

JAERI - M
90-116

第1回JMTR照射用ウラン・プルトニウム
混合窒化物燃料ピン(88F-5A)の製作

1990年7月

鈴木 康文・岩井 孝・荒井 康夫・笹山 龍雄
塩沢 憲一・大道 敏彦・半田 宗男

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開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 Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 株高野高速印刷

第1回JMTR照射用ウラン・プルトニウム
混合窒化物燃料ピン(88F-5A)の製作

日本原子力研究所東海研究所燃料・材料工学部
鈴木 康文・岩井 孝・荒井 康夫・笹山 龍雄
塩沢 憲一・大道 敏彦・半田 宗男

(1990年6月27日受理)

高速炉用新型燃料であるウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射挙動を把握し、その健全性を実証するためにJMTRでの第1回目の照射試験用燃料ピンを製作した。2本組のヘリウムボンド燃料ピンのうち1本については、燃料中心温度を測定するために熱電対を計装した。本報告書では、燃料ピンの設計、燃料ペレットの製造と確性試験、燃料ピンの溶接と検査までの工程のほか、今回新たに設置した燃料ピンTIG溶接装置の概略についても紹介する。

Fabrication of Uranium-Plutonium Mixed Nitride Fuel Pins(88F-5A)
for First Irradiation Test at JMTR

Yasufumi SUZUKI, Takashi IWAI, Yasuo ARAI
Tatsuo SASAYAMA, Ken-ichi SHIOZAWA
Toshihiko OHMICHII and Muneo HANDA

Department of Fuels and Materials Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 27, 1990)

A couple of uranium-plutonium mixed nitride fuel pins was fabricated for the first irradiation tests at JMTR for the purpose of understanding the irradiation behavior and establishing the feasibility of nitride fuels as advanced FBR fuels. The one of the pins was fitted with thermocouples in order to observe the central fuel temperature. In this report, the fabrication procedure of the pins such as pin design, fuel pellet fabrication and characterizations, welding of fuel pins, and inspection of pins are described, together with the outline of the new TIG welder installed recently.

Keywords: FBR, Advanced Fuel, Nitride, Uranium Nitride, Plutonium Nitride, Irradiation Test, Fabrication, Fuel Pin, TIG Welder

目 次

1. まえがき	1
2. 燃料ピンの設計	2
2.1 燃料ペレットの仕様	2
2.2 燃料ピンの構造	2
2.3 核熱計算	4
3. 燃料ペレットの製造	5
3.1 原料物質	5
3.2 ペレット製造	5
3.3 ペレット加工	6
3.4 確性試験	7
4. 燃料ピン溶接装置の整備	9
4.1 燃料ピン溶接装置の更新	9
4.2 新燃料ピン溶接装置の設計・製作	9
4.3 新燃料ピン溶接装置による溶接試験	10
4.4 許認可手続き	10
5. 燃料ピンの製作	11
5.1 燃料ピン構成部材	11
5.2 燃料ピン溶接	11
5.3 燃料ピンの検査	11
6. あとがき	13
謝辞	13
参考文献	14
付録	29

Contents

1. Introduction	1
2. Design of fuel pins	2
2.1 Specifications of fuel pins	2
2.2 Structure of fuel pins	2
2.3 Nuclear and thermal calculations	4
3. Fabrication of fuel pellets	5
3.1 Starting materials	5
3.2 Pellet fabrication	5
3.3 Centerless grinding and boring	6
3.4 Characterization tests	7
4. Installation of TIG welder for fuel pins	9
4.1 Renewal of welder for fuel pins	9
4.2 Design and manufacturing of TIG welder	9
4.3 Welding test by new welder	10
4.4 Liscence procedures	10
5. Fabrication of fuel pins	11
5.1 Component parts	11
5.2 Welding of fuel pins	11
5.3 Inspection of fuel pins	11
6. Summary	13
Acknowledgment	13
References	14
Appendix	29

1. ま え が き

ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料は、炭化物燃料と同様に高い重金属密度をもち、良好な熱伝導度を示すほか、ナトリウムとの両立性にも優れており、高速炉用高性能新型燃料として期待されている^(1,2)。窒化物燃料の開発研究は1960年代より始まったが、同じく高速炉用新型燃料として有望視されている炭化物燃料と比べると、中性子経済に劣ること等が短所とされ、その開発テンポは遅れていた。このため、これまでに照射された燃料ピンの数は数百本にとどまり、炭化物燃料の1/10程度となっている⁽²⁾。しかし、炭化物燃料については、硝酸溶液中で溶解した場合にシュウ酸塩を生成し、ピューレックス法に基づく再処理法では溶媒抽出が困難となることや化学的に極めて活性であり、燃料製造に当たって酸化防止のために高純度の不活性ガス雰囲気が必要されるなどの技術的課題が残されている。これに対して、窒化物燃料はピューレックス法に基づく再処理で使用済み燃料の処理が可能であると期待され、また化学的安定性についても炭化物燃料と比較した場合には良好であると言え、酸化物(MOX)燃料製造工程が部分的に利用可能であるとみなされている。さらに、被覆管との化学的相互作用についても軽微であって、燃料の健全性に対する影響については問題がないと考えられており⁽²⁾、近年、その優れた燃料特性が再認識されるようになった。

日本原子力研究所では、大洗研究所燃料研究棟を中心として1970年代末より炭化物燃料の開発研究に注力し、これまで燃料製造研究、物性研究等に成果を挙げ⁽³⁾、さらにJRR-2、材料試験炉(JMTR)を用いた照射試験を実施してきた⁽⁴⁻⁶⁾。初期の照射試験で照射された2体のキャプセル、4本の炭化物燃料ピンについては、既に東海研究所燃料試験施設において照射後試験が終了し、低燃焼度ながら炭化物燃料の照射健全性が実証されつつある^(7,8)。そのほか、1989年度には約3 at. %燃焼度まで照射した燃料ピン2本が照射後試験に供される等、炭化物燃料の開発研究はおおむね順調に推移してきた。このような背景のもとに、1980年代後半より炭化物燃料と同等の性能を期待できる窒化物燃料についても開発研究に着手し、製造研究⁽⁹⁾を始めとして、順次、研究基盤の拡充を図ってきた^(9,10)。

燃料製造にあたっては経済性を考慮し、まず、ウラン酸化物およびプルトニウム酸化物粉末を原料物質として炭素熱還元法により混合窒化物を調製する必要があるが、その技術確立は炭化物燃料と比べて遅れていた。また、燃料ペレットの製造工程においても、焼結特性に劣る等の製造上の技術的課題を抱えていた。しかし、ここ数年の製造研究の結果、これらの点をほぼ克服することができ⁽⁹⁾、その成果を踏まえ、現在、研究課題を製造研究から物性研究および照射試験に移行させつつある。窒化物燃料の照射試験については、照射挙動を把握し、その健全性を実証することを目標として1989年度より2回にわたってJMTRでキャプセル照射を実施するほか、さらには、動燃団との共同研究により1993年から高速実験炉「常陽」において高速中性子照射を行なう予定としている。

本報告書は、一連のウラン・プルトニウム混合窒化物燃料の照射試験計画の中で、JMTRにおける第1回目の照射試験に用いる燃料ピン2本の製作に関して、燃料ピン設計、燃料ペレ

ットの製造と確性試験、燃料ピン製作などについてまとめたものである。また、今回、高速実験炉「常陽」での照射試験に備えて長尺燃料ピンの製作にも対応できるように燃料ピン溶接装置の更新を行なっている。今回の窒化物燃料ピンの製作にあたって、この新しい燃料ピン溶接装置を使用したのでその概要についてもあわせて紹介する。

2. 燃料ピンの設計

2.1 燃料ペレットの仕様

欧米における照射試験の結果等から炭化物燃料や窒化物燃料等新型燃料については、経済性が損なわれない範囲で燃料密度を低密度化させ、スミア密度を下げることによって被覆管との機械的相互作用を緩和させ、10at.%以上の高燃焼度まで燃料の健全性を確保し得ることが明かにされている⁽¹⁾。炭化物燃料では機械的相互作用のほかにステンレス鋼被覆管の炭化現象が燃料寿命に影響を与える要因として挙げられている⁽²⁾。しかし、窒化物燃料については、被覆材の窒化がほとんど進まず、また、酸化物燃料に見られるようなFP元素による被覆管の腐食もこれまでの照射試験では認められていない^(1,2)ことなどから被覆管との化学的相互作用(FCCI)が燃料寿命を左右する恐れはないと考えられている。その反面、窒化物燃料はクリープ特性に劣り、スエリングによって燃料の健全性が損なわれる可能性のあることが予想される。したがって、窒化物燃料の開発で最も重要な研究課題としては、被覆管との機械的相互作用(FCMI)に関連した現象に的を絞ることが適切であると考えられる。

炭化物燃料では、スミア密度が81-82%T.D. (T.D.; 理論密度) を超えると燃料スエリングの影響が顕著になり、燃料破損率が上昇するとの報告がある⁽¹⁾。窒化物燃料については、照射実績が乏しいこともあり、燃料の健全性に対するスミア密度の影響についての定量的な評価ははっきりしていない。しかし、照射条件や燃料特性に関して炭化物燃料と窒化物燃料との類似性を考慮したとき、設計値として炭化物燃料と同程度のスミア密度を選定することが適切であると考えられる。実用的な燃料の場合には、80%T.D.未満のスミア密度をもつ燃料の採用も想定されるが、低いスミア密度は経済性の低下をもたらすほか、照射後試験において金相試験による組織観察等が難しくなることも予想されるなど、試験技術的観点をも考慮し、第1回目の照射用燃料については、燃料の健全性を確保する範囲で高めのスミア密度を燃料仕様とするのが妥当と判断した。このため、燃料ペレットの密度としては、スミア密度を80-82%T.D.とすることを前提として85±2%T.D.を選択した。

プルトニウム富化度については、炭化物燃料の場合と同様に大型炉心を想定した20%を採用し、ウランには天然ウランを使用することとした。

2.2 燃料ピンの構造

窒化物燃料の照射試験全体スケジュールから判断して、1回の照射試験でなるべく多くの情

ットの製造と確性試験、燃料ピン製作などについてまとめたものである。また、今回、高速実験炉「常陽」での照射試験に備えて長尺燃料ピンの製作にも対応できるように燃料ピン溶接装置の更新を行なっている。今回の窒化物燃料ピンの製作にあたって、この新しい燃料ピン溶接装置を使用したのでその概要についてもあわせて紹介する。

2. 燃料ピンの設計

2. 1 燃料ペレットの仕様

欧米における照射試験の結果等から炭化物燃料や窒化物燃料等新型燃料については、経済性が損なわれない範囲で燃料密度を低密度化させ、スミア密度を下げることによって被覆管との機械的相互作用を緩和させ、10at.%以上の高燃焼度まで燃料の健全性を確保し得ることが明かにされている⁽¹⁾。炭化物燃料では機械的相互作用のほかにステンレス鋼被覆管の炭化現象が燃料寿命に影響を与える要因として挙げられている⁽²⁾。しかし、窒化物燃料については、被覆材の窒化がほとんど進まず、また、酸化物燃料に見られるようなFP元素による被覆管の腐食もこれまでの照射試験では認められていない^(1,2)ことなどから被覆管との化学的相互作用(FCCI)が燃料寿命を左右する恐れはないと考えられている。その反面、窒化物燃料はクリープ特性に劣り、スエリングによって燃料の健全性が損なわれる可能性のあることが予想される。したがって、窒化物燃料の開発で最も重要な研究課題としては、被覆管との機械的相互作用(FCMI)に関連した現象に的を絞ることが適切であると考えられる。

炭化物燃料では、スミア密度が81-82%T.D. (T.D.; 理論密度) を超えると燃料スエリングの影響が顕著になり、燃料破損率が上昇するとの報告がある⁽¹⁾。窒化物燃料については、照射実績が乏しいこともあり、燃料の健全性に対するスミア密度の影響についての定量的な評価ははっきりしていない。しかし、照射条件や燃料特性に関して炭化物燃料と窒化物燃料との類似性を考慮したとき、設計値として炭化物燃料と同程度のスミア密度を選定することが適切であると考えられる。実用的な燃料の場合には、80%T.D.未満のスミア密度をもつ燃料の採用も想定されるが、低いスミア密度は経済性の低下をもたらすほか、照射後試験において金相試験による組織観察等が難しくなることも予想されるなど、試験技術的観点をも考慮し、第1回目の照射用燃料については、燃料の健全性を確保する範囲で高めのスミア密度を燃料仕様とするのが妥当と判断した。このため、燃料ペレットの密度としては、スミア密度を80-82%T.D.とすることを前提として85±2%T.D.を選択した。

プルトニウム富化度については、炭化物燃料の場合と同様に大型炉心を想定した20%を採用し、ウランには天然ウランを使用することとした。

2. 2 燃料ピンの構造

窒化物燃料の照射試験全体スケジュールから判断して、1回の照射試験でなるべく多くの情

報を得ることを前提とし、1対のキャプセルに2本の燃料ピンを組み込むことで燃料ピンの設計を行なった。燃料と被覆管との機械的相互作用を理解するために大切な情報としては、燃料のスエリングとクリープが挙げられる。この二つの特性は、いずれも温度に対して極めて鋭敏であり、照射試験の第1段階として燃料中における正確な径方向温度分布を把握することが重要である。このため、2本の燃料ピンのうち1本については、燃料中心に熱電対を挿入して燃料温度の測定評価が可能な構造とすることとした。また、残りの燃料ピンについては、燃料と被覆管との間のギャップを変えることにより径方向の燃料温度プロファイルを変化させ、ギャップの相違が燃料挙動や機械的相互作用に及ぼす影響を調べることにした。以上のような照射試験目標の設定から決定した今回の照射用混合窒化物燃料ピン2本の基本設計仕様値をTable 1に示す。

