

JAERI - M
93-070

核融合ダイバータ板の片面加熱条件下
における熱伝達実験 (1)

—非沸騰・核沸騰冷却水流れにおける管壁内周方向温度分布—

1993年3月

池田 秀一*・荒木 政則・小川 益郎
秋場 真人・西野 好彦

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute. 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

核融合ダイバータ板の片面加熱条件下における熱伝達実験(1)
—非沸騰・核沸騰冷却水流れにおける管壁内周方向温度分布—

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

池田 秀一*・荒木 政則・小川 益郎+

秋場 真人・西野 好彦

(1993年2月26日受理)

核融合実験炉ITER用ダイバータ板は、片面より $15\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の高い熱負荷を定常的に受ける受熱機器であり、ITERを実現する上で重要な開発課題である。ITERで予想される片面加熱条件下においては、冷却水は、加熱側のみ部分的に沸騰し、非加熱側は非沸騰領域であると予想される。しかしながら、片面加熱条件下における熱伝達特性、特にスワール管に関しては殆ど実験データがない。このため、実験による熱伝達率データの蓄積及び数値計算コードを開発する必要がある。

今回は、実験の第1段階として、スワールテープが挿入されていない銅製の水平平滑円管において、強サブクール強制対流時の片面加熱実験を行った結果を報告する。実験は、水平に設置された冷却管の上部から、 $2\sim 25\text{MW}/\text{m}^2$ のビーム熱流束を垂直に加え、非沸騰域から、バーンアウト域までの管壁内の周方向温度分布を測定した。冷却には、常温の水を用い、流速を $4.2\sim 16\text{m}/\text{s}$ 、圧力を $0.5\sim 1.3\text{MPa}$ の範囲で行った。さらに、冷却管壁内の周方向温度分布について、一様加熱条件下での既存の熱伝達相関式(Shah及びThom)を用いた熱伝導計算結果と実験データの比較を行った。今回の実験範囲では、本実験結果と計算結果は、比較的良い一致を見た。

Heat Transfer Experiments for Divertor Plate of Fusion Reactor
under One-sided Heating Conditions (1)
- Circumferential Temperature Distributions of Tube Wall
in Non-boiling and Nucleate Boiling Water Flows -

Shuichi IKEDA^{*}, Masanori ARAKI, Masurou OGAWA⁺
Masato AKIBA and Yoshihiko NISHINO

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 26, 1993)

The divertor plates for a fusion experimental reactor such as ITER, will be subjected to steady state and high heat loads more than 15 MW/m² in a normal operation. R&D of the divertor plates is one of very important issues for realizing ITER. Under one-sided heating conditions in the ITER, the cooling water of the divertor plates will be partially boiled on the heated side, while it will remain being a single phase on the other side. However there have been few heat transfer experiments, especially for swirl tubes, under one-side heating conditions. Therefore, it is necessary to accumulate further experimental data base to develop the design calculation code on heat transfer.

This paper reports the experimental results in a horizontal smooth copper tube exposed to one side heat loads under a condition for highly subcooled forced convection. In the experiments, the cooling tube which was installed normal to the beam was heated from upper side for different heat fluxes 2 to 25 MW/m² which correspond to regions from non-boiling to burnout. Temperature distributions of the selected points were measured

⁺ Department of High Temperature Engineering, Tokai Research Establishment

^{*} Science University of Tokyo

in the tube wall along the circumferential and the flow directions. De-ionized cooling water was supplied at normal temperature, flow velocities ranged from 4.2 to 16 m/s and the local water pressures 0.5 to 1.3 MPa, respectively. The experimental results were compared with the results of heat conduction calculation using existing heat transfer correlations under uniform heating proposed by Thom and Shah. Consequently, the experimental results were consistent with the calculations under the present experimental conditions.

Keywords: ITER, Divertor Plates, High Heat Flux, One Side Heating, Heat Transfer

目 次

1. はじめに	1
2. 実 験	2
2.1 実験装置	2
2.2 試験体及び測定系	3
2.3 実験条件	4
3. 実験結果及び検討	4
4. まとめ	6
謝 辞	7
参考文献	7
付録 一様加熱条件下における既存熱伝達相関式	20

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	2
2.1 Experimental Set-up	2
2.2 Test Sections and Measurement Systems	3
2.3 Experimental Conditions	4
3. Experimental Results and Discussion	4
4. Conclusion	6
Acknowledgment	7
References	7
Appendix Existing Heat Transfer Correlations under Uniform Heating Conditions	20

1. はじめに

核融合実験炉ITER用ダイバータ板は、その片面より 15MW/m^2 以上の熱負荷を定常的に受ける受熱機器であり、この開発は、ITERを実現する上で重要な項目である⁽¹⁾。ITERで用いられるダイバータ板は、炭素系材料と金属製冷却管との異種材料接合体であり、異種材料の接合技術の開発及び除熱性能の優れた冷却管の開発が重要となっている。炭素系材料は、ディスラプション時の超高熱流束から冷却管を保護し、さらに、定常熱負荷時のプラズマへの不純物混入を抑制するために用いられる。一方、冷却管にはスワールテープを円管に挿入したスワール管等が提案されており、これは、片面に集中する熱を分散させ、バーンアウト熱流束を向上させる必要があることに起因する。このように、ITER用ダイバータ板の開発は、材料開発から異種材料の接合技術、さらには、接合体の熱疲労特性評価を行うことによりなされている。このため、ITERで要求されるダイバータ板を設計する上で、冷却管単体の片面加熱条件下における熱伝達特性を把握する必要がある。しかしながら、ITERにおける使用条件下（片面加熱、低圧力（ $\sim 3.5\text{MPa}$ ）、管内流れ、強サブクール）での熱伝達特性に関する研究は前例がない。

このため、ITERの概念設計時においては、冷却管の温度を評価する際に、周方向一様熱流束条件で得られている従来の非沸騰及び核沸騰時の熱伝達率を局所的に冷却管内壁の温度の関数として評価している。しかしながら、周方向一様加熱条件下で得られている核沸騰熱伝達相関式、例えばThomの式とShahの式から得られる熱伝達率が片面加熱条件の場合にも適用できるかどうかは明確になっておらず、これらの適用性を評価するにはより多くの実験データが必要である。さらに、強サブクール条件下におけるこれらの式の適用性についても、実験的に検証されていない。このため、現在、各種冷却管（外形状の異なる2種類の冷却管に、スワールテープを入れた場合と入れない場合）の片面加熱、強サブクールにおける熱伝達実験を行っている。

本稿では、第1段階として、スワールテープが挿入されていない銅製の平滑円管について、強サブクール強制対流時の片面加熱実験を行った結果について報告する。

2. 実験

2-1 実験装置

Fig.2-1に粒子工学試験装置の概略図を示す。加熱源には、JT-60粒子入射加熱装置用水素イオン源⁽²⁾を使用した。以下に、本加熱源の基本性能を示す。

- ・加熱源
 - 多極磁場閉じ込めバケツ型水素イオン源
 - 加速電圧 ; 30~100 kV
 - 加速電流 ; ~50 A
- ・照射面積 ; 160×200 mm (半値幅)
- ・照射時間 ; ~10 s

本装置には、高熱流束受熱機器を開発する上で必要な冷却水供給系が、真空容器内に2系統用意されており、必要とする熱負荷及び分布に応じて、それぞれ使用できるものである。本実験では、比較的広い範囲を加熱することが重要であるため、Fig.2-1に示す位置に試験体(冷却管)を水平に取り付けた。水素ビームは、試験体の上方から、垂直に照射される。

また、試験体表面の熱流束は、Fig.2-2に示すようなカロリメータを用いて測定した。カロリメータは、断熱された外径約16mmの銅ブロック(受熱面積:2 cm²、体積:1 cm³)を試験体流路方向に20mm間隔で、11個並べたものである。各ブロックには、外径0.5mmの非接地型熱電対(Kタイプ)が深さ4mmの位置にロー付けされており、ブロックの温度変化及び絶対温度の測定が可能である。各位置におけるビーム熱流束は、カロリメータブロックに埋め込まれた熱電対の温度上昇から、次式で求められる。

$$q_{\text{BEAM}} = \frac{V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)}{S \cdot (\tau_2 - \tau_1)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

q_{BEAM} ; ビーム熱流束 (W/m²)

V ; カロリメータブロックの体積 (= 1 mm³)

- S ; 受熱面積 ($= 2 \text{ mm}^2$)
 ρ ; 銅の密度 (kg/m^3)
 C_p ; 銅の比熱 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)
 T_1, T_2 ; 時刻 τ_1, τ_2 におけるカロリメータブロック平衡温度 ($^{\circ}\text{C}$)

なお、ここで求めたビーム熱流束は、試験体受熱表面における熱流束と等価な値であり、冷却管内壁部での値ではないことに注意する必要がある。

Fig.2-3に、試験体取り付け位置での典型的なビーム熱流束分布を示す。横軸は、試験体長さ方向の位置を示し、Position"0"はカロリメータ中心位置を示す。また、各シンボル (○、□、◇、△、+及び×) は異なるビーム照射条件下におけるビーム熱流束測定値を示す。同図から明らかなように、長さ方向のビーム熱流束分布は、半値幅160mmのガウス分布である。この分布は、ITERで予想されるダイバータ板上での熱負荷分布に近いものである。また、長さ方向に直交する方向 (試験体断面方向) では、ビーム熱流束は一様であることが確認されている⁽³⁾。したがって、本実験では受熱表面形状が円形であるので、冷却管外表面での法線に沿った周方向ビーム熱流束分布は、 \cos 分布と仮定した。

