

## 論点 10 緊急時の原子炉停止能力

### ○検討課題

プルトニウムはウランより熱中性子を吸収しやすいため、MOX燃料を採用すると制御棒への熱中性子の吸収割合が減少し、制御棒の効きが悪くなる傾向があるが、原子炉の安全は確保されているのか。

### ○過去に本県や他道県に寄せられた意見

- ・ ほう酸水注入装置が作動しなかった場合の、事故の経過の解明を行うべきではないか。
- ・ 原子炉の制御装置や停止装置（制御棒とホウ酸）の効きが低下する。
- ・ 対策として、制御棒の位置をなるべくMOX燃料集体から離れた場所に配置することになっているが、それには限界がある。

### ○ 東北電力株式会社の講じる対策または見解 (制御棒の停止能力について)

- ・ MOX燃料に含まれるプルトニウムは、ウランよりエネルギーが小さい中性子（熱中性子）を吸収しやすく、このため制御棒付近では中性子の数が減少し、MOX炉心では制御棒の効きが若干低下するものの、制御棒が原子炉を停止する能力にはもともと十分な余裕がある（要求される能力を100とすると、ウラン炉心で280程度、MOX炉心で250程度）。
- ・ MOX燃料とウラン燃料の配置などの工夫により、MOX燃料を使用しても確実に原子炉を制御・停止することができる。（表10-1、図10-1参照）

[参考] 「9×9燃料（A型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡サイクル並びに9×9燃料（B型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡サイクルの解析によると、最大反応度価値を持つ制御棒1本が完全に引き抜かれた状態でも実効増倍率は0.99未満となっている。（設置許可申請書8-3-66）」

- ・ 原子炉は運転期間を通じて定格出力を維持できるよう、約1年間運転できるように燃料を装荷しているが、制御棒も多めに用意している。したがって、MOX燃料炉心においてもウラン燃料炉心と同様、原子炉を余裕をもって停止することができる。

[参考] 「9×9燃料（A型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡サイクル並びに9×9燃料（B型）及びMOX燃料228体を装荷した平衡サイクルの解析例においては、制御棒の反応度制御能力の余裕が最小になる時の過剰増倍率は約0.09Δkであり、その場合の反応度制御能力は約0.16Δkである。（設置許可申請書8-3-65）」

- ・ 制御棒は、原子炉を停止するにあたり十分な本数を確保しており、また、1本1本が独立して駆動する設計となっている。さらに、制御棒が挿入できない場合、ほう酸水注入系によって原子炉を停止できる設計としている。
- ・ ほう酸水注入系は、MOX燃料を採用しても、ウラン炉心と同様、原子炉を余裕をもって臨界未満にできる能力を有している。ほう酸水注入系の系統概要図を図10-2に示す。なお、ほう酸水注入系は、必要なとき確実にほう酸水を原子炉へ注入できるよう、ほう酸水注入ポンプおよびほう酸水注入弁の動作確認を定期的（ほう酸水注入ポンプ：1ヶ月に1回、ほう酸水注入弁：3ヶ月に1回）に実施している。
- ・ なお、評価手法を従来的一点近似による解析から、より詳細な三次元解析に変更しているが、この評価方法の採用によっても、現状の設計（ほう酸水濃度：750ppm）で対応可能であることを確認している。

[参考] 「ほう酸水注入系は、～中略～ 毎分0.001  $\Delta k$  以上の負の反応度を与え、原子炉を臨界未満にする能力を持っている。9 × 9燃料およびMOX燃料228体を装荷した平衡サイクルの解析例によれば、ほう酸水注入系の反応度は毎分0.002  $\Delta k$  であり約30分間で臨界未満に必要な負の反応度を添加する能力を有している。(設置許可申請書8-3-53)」

- ・ プルトニウムはウランに比べて熱中性子を吸収しやすいことから、制御棒が吸収する熱中性子量が少なくなるため、制御棒の効きは若干悪くなる。一方、MOX燃料はウラン燃料より遅発中性子割合が少ないため、制御棒が挿入された際、中性子の減少が早くなり、制御棒の効きはよくなる。これらの効果が打ち消しあうことにより、原子炉の緊急停止能力はウラン燃料炉心と同等となる。

スクラム能力が確保されていることの確認として、スクラム曲線<sup>\*1</sup>が用いられており、原子炉のスクラム曲線を設計用スクラム曲線<sup>\*2</sup>と比較したとき、同じ制御棒の原子炉内への挿入割合に対してより多くの反応度(スクラム反応度<sup>\*3</sup>)が投入されていれば、その炉心のスクラム能力は確保されていることとなる。

- ・ なお、以下に示す監視パラメータがある設定値に達した場合、安全保護系の機能により原子炉を緊急停止する設計としている。

- i) 原子炉圧力
- ii) 原子炉水位
- iii) ドライウェル圧力
- iv) 中性子束
- v) 原子炉周期(ペリオド)
- vi) 中性子検出器計数率
- vii) スクラム排出容器水位
- viii) 主蒸気管放射能
- ix) 主蒸気隔離弁開度
- x) 主蒸気止め弁開度
- xi) 蒸気加減弁開度
- xii) 地震加速度

[参考] 「9 × 9燃料(A型)平衡サイクル又は9 × 9燃料(B型)平衡サイクルの炉心にMOX燃料76体を装荷したサイクル、さらにMOX燃料76体を装荷したサイクル、及びMOX燃料228体を装荷した平衡サイクルの各サイクル末期のスクラム曲線の解析値は、設計スクラム曲線に比べ十分安全側となっている(図10-3, 10-4参照)。(設置許可申請書8-3-68)」

#### (補足：燃料プールの未臨界性について)

- ・ MOX新燃料、使用済MOX燃料は燃料プールの使用済燃料貯蔵ラックに貯蔵されるが、核分裂が起きやすい最も厳しい状態を想定しても、貯蔵燃料の臨界を防止することが出来ることを確認している(図10-5参照)。

##### プール水温度

4°C(中性子の減速効果が最も高い温度)を想定する。

##### ボロン(中性子吸収材)添加率

貯蔵ラックのボロン添加率は設計の最小値とし、安全側の評価とするため(臨界になりやすいように)ボロンによる中性子吸収量を少なく想定する。

##### 貯蔵ラックの製造公差

板材肉厚は仕様上の最小値とし、ラックによる中性子吸収量を少なく想定する。  
格子ピッチ、ラック内幅を仕様上の最小値とし燃料集合体間の距離が小さいことを想定する。

##### 貯蔵ラック内における燃料集合体配置

燃料集合体がラック中心に配置(ラック壁面から最も離れた位置)された状

態を想定する。

#### 燃料集合体の無限増倍率

無限増倍率が、実際に使用する燃料よりさらに5%程度大きいと想定する。  
(ウラン燃料(9×9, 高燃焼度8×8)の無限増倍率1.30, MOX燃料の無限増倍率1.23と想定)

