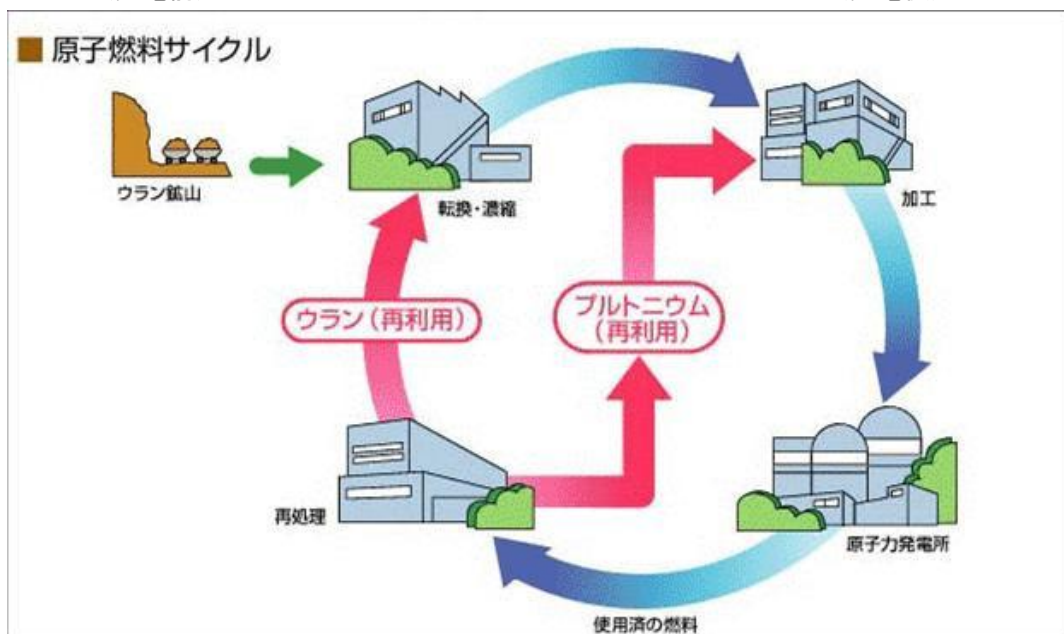
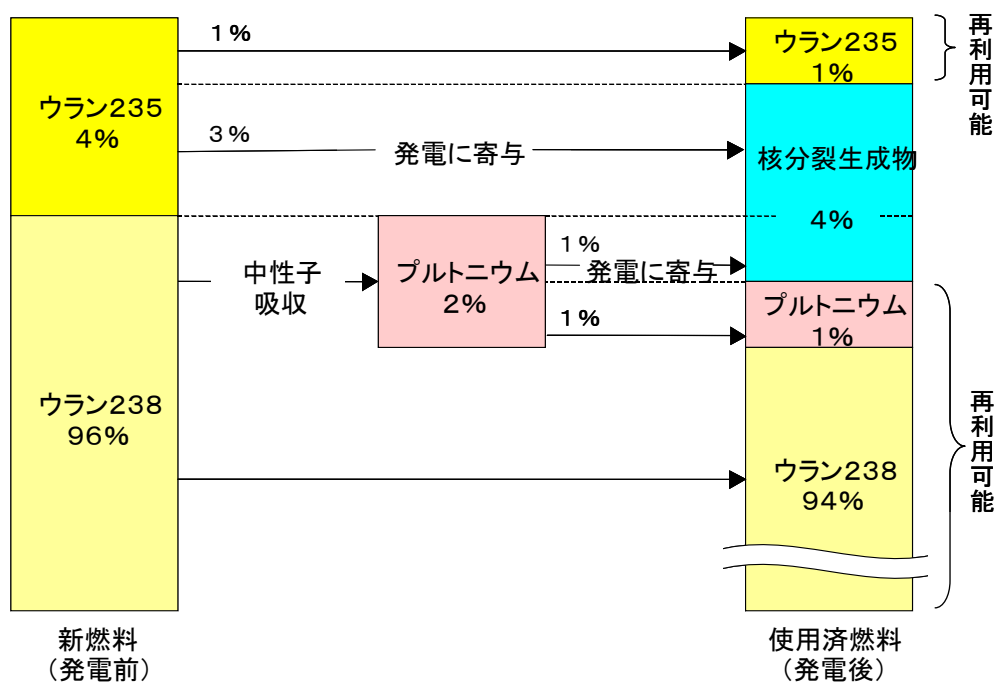


