

JAERI - M
83-220

JT-60 磁気リミタ板の熱的性能

1983年12月

安東俊郎・中村博雄

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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)高野高速印刷

JT-60磁気リミタ板の熱的性能

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部

安東 俊郎・中村 博雄

(1983年11月22日受理)

JT-60磁気リミタ板の熱解析を以下のモデルで行い、その熱的性能を明らかにした。プラズマからの入熱条件に関しては、まず荷電粒子による入熱として半値幅3 cmのガウス分布を考慮した。セパトリクス磁気面を磁気リミタ板上でスイングさせる場合については、時間平均入熱条件および入熱中心を正弦的に移動させるモデルの両条件で検討した。また磁気リミタ領域のプラズマからのふく射（光および荷電交換中性粒子）によるリモートクーリング効果を模擬するために、プラズマ空間に分布するふく射熱源を考慮した。磁気リミタ板の計算モデルでは支持部の接触熱抵抗、冷却ダクトへの熱ふく射および冷却ガスへの伝熱を考慮し、2次元熱伝導解析を行った。この解析により入熱条件と磁気リミタ板温度の関係を明らかにしプラズマ運転範囲の目安を示した。その結果、一般的には最大加熱10秒の運転は困難であり、リモートクーリング効果が必要となる。磁気リミタ領域でのふく射損失が磁気リミタ室へのプラズマ熱流の70%を占める場合には磁気リミタ板への熱流は約半分に減少し、ピーク熱流束も半分以下に減少すること、またこの熱流束は幅±3.5 cmのスイングにより実効的にさらに半減することがわかった。

Thermal Capability of JT-60 Magnetic Limiter Plate

Toshiro ANDO and Hiroo NAKAMURA

Department of Large Tokamak Development,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 22, 1983)

Thermal analysis of the JT-60 magnetic limiter (ML) plate has been made to investigate the thermal capability for its use in the ML operation. The following heat load models are considered to simulate the possible thermal conditions in the operation. Gaussian heat flux distribution with a half width of 3 cm is considered as charged particle heat load. In order to simulate the swing of the separatrix magnetic surface on the ML plate, both time averaged and sinusoidally moving heat flux are used. The effect of remote cooling by radiation (photon and charge exchanged neutral particle) in the ML region is modeled by the spacially distributed radiative heat sources. The ML plate is modeled by 2-dimensional slab geometry allowing interface conductance between the ML plate and the cooling duct. The effect of radiative heat transfer to the cooling duct and convective heat transfer to the cooling gas are included. Results show that in general the operation with the maximum heating pulse length of 10 s is not allowable in the absence of remote cooling. In a typical case when radiation loss in the ML region amounts to 70 % of the total power flow to the ML chamber, the power flow to the ML plate reduces by half and the peak heat flux also reduces by half or more. In addition, this heat flux is further decreased by half with ± 3.5 cm swing. This analysis presents the relationship between various heat loads and the ML plate temperature and hence the thermally allowable operational range on the ML plate.

Key Words; Heat Flux, Temperature, First Wall, Magnetic Limiter,
JT-60, Thermal Analysis, Radiation, Remote Cooling.

目 次

| | |
|---------------------|---|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 磁気リミタ部第1壁の熱負荷 | 2 |
| 2.1 磁気リミタプラズマの解析結果 | 2 |
| 2.2 磁場形状 | 2 |
| 2.3 粒子熱流束 | 2 |
| 2.4 ふく射熱流束 | 3 |
| 2.5 磁気リミタ部第1壁の熱流束分布 | 4 |
| 3. 磁気リミタ板熱解析 | 5 |
| 3.1 計算モデル | 5 |
| 3.2 入熱条件 | 5 |
| 3.3 計算結果 | 5 |
| 3.4 補足検討 | 6 |
| 3.5 熱解析結果のまとめ | 7 |
| 4. おわりに | 7 |
| 謝 辞 | 8 |
| 文 献 | 8 |

Contents

| | |
|---|---|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Heat load onto the first walls in magnetic limiter chamber | 2 |
| 2.1 Analytical results of magnetic limiter plasma | 2 |
| 2.2 Magnetic field configuration | 2 |
| 2.3 Charged particle heat flux | 2 |
| 2.4 Radiation heat flux | 3 |
| 2.5 Heat flux distribution | 4 |
| 3. Thermal analysis of magnetic limiter plate | 5 |
| 3.1 Calculation model | 5 |
| 3.2 Heat load and operation parameter | 5 |
| 3.3 Results | 5 |
| 3.4 Supplemental calculation | 6 |
| 3.5 Summary of results | 7 |
| 4. Conclusion | 7 |
| Acknowledgement | 8 |
| References | 8 |

1. は じ め に

大型トカマク装置の設計における難しい問題の一つは、プラズマを取り囲む第1壁への大きな集中的な入熱である。プラズマの熱エネルギーがごく一部の第1壁に集中すると、材料の溶融、高温化による強度の低下、材料劣化などを起こし、材料寿命を短くする。またこのような入熱は、放電時間が長くなるに伴って、熱除去の点からも容易ではなくなり、装置が大型化されるにつれて益々深刻な問題となっている。したがって、プラズマから第1壁への入熱条件を明らかにし、その熱負荷を軽減することが強く要求される。

一方、プラズマへの不純物の混入を軽減することは、物理的に重要な課題であり、その一つの方法としてダイバータが用いられる。このダイバータの場合には、プラズマ粒子を主プラズマから離れた室へ導くので、本質的にかんがりのプラズマ熱エネルギーをダイバータ板で受けることになり、熱的に厳しいものとなる。したがって、受熱面の拡大や熱集中を避けることによる熱負荷軽減の必要性が特に強く求められる。

ところで、最近のDoublet-III^{(1),(2)}やASDEXのダイバータ実験結果によると、第1壁への入熱の観点から興味ある報告がなされている。それはダイバータ領域でプラズマの密度が増加し、プラズマ粒子間の相互作用が増大する結果、粒子のもつエネルギーがふく射に変換され器壁へ放出される、いわゆるリモートクーリングによってダイバータ板への入熱が大幅に軽減されたことである。

JT-60は、現在建設中の臨界プラズマ試験装置であり、プラズマの不純物を軽減するために磁気リミタを有している。この磁気リミタの構成は、Fig.1に示すように、セパトリクス磁気面を形成するための主および副磁気リミタコイルおよびそのコイルのまわりに取り付けられるライナ、磁気リミタ室へ導かれるプラズマ粒子を受ける磁気リミタ板などからなる。JT-60では加熱入力30MW、放電時間5~10secの磁気リミタ運転が予定されており、磁気リミタ板は熱的に厳しい使用条件になると予想されるが、最近行われたJT-60磁気リミタプラズマの解析によると、セパトリクス磁気面の制御や磁気リミタ室へのガス注入により、磁気リミタ領域のプラズマ密度が増加し、強いリモートクーリング⁽³⁾が生じる可能性が示されている。

またJT-60では、磁気リミタコイル電流に2~5Hzの交流成分を重畳させて、磁気リミタ板上でセパトリクス磁気面をスイングさせることにより、実効的に表面熱流束を軽減させる方法を採用している。このスイングの効果を考慮した磁気リミタ板の熱解析がこれまで報告されているが、本報告ではそれ以後の設計検討による構造や材料の決定を反映するとともに、JT-60において起こり得る入熱条件を模擬することを考慮し、上述のリモートクーリングが生じる場合およびスイングさせる場合に対して、磁気リミタ部第1壁への熱負荷を評価し、磁気リミタ板の熱解析を行う。

以下次章では磁気リミタプラズマの解析結果に基づいて磁気リミタ部第1壁の熱負荷を評価し、3章において磁気リミタ板の熱解析について記述する。最後に4章で検討結果のまとめを記す。

2. 磁気リミタ部第1壁の熱負荷

2.1 磁気リミタプラズマの解析結果

Fig.2にJT-60磁気リミタプラズマの解析により得られた結果の一例として、強いリモートクーリングが生じる“High Compression Case”における、磁気リミタ領域でのプラズマ熱流の磁気面に沿った変化を示す。この例では、主プラズマから磁気リミタ室へ流入するプラズマ熱流が20 MW（上下の磁気リミタでの合計値）、単位時間あたりの流入粒子量が $6 \times 10^{22} \text{ s}^{-1}$ 、酸素不純物の含有量が1%という計算条件に基づいている。Fig.2より、磁気リミタ板の近傍になるほど、強いリモートクーリングにより粒子熱流が減少し、ふく射熱流が増加することがわかる。以下に示す熱解析においては、このようなリモートクーリングが生ずる代表的な場合として、磁気リミタ室へ流入するプラズマ熱流の約70%がふく射損失となり、残りの30%が磁気リミタ板への粒子熱流となる場合を検討する。

2.2 磁場形状

磁気リミタ部第1壁への熱負荷を評価する際の磁場形状は、Fig.3に示す平衡磁場配位⁽⁴⁾を使用した。計算条件は、プラズマ電流が2.02 MA、プラズマ小半径が0.866 m、ポロイダルベータ値を β_p 、内部インダクタンスを l_i とした場合の $(\beta_p + \frac{1}{2} l_i)$ の値が1.46、磁気リミタコイル電流が105 kA、垂直磁場コイル電流が34.55 kA、四重極磁場コイル電流が15 kAである。

2.3 粒子熱流束

プラズマから磁気リミタ板への熱負荷の評価において、まずプラズマ粒子により輸送される熱流について検討する。ここでは、プラズマ粒子による熱流の分布をガウス分布で与えた。またその半値幅は、磁気リミタ板上で3 cmとした。

Fig.4に示すように磁気リミタ板に沿った座標系を用いると、板の表面熱流束 q は次式で表わされる。

$$q = \frac{Q_0' \exp(-x^2/w)}{2\pi (R_0 + x \cos 35^\circ)} \quad (1)$$

ここで、 Q_0' は磁気リミタ板上の x 方向単位幅あたりのプラズマ熱流、 R_0 は分布中心の大半径、 w は分布の拡がりを表わす係数であり、磁気リミタ板の傾斜角は 35° である。

また、磁気面をスイングさせる場合の熱流束は、時間平均値で与えるものとし、半値幅がスイング幅だけ拡がるとした。本計算では ± 1.5 cm および ± 3.5 cm のスイング幅を対象とし、これに対応する分布の半値幅をそれぞれ6 cm、10 cmとした。

上記の考え方により求めた粒子熱流束に関する諸数値をTable 1に示す。本表には、強いリモートクーリングを生じる場合に対する、スイングなし、スイング幅 ± 1.5 cm および ± 3.5 cm の3ケー

スが示されている。リモートクーリングを生じない場合は、磁気リミタ部へ流入するプラズマ熱流がすべて磁気リミタ板への熱負荷となるので、ピーク熱流束の値は各々のケースに対して、本表に示す値の約3.5倍となる。

2.4 ふく射熱流束

磁気リミタ部第1部のふく射熱流束を計算するため、ふく射熱源の分布を、2.1節で述べたふく射熱流およびFig.3に示す磁場形状に基づいて設定した。

計算上の仮定は以下のとおりである。

- (イ) ふく射は等方的に放出される。
- (ロ) トロイダル方向のふく射熱源分布は一様とする。
- (ハ) ふく射はプラズマ中で吸収されない。
- (ニ) 壁面に到達するふく射は反射されることなくすべて吸収される。

また概略の計算手法を以下に示す。

ポロイダル断面における第1壁面形状を多数の線分で近似する。つぎにふく射領域を複数の要素領域に分割し、各領域毎に熱源密度を与える。各要素領域では、熱源は一様分布として取扱う。また熱源分布は上下対称とする。本計算における第1壁面の幾何形状およびふく射領域をFig.5に示す。計算形状は、JT-60実機の各第1壁面を一つの線分で与え、全部で38分割(上下片側)した。またふく射領域については、Fig.6に示すように11の要素領域(上下片側)に分割した。図中の数値は各要素領域におけるふく射損失(MW)を示す。

このようにして設定したふく射領域から各第1壁へ到達するふく射熱流束は次のようにして求めた。Fig.7に示すように、着目する第1壁面の点を原点とし、面法線方向をZ軸とする座標系を用いると、ふく射熱流束 q は次式で表わされる。

$$q = \int_{\varphi_p=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{s=0}^{s_w} \frac{I}{4\pi} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \, ds \quad (2)$$

ここで、 I はふく射熱源の射出強度であり、 s_w はトラス内壁にふく射が衝突するまでの距離である。(2)式を数値的に積分することにより各第1壁のふく射熱流束を求めた。ここで s 方向の積分はふく射が器壁と衝突するまで、ふく射領域を通過した部分について、その射出強度を加算した。

上記計算により得られた、磁気リミタ部第1壁のふく射熱流束をTable2に示す。表より、磁気リミタ板に関しては、強いふく射源が板のごく近傍に存在するため、熱流束にピークを生ずるが、磁気リミタ室内の他の第1壁の場合はむしろ均等に熱が分散されることがわかる。

この計算では磁気リミタ領域でのふく射損失のみ考慮したが、その他に主プラズマからのふく射損失もあるので、主および副磁気リミタコイルまわりライナのうち主プラズマに面するものの熱流束が約 10 w/cm^2 増加することになる。しかし磁気リミタ室側へのふく射の形態係数は小さいので磁気リミタ板などの磁気リミタ室内部の第1壁の熱流束への影響は小さいと考えられる。