- ※1：制御棒の原子炉内への挿入割合とこれによって原子炉へ投入される反応度の関係を表したものの。
- ※2：実際の原子炉におけるスクラム曲線を包絡するよう厳しく設定したスクラム曲線を設計用スクラム曲線という。原子炉の異常な過渡変化および事故時の評価には、この設計用スクラム曲線を用いて評価を行い、安全性を確認している。
- ※3：原子炉がスクラムした際、原子炉に投入される反応度

### ○国の見解（安全審査結果）

- ・ 以下のとおり、安全審査の要求事項を満足していることを確認している。

#### (安全審査書 P9 中段より)

9×9燃料(A型)又は9×9燃料(B型)及びMOX燃料228体を装荷した平衡炉心においては、全制御棒を全挿入した状態から最大反応度値を有する制御棒1本が完全に引き抜かれた場合でも、炉心の実効増倍率が常に0.99未満となるように設計するとしている。すなわち、最大反応度値を有する制御棒1本が完全に引き抜かれた場合でも、炉心を臨界未満にできるとしている。

#### (安全審査書 P14 中段より)

MOX燃料を装荷したサイクル以降、ほう酸水の反応度値が低下することを考慮しても、0.001 Δk/min以上の負の反応度を与え、原子炉を定格出力運転状態から0.015 Δk以上の余裕を持って炉心を臨界未満にでき、かつ、維持できるとしている。

#### (安全審査書 P9 下段より)

運転時の異常な過渡変化の解析に用いる設計用スクラム反応度曲線については、MOX燃料76体を装荷したサイクルからMOX燃料228体を装荷した平衡サイクルに至るまでの各サイクル燃焼によるスクラム反応度曲線の劣化が考慮されている。

表10-1 女川3号機の停止余裕

燃料型式		実効増倍率	判断基準
ウラン燃料	高燃焼度8×8燃料	0.974	0.99以下
	9×9燃料(A型)	0.972	
	9×9燃料(B型)	0.979	
MOX燃料 (9×9燃料(A型)混在)		0.975	
MOX燃料 (9×9燃料(B型)混在)		0.975	

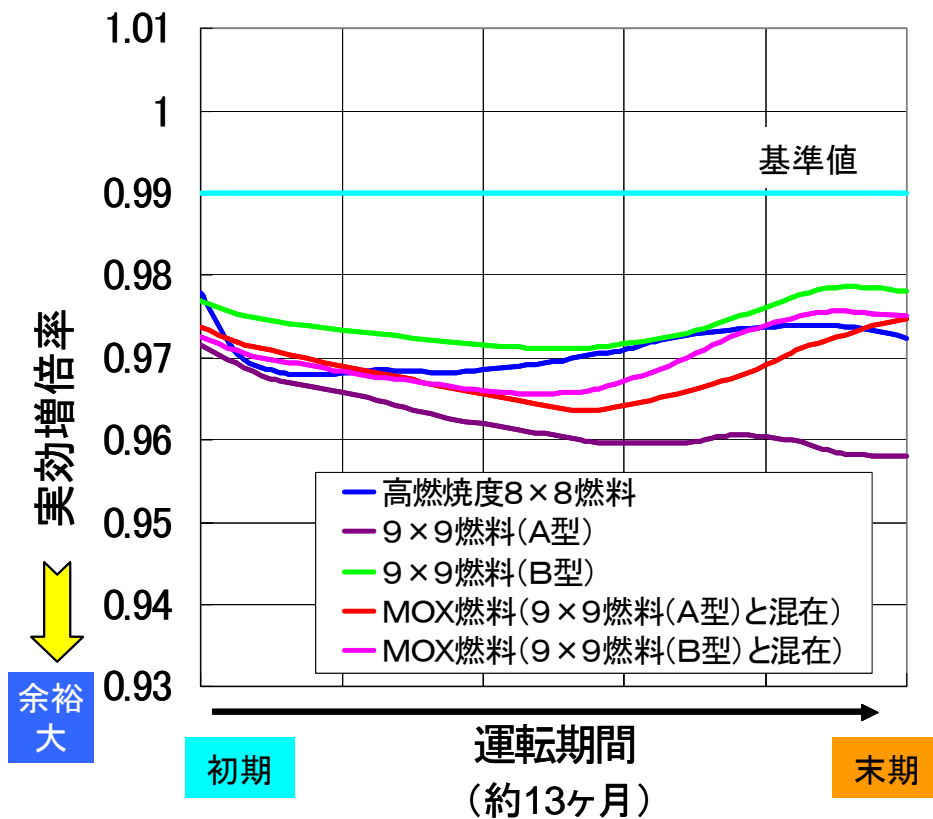


図10-1 (1) 女川3号機 停止余裕の推移

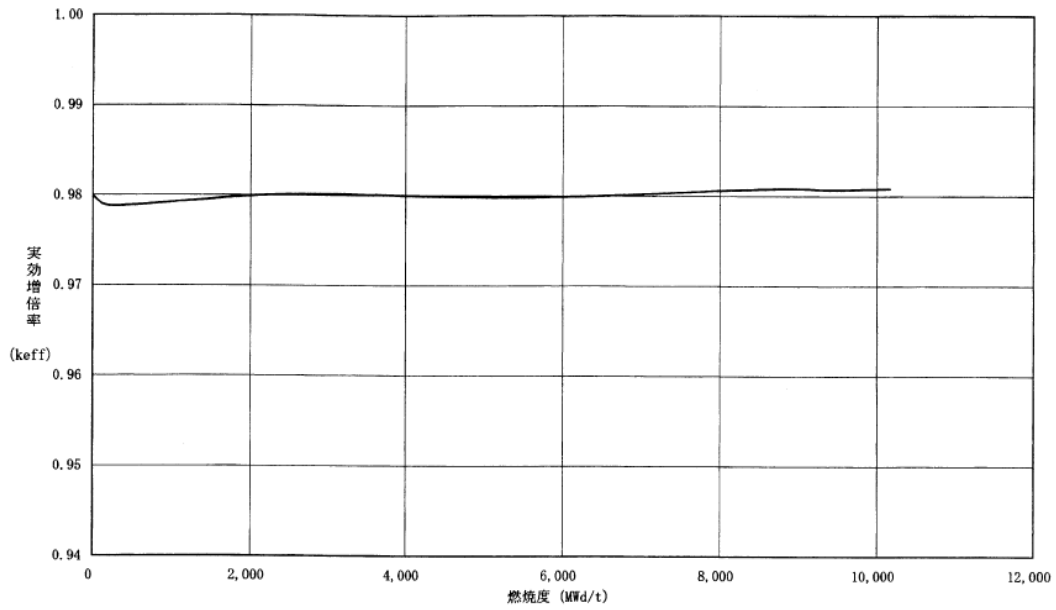


図10-1(2) 島根2号機 停止余裕の推移  
(9×9燃料(A型)及びMOX燃料を装荷した平衡炉心)

