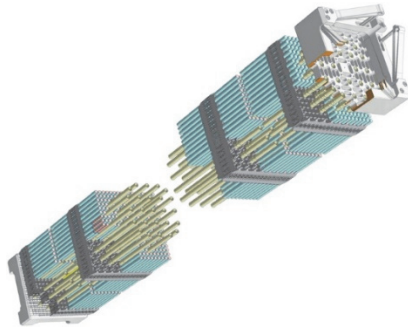


PWR 燃料の安全性向上・高度化 － 事故耐性燃料被覆管の開発状況 －

Development of Advanced Fuel for Improvement of PWR Safety and Operation
－ Development of Accident Tolerance Fuel Cladding －



大和 正明^{*1}
Masaaki Yamato

佐藤 大樹^{*2}
Daiki Sato

岡田 裕史^{*1}
Yuji Okada

村上 望^{*3}
Nozomu Murakami

渡邊 啓太^{*1}
Keita Watanabe

軽水炉プラントの安全性向上及び炉心運用高度化に向けた活動の一環として、三菱重工業株式会社では、通常運転時・事故時の性能向上を図った事故耐性燃料被覆管を開発している。2030年代の実機プラントへの本格導入を目標に、各種性能確認試験及び米国研究炉での燃料棒照射試験を実施し、燃料棒設計に必要なデータの取得を実施中である。

1. はじめに

PWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor)向け燃料集合体の概要を図1に示す。三菱製燃料集合体は上部ノズル、下部ノズル及び支持格子が案内シンプルと結合されており、支持格子により約300本の燃料棒が束ねられている。燃料棒内に燃料ペレットを封入するための燃料被覆管は、炉心の安全性や通常運転時の燃料健全性に大きく関わる部材である。

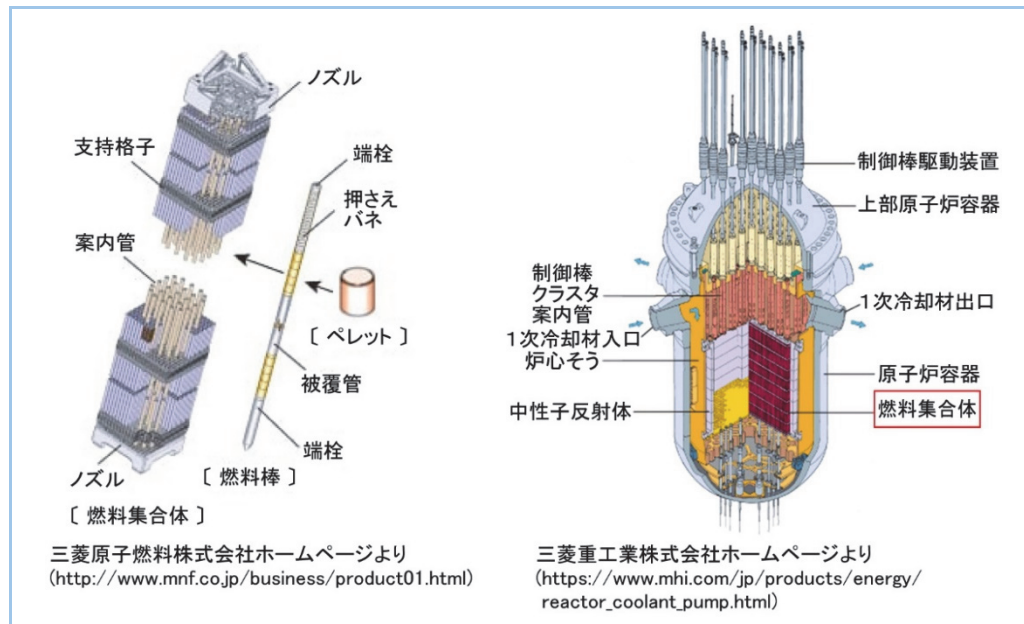


図1 PWR 向け燃料集合体の概要

福島第一原子力発電所のシビアアクシデントをきっかけに、炉心損傷や水素爆発などのシビアアクシデントへの進展を抑制し事故耐性を向上させる技術として、事故耐性燃料(ATF:Accident Tolerant Fuel)が世界的に着目され開発が進められている⁽¹⁾。三菱重工業株式会社(以下、当社)では、燃料被覆管の事故耐性向上を目指し、開発を進めている。本報では、事故耐性燃料

*1 原子力セグメント 炉心・安全技術部

*2 原子力セグメント 炉心・安全技術部 首席技師 博士(工学)

