

論点9 原子炉の制御性への影響(その1)

【検討課題】(9-1)MOX燃料はプルトニウムが中性子を吸収するために燃料集合体内の中性子が少なくなる。中性子が多く存在するウラン燃料を隣に配置すると、その部分のMOX燃料が反応しやすくなり、MOX燃料集合体外周部の燃料棒出力が高くなりやすいが、燃料の健全性や原子炉の制御に影響を与えないか。

【電力の見解】MOX燃料の燃料棒の出力分布はウラン燃料と同等にできる。

MOX燃料集合体の燃料棒の出力分布のバラツキは以下の方法によりウラン燃料と同等にすることができる。

{ 9×9燃料に対しては1割程度小さい。
高燃焼度8×8燃料とはほぼ同等。

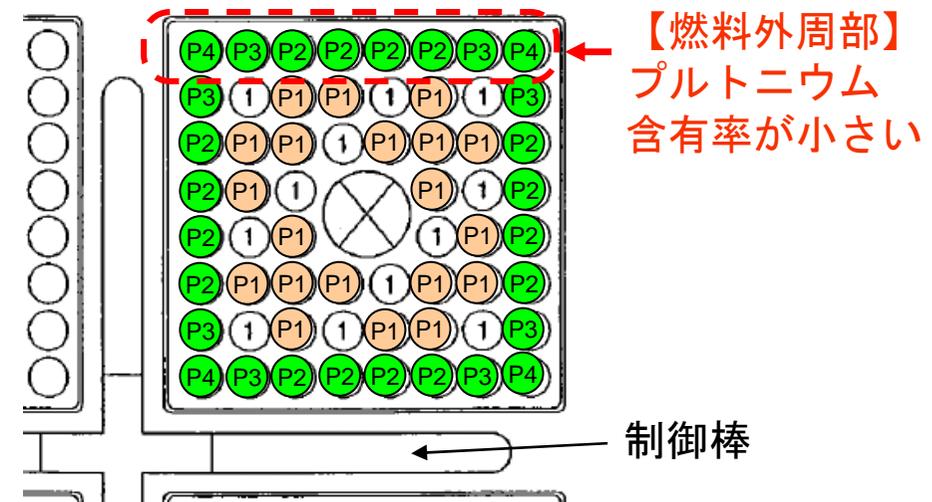
○プルトニウム含有率を変える

(4段階)

○燃料外周部の燃料棒はプルトニウム含有率を小さくし燃えにくい配置にする

出力運転時の制御棒の異常な引き抜き解析において、表面熱流束の最大値はMOX炉心、ウラン炉心、島根2号MOX炉心、浜岡4号MOX炉心のいずれにおいても定格値の約121%である。

MOX燃料集合体内の燃料棒配置(例)



- ① ウラン燃料
- ⊗ ウォータロッド
- Ⓟ 最高プルトニウム含有率MOX燃料
- Ⓟ~Ⓟ4 この順でプルトニウム含有率が小さくなる

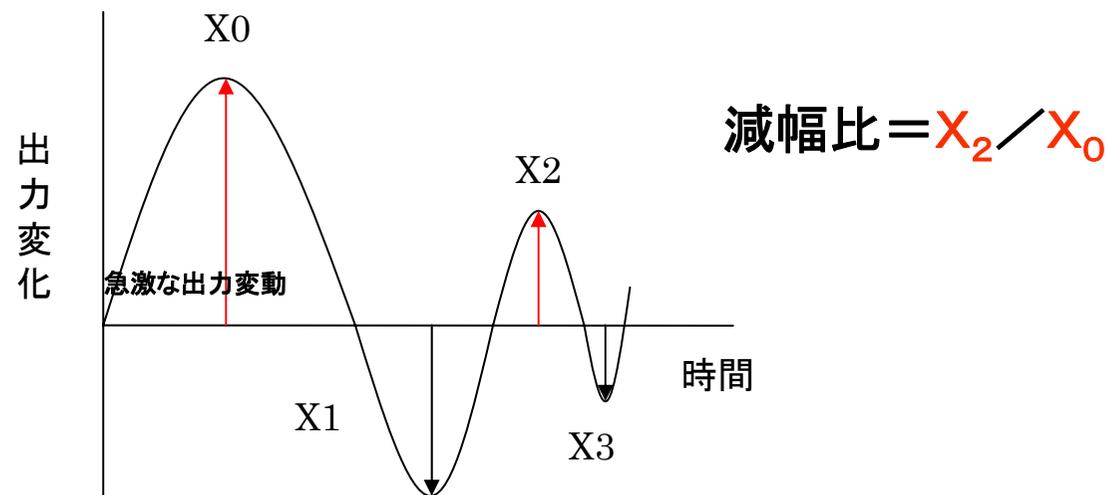
論点9 原子炉の制御性への影響(その2)

2

【検討課題】(9-2)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燃料を採用すると熱中性子の割合が減少することから、原子炉の制御が不安定になったり、制御が不能になることはないのか。

【電力の見解】原子炉は、出力振動に対し十分な減衰特性を有しているため制御が不能になることはない。

表9-1に示すとおり、炉心安定性※1減幅比は判断基準を満足しているため、出力振動が起きても出力は元に戻る。



※1: 炉心全体の出力の振動

論点9 原子炉の制御性への影響(その2)

