

2023年4月4日
原子力委員会殿ご説明資料

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

日本原子力研究開発機構

1. はじめに

- ✓ 政策的位置付け、目的、開発ステップ等

2. ATF共通基盤技術開発の現状

- ✓ 国内におけるATF開発体制、スケジュール
- ✓ これまでに得られている成果の例
(国内ワークショップ開催、海外試験炉照射試験、基盤インフラ整備の進捗等)

3. ATF要素技術開発の現状

- ✓ Crコーティング被覆管（三菱コンソ殿ご提供資料）
- ✓ FeCrAl-ODS被覆管、SiC被覆管（日立コンソ殿ご提供資料）
- ✓ 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）

4. 海外におけるATFの開発状況

- ✓ 米国／仏国の開発状況

5. まとめ

政策的位置付け

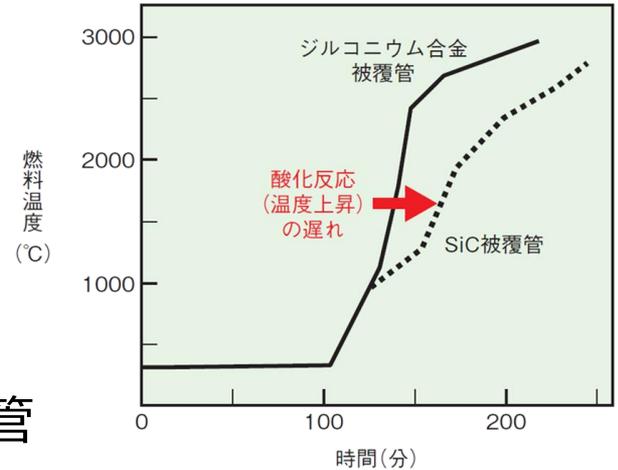
- 第6次エネルギー基本計画（令和3年10月閣議決定）では、いかなる事情よりも安全性を全てに優先させる等、安全性向上への一層の取組の必要性が示されている。
- また、原子力事業者を含む産業界には、自主的に不断に安全を追求するという安全文化の醸成に取り組む必要があるとされる中、東京電力福島第一原子力発電所事故の経験を踏まえて、万が一の事故のリスクを下げるための過酷事故対策を含めた軽水炉の一層の安全性・信頼性・効率性向上に資する技術を開発し、安全性の高度化に貢献する技術開発を、海外市場の動向を見据えつつ国際協力の下で推進することが重要とされている。
- 令和元年度以降、複数の事業者によりそれぞれの技術の差別化が図られながら、新型燃料の早期実用化を目指した開発が行われている一方、国大としては新型燃料開発を効果的に進めるため、共通する課題に対しては共同で取り組む枠組みが必要であり、国際協力を活用しながら有機的な連携協力による成果の創出を目指すべきである。

目的

- 我が国の新型燃料開発を、戦略的かつ効果的に進めて工学実証段階へ引き上げるため、国内事業者等との連携・協力体制を継続的に強化し、海外機関等との連携による照射試験の推進や燃料挙動評価を行う。もって、開発に必要な技術基盤を継続的に整備する。

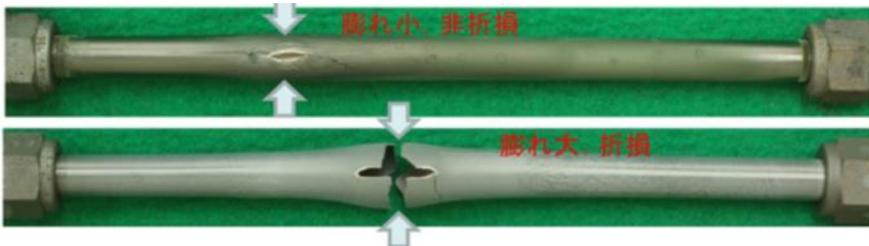
拡張性：今般の事故耐性燃料開発は既存軽水炉への導入を前提に進めているが、並行して進められている革新型軽水炉等への適用も可能であると考え（JAEA私見）

- 福島第一原発事故：ジルコニウム合金（ジルカロイ：Zry）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
- 「燃料・材料」からの対応：
 - Crコーティング、ステンレス鋼、SiC等の新材料被覆管
 - 新材料被覆管に対応した燃料（ペレット）
- 現行商用軽水炉への出来るだけ早期装荷を目指した開発
- 現行燃料（UO₂ペレット、Zry被覆管燃料と同等以上の性能も追及）



図：酸化反応が進行した時の燃料温度の上昇と時間の関係を示した模式図

https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2016/j2016_4_10.html



LOCA模擬試験後の外観
上：コーティングあり
下：コーティングなし



写真：SiC/SiC複合材料で製作されたBWR用チャンネルボックス

三菱重工技報 Vol.57 No.4 (2020)
<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574110.pdf>

東芝レビュー Vol. 75 No. 2 (2020年3月)
https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/02/75_02pdf/3-2.pdf



プロジェクトでの実施内容 - 実用化までの開発ステップ

(1) 事業の効率的・効果的実施に向けた体系的準備

- 開発状況調査
- 技術成熟度整理
- 研究計画策定

(2) プロトタイプ燃料設計のための試験データ整備

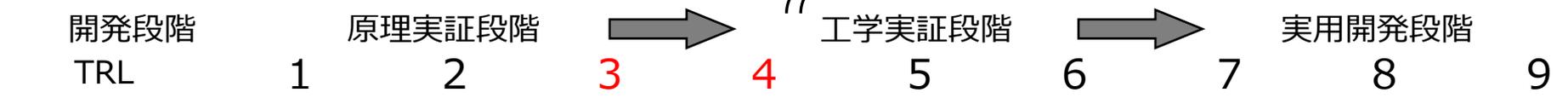
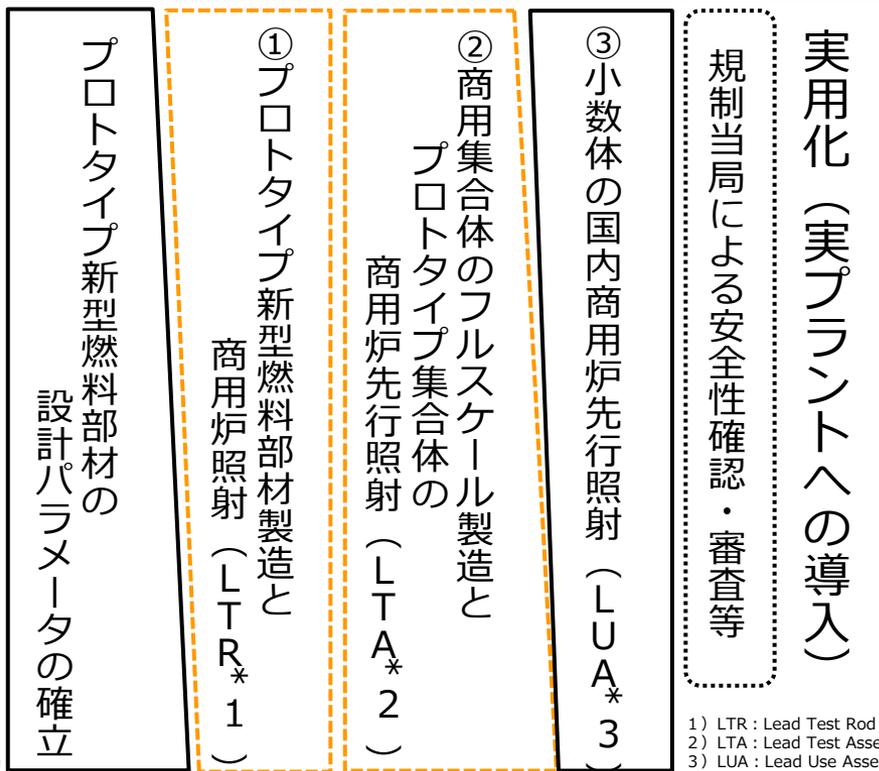
- 燃料設計のための基礎データ取得及び詳細解析

- 照射試験準備 (リグ設計等)
- 試験炉を用いた材料照射
- 照射後試験

- 照射試験準備 (リグ設計等)
- 試験炉燃料棒照射
- 照射後試験

(3) 導入に起因する要素技術、規格、規制基準整備

- 製造や品質管理のための技術開発
- 規格・基準の検討



	2015~	2020~	2025~	2030~	2035~
主に事業者等による開発		設計・製造用データ取得 照射試験 規格基準策定		LTR/LTA/LUA	許認可・導入
主に技術基盤整備	燃料ふるまい解析コード	共通試験・評価技術 (新材料機械特性、長期照射・事故時挙動予測等) 海外との連携体構築、照射試験コーディネート			

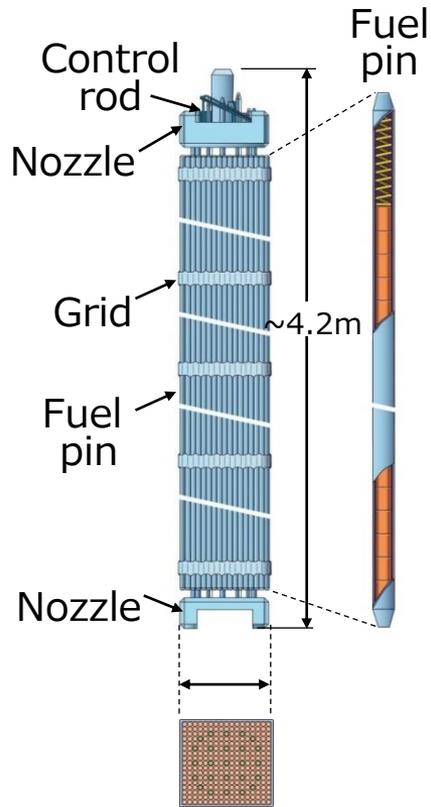
(注) : 事故耐性燃料候補材については、開発初期 (2015年) の段階で再処理可能の見込みであることを確認している。今後、TRLの進捗に応じて再処理性に係る具体的な研究開発を進める予定

1) LTR : Lead Test Rod
2) LTA : Lead Test Assembly
3) LUA : Lead Use Assembly

ATF共通基盤技術開発の現状

- ①国内におけるATF開発体制、スケジュール
- ②これまでに得られている成果の例
- ③海外試験炉照射試験、及び国内基盤インフラ等の整備の進捗

既存のジルカロイ（Zry）被覆管燃料に比べて、**安全性の大幅な向上**が見込める事故耐性燃料（ATF）開発をオールジャパン体制で進めている



PWR 燃料集合体

ATF候補材料と開発体制

【 SiC/SiC複合材の開発 】

- 開発対象：BWR及びPWR用燃料被覆管
BWR用チャンネルボックス
開発主体：東芝ESS

- 開発対象：BWR用燃料被覆管
開発主体：日立GE/GNF-J

【 FeCrAl-ODS(改良ステンレス鋼)の開発 】

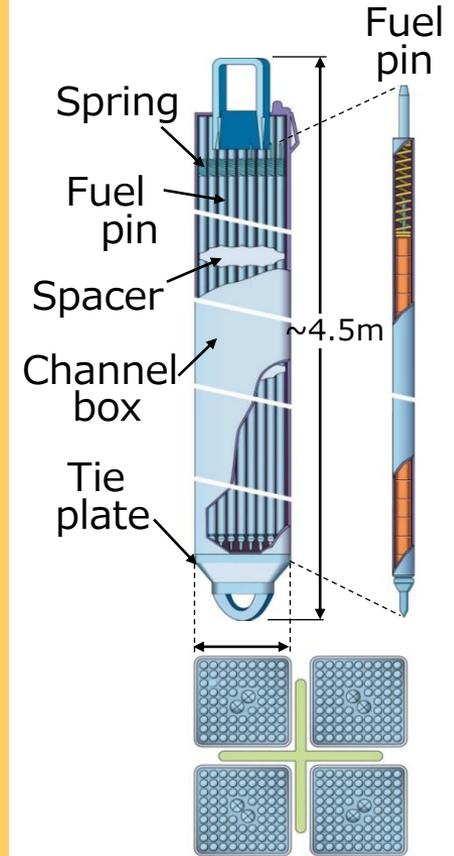
- 開発対象：BWR用燃料被覆管
開発主体：日立GE/GNF-J(+NFD)

【 Coated-Zryの開発 】

- 開発対象：PWR用燃料被覆管
開発主体：MHI/MNF

【 ATF共通基盤技術開発、事業者間の連携推進 】

- 検討事項：代替照射技術開発、長期ふるまい予測手法開発、事故時挙動評価手法開発、海外炉照射試験、等
取り纏め：JAEA



BWR燃料集合体

注) 国内では、事故耐性制御棒（ATCR）の開発も進められている

実施項目	R1年度 (2019)	R2年度 (2020)	R3年度 (2021)	R4年度 (2022)	R5年度 (2023)	R6年度 (2024)	R7年度 (2025)	R8年度以降～ (2026～)
(1) 国内における 新型燃料の開発 推進	①国内連携協力推進と開発状況総括							<ul style="list-style-type: none"> ● 海外試験炉照射の継続 ● 照射後試験の実施 ● ふるまい解析コードの検証 ● 事故時挙動評価 ● 商用炉照射の検討(*) ● その他
	②研究開発動向や規制基準等に係る情報収集							
(2) 新型燃料の 共通技術基盤の 整備と継続的 高度化	①海外試験炉における各炉固有の照射試験技術に係る情報の調査・整理							
				①海外試験炉における照射試験／照射後試験の計画の具体化と照射試験の準備				
				①海外試験炉における照射試験				
	②新型燃料等の試験技術・解析コード等の共通基盤技術の高度化に係る検討							
(3) 海外との連携 協力体制の強化				①専門家グループの継続的強化				
				②OECD/NEA QUENCH-ATFプロジェクトへの参加				
	③照射済み試験片の米国からの輸送及び国内機関への輸送			③国内機関での照射後試験				
民間事業者による 要素技術開発	設計・製造のためのデータ取得							
	照射試験、照射データの整備							
	規格基準の策定							

