

JAERI-Research

2005-027



JP0550532



JMTR照射用イナートマトリックス含有窒化物燃料ピンの製作

2005年9月

中島 邦久・岩井 孝・菊地 啓修・芹沢 弘幸・荒井 康夫

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

JMTR 照射用イナートマトリックス含有窒化物燃料ピンの製作

日本原子力研究所東海研究所エネルギー・システム研究部
中島 邦久・岩井 孝・菊地 啓修・芹沢 弘幸・荒井 康夫

(2005年 8月 11日受理)

マイナーアクチノイド核変換用窒化物燃料の照射挙動把握に資するため、ZrN や TiN のようなイナート（不活性）マトリックスを含有し、マイナーアクチノイドをプルトニウムで模擬した JMTR 照射試験用燃料ピンを製作した。本報告書では、燃料ペレットの製造と確性試験結果ならびに燃料ピンの製作について記述する。イナートマトリックス含有窒化物燃料ピンの照射は、2002 年 5 月から 2004 年 11 月まで計 11 サイクル行われ、無事に終了した。

**Fabrication of Inert-matrix Nitride Fuel Pins
for the Irradiation Test at JMTR**

Kunihisa NAKAJIMA, Takashi IWAI, Hironobu KIKUCHI
Hiroyuki SERIZAWA and Yasuo ARAI

Department of Nuclear Energy System
(Oarai Site)
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 11, 2005)

Nitride fuel pins containing inert matrix such as ZrN and TiN were fabricated for the irradiation test at JMTR, aiming at understanding irradiation behavior of nitride fuel for transmutation of minor actinides. Minor actinides are surrogated by plutonium in the present fuel pin. This report describes the preparation and characterization of fuel pellets, and fabrication of fuel pins. The irradiation for 11 cycles from May 2002 to November 2004 at JMTR was completed without any failure of fuel pins.

Keywords: Inert Matrix, Nitride, Plutonium Nitride, Zirconium Nitride, Titanium Nitride, ADS, Irradiation Test, Fabrication, Fuel Pin

目 次

1.	はじめに	1
2.	燃料ピンの設計	2
2.1	燃料ピンの仕様	2
2.2	燃料ピンの構造	2
2.3	核熱計算	2
3.	燃料ペレットの製造	3
3.1	ペレット製造	3
3.1.1	(Zr,Pu)N ペレット	3
3.1.2	(TiN+PuN)ペレット	4
3.1.3	(U,Pu)N ペレット	4
3.2	確性試験結果	4
4.	燃料ピンの製作	6
4.1	燃料ピンの構成部材	6
4.2	燃料ピンの溶接	6
4.3	燃料ピンの検査	6
5.	あとがき	7
	謝辞	7
	参考文献	8
	付録	21

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	2
3 .	Fabrication of Fuel Pellets	3
3. 1	Fabrication of Pellets	3
3. 1. 1	(Zr,Pu)N Pellets	3
3. 1. 2	(TiN+PuN) Pellets	4
3. 1. 3	(U,Pu)N Pellets	4
3. 2	Characterization Tests	4
4 .	Fabrication of Fuel Pins	6
4. 1	Component Parts	6
4. 2	Welding of Fuel Pins	6
4. 3	Inspection of Fuel Pins	6
5 .	Summary	7
Acknowledgement		7
References		8
Appendix		21

Figures

- Fig. 1 Uranium-plutonium mixed nitride fuel pin for 01F-51A capsule
- Fig. 2 Inert matrix nitride fuel pin for 01F-51A capsule
- Fig. 3 Temperature distribution of the fuel pellets and the cladding tube of 01F-51A capsule as a function of linear power
- Fig. 4 Flow sheet of fabrication of $(Zr,Pu)N$ fuel pellets
- Fig. 5 External appearance of nitride fuel pellets
- Fig. 6 Flow sheet of fabrication of $(TiN+PuN)$ fuel pellets
- Fig. 7 Microstructure of $(U,Pu)N$, $(Zr,Pu)N$ and $(TiN+PuN)$ fuel pellets
- Fig. 8 External appearance of cladding tube, upper and lower endplugs, and spring
- Fig. 9 External appearance of No.1($(U,Pu)N$ fuel) and No.2($(Zr,Pu)N$ and $TiN+PuN$ fuel) pins
- Fig. 10 X-ray radiographs of fuel pins and endplugs

This is a blank page.

1. はじめに

使用済燃料の再処理に伴って発生する高レベル放射性廃棄物には、放射性毒性が強い長寿命のマイナーアクチノイド(MA; Np-237: 半減期約 210 万年、Am-241: 半減期約 433 年、Am-243: 半減期約 7000 年、Cm-245: 半減期約 8500 年、Cm-246: 半減期約 4730 年等)が含まれている。これらの核種を分離した上で非放射性の核種あるいはより寿命の短い核種に変換することができれば、高レベル放射性廃棄物の毒性を低減させるとともに、地層処分が必要とする超長期の隔離期間を著しく短縮することが可能になる。長寿命放射性核種を非放射性核種あるいは短寿命核種に変換する核変換処理には、原子炉を用いる方法と加速器を用いる方法が提案されており、窒化物は核変換用燃料の有望な候補物質である。具体的には、加速器駆動未臨界炉(ADS)用の燃料としてジルコニウム窒化物 ZrN をイナート(不活性)マトリックスに用いた $(MA, Pu, Zr)N$ ¹⁾やアクチノイド専焼炉(ABR)用の燃料として $(MA, U)N$ ²⁾などが提案されている。

窒化物燃料の特徴として、高融点、高熱伝導度、高重金属元素密度といった優れた熱特性や核特性のほか、MA 単窒化物の結晶構造はいずれも同じ岩塩(NaCl)型構造の立方晶で分子容も互いに接近している³⁾ことから相互固溶が期待できる点が挙げられる。そのため、種々の組成の MA 核変換用燃料に対して高い安全裕度を保ちながら高燃焼度を達成できるものと期待されている。原研では、核変換用窒化物燃料の燃料特性に注目し、1990 年代以降 MA 窒化物の調製や物性研究のほか、燃料ペレットの製造技術の確立を行ってきた⁴⁾。

しかし、これまでイナートマトリックス含有窒化物燃料の照射挙動についての報告は皆無であるため、その照射挙動把握を目的とした JMTR を用いたイナートマトリックス含有窒化物燃料の照射試験を計画した。イナートマトリックスには ZrN の他、優れた熱特性を有するチタン窒化物(TiN)を含むペレットについても照射試験に供することにした。なお、ZrN については PuN と全率固溶して $(Zr, Pu)N$ 固溶体を形成するが、TiN は PuN 中にほとんど固溶しないため、 $(TiN + PuN)$ は 2 相混合試料であることを意味する⁵⁾。本報告では、マイナーアクチノイドをプルトニウムで模擬した JMTR 照射試験用イナートマトリックス含有窒化物燃料ピンの製作について記述する。また、比較照射用に製作したウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピンについても併せて報告する。一方、海外でもイナートマトリックスに ZrN を用いた窒化物燃料の照射試験が開始されている^{6), 7)}。

2. 燃料ピンの設計

2.1 燃料ピンの仕様

被覆材には肉厚 0.51mm のオーステナイト系ステンレス鋼管を使用し、燃料ピンの外径は、これまでに JMTR で照射されたウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン^{8),9)}と同じく 9.40 mmとした。燃料ペレットと被覆管の間の直径ギャップについては、0.15 mmとしたため、燃料ペレットの外径寸法は、8.23 mmとなる。プルトニウム含有量については、(Zr,Pu)N、(TiN+PuN)ペレットとも全重量の 20 wt%、比較照射用の(U,Pu)N 燃料では、イナートマトリックス含有燃料ピンとの出力差を小さくするため、重金属元素の内の 15 at% (=Pu/U+Pu) とした。なお、用いたウランは天然ウランである。

(Zr,Pu)N、(TiN+PuN)ペレット密度として 85~90 %T.D. (T.D. : 理論密度)、燃料ピンスマニア密度として 80~85 %T.D. を目標とした。燃料ペレット製造にあたり、比較的密度の高い燃料マトリックス中にポアフォーマを用いて熱的に安定なポアを導入することでペレット密度を調整することとした。

照射試験用燃料ピンの基本設計仕様を Table1 に示す。

2.2 燃料ピンの構造

燃料ピンの概略構造、寸法等については、これまでに行ったウラン・プルトニウム混合窒化物燃料照射試験の場合と基本的に同様である⁹⁾。断熱ペレットを合わせた燃料スタック長は 96 mm として、両端及び(Zr,Pu)N ペレットと(TiN+PuN)ペレットとの間に、断熱用 UN ペレットを配置する。一方、比較照射用の(U,Pu)N 燃料ピンの燃料スタック長も断熱ペレットを合わせて 96 mm とした。燃料ピンの全長は 230 mm であり、2 本の燃料ピンの下部端栓を相互に突きあわせる形で 1 体の照射キャップセルに組み立てられる。燃料ピンの概略構造を Fig.1 および Fig.2 に示す。

2.3 核熱計算

今回製作した照射用燃料ピンは、照射キャップセルに組込まれた後、JMTR の照射孔（第 145, 146 サイクルが L-3、第 147 サイクル～第 155 サイクルまで G-3）に装填され、平成 14 年 5 月から照射が開始された（キャップセル名：01F-51A）。GENGTC コードを用いて評価した燃料ピンの線出力とキャップセル各部材温度との関係を Fig.3 に示す。キャップセルは内側より順次、燃料ピン、He 熱媒体、SUS304-Al 共引き管を使用した内筒、Al 製（A1050）外筒が配置される。照射孔での中性子束条件から本燃料ピンの線出力は、目標値として設定した 350~400 W/cm になり、初期燃料中心温度は約 1070~1270 K、SUS316 被覆管の温度は約 570 K になることが推定された。

3. 燃料ペレットの製造

3.1 ペレット製造

3.1.1 (Zr,Pu)N ペレット

(Zr,Pu)N 燃料ペレットの製造では、ZrN および PuN 粉末の混合物を N₂-8%H₂ 混合ガス気流中で加熱することによって固溶体を調製し、その粉末を成型・焼結によって燃料ペレットとした⁵⁾。燃料ペレットの製造フローの概略を Fig.4 に示す。今回使用した ZrN 粉末は、レアメタリック社製の市販品であり、純度 99.5%、粒径 3~6 μm である。一方、PuN 粉末は、炭素熱還元により PuO₂ から調製した PuN を乳鉢で粉碎したもの用いた。なお、炭素熱還元による PuN の調製条件は、これまでに報告されている⁹⁾。

