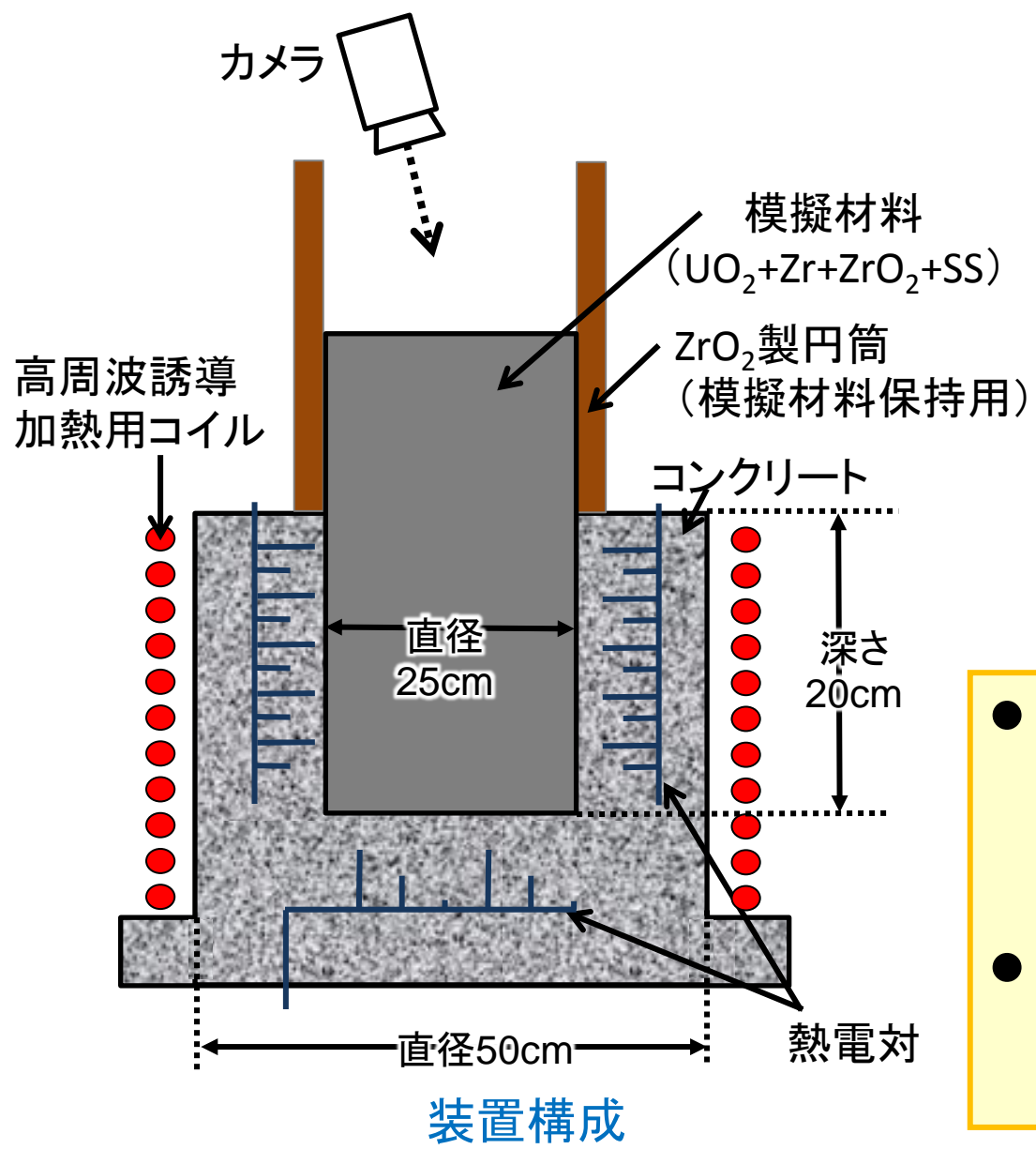
表1 模擬炉心材料の組成

	UO ₂	ZrO ₂	Zr	SS* ¹
wt %	58.8	16.2	11.8	13.2

*¹ ステンレス鋼



図1 コンクリート原材料の外観



外観(模擬材料フル装填前)

- 高周波誘導加熱方式を採用。
⇒ 模擬材料中の金属(ZrやSS)が先に溶融し、周囲の酸化物を溶かすことで全体が溶融。
- コンクリートの浸食体積が、1F 1号機を想定した解析結果^[1]に近い値となるまで加熱を継続。

[1] Kitagaki et al., ACTINIDE2017.

