

HITACHI



事故耐性燃料開発に関するワークショップ

UE-OG-4828 Rev.0

FeCrAl-ODS被覆管及びSiC被覆管の開発

2023/12/14

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン



Contents

1. はじめに
2. 日立GEの原子力ビジョン
3. 事故耐性燃料開発の方針
4. FeCrAl-ODS被覆管開発
5. SiC被覆管開発
6. 照射試験計画
7. まとめ



はじめに

福島第一原子力発電所事故を受け、現行の燃料被覆管材料であるジルコニウム合金に比較して、シビアアクシデント時の事象進展を遅らせ、かつ水素発生量を低減する事故耐性燃料の開発が近年世界的に進められている。

日立コンソ(日立GE・GNF-J・NFD)では、BWR向け事故耐性燃料として、改良ステンレス鋼(FeCrAl-ODS)被覆管及び炭化珪素(SiC)被覆管の開発を進めている。

本発表では、両事故耐性燃料の開発状況について紹介する。

2020

2030

2040

2050

2060



ABWR

安全機能がハイブリッド強化
国際標準設計(GDA取得)



ESBWR

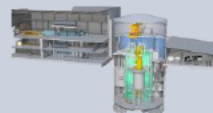
受動的安全性
DCD取得



HI-ABWR

安全設備合理的実装・被ばく低減
革新軽水炉

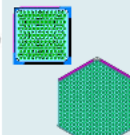
大型軽水炉(高い電気出力, ベースロード電源)



BWRX-300 (2030年代~)

受動的安全性, 小型化・高経済性
日米共同開発

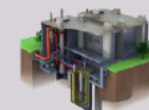
高経済性小型炉(小さい敷地面積, 再エネとの共存, 初期投資の低減)



RBWR (2040年代~)

Pu利用増大, 使用済燃料削減
日・英・米7カ国7連携

軽水冷却高速炉(使用済燃料削減)



PRISM (2050年代~)

