

全炉心をウランとプルトニウムの混合酸化物 (MOX) 燃料とする改良型沸騰水型原子炉 (フルMOX-ABWR) の建設計画が、昨年わが国の原子力委員会から発表された。MOX 燃料の利用を高めることでいっそうのウラン資源の節約が可能になる。

フルMOX炉心には、MOX燃料の利用に柔軟に対応できる炉心性能と高い経済性が求められている。当社は、永年にわたり研究開発してきたMOX燃料炉心技術とウラン燃料炉心での豊富な実績に基づき、最適なフルMOX炉心設計を提案する。当社のフルMOX-ABWR炉心設計は、MOX燃料の特質を考慮しても現行ABWRのプラント・炉心基本仕様を変更することなく、現行の炉心と同等の炉心性能をもつように開発されている。

The Japan Atomic Energy Commission has announced the construction plan for an advanced boiling-water reactor (ABWR) with a full MOX (mixed oxide) core instead of ATR. Increased MOX fuel utilization will result in **greater savings of uranium ore**.

A full MOX core for a power plant requires flexibility in MOX fuel utilization, steadiness, and economical operation. We have proposed the optimum full MOX core design for an ABWR based on the MOX fuel and core technologies that we have developed over a period of many years, as well as our considerable experience in uranium fuel and cores. Our full MOX core design for an ABWR has good core characteristics and safety performance with no change in the basic design specifications of the current ABWR.

1 まえがき

1995年8月、原子力委員会は新型転換炉 (ATR) 実証炉の建設計画の見直しを決定し、代替としてフルMOX-ABWRの建設計画を発表した。ATRは使用済燃料を再処理して得られるプルトニウムを燃料とする原子炉で、今回経済性の理由により見直しに至ったが、原子燃料リサイクル計画上、フルMOX-ABWRはATRの役割を代替できるとの判断がなされたものである。

わが国では、ウラン資源の有効利用とエネルギーセキュリティ確保の観点から、段階的に軽水炉でのプルトニウム利用 (プルーサーマル) 計画を進めている。90年代後半からは稼働中の原子力発電所数基で、取替燃料の1/3程度までをウランとプルトニウムの混合酸化物 (MOX) 燃料とする実用規模利用が検討されている。

フルMOX炉心は、MOX燃料自体の設計は実用規模利用計画と同じであるが、炉心内のすべてをMOX燃料とするところに大きな特徴がある。原子炉一機当たりのプルトニウム利用量は実用規模利用の約3倍、ATRの約2倍強となる。全炉心をMOX燃料とすることによる炉心特性、安全性への影響については検討が必要である。

以下に、沸騰水型原子炉 (BWR) でのMOX燃料利用について概説した後、当社のフルMOX-ABWR炉心の設計の考えかた、設計案、およびその特性について紹介する。

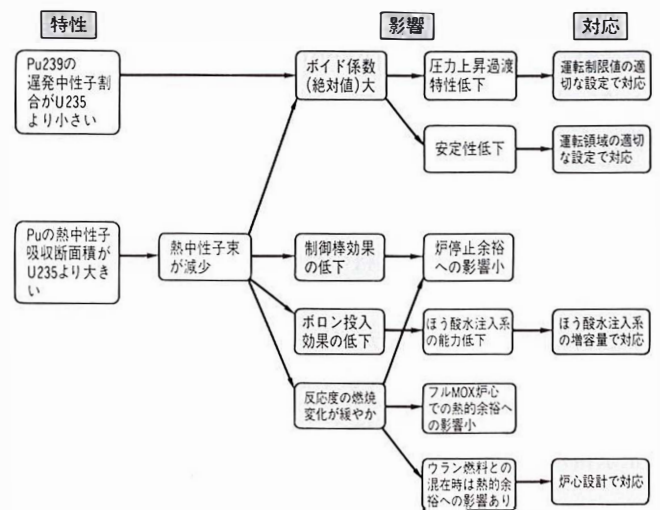


図1. MOX燃料装荷による炉心特性への影響 MOX燃料の特性を考慮した適切な対応により、その影響は排除できる。

Influence on core characteristics due to MOX fuel

2 BWRにおけるMOX燃料利用

2.1 MOX燃料

ウラン燃料は初期に核分裂性のU235を約3%含んでおり他は核分裂を起こさないU238である。燃焼の過程で、U235は減少し、一部のU238は中性子を吸収しプルトニウムに変