(*) : 国内商用炉での先行照射に係り、2023.12.12に開催されたCNO意見交換会において、事業者より以下の説明あり。

- 少数体先行照射を実施したいこと
- 少数体先行照射に関する安全性の示し方について、実務者で意見交換させていただきたいこと

意見交換会の開催については規制委員会も受諾。

(1) 国内における新型燃料の開発推進

① 国内連携協力推進と開発状況総括

- ・技術成熟度 (TRL) 整理表を統合・整備し、ロードマップ (RM) を更新 (各部材のTRL表及び開発RMは補足資料①参照)

- ・国内のステイクホルダーが一堂に介する「事故耐性燃料開発に関するワークショップ (右図参照)」を開催し、新型燃料に関する最新の開発状況を共有。
東大・阿部教授 (原子力システム研究開発事業のATF関連課題の代表) とも連携協力し、人材育成にも寄与

② 研究開発や規制基準等に係る情報収集

- ・規制庁との意見交換 (2022年12月のCNO意見交換会含む)、IAEA主催の専門家会合や関連国際会議での情報収集を行い情報を整理

事故耐性燃料開発に関するワークショップ

Workshop on Development of ATF for LWR

- Current status and future challenges in enhancing the nuclear safety -

○東京大学大学院工学系研究科および日本原子力研究開発機構では、原子力の継続的な安全性向上の観点から、事故耐性燃料(ATF)の開発を進めています。
○ATF開発について、下記の通りワークショップを開催いたします。
一般の方も参加できますので、ふるってご参加ください。

2022年 12月 21日 (水) 武田先端知ビル 武田ホール
13:00~17:00 (12:30開場)

※ Web同時配信も予定しています。

お申込み先

日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター

<https://nsec.jaea.go.jp/>

※右側のQRコードからも、お申込み頂けます。



プログラム		
開会挨拶	日本原子力研究開発機構	大井川 宏之 氏
>>イントロダクション		13:10 ~ 13:25
『事故耐性燃料導入への期待』	経済産業省資源エネルギー庁	大田 悠平 氏
>>基調講演		13:25 ~ 14:35
『ATFの挑戦』	前・原子力規制委員会委員長	更田 豊志 氏
『知識の総合化と継続的安全性向上』	東京大学大学院	関村 直人 氏
>>講演		14:35 ~ 15:45
『原子力システム研究開発事業での事故耐性燃料の開発』	東京大学大学院工学系研究科	阿部 弘亨 氏
『原子力の安全性向上に資する技術開発事業での事故耐性燃料の開発』	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター	山下 真一郎 氏
>>パネルディスカッション・総合討論		16:00 ~ 16:55
『新燃料の実機適用に向けてどのように情報を整理していくべきか』		
玉手レータ	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター	逢坂 正彦 氏
パネラー	原子力規制庁技術基盤グループ	北野 剛嗣 氏
	日本原子力学会標準委員会 システム安全専門部会	村上 望 氏
	原子力エネルギー協議会 ATFワーキンググループ	小原 教弘 氏
	東京大学大学院 工学系研究科	阿部 弘亨 氏
	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター	山下 真一郎 氏
閉会挨拶	東京大学大学院工学系研究科	阿部 弘亨 氏

主催：東京大学大学院工学系研究科
日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター
協賛：日本原子力学会核燃料部会、材料部会、水化学部会
日本原子力学会標準委員会システム安全専門部会

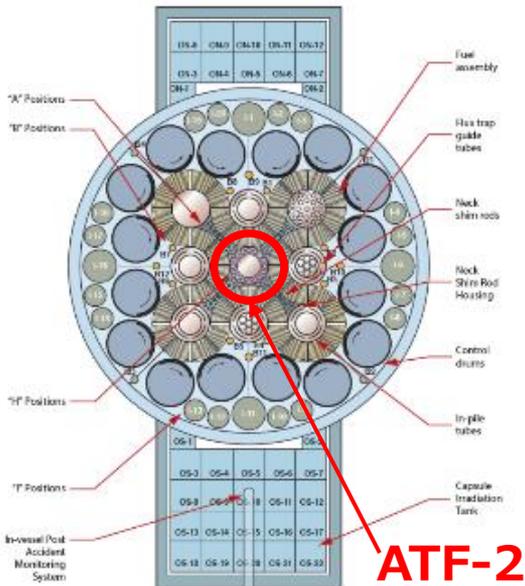
お問合せ先
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
E-mail: nsec-atfws@jaea.go.jp

(2) 新型燃料の共通技術基盤の整備と継続的高度化

① 海外試験炉における新型燃料の照射試験の継続、及び新規照射試験／照射後試験の計画の具体化と試験準備

• DOE-JAEA間で協力協定を締結した日米民生用原子力研究開発ワーキンググループ (CNWG : 2013年～) の枠組みを活用し、照射試験に係る個別協定を締結

- Cr-coated Zry (2021.6～)
- FeCrAl-ODS (2023.3～)



ATF-2

未公開情報に付き配布資料からは削除

CRADA No. 21CRA19

STEVENSON-WYDLER (15 USC 3710a)
COOPERATIVE RESEARCH AND DEVELOPMENT
AGREEMENT (hereinafter "CRADA") No. 21CRA19

BETWEEN

Battelle Energy Alliance, LLC (BEA)
under its U.S. Department of Energy Contract
No. DE-AC07-05ID14517 (hereinafter "Contractor"),

AND

Japan Atomic Energy Agency (JAEA, Participant 1),

AND

Mitsubishi Heavy Industries, LTD (MHI, Participant 2),

(Hereinafter "Participants"),

hereinafter referred to singularly as "Party" and jointly as "Parties."

ARTICLE I: DEFINITIONS

A. "Background Intellectual Property" means the Intellectual Property identified by the Parties in Annex B, Background Intellectual Property, which was in existence prior to or is first produced outside of this CRADA, except that in the case of inventions in those identified items, the inventions must have been conceived outside of this CRADA and not first actually reduced to practice under this CRADA to qualify as Background Intellectual Property.

B. "Contracting Officer" means the DOE employee administering the Contractor's DOE contract.

C. "DOE" means the Department of Energy, an agency of the Federal Government.

D. "Generated Information" means information, including data, produced in the performance of this CRADA.

E. "Government" means the Federal Government of the United States of America and agencies thereof.

F. "Intellectual Property" means patents, trademarks, copyrights, mask works, Protected CRADA Information, and other forms of comparable property rights protected by Federal law and foreign counterparts, except trade secrets.

G. "Proprietary Information" means information, including data, which is developed at private expense outside of this CRADA, is marked as Proprietary Information, and embodies (i) trade

BEA Model CRADA v. 8/26/2014 Page 1 of 9

(2) 新型燃料の共通技術基盤の整備と継続的高度化

- ② 新型燃料等の試験技術・解析コード等の共通基盤技術の高度化に係る検討
- ・ATF基礎基盤研究 (下表：研究課題案の整理結果)

	1.燃料・材料挙動評価技術		2.事故時挙動評価技術
	a. 通常時～AOO	b. DBA	B-DBA～SA
Crコーティング	(1) 代替照射技術開発による腐食挙動予測手法の検討 (2) 代替照射技術開発によるコーティング堅牢性評価手法の検討	(1) LOCA試験による破損挙動等評価	
FeCrAl-ODS	(3) 照射下組織安定性評価 (4) 被覆管材と構造材 (SS等) の両立性・相互作用評価	(2) LOCA試験による破損挙動等評価	(1) FP放出・移行挙動に与える化学的影響評価
SiC		(3) 内圧負荷時の接合部健全性評価	(2) FP放出・移行挙動に与える化学的影響評価
3. 解析コード高度化	(1) FEMAXI		(2) SAMPSON、THALES等
4. 技術開発	【通常時】照射／環境／応力等の重畳影響等を評価するための試験・分析技術 (スマート技術) 【事故時】LOCA時挙動評価のための実験技術		

赤：エネ庁殿委託事業からサポート頂いた成果も活用
 青：運営費交付金、その他外部資金

ATF要素技術開発の現状

- ①Crコーティング被覆管（三菱コンソ殿ご提供資料）
- ②FeCrAl-ODS被覆管、SiC被覆管（日立コンソ殿ご提供資料）
- 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）

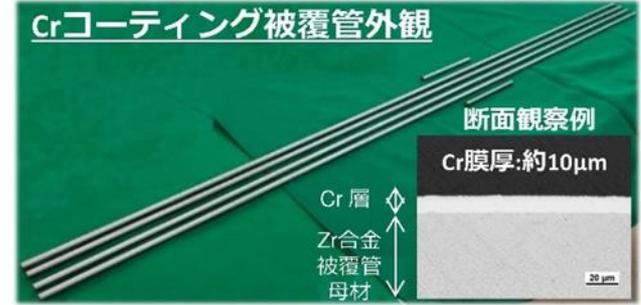
*) 三菱重工殿発表資料から抜粋

□ Crの酸化抑制効果を踏まえた導入期待効果が整理されている

技術概要

- 現行Zr被覆管表面にCr層を形成
- 通常運転時から事故時まで、表面でのZr酸化反応を抑制
- 被覆管性能低下(脆化)や水素発生量を低減する技術

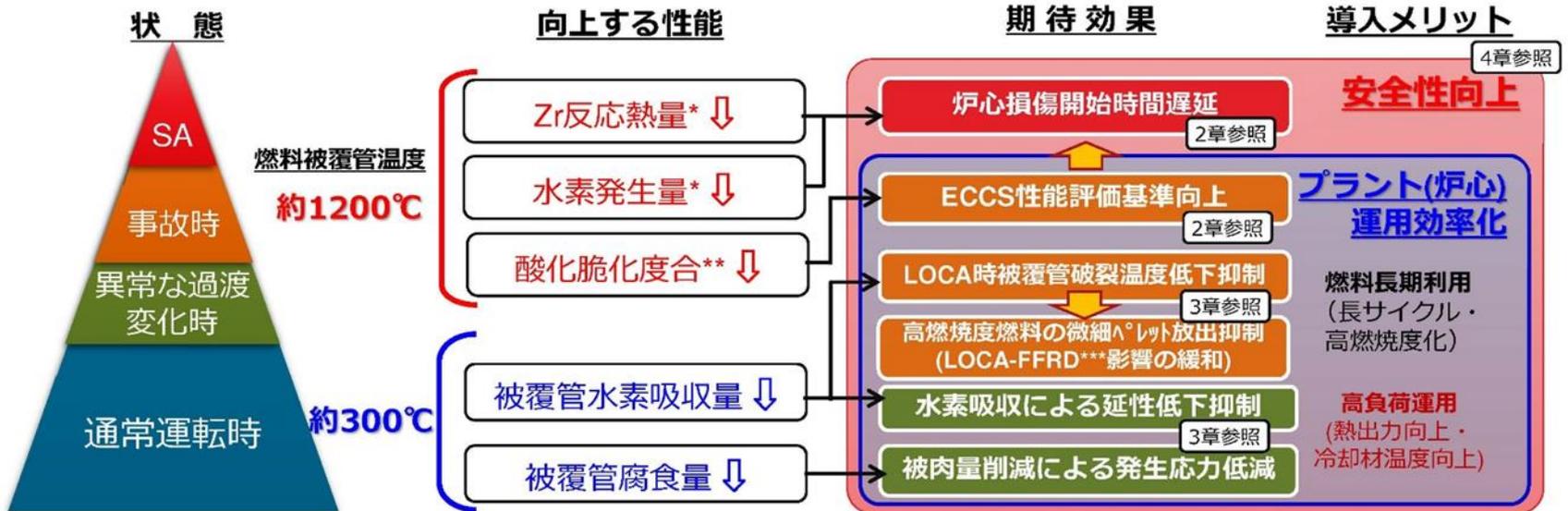
項目	Crコーティング法/めっき法
Cr膜厚さ	約10μm
外径	約9.5mm
母材	Zr基合金(MDA)



MDA: Mitsubishi Developed Alloy (耐食性改良被覆管)

