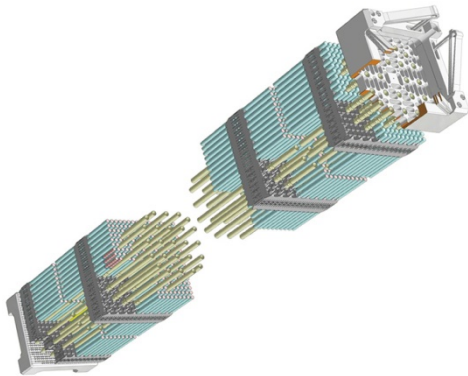


# 軽水炉燃料の高度化に対する取組み - M-ReX™ 及び事故耐性燃料被覆管の開発 -

Development of M-ReX™ for High Reliability and High Seismic Performance, and Study for Development of Accident Tolerance Fuel cladding



下村 尚志\*<sup>1</sup>  
Takashi Shimomura

佐藤 大樹\*<sup>2</sup>  
Daiki Sato

尾上 昌晃\*<sup>3</sup>  
Masaaki Onoue

村上 望\*<sup>4</sup>  
Nozomu Murakami

軽水炉の安全性向上と信頼性向上に向けた活動の一環として、三菱重工業(株)と三菱原子燃料(株)では、軽水炉燃料の高度化に取り組んでいる。短中期的には、軽水炉の安定かつ計画的な運転に向け、燃料の耐震性や信頼性向上を目指し、M-ReX™(MNF Robust and eXcellent performance fuel assembly)を開発中である。また、中長期的には現行のZr基合金よりも事故耐性が向上するクロム(Cr)コーティングジルコニウム(Zr)基合金製燃料被覆管を開発し、さらに高い事故耐性が期待できるシリコンカーバイド(SiC)製の燃料被覆管の開発も視野に入れている。本報ではこれらの取組みの概要について述べる。

## 1. はじめに

M-ReX™ は、耐震性や信頼性の向上を目指し、2020年代に実機プラントに導入できるよう開発中である。また、事故耐性燃料被覆管は、最早で2030年代に実機プラントに導入できるよう開発している。本報ではこれらの開発コンセプトや開発状況について紹介する。

