

軽水炉におけるプルトニウム(MOX 燃料)利用について

九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻
出光一哉

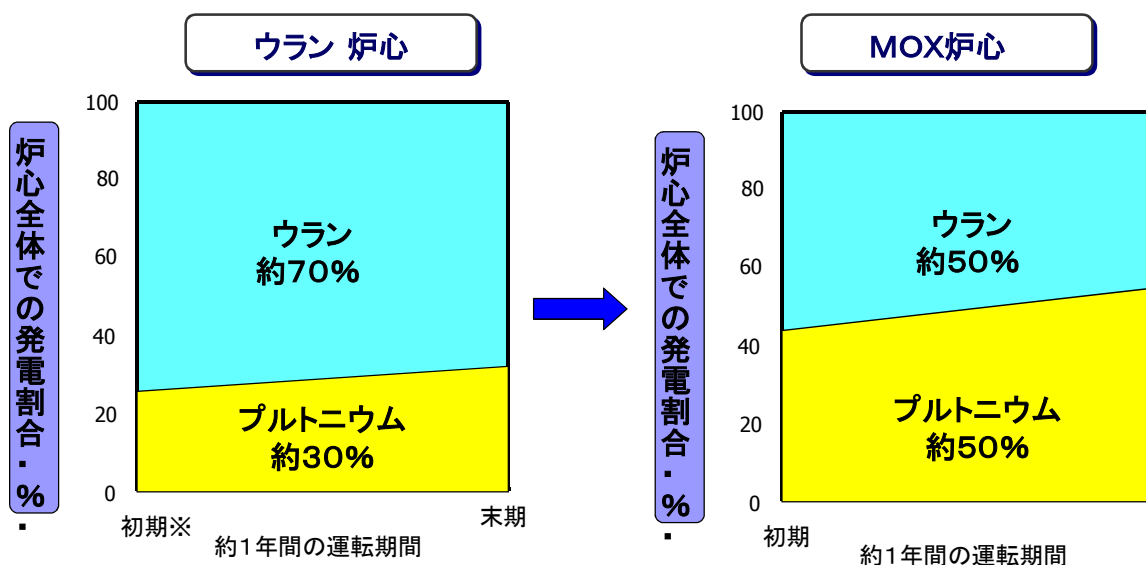
1. ウラン燃料とプルトニウムの生成

原子炉ではウランが燃料として使用されています。ウランには核分裂しやすいウラン (^{235}U : ウラン 235) と核分裂しにくいウラン (^{238}U : ウラン 238) があり、このうちウラン 235 は天然には 0.72%しか含まれていません。現在多く使われている軽水炉では、天然ウランを燃料にすることはできません。天然ウランに含まれるウラン 235 の割合では原子炉を臨界にすることができないからです。このため、ウラン 235 の割合を4から5%に濃縮(同位体濃縮)したものを使用します。このように燃料として利用するためにはウラン 235 のような核分裂性の物質をある濃度以上に含む必要があります。

一方ウラン 238 はウラン 235 に比べ核分裂しにくいのですが、原子炉の中で使われる間に中性子を吸収してプルトニウム 239 (^{239}Pu) になります。プルトニウム 239 はウラン 235 に比べていくらか核分裂しやすい性質を持っています。したがって、ウラン 238 は原子炉の中でプルトニウム 239 に変わり核分裂をします。つまり、初期にウランしか入っていない燃料でもプルトニウムが生成し核分裂しています。

原子炉内の燃料集合体は約1年間の運転毎に約1/4が新燃料に交換されます。約4年間使用された燃料内部の核分裂性物質は消費され、臨界にする能力(余剰反応度)が足りなくなっています。これを補うため新燃料と交換されます。このように新しい燃料が古い燃料を助けながら臨界を維持していきます。

下の図は炉心全体での発電量に対するプルトニウムの寄与を表したものです。ウラン燃料の場合、新燃料はウランしか入っていないので初期にはウランだけがエネルギーを出しますが、最終年度の燃料ではエネルギーの半分以上がプルトニウムから出ます。これらのグループを原子炉全体で平均すると、下の左図のように、初期に20%強、末期に30%強のエネルギーがプルトニウムから出ており、全体で約30%がプルトニウムの寄与となります。一方、MOX燃料を全体の1/3用いた場合は右図のようになります。新燃料にもプルトニウムが入っているため、初期に40%強、末期に60%弱のエネルギーがプルトニウムから出ており、全体で約半分がプルトニウムの寄与となります。



*約1年間の運転毎に、炉心の燃料の約1/4を新燃料に取り替えるが、残りは継続使用するため、ウラン炉心の運転初期でも燃焼して生成したプルトニウムを含む燃料が存在している。

プルトニウムにも核分裂しやすいものと核分裂しにくいものがあります。核分裂しやすいものは、プルトニウム 239 (^{239}Pu) とプルトニウム 241 (^{241}Pu)、核分裂しにくいものはプルトニウム 240 (^{240}Pu) とプルトニウム 242 (^{242}Pu) です。これらプルトニウム同位体はプルトニウム 239 が原子炉内で中性子を吸収して生成します。ちなみに兵器級のプルトニウムはプルトニウム 239 の割合が 95%以上ありますが、原子炉級のプルトニウムは、標準的には、プルトニウム 239 とプルトニウム 241 を合せても最大 8 割程度となります。

熱中性子吸収断面積

核種	熱中性子吸収断面積 (核分裂断面積) barn (バーン)
U-235	680 (577)
U-238	3 (0.0005)
Pu-239	1017 (741)
Pu-240	289 (0.08)
Pu-241	1378 (950)
Pu-242	19 (0.2)

