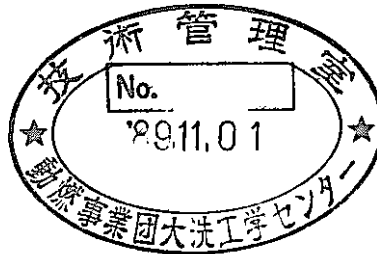


炭化硼素ペレットと被覆管間の熱伝達率の 測定に関する研究 (III)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1989年6月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	TJ9613 89-001
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

茨城大学工学部

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

炭化硼素ペレットと被覆管間の熱伝達率の測定に関する研究 (IV)

佐藤千之助*, 神永文人*

要 旨

本報告は高速増殖炉 (FBR) の制御材として用いられる炭化硼素 (B_4C) ペレットとその被覆管との間のギャップ熱伝達についての研究成果を述べたものである。本年度は、昨年度までに得られた結果を再検討するとともに、これまでの実験データの誤差の原因となっていた、被覆管内におけるペレットの偏心と上下方向への熱の散逸をできるだけ少なくし、加えて伝熱量の評価をより正確に行える環状ギャップを持つ実験装置を新たに製作し、ギャップ幅 0.5mm のギャップ熱伝達の計測を B_4C ペレットの表面温度で 600°C の範囲まで行った。さらに、放射伝熱量の評価計算に必要な B_4C とステンレスの放射率の計測と、ギャップ内の伝熱量の周方向分布に帯する B_4C ペレットの偏心の影響を有限要素法を用いて数値的に評価した。

その結果、 B_4C とステンレス被覆管の放射率はそれぞれ、0.85 と 0.25 であること、 B_4C ペレット偏心による周方向の伝熱量は、0.5mm の初期ギャップ幅が偏心によって最小幅位置で 0.125mm になった場合、 $\pm 25\%$ の範囲に分布することが分かった。さらに、ギャップ幅が 0.5 mm 程度で、ギャップガスがヘリウムである場合、ギャップ部の熱伝達はガスの熱伝導と B_4C ペレットと被覆管の間の熱放射により予測できることが明らかにされた。

本報告は茨城大学工学部が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号: 63 O 3005

事業団担当課室および担当者: 燃料材料開発部 照射材料試験室 (小野瀬庄二)

※茨城大学工学部機械工学第二学科

June, 1989

A Study on Gap Heat Transfer between Boron Carbide Pellet
and Cladding (IV)

Sennosuke Sato *

Fumito Kaminaga *

Abstract

The purpose of this study is to investigate gap heat transfer between a boron carbide pellet (B_4C) and a cladding in a control rod of the Fast Breeder Reactor. The present report describes discussions of the experimental data obtained previously and results of the following two experiments and one analytical calculation. The first experiment was performed to measure conductances of an annular gap between the B_4C pellet and the cladding. The test piece used a sheath heater to obtain an accurate heat transfer rate and ceramic spacers to minimize an axial heat dissipation and an eccentric effect. The gap width was 0.5 mm and the test range was up to 600°C on a surface temperature of the B_4C pellet. The second experiment was to measure an emissivity of radiative heat of the B_4C and the stainless steel materials. The analytical calculation was made by the finite element method to evaluate an eccentric effect on a circumferential profile of the heat transfer rate.

The results were summarized as follows. The emissivities of the B_4C and the stainless were 0.85 and 0.25, respectively. When the minimum gap width was 0.125 mm due to the eccentricity of the B_4C and the cladding, heat transfer rates in the circumferential direction distributed within 25%. If the gap width is around 0.5 mm and the gap is charged

Work performed by Ibaraki University under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Shoji Onose, Materials Monitoring Section,
Fuels and Materials Division

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Ibaraki University

PNC TJ9613 89-001

with helium gas, the gap conductance can be predicted by thermal conductance and radiation.

記 号

A	: Area
D	: Diameter
g	: Acceleration of gravity
L	: Length
h	: Gap conductance
Q _{in}	: Heater power
r	: Radius or Radial direction
q	: Heat flux
Ra	: Rayleigh number
T	: Temperature
ΔT	: Temperature difference
α	: Coefficient of thermal expansion
δ	: Average gap width in cold condition
δ _m	: Modified gap width in hot condition
ε	: Emissivity
θ	: Circumferential direction
λ	: Thermal conductivity
ν	: Poisson's ratio
σ	: Stefan-Boltzmann's constant (=5.6687×10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置と実験方法	3
2.1 B ₄ Cペレットを使用した実験 I	3
2.1.1 実験装置	3
2.1.2 実験方法	4
2.2 シースヒータを使用した環状気体ギャップでの実験	5
2.2.1 実験装置	5
2.2.2 実験方法	5
2.3 B ₄ Cとステンレスの放射率の測定.....	6
2.3.1 実験装置	6
2.3.2 放射率の測定原理と実験方法	6
2.4 B ₄ Cペレットを使用した実験 II	7
2.4.1 実験装置	7
2.4.2 実験方法	8
3. 実験結果及び考察	9
3.1 B ₄ Cペレットを使用した実験 I によるギャップ熱伝達率の実測値	9
3.2 シースヒータを使用した環状気体ギャップでの実験結果	10
3.3 B ₄ Cとステンレスの放射率の測定結果	11
3.4 B ₄ Cペレットを使用した実験 I によるギャップ熱伝達率の検討	12
3.5 B ₄ Cペレットを使用した実験 II によるギャップ熱伝達率	15
3.6 B ₄ Cペレットとステンレス被覆管との偏心量のギャップ内伝熱量に対する効果	16
4. まとめ	17
謝 辞	18
参考文献	19

付録1	実験データと計算値の一覧表	53
付録2	熱膨張によるギャップ幅の変化	65
付録3	物性値について	68

1. はじめに

炭化硼素はダイヤモンドや等軸晶系の窒化硼素(BN)などについて硬度が大であり、融点も高く、強度も十分大きいセラミック材である。そのため工業的には研磨材などとしても広く使用されている。また硼素中に含まれる同位元素 ^{10}B は非常に大きな中性子吸収断面積を持つため、ペレット状に加工され原子炉、とくに高速増殖炉(以後(FBR)という)用の中性子吸収材として用いられている。FBR制御棒材料(以後「制御材」と呼ぶ)としての B_4C ペレットはステンレス鋼製の被覆管に封入されてロッド状で使用されるが、炉内において中性子を吸収することにより発熱し高温になる。 B_4C ペレット内ではヘリウムガスが発生し、スエリングが起こり、熱応力でクラックが生じ、破壊することがある。そのため、中性子吸収材の長寿命化を図り、原子炉を安全に運転するためには、燃料ピンと同様に B_4C の温度が安全上のしきい値を越えないように制御棒の冷却性能を十分に確保する必要がある。

制御棒は B_4C ペレットのスエリングや変形に対処するため、ペレットと被覆管との間にギャップが設けられており、製作時にはヘリウムガスが充てんされている。

B_4C ペレット中で発生した熱はこのガスギャップを経て被覆管に伝わり、さらに冷却材へと伝達される。したがって、制御材の熱設計や安全評価のため B_4C ペレットと被覆管のギャップ熱伝達の評価は、被覆管と冷却材間の熱伝達の評価と並んで設計上極めて重要な課題である。

このペレットと被覆管間のギャップ熱伝達は、一般にはギャップガス中の熱伝導とペレット表面からの放射との和、さらに、ペレットと被覆管とが接触した場合には、これに接触熱伝達の寄与も加算して評価される。このギャップ熱伝達については、古くはTachibana⁽¹⁾やFenechとRohsenow⁽²⁾による固体間の接触熱伝達に関する諸研究があり、またRossとStoute⁽³⁾によって実用式が提案され、現在、直接あるいは多少の改良が加えられた形で広く用いられている。さらに、上記以外にもこの問題に関する研究が数多く行われてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、ギャップ熱伝達に関する研究の多くは軽水炉の燃料ピンを対象としたものであり、燃料ピン内の UO_2 と被覆管との間のギャップ幅は数十ミクロンから0.1mm程度と小さな値となっていた。

他に、高温ガス炉用燃料内のギャップ熱伝達を扱った研究があるが、その幅は0.15mmであった⁽⁶⁾。今回の対象となっている0.5mm程度の比較的大きな気体がギャップにおける熱伝達の研究はほとんどなされていない現状にある。

本研究は、 B_4C ペレットと被覆管のギャップ熱伝達に及ぼすギャップの大きさの影響を系統的に検討し、制御棒の設計に対処するための基礎的データを取得することを目的としている。昨年度までに、3種類の実験を行い以下に示す知見を得ている。

- (1) 実際の制御棒と同じ外形を持つ B_4C ペレットを用いて電気加熱型模擬制御棒を作成し、 B_4C ペレット周りの環状の気体をギャップにおいてギャップ幅を0.225~0.505mmまでの範囲で4通り変化させ、ギャップ幅によるギャップ熱伝達の変化を実験的に調べた、その結果、 B_4C ペレットと被覆管の間の偏心の影響が大きいこと、温度差から伝熱量を計算したためギャップ内を伝わる熱量の計算誤差が大きいこと、温度差から伝熱量を計算したためギャップ内を伝わる熱量の計算誤差が大きいこと、上下方向への熱の散逸が大きいことなどにより予測計算値と実験値の相違が大きくなった。
- (2) 気体ギャップ幅を正確に制御するため、円板形 B_4C ディスクを用いた水平気体ギャップにおいて、ギャップ幅をガラス製スペーサの高さを変えることにより0.61mm, 0.40mm, 0.21mmの3通り変化させた実験を行った。その結果実験から求められたギャップ熱伝達率は熱伝導と熱放射から計算された値と比べて全体的に高い値を示したが、相違は最大で10%と小さかった。
- (3) 自然対流の効果を調べるため、環状ギャップを B_4C ペレットの代わりにシーブヒータを用いて形成し、スペーサで偏心が少なくなるように制御した実験を行った。この場合ギャップ幅は0.54mmのみであり、熱膨張の影響などを避けるため低音（ヒータ表面温度が188℃まで）状態で実験を行った。さらに自然対流下での流れを可視化・観察するため、ギャップ幅が5mmから1mmまでの範囲で、ギャップガスとして空気を用いた実験を行った。その結果ギャップ幅を代表長さにとったレイレイ数が0.1以下では自然対流の影響はないことが分かった。

以上のことから、現在問題となっているギャップ幅の範囲（最大で0.5mm程度）において、ギャップガスがヘリウムの場合、ギャップ熱伝達は B_4C ペレットが被覆管に接触していなければ熱伝導と熱放射により評価することができるとの知見を得た。

本年度はこれまでに得られた結果をまとめるとともに、上記(1)に示した誤差の原因となった、偏心と上下方向への熱の散逸をできるだけ少なくし、加えて伝熱量の評価をより正確に行える環状ギャップを持つ実験装置を新たに製作し、ギャップ幅0.5mmでのギャップ熱伝達を実測し、高温状態でのギャップ熱伝達の評価を行った。さらに、放射伝熱量の評価計算に必要な B_4C とステンレス鋼の放射率を計測した。また、ギャップ内の伝熱量の周方向分布に対する B_4C ペレットの被覆管に対する偏心の影響を有限要素法を用いて数値的に評価した。

2. 実験装置と実験方法

2.1 B₄Cペレットを使用した実験 I

2.1.1 実験装置

実験装置の概略をFig. 2-1に示す。内径200mm、高さ280mmの円筒形容器①の上下を黄銅のフランジをつけて密閉し、その中に模擬制御棒となる試験体②を垂直に設置してある。試験体内のギャップ部分（B₄Cペレットと被覆管との間）はヘリウムガスによって充填されている。ヘリウムガスの冷却のため、外側には内径48mmの冷却器④を取り付けた。

ヘリウムは気体循環器を用いて、冷却器の上部の内側から抜かれ、冷却器の外側にもどってくるように循環している。つまり被覆管表面ではヘリウムは上方向に流れている。ヘリウムガスの循環流量は23 l/minで一定となっている。

B₄Cペレットの加熱は試験体中心に設けたタンタル棒⑥を直接通電し、ジュール加熱を行う。その加熱体の上下端に銅製の電極⑤を取り付け、電極の過熱を防止するために水冷回路③がついている。加熱には定電圧装置により一定電圧に調整された交流を用い、入力調節にはスライドレギュレータを用いた、タンタル棒の抵抗が0.05オーム以下と小さいので、変圧器を用いて低電圧印加を行った。

試験体の詳細をFig. 2-2に示す。試験体中心にはタンタル棒が入っており、B₄Cの発熱を模擬している。このタンタル棒は直径2mmで長さ225mmの中実丸棒で、銅電極と接合されている。タンタルの外側は電気絶縁のため純度99.5%以上のアルミナ管に覆われている。このアルミナ管は長さが100mmと70mmの2本を使用し、合計で170mmである。試料のB₄Cペレットは中空状の円柱形をしており、長さと同外形が同じものを垂直方向に5個重ねて使用した。ここでは上から順に試料A1, A2, C, B1, B2, と呼ぶことにする。このうち計測の対象となる試料Cの外径はTable 2-1に示すように4種類ある。表面粗さはいずれもRa=6 μmである。B₄C試料の上部にはボロンナイトライド (BN)、下部にはガラス化セラミックのブッシュを取り付け、それらはインコネル製のバネによりおさえられている。被覆管としては外径18.0mmのステンレス管 (SUS316) を用いた。ステンレス管下部には、B₄Cペレットの内側の温度計測用熱電対を通すため、中心に直径9mmの穴が、また外側の温度計測用熱電対を通すため、直径2mmの穴を円周方向に120° 間隔で3つ開けた。

B₄C試料の温度計測を行うための熱電対の位置とその番号をFig. 2-3に示す。B₄C試料のうちで、C, B1, B2, の3試料には円周方向に120° 間隔で内表面に3本、そして、60° ずらした位置に、120° 間隔で外側にも3本のスリットが加工してある。B₄Cの温度を計測するための熱電対が、このスリット中を下から上に向かって軸方向に挿入されている（熱電対番

号で示すと、外側No.1, 2, 3と内側No.4, 5, 6)。この熱電対は外径0.3mmのシース型クロメル・アルメルで、接地タイプである。熱電対を B_4C 試料に取り付ける際には、耐熱性にすぐれたセラミック接着剤（アロンセラミックD, 東亜合成化学工業）を用いた、被覆管の表面温度は B_4C 表面に取りつけたものと同じタイプの熱電対により計測した。その熱電対は、放電加工によって作られた溝に、たたき込むことによって取り付け、その取り付け位置は、 B_4C 試料の外側の熱電対と高さならびに周方向の位置は同じである。(No.9, 10, 11)。また、上下に20mm離れた位置でも各々1ヶ所ずつ計測した (No.7, 8)。ステンレス被覆管外側のヘリウムガス雰囲気温度は試験体の中央の熱電対 (No.9) と同じ高さとなる位置でクロメル・アルメル熱電対で計測した。

熱電対の計測値はハイブリッドレコーダに記録した。タンタル棒への印加電圧値はデジタルマルチメータにより計測した。また、電流値は変流器と変換器を用いて直流電圧値に変換した後、同じレコーダに記録した。

2.1.2 実験方法

実験は次のような手順で行った。Fig. 2-1に示す容器内①を大気圧のヘリウムガスに置換するため、最初に真空ポンプで容器内の気体を抜いてから、大気圧になるまでヘリウムガスを注入した。次に、電極の冷却器と試験体の外側の冷却器に水道水を流してから、タンタル棒⑥電気加熱した。加熱量の調節にはスライドレギュレータを用い、低入力からステップ状に加熱量を増加させた。被覆管からの除熱のため、気体循環器により23 l/minの流量で容器内のヘリウムを循環させた。

電圧以外の計測値はハイブリッドレコーダに記録されるが、その値はアナログ状に表示される。また、この記録計はデジタル値も表示可能で、30分ごとに表示した。この時、タンタル棒への印加電圧値はデジタルボルトメータから読み取った。

試験体の温度が定常に達した後、 B_4C の温度（内側3点、外側3点）、被覆管の表面温度（5点）、冷却水温度、容器内のヘリウムガス雰囲気温度、電流、電圧値の計15点を測定した。1組の測定データを得るのには、電気入力を設定値に上げてから、約1～2時間を要した。次に、電気入力をステップ状に上昇させ、上記と同様に計測・記録を行った。 B_4C 表面温度として最高600°Cまでの測定を行うことができた。

以上の方法で、Table 2-1に示す4種類のギャップ幅に対して実験を行った。また、最大ギャップ幅である B_4C 試料No.4においてのみ、 B_4C ペレットを被覆管内であらかじめ偏心させた実験も行った。これは実際の制御棒の製作においてはペレットの偏心がかなり大きいと考えられるからである。

2.2 シースヒータを用いた環状気体ギャップでの実験

2.2.1 実験装置

前項での B₄Cペレットとタンタル棒をシースヒータで置き換え、スペーサにより偏心をなくした実験装置を組み立て、ギャップ内での伝熱現象を調べた。

シースヒータを用いた実験装置の概略図をFig. 2-4に示す。被覆管②は前項に示したものと同じで内径16.5mm、外径18.0mmのステンレス (SUS316) 管である。その中心に直径 15.43mmのヒータ①を置き、ヒータの上下をスペーサ④でおさえ、被覆管とヒータとのギャップ幅を0.54mm一定に保った。被覆管表面ではエアポンプにより空気が下から上へ流れ被覆管を冷却している。被覆管の外側は冷却器③で覆い、その中に水道水を流して除熱することにより気体の温度を一定に保った。

ギャップ部のガスとしてヘリウムと空気を用いた。この実験では熱膨張など影響を少なくするため低温で実験 (ヒータ表面温度で最大 188°Cまで) を行った。

Fig. 2-5は試験体の詳細と熱電対位置と熱電対番号を示している。被覆管表面温度は溝に取り付けた素線径 0.1mmのCA熱電対で行った (熱電対番号 # 3, 4, 5, 6, 7)。ヒータ表面の温度は放電加工によって工作した溝にハンダ付けした 0.5mmのシース型CA熱電対により2ヶ所計測した (# 1, # 2)。熱電対の計測値はハイブリットレコーダに記録し、ヒータの加熱に要する電圧と電流値をデジタルマルチメータで計測した。

2.2.2 実験方法

実験は次の手順で行った。冷却装置に水道水を流し、スライドレギュレータを調節して一定の電気加熱量を与えた。このとき、気体循環器により空気を下から上に流し被覆管表面の除熱を行った。温度が一定になり定常状態に達したことを確認した後、各点の温度を記録し、その時の電流と電圧値をデジタルマルチメータから測定した。このようにして1組のデータを取り、さらに、電気過熱量をステップ状に上昇させて、実験を行った。

この実験では、ギャップガスがヘリウムと空気の2種類について計測を行った。ヘリウム実験では試験体を組み立てた後、真空容器に入れ、真空引きを半日行い、ギャップ部を真空にし (10^{-3} Torr程度)、その後、そのギャップ部にヘリウムを充填した。

また、ギャップガスが空気の場合については、ヘリウムと同じ体系での実験に加え、被覆管の下端から15mmの所に直径3mmの穴を4ヶ所と、上端から10mmの所に同様の穴を8ヶ所あけ、上下端でギャップ部と外部が連結することによりギャップ部に対流が起こりやすい条件においても実験を行った。これは、上下端が開放されている場合、対流現象が促進されるか否かを実験的に確認するためである。

2.3 B₄Cとステンレスの放射率の測定

2.3.1 実験装置

B₄C とステンレス被覆管の間の放射熱伝達の評価を行うため、本年度行った放射率測定実験である。Fig. 2-6 に装置の概略を示す。B₄Cとステンレスの試料形状と寸法をFig. 2-7 に示す。試料①は外径40mmの銅製円筒ブロック③の中央に収められ、外側には温度制御のためバンドヒータ④を設け、バンドヒータの外側は断熱材⑤で覆われている構造となっている。B₄C試料の表面粗さはRa=3.6μm である。ステンレスについては以下の3つの試料について計測した。

SUSE 1 : 鏡面仕上 (Ra=0.06 μm)

SUSE 2 : エメリーペーパー 0 番で研磨 (Ra=0.11 μm)

SUSE 3 : SUSE 2 試料を加熱し表面を酸化させた。酸化の程度は定量的には測定していないが、表面温度が 500℃の状態です空気雰囲気中に 2 時間程度置いてあったもので、表面が少し黄色くなった程度である。

前項までのギャップ熱伝達の測定に使用したステンレス被覆管の表面粗さはRa= 0.08 μm であった。つまり、その粗さは試料SUSE 1 とSUSE 2 の中間である。2.1 項の実験では約600℃以上の高温であったが、ヘリウム雰囲気で行ったため、目視観察では酸化はほとんど認められなかった。表面粗さの測定にはミツトヨ製 Surf test 201 Series 178を用いた。

試料端面から距離L=17.5 (cm) だけ離れた所にHg-Cd-Te光量子型赤外線放射計 (日本電気三栄製、サーモレーサ 6 T62) を置き、表面の温度を CRT上に二次元のサーモ像として表示する。試料と放射計は外部からの擾乱をできるだけ小さくするように、全体を暗幕で囲んだ。また、試料表面での測定機センサーからの反射の影響をなくすために、放射計に対して試料面を水平面で5°傾けた。Fig. 2-7 は B₄Cとステンレス試料の形状とサイズを示している。中心には直径 3 mmの深穴があけてある。この穴の直径と深さの比は B₄Cの場合は 5, ステンレスの場合は 9 であり、空洞放射効果により、ほぼ黒体とみなしてよい。試料の温度を測定するため一對の熱電対をできるだけ中心の 3 mmの穴に近い位置に取り付けた。

2.3.2 放射率の測定原理と実験方法

放射率は物質が持つ熱的物性の一つであるが、波長、表面性状や温度により変化する。物体が灰色体の場合、放射エネルギーEはプランクの量子論から次式のように現せる⁽⁷⁾。

$$E = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (2-1)$$

ここで、 ε は物体の表面放射率、 σ はステファンボルツマン定数、 T_w は物体の表面温度を示す。

赤外線放射計は放射エネルギーEを検知し、内蔵する校正曲線から表面の温度を計測する計器である。このとき、表面の放射率をあらかじめ計器に入力しておく必要がある。

この測定原理を用いて、逆に表面放射率 ε を以下の 2 つの方法で測定し、両者の方法を比較した。

- 1) 被測定物体を ε が既知の物体と同じ温度状態に置き、放射計の温度指示が既知の物体と同じになるときの放射率を求める。
- 2) 被測定物体を黒体と同じ温度状態に置くと、以下の関係が成立つ。

$$E = \varepsilon \sigma T_w^4 = \sigma T_i^4 \quad (2-2)$$

ここで、 T_i は赤外放射計による被測定物体の表面温度。したがって、

$$\varepsilon = \frac{T_i^4}{T_w^4} \quad (2-3)$$

となり、表面の放射率 ε を求めることができる。

ただし、一般には、放射計内のセンサは有限幅の波長範囲（今回使用したセンサでは $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ）のエネルギーのみを検知するようにフィルタがかけられているため、センサの出力は式（2-1）と異なり、絶対温度の 4 乗に比例せず、厳密には式（2-3）は成立たない。また各測定器ごとに校正曲線が異なり、またこの情報は公開されていないため、式（2-3）の誤差の評価もできない。