2.5 磁気リミタ部第1壁の熱流束分布

2.3節と2.4節で述べた粒子熱流束およびふく射熱流束の計算結果に基づいて、磁気リミタ部第1壁の熱負荷を検討する。

Fig.8は強いリモートクーリングを生じる場合の磁気リミタ部第1壁の熱流束分布を示す。Fig.9は強いリモートクーリングを生ずる場合と生じない場合とで磁気リミタ板の熱流束分布を比較したものである。これらの図には、磁気面をスイングさせない場合を示す。Fig.8, Fig.9より、リモートクーリングにより磁気リミタ板への入熱が大幅に減少し、他の第1壁面へ分散されることが明瞭にわかる。

Fig.10は強いリモートクーリングを生じる場合の磁気リミタ板の時間平均熱流束のスイング幅に対する依存性を示すものである。図にはスイング幅0, ± 1.5 および ± 3.5 cmの3ケースが示されている。図よりスイングにより熱流束のピーク値が減少する様子がわかる。

Table 3は磁気リミタ板の熱負荷に関して上述の検討結果をまとめたものである。ケース番号1, 2, 3が強いリモートクーリングを生じる場合であり、ケース番号1A, 2A, 3Aがリモートクーリングを生じない場合である。またケース1, 1Aはスイングのない場合、ケース2, 2Aは ± 1.5 cmのスイングがある場合、ケース3, 3Aは ± 3.5 cmのスイングがある場合を示す。本表より以下のことがわかる。

- (i) 磁気リミタ板への熱流はリモートクーリングにより約半分に減少する。また最大熱流束についても、スイングがない場合で約 400 w/cm^2 となり、リモートクーリングがない場合の 1100 w/cm^2 に比較すると大幅に軽減される。
- (ii) 磁気面をスイングさせる場合の時間平均熱流束はスイング幅の増加に伴い低減され、 ± 3.5 cmのスイングの場合にはスイングのない場合と比較して約半分になる。
- (iii) リモートクーリングと ± 3.5 cmのスイング効果の両方があれば、磁気リミタ板最大熱流束は大きく軽減され、約 200 w/cm^2 となる。

また、リモートクーリングがある場合に対して、主プラズマから磁気リミタ室へ流入するプラズマ熱流の各第1壁への分配をFig.11に示す。図中の数値は上下片側半分の値を示す。図より、磁気リミタ板への熱流 5.3 MW のうち、粒子によるものが 2.9 MW 、ふく射によるものが 2.4 MW となる。磁気リミタ板を除く磁気リミタ部第1壁へはふく射による熱流があり、その値は 4.2 MW で全体の4割程度となる。これらの各面の熱流束に関しては、副磁気リミタコイルまわりライナで 21 w/cm^2 、主磁気リミタコイルまわりライナで 17 w/cm^2 、磁気リミタ室奥ライナで 32 w/cm^2 である。また、磁気リミタ室へ流入するプラズマ熱流の一部は、ふく射により主プラズマ側真空容器の第1壁面に分配され、その値は 0.5 MW で全体の5%程度となる。

3. 磁気リミタ板熱解析

3.1 計算モデル

Fig.1 2に磁気リミタ板構造を示す。磁気リミタ板は厚さ2 cm, 長さ24 cm, 幅10 cmのモリブデンに炭化チタン (TiC) をコーティングした平板であり, 一端がインコネル625の冷却ダクトにSUH660のボルトで締結されている。冷却は窒素ガスによりなされる。

熱解析は汎用熱伝導解析コードHEATING⁽⁵⁾-3を使用し, 1パルスの非定常計算および定常計算を行った。Fig.1 3にメッシュ図を示す。計算に使用した材料の熱物性値をTable4に示す。SUH660の物性値はステンレス鋼SUS304Lのものを採用した。物性値の温度依存性は考慮せず, 各部分の代表的温度における値を使用した。非定常計算における初期温度および窒素ガス温度は120℃とした。

ふく射の境界条件については, TiCでコーティングされたモリブデン表面のふく射率を0.8, インコネル625やSUH660のそれを0.3として次式によりふく射熱伝達係数 h_r を求めた。

$$h_r = \frac{\sigma_{SB} \cdot K}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (3)$$

ここで, σ_{SB} はステファナーボルツマン定数, K は換算係数 ($1.164 \times 10^{-4} \text{w/cm}^2/\text{kcal/hr m}^2$), ϵ_1, ϵ_2 は伝熱面のふく射率である。(3)式より, 磁気リミタ板と冷却ダクト間のふく射熱伝達係数は $1.59 \times 10^{-12} \text{w/cm}^2\text{K}$ となる。また, 磁気リミタ板から対向面ライナへのふく射については, 対向面温度を300℃とし, ふく射熱伝達係数は $1.59 \times 10^{-12} \text{w/cm}^2\text{K}$ を採用した。

冷却ダクトから窒素ガスへの強制対流熱伝達係数は $0.01 \text{w/cm}^2\text{°C}$ とし, 磁気リミタ板ボルト締結部の接触熱コンダクタンスは $0.1 \text{w/cm}^2\text{°C}$ を用いた。

3.2 入熱条件

磁気リミタ板の熱解析を行う際の入熱条件としては, 熱流束の分布, 入熱時間および運転間隔がある。このなかで熱流束分布は2.5節で得られた結果を用いた。また入熱時間/運転間隔の組合せとして, 5s/10min, 10s/10minおよび10s/20minの3ケースを検討した。なお熱流束の時間変化は矩形で与えた。

3.3 計算結果

磁気リミタ板の熱解析はTable3に示す各ケースに対して行った。計算ではまず, パルス入熱を時間平均した入熱条件に対する定常温度計算を行い, その結果を到達ベース温度とし, 非定常温度計算により得られる温度上昇をそれに加算することにより到達最高温度を求めた。

Fig.1 4に入熱条件10s/10minの場合の定常計算結果を, Fig.15に10s/20min(5sec/10

min) の場合の結果を示す。いずれもリモートクーリングがある場合を示す。これらの図より、磁気リミタ板表面は板幅方向にはほぼ均一な温度となり、到達ベース温度は前者が600℃、後者が400℃となることがわかる。

また、Table3に示すケース1、2および3に対する磁気リミタ板温度の時間変化をFig.16に、加熱開始から10秒後の温度の板幅方向の分布をFig.17に示す。これらの図をみると、強いリモートクーリングを生じる場合の磁気リミタ板の温度上昇は、加熱後10秒において、スイングのない場合で600℃、±1.5 cmのスイングを行う場合で450℃、±3.5 cmのスイングを行う場合で360℃となる。また、スイング幅の増加とともに板幅方向に温度分布が広がるが、ボルトの部分の温度上昇はそれほど大きくなりなことがわかる。

3.4 補足検討

これまでの検討では、磁気面をスイングさせる場合には、スイングの幅に対応した実効的半値幅をもつガウス分布を時間平均熱流束として熱計算を行ってきた。しかし、スイングさせる場合は、厳密には表面熱流束はスイングする磁気面の動きに応じて周期的に変化する。したがって各部の温度は時間的に増加、減少を繰り返しながら鋸歯状に上昇する。そこで本節では、スイングを模擬した表面熱流束を境界条件として与えた場合の温度上昇を検討し、前節で示した時間平均熱流束を用いた場合との差を調べる。

まず、鋸歯状温度変化の幅を評価する。計算モデルはFig.18に示すように、磁気リミタ板の中心を初期点として矩形分布の熱流束が時間とともに正弦的に変化するものである。板の幅、厚さはそれぞれ20 cm、2 cmとし、熱流束の幅、大きさをそれぞれ3 cm、400w/cm²とした。計算は2次元熱伝導数値解析プログラム(DIVHEAT)を使用し、Table5に示すスイング周波数と振幅をパラメータとした。

つぎに、実際の分布をもつ表面熱流束が時間とともに正弦的に変化する場合の時間平均熱流束を境界条件として与え、前節と同様の計算プログラムを使用して温度上昇を計算した。

これら2つの計算により得られた結果を組合せることにより、スイングを模擬した場合の磁気リミタ板温度上昇を評価した。

Fig.19はスイング周波数1 Hzの場合の結果を示し、Fig.20は2.5 Hzの場合、Fig.21は5 Hzの場合の結果を示す。いずれの図にもスイングの振幅±1.5 cmと±3.5 cmの2ケースの結果を示し、また比較のため前節で得られた結果についても示した。これらの図より、スイングを模擬した場合と実効的ガウス分布の場合との温度上昇の差は、±1.5～±3.5 cmのスイングに対して、スイング周波数1 Hzの場合で70～90℃、5 Hzで50～60℃となる。また、鋸歯状の温度変化の上限と下限の差は数周期ではほぼ一定値となること、スイング周波数が大きくなるほどその差は小さくなり、またスイング振幅が小さいほどやはりその差は小さいことがわかる。なお、±1.5 cmのスイングを模擬した場合は前節の結果に比べて時間平均温度上昇が大きくなる傾向があるが、これはスイングを模擬した場合の時間平均熱流束のピーク値が、ガウス分布に基づくものより大きいことによる。

また、鋸歯状温度変化の振幅は表面熱流束に比例すると考えられる。そこでFig.22に、±1.5 cmと±3.5 cmのスイングについて、単位熱流束あたりの鋸歯状温度変化の振幅のスイング周波数

に対する依存性を示した。本図を見ると、 ± 3.5 cm のスイングの温度振幅が ± 1.5 cm の場合より大きくなっているが、さらにスイング幅が大きくなる場合には、表面熱流束が低減され温度上昇そのものが小さくなるので、温度振幅としては逆に小さくなると考えられる。

3.5 熱解析結果のまとめ

以上述べた熱解析結果をまとめTable 6に示す。本表においてケース番号の後に(s)を付して示したものは、前節で検討したスイングを模擬した場合の結果である。本表をみると、磁気リミタ板温度に関して、ふく射によるリモートクーリングの効果が顕著であることがわかる。例えば、 $10\text{ s}/20\text{ min}$ の入熱条件では、リモートクーリングを生じない場合の最高温度が 2000°C 以上であるのに対して、リモートクーリングがある場合には 1000°C となる。さらにスイングの効果により温度上昇は減少し、 ± 1.5 cm のスイングでは 900°C 程度、 ± 3.5 cm の場合には 800°C 程度となる。

つぎに、これまでに検討した入熱条件以外に入熱条件に対しても磁気リミタ板温度を予測し、熱的性能の目安をつけることができるように、その到達ベース温度およびパルス入熱時の温度上昇に関して一般性のある整理を行った。Fig.23は磁気リミタ板および取付ボルトの到達ベース温度を示す。横軸は上下片側の磁気リミタ板への熱流値にパルス入熱時間を乗じ、放電間隔で除した平均熱流値を示す。本図より、これらの入熱条件の各種組合せに対して到達ベース温度を推測することが可能である。Fig.24はパルス入熱時の短時間的な磁気リミタ板温度上昇を示す。縦軸は上下片側の磁気リミタ板への単位熱流値あたりの温度上昇である。この場合の入熱モデルとしては、まず粒子入熱に対する表面熱流束をガウス分布で与え、その半値幅をパラメータとした。またふく射入熱による温度上昇を予測するため、一様な熱流束分布の場合の温度上昇を、磁気リミタ板および取付ボルトについて示した。さらに、スイングを模擬した場合の温度上昇についても、前節と同様の手法により評価した。計算は半値幅3 cm のガウス分布を正弦的に ± 1.5 cm、 ± 3.5 cm および ± 5.0 cm だけスイングさせる場合に対して行い、鋸歯状温度変化の平均値を示した。

4. お わ り に

以上のように、JT-60の磁気リミタプラズマの解析結果に基づいて、磁気リミタ領域で強いリモートクーリングを生じる場合の磁気リミタ部第1壁の熱負荷を評価し、磁気リミタ板の熱解析を行った。その結果、磁気リミタ領域でのふく射熱損失により、プラズマ熱流が磁気リミタ部の各第1壁へ分散され、磁気リミタ板への熱流はリモートクーリングを生じない場合と比較して半分に減少し、熱流束のピーク値も50%程度の、 400 w/cm^2 に減少すること、さらに磁気リミタ板上でセパトリクス磁気面をスイングさせることにより、熱流束のピーク値は20%程度の、 200 w/cm^2 にまで低減されることがわかった。このような熱流および熱流束の低減に伴って、磁気リミタ板の到達最高温度は半分以下の、 $600\sim 1000^\circ\text{C}$ となることがわかった。

したがって、リモートクーリングやスイングによって、JT-60における磁気リミタ運転範囲の拡大の可能性が考えられる。その他、核融合実験炉などにおいても、リモートクーリングによる熱負荷軽減効果によりダイバータ板の熱設計の困難さを大きく軽減できるものと期待される。

に対する依存性を示した。本図を見ると、 ± 3.5 cm のスイングの温度振幅が ± 1.5 cm の場合より大きくなっているが、さらにスイング幅が大きくなる場合には、表面熱流束が低減され温度上昇そのものが小さくなるので、温度振幅としては逆に小さくなると考えられる。