「プルサーマル運転」に関する回答要旨

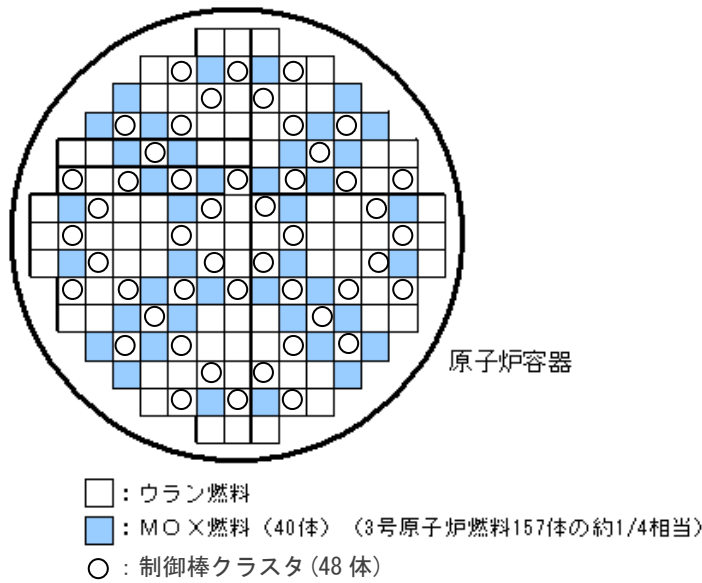
○発電後のウラン燃料（使用済燃料）には、再利用可能な物質が含まれています。この再利用できる部分を回収し、再び原子力発電所で利用することを「原子燃料サイクル」と言います。使用済燃料を再処理し、ウラン・プルトニウム混合酸化燃料（MOX燃料）にして再び軽水炉（熱中性子炉：サーマルリアクター）で利用することを「プルサーマル」と言います。

ウラン燃料のみを使用した原子力発電所でも、運転に伴って生成されたプルトニウムの一部はウランと同様に核分裂しており、発電に寄与しています。このことから、プルトニウムの燃え方（核分裂）については把握されており、炉心設計技術に取り込まれています。



○MOX燃料も通常のウラン燃料とほとんど同じ燃え方(核分裂)をするように作られています。

プルトニウムはウランに比べて中性子を吸収しやすいため、制御棒が吸収する中性子の数が少なくなることによって原子炉の運転を制御しにくくなるといった指摘がありますが、ウラン燃料のみを利用する場合と同様の十分な安全性が確保できるように、MOX燃料を適切に配置して制御棒の効きを確保したり、中性子を吸収するほう酸水(ほう素)の濃度を高くするなどの対策を行っています。(詳細は問⑩-2【MOX燃料使用時の特性】、【伊方発電所3号機の対策】)



[四国電力(株)提供資料]

○伊方発電所では、このようなMOX燃料の特性を踏まえた検討・準備を行った上で、3号機において平成22年3月から平成23年4月にわたり、プルサーマル運転を実施しました。

3号機では、炉心に装荷する157体の燃料集合体のうち、最大40体をMOX燃料に交換して運転することを許可されていましたが、この時には約1/10に当たる16体をMOX燃料に交換して運転を行いました。

