講演

ラプソディー計画およびフランスにおける
Pu 燃料開発の現状

RAPSODIE and the Plutonium Studies Carried Out in France

By F.E.J. SEBILLEAU*

(1963年10月4日(金) 日本原子力産業会議会議室にて講演)

座長 (原燃) 今井美材氏

RAPSODIE は、ナトリウム冷却高速炉という特徴にちなんで名づけられたものである。その研究は1957年に開始され、1962年までフランス原子力委員会(CEA)の手で行なわれたが、1962年7日以降はこのプロジェクトはEURATOM と CEA によって分担されている。

第1図はプロジェクトの図解である。原子炉のほか中性子束測定装置校正用の source reactor である HARMONIE と、大容積コア研究用の高速中性子臨界集合体の MASURCA とが含まれており、燃料要素脱被覆施設の ADAC が付加されている。このプロジェクトに密接に関連したものとして、プルトニウム燃料要素加工施設が建設され、照射済み燃料試験施設も計画されている。

第1図 RAPSODIE 燃料サイクル

MASURCA, HARMONIE, ADAC および加工施設は、フランス南部の Cadarache 原子力センターにある。照射済み燃料試験施設は Fontenay-aux-Roses に建設される予定である。再処理工場の位置はまだ決定されていない。

ここでは、RAPSODIE 計画について主として燃料の観点から述べる。

1. RAPSODIE

この原子炉の最高出力は20 MWで、EBR-I あるいは BR-V (5 MW) と EBR-II (60 MW) あるいは DFR (72 MW) との間にあるが、その平均比出力は450 kW/l、最高比出力は750 kW/l であるから、EBR-II につぎ DFR に匹敵する。このように比出力が高く、また燃料中には15~20% のプルトニウムが含まれているか

第2図 炉断面図

* CEA フォンテネ・オ・ローゼ研究所 Pu 燃料・放射線金属学研究課長

ら、実用高速発電炉のための技術的研究開発に有効である。1966年臨界に達する予定であるが、炉物理的な研究のほか、その高速中性子束が高い (10^{15} n/cm²·sec) ので、高速炉用原型燃料要素の照射試験に使用されるであろう。第2図は炉の断面図である。コアの容積は40ℓである。10 MWで運転する場合のナトリウムの入口温度は250℃であるが、これは450℃まで上昇しうる。炉内でのナトリウムの温度上昇は90℃である。

燃料要素は37本のピンを組み立てた六角形のチューブである(第3図)。この燃料ピンはステンレス鋼被覆した UO_2 - PuO_2 混合酸化物の焼結ペレットである。コア中のプルトニウムは約 40 kg であり、 UO_2 には60%濃縮ウランを使用している。

第3図 RAPSODIE 燃料要素

2. プルトニウム燃料加工施設

主として RAPSODIE 燃料の製造のために、プルトニウム燃料の加工施設が Cadarache に建設された。着工は1960年5月で、1961年末に完成した。第4図はその平面図である。2列、各6室のコンパートメントとホールからなっており、コンパートメントでは、金属の鑄造、セラミックスの焼結などのように、プルトニウム含有量の高いものを扱う汚染の危険がある作業を行ない、ホールでは、低濃度のもの、被覆済みのものを取り扱うほか、コンパートメントに入らない大型の設

備を置いてある。臨界危険防止のために、各コンパートメントごとにプルトニウム貯蔵庫があり、プルトニウムの移動は厳重に管理されている。RAPSODIEの酸化物燃料の加工設備のほかに、完備した金属加工設備と、プルトニウムの化学分析、ラジオグラフィーなどの設備がある。

第4図 平面図

3. 燃料要素脱被覆施設

RAPSODIE からの使用済み燃料は、鋼製キャスクに鉛-蒼鉛鉛晶合金を熱除去のためのボンディングにして貯蔵されているが、これを脱被覆して燃料ピンを取り出すための施設である。

第5図に見られるように3つのセルからなっている。まず、鉛-蒼鉛合金を溶解して燃料集合体をキャスクから取り出し、つぎのセルでそれを切断して、コアビン、軸ブランケットおよび構造材の3種類に分け、第3のセルでそれぞれを気密な箱に包装する。第6図はセルの縦断面である。

第5図 燃料要素脱被覆施設

第6図 セルの断面

各セルは気密で、作業区域に対して負圧にされている。前部は実際の作業に、後部は補修等のために使用される。各セルにはテレビジョン、1 t. の General Mills 150 マニピュレータ、CRL 気密型マニピュレータが備えられる。

