

JAERI - M
83-206

照射用ウラン・プルトニウム混合炭化物
燃料ピンの製作

1983年11月

半田 宗男・大道 敏彦・福島 奨*
笹山 龍雄・鈴木 康文・前多 厚
荒井 康夫・岩井 孝・相沢 雅夫
金田 義朗・梅井 弘・海老根典也

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 印刷 いばらき印刷(株)

照射用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

半田 宗男・大道 敏彦・福島 奨⁺

笹山 龍雄・鈴木 康文・前多 厚

荒井 康夫・岩井 孝・相沢 雅夫⁺

金田 義朗⁺・梅井 弘⁺・海老根典也

(1983年11月7日受理)

高速炉用新型燃料であるウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の健全性を評価するために、58年度に JRR-2 で照射する 2 本のヘリウムボンド炭化物燃料ピンを製作した。燃料としては、化学量論組成及び超化学量論組成の炭化物ペレットを用いた。本報告書では、炭素熱還元法による炭化物ペレットの製造から 316 ステンレス鋼被覆管へのペレットの封入までの過程と、ペレット及びピンに関する各種検査について記述する。

+ 研究炉管理部

* 科学技術庁，核燃料規制課

Fabrication of Uranium-Plutonium Mixed Carbide Fuel
Pins for Irradiation Tests

Muneo HANDA, Toshihiko OHMICHII, Susumu FUKUSHIMA*
Tatsuo SASAYAMA, Yasufumi SUZUKI, Atsushi MAEDA
Yasuo ARAI, Takashi IWAI, Masao AIZAWA⁺, Yoshio KANEDA⁺
Hiroshi UMEI⁺ and Noriya EBINE

Department of Fuels and Materials Research,
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received November 7, 1983)

Irradiation program of uranium-plutonium mixed carbide fuels for evaluating their feasibility as an advanced LMFBR fuel has been started. Two helium-bonded carbide fuel pins were fabricated for irradiation in JRR-2 in 1983. Near stoichiometric and hyperstoichiometric pellets were used as fuel materials contained. In this paper, the procedure of pin fabrication beginning from the preparation of carbide fuel materials by carbothermic reduction and finally ending to the enclosing of the fuel pellets into 316 stainless steel cladding tubes by welding are described, together with several examinations for pellets and pins.

Keywords : LMFBR, Advanced Fuel, Fuel Pins, Uranium
Plutonium Mixed Carbide Fuel, Irradiation Tests,
Fabrication, Carbothermic Reduction

+ Department of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

* Nuclear Material Regulation Division, Science and Technology Agency

目 次

1. まえがき	1
2. 混合炭化物燃料ペレット並びに同燃料ピンの設計	2
2.1 燃料組成	2
2.2 燃料ピンの設計	2
2.3 キャプセルの構造と熱計算の概略	2
3. 二酸化プルトニウムの精製	6
4. 混合炭化物燃料ペレットの製造及び特性試験	8
4.1 燃料ペレットの仕様	8
4.2 燃料ペレットの製造	8
4.2.1 原料物質	8
4.2.2 燃料ペレットの製造	8
4.2.3 円周研削	10
4.3 照射用燃料ペレットの特性試験	10
4.3.1 密度測定	10
4.3.2 化学分析	10
4.3.3 X線分析	11
4.3.4 金相試験	11
4.3.5 寸法検査	11
4.3.6 高温放出ガスの定量	11
5. 燃料ピンの製作	19
5.1 燃料ピンの構成部品	19
5.1.1 燃料ペレット及び断熱ペレット	19
5.1.2 被覆管	19
5.1.3 端栓	19
5.1.4 スプリング	19
5.2 燃料ピンの製作	19
5.2.1 下部端栓の溶接	19
5.2.2 ペレットの充填	20
5.2.3 上部端栓の溶接	20
5.3 燃料ピンの検査	21
5.3.1 外観検査	21
5.3.2 寸法検査	21
5.3.3 表面汚染度検査	21
5.3.4 ヘリウムリーク検査	21

5.3.5 X線透過試験.....	22
5.3.6 溶接部の金相試験.....	22
6. あとがき.....	26
参考文献.....	27
付 録.....	29

Contents

1. Introduction	1
2. Mixed carbide fuel pellets and design of fuel pins	2
2.1 Fuel composition	2
2.2 Design of fuel pins	2
2.3 Capsule structure and outline of thermal calculation .	2
3. Purification of plutonium dioxide	6
4. Preparation and characterization of mixed carbide fuel pellets	8
4.1 Specification of fuel pellets	8
4.2 Preparation of fuel pellets	8
4.2.1 Raw materials	8
4.2.2 Preparation of carbide fuel pellets	8
4.2.3 Centerless grinding	10
4.3 Characterization of fuel pellets	10
4.3.1 Density measurement	10
4.3.2 Chemical analysis	10
4.3.3 X-ray diffraction analysis	11
4.3.4 Ceramography	11
4.3.5 Dimension measurement	11
4.3.6 Determination of volatile impurity gases	11
5. Fabrication of carbide fuel pins	19
5.1 Components of fuel pins	19
5.1.1 Fuel and thermal insulator pellets	19
5.1.2 Cladding tube	19
5.1.3 Upper and lower endplugs	19
5.1.4 Spring	19
5.2 Fabrication of fuel pins	19
5.2.1 Welding of lower endplug	19
5.2.2 Loading of fuel pellets	20
5.2.3 Welding of upper endplug	20

5.3 Characterization of fuel pins	21
5.3.1 Appearance test	21
5.3.2 Dimension test	21
5.3.3 Surface contamination test	21
5.3.4 Helium leak test	21
5.3.5 X-ray radiography	22
5.3.6 Metallography of welded part	22
6. Summary	26
References	27
Appendix	29

1. ま え が き

10年前後の短い倍増時間を有する高速炉用新型燃料として、これまでウラン・プルトニウム混合炭化物、炭窒化物及び窒化物燃料の研究開発が世界各国で進められてきた。核特性の観点から考えると、炭素の中性子吸収断面積は、窒素よりも数桁小さいので炭化物燃料が最も優れている。しかし、炭化物燃料は、燃料とステンレス鋼被覆材の化学的相互作用(Fuel and Cladding Chemical Interaction, 一般に FCCI と呼称されている)に問題があることが熱力学的解析から判明し、この解決策として炭窒化物及び窒化物燃料が炭化物燃料の代替燃料に選ばれていた。

1974年米国は新型燃料開発プログラムを策定し、ロスアラモス国立研究所を中心に高速実験炉、EBR-IIを用いて新型燃料の照射試験を行った。その結果、炭化物燃料の FCCI は反応速度が遅いことから実用化に際して問題ないことが明らかにされた¹⁾。新型燃料は、酸化燃料に比べてスエリング率が高いために、ボンド材としてはヘリウムに加えて燃料と被覆材の機械的相互作用を緩和することが可能なナトリウムが候補に挙げられていた。この点に関して、85%T.D.(理論密度)程度の低密度燃料(スミア密度で80%T.D.)を採用すれば、燃料ピンの製造及び再処理技術の容易なヘリウムボンド燃料で、被覆管の破損なしに最高16 at.%燃焼度まで達成可能であることが実証された²⁾。このため、現在では新型燃料=ヘリウムボンドの炭化物燃料と見なされており、ナトリウムボンド燃料はバックアップ燃料に位置づけられている³⁾。

我が国においても高速炉用新型燃料の健全性を確立するために、昭和49年原研大洗研究所に燃料研究棟が建設された^{4,5)}。同棟の内装整備及び許認可の手続は順調に進められている。すなわち、これまでに炭化物燃料の調製⁶⁻⁸⁾、特性試験⁹⁻¹¹⁾及び照射用ヘリウムボンド燃料ピンの製作技術¹²⁾を確立した。また、昭和58年度からJRR-2及びJMTRを用いたキャプセル照射計画が具体化されている¹³⁾。

本報告書では、58年度JRR-2で照射する予定の化学量論性の異った2本のウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作にあたって実施した照射キャプセルの設計、炭化物ペレットの調製及び特性試験、燃料ピンの溶接及び完成検査の結果などについて順次述べる。最後に燃料ペレット及び燃料ピンの検査要領及び結果を付録に示す。

2. 混合炭化物燃料ペレット並びに同燃料ピンの設計

2.1 燃料組成

照射のための燃料ペレットには、C/(U+Pu)比に関して次の二種類の組成をもつものを製作することとした。一つは化学量論組成の(U,Pu) $C_{1.0}$ であり、もう一つは超化学量論組成の(U,Pu) $C_{1.1}$ である。これらの炭素含有量の異なる2種のペレットを2本の燃料ピンに充填した後、同一キャプセルに組み込み、照射することとした。この様な方式を採用した主な目的は、被覆管と燃料ペレットの相互作用に対しての炭素量の効果についての情報を得ることにある。

プルトニウム富化度は、二種の燃料とも20%を採用し、ウランは天然ウランを、プルトニウムについては同位体比にして、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 及び ^{241}Pu が、それぞれ83.9、14.6及び1.2%のものを使用することとした。また、ペレットの密度については理論密度の90%から95%のものを調製目標とし、さしあたり、燃料ピン並びにキャプセルの設計のためには、化学量論組成の(U,Pu) $C_{1.0}$ については 12.51 g/cm^3 (92% T.D.)、超化学量論組成の(U,Pu) $C_{1.1}$ については 12.60 g/cm^3 (93% T.D.)を用いた。

2.2 燃料ピンの設計

Fig. 1に炭化物燃料ピンの図面を示す。被覆管にはSUS 316相当の我が国の高速増殖炉原型炉「もんじゅ」用炉心燃料被覆管(住友金属工業(株)製)を用いることにした。被覆管は外径が6.50 mm、内径5.56 mm(肉厚0.47 mm)の寸法を有している。被覆管内面と燃料ペレット表面の間隔は0.08 mmとした。従って燃料ペレットの直径は5.4 mm ϕ となる。(U,Pu)Cペレットの上下には(U,Pu)Cペレットスタック端の中性子分布、従って、温度分布の急激な変化を避けるために断熱ペレットとして6 mm高さのUCペレットが置かれる。ピン内部空間にはヘリウムが充填されるとともに、ピンの両端にはSUS 316 L製端栓が設置されるが、Fig. 1の様に上部端栓側には燃料ペレットのピン内位置固定のためにインコネル製スプリングを使用した。ピンの長さは端栓部を含めて185 mmとした。

