

# 軽水炉における MOX 燃料利用(プルサーマル)の安全性について

九州大学大学院工学研究院 エネルギー量子工学部門 工藤 和彦

## 1. MOX 燃料の利用実績

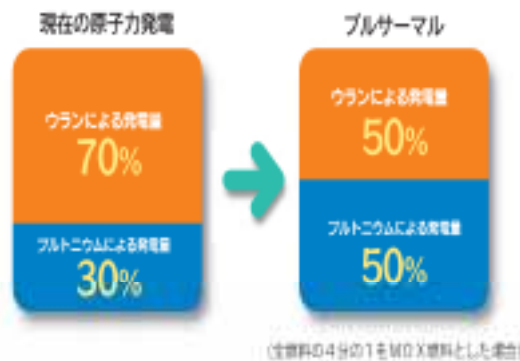
- ✓ 各国の原子力発電所(56基)で既に40年以上前から累計 約 5000 体のMOX燃料を装荷し、安全にプルサーマルを実施している。これまでMOX燃料であることが原因での燃料の破損や事故は起きていない。

フランス 21基 ドイツ 15基  
ベルギー 3基 スイス 3基 など

米国はいったんプルサーマルを停止したが、2005年6月から核兵器を解体したプルトニウムでプルサーマルを再開した。

- ✓ わが国では2基の原子炉で6体のMOX燃料を使用し、燃料はすべて健全であった。
- ✓ 転換炉「ふげん」では772体のMOX燃料の使用経験がある。これらは国内で製作した燃料である。
- ✓ 現在の原子力発電所のウラン燃料の中でもプルトニウムの核分裂によって発電量の約30%が生み出されている。

MOX 燃料を全体の約1/4用いた場合、発電量の約50%がプルトニウムで発電されることになる。



## 2. 1/3MOX炉心報告書(平成7年 原子力安全委員会)での検討事項

- ✓ ウランとプルトニウムとを混ぜた燃料(MOX)では以下のことが変わってくるので留意が必要としている。やや専門的であるが安全性に直接関係するので以下に示しておく。
- ✓ このうち(1)が主として原子炉の挙動、(2)が燃料棒の健全性に関する。

### (1)核的特性

(7項目、主として原子炉の挙動に関する)  
減速材温度係数、ドップラ係数等がより負となる。  
制御材等の反応度係数が相対的に低下する。

中性子スペクトルの柔らかいところに隣接したMOX燃料は出力が高くなる傾向にある。  
ペレットの径方向周辺部の出力が高くなる。  
即発中性子寿命がより短く、遅発中性子割合がより小さくなる。  
燃焼に伴う反応度低下の割合がより小さくなる。  
ヘリウム生成量等が若干異なる

### (2)物性、照射挙動

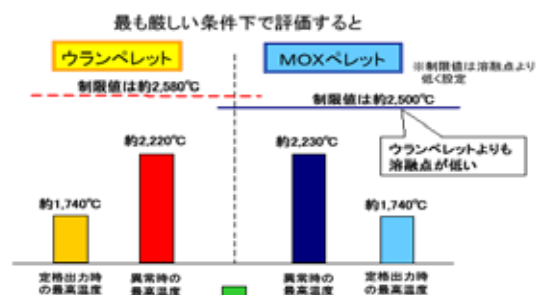
#### (4)項目、主として燃料棒の健全性に関する)

ペレットの融点及び熱伝導度が低下する。  
ペレットのクリープ速度が増加する。  
核分裂生成ガス放出率がウランペレットより若干高めである。  
ペレット内のプルトニウム含有率の不均一が製造時に生じる可能性がある。(プルトニウムスポットの生成)

## 3. 燃料棒の健全性について

### 燃料が溶融しやすいのではないかと?

未照射のMOX燃料の融点は2730となり未照射のウラン燃料より70度低下する。しかし、定格運転時のMOX燃料の最高温度は1740度であり、燃焼に伴う融点の低下を考慮しても制限値(2500度)を十分下回っている。



燃料中心温度の溶融点に対する余裕は確保でき、異常時においてもペレットが溶けることはないことを確認した

### 核分裂生成ガスの発生が多くなり燃料棒内圧が上がリ、壊れやすくなるのではないかと?

燃料棒製造時に封入するヘリウムガス圧力を低くすることで対応できる。核分裂ガスの放出は運転履歴(熱出力)や燃焼度による影響が大きく、プルトニウムの特徴よりも運転条件に左右される。

