

FeCrAl-ODS被覆管を用いた BWR事故耐性燃料の開発

日本核燃料株式会社 坂本 寛

*本発表資料はNuMat2020において発表した資料を翻訳したものです

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.







- FeCrAI-ODSの概念
- 開発状況
- 通常運転時のふるまい
- 事故時のふるまい
- 今後の展望





11:01 Hydrogen explosion in the Unit 3 reactor building

The development of the accident at Unit 3

The nuclear reactor underwent an emergency trip after the earthquake. Offsite power had been lost, but the emergency diesel generator started automatically. The RCIC was used and cooling of the reactor core proceeded. The emergency diesel generator tripped due to the sumani. However, the batteries (DC power) relieved damage and so it was possible to control the RCIC and HPCI and continue cooling. A shift to low-pressure coolant injection was used attempted in parallel with tripping the HPCI system, but depressurization in the pressure vessel did not go well and moving ahead with the work became difficult. During this time, the water level in the pressure vessel dropped, the reactor core was damaged, conditions developed to the point of hydrogen being generated, and at 1101 a.m. on March 14 a hydrogen explosion occurred in the reactor building.



NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.





● 軽水炉の事故耐性燃料(ATF^{*1})への要求性能
 > #1: 高温酸化耐性

*1: Accident tolerant fuel



福島第一原子力発電所1号機の過酷事故解析の例(SAMPSONコード)

Reference: M. Naito, et al., Proc. Int. Mtg. on SA Assessment and Management, Paper 6005, San Diego, USA, November 11-15, 2012

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.





- 軽水炉のATFへの要求性能
 ▶ #2:現行軽水炉への適合性
 - ATFは現行の燃料サイクルシステムに適合する必要がある
 - □ 製造
 - □通常運転時, AOO^{*1}, DBA^{*2}
 - □ 貯蔵
 - □ 再処理
 - □廃棄
 - *1: Anticipated Operational Occurrence
 - *2: Design Based Accident







- FeCrAI-ODSの概念
- 開発状況
- 通常運転時のふるまい
- 事故時のふるまい
- 今後の展望

FeCrAI-ODSの概念(1)





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

FeCrAI-ODSの概念(2)



● 反応度ペナルティの解消(1)



NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.

FeCrAI-ODSの概念(3)



● 反応度ペナルティの解消(2)



酸化物粒子のTEM観察結果

Reference: J. Gao et al., J. Nucl. Mater, 524 (2019) 1-8

酸化物粒子



Reference:

*1: K. Sakamoto, et al. , Proc. Top Fuel 2018, 30 Sep. – 04 Oct. 2018, Prague, Czech Republic *2: Onchi et al., J. Nucl. Mater., 88 (1980) 226-235

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.





- 背景
- FeCrAI-ODSの概念
- 開発状況
- 通常運転時のふるまい
- 事故時のふるまい
- 今後の展望





● 日本における軽水炉ATF用FeCrAI-ODSの開発状況

TRL ^{*1}	開発段階	事業
9		
8	実用開発段階	
7		
6		
5	技術実証段階	(METI補助事業)
4		 – – – – – – – – – – – – – – – – – – –
3		(METI委託事業)
2	原理実証段階	合金開発、基礎的材料特性評価
1		(MEXT原子カシステム事業)

*1: Technical Readiness Level





- FeCrAI-ODS燃料被覆管の導入による影響評価
 - ≻ 炉心解析
 - ▶ 燃料ふるまい解析
 - ▶ 過酷事故(Severe accident: SA)解析
- 材料特性の取得および蓄積
 - ▶ 製造性
 - ▶ 機械的特性
 - ▶ 通常運転時におけるふるまい
 - > 事故時におけるふるまい
 - ▶ 再処理におけるふるまい
 - ▶ 溶接性





- 背景
- FeCrAl-ODSの概念
- 開発状況
- 通常運転時のふるまい
- 事故時のふるまい
- 今後の展望

通常運転時のふるまい(1): <u>炉心解析(1)</u>





部材	現行	ATF
燃料被覆管	Zircaloy (肉厚: ~0.6 mm)	FeCrAl-ODS (肉厚: 0.30 mm)
ウォーターロッド	Zircaloy	SiC/SiC
チャンネルボックス	Zircaloy	SiC/SiC

* Reference: https://nuclear.gepower.com/fuel-a-plant/products/gnf2-advantage



* Reference: K. Kusagaya et al., Proceeding of AESJ2019 fall meeting, 11-13 Sep. 2019, Toyama, Japan

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.

通常運転時のふるまい(2):



通常運転時のふるまい(3): 製造性(1)



● 化学成分 (in mass %)

Material	Cr	Α	T	Zr	Y_2O_3
FeCrAI-ODS 被覆管	12	6	0.5	0.4	0.5



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

- ・ ジルカロイと比較して、メカニカルアロイと高温押出が追加で必要
- 現行の冷間圧延、焼鈍プロセスが適用可能

通常運転時のふるまい(4): <u>製造性(2)</u>



● 10 x 10 型 (∳10.3 mm)

肉厚 (mm)	長さ (m)	員数
0.30	4.8 - 5.2	2
0.40	4.2	1



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

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.