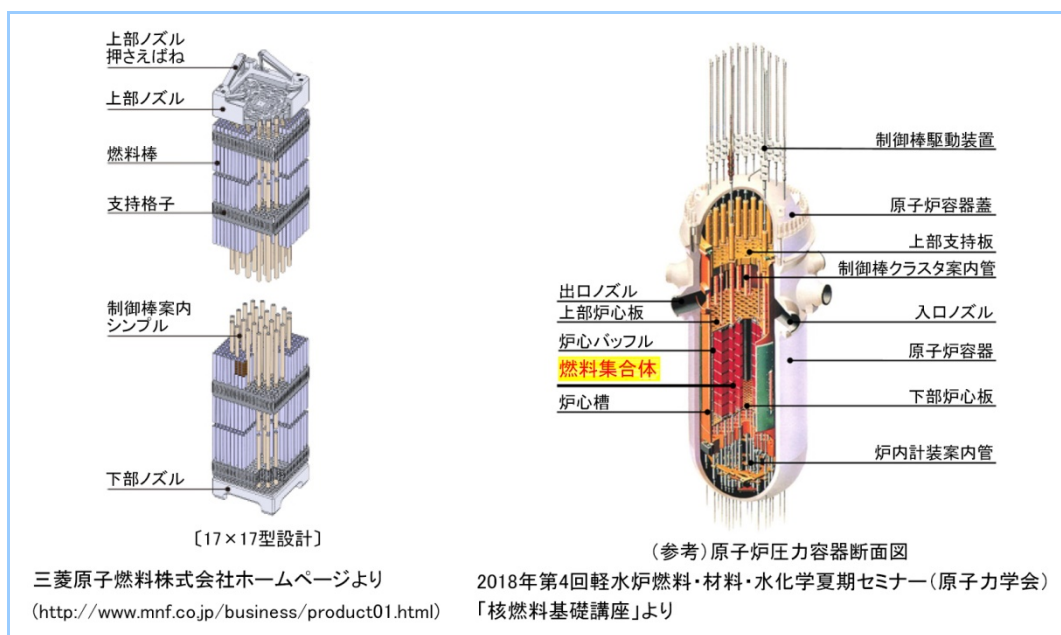


図1 PWR 向け燃料集合体の概要

\*1 三菱原子燃料(株) 燃料技術本部燃料・炉心技術部 課長

\*2 三菱原子燃料(株) 燃料技術本部燃料・炉心技術部 統括主査 工博

\*3 原子力セグメント炉心・安全技術部 次長

\*4 原子力セグメント炉心・安全技術部 首席技師

図1に PWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor)向け燃料集合体の概要を示す。上部ノズル, 下部ノズル及び支持格子は制御棒案内シムプル(以下, 案内シムプル)と結合されており, 燃料棒は支持格子により保持されている。燃料集合体は上部ノズルと下部ノズルを介して原子炉容器内で支持され, 上部ノズル, 下部ノズル及び案内シムプルと支持格子で燃料棒の支持骨格を形成している。

## 2. M-ReX™ の開発

### 2.1 コンセプト

#### ○耐震性向上(構造強度の増加)

東日本大震災の影響による福島第一原子力発電所事故を教訓に, 軽水炉には以前に増して安全性の向上や自然現象を考慮した設計が求められるようになってきている。特に燃料集合体においては実機プラントの設計用地震力に耐えうる設計としているが, さらに裕度を確保して安全性を向上するため, 材料や構造の変更, あるいは評価手法の精緻化により耐震性向上を図る必要がある。M-ReX™ は, このうちハード面, すなわち材料や構造の面での性能向上対応を目指したもので, それを実現するための特徴は以下のとおりである。

#### (1) 構造材への高強度材料の導入

案内シムプルや支持格子といった構造材に, 従来から使用している材料であるジルカロイ-4よりも強度が高い M-MDA™(Modified-Mitsubishi Developed Alloy)を適用することで, 耐震性を向上している。(2.2 参照)

#### (2) 支持格子及び案内シムプルの構造変更

支持格子の設計変更及び案内シムプルの部分的な厚肉化によって, 燃料の構造強度を増加し, 耐震性を向上している。(2.3 参照)

#### ○信頼性向上

2008 年から 2010 年にかけて発生した燃料漏えい事象の対策として, 信頼性向上燃料 ZDP-1 (first design of Zero Defect Performance)を開発し実機プラントに導入済みであるが<sup>(1)</sup>, M-ReX™ は, 燃料漏えいによるプラントの計画外停止の更なるリスク低減に貢献するべく, その ZDP-1 の設計コンセプトを踏襲しつつ, 燃料漏えいの推定要因に対する抜本的対策を適用して信頼性を向上している。また, プラントの安全余裕の拡大に貢献するべく, 材料面での性能向上を図っている。その特徴は以下のとおりである。

#### (3) 燃料棒保持性能向上

燃料棒を保持する支持格子スプリング形状を変更し, 燃料棒保持部での耐摩耗性を向上させることにより, 信頼性を向上している。(2.4 参照)

#### (4) 燃料被覆管材への耐食性向上材料の導入

M-ReX™ は, 後述のとおり耐食性を向上させた材料を適用している。通常運転時の耐食性向上により Zr 基合金被覆管中に吸収される水素量も低減する。この結果, 水素による材料劣化が低減され, 安全評価上の余裕が創出されることとなる。(2.2 参照)

次項以降にこれらの概要を示す。

### 2.2 M-MDA™ 材の適用

#### ○開発経緯

#### (1) 耐食性の向上

M-MDA™ は当初, 燃料被覆管向けに開発が進められた材料であり, その組成は表1に示すように, 高耐食性燃料被覆管材料として既に実機プラントに適用済みの MDA (Mitsubishi Developed Alloy)をベースとして, 更なる耐食性向上のために添加物元素である Sn を低減し, 水素吸収率の低減のために高 Cr/Fe 化を図っている<sup>(2)(3)</sup>。

表1 M-MDA の材料組成

材料	Sn	Nb	Fe	Cr	Zr
M-MDA	0.5	0.5	0.3	0.4	Bal.
(参考)MDA	0.8	0.5	0.2	0.1	Bal.
(参考)ジルカロイ-4	1.5	—	0.2	0.1	Bal.

