

JAERI-M
7013

磁気リミタ板熱解析
(臨界プラズマ試験装置設計報告・XXXVI)

1977年3月

中村博雄・二宮博正・清水正亜・太田 充

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

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

磁気リミタ板熱解析

(臨界プラズマ試験装置設計報告・XXXVI)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部

中村博雄・二宮博正・清水正亜・太田 充

(1977年2月4日受理)

本報告書は、原研が建設を計画している臨界プラズマ試験装置(JT-60)の磁気リミタ板の熱解析の結果と問題点について述べたものである。

磁気リミタ板の材料としては、高融点金属としてモリブデンを、低原子番号の非金属材料として黒鉛、熱分解黒鉛と炭化珪素を考えた。熱分解黒鉛は、熱伝導率に大きい異方性がある為、積層構造として温度上昇が小さくなる様にした。熱計算の結果、温度上昇から各材料を比較すれば、熱分解黒鉛が最も低く、それにモリブデンが続く。黒鉛や炭化珪素は、熱負荷を少なくする必要がある。モリブデンの場合について、磁気リミタ板の取付け構造を考慮して定常温度解析を行なった結果、真空容器のベローズ部の磁気リミタ板では定常温度が1000°C以上にもなる為、冷却機構が必要である事がわかった。磁気リミタ板への熱負荷を実効的に軽減させる方法として、磁気リミタコイルに交流成分を重畳させフラックスラインをふらせる事が有効である事を示した。モリブデンの場合、振幅を5cm振動周波数を2Hzにすれば、温度上昇を $\frac{1}{3}$ 程度に低減出来る。また、磁気リミタ板部から高温プラズマ側への不純物逆流量軽減を目的とした多条溝構造板の形状を、熱解析により決定した。

Heat analysis of the magnetic limiter plate for JT-60

Hiroo NAKAMURA, Hiromasa NINOMIYA, Masatsugu SHIMIZU
and Mitsuru OHTA

Division of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

(Received February 4, 1977)

Heat analysis has been made of the magnetic limiter plate for JT-60. Test materials of the magnetic limiter plate are molybdenum, graphite, pyrolytic graphite and silicon carbide. It is assumed in calculation of the heat analysis that 10MW is deposited on the 2 cm wide surface of the magnetic limiter plate in about 10 sec.

The magnetic limiter plate of pyrolytic graphite is a stack of pyrolytic graphite sheets, heat input is in the deposition plane to take advantage of the large heat conductivity along this plane. Pyrolytic graphite is the best in terms of temperature rise. The temperature of molybdenum and graphite rise up to 1800°C and 620°C, respectively, in a deposition of 10 MW×10sec. Silicon carbide is not suitable for the magnetic limiter plate.

Because the plasma of the JT-60 discharges every 10 min, the average heat flux decreases to 17 w/cm² during the each interval. When the magnetic limiter plate has the above heat inflow, a maximum of above 1000°C occurs at the edge far from the joint to the thick ring of the vacuum vessel. To reduce heat load of the magnetic limiter plate, an alternating current (2~5Hz) is superposed on the magnetic limiter coil current. The intersection of separatrix line and magnetic limiter plate then moves cyclically more than 10 cm. Concerning temperature distribution of the multi-groove magnetic limiter plate, its dimensions are determined by the limitation in vapor pressure to prevent the impurity inflow.

目 次

1. はじめに	1
2. 磁気リミタ板熱解析	2
2.1 磁気リミタ板への熱負荷	2
2.2 モリブデン磁気リミタ板熱解析	3
2.2.1 定常温度解析	3
2.2.2 非定常温度解析	8
2.2.3 許容熱負荷条件の評価	10
2.3 低原子番号材磁気リミタ板熱解析	11
2.3.1 非定常温度解析	11
2.3.2 許容熱負荷条件の評価	12
3. 磁気リミタ板への熱負荷軽減対策	13
3.1 プラズマ平衡の検討	13
3.2 磁気面をふらせた場合の熱解析	15
4. 多条溝構造磁気リミタ板熱解析	17
4.1 多条溝構造板	17
4.2 多条溝構造板熱解析	17
5. まとめ	19
謝 辞	19
参考文献	20

1. はじめに

現在、原研では昭和50年代中頃の建設を目的とする臨界プラズマ試験装置(JT-60)を計画している。このJT-60には、TFTR, JET, T-20等の大型トカマク装置に類を見ない磁気リミタの設置を予定している。

この磁気リミタは、プラズマ中に含まれる不純物を除去することを目的としており、その機構は、図1.1に示す様に、真空容器の内部にポロイダル磁気リミタコイルを設け、プラズマ電流と磁気リミタコイル電流により作られる磁場配位により、真空容器壁近くに拡散してきたプラズマを磁気リミタ板の一部分に集めて、固定リミタもしくは真空容器壁に直接プラズマを接触させないことを特徴としている。

一般に、プラズマによりスパッタされた真空容器壁材の粒子がプラズマ中に混入するとイオン化される。この金属イオンは、ライン放射、再結合放射、制動放射等の放射を誘起し、プラズマを冷却し、臨界プラズマを目指すための一つの障害になる。

このため、JT-60では図1.1に示す様に、袋小路に設置された磁気リミタ板に前述した機構により金属イオンを衝突させ、中性化しプラズマ中に再混入する前に壁に吸着させる磁気リミタを設けている。

この磁気リミタを設置するためには、幾つかの問題がある。物理的な面では、磁気リミタ配位による平衡及び安定性の問題、技術的な面では、磁気リミタコイルの真空容器内への設置の問題、表面現象の面ではアウトガス、スパッタ、ガスの拡散の問題、材料の面では熱、強度、高温における疲労等の問題がある。

本報告では、プラズマ粒子が衝突する磁気リミタ板の温度上昇に着目し熱解析を行い、熱解析の観点から問題点について考察した。第2章では、磁気リミタ板にモリブデンを用いた場合の定常温度解析及び非定常温度解析を行った。次いで、材料を非金属材料であるグラファイト及びシリコンカーバイドに代えた場合の非定常温度解析を行い、モリブデンとの比較を行なった。第3章では、磁気リミタ板への熱負荷を軽減させる為に、セパトリックス磁気面を振動させた場合の平衡計算の結果について述べ、それに対応し磁気面振動周波数をパラメータにした熱解析を行ない、振動周波数を決定した。第4章では、高温プラズマ側への不純物の逆流量を軽減する事を目的として磁気リミタ板表面を多条溝構造にした場合の熱解析を行ない、多条溝構造の寸法諸元に熱の面から制限がある事を指摘した。

2. 磁気リミタ板熱解析

JT-60 において、磁気リミタ放電のモードとして、放電時間が最大 10 秒、放電休止時間が 10 分の場合を考える。又、磁気リミタ板への熱負荷は、最大 1 kw/cm^2 とした。本報告では磁気リミタ板には、次の理由で冷却機構は設けなかった。すなわち、放電中に発生する可能性の有る、逃走電子により、磁気リミタ板が損傷を受けて、それに引き続いて冷却機構も損傷を受ける恐れが有る為である。その為、磁気リミタ板の冷却は、真空容器への熱伝導と周囲とのふく射を考えた。2.1では、磁気リミタ板への熱負荷について、簡単な検討を行った。2.2では、モリブデンの磁気リミタ板熱解析を、放電中の温度上昇を考える非定常温度解析と、連続放電による放電開始前温度の上昇を考える定常温度解析の二つに区別して行い、許容熱負荷条件について検討した。2.3では、低原子番号材について、非定常温度解析を行い、許容熱負荷条件について検討した。

2.1 磁気リミタ板への熱負荷

磁気リミタは、プラズマを固定リミタもしくは、真空容器壁に直接接触させることを防ぐために設置されており、プラズマ境界（ここではセパトロリックスライン）から真空容器側へ拡散してくるプラズマ粒子の大部分が磁気リミタ板へ衝突する。磁気リミタ板への熱流束は、プラズマの境界の幅（スクレイプオフ層）に依存する。この層の厚さは、粒子のプラズマ小半径方向の拡散長、案内中心（guiding center）の施回距離もしくは、粒子軌道の電界による磁気面からのずれ等から決定される。拡散長は、プラズマの密度分布をベッセル函数で近似すると、拡散長 $\approx a \sqrt{\pi q R / 2.4^2 v_i \tau_p}$ で表わされる。ここで、 R 、 a はそれぞれプラズマの大半径、小半径であり、 q は安定係数、 v_i はイオン速度、 τ_p は粒子の閉じ込め時間である。一方、案内中心の施回距離は、 $m v_i \sqrt{2a/R} / e B_p$ のオーダーである。ここで、 B_p はプラズマ表面のポロイダル磁場、 m 、 e はそれぞれ、水素の質量、電子の重荷を表わす。また、磁気面とのずれは、 $T_e m v_i / T_i e B_p$ である。ここで、 T_i 、 T_e はイオン及び電子の温度を表わす。

JT-60 の装置のパラメータは、 $R \sim 3 \text{ m}$ 、 $a \sim 1 \text{ m}$ であり、プラズマパラメータは、 $\tau_p \approx 0.2 \text{ 秒} \sim 1 \text{ 秒}$ 、 $q \sim 2.5$ 、プラズマ電流 $I_p \sim 3 \text{ MA}$ を期待している。JT-60 のプラズマ境界の温度を、 $T_i \sim T_e \sim 1 \text{ KeV}$ と仮定すれば、上記の値は、 $0.3 \text{ cm} \sim 2 \text{ cm}$ になる。これは、あくまでも、期待どおりのプラズマが得られた場合の値であり、境界温度が下がれば、もしくは、拡散速度が大きくなれば、スクレイプオフ層の厚さは、さらに厚くなる。

この他、磁気リミタ板に熱負荷が作用する位置に影響を、与えるものとして、プラズマの揺動が考えられる。しかし、これらを現時点で評価することは、極めて難しい。ここでは、磁気リミタ板に衝突する粒子束幅（スクレイプオフ層に相当）を、 2 cm に仮定して以下の計算を行った。

磁気リミタ板に入る熱流量は、プラズマの粒子衝突によるものが、大部分である。これは、放電の期間中、時間的に変化する。放電の初期には、閉じ込め性能が悪いため、磁気リミタ板への単位時間当りの熱負荷は大きい。プラズマ電流の上昇とともに、プラズマの閉じ込め性能が良く

なり、熱流入量は一度低下するが、中性粒子入射装置の作動とともに、再度上昇する。最も大きな熱入力が見込まれる時点は、プラズマ放電の終了時である。この場合には、磁気リミタ板ばかりでなく、真空容器に内張されたライナへも、プラズマ粒子が衝突する。

以上の様な、熱入力の時間的な変化は、プラズマ挙動のシミュレーション結果から、ある程度類推できる。しかし、これも、拡散速度、プラズマの境界温度を仮定しての値であり、不確かさが残る。

本報告では、計算を簡単化するために、放電中一定の熱負荷が作用すると仮定した。又、その熱流束は、プラズマに注入する加熱入力から最大 1 kw/cm^2 と設定した。図 2.1 に、 1 kw/cm^2 の場合の熱負荷波形を示す。

2.2 モリブデン磁気リミタ板熱解析

2.2.1 定常温度解析

ここでは、磁気リミタ板の定常温度を、次の様に定義した。磁気リミタ板は、プラズマ粒子の衝撃により、10 秒間加熱され、次の 10 分間冷却される。前述の通り、磁気リミタ板には、強制冷却機構を設けていない為、10 分間の放電休止中に、最初の放電開始前温度に戻らない。次の放電開始時に、放電開始前温度は少し高くなる。この様に、連続放電を行なう場合、磁気リミタ板の放電開始前温度は、次第に上昇し、或る平衡値に達する。この平衡温度を、磁気リミタ板の定常温度と定義する。

定常温度は、近似的に次の様にして求めた。すなわち、10 秒間に磁気リミタ板へ入る熱負荷を、10 分間で平均し、その平均熱負荷が定常的に有るとして、定常温度解析を行った。連続放電によって、放電開始前温度が時間的にどの様に変化するかは、ここでは議論しないが、今後検討する必要がある。

解析モデルにおいて、磁気リミタ板は、図 2.2 に示す様に、真空容器厚肉部へ直接取付ける構造にした。解析は、厚肉部の大周方向一様性やリミタ板の板厚方向温度分布は一様であるとすれば、半径方向だけの一次元で、定常温度解析を行う事が出来る。

ところが、排気ポート部やベローズ部では、磁気リミタ板は、厚肉部に取付けられない為、近くの磁気リミタ板から張り出す構造になる。この場合、大周方向の一様性がなくなる為、定常温度解析は、大周方向と半径方向の二次元で行う必要がある。その為、定常温度解析は、厚肉部と排気ポート部にわけて行う。ベローズ部の磁気リミタ板定常温度解析は、原理的に排気ポート部と同じと考えられるので、ここでは省略する。

(1) 接触熱抵抗の評価

磁気リミタ板を、真空容器厚肉部へ取り付ける場合、取付け部分の接触熱抵抗の大きさが問題となる。接触熱抵抗に関する研究は古くから行なわれているが、表面の形状を定量的に表現する事が難しい為、理論的に取り扱う事が難しい。ここでは、次式を用いて、磁気リミタ板取付け部の接触熱抵抗を評価する⁽¹⁾。

$$h_c = \frac{1}{r_c} = \frac{q}{\Delta T}$$

$$= \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_0} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)^{-1} \cdot \frac{P}{H} \quad (2.1)$$

- Q : (kcal/h) 熱流量
 A : (m^2) 実効的接触面積
 q : (kcal/ m^2h) 熱流束 (= Q/A)
 ΔT : ($^{\circ}C$) 接触面における温度差
 h_c : (kcal/ $m^2h^{\circ}C$) 接触熱コンダクタンス
 h_0 : (kcal/ $m^2h^{\circ}C$) 直接接触点における熱コンダクタンス
 r_c : ($m^2h^{\circ}C/kcal$) 接触熱抵抗
 P : (kg/ mm^2) 接触面押付け圧力
 H : (kg/ mm^2) 接触固体のかたさ
 $\lambda_{1,2}$: (kcal/ $m^2h^{\circ}C$) 熱伝導率
 $\delta_{1,2}$: (m) 接触面のあらさ (最大高さ)

接触固体としては、磁気リミタ板はモリブデン、真空容器は YUS を考える。接触面積 A は、正確な値を評価する事は難しい為、対象とする面の半分の面積と仮定した。計算に用いた数値を以下に示す。

$$\lambda_1 = 100 \text{ kcal/mh}^{\circ}C, \quad \lambda_2 = 15 \text{ kcal/mh}^{\circ}C$$

$$H = 100 \text{ kg/mm}^2, \quad h_0 = 5 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2h^{\circ}C$$

$$Q = 2375 \text{ kcal/h}$$

Q は、大周方向単位長さ当り、磁気リミタ板への 10 分間の平均熱負荷である。接触面における押付け圧力 P および表面あらさ δ は、それぞれ $P = 1, 5, 10 \text{ kg/mm}^2$ および $\delta = 10^{-4}, 10^{-5} \text{ m}$ として計算した。図 2.3 に、計算結果を示す。これによると、表面あらさを 100μ 、押付け圧力を数 kg/mm^2 にすれば、 ΔT は $10 \sim 20^{\circ}C$ 以下であり、無視出来ると考えられる。しかし、初期の押付け圧力は、装置を運転する間に变化する事も予想される。押付け圧力の減少は接触部温度差が増大し、磁気リミタ板定常温度の上昇により磁気リミタ板が溶融する恐れもある。

(2) ふく射伝熱の評価

最近、原子炉のガス冷却などにおいて、ふく射伝熱現象の重要性が認識されて来た。ふく射伝熱は、伝導伝熱が微分方程式で記述出来るのに対し、積分方程式となり厳密な解を得る事は難しく、各種の近似解法が使用されている。⁽²⁾

ここでは、次のモデルを用いて、磁気リミタ板のふく射伝熱の効果を検討する。すなわち、ふく射伝熱は、磁気リミタ板と主磁気リミタコイルケースとの間だけであるとする。近似として、コイルケース温度は時間的に一定であるとし、コイルケース温度 (T_1) をパラメータとして計算した。

ふく射伝熱量は、次式で表わされる。

$$q = \sigma F (T_2^4 - T_1^4) \quad (2.2)$$

$$F = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}$$

q : ふく射伝熱量 (kcal/m²h)

ϵ_1 : 磁気リミタ板のふく射率

ϵ_2 : 周辺部のふく射率

σ : ステファン・ボルツマン係数

$$= 4.88 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{K}^4$$

T_1 : 周辺部の温度 (°K)

T_2 : 磁気リミタ板の温度 (°K)

$\epsilon_1 = 0.3$, $\epsilon_2 = 0.1$ とし, T_1 は 150°C ~ 600°C の間で変化させた。計算結果を、図 2.4 に示す。磁気リミタ板への熱負荷を 10 分間で平均した値が 1430 kcal/m²h である事を考えれば、10 分間の放電休止中における、ふく射による磁気リミタ板の冷却は、有効であることがわかる。

(3) 真空容器厚肉部磁気リミタ板の定常温度解析

計算モデルを図 2.5 に示す。定常温度の計算は、二つに分けて行う。すなわち、図 2.6(a) に示す様に、平板の表面に一様に熱負荷が有る場合の温度差 ΔT_0 は、次式で表わされる。⁽³⁾

$$\Delta T_0 = \frac{\ell^2 q}{2 t \lambda} \quad (2.3)$$

また、図 2.6(b) に示す様に、平板の片側から熱負荷が有る場合の温度差 ΔT_c は、次式で表わされる。

$$\Delta T_c = \frac{Q \ell}{\lambda S} \quad (2.4)$$

各部の寸法の詳細は、詳細設計で定められるが現時点では、著者の概念設計から次の様に定める。

$$\begin{aligned} \ell_1 &= 0.35 \text{ m}, & \ell_2 &= 0.1 \text{ m}, & \ell_3 &= 0.05 \text{ m} \\ \ell_4 &= 0.06 \text{ m}, & \ell_5 &= 0.05 \text{ m}, & t_1 &= 0.005 \text{ m} \\ t_2 &= 0.02 \text{ m}, & R_{ML} &= 4.79 \text{ m}, & R_{MLC} &= 4.64 \text{ m} \end{aligned}$$

ここで、 R_{ML} は磁気リミタ板に磁気面が当る位置であり、 R_{MLC} は主磁気リミタコイルの位置を表わす。

また、熱伝導率は、 $\lambda (M_0) = 100$ (kcal/mh°C) at 600°C, $\lambda (YUS) = 15$ (kcal/mh°C) at 400°C とした。

図 2.5 の計算モデルにおいて、 $T_1 \sim T_2$ 間の温度差計算には、(2.3) 式を用いた。他の

部分では、(2.4)式を用いた。

磁気リミタ板周囲のライナへの熱負荷 q_L と、磁気リミタ板への熱負荷 Q_{ML} は、次の様に算出した。

$$\begin{aligned} q_L &= 10 \text{ w/cm}^2 \quad (10 \text{ 秒}) \\ &= 1.43 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h} \quad (10 \text{ 分間平均値}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} Q_{ML} &= 10 \text{ MW} \times \frac{1}{2} \quad (10 \text{ 秒}) \\ &= 7.15 \times 10^4 \text{ kcal/h} \end{aligned} \quad (2.6)$$

以上の数値を用いて、定常温度を計算した結果を、図 2.7 および図 2.8 に示す。図 2.7 は、放電時間を変化させた場合における、各部の定常温度を表わしている。図 2.8 は、放電開始前温度を変化させた場合における、各部の定常温度を表わしている。これによると、磁気リミタ板の T_4 の部分の定常温度上昇は、10 秒間で 230°C になる事がわかる。

