

# 令和2年度 福島研究開発部門 成果報告会

## 燃料デブリは どのようにして形成されたか？

令和2年12月 5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  
廃炉環境国際共同研究センター  
炉内状況把握ディビジョン 試験技術開発グループ

永江 勇二

1. 福島第一原子力発電所（1F）2号機の内部調査  
内部調査での堆積物の特徴
2. 燃料デブリ形成メカニズムの解明
  - 制御棒ブレード破損試験装置（LEISAN）の特徴
  - LEISAN試験での成果
    - 制御棒ブレード溶融・移行
    - 圧力容器下部での溶融・移行
3. 取り出したデブリの分析結果の評価に向けて
4. 今後の計画
5. まとめ

➤ 1F2号機内部調査 (TEPCO) \*

2018年1月

カメラによる内部調査 ⇒ 金属系とみられる物質の堆積、半溶融の集合体部材を検出

2019年2月

堆積物への接触調査 ⇒ 3種類の堆積物 (小石状、プレート状、半溶融物) を確認

小石状の堆積物



ペDESTAL底部

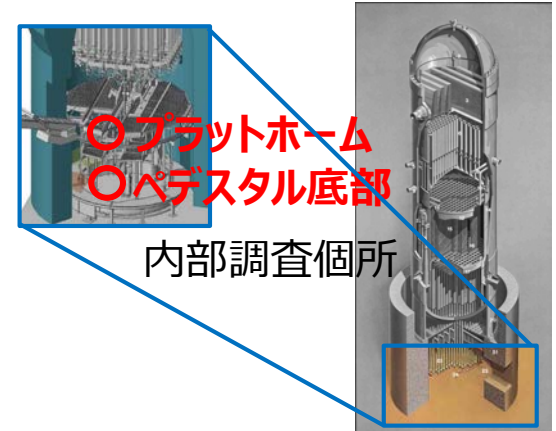
構造物の一部



プレート状の堆積物



プラットホーム  
ペDESTAL底部



➤ 「廃炉に向けた中長期ロードマップ」(2019年12月、改定)

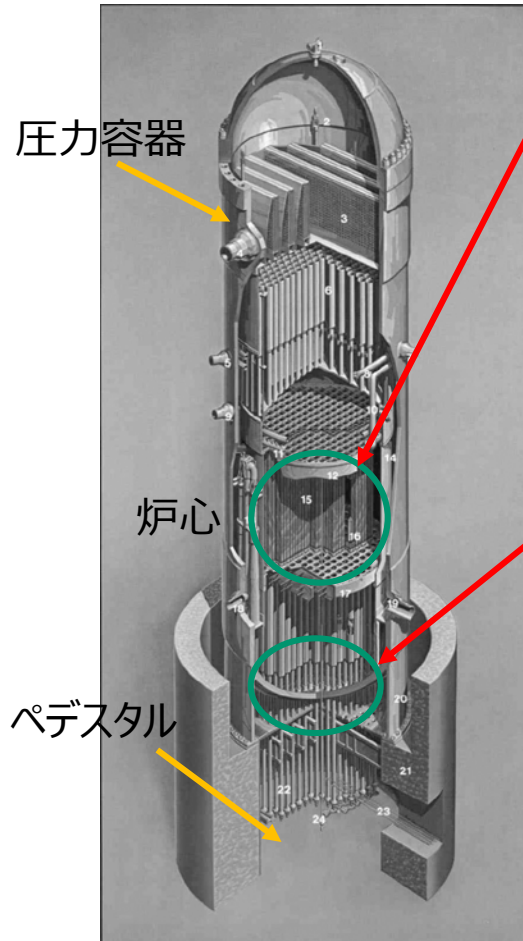
**2021年内より、燃料デブリの試験的取り出しを2号機から始める方針**

炉内状況推定などから、**燃料デブリは様々な形状で存在する**ことが予想されている。

\* 東京電力ホールディングス株式会社、福島第一原子力発電所2号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果 (速報) 2018年1月19日  
 \* 東京電力ホールディングス株式会社、福島第一原子力発電所2号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果 (速報) 2019年2月13日  
 \* 東京電力ホールディングス株式会社、「2号機原子炉格納容器内部調査実施結果」、第48回 廃棄・汚染水対策現地調整会議、2019年3月28日