ZrN と PuN の固溶体調製には、ジルコニア製のボール (10 mm φ、仕込量~300 g) およびジルコニア製転動式ボールミルポット (内容積 400 cc) を用いて 10 時間粉碎混合、240 MPa 成型、N₂-8%H₂ 混合ガス気流中 1673 K、9 時間の加熱といった一連のプロセスを繰り返して行った。X 線回折測定による回折パターンから、このプロセスを 3 回繰返すことほぼ固溶体化が完了することを確認した。焼結用微粉末を得るために、得られたブロック状の(Zr,Pu)N 固溶体を、同じジルコニア製のボールおよびボールミルポットを用いて 190 時間粉碎した。なお、この時のボール対試料重量比は約 10 : 1 である。焼結特性を確認するために本焼結の前に試焼結を行い、その密度測定結果から 85~90 %T.D. のペレットを得るために必要なポアフォーマの添加量を求めた。今回の燃料ペレットに用いたポアフォーマは、粒径 10~20 μm のワックス系高分子化合物である。窒化物粉末とポアフォーマを混合した後、油圧プレスによって 190 MPa の成型圧力でグリーンペレットとした。ポアフォーマを添加することより十分に流動性のある粉末が得られたため、成型にあたってバインダーは使用しなかった。ペレットの焼結は、Ar-8%H₂ 混合ガス気流中、2000 K で行った。ただし、ポアフォーマを蒸発させるために昇温途中において約 800 K で 2 時間の温度保持を行ったほか、昇温および降温時には、Ar-8%H₂ 混合ガスに代り純 Ar ガスを用いた。焼結温度での保持時間は 5 時間とした。次に、燃料ペレットの N/(Zr+Pu) 比調整の目的で N₂-8%H₂ 混合ガス気流中 1673 K で 9 時間の熱処理を行った後、外径を 8.23 mm に調整するため、空気雰囲気グローブボックス内に格納されているセンタレス・グラインダを用いて円周研削を行った。センタレス・グラインダの研削精度は ±0.001 mm である。円周研削後、アセトン中で超音波洗浄を施し、さらに真空中で 1473 K に加熱することによって脱脂乾燥した。あらかじめ調整した高さの異なるペレットを用いてスタック

長調整を行った。燃料ペレットスタックの外観写真を Fig.5 に示す。断熱用の UN ペレットについては、過去の照射試験用に調製した断熱ペレットを使用した。

3.1.2 (TiN+PuN)ペレット

(TiN+PuN)ペレットの製造についても、(Zr,Pu)N ペレットの場合と同様に炭素熱還元によって調製した PuN および市販の TiN 粉末の混合物を成型・焼結することによって燃料ペレットとした。燃料ペレットの製造フローの概略を Fig.6 に示した。燃料製造に用いた TiN 粉末は、レアメタリック社製で、純度 99.5%、ZrN の原料粉末よりも小さい粒径 ($1 \sim 2 \mu\text{m}$) の市販品である。(TiN+PuN)ペレット焼結用の微粉末を得るために、ボールミルによる粉碎混合を行った。ボールミル条件としては、ジルコニア製のボール (10mm φ、仕込量～500 g) およびジルコニア製転動式ボールミルポット (内容積 400 cc) を用いて 49 時間粉碎混合した。この時のボール対試料重量比は約 25 : 1 である。得られた窒化物粉末の焼結特性を確認するために本焼結の前に試焼結を行い、その密度測定結果から 85～90 %T.D. のペレットを得るために必要なポアフォーマの添加量を求めた。窒化物粉末とポアフォーマを混合した後、油圧プレスによって 200 MPa の成型圧力でグリーンペレットとした。この場合もバインダーは使用せず、焼結についても (Pu,Zr)N ペレットと同条件で行った。次に、燃料ペレットの N/(Ti+Pu)比調整の目的で N₂-8%H₂ 混合ガス気流中 1673K で 9 時間の熱処理を行った後、センタレス・グラインダを用いてペレットの円周研削を行った。超音波洗浄を施した後、真空中で 1473K に加熱することによって脱脂乾燥した。スタック長調整を行った後の燃料ペレットの外観写真を Fig.5 に示した。

3.1.3 (U,Pu)N ペレット

比較照射用の(U,Pu)N 燃料ペレットの製造では、従来同様に UO₂、PuO₂ および黒鉛粉末混合物を N₂-8%H₂ 混合ガス気流中で加熱することによって混合窒化物を調製し、その粉末を成型・焼結を経て燃料ペレットとした。さらに円周研削を行い燃料ペレットの外周を調整した。これらについて既に報告されている⁹⁾。

3.2 確性試験結果

製造した燃料ペレットについて、外観検査、寸法測定、重量測定、窒素定量¹⁰⁾、酸素及び炭素不純物量の定量^{11),12)}、X 線回折（相同定、格子定数）、断面組織観察および高温放出ガス定量¹³⁾を行った。これらの結果を Table 2 にまとめて示す。

燃料ペレットの密度については、寸法測定から求めた容積と重量測定の結果から計算した。(Zr,Pu)N、(TiN+PuN)ペレットの密度はそれぞれ、90.0 %T.D.、86.7 %T.D. であり、イナートマトリクス含有燃料ピンのスミア密度はそれぞれ、

86.5 %T.D.、83.3 %T.D.であり、ピン全体では平均すると 84.9 %T.D.となった。一方、比較照射用の(U,Pu)N ペレットの密度は 79.6 %T.D.であり、これは設計仕様よりも低い値であった。原因としては後述する不純物炭素の混入が考えられる。このため、燃料ピンのスミア密度も低く 76.5 %T.D.となった。

X 線回折による(Zr,Pu)N、(TiN+PuN)ペレットの相同定では、ごく微量の酸化物相の存在を除くと单窒化物相であることが確認された。单窒化物相の格子定数の値については、過去に報告された文献値とほぼ同様の傾向が得られた⁵⁾。すなわち、(Zr,Pu)N の格子定数は Vegard 則を用いて ZrN と PuN の格子定数から推定した結果とほぼ一致し、TiN+PuN 中の 2 相の格子定数は TiN および PuN の格子定数の報告値とほぼ一致した。(Zr,Pu)N および(TiN+PuN)ペレット中に含まれる酸素および炭素不純物の量については、O/M および C/M 比で比較するとこれまでに行つた(U,Pu)N 燃料の照射試験と同程度の値を示している^{8),9)}。一方、窒素含有量については、(Zr,Pu)N がほぼ化学量論組成に近い値が得られたのに対し、(TiN+PuN)では、大きく亜化学量論組成側にずれている。Ti-N 系二元状態図に示されている TiN は、ZrN や PuN の場合と比較し亜化学量論組成側に広い単相領域を有している^{14),15)}ことからペレット焼結時あるいは真空加熱による脱脂乾燥時に化学量論組成からのズレが生じたものと考えられる。また、今回調製した(U,Pu)N ペレットでは、燃料調製時に不純物炭素が混入して炭素含有量が多いのに対し窒素含有量が少ないので特徴である。このため格子定数も高い値を示している。

燃料微細組織は、研磨したペレットを、(Zr,Pu)N の場合は乳酸 30 cc、硝酸 10 cc、フッ酸 0.1 cc の混合溶液、また、(TiN+PuN)の場合は乳酸 30 cc、硝酸 10 cc、フッ酸 0.4 cc の混合溶液を用いた化学エッチングを施した上で光学顕微鏡を用いて観察した。Fig. 7 には各ペレット断面の金相写真を示す。結晶粒径は、(U,Pu)N ペレットよりも(Zr,Pu)N ペレットや(TiN+PuN)ペレットで小さくなっており、出発原料に用いた ZrN や TiN 粉末の大きさ（数ミクロン）とほぼ同程度であった。

燃料中ペレットからの高温放出ガスについては、真空中で 1673K で加熱して放出ガスをガスクロマトグラフで定量した。(U,Pu)N、(Zr,Pu)N および(TiN+PuN)の放出ガス量は、それぞれ約 $80 \mu\ell \cdot \text{atm}$ (30 分)、約 $100 \mu\ell \cdot \text{atm}$ (30 分) および約 $250 \mu\ell \cdot \text{atm}$ (30 分) であり、(TiN+PuN)については、他と比べて 2 倍以上の値となっている。この点については、前述した(TiN+PuN)の N/M 比が 1 より小さくなっていることと考え合わせると、測定中に燃料から窒素が放出されていることが示唆される。

4. 燃料ピンの製作

4.1 燃料ピンの構成部材

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。被覆管は外径 9.40 mm、内径 8.38 mm の 20% 冷間加工の 316 相当ステンレス鋼である。使用に先立ち被覆管の渦電流探傷試験を行い、無欠陥であることを確認した。上下部端栓は SUS316L 鋼丸棒を加工して製作した。上部端栓の構造はホットラボにおける照射後試験の作業性も考慮して決定した。スプリングはインコネル-X750 製で、その自由長は 104 mm であるが、装荷時には 89 mm に圧縮されて、5.875 N の力で燃料ペレットなどを押しつける。このスプリングの押付荷重によりピン内のペレットを所定の位置に十分保持できるようにしている。

4.2 燃料ピンの溶接

被覆管と上下部端栓の溶接は TIG 溶接法で行った^{8),9)}。最初に下部端栓を溶接して、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、燃料ペレット等の部材の充填および上部端栓の溶接を行なった。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、さらに上部端栓を圧入した。溶接時の雰囲気条件は、酸素濃度 5 ppm、水分露点 -50°C 以下の条件が確保されている。また、燃料ペレット挿入時には、被覆管に管ロマスクを装着し、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¹⁶⁾。今回製作した 2 本の燃料ピンの外観写真を Fig.9 に示す。

4.3 燃料ピンの検査

燃料ピンの完成検査としては、外観検査、寸法検査、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観察されなかった。そのほか、燃料ピン外観について有害な傷、欠陥等は認められなかった。燃料ピンの真直度は、全長に対して 0.01 mm 以内であった。

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表面汚染密度（アルファ放射能）を測定したが、有意の汚染は認められなかった。また、ヘリウムリーク検査では、漏洩率は $3.9 \times 10^{-9} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 以下であり、十分に基準値を満たしていることを確認した。また、燃料ピン全体および端栓溶接部については、材料試験炉部検査技術課の協力を仰いで X 線透過試験を実施した。2 本の燃料ピンの X 線透過写真を Fig.10 に示す。なお、各検査の要領および検査結果の詳細については、付録にまとめて示した。