化する。したがって、現行燃料でも取り出す直前では出力の半分以上をプルトニウムが担っている。使用済燃料には燃え残りの約1%のU235と生成した約1%のプルトニウムが存在し、このプルトニウムのうち約60~70%が核分裂性のPu239、Pu241である。MOX燃料は、プルトニウムを酸化物の形態で劣化ウランや天然ウランに混合して、燃料集合体当たり約3~5%含む燃料である。

MOX燃料のウラン燃料との違いは、はじめからプルトニウムが混入されていることであり、プルトニウム量がウラン燃料より多いことによりPuとUの核特性の違いが炉心特性に影響を及ぼす(図1)。PuはUに比べ遅発中性子割合が小さく、また、中性子吸収断面積が大きいことにより次の影響が生ずる。

- (1) 冷却材のボイド量変化時の出力変化量が大きい(これをボイド係数が大きいと言う)。
- (2) 制御棒やほう酸水の中性子吸収効果が低下し、原子炉停止余裕を低下させる可能性がある。
- (3) ウラン燃料との混在により相対的にMOX燃料の出力が高くなりやすい。

これらの影響は、MOX燃料の装荷割合が大きいほど顕著になるため、フルMOX炉心の炉心設計、プラント設計では十分考慮して設計している。

2.2 ABWRとMOX燃料

ABWRは、改良炉心による燃料サイクル費の低減、微調整電動制御棒駆動方式(FMCRD)による運転性の向上、インターナルポンプによるプラント単純化、高度計測制御設備による運転監視性能の向上をはじめ、種々の高度化技術の採用により、従来のBWRより一段と安全性、経済性、融通性の高いプラントである。

炉心仕様も、将来の燃料の高燃焼度化やMOX燃料の導入を考慮した設計となっている。炉心の基本性能を決定する燃料の配置(格子ピッチ)は、図2に示すように燃料集合体間の間隔を従来のBWRより2.5mm拡大し、非沸騰水領域の面積を増加することにより、ボイド係数の低減や炉停止余裕の向上を図っている。まさに、MOX燃料による影響

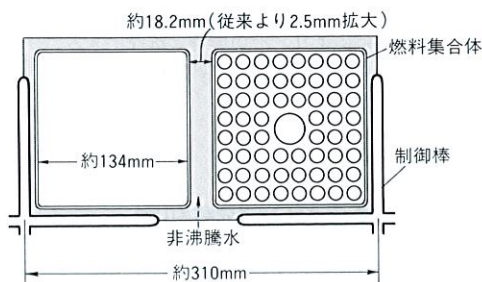


図2. ABWR炉心の燃料格子ピッチ 燃料集合体の配置間隔を大きくすることにより、MOX燃料の影響を緩和できる。

Fuel bundle pitch of ABWR core

を緩和できる設計となっており、フルMOX炉心として好適なプラントと考えられる。

3 フルMOX-ABWR炉心

3.1 燃料・炉心設計の考えかた

フルMOX炉心には、MOX燃料の利用に柔軟に対応できる炉心性能と発電所として高い安全性と経済性が求められる。フルMOX炉心への要求事項は以下に集約される。

- (1) 燃料の経済性が高い。
- (2) 初期サイクルからMOX燃料の利用が可能。
- (3) MOX燃料の利用率が0%~100%に対応可能。
- (4) ウラン炉心と同等の安全性。

この観点から、当社のフルMOX炉心の設計概念は次のとおりである。

- (1) 初装荷炉心は、炉心性能、経済性に優れた改良型濃縮度多種類炉心(IMEC)(図3)を採用し、MOX燃料とウラン燃料の混在による熱的性能低下を緩和できる設計とする。
- (2) 取替炉心は、ウラン炉心と同じ低中性子漏洩(えい)炉心とし、少ない燃料交換で運転期間の変動にも柔軟に対応できる設計とする。
- (3) MOX燃料は、ウラン燃料で豊富な使用実績があり、ウラン燃料との共存性、互換性のある高燃焼度8×8燃料(ステップ2燃料)(図4(a))とする。
- (4) フルMOX炉心でも一部にウラン燃料を使用する。その場合、ウラン燃料は熱的性能と経済性が高い高燃焼度化対応の9×9燃料(ステップ3燃料)(図4(b))が最適である。