炉心溶融、溶融物の下部への移行、閉塞、下部での再溶融、圧力容器の破損という一連の現象について評価を行う必要がある。

BWR原子炉本体



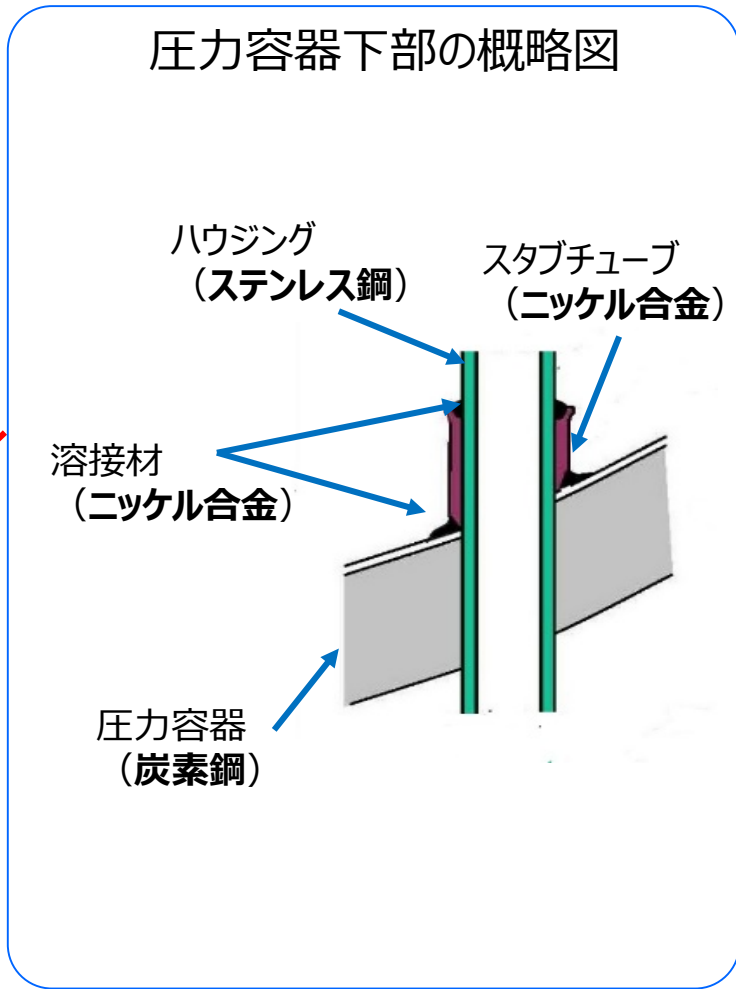
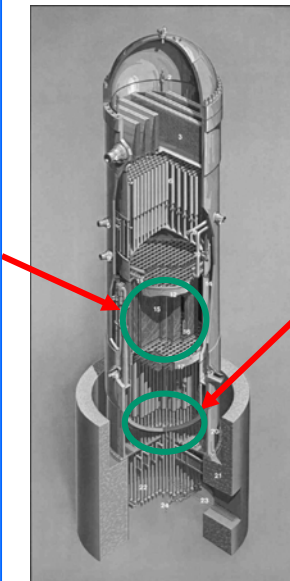
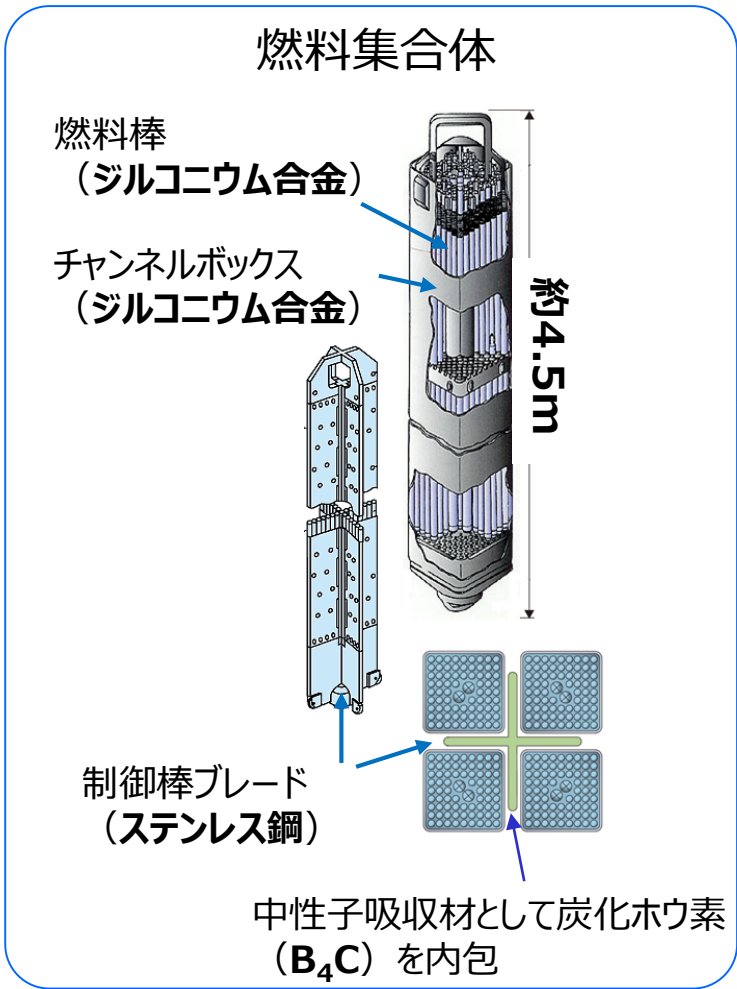
① **BWR制御棒ブレード溶融・移行挙動の解明 (本日のご報告)**  
**金属系デブリの生成メカニズム・特性の解明**