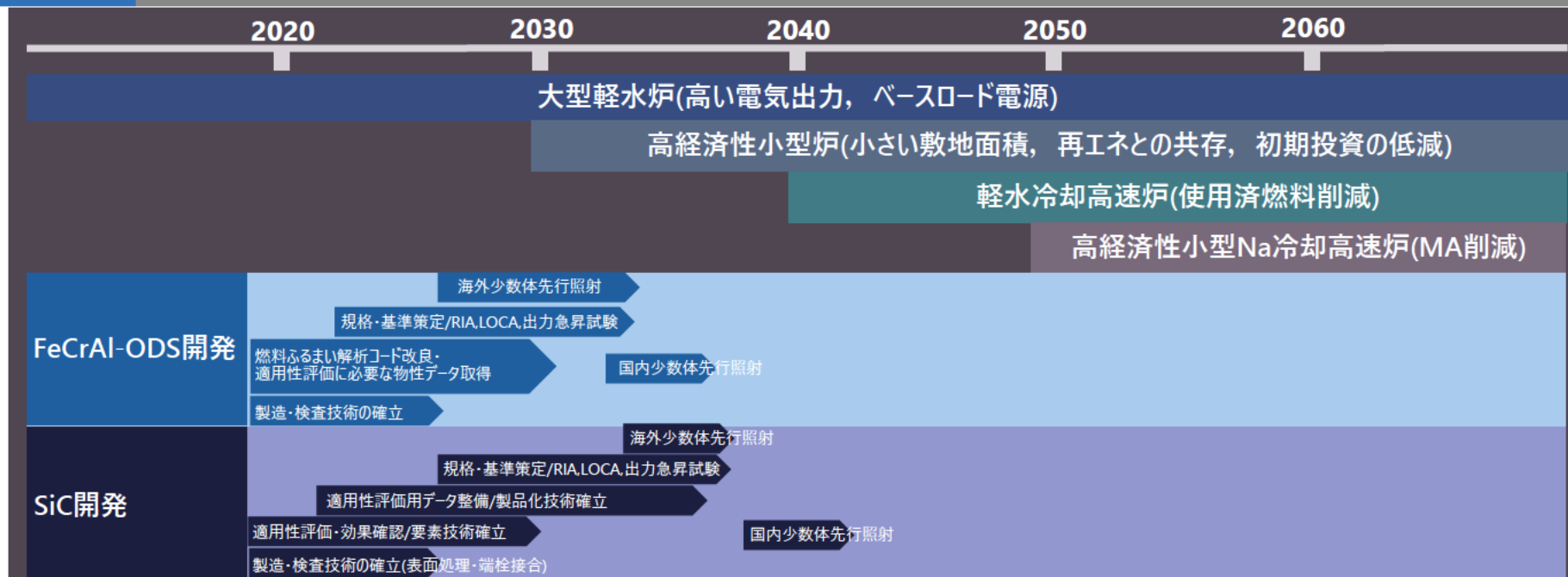
Pu燃焼, 有害度低減
日米共同開発

高経済性小型Na冷却高速炉(MA削減)

BWR建設経験と燃料サイクル技術を元に,

- 初期投資リスク低減,
- 長期的な安定電源,
- 高レベル廃棄物の減容化・有害度低減

を実現する新型炉をオープンイノベーションで国際共同開発。



軽水炉及び高速炉併用時代を想定し、安全性向上に資するとともに経済的合理性を有す事故耐性燃料を開発

- 安全性向上：通常運転時の高い形状安定性，事故時の損傷抑制，SA時の高温酸化耐性を指向
- 経済的合理性：材料特性を活用した運転融通性の向上を指向



1 通常運転時の 安全性・効率性の向上

中性子照射下での形状安定性、耐水素脆化などの優れた材料特性により、安全裕度の向上と燃料漏えいリスクを低減

中性子照射損傷と照射成長の関係

Ref (Zircaloy-2): R B Adamson, C E Coleman, M Griffiths, J Nucl Mater, 521 (2019) 167-244
Ref (FeCrAl-ODS): K Sakamoto et al., Proc WRFPM2023, Xi'an, China, 17-21 July, 2023

2 事故時損傷抑制

酸化物の微細分散により高強度化し耐震性を向上させるとともに、事故時の変形、破損(破裂)を抑制

破裂温度と破裂時円周方向応力の関係

Ref (Zircaloy-4): M Ishikawa and S Shiozawa, J Nucl Mater, 95, 1-2, (1980) 1
Ref (FeCrAl-ODS): K Sakamoto et al., Proc TopFuel2022, Raleigh, NC, 9-13 Oct, 2022

3 高温水蒸気中 酸化反応の抑制

高温水蒸気中で自己再生型のアルミナ被膜を形成する特性により、酸化反応熱と酸化に伴う水素発生を大幅に低減

酸化速度定数の比較

Ref: K Sakamoto et al., Proc Top Fuel 2018, 30 Sep – 04 Oct 2018, Prague, Czech Republic