表9-1 炉心安定性減幅比解析結果

解析点	1/3MOX 炉心	9×9 炉心	高燃焼度 8×8 炉心	島根2号 1/3MOX 炉心	浜岡4号 1/3MOX 炉心	判断基準
安定性が最も悪化する運転状態※1	<u>0.75</u>	0.60	0.67	0.74	0.72	限界基準 減幅比<1.0
最大出力運転時	<u>0.08</u>	0.06	0.01未満	0.08	0.08	運転上の 設計基準 減幅比≤0.25
自動流量制御 下限出力運転時	<u>0.19</u>	0.21	0.14	0.23	0.18	

原子炉の自己制御性※2が働くことにより、出力は元に戻ろうとする。

先行他社との結果の差は、最低ポンプ速度時の炉心流量および最大出力の値が異なること等による。(出力が大きく炉心流量が小さいほど減幅比は大きくなる。)

※1: 最低ポンプ速度最大出力運転時

※2: 自己制御性: BWRでは、原子炉の出力が変化しても、「燃料の温度」や「冷却材の泡(ボイド)」の量が変わることで、出力変化を抑え、元に戻ろうとする作用(フィードバック作用)が働く。

●燃料温度効果(ドップラ効果): 燃料温度が上がると、燃料中のウラン238, プルトニウム240など核分裂しにくい核種(主としてウラン238)がより中性子を吸収するようになる。

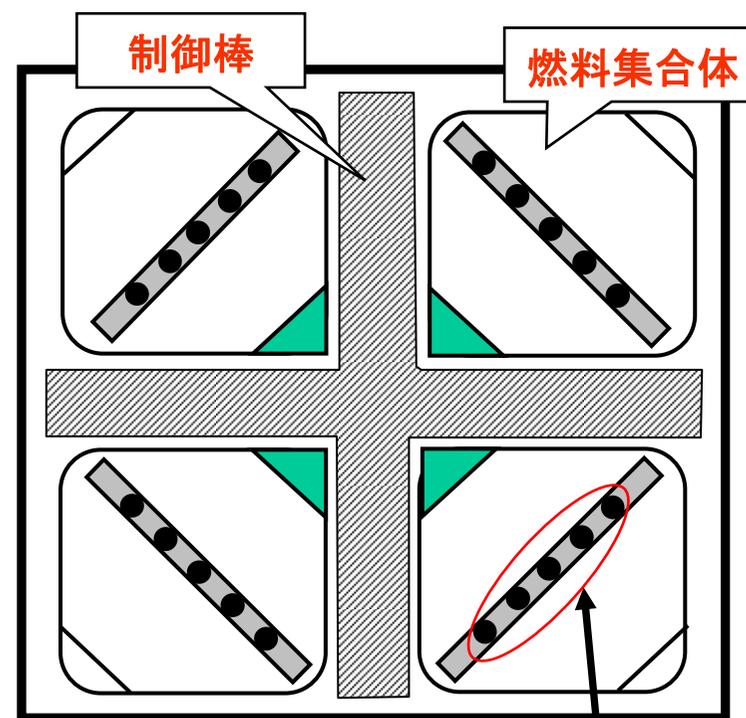
●冷却材の泡の効果: 冷却材中の泡が増えると、エネルギーの小さい中性子(熱中性子)の数が減り、ウラン235, プルトニウム239の核分裂が減少する。

論点9 原子炉の制御性への影響(その3)

【検討課題】(9-3)MOX燃料を導入すると燃料の種類が増え、炉心への燃料装荷時に間違いを誘発しやすく、また、制御棒引き抜けなどの操作ミスが事故につながる危険性も大きくなるのではないか。

【電力の見解】燃料取替作業は以下の手順により行い、装荷位置を繰り返し、かつ複数の人間が確認することにより、配置ミスを起こさないようにしている。

- ① 燃料集合体の番号(刻印番号)と装荷位置(560ヶ所)を記載した手順書を準備。
↓
- ② 燃料装荷手順を燃料交換用の計算機に入力。
↓
- ③ 燃料装荷時に燃料番号を手順書、計算機で確認し、燃料交換機にて1体ずつ装荷を実施。
↓
- ④ 全数の装荷が終了した後、集合体の位置に間違いはないか水中カメラにより刻印番号をチェック。炉内の確認は定期事業者検査として行われる。