② 燃料溶融反応挙動の解明  
 UO<sub>2</sub>/Zrの拡散挙動を考慮した溶融反応の解明

③ **圧力容器下部ヘッド破損挙動の解明 (本日のご報告)**  
**金属系デブリ/下部ヘッド部材との溶融反応挙動の解明**

④ 燃料デブリ凝固・偏析挙動の解明  
 熱力学的手法による燃料デブリ形成過程の解明

酸化物 ( $UO_2$  など) よりも  $1000^\circ\text{C}$  以上も低い温度で溶融する金属材が、多く使用されている。

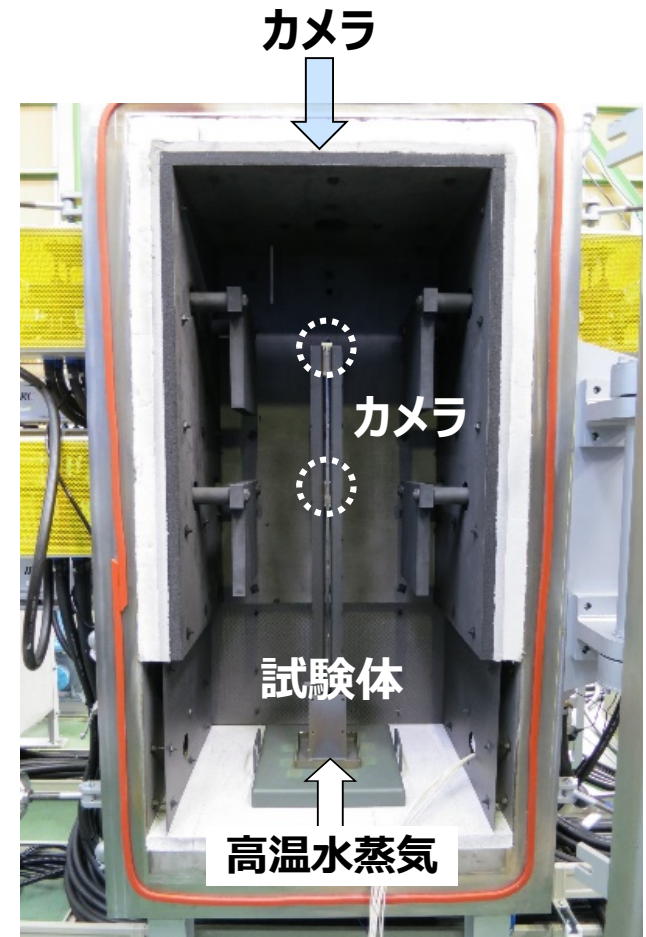


**LEISAN** : Large-scale Equipment for Investigation of Severe Accidents in Nuclear reactors

※日本語名「制御棒ブレード破損試験装置」

## 画期的な性能をもつ装置

- 急速昇温 (0.3~1°C/秒)  
炉心露出時の崩壊熱の違いによる、異なる昇温速度への対応
- 軸方向温度勾配 (約500°C/m)  
下部に残る冷却水によって生じる、軸方向の温度勾配への対応
- 水蒸気量可変  
溶融物の閉塞状態などで異なる水蒸気量への対応
- 動画撮影  
溶融・移行・閉塞挙動に関わるリアルタイム情報の取得
- 反応によって発生するガスなどの測定  
溶融・移行・閉塞挙動における水素などのリアルタイム情報の取得
- 実機とほぼ同寸法での試験体の使用  
実際の溶融・移行・閉塞挙動を把握するため