照射硬化はジルカロイと比較して緩やか

日本原子力学会「水化学部会」第39回定例研究会 2021/3/12@Web会議



0.5 16 1200 1200 5 9 1000 1000 1.2 (MPa) 8 800 800 8 600 600 stress 400 \circ 0 dpa 400 \circ 0 dpa ○ 2.6 dpa ○2.6 dpa 200 Yield 200 Reference: K. Sakamoto, et al., Proc. Top Fuel 2018, ○ 3.9 dpa ○ 3.9 dpa 30 Sep. - 04 Oct. 2018, Prague, Czech Republic 0 0 200 300 400 500 600 700 200 300 400 500 600 700 **Temperature (K) Temperature (K)** 照射硬化あり(0 →2.6 → 3.9 dpa)

1400

- 単軸引張試験(再結晶熱処理板材) ➤ SS-J2 型試験片
 - > ORNL HFIRにおいて 573 Kで3.9 dpaまでの中性子照射

通常運転時のふるまい(5): 機械的特性

1400

Strength (MPa)



- (純水、563 K,~8MPa、6 ppmDO (563 K)) 10
 Image: Contraction of the contract **Weight gain (mg dm⁻²)** SEM image EDS (Fe-K) EDS (O-K) EDS (Cr-K) 0 -10 600 nm EDS (Ni-K) EDS (AI-K) ----- FeCrAI-ODS (Tube) -••- FeCrAl-ODS (Sheet) 溶出による減肉~0.3 μm - Wrought FeCrAl (Bar) - 🗗 - SS316L 安定した腐食耐性 -20 炉水への溶出は限定的 100 200 300 400 0 Time (d) Reference: K. Sakamoto, et al., Proc. Top Fuel 2018, 30 Sep. - 04 Oct. 2018, Prague, Czech Republic
- <u>腐食特性(1)</u> ● 循環型オートクレーブにおいて長期間腐食

通常運転時のふるまい(6):

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.



通常運転時のふるまい(7): <u>腐食特性(2)</u>



● 循環型オートクレーブを用いてGlobal Research Centerにて長期間腐食 BWR NWC, BWR HWC, PWR NWC 条件*



PWR: 330 °C water with 3.75 ppm hydrogen BWR HWC: 288 °C water with 0.3 pm hydrogen BWR NWC: 288 °C water with 1 ppm oxygen

- 溶存酸素により溶出は抑制される
- 腐食は安定していて、溶出も限定的(6ヵ月後で も肉厚の1%未満)

* Reference: R. B. Rebak, K. Sakamoto, Proceeding of TopFuel2019, TopFuel2019, 22-26 Sep. 2019, Seattle, WA

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.



通常運転時のふるまい(8):

トリチウム透過

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.







- 背景
- FeCrAI-ODSの概念
- 開発状況
- 通常運転時のふるまい
- 事故時のふるまい
- 今後の展望

事故時のふるまい(1): <u>ATFのSA進展抑制効果(1</u>)



● アクシデントマネジメント(AM)を考慮したATFによるSA進展抑制効果

Item	Analysis conditions
Analysis code	MAAP5.05β *
Plant type	ABWR
Fuel type	9×9 (StepIII)
Cladding and channel box materials	Zry, ODS**, and SiC
Accident sequence groups	TQUV (high/low pressure water injections failure), and TB (Station blackout)
Analysis range	Until fuel cladding failure *

*: MAAP5.05 beta version has the limitation that it can handle ATF behaviour only inside the core.

**: Thin-walled fuel was applied for ODS in consideration of neutron economy.

Reference: T. Ikegawa, et al., Proc. Top Fuel 2018, 30 Sep. – 04 Oct. 2018, Prague, Czech Republic

事故時のふるまい(2): <u>ATFのSA進展抑制効果(2)</u>

NFD Power the Future

- 長期TB(全電源喪失) シナリオ
- 燃料破損を防止するために、低圧給水を行う場合の"減圧までの時間"と"給水速度"を指標として使用



• ATF は"Grace time"(措置に必要な時間)の拡大とAM施設性能の低減が可能

Reference: T. Ikegawa, et al. , Proc. Top Fuel 2018, 30 Sep. - 04 Oct. 2018, Prague, Czech Republic

事故時のふるまい(3): <u>LOCA時の脆化(1)</u>





- 1200 ℃水蒸気酸化
- 電気炉の予加熱 (位置 1)
- 電気炉加熱部ヘリング試料を降下 (位置 2)
- 水中へ落下(位置3)
- 室温においてリング圧縮試験



Ring specimen

Reference: K. Sakamoto et al., Proc. ICAPP2017, 24-28 April, 2017, Fukui and Kyoto, Japan

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.