炭化物あるいは窒化物燃料では、燃料ピンの製造時に与えられたギャップが照射の進行とともに燃料のクラッキングやフリースエリングにより狭まり、200 μ 程度の通常のギャップの場合には燃焼度が2-3 at. %になると完全に閉塞すると考えられている。ギャップが狭まるとともにギャップ部分における熱伝達係数が大きくなるため、燃料温度は2-3 at. %燃焼度までは照射とともに低下し、その後、ギャップが閉塞した段階でほぼ一定になると考えられている⁽¹³⁾。このため、燃料温度の測定については、2-3 at. %燃焼度までの照射初期の段階が最も重要である。今回の照射試験については、第1回目の照射試験でもあり、中・低燃焼度における燃料挙動の把握および燃料の健全性の確認等を第1の研究目標として設定した。このため、照射に必要な時間をも考慮に入れて約3 at. %の燃焼度を目標に設定している。燃料挙動から見た場合、上述したように2-3 at. %燃焼度で被覆管とのギャップが閉塞して機械的相互作用が顕在化すると予想される。仮にフリースエリング率として米国、BMIで行なわれた照射試験の結果⁽¹⁴⁾から報告されている0.68%/at. %b.u.を用いてギャップの閉塞時期を計算してみると、ギャップが0.15mmおよび0.20mmの場合、それぞれ3.0at. %および4.0at. %となる。BMIでの照射試験と照射条件が異なるため、単純な比較はできないが、3 at. %まで照射すれば、熱電対計装ピン (No. 2ピン、ギャップ寸法; 0.15 mm) ではギャップが閉塞して燃料温度がほぼ一定となる状態まで観察することが可能であると予想される。なお、熱電対を燃料中心に装荷するためには、新たに燃料ペレットの穿孔作業、熱電対付き端栓の製作等が必要となるが、付随する技術的課題は解決可能であると判断された。まず、穿孔作業に関してはUN等のダミーペレットを用いた予備試験により技術的な問題点の洗いだしを行った。また、燃料ピンおよび熱電対シースの健全性については、使用実績および文献報告⁽¹⁵⁾等から、シース材としてNb系材料を用いれば、照射時の温度条件等から判断して燃料との両立性に問題がないと結論した。なお、UN-Nbカップル試料を1,600 $^{\circ}$ Cで25時間(真空中)加熱して反応性を調べたが、その結果でも反応の起きている兆候は全く認められていない。

被覆管材料としては、これまでの炭化物燃料の照射試験^(5,6)に用いてきたASTM、SUS 316 (米国DOEより入手)、外径9.4mmのものを窒化物燃料の照射試験についても継続して用いることとした。燃料ピンの構造はこれまでJMT Rで行なってきた炭化物燃料照射試験用燃料ピンと基本的に同様であり⁽⁶⁾、燃料ピンの長さとしては、これまでの2本組炭化物燃料ピン装荷キャプセルの場合と同様に、燃料スタック100mm、ピン全長250mm (ただし、熱電対

付き燃料ピンNo. 2については熱電対装着によって下部端栓が長くなるため256mmとなる。)とした。燃料ピンの概略構造をFig. 1に示した。

熱電対としては、これまでJMTR等において最も使用実績があり、窒化物燃料との両立性にも優れているニオブ(Nb-1Zr)シースのW5Re-W26Re熱電対(外径1.6mm ϕ)を採用した。燃料の(U,Pu)Nペレットの両端には断熱用のUNペレットをそれぞれ1個ずつ配置させている。

ガスプレナムについては、これまでの炭化物燃料と同様に89mmとした。窒化物燃料では炭化物燃料と比べてもFPガス放出率が低く、これまでの窒化物燃料のFPガス放出率の結果⁽¹⁶⁾等と比較した場合、今回の目標燃焼度(約3at.%)では10-40%程度と予想され、FPガス内圧の蓄積による燃料ピンの損傷は全く考えられない。しかし、仮に100%のFPガスがプレナムに放出された場合を想定してもピン強度上から問題のないことを確認した。

2. 3 核熱計算

今回製作した混合窒化物燃料ピン2本は、キャプセルに組み込まれた後、平成2年3月からJMTRの照射孔[0-7]で照射が開始された(キャプセル名; 88*F-5A)。照射燃料ピンの核熱計算については、JMTRの協力を得てGENGTコードを用いて行ない、線出力とキャプセル各部材温度との関係を求めた。その結果をFig. 2に示した。キャプセルは内側より順次、燃料ピン、NaK熱媒体、SUS304-A ϕ 共引き管を使用した内筒、A ϕ 製(A1050)外筒が配置される。

照射孔[0-7]での中性子束条件から本燃料ピンの目標線出力としては660W/cmが設定され、この場合にSUS316被覆管の温度は約500 $^{\circ}$ Cになることのほか、各キャプセル部材や被覆管表面温度は設計上の制限温度を満足することが確認された。

Table 2には燃料と被覆管との間のギャップを変化させたときの最高中性子束位置における燃料中心温度および燃料表面温度の変化の様子を示した。これからも燃料温度はギャップの大きさによって強く影響されることが明確になった。また、この計算結果から照射の進行に伴いギャップが小さくなれば顕著な燃料中心温度の低下が期待され、燃料中心に挿入した熱電対によって燃料中心の温度変化を追跡することによりこれらの現象が十分に把握できるものと考えられる。なお、熱電対挿入箇所は最高中性子束位置からはずれており、約600w/cmの線出力で照射されると評価される。この場合、初期燃料中心温度は約1,330 $^{\circ}$ Cと計算される。ただし、窒化物燃料は原子炉の起動に伴う温度上昇を起因として複雑なクラッキング特性を示すため、燃料製造時に与えられたギャップが照射初期にどの程度の大きさになるかについては予測が難しく、実際に観測される燃料中心温度は上記の値よりも相当低下する可能性が残されている。

3. 燃料ペレットの製造

3. 1 原料物質

混合窒化物燃料ペレットの製造には、ウラン酸化物、プルトニウム酸化物および黒鉛の混合粉末を $N_2-8\%H_2$ 混合ガス気流中で約 $1,550^\circ C$ まで加熱することにより得られる混合窒化物、 $(U_{0.8}Pu_{0.2})N$ を原料として用いた。今回使用したウラン酸化物、プルトニウム酸化物および黒鉛粉末は、それぞれ日本核燃料コンバージョン(株)、British Nuclear Fuel Ltd. および Graphitwerk Kropfmühl 製のものである。ウラン酸化物の特性については、Table 3 に示した。プルトニウム酸化物および黒鉛粉末の特性については先に報告されているものと同様である^(4,17)。

原料ウラン酸化物粉末については、混合前に $Ar-8\%H_2$ 混合ガス気流中で約 $1,000^\circ C$ に加熱して化学量論組成の UO_2 とした。また、酸化プルトニウム粉末については、乾燥空気気流中において約 $700^\circ C$ まで加熱処理を行なったものを使用した。このプルトニウム酸化物には高次のプルトニウム核種が含まれ、 ^{241}Pu の娘核種 (^{241}Am 等) が不純物として存在するが、製造前にプルトニウムの精製 (Am の除去) は特に実施しなかった。黒鉛粉末については、事前に真空中で約 $400^\circ C$ まで3時間加熱することにより脱ガス処理を行なった。

炭素熱還元および焼結時に雰囲気ガスとして使用した $Ar-8\%H_2$ あるいは $N_2-8\%H_2$ 混合ガスとしては、高純度の純ガスを混合した市販のものを直接用いた。これらのガス中に含まれる不純物酸素は $0.5ppm$ 以下であり、また、露点は $-70^\circ C$ 以下である。

断熱ペレットには三菱金属(株)製の UN ペレットを使用し、 $(U, Pu)N$ ペレットと同様に円周研削を施して用いた。なお、断熱ペレットには、天然ウランが用いられている。断熱用 UN ペレットの特性については Table 4 に示した。

3. 2 ペレット製造

混合窒化物燃料ペレットの製造は、これまでの製造研究の結果⁽⁹⁾ を参考にしながら工程を決め、高純度アルゴンガス雰囲気グローブボックス⁽¹⁷⁾ に格納されている装置を用いて行なった。燃料製造時におけるアルゴンガス雰囲気中の不純物酸素量は、常時 $1\sim 2ppm$ に抑制され、露点は $-70^\circ C$ 以下であった。今回の混合窒化物燃料ペレットの製造工程の概略を Fig. 3 に示した。

ウラン・プルトニウム混合窒化物、 $(U, Pu)N$ は、 UO_2 、 PuO_2 および黒鉛粉末をガラス製 V 型ブレンダーおよびアルミナ製ボールミルを用いて混合したものを圧粉体としてから $N_2-8\%H_2$ 混合ガス気流中で加熱することにより調製した。黒鉛の添加量は、これまでの経験⁽⁹⁾ から酸化物に対してモル比で 2.5 倍とした。V 型ブレンダーによる混合時間は約 2 時間、アルミナ製ボールミルによる混合は、約 48 時間とした。混合した後、約 $100 MPa$ の圧力

で直径12mm、厚さ2～3mmの薄いディスク状に成型してから炭素熱還元を行なった。炭素熱還元は、1,550℃において $N_2-8\%H_2$ 混合ガス気流中で10時間加熱することにより実施した。ただし、昇温および降温時においては、それぞれ黒鉛と水素との反応を抑制し、また、三二窒化物の生成を避けるために雰囲気ガスとして $N_2-8\%H_2$ 混合ガスのかわりに高純度のArガスをを用いた。

炭素熱還元により得られたディスク状の窒化物については、タングステンカーバイド製ボールミルで約72時間粉碎した。ボールミルに装荷した窒化物量、ボールミル時間等の粉碎条件によってペレットの焼き上がり密度が変化すると予想されたため、ボールミルの途中で試料を採取して試験焼結を行ない、あらかじめボールミル時間と焼結密度との関係を確認した。今回の窒化物燃料ペレットの製造では、ポアフォーマを使用して密度制御を行った。これは、燃料全体としては約85%T.D.の低い燃料密度を確保する一方で、燃料母材密度をできるだけ高くし、安定化することを意図したものである。ポアフォーマとしては、約20 μm の粒径をもつ(株)川研ファインケミカル製のワックス系高分子化合物を使用し、窒化物量に対して約1.2wt.%を添加した。窒化物とポアフォーマの混合には、V型ブレンダーを用いた。ポアフォーマの添加により成型性が改善されるため、成型にあたってバインダー類は使用しなかった。成型圧力は、約300 MPaとした。

窒化物ペレットの焼結では、Ar-8% H_2 混合ガスを使用し、1,750℃で5時間の加熱を行なった。雰囲気ガスとしてAr-8% H_2 混合ガスを使用したのは、昇降温時における三二窒化物の生成を避けるとともに、 N_2 ガス雰囲気よりも窒化物の焼結性が向上して高密度のペレットの得られることが期待できることによる⁽⁹⁾。その反面、Ar-8% H_2 混合ガス雰囲気での熱処理では、降温時に金属相が析出する可能性が考えられる。金属相の存在は、燃料の照射挙動に極めて悪い影響を及ぼすと考えられるため、円周研削等のペレット加工等を終えたのち、最終段階で N_2 ガス中での熱処理(1,500℃, 5時間)を行った。

3.3 ペレット加工

焼結後の燃料ペレットについては、空気雰囲気グローブボックス内に格納されたセンタレスグラインダー⁽¹⁰⁾を用いて湿式法による円周研削を施した。焼結後の焼き上がり直径寸法は約8.35mmであったが、段階的に研削を行ない、最終的に8.23mmおよび8.18mmの直径に仕上げた。なお、一部のペレットについてはスタック長を設計値に調整するためにマイクロソーにより切断を行った。円周研削等の作業の後には、アセトンを用いた超音波洗浄により研削油を除去し、さらに高真空条件(3×10^{-2} Pa)で約1,200℃に加熱することにより脱脂、乾燥を行なった。

前述のように今回製作された燃料ピン2本のうち1本については、燃料中心温度測定用の熱電対が計装されている。このため、熱電対が挿入される部分に充填予定の燃料ペレット(混合窒化物ペレット2個、断熱用ウラン窒化物ペレット1個)については、超音波加工により中心孔の穿孔を行った。この穿孔作業は初めての経験であったため、事前に十分な検討および試験を行なった。

穿孔に用いた超音波加工機は、空気雰囲気グローブボックス内に設置されているもので、最大出力75W、周波数28kHzのものである。この超音波加工機的能力および穿孔する穴の大きさ等を勘案し、専用の中空振動子を新たに設計、製作し、事前にアルミナペレット及びUNペレットで穿孔性能の確認を行なった。研削液には平均粒径 $48\mu\text{m}$ のシリコンカーバイド(SiC)粉末をアルコールに懸濁させたものを用いた。中心孔の大きさについては、燃料ペレットを被覆管へ充填するための寸法裕度をも考慮し、熱電対シース径(約 1.6mm)よりも約 0.5mm 大きい $2.0-2.2\text{mm}\Phi$ とすることとし、振動子の針にはSUS304製で、外径 2.0mm 、内径 1.4mm の寸法のものを用いた。

