UO₂ 燃料体の国産化の現状と諸問題

上 田 隆 三*

Some Problems in Domestic UO₂ Fuel

By Ryūzō UEDA

The present status of research and development in Japan of UO₂ fuel, and some problems encountered in the fabrication of UO₂ fuel power for reactors are described.

I. ま え が き

わが国の原子力発電も日本原子力発電会社の東海炉の商業発電にひきつづいて、これから軽水炉を主流とした発電所の建設がぞくぞく計画されている。また一方、国のプロジェクトとして新型転換炉および高速増殖炉の自主的な開発もいよいよスタートを切ろうとしている。これらの動力炉の開発計画に対処して、燃料を国産化することが切実な問題となってきた。

さて、国産という意味を、わが国で燃料を製造するということであると解釈すると、それにはいろいろのやり方があり、つぎのようなことが考えられる。

- (1) 外国から技術を導入して、外国の燃料仕様に従って、外国から輸入した燃料部品で燃料要素を組み立てる。
- (2) 燃料設計は外国のものであるが、原料の一部は輸入するとしても、その加工、組立てはわが国で行う。
- (3) わが国自らの手で燃料設計を行い、原料の一部の輸入はやむをえないとしても、その加工、組立てもわが国で行う。

(1)は全く下請工場的なあり方で、これは国産といいたくない。(2)は、例えば JPDR の燃料を国産化するために、まず差し当り現在 JPDR で使用している G.E. 社の燃料の仕様のとおりのものを試作して、テストアセンブリー No.1 を組み立てた例である。また、導入した従来型動力炉の燃料を仕様を変えずに国産するならこの例となろうし、また、外国から燃料だけの製造を依頼されて輸出する場合もこの例となろう。(3)は本当の意味での国産化であり、これからわが国で軽水炉を国産してゆくにしても、新型転換炉や高速増殖炉を自らの手で開発してゆくには、この方法をとらねばならないであろう。

燃料を製造するには、その仕様に合ったものを作らねばならない。燃料仕様は燃料が原子炉の運転条件のもとで安全に目標の燃焼度まで使用できることを保証するものではあるが、その仕様を決めるためには多くの炉外および炉内試験が必要であり、また多くの燃料の使用経験が必要である。

UO₂燃料の歴史は相当古い。しかしながら、その高温・高燃焼時における挙動が明らかになってきたのもここ数年来のことであり、その使用限界をあげる努力が常につづけられている。わが国においても、従来からUO₂燃料の国産化をめざして不断的な努力がつづけられてきたのであるが、研究炉や臨界実験装置の燃料製造の経験はあるとしても、動力炉の燃料要素の製造やその炉内照射実験はまだ緒についたばかりであるといえる。

軽水炉およびわが国で開発しようとしている重水炉も、使用される燃料はUO₂であり、これらのUO₂燃料の国産化の体制を早急にかためることが必要である。ここでは、UO₂燃料の国産化をめざして進んできた経過と今後の問題点について述べたいと思う。

II. わが国でのUO₂燃料開発の経過と現状

わが国でUO₂燃料の製造研究が始められたのは比較的早く、原子力局の補助金を得て1957年頃から、最初はUO₂ペレットの製造研究から開始された。そしてその後民間5社において1960年頃までにその製造技術が完成された。また、一方、1960年頃から三菱原子力工業(株)において、スエーデン法による燃料棒製作が開発され、1962年頃から民間5社や原子燃料公社において振動充填法による燃料棒の製造研究が行われ、それに用いるための高密度UO₂粉末を作るために、プ

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

ラズマ法、溶融法、ダイナパック法、電解法、ゾルゲル法などが研究されてきた。

ここまでは、燃料棒としての試作研究であって、一応燃料棒を製造するための一般的な勉強や開発が終了という段階であった。

しかしながら、このようにして作った燃料物質や燃料棒が動力炉の燃料として使用できるかどうかは、実際に照射実験を行なって確かめる必要がある。照射実験は非常に金がかかるので、照射時の燃料挙動を模擬した炉外実験で、できるだけ燃料挙動を解析するための研究が行われ資料が集められてきたが、一方原研では、研究炉(主として JRR-2)を使ってのキャプセル照射技術の開発が進められ、また、1960年に東芝は G.E. 社の GETR で天然 UO_2 ペレットを照射し、三菱原子力は W.H. 社の WTR で天然ウランペレット、濃縮 UO_2 をベルギー BR-2 でそれぞれ照射し、その照射後試験の一部は原研のホットラボで行われた。このような照射試験とは別に、民間5社が共同で、各社それぞれ特長のある燃料をもちり、海外炉で照射試験を行う計画が、1963年度の研究費補助金をうけて具体化した。原研、原燃も協力して照射計画の検討、炉外評価、照射後試験を分担することとなった。この計画は1965年度までつづけられ、これまで民間5社が研究してきた燃料棒の実用性を実証しようとするもので、照射条件も現用軽水動力炉の燃料使用条件を目標としている。1963年度はアメリカ GETR で照射試験を行い、濃縮 UO_2 のペレット燃料棒とスエーデン燃料棒はすでに照射後試験が終了、天然 UO_2 の振動充填法による燃料棒は日本に持ち帰り、原研ホットラボで照射後試験が行われた。

