

国内におけるATF開発状況と 研究開発概要

-Status of ATF development and overview of R&D in Japan-

モハマド アフィカ

山下 真一郎, 相馬 康孝, 根本 義之, ハイ ファム, 阿部 陽介, 井岡 郁夫, 佐藤 智徳,
石島 暖大, 三輪 周平, 中島 邦久, リザール ムハンマド, 加治 芳行, 逢坂 正彦

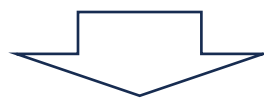
日本原子力研究開発機構



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。

- 国内において、文部科学省事業、資源エネルギー庁事業を活用し、大学、研究機関およびメーカーにおいて、電力会社の協力も得つつ、事故耐性燃料（ATF）の開発が進行中
- 海外の開発状況をウォッチしつつ、ステークホルダー間で連携を十分に取り、開発課題を共有したうえで、効率的に進めていく必要
- このためのATFワークショップ（ATF-WS）を2021年より開催

本ワークショップの目的



今般状況を踏まえ、国内導入を見据えつつ、多くのステークホルダーが一堂に介して技術的議論を行うことを目的に、第4回のATFワークショップを開催

- 海外炉を利用した照射試験進捗等の国内開発の進捗
- 今後の開発ステージの段階が工学的実証に移行

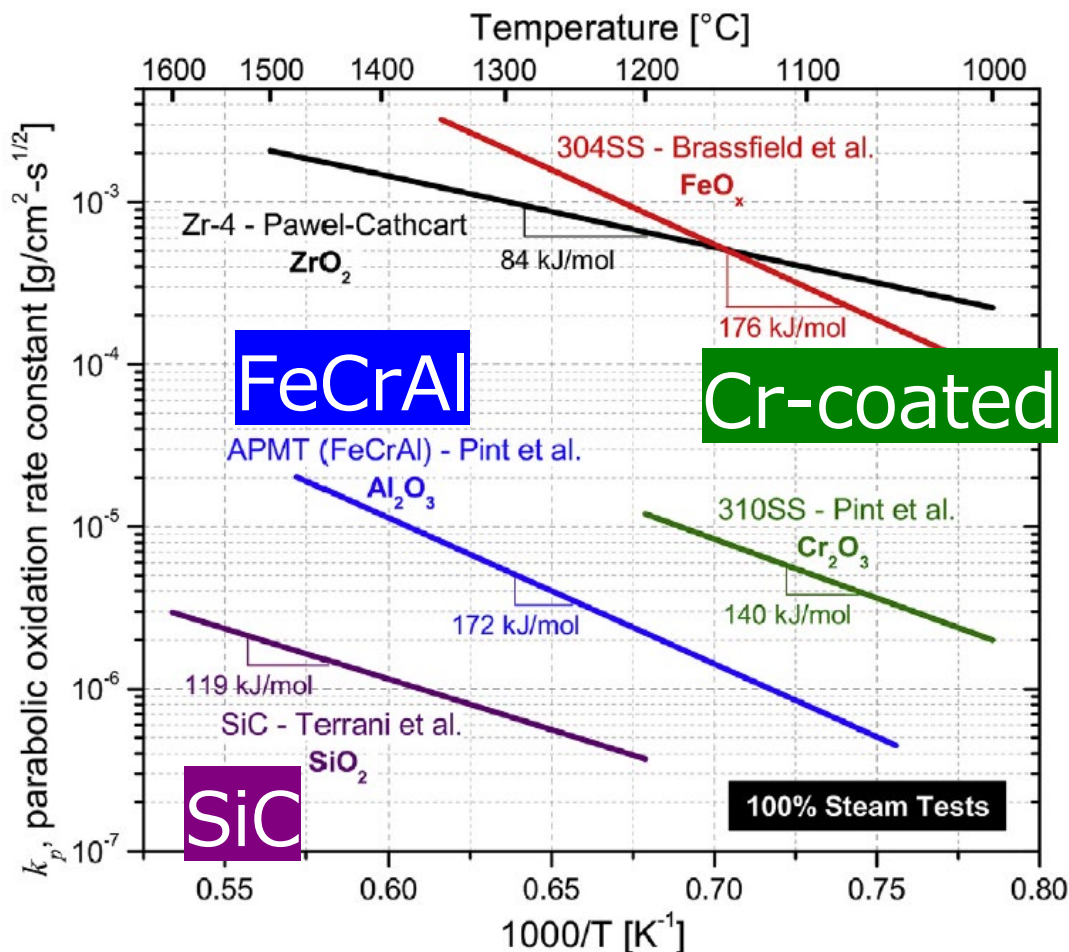
【本講演の目的】

国内ATF研究開発の最新の情報を共有し、パネル討論、ポスターセッション等での技術的議論の活性化に資する

【本講演の内容】

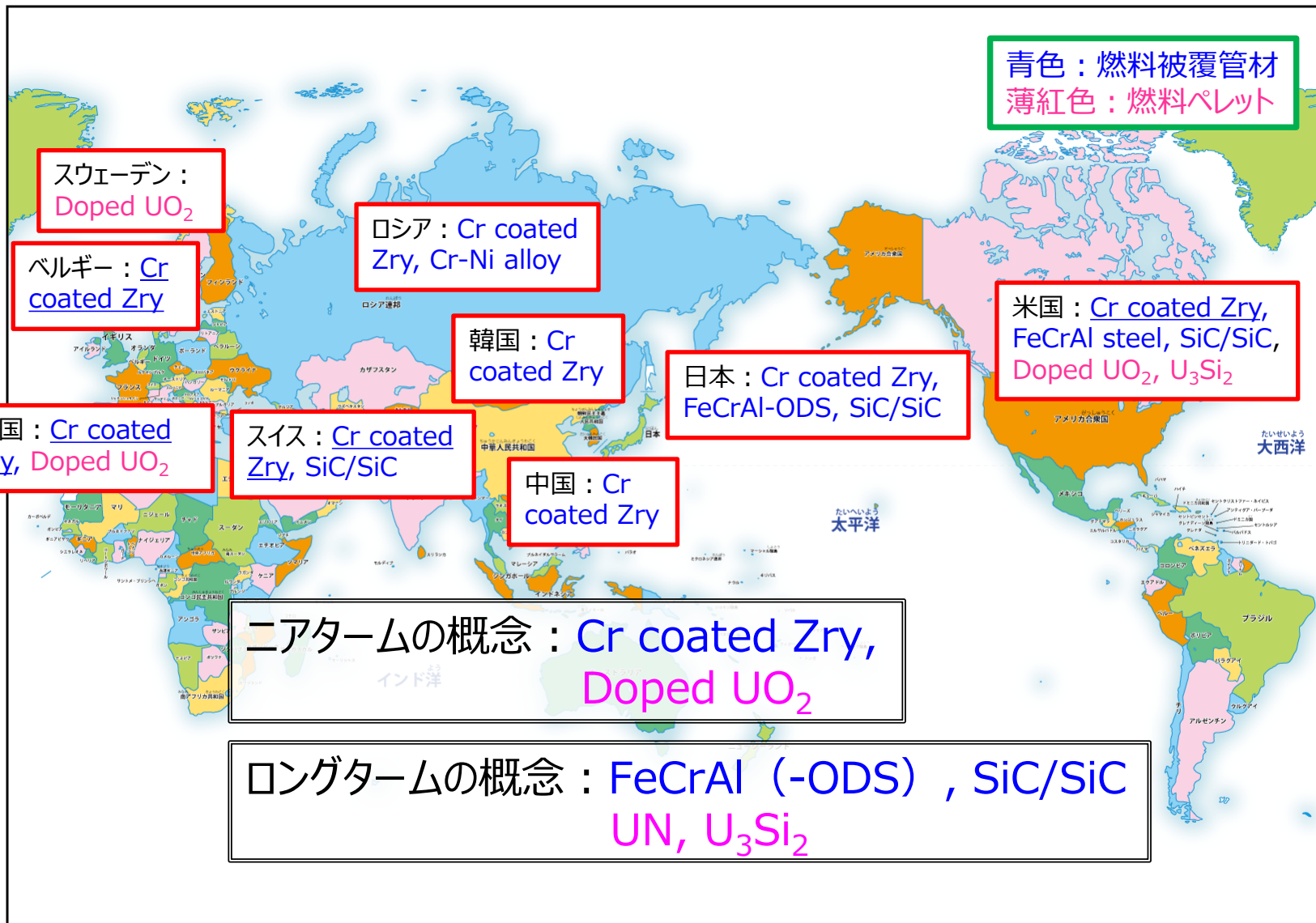
- 本ワークショップの目的（再掲）
- 本講演の目的、内容
- ATF研究開発の状況
 - ✓ 海外動向
 - ✓ 国内研究開発の現状
- Cr-Zryに関する基礎基盤研究
- まとめ

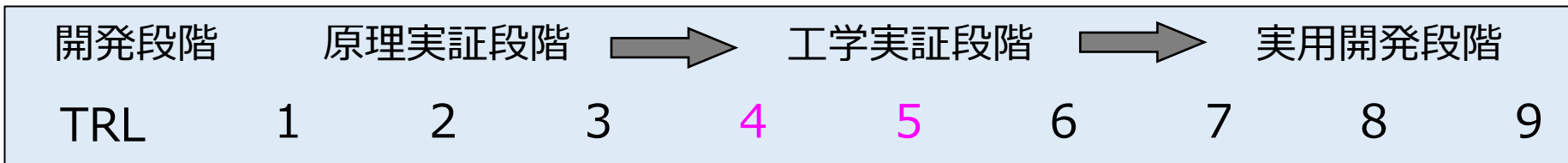
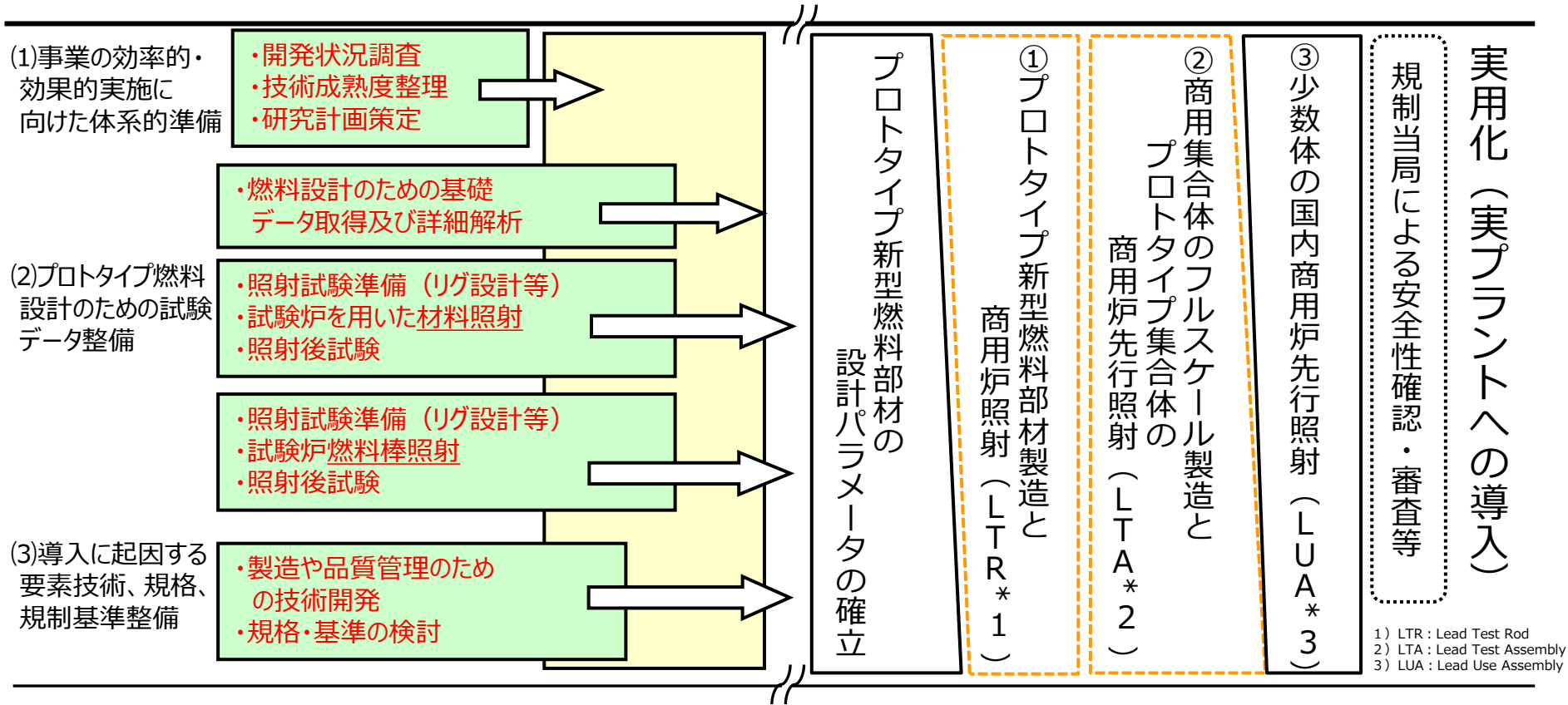
- 福島第一原発事故：
ジルカロイ合金被覆管酸化による温度急昇と水素発生・爆発
- 酸化抑制による温度急昇と水素発生の抑制・緩和
⇒事故への対処時間延伸
- “Cr-coated”, “FeCrAl”, “SiC”ともに現行のジルカロイ合金に比べて酸化速度定数は概ね2桁程度小さい