3.5 熱解析結果のまとめ

以上述べた熱解析結果をまとめTable 6に示す。本表においてケース番号の後に(s)を付して示したものは、前節で検討したスイングを模擬した場合の結果である。本表をみると、磁気リミタ板温度に関して、ふく射によるリモートクーリングの効果が顕著であることがわかる。例えば、 $10\text{ s}/20\text{ min}$ の入熱条件では、リモートクーリングを生じない場合の最高温度が 2000°C 以上であるのに対して、リモートクーリングがある場合には 1000°C となる。さらにスイングの効果により温度上昇は減少し、 ± 1.5 cm のスイングでは 900°C 程度、 ± 3.5 cm の場合には 800°C 程度となる。

つぎに、これまでに検討した入熱条件以外に入熱条件に対しても磁気リミタ板温度を予測し、熱的性能の目安をつけることができるように、その到達ベース温度およびパルス入熱時の温度上昇に関して一般性のある整理を行った。Fig.23は磁気リミタ板および取付ボルトの到達ベース温度を示す。横軸は上下片側の磁気リミタ板への熱流値にパルス入熱時間を乗じ、放電間隔で除した平均熱流値を示す。本図より、これらの入熱条件の各種組合せに対して到達ベース温度を推測することが可能である。Fig.24はパルス入熱時の短時間的な磁気リミタ板温度上昇を示す。縦軸は上下片側の磁気リミタ板への単位熱流値あたりの温度上昇である。この場合の入熱モデルとしては、まず粒子入熱に対する表面熱流束をガウス分布で与え、その半値幅をパラメータとした。またふく射入熱による温度上昇を予測するため、一様な熱流束分布の場合の温度上昇を、磁気リミタ板および取付ボルトについて示した。さらに、スイングを模擬した場合の温度上昇についても、前節と同様の手法により評価した。計算は半値幅3 cm のガウス分布を正弦的に ± 1.5 cm、 ± 3.5 cm および ± 5.0 cm だけスイングさせる場合に対して行い、鋸歯状温度変化の平均値を示した。

4. お わ り に

以上のように、JT-60の磁気リミタプラズマの解析結果に基づいて、磁気リミタ領域で強いリモートクーリングを生じる場合の磁気リミタ部第1壁の熱負荷を評価し、磁気リミタ板の熱解析を行った。その結果、磁気リミタ領域でのふく射熱損失により、プラズマ熱流が磁気リミタ部の各第1壁へ分散され、磁気リミタ板への熱流はリモートクーリングを生じない場合と比較して半分に減少し、熱流束のピーク値も50%程度の、 $400\text{ w}/\text{cm}^2$ に減少すること、さらに磁気リミタ板上でセパトリクス磁気面をスイングさせることにより、熱流束のピーク値は20%程度の、 $200\text{ w}/\text{cm}^2$ にまで低減されることがわかった。このような熱流および熱流束の低減に伴って、磁気リミタ板の到達最高温度は半分以下の、 $600\sim 1000^\circ\text{C}$ となることがわかった。

したがって、リモートクーリングやスイングによって、JT-60における磁気リミタ運転範囲の拡大の可能性が考えられる。その他、核融合実験炉などにおいても、リモートクーリングによる熱負荷軽減効果によりダイバート板の熱設計の困難さを大きく軽減できるものと期待される。

謝 辞

本検討を行うにあたり、プラズマからの入熱条件や結果のまとめなどに関して広範にご指導戴いた下村安夫 JT-60 計画室実験解析グループリーダーに厚く感謝の意を表します。また報告書をまとめるにあたり有益なご意見を戴いた同室同グループ関省吾氏に深く感謝致します。

さらに、終始ご指導、ご鞭達戴いた苫米地頭大型トカマク開発部長、吉川允二同次長、田村早苗 JT-60 第 1 開発室長、太田充同室長代理に厚く謝意を表します。最後に有益なご意見をいただいた JT-60 第 1 開発室員の皆様に対して深く感謝致します。

文 献

- ① Y. Shimomura, M. Keilhacker, K. Lackner, H. Murmann and G. Siller, Nuclear Fusion, 23 (1983) 869.
- ② S. Sengoku, M. Shimada, M. Miya et al., JAERI-M 83-008 (1983).
- ③ S. Seki, T. Takizuka, S. Saito et al., to be published in Journal of Nuclear Materials.
- ④ 中村博雄, 二宮博正, 他; JAERI-M 7013 (1977).
- ⑤ Y. Suzuki, A. Kameari, H. Ninomiya et al., Proc. 5th Int. conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Research, Tokyo 1974, Vol. I (IAEA, Vienna, 1975) 411.
- ⑥ W. D. Turner and M. Siman-Tov; ORNL-TM-3208 (1971).

謝 辞

本検討を行うにあたり、プラズマからの入熱条件や結果のまとめなどに関して広範にご指導戴いた下村安夫 JT-60計画室実験解析グループリーダーに厚く感謝の意を表します。また報告書をまとめるにあたり有益なご意見を戴いた同室同グループ関省吾氏に深く感謝致します。

さらに、終始ご指導、ご鞭達戴いた苫米地頭大型トカマク開発部長、吉川允二同次長、田村早苗 JT-60第1開発室長、太田充同室長代理に厚く謝意を表します。最後に有益なご意見をいただいた JT-60第1開発室員の皆様に対して深く感謝致します。

文 献

- ① Y. Shimomura, M. Keilhacker, K. Lackner, H. Murmann and G. Siller, Nuclear Fusion, 23 (1983) 869.
- ② S. Sengoku, M. Shimada, M. Miya et al., JAERI-M 83-008 (1983).
- ③ S. Seki, T. Takizuka, S. Saito et al., to be published in Journal of Nuclear Materials.
- ④ 中村博雄, 二宮博正, 他 ; JAERI-M 7013 (1977).
- ⑤ Y. Suzuki, A. Kameari, H. Ninomiya et al., Proc. 5th Int. conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Research, Tokyo 1974, Vol. I (IAEA, Vienna, 1975) 411.
- ⑥ W. D. Turner and M. Siman-Tov ; ORNL-TM-3208 (1971).

Table 1 磁気リミタ板の粒子熱流束に関する諸数値

| Half Width (cm) | Swing Width (cm) | Q_0' (MW/cm) | w (cm ²) | R ₀ (cm) | q _{peak} (w/cm ²) |
|-----------------|------------------|----------------|----------------------|---------------------|--|
| 3 | (0) | 0.91 | 3.25 | 455.8 | 320 |
| 6 | (±1.5) | 0.454 | 13.0 | 453.2 | 160 |
| 10 | (±3.5) | 0.273 | 36.0 | 453.9 | 96 |

Table 2 強いリモートクーリングを生じる場合の
JT-60第1壁のふく射熱流束

| Face No. | Radiative Heat Flux (w/cm ²) | Face No. | Radiative Heat Flux (w/cm ²) |
|----------|--|----------|--|
| 1 | 0.5 | 20 | 16.2 |
| 2 | 0.7 | 21 | 24.3 |
| 3 | 1.5 | 22 | 32.1 |
| 4 | 1.7 | 23 | 1.1 |
| 5 | 1.6 | 24 | 17.8 |
| 6 | 1.1 | 25 | 20.1 |
| 7 | 0.9 | 26 | 8.5 |
| 8 | 0.9 | 27 | 35.3 |
| 9 | 0.5 | 28 | 75.3 |
| 10 | 0.5 | 29 | 52.0 |
| 11 | 0.5 | 30 | 40.5 |
| 12 | 1.1 | 31 | 27.4 |
| 13 | 2.3 | 32 | 22.3 |
| 14 | 4.4 | 33 | 19.4 |
| 15 | 6.6 | 34 | 16.6 |
| 16 | 11.2 | 35 | 15.3 |
| 17 | 17.6 | 36 | 10.0 |
| 18 | 21.0 | 37 | 6.5 |
| 19 | 16.9 | 38 | 4.2 |

Face No 1~10 : Main vacuum vessel first walls

Face No.11~19 : Sub magnetic limiter coil liners

Face No.20~25 : Magnetic limiter chamber liners

Face No.26~33 : Magnetic limiter plate

Face No.34~38 : Main magnetic limiter coil liners

Table 3 磁気リミタ板の熱負荷

| Case No. | Dlasma Energy Loss (One Side) | | Half Width * ₁ (cm) | (Swing) Width (cm) | Heat Load on Magnetic Limiter Plate | |
|----------|----------------------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------|--|--|
| | Radiation (MW) | Particle (MW) | | | Power Flow (MW/cm) | Max. Heat Flux (w/cm ²) |
| CASE1 | 7.1 | 2.9 | 3 | (0) | 5.3 | 395 |
| CASE1A | 0 | 10 | 3 | (0) | 10 | 1100 |
| CASE2 | 7.1 | 2.9 | 6 | (±1.5) | 5.3 | 245 * ² |
| CASE2A | 0 | 10 | 6 | (±1.5) | 10 | 550 * ² |
| CASE3 | 7.1 | 2.9 | 10 | (±3.5) | 5.3 | 175 * ² |
| CASE3A | 0 | 10 | 10 | (±3.5) | 10 | 330 * ² |

*1 Along magnetic limiter plate

*2 Time averaged heat flux

Table 4 磁気リミタ板などの熱物性値

| | Thermal Conductivity (w/cm°C) | Density (g/cm ³) | Specific Heat (J/g°C) | Notes |
|------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|
| Molybdenum | 1.17 | 10.2 | 0.285 | at 550°C |
| SUS660 | 0.184 | 7.93 | 0.557 | SUS304L at 300°C |
| Inconel625 | 0.123 | 8.44 | 0.455 | at ~200°C |
| | 0.138 | 8.44 | 0.477 | at ~300°C |

Table 5 スィングの周波数および振幅

| Case No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| Frequency (Hz) | 1.0 | 1.0 | 2.5 | 2.5 | 5.0 | 5.0 |
| Swing Width (cm) | ±1.5 | ±3.5 | ±1.5 | ±3.5 | ±1.5 | ±3.5 |

Table 6 磁気リミッター板熱解析結果のまとめ

| Case | Plasma Energy Loss | | Swing Width (cm) | Swing Frequency (Hz) | Heat Load on Magnetic Limiter Plate | | Temperature of Magnetic Limiter Plate (°C) | | | | | | |
|------------|--------------------|---------------|------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|-------------------------------------|------------|------|-----|------|
| | Radiation (MW) | Particle (MW) | | | Power Flow (MW) | Max. Heat Flux (w/cm ²) | 5 s/10min Base Temp. | 10 s/20min Max. Temp. | 10 s/10min ³⁾ Base Temp. | Max. Temp. | | | |
| CASE 1 | 7.1 | 2.9 | 3 | 0 | — | 5.3 | 395 | 400 | 820 | 400 | 1000 | 600 | 1200 |
| CASE 1A | 0 | 10 | 3 | 0 | — | 10 | 1100 | 600 | 1750 | 600 | 2150 | 900 | 2500 |
| CASE 2 | 7.1 | 2.9 | 6 | — | — | 5.3 | 245 ⁴⁾ | 400 | 700 | 400 | 850 | 600 | 1050 |
| CASE 2(s) | 7.1 | 2.9 | 3 | ±1.5 | 5 | 5.3 | 300 ⁴⁾ | 400 | 760 | 400 | 930 | 600 | 1120 |
| CASE 2A | 0 | 10 | 6 | — | — | 10 | 550 ⁴⁾ | 600 | 1250 | 600 | 1600 | 900 | 1900 |
| CASE 2A(s) | 0 | 10 | 3 | ±1.5 | 1 | 10 | 800 ⁴⁾ | 600 | 1550 | 600 | 1950 | 900 | 2250 |
| CASE 3 | 7.1 | 2.9 | 10 | — | — | 5.3 | 175 ⁴⁾ | 400 | 630 | 400 | 760 | 600 | 960 |
| CASE 3(s) | 7.1 | 2.9 | 3 | ±3.5 | 1 | 5.3 | 178 ⁴⁾ | 400 | 650 | 400 | 780 | 600 | 980 |
| CASE 3A | 0 | 10 | 10 | — | — | 10 | 330 ⁴⁾ | 600 | 700 | 600 | 830 | 900 | 1030 |
| CASE 3A(s) | 0 | 10 | 3 | ±3.5 | 1 | 10 | 410 ⁴⁾ | 600 | 1050 | 600 | 1300 | 900 | 1600 |
| | | | | | | | | | 1160 | 600 | 1560 | 900 | 1760 |
| | | | | | | | | | 1280 | 600 | 1680 | 900 | 1880 |

Notes : 1) Power flow into upper or lower half of magnetic limiter chamber.

2) Along magnetic limiter plate.

3) Temperature of gaseous nitrogen is corrected from 120°C to 170°C.

4) Time averaged heat flux.