ピンは化学量論組成及び超化学量論組成の(U,Pu)Cペレットについて一本ずつ製作され、キャプセル組立の際に下端栓部を利用して、上下に接続される。

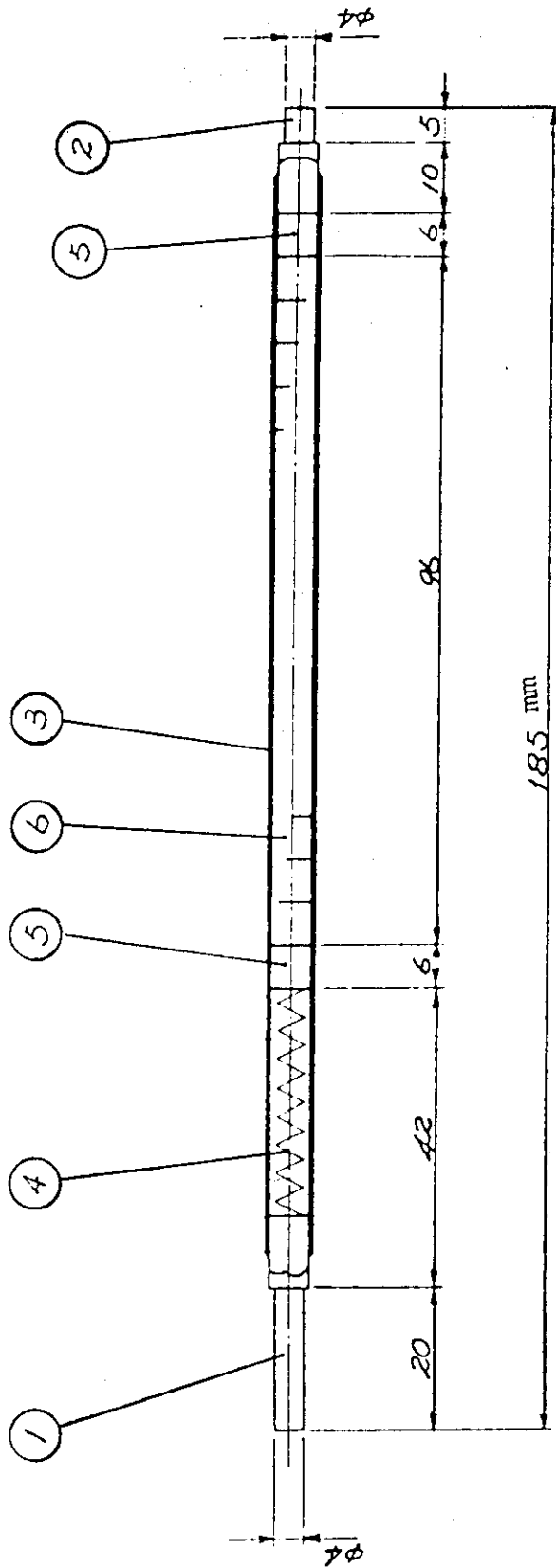
2.3 キャプセルの構造と熱設計の概略

Fig. 2にはキャプセルの径方向断面構造の概略を示す。ピンの外側には、内側より順にNaK熱媒体、SUS 316-Al共引管を使用した内筒、Al製(A 1050)外筒が配置される。

Fig. 3には、本キャプセルについての熱計算結果を示す。照射が予定されているJRR-2、インコア6 D孔の熱中性子束 $8 \times 10^{13}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ のもとでは、本燃料ピンの線出力は 550 W/cm とな

る。この出力において、ペレットの中心温度は 1200 °C、表面温度は 1000 °C となる。また、被覆管の内面は 550 °C、表面は 500 °C となり、照射中の被覆管に課せられる制限温度を満足している。

以上、キャプセルの設計に関する概略のみを記述した。本報報告書は、燃料ペレットの調製からピンの製作完了までの経緯の記述を主たる目的としたため、キャプセルに関する記述は簡略にとどめた。



No.	Items	Materials	Dimension
1	Upper endplug	SUS 316L	
2	Lower endplug	SUS 316L	
3	Cladding tube	SUS 316	6.50φx5.56φ
4	Spring	Inconel	
5	Thermal insulator pellet	UC	5.40φx6L
6	Fuel pellet	(U,Pu)C	5.40φx6L

Fig. 1 Mixed carbide fuel pin

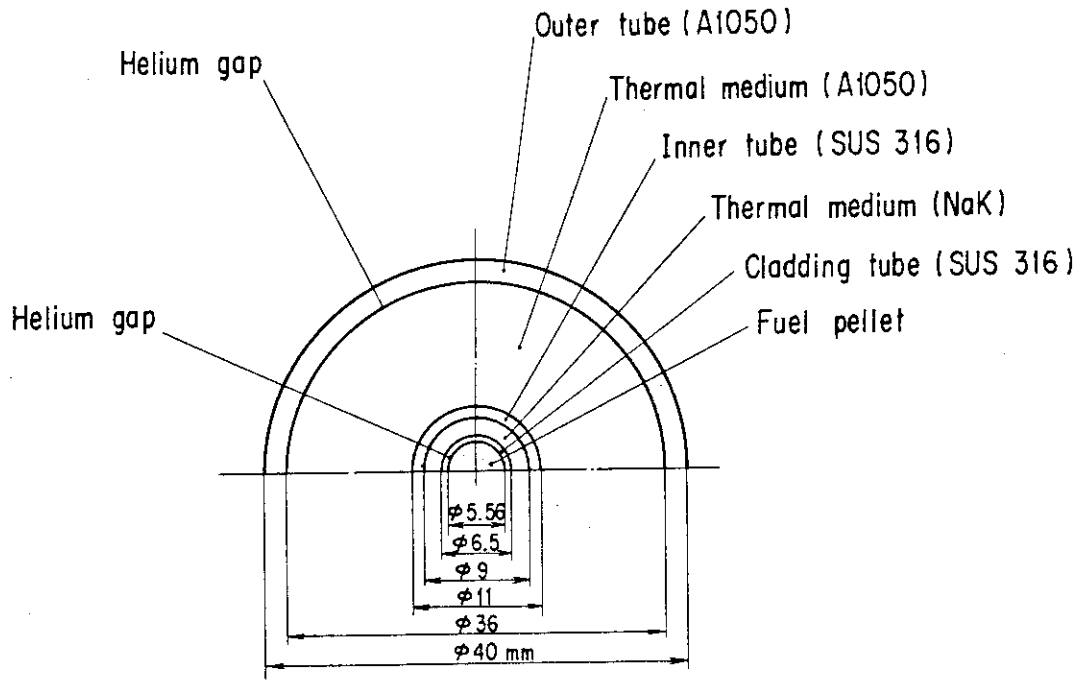


Fig. 2 Radial cross section of irradiation capsule

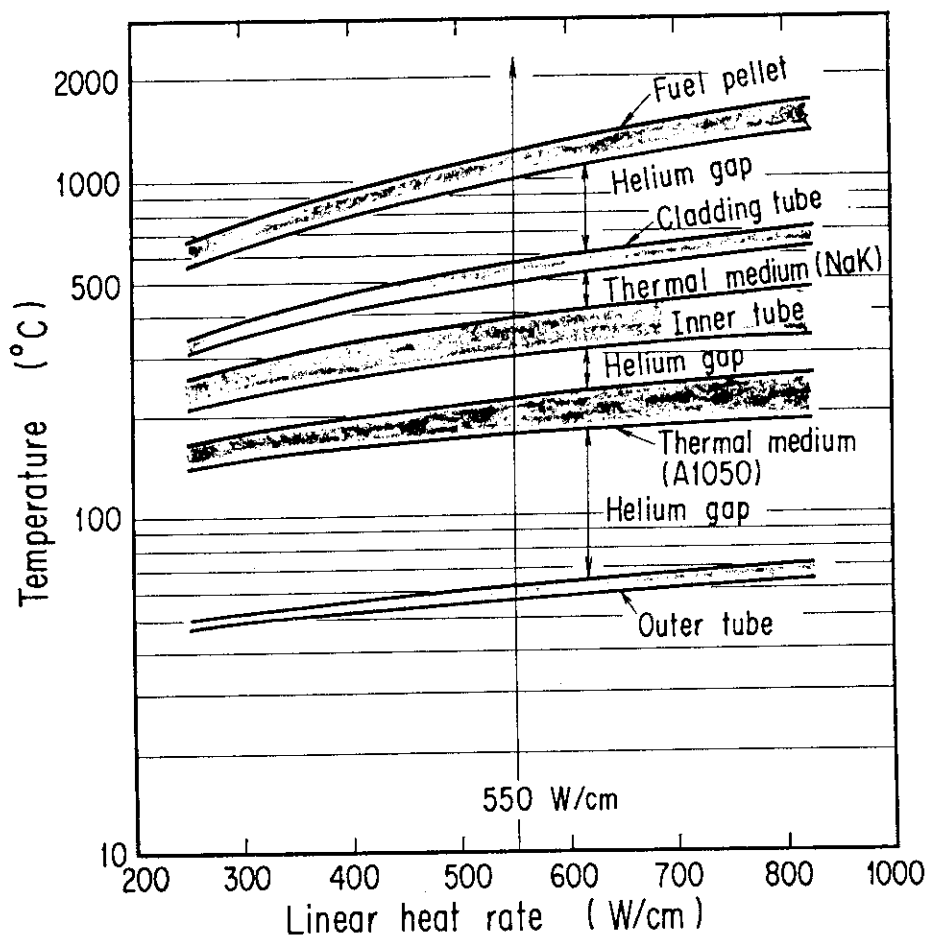


Fig. 3 Relation between radial temperature distribution and linear heat rate of fuel pin

3. 二酸化プルトニウムの精製

混合炭化物を調製するために原料として使用した二酸化プルトニウム (PuO_2) 粉末の主な特性を Table 1 に示す。同位体組成としては比較的高次プルトニウムの含有量が高く、 ^{241}Pu の存在比は 2.2 % であった。 ^{241}Pu は半減期 14.355 年でベータ壊変し、アメリシウム-241 (^{241}Am) が生成蓄積する。使用した PuO_2 は、製造後約 12 年が経過しているため、44 % 近くの ^{241}Pu が ^{241}Am に変換している。その結果 ^{241}Am の含有量は、約 0.9 wt.% と推定される。

^{241}Am から放出される 60 KeV の γ 線による被ばくは、鉛などのしゃへいにより低減化を図っているが、粉末取扱い時や、グローブボックス内機器に付着した粉末による局部被ばくは無視できないほど大きくなる。このために原料の PuO_2 は、燃料ペレットの製造に使用する前に、イオン交換法による Pu の精製 (Am の除去) を行うことにした。

イオン交換法を用いた Pu 精製は、多くの報告があり、指針としてもまとめられている¹⁴⁾。当研究室についても既に 50 ~ 100 g 程度の実験室規模による取扱い経験があり、これらの知見を踏まえて作業を進めた。精製の手順及び結果を次に述べる。

