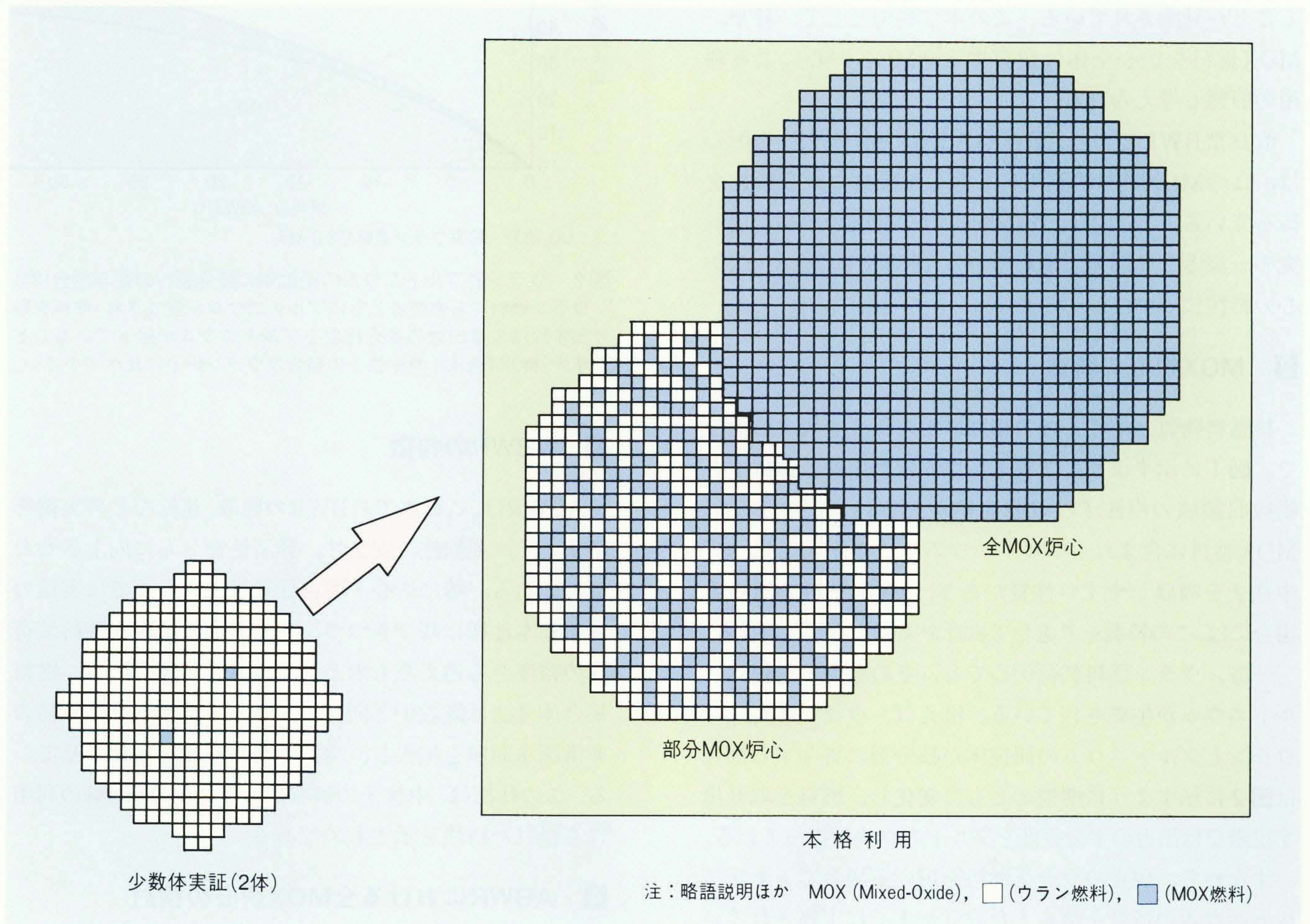


ABWRにおける全MOX炉心の開発

Development of Full MOX Core in ABWR

青山肇男* Motoo Aoyama 別所泰典** Yasunori Bessho
井筒定幸** Sadayuki Izutsu 内川貞夫* Sadao Uchikawa



BWRでのMOX燃料利用計画

日立製作所はMOX燃料の利用に関して長年にわたり研究開発を重ねてきており、少数体での実証を踏まえ本格利用へと開発を進めている。

原子力の研究、開発および利用に関する長期計画(1994年6月)では、使用済燃料を再処理して取り出すプルトニウム(Pu)を混合酸化物燃料(以下、MOX燃料と言う。)に加工し、軽水炉で利用する計画が示されている。この計画では、1990年代後半からBWR(Boiling Water Reactor：沸騰水型原子炉)とPWR(Pressurized Water Reactor：加圧水型原子炉)の少数基で利用を開始し、2000年ごろに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ている。一方、欧州ではすでに相当量のMOX燃料の利用実績があり、国内でもMOX燃料の少数体実証計画が実施され、燃料の設計、運転などでわが国独自の経験を蓄積している。日立製作所は、これらの経験に加えて、新型転換炉(ATR：Advanced Thermal Reactor)での豊富なMOX燃料利用実績の知見も反映して、BWRでのMOX燃料の本格利用に向けた研究開発に積極的に取り組んでいる。

