

ATF-PFキックオフ会合資料①

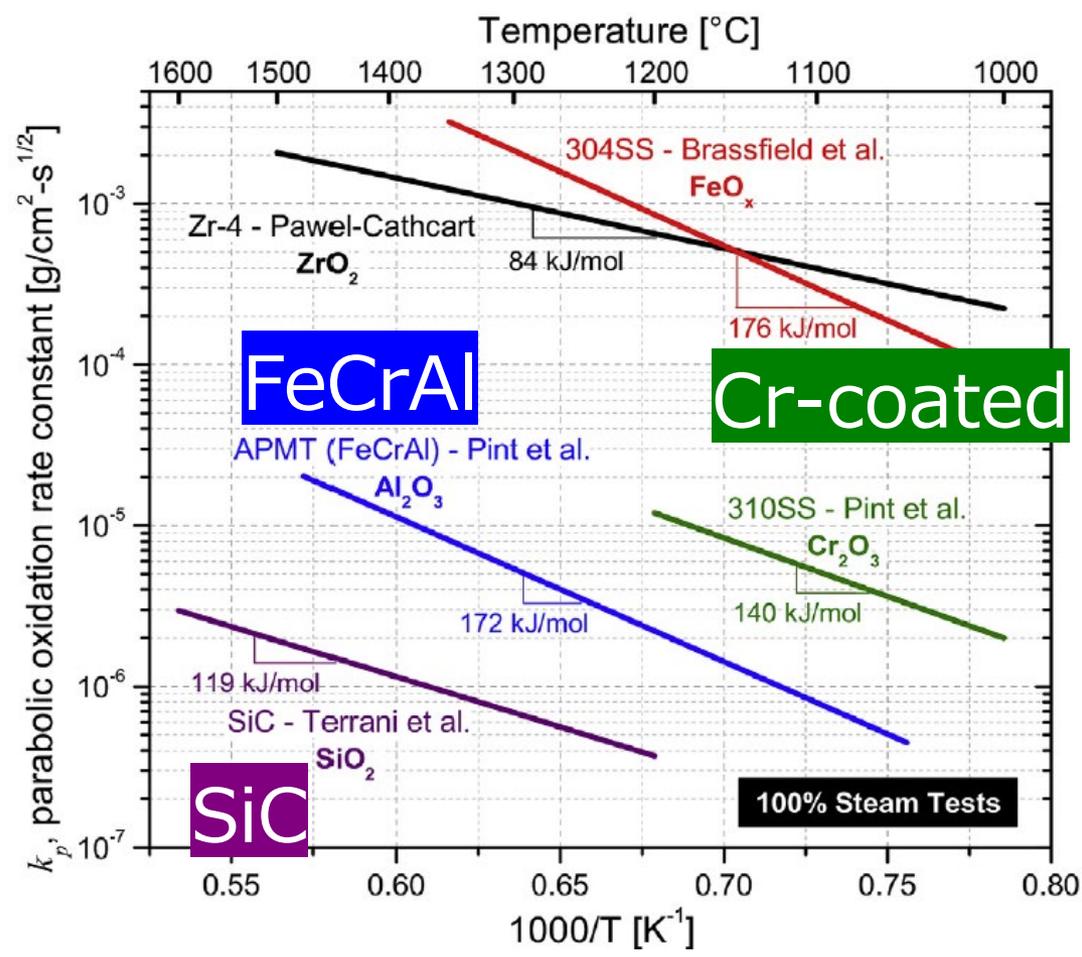
# 資源エネルギー庁受託事業 における新型燃料（ATF）の 開発状況の概要について

日本原子力研究開発機構

2025年7月1日

本研究は経済産業省原子力の安全性向上に資する技術開発事業JPMT003830の助成を受けたものです。また、本研究の一部には、国内のATF開発メーカー（三菱重工、日立GE、日本核燃料開発、グローバルニュークリアフュエルジャパン、東芝ESS）／研究機関（電力中央研究所、量子科学研究機構）／大学（早稲田大学、東北大学）との協力で得られた成果が含まれています。