その際には、従来のウラン燃料のみの場合と同等の制御棒の効きを確保するなど、安全にプルサーマル運転を実施しました。

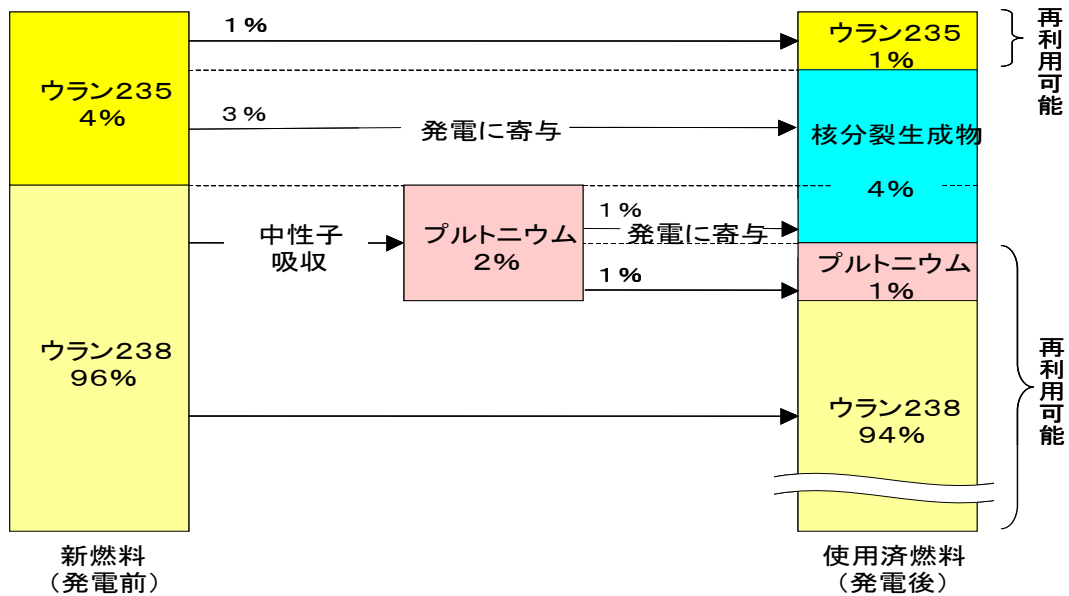
平成27年7月に許可となった新規規制基準の適合性審査においても、最大40体をMOX燃料に交換して運転することを前提として審査が行われ、許可されました。再稼働時には、前サイクルからの継続使用となる16体のMOX燃料を使用して運転する予定です。(詳細は問⑩-2【プルサーマル運転の実績等】)

問⑩ プルトニウムはウランと比べて危険とされていますが、プルトニウムを燃料として使うプルサーマル運転は安全なのですか。

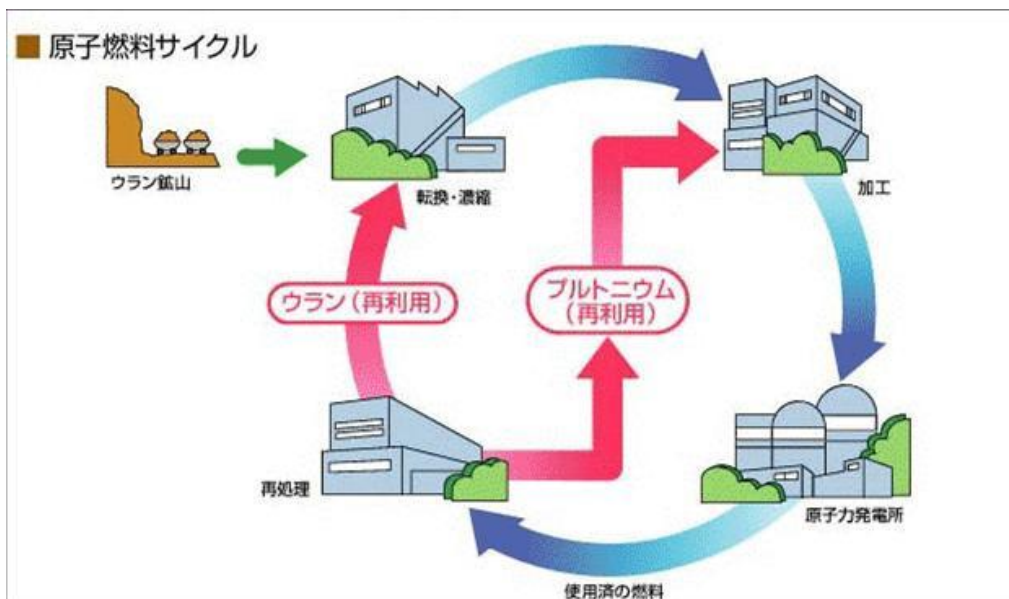
【プルサーマルとは】(図⑩-1、図⑩-2)