なお、たとえ配置ミスをしたとしても、運転中も中性子検出器により燃料の出力を監視しているため、異常を検知できる

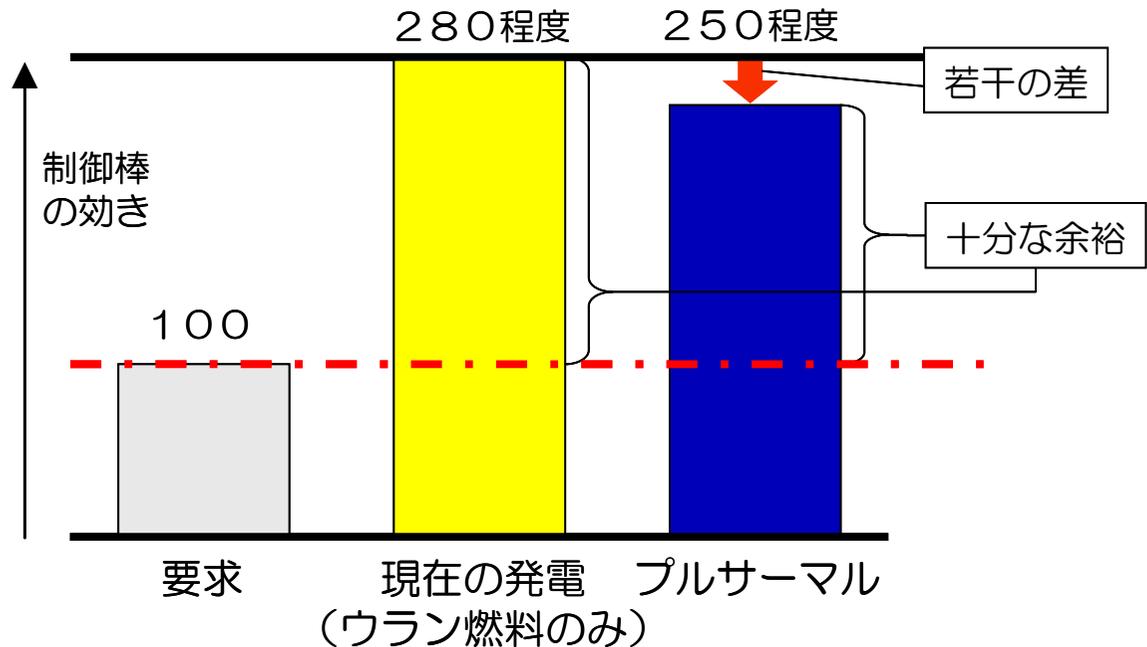
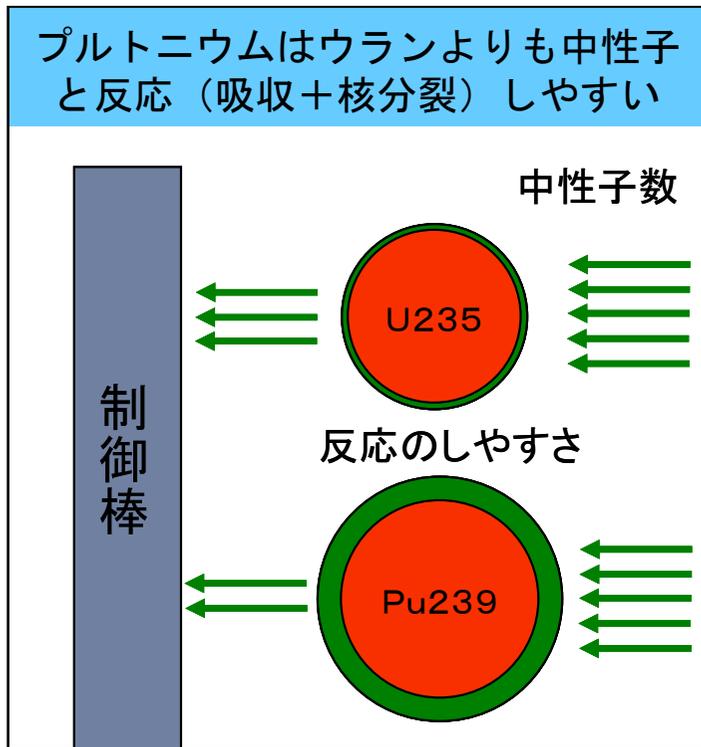
刻印番号

論点10. 緊急時の原子炉停止能力(その1-1)

【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。

【電力の見解】MOX燃料を採用しても、これまでと同様原子炉の安全は確保できる。

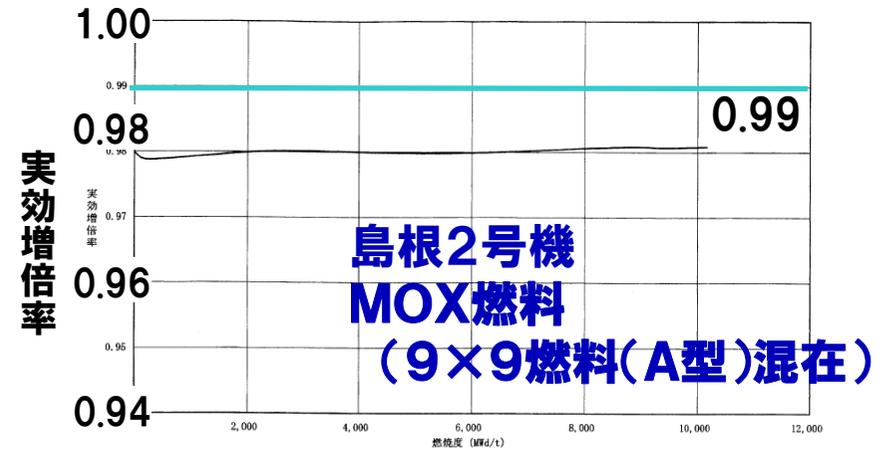
プルトニウムはウランに比べて熱中性子を吸収しやすいことから、制御棒が吸収できる熱中性子の割合が減少するが、**原子炉を停止するために必要な能力にはもともと十分な余裕がある。**



