

伊方発電所第 3 号機  
ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 燃料  
原子燃料のリサイクル利用  
の採用計画等について

平成 16 年 6 月

四国電力株式会社

## 目 次

1 .採用理由	1
2 .MOX 燃料利用の概要	3
3 .MOX 燃料採用の安全性	6
4 .MOX 燃料の成型加工・輸送	10
5 .採用時期	11
[ 参考資料 - 1 ] 原子燃料サイクルの概要	12
[ 参考資料 - 2 ] MOX 燃料に係る経緯	13
[ 参考資料 - 3 ] MOX 燃料の使用実績	14
[ 参考資料 - 4 ] MOX 燃料採用に係る許認可	15
同時に原子炉設置変更許可申請を行う案件について	
1 .伊方発電所 1,2 号機 安全保護回路等の変更	17
2 .伊方発電所 1,2,3 号機 放射性廃棄物廃棄施設の変更	19
[ 添付資料 ]	
ウラン・プルトニウム混合酸化物 ( MOX ) 燃料 の採用計画に係る補足説明	21

## 1. 採用理由

使い終わったウラン燃料（使用済燃料）には、運転中に新しく生成したプルトニウムが有用な燃料資源として残っている。

今回、伊方発電所 3 号機で採用を計画しているウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX<sup>(\*)</sup>）燃料は、再処理によってこのプルトニウムを回収して、ウランに混合したものであり、原子燃料としてリサイクル利用するものである。

### （1）プルサーマル計画の経緯

MOX 燃料を原子力発電所（軽水炉）で使用することをプルサーマルといい、これについては、原子力開発の初期段階である昭和 36 年の国の「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（以下「原子力長計」という。）において、ウランの代替利用として位置付けられ、最新の原子力長計（平成 12 年）に至るまで、プルサーマルを実施することが一貫して国の方針として定められている。

一方、当社を含む電気事業者は、平成 9 年 2 月、原子力委員会や閣議において改めて示された原子燃料サイクルの推進方針を受け、2010 年（平成 22 年）までに 16～18 基のプラントで導入するという全電力大のプルサーマル計画を公表し、現在、その実現に向け取り組んでいる。

なお、最近においても、平成 15 年 8 月に原子力委員会がとりまとめた原子燃料サイクルの全体像である「核燃料サイクルについて」や同年 10 月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても、プルサーマルの重要性が再確認されているところである。

当社としては、原子燃料サイクルの重要性を認識し、その一環としてのプルサーマルを伊方発電所 3 号機において 2010 年度までに導入することを目指し、着実に計画を進めていくこととしている。

---

(\*) MOX : Mixed Oxide

## ( 2 ) 国内外の利用状況等

MOX 燃料は、海外では 40 年以上も前から欧州を中心に利用されており、平成 14 年 12 月末現在で、約 4,000 体の豊富な使用実績があり、既に確立された技術である。

一方、国内においては、MOX 燃料の本格利用に先駆けて、実用炉における MOX 燃料の少数体実証計画として、

- ・日本原子力発電(株)敦賀発電所 1 号機 (BWR<sup>(\*1)</sup>) で昭和 61 年 6 月から平成 2 年 2 月まで 2 体
- ・関西電力(株)美浜発電所 1 号機 (PWR<sup>(\*2)</sup>) で昭和 63 年 3 月から平成 3 年 12 月まで 4 体

が、計画どおり順調に使用され、その後の照射後試験においてもその健全性が確認されている。また、MOX 燃料を使用する新型転換炉「ふげん」でも、20 年以上にわたり 700 体以上の使用実績がある。

MOX 燃料は、ウラン燃料に比べて、中性子を吸収しやすいなど原子炉内での特性が若干異なるものの、MOX 燃料の使用割合が炉心全体の約 1/3 までの範囲においては、ウラン燃料と基本的に同じ安全設計・評価が可能であることが、国の原子力安全委員会 (平成 7 年 6 月) で確認されている。

これらを踏まえて、先行電力である関西電力(株)は、伊方発電所 3 号機と同じタイプの高浜発電所 3,4 号機において、MOX 燃料採用に係る国の原子炉設置変更許可を平成 10 年 12 月に取得している。

## ( 3 ) 伊方発電所での採用理由

当社は、国の原子燃料サイクル政策を踏まえ、伊方発電所 3 号機で MOX 燃料を採用することにより、再処理で回収したプルトニウムを原子燃料としてリサイクル利用し、ウラン資源の有効利用を図ることができる。

また、これにより、我が国の原子燃料サイクルを確立し、将来にわたるエネルギーの安定供給に資することができる。

以上のことから、MOX 燃料を採用するものである。

---

(\*1) BWR : Boiling Water Reactor ( 沸騰水型原子炉 )

(\*2) PWR : Pressurized Water Reactor ( 加圧水型原子炉 )

## 2 . MOX 燃料利用の概要

### ( 1 ) MOX 燃料の概要

MOX 燃料は、ペレット材料としてウラン・プルトニウム混合酸化物を使用するが、それ以外の燃料集合体の基本的な構造（燃料棒配列、形状等）はウラン燃料と同じである。

今回採用を計画している MOX 燃料は、高燃焼度ウラン燃料ステップ 1（以下、「ステップ 1 燃料」という。）と同等の性能を持たせるように設計しており、プルトニウム富化度<sup>(\*1)</sup>や燃焼度<sup>(\*2)</sup>制限値等の基本仕様は、既に原子炉設置変更許可を取得した関西電力(株)高浜発電所 3,4 号機の MOX 燃料と同一である。

海外で利用されている PWR 用 MOX 燃料の大半（約 2,000 体）が伊方発電所 3 号機と同じ燃料タイプ（17×17 型）であり、国内でも、美浜発電所 1 号機で少数体の MOX 燃料（PWR,14×14 型,4 体）を使用しており、これらの実績から、MOX 燃料の健全性を把握している。

#### プルトニウム富化度

ペレット中のプルトニウムの割合を示すプルトニウム富化度は、その燃焼能力がステップ 1 燃料（ウラン濃縮度約 4.1wt%）相当となるように設定する。

また、MOX 燃料は、燃料集合体外周部の燃料棒出力が高くなる傾向があるため、原子炉内で均等に燃焼するよう、3 種類の富化度の燃料棒を採用し、集合体内で適切に配置する。

#### 燃焼度制限値

MOX 燃料集合体の燃焼度制限値は、ステップ 1 燃料（燃焼度制限値：48,000MWd/t）より低めの 45,000MWd/t とする。

MOX 燃料は、集合体内の燃料棒の燃焼度が、ステップ 1 燃料に比べ若干ばらつきが大きくなるため、燃料棒の最高燃焼度がステップ 1 燃料を超えないよう、集合体平均の燃焼度制限値を低く設定する。

### ( 2 ) 原子炉内での MOX 燃料使用体数

MOX 燃料は、定期検査時の取替燃料の一部として、ウラン燃料とともに用いる。

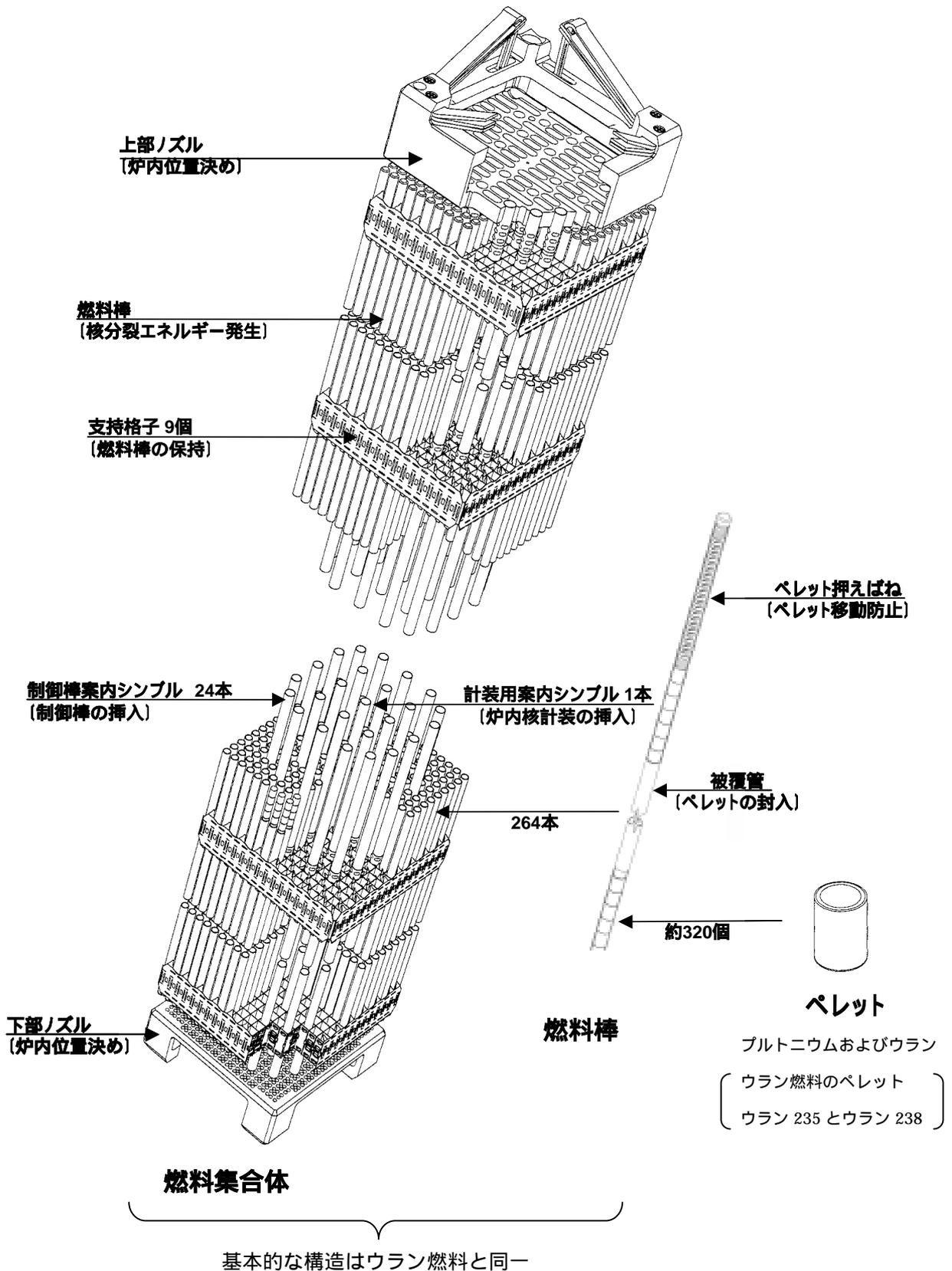
原子炉内での MOX 燃料の使用体数は、伊方発電所 3 号機原子炉の全燃料 157 体中 40 体（原子炉内の使用割合：約 1/4）以下とする。これにより、当社は、将来にわたり再処理によって回収されるプルトニウムを余剰なく、計画的にリサイクル利用できる見通しである。