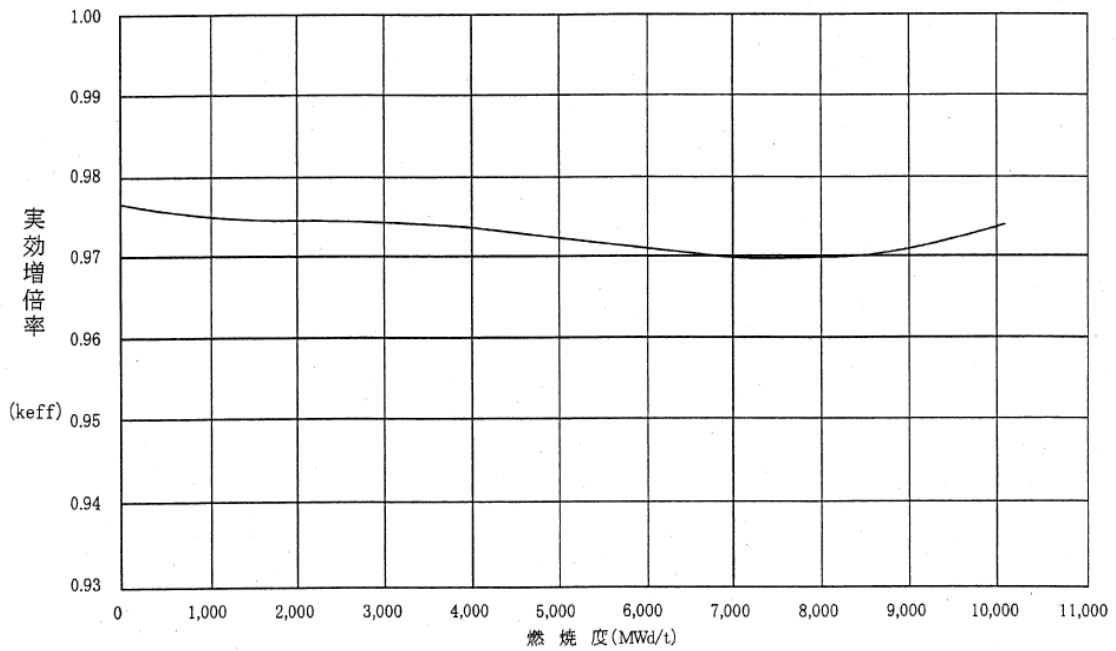


図10-1(3) 浜岡4号機 停止余裕の推移  
(9×9燃料(A型)及びMOX燃料を装荷した平衡炉心)