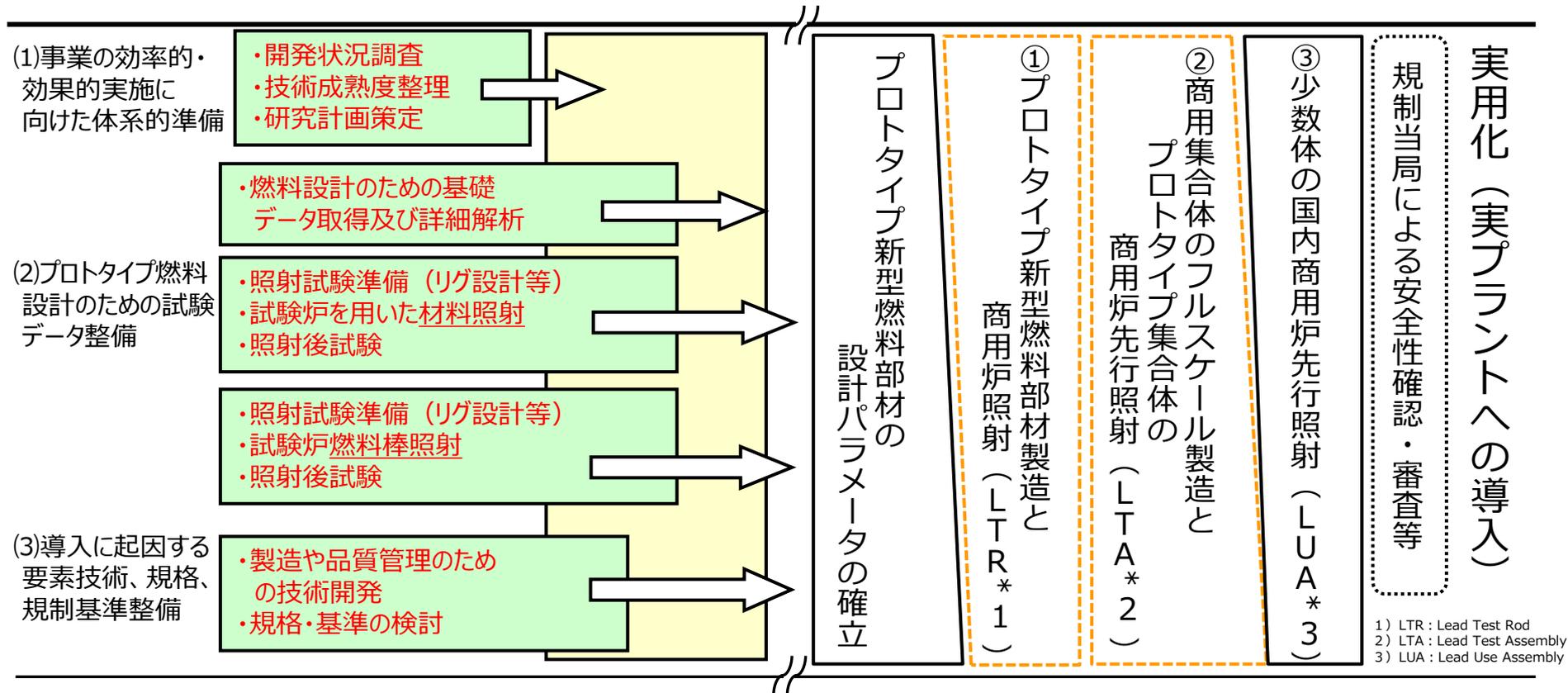
- 福島第一原発事故：  
ジルカロイ合金被覆管酸化による  
温度急昇と水素発生・爆発
- 酸化抑制による温度急昇と水素  
発生抑制・緩和  
⇒事故への対処時間延伸
- ATF被覆管として国内開発中の  
ものは以下の3つ
  - Cr-coated
  - FeCrAl
  - SiC
- 現行のジルカロイ合金に比べて  
高温水或いは水蒸気との酸化  
反応速度は概ね2桁程度小さい



1200°C: SiO<sub>2</sub> < Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < ZrO<sub>2</sub>  
 Terrani et al, JNM, 501 (2018) 13-30

参考：モハマドアフィカ「事故耐性燃料 (ATF) の実現に向けた課題の整理」、事故耐性燃料開発に関するワークショップ (2024年12月14日)、[https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2024/atfws\\_material\\_2.pdf](https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2024/atfws_material_2.pdf) から一部転記

