

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

PWR 用燃料開発

Development of Accident Tolerant Fuel for PWR

*渡部 清一¹, 村上 望²¹三菱原子燃料, ²三菱重工業

1. はじめに

加圧水型軽水炉（PWR）では、冷却材喪失事故（LOCA）時に非常用冷却設備が何らかの要因で設計通りに作動しない場合でも、炉心溶融や水素爆発等のシビアアクシデント（SA）に進展しないように様々な安全対策が施されている。一方で、更なる安全性向上策として、原子燃料自体の温度上昇や水素発生を抑制するといった、固有の安全機能を付加した事故耐性燃料の開発が期待される。

現在、PWR 燃料被覆管材料として適用しているジルコニウム（Zr）合金は、事故時の高温条件で水蒸気と著しく反応して発熱すると共に水素を発生し、これらが炉心溶融や水素爆発の一要因となりうる。このため、事故耐性燃料にまず求められるのは、高温水蒸気との酸化反応が小さい被覆管である。

炭化ケイ素（SiC）は、融点（昇華点）が高く、高温条件で水蒸気との酸化反応が殆どなくかつ機械的強度が低下しない特性を有しており、事故耐性燃料被覆管の候補材の一つとされている。一方、SiC はセラミクスであり、Zr 合金とは全く特性が異なるため、燃料被覆管材料としての適用性を確認する必要がある。そこで、我々は SiC を PWR 燃料被覆管材料として適用するうえで重要となる、燃料・炉心設計への影響及び事故時安全性への影響を確認するべく、SiC 被覆管の試作及び各種炉外試験、並びに燃料ふるまい等の解析評価を実施した。ここでは、それらの成果を発表する。

2. 開発状況

2-1. SiC 被覆管の仕様及び試作結果^[1]

(1) 仕様

本研究で試作した SiC 被覆管は、管状に編んだ SiC ファイバーに SiC を化学蒸着させた SiC-SiC 複合材（以下、単に SiC と呼ぶ）である。SiC の機械特性は、SiC ファイバーの構造（編み方）に依存するため、本研究では編み方を変えた複数の SiC 被覆管を試作し、機械特性との相関を調べた。外径及び肉厚は、三菱製 17×17 型 PWR 燃料被覆管と同じ（外径：約 9.5mm、肉厚：約 0.6 mm）に設定した。なお、試作は米国 General Atomics 社に委託している。

(2) 試作結果

試作した SiC 被覆管及び模擬燃料棒の写真を図 1 に示す。外径及び肉厚は、概ね仕様通りの管を製造することができた。また、模擬燃料棒とは、照射試験用に試作した燃料ペレットを装填していない燃料棒であり、ヘリウムガスを加圧充填し、両端を SiC 製の端栓で密封したものである。この模擬燃料棒は、試作後にリーク試験を実施し、気密性を確認している。

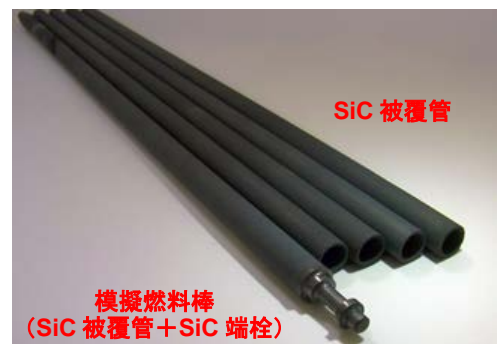


図 1 SiC 被覆管及び模擬燃料棒

2-2. 燃料・炉心設計への影響評価

(1) 炉外試験による材料特性データの取得^[2]

燃料設計への影響を評価するうえで重要な材料特性を調べるため、炉外試験を実施した。試験結果の例として、軸方向引張試験による応力-歪線図を図2に示す。図中のType D, E, FはSiCファイバーの編み方が異なるサンプルであり、軸方向強度の最適化を図ったType Fが最も高強度であることを示している。この他に、熱膨張率測定、熱伝導率測定、一次冷却水質での腐食試験、周方向強度試験（EDC試験）を実施した。