次に、ふく射伝熱を考慮して、上記と同様の検討を行なう。計算の仮定として、主磁気リミタコイルケースを 150°C で一定とし、ふく射は大部分コイルケースとの間で行なわれるとした。ふく射伝熱量を算出する際、磁気リミタ板の温度は、ふく射を考慮しない場合の定常温度よりも 100°C 低く一定であると仮定した。以上の仮定で、図 2.4 によりふく射伝熱量を算出した。図 2.9 と図 2.10 に、ふく射を考慮した場合の計算結果を示す。これから、ふく射伝熱の有る場合、定常温度はふく射を考慮しない場合よりも、約 80°C 低くなる事がわかる。磁気リミタ板の放電開始前温度を 500°C とした場合、 T_4 の部分の定常温度上昇は 160°C 位であり、定常温度は 660°C となる。すなわち、磁気リミタ板の冷却が、真空容器への熱伝導とふく射により行なわれる場合、連続放電により放電開始前温度は 500°C から次第に上昇し、 660°C になり平衡に達する。今後、放電回数と放電開始前温度上昇との関係について検討する必要が有る。

(4) 排気ポート部近傍の磁気リミタ板定常温度解析

排気ポート部及びベローズ部に於いては、構造上、磁気リミタ板を直接取り付け事が出来ない為、図 2.2 に示す様に、横から張り出す構造となる。その為、真空容器厚肉部までの熱流路長さが大きくなり、定常温度は、厚肉部磁気リミタ板に比較してもかなり高くなる事が予想される。ここでは、大周方向と半径方向の二次元で定常温度解析を行う。

計算は、図 2.2 の (A) ~ (C) ~ (E) ~ (G) の領域について行った。計算手法は、計算領域をいくつかのメッシュに分割し、各メッシュにおいて定常熱伝導式をたてれば、各メッシュの温度を未知数とする連立方程式が得られ、定常温度は、その解として与えられる。

定常熱伝導の場合は、次の関係式が成立する。

$$\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x} + Q = 0 \quad (2.7)$$

λ ; 熱伝導率

S ; 熱流路の断面積

Δx ; メッシュ点間の距離

ΔT ; メッシュ点間の温度差 ($= T_1 - T_2$)

Q ; 外部熱負荷

ここで熱アドミタンスを考える。図 2.11(a)において隣り合うメッシュ中心間の熱アドミタンスを次式で定義する。

$$Y = \frac{\lambda S}{\Delta x} \quad (2.8)$$

また、図 2.11(b)の様に断面積 S と熱伝導率 λ がメッシュにより違う場合の熱アドミタンスは次式で表わされる。

$$Y = \frac{Y_1 \cdot Y_2}{Y_1 + Y_2} \quad (2.9)$$

ここで、

$$Y_1 = \frac{\lambda_1 S_1}{\Delta x_1}, \quad Y_2 = \frac{\lambda_2 S_2}{\Delta x_2}$$

熱アドミタンスを用いれば、(2.7)式は、次の様になる。

$$Y \cdot \Delta T + Q = 0 \quad (2.10)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

図 2.12 において、 (I, J) メッシュの温度 $T(I, J)$ を求める。周囲のメッシュとの熱のバランスを考えると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & Y_{I, J}^{I, J-1} \{ T(I, J-1) - T(I, J) \} + Y_{I, J}^{I, J+1} \{ T(I, J+1) - T(I, J) \} \\ & + Y_{I, J}^{I-1, J} \{ T(I-1, J) - T(I, J) \} + Y_{I, J}^{I+1, J} \{ T(I+1, J) - T(I, J) \} \\ & + Q(I, J) = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで、 $T(I, J)$ は、 (I, J) メッシュの温度である。また、 $Q(I, J)$ は、外部熱負荷を表わしており、プラズマ粒子衝撃により与えられる。

全てのメッシュにおいて、(2.11)式をたてると、連立一次方程式が得られ、これは、次式で表わす事が出来る。

$$[Y] [T] = [Q] \quad (2.11')$$

$$[T] = [Y]^{-1} [Q] \quad (2.12)$$

定常温度分布は、(2.12)式で与えられる。

計算モデルの大きさは、図2.2で $AB = BC = 25 \text{ cm}$ とした。図2.13に、ここで計算した際のメッシュを示す。座標系 (x, y) は、図2.2に示す様にとった。境界条件は、次の領域を除いて断熱とした。

$$\left. \begin{array}{l} - 12 \text{ cm} \leq x \leq -10 \text{ cm} \\ - 25 \text{ cm} \leq y \leq 0 \end{array} \right\} \text{の領域は } 500 \text{ }^\circ\text{C} \text{ で一定とする。}$$

$$\left. \begin{array}{l} - 10 \text{ cm} \leq x \leq 50 \text{ cm} \\ - 30 \text{ cm} \leq y \leq -25 \text{ cm} \end{array} \right\} \text{の領域は、2.2.1(3)のふく射を考えない場合の} \\ \text{定常温度分布とする。}$$

また、周囲とのふく射伝熱は無視した。熱負荷は、2.3.1(3)の場合と同じとし、次の様に与えた。

磁気リミタ板

$$4 \text{ cm} \leq x \leq 6 \text{ cm} \quad q = 1.43 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$$

ライナ

$$15 \text{ cm} \leq x \leq 50 \text{ cm} \quad q = 1.43 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$$

以上の条件のもとに、二次元定常熱伝導計算プログラム STEADY-2D⁽⁵⁾ を用いて計算した結果を、図2.14と図2.15に示す。

以上の結果から、排気ポート部の磁気リミタ板の定常温度は、真空容器を $500 \text{ }^\circ\text{C}$ とした場合、高い所で $1000 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ にも達する事がわかる。その為、磁気リミタ板取付け部に、排気ポートを設置する事は、好ましくないと考えられる。しかし、ベローズはトカマク型装置では、不可欠な為、ベローズ部では磁気リミタ板言張り出す構造にせざるを得ない。その為、真空容器厚内部磁気リミタ板に比較して、定常温度がかなり高くなる事は避けられない。定常温度を低くする為には、運転条件を変更するか、強制冷却する必要が有る。運転条件変更の場合、定常温度上昇を $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度にする為には、放電時間を例に取れば1秒程度にする必要が有る。JT-60は、閉じ込め時間 $0.2 \sim 1$ 秒を目標にしている為、放電時間を1秒程度に短く出来ない。以上から、強制冷却する必要のある事がわかる。この場合、逃走電子により磁気リミタ板や強制冷却機構の溶損が問題となる。その為、逃走電子の発生しにくい放電を行うと共に、磁気リミタ板表面を何らかの方法で監視する必要が有る。

2.2.2 非定常温度解析

プラズマ粒子の衝突により磁気リミタ板表面は加熱され温度が上昇する。プラズマ粒子のエネルギーは、全て磁気リミタ板へ伝ると仮定する。ここでは、二次元非定常熱伝導により、放電中における磁気リミタ板の温度上昇について考察する。二次元非定常熱伝導は、次の偏微分方程式で表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\kappa = \frac{\lambda}{C_p \rho}$$

- κ : 温度伝播率 (m^2/h)
 λ : 熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{h m}^\circ\text{C}$)
 C_p : 比熱 ($\text{kcal}/\text{g}^\circ\text{C}$)
 ρ : 密度 (kg/m^3)

(2.13)式を、差分近似すると次の様に表わされる。

$$\begin{aligned} & \frac{T(m, n, t + \Delta t) - T(m, n, t)}{\Delta t} \\ &= \kappa \frac{T(m+1, n, t) + T(m-1, n, t) - 2T(m, n, t)}{(\Delta x)^2} \\ &+ \frac{T(m, n+1, t) + T(m, n-1, t) - 2T(m, n, t)}{(\Delta y)^2} \\ & \dots\dots\dots (2.14) \end{aligned}$$

- $T(m, n, t)$: 時刻 t における, (m, n) メッシュの温度
 $\Delta x, \Delta y$: それぞれ, x 方向および y 方向のメッシュの大きさ
 Δt : 時間メッシュの大きさ

計算モデルを、図 2.16 に示す。板厚は、2 cm とし、長さは、10 cm とした。一般に、熱浸透長さは次式で表わされる。

$$d = \sqrt{\kappa t} \quad (2.15)$$

- κ : 温度伝播率 (m^2/h)
 t : 時間 (h)
 d : 熱浸透長さ (m)

磁気リミタ板の加熱部分から、真空容器厚肉部までの距離を、5~10 cm とすれば、モリブデンの熱浸透長さは約 2 cm であるから、10 秒間の非定常熱伝導を計算するのは、図 2.16 のモデルで十分である。表 2.1 に各材料の 10 秒間の熱浸透長さを示す。図 2.17 は、熱浸透長さの時間変化を示している。あまり厳密な議論を行なわない場合、熱はその時間における熱浸透長さまで伝わると考えて良い。

表 2.1 10 秒間の熱浸透長さ

material	K (m^2/h)	d (mm)
Molybdenum	0.166	21
Silicon carbide	0.053	12
Graphite	0.090	16
Pyrolytic Graphite	0.354	31

K : thermal diffusivity

d : thermal skin depth at 10 sec

境界条件は、加熱表面を除いて断熱とした。また、周囲とのふく射伝熱は、プラズマ粒子による熱負荷の1%以下であり、10秒間の非定常熱伝導計算では、無視した。計算では、モリブデンの熱伝導率と比熱は、図2.18および図2.19に示す様に温度の関数とした。密度は、 10200 kg/m^3 とした。

以上の条件のもとに、二次元非定常熱伝導計算プログラム MELTING-2D⁽⁵⁾を用いて計算した結果を、図2.20、図2.21および図2.22に示す。加熱前温度は、 500°C とした。図2.20は、加熱中心部の表面温度上昇の時間変化を表わしている。参考として、 1.5 kw/cm^2 の場合の計算結果も示す。図2.21および図2.22は、それぞれ各時刻における表面温度分布および加熱中心部の深さ方向温度分布を示している。図2.20より 1 kw/cm^2 の熱負荷の場合、加熱中心部の表面温度上昇は、10秒で 1800°C 位であり、加熱前温度を 500°C とすれば、表面温度は 2300°C にも達する。モリブデンの融点が 2600°C である事を考えれば、 1 kw/cm^2 の熱負荷が10秒間有る事は、非常に過酷な条件である。また、図2.22より、10秒後では、磁気リミタ板の表面と裏面で 1000°C 程度の温度差がつく事がわかる。加熱領域付近の熱応力は、かなり大きい事が予想される。今後、加熱領域の熱応力の評価が必要である。

2.2.3 許容熱負荷条件の評価

モリブデン磁気リミタ板の許容熱負荷は、次の点より制限される。

- (1) 加熱表面における熱応力
- (2) 加熱表面からの蒸発量

(1)の熱応力は、熱負荷の値によりかなり大きい事が予想され、今後、検討する必要がある。(2)の加熱領域からの蒸発量は、表面温度が 2300°C 程度になれば、JT-60のモリブデン不純物許容量と同程度になる。ここでは、モリブデン磁気リミタ板の許容温度を、再結晶温度と決め、許容熱負荷条件を評価する。モリブデンの再結晶温度は、加工度や板厚等により $800^\circ\text{C} \sim 1100^\circ\text{C}$ の幅が有るが、 1000°C と考えた。

図2.23は、加熱前温度からの温度上昇 ΔT をパラメータとして、放電時間と熱負荷の関係を示している。加熱前温度が高くなれば、物性値の変化により、温度上昇 ΔT も若干高くなる傾向

に有るが、ここでは、加熱前温度の違いによる温度上昇 ΔT の違いは無視する。図 2.23 は放電開始前温度が 500°C の場合である。図 2.23 より、粒子束幅が 2 cm の場合における、放電時間と熱負荷の関係がわかる。各曲線の下側が、許容熱負荷条件の領域である。例として、次の場合を考える。最初の放電開始前温度が 400°C で、連続放電により定常温度上昇が 100°C であったとすると、放電開始前温度は、最終的に 500°C となる。表面温度を 1000°C 以下とする為には、放電中の非定常温度上昇は 500°C まで許容出来る。図 2.23 の ΔT が 500°C の曲線の下側が、この場合の許容熱負荷条件である。放電時間を 10 秒とすれば、熱負荷は、約 350 w/cm^2 となり、 5 秒の場合は、 450 w/cm^2 となる事がわかる。

2.3 低原子番号材磁気リミタ板熱解析

第一壁材料がプラズマ中に不純物として混入すれば、制動ふく射損失、励起損失、イオン化損失等により、プラズマエネルギーを損失する。これらの損失量は、第一壁材の原子番号の二乗以上に依存して増加する。その為、低原子番号材を使用すれば、プラズマ中の不純物許容量を大きく出来る。

J T-60 では、低原子番号材の候補として、C と SiC を選んだ。ここでは、C として高級黒鉛と熱分解黒鉛を、SiC としては高温圧縮 SiC と反応焼結 SiC を考える。

熱解析は、非定常温度解析について行い、定常温度解析は、省略した。

2.3.1 非定常熱解析

計算手法は、2.2.2 のモリブデンの場合と同様である。計算モデルは、図 2.16 を用いた。ただし、熱分解黒鉛は、図 2.24 に示す様に積層構造にして、磁気リミタ板を構成する。熱分解黒鉛は、製法上、厚さ数 mm 程度の薄板しか出来ない。また、熱伝導率に強い異方性が有り、 $k_{//}/k_{\perp}$ の値は $100\sim 150$ にもなる。ここで、 $k_{//}$ 、 k_{\perp} は、堆積面に平行および垂直方向の熱伝導率を表わす。図 2.24 に示す構造にして、熱負荷を熱伝導率の良い堆積面に平行方向に逃せば、表面温度を低く抑える事が出来る。⁽⁷⁾

粒子束幅は、 2 cm とした。熱負荷は、最大 1 kw/cm^2 とした。計算に用いた比熱と熱伝導率を図 2.25 ~ 図 2.29 に示す。熱分解黒鉛の比熱は、黒鉛のもので代用した。各材料の密度は、黒鉛、熱分解黒鉛、高温圧縮 SiC、反応焼結 SiC について、それぞれ 1700 g/cm^3 、 2200 g/cm^3 、 3200 g/cm^3 、 3100 g/cm^3 とした。

計算結果を図 2.30 ~ 図 2.40 に示す。図 2.30 ~ 図 2.32 は、各材料の加熱中心部における表面温度の時間変化を表わしている。図 2.34、36、38、40 は、各材料の表面温度分布を表わしており、図 2.23、25、37、39 は、加熱中心部の深さ方向温度分布を表わしている。

これから、 1 kw/cm^2 の熱負荷の場合、加熱中心部表面温度上昇は、高級黒鉛の場合、 6 秒で 2500°C 近くにもなり、炭化珪素の場合は、 3 秒で 2500°C 近くにもなる。しかし、熱分解黒鉛の場合は、 1 秒で 200°C 位であり、その他の材料の場合、 1 秒で 1000°C 以上にもなることがわかる。

熱分解黒鉛は、他の低原子番号材に比較して、温度上昇が極めて小さいが、計算に用いた熱伝導率の熱分解黒鉛は、良く配向された場合であり、実際は製造条件により若干変る。⁽¹³⁾ その為、

表面温度上昇は、少し高くなる可能性が有る。熱分解黒鉛を除く低原子番号材は、モリブデンに比較して表面温度上昇はかなり大きい。積層構造にした熱分解黒鉛は、モリブデンよりも、表面温度上昇を低く抑える事が出来る。

2.3.2 許容熱負荷条件の評価

CやSiC等の低原子番号材は、金属に比較して電気伝導度が小さい為、電磁力は無視出来ると考える。許容熱負荷条件を次の様に定義した。磁気リミタ板より蒸発した粒子は、一部分が高温プラズマの方へ逆流し不純物となる事が予想される。その為、この逆流する不純物量を評価して、磁気リミタ板から蒸発量の許容値を算出する必要がある。ここでは、磁気リミタ板の加熱領域からの蒸発量が、JT-60の不純物許容量と等しくなる場合を、許容熱負荷条件と定義する。

磁気リミタ板の表面からの全蒸発量は次式で表わされる。⁽⁷⁾

$$\text{全蒸発量} = \int_0^t \dot{n}(T) dt \times 2\pi R \times 2\Delta x \quad (2.16)$$

ここで、 $\dot{n}(T)$; 温度Tの時の蒸発速度 (atoms/sec·cm²)、R ; 加熱中心の半径 (= 479 cm)、 Δx ; 蒸発に寄与する長さである。磁気リミタ板は、上下2枚有る為、 $2 \cdot \Delta x$ とした。

JT-60のプラズマ密度をn、プラズマ体積をVとすると、イオンの個数NはnVで表わされる。n = 5×10^{13} (cm⁻³)、V = 60×10^6 (cm³)とすれば、N = 3×10^{21} となる。JT-60の不純物許容量は、Cが10%、SiCが2~3%である。許容される蒸発粒子数はCが 3×10^{20} コ、SiCが $6 \sim 9 \times 10^{19}$ コとなる。

蒸発量が、JT-60の不純物許容量以上になる時の、磁気リミタ板の加熱中心部表面温度を許容温度とする。図2.30~図2.32の結果により、(2-16)式を用いて蒸発量を計算し、許容温度を求めた。その結果によると、CおよびSiCについて、それぞれ2000℃および1700℃となる。

図2.41~図2.43は、2.3.1の計算結果をもとに、加熱前温度からの温度上昇 ΔT をパラメータとして、放電時間と熱負荷の関係を示している。材料は、高級黒鉛、熱分解黒鉛、高温圧縮SiCとし、反応焼結SiCは省略した。

連続放電により放電開始前温度が500℃になった場合を例として、許容熱負荷条件を評価する。C、SiCの許容温度は、それぞれ2000℃、1700℃であるから、非定常温度上昇は、それぞれ1500℃、1200℃まで許容できる。放電時間を10秒とすれば、図2.41~図2.43より許容熱負荷は、高級黒鉛、熱分解黒鉛、高級圧縮SiCについて、それぞれ550w/cm²、1900w/cm²、300w/cm²となる事がわかる。

ここでは、耐熱衝撃性について触れなかったが、CやSiC等の脆性材料を、磁気リミタ板の様に高熱負荷が予想される部分に使用する場合、熱衝撃破壊が問題になると考えられる。今後、熱衝撃の観点からも、許容熱負荷の評価が必要である。

3. 磁気リミタ板への熱負荷軽減対策

2.2および2.3では、最大 1 kw/cm^2 の熱負荷で熱解析を行なった。その結果、モリブデンの場合、加熱前温度を 500°C とした時、加熱中心部表面温度は、10秒で約 2300°C にも達する。これは、モリブデンの再結晶温度が $800^\circ\text{C}\sim 1100^\circ\text{C}$ である事や、融点が 2600°C 位である事を考えると非常に厳しい値であると考えられる。また、熱分解黒鉛を除く低原子番号材は、加熱後数秒で分解温度あるいは昇華温度（ 3000°C 近く）に達する。その為、高温強度や加熱面からの材料の蒸発が問題になると考えられる。これから、 1 kw/cm^2 の熱負荷が10秒間という条件は、ここで考えている材料にとって過酷な条件であり、熱負荷を軽減させる必要が有る。熱負荷軽減の一つの指標として、モリブデン表面温度を 1000°C 以下にする事を考えた。モリブデンについて着目したのは次の理由による。モリブデンは、材料の再結晶化が進行すれば、材料の強度が著しく低下する。また、モリブデンの場合、CやSiC等の低原子番号と比較して電気伝導度が大きい為、磁気リミタ板には、電磁力が負荷としてかかる。一方、低原子番号材の場合、電気伝導度が小さい為、電磁力を無視出来る。