導入効果

- 被覆管性能向上により「安全性向上」と「プラント運用効率化」への寄与が見込まれる

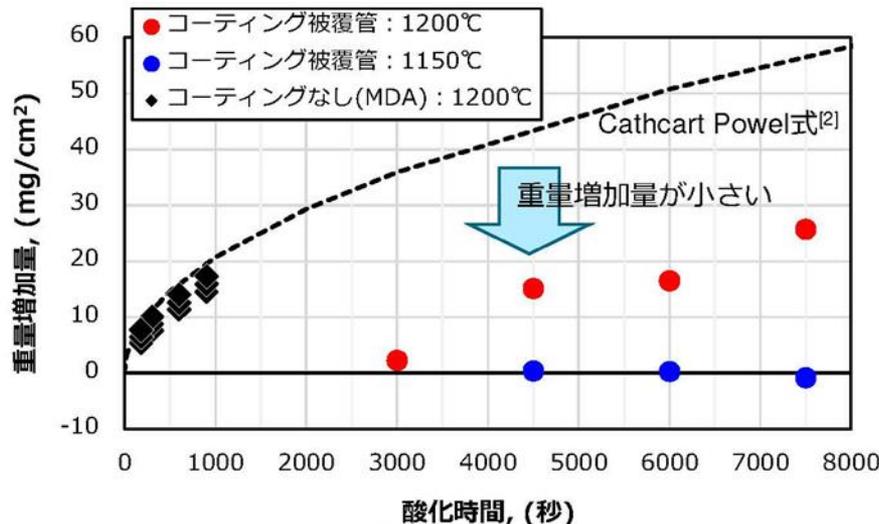


*被覆管損傷までを想定 **再冠水時熱衝撃(クエンチ)に対する耐性向上 ***FFRD: Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal

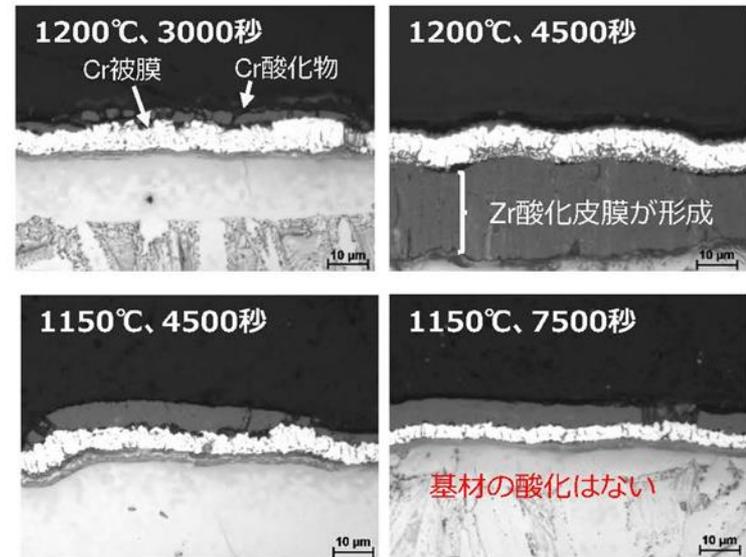
*) 三菱原子燃料殿発表資料から抜粋

- 事故時を想定した高温酸化試験実施
- Cr被膜による表面酸化抑制効果を確認

- 1150℃では、7500秒まで、基材の酸化はほとんどなかった。
 - 1200℃では、4500秒以降で、基材の酸化が見られたが、コーティングなしに比べて重量増加量は小さかった。
- ⇒ Cr被膜はLOCA環境下で高い耐酸化性能を示し、長時間に亘り基材の酸化を防ぐことが確認された。



コーティング被覆管の重量増加量の変化

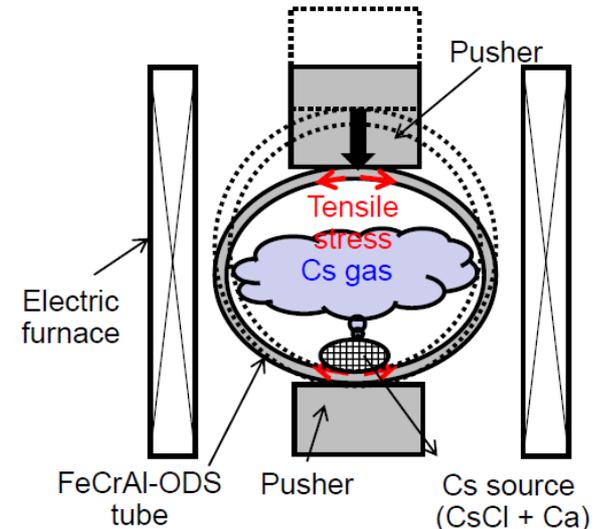


高温酸化試験後サンプルの金相観察写真

[2] J. V. Cathcart, ORNL-NUREG/TM-41 (1976).

概要

- FeCrAl-ODS鋼被覆管の応力腐食割れ（SCC）感受性に対するセシウム（Cs）分圧依存性を炉外SCC試験により評価
- SCC感受性を示すしきいCs分圧が0.2～24 Paの範囲にあり、実機条件でのCs分圧（ 1×10^{-8} Pa程度）と比較して十分に高いことから、FeCrAl-ODS鋼の耐Cs-SCC性を確認



Test ID	Partial pressure of Cs (Pa)*	Pre-heating conditions	Ref.
SCC-1	800**	350° C, 3 h	2
SCC-2	800**	350° C, 3 h	2
SCC-3	800**	250° C, 72 h	2
SCC-4	0.2	250° C, 72 h	2
SCC-5	0.2	250° C, 72 h	2
SCC-6	24	250° C, 72 h	2
SCC-7	800**	250° C, 72 h	This work
SCC-8	24	250° C, 72 h	This work
SCC-9	0.2	250° C, 72 h	This work

*: Calculated pressure

** : Saturation vapor pressure of Cs at test temperature (623 K)

[1] K. Konashi, M. Yamawaki, J. Nucl. Sci. Tech., 29[1], 1-10 (1992).

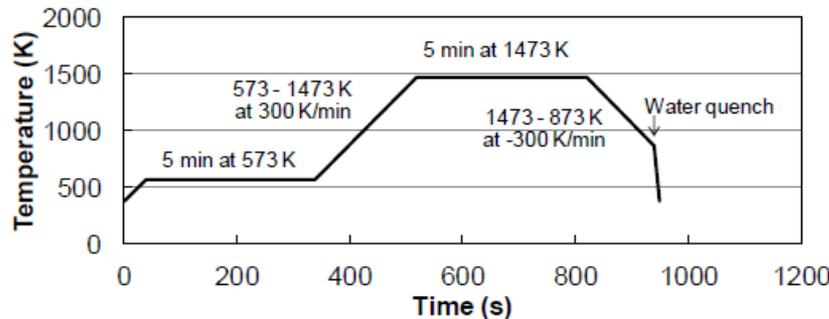
[2] K. Sakamoto et al., J. Nucl. Mater., 557 (2021) 153276.

Test ID	Partial pressure of Cs (Pa)*	Evaluated partial pressure of Cs (Pa)	SCC cracking	Ref.
SCC-1	800**	-	Yes	1
SCC-2	800**	-	Yes	1
SCC-3	800**	-	Yes	1
SCC-4	0.2	-	No	1
SCC-5	0.2	-	No	1
SCC-6	24	-	Yes	1
SCC-7	800**	610	Yes	This work
SCC-8	24	8.0	Yes	This work
SCC-9	0.2	0.09	No	This work

[1] K. Sakamoto et al., J. Nucl. Mater., 557 (2021) 153276.

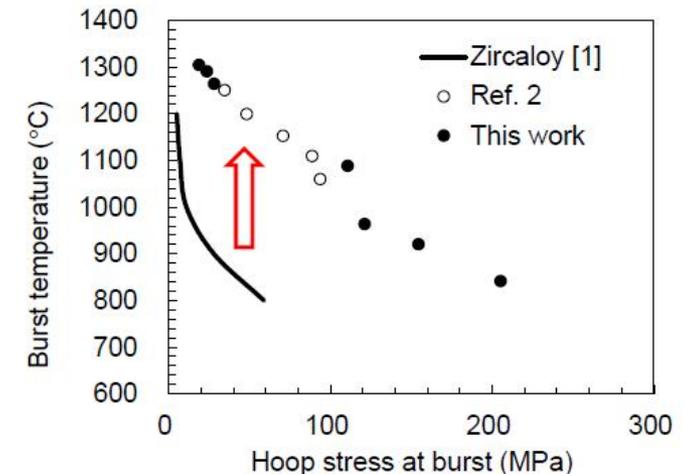
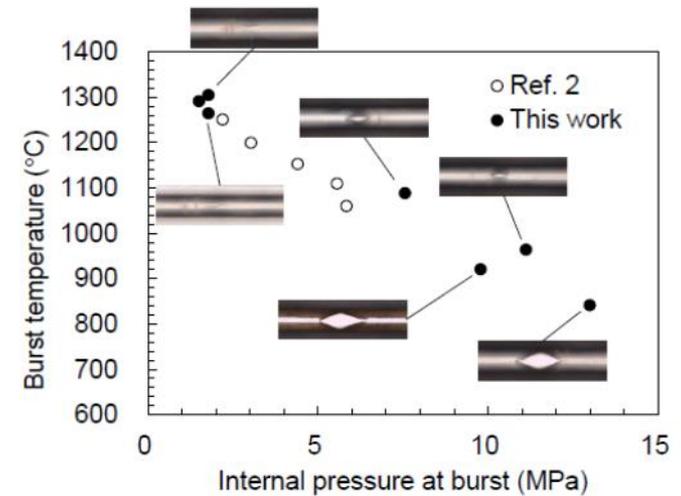
概要

- FeCrAl-ODS 鋼 被覆管の LOCA 模擬試験を CNWG日米協力の下、米国ORNLにおいて実施
- 最高1300℃のLOCA模擬試験において、クエンチ後も被覆管脆化は見られず、かつジルカロイ被覆管よりも高い耐バースト性能を確認



Sample ID	Isothermal temp. (°C)	Initial pre. (MPa)	Ref.
P50R5ST25	1200	5.45	1
P50R5ST26	1200	4.02	1
P50R5ST27	1200	5.31	1
P50R5ST28	1200	2.70	1
P50R5ST29	1200	1.99	1
P50R5ST30	1200	1.45	This work
P50R5ST31	1300	1.45	This work
P50R5ST32	1200	10.34	This work
P50R5ST33	1200	7.58	This work
P50R5ST34	1200	5.86	This work
P50R5ST89	1200	8.62	This work
P50R5ST90	1300	1.38	This work

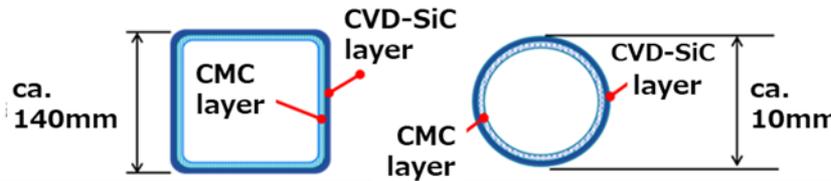
[1] K. Sakamoto et al., J. Nucl. Mater., 557 (2021) 153276.



[1] M. Ishikawa and S. Shiozawa, J. Nucl. Mater., 95, 1-2, (1980) 1.
 [2] K. Sakamoto et al., J. Nucl. Mater., 557 (2021) 153276.

概要

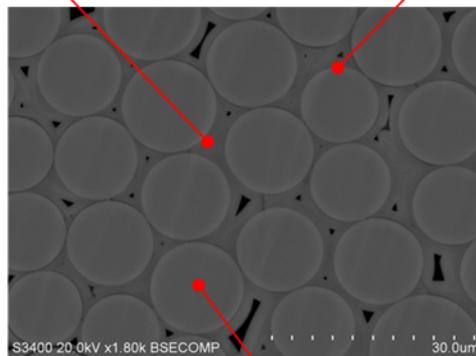
- SiC被覆管及びSiCチャンネルボックスの製造プロセスとして、良好な耐食性と気密性を有するCVI/CVD成膜工程を確立した。



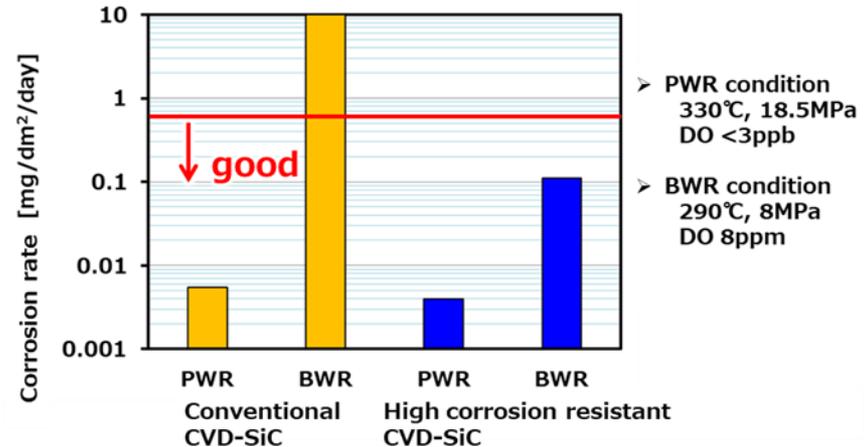
CVI: Chemical Vapor Infiltration
 CVD: Chemical Vapor Deposition
 PyC: Pyrolytic carbon
 CMC: Ceramic Matrix Composites

Cross section of CMC layer (SEM)

CVD-SiC matrix PyC interface layer



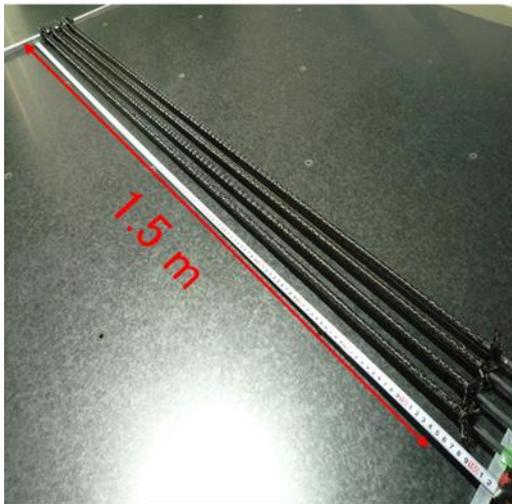
Autoclave test for CVD-SiC



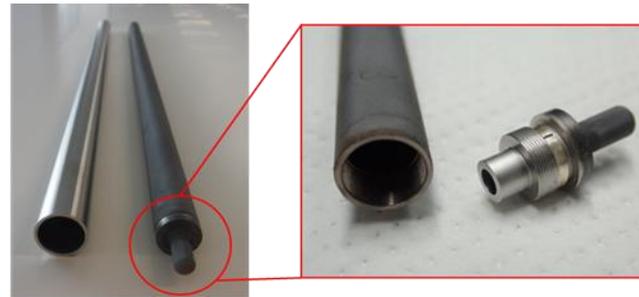
Ref1) F. Inoue, "Development of Accident Tolerant SiC/SiC Cladding and Channel Box in Toshiba", The 29th International Conference on Nuclear Engineering, Shenzhen, China, August 8-12, 2022.
 Ref2) T. Nishimura, "Development of CMC for nuclear fuel components", Ceramic Matrix Composites II, Santa Fe, New Mexico, November 13-18, 2022.