..... ほう酸水注入ポンプ動作確認時の  
テストライン

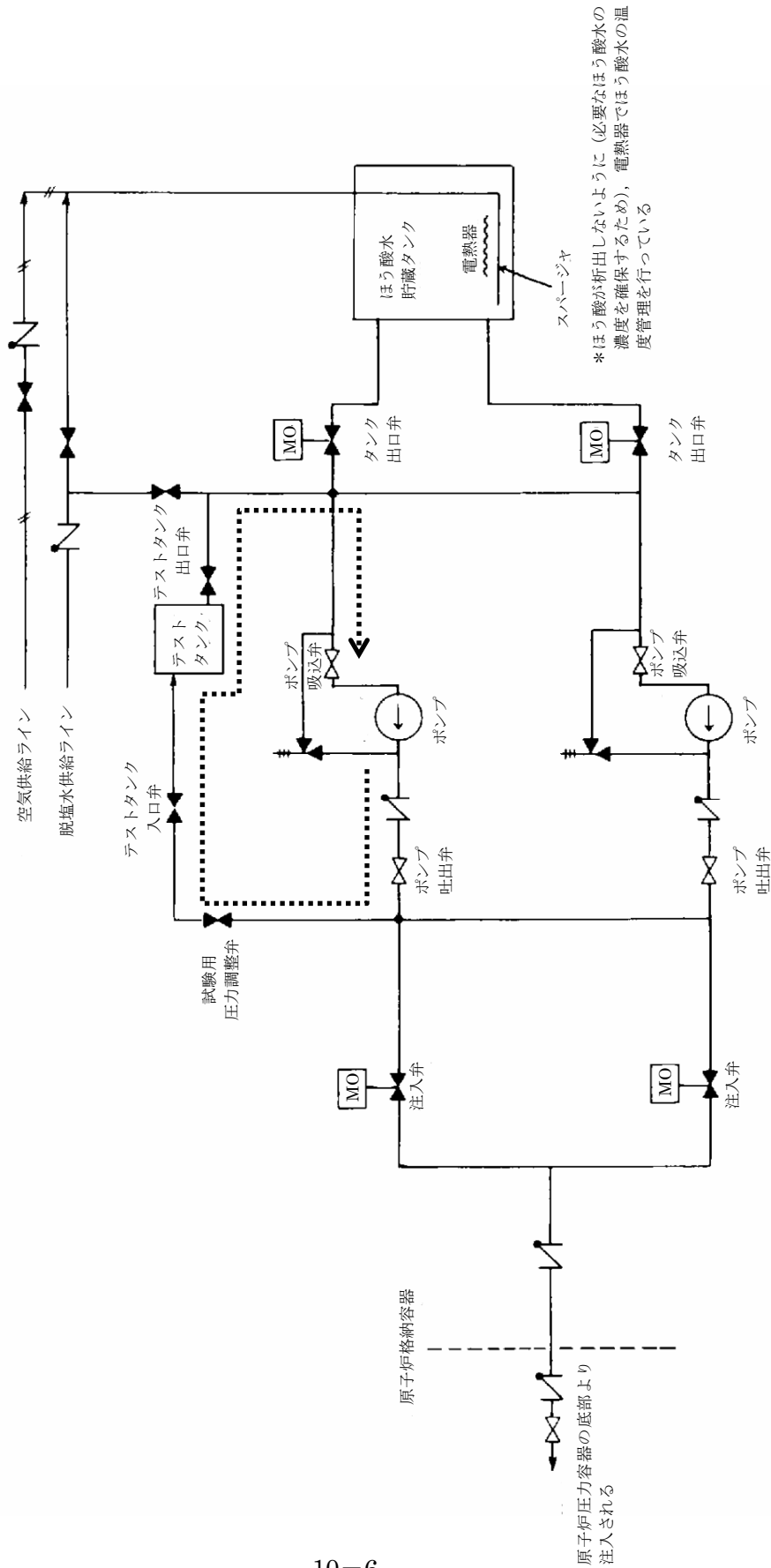


図 10-2 (1) ほう酸水注入系系統概要図

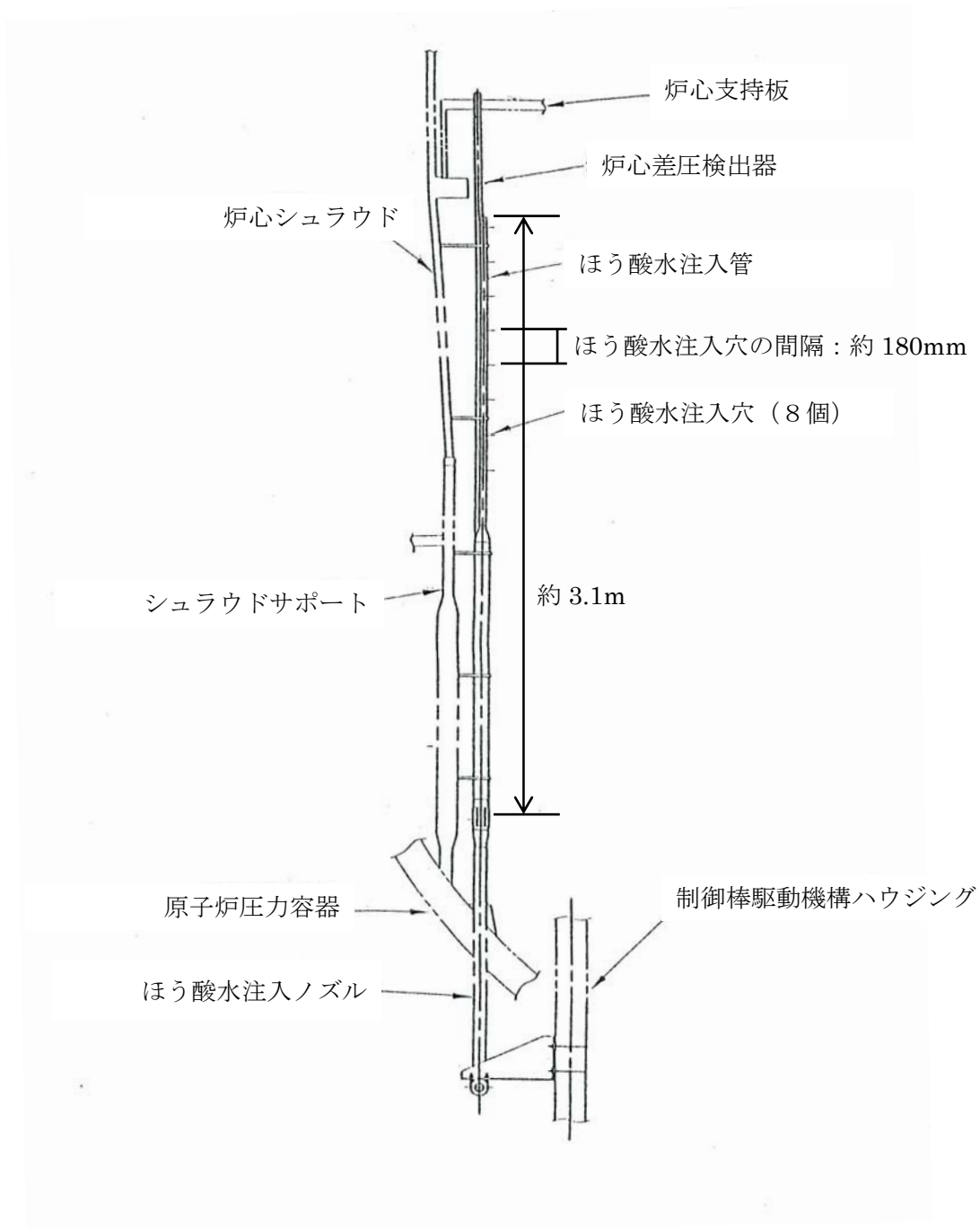


図 10-2 (2) ほう酸水注入系注入口概要図

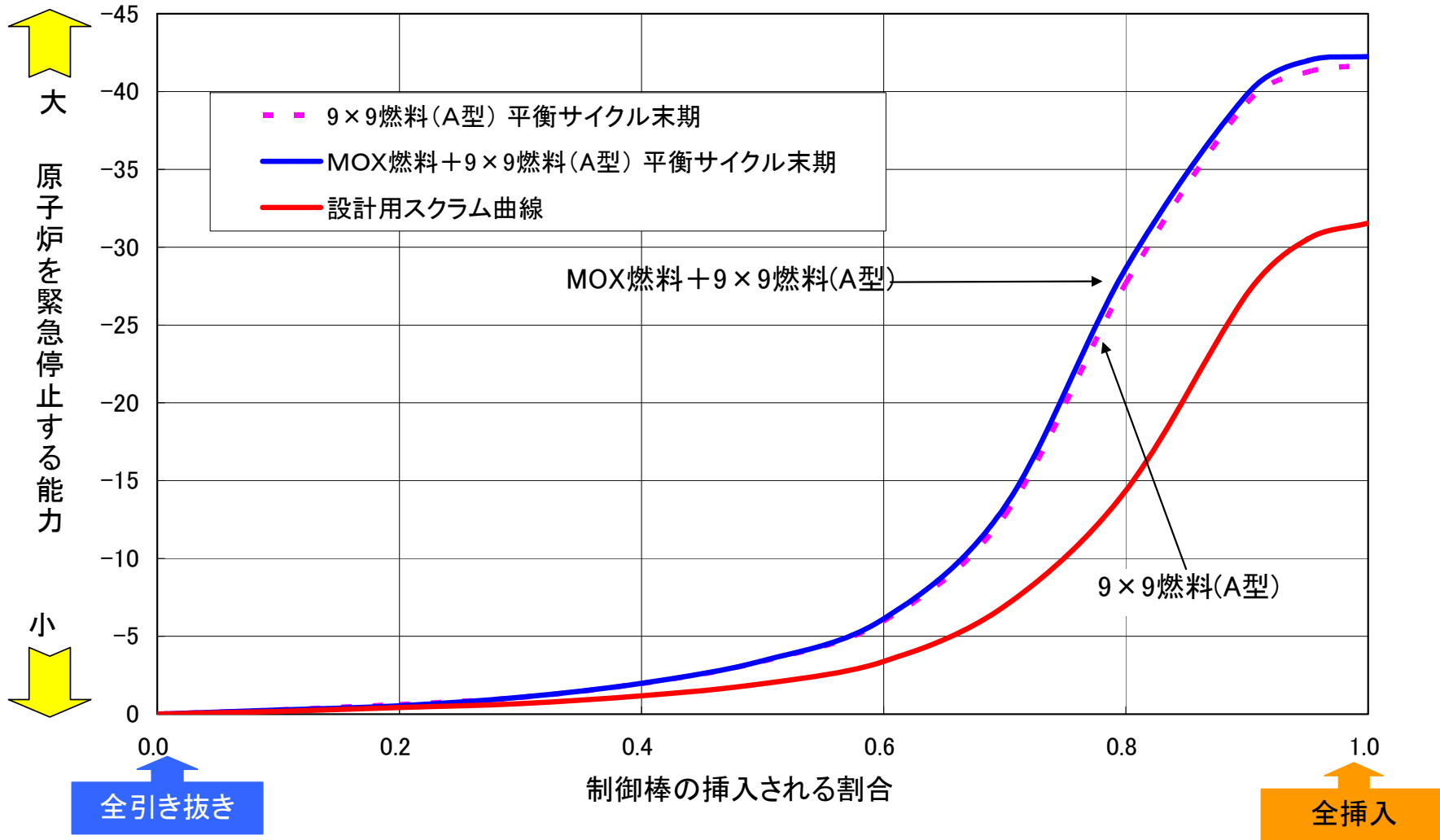


図10-3 スクラム反応度曲線



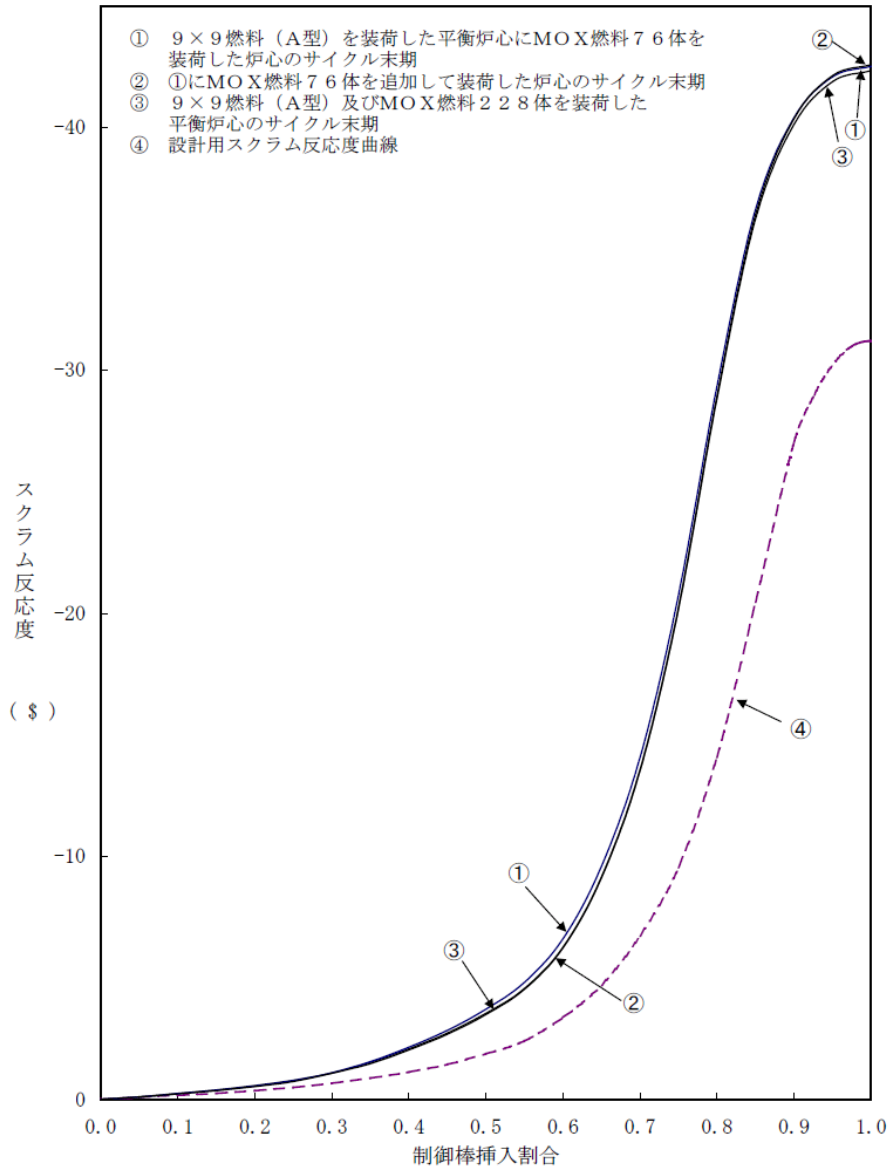