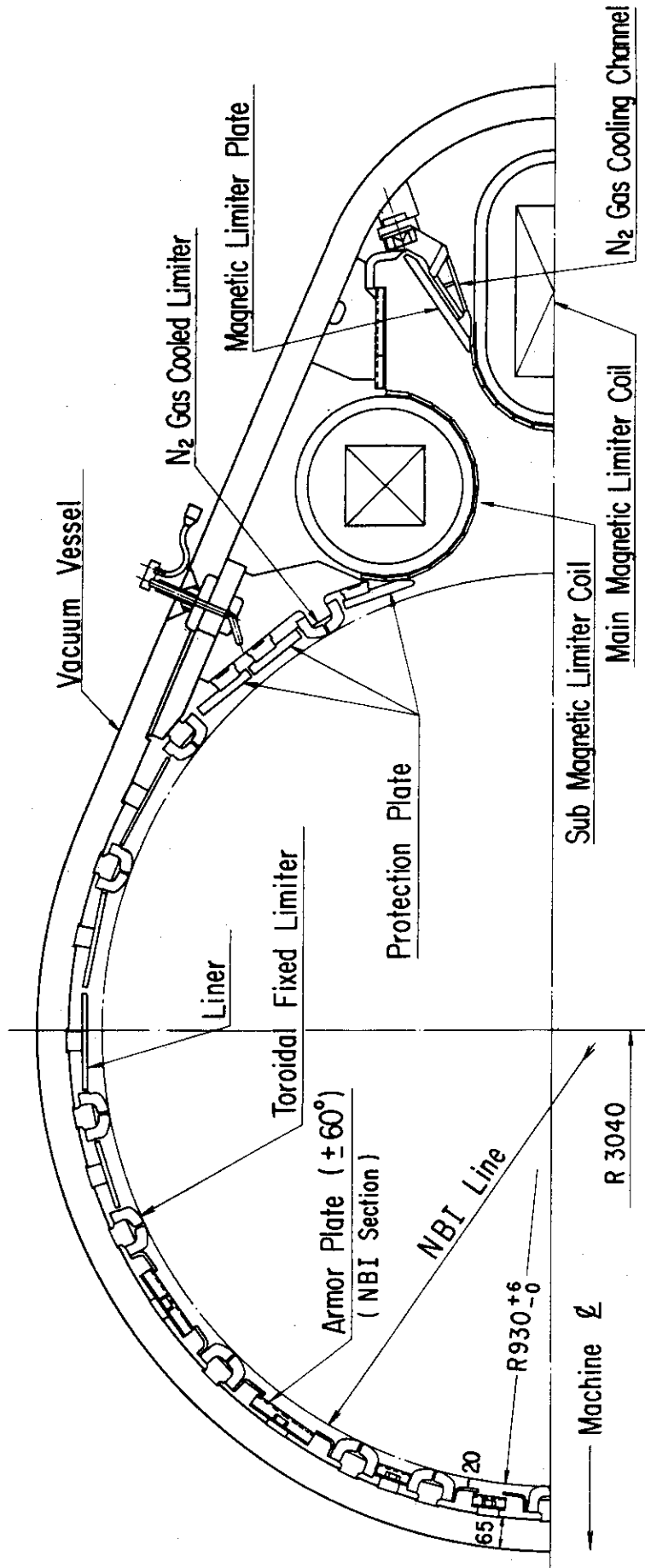


Fig. 1 JT-60U の第 1 壁および磁気リミタの構造

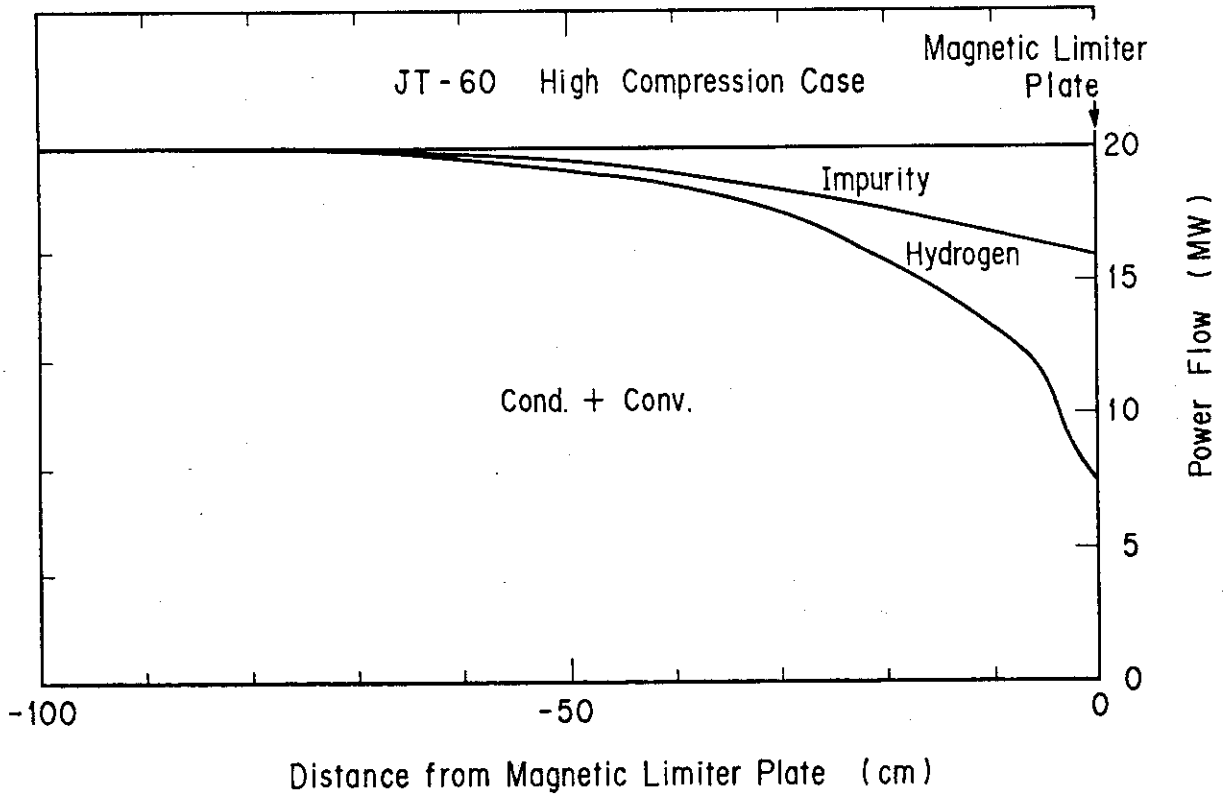


Fig. 2 強いリモートクーリングが生ずる場合 (High Compression Case) のJT-60磁気リミタ部へ流入するプラズマ熱流

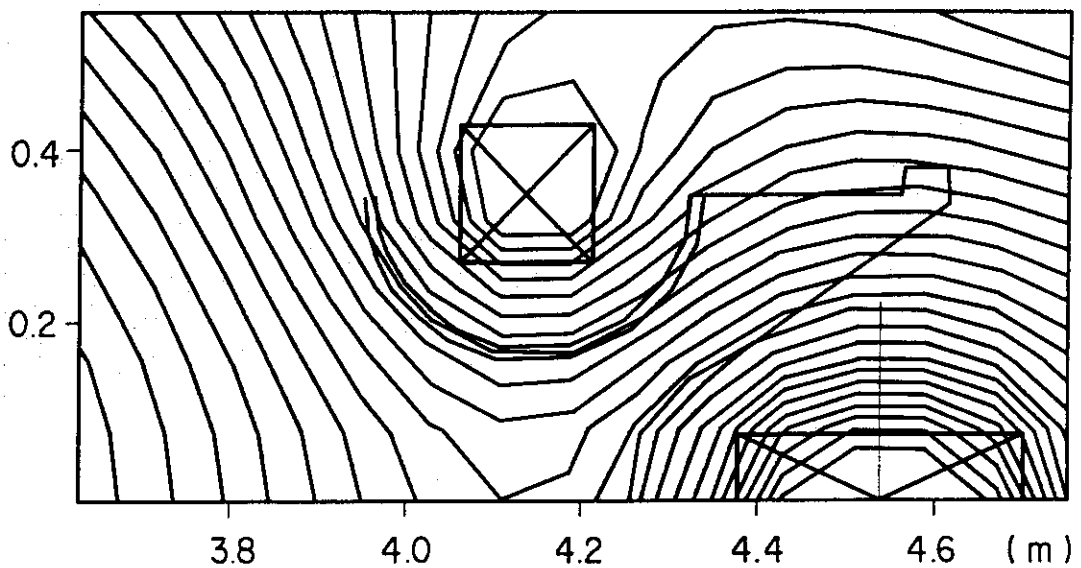


Fig. 3 JT-60磁気リミタプラズマの平衡磁場配位

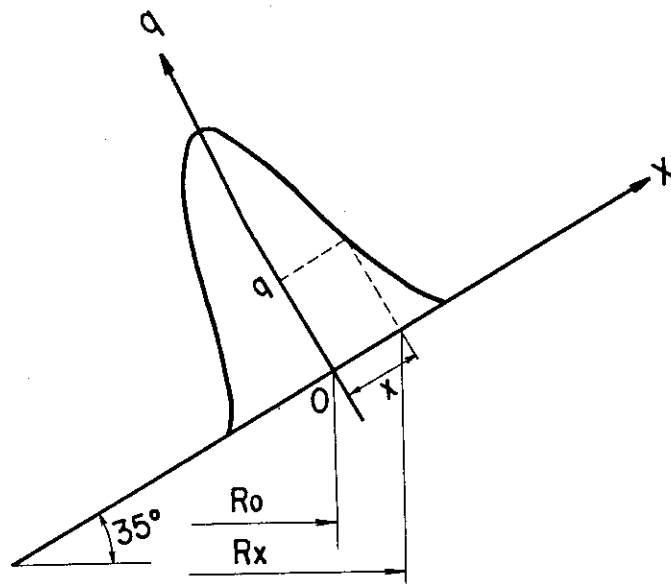


Fig. 4 磁気リミタ板の粒子熱流束分布および座標系
分布型はガウス分布, 半値幅は3 cmとする。

POLOIDAL CROSS SECTION
SOURCE DISTRIBUTION

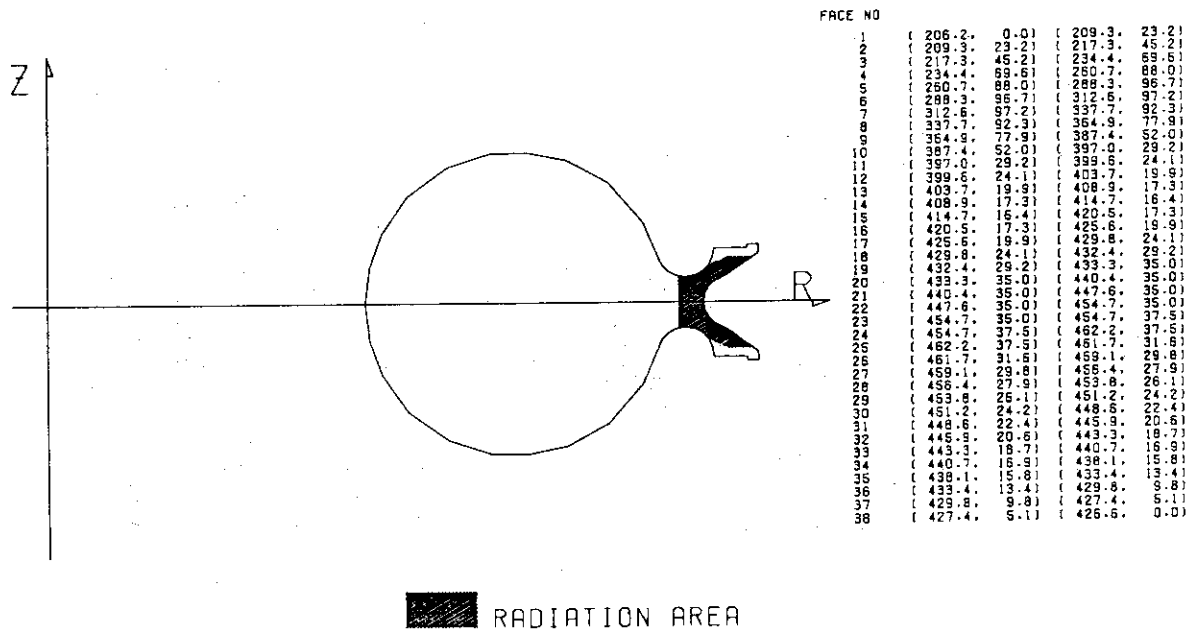


Fig. 5 ふく射熱流束計算の幾何モデル

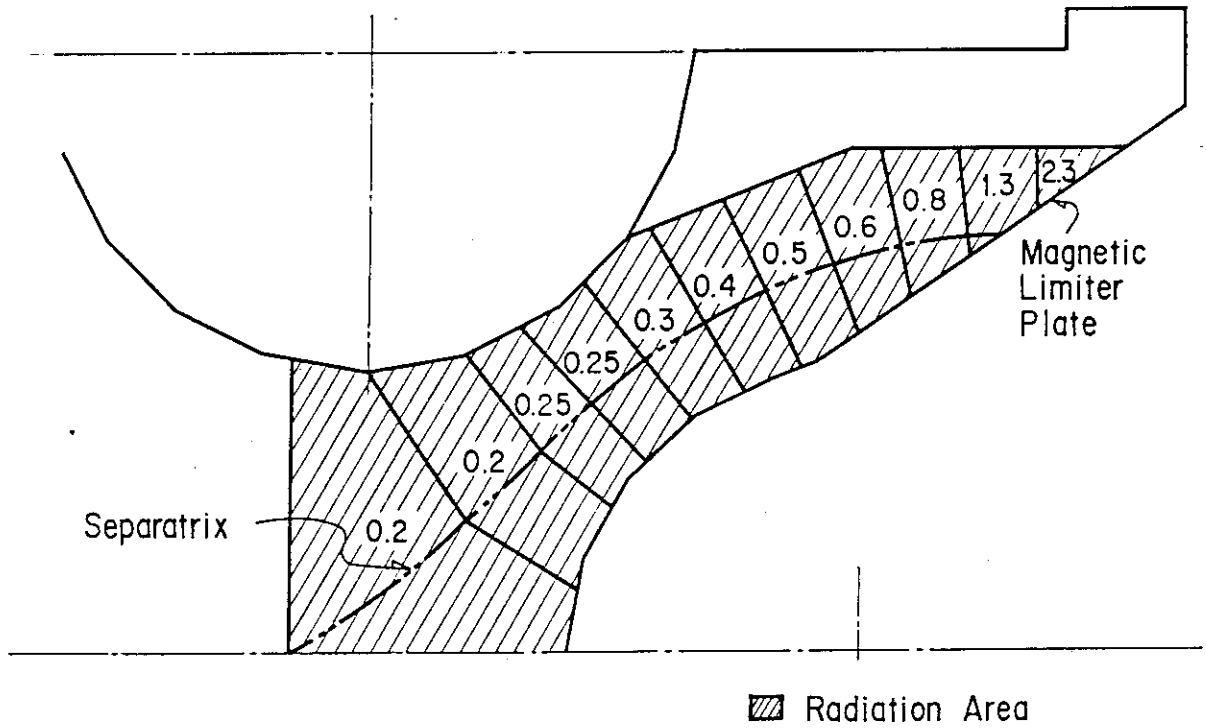


Fig. 6 強いリモートクーリングが生ずる場合 (High Compression Case) の JT-60 磁気リミタ領域のふく射熱源分布
 斜線部はふく射領域を示し、数値は各領域のふく射損失 (MW) を示す。