概要

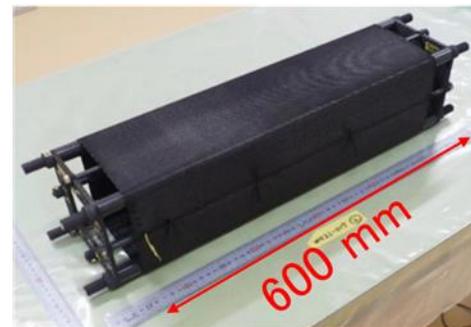
- 実機スケールのSiC被覆管、チャンネルボックスを製造可能とする製造プロセス条件の策定を目的に、安全性に優れるCVI技術の開発試験および量産性を考慮した長尺織物製織試験を実施し、CVI成膜試験の結果および1.5m級のSiC被覆管前駆体での適用可能性確認結果を得て、実機スケールの試作に向けて有効な製造プロセスを構築した。また、高い密封性・耐食性を有する端栓接合技術を開発した。



SiC Cladding tube Preform



End plug sealing structure



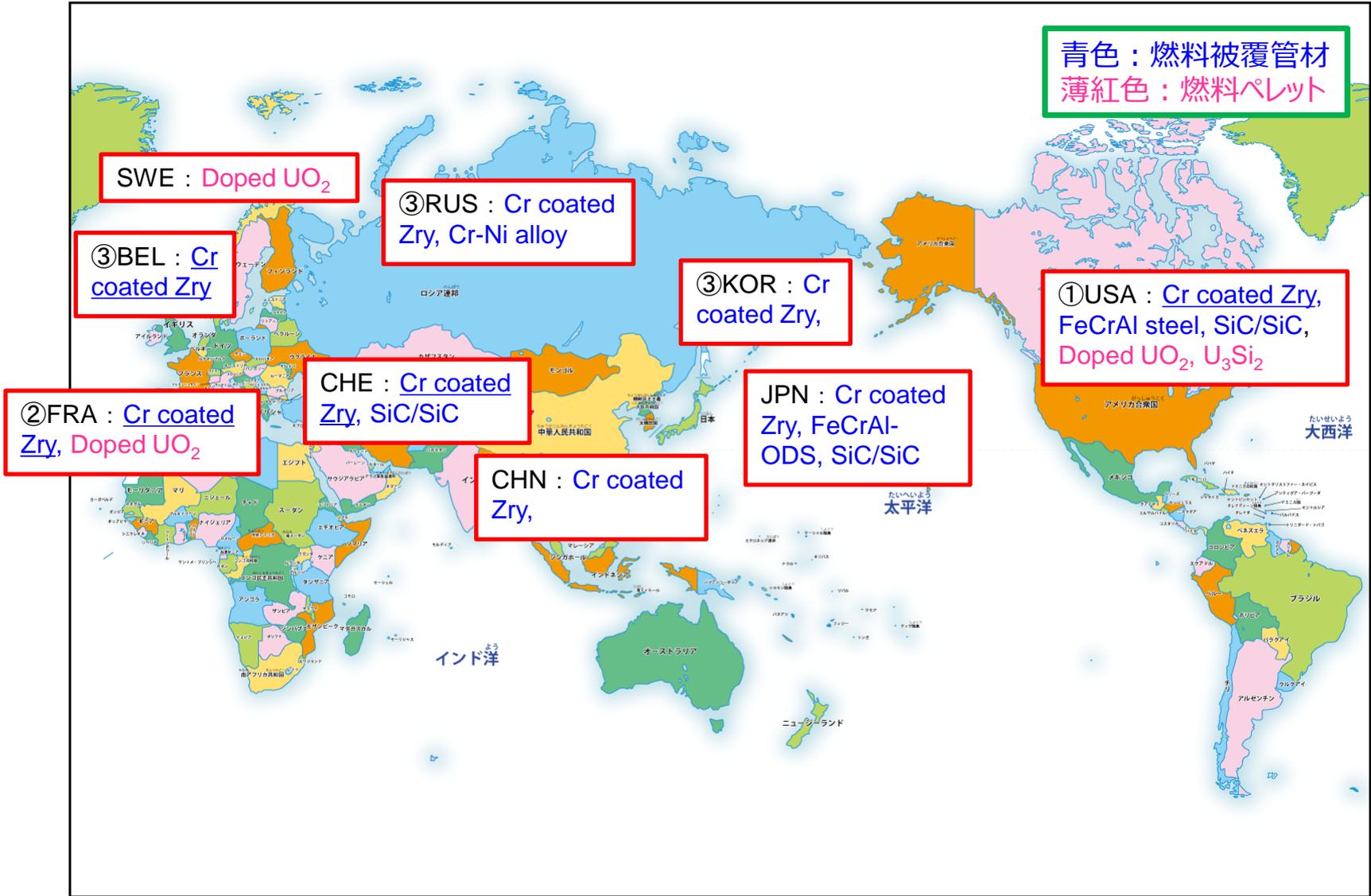
SiC Channel Box Preform

Ref) T. Nishimura, "Development of CMC for nuclear fuel components", Ceramic Matrix Composites II, Santa Fe, New Mexico, November 13-18, 2022

海外におけるATFの開発状況

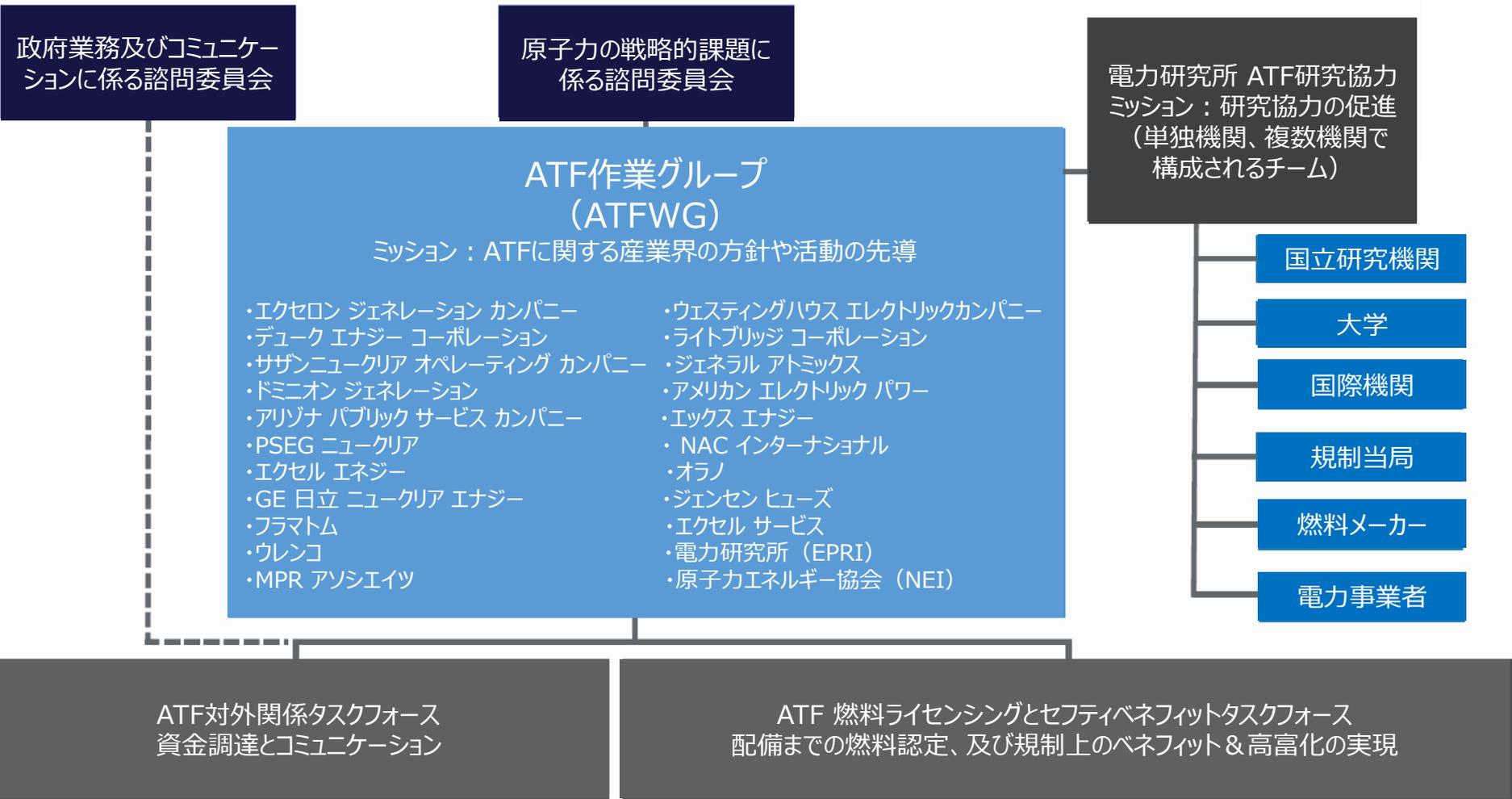
- ① 米国の開発状況
- ② 仏国の開発状況

世界各国で行われているATF開発の現状 (2021年11月時点)



① 米国におけるATFの開発状況

➤ 開発体制



① 米国におけるATFの開発状況

- ① ジルコニウム合金燃料ピンの外表面をクロム等でコーティングした被覆管
- ② 鉄系 (FeCrAl合金) 燃料ピン被覆管
- ③ セラミクス系 (SiC/SiC複合材) 燃料ピン被覆管
- ④ 改良 UO_2 燃料ペレット
- ⑤ 高密度 (例えば、 U_3Si_2 やUNなど) 燃料ペレット