- 1) PuO_2 粉末を秤量した後、乾燥空気中において 600 °C で 3.5 時間脱ガス処理を行った。その結果、3.24 % の重量減少があり、精製に供した PuO_2 重量は、60.04 g であった。
- 2) 濃硝酸により PuO_2 粉末を加熱溶解した。溶解時においては、沸とう濃硝酸中にフッ化水素酸 (濃フッ化水素酸を水で 20 倍にうすめたもの) を滴下することにより完全に溶解することができた。
- 3) 溶解液は、0.3 MHNO_3 を加え、8 MHNO_3 溶液とした。次に、亜硝酸ナトリウム (NaNO_2) を加えることにより、溶液中の Pu 原子価を Pu (IV) に調整してイオン交換用の原液とした。原液量は 1.6 ℓ であり、Pu 濃度は 33 mg/ml であった。
- 4) イオン交換樹脂は、DOWEX 1-X8 (ダウ・ケミカル社製) を用い、55 mm 内径 \times 200 mm 高さのカラムに充填した。樹脂は、イオン交換直前に 7 MHNO_3 溶液によりコンディショニングを行った。
- 5) イオン交換は、原液 400 ml を 1 バッチとして 4 回行った。樹脂に吸着させた後 7 MHNO_3 液による洗浄で Am を溶離した。樹脂に吸着した Pu の溶出は、最初 0.3 MHNO_3 溶液により行ったが、完全に溶出を終了させるため、最終的には 0.3 MHCl + 5 % ヒドロキシルアミン溶液を流して、Pu (III) として溶出した。
- 6) Am を分離した Pu 溶出液に、しゅう酸を加えることにより Pu しゅう酸塩として沈澱回収した。しゅう酸塩は、乾燥空気中において 800 °C で 2 時間焙焼した。得られた PuO_2 粉末の重量は 56.82 g であった。

イオン交換法による Pu 精製前後における PuO_2 粉末の γ 線線量率は、ネオプレングローブを通し、電離箱 (Ionization Chamber) を用いてほぼ同一条件で測定した。その結果精製前は 400 mR/h であったが、 Am を分離除去したことにより 30 mR/hr に減少した。生成していた ^{241}Am を除去した後の PuO_2 中の Pu 同位体比は、 ^{239}Pu 83.86 %、 ^{240}Pu 14.60 %、 ^{241}Pu 1.18 % と推定した。

Table 1 Characteristics of plutonium dioxide powder

Plutonium content (wt.%)		86.860	
Isotopic composition of plutonium* (at.%)		Pu 239	82.990
		Pu 240	14.445
		Pu 241	2.205
Impurities (ppm)			
Al	<20	B	<10
Ca	<200	Cd	<10
Cr	20	Cu	<10
Fe	55	K	<100
Mg	<10	Mn	<20
Na	<100	Ni	<50
Si	<50	Sn	<20
Ti	<30	U	15
Zn	<25	C	20
		Co	<40
		F	20
		Li	<10
		Mo	<15
		Pb	<25
		Th	120
		V	<15

*Analyzed date; October, 1969

4. 混合炭化物燃料ペレットの製造及び特性試験

4.1 照射用燃料ペレットの仕様

第1回照射試験（JRR-2で昭和58年度より照射予定）用の混合炭化物燃料ペレットの基本的な仕様を以下に示す。

ペレット寸法	5.40 mm ϕ × 約 8 mmH
密度	90 ~ 95 % T.D. (12.2 ~ 12.9 g/cm ³)
Pu 濃度	Pu / (U+Pu) = 0.20 (原子比)
組成	(1) C/(U+Pu) = 1.0 化学量論組成 (2) C/(U+Pu) = 1.1 超化学量論組成

4.2 炭化物ペレットの製造

4.2.1 原料物質

原料物質としては、二酸化ウラン (UO₂)、二酸化プルトニウム (PuO₂) 及び黒鉛粉末を用いた。PuO₂ は前章でも述べたように、製造工程中の外部被ばくを低減化する目的で、イオン交換法によって精製したものをを用いた。UO₂ 粉末は Spencer Chemical Co. 製のもので、主な特性を Table 2 に示す。黒鉛粉末は Graphitwerk Kropfmühl 製の原子炉級天然黒鉛を用いた。その主な特性を Table 3 に示す。

燃料ピンに装荷する混合炭化物ペレットのスタック長は 96 mm である。また、ペレットの直径は 5.40 mm であるので、2本の燃料ピンを製作するのに必要な混合炭化物の量は、おおよそ 60 g となる。この量から PuO₂ 及び UO₂ の必要量はそれぞれ約 13 g 及び約 52 g と計算されるが、後述する製造工程や円周研削で発生する損耗、特性試験や試焼結に用いるペレット及び焼結ペレットの歩留り等を考慮して、それぞれ約 35 g 及び 140 g を原料として用いた。

4.2.2 炭化物ペレットの製造

混合炭化物ペレットの製造は、高純度アルゴンガス雰囲気グローブボックス⁵⁾ (GB) 内に格納されている各種機器を利用して行った。混合炭化物系燃料の製造については、これまでに多くの報告^{15,16)}があるが、ここでは著者らがこれまでに得た知見⁶⁾をもとに、製造工程をすすめた。

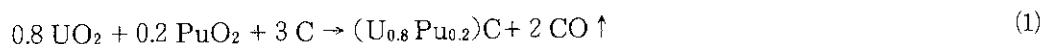
今回の照射用混合炭化物ペレット製造のフローシートを Fig. 4 に示す。

イオン交換法により精製した PuO₂ は、真空中において約 800 °C で 3 時間、脱ガスを行った。UO₂ 粉末は、Ar-8% H₂ 混合ガス気流中において約 1000 °C で 3 時間加熱することにより、脱ガスを兼ねて O/U 比を調整した。また、黒鉛粉末は、GB 外の真空中において約 400 °C で 3 時間加熱して脱ガスしたものをを用いた。

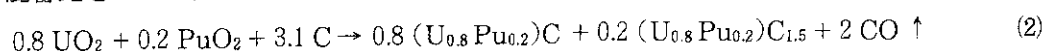
UO₂、PuO₂ 及び黒鉛粉末を直示天秤（精度 ± 1 mg）で秤量した後、V型ブレンダー（硬質ガ

ラス製) 及びアルミナ製のボールミルで混合した。UO₂ と PuO₂ の混合比は、Pu/(U+Pu) = 0.20 (原子比) とし、黒鉛の添加量は、C/(UO₂ + PuO₂) = 2.975 及び 3.100 とした。

酸化物より (U,Pu)C を得るための炭素熱還元は、一般に次式で表わされる。



反応式からは、単相の (U, Pu)C を調製するためには 3 倍の炭素を添加すればよいことがわかる。しかし、炭素熱還元時に少量の酸素が残留して炭化物相中に固溶することを考慮して、混合比を 2.975 とした。また、20% の (U, Pu)₂C₃ 相を含む超化学量論組成の混合炭化物を調製するためには、混合比を 3.100 とし、



に従って反応が進行すると仮定し、残留酸素の影響については、特に考慮しなかった。これは、化学量論組成の場合に比べて、残留する酸素量を低減化できるためである¹⁷⁾。

V 型ブレンダ及びボールミルによって酸化物と黒鉛を混合した後、油圧プレスを用いて粉末を円盤状の圧粉体とした。これは炭素熱還元時に試料が飛散するのを防止し、粉末相互間の接触をより強めることを目的としたものである。圧粉体は還元時の CO ガスの放出を容易するために、約 5 mm 角のブロック状に破碎した。

炭素熱還元はブロック状の圧粉体をタングステン製のつぼに入れて真空中で行った。還元中の Pu の損失を抑えるために油回転ポンプのみを用いた⁶⁾。還元温度は約 1,500 °C とし、真空度が約 10⁻³ Torr に到達して CO ガスの放出がほぼ完了したとみなせる段階まで加熱を続けた。炭素熱還元の前後で試料の重量を測定し、重量変化が計算値 (重量減少約 18.5%) と合致することを確認してから粉碎工程に移った。

炭素熱還元で得られたブロック状の混合炭化物は、あらかじめ乳鉢で粗砕した後、タングステンカーバイド製のボールミルを用いて 48 時間粉碎を行った。

粉碎の後、炭化物粉末の成形性を高めるために、バインダの添加を行った。バインダはポリエチレングリコール 6,000 (0.25 wt.%) を採用し、トリクロルエチレンに溶解して添加した。トリクロルエチレンは約 20 時間真空排気することによって成形前に除去した。成形圧は約 300 MPa とし、成形用の金型は焼結ペレットの直径が 5.5 ~ 5.7 mm になるように配慮して、直径 6.4 mm のものを用いた。また高さについても焼き上がりで 8 mm になるように、グリーンペレットでは約 9 mm を目安にした。

焼結はアルゴンガス気流中で行った。低温 (約 500 °C) においてバインダを除去した後、300 °C/hr で昇温した。仕様に定められた密度 (90 ~ 95 % T.D.) の焼結ペレットを製造するための温度条件を確認するために、本焼結に先立ち、グリーンペレット 3 個を用いて試焼結を実施した。照射用ペレットの焼結温度は 1750 °C、焼結温度は 5 時間とした。

得られた焼結ペレットについて、化学分析 (炭素及び酸素含有量, Pu/(U+Pu) 比), X 線回折, 密度測定, 金相試験, 高温放出ガスの定量などの確性試験を実施した。ペレット中の全炭素及び全酸素はそれぞれ高周波加熱電量法¹⁰⁾ 及び不活性ガス融解電量法⁹⁾ で定量した。Pu/(U+Pu) 比は、ペレットを酸化させて硝酸に溶解した後、重クロム酸カリウムによる電位差滴定法により求めた。X 線回折は CuK_α 線を用いた粉末ディフラクトメータ法によって行った。焼結ペレットの密度は直示天秤で測定した重量とダイヤルゲージで得た寸法より計算で求めた。金相試験は、シリコン

カーバイト研磨紙及びダイヤモンドペーストにより研磨した後にエッチングを行う方法を用いた。エッチング液は硝酸 2，酢酸 1，水 1 の割合のものとし，組織の撮影には 35 mm のカメラを用いた。高温放出ガスの定量は，真空抽出法により行った。

4.2.3 円周研削

焼結ペレットの円周研削は，空気雰囲気中の GB 内に格納された湿式のセントレスグラインダ¹²⁾を用いて行った。セントレスグラインダの研削精度は直径寸法で $\pm 3/1,000$ mm である。ここでは酸化しやすい炭化物ペレットを研削するために，水分溶解度の小さい研削油を循環させ，さらに研削時にはアルゴンガスのフラッシングも行った。円周研削の後，速やかに寸法の確認を行い，アセトンを溶媒にした超音波洗浄，さらに高真空 (10^{-6} Torr) において約 $1,000^{\circ}\text{C}$ に加熱して脱脂乾燥を行った。

円周研削，脱脂乾燥の工程についても，試焼結に用いたペレットを利用した先行試験を実施した。そこで寸法精度，酸化防止などを確認した後，照射用ペレットの研削に入った。焼き上がり約 5.7 mm ϕ の焼結ペレットを段階的に 5.40 mm ϕ まで研削した。