1200°C: SiO₂ < Al₂O₃ < Cr₂O₃ < ZrO₂

Terrani et al, JNM, 501 (2018) 13-30

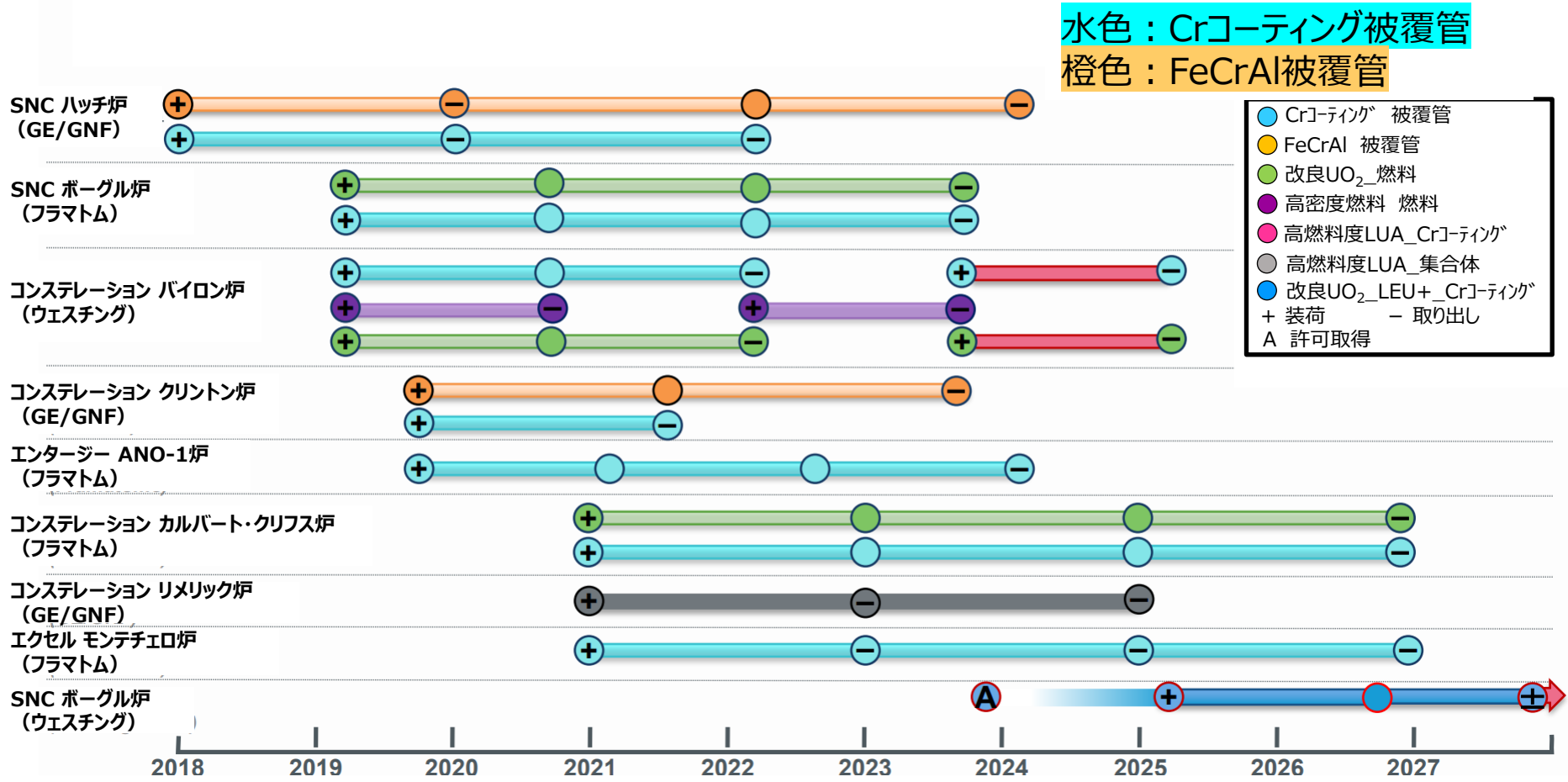




TRL (*)		新型燃料部材の実用化における一般定義	
実用開発段階	実用システムの運転	9	【実用化技術として選定された新型燃料部材実プラントでの商用利用】
	実用システムの検証	8	【最終的に定められた商用利用条件の証明】 少数体の商用炉先行照射(LUA)、及び、プラント運転、安全性評価、規格・基準等の最終確認
		7	【実用化製品の設計の完成】 実用技術としての設計妥当性の検証（商用燃料集合体のフルスケール製造、プロトタイプ燃料集合体の商用炉照射(LTA)、等
工学実証段階	工学技術の証明	6	【実用化候補技術の最終選定】 工学技術としての性能検証（プロトタイプ燃料集合体の製造試験、商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)