ニアタームのATF概念

ロングタームのATF概念

- フラマトム (Framatome)
 - CrコーティングZr被覆管
 - 改良 UO_2 燃料ペレット
 - SiC/SiC複合材被覆管



- ジェネラルエレクトリック (General Electric)
 - コーティングZr被覆管
 - 現行の UO_2 燃料ペレット
 - FeCrAl被覆管

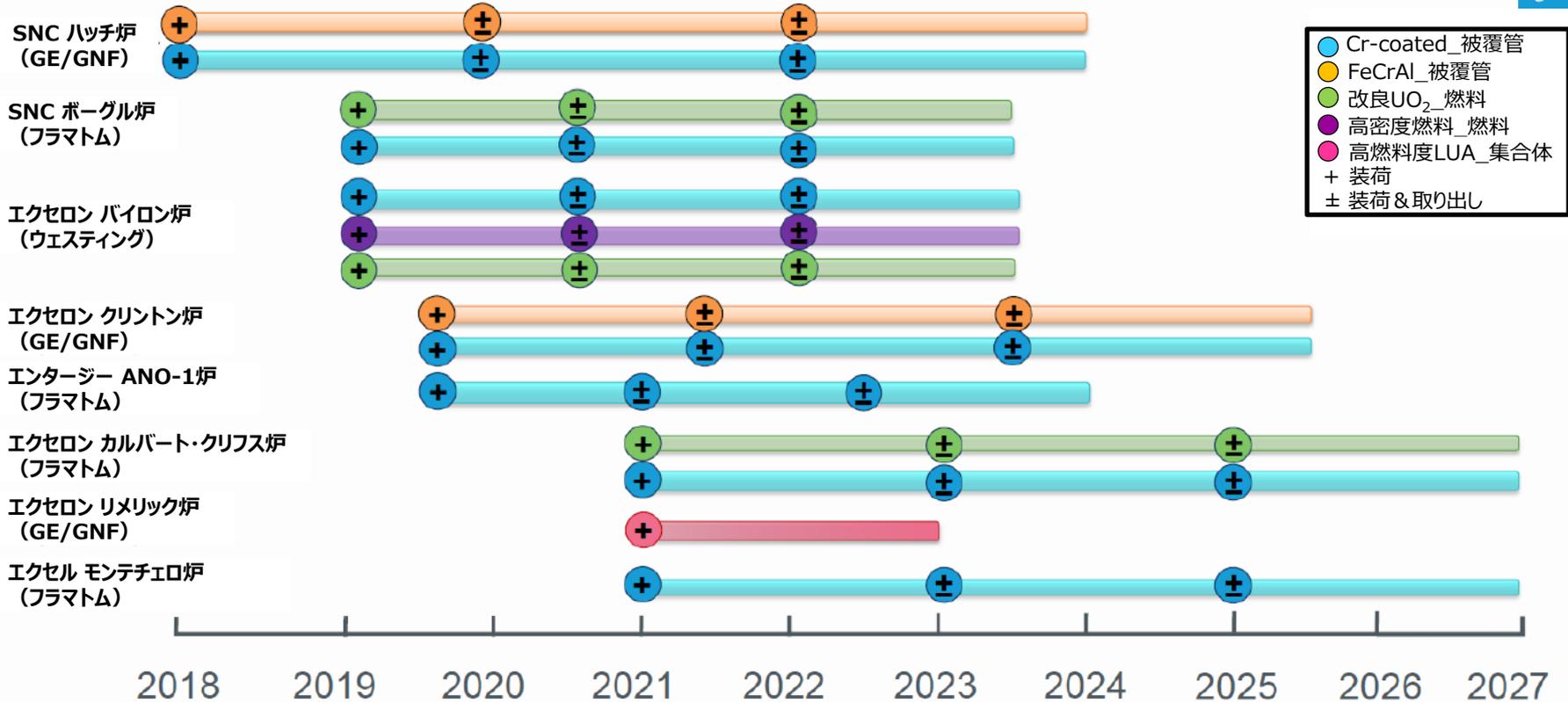


- ウェスティングハウス (Westinghouse)
 - CrコーティングZr被覆管
 - SiC/SiC複合材被覆管
 - 高密度燃料ペレット



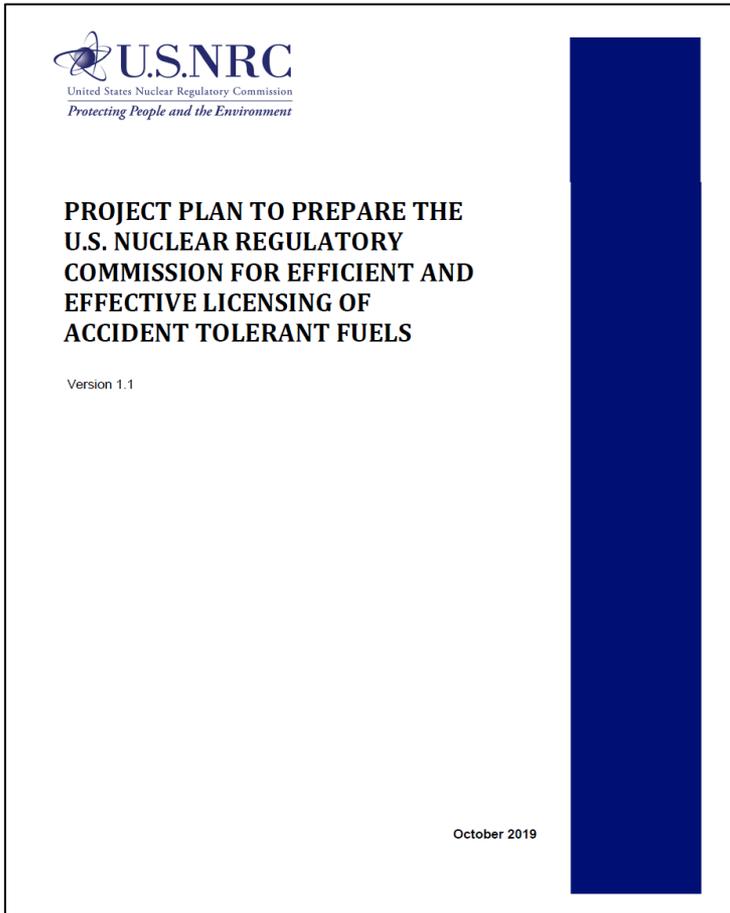
➤ 商用炉を用いた照射試験の実施状況

水色：Crコーティング被覆管
 橙色：FeCrAl被覆管



① 米国におけるATFの開発状況

➤ 規制当局側（アメリカ合衆国原子力規制委員会：NRC）の活動状況



- NRCは現行の規制の枠組みのもとで、ATF使用の許可を与えるまでの機関プロセスを、より効率的・効果的に行うために、幾つかのステップを踏むこととしている。
- NRCは、燃料製造、新規燃料輸送、炉内要件、及び使用済燃料の貯蔵と輸送を含む燃料サイクル全般に対処する、ニアタームとロングタームの両方のATF設計のためのプロジェクトプランを策定した。
- 計画策定を通じて、スタッフは燃料ベンダー、産業界グループ、非政府機関、NRCの国際連携機関などの被許諾者を含む、機関ステイクホルダーと広範に連動してきている。
- 本計画では、燃料の使用許可への新しい規制アプローチの概要を記している。この計画の中では、NRCがATFを適用しようとする事業者と、研究開発段階のかなり早くから連動し、データ共有や緊密な連携によって、より後段のライセンス取得プロセスの効率を高めることが期待される。
- NRCはまた、規制のためのルールやガイダンスを産業界が実施している研究開発と並行して洗練させていく予定で、各ステイクホルダーと密接にコミュニケーションを図りながら透明性を担保しつつ取り組んでいる。

➤ 実施主体

- 燃料設計／評価（燃料ベンダー）：

フラマトム（Framatome）

framatome

ウェスティングハウス（Westinghouse）



- 原子炉安全解析（電気事業者）：

フランス電力株式会社（EDF）



➤ 開発中のATF

- 被覆管：Cr coated Zr alloy（ニアタームのATF概念）
（ジルコニウム合金燃料ピンの外表面をクロム等でコーティングした被覆管）
- 燃料：Doped UO₂ pellet（ニアタームのATF概念）
（改良UO₂燃料ペレット）

（*） 欧州では、気候変動対策と経済成長の両立を目指す仕組みとして構築されたEUタクソミーへの適合条件としてATFの採用が加えられている

➤ 照射試験（LTR）計画

- 2023年からEDFプラントで照射を開始予定。
- 所定燃焼度まで6～10年程度

① フラマトム（Framatome）：

- 4 集合体照射（集合体のうち複数本の燃料棒にCrコーティングを導入）
- 9 0 0 MWクラス（17×17型燃料 3 ループ・プラント）
- 最大 5 サイクル運転（12ヵ月× 5 サイクル）

② ウェスティングハウス（Westinghouse）：

- 4 集合体照射（集合体のうち複数本の燃料棒にCrコーティングを導入）
- 1300MWクラス（17×17型燃料 4 ループ・プラント）
- 最大 4 サイクル運転（18ヵ月×4サイクル）

② 仏国におけるATFの開発状況

➤ 規制当局（フランス安全当局）

- 原子力安全局（ASN）：原子力安全および放射線防護に係る規制を担当している独立行政機関の一つで2006年に設立
- フランス放射線防護原子力安全研究所（IRSN）：2002年に設立された原子力および放射線リスクに関する国の公共機関であり、ASNの主要なTSO(Technical Support Organization)
- ASNを強化するとともに意思決定プロセスを円滑化するために、IRSNを組織再編(ASN等への移管)する方針が2月に政府でだされ、その実現のための法案が現在国会で審議中。組織再編までは1～1.5年かかる見込み。



- 原子炉を運用する事業者として、フランス電力株式会社(EDF)は、ATFの実用化に際し実機原子炉での安全性確認がフランスの安全当局より求められている。
- EDFは、フラマトムやウェスティングハウスからライセンスングプロセスにおける支援を受ける予定。

- 2015年から本格的に開始された国内の事故耐性燃料（ATF）開発では、先行する欧米に早期にキャッチアップすべく、戦略的かつ効果的に開発を進めてきている。
- 今後も引き続き、国内事業者等との連携体制を継続的に強化しつつ、海外機関等との連携による照射試験の推進や燃料挙動評価を行う予定である。
- 以下に現在までに得られている成果・結果をまとめて記す。

(1) 国内における新型燃料開発推進

- ① 国内連携協力推進と開発状況総括：事業者／メーカー／研究機関／大学との連携推進、TRLとRMの継続的更新
- ② 研究開発動向や規制基準等に係る情報収集：国内外関連情報収集と共有

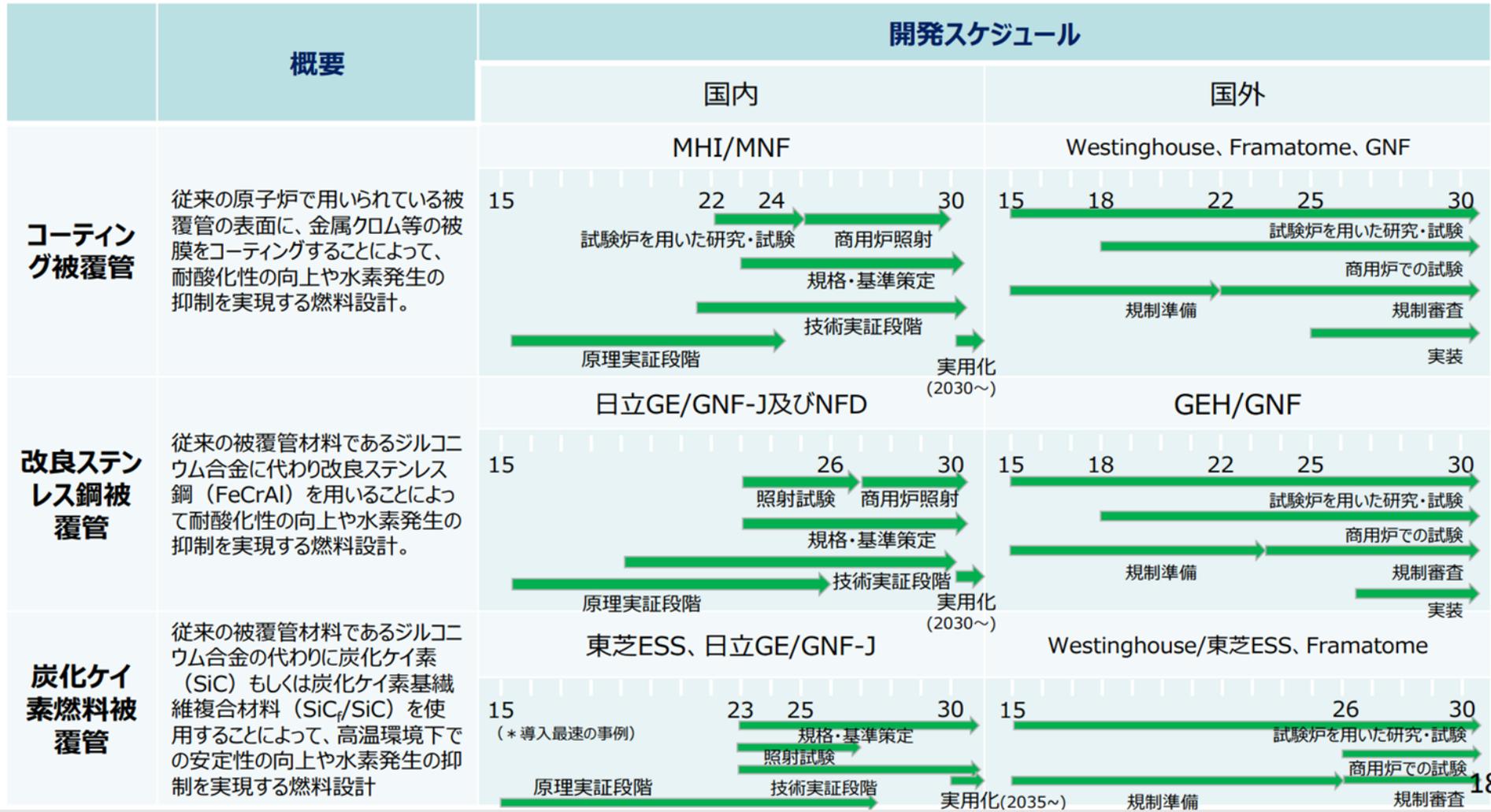
(2) 新型燃料の共通技術基盤の整備と継続的高度化

- ① 照射試験の円滑かつ継続的な推進：Crコーティング@ATR
- ② 基礎基盤研究の推進：燃料ふるまい解析手法の高度化、共通基盤インフラ整備を含む試験技術開発による各コンソーシアムの開発支援

