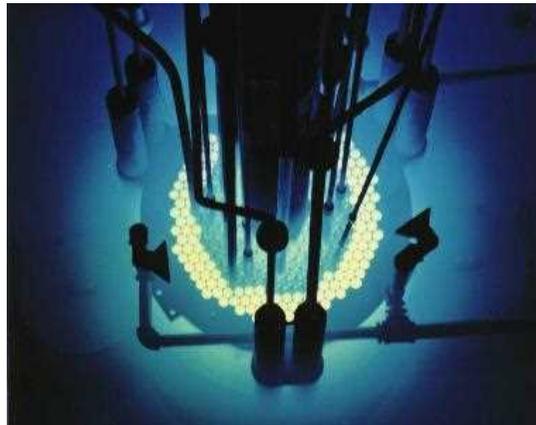


基調講演

# 新技術の導入について



更田 豊志

2023年12月14日

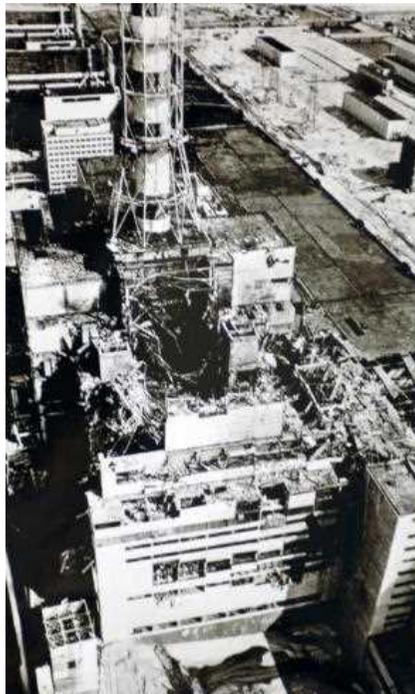
# 新技術の導入



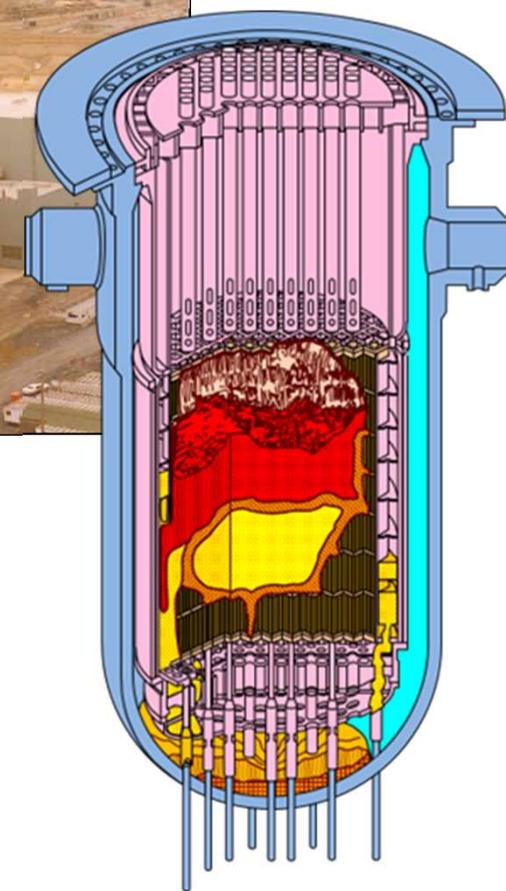
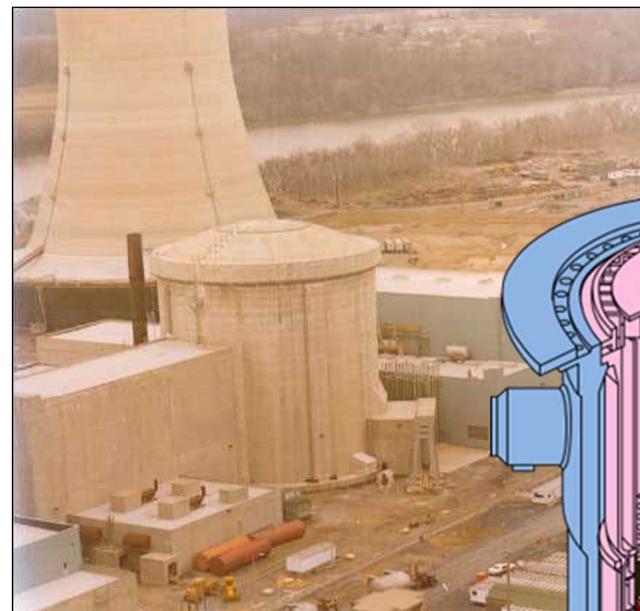
- ✓ 新技術は、東京電力・福島第一原子力発電所事故の教訓に対する工学的な回答の一つ。
- ✓ 既設炉に対する工学的回答は、地震・津波といった自然の脅威への備え、シビアアクシデント対策、火災防護、セキュリティ対策などの大幅な強化とその継続的な改善。
- ✓ 原子力の利用をさらに続けるのであれば、原理的に安全性の高い技術の開発・導入を進めようとするのが義務であり倫理的行動。
- ✓ 思考の停滞/停止を防ぎ、いったん決めたことに固執して変化を嫌う姿勢を排除することが、最も重要な事故の教訓の一つ。安全神話とは、思考の停止をもたらすもの。

# シビアアクシデント

チェルノブイリ  
原発4号機  
1986



スリーマイル島原発2号機 1979



東京電力・福島第一原発 2011



# 放っておくと炉心は溶ける

## 熱バランスの概略

100万kWe軽水炉の場合  
熱出力は約 3 GW.

