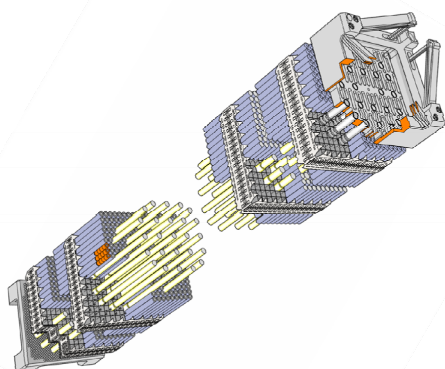


PWR 燃料・炉心の更なる信頼性向上・高度化 に向けた取組み

Development of PWR Advanced Fuel and Core for
High Reliability and High Performance



佐治 悦郎^{*1}
Etsuro Saji

井田 俊一^{*2}
Toshikazu Ida

若松 明弘^{*3}
Akihiro Wakamatsu

河越 稔之^{*4}
Toshiyuki Kawagoe

清水 純太郎^{*5}
Juntaro Shimizu

堀元 俊明^{*6}
Toshiaki Horimoto

三菱 PWR(Pressurized Water Reactor: 加圧水型原子炉) 燃料・炉心は、主に経済性向上の観点から高燃焼度化の開発を行ってきた。現状では燃料集合体最高燃焼度 55000MWd/t を達成できる燃料が実プラントに装荷され、計画通り照射を終えた実績も出てきた。また、海外での MOX 燃料加工を厳格な管理の下で完遂し、実炉心装荷を終えている。またウラン燃料においても、長サイクルや出力アップといったプラント運転からの要求にも対応可能であり、更なる要求にも軽微な設計変更で対処できる見通しが得られている。現状より一層の経済性向上を目指して、更なる燃料・炉心の高度化に向けた開発を推進するとともに、海外への燃料供給も視野に入れた各種開発を行っていく。

1. まえがき

三菱重工(株)は 1970 年に関西電力(株)美浜1号機に PWR 燃料を初めて供給し、それ以来、現在まで豊富な使用実績を有している。

一方、1980 年代には経済性向上のため、燃料の取出燃焼度制限を 39000MWd/t から 48000MWd/t へ引き上げる開発を行い、さらに 2004 年には、取出燃焼度制限を 48000MWd/t から 55000MWd/t へ引き上げる開発を行い、実用化してきた。またこの間、燃料トラブルを踏まえた信頼性向上対策、MOX 燃料の本格適用や長サイクル化検討も着実に進めた。2009 年4月には、三菱重工の原子燃料事業(開発、設計、営業、販売)とこれまで燃料製造を担っていた三菱原子燃料(株)と統合し、総合原子燃料会社に生まれ変わり、プラントビジネスを担う三菱重工と一体となって展開している。

さらに、三菱重工での US/EU-APWR プラントの開発に歩調を合わせ、三菱原子燃料は海外プラントへの燃料事業展開についても取り組んでいるところである。

以下では、これらの状況を踏まえ、燃料・炉心開発に関する取組みと今後の展開を紹介する。

2. 燃料・炉心開発の実績と現状

2.1 国内照射実績

三菱PWR燃料は、1970 年に関西電力(株)美浜1号機の初装荷燃料用として2体の燃料を初めて供給して以来、現在(2009 年8月時点)まで約 18600 体の製造実績があり、また同時に豊富な使用実績を有している(図1)。

*1 原子力事業本部原子力技術センター炉心技術部長(工博)

*2 原子力事業本部原子力技術センター炉心技術部課長

*3 三菱原子燃料(株)燃料技術部長

*4 三菱原子燃料(株)燃料技術部グループリーダー

*5 三菱原子燃料(株)燃料設計部グループリーダー

*6 三菱原子燃料(株)燃料技術部主査

また、ステップ2高燃焼度燃料(集合体最高燃焼度 55000MWd/t)は、2004 年より国内PWRプラントに順次導入中であり、現在(2009 年8月時点)までに国内PWRプラント全 24 基中 14 基で導入が完了している。国内において最も早くステップ2燃料を導入した関西電力(株)大飯4号機では、集合体平均燃焼度が最高で約 53000MWd/t まで到達しており、照射のフォローアップを行って、挙動の妥当性を確認した。