1964年に建設開始の予定であるが、すでに内部の機器はほとんど完成し、モックアップセルで試験操作を行なっている。

4. プルトニウム精製実験室

燃料の加工工程で生ずる照射されていないスクラップの処理を、使用済み燃料の再処理工程にまわすのは必ずしも容易ではないから、専用の精製回収施設が1963年に Cadarache で着工された。これは、ルツボ、切削屑、不合格燃料要素など種々の形態のものからプルトニウムを回収するように設計されている。

5. RAPSODIE の燃料

合金燃料と混合酸化物燃料との2つの可能性が考えられた。

(1) 合金

増殖率を高くするためには、U-Pu-X という3元合金だけが燃料として使用される可能性があるが、U-Mo系合金が優れた性質を持っているので、U-Pu-Mo系合金の研究が行なわれた。

この3元合金は冶金的な性質がよく、サーマルサイクルに対して安定で、ほぼ規則的な熱膨脹性があり、鋳造・加工も容易であることが実験的に知られた。

しかし、この合金とステンレス鋼との間に、600°C で反応が起こり液相を生ずることがわかった。このため、発電炉の運転中に被覆の破壊が起こることが予想される。ニオブの薄肉の管に合金ピンを鋳造し、両端にキャップを溶接してステンレス鋼被覆管に入れることによって、この反応を防ぐことは可能である(第7図)。

また、EL-3で行なわれた照射試験の結果、著しいスエリングが起こった。これは8,300 MWD/t のバーンアップで64%の体積増加に相当するものであり、均一に分布した気泡の生成によるものであった。

ステンレス鋼との共存性がないことと、スエリングという2つの欠点のために、RAPSODIE の1次装荷燃料としてはつぎに述べる酸化物が選ばれた。

(2) 混合酸化物(UO₂-PuO₂)

共沈法によるよりも、混合による方がプルトニウム含有量を正確にコントロールできるので、混合法が選ばれた。また、焼結によって理論密度の95%以上の均一な固溶体が容易に得られることもわかった。

第7図 U-Pu-Mo 合金ピン

第8図に加工工程を示す。図中(2),(3)のプレスおよび粉碎工程は自動プレスへ供給するための最適粒度を得るために行なわれる。RAPSODIE の1次装荷燃料の加工は1964年の初めに開始される予定である。

第8図 UO₂-PuO₂ 製造工程

第9図は酸化物ピンの照射試験用キャプセルである。燃料ピンはキャプセル内のナトリウム中に浸漬されている。キャプセルは Saclay にある EL-3 の燃料要素の位置に挿入された。この照射試験は、RAPSODIE に相当するであろう温度および比出力の条件下で、構造上のパラメータを求める目的で行なわれた比較的短期間のものであった。

照射後試験は Saclay の照射燃料試験室 (LECI) で行なわれた。この α - γ ホットセルは鋳鉄製で、その中に気密なステンレス鋼製ボックスがあり、その雰囲気は

第9図 照射試験用キャプセル

チッ素ガスである。特別のマグネチックマニピュレータを使用している。

分裂生成ガスの発生を測定するための、高バーンアップ試験がさらに行なわれている。

6. フランスにおけるプルトニウム研究開発

原子炉にプルトニウムを利用するには2つの可能性があるが、フランスでは特に高速炉燃料として使用するための研究が進められている。フランスの天然ウランの資源は、高速炉が支配的となるまでのエネルギー需要を十分に満たしうるのである。

(1) 高速炉へのプルトニウムの利用

高速炉において、プルトニウムを最も有効に利用することは異論のないところであるが、高速炉の開発のためには、プルトニウムを生産する熱中性子炉の存在が前提となる。この観点からフランスでは、まず黒鉛減速ガス冷却炉の開発に着手し、すでにG系列の炉と、フランス電力庁のEDF炉がある。また天然ウラン酸化物を燃料とする炭酸ガス冷却、重水減速のEL-4が建設されている。第10図はフランスの原子炉建設計画

第10図 フランスの動力炉建設計画

画である。RAPSODIEは1966年に運転開始の予定であり、さらに、中容量の動力炉(100~200 el MW)を1969年に着工する計画がある。

高速炉開発のために、プルトニウム研究の分野で多大の努力が払われているが、炉物理および燃料の研究が2大目標である。物理的な研究は、5,000 lまでの容積の種々な形状のコアを研究できる臨界実験装置のMASURCAで、各種燃料について行なわれている。

燃料については、炭化物、チッ化物の研究が進められているが、実用化に至るには被覆、熱的ボンド、共存性および照射挙動などの問題が解明されなければならない。第1次装荷用としては採用されなかった合金燃料についても、増殖比が高いという利点があるから、強力被覆管によるスエリングの防止、二重被覆、ナトリウムボンドの除去の可能性などについて、さらに研究する価値がある。

酸化物燃料については、RAPSODIEでは問題ないにしても、高バーンアップの際の分裂ガスの放出や、特に比出力が高い場合の溶融の問題をさらに研究する必要がある。また経済的には、高密度で直径の小さい燃料要素のための、焼結法よりも安価な加工法が開発されなければならない。

