

特集

原子燃料サイクルの新動向

軽水炉におけるMOX燃料の利用(プルサーマル)

Utilization of MOX Fuel on LWRs

後 藤 健*

Ken Goto

1. はじめに

原子力発電所の燃料は、天然ウラン中に約0.7%程度しか存在しない²³⁵Uを3~4%程度に濃縮し、燃料集合体に加工して使用している。このウラン燃料は、原子力発電所で使用された後、再処理工場に搬出され、燃料中に生成したプルトニウムなどが回収される。回収されたプルトニウムはウランと同様、核分裂によってエネルギーを取り出すことができるため、これをウランと混合して燃料集合体に加工し、従来の原子力発電所(軽水炉)で使用する計画としている。プルサーマルとは、このようにプルトニウムをウランと混合した燃料(MOX燃料)に加工し、サーマル・リアクター(熱中性子炉; 軽水炉も熱中性子炉の1つ)で利用することを指した和製英語である。本稿では、このプルサーマルの意義、国内外での実績およびその安全性について概説する。

2. プルサーマルの意義

ウラン資源も石油・石炭などと同様に有限であるが、前節で触れたように、原子力発電所で使用した使用済燃料を再処理し、プルトニウムや燃え残りのウランを回収・リサイクルすることにより、限られたウラン資源を有効に利用することが可能となる。再処理により回収されたウランとプルトニウムを利用して新たに燃料を加工した場合は、それらを利用しない場合と比べ、天然ウランを数割程度節約できる。

また、回収されるウランとプルトニウムを準国産エネルギーとして利用することにより、将来にわたりエネルギー供給の安定化に寄与できるため、原子燃料サイクルを確立することは重要であると考えている。

原子燃料サイクルについては、昭和31年、我が国に

おいて最初の『原子力開発利用長期計画』が策定され、その当時から将来的に国内で確立することとされていた。プルサーマルについても、昭和36年に改訂された原子力開発利用長期計画においてウランの代替利用として位置付けられるなど、原子力開発の初期の段階から検討が行われていた。

平成6年に改訂された最新の長期計画では、プルサーマルは「1990年代後半からPWRとBWRそれぞれ少数基において利用を開始し、2000年頃に10基程度、その後、2010年までには十数基程度の規模にまで計画的かつ弾力的に拡大することが適当」とされ、具体的な計画が示された。さらに平成9年2月には、「現時点で最も確実なプルトニウムの利用方法」として閣議了解が行われ、プルサーマルの位置付けが明確にされている。

このような動きの中、敦賀・美浜両発電所でのMOX燃料少数体実証計画や、海外でのMOX燃料利用の拡大により実績データが拡充されていった。これらを踏まえ、平成7年、原子力安全委員会において、1/3炉心程度までのMOX燃料装荷(炉心に装荷される燃料のうち、1/3程度をMOX燃料、残りの2/3程度をウラン燃料とすること)について、設計手法、判断基準の妥当性を確認した報告書が取りまとめられ、プルサーマルを安全に行うための条件が整うこととなった。

一方、わが国には商業規模の再処理工場が存在しないことから、海外(英・仏)に使用済燃料の再処理を委託してきた。その結果、平成9年12月末時点で約19トンのプルトニウム(全Pu)が海外再処理工場で回収されている。わが国は平和利用の観点から余剰のプルトニウムを持たないことを国際的に表明しており、「プルトニウムの保有量増加」に対して国際的な疑念が生じる恐れがあることから、プルサーマルを開始し、プルトニウムを着実に利用することが必要である。

* 関西電力(株)原子力・火力本部原子燃料技術課長
〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22

3. 国内外における実績

3.1 海外でのMOX燃料使用実績

海外ではMOX燃料を1960年代より軽水炉に装荷しており、表1に示すとおり1998年12月現在47基（PWR：36基，BWR：11基）で装荷した実績がある。1998年10月現在では32基（フランス17基，ドイツ10基，ベルギー2基，スイス3基）においてMOX燃料が利用されている^{1) 2)}。また，燃料集合体としては1996年12月現在で1600体以上の使用実績がある¹⁾。