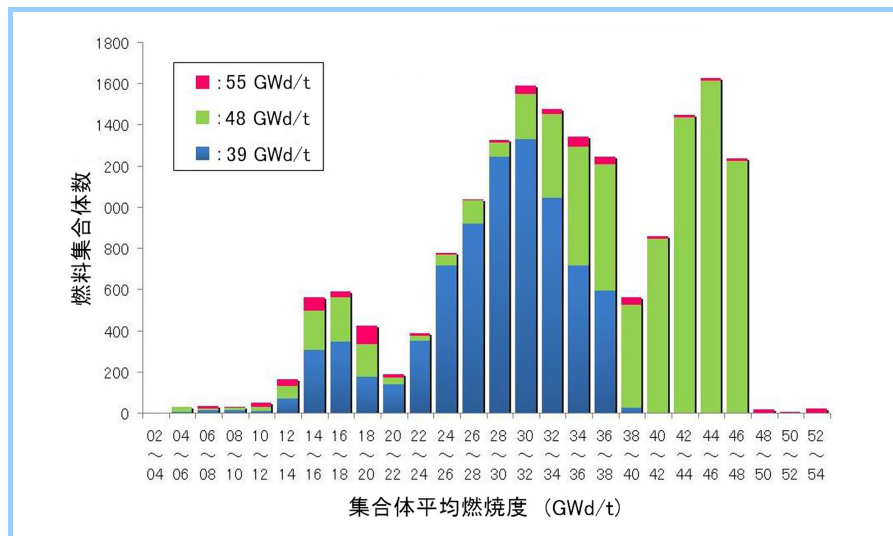


図1 三菱燃料の使用実績(2009年9月時点)

2.2 MOX燃料海外加工及び炉心設計

MOX 燃料の導入に関しては、国・電気事業者の方針に従って、燃料設計、炉心設計、安全評価、プラント設備影響評価、輸送容器設計、MOX 燃料加工、発電所での受け入れ等全ての分野において、原子炉及び燃料メーカーの技術力を統合して取り組んでいる。

MOX 燃料は、使用実績が豊富なウラン燃料の仕様を踏襲し、ステップ1燃料(集合体最高燃焼度 48000MWd/t)をベースに集合体最高燃焼度 45000MWd/t とした仕様としている。仏国 MELOX 工場において厳格な品質保証要求のもとで MOX 燃料を加工し、九州電力(株)玄海3号機に装荷された。

炉心設計では、まず炉心設計の観点から、MOX 燃料の製造に先立って、要求される運転期間、燃料装荷時期及びMELOX工場や輸送容器の許認可上の制限を踏まえた最適なPu含有率設定を行った。また、輸入燃料体検査申請や MOX 燃料導入に係る工事認可の取得において、原子力安全・保安院の厳しい審査に対し電気事業者を強力に支援するとともに、燃料棒内圧の確認プロセス等、実機炉心設計において必要となる炉心設計－燃料設計インターフェースの合理化等、設計環境の整備を入念に行った。

MOX 燃料装荷炉心は、従来にも増して、十分な安全裕度を考慮した炉心となるよう設計しており、また、炉心管理の側面においても、MOX 燃料の保障措置対応に伴う炉心管理コードの改修、設計コードと同等な精度を有する新型炉心監視システムの導入、運転員訓練用シミュレータへの MOX 炉心モデルの組み込み等、種々の支援を行ってきている。

今後は、MOX 燃料装荷炉心が運転を開始した後、炉心の挙動を十分にフォローして、運転管理の支援を行う予定である。

2.3 長サイクル運転への対応

運転期間の延長(長サイクル運転)を実施した場合、これまでより稼働率の増加、燃料の炉内滞在期間延長、新燃料装荷体数の増加となり、燃料設計、炉心設計、安全評価に影響する可能性がある。このため、現在、代表プラントにおける運転期間延長時の影響評価結果を踏まえ、原子炉の運転期間の妥当性を評価するための確認方法について、原子力安全・保安院による審査が行われている。

PWRでは15ヶ月運転(発電開始から停止までの期間は16ヶ月)とした炉心を対象に審査が行われている。これらの審査は、設置変更許可申請を伴わないで運転期間の妥当性を確認するための方法を検討するものであり、現状の運転期間での特性との詳細な比較が必須であることから、設置許可申請時と同等あるいはそれ以上の解析を実施し、審査においても電気事業者を支援している。