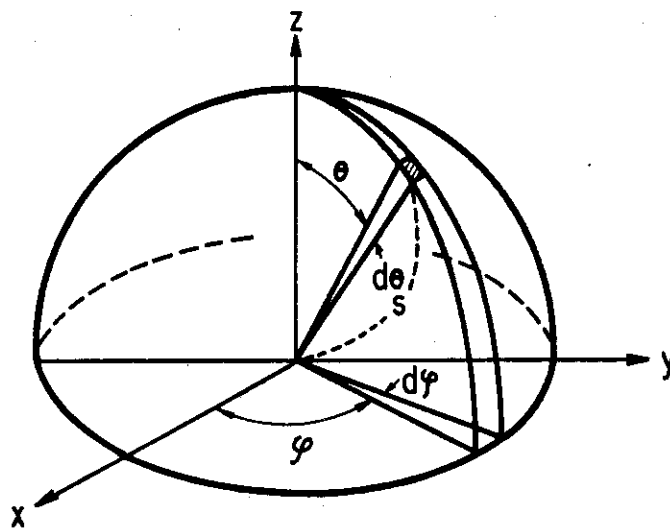


Fig. 7 第1壁へのふく射熱流束計算のための座標系

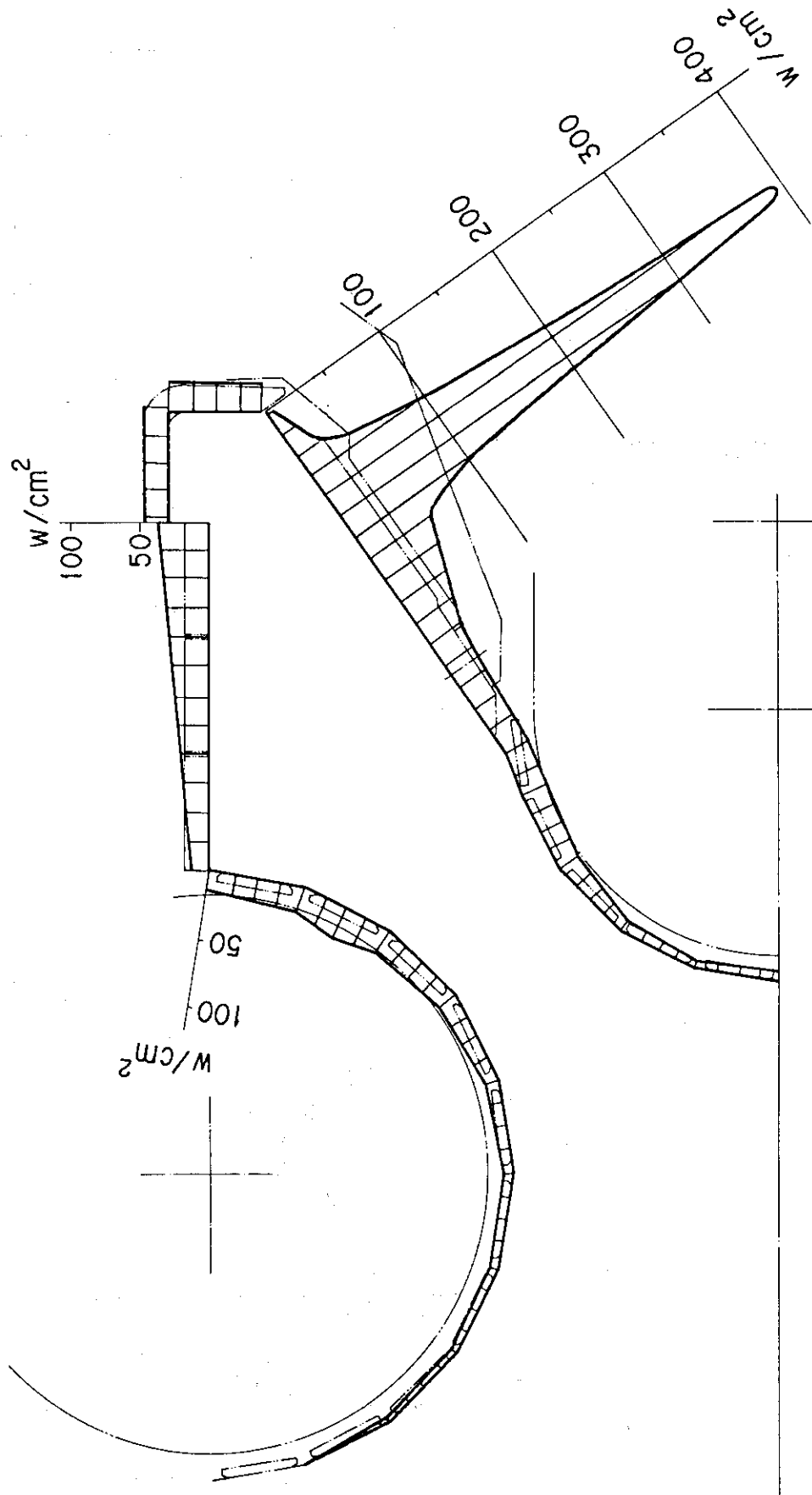


Fig. 8 強いリモートクーリングを生じる場合 (High Compression Case) のJT-60磁気リミタ部第1壁の熱流束分布

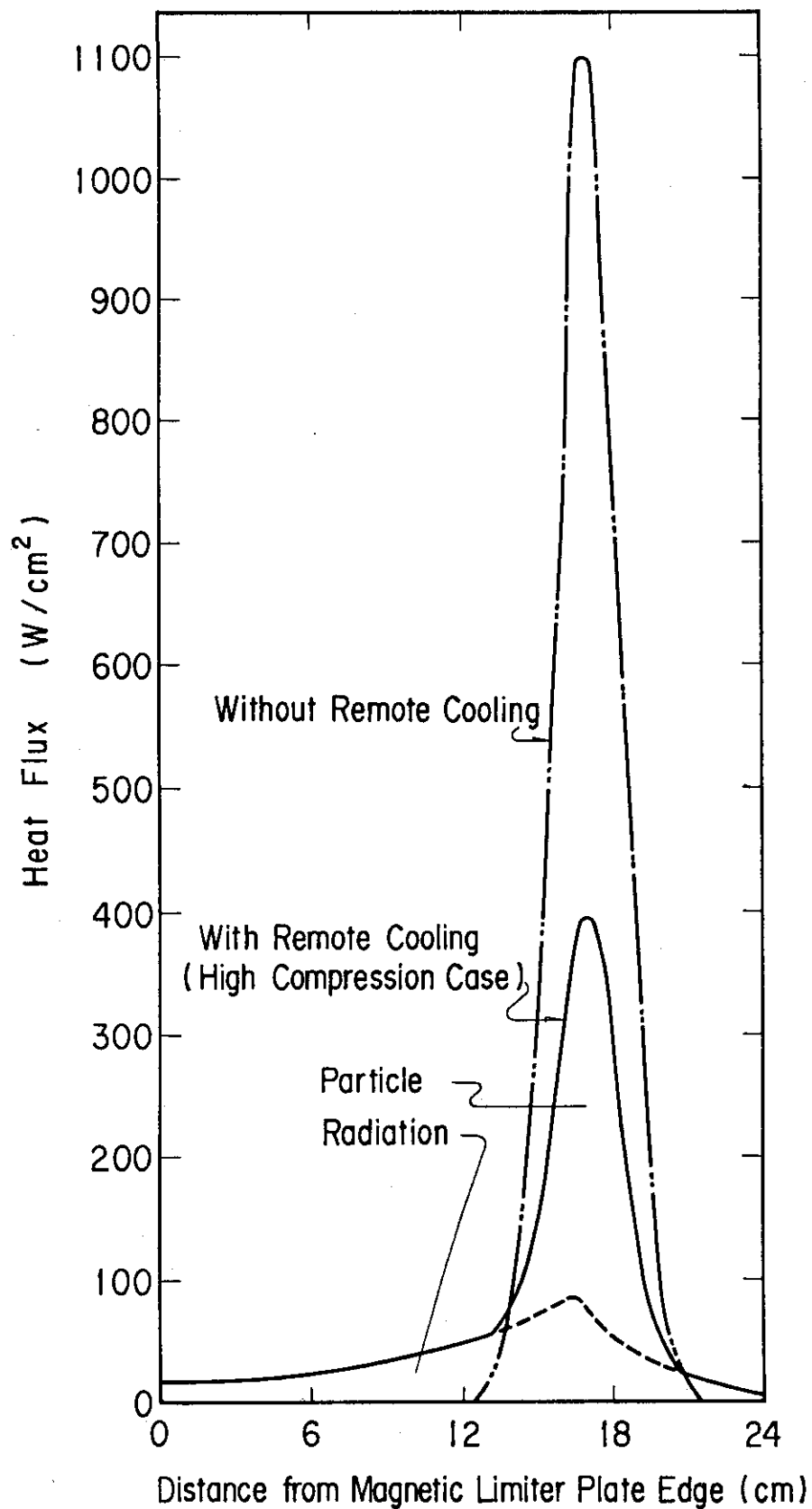


Fig. 9 磁気リミタ板の熱流束分布
 リモートクーリングがある場合とない場合の比較を示す。点線部分は
 ふく射熱流束の寄与分を表わす。

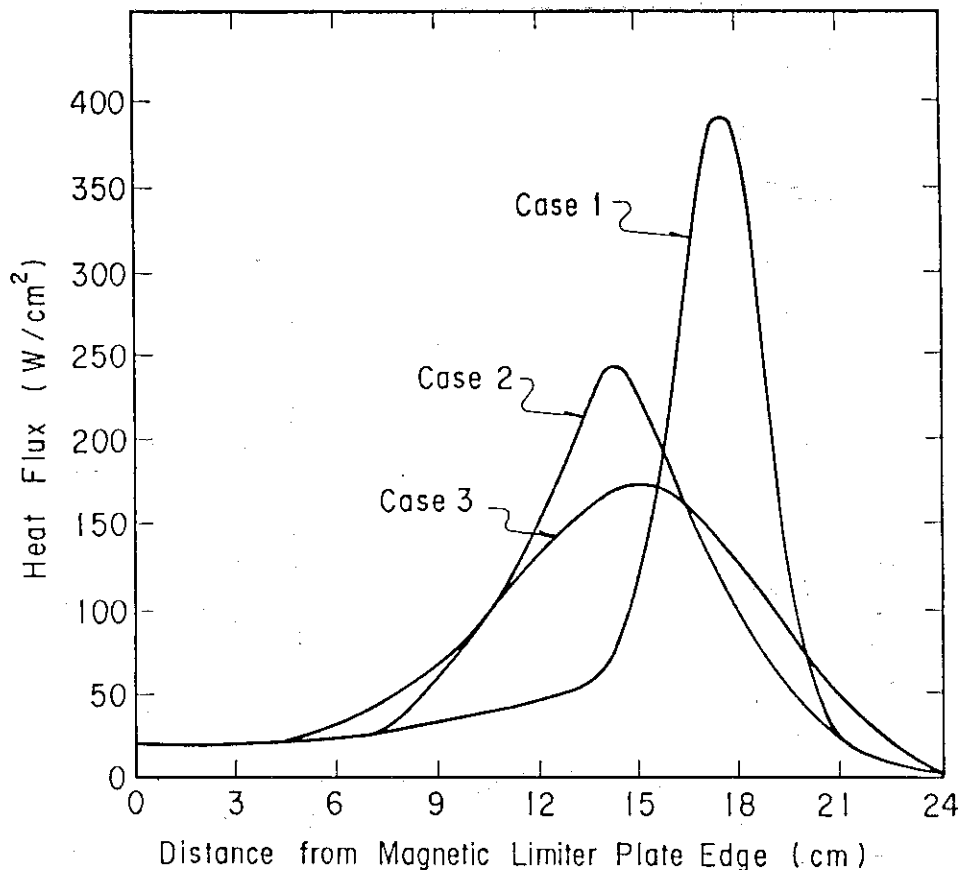


Fig.10 磁気面をスイングさせる場合の磁気リミタ板の時間平均熱流束

- Case 1 : スイングなし (半値幅 3 cm)
- Case 2 : スイング ± 1.5 cm (半値幅 6 cm)
- Case 3 : スイング ± 3.5 cm (半値幅 10 cm)

