

JAERI-M

9600

JMTRにおける燃料中心温度測定実験(I)
—第1次燃料試料(77LF-33J)の設計と製作—

1981年8月

中島 照夫・松原 邦彦・大岡 紀一
伊丹 宏治

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JMTRにおける燃料中心温度測定実験(I)
－第1次燃料試料(77LF-33J)の設計と製作－

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部
中島照夫・松原邦彦・大岡紀一・伊丹宏治

(1981年7月16日受理)

軽水炉燃料安全研究に関して燃料中心温度測定実験が JMTR の水ループ(OWL-1)を利用して行われることになった。この実験では、照射中の軽水炉燃料について、線出力密度、燃料中心温度、FP プレナム圧力、被覆管伸びなどを測定し、燃料挙動のコード検証に役立つデータを総合的に取得する。

実験は、3回のシリーズを計画している。第1次燃料試料は、燃料-被覆管のギャップをパラメータにした4本の燃料棒を照射し、ギャップコンダクタンスに関するデータを得るもので、昭和54年7月製作を完了した。引続いて、照射実験が JMTR 運転サイクル48、49に行われた。

本報告では、計装機器の開発を含め、第1次燃料試料の設計と製作について述べる。

JAERI-M 9600

Fuel Centerline Temperature Measurement Experiment in JMTR (I)
- Design and Fabrication of the First Test Assembly (77LF-33J) -

Teruo NAKAJIMA, Kunihiko MATSUBARA, Kiichi OOKA
and Hiroharu ITAMI

Division of JMTR Project,
Oarai Research Establishment, JAERI

(Received July 16, 1981)

Fuel centerline temperature measurement experiment was planned using in-pile water loop (OWL-1) in JMTR for the LWR fuel safety research program.

The purpose of experiment is to obtain useful data on fuel centerline temperatures, pressure of fission product gases in the fuel plenum and elongation of the cladding etc. during the irradiation.

Those data will be used for verification of a computer code for the analysis of fuel behaviors. The plan has three series of the experiments. At the first series, the fuel test assembly consists of 4 rods (BWR-Type) which have different fuel-cladding gap parameters each other for getting data concerning with gap conductance of fuel rods through the irradiation period. This assembly was fabricated on July, 1979 and the irradiation experiment was carried out from 48 through 49 operating cycles in JMTR. In this report, the design and fabrication of the first test assembly including the development of instruments are described.

Keywords ; LWR Fuel, Fuel Centerline Temperature, Irradiation, Instrumentation, JMTR, Inpile Loop, Fabrication, Gap Conductance

目 次

1. まえがき	1
2. 照射実験の全体計画	1
2.1 実験の目的	1
2.2 年次計画	2
3. OWL-1 照射設備	5
3.1 OWL-1 の概要	5
3.2 OWL-1 の構成	5
4. 第1次照射試料の設計	13
4.1 試料の概要	13
4.2 設計上の条件	13
4.3 設計仕様	14
4.4 設計計算	15
5. 計装品の開発と選定	27
5.1 燃料中心温度測定用熱電対	27
5.2 热電対の端栓封入方法	29
5.3 FP圧力／温度検出器	29
5.4 被覆管伸び検出器	30
5.5 ターピン型流量計	31
5.6 その他の計装品	32
6. 第1次照射試料の製作と検査	43
6.1 製作工程	43
6.2 検査の概要	43
7. 模擬燃料集合体の水力振動実験	49
7.1 実験の目的	49
7.2 実験装置と実験条件	49
7.3 実験の結果	49
7.4 結論	49
8. あとがき	53
謝辞	53
参考文献	54
Appendix A 燃料棒構成材の材料検査成績書	55
Appendix B 燃料中心温度測定用熱電対の検査成績書	63

Contents

1.	Introduction	1
2.	Plan of Irradiation Experiments	1
2.1	Purpose of Experiments	1
2.2	Experiment Programs	2
3.	Irradiation Facility - OWL-1 -	5
3.1	Outline of OWL-1	5
3.2	Constitution of OWL-1	5
4.	Design of the First Test Assembly	13
4.1	Outline of Test Assembly	13
4.2	Design Conditions	13
4.3	Design Specification	14
4.4	Design Calculation	15
5.	Development of Instruments	27
5.1	Fuel Center Thermocouples	27
5.2	Sealing of End-plug and Thermocouple	28
5.3	Plenum Pressure and Temperature Transducer	29
5.4	Fuel Cladding Elongation Senser	30
5.5	Turbine Flow Meter	31
5.6	Other Instruments	32
6.	Fabrication and Inspection	43
6.1	Fabrication Processes	43
6.2	Outline of Inspection	43
7.	Flow-Induced Vibration Experiment with Dammy Assembly ...	49
7.1	Purpose of Experiment	49
7.2	Apparatus and Conditions	49
7.3	Results	49
7.4	Conclusions	49
8.	Concluding Remarks	53
	Acknowledgement	53
	Reference	54
	Appendix A : Materials Inspection Sheets of Fvel Rods ...	55
	Appendix B : Inspection Certificates of Fuel Center Thermocouples	63

表 目 次

Table 1 JMTR における実験計画	4
" 2 UO ₂ ベレット, 被覆管等の設計仕様	17
" 3 FREG-3 入力データ	23
" 4 オプションモデル	23
" 5 燃料中心温度の評価	24
" 6 被覆管強度の評価	24
" 7 金ロー付け試験	34
" 8 ニッケルロー付け試験	34
" 9 熱電対のロー付け部曲げ試験	34
" 10 F P 壓力温度検出器の主要性能	37
" 11 変位計の主要性能	38
" 12 試験検査一覧表	48

図 目 次

Fig. 1 JMTR 炉心配置図	9
" 2 OWL-1 フローシート	10
" 3 OWL-1 炉内管	11
" 4 加圧水型運転モードフローシート	12
" 5 沸騰水型運転モードフローシート	12
" 6 UO ₂ ベレット, 断熱ベレット	18
" 7 燃料棒組立図	19
" 8 燃料集合体組立図	20
" 9 照射試料全体組立図	21
" 10 燃料棒計算モデル	22
" 11 熱中性子束の軸方向分布	22
" 12 FREG-3による燃料中心温度の照射履歴	25
" 13 燃料試料の限界熱流束比および熱水力特性	26
" 14 W-Re 熱電対の形状・寸法	33
" 15 SUS 304-zry 4 压接材の引張試験結果と Sm 値	33
" 16 涡電流を利用した圧力検出器の原理	37
" 17 F P 壓力温度検出器	38
" 18 圧力較正曲線	39
" 19 変位計	40
" 20 変位計の較正曲線	41
" 21 タービン型流量計	40
" 22 中性子検出器 (SPD)	42
" 23 照射試料製作工程図	46

Fig. 24 水力振動実験の概図.....	51
" 25 管状タイロッドの振動領域.....	51

写 真 目 次

Photo. 1 金ロー付け試験 (× 10)	35
" 2 " (× 200)	35
" 3 ニッケルロー付け試験 (× 10)	35
" 4 " (× 200)	35
" 5 カラーを用いたロー付け試験 (× 10)	36
" 6 " (× 200)	36
" 7 曲げ試験機.....	36
" 8 照射試料組立部品.....	47
" 9 " 完成品.....	47
" 10 水力振動実験の例(I).....	52
" 11 " の例(II).....	52

1. まえがき

昭和49年に原子力委員会は、軽水炉燃料の安全研究の相当部分を国が実施すべきであるとの結論に達し、「原子炉施設等安全研究専門部会」を設置し、安全研究の企画立案及び調整、その成果の評価、活用などについて諮詢した。これに対して同部会は軽水炉安全研究の51年度から5ヶ年計画を策定した。

この中心温度測定実験は、上記専門部会の燃料検討会が提示した研究課題に基づき、材料試験炉部で作成した実験計画の一環として行っているもので、燃料の中心温度等が測定できる計装付燃料集合体を、JMTRの軽水ループ(OWL-1)に装荷し、軽水炉燃料のふるまいに関する実験を行う。現在、第1次照射実験について、照射が終了し、ホットラボにて照射後試験を実施中である。また、第2次、第3次の照射試料を製作中である。第1次照射試料は、BWR(8×8)型燃料棒の仕様を基準とした4本の燃料棒を、燃料ペレットと被覆管のギャップをパラメータとして製作し、燃料中心温度測定用熱電対、FP圧力検出器、被覆管伸び計などの実験計装品を取りつけたものである。特に、各種計装品については、使用経験が全くないものや乏しいものため、設計上、材質、寸法、燃料棒への取付方法などを十分検討し、確認試験を含め製作にあたった。

第1次照射実験は、BWR運転条件を模擬して、冷却材圧力 $71 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ 、出口蒸気含有率10%以下で設計されて運転を予定していたが、製作途上、燃料集合体の窓付き管状タイロッドが燃料棒とフレッティングを生じる恐れがあるため、2相流にせず加圧水型モードで照射することになった。

燃料試料は、設計計算により、集合体総発熱量 93.3 KW、最高線出力密度 500 W/cm、最高燃焼度 6,000 MWD/TUO₂まで熱的、機械的に安全であることが確認された。また、JMTR炉心核計算では集合体総発熱量 70 KW、最高線出力密度 379 W/cm と予想されている。

2. 照射実験の全体計画

2.1 実験の目的

現在軽水炉燃料の安全性に関する研究は、OECDハンデンプロジェクトを中心に活発に行われているが、中心温度を測定する実験は、実験の目的から、①ギャップコンダクタンス、FPガス放出などに関する燃料棒熱挙動実験、②焼きしまり、スエリングなどに関する燃料棒変形実験、③PCM(Power Cooping Mismatch)実験などがある。JMTRの実験目的は、①項の燃料棒の熱挙動実験でJMTR既設の軽水ループOWL-1(挿入可能な試料アセンブリの最大外径は39 mm)を用いて、計装付き燃料アセンブリの照射実験を行うものである。

本実験の目的は次に記す通りである。

1. まえがき

昭和49年に原子力委員会は、軽水炉燃料の安全研究の相当部分を国が実施すべきであるとの結論に達し、「原子炉施設等安全研究専門部会」を設置し、安全研究の企画立案及び調整、その成果の評価、活用などについて諮詢した。これに対して同部会は軽水炉安全研究の51年度から5ヶ年計画を策定した。

この中心温度測定実験は、上記専門部会の燃料検討会が提示した研究課題に基づき、材料試験炉部で作成した実験計画の一環として行っているもので、燃料の中心温度等が測定できる計装付燃料集合体を、JMTRの軽水ループ(OWL-1)に装荷し、軽水炉燃料のふるまいに関する実験を行う。現在、第1次照射実験について、照射が終了し、ホットラボにて照射後試験を実施中である。また、第2次、第3次の照射試料を製作中である。第1次照射試料は、BWR(8×8)型燃料棒の仕様を基準とした4本の燃料棒を、燃料ペレットと被覆管のギャップをパラメータとして製作し、燃料中心温度測定用熱電対、FP圧力検出器、被覆管伸び計などの実験計装品を取りつけたものである。特に、各種計装品については、使用経験が全くないものや乏しいものため、設計上、材質、寸法、燃料棒への取付方法などを十分検討し、確認試験を含め製作にあたった。

第1次照射実験は、BWR運転条件を模擬して、冷却材圧力 $71 \text{ Kg/cm}^2 \cdot \text{G}$ 、出口蒸気含有率10%以下で設計されて運転を予定していたが、製作途上、燃料集合体の窓付き管状タイロッドが燃料棒とフレッティングを生じる恐れがあるため、2相流にせず加圧水型モードで照射することになった。

燃料試料は、設計計算により、集合体総発熱量 93.3 KW、最高線出力密度 500 W/cm、最高燃焼度 6,000 MWD/TUO₂まで熱的、機械的に安全であることが確認された。また、JMTR炉心核計算では集合体総発熱量 70 KW、最高線出力密度 379 W/cm と予想されている。

2. 照射実験の全体計画

2.1 実験の目的

現在軽水炉燃料の安全性に関する研究は、OECDハンデンプロジェクトを中心に活発に行われているが、中心温度を測定する実験は、実験の目的から、①ギャップコンダクタンス、FPガス放出などに関する燃料棒熱挙動実験、②焼きしまり、スエリングなどに関する燃料棒変形実験、③PCM(Power Cooping Mismatch)実験などがある。JMTRの実験目的は、①項の燃料棒の熱挙動実験でJMTR既設の軽水ループOWL-1(挿入可能な試料アセンブリの最大外径は39 mm)を用いて、計装付き燃料アセンブリの照射実験を行うものである。

本実験の目的は次に記す通りである。

- (i) 炉内計装技術の確立
- (ii) ベレットークラッドギャップコンダクタンスの評価モデルの検討
- (iii) 通常時燃料ふるまいコードの検証
- (iv) 設計パラメータの PCMI に与える影響

この中で計算コードの検証や評価モデル作成のためのデータ収集の見地から、燃料棒の熱電対位置での線出力密度を精度良く測定できるように考慮し、燃料中心温度を測定することによりギャップコンダクタンス、リロケーションなどに関する知見を得るものとする。

この実験の燃料アセンブリーに取付けられる計装品は、中心温度測定用熱電対、プレナム温度測定用熱電対、FPガス圧力センサー、タービン流量計、冷却水温度測定用熱電対、中性子検出器(SPD)、被覆管伸び検出器などである。ループ試料出入口の冷却水温度測定熱電対とタービン流量計からループ試料発熱量をできるだけ正確に求める。次に中心温度測定用熱電対先端と同一平面に分布させた中性子検出器により各燃料棒の出力分担(比)を求め、燃料棒の熱電対位置での線出力密度を求める。また、燃料中心温度、プレナム温度、FPガス圧力、燃料棒伸びなどを総合的に測定する。

一方、我が国では上記のような多くの計装の炉内実験の経験は浅く、必ずしもその計装技術は十分とは言えない。従ってこの種の実験を行うために必要な各種計装品の技術上の問題点を解決しなければならない。その問題点は、各種計装品にそれぞれある。高温用熱電対については、一般的に W-Re 热電対が使用されているが、JMTRでの 1,800 °C 近くの高温の長時間測定例はなく、また、1,000 ~ 1,300 °C 付近でも破損する例が多いという問題がある。圧力センサ、変位センサー、タービンフローメータについては、種々の開発がなされているが、試験部の空間的制限から性能を落とさずに小型化しなければならない問題がある。

2.2 年次計画

OWL-1 を用いた燃料中心温度実験は、Table 1 に示すように 3 次にわたる計画である。以下にその概要を述べる。

2.2.1 第1次照射実験

第1次は JMTR 48 ~ 49 運転サイクル程度の比較的短期照射とし、燃料と被覆管とのギャップの大きさをパラメータとしたときの燃料棒の熱的挙動を調べ、かつ炉内計装確性試験を行う。照射試料及び実験項目の基本設定は、次の通りである。

- 1) 照射実験に使用する燃料棒は BWR 8 × 8 型(被覆管外径 12.5 mm)のもの 4 本とする。
- 2) 4 本の燃料棒それぞれの製造時直徑ギャップは、100, 200, 300, 400 μm とする。
- 3) 各燃料棒の燃料中心温度、線出力を測定し、それぞれのギャップコンダクタンスを燃焼度の関数として求める。
- 4) 直径ギャップ 300 μm の燃料棒のプレナム部に、FPガス圧力センサー、FPガス温度測定用熱電対を取り付け、FPガス放出率に関するデータを得る。
- 5) 直径ギャップ 100 μm の燃料棒には、被覆管伸び検出器を取り付け燃料棒の伸び特性を調

べる。

2.2.2 第2次照射実験

ペレット被覆管相互作用 (Pellet Clad Interaction; PCI) による燃料破損に関する研究として、燃料棒設計の立場から PCI に対して種々の対策をとったいわゆる “PCI 対策ピン” を検討し、照射試料として、その熱的挙動を調べることを目的とする。

すなわち PCI 対策ピンとして現在有力な方法と考えられている、銅やジルコニウムを被覆管の内面にコーティングして潤滑等の役目を持たせた燃料棒を 3 本製作する。実験は、この被覆管内面状態をパラメータとし、各種の炉内計装を用いて、ギャップコンダクタンス、燃料棒の伸びなどの測定を行う。

2.2.3 第3次照射実験

軽水炉の通常運転時に経験する程度の線出力密度での燃料棒熱挙動実験は、第二次照射実験までにかなりのデータが揃い、ギャップコンダクタンスなどの評価プログラムの作成、検証は一応コンセンサスが得られる程度になるものと予想される。今後は燃料棒の余裕度向上が主要テーマとなると想定されるので、第3次では通常運転時よりかなり高い線出力密度で燃料棒の熱的挙動実験を行う予定である。しかしこのためには燃料中心温度として 1,800 °C 以上の高温を測定する必要があり、JMTR では、高温測定技術の開発として、このような高温測定熱電対を製作し、炉内確性試験を行うものとする。また、照射する燃料棒は、高燃焼度を模擬し、キセノンなどの模擬 FP ガスを封入して、その濃度または封入ガス圧力をパラメータとして照射実験する計画である。

Table 1 JMTRにおける実験計画

試料名	オ1次 77LF-33J	オ2次 78LF-35J	オ3次 79LF-39J
実験目的	通常燃料棒の挙動 炉内計装の確立	PCMI対策ヒン の熱的挙動	高燃焼度の模擬
炉内計装品	燃料温度用 T/c 圧力検出器 伸び検出器 中性子検出器	燃料温度用 T/c 伸び検出器 中性子検出器	燃料温度用 T/c 圧力検出器 伸び検出器 中性子検出器
評価モデル のパラメータ	直 径 キ ャ ッ フ°	被覆管内面 (Zry-2, Cu, Zr)	封入ガス混合比 (He, Xe)
コードの検証	○	○	○
裕度の評価			○
PCMIの評価		○	○

3. OWL-1 照射設備

3.1 OWL-1 の概要

JMTRのOWL-1(大洗水ループ1号)照射設備は、昭和45年設置されたもので、高温高圧の水ループで下記の実験を目的としている。

- (1) 各種のPWR, BWR, ATR用燃料、材料の照射実験。
- (2) 同上燃料、材料の両立性試験、冷却材中の腐食試験。
- (3) 各種破損燃料実験。
- (4) 燃料要素アセンブリーの熱、水力学的特性試験。

照射試料を装荷する炉内部テストセクションは、炉心格子位置D-7に挿入されている。Fig. 1にJMTR炉心配置図を示す。また、OWL-1の一次系は次の使用条件を満たすよう設計、製作されている。

Parameter	加圧水型	沸騰水型
炉内テストセクション最大流量	300 Kg/min	200 Kg/min
“ 出口最高温度	320 °C	320 °C
“ 出口最高圧力	150 Kg/cm² G	115 Kg/cm² G
“ 試料最高発熱量	200 KW	200 KW
“ 出口最高蒸気含有率	—	20 wt %
ループ最高除熱能力	250 KW	250 KW

3.2 OWL-1 の構成

OWL-1は大別して一次系、二次系、給水系、補助系、安全系、計測制御系などから構成され、Fig. 2にそのフローシートを示す。

3.2.1 一次系

一次系は炉内テストセクションに挿入された照射試料の熱を完全に除去し、これを熱交換器を介して二次系に伝える閉回路の冷却水循環系である。系は、次のような各部から構成されている。
a) 炉内管

炉内管は照射試料を加圧水、または沸騰水下で中性子照射するための圧力容器である。構造はFig. 3に示すような折り返し型で耐圧管、流路仕切管、外套管、枝管などから構成される。照射試料は、耐圧管上蓋(グレーロック型フランジ)から耐圧管内に挿入し流路仕切管内の炉心相当位置(高さ 75 cm)に挿入する。流路仕切管内の炉心部照射有効寸法は、39.7 mm $\phi \times 750$ mm ℓ

である。

照射試料の冷却水は、炉プール壁を貫通する冷却水入口枝管をへて、耐圧管と流路仕切管の間を下方に通り耐圧管下部で反転し仕切管内（試料部）を上方に流れ照射試料を除熱し、炉プール壁を貫通した冷却水出口枝管を通り主循環系へもどる。耐圧管および枝管と外套管の間には適当なガス層を設けて熱的絶縁を行い、高温の耐圧管および枝管が反射体要素や原子炉冷却水と直接触れるのを避けている。炉内部分の耐圧管はステンレス鋼 32 種 (SUS 316 相当) である。

b) 主循環系

主循環系は、照射試料を所定の冷却条件で除熱を行うための流路系で、冷却水はループの運転条件によって以下に記す系路を循環する。

(i) 加圧水型で運転する場合 (Fig. 4)

主循環ポンプを出た冷却水は、流量調節弁で所定流量に調節され、温度調節器で所定温度にした後炉内テストセクションを通り照射試料を除熱する。炉内テストセクションを出た高温の冷却水は、蒸気系をバイパスし主冷却系冷却器で除熱され、主循環ポンプの吸入側にもどる。冷却水は圧力調節系によって系内で沸騰をおこさないよう常に加圧され、所定圧力に保たれる。

(ii) 沸騰水型で運転する場合 (Fig. 5)

沸騰水型で運転する場合、所定の流量、温度、圧力を保ちつつ冷却水は照射試料を除熱し、一部が沸騰し、二相流となって炉内管より出てくる。そして蒸気系の気水分離器で液相、蒸気相に分離される。分離された蒸気は、流量計を通り圧力調節系のコンデンサー上部に入り、圧力調節系のスプレー水で凝縮され、気水分離器で分離された水と合流し、主冷却器で除熱され主循環ポンプの吸入側にもどる。主冷却器を出た冷却水の一部は圧力調節系循環ポンプおよび冷却器を通り、圧力調節器系のコンデンサーにスプレー水として送られ、気水分離器で分離した蒸気を凝縮するのに使用する。

系の圧力はコンデンサー内で蒸気を所定圧力の飽和温度にして凝縮させ、一定圧力に保っている。

主循環系の構成材料は、18-8 系ステンレス鋼 27 種 (SUS 304 相当) を使用している。

c) 圧力調節系

圧力調節系は一次系の圧力を規定値に一定に保つためのものであるが、同時に一次系の昇温降溫時および沸騰水型で運転する場合の炉内テストセクションでの沸騰に伴う冷却水の容積変化を吸収する役割を果す。系は冷却器、循環ポンプ、コンデンサー、サージタンクなどから構成される。

コンデンサーは縦型のジェットコンデンサーで、サージタンクは球型構造である。系の圧力調節法は、スプレー水温を一定に保ち、スプレー水流量を調節する方法と、スプレー水流量を一定に保ち水温を調節する二つの方法があるが、前述の運転状態などによりそれぞれ使い分ける。サージタンクの容積は炉の緊急出力低下、停止によって圧力制御の喪失を生じないよう充分な容積を有している。圧力調節系の構成材料は 18-8 系ステンレス鋼 27 種 (SUS 304 相当) を使用している。

d) 主冷却系

主冷却系は、照射試料を除熱した高温の冷却水の除熱、冷却を行うと同時に主循環ポンプお

および圧力調節系循環ポンプのキャビテーションを防止するものである。系はおもに、冷却器で構成されており最高 250 KW の除熱能力を有するが、広範な運転条件を満足できるように除熱能力の異なる冷却器 2 基を直列に設置し、1 基だけでも使用できるようになっている。系の構成材料は 18-8 系ステンレス鋼 27 種 (SUS 304 相当) である。

e) 精製系

精製系はループ水の一部を連続的に通し、冷却水中の溶解性、不溶解腐食生成物および核分裂生成物を除去すると同時にループ構成材料の腐食を抑止するため冷却水の水質 (PH, 電導度など) を規定値に保つためのもので、イオン交換樹脂塔、水質監視計、crud probe などから構成されている。

精製系は主循環系と並列に設置しており、流れるループ水はイオン交換樹脂の使用限界温度以下に冷却される。イオン交換樹脂塔は混床型で、充填容量は 10 ℥あり、ループ運転中精製能力が低下してもループ運転に支障のないよう 1 基予備を設け、切換は遠隔操作で行っている。

構成部品の接液部はすべて 18-8 系ステンレス鋼を使用している。

f) 放射能検出系

放射能検出系は冷却水中の放射能レベルを監視し照射試料の破損を検出すると同時に破損燃料試験 (人工欠陥)においては破損部から放出される放射性物質の核種放出挙動などを調べるためのもので、 γ 線モニター、D/N (Delayed Neutron) モニターなどから構成される。