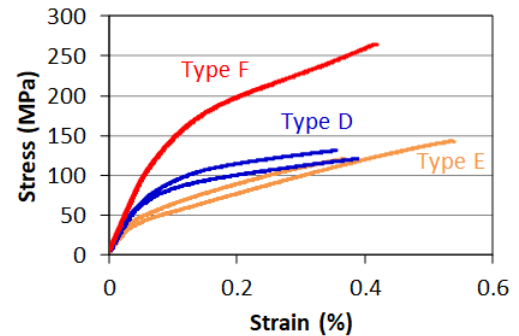


図2 軸方向引張試験による応力-歪線図
(Type D, E, FはSiCファイバーの構造が異なる)

(2) 燃料機械設計への影響^[3]

上述した炉外試験の結果、並びに文献で報告されている照射特性データ等に基づいて、SiC被覆管の材料特性のモデル化を行い、解析コード(JAEAが開発したFEMAXI-ATF)により、燃料ふるまい解析を行った。

解析の結果、SiC被覆管は照射材の熱伝導率が低いため、燃料ペレットの熱膨張が大きくなり、被覆管が破損するという結果になった。

これを解決する方策として、燃料集合体（燃料棒）の改良設計を検討した。表1には、改良設計の一つとして検討した、19×19型燃料集合体の設計仕様を示す。この改良設計では、燃料集合体1体あたりのウラン装荷量が現行燃料と同じになるようにしている。

表1に示した改良設計燃料棒の、運転中の燃料被覆管に生じる応力を解析した結果を図3に示す。この改良設計では、燃料棒を細径化することで、燃料棒1本あたりの発熱量を低減したこと、並びにSiC被覆管を薄肉化することで熱抵抗を低減したことにより、燃料ペレットの温度（熱膨張）が抑制されている。その結果、燃料ペレットとSiC被覆管が接触しないことにより、SiC被覆管には高い応力が発生しないという結果になっている。

表1 本研究で検討した改良設計の一例

	現行燃料 (17×17型)	改良設計 (19×19型)
燃料棒格子配列	17行17列	19行19列
燃料集合体断面寸法	214 mm×214 mm	←
制御棒案内シンプル本数	24本	32本
燃料棒本数	264本	328本
被覆管外径	9.5 mm	8.52 mm
被覆管肉厚	0.57 mm	0.50 mm
燃料ペレット外径*	8.19 mm	7.35 mm
燃料棒平均線出力	17.9 kW/m	14.4 kW/m

*本ケースでは、中空ペレットを想定している。

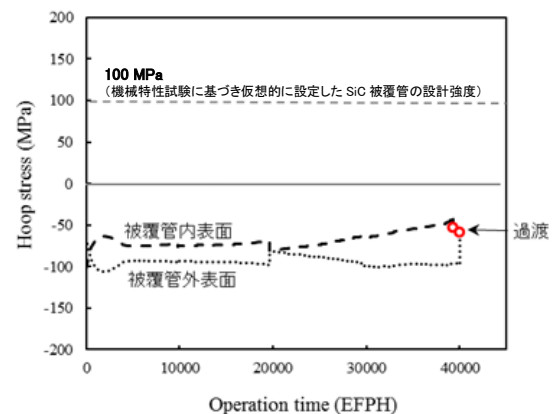


図3 改良設計燃料棒（表1に示したもの）
の被覆管応力解析結果

(3) 炉心特性への影響^{[3][4]}

上述の改良設計の場合でも、現行燃料に比べて燃料ペレットの温度が高いため、反応度停止余裕に及ぼす影響を評価する必要がある。そこで、MHIの炉心解析コードシステム（GalaxyCosmo-S）により炉心計算を実施した。

炉心計算の結果、改良設計の場合でも、反応度停止余裕が制限値を満足しない場合があることが確認された。これを解決する方策として、制御棒の増設や、中空ペレットを導入することで、制限値を満足することが炉心計算により確認された。

2-3. 事故時安全性への影響評価

(1) LOCA 時特性^[5]

LOCA 時の特性を調べるため、SiC 被覆管に LOCA を模擬した負荷（加圧、温度上昇、高温水蒸気曝露、急冷熱衝撃）を与える LOCA 試験を実施した。

LOCA 試験の結果の一例として、1,200℃×1,000 秒保持後に急冷した SiC 被覆管及び Zr 合金被覆管の外観写真を図 4 に示す。同条件は Zr 合金の酸化量約 40% ECR に相当し、現行 LOCA 基準（ECCS 性能評価指針）の上限値 15% ECR よりも遥かに厳しい条件である。同図に示すように、SiC 被覆管は LOCA 条件下でも変形（膨れ）、破裂、酸化が生じず、急冷後の熱衝撃でも破断せず、冷却可能形状を維持することが確認された。

また、図 5 は様々な保持条件（温度・時間）の後に急冷した場合の結果（破断/非破断）を示している。同図に示すように、SiC 被覆管は、LOCA 基準の上限温度（1,200℃）を超える 1,600℃まで加熱・保持した場合でも、急冷後に破断せず、冷却可能形状を維持することが確認された。

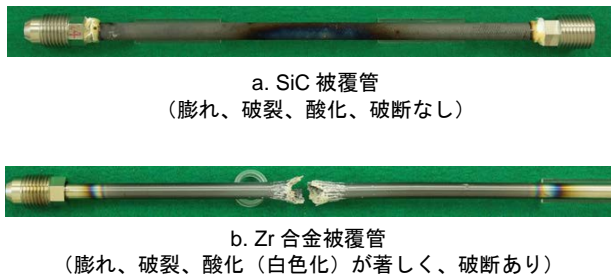


図 4 LOCA 試験後の被覆管の外観写真
(1,200℃×1,000 秒保持後に急冷)

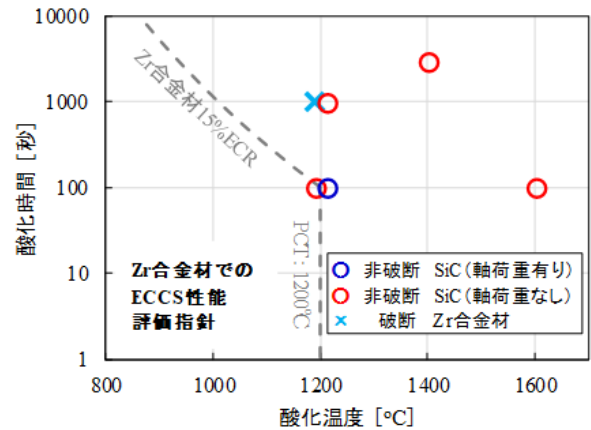


図 5 LOCA 試験結果のまとめ
(各保持条件と、急冷後の破断の有無)

(2) シビアアクシデントの抑制効果^[1]

LOCA が発生し、かつ非常用冷却設備が設計通りに機能しなかった場合の炉心温度及び水素発生量を、SiC 被覆管の場合と Zr 合金被覆管それぞれの場合について解析評価した。解析は、様々なタイプの LOCA 事象や非常用冷却設備の不具合（事故シナリオ）について実施した。

解析結果（炉心温度評価）の一例を図 6 に示す。同図は、LOCA 後に非常用冷却設備が作動しない事故のうち、比較的発生確率が高い事象の例（事故シナリオは図中に記載）である。この例では、Zr 合金被覆管は最終的に炉心溶融に至るのに対し、SiC 被覆管は炉心溶融を回避することができる。

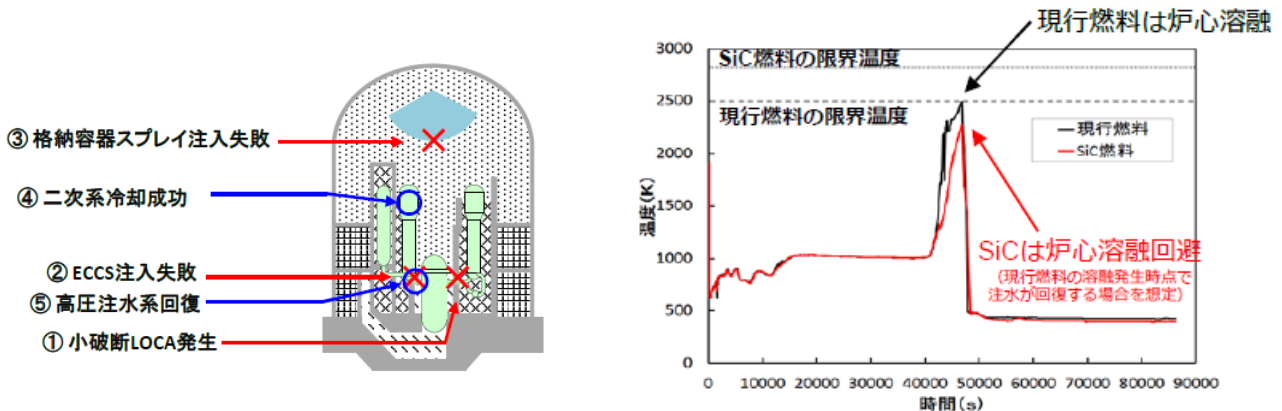


図 6 事故進展解析の一例（左：想定した事故シナリオ、右：炉心温度の推移）

3. 今後の課題と展望^[1]

本研究の成果を踏まえると、SiC 被覆管を導入した場合、LOCA 時の冷却性向上やシビアアクシデントへの移行が抑制されると期待される。一方で、SiC 被覆管は照射後の熱伝導率が低いため、被覆管の応力が厳しく、設計の改良が求められる。但し、設計改良を行うには、現時点では SiC 被覆管の材料特性及び照射特性データが大幅に不足しており、当面はデータの拡充が課題といえる。また、設計改良の方向性としては、燃料ペレット温度低減の観点から、SiC 被覆管の細径化と薄肉化が必要になると考えられるため、SiC 被覆管には更なる製造技術の高度化が求められる。

また、上記以外にも、SiC 被覆管を導入する場合に考えられる課題として、一次冷却材中へのケイ素 (Si) の溶出による影響、輸送及び貯蔵時の燃料健全性、再処理への影響などが挙げられる。これらは、現時点において解決不可能な課題 (showstopper) ではないと考えられるが、課題の把握と解決には時間を要すると考えられるため、適切に計画していく必要がある。

以上の通り、SiC 被覆管は有望な事故耐性を有する一方、実用化に向けては乗り越えるべき課題が多いことも明らかである。従って、当社は SiC 被覆管を長期的な開発課題と位置づけ、当面は基盤技術の整備に向けた研究開発を進めていく。

謝辞

本発表は、経済産業省資源エネルギー庁による原子力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基盤技術整備) の成果である。当該事業の推進にあたり、ご協力頂いた JAEA 関係者の皆様に感謝する。

参考文献

- [1] 渡部 清一、他 日本原子力学会 2019 年秋の大会 富山大学 2E04
- [2] 佐藤 大樹、他 日本原子力学会 2019 年秋の大会 富山大学 2E06
- [3] 山路 和也、他 日本原子力学会 2017 年秋の大会 北海道大学 2I12
- [4] 村上 望、他 日本原子力学会 2018 年秋の大会 岡山大学 2D05
- [5] 小宮山大輔、他 日本原子力学会 2019 年秋の大会 富山大学 2E08

*Seiichi Watanabe¹ and Nozomu Murakami²

¹Mitsubishi Nuclear Fuel Co Ltd., ²Mitsubishi Heavy Industries Ltd.,