表1に設計仕様のまとめを示すとともに以下に説明する。

3.2 MOX燃料の設計

MOX燃料の目標燃焼度(核燃料1t当たりの発生エネルギー、単位はMW・d/t)は、照射実績から、当面は燃料集合体最高を約40,000 MW・d/t、平均を約33,000 MW・d/tと

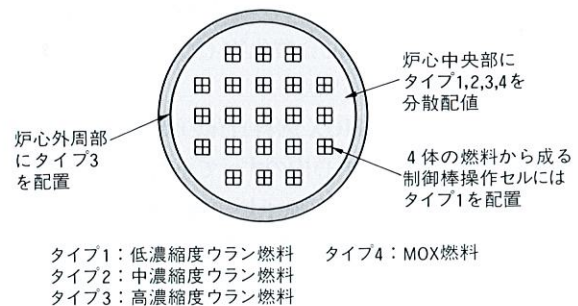


図3. 改良型濃縮度多種類炉心(IMEC)の燃料装荷方式の概念 炉心外周部への高濃縮度燃料の配置により、出力分布の平たん化と燃料経済性の両方を改善でき、MOX燃料の装荷に最適である。

Fuel loading concept of IMEC

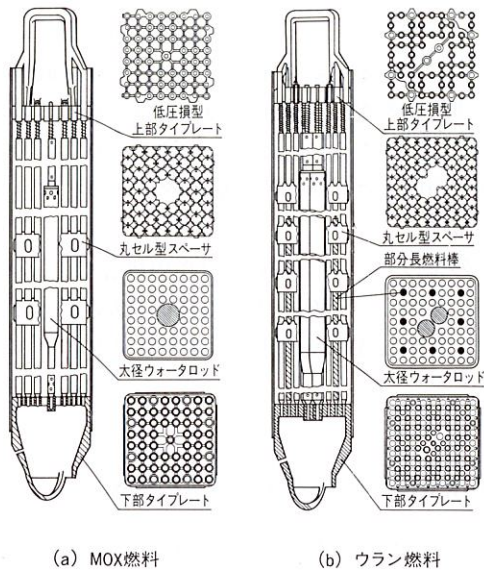


図4. 燃料集合体仕様 太径ウォータロッドをもつ高燃焼度8×8燃料はMOX燃料のボイド係数低減に効果がある。燃料棒本数が多い9×9燃料はウラン燃料の濃縮度増加に対応しやすい。

Appearance of fuel bundle

表1. フルMOX-ABWRの基本設計仕様
Design specifications of full MOX ABWR core

| | | |
|-------|------------------------------|---|
| 出力 | 電気出力 原子炉熱出力 | 約 135~138 MW 約 3,926 MW |
| 燃料 | 燃料集合体数 | 872 体 |
| | ウラン燃料 集合体最高燃焼度 取出平均燃焼度 | 9×9 燃料 (ステップ3 燃料) 55 GW・d/t 約 45 GW・d/t |
| MOX燃料 | MOX燃料 集合体最高燃焼度 取出平均燃焼度 | 高燃焼度 8×8 燃料 (ステップ2 燃料) 40 GW・d/t 約 33 GW・d/t |
| | 炉心 | 初装荷炉心設計概念 燃料種類数 MOX燃料装荷率 取替炉心設計概念 |
| | | 改良型濃縮度多種類炉心 (IMEC) ウラン燃料3種類, MOX燃料1種類 全炉心の1/3程度まで 低中性子漏洩燃料装荷方式のフルMOX炉心 |

する。

ステップ2燃料構造のMOX燃料集合体は60本の燃料棒から成り、そのうち50本弱の燃料棒がMOX燃料棒である。プルトニウムの混合量は、核分裂性プルトニウムの含有率によって異なるが、燃料棒によりおよそ2~10%の範囲に調整する。燃料集合体平均の混合量は約3~5%である。また、残りの10数本の燃料棒は中性子吸収物質ガドリニアを含むウラン燃料棒である。