2-2 試験体及び計測系

試験体の全体を Fig.2-4 に、断面を Fig.2-5 にそれぞれ示す。試験体は、内径10mm、外径15mm、長さ約470mmの銅製平滑円管である。この試験体には、Fig.2-4及び5に示すように、軸方向の温度分布測定用に5対、さらに、真空容器の中心 (試験体中心) から10mm下流のA-A'断面に、周方向温度分布測定用に12対の外径0.5mm非接地型熱電対 (Kタイプ; JIS0.4級) が、それぞれ表面からの深さ1mmの所に埋め込まれている。これらの熱電対を用いて、非沸騰領域からバーンアウト領域までの熱負荷における各位置の温度を測定した。各熱電対の出力は、データロガーでデジタル変換し、パソコンを用い数msec間隔で収録した。また、試験体出入口部の圧力及び流量も同時に収集した。流量の測定には、流量65 l/minまではオリフィス流量計 (精度2%) を用い、それ以上の流量では、フローメータ (精度2%) を使用した。また、流量の調整は、試験体出入口に設置した2個の流量調整弁で行った。さらに、本弁の開度を調整することにより、試験体入口圧力を流速一定の条件のもとに変更し、圧力依存性を評価した。圧力測定には、可

変りラクタンズ型絶対圧力センサー（精度3%）を使用した。水温測定には、外径0.5mm非接地型熱電対を使用した。

2-3 実験条件

ITER用ダイバータ板では、表面定常熱流束 15MW/m^2 を除熱するために、流速 10m/s 、圧力 $\sim 3.5\text{MPa}$ 、入口温度 60°C の冷却水が供給される。この条件下をできる限り模擬するために、本実験では、下記に示す範囲で行った。

- ・ 流速 ; $4.2\sim 16\text{m/s}$
- ・ 圧力（試験体中央部） ; $0.5\sim 1.3\text{MPa}$
- ・ ビーム熱流束 ; $2\sim 25\text{MW/m}^2$
- ・ 入口温度 ; 常温（約 $20\sim 30^\circ\text{C}$ ）

流速は、ITER条件を十分満たす範囲であるが、圧力に関しては、実験装置冷却系の性能限界により、最大 1.3MPa とした。Table.2.1に実験条件一覧を示す。ただし、表に示した圧力は、試験体中央部での圧力であり、出入口圧力の平均とした。なお、出入口間の圧力損失は流速 15m/s のときに、 0.14MPa 程度であり、今回の実験範囲では、Blasiusの式で予想される値とよく一致した。

3. 実験結果及び検討

実験は、先に示したように、流速 $4.2\sim 16\text{m/s}$ 、圧力 $0.5\sim 1.3\text{MPa}$ の範囲で、ビーム熱流束をパラメータとして行った。Fig.3-1に、周方向に取り付けられた熱電対の温度時刻歴を示す。流速、試験体中央部圧力及びビーム熱流束はそれぞれ 10m/s 、 1MPa 及び 12.8MW/m^2 である。横軸は、照射直後からの時間経過を示す。本図より、ビーム照射開始から約1秒で冷却管受熱面頂部では、ほぼ定常温度に達していることが明かである。一方、冷却管非受熱面において、1秒のビーム照射条件では僅かに温度上昇が認められた。これは、定常熱流束を受けた場合の到達温度と比較すると数%であったが、実験精度を確保するためにビーム照射時間を1秒及び2秒とした。

変りラクタンズ型絶対圧力センサー（精度3%）を使用した。水温測定には、外径0.5mm非接地型熱電対を使用した。

2-3 実験条件

ITER用ダイバータ板では、表面定常熱流束 15MW/m^2 を除熱するために、流速 10m/s 、圧力 $\sim 3.5\text{MPa}$ 、入口温度 60°C の冷却水が供給される。この条件下をできる限り模擬するために、本実験では、下記に示す範囲で行った。

- ・ 流速 ; $4.2\sim 16\text{m/s}$
- ・ 圧力（試験体中央部） ; $0.5\sim 1.3\text{MPa}$
- ・ ビーム熱流束 ; $2\sim 25\text{MW/m}^2$
- ・ 入口温度 ; 常温（約 $20\sim 30^\circ\text{C}$ ）

流速は、ITER条件を十分満たす範囲であるが、圧力に関しては、実験装置冷却系の性能限界により、最大 1.3MPa とした。Table.2.1に実験条件一覧を示す。ただし、表に示した圧力は、試験体中央部での圧力であり、出入口圧力の平均とした。なお、出入口間の圧力損失は流速 15m/s のときに、 0.14MPa 程度であり、今回の実験範囲では、Blasiusの式で予想される値とよく一致した。

3. 実験結果及び検討

実験は、先に示したように、流速 $4.2\sim 16\text{m/s}$ 、圧力 $0.5\sim 1.3\text{MPa}$ の範囲で、ビーム熱流束をパラメータとして行った。Fig.3-1に、周方向に取り付けられた熱電対の温度時刻歴を示す。流速、試験体中央部圧力及びビーム熱流束はそれぞれ 10m/s 、 1MPa 及び 12.8MW/m^2 である。横軸は、照射直後からの時間経過を示す。本図より、ビーム照射開始から約1秒で冷却管受熱面頂部では、ほぼ定常温度に達していることが明かである。一方、冷却管非受熱面において、1秒のビーム照射条件では僅かに温度上昇が認められた。これは、定常熱流束を受けた場合の到達温度と比較すると数%であったが、実験精度を確保するためにビーム照射時間を1秒及び2秒とした。

Fig.3-2に、軸方向に取り付けた熱電対の一秒照射後の到達温度を示す。横軸は、熱電対取り付け位置を示す。ここで、周方向温度分布の測定は、同図のTP4の位置であり、この位置での軸方向熱移動は僅かに認められるが、この熱移動量は、半径方向の熱移動量と比較すると、3.5%以下であった。したがって、後に示す解析では、2次元モデルを採用することとした。

一方、熱伝達率を評価する上で、ITERの概念設計時にも適用された手法、つまり、一様加熱条件下で得られている熱伝達相関式の適用性を評価することは、充分価値あるものであるから、本報では、周方向温度分布に関して、一様加熱条件下における既存熱伝達相関式（付録）を用いて、熱電対取り付け位置の温度を計算により求め、実験結果と比較した。計算には、有限要素法による汎用熱伝導解析コードADINATを使用した。軸方向への熱移動は、先に示したように、半径方向への熱移動に比べ十分小さいので、定常2次元問題として扱った。ただし、銅の熱物性は温度依存性を考慮した。また、本計算におけるメッシュは周方向に64等分割、半径方向に5等分割とした。

Fig.3-3～3-7に、実験結果と上記手法による計算結果の比較を示す。横軸は、加熱面最上部からの周方向角度を示し、また、縦軸は、試験体周方向位置の温度をそれぞれ示す。各図には、非沸騰時からバーンアウト近くまでの定常状態における周方向温度分布を示し、各記号が実験値を示す。また、点線がThomの相関式を用いた計算値を、実線がShahの相関式を用いた計算値をそれぞれ示す。

Fig.3-3、3-4、3-5では、流速10m/s一定で、圧力を順に、0.5、1.0、1.3MPaと変化させた場合の周方向温度分布を示す。同一ビーム熱流束に対し、圧力を高くすると、各点の温度はわずかに高くなる傾向が見られる。しかしながら、全般的にそれらは微小であり、圧力依存性は小さい。

Fig.3-6、3-4、3-7では、圧力1.0MPa一定で、流速を順に、4.2、10、15m/sとした。同一ビーム熱流束に対し、流速を速くすると、各点の温度は低くなり、熱伝達率の増加がみられる。このことから、熱伝達率の流速依存性は、圧力依存性に比べて大きい。

実験値と計算結果の比較では、Thomの相関式を用いた場合とShahの相関式を用いた場合のいずれに対しても、各冷却条件及び加熱条件に対し、周方向温度は非沸騰域から沸騰域まで比較的よく一致した。また、全体として、Thomの相関式を用いた場合は、実験値よりも高めに、Shahの相関式を用いた場合は、低めに予測し、実験結果は、これらの相関式でできる範囲内であった。このことから、片面

加熱条件下における周方向温度は、かなり粗い予測であるが、Thom及びShahの相関式から予測される値の範囲内であるものと予想される。一方、これら2者の相関式を適用して冷却管内壁を横切る熱流束を比較した結果をFig. 3-8に示す。本比較では、ビーム熱流束が 15.5MW/m^2 の場合について示したものであるが、それらの差は、冷却管頂部で僅か3%であると予想される。したがって、ITER等における片面加熱条件下での熱伝達評価を行う場合の第1次近似として、ITERの概念設計で適用した方法ではなく、Thom及びShahの相関式を利用して、この結果から熱伝達率及び冷却面熱流束を評価することを提案する。

4. まとめ

片面加熱条件下の熱伝達特性評価実験を行い、流速 $4.2\sim 16\text{m/s}$ 、圧力 $0.5\sim 1.3\text{MPa}$ 、表面熱流束 $2\sim 25\text{MW/m}^2$ の範囲で、非沸騰域からバーンアウト域までの加熱条件下で、冷却管壁内の温度分布を測定した。

周方向温度分布に関して、異なった冷却条件及び加熱条件下で実験結果を比較すると、圧力依存性は小さく、流速依存性は大きい。

また、冷却管内の温度測定値と一様加熱条件下における既存熱伝達相関式を冷却管壁温度の関数として用いた熱伝導計算結果との比較では、Thom及びShahの相関式を用いた場合のいずれに対しても、非沸騰域から沸騰域まで、比較的よく一致した。さらにその傾向は、Thomの相関式を用いた場合は、実験値よりも高めに、Shahの相関式を用いた場合は、低めに予測された。したがって、ITER等における片面加熱条件下での熱伝達評価を行う場合の第1次近似として、ITERの概念設計で適用した方法ではなく、Thom及びShahの相関式を利用して、この結果から熱伝達率及び冷却面熱流束を評価することを提案した。

