

特集

核燃料サイクル技術の開発動向と将来

原子燃料の設計・製造 ②プルトニウム燃料の設計・製造

Design and Fabrication of Nuclear Fuels

②Design and Fabrication of Pu-U Mixed Oxide Fuels

檜原 英千世*

Hidechiyo Kashihara

1. はじめに

エネルギー資源に乏しい我が国は、ウラン資源の有効利用およびエネルギーセキュリティ確保の観点から、使用済燃料を再処理して得られるプルトニウムは、再利用することとしている。プルトニウムは酸化物の形でウラン酸化物と混合し、混合酸化物 (Mixed Oxide ; MOX) 燃料として利用される。

MOX燃料の利用は、高速増殖炉 (FBR) と新型転換炉 (ATR) を中心に進められてきたが、軽水炉での利用 (プルサーマル) 計画も進められつつある。

本稿では、MOX燃料の燃料設計および燃料製造の技術開発の概要を紹介する。

2. MOX燃料の設計

2.1 各種MOX燃料の特徴

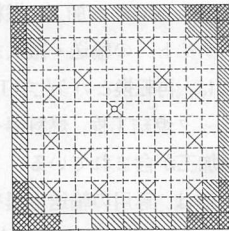
プルトニウムの核特性に起因するMOX燃料の特徴を原子炉の炉型毎に示す。

1) 軽水炉用MOX燃料

一般的にMOX燃料の場合、ウラン燃料に比べて中性子エネルギーが高くなるため、熱中性子を吸収する制御棒の効果が減少する。PWRでは燃料集合体中に直接制御棒が挿入される方式であるため、プルトニウムを使用するときには、MOX燃料集合体とウラン燃料集合体に分け、制御棒はMOX燃料集合体には配置しない方法 (図-1-a) が考えられる。一方BWRの場合は制御棒が集合体の外周部に挿入される方式をとっているため、集合体の中央部にMOX燃料を配置し、その外側にウラン燃料を配置することにより、制御棒効果の減少を抑える方法 (図-1-b) が考えられる。

2) ATR用MOX燃料 (図-2)

圧力管タイプの原子炉であるATRでは、制御棒は燃料から離れた重水中に挿入され、中性子は重水中で



(a) PWR用燃料設計例

制御棒

4	3	2	1	1	2	3	4
3	1	G	P ₁	P ₂	G	1	3
2	G	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	G	2
1	P ₁	P ₁	P ₁	W	P ₁	P ₁	1
1	P ₁	P ₁	W	P ₁	P ₁	P ₁	1
2	G	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	G	2
3	1	G	P ₂	P ₂	G	1	3
4	3	2	1	1	2	3	4

1, 2, 3, 4 : 低濃縮UO₂燃料棒
G : ガドリニア燃料棒
P₁, P₂ : MOX燃料棒
W : ウォーターロッド

(b) BWR用燃料設計例

図-1 軽水炉用MOX燃料

比較的最長い距離を動いて減速されるので、いずれの燃料を使用しても制御棒における中性子スペクトルの変化があまりないため、制御棒値が余り変わらない。

また中性子は重水中で減速されるため、Pu-239とPu-241をU-235に近い核的価値で利用できる特徴を持つ。従って、核分裂性プルトニウムとU-235の和を一定にすれば、プルトニウムの同位体組成に余り影響されずにほぼ同一の燃焼度が得られる。

3) FBR用MOX燃料 (図-3)