試料をバンドヒータで決められた温度になるように加熱した。測定温度範囲は常温から約 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ までである。熱電対出力をペンレコーダで記録し、定常状態であることを確認してから、放射計の放射率の設定値が 1.0 の状態で、試料表面中心の空洞部の温度 T_c 、中心部から半径約 4 mm の円周上で 90° 間隔で 4 箇所の試料表面の温度 T_1, T_2, T_3, T_4 を赤外線放射計で測定した。また試料に埋め込んだ熱電対により試料温度 T_w を測定した。さらに、上記 1) の方法で放射率の測定を行った。放射計の放射率の設定値を変化させ、試料表面の温度 T_1, T_2, T_3, T_4 がさきほど測定した中心の空洞部の温度 T_c に等しくなるときの放射率を各表面での値とした。

2.4 B₄Cペレットを使用した実験 II

2.4.1 実験装置

本年度新たに製作した装置である。Fig. 2-8 に実験装置の概略を示す。主な構成要素は試験体①、冷却器②とヘリウム容器③である。Fig. 2-9 に試験体の詳細を示す。2.1 項に示した B₄Cペレットを使用した実験 I と B₄Cペレットと被覆管で環状ギャップを構成している点は同じであるが、以下の点が異なっている。1) 熱伝導率の低いセラミックを取り付け発熱体から上下方向への熱の散逸を少なくしたこと。2) そのセラミックにスペーサの機能も持たせることにより、B₄Cペレットと被覆管との偏心を小さくしたこと。3) シースヒータを用いることにより半径方向に伝達される熱量の正確な評価が可能になったこと。

試験体は、Fig. 2-9に示すようにヒータ、 B_4C ペレット、セラミックスペーサ、ステンレス管とバネから構成されている。ヒータは外径 9.4mm、長さ 227mmで最大熱出力500Wのシースタイプ、その外側に位置する B_4C ペレットは外径 15.49mm、長さが20mmの円筒状のものを5個積み重ねている。ステンレス管は内径16.5mm、外径18.1mm、長さ 215mmであり、 B_4C ペレットとのギャップ幅は 0.505となっている。今回はこのギャップ幅のみの実験を行った。上下に取り付けたマシナブルセラミックは熱の散逸と偏心を少なくするためのものであり、バネにより保持されている。

Fig. 2-10は試験体断面の詳細と熱電対の位置を示している。 B_4C ペレットの表面温度は中央に位置するタイプCについてのみ表面の溝に 0.3mm径のCA熱電対を取り付け測定した。測定は 120° おきに3ヵ所とした(#1, #2, #3)。ステンレス被覆管の温度は表面に放電加工で付けた溝に 0.3mm径のCA熱電対をロウ付けした。 B_4C ペレット表面と同じ高さと同位置に3点、上下20mm離れた位置に6点、合計9点(#4~#12)である。

Photo 2-1にヒータに B_4C ペレットとセラミックを取り付けた状態と装置の全体を撮影した写真を示す。

2.4.2 実験方法

実験は次の手順で行った。真空ポンプにより試験体内部と下部のヘリウム容器内の空気を抜き、その後ヘリウムガスを容器に封入し、ギャップ部をヘリウムガスで置換する。ガス圧は大気圧とする。冷却装置に水道水を流し、スライドレギュレータを調節して一定の電気加熱量を与えた。このとき、エアーポンプにより空気を下から上に流し被覆管表面の除熱を行った。温度が一定になり定常状態に達したことを確認した後、各点の温度をハイブリットレコーダに記録し、その時の電流と電圧値をデジタルマルチメータから測定した。このようにして1組のデータを取り、さらに、電気加熱量をステップ状に上昇させ、 B_4C ペレットの表面温度が 600°C になるまで実験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 B₄Cペレットを使用した実験Iによるギャップ熱伝達率の実測値

一般に円筒が十分に長い場合、その両端が断熱されている場合には、円筒内の半径方向に伝わる単位長さ当たりの熱量 Q は、半径 r_a 、 r_b 、その位置での温度 T_a 、 T_b により、次のような関係がある。

$$Q = \frac{2\pi\lambda}{\ln(r_a/r_b)} (T_a - T_b) \quad (3.1)$$

Fig. 2-3に示すA, B, C方向へ伝達される熱量をそれぞれ次のような方法で求めた。 T_a , T_b としてA方向では $(T_4 + T_5)/2$ と T_1 、B方向では $(T_5 + T_6)/2$ と T_2 、C方向では $(T_6 + T_4)/2$ と T_3 を用いて求めたものである。 T の添字はFig. 2-3に示す熱電対番号の温度を表す。結局、A, B, C方向の伝熱量 Q_a 、 Q_b 、 Q_c は次式で示される。

$$Q_a = \frac{2\pi\lambda}{\ln(D_2/D_1)} \left[\frac{T_4 + T_5}{2} - T_1 \right] \quad (3.2)$$

$$Q_b = \frac{2\pi\lambda}{\ln(D_2/D_1)} \left[\frac{T_5 + T_6}{2} - T_2 \right] \quad (3.3)$$

$$Q_c = \frac{2\pi\lambda}{\ln(D_2/D_1)} \left[\frac{T_6 + T_4}{2} - T_3 \right] \quad (3.4)$$

ここで、 D_1 と D_2 はB₄Cペレットの内径と外径であり、熱伝導率 λ (W/mK)は各温度の平均値、例えばA方向では $((T_4 + T_5)/2 + T_1)/2$ から計算した値を用いた。熱伝導率の温度相関式は付録3に示す。

ギャップ熱伝達率 h_a 、 h_b 、 h_c は下記の式で計算した。

$$h_a = \frac{Q_a}{\pi D_2 (T_1 - T_9)_a} \quad (3.5)$$

$$h_b = \frac{Q_b}{\pi D_2 (T_2 - T_{10})} \quad (3.6)$$

$$h_c = \frac{Q_c}{\pi D_2 (T_3 - T_{11})} \quad (3.7)$$

ここで、ステンレス被覆管の内面温度としては、測定した外面温度 (T_9 , T_{10} , T_{11}) を用いたが、被覆管壁面内部の温度勾配は小さく、ギャップ熱伝達に与える影響は多くて1%以下であった。Fig. 3-1とFig. 3-2は、線出力が11W/cm以上の測定値に関して、ギャップ熱伝達率を常温時の平均ギャップ幅で整理した結果を示している。(ここで黒塗りの記号は、あらかじめ B_4C ペレットと被覆管を偏心させて組立てた試験体の実験値である。) また実線はギャップ熱伝達が熱伝導のみによるとして求めたギャップ熱伝達率 ($= \lambda / \delta$) の予測値である。A, B, Cそれぞれの方向で値が最大で3倍程度異なり、これは試験体の組み立て時に B_4C ペレットと被覆管との偏心が大きかったとが原因していると考えられる。また、あらかじめ偏心をさせた場合の実験データ (図中黒ぬりの記号で示した) では方向によるギャップ熱伝達率の相違は2.5倍程度であり、常温時のギャップ幅が小さい方が偏心を少なくなるように組み立てた場合でも、方向による差が大きくなる結果となった。ギャップ熱伝達が熱伝導のみとした予測値より実験データは最大で3倍以上大きくなった。

本年度再評価に用いた測定温度と計算された熱量およびギャップ熱伝達の値は付録1のTable A. 1-1にまとめた。また残りのデータは1986年度の報告書⁽⁸⁾の付録1にまとめられているので参照されたい。

3.2 シースヒータを使用した環状気体ギャップでの実験結果

測定された温度から以下の式を用いてギャップ熱伝達率の実験値 h_{exp1} , h_{exp2} を求めた。

$$h_{exp1} = Q_{in} / \{ \pi D_{in} (T_1 - T_5) \} \quad (3.8)$$

$$h_{exp2} = Q_{in} / \{ \pi D_{in} (T_2 - T_4) \} \quad (3.9)$$

ここで Q_{in} はヒータの単位長さ当たりの熱出力、 D_1 はヒータの直径(15.43mm)、 T の添字はFig. 2-5に示す熱電対番号の温度を示す。

Fig. 3-3と3-4は式(3.8)と(3.9)で求めたギャップ熱伝達率の実験値 h_{exp} を縦軸にギャップ熱伝達が熱伝導のみによるとして求めたギャップ熱伝達率 ($h_{cal} = \lambda_g / \delta$) の予測値を横軸にとり整理した結果である。ここで、Fig. 3-3はギャップガスが空気の場合、Fig. 3-4はヘリウムガスの場合である。両図より、実験値は計算値より最大で3%高くなるだけであり、低温の場合、ギャップ内の熱伝達は熱伝導のみによるとしてよいことが分かった。また、Fig. 3-3に示すように、ギャップ幅が0.5mmで高さが100mm以上あるようなギャップ空間では、上下端が閉じているか (Δ 印の実験データ)、開放されているか (\circ 印の実験データ) によりギャップ熱伝達は変わらないことが分る。

測定された温度と計算値、ならびにギャップガス内でのレイレイ数 R_{a1} , R_{a2} の値は付録1のTable A. 1-2からA. 1-4にまとめた。

3.3 B₄Cとステンレスの放射率の測定結果

Fig. 3-5から3-8は測定された放射率と表面温度の関係を示している。各々の試料についての測定結果を付録1 Table A. 1-5～A. 1-8に示す。赤外線放射計のCRT上のサーモ像の例をPhoto 3-1から3-3に示す。Fig. 3-5はB₄C, Fig. 3-6は鏡面状態のステンレス(試料SUSE1), Fig. 3-7は研磨面(試料SUSE2), Fig. 3-8は表面が少し酸化した面(試料SUSE3)の測定値である。

ここで、 ϵ は2.3.2項で示した1)による値、 ϵ_c と ϵ_w は2)により以下の式で計算した値を示す。

$$\epsilon_c = \frac{T_i^4}{T_c^4}, \quad \epsilon_w = \frac{T_i^4}{T_c^4} \quad (3.10)$$

ただし、 $T_i = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4$ とする。

B₄CではFig. 3-5に示すように、 ϵ と ϵ_w の値がほぼ同じとなり、表面温度200℃以上では外部からの反射の影響はなくなり、放射率がほぼ一定な値0.85となり、文献⁽⁹⁾に示されている値と同じとなった。

ステンレスの場合は ϵ は200℃以上で外部からの反射の影響はなくなり、0.2～0.25の範囲となる。表面粗さに関しては、Fig. 3-6とFig. 3-7を比べても $Ra_1 = 0.06 \mu m$ と $Ra_2 = 0.10 \mu m$ の粗さの違いでは放射率はほとんど変わらない。ちなみに、ギャップ熱伝達の測定に使用したステンレス被覆管内面の粗さは $Ra = 0.08 \mu m$ であった。酸化の影響については表面に酸化膜が存在する場合には、放射率が少し大きくなる傾向がある。さらに、研磨面と酸化面では200℃以上で温度の増加につれて放射率は少し増加する傾向があることが分る。図中 ϵ_c と ϵ_w はほぼ同じ値を示すが、今回の温度範囲では表面温度に対して単調に減少し、一定値を示さない。従って、放射率がステンレスの様に小さい場合は式3-10(2.3.2項の2)の方法)で放射率を測定するのは適当でないことが推察される。また、温度が300℃以下では、 ϵ が ϵ_c 、 ϵ_w に比べて小さい値を示すのは、放射計の付属機能である反射補正を行ったためであり、放射率が0.2と小さくてもこの補正を行えば表面温度が100℃以上になると、外部からの反射の影響は無視できることが分る。

以上より、実験データとしては ϵ の値を用いることとし、放射熱が影響するのは、面の温度が400℃以上であるから、以下の値を推奨値とする。

B ₄ Cの放射率	: 0.85
ステンレスの放射率	: 0.25

3.4 B₄C ペレットを使用した実験 I によるギャップ熱伝達率の検討

以上の結果よりギャップ幅が 0.5mm 程度であると、ギャップ熱伝達として対流熱伝達の寄与は考えなくてよい。今回の実験では B₄C ペレットと被覆管は接触しておらず、接触熱伝達 h_c は無視できるのでギャップ部での熱伝達率 h は以下のようにギャップガスの伝導による熱伝達 h_{cond} と放射熱伝達 h_{rad} の和として表せる。

$$h = h_{cond} + h_{rad} \quad (3.11)$$

(1) ギャップ部の熱伝導について

ギャップガスの熱伝導の項 h_{cond} は、次式で表すことができる。

$$h_{cond} = \frac{\lambda_g}{\delta + g_1 + g_2} \quad (3.12)$$

ここで、 λ_g はギャップガスの熱伝導率、 $g_1 + g_2$ は固体表面近傍の気体と固体表面が熱平衡でないときに生じる温度跳躍距離、 δ は B₄C ペレットと被覆管の距離（半径基準）である。温度跳躍距離の値は分子の平均自由行程 L と代表長さ ℓ （ギャップ幅 δ ）を用いたクヌトセン数 Kn (L/ℓ) に依存し、 $0.01 < Kn < 0.1$ の時は気体は連続体として取り扱うことができるが、気体分子の壁面に衝突する頻度があまり多くないため熱平衡状態に達せず、温度跳躍距離が生じる。 $Kn < 0.01$ ならば熱平衡状態になり温度跳躍距離はないものとしてよい⁽¹⁰⁾。平均自由行程 L は

$$L = \frac{3\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi m}{8KT}} \quad (3.13)$$

と表すことができる。ここで、 m はヘリウムの分子量 ($m = 6.695 \times 10^{-27} \text{g}$) K はボルツマン定数 ($K = 1.68 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) である。 L は温度に関して増加関数になるので、実験データの範囲を考慮して、800K の場合について計算を行った結果、 $L = 0.9669 \times 10^{-3} \text{ (m)}$ を得た。ここで、密度 $\rho = 0.06017 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ 、粘性係数 $\mu = 3.94 \times 10^{-7} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ を用いた。

従って、最小ギャップ幅である Table 2-1 に示した B₄C ペレット No. 1 の場合において、本実験のクヌトセン数は最大で $Kn = 0.0043$ となり、上述の条件から温度跳躍距離は δ に比べ無視できるほど小さい。

ゆえに、幾何学的なギャップ幅のみを用いて、

$$h_{\text{cond}} = \lambda_g / \delta$$

と表すことができる。

(2) 放射熱伝達について

ヘリウムガスなどのように分子量が小さく分子構造が単純な場合放射熱に関しては透明体と考えてよいから放射熱伝達 h_{rad} は以下の様に書ける。

$$h_{\text{rad}} = \frac{\sigma}{1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 (1/\varepsilon_2 - 1)} \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} \quad (3.15)$$

ここで、添字 1 は B_4C の外表面を、2 はステンレス被覆管の内表面を示す。A は表面積、T は温度である。放射率 ε については、3.3 節の測定値を用いて、 B_4C に対しては 0.85、ステンレス管については 0.25 とした。

(3) B_4C ペレットと被覆管の偏心量の推定

3.1 節で述べたように B_4C ペレットと被覆管の偏心が生じている。そこで実際のギャップ幅の補正計算を 1986 年度報告書の付録 3 に従い行った。

Fig. 3-9 と 3-10 はそれぞれ Fig. 3-1 と 3-2 に示したデータに対して、縦軸に式 (3-5) から (3-7) で計算したギャップ熱伝達率を、横軸に補正したギャップ幅を取り整理したものである。また実線は式 (3-11), (3.14), (3.15) を用いて求めたギャップ熱伝達率の予測値である。周囲方向に関してのばらつきはなくなったものの、予測値と比べ 2 倍程度大きな値を示している。

(4) 軸方向への散逸熱量の推定

軸方向への熱の散逸について、 B_4C ペレット内の軸方向と半径方向の二次元熱伝導問題を解くことにより評価した。

計算に必要な境界条件は次のようにして求めた。

B_4C ペレットの外表面の温度は測定した被覆管外表面温度を用いて内挿して求めた。Fig. 2-3 を使って説明するとすると、熱電対 No. 7 の値から B_4C ペレット A 2 の外表面の中央温度と、熱電対 No. 8 から B_4C ペレット B 1 の外表面の中央温度を内挿し、その 2 つの温度と B_4C ペレット C の上端外表面温度 T_1 を用いて、2 次補間式を使い、 B_4C ペレット C の外表面温度を計算した。

B_4C ペレット内表面温度はすべて $(T_4 + T_5 + T_6) / 3$ に等しく、一様とする。

B₄Cペレット上端の温度分布は

$$T = \frac{T_4 + T_5 + T_6}{3} - \left[\frac{T_4 + T_5 + T_6}{3} - T_{cu} \right] \frac{1}{\ln(D/0.0030)} \frac{\ln(r/0.0015)}{\ln(D/0.0030)} \quad (3.16)$$

で、下端の温度分布は

$$T = \frac{T_4 + T_5 + T_6}{3} - \left[\frac{T_4 + T_5 + T_6}{3} - T_{cd} \right] \frac{1}{\ln(D/0.0030)} \frac{\ln(r/0.0015)}{\ln(D/0.0030)} \quad (3.17)$$

で計算した。ここで、 T_{cu} 、 T_{cd} はそれぞれ2次補間されたB₄Cペレットの上端と下端の外表面温度、 D はB₄Cペレット直径、 r はB₄Cペレット中心からの距離である。

この四辺の温度を境界条件として、有限要素法（計算プログラム名：ANSYS-THERMAL, サンバネット(株)）を用い、B₄Cペレット内部の温度分布を計算して、軸方向へ散逸する熱量を求めた。

Fig. 3-11と3-12はタンタル発熱体からの発熱量から軸方向へ散逸する熱量を差引いて、半径方向へ伝達される熱量をもとにギャップ熱伝達率を再計算したものである。ここで、実線は式(3-11)、(3-14)、(3-15)による予測計算値である。実測値と計算値はギャップ幅0.3mm以上でよく一致することが分る。ただし、ギャップ幅がそれ以下の小さな値では誤差が大きくなるため、20%程度高い値を示している。従って、軸方向へ散逸する熱量の補正を行うことにより、ギャップ熱伝達がギャップガスの伝導とB₄Cペレットとステンレス被覆管の間の放射により評価できることがわかった。

3.5 B₄Cペレットを使用した実験IIによるギャップ熱伝達率

計測した B₄Cペレットとステンレス被覆管の表面温度から下記の式に従いギャップ熱伝達率を計算した。

$$h_a = \frac{Q_{in}}{\pi D_1 (T_1 - T_5)} \quad (3.18)$$

$$h_b = \frac{Q_{in}}{\pi D_1 (T_2 - T_8)} \quad (3.19)$$

$$h_c = \frac{Q_{in}}{\pi D_1 (T_3 - T_{11})} \quad (3.20)$$

ここで、 D_1 は B₄Cペレットの外径、 Q_{in} はヒータの線出力、温度 T の添字は Fig. 2-10 に示す熱電対番号である。測定データと計算したギャップ熱伝達率を付録1のTable A. 1-9 に示す。3.1節に示した実験Iに比べるとA, B, Cの3方向でのばらつきは少なくなったものの、平均値の周りで最大±12%のばらつきがあった。

Fig. 3-13は計測されたギャップ熱伝達率 h_{exp} と伝熱を伝導と放射の和とした下記の式で予測したギャップ熱伝達率 h_{cal} を比較したものである。

$$h_{cal} = \frac{\lambda_g}{\delta} + \frac{\sigma}{1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 (1/\varepsilon_2 - 1)} \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} \quad (3.14)$$

ただし、ギャップ幅 δ としては B₄Cペレットとステンレス被覆管の熱膨張による変化を付録2に示す計算式により求めた値を用いた。添字1は B₄Cペレットを2はステンレス被覆管を示す。Table 3-1に各実験に対して計算されたギャップ幅を示す。ここで、 δ_1 は軸方向の拘束力がなく自由変位の場合、 δ_2 は拘束されており変位がない場合である。両者にはほとんど相違が無いため、ここではギャップ幅 δ として δ_1 を用いた。実験値は予測計算値に比べ全体的に低くなっており、A, B, Cの3方向で見ると+15%から-20%の範囲に分布している。平均値を比較すると最大で22%予測計算値より低くなっている。温度の増加につれて予測値との誤差が大きくなっているが、これはステンレス被覆管の温度測定の誤差によるものと考えられる。被覆間外面附近の空気相では大きな温度勾配が付いており、このため熱電対を通して熱が逃げ、低い温度を示したものと考えられる。

Fig. 3-12はギャップ熱伝達率と B₄Cペレット表面温度の関係を示す。平均値 (▲印) を見ると、表面温度が 400°C以下では誤差は10%以内であるが、それ以上の温度ではおおよそ最大20°C程度になることが分る。Fig. 3-13はギャップ熱伝達率と単位長さ当たりの伝熱量の関係を示している。

3.6 B₄Cペレットとステンレス被覆管との偏心量のギャップ内伝熱量に対する効果

B₄Cペレットとステンレス被覆管との偏心量がギャップ内での周方向の伝熱量分布にどのような影響を与えるかについて、B₄Cペレットを使用した実験Iの体系に対して、有限要素方を用いて計算解析した。

計算モデルをFig. 3-16に示す。半径方向 r と周方向 θ の2次元計算となる。計算条件としてはAl₂O₃内側面で一様な熱流束 q 、被覆管外側の熱伝達率 h 、気体の温度 T_f を与えた。ここでは、実験データから $q=1680\text{W/m}$ 、 $h=150(\text{W/m}^2\text{K})$ 、 $T_f=567\text{K}$ とした。偏心量 DX を0.0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.505mmの5種類の場合について、ギャップガスを通り被覆管に伝達される熱流束の θ 方向の分布を求めた。計算は平均ギャップ幅が0.505mmの場合について行った。ギャップガス中において、ギャップガスの熱伝導に加えB₄Cペレットとステンレス被覆管の間の熱放射も考慮した。