### プルトニウムスポットにより燃料棒が壊れやすくなるのではないかと?

プルトニウムスポットが存在したときの影響は原子炉を

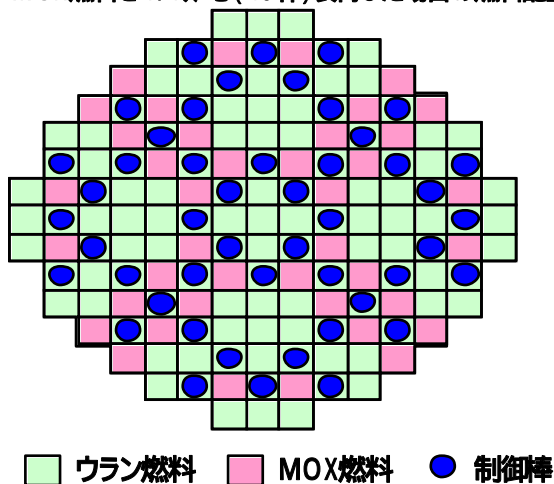
用いた実験によって確認されている。現在のMOX燃料の製造法によるプルトニウムスポットは最大でも直径 02 mm程度である。04mm $\times$ 1.1 mmのプルトニウムスポットを作ってNSRR炉(日本原子力研究所:当時)に入れた燃料の実験においても破損などの特性はウラン燃料と変わらなかったことが確認されている。

#### 4. 原子炉の挙動について

**燃料棒の効きが悪くなり、原子炉の制御が難しくなるのではないかな?**

MOX燃料はウラン燃料よりも中性子を吸収しやすいため、制御棒の効きが若干低下する傾向となる。ウラン燃料とMOX燃料を適切に配置することによりウラン燃料炉心と同等の制御棒の効きを確保できる。

MOX燃料を1/4炉心(40体)装荷した場合の燃料配置(例)



**ほう酸水の効きが悪くなるのではないかな?**

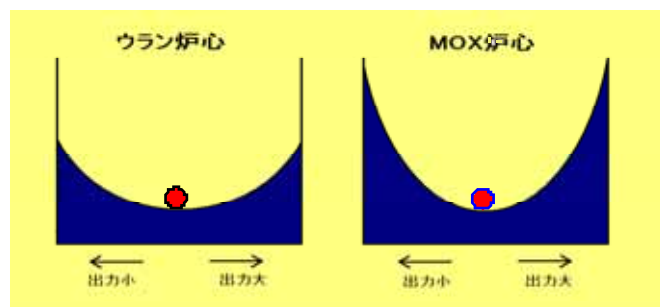
MOX燃料の使用によりと同じ理由で中性子を吸収するためのほう酸水の効きがやや低下する。このためほう酸水を注入するタンクの濃度を高めておくことで対応できる。(3,400PPM 4,400PPM)

**出力が変動したときの原子炉の制御性が悪くならないかな?**

燃料温度が上昇したとき、ウラン<sup>238</sup>やプルトニウムの中性子の吸収量が増えて核分裂が抑えられる。この負のドップラ係数はMOX燃料はウラン燃料よりも負に大きくなる。

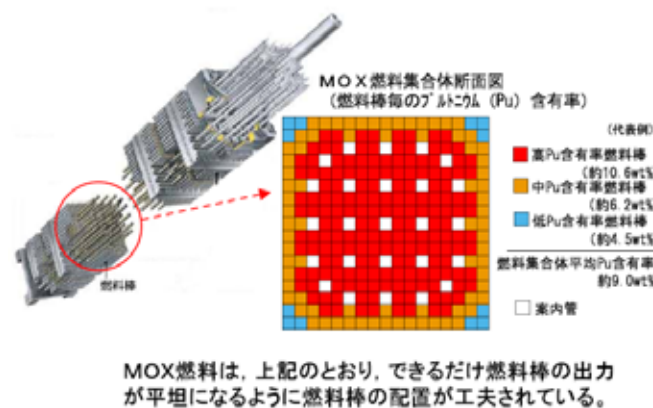
また、冷却水温度が上昇すると水の密度が下がり中性子が減速されにくくなり、次の核分裂を起こしにくくなる。この減速材温度係数はMOX燃料が入るとドップラ係数と同様にウラン燃料よりも負に大きくなる。

このことを原子炉の自己制御性、または原子炉の固有の安全性という。MOX燃料炉心では原子炉の自己制御性は高まる。



**MOX燃料では燃料集合体の中での出力分布の差が大きくなり、温度分布の差が大きくなるかな?**

MOX燃料は中性子を吸収しやすいため、ウラン燃料と隣接して配置されると、ウランに近いMOX燃料棒に中性子が流れ込みやすくなり、その出力が上がりやすい。このため3種類のプルトニウム含有率のMOX燃料棒を用いて、燃料集合体の外周にはプルトニウム含有率を下げたMOX燃料棒を配置している。



**MOX燃料とステップ2高燃焼度燃料とを合わせて用いることで安全性に影響はないかな?**

MOX燃料集合体内の燃料棒のプルトニウム含有率の調整(上図)と、炉心内の燃料集合体の適切な配置(左図)によって、安全性に影響する問題はない。

MOX燃料集合体は3サイクルかけて、たとえば最初16体装荷(全炉心の約1/10)、次に16体追加といったように行い、そのつど原子炉の諸特性、安全性を確認しつつ進められる。

伊方3号機で計画しているMOX燃料の最高燃焼度は4,500MWd/tであるが、海外ではこれを越えている炉もある。また伊方3号機でのMOX燃料の装荷割合は約1/4以下であるが、海外では最大50%までの装荷が許可されている炉もある。ベルギーではMOX炉心に装荷されたウラン燃料の高燃焼度の実績(54,000MWd/t)もある。