以上のことから、低原子番号材よりも、モリブデンの方が高温強度の点で厳しいと考えられる為、モリブデンの温度上昇に着目した。

熱負荷を軽減させる方法としては、まず一つはプラズマの放電時間を短くする事が考えられる。この方法による場合、放電開始前温度を 500°C とした時、図2.17のモデルで、放電終了時における加熱中心表面温度を 1000°C 以下に抑える為には、放電時間を0.5秒にする必要が有る。JT-60の閉じ込め時間の目標値が0.2~1秒である事を考慮すれば、放電時間を1秒以下にする事は好ましくない。もう一つの方法として、セパトリックスラインをふらせて、磁気リミタ板の受熱面積を大きくして実効的に熱負荷を小さくする事が考えられる。

ここでは、後者について考える。3.1では、磁気リミタコイル電流に交流成分を重畳させた場合のプラズマの平衡計算の結果について議論を行ない、3.2では、磁気面をふらせた場合の磁気リミタ板の熱解析を行ない、振動周波数及び振幅の大きさを決めた。

3.1 プラズマ平衡の検討

磁気リミター板表面の磁力線（Plasms collision line, P.C.L）をふらせる方法として次の三通りの方法が考えられる。

- 1) 電場を用いる方法
- 2) 補助コイルを用いる方法
- 3) 磁気リミターコイル電流に交流を重畳する方法

1)の方法は、P.C.Lを10 cm程度にふらせるためには非常に大きな電場を必要とする、また2)の方法も補助コイルの電流として数百KA位を必要とするとともに、主磁気リミターコイル取付部付近に補助コイルを置く必要があり、空間的な余裕がないという理由により我々は3)の方法を採用した。図3.1に電流波形（2 Hz）を示す。

次に3)の方法による検討結果を述べる。今、図3.2中のA点付近の詳細を図3.3の記号で書き表わす。ここで B_p は交流分重畳前のA点におけるポロイダル磁場、 B_A は交流重畳分、 l' は重畳によるP. C. Lの移動距離を示している。今、

$$\delta \theta = \frac{B_A}{B_p} = \frac{x}{\sqrt{l'^2 + d^2}} \quad (3.1)$$

$$\tan \varphi = \frac{d}{l + l'} \quad (3.2)$$

より

$$B_A = \frac{l' \sin \varphi B_p}{\sqrt{l'^2 + d^2}} \approx \frac{B_p}{\sqrt{l'^2 + d^2}} \frac{l' d}{l + l'} \quad (3.3)$$

となる。従って $B_p \approx 8 \text{ kG}$ の時に、磁気リミター板より5 cm程度上方の点Aに B_p に直角方向に1 kG程度の磁場をかけると5 cm程度P. C. Lが動くと予想される。また図3.2のB点付近の磁力線の水平面に対する角度 α も、磁気リミターコイルに重畳された交流の影響を受ける。すなわち、主磁気リミターに+15%の交流が重畳された時はB点矢印の方向に移動し α が大きくなり、-15%の交流が重畳された時は α が小さくなる方向に動く。この様なB点付近の磁力線の運動は、上で述べたP. C. Lの振りを大きくする方向である。

次に上で述べた議論を実証するために平衡計算を行なった結果を次に示す。表3.1はプラズマ

表3.1 平衡計算の結果求めたP.C.Lの位置

l_i β_p	Position of P.C.L		
	0 kA	+150 kA	-150 kA
$l_i = 1$ $\beta_p = 0.5$	4.69 m	4.74 m	4.62 m
$l_i = 1$ $\beta_p = 1$	4.63 m	4.69 m	4.54 m
$l_i = 0.5$ $\beta_p = 0.5$	4.73 m	4.79 m	4.68 m
$l_i = 0.5$ $\beta_p = 1$	4.68 m	4.74 m	4.59 m

電流3.3 MAのときに磁気リミターコイル電流に定格値(主磁気リミターコイル1 MA, 副磁気リミターコイル0.5 MA)の15%の交流を重畳したときのP. C. Lの位置を示したものである。この結果よりわかるように、P. C. Lは予想どおり±5 cm程度、もしくはそれ以上動いている。またプラズマパラメーターとP. C. Lの位置は直接に関連しており、図3.4に示すように $\beta_p + l_i / 2$ とP. C. Lの位置はほぼ比例関係にある。また β_p が大きな時の方が、磁気リミターコイルに重畳した交流に対するP. C. Lの位置の変化の感度が大きなことがわかった。

$\beta_p + l_i / 2$ が 0.75 より小さな場合でも、図 3.4 に示される巾の P. C. L の位置変化が予想される。また電流の重畳によるプラズマ内への磁場の影響は重畳する交流の大きさに比例するが、全体のプラズマ平衡には影響せず、プラズマ断面外側（磁気リミター側）が多少変化する程度である。なおプラズマ電流が、3.3 MA から変化した場合、磁気リミタコイルの直流分を、プラズマ電流に比例して変化させれば、以上の議論は全て成立する。

3.2 磁気面をふらせた場合の熱解析

計算モデルを、図 3.5 に示す。プラズマからの熱負荷は、2.2.2 の場合と同様に 1 kw/cm^2 と粒子束は 2 cm とした。磁気面は、磁気リミタ板付近で、単振動していると仮定し、熱負荷も時間と共に移動しているとした。計算手法は、2.2.2 と同様である。

磁気面が振動する場合の振幅は次の様にして決めた。図 2.17 の計算モデルを用いて、熱負荷と加熱長さの積が一定であるという下記の条件のもとに、二次非定常熱伝導プログラム MELTING-2D⁽⁵⁾ を用いて計算した。

$$Q \times \Delta x = C \quad (3.4)$$

Q : 熱負荷 (kw/cm^2)

Δx : 加熱領域長 (cm)

C : 定数 (= 2 kw/cm)

図 3.6 は、10 秒後における加熱中心部表面温度と、加熱領域長さとの関係を示したものである。これから、振幅を、5 cm とすれば振動周波数を適当な値に取る事により、10 秒後における加熱中心部表面温度上昇を 500°C に抑える事が出来ると予想される。

次に、振幅を 5 cm として熱負荷を磁気リミタ板表面で振動させ非定常温度解析を行う。二次元非定常熱伝導プログラム VIBRATION⁽⁵⁾ を用いた。図 3.7 ~ 図 3.10 は、振動周波数が、それぞれ 0.2, 1, 2, 5 Hz の場合における加熱表面温度分布を表わしている。各振動数について、最大温度を示す時間と最大表面温度を表 3.2 に示す。これから、表面温度が最大となる時刻

表 3.2 磁気面を振動させた場合の最高表面温度及びその時間

Sweep frequency	Max. surface temperature	Time
0.2(Hz)	1348($^\circ\text{C}$)	8(sec)
1	1127	9.6
2	1066	9.8
5	1008	9.92

は、いずれの場合も 10 秒後ではなく、振動の最後の折り返し時刻から若干後である。図 3.11 は、表 3.2 から作図したもので、各周波数における表面温度の最大値と周波数との関係を表わしている。これから、加熱前温度が 500°C の時、最大表面温度を 1000°C 以下にするためには、温度上昇を 500°C 以下にする必要があり、周波数を 5 Hz 以上にする必要が有る事がわかる。しかし、周波数を 5 Hz 以上にすれば、磁気リミタコイル電源容量が大きくなる心配が有る。⁽¹⁴⁾

図 3.11 によると、周波数 2 Hz 以上では温度上昇はあまり低下しない。以上の事を考慮して、磁気面の振動周波数は、2 Hz が適当であると思われる。

この様に、非定常温度上昇は、磁気リミタ板付近の磁気面を振動させる事で解決される事がわかる。JT-60 規模あるいはそれ以上の規模のトカマクに磁気リミタを設置する場合、磁気リミタ板へは高熱負荷が予想される。その場合、磁気リミタ板への熱負荷軽減対策として、磁気面を振動させる方法は有効である。

しかし、材料表面が周期的に加熱される為に、熱疲労が問題になって来ると考えられる。図 3.12(a)及び(b)は、2 Hz で磁気面を振動させた場合の、 $x = 4.1$ cm における温度の時間変化を、加熱表面と深さ 1, 3, 5 mm について示したものである。これから、表面付近は、1 秒間に 2 回温度変化があり、0.1 秒間で約 100 °C 変化する事がわかる。この様な条件下の熱疲労について、今後検討する必要が有る。

4. 多条溝構造磁気リミタ板熱解析

4.1. 多条溝構造板

磁気リミタ板は、プラズマ粒子の衝撃を局所的に受ける。スパッタされた粒子は、一部が高温プラズマの側へ不純物として混入する。不純物対策の観点から、逆流する量は出来るだけ少ない方が良い。逆流する量を減少させる方法の一つとして、磁気リミタ板表面を、図 4.1 に示す様な多孔構造又は多条溝構造にする事が考えられる。磁気リミタ板のスパッタ比を実効的に減少させる事が出来る為、結果として、高温プラズマ側への逆流量が、減少する事が予想される。

磁気リミタ板材料は、モリブデンを考える。磁気リミタ板表面の構造は、次の様な理由から、多条溝構造とした。すなわち、磁気リミタ板付近では、磁力線は、図 4.2 に示す様に磁気リミタ板と小さい角度で交わる。その為、多孔構造壁の場合、半径方向の壁先端部が集中的に加熱され融解するおそれが有り、構造上好しくない。そこで、図 4.3 に示す様に、多条溝を大周方向に形成すれば、多孔構造に比較して壁先端部にイオンが集中する割合を小さくする事が出来る。以上の理由から、磁気リミタ板表面には、多孔構造よりも多条溝構造の方が適している。

4.2 多条溝構造板熱解析

二次元非定常温度解析を行い、多条溝壁の温度上昇に着目し、多条溝形状について検討した。計算モデルを、図 4.4 に示す。磁気リミタ板の厚さは、20 mm としたが、計算時間を短縮する為、図 4.4 に示す深さ 7 mm における EF の境界条件は、厚さ 20 mm 平滑板における深さ 7 mm の平面の温度で近似した。その他の境界条件は、加熱面を除いて断熱とした。モリブデンの物性値は 2.2.2 の場合と同じとした。加熱前温度は、500 °C とした。熱負荷は、250 w/cm² とした。1 kw/cm² 位の熱負荷では、形状により壁先端部の温度は融点を越す事も予想される。温度上昇を抑える為には、壁を厚くする必要が有る。その場合、壁先端の平面からスパッタされる量が増加し、スパッタ比軽減効果は、実効的に小さくなる。その為、高熱負荷の有る所では、多条溝構造板はスパッタ比軽減効果の小さいものとなるので、使用しても効果は期待出来ない。加熱面は、図 4.4 で AH と AB とした。磁気面は、板と 45° で交わるとし、熱負荷も 45° で入射するとした。

スパッタ比軽減効果は、多孔構造の場合、孔の深さ H と孔の幅 W の比 H/W が 1 以上の時、平滑板に比較して、スパッタ比を実効的に 30 % 程度に軽減できる事がわかっている。^{(15), (16)} ここでは、スパッタ比軽減効果と H/W の値との関係は、多孔構造と多条溝構造では同じであると仮定し、多条溝構造の溝の幅 W と溝の深さ H が等しいという条件のもとに計算を行う。計算結果を図 4.5 と図 4.6 に示す。図 4.5 は、溝の深さ H をパラメータとして、加熱後 10 秒における壁先端部表面温度と壁厚 D との関係を示している。また、図 4.6 は、壁厚 D をパラメータとして、加熱後 10 秒における壁先端部表面温度と溝の深さ H との関係を示している。

多条溝構造の壁先端部の許容温度を次の様に定義する。平滑なモリブデン磁気リミタ板が 2 cm 幅で熱負荷を受ける場合、加熱中心部表面温度が 2300 °C 程度になれば、加熱面からの蒸発量

がJT-60のモリブデン不純物許容量と同程度になる。この蒸発量が、不純物許容量の10%に達する時の加熱中心部表面温度は約1800°Cである。この温度を、多条溝壁の許容温度とする。

図4.5, 図4.6より, $H=W=3\text{ mm}$ とすれば, $D \approx 0.3\text{ mm}$ となる事がわかる。しかし, 寸法形状の決定に際しては, モリブデンの加工性を考慮する必要が有る。多条溝構造板が加熱された場合, 熱応力による壁の破損や, 壁のつけ根付近の応力集中等が予想される。多条溝構造板の適用に際しては, これらの評価が必要である。

5. ま と め

磁気リミタ板に関する設計上の問題点として、次の項目が挙げられる。

1. 除熱
2. 電磁力による材料の疲労
3. 熱衝撃（特に低原子番号材）
4. 逃走電子衝撃による溶損

これらは、JT-60固有の問題ではなく、大型のトカマク装置に磁気リミタを設置する場合の共通の問題であると思われる。尚、詳細設計により、磁気リミタ板付近の構造は、本解析で用いたものと異っているが、上記の問題点は変りない。

謝 辞

最後に、有益な御意見、御指導をしてくださった吉川允二 JT-60 開発室長をはじめとするグループの諸氏に謝意を表します。熱解析にあたって、東芝総合研究所からの外来研究員である五明由夫氏、燃料工学部黒鉛材料研究室の野村真三氏には、計算方法や物性値について多くの貴重な助言をいただいた。ここに重ねて感謝の意を表します。

5. ま と め

磁気リミタ板に関する設計上の問題点として、次の項目が挙げられる。

1. 除熱
2. 電磁力による材料の疲労
3. 熱衝撃（特に低原子番号材）
4. 逃走電子衝撃による溶損

これらは、JT-60固有の問題ではなく、大型のトカマク装置に磁気リミタを設置する場合の共通の問題であると思われる。尚、詳細設計により、磁気リミタ板付近の構造は、本解析で用いたものと異っているが、上記の問題点は変りない。

謝 辞

最後に、有益な御意見、御指導をしてくださった吉川允二 JT-60 開発室長をはじめとするグループの諸氏に謝意を表します。熱解析にあたって、東芝総合研究所からの外来研究員である五明由夫氏、燃料工学部黒鉛材料研究室の野村真三氏には、計算方法や物性値について多くの貴重な助言をいただいた。ここに重ねて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本機械学会編, 伝熱工学資料, 日本機械学会 (1966)。
- (2) A.K. Oppenheim., Trans. ASME, 78 (1956) 725.
- (3) 臨会プラズマ試験装置用大型真空容器の開発 R & D 中間設計報告書; 日本原子力研究所 (1975)。
- (4) 甲藤好郎, 伝熱概論, 養献堂 (1972)。
- (5) H. Nakamura, to be published.
- (6) Molybdenum; PLANSEE
- (7) 五明由夫等 JAERI-M 6432 (1976)。
- (8) C.L. Mantell., Carbon and Graphite Handbook (1968)。
- (9) P.L. Walker et al., Chemistry and Physics of Carbon. 3 Marcel Dekker New York (1968)。
- (10) M.R. Null et al., Carbon 11 (1973) 81.
- (11) GAC Fusion Staff, GA-A13430 (1975)。
- (12) V. Ya. Checkhovskoy., J. Chem. Thermodynamics 3 (1971) 289.
- (13) S. Nomura, private communication.
- (14) K. Yabuno, private communication.
- (15) 吉川允二, JAERI-M 5849 (1974)。
- (16) S.N. Cramer., E.M. Oblow., Nucl. Fusion 15 (1975) 339.

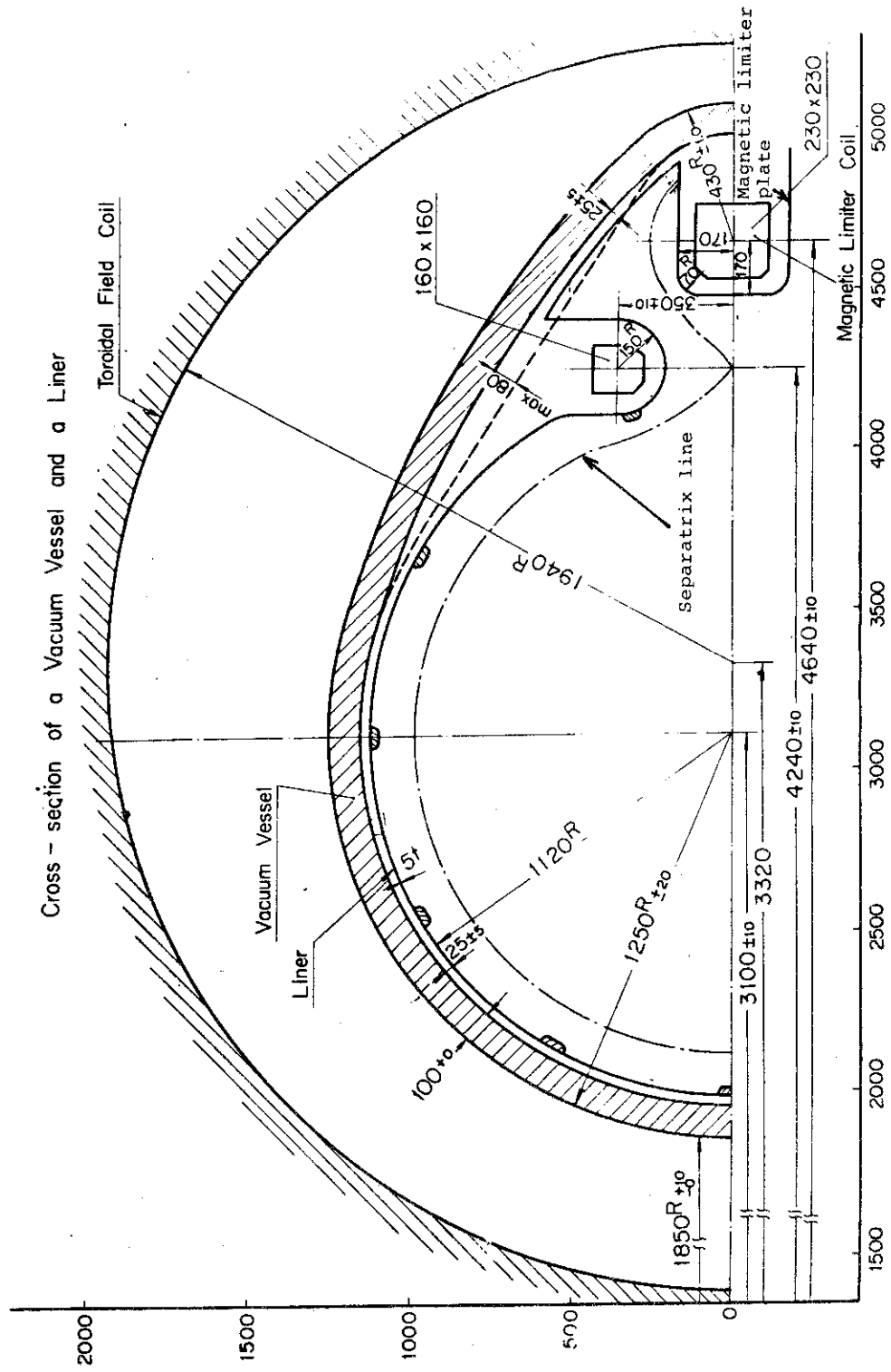
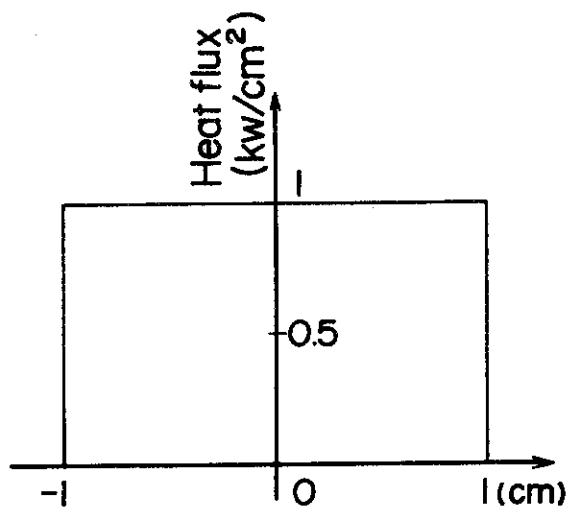
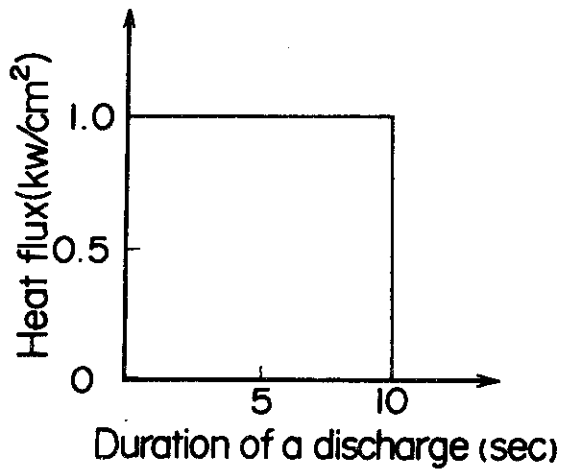