しかしながら、片面加熱、強サブクール条件下の熱伝達率が、必ずしもこれら既存の熱伝達相関式から得られるものと一致するとは限らないため、今後は、実験データをもとに、熱伝達率を評価し、既存相関式との比較を行う予定である。また、管径及び管の厚みの違いによる熱伝達特性を評価する実験や、角管及びスワール管に関する実験も計画している。

加熱条件下における周方向温度は、かなり粗い予測であるが、Thom及びShahの相関式から予測される値の範囲内であるものと予想される。一方、これら2者の相関式を適用して冷却管内壁を横切る熱流束を比較した結果をFig. 3-8に示す。本比較では、ビーム熱流束が 15.5MW/m^2 の場合について示したものであるが、それらの差は、冷却管頂部で僅か3%であると予想される。したがって、ITER等における片面加熱条件下での熱伝達評価を行う場合の第1次近似として、ITERの概念設計で適用した方法ではなく、Thom及びShahの相関式を利用して、この結果から熱伝達率及び冷却面熱流束を評価することを提案する。

4. まとめ

片面加熱条件下の熱伝達特性評価実験を行い、流速 $4.2\sim 16\text{m/s}$ 、圧力 $0.5\sim 1.3\text{MPa}$ 、表面熱流束 $2\sim 25\text{MW/m}^2$ の範囲で、非沸騰域からバーンアウト域までの加熱条件で、冷却管壁内の温度分布を測定した。

周方向温度分布に関して、異なった冷却条件及び加熱条件で実験結果を比較すると、圧力依存性は小さく、流速依存性は大きい。

また、冷却管内の温度測定値と一様加熱条件下における既存熱伝達相関式を冷却管壁温度の関数として用いた熱伝導計算結果との比較では、Thom及びShahの相関式を用いた場合のいずれに対しても、非沸騰域から沸騰域まで、比較的よく一致した。さらにその傾向は、Thomの相関式を用いた場合は、実験値よりも高めに、Shahの相関式を用いた場合は、低めに予測された。したがって、ITER等における片面加熱条件下での熱伝達評価を行う場合の第1次近似として、ITERの概念設計で適用した方法ではなく、Thom及びShahの相関式を利用して、この結果から熱伝達率及び冷却面熱流束を評価することを提案した。

しかしながら、片面加熱、強サブクール条件下の熱伝達率が、必ずしもこれら既存の熱伝達相関式から得られるものと一致するとは限らないため、今後は、実験データをもとに、熱伝達率を評価し、既存相関式との比較を行う予定である。また、管径及び管の厚みの違いによる熱伝達特性を評価する実験や、角管及びスワール管に関する実験も計画している。

謝辞

本研究を実施するに際し、終始激励と有益な助言を頂いた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、終始激励して頂いた関 昌弘核融合計画室長、有益な助言を頂いた河村 洋東京理科大学工学部教授に感謝します。

最後に、不断の激励と支援を頂きました島本 進核融合研究部長、鹿園直基那珂研究所所長に深く感謝致します。

参考文献

- (1) T.Kuroda et al., "ITER plasma facing components," *IAEA ITER Documentation Series*, No.30, vienna (1991).
- (2) 例えば, M.Araki et al., "Burnout Experiments on the Externally-Finned Swirl Tube for Steady State and High Heat Beab Stops," *Fusion Engineering and Design*, **9** (1989) 231-236.
- (3) 例えば, M.Araki et al., "Thermal Response of Bended CFC/OFHC Divertor Mock-ups for Fusion Experimental Reactors under Large Numbers of Cyclic High Heat Loads," *J. of Nucl. Sci. and Technol.*, **29** (9) (1992) 901-908.

謝辞

本研究を実施するに際し、終始激励と有益な助言を頂いた小原祥裕室長をはじめとするNBI加熱研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、終始激励して頂いた関 昌弘核融合計画室長、有益な助言を頂いた河村 洋東京理科大学理工学部教授に感謝します。

最後に、不断の激励と支援を頂きました島本 進核融合研究部長、鹿園直基那珂研究所所長に深く感謝致します。

参考文献

- (1) T.Kuroda et al., "ITER plasma facing components," *IAEA ITER Documentation Series*, No.30, vienna (1991).
- (2) 例えば, M.Araki et al., "Burnout Experiments on the Externally-Finned Swirl Tube for Steady State and High Heat Beab Stops," *Fusion Engineering and Design*, **9** (1989) 231-236.
- (3) 例えば, M.Araki et al., "Thermal Response of Bended CFC/OFHC Divertor Mock-ups for Fusion Experimental Reactors under Large Numbers of Cyclic High Heat Loads," *J. of Nucl. Sci. and Technol.*, **29** (9) (1992) 901-908.

Table.2-1 実験条件一覧

NO.	流量 (l/min)	流速 (m/s)	入口圧力 (MPa)	出口圧力 (MPa)	平均圧力 (MPa)	入口温度 (°C)	実験回数
1	47	10	0.57	0.51	0.54	20	14
2	40.1	8.5	0.64	0.59	0.61	20	13
3	29.5	6.3	0.71	0.67	0.69	20	11
4	21.2	4.5	0.75	0.73	0.74	20	8
5	76	16.1	1.03	0.88	0.96	21.5	8
6	65	13.8	1.18	1.06	1.12	21.5	8
7	55.9	11.9	1.3	1.2	1.25	21.5	8
8	47.5	10.1	1.39	1.32	1.36	20	9
9	35.6	7.6	1.49	1.44	1.47	20	8
10	23.4	5	1.57	1.55	1.56	20	7
11	67	14.2	0.83	0.71	0.77	20	9
12	65	13.8	1.1	0.97	1.04	21.5	8
13	60.6	12.9	1.11	1.01	1.06	21.5	10
14	55.6	11.8	1.14	1.05	1.09	21.5	9
15	47	10	1.16	1.09	1.13	21.5	10
16	40.6	8.6	1.17	1.12	1.15	23.5	10
17	31	6.6	1.21	1.17	1.19	23.5	9
18	20.3	4.3	1.21	1.19	1.2	23.5	9
19	55.4	11.8	0.85	0.77	0.81	23.5	7
20	47.5	10.1	0.88	0.81	0.84	23.5	11
21	41.3	8.8	0.89	0.83	0.86	25	10
22	32.1	6.8	0.92	0.88	0.9	25	8
23	20.4	4.3	0.93	0.91	0.92	25	8
24	41.6	8.8	0.37	0.32	0.35	22.5	9
25	29.8	6.3	0.4	0.37	0.38	22.5	8
26	19.8	4.2	0.42	0.41	0.41	22.5	5
27	19.5	4.1	0.2	0.19	0.19	22.5	8
28	40.1	8.5	1.42	1.32	1.37	25.5	8
29	30.3	6.4	1.42	1.38	1.4	23.5	9
30	19.5	4.1	1.43	1.41	1.42	23.5	9
31	60.4	12.8	1.32	1.23	1.28	23.5	11
32	59.9	12.7	0.8	0.72	0.76	24	9
33	76	16.1	1.03	0.88	0.96	24	6
34	20	4.2	1	0.99	0.99	28	9
35	47	10	1.01	0.96	0.99	23	13
36	47	10	1.32	1.26	1.29	23	9
37	74.5	15.8	1.07	0.91	0.99	23.5	11
38	47.5	10.1	0.53	0.47	0.5	23.5	10