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

<https://www.powermag.com/urgency-ramping-up-to-commercialize-nuclear-accident-tolerant-fuels-by-2025/>

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 *クロムコーティングM5被覆管	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・ボークル	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	米国・ボークル	バッチ装荷の計画 (2025)	-

*実装目標時期は2027年

サザンニュークリア社 ボークル原子力発電所 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

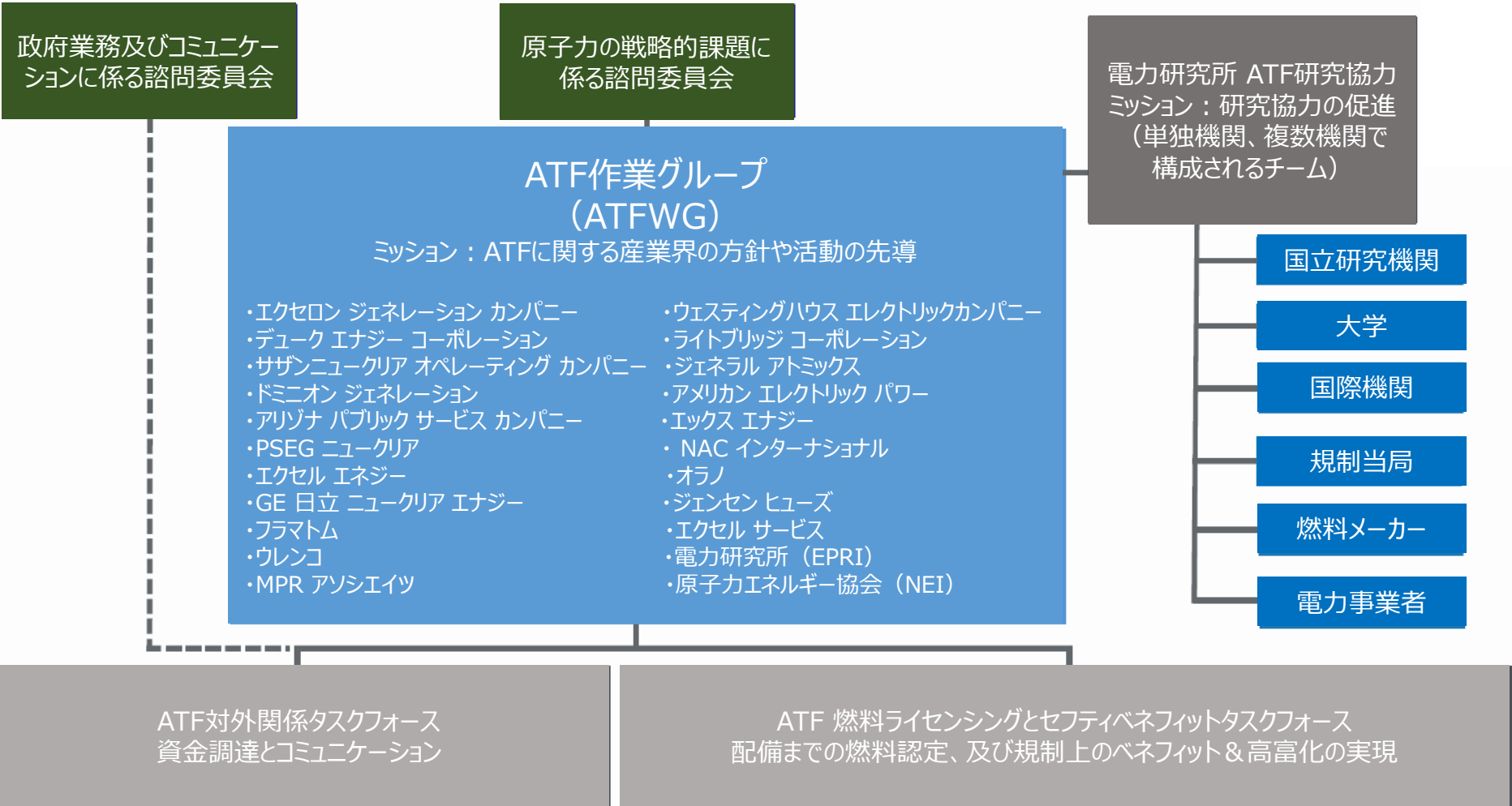
エクセル・エナジー社 モンティセロ原子力発電所 米国

サザンニュークリア社 ボークル原子力発電所 米国

2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027

未発表分

米国での開発体制：ATFWGが中心となり先導



- 国としての開発方針策定・開発推進
- 安全審査・安全研究
- ATF開発・導入：設計、安全評価、製品化
- 基礎研究・人材育成
- 学協会活動等を通じた技術文書の策定
- 国内研究開発の推進・調整

政府機関

電力

メーカー

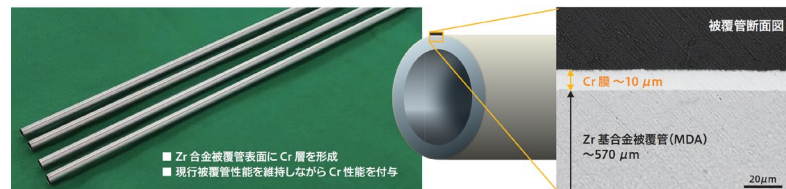
電力研究所

国立研究開発法人

学協会

[Crコーティングジルカロイ: PWR]

- 三菱重工業 (MHI)



[FeCrAl-ODS: BWR]