製管技術

4m越えのFeCrAl-ODS被覆管の製造技術を開発

2019年度作製



2020年度作製
5.3m



接合技術

端栓の密封・接合技術開発を継続実施中



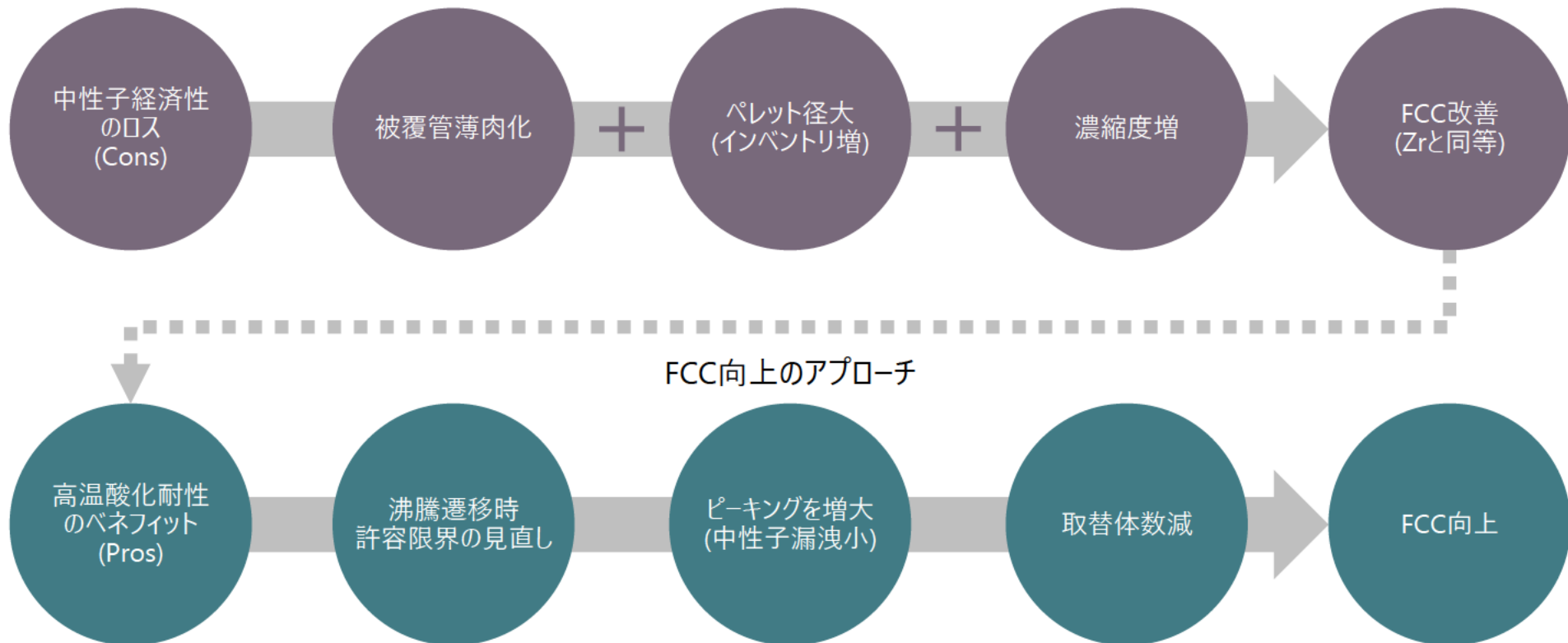
燃料設計				製造品質管理			
実用開発段階	TRL9	商用炉で使用されている状態		実用開発段階	TRL9	商用製品として生産されている状態	
	TRL8	製品の設計が認可された状態			TRL8	採算性をもって量産が可能な状態	
	TRL7	商用炉での安全性が認められた状態			TRL7	工場規模での生産が可能な状態	
工学実証段階	TRL6	商用炉において燃料集合体として使用可能と判断できる状態		工学実証段階	TRL6	燃料集合体の製造が可能であり、かつ、製品検査技術が確立された状態	
	TRL5	商用炉において燃料棒として使用可能と判断できる状態			TRL5	商用炉で使用可能な燃料棒の製造が可能な状態(フルスケール燃料棒)	
	TRL4	商用炉のためのプロトタイプ燃料棒の設計に必要な材料特性が把握されている状態	X		TRL4	燃料棒としての性能試験(炉外試験及び照射試験)で使用可能なプロトタイプ燃料棒の製造が可能な状態	X
原理実証段階	TRL3	原子炉環境での材料特性が把握されており、燃料棒の設計成立性が評価されている状態		原理実証段階	TRL3	原子炉環境での材料特性試験(炉外試験及び照射試験)で使用可能な管状試験片の製造が可能な状態	
	TRL2	概ねの材料特性が把握されており、それに基づいた概略評価により実用化された場合の影響(利得)評価がなされている状態			TRL2	材料照射特性を把握するために必要な試験片が製造できている状態	
	TRL1	原理的に実現可能性のある候補技術が立案され、主な開発課題が抽出されている状態			TRL1	原理的に製造可能な状態	

燃料設計及び製造品質管理ともに工学実証段階 TRL4 を実施中

今後、照射試験を経て2030年代前半の実用開発段階(TRL 8-9)への移行を目指す

燃料サイクルコスト(FCC)改善のアプローチ

(改良ステンレス鋼燃料被覆管のBWR装荷に向けた研究開発(2)燃料断面積核特性・炉心特性評価, 原子力学会2016年秋の大会, 1B08, GNF-J他.)