5. あとがき

今回製作したイナートマトリックス含有窒化物燃料ピン及び比較照射用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピンは01F-51Aキャップセルに組込まれ、平成14年5月からJMTRにおいて照射が開始された。JMTRでの計11サイクルの照射は関係課室の協力を得て平成16年11月に無事終了し、現在は照射後試験が行われている。今後はイナートマトリックス含有窒化物燃料の高速実験炉「常陽」における照射試験も計画されている。これらの照射試験を通じてMA核変換用窒化物燃料の照射健全性が実証され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計画課、照射第1課ならびに検査技術課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。特にキャップセル設計等について助言、助力を頂いた雨澤博男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岩村公道エネルギーシステム研究部長および長谷川明エネルギーシステム研究部次長に厚くお礼申上げる。

参考文献

1. 西原健司、"階層型核変換システムにおけるMAの蓄積と核変換のマスバランス"、JAERI-RESEARCH 99-074 (2000).
2. 向山武彦、"マイナーアクチノイド専焼炉の設計研究"、「消滅処理研究の現状」日本原子力学会 p.21-28 (1994).
3. Haire, R.G., "PREPARATION, PROPERTIES, AND SOME RECENT STUDIES OF ACTINIDE METALS", J. Less-Common Metals 121, 379 (1986).
4. Minato, K., Akabori, M., Takano, M., Arai, Y., Nakajima, K., Itoh, A., Ogawa, T., "Fabrication of nitride fuels for transmutation of minor actinides", J. Nucl. Mater., 320, 18-24 (2003).
5. Arai, Y. and Nakajima, K., "Preparation and characterization of PuN pellets containing ZrN and TiN", J. Nucl. Mater., 281, 244-247 (2000).
6. Meyer, M.K., et al., "Development and Testing of Metallic Fuels with High Minor Actinide Content", 11 th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, JAPAN, April 20-23, 2003, ICONE11-36499(CD-ROM).
7. Mayorshin, A.A., et al., "Irradiation of oxide and nitride fuels and also fuel in the inert matrix with high plutonium content in the BOR-60 reactor. Status of Russian-French experiment "BORA-BORA".", Global 2003 New Orleans, LA November 16-20, 2003 p.1989 (CD-ROM).
8. 鈴木康文他、"第1回 JMTR 照射試験用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン(88F-5A)の製作"、JAERI-M 90-116 (1990).
9. 鈴木康文他、"第2回 JMTR 照射試験用ウラン・プルトニウム混合窒化物燃料ピン(89F-3A)の製作"、JAERI-M 91-078 (1991).
10. Handa, M., Shiozawa, K., Iwai, T., Arai, Y., "Determination of Nitrogen in UN, PuN and (U,Pu)N by Oxydation and Gas Chromatographic Measurement of Combustion Gases", Anal. Chimica Acta, 239, 107 (1990).
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. Massalski, T. B.(Ed.), Binary Alloy Phase Diagrams, vol.2, American Society for Metals, Metal Parks, OH, 1987, p.1655, p.1660.
15. Matzke, Hj., Science of Advanced LMFBR Fuels, North-Holland, Amsterdam, 1986, p.66.
16. 笹山龍雄他、"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).

Table 1 Design parameters of (U,Pu)N and inert matrix nitride fuel pins for irradiation

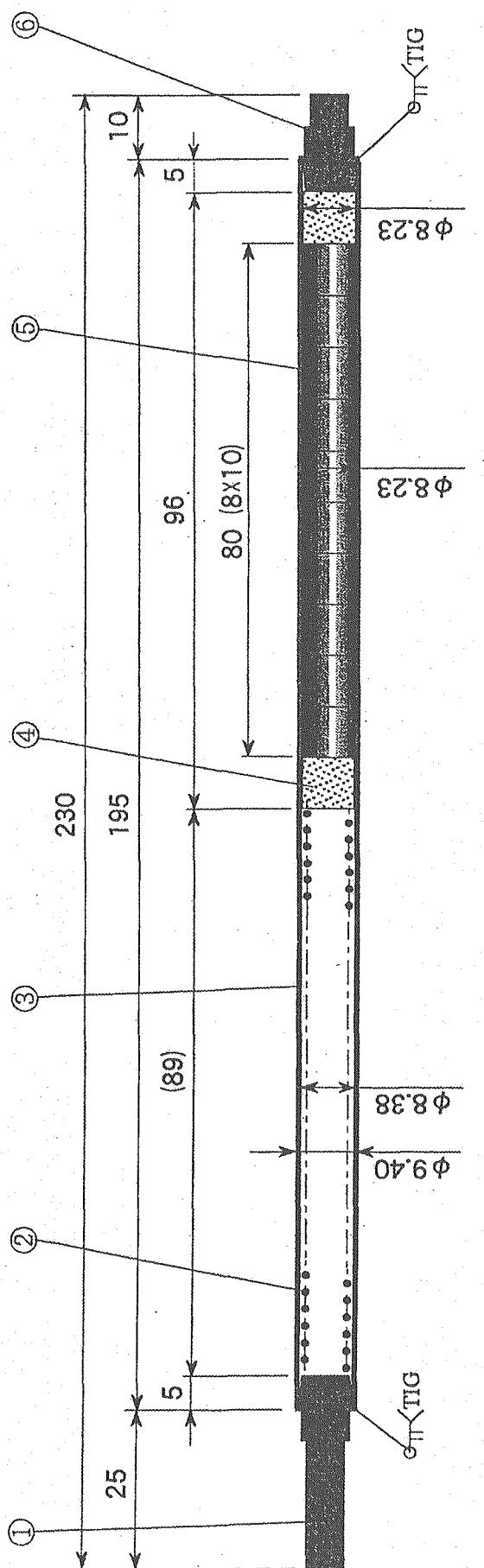
		No.1 pin	No.2 pin
Fuel Pellets	Chemical form	(U, Pu)N	(Zr, Pu)N & (TiN+PuN)
	Radius	8.23 mm	8.23 mm
	Height	8 mm	6 mm
	Density	85-90 %T.D.	85-90 %T.D.
	Pu content	15 at% (=Pu/U+Pu)	20 wt% (=Pu/MN+PuN), M=Zr or Ti
Thermal insulator	Stack length	96 mm	96 mm
	Chemical form	UN	UN
	Radius	8.23 mm	8.23 mm
	Height	8 mm	8 mm
Cladding	Density	80-90 %T.D.	80-90 %T.D.
	Material	SUS316	SUS316
	Outer radius	9.40 mm	9.40 mm
Spring	Thickness	0.51 mm	0.51 mm
	Material	Inconel X	Inconel X
Pin design	Gap width	0.15 mm	0.15 mm
	Smear density	80-85 %T.D.	80-85 %T.D.
	Bond material	He gas	He gas
	Pin length	230 mm	230 mm
T.D. ; Theoretical Density		T. D. for $(U_{0.85}Pu_{0.15})N$	14.29 g/cm ³
		UN	14.32 g/cm ³
		$(Zr_{0.9}Pu_{0.1})N$	7.99 g/cm ³
		0.94TiN+0.06PuN	5.94 g/cm ³

**Table 2 Characteristics of (U,Pu)N
and inert matrix nitride fuel pins**

	No.1 pin	No.2 pin [(Zr,Pu)N]	No.2 pin [TiN+PuN]
Fuel pellet			
Dimensions			
Diameter (mm)	8.22	8.22	8.21
Density (g/cm ³)	11.37	7.19	5.15
Density (%T.D.)	79.6	90.0	86.7
Composition			
Pu content (wt.%)*	14.2	20.0	20.0
Nitrogen content (wt.%)	3.07	11.32	14.42
Oxygen content (wt.%)	0.09	0.28	0.79
Carbon content (wt.%)	2.27	0.35	0.50
N/M [#] ratio	0.55	0.96	0.70
O/M [#] ratio	0.01	0.02	0.03
C/M [#] ratio	0.48	0.03	0.03
N+O+C/M [#] ratio	1.04	1.01	0.76
X-ray diffraction analysis			
Phase identified	(U,Pu)N	(Zr, Pu) N	TiN & PuN
Lattice parameter (nm) of nitride	0.49274	0.46095	0.42374 (TiN) 0.49076 (PuN)
Occluded gases ($\mu\text{l}\cdot\text{atm}/30\text{min}$) (at 1673K)	82	99	246
Fuel pin			
Number of pellets	10	6	6
Smear density (%T.D.)	76.5	86.5	83.3
Stack length (mm)	80.44	35.58	36.61

* nominal

metal



品番	品名	材質	数量	備考
⑥	下部端栓	SUS316	1	
⑤	燃料試料	(U,Pu)N	10	天然ウラン(Φ8.23×8)
④	断熱ペレット	UN	2	天然ウラン(Φ8.23×8)
③	被覆管	SUS316	1	(Φ9.4×Φ8.38)
②	スプリング	イノキX	1	(Φ0.8)
①	上部端栓	SUS316	1	