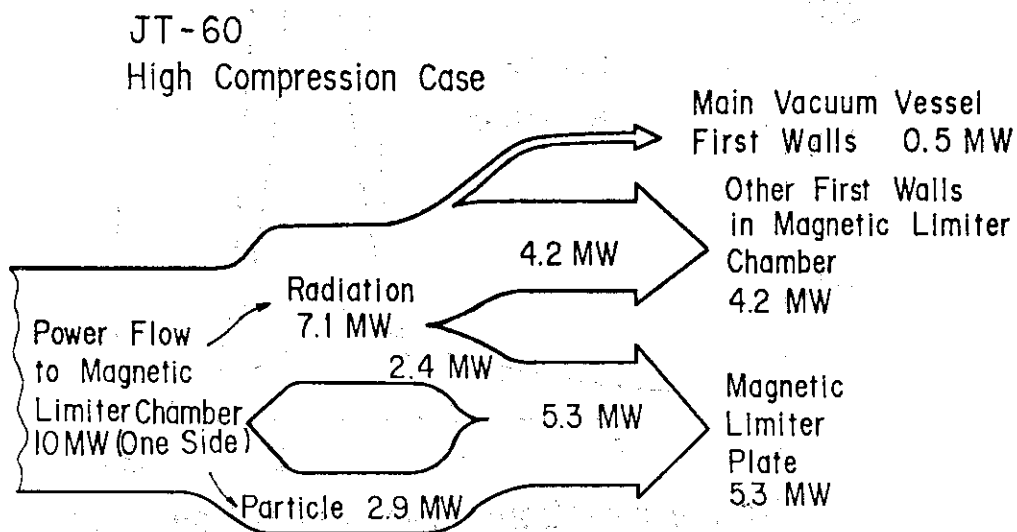


Fig.11 強いリモートクーリングを生ずる場合 (High Compression Case) の JT-60 第一壁への熱流
磁気リミタ部へ流入する全プラズマ熱流を 10 MW (上下片側の値) とした場合

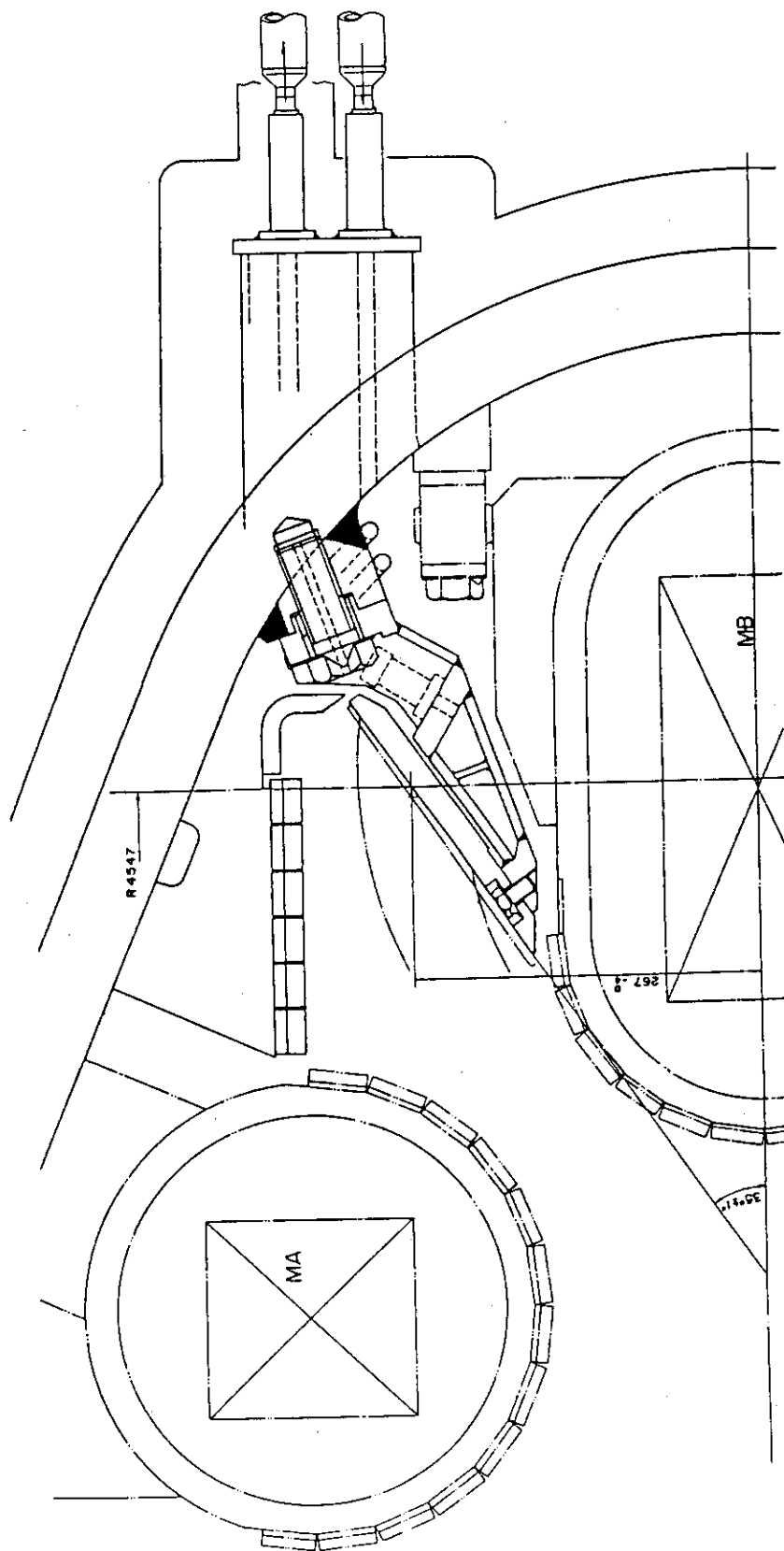


Fig. 1 2 磁気リミッター構造

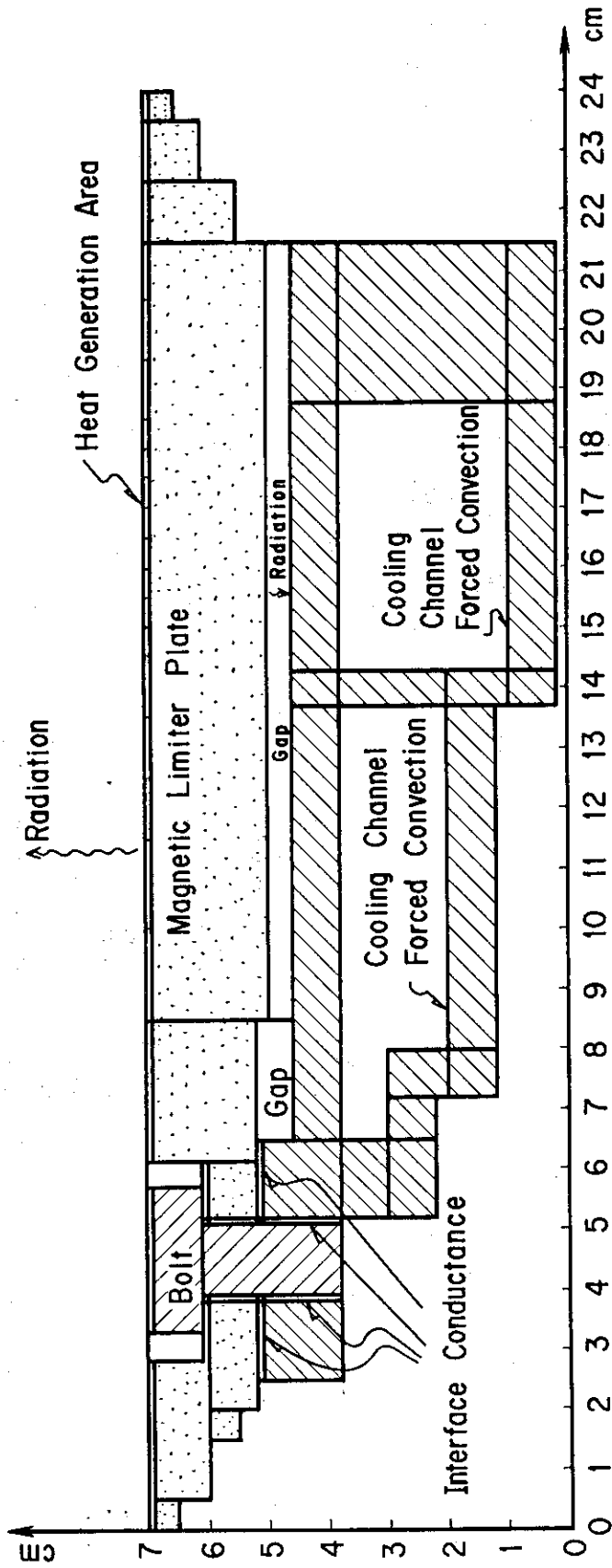


Fig.13 磁気リミッター板熱解析メッシュ図

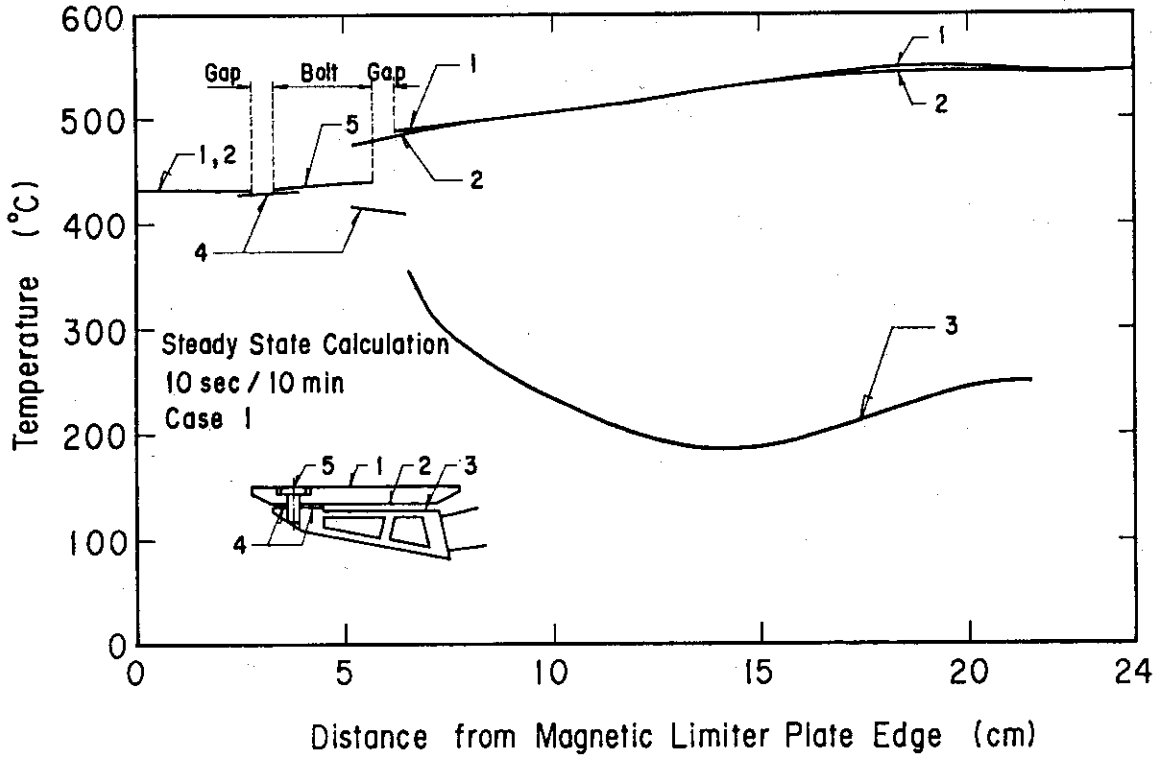


Fig. 14 磁気リミタ板の板幅方向温度分布
入熱条件 10 s / 10 min の場合の定常計算結果を示す。
Case 1 : リモートクーリングあり, スイングなし