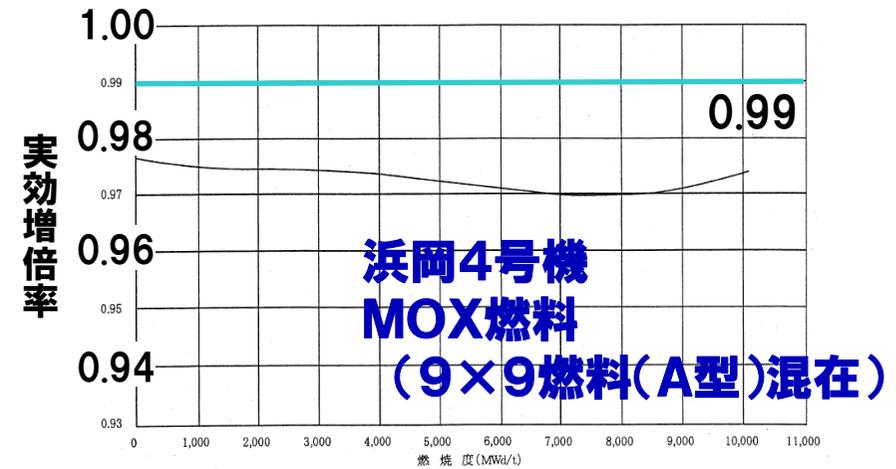
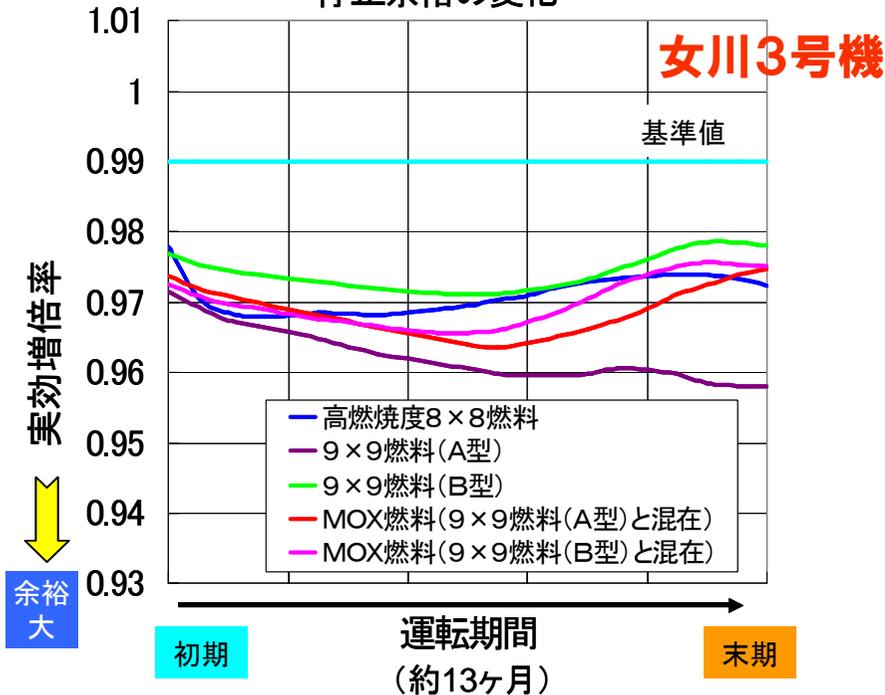
論点10. 緊急時の原子炉停止能力(その1-2)

原子炉停止余裕の解析結果の比較

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	



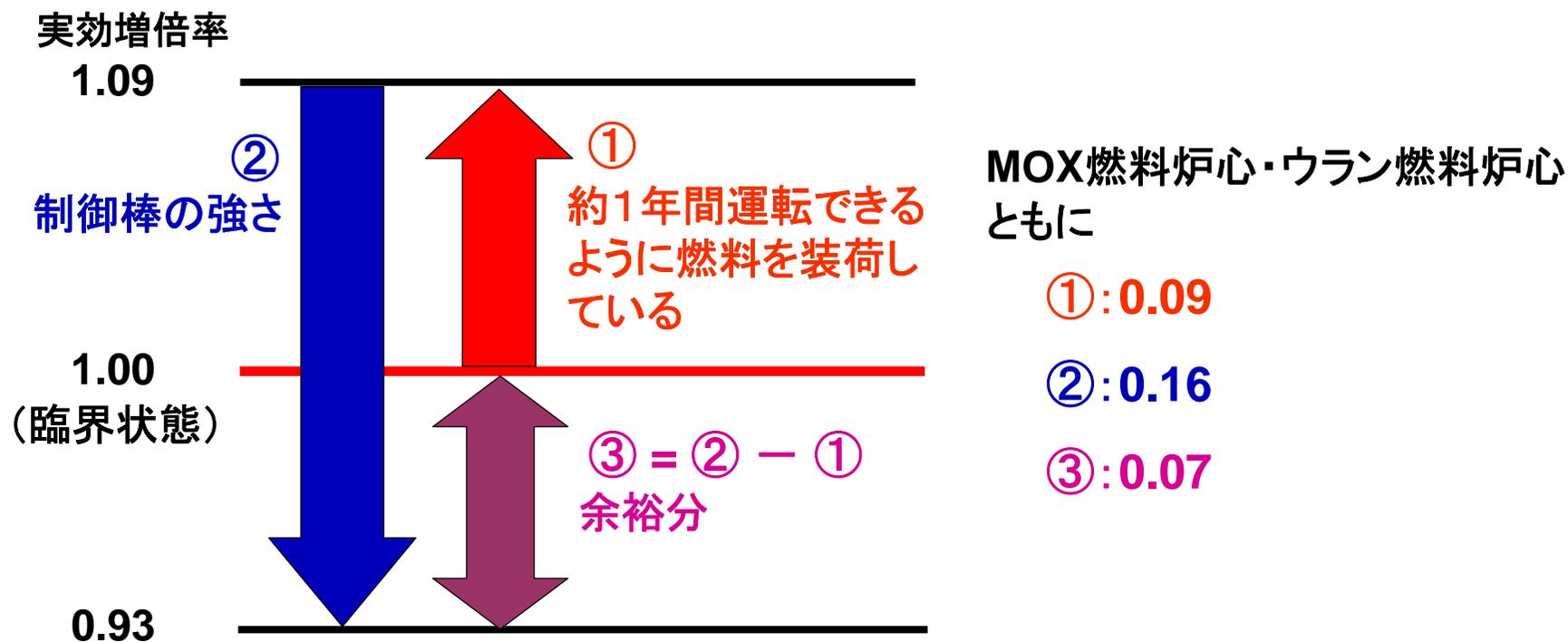
停止余裕の変化



論点10. 緊急時の原子炉停止能力(その1-3)