Fig. 1 Uranium-plutonium mixed nitride fuel pin for 01F-51A capsule

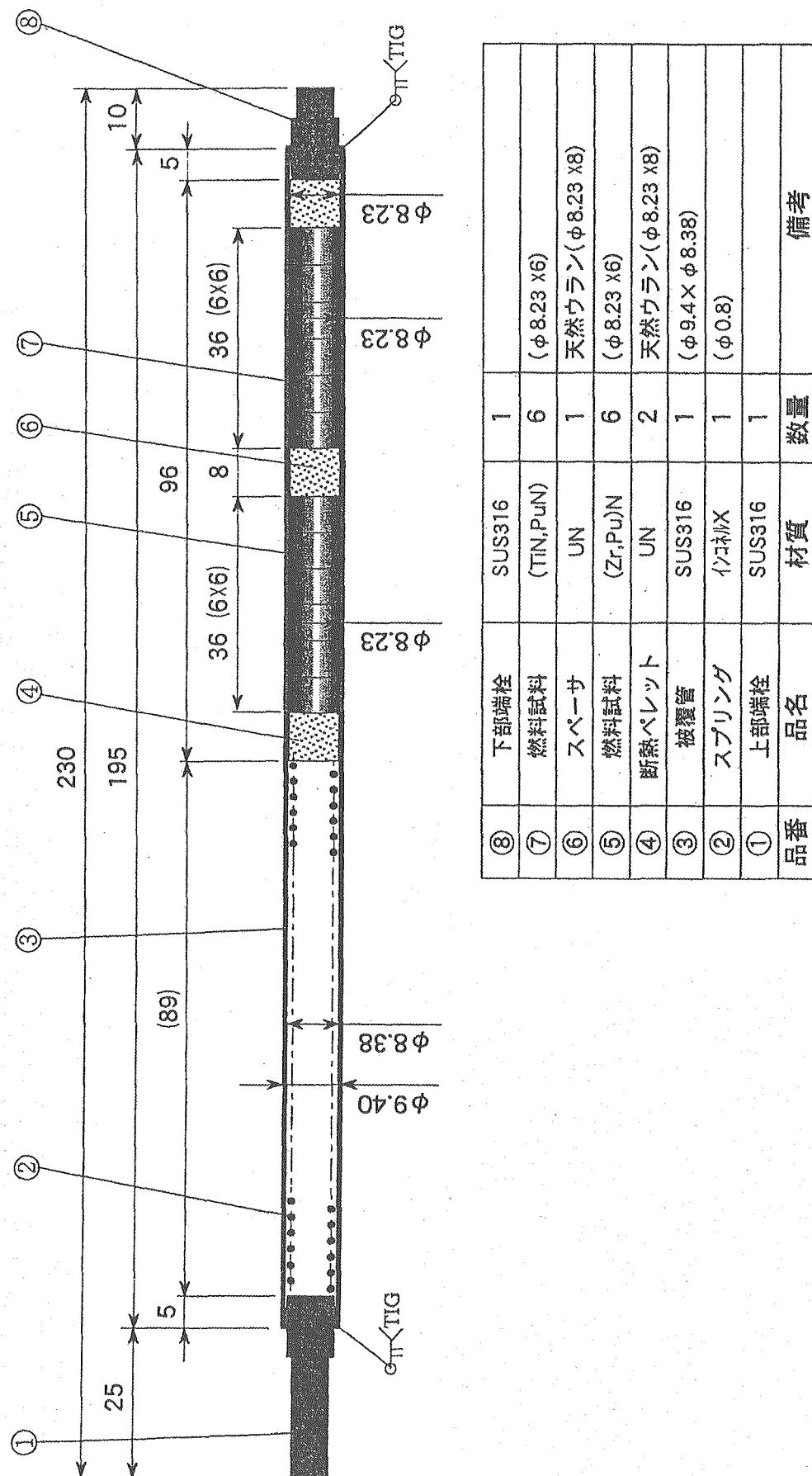


Fig. 2 Inert matrix nitride fuel pin for 01F-51A capsule

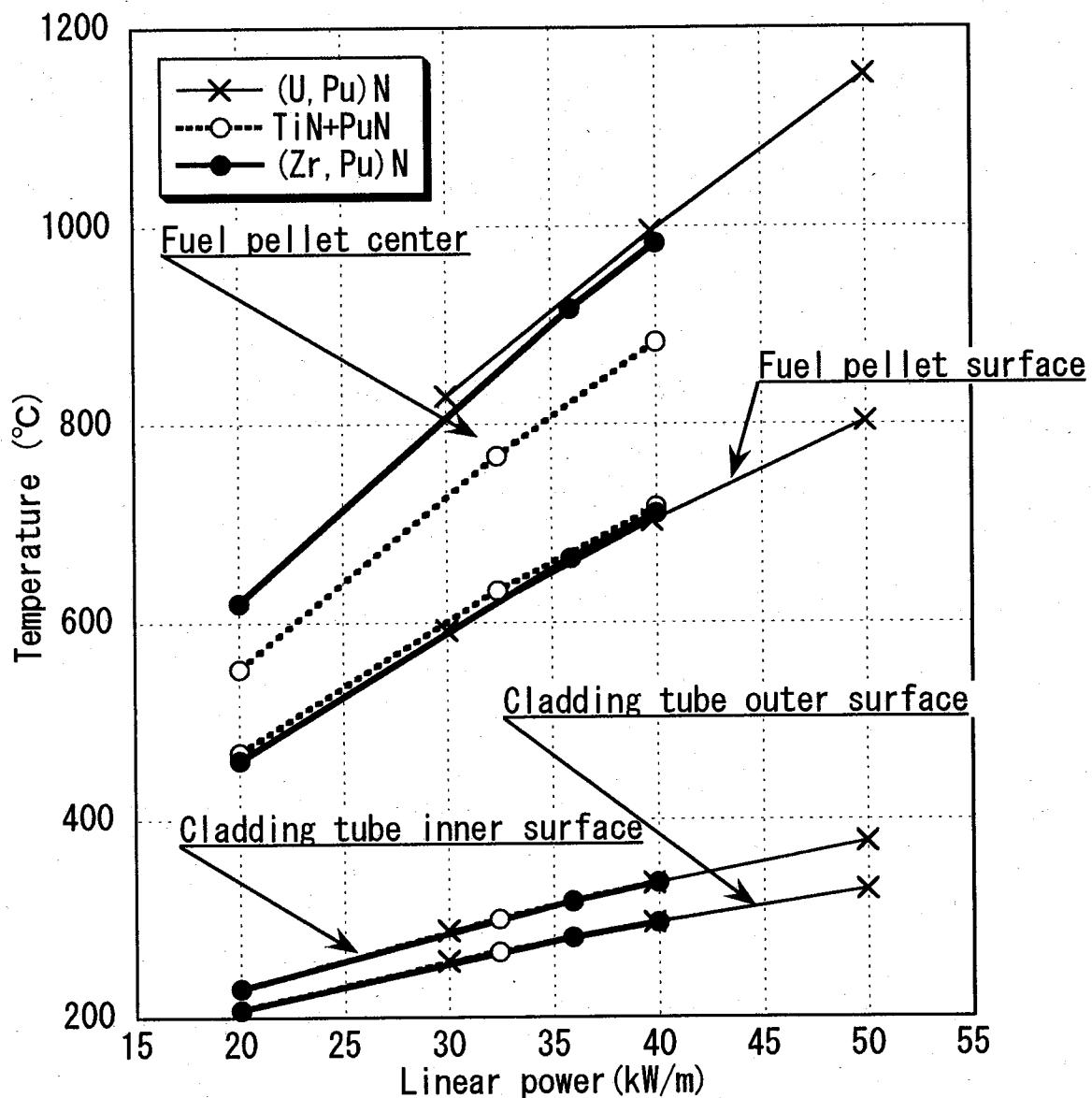


Fig. 3 Temperature distribution of the fuel pellets and the cladding tube of 01F-51A capsule as a function of linear power

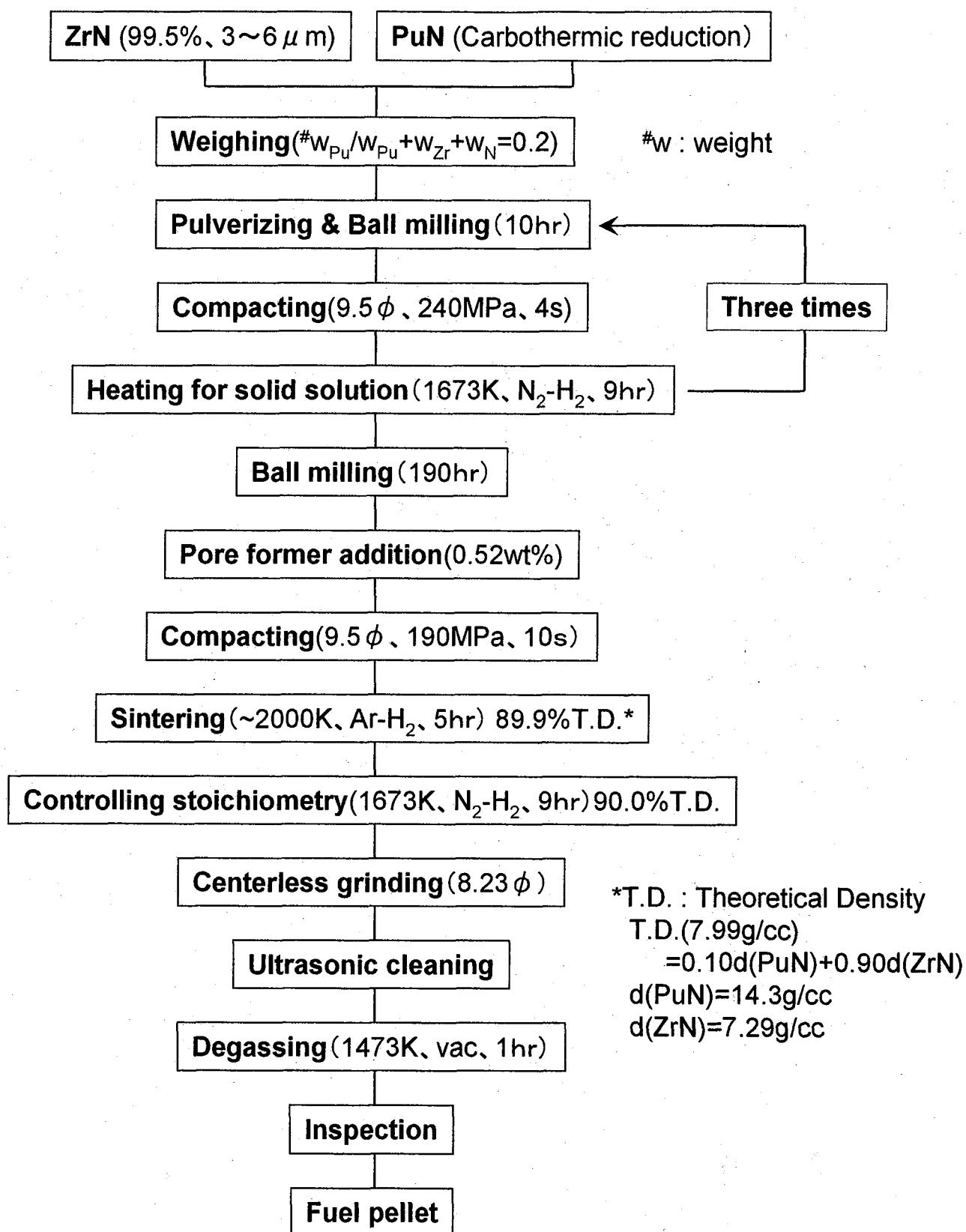
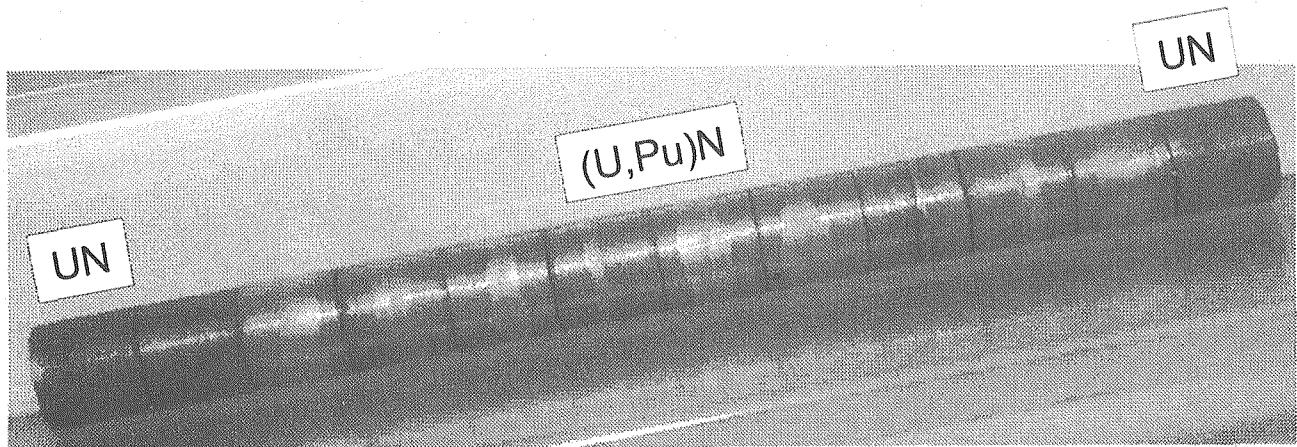
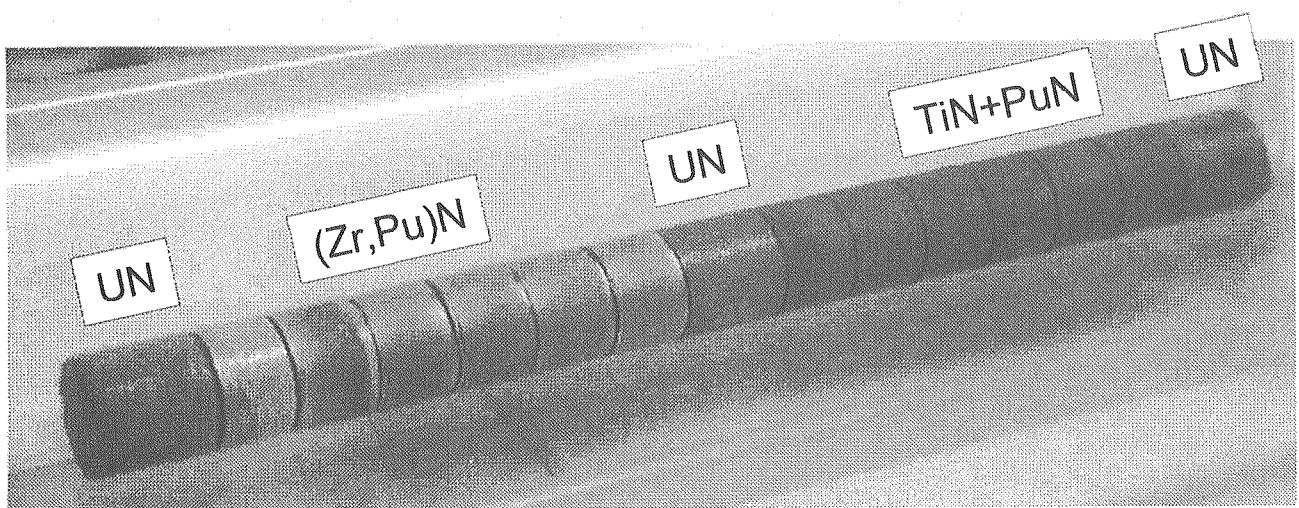