円周研削および穿孔の後、スタック長の調整を行った燃料ペレットの外観写真をFig. 4に示した。

3. 4 確性試験

製造された燃料ペレットについては、X線回折(相同定、格子定数)、組織観察、窒素定量、Pu/(U+Pu)比測定、酸素および炭素定量、高温放出ガス定量、寸法測定、重量測定などを実施した。混合窒化物(U, Pu)Nペレットに関する確性試験の結果は、Table 5にまとめて示した。

燃料ペレット密度については、寸法測定から得られる容積と重量測定の結果から求めた。その結果は約83%T.D. ($83.1\pm 0.6\%$ T.D.)となり、設計中央値(85%T.D.)よりも若干低いものであったが、設計仕様範囲内に納まった。この結果、最終的なスミア密度は、No. 1およびNo. 2ピンともに約80%T.D.となり、適切な値が確保された。今回の燃料製造においては照射試験に用いる燃料ペレットのほかに、製造条件は同一としてポアフォーマを添加しないで比較用の(U_{0.8}, Pu_{0.2})Nペレットを製造したが、その密度は約95%T.D.であった。従って、ポアフォーマを添加した照射試験に供するペレットの燃料母材密度も同じく95%T.D.程度であると評価される。このことから高密度の燃料マトリックスと安定した気孔をもつ窒化物燃料が得られたものと判断される。燃料の組織観察では、ペレットをベークライト樹脂に埋め込んだ上で研磨を行い、硝酸、酢酸および水の混合液(混合比2:1:1)を用いて化学エッチングを施した後、顕微鏡観察を行った。Fig. 5には、今回製造した燃料の金相写真の例を示した。これらからポアフォーマにより形成されたとと思われる約 $20\mu\text{m}$ のポアと高密度の燃料母材の形成が認められる。また、混合窒化物の結晶粒の大きさは $10-15\mu\text{m}$ と評価される。金属相等の第2相の析出は金相試験で観察されていない。なお、ポアの一部は均一に分散せず、偏析しているものがごく一部で認められた。これは添加したポアフォーマと窒化物粉末との混合の程度が若干不均質であったことに起因すると推定される。しかし、ポアの偏在は軽微であり、照射下におけるクラッキングパターンに影響を及ぼす可能性は残るものの、燃料全体からみて燃料の健全性を損なうものではないと判断される。

化学分析では、Pu/U比、炭素、酸素、窒素量ともに設計許容内の値を示した。Pu/U比については、酸化物に転換した後、溶解して電位差滴定法⁽¹⁹⁾により求めた。分析結果は、Pu/(U+Pu)=0.196(原子比)であり、原料粉末の混合割合が適切であったことが確認された。

不純物としての酸素および炭素については、それぞれ不活性ガス溶融電量法⁽²⁰⁾および高周波加熱電量法⁽²¹⁾により定量したが、酸素量が0.12wt.%, 炭素量が0.20wt.%であり、これまでの製造経験で得られている値と同程度のものであった。特に、酸素量については、酸化物を原料とし、かつ、焼結性の悪い点を補うためにボールミルを長時間行った微細な粉末の形で窒化物を取り扱う工程が含まれる点を考慮した場合、満足すべき値であると考えられる。また、照射試験の結果から0.30wt.%以上の高い酸素含有量の場合には、照射挙動に悪い影響を及ぼすことが指摘されている⁽¹²⁾が、この点に関しても特に問題のない値に抑制されている。なお、炭素熱還元で調製した焼結前の混合窒化物中の酸素および炭素含有量は、それぞれ0.11wt.%, 0.16wt.%であった。燃料ペレットの不純物量と比較した場合、酸素量はほとんど変化していないが、炭素量については僅かに増加していることが認められる。この増加分はポアフォームの熱分解に伴うものであると推定される。構成元素である窒素含有量の定量については、新たに整備された窒素定量装置を用いて行なわれた。この装置では、窒化物試料を酸素中で加熱することにより生成するNOガスをガスクロマトグラフを用いて定量する方法が採用されているが、極めて良好な分析精度が得られている⁽¹⁰⁾。

X線回折の結果では、ごく僅かの酸化物相の存在が認められたが、そのほかは全て面心立方晶構造をもつ窒化物(U, Pu)N相であり、その格子定数は0.4892nmであった。格子定数については、Tenneryら⁽²²⁾が(U_{0.8}Pu_{0.2})Nの値として報告しているものよりも若干高い値が得られている。この原因としては不純物として含まれる炭素(0.20wt.%)が影響しているものと考えられる⁽⁹⁾。なお、今回得られた格子定数の値は、UNとPuNがVegard則に従うと仮定して得られる値に近いものである。

燃料中に含まれる蒸発性不純物ガス(高温放出ガス)の定量については、炭化物燃料の場合と同様にして高温真空抽出法^(23, 24)により実施した。1,400℃における30分間の加熱で81.9 μl・atmのガス放出が認められ、その成分はN₂;84%、H₂;13%、CO;3%であった。この高温放出ガスについては、加熱を継続するのに伴い放出速度の減少することが認められており、特に成分として窒素ガスの放出量の低下が寄与していることが確認された。高温放出ガスは、真空条件(約4Pa)で測定しているのに対して、燃料ペレットの最終熱処理は窒素雰囲気で行われており、この雰囲気条件の差により構成元素としての窒素が放出されたために上記のような結果が得られたものと考えられる。断熱ペレット用UNについても同様の試験を行って、34.8 μl・atm/30minの値が得られている。

4. 燃料ピン溶接装置の整備

4. 1 燃料ピン溶接装置の更新

これまでの炭化物および窒化物燃料に関する研究成果を踏まえ、平成5年度に動燃との共同研究により高速実験炉「常陽」においてこれらの燃料の照射試験を開始することが具体化してきた。このため、これまでの短尺ピンに変わって長尺ピンの製作が必要になると見込まれ、常陽での照射試験に備えて燃料ピン溶接装置の更新を行なった。

従来の燃料ピン溶接装置⁽¹⁸⁾は、これまでに9本のウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作に使用されており⁽⁴⁻⁶⁾、更新時点においても良好な性能を維持していたが、JMT R照射試験用の短尺ピンの製作を前提に設計、製作されており、溶接用トーチを固定し、溶接対象の燃料ピンを回転させる方式を選んでいる。このため、長尺ピンを溶接する際には溶接箇所における寸法精度を確保することが難しい構造となっている。したがって、長尺ピンの溶接に対応できるように電極トーチ回転式の溶接機を新たに設置したものである。

4. 2 新燃料ピン溶接装置の設計・製作

燃料ピン端栓部の溶接は、基本的にはヘリウムガス雰囲気TIG (Tungsten Inert-Gas) 溶接による薄肉管溶接であって特殊な分野のものであることから、新しい燃料ピン溶接装置の選定については、機種が限定されたが、最終的に電源部はこれまでホットラボ施設などで使用実績のあるWeldlogic社製のものとし、電極部はグローブボックスでの操作、保守に適合し、かつ原子炉等規制法の要求に適合するように改造を施した。電極部の主な改造点は以下の通りである。

- (1) 電極トーチ部の位置を変更して、グローブボックス窓の外側からトーチ部及び被溶接箇所が目視により観察できる構造とした。
- (2) 電極トーチを横軸方向に移動させ、被溶接箇所とトーチとの位置関係について微調整ができる構造とした。また、横軸調整距離についてはダイヤルゲージの設置により定量的に把握できるようにした。
- (3) 被溶接物に対するトーチ角度を変化させることのできる構造とした。
- (4) 耐震安全等原子炉等規制法等により要求される安全対策を施した。

新しい燃料ピン溶接装置の仕様については、Table 6に示した。さらに、電極部の外観概略図としてグローブボックスに据え付けられている状態をFig. 6に示した。そのほか、長尺燃料ピン被覆管に上下端栓を圧入するための端栓圧入装置についても同時に更新した。

4. 3 新燃料ピン溶接装置による溶接試験

新しい燃料ピン溶接装置の設置に伴い、電流、電圧等の溶接条件の再検討が必要になったため、溶接電流、溶接電圧等の各種条件をパラメータとして試験片の溶接試験を行ない、装置性能の確認を行なうと共に、最適の溶接条件を求めた。被覆管材料は、今回の照射用燃料ピンに使用したのと同じSUS316である。溶接雰囲気およびトーチガスにはヘリウムガスを用いた。

Fig.7には、本溶接試験で得られた溶接部断面写真と溶接条件とを示した。十分な溶け込みが確保されているほか、欠陥も認められず、結果として、これまでと同等以上の良好な溶接結果を確保しうることが明らかになった。

4. 4 許認可手続き

本装置の設置に関する許認可手続きについては、昭和63年度中頃より準備を行なった。原子炉等規制法55条に基づき行なった許認可手続きは以下の通りである。なお、施設検査については、耐震上の安全性等に関して検査を受けた。

使用変更申請	平成元年1月19日付1原研52第7号申請
	平成元年3月27日付元安(核規)第40号許可
検査申請	平成元年4月14日付1原研52第60号申請
	平成元年5月16日施設検査受検
	平成元年6月5日付元安(核規)第260号施設検査合格証取得

5. 燃料ピンの製作

5. 1 燃料ピン構成部材

被覆管等の燃料ピン構成部品の外観写真をFig. 8に示した。基本的な構造は、熱電対付きの下部端栓を除いてこれまでに炭化物燃料ピンに使用してきたものと同じである^(5,6)。熱電対の下部端栓への取り付けについては、東海研究所工作課に依頼し、ロー付けにより行った。今回使用した熱電対は、Nb-1 ZrシースのW5Re-W26Reであり、ロー付け部分については、X線透過法および浸透探傷法により欠陥検査を行ない、欠陥のないことを確認してから使用した。

5. 2 燃料ピン溶接

まず、ヘリウムガスTIG溶接法により燃料被覆管に下部端栓を溶接した。X線透過試験等の検査により溶接部に欠陥のないことを確認した後、燃料ペレット等の充填および上部端栓の溶接を行なった。

下部端栓の溶接後、グローブボックス内をヘリウムガスによって置換した状態で被覆管に燃料ペレット、スプリングを挿入し、さらに上部端栓の圧入を行った。この時の雰囲気条件は、これまでの経験から酸素 5ppm、水分 -50°C 以下の良好な条件が確保されていると考えられる。また、燃料ペレット挿入時には、被覆管に管口マスクを装着し、被覆管がプルトニウムにより汚染するのを抑制した。燃料ピン溶接関連装置および燃料ピン製作手順の詳細については既に報告されているとおりである⁽¹⁸⁾。今回製作された2本の燃料ピンの外観写真をFig. 9に示した。

5. 3 燃料ピンの検査

溶接後の燃料ピンについては、外観検査、寸法検査、真直度検査、重量検査、表面汚染度検査、ヘリウムリーク検査、X線透過試験を実施した。溶接後の燃料ピンの外観については、溶接部に若干の着色が認められたが、軽微なものであり、問題となるものではなかった。また、溶接ビードの不均一性等溶接欠陥を示唆する兆候は全く認められなかった。そのほか、燃料ピン全体についても有害な傷等、欠陥は観察されていない。寸法検査については、ノギスおよびマイクロメータにより行ったが、すべて基準範囲内であった。真直度については、全長に対して $0.03\sim 0.06\text{mm}$ であり、基準内であった。

燃料ピンの溶接後、ZnS(Ag)シンチレーション型検査計により燃料ピン表面の表面汚染度(アルファ放射能)検査を実施した。溶接直後においては、軽微な汚染のあることが示唆されたが、簡単な除染を行なうことにより表面汚染度を有意値以下に落すことができた。最終

的に燃料全体についてスミア法により精密な汚染検査を実施したが、基準値 (20dpm/100cm²) 以下であることが確認された。また、溶接部については、直接測定を行ない、溶接部へのプルトニウムの巻き込み等についても調べたが、有意な値は検出されなかった。

燃料ピンの溶接部の気密検査については、ボンド材としてピン内部に封入したヘリウムの漏洩をヘリウムリークディテクターを用いて測定することにより行なった。使用したヘリウムリークディテクターの検出感度は、 2×10^{-9} atm·cc/sである。検査の結果、2本の燃料ピンの漏洩率はいずれも検出感度以下であった。

燃料ピン全体および溶接部については、材料試験炉部照射3課に協力を仰いでX線透過試験を行なった。その結果、断熱ペレットの一部に亀裂のあることが認められたが、照射試験には支障がないものと判断された。そのほか、燃料ペレット、スプリング等は燃料ピン内で正常に位置していることが確認された。また、上下端栓部の溶接部分についても欠陥は認められなかった。

6. あとがき

今回製作したウラン・プルトニウム混合窒化物燃料は、キャプセルに組み込まれた上、平成2年3月よりJMTR90サイクルから照射が開始された。予定通りに進めば、平成5年頃に照射後試験が実施されることになる。今回製作された燃料ピンの照射試験では、燃焼度3 at. %までの燃料挙動が明らかにされるほか、燃料の再編成に伴う燃料温度の変化について知見の得られることが期待される。また、引き続き2本の窒化物燃料ピンを製作し、平成3年1月からは燃焼度6 at. %を目標とした第2回の照射試験を行うことが予定されており、さらにこれまでの成果を踏まえて動燃との共同研究により「常陽」において炭化物、窒化物燃料の高速中性子照射を実施する計画についても順調に準備が進められている。これらの照射試験を通じて窒化物燃料のもつ優れた燃料特性が明らかにされ、また、燃料と被覆管との機械的相互作用などの燃料挙動についても情報が得られ、高速炉用高性能新型燃料としてその健全性の実証に道が開けることが期待される。