発電後のウラン燃料(使用済燃料)には、核分裂に使われなかったウランおよび新しく生まれたプルトニウムがあわせて95~97%含まれており、これらは再利用できます。この再利用できる部分を回収し、再び原子力発電所で利用することを「原子燃料サイクル」と言います。使用済燃料を再処理し、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)にして再び軽水炉(熱中性子炉:サーマルリアクター)で利用することを「プルサーマル」と言います。

図⑩-1 ウラン燃料の発電による変化



図⑩-2 原子燃料サイクルのイメージ



【プルトニウムの特性】

プルトニウムは、同じ重量のウラン 238 と比べ、放射能（放射線を出す能力）が約 20 万倍あります。α線※を長期間出し続ける性質がありますが、α線は紙一枚程度で遮ることができ、空気中では数センチしか飛びませんので、体外にある場合には影響はありません。したがって人体への影響が問題となるのは、主に呼吸とともに肺へ吸い込んだ場合です。

しかし、燃料として利用するプルトニウムは、ペレットに焼き固められ、被覆管に密封された上で原子炉容器や原子炉格納容器などで、外部に放出されることのないように何重にも閉じ込め、MOX燃料の安全性を確保する対策をとっています。

※α線：放射線の一種。陽子2個と中性子2個（ヘリウムの原子核）によって構成されたα粒子の流れであり、強いプラスの電気を帯びている。そのため、周囲の元素が持つ電子（マイナスの電気を帯びている）を引き離す、強い電離作用を持っている。

【プルサーマル運転の安全性】

ウラン燃料のみを使用した原子力発電所でも、運転に伴って生成されたプルトニウム（約4年間使用したウラン燃料で約1%が残存）の一部はウランと同様に核分裂しており、全体の約30%の発電に寄与しています。炉心でのプルトニウムの燃え方（核分裂）については把握されており、既に炉心設計技術に取り込まれています。

プルサーマルで用いるMOX燃料には最初からプルトニウム（約9%）が含まれていますが、MOX燃料も通常のウラン燃料とほとんど同じ燃え方（核分裂）をするように作られており、平成7年に当時の原子力安全委員会において、軽水炉においては炉心の1/3以下であれば安全に利用できることが確認されています。伊方発電所3号機のプルサーマルは、この範囲内（約1/4：炉心燃料157体のうち40体まで）で計画され、国の安全審査を受け、平成18年3月に許可されています。

プルトニウムは、ウランに比べて中性子を吸収しやすいため、プルサーマル運転を実施すると、制御棒やほう酸（ほう素）が吸収する中性子の数が少なくなり、制御棒やほう酸（ほう素）の効きが若干悪くなり、原子炉の運転を制御しにくくなるといった指摘がありますが、ウラン燃料のみを利用する場合と同様に、十分な安全性が確保できるように、MOX燃料を原子炉内で適切に配置したり、あらかじめほう酸水の濃度を高くすることなどの対策を行っています。