図10-4 (1) 女川3号機 スクラム反応度曲線  
 (9×9燃料 (A型) 及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

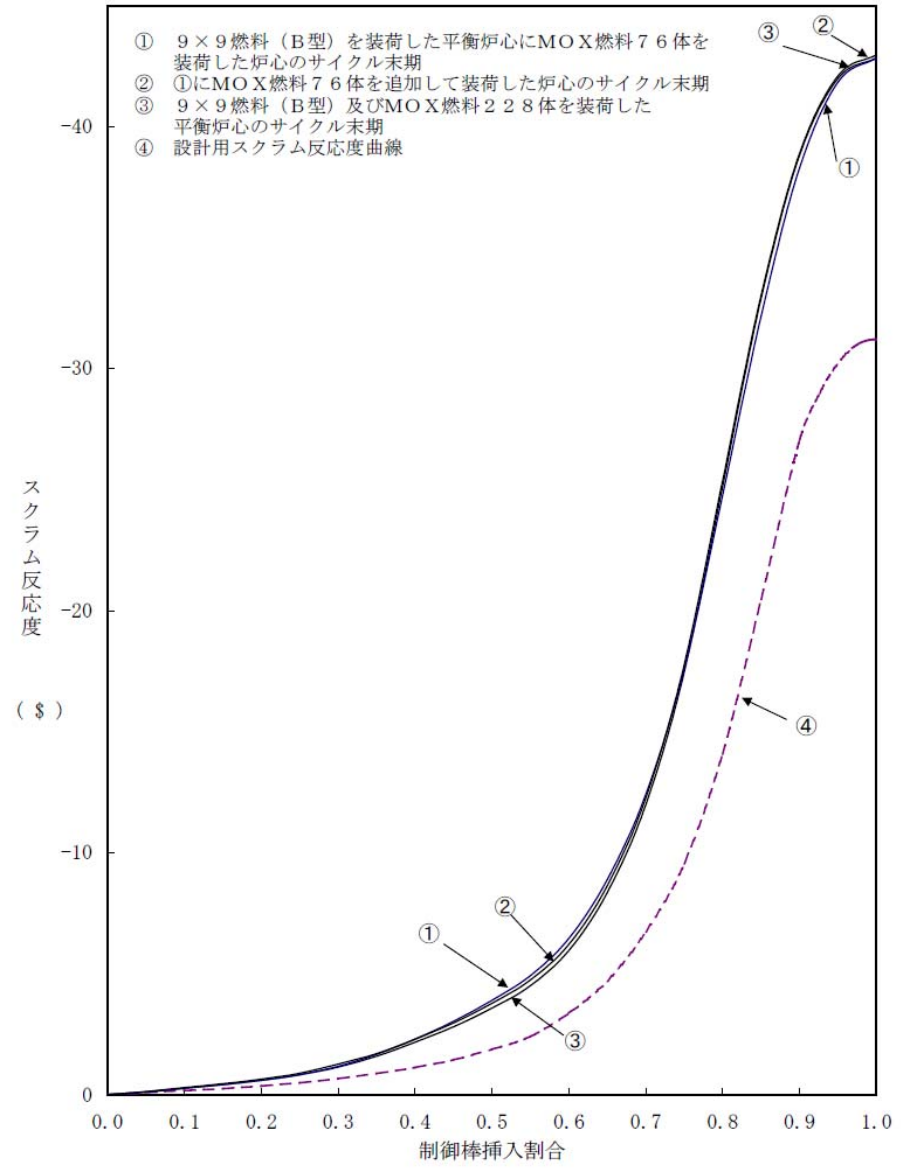


図10-4 (2) 女川3号機 スクラム反応度曲線  
 (9×9燃料 (B型) 及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