停止後1時間～1日  
崩壊熱：約 1%, 約 30MW

停止後1ヶ月～3ヶ月  
崩壊熱：約 0.3%, 約 9MW

停止1年後  
崩壊熱：約 0.1%, 約 3MW

冷却材200トンの蒸発潜熱：約 400GJ

崩壊熱により炉心の冷却材が干上がるのに約 4 時間(400GJ/30MW)

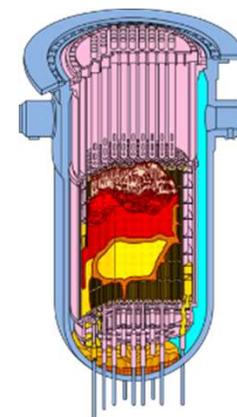
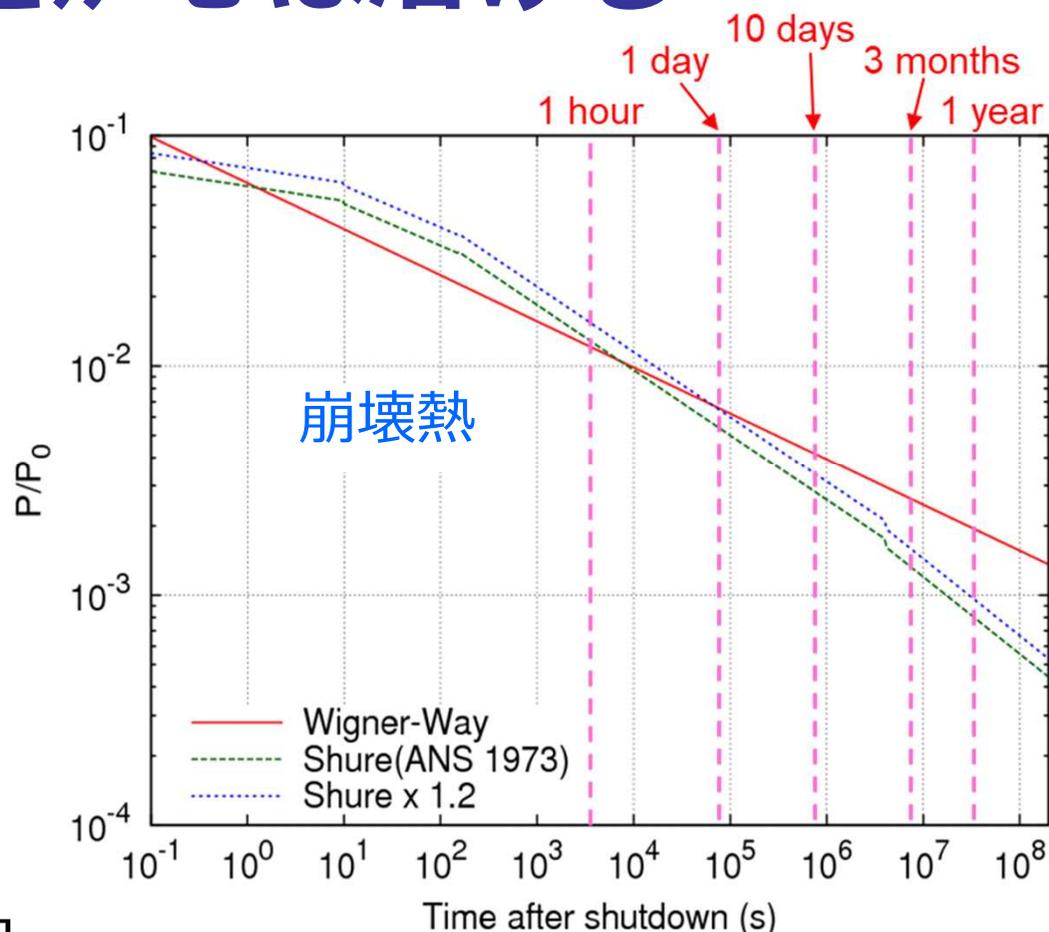
炉心150トンの熱容量：約 75GJ/1000K