【伊方発電所におけるプルサーマル運転】

伊方発電所では、このようなMOX燃料の特性を踏まえた検討・準備を行った上で、3号機において平成22年3月から平成23年4月にわたり、プルサーマル運転を実施しました。

3号機では、炉心に装荷する157体の燃料集合体のうち、最大40体をMOX燃料に交換して運転することを許可されていましたが、この時には約1/10に当たる16体をMOX燃料に交換して運転を行いました。

その際には、従来のウラン燃料のみの場合と同等の制御棒の効きを確保するなど、安全にプルサーマル運転を実施しました。

平成27年7月に許可となった新規制基準の適合性審査においても、最大40体をMOX燃料に交換して運転することを前提として審査が行われ、許可されました。再稼働時には、前サイクルからの継続使用となる16体のMOX燃料を使用して運転する予定です。

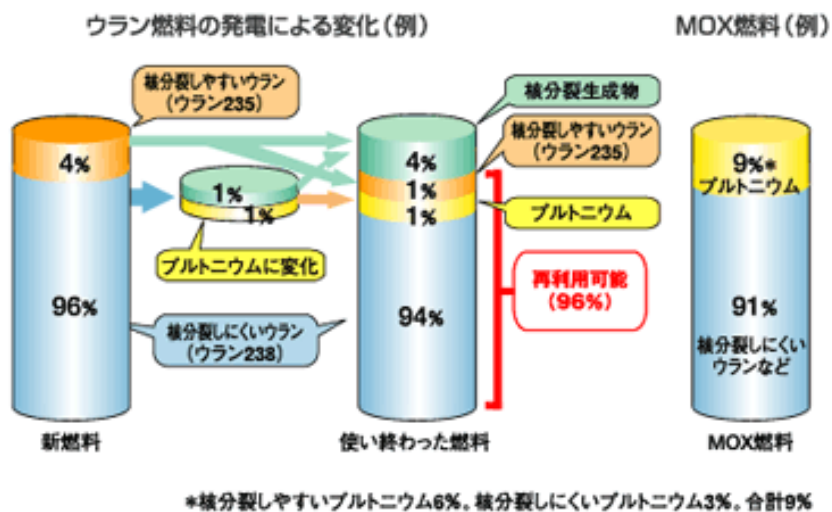
問⑩-1 プルトニウムを混合したMOX燃料は、事故が起こった時の放射線被害がより深刻になるのではないですか。

【プルトニウムの特性】(図⑩-1-1)

従来のウラン燃料のみを使用した運転においても、燃料中のウランが中性子を吸収してプルトニウムが生成されており、約4年間使用したウラン酸化物燃料の中には、プルトニウムが約1%含まれています。一方、プルサーマル運転で使用するウランとプルトニウムの混合酸化物燃料であるMOX燃料中には、約9%のプルトニウムが入っています。

プルトニウムは、 α 線という放射線を出しますが、この α 線の透過力は弱く、空気中では数センチしか飛びません。紙1枚で遮ることができますので、プルトニウムが体の外にある限りは、特に危険なものではないと考えられています。ただし、呼吸とともに吸い込んだ場合は肺などに沈着し、何年もの長い期間を経てガンになるなど、身体に影響を与える可能性があると言われています。

図⑩-1-1 ウラン燃料とMOX燃料

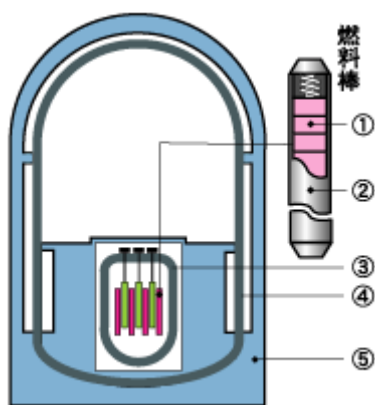


[四国電力(株)提供資料]