燃焼度実績としては，燃料集合体平均で約58GWd/tまで報告されている³⁾。

3.2 海外でのPWR用MOX燃料の仕様

MOX燃料はウラン燃料の取替燃料の一部として装

表1 海外のMOX燃料利用実績^{1), 2)}

国名	プラント名	炉型	利用開始年
フランス	セナ	PWR	1974
	サンローランデゾーB1※	PWR	1987
	サンローランデゾーB2※	PWR	1988
	グランブリーヌB3※	PWR	1989
	グランブリーヌB4※	PWR	1989
	ダンビエール1※	PWR	1990
	ダンビエール2※	PWR	1993
	ルブレイエ2※	PWR	1994
	トリカスタン2※	PWR	1996
	トリカスタン3※	PWR	1996
	トリカスタン1※	PWR	1997
	トリカスタン4※	PWR	1997
	グランブリーヌB1※	PWR	1997
	ルブレイエ1※	PWR	1997
	ダンビエール3※	PWR	1998
	グランブリーヌB2※	PWR	1998
	ダンビエール4※	PWR	1998
	シノンB4※	PWR	1998
	ドイツ	カール	BWR
リンゲン		BWR	1970
オブリヒハイム※		PWR	1972
グンドレミンゲンA		BWR	1974
ネッカー1※		PWR	1982
ウンターペーザー※		PWR	1984
グラウフェンラインフェルト※		PWR	1985
フィリップスブルグ2※		PWR	1988
グロンデ※		PWR	1988
ブロックドルフ※		PWR	1988
グントレミンゲンC※		BWR	1995
グントレミンゲンB※		BWR	1996
イザール2※		PWR	1998
スイス	ベツナウ1※	PWR	1978
	ベツナウ2※	PWR	1984
	ゲスゲン※	PWR	1997
ベルギー	BR3	PWR	1963
	ドール3※	PWR	1995
	チアンジュ2※	PWR	1995
アメリカ	サクストン	PWR	1965
	ドレンスデン1	BWR	1967
	ビッグロックポイント	BWR	1968
	サンオノフレ1	PWR	1970
	クオドシチズ1	BWR	1974
	ギネー	PWR	1979
イタリア	ガリリアーノ	BWR	1968
	トリノ	PWR	1976
オランダ	ドーデバルト	BWR	1971
スウェーデン	オスカーシャム1	BWR	1974

※：現在，MOX燃料使用中（32基）

（平成10年12月末現在）

荷されることから，MOX燃料はウラン燃料と互換性を有し，かつ，炉心内での共存性を有することが必要である。このため，MOX燃料はウラン燃料と同一の構造としている。

MOX燃料がウラン燃料と異なる点は，燃料集合体内にプルトニウム富化度の異なる燃料棒を配置していることである。（ウラン燃料集合体では燃料棒のウラン濃縮度は一定である。なお，ガドリニア入り燃料ではガドリニア入り燃料棒のみウラン濃縮度が下げられている。）これは，MOX燃料がウラン燃料と隣接するとMOX燃料への熱中性子の流れ込みによりMOX燃料外周部で出力が大きくなる傾向があるが，それに対し燃料集合体内にプルトニウム富化度分布をもたせることにより燃料集合体内の出力を均一にするための設計である。その一例として，図-1にスイスのベツナウで使用されている14×14MOX燃料集合体のプルトニウム富化度分布を示す。これを見ると，中心部燃料棒・外周部燃料棒・コーナー部燃料棒の順で富化度が低くなっていることがわかる⁴⁾。

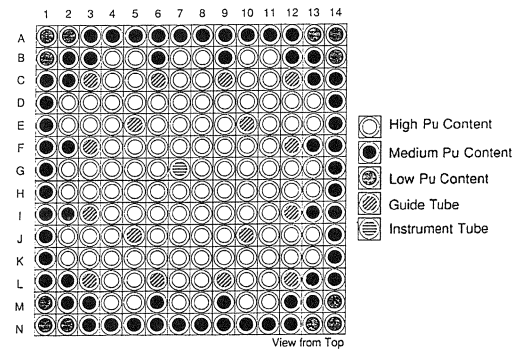


図-1 ベツナウにおけるMOX燃料集合体⁴⁾

3.3 海外でのMOX燃料の運用

現在，海外でプルサーマルが実施されている国々におけるMOX燃料の運用方法を見てみる。

フランスでは，MOX燃料の装荷規模が出力900MWeのPWRにおいて30%まで許されており，燃料集合体平均燃焼度は最高で47GWd/tの実績がある。なお，ウラン燃料は最高で50GWd/tの実績がある⁵⁾。