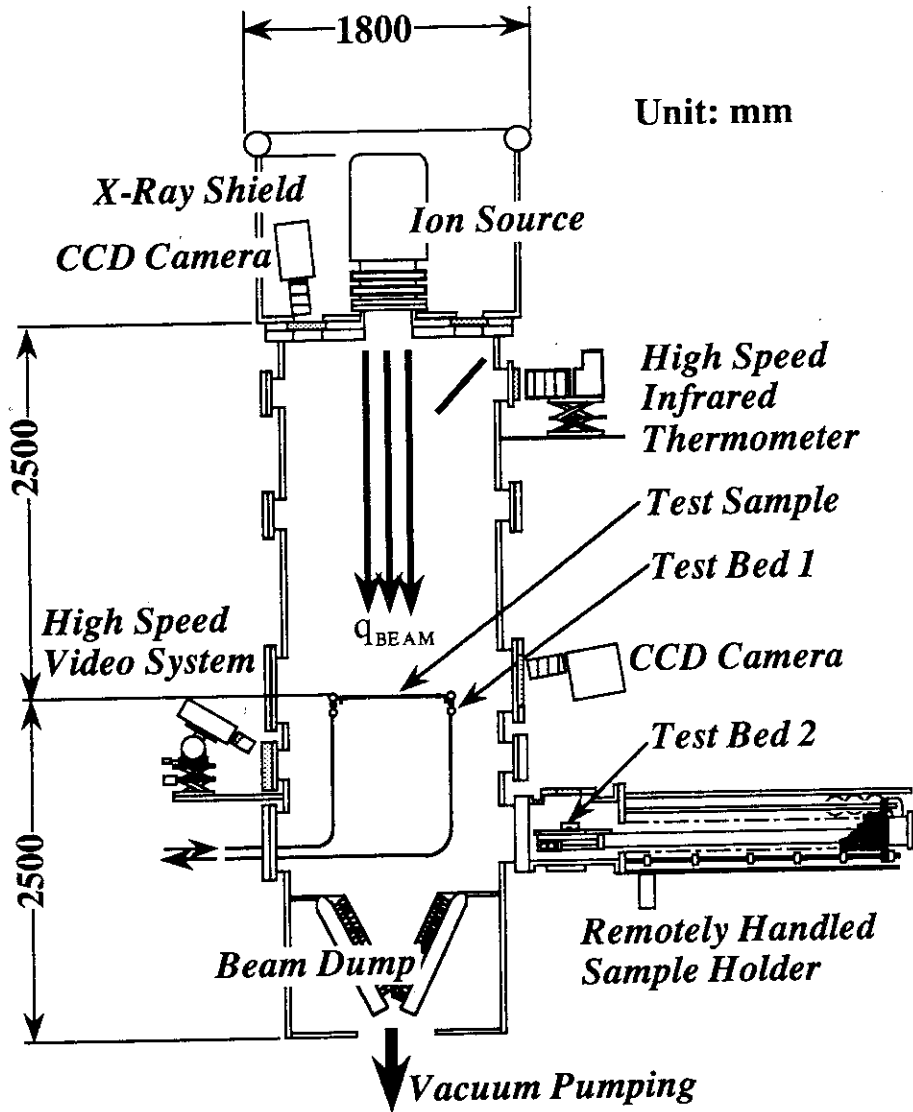


Fig.2-1 粒子工学試験装置概略図

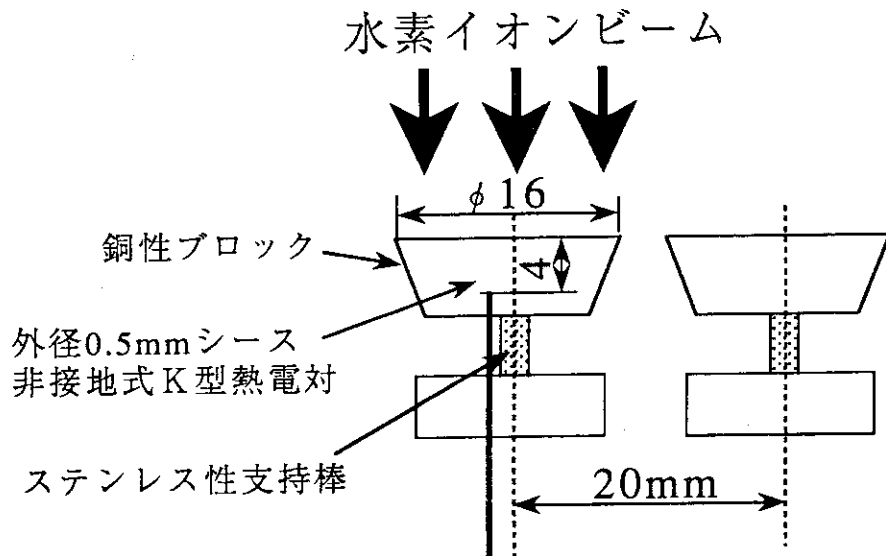


Fig.2-2 カロリメータ断面図

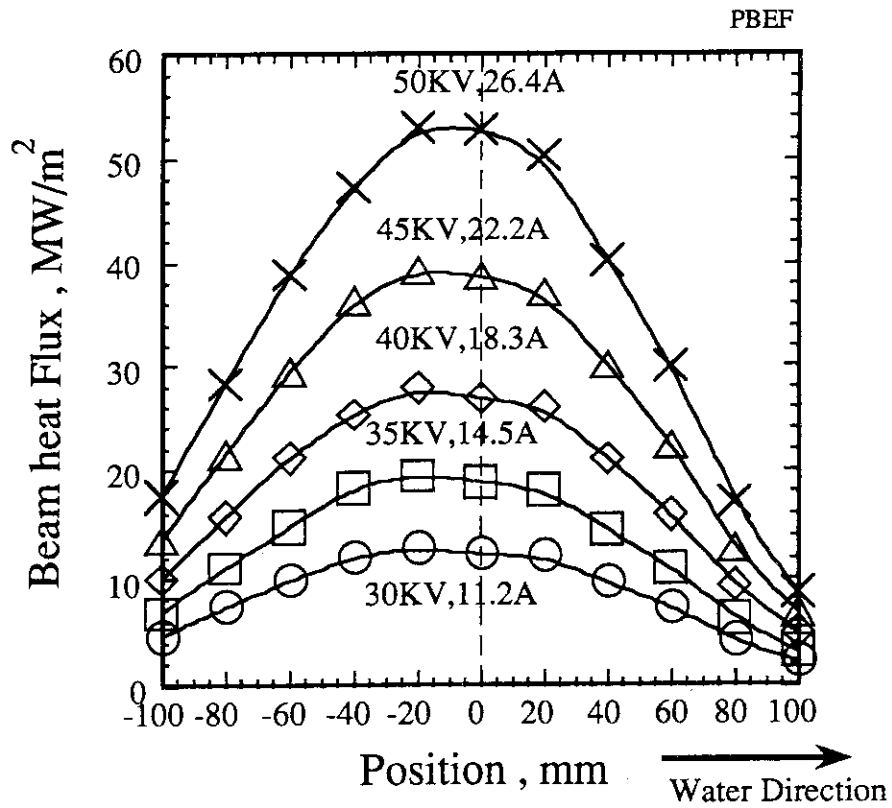


Fig.2-3 試験体設置位置における長さ方向のビーム熱負荷分布

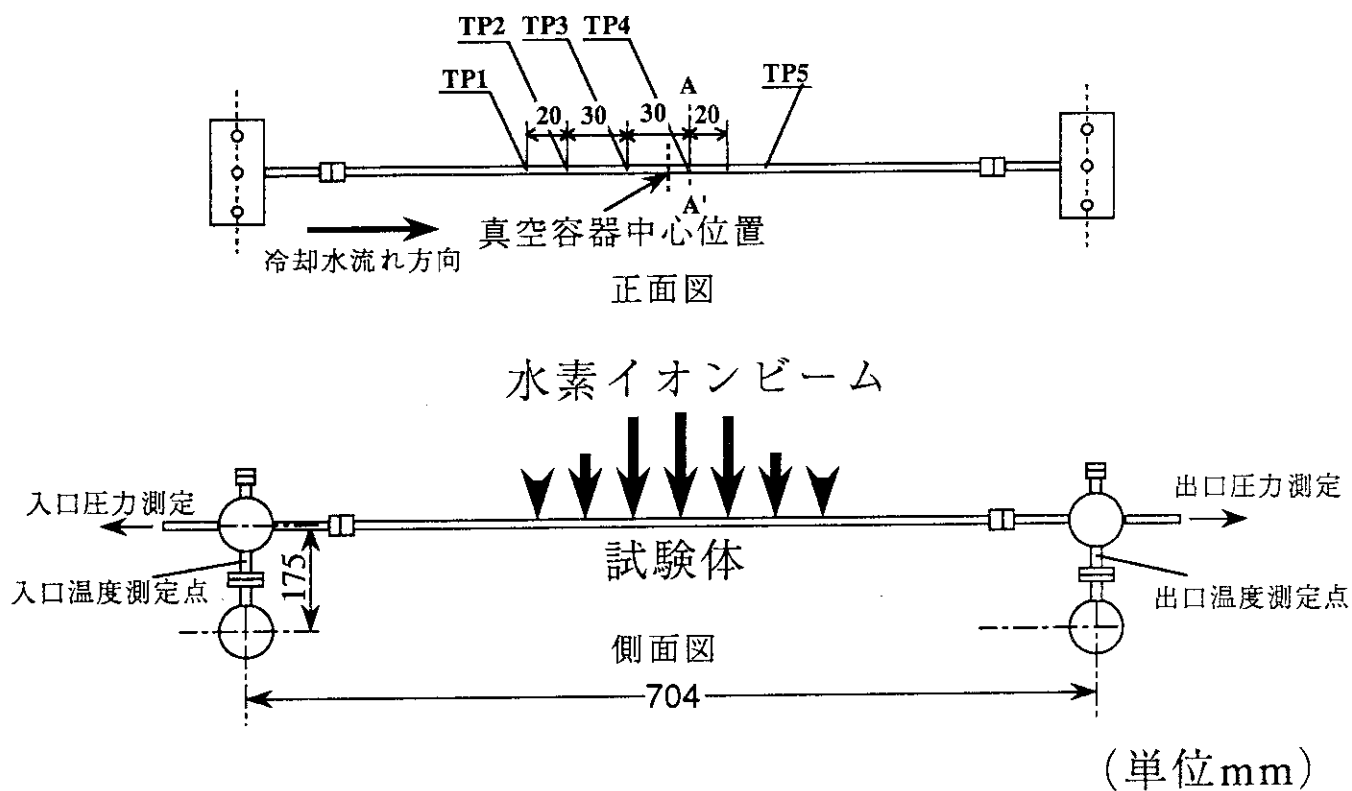


Fig.2-4 試験体配置図

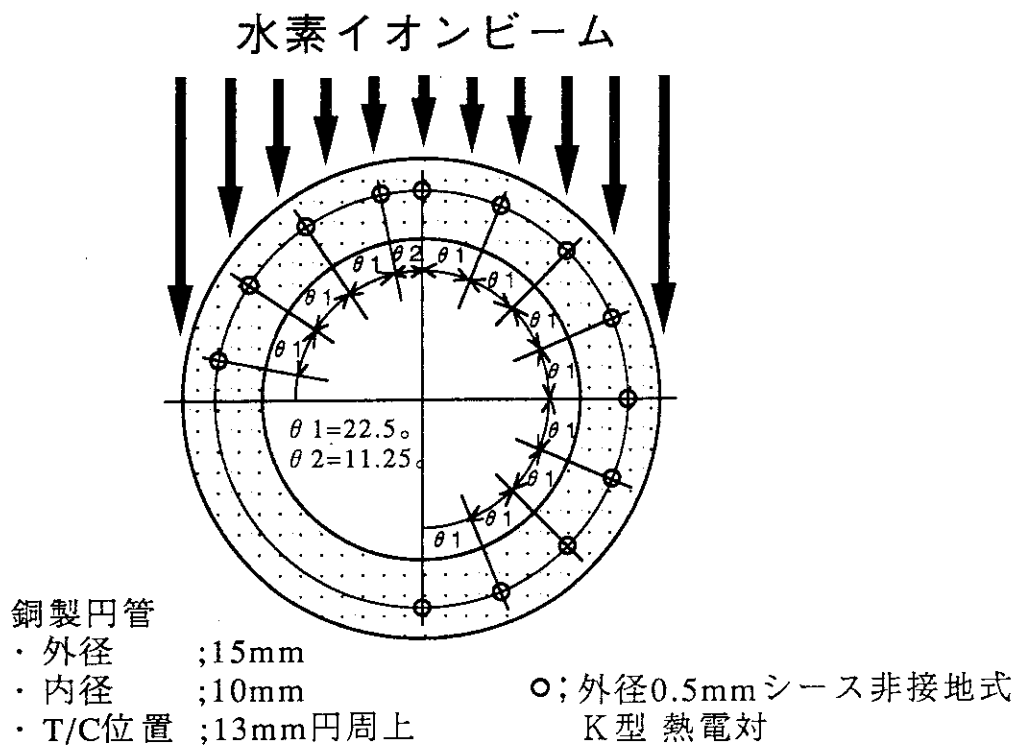


Fig.2-5 試験体断面図

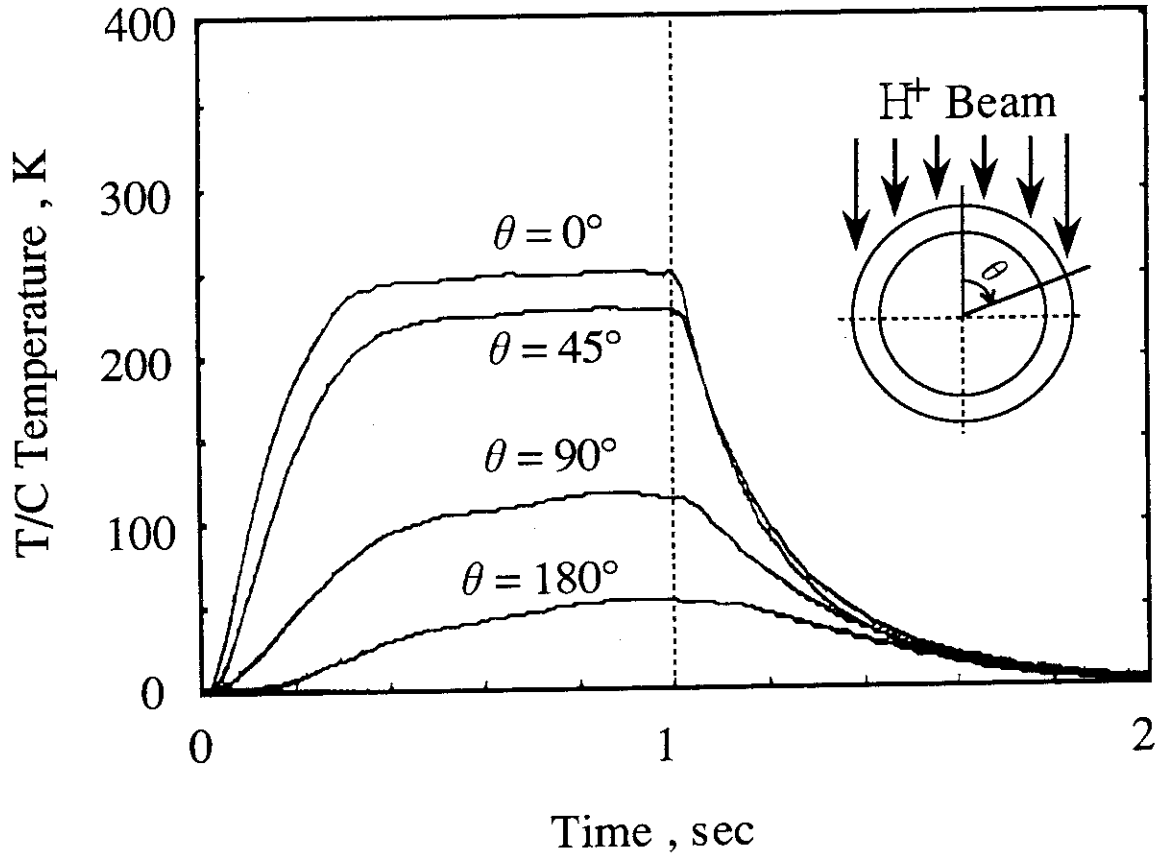


Fig.3-1 熱電対温度上昇時刻歴
 - 流速10m/s、压力1MPa、
 表面熱流束12.8MW/m -

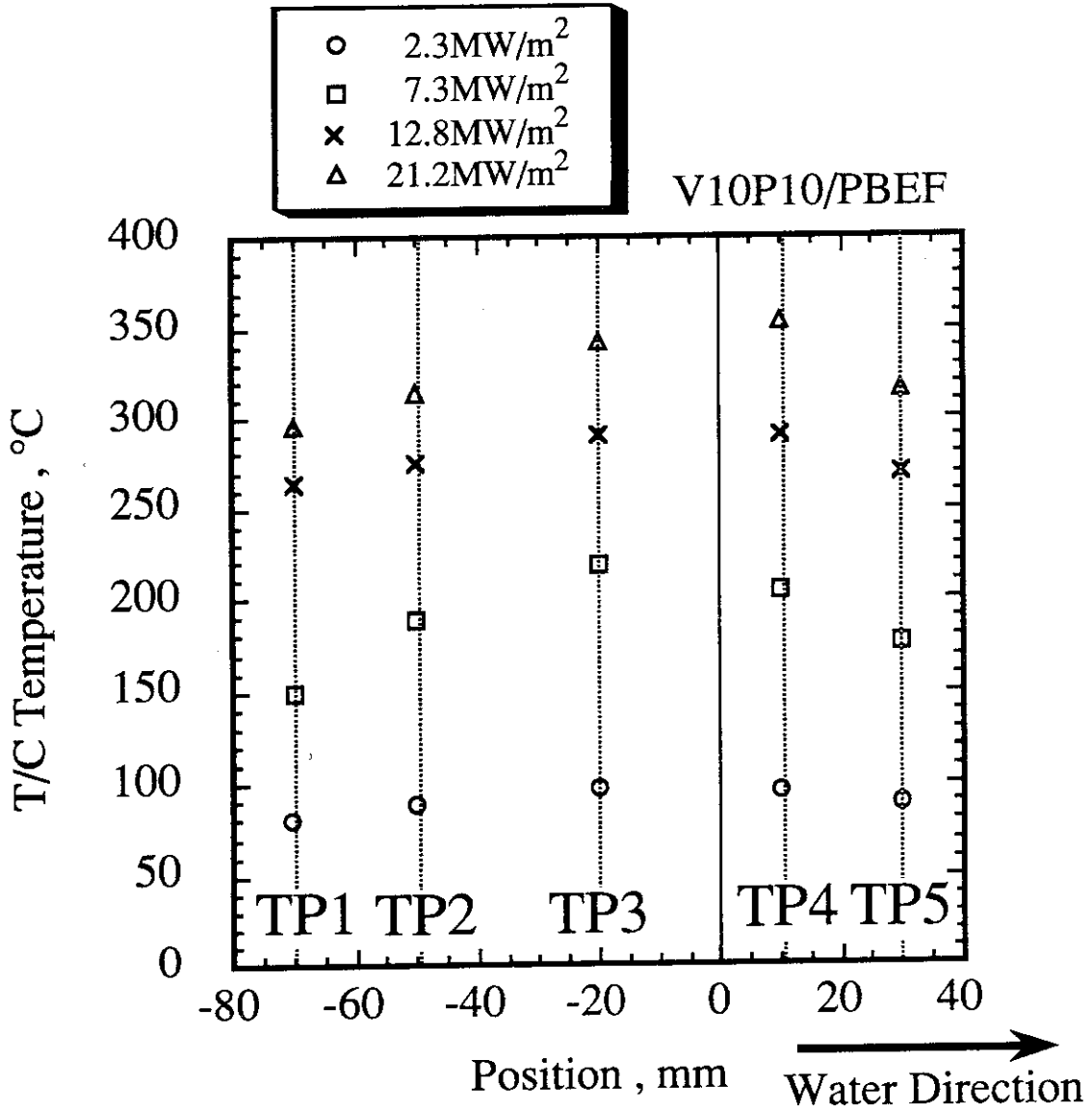


Fig.3-2 軸方向温度分布
 - 流速10m/s、压力1MPa -

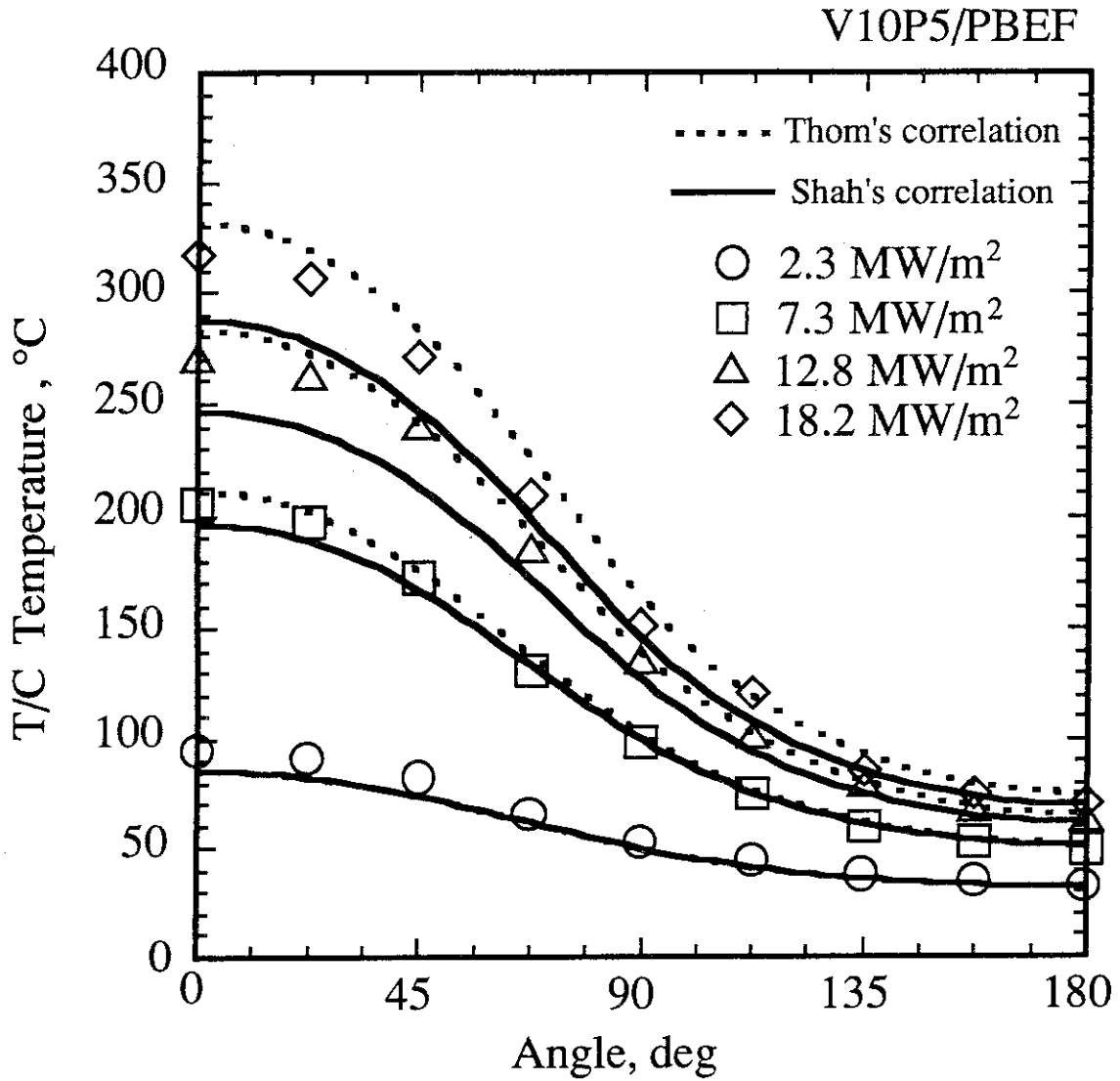


Fig.3-3 周方向温度分布比較結果