Fig. 3-17は、偏心がないとき($DX=0.0\text{mm}$)の熱流束 q_0 と偏心があるときの熱流束 q との比の周方向分布を示したものである。 $DX=0.505\text{mm}$ の時の接触点近傍を除けば偏心量の変化により熱量は周方向に±数%~30%程度の範囲内に分布することが分る。 $DX=0.505\text{mm}$ の時は $\theta > 160^\circ$ で最低値と最高値の比は3以上と高くなり、接触している影響が大きい結果となった。ただし、3, 4節(1)に示したように、ギャップ幅がギャップガスの平均自由行程の100倍より小さくなると温度跳躍が生じ、熱伝達率が小さくなるので、ここで計算された値より q_0/q は小さくなるものと思われる。

4. ま と め

高速増殖炉（FBR）の制御材として用いられる炭化硼素（ B_4C ）ペレットとステンレス被覆管との間の気体ギャップでの熱伝達を調べるため、本年度は、昨年度までの実験値の再評価、偏心と上下方向への熱の散逸をできるだけ少なくし、加えて熱伝熱量の評価をより正確に行える環状ギャップを持つ実験装置によるギャップ熱伝達率の実測と B_4C とステンレスの放射率の測定を行い、以下の結果を得た。

- (1) 現在問題となっているギャップ幅の範囲（最大で 0.5mm程度）において、ギャップ幅を代表長さにとったレイレイ数が 0.1以下では自然対流の影響はなく、ギャップ熱伝達は熱伝導と熱放射の和により予測・評価することができる。
- (2) 放射率は2.3.2節の1)で示す方法で測定し、 B_4C では0.85であり、ステンレス鋼では表面の酸化と温度によりその値は多少するものの、被覆管として使用される程度の表面粗さでは0.25となった。
- (3) 昨年度までのギャップ熱伝達率に関する実験値の誤差の多くは、軸方向への散逸の考慮をせずそのため半径方向の伝熱量を過大に見積もったためである。その熱散逸量を考慮・評価すると、実験値は熱伝導と熱放射の和による計算値と20%以内の誤差で一致する。
- (4) 今年度のギャップ熱伝達率の測定値は10%以内で計算値と一致した。しかし、400°C以上の高温では被覆管温度測定用の熱電対からの熱の逃げが大きくなり、測定値は予測計算値より最大で20%低い値を示した。
- (5) B_4C ペレットと被覆管の偏心による周方向の伝熱量は、0.505mmの初期ギャップ幅が最小幅位置で0.125mmになった場合、 $\pm 25\%$ 範囲に分布することが分った。また、一部でペレットと被覆管の接触がある場合、接触している近傍を除けば $\pm 30\%$ の範囲に分布するが、接触点近傍では温度跳躍などを考慮した解析が必要である。

謝 辞

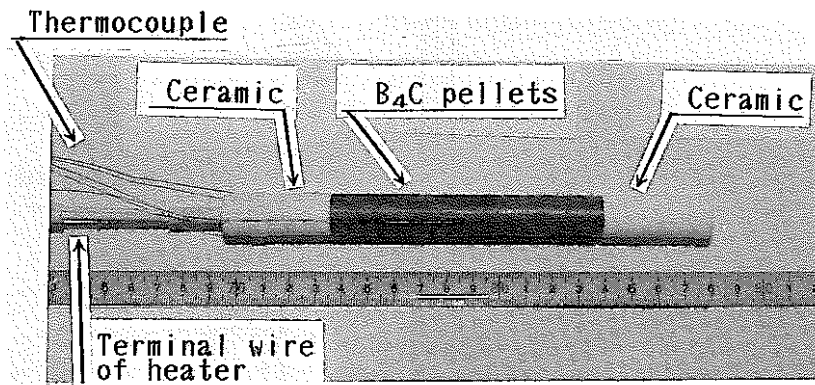
本研究は1985年から1988年までの4年間にわたり行ったものである。その間、燃料材料開発部照射材料試験室の当初の柚原俊一室長と、引続き後任の檜原英世室長には、研究テーマの設定から研究の進めかた全般にわたり終始懇切な御指導を賜った。また、実験の実施にあたり、照射材料試験室の伊藤正彦氏からは有益な参考試料と精度の高い実験試料を提供して頂き、実験をスムーズに遂行し、良好な結果を得ることができた。以上、御指導と御協力を頂いた諸氏に対し、心からの感謝の意を表す。

参 考 文 献

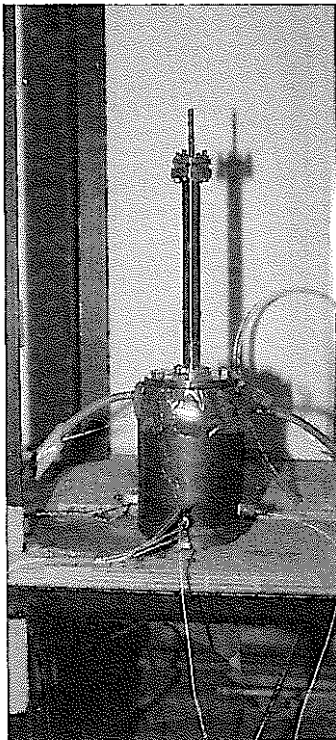
- (1) F. Tachibana, "An investigation of thermal resistance between contact surfaces", J. of JSME Vol.55, No.397 (1952) 102
- (2) H. Fenech, W.M. Rohsenow, "Prediction of thermal conduction of metallic surfaces in contact", J. Heat Transfer, No.1 (1963) 15
- (3) A.M. Ross, R.L. Stoute, "Heat transfer coefficient between UO₂ and Zircaloy 2", CRFD-1075 (1962)
- (4) 佐野川, "接触熱抵抗" 日本機械学会誌, 64-505 (1961) 34
- (5) 藤城, "反応事故条件下における軽水炉燃料のギャップ熱伝達の研究" JAERI-M 84-063 (1984)
- (6) 菊地, 岩本, 川井, "高温ガス炉内燃料コンパクトの熱伝達率及び燃料コンパクト-黒鉛スリーブ間のギャップ熱伝達率," JARI-M 9287 (1981)
- (7) 甲藤, "伝熱概論" 養賢堂 (1969)
- (8) 佐藤, 神永, "炭化硼素ペレットと被覆管間の熱伝達率の測定に関する研究 (II)," PNC SJ9613 87-001
- (9) Y.S. Touloukian, et al., "Thermophysical properties of matter, Vol.8 Thermal radiation properties-Nonmetallic solids", Plenum Press (1970)
- (10) 佐藤, 神永, "炭化硼素ペレットと被覆管間の熱伝達率の測定に関する研究 (III)," PNC SJ9613 88-001 (1988)
- (11) Y.S. Touloukian, et al., "Thermophysical properties of matter, Vol.13 Thermal expansion-Nonmetallic solids", Plenum Press (1970)
- (12) Y.S. Touloukian, et al., "Thermophysical properties of matter, Vol.12 Thermal expansion-Metallic elements and alloys", Plenum Press (1970)
- (13) MATPRO-Version 09, Handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior", TREE-NUREG-1005 (1976)
- (14) "技術資料 流体の熱物性集," 日本機械学会 (1983)

Table 2 - 1 Dimensions of B₄C pellet C

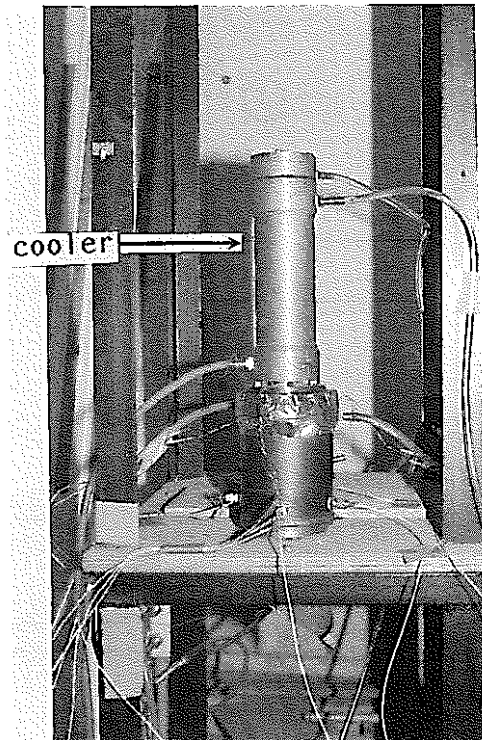
Pellet Number	Outer Diameter(mm)	Inner Diameter(mm)	Height (mm)	Density (g/cm ³)	Radial Gap Width(mm)
1	16.05	3.19	20.03	2.36	0.225
2	15.86	3.19	20.01	2.36	0.320
3	15.65	3.18	20.02	2.38	0.425
4	15.49	3.19	20.02	2.39	0.505



(1) Test piece



(2) Test section without a cooler



(3) Test section

Photo 2-1 Test piece and view of test section B₄C annular gap test II

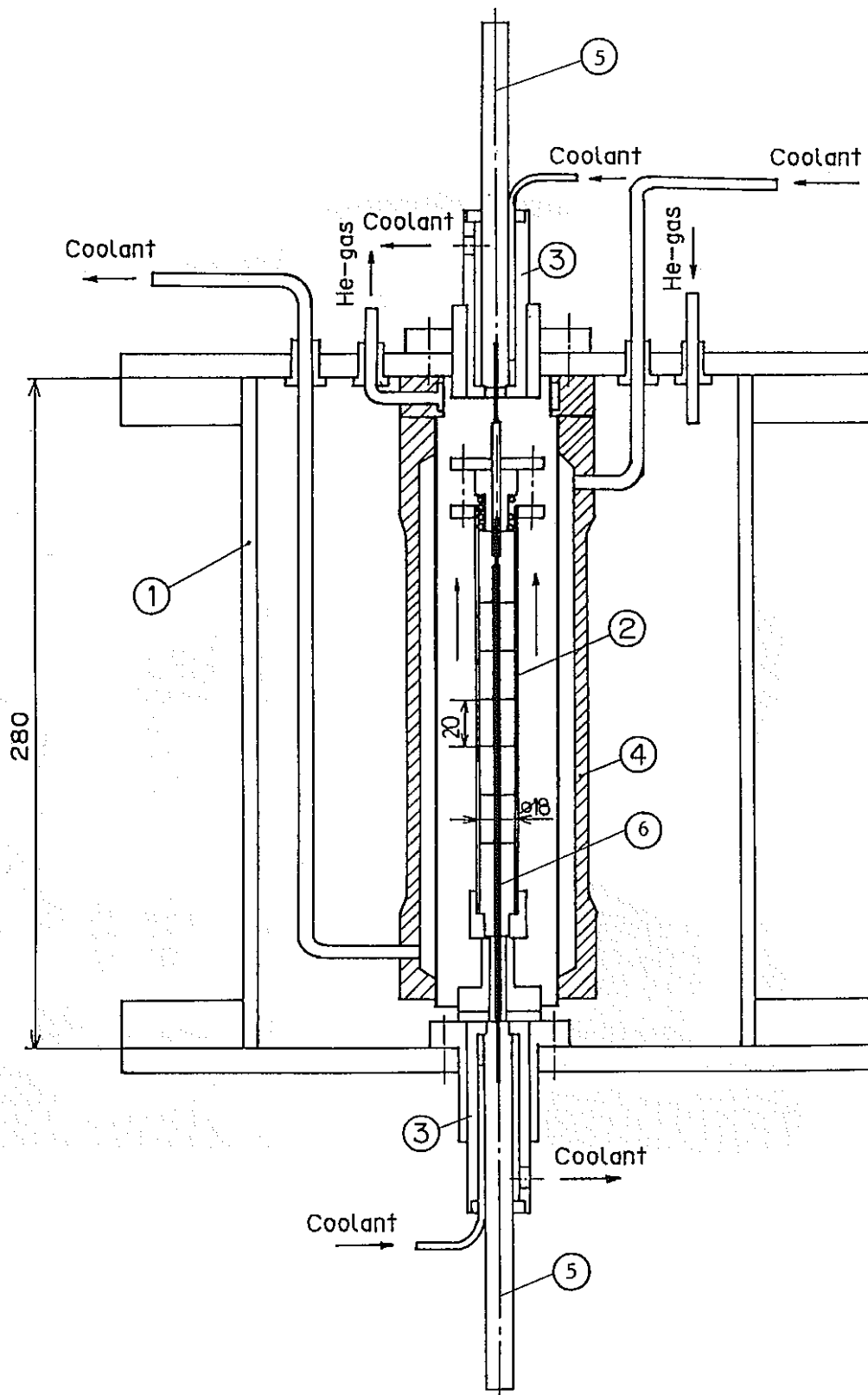


Fig.2-1 Schematic diagram of experimental apparatus of B_4C annular gap test I

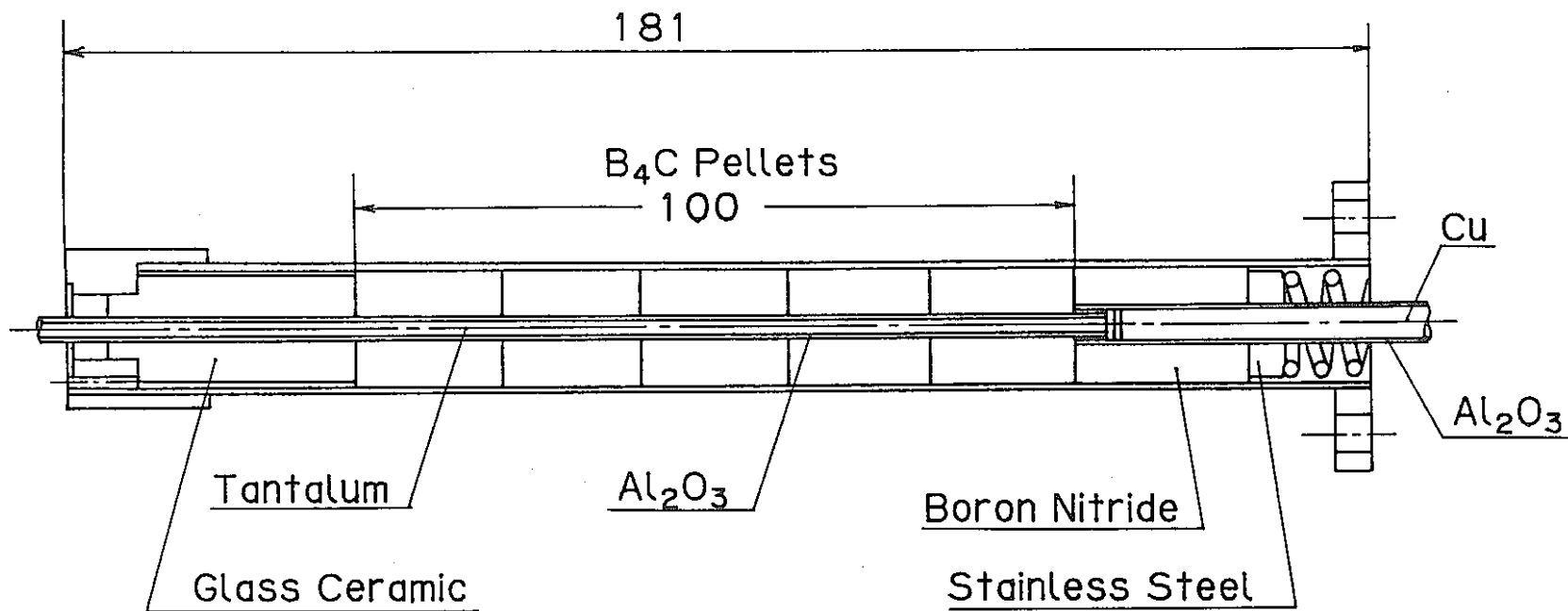


Fig.2-2 Description of the test piece of B₄C annular gap test I

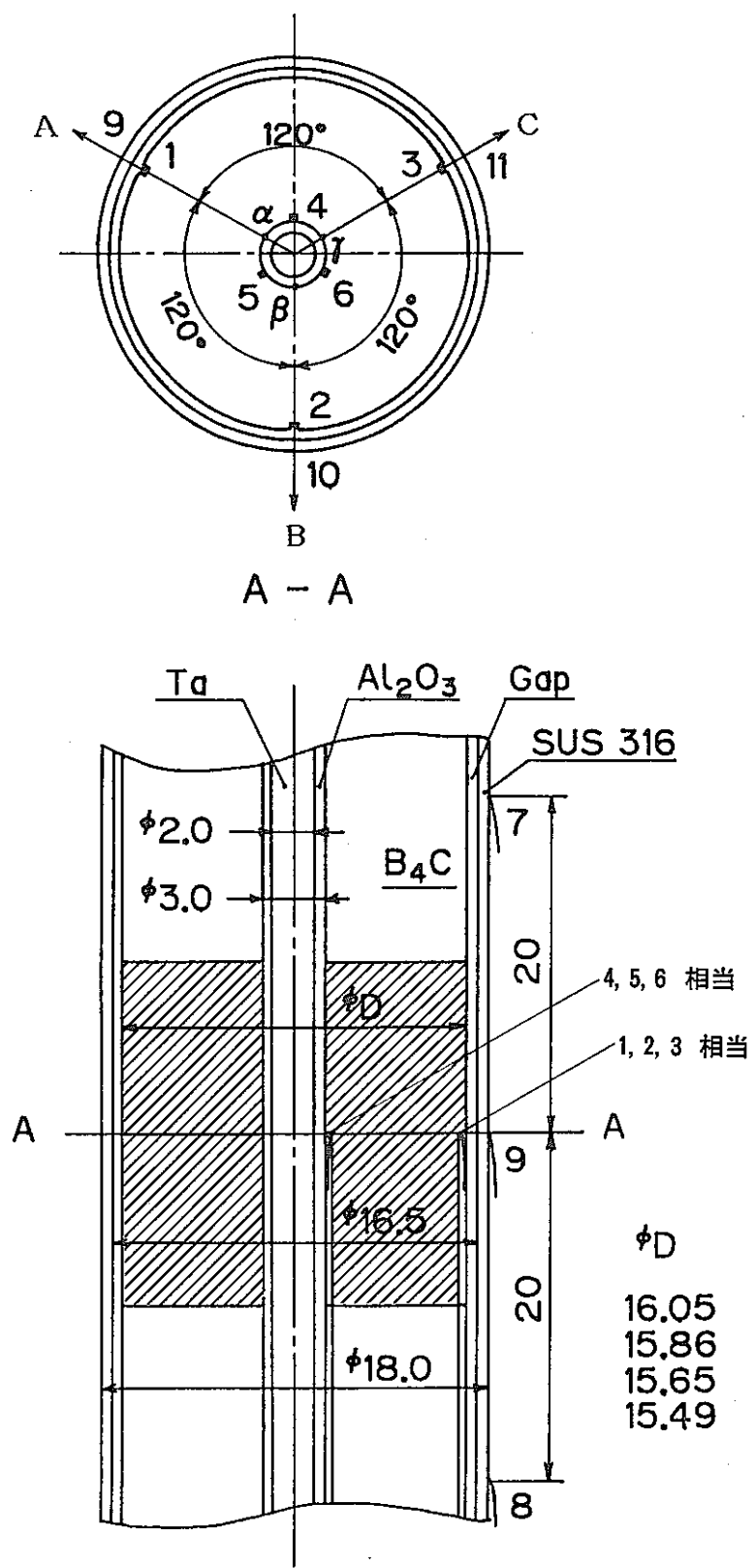


Fig.2-3 Cross sectional view and thermocouple locations of B₄C annular gap test I

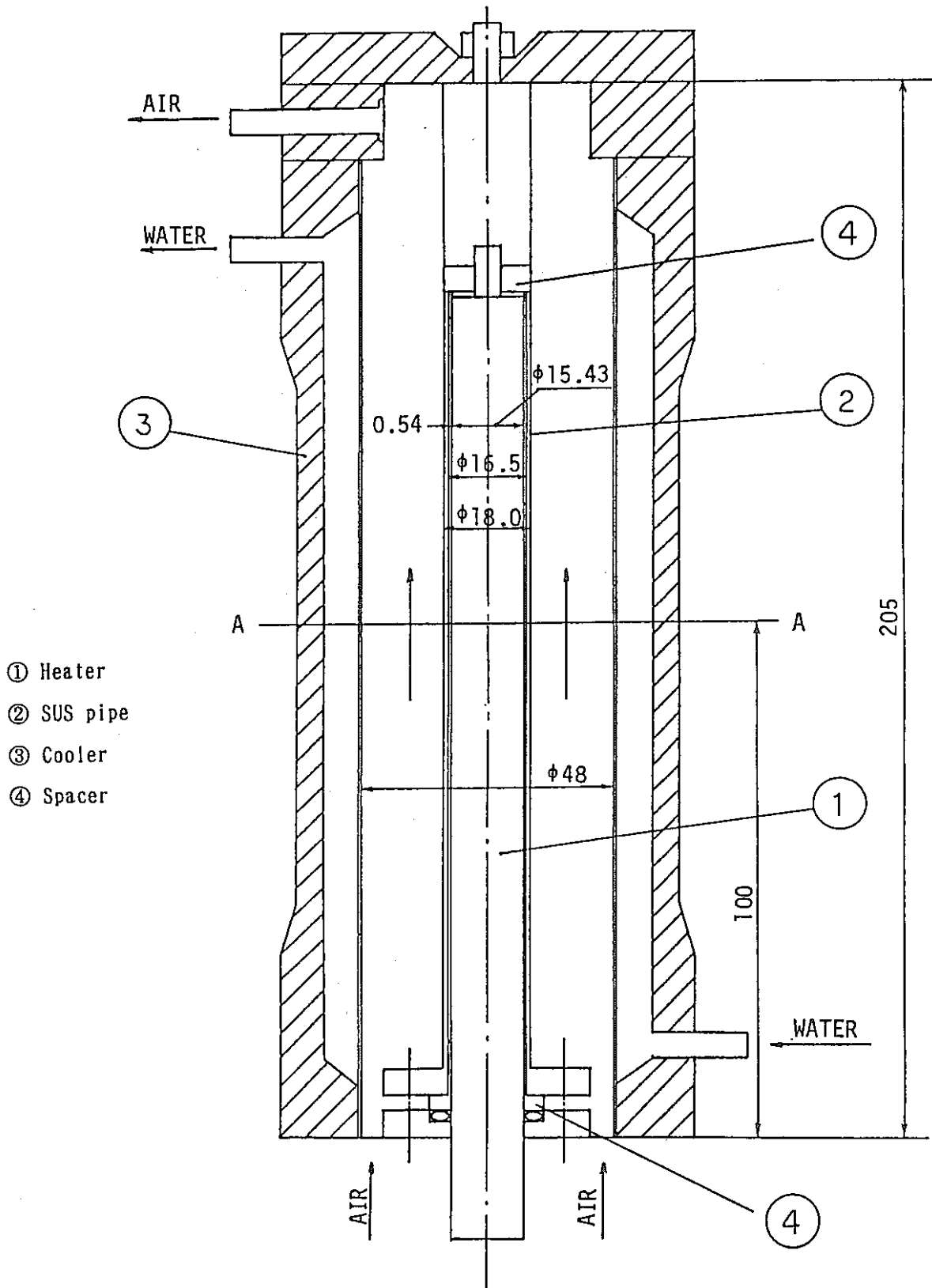


Fig.2-4 Experimental apparatus for the low temperature test using the sheath heater