【炉心損傷を伴わない事故の場合】(図⑩-1-2)

原子力発電所では、運転に伴って、セシウムやキセノン等の放射性物質が生じます。しかし、燃料となるウランおよびプルトニウムを陶器のように焼き固めた①ペレットとし、それらをジルコニウム合金製の②被ふく管に密封し、燃料集合体として分厚い鋼鉄製の③原子炉容器内に封入しています。さらに、原子炉容器を含む一次冷却材循環系統を④原子炉格納容器に密封し、それを鉄筋コンクリート製の⑤しゃへいコンクリート壁で取り囲むという、いわゆる「5重の壁」があり、万が一の事故においても放射性物質を外部に放出しないよう、しっかりと閉じ込めるように設計し、建設しています。

図⑩-1-2 5重の壁のイメージ



①ペレット

燃料となるウラン、プルトニウムを陶器のように焼き固めたもので、放射性物質を内部にしっかりと保持します。

②被ふく管

ジルコニウムという丈夫な金属でできていて、ペレットを密封しています。

③原子炉容器

厚さが約 20cm※の丈夫な鋼鉄製の容器です。

④原子炉格納容器

円筒部厚さが約 4.5cm※の鋼鉄でできた密封容器です。

⑤コンクリートの遮へい壁

円筒部厚さが約 140cm※のコンクリートで全体をすっぽり囲んでいます。

※伊方発電所3号機の場合

[四国電力(株)提供資料]

【炉心損傷を伴う重大事故の場合】

原子炉の中の燃料が損傷するような重大な事故が起こった際には、キセノン等の希ガスやよう素、セシウム等の揮発しやすい放射性物質は大気中に放出されやすくなりますが、揮発しにくくガス状になりにくい金属元素であるプルトニウムは燃料から放出されにくい性質を持っています。また、仮に格納容器内にプルトニウムが放出された場合でも、格納容器のスプレイ等で除去※されることになっています。

※燃料棒が溶けるなどの状況で、プルトニウムの一部が小さな粒子となり空気中へ放出された場合には、スプレイにより上からシャワーを降らせてプルトニウムが水の中に留まる状態にして洗い落とします。

問⑩-2 MOX燃料はウラン燃料と比較して制御が難しいのではないですか。

【MOX燃料使用時の特性】

プルトニウムはウランに比べ中性子を吸収しやすいため、プルサーマル運転を実施すると、制御棒が吸収する中性子の量が減少し、制御棒の「効き」が若干低下する傾向にあります。

しかしながら、制御棒の挿入位置に対するウラン燃料とMOX燃料の配置を考慮して制御棒の効きを確保するなど、MOX燃料の性質を把握した上で適切な対応を実施することにより、MOX燃料を使用した場合でも原子炉を安全に停止するための余裕を、ウラン燃料炉心と同様に確保することができます。

【伊方発電所3号機の対策】(図⑩-2-1)

このようなMOX燃料の特性を踏まえ、伊方発電所でプルサーマル運転を実施した際には、制御棒の効きを確保するようウラン燃料とMOX燃料を適切に配置※¹するとともに、同じくMOX燃料の特性によるほう酸水の「効き」の低下を補うため、燃料取替時や万一の事故時に使用する燃料取替用水(タンク)のほう素濃度も変更(3,400ppm以上→4,400ppm以上※²)し安全に運転しました。

