

核燃料部会セッション

事故耐性燃料の開発状況～課題と展望

Development Status of Accident Tolerant Fuel : Challenges and Prospects

BWR 用燃料開発その 2

Development of Accident Tolerant Fuel for BWR (2)

*大脇 理夫¹, 井上 史章¹, 石橋 良², 近藤 貴夫²¹東芝エネルギーシステムズ, ²日立 GE

1. はじめに

事故耐性を高めた新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた研究開発として、SiC 複合材料を適用した BWR 用被覆管、チャンネルボックスの開発を進めている。

2. 開発状況

開発にあたり、まず国内外の最新動向調査および開発状況の整理を行い、これに基づき技術成熟度 (TRL)、課題抽出マップの作成を行った上で各種技術の開発・評価を行っている。以下にこれまでの主な成果を示す。

2-1. 燃料ふるまい解析

燃料ふるまい解析では、被覆管径方向スエリングや多層化モデルに対応した”FEMAXI-7-SiC 版”を用いて通常時の燃料棒挙動解析を実施した。現行の Zry 被覆管を用いた 9×9 燃料の仕様を基準として評価を行った結果、SiC 被覆管を用いた場合、被覆管径方向のスエリングにより、ペレット被覆管ギャップ幅が拡大し、ペレット温度および被覆管応力が増加傾向となる。成立性を向上させるためにはペレット被覆管ギャップ幅の低減やプレナム体積の増加が有効である。また、設計条件や物性値に幅を持たせた条件で多数の解析を行うことにより燃料ふるまいへの影響を評価し、各入力・出力パラメータ同士の相関関係や影響度の大きさ等を確認した¹⁾²⁾³⁾。

2-2. 材料特性評価

設計に資する機械的特性として、室温での SiC 複合材料管の軸および周方向引張強度データを取得した。

腐食特性評価では、SiC 複合材に CVD コートした材料について BWR 環境を模擬した腐食試験 (288 °C、圧力 7 MPa 以上、実機の炉心燃料領域の過酸化水素を考慮した溶存酸素濃度 8 ppm) を実施した。その結果、腐食速度は最大で減肉速度換算にして数 μm /年であり、BWR 環境において減肉を考慮した構造強度の観点で適用可能であることが示唆されたが、さらなる耐食性向上が望まれる²⁾⁴⁾。NWC-BWR 環境を模擬した高温水浸漬試験 (288 °C) による SiC の高温水腐食に及ぼす溶存酸素濃度 (DO) の影響を評価した結果、DO の上昇とともに Si 溶出を伴う腐食が増加すること、これを防止する手法の一つとして Ti 系の耐食被覆が有効であることが示唆された。この耐食被覆を短管および接合部に施工できることも確認した³⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

2-3. 熱水力特性評価

熱水力特性試験として 2×2 ロッドバンドルを対象として、水-空気系非加熱条件の被覆管圧損試験を実施し、摩擦係数の一般的な経験式による液相圧損と二相摩擦乗数を用いることで二相圧損を予測できることを確認した。また、SiC 材の濡れ性改善による限界液膜厚さの変化量を仮定し、最も液膜体積率が低いサブチャンネルを対象として限界出力の変化を評価した結果、濡れ性改善による限界出力の上昇は数%程度であることが推定された³⁾。

2-4. 安全性評価

過渡解析として被覆管表面での沸騰遷移が生じるような仮想的な条件で TRACT™解析を行い、同事象時における燃料棒解析を実施した。特にギャップ熱伝達の差に伴う初期における応力等の条件は異なるが、過渡時における機械的挙動は Zry 被覆管と SiC 被覆管に大きな違いがないことを確認した⁸⁾。

LOCA 解析として PLR 配管の大破断および小破断解析を TRACT™で実施し、”FEMAXI”で燃料棒挙動解析

を実施した。LOCA 解析においても過渡同様に、ギャップ熱伝達の差に伴う初期における応力等の条件は異なるが、Zry 被覆管と SiC 被覆管に大きな違いがないことを確認した⁸⁾。

RIA 時における Zry 被覆管燃料と SiC 被覆管燃料の機械的挙動特性評価を実施した。その結果、RIA 時における急激なペレット熱膨張による応力増加を Zry 被覆管燃料では吸収できないが、あらかじめギャップ幅に余裕を持たせた SiC 被覆管ではペレット - 被覆管の接触が回避され、機械的強度が確保されることを確認した。