原子炉は運転期間を通じて定格出力を維持できるよう、①約1年間運転できるように燃料を装荷しているが、②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、③原子炉を余裕をもって停止することができる。

制御棒による原子炉停止能力



制御棒の能力は1本あたり0.01以下となるよう管理している

制御棒は、原子炉を停止するにあたり十分な本数(137本)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」(中性子を吸収する「ほう素」を含む液体)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燃料炉心と同様、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。
- 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に行っている。
(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)

論点10. 緊急時の原子炉停止能力(その1-5)

MOX燃料を装荷すると制御棒の能力は若干悪くなるが、炉内の熱中性子量も少ないため、**制御棒の効きはウラン燃料炉心と同等であり、原子炉の緊急停止能力は確保されている。**

原子炉を緊急停止する能力※2

	制御棒の挿入割合			
	25%	50%	75%	100%
設計用スクラム曲線※1	1	1	1	1
1/3MOX炉心	1.6	1.9	2.1	1.4
高燃焼度8×8炉心	1.8	2.0	2.0	1.2
9×9炉心	1.7	1.8	2.0	1.3

※1 設計用スクラム曲線は、実際の原子炉より制御棒の効きを少なく想定して設計したものであり、安全評価で設計の妥当性を確認する際に用いられる。

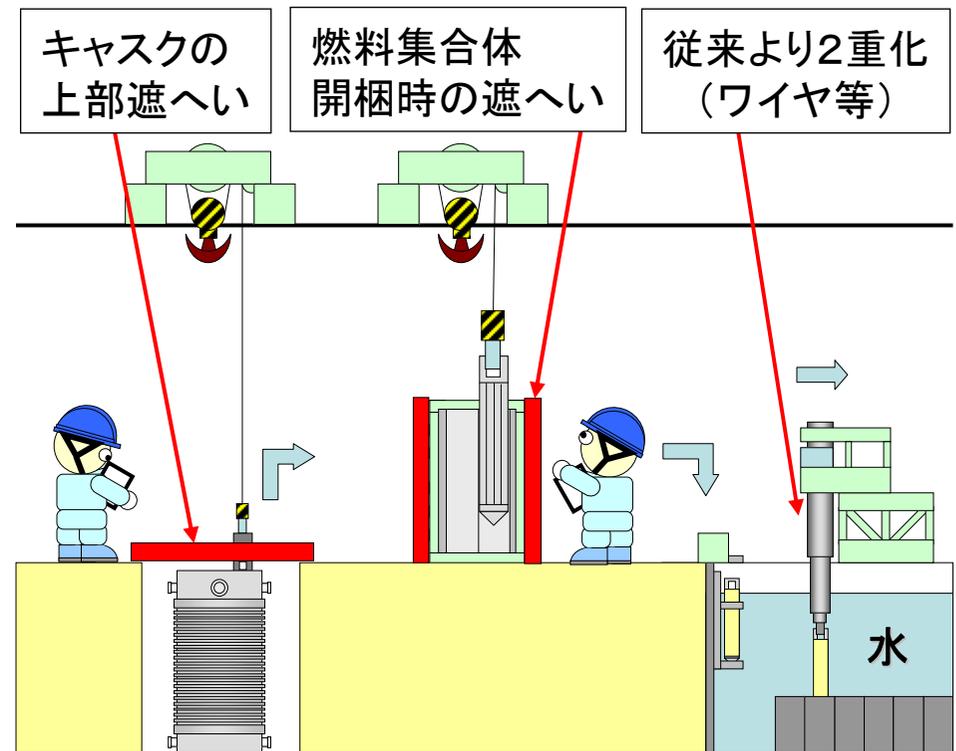
※2 原子炉を緊急停止する能力は、設計用スクラム曲線を1とした比で記載している。

論点11. 作業時の被ばく(その1)

【検討課題】(11-1)MOX燃料は新燃料でもウラン燃料より放射線が強く、輸送や検査時等における燃料取扱時に作業員の被ばくが大きくなるのではないかと。また、燃料取扱中に燃料落下事故が発生した際、ウラン燃料と比較して影響が大きくなるのではないかと。

【電力の見解】作業に合わせた被ばく低減対策を取る事で、ウラン新燃料と同様に扱う事ができる。
MOX燃料が落下した場合の影響はウラン燃料と同等である。

- MOX新燃料は、ウラン新燃料に比べ高線量(先行実績例:表面で1mSv/h程度)でありMOX新燃料の取扱い時は被ばく低減対策として、
 - ①遠隔操作による燃料との距離の確保と燃料近辺での作業時間の短縮
 - ②必要に応じた遮へい体の設置を実施する。
- 燃料の取扱装置は、2重化等の設計をしており燃料が落下することはない。
- 万が一MOX燃料が落下した場合の実効線量は従来のウラン燃料と変わらない(詳細は論点14参照)。



論点11. 作業時の被ばく(その2)

【検討課題】(11-2)使用済MOX燃料は、使用済ウラン燃料に比べて放射線が強くなるが、使用済MOX燃料を貯蔵することにより作業エリアの線量が高くなることはないか。