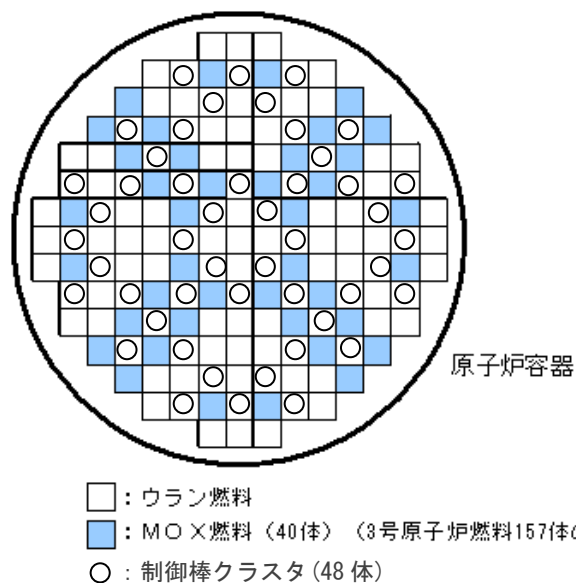
※¹MOX燃料は中性子を吸収しやすいため、MOX燃料の周りには中性子の数が少なくなり、そこへ制御棒を挿入しても吸収する中性子の数は相対的に少なくなります。

そのため、制御棒が挿入される位置に対するウラン燃料とMOX燃料の配置を考慮するなどして、制御棒の効きを確保します。

※²ppm (parts per million) : 100 万分のいくらかを示す割合の単位。100 万分率。

% (パーセント、ppc) = 100 分率

図⑩-2-1 MOX燃料の炉内配置例



【プルサーマル運転の実績等】

プルサーマル運転の安全性については、四国電力において、原子炉の制御性や事故時の影響等、様々な観点から問題ないことを確認するとともに、国の安全審査においても厳正な確認を受けたうえで、平成22年3月から平成23年4月の間で安全に実施しています。

プルサーマル運転は、これまでベルギー、フランス、ドイツ、スイス、米国など海外で約40年以上にわたり、57基の原子力発電所で約6,350体のMOX燃料が使用された豊富な実績（1963年から2008年までの実績）があり、安全に運転しています。また、日本においてもMOX燃料の少数体実証計画として、日本原子力発電の敦賀発電所1号機（BWR※¹）で1986年6月から1990年2月まで2体が、関西電力の美浜発電所1号機（PWR※²）で1988年3月から1991年12月まで4体が使用され、ともに計画どおり安全に使用を終了しています。

2009年11月の九州電力玄海原子力発電所3号機以降、四国電力や関西電力などで本格的にプルサーマル運転が実施されており、良好な運転実績を収めていることから、十分に確立した技術と考えています。

※¹BWR：沸騰水型原子炉

※²PWR：加圧水型原子炉

【使用済MOX燃料】

使用済MOX燃料は、燃料を取り出した直後の発熱量は通常の使用済ウラン燃料とほとんど変わりませんが、半減期※の長い放射性核種が多く含まれているため、発熱量がなかなか低下しにくいといった傾向があります。

国の審査では、このような使用済MOX燃料の特性も考慮したうえで、使用済燃料プールにおいて安全に冷却できることが確認されています。

使用済燃料については、一定期間プールで冷却した後、再処理工場へ送ることになっていますが、使用済MOX燃料については、当面の間はプールで保管を続けることになっています。なお、使用済MOX燃料の再処理等の核燃料サイクルに関する諸課題については、エネルギー基本計画において「状況の進展に応じて戦略的柔軟性を持たせながら対応を進める」とされています。

使用済MOX燃料については、燃料の発熱量に応じた容器を設計することで、使用済ウラン燃料と同様に再処理工場への搬出や保管は可能だと考えていますが、当面の間、3号機の使用済燃料プールで使用済ウラン燃料と同様に安全に保管することを予定しています。

※半減期：放射性物質が放射線を放出する能力が半分になるまでの期間。

問⑩-3 ステップ2燃料（高燃焼度ウラン燃料）と組み合わせたプルサーマル運転は、危険ではないですか。

【ステップ2燃料とは】

伊方発電所では、1号機と3号機では平成16年度から、2号機は平成17年度から順次ステップ2燃料を採用しています。

ステップ2燃料（高燃焼度ウラン燃料）とは、燃料に含まれる核分裂しやすいウラン235の濃度を、従来の4.1wt%※¹から4.8wt%に高めた燃料で、使用期間を従来の約3年から約4年に延長できます。このため、新燃料の使用数が減るとともに、使用済燃料の発生量と、使用済燃料の再処理に伴って発生する放射性廃棄物も、約2割削減することができます。また、長期間原子炉内で使用することから、核分裂しにくいウラン238も有効に利用することができます※²。