---

(\*1) MOX 燃料中にどの程度プルトニウムが含まれるかを示したものであり、プルトニウム富化度 = 全プルトニウム量 / ( 全プルトニウム量 + 全ウラン量 ) で定義される。

(\*2) 1 トン(t)の燃料（ウランおよびプルトニウム）がどれくらいの熱量を出したかを示す指標であり、1,000kW(1MW)の熱量を 1 日(d)出し続けた場合の熱の大きさを単位とし、MWd/t で表す。

MOX 燃料集合体概略図



MOX 燃料の主要仕様

		MOX 燃料	(参考) 高燃焼度ウラン燃料	
			ステップ 1	ステップ 2
ペレット	材料	ウラン・プルトニウム混合酸化物	二酸化ウラン	同左
	ウラン濃縮度	約 0.2 ~ 約 0.4wt%	約 4.1wt%	約 4.8wt%
	プルトニウム富化度 ペレット最大	13wt%以下 (核分裂性プルトニウム富化度： 8wt%以下)	-	-
	集合体平均	約 4.1wt%ウラン燃料 相当以下	-	-
	プルトニウム組成比	原子炉級 <sup>(*)1</sup>	-	-
	初期密度	約 95% 理論密度	同左	約 97% 理論密度
被覆管	材料	ジルコニウム合金	同左	改良ジルコニウム合金
	外径 肉厚	約 9.5mm 約 0.6mm	同左 同左	同左 同左
燃料棒	全長	約 3.9m	同左	同左
燃料集合体	配列	17×17	同左	同左
	全長	約 4.1m	同左	同左
	燃料棒数	264 本	同左	同左
	燃焼度制限値	45,000 MWd/t	48,000 MWd/t	55,000 MWd/t

(\*)1 原子力発電所で使用された後にでてくる使用済燃料を再処理することにより取り出されたプルトニウムを「原子炉級プルトニウム」と呼ぶ。プルトニウム中に含まれる核分裂性プルトニウムの割合が 8 割程度までのものをいう。

### 3 . MOX 燃料採用の安全性

#### ( 1 ) 原子炉運転中の安全性

MOX 燃料は、ウラン燃料に対して一般的に次のような主な特徴がある。

- ・ MOX 燃料中のプルトニウムの量が増加すると、ペレットの融点が低下する。
- ・ プルトニウムは中性子を吸収しやすいため、プルトニウムの量が増加すると制御棒や 1 次冷却水中のほう酸が中性子を吸収する量が相対的に減少する。

しかしながら、

- ・ MOX 燃料ペレットのプルトニウム含有量が約 1 割であり、残りの約 9 割はウランであることから、融点等の物性値はウラン燃料から大きく異なることはない。
- ・ 現行のウラン燃料においてもウラン 238 から生成されたプルトニウムが核分裂して、全体の約 1/3 の発電に寄与しており、MOX 燃料を炉心全体で約 1/4 の割合で使用した場合には、その寄与は約 1/2 に増加するが、原子炉の特性への影響は大きくない。

これらのことは、国の原子力安全委員会が平成 7 年 6 月に了承した「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」の報告書においても、MOX 燃料の使用割合が炉心全体の約 1/3 までの範囲では、以下のとおり、ウラン燃料と基本的に同じ安全設計・評価が可能であると確認されている。

#### ( 主な検討結果 )

- ・ MOX 燃料の軽水炉での使用は、海外で実用規模で継続使用されており、相当の実績があること、また、照射後試験により、MOX ペレットおよび燃料棒の照射挙動はウランと同等であることが確認されており、基本的な技術は確立されている。
- ・ MOX 燃料は、その基本構造がウラン燃料と同一であるので、燃料被覆管と冷却材間の熱水力特性はウラン燃料と変わらない。また、ウラン燃料との共存性についても問題ない。
- ・ MOX 燃料の照射データは採取されており、ウラン燃料で用いている燃料設計手法に MOX 燃料の特性を取り込むことにより評価可能である。また、MOX 燃料を使用した炉心の核設計についても、プルトニウム富化度分布の影響等を取り扱えるようにした設計手法により評価可能である。

また、伊方発電所 3 号機で MOX 燃料を採用した場合の評価結果は、以下のとおりであり、その安全性については問題ない。

#### 燃料中心最高温度

MOX 燃料ペレットの融点は、プルトニウム富化度が大きくなるに従って低下するが、燃料中心最高温度は基準値に対して十分余裕がある。

	MOX燃料	(参考) ウラン燃料 (ステップ2燃料)
燃料中心最高温度( ) (定格出力運転時)	約1,740	約1,740
基準値( )	2,500未満	2,580未満

#### 原子炉の制御能力

##### a . 通常運転時の制御能力

通常運転時に行う原子炉の制御は、ウランやプルトニウムの燃焼による変化など緩やかな変化に対応するものであり、この制御は、中性子を吸収するほう酸の1次冷却水中の濃度を調整することによって行い、制御棒はほとんど引き抜かれた状態である。これらは、MOX 燃料を採用しても同じである。

一方、原子炉を停止する際には、ほう酸水、制御棒のいずれでも、100%出力から停止状態まで出力を下げる能力を有している。必要なほう酸水量は、MOX 燃料を採用しても、現状のほう酸タンクの容量で対応可能である。

##### b . 事故時の制御能力

万一の事故が発生した場合、原子炉は制御棒が瞬時に挿入され停止される。MOX 燃料に制御棒が挿入された場合、制御棒が中性子を吸収する量はウラン燃料に比べやや減少する傾向になるが、ウラン燃料と MOX 燃料を原子炉内で

適切に配置することにより、万一の事故を想定した安全解析<sup>(\*1)</sup>上の反応度停止余裕<sup>(\*2)</sup>は、ウラン燃料炉心と同程度に確保できる。

	MOX燃料炉心	(参考) ウラン燃料炉心 (ステップ2燃料)	基準値
反応度停止余裕 (% k/k)	2.48 <sup>( )</sup>	2.27	1.8以上

( ) 約 1/4MOX 燃料を使用した典型的な原子炉 (平衡炉心) についての解析結果

また、安全解析では、全ての制御棒が挿入され原子炉が停止した状態で発生する事故も想定しており、こうした時には、燃料取替用水タンクに貯蔵しているほう酸水を原子炉に注入して事故を収める。MOX 燃料を採用すると、ほう酸が中性子を吸収する量が減少するが、貯蔵しているほう酸水の濃度を 3,400ppm から 4,400ppm に予め高めておくことで対応可能である。

<sup>(\*1)</sup> 安全解析においては、最大の制御能力をもつ制御棒 1 体が挿入不可能で、残りのすべての制御棒の能力も 9 割しかないという保守的な仮定のもとに、原子炉を未臨界にする余裕をどれだけ持っているかを評価している。

なお、実際の運転においては、制御棒が 1 体でも挿入できなくなった場合には、原子炉を停止することとしている。

<sup>(\*2)</sup> 定格出力運転から制御棒により原子炉を未臨界にする余裕をどれだけ持っているかを示す指標。反応度停止余裕 = 0 (臨界) > 0 (未臨界)。

## ( 2 ) 取扱・貯蔵時の安全性

### 貯蔵設備の未臨界性

MOX 新燃料は、発電所に受け入れた後、使用済燃料ピットで貯蔵する。

MOX 燃料は、ステップ 1 燃料(ウラン濃縮度約 4.1wt%)相当の燃焼能力となるように設定しており、使用済燃料ピットは、ウラン濃縮度 5.05wt%の新燃料を貯蔵しても臨界にならないように余裕を持って設計されていることから、現状の設備で問題ない。