* 日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士 ** 日立製作所 日立工場 工学博士

1 はじめに

わが国では、軽水炉でのMOX燃料利用について、1980年代から実施されたMOX燃料の少数体実証の実績を踏まえて、既設炉で取替燃料の一部として本格的に利用することが計画されている。この本格利用として、将来、MOX燃料を炉心全体に装荷する全MOX炉心による利用の形態も考えられる。

改良型BWRであるABWR(Advanced BWR)の炉心は、このMOX燃料の利用にも適した優れた炉心特性を持っている。ここでは、日立製作所がMOXの本格利用研究の一環として開発を進めているABWRでの全MOX炉心の特性について述べる。

2 MOX炉心の特徴

核燃料物質と中性子との相互作用の程度を表す断面積で、図1に示すようにプルトニウムは熱中性子領域や共鳴吸収領域の中性子吸収断面積が大きい。このようにMOX燃料に含まれるプルトニウムは、ウランと比べて中性子を吸収しやすい性質があり、MOX燃料を用いる場合には、この特徴を考慮して設計を実施することになる。

一方、ウラン燃料装荷炉心でも、その燃焼の過程でプルトニウムが生成されている。例えば、ウラン燃料でのウランとプルトニウムの同位体が核分裂に寄与する割合は図2に示すように燃焼とともに変化し、燃料を取り出す段階では出力の半分程度をプルトニウムが担っている。