 - 流速10m/s、圧力0.5MPaの場合 -

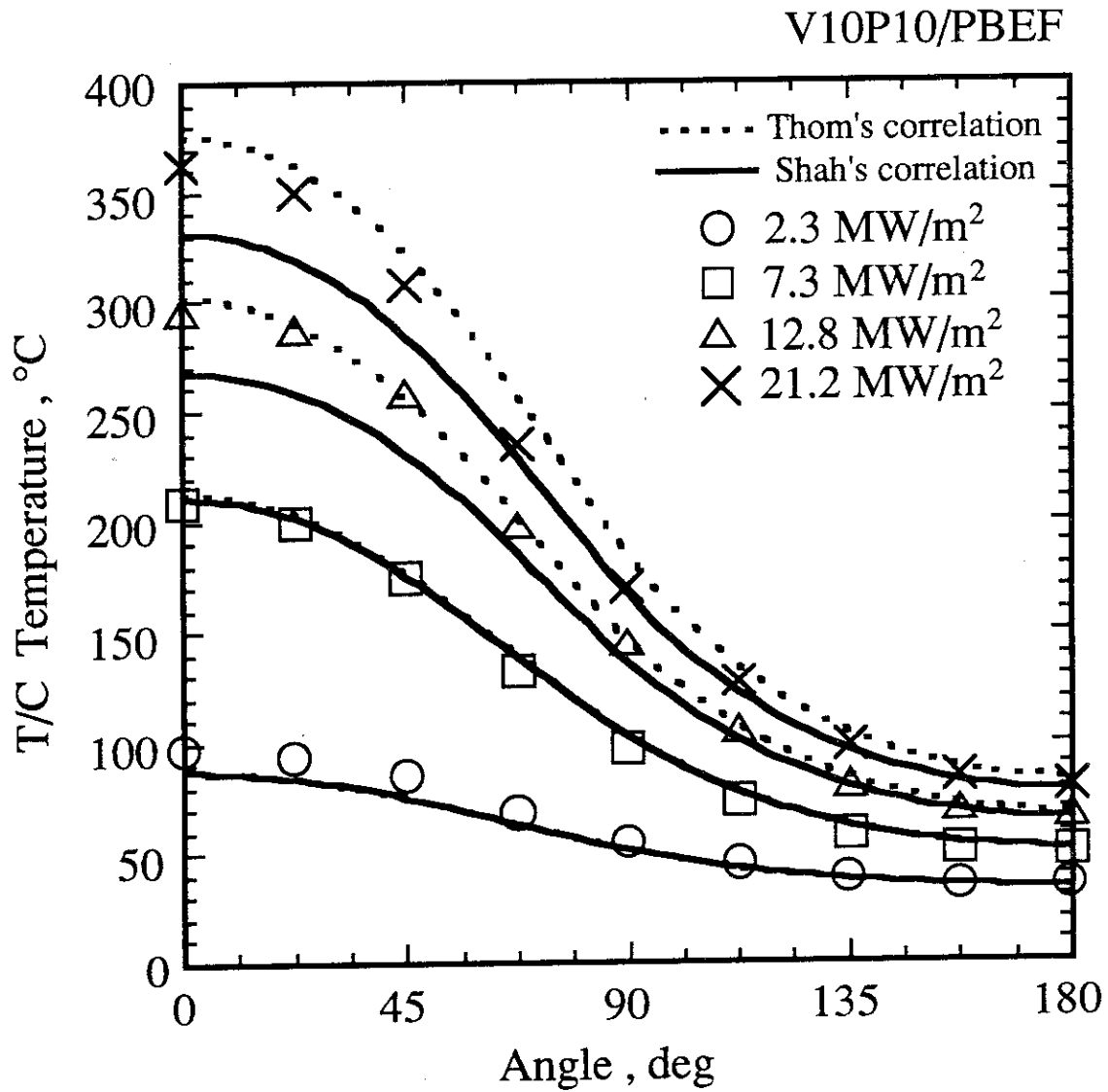


Fig.3-4 周方向温度分布比較結果
 - 流速10m/s、圧力1MPaの場合 -

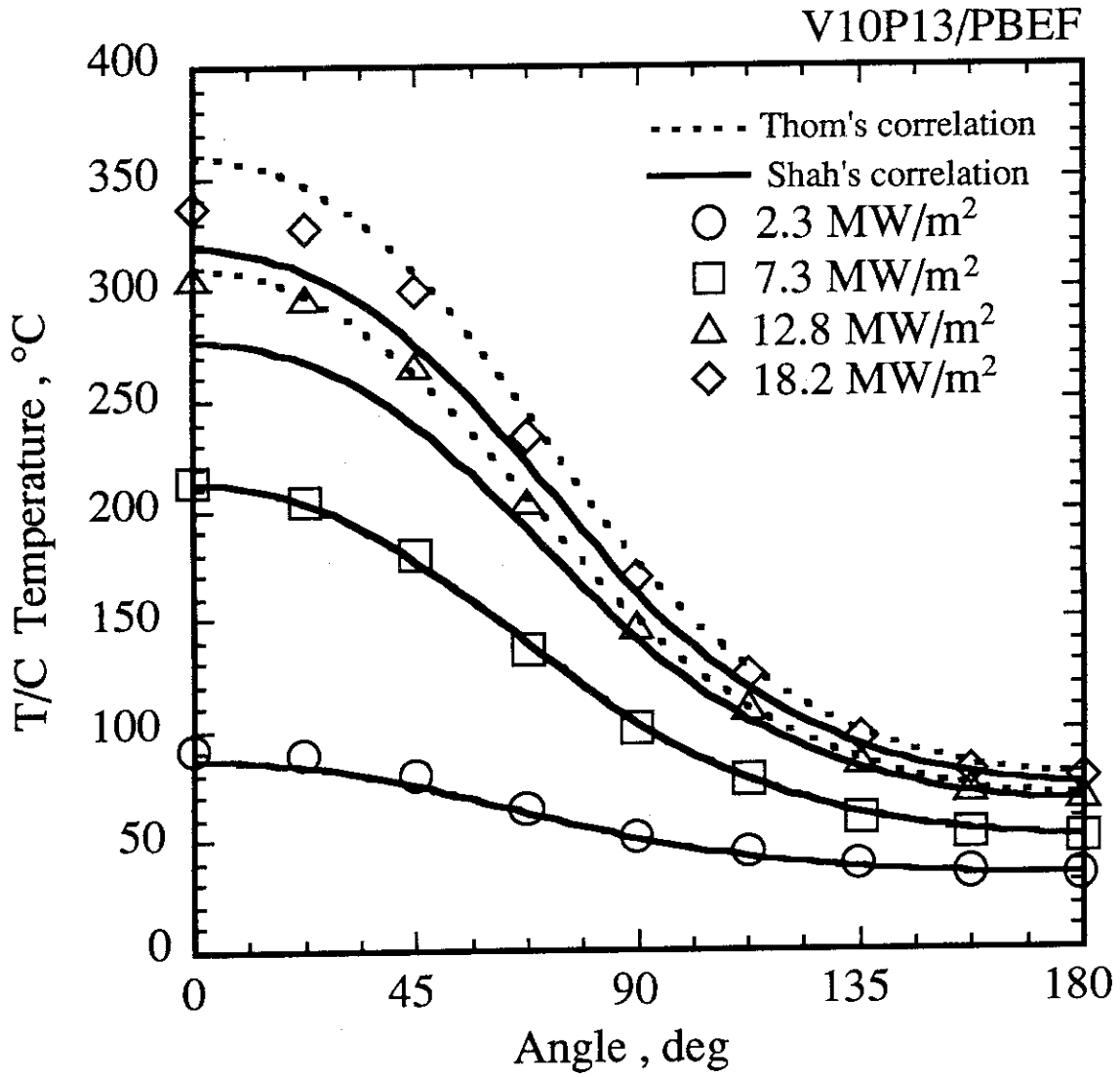


Fig.3-5 周方向温度分布比較結果
 - 流速10m/s、圧力1.3MPaの場合 -

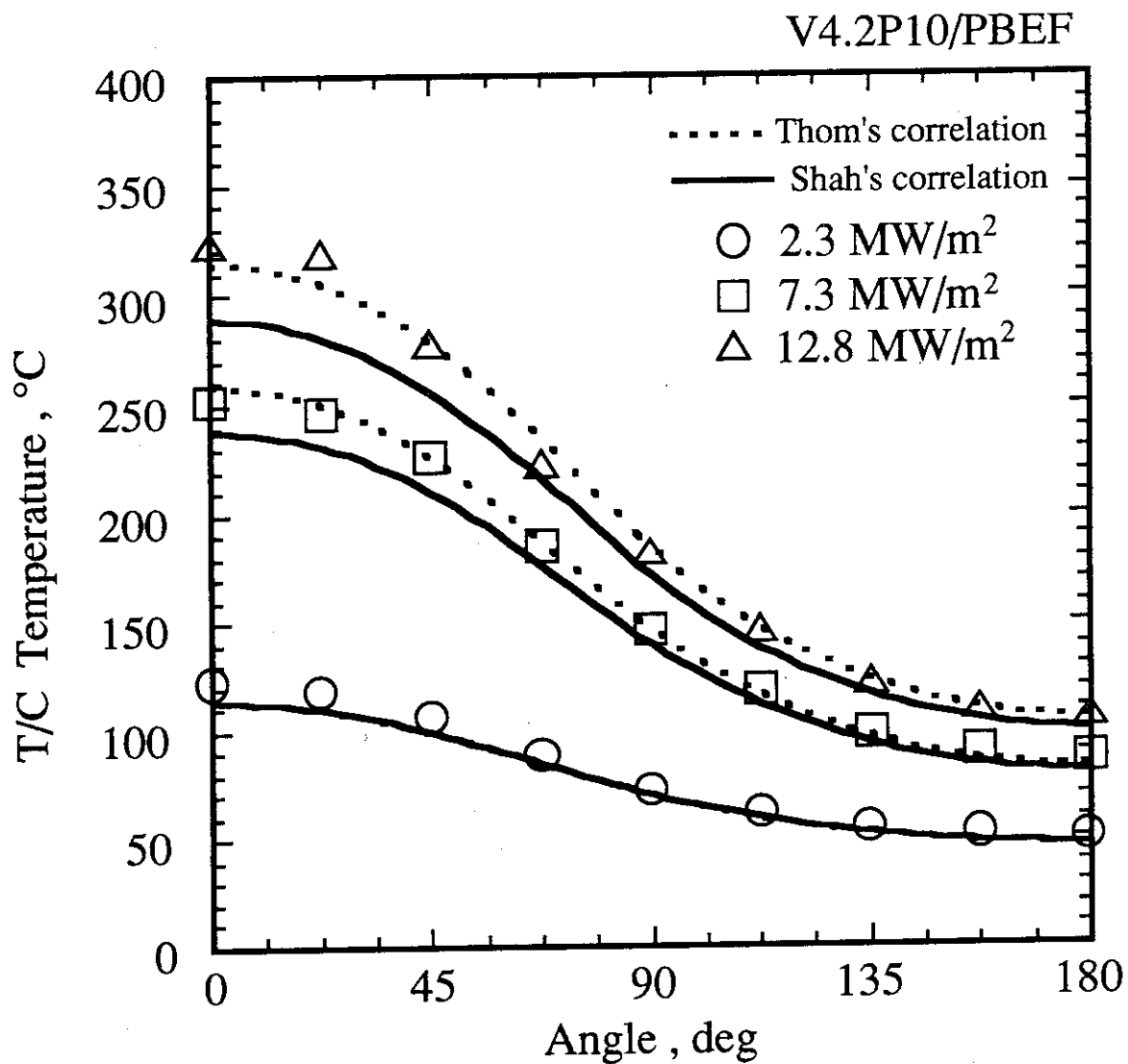


Fig.3-6 周方向温度分布比較結果
 - 流速4.2m/s、圧力1MPaの場合 -

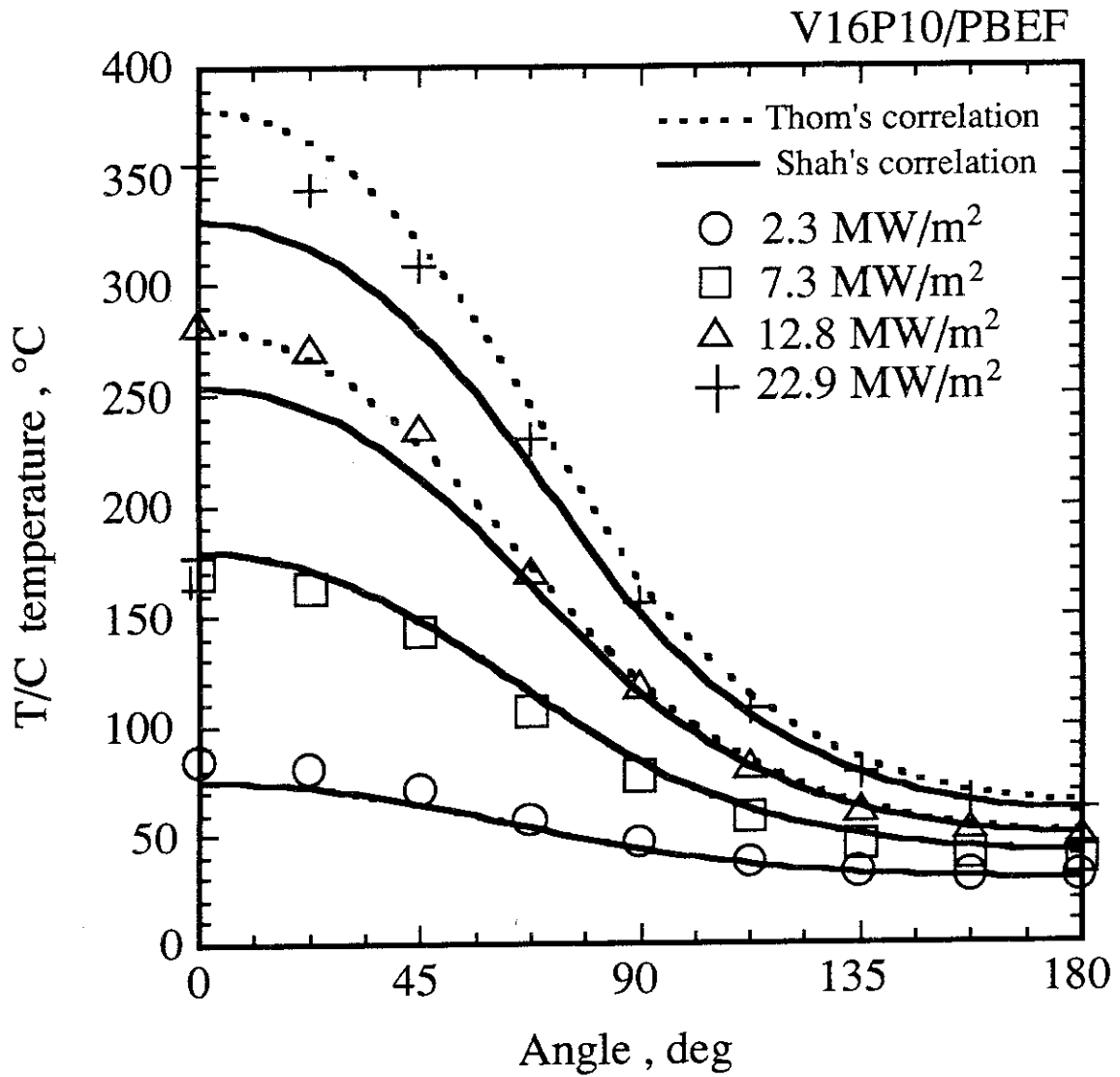


Fig.3-7 周方向温度分布比較結果
 - 流速15.8m/s、圧力1MPaの場合 -

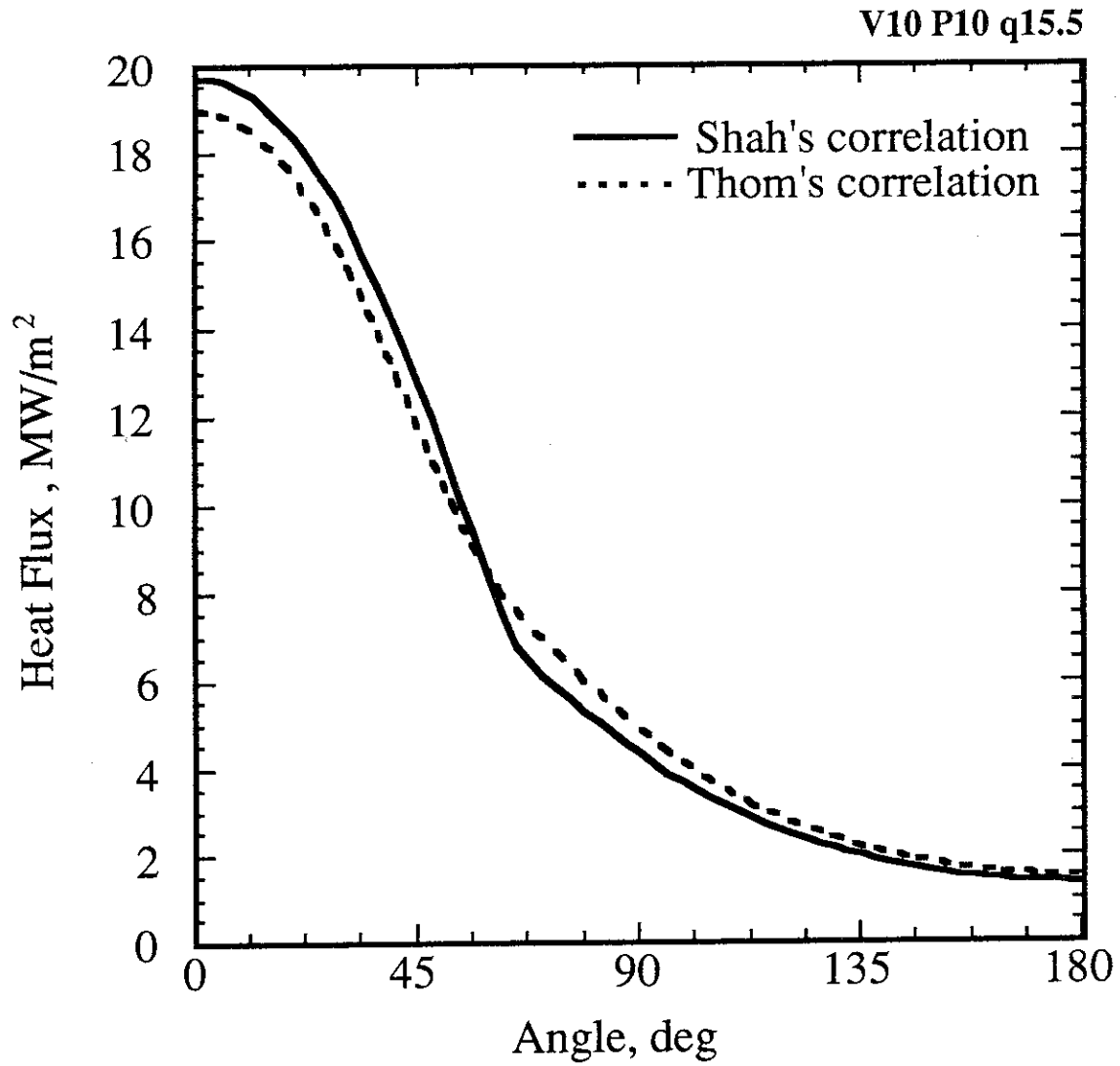


Fig.3-8 管内壁面の熱流束予測

- 流速10m/s、圧力1MPa、

表面熱流束15.5MW/m²の場合 -

付録 一様加熱加熱条件下における既存熱伝達相関式