4.3 照射用燃料ペレットの特性試験

今回製造した 2 種類の混合炭化物ペレットの特性を Table 4 にまとめて示す。以下各特性について考察する。

4.3.1 密度測定

化学量論組成のペレットについては 12.2 g/cm³ (90 % T.D.)，超化学量論組成のペレットについては 12.6 g/cm³ (93 % T.D.) の密度が得られた。これらの値は，前述した照射用ペレットの仕様に適合するものである。超化学量論組成のペレットの方が高い密度を有しているが，これは焼結温度において超化学量論組成の方が拡散速度が大きく，そのために焼結がより進行したためと思われる。混合炭化物ペレットの焼結挙動は極めて複雑で，焼結条件 (温度，時間，昇温速度，雰囲気など)，粉末の粒度分布，比表面積，化学組成，成形条件などの要因によって影響を受ける。その意味から，今回，焼結の先行試験の形でグリーンペレット 3 個を用いて試焼結を行い，焼結密度について検討したことは有効であったと思われる。

4.3.2 化学分析

ペレット中の酸素含有量は，化学量論組成，超化学量論組成のものともそれぞれ 0.27 wt. %，0.14 wt. % と低い値に抑えることができた。両者の間に有意な差が認められるのは，後者の場合酸化物に対して添加した炭素量が多く，炭素熱還元時に残留酸素の量が小さくなったためと思われる。これらの結果から，炭素熱還元以降の粉末調整，焼結，円周研削，脱脂乾燥などの工程中に，試料の有意な酸化が起こらなかったことがわかる。ペレット中の炭素含有量は化学量論組成のものは 4.70 wt. %，超化学量論組成のものは 5.21 wt. % であり，酸素の固溶を考慮した炭素当量 (C_{eq}) はそれぞれ 4.90 wt. %，5.31 wt. % であった。この結果から化学量論組成のペレットについては

ほぼ (U, Pu)C 単相が予想され、後述する X 線回折や金相試験等の結果もそれを裏付けている。一方、超化学量論組成ペレットについては、第 2 相の $(U, Pu)_2C_3$ を約 18% 含むことが炭素当量値より推定される。これは残留酸素が炭化物相中にすべて固溶し、かつ遊離炭素が存在しないと仮定した計算結果である。混合炭化物の場合、組成の制御が困難であるにもかかわらず、今回の化学分析より得られた結果は、照射用ペレットの仕様を十分満足するものであった。

また、Pu/(U+Pu) 比は、2 種類のペレットともに、ほぼ 0.20 であった。これは、製造工程中、特に炭素熱還元や焼結時に Pu の蒸発による損失が極めて少なかったことを示唆している。

4.3.3 X 線分析

Figs. 5 及び 6 に 2 種類の混合炭化物ペレットの X 線回折像を示す。回折像からは酸化物相、金属相などは同定できず、化学量論組成のペレットについては (U, Pu)C 単相、超化学量論組成のペレットについては (U, Pu)C 及び $(U, Pu)_2C_3$ の 2 相であることがわかる。(U, Pu)C 相の格子定数は、それぞれ 0.49651 nm, 0.49642 nm であり、これらの値は酸素含有量の低い $(U_{0.8}Pu_{0.2})C$ の格子定数の報告値⁶⁾によく一致している。超化学量論組成のペレット中の $(U, Pu)_2C_3$ 相の格子定数は 0.8100 nm であり、これは Vegard 則より予測される $(U_{0.8}Pu_{0.2})_2C_3$ の格子定数よりやや高い値を示す。このことは、2 相共存の場合、(U, Pu)₂C₃ 相に Pu が偏析する¹⁸⁾影響と思われる。(U, Pu)C 相の格子定数の値も、化学量論組成のものに比べてわずかに低いのは、このことを示唆している。

4.3.4 金相試験

Photos. 1 及び 2 に、化学量論組成及び超化学量論組成のペレットの代表的な金相写真を示す。これらの写真は、前述した X 線回折の結果を裏付けている。すなわち Photo. 1 は (U, Pu)C 単相を示しており、Photo. 2 はマトリクスの (U, Pu)C 相に加えて $(U, Pu)_2C_3$ 相が白く析出している。(U, Pu)C 相の結晶粒径はそれぞれ 10~12 μm 及び 5~7 μm であり、超化学量組成のペレットの場合、第 2 相の析出によってマトリクスの粒成長が抑えられていることがわかる。

4.3.5 寸法検査

円周研削の結果を Table 5 に示す。これらの値、5.397 mmφ 及び 5.396 mmφ は、照射用ペレットの仕様 5.40 ± 0.01 mmφ を十分に満足するものである。

焼結の段階でペレット表面にキャッピングが生じた例は、一、二見られたが、円周研削による外観上の損傷はまったく認められなかった。

脱脂乾燥したペレットは再びアルゴン雰囲気中で保管した後、実際に燃料ピン中に充填するペレットを選択し、スタック長 96 mm の調整を行った。

4.3.6 高温放出ガスの定量

脱脂乾燥した断熱用 UC ペレット、化学量論組成の $(U, Pu)C_{1.0}$ 及び超化学量論組成の $(U, Pu)C_{1.1}$ ペレットについて真空抽出法により高温放出ガスを定量した¹¹⁾。抽出温度は、照射中の燃料ペレット中心温度が 1200 °C と計算されていること及び酸化物燃料の特性試験温度が 1600 °C であるこ

とから、この二つの温度について行った。その結果 1600 °C では、UC: 98 μ l/g 燃料, (U, Pu) $C_{1.0}$: 166, (U, Pu) $C_{1.1}$: 155, 1200 °C では (U, Pu) $C_{1.0}$: 185, (U, Pu) $C_{1.1}$: 57 の値を得た。ガス組成としては、水素及び一酸化炭素が主成分であり他に少量 (1%以下) のメタンガスを検出した。炭化物燃料の高温放出ガス含有量については、特別に定められていないが、高速炉用混合酸化物燃料では、例えば米国の FFTF (Fast Flux Test Facility) においては < 50 μ l/g 燃料と規定されている。今回得られた値は酸化物燃料の規定値よりも数倍大きい。この原因は、円周研削を行った後脱脂乾燥した温度 (1000 °C) よりも高温放出ガスの抽出温度が高かったためであると推定される。照射用燃料ピンには十分なプレナムが設けられており、かつ、目標燃焼度が 2 at.% 以下であることから判断して燃料ピンの健全性には支障はないと推定した。

Table 2 Characteristics of uranium dioxide powder

Oxide composition	UO _{2.03~2.08}		
Uranium content (wt.%)	87.5 minimum		
Tap density (g/cm ³)	2 minimum		
Powder size	micron range		
Impurities (ppm)			
	Cd	<1	Fe 130
	Si	100	Ni 100
	B	<1	Al 20
	P	<50	Mo 3
	Mn	<10	Sn 2
	Mg	<20	Cu 3
	Pb	2	Ag 0.1
	Cr	<50	

Table 3 Characteristics of graphite powder

Carbon content (wt.%)	99.994		
Moisture (wt.%)	0.051		
Specific surface area (m ² /g)	10.42		
Grain size distribution	0 - 2 μm	9.75 %	
	2 - 3 μm	12.14 %	
	3 - 4 μm	13.43 %	
	4 - 5 μm	11.94 %	
	5 -10 μm	39.80 %	
	10 -20 μm	12.44 %	
	20 -32 μm	0.20 %	
	32 -40 μm	0.30 %	
Impurities (ppm)	Ag	0.1	Fe 11
	Al	2.5	Mo 1.9
	B	0.05	Ni 3.1
	Ca	6	S 38
	Cd	0.1	Si 31
	Co	0.02	Ti 1
	Cr	2.1	V 0.1

Table 4 Characteristics of (U,Pu)C pellets for irradiation tests

	(U,Pu)C _{1.0}	(U,Pu)C _{1.1}
Chemical composition		
Pu/(U+Pu) (at. ratio)	0.205	0.204
Carbon content (wt.%)	4.70	5.21
Oxygen content (wt.%)	0.27	0.14
X-ray diffraction		
Phases	(U,Pu)C	(U,Pu)C, (U,Pu) ₂ C ₃
Lattice parameters (nm)		
(U,Pu)C	0.49651	0.49642
(U,Pu) ₂ C ₃	-----	0.8100
Bulk density (g/cm ³)	12.2	12.6

Table 5 Diameter of pellets after centerless grinding

Pellet	Diameter (mm)
(U,Pu)C _{1.0}	5.397 ± 0.002
(U,Pu)C _{1.1}	5.396 ± 0.002

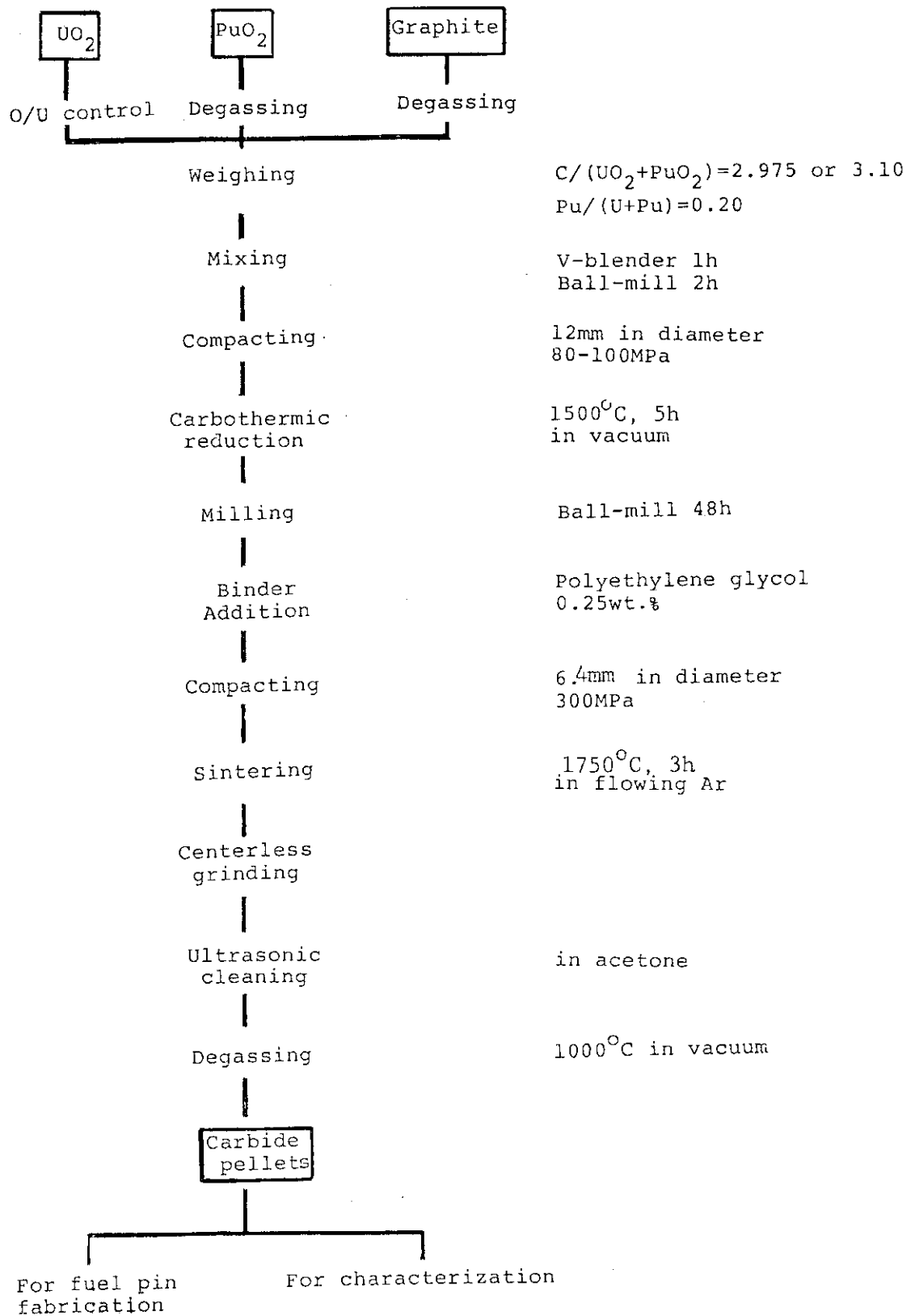


Fig. 4 Flow sheet for the preparation of mixed carbide pellets for irradiation test