Fig.4 Flow sheet of fabrication of (Zr,Pu)N fuel pellets



(pin No. 1)



(pin No. 2)

Fig. 5 External appearance of nitride fuel pellets

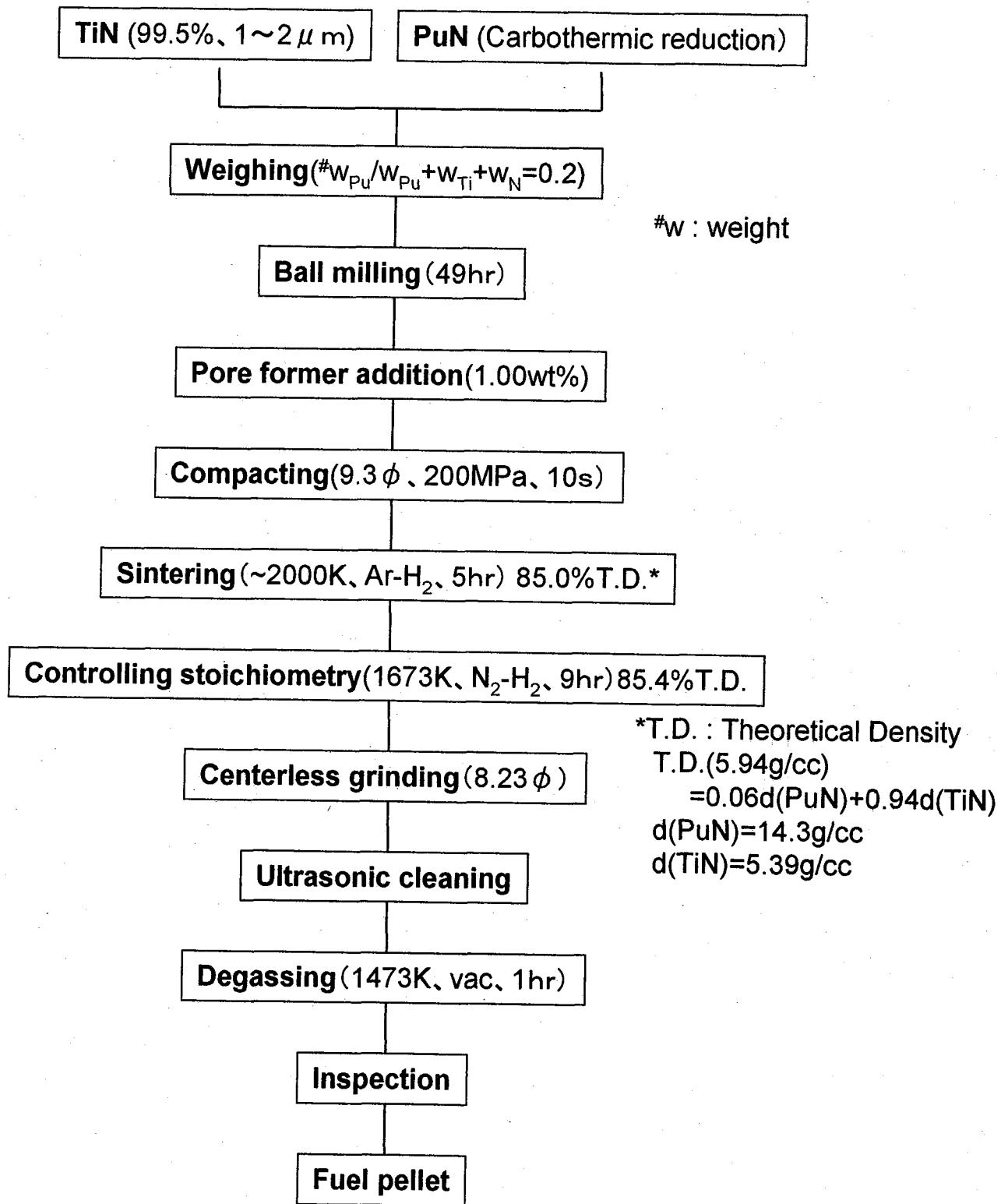


Fig.6 Flow sheet of fabrication of (TiN+PuN) fuel pellets

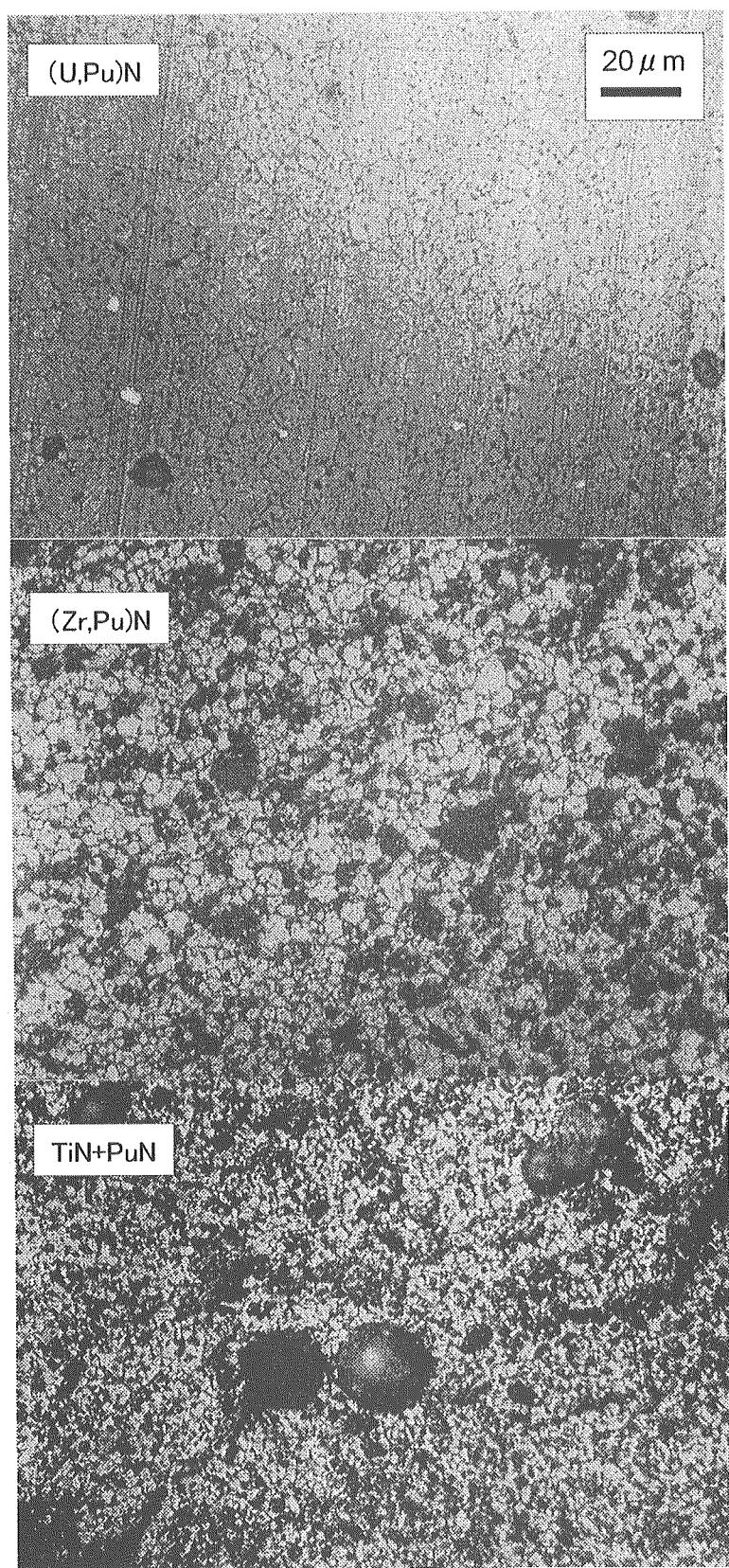


Fig.7 Microstructure of $(\text{U},\text{Pu})\text{N}$, $(\text{Zr},\text{Pu})\text{N}$ and $\text{TiN}+\text{PuN}$ fuel pellets