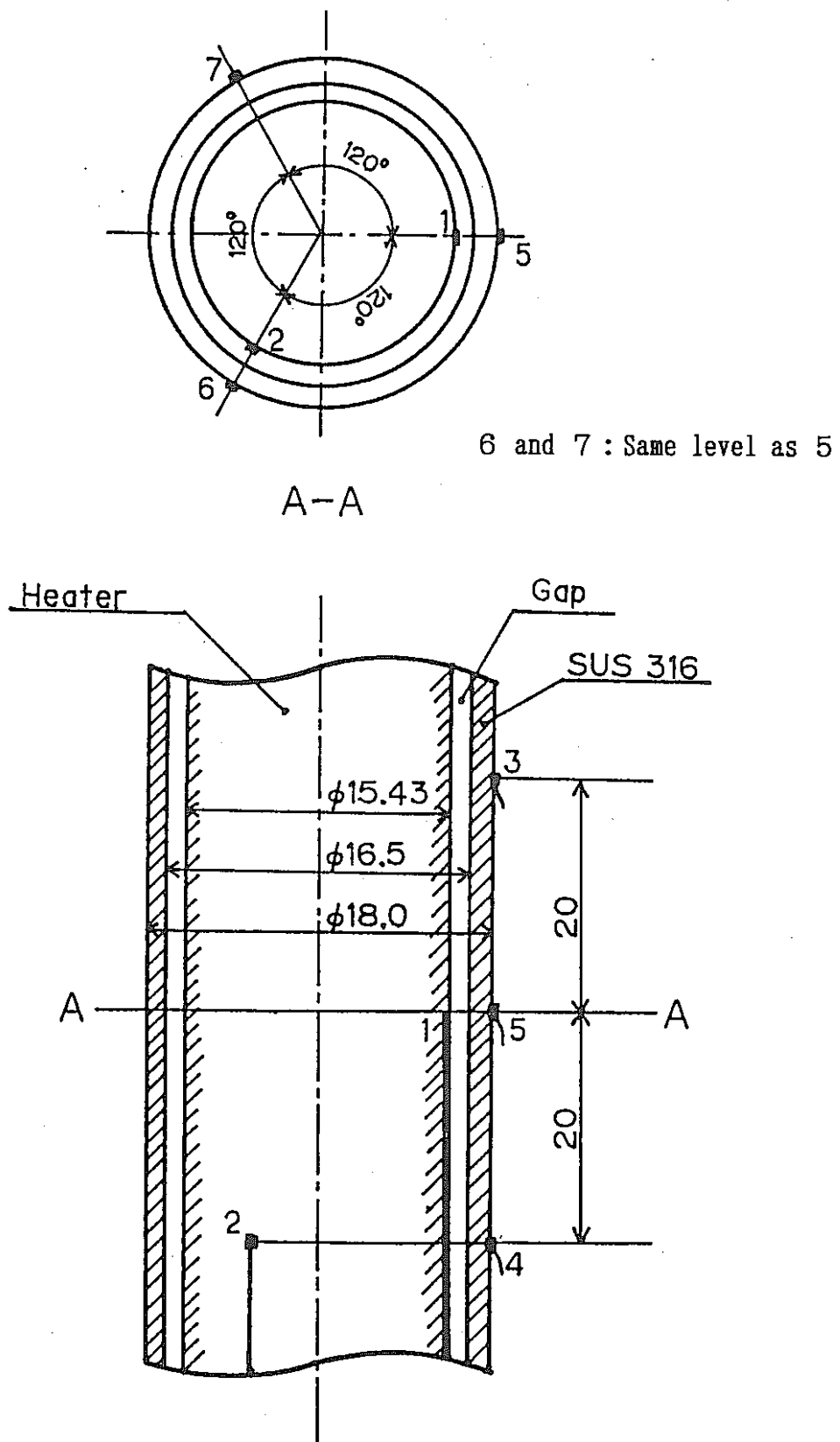


Fig.2-5 Cross sectional view and thermocouple locations for the low temperature test using the sheath heater

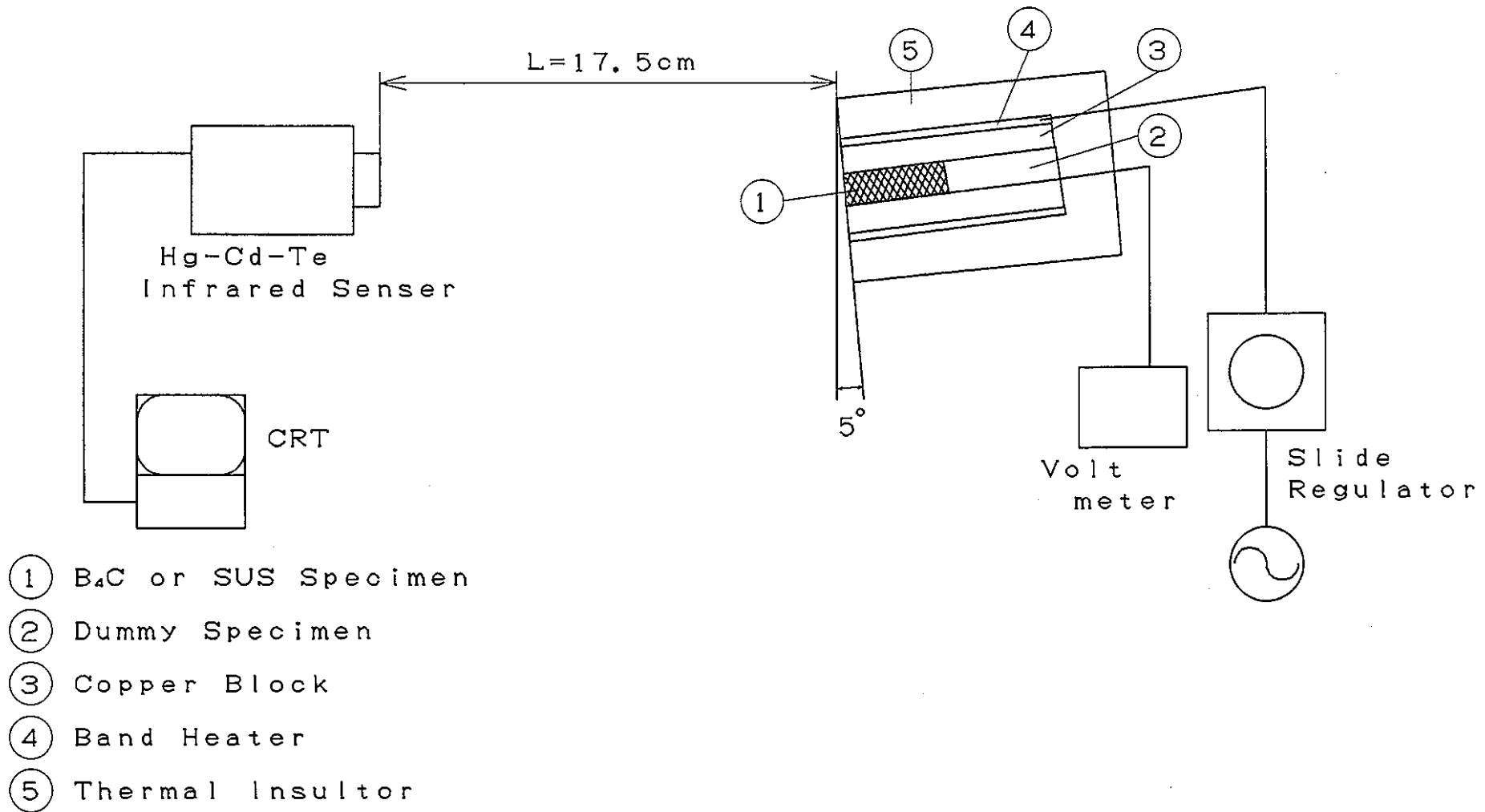
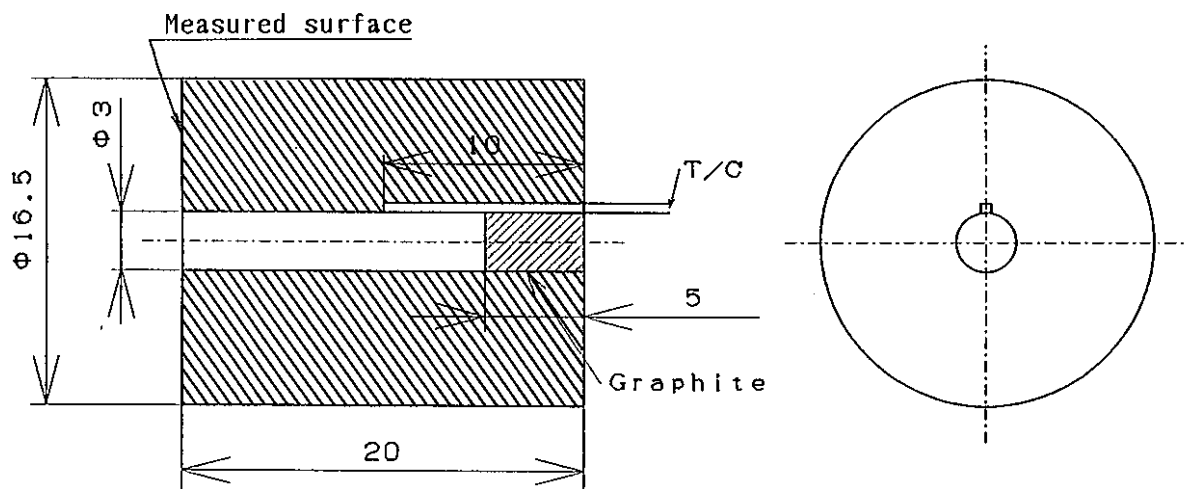
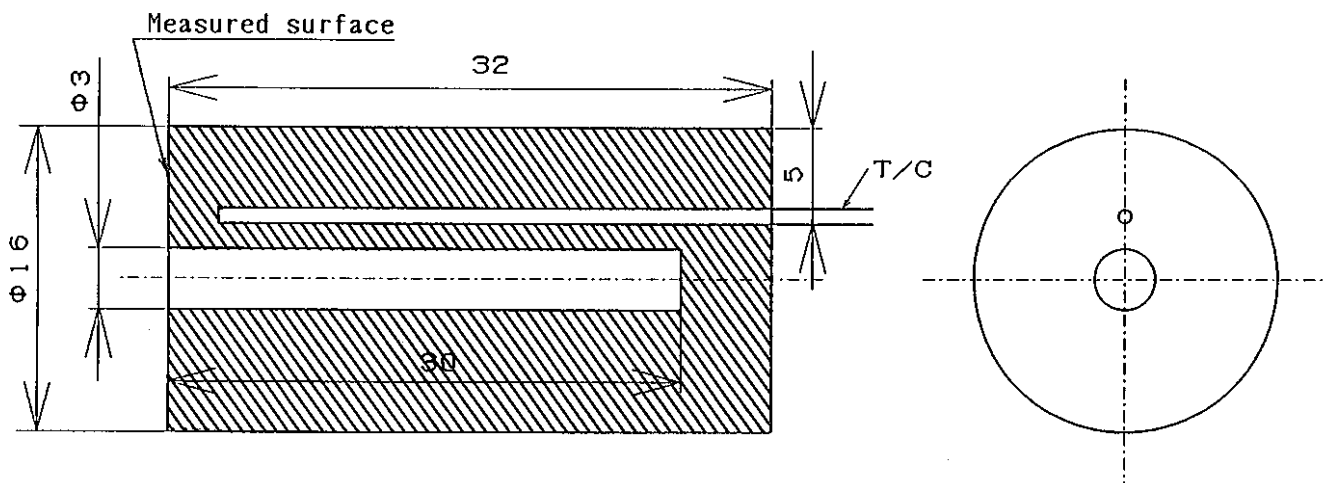


Fig.2-6 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring emissivity



(1) B_4C specimen



(2) Stainless steel specimen

Fig.2-7 B_4C and stainless steel specimen for measurement of emissivity

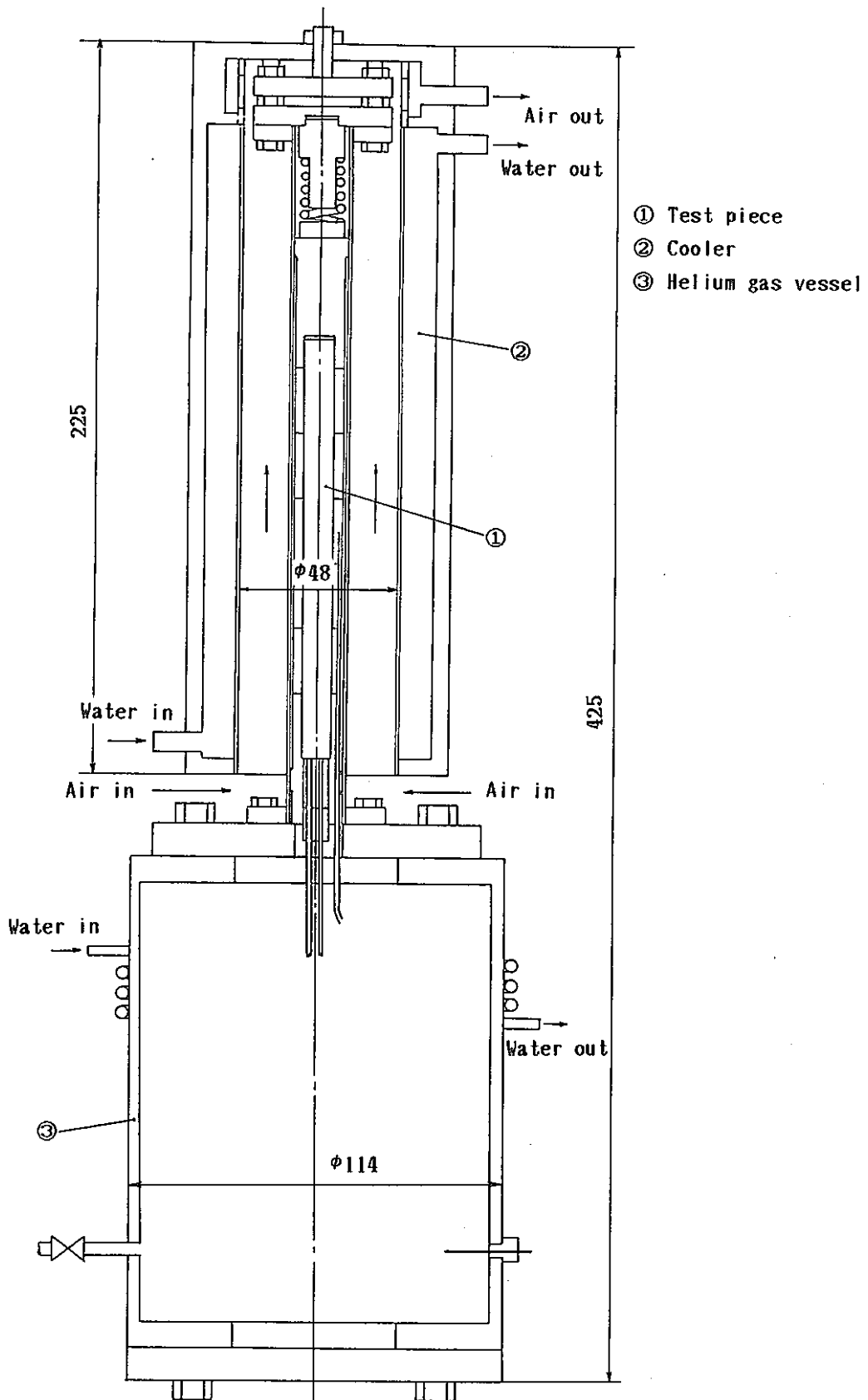


Fig.2-8 Schematic diagram of experimental apparatus of B_4C annular gap test II

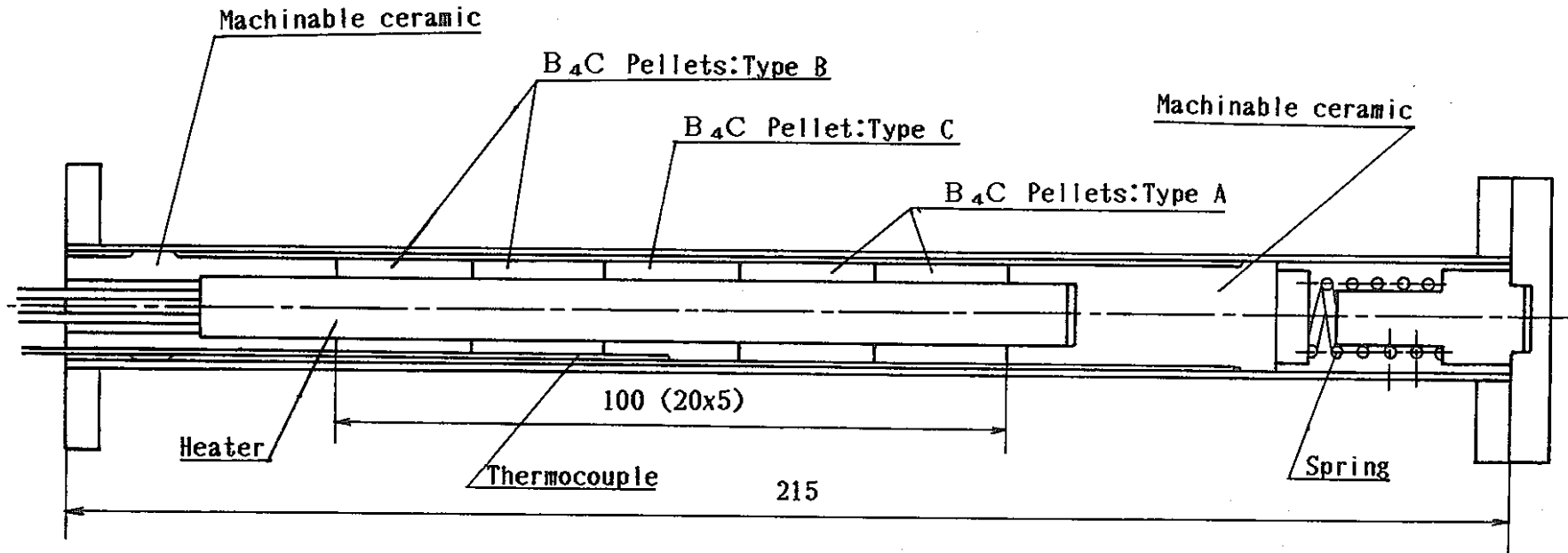
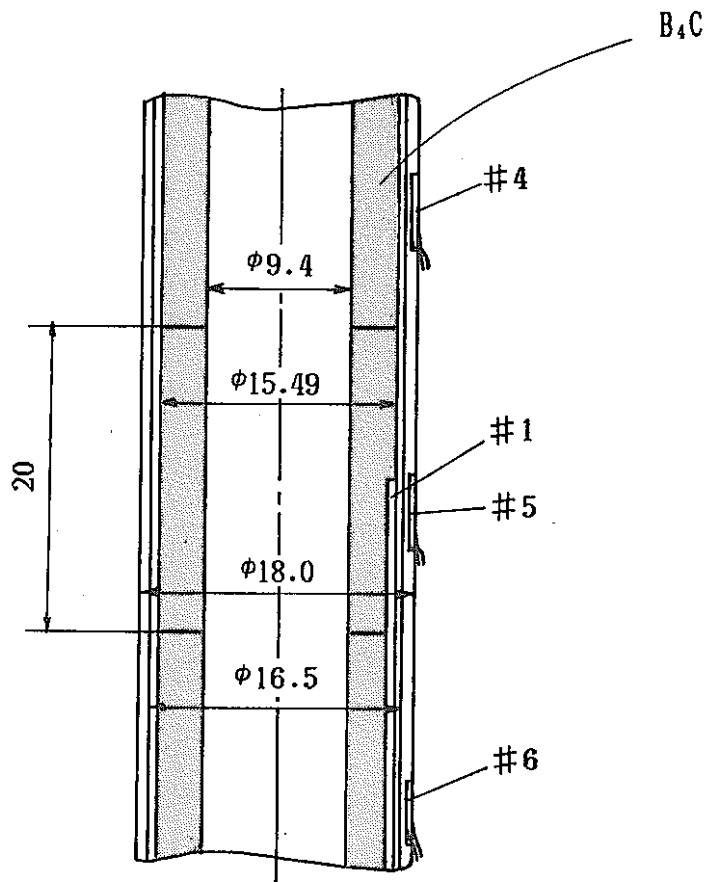
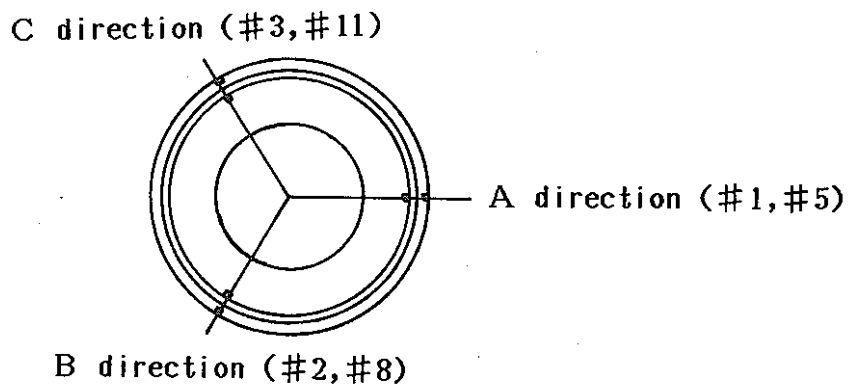


Fig.2-9 Description of the test piece of B₄C annular gap test II



#:Thermocouple number

Fig.2-10 Cross sectional view and thermocouple locations of B₄C annular gap test II

Table 3-1 Change of gap distance by thermal expansion of
B₄C pellet and stainless steel sheath pipe