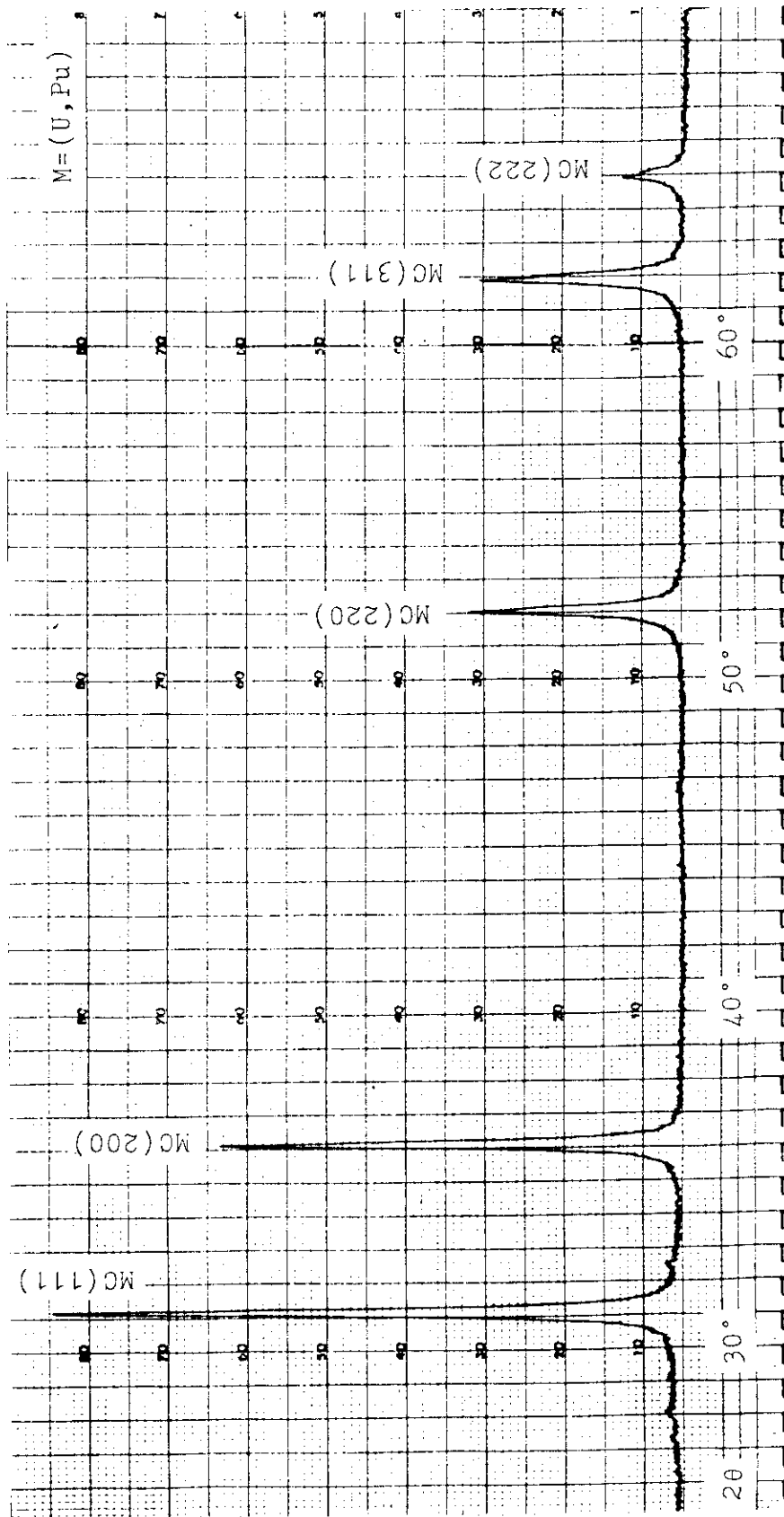


Fig. 5 X-ray diffraction pattern of (U,Pu)C_{1.0} pellet

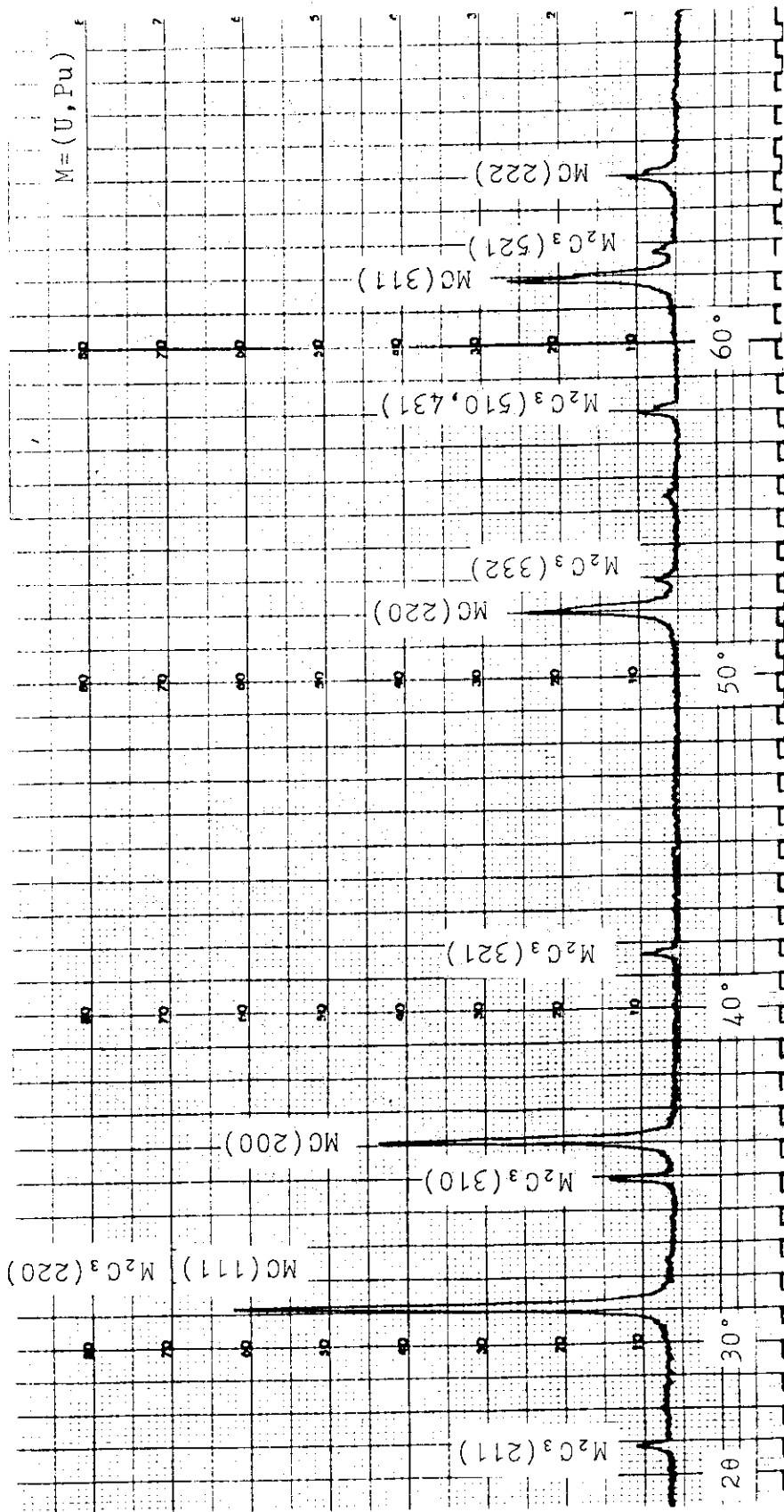


Fig. 6 X-ray diffraction pattern of $(U,Pu)C_{1.1}$ pellet

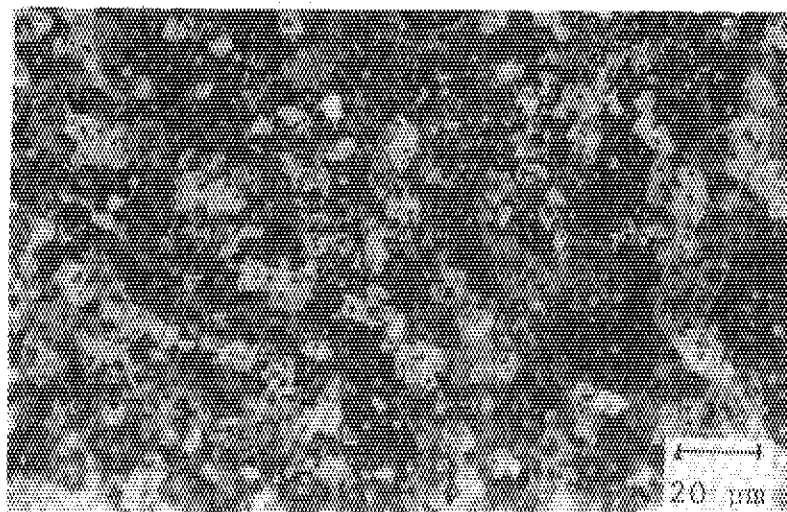


Photo. 1 Microstructure of (U,Pu)C_{1.0} pellet

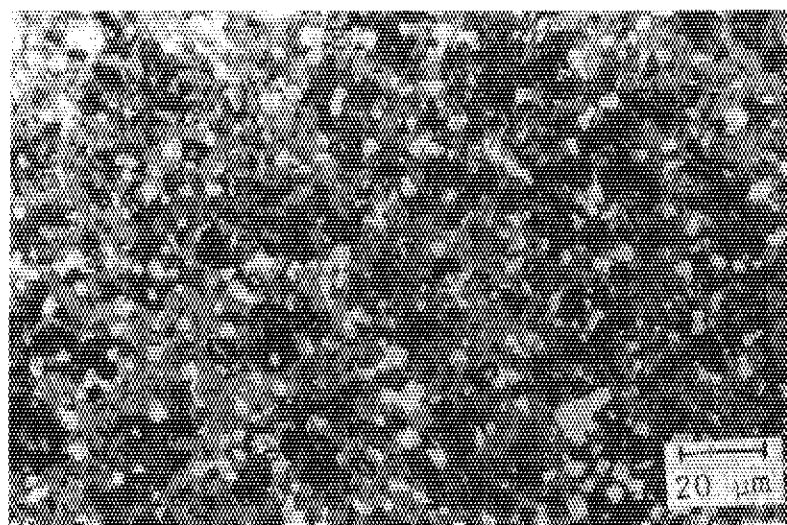


Photo. 2 Microstructure of (U,Pu)C_{1.1} pellet

5. 燃料ピンの製作

5.1 燃料ピンの構成部品

5.1.1 燃料ペレット及び断熱ペレット

燃料ペレット及び断熱ペレットの化学組成や密度などの特性は前述したとおりである。

5.1.2 被覆管

今回使用した被覆管は前述したように住友金属工業（株）製で、その材質は SUS 316 である。この被覆管の寸法は外径 6.5 mm、肉厚 0.47 mm である。また、この被覆管は長尺物（3 m）であるために、150 mm に切り出して使用した。

5.1.3 端 栓

上下部端栓は大同特殊鋼（株）製 SUS 316 L を加工して製作した。上部端栓はホットラボにおける照射後試験で作業しやすい構造に設計した。

5.1.4 スプリング

今回使用したスプリングはインコネル-X 製で、その自由長は 37 mm である。装荷時には 32 mm に圧縮されて、約 270 g の圧力で燃料ペレットなどを押しつける。燃料ペレット及び断熱ペレットの重量は約 30 g であるので、この圧力は加速度 9 G の衝撃が作用しても燃料ペレットが動かない値である。

5.2 燃料ピンの製作

燃料ピンは Fig. 7 に示す工程にしたがって製作した。組立前の被覆管、上下部端栓及びスプリングの外観を Photo. 3 に示す。これらの材料はアセトン中で超音波洗浄した上で真空中で脱気した。

5.2.1 下部端栓の溶接

下部端栓の溶接は溶接用グローブボックス内の溶接装置¹²⁾を使用して実施した。溶接作業時には、このグローブボックスを Once through 方式によってヘリウムガス雰囲気¹²⁾に置換した。雰囲気中に存在する不純物ガスは酸素 3 ppm、露点 -49 °C（水分 45 ppm）であった。溶接条件は次のとおりである。

起動電流	13 A, 1.0 秒
溶接電流 I	7.5 A, 1.5 秒
溶接電流 II	10 A, 5.0 秒

クレータ電流	10～3 A, 3.0 秒
トーチ角度	30°
ポジショナ回転数	20 R. P. M.
アーク・ギャップ	0.30 mm

5.2.2 ペレットの充填

被覆管に燃料ペレット及び断熱ペレットを充填する作業は充填用グローブボックス¹²⁾において行った。このグローブボックスは充填時に被覆管の管口部及び外表面をプルトニウムで汚染させないで作業ができるように低汚染領域と高汚染領域に仕切られている。燃料ペレットなどはスタック長の調整を行ってから保管用のステンレス鋼管に溶封した状態で高汚染領域側へ搬入した。そのほか、管口部を除染するためにエチルアルコール、ガーゼ、線棒などを用意した。一方、下部端栓を溶接した被覆管は管口マスクを装着してから熱収縮チューブで外表面を保護し、充填用グローブボックスの低汚染領域に搬入した。この状態の被覆管の外観をPhoto. 4に示す。この被覆管を充填用グローブボックスの仕切り壁に設けた貫通孔部に装荷し、高汚染領域から燃料ペレット及び断熱ペレットを被覆管内に挿入した。挿入後、管口マスク及び被覆管内側を除染した上で、管口マスクを取り除いた。被覆管は低汚染領域へ引き抜き、直ちにスプリングを挿入し、さらに、上部端栓を圧入した。上部端栓の圧入にあたっては、圧入装置¹²⁾を使用した。これらの作業が完了してから熱収縮チューブを除去して溶接工程に移った。