ベルギーでは1998年現在チアンジュ2号機とドール3号機にてMOX燃料が使用されているが，現在MOX燃料の装荷規模は20%まで許されている。また，燃焼度については45GWd/tまで認められている⁵⁾。

スイスではベツナウ1・2号機およびゲスゲンにおいてMOX燃料が使用されている。ベツナウにおいて

表2 MOX燃料の破損実績

プラント (国名)	タイプ	時期	燃焼度 (GWd/t)	原因	出典
BR 3 (ベルギー)	PWR	1972年	30	端栓の溶接不良 (1本)	[7]
		1980年	35	過大クラッド付着による局所腐食 (6本)	
ベツナウ (スイス)	PWR	1990年	15	異物 (1体中, 2本)	
ドーデバルト (オランダ)	BWR	1973年	10	被覆管水素化 (1本)	[8]
不明 (ドイツ)	-	-	7~14	異物 (2体中, 2本)	
			15~29	異物 (1本中, 1本)	
			22~37	異物 (1体中, 1本)	
ダンピエール (フランス)	PWR	1993年	1 サイクル目	異物と推定 (1体) ; 再使用された	[9]
トリカスタン (フランス)	PWR	1997年	(不明)	不明 (1体)	[10]

は40%のMOX燃料装荷が認められており、燃料集合体平均燃焼度は45GWd/tに達しつつあると報告されている⁴⁾。

3.4 リーク実績

これまでに報告されているMOX燃料のリーク実績をまとめたものが表2である。

これを見ると、リークの原因としては異物によるものが多く、その他に端栓の溶接不良、被覆管の水素化、および過大クラッド付着による局所腐食であったことがわかる。しかし、これらのリークについては、ウラン燃料でも同様の原因によるリークが発生していることから、MOX燃料特有のものではないと言える。なお、これらウラン燃料・MOX燃料に共通するリークについては異物管理の徹底や燃料の設計仕様・製造技術の改良などにより、解決が図られてきている。

3.5 敦賀1号機・美浜1号機におけるMOX少数燃料体実証計画¹⁾

国内におけるMOX燃料の照射実績としては、少数体実証計画として行われた敦賀1号機・美浜1号機の実績がある。この少数体実証計画は、海外での照射実績をもとに、国内において設計から運転までを実証することを目的としていた。また、照射後試験(PIE)を実施し、MOX燃料の照射挙動についても調査された。

敦賀1号機(BWR)に装荷されたMOX燃料は、UO₂燃料棒を日本ニュークリア・フューエル(株)(JNF)で、MOX燃料棒を動力炉・核燃料開発事業団(動燃、現・核燃料サイクル開発機構)でそれぞれ製造され、動燃にて集合体に組み立てられた。照射実績としては、MOX燃料2体を1986年から1990年までの3サイクル照射している。燃料集合体平均燃焼度は約26GWd/tであった。

また、美浜1号機(PWR)に装荷されたMOX燃料は、MOX燃料棒をウェスティングハウス社(WH社)と動燃にて製造し、WH社にて集合体に組み立てられ

表3 少数体実証計画におけるPIE項目¹⁾

敦賀1号機

非破壊試験	破壊試験
集合体表面熱中性子測定	バンクチャー試験
集合体表面γ線測定	被覆管金相試験
外観観察	被覆管内外面観察
ECT欠陥探傷試験	ペレット金相試験
伸び測定	ペレット径方向SXMA
外径測定	(EPMA)分析-Pu, Xe-
外面酸化膜厚さ測定	ペレット径方向燃焼度分布
軸方向γ線強度分布測定	ペレット密度測定
プレナムスペクトロメトリ	ペレット融点測定
	ペレット熱伝導度測定
	ペレットO/M比測定
	ペレット燃焼度分布