Run No.		A kirection	B direction	C direction
801	δ_1	0.510	0.510	0.510
	δ_2	0.510	0.510	0.510
802	δ_1	0.517	0.517	0.517
	δ_2	0.516	0.516	0.516
803	δ_1	0.524	0.524	0.524
	δ_2	0.523	0.522	0.523
804	δ_1	0.532	0.531	0.531
	δ_2	0.530	0.530	0.529
805	δ_1	0.541	0.541	0.541
	δ_2	0.539	0.538	0.538
806	δ_1	0.550	0.549	0.550
	δ_2	0.547	0.546	0.547
807	δ_1	0.557	0.556	0.556
	δ_2	0.554	0.553	0.553
808	δ_1	0.563	0.563	0.563
	δ_2	0.560	0.559	0.559

δ_1 (mm) : In case of free axial expansion

δ_2 (mm) : In case of no axial expansion

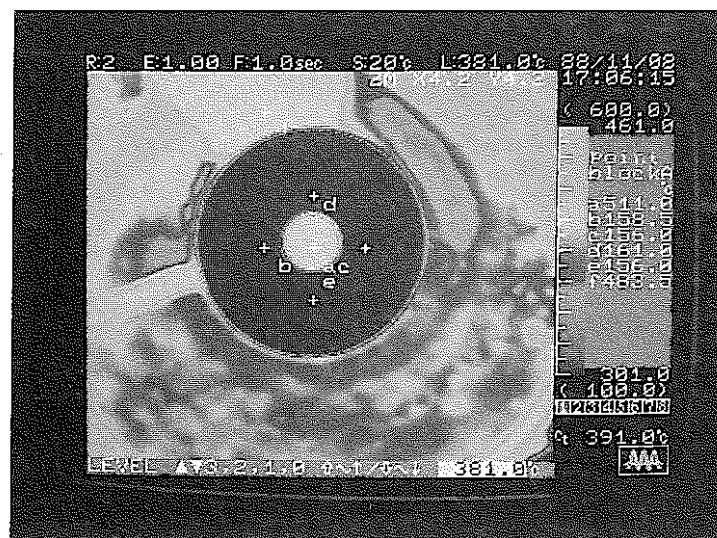
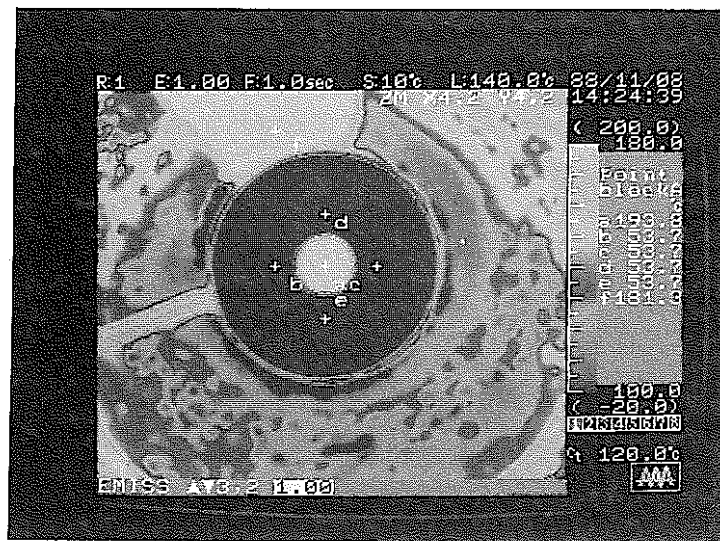


Photo 3-2 Thermoview of thermo tracer for SUSE1 specimen

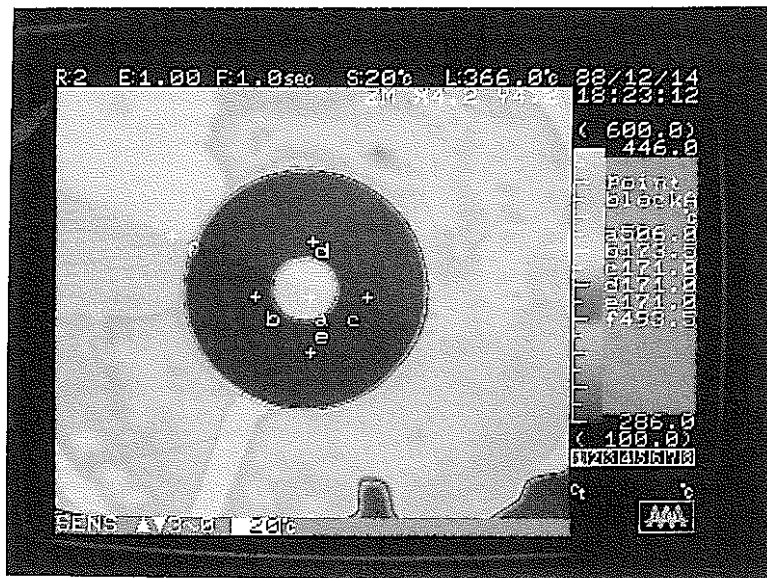
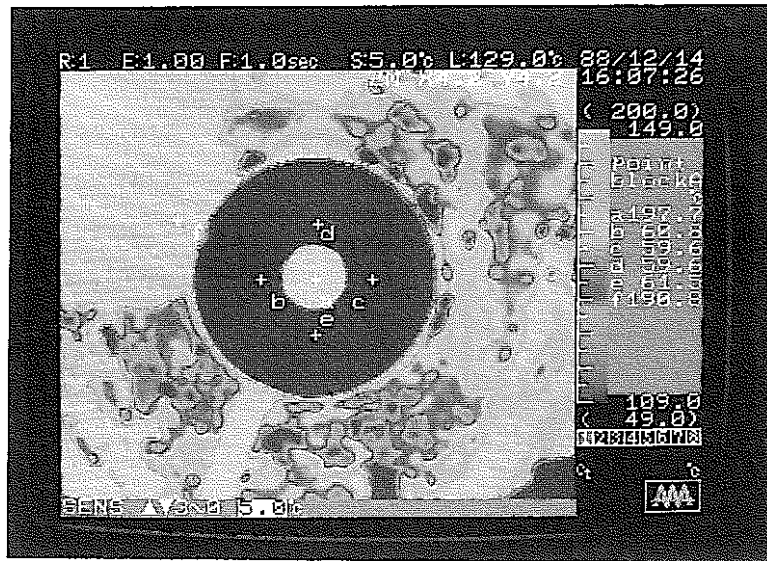


Photo 3-3 Thermoview of thermo tracer for SUSE2 specimen

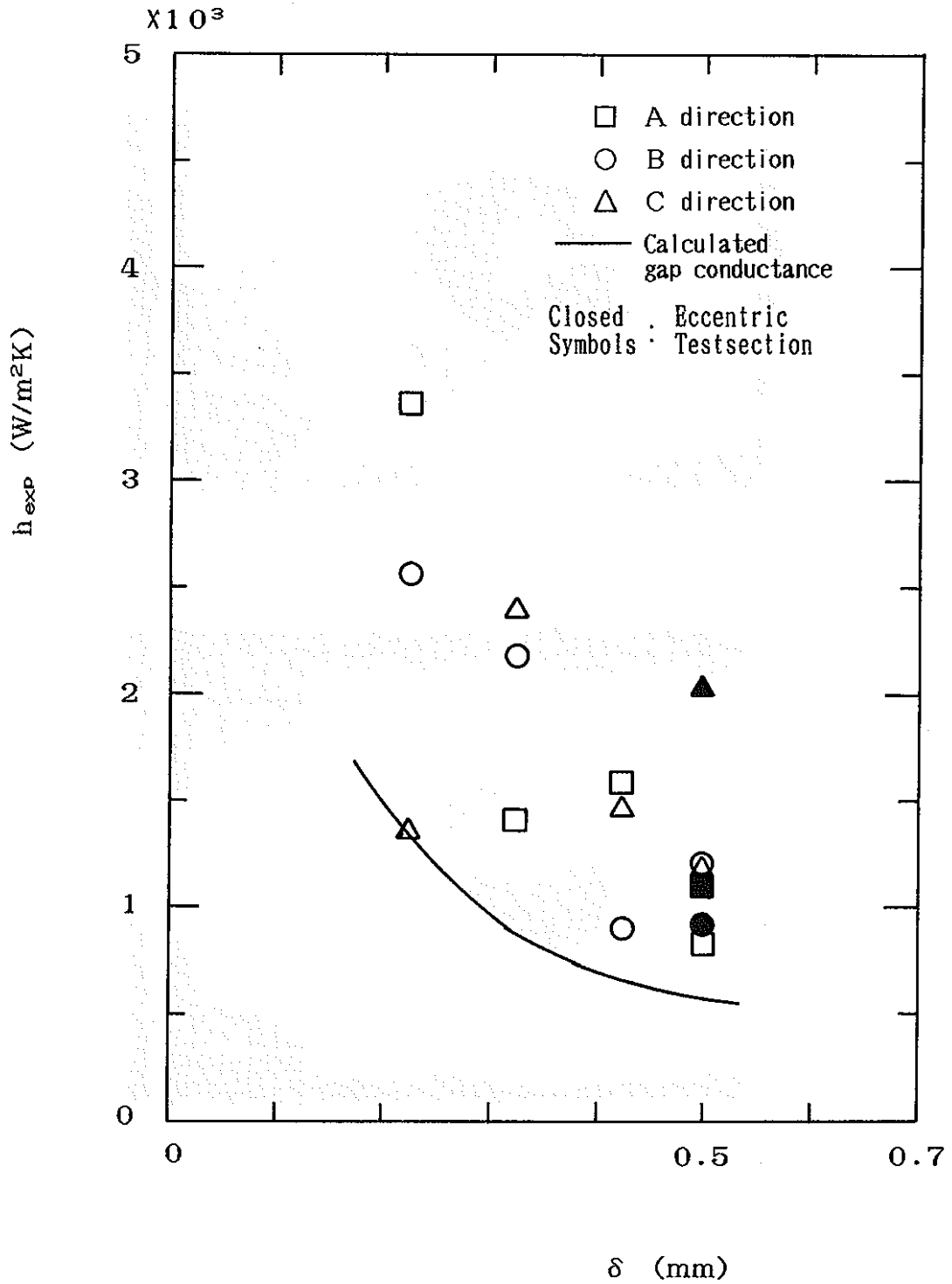


Fig.3-1 Relation between measured gap conductance and average gap width in cold condition (Run Nos. 111,207,311,411,513)

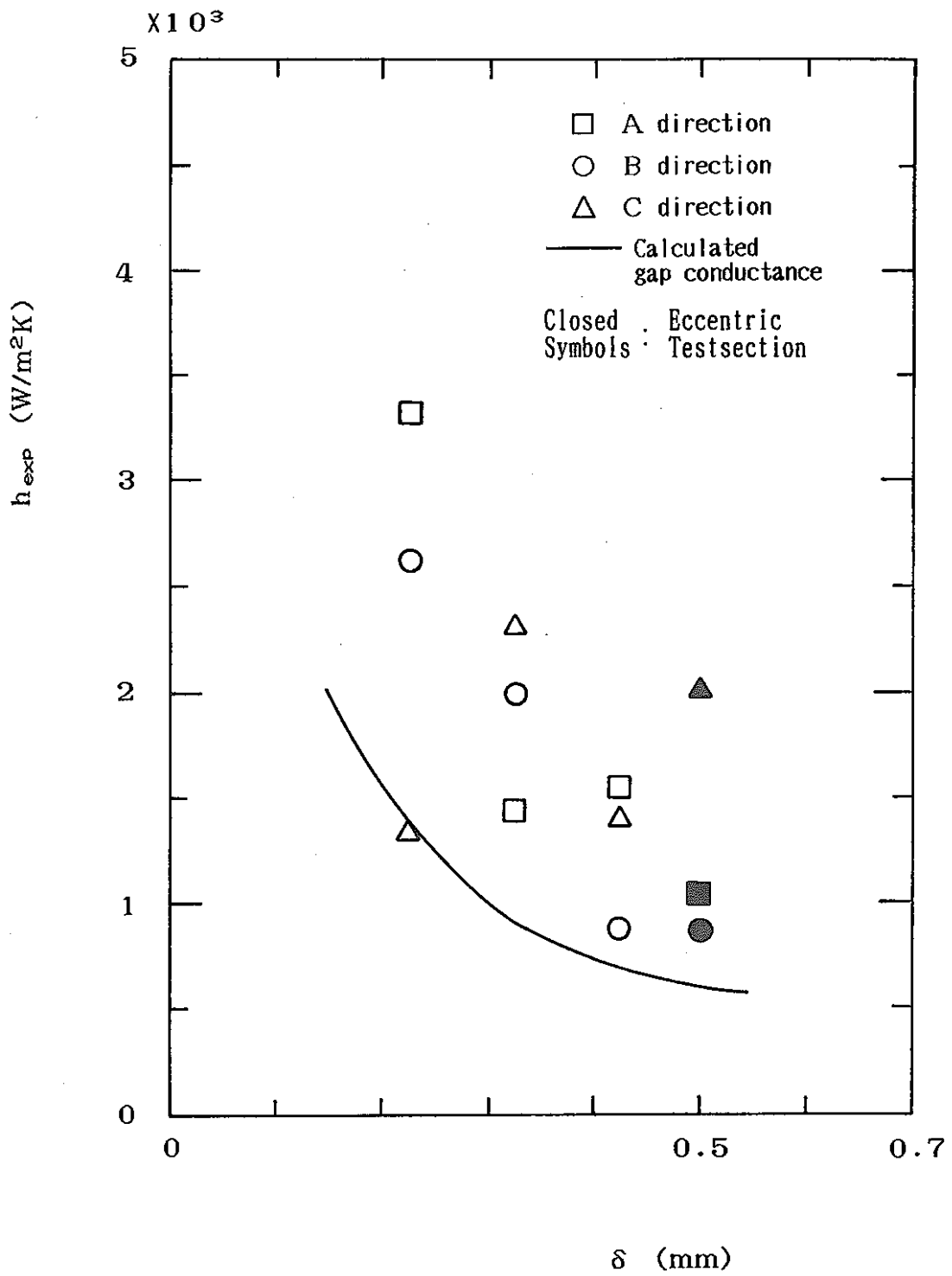


Fig.3-2 Relation between measured gap conductance and average gap width in cold condition (Run Nos. 112,213,313,515)

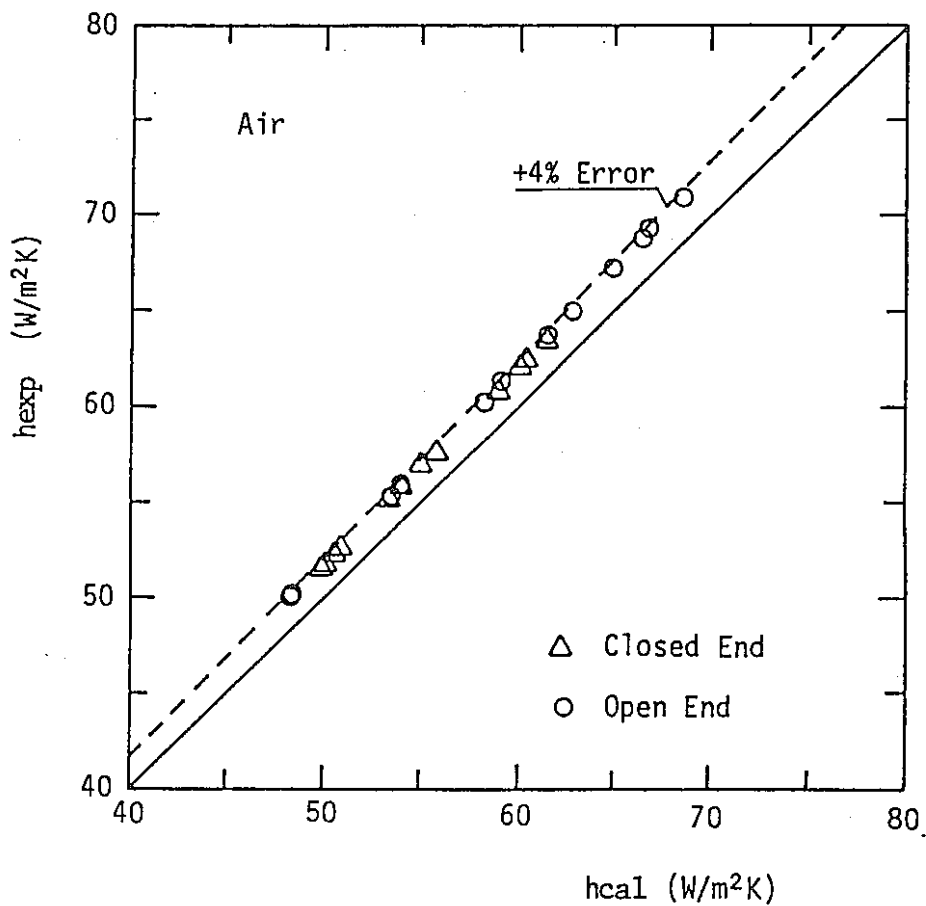


Fig.3-3 Comparison of experimental gap conductances with calculated ones in the annular gap test using air gap gas

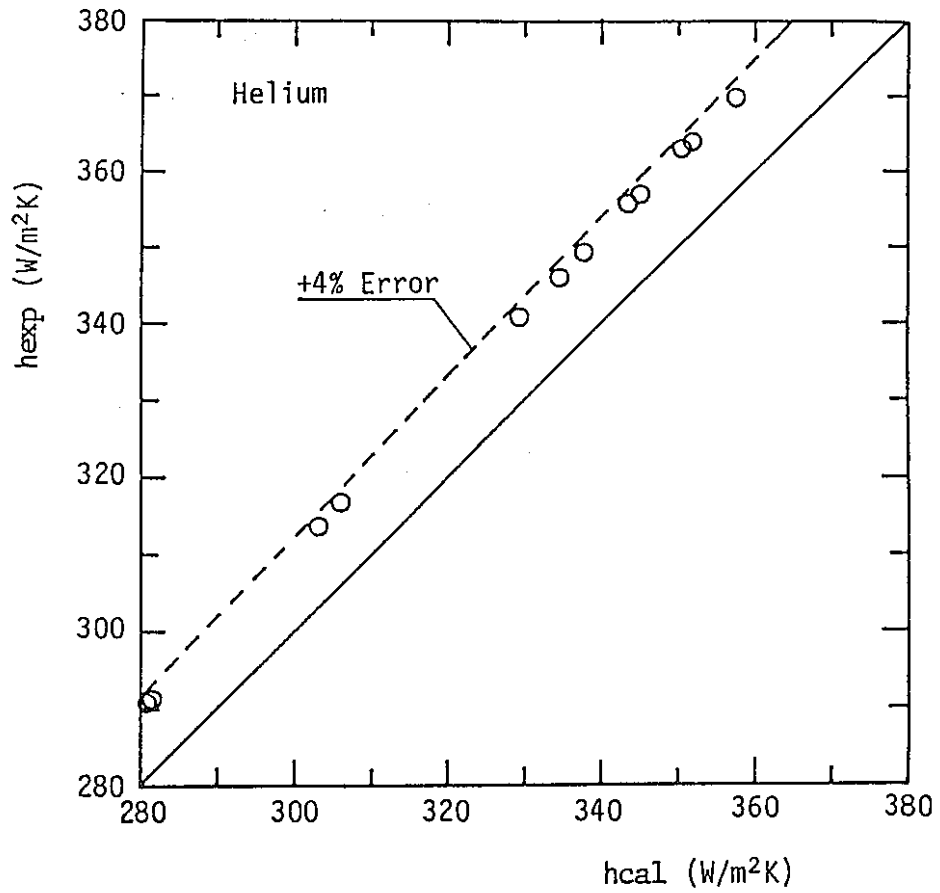


Fig.3-4 Comparison of experimental gap conductances with calculated ones in the annular gap test using helium gap gas