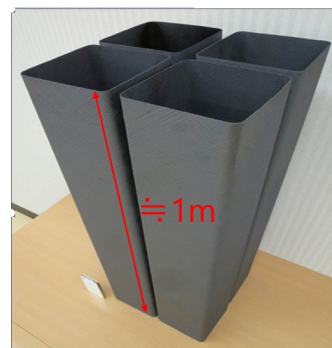
- 日立GE/グローバル ニュークリア フュエル ジャパン/日本核燃料開発



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

[SiC/SiC複合材: BWR&PWR]

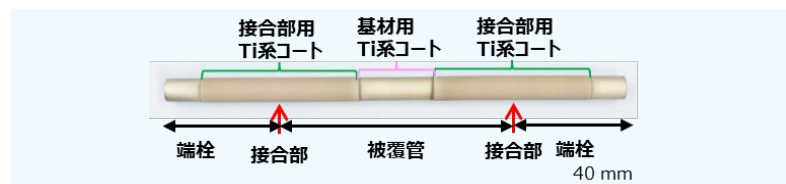
- 東芝ESS
 - BWR/PWR向け燃料被覆管
 - BWR向けチャンネルボックス
- 日立GE
 - BWR向け燃料被覆管



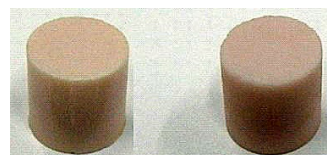
Ref. F. Inoue, TOSHIBA ATF Development Update, The 31st International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech, August 4-8, 2024 (NNO-2024-000050 Rev.0)

[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).



Eu₂O₃-HfO₂ Eu₂O₃-ZrO₂

- 長寿命型中性子吸収材: RE₂O₃-MO₂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

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)

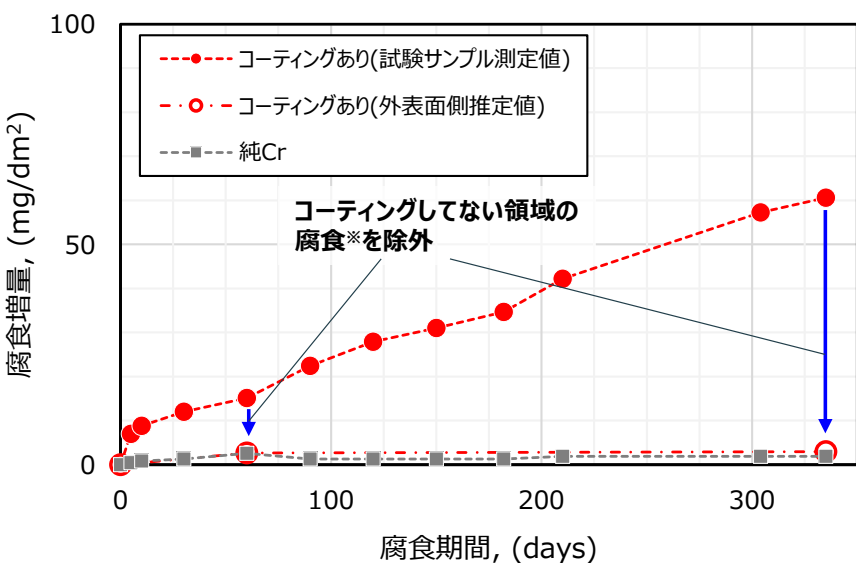
→ 上記試験は全て経産省資源エネルギー庁からの助成を受けて進行中

*最新の進捗状況や具体的な内容について、ポスターセッションにおいて各機関の代表者が紹介予定

①Crコーティング被覆管 (三菱コンソ殿ご提供資料)

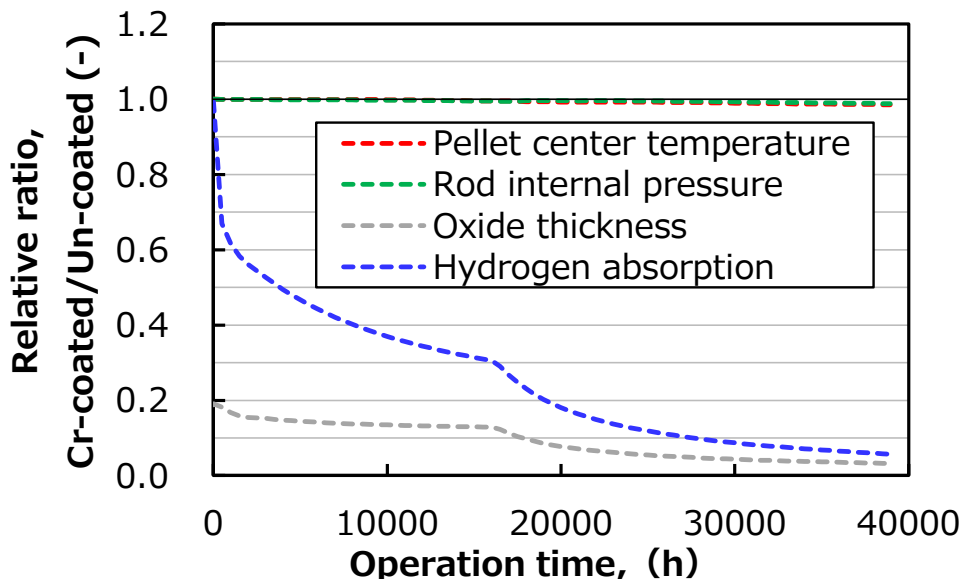
開発課題：

- 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)