FBRの炉心反応度に寄与する効果は、各プルトニウム同位体間で大きく異なるため、炉心反応度を精度よく管理する方法として、特価フィッサイル法を採用

* 動力炉・核燃料開発事業団 核燃料サイクル技術開発部長
〒107 東京都港区赤坂 1-9-13

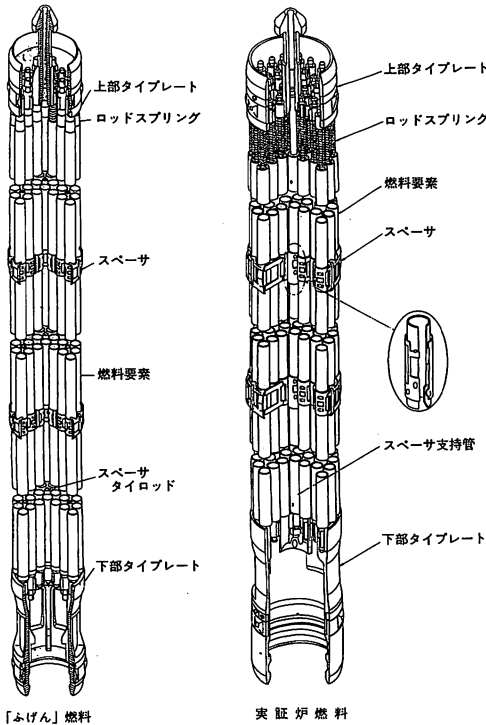


図-2 ATR用MOX燃料

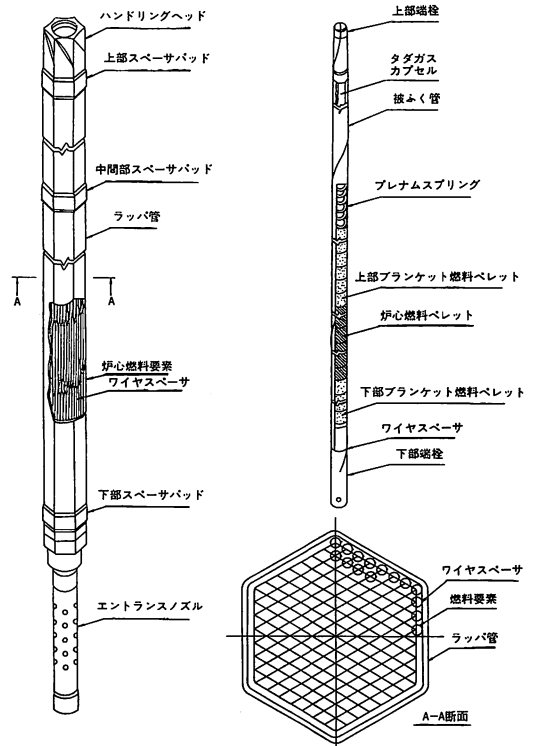


図-3 FBR用MOX燃料

している。特価フィッサイル法とは、Pu-239の炉心反応度に対する効果を1.0として他のプルトニウム同位体（Am-241も含む）およびウラン同位体の相対的な反応度効果を定義し、炉心反応度への効果を各元素の構成比率に、この等価フィッサイル係数を乗じたものの和として表わす方法である。

2.2 各種MOX燃料の設計

1) 軽水炉用MOX燃料の設計

軽水炉用MOX燃料集合体は、通常のBWRまたはPWR燃料の構造と全く同一の構造を有している。軽水炉用MOX燃料が通常の軽水炉燃料と異なるのは、燃料ペレットの組成のみである。MOX燃料要素の集合体内での配置については、図-1で説明した通りである。軽水炉用MOX燃料のプルトニウム富化度は低く、物性的にUO₂燃料と大きな差はなく、基本的には通常の軽水炉燃料と同様の設計手法が使用できる。

2) ATR用MOX燃料の設計

ATR燃料設計の流れを図-4に示す。これは基本的には軽水炉燃料設計の場合と同様であるが、MOX燃料設計の特徴的なものとして以下のものがある。①プルトニウム富化度に起因する燃料ペレットの物性変化、②プルトニウムスポット。

①の物性変化に関しては、プルトニウム富化度が低

い場合には、物性にUO₂燃料と大差がないが、高い場合には、熱伝導度等のプルトニウム富化度による変化を考慮して計算している。一方、FPガス放出率等については、UO₂燃料の物性と大きな差はない。

②のプルトニウムスポットとは、PuO₂粉末とUO₂粉末をボールミルで混合する時に生成されるPuO₂濃度の高い部分のことである。この大きさは、通常200μm以下である。

3) FBR用MOX燃料の設計

FBR燃料の設計基準としては、熱中性子炉の場合と基本的なところで大きな差はないが、使用温度が高いためクリーブ破損の防止に重点が置かれている点が特徴といえる。高速炉燃料設計の流れを図-5に示す。