すなわち、現在のウラン燃料を用いる場合でも上記プルトニウムの特徴を踏まえた設計がすでに実施されているところである。

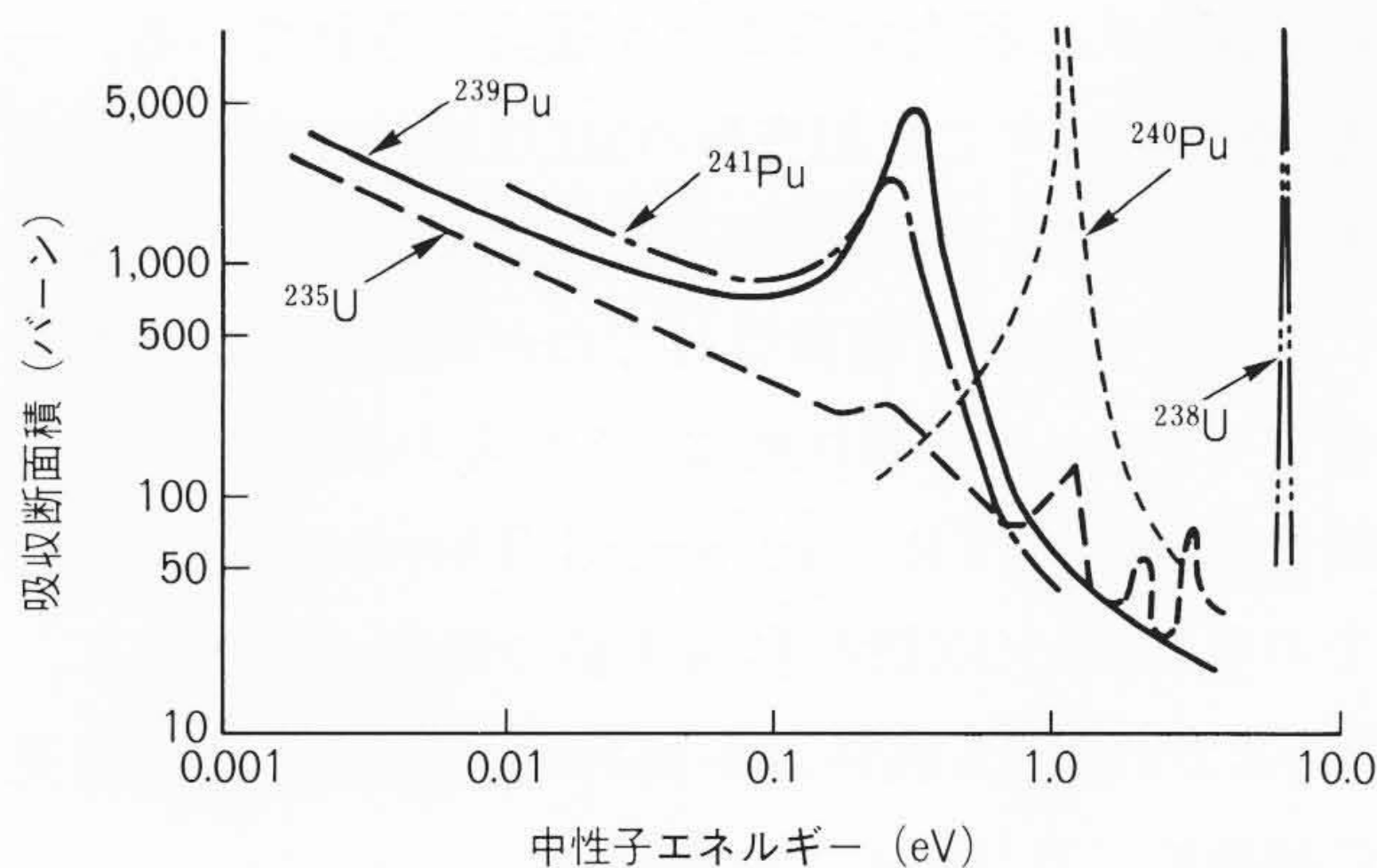
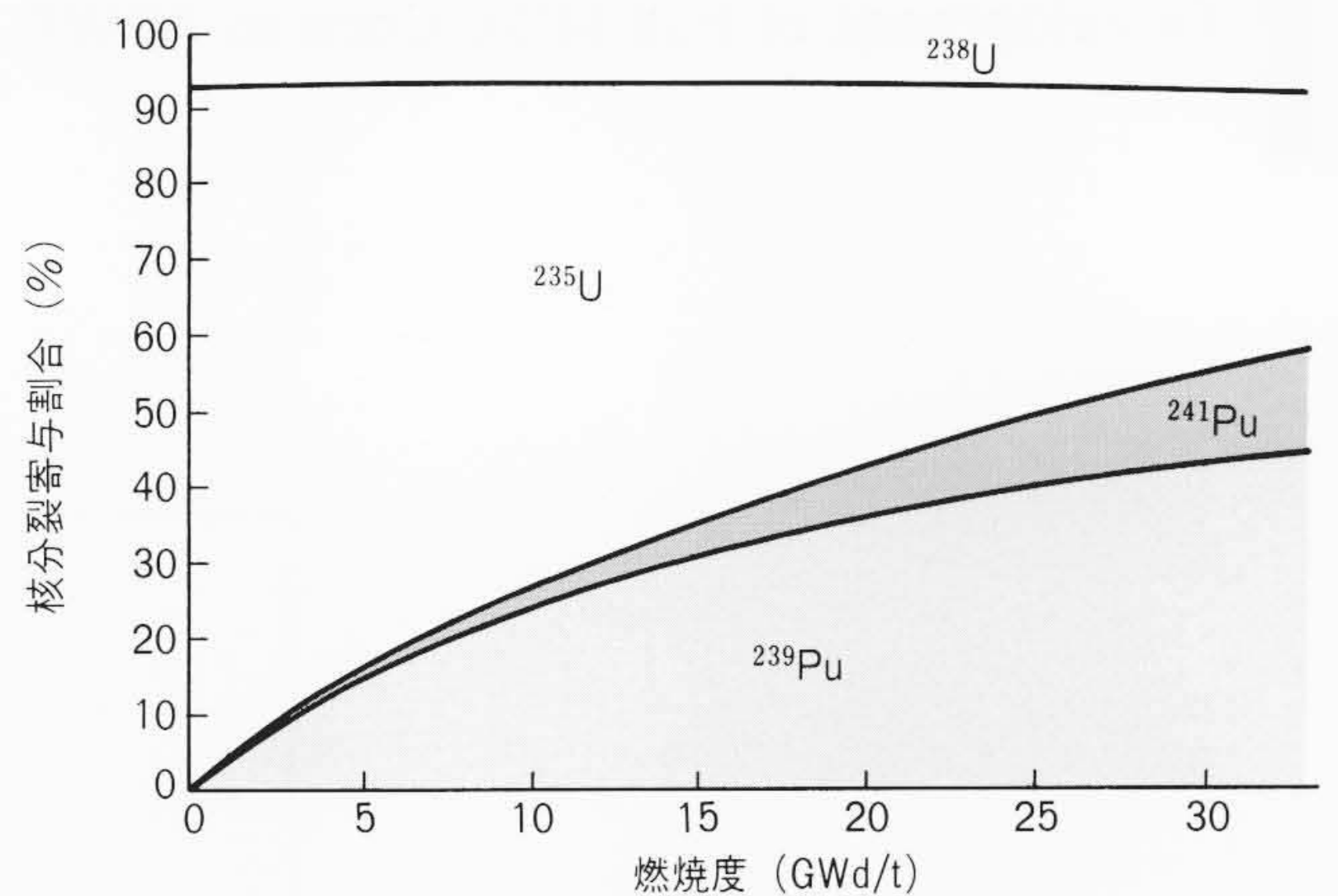