ポスターセッション # 22 Crコーティング被覆管の通常運転特性と挙動
(三菱重工業) において詳細を紹介予定

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、評価に必要となる物性データの取得を実施中。

➡ **ポスターセッション# 23 FeCrAl-ODS被覆管の研究開発（NFD）において詳細を紹介予定**

◇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。

➡ **ポスターセッション# 20 BWR適用に向けたSiC被覆管の要素技術開発（日立GE）において詳細を紹介予定**

◇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。

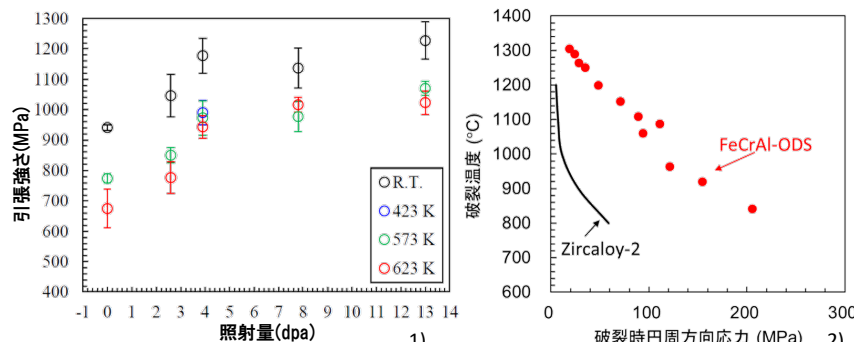


図 引張強さと照射量(dpa)の関係 図 破裂温度と破裂時円周方向応力の関係

1) Ref. K. Sakamoto, et al., Proc. WRFPM2023, 17-21 July 2023, Xi'an, China
2) Ref. K. Sakamoto, et al., Proc. Top Fuel 2022 Raleigh, NC, October 9-13, 2022, 161-169

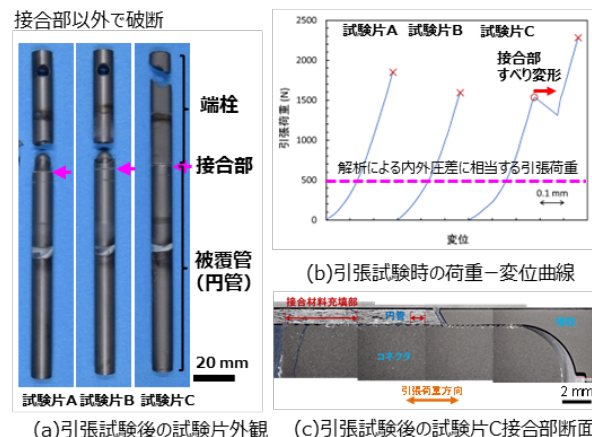


図 接合部試験片の引張試験結果 (1673 K) 3)

3) Ref. R. Ishibashi, et al, Top Fuel 2024, Grenoble, ENS, (2024).

③SiC被覆管、SiCチャンネルボックス（東芝コンソ殿ご提供資料）

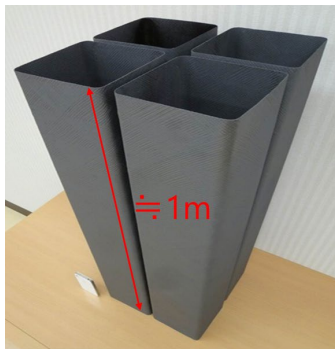
開発課題：長尺化製造技術（4m長のチャンネルボックスと被覆管）
照射試験、材料特性試験データの拡充

- 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～)

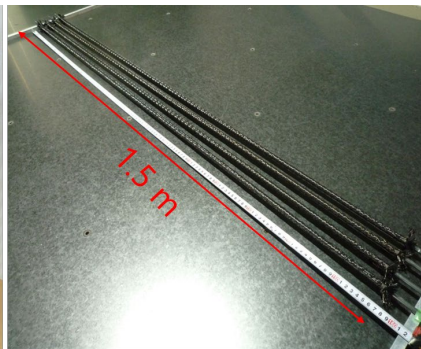
Irradiation test in MITR

(BWR condition)

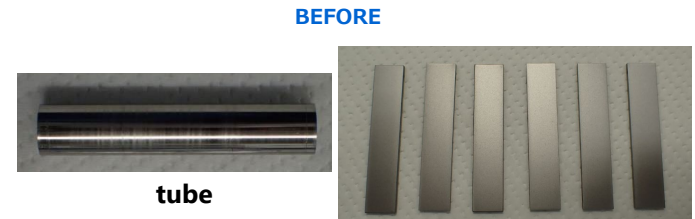
- Load tube & sheet specimens
- Up to 4 irradiation cycles: ~2026



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)



ポスターセッション # 21 Development of SiC core material for LWR（東芝ESS）において詳細を紹介する予定

- 国としての開発方針策定・開発推進
- 安全審査・安全研究
- ATF開発・導入：設計、安全評価、製品化
- 基礎研究・人材育成
- 学協会活動等を通じた技術文書の策定
- 国内研究開発の推進・調整

JAEAの主な役割

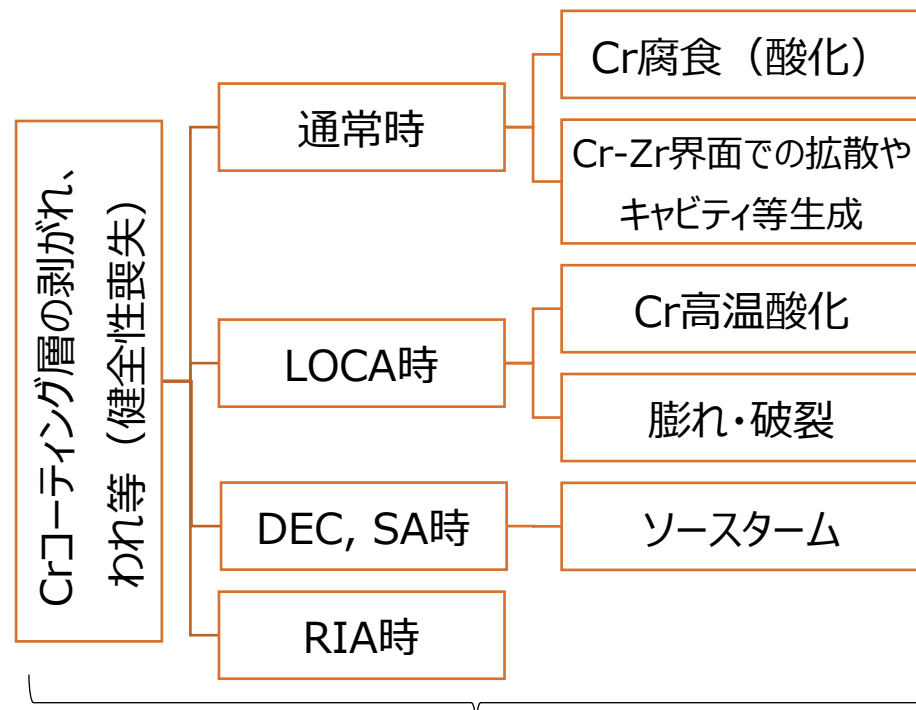
- 国内ステークホルダーの調整、開発とりまとめ
- 国内協働・連携の創出・推進・促進
- 海外協力のコーディネート（特に照射試験）
- 上記を通じた人材育成とその推進
- 基礎基盤研究の実施

「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 ・ 界面： Cr-Zr共晶、熱伝導等 ・ コーティング： 腐食、フレッティング、 LOCA時膨れ等

JAEAにおける基礎基盤研究項目



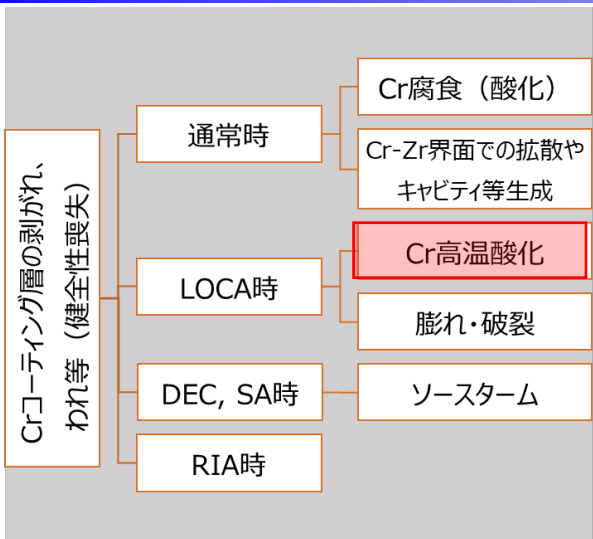
(※1) Cr-Zry設計等に係る海外レポート類を調査

- 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

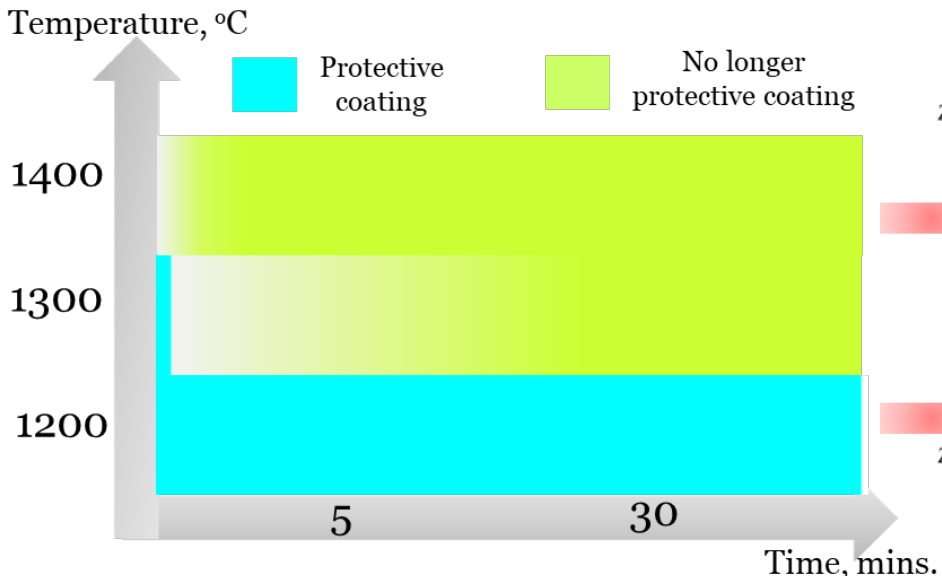
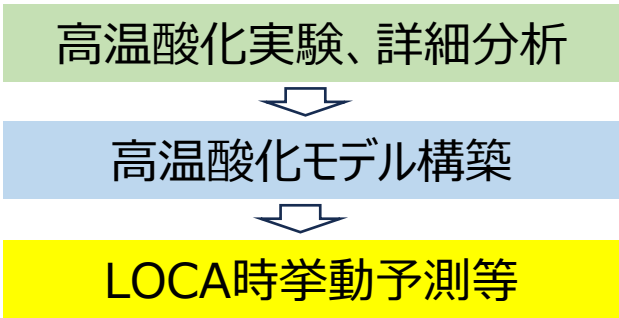
(※2) FEMAXI, SAMPSON等



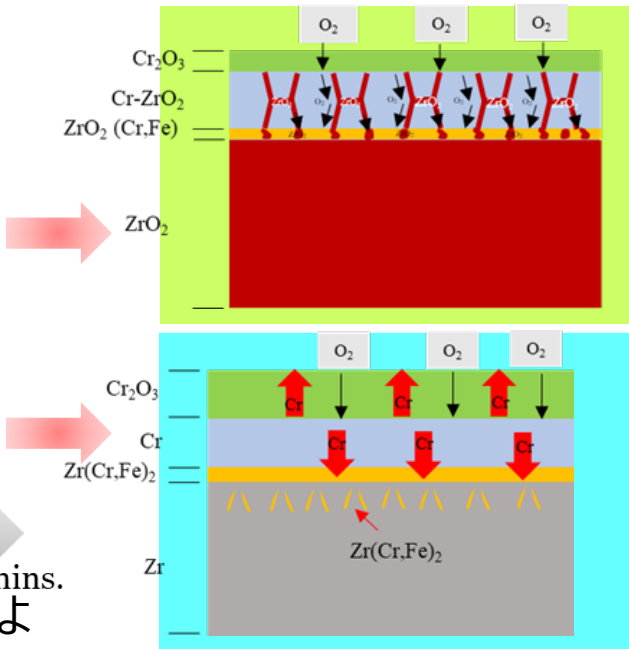
LOCA時影響要因

- Crによる酸化耐性向上
- Cr-Zr共晶
- 非酸化Zr露出 等

目的：高温酸化実験により、Cr酸化挙動や化学反応等を明らかにする



LOCA (~DEC) 時被覆管の温度・時間による酸化特性変化を明らかにした

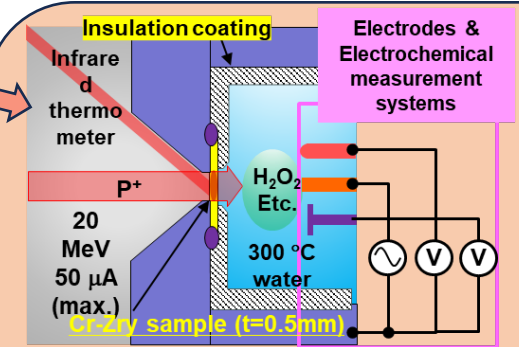
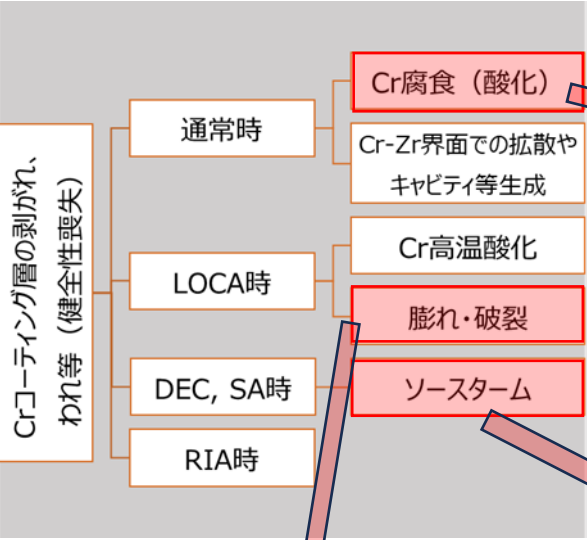


Cr₂O₃: Growth rate

Zr(Cr,Fe)₂: Cr diffusion coefficient

ポスターセッション #17 未来へげんき

※ポスターセッションで詳細を発表



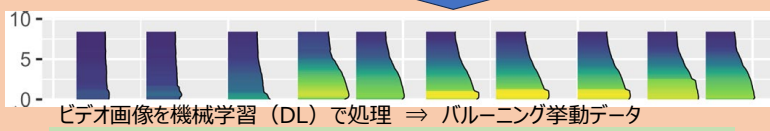
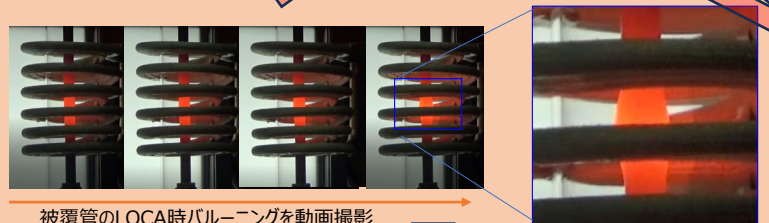
高温高圧水・ラジオリス条件下、プロトン照射Cr-Zryの腐食挙動その場測定 (電気化学測定等)

腐食挙動その場測定装置開発

Cr腐食減肉速度モデル構築

試験炉照射試験結果の検証、長期照射時の腐食予測等

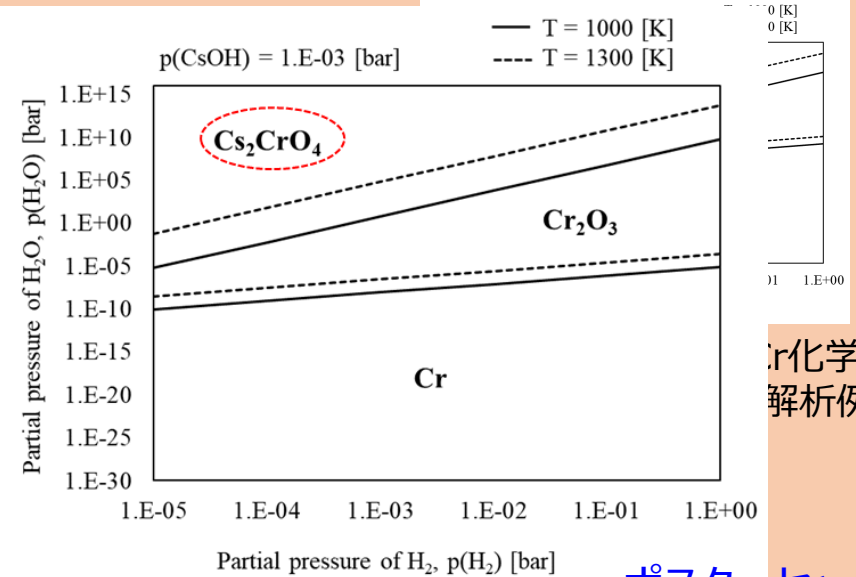
ポスターセッション # 12, 13



燃料ピン変形挙動観察装置開発

変形挙動モデル構築

バンドルLOCA試験解析等



ソースタームへの影響評価

ポスターセッション # 15

化学解析例

本講演では、国内ATF開発のステージが工学実証段階に移行しつつある状況を踏まえて、ATF開発に係わるステイクホルダが国内導入を見据えた技術的議論を行うために必要となる情報、すなわち

- ATF開発に係る世界の動向と日本の最新情報（国内ATF開発メーカーの取り組み概要含む）
- 既往知見に基づく技術課題の整理結果

を共有した。

加えて、技術課題の整理結果を踏まえたJAEAの取り組みとして、現在進行中のATF基礎基盤研究についても概要を紹介した。

これらの情報が、後段にプログラムされたパネル討論やポスターセッションでの技術的議論の活性化に資することを期待したい