この代表プラントでは、運転期間を従来から大幅に延長したものではないことから、一般に言われている長期サイクル運転の特徴は顕著には表れず、特性は従来の運転期間のものと大差ないものとなり、影響は軽微であった。

代表プラントの審査が終了した後は、各電気事業者から個別のプラント毎に運転期間延長のための保安規定変更認可申請が順次行われる見込みである。それ以降については、電気事業者のプラント運用計画にもよるが、更に延長した運転期間への移行も視野に入れて、環境負荷の低減や更なる経済性を考慮した燃料の改良及び炉心の運用方法を提案していく予定である。

2.4 US/EU-APWR 用燃料・炉心開発

US/EU-APWR は、国内向け APWR をベースとしたプラントであり、これに対応した燃料開発を進めている。燃料・炉心設計の観点で、US/EU-APWR と国内向け APWR との最も大きな相違点は、燃料有効長を 12ft から 14ft に長尺化した点である。燃料有効長を長尺化したことで、線出力密度の低下が可能となり、これにより炉心安全上及び燃料健全性上の余裕を増加させている。

US/EU-APWR 燃料は、国内で豊富な使用実績のある、三菱 17×17 型ステップ 2 高燃焼度燃料の設計をベースとして設計しているが、燃料の長尺化に対応して、グリッドの段数を 11 段としている。これにより、燃料棒スパン長は従来の 12ft 燃料(9段グリッド)と同等またはそれよりも短くなっており、燃料の流動振動を低減し、燃料棒-グリッド間の流動振動摩耗に対する信頼性を維持している。

また、スパン長が短いことは熱水力特性上も有利である。燃料棒設計に関しては、燃料棒の長尺化に対応して、燃料棒下部にもプレナムを設置し、燃料棒内圧低減を実現している。燃料集合体の構成部材は、基本的に三菱 17×17 型ステップ2高燃焼度燃料と同じ設計を適用している。グリッドは燃料棒保持性能に優れた三菱I型グリッドで、中間部グリッドは被ばく低減及び中性子経済向上に寄与するジルカロイ製とし、上部及び下部グリッドは燃料棒保持力の高いインコネル製として流動振動低減等に配慮している。なお、上部ノズル及び下部ノズルには設計改良を適用している。上部ノズルは流路穴の形状・配列を変更して、炉心上部への流動状況を改善し、また下部ノズルには異物捕獲効果の高い異物フィルタ機能付き下部ノズルを適用して、従来以上の性能及び信頼性を確保するようにしている。

US/EU-APWR では、炉心熱出力や装荷する燃料集合体数、中性子反射体の設置などの仕様は国内向け APWR と同一の設計としているものの、海外における長サイクル運転の実績を考慮し、運転期間をとして 24 ヶ月をターゲットとした炉心仕様としている。具体的には、上述のように、燃料有効長を 14ft とすることにより出力密度を低下させている。これにより、24 ヶ月の運転に必要な新燃料体数の過度な増加を抑制しつつ、稼働率向上に伴うプラント経済性の向上を図っている。また、炉心設計にあたっては、運転期間の長期化により、運転中の軸方向出力分布が大きく変化するため、軸方向に部分長のガドリニア燃料を採用する非均質性を高めた燃料を採用するなど、出力分布変化の抑制を図っている。

燃料装荷パターンは、海外顧客の要求を考慮し、図2に示すように最外周に照射済み燃料を配置した L3P(Low Leakage Loading Pattern)を採用するなど、海外顧客に配慮した炉心設計を標準としている。これら標準設計に基づく型式認定申請書(Design Control Document)は、現在、米国規制当局である NRC によるレビューを受けており、認定早期取得に向けて対応している。