初装荷炉心用のMOX燃料は、プルトニウム含有量を取替用のMOX燃料と同一とし、取替燃料並の燃焼度を達成させMOX燃料の経済性向上を図る。

MOX燃料の中性子増倍率(k_{∞})特性を図5に示す。ウラン燃料と比較すると、燃焼初期では小さく燃焼後半では高く最高値は低い、より平坦な特性をもっている。これは、MOX燃料には、どの燃焼度でも均等に出力を発生しやすい

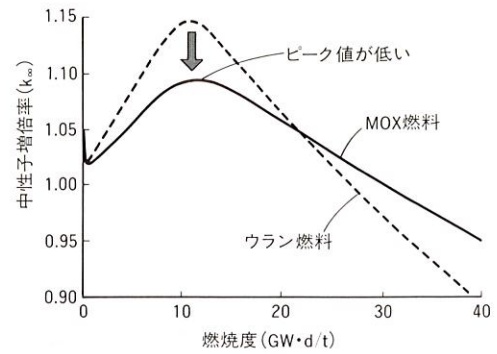


図5. MOX燃料とウラン燃料の中性子増倍率の比較 MOX燃料の中性子増倍率の燃焼変化が緩やかであることが、フルMOX炉心の炉心特性を良好にする主因である。

Comparison of neutron multiplication factors of MOX fuel and uranium fuel

傾向があり、フルMOX炉心の熱的性能がウラン炉心と大差ない理由となっている。

3.3 フルMOX炉心設計

フルMOX炉心は、最初は部分的なMOX燃料の装荷から始まり、数サイクル経過後にフルMOX炉心に達する。熱出力3,926 MWのABWRで、13か月運転平衡炉心での燃料装荷方式を図6に示す。炉心は872体の燃料から成り、一回の取替体数は約1/3の288体である。取替体数は運転期間とMOX燃料の燃焼度条件から決まっている。

炉心特性を図7に示す。原子炉停止余裕はウラン炉心と同等である。これはMOX炉心では制御棒値が低下するが、停止時のような炉水温度の低い状態では炉心の中性子増倍率は燃料の k_{∞} の最高値に支配され、その最高値がMOX燃料では低く制御棒値の低下を相殺するためである。

燃料棒の最大線出力密度、燃料集合体の最小限界出力比もウラン炉心と同等である。これらはMOX燃料の k_{∞} の燃焼変化が緩やかであることに起因することが大きい。