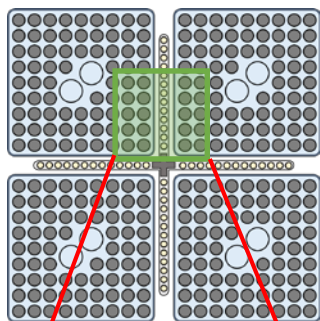


LEISAN装置内部

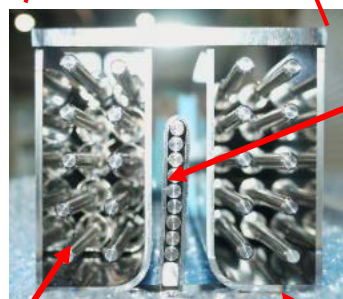
## 制御棒ブレード破損試験体

## 試験条件

BWR燃料集合体断面



100 mm

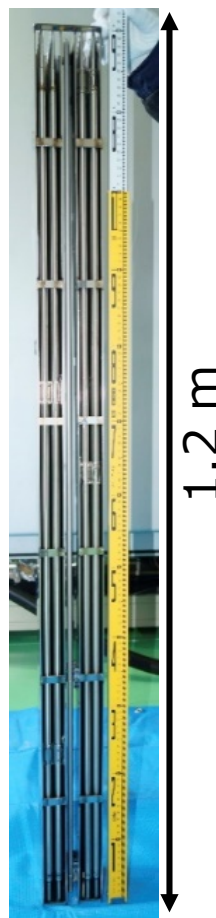


中性子吸収材  
( $B_4C$ ) を包含

燃料棒  
(主成分:  $Zr$ )

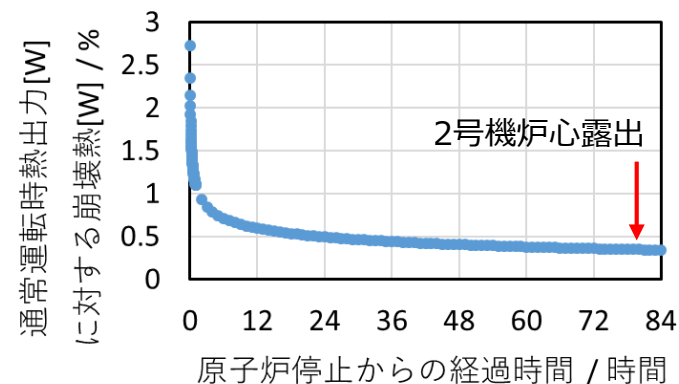
制御棒ブレード  
(主成分:  $Fe, Ni$ )

チャンネルボックス  
(主成分:  $Zr$ )



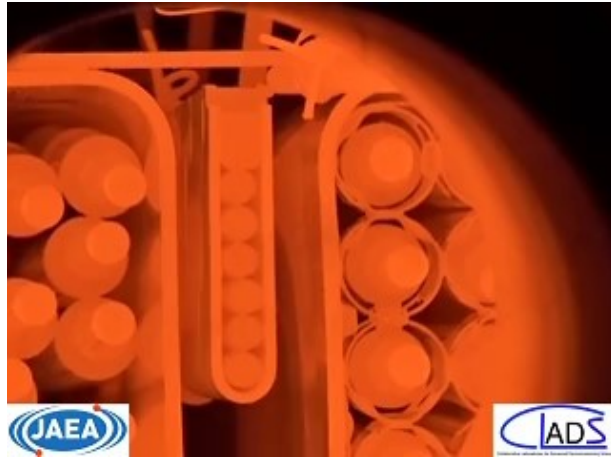
1.2 m

炉心露出時間と崩壊熱の関係例

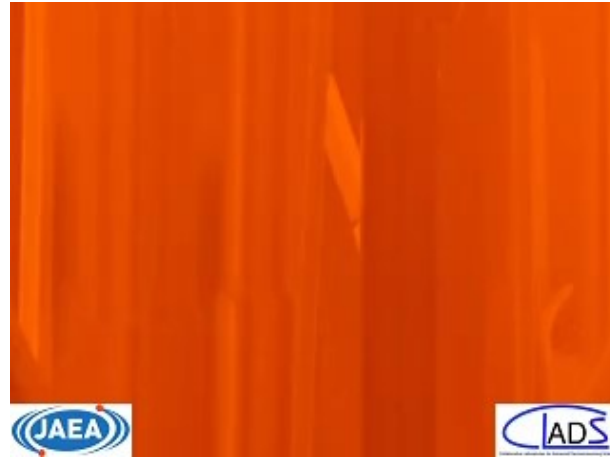


- 初期酸化膜付加：約 $40\mu m$   
通常運転時に形成する酸化膜
- 昇温速度： $0.3^\circ C/秒$   
炉心露出時の崩壊熱が小さい条件
- 水蒸気流量： $\sim 40g/秒$   
知見が不足していた水蒸気が乏しい条件