今回製作した燃料ピンはヘリウムボンド方式で設計している。したがって、燃料ペレットやスプリングなどの充填及び上部端栓の圧入作業は充填用グローブボックスを Once through 方式でヘリウムガス雰囲気中に維持して行った。これらの作業に伴うプルトニウム汚染については、作業終了後に行ったスマア法による検査の結果、被覆管、グローブ及びグローブボックス内面のいずれにおいても 20 dpm/100 cm²以下であることが判明した。

5.2.3 上部端栓の溶接

上部端栓を被覆管に溶接する作業は溶接用グローブボックスをヘリウムガスに置換した上で、下部端栓を溶接した溶接機を使用して実施した。溶接時の雰囲気中に存在する不純物ガスは酸素 3 ppm, 露点 -52 °C (水分 30 ppm) であった。

上部端栓を被覆管に溶接する際の溶接条件については、溶接部の溶け込み深さ、ビード幅、ビード外径などが溶接電流や時間、端栓の材質や形状など多くの要因によって左右されるために、事前に約 200 本の模擬ピンを製作してその最適条件を検討した。模擬ピンの溶接部の断面を金相試験によって調べた結果、次のような条件で上部端栓を溶接することにした。

起動電流	13 A, 1.0 秒
溶接電流 I	7.5 A, 1.5 秒
溶接電流 II	11 A, 5.0 秒
クレータ電流	11～3 A, 3.0 秒
トーチ角度	30°
アーク・ギャップ	0.30 mm

上部端栓押圧 300 g
 ポジショナ回転数 20 R. P. M

完成した燃料ピンの外観を Photo. 5 に示す。

5.3 燃料ピンの検査

5.3.1 外観検査

溶接部にわずかな着色が観察されたが、傷あるいはピンホールなどの有害な欠陥は認められなかった。

5.3.2 寸法検査

燃料ピンの寸法については、ノギスを用いてその長さを測定した。その結果は次のとおりである。

(U, Pu) C _{1.0} 用燃料ピン	184.85 mm
(U, Pu) C _{1.1} 用燃料ピン	184.90 mm

5.3.3 表面汚染度検査

溶接した燃料ピンは、除染用グローブボックス内において除染を行ってから ZnS (Ag) シンチレーション型検査計¹²⁾により表面汚染度の検査を行ったが、有意の汚染は認められなかった。さらに、グローブボックス外に搬出し、ガスフロー型比例計数装置で精密な検査を行った。この検査での測定条件は次のとおりである。

自然計数率	0.1 cpm
計数効率	25 %
計数時間	10 分

その結果、検出限界表面汚染密度として 2.2 dpm/30 cm² という値を得た。これは燃料ピンの表面汚染度の基準 (20 dpm/100 cm² 以下) を十分に満足している。また、この結果から、今回実施した方法によれば燃料ピンを汚染させることなく燃料ペレットを充填し、かつ、溶接できることがわかった。

5.3.4 ヘリウムリーク検査

燃料ピンの気密検査はピン内部に封入したヘリウムの漏洩率をヘリウムリークディテクタにより測定することによって行った。この試験で用いたディテクタはデュポン社 120 SSA 型である¹²⁾。標準リークを用いて求めた検出感度は 1.1×10^{-10} atm · cc/s である。

本検査は 2 本の燃料ピンを一緒にして検査容器に装荷した上で行った。その結果、2 本の燃料ピンの漏洩率は 1×10^{-9} atm · cc/s 以下であった。これは JRR-2 における基準、 1×10^{-8} atm · cc/s よりも十分に低い値である。

5.3.5 X線透過試験

燃料ピンの全体及び溶接部について X 線透過試験を行った。その結果、燃料及び断熱ペレット並びにスプリングは燃料ピン内で正常な場所に位置しており、また、上下端栓の溶接部にも欠陥は観測されなかった。

5.3.6 溶接部の金相試験

燃料ピンの溶接において溶接部の溶け込みが十分に得られていることを確認するために、2本の燃料ピンのほかに模擬ピンを同じ条件で製作し、溶接部断面の金相試験を行った。Photo.6には模擬ピンの上部端栓溶接部の断面金相写真を示す。これから十分な溶け込みの得られていることを確認することができた。