一方、核分裂しやすいウランの増加に伴い、燃料取替時や事故時に使用する燃料取替用水（タンク）のほう素濃度を3号機では2,700ppmから3,400ppmに上昇させるとともに、燃料使用期間の長期化に対応するため、燃料被覆管により耐食性の高い材料を採用するなど、安全性を確保しています。

※¹wt%：重量パーセント濃度。ウラン235の重量/ウラン燃料の重量。

※²ウラン238は核分裂しにくいですが、中性子を受けてプルトニウム239に変わります。

ステップ2燃料は長期間原子炉内で使用するため、従来の燃料に比べて多くのウラン238がプルトニウムに変わります。

よって、ステップ2燃料は従来の燃料と比べて多くのプルトニウムを燃やすことができます。

【伊方発電所3号機における実績】

伊方発電所3号機では、平成22年3月から平成23年4月にかけて、ステップ2燃料とMOX燃料を組み合わせたプルサーマル運転を実施しました。

実施に当たっては、事前に四国電力において十分な安全性を確認しており、また平成18年3月には国の安全審査においても許可を受けています。その後、フランスにおけるMOX燃料21体の製造、輸入、搬入を経て、平成22年3月からプルサーマル運転を実施しました。この時には、炉心に装荷する157体の燃料集合体のうち、約10分の1に当たる16体をMOX燃料に交換して運転しましたが、従来のウラン燃料のみの場合と同等の制御棒の効きを確保するなど、安全なプルサーマル運転を実施しました。

平成27年7月に許可となった新規規制基準への適合性審査では、炉心に装荷する157体の燃料集合体のうち、最大40体をMOX燃料に交換して運転することを前提として審査が行われ、許可されました。

実際の運転時には、この許可の範囲内でMOX燃料へ交換して運転を行うこととしており、再稼働時には、前サイクルからの継続使用となる16体のMOX燃料を使用して運転を行うこととしています。

【安全対策】

プルトニウムは、ウランに比べて中性子を吸収しやすいため、プルサーマル運転を実施すると、制御棒やほう酸（ほう素）が吸収する中性子の数が少なくなり、制御棒やほう酸（ほう素）の効きが若干悪くなるといった傾向があります。

このため、MOX燃料の導入に当たっては、燃料の配置を決める際にウラン燃料とMOX燃料の配置を考慮して制御棒の効きを確保したり、予め燃料取替時や万一の事故時に使用する燃料取替用水（タンク）のほう素濃度を変更（3,400ppm 以上→4,400ppm 以上）したりして、原子炉を安全に停止するために必要な能力を、従来のウラン燃料の炉心の場合と同等に確保しました。

また、従来どおり、燃焼能力の高い燃料（新しく、あまり燃えていない燃料）が集中しないように、適切に配置することにより、原子炉内の出力分布が平坦になるよう、配慮しました。

あわせて、運転に当たっては、従来どおり運転員による計器の監視や警報発信状態の確認およびパトロールなどにより、運転上の制限はもとより、原子炉の温度や圧力、放射線レベルなどについて、プラント状態に異常の無いことを確認しながら運転しました。

また、炉心の安全性についても、保安規定に基づき、

- ・ 毎月 1 回、炉心内の出力分布や炉心のほう素濃度の測定値と予測値の差を確認することにより、設計どおり燃料が燃焼していること
- ・ 1 週間に 1 回、一次冷却材中の放射性ヨウ素濃度を確認することにより、燃料棒が健全であることなどを確認しました。