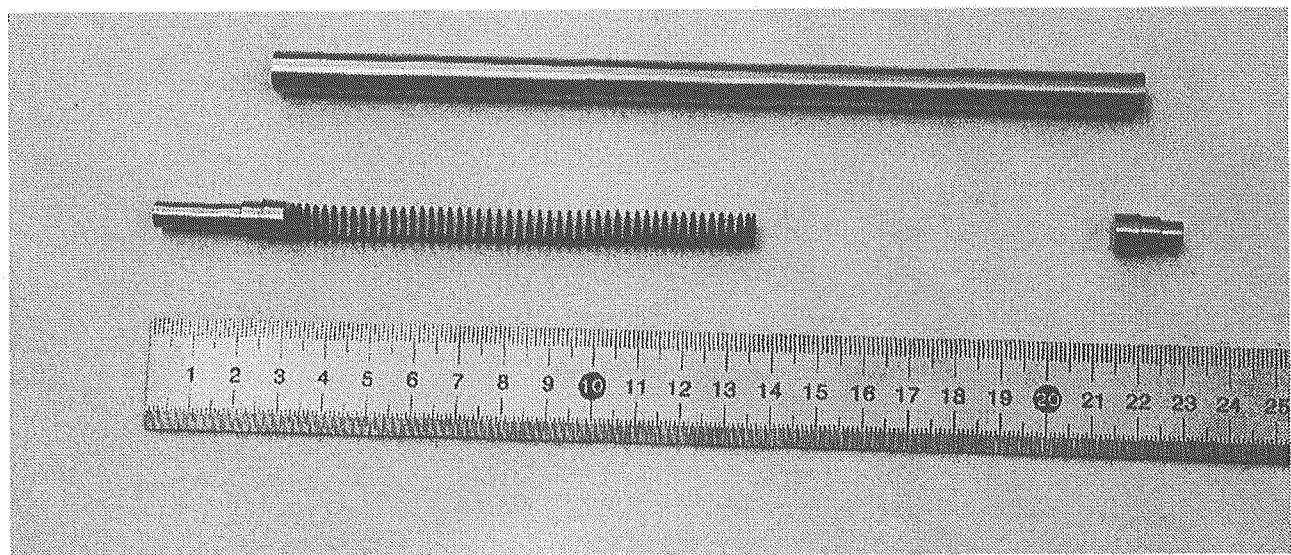
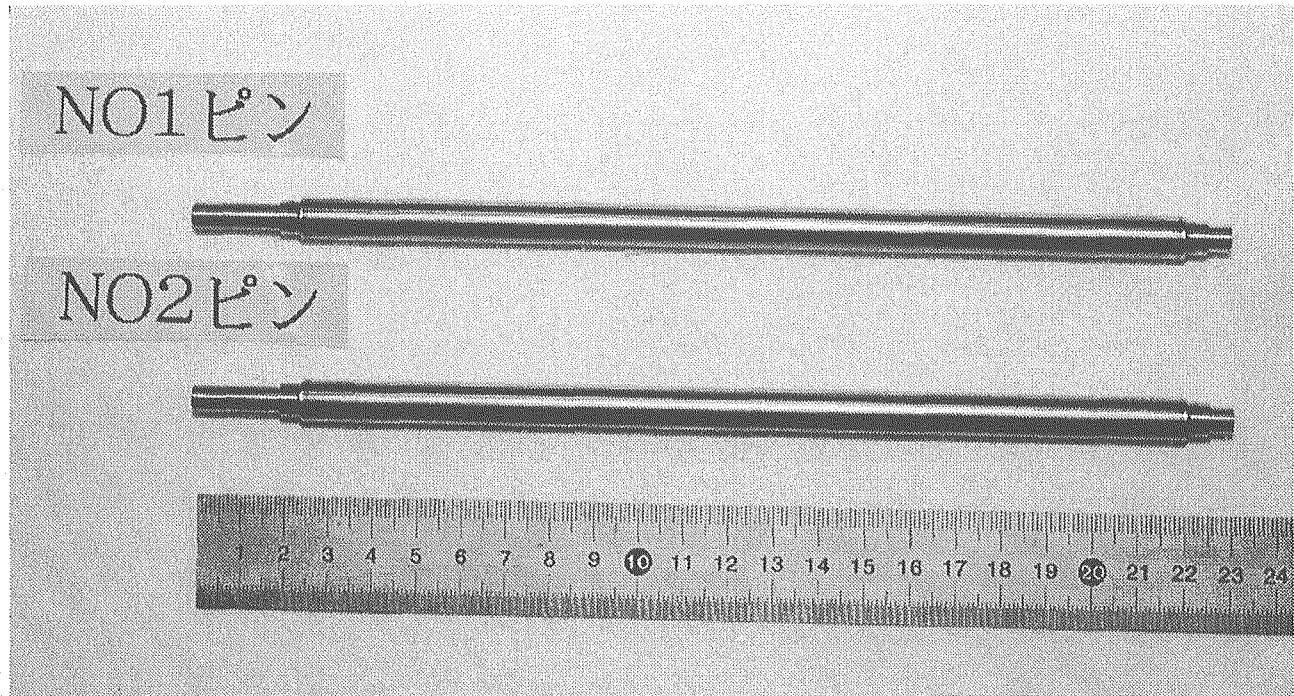
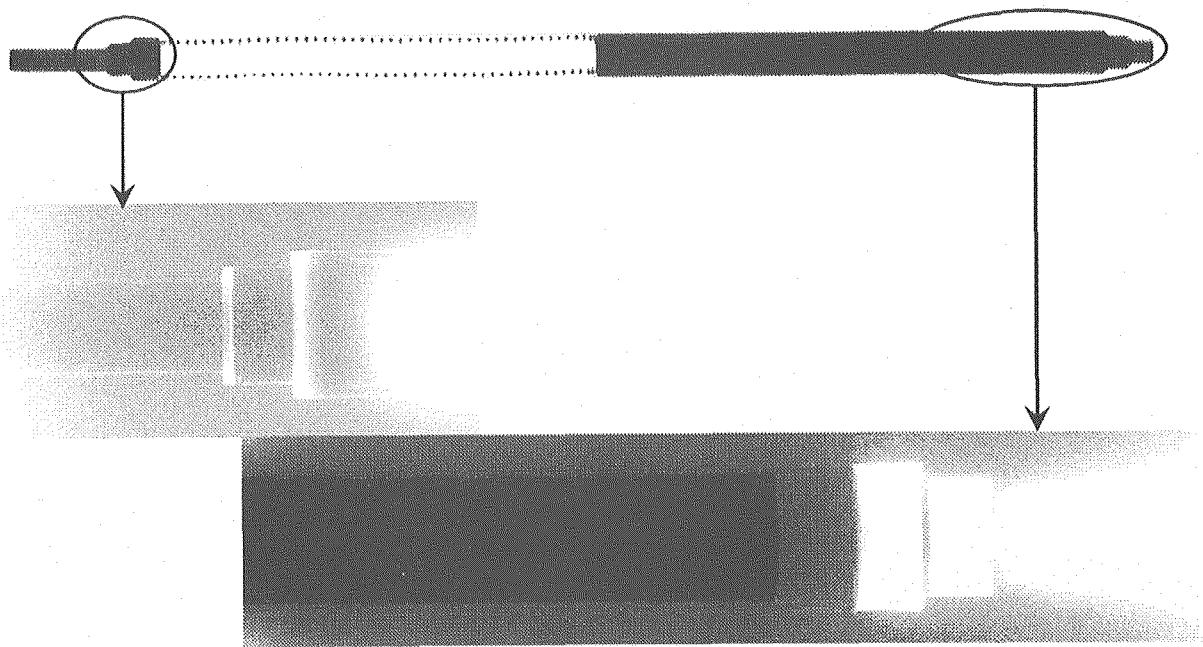


Fig.8 External appearance of cladding tube, upper and lower endplugs, and spring



**Fig.9 External appearance of No.1((U,Pu)N fuel)
and No.2((Zr,Pu)N and TiN+PuN fuel) pins**

01F-51A-1



01F-51A-2

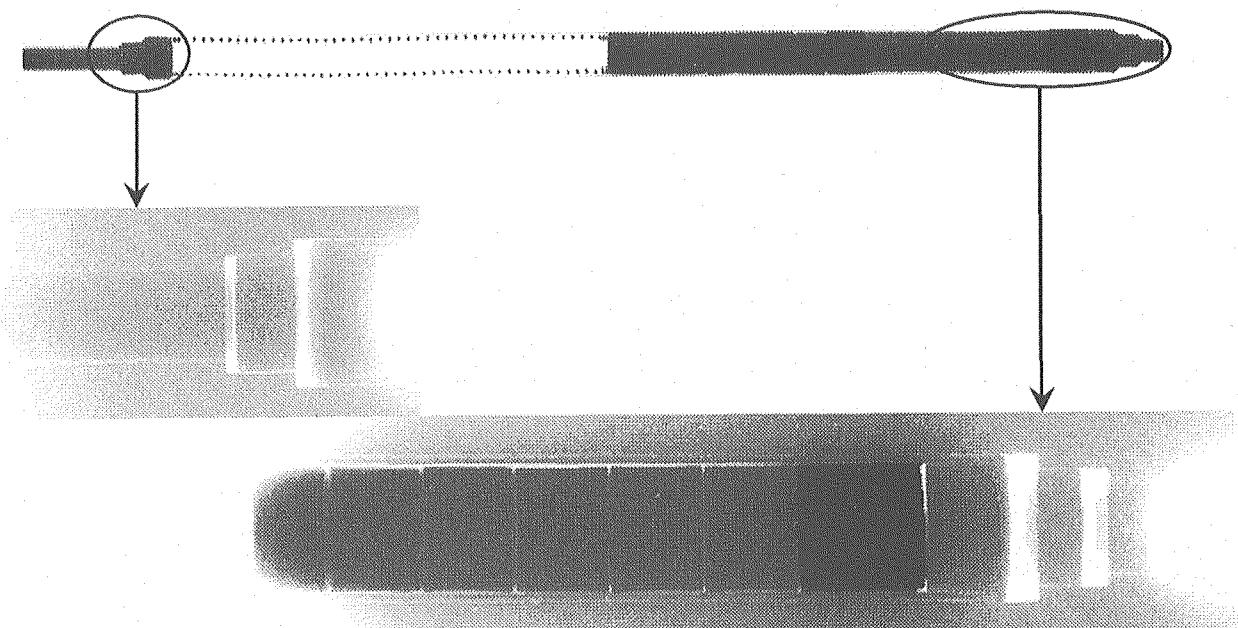


Fig. 10 X-ray radiographs of fuel pins and endplugs

付 錄

01F-51A JMTR 照射キャップセル用混合窒化物
燃料ピン検査要領書および検査記録
(抜 粋)

This is a blank page.