γ 線モニターとして炉内テストセクション出口、精製系イオン交換塔、蒸気系試料採取ライン、脱ガスライン出口に電離箱もしくはシンチレーションカウンターをそれぞれ 1 基設けてある。D/N モニターは遅発中性子を検出するため B_3F カウンターを気水分離器の液相出口に設けてある。

g) その他

一次系は、以上その他、蒸気系、脱ガス系、試料採取系などから構成されている。系の構成材料は主に 18-8 系ステンレス鋼である。

3.2.2 二次系

二次系は、一次系の発熱を除熱する閉回路の循環系で構成機器は一次系とほぼ同じで次のようにになっている。

- a) 主循環系
- b) 圧力調節系
- c) 冷却系
- d) 精製系
- e) 放射能検出系

3.2.3 給水系

給水系は一次系、二次系に脱ガス、脱イオン水をループ運転前および運転中必要に応じて給水するための装置で、次の各機器と配管から構成される。

- a) 脱ガスホールドアップタンク

- b) 低圧給水ポンプ
- c) 高圧給水ポンプ

3.2.4 補助系

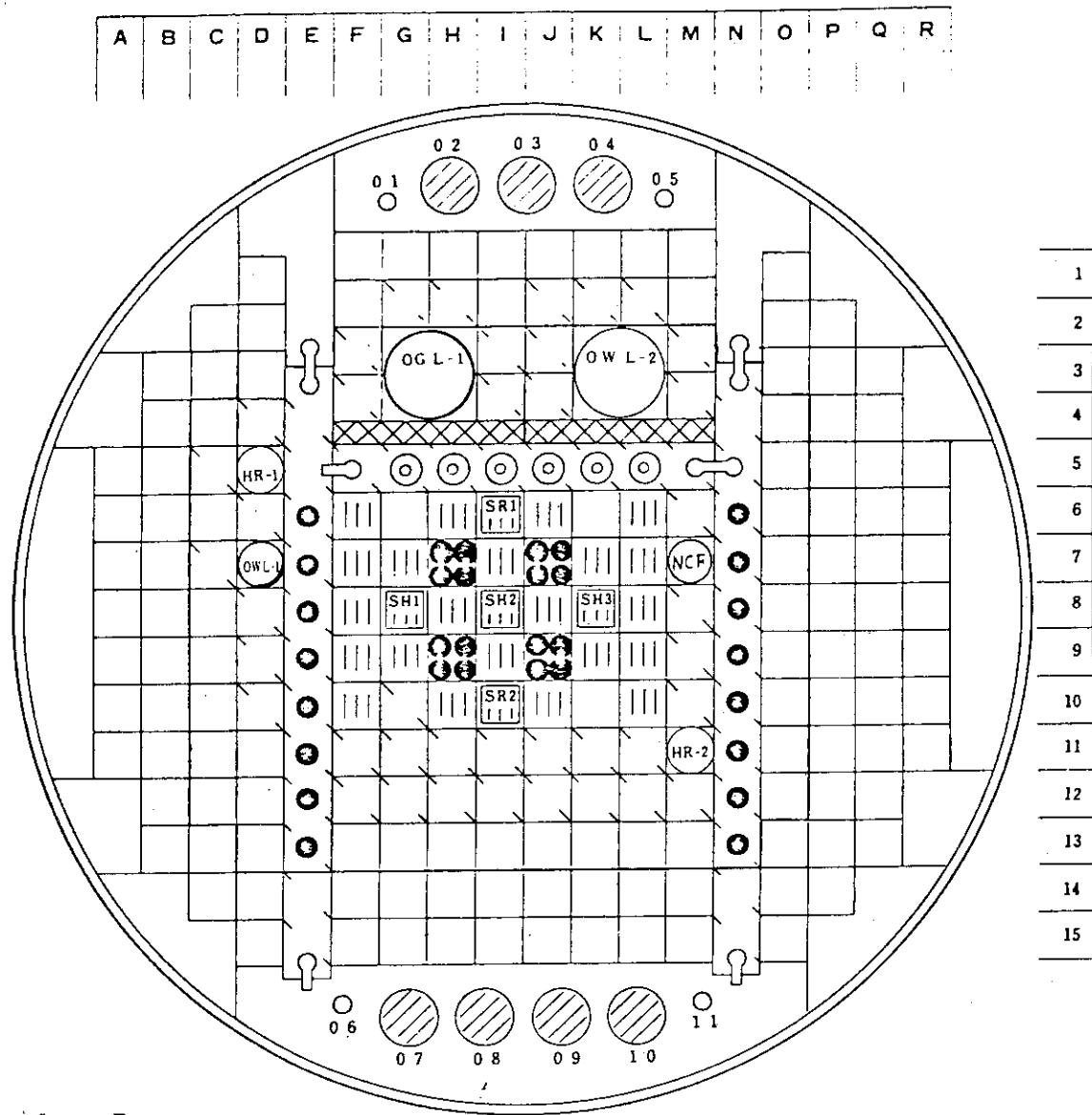
補助系は、一次系冷却水の水質を調節する薬液注入系、一次系、二次系が放射性物質によって汚染した場合除染する汚染除去系、一次系の排気、排水を一次的に収容する排水タンク及びループ運転中試料水を採取したり、ループにガス添加を行う試料採取装置からなる。

3.2.5 計測制御安全系

計測制御安全系は、OWL-1の系全体を安全、確実、容易にしてかつ総合的に運転制御を行うもので、集中制御方式である。ループ運転操作に必要な計測制御盤は、炉室1階の照射制御室に設けられている。また、現場にも必要な指示盤を設けループの運転状態が集中してわかるようになっている。

3.2.6 ループキュービクル

OWL-1の一次系はループ運転中高放射能をもつて、厚さ1mのコンクリートブロックなどで放射線遮蔽をしたキュービクル内に收め、キュービクル外壁表面線量率が通常運転の場合 10 mrem/h以下におさえられている。又、キュービクル壁は有害な放射性物質が外部に漏れない様な気密構造となっており、ループ運転中常に水柱で最低5mm以上の負圧に保たれている。



記 号

○	32φ孔 32孔		燃 料
◎	38φ孔 6孔	—	ベリウム反射体要素
□	42φ孔 78孔	SR	微調整棒
○	ループ孔 OWL-1, OWL-2, OGL-1	SH	粗調整棒
(HR)	水力ラビット		
○	80φ孔 02, 03, 04, 07, 08, 09, 10		
○	32φ孔 01, 05, 06, 11		

Fig.1 JMTR 炉心配置図

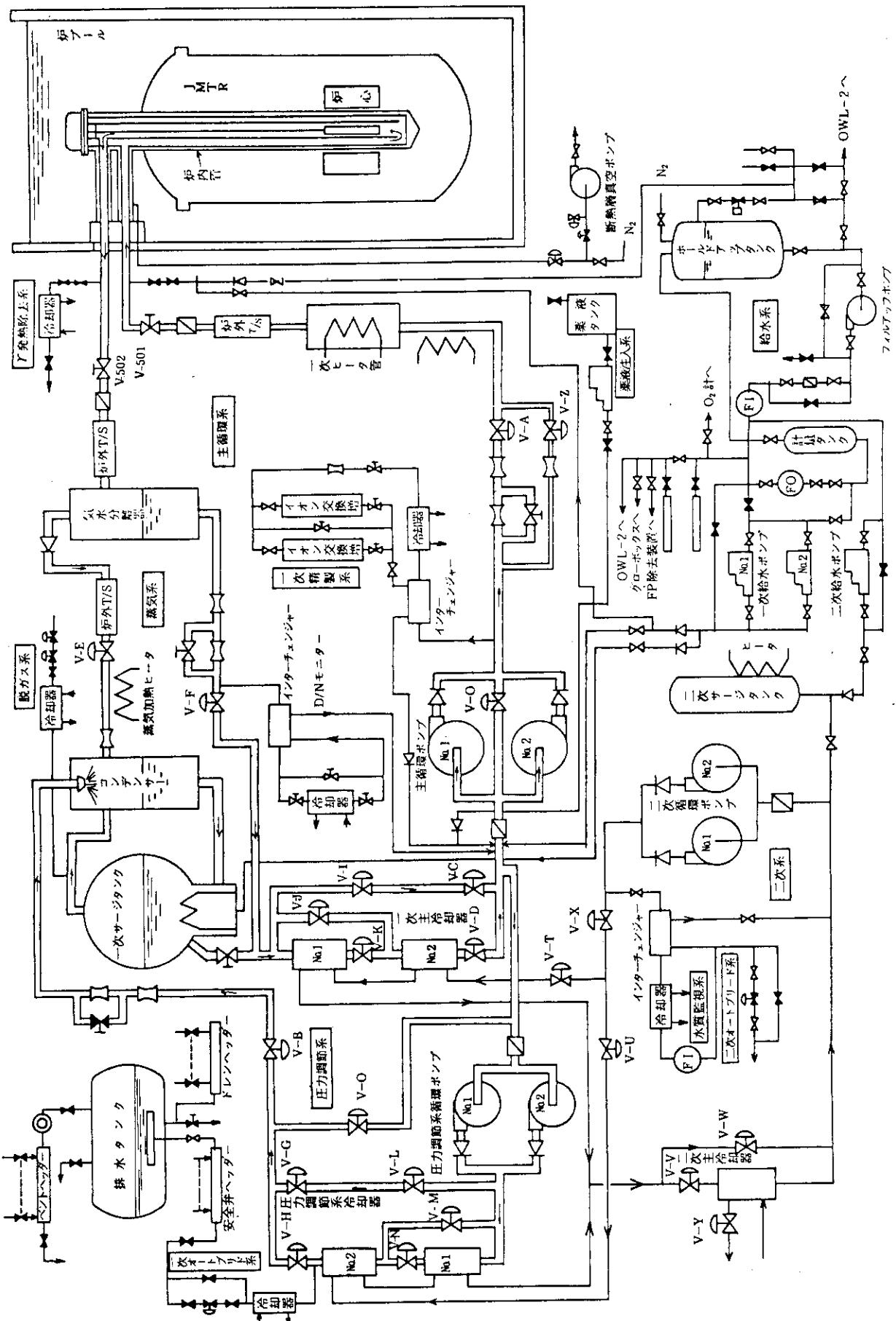
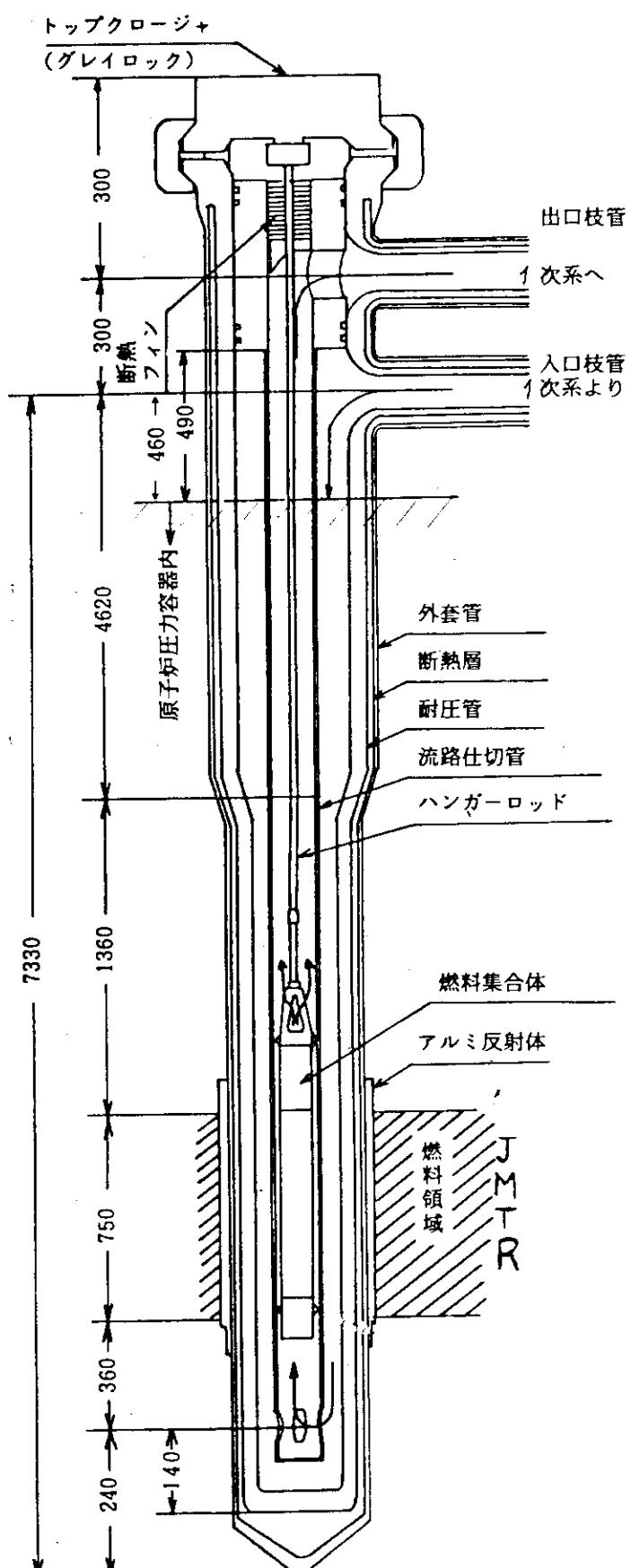


Fig.2 OWL1 フローレートシート



場 所		内 径	外 径
上 部	外 套 管	86.0 ϕ	92.0 ϕ
	耐 圧 管	60.7 ϕ	74.0 ϕ
	流 路 仕 切 管	42.0 ϕ	45.0 ϕ
下 部	外 套 管	64.2 ϕ	69.0 ϕ
	耐 圧 管	50.2 ϕ	60.2 ϕ
	流 路 仕 切 管	39.7 ϕ	42.7 ϕ
出 口 枝 管		38.2 ϕ	48.6 ϕ
枝 管 部 外 套 管		60.0 ϕ	66.0 ϕ

Fig.3 OWL-1炉内管

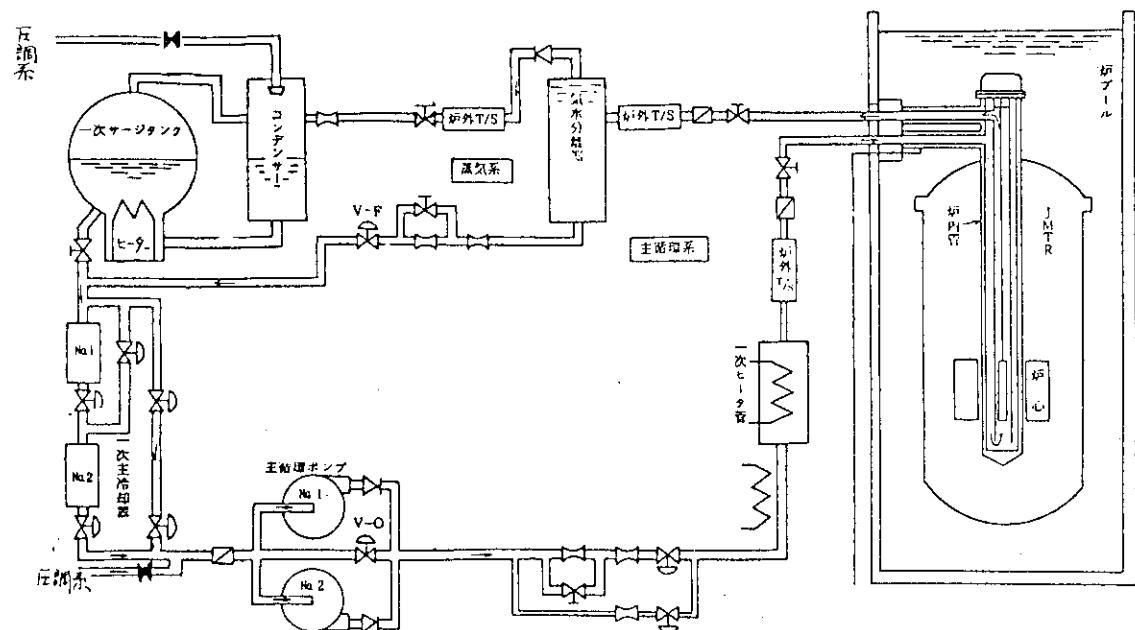


Fig. 4 加圧水型運転モードフローシート

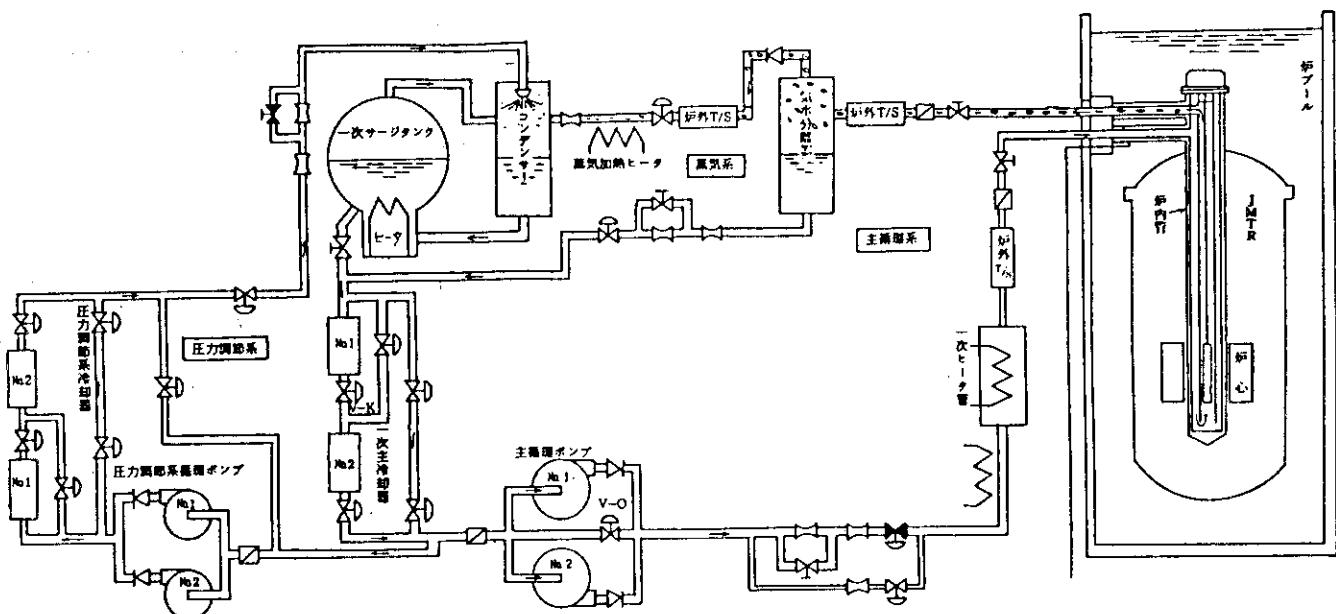


Fig. 5 沸騰水型運転モードフローシート

4. 第1次照射試料の設計

4.1 試料の概要

照射試料は、BWR型 8×8 燃料集合体の燃料棒の仕様を基準とした4本の燃料棒からなり、実験用各種計測体を取付け、ハンガーロッドによりOWL-1炉内テストセクションに吊り下げる。燃料棒の核燃料物質は、ウラン-235濃縮度1.5%の二酸化ウランである。4本の燃料棒は、燃料と被覆管の直径ギャップをパラメータとするため、燃料ペレットの外径を変えて製作する。各々の燃料棒の中心には、燃料ペレット中心温度測定用の熱電対を挿入する。さらにその他の計測体としてSPD型中性子検出器、被覆管の伸び計、FP圧力検出器、冷却材流量計、冷却材出入口温度測定用熱電対を取付ける。

本試料は、次のように構成する。

- (1) 热電対を挿入した燃料棒4本（うち1本はFP圧力温度検出器装備）、燃料棒を支持する管状タイロッド及びタイプレートなどからなる燃料集合体。
- (2) 被覆管伸び計、冷却材流量計などからなる計測体。
- (3) 燃料集合体と計測体を接続する構造物及びハンガーロッド。

4.2 設計上の条件

照射試料の設計にあたっては、試料の照射希望条件、JMTR及び照射設備の制限条件及び照射試料の健全性が満たさなければならない。

4.2.1 JMTR及び照射設備の条件

- (1) 原子炉出力 最高 50 MWt
- (2) 原子炉運転中、炉プール水表面放射線量率は、1 mrem/h以下
- (3) JMTRの卓越振動数は 5 Hz
- (4) OWL-1炉内管は、燃料領域外 (D-7)
- (5) 炉内管の設計地震力は、水平方向：0.6 G 垂直方向：0.3 G
- (6) OWL-1照射設備の最高使用条件

冷却材圧力：150 Kg/cm² G

冷却材温度：320 °C

4.2.2 照射試料の設計条件

- (1) 燃料棒仕様……………沸騰水型燃料棒
- (2) 燃料ペレット………… UO₂ ペレット
- (3) 燃料寸法…………… 10.68, 10.58, 10.48, 10.38 mm ϕ (外径), 616 mm (スタ

ック長)

(4) 冷却材条件

- (i) ループ運転モード 沸騰水型
- (ii) 圧 力 $71 \text{ Kg/cm}^2 G$
- (iii) 燃料集合体出口温度 286°C
- (iv) 燃料集合体出口蒸気含有率 10 %以下
- (5) 燃焼度最高 $6,000 \text{ MWD/T} \cdot \text{UO}_2$ (120 日相当)
- (6) 燃料試料最高線出力密度 500 W/cm
- (7) 燃料ペレット最高温度 $2,800^\circ\text{C}$ 以下
- (8) 最小限界熱流束比 (MCHFR) 1.9 以上

4.3 設計仕様

燃料集合体は、4本の燃料棒が窓付きの管状タイロッド及び上下タイプレートによって支持し、燃料中心温度測定用熱電対4本、燃料棒プレナムのFP圧力温度検出器1本を装備する。さらに、管状タイロッドには、自己出力型中性子検出器3本を装備する。

4.3.1 燃料棒

燃料棒は、濃縮ウランペレット (UO_2) をジルカロイ被覆管に充填し、端栓部を溶接する。 UO_2 ペレットスタックの上下に断熱ペレット (Al_2O_3) を挿入し、その上下にはFPプレナムを設ける。 UO_2 ペレットスタックには、燃料中心温度測定用熱電対挿入のため $2.1 \text{ mm } \phi$ の中心孔を設けた。

UO_2 ペレットの詳細はTable 2, Fig. 6の通りであるが燃料と被覆管のギャップを、パラメータとするために外径を4種類とした。スタックは孔あき39個、孔なし17個の計56個のペレットで構成した。 UO_2 ペレットの形状は円柱(筒)形、端面平型で、 $\text{U}-235$ 濃縮度は1.5%である。

被覆管はジルカロイ-2で、内径 $10.80 \text{ mm } \phi$ 、内厚 0.86 mm である。プレナムは各燃料棒とも燃料スタックの上下にあり、インコネル-X 750 製のスプリングで保持している。端栓は、上部、下部とも各種計装を取付けるため、材質、寸法等 Table 2 のようになっている。特に、熱電対が貫通する上部端栓、FP圧力センサーを取り付けるNo 3 下部端栓は、SUS 304 と Zry-4 の摩擦圧接材を使用した。この件に関しては後述することにする。燃料棒の組立図をFig. 7に示す。

4.3.2 燃料集合体とハンガーロッド

燃料集合体は、燃料棒4本、上下タイプレート及び管状タイロッド等からなる。各燃料棒は、タイプレートにより約 3.0 mm の間隔を確保した。またタイプレートは管状タイロッドにより軸方向に $789. \text{ mm}$ の間隔で固定され、燃料棒の伸縮が可能なように、ロッドスプリングにより燃料棒を保持している。

燃料棒の伸縮は、No 3 燃料棒の下部に取付けた伸び計によって測定される。また、管状タイロ

ッドには、SPDが取付けてある。タービン型流量計は、集合体の上部に取付けた。燃料集合体の組立図をFig. 8に示す。

この燃料集合体は、Fig. 3に示すようにOWL-1の炉内管に挿入し、その上蓋から約5,000 mmのハンガーロッド（外径19φ、肉厚1.5t）により炉心部に装荷される。照射試料の全体組立図をFig. 9に示す。

4.4 設計計算

本照射試料は、燃料中心温度測定実験のため、JMTR, OWL-1照射設備で照射されるが、この実験を遂行するため次のような条件を満たすことが必要である。

- (1) 燃料の中心温度は、ペレット溶融温度以下とする。
- (2) 燃料集合体構成材に、熱膨張による有害な応力、変形等がなく、また被覆管が破損しないこと。
- (3) 運転時における最小限界熱流束比は、1.9以上とする。

ここでは、設計計算として、1)燃料ペレット中心温度の評価、2)被覆管強度の評価、3)SUS-Zry圧接材の強度評価、4)燃料棒の焼損の評価を行った。

4.4.1 燃料ペレット中心温度の検討

OWL-1の炉内管は、39.7 mmφであり、発熱分布は、水平方向にも生じるが、実験条件下燃料棒の最高線出力密度を規定して、軸方向分布のみ考慮する。従って熱発生割合の分布は、3本の燃料棒について軸方向一次元モデルとして取扱う。

- (1) 燃料棒温度分布は、Fig. 10の通り、全長を10等分して計算する。各領域の熱中性子束軸方向分布はJMTR炉心の分布とする。（Fig. 11）
- (2) 半径方向の温度分布は、燃料ペレット、ギャップ及び被覆管領域を考え、さらに燃料ペレット部については50等分した計算領域と設定する。
- (3) 熱伝導方程式は、軸方向熱流を無視した中心対称の方程式とする。
- (4) ペレット内半径方向の発熱分布は変形ベッセル関数Io分布とする。
- (5) 計算は燃焼度の増加に伴い、FPの放出、被覆管とペレットの接触状態などを考慮する。

従って計算結果は、燃焼開始時から6,000 MWD/TUO₂まで求め評価する。

計算は、以上のモデル化をもとに照射履歴に従った燃料挙動解析評価プログラムコード「FREG-3」^{1), 2)}を使用した。このコードに用いた入力データ及びオプションモデルをTable 3, 4に示す。

計算結果は、Table 6, Fig. 12の通りで軸方向における最高線出力密度の点における燃料中心温度は、No. 1燃料棒で1,938 °C、ギャップの大きいNo. 4で2,331 °Cであった。しかし実際に予想される最高線出力密度400 W/cmでは1,800 °C付近となるものと思われる。

4.4.2 被覆管の強度

本試料に使用する被覆管は、ジルカロイ-2を用いて内外圧力に対し自立型で設計してある

が、ここでは常温の水圧試験時の内外圧力と照射初期及び終期の内外圧力について強度の安全性を検討した。熱応力については、前項 3.4.1 で求めた被覆管内外面の温度差とした。また、燃料棒内圧は、封入ガス、核分裂生成ガスと蒸発性不純物の寄与によるものとする。

計算式は外圧応力の計算式³⁾、最大熱応力計算式を使用した。

(1) 外圧応力の計算式

$$P_m = - \frac{PeD}{2t} \left(1 + \frac{6u/t}{1 - Pe/P_{cr}} \right)$$

ただし P_m : 外圧によって生じる応力

Pe : (外圧 - 内圧)