### 取扱・貯蔵設備の遮へい能力

MOX 新燃料は、プルトニウムなどの放射性核種を含み、ウラン新燃料に比べて線量率が高くなるため、発電所への受け入れ時には、遮へい能力を有する専用の取扱設備等を用いて取扱い、使用済燃料ピットに貯蔵する。これにより、作業員の線量を低く抑えることができる。

また、MOX 使用済燃料は、ウラン使用済燃料と同様に、使用済燃料ピットで貯蔵する。MOX 使用済燃料は、ウラン使用済燃料に比べ、線の線源強度は低く、中性子の線源強度は高くなるが、中性子は水中で十分に減衰される。このため、現状の燃料取扱設備で取扱い、使用済燃料ピットに貯蔵することにより、作業エリアの線量率は高くなることはない。

### 貯蔵設備の冷却能力

原子炉内で使用された MOX 燃料は、ウラン燃料に比べ、より高次のアクチニド核種<sup>(\*)1</sup>が多く存在することから、長期的に見た場合、使用済燃料ピットで貯蔵される際の発熱量が、ウラン燃料に比べてやや増加し、このため使用済燃料ピット水温は若干上昇する。

しかし、冷却設備のうちポンプ 1 台が停止した場合等の厳しい条件で評価を行っても、使用済燃料ピット水温は約 58 であり基準値(65 )に対して余裕がある。<sup>(\*)2</sup>

発電所における MOX 燃料の安全性については、今後、国の安全審査において、関係法令、指針等に基づき確認される。

---

(\*)1 原子番号 90 のトリウムから 103 のローレンシウムまでの元素の総称。一般に、長寿命の放射能を持ち、崩壊するが、重い元素では自発核分裂も行う。MOX 燃料はウラン燃料に比べて燃焼に伴うアメリカシウム(原子番号 95)、キュリウム(原子番号 96)等高次のアクチニドの増加量が多い。

(\*)2 使用済燃料ピット冷却器 3 基での評価(平成 18 年度の定期検査において 1 基増設する。)

## 4 . MOX 燃料の成型加工・輸送

国の安全審査を受けた後、MOX 燃料の成型加工・輸送等を行うことになるが、当社は、以下の基本的な方針に基づき、万全を期して取り組んでいく。

### ( 1 ) 成型加工

海外で再処理し回収されているプルトニウムについては、海外の MOX 燃料工場  
で成型加工し、今後六ヶ所再処理工場から回収されるプルトニウムについては、国  
内に建設が予定されている MOX 燃料工場  
で成型加工する計画である。

MOX 燃料の加工にあたっては、BNFL 製 MOX 燃料データ問題により、輸入燃  
料体検査制度の改善を目的として改正された電気事業法施行規則や国の通達等を  
遵守し、品質保証活動を確実に実施する。

#### 電気事業法施行規則の改正および国の通達の概要

##### ( 電気事業法施行規則 )

輸入燃料体検査申請書に「品質保証に関する説明書」を添付する。

##### ( 国の通達 )

- ・ 上記「品質保証に関する説明書」において、当面の間、以下の事項を明記する。
  - MOX 燃料加工事業者の評価および監査
  - 品質保証に係る異常事態発生時の処置
  - MOX 燃料工場における検査・試験管理
  - MOX 燃料工場における製造状況および品質保証活動の確認
- ・ MOX 燃料の製造開始に先立ち、原子炉設置変更許可を取得し、加工着手前には輸入燃料体検査申請を行う。

### ( 2 ) 輸送

MOX 燃料の海上輸送にあたっては、国際的な安全基準を満たす専用の輸送船、  
専用の輸送容器を使用して、万全の安全対策を講じる。また、日米原子力協定など、  
国際的な核物質防護の要件を十分に満足して実施する。

## 5 . 採用時期

MOX 燃料は、原子炉設置変更許可取得後、海外の MOX 燃料工場で成型加工を開始し、平成 22 年度（2010 年度）までの伊方発電所 3 号機定期検査時を目途に採用する。

### 採用スケジュール

年度 項目	平成 16 (2004)	平成 17 (2005)	平成 18 (2006)	平成 19 (2007)	平成 20 (2008)	平成 21 (2009)	平成 22 (2010)
原子炉設置変更許可 工事計画認可	[ ]					[ ]	
成型加工・輸送等			[ ]				
使用開始							3号機

以 上

## 参 考 资 料



## MOX燃料に係る経緯

年度	61	62	63	平成元	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
少数体実証計画	敦賀1号機 (BWR:2体)				照射後試験															
		美浜1号機 (PWR:4体)					照射後試験													
データ取得・評価	海外商業炉 / 試験炉におけるMOX燃料照射データ取得・評価												照射データ拡充・評価							
国の検討									MOX燃料検討小委員会		原子力安全委員会了承									
先行電力 原子炉設置変更許可 取得実績 (申請～許可)											関西電力高浜3・4号機			東京電力福島第一3号機			東京電力柏崎刈羽3号機			
(参考)	当初燃料 (39,000MWd/t)							高燃焼度燃料ステップ1 (48,000MWd/t)												
ウラン燃料の採用 (PWR)																				高燃焼度燃料ステップ2 許認可取得(55,000MWd/t)

## MOX 燃料の使用実績

各国の MOX 燃料使用実績

(平成 14 年 12 月末現在)

国名	プラント数	累積装荷体数	装荷期間
日本	2 基	6 体	1986 ~ 1991
ベルギー	3 基	289 体	1963 ~
フランス	21 基	1,822 体	1974 ~
ドイツ	14 基	1,420 体	1966 ~
インド	2 基	10 体	1994 ~ 2000
イタリア	2 基	70 体	1968 ~ 1981
オランダ	1 基	7 体	1971 ~ 1987
スウェーデン	1 基	3 体	1974 ~ 1979
スイス	3 基	280 体	1978 ~
アメリカ	6 基	91 体	1965 ~ 1985
計	55 基	3,998 体	

(出典：資源エネルギー庁調べ)

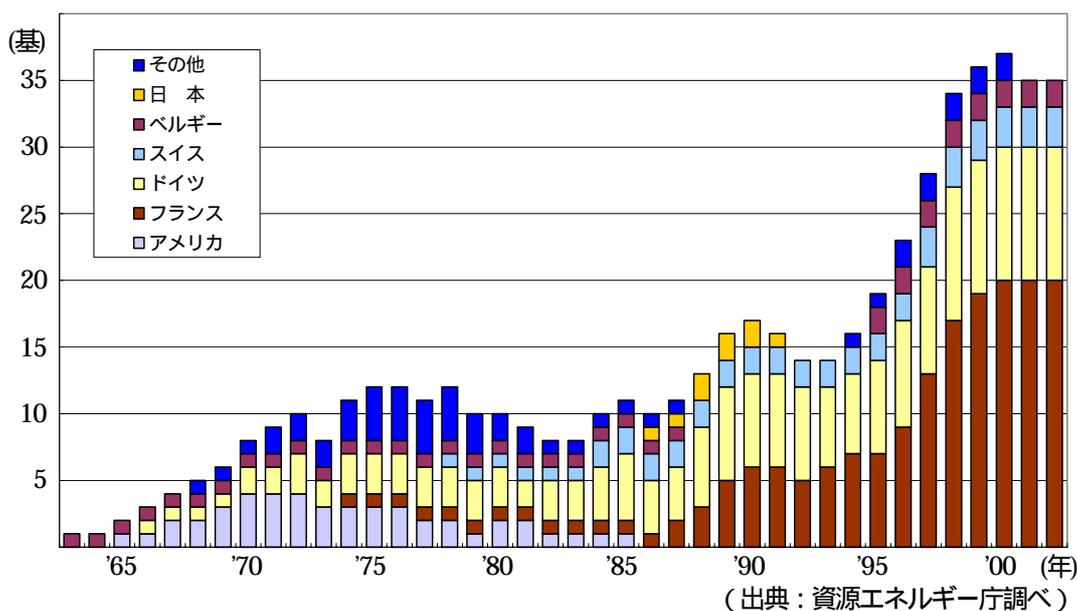
新型転換炉「ふげん」の MOX 燃料使用実績

(平成 15 年 3 月運転終了時)

国名	プラント名	累積装荷体数	装荷期間
日本	ふげん	772 体	1978 ~ 2003

(出典：サイクル機構技報，2003 年 9 月)

各国の MOX 燃料使用基数の推移



## MOX 燃料採用に係る許認可

法令に基づき、国の原子炉設置変更許可、工事計画認可および使用前検査を受ける。  
 なお、MOX 燃料の海外での成型加工に関しては、国の輸入燃料体検査を受けるとともに、輸送に関しては、国の輸送物設計承認、輸送容器承認を受ける。