(3) 海外との連携協力体制の強化

- ① 国際連携の継続的推進：米国等（二国間）
- ② ATF研究開発に係る国際動向の把握・情報収集：関連国際会議等

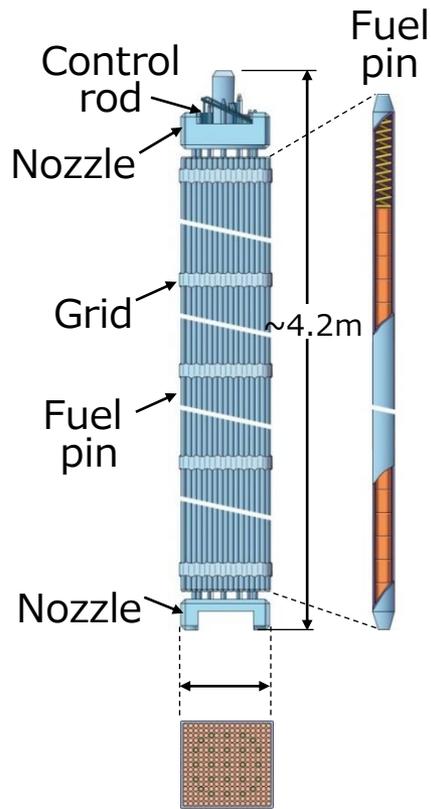
参考資料



出典: 事故耐性燃料開発に関するワークショップ (2022.12.21)

https://nsec.jaea.go.jp/ATFWS/pdf/2022w/atfws_material_2.pdf#PAGE=11

➤ 事業開始時に、民間事業者、大学、燃料ベンダー、研究機関から提案されたATF候補概念は下に4つの概念であった。



PWR 燃料集合体

① **SiC (炭化ケイ素)**

- PWR及びBWR用燃料被覆管
- BWR用チャンネルボックス

[提案者：三菱重工、MNF、東芝、日立GE]

② **TRISO*1型被覆燃料粒子**

- 事故時における核分裂生成物放出抑制を目指した新型燃料

[提案者：NFI]

③ **FeCrAl-ODS*2鋼**

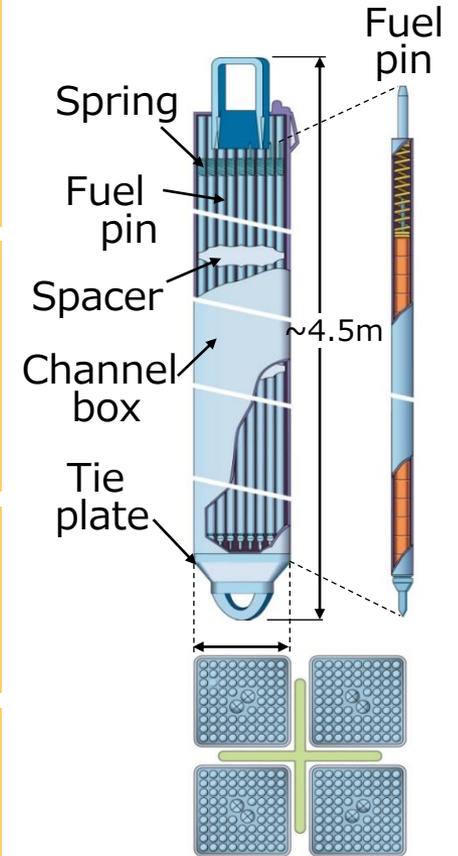
- PWR及びBWR用燃料被覆管

[提案者：NFD、GNF-J、北大、京大、日立GE]

④ **ATCR*3**

- BWR及びPWR用制御棒

[提案者：電中研、東芝]



BWR燃料集合体

*1 TRi-structural ISOtropic particle fuel, 三重等方性被覆燃料粒子

*2 FeCrAl-Oxide Dispersion Strengthened, 酸化物分散強化型FeCrAl

*3 Accident Tolerant Control Rod, 事故耐性制御棒

(1) 新型燃料部材を既存軽水炉に装荷した場合の影響評価

- ・開発状況の調査
- ・技術成熟度の整理と開発課題の明確化

成果を反映

- 新型燃料部材の技術成熟度を整理

成果を反映

- 炉心・プラント特性解析による炉心装荷時の影響を評価
 事故進展解析による安全性評価手法への影響を評価
 設計コード等により、燃料ふるまい解析や燃料設計への影響を評価
 燃料製造の品質管理や規格に対する影響や輸送・貯蔵方法への影響を評価
 必要な材料物性データ等を取得

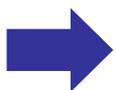
成果を反映

- 照射試験、燃料設計・ふるまい解析、工学規模での製造性検討、
 その他の実用化に必要な課題を整理・抽出
 軽水炉体系で必要となる開発課題マップを整備

(2) 優先的に開発すべき新型燃料部材の選定、及びその設計・製造に向けた研究計画の策定

成果を反映

(3) 研究計画に基づく各種試験データの整備、新規取得データに基づく各種解析・評価の高精度化、及び実用化阻害因子の抽出 (有無の確認)



安全性向上に資する新型燃料を既存軽水炉に装荷可能な形で設計・製造するために必要となる技術基盤を整備

➤ 「安全性向上の利点」、「リスクや技術開発課題」、「技術成熟度」、「諸外国における開発動向」等を踏まえて、総合的な視点で技術評価を行い優先順位付け

・ 開発継続の候補材料と実施体制（2016年度～）

SiC (炭化ケイ素)
 - PWR及びBWR用燃料被覆管
 - BWR用チャンネルボックス
 [三菱重工、MNF、東芝、日立GEと協力]

➡ 実用化できた場合に安全性向上効果の期待が大きい**優先度の高い候補概念**。残されている課題は多いものの、製造技術開発の進展も著しい

TRISO型被覆燃料粒子
 - 事故時における核分裂生成物放出抑制を目指した新型燃料
 [NFIと協力]

➡ 軽水炉燃料としての具体的な技術開発はこれまでに行われておらず、他に比べて**優先度が低い候補概念**

FeCrAl-ODS鋼
 - PWR及びBWR用燃料被覆管
 [NFD、GNF-J、北大、京大、日立GEと協力]

➡ 比較的短期間での既存軽水炉への導入が見込まれる**優先度の高い候補概念**

事故耐性制御棒(ATCR)
 - BWR及びPWR用制御棒
 [電中研、東芝と協力]

➡ 制御棒の開発は日本独自の技術であるが、技術成熟度はまだ低く、他に比べて**優先度が低い候補概念**

新型燃料部材の候補材料

- 1. FeCrAl-ODSステンレス鋼**
 - BWR用燃料被覆管
- 2. SiC (炭化ケイ素) / SiC複合材**
 - PWR及びBWR用燃料被覆管
 - BWR用チャンネルボックス

実用化研究開発の体制

FeCrAl-ODS鋼Gr

- ・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
- ・北海道大学
- ・京都大学
- ・早稲田大学
- ・日立GE
- ・原子力機構

SiC/SiC複合材Gr

- ・三菱重工業 (PWR向け)
- ・三菱原子燃料 (PWR向け)
- ・東芝エネギ・システムズ (BWR向け)
- ・日立GEニュークリア・エナジー (BWR向け)
- ・量研機構
- ・原子力機構

実施項目	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	
BWR用 改良ステンレス鋼 燃料に係る 技術基盤整備	開発 状況 調査	燃料設計のための基礎データ取得試験と詳細解析			照射リグ設計・材料照射試験・米国からの試験片輸送・国内での照射後試験			
		適宜データを反映		一部データを反映				
		品質管理のための技術開発／規格・基準の検討						
BWR用 SiC燃料等に係る 技術基盤整備	技術 成熟度 (TRL) 整理	燃料設計のための基礎データ取得試験と詳細解析						
		適宜データを反映		適宜データを反映				
		B/P共通試験技術開発(ラウンドロビン試験等)						
PWR用 SiC燃料に係る 技術基盤整備	研究 計画 策定	燃料設計のための基礎データ取得試験と詳細解析						
		適宜データを反映		適宜データを反映				
		B/P共通試験技術開発(ラウンドロビン試験等)						
<p>① 2018年6月12日付け原子力委員会決定「技術開発・研究開発に対する考え方」を受けて、個別要素技術開発については、民間主導で実施（コストシェアの考えを導入）。</p> <p>② 米国との連携・協力で進めてきた部分については、所期の目標達成に向けて継続。</p> <p>③ ノルウェー・ハルデン炉の廃炉決定（2018.6.27発表）を踏まえて、開発中の個別要素技術の照射特性評価の進め方について、ステークホルダーとの間で議論を開始。</p>								

- 第1フェーズでは、冷却材喪失等の過酷な条件においても損傷しにくく、高い信頼性を有する新型燃料部材について、既存軽水炉に装荷可能な形で設計・製造するために必要となる技術基盤を整備することを目的に、総合的な視点での技術評価に基づく候補概念のスクリーニングを事業初年度（2015年度）に実施。
- 開発継続となったATF候補概念（改良SS及びSiC）に対して策定した、技術成熟度（TRL）整理表、研究計画、技術課題マップに基づき、
 - 各候補材料の物性値、機械及び熱特性、照射挙動等の基礎データの取得、及び海外の試験研究炉を用いた中性子照射試験計画の検討
 - 各候補材料の軽水炉導入による、製造性、炉心特性、燃料設計やふるまい、事故進展、安全評価、使用済燃料の取り扱い等への影響の評価
 - 照射試験等残された課題を整理（次頁参照）
- また、適宜ユーザー（電力事業者等）のニーズや外部有識者の意見などを研究開発計画に反映し、各新型燃料候補材料の開発の進め方の適正化を図るとともに、規制基準等の最新知見を取り入れる形でTRLやAGを更新。
- 事業を進めるにあたっては、軽水炉燃料の特異性を考慮しつつ、大学や産業界に蓄積された知識、技術、経験、人材等を活用。また、技術の伝承や人材育成にも留意。