美浜1号機

非破壊試験	破壊試験
外観観察	バンクチャー試験
燃料棒寸法測定	金相試験
渦電流欠陥探傷試験	αオートラジオグラフィ
軸方向γ線強度分布測定	マイクロαスキャン
X線透過試験	ペレット密度測定
	被覆管内面観察
	被覆管引張試験
	被覆管水素分析
	ペレット燃焼度分布
	被覆管 ⁵⁴ Mn分析

た。照射実績としては、MOX燃料4体を1988年から1991年までの3サイクル照射している。燃料集合体平均燃焼度は約23GWd/tであった。

照射後これらのMOX燃料に実施されたPIE項目は表3に示すとおりであり、その結果MOX燃料は健全に照射されたことが確認されている。また、MOX燃料棒の照射挙動についても、ウラン燃料棒と概ね同等であり、特異な結果は見られなかった。

4. MOX燃料の本格利用

4.1 全電力のプルサーマル計画

国内におけるプルサーマル計画としては、原子力開発利用長期計画に沿って表4に示すとおり各電力において計画されている。

現在、先頭を切って準備が進められているのが、関西電力(株)高浜3・4号機および東京電力(株)福島第一3号機・柏崎刈羽3号機である。

高浜3・4号機(PWR)におけるMOX燃料導入

表4 我が国の軽水炉におけるプルサーマル計画
[電気事業連合会公表(1997.2.21)]

	2000年まで	2000年初頭	2010年まで
東京電力	1999年 1基 2000年 1基(2基)	1基(3基)	0~1基(3~4基)
関西電力	1999年 1基 2000年 1基(2基)	(2基)	1~2基(3~4基)
中部電力		1基(1基)	(1基)
九州電力		1基(1基)	(1基)
日本原子力発電		2基(2基)	(2基)
その他電力5社			各1基(各1基)
電源開発			1基(1基)*
計	4基(4基)	5基(9基)	7~9基(16~18基)

()内は累計基数

*電源開発(株)の大間原子力(2006年運転開始予定)は、従来からプルサーマルを行う計画

の進捗状況は、1998年5月11日にMOX燃料使用に係る「原子炉の設置変更許可」を通商産業省に申請し、同年12月16日に許可を得ており、高浜4号機については現在1999年中の導入に向け、また高浜3号機については2000年を目前に準備中である。また、福島第一3号機(BWR)は1998年11月4日に、柏崎刈羽3号機(BWR)は1999年4月1日にそれぞれMOX燃料使用に係る「原子炉の設置変更許可」を通商産業省に申請し現在審査中である。

その後2000年初頭に5基(累計9基)、さらに2010年までに7~9基(累計16~18基)が計画され、原子力発電を用いている全電力においてプルサーマルが実施される予定である。

4.2 MOX燃料の加工

現在、軽水炉用のMOX燃料を加工する工場が国内には存在しないため、海外のMOX燃料加工工場で加工することとしている。操業を行っているプラントとしては、メロックス工場(仏:コジェマ)、カダラッシュ工場(仏:コジェマ)、デッセル工場(ベルギー:ベルゴニュークリア)、MDF工場(英:BNFL)がある。これらのMOX燃料加工工場では、プルトニウムを取り扱う観点から、グローブボックスや遮へい体を用いられていること、また可能な限り自動化・遠隔化が図られていることが特徴的である。

MOX燃料の加工工程では、UO₂粉末とPuO₂粉末を混合し、MOXペレットを製造する。この混合が不十分だとプルトニウムスポット(プルトニウムの固まり)がペレット内にでき、その部分の出力が他の部分に比べ高くなる現象が生じてしまうため、より均一に混合できるような手法が開発されている。現在、主流となっている手法には、メロックス工場などで採用されているボールミルを用いて2段階混合を行うMIMAS法と、BNFLで採用されているアトリターミルを