図 1.1 JT-60 真空容器断面の例



Distance from a center of an irradiated region



Duration of a discharge (sec)

図 2.1(a) 磁気リミタ板への熱負荷の横方向分布

図 2.1(b) 磁気リミタ板への熱負荷の時間変化

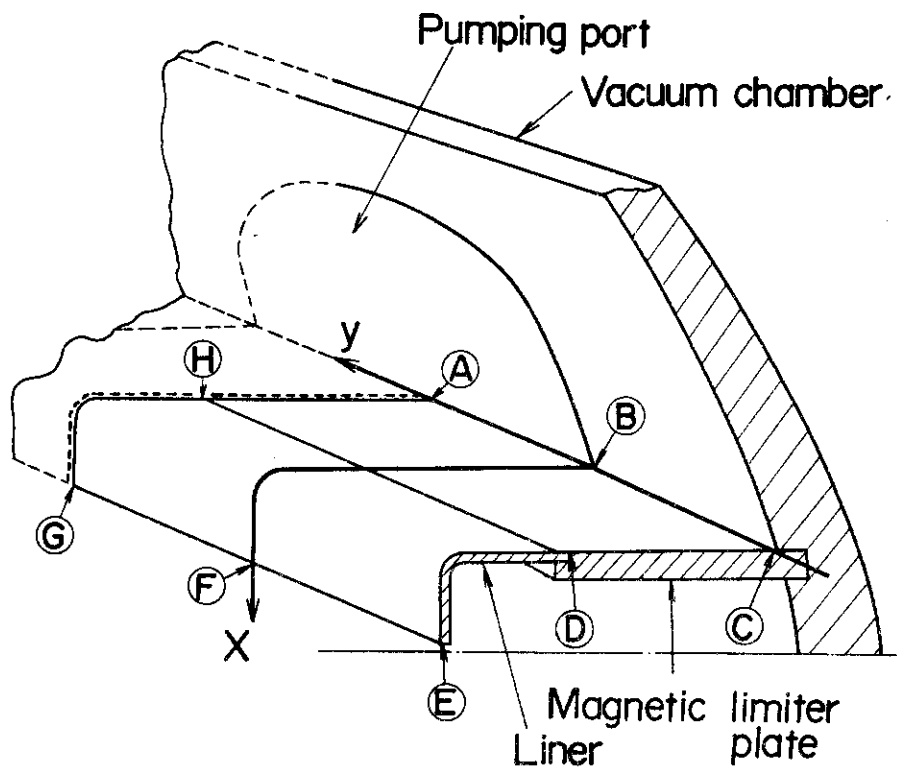


図 2.2 磁気リミタ板付近の模式図

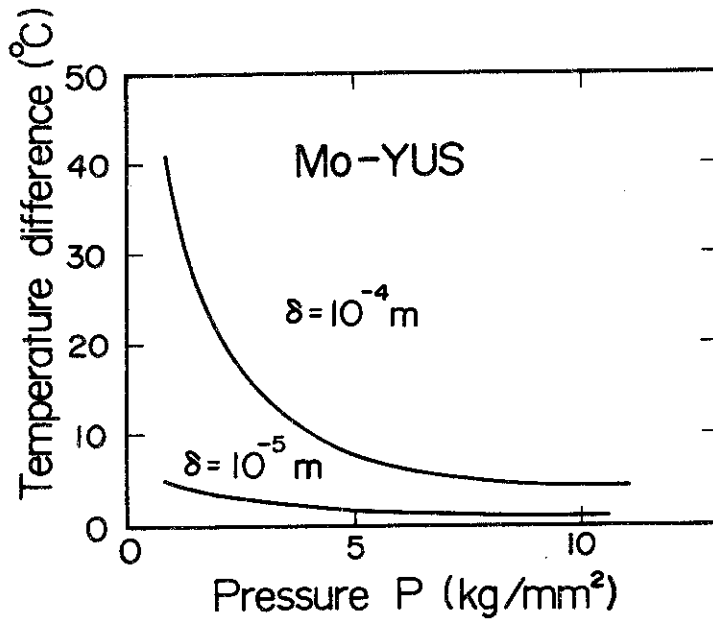


図 2.3 接触部温度差の押付け圧力依存性

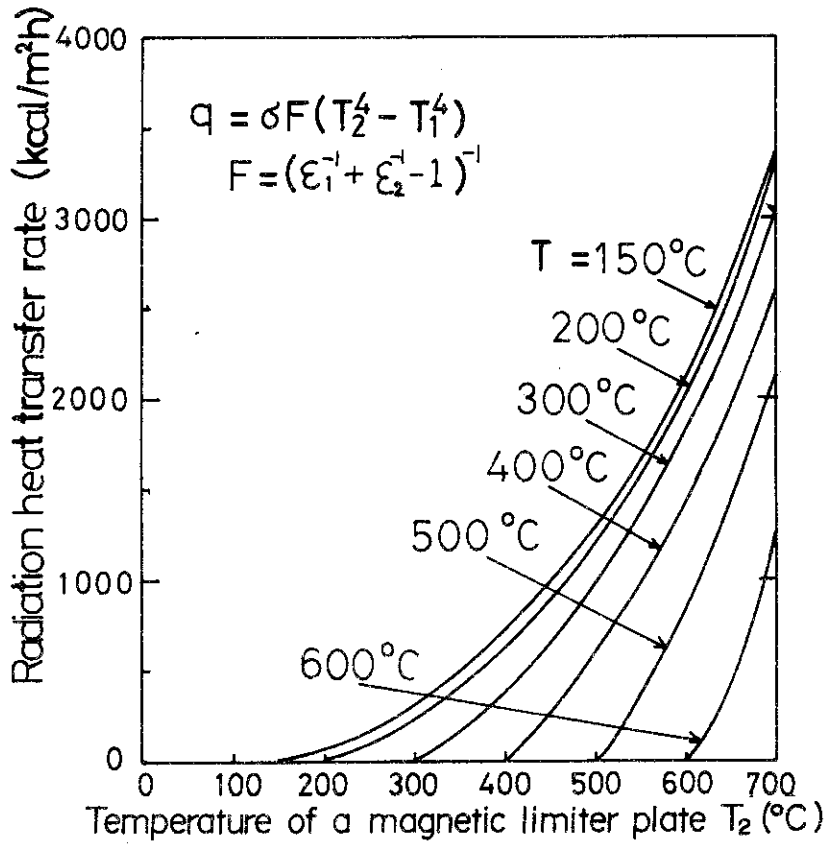
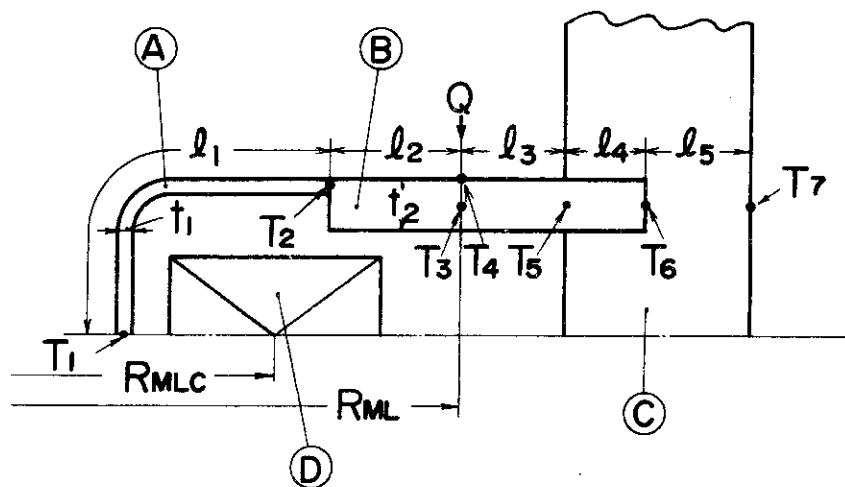
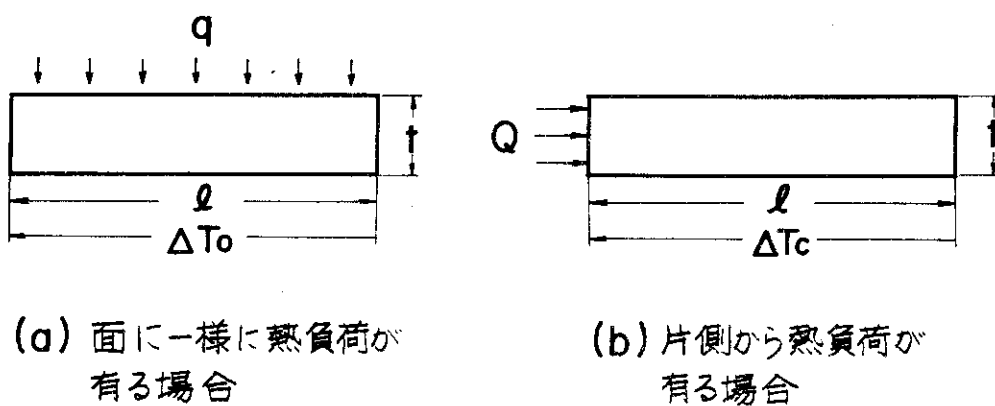


図 2.4 磁気リミタ板からのふく射伝熱量



- (A) Liner
- (B) Magnetic limiter plate
- (C) Vacuum Chamber
- (D) Magnetic Limiter Coil

図 2.5 磁気リミタ板定常温度分布計算モデル



(a) 面に一様に熱負荷が
有る場合

(b) 片側から熱負荷が
有る場合

図 2.6 定常温度計算モデル

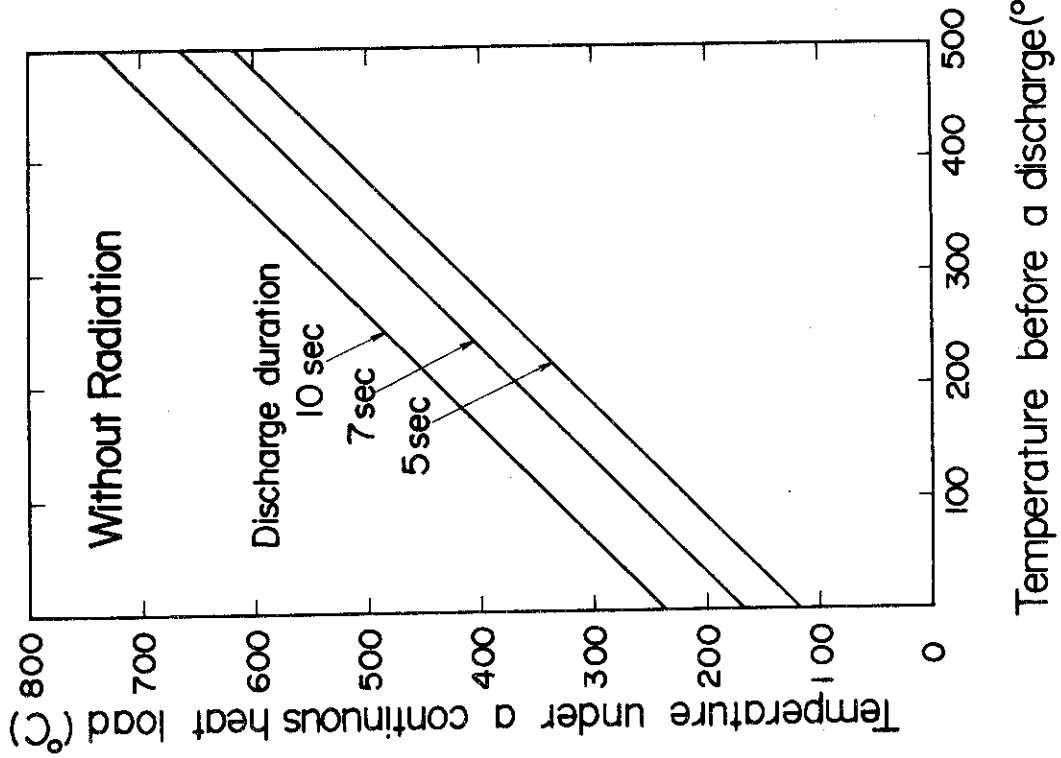


図 2.8 磁気リミタ加熱中心部における定常温度 (T_3) の放電開始前温度依存性 (ふく射が無い場合)

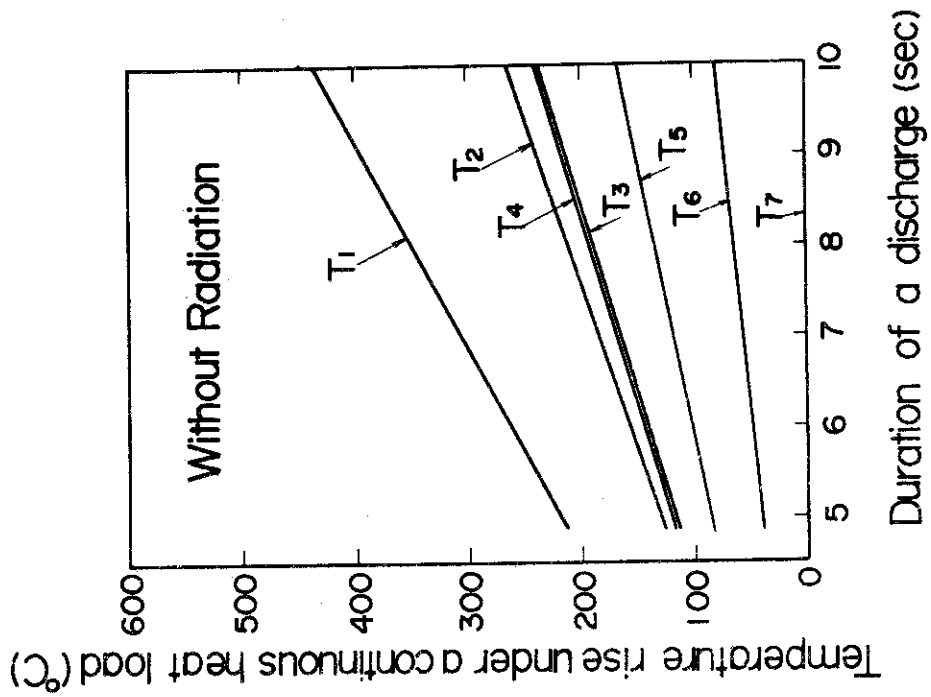


図 2.7 各部定常温度の放電時間依存性 (ふく射が無い場合)

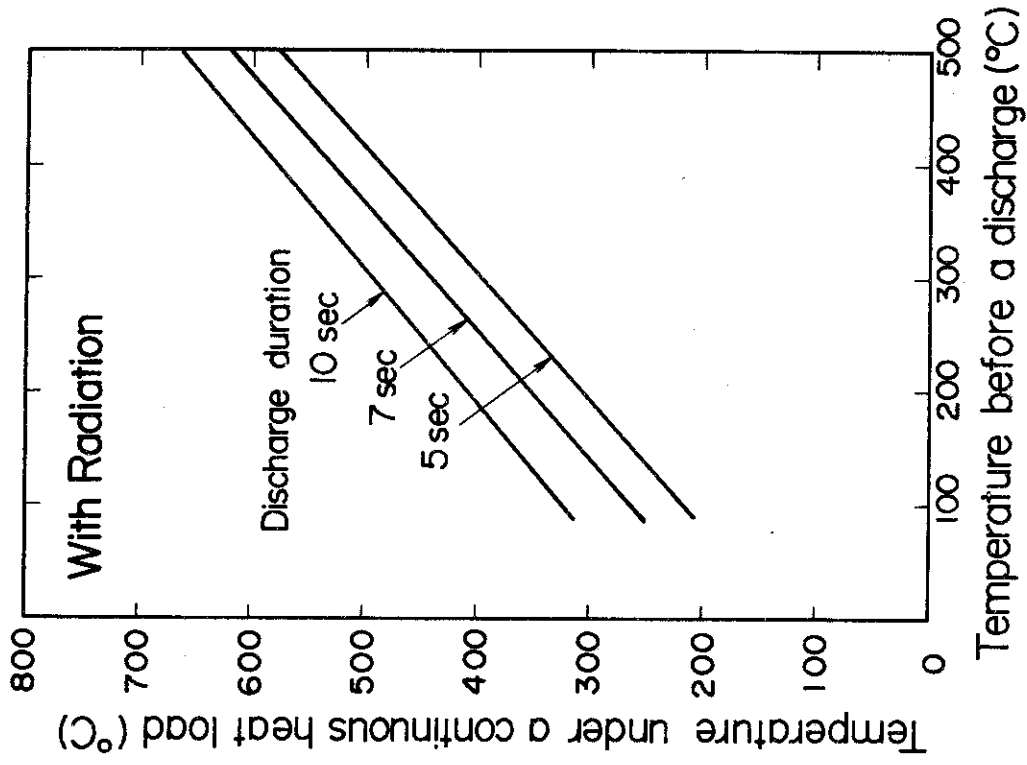


図 2.10 磁気リミッタ加熱中心部における定常温度 (T_3) の放電開始前温度依存性 (ふく射がある場合)