崩壊熱による炉心温度1000K上昇に約 40分

炉心の融解潜熱：約 45GJ

ジルコニウム30トンの酸化反応熱：約 200GJ

この約 200GJは炉心温度2000K上昇(75x2) + 全炉心溶融(45)に相当



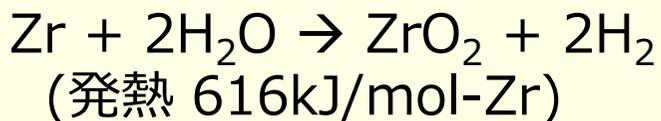


UTokyo

# 炉心溶融における酸化反応の寄与

事故初期に冷却材を蒸発させ、炉心温度を上昇させるのは崩壊熱。

約1500Kを超える温度からは、Zr/水反応による発熱が支配的に。



TMI-2炉心の全Zrが反応した場合には炉心全体の温度が2000K程度上昇。

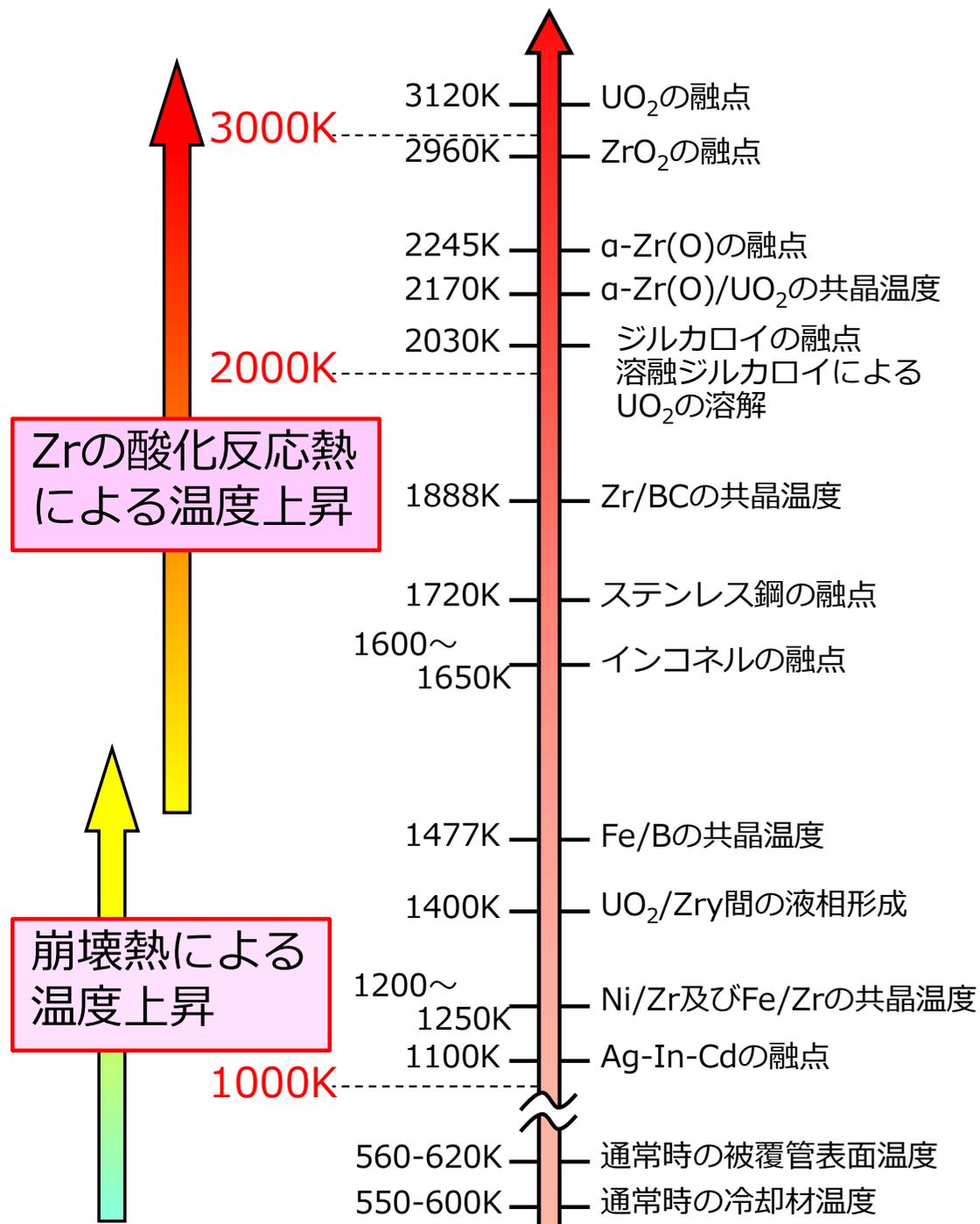
1500K以上では急激な温度上昇

この反応は水素を発生させる点でも極めて重要。

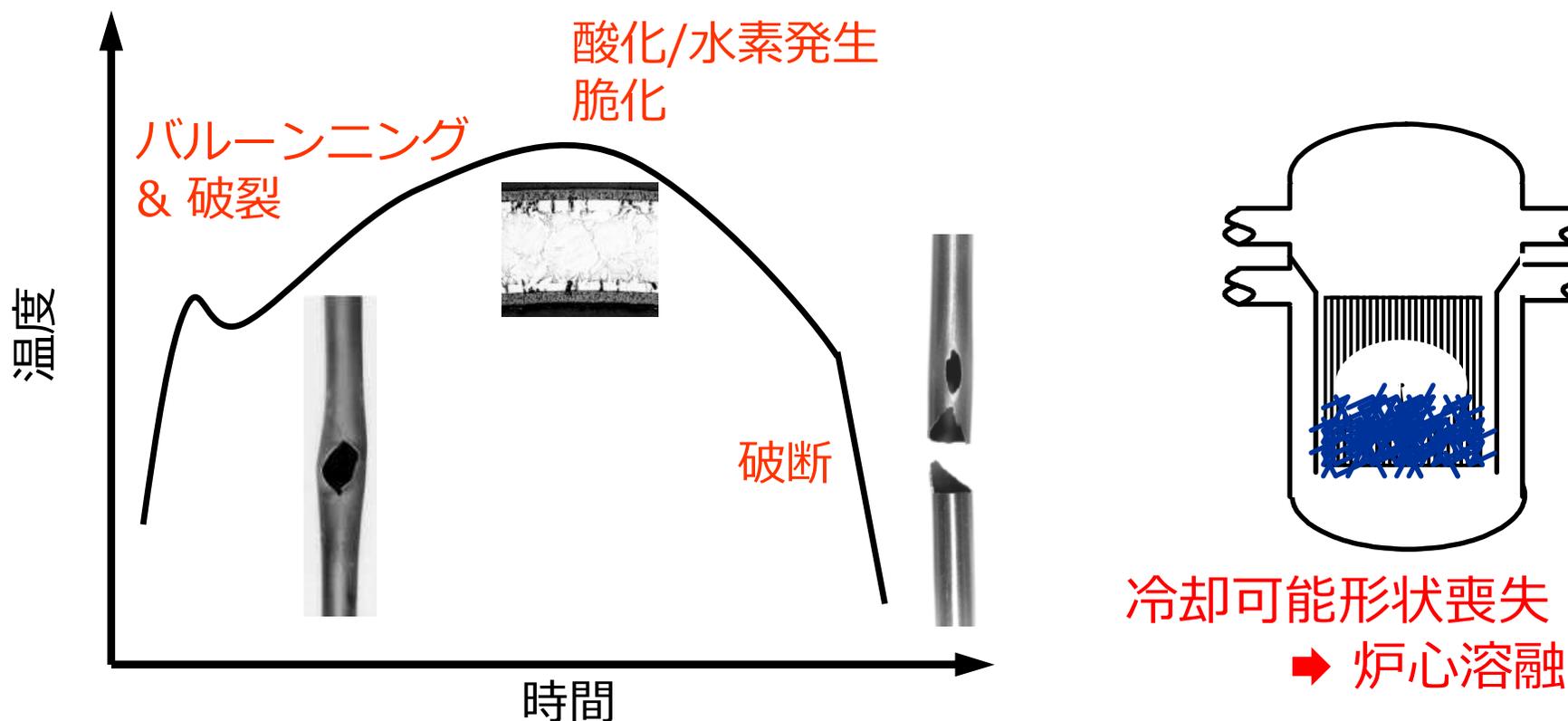