①天井面から



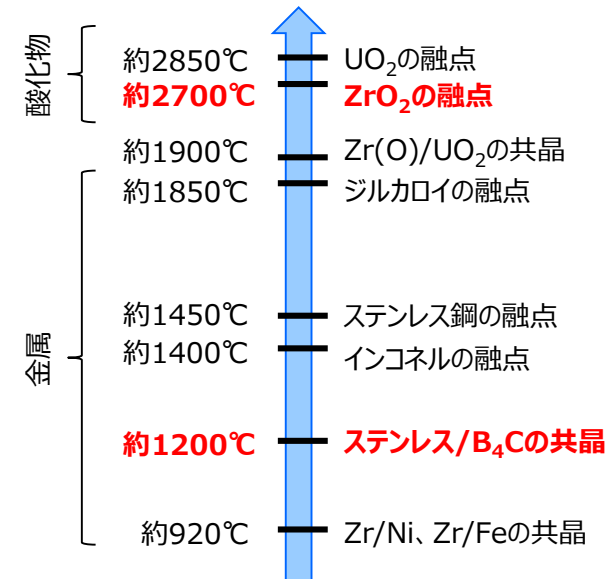
②背面上部から  
(底部から約1200 mm)



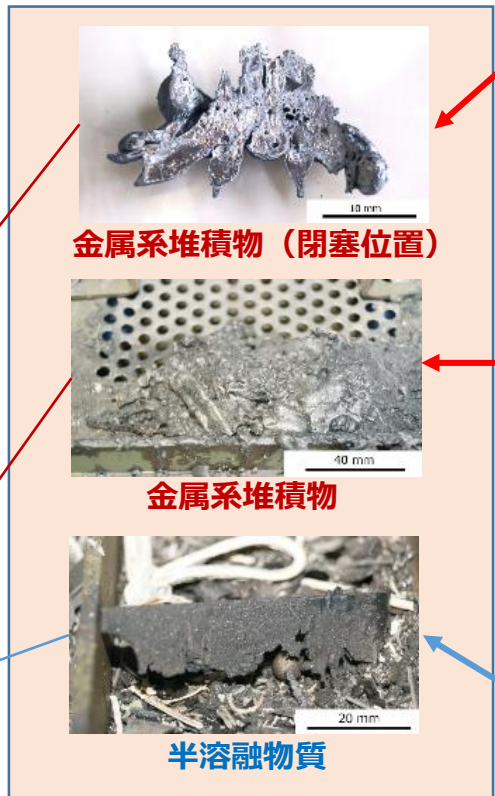
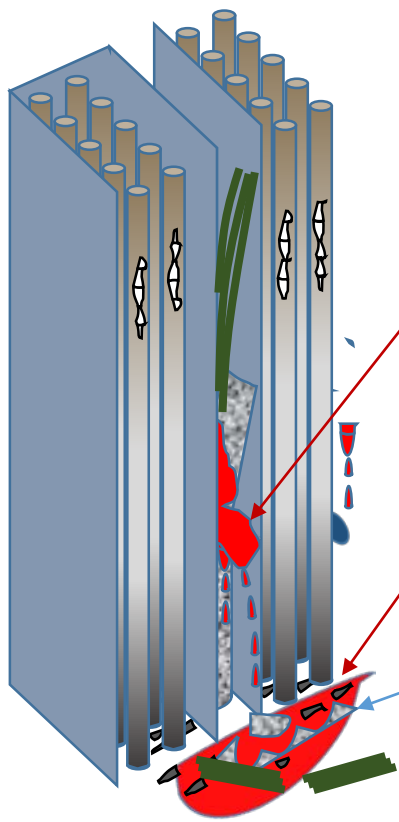
③背面中部から  
(底部から約750 mm)



- 一部の制御棒ブレードは溶融（約1200℃）し、一部の制御棒ブレードはその形状を残したまま下部へ落下
- 制御棒ブレード溶解物はチャンネルボックスと反応することなく、下部へ液下
- 制御棒ブレード溶解物が、低温部（1200℃以下）で固まり、冷却ガス流路を閉塞