動画



動画





コンクリート境界層



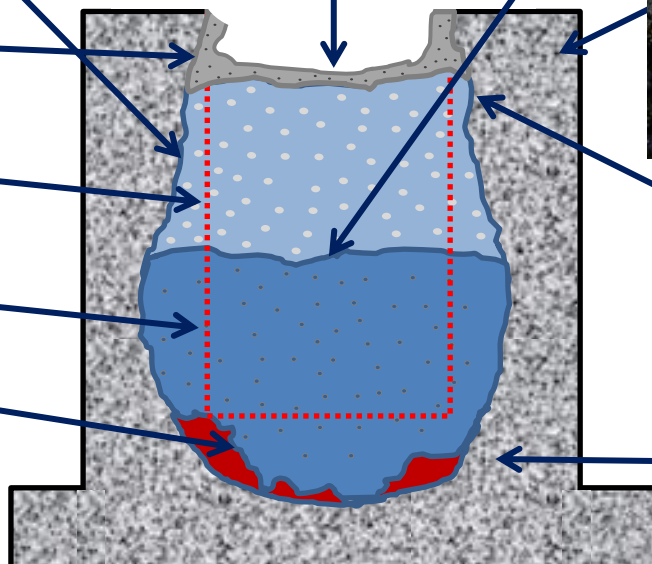
解体前の状況(上部筒撤去後)