P : 被覆管外径

t : 被覆管肉厚

u : オーバリティ

P_{cr} : 限界挫屈圧力 = $\frac{E}{4(1-\nu)} \left(\frac{t}{r_m} \right)^3$

E : ヤング率

ν : ポアソン比

r_m : 被覆管半径

(2) 最大熱応力の計算式

$$Q = \frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\nu)}$$

Q : 最大熱応力

ΔT : 被覆管内外温度差

ν : ポアソン比

E : ヤング率

α : 線膨張係数 [°C]⁻¹

計算の結果を Table 6 に示す。評価は ASME - Sec III の安全性評価に準じて

$P_m < S_m$

$P_m + Q < 3 S_m$

ここに S_m : 被覆管の許容応力

を満たしていることを確認した。この結果、被覆管の強度は、照射実験上十分安全であるといえる。

4.4.3 SUS-304/Zry-4 トランジッションジョイントの強度

本継手の詳細については 4.2 で後述するが、摩擦圧接部には内圧、熱膨張などにより周、半径及び軸方向の応力が作用する。ここでは、そのもっとも大きな応力である内圧による引張応力について強度評価した。この結果、300 °C のとき、上部端栓で 0.025 Kg/mm²、下部端栓 0.066 Kg/mm² である。これは、この継手の許容応力 8.0 Kg/mm² に比べて十分小さく強度は安全であることを示した。

4.4.4 燃料棒の焼損の検討

本試料の実験は沸騰水型軽水炉の燃料を用いるため、焼損の限界熱流束を求め、Hench-Levy の式⁴⁾から求めた限界熱流束との比較により安全性を評価する。限界熱流束比は 1.9 以上とする。限界熱流束の計算モデルは、Fig. 13 のように流路断面を 5 つのサブチャンネルに分けてクラスター燃料の熱水力学計算プログラムコード⁵⁾「COBRA-II」を使用した。計算結果を Fig. 13 に示す。最小限界熱流束比は 2.42 であり、蒸気含有率は出口で最高 6.4 % となる。

Table 2 UO₂ペレット、被覆管等の設計仕様

項目	バラメータ	項目	バラメータ
(UO ₂ ペレット)		(被覆管)	
濃縮度	1.50 ± 0.05 w/o	材質	Zry-2
密度	95.0 ± 1.5 %T·D	寸法	0.86 ^t × 10.78 ^{ID} mm
直 径 No.1	10.68 ± 0.03 mm	(上部端栓)	
No.2	10.58 ± 0.03 mm	材質	Zry-4/SUS 304 (圧接材)
No.3	10.48 ± 0.03 mm	寸法	12.5 ± 0.05 ^{OD} mm
No.4	10.38 ± 0.03 mm	(下部端栓)	
高さ	11.0 ± 1.0 mm	No.1, 2, 4, 用	
燃料領域長さ (スタック)	616 ± 5 mm	材質	Zry-2
熱電対用孔径	2.1 ± 0.2 mm	寸法	12.5 ± 0.05 ^{OD} mm
形 状	端面フラット	No.3 用	
O/U 比	2.0 ~ 2.03	材質	Zry-4/SUS 304 (圧接材)
蒸発性不純物 ガス	~ 60 μℓ/g · UO ₂	寸法	12.5 ± 0.05 ^{OD} mm

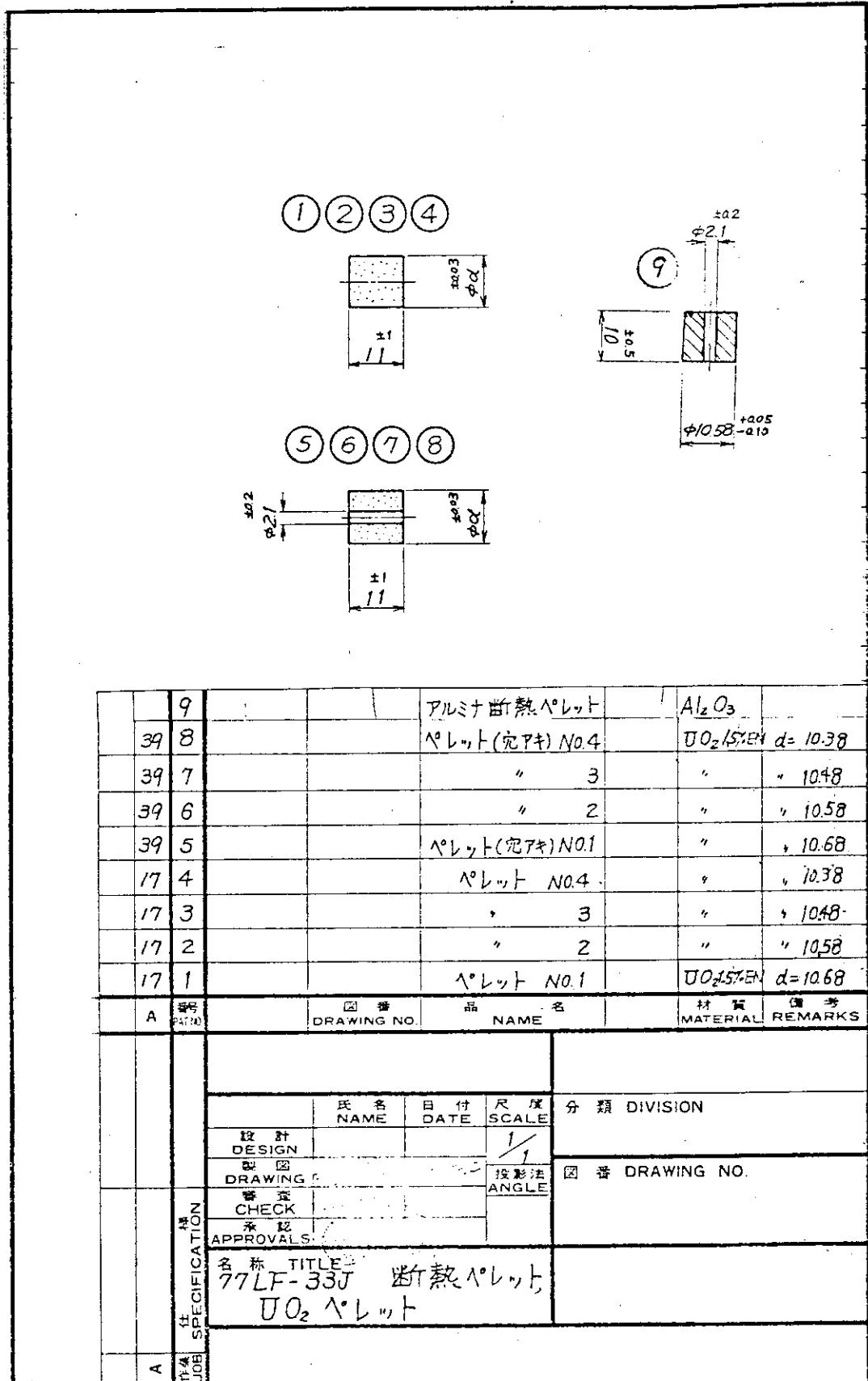


Fig. 6 UO_2 ベレット, 断熱ベレット

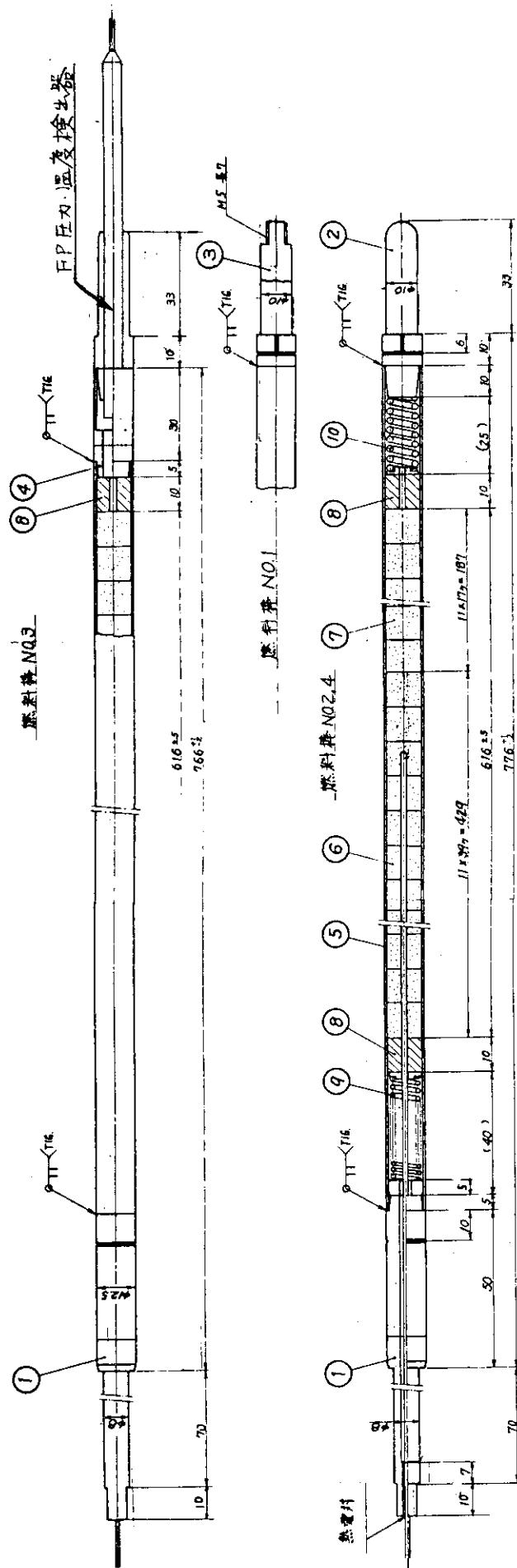
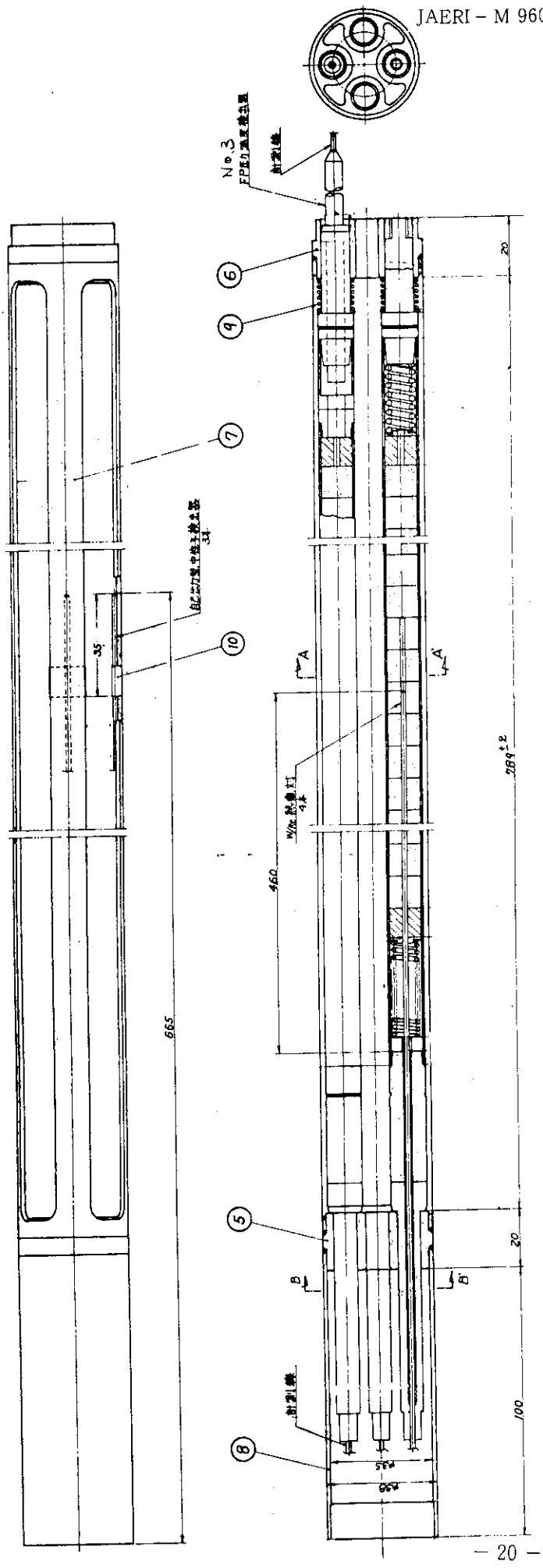


Fig. 7 燃料棒組立圖

JAERI - M 9600

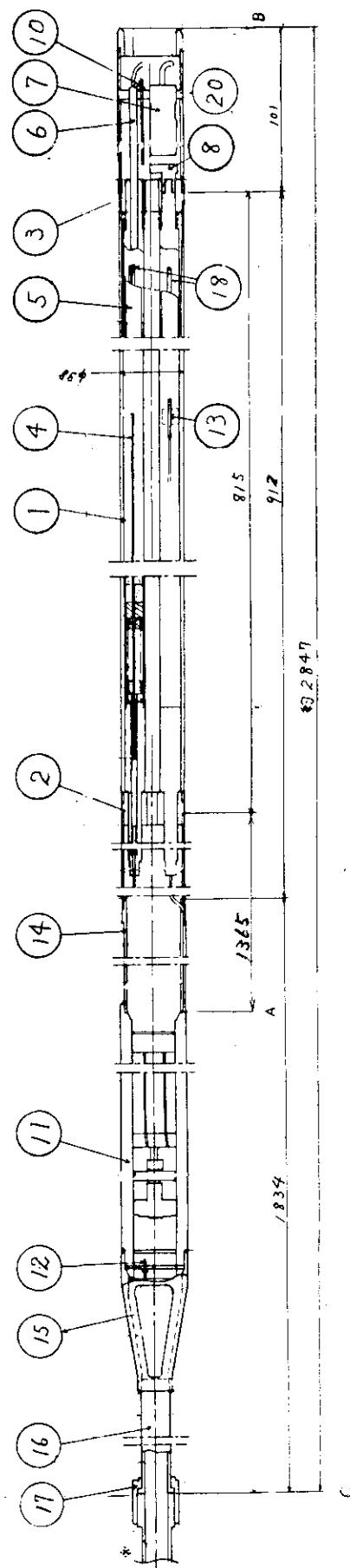


部品番号	上×見	SPECIFICATION	
		NAME	MATERIAL
10	上×見 ロッドスリーブ	SUS304	
9	上×見 ロッドスリーブ	1.0φX-X	
8	シユラウト	SUS304	
7	管状タイロット	.	
6	下部タイロット	.	
5	上部タイロット	SUS304	
4	燃料棒	Ni4	
3	燃料棒	Ni4	
2	燃料棒	Ni4	
1	燃料棒	Ni4	
A-A断面	DRAWING NO.		
B-B断面	DRAWING NO.		
C-C断面	DRAWING NO.		



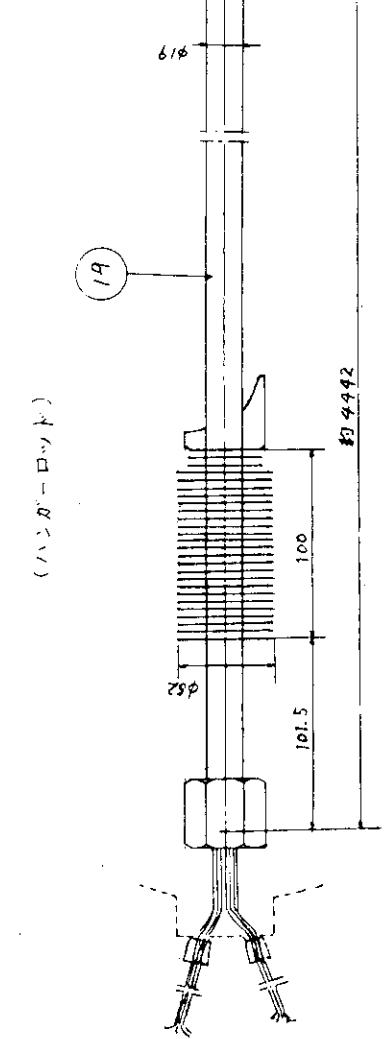
Fig. 8 燃料集合体組立図

(燃 料 集 合 体)



- 21 -

品番	部品名	規格	寸法	角材	規格	寸法	角材	規格	寸法
20	母 管 全 長 (B)	SUS304	1						
19	ノズル-D付(A)	SUS304	1						
18	計 測 管								
17	内 测 管	SUS304	1						
16	外 测 管(B)	SUS304	1						
15	母 管 (A)	SUS304	1						
14	蓋 内	SUS304	1						
13	自己吸出型熱電線端子								
12	C/A 端子		1						
11	自己吸出型		1						
10	C/A 端子		1						
8	支 付	SUS304	1						
7	支 付		1						
6	FEP防爆内管接頭		1						
5	管 枝 74074	SUS304	1						
4	WPE 納電管		4						
3	下 部 3474-1	SUS304	1						
2	上 部 3174-1	SUS304	1						
1	燃 料 管		4						

直通尺 A-B部 1.5
3000
以下

OWL-1 照射試料	直通	二 角	規格	規格
77LF-33J				
全体組立経路(国)				
日本原子力研究所				

Fig. 9 照射試料全体組立図

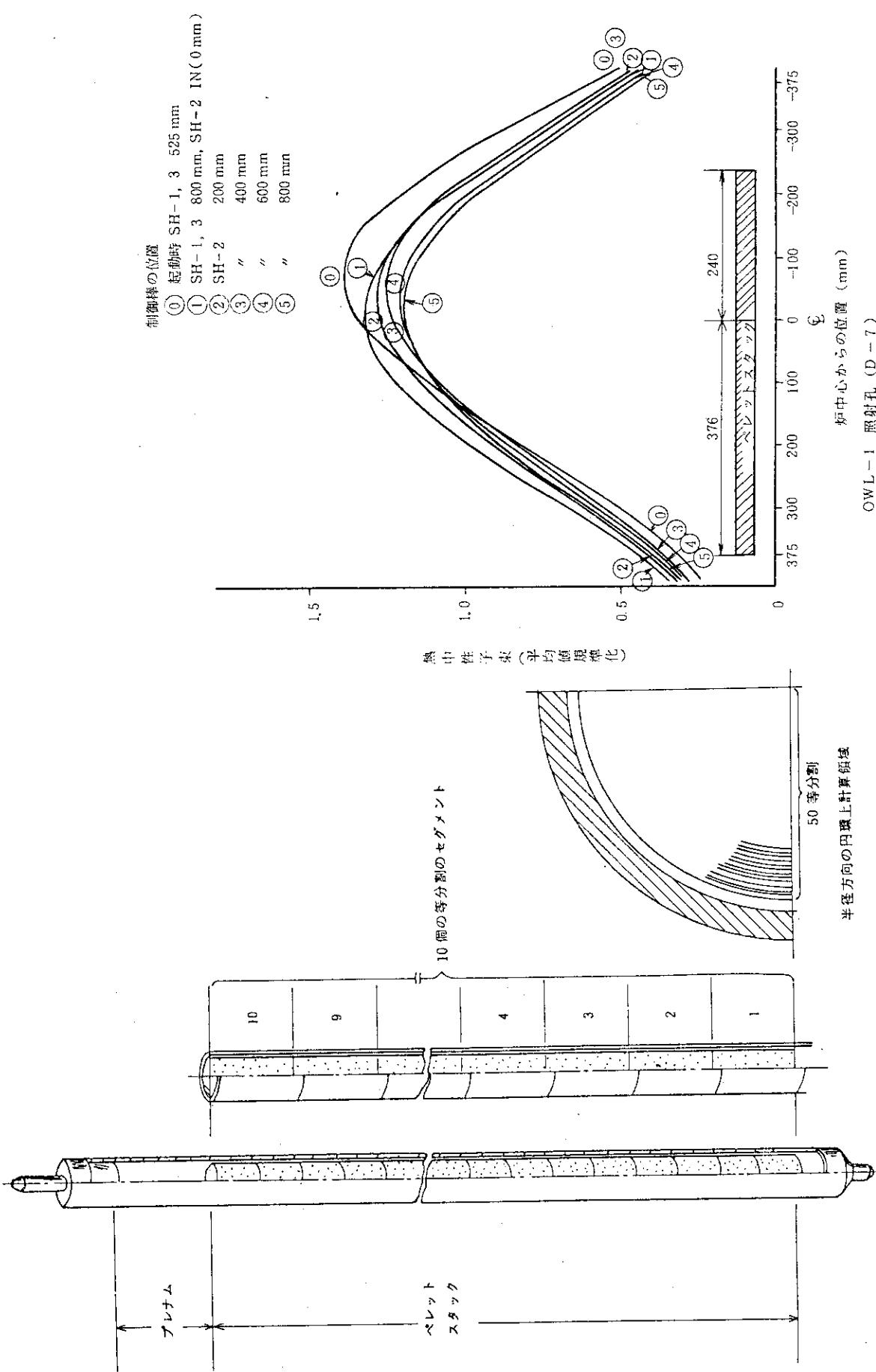


Fig. 10 燃料棒計算モデル

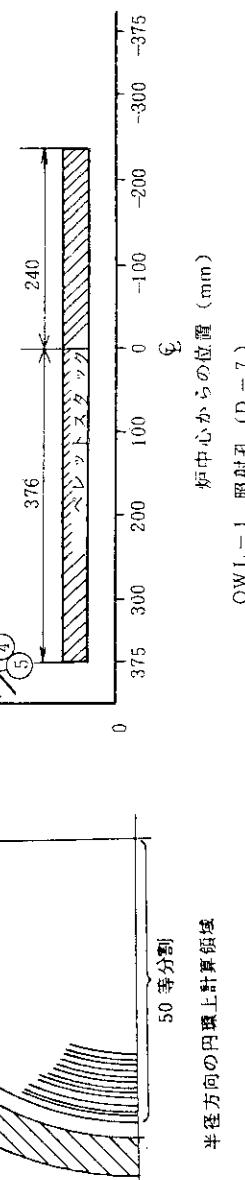


Fig. 11 熱中性子束の軸方向分布

Table 3 「FREG-3」入力データ

項目	単位	入力データ
U^{235} 濃縮度重量比		0.015
燃料密度(T.D)		0.95
燃料ペレット直径	mm	10.68
No. 1		0.
No. 2		10.58
No. 3		10.48
No. 4		10.38
被覆管内径	mm	10.78
外径		12.50
燃料スタッツ長さ	mm	616
中心孔直徑	mm	2.1
プレナム体積	cm^3	5.93
冷却材温度差(出口-入口)	°C	7.4
燃料表面糸さ	cm	0.00016
被覆管内面糸さ	cm	0.00011
プレナム封入ガス圧力	atm	1
プレナム封入ガス 直徑ギヤップ		He 100 %
No. 1	μm	100
No. 2		200
No. 3		300
No. 4		400
被覆管材質		Zry-2

Table 4 オプションモデル

FUEL THERMAL CONDUCTIVITY EQUATION		LYONS, DOCKET STN-50447-1)	
TEMPERATURE		THERMAL CONDUCTIVITY	
UNRESTRUCTURED FUEL (WATT/CM-C)		RESTRUCTURED FUEL (WATT/CM-C)	
(DEG C)			
0.		0.095	0.097
300.		0.055	0.055
600.		0.039	0.039
900.		0.030	0.031
1200.		0.026	0.026
1500.		0.024	0.024
1800.		0.023	0.023
2100.		0.023	0.024
2400.		0.025	0.026
2700.		0.028	0.029
3000.		0.033	0.033
FUEL THERMAL EXPANSION EQUATION			
CONWAY, FINCEL AND HAIN (BNWL-1778, SEP. 1973. GAPCON-THERMAL-1)			
TWO REGION MODEL (HALF CRACK TYPE)			
FUEL SWELLING IS NOT TAKEN INTO ACCOUNT.			
GAPCON-THERMAL-2 RELOCATION MODEL (BNWL-1898, NOV. 1975)			
E. ROLSTAD (HALDEN) (HPR-188, PAPER NO. 17)			
CLADDING-TO-COOLANT HEAT TRANSFER COEFF., COOLANT IS WATER JENS LOTTES EQUATION			
ROS AND STOUTE EQUATION (CRFD-1075)			

Table 5 燃料中心温度の評価

燃料棒	燃焼度 (MWD / MTU)	燃料棒内温度 (°C)			
		被覆管外面	被覆管内面	燃料表面	燃料中心
No. 1	0	294.8	368.2	433.4	1739
	2000	"	"	453.4	1766
	4000	"	"	501.2	1840
	6000	"	"	561.3	1938
No. 2	0	294.8	368.2	604.5	2053
	2000	"	"	454.7	1768
	4000	"	"	597.9	2000
	6000	"	"	621.4	2035
No. 3	0	294.3	351.3	704.4	1881
	2000	"	"	723.5	1845
	4000	"	"	895.2	2100
	6000	"	"	931.8	2147
No. 4	0	294.4	353.7	831.3	2071
	2000	"	"	958.7	2184
	4000	"	"	1060.0	2286
	6000	"	"	1102.6	2331

Table 6 被覆管強度の評価

計算条件	許容値	計算結果
水圧試験時	周方向応力	周方向応力
温 度 常温	< 26.0	6.83
压 力 88 Kg/cm ² g	Kg/mm ²	Kg/mm ²
照射時	周方向応力	周方向応力
温 度 (平均) 324 °C	< 11.0	5.46
压 力 71 Kg/cm ² g	Kg/mm ²	Kg/mm ²
寸 法	周方向応力	周方向応力
平均半径 5.82 mm	+ 最大熱応力	+ 最大熱応力
肉 厚 0.86 mm	< 3 × 11.0	8.50
オーバリティ 0.10 / 4 mm	Kg/mm ²	Kg/mm ²