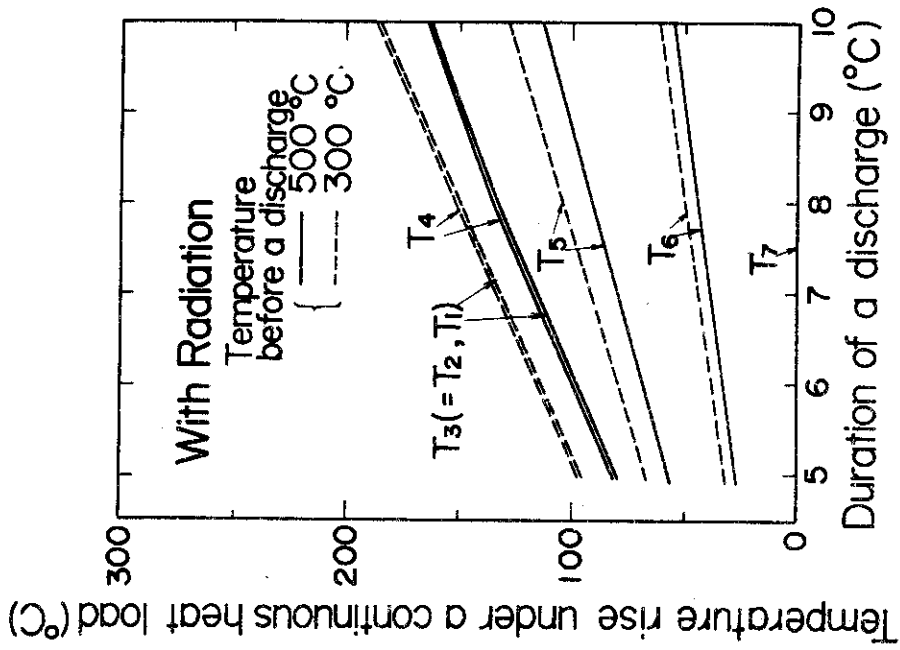


図 2.9 各部定常温度の放電時間依存性 (ふく射がある場合)

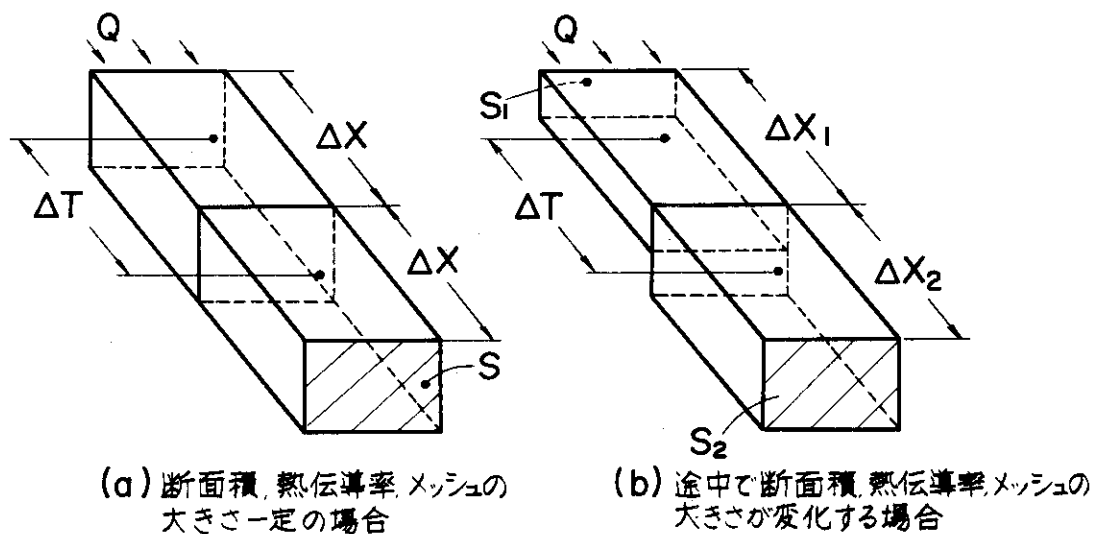


図 2.11 熱アドミタンス計算モデル

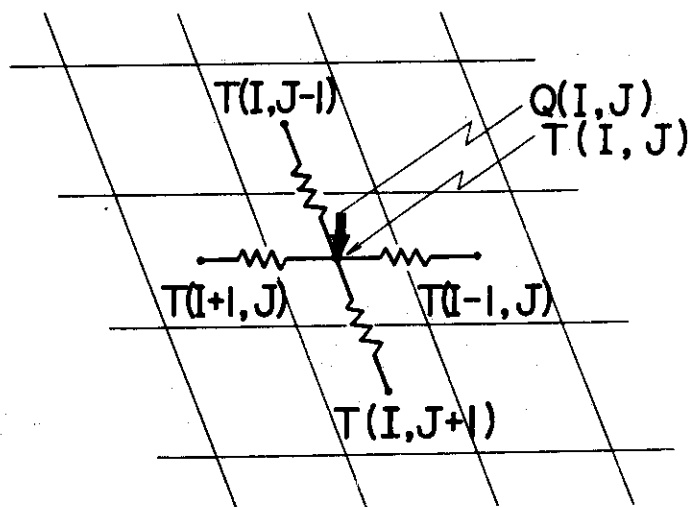


図 2.12 (I, J)メッシュ付近のメッシュの温度表示

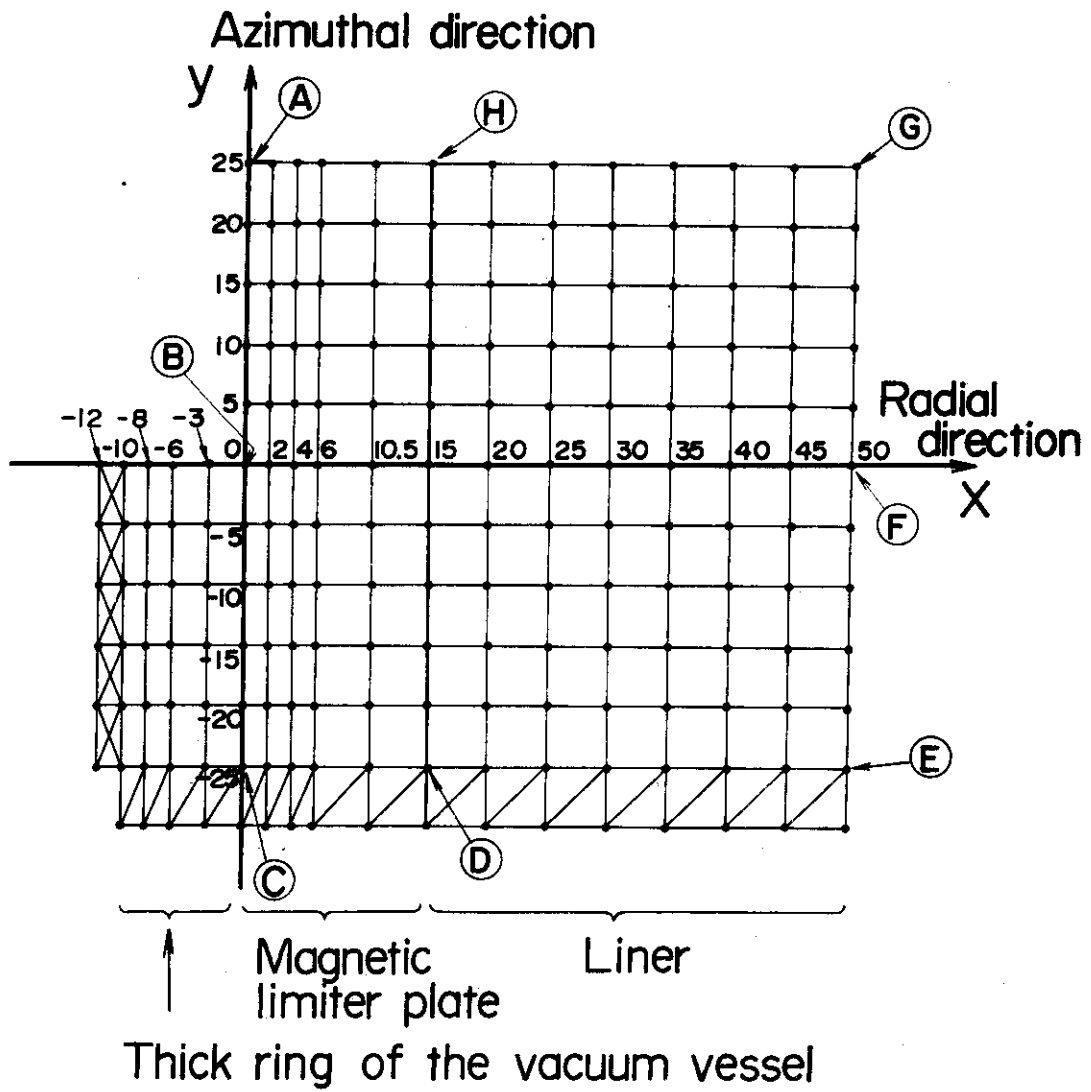


図 2.13 排気ポート部磁気リミタ板の二次元定常温度分布計算メッシュ

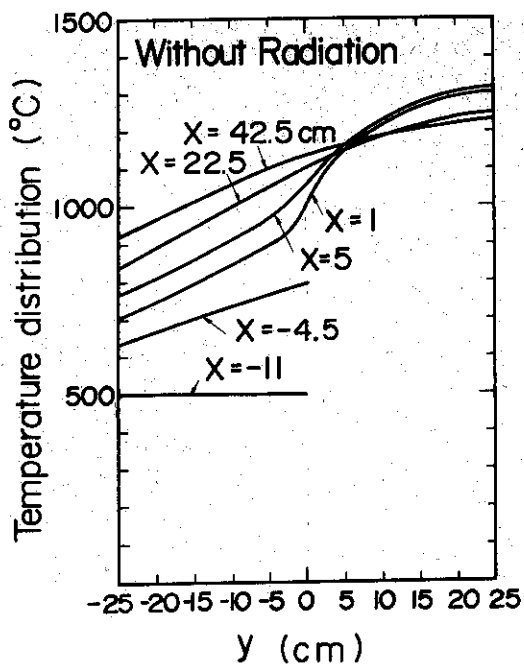


図 2.14 排気ポート部磁気リミタ板のy方向
定常温度分布 (ふく射が無い場合)

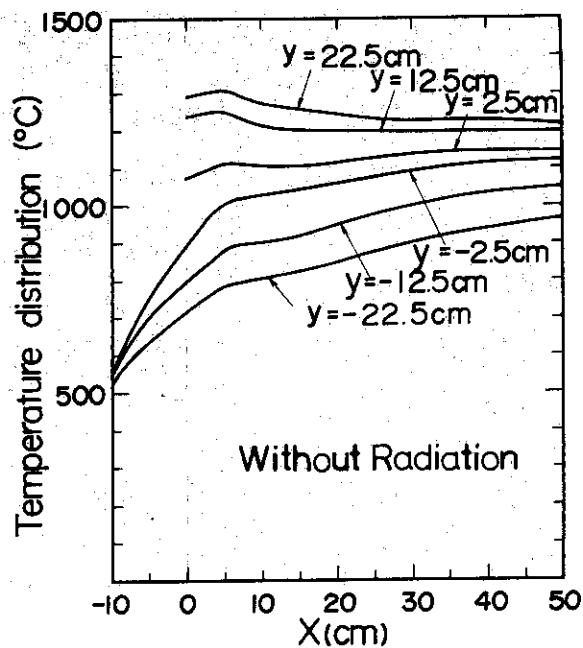


図 2.15 排気ポート部磁気リミタ板のX方向
定常温度分布 (ふく射が無い場合)

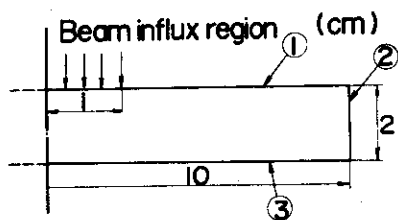


図 2.16 二次元非定常温度計算モデル
①, ②, ③断熱

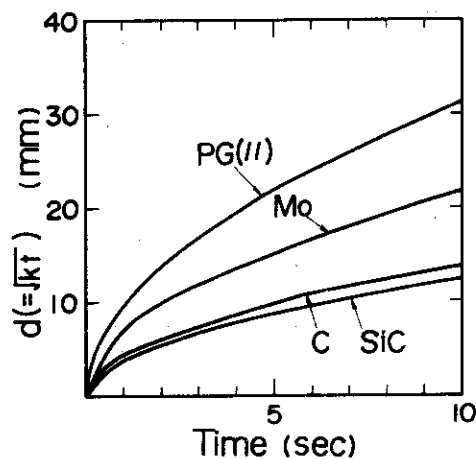


図 2.17 熱浸透長さの時間依存性
(k; 温度伝播率, t; 時間,
d; 熱浸透長さ)

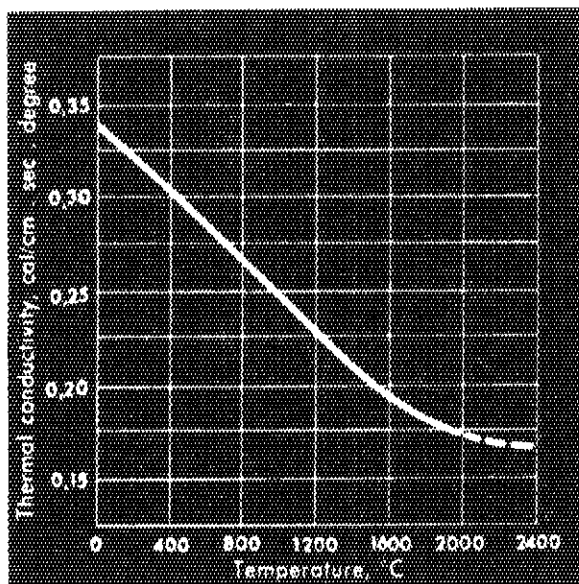


図 2.18 モリブデンの熱伝導率の温度依存性⁽⁶⁾

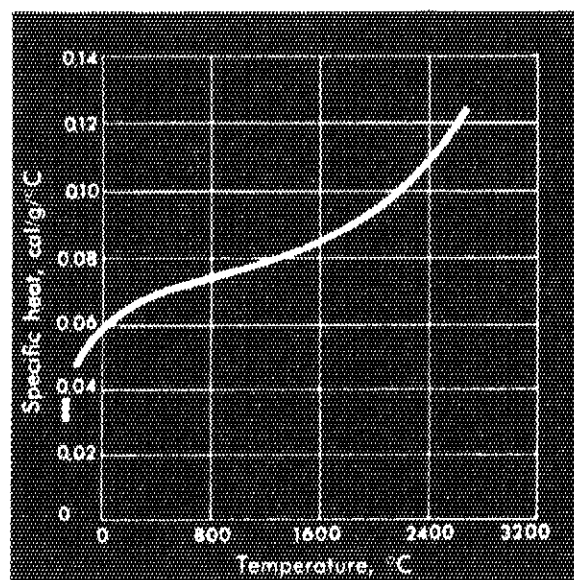


図 2.19 モリブデンの比熱の温度依存性⁽⁶⁾

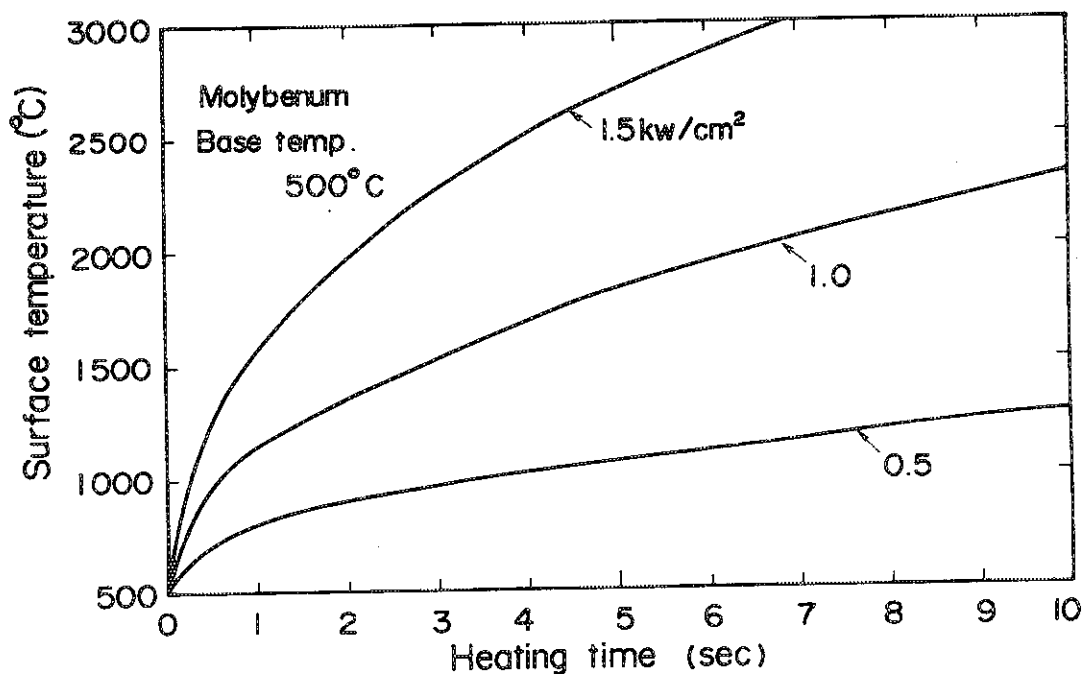


図 2.20 加熱中心部表面温度の過渡変化 (モリブデン)

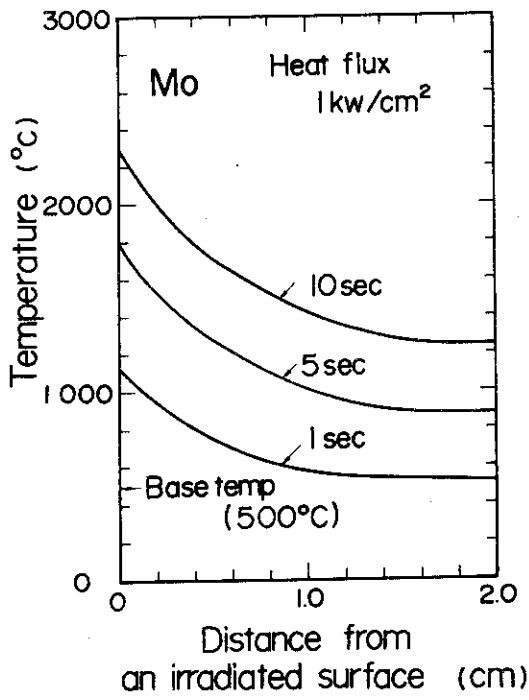


図 2.21 加熱中心軸上の深さ方向温度分布 (モリブデン)

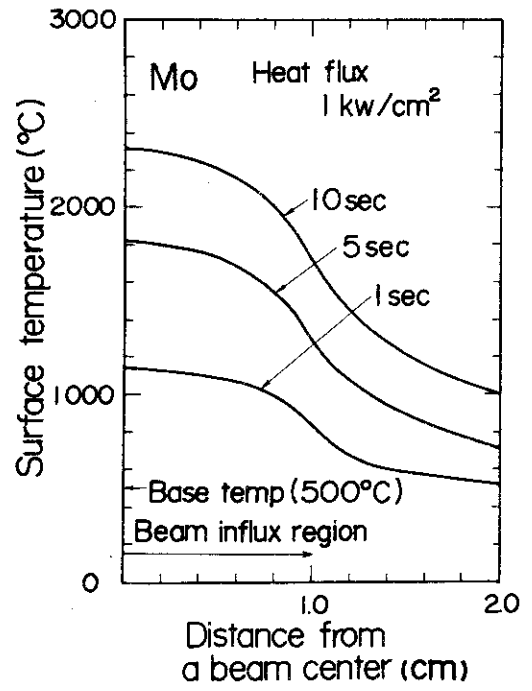


図 2.22 加熱表面の横方向温度分布 (モリブデン)