ガラス、オレンジ色の相



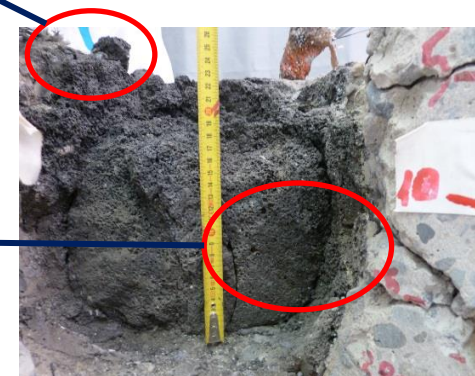
層構造



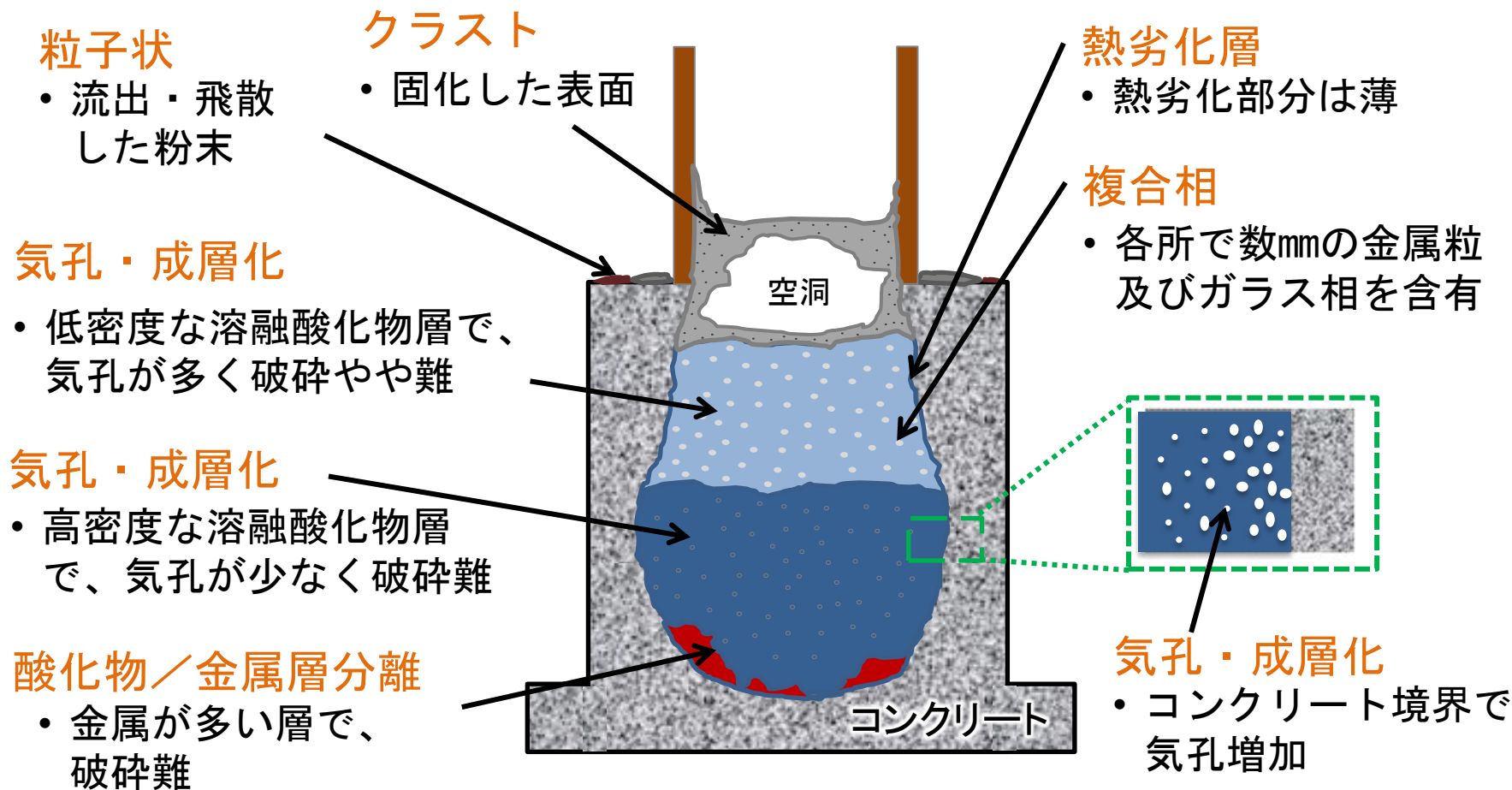
生成物断面のイメージ



金属粒



大半の溶融物を取り除いた後



小規模試験では見られなかった外観上の特徴を多く確認。
 (例) クラストの形成とその直下での空洞形成。
 気孔の密度が異なる層の出現。

解体時に確認されたサンプルの特徴や作業環境の変化等をもとに、機械的工法による燃料デブリの取出し方法の検討に対する提言を取りまとめた。

解体時の様子	提言
デブリの外観は非常にポーラスで脆く見えるが実際は非常に堅い	外観観察のみの工具選定は不可能
機械的な掘削作業では粉塵が多く発生	急激な視認性低下、放射線モニタへの影響
クラストの確認	とても堅く、打撃などで割れにくい可能性あり
粒子状デブリの確認	ハンドリングツール(吸引、搦い)や水処理系の固液分離の必要性あり
熱劣化コンクリート層の存在	脆いので、把持によるハンドリングに向かない
気孔・成層化の確認	空隙率の違いによる臨界評価への影響を確認する必要性あり
酸化物層と金属層の分離	酸化物と金属を扱う工具が異なる場合は、層の変化を検知する必要性あり

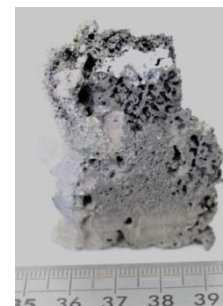
[1] 仲吉, 第3回 福島第一原子力発電所の廃炉に関する戦略ワークショップ

MCCI生成物特性(相状態や硬さ)の不均質性の把握に向けて、仏国・CEAとの協力のもと、大型MCCI試験サンプルの特性データの取得を進めている。

- 過去の大型MCCI試験サンプルの分析から、コンクリート底部境界付近での $ZrSiO_4$ の生成など、場所に応じた特性の変化を確認。
- 1Fの炉心材料組成等を考慮した大型MCCI試験(VF-U1試験)を実施し、クラストの形成や気孔の分布など、小規模試験では見られない外観上の特徴を多く確認。

 - ⇒ 解体時の様子や生成物の外観等の特徴から、燃料デブリの取出し方法を検討するうえで重要な知見が得られた。
- 今後、VF-U1試験サンプルの詳細な特性データ(生成相や硬さ等)を取得。

 - ⇒ 過去サンプルの分析結果や小規模試験における知見も反映しつつ、不均質性の把握とその要因解明に役立てていく。



試験サンプル外観の一例

ご清聴ありがとうございました。