項 目	主 要 内 容
原子炉設置変更許可 (安全審査)	<p>核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に基づき、原子炉施設の変更の内容について以下の審査を受ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・変更後の設計が、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」、「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」および関連指針に適合すること</li> <li>・変更後の平常運転時における原子炉施設周辺の一般公衆の受ける線量が、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」および関連指針に適合すること</li> <li>・変更後の原子炉施設が、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」および関連指針に適合すること</li> </ul>
工 事 計 画 認 可	<p>電気事業法に基づき、工事の計画について以下の審査を受ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・電気工作物が、経済産業省令で定める技術基準に適合しないものでないこと</li> </ul>
使 用 前 検 査	<p>電気事業法に基づき、以下の検査を受ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・工事が認可を受けた工事の計画に従って行われたものであること</li> <li>・電気工作物が、経済産業省令で定める技術基準に適合しないものでないこと</li> </ul>

項 目	主 要 内 容
輸 入 燃 料 体 検 査	<p>電気事業法に基づき、以下の検査を受ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸入した燃料体が、経済産業省令で定める技術基準に適合すること</li> </ul>
輸 送 物 設 計 承 認	<p>危険物船舶運送及び貯蔵規則等に基づき、以下の審査を受ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送物が、国土交通省令等で定める技術上の基準に適合すること</li> </ul>
輸 送 容 器 承 認	<p>危険物船舶運送及び貯蔵規則等に基づき、以下の検査を受ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送容器が、承認された設計に従って製作されていること</li> </ul>

同時に原子炉設置変更許可申請を行う案件について

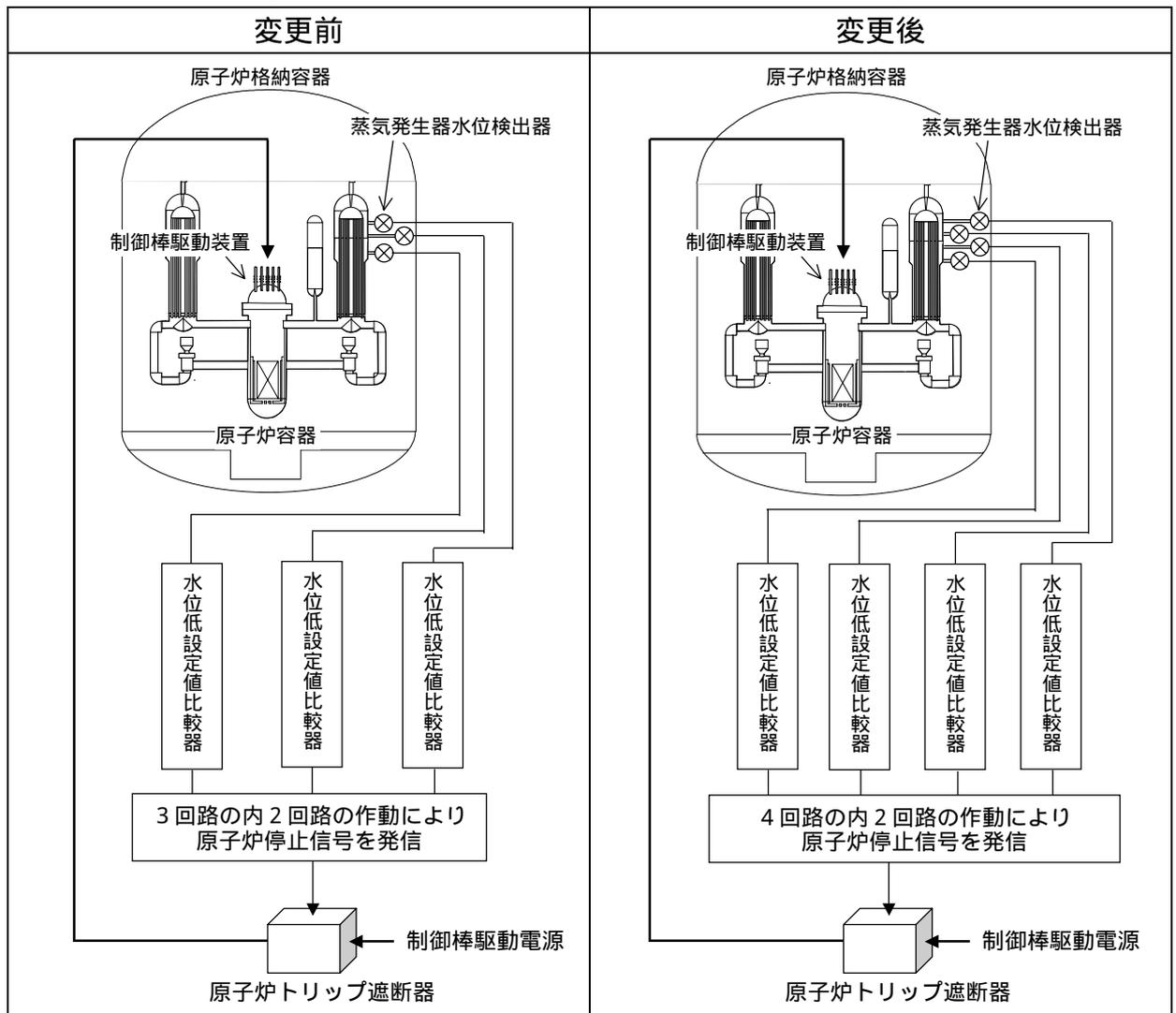
# 1 . 伊方発電所 1,2 号機 安全保護回路等の変更

1,2 号機では、原子炉の停止信号や非常用炉心冷却設備の作動信号を発生させる制御装置（安全保護回路）と中央制御盤等を最新のデジタル式に取り替える予定であるが、これに伴い、以下の変更を行う。

## ( 1 ) 安全保護回路の変更

安全保護回路は多重化されており、1,2 号機では主に 3 回路のうち 2 回路が動作すれば信号を発生させる構成となっている。安全保護回路の取替に際しては、最新の 3 号機と同様に、4 回路のうち 2 回路が動作すれば信号を発生させる構成に変更し、1 回路が点検の場合でも 3 回路の多重性を確保することで運用性の向上を図る。

### 4 回路への変更（例：蒸気発生器水位低による原子炉停止信号）



また、これに伴い、安全保護回路の 22 種類の信号の内、以下の 2 種類を 3 号機と同じに変更する。

#### 信号の種類の変更

信号	変更前	変更後
蒸気発生器関連の 原子炉停止信号	「蒸気発生器水位異常低」または 「蒸気発生器蒸気給水流量差大」	「蒸気発生器水位異常低」
主蒸気ライン隔離 信号	「主蒸気流量異常高と非常用炉心 冷却設備作動の一致」または 「主蒸気流量高と 1 次冷却材平均 温度異常低と非常用炉心冷却設 備作動の一致」	「主蒸気ライン圧力異常低」 または 「主蒸気ライン圧力減少率高」

#### ( 2 ) 蓄電池の変更

安全保護回路等は電源が喪失した場合でも動作可能なように蓄電池に接続されているが、取り替えに伴い若干負荷が増加するため、蓄電池を増設して余裕を確保する。

#### ( 3 ) 実施時期

安全保護回路や中央制御盤は、1,2 号機とも平成 21 年度に取替工事を行うこととしており、安全保護回路はこれに合わせて変更する。蓄電池は取替工事の開始までに増設することとし、平成 19 年度から平成 20 年度に工事を行う。