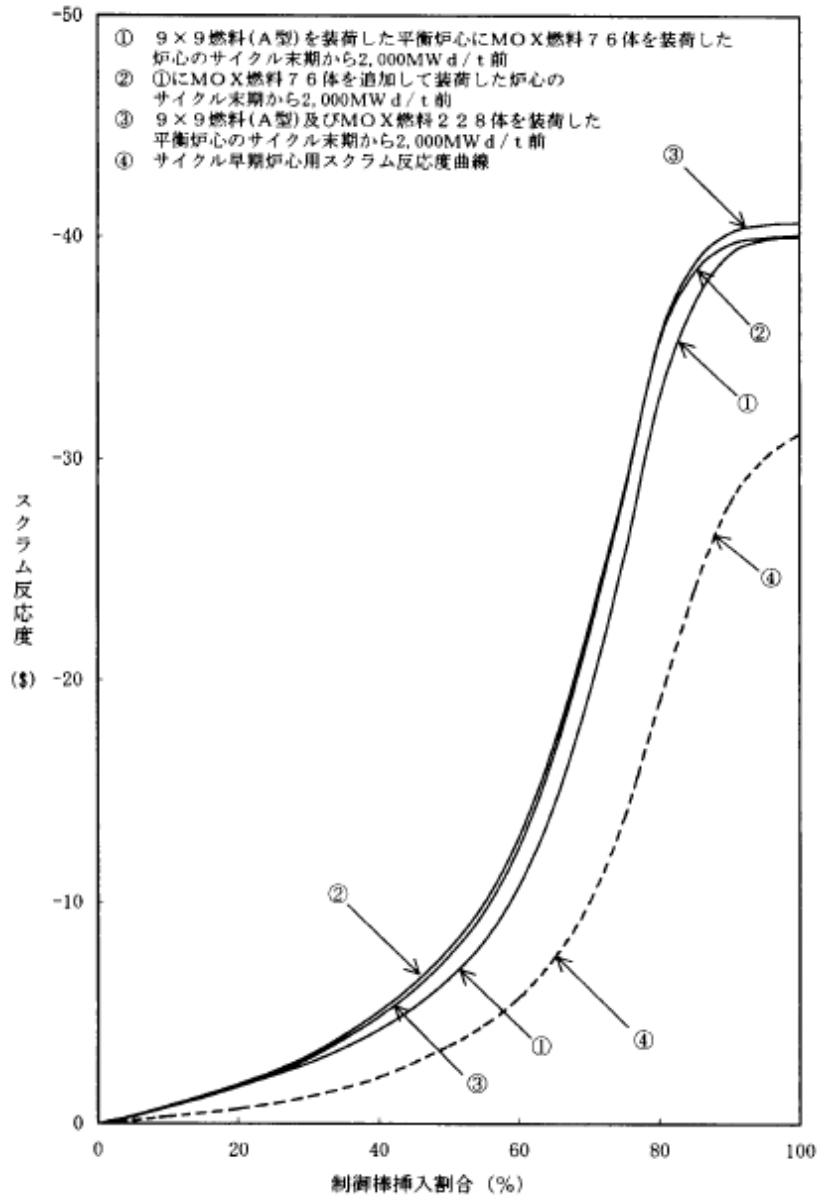


図10-4(3) 島根2号機 スクラム反応度曲線(サイクル早期炉心用)  
 (9×9燃料(A型)及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

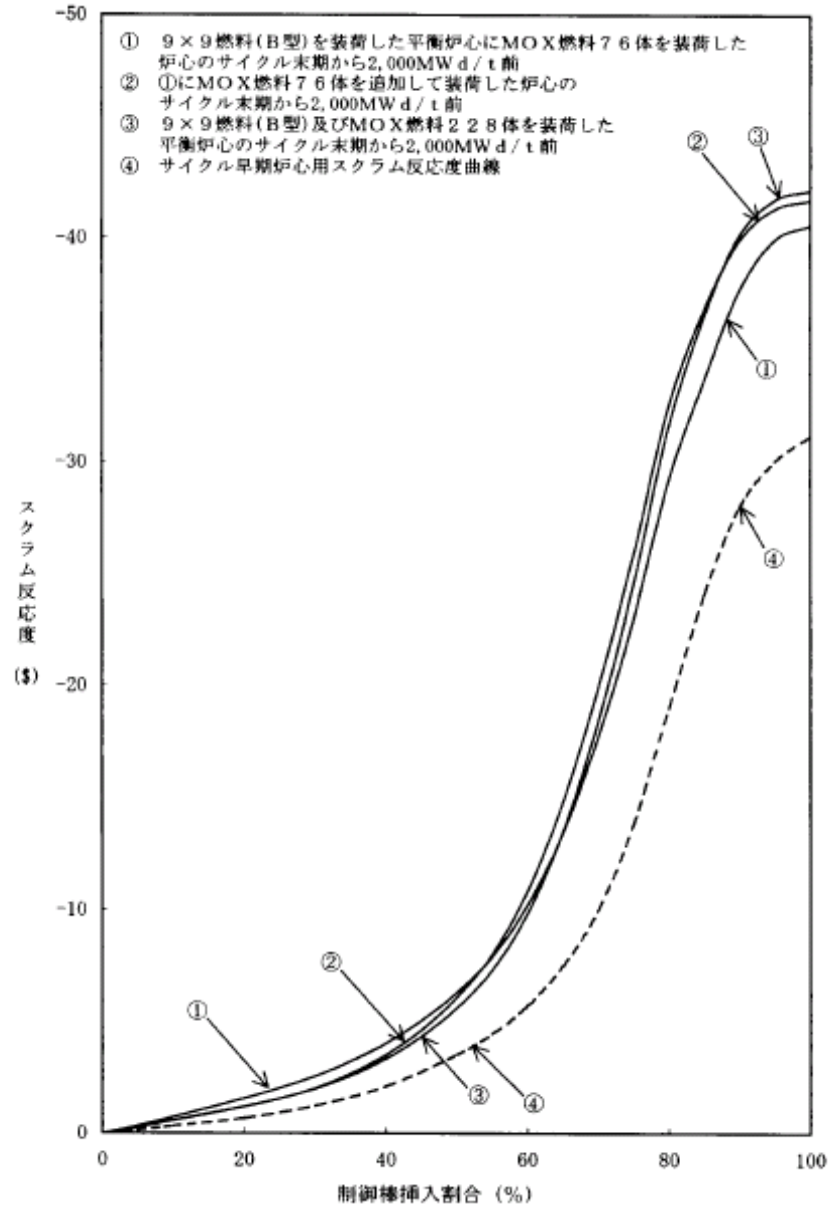


図10-4(4) 島根2号機 スクラム反応度曲線(サイクル早期炉心用)  
 (9×9燃料(B型)及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