図1 中性子吸収断面積の比較

プルトニウム核種の中性子吸収(熱、共鳴領域)は、ウラン核種より大きいことを示す。



注: UO_2 燃料, 初期ウラン濃縮度3.0 wt%

図2 ウランとプルトニウムの同位体の核分裂への寄与割合(例)

ウラン燃料でも燃焼とともにプルトニウムが生成され、燃料を取り出す段階では出力の半分程度をプルトニウムが担っていることを示す。MOX炉心は、熱中性子の割合がウラン炉心に比べて小さい。

3 ABWRの特徴

ABWRは、これまでのBWRの建設、運転などの実績を踏まえて、運転性、安全性、経済性をさらに向上させたものである。特に炉心・燃料仕様は、これまでに実績のある基本仕様に基づきつつ、将来の高燃焼度化燃料装荷への裕度をも備えたものとしている。具体的には、燃料集合体寸法は既設炉と同一で、チャンネルボックス外部の非沸騰水領域を拡大し、水対燃料体積比を増加させている。この仕様は、中性子の吸収が大きいMOX燃料の利用にも優れた特性を示すものである。

4 ABWRにおける全MOX炉心の検討

先行実績のある技術を用い、下記の条件を設定している。

- (1) 1,350 MWe級のABWRプラントをベースとする。
- (2) MOX燃料は、現在計画されている部分MOX炉心と同様のステップⅡ燃料(高燃焼度化ウラン燃料)の構造設計仕様を用い、取出平均燃焼度は約33 GWd/tとする。燃料形状を図3に示す。
- (3) MOX燃料の母材は劣化ウランとし、集合体当たりのプルトニウム装荷量が多くなるようにする。