種別	項目	説明	ベネフィット定量評価のための実施項目例	対象となる ATF 候補材			ベネフィット 定量評価時期	
				Coated-Zry	FeCrAl-ODS	SiC/SiC		
安全性向上	SA 時	Grace Time 延伸 ・事故耐性向上に伴う Grace Time 延伸 ※ 事故対応操作までの余裕時間延伸	・被覆管破損限界把握、高温挙動・物性把握、モデリングのための試験 ・破損機構・挙動モデル、物性データの事故解析コードへの反映 ・代表シナリオによる SA 解析	△	○	○	【TRL:3~5】 ・開発の方向性検討 ・ATF 採否予備検討	
	事故時	LOCA 耐性等向上 ・LOCA 時高温酸化抑制に伴う耐熱衝撃性能向上 ・DNB 裕度拡大に伴う燃料破損リスク低減	・燃料集合体の DNB 試験(燃料集合体の設計変更を伴う場合) ・炉心特性解析、燃料棒挙動解析 ・LOCA 解析、Non-LOCA 解析	○	○	○	and/or 【TRL:6~8】 ・許認可対応検討 ・ATF 採否検討	
	通常運転時	フレットング 損傷低減	・グリッド等フレットング損傷の低減 ※ 燃料棒堅牢化による、等	・流水試験/振動試験等での摩耗特性評価試験 ・実炉使用燃料のスペーサコンタクト部の確認 ・被覆管摩耗試験、フレットング試験	○	○	○	and/or 【TRL:6~8】 ・許認可対応検討 ・ATF 採否検討
		AOA [*] 抑制	・クラッド付着抑制 ※ コーティング適用によるなど	・実炉水化学環境下でのクラッド付着特性試験 ・クラッド厚みをパラメータとした AOA 発生リスク評価	○	○	○	
	その他	耐食性向上	・材料変更またはコーティング層形成による冷却材反応の抑制	・実炉水化学環境下での耐食性確認試験	○	○	○	and/or 【TRL:6~8】 ・許認可対応検討 ・ATF 採否検討
PRA 評価改善		・CDF ^{**} 、CFF ^{**} 、LERF ^{**} の低減	・(Grace Time 延伸に係る試験と同じ) ・PRA 評価、成功基準解析(BDBA/SA 解析)	△	○	○		
	地震応答特性改善 材料耐震裕度向上	・チャンネルボックス軽量化、被覆管高強度化、コーティング層形成による強度の増加による耐震性裕度向上等 ※ 固有振動数増一原子炉建屋との共振回避、軽量化一炉内構造物等への地震応答負荷低減、地震時相対変位低減一制御棒挿入性改善、など	・燃料棒、チャンネルボックス強度試験 ・地震時制御棒挿入性試験 ・燃料集合体耐震試験・加振試験	○	○	○		
運用・設備影響	定期検査	定検期間短縮	・定検時の燃料取扱時間短縮 ※ 燃料棒堅牢化による、等	・照射試験(燃料棒・集合体の寸法安定性に関するデータ取得) ・燃料取扱時加速度制限値の評価 ・FHM 作業高速化の検討	—	○	○	【本格適用後】 ・活用高度化検討
		定検時被ばくの低減	・高効率運転(燃料交換頻度低減)に伴う定検作業員の被ばく低減	・クラッド付着特性試験、炉水クラッド起因の被ばく量影響評価 ・被覆管耐食性試験(長 Cy 想定)	○	○	○	【TRL:6~8】 ・許認可対応検討 ・ATF 採否検討
	運用時影響	冷却材水化学	・被覆管材の冷却材への溶出による水質への影響、被ばくへの影響	・溶出確認試験	△	○	○	【本格適用後】 ・活用高度化検討
	燃料運用	高効率炉心運用	・通常運転時性能向上及び事故耐性向上に伴う運転制限緩和の運転範囲拡大への適用 ・L3P ^{**} 等 ※ 効率的な燃料運用、等 核的制限値緩和を想定	・被覆管材料の高温挙動・物性把握及びモデリングのための試験 ・沸騰遷移時挙動把握、モデリングのための試験 ・耐食性確認試験、PCI 破損への影響確認試験 ・炉心特性解析、燃料棒挙動解析	○	○	○	【本格適用後】 ・活用高度化検討
		FCC ^{**} 低減	・ウラン装荷量増(燃料取替体数減)に伴う FCC の低減	・代表的な燃料運用による FCC 評価	—	○	○	
	設備影響	安全系設備合理化	・通常運転時性能向上及び事故耐性向上に伴う安全系設備合理化	・(Grace Time 延伸に係る試験と同じ) ・DBA で考慮する安全系設備条件をパラメータとした影響評価 ・代表シナリオによる BDBA/SA 解析	△	○	○	【TRL:6~8】 ・許認可対応検討 ・ATF 採否検討
フルタイム運用高度化	稼働率向上	負荷追従運転	・通常運転時性能向上及び事故耐性向上に伴う安全裕度拡大分のプラント運転範囲拡大への適用 ※ グリッド状況等に応じた柔軟なプラント運用、等 核的制限値緩和を想定(①)、早い出力変動などを想定(②)	①・被覆管の高温挙動・物性把握・モデリングのための試験 ・沸騰遷移時挙動・モデリングのための試験 ・耐食性確認試験、PCI 破損への影響確認試験 ②・燃料棒の PCI 挙動への影響を把握するための試験 ・想定出カシークスでの炉心特性・燃料棒挙動解析	△	○	○	【TRL:6~8】 ・許認可対応検討 ・ATF 採否検討 and/or 【本格適用後】 ・活用高度化検討
		熱出力向上	・通常運転時性能向上及び事故耐性向上に伴う安全裕度拡大分のプラント運転範囲拡大への適用 ※ 熱出力向上に伴う発電コストの低減	・燃料集合体の DNB 試験(燃料集合体の設計変更を伴う場合) ・耐食性確認試験、PCI 破損への影響確認試験 ・高出力定常照射試験 ・炉心特性解析、燃料棒挙動解析、燃料健全性判定クライテリア評価	○	○	○	【本格適用後】 ・活用高度化検討
	長 Cy 運転	・通常運転時性能向上及び事故耐性向上に伴う安全裕度拡大分のプラント運転範囲拡大への適用 ※ プラント稼働率向上に伴う発電コストの低減	・耐食性確認試験、PCI 破損への影響確認試験 ・被覆管腐食/水素吸収特性確認試験 ・炉心特性解析、燃料棒挙動解析	○	○	○		
	廃棄物低減	高燃焼度化	通常運転時性能向上及び事故耐性向上に伴う安全裕度拡大分の安全裕度拡大分の運転範囲拡大への適用	・耐食性確認試験、PCI 破損への影響確認試験 ・被覆管腐食/水素吸収特性確認試験 ・炉心特性解析、燃料棒挙動解析	○	○	○	

注)上記表のうち、「定量評価時期の目安」は安全系設備・系統設備等の大幅な改造なしに設置変更許可申請を行う場合を想定。
上記表中の○/△/—はベネフィット見込みで、○:有望(高~中程度)、△:有望(中~低程度)、—:見込み薄。

*1) AOA: Axial Offset Anomaly *3) CFF: Containment Failure Frequency *5) L3P: Low-Leakage Core Loading Pattern
*2) CDF: Core Damage Frequency *4) LERF: Large Early Release Frequency *6) FCC: Fuel Cycle Cost

- EUタクソミーは、**EUのサステナビリティ方針に資する経済活動を明示**した、いわば「**グリーン・リスト**」。
※企業が基準に合致する旨を開示することで、「グリーン債券」の発行等を通じて資金調達しやすくなる効果がある。
- 欧州委員会は加盟国等からの意見聴取を経て、2022年2月2日付で**原子力および天然ガスの取扱いに関するドラフトを承認**。
- 今後、加盟国や議会等との議論を経て、**4～6カ月以内に理事会・議会で可決される見込み**。

補完的委任規則 (complementary Delegated Act) における原子力と天然ガスの記載

以下の条件に適合する**原子力・天然ガスについてはEUのサステナビリティ方針（気候変動緩和・適合）に資する**。

原子力

- ・**2045年までに建設許可**を受けた**新規原発**。
- ・**2040年までに延長認可**を受けた**既設原発**。
- ・放射性廃棄物の管理について、資金面や処分場の計画についての条件あり。

<具体的には以下のような条件を記載>

- ・放射性廃棄物の管理等の資金を確保すること
- ・低レベル/中レベルの放射性廃棄物の運用可能な処分施設を有すること
- ・2050年までに高レベル放射性廃棄物処分施設が運用開始できるよう
詳細な文書化された計画を有していること

- ・**2025年からは事故耐性燃料(※)を実装すること 等**

※燃料被膜管に新素材を活用する等、シビアアクシデントに至る事象が発生した場合でも事故リスクを低下させる技術

天然ガス

CO2の排出量によってはグリーンと認定。

※具体的には、

- ・100 g CO₂/kWh未満のもの、又は、
 - ・2030年までに建設許可を得たものであれば、
 - ① 270gCO₂/kWh未満であるもの、又は、 ② 20年以上の年間平均排出量が550kgCO₂/kW未満のものが対象。
- さらに、既存の高排出な火力発電所の建て替えに限定する等、複数の条件あり。

⇒日本の一番発電効率が良いガス火力でも327gCO₂/kWh程度のため、発電所のプラントから排出されるCO₂を回収し地下に貯蔵するCCSを行う、または、水素を約50%程混焼する、もしくは稼働率を20%未満とする必要があり、極めて厳しい基準。

● 海外との連携協力体制の強化

① 専門家グループの継続的強化

- ・DOE／EPRI／INLと調整し、日米の新型燃料等に係る開発事業者が一堂に介し協議する場を設けて、[日米連携協力の継続的強化を図る予定](#)（4月4日開催予定）。

② OECD／NEA QUENCH-ATFプロジェクトへの継続参加

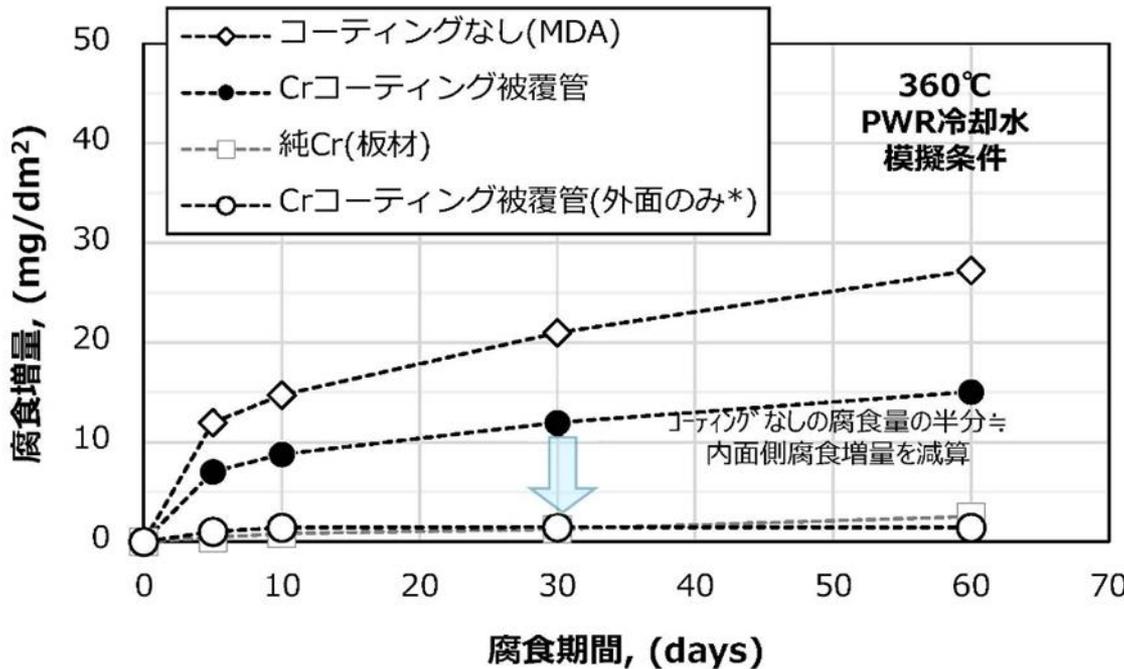
- ・[2022年6月に実施された一回目の試験](#)（米国Westinghouseから提供されたCrコーティング被覆管24本を用いて構成した模擬集合体に対して、過去の試験条件と同条件で試験）[について、各種試験後評価](#)（金相試験、中性子ラジオグラフィ、機械試験等）[結果を入手](#)。
- ・本プロジェクトへの国内機関（エネルギー総合研究所）の参画に必要な手続きを進め、SAMPSONを用いたベンチマーク解析への参加を実現。

*) 三菱重工殿発表資料から抜粋

□ PWR冷却水模擬環境（未照射）での表面酸化抑制効果を確認

□ 特異な腐食等は見られていない

- 360℃冷却水模擬雰囲気での未照射材による腐食試験を実施中
- 両端開放被覆管を用いた試験のため、被覆管内面はコーティングの有無に関わらず腐食進展
- Crコーティング被覆管は被覆管内面のみ腐食が進展。外面腐食はわずか（純Crと同程度）



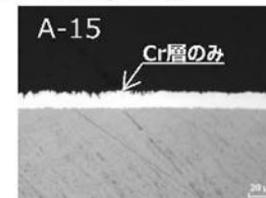
試験前(外観)



60日後(外観)



60日後(断面)



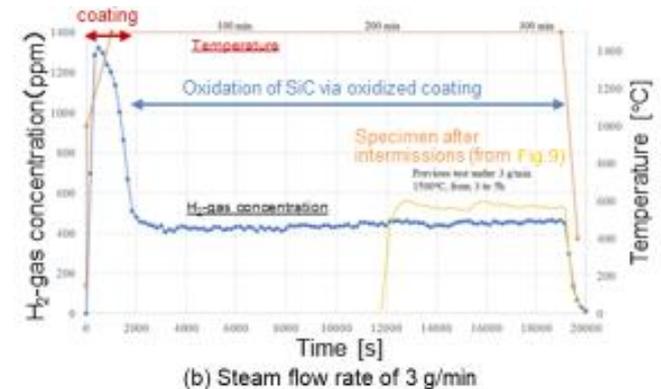
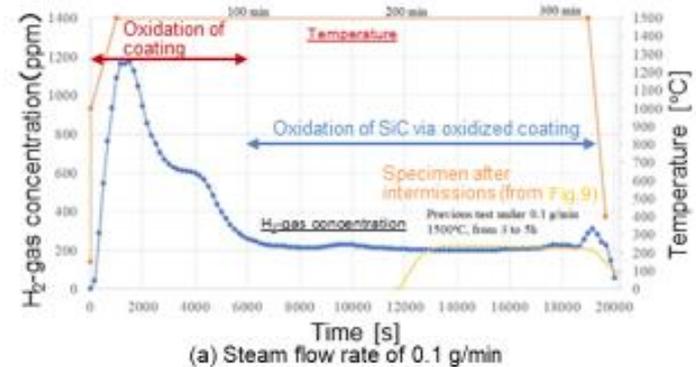
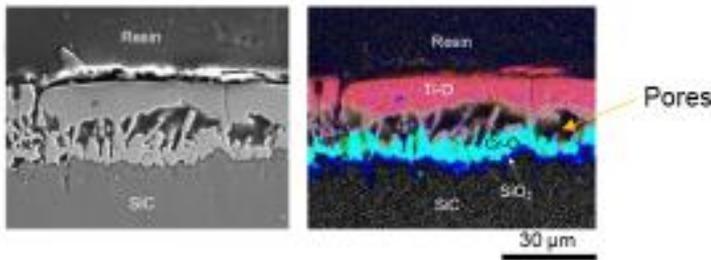
PWR冷却材模擬環境(360°C)腐食試験（未照射）結果

概要

- JAEA保有のレーザ加熱装置（LAHF）を用いて、鉄の融点を超える1600℃まで水蒸気中での酸化および水素ガス発生挙動を評価。
- Ti被覆はSiC基材と顕著な反応を生じず、Ti被覆がSiC被覆管の破損に繋がらないことを確認。
- Ti被覆の有無にかかわらず、水蒸気流量増加に伴い水素ガス発生が増加するという知見が得られた。

Steam flow rate	0.1 g/min		3.0 g/min	
	Before	After 18000 s	Before	After 18000 s
With intermissions at 3600 s and 10800 s				
Without intermissions				