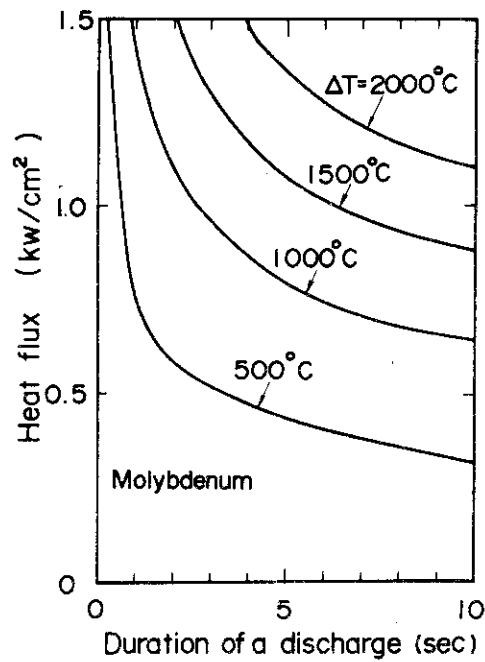


図 2.23 加熱中心部表面温度上昇の熱負荷，放電時間依存性

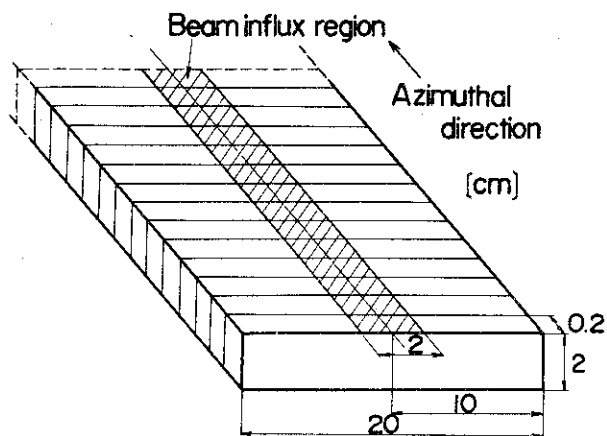


図 2.24 熱分解黒鉛を用いた積層構造磁気リミタ板

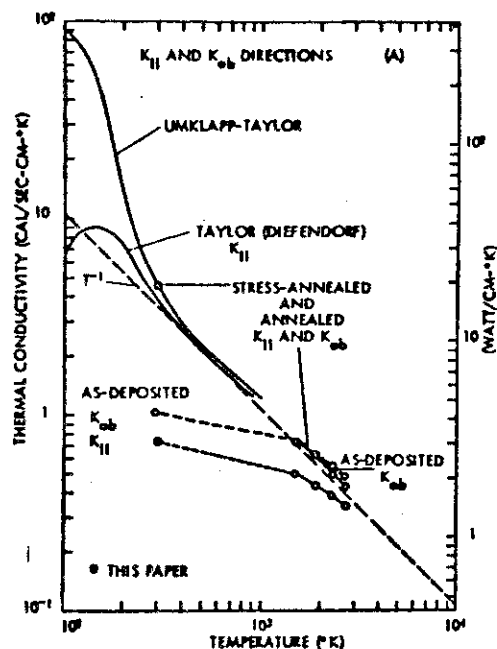


図 2.26 熱分解黒鉛の熱伝導率 (堆積面に平行方向)⁽¹⁰⁾
as-deposited kab を用いた。

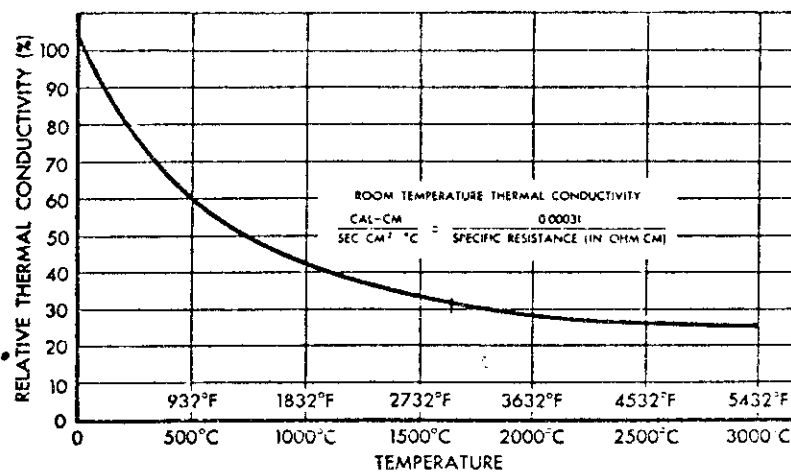


図 2.25 黒鉛の熱伝導率 (室温の値に対する割合)⁽⁸⁾
室温の値を 0.27 (cal/cm·°C·sec) とした。⁽⁹⁾

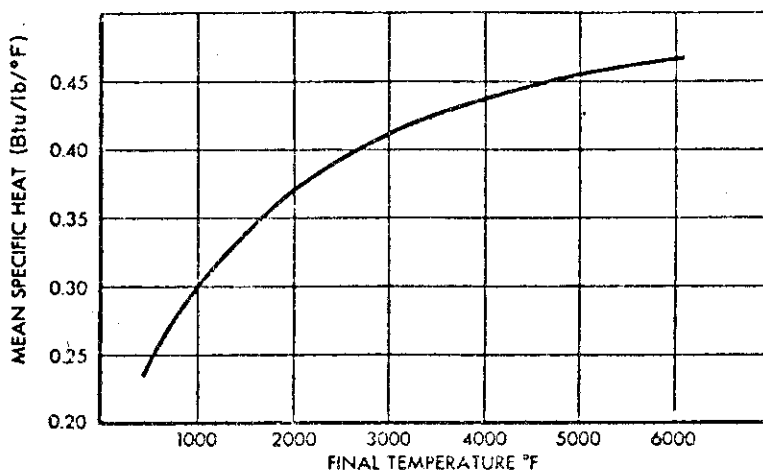


図 2.27 黒鉛の比熱⁽⁸⁾

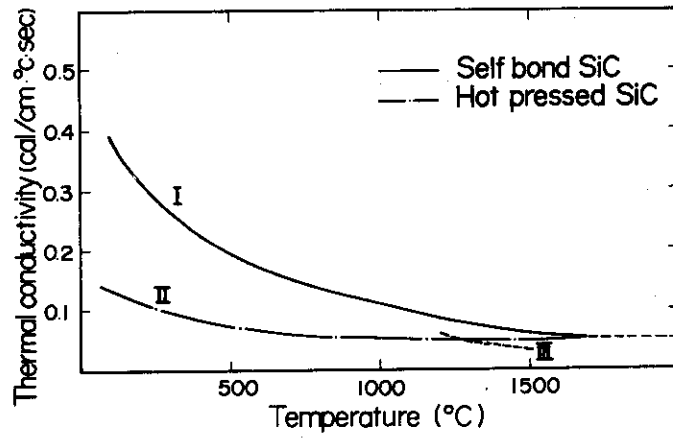


図 2.28 炭化珪素の熱伝導率の温度依存性
 I ; Refel のカタログを, 文献(11) のデータ (曲線Ⅲ) を用いて,
 1500 °C まで拡張
 II ; C.V.D SiC 文献(11) より。

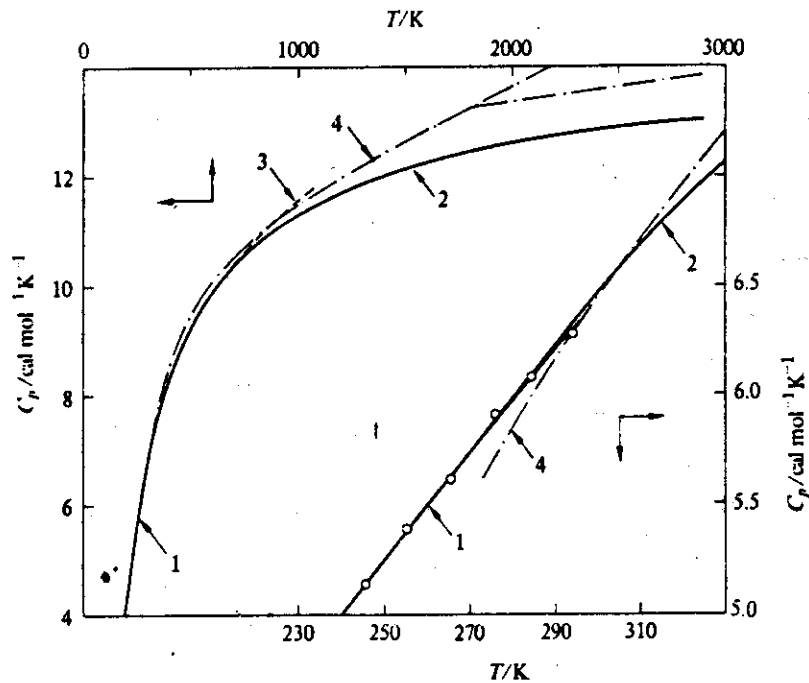


図 2.29 SiC の比熱⁽¹²⁾
 計算は 2 の data を使用

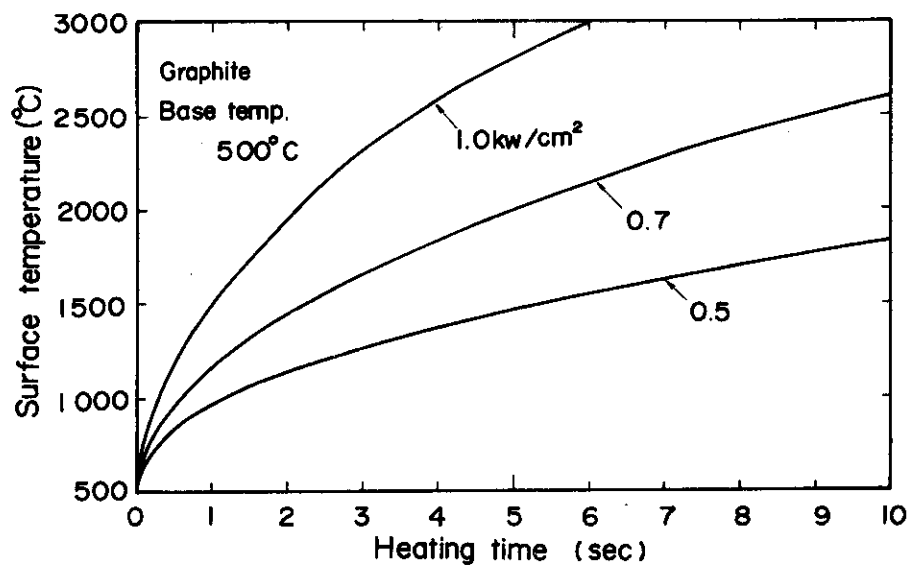


図 2.30 加熱中心部表面温度の過渡変化
(黒鉛)

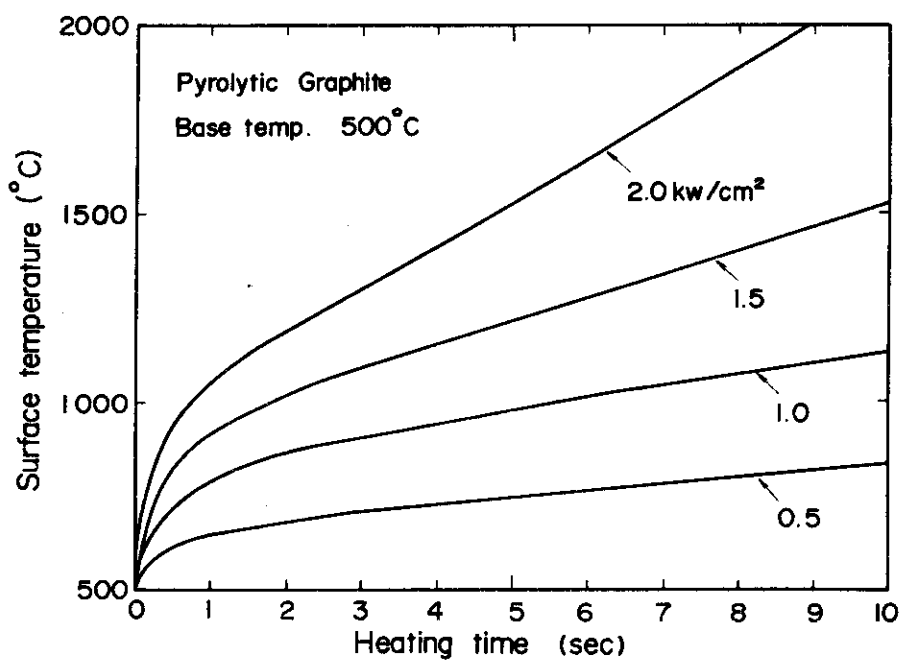


図 2.31 加熱中心部表面温度の過渡変化
(熱分解黒鉛)

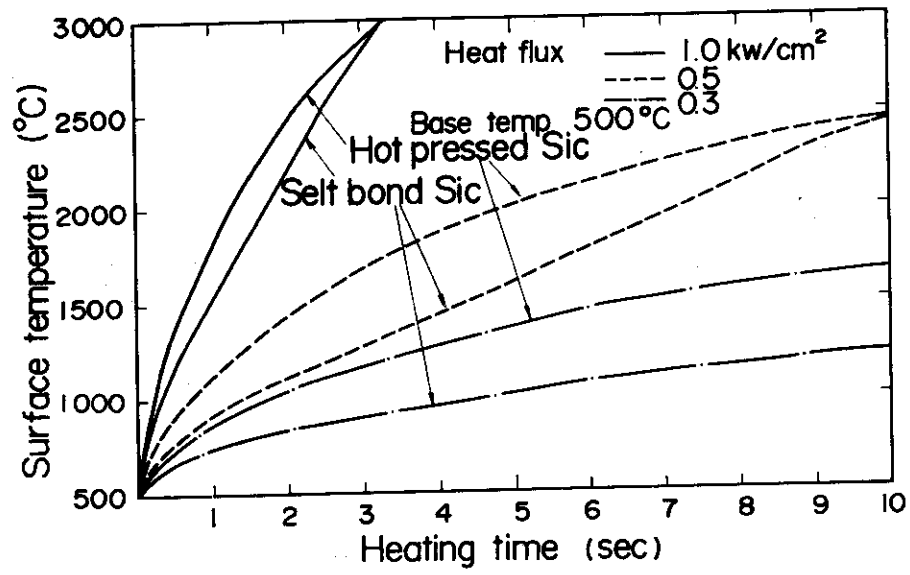


図 2.32 加熱中心部表面温度の過渡変化
(炭化珪素)

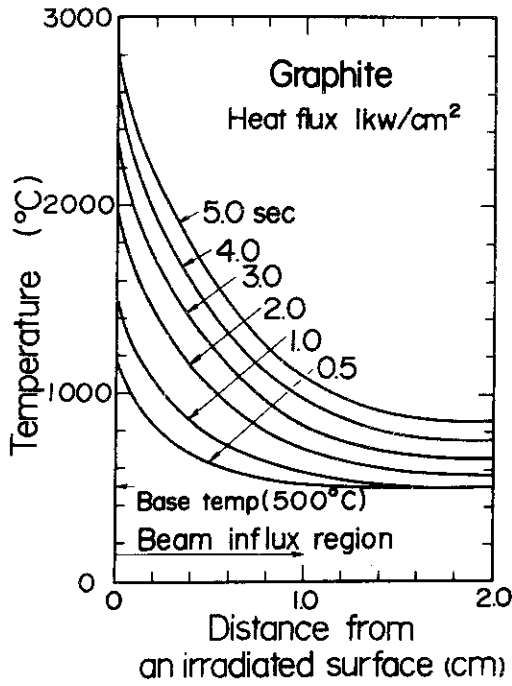


図 2.33 加熱中心軸上の深さ方向温度分布 (黒鉛)

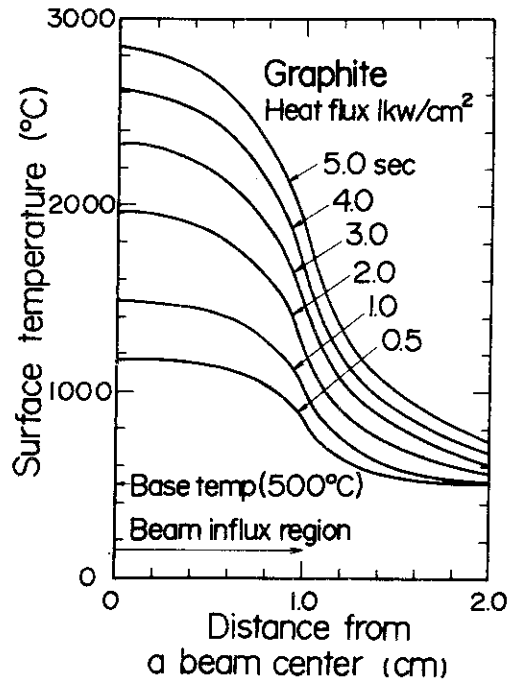


図 2.34 加熱表面の横方向温度分布 (黒鉛)

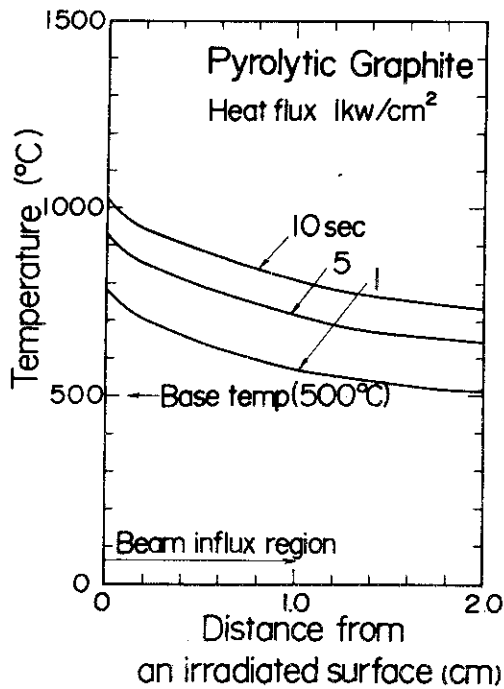


図 2.35 加熱中心軸上の深さ方向温度分布 (熱分解黒鉛)

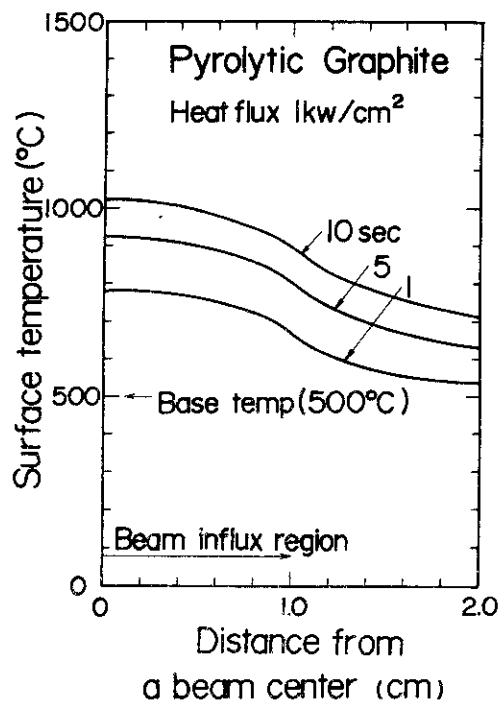


図 2.36 加熱表面の横方向温度分布 (熱分解黒鉛)