用いたSBR法がある。その他の加工工程は基本的にウラン燃料のものと同じであり、ペレットの成型、焼結、研削によりペレットを製造し、燃料被覆管・端栓などと合わせ燃料棒を作り、その後、支持格子、上下部ノズルなどを合わせて燃料集合体を組み立てている。

4.3 本格PWR用MOX燃料仕様

現在装荷が予定されている高浜3・4号機用のMOX燃料の概略を図-2に、ウラン燃料との仕様の比較を表5にそれぞれ示す。

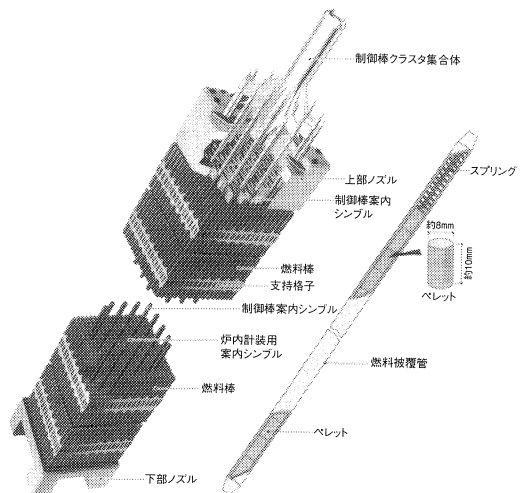


図-2 MOX燃料集合体概略図

表5 ウラン燃料とMOX燃料の仕様比較

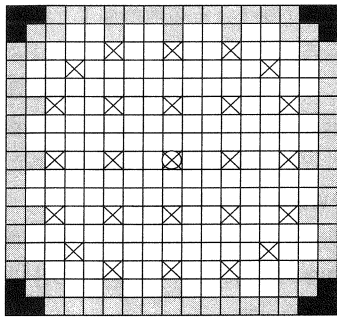
	ウラン燃料	MOX燃料	
燃料集合体	配列	17×17	同左
	全長	約4.1m	同左
	燃料棒数	264本	同左
	²³⁵ U濃縮度	約4.1wt%	約0.2~0.4wt%
	平均核分裂Pu富化度	—	約6.1wt% 高: 7.2wt% 中: 4.2wt% 低: 3.1wt%
燃料棒	核分裂Pu重量	—	約28kg/体
	最高燃焼度	48,000Mwd/t	45,000Mwd/t
燃料棒	ペレット材	UO ₂	UO ₂ -PuO ₂
	ペレット材直径	約8.1~8.2mm	同左
	被覆管外径	約9.5mm	同左
	被覆管厚さ	約0.6mm	同左
被覆管材料	ジルカロイ-4	同左	

(注) Pu 富化度の値は、代表例を示したものの

$$\text{核分裂Pu 富化度} = \frac{^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}}{\text{全Pu} + \text{全U}}$$

MOX燃料の構造は海外におけるPWR用MOX燃料の場合と同様に、ウラン燃料と同一の構造をしている。MOX燃料集合体内のプルトニウム富化度分布についても海外と同様、図-3に示すとおり燃料集合体中心部から周辺部へ高・中・低と3段階になっている。

また、MOX燃料における燃料集合体平均燃焼度制



- ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料棒 (高Pu富化度棒)
- ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料棒 (中Pu富化度棒)
- ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料棒 (低Pu富化度棒)
- ⊗ 制御棒案内シンプル
- ⊗ 炉内計装用案内シンプル

図-3 燃料集合体内の燃料棒配置について

限値は45GWd/tであり、現在主流であるウラン燃料の制限値48GWd/tに対し若干低くなっている。これは、MOX燃料・ウラン燃料ともに燃料棒平均燃焼度制限値を53GWd/tとしており、この値を逸脱しないように燃料集合体平均燃焼度制限値を定めた結果、燃料棒燃焼度のばらつきの大いMOX燃料が若干低くなったものである。

プルトニウム富化度については、ウラン燃料相当の反応度を有するよう設定される。ただし、ウラン燃料とは異なり、²⁴¹Puは半減期約14年でβ崩壊し²⁴¹Amに変換するため、MOX燃料を保管しておくこと核分裂性