非沸騰時の円管内の強制対流乱流熱伝達に関する整理式は、Petukov⁽¹⁾ や Sleicher-Rouse⁽²⁾ などにより公表されているが、本報では、従来から広く使われているDittus-Boelterの式⁽³⁾ に粘性係数の補正項を乗じた式を用いた。

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\mu/\mu_w)^{0.14} \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、
 Nu ; ヌッセルト数
 Re ; レイノルズ数
 Pr ; プラントル数
 μ ; 粘性係数 (Pa·s)
 μ_w ; 壁面における粘性係数 (Pa·s)

また、沸騰熱伝達に関しては、一様加熱条件下の実験に基づいたいくつかの整理式が公表されているが、まだまだ、ばらつきが大きい。本報では、Thom⁽⁴⁾ の相関式とShah⁽⁵⁾ の相関式を用いた。

Thomは、次式により T_w が求められるとしている。

$$T_w = T_{SAT} + \frac{0.0235 \cdot q^{0.5}}{\exp(P/8.69 \times 10^6)} \dots\dots\dots (2)$$

- ここで、
 q ; 熱流束 (W/m²)
 P ; 圧力 (MPa)
 T_w ; 壁温 (K)
 T_{SAT} ; 圧力Pにおける飽和温度 (K)

したがって、沸騰熱伝達率は次式で求められる。

$$h_B = q/(T_w - T_L) \dots\dots\dots (3)$$

- ここで、
 h_B ; 沸騰熱伝達率 (W/m²·K)

また、Shahは、沸騰時の内壁の温度 T_w は次式で求められるとしている。

$$T_w = \{(\psi - 1.0) \cdot (T_{SAT} - T_L) + (q/h_L)\} / \psi + T_L \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\psi = 230.0 \cdot (q/(G \cdot Hg))^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- T_L ; 流体の平均温度 (K)
 h_L ; 単相流における熱伝達率 (W/m²·K)

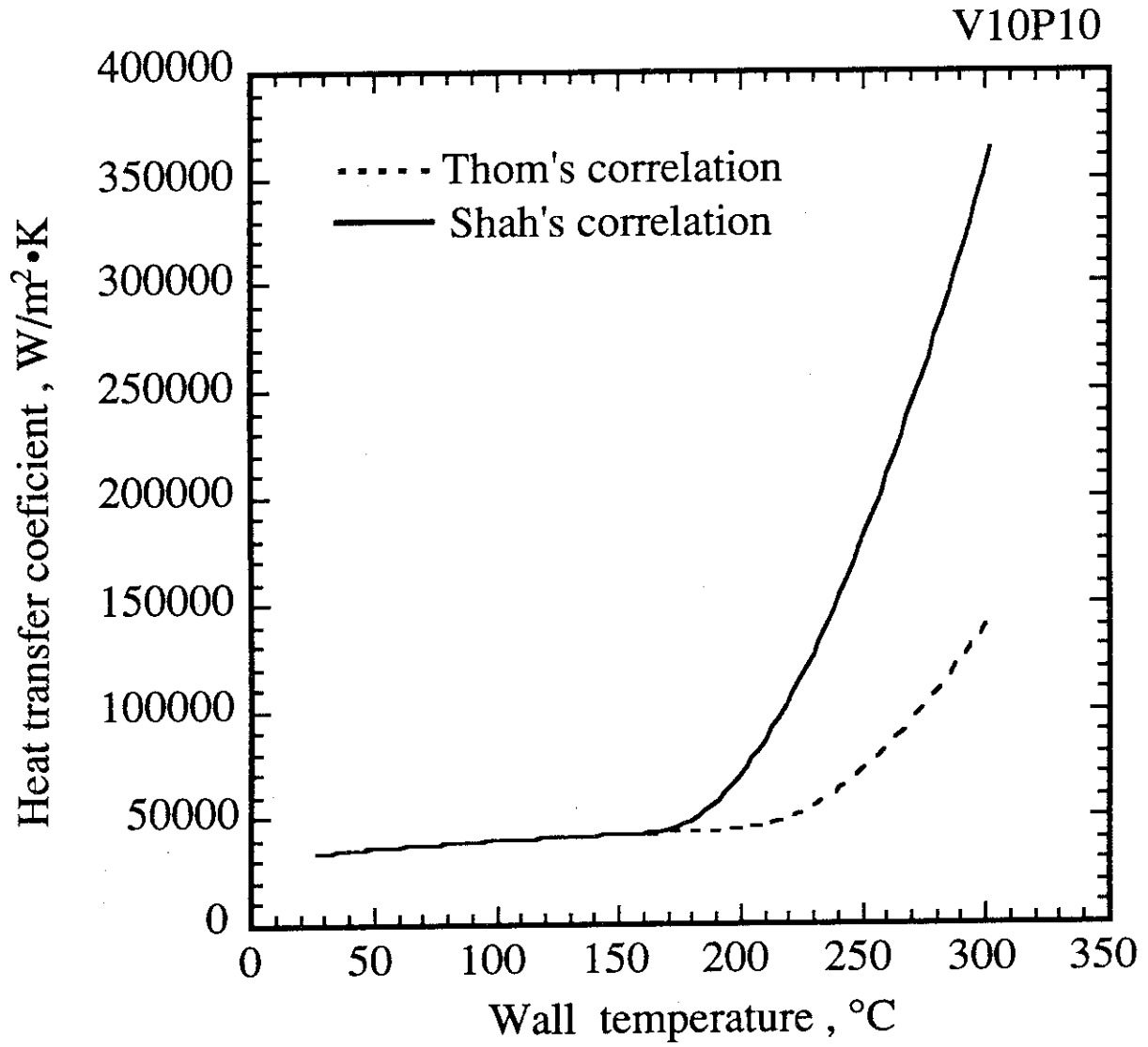
G ; 質量流量 (kg/s)

Hg; 蒸発潜熱 (J/K)

それぞれの相関式から求められた熱伝達率を壁温の関数として表すと付録Fig.1のようになる。なお、1 MPaにおける飽和温度は、453Kである。

参考文献

- (1) B.S.Petukov, *Advance in Heat Transfer*, **6** (1970) 523.
- (2) C.A.Sleicher and M.W.Rouse, *Int.J.Heat Mass Transfer*, **18-5** (1975) 677
- (3) Dittus,F.W.and Boelter,L.M.K., *Univ.Calif.Publs Engrs*, **2** (1930) 443
- (4) J.R.S.Thom et al, Boiling in Sub-cooled Water during Flow Up Heated Tubes or Annuli, *Proc.Inst.Mech.Engrs.*, **180**,Pt 3C (1966) 226
- (5) Shah,M.M., Generalized Prediction of Heat Transfer during Subcooled Boiling in Annuli, *Heat Trans. Engr.*, **83** (1977) 202



付録 Fig.1 壁温度と既存の熱伝達率の関係
 - 流速10m/s、圧力1MPaの場合 -