なお、Zrが空気と反応する場合は反応熱が1100kJ/molと大きくなる。

✓ 酸化反応の抑制が第一目標に

➡ 酸化反応抑制だけが特に重要なのか？



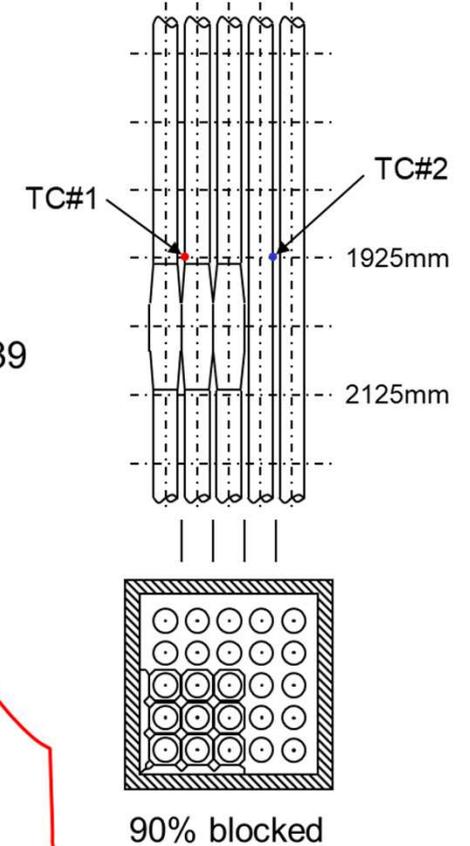
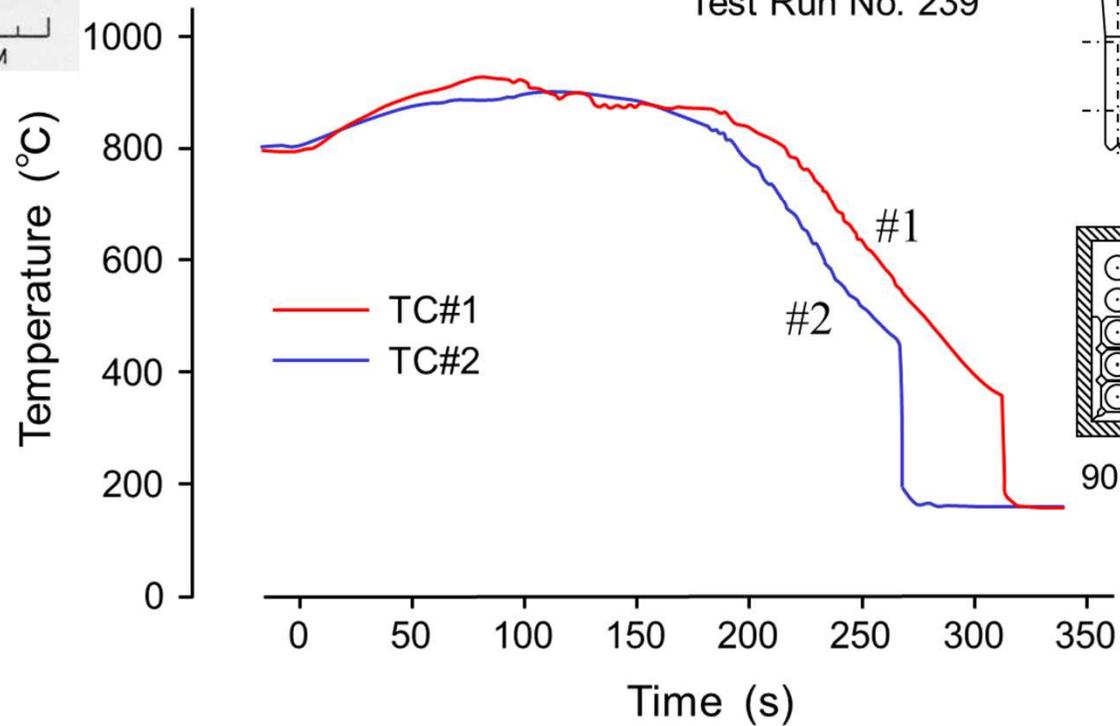
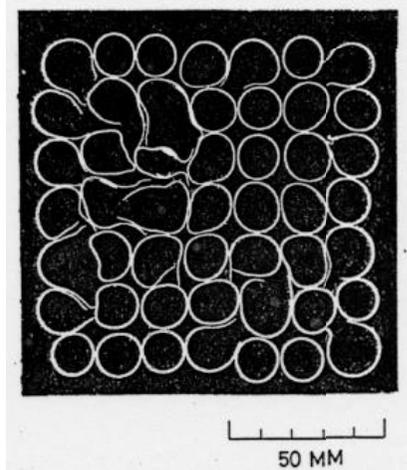
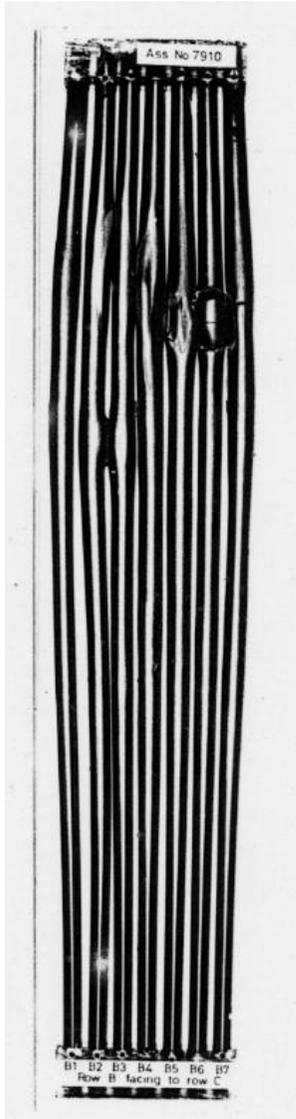
# LOCAから炉心溶融に向かう道筋



## 炉心溶融の可能性

- ① バルーンニングによる流路閉塞
  - ② 破裂・開口による微粒子化した燃料ペレットの飛散 (FFRD)
  - ③ 1500K以上で熱暴走
  - ④ 酸化/水素吸収によって脆化した燃料棒の破断
- ↑ 現行のECCS性能評価指針は③④を防止