謝辞

本燃料ピンの設計・製作にあたり、大洗研究所材料試験炉部照射1課、照射3課、計画課、東海研究所技術部工作課、実用燃料試験室の方々のご協力を頂いた。さらに大洗研究所管理部プルトニウム技術開発室、放射線管理課、工務課の方々にも多くのご支援を頂いた。特に、キャプセル設計について助言、助力を頂いた新見 素二氏、武山 友憲氏、およびPu/U分析をお願いした平田 勝氏、黒沢 誠氏には多大な労をおかけした。関係各位に深く感謝の意を表するものである。

また、本研究の遂行にあたり貴重な助言を頂いた近藤達男燃料・材料工学部長、柴是行燃料安全工学部長に厚くお礼申し上げます。

6. あとがき

今回製作したウラン・プルトニウム混合窒化物燃料は、キャプセルに組み込まれた上、平成2年3月よりJMTR90サイクルから照射が開始された。予定通りに進めば、平成5年頃に照射後試験が実施されることになる。今回製作された燃料ピンの照射試験では、燃焼度3 at. %までの燃料挙動が明らかにされるほか、燃料の再編成に伴う燃料温度の変化について知見の得られることが期待される。また、引き続き2本の窒化物燃料ピンを製作し、平成3年1月からは燃焼度6 at. %を目標とした第2回の照射試験を行うことが予定されており、さらにこれまでの成果を踏まえて動燃との共同研究により「常陽」において炭化物、窒化物燃料の高速中性子照射を実施する計画についても順調に準備が進められている。これらの照射試験を通じて窒化物燃料のもつ優れた燃料特性が明らかにされ、また、燃料と被覆管との機械的相互作用などの燃料挙動についても情報が得られ、高速炉用高性能新型燃料としてその健全性の実証に道が開けることが期待される。

謝辞

本燃料ピンの設計・製作にあたり、大洗研究所材料試験炉部照射1課、照射3課、計画課、東海研究所技術部工作課、実用燃料試験室の方々のご協力を頂いた。さらに大洗研究所管理部プルトニウム技術開発室、放射線管理課、工務課の方々にも多くのご支援を頂いた。特に、キャプセル設計について助言、助力を頂いた新見 素二氏、武山 友憲氏、およびPu/U分析をお願いした平田 勝氏、黒沢 誠氏には多大な労をおかけした。関係各位に深く感謝の意を表するものである。

また、本研究の遂行にあたり貴重な助言を頂いた近藤達男燃料・材料工学部長、柴是行燃料安全工学部長に厚くお礼申し上げます。

参考文献

1. 半田 宗男、福島 奨、岩井 孝 "高速炉用燃料の特性および照射挙動:U-Pu 混合酸化物、炭化物、チッ化物、金属" 日本原子力学会誌、8、886 (1989).
2. Hj. Matzke, "Science of Advanced LMFBR Fuels", North-hollands, Amsterdam (1986).
3. 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 26、2 (1984).
4. 荒井 康夫、岩井 孝、前多 厚、笹山 龍雄、塩沢 憲一他、"JMTR照射キャプセル(84F-10A, 84F-12A, 87F-2A)用混合炭化物燃料ピンの製作"、JAERI-M 89-060 (1989)。
5. 荒井 康夫、岩井 孝、前多 厚、笹山 龍雄、塩沢 憲一他、"高出力照射試験用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作"、JAERI-M 86-094 (1986)。
6. 半田 宗男、大道 敏彦、福島 奨、笹山 龍雄、鈴木 康文他、"照射用ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料ピンの製作"、JAERI-M 83-206 (1983).
7. 前多 厚、笹山 龍雄、岩井 孝、相沢 作衛、大和田 功他 "ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の低線出力(第1回)照射および照射試験" JAERI-M 88-219 (1988).
8. 岩井 孝、笹山 龍雄、前多 厚、相沢 作衛、川崎 公靖他 "ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料の中線出力(第2回)照射および照射試験" JAERI-M 89-186 (1989).
9. Arai, Y., Fukushima, S., Shiozawa, K., Handa, M. "Fabrication of (U,Pu)N Fuel Pellets", J. Nucl. Mater., 168, 280 (1989).
10. Suzuki, Y., Arai, Y., Handa, M., Shiba, K. "Research and Development of Uranium-Plutonium Mixed Carbide and Nitride Fuels at JAERI", IAEA Advisory Meeting on Advanced Fuel Technology, Vienna (1989).
11. Latimer, T.W., Barnier, J.O., Kerrisk, J.F., Green, J.L. "Postirradiation Results and Evaluation of He-bonded Uranium-Plutonium Carbide Fuel Elements Irradiated in EBR-II, Interim Report", LA-6249-MS (1976).
12. Bauer, A.A., Brown, J.B., Fromm, E.O., Storhok, V.W. "Mixed-Nitride Fuel Irradiation Performance", Proc. on Fast Reactor Fuel Elements Technology, New Orleans, Apr. 13-15, 785 (1971).
13. Blank, H., Coquerelle, M., Ray, I.L.F., Richter, K., Walker, C.T. "The Performance of He-bonded Carbide Fuels", Pro.Int.Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactors, Sept 7-11, 1986, Tucson, 7-15 (1986).
14. Bauer, A.A., Cybulskis, P., Petty, R.L., Demuth, N.S. "Helium- and Sodium-Bonded Mixed-Nitride Fuel Performance", Proc. on Fast Breeder Reactor Fuel Performance, Monterey, Mar. 5-8, 827 (1979).

15. Pardue, W.N., Storhok, V.W., Smith, R.A., Bonnell, P.H., Gates, J.E., Keller, D.L. "Synthesis, Fabrication, and Chemical Reactivity of Plutonium Nitride", BMI-1693 (1964).
16. Coquerelle M., Walker C.T., "Fission Gas Release and Microscopic Swelling in Highly Rated Advanced Fuels", Nucl. Technol., 48, 43 (1979).
17. Suzuki, Y., Sasayama, T., Arai, Y., Watanabe, H. "Fabrication of Uranium-Plutonium Mixed Carbide Pellets", J. Nucl. Sci. Technol., 18, 61 (1981).
18. 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).
19. 半田 宗男、前多 厚、塩沢 憲一、星野 昭、"高速炉用プルトニウム炭化物系燃料の分析ラインの設計、製作ならびに性能試験"、JAERI-M 8312 (1979).
20. 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).
21. 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).
22. Tennery V.J., Bomar E.S., "Lattice Parameters of (U,Pu)N Solid Solutions", J. Amer. Ceram Soc., 54, 247 (1971).
23. 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-M82-042 (1982).
24. Iwai T., Takahashi I., Handa M., "Measurement of Occluded Gases Released from Uranium-Plutonium Mixed Carbide and Uranium Carbide Fuels", J. Nucl. Sci. Technol., 25, 456 (1988).

Table 1 Design parameters of uranium-plutonium mixed nitride fuel pins for irradiation test at JMTR

		No.1 pin	No.2 pin
Fuel Pellets	Chemical form	(U, Pu)N	(U, Pu)N
	Radius	8.18 mm	8.23 mm
	Height	8 mm	8 mm
	Density	85 %T.D.	85 %T.D.
	Pu content (Pu/U+Pu)	0.20	0.20
	Stack length	100 mm	100 mm
Thermal insulator	Chemical form	UN	UN
	Radius	8.18 mm	8.23 mm
	Height	8 mm	8 mm
	Density	80-90 %T.D.	80-90 %T.D.
Cladding	Material	SUS316	SUS316
	Outer radius	9.40 mm	9.40 mm
	Thickness	0.51 mm	0.51 mm
Spring	Material	Inconel X	Inconel X
Pin design	Gap size	0.20 mm	0.15 mm
	Smear density	81 %T.D.	81 %T.D.
	Bond material	He gas	He gas
	Pin length	250 mm	256 mm
	Thermocouples*	No	Yes

* Thermocouples for measuring the central fuel temperatures.

Table 2 Temperatures of fuel and clad with different gap size

Position	Gap size (mm)			
	0.20	0.15	0.10	0.05
Fuel center	1,519°C	1,413°C	1,178°C	1,075°C
Fuel surface	1,144°C	1,026°C	759°C	638°C
Clad surface	500°C	500°C	501°C	501°C

Temperatures were estimated at the linear power of 660 W/cm.

Table 3 Characteristics of uranium dioxide powder

Uranium content	87.61 %	
O/U	2.08	
Tap density	2.0 g/cm ³	
Average particle size	0.8 μ m	
Specific surface area	3.9 m ² /g	
Impurities (ppm)		
	C : 50	Co : < 3
	Ca : < 2	Cr : < 2
	Cl : < 2	Fe : < 13
	F : 18	Na : < 39
	N : 6	Si : 6
	Al : 5	V : < 5
	Cd : < 0.5	Zn : < 50

Table 4 Characteristics of thermal insulators

	No.1 pin	No.2 pin
Dimensions		
Radius	8.18 mm	8.23 mm
Height (average)	7.97 mm	8.04 mm
Density (average)	85.4 %T.D.	85.7 %T.D.
Compositions		
Nitrogen content	5.46 wt. %	5.46 wt. %
Oxygen content	0.35 wt. %	0.35 wt. %
Carbon content	0.14 wt. %	0.14 wt. %
X-ray diffraction analysis		
Phases identified	UN	UN
Lattice parameter of UN	0.48903 \pm 0.00002 nm	0.48903 \pm 0.00002 nm
Occluded gases (at 1400 $^{\circ}$ C)	34.8 μ l \cdot atm/30min	34.8 μ l \cdot atm/30min
Number of pellets	2	2

Table 5 Characteristics of (U,Pu)N fuel pellets

	No.1 pin	No.2 pin
Dimensions		
Radius	8.18 mm	8.23 mm
Density	83.1±0.7 %T.D.	83.0 ±0.5 %T.D.
Compositions		
Pu/(U+Pu)	0.196	0.196
Nitrogen content	5.56 wt.%	5.56 wt.%
Oxygen content	0.12 wt.%	0.12 wt.%
Carbon content	0.20 wt.%	0.20 wt.%
X-ray diffraction analysis		
Phases identified	(U, Pu)N	(U, Pu)N
Lattice parameter of (U, Pu)N	0.4892 nm	0.4892 nm
Occluded gases(at 1400 °C)	81.9 μℓ · atm/30min	81.9 μℓ · atm/30min
Number of pellets	13	13
Stack length	100.00 mm	99.85 mm

Table 6 Specifications of TIG fuel pin welder

Automatic welding source	
Model	WELDLOGIC PA-100-STW
Weld system	Pulsed TIG arc welding
Operating input source	200 V (AC) 30A
Welding power Source	100 A (DC) max.
Minimum controlled current	3 A
Control system	
Peak weld current	0 - 99 A
Background current	0 - 99 A
Pulse width	0 - 99 %
Pulse frequency	0 - 99 Pulses/second
Weld timers	0 - 99 Seconds
Primary linear current functions	$\pm 1 \%$
Primary linear voltage functions	$\pm 12 \%$
Arc starting system	High voltage RF arc starting
Automatic weld head	
Model	WELDLOGIC STW-100, clamp-on orbital weld head
Object	Stainless steel fuel cladding (radius 9.4 Φ , maximum length 1.5 m)
Setting of arc length	Feeler gauge
Tungsten angle	3 steps(90° ,75° ,70°)
Shield gas	He gas