このようにして、燃料棒としてのわが国での製造技術を確認する試験が行われてきたのであるが、実際に動力炉内で燃料を使用するのは、数10本の燃料棒を組んだ燃料要素の形である。この燃料要素は、原子炉の設計に合わせて、核的、熱的、構造的な設計のもとに製造しなければならない。したがって、燃料要素としての製造研究、照射研究はある目標の原子炉がないと手がつけにくい。燃料要素まで製作して、初めて燃料を作ったというのであるが、わが国において燃料要素として実際に使用しうる UO_2 燃料を製造したのは、JPDR-II 計画においてテストアセンブリ No.1 を試作したのが最初であった。

1. JPDR-II 計画と燃料国産計画

JPDR は自然循環冷却方式の沸騰水型動力炉である。原研がアメリカ G.E. 社から購入し、1963年10月

末初発電して以来、原子力発電の実用性を示すための運転、発電用原子炉の運転の習熟や、運転を通じての特性の解析や問題点の抽出に努めてきたのである。そして、このような小型の試験用動力炉は燃料の試験炉として使用してこそ作った意義のあることが認識された。しかし JPDR を設計した時より、軽水型動力炉は大きい発達をとげ、今後わが国がこの型式の商業用発電炉を輸入する場合、あるいは国産する場合は JPDR よりさらに進歩したものであることは確実である。いかにいへば、今のままの JPDR で燃料試験を行なっても、今後の軽水炉の燃料のよりきびしい使用条件に耐えることを保証する試験が行えないのである。そこで JPDR を強制循環冷却に改造し、炉心出力密度を高め、総熱出力を倍増して、燃料試験の可能性を高めることが計画された。そしてこの計画を JPDR-II 計画と称せられた。

(1) テストアセンブリ No.1 (TA No.1)

JPDR の出力を2倍にして JPDR-II とするためには、それにあった高出力用の燃料を設計・製造しなければならない。しかしながら、先にも述べたように、わが国においてはまだ今までに動力炉用の実用燃料の製造を行なった経験がなかった。そこで、まず、現在使用している G.E. 社製の燃料と同じ仕様の燃料を国産することとした。このテストアセンブリ No.1 の大きい目的は、実用燃料を国産するに際しての種々の問題を摘出することと、国産燃料の安全性を確認することであった。

TA No.1 の製造については、1963年末頃から予備的な検討を始め、1964年度に燃料アセンブリのすべての仕様、検査方法の検討を終り、燃料セグメントを民間製造業者に発注した。この製造は国産品の技術水準を調べる意味もあったので、国産のジルカロイ管については神戸製鋼所と住友金属工業の2社へ、燃料セグメントの製造は、古河、日立、三菱、住友、東芝の5社に均等に発注された。また、U.S.AEC から受け入れた UF₆ の UO_2 への転換加工は、燃料セグメント製造業者の希望もあり、三菱金属鉱業と住友金属鉱山の2社へ依頼した。

この燃料セグメントの製作に当って、原子燃料公社の全面的な協力を得て、使用部品の検査、工程検査、燃料セグメントの検査を行なった。また、原研の軽水炉臨界実験装置 TCA での反応度試験も行われた。そして納入された燃料セグメントのうち114本と G.E. 社製セグメント30本とで燃料アセンブリ2体を原研で組み上げ、1965年9月 JPDR に装荷された。そして現在

まで順調に燃焼をつづけ、その燃焼度は2,000MWD/t以上に達している。このうち1体は今年末炉からとり出して冷却後、照射後試験を行う予定である。

このTA No. 1の製造にあたって多くの問題に遭遇した。そのうちから主な問題をあげてみよう。

まず第1には、最初は燃料被覆管として使用するジルカロイ-2は全部国産品を使う予定であったが、実際に炉に装荷した国産燃料セグメント114本のうち、国産ジルカロイ-2管を使用できたのは11本のみであったことである。わが国でのジルカロイ製造技術はまだ実験室的規模であったため、寸法精度、オートクレーブ試験、機械強度試験、超音波による欠陥探傷など厳重な燃料被覆管としての仕様に合格できるものが少なかったためである。