(2) 機械強度の増加

Fe と Cr の合計量を増やすことで、Sn の減少による機械強度の低下を相殺する以上に機械強度を増加させている。

M-MDA<sup>TM</sup> 被覆管は、これまでに電力会社との共同研究の枠組みで海外の実機プラントにて照射しており、その後の試験にて、耐食性(図2)及び機械強度(図3, 4)が従来材と比べて優れていることを確認している<sup>(3)</sup>。

○案内シムプル及び支持格子への適用

図3及び4に示すとおり M-MDA<sup>TM</sup> は、機械的強度が従来の構造材であるジルカロイ-4よりも高い傾向が確認されている。このように従来材よりも強度が高いM-MDA<sup>TM</sup>を案内シムプルや支持格子といった構造材に適用することで、耐震性を向上している。

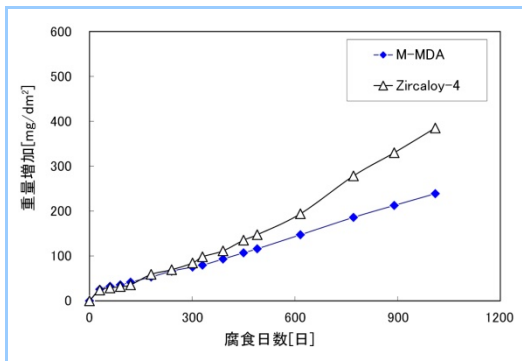


図2 制御棒案内シムプルの腐食挙動

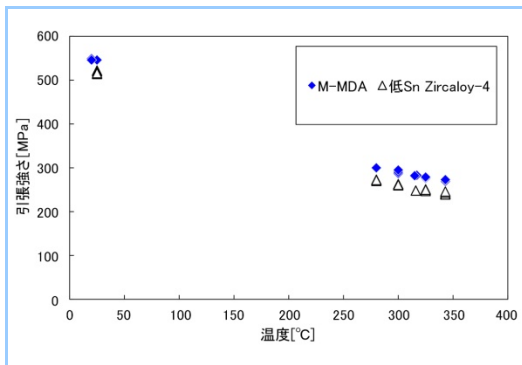


図3 制御棒案内シムプルの引張強さ

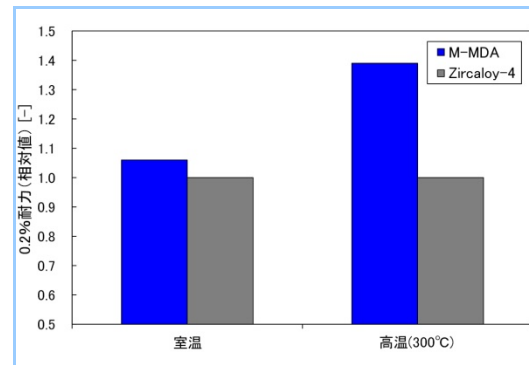


図4 支持格子のシート材耐力

2.3 設計変更による構造強度の増加

(1) 支持格子の耐震性向上

支持格子は、図1に示すとおり燃料棒を保持する構造部材である。地震時に横揺れが大きくなると、炉内の構造物あるいは隣接する燃料集合体の支持格子との衝突により、支持格子には衝撃荷重が生じる。このため M-ReX<sup>TM</sup> では、支持格子の耐震性能の指標として、弾性限界荷重に着目し、その向上を図っている。具体的には、現行のジルカロイ-4 よりも高強度であるM-MDA<sup>TM</sup> を支持格子材に適用すると同時に(図4参照)、支持格子は冷却材流路の障害物となるため、冷却材の流れに影響しない範囲で支持格子高さを増加している(図5)。これにより従来の支持格子と比較して、支持格子の耐震性能の目安である弾性限界荷重が約 30%向上することを衝撃試験により確認した。

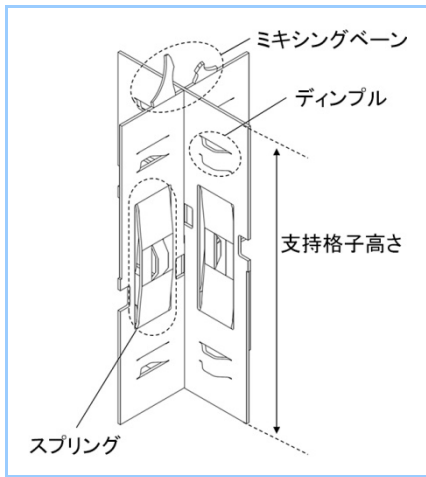


図5 支持格子の概要図

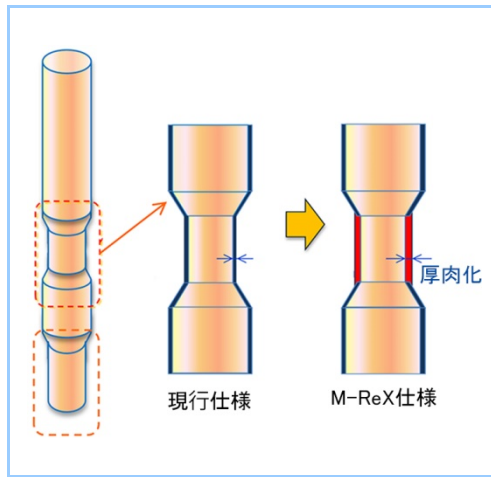


図6 案内シンプルの耐震裕度向上策

(2) 案内シンプルの耐震性向上

案内シンプルは、図1に示すとおり支持骨格をなす構造部材であり、制御棒の挿入経路も兼ねている。このため M-ReX™ では、支持格子と同様に、案内シンプルに M-MDA™ を適用することで強度の向上を図っている。これにより、案内シンプルの強度が約 30%向上することを確認した(図3)。

また、案内シンプルの下部には、原子炉トリップ時に自由落下する制御棒を冷却材の抵抗で急減速させるために、内径を絞った部分(細径部と呼ぶ)を設けている。地震時に縦揺れが大きくなると、特に燃料集合体下部側で案内シンプルに生じる圧縮荷重が増加する。このため、M-ReX™ では、M-MDA™ を適用するとともに、圧力損失特性に影響しない範囲で案内シンプル細径部の肉厚を増加することで強度の向上を図っている(図6)。これにより、案内シンプルの強度はさらに約5%向上し、M-MDA™ 適用と併せ強度が約 35%向上することを確認した。

2.4 耐摩耗性向上

実機プラントに導入済みである信頼性向上燃料 ZDP-1 では図7に示す耐摩耗性向上対策(異物フィルター付き均質多孔下部ノズル、長尺下部端栓)を施している。M-ReX™ では上記コンセプトに加え、燃料棒を直接保持するグリッドスプリング及びデンプル(図5)を設計変更することで、更なる耐摩耗性向上を図り、燃料漏えい事象に対する抜本的対策としている。

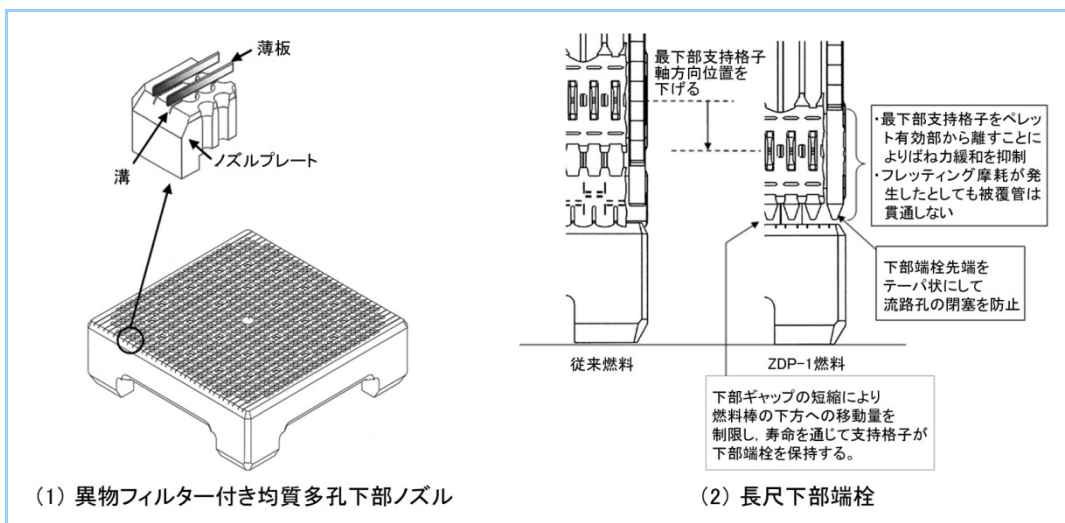


図7 耐摩耗性向上対策

### (1) 燃料棒保持性能の向上

燃料棒の外径は、炉内で使用されている間に冷却材圧力の影響で減少する。このため、使用期間中にわたり燃料棒が保持されるようにスプリングを設計する必要がある。一方、中性子照射による照射欠陥が燃料棒の軸方向に蓄積する性質があるため、燃料棒は炉内で使用されている間に軸方向に伸びる挙動を示す。このため、燃料棒保持力を大きくし過ぎると燃料棒の伸びを阻害して燃料棒に曲げを生じさせるなどの悪影響が生じる。そこで、スプリング剛性を低減させて保持たわみを大きくしつつ、従来と同等の初期燃料棒保持力を確保するスプリング設計とした。これにより、仮に燃料被覆管に摩耗が進行したとしても、スプリングが燃料棒の外径減少に追従することで、燃料棒の保持機能を維持できる設計とした。

### (2) 燃料棒保持部の接触面積増加(摩耗低減)

燃料棒との接触面積を増加させることで、摩耗深さを約 20%低減できる設計とした。

## 2.5 実証データの取得状況

実機プラントへの適用性及び従来燃料との共存性を確認するため、各種実証試験を実施した。

### (1) 集合体機械試験

燃料集合体の振動試験及び剛性試験の結果、現行燃料と同等の機械特性を持つことを確認した。このため、従来燃料と同じ地震動に対する耐震性評価を実施した場合、前節までで説明したような耐震性向上の効果が得られる見通しである。

### (2) 圧力損失測定

圧力損失試験の結果、燃料集合体圧力損失及び支持格子圧力損失は従来燃料と同程度となり、従来燃料との共存性を確保できることを確認した。

## 2.6 今後の展開と見通し

お客様に M-ReX™ の導入提案を行えるよう、引き続き実証試験及び詳細設計評価を行う。また、熱的余裕の向上によって炉心運用の柔軟性を向上させるため、ミキシングペーンを大型化した仕様の支持格子についても、2020 年代に実機プラントに導入できるよう開発中である(図8)。

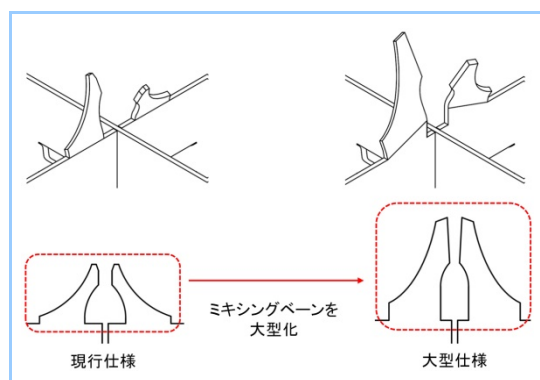


図8 支持格子のミキシングペーン形状の比較

## 3. 事故耐性燃料被覆管の開発

### 3.1 コンセプト

東日本大震災の影響による福島第一原子力発電所のシビアアクシデントの発生をきっかけに、炉心損傷、水素爆発などへの進展を抑制しうる技術として事故耐性燃料が世界的に着目されている。

#### ○耐酸化性能の向上(シビアアクシデントへの進展抑制)

事故時に炉心への注水が喪失すると、やがて燃料被覆管が露出し、高温となった燃料被覆管と水蒸気が酸化反応を起こす。酸化反応熱によって燃料被覆管温度は急上昇し、水素生成

が顕著となるとともに、燃料被覆管の脆化も進む。よって、高温水蒸気中で耐酸化性能を向上させた材料は事故耐性燃料被覆管として有望である。

#### ○冷却性の向上 (FFRD の対策)

冷却材喪失事故 (Loss of Coolant Accident, 以下 LOCA) 時に、非常に高い燃焼度に到達した燃料棒の内部で燃料ペレットが細片化し、被覆管の破裂開口部から燃料棒外へ放出される現象 (FFRD: Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal) が着目されており、高燃焼度化などの軽水炉燃料の高度化においては FFRD についてもハード面での対策を図る必要がある。

事故耐性燃料被覆管は、これらの性能向上対応を目指したもので、それを実現するための特徴は以下のとおりである。

##### (1) Cr コーティング Zr 基合金製燃料被覆管 (以下、Cr コーティング被覆管) の導入

燃料被覆管としての使用実績が豊富な Zr 基合金を技術基盤とする Cr コーティング被覆管を導入することで、事故時の耐酸化性能及び冷却性の向上を図る。(3.2 参照)

##### (2) SiC 被覆管の導入

高温に強く、水蒸気と殆ど反応しない SiC 複合材を燃料被覆管に用いることで、更なる事故時の耐酸化性能及び冷却性の向上を図る。(3.3 参照)

いずれの材料も安全性を向上させながら、より長期間の運転等、炉心運用高度化の導入に貢献することができる。次項以降にこれらの開発状況を示す。

### 3.2 Cr コーティング被覆管の開発状況

Cr コーティング被覆管については製作性及び LOCA 特性の向上の確認を行い、基本的な性能を確認している<sup>(4)</sup>。

#### (1) 現状

燃料被覆管としての使用実績が豊富な Zr 基合金を技術基盤とする Cr コーティング被覆管については、国内外で進む事故耐性燃料開発の現状も踏まえつつ、既設 PWR を対象に、2030 年頃の実用化を目指して開発を開始しており、現在は試作、試験を進めている。

#### (2) 事故耐性効果

試作被覆管サンプルを用いて、LOCA 時燃料健全性基準 (PCT1200°C/15%ECR) に対して、従来の Zr 基合金被覆管では酸化量が基準の2倍 (30%ECR) となる保持時間を模擬した試験を実施した。その結果、従来の Zr 基合金被覆管では、再冠水を模擬した水急冷時の熱衝撃により折損するのに対し、Cr コーティング被覆管は折損しない結果 (図9) が得られた。これは Cr 被膜により Zr 基材の酸化が抑制され基材の強度が維持されたためと考えられる。この結果のとおり、被膜形成による被覆管の耐酸化性能の向上が期待される。また、同様の LOCA 模擬試験により、Cr 被膜によって LOCA 時の被覆管の膨れ量が小さく抑えられる結果も得られており、冷却材流路が閉塞しにくくなることで LOCA 後の長期冷却性の向上が期待される。

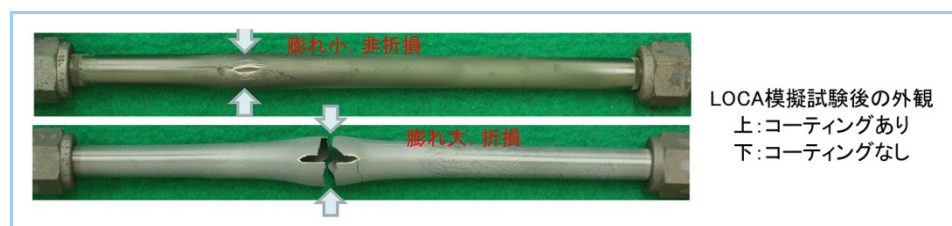


図9 事故耐性効果の確認例

#### (3) 通常運転時性能

試作した Cr コーティング被覆管は、安定した厚みで外表面に Cr 被膜が形成できており、引張変形後も被膜の剥がれや割れは見られなかった。また被膜を形成した外表面側は耐食性の向上や硬度の増加が見られた。被膜形成による通常運転時における耐食性や耐摩耗性の性

能向上が期待される。

#### (4) 実用化に向けた今後の対応

実用化に向け、Cr コーティング被覆管の材料特性試験、照射挙動の把握に向けた照射試験、及びCrコーティング被覆管導入による安全設計への影響を評価するための解析モデル及びコードの整備を行っていく。

### 3.3 SiC 被覆管の開発状況

SiC 被覆管については基礎データ取得及び解析を行い技術の成立性を見通しを得ている。

#### (1) 現状

SiC 複合材は、上述のとおり事故耐性燃料の被覆管として有望な候補材料である。一方で、後述するように、SiC 複合材は Cr コーティング被覆管に比べて、燃料設計のための材料特性データの充実が必要となるなど、実機プラントでの実用化に向けては課題がある。

#### (2) 事故耐性効果

事故模擬解析により、SiC 被覆管はシビアアクシデントに進展した場合でも水素発生量が抑制され、炉心溶融までの時間を遅延させうることを確認した。また、LOCA 模擬試験により、SiC 被覆管は LOCA 時でも膨れ・破裂・酸化がなく、水急冷時の熱衝撃により折損することなく形状を維持することが確認され、LOCA 事象に対しても耐性が高いことが確認された。

#### (3) 通常運転時性能

SiC 被覆管は、照射材の熱伝導率及び機械的強度が低いことから、現行の燃料と同じ設計を適用すると、熱膨張したペレットとの接触応力により被覆管は破損するという結果になる。この結果を受け、ペレット温度を低減させ、ペレットとの接触を抑制する改良により設計が成立する可能性を見出したが、実機プラントで運用できる燃料設計を確立するためには製造技術の進歩による材料特性の改善(熱伝導率、機械的強度の増加)と照射挙動を含めた材料特性データの充実が必要である。

#### (4) 実用化に向けた課題

SiC 被覆管については、上記の燃料設計の成立性以外にも、冷却材への Si の溶出、輸送中の破損など、実用上の課題が抽出されている。それらは直ちに SiC 被覆管の成立性を否定するものではないが、将来 SiC 被覆管を実用化するためには必ず解決すべき課題であり、水質管理や輸送容器の改良に関する技術オプションの開発が必要である。

### 3.4 今後の展開と見通し

事故耐性燃料被覆管については、2030年代の実機プラントへの導入を目標にCrコーティング被覆管の開発を進める。

## 4. まとめ

軽水炉の安全性・信頼性向上に向けた活動の一環として軽水炉燃料の高度化に取り組んでおり、M-ReX™及び事故耐性燃料被覆管を開発している。

M-ReX™については、M-MDA™材の適用及び構造材の設計変更により耐震性を向上している。また、ZDP-1の設計コンセプトに加え、支持格子の燃料棒保持部を設計変更することで信頼性を向上している。引き続き、お客様にM-ReX™の導入提案を行えるよう、実証試験及び詳細設計評価を行っていく。

事故耐性燃料被覆管については、燃料被覆管としての使用実績が豊富なZr基合金を技術基盤とするCrコーティングZr基合金製燃料被覆管を導入することで、LOCA時のシビアアクシデントへの進展抑制や冷却性向上を図るとともに、使用環境における耐食性及び耐摩耗性の向上を図る。引き続き、実用化に向けて、照射試験、解析モデル及びコードの整備を行っていく。

本報で紹介したような軽水炉の耐震性向上、安全余裕の拡大、あるいは将来の炉心運用高度化の導入といったメリットを享受できるよう、燃料の高度化に取り組んでいく。

## 参考文献

---

- (1) Norihiro Kitashiba, Mitsubishi PWR Fuel Assembly ZDP-1 with High Reliability to Avoid GTRF Wear, ICON-23, May 2015, ICON-23-2204
- (2) Yuji Okada et al., Development of M-MDA as Reliable Cladding and Structural Materials, ICAPP 2017, April 2017, 17790
- (3) Daisuke Komiyama et al., Development of M-MDA as a Fuel Structural Material with Improved Reliability, ICON-27, May 2019, ICON-27-1512
- (4) 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