敦賀発電所1号機におけるMOX燃料照射計画

(日本原子力発電) 高橋 義信

軽水炉における Pu 利用(プルサーマル)については欧米諸国では1960年代からすでにその実績があるが、わが国においては1986年に最初のMOX燃料が軽水炉で使用されようとしている。
本稿では敦賀1号機におけるMOX燃料照射計画を中心に、プルサーマル利用について概説する。

I. はじめに

使用済燃料の再処理により回収される Pu は有効なエネルギー資源であり、燃料サイクルの面からも、再処理—Pu 利用はその要である。エネルギー資源に乏しいわが国としては、燃料サイクルを完結することにより準国産資源ともいえる Pu をいかに有効に活用できるかはエネルギーセキュリティ確保の面からも重要な課題である。1985年12月に発表された「原子力白書」でも、燃料サイクルの自立と Pu 利用の基礎固めの重要性が強調されている。

原子力開発の当初から、Pu は高速増殖炉で使用するのが最も効率的であるといわれてはいたが、これを熱中性子炉で使用する、すなわちプルサーマルも、有効な利用方法といわれて来た(動燃で開発した新型転換炉 ATR もプルサーマルの一種であるが、最近ではプルサーマルといえば、軽水炉への Pu 利用を指すことが多い)。

当社においても、敦賀1号機の完成(1970年3月運転開始)以後プルサーマルについて、日本原子力研究所(原研)、動力炉・核燃料開発事業団(動燃)との共同研究等でその検討を行なって来たが、プルサーマルが初めてわが国で大きく話題となったのは、1973年(昭和48)、当時の米国原子力委員会が濃縮ウランの供給不足を懸念し、濃縮ウランの契約に際し、プルサーマル利用を条件とすると発表した時であった。各国のプルサーマル状況については後で述べるが、わが国としてもプルサーマルの検討を始めるべきであるとの意見が多く出され、1985年度以降は通産省の委託調査が始まった。この委託を受け当社に原研、動燃、東京電力、日立、東芝の専門家からなるプルサーマル検討会を設け、敦賀1号機をモデルとした検討を行なった。

この委託調査は1979年まで続き80年以降は東京電力、東北電力、中部電力、北陸電力、中国電力のBWR電

力の電力共研(1984年度から動燃も参加)として引き継がれている。電力共研でMOX燃料の設計、許認可に必要な解析等を行い、84年10月にMOX燃料(2体)を装荷するための敦賀発電所の設置変更許可を申請し、85年3月に国の安全審査を終え変更許可を取得した。

1985年度中に燃料を製造して86年度には燃料を装荷し、3サイクル程度使用した後は照射後試験を行う予定である。敦賀1号機におけるMOX照射計画の全体工程を第1図に示す。

年 度	1980	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92
設計・検討													
安全審査													
燃料製造													
照射													
照射後試験													

□ 実績 ▨ 予定

第1図 敦賀1号機のMOX燃料照射計画

II. MOX燃料設計

軽水炉には通常、濃縮度が3%程度の低濃縮Uを使用する。この低濃縮Uの代わりにPuを使用する場合は3%程度のPuと天然U(もしくは使用済燃料再処理後の回収Uか濃縮プラントからの廃棄U)を酸化物の形で混合して使用する。Puを含む燃料を混合酸化物燃料とかMOX(Mixed Oxide)燃料と呼ぶ。軽水炉用のMOX燃料を設計する際の前提は、通常のU燃料と互換性を有する、すなわち核熱水力特性が同等になるように設計することである。

熱水力特性については、燃料の寸法・形状等を通常

Tsuruga MOX Fuel Utilization Program: Yoshinobu TAKAHASHI.

(1986年 1月9日 受理)

のU燃料と同一にすることにより対処する。核特性については第2図に示すように、 ^{235}U と ^{239}Pu もしくは ^{241}Pu を比べると、Puの方が吸収断面積も核分裂断面積も大きいので、設計上若干の配慮が必要となる。もっぱら通常のU燃料においても、炉内で燃焼するに従ってPuは生成し、核分裂を起こしている(軽水炉の場合エネルギーの $\frac{1}{2}$ 程度はPuの核分裂による)訳であるから、MOX燃料といっても、通常のU燃料の特性と大幅な差がある訳ではない。核特性の観点から、MOX燃料は、一般にU燃料に比べて以下の特徴がある。

- (1) 無限増倍率の燃焼による変化が緩やかである。(転換比が高い)
- (2) 制御棒の効きが低下する。
- (3) 局所出力ピーキングが大きくなり易い。
- (4) 反応度フィードバック係数が大きい。