## 2 . 伊方発電所 1,2,3 号機 放射性廃棄物廃棄施設の変更

これまでの運用実績等から 1,2,3 号機放射性廃棄物廃棄施設について、一部設備の共用化・廃止等を行い、設備の効率的な運用等を図る。

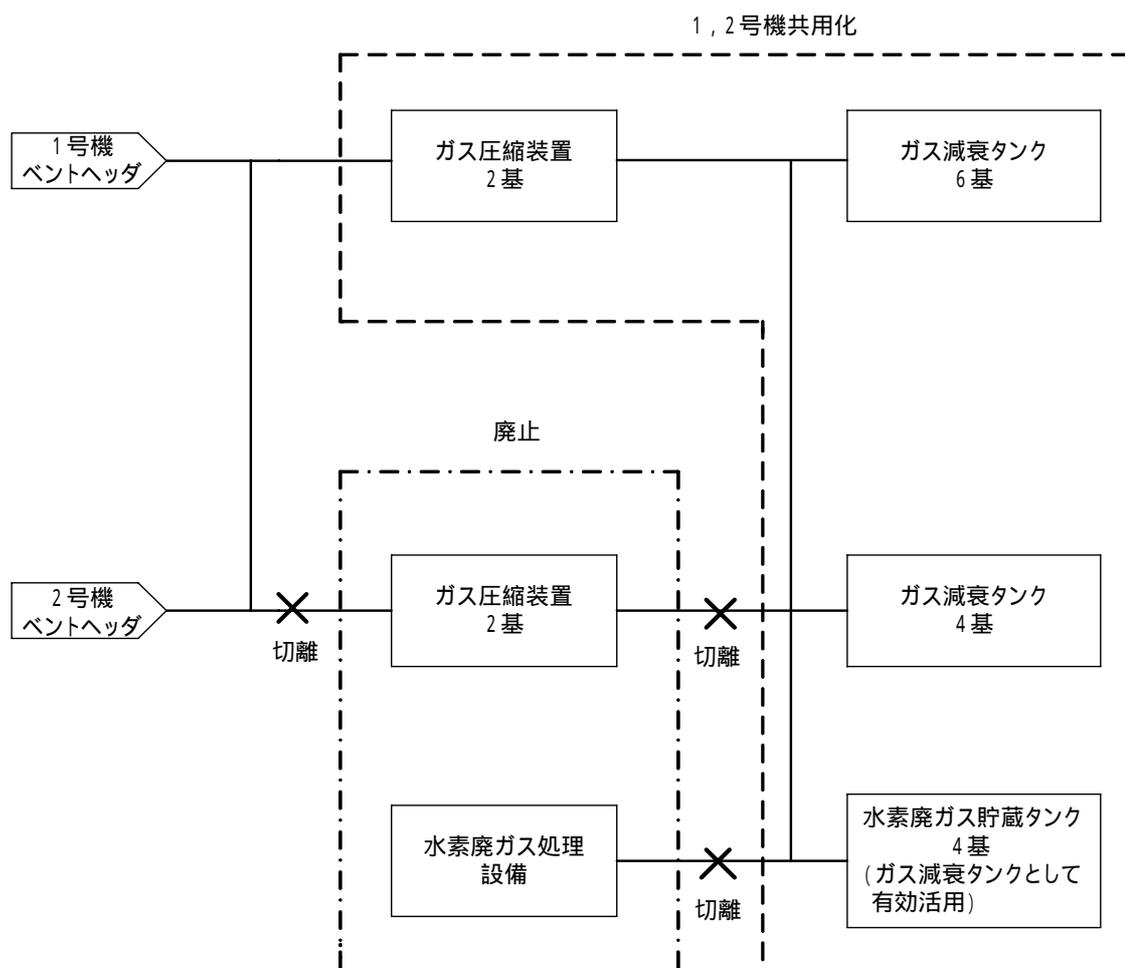
### ( 1 ) 気体廃棄物廃棄設備の変更について

水素廃ガス処理設備のうち水素廃ガス貯蔵タンクをガス減衰タンクとして有効活用するとともに、既存のガス減衰タンクを 1,2 号機で共用化し、ガス減衰タンクの貯蔵容量を増加させ、放射性希ガスの減衰を図る。

これまでの運用実績から休止状態となっている水素廃ガス処理設備のその他の設備を廃止する。

ガス圧縮装置は、1 号機のものを 1,2 号機での共用として使用する。

### 気体廃棄物廃棄設備の変更

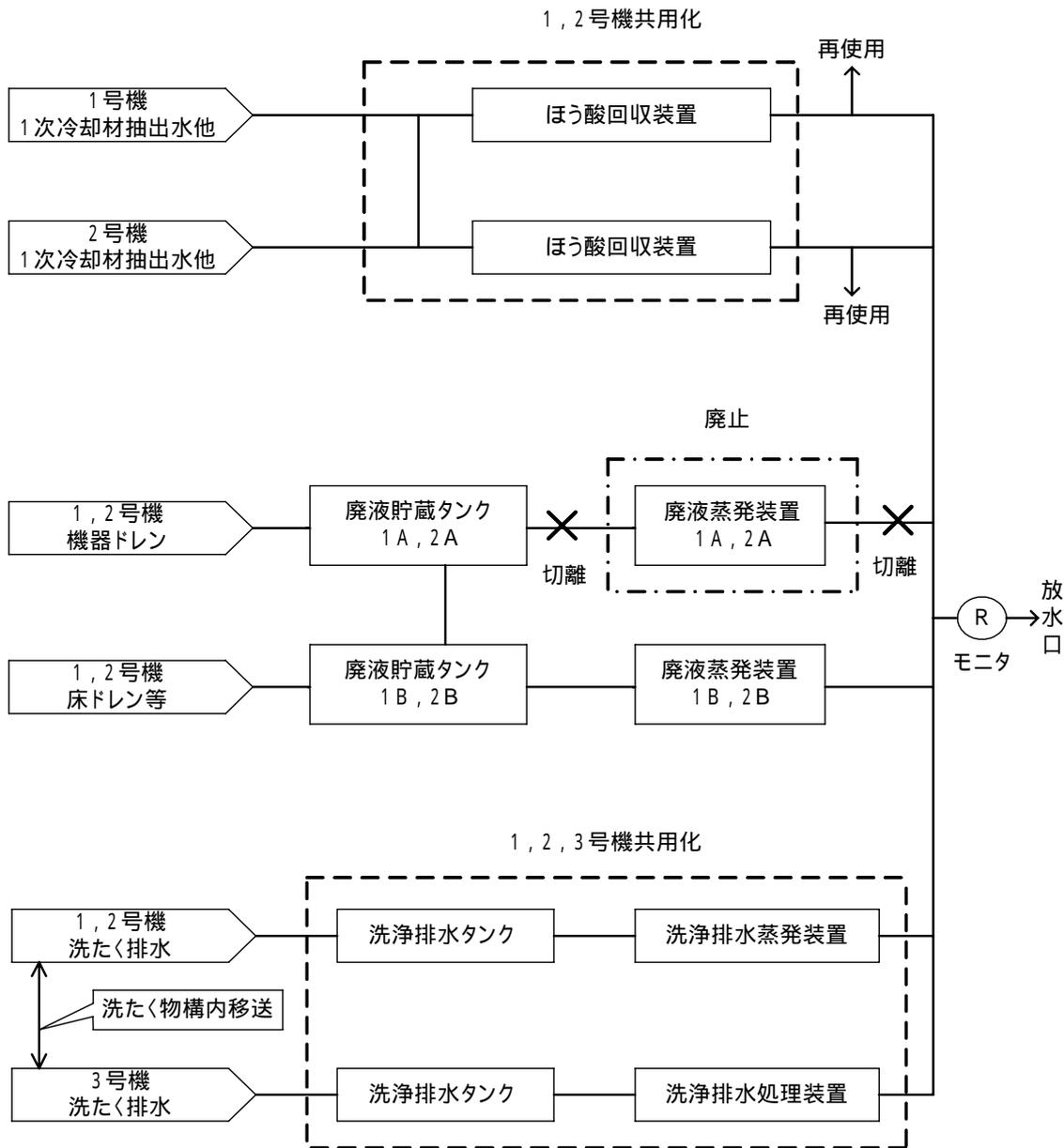


( 2 ) 液体廃棄物廃棄設備の変更について

ほう酸回収装置を 1,2 号機で共用化する。

これまでの運用実績から、休止状態となっている廃液蒸発装置 1A,2A を廃止する。  
1,2 号機と 3 号機の洗濯物を相互に構内移送して洗浄できるように、1,2 号機と 3 号機の洗浄排水処理設備を 1,2,3 号機で共用化する。

液体廃棄物廃棄設備の変更



( 3 ) 実施時期

設備の共用化・廃止に必要な工事を平成 18 年度に実施する。

## 添付資料

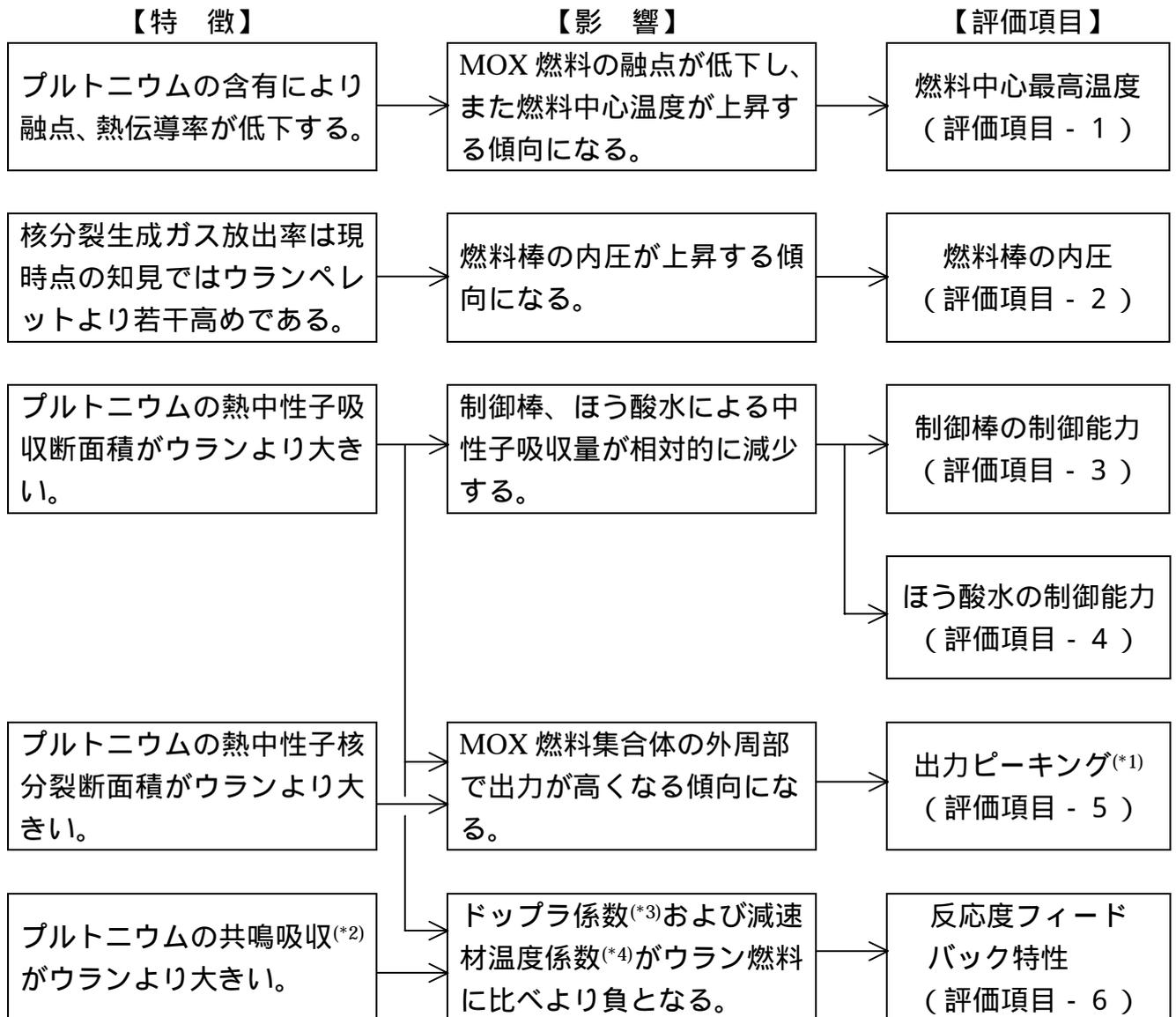
### ウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料 の採用計画に係る補足説明