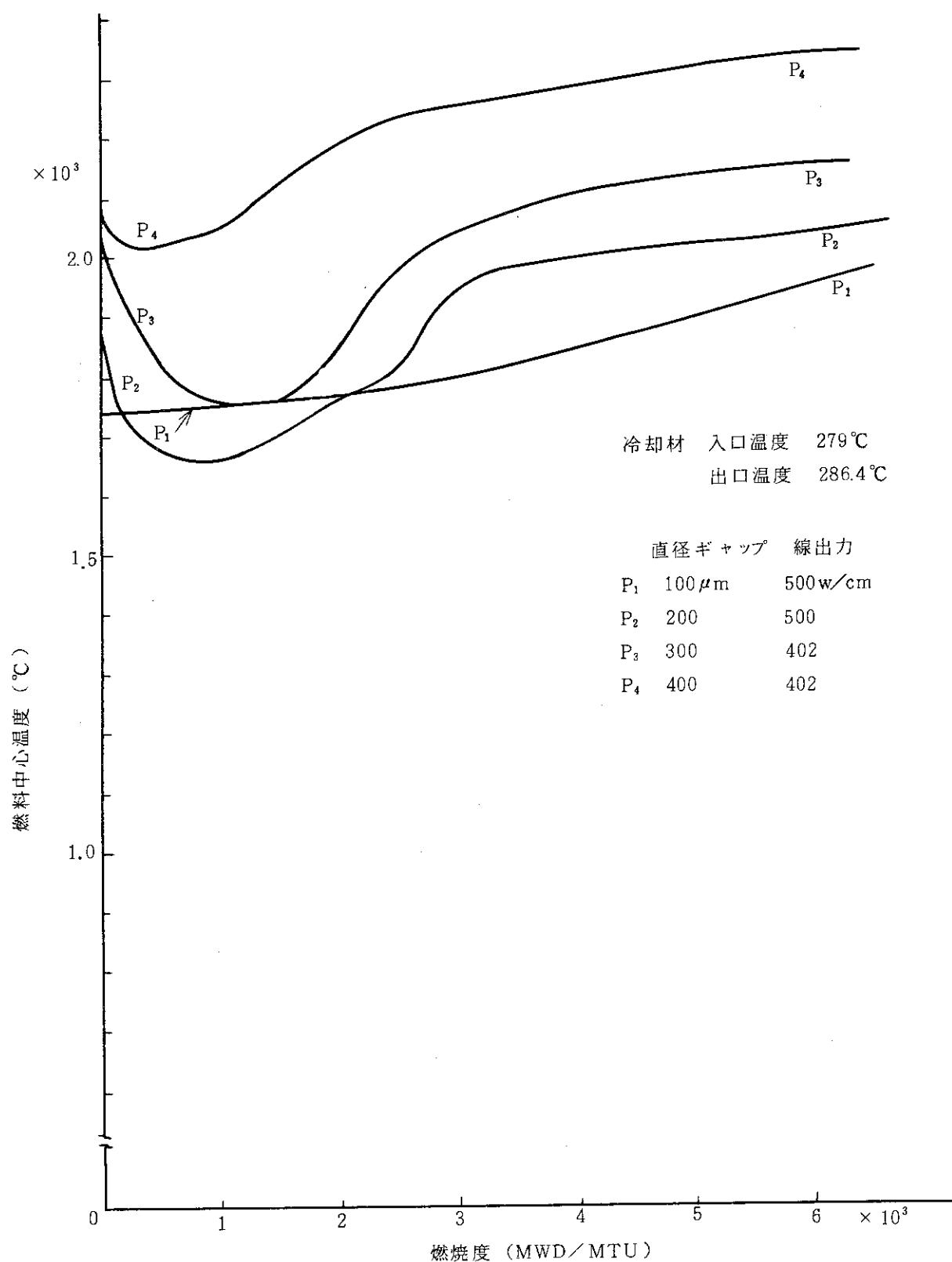


Fig. 12 FREG - 3による燃料中心温度の照射履歴

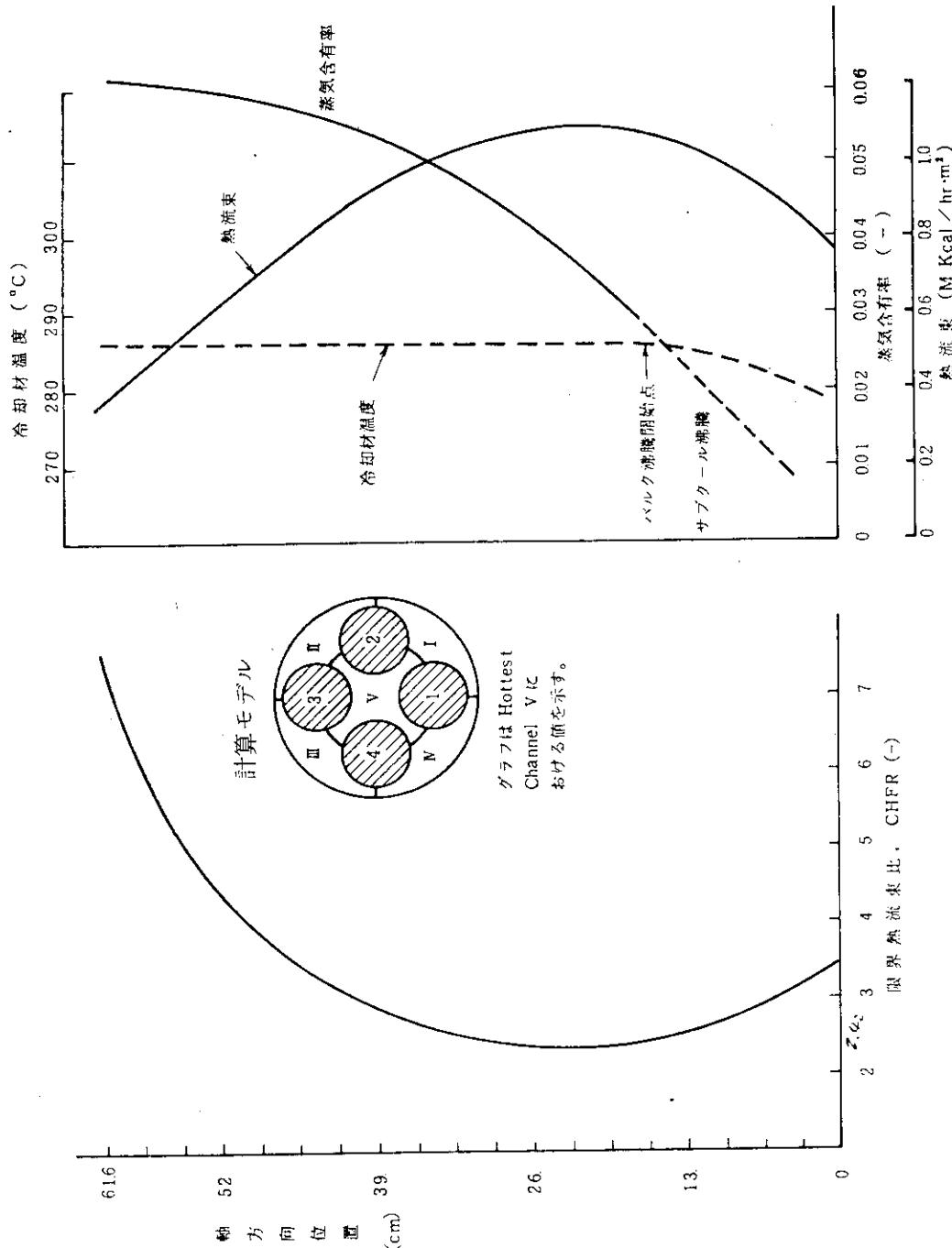


Fig. 13 燃料試料の限界熱流束比および熱水力特性

5. 計装品の開発と選定

本実験の主目的の一つである炉内計装品の開発、照射試験と炉内確認試験を行うため、各種の計装品を開発、選定して燃料集合体に取付けた。第1次照射試料の計装品名はすでに述べたが、ここでは、次のような点について詳述する。

- 1) 燃料中心温度測定用熱電対
- 2) 熱電対の端栓封入方法
- 3) FP 圧力／温度検出器
- 4) 被覆管伸び検出器
- 5) タービン型流量計
- 6) その他の計装品

5.1 燃料中心温度測定用熱電対

燃料中心温度測定に用いられる W-Re 熱電対は、 JMTR での使用経験でも寿命が短く、破損例も比較的多い。使用した製品自体にも問題があることが考えられるため、本実験に使用する熱電対についての購入仕様は特に吟味した。今回選定の検討項目は、耐熱金属シース部の材質、絶縁材、シース外径、価格及び納期などであり、製作メーカーの選定は、優劣を決定するに充分な資料も実績も今だないので、数社の製品を同時に購入し、照射実験によって評価することにした。第1次照射試料に用いるのはこのうち、某メーカーのもの同一ロット製品 4 本である。この仕様は次のとおりである。

燃料中心温度は、通常照射時 1800 °C 付近となるため材料の選定には、充分考慮し、芯線材は、W 5 % Re-W 26 % Re、絶縁材は BeO、被覆材は Mo とした。また、被覆材外径は、1.3 φ とした。ここで、この熱電対の特徴について述べると、熱電対は、燃料スタック長 616mm の中心部の最高温度と予想される位置まで挿入され、1000 °C を超える高温にさらされるのであるが、燃料領域以外の部分では 300 °C 以下である。また、熱電対を燃料棒にロー付け等で取り付ける必要があり Mo では、作業が困難である。従って、Mo 被覆の測温部をできるだけ短かくし、接続部を設け、補償導線を用いた延長ケーブルを接続することにした。その結果、Fig. 14 のように Mo シース部 1.3 φ × 490 ℥、接続部 2.0 φ × 20 ℥、延長ケーブル 1.6 φ × 17,000 ℥ となっている。延長ケーブルの材質は、AISI 321 ステンレス鋼である。

燃料中に挿入される耐熱金属シース部は、熱電対の性能上からその健全性が特に要求され、現在開発されているシース材としては、Mo、Nb、Ta があり、また WRe 合金をシースとした熱電対も開発されている。これらはそれぞれ特徴があり、Ta は、高温特性は優れているが、ホットセルでの解体時に汚染発生の問題がある。Nb は Mo と比較して高温時の機械的特性が劣り、また、UO₂ の酸素との両立性、水素透過率も悪い。WRe 合金は、高温特性も良く、化学的にも安定であるが加工性が悪く、高価なため今後の計画にゆずった。以上のような事実を考慮して、本実験では、Mo をシース材と選定した。（Appendix・B）

5.2 热電対の端栓封入方法

軽水炉燃料棒の被覆管は、一般にジルカロイ材が用いられ、これを密封する端栓もやはりジルカロイ材である。本実験においても、BWR型燃料棒を基準仕様とした被覆管は、ジルカロイ-2であり、端栓も溶接の都合により、ジルカロイ材の使用が余議なくされた。しかし、計装燃料棒として、燃料中心温度測定熱電対やFP圧力検出器等を燃料棒に直接取付る必要があり、また取付部は完全にシールしなければならない。ここでシール方法として溶接やロー付を採用するため、JMT-R⁶⁾で研究開発されているジルカロイ-4とステンレス鋼(SUS 304)の摩擦圧接材を使用した。この摩擦圧接材については、各種試験検査を行い、品質が評価されており、強度についても常温、高温(300°C)においてFig.15のように確認した。摩擦圧接材は、被覆管との溶接(TIGアーケ溶接法)側にジルカロイ-4を、計装品ターミナル側にステンレス鋼を用いている。

熱電対は上部端栓から挿入され、シールは、熱電対のシーズ(AISI 321ステンレス鋼)と端栓(SUS 304)をニクロブレージングにより行う。熱電対封入には、従来、主として、ハルデン炉(ノルウェー)において使用されていたホークシールと呼ばれるメカニカルシールがとられてきたが、国内での技術が十分なレベルに達しておらず取付時の作業性、使用時の健全性に疑問を持たれていたので、ロー付部材料をともにステンレス鋼にすることにより解決したものである。ニクロブレージングを採用するにも以下に述べる熱電対ロー付け確性試験を実施し、曲げ試験、リーグ試験等評価確認しニッケルローに決定した。しかし、曲げ試験の結果、ブレージングの高温影響により、ロー付け部が脆化し曲げ圧力に対し、非常に弱くなることがわかった。このため、端栓に取付けシール後の熱電対は取扱いを充分注意し曲げ負荷のかからないよう、サポートを設けることにした。

下部端栓については、燃料棒No.3にFP圧力検出器を取り付けるため、これも摩擦圧接材を用いることにした。FP圧力検出器についての詳細は、次項で述べるが外部アダプター(端栓型形状)をステンレス鋼を用いて製作し、摩擦圧接材のSUS 304の部分にTIGアーケ溶接により取付けシールする。

5.2.1 热電対ロー付確証試験

燃料棒内に挿入する熱電対の取付、シール方法について検討した結果、ジルカロイ-4／ステンレス鋼の摩擦圧接継手材を端栓を用いて、熱電対のシーズ材ステンレス鋼とのロー付けが可能となるため、従来、JMT-Rのキャップセル等が行われているロー付けで封入することに決定した。しかし、端栓部の加工寸法、材質、ロー付けの加熱条件等その技術を確立するためには、充分な確証試験を行う必要がある。確証試験は、照射試料の組立を担当する原研工作課にて行い、ロー材の選定、同材質、寸法を用いたモックアップ試験による健全性の確認である。

(イ) ロー付け試験

ロー付け部の材質は、端栓がSUS 304、熱電対シーズがAISI 321(SUS 321相当)である。寸法は実験と同じものとした。熱電対は、外径1.6φ、インシュレータは、酸化マグネシウム、芯線は、W-Reの補償導線である。また、シーズの肉厚は約0.25mmである。ロー付試験に使用するロー材は、使用する燃料棒の雰囲気、温度、工作課における経験的技術などを考慮し、金ロ

ーとニッケルローを選定した。

金ローについては、Table 7 のように条件を変えて実施した。しかし、いずれも加熱により金ローは溶けるが、母材と溶融せず小さな丸い玉状となって全くロー付けされず、満足するものはできなかった。Photo - 1, 2 に示すロー付けの写真からも、マイクロ図 ($\times 10$) 及びその拡大図 ($\times 200$) から十分な溶け込みが得られていないことが明らかである。

次にニッケルローについて実施した。この場合、すでに JMTR 照射用キャップセル等の製作経験で使用したロー付け技術をもとに、加熱出力（電圧×電流）、加熱時間、ロー付温度、雰囲気（真空間度）などの条件を変えて 7 ケースについて行ったが外観検査、リーク検査等の検査では、いずれも結果が良好であった。また、Photo .3, 4 に示す金相試験からも十分な溶け込みが観察された。

以上の結果から、ニッケルローをロー材として選定することにした。更に健全性を確立するため、10 個のロー付け部にカラーを挿入したモックアップ試料を製作し、ロー付け条件を確認し、以下の性能試験と実施した。Table 8 にその結果を示す。

金相試験では、ニッケルローが、母材に十分溶け込んでいるか、被覆管の破損はないかなどを調べたが、溶け込みは十分であり、被覆管の破損もなく健全であった。Photo .5, 6 に一例を示す。また、気密性を確認する方法として He リーク試験やアルコール浸漬による電気絶縁試験を行い、その性能を確認した。

次に曲げ試験を行った。ロー付け作業による高温のため一般にロー付け部は硬化し脆化すると考えられたが、 $1.6 \text{ mm}\phi$ の熱電対は、燃料集合体組立中に曲げ応力が加わることもあり、曲げに対する強度を確認する必要があった。曲げ試験は、ロー付け熱電対 2 本、比較用熱電対 1 本について、Photo .7 に示す曲げ試験機を使用して垂直より左右 30 度、計 60 度の曲げを繰り返し、クラックの発生（絶縁の劣化）、シース破断、補償導線の切断の状況を調べた。結果を、Table 9 に示す。製作条件（加熱時間など）の違いにより差違が現われているが、いずれにしても曲げに対する十分な注意が必要とされる。

以上、熱電対ロー付け確認試験の結論として、熱電対ロー付けは、ニッケルロー付けを真空中で行い、ロー付け後の取扱いには、曲げ応力のかからないよう十分注意することにより、燃料棒端栓部シール方法として使用できることが確認された。

5.3 FP 圧力／温度検出器

燃料棒内のプレナムガスは、製作時常温にて、大気圧 ($\approx 0.1 \text{ MPa}$) の He を封じたものであるが、燃料棒を照射すると、このプレナムガス圧力は、昇温によるガス膨張、核発熱による燃料ペレット内不純物ガスの放出、核分裂生成ガスの放出等により時々刻々変化する。燃料棒の挙動研究には、このプレナムガス圧力の測定は、放出量の定量、燃料ー被覆管ギャップコングタンスの解析、被覆管の腐食や強度等の健全性解析等重要な因子であり、この検出器の測定レンジは、圧力： $0\sim 5 \text{ MPa}$ 、温度： $0\sim 400^\circ\text{C}$ のものを検討した。

圧力検出器としては、従来 JMTR でキャップセル用に開発してきた ヌルバランス型のものがあるが OWL-1 の炉内管のスペースが狭く、のび検出器やターピン型流量計などと共に試料に取付

けるためには、これまで開発された検出器のサイズでは無理があり、この小型化にも問題が多い。そこで KAMAN 社製の KP-1921 型を採用した。この検出器は、うず電流方式で次のような特長を有する。(1) 小型である。(2) 燃料棒のプレナム部に検出器を直接組込むことができる。(5.2 参照) (3) ガス供給ラインを必要としない。

次に検出器の動作原理を述べる。この検出器は印加圧力によって変位するダイヤフラムを内蔵しており、この変位は高周波電流によって発生している渦電流に変化を与える。渦電流の変化(電磁的なエネルギー損失の変化)は、電力を供給しているコイルのインピーダンス変化となって表われる。これを較正回路を含む測定回路をへて、電圧信号として取り出すものである。原理図を Fig.16 に示す。図中参照コイルとは、使用環境において圧力以外にインピーダンス変化を与える影響(例えば、温度や放射線など。)を補償するためのものである。

Table 10 に圧力温度検出器の主要な性能を、Fig.17 に形状、寸法を示す。較正曲線を Fig.18 に示す。

また、この検出器の検出端(ダイヤフラム付近)には熱電対を取付けることができ、C/A 熱電対がレーザー溶接されている。

5.4 被覆管伸び検出器(変位計)

燃料棒の被覆管は、照射により、各種の変形を伴うが、大きな変形として伸びがある。被覆管は、定常的に、温度による伸びの変化が現われるが、燃料挙動上からは被覆管と燃料の相互作用による変形に伴う伸びの変化がある。この伸びを測定することにより、被覆管破損状況の解明に有益なデータを得ることができる。⁷⁾

被覆管の伸びを測定する変位計としては、JMT-R で、すでに使用経験がある差動変圧器方式や、渦電流方式があるが、今回の場合、空間的制限のため小型であることが要求され、後者のものを採用した。前者については、JMT-R 内で更に小型化を進め、検出原理上の性能劣化を解決する開発を行う予定である。

渦電流方式の変位計の特長は、(1) 長さ方向が、50mm 以内の空間に納められている。(2) 高精度($1 \mu\text{m}$ の測定可能)である。(3) 1100°F ($\approx 593^{\circ}\text{C}$) の水、ガス雰囲気中で使用可能で、また、中性子照射についても 10^{19}nvt までのテストデータがある、などである。

測定原理は、先に述べた FP 圧力検出器のダイヤフラム変位の測定と同様であるが、この場合、ダイヤフラムのかわりに被測定体(ターゲット)を燃料棒下部端栓に取付けて使用する。また、放射線や温度の影響は参照コイルによって補償される。主な仕様を Table.11 に示す。この変位計を使用するにあたって注意すべき点は、被測定体に近接した構造物が変形したり、位置が変わると、渦電流に変動をもたらし、測定誤差となって表われるということである。したがって被測定体以外は固定していなければならない。また、使用される周辺構造をあらかじめ模擬したモックアップをつくり、較正曲線を得ておく必要がある。この変位計の形状、寸法を Fig.19 に較正曲線を Fig.20 に示す。

5.5 タービン型流量計

燃料試料発熱量を求め、OWL-1プロセスコントロールのため、炉内管内冷却材流量を測定しているが、これには、通常、ベンチャリー管式流量計を使用している。しかし、この方式では、単相流しか測定できず、このシリーズ実験で意図しているBWRタイプの沸騰水照射した場合、蒸気含有率（ボイド率）の測定が不可能である。沸騰水状態における炉内部の熱収支は、この蒸気含有率から求めるため、この測定は不可欠である。JMTRでは精度良く、単相、二相流とも測定できるタービン型流量計を開発した。^{8) 9)} タービン型流量計は、試料アセンブリーの入口、出口の2ヶ所に組込む予定であったが、ここでもOWL-1炉内部の空間的制限から、試料の出口側のみ取付け測定し、単相流の入口側は、従来のプロセス制御系の流量計により測定することにした。¹⁰⁾

従来、タービン型流量計については、JPDR、HBWRなどの使用例が報告されているが、これらのタービン型流量計は、いわゆるハルデン型と称されているものである。今回我々が使用するのは、国産のプロセス用タービン型流量計の改良型で、炉内計装用としては、初めてである。しかし、この種のタービン型流量計に関しては、永年JMTRインパイルループ（OWL-2）の炉外部で使用され、種々の改良を加えたものであり、十分使用に耐えるものと期待している。

タービン型流量計の構造、原理は、ロータの前後に置かれたサポートでガイドブッシング、シャフト、スリーブペアリングを介してロータを保持し、その回転によりハウジングに組込まれた永久磁石の磁界を切り、ピックオフコイルによりその信号をパルスとして取出すものである。タービン型流量計の寸法は、炉内管内径により制約を受けるが、出口側は二相流の条件で使用するため可能な限り大きくした。炉内管の内径（出口側42φ）を考慮してロータ外径25φ、ピックオフコイル厚さ10mmである。また、構成する主要部材は、SUS316であるが、ロータ、シャフト、ペアリング等についてはこれまでのJMTRでの使用経験に基いて超硬合金（シャフト、ペアリング）と17-4pH（ロータ）の組合せとした。信号を取出すピックオフコイルについては、1個の予備を考慮して2個取付けた。Fig.21に概略図を示す。今回使用するタービン型流量計の特徴としては、

(1) 小型、高速回転型である。

従来のOWL-2で開発したタービン型流量計のロータ外径は40φもあるため、ロータの回転数は、OWL-1用は約2倍となり1400rpm付近になると予想される。従って当然のことながら、シャフト、ガイドブッシング、ペアリング等の回転部に摩耗を生じやすくなるため、シャフトを、太径のものにした。

(2) 薄形ピックオフコイルの開発使用

タービン型流量計の内器と同様ピックオフコイルも小型薄形とする必要があり、厚さ6.5mm、長さ35mmのものを製作することになり、このため製作上の問題や性能上の問題が多く生じたが、最終的には、炉外試験の結果、絶縁や較正試験も良好であった。今後の実用にあたっては、さらに、シャフト、ペアリング材の超硬合金の放射能による劣化、組立後の性能確認など遂次、実験が必要となるであろう。

5.6 その他の計装品

その他の計装品として冷却材の試料出入口温度を測定するためのクロメルーアルメル熱電対（C A 热電対）燃料集合体部の水平方向熱中性子分布を測定するために自己出力型中性子検出器（S P D）を取付ける。

OWL-1の炉内管出入口温度は、プロセスセンサーの測温抵抗体で測定しているが、燃料集合体部分の冷却材の出入口温度を求めるため、C A 热電対を取付けた。シース外径は、 $1.6\text{mm}\phi$ ，絶縁物にMgO，シース材はインコネルである。電気ノイズ対策から非接地型とした。また、シース材長さは、炉内管長、JMTR炉プール深さから約20.000mmである。

SPDはJMTRにおける使用経験を十分に活かし、Rhエミッタ型S P D を用いることにした。竹下らによれば、常温中で、 $0.5\text{mm}\phi \times 50\text{mm}\ell$ のRhエミッタによるSPDについて($1.05 \pm 0.11) \times 10^{-21} \text{ A/nv} \cdot \text{cm}$ の感度が得られている。しかし今回の実験では、使用温度が約280°Cである上に γ 線レベルにも違いがあり、上記の感度較で値がそのまま適用できるかどうか確認されていない。出力の絶対値測定を行うためには、これらの課題があるとは言え、常温での較正実験が行われているものと同一規格のものを使用することは有利である。構造および仕様についてFig.22に示す。Rhエミッタはアルミナの絶縁チューブに収められ、これをステンレス鋼のコレクターで囲んでいる。この検出端の寸法は、 $2.0\phi \times 70\ell\text{mm}$ とした。これにMIケーブル約17mを接続して炉外部計器へ導いている。MIケーブルは、Ni 2芯線で1本は γ 線補償用である。また、絶縁物はMgOである。

試料への取付は、3本同一平面上に配置し、燃料集合体部分の熱中性子束の勾配を検出する。なお過渡応答時間はかなり遅く、～4, 5分程度になるが、実験目的から言って支障にならない。また、照射開始前に同一ロットにより製作されたS P D の予備品を用い、JRR-4を用いて較正試験を実施する予定である。

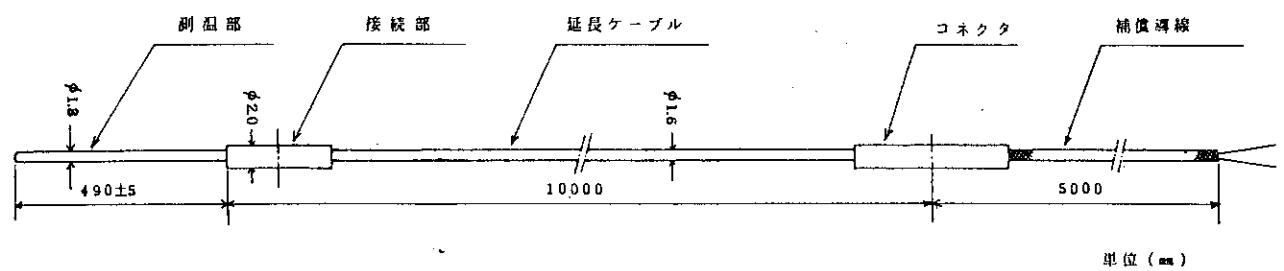


Fig.14 W-Re 热電対の形状・寸法

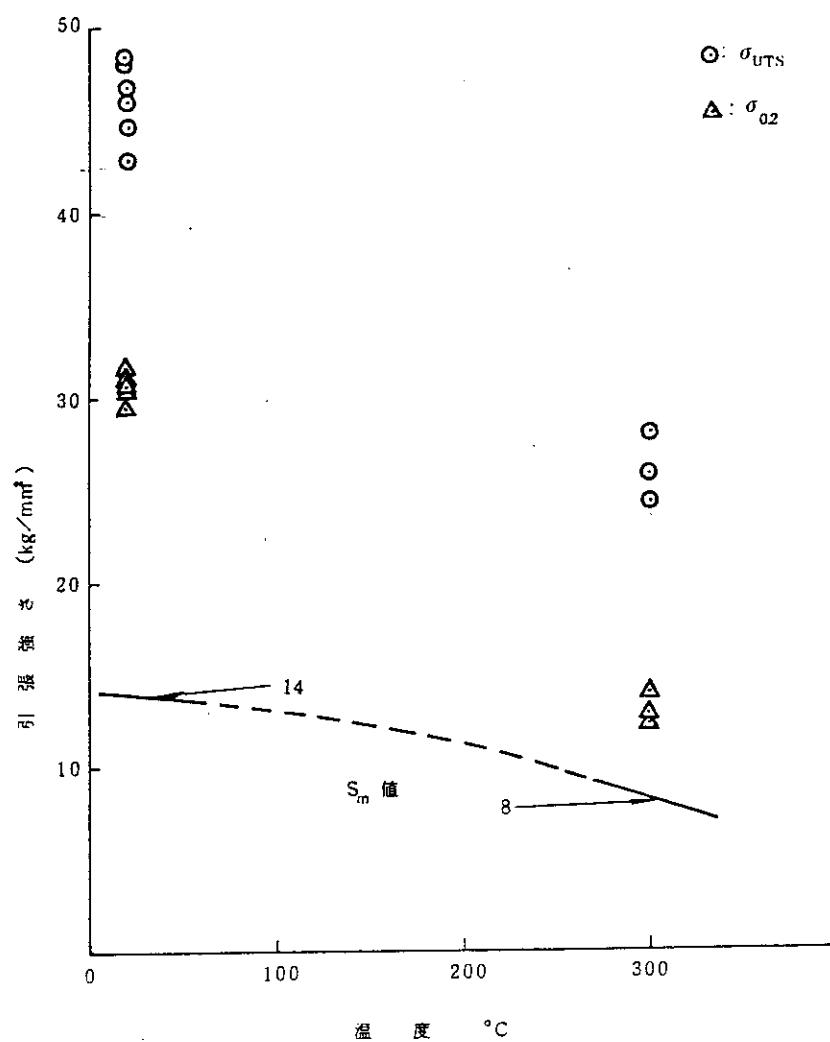
Fig.15 SUS 304-Zry 4 壓接材の引張試験結果と S_m 値

Table 7 金ロー付け試験

ケース	雰囲気	ロー付け温度	ロー付け状態	備考
A - 1	真空中	$\simeq 1070^{\circ}\text{C}$	不良	
- 2	"	$\simeq 1150^{\circ}\text{C}$	"	
- 3	He 中	1070~1150°C	"	
- 4	大気中	-	"	銀ローフラックスを使用

Table 8 ニッケルロー付け試験

ケース	*出力 (kV)	Total時間 (sec)	絶縁抵抗 (MΩ)	リーク試験 (atm·cc/sec)	金相試験	曲げ試験
N - 1	4.0~6.5	520	0.65	$<2 \times 10^{-10}$	-	-
- 2	4.5~6.5	400	> 20	"	-	○
- 3	4.5~6.5	375	> 20	"	○	-
- 4	4.5~6.5	409	> 20	"	-	-
- 5	4.5~6.5	300	> 20	"	○	-
- 6	4.5~6.5	321	> 20	"	-	-
- 7	4.5~6.5	315	> 20	"	-	○
- 8	4.5~5.5	248	> 20	"	○	-
- 9	4.5~6.5	326	> 20	"	○	-
- 10	4.5~6.5	320	> 20	"	-	-

* 観察窓より目視にて、ローの溶け具合を調べながら、出力変化させて行う。

Table 9 熱電対のロー付け部曲げ試験

試料	N - 2	N - 7	比較熱電対
初期絶縁抵抗	∞	∞	∞
クラック発生	31回	161回	210回
絶縁劣化後の抵抗	270 KΩ	340KΩ	320KΩ
シーズ破断	34回	168回	212回
芯線破断	36回	169回	218回

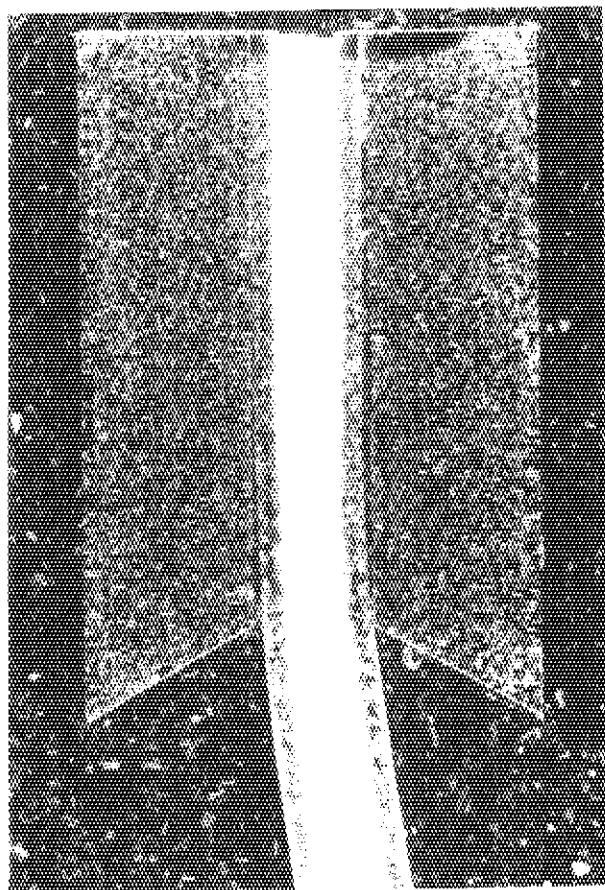


Photo. 1 金ロー付け試験 ($\times 10$)

→ 拡大



Photo. 2 金ロー付け試験 ($\times 200$)

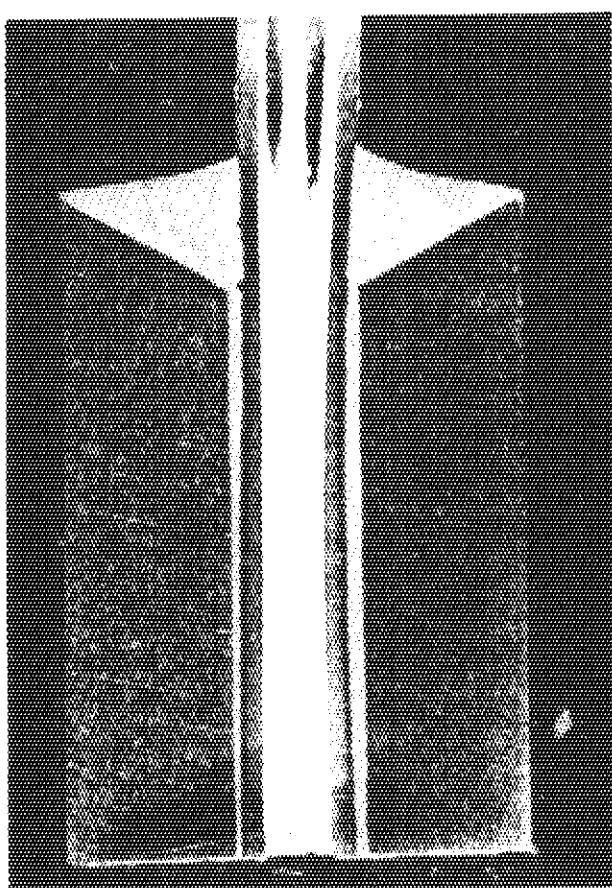


Photo. 3 ニッケルロー付け試験 ($\times 10$)

→ 拡大

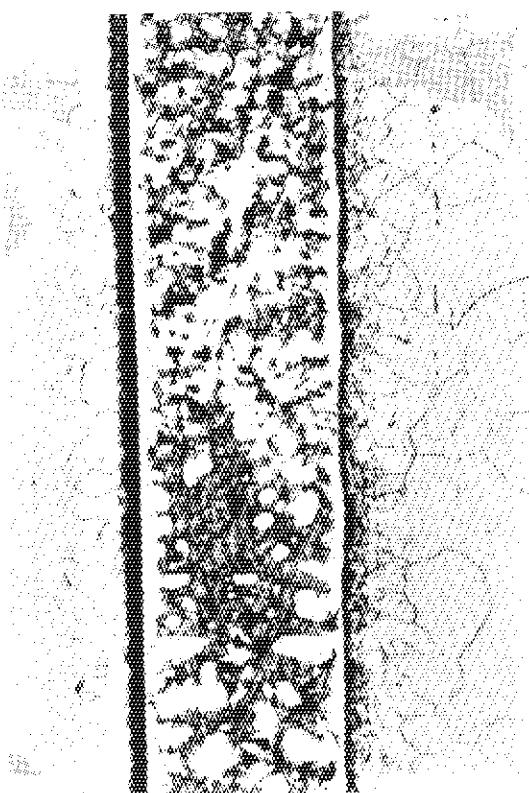


Photo. 4 ニッケルロー付け試験 ($\times 200$)

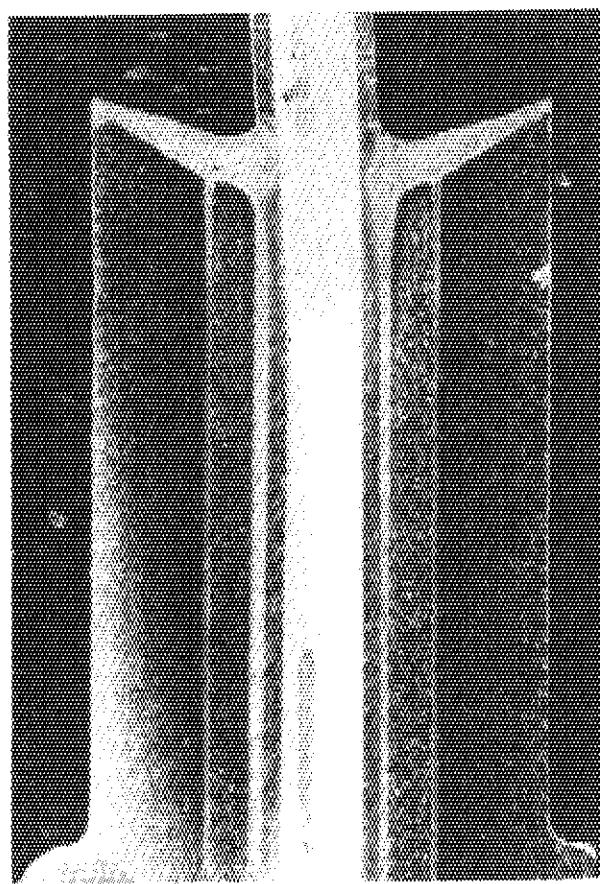


Photo.5 カラーを用いたロー付け試験 ($\times 10$)

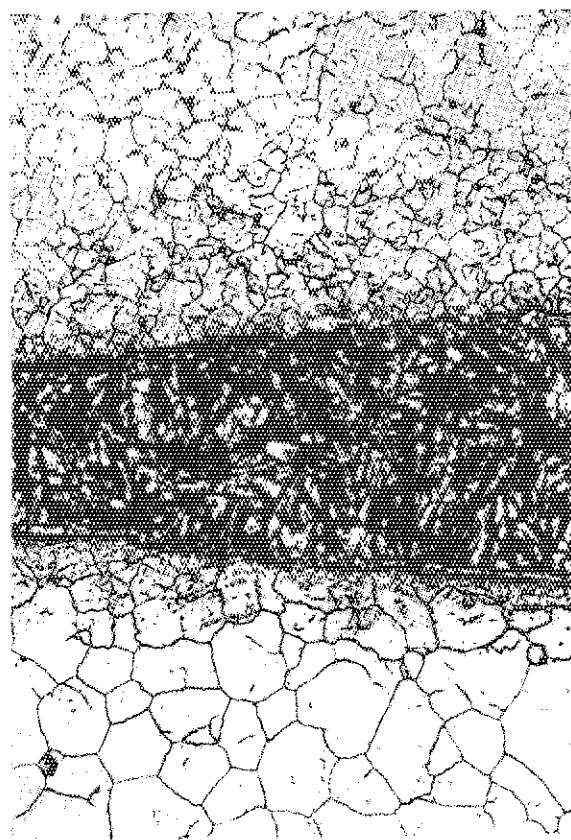


Photo.6 カラーを用いたロー付け試験 ($\times 200$)

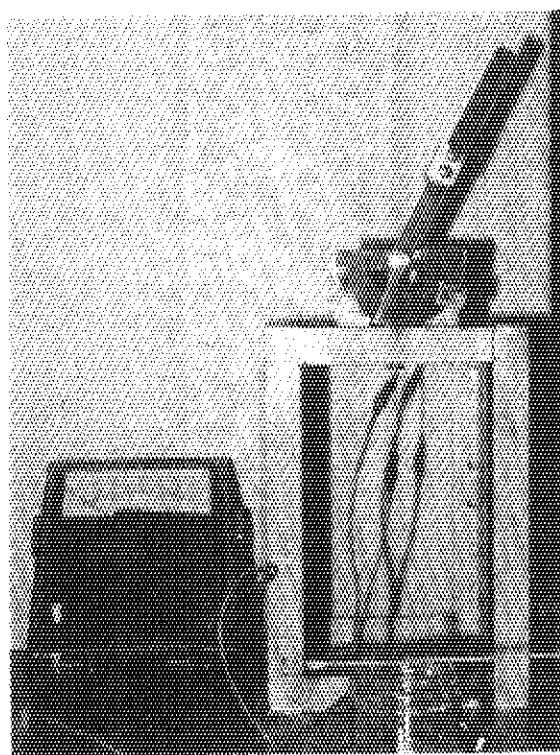


Photo.7 曲げ試験機

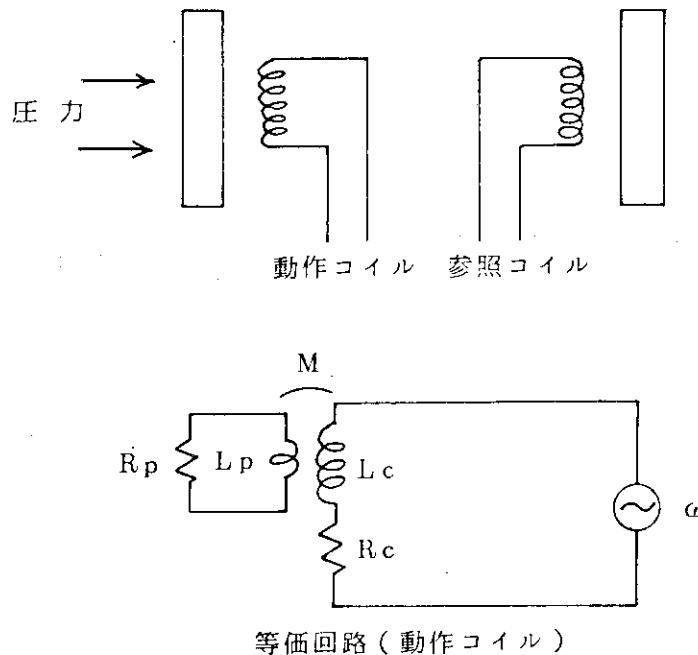


Fig.16 涡電流を利用した圧力検出器の原理

Table 10 F P 圧力温度検出器 (KP-1921) の主性能能

項目	性能	項目	性能
圧力範囲	0~1000 psi	立上り時間	10^{-2} s 以下
耐圧	1250 psi	リニアリティ	3 % FSO 以内
材質 検出器	Alloy 718	出力	0~1.0 VDC
ケーブルシース	Alloy 600	感度	1mV/1psi
温度較正点 (°C)	316, 482 593, 704	最大ドリフト (温度係数)	0.023%FSO/hr 204~704°C
使用温度	20~704°C	感度シフト	±0.08%/°C
最大温度変化	56°C/s	ゼロ点シフト	±0.23%FSO/°C
共振周波数	1650 Hz (室温) 1550 Hz (704°C)		

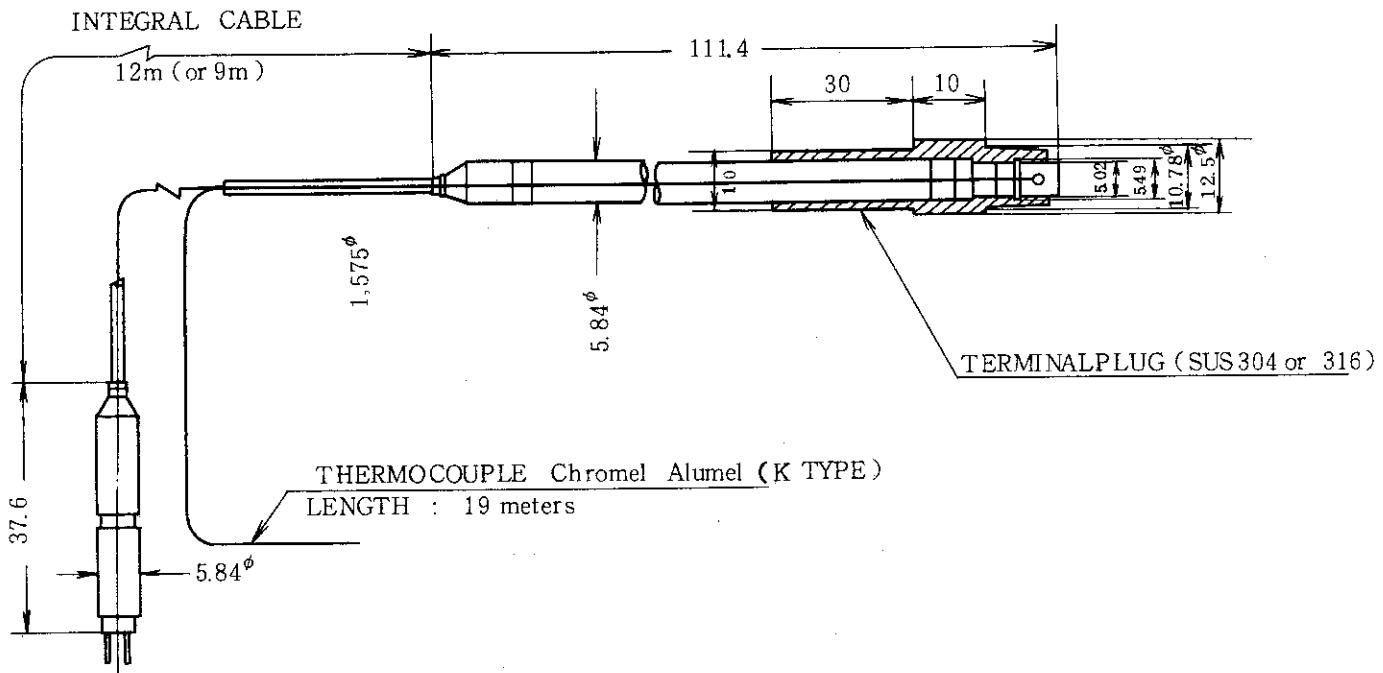


Fig. 17 FP 壓力・温度検出器 (MODEL KP-1921)

Table 11 変位計 (KD-1902) の主要性能

項目	性能	項目	性能
測定範囲	0~5 mm (非磁性体ターゲット)	出力	0~1.0 VDC ± 1%以下
使用温度	-100°F~1100°F	リニアリティ (温度係数)	< 0.01%/F
使用圧力	3500psi 以下	感度シフト	< 0.01%/F
使用環境	水, 過熱蒸気 高温ガス他	ゼロ点シフト 周波数応答	0~2.5 kg

LEAST SQUARES STRAIGHT LINE FIT
 MODEL --- KP1921-A1000-CS-C40 S/N --- 7215-0-01

○ = CALIB. DATA
 ◇ = CALIB. DATA
 △ = CALIB. DATA
 × = CALIB. DATA

TEMP. = 600, DEG F
 TEMP. = 900, DEG F
 TEMP. = 1100, DEG F
 TEMP. = 1300, DEG F

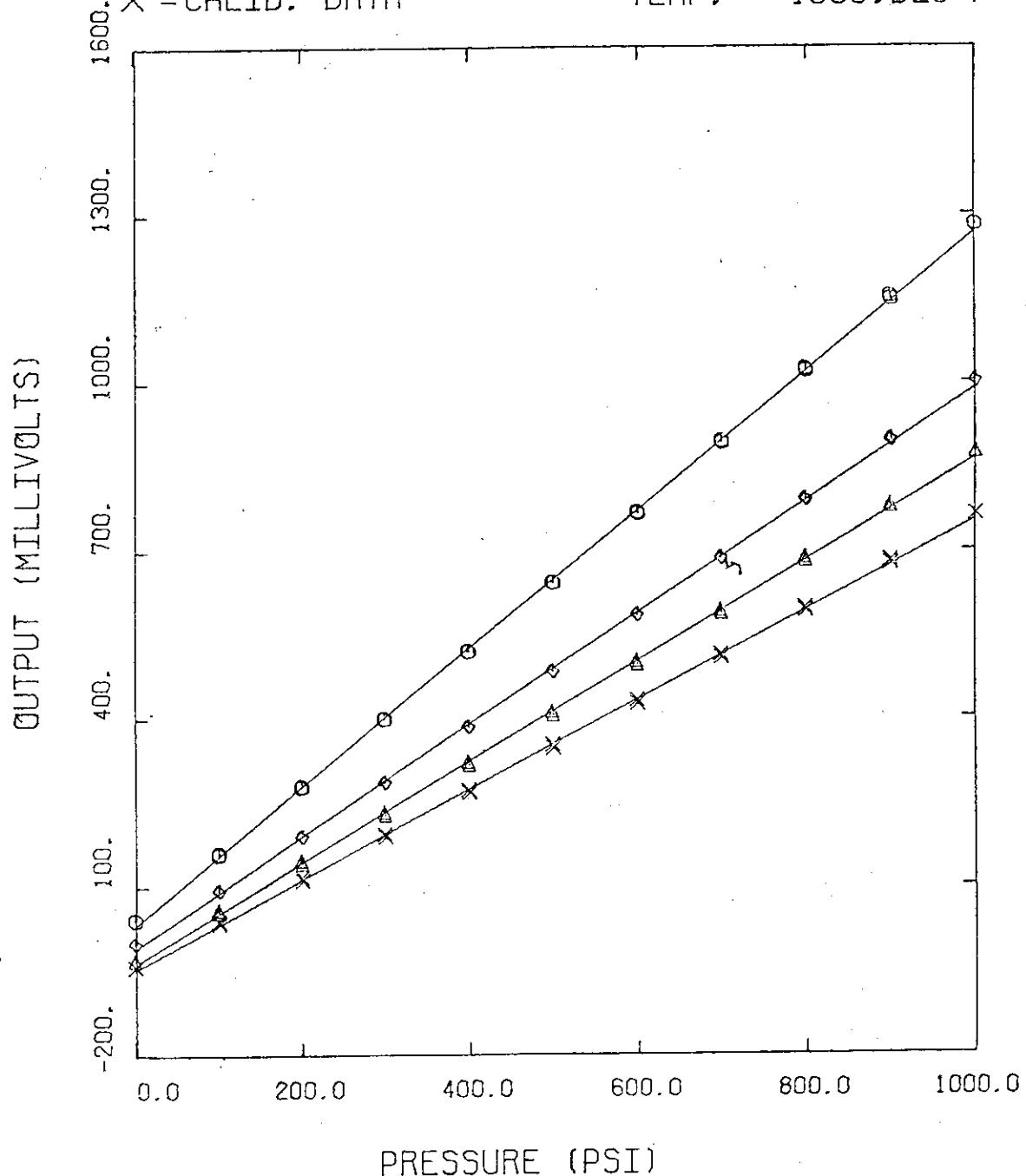
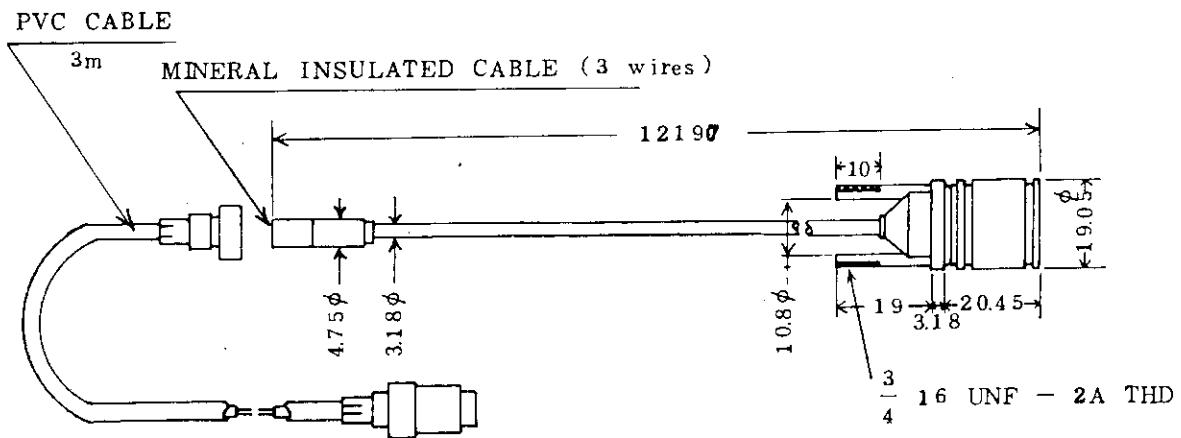


Fig. 18 壓力較正曲線



ALL DIMENSIONS IN MM

Fig. 19 変位計 (MODEL KD-1902)

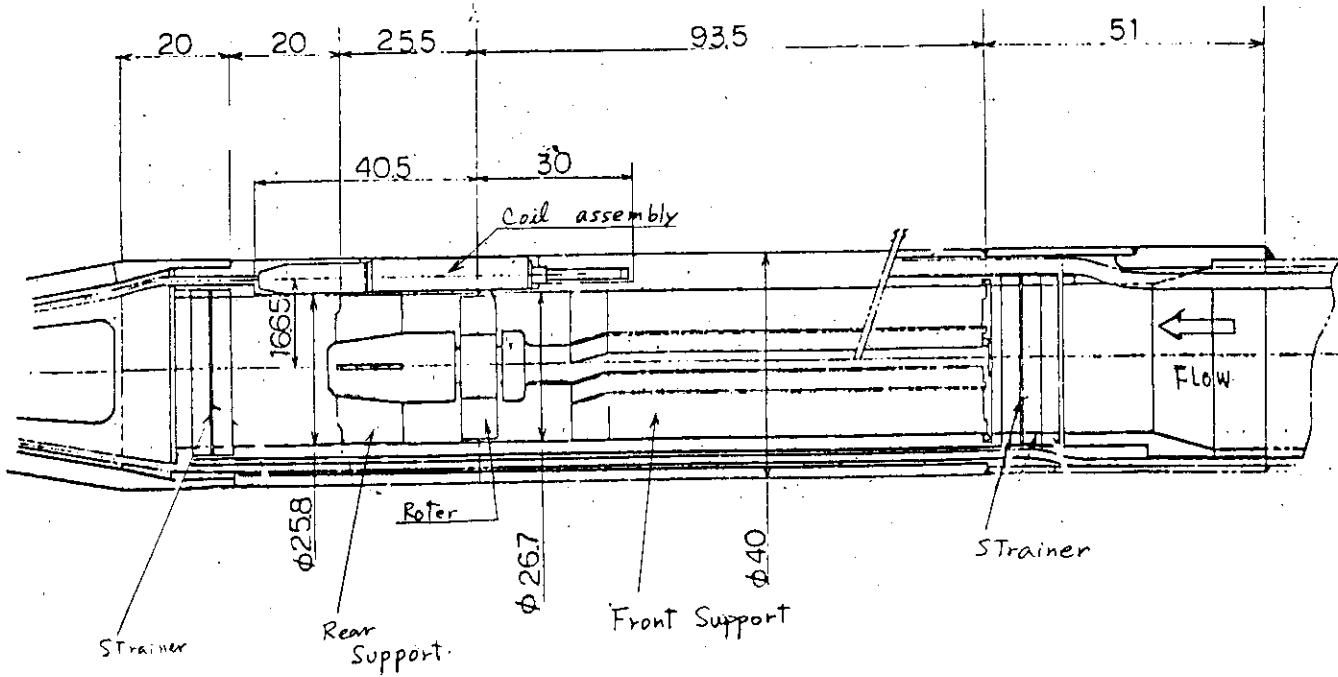


Fig. 21 タービン型流量計

LEAST SQUARES STRAIGHT LINE FIT
 MODEL --- KD1902-5MM-SPL-C480 S/N --- 7215-0-02

• = CALIB. DATA	TEMP. = 25. DEG C
* = CALIB. DATA	TEMP. = 200. DEG C
△ = CALIB. DATA	TEMP. = 280. DEG C
X = CALIB. DATA	TEMP. = 350. DEG C

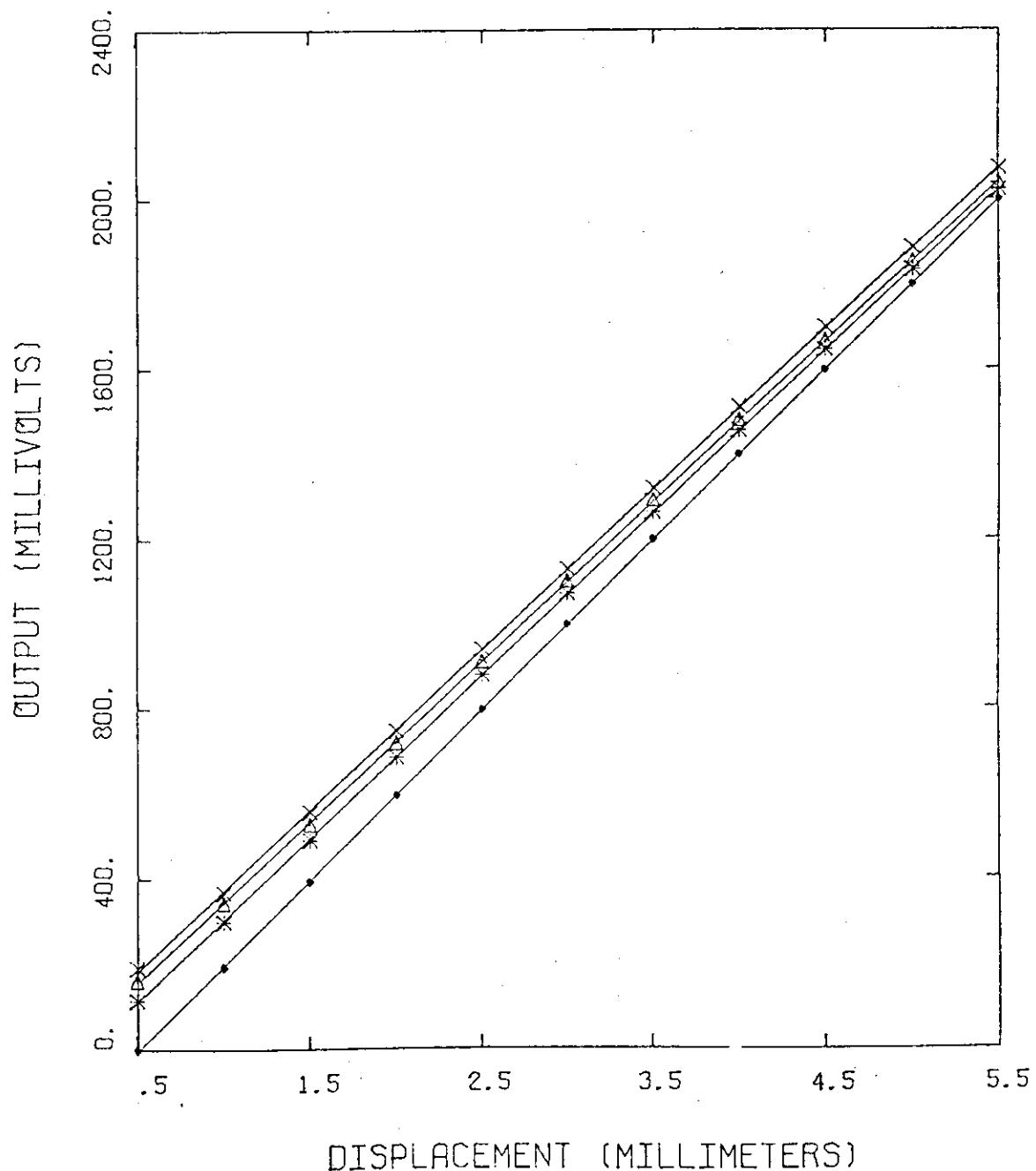


Fig. 20 変位計の較正曲線

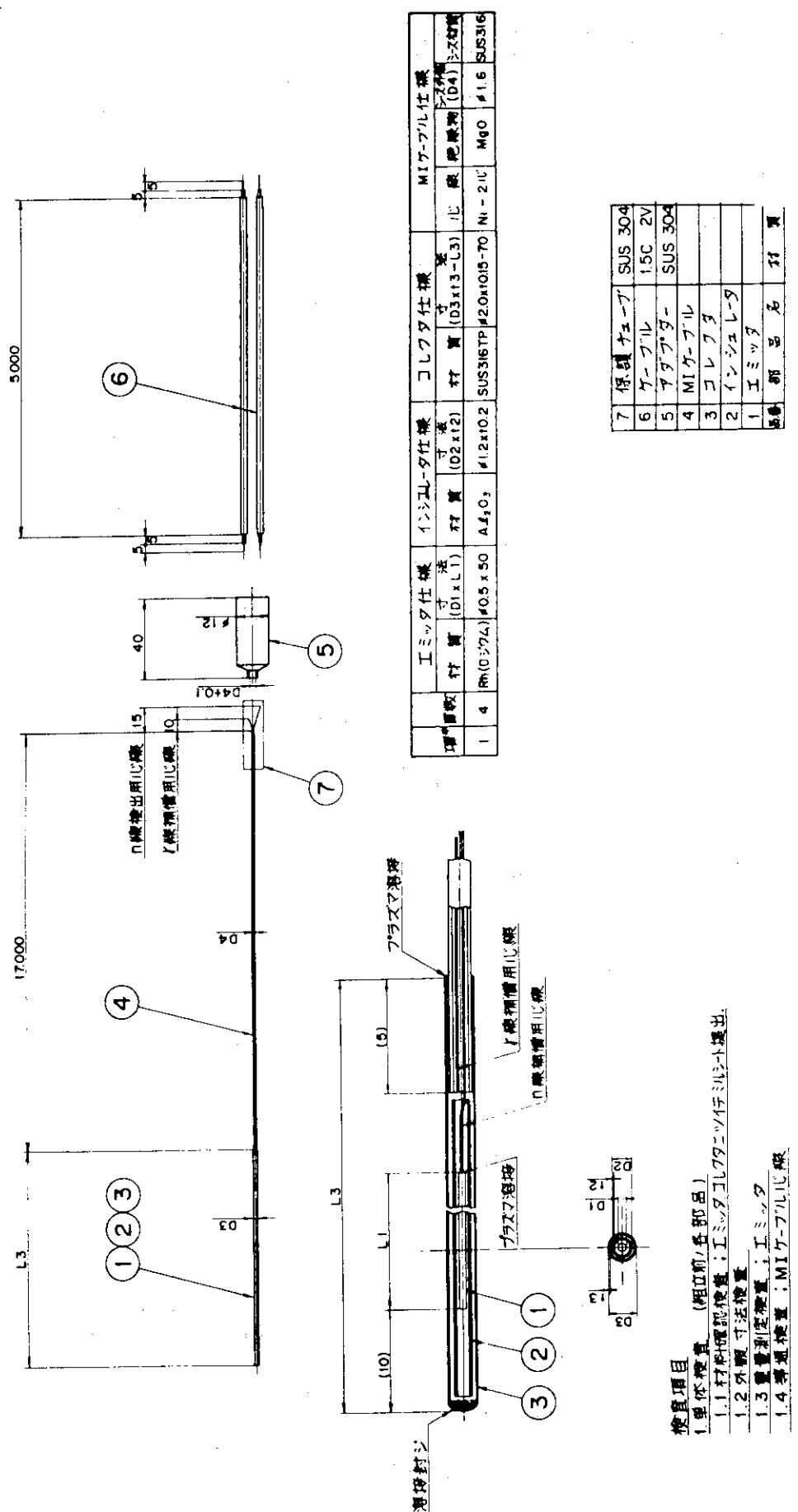


Fig. 22 中性子検出器 (SPD)

6. 第1次照射試料の製作と検査

6.1 製作工程

JMT Rの水ループOWL-1を使用して行われる燃料中心温度実験は、前述のように3次にわたる実験シリーズとして、またそれに続く出力急昇試験(BOCA実験)等の炉内計装技術の確立を目指して51年度より計画し、製作が開始された。この実験は、OWL-1の原子炉内燃料照射実験となるため、第1次照射試料77LF-33Jの製作にあたっては、科学技術庁長官より「設計及び工事の方法」の認可申請を行い昭和53年1月14日に認可された。

照射試料のうち燃料棒は、原子燃料工業KKにて製作し、各計装品は、それぞれのメーカーに仕様書を発注した。燃料棒は、54年1月メーカー製作分を完了し、原研東海研に搬入後、東海研技術課にて、燃料中心温度測定用熱電対の取付封入、FP圧力／温度検出器の取付を実施し、完成した。その後、大洗研へ搬入し、燃料集合体の組立、各種計装品の取付を行い、6月25日試料全体の組立を終了した。その間、原研及びメーカーの試験、検査と並行して、科学技術庁原子力安全局による使用前検査が3回(UO₂ペレット完成時、燃料棒完成時、照射試料完成時)に分けて実施され、54年7月12日合格証の交付を受けた。Fig.23に製作工程図を示す。また、照射試料の組立部品をPhoto.8に、完成品をPhoto.9に示す。

6.2 検査の概要

検査の目的は、設計に基いて製作された試料が、照射実験を行うにあたって満足する性能を有していることと、原子炉内照射設備において安全に実験できるかということである。77LF-33Jの検査は、製作メーカー、原研、原子力安全局(使用前検査)によりそれぞれ独立して、3段階の体制をもって行われた。以下に主要な検査の方法と検査データについて述べる。試験検査項目をTable 12に示す。(燃料棒構成材の材料検査成績表はAppendix A参照)

6.2.1 燃料ペレット

(1) 不純物含有量、酸素／ウラン比、密度、濃縮度等を質量分析、化学分析、形状重量等により測定した。

[不純物含有量] 単位: ppm

Ag < 0.5,	Aℓ < 15 ,	B < 0.2 ,	C : 28,
Ca < 10 ,	Cd < 0.7 ,	Cℓ < 10 ,	Cr < 22 ,
Cu < 3 ,	F < 1 ,	Fe < 20 ,	Mg < .2 ,
Mo < 20 ,	N : 17 ,	Ni < 20 ,	Pb < 3 ,
Si < 6 ,	Sn < 3		

[蒸発性不純物]

8 μℓ/gr UO₂

[水分量]

3.1 μℓ/gr UO₂

〔酸素／ウラン比〕

2.005

〔密度〕……同位体分析 単位: wt %

U-234	: 0.0097±0.0002
U-235	: 1.520±0.009
U-236	: 0.0089±0.0002
U-238	: 98.462±0.004

〔濃縮度〕

95.0 ± 0.1 %

(2) 寸法, 外観, スタック重量等検査

設計仕様通りに製作され, 外観において有害な表面のキズ, 割れに付着物のないことを確認した。特に UO_2 ペレットの外径については, ギャップを精度良く保つため, 外周研磨により寸法を合わせて, 仕様通りに製作した。

〔寸法, スタック重量〕

燃 料 棒	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
UO_2 ペレット外径 (mm)	10.68	10.58	10.48	10.38
スタック長 (mm)	617.0	615.2	615.9	616.4
スタック重量 (g)	557.7	545.7	535.9	526.6

6.2.2 被覆管の検査

(1) 材料検査

ASTM規格 (B 353相当) を満足していることを素材メーカミルシートにより, また, 欠陥検査として超音波探傷検査により確認した。

欠陥検査については, 使用材料の肉厚 0.86mm の10%まで強度検討で許容しているため, 80 μm 以上の欠陥のないことを確認した。

(2) 寸法, 外観検査

寸法については, UO_2 ペレットとのギャップを正確に抑えるため, 被覆管の内径を $1/100$ mm まで測定した。外観は, 被覆管の破損の原因とならぬようキズやヨゴレ等について確認した。

〔被覆管寸法〕	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
内 径 (mm)	10.79	10.79	10.79	10.79
肉 厚 (mm)	10.86	10.86	10.87	10.86

6.2.3 計装品の検査

各計装品は, 各種特殊材料で製作されているが, 材料検査, 寸法ならびに外観検査を行い, 組立上, 照射上問題のないことを確認するとともに, それぞれの計装品の使用環境条件により, 特性(較正)データの提出を求め, 実験データの準備をした。

6.2.4 燃料棒の検査

燃料棒は、核分裂生成物を封じ込め、健全な状態で照射する必要があり端栓溶接部、各シール部は、健全であることを確認する。そのため、X線透過写真検査、ヘリウムリーク検査、表面汚染密度検査、寸法、外観検査を実施した。X線透過写真検査では、0.5mm以上の白、黒点の有無を確認し、またクラック、肉厚減少、とけ込み不足のないことを検査した。結果は、いずれも良好であった。

6.2.5 照射試料完成品の検査

OWL-1炉内管に吊り下げた状態で照射するため、ハンガーロッドの長さを確認し、各計装品の電気絶縁、導通を確認した。

〔寸法検査〕

全 長 7.289 mm

外 径(最大) 38.1mm ϕ

燃料集合体真直度 1/1000 以下

〔電気試験〕

計 装 品 名	線間抵抗(Ω)	絶縁抵抗(M Ω)
WRe 熱電対 No.1	217	> 100
No.2	216	"
No.3	219	"
No.4	216	"
C A 熱電対 入口	208	"
出口	208	"
タービン流量計 1	198	"
2	197	"
FP 圧力検出器	53.2	接地タイプ
A-B	43.5	"
A-E	46.1	"
F P 温度検出器 (C A)	197	> 100
伸び検出器	-	"
SPND No.1	-	> 1 × 10 ¹⁰ (Ω)
No.2	-	> 1 × 10 ¹⁰ (Ω)
No.3	-	> 1 × 10 ¹⁰ (Ω)

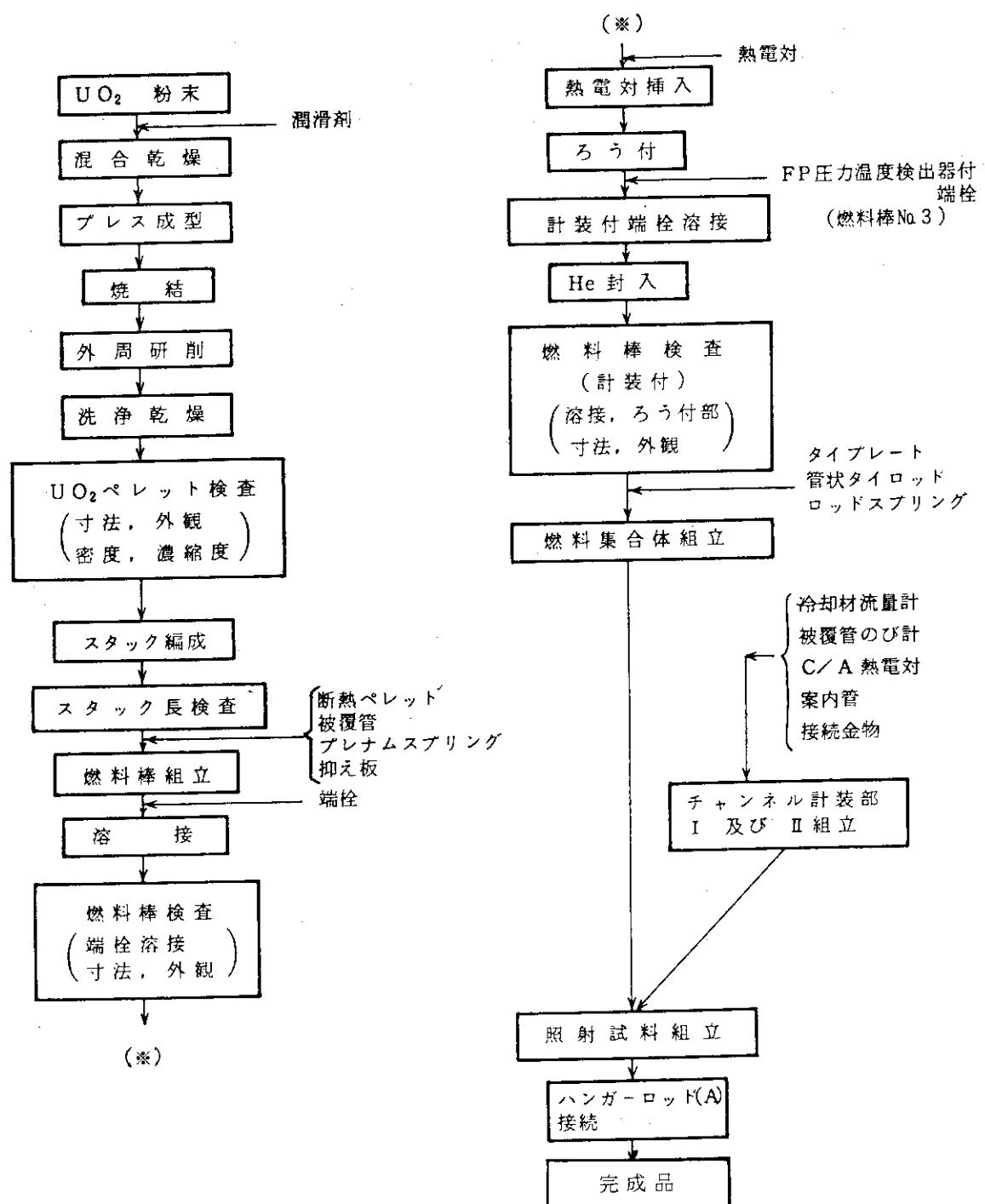


Fig. 23 照射試料製作工程図

JAERI - M 9600

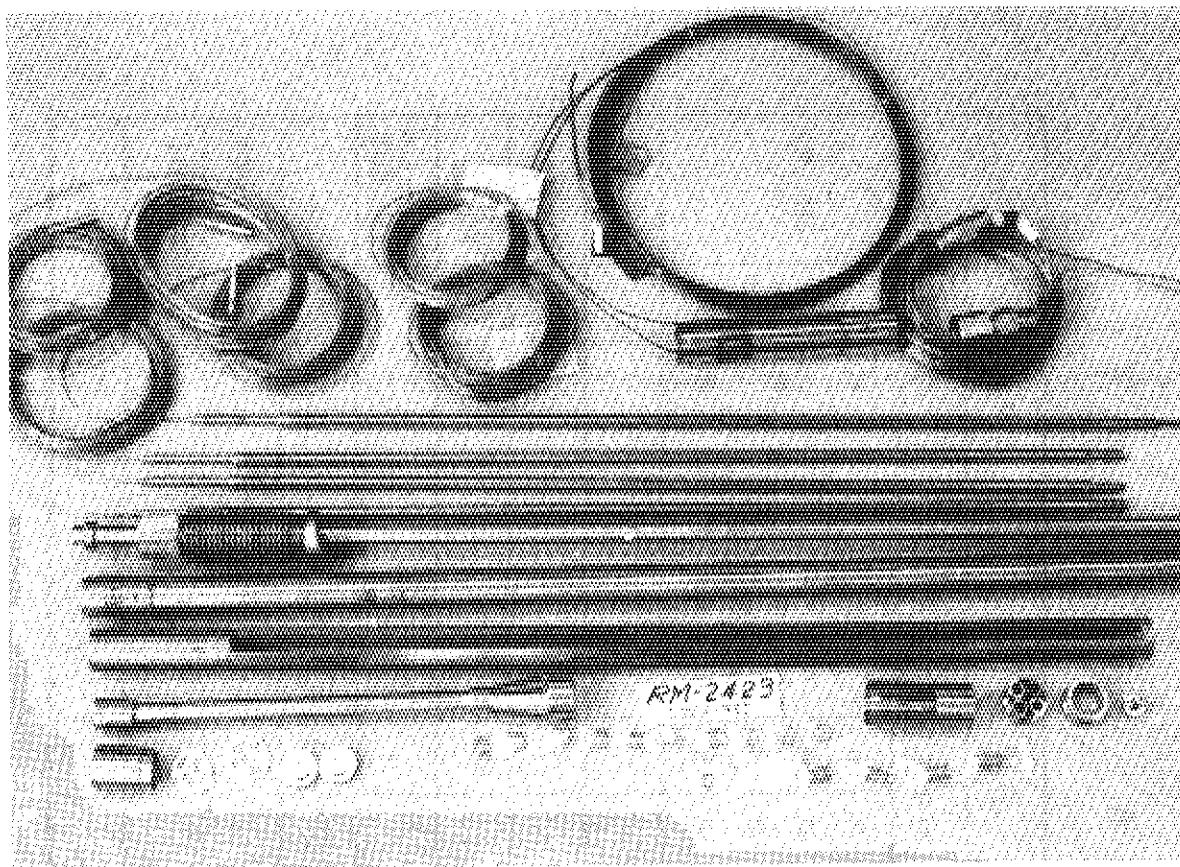


Photo.8 組立部品



Photo.9 完成品

Table 12 試験検査一覧表

検査項目 品名	部品検査						組立後検査			備考 (材質)
	濃縮度検査	密度検査	材料検査	寸法検査	外観検査	寸法検査	外観検査	寸法検査	外観検査	
				溶接部	X線検査	外観検査	ヘリウムリーク検査	表面汚染度検査	全体X線写真検査	
UO ₂ ベレット	○	○	○	○	○	○				UO ₂
断熱ベレット			○	○	○	○				アルミナ
被覆管			○	○	○	○				Zry-2
燃料構成部品			○	○	○	○				インコネル Zry, SUS
燃料棒			○	○	○	○	○	○	○	—
燃料集合体部品			○	○	○	○				SUS 304
計装部その他			○	○	○	○				SUS 304 etc.
照射試料完成品						○			○ ○ ○	—

7. 模擬燃料集合体の水力振動実験

7.1 実験の目的

77LF-33J の燃料集合体は、4本の燃料棒を上下のタイプレートとそれを保持する管状タイプレートで組立てられている。管状タイロッドは、Fig.8に示すように肉厚 1.5 mm、外径 38 mm ので、燃料部は、燃料棒との間隔を確保するため窓があけられている。この試料を照射するに際し、タイロッドの八つ橋型板状部と燃料部の水力振動によるフレッティングが心配された。このため、模擬燃料集合体を製作し、炉外で実験を行い振動の状態を観察し、被覆管と管状タイロッドとの接触の有無を確認した。

7.2 実験装置と実験条件

実験に用いた試験体は、本体とほぼ同一寸法とし、管状タイロッドは、SUS 304、燃料棒も SUS 304 の中空パイプとした。試験部は、観察可能なように、炉内管の模擬としてアクリルパイプを用いた。模擬冷却材としては、常温の水と空気を用い、Fig.24のように試験体下部から入り上昇する。水と空気の混合割合はバルブ操作により、それぞれの流量を調節して行った。

実験の条件としては以下のとおりである。

系の圧力：常圧

系の温度：常温

流量：入口単相流にて 10~50 ℥/min

ボイド（空気）：液相流量各流量に対し 0~60 ℥/min

7.3 実験の結果

- (1) 管状タイロッドと被覆管が接触するような振動は、実験の条件の範囲においてなかった。
- (2) 管状タイロッドの微小な振動は、単相流における目視観察による限りでは認められなかった。2 相流においては、小さな気泡流の領域での振動は認められないが、スラグ流（栓流）領域に近くと小さな振動が認められた。Fig.25に振動が起こる領域を示す。

振動のパターンは、スラグ流の脈動に従って発生する不規則振動で減衰振動である。振幅は、最大約 1 mm、主振動数は約 1 Hz（いずれも目視）であった。

ストロボ光による写真例を Photo.10, 11 に示す。

- (3) 模擬燃料棒の振動も目視観察では認められなかった。またボイド率が高いところでは観察にやや困難なため微弱な振動は判別し難いが有害な振動はなかった。

7.4 結論

今回の実験条件による結果から

- (1) 管状タイロッドと被覆管とが接触するような振動は生じない。
 - (2) スラグ流領域に近づかない限り、微少な振動も起らない。
- ということが言える。この結果をもとに運転条件を検討し、管状タイロッドと被覆管とか接触しないが2相流にはさせない方が良いとの判断から、加圧水モードで照射実験することに決定した。

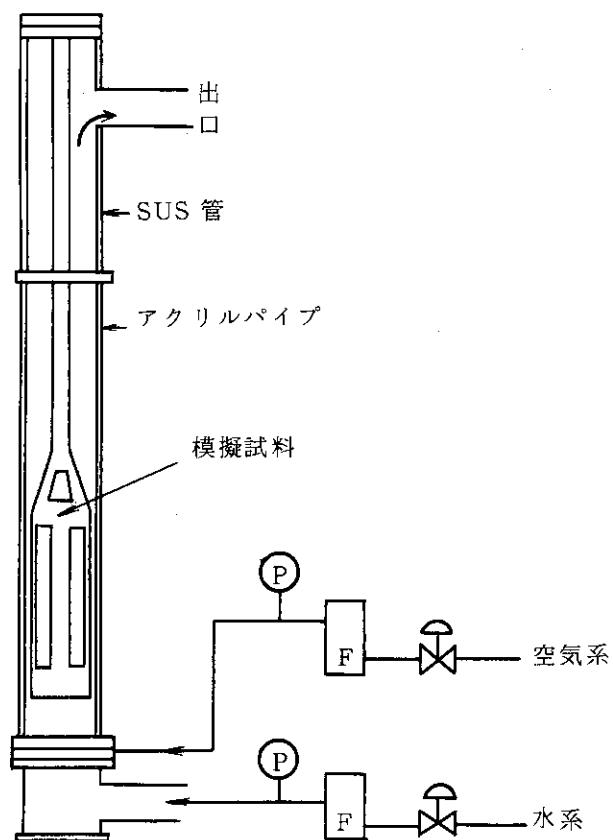


Fig. 24 水力振動実験の概図

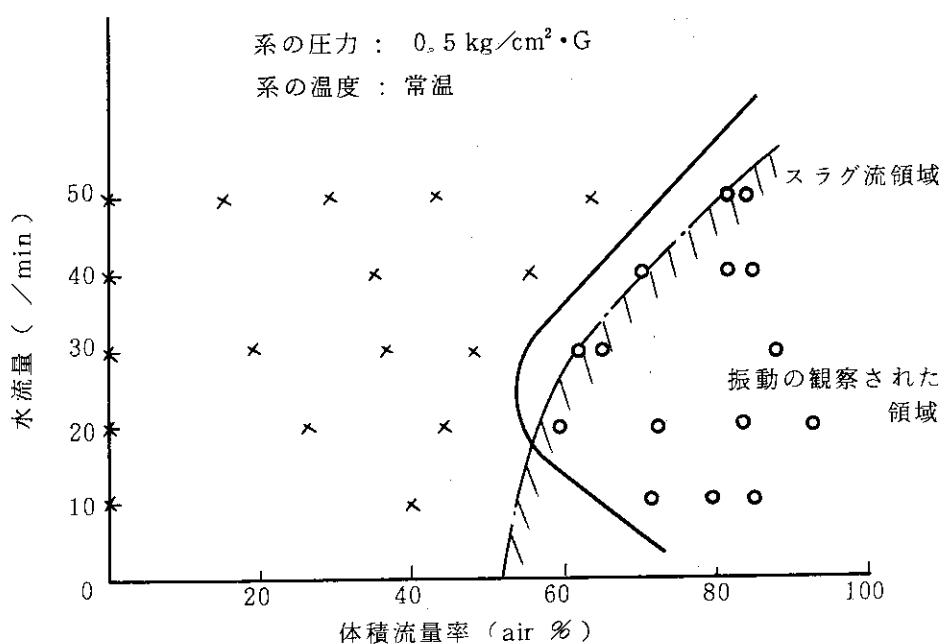


Fig. 25 管状タイロッドの振動領域

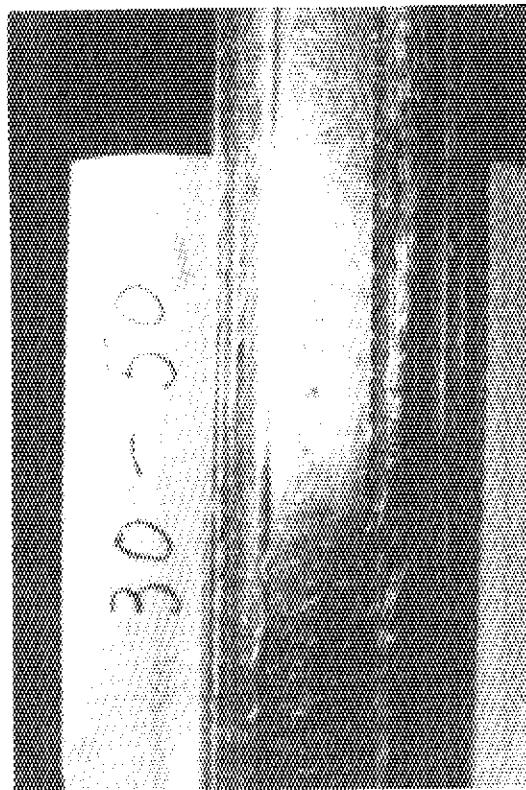


Photo.10 水力振動実験の例(I)

水流量 : $30\ell/\text{min}$, みかけの空気流量 : $50\ell/\text{min}$

(振動有)

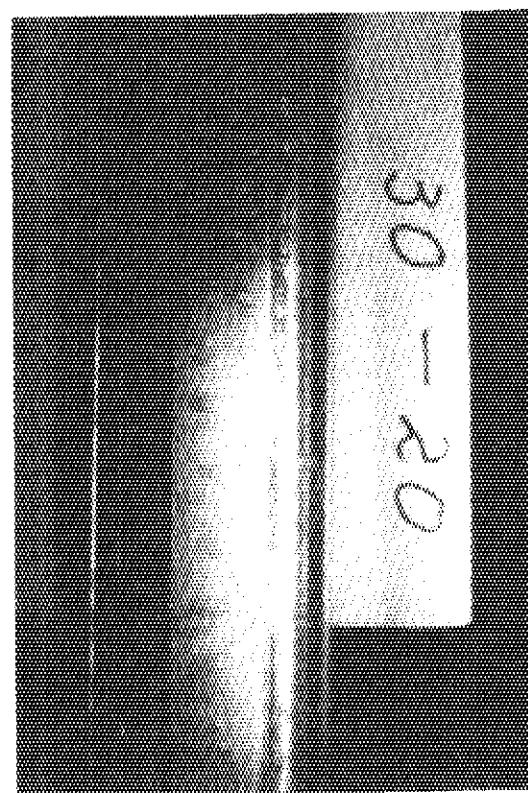


Photo.11 水力振動実験の例(II)

水流量 : $30\ell/\text{min}$, みかけの空気流量 : $20\ell/\text{min}$

(振動無)

8. あとがき

本照射試料は、軽水炉の安全研究の一環として燃料中心温度測定実験のため製作したもので、昭和51年度実験計画してから3年間、JMTRにおける実験の詳細についての検討、外国における実験例の調査、計装技術の開発を行い、54年7月完成した。

照射試料の設計にあたり、実験設備OWL-1の炉内管が狭く、実験要求にすべて満たすことは、至難の技であった。特に、圧力検出器、変位計、流量計等従来 JMTR で使用されていたものは、いずれも大きく取付け不可能であったため、信頼度を落さずに改良したり、輸入品の使用を余儀なくされた。結局、本照射試料では、入口側タービン流量計を取り止め、第2次以後の燃料棒は、燃料棒間のギャップを確保するため3本燃料棒にし、実験パラメータが縮少されることになった。

また、今回使用した、W-Re熱電対、FP圧力検出器、被覆管伸び計などは輸入品であり、実験進行上仕様の制限や納期の長期化など問題が多く、早々に国産技術の開発を十分に行う必要がある。

第1次照射試料による実験で、BWR燃料のや照射中のFPプレナム圧力の変化、被覆管の伸縮が実測でき、軽水炉の燃料挙動の解析に重要なデータを提供するものと思われる。

謝 詞

本実験は、材料試験炉部内に設置された燃料中心温度測定実験タスクフォースを中心にして推進されました。

高田稔氏（53年まで材料試験炉部長）には、計画発足にあたり全体的な御指導をいただき、また大内信平氏（55年まで同部長）には計画遂行にあたり、絶えざる御指導と終始激励をいただき、深く感謝の意を表します。

また、タスクフォース委員長として、瑞穂満氏（54年5月まで）、佐藤雅幸氏（54年6月以後）には、具体的な計画遂行上の多くの御指導をいただきました。安藤弘栄氏、河村弘氏（計画課）には、本実験試料の基礎的な設計パラメータ、燃料棒温度分布の計算をしていただきました。中田宏勝氏（照射第1課）には計装部品について御指導を受けました。酒井陽之氏（ホットラボ課）には照射後試験時の解体に関する設計構造について多くの御助言をいただきました。（上記の方々は、いずれもタスクフォースメンバー）、米川出氏（当時照射第2課、現在大型トカマク開発部）、大友昭敏氏（照射第2課）には、タービン流量計の設計製作を担当していただき、多大の御協力をいただきました。

燃料部分（原燃工業KK製作）、計装部品を除く試料各部品の製作、組立作業は、東海研工作課に依頼して行われました。石橋昭彦氏（工作課長）には組立工程上の諸問題について、萩野谷欣一氏には検査に関して、渡辺福雄氏ならびに菊地泰二氏には設計製作に関して、沢畠求氏には溶接加工に関し多大な御助言と御協力をいただきました。

以上の諸氏に対して心より感謝の意を表します。

8. あとがき

本照射試料は、軽水炉の安全研究の一環として燃料中心温度測定実験のため製作したもので、昭和51年度実験計画してから3年間、JMTRにおける実験の詳細についての検討、外国における実験例の調査、計装技術の開発を行い、54年7月完成した。

照射試料の設計にあたり、実験設備OWL-1の炉内管が狭く、実験要求にすべて満たすことは、至難の技であった。特に、圧力検出器、変位計、流量計等従来JMTRで使用されていたものは、いずれも大きく取付け不可能であったため、信頼度を落さずに改良したり、輸入品の使用を余儀なくされた。結局、本照射試料では、入口側ターピン流量計を取り止め、第2次以後の燃料棒は、燃料棒間のギャップを確保するため3本燃料棒にし、実験パラメータが縮少されることになった。

また、今回使用した、W-Re熱電対、FP圧力検出器、被覆管伸び計などは輸入品であり、実験進行上仕様の制限や納期の長期化など問題が多く、早々に国産技術の開発を十分に行う必要がある。

第1次照射試料による実験で、BWR燃料のや照射中のFPプレナム圧力の変化、被覆管の伸縮が実測でき、軽水炉の燃料挙動の解析に重要なデータを提供するものと思われる。

謝　　辞

本実験は、材料試験炉部内に設置された燃料中心温度測定実験タスクフォースを中心にして推進されました。

高田稔氏（53年まで材料試験炉部長）には、計画発足にあたり全体的な御指導をいただき、また大内信平氏（55年まで同部長）には計画遂行にあたり、絶えざる御指導と終始激励をいただき、深く感謝の意を表します。

また、タスクフォース委員長として、瑞穂満氏（54年5月まで）、佐藤雅幸氏（54年6月以後）には、具体的な計画遂行上の多くの御指導をいただきました。安藤弘栄氏、河村弘氏（計画課）には、本実験試料の基礎的な設計パラメータ、燃料棒温度分布の計算をしていただきました。中田宏勝氏（照射第1課）には計装部品について御指導を受けました。酒井陽之氏（ホットラボ課）には照射後試験時の解体に関する設計構造について多くの御助言をいただきました。

（上記の方々は、いずれもタスクフォースメンバー）、米川出氏（当時照射第2課、現在大型トカマク開発部）、大友昭敏氏（照射第2課）には、ターピン流量計の設計製作を担当していただき、多大の御協力をいただきました。

燃料部分（原燃工業KK製作）、計装部品を除く試料各部品の製作、組立作業は、東海研工作課に依頼して行われました。石橋昭彦氏（工作課長）には組立工程上の諸問題について、萩野谷欣一氏には検査に関して、渡辺福雄氏ならびに菊地泰二氏には設計製作に関して、沢畠求氏には溶接加工に関し多大な御助言と御協力をいただきました。

以上の諸氏に対して心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原山泰雄, 泉文男他, " 照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱電達解析プログラム FREG-3 の入力手引", JAERI-M 6742, Oct. 1976
- 2) 原山泰雄, 泉文男, " FREG-3: 照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム", JAERI-M 7278, Sept. 1977
- 3) 村主進編著, " 原子炉安全工学" 日刊工業
- 4) J.H. Healzer, J.E. Hench, E.Janssen, S.Leavy ; APED-5286 Design Basis for Critical Heat Flux Condition in Boiling Water Reactors (Sept. 1966)
- 5) D.S.Rowe ; COBRA-II A digital Computer Program for Thermal-Hydraulic Subchannel Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Element, BNWL-1229 (1970)
- 6) 石井忠彦, 田中勲, " ジルカロイ-4 /ステンレス鋼摩擦接合継手の開発 JAERI-M 7152, July 1977
- 7) 斎藤隆, 石井忠彦他" 燃料棒伸び・破損検出器の試作 内部資料, Sept. 1978
- 8) 米川出, 大友昭敏他" ターピン流量計の開発 第1報" 内部資料, Jan. 1979
- 9) 米川出, 大友昭敏, " ターピン流量計の開発・第2報" 内部資料, Jan. 1980
- 10) 横田光雄他 " JPDR-II用計装燃料の開発" JAERI-M 4974, 1972
- 11) 竹下功他 " Self-Powered Neutron Detector の感度較正と JMTR におけるその使用例" 内部資料, Jul. 1975
- 12) 中田宏勝他 " ^3He -BOCA出力急昇試験設備の開発 1(開発計画と設備概要)" JAERI - M 8533 (Nov. 1979)

Appendix A 燃料棒構成材の材料検査成績書

- A - 1 UO₂ ペレットの濃縮度分析
- A - 2 " の不純物, 組成分析
- A - 3 " の水分量分析
- A - 4 断熱ペレット (Al₂O₃)
- A - 5 被覆管 (Zry-2)
- A - 6, 7 上部プレナムスプリング (インコネル×750)
- A - 8 下部 " "
- A - 9, 10 端栓材(I) (壓接材) (Zry-4)
- A - 11 " (SUS 304)
- A - 12, 13 端栓材(II) (Zry-2)

端栓材(I): 上部端栓, 下部端栓No.3

端栓材(II): 下部端栓No.1, 2, 4

告報書

No. 40

原子燃料工業研究所

動力炉・核燃料開発事業團
東池原燃所技術部分析課

(E) ハイブリッド車の運転は、燃費を高めます。

(三)

1

試験成績報告書 No.

JAERI - M 9600

ご依頼の件、本當の通りご通知いたしました。

分析報告書

原子燃料工業株式会社段
(ご依頼 小・寄征対 号)

番号 763-⁹
日付 1977年1月27日

古河電気工業株式会社
開発本部 中研室

顧客名	日本原子力研究所 段	試験自昭和53年1月2日
依頼番号	UO ₂ ペレット: Y771F-33J	報告至昭和53年1月2日
試験項目	水分量(ヨロトリー法)	契約名燃料中心湿度実驗用ループ試料

試料番号	水分量 (M/g _{H2O})	記
1	3.1	
2	1.5%	
3	1.5%	
4	1.5%	
5	1.5%	
6	1.5%	
7	1.5%	
8	1.5%	
9	1.5%	
10	1.5%	
11	1.5%	
12	1.5%	
13	1.5%	
14	1.5%	
15	1.5%	
16	1.5%	
17	1.5%	
18	1.5%	
19	1.5%	
20	1.5%	
21	1.5%	
22	1.5%	
23	1.5%	
24	1.5%	
25	1.5%	
26	1.5%	
27	1.5%	
28	1.5%	
29	1.5%	
30	1.5%	
31	1.5%	
32	1.5%	
33	1.5%	
34	1.5%	
35	1.5%	
36	1.5%	
37	1.5%	
38	1.5%	
39	1.5%	
40	1.5%	
41	1.5%	
42	1.5%	
43	1.5%	
44	1.5%	
45	1.5%	
46	1.5%	
47	1.5%	
48	1.5%	
49	1.5%	
50	1.5%	
51	1.5%	
52	1.5%	
53	1.5%	
54	1.5%	
55	1.5%	
56	1.5%	
57	1.5%	
58	1.5%	
59	1.5%	
60	1.5%	
61	1.5%	
62	1.5%	
63	1.5%	
64	1.5%	
65	1.5%	
66	1.5%	
67	1.5%	
68	1.5%	
69	1.5%	
70	1.5%	
71	1.5%	
72	1.5%	
73	1.5%	
74	1.5%	
75	1.5%	
76	1.5%	
77	1.5%	
78	1.5%	
79	1.5%	
80	1.5%	
81	1.5%	
82	1.5%	
83	1.5%	
84	1.5%	
85	1.5%	
86	1.5%	
87	1.5%	
88	1.5%	
89	1.5%	
90	1.5%	
91	1.5%	
92	1.5%	
93	1.5%	
94	1.5%	
95	1.5%	
96	1.5%	
97	1.5%	
98	1.5%	
99	1.5%	
100	1.5%	
101	1.5%	
102	1.5%	
103	1.5%	
104	1.5%	
105	1.5%	
106	1.5%	
107	1.5%	
108	1.5%	
109	1.5%	
110	1.5%	
111	1.5%	
112	1.5%	
113	1.5%	
114	1.5%	
115	1.5%	
116	1.5%	
117	1.5%	
118	1.5%	
119	1.5%	
120	1.5%	
121	1.5%	
122	1.5%	
123	1.5%	
124	1.5%	
125	1.5%	
126	1.5%	
127	1.5%	
128	1.5%	
129	1.5%	
130	1.5%	
131	1.5%	
132	1.5%	
133	1.5%	
134	1.5%	
135	1.5%	
136	1.5%	
137	1.5%	
138	1.5%	
139	1.5%	
140	1.5%	
141	1.5%	
142	1.5%	
143	1.5%	
144	1.5%	
145	1.5%	
146	1.5%	
147	1.5%	
148	1.5%	
149	1.5%	
150	1.5%	
151	1.5%	
152	1.5%	
153	1.5%	
154	1.5%	
155	1.5%	
156	1.5%	
157	1.5%	
158	1.5%	
159	1.5%	
160	1.5%	
161	1.5%	
162	1.5%	
163	1.5%	
164	1.5%	
165	1.5%	
166	1.5%	
167	1.5%	
168	1.5%	
169	1.5%	
170	1.5%	
171	1.5%	
172	1.5%	
173	1.5%	
174	1.5%	
175	1.5%	
176	1.5%	
177	1.5%	
178	1.5%	
179	1.5%	
180	1.5%	
181	1.5%	
182	1.5%	
183	1.5%	
184	1.5%	
185	1.5%	
186	1.5%	
187	1.5%	
188	1.5%	
189	1.5%	
190	1.5%	
191	1.5%	
192	1.5%	
193	1.5%	
194	1.5%	
195	1.5%	
196	1.5%	
197	1.5%	
198	1.5%	
199	1.5%	
200	1.5%	
201	1.5%	
202	1.5%	
203	1.5%	
204	1.5%	
205	1.5%	
206	1.5%	
207	1.5%	
208	1.5%	
209	1.5%	
210	1.5%	
211	1.5%	
212	1.5%	
213	1.5%	
214	1.5%	
215	1.5%	
216	1.5%	
217	1.5%	
218	1.5%	
219	1.5%	
220	1.5%	
221	1.5%	
222	1.5%	
223	1.5%	
224	1.5%	
225	1.5%	
226	1.5%	
227	1.5%	
228	1.5%	
229	1.5%	
230	1.5%	
231	1.5%	
232	1.5%	
233	1.5%	
234	1.5%	
235	1.5%	
236	1.5%	
237	1.5%	
238	1.5%	
239	1.5%	
240	1.5%	
241	1.5%	
242	1.5%	
243	1.5%	
244	1.5%	
245	1.5%	
246	1.5%	
247	1.5%	
248	1.5%	
249	1.5%	
250	1.5%	
251	1.5%	
252	1.5%	
253	1.5%	
254	1.5%	
255	1.5%	
256	1.5%	
257	1.5%	
258	1.5%	
259	1.5%	
260	1.5%	
261	1.5%	
262	1.5%	
263	1.5%	
264	1.5%	
265	1.5%	
266	1.5%	
267	1.5%	
268	1.5%	
269	1.5%	
270	1.5%	
271	1.5%	
272	1.5%	
273	1.5%	
274	1.5%	
275	1.5%	
276	1.5%	
277	1.5%	
278	1.5%	
279	1.5%	
280	1.5%	
281	1.5%	
282	1.5%	
283	1.5%	
284	1.5%	
285	1.5%	
286	1.5%	
287	1.5%	
288	1.5%	
289	1.5%	
290	1.5%	
291	1.5%	
292	1.5%	
293	1.5%	
294	1.5%	
295	1.5%	
296	1.5%	
297	1.5%	
298	1.5%	
299	1.5%	
300	1.5%	
301	1.5%	
302	1.5%	
303	1.5%	
304	1.5%	
305	1.5%	
306	1.5%	
307	1.5%	
308	1.5%	
309	1.5%	
310	1.5%	
311	1.5%	
312	1.5%	
313	1.5%	
314	1.5%	
315	1.5%	
316	1.5%	
317	1.5%	
318	1.5%	
319	1.5%	
320	1.5%	
321	1.5%	
322	1.5%	
323	1.5%	
324	1.5%	
325	1.5%	
326	1.5%	
327	1.5%	
328	1.5%	
329	1.5%	
330	1.5%	
331	1.5%	
332	1.5%	
333	1.5%	
334	1.5%	
335	1.5%	
336	1.5%	
337	1.5%	
338	1.5%	
339	1.5%	
340	1.5%	
341	1.5%	
342	1.5%	
343	1.5%	
344	1.5%	
345	1.5%	
346	1.5%	
347	1.5%	
348	1.5%	
349	1.5%	
350	1.5%	
351	1.5%	
352	1.5%	
353	1.5%	
354	1.5%	
355	1.5%	
356	1.5%	
357	1.5%	
358	1.5%	
359	1.5%	
360	1.5%	
361	1.5%	
362	1.5%	
363	1.5%	
364	1.5%	
365	1.5%	
366	1.5%	
367	1.5%	
368	1.5%	
369	1.5%	
370	1.5%	
371	1.5%	
372	1.5%	
373	1.5%	
374	1.5%	
375	1.5%	
376	1.5%	
377	1.5%	
378	1.5%	
379	1.5%	
380	1.5%	
381	1.5%	
382	1.5%	
383	1.5%	
384	1.5%	
385	1.5%	
386	1.5%	
387	1.5%	
388	1.5%	
389	1.5%	
390	1.5%	
391	1.5%	
392	1.5%	
393	1.5%	
394	1.5%	
395	1.5%	
396	1.5%	
397	1.5%	
398	1.5%	
399	1.5%	
400	1.5%	
401	1.5%	
402	1.5%	
403	1.5%	
404	1.5%	
405	1.5%	
406	1.5%	
407	1.5%	
408	1.5%	
409	1.5%	
410	1.5%	
411	1.5%	
412	1.5%	
413	1.5%	
414	1.5%	
415	1.5%	
416	1.5%	
417	1.5%	
418	1.5%	
419	1.5%	
420	1.5%	
421	1.5%	
422	1.5%	
423	1.5%	
424	1.5%	
425	1.5%	
426	1.5%	
427	1.5%	
428	1.5%	
429	1.5%	
430	1.5%	
431	1.5%	
432	1.5%	
433	1.5%	
434		

◆ KOBE STEEL, LTD.
CHOFU-KITA PLANT.

2. MINATOMACHI CHO FU SHIMONOSEKI
YAMAGUCHI-PREF., JAPAN

HEAD OFFICE

* 36-1, 1-CHOME WAKINOHAMA-CHO, FUKUOKA-KU, KOBE

昭和51年8月

試験分析書

(断熱材)

又芝セラミック技術部

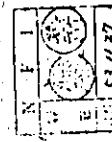
① 化学分析値

成分	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	N ₂ O	F ₂ O	P	C ₁
%	9.55	4.03	0.04	0.25	0.012%	0.012%	0.012%	5 ppm	5 ppm

10μL/HR (at 1700°C 0.5HR 20%)

② 高温性不純物

10μL/HR (at 1700°C 0.5HR 20%)



③ 水分

10μL/HR (at 1700°C 0.5HR 20%)

-以上-

INGOT NO.	PRODUCT NAME	INGOT COMPOSITION BY WEIGHT (%)		PRODUCT TEST RESULTS		SPEC. ITEM	TEST ITEM	TEST RESULT	SPEC. ITEM	TEST ITEM	TEST RESULT
		TOP	MID	TOP	MID						
120	Z-2 Nuclear Fuel Cladding Tubes	1.25	1.35	1.54	1.54	1.25	1.35	1.54	1.54	1.25	1.35
Si	0.20	0.14	0.15	0.16	0.16	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Fe	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
C	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
N	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
H	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Al ₂ O ₃	1.25	1.35	1.54	1.54	1.25	1.35	1.54	1.54	1.25	1.35	1.54
SiO ₂	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
CaO	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
MgO	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%
N ₂ O	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%
F ₂ O	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%	0.012%
P	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm
C ₁	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm	5 ppm
LOT No.	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
INGOT No.	399942	399942	399942	399942	399942	399942	399942	399942	399942	399942	399942
QUANTITY	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

材料試験成績表

No. 68323

測定者：中川 勝也 検査機関：JAERI 検査日：昭和52年7月6日

INCOHED X-750 納入供給 CPC 作業日：昭和52年7月6日 設置日：昭和52年7月6日

試験項目	C	Si	Mn	Pn	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	%	
											Max	Max
HT197CX	.03	.129	.142	.766	.006	.12	71.38	15.95	1.02	.74	2.38	-2.75
HT197DX	1.195			96.3		65.6						

SI. 2. 1x100x10 (mm)	上部アリナム スプリング(1)	N.F.I.	向入ベ ル	株式会社
		在庫	販賣	所
		7-13	7-13	7-13
		105	105	105
		0921	0921	0921

A-6

記述結果を下記の通りご通知いたしました

試験成績報告書

研4第428号

検査機関：東京大学工学部金属研究所

実施日：昭和52年7月21日

(担当者：松井厚田)

実施日：昭和52年7月22日

報告：昭和52年7月22日

試験名：インコネルX線

試験項目：引張強度

古河電気工業

試験番号：22355

中央研

検査番号：52-83 検査番号：52-27

試験番号	直 径 mm	引 張 強 度 kgf	引 張 強 度 kg/mm ²	伸 び %	L.E.							
溶体化処理材												
1.2#	1.189	1.111	108.0	97.21	17.4	A						
1	1.189	1.103	107.5	97.02	19.0	B						
1.5#	1.588	1.981	199	101	19.5	B						
2	1.587	1.978	199	101	20.3	B						
溶効処理材												
1.2#	1.189	1.111	150.5	135.5	12.8	B						
1	1.189	1.111	150.4	135.4	-	C						
1.5#	1.585	1.973	279	141	9.8	B						
2	1.585	1.973	279	141	13.1	B						
上部アリナム スプリング												
1. 実験速度	7.5cm/min	N.F.I.	主任	担当者								
2. 口点距離 (mm)	100											
3. 実験温度 (°C)	25											

A-7



試験成績表

日本工業規格表示許可工場

明石合金株式会社

孫子燃料工業株式会社

昭和 50 年 9 月 1 日

機種	規格
(A)	(B)

品名・記号	1/2"X1/2"X1/2"Zircaloy-4	注文番号	No.
寸法	2.0%	製作番号	No. H5610
納入数量	JIS 10 kg	製作規格	
納入期日	昭和 50 年 9 月 1 日	成績番号	No. 44-19

分析試験									
成分名	Ni + Co	Mn	Si	Mg	Fe	Cu	Cr	C	Al
H5610	22.2	2.2	2.2	—	6.8	2.2	0.2	0.2	2.2
Ti	—	—	—	Co	—	—	—	—	—
Zr	2.6	—	—	—	—	—	—	—	—

機械試験

項目	引張強さ (kg/mm²)	伸び (%)	かたさ (HV)	スライス (kg/mm²)	熱膨脹係数 (20°C~100°C)	伸び抵抗 (nm)	固有伸び (mm/cm)	屈曲強度 (20°C~50°C)	熱起電力 (mV)
時効材	115.3	—	—	—	—	—	—	—	—
時効後	106.9	—	—	—	—	—	—	—	—

磁性試験

項目	初透磁率 μ₀₁	最大透磁率 μₘₐₓ	保磁力 Hc	炎點 μ₃₀₀	剩磁 μ₁₀₀₀	剩磁 μ₃₀₀₀	下部フローテム	フローテム

機 械 試 験、外観、金屬組織計 判定
良 良 良 合格

N	F	I
Y	—	—
P	—	—

100×200 49.6 T 350

A-8

(1)

INSPECTION CERTIFICATE

NIPPON MINING Co., Ltd.

Customer: NIHON SANSO K.K.

Shipping Date: 8.52.11.4

Head Office: Akasaka-Aoicho 3, Minato, Tokyo.

Messrs

Contract No. MB9330		Invoice No. ZA 24		Description Annealed Bar		Type Zircaloy-4	Weight(Total) 6.70 Kg
Heat No.	Size	Quantity	Component Spec	Finished Product		Chemical Compositions (%) or (ppm)	
				Weight	O(ppm)	N(ppm)	H(ppm)
L 5104-2	12" x 1500"	3	6.70	1	1360	33	16
				2	1280	28	14
				x	1320	31	15

Mechanical and Physical Properties							
Heat No.	Coil No.	Tensile Strength (kg/mm²)	Elongation (%)	Vickers Hardness Hv (kg)	Yield Strength (kg/mm²)	Grain Size (ASTM No.)	
		min.42	min.14	—	min.24.5	min.7	
L 5104-2	1	56.6	29.3	—	39.9	11	
	2	56.5	28.1	—	39.5	11	
	x	56.6	28.7	—	39.7	11	

Dimension and Surface	O.K., Straightness O.K.
Remarks	上部端柱全 - (1) (压接材)

埼玉県戸田市新富町1丁目11の35
日本鉄道中央研究所
株式会社

Chief of Inspection Dept.

A-9

(II)

INSPECTION CERTIFICATE (INGOT CHEMICAL ANALYSIS)

Ingot No. L5104

Alloy Type Zircaloy-4

Spec No.	Chemical Composition (%)												
	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Al	B	Cd	C	Cl	Co	Cu	Hf	Mg
1:20 -1.70	0.18 -0.24	0.07 -0.13	0.28 -0.37	max. 0.0075	max. 0.00005	max. 0.00005	max. 0.027	max. 0.020	max. 0.0050	max. 0.010	max. 0.0020	max. 0.0010	
T	1.42	0.205	0.107	0.312	0.0070	0.00003	0.00005	< 0.005	< 0.002	< 0.0005	< 0.0010	0.0075	0.0010
M	1.55	0.215	0.107	0.322	0.0070	0.00003	0.00005	0.005	< 0.002	< 0.0005	< 0.0010	0.0075	0.0010
B	1.51	0.218	0.115	0.333	0.0068	0.00003	0.00005	0.005	< 0.002	< 0.0005	< 0.0010	0.0075	0.0010
Z	1.49	0.213	0.110	0.32	0.0069	0.00003	0.00005	< 0.005	< 0.002	< 0.0005	< 0.0010	0.0075	0.0010

Spec No.	Chemical Composition (%)											
	Mn	Mo	Ni	Si	W	U	Ti					
1:20 -0.0050	max. 0.0050	max. 0.0050	max. 0.0070	max. 0.0120	max. 0.010	max. 0.0003	max. 0.0050					
T	0.0012	< 0.0010	< 0.0010	0.0030	< 0.001	< 0.0001	< 0.0010					
M	0.0015	< 0.0010	< 0.0010	0.0030	< 0.001	< 0.0001	< 0.0010					
B	0.0013	< 0.0010	< 0.0010	0.0030	< 0.001	< 0.0001	< 0.0010					
Z	0.0013	< 0.0010	< 0.0010	0.0030	< 0.001	< 0.0001	< 0.0010					

Remarks

上部端検(2)
(左端材)

A-10

材料試験成績表 TEST CERTIFICATE

Material	Size mm Width Thickness	Bar Size mm Width Thickness	Charge No.	Manufacturing Date	Test Certificate No.
SUS304	25 00	10	40410	OS 49- 7	6-6-1319- 3095

愛知製鋼株式会社
Chief, Inspection Department
Aichi Steel Works, Ltd.

Item	Chemical Compositions (%)											
	C (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	P (wt%)	S (wt%)	Cu (wt%)	Ni (wt%)	Cr (wt%)	Mo (wt%)	Al (wt%)	V (wt%)	
12.43 Spec.	MAX : 8	MAX 100	MAX 200	MAX 40	MAX 30		800-1050	1800-2000				
22.13 Results	8	61	160	37	9		869	1841				

Item	Mechanical Properties													
	熱処理温度 Heat Treatment Temperature (°C)			SI 強度試験 Tension Test			引張強度試験 Yield Test (kg/mm²)			布氏硬度試験 Hardness Test (HB)			曲げ試験 Bending Test	
12.43 Spec.	1010-1150	1st Quenching	2nd Quenching	Temper	Yield P. (kg/mm²)	Tensile Str. (kg/mm²)	Elon. (%)	Red. A (%)	Ext. Len. (%)	HB				
22.13 Results	1100				29	59	64	73	148	MAX 187				

Item	焼入性試験 (一端焼入) Hardenability Test (End Hardenability Process)												Remarks	
元素	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16	1/16
結果													上部端検(3) (左端材)	

Item	地合試験 Macro-Streak-Flow Test			粒度 Grain Size	晶粒度 Koenig's Index	マクロ組織 Macro-Structure	ミクロ組織 Micro-Structure	地合試験 Hardness Test	II Decarb. Diameter S End S.	III Decarb. Diameter S End S.	IV Decarb. Diameter S End S.	V Decarb. Diameter S End S.	
	I	II	III										

注記: 1) 焼入性試験は、1/16 の試験結果を示す。
 2) 地合試験は、II, III, IV, V の試験結果を示す。
 3) 地合試験の結果は、II, III, IV, V の各試験結果の平均値を示す。
 4) 地合試験の結果は、II, III, IV, V の各試験結果の平均値を示す。

A-11

REISSUED 12/19/77 to show corrosion results

AT&T EDYNE

WAH CHANG ALBANY

P.O. Box 480

ALBANY, OREGON 97321 TWX 1510138527A

ATTENTION OF: J. A. Budocore

ATTENTION OF: J. A. Budocore

IN REGARD TO YOUR PURCHASE ORDER NO. 136046
ITEM NO. 1 DATE SHIPPED December 13, 1977
DESCRIPTION Zincalloy 2 Barstock
DIMENSIONS .5315" dia. x 118.1" L
SPECIFICATIONS NEI-N-7711 with TRCA
THE TEST REPORT FOLLOWS:

* annealed and centerless ground surface.

* comments per ALB033 (8-5-77) & P.O.
* comments per ALB033 (8-5-77) & P.O.

INGOT ANALYSIS

COMPOSITION IN PERCENT

Element	Spec. max:	max:	min:
Si	0.20-1.70	1.52	1.34
Fe	0.07-0.20	0.15	0.14
Cr	0.05-0.15	0.10	0.10
Ni	0.03-0.08	0.05	0.05
C	0.18-0.38	0.29	0.28
O	0.07-0.15	0.13	0.13
Zr			

BALANCE

IMPURITIES IN PPM

BAR DYE PENETRANT TEST RESULTS

Spec. min:	(100% Coverage)
PS-1P-2, Rev. 1	PS-1P-2, Rev. 1
Results - Acceptable	Results - Acceptable

BAR SURFACE FINISH, RMS

Spec. max: 70

Results - Acceptable

TESTS RESULTS AT ROOM TEMP

Spec. min:	Yield Strength (0.2% offset), ksi	Elong. in.
60	35	14
Sample:	Spec. min:	Spec. max:
Long. #1	83.3	66.6
Long. #2	83.2	67.3

METALOGRAPHY REPORT

Spec. min:	Results	Spec. max:
1	10.0	< 0.7
2	10.0	< 0.7

(3 Long. samples lot to LP-1E-10 Rev. 0)

Three Long. samples were microscopically examined @ 50 X for internal porosity, seams, cracks, pipe, laps, center bursts, stringering, and any other defects conductive to axial leakage.

Results - No defects noted. Material meets the acceptance criteria of LP-1E-10 Rev. 0.

"MICROPHOTOGRAPHS ENCLOSED"

INGOT ULTRASONIC TEST RESULTS

ASTM B350-67

Results - Acceptable

Range (200 max)	165 - 175	ASTM B350-67
Average	170	

A-12

A-13

ANALYSIS CERTIFIED BY R. W. Jenkins
14
Date
Quality Assurance Mgr.

AT&T EDYNE

WAH CHANG ALBANY

P.O. Box 480

ALBANY, OREGON 97321

1503 318-4211 TWX 1510138527A

ATTENTION OF: J. A. Budocore

IN REGARD TO YOUR PURCHASE ORDER NO. 136046

ITEM NO. 1 DATE SHIPPED December 13, 1977

DESCRIPTION Zincalloy 2 Barstock

DIMENSIONS .5315" dia. x 118.1" L

SPECIFICATIONS NEI-N-7711 with TRCA

HEAT NO. 204593Q ZF-2

Mac's No. 60637

Assm't Run No. 6072

annealed and centerless ground surface.

Comments per ALB033 (8-5-77) & P.O.

Comments per ALB033 (8-5-77) & P.O.

TYPE OF SHIPMENT NO. OF PCS.

Air 35

Ocean 192

WEIGHT 197.0*

1086.0#

PRODUCT CERTISTRY, PPM

Element

Spec. max:

Bottom

N

45

G7

15

16

Spec. max:

Middle

N

80

45

G7

25

15

16

Spec. max:

Top

N

80

45

G7

25

15

16

Spec. max:

Bottom

N

80

45

G7

25

15

16

Spec. max:

Middle

N

80

45

G7

25

15

16

BAR SURFACE FINISH, RMS

Spec. max: 70

Results - Acceptable

TESTS RESULTS AT ROOM TEMP

Spec. min:	Yield Strength (0.2% offset), ksi	Elong. in.
60	35	14
Sample:	Spec. min:	Spec. max:
Long. #1	83.3	66.6
Long. #2	83.2	67.3

METALOGRAPHY REPORT

Spec. min:	Results	Spec. max:
1	10.0	< 0.7
2	10.0	< 0.7

(3 Long. samples lot to LP-1E-10 Rev. 0)

Three Long. samples were microscopically examined @ 50 X for internal porosity, seams, cracks, pipe, laps, center bursts, stringering, and any other defects conductive to axial leakage.

Results - No defects noted. Material meets the acceptance criteria of LP-1E-10 Rev. 0.

"MICROPHOTOGRAPHS ENCLOSED"

INGOT ULTRASONIC TEST RESULTS

ASTM B350-67

Results - Acceptable

Range (200 max)	165 - 175	ASTM B350-67
Average	170	

INGOT HARDNESS, BEN

Range (200 max)

165 - 175

Average

170

Spec. min

165

Spec. max

175

Spec. min

165

Spec. max

Appendix B 燃料中心温度測定用熱電対の検査成績書

燃料棒と熱電対Noの対応

燃料棒No. 1 TC 1591/05

No. 2 1591/02

No. 3 1591/04

No. 4 1591/06

Société Anonyme d'Etudes
& Réalisations Nucléaires
S O D E R N
10 rue de la Passerelle
92150 SURESNES (France)
Tel 772 09 42
RC. PARIS 8 572 089795

CERTIFICATE OF COMPLIANCE

Order Nr. : 874/038-29 dated 6.10.78 - Item 1 -
Placed by : NIHON PHILIPS Co. - TOKYO - Japan -
Our ref. : 234 419 S - 2809

- Object of the order : Item 1 , 9 x THERMOCOAX thermocouples for high temperature, ref. :
2 WS-W26 Mo 18/BeO/49 cm//2 XY At 16/1700cm/MF 3/2 XY-35/500cm,
manufactured in accordance with customer's specifications dd October 6, 1978
altered as for order 874/038-6 (our 233 2005) - our telex 17094.3 also
applies.

- Identification numbers of the 9 pieces now delivered :

1591/01 - 1591/02 - 1591/04 - 1591/05 - 1591/06 - 1591/07 - 1591/09 -
1591/10 - 1591/11 -

1.1 Dimensions : as per drawings 402 237.8 and 402 238.8.

1.2 Materials :

- . Compensation cable : THERMOCOAX 2 XY At 16 from SODERN batch 7987
At : AISI 321 stainless steel, manganin oxide* insulated.
- . Molybdenum* sheath, from SODERN batch 6014,
- . Beryllium oxide* insulation, from SODERN batch 5014,
- . Tungsten - rhenium wires : 2 WS-W26 from Hoskins, batch 5101, size.0.2 mm.

* Typical analysis of which are to be found attached.

- Test inspection :

2.1.1. to 2.1.5. tests have been duly performed and found up to specifications
- See 1st enclosure -

2.1.6. X-ray pictures of the welded bushing are supplied.

2.1.7 Calibration :

- . See attached table from Hoskins :
- . one sample was calibrated at Silver point, and then at 1 100°C was compared to a platinum rhodium 10 % - platinum thermocouple. The observed e.m.f. :
 - 17.478 mV at 961.93°C, and 25.012 mV at 1400°C ($\pm 1\%$);
 - duly correspond to the theoretical values $\pm 1\%$.

Certified that the supplies enumerated above conform in every way to the established specification, drawing(s), and/or other technical requirements in the order.

Made out in Suresnes, on the 30 November, 1978

R. Ay
J. BALDY

CE DOCUMENT APPARTIENT À LA SUITE
D'ANONYME D'ÉTUDES ET D'ÉVALUATIONS.
NUCLÉAIRE. SODEC 4117. HS PAUS
ATLAS SAISONNIER DU CONTRÔLE DE
SANS AUTORISATION LIVRÉE

802

Reference des machines
Materiel identification number

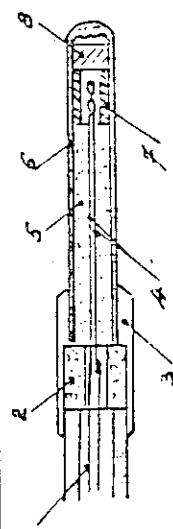


Figure 1. Cylindre type 80

- 2 - Béton Ø 55 (épaisseur 90) 960
- 3 - Couvercle accordéon. Diam. ext. 300
- 4 - Béton Ø 200mm. Diam. int. 200 - lot - 5101
- 5 - Béton Ø 100mm. Diam. int. 100 - lot - 5101
- 6 - Anneau Ø 0,99 (épaisseur 25). 400. Lot - 5014
- 7 - Tube Ø 110x 1,07. 100.
- 8 - Béton Ø 0,99x 0,07. 300. Lot - 5013
- 9 - Béton Ø 0,99 (épaisseur 25) 400. Lot - 5013

Référence	Référence	Longueur	Diamètre	Test de tension et de résistance à la traction		Test de résistance à la flexion	Test de résistance à la torsion	Test de résistance à la compression
				Longueur	Résistance à la traction			
15/9/61	100	2,60	Ø 10	Ø 10	8,00	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/64	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/65	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/66	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/67	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/69	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/71	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/72	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/73	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/74	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/75	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/76	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/77	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/78	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/79	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/80	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/81	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/82	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/83	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/84	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/85	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/86	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/87	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/88	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/89	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/90	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/91	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/92	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/93	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/94	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/95	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/96	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/97	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/98	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/99	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C
15/9/100	310	2,60	Ø 10	Ø 10	5,10	Ø 10	Ø 10	1000°C

Thermocouple haute température
High temperature Thermocouple. W5Re/W26Re
PHILIPS. Tokyo. - C°/Socles R344419

N° Rev.
Page : 1/1

SODEC

10 rue de la Passerelle 92150 SURESNES

Auteur : J. Filliou

ANALYSE TYPE DU MATERIAU

ELEMENT	P.P.M.
Aluminium	10
Calcium	20
Silicon	17
Molybdenum	97.95 % Min.
Iron	40
Chromium	10
Nickel	10
Copper	12
Tungsten	90
Sodium	8
Potassium	3
Manganese	10
Magnesium	< 10
Tin	10
Lead	< 10
Cobalt	< 8
Silver	< 1
Titanium	< 10
Zirconium	< 10
Vanadium	-
Tantalum	-
Columbium	-
Carbon	< 10
Oxygen	25
Hydrogen	2

ANALYSE TYPE DE L'OXIDE DE BERYLLIUM

ELEMENT	P.P.M.
Silicon	100
Aluminum	100
Iron	20
Calcium	50
Boron	3
Chromium	10
Magnesium	50
Manganese	10
Sodium	50
Nickel	20
Lithium	1
Cadmium	2
Copper	5
Cobalt	5

Balance Beryllium Oxide

234 419 1

Société Anonyme d'Etudes
 & Réalisations Nucléaires
 SODERN
 10, rue de la Passerelle
 92150 SURESNES (France)
 RC. PARIS B 572 089795

IDENTIFICATION CERTIFICATE

Type : THERMOCOAX thermocouples ref. :

2 WS-W26 Mo 18/8e0/49cm//2 XY At 16/1700cm/MF 3/2 XY 35/500cm

Identification : Serial/running No. :

1591/01 - 1591/02 - 1591/04 - 1591/06 - 1591/07

1591/09 - 1591/10 - 1591/11 - 1591/05 -

ID No.	ID No.
No. 1	1591/05
No. 2	1591/02
No. 3	1591/04
No. 4	1591/06

This is to certify that the above-quoted high temperature thermocouples were manufactured with tungsten -5% / tungsten -26% rhenium thermocouple wires.

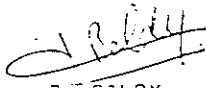
- tungsten 5%)
) SODERN Batch Nr.: 5101
 - tungsten 26% ,)

This batch is in accordance with attached table.

. tolerance + 1% till 2000°C
 - 2% above 2000°C

Made out in Suresnes on the, 30 th November, 1978

Signature of authorised controller :



J.-P. BALDY

W5Re/W26Re temperature millivolt equivalent

ADOPTED MARCH 4, 1974

REFERENCE JUNCTION AT 0°C

DEGREES C.	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0°	0.000	0.135	0.272	0.412	0.554	0.698	0.845	0.993	1.144	1.295
100°	1.451	1.607	1.765	1.925	2.087	2.250	2.415	2.581	2.749	2.913
200°	3.089	3.261	3.434	3.609	3.785	3.962	4.140	4.319	4.500	4.681
300°	4.863	5.047	5.231	5.416	5.601	5.788	5.975	6.163	6.352	6.541
400°	6.731	6.921	7.112	7.304	7.496	7.688	7.881	8.074	8.267	8.451
500°	8.655	8.849	9.044	9.239	9.434	9.629	9.824	10.019	10.215	10.410
600°	10.606	10.801	10.997	11.192	11.388	11.583	11.778	11.974	12.169	12.364
700°	12.558	12.753	12.947	13.142	13.336	13.529	13.723	13.916	14.109	14.302
800°	14.494	14.686	14.877	15.069	15.260	15.450	15.640	15.830	16.020	16.208
900°	16.397	16.585	16.773	16.960	17.147	17.333	17.519	17.704	17.889	18.073
1000°	18.257	18.440	18.623	18.805	18.987	19.168	19.349	19.529	19.709	19.883
1100°	20.066	20.244	20.421	20.598	20.774	20.950	21.125	21.299	21.473	21.647
1200°	21.819	21.991	22.163	22.334	22.504	22.674	22.843	23.012	23.180	23.347
1300°	23.514	23.680	23.846	24.010	24.175	24.339	24.502	24.664	24.825	24.983
1400°	25.148	25.308	25.468	25.627	25.785	25.943	26.100	26.256	26.412	26.568
1500°	26.722	26.876	27.030	27.183	27.335	27.486	27.637	27.788	27.938	28.087
1600°	28.236	28.384	28.531	28.678	28.824	28.969	29.114	29.259	29.402	29.546
1700°	29.688	29.830	29.971	30.112	30.252	30.391	30.530	30.668	30.805	30.942
1800°	31.078	31.214	31.349	31.483	31.617	31.749	31.882	32.013	32.144	32.274
1900°	32.404	32.533	32.661	32.788	32.915	33.041	33.166	33.291	33.415	33.538
2000°	33.660	33.782	33.902	34.022	34.142	34.260	34.378	34.494	34.610	34.725
2100°	34.839	34.953	35.065	35.177	35.289	35.397	35.506	35.614	35.721	35.827
2200°	35.932	36.036	36.138	36.240	36.341	36.441	36.539	36.637	36.733	36.828
2300°	36.922	37.015	37.107							

REFERENCE TABLE PUBLISHED BY « HOSKINS Mfg CO., DETROIT »

DATA SUBJECT TO ALTERATION WITHOUT NOTICE

SOCIÉTÉ ANONYME D'ÉTUDES ET RÉALISATIONS NUCLÉAIRES " SODERN "
 SOCIETE ANONYME AU CAPITAL DE 3.000.000 F.
 10, rue de la Passerelle - 92150 SURESNES - FRANCE - Tél. : 772

R.C. PARIS 8 572 089 795