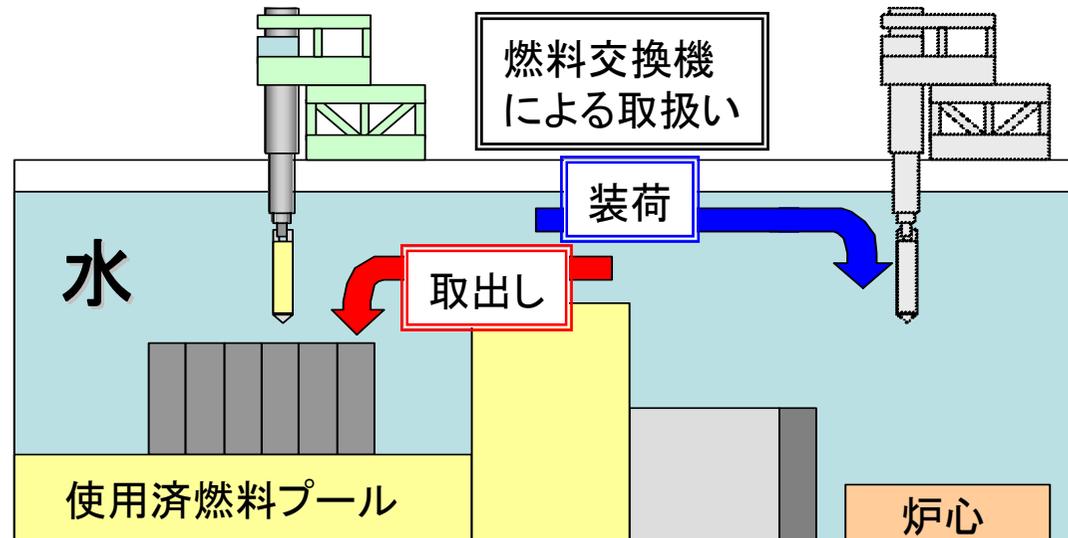
【電力の見解】使用済MOX燃料を貯蔵しても作業エリアの線量が高くなることはない。

- ・使用済MOX燃料は、使用済ウラン燃料と比較して
 - ①ガンマ線強度は低い。
 - ②中性子線強度は高いが、水中で取り扱うため遮へいされる。

燃料の種類	燃料1体当りの線源強度		備考
	ガンマ線 (γ /s/体)	中性子線 (n/s/体)	
ウラン燃料	1.0×10^{17}	0.5×10^9	燃焼度 55GWd/t
MOX燃料	0.9×10^{17}	1.0×10^9	燃焼度 40GWd/t

(注)線源強度は炉停止10日後の値

- ・従って、作業エリアの線量が高くなることはない。

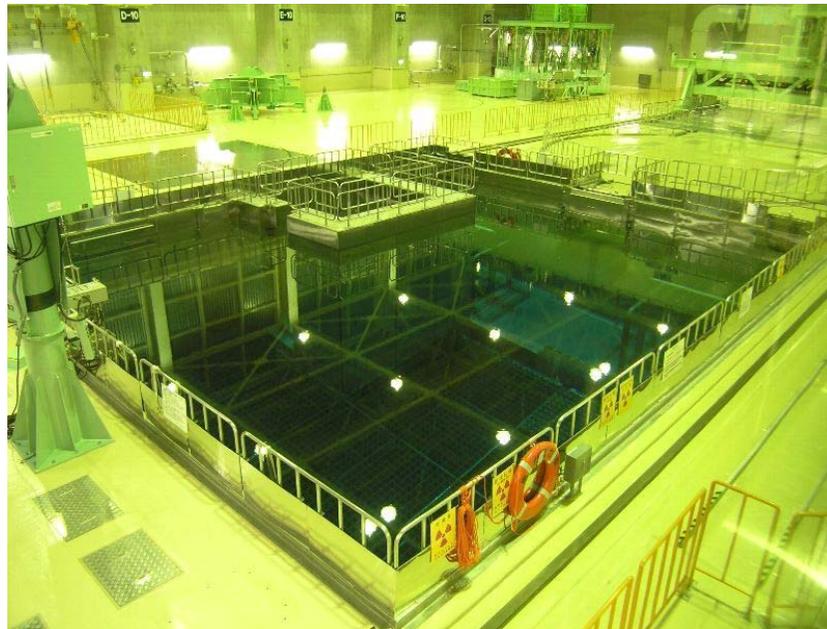


論点12. 貯蔵設備の冷却能力(その1-1)

【検討課題】使用済MOX燃料の発熱量は使用済ウラン燃料に比べて大きいですが、使用済MOX燃料を保管する際、十分に冷却することができるか。

【電力の見解】現在の冷却設備で十分冷却することができる。

- ・使用済MOX燃料は、使用済ウラン燃料と同様に女川3号機の使用済燃料プールに貯蔵する。
- ・MOX燃料は、ウラン燃料に比べて原子炉内での燃焼期間が短いため、使用済MOX燃料と使用済ウラン燃料の崩壊熱は、ほぼ同等である。