# 軽水炉燃料の開発ステップ



開発段階

原理実証段階

工学実証段階

実用開発段階

TRL

1

2

3

4

5

6

7

8

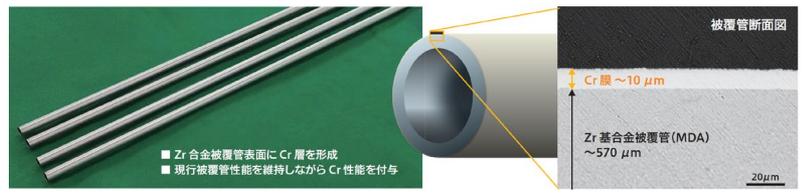
9

TRL (*)		新型燃料部材の実用化における一般定義	
実用開発段階	実用システムの運転	9	【実用化技術として選定された新型燃料部材実プラントでの商用利用】
	実用システムの検証	8	【最終的に定められた商用利用条件の証明】 少数体の商用炉先行照射(LUA)、及び、プラント運転、安全性評価、規格・基準等の最終確認
		7	【実用化製品の設計の完成】 実用技術としての設計妥当性の検証（商用燃料集合体のフルスケール製造、プロトタイプ燃料集合体の商用炉照射(LTA)、等
工学実証段階	工学技術の証明	6	【実用化候補技術の最終選定】 工学技術としての性能検証（プロトタイプ燃料集合体の製造試験、商用炉条件での照射性能検証等）、及び新型燃料部材のプロトタイプ燃料集合体の設計を可能とする規格や規制基準の確立、安全性評価手法の確立等
	工学技術としての開発	5	【製造と設計技術の確立と検証】 プロトタイプ燃料棒製造と商用炉照射(LTR)、新型燃料部材の規格や規制基準ガイドラインの策定、炉心設計、プラント運転、 <u>安全性評価手法の検討</u> 、および、輸送、貯蔵、処理・処分の要素技術の確立
		4	【プロトタイプ燃料棒の設計パラメータの確立】 燃料製造要素工程の性能の検証、 <u>現行の規格や規制基準に対する課題解決策の検討</u> 、現行の炉心設計、プラント運転、 <u>安全性評価手法及び輸送、貯蔵、処理・処分技術に関する課題解決策の検討</u>
原理実証段階	フィジビリティの証明	3	【技術の工学化に必要な開発課題と開発目標の明確化】 炉外試験、材料照射試験、製造模擬試験等の実施、新型燃料部材の導入に起因する重要課題(阻害因子)の検討、及びこれらに基づく、実用化候補技術の一次選定
	要素技術の提案と調査	2	【技術の実現範囲や適用範囲の明確化】 現行の規格・基準、貯蔵、輸送、処理・処分などに与える影響の検討、これらに基づき、致命的な阻害因子がないことの確認
		1	基本原理の調査に基づく、新型燃料部材の候補概念の提案、固有の属性(ATF-attribute)の明確化に基づく、原理的に達成可能な範囲の提示

(\*) TRL : Technology Readiness Level (技術成熟度レベル)

## [ Crコーティングジルカロイ: PWR ]

- 三菱重工業 (MHI)



## [ FeCrAl-ODS: BWR ]

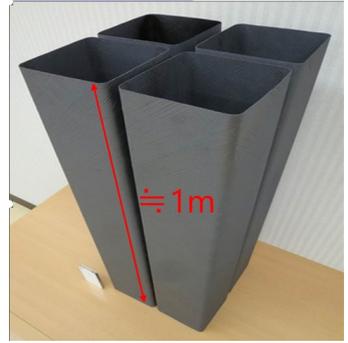
- 日立GE/グローバル ニュークリア フュエル ジャパン/日本核燃料開発



Ref. K. Sakamoto, et al., Proc. WRFPM2023, 17-21 July 2023, Xi'an, China

## [ SiC/SiC複合材: BWR&PWR ]

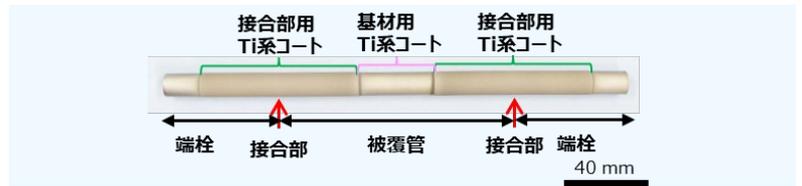
- 東芝ESS
  - BWR/PWR向け燃料被覆管
  - BWR向けチャンネルボックス
- 日立GE
  - BWR向け燃料被覆管



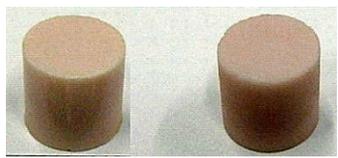
Ref. F. Inoue, TOSHIBA ATF Development Update, The 31st International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech, August 4-8, 2024 (NNO-2024-000050 Rev.0)

## [ 事故耐性制御棒: BWR&PWR ]

- 電力中央研究所(CRIEPI)



Ref. R. Ishibashi, et al, Top Fuel 2021, Santander, ENS, (2021).



- 長寿命型中性子吸収材:  $RE_2O_3-MO_2$  固溶体 (RE=Eu or Sm, M=Zr or Hf)
- 制御棒被覆管: ステンレス鋼またはATF被覆管

$Eu_2O_3-HfO_2$   $Eu_2O_3-ZrO_2$

4/2024 9/2024 12/2024 4/2025 9/2025

Crコーティングジルカロイ(MHI)

**米国ATR/INL:**  
低燃焼度照射試験 (完了)

**米国ATR/INL**  
低燃焼度材の照射後試験

FeCrAl-ODS (日立GE/GNF/NFD)

**米国ATR/INL:**  
端栓接合技術開発

**米国ATR/INL**  
照射試験開始

SiC/SiC複合材 (東芝ESS, 日立GE)