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 燃料ペレット
- II. No.1 ピン用(U, Pu)N 燃料ペレット
- III. No.2 ピン用(Zr, Pu)N および(TiN+PuN)燃料ペレット
- IV. 被覆管
- V. 上部および下部端栓
- VI. スプリング

2. 組立前検査

- I. ペレットのスタック長
- II. 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. 質量検査
- IV. 真直度検査
- V. 溶接部検査
- VI. ヘリウムもれ試験
- VII. 表面密度検査
- VIII. 組立後写真
- IX. 組立後の放射線透過検査

1. 単品検査

(U,Pu) N を装荷した燃料ピンを No.1 と称す。
 (Zr,Pu) N 及び (TiN+PuN) を装荷した燃料ピンを 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 製法 U 濃縮度 N/U 比 不純物分析 高温放出ガス定量 燃料 1 g 中の U 質量	焼結法 天然ウラン 1.0 ± 0.1 _____ 500 μ 1 / g 以下 _____	改良型デューマ法 高周波加熱電量法及び 不活性ガス溶融抽出法 高温真空抽出法 計算	測定値記載 0.01 測定値記載 100ppm 測定値記載 1 μ 1 / g 計算値記載 0.01 g	炭素及び窒素のみ分析 1400°C
2. 寸法検査 外径 高さ 質量 密度 外観	8.23 ± 0.05 8.0 ± 1.0 _____ 75-95%TD 表面に有害な割れ、傷等 のないこと	マイクロメータまたはノ ギス 直示天秤 寸法重量法 目視、外観写真	測定値記載 0.01 mm 測定値記載 0.01 mm 測定値記載 0.01 g 測定値記載 0.1%TD 写真提出	
3. 質量検査 ペレット全体質量 ウラン全体質量	_____	直示天秤法 N/U 比より算出	測定値記載 0.01 g 測定値記載 0.01 g	

II No.1 ピン用 (U,Pu) N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 製法 U 濃縮度 $(N+C) / (U+Pu)$ 比 Pu 同位体比 不純物分析	焼結法 天然ウラン 1.0 ± 0.1	改良型デューマ法 初期組成から計算 高周波加熱電量法及び 不活性ガス溶融抽出法 高温真空抽出法 計算	測定値記載 0.01 計算値記載 0.1 % 測定値記載 100ppm	炭素及び窒素のみ分析
2. 寸法検査 外径 高さ 質量 密度 外観	8.23 ± 0.05 8.0 ± 1.0	マイクロメータまたはノ ギス 直示天秤 寸法重量法 表面に有害な割れ、傷等 のないこと	測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.01g 測定値記載 0.1%TD 写真提出	
3. 質量検査 ペレット全体質量 ウラン全体質量 プルトニウム全体質 量		直示天秤法 初期組成より算出	測定値記載 0.01 g	
4. 組織検査		顕微鏡	写真提出	

III No.2 ピン用 (Zr,Pu) N 及び (TiN+PuN) 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 製法 U 濃縮度 N/M 比 Pu 同位体比 不純物分析	焼結法 天然ウラン 1.0 ± 0.3	改良型デューマ法 初期組成から計算 高周波加熱電力量法及び 不活性ガス溶融抽出法 高温真空抽出法 計算	測定値記載 0.01 計算値記載 0.1 % 測定値記載 100ppm	炭素及び窒素のみ分析
高温放出ガス定量 燃料 1 g 中の Pu 質量	$500 \mu 1 / g$ 以下	測定値記載 1 $\mu 1 / g$ 計算値記載 0.01 g	1400°C	
2. 寸法検査 外径 高さ 質量 密度 外観	8.23 ± 0.05 6.0 ± 1.0	マイクロメータまたはノギス 直示天秤 寸法重量法 目視、外観写真 のないこと	測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.01g 測定値記載 0.1%TD 写真提出	
3. 質量検査 ペレット全體質量 プルトニウム全體質 量	—	直示天秤法 初期組成より算出	測定値記載 0.01 g	
4. 組織検査	—	顕微鏡	写真提出	

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 素材組成及び 材料検査	SUS316相当	ミルシート確認	ミルシート提出、良否	
2. 尺法検査	外径 9.40±0.02 mm φ 内径 8.38±0.02 mm φ 肉厚 0.51±0.02 mm 長さ 195.0±0.1 mm	マイクロメータまたはノギス	測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.01mm 測定値記載 0.1mm	外径、内径、肉厚とともに 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. 質量検査 質量	—	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. 涡流探傷検査	インピーダンスの値が対比試験片の標準値による JIS G0568に準じて行う であること	JIS G0568	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	定盤基準法	測定値記載 0.01mm	

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 組材組成及び 材料検査	SUS316相当	ミルシート確認	ミルシート提出、良否	
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. 質量検査 質量	—	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. 浸透探傷検査	浸透指示模様が認められ ないこと	JIS Z2343に準じて行う	良否	

VI スプリング

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. 組材組成及び 材料検査	インコネル750	ミルシート確認	ミルシート提出、良否	バネ定数の値 $K(\text{kg/mm})$
2. 尺法検査				$= \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3}$
コイル外径 線径 有効巻数 自由長 バネ定数	8.0±0.1 mm 0.8 mm ϕ 48 104±1 mm 0.235 N/mm	ノギス ノギス ノギス ノギス ノギス	測定値記載 測定値記載 測定値記載 計算値記載	G: 橫弾性係数 (インコネルX は 7500 kg/mm ²) d : コイル線径 n : 有効巻数 D : コイル中心径
3. 質量検査 質量	—	直示天秤法	測定値記載 0.01 g	

2. 組立前検査

I ペレットスタック長

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. No.1 ピン (U,Pu) N スタック長 全スタック長	80±1 mm 96±1 mm	ノギス ノギス	測定値記載 測定値記載	0.1mm 0.1mm
2. No.2 ピン (Zr,Pu)N スタック長 (TiN,PuN)スタック長 全スタック長	36±1 mm 36±1 mm 96±1 mm	ノギス ノギス ノギス	測定値記載 測定値記載 測定値記載	0.1mm 0.1mm 0.1mm

II 組立前写真

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
1. ペレット	—	写真撮影	写真提出	
2. 構成部材	—	写真撮影	写真提出	

3. 完成検査

I 外観検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
組立後外観	表面に欠陥がないこと 充分に清浄であること 溶接部に有害な割れ、 傷等がないこと 溶接部のビード幅、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				
全長	250±1 mm	ノギス	測定値記載	0.1mm
被覆管外径	9.40±0.02 mm	マイクロメータ	測定値記載	0.01mm
ビード幅	—	ノギス	測定値記載	0.1mm
ビード高さ	—	マイクロメータ	測定値記載	0.01mm
				ビード幅の最大値と最小 値を測定 ビードを含む直径4ヶ所 の最大値と最小値を測定

III 質量検査

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

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 0.01 mm	

V 溶接部検査

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. 放射線透過検査	JISZ3106 に準じて実施する。 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。	X線フィルム提出、良否		

VII ヘリウムもれ検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
ヘリウムもれ検査	$1 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下	真空容器法	測定値記載	

VIII 表面密度検査

項目	品質規格	試験検査方法	表示	備考
表面密度	0.04Bq/cm^2 以下	スミア法	測定値記載	

IX 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	写真撮影	

X 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、良否	

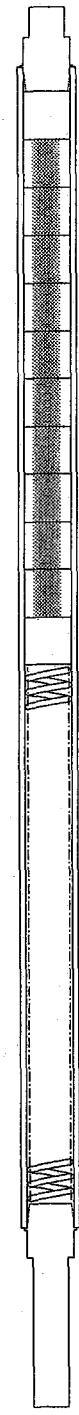
燃料ペレット検査シート 1-1

項目	No. 1燃料ピン装荷ペレット	
	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 (Neq/U))	1.00 (1.04)	_____
N+C/ (U+Pu) ((N+C) eq/ (U, Pu))	_____	1.03 (1.04)
Pu/ (U+Pu)	_____	0.150
Pu 同位体比(2002.4 現在)	_____	238:0.13 241 : 1.17 239 : 75.13 242 : 0.68 240 : 20.51 (Am241:2.38)
不純物分析	炭素 1800ppm 酸素 500ppm	炭素 2.27% 酸素 900ppm
高温放出ガス量	58 μl/g	37 μl/g
燃料 1 g 中のU及びPu質量	U:0.942g	U:0.802g Pu:0.142g
質量	ペレット	10.41
	ウラン	9.83
	プルトニウム	6.93
スタック長	16.16	80.44
全スタック長	96.60	

燃料ペレット検査シート 1-2

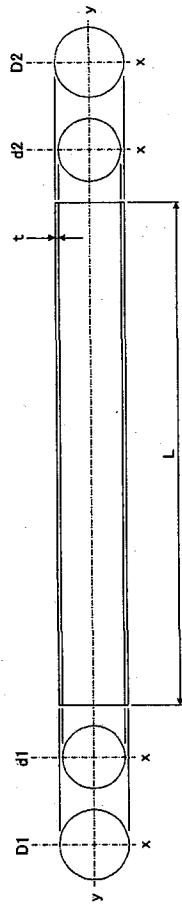
項目	No. 2 燃料ピン装荷ペレット		
	UN	(Zr, Pu)N	(TiN+PuN)
製法	焼結法	焼結法	焼結法
U濃縮度	天然ウラン	—	—
N/U (Neq/U)	1.00(1.04)	—	—
N/M (Neq/M)	—	0.96(1.01)	0.70(0.76)
Pu/M	—	0.226	0.247
Pu 同位体比(2002.4 現在)	—	238:0.13 239:75.13 240:20.51 (Am241:2.38)	241:1.17 242:0.68
不純物分析	炭素:1800ppm 酸素:500ppm	炭素:3500ppm 酸素:2800ppm	炭素:5000ppm 酸素:7900ppm
高温放出ガス量	58 μl/g	74 μl/g	220 μl/g
燃料1g中のU及びPu質量	U:0.942g	Pu:0.200g	Pu:0.200g
質量	ペレット	15.63	13.57
	ウラン	14.76	—
	プルトニウム	—	2.71
スタック長	24.44	35.58	36.61
全スタック長	96.63		