## ○ 小石状物質

- 主成分は、ステンレス・ジルカロイ（酸化、または部分酸化）
- 残留 $B_4C$ や燃料の一部が、内部に包まれている可能性
- 破碎・粉体化しやすい可能性

## ○ プレート状物質

- 主成分は、ステンレス（未酸化）
- 残留 $B_4C$ が内部にくるまれている可能性
- Bの溶融により、ステンレスが硬化している可能性

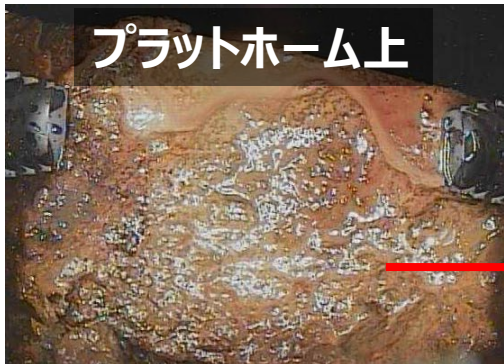
## ○ 半熔融の金属系物質

- チャンネルボックスなどの一部と推定
- 残留 $B_4C$ や燃料の一部が、内部に包まれている可能性
- 化学活性が残留している可能性

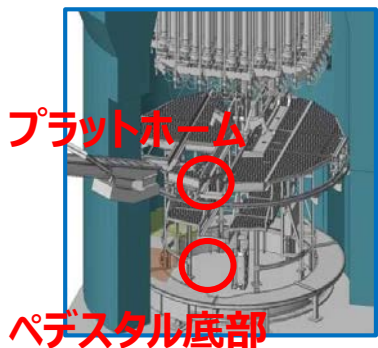
金属系デブリの生成挙動  
 (左図：模式図、右図：生成物の外観)

## 1F2号機格納容器内堆積物\*

## LEISAN試験生成物



溶融した状態で直接下部へ落下し、冷えて凝固したもの（岩状の堆積物）



溶融前の形のまま酸化し下部へ崩落したもの（構造物の一部と推定される堆積物）



チャンネルボックスに付着凝固した小石状の堆積物



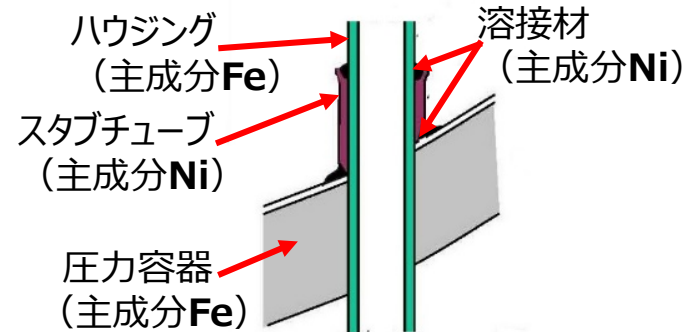
\*東京電力ホールディングス、福島第一原子力発電所 2号機 原子炉格納容器内部調査 実施結果（2019年2月28日）