**米国MITR/MIT:**  
BWR水質環境下における  
材料照射試験を実施中

**米国MITR/MIT**  
4サイクルまで  
材料照射試験を継続

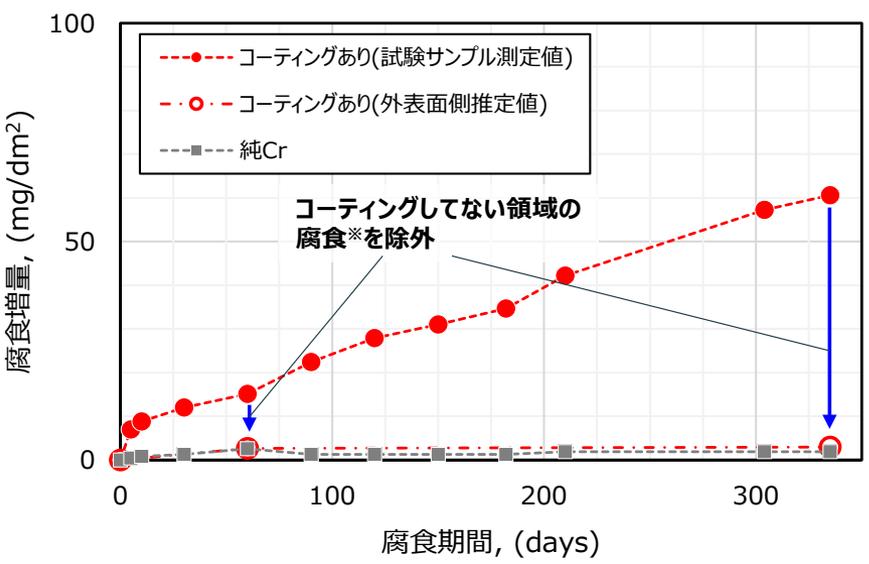
事故耐性制御棒 (CRIEPI)

**独国QUENCH/KIT:**  
Cr-Zry燃料バンドルを用いたDEC  
模擬試験 (OECD/NEAプロジェクト)

→ 上記試験は全て経産省資源エネルギー庁からの助成を受けて進行中

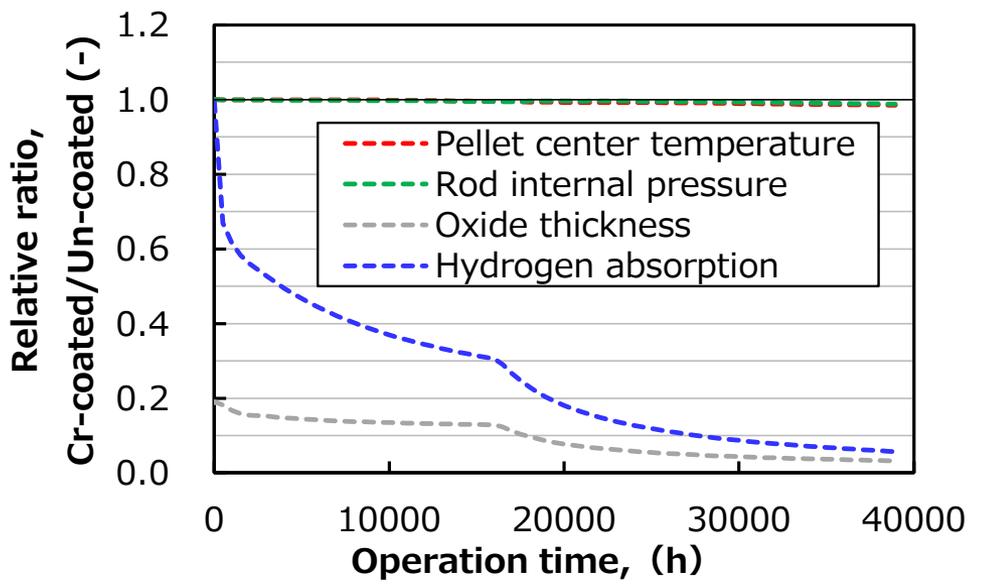
## ①Crコーティング被覆管 (三菱コンソ殿ご提供資料)

- 開発課題：
- 物性・挙動データ (耐酸化性など) の取得、拡充
  - 照射影響 (Crコーティング層の健全性など) の確認
  - 商業炉先行照射に向けた安全評価手法 (評価モデル、基準) の設定



コーティング被覆管の腐食増量の評価

岡田ら、日本原子力学会 2024秋の大会 (2024)



Calculation results of fuel behavior under normal operation conditions

Y. Okada et al., TopFuel 2024 (2024)

## ②FeCrAl-ODS被覆管、SiC被覆管（日立コンソ殿ご提供資料）

開発課題：照射試験の実施（共通課題）、物性データの取得、コードの改良、製造・検査技術の開発等

◇FeCrAl-ODS鋼技術開発の取り組み状況：  
 ユーザーが導入メリットを適切に判断するための評価や、  
 評価に必要な物性データの取得を実施中。

### ◇SiC技術開発事業

BWR向けSiC被覆管燃料の実現可能性を示すため、  
 通常運転時の耐食被覆効果について、照射試験による  
 検討を進めるとともに、事故時裕度の増大について炉外  
 試験評価を踏まえて事故時の燃料棒破損要因を検討。