(2) 熱中性子炉へのプルトニウムの利用

この方面では、EURATOMとの契約によって炉物理的研究が行なわれている。熱中性子炉におけるプルトニウムの核的特性の研究は、天然ウラン炉でもそのエネルギーのかなりの部分が、生成したプルトニウムの燃焼によって発生するので重要である。

ウラン濃縮度、プルトニウム含有量およびプルトニウムの同位元素組成をパラメータとして、2種類の実

験が計画されている。

- a. 限られた数の U-Pu 燃料要素を熱中性子炉の格子に置換する。重水減速炉 (Aquilon, Minerve); 黒鉛減速炉, 加熱なし (Marius), 加熱 (Cesar) この実験は正確な結果を得られるが, 大量の燃料要素 (700~1,000 kg) を必要とする。

- b. 重水または黒鉛格子中での U-Pu 燃料要素のオシレーション実験

この実験計画のための, 種々なプルトニウム含有量の U-Pu 合金は Cadarache の加工施設で製造されるが, すでに 0.043%Pu を含む天然ウラン-プルトニウム合金のロッド 292 本, 全重量 720 kg が製造され, 実験が進められている。

7. 結 論

フランスにおけるプルトニウムの将来は, 高速炉の開発に密接に関連している。

RAPSODIE に続いて, さらにその数年後には第 2 の高速炉の建設が計画されているが, その時期は燃料問題の解決にかかっている。

合金燃料が経済的に使用可能となるか。

有望視されている炭化物燃料が実用化されるか。

現在, 最有力な酸化物燃料がこれらに置き換えられないであろうか。

これらが今後数年間に努力を傾注して解決しなければならない課題である。

(原 燃 吉岡一彦 抄訳)

“MHD 発電に関する国際シンポジウム”

(International Symposium on Magnetohydrodynamic Power Generation)

1964 年 7 月 6 日~10 日 (於パリ)

分 科

- (1) Physical properties of the MHD working fluids
- (2) Study of magnetohydrodynamic flows and power conversion processes
- (3) Production of magnetic field
- (4) Materials problems
- (5) Open cycle converters
- (6) Closed cycle converters

原子力直接発電専門委員会では, 12 月 23 日の第 1 回会合において他の学会ともはかって, 国内の諸研究を 1 論文にまとめて報告することにつきお世話することになりました。

発表希望者は 1 月 15 日までに 200 字程度の和文抄録を本会事務局へご提出下さい。

なお, 詳細は本会事務局または原研矢野淑郎氏にお問い合わせ下さい。

○精機学会第 7 回明石記念賞受賞○ 推薦候補者の公募

このたび精機学会明石記念会 (会長 青木 保氏) から第 7 回明石記念賞の受賞候補者の推薦の依頼がありましたので, 公募選考の上本会からも推薦します。

- 精密機器に関する設計および発明
- 精密工学に関する研究成果
- 精密工業における実施上の業績
- その他, 明石記念賞に適當と認められる業績

記念賞 本賞 (賞状) および副賞 (賞牌, 賞金)

応募締切 1 月 15 日 (水) 推薦締切 1 月 18 日 (土)

応募用紙その他, 詳細は本会事務局へ。

日本工学会のご案内

○講演と映画の会○

日本工学会主催で下記の講演会と見学会を催します。この催しは傘下各学協会所属会員の方々に気楽に参加していただくことを目標としています。奮ってご参加下さい。

演 題 最近の交通計画

東京大学土木学科教授 八十崎義之助氏

行詰った交通難にメスを入れ, これをいかに打開すべきかを, 理論的かつ具体的に論じていただきます。(なお, これに関する映画を上映します。)

日 時 39 年 1 月 28 日 (火) 14:00~16:00

会 場 日本化学会 講堂

(千代田区神田駿河台 1 の 5 明治大学大学院裏, 国電お茶の水駅下車都心に 向って右側裏, 徒歩約 3 分)

定 員 200 名 多数お誘い合わせご来場下さい。

○第 8 回見学会○

日 時 2 月 27 日 (木) 14:00~16:00

見学先 八幡製鉄東京研究所 (川崎市井田 1618)

定 員 100 名 先着順に参加証を送ります。

集 合 14:00 までに見学先正門に集合。

(東横線日吉駅裏と反対側に下車, 下田住宅行バスにて駒ヶ橋下車, 右へ徒歩約 3 分)

申込先 はがきに第 8 回見学会申込みと書き, 住所, 氏名, 所属学会名を記入, 2 月 15 日までに直接日本工学会あて申込むこと。

(東京都千代田区神田佐久間町 1-11 Tel. 251-4358)