# バルーニングによる流路閉塞



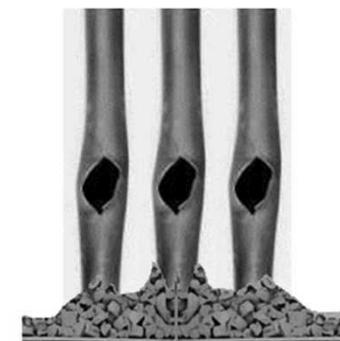
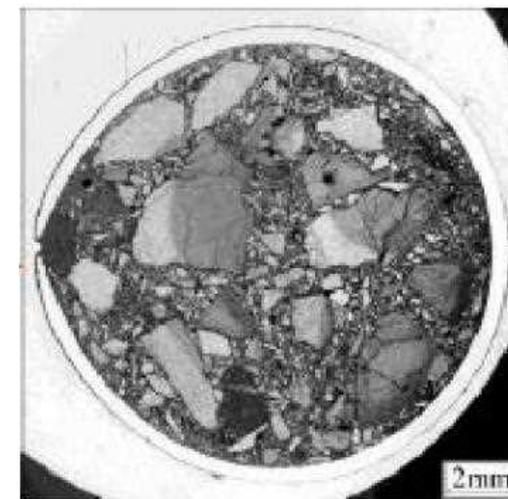
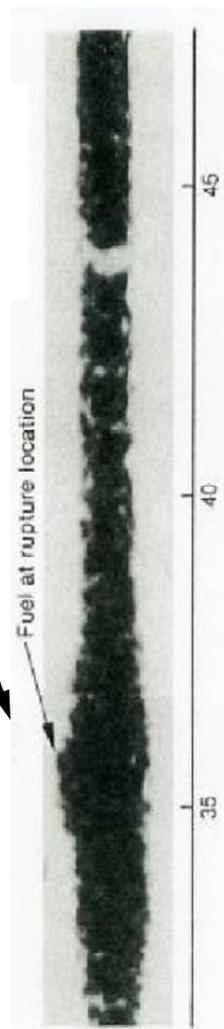
- ✓ 流路90%閉塞でも冷却可能との実験結果あり。
- ✓ 但し、改良被覆管の高い延性はバルーニング拡大の可能性あり。

# 燃料の飛散

FFRD; Fuel fragmentation, relocation and dispersal

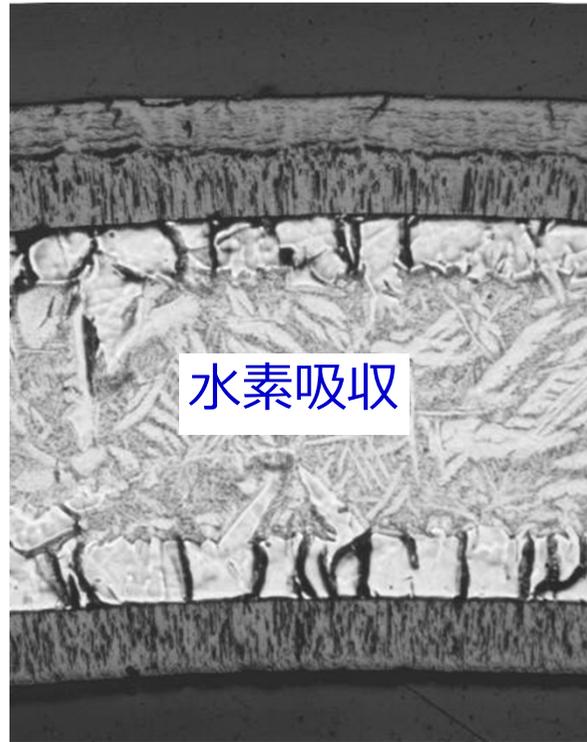
微粒子化した燃料  
ペレットの膨れ部  
への軸方向移動

test #	2	7	6	11	10	12	13	14	3	5	9	4
burnup, MWd/kg	0	44.3	55.5	56	60	72.3	74.1	71.1	81.9	83	90	92
balloon strain, %	54	23	49	25	15	40	45	55	8	15	61	62
radiography												
ceramography												
fragment size	coarse	coarse	coarse	coarse	coarse & some fine	coarse & fine	coarse (& fine?)	coarse (& fine?)	medium	medium & fine	medium & fine	medium & fine
gamma scan												
flask bottom →												
HBS width												
dispersal (qualitative)	none	none	none	none	some	some more	nearly none	did not fail	n/a	much	much more	much more



- ✓ 高燃焼度燃料を対象としたハルデン炉における実験は、燃料ペレットの微粒子化、膨れ部への軸方向移動、開口部からの冷却材中への飛散の可能性を示唆 ➡ 冷却可能形状喪失の可能性

# 被覆管の酸化



通常照射中に  
形成した  
酸化層

ZrO<sub>2</sub>

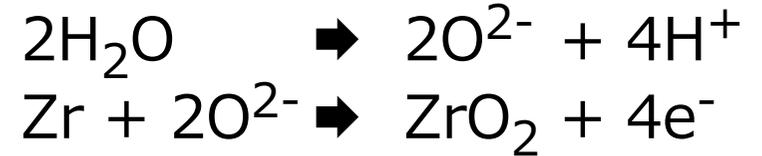
α-Zr(O)  
(LOCA時)

金属層 (Prior-β)

α-Zr(O)

ZrO<sub>2</sub>  
(LOCA時)