### ◇規格・基準の策定に向けた検討（ODS鋼対象）

米国の動向を参照しながら、国内における規格・基準の策定  
 に向けた検討を、JAEA等と密接に連携を図りながら実施。

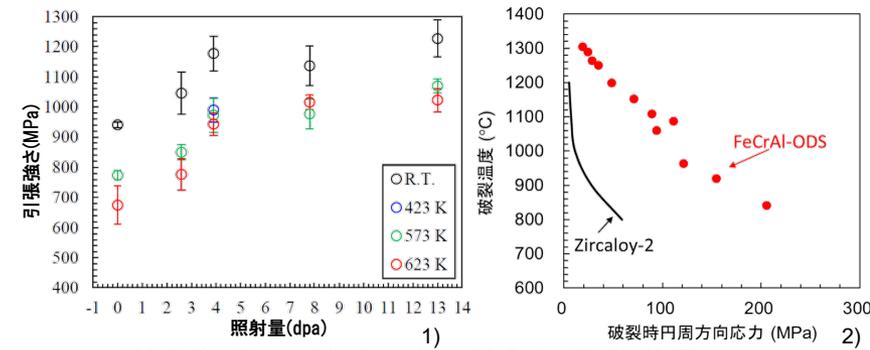


図 引張強さと照射量(dpa)の関係 図 破裂温度と破裂時円周方向応力の関係  
 1) Ref. K. Sakamoto, et al., Proc. WRFPM2023, 17-21 July 2023, Xi'an, China  
 2) Ref. K. Sakamoto, et al., Proc. Top Fuel 2022Raleigh, NC, October 9-13, 2022, 161-169

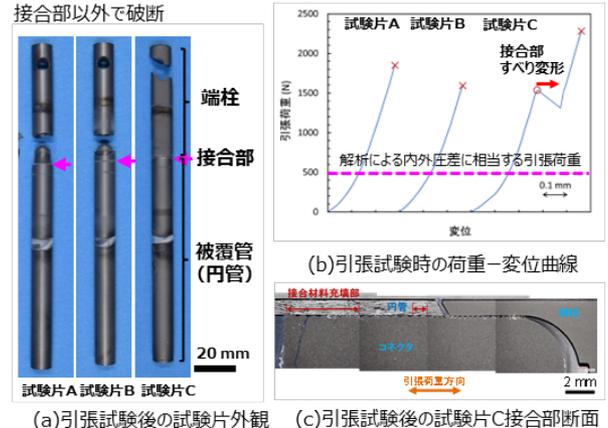


図 接合部試験片の引張試験結果 (1673 K) 3)

3) Ref. R. Ishibashi, et al, Top Fuel 2024, Grenoble, ENS, 未来へげんき (2024).

## ③ SiC被覆管、SiCチャンネルボックス (東芝コンソ殿ご提供資料)

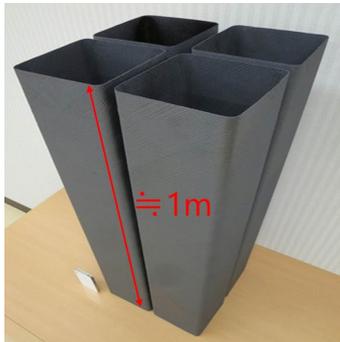
開発課題：長尺化製造技術（4m長のチャンネルボックスと被覆管）  
照射試験、材料特性試験データの拡充

- 1.5m超級のSiC被覆管及びチャンネルボックスを製造可能とする製造プロセス条件の策定を進め、将来的な長尺化に向けた製造上の技術課題を抽出するとともに解決策を確立
- MITR試験片照射(BWR条件:2024～)

### Irradiation test in MITR

(BWR condition)

- Load tube & sheet specimens
- Up to 4 irradiation cycles: ~2026



SiC Channel Box (C/B)



SiC Cladding tube Preform



## TOSHIBA

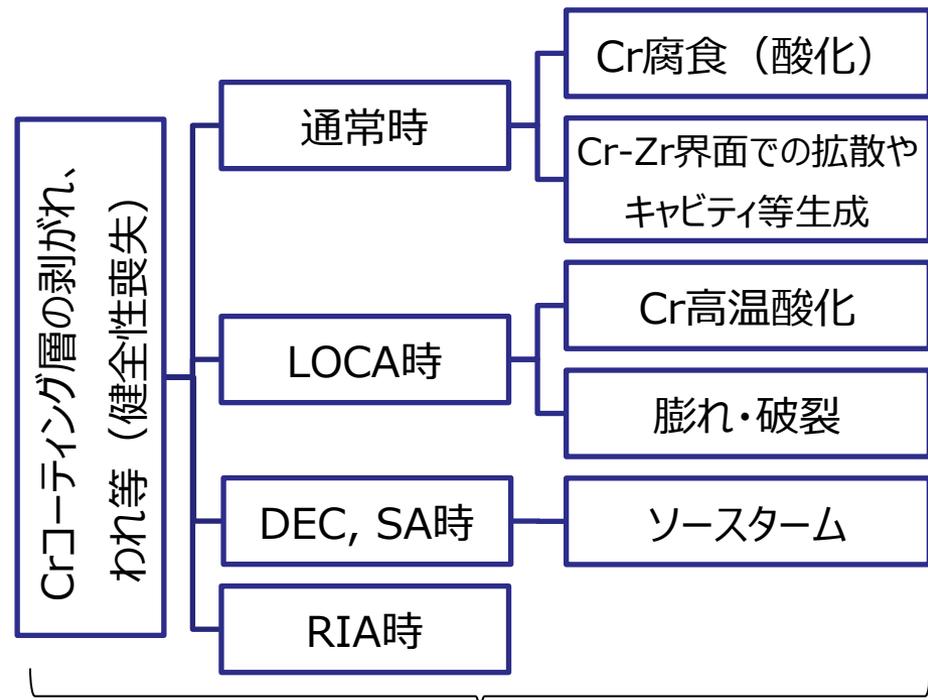
- F.Inoue, TOSHIBA ATF Development Update, The 31st International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech, August 4-8, 2024 (NNO-2024-000050 Rev.0)
- 大脇 理夫、SiC被覆管／チャンネルボックスの開発、2023年度事故耐性燃料開発に関するワークショップ (NNO-2023-000078 Rev.1)