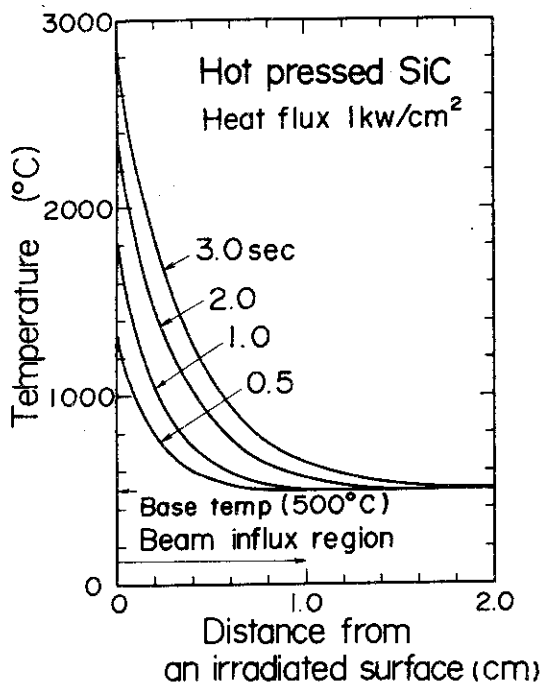


図 2.37 加熱中心軸上の深さ方向温度分布 (高温圧縮 SiC)

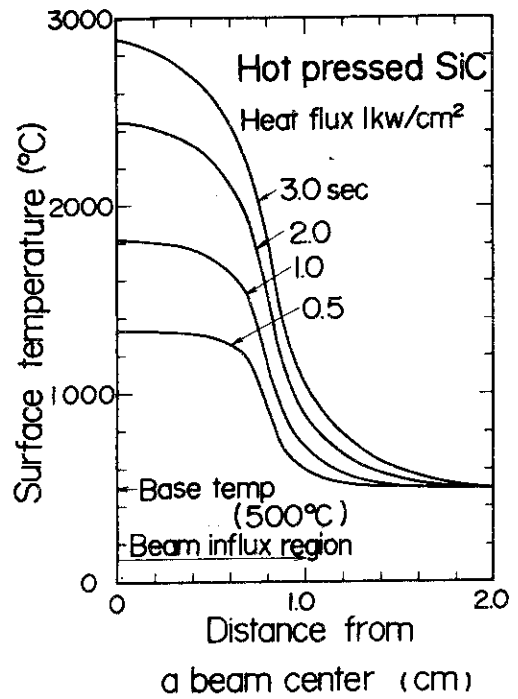


図 2.38 加熱表面の横方向温度分布 (高温圧縮 SiC)

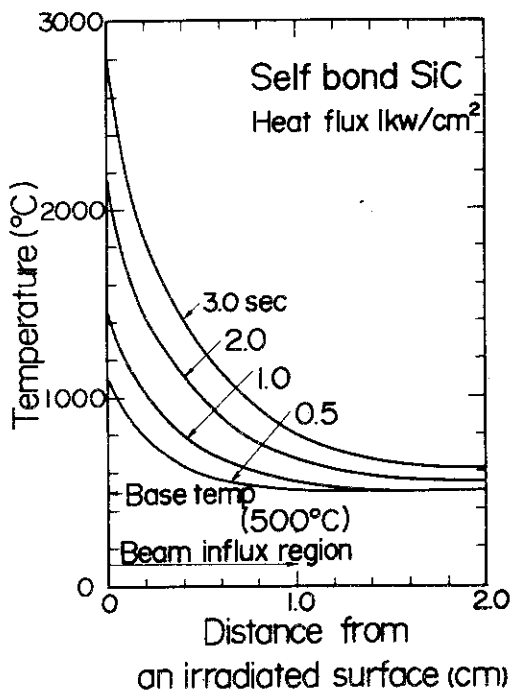


図 2.39 加熱中心軸上の深さ方向温度分布 (反応焼結 SiC)

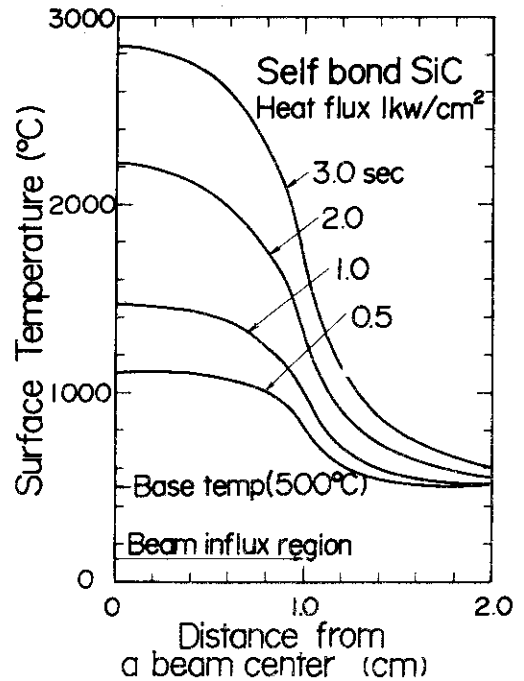


図 2.40 加熱表面の横方向温度分布 (反応焼結 SiC)

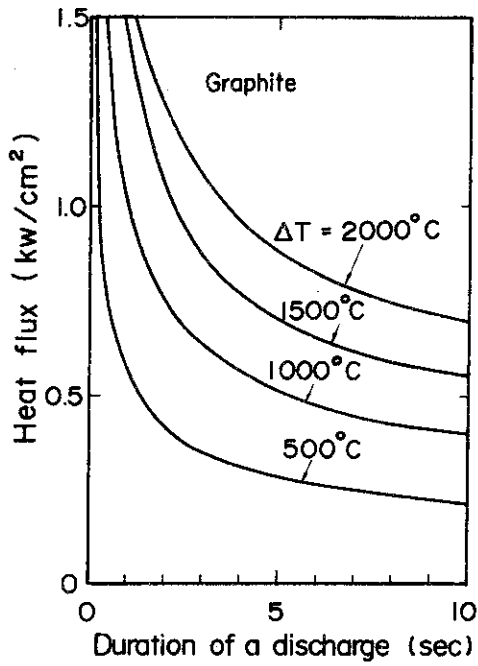


図 2.41 加熱中心部表面温度上昇の熱負荷，
放電時間依存性（黒鉛）

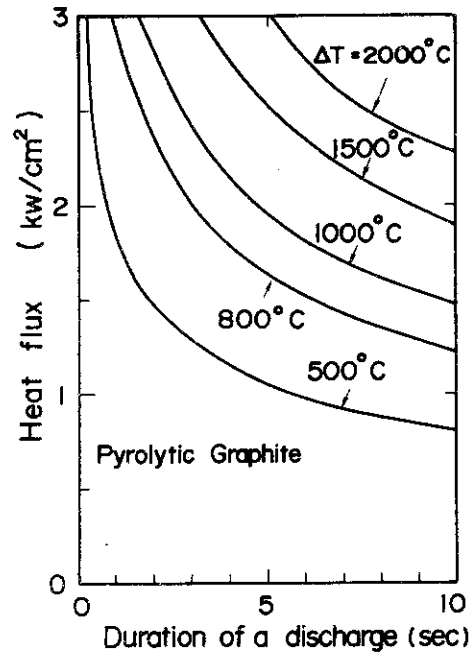


図 2.42 加熱中心部表面温度上昇の熱負荷，
放電時間依存性（熱分解黒鉛）

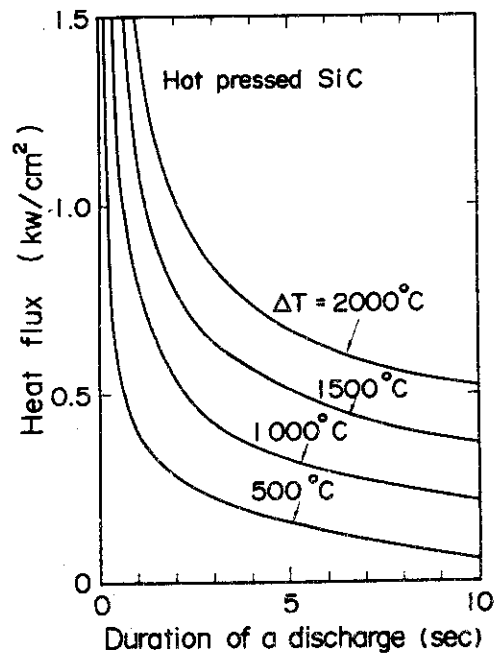


図 2.43 加熱中心部表面温度上昇の熱負荷，放電時間依存性
（高温圧縮 SiC）

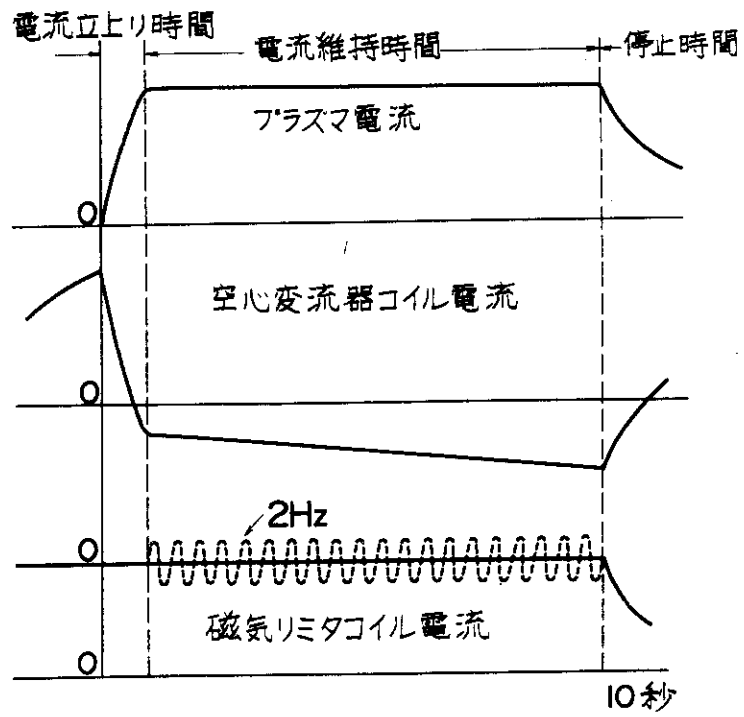


図 3.1 磁気リミタコイル電流波形

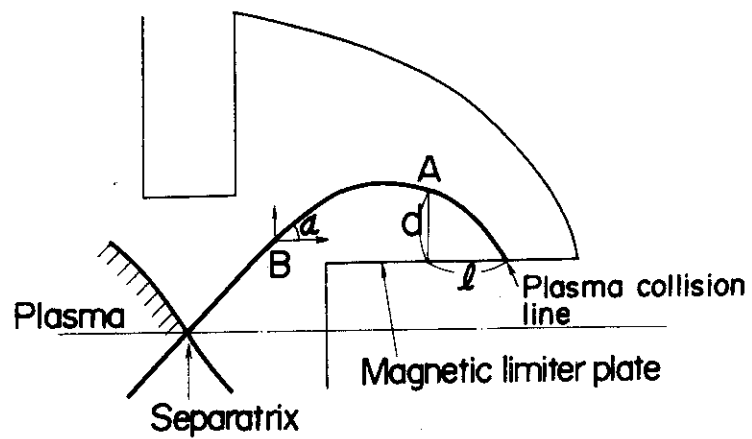


図 3.2 磁気リミタ板付近の各パラメータ

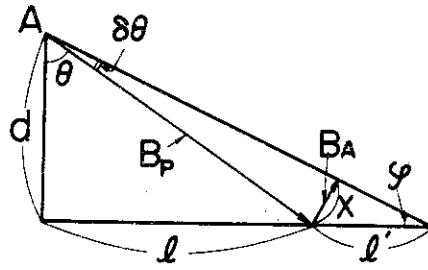


図 3.3 図 3.2 の A 点付近詳細図

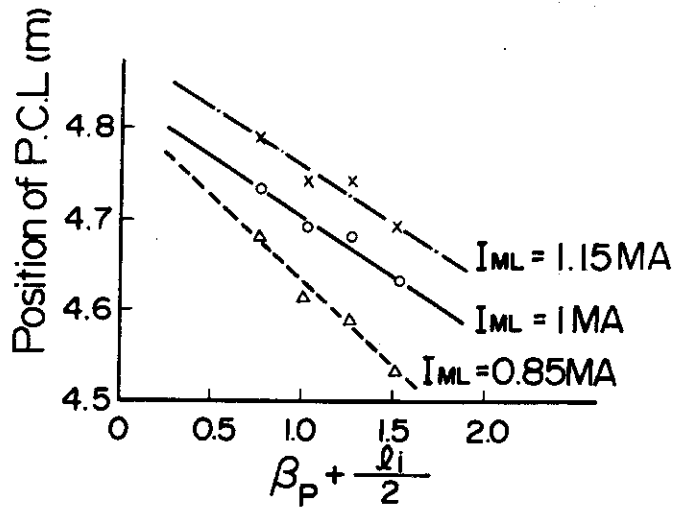


図 3.4 P.C.L の $\beta_p + (l_i/2)$ 依存性

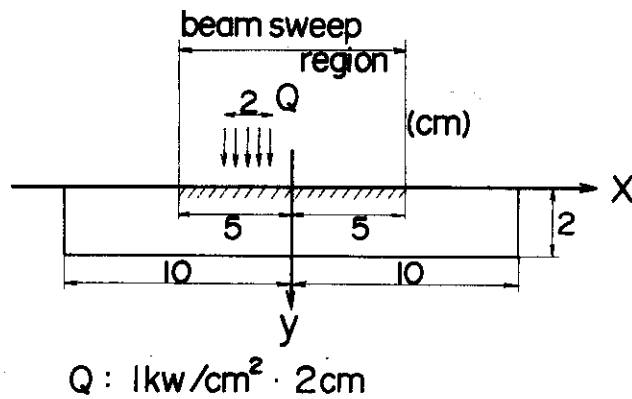


図 3.5 磁気面を振動させる場合の非定常温度計算モデル
(境界条件は、加熱面を除き断熱)

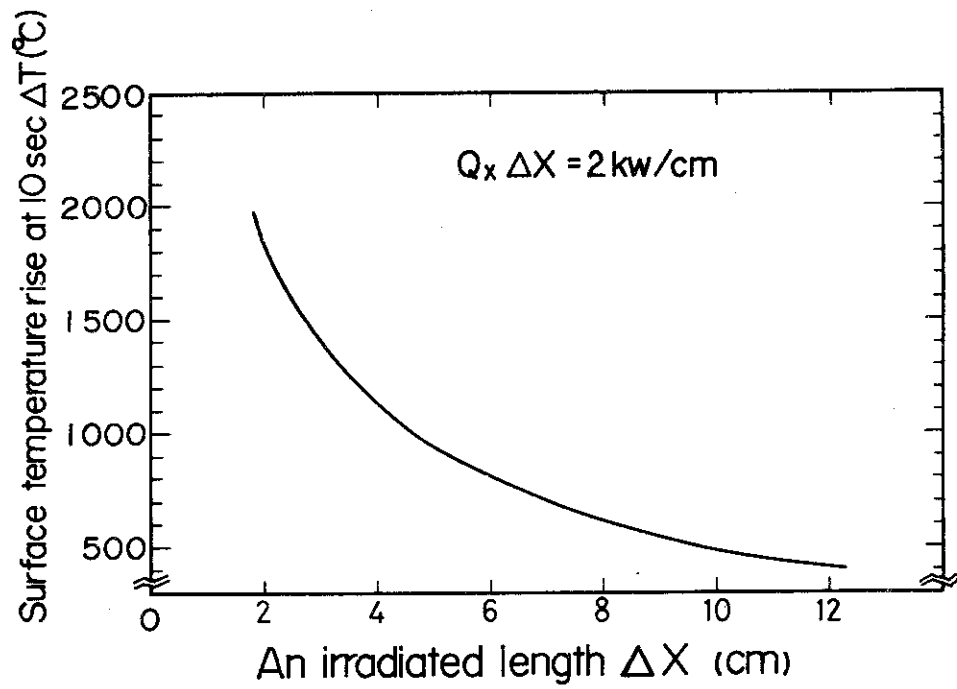


図 3.6 加熱中心部表面温度上昇の加熱長さ依存性 (加熱後 10 秒)

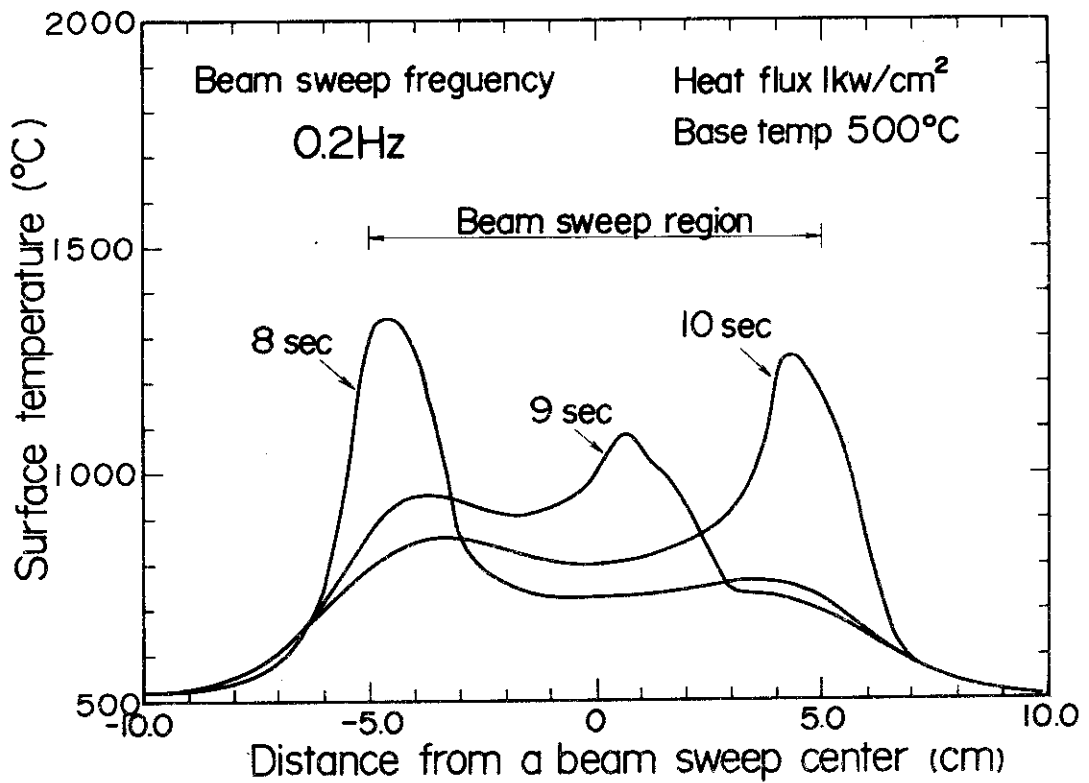


図 3.7 磁気面を振動させた場合における表面温度の横方向分布 (振動周波数 0.2 Hz)