## 目 次

MOX 燃料の主な特徴と影響について -----	21
（評価項目 - 1）燃料中心最高温度について -----	23
（評価項目 - 2）燃料棒の内圧について -----	24
（評価項目 - 3）制御棒の制御能力について -----	25
（評価項目 - 4）ほう酸水の制御能力について -----	26
（評価項目 - 5）出力ピーキングについて -----	27
（評価項目 - 6）反応度フィードバック特性について -----	28
（評価項目 - 7）貯蔵設備の未臨界性について -----	29
（評価項目 - 8）取扱・貯蔵設備の遮へい能力について -----	30
（評価項目 - 9）貯蔵設備の冷却能力について -----	31
（参 考）MOX 燃料の環境への影響について -----	32

## MOX 燃料の主な特徴と影響について

### 1 . 原子炉運転中の MOX 燃料



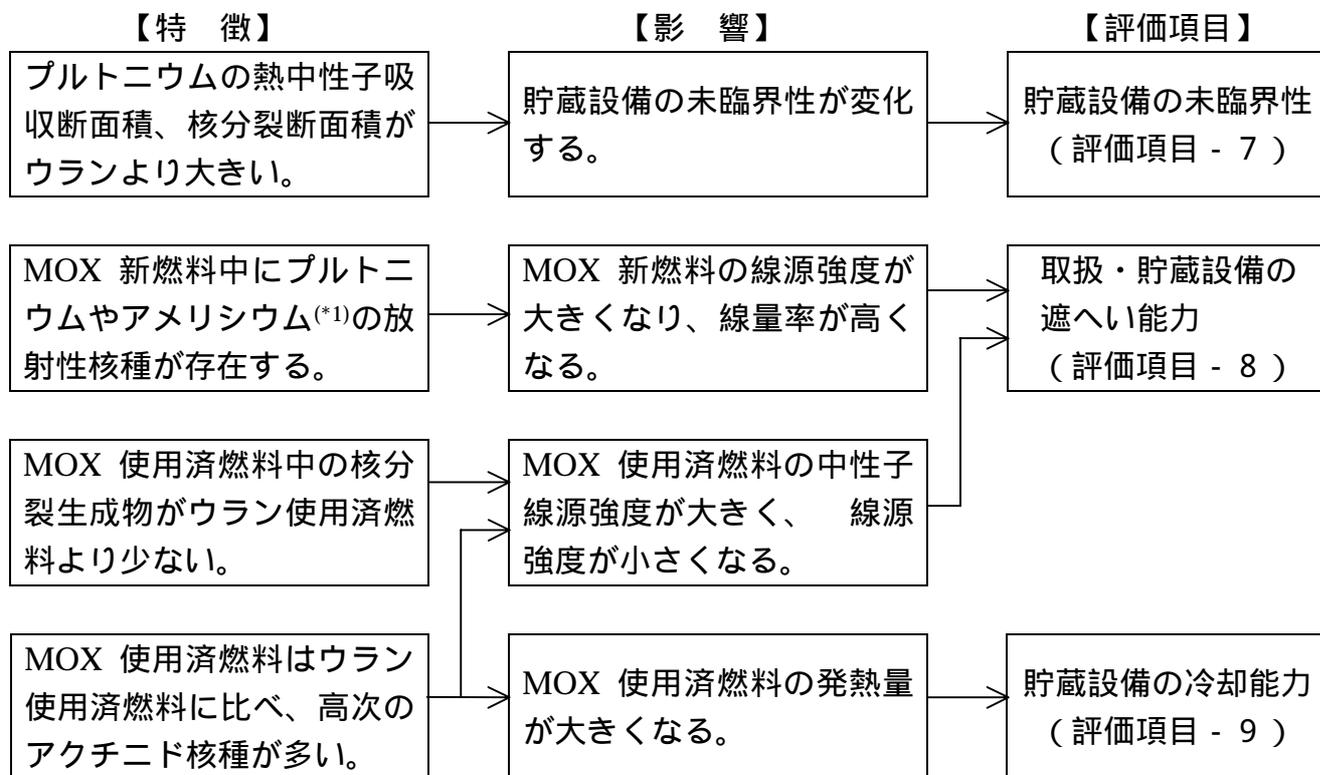
(\*1) 定格出力運転時に全ての制御棒を引き抜いた状態における原子炉内最大燃料棒出力と平均燃料棒出力の比。

(\*2) 核分裂で発生した高速中性子が熱中性子まで減速されていく過程で、ある特定のエネルギーにおいてウランやプルトニウムに吸収される量が急激に増加する現象。

(\*3) 原子炉の出力が上昇し燃料の温度が上昇すると、燃料中のウラン 238 やプルトニウムの中性子吸収量が増加し、原子炉の反応度は低下する。ドップラ係数はその程度を示す指標。

(\*4) 原子炉の出力が上昇し 1 次冷却材温度が上昇すると水の密度が低下し、中性子が核分裂を起こしやすい低いエネルギーまで減速されにくくなり、原子炉の反応度は低下する。減速材温度係数はその程度を示す指標。

## 2 . 取扱・貯蔵時の MOX 燃料



(\*) MOX 新燃料にはプルトニウム 241 の崩壊により生成されるアメリシウム 241 が存在する。

## 燃料中心最高温度について

### 1 . 概要

MOX 燃料は、プルトニウムの含有量が増加すると融点が低下し、また熱伝導率が低下することで燃料中心温度が上昇する傾向になるが、その影響はわずかである。

### 2 . 燃料中心最高温度の評価結果

MOX 燃料において、プルトニウムの富化度が大きくなると、プルトニウム原子が二酸化ウラン結晶構造のウラン原子の位置に置き換わっていくので、MOX 燃料の物性値は二酸化ウランのそれから滑らかに変化する。

このため、MOX 燃料の融点が低下し、また熱伝導率の低下により燃料中心温度が上昇する傾向になるが、今回採用を計画しているプルトニウム富化度 13wt%以下の範囲では、ウラン燃料との差は小さく、燃料中心最高温度評価値はウラン燃料と同程度である。

	MOX燃料	(参考)ウラン燃料 (ステップ2燃料)
燃料中心最高温度( ) (定格出力運転時)	約1,740	約1,740
基準値( )	2,500未満	2,580未満

(備考) 運転時の異常な過渡変化時における MOX 燃料の燃料中心最高温度は、2,294 であり、基準値の 2,500 未満に対して十分な余裕がある。

## 燃料棒の内圧について

### 1 . 概要

現時点では、キセノン、クリプトン等の核分裂生成ガスの放出率はウラン燃料より MOX 燃料の方が若干高いとの知見が得られている。MOX 燃料では、燃料製作時に燃料棒内部に加圧封入しているヘリウムガスの加圧量を調整することにより、燃料棒内圧は燃焼末期においても十分低く保たれる。

### 2 . 燃料棒の内圧評価結果

MOX 燃料の燃料棒内圧は、製作時のヘリウムガスの加圧量を低下させることにより、燃焼末期に過大となることはなく、基準値に対して十分な余裕がある。

また、ヘリウムガスの加圧量を低下させても、1 次冷却水の圧力により被覆管が扁平化することはない。

	MOX 燃料	( 参考 ) ウラン燃料 ( ステップ 2 燃料 )
燃料棒内圧 ( 設計比 <sup>(*)</sup> )	0.83	0.70

(\*) 設計比とは、燃料棒内圧の評価値と基準値との比

## 制御棒の制御能力について

### 1 . 概要

MOX 燃料を採用すると、制御棒が熱中性子を吸収する量が相対的に減少する傾向となるが、MOX 燃料を原子炉内で適切に配置することにより、万一の事故を想定した安全解析<sup>(\*)1</sup>上の反応度停止余裕<sup>(\*)2</sup>を確保できる。