## 「高燃焼度時」「事故時」におけるCr-Zryのふるまい解明を目指した基礎基盤研究 ⇒ Cr-Zryの開発・実装化への貢献

文献調査等（※1）により研究対象とする技術課題を抽出・整理

性能向上可能性	被覆管表面腐食抑制等
現行設計の適用性	現行Zry設計の適用性高
新現象とその影響	Cr層の効果等 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 界面：Cr-Zr共晶、熱伝導等</li> <li>• コーティング：腐食、フレッティング、LOCA時膨れ等</li> </ul>

### JAEAにおける基礎基盤研究項目



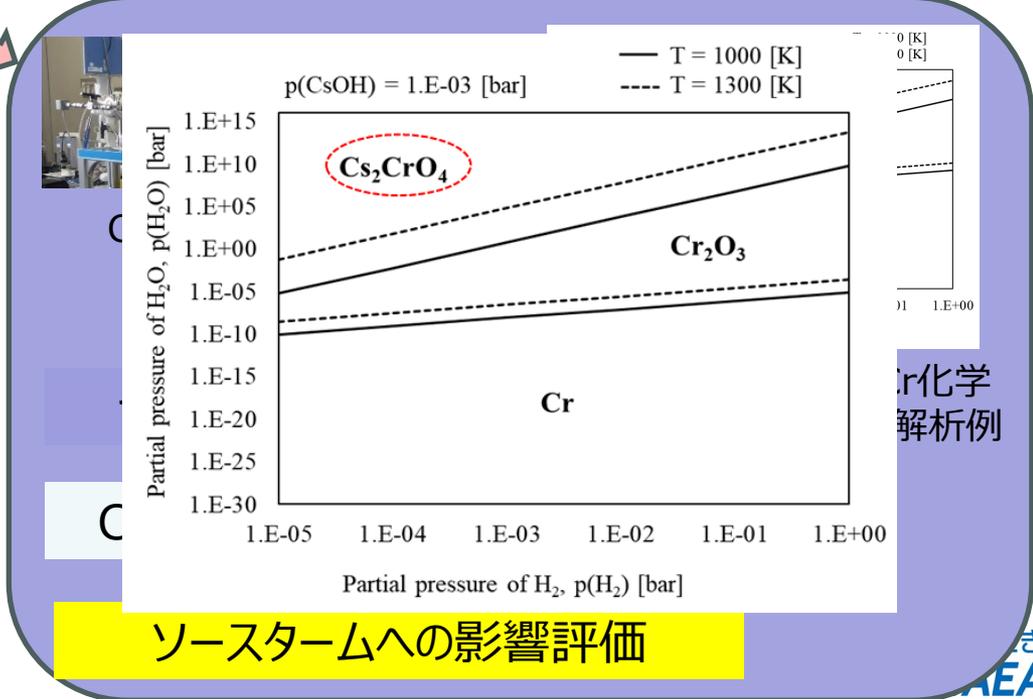
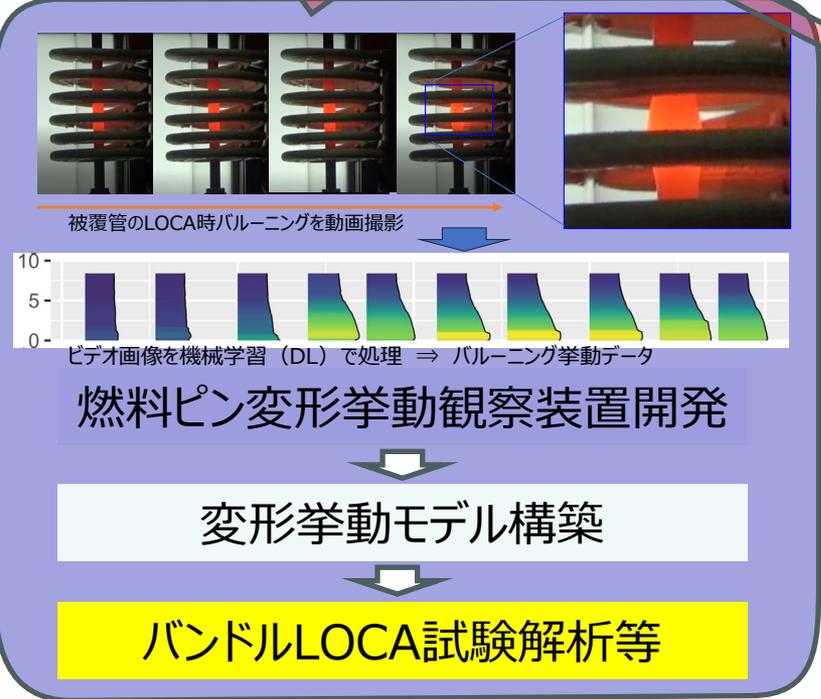
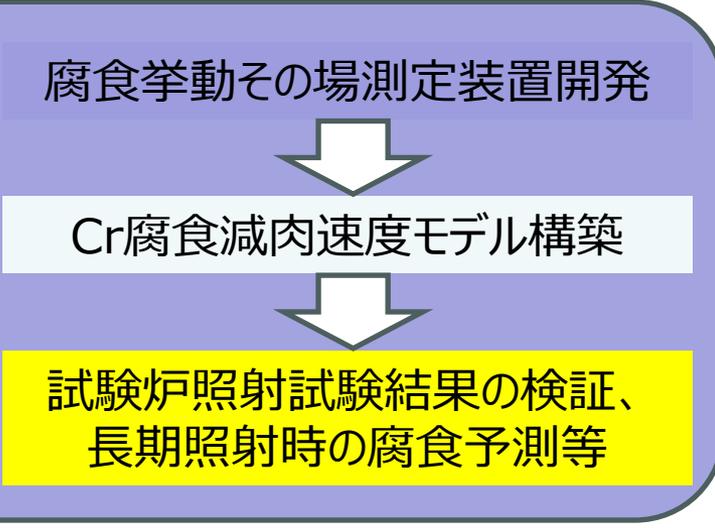
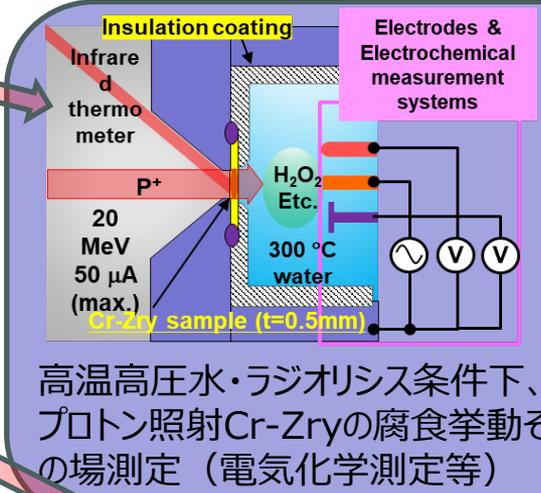
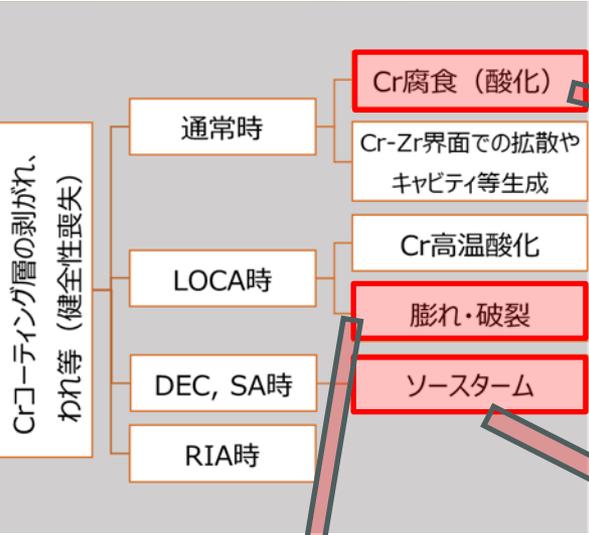
(※1) Cr-Zry設計等に係る海外レポート類を調査