第2には、G.E.社の仕様をそのまま使用したが、検査の規準に対して検査技術がそこまで開発されていなかったことである。例えば、ジルカロイ-2被覆管は厚み0.76mmであったが、その疵の深さは76μ以上であることは許されない。この疵は超音波探傷法で検査されたが、その当時はその探傷技術が十分開発されていなかったため検査に非常に苦心が払われた。そこで原燃を中心として急いで技術開発が行われ、ジルカロイ-2については約50μの疵も検出できるようになった。また、ジルカロイおよびUO₂中の不純物の分析についても同様のことがいえた。

(2) テストアセンブリ No. 2 (TA No. 2)

現在のJPDR燃料要素の数を変えずに出力を上昇するため高出力燃料の設計が原研自らの手で行われているが、現時点ではまだ自然循環冷却であり、また、装荷する試作燃料がその周囲の燃料要素に及ぼす影響も考慮して、第1表のようなTA No. 2を試作することとした。TA No. 1が6×6本組みのアセンブリであるのに対し、TA No. 2は7×7本組みのアセンブリであり、燃料棒の外径は12.23mmと細くなっている。また、濃縮度が2.6%の燃料棒と5.9%のものを組み合わせて組み立てることになっている。このTA No. 2はF型とR型とがあり、F型は燃料セグメントが固定されているが、R型は1本1本取り外しのできるようになっていて、ある程度照射したあと1本だけとり出して試験し、他はそのまま再び照射をつづけられるようにしてある。このTA No. 2用のセグメントもTA No. 1と同様に民間5社に発注され、11月中に出来上がる予定である。そしてTA No. 1と同様原研で燃料アセンブリとして組み立て、TCAで種々の測定を行なったのち来年2月にJPDRに装荷の予定である。この

第1表 JPDR テストアセンブリ対照表

項 目	TA No. 1	TA No. 2
UO ₂ ペレット		
濃 縮 度	2.6%	2.6%および5.9%
密 度	95%T.D.	95%T.D.
直 径	12.5 mm φ	10.71 mm φ
被 覆 材		
材 質	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2
外 径	14.14 mm φ	12.23 mm φ
内 径	12.62 mm φ	10.83 mm φ
肉 厚	0.76 mm	0.70 mm
燃料セグメント		
有 効 長 さ	721 mm	721 mm
UO ₂ 量	921 g	677 g
燃料アセンブリ		
形 状	6×6 正方位列	7×7 正方位列
ピ ッ チ	19.56 mm	16.60 mm
照 射		
経 過 (予定)	1965年8月より	1967年2月より
アセンブリ当り		
出力 ⁽¹⁾	775kW ⁽⁴⁾	975kW ⁽⁴⁾
最高表面熱流束 ⁽²⁾	245,000 Btu/ft ² hr ⁽³⁾	347,000 Btu/ft ² hr ⁽⁴⁾
最高 $\int kd\theta$	28.8W/cm ⁽³⁾	33.1W/cm ⁽⁴⁾
最高燃料温度 ⁽²⁾	1,370°C ⁽³⁾	1,810°C

(1) 定常運転時, (2) 125%過出力時,

(3) 機械学会誌, 69, No.571, (1966), (4) 安全審査資料, (41.8.)

TA No. 2は日本で設計され製造される本当の意味での国産燃料といえるものであり、模擬燃料を作って種類の流動試験や伝熱試験も行われた。

(3) Halden 炉での照射実験とTA No. 3

第1表でもわかるように、TA No. 2では出力を2倍にするための試験を行うことはできない。そこでノルウェーのハルデン・プロジェクトに参加して、HBWRで燃料照射を行い、できるだけ早くJPDR-IIの計画を完成させようとする計画をたてている。ハルデン炉では、燃料中心温度、表面温度、燃料棒の核分裂ガスの内圧、冷却材の流速などが照射中に測定できる。目下来年6月から照射試験が行えるよう、ハルデンと密接な連絡をとりながら準備を進めているが、これから得られる照射結果を参照して、最終的な高出力燃料TA No. 3の設計を行うこととしている。