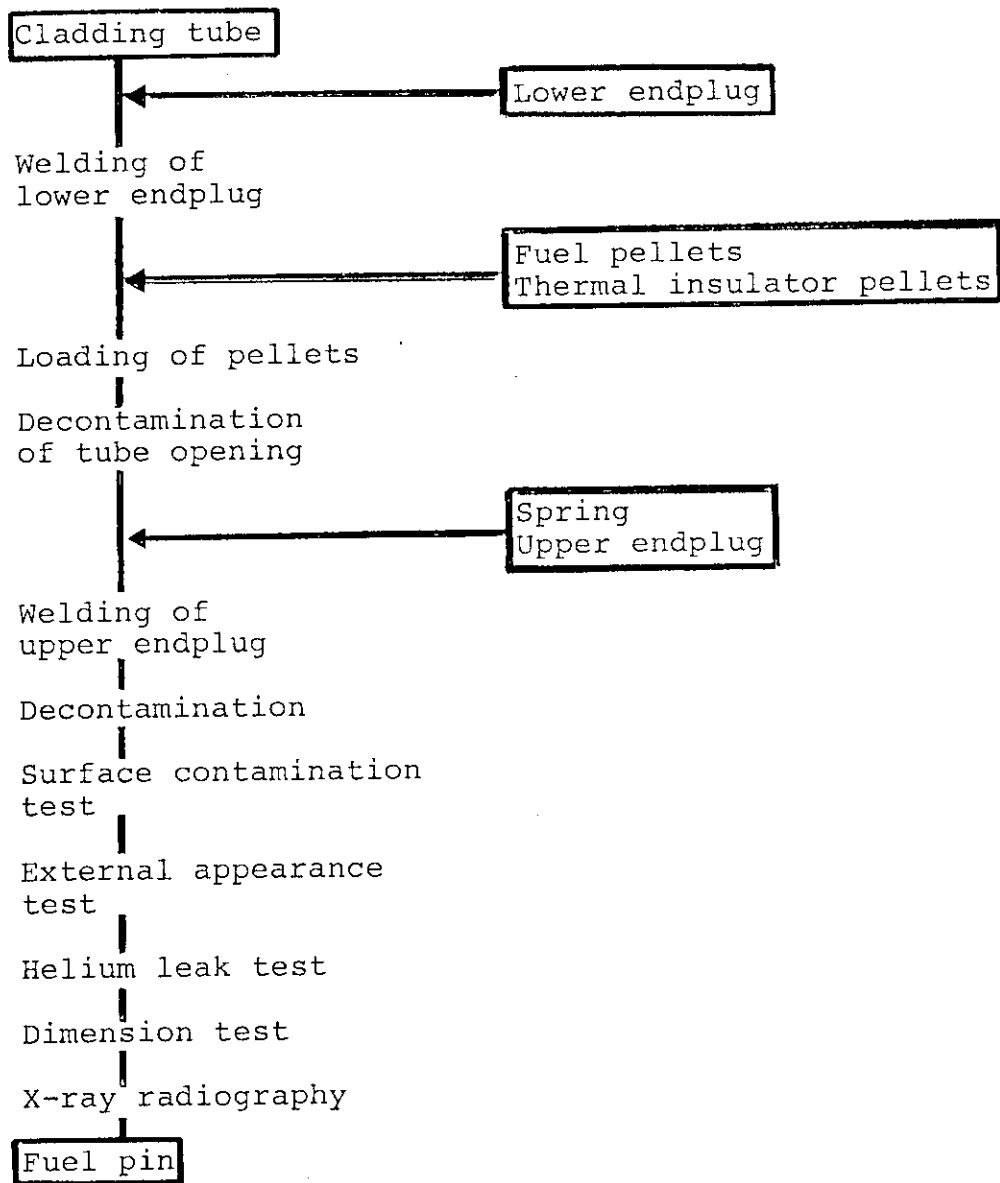


Fig. 7 Flow sheet for the fabrication of mixed carbide fuel pin

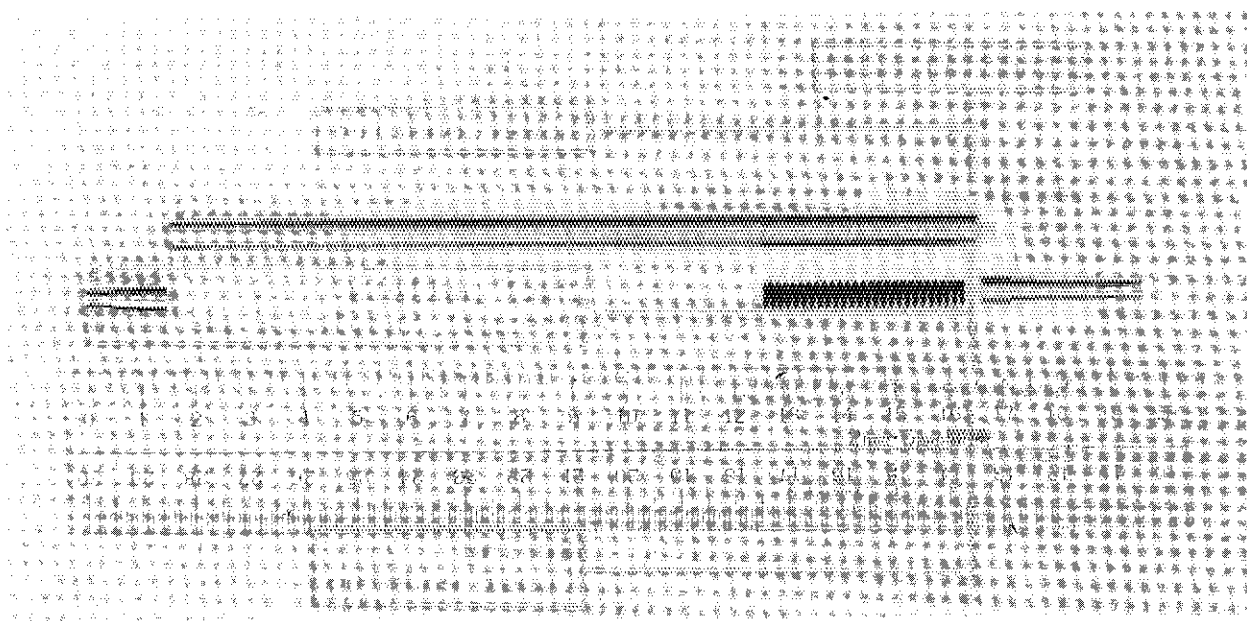


Photo. 3 External appearance of cladding tube, upper and lower endplugs and spring before assembling

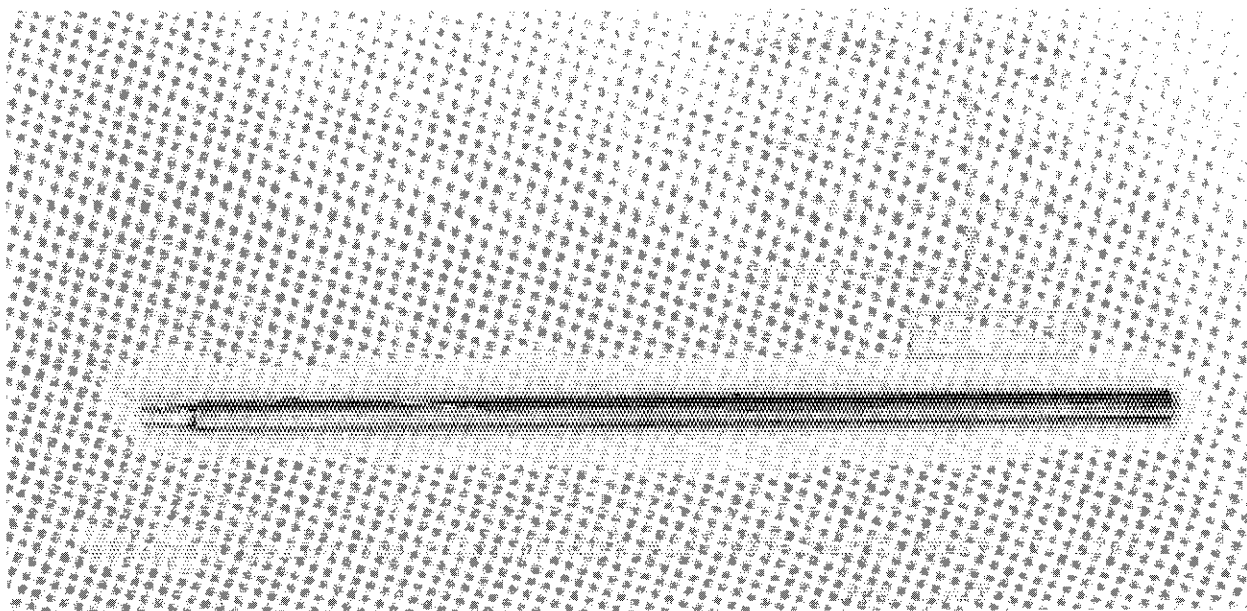


Photo. 4 External appearance of fuel pin proper after loading fuel pellets into cladding tube

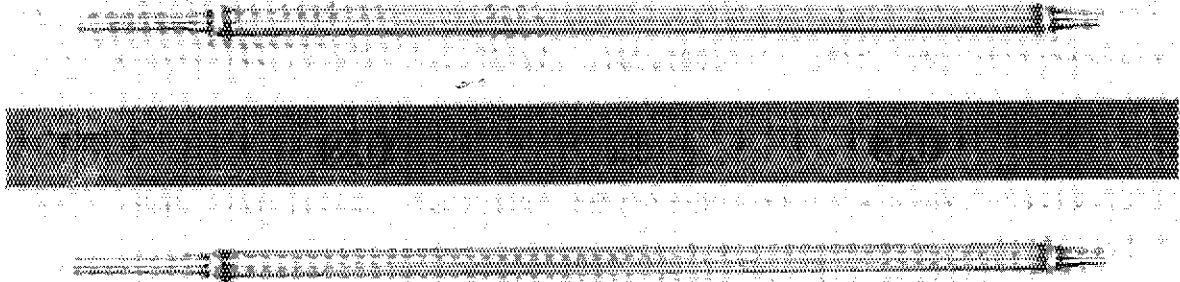


Photo. 5 External appearance of completed fuel pins

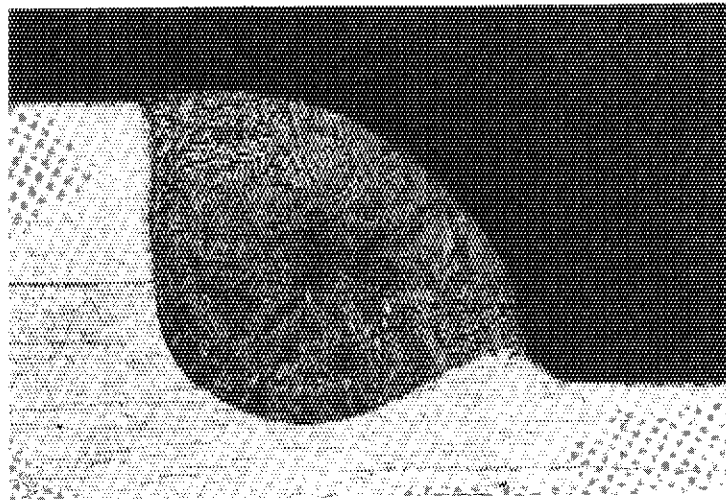


photo. 6 Sectional photograph at welded part of fuel pin

6. あとがき

燃料研究棟の竣工以来約 10 年の年月を要して、高速炉用新型燃料として本命視されているヘリウムボンドのウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピン 2 本の製作に成功した。化学組成など燃料の特性を十分に把握した燃料ピンの照射試験は、我が国における同燃料の研究開発に大きく貢献できることが期待される。なお、2 本の燃料ピンは、昭和 57 年秋に大洗研から東海研へ輸送し、58 年春に実用燃料試験室に依頼してプロフィロメトリーなどの照射前試験を行った。現在技術部工作課において照射キャプセルへの組込み作業が行われており、本年 11 月から JRR-2 で照射される予定である。