水素吸収



**熱暴走**

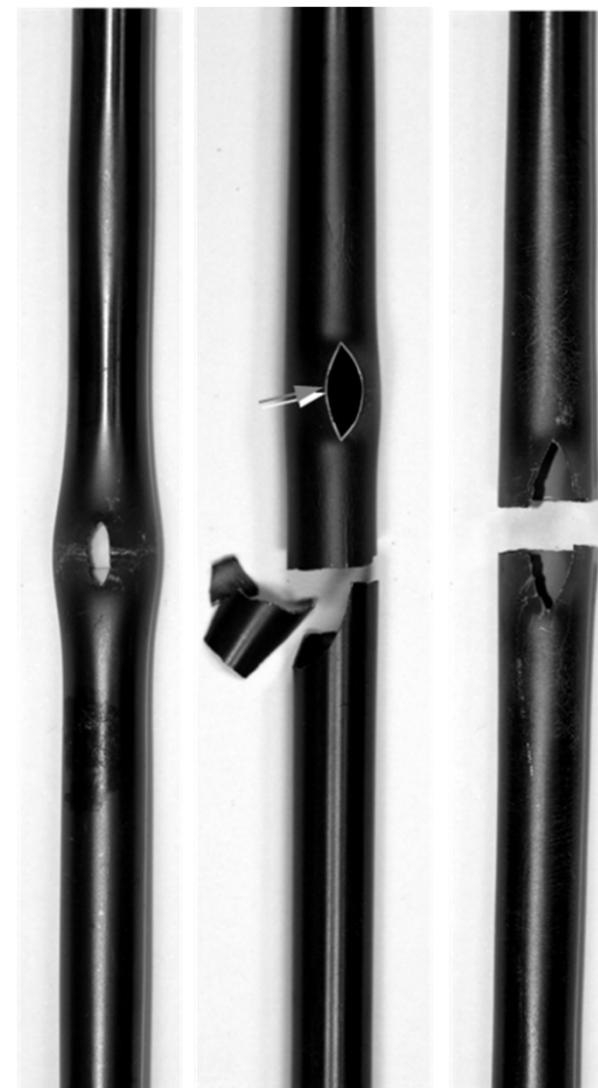
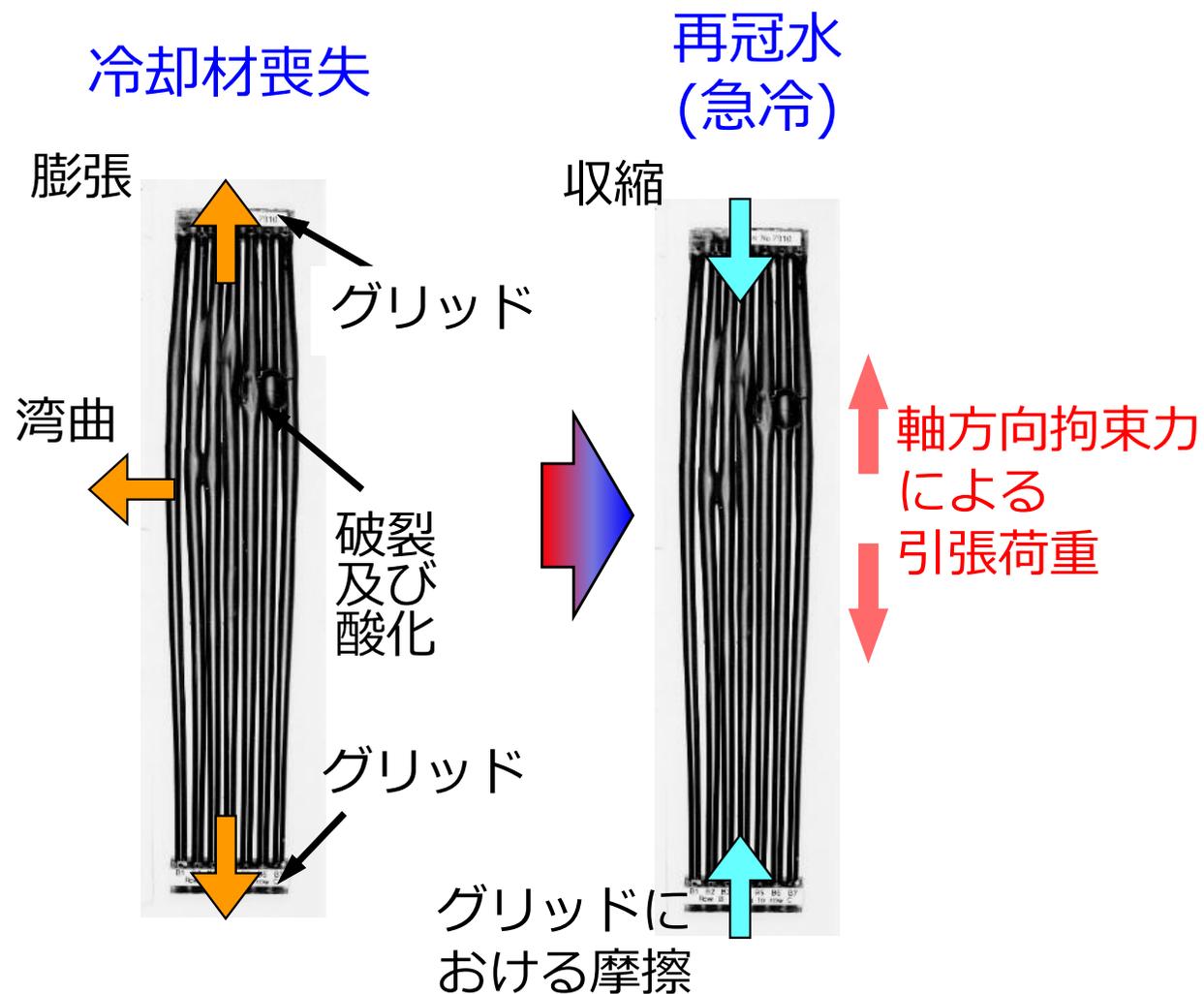
温度上昇

反応加速

発熱増大

- ✓ 再冠水までの高温期間に被覆管は水蒸気により酸化
- ✓ 酸化/水素吸収により被覆管は脆化
- ✓ 1500K以上で熱暴走 → 炉心溶融

# 燃料棒の破断



- ✓ 再冠水に伴う急冷時の熱衝撃及び軸方向荷重により燃料棒が複数に分断
- ✓ 燃料棒の分断は冷却可能形状喪失と見なされる.