炉心燃料基本仕様および主要な炉心特性をまとめたものを表1に示す。

4.1 平衡炉心特性

- (1) 炉心燃料の設計概念

全MOX炉心燃料の設計の考え方は、現行のウラン炉心燃料と基本的に同一とした。ただし、燃料集合体内のMOX燃料棒装荷割合をできるだけ大きくすることや、

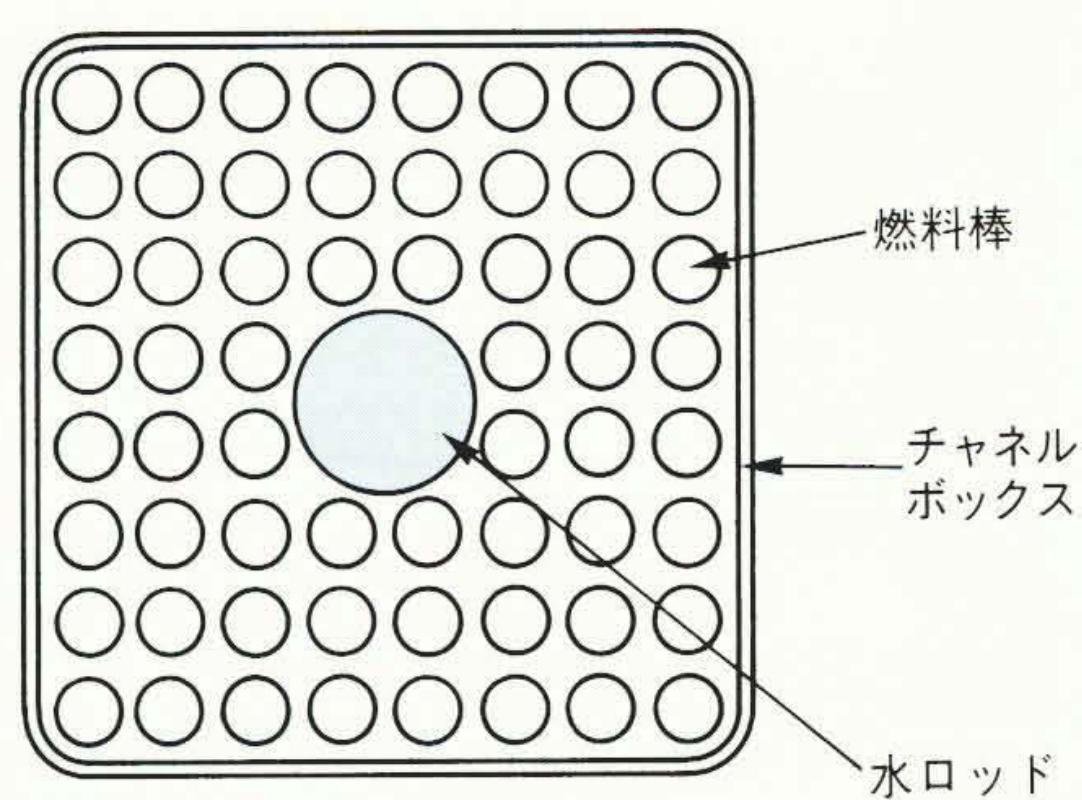


図3 MOX燃料集合体の形状
集合体の中央部に太径の水ロッドが設置されているステップⅡ燃料の断面形状を示す。

成型加工の簡素化に配慮し、すべてのMOX燃料棒の軸方向富化度は一様とした。その結果、燃料集合体平均の核分裂性Pu(Puf)富化度は約2.9 wt%で、燃料集合体を構成する60本の燃料棒の約8割をMOX燃料棒としている。燃料集合体内出力分布は、ウラン燃料棒を用いずにMOX燃料棒の富化度差で平坦化している。

(2) 炉心特性

上記MOX燃料集合体を全数装荷した運転サイクル長さ13か月の平衡炉心を構成した。各サイクルで交換する燃料は全炉心の約 $\frac{1}{3}$ (約3バッチ)で、そのときの核分裂性Pu装荷量は約1.4 tとなる。これは、年間当たりの使用量に換算すると、約1.1 tに相当する。

表1 MOX炉心燃料基本仕様および炉心特性のまとめ
先行実績のある技術を用いて設定した炉心と燃料の基本仕様、および得られた炉心特性の結果を示す。

(1)炉心基本仕様		
電気出力	1,350 MWe	
原子炉熱出力	3,926 MWt	
炉心格子ピッチ	30.99 cm(12.2インチ)	
燃料集合体数	872体	
制御棒本数	205本	
制御棒駆動機構	FMCRD(高速スクラム)	
(2)燃料基本仕様		
燃料棒配列	8×8	
燃料棒本数	60本	
ウォータロッド本数	1本(太径)	
平均取出燃焼度	約33 GWd/t	
平均Puf富化度	約2.9 wt%	
(3)炉心特性(13か月サイクル長)		
	平衡炉心	初装荷・移行炉心
Puf装荷量(サイクル当たりt)	約1.4	約1.3～1.6
最大線出力密度(kW/m)	約41以下	同左
最小限界出力比	約1.5以上	同左
炉停止余裕(%Δk)	約2.4以上	同左
最小限界出力比の運転制限値	約1.3	同左
安定性減幅比	約0.7以下	同左

一様分散方式による燃料装荷パターン、制御セルによる制御棒パターンを用いるなど、運転計画についてもウラン炉心と同様の方針で設計を実施し、以下の結果を得た。

最大線出力密度の燃焼変化を図4に、最小限界出力比(MCPR)の燃焼変化を図5に、炉停止余裕の燃焼変化を図6にそれぞれ示す。熱的余裕については、最大線出力密度の運転制限値(44 kW/m以下)、最小限界出力比の運転制限値をいずれも満足している。また、炉停止余裕も設計条件(1%Δk以上)を満足している。

4.2 初装荷・移行炉心特性

(1) 炉心燃料の設計概念

初装荷炉心の設計の考え方は、ウラン炉心で実用化されている高経済性初装荷炉心と同様とした。すなわち、平衡サイクルを模擬した複数の濃縮度の燃料集合体を組み合わせた炉心である。初装荷炉心へはMOX燃料集合体を約30%装荷するものとし、他の約70%のウラン燃料集合体はステップⅡ燃料炉心相当の濃縮度3種類の燃料集合体で構成している。全MOX炉心への移行にあたっては、できるだけ早く全MOX炉心を構成することを念頭において検討した。初装荷炉心および移行炉心に装荷されるMOX燃料集合体の仕様は、平衡炉心に装荷するものと同じとした。

(2) 炉心特性

運転サイクル長さを13か月とし、上記初装荷炉心(第1サイクル)から第3サイクルまでの炉心特性を評価した。各サイクルでの取替燃料は全炉心の約 $\frac{1}{3}$ で、第3サイクルで全装荷燃料がMOX燃料の炉心となる。この結果、初装荷炉心および燃料交換当たりの核分裂性Puの装荷量は、約1.3~1.6 tである。