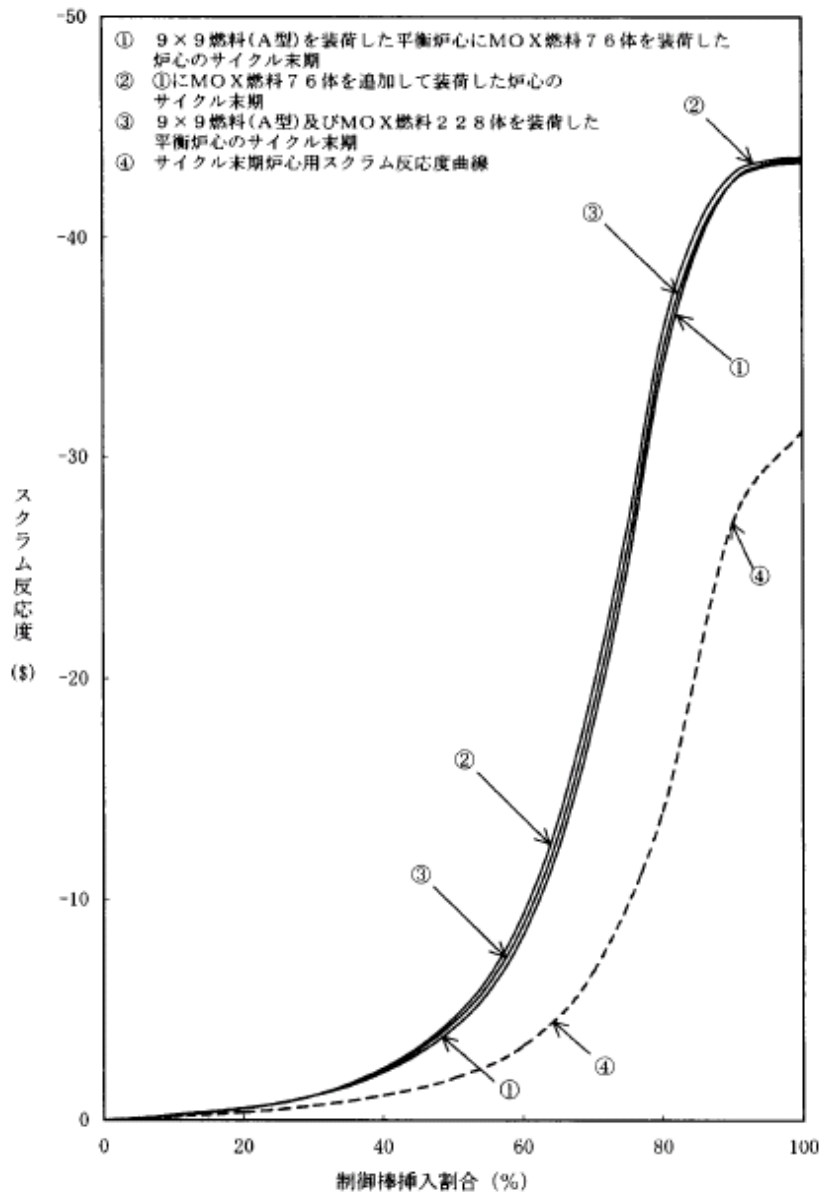


図10-4(5) 島根2号機 スクラム反応度曲線(サイクル末期炉心用)  
 (9×9燃料(A型)及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

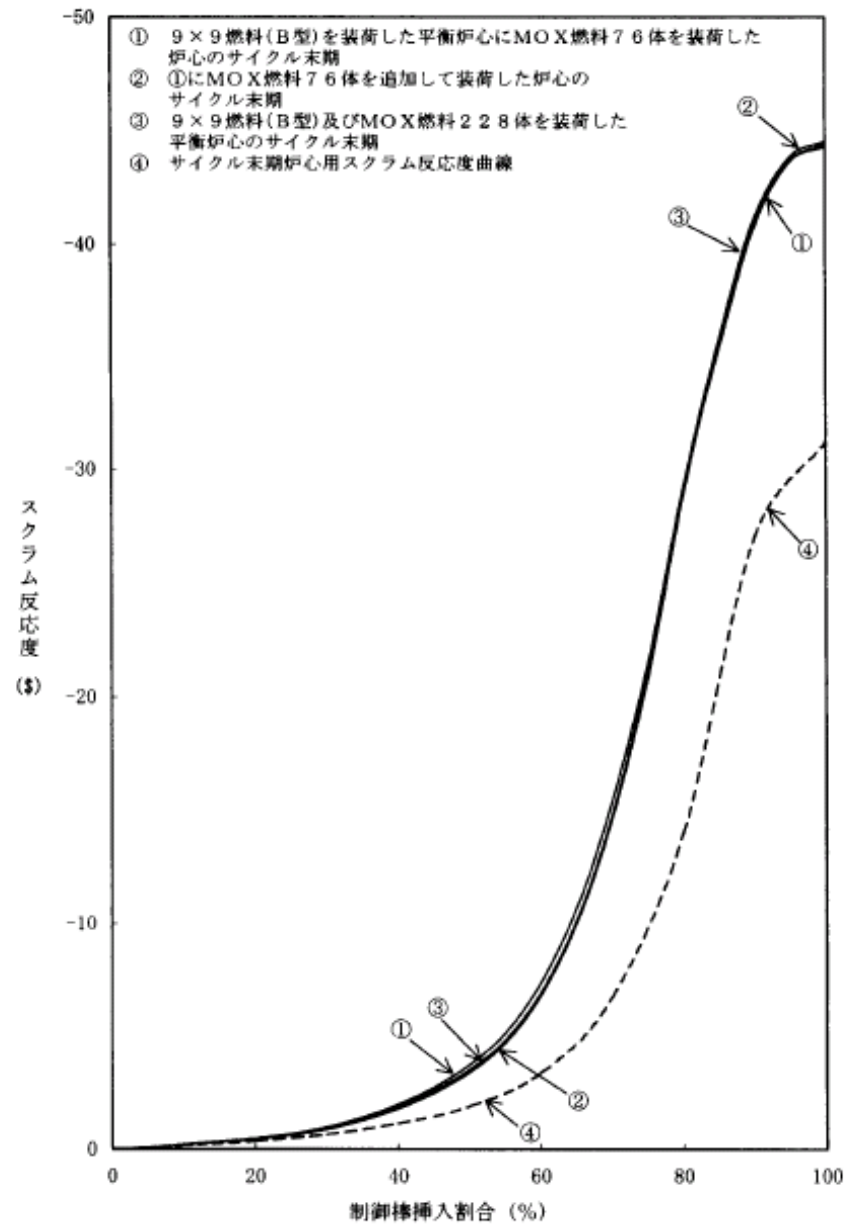


図10-4(6) 島根2号機 スクラム反応度曲線(サイクル末期炉心用)  
 (9×9燃料(B型)及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