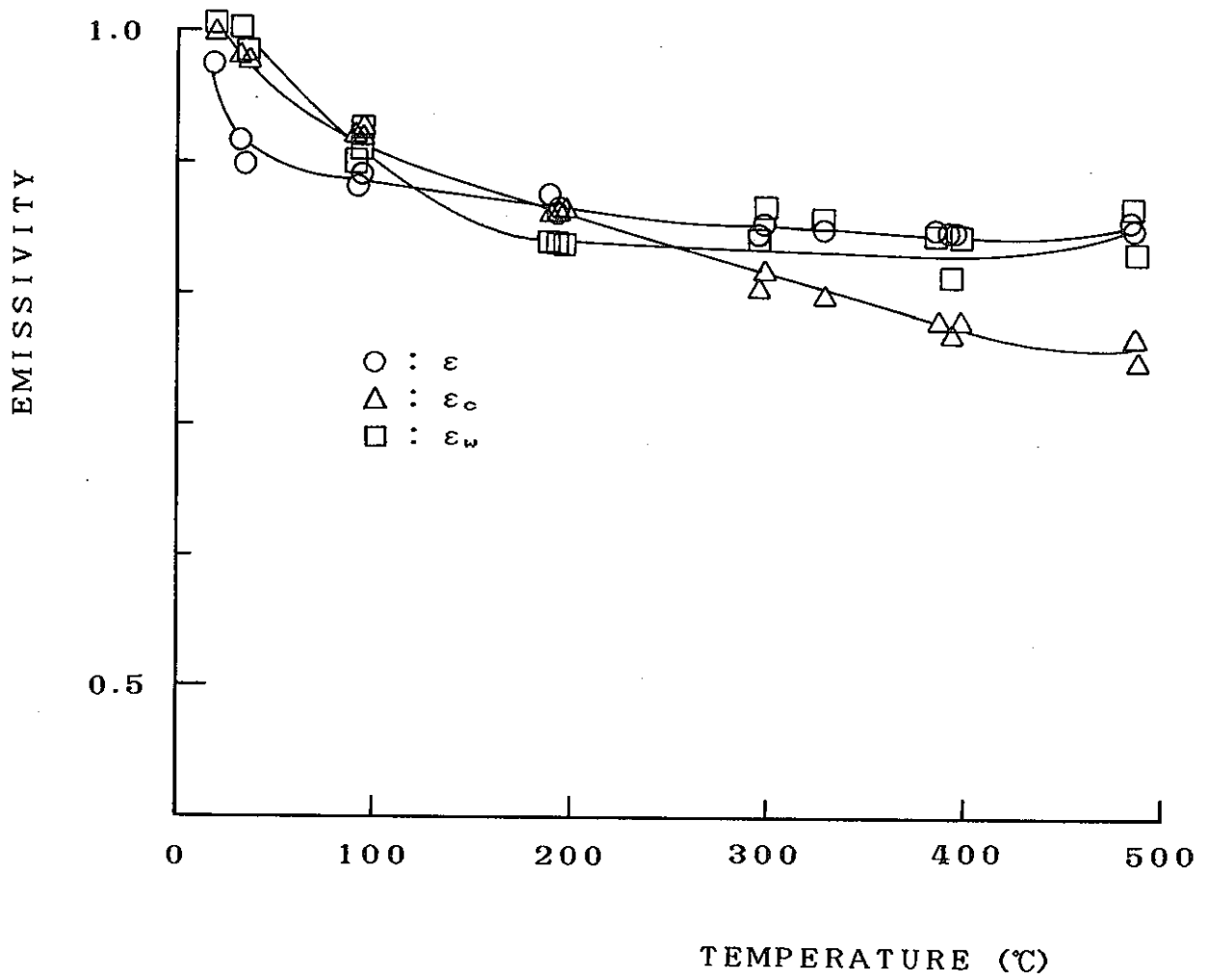


Fig.3-5 Emissivity of B₄C for different temperature

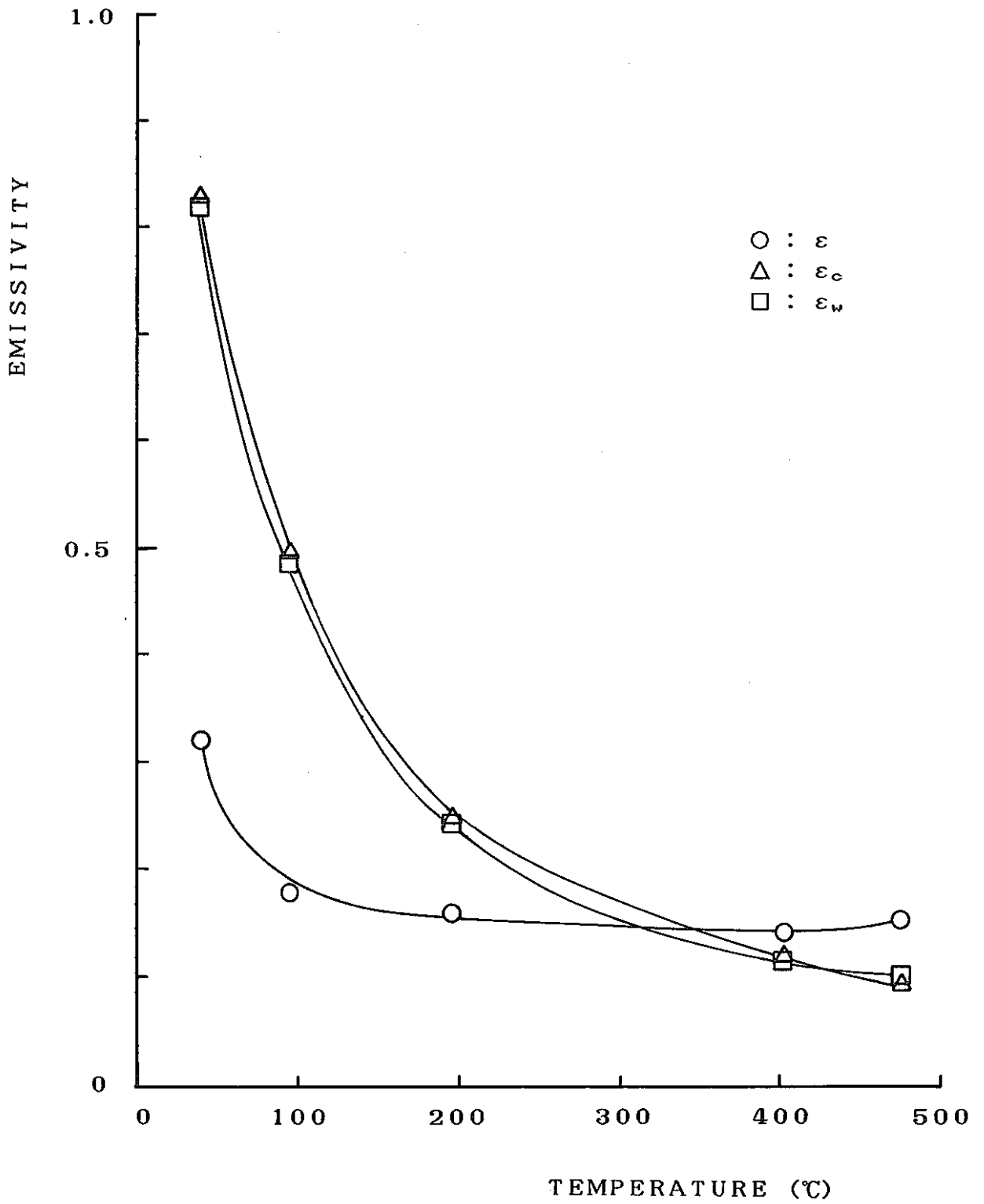


Fig.3-6 Emissivity of stainless steel (Specimen SUSE1) for different temperature (鏡面状態)

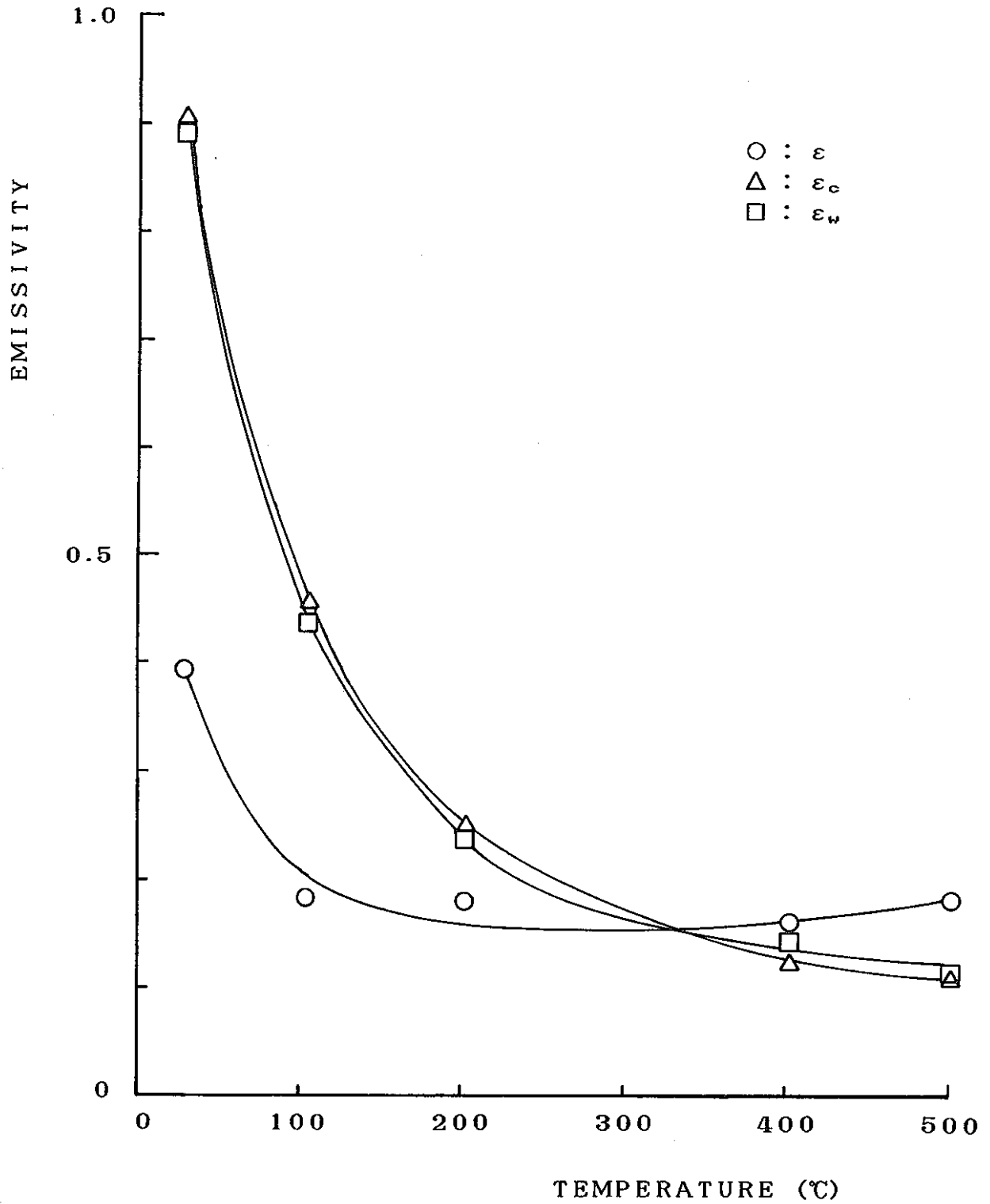


Fig.3-7 Emissivity of stainless steel (Specimen SUSE2) for different temperature (研磨面)

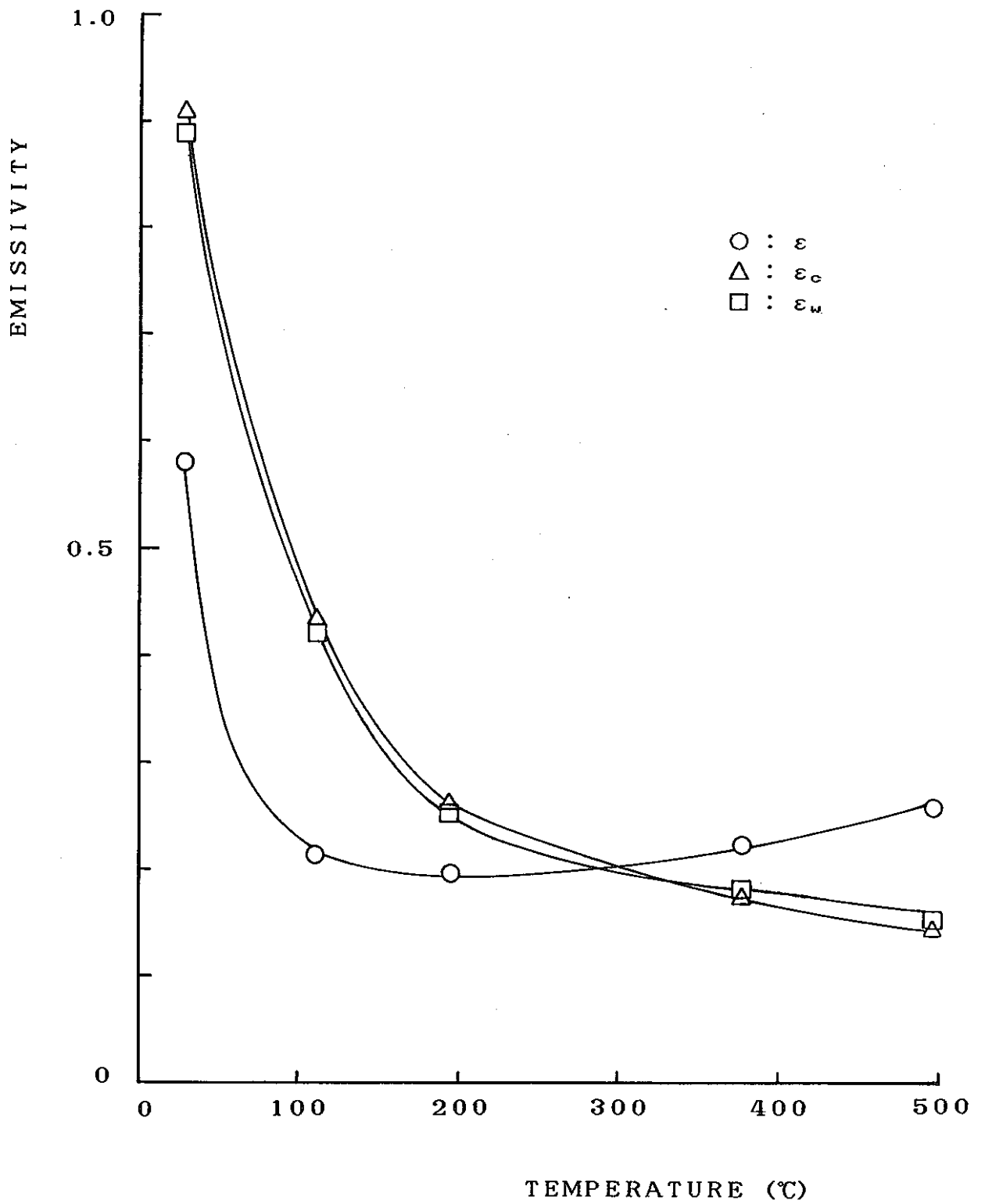


Fig.3-8 Emissivity of stainless steel (Specimen SUSE3) for different temperature (酸化面)

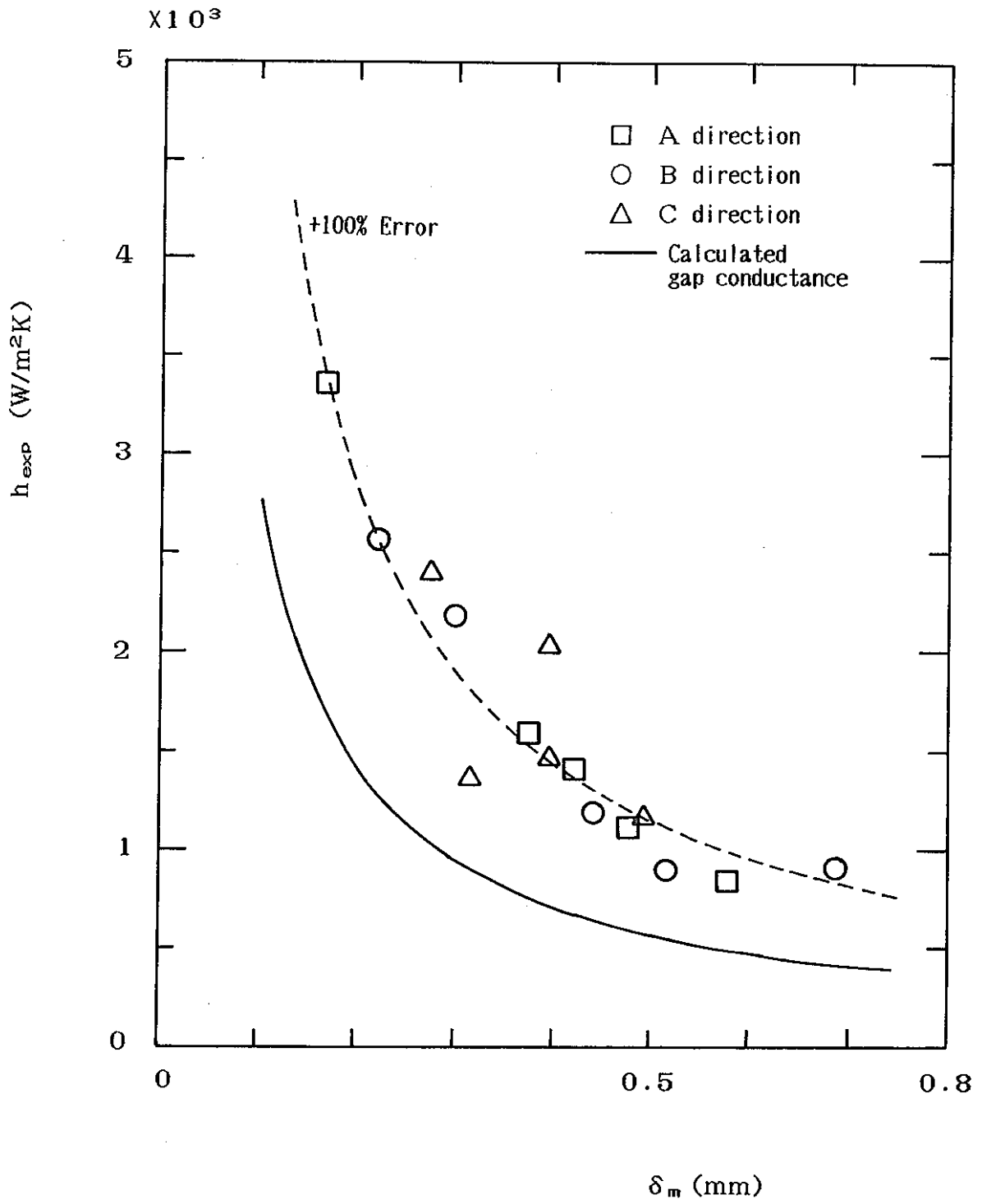


Fig.3-9 Gap conductance versus modified gap width in hot condition (Run Nos. 111,207,311,411,513)

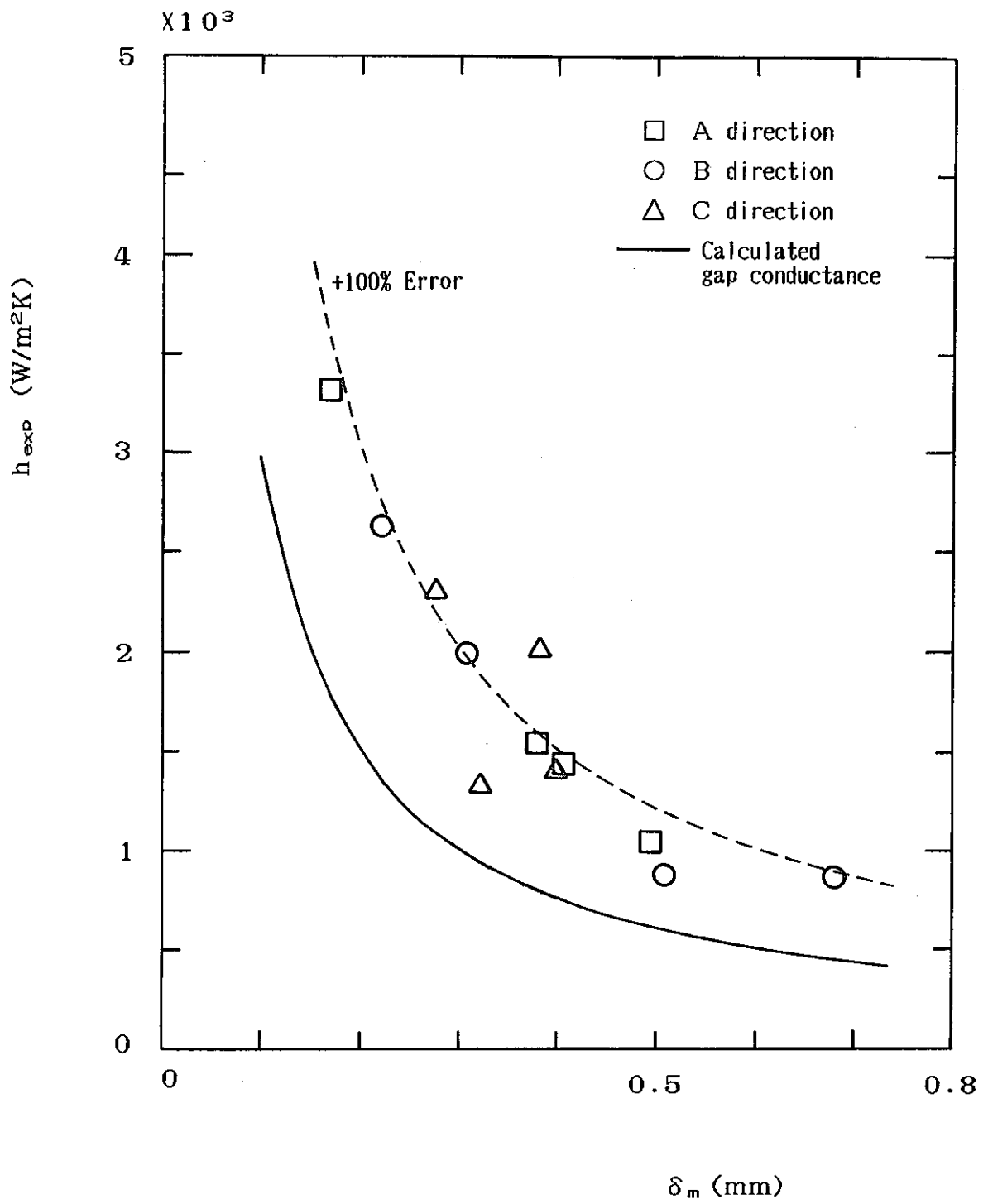


Fig.3-10 Gap conductance versus modified gap width in hot condition (Run Nos. 112,213,313,515)

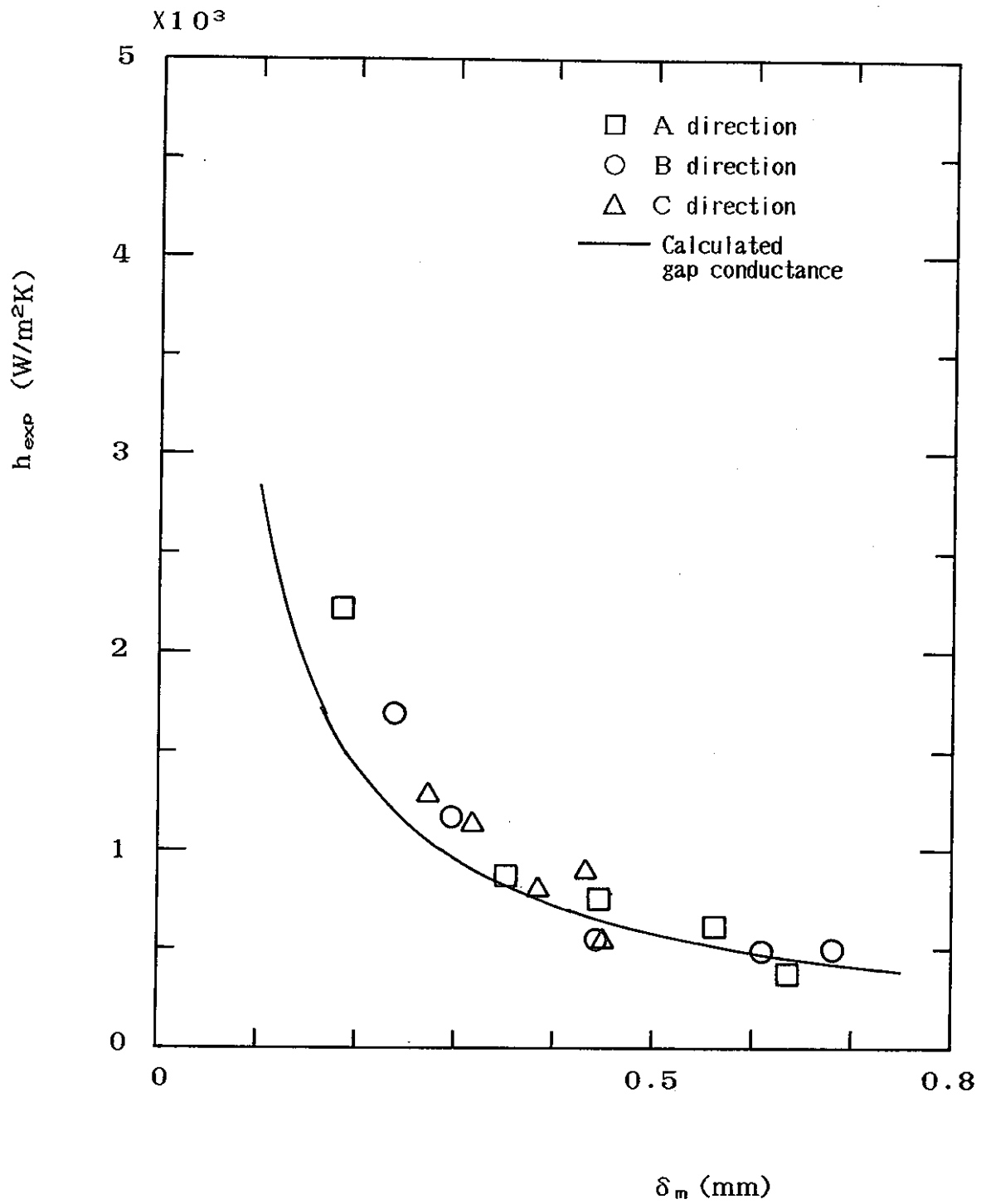


Fig.3-11 Gap conductance considering axial heat removal versus modified gap width in hot condition (Run Nos. 111,207, 311,411,513)