各サイクルの熱的余裕および炉停止余裕は、いずれも設計条件を満足している。

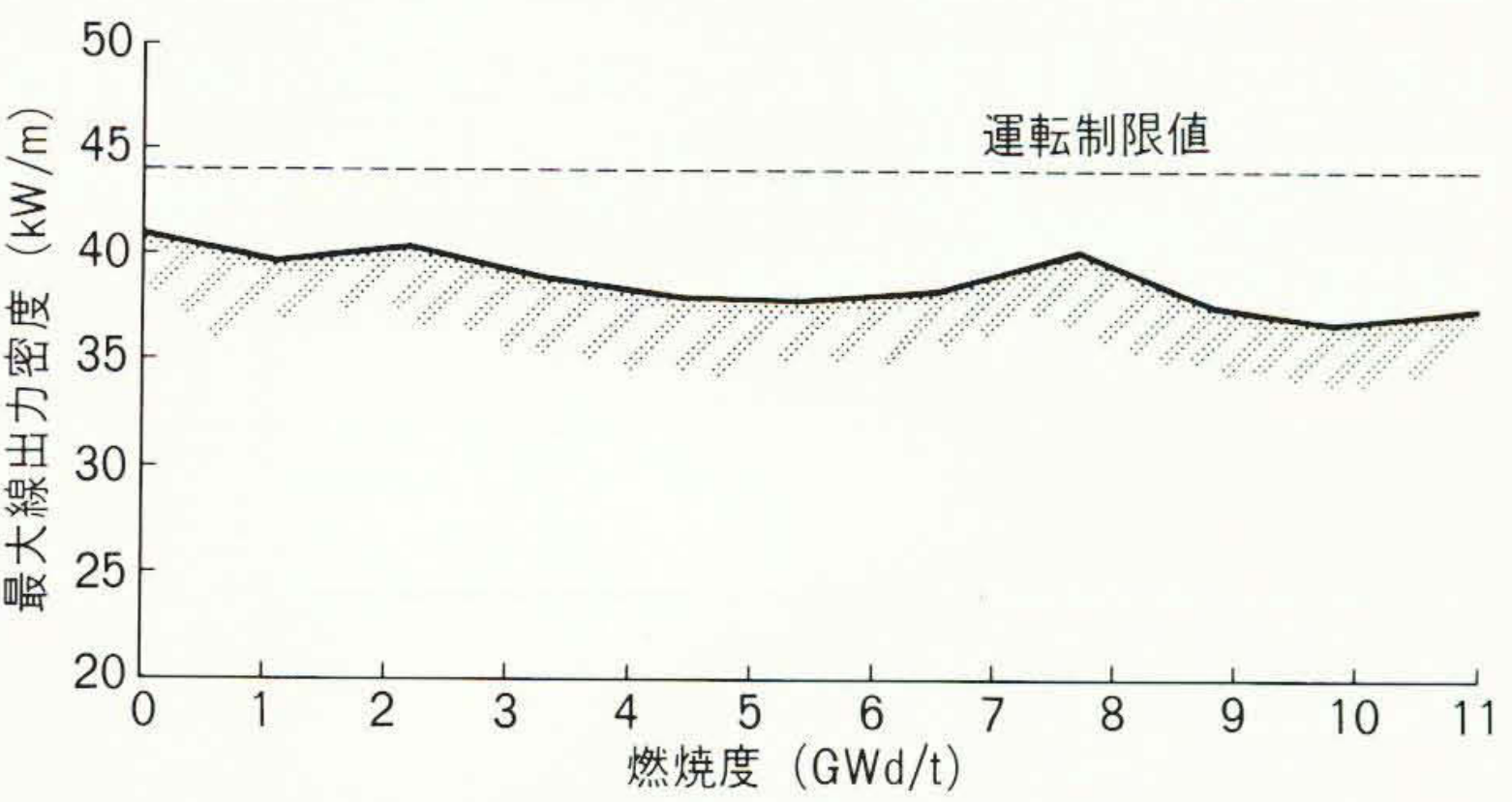


図4 最大線出力密度の燃焼変化
全MOX炉心平衡サイクルを通して、最大線出力密度は運転制限値を満足している。

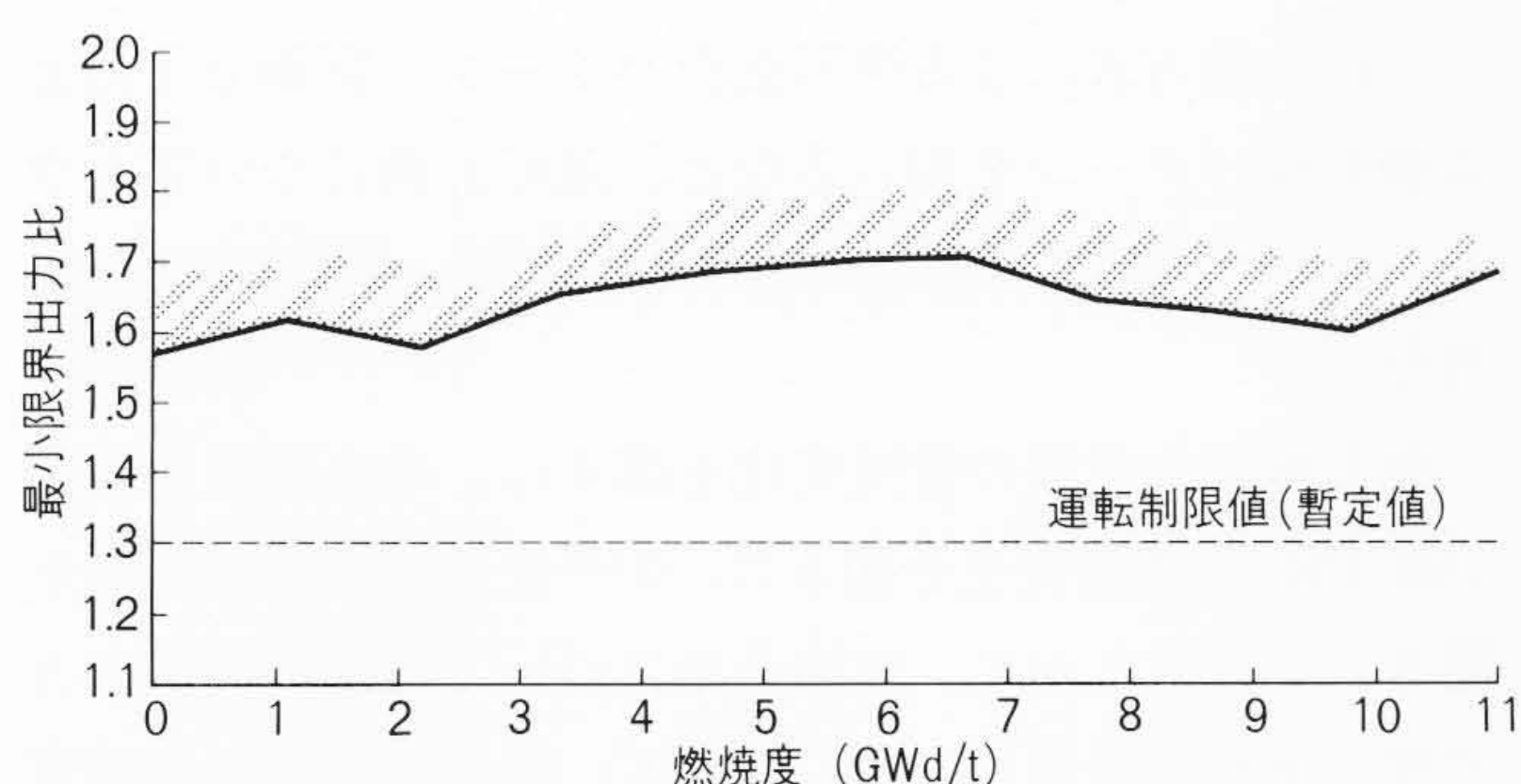


図5 最小限界出力比の燃焼変化

全MOX炉心平衡サイクルを通して、最小限界出力比は運転制限値を満足している。

4.3 その他の特性

部分的にMOX燃料が装荷された初装荷および移行炉心の特性は、ウラン炉心と全MOX平衡炉心の中間的な特性となる。したがって、ここでは安全特性や安定性について、全MOX平衡炉心での評価結果を示す。

全MOX炉心での最小限界出力比の運転制限値は、次の事象によって決定される。すなわち、何らかの原因で発電機負荷がなくなってタービンの蒸気加減弁が閉止した際に、タービンバイパス弁が作動しないことを想定する事象である。このとき、運転制限下限値は図5に示すように1.3程度になるが、運転特性値はこれを十分に上回っており熱的余裕は確保される。また、安定性については、全MOX炉心の安定性減幅比が表1に示すように約0.7以下であり、安定である。

ホウ酸水注入系の反応度については、現行ABWRの設備容量で未臨界性基準を満足している。また、将来のMOX燃料の高燃焼度化等、炉心性能の高度化に際しては、中性子吸収材容量の拡大などによって能力を増強することができる。

4.4 炉心管理面について

実際の運転に際しては、供給されるPuの全Pu中の核分裂性Puの比率を考慮して、MOX燃料のPu富化度を調整して取出燃焼度を制御することになる。この比率が10%程度異なった場合でも、炉心特性の変化は炉心設計や炉心運用上の余裕に比して小さい。