# LOCAなどにおける炉心溶融の回避

- ✓ 再冠水時の燃料棒破断のしきい値は、それまでの被覆管の酸化/水素吸収による脆化の程度によって決まり、燃料棒の破断を防ぐには急冷前の酸化を抑える必要がある。一方、酸化の暴走(熱暴走)を防ぐには、被覆管温度を1500K以下に保つ必要がある。このため、ECCS性能評価指針(LOCA基準)はピーク被覆管温度(PCT)と等価被覆酸化量(ECR)の2つのパラメータを制限している。
- ✓ 一方、FFRDによる冷却可能形状の喪失については、一部にこれを防ぐための規制の変更を迫っている専門家がいますが、議論は続いており、これまでのところLOCA基準では考慮していない。
- ✓ RIAにもOxide spallationなど考慮すべき現象が幾つも。
- ✓ 炉心溶融の防止において**重要なのは酸化抑制だけではない**。
- ✓ 通常運転時の燃料ペレットからのFPガス放出抑制は、事故時の健康/環境影響低減に直接的な効果あり。
- ✓ **事故との闘い、安全の追求という観点からすると、ATFの開発目標は継続的に問い直され、議論されていることが重要。**



# 顧客の導入意欲



- ✓ 実用化のためには、原発を運用する電力会社の導入意欲を喚起する魅力をATFが備えなければならない。

安全性向上の恩恵は電力会社だけでなく社会全体が受けるが、導入を決めるのはあくまで電力会社であり、果たしてATFはその顧客に十分な導入意欲を与えることが出来るだろうか。

- ✓ 通常時の健全性や高燃焼度までの耐久性を犠牲にして導入する電力会社は無いし、規制当局やStakeholderもそれを許さない。  
10<sup>-4</sup>イベントでのメリットのために10<sup>0</sup>イベント(確率1)でのデメリットを受け容れることは出来ない。
- ✓ 国が支援しているうちに、顧客の導入意欲を喚起できるものにしなればというのは各国共通の認識であり課題。

米国ではNEIMA法においてATFを既存原発の事故耐性を強化するとともに運用期間中の発電コストを低下させるものと定義。

# 低頻度高影響事象



- ✓ 原子力利用の未来を大きく左右する低頻度高影響事象を特に抑制しようというのは国際的な流れだが、一般に、**低頻度高影響事象対策の導入に向けた動機づけはとても難しい。**
- ✓ 一般に安全対策は、同じ投資であれば前段の対策に行った方が後段の対策に行うよりもリスク上のメリットは大きい。
- ✓ 発生確率が小さいだけに低頻度高影響事象には**極めて大きな不確かさ**が伴う。そして、その対策の有効性にも大きな不確かさが伴う。したがって、**費用対効果を定量的に示すことは極めて困難。**
- ✓ このため、低頻度高影響事象対策を強化する必要があるときは、電力会社の判断に代わって規制当局が強制という行政サービスを提供するケースが多い。

しかし、規制当局によるATF導入の強制や、ATF導入に伴う既存施設の省略、運転ルールの変更は考えにくい。



ATF開発の目的が、固定化、矮小化されてしまうことは、事故との闘いという安全上の観点から問題であるばかりでなく、導入の実現にとっても障害となる。

JAEAが原子力委員会に報告した「日本における事故耐性燃料研究の現状及び今後の見通し」(2023.4.4)では、ATF開発 イコール 酸化抑制による温度急昇と水素発生抑制・緩和⇒事故への対処時間延伸。

安全の追求に向け、思考の停滞や停止に陥ることなく、また、実用化のために必要な電力会社の導入意欲を生むためにも、開発目的の固定化、矮小化を避け、継続的な議論とともに計画が見直されることが重要。

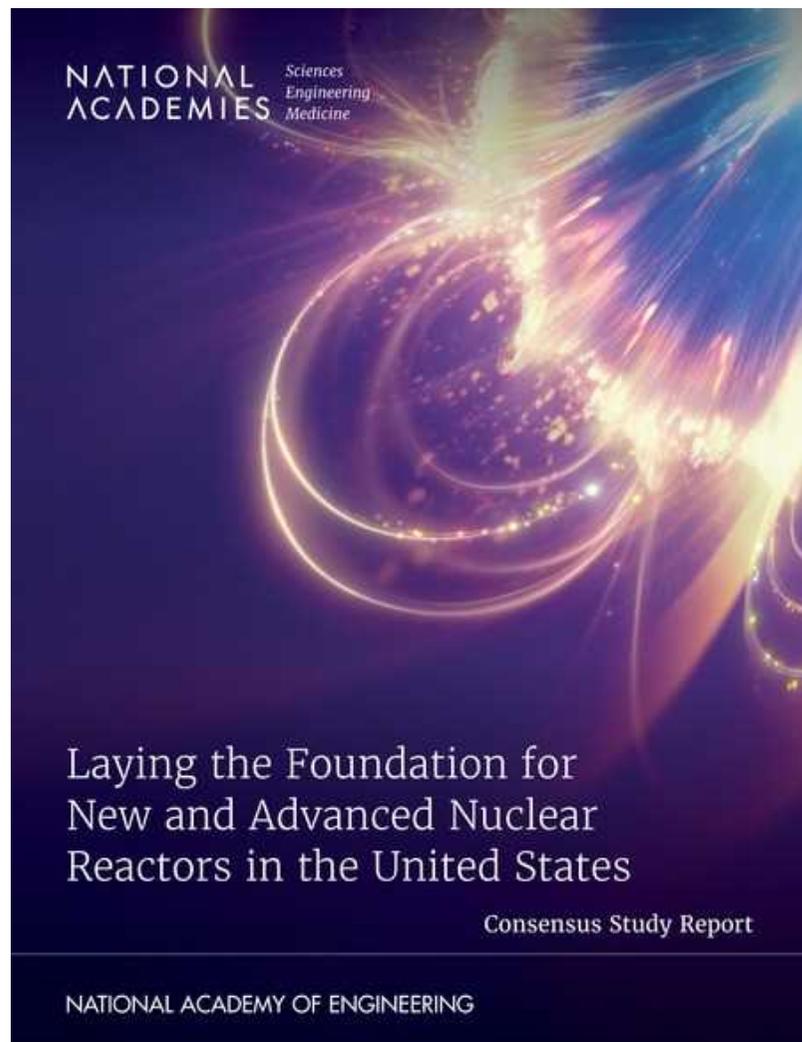


UTOKYO

# 米国における新型炉/革新炉のための基盤構築

14

米国・科学アカデミー/工学アカデミー/医学アカデミー  
が編成した委員会(リチャード・メザーブ議長)の報告書



米国における新型炉/革新炉の開発・実用化における要件を、技術、経済/資金、経営管理、建設、規制、社会的受容性、セキュリティ、保障措置、輸出/国際競争など様々な面から検討し、課題と提言をまとめたもの。