燃料集合体仕様、炉内構造物等の設備仕様に対して、炉心核設計、熱設計、動特性から得られる燃料設計条件をあてはめて、燃料要素および燃料集合体の特性を評価する。

燃料要素設計では、高温高出力下での使用条件に鑑みて、燃料中心最高温度、高速中性子照射に起因するスエリングによる被覆管の外径増加、高燃焼度によるFPガス圧力の上昇および高温使用条件に対してクリー

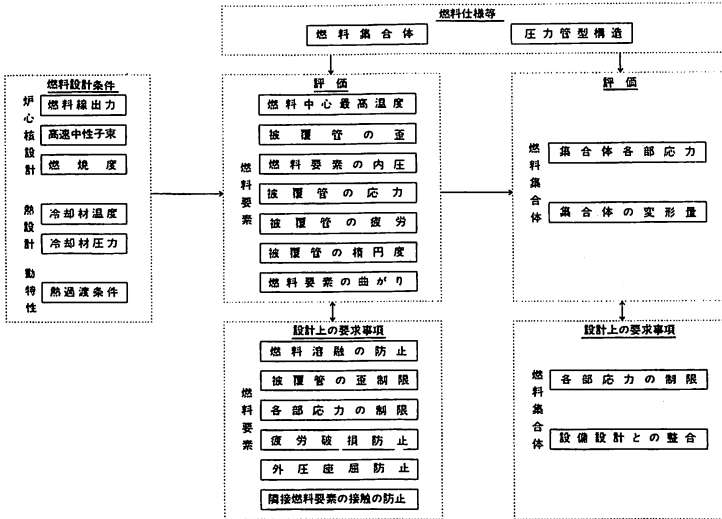


図-4 ATR用MOX燃料設計の流れ

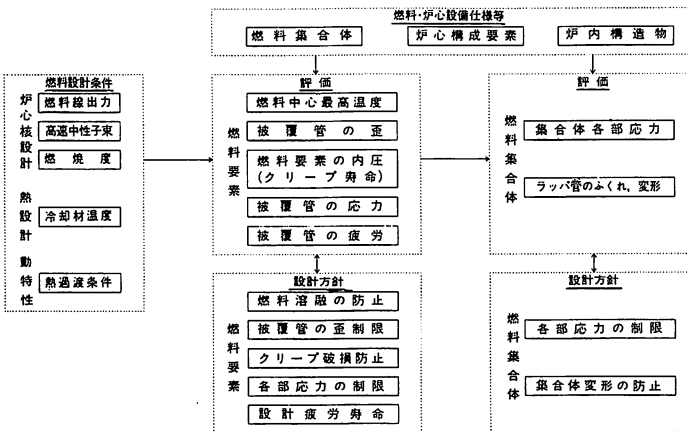


図-5 FBR用MOX燃料設計の流れ

ブ寿命，また被覆管の応力および歪さらには疲労サイクルについて評価する必要がある。

燃料集合体設計では，高温の流動ナトリウム中での耐久試験等の炉外評価試験結果に基づく設計モデルによる材料力学的評価，すなわち，「集合体各部応力」，「流力振動」および「ラッパ管の変形」について評価し，その健全性を確認する必要がある。

2.3 今後のMOX燃料設計

MOX燃料の使用実績は，我が国においては主として「常陽」「ふげん」のドライバー燃料として蓄積されてきた。この間，MOX燃料の熱中性子炉での利用技術は，ATR燃料開発の過程で確立されてきた。

今後の熱中性子炉用MOX燃料は，UO₂燃料と同様に高性能化，高燃焼度化および負荷追従の可能性を

追求する方向に進むものと考えられ，MOX-Gd₂O₃燃料ペレットの開発等が必要となる。

FBR用MOX燃料についても，高線出力化および高燃焼度化が求められる。このため，燃料仕様としては，高線出力化に対し，燃料中心溶融の点から中空ペレットの採用が，また高燃焼度化に対しては，燃焼に伴う反応度の低下を防ぐ観点より，燃料ペレットの密度をできるだけ高めることや，燃料ピンの太径化さらには大型集合体とすることにより，構造材の炉心に占める割合を減じる方策等が必要となる。