- リング試験片を1473 K水蒸気に 4 24時間曝露後、343 Kの水で急冷
- リング圧縮試験により急冷後の機械的特性を評価





事故時のふるまい(5): LOCA時の脆化(3)

- 日米CNWGによる共同研究で実施
- ORNLのSevere Accident Test Station に設置されている Integral LOCA試験装置を利用
- 標準的な温度履歴を適用





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





事故時のふるまい(6): LOCA時の脆化(4)

- 初期内圧を変えて試験を実施
- 全ての試験片が破裂したものの脆化や極度の 変形はなかった

9x9燃料被覆管形状として、非ODSのFeCrAl やZircaloyと比較

- FeCrAl(-ODS): 11.3 mmOD, 0.35mmt
- Zircaloy: 11.3 mmOD, 0.7mmt
- 200-300 K の破裂温度の上昇(ODSの効果)
- 脆化はみられず



Reference

日本原子力学会「水化学部会」第39回定例研究会

2021/3/12@Web会議

- Zircaloy: M. Ishikawa and S. Shiozawa, J. Nucl. Mater., 95, 1-2, 1 (1980)
- Wrought FeCrAl(C26M): B. A. Pint, ORNL/LTR-2018/530, August 2018



日本原子力学会「水化学部会」第39回定例研究会 2021/3/12@Web会議 29



事故時のふるまい(6):





事故時のふるまい(6): <u>事故時の被覆管減耗予測</u>





減耗速度は数桁小さく抑えることが可能

Reference: K. Sakamoto et al., Proc. ICAPP2017, 24-28 April, 2017, Fukui and Kyoto, Japan

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.

- 背景
- FeCrAI-ODSの概念
- 開発状況
- 通常運転時のふるまい
- 事故時のふるまい
- 今後の展望

今後の展望(1):

- 現在のR&D 開発レベルはTRL 3-4相当
- 短期目標:重要実施項目は"模擬燃料棒照射試験"を試験炉で実施して、燃料ふるまい解析コードの検証と燃料健全性の確認を実施
- 中期目標: 重要実施項目は"lead test rod (LTR)" と"lead use assembly (LUA)" を国内商用炉で実施すること

GNF accident-tolerant fuel loaded into US reactor

15 January 2020

Share

Global Nuclear Fuel (GNF) accident-tolerant fuel assemblies have been loaded into a US reactor for the first time. Lead test assemblies using the company's ARMOR-coated zirconium cladding and IronClad accident-tolerant fuel solutions have been installed at Exelon's Clinton boiling water reactor power plant in Illinois.

The Clinton plant (Image: US NRC/Exelon)

The assemblies contain three varieties of GNF's IronClad solution, and are the first fuelled ferritic steel-based cladding assemblies to be installed in a commercial reactor, the company said. Unfuelled IronClad lead test rods and fuelled ARMOR-coated zirconium cladding lead test rods were installed at Georgia Power's Hatch in 2018.

Accident-tolerant fuel - or ATF - is a term used to describe new technologies that enhance the safety and performance of nuclear fuel. ATF may incorporate the use of new materials and designs for cladding and fuel pellets. The GNF assemblies were developed as part of the US Department of Energy's (DOE) accident-tolerant fuel programme and manufactured at GNF's facility in Wilmington, North Carolina.

GE Hitachi Nuclear Energy President and CEO Jay Wileman said the company was, with the support of the industry and DOE, advancing the fuel technology at an "aggressive pace".

IronClad solutions are designed to provide substantial oxidation resistance and superior material behaviour over a range of conditions compared to previous offerings. The low oxidation rates of the material at higher temperatures further improves safety limit margins, GNF said. GE Research supported the development of one of the IronClad solution varieties installed at Clinton by providing engineering support and fabricating components that went into making the fuel rods.

Reference: https://www.world-nuclear-news.org/Articles/GNF-accident-tolerant-fuel-loaded-into-US-reactor

● 現行軽水炉へ導入するための鍵

- ▶ 概念の早期証明
 - 現行炉の寿命を迎える前に導入が必要
- ▶ 国際協力
 - ハルデン炉(Halden boiling water reactor (HBWR))の廃炉により、特に試験炉照射試験の国 際協力が必要
 - 国内だけでなく海外との協力を加速し、より効率的な開発が必要
- ➤ "安全(Safety)"と"効率(Efficiency)"のバランス
 - ATFは安全向上だけでなく効率向上への寄与も必要

今後の展望(3):

● 他の原子炉燃料への適用

- ➢ FeCrAI-ODSは水冷却の次世代炉の安全性向上が可能
- ▶ 硬スペクトルの軽水炉は反応度ペナルティの点からより好ましい

Resource-renewable BWR (RBWR)

Reference: T. Mitsuyasu. Sakamoto et al., Proc. ICAPP2017, 24-28 April, 2017, Fukui and Kyoto, Japan

Super Critical-Water-cooled Reactor (SCWR)

Reference: T. Schulenberg et al., IAEA-CN-164-5S06, 2009

NIPPON NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CO., LTD.

- 本研究発表の一部は、経済産業省資源エネルギー庁の原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業(安全性向上に資する新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた技術基盤整備)の成果である
- 本研究開発はJAEA、GNF-J、日立GEニュークリア・エナジー、北海道大学、京都大学、早稲田大学と共同で実施したものです
- Integral LOCA 試験は日米CNWGの枠組みを利用してORNL SATSで実施しました。特に Dr. K. Terrani, K. Linton, M. Howellに感謝いたします