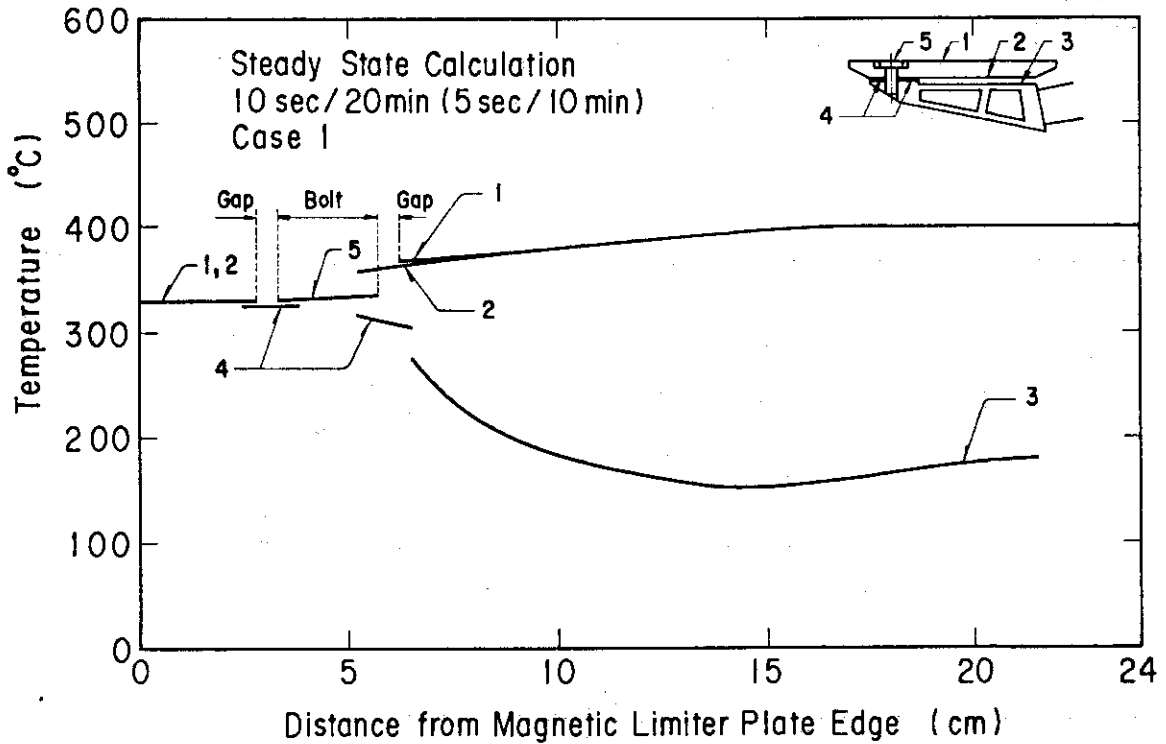


Fig. 15 磁気リミタ板の板幅方向温度分布
入熱条件 10 s / 20 min (5 s / 10 min) の場合の定常計算結果を示す。
Case 1 : リモートクーリングあり, スイングなし

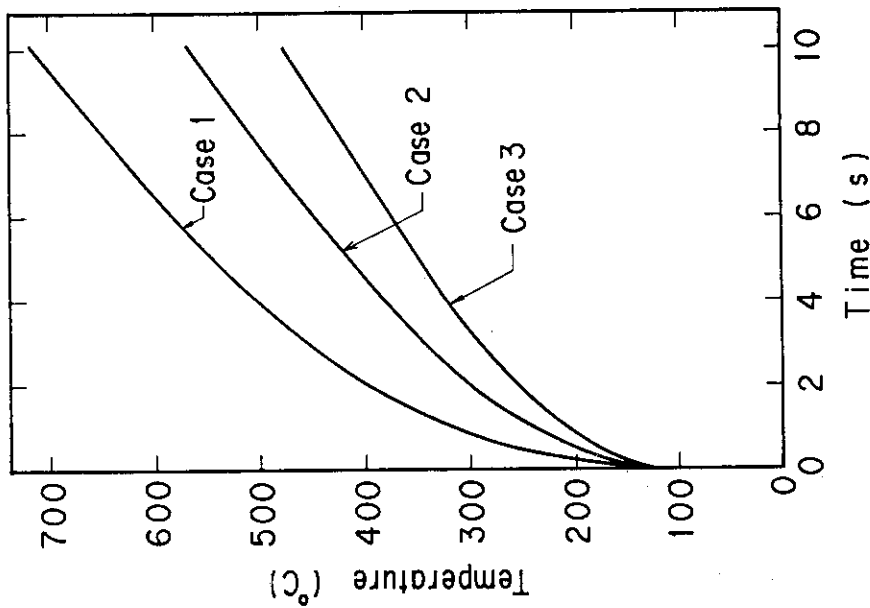


Fig. 16 磁気リミタ板温度の時間変化
下記のケースに対する非定常計算結果を示す。

- Case 1 : リモートクーリングあり,
スライダなし
- Case 2 : リモートクーリングあり,
スライダ ± 1.5 cm
- Case 3 : リモートクーリングあり,
スライダ ± 3.5 cm

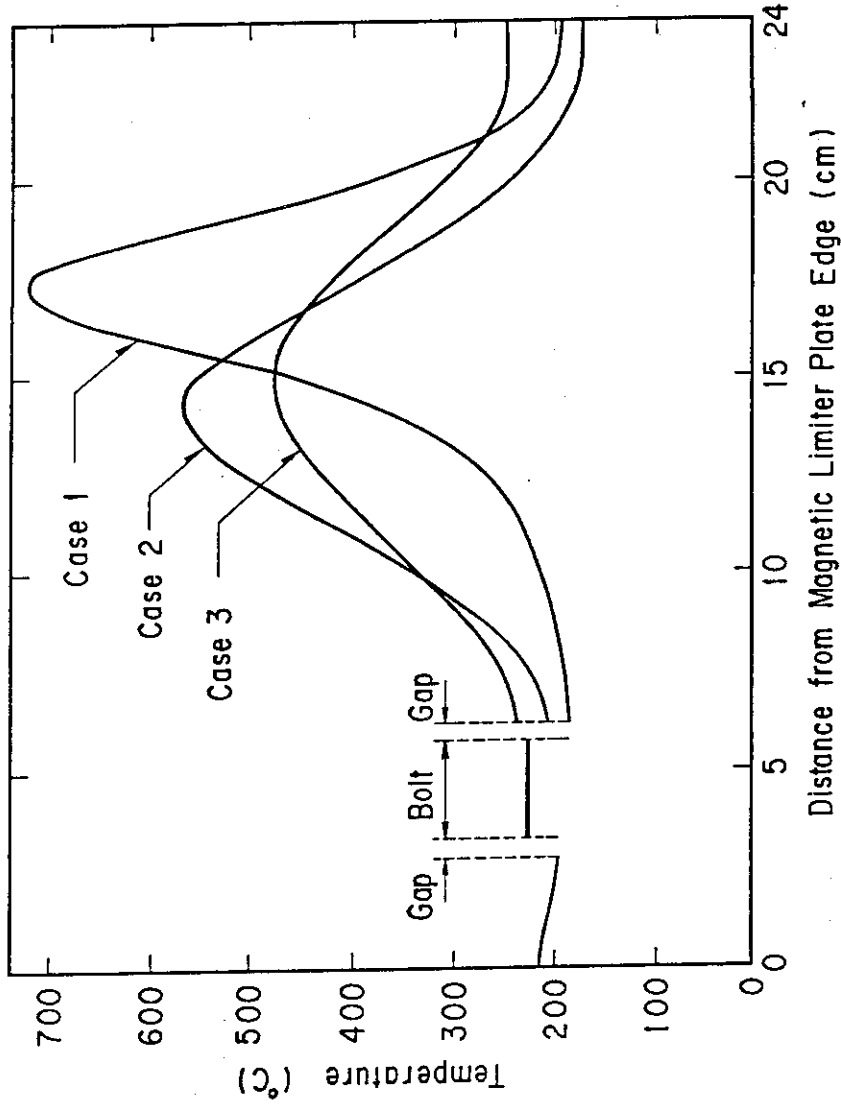


図 17 磁気リミタ板の板幅方向温度分布

下記のケースに対して、加熱開始から 10 秒後の温度を示す。

- Case 1 : リモートクーリングあり, スライダなし
- Case 2 : リモートクーリングあり, スライダ ± 1.5 cm
- Case 3 : リモートクーリングあり, スライダ ± 3.5 cm

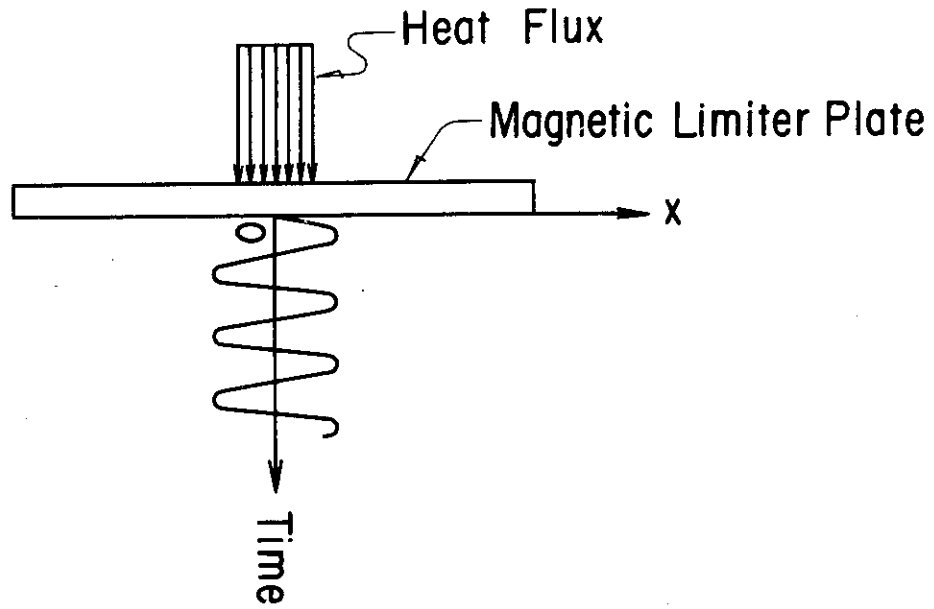


Fig.1 8 磁気面のスイングを模擬する場合の熱計算モデル

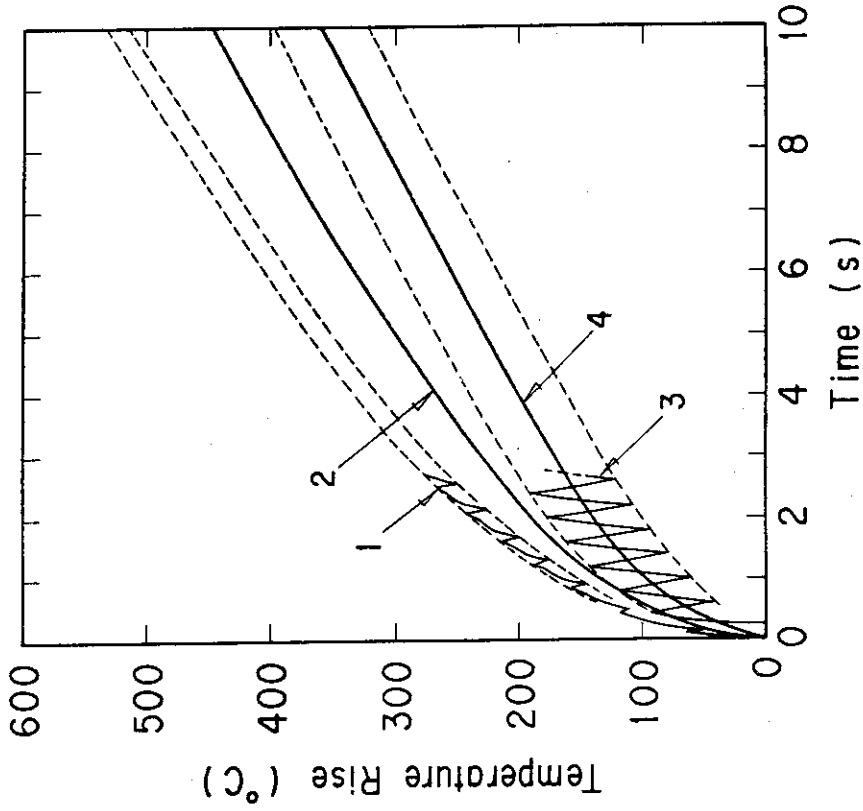


Fig. 20 磁気面のスイングを模擬した場合と実行的ガウス分布の場合の磁気リミタ板温度上昇の比較

スイング周波数 2.5 Hz の場合を示す。
 1 : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 1.5 cm, 2 : 半値幅 6 cm, 3 : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 3.5 cm, 4 : 半値幅 1.0 cm

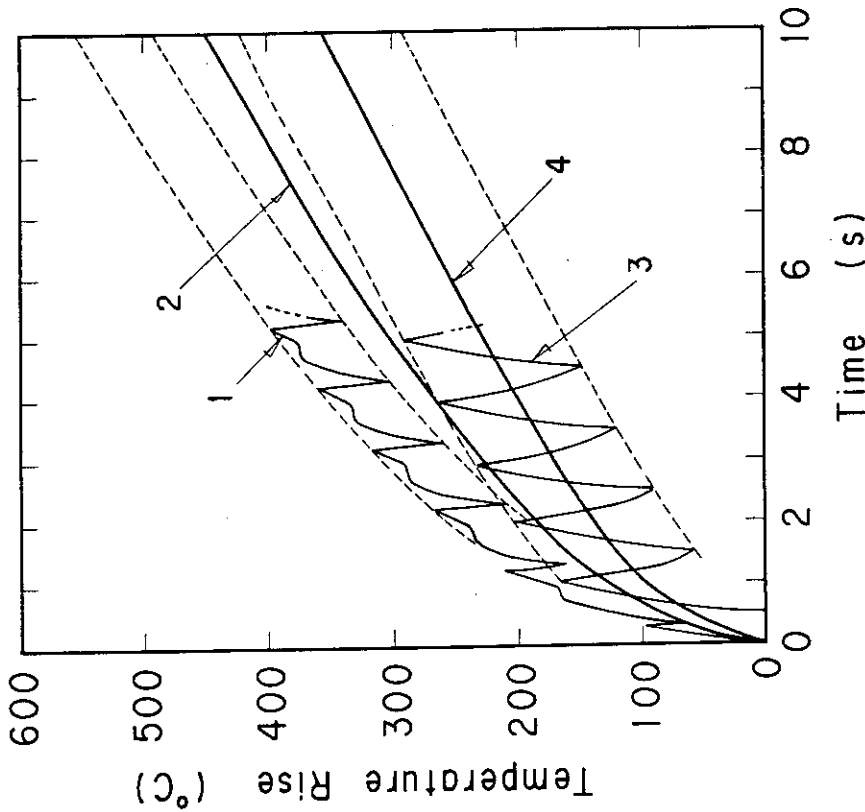


Fig. 19 磁気面のスイングを模擬した場合と実行的ガウス分布の場合の磁気リミタ板温度上昇の比較

スイング周波数 1.0 Hz の場合を示す。
 1 : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 1.5 cm, 2 : 半値幅 6 cm, 3 : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 3.5 cm, 4 : 半値幅 1.0 cm