*3 原子力セグメント 炉心・安全技術部 首席プロジェクト統括

被覆管の開発概要及び開発状況について紹介する。

2. 事故耐性燃料被覆管の開発概要

事故耐性燃料被覆管は、シビアアクシデントを含む事故時における炉心・燃料の高温時の耐酸化性を向上させることにより、実機プラントの安全性向上に貢献できる部材である。当社は、燃料被覆管としての使用実績が豊富なジルコニウム(以下、Zr)基合金を母材とし、耐酸化性を有するクロム(以下、Cr)コーティングを処理した燃料被覆管(以下、Cr コーティング燃料被覆管)を開発している。また、Cr コーティング燃料被覆管は優れた耐食性も有しており、炉心運用高度化(高燃焼度化、高出力化)にも貢献できる。

2030 年代に実用化(本格導入)できることを目指して、経済産業省による原子力の安全性向上に資する技術開発事業に参画し、①基盤技術研究、②実用化研究を推進している。現在は、①基盤技術研究フェーズの終盤にあり、耐酸化性の向上を確認し、燃料被覆管の物性及び挙動に対する Cr コーティングの影響確認を進めるとともに、②実用化研究フェーズへのステップアップに向け照射影響を確認するために、日米連携枠組みを活用して米国の研究炉 ATR(Advanced Test Reactor)で照射試験を実施している。②実用化研究フェーズでは国内実機での少数体先行照射を実施することで実機適用性を確認し、実機プラントへの本格導入を果たす計画である。

次に Cr コーティング燃料被覆管の導入メリットを 2 点示す。

- (1) 事故時の安全性向上(高温時の耐酸化性向上、冷却材喪失事故(Loss of Coolant Accident, 以下 LOCA)時の燃料被覆管破裂抑制性能向上)

原子炉内の一次冷却材の喪失などで炉心の冷却機能の低下に伴い燃料被覆管が高温となった場合、水蒸気と酸化反応を起こし、燃料被覆管の脆化が進む。また、配管破断等により一次冷却材が大量に喪失する LOCA では、燃料棒の一部は、燃料棒内外圧差の増加に加え、温度上昇による燃料被覆管の機械的強度の低下によって、燃料被覆管が破裂する。燃料被覆管の破裂開口部から内部に水蒸気が流入することで燃料被覆管内面でも酸化反応が発生し、燃料被覆管の脆化がさらに進む。

安全機能が有効に作動せずに、水蒸気との反応が進み過度の脆化が生じた燃料被覆管は、非常用炉心冷却系等からの炉心注入水による急冷に伴う熱衝撃や機械的荷重の負荷が加わり、折損・破砕する可能性がある。燃料被覆管が折損・破砕した場合、炉心冷却可能な形状が失われ、炉心損傷に至るおそれがある。そのため、炉心損傷などのシビアアクシデントへの進展を抑制する対策として、高温水蒸気中における耐酸化性向上及び LOCA 時の燃料被覆管の破裂抑制を図ることが有効である。

Cr コーティング燃料被覆管の導入は、耐酸化性及び通常運転時の耐食性の向上により事故時の燃料被覆管の脆化及び破裂を抑制し、炉心・燃料の安全性向上に有効である。

- (2) 通常運転時の耐食性向上

通常運転時、燃料被覆管は冷却材によって腐食する。腐食量の増加に伴い、金属部肉厚が減少するとともに、照射中の腐食によって発生する水素が燃料被覆管に吸収され、水素脆化が進む。これは、炉心運用の高度化(高燃焼度化、高出力化)に向けた課題の一つであることから、耐食性が大幅に向上する Cr コーティング燃料被覆管の導入は、炉心運用高度化に有効である。

3. 事故耐性燃料被覆管の開発状況

当社は、国内外で進む事故耐性燃料開発の現状も踏まえ、現在は米国研究炉での燃料棒照射試験及び性能確認試験を実施している。性能確認試験について以下に紹介する。^{(2)~(4)}

3.1 Cr コーティング燃料被覆管の製造

当社は、物理蒸着法(スパッタリング法)を用いて、Zr 基合金燃料被覆管の外表面に安定した

約 $10\mu\text{m}$ の Cr でコーティングする製造技術を開発した(図 2)。また、この技術により製造した Cr コーティング燃料被覆管を用いて、3.2 節に示すとおり性能確認試験を実施した。

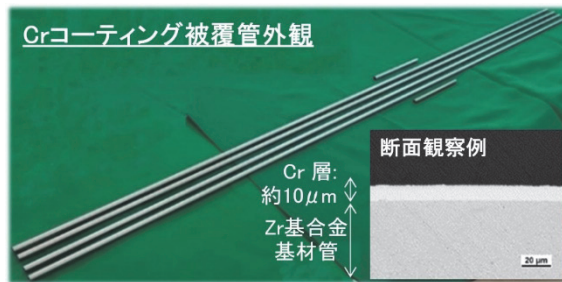


図2 Cr コーティング燃料被覆管の外観と断面観察写真例

3.2 Cr コーティング燃料被覆管の性能確認

(1) 高温時の耐酸化性

燃料被覆管温度が、LOCA 時において許容される被覆管温度の上限である 1200°C の高温、水蒸気条件で、酸化反応を確認する試験を実施した。従来の Zr 基合金燃料被覆管では保持時間に対して Cathcart-Powel 式のとおり単調に酸化量が増加していくことが確認されている⁽⁵⁾が、Cr コーティング燃料被覆管では、約 50 分まで酸化量の増加は認められなかった(図 3)。これは、Cr コーティングにより Zr 基材の酸化反応が抑制されたためと考えられる。また、LOCA 事象で起きる燃料被覆管破裂、高温酸化及び急冷事象を模擬し、同一の酸化条件での試験を実施した結果、従来の Zr 基合金燃料被覆管は急冷時に折損するのに対し、Cr コーティング燃料被覆管は折損しない結果が得られている(図 4)⁽⁶⁾。この理由として、耐酸化性の向上により Zr 基材の酸化反応が抑制され、燃料被覆管の延性が維持されたためと考えられる。

これらの結果より、Cr コーティングによる燃料被覆管の耐酸化性能の向上によって、事故耐性の向上が図れることがわかる。

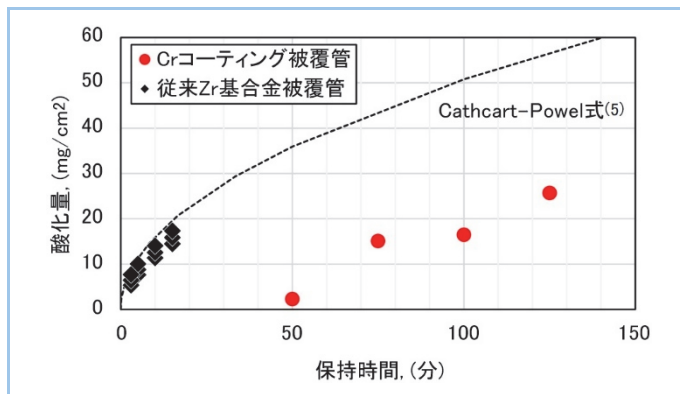


図3 Cr コーティング燃料被覆管の高温 (1200°C) での酸化試験結果

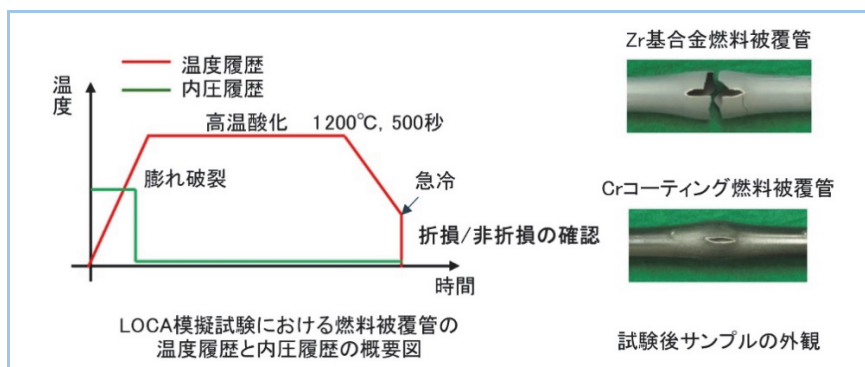


図4 Cr コーティング燃料被覆管の LOCA 模擬試験結果
(LOCA 時に許容される酸化量を超えた試験)

(2) 通常運転時の耐食性

PWR の通常運転時の水質を模擬した燃料被覆管の腐食試験を実施した。試験条件は、腐食が加速する条件とするため通常運転時の冷却材温度より高い 360℃とした。延べ 335 日の腐食試験を実施し、Cr コーティング燃料被覆管では、有意な腐食量の増加が認められなかった(図 5)。このように Cr コーティングによって燃料被覆管の耐食性が向上することから、通常運転時における耐食性の向上が図れることがわかる。このことから、炉心運用高度化に向けた課題の一つである腐食量増加の抑制に繋がる。

なお、Cr コーティング燃料被覆管の通常運転時の耐食性は大幅に向上するため、燃焼の進んだ燃料棒の水素吸収量も大幅に低減する。燃料被覆管の水素吸収量が増加すると、燃料被覆管の高温時の材料強度が低下し、LOCA 発生時に燃料被覆管はより低い応力で破裂すると示唆されている⁽⁷⁾。つまり、Cr コーティング燃料被覆管は燃焼が進んでも燃料被覆管が破裂する応力が低下しにくく、LOCA 時の燃料被覆管破裂抑制に繋がると考えられる。

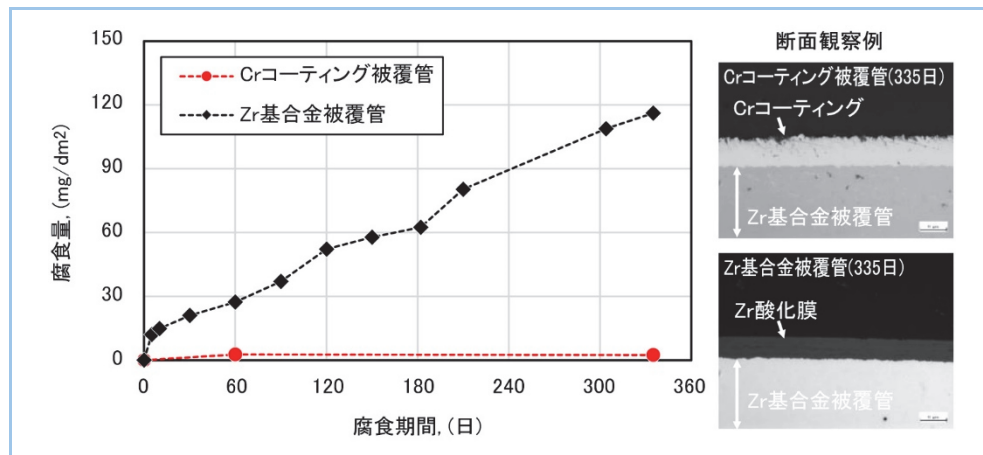


図5 Cr コーティング燃料被覆管の PWR 炉水模擬腐食試験結果

3.3 今後の展開と見通し

- (1) 現在の①基盤技術研究フェーズでは、Cr コーティング燃料被覆管の早期実用化に向け、事故時及び通常運転時の性能把握のための各種性能確認試験によるデータ取得及び評価を進めるとともに、日米協力の下で、米国研究炉 ATR において照射試験データを取得している。これらの知見等に基づき国内実機プラントでの燃料健全性評価及び炉心・燃料の安全性評価に向け評価手法の整備を進める。
- (2) ②実用化研究フェーズにおいて、日本原子力学会で検討が進められている実機プラントでの先行照射を行うための要件をまとめた標準に基づき少数体先行照射試験を実施し、同照射試験にて取得したデータを用いて評価手法を確立する。
- (3) 確立した評価手法を用いて、Cr コーティング燃料被覆管の実機適用性を確認し、最終的には、2030 年代の実機プラントへの本格導入が可能となることを目指す。

4. まとめ

使用実績が豊富な Zr 基合金に Cr コーティングを施した、事故耐性燃料被覆管を開発中である。各種性能確認試験及び米国研究炉での照射試験を通じ、同燃料被覆管を用いた炉心・燃料の事故時の安全性向上及び通常運転時の耐食性の向上効果について現在検証を進めている。

今後は、国内実機での少数体先行照射を経て、実機プラントへの導入が可能となるよう技術開発を進めることで、軽水炉プラントの安全性向上、炉心運用高度化の実現を目指す。

参考文献

- (1) 山下 真一郎, 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, 2022 年度事故耐性燃料開発に関するワークショップ
- (2) 村上望ほか, 早期実用化に向けた PWR 向け事故耐性燃料被覆管(コーティング燃料被覆管)の開発 (1)開発コンセプトと基礎的性能確認結果, 日本原子力学会 2020 年秋の大会
- (3) 村上望ほか, 早期実用化に向けた PWR 向け事故耐性燃料被覆管(コーティング燃料被覆管)の開発, (1) 安全性への影響評価の現状と今後の開発計画, 日本原子力学会 2022 年秋の大会
- (4) Y. Okada et al., Investigation of Chromium Coated Zirconium Alloy Behaviour as Accident Tolerant Fuel Cladding for Conventional LWRs, TopFuel2021(2021)
- (5) J. V. Cathcart, ORNL-NUREG/TM-41(1976)
- (6) Y. Okada et al., Development of Chromium Coated Cladding in Japan for the Commercial PWR, TopFuel2024(2024)
- (7) F. Nagase et al., Behavior of Pre-hydrided Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA conditions, Journal of Nuclear Science and Technology(2005)