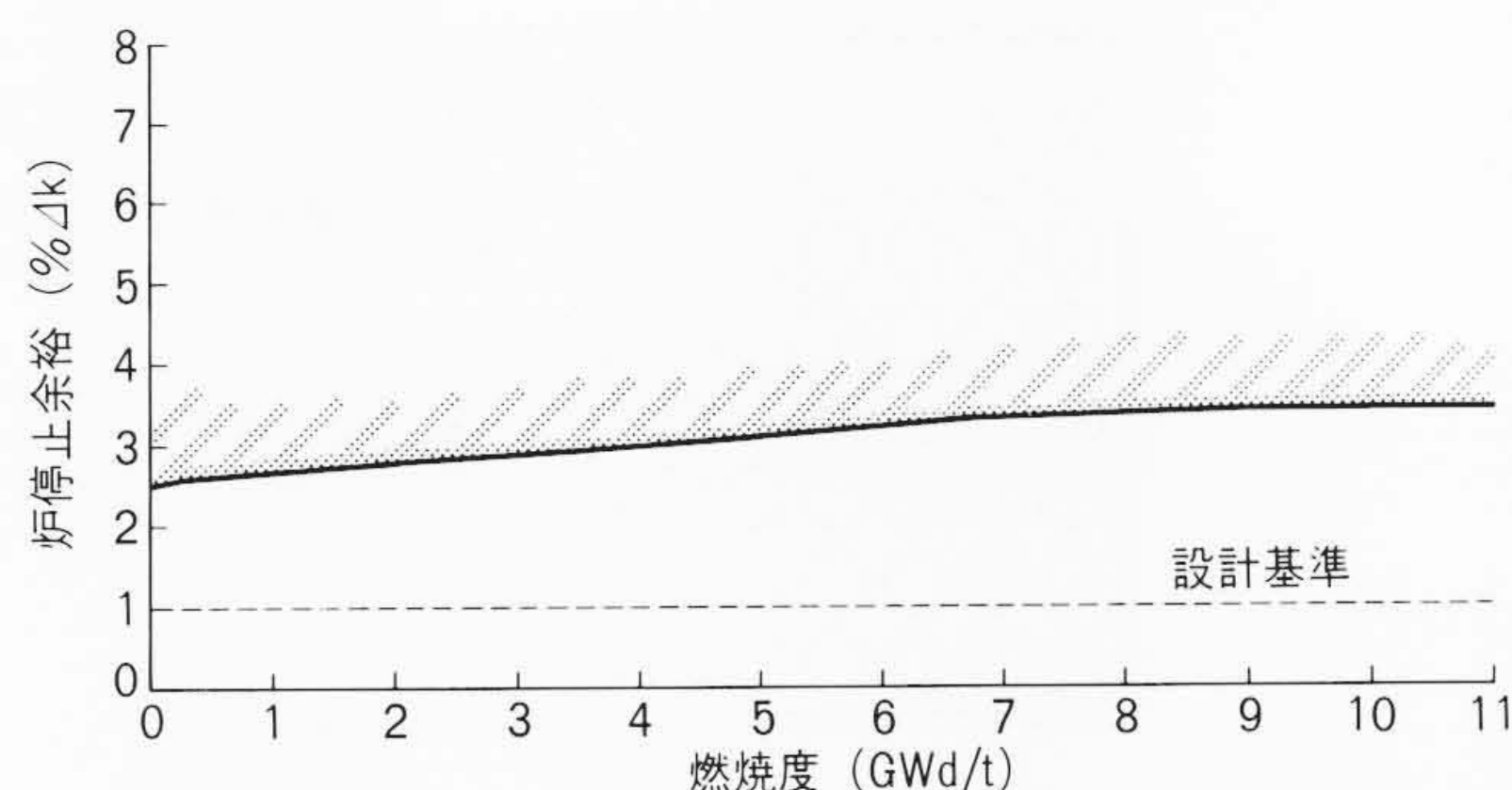


図6 炉停止余裕の燃焼変化

全MOX炉心平衡サイクルを通して、炉停止余裕は設計基準を満足している。

また、MOX新燃料の装荷時期が計画より遅れた場合、半減期約14年の核分裂性Pu-241が中性子吸収物質であるAm-241に変化するが、大幅に遅れる場合を除き運転継続期間への影響は小さい。

5 将来の炉心性能向上

将来のMOX炉心のいっそうの性能向上として次の項目が考えられ、この実現に向けた検討を進めている。

- (1) ウラン燃料で導入予定のステップⅢ構造仕様をベースとするMOX炉心の最適化
- (2) 経済性などをさらに向上させる観点からの燃料集合体当たりの累積発生エネルギーの最大化

これは燃焼度とプルトニウム装荷量の積を最大化させることをねらうものである。

- (3) プルトニウムの供給事情に対して、いっそう柔軟に対応できる自由度の高い炉心

6 おわりに

改良型BWRであるABWR(1,350 MWe)を対象にステップⅡ燃料構造設計仕様のMOX燃料(取出平均燃焼度約33 GWd/t)を用いた全MOX平衡炉心、および全MOXに至る初装荷、移行炉心の特性を評価し、その基本的成立性を確認した。今後、MOX炉心のいっそうの性能向上に向けての最適化を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 下重, 外: 炉心燃料技術と原子燃料サイクルへの対応, 日立評論, 74, 10, 733~738(平4-10)
- 2) 西村, 外: BWR高燃焼度炉心燃料の開発と適用, 日立評

論, 72, 10, 1011~1018(平2-10)

- 3) 友野, 外: 改良型軽水炉の開発と実用化, 日本原子力学会誌, 32, 5(1990)