また燃料設計手法も，現状の決定論的な手法から確率論的手法へと移行するであろう。このため，今後とも数多くの製造データおよび照射データの蓄積が必要となる。

3. MOX燃料の製造技術開発

3.1 技術開発の経緯

大量のプルトニウムを取り扱う燃料製造では、ウラン燃料の製造に比べ以下のような特徴がある。

- (イ) プルトニウムを使用するため、グローブボックス等の閉じ込め設備の中で取り扱う必要があり、工程設備等の形状および配置が制約を受ける。
- (ロ) 外部被ばく対策として、設備の自動化、遠隔化等が必要である。
- (ハ) 臨界管理上の制限が大きい。
- (ニ) プルトニウム使用に伴う保障措置上の特別な配慮が必要である。

これらの特徴に起因する諸課題を解決するために、プルトニウム燃料製造技術開発を動燃事業団は次のように展開してきた(図-6参照)。

第1期は、基礎研究段階で米国からの技術導入によって、昭和40年11月にプルトニウム燃料第一開発室(以下、「第一開発室」という)が完成し、昭和41年1月からプルトニウムを使用し、その取り扱い技術の習得とともに、照射試験用燃料の製造等を開始した。これにより、日本におけるプルトニウム利用技術開発の幕開けとなった。

第2期は技術の確証・蓄積の時代で、昭和47年1月に完成したプルトニウム燃料第二開発室(以下、「第二開発室」という)を中心に、重水臨界実験装置(DCA)用燃料、新型転換炉原型炉「ふげん」、高速実験炉「常陽」の炉心燃料等の製造を行った。ATR用工程は10トンMOX/年の製造能力を有し、当初DCA、

その後「ふげん」用燃料およびプルサーマル用燃料の製造を行い、現在に至っている。またFBR工程は1トンMOX/年の製造能力を有し、最初に「常陽」MK-I炉心燃料を製造した。その後MK-II炉心燃料製造のため、大幅な工程の改造を行い、取替燃料の製造を行った。その中で自動化に向けての機器開発および高度化を進め、被ばく低減を図ってきた。また、これらの燃料製造技術開発にあわせて、燃料部材の検査技術の開発を進めた。

第3期は技術の実証の段階で、プルトニウム燃料製造施設(以下、「第三開発室」という)における高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の炉心燃料の製造を中心とした展開である。第三開発室はこれまでの技術を結集し、遠隔自動化技術を取り入れた製造工程となっている。FBR用工程は5トンMOX/年の製造能力である。

3.2 技術開発の現状

第三開発室は、20年あまりにわたって自主開発したMOX燃料製造技術および施設管理・安全管理技術の集大成であり、高速増殖炉原型炉「もんじゅ」および新型転換炉実証炉等の燃料製造を通じて、将来の商業プラントのための技術実証を行うことを目的として建設されており、以下のような特徴を有している。

- ①改良されたグローブボックスシステム,
- ②燃料製造設備の遠隔・自動運転と直接保守,
- ③工程の乾式化
- ④オンラインリアルタイムな計量・臨界管理,
- ⑤製造、検査データのオンライン集中管理,
- ⑥査察用機器の遠隔自動化。