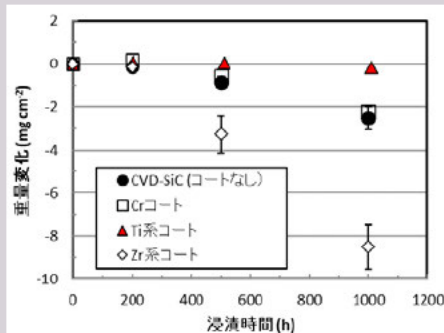
機能毎に重要度高
(影響レベル高&知識レベル低)の
評価項目を整理

知識レベル拡充のための方法を
検討

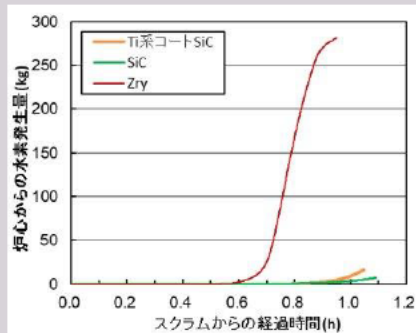
対象	評価項目	影響レベル(性能向上に関するものは赤字) H:影響が明確 M:影響が有意となる可能性あり L:影響なし、または定性的に影響が軽微	知識レベル H:評価モデル設定が可能 M:影響評価は可能だが、データ拡充が必要 L:評価に必要なデータが限定的
燃料棒 閉込め機能	燃料棒内圧	H: 限界内圧への影響は大きいと予想 (裕度が増大する可能性あり)	L: 炉内クリープ特性データはなく、類似材のデータを参照している
通常運転時	被覆管外面腐食 (酸化膜厚、クラッドなど)	H: 耐食性への影響は大きいと予想 (裕度が増大する可能性あり) M: 異種金属間のシャドウ腐食等による酸化減肉および/またはクラッド付着の程度が大きいと影響が無視できない可能性あり M: FeおよびCrの溶出が有意である場合、プラントの水質管理 (作業従事者の被ばく低減) に影響しうる	M: 実炉環境でのデータはあるものの、限られた条件のみ 類似材のデータも参照している
	トリチウム透過 【追加項目】	L-M: 透過量の程度によってはプラントの水質管理 (トリチウムのインベントリ増加) に影響しうる	M: 炉外試験データ取得済み
	被覆管コラプス	L-M: 被覆管薄肉化により外圧支配のクリープ変形が進展し、影響が有意となる可能性がある	M: 炉外試験データ取得済み
	被覆管フレッティング摩耗	M: ジルカロイよりも耐摩耗性が向上することが期待される	M: 従来燃料の知見を参照している
	遅れ水素割れによる貫通性損傷 【項目名変更】	H: 従来のDHCが発生する可能性は低い (裕度が増大する可能性あり) M: 別の形態のDHCが発生する可能性もあり	M: 炉外データ取得済み 実炉での照射試験データが望まれる

1 耐食性の向上

BWR NWC環境でのSi溶出抑制のためTi系コートを施行し耐食性を向上



炉外試験による加速腐食環境での試験片の減量

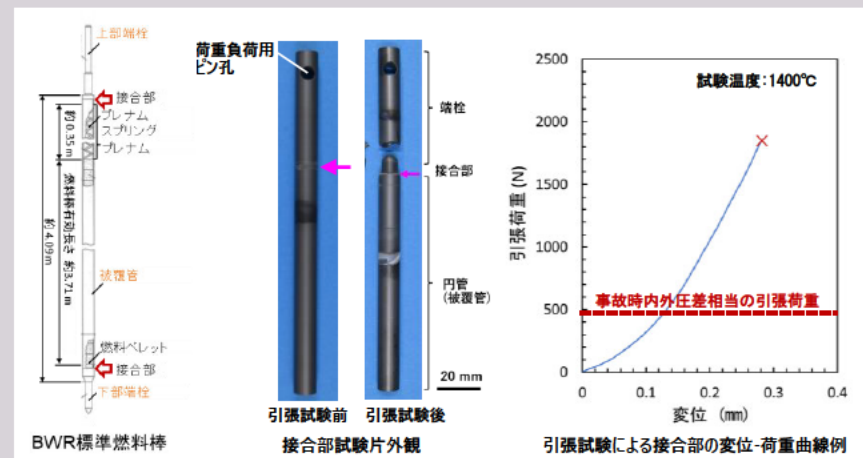


高温水蒸気試験結果を反映した半定量解析による過酷事故時水素発生量

Ref R Ishibashi et al, Proc WRFPM 2017, Jeju, Korea, paper No A-177, KNS (2017)
 R Ishibashi et al, Proc Top Fuel 2018, Prague, Czech Republic, A0072, ENS (2018)
 R Ishibashi et al, Proc Top Fuel 2022, Raleigh, USA, 200-207, ANS (2022)