2. JPDR 以外の燃料要素の試作

JPDRの燃料を国産化しようと試みた頃から、民間会社でも独自の製作技術で燃料要素までの製造開発にのり出した。最初は燃料要素の組立技術を中心に研究

が進められ、試作したもので炉外試験が行われた。そしてその実用性を確かめるために三菱原子力で試作した Saxton 型の PWR 燃料要素は、現在 Saxton において照射試験が行われている。JPDR の燃料棒は 2 本の燃料セグメントをつぎ合わせて 1 本の燃料棒としているが、最近の実用軽水炉ではつぎ合わせでない長い燃料棒を使用している。東芝、住友では、原研の協力を得て長尺燃料要素の設計および試作研究を進めてきた。東芝の設計しているのは 6×6 本組み、住友のは 8×8 本組みである。これらを JPDR の炉心に装荷するために設計が検討され、それぞれ来年 1 月および 6 月に炉内に装荷する予定で準備が進められている。

また、三菱原子力で開発されたスエージ燃料棒は、燃料要素としてではないが、実寸の燃料棒として特殊なリグに組み込まれ、本年 8 月より JPDR の炉心周縁部の予備燃料位置に装荷され、照射試験されている。JPDR には運転初期から G.E. 社製のスエージ燃料 2 体が入れているが、このスエージ燃料は近く取り出して照射後試験を行う予定であるので、国産品との比較検討が行われるであろう。

II. UO_2 燃料国産上の問題点

UO_2 燃料を国産するということは、形ができあがればよいということではない。軽水炉にしても、重水炉にしても、その原型はすでに外国にあり、燃料もそれらの仕様をまねて作ればよいというものではない。作った燃料が安全に目標の燃焼度まで燃焼することを保証しなければならない。また一方、燃料製造コストを下げる研究を行うことも必要である。民間燃料製造業者の不断努力によって燃料の国産の準備が整えられつつあるが、今まで述べたように、まだ燃料要素としての開発は緒についたばかりであるといえよう。国産化に際して技術的に問題となる 2, 3 の点にふれてみたいと思う。

(1) 燃料被覆管の問題 軽水炉のうち BWR の燃料被覆管はジルカロイ-2 が用いられ、PWR もステンレス鋼からジルカロイ-2 に変わりつつある。また、わが国で開発を計画している軽水沸騰型の重水炉の燃料被覆管もジルカロイ-2 を用いることとなろう。燃料製造コストのうち被覆管の占める割合は比較的大きいが、このジルカロイの工業的製造技術は先にも述べたように、まだわが国では確立されていない。JPDR 燃料の国産化以来、ジルカロイ被覆管の国産化のため種々の研究が行われ、製造上の問題点も解明されつつ

あるが、従来のように少数本を製造する程度では工業的な問題点を解決できない状態にきている。ジルカロイは原子力にのみ使われる材料であるから、この工業化は十分配慮しなければならない問題であろう。

(2) 金具類の製造 燃料要素には燃料棒以外にスペーサー、タイプレートその他重要な金具類の部品が必要である。これらは燃料要素としての性能を支配するものが多いので、その製法、構造、品質についてもっと研究する必要がある。

(3) 試験と検査 燃料の素材や中間製品や燃料要素の検査法については、原子燃料公社を中心に研究開発が進められてきた。そして例えば、ジルカロイ管の超音波による欠陥検出も 50μ くらいまで可能となってきた。しかし、被覆管の厚みがさらに薄くなってくると、さらに小さい欠陥の検出も必要になり、ジルカロイで成功した検出法もステンレス鋼管になるとうまくゆかぬという問題もある。また検査技術は、単にあるところで研究が成功したというだけではなく、いつ、どこでも、同じ測定結果が出る必要がある。また、検査技術の開発と製造技術の開発とは密接な関係がある。燃料の素材、部品の検査が確実に行えてこそ燃料要素の安全性が確認されてゆくのであり、燃料の使用条件が高まるほど検査規準もきびしくなるから、検査法を常に開発しなければならない。

(4) 照射試験 国産した燃料が実用できるかどうかは、最終的には燃料要素の形で照射試験を行い、その安全性や燃焼度を確かめる必要がある。この最終試験はその燃料を使う原子炉で行うのが最もよい。しかし、現時点において、燃料要素を照射試験できる原子炉はわが国において JPDR しかない。JPDR を燃料試験の場として使うにも試験条件がある程度限定されてくるから、燃料の使用限界をつきとめるような試験はなかなか行いにくい。もっと JPDR を積極的に使う考え方に立つ必要もあろうし、またそのように使えるように改造も必要であろう。また、輸入した商業発電炉で試作燃料の照射試験を行うことは、実際問題としては難しいことであろうが、燃料試験もできやすい発電炉も設置することが必要でなかろうか。

(5) 特許の問題 今日まで燃料要素の試作研究が行われてきたが、試作ということで特許上の問題はあまり重要視されてこなかった。しかし、本番の燃料をわが国で製造するとなるといろいろ問題がおこるであろう。

(1966 年 11 月 4 日 受理)