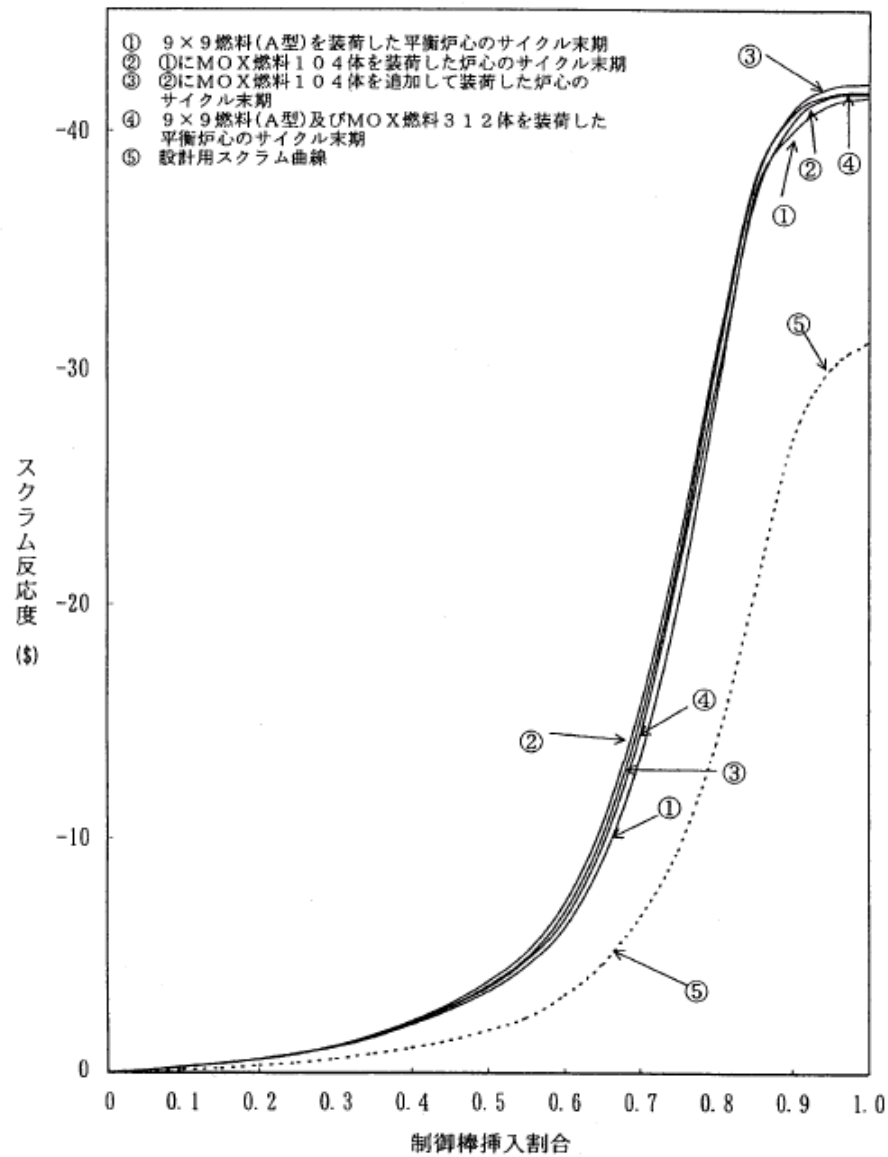


図10-4(7) 浜岡4号機 スクラム反応度曲線(サイクル末期炉心用)  
 (9×9燃料(A型)及びMOX燃料を装荷した取替炉心)

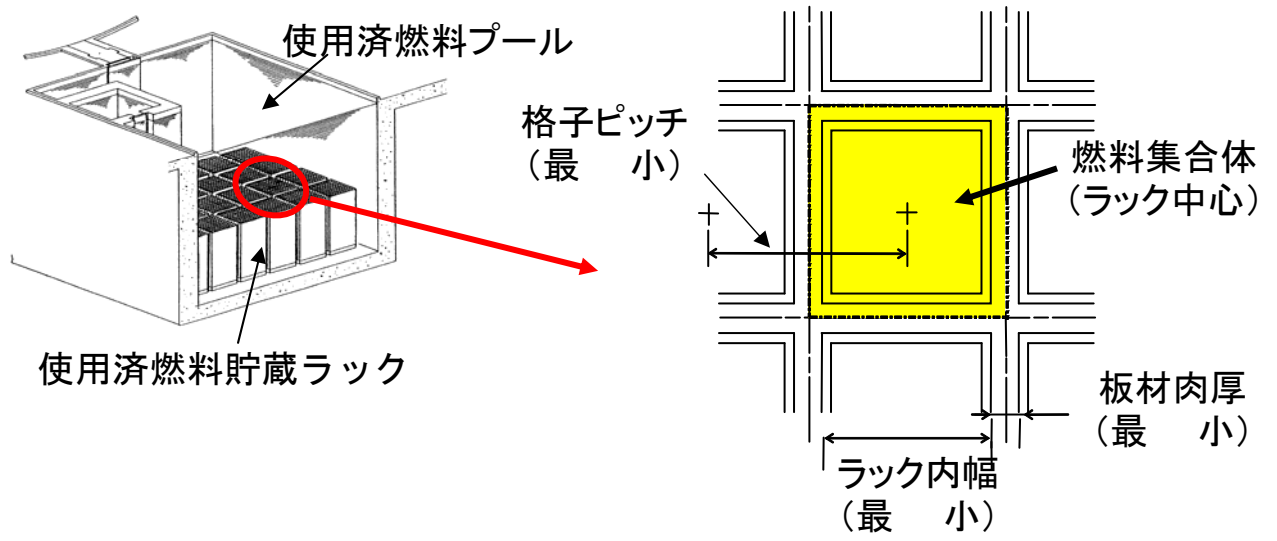


図 10-5 使用済み燃料プール・使用済み燃料ラック外略図