2 閉じ込め機能の向上

高融点接合材料(シール材料)により事故時の端栓部での閉じ込め機能を向上



検討中の端栓接合部に対する強度評価例

Ref: 田辺ら, 日本原子力学会誌, 46, 566-572 (2004)
 石橋ら, 日本原子力学会2021年秋の大会オンライン (2021)

燃料設計				製造品質管理			
実用開発段階	TRL9	商用炉で使用されている状態		実用開発段階	TRL9	商用製品として生産されている状態	
	TRL8	製品の設計が認可された状態			TRL8	採算性をもって量産が可能な状態	
	TRL7	商用炉での安全性が認められた状態			TRL7	工場規模での生産が可能な状態	
工学実証段階	TRL6	商用炉において燃料集合体として使用可能と判断できる状態		工学実証段階	TRL6	燃料集合体の製造が可能であり、かつ、製品検査技術が確立された状態	
	TRL5	商用炉において燃料棒として使用可能と判断できる状態			TRL5	商用炉で使用可能な燃料棒の製造が可能な状態(フルスケール燃料棒)	
	TRL4	商用炉のためのプロトタイプ燃料棒の設計に必要な材料特性が把握されている状態			TRL4	燃料棒としての性能試験(炉外試験及び照射試験)で使用可能なプロトタイプ燃料棒の製造が可能な状態	X
原理実証段階	TRL3	原子炉環境での材料特性が把握されており、燃料棒の設計成立性が評価されている状態	X	原理実証段階	TRL3	原子炉環境での材料特性試験(炉外試験及び照射試験)で使用可能な管状試験片の製造が可能な状態	X
	TRL2	概ねの材料特性が把握されており、それに基づいた概略評価により実用化された場合の影響(利得)評価がなされている状態			TRL2	材料照射特性を把握するために必要な試験片が製造できている状態	
	TRL1	原理的に実現可能性のある候補技術が立案され、主な開発課題が抽出されている状態			TRL1	原理的に製造可能な状態	

燃料設計は原理実証段階TRL3、製造品質管理は原理実証段階 TRL3及び工学実証段階 TRL4 を実施中

今後、TRL3での照射試験を経て段階的な開発を継続し、2030年代後半から2040年代の実用開発段階(TRL 8-9)への移行を目指す



FY2022/1Q

FY2023/1Q

FY2024/1Q

FY2025/1Q

FY2026/1Q

FeCrAl-ODS

- 米国ATRで実施
- PCI/SCC等、燃料ペレットと被覆管の共存性を確認
- 2024年度照射開始を予定

端栓溶接技術開発, 設備設計・製作, 試験計画策定

照射試験

照射後試験

SiC

- 米国MITRで実施
- Si溶出挙動/Si溶出に対する防止対策の有効性を確認
- 端栓接合部の健全性を確認
- 2023年度照射開始を予定

設備設計・製作, 試験計画策定

照射試験/照射後試験

まとめ

日立コンソは中長期的なビジョンのもと、軽水炉及び高速炉併用時代を想定し、安全性向上に資するとともに経済的合理性を有す事故耐性燃料としてFeCrAl-ODS被覆管及びSiC被覆管の開発を進める。

事故耐性燃料の機能毎に重要度の評価を整理し、知識レベル拡充のための方法を検討し、将来的な規制対応に関わる課題を開発段階で網羅的に検討していく。

燃料設計・製造品質管理に係る技術を段階的に高度化し、FeCrAl-ODS被覆管は2030年代、SiC被覆管は2040年代、の実用化を目指す。



END

FeCrAl-ODS被覆管及びSiC被覆管の開発

2023/12/14

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

HITACHI