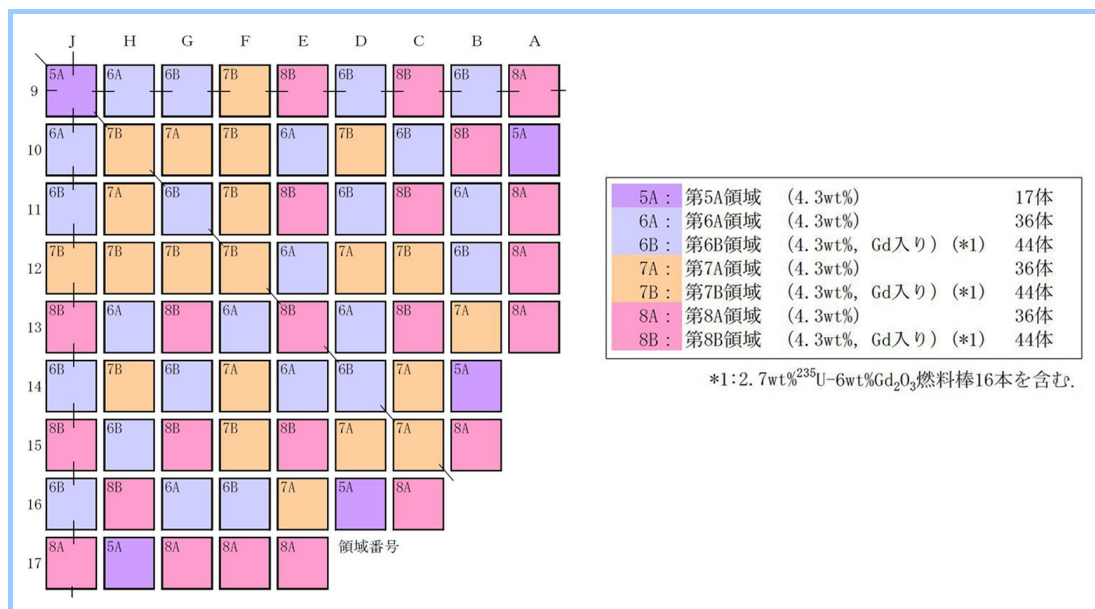


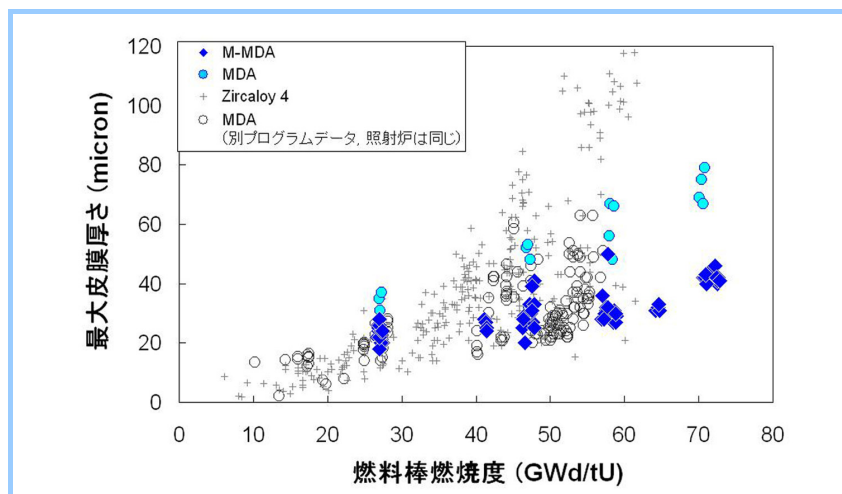
図2 24ヶ月運転時の燃料装荷パターンの一例

3. 今後の燃料・炉心高度化に向けた取り組み

3.1 燃料設計の高度化

三菱原子燃料は将来の PWR 燃料の更なる高燃焼度化および高負荷環境への対応に向けて、燃料被覆管の新材料開発を進めている

MDA (Mitsubishi Developed Alloy)被覆管は、300 万本以上の照射実績のあるジルカロイ4の基礎的特性を維持しつつ、耐食性を向上させることをコンセプトとして開発された被覆管であり、55000MWd/t 燃料として 10 万本以上の照射実績を有する。更なる高燃焼度化および高負荷環境へ対応するためにはより一層の被覆管の耐食性向上が必要であり、MDA の基礎的特性を維持しつつ更に耐食性向上をさせることをコンセプトとして MDA の化学成分を調整した M-MDATM (Modified MDA) 被覆管の開発が進められている。スペインの PWR 商業炉で M-MDATM 被覆管の照射試験を実施しており、4サイクル照射が終了し、70000MWd/t を超える燃料棒燃焼度の範囲まで、MDA に比べて優れた耐食性を有することが確認されている(図3)。今後の実用化に向けて、照射後試験施設において照射後試験を実施する予定である。