本施設のうち高速炉燃料製造棟(FBRライン)および共通棟の建屋建設は、昭和57年に着工、昭和59年

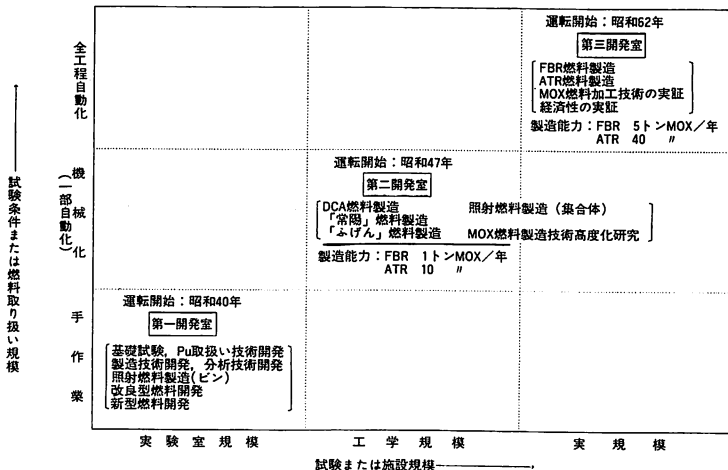


図-6 各開発施設の役割と開発ステップ

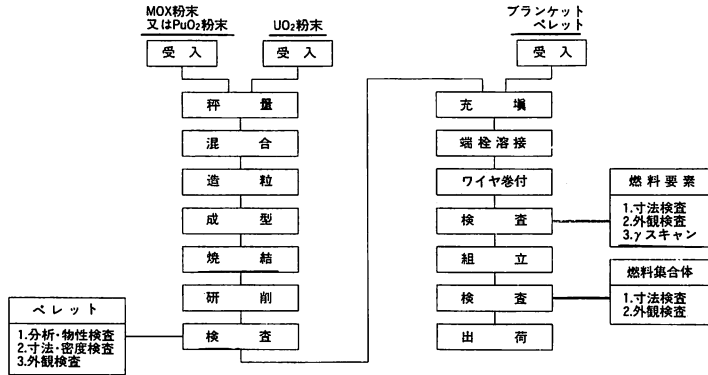


図-7 もんじゅ燃料製造工程フロー

に完成し、引き続き内装設備の据付け調整を実施し、総合試験運転を経て、昭和62年11月からウラン試験、昭和63年4月からプルトニウム試験を開始し、同年10月より本格操業を開始した。図-7に製造工程フローを示す。

一方、新型転換炉燃料製造棟（ATRライン）は、昭和61年10月に加工事業の許可を得て、昭和62年5月に建設に着手し、平成元年12月に建屋が竣工した。現在、内装設備製作に係わる諸準備を進めている。

3.3 MOX燃料製造実績

現在に至るまでのMOX燃料製造量は、平成3年7月末現在で累計109トンMOXである（図-8参照）。また、「常陽」および「ふげん」の使用済燃料から回収したプルトニウムを「常陽」、「ふげん」にリサイクルし、燃料サイクルの輪を閉じさせている。これらの燃料はいずれも健全で、優れた炉心特性を示し、燃料設計の妥当性や製造技術、品質管理、品質保証技術等の信頼性の高いことを示している。

なお、MOX燃料開発の一環として、軽水炉用MOX燃料（プルサーマル燃料）の開発も早くから行って

きており、昭和61年には、プルサーマル少数体試験（共同研究）用燃料集合体を2体製造し、敦賀1号炉へ装荷された。

3.4 今後のMOX燃料製造技術開発

我が国のMOX燃料製造技術の実用化、すなわち商業プラントにおけるMOX燃料の安定供給、安全性、経済性を確立するため、今後は次のような技術開発の展開が必要と考えられる。

現在まで開発された製造技術をベースとして、設備のコンパクト化・高速処理化、製造工程の合理化および保障措置技術等の高度化を図る一方、次のステップとして、工程の簡略化、設備・機器のモジュール化、自己診断を含めた保守技術の高度化および工程管理のAI化等の革新技術の開発を着実に進めることが重要である。

4. おわりに

以上、MOX燃料の燃料設計および燃料製造技術開発について概略を述べた。MOX燃料技術は25年以上の経験があるが、なお一層の経済性や信頼性を追求した高性能燃料の開発はもちろんのこと、原子炉および燃料サイクル全体を見通しての経済性・安全性の向上に向けた研究開発が必要であり、関係者各位の一層のご支援を切にお願いする次第である。

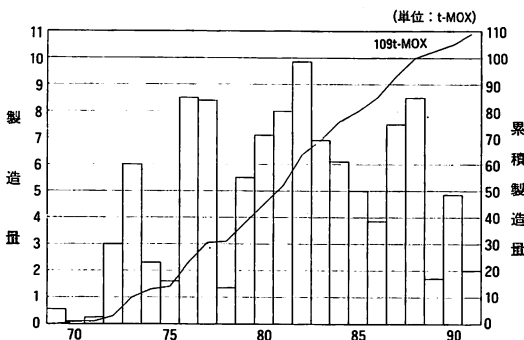


図-8 動燃におけるMOX燃料製造実績
(平成3年7月末現在)