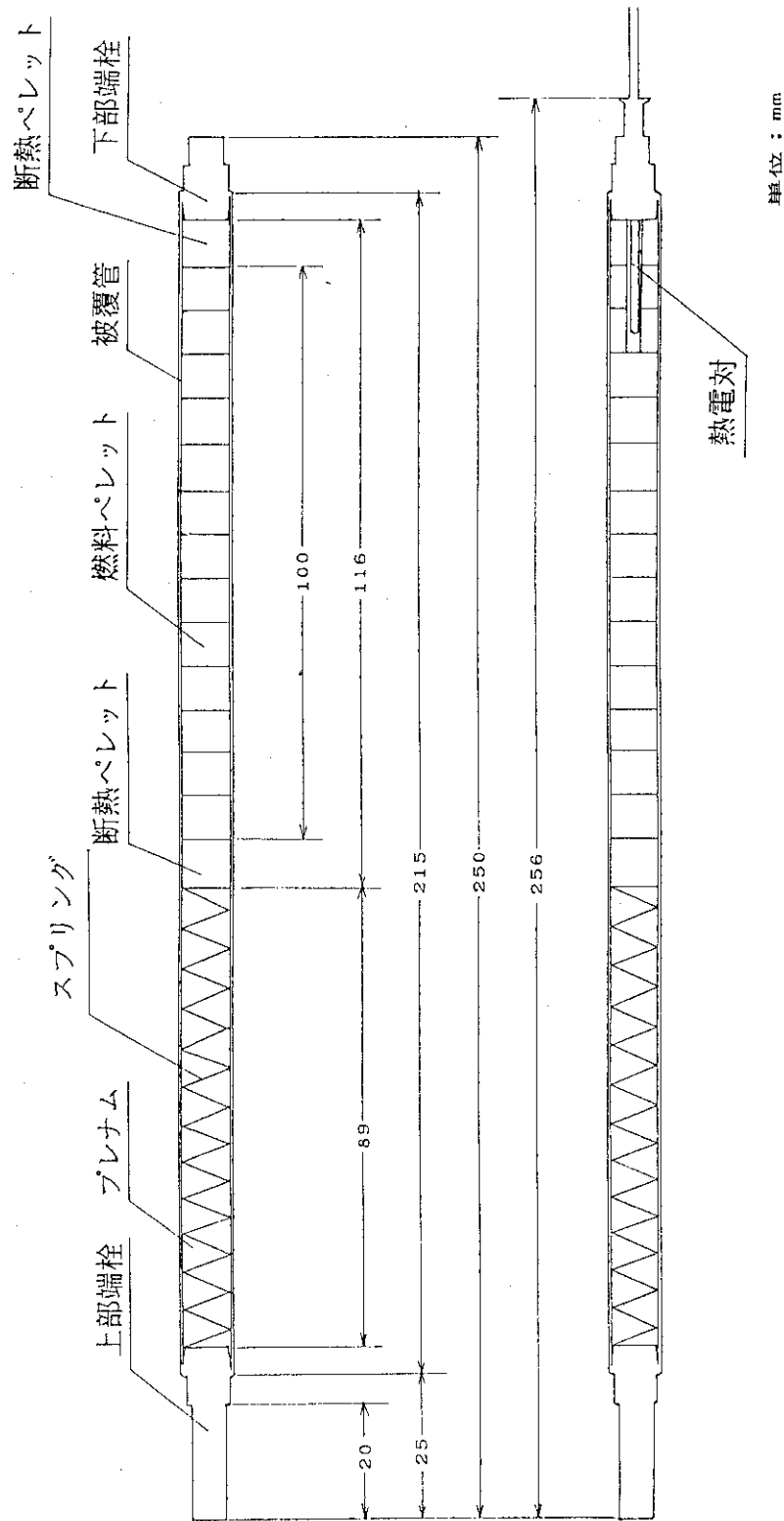


Fig. 1 Mixed nitride fuel pins for 88F-5A capsule

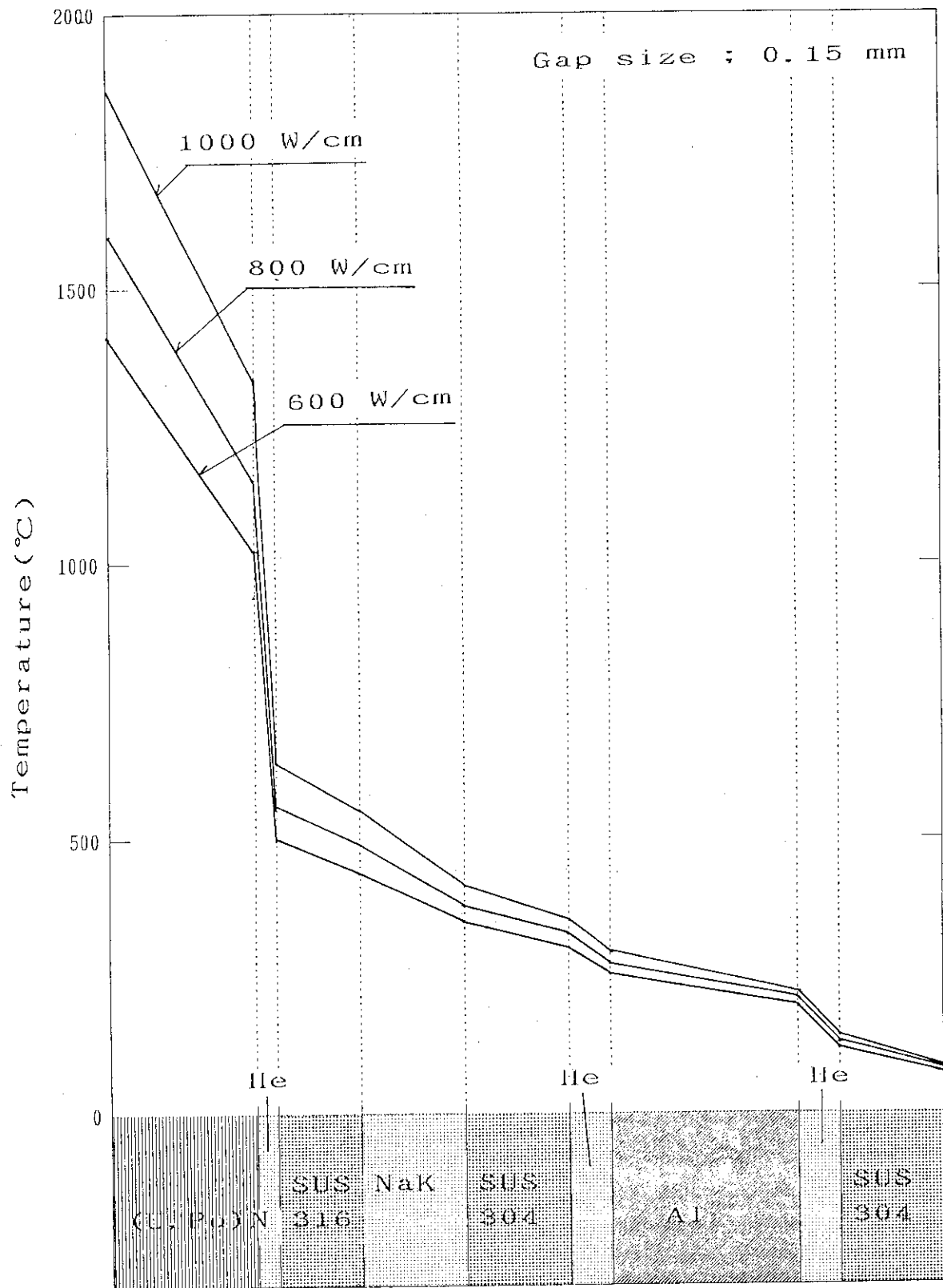


Fig. 2 Radial temperature distribution of 88F-5A capsule as a function of linear heat rate

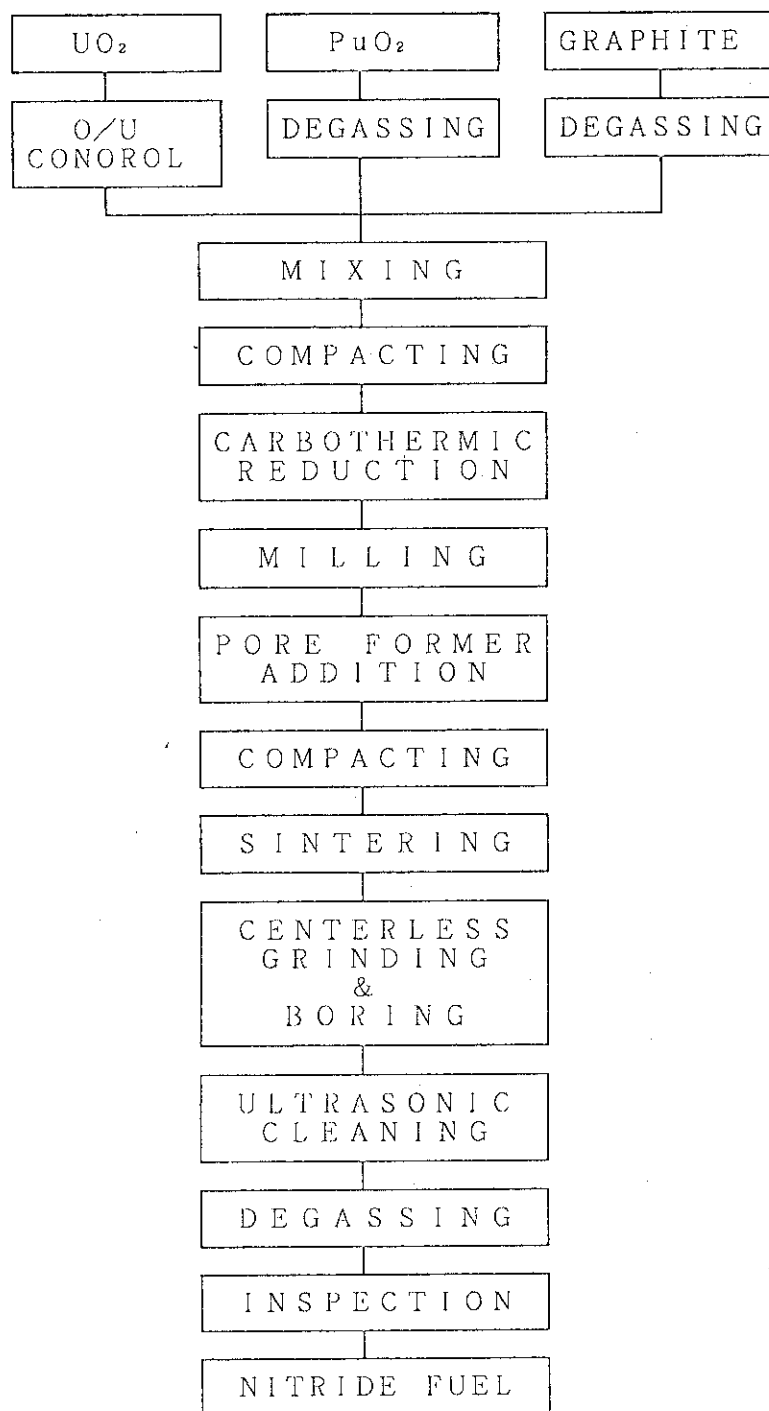
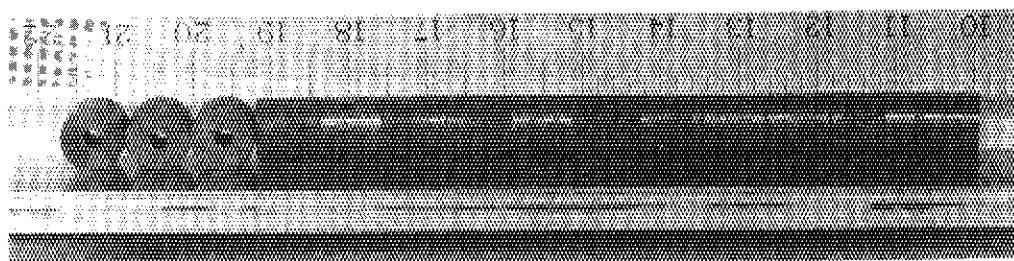


Fig. 3 Flow sheet of fabrication of mixed nitride fuel pellets



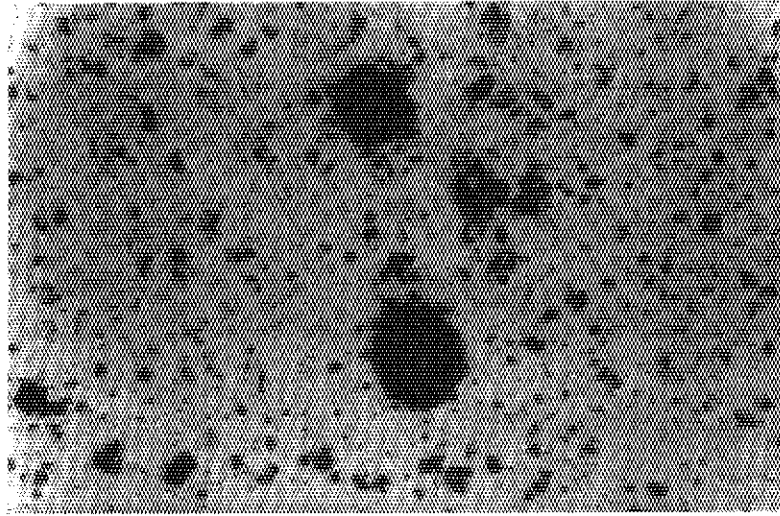
(pin No. 1)



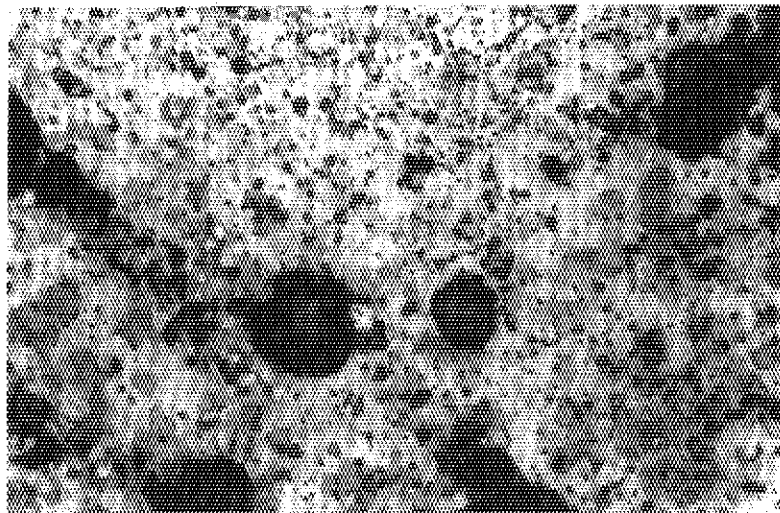
(pin No. 2)