プルトニウムの割合が減少する。このことから、使用時期を考慮してプルトニウム富化度を設定する必要がある。なお、MOX燃料のプルトニウム富化度は、燃料集合体平均で11%以下、ペレット最大で13%以下(核分裂性プルトニウム富化度で8%以下)に制限されている。

5. MOX燃料の安全性について

5.1 プルトニウムの照射挙動への影響

プルトニウムはウランと同様に核分裂を行いエネルギーを放出するが、ウランと比較すると核特性の点で次のような特徴がある。(図-4)

- 熱中性子に対する吸収断面積がウランより大きく、中性子スペクトルは硬い。(図-5、図-6)
 - 中性子共鳴吸収がウランより大きい。(図-5)
 - 遅発中性子割合が小さい。(²³⁹Pu : 約0.2%, ²⁴¹Pu : 約0.5%, ²³⁵U : 約0.7%)
 - 核分裂性プルトニウムの熱中性子に対する核分裂断面積が大きい。(²³⁹Pu : 約740barn, ²⁴¹Pu : 約1070 barn, ²³⁵U : 約580barn) (図-5)
- こうしたプルトニウムの特徴により、MOX燃料をPWRで使用する場合、以下のような影響がある。
- 制御棒価値・ほう素価値が低下する。
 - 減速材温度係数がより負となる。
 - ドップラ係数がより負となる。
 - 即発中性子寿命が短くなる。
 - 遅発中性子割合が小さくなる。
 - MOX燃料集合体内の周辺部出力が高くなる。

これらの影響に対し安全性を確保するため、MOX

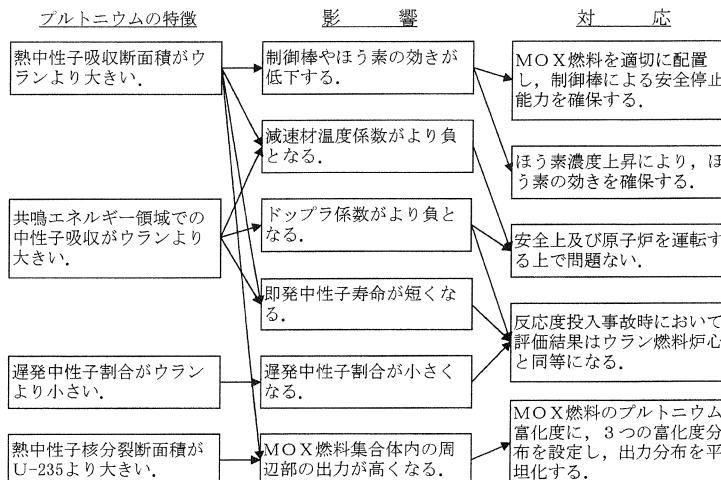


図-4 MOX燃料の核特性上の影響

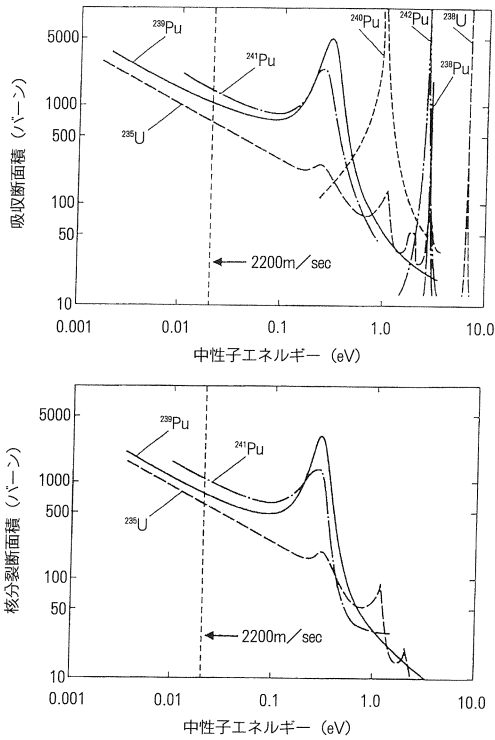


図-5 プルトニウム・ウランの中性子断面積^(2), 13)