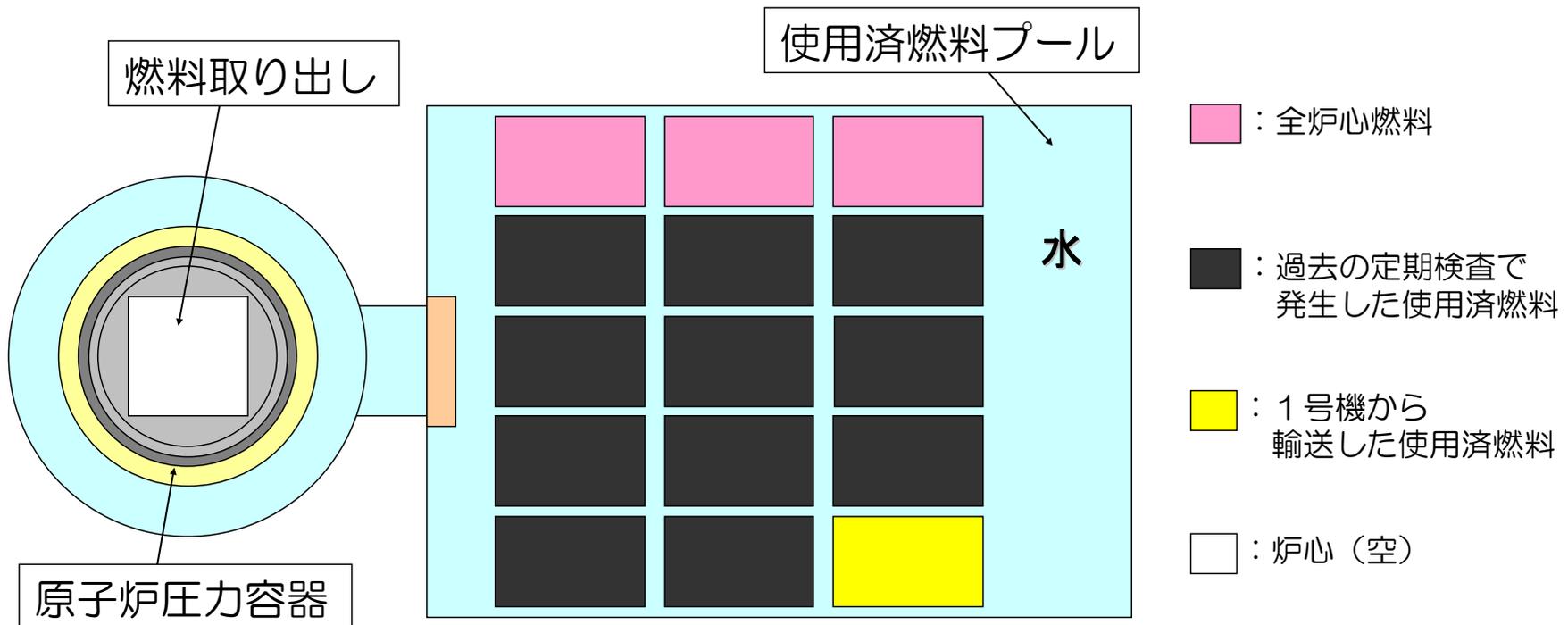


MOX燃料とウラン燃料の崩壊熱

停止後の時間	全発熱量 (kW / 体)	
	MOX燃料 (33GWd/t)	ウラン燃料 (45GWd/t)
取り出し後	9.4	8.5
1年	2.5	1.9
2年	1.2	1.0
10年	0.37	0.30
20年	0.33	0.21

論点12. 貯蔵設備の冷却能力(その1-2)

- ・原子炉内の燃料を全部取り出し、使用済燃料プールが満杯になった状態(最大熱負荷時)でもプール水温をコンクリート健全性のための制限値65°C以下に保つことができる。



原子炉および使用済燃料プールにおける使用済燃料配置概略図(上から見た図)

論点13. 平常時の周辺への影響

【検討課題】MOX燃料を使用することにより、通常の運転時において周辺住民の被ばく量が増えるのではないかと。

【電力の見解】通常運転時の被ばく量は増えることはない。

- ・ 被ばく量に対する影響は、希ガスが支配的である。
- ・ プルトニウムの核分裂が増えると1核分裂あたりに発生する希ガスの割合が減り、被ばく量が低くなるため、この効果は考慮していない(安全側)。

($\mu\text{Sv}/\text{y}$)

被ばく経路	ICRP1990年 勧告取込前		ICRP1990年 勧告取込後		判断 基準
	高燃焼度 8×8 炉心 9×9 炉心	高燃焼度 8×8 炉心 9×9 炉心	高燃焼度 8×8 炉心 9×9 炉心	1/3MOX炉心	
希ガスによる実効線量	約 1.1	約 1.1	約 1.1	約 1.1	50
液体廃棄物（よう素を除く）による実効線量	約 1	約 0.9	約 0.9	約 0.9	
よう素による実効線量	① 約 0.8	② 約 1.7	約 1.7	約 1.7	
評価結果の合計	約 1.3	約 1.3	約 1.3	約 1.3	

【参考】 よう素摂取時の実効線量約2倍 (①約0.8⇒②約1.7 $\mu\text{Sv}/\text{y}$) の理由
 :ICRP1990年勧告で原爆被ばく者の疫学データに基づき実効線量換算係数が見直されたことによるもの。

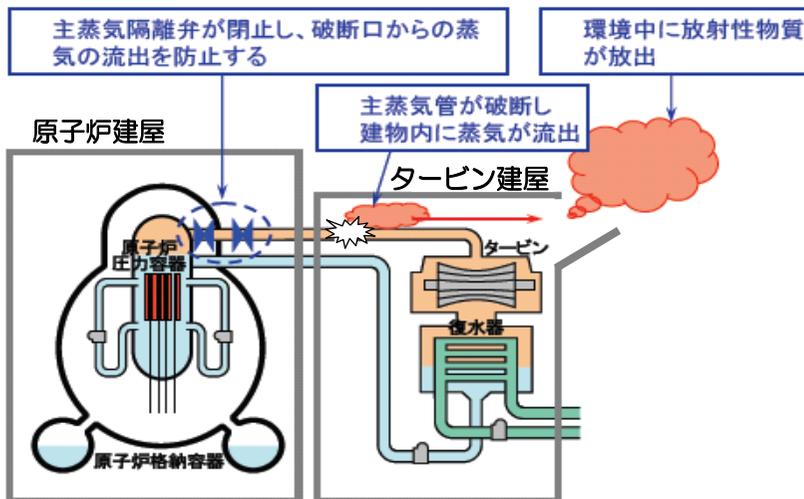
論点14. 事故時の周辺への影響 (その1)

【検討課題】①MOX燃料を使用すると事故が発生した際、住民の被ばく量が増えるのではないか

【電力の見解】事故時の被ばく量はウラン燃料の場合と変わらない。

	ICRP1990年勧告 取込前	ICRP1990年勧告 取込後			判断 基準	(mSv) ※5mSvを判断の目安として安全設計の妥当性を確認している。	
	高燃焼度8×8, 9×9炉心	9×9炉心	1/3MOX炉心				
			女川3号	島根2号			浜岡4号
主蒸気管破断	約0.031	約0.090	約0.090	約0.072	約0.074	5 ※	

9×9燃料とMOX燃料では、燃料の出力及び燃料内の冷却材の流れがほぼ同じであり、事故時の水や蒸気の流出量に差は無いことから被ばく量は変わらない。



原子炉冷却材浄化系容量の相違により、仮定する冷却材中の核分裂生成物の濃度は女川3号炉がわずかに高い(※)。
 事故時に冷却材とともに放出される核分裂生成物の量も多くなる結果となった。
 但し、女川原子力発電所の被ばく線量は世界的に最も低い(優れている)。
 (※):解析では、事故発生前から燃料棒に破損が発生していて冷却材中の核分裂生成物濃度が高くなるという安全側の条件を設定している。

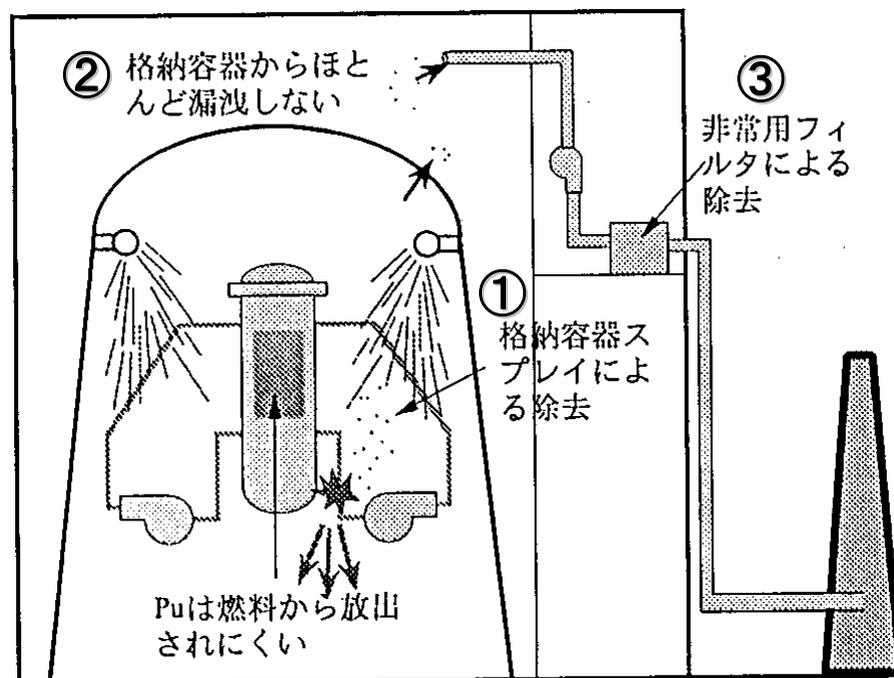
論点14. 事故時の周辺への影響（その2）

16

【検討課題】 ② プルトニウムの放出の可能性はないのか。

【電力の見解】 仮に格納容器内にプルトニウム等の粒子状物質が放出されたとしても、以下の理由により、プルトニウムが周辺環境に放出されることはない。

- ①格納容器スプレイ系 ⇒ 放射性物質の除去(除去効率:50%以上)。
- ②格納容器は高气密性 ⇒ 格納容器外への漏洩率は低い(格納容器体積に対して0.5%/日)。
- ③格納容器から建屋内に漏えいした場合 ⇒ 非常用ガス処理系の高性能エアフィルタにより環境へ放出される粒子状物質を除去(捕集効率は99.9%以上)



(参考) プルトニウムは沸点が高く(酸化プルトニウムの沸点3227°C)、燃料の温度が上がっても燃料の外へはほとんど放出されない。

論点14. 事故時の周辺への影響（その3）

【検討課題】③炉心溶融等の過酷事故対策が必要ではないか。

【電力の見解】女川3号機は、アクシデントマネジメント対策を実施しており、確率論的安全評価の結果も、原子力安全委員会の目標を十分下回っているため、追加対策をとる必要はない。

確率論的安全評価結果

	女川3号機の評価	原子力安全委員会の目標
炉心損傷頻度	8.7×10^{-9} / (炉年) (1億年に1回)	1×10^{-4} / (炉年) (1万年に1回)
格納容器破損頻度	4.5×10^{-10} / (炉年) (20億年に1回)	1×10^{-5} / (炉年) (10万年に1回)

女川3号機は目標よりも4桁以上低い

なお、評価上使用している崩壊熱はウラン燃料の崩壊熱である。MOX燃料の燃焼度はウラン燃料よりも低いため、事象発生直後の崩壊熱はより小さく、評価結果は変わらない。