## 下部ヘッド破損試験体

### 金属物質の準備

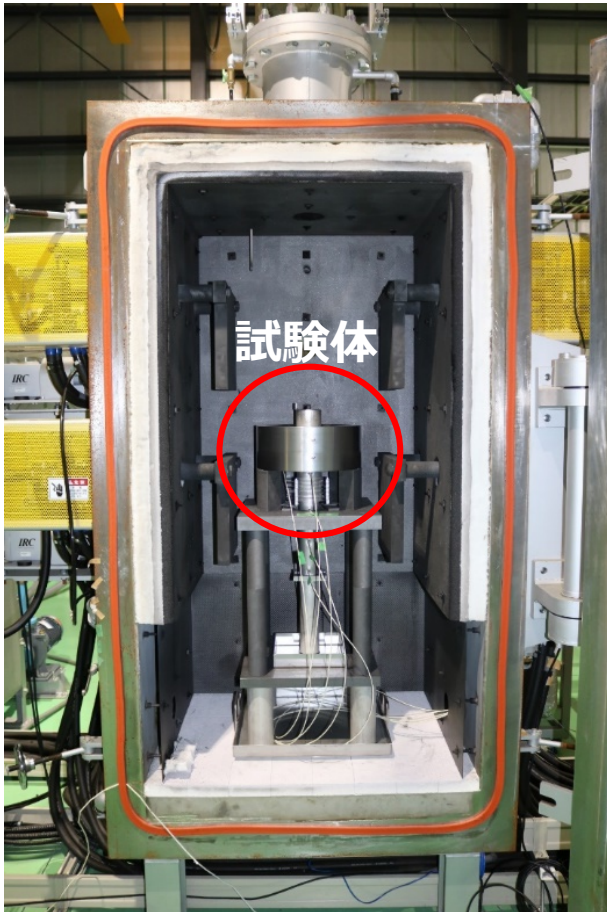


### 圧力容器下部の拡大模式図



### 試験条件

- 最高温度：圧力容器材が溶けはじめる約1500℃
- 温度分布：圧力容器内外で約250℃
- 雰囲気：Arガス



LEISANに試験体を設置

金属デブリが堆積すると、酸化物デブリが溶融する温度より1000℃以上も低い温度で局所的に溶融・反応で破損が起こる可能性が高い。

**金属材**  
 ・ジルコニウム  
 ・ステンレス鋼  
 ・B<sub>4</sub>C

制御棒駆動機構  
ハウジング



熱電対

加熱開始時

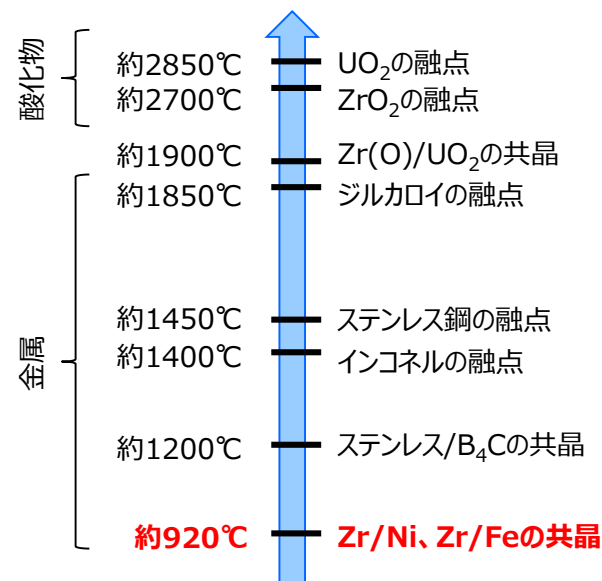


金属系デブリ材が溶融開始 (約900℃)