- KG Geelhood, WG Luscher, PNNL-28437, January 2019
- K. R. Mohsen et al., ERI/NRC 20-209 October 2020
- OECD/NEA Nuclear Safety, NEA No. 7576, OECD/NEA, (2022).
- IAEA, IAEA-TECDOC-2032, IAEA, (2023).
- US-NRC, "Regulatory Framework Applicability Assessment and Licensing Pathway Diagram for the Licensing of ATF-Concept, Higher Burnup, and Increased Enrichment Fuels", (2022) 他

モデル化・解析コード（※2）に組み込んで解析評価  
安全性や利得評価のための基礎知見や根拠データ

- 腐食速度：高燃焼度時腐食挙動・予測
- 被覆管高温酸化挙動：LOCA/BDBA時ふるまい 他

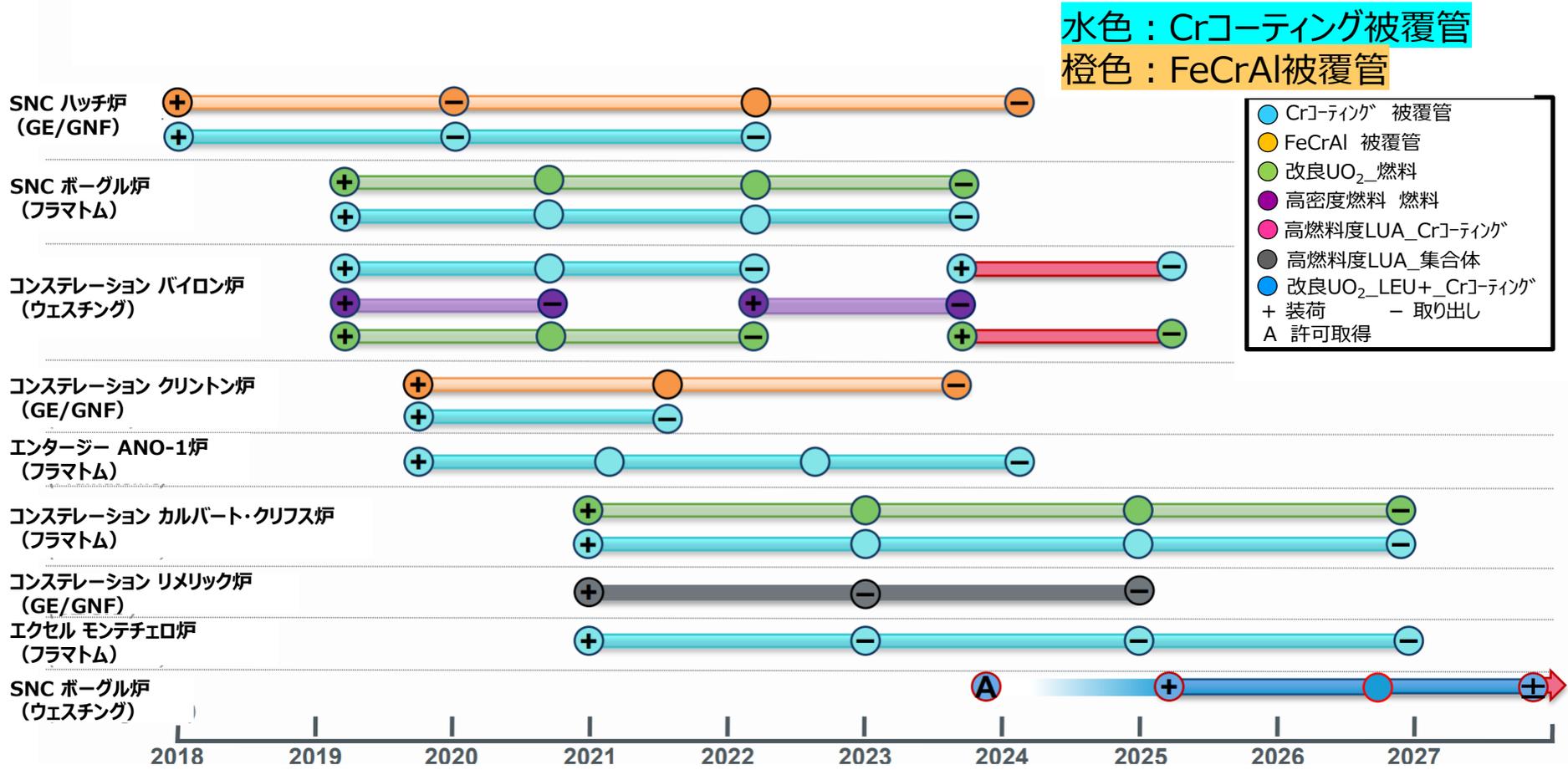
(※2) FEMAXI, SAMPSON等



- ATFプラットフォームで今後議論を進めていく上で必要な、資源エネルギー庁受託事業における国内ATF開発に関する概略内容を紹介した。
- 国内におけるATFの開発ステージは、令和4年度から開始された海外炉を用いた照射試験が継続実施され、「工学実証段階」に移行しつつある。
- 一方、燃料安全に係る研究も、国が支援する委託研究が令和6年度から開始された状況にある。
- これら現在に至る状況を受けて、新型燃料の開発・実装化のスピードをより加速させるためには、国内のステイクホルダによる技術的課題に関する速やかな議論が望まれる。

# 参考資料

米国では商用炉を用いた照射試験／先行照射を多数実施中



Key accident-tolerant fuel milestones at various U. S. power plants. Courtesy : Nuclear Energy Institute

## クロムコーティング被覆管の照射試験／先行照射状況

開発メーカー	開発段階	原子炉	状況	備考
フラマトム社 <small>*1)クロムコーティングM5被覆管</small>	先行ロッド照射試験 (LTR)	米国・先進試験炉	照射試験完了 (2019)	健全性を確認
	先行試験燃料集合体照射試験 (LTA)	米国・ボーグル	照射試験完了 (2024)	健全性を確認
ウェスチングハウス社 クロムコーティング ZIRLO被覆管	バッチ装荷 <small>*2)</small>	米国・ボーグル	バッチ装荷の計画 (2025)	-

\*1) 実装目標時期は2027年 \*2) 原子炉に燃料集合体をまとめて装荷する作業

サザンニュークリア社 ボーグル原子力発電所 米国

インタジー社 アーカンソー・ニュークリア・ワン原子力発電所 米国

エクセル・エナジー社 モンティセロ原子力発電所 米国

サザンニュークリア社 ボーグル原子力発電所 米国

2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027

## 米国での開発体制：ATFWGが中心となり先導

産学官・推進側／規制側が連携してATFの開発及び導入に向けて取り組んでいる