最後に、本燃料ピンの製作及び照射試験にあたっては、大洗研究所管理部プルトニウム技術開発室及び放射線管理課、材料試験炉部照射第 3 課、東海研究所技術部工作課、実用燃料試験室、管理部構内課の諸氏に多大のご支援をいただいた。ここに心から感謝の意を表す。また、本研究の遂行にあたり貴重な助言をいただいた岩本多実燃料工学部長及び渡辺齊前プルトニウム燃料研究室長に厚くお礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) R.J. Herbst and R.B. Matthews, "Uranium-Plutonium Carbide as an LMFBR Fuel", LA-9259-MS (1982).
- 2) T.W. Latimer, G.R. Harry and R.L. Petty, "Irradiation Performance of Uranium-Plutonium Carbide Fuel Pins in EBR-II", Trans. Am. Nucl. Soc., 39, 411 (1981).
- 3) R.L. Petty and T.W. Latimer, "The Behavior of Sodium-Bonded Carbide Fuel Elements Irradiated to Goal Burnup", *ibid.*, 39, 418 (1981).
- 4) 渡辺 斉, 栗原正義, 「プルトニウム炭化物系燃料研究施設」, 日本原子力学会誌, 19〔8〕, 526 (1977).
- 5) S. Momura, J. Shimokawa et al., "Japanese Development Program for Advanced LMFBR Fuels", Topl. Mtg. Proc. Advanced LMFBR Fuels, Oct. 10-13, 1977.
- 6) Y. Suzuki, T. Sasayama, Y. Arai and H. Watanabe, "Fabrication of Uranium-Plutonium Mixed Carbide Pellets", J. Nucl. Sci. Technol., 18[1], 61 (1981).
- 7) 鈴木康文, 笹山龍雄, 荒井康夫, 渡辺 斉, 「混合炭化物ペレットの焼結機構及び照射用ペレットの試作」JAERI-M 9943 (1982).
- 8) Y. Suzuki, Y. Arai and T. Sasayama, "Carbothermic Synthesis of Uranium-Plutonium Mixed Carbide", J. Nucl. Sci. Technol., 20[7], 603 (1983).
- 9) 半田宗男, 前多 厚, 矢幡胤昭, 「ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料中の酸素の定量」, JAERI-M 8406 (1979).
- 10) 半田宗男, 前多 厚, 塩沢憲一, 「ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料中の炭素の定量」, JAERI-M 8414 (1979).
- 11) 半田宗男, 高橋一郎, 渡辺 斉, 「炭化ウランペレット中の高温放出ガスの定量」, JAERI-M 82 - 042 (1982).
- 12) 笹山龍雄, 鈴木康文, 渡辺 斉, 半田宗男, 「ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作設備」, JAERI-M 83 - 136 (1983).
- 13) 半田宗男, 鈴木康文, 「高速炉用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の開発現状」日本原子力学会誌, 1984, 26〔1〕に掲載予定。
- 14) 渡辺賢寿, 「プルトニウム精製指針」, 同誌, 11, 687 (1969).
- 15) A. Strasser and D. Stahl, "Carbide Fuel Development", UNC-5134 (1965).

- 16) J.M. Horspool, N.F. Rose and M.B. Finlayson, "The Fabrication of Uranium-Plutonium Monocarbide Ceramics", Proc. Nucl. Eng. Ceramics, Brit. Ceram. Soc., 7, 23 (1967).
- 17) R.L. Gutierrez and R.J. Herbst, "Preparation of Carbide Type Advanced LMFBR Fuel Pellets for Irradiation Testing", LA-8304-MS (1980).
- 18) P.E. Potter and W.G. Roberts, "Inhomogeneity in Sintered Uranium-Plutonium Carbides and Oxycarbides", AERE-R-5661 (1968).

付 録 照射用炭化物ペレット及び燃料ピンの検査要領及び結果

1. 単品検査

区 分	項 目	品 質 規 格	試験検査方法	試験検査記録	備 考
1. UC 断熱ペレット	1. 組成検査	天然ウラン 1.0 ~ 1.2	高周波加熱電量法 不活性ガス溶融, 電量法 高温真空抽出法	C/U = 1.08 酸素 300 ppm ≤ 60 μℓ/g at 1,600 °C	他元素については は行わず
	1) U 濃縮度				
	2) C/U 比				
	3) 不純物分析				
	4) 高温放出ガスの 定量				
	2. 寸法検査	5.40 ± 0.01 mmφ 6.0 ± 0.1 mm 85 ~ 95 % T. D.	マイクロメータ ノギス 直示天秤法 寸法重量法	5.400 ± 0.001 mm φ 6.0 ± 0.1 mm 1.6 ± 0.1 g 88 % T. D.	
	1) 外 径				
	2) 高 さ				
	3) 重 量				
	4) 密 度				
3. 重量検査	1) 天然ウラン		直示天秤法及び C/M 比より算出	No. 1 ピン 3.13 g No. 2 ピン 3.15 g	
1) 天然ウラン					
2. (U, Pu) C 燃料ペレット	1. 組成検査	天然ウラン No. 1 ピン 1.00 ± 0.05 No. 2 ピン 1.10 ± 0.05 0.20 ± 0.01	高周波加熱電量法 電位差滴定法 質量分析法	No. 1 ピン 1.00 No. 2 ピン 1.09 No. 1 ピン 0.205 No. 2 ピン 0.204 Pu-239 ~ 83.9%, Pu-240 ~ 14.6%, Pu-241 ~ 1.2%, そ の他 0.3 %	本文第 3 章参照
	1) U 濃縮度				
	2) C/(U+Pu)比				
	3) Pu/(U+Pu)比				
	4) Pu 同位体比				

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査記録	備考	
	5) 不純物分析		不活性ガス溶融・電量法 高温真空抽出法	酸素No.1ピン 2,100 ppm No.2ピン 1,200 ppm ≤ 220 μL/g at 1,600 °C		
	6) 高温放出ガスの定量					
	2. 寸法検査					
	1) 外径	5.40 ± 0.01 mm φ	マイクロメータ	No.1ピン 5.397 ± 0.002 mmφ No.2ピン 5.396 ± 0.002 mmφ	各ピンともスタック長調整のため規格以下の寸法のペレットを1個ずつ含む。	
	2) 高さ	約 8 mm	ノギス	No.1ピン 8.1 ± 0.1 mm No.2ピン 8.2 ± 0.2 mm	No.1ピン, No.2ピンとも高さ約 8 mmのペレット11個と高さ約 6 mmのペレット1個を充填した。	
	3) 重量		直示天秤法	No.1ピン 2.26 ± 0.03 g No.2ピン 2.36 ± 0.04 g		
	4) 密度	90 ~ 95 % T. D.	寸法重量法	No.1ピン 90 % T. D. No.2ピン 93 % T. D.		
	3. 重量検査					
	1) 天然ウラン			直示天秤法及び C/M 比より算出	No.1ピン 20.30 g No.2ピン 20.96 g	
	2) プルトニウム			直示天秤法及び C/M 比より算出	No.1ピン 5.80 g No.2ピン 5.24 g	
4. 外観検査		目視		合格		
		<ul style="list-style-type: none"> • ペレットに有害な割れピットのないこと • 表面は清浄であること 				

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査記録	備考
3. 被覆管	5. 組織検査		光学顕微鏡	合格	本文 Photos. 1 及び 2 参照
	1. 組成検査	SUS-316 相当	試験成績書確認	合格	
	2. 寸法検査 1) 外径	6.50 ± 0.03 mm φ	マイクロメータ	No. 1 ピン 6.49 mm φ No. 2 ピン 6.49 mm φ	外径, 内径, 肉厚 ともに管口部両端 のみ
	2) 内径	5.56 ± 0.03 mm φ	マイクロメータ	No. 1 ピン 5.56 mm φ No. 2 ピン 5.57 mm φ	
	3) 肉厚	0.47 ± 0.03 mm	マイクロメータ	No. 1 ピン 0.47 mm φ No. 2 ピン 0.46 mm φ	
	4) 長さ	150.0 ± 0.1 mm	ノギス	No. 1 ピン 150.0 mm No. 2 ピン 150.0 mm	
	3. 重量検査		直示天秤法	No. 1 ピン 10.52 g No. 2 ピン 10.52 g	
	4. 外観検査	<ul style="list-style-type: none"> 表面は清浄であること 有害な欠陥が認められないこと 	目視	合格	
	5. 欠陥検査		超音波探傷法	合格	
4. 上・下端栓	1. 組成検査	SUS-316 L	ミルネート確認	合格	
	2. 寸法検査		マイクロメータまたはノギス	合格	
	3. 重量検査		直示天秤法	No. 1 ピン 上部端栓 3.77 g 下部端栓 2.27 g	

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査結果	備考
				No.2 ピン 上部端栓 3.76 g 下部端栓 2.27 g	
	4. 外観検査	<ul style="list-style-type: none"> • 表面は清浄であること • 有害な欠陥が認められないこと 	目視	合格	
5. スプリング	1. 組成検査	インコネル X	ミルシート確認	合格	
	2. 線径	0.6 mm φ	ノギス	0.6 mm φ	バネ定数の値 (kg/mm) $K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3}$ より算出, ただし G: 横弾性係数 (インコネル X の場合 7,500 kg/mm ²) d: コイル線径 n: 有効巻数 D: コイル中心径
	3. コイル内径	3.9 mm φ		3.9 mm φ	
	4. コイル外径	5.1 mm φ		5.1 mm φ	
	5. 有効巻数	25		n = 25	
	6. 自山長	37 mm		37 mm	
	7. バネ定数	0.0534 kg/mm			

(U, Pu)C_{1.0} 及び (U, Pu)C_{1.0} 組成の燃料ペレットを充填した燃料ピンをそれぞれ No.1 及び No.2 燃料ピンと呼称する。

2. 組立中検査

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査結果	備考
1. ペレットスタック長	1. (U, Pu)C 燃料ペレットスタック長	96 ± 1 mm	ノギス	No.1 ピン 95.8 mm No.2 ピン 95.8 mm	

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査結果	備考
	2. 全スタック長 (断熱UCベレットを含む)	108 ± 1 mm	ノギス	No. 1 ピン 107.8 mm No. 2 ピン 107.8 mm	
2. ベレット重量	1. 天然ウラン		直示天秤法及びC/U, C/M 比より算出	No. 1 ピン 23.44 g No. 2 ピン 24.10 g 計 47.54 g	
	2. プルトニウム			No. 1 ピン 5.08 g No. 2 ピン 5.24 g 計 10.32 g	
3. 組立途中の写真					本文Photos. 3 及び 4 参照。

3. 燃料ピンの完成検査

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査結果	備考
1. もれ試験		1×10^{-8} atm. cc/s 以下	He リーク試験	No. 1 ピン 検出感度以下 No. 2 ピン 検出感度以下	検出感度 2×10^{-10} atm. cc/s
2. 表面汚染検査		20 dpm/100 cm ² 以下		No. 1 ピン 検出感度以下 No. 2 ピン 検出感度以下	検出感度 20 dpm/100 cm ²
3. 寸法検査	1. 組み立て後全長	185 ± 1 mm	ノギス	No. 1 ピン 184.9 mm No. 2 ピン 184.9 mm	
4. 真直度検査			プロファイロメータ	合格	

区分	項目	品質規格	試験検査方法	試験検査結果	備考
5. 重量検査	1. 組み立て後全重量		直示天秤法	No.1 ピン 47.42 g No.2 ピン 48.43 g	
6. 溶接部 X線検査		JIS Z 3106 1 級以上	X 線透過法	合格	本文 Photo. 6 参照
7. 外観検査		<ul style="list-style-type: none"> • 表面に欠陥がないこと • 十分に清浄であること • 溶接部に割れきず等で有害なものがないこと 	目視	合格	本文 Photo. 5 参照
8. 全体 X線検査		内部構造に異常が認められないこと	X 線透過法	合格	