Fig. 4 External appearance of mixed nitride fuel pellets

50 μ m



as polished



etched

Fig. 5 Microstructure of mixed nitride fuel pellet

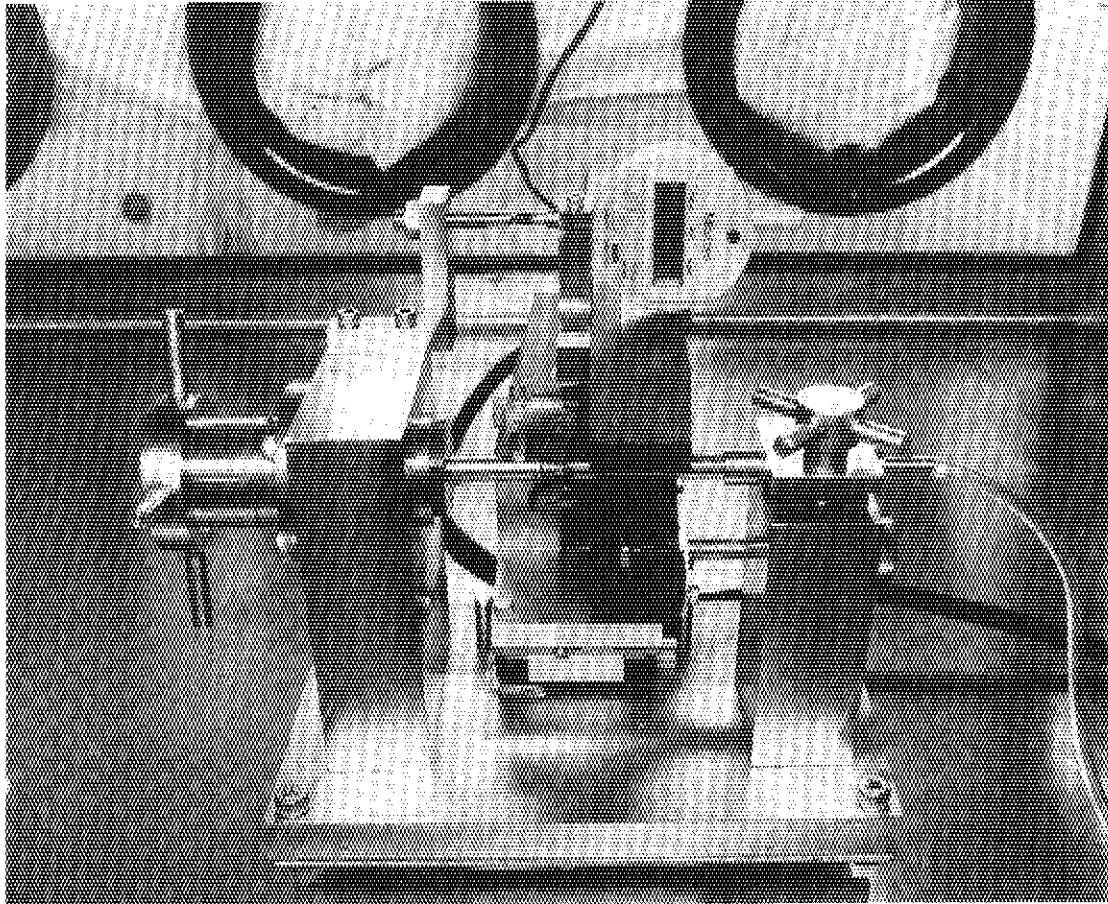


Fig. 6 External appearance of TIG fuel pin welder

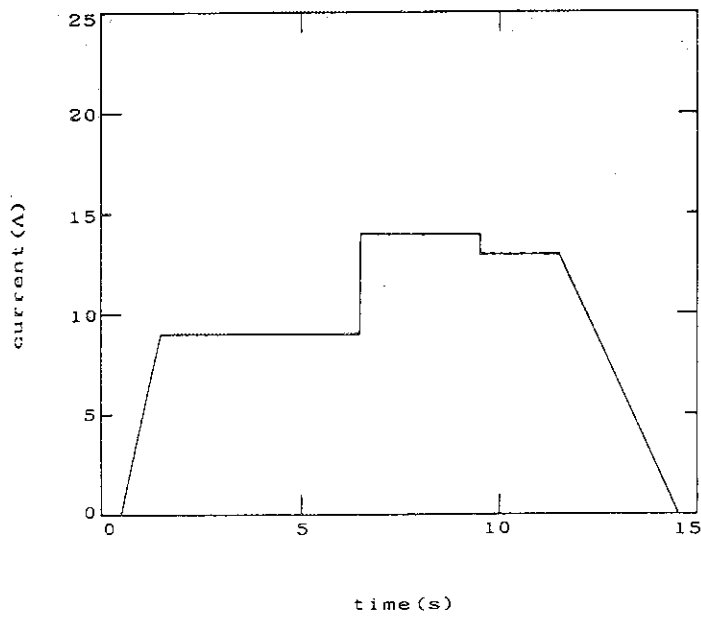
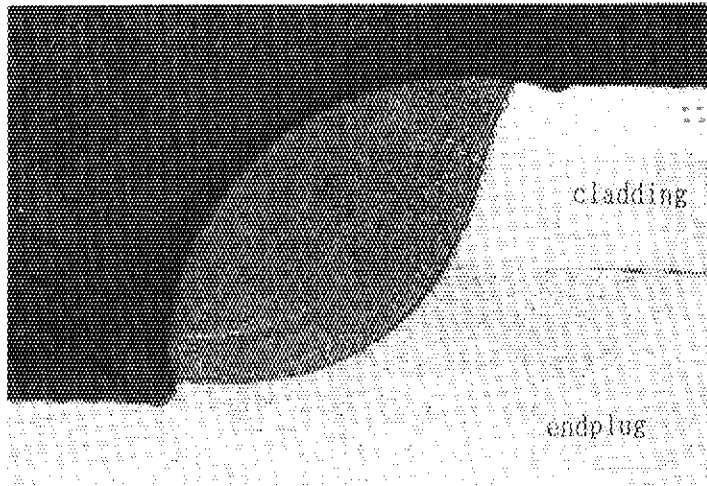


Fig. 7 Cross section of welded part of cladding tube and welding conditions

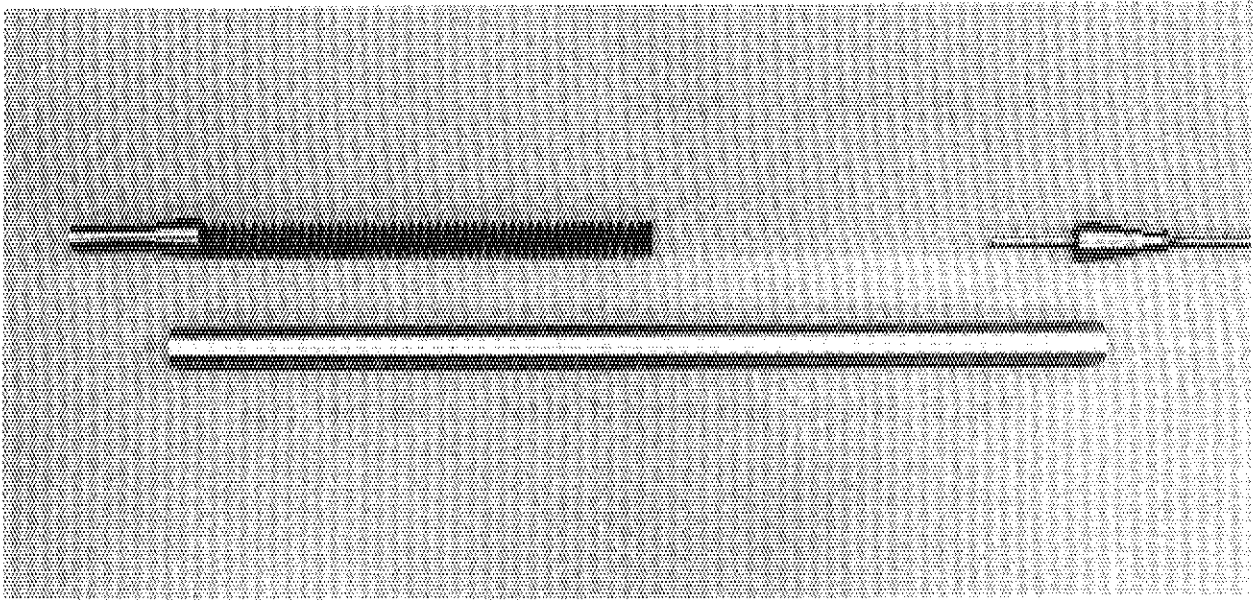
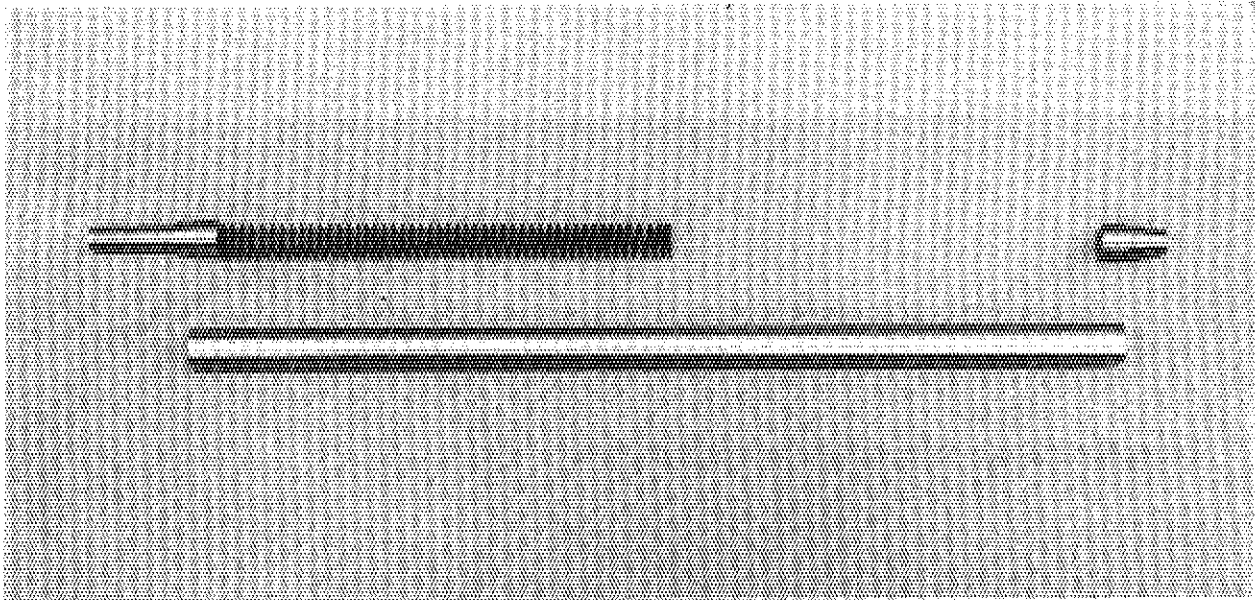


Fig. 8 External appearance of cladding tubes, upper and lower endplugs and springs

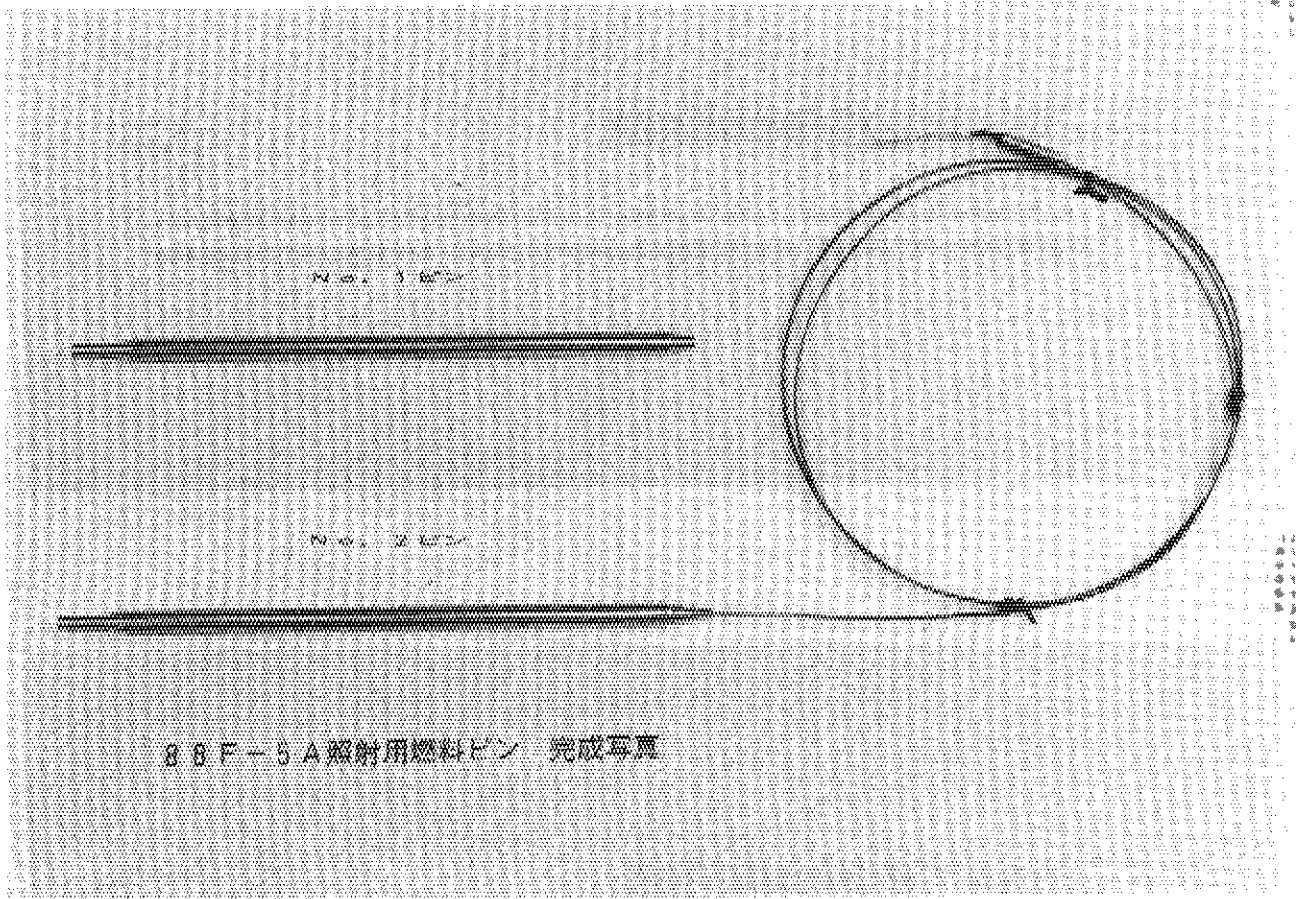


Fig. 9 External appearance of mixed nitride fuel pins

付録

88 F-5 A 照射キャプセル用ウラン・プルトニウム
混合窒化物燃料ピン検査要領書および検査記録

(抜 粋)