”MAAP”等の過酷事故 (SA) コードを用いた感度解析を実施した結果、SiC を適用することにより、従来の Zry と比べて水素発生量が大きく低減し、減圧、注水といったアクシデントマネジメントにおける余裕が拡大する可能性が示唆された⁹⁾。

3. 今後の課題と展望

2.項に記載した各種評価を受けた主な課題として以下が挙げられる。

- ・ BWR 水質環境での腐食特性データの取得および耐食性を改善する製造プロセスの構築
- ・ 照射環境での耐食性、機械特性データの取得および設計へのフィードバック
- ・ SiC 適用の説得性向上および安全性評価の高精度化のため、SA 時にさらされる高温環境での挙動に関するデータの拡充
- ・ 将来の規格・標準化のためのデータ整備に資する SiC 複合材料の試験方法の確立

SiC 被覆管、チャンネルボックスの軽水炉への適用に向けては照射試験データの取得が必須であり、早期の照射試験の実施が望まれる。

※ 本発表に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

4. 参考文献

- 1) H. Matsumiya, K. Yoshioka, S. Sakurai, K. Kakiuchi, S. Yamashita, F. Nagase, Fuel Behavior Analysis of Accident Tolerant Fuel with SiC/SiC-Composite Cladding, Proc. ICAPP2017, Fukui and Kyoto, Japan, April 24-28, 17162 (2017).
- 2) K. Kakiuchi, M. Akimoto, S. Suyama, M. Ukai, H. Heki, A. Kawaguchi, T. Takagi, Y. Sato, Y. Taniguchi, T. Goto, Y. Kagawa, ATF material development of SiC with Enhanced Safety LWR core, Proc. 42nd International Conference & Expo on Advanced Ceramics (ICACC 2018), Daytona Beach, Florida, USA, January 21-26, ICACC-S13-019-2018 (2018).
- 3) 大脇 理夫, 井上 史章, 佐藤 寿樹, 石橋 良, 近藤 貴夫, 山下 真一郎, 川西 智弘, 深堀 智生, 「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研究開発(3) (3) BWR 用 SiC」, 日本原子力学会 2019 年秋の年会, 富山大学 2E03 (2019).
- 4) S. Suyama, M. Ukai, M. Akimoto, T. Nishimura, S. Tajima, Safety Evaluation of Accident Tolerant Fuel with SiC/SiC Cladding, Ceramics 2019, 2(4), 602-611 (2019).
- 5) R. Ishibashi, S. Tanabe, T. Kondo, S. Yamashita, and F. Nagase, Improving The Corrosion Resistance of Silicon Carbide for Fuel in BWR Environments by Using A Metal Coating, Proc. WRFPM 2017, Jeju Island, Korean Nuclear Society, A-177 (2017).
- 6) R. Ishibashi, S. Tanabe, T. Kondo, S. Yamashita, and T. Fukahori, Improvement of Corrosion Resistant Coating for Silicon-carbide Fuel Cladding in Oxygenated High Temperature Water, Proc. Top Fuel 2018, Prague, Czech Republic, September 30- October 4, A-0072 (2018).
- 7) R. Ishibashi, M. Kida, M. Shibata, T. Kondo, S. Yamashita, and T. Fukahori, Joining Technology with Corrosion-Resistant Coating for Silicon-Carbide Fuel Cladding, Proc. Top Fuel 2019, Seattle, USA, September 22-26, 235-29441 (2019).
- 8) H. Sato, Y. Takeuchi, K. Kakiuchi, S. Yamashita, F. Nagase, Safety Evaluation of Accident Tolerant Fuel with SiC/SiC

Cladding, Proc. WRFPM 2017, Jeju Island, Korean Nuclear Society, A-238 (2017).

- 9) T. Ikegawa, K. Sakamoto, T. Kondo, and S. Yamashita, Performance Evaluation of Accident Tolerant Fuel Claddings during Severe Accidents of BWRs, Proc. Top Fuel 2018, Prague, Czech Republic, September 30- October 4, A-0131 (2018).

備考：本研究発表は、経済産業省資源エネルギー庁の平成 27～30 年度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。また、同事業の推進にあたりご協力いただいた JAEA 関係者に感謝する。

* Masao Owaki¹, Fumiaki Inoue¹, Ryo Ishibashi², Takao Kondo²

¹Toshiba Energy Systems & Solutions Corp., ²Hitachi GE