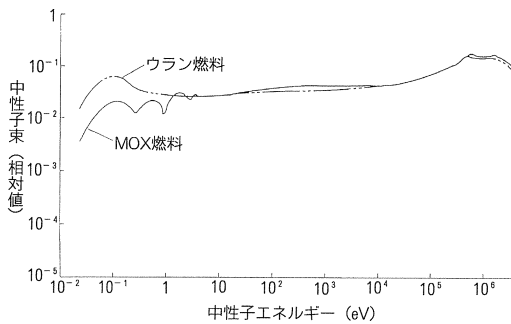


図-6 中性子スペクトルの比較⁽¹⁴⁾

燃料の装荷位置を適切に配置し制御棒値を十分確保するとともに、ほう素濃度を高めたり、MOX燃料集合体内にプルトニウム富化度分布を持たせるなどしている。

一方、物性・照射挙動の点でMOX燃料はウラン燃料と比べ次のような特徴がある。(図-7)

- FP(核分裂生成物)ガスの放出量が若干高くなる。(プルトニウムスポットの影響)
- プルトニウムの含有率が大きくなると、熱伝導率が低下する。
- プルトニウムの含有率が大きくなると、融点が低下する。

これらの特徴により、MOX燃料では以下のような影響がある。

- 燃料棒内圧が上昇する。
- ペレットの融点が低下する。
- ペレットの温度が上昇する。

こうした影響に対し、燃料棒初期ヘリウム加圧量を低減するなど燃料設計に反映させ、また事故時安全解析において融点の低下を考慮した上で、燃料最高温度が融点に対し十分余裕があることを確認するなど安全評価においても考慮している。

5.2 PWRにおける制御棒の制御能力および自己制御性への影響

制御棒はほう酸水と共にPWRの制御に用いられている。MOX燃料を用いた場合、ウラン燃料のみの場合と比べ、プルトニウムの熱中性子吸収断面積が大きい分、制御棒が制御(吸収)できる熱中性子量が減少するため制御棒値が低下するが、この低下量は小さく原子炉の制御に影響を及ぼすことはない。

原子炉の自己制御性とは原子炉の温度が上昇(低下)すれば自ら出力を下げる(上げる)ように働くことで

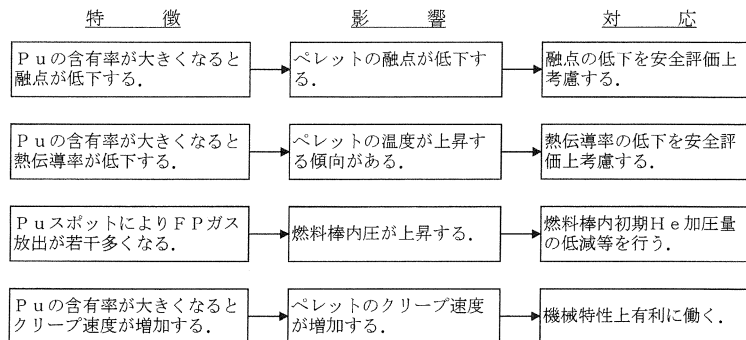


図-7 MOX燃料の物性・照射挙動による影響

あるが、MOX燃料を用いた場合プルトニウムの共鳴吸収が大きく中性子スペクトルが硬いことから、ウラン燃料のみの炉心と比べ自己制御性は強くなる。

この特徴により、原子炉の温度が上昇する多くの想定事故に対してはウラン燃料のみの炉心と比べてより有利になる。一方、原子炉の温度が低下する事象では、原子炉出力の上がり方が大きくなるため、ウラン燃料のみの炉心と比べて不利となるが、制御棒やほう酸水の効果により、原子炉は十分制御可能であり、安全に停止できるよう設計されている。

5.3 PWRにおけるMOX燃料の運用方法

MOX燃料の炉心装荷規模については、原子力安全委員会において1/3炉心程度まで設計手法、判断基準の妥当性が確認されているが、高浜3・4号機では現在のところ最大40体（約1/4炉心相当）のMOX燃料装荷を予定している。典型的な1/4 MOX燃料炉心への移行過程では、移行炉心1サイクル目に8体、2サイクル目に16体（合計24体）、3サイクル目に16体（合計40体）を装荷する。