本検査要領書は、単品検査、組立前検査および燃料ピンの完成検査から構成されており、各検査の主要項目は次のとおりである。

1. 単品検査

- I UN断熱ペレット
- II (U, Pu) N燃料ペレット
- III 被覆管
- IV 上部および下部端栓
- V スプリング
- VI 熱電対

2. 組立前検査

- I (U, Pu) NおよびUNペレットのスタック長
- II (U, Pu) NおよびUNペレットの重量
- III 組立前写真

3. 燃料ピンの完成検査

- I 外観検査
- II 寸法検査
- III 重量検査
- IV 真直度検査
- V 溶接部およびロー付け部検査
- VI Heリーク試験
- VII 表面汚染検査
- VIII 組立後写真
- IX 組立後の放射線透過検査

1. 単品検査

無計装 (U, Pu) N燃料ピンをNo. 1と称す。

燃料中心温度測定用熱電対付き (U, Pu) N燃料ピンをNo. 2と称す。

I UN断熱ペレット

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 組成検査 (1) U濃縮度 (2) N/U比 (3) 不純物分析 (4) 高温放出ガスの定量 (5) 燃料物質1g中のU量	天然ウラン 1.0 ± 0.1 500 μl/g 以下	改良型デューマ法 高固液加熱電量法および 不活性ガス溶融電量法 高温真空抽出法 分析値より計算	測定値記載 0.01 " 100ppm " 1 μl/g " 0.01g	炭素および酸素のみ分析 at 1400 °C
2. 寸法検査 (1) 外径 (2) 高さ (3) 中心孔径 (4) 重量 (5) 密度 (6) 外觀	No. 1ピン、8.18 ± 0.01mm No. 2ピン、8.23 ± 0.01mm 8.0 ± 0.2mm 2.0 + 0.2 - 0mm 80~90 %T.D. 表面に有害な割れ、傷等のない こと 表面に有害な付着物が無いこと	マイクロメータ ノギス " 直示天秤法 寸法重量法 目視、外觀写真	測定値記載 0.01mm " 0.05mm " 0.05mm " 0.01g " 0.1%T.D. 写真提出、良否	No. 2ピンには中心孔2φ を有するペレット1個を 含む
3. 重量検査 ウラン		直示天秤法およびN/U 比より算出	測定値記載 0.01g	

II (U, Pu) N燃料ペレット

項 目	品 質 規 格	試験検査方法	表 示	備 考
1. 組成検査 (1)製法 (2)U濃縮度 (3)N/(U+Pu)比 (4)Pu/(U+Pu)比 (5)Pu同位体比 (6)不純物分析 (7)高温放出ガスの定量 (8)燃料物質1g中のUおよびPu量	焼結法 天然ウラン 1.0 ± 0.1 0.20 ± 0.01 _____ _____ 500 μl/g 以下 _____	_____ _____ 改良型デューマ法 電位差滴定法 質量分析法 高周波加熱電量法および 不活性ガス溶融電量法 高温真空抽出法 分析値より計算	測定値記載 0.01 " " 0.01 " " 0.1at.% " " 100ppm " " 1 μl/g " " 0.01g	1989年3月現在の値 炭素および酸素のみ分析 at 1400 °C
2. 寸法検査 (1)外径 (2)高さ (3)中心孔径 (4)重量 (5)密度 (6)外觀	No.1ピン、8.18 ± 0.01mm No.2ピン、8.23 ± 0.01mm 8.0 ± 0.2mm 2.0 + 0.2 - 0mm _____ 80~85 %T.D. 表面に有害な割れ、傷等のない こと 表面に有害な付着物が無いこと	マイクロメータ ノギス " " 直示天秤法 寸法重量法 目視、外觀写真	測定値記載 0.01mm " " 0.05mm " " 0.05mm " " 0.01g " " 0.1%T.D. 写真提出、良否	長調整のため、 規格値外の寸法のベレッ トを含む No.2ピンには中心孔2φ を有するベレット2個を 含む
3. 重量検査 (1)ウラン (2)プルトニウム	_____ _____	直示天秤法およびN/U (N/U+Pu)比より算出	測定値記載 0.01g " " 0.01g	
4. 組織検査	_____	光学顕微鏡	写真提出	

III 被覆管

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 素材組成および材料試験	SUS-316相当	ミルシート確認	ミルシート提出、合否	
2. 寸法検査 (1) 外径 (2) 内径 (3) 肉厚 (4) 長さ	9.40±0.02mmφ 8.38±0.02mmφ 0.51±0.02mm 215±0.1mm	マイクロメータ " " ノギス	測定値記載 0.01mm " " " " 0.1mm	外径、内径、肉厚ともに管口部両端のみ 外径、内径は90° 2方向 肉厚は両端の4方向
3. 重量検査	—	直示天秤法	測定値記載 0.01g	
4. 外観検査	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	良否	
5. 欠陥検査	欠陥が肉厚の10%以下であること	渦電流探傷法	試験成績書提出、合否	
6. 真直度検査	全長に対して0.3mm以内であること	定盤基準法	測定値記載 0.01mm	

IV 上部および下部端栓

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 素材組成および材料試験	SUS-316相当	ミルシート確認	ミルシート提出、合否	
2. 寸法検査	図面記載通り	マイクロメータまたはノギス	測定値記載 0.01mmまたは0.1mm	
3. 重量検査	—	直示天秤法	測定値記載 0.01g	
4. 外観検査	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	良否	
5. 欠陥検査	有害な欠陥が認められないこと	カラーチェック	合否	

V スプリング

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 素材組成および材料試験	インコネルX 相当	ミルシート確認	ミルシート提出、合否	
2. 寸法検査 (1) コイル外径 (2) 線径 (3) 有効巻数 (4) 自由長 (5) パネ定数	8.0 ± 0.1mm φ 0.8mm φ 48 104 ± 1 mm 0.024 kg/mm	ノギス ノギス 計算による	測定値記載 0.1mm 測定値記載 1mm 計算値記載	パネ定数の値 $K(kg/mm) = \frac{G \cdot n \cdot D^3}{8 \cdot n \cdot D^3}$ G: 横弾性係数 (インコネルXは7500kg/mm ²) d: コイル線径 n: 有効巻数 D: コイル中心径
3. 重量検査	—	直示天秤法	測定値記載 0.01g	

VI 熱電対

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 素材組成および材料試験	W-5Re, W-26Re (T.C.) Nb-1Zr (シース材)	ミルシート確認	ミルシート提出、合否	
2. 寸法検査 外径	1.6 ± 0.1mm	マイクロメータ	測定値記載 0.01mm	先端から30mmの位置で 90° 2 方向
3. 外観	表面は精浄であること 有害な欠陥が認められないこと	目視	良否	
4. 導通・絶縁検査 (1) 導通 (2) 絶縁	10MΩ以上	抵抗測定	測定値記載 1 Ω 1 MΩ	
5. 欠陥検査	有害な欠陥が認められないこと	放射線透過法	X線フィルム提出、合否	
6. 重量検査	—	直示天秤法	測定値記載 1g	

2. 組立前検査

I ベレットスタック長

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. (U, Pu) N燃料ベレット スタック長	100 ± 1mm	ノギス	測定値記載 0.1 mm	
2. 全スタック長 (断熱UNベレットを含む)	116 ± 1mm	"	"	

II ベレット重量

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. ウラン	—	直示天秤法およびN/U、 N/U+Pu比より算出	測定値記載 0.01g "	
2. プルトニウム	—			

III 組立前写真

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
構成部材写真	寸法判別可能	写真撮影	写真提出	キャビネ版

3. 燃料ピンの完成検査

I 外觀検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
組立後外觀	表面に欠陥がないこと 充分に清浄であること 溶接部およびロー付け部に有害な割れ、傷等がないこと 溶接部のピード幅、高さ等が不均一でないこと 溶接部にアンダーカット等で有害なものがないこと	目視	良否	

II 寸法検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
組立後寸法 (1)全長	No.1ピン 250 ± 1mm No.2ピン 256 ± 1mm 9.40 ± 0.02mm	ノギス	測定値記載 0.1mm	
(2)被覆管外径		マイクロメータ	" 0.01mm	ピード幅の最大値と最小値を測定
(3)ピード幅		ノギス	" 0.1mm	ピードを含む直径4ヶ所の最大値と最小値を測定
(4)ピード高さ		マイクロメータ	" 0.01mm	

Ⅲ 重量検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
全重量	—	直示天秤法	測定値記載 0.1g	

Ⅳ 真直度検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
組立後真直度	全長に対して0.3mm 以内であること	定盤基準法	測定値記載 0.01mm	

Ⅴ 溶接部およびロー付け部検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 外観検査	溶接部およびロー付け部に有害な割れ、傷等がないこと 異常な着色が認められないこと	目視	良否	
2. 欠陥検査 (1) 溶接部 (2) ロー付け部	JISZ3106に準じ、溶接部の欠陥が肉厚の10% 以下であること 有害な欠陥が認められないこと	放射線透過法 "	X線フィルム提出、合否 X線フィルム提出、合否	

VI Heリーク試験

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
Heリーク試験	3×10^{-8} atm. cc/s 以下	吹きつけ法およびベルジャーク法	測定値記載	

VII 表面汚染検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
表面汚染度	20dpm/100cm ² 以下	スマア法	測定値記載	

VIII 組立後写真

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
燃料ピンの写真	—	写真撮影	写真提出	キャビネ版

IX 組立後の放射線透過検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
全体放射線透過	内部構造に異常が認められな いこと	放射線透過法	X線フィルム提出、合否	

燃料ペレット検査シート 1

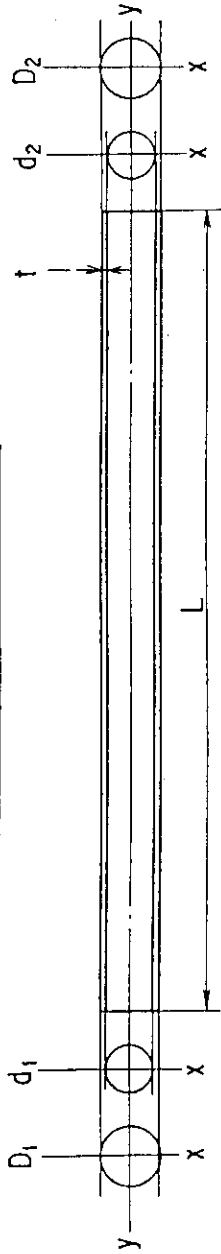
項目	No.1燃料ピン装荷ペレット		No.2燃料ピン装荷ペレット		
	UN	(U,Pu)N	UN	(U,Pu)N	
製法	焼結法		焼結法		
U濃縮度	天然ウラン		天然ウラン		
N/U比	0.99	—	0.99	—	
N/(U+Pu)比	—	1.00	—	1.00	
Pu/(U+Pu)比	—	0.20	—	0.20	
Pu同位体比	—	238:0.1 241:2.2 239:76.3 242:0.7 240:20.7 (wt.%)	—	238:0.1 241:2.2 239:76.3 242:0.7 240:20.7 (wt.%)	
不純物分析	炭素 1400ppm 酸素 3500ppm	炭素 2000ppm 酸素 1200ppm	炭素 1400ppm 酸素 3500ppm	炭素 2000ppm 酸素 1200ppm	
高温放出ガス量	35 μ l/g	82 μ l/g	35 μ l/g	82 μ l/g	
燃料物質1g中のU およびPu量	U: 0.941 g	U: 0.753 g Pu: 0.188 g	U: 0.941 g	U: 0.753 g Pu: 0.188 g	
重 量	ペレット	10.21 g	62.40 g	10.08 g	62.56 g
	ウラン	9.61 g	46.99 g	9.49 g	47.11 g
	プルトニウム	—	11.73 g	—	11.76 g
(U,Pu)N スタック長	—	100.00 mm	—	99.85 mm	
全スタック長	115.85 mm		116.00 mm		