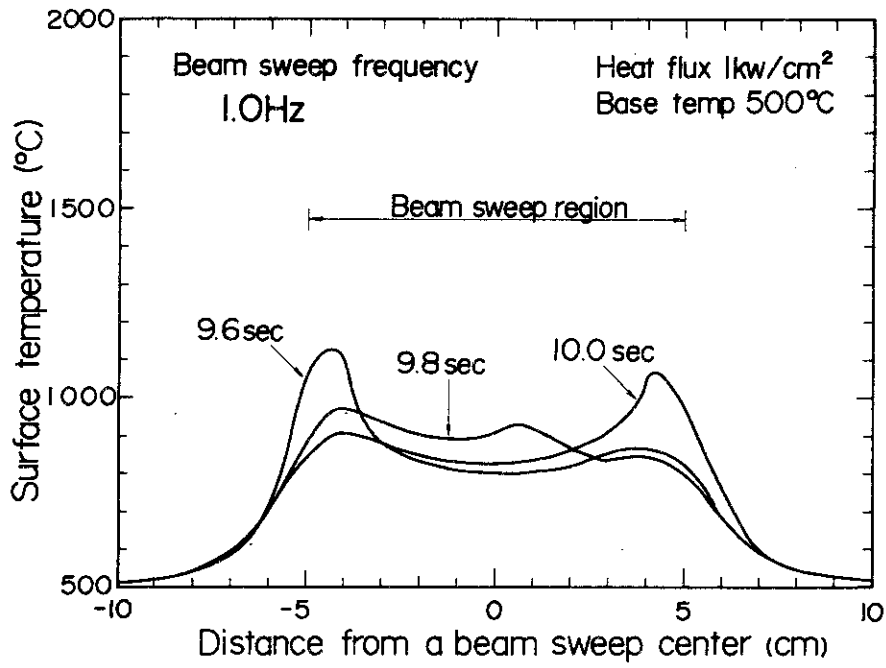


図 3.8 磁気面を振動させた場合における表面温度の横方向分布 (振動周波数 1.0 Hz)

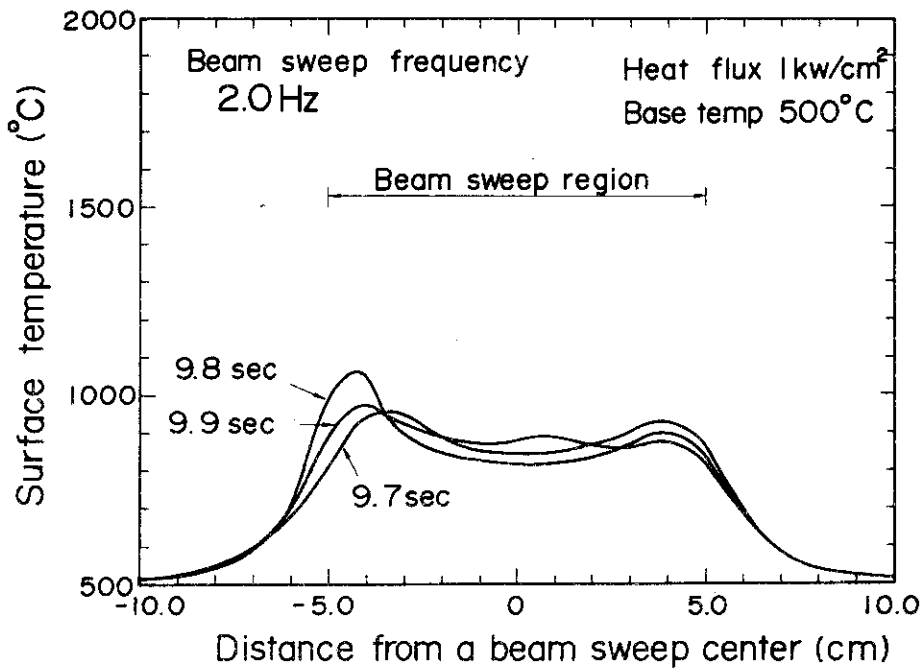


図 3.9 磁気面を振動させた場合における表面温度の横方向分布 (振動周波数 2.0 Hz)

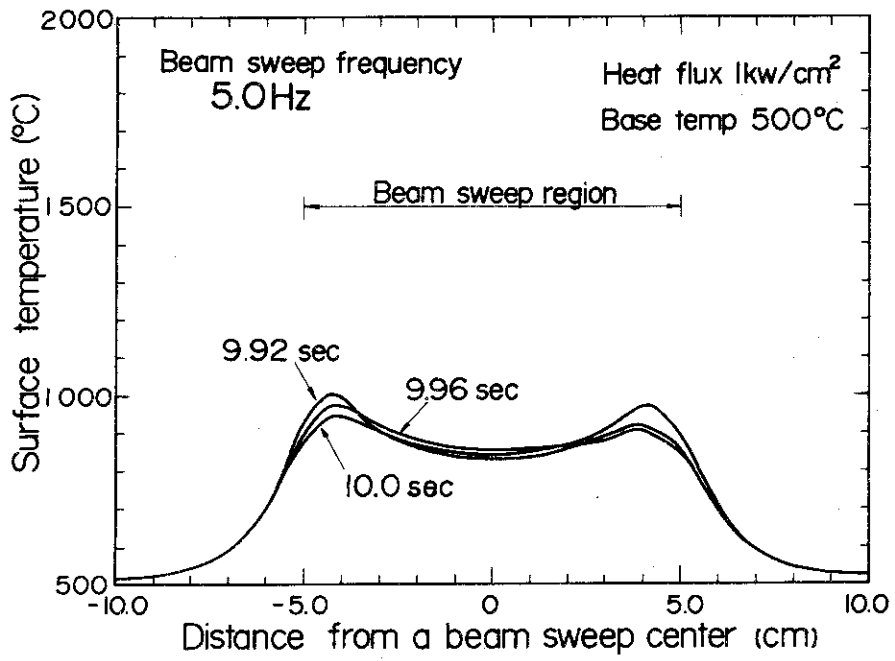


図 3.10 磁気面を振動させた場合における表面温度の横方向分布 (振動周波数 5.0 Hz)

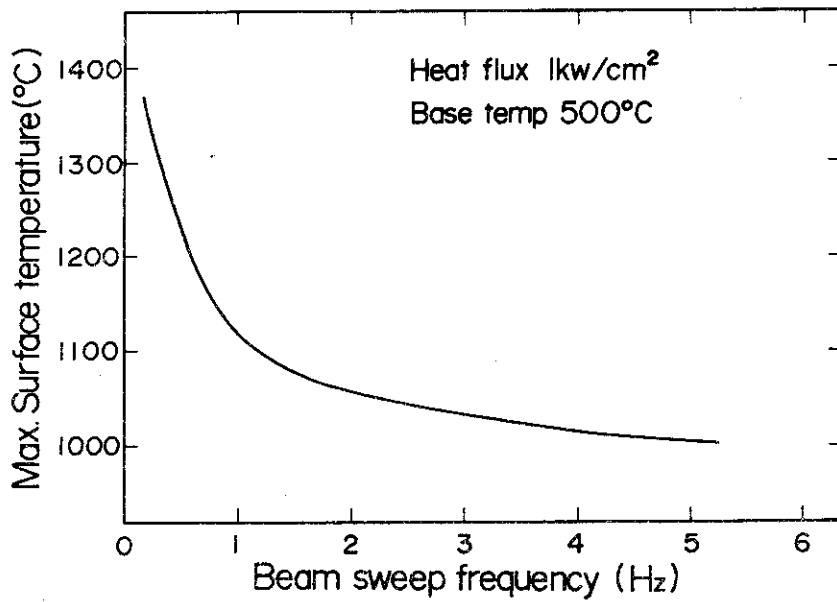


図 3.11 最大表面温度の磁気面振動周波数依存性

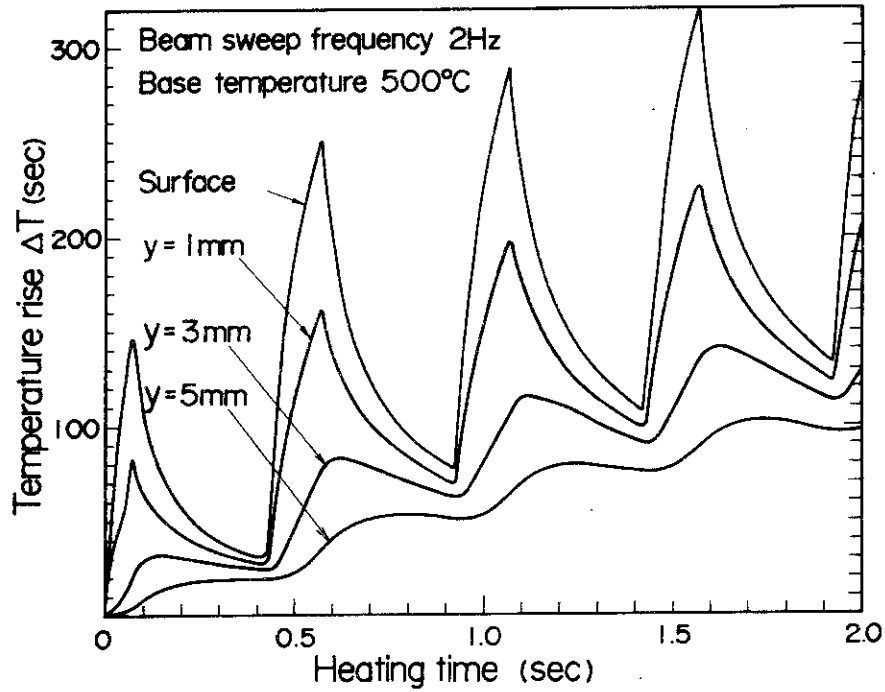


図 3. 12(a) $x = 4.1 \text{ cm}$ の位置における温度上昇の過渡変化 (0 ~ 2 秒)

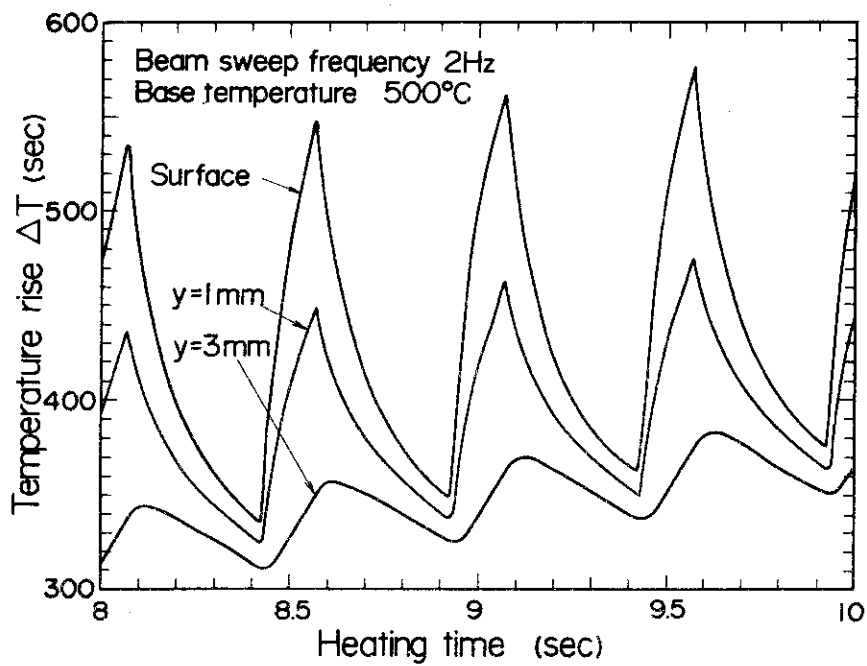
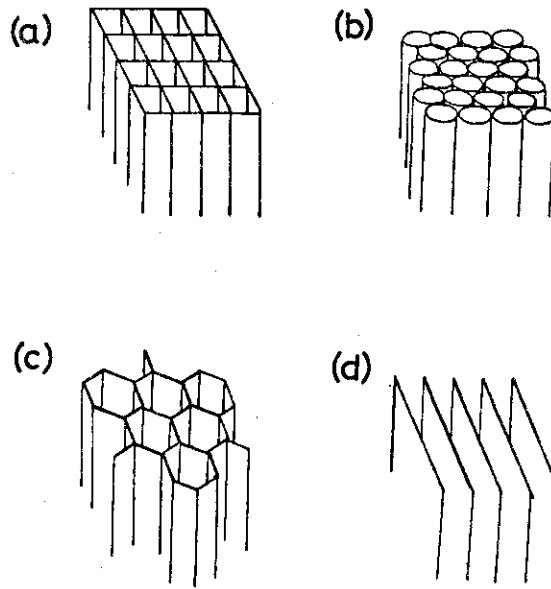


図 3. 12(b) $x = 4.1 \text{ cm}$ における温度上昇の過渡変化 (8 ~ 10 秒)



(a),(b),(c) multi-hole structure
 (d) multi-groove structure

図 4.1 多孔構造および多条溝構造⁽¹⁵⁾

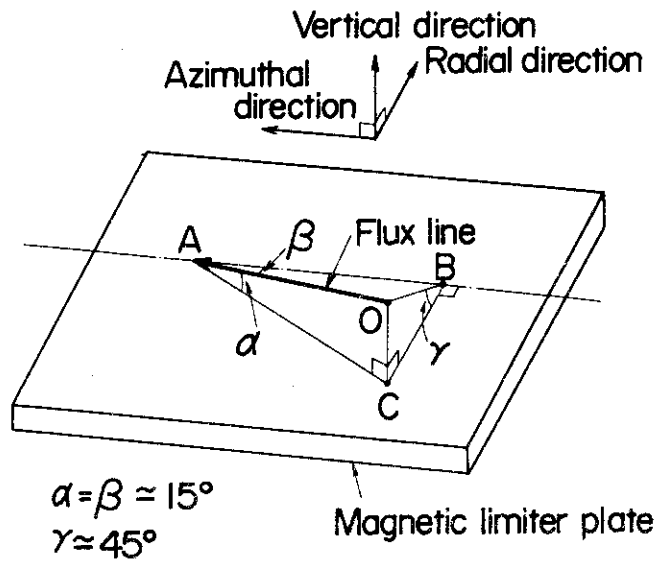


図 4.2 磁気リミタ板付近の磁力線
 (フラットトップ時)

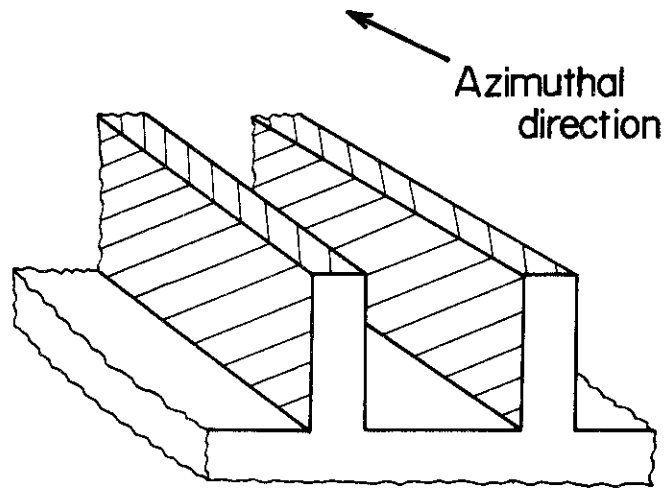


図 4.3 直立型多条溝構造板

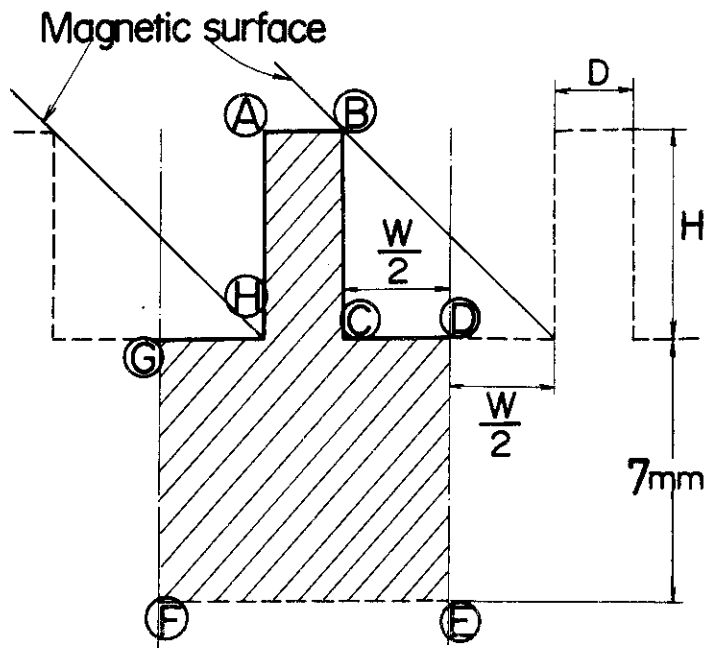


図 4.4 多条溝構造板温度計算モデル

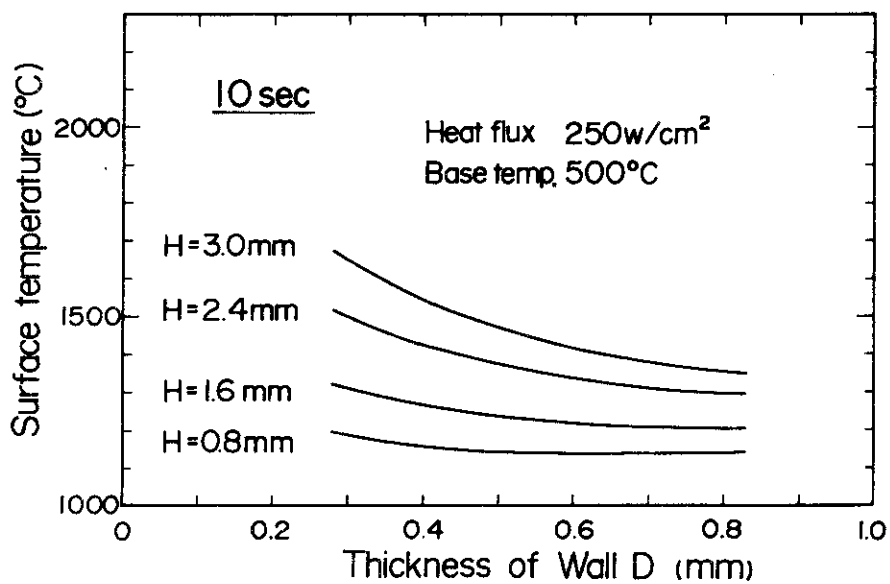


図 4.5 壁先端部表面温度の壁厚依存性
(加熱後 10 秒)

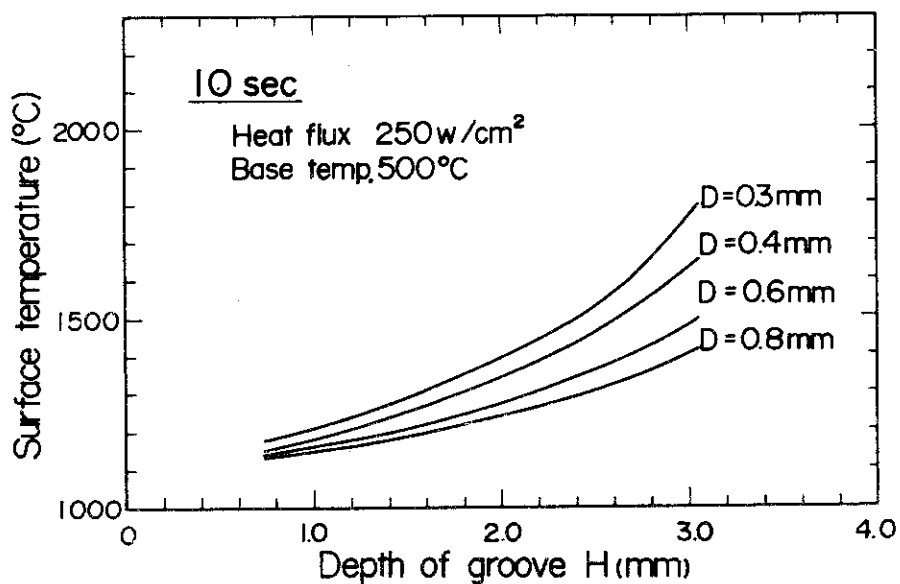


図 4.6 壁先端部表面温度の溝深さ依存性
(加熱後 10 秒)