#### 5. 異常時、事故時の影響

✓ **MOX燃料炉心について、次のような異常時の解析がなされている**

制御棒の異常な引き抜きやほう素の異常な希釈の影響

停止レープの誤起動、停電、2次系の異常の影響  
非常用炉心冷却系の誤作動の影響

✓ これらの異常の解析から次の結果が得られている  
燃料の冷却条件(最小DNBR)は許容限界値を下回ることはない

燃料中心最高温度はそれぞれの制限値を下回っている。

燃料棒の破損に関する値(燃料エンタルピの最大値)は許容限界値を下回っており、燃料棒が破損することはない。

原子炉圧力容器等(圧力バウンダリ)にかかる圧力は判断基準を下回っている。

✓ **MOX燃料炉心について、次のような事故時の解析がなされている。**

配管の破断などによる冷却水の流出

制御棒の飛び出し

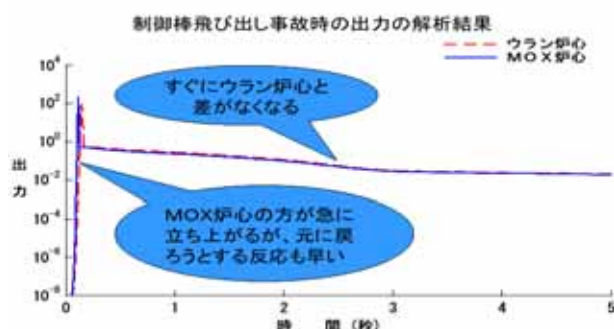
配管の破断や蒸気発生器伝熱管破損などによる環境への放射性物質の放出

原子炉格納容器内圧力などの異常な変化

✓ これらの事故の解析から次の結果が得られている  
燃料棒で最も厳しいウラン燃料棒被覆管最高温度は1,039で、燃料棒は著しく損傷することはない。

燃料棒の破損に関する値(燃料エンタルピの最大値)は制限値を下回っており、燃料の大きな損傷が生じることはない。原子炉容器の健全性も損なわれない。

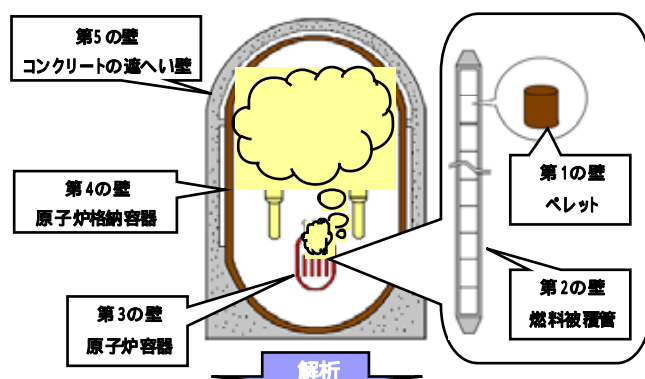
原子炉圧力容器等(圧力バウンダリ)にかかる圧力は判断基準を下回っている。



**MOX炉心の方が出力が元に戻ろうとする力が強い**

✓ MOX燃料はウラン燃料と基本構造は同じであり、安全施設も変更していない。異常・事故時の原子炉の温度、圧力、燃料棒の冷却などに大きい変化はなく、いずれもウラン燃料と同様に規制値を満足し

ている。



**影響は、ウラン炉心もMOX炉心も変わらないことを確認した**

原子炉冷却材喪失事故の場合 約0.49 mSv(胸のX線集団検診 約9.8回分)  
\*蒸気発生器伝熱管破損事故の場合 約0.50 mSv(胸のX線集団検診 約10回分)  
(影響の最も大きい事故)

**6. 被ばく線量についての解析結果**

✓ **平常時には**

燃料は多重の障壁で封じられており、通常運転中にプルトニウムが周辺へ放出されることはない。MOX燃料炉心で運転することによる周辺への放射線線量は特に増加しない。

✓ **事故時には**

燃料が著しく破損することなく、プルトニウム等を閉じ込める格納容器の健全性は確保される。周辺へ放出される放射性希ガスおよびよう素の生成割合がウラン炉心とプルトニウム炉心で若干異なるが影響は小さい。蒸気発生器伝熱管破損事故時の線量が最も大きい。MOX炉心では敷地境界において約0.5mSvであり、事故時の制限値としている5mSvを十分下回っている。

✓ **立地評価事故(重大事故時には)**

周辺に影響を与えるのは希ガスおよびよう素であり、蒸気発生器伝熱管破損では、ガンマ線による全身に対する線量は約0.64mSvであり、判断のめやす(250mSv)を十分下回っている。よう素の吸入摂取による小児甲状腺に対する線量は0.022Svであり判断のめやす(1.5Sv)を下回っている。

✓ **立地評価事故(仮想事故時には)**

ガンマ線による全身に対する線量は約2.7mSvであり、判断のめやす(250mSv)を十分下回っている。よう素の吸入摂取による成人甲状腺に対する線量は約0.044Svであり、判断のめやす(3Sv)を下回っている。全線量の積算値は $4.3 \times 10^2$ 万人Svであり、判断のめやす(2万人Sv)を下回っている。