技術面では、

- 定期的な計画の見直し
- 実験施設の二一ズの特定
- 最新の試験炉の利用

などを提言。

# 試験炉の必要性

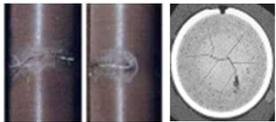
- ✓ 出力急昇試験などの試験炉照射は不可欠だが、国内では実施出来ず、海外炉の利用も限定的であり、高経年化も深刻。  
JMTR廃止、Halden炉廃止、JHR供用の遅れ
- ✓ 国際協力(OECD/NEA FIDES等)は極めて重要だが限界あり。
- ✓ 米国にはATRがあり、後継機も計画。軍と併用。自国中心。
- ✓ 国内での照射炉建設が不可能であれば、既にスタートしている将来計画への参加を検討せざるを得ないのではないか。  
現時点では仏JHRが唯一進行中の計画。



# JHR: スタート時の実験装置

## ADELINE

燃料出力急昇試験  
異常過渡  
PCI破損  
リフトオフなど。



ADELINE (transient)  
Displacement system

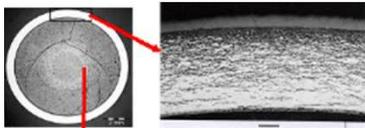
## MICA (x3)

材料照射



## MADISON

燃料定常照射



Fuel μstructure  
FG releases

Clad corrosion  
Crud,...

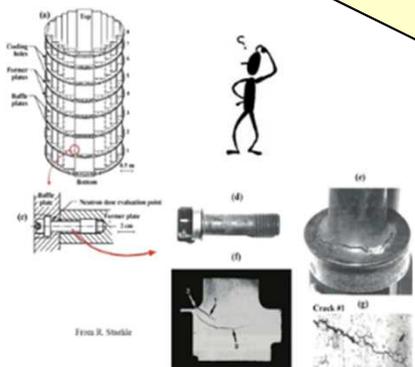
MADISON  
(BU cooking)  
Displacement system

## OCCITANE

圧力容器鋼材  
の特性試験

# JHR: 第2期実験装置

**CLOE**  
 被覆材腐食ループ  
 材料腐食試験  
 IASCC



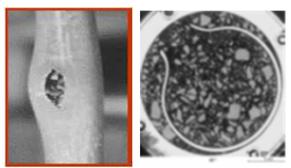
**Advanced MICA (x2)**  
 材料照射 + 荷重

**CALIPSO**  
 材料照射  
 (高精度温度条件)

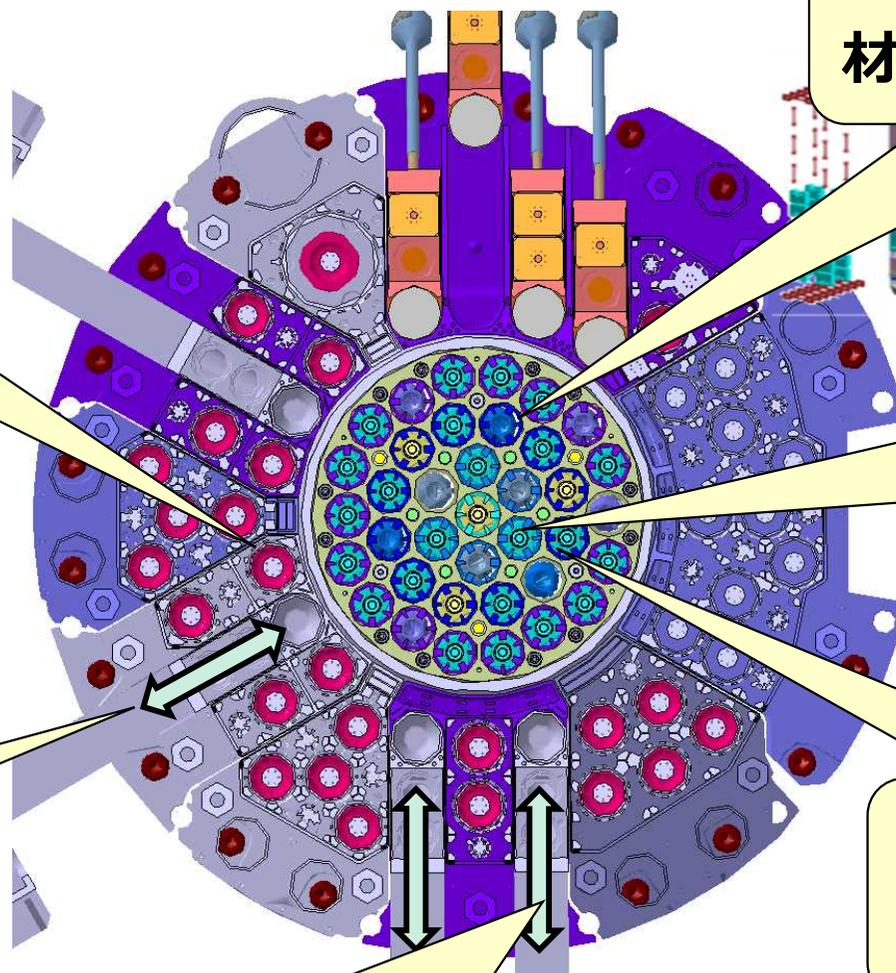
**MELODIE**  
 被覆管多軸応力試験



**LORELEI**  
 燃料LOCA試験



**MADISON 2**  
 燃料(通常運転状態)



## 終わりに

- ✓ 導入が実現するためには、新技術が顧客のニーズ(優先順位)に沿ったもので、かつ、導入に向けたインセンティブを与えるものであることが不可欠。
- ✓ Accident Tolerant Fuel は **Advanced Technology Fuel** の一側面に過ぎない。安全上の観点からも、導入の観点からも、**開発目的を矮小化させないことが重要**。10 x 10燃料も出力増強を目指してこそ、導入が進み、安全性も高まる。
- ✓ 試験研究炉の利用は不可欠であり、将来的な国際共同計画への参加について国内議論の活性化が必要。
- ✓ TMI-2事故後、米国は出力増強、長サイクル運転、これらに必要な高燃焼度化を進めた。燃料分野の役割は極めて大きい。