MOX 燃料ではプルトニウムの濃度を、プルトニウム含有率と核分裂性プルトニウム富化度で表わします。プルトニウム含有率は全プルトニウム量をウランとプルトニウムの全量で割ったもので、核分裂性プルトニウム富化度は核分裂しやすいプルトニウム量をウランとプルトニウムの全量で割ったものです。原子力安全委員会原子炉安全基準専門部会報告書「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」(通称：1/3MOX 報告書)では、核分裂性プルトニウム富化度約 8% (プルトニウム含有率約 13%) の範囲で、MOX 燃料の装荷率が 1/3 までとした場合には、従来の設計を大幅に変えることなく使用できるとしています。

2. MOX 燃料の性質

プルトニウムが混ざることによって燃料の性質は変化します。「1/3MOX 報告書」では、ウラン燃料

との共存性については問題ないが、以下の特徴に留意することとしています。

- (1)ペレットの融点及び熱伝導度が低下する
- (2)ペレットのクリープ速度が増加する
- (3)核分裂生成ガス放出率がウランペレットより若干高め
- (4)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

(1)については、燃料の融点はプルトニウムが 10%混ざる事で約 60°Cほど低下し約 2740°C程度となりますが、通常運転時の燃料最高温度は 1660°C程度であり十分な余裕があります。

(2)については、燃料が柔らかくなることを意味し、被覆管に与える応力を緩和する能力が高くなり、より壊れにくくなると考えられます。

(3)については、燃料棒内圧が若干高くなる可能性があるため、燃料棒の上部に設けてある空間(プレナム)の体積を増加させることで対応可能です。もっとも、核分裂生成ガスの放出率は燃料の温度履歴(熱出力)や燃焼度による変動の方が大きく、プルトニウムの特徴よりも運転条件に左右されます。

(4)については、できるだけプルトニウムの片寄りが生じないような製造法をとり、検査を行います。例えば、フランスで行われている製造法(ミマス法)では、まず、プルトニウム粉末をウラン粉末と粉碎混合しプルトニウム含有率 30%程度の均質な粉末を作ります。次にこの粉末とウラン粉末を混合し所定のプルトニウム含有率にしてから、焼結(焼き固め)してペレットにします。このとき、プルトニウムスポット(プルトニウムの濃度の高い粒)の大きさが 0.4mm 以下になるように管理しますし、仮にプルトニウムスポットができたとしても、含有率 30%程度となります。通常運転時には、このようなプルトニウムスポットは初期に消滅し、燃料の健全性には影響を与えません。異常時には、このようなプルトニウムスポットで異常発熱が起き燃料が破損しやすくなるのではと心配されましたが、原子力研究所(現原子力機構)の安全研究炉(NSRR)で試験した結果、プルトニウム 100%の 1.1mm 程度のプルトニウムスポットを被覆管と接触させた条件においても、ウラン燃料と変わらぬ特性を持つ事が実証されています。

3. MOX 燃料の使用実績

MOX 燃料は世界中で使用の実績があります。毎年約 450 体の MOX 燃料集合体が原子炉に装荷されており、2007 年 12 月までの累計で約 6,018 体が使用されています（右表）。これは女川 3 号での MOX 使用の数十年分の実績に相当します。この間、MOX が原因となるような事故やトラブルは 1 件も報告されていません。また、装荷率も炉心の 1/3 以上（最大 36%）を MOX にした例や、燃焼度 55,000MWd/t まで達成したものがありません。装荷率、燃焼度の高いものの実績を下表に示します。

4. プルトニウムはエネルギー資源

以上のように、プルトニウムを使用するにあたって、ウラン燃料と大きく異なることはありません。

むしろ積極的に使用することによって、エネルギー資源を有効に利用することができます。MOX 燃料の軽水炉での使用は、ウラン資源を約 1 割も節約することになります。「1 割はわずかでとるに足りない」と思われる方もいるかもしれませんが、今乗っている自動車の燃費を 1 割延ばすことを考えてみてください。どれほど大変なことかお判りになると思います。

日本のエネルギー源確保の観点からも MOX 利用は進めるべきと考えます。

MOX 集合体使用実績
(2007 年 12 月末)

国（発電所）	集合体数
フランス(21 基)	2,894
ドイツ(15 基)	2,220
ベルギー(3 基)	321
スイス(3 基)	392
アメリカ(7 基)	95
イタリア(2 基)	70
インド(2 基)	10
オランダ(1 基)	7
日本(2 基)	6
スウェーデン(1 基)	3
計(57 基)	6,018
*ふげん	772

*「ふげん」は新型転換炉

なお、アメリカは核兵器解体によるプルトニウムをフランスに頼んで MOX 燃料にしてもらい、現在サウスカロライナ州のカトーバ発電所で使用している。

MOX 燃料使用の実績

国	発電所	出力 万 kW	MOX 装荷 開始	燃焼度 MWd/t	装荷率 %
ベルギー	ドール 3	105.6	1995	47,000	20
ドイツ	グンドレミンゲン(B)	134.4	1996	55,000	28
	ネッカー 2	139.5	1998	55,000	27
	イザール 2	147.5	1998	55,000	33
	ブロックドルフ	136.5	1989	50,000	33
	グローンデ	143.0	1988	50,000	33
	ウンターペーサー	141.0	1984	50,000	37
	フィリップスブルク 2	142.4	1988	55,000	33
スイス	ゲスゲン	102.0	1997	52,000	36
日本	女川 3 号炉	82.5	2015 までに導入	40,000	32

「平成 17 年度核燃料サイクル関連技術調査報告書」財団法人 エネルギー総合工学研究所
付録「2005 年までの世界の MOX 燃料装荷実績」から引用 2005 年末のデータ