5.4 MOX燃料の輸送

MOX燃料の輸送については、国内法をはじめ、日米原子力協定上関連する規定や核物質防護条約、IAEA輸送規則などにに基づき、万全の安全対策・核物質防護対策を講じている。

海外で製造したMOX燃料を国内の発電所まで海上輸送する場合に使用される輸送船は、二重船殻構造・十分な消火設備・衝突防止レーダーなどを備えており、使用済燃料輸送船と同等の安全性を有している。

また、MOX燃料を収納した輸送容器はBM型輸送容器に区分され、輸送容器の安全性については、IAEAの輸送規則で定められている輸送容器の安全基準を十分に満足しており、通常輸送時はもとより、万一過酷な事故に巻き込まれることを想定した条件下においても十分健全性が保たれるよう設計されている。

さらに、MOX燃料はプルトニウムを含んでいるため、ウラン燃料とは異なり、新燃料であっても線量が高く、輸送時に十分な遮へい性能を確保する必要がある。この遮へい性能確保の一環として、輸送容器の周囲に水素やほう素を含むレジンを注入し線量の低減を図り、安全上問題のない線量としている。

6. まとめ

プルトニウムの利用は原子力開発初期から検討されてきており、エネルギー資源の有効利用、廃棄物の適

切な処理・処分の観点から、プルトニウムの利用は大変有効な手段である。さらに、余剰プルトニウムを持たないという観点からも、プルトニウムをMOX燃料として軽水炉で使用していくことは重要である。

なお、MOX燃料はウラン燃料と性能上ほぼ同等と考えられるため、軽水炉で使用する上で特に問題となるようなことはないが、利用に当たっては安全性を十分確保した上で実施することとしている。

参考文献

- 1) 総合エネルギー調査会原子力部会中間報告書
- 2) 日本原子力産業会議、原産マンスリー3/4月号第40号(1999)
- 3) P. DERAMAIX, et al., "MIMAS FUEL PERFORMANCE IN COMMERCIAL REACTORS", INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON LIGHT WATER REACTOR PERFORMANCE/ANS-ENS, APRIL (1991)
- 4) R. Stratton & H. Bay, "Experience in the use of MOX Fuel in the Beznau Plants of NOK" The Nuclear Engineer, Vol.37, No.6
- 5) J. L. PROVOST, "PLUTONIUM RECYCLING AND USE OF MOX FUEL IN PWR EDF OPERATING EXPERIENCE" Workshop on the physics and fuel performance of reactor-based plutonium disposition OECD PARIS 28-30 september, 1998
- 6) A. Charlier, J. Van Vyve, "MOX FUEL UTILIZATION IN BELGIAN NPPs", Proceedings of the American Nuclear Society Topical Meeting Advances in Nuclear Fuel Management II
- 7) P. DERAMAIX et al., "IN-PILE PERFORMANCE OF MIXED-OXIDE FUEL WITH PARTICULAR EMPHASIS ON MIMAS FUEL" NUCLEAR TECHNOLOGY VOL.102 APR. 1993
- 8) F. U. SCHLEMMER et al., "STATUS OF IRRADIATION EXPERIENCE WITH RECYCLED FUEL MATERIALS IN THE FRG FOR SIEMENS/KWU TYPE FUEL ASSEMBLIES IAEA Cadarache 1989
- 9) P. Blanpain et al., "Recent results from the in Reactor MOX fuel performance and improvement program", 1997 ANS Topical Meeting, Portland.
- 10) Nuclear Fuel Vol.22 No.16-August 11, 1997
- 11) 市川ほか, "我が国におけるMOX燃料の照射実証および照射後試験", 日本原子力学会誌Vol.39, No.2, p.93~111, 1997
- 12) 原子力安全研究協会, 「軽水炉燃料のふるまい」, 平成2年7月
- 13) T. Nakagawa, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Technol., 32, 1259 (1995)
- 14) 三菱重工業, 「三菱PWRの新核設計手法と信頼性」, MA PI-1087改3, 平成10年4月