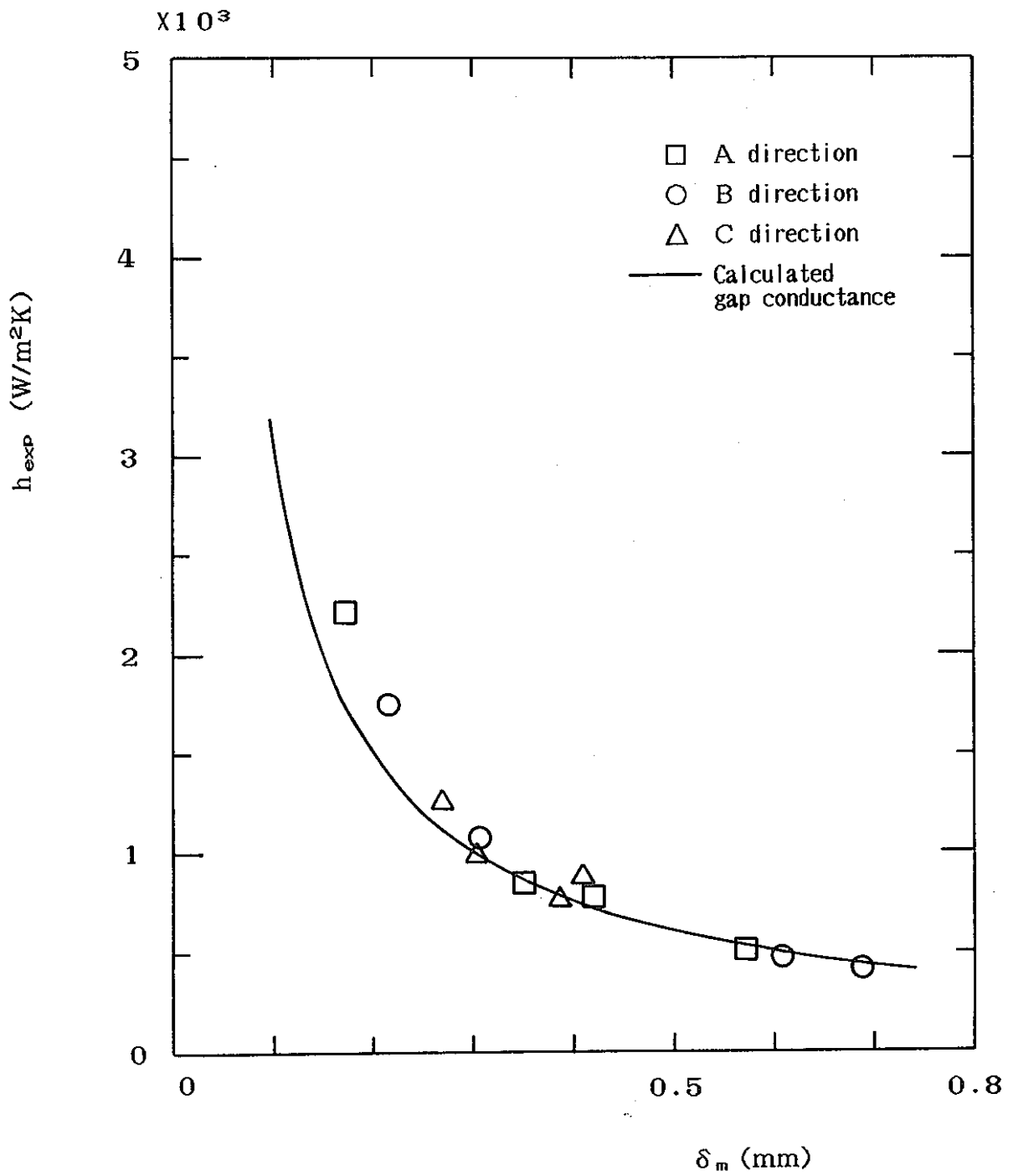


Fig.3-12 Gap conductance considering axial heat removal versus modified gap width in hot condition (Run Nos. 112,213, 313,515)

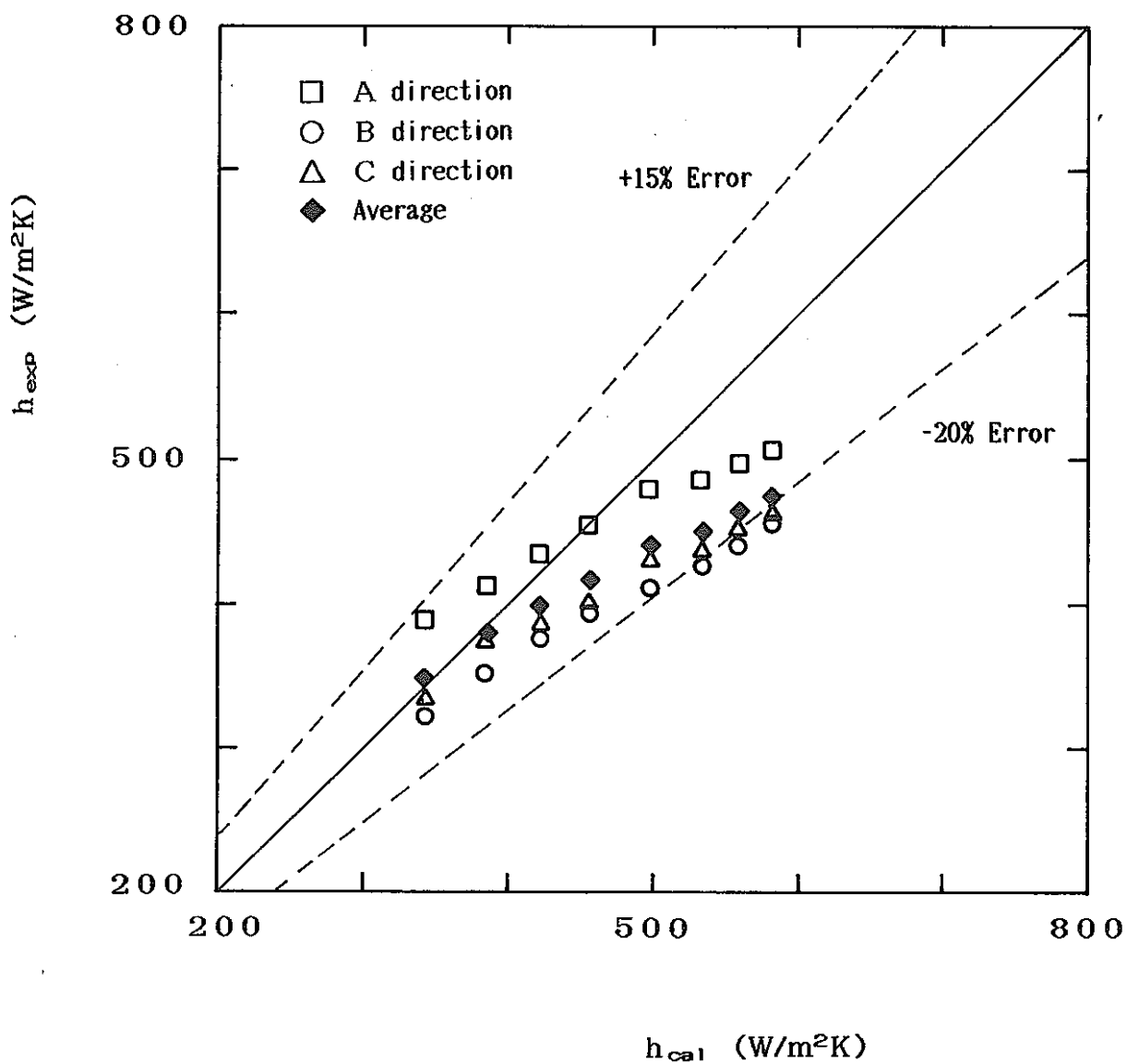


Fig.3-13 Comparison of measured gap conductance with calculated ones

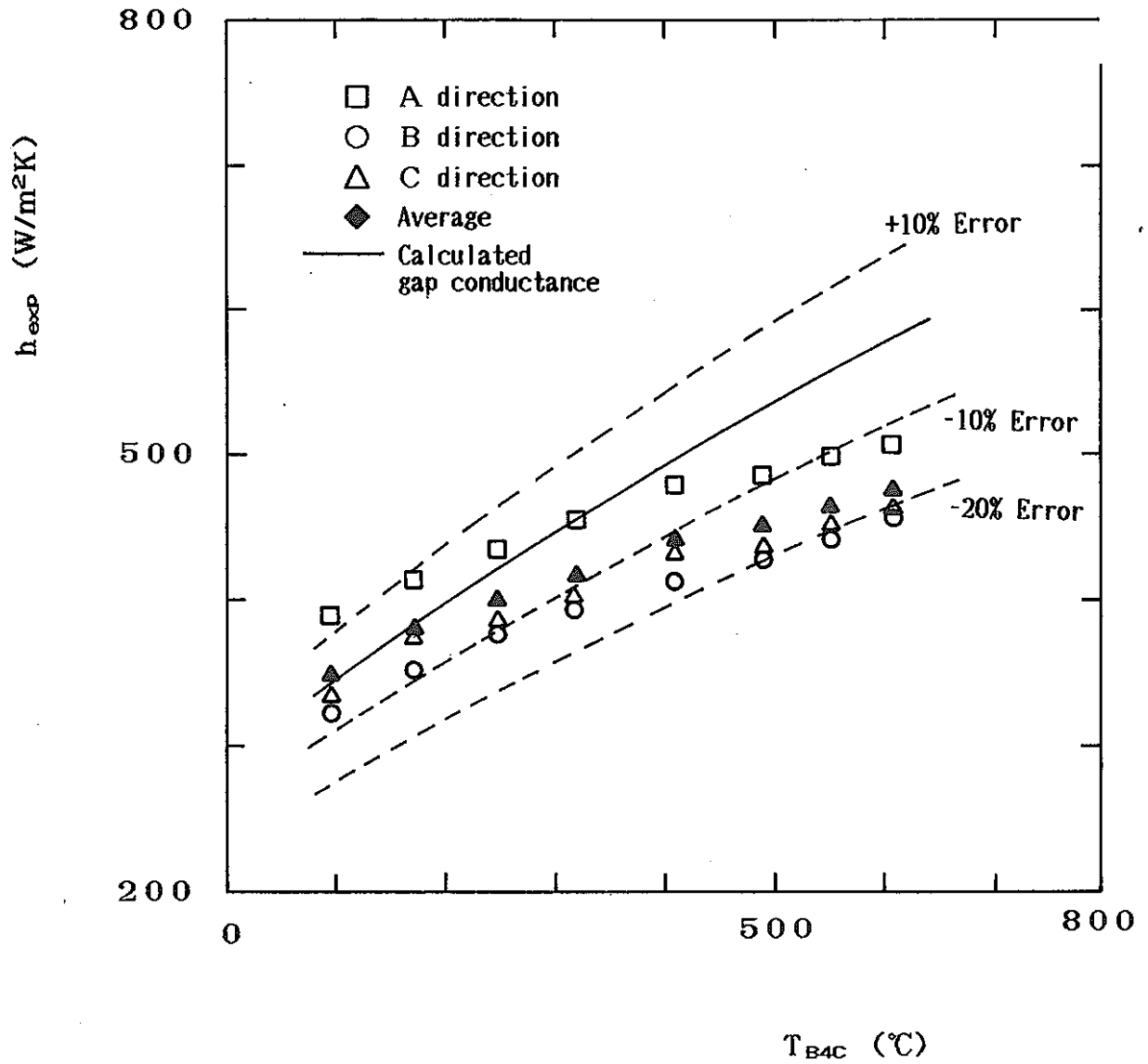


Fig.3-14 Gap conductance versus B₄C pellet surface temperature

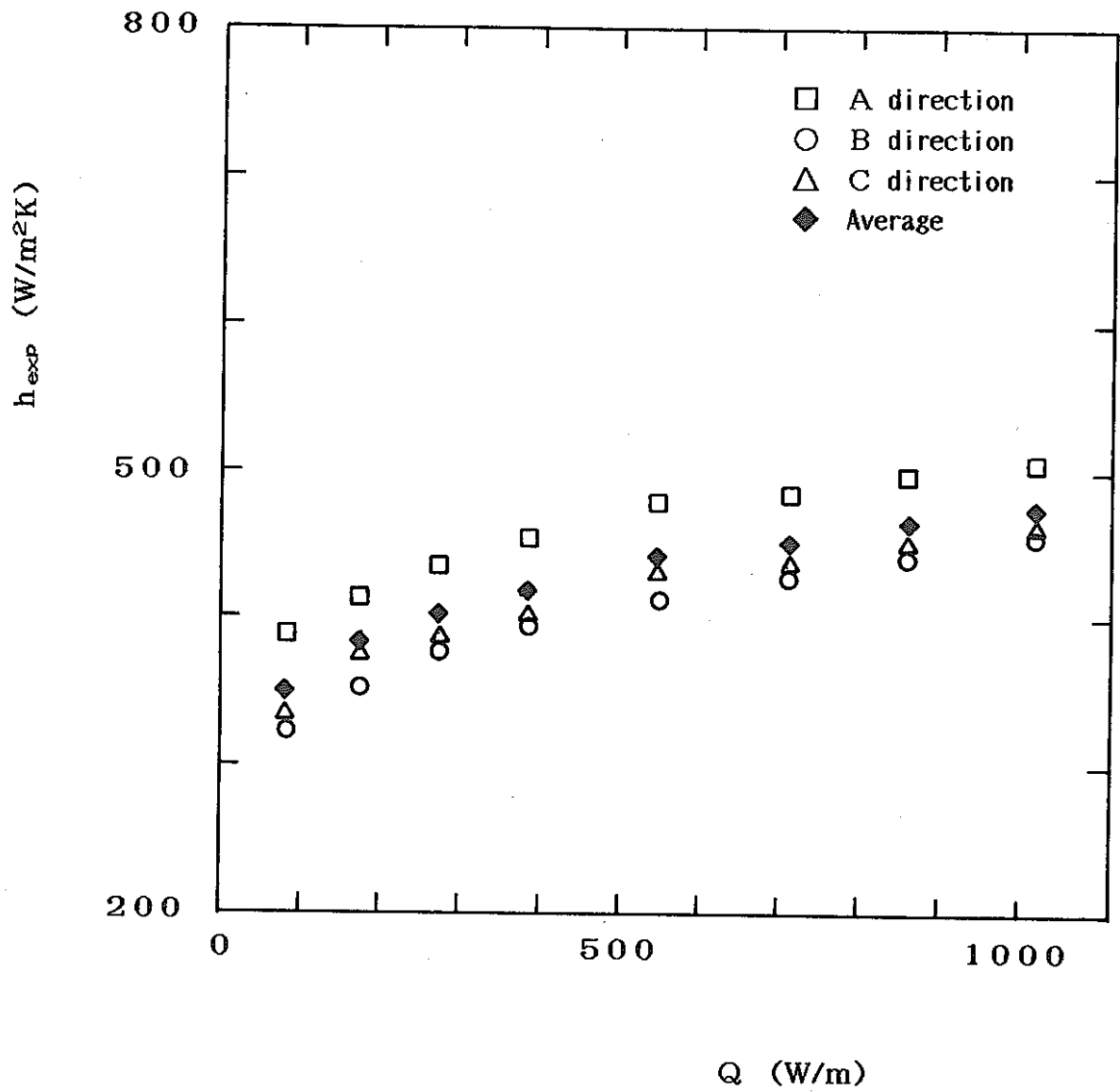


Fig.3-15 Gap conductance versus linear heat rate

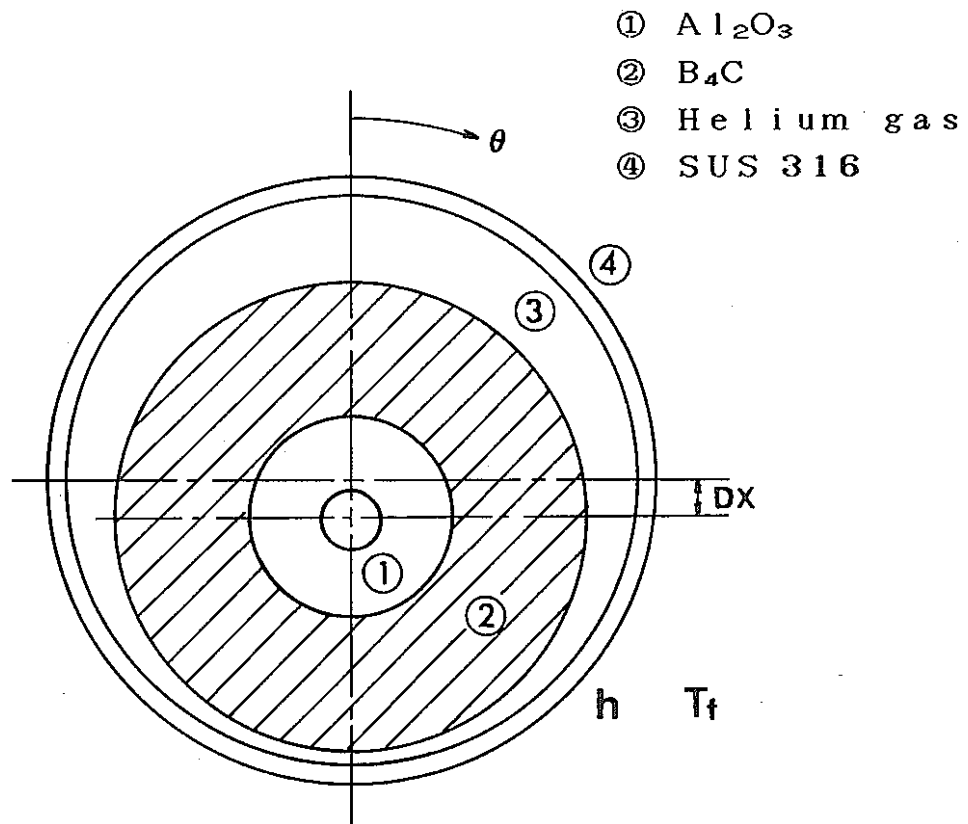


Fig.3-16 Calculation model for eccentric effect of B_4C pellet on circumferential heat flux profile

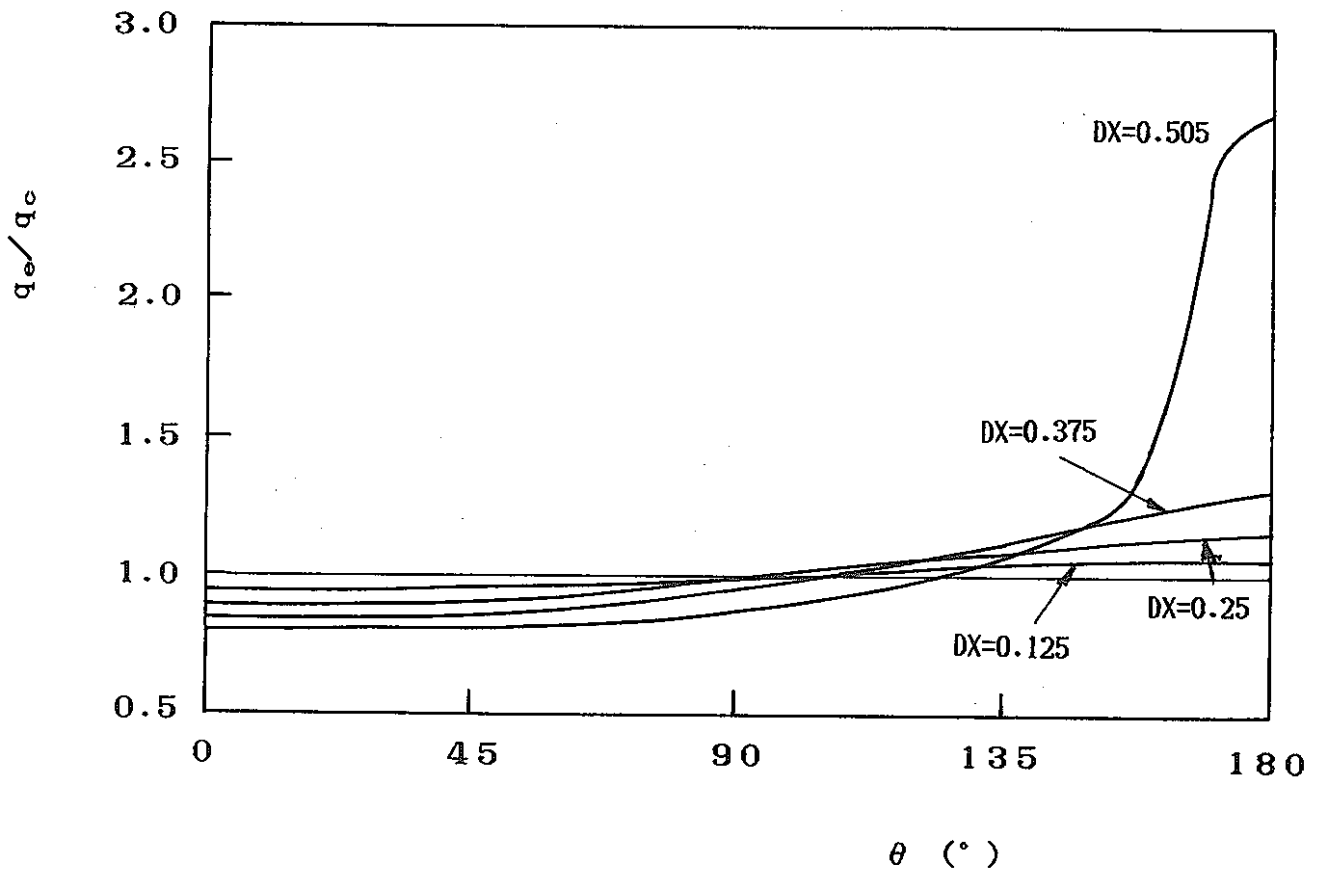


Fig.3-17 Circumferential heat flux profile due to eccentric effect of B_4C pellet