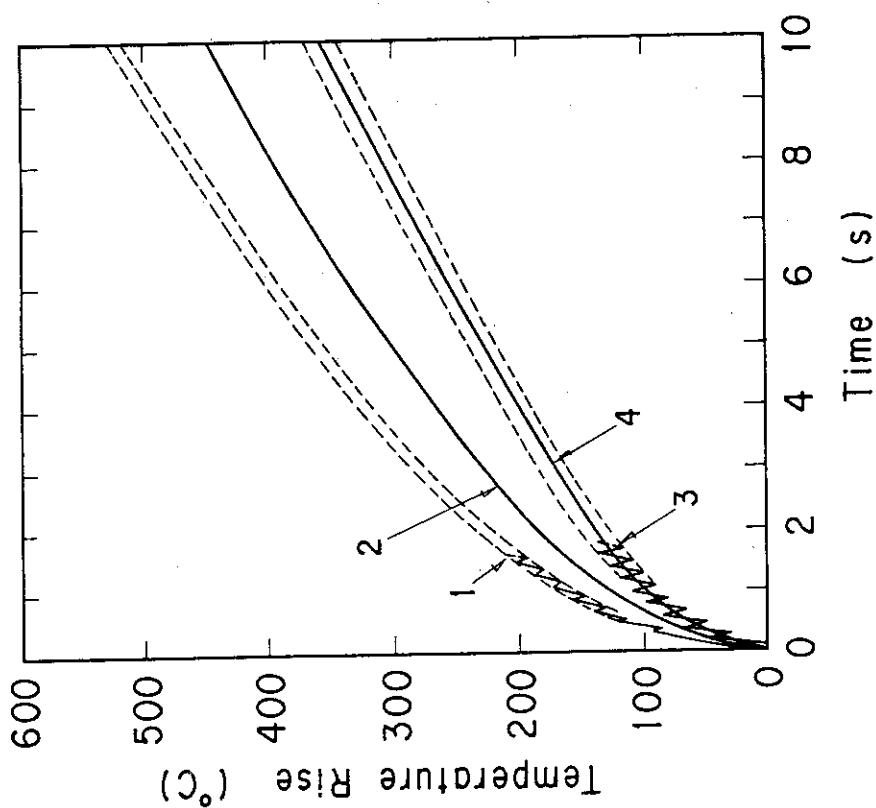


Fig. 2 1 磁気面のスイングを模擬した場合と実効的ガウス分布の場合の磁気リミッタ板温度上昇の比較
スイング周波数 5.0 Hz の場合を示す。
1 : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 1.5 cm, 2 : 半値幅 6 cm, 3 : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 3.5 cm, 4 : 半値幅 1.0 cm

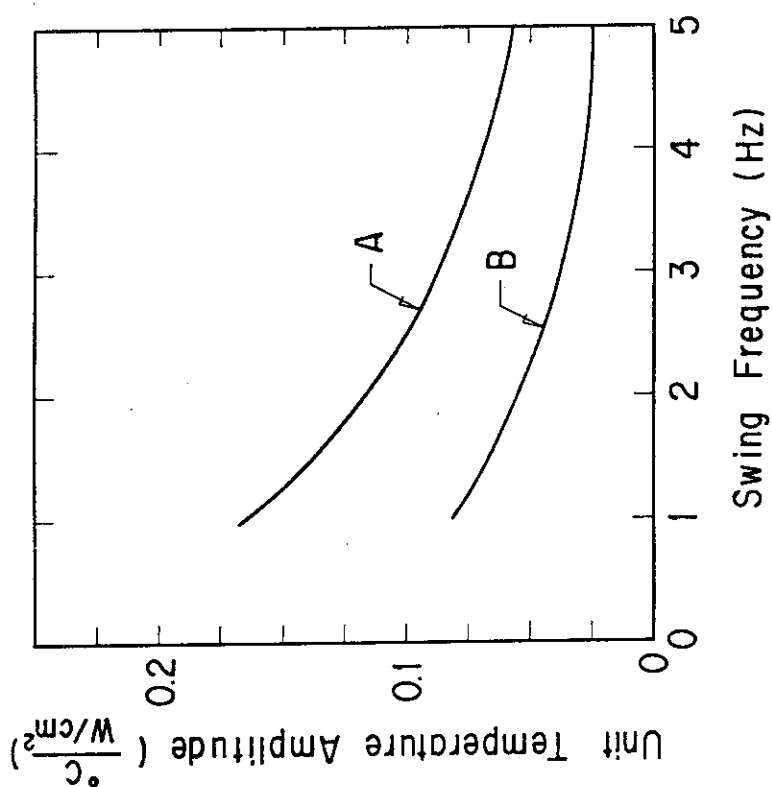


Fig. 2 2 磁気面のスイングを模擬した場合の細菌状態温度振幅のスイング周波数に対する依存性
単位熱流束あたりの温度振幅を示す。
A : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 3.5 cm, B : 半値幅 3 cm, スイング幅 ± 1.5 cm

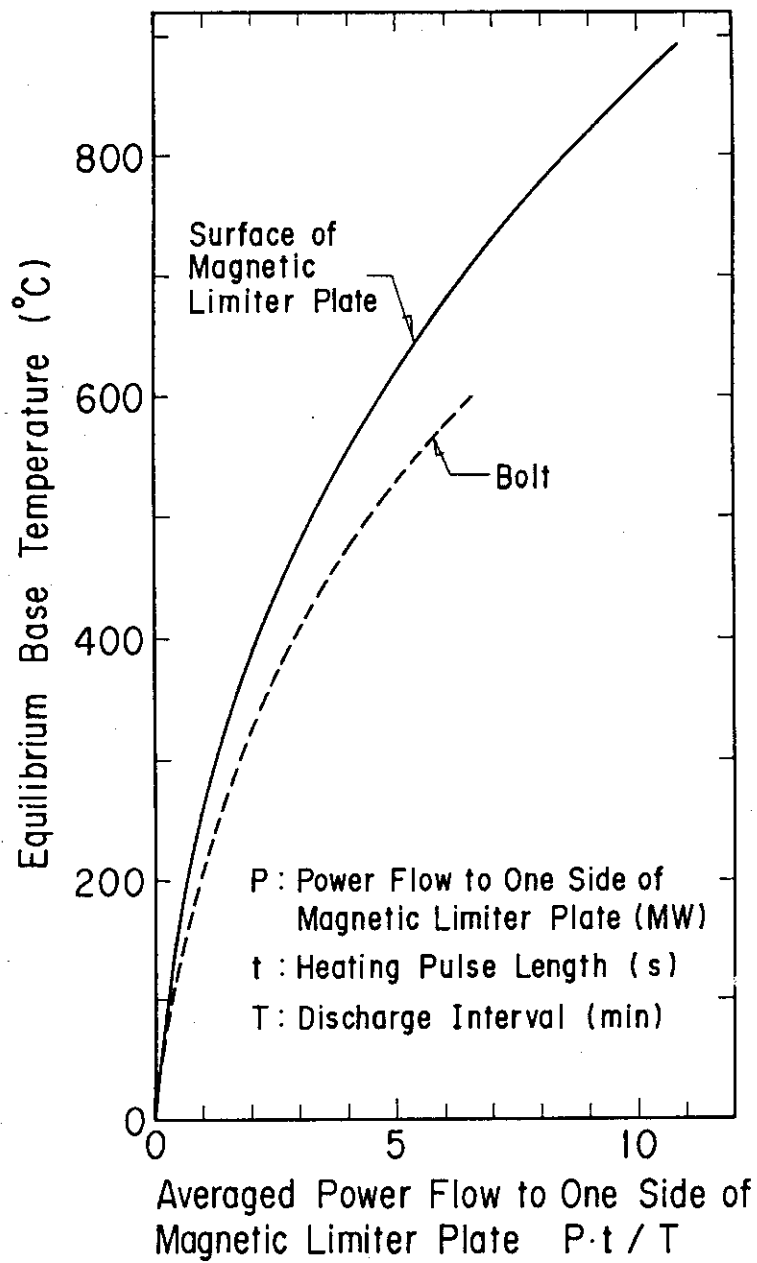


Fig. 23 磁気リミタ板のベース温度

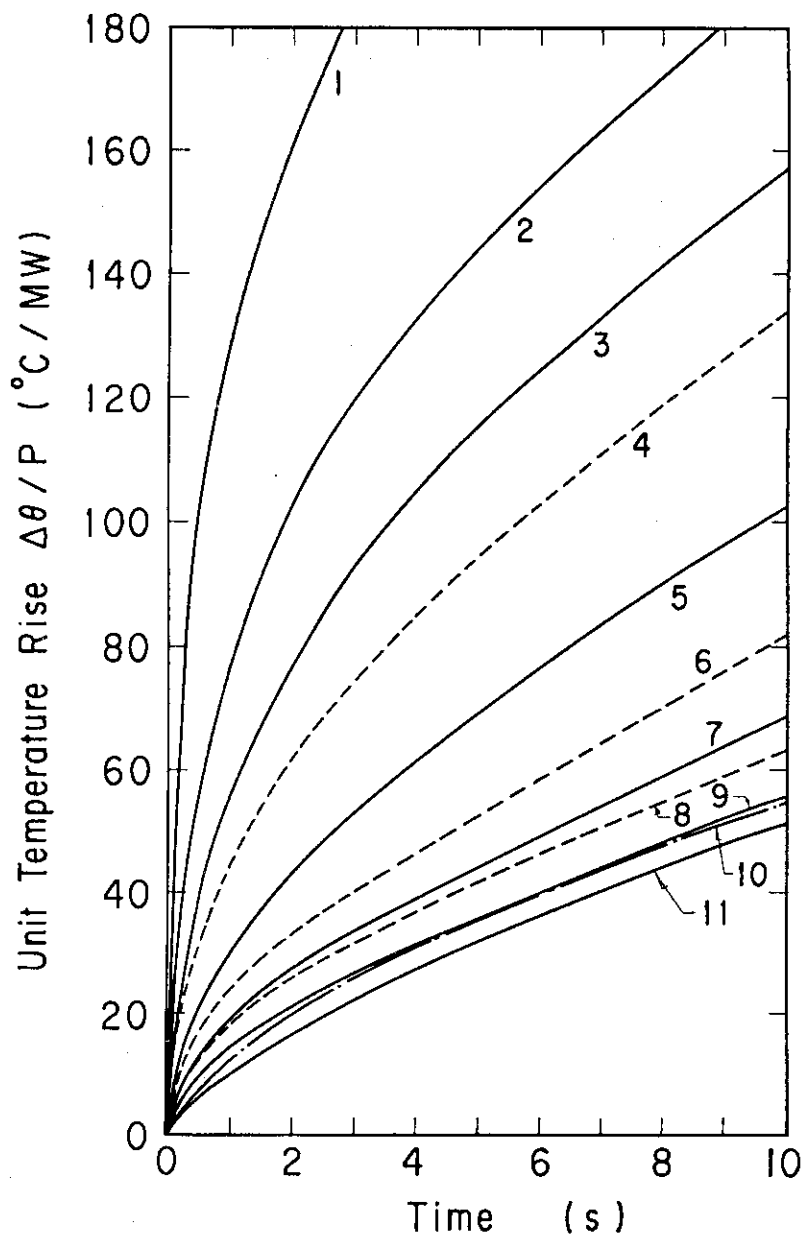


Fig.2 4 磁気リミタ板の入熱中の温度上昇

- 1 : 半値幅 1 cm のガウス分布
- 2 : 半値幅 2 cm のガウス分布
- 3 : 半値幅 3 cm のガウス分布
- 4 : 半値幅 3 cm のガウス分布を正弦的に幅 ± 1.5 cm のスイングをさせる場合
- 5 : 半値幅 6 cm のガウス分布
- 6 : 半値幅 3 cm のガウス分布を正弦的に幅 ± 3.5 cm のスイングをさせる場合
- 7 : 半値幅 10 cm のガウス分布
- 8 : 半値幅 3 cm のガウス分布を正弦的に幅 ± 5.0 cm のスイングをさせる場合
- 9 : 半値幅 13 cm のガウス分布
- 10 : 一様熱流束分布の場合のボルト温度
- 11 : 一様熱流束分布の場合の磁気リミタ板温度