燃料ペレット検査シート 2

No. 1 燃料ピン													
配置順		UN 1	MN 2	MN 3	MN 4	MN 5	MN 6	MN 7	MN 8	MN 9	MN 10	MN 11	MN 12
外観	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
外径 (mm)	8.24	8.21	8.24	8.20	8.25	8.26	8.21	8.22	8.21	8.21	8.21	8.21	8.24
高さ (mm)	8.08	7.88	7.94	8.23	8.08	8.26	8.06	8.18	8.16	8.16	7.79	7.79	8.08
質量 (g)	5.21	5.14	4.83	4.83	4.82	4.80	4.85	4.86	4.83	4.83	4.92	4.92	5.19
密度 (g/cm ³)	12.10	12.32	11.41	11.11	11.15	10.84	11.36	11.19	11.17	11.17	11.94	11.94	12.06
密度 (% TD)	84.6	86.2	79.8	77.7	78.0	75.8	79.4	78.2	78.1	78.1	83.5	83.5	84.3

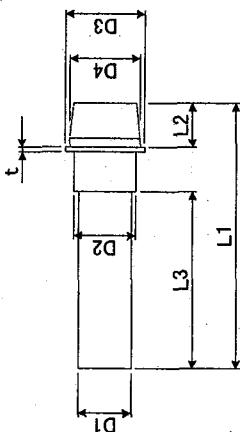
No. 2 燃料ピン																
配置順		UN 1	Zr系 2	Zr系 3	Zr系 4	Zr系 5	Zr系 6	Zr系 7	UN 8	Ti系 9	Ti系 10	Ti系 11	Ti系 12	Ti系 13	Ti系 14	UN 15
外観	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良	良
外径 (mm)	8.24	8.24	8.23	8.21	8.22	8.21	8.20	8.24	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21	8.24	
高さ (mm)	8.15	5.34	5.98	5.96	5.97	6.28	6.06	8.14	6.11	6.10	6.08	6.16	6.12	6.12	6.14	8.14
質量 (g)	5.25	2.04	2.29	2.28	2.29	2.40	2.28	5.19	1.66	1.66	1.70	1.66	1.66	1.66	1.66	5.20
密度 (g/cm ³)	12.07	7.15	7.19	7.22	7.22	7.14	7.14	11.95	5.13	5.15	5.16	5.23	5.14	5.11	5.11	11.97
密度 (% TD)	84.4	89.5	90.0	90.3	90.3	90.4	90.3	83.5	86.5	86.7	86.9	88.0	86.6	86.6	86.0	83.7

被覆管検査シート



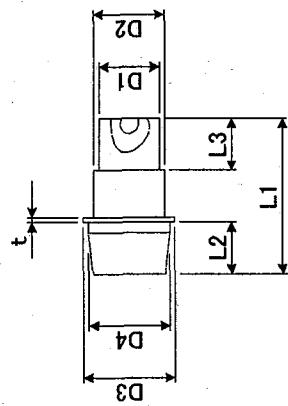
No.	素材及 び材料 検査	D1	D2	d1	d2	t	L	質量 (g)	外観	渦流探 傷 検査	真直度
		9.40 ±0.02	9.40 ±0.02	8.38 ±0.02	8.38 ±0.02	0.51 ±0.02	195 ±0.1				
No. 1 E-1	x	良	9.40	9.39	8.37	8.37	0.51	195.08	22.11	良	0.02 — 195
	y		9.39	9.39	8.38	8.37	0.51	195.08	22.11	良	0.02 — 195
No. 2 E-2	x	良	9.39	9.39	8.37	8.37	0.51	195.08	22.12	良	0.02 — 195
	y		9.39	9.39	8.38	8.37	0.51	195.09	22.11	良	0.02 — 195
3	x	良	9.39	9.39	8.37	8.37	0.51	195.09	22.11	良	0.02 — 195
	y		9.39	9.39	8.37	8.37	0.51	195.08	22.10	良	0.02 — 195
4	x	良	9.39	9.39	8.38	8.37	0.51	195.08	22.10	良	0.02 — 195
	y		9.39	9.39	8.38	8.37	0.51	195.08	22.10	良	0.02 — 195

上部端栓検査シート



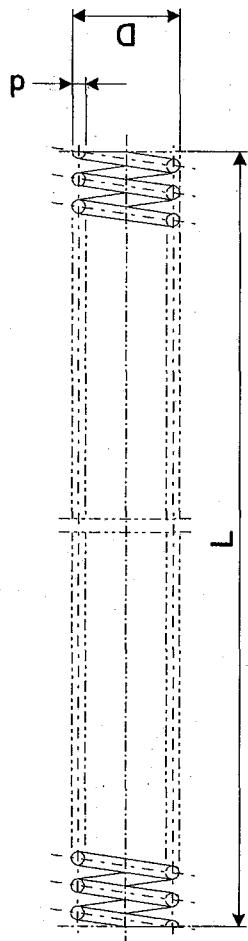
No.	素材及 び材料 検査	D1	D2	D3	D4	L1	L2	L3	t	質量 (g)	外観	浸透探 傷 検査
		6.0+0 -0.05	7.6 ± 0.05	8.8 ± 0.02	8.38-0 +0.02	30.0 ± 0.2	5.0 ± 0.2	20.0 ± 0.2	0.4 ± 0.05	(g)		
No. 1 ピン	1 良	5.98	7.58	8.80	8.38	30.0	5.0	20.0	0.41	8.52	良	良
No. 2 ビン	2 良	5.98	7.59	8.78	8.37	30.0	5.0	20.0	0.42	8.50	良	良
	3 良	5.98	7.59	8.79	8.38	30.0	5.0	20.0	0.39	8.51	良	良
	4 良	5.97	7.59	8.79	8.39	30.0	5.0	20.0	0.42	8.50	良	良

下部端栓検査シート



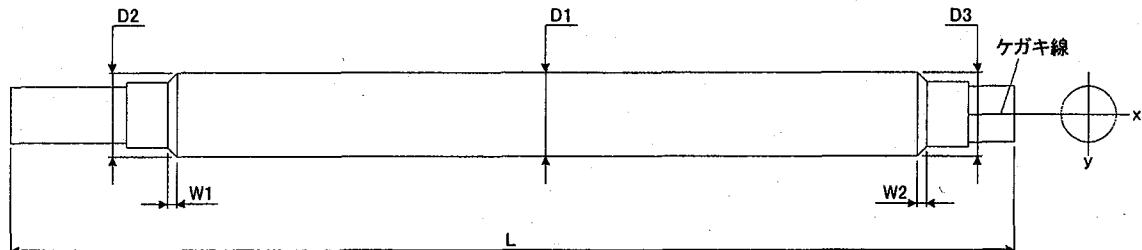
No.	素材及 び材料 検査	D1	D2	D3	D4	L1	L2	L3	t	重量 (g)	外観	浸透探 傷 検査
No. 1 ピン	良	6.0+0 -0.05	7.6 ±0.05	8.8 ±0.02	8.38-0 +0.02	15.0 ±0.2	5.0 ±0.2	5.0 ±0.2	0.4 ±0.05	0.40	5.17	良
No. 2 ピン	良	5.99	7.58	8.80	8.39	15.0	5.1	5.0	0.40	5.16	良	良
3	良	5.98	7.59	8.80	8.38	15.0	5.1	5.0	0.40	5.16	良	良
4	良	5.98	7.59	8.80	8.38	15.0	5.1	5.0	0.40	5.17	良	良

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
素材組成及び材料検査	イシコネル 750	良	良
コイル外径 (D)	8.0 ± 0.1 mm	ϕ 8.00	7.98
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	104.7	104.0
バネ定数	0.235 N/mm	—	—
質量 (g)	—	4.70	4.70

No.1 燃料ピン完成検査シート

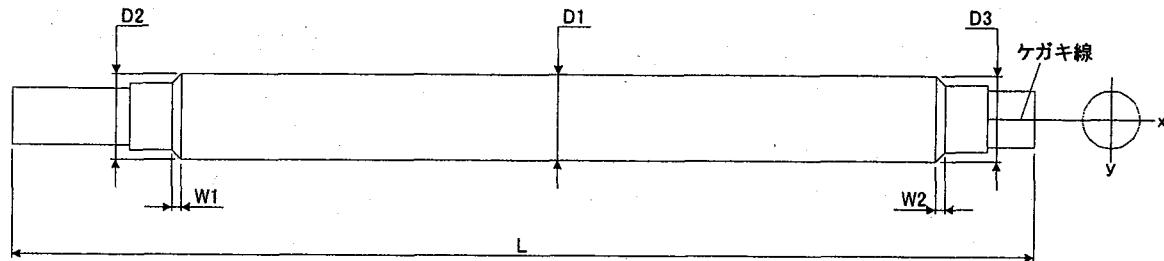


(単位: mm)

		外観	L	D1	D2	D3	W1	W2	質量 (g)
			230 ± 1	9.40 ± 0.02	—	—	—	—	
No.1	x	良	229.9	9.39	9.48	9.49	1.2	1.2	99.6
	y			9.39	9.49	9.49	1.2	1.2	

真直度	溶接部検査				ヘリウムもれ 検査 (Pa · m ³ /s)	表面 密度 (Bq/cm ²)	燃料 ピン 写真	全体 放射線 透過				
	上部端栓部		下部端栓部									
	外観	放射線 透过	外観	放射線 透过								
0.01 — 230	良	良	良	良	<1.2 × 10 ⁻¹⁰	<0.04	良	良				

No. 2 燃料ピン完成検査シート



(単位： mm)

		外観	L	D1	D2	D3	W1	W2	重量 (g)
			230 ± 1	9.40 ± 0.02	—	—	—	—	
No.1	x	良	229.9	9.39	9.49	9.50	1.2	1.2	79.7
	y			9.39	9.48	9.49	1.2	1.2	

真直度	溶接部検査				ヘリウムもれ 検査 (Pa · m ³ /s)	表面 密度 (Bq/cm ²)	燃料 ピン 写真	全体 放射線 透過				
	上部端栓部		下部端栓部									
	外観	放射線 透過	外観	放射線 透过								
0.01 — 230	良	良	良	良	<1.2×10 ⁻¹⁰	<0.04	良	良				

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここで省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N($=10^6$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$

圧力	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10^{-4}	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
6.89476×10^{-3}	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)	
								熱化学	(15 °C)
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		$= 4.184 \text{ J}$	$= 4.1855 \text{ J}$
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}			
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}			
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}			
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}			
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}			
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	仕事率 1 PS (仏馬力)	
									1	735.559 W
1	2.70270×10^{-11}		1	100	1	1	3876	1	100	
3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1	1	0.01	

線量当量	Sv	rem	(86年12月26日現在)	
			1	100

JMTR照射用イナートマトリックス含有窒化物燃料ビンの製作

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています