

JAERI-M
9196

高温燃料試験(III)
(黒鉛ヒーターの開発)

1980年11月

秋野 詔夫・武山 友憲・椎名 保顕
佐野川好母・岡本 芳三

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、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

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.

高温燃料試験(Ⅲ)

(黒鉛ヒーターの開発)

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

秋野 詔夫・武山 友憲[†]・椎名 保顕

佐野川好母・岡本 芳三

(1980年10月24日受理)

大型高温ヘリウムガスループで実施した高温燃料試験に使用するため、黒鉛を伝熱面とするVHTR燃料棒を模擬した加熱体を開発した。

高温燃料試験体に組み込んで最高1000℃・40気圧のヘリウムガスの流れの中で最大300W/cmの出力を達成することができ、測定された熱伝達率の精度も非常に良かった。

+) 東海研究所技術部

Test of High Temperature Fuel Element (III)
(Development of Graphite Heaters)

Norio AKINO, Tomonori TAKEYAMA⁺, Yasuaki SHIINA,
Konomo SANOKAWA and Yoshizo OKAMOTO

Division of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 24, 1980)

Electrical heaters simulating the VHTR fuel rods were fabricated to use in the High Temperature Fuel Test Section. The heat transfer surfaces of these heaters are made of graphite.

These heaters were tested in the condition of 1000°C and 40 bar helium gas flow and the maximum heat rate of 300 W/cm was obtained. The measured heat transfer coefficients were in good agreement with the established experimental correlations.

Keywords: VHTR, Fuel Element Graphite Heater, Heat Transfer,
Helium Gas

⁺) Division of Engineering Services, Tokai Research Establishment, JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. 経過と構造	2
3. 開発項目	9
3.1 機械的強度	9
3.2 黒鉛とモリブデンの結合	9
3.3 熱電対の取り付け	10
3.4 材料間の共存性	11
4. 使用経験	21
5. MARK-Ⅲ炉心試験用黒鉛加熱体の設計・開発	26
5.1 概 要	26
5.2 開発試験項目	26
(1) 黒鉛の深穴加工	26
(2) その他の試作開発	27
5.3 その後の経過	27
6. 結 論	27
付録1 多目的ガス炉燃料用黒鉛被覆模擬発熱体の検討	34
付録2 MARK-Ⅲ用黒鉛加熱体開発計画書	39

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Design and structure	2
3. Technical problems	9
3.1 Mechanical strength.....	9
3.2 Connection between graphite and Molybdenum.....	9
3.3 Fixation of thermocouples.....	10
3.4 Compatibility between materials.....	11
4. Some remarks on the practical use	21
5. New graphite heater for MARK-III fuel.....	26
5.1 Outline.....	26
5.2 Developments	26
(1) Deep hole machining into graphite sheath.....	26
(2) Other development items.....	27
5.3 Termination of development.....	27
6. Summary	27
Appendix 1	34
2	39

1. は じ め に

本報告は、多目的高温ガス炉燃料棒の伝熱流動特性を炉心と同じ条件1000°C、40気圧で高温燃料試験に用いた黒鉛加熱体（模擬燃料棒：電気加熱）について記したものである。

原子炉の熱設計を進めるにあたって、まず最初に必要となる情報の一つは、炉心における熱伝達率と摩擦損失係数である。多目的高温ガス実験炉の炉心の場合は流動条件が遷移領域にさしかかる恐れがあるため、特に正確な実験データを必要とする。さらに、これらの値は、伝熱面の粗さによって変化する。通常の金属の場合は、一般に平滑であり、ムーディー線図等を参照して求めることができる。しかしながら、黒鉛の表面粗さは、冷却材中に不純物として含まれる酸素や水分との化学反応、及び高速で流れる冷却材による流体力学的な力による腐食によって変化して行くものと考えられる。

VHTRは、従来の高温ガス炉と比べて、温度が高いこと、流路代表寸法が小さいこと、流速が大であること等により、特に腐食による表面粗さ、及び流路形状の変化は重要な問題である。しかし、高温・高速気流による黒鉛の腐食は、化学と流体力学の境界領域であり、予測は困難である。従って、できるだけ炉心と等しい条件で実際に黒鉛に腐食を発生させ、どのような現象が生ずるかを知ることが重要と考えられる。このような試験を行うためには、現実のVHTRの燃料棒を模擬した黒鉛製加熱体を開発することが必要となる。

また、この加熱体によって、より高温での伝熱試験が可能となり、将来、炉外モックアップテスト、さらにこの開発で得られた技術は炉内計測に生かされて行くものと考えられる。

しかしながら、高温燃料試験体を計画した時点では、黒鉛を伝熱面とする加熱体（模擬燃料棒）の発注は不可能であった。その理由は、いくつかの技術的問題点があって製作の目途が立たないということであった。その結果、当初高温燃料試験体に組み込む加熱体の伝熱面は、とりあえずタンタルとせざるを得なかった。タンタルは、機械加工・溶接等の通常の工作方法に難しい点があったが、通常の機械メーカーでも製作できるという見通しがついた。

しかしながら、ふく射率、熱膨張係数、熱伝導率、熱容量、表面粗さ等の伝熱流動特性に關与する諸性質について実際と同じ条件で炉外実証試験を行うための技術を開発するには、どうしても黒鉛製模擬燃料体を製作しなければならない。

この黒鉛製模擬燃料体を開発するに当たっての問題点は、以下のようのものであった。

- (1) 長尺薄肉管の製造
- (2) 長尺加熱体の機械的強さ
- (3) 電極ブスと黒鉛との結合
- (4) 熱電対の取り付け
- (5) 黒鉛と各種材料の共存性

2. 経 過 と 構 造

このような経緯のもとで、黒鉛加熱体は原研が自ら開発製造しなければならないと考えて、昭和48年より工作課との共同研究として試作を進めることになった。末尾に付した資料「多目的ガス炉燃料用黒鉛被覆模擬燃料体の検討」は開発の出発点となったものである。その後、昭和49年に設計が完了し、昭和50年前期に組み立てが行われた。

Fig.2.1は、その概念図である。中央部分は、燃料棒の被覆管に相当する黒鉛発熱部（外径34mmφ、長さ1m）、両側にモリブデン製の電極ブスが取り付けられている。発熱部と電極ブスはねじで結合されている。上の2体は、被覆管に電流を流して発熱させる直接型である。一番上のものは、平滑な表面を有する直接型平滑面と呼ばれるものである。真中の一体は、被覆管の表面に環状の突起を削り出したもので直接型粗面と呼ばれる。

一番下は、内部の燃料棒のコンパクトに相当する部分に通電させる間接型である。内部の発熱体は、表面の被覆等とはBNの棒（2mmφ）で絶縁されている。従って、この間接型は現実の燃料棒を最も良く模擬しているものであり、ギャップコンダクタンスが重要となる非定常実験・冷却材流路が狭い場合や偏心のある場合等の被覆管が流路管と短絡する恐れがある実験に適しているものと考えられる。

Table 2.1に、多目的高温ガス実験炉と本黒鉛ヒーターの設計仕様を示す。

Fig. 2.2 (a), (b)に、直接型及び間接型の詳細図を示す。

Fig. 2.3は、直接型平滑の高温部分の写真である。

流路管と加熱体の間隙を精度良く同心に保つ役目をするスペーサーは、同時に電氣的絶縁を保つ必要がある。上流のスペーサーはモリブデン電極ブスと黒鉛被覆管の間に取り付けられている。形状は、環状で燃料棒のスペーサーリブを模擬した三方向の長方形突起を有する。

Fig.2.4に、上部スペーサー部を示す。

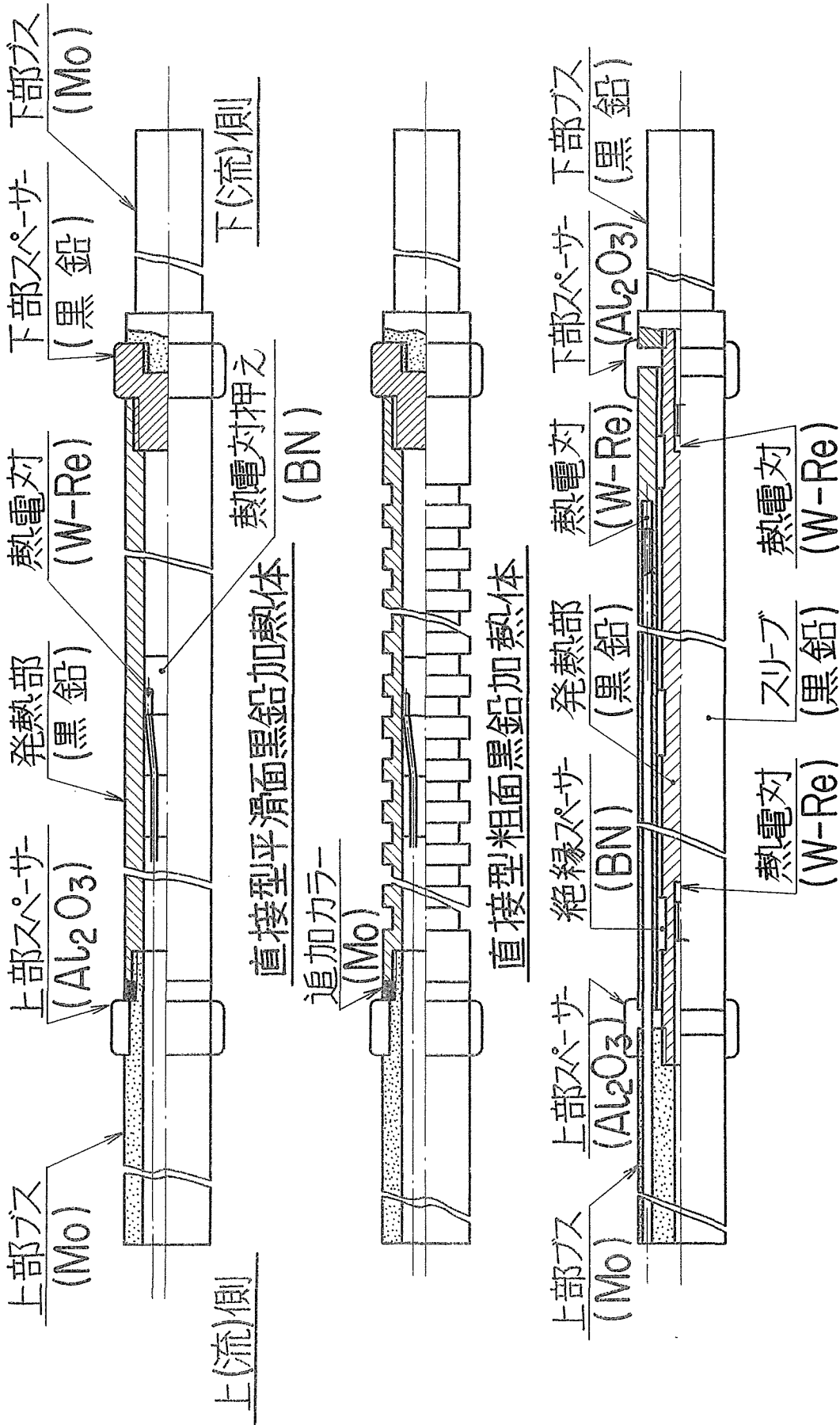
下部スペーサーは、高温となるためアルミナが還元される可能性があること、及び加熱体の片方は接地することが可能なので黒鉛製とした。

Fig.2.5に、下部スペーサー部を示す。

伝熱面温度を測定する熱電対は、黒鉛の還元性と温度レベルを考慮してタングステン・レニウム（W5Re/W26Re）を採用した。直接型は、被覆管の内面に接触するように、窒化ボロン（BN）ペレットによって支持されている。直接型は、厚さ8mmの被覆管壁に加工された内径5.6mmφの深穴の中に挿入されている。

Table 2.1 Principal design specifications of graphite heaters comparing with VHTR

	多目的高温ガス実験炉燃料	直接型黒鉛加熱体	間接型黒鉛加熱体
形 式	黒鉛製円筒に燃料コンパクトを12個つめたもの	黒鉛被覆電気加熱方式	黒鉛棒電気加熱黒鉛被覆方式
内 径	24φ	24φ(粗面22φ)	14φ
外 径	34φ	34φ	34φ
全 長	499mm	(発熱部) 1000mm	(発熱部) 1000mm
燃料コンパクト内径	8φ	—	—
“ “ 外径	24φ	—	13φ
最 高 線 出 力	412W/cm	400W/cm	100W/cm
燃料コンパクト最高温度	1293°C	—	1400°C
黒鉛スリーブ最高温度	1259°C	1400°C	1200°C
冷 却 材	ヘリウム	ヘリウム	ヘリウム
“ 圧 力	40 kg/cm ² G	42 kg/cm ² G	42 kg/cm ² G



間接型黒鉛加熱体

Fig. 2.1 Conceptual diagram of graphite heaters

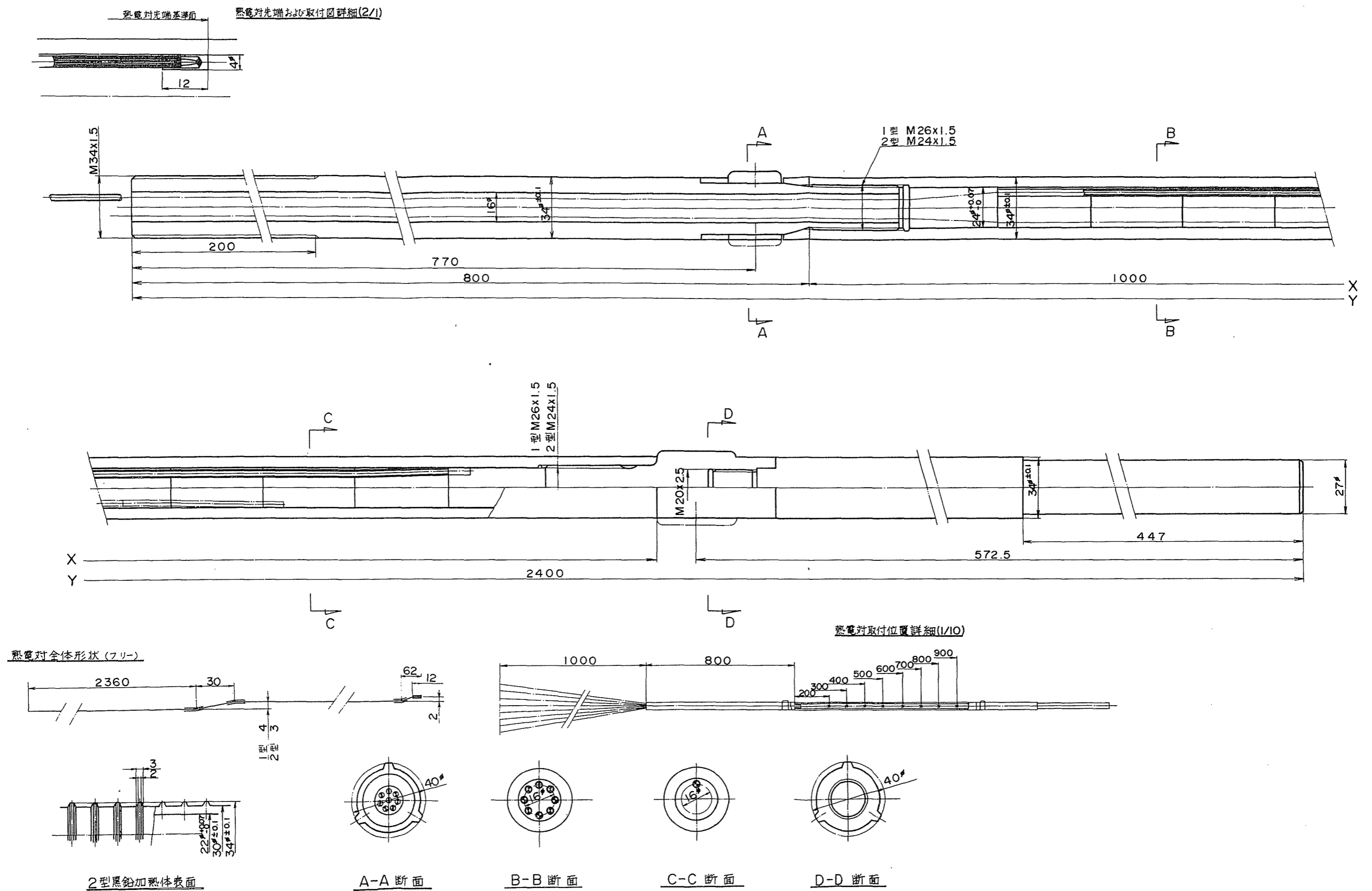


Fig. 2.2 (a) Detail of direct type graphite heater

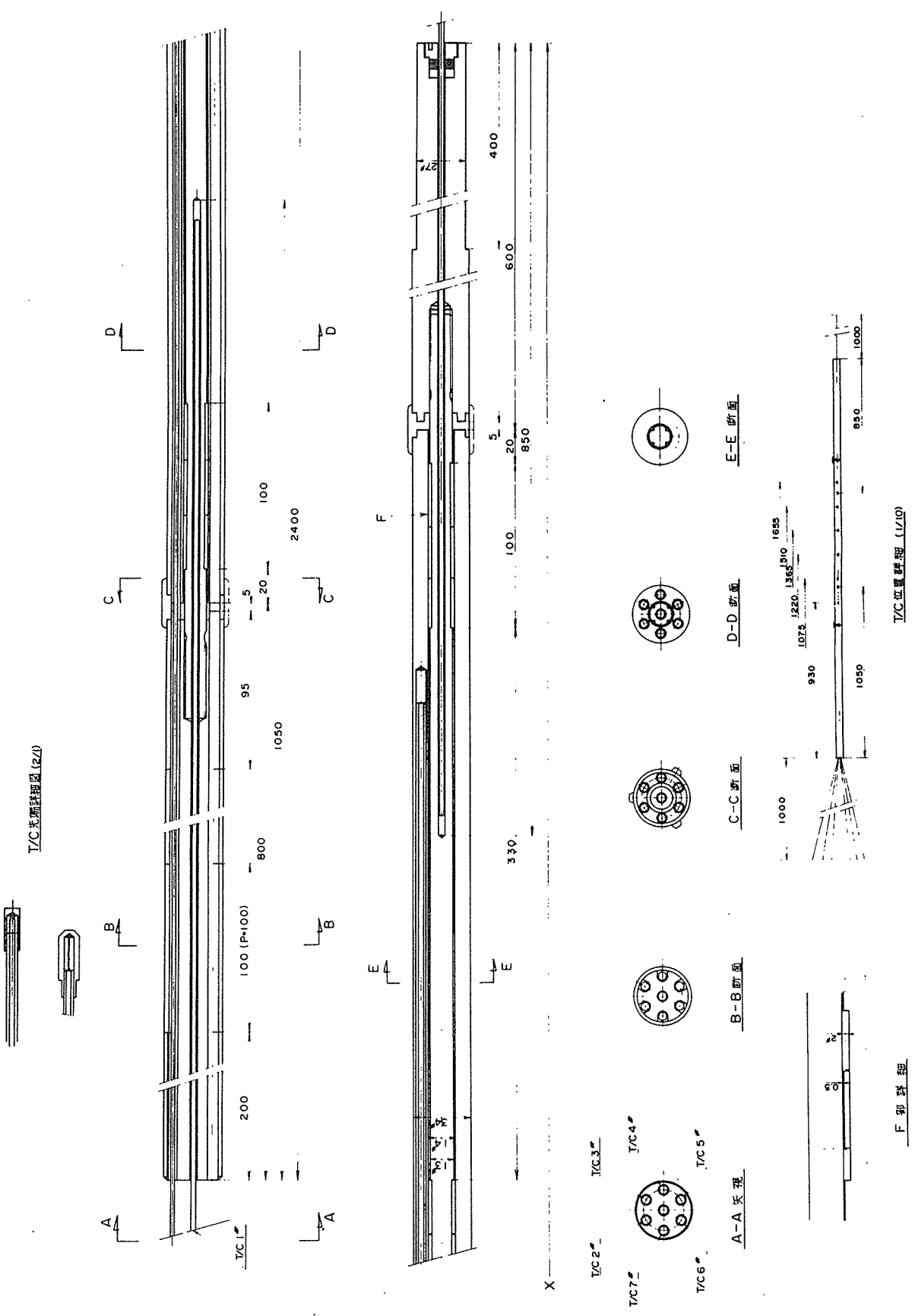


Fig. 2.2 (b) Indirect type

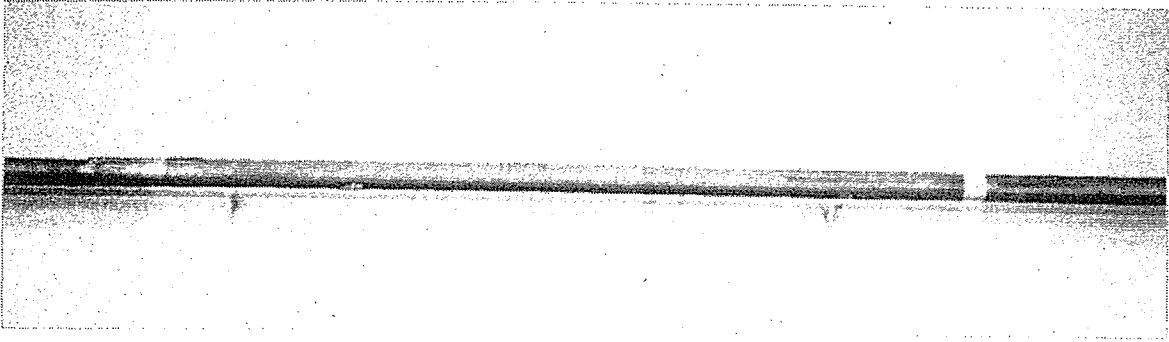


Fig. 2.3 High temperature part of direct type (plane surface) graphite heater

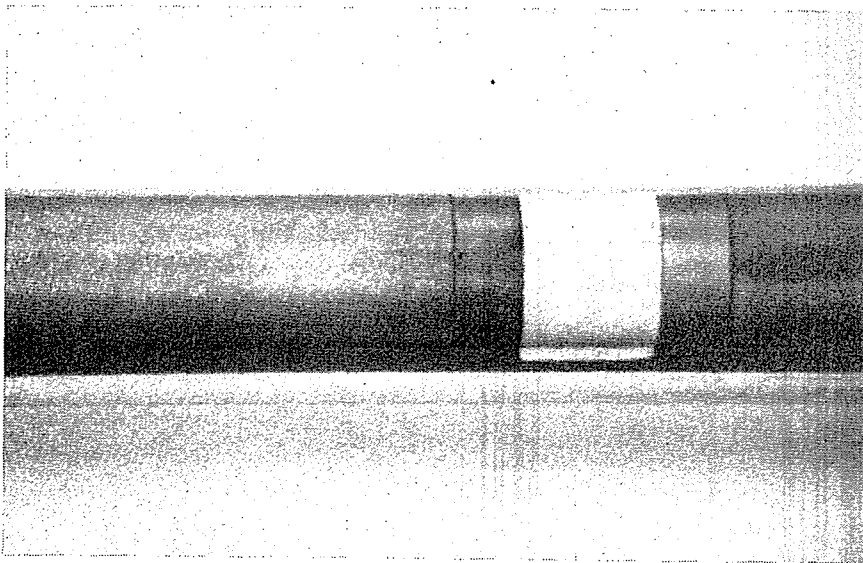


Fig. 2.4 Upper Al₂O₃ spacer

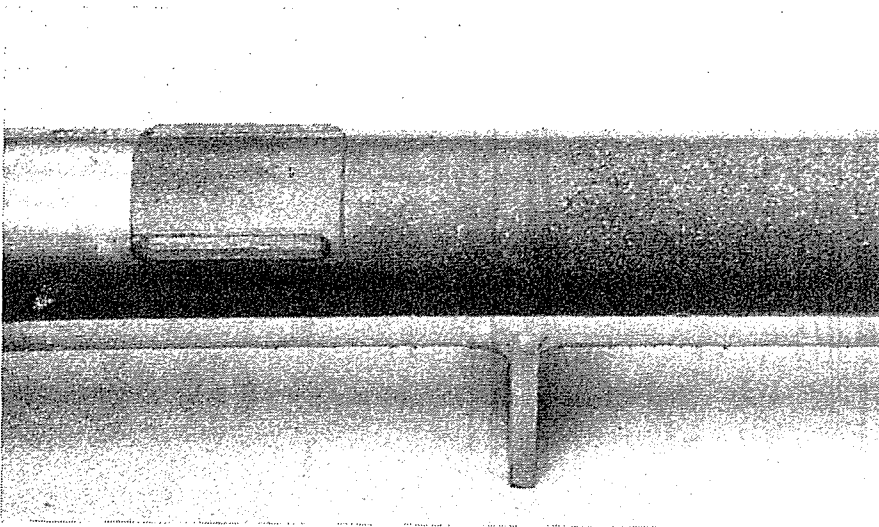


Fig. 2.5 Lower graphite spacer

3. 開発項目

前述の技術的問題点の(1)については、黒鉛メーカーの協力で解決した。以下、残った問題点について記す。

3.1 機械的強度

加熱体の構造は、小径長尺(34 mm ϕ × 2.4 m)の形状であり、真中に(金属と比べて)脆弱な黒鉛被覆管があり、その両側に重いモリブデン製の電極ブスが取り付けられている。従って、各部の強度・長尺物としての取り扱いの可能性を検討した。

単純な強度計算によれば、一端を支点にして、他端を持ち上げても破損しないことになっているが、黒鉛の応力集中、切り欠き部の特性等に不確定な要素が残されていた。

現実には、下部電極ブス部で、輸送中に折損が生じ、第3回高温運転を延期する原因となった。折損箇所は、モリブデンに切った内ねじに黒鉛オスねじをねじ込んである部分に生じた。破断面を、Fig. 3.1 ~ 2に示す。クラックは、黒鉛オスねじの切り初めの部分に沿って生じている。

これに対する対策としては、モリブデンと黒鉛のねじのオス・メスを逆にし、黒鉛側にメスねじを切り、断面係数を増大し、黒鉛表面に切り欠きが残ることがないように改善した。また、メスねじの施工に当たっても、不完全なねじ部分が生じないように注意した。この結合部分は、さらに黒鉛接着剤を塗布しねじ部のすき間をなくし、局所的応力の発生を避けた。(この接着は、電気的接触を改善する目的にも役立っている。次項参照)

その外に機械的破損による事故は一切発生しなかった。

3.2 黒鉛とモリブデンの結合

組み立て後の検査の段階では、上部のモリブデン電極ブスと黒鉛発熱管のねじ結合部に過大な電気抵抗が存在し、全体の抵抗の半分近い値になることが分かった。一方、下部の結合部の抵抗は10%程度と小さいが、ねじ部に僅かな緩みが生ずると10倍以上の値に増大する。

下部結合部は黒鉛発熱管とモリブデンの端面が突き当たっている。上部結合部は、アルミナスペーサーを取り付ける必要があるため、突き当たり面がない。

上部結合部を改善するために、Fig. 3.3に示すようにアルミナスペーサーと黒鉛発熱管の中間に(テーパによって)固定された環を取り付け、当たり面を形成するようにした。その結果、Fig. 3.4に示すように抵抗は小さくなった。設計としては、十分長いねじ結合区間を設けることによって電気抵抗を低減させる方針であった。しかしながら、導通はねじ部端の平面同士の面接触に依存しているため、高温でも抵抗値が低い値にとどまるかどうかという点については何ともいえない。

このねじ結合部の接触電気抵抗の高温及び温度サイクルによる変化を測定するため、ねじ結

合部のモデルを製作し、真空容器中で加熱試験を行った。Fig. 3.5に測定方法を示す。試験の結果、Fig. 3.6のように150～300°Cの間で接触電気抵抗が増大する領域が見い出された。この抵抗増大の原因は、材料の熱膨張の差によって接触部の面圧が、温度によって変化するためと考えられる。最大の抵抗値を取る場合、接続部の発熱は、全発熱量の10%に相当する。この値は、ホットスポットの原因ともなりMoと黒鉛の共存性を考慮する場合、かなり厳しい条件(1500°C, 300hrではMoC層の厚さは0.1mm程度となる)となる。さらに、定量的には握できない発熱量の存在は実験精度の上で望ましくない。それらを考慮して接触電気抵抗の安定化を図ることとなった。

その改善の手段として、

- (1) 高温用導電性接着剤の使用
- (2) 黒鉛用接着剤の使用
- (3) ろう付けの実施

の各方法が検討されたが、使用実績、処理温度、開発事項の程度を考慮して(2)の黒鉛用接着剤を使用することにした。Fig. 3.6には、日本カーボン製S-9型高温用黒鉛接着剤をねじに塗布した試験結果が示されている。同図より明らかなように150～300°Cの温度条件で見られた接触電気抵抗の増大は1/5以下に減少している。

Fig. 3.6の接触電気抵抗の推移から判断すると、ねじ部に黒鉛接着剤を塗布してそのまま使用してもよい。しかしながら、高温燃料試験体の性能試験に際して、黒鉛流路管に残留していた油成分によって装置全系が汚染されたことがあるのでHTGLに取り付ける前に焼成を行うことにした。そこで、ねじ結合部を800°Cまで昇温することができる真空電気炉を製作した。

Fig. 3.7に焼成用真空炉を示す。

3.3 熱電対の取り付け

直接型の場合には、熱電対を黒鉛被覆管の内面に熱電対を接触させる必要がある。高温における材料の共存性、及び保持、固定方法に工夫を要した。

最終的に、黒鉛被覆管の中に窒化ボロン(BN)のペレットを挿入し、その中に明けた穴の中に熱電対を通し、測温点の60mm手前から被覆管内面に接触するように外面へ取り出す。

熱電対は、タングステン・レニウム型(W5Re/W26Re)の0.5mmφ素線であり、アルミナの2孔ガイシによって絶縁されている。タングステンとBNの接触は共存性の点で望ましくない。

アルミナと黒鉛、熱電対と黒鉛の接触も望ましくない。そのため、熱電対先端部にはタンタル製のキャップを取り付けた。その肉厚は炭化層が1400°Cで300時間以内に内側に達しないように定めた。

これまでの高温運転で、熱電対の指示温度に変動を生じる例があった。この原因は、熱電対と被覆管の接触状態の変化に起因することが考えられる。従って、被覆管内面に熱電対を押し

付ける構造が望ましい。

3.4 材料間の共存性

高温部には、下記のような各種の材料が使用されている。

- a. 黒鉛
- b. モリブデン (Mo)
- c. アルミナ (Al_2O_3)
- d. タングステン (熱電対)
- e. 窒化ボロン (BN)
- f. タンタル (Ta)

共存性に一番問題が多いのは黒鉛である。酸化物は、還元され、金属は炭化される。接触が許されるのは、窒化ボロンだけである。そこで、お互いに反応が生じる可能性のある組み合わせとならないように配慮した。

しかし、モリブデン製の上部及び下部電極ブスル黒鉛被覆管の接触部をなくすことはできないし、上部は比較的溫度が低いので、直接ねじ結合部を設けた。下部は、中央の黒鉛で移行部を設け発熱を約 1 / 3 に減らし、モリブデンブスとねじで結合した。

タンタル製の熱電対先端保護キャップは、黒鉛被覆管内面に接触するが、前述したように寿命中に炭化が熱電対に及ばないように肉厚とした。

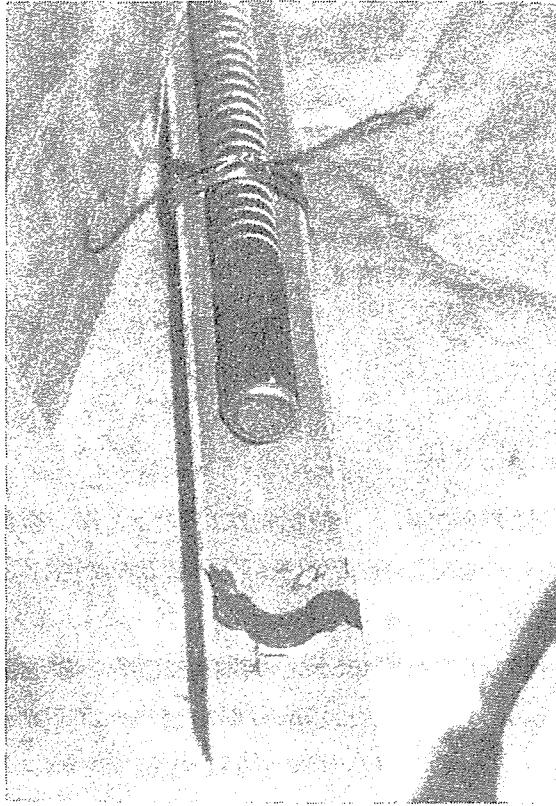


Fig. 3.1 Broken part of direct type graphite heater
(1) Graphite side

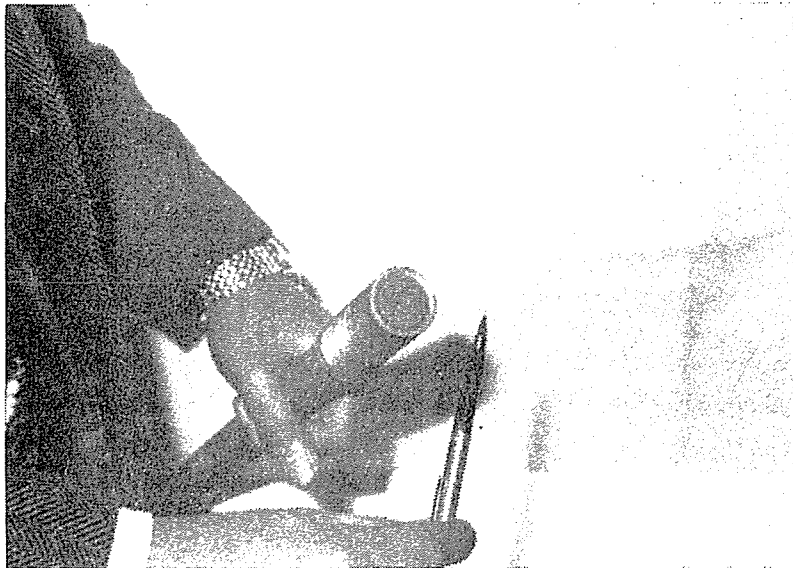


Fig. 3.2 Broken part of direct type graphite heater
(2) Mo buss side

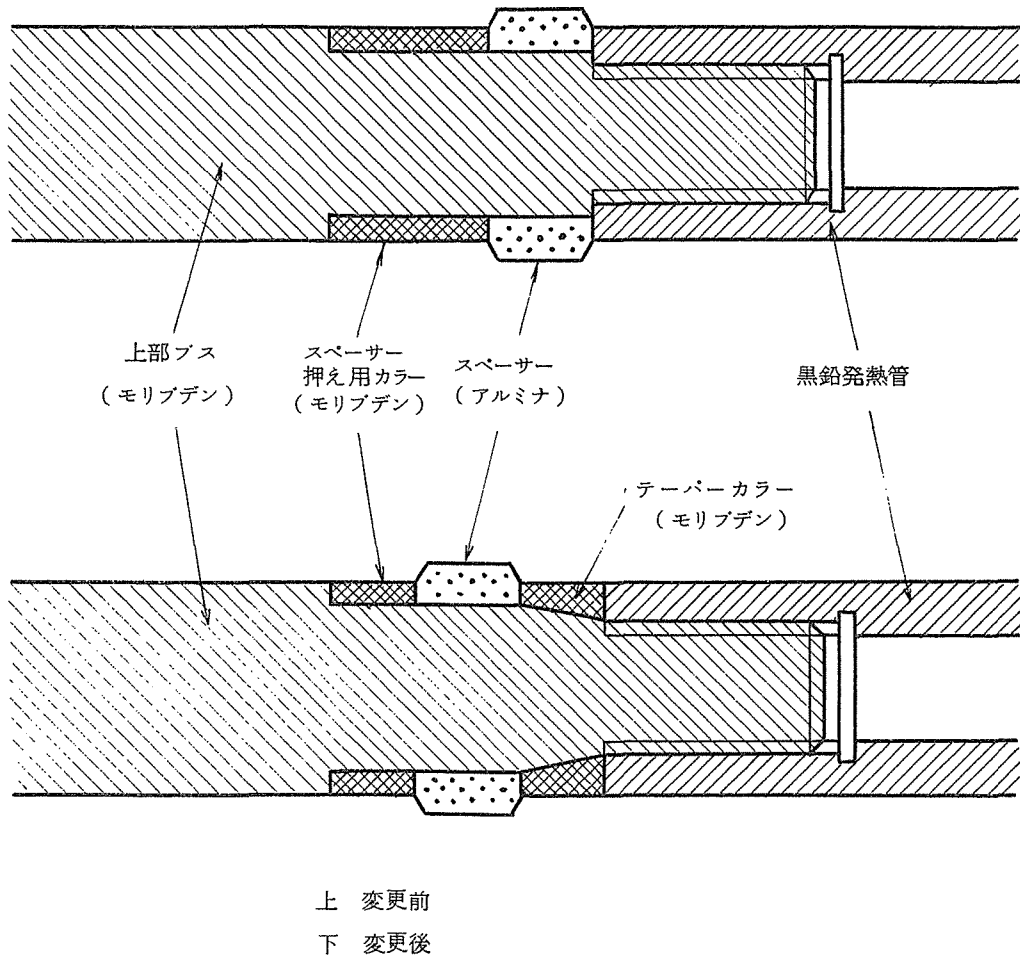


Fig. 3.3 Design change of upper spacer part

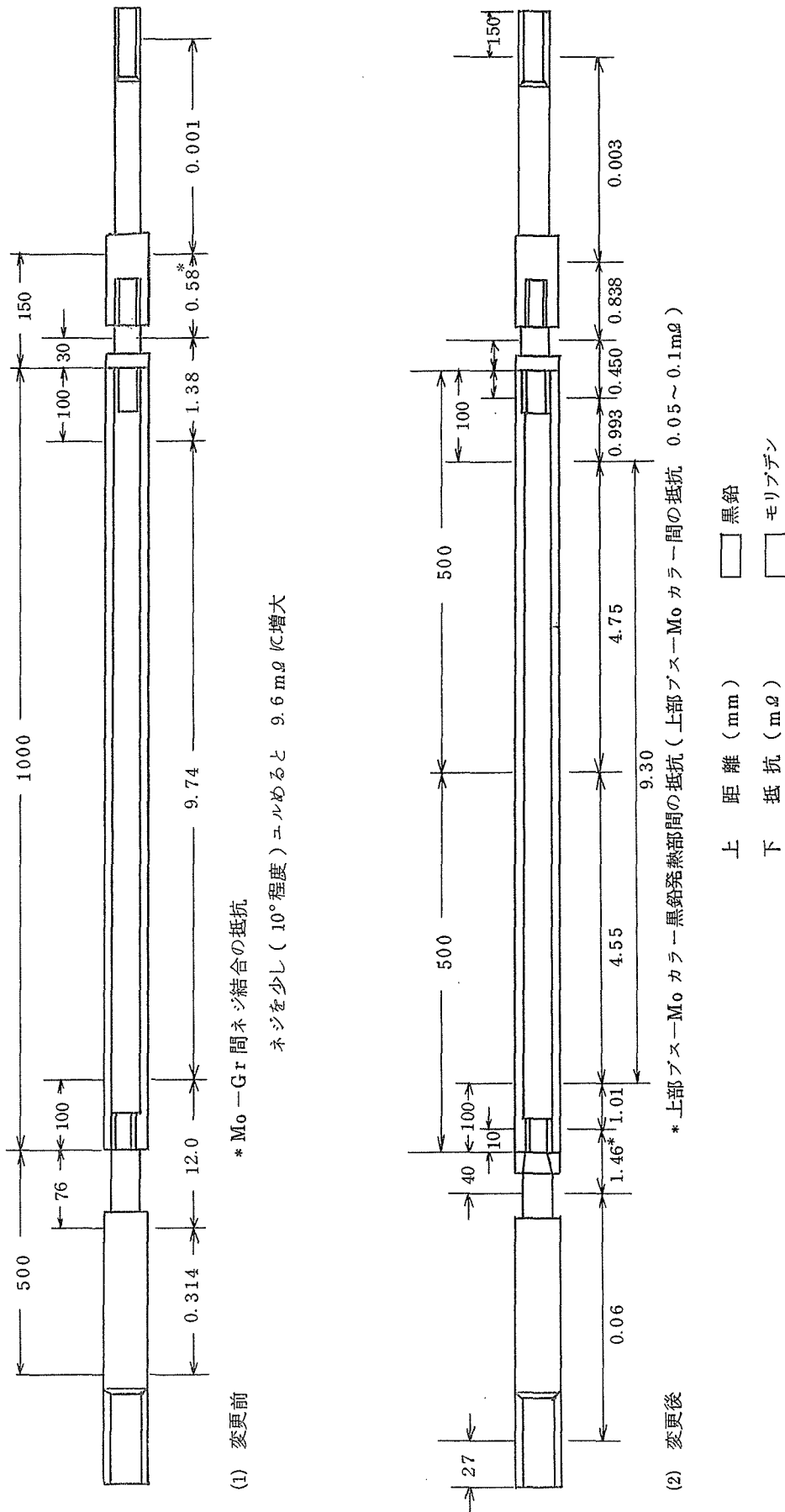


Fig. 3.4 Electrical resistance distribution

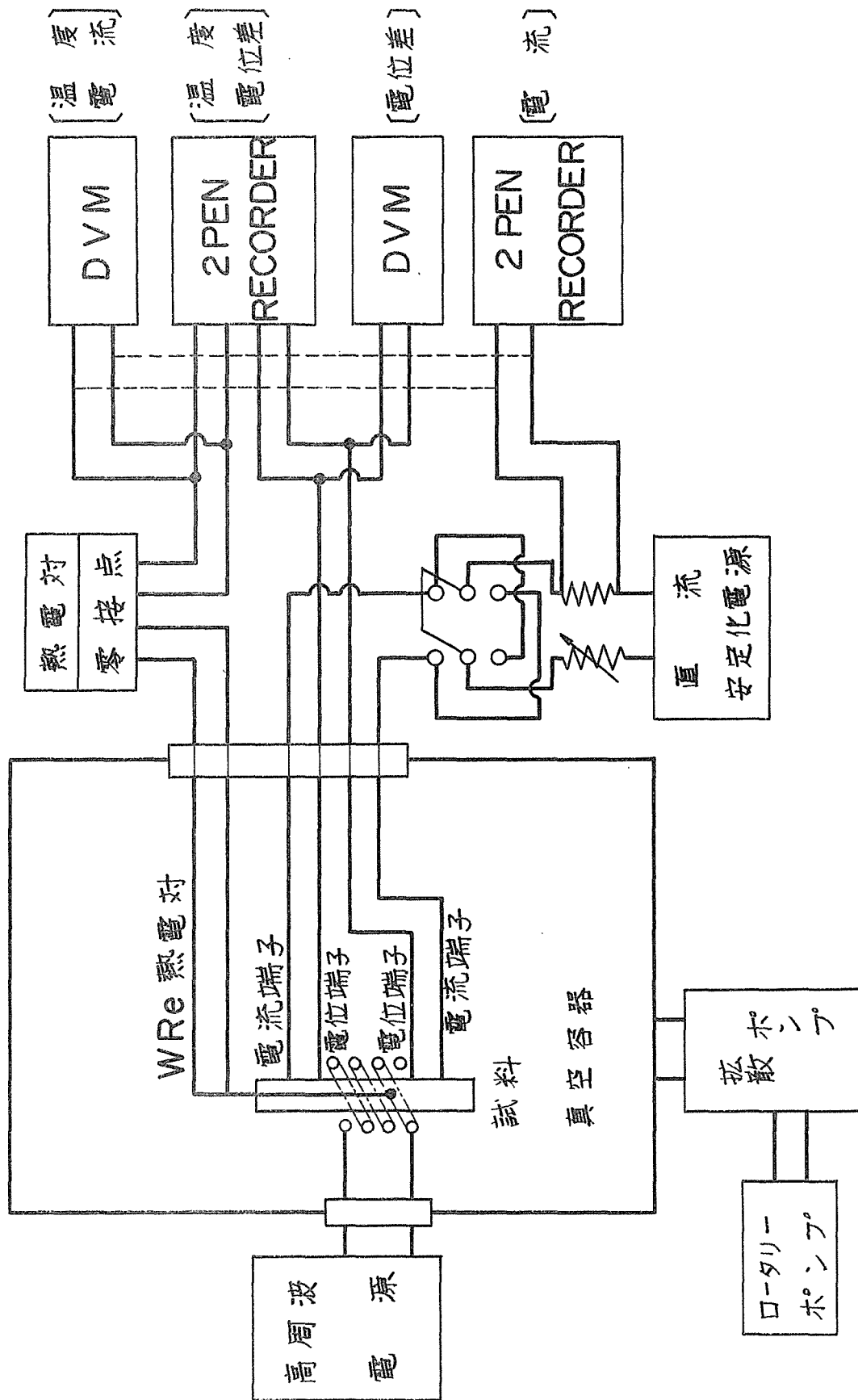


Fig. 3.5 Resistance measurement apparatus

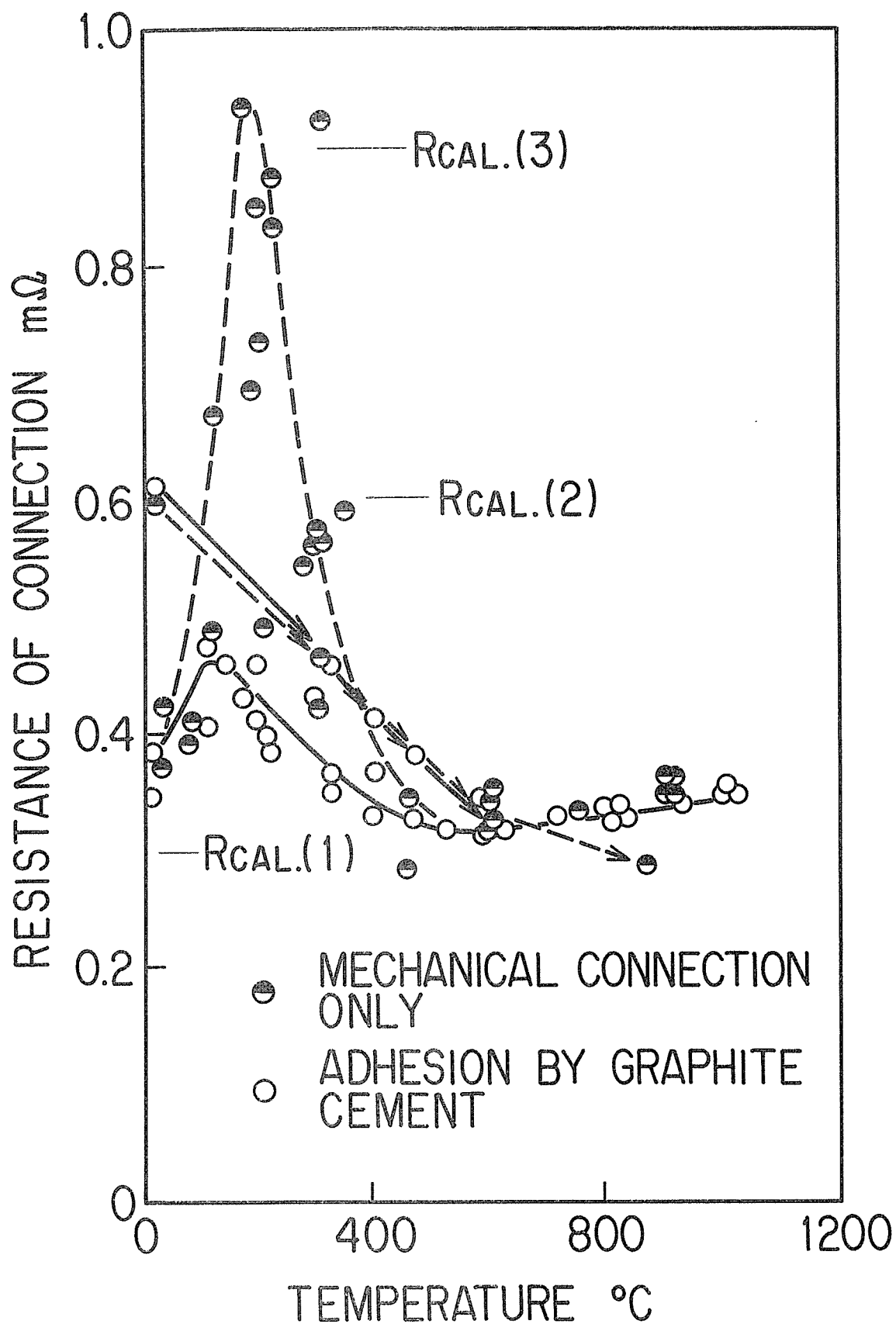
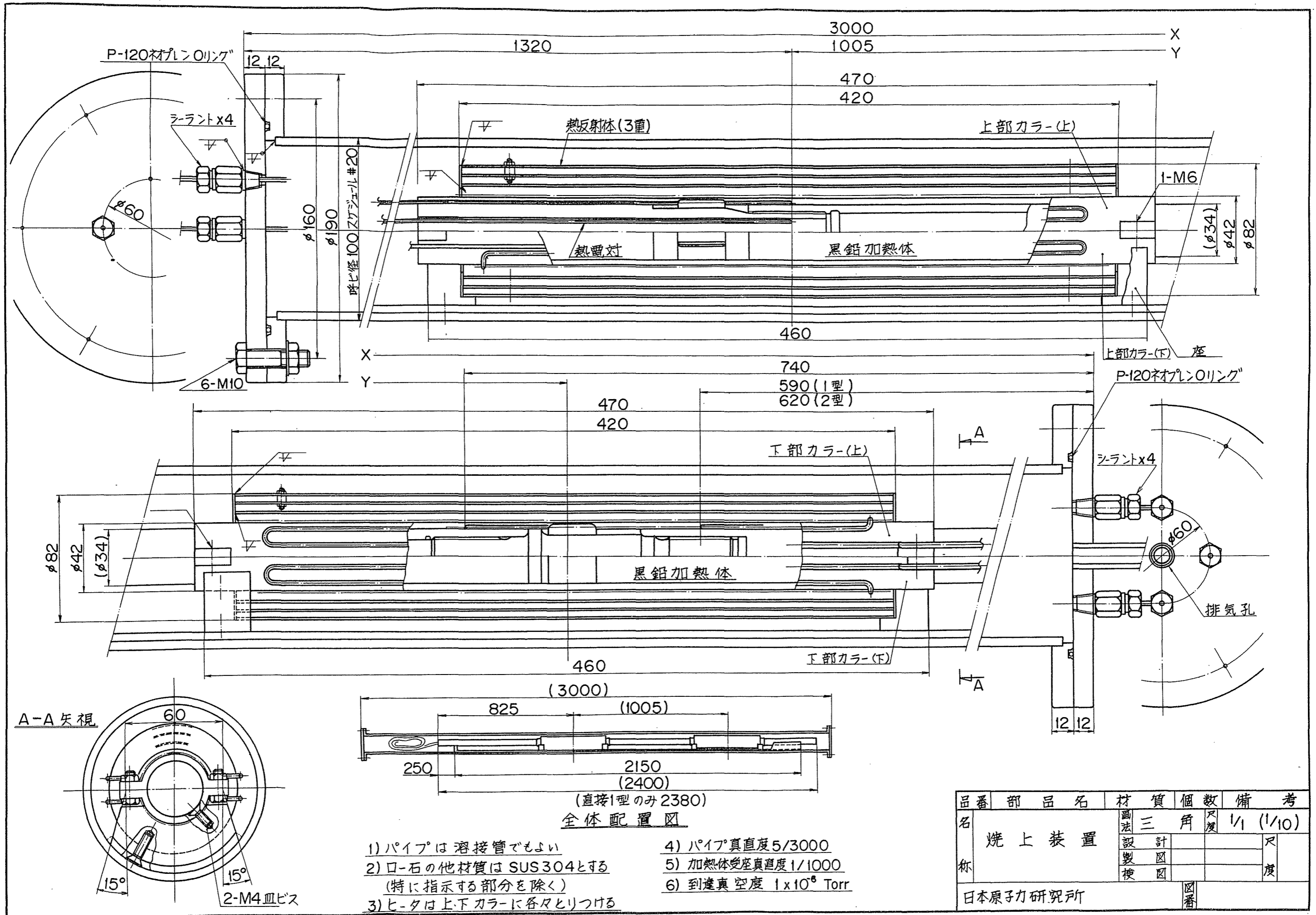


Fig. 3.6 Temperature dependency of electrical resistance at Mo - Graphite screw-joint

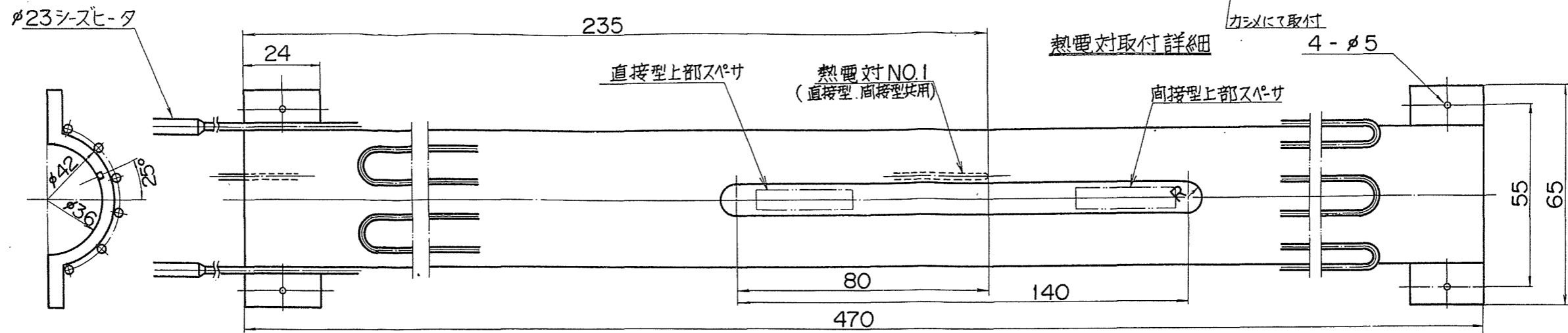


- 全体配置図
(直接1型のみ 2380)
- 1) パイプは溶接管でもよい
 - 2) ロ-石の他材質は SUS304 とする
(特に指示する部分を除く)
 - 3) ヒ-タは上下カラ-に各々とりつける
 - 4) パイプ真直度 5/3000
 - 5) 加熱体受座真直度 1/1000
 - 6) 到達真空度 1×10^{-6} Torr

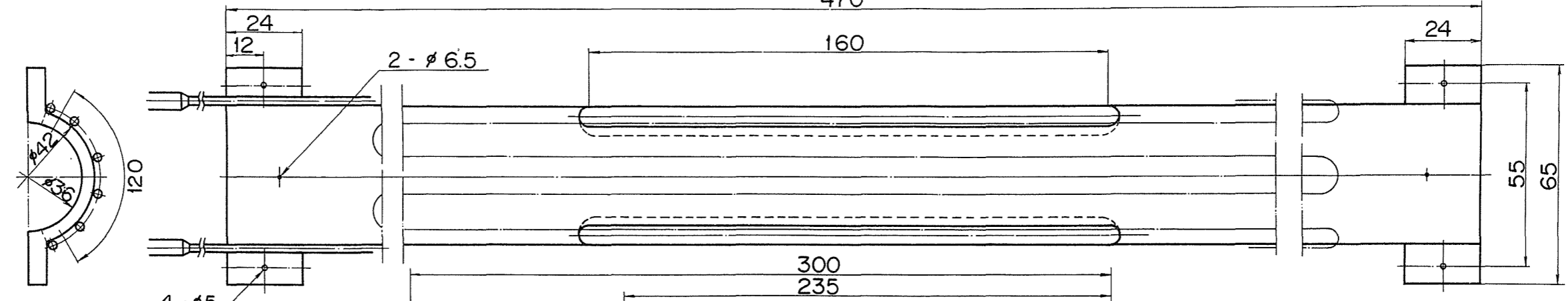
品番	部品名	材質	個数	備考
名	焼上装置	画法	三角	尺度 1/1 (1/10)
称		設計		尺
		製図		度
日本原子力研究所				図番

Fig. 3.7(a) 焼成用真空炉本体

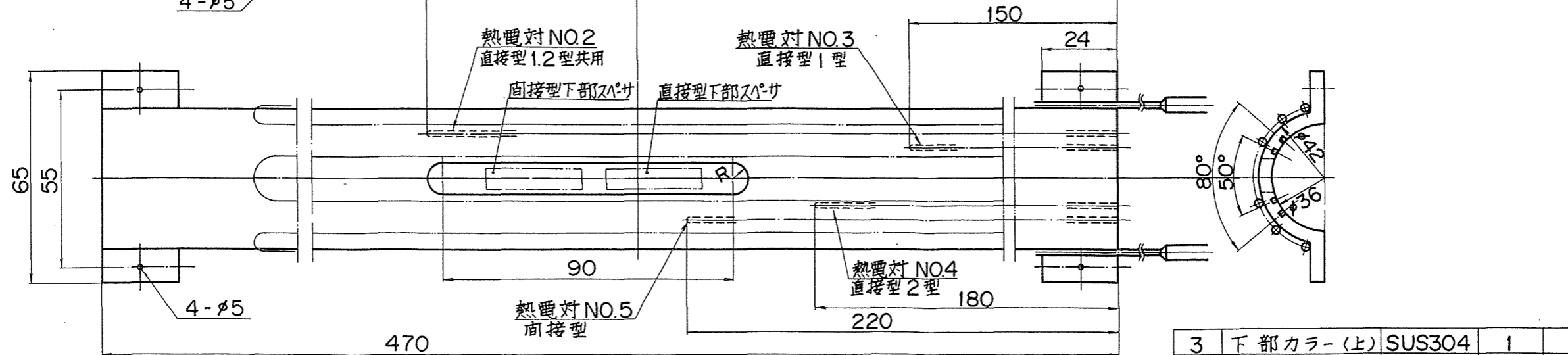
①



②



③



- 1) ヒータはカラーに固定すること
- 2) カラー内面温度 900°C 内面はMo及び黒鉛に黒鉛シートを介して接触
- 3) ヒータは外径φ23, 出力2kw (投入電力200V, 10A)とする
- 4) 真直度 1/1000
- 5) 熱電対 φ1.6C.A素線SUS304被覆
シース長さ2000 補償導線1000

3	下部カラー(上)	SUS304	1	
2	上部カラー(下)	〃	2	下部カラーも同型
1	上部カラー(上)	SUS304	1	
品番	部品名	材質	個数	備考
名	カラー	図法 三角 尺 1/1		承
称		設計		認
		製図		
		検査		
日本原子力研究所				図番

Fig. 3.7 (b) 焼成用真空炉カラー (加熱用ヒーター)

4. 使用 経 験

ここでは、実際に使用した経験について簡単に述べる。試験結果の詳細については別報を参照されたい。

最初、黒鉛の脆性に対する不安があったので、移動に際しては必ず35mmのL形鋼に5箇所半円形の枕を取り付けたベッドを使用したところ、破損は全く起きなかった。特に、高温燃料試験体の中へ吊り込むときは、垂直に保持しなければならないが、上述のベッドごと垂直にしてから、加熱体単品を吊り上げるという方法を取ったが問題はなかった。Fig. 4.1に運搬時の状況を示す。

Fig. 4.2は、HTGLで直接平滑型の試験を行った場合の条件を示したものである。図には、電気抵抗も一諸に示してあるが、ほぼ黒鉛の電気比抵抗の温度変化に対応している。

Fig. 4.3は、試験前後の電気抵抗の詳細を示したものである。全体の抵抗は、試験後僅かながら減少しているが、変化は1%以内である。特に、発熱部には全く変化は認められなかった。

Fig. 4.4は高温運転後の黒鉛表面を示したものである。目視ではやや粗くなったように見えるが、実際の粗さ、寸法に、変化はなかった。

Fig. 4.5に示すように、測定された熱伝達率も従来の結果と一致した。

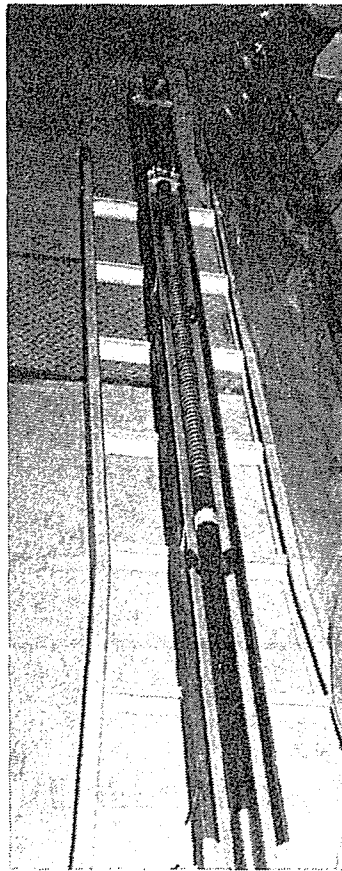


Fig. 4.1 Transport of graphite heater

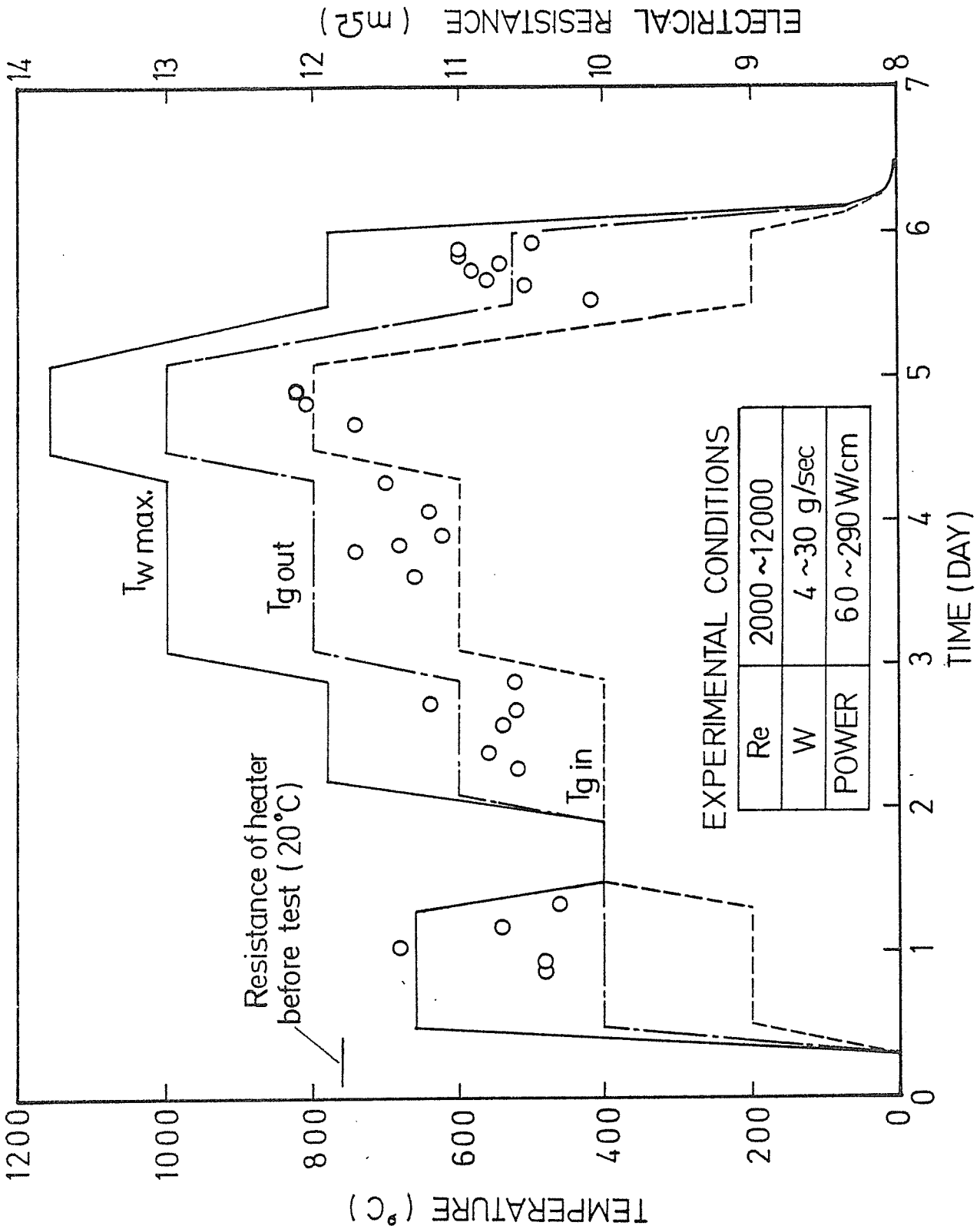


Fig. 4.2 Experimental condition

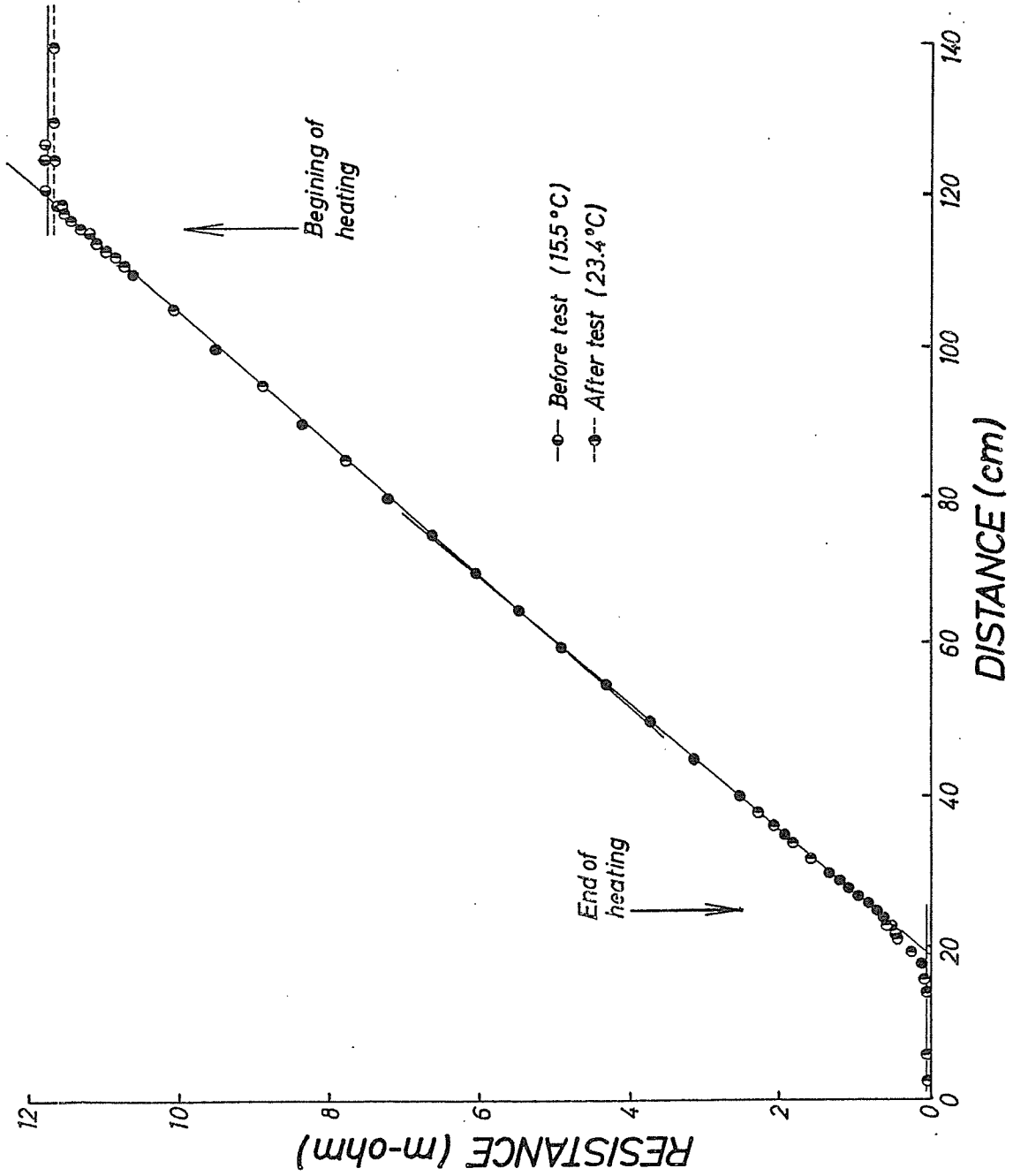


Fig. 4.3 Resistance distribution before and after high temperature experiment

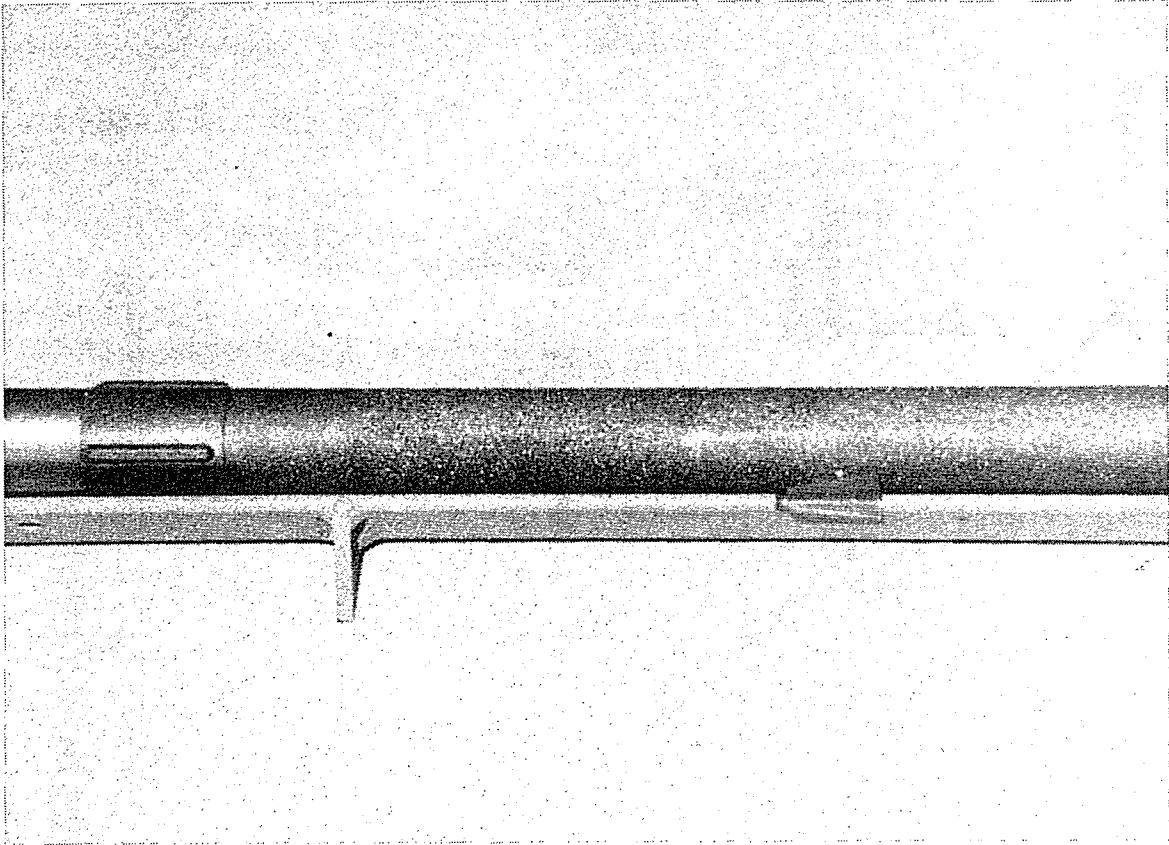


Fig. 4.4 Surface of graphite heater
after high temperature operation

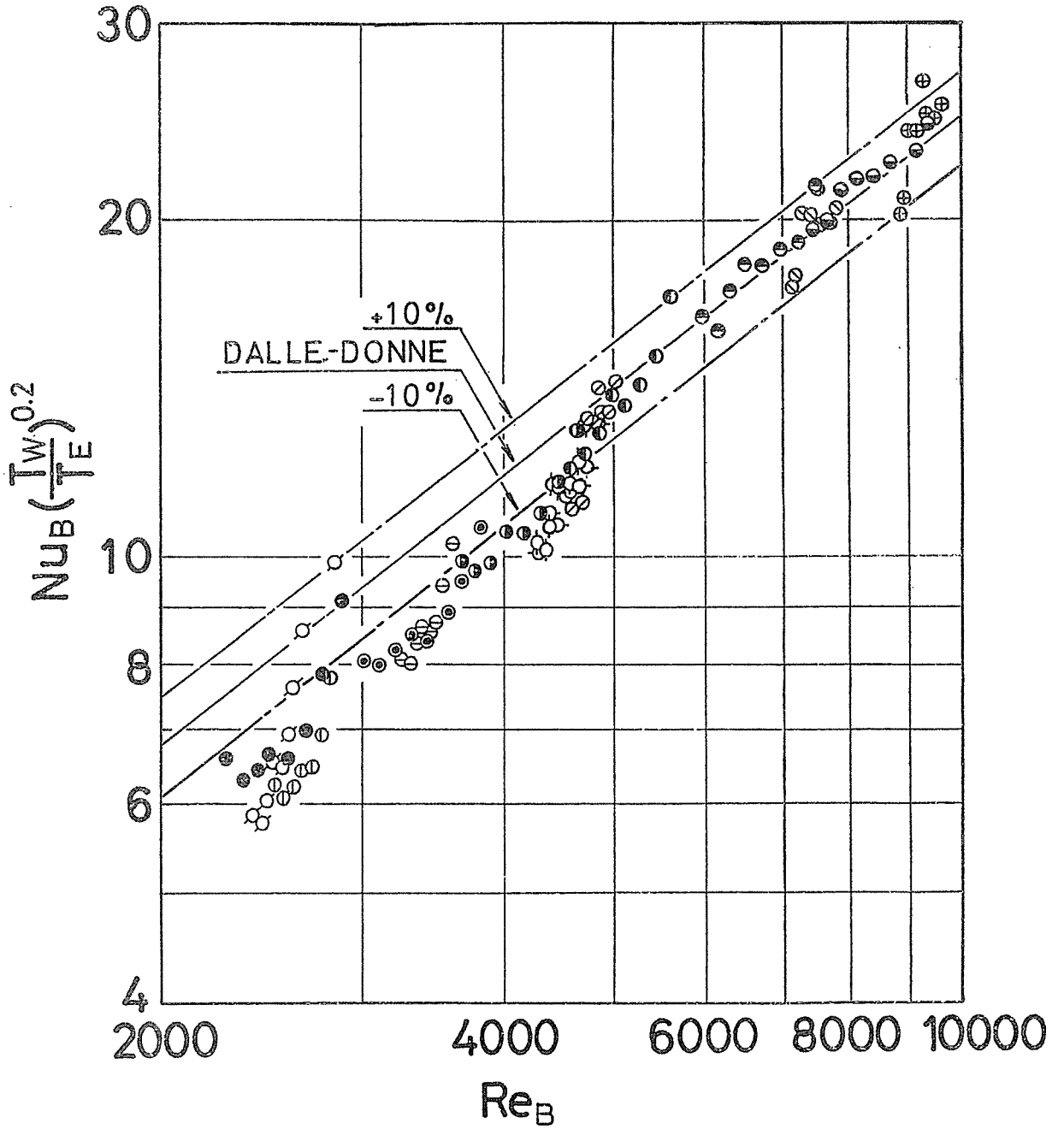


Fig. 4.5 Measured heat transfer coefficient using direct type graphite heater (plane surface)

5. MARK-Ⅲ炉心試験用黒鉛加熱体の設計・開発

5.1 概 要

H T G Lによる試験に関しては、52年度からMARK-Ⅲ炉心設計に準拠した黒鉛加熱体の設計を行った。(50～51年度に実施した試験では、加熱体は被覆管に直接通電し発熱させる直接型であり、寸法は「試設計」炉心設計に準拠して製作したものが使用された。従って、現在のMARK-Ⅲとは条件が異なっている。)この新しい設計の特色は、次の2点にある。すなわち、直接型では、被覆管の肉厚を長さ方向に変化させて炉心出力分布を模擬できるようにし、間接型では、実際の燃料棒の熱的な条件をほぼ完全に模擬できるようにしたことである。

つまり、間接型とは、被覆管の内側に電氣的に絶縁した発熱体を組み込む方式で、内部の発熱体は、燃料コンパクトを模擬している。間接型の効用は、被覆管が電氣的に中立なので、今後必要となる偏心・湾曲燃料棒の伝熱試験のように流路壁との間隙が狭くなっても安心して使用できる点にある。また、燃料コンパクトや被覆管の中の熱伝導や、ギャップ・コンダクタンスを考慮した試験、さらに、熱容量、熱抵抗を模擬した非定常特性試験も可能である。Fig. 5.1に、間接型黒鉛ヒータの構造を示す。

本設計に基づいて加熱体各部の実物試験片を製作し、高温での予備試験を行った後、本製作に移る。付録2に開始計画書を示す。その試験項目を次に示す。

- (1) 黒鉛～黒鉛，黒鉛～モリブテン(ブス導体)の結合部分の抵抗，及び強度に関する高温繰り返し試験
 - ろう付け(間接型)
 - 接 着(直接型)
- (2) 電気絶縁物の高温での抵抗測定，及び連続試験
 - 間接型の間隙部用絶縁物
 - 直接型のスペーサリブ用絶縁物
 - (候補材料：BN，BeO，Si₃N₄)
- (3) 熱電対取り付け部の高温繰り返し試験
 - 熱電対を，粉体を充填することにより固定する方法
 - 〃 ，弾力性物質で押し付けて固定する方法

5.2 開発試験項目

- (1) 黒鉛の深穴加工

黒鉛ヒータの開発試験項目のうち、黒鉛の深穴加工に関する試作を完了した。本試作の目的は、正確な燃料棒表面温度を測定するために被覆管の肉厚の部分に熱電対を挿入する細い深穴を軸方向より加工する技術を確認するものである。本試作の結果によれば、

1mmφ及び1.6mmφのドリルによる深さ150mmの穴加工が可能であることが明らかとなった。1mmφのドリルの場合の作業は極めて困難であったが、1.6mmφのドリルならば、より大型の加工機械を製作することにより、燃料棒の中央近くまで(約250mm)、熱電対挿入孔を被覆管肉厚内に加工することが可能であることが確認された。

(2) その他の試作開発

他の試験項目については、昭和52年度中に試験片を製作し、昭和52年度から開発を実施し、これらの結果を反映させて最終的な黒鉛模擬燃料棒の設計製作を行う。

下記のようなヒーター部分の試作を計画し、電気炉中で最高使用温度までの各種試験を行う。

- | | |
|-----------------------|---------|
| (1) 直接型ブス結合部テスト片 | Fig.5.2 |
| (2) 直接型スペーサリブ用絶縁物テスト片 | Fig.5.3 |
| (3) 間接型内部絶縁テスト片 | Fig.5.4 |
| (4) 直接型熱電対固定部テスト片 | Fig.5.5 |
| (5) 間接型ブス接続部ろう付けテスト片 | Fig.5.6 |

5.3 その後の経過

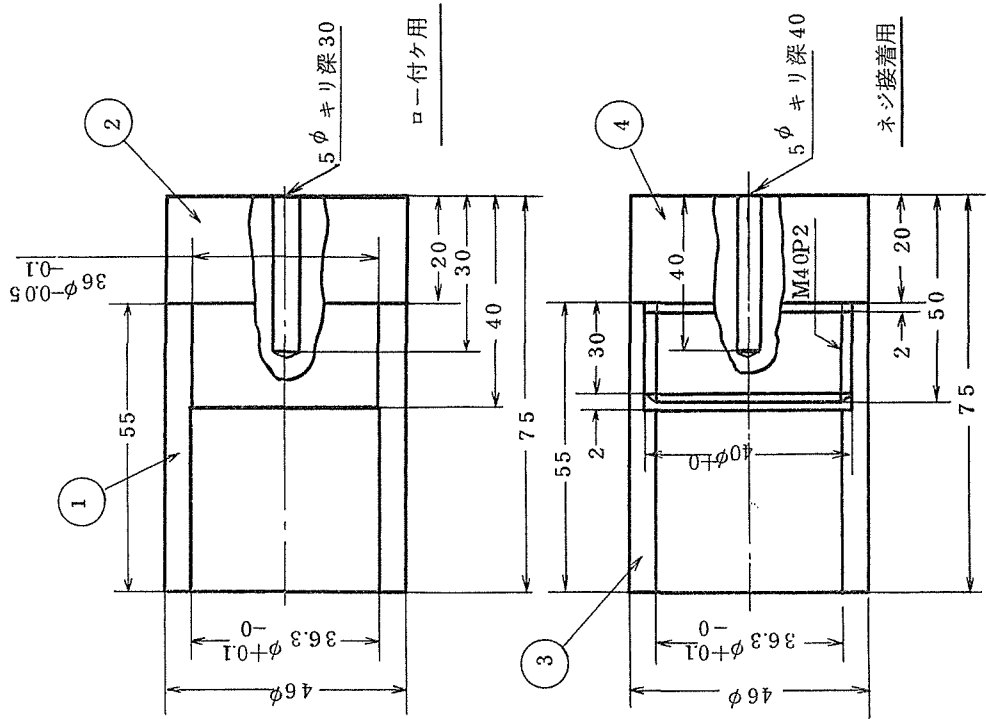
昭和53年度より、HENDEL計画が具体化し実証的試験の実施主体が明確になってきた。そこで、当研究室としては小型高温ヘリウムガスループ(SGL)に主力を移し、遷移領域の特性の解明、設計資料の整備に集中的に取り組むことになった。従って、昭和52年度末でこの黒鉛模擬燃料棒開発は終了した。

6. 結 論

多目的高温ガス炉の燃料体の炉外伝熱流動試験のために黒鉛加熱体を製作した。次いで、HTGLに取り付けた高温燃料試験体に組み込んで、1000°C、40気圧を含む条件で約1週間の運転を行った。最大入力30KW、最高伝熱面温度は約1200°Cであった。また、測定した伝熱特性も良好であった。

すなわち、炉心条件で炉外実験を実施する技術が確立された。

その後、MARK-III燃料棒に準拠した黒鉛加熱体の開発にも取り組んだ。以上、模擬燃料体の試作・開発の経験を述べたが、HENDELを初め、同種類の加熱体の製作に役立つことも多いと思う。

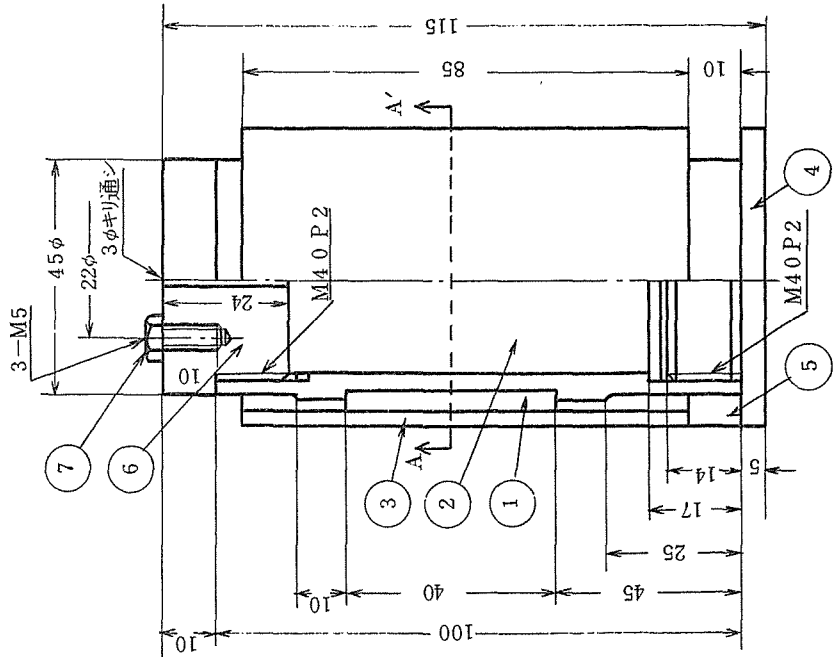
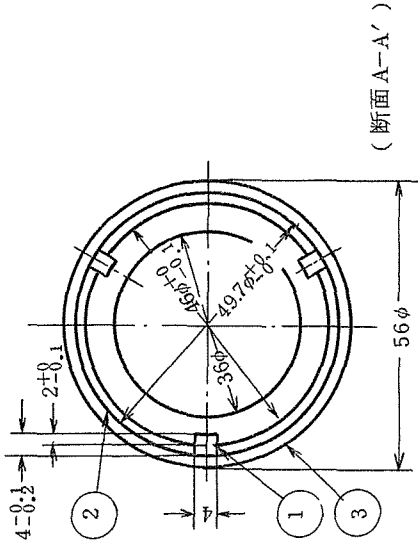


部番	名称	材質	個数	備考
1	発熱管	黒鉛 I	6	ローケケテスト用
2	導体	黒鉛 II	3	"
		モリブデン	3	"
3	発熱管	黒鉛 I	4	ネジ接着用
4	導体	黒鉛 II	2	"
		モリブデン	2	"

NO	用途	比抵抗 ($\mu\Omega\text{cm}$)
I	SMI-24 相当	1000 ± 100
II	導体用黒鉛	500 ± 50

黒鉛材質

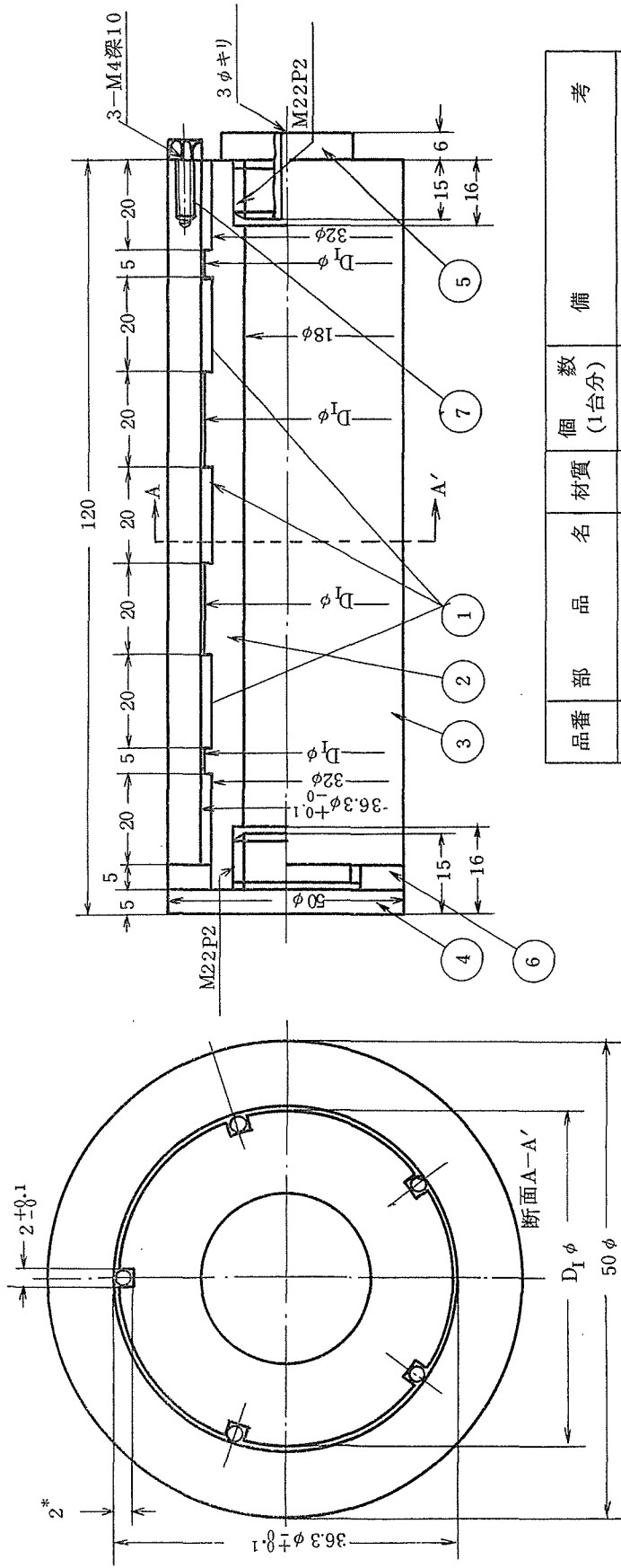
Fig. 5.2 Test piece (1) Graphite-buss connection test piece of direct part



品番	部	品名	材質	個数 (1台分)
1	絶縁スペーサー		BN	3
2	被覆管		黒鉛	1
3	ブロック筒		黒鉛	1
4	底		黒鉛	
5	スペーサーブロック		BN	4
6	タ		黒鉛	1
7	ナ		黒鉛	4
8			M5 × 10 ℓ (中心1φ穴)	

Fig. 5.3 Test piece (2) Spacing insulator test piece for direct part

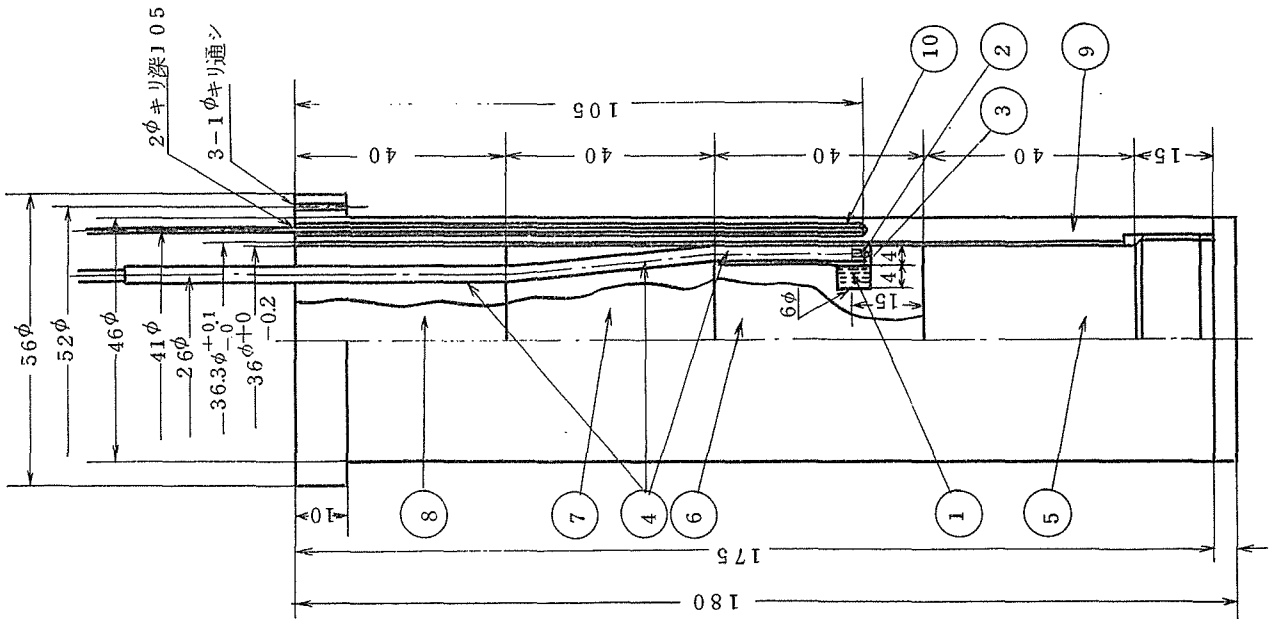
注) * 2φBN棒 (部品番号1) の発熱体に加エシタ幅 2 ± 0.1 ナルミゾニ
 取り付ケタトキニ, 棒の外接円ノ径ガシリノ (部品番号3) ノ内径
 ノ測定値 $D_I \phi \pm 0$, -0.03 以内トナルヨウニ仕上ゲルコト



No.	$D_I \phi \pm 0.05$	クリアランス
1	36.0	0.15
2	35.8	0.25
3	35.5	0.40

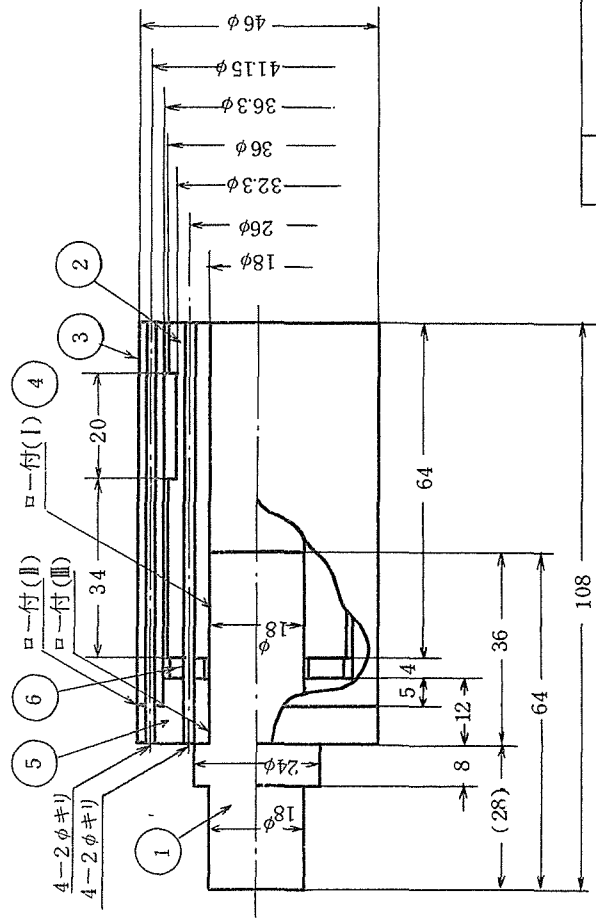
品番	部品名	材質	個数 (1台分)	備考
1	内部絶縁物	BN	15	$2 \phi \pm 0.1 \times 20 \ell$ 予備3ヲ要ス
2	発熱体	黒鉛	1	材質ハ別ニ定メル
3	シリ-ブ	黒鉛	1	SMI-24 相当
4	底キャップ	黒鉛	1	
5	吊り下げキャップ	黒鉛	1	
6	絶縁スベ-サー	BN	5	$5 \times 7 \times 5$
7	電線固定用ネジ	黒鉛	2	予備1ヲ含ム

Fig. 5.4 Test piece (3) Inner insulator test piece for indirect part



品番	部品名	材質	個数 (一台分)	備考
1	押えシナ	黒鉛シート	3	弾力性ノアル黒鉛(ル・カーボン エラスチック)
2	熱電対	WRe	1	支給
3	補護キャップ	タシタル	1	
4	磁製管	アルミナ(SSA-S)	10	3φOD×100ℓ(ニツ穴)
5	充填ベレット(1)	BN	1	36φ ⁺⁰ _{-0.2} ×40
6	充填ベレット(2)	BN	1	36φ ⁺⁰ _{-0.2} ×40
7	充填ベレット(3)	BN	1	36φ ⁺⁰ _{-0.2} ×40
8	充填ベレット(4)	BN	1	36φ ⁺⁰ _{-0.2} ×40
9	スリーブ	黒鉛	1	SMI-24相当
10	シース熱電対	TaシースWRe	1	当面ハSUSシースCA1.6φ

Fig. 5.5 Test piece (4) Thermocouple fixation test piece for direct part



ろり付けについて 最高使用温度

- I 1400°C
- II 1300°C
- III 1200°C

品番	部品名	材質	個数 (1台分)	備考
1	アース棒	モリブデン	1	
2	発熱体	黒鉛	1	SMI-24 相当品
3	被覆管	黒鉛	1	SMI-24 相当品
4	絶縁スベラー	B N	5	2φ±0.1×20ℓ
5	絶縁キャップ	BeO	1	
6	スベイングブッシュ	B N	1	34 ⁰ .D×20 ⁰ .I.D×4 ^t

Fig. 5.6 Test piece (5) brazing test piece for connection of indirect part

付 録 1

多目的ガス炉燃料用黒鉛被覆模擬発熱体の検討

昭和48年4月27日

1. はじめに

47年度には、多目的ガス炉炉心熱伝達の炉外確性試験を行うために、高温燃料試験体が製作された。

次いで、48年度には、HTGLに試験体を取り付けて実験を行う。

現試験体の発熱体は、直接通電で発熱させるタンタルパイプであり、基本的な伝熱流動特性を解明することが可能である。

しかしながら、多目的ガス炉の炉心における伝熱特性を測定する技術を実証するためには、燃料棒と同様に、黒鉛加熱面で試験を実施しなければならない。また、高温・高圧・高速・高熱流束条件のヘリウムガスの流れによる黒鉛材料の諸特性に関するデータも得る必要がある。

以上のような経過と要求を前提として、高温燃料試験の後半に使用すべき黒鉛伝熱面を有する模擬発熱体の製作と伝熱流動試験が計画された。本文では 主要仕様、構造の概略、製造法、材料の選択などについて検討した結果を記す。

2. 主要仕様

多目的高温ガス炉炉心の伝熱流動条件を考慮して、次のように主要仕様を決定する。

- | | |
|-----------|---|
| 1. 最高表面温度 | 1050°C ; 出力10KW
(1200°C ; 出力 1 KW) |
| 2. 最大出力 | 10KW
(40KW ; 表面温度400°C) |
| 3. 最大熱流束 | 10W/cm ²
40W/cm ² ; 出力40KW |
| 4. 寸法 外径 | 34mmφ |
| 長さ | 1000mm (発熱部)
(少なくとも600mm) |

3. 概略構造

加熱方式として、次の2形式が考えられる。

- | | |
|-----------|-----------|
| (1) 間接加熱型 | 図A・1(1)参照 |
| (2) 直接加熱型 | 図A・1(2)参照 |

前者は比較的小出力の条件で燃料棒の偏心・湾曲及びスパーサーパッドの効果の測定等，加熱体と流路管が接触する可能性のある試験に使用する。

後者は，高出力・高温条件の試験に使用される。

材料は，表 A . 1 に記されている。選択理由は 5. 検討に概要を記してある。なお，材料の最終的決定に至るまでには，材料の強度，相互の共存性について確認検討を必要とする。

4. 製造法の概略

(1) 間接加熱型

- 1) 内外径及び熱伝対の入る溝の加工が終了した黒鉛被覆管の中に同心性を保持しつつ，発熱体を配置する。
- 2) BN または BeO 粉末を油圧プレス等によって予備成生したペレットを被覆管と加熱体の間に挿入する。
- 3) BN または BeO を被覆管及び加熱体に密着させ，さらに充填密度を増大するため，円筒形ピストンによって，挿入されたペレットを所定圧力まで圧縮プレスする。
- 4) 熱伝対は適宜定められた位置に挿入し，ペレットの圧縮プレスと同時に被覆管に密着させる。
- 5) 2)～4) の工程を加熱体全長にわたって BN または BeO が充填されまで繰り返す。

(2) 直接加熱型

この場合は，内部絶縁物は熱電対の固定及び自然対流の防止が主たる目的となる。製作技術上，(1) に比べて単純である。

5. 考 察

(1) 温度と材料について

温度的により厳しい間接加熱型について検討する。

○ 絶縁層内の温度差 (ΔT)

層物質熱伝導率 (λ)	2 kcal/mh °C ^{1) 2)}
熱 流 束 (q)	20 W/cm ²
層 の 厚 さ (δ)	3 mm

$$\Delta T = \frac{q}{\lambda} \delta = \frac{20 \times 8600}{2} \times 3 \times 10^{-3}$$

$$= 254^{\circ}\text{C}$$

従って，300 °C の温度差を絶縁物層内に見込むこととする。

○ 発熱体の温度

発熱体の温度は，接触する絶縁物との共存性によって決定される。

黒鉛 - BeO	1400°C
黒鉛 - BN	不明(ただし, BeOより良好と思われる。)
Ta - BeO	不明
Ta - BN	1500°C, 15h程度で僅か反応
Nb - BN	1500°C, 25hで全く反応せず

従って、発熱体温度として、1400°C とする。

○熱電対

熱電対の温度は、発熱体温度と絶縁層内温度差より、1100°C とする。

熱電対として、まず、Ta シースW/Reを考えてみる。シースは黒鉛と接触するので、Ta - 黒鉛の共存性を検討する。村岡ら⁴⁾のデータによると、黒鉛と接触する金属 Ta はTaC (または TaC₂) 層が形成される。層の厚さは、時間に比例して進行し、1200°C, 300時間で30~40μに達するものと考えられる。従って、Ta シースW/Re 熱電対は十分に耐えると考えてよい。

熱電対碍子としては、BNはWとの反応の点で望ましくない。

(2) 開発試験項目

○共存性試験

黒鉛 - 金属 (W:電極, Ta:補護管)

黒鉛 - 絶縁物 (BeO, BN)

発熱体 - 絶縁物 (W/BN, BeO; Ta, Nb/BN, BeO)

熱電対 - 絶縁物 (BN, BeO)

熱電対 - 黒鉛

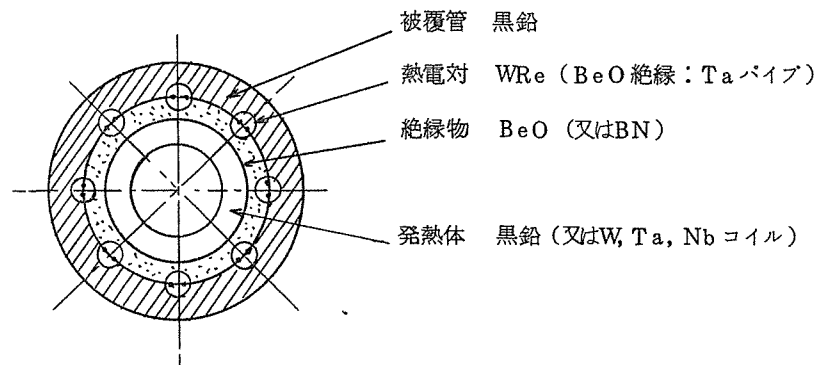
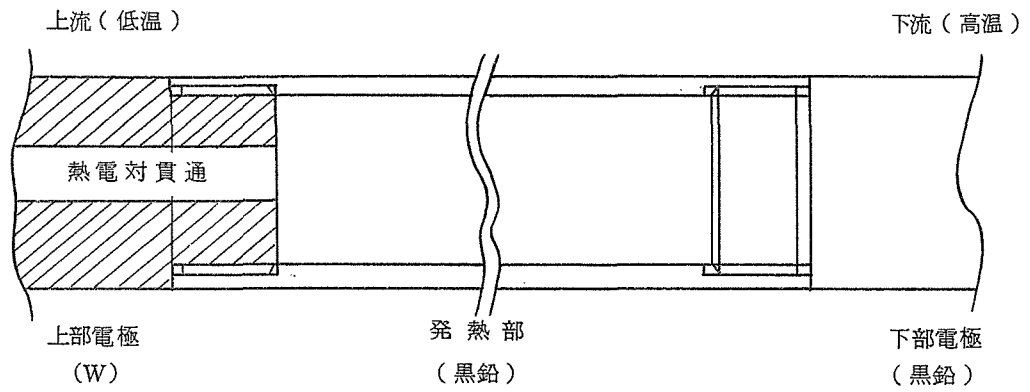
○溶接技術

高融点金属

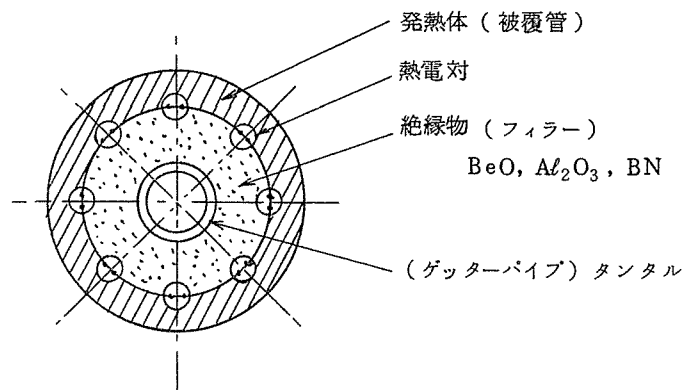
熱電対

文 献

- 1) 助川電気の設計値より
- 2) Carborundum社BNデータより
- 3) Simrad et al., Proc. Conf. Nuclear Application of nonfissile Ceramics, ANS, 1966
- 4) 村岡他, 日本原子力原会誌, 14, p. 580 (1972)



(1) 間接加熱型黒鉛ヒーター



(2) 直接加熱型黒鉛ヒーター

図 A . 1 概略構造

表 A.1 材料一覧

被 覆 管

材	料	黒鉛
外	径	3.4 mm ϕ
内	径	2.6 mm ϕ
肉	厚	4 mm

絶 縁 物

材	料	BeO 又は BNの粉末 (プレス充填)
層	厚	3~4 mm (間接加熱の場合)

発 熱 体

材	料	黒鉛または高融点金属 (W, Ta, Nb)
形	状	円筒 (黒鉛), コイル (W, Ta, Nb)
外	径	1.8 mm ϕ

熱 電 対

形	式	保護管入り	
熱	電	対	W-Re (0.5 mm ϕ)
ガ	イ	ン	BeO (3 mm ϕ 2ツ穴)
保	護	管	Ta パイプ (4 mm ϕ \times 0.5 t)

電 極

上部 (低温側)	タングステン
下部 (高温側)	黒鉛

M A R K - III 用黒鉛加熱体開発計画書

昭和52年12月20日

伝熱流動研究室

1. 概 要

黒鉛加熱体は、多目的高温ガス炉の燃料棒を模擬する電気加熱体である。この開発の成否は、伝熱流動試験を初めとする炉外試験を実現する上で重要な意義を有する。

現在までの開発の概要は、以下のとおりである。まず、昭和49年度より当研究室、工作課の共同研究として設計試作が始められ、3型式の加熱体が昭和50年度に完成した。その後、特性試験を行ってその結果に基づき改良設計を行った。昭和50年度後半から昭和51年度初めにかけて、HTGLに組み込み、炉心と同一の高温・高圧ヘリウムガス条件で伝熱流動特性の測定が実施された。この試験によって、試作した直接型加熱体の性能は実用上問題がないことが明らかとなった。

昭和51年度には、改良設計・開発試験用電気炉の整備が行われた。

本年度は、引き続いて以下の内容について、詳細設計・問題点抽出・確認試験・最終設計・試作の諸項目について作業を進める。

- (1) 間接加熱型発熱体の設計・試作
- (2) M A R K - III 準抛直接型発熱体の設計・試作
- (3) 熱電対取付部の設計・試作試験
- (4) 間接型電気絶縁物の試験装置の製作
- (5) ろう付け接合部の試験片の設計・製作

2. 間接加熱型発熱体の設計・試作

間接型発熱体は、燃料棒と同様に被覆管の内部に発熱体を有する型式である。

構造の概略を図に示す（Fig. 5.1に同じ）。両側にモリブデンの導体部（長さ600mm及び700mm）を有する。中央は間接加熱体である（長さ555mm）。この両側に、補償ヒーターの役割を果たす直接型発熱部（長さ260mm）が接続される。発熱部には、32本の熱電対が取り付けられ、導体部の中を通して上・下方向に引き出される。

間接型発熱部は、内部に燃料コンパクトに相当する発熱体を有する。被覆管は、発熱体と電氣的に絶縁されているので、特に流路幅が小さい実験条件では不可欠となってくる。発熱体の方式は2つある。

- (1) Heギャップ方式：被覆管と発熱体の間隙を電気絶縁物で保持する。間隙は、実際の燃料棒のすき間に近づける。ただし、電気絶縁物の耐熱・寿命試験が必要となる。

- (2) 粉末充填方式：電気絶縁物の粉，粒体を間隙に充填する。発熱体は，Taの薄板ストリップを電気絶縁物に巻き付けたものとする。この方式は，高電圧小電流となるため今後の導体の設計にも参考となろう。

間接型発熱部主要仕様

模擬対象	MARK-III 燃料棒
外径	46mmφ (スペーサー基部径)
長さ	555mm
出力	20kW
最高温度	1200°C / 1500°C (表面/発熱体)
材質	黒鉛 (SMI-24相当) モリブデン (導体) BN, BeO (電気絶縁物) タングステンレニウム (熱電対)
数量	2 (Heギャップ, 粉末充填各1)

3. MARK-III 準坩堝直接型発熱体の設計・試作

直接型は，基本的設計方法については，既の実績があるので，本年度はMARK-III寸法での試作と各部の耐久試験を中心とする。

外観・寸法は，間接型と同一とする。ただし，中央部（長さ555mmの部分）は直接型とする。

主要仕様も，同一とする。（ただし，数量は一体）

4. 熱電対取付部の設計・試作試験

高温で黒鉛伝熱面の温度を測定するためには，熱電対を黒鉛被覆管の内表面（直接型発熱体）に密着して取り付けなければならない。しかしながら，従来の金属への取り付けとは異なり，溶接等の方法が利用できない。

この問題に関して，下記のような種々の方法が考案されている。本年度は，高温耐久試験を実施して，最良の方法を検討する。

- (1) 粉粒体によって熱電対を黒鉛内面に押し付ける方法
- (2) 弾力性のある黒鉛シートによって押し付ける方法
- (3) 被覆管に長手方向の深穴を明けて熱電対を挿入する方法

試験項目は，

- a) 使用材料の高温での共存性
- b) 熱サイクル試験

5. 間接型発熱体電気絶縁物の試験片の製作

間接型で設計上困難な項目の一つに、被覆管と発熱体の間隙（Heギャップ方式）の決定と、電気絶縁物の選定の問題がある。この見通しを得るために、ギャップ幅と材質を変化させた試験片を製作し、高温で電気抵抗の測定を行う必要がある。

本試験のための装置（電気炉，本体51年度購入済）と試験片の製作を行う。

6. ろう付け接合部の試験片の製作

前回の試作では、黒鉛発熱管（被覆管）とモリブデン導体の結合は、ねじによって行った。ねじだけでは、高温で電気抵抗が増大するので、ねじ部に黒鉛粉末を主成分とする接着剤を塗布した。しかし、この方法は、かなりねじ込む必要があるので、組み立てが困難となる。

そこで、より完全な電氣的接触を確認する方法としてろう付け接合を実用化したい。

設計上の検討項目

- (1) 接着剤による方法をMAR-Ⅲと同じ寸法で確認する。
- (2) ろう付け方法
 - a) ろう材の選定
 - b) 熱サイクル特性
 - c) 共存性（黒鉛-ろう材-モリブデン）

以上の検討によって設計方針が決定したら、部分試験片を製作し、高温熱サイクル試験を行う。

7. 作業方針

- (1) 詳細設計
- (2) 問題点の検討
- (3) 部分試作試験片の製作
- (4) 同上高温熱サイクル試験
- (5) 最終設計
- (6) 試作
- (7) ヘリウムガスループによる特性試験

なお、本年度の実施範囲は(4)までとする。