### 2 . 制御棒の制御能力評価結果

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 燃料集合体内の熱中性子の割合は、ウラン燃料集合体よりも少なくなる。この結果、MOX 燃料に制御棒が挿入された場合、制御棒が中性子を吸収する量はウラン燃料に比べやや減少する傾向になるが、図 1 に示すように、ウラン燃料と MOX 燃料を原子炉内で適切に配置することにより、万一の事故を想定した安全解析上の反応度停止余裕は、ウラン燃料炉心と同程度に確保できる。

	MOX燃料炉心	(参考)ウラン燃料炉心 (ステップ2燃料)	基準値
反応度停止余裕 (% k/k)	2.48 <sup>( )</sup>	2.27	1.8 以上

( ) 約 1/4MOX 燃料を装荷した典型的な原子炉 ( 平衡炉心 ) についての解析結果

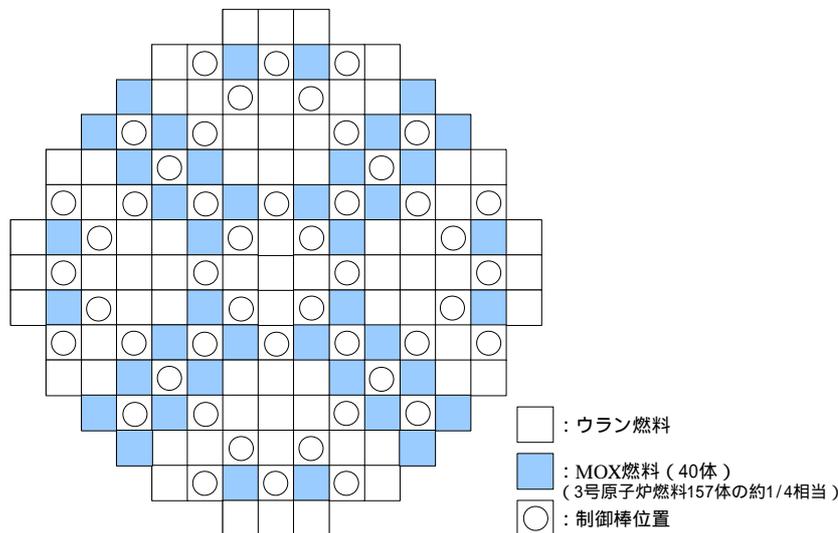


図 1 . MOX 燃料の原子炉内配置例

(\*)1 安全解析においては、最大の制御能力をもつ制御棒 1 体が挿入不可能で、残りのすべての制御棒の能力も 9 割しかないという保守的な仮定のもとに、原子炉を未臨界にする余裕をどれだけ持っているかを評価している。

(\*)2 定格出力運転から制御棒により原子炉を未臨界にする余裕をどれだけ持っているかを示す指標。反応度停止余裕 = 0 ( 臨界 )、> 0 ( 未臨界 )

## ほう酸水の制御能力について

### 1 . 概要

MOX 燃料を採用すると、ほう酸が熱中性子を吸収する量が相対的に減少し、ほう酸水の制御能力がやや低下する。このため、

- ・通常運転時に安全上必要なほう酸水量<sup>(\*)</sup>が増えるが、現状のほう酸タンクの容量で対応可能である。
- ・万一の事故時に原子炉に注入される、燃料取替用水タンクのほう酸水の濃度を予め高めておくことで対応可能である。

### 2 . 通常運転時のほう酸水の制御能力評価結果

MOX 燃料を採用すると、通常運転時に安全上必要なほう酸水量が増えるが、現状のほう酸タンク（濃度：約 21,000ppm）の容量で対応可能である。また、すべての制御棒が挿入できないとの現実にはあり得ない条件において、ほう酸水の濃度調整だけで 100%出力から停止状態にするのに必要なほう酸水量も現状のほう酸タンクで貯蔵可能である。

	MOX燃料炉心	(参考)ウラン燃料炉心 (ステップ2燃料)
安全上必要なほう酸水量(m <sup>3</sup> )	21.4	19.2
100%出力から低温停止するのに必要なほう酸水量 (m <sup>3</sup> )	28.8	25.1
ほう酸タンクの有効容量(m <sup>3</sup> ) (現状設備)	57.7	

### 3 . 事故時のほう酸水の制御能力評価結果

非常用炉心冷却設備のほう酸注入機能を期待するような事故が発生した場合、燃料取替用水タンクのほう酸水を原子炉に注入し事故を収めることになる。

MOX 燃料を採用すると、ほう酸水の制御能力がやや低下するが、このほう酸水の濃度を予め高めておくことで対応可能である。

	MOX燃料炉心	(参考)ウラン燃料炉心 (ステップ2燃料)
燃料取替用水タンク ほう酸水濃度 (ppm)	4,400以上	3,400以上

(\*) 最大反応度効果の制御棒 1 体が挿入不能でも、原子炉を高温停止から低温停止に移行可能とするほう酸水量

## 出力ピーキングについて

## 1 . 概要

MOX 燃料は、ウラン燃料に隣接して装荷されると、燃料集合体外周部の燃料棒出力が高くなる傾向になるが、最外周およびその近傍の燃料棒のプルトニウム富化度を下げることにより、出力ピーキングを所定の範囲に収め、出力分布に偏りのない炉心を設計できる。

## 2 . 出力ピーキングの評価結果

MOX 燃料は、熱中性子に対する吸収断面積が大きいいため、ウラン燃料より熱中性子の量が少ない。MOX 燃料が、ウラン燃料に隣接して装荷されると、MOX 燃料集合体外周部の燃料棒には、隣接するウラン燃料棒近傍から熱中性子が流れ込みやすくなる。プルトニウムの核分裂断面積は、ウランより大きいいため、この影響で MOX 燃料集合体外周部の燃料棒出力は高くなりやすい。

このため、図 2 に示すように、最外周およびその近傍のプルトニウム富化度を下げることにより、出力の上昇を抑え、集合体全体としてばらつきなく燃焼するように設計しており、MOX 燃料炉心の出力ピーキングをウラン燃料炉心と同程度にすることができる。

	MOX燃料炉心	(参考)ウラン燃料炉心 (ステップ2燃料)	基準値
出力ピーキング	1.45( )	1.46	1.52以下

( ) 約 1/4MOX 燃料を装荷した典型的な原子炉 ( 平衡炉心 ) についての解析結果。

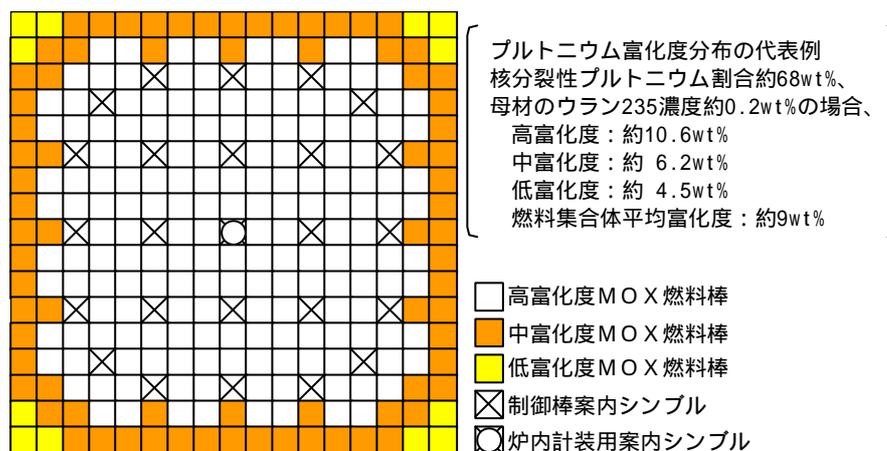


図 2 . MOX 燃料集合体内の富化度分布

## 反応度フィードバック特性について

### 1 . 概要

プルトニウムは、ウランに比べて中性子に対する共鳴吸収が大きいので、燃料や1次冷却材の温度が上昇した場合に、原子炉出力を低下させる性質（反応度フィードバック特性）が強くなり、原子炉の自己制御性が高まる方向に変化する。

### 2 . 反応度フィードバック特性の評価結果

燃料温度が上昇すると、ウラン 238 やプルトニウムの共鳴吸収量が増加し、核分裂の割合が減少する。これをドップラ効果といい、プルトニウムの共鳴吸収断面積は、ウラン 238 より大きいいため、この効果が大きくなる。このため、MOX 燃料炉心では、ウラン燃料炉心に比べてドップラ係数は負に大きくなる。

また、1次冷却材温度が上昇すると、水（減速材）の密度が下がり、中性子が減速されにくくなるため、共鳴吸収量が増加し、核分裂の割合が減少する。これを減速材温度効果といい、プルトニウムの共鳴吸収断面積がウラン 238 より大きい等のことから、MOX 燃料炉心では、減速材温度係数も負に大きくなる。

以上のように、MOX 燃料炉心では、燃料や1次冷却材の温度が上昇すると、それを抑制する方向に働く特性が大きくなり、原子炉の自己制御性が高まる。なお、MOX 燃料の原子炉での使用割合が、約 1/4 の範囲においては、ウラン燃料炉心との差はわずかである。

	MOX燃料炉心	(参考)ウラン燃料炉心 (ステップ2燃料)	基準値
ドップラ係数 ( $10^{-5}$ ( k/k)/ )	-3.6 ~ -2.6( )	-3.5 ~ -2.4	-5.2 ~ -1.8
減速材温度係数 ( $10^{-5}$ ( k/k)/ )	-66 ~ -11.3( )	-63 ~ -8.1	-78 ~ 8 <sup>(*1)</sup>

( ) 約 1/4MOX 燃料を装荷した典型的な原子炉（平衡炉心）についての解析結果。

(\*1) 減速材温度係数の基準値として異常・事故時の安全性評価に用いた値。実際の設計、運転管理では高温出力運転状態で負とする。

## 貯蔵設備の未臨界性について

### 1 . 概要

MOX 燃料は、ステップ 1 燃料 (ウラン濃縮度約 4.1wt%) 相当の燃焼能力となるように設定している。MOX 燃料を貯蔵する使用済燃料ピットは、ウラン濃縮度が 5.05wt% の新燃料を貯蔵しても臨界にならないように余裕を持って設計されており、現状の設備で問題ない。

### 2 . 使用済燃料ピットの未臨界性評価結果

MOX 燃料は、中性子吸収能力の高いほう酸水で満たされた使用済燃料ピットに貯蔵されるが、未臨界性評価は、安全側に以下の条件で行っている。

設備容量一杯の MOX 新燃料が、貯蔵されているとする。

MOX 新燃料のプルトニウム富化度は、仕様であるペレット最大 13wt% に余裕をみて、すべての燃料棒の富化度を 14wt% とする。

使用済燃料ピットは、ほう酸水でなく純水で満たされているとする。

これらの条件のもとに未臨界性を評価した結果、基準値を下回っており、現状の設備で問題ない。

	MOX 新燃料	(参考)ウラン新燃料 (ステップ 2 燃料)	基準値
実効増倍率 <sup>(*1)</sup>	0.957	0.974	0.98 以下

(\*1) 核分裂連鎖反応前後での中性子個数比を表したもの。実効増倍率=1 (臨界) < 1 (未臨界)

## 取扱・貯蔵設備の遮へい能力について

### 1 . 概要

MOX 新燃料は、プルトニウムなどの放射性核種を含み、ウラン新燃料に比べて線量率が高くなる。しかしながら、遮へい能力を有する専用の取扱設備等を用いて取扱い、使用済燃料ピットに貯蔵することにより、作業員の線量を低く抑えることができる。

また、MOX 使用済燃料は、現状の燃料取扱設備で取扱い、使用済燃料ピットに貯蔵することにより、作業エリアの線量率は高くなることはない。

### 2 . MOX 新燃料の取扱・貯蔵設備の遮へい能力評価結果

MOX 新燃料は、プルトニウムの自発核分裂や(  $\alpha$ , n ) 反応により中性子が放出され、またアメリシウム 241 を含むため  $\gamma$  線が放出され、線量率がウラン新燃料より高くなる。

	MOX 新燃料	( 参考 ) ウラン新燃料 ( ステップ 2 燃料 )
燃料集合体表面の線量率 (mSv/h)	約 10	約 0.04

しかしながら、遮へい能力を有する専用の取扱設備等を用いて取扱い、使用済燃料ピットに貯蔵することにより、作業員の線量は、年間の線量限度 ( 50mSv ) に比べ、十分に低く抑えることができる。

### 3 . MOX 使用済燃料の取扱・貯蔵設備の遮へい能力評価結果

MOX 使用済燃料はウラン使用済燃料と同様に、現状の燃料取扱設備で取扱い、使用済燃料ピットに貯蔵する。MOX 使用済燃料の取扱・貯蔵時における作業エリアの線量率は、以下の理由により高くなることはない。

- ・使用済燃料からの  $\gamma$  線は核分裂生成物が主線源であるが、単位出力あたりの核分裂数が少ない MOX 燃料の方が核分裂生成物が少なくなること等により、線源強度は小さくなる。
- ・中性子については、MOX 燃料の方が線源強度が大きいが、中性子は水中で十分に減衰されるため、遮へい上は  $\gamma$  線に比べて無視できる。

	MOX 使用済燃料	( 参考 ) ウラン使用済燃料 ( ステップ 2 燃料 )
燃料取扱時の線量率(mSv/h) ( 使用済燃料ピット水面 )	0.011	0.013

## 貯蔵設備の冷却能力について

### 1 . 概要

原子炉内で使用された MOX 燃料は、ウラン燃料に比べ、より高次のアクチニド核種が多く存在することから、長期的に見た場合、発熱量が若干増加するが、使用済燃料ピット冷却設備は、十分な冷却能力を有している。

### 2 . 使用済燃料ピットの冷却能力評価結果

MOX 燃料を貯蔵した時の使用済燃料ピットの水温を、安全側に以下の条件で評価した結果、ポンプ 2 台運転時は作業環境上からの基準値 52 に対し約 49 、ポンプ 1 台運転時は使用済燃料ピット設備の健全性を保つための基準値 65 に対し約 58 であり、いずれも基準値を下回っている。(\*1)

使用済燃料ピット設備容量一杯の使用済燃料が貯蔵されているものとし、MOX 燃料とステップ 2 燃料（燃焼度制限値 55,000Mwd/t）の混合貯蔵において、使用済燃料ピットの熱負荷が最大となるように各燃料の貯蔵体数を設定する。使用済燃料ピットからの放散熱を無視し、崩壊熱は冷却器のみで除去されるものとする。

貯蔵される 1,2 号機の使用済燃料は、最短である 2 年の冷却期間を経て、3 号機に移送されるものとする。

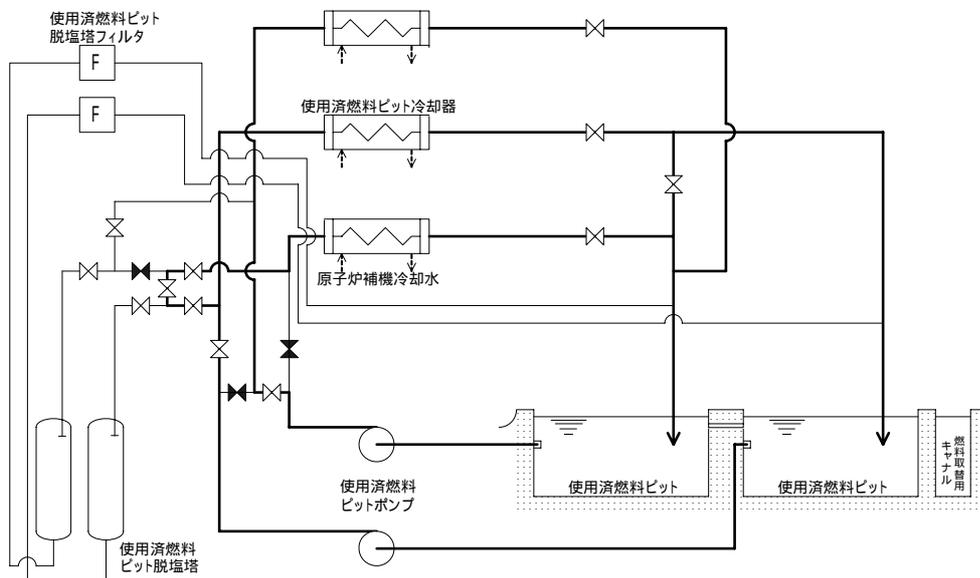


図 3 . 使用済燃料ピット冷却設備（概要図）  
（ポンプ 2 台運転時の例）

(\*1) 使用済燃料ピット冷却器 3 基での評価（平成 18 年度の定期検査において 1 基増設する。）

## MOX 燃料の環境への影響について

MOX 燃料はウラン燃料と基本構造は同じであり、MOX 燃料を装荷しても安全防護施設はこれまでと変わることはなく、運転に伴って MOX 燃料から生じる放射性物質をペレット、被覆管、原子炉容器、格納容器など幾重もの障壁で封じ込め、非常用炉心冷却設備等ともあいまって、万一の事故時の安全性を確保することができる。

ウラン 235 とプルトニウム 239 では、事故時に周辺環境へ放出される放射性希ガスおよびよう素の核分裂収率が若干異なるものの、その差異は、現行の評価手法の有する裕度の範囲内であることが国の原子力安全委員会で確認<sup>(\*)</sup>されている。

また、MOX 燃料炉心は、ウラン燃料炉心に比べて炉心内のプルトニウムは増加するものの、事故時において炉心が溶融することはなく、仮にプルトニウムが格納容器内に放出されたとしても、格納容器スプレイにより除去され、気密性の高い格納容器からはほとんど漏えいしないことなどから、環境に放出されるプルトニウムによる影響は、よう素によるものと比べても小さいことが原子力安全委員会で確認<sup>(\*)</sup>されている。

---

(\*) 「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」(平成 7 年 6 月 19 日原子力安全委員会了承)

(\*) 「『プルトニウムを燃料とする原子炉の立地評価上必要なプルトニウムに関するめやす線量について』の適用方法などについて」(平成 10 年 11 月 16 日原子力安全委員会了承、平成 13 年 3 月 29 日一部改訂)