(1)の特徴は燃料の燃焼が進んでも反応度が変わらない、すなわち新しい燃料と古い燃料の出力 mismatch が小さくなるという、燃料としては極めて好ましい特徴であるので問題にはならない。(2)に対しては例えば制御棒の近くにMOX燃料を使用しない設計、(3)に対

第2図 ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{235}U の核特性
(Nucl. Technol., 18, May 1973)

しては、Puの富化度を調整することにより出力分布を平坦化するという工夫が必要となる。(4)は一般には原子炉の安全性上望ましい特性ではあるが、燃料の温度係数(ドブラー係数)の方は問題ないものの、減速材温度係数もしくはボイド係数が大きいと、冷水導入もしくは加圧事象の際の反応度添加が大きくなる恐れがある。ボイド係数が大きくなりすぎる場合には水対U比を大きくする等の設計上の配慮が必要となる。

敦賀1号機用のMOX燃料設計を第1表と第3図に示す。その主要な特徴は以下の通りである。

- (1) 燃料の格子配列は 8×8 型で、中央に2本のウォーター・ロッドを使用する。燃料の寸法・形状は通常のU燃料(新型 8×8 燃料)と同一である。
- (2) 中央の24本の燃料棒にPuを天然Uに混ぜたMOX燃料を使用し、周辺の38本の燃料には低濃縮Uを使用する(アイランド設計といわれている)。
- (3) MOX燃料としては中空ペレットを使用する。

(1)は、燃料の圧力損失、流量配分、熱伝達特性等を通常のU燃料と同一にするための設計条件である。

(2)は、BWR用MOX燃料設計の特徴であり、MOX燃料棒は燃料集合体の中央部、すなわち制御棒から離

第1表 MOX燃料設計仕様の概要

	MOX燃料棒	UO ₂ 燃料棒
ペレット直径 (cm)	1.03	同 左
ペレット中空径 (cm)	0.36	—
ペレット長さ (cm)	1.0	同 左
ペレット密度	理論密度の約95%	同 左
ペレット材	UO ₂ -PuO ₂	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃
被覆管外径 (cm)	1.23	同 左
被覆管厚さ (mm)	0.86	同 左
被覆管材料	ジルカロイ-2 (再結晶焼なまし材)	同 左
燃料棒有効長 (m)	3.66	同 左
ペレット-被覆管 間隙 (mm)	0.24	同 左
ブレナム体積比	0.1	同 左
最大線出力密度 (kW/m)	44.0	同 左
ペレット最高温度 (設計線出力密度)(°C)	約1,470	約1,850
被覆管外面最高 温度 (°C)	約390	同 左
燃料集合体全長 (つかみ部分を含む)		4.35 m
濃縮度(集合体平均)†		約2.9%
ウォーター・ロッド外径		1.50 cm

† $(^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}) / (\text{U} + \text{Pu})$

制御棒							
4	3	2	2	2	2	2	3
3	1	1	P ₁	P ₂	1	1	2
2	1	P ₁	P ₁	P ₂	P ₂	1	1
2	P ₁	P ₂	P ₂	W	P ₂	P ₂	1
2	P ₁	P ₂	W	P ₂	P ₁	P ₂	1
2	1	P ₂	P ₂	P ₁	P ₁	P ₂	1
2	1	1	P ₂	P ₂	P ₂	1	1
3	2	1	1	1	1	1	2

W: ウォータロッド

内MOX燃料棒

UO ₂ 燃料棒		MOX 燃料棒	
1	高濃縮度燃料棒	P ₁	高富化度燃料棒
2	中間高濃縮度燃料棒	P ₂	中富化度燃料棒
3	中間低濃縮度燃料棒	P ₃	低富化度燃料棒
4	低濃縮度燃料棒		

第3図 MOX燃料集合体の燃料棒配置図

れた位置とし、制御棒の周辺には通常のU燃料とすることにより、制御棒の価値は変わらなくなる*。また、BWRの場合、燃料集合体の中央部に高濃縮度の燃料棒を使用するが、アイランド設計では高濃縮度部分にMOX燃料を使用し、Puの有効利用が図れることになる。なお、敦賀用のMOX燃料の場合、燃料集合体当たり3種類のPu富化度、4種類の濃縮度の燃料棒を使用して、出力分布の平坦化を図っている。

(3)の中空ペレットの採用は、燃料温度の低下と、水対U比の増大によるボイド係数の減少を意図したもので、GE社が以前に行なったビッグロックポイント炉もしくはクォドシティ炉での照射試験の成果を反映したものである。