燃料ペレット検査シート 2

No.1 燃料ピン															
	UN	MN 2	MN 3	MN 4	MN 5	MN 6	MN 7	MN 8	MN 9	MN 10	MN 11	MN 12	MN 13	MN 14	UN 15
配置順	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
外観	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
外径 (mm)	8.17	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18
高さ (mm)	7.98	4.20	6.21	8.09	8.18	8.08	8.11	8.13	8.14	8.14	8.19	8.16	8.12	8.22	7.96
重量 (g)	5.10	2.66	3.84	5.11	5.09	5.09	5.07	5.08	5.07	5.08	5.08	5.08	5.09	5.06	5.11
密度 (%TD)	85.2	84.4	82.4	84.0	82.8	83.9	83.2	83.2	82.9	83.3	82.6	82.9	83.4	81.9	85.5

No.2 燃料ピン															
	UN	MN 2	MN 3	MN 4	MN 5	MN 6	MN 7	MN 8	MN 9	MN 10	MN 11	MN 12	MN 13	MN 14	UN 15
配置順	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
外観	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
外径 (mm)	8.23	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22	8.22
高さ (mm)	8.07	4.10	6.80	8.15	8.16	8.13	8.14	8.15	8.16	8.07	8.04	8.20	7.98	8.15	8.01
中心孔径 (mm)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	2.0	2.0
重量 (g)	5.27	2.60	4.26	5.11	5.10	5.11	5.13	5.15	5.15	5.16	5.10	5.15	4.77	4.77	4.81
密度 (%TD)	85.8	83.5	82.6	82.5	82.3	82.9	83.0	83.2	83.1	84.2	83.7	82.7	82.8	82.8	85.5

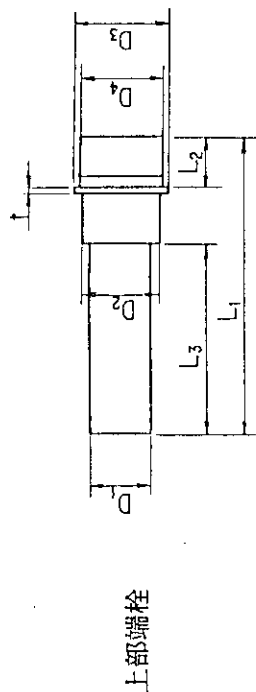
被覆管検査シート



単位: mm

No.	素材組成 および 材料試験		D_1	d_1	d_2	t	L	重量 (g)	外観	欠陥 検査	真直度
	x	y									
1	x	9.40 ± 0.02	8.38 ± 0.02	8.37	8.37	0.51 ± 0.02	215.0 ± 0.1	24.38	良	合	0.02 — 215
	y	9.39	8.37	8.37	0.51	215.1					
2	x	9.39	8.37	8.38	8.37	0.51	215.0	24.38	良	合	0.01 — 215
	y	9.40	8.37	8.37	0.51	215.1					
3	x	9.39	8.37	8.37	8.37	0.51	215.0	24.38	良	合	0.01 — 215
	y	9.39	8.38	8.38	0.51	215.0					
4	x	9.39	8.38	8.38	8.38	0.51	215.0	24.38	良	合	0.02 — 215
	y	9.39	8.38	8.38	0.51	215.0					
5	x	9.39	8.38	8.38	8.38	0.51	215.0	24.39	良	合	0.01 — 215
	y	9.39	8.38	8.38	0.51	215.0					
6	x	9.39	8.38	8.38	8.38	0.51	215.0	24.38	良	合	0.01 — 215
	y	9.39	8.38	8.38	0.51	215.0					

端栓検査シート



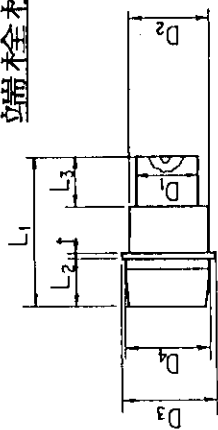
上部端栓

単位: mm

No.	素材組成 および 材料試験	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	L ₁	L ₂	L ₃	t	重量 (g)	外観	欠陥 検査
		6.0+0 -0.05	7.6 ±0.05	8.8 ±0.02	8.38-0 +0.02	30 ±0.2	5.0 ±0.2	20 ±0.2	0.4 ±0.05			
No.2ピン	合	6.00	7.61	8.79	8.38	30.1	5.0	20.0	0.39	8.52	良	合
	合	5.99	7.61	8.81	8.38	30.1	5.0	20.0	-0.41	8.51	良	合
No.1ピン	合	5.99	7.61	8.81	8.38	30.1	5.1	20.1	0.42	8.51	良	合
	合	5.99	7.60	8.80	8.38	30.1	4.9	20.1	0.41	8.51	良	合
	合	6.00	7.61	8.81	8.39	30.1	5.0	20.1	0.41	8.51	良	合
	合	6.00	7.62	8.81	8.39	30.1	5.1	20.2	0.41	8.51	良	合

端栓検査シート (続き)

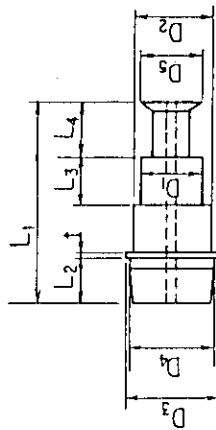
下部端栓 (No.1燃料ピン用)



単位: mm

No.	素材組成 および 材料試験	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	L ₁	L ₂	L ₃	t	重量 (g)	外観	欠陥 検査
		6.0+0 -0.05	7.6 ±0.05	8.8 ±0.02	8.38-0 +0.02	15 ±0.2	5.0 ±0.2	5.0 ±0.2	0.4 ±0.05				
1	合	6.00	7.60	8.82	8.38	15.1	5.2	5.0	0.41	5.20	良	合	
2	合	6.00	7.60	8.81	8.38	15.1	5.2	4.9	0.41	5.20	良	合	
3	合	6.00	7.60	8.80	8.38	15.1	5.2	4.9	0.41	5.20	良	合	

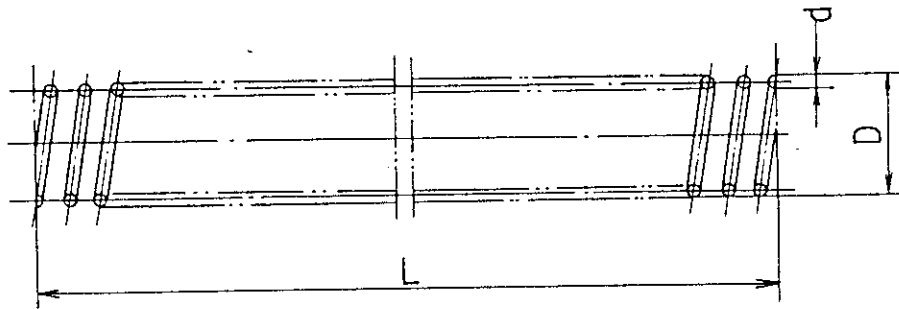
下部端栓 (No.2燃料ピン用)



単位: mm

No.	素材組成 および 材料試験	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	t	重量 (g)	外観	欠陥 検査
		6.0+0 -0.05	7.6 ±0.05	8.8 ±0.02	8.38-0 +0.02	5.8 ±0.1	21 ±0.2	5.0 ±0.2	5.0 ±0.2	6.0 ±0.2	0.4 ±0.05			
1	合	6.00	7.60	8.81	8.39	5.75	21.0	5.1	5.0	6.0	0.41	5.29	良	合
2	合	6.00	7.60	8.81	8.39	5.80	21.0	5.1	5.0	6.0	0.41	5.29	良	合
3	合	6.00	7.60	8.80	8.39	5.80	21.0	5.0	5.0	6.0	0.40	5.29	良	合

スプリング検査シート



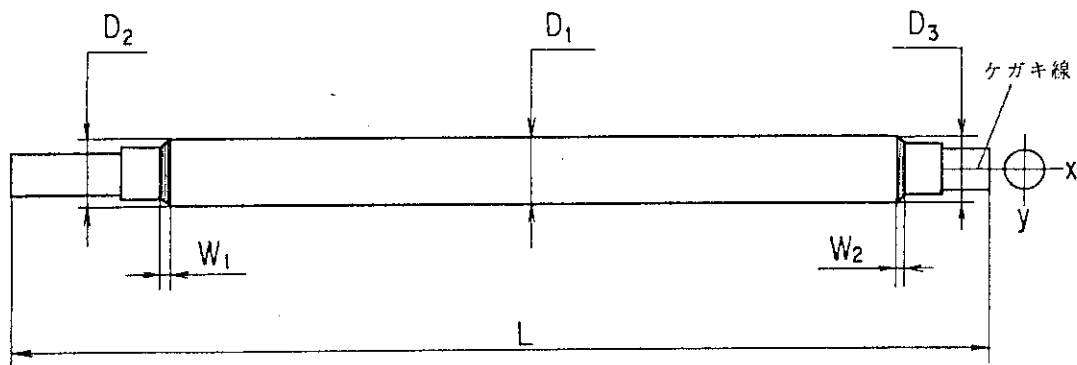
項目	規格	No.1燃料ピン用	No.2燃料ピン用
素材組成および 材料試験	インコネル X	合	合
コイル外径 (D)	8.0 ± 0.1mm φ	8.0	8.0
線径 (d)	0.8 mm φ	0.8	0.8
有効巻数	48	48	48
自由長 (L)	104 ± 1 mm	103.9	104.1
バネ定数	—	0.024kg/mm	
重量 (g)	—	4.74	4.75

熱電対検査シート

項目	規格	No.2燃料ピン用
素材組成および 材料試験	W-5Re, W-26Re (T.C.) Nb-1Zr (シース材)	合
外径	1.6 ± 0.1mm	1.58 1.57
外観	————	良
導通	————	63 Ω
絶縁	10 MΩ以上	20 MΩ
欠陥検査	有害な欠陥が認められ ないこと	合
重量 (g)	————	138

燃料ピンの完成検査シート 1

No. 1 燃料ピン



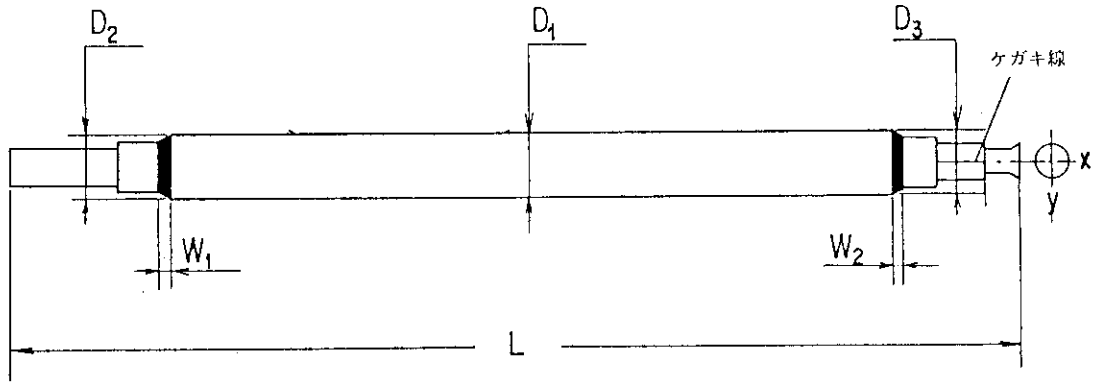
単位：mm

		外 観	L	D_1	D_2	D_3	W_1	W_2	重 量
			250 ± 1	9.40 ± 0.02	—	—	—	—	(g)
No. 1	x	良	249.8	9.40	9.45	9.44	1.4	1.0	115.38
	y			9.40	9.44	9.44	1.4	1.0	

真 直 度	溶 接 部 検 査				Heリーク試験 (atm.cc/s)		表 面 汚染度 (dpm)	燃 料 ピ ン 写 真	全 体 放 射 線 透 過
	上部端栓部		下部端栓部		上部端 栓部	下部端 栓部			
	外 観	X 線	外 観	X 線					
$\frac{0.06}{250}$	良	合	良	合	2.5×10^{-9}	2.0×10^{-9}	20	別 添	合

燃料ピンの完成検査シート 2

No. 2燃料ピン



単位：mm

		外 観	L	D_1	D_2	D_3	W_1	W_2	重 量	真直度
			256 ± 1	9.40 ± 0.02	—	—	—	—	(g)	
No. 2	x	良	256.0	9.40	9.47	9.49	1.4	1.3	148.03	0.03
	y			9.40	9.46	9.49	1.4	1.3		256

溶接部およびロー付け部検査						Heリーク試験		表 面 汚染度	燃 料 ピ ン 写 真	全 体 放射線 透 過
上部端栓部		下部端栓部		ロー付け部		(atm.cc/s)				
外 観	X 線	外 観	X 線	外 観	X 線	上 部 端栓部	下 部 端栓部	(dpm)		
良	合	良	合	良	合	2.5×10^{-9}	2.0×10^{-9}	20	別 添	合