図3 M-MDATM の炉内腐食データ

また、将来要求されるより高い負荷環境における燃料性能に対応すべく、既に良好な耐食性が確認されているZr-Nb 二元系合金に対して、より一層の耐食性向上の観点で高Nb化を図ったJ-AlloyTM 被覆管の開発を国内産業界と共同で進めている。

国内にて J-AlloyTM 被覆管の製造試験および炉外試験を実施し、被覆管の量産性および高耐食性、低水素吸収性能を確認すると同時に、スペイン商業炉において2サイクル目の照射試験を実施しており、今後はおよそ 70000MWd/t の燃料棒燃焼度まで照射試験を継続する計画である。1サイクル照射された燃料の一部は照射後試験施設へ輸送され、今後の実用化にむけた照射後試験に供する。

M-MDATM、J-AlloyTM 製の燃料被覆管は燃料の負荷環境や要求仕様等の要請に応じて今後適用していくこととしている。

3.2 炉心設計の高度化

国内外の PWR プラントを対象として、更なる高燃焼度化や出力アップ等を含む今後のニーズに適切かつ柔軟に対応できるよう、炉心設計及び関連技術の高度化を進めている。

国内においては、全PWR炉心の取替炉心設計を通じて、従来より進めている高燃焼度化や長サイクル化に着実に対応すべく、地に足のついた炉心設計技術の研鑽を行っている。また、高燃焼度化ステップ3として、ステップ2で設定した集合体最高燃焼度制限 55000MWd/t に相当する燃焼度制限について、ウラン濃縮度が5wt%を超えないことを前提として、炉心運用の観点から検討を進めているところである。

近年の海外への事業展開に際しては、国内における炉心運用との違いに炉心設計を対応させるべく、高度化検討を開始している。海外プラントでは、L3P を強めることにより、中性子経済を向上させウラン濃縮度を出来るだけ低くしようとする傾向が強く、このため、炉心反応度制御や出力ピーキング抑制のために濃縮度やガドリニア濃度を取替炉心毎に多様化・最適化させる運用を取り入れているプラントが少なくない。この場合、炉心設計はより複雑になり、かつスピードも要求されることとなるが、このようなニーズにも適切に対応できるよう開発に取り組んでいく。

炉心設計コードについては、US-APWR の設計認証申請と同時期に、炉心設計ツールの高度化を目指して GALAXY/COSMO-S システムの開発に着手した。このコードシステムは、国内PWR炉心設計に用いている PHOENIX-P/ANC システム、及び US-APWR の炉心設計に用いている PARAGON/ANC システムに替えて、三菱の設計経験から最適化した炉心設計の中核を担うコードシステムとすることを目指している。最新の核データ、最新の中性子束解法の採用により、高速かつ高精度な三次元解析を実現し、動特性化による核・熱・動特性の結合による安全解析の高度化にも対応している。

炉心管理技術では、まず、炉心管理システムを積極的に活用することにより、保安規定上必要な炉心パラメータ監視や異常時の診断を、より適切に実施していくことを当面の目標としているが、将来的には、FID (Fixed Incore Detector) の採用も視野に入れて、また、常時監視・直接監視の適用方法も検討した上で、プラント運用上の利得が最大限に得られるよう開発研究を重ねていきたいと考えている。

3.3 次世代軽水炉燃料・炉心の開発

当社は、国のプロジェクトで実施している次世代軽水炉開発に参加している。次世代軽水炉では、大幅な発電コスト低減による経済性向上及び環境負荷低減を目標としており、この目標を達成するためには稼働率の向上、燃料サイクルコストの低減、取替燃料体数の削減が必要である。このため、現行の取出燃焼度制限を大きく上回る超高燃焼度(取出燃焼度制限 80000MWd/t 以上)に耐えうる革新的な次世代軽水炉用 PWR 燃料(被覆管材料)の開発に鋭意取り組んでいる。

4. まとめ

当社はこれまで、燃料の高燃焼度化、炉心の高度化対応など燃料・炉心の開発を行ってきた。今後は、原子燃料事業を引き継いだ三菱原子燃料(株)とともに、より一層の原子力発電の信頼性、経済性向上のため、燃料の高燃焼度化、長サイクル運転などの炉心運用の多様化に対応できる燃料の開発を進めていくと同時に、海外プラントへの燃料事業展開についても進めていく。