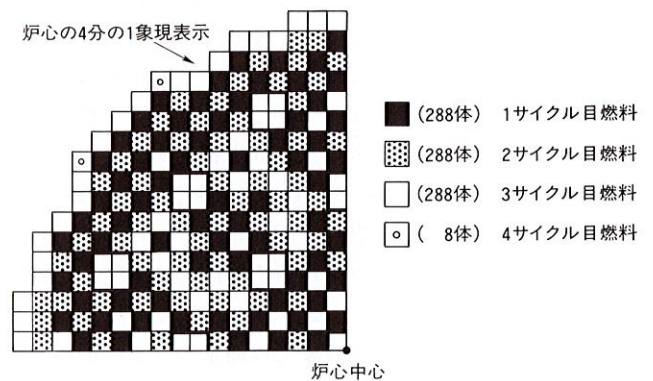


図6. フルMOX平衡炉心の燃料装荷方式例 燃料装荷方式はウラン炉心と変わりなく、燃焼が進んだ燃料を炉心外周と制御棒操作セルに、ほかは中央に均一に配置している。

Fuel loading pattern of full MOX equilibrium core

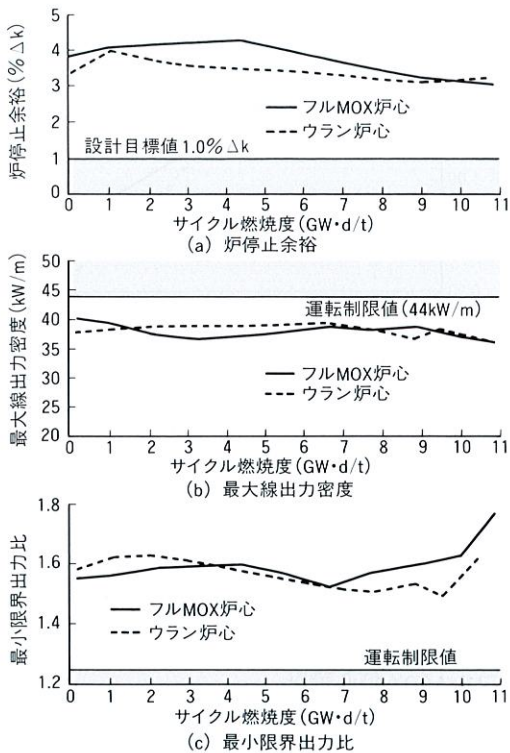


図7. フルMOX炉心とウラン炉心の炉心特性比較 フルMOX炉心は、良好な炉心特性と十分な運転制限値に対する余裕をもち、ウラン炉心と同等の運転が可能である。

Comparison of core characteristics of full MOX core and uranium core

3.4 初装荷 MOX 炉心の設計

初装荷炉心は872体の燃料を一度に装荷する必要があるが、MOX燃料の調達を考えると初めからのフルMOX炉心は現実的ではなく、ウラン燃料を主としてMOX燃料は部分的に装荷する設計が妥当である。

ウラン燃料とMOX燃料が混在する炉心での留意点は、MOX燃料の出力が相対的に高くなりやすい点にある。これを緩和するための手段は、できるだけ炉心の出力分布を平坦化し熱的余裕を大きくとり、そして、ウラン燃料の出力を相対的に高めることである。このような炉心は当社が開発したIMEC初装荷炉心であり、また、ウラン燃料はウラン濃縮度を高くできるステップ3燃料である。

IMECは濃縮度の異なる3種類のウラン燃料からなり、炉心の最外周には高濃縮度燃料が配置される。MOX燃料は、中濃縮度と高濃縮度のウラン燃料の中間の反応度を持ち、炉心中央部に均一に配置される。この設計で、MOX燃料の装荷割合が炉心の約1/3程度までは通常のウラン炉心と同等の炉心性能が得られる。

3.5 プラント設計への影響

フルMOX炉心のプラント設計では、ボイド係数の増加による影響に留意する必要がある。発電機負荷遮断時の出力

変化幅はやや大きくなるが、運転制限値を適切に設定することで安全制限値を余裕をもって満たせる。低炉心流量、高出力運転時の炉心の安定性の低下は、運転領域を適切に設定すれば問題がない。ほう酸水注入系のほう素の中性子吸収効果の低下は、ほう酸水貯蔵タンクの増容量化で対応可能である。

以上のように、フルMOX炉心の場合でも基本的に現ABWRのプラント設備を大きく変更する必要はないと考えられる。詳細は最終設計仕様に基づいて決定することになる。

4 フルMOX炉心を支える総合技術

プルトニウムは、再処理した燃料により同位体組成が異なること、時間の経過によって組成が変化することなど、ウラン燃料にはない特質がある。当社は、これらの特質を考慮し、製造キャンペーンごとに適正なプルトニウム混合量の決定を行い、つねに最適なMOX燃料を設計していく。

また、炉心運転管理では、プラント停止中のMOX燃料の組成変化も逐次評価し、それを反映できる新炉心運転管理システムを開発した。

これらの技術には、炉心設計、燃料設計、運転管理などのソフトウェア技術の信頼度向上が不可欠である。当社は、積極的に臨界試験、熱水力試験、燃料試験、実機照射燃料のデータ収集、評価などに取り組んでおり、ソフトウェア技術の信頼度向上に努めている。

5 あとがき

現行ABWRのプラント仕様で、ウラン炉心と同等の性能が得られるフルMOX燃料炉心を開発した。今後は定期点検時の燃料取替体数をさらに減らせる高燃焼度MOX燃料の開発に重点を置き、当社は、炉心・燃料の総合技術を生かした最良なフルMOX炉心を開発をさらに推進していく。



山本 有紀 Yuki Yamamoto

原子力事業部原子炉設計部部長。
BWR原子力発電プラントの炉心燃料開発に従事。
Nuclear Energy Div.



吉岡 律夫 Ritsuo Yoshioka

原子力事業部原子炉設計部主幹。
BWR原子力発電プラントの炉心燃料開発に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Div.



永野 護 Mamoru Nagano

原子力事業部原子炉設計部主査。
BWR原子力発電プラントの炉心燃料開発に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Div.