Ⅲ. 燃料製造

敦賀用のMOX燃料は、第3図に示したように、通常の低濃縮Uの燃料棒と、Puを含むMOX燃料棒で構成されている。燃料は動燃と日本ニュークリア・フュエル(JNF)で製造した。燃料製造の流れを第4図に

示す。通常のU燃料製造と同じ部分、すなわち、部材の調達、検査およびU燃料棒の製造まではJNFで行い、MOX燃料棒の製造と集合体の組立ては動燃で行なった。JNFでは、完成したU燃料棒は所定の位置に組み込み、MOX燃料棒が挿入される位置には被覆管(ダミー燃料棒)だけを組み込んだ、ダミーの燃料集合体を組み立てて動燃に輸送し、動燃では中央部のダミー燃料棒と所定のMOX燃料棒を入れ替えることによりMOX燃料集合体の組立てを行なった。

JNFはBWR燃料の製造技術については、最近の燃料は破損ゼロという実績から見ても、世界のトップに位置付けられ、また動燃も、MOX燃料の製造技術については「ふげん」の実績等からもわかるように世界のトップにあるといえる。しかしながら、それぞれが、それぞれの実績を背景に品質保証、品質管理、検査手法、頻度等について独自の技術を確認しており、これが一緒になって1つの燃料を作るとなると、細部についてはいろいろ調整すべき点が多かったのは事実である。したがって、動燃と、日立、東芝、JNFと当社の担当者による会議を頻繁に開催して意志の疎通を図り、それぞれが互いの立場を尊重しつつも、主張すべき点は主張して、考え方を統一できたのは当然とはいえ貴重な成果であった。

なお、このMOX燃料体の製造は、ほとんどが従来の製造技術の範囲内であったが、中空のMOXペレットを商業炉で使用するのは初めてのことであり、中空部の製造公差を初めとして、動燃といろいろ議論もし、動燃では試作も繰り返し行われたが結果的には写真1のように良好な中空ペレットが製造された。

写真1 中空のMOXペレット

* 制御棒が集合体内に挿入されるPWRの場合は、燃料集合体全部をMOX燃料とし、MOX燃料は制御棒挿入位置以外の場所に装荷することにより、制御棒価値の低下を防止している。

第 4 図 アイランド型 MOX 燃料の加工工程

Ⅳ. 今後の計画

敦賀 1 号機の計画については、最初に述べたように、1986年度から照射を開始し、その後照射後試験を行う予定であるので、それらの結果については適宜報告する機会もあると思われる。PWRでも美浜 1 号機で 4 体の MOX 燃料の照射が計画されている。少数体照射の次の計画として、BWR, PWR 各 1 基で、炉心の $\frac{1}{3}$ 程度に MOX 燃料を使用する実用規模利用の実証を行い、その後本格利用に移行するというのが、わが国の基本的な考えであり、その具体的な計画について検討されているところである。

今後の計画を策定するに際し、必要なのは Pu の需給見通しと軽水炉における Pu 使用量であるが、その概要は以下の通りである。

1. Pu の需給バランス

Pu の需給バランスについては、公開・非公開を含めいくつかの機関で試算がなされている。Pu の供給は、再処理施設の建設計画、運転計画(稼働率)により決まり、これにはかなりの不確かさが含まれるが、供給量を累積すると 2000 年時点で 50 t、2010 年時点で 90 t 程度になると思われる。

一方需要の方は、高速増殖炉と新型転換炉の建設もしくは運転計画次第であるが、まず確実なのは(いつまで運転するかの問題はあるが)現在運転している「常陽」と「ふげん」、次が建設中の「もんじゅ」および建

設計画中の ATR 実証炉(大間)で、これらの需要量の累積は 2000 年で 10 t 強、2010 年で 20 t 強となり、余剰 Pu は 2000 年で 30 t 強、2010 年で 60 t 強となり、この余剰 Pu を活用するには、軽水炉に使用するほかに良い方法はあるまい。

2. 自給リサイクル(SGR)

プルサーマルの場合は炉心の $\frac{1}{3}$ に MOX 燃料を使用するというのが一般的な考えである。この $\frac{1}{3}$ というのはいかんして出て来たかをいうと、使用済燃料を再処理して回収された Pu を自分で使用するというを繰り返せば(Self Generating Recycle), 炉心全体のうち $\frac{1}{3}$ が MOX 燃料になった時点で平衡に達するという、あくまで仮想的な数字である。自給リサイクルモデルの試算例を第 2 表に示す。