付録 1 実験データと計算値の一覧表

Table A. 1 - 1 Measured temperature and gap conductance of the
B₄C pellet test 1

Run No.	111	112	207	213	311	313
T 1 [°C]	599.1	626.1	457.6	527.3	531.7	581.6
T 2 [°C]	595.8	622.1	454.8	524.8	534.9	585.1
T 3 [°C]	601.0	627.9	455.2	525.1	533.8	584.2
T 4 [°C]	631.5	659.7	477.5	551.8	560.7	615.2
T 5 [°C]	636.4	665.5	476.8	550.0	554.0	606.2
T 6 [°C]	626.7	655.1	474.7	548.1	556.8	609.0
T 7 [°C]	548.6	572.5	444.0	508.7	493.5	541.1
T 8 [°C]	604.1	634.2	426.9	496.9	513.1	560.2
T 9 [°C]	583.9	610.3	435.7	502.8	507.1	554.1
T 10 [°C]	575.8	601.6	439.2	506.3	501.1	548.3
T 11 [°C]	572.5	597.9	440.9	508.5	507.9	555.3
T f [°C]	388.2	411.5	250.5	301.6	347.6	380.0
Q a (M/m)	2317	2382	1463	1671	1824	1993
Q b (M/m)	2381	2498	1571	1720	1457	1541
Q c (M/m)	1870	1927	1566	1761	1772	1908
h a (M/m 2K)	3368	3321	1412	1439	1592	1552
h b (M/m 2K)	2568	2630	2184	1998	905	877
h c (M/m 2K)	1362	1331	2393	2303	1463	1407
δ e a (mm)	0.169	0.170	0.416	0.402	0.377	0.380
δ e b (mm)	0.223	0.221	0.297	0.304	0.518	0.509
δ e c (mm)	0.318	0.323	0.272	0.272	0.397	0.400

Table A. 1 - 1 Continued

Run No.	411	513	515
T 1 (°C)	527.1	562.4	601.0
T 2 (°C)	523.4	562.4	601.1
T 3 (°C)	524.3	560.7	598.6
T 4 (°C)	549.8	590.5	631.0
T 5 (°C)	545.4	580.9	621.1
T 6 (°C)	548.1	599.3	638.6
T 7 (°C)	472.5	510.3	545.8
T 8 (°C)	494.1	534.1	569.6
T 9 (°C)	489.6	531.2	566.4
T 10 (°C)	493.5	517.6	553.5
T 11 (°C)	492.3	534.9	571.8
T f (°C)	293.5	302.3	325.6
Q a (M/m)	1475	1632	1706
Q b (M/m)	1683	1937	1956
Q c (M/m)	1774	2389	2460
h a (M/m 2K)	832	1116	1049
h b (M/m 2K)	1205	917	869
h c (M/m 2K)	1187	2034	2012
$\delta e a$ (mm)	0.575	0.484	0.500
$\delta e b$ (mm)	0.458	0.695	0.687
$\delta e c$ (mm)	0.490	0.400	0.387

Table A. 1 - 2 Measured temperature, gap conductance, and Rayleigh number for sheath heater tests using air gap gas

Run No.	Air1	Air2	Air3	Air4	Air5	Air6
T 1 [°C]	37.2	67.9	117.3	42.1	80.2	127.4
T 2 [°C]	35.3	63.1	108.5	40.3	75.6	119.7
T 3 [°C]	34.8	60.8	103.4	39.8	72.7	113.5
T 4 [°C]	31.2	51.2	86.1	36.3	63.9	98.3
T 5 [°C]	33.2	56.7	96.1	38.3	68.9	107.2
T 6 [°C]	33.3	56.9	96.6	38.4	69.5	108.0
T 7 [°C]	33.4	56.9	96.5	38.5	69.4	107.8
T C [°C]	17.4	17.2	17.4	17.1	16.9	16.8
Q i n (W/m)	12.7	39.1	80.4	13.2	39.9	79.0
h e 1 (W/m ² K)	51.9	55.9	62.2	52.6	57.6	63.7
h e 2 (W/m ² K)	51.6	55.1	60.9	52.3	56.9	62.5
h c 1 (W/m ² K)	50.2	54.0	60.1	50.9	55.7	61.5
h c 2 (W/m ² K)	49.9	53.3	58.8	50.6	55.0	60.4
R a 1	0.047	0.090	0.096	0.042	0.076	0.081
R a 2	0.050	0.102	0.114	0.046	0.084	0.095

Table A. 1 - 3 Measured temperature, gap conductance, and Rayleigh number for sheath heater tests using air gap gas with open end condition

Run No.	Air7	Air8	Air9	Air10	Air11	Air12
T 1 [°C]	24.9	68.3	110.0	140.8	170.9	188.3
T 2 [°C]	24.0	64.2	102.9	131.8	160.3	176.7
T 3 [°C]	21.3	54.4	86.9	110.8	116.5	117.6
T 4 [°C]	21.2	52.3	82.1	104.6	127.3	139.9
T 5 [°C]	22.3	56.6	89.5	114.3	139.0	153.1
T 6 [°C]	22.0	56.1	89.0	113.9	137.6	151.9
T 7 [°C]	22.5	57.3	90.8	115.8	140.6	153.5
T C [°C]	9.6	10.6	10.8	11.2	10.8	10.8
Q i n [W/m]	9.1	41.6	78.3	105.0	141.4	157.5
h e 1 [W/m ² K]	50.2	55.9	61.2	65.1	68.8	70.9
h e 2 [W/m ² K]	50.0	55.3	60.2	63.8	67.3	69.2
h c 1 [W/m ² K]	48.5	54.0	59.2	62.9	66.5	68.5
h c 2 [W/m ² K]	48.3	53.4	58.2	61.7	65.0	66.9
R a 1	0.037	0.094	0.101	0.094	0.084	0.079
R a 2	0.040	0.100	0.112	0.108	0.098	0.094

Table A. 1 - 4 Measured temperature, gap conductance, and Rayleigh number for sheath heater tests using helium gap gas

Run No.	He 1	He 2	He 3	He 4	He 5	He 6
T 1 [°C]	24.1	67.8	120.4	138.2	153.3	164.1
T 2 [°C]	23.0	63.2	112.1	128.7	143.0	153.1
T 3 [°C]	22.5	60.1	105.3	120.0	133.5	142.9
T 4 [°C]	20.6	51.9	90.2	102.6	113.8	122.9
T 5 [°C]	21.8	57.2	99.8	113.6	126.5	135.8
T 6 [°C]	21.5	56.7	99.2	113.2	125.9	134.6
T 7 [°C]	21.4	56.0	98.0	111.9	124.5	133.6
T C [°C]	10.2	11.2	12.6	12.6	13.0	14.0
Q i n [W/m]	8.8	39.9	84.3	105.2	117.7	129.5
h e 1 [W/m ² K]	291.3	316.7	346.1	355.5	363.8	369.7
h e 2 [W/m ² K]	290.6	313.6	340.6	349.4	357.0	362.7
h c 1 [W/m ² K]	281.7	306.2	334.6	343.7	351.8	357.5
h c 2 [W/m ² K]	280.9	303.2	329.3	337.8	345.2	350.7
R a 1 *	0.540	1.429	1.535	1.527	1.434	1.360
R a 2 *	0.574	1.613	1.811	1.820	1.767	1.649

* Real Rayleigh number $Ra = Ra * x0.001$

Table A. 1 - 5 Experimental data of measurement of emissivity of B₄C

	T _w	T _c	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Temp (°C) ε	21.1	22.0	22.4 0.96	22.4 0.99	22.2 0.99	22.2 0.99
Temp (°C) ε	92.1	90.0	83.2 0.80	82.7 0.78	82.5 0.78	82.5 0.78
Temp (°C) ε	139.9	191.0	174.5 0.87	137.7 0.86	173.5 0.86	173.2 0.86
Temp (°C) ε	33.4	36.5	35.1 0.92	34.7 0.91	34.9 0.91	35.1 0.92
Temp (°C) ε	95.8	95.7	88.2 0.88	87.7 0.88	87.8 0.88	88.1 0.88
Temp (°C) ε	190.1	187.3	170.6 0.88	170.1 0.87	170.0 0.87	170.6 0.88
Temp (°C) ε	297.0	304.0	273.7 0.85	272.7 0.84	272.2 0.84	273.5 0.85
Temp (°C) ε	392.6	430.0	360.0 0.85	359.2 0.8	352.8 0.84	360.7 0.85
Temp (°C) ε	487.7	508.6	360.0 0.85	453.5 0.8	450.8 0.84	454.6 0.85
Temp (°C) ε	36.6	37.3	452.7 0.91	35.4 0.89	35.4 0.89	35.6 0.90
Temp (°C) ε	94.0	92.7	85.5 0.89	85.3 0.88	85.3 0.90	85.5 0.89

Table A. 1 - 5 Experimental data of measurement of emissivity of B₄C
(Continued)

	T _w	T _c	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Temp (°C) ε	195.4	193.0	175.7 0.88	175.0 0.87	175.1 0.87	175.7 0.88
Temp (°C) ε	298.6	307.7	279.3 0.86	277.2 0.85	277.2 0.85	279.0 0.86
Temp (°C) ε	326.6	337.1	304.1 0.86	302.6 0.85	302.2 0.85	303.3 0.85
Temp (°C) ε	385.6	399.8	360.1 0.85	359.0 0.85	357.8 0.85	360.1 0.85
Temp (°C) ε	397.7	412.2	371.0 0.86	370.6 0.85	369.1 0.85	371.3 0.86
Temp (°C) ε	484.9	508.2	458.0 0.86	457.6 0.86	457.6 0.85	458.0 0.86
Temp (°C)	487.1	511.2	461.5 0.86	461.0 0.86	459.0 0.85	461.5 0.86

Table A. 1 - 6 Experimental data of measurement of emissivity of stainless steel (Specimen:SUSE1)

	T_w	T_c	T_1	T_2	T_3	T_4
Temp (°C) ε	19.5	19.0	20.8	20.8	20.8	20.8
Temp (°C) ε	40.4	39.5	25.2 0.32	25.2 0.32	25.2 0.32	25.2 0.32
Temp (°C) ε	95.0	93.5	34.5 0.18	34.5 0.18	34.7 0.18	34.5 0.18
Temp (°C) ε	196.4	195.0	57.5 0.16	57.5 0.16	58.7 0.16	57.5 0.16
Temp (°C) ε	402.6	400.5	125.6 0.14	123.0 0.14	127.1 0.14	123.0 0.15
Temp (°C) ε	477.0	498.6	154.7 0.15	152.8 0.15	157.7 0.16	152.5 0.15

Table A. 1-7 Experimental data of measurement of emissivity of stainless steel (Specimen:SUSE2)

	T_w	T_c	T_1	T_2	T_3	T_4
Temp (°C) ϵ	14.5	16.3	17.7	17.7	17.7	17.7
Temp (°C) ϵ	32.3	31.8	20.1 0.34	20.1 0.34	20.1 0.34	20.1 0.34
Temp (°C) ϵ	100.2	97.2	30.8 0.17	30.8 0.17	30.8 0.17	30.8 0.17
Temp (°C) ϵ	198.6	193.8	53.7 0.16	53.7 0.16	53.7 0.16	53.7 0.16
Temp (°C) ϵ	397.8	410.5	125.5 0.14	124.0 0.14	126.7 0.15	123.0 0.14
Temp (°C) ϵ	492.5	511.0	158.5 0.16	156.0 0.15	161.0 0.16	156.0 0.15

Table A. 1 - 8 Experimental data of measurement of emissivity of stainless steel (Specimen:SUSE3)

	T_w	T_c	T_1	T_2	T_3	T_4
Temp (°C) ε	12.5	12.0	14.3	12.8	13.3	14.8
Temp (°C) ε	29.5	28.0	22.1 0.64	20.0 0.53	20.4 0.54	21.6 0.61
Temp (°C) ε	111.7	108.7	37.5 0.22	36.7 0.21	36.7 0.21	36.7 0.21
Temp (°C) ε	194.9	191.2	60.0 0.20	58.2 0.19	58.2 0.19	60.0 0.20
Temp (°C) ε	378.2	386.5	160.2 0.24	142.7 0.20	167.7 0.26	142.7 0.20
Temp (°C) ε	496.3	510.0	210.0 0.26	187.5 0.22	250.0 0.35	180.0 0.20

Table A. 1 - 9 Measured temperature and gap conductance of the
B₄C Pellet test II

Run No.	801	802	803	804	805
T 1 (°C)	96.1	173.3	247.7	319.2	411.2
T 2 (°C)	69.0	173.2	247.5	319.1	411.1
T 3 (°C)	95.8	172.9	247.2	318.8	410.6
T 4 (°C)	93.1	166.7	237.3	304.3	390.0
T 5 (°C)	91.7	164.7	234.8	301.9	387.8
T 6 (°C)	87.4	157.2	224.4	288.8	371.5
T 7 (°C)	92.3	165.6	235.4	302.4	387.3
T 8 (°C)	90.7	163.1	232.6	299.1	383.9
T 9 (°C)	86.0	154.4	220.8	284.3	366.1
T 10 (°C)	91.9	165.2	235.2	302.0	386.6
T 11 (°C)	90.7	163.4	232.7	299.3	384.6
T 12 (°C)	85.9	154.3	220.2	284.0	366.2
T C (°C)	8.6	8.8	8.7	8.8	8.7
Q in (W/m)	82.5	171.7	270.6	379.8	541.5
h a (W/m 2K)	389.4	414.5	435.4	455.6	480.1
h b (W/m 2K)	322.7	352.4	376.5	393.6	412.5
h c (W/m 2K)	335.4	374.9	386.9	403.8	431.7

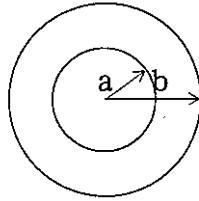
Table A. 1 - 9 Continued

Run No.	806	807	808
T 1 [°C]	492.9	554.2	611.5
T 2 [°C]	492.4	553.5	610.5
T 3 [°C]	492.4	553.7	610.9
T 4 [°C]	464.4	519.4	570.2
T 5 [°C]	462.9	518.9	570.4
T 6 [°C]	444.8	500.7	552.0
T 7 [°C]	461.3	516.2	566.9
T 8 [°C]	458.3	513.6	564.8
T 9 [°C]	438.5	493.8	544.8
T 10 [°C]	460.1	514.8	565.3
T 11 [°C]	459.1	514.9	566.0
T 12 [°C]	438.6	495.1	547.2
T C [°C]	8.9	8.9	8.7
Q in (W/m)	704.3	849.7	1006.6
h a (W/m 2K)	486.9	499.1	507.7
h b (W/m 2K)	427.9	441.1	456.2
h c (W/m 2K)	438.2	453.7	464.4

付録 2 熱膨張によるギャップ幅の変化

円柱座標において、まず温度分布が θ には無関係で、 $\tau = \tau(r, z)$ の場合の応力-ひずみの関係式は

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= 2G \left\{ \frac{1-\nu}{1-2\nu} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} - \beta \tau \\ \sigma_{\theta\theta} &= 2G \left\{ \frac{1-\nu}{1-2\nu} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} - \beta \tau \\ \sigma_{zz} &= 2G \left\{ \frac{1-\nu}{1-2\nu} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \right\} - \beta \tau \\ \sigma_{rz} &= G \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (\text{A. 2-1})$$



- ν : ポアソン比
- σ : 応力
- u : 半径方向の変化
- β : $\frac{\alpha E}{1-2\nu} = (3\lambda + 2\mu)$
- α : 線膨張係数

応力成分によるつりあい方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zr}}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A. 2-2})$$

ここで、式 (A. 2-1) を式 (A. 2-2) に代入すれば

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \\ + \frac{1}{2(1-\nu)} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial z} - \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{\partial \tau}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \frac{\partial u_z}{\partial r} \\ + \frac{1}{2(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{\partial \tau}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A. 2-3})$$

温度変化は、 r のみの関数であるから $\sigma_{zz} = 0$ となり、式 (A. 2-2) のつりあい方程式は

$$\frac{\partial (r \cdot \sigma_{rr})}{\partial r} - \sigma_{\theta\theta} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0$$

上式に式 (A. 2-1) を代入すれば

$$\frac{d^2 u_z}{d z^2} = \frac{d}{d z} (\varepsilon_{zz}) = 0$$

$$\frac{d^2 u_z}{d r^2} + \frac{1}{r} \frac{d u_r}{d r} - \frac{1}{r} \frac{u_r}{r} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{d \tau}{d r}$$

上の第一式より

$$\frac{d u_z}{d z} = \varepsilon_{zz} = \text{CONST} = k_z$$

第二式は、次のように変形できる。

$$\frac{d}{d r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d (r u_r)}{d r} \right\} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{d \tau}{d r}$$

2回積分すれば

$$u_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\alpha}{r} \int_a^r \tau r d r + C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (\text{A. 2-4})$$

上式を式 (A. 2-1) に代入すれば

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{1+\nu} \left(-\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\alpha}{r^2} \int_a^r \tau r d r + \frac{C_1}{1-2\nu} - \frac{C_2}{r^2} \right. \\ \left. + \frac{\nu}{1-2\nu} k_z \right)$$

外力の作用がないから、 $r = a, b$ で $\sigma_{rr} = 0$ より、積分定数 C_1, C_2 を定める。

$$C_1 = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \frac{\alpha}{b^2 - a^2} \int_a^b \tau r d r - \nu k_z$$

$$C_2 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{\alpha a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b \tau r d r \quad (\text{A. 2-5})$$

式 (A. 2-1) から

$$\therefore \sigma_{rr} = \frac{\alpha E}{1+\nu} \left\{ -\frac{1}{r^2} \int_a^r \tau r d r + \frac{r^2 - a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \int_a^b \tau r d r \right\}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{1}{r^2} \int_a^r \tau r d r + \frac{r^2 + a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \int_a^b \tau r d r - \tau \right)$$

$$\sigma_{zz} = k_z E - \frac{\alpha E \tau}{1-\nu} + \frac{2\nu \alpha E}{(1-\nu)(b^2 - a^2)} \int_a^b \tau r d r \quad (\text{A. 2-6})$$

外力の作用がない時には、軸方向の応力による力のつりあいより、

$$2 \pi \int_a^b \sigma_{zz} r dr = 0 \quad (\text{A. 2-7})$$

式 (A. 2-6) を式 (A. 2-7) に代入すれば

$$k_z = \frac{2 \alpha}{b^2 - a^2} \int_a^b \tau r dr \quad (\text{A. 2-8})$$

$$\therefore \sigma_{zz} = \frac{E \alpha}{(1-\nu)} \left(\frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b \tau r dr - \tau \right) \quad (\text{A. 2-9})$$

軸方向の変位がないとき、すなわち $k_z = 0$ となる場合には、式 (A. 2-6) より $k_z = 0$ とおくことにより、 σ_{zz} の形は式 (3.1.7) の右辺第一項 ν 倍となる。

式 (A. 2-8) の k_z の値を代入すれば、

$$C_1 = \frac{1-3\nu}{1-\nu} \frac{\alpha}{b^2 - a^2} \int_a^b \tau r dr \quad (\text{A. 2-10})$$

となる。

B₄C に対して線膨張係数 $\alpha = 5.0 \times 10^{-6}$ ⁽¹¹⁾, ポアッソン比 $\nu = 0.16$ を用いた。

ステンレス被覆管の熱膨張後の内径は、管が薄肉円管として、以下の式で計算した。 ⁽¹²⁾

$$\Delta L/L = -0.358 + 9.472 \times 10^{-4} T + 1.169 \times 10^{-6} T^2 - 4.586 \times 10^{-10} T^3$$

$$D_{2hot} = (L + \Delta L) / \pi$$

ここで、 $L = \pi D_{2cold}$, ΔL は周方向の伸びを示す。

付録 3 物性値について

計算に用いた物性値の近似相関式を以下に示す。ここで、熱伝導率 λ はW/mK, 動粘性係数 ν は m^2/s , 温度 T はKの単位を持つ, また, B_4C とステンレス304の熱伝導率は実測した値から求めた近似相関式である。

1. 気体

(1) ヘリウム

$$\lambda = 3.366 \times 10^{-3} T^{0.668} \quad (13)$$

$$\nu = -21.69 \times 10^{-6} + 0.2516 \times 10^{-6} T + 7.981 \times 10^{-10} T^2 - 6.938 \times 10^{-14} T^3 \quad (14)$$

$$Pr = 0.6905 - 4.477 \times 10^{-5} T \quad (14)$$

(2) 空気

$$\lambda = 1.45 \times 10^{-4} + 9.632 \times 10^{-5} T - 3.167 \times 10^{-8} T^2 \quad (14)$$

$$\nu = -4.482 \times 10^{-5} + 4.136 \times 10^{-8} T + 9.288 \times 10^{-11} T^2 \quad (14)$$

$$Pr = 0.8157 - 4.668 \times 10^{-4} T + 4.089 \times 10^{-7} T^2 \quad (14)$$

2. 固体

(1) B_4C

$$\lambda = 24.21 - 0.009433 T + 3.836 \times 10^{-5} T^2$$

(2) ステンレス 304

$$\lambda = 12.39 + 0.0232 (T - 273) - 5.08 \times 10^{-6} (T - 273)^2$$