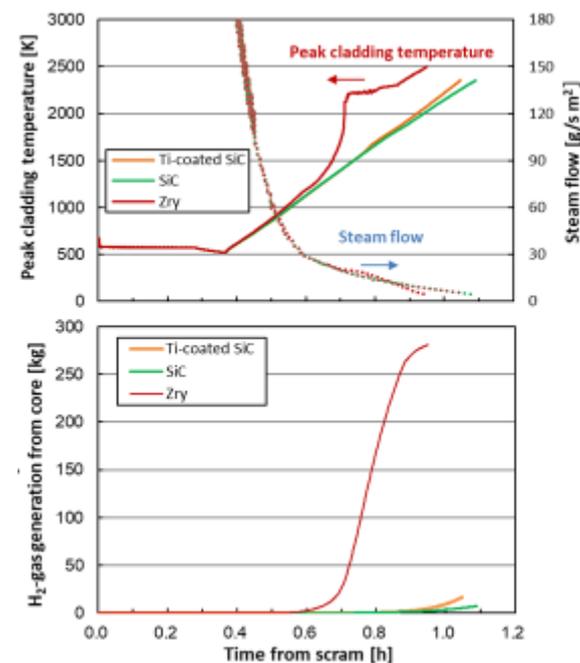
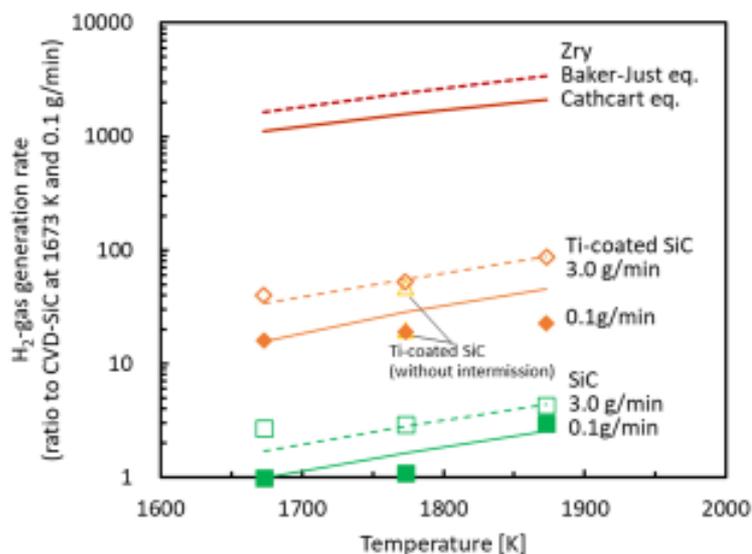
5 mm



概要

- 高温水蒸気酸化試験で得られた水素ガス発生速度に基づき、高温水蒸気酸化のTi被覆SiC被覆管モデルを作成し、過酷事故解析を実施。
- Ti被覆SiC被覆管からの水素ガス発生量は、被覆なしのSiC被覆管と比べ、わずかに増加するが、Zry被覆管と比べると94%減少する解析結果が得られた。
- SiC被覆管の反応熱による温度上昇はZry被覆管と比べて小さく、事故時の水素ガス発生量の低減に寄与することが解析により確認された。

Item	Zry	SiC	Ti-coated SiC
Time from Scram [h]	0.57	0.87	0.85
PCT [K]	1110	1840	1820

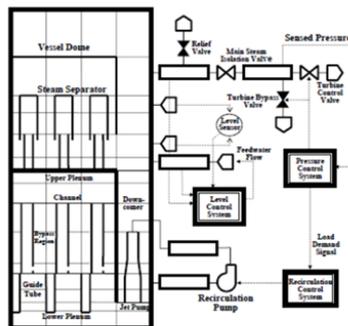
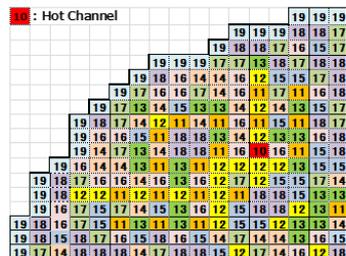


概要

- SiC被覆管を適用した場合の過渡・事故時燃料棒挙動を評価するため、プラント過渡解析コードTRACT™と燃料棒挙動解析コードFEMAXIの連携解析手法を開発した。

【Plant Transient Analysis】

Code: TRACT™



Accident Scenario:
Large Break LOCA@BWR/5

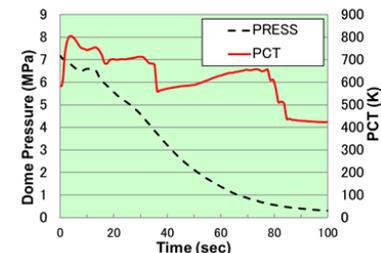
TRACT

Exposure condition

Burn-up Calculation

- fuel pellet radial power profile
- He generation rate

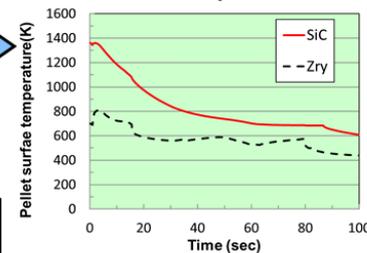
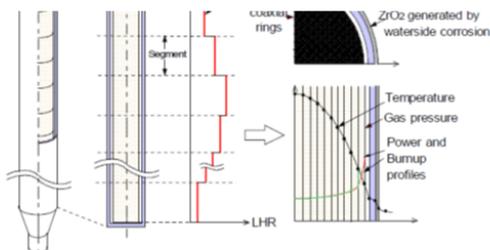
FEMAXI



- thermal hydraulic conditions
- Cladding surface conditions

【Fuel rod behavior Analysis】

Code: "FEMAXI-7" ATF version



- Pellet temperature
- Cladding surface stress, etc.

Ref) F. Inoue, "Development of Accident Tolerant SiC/SiC Cladding and Channel Box in Toshiba", The 29th International Conference on Nuclear Engineering, Shenzhen, China, August 8-12, 2022.

③ その他の国におけるATFの開発状況

➤ 露国



- ✓ 実施主体：TVEL (ТВЭЛ) / ロスアトム (ROSATOM)
 - 被覆管 : Cr coated Zr alloy (E110+Cr) / Cr-Ni alloy (42CrNiMo)
 - 燃料 : 大粒径燃料ペレット
- ✓ 照射試験：MIR研究炉 (実施済み)
 - : Rostov-2 原子力発電所 (試験燃料集合体：2021.8～)

➤ 韓国



- ✓ 実施主体：韓国電力公社 (KEPCO)
 - 被覆管 : Cr coated Zr alloy (HANA-6)
 - 燃料 : 改良 UO_2 燃料ペレット (シリコン酸化物添加 UO_2)
- ✓ 照射試験：BR2炉 (2020.9～2020.12)
 - : 商用炉照射 (2022.12～実施予定)

➤ ベルギー



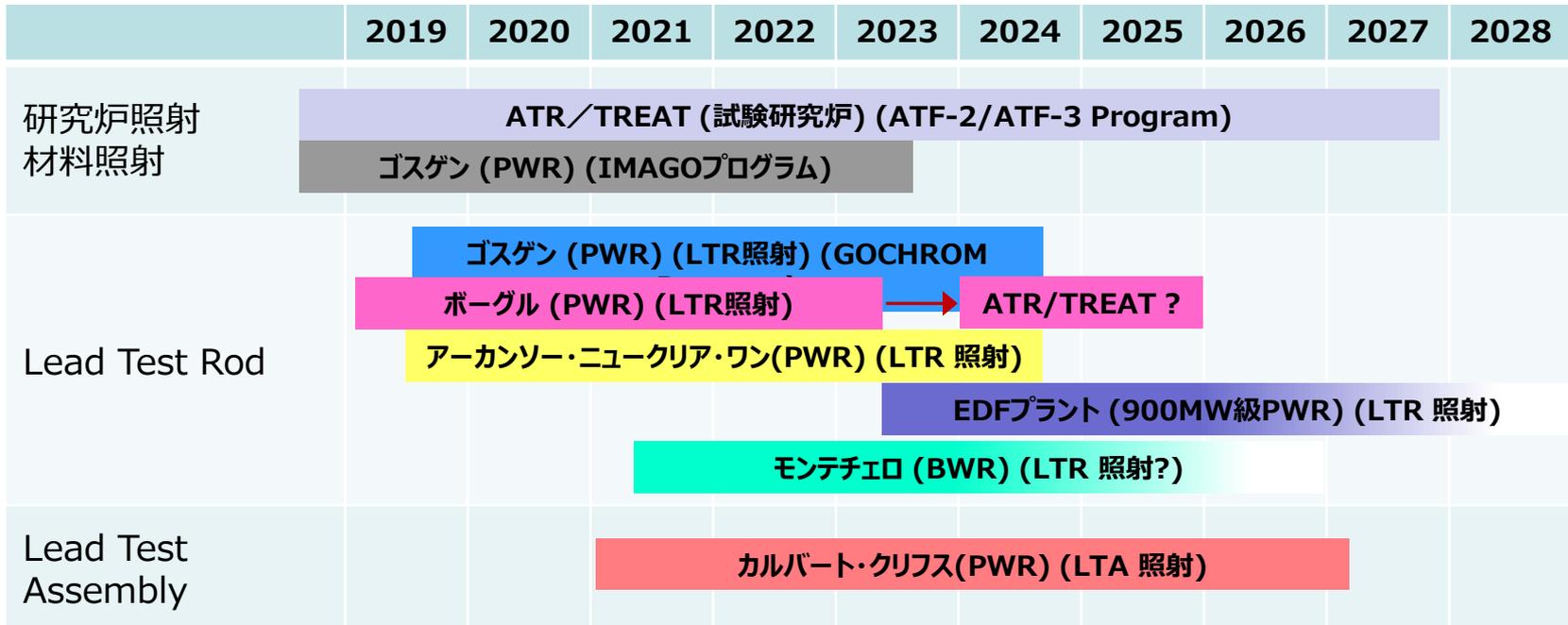
- ✓ 実施主体：エンジー社 (ENGIE) / ウラン公社 (ENUSA)
 - 被覆管 : Cr coated Zr alloy (EnCore)
 - 燃料 : UO_2 燃料ペレット
- ✓ 照射試験：Doel-4炉 (2020.6～)

➤ CrコーティングZIRLO™燃料棒の照射試験を欧米の商用炉で実施中

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
研究炉照射 材料照射	ATR (試験研究炉) (ATF-2プログラム)?									
Lead Test Rod	バイロン発電所 (PWR) (LTR照射)									
	ドール(PWR) (LTR 照射)									
	EDFプラント (1300MW級PWR) (LTR 照射)									
Lead Test Assembly	不明									

標準UO₂、またはADOPTペレットを用いた16本のCrコーティングZIRLO™燃料棒と、ウランシリサイド (U₃Si₂) ペレットを用いた4本のセグメント燃料棒を含むATF先行試験燃料棒 (LTRs : Lead Test Rods) を、**米国エクセルン バイロン発電所2号機に装荷し2019年春より照射開始**。1サイクルの照射が完了し、LTRの一部はPIEに供され、残りは引き続き2サイクル目の照射のため原子炉に再装荷。また、**ベルギーのDoel (ドール) 発電所4号機**においてもCrコーティングLTRの**照射が進行中** (スライド13のベルギーの所にも記載)。ドール4号機での照射は、2021年秋に第1サイクルの照射が終了。**フランスのEDFプラント (1300MWクラス) でも最大4サイクル (18ヶ月/サイクル) のLTR照射を2023年から実施する計画。**

➤ フラマトム社製CrコーティングM5燃料棒のLTR/LTA照射試験の実績と予定



上記の照射試験工程に先立ち、フラマトム社は、フランスCEAの試験研究炉であるOSIRIS (2015年)、スイスのGösgen (ゴスゲン) 発電所 (2016年)、及びHalden炉 (2017年) でATF試料のクーポン照射試験を実施。ゴスゲン発電所でのクーポン照射 (IMAGOプログラム) については、現在も進行中。また、2018年の米国INLの試験研究炉であるATRにおけるPWR条件でのCrコーティングM5燃料棒の照射試験を経て、2019年にはATF先行試験燃料棒 (LTRs : Lead Test Rods) を3基の商用PWR (ゴスゲン発電所 (GOCHROMプロジェクト)、Vogtle (ボーグル) 発電所、ANO発電所) に装荷し、2024年まで照射予定。さらに、カルバート・クリフス発電所において、ATF先行試験燃料集合体 (LTA : Lead Test Assembly) 1体の第1サイクル照射を2021年3月より開始。フランスのEDFプラント (900MWクラス) でも最大5サイクル (12ヶ月/サイクル) のLTR照射を2023年から実施する計画。

V. REBEYROLLE et al., PROtect: The Leading E-ATF Solution Delivered by Framatome, topfuel2019

L. DUQUESNE et al., Framatome's evolutionary ATF solution: Feedback from the irradiation programs on PROtes's Cr-coated M5 cladding, topfuel2021

Marc Ton-That, ATF development and licensing in France, Technical Meeting on The Licensing of Advanced Nuclear Fuels for Water Cooled Reactors, October 2021