一方、この値は一つの目安として使うには便利であり、現在の軽水炉に MOX 燃料を使用する際 $\frac{1}{3}$ 炉心程度であれば、原子炉の安全性を含め炉心特性には影響ないといえる数字でもある。このことは $\frac{1}{3}$ 以上 MOX 燃料を装荷すると安全性が損われるとかいった MOX 燃料装荷量の上限值ではない。MOX 燃料の装荷割合を制限する因子としては第 II 章で述べた制御棒価値の低下による停止余裕の確保と、ボイド係数の増大が考えられるが、前者にはガドリニアのような可燃性毒物の活用、後者には水対 U 比を変える等の方法により対処可能であるが、現状では MOX 燃料の使用は $\frac{1}{3}$ 炉心程度を前提として考えるのが妥当であろう。

第2表 自給 Pu リサイクルでのPuの増加(PWR)

U 領域 番号†	装荷年/取出年	Pu の源U 領域番号	%Pu(装荷時)††	領域	炉心
1	0	2	—	—	—
2	0	3	—	—	—
3	0	4	—	—	—
4	2	5	—	—	—
5	3	6	—	—	—
6	4	7	1	15.7	5.2
7	5	8	2	19.3	11.7
8	6	9	3	21.3	18.8
9	7	10	4	21.3	20.6
10	8	11	5	21.3	21.3
11	9	12	6	27.4	23.3
12	10	13	7	29.4	26.0
13	11	14	8	29.6	28.8
14	12	15	9	29.6	29.5
15	13	16	10	29.6	29.6
16	14	17	11	32.8	30.7
17	15	18	12	33.5	32.0
18	16	19	13	33.5	33.3

† 最初の3領域が初期炉心となる。第4領域は最初の
取替燃料である。以下同様。

†† $\%Pu = \frac{\text{MOXロッド数}}{\text{全ロッド数}} \times 100(\%)$
(WCAP-4167-2 EEI-WH)

100万kW級の大型軽水炉の場合、炉心の $\frac{1}{3}$ をMOX燃料とするのに必要なPuの量は300kg/年程度であるので、10基の軽水炉で使用すると年間約3t、10年間で30tのPuを消費することになる。また軽水炉用MOX燃料のPu富化度は3%程度であるので、毎年3tのPuを燃料として使うためには100t/年規模のMOX加工施設が必要となる。

V. 各国の状況

欧米諸国におけるプルサーマルの実績および計画をまとめて第3表に示す。各国の状況は以下の通りである。

1. 米 国

軽水炉開発で世界をリードしてきた米国は、Pu利用についても例外ではなく、1956年のPu利用計画(PUP)以来長い歴史と豊富な実績を有している。最初に述べたように、プルサーマル利用を濃縮契約の条件とすると発表して、世界のプルサーマル利用熱に火をつけたのも米国である。米国においてもプルサーマル利用について膨大な調査・検討を行い、「軽水炉における混合酸化物燃料利用に関する一般環境報告書(GESMO)」として発表した。この中でいくつかのケーススタディ

第3表 各国の軽水炉における MOX 燃料使用実績・計画

プラント名	炉型	出力 (MWe)	装荷(年)	装荷 体数
(米 国)				
ドレスデン-1	BWR	210	1967~69	15
ビッグロックポイント	BWR	75	1969~76	53
クォドシティズ-1	BWR	850	1974	5
サクストン	PWR	5.5	1965	9
			1969	7
サンオノフェ-1	PWR	450	1970	4
ギネー	PWR	490	1981	4
(西ドイツ)				
カール	BWR	17	1966~82	95
リンゲン	BWR	252	1970	1
グンドレミンゲン	BWR	250	1974~76	64
オブリッヒハイム	PWR	345	1972~83	38
			1985~(計画)	8
ネッカー	PWR	855	1982~84	16
			1985~(計画)	8
ウンターペーザー	PWR	1,300	1984	4
			1985~(計画)	8
グラフェンライン フェルト	PWR	1,300	1985~(計画)	16
ボーゲン	PWR	1,300	1985~(計画)	4
(フランス)				
ショー	PWR	285	1974~75	6
原子炉未定(CPIシリ ーズ炉4基)	PWR		1987~89 (計画)	64
(ベルギー)				
BR-3	PWR	11.2	1963~69	4
			1972	22
			1976	31
			1979	22
			1981	18
			1984	28
(スイス)				
ベズノ-1	PWR	364	1978	4
ベズノ-2	PWR	364	1984	4
			1985~(計画)	24
(イタリア)				
ガリリアーノ	BWR	164	1968~75	62
トリノ	PWR	285	1976	8
(オランダ、スウェーデン)				
	BWR		1963~74	10
BWR 合計				305
PWR 合計				229
総計(計画中は除く)				534