**ハウジング内部への流出**  
 (約1100℃)



溶融金属デブリが制御棒駆動機構ハウジングを破って、ガイド管内部に流出

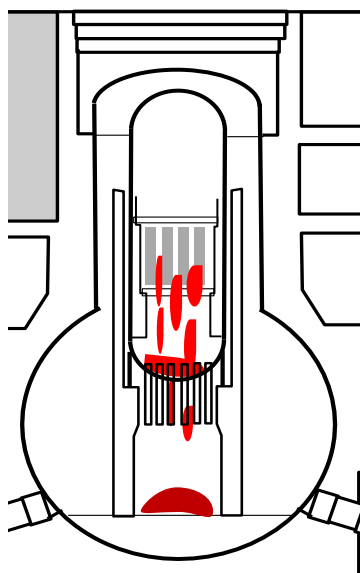


## ➤ 燃料デブリ堆積状況把握の高精度化

多様な燃料デブリ

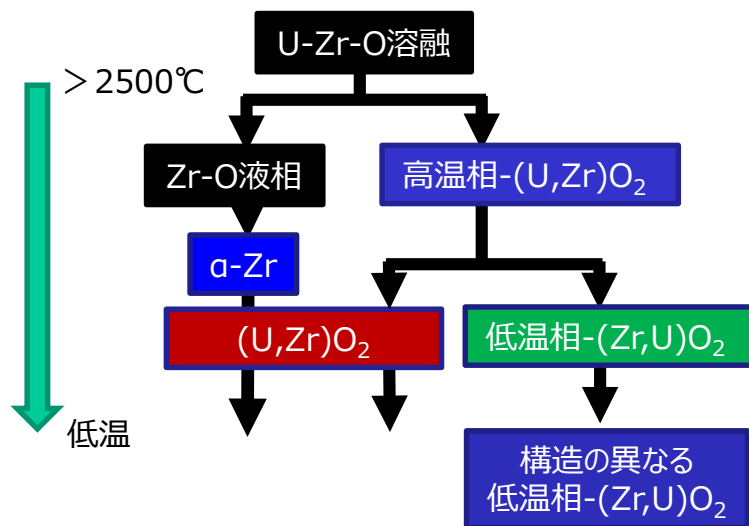
主な元素：U、Zr、Fe、Ni、B、O

事故条件：水蒸気量、最高温度、冷却速度



燃料デブリ取出し

相の同定  
各相の量などの分析



例として、

燃料棒の溶融後のデブリ形成

急冷：単相

徐冷：2～3つの相（冷却速度に依存）



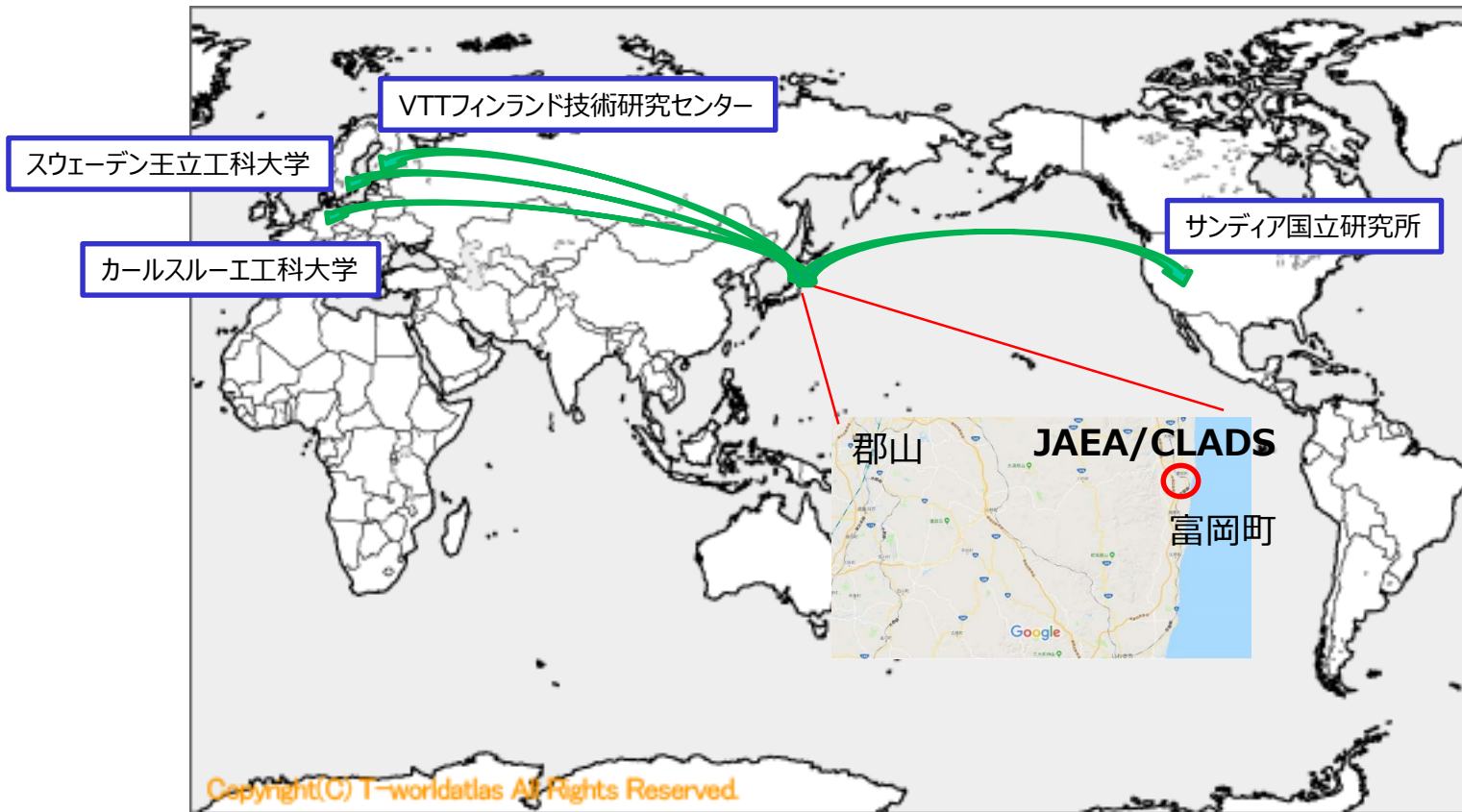
➤ 燃料デブリ性状把握の高精度化

- 1F 2号機の内部調査から、燃料デブリは、燃料や燃料棒、炉内の構造物等が混合して固まっている、複雑な形態であると推測される。
- 試験的に取り出した燃料デブリの分析データをもとに、
  - 燃料デブリ形成過程（局所領域での挙動）
  - 事故シナリオ（プラント全体での挙動）を、総合的に評価することで、燃料デブリがたどってきた過程（温度履歴など）を推測する。  
これをもとにしたデブリ形成過程条件で、
  - LEISAN等の試験装置により模擬物質を作製

燃料デブリの状態把握の高精度化を図り、取出し規模の拡大に向けた、取出し方法の検証・確認に資する。

LEISANは、従来試験装置にない画期的な性能を有しており、

- BWRを保有する国の研究機関等から研究協力の申し入れを受けている。
- 次世代研究者を中心とした国際研究者ネットワークの“ハブ”を富岡町に整備することにも取り組んでいく。



- 高温水蒸気雰囲気中で、軸方向温度勾配をかけたまま急速昇温することで、溶融・移行・堆積挙動を、試験中の映像で調べることができる、世界初の装置（LEISAN）開発に成功した。この装置は国際的に注目され、装置を利用した国際協力などを通じて、燃料デブリの形成メカニズム解明に挑んでいる。
- これまでに、LEISAN試験で得られた金属系生成物と実堆積物の類似性から、実際の情報が少ない中で、2号機での金属系デブリ堆積を裏付ける知見を得た。
- 今後は、実デブリの形成過程の評価から、燃料デブリの状態把握を高精度化する計画である。この知見により、燃料デブリ取り出し規模の拡大に向けた、取り出し方法の検証・確認に貢献する。

多目的試験棟／CLADS



LEISAN装置



ワンチームでLEISAN試験を実施