を行い、軽水炉の燃料をなるべく早く再処理し、そこから回収されるUとPuをなるべく早く軽水炉にリサイクル利用するのが最も望ましいとの結論を出した。

このGESMOの最終報告が出されたのは1976年夏であったが、同年秋の核不拡散を重視した新エネルギー政策の出現、さらには原子炉発電の伸びの鈍化によるUの供給過剰、再処理-高速炉開発路線の中断等によ

り、米国の Pu 利用熱は完全に冷めてしまっている。したがって、プルサーマルは1970年代前半までは少数体使用の実績はあるが、その後は全くない。

2. 西ドイツ

プルサーマルに関し、米国に代わり世界をリードしているのが西ドイツである。現在は、わが国の電力共研に似たシステムとなっており、Pu を保有している12の電力会社が「プルトニウムプール契約」を締結し、ある特定の炉に MOX 燃料として使用する。MOX 燃料はアルケム社で加工するが、U 燃料に比べて費用が余分にかかった分(Pu は無料、燃料費の増加分は MOX であることによる加工費の増加分から U 節約分を差し引いたもの)だけは、電力各社で分担するという方法で、COGEMA から返還される Pu は、高速増殖炉用の分を除くとすべて軽水炉に使用することとしている。軽水炉に使用する際の MOX 燃料の割合は原則として1回の取替燃料の1/4で、返還される Pu の量が増えれば、プルサーマル対象炉を増やす方針で、2000年までの順番もほぼ決っている。

3. フランス

高速増殖炉開発で世界をリードしているフランスの Pu 利用は高速増殖炉中心であったが、高速増殖炉の実用化が予定よりも遅れるのは避けられなくなった現状では、1985年の夏、余剰 Pu を軽水炉に利用する方

針を明確にした。フランスでは再処理を含め MOX の加工も COGEMA の責任であり、COGEMA は、まずベルギーのベルゴニュクリアー社と合弁の MOX 加工会社 COMMOX(50 t/年)を設立し、さらにマルクールに 100 t/年規模の加工施設を計画している。

4. ベルギー、スイス、イタリア等

その他にプルサーマルに積極的な国としてはベルギー、スイスがある。イタリアは一時積極的で、パッチすべてを MOX 燃料にする等の実績があったが、Pu 不足を理由にプルサーマルは中止している。その他、オランダ、スウェーデン等でも少数体照射の実績がある。

INFCE 等では西ドイツと並んでプルサーマルに積極的であったわが国としては、ようやく1986年になって少数体照射を開始しようという段階であり、上述の欧米諸国に比べ大幅に遅れている。軽水炉への Pu 利用は技術的に特に大きな問題はないが、MOX 燃料加工体制の整備を初めとして今後解決すべき課題は多い。Pu を取りまく国内外の情勢はなお流動的であるが、エネルギー資源に乏しく、技術をよりどころとせざるを得ないわが国としては、軽水炉への Pu 利用についても1日も早く自主技術として確立する必要がある。

☆昭和61年度会費をお払込み願います☆

本会の会計年度は4月1日～翌年3月31日で、会費は定款で全額前納となっております。2月1日に個別送付の「会費専用の振替用紙」にてお払込み願います。

入金および異動の記録は、毎月3日にひと月分一括して電算機に入力されます。3日を過ぎると翌月の入力になりますので、ご注意ください。(郵便振替は着金までに約5～7日間)

(10名以上分の全額を7月2日以前に「一括払込み」すれば、手数料として5%謝礼します。)

正会員 7,500円 学生会員 4,000円 賛助会員 1口 35,000円(2口以上)

「欧文誌」誌代(Vol. 23, Nos. 1～12) 会員特価 3,500円(千とも)

○5連絡会費(各1,500円)と一緒に送金する方は、通信欄にその旨記入し、金額欄を訂正・捺印して下さい。

その他、本会へのご送金は、郵便局備付けの「振替用紙」でもできます。(振替番号は東京3-55932)

会費未納の場合、年会・分科会の研究発表や「会誌」投稿等は受け付けません。また、上半期(4～9月)半年間滞納すると、10月号から「会誌」が発送保留となり(「欧文誌」代滞納も同様)、さらに来年3月までの1年間滞納すると除名になりますので、ご留意願います。