

JAERI-M

8359

高速中性粒子入射加熱に伴なう  
JT-60第1壁の工学的問題点  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・71)

1979年8月

中村 博雄・栗山 正明

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、お申しこしください。

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

高速中性粒子入射加熱に伴う JT-60 第 1 壁の工学的問題点  
(臨界プラズマ試験装置設計報告・71)

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・栗山 正明

(1979年7月6日受理)

高速中性粒子入射 (NBI) 加熱高速中性粒子衝突に起因する JT-60 第 1 壁の問題点について検討し、第 1 壁強度の観点から NBI 加熱系に必要とされるインタロック時間の評価や NBI 加熱実験への制限条件の評価を行った。JT-60 モリブデンライナの許容使用条件を強度低下が無視出来る 10% 再結晶とした場合、次の事が明らかになった。NBI 加熱系に必要とされるインタロック時間は、許容 NBI ビーム衝突回数を  $10^4$  回とすれば常温運転時には 1.4 sec、 $400^\circ\text{C}$  運転時には 0.5 sec である。又、プラズマ実験中の NBI 突抜け損失によるモリブデンライナの再結晶は無視出来る程度である。今後、疲労を考慮した第 1 壁寿命評価および、リップル損失高速中性粒子の副磁気リミタコイル近傍固定リミタへの衝突の評価が必要である。

Engineering Problems of JT-60 First Wall  
under NBI Fast Neutral Particle Bombardment

Hiroo NAKAMURA and Masaaki KURIYAMA

Division of Large Tokamak Development,  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received July 6 , 1979)

Engineering problems of the JT-60 first wall under NBI fast neutral particle bombardment have been investigated. A permissible delay time of the NBI shutdown at faulty conditions and restrictions to NBI experiments were revealed in mechanical strength of the first wall.

When 10% recrystallization above which there occurs abrupt strength decrease was assumed as the permissible usage criterion of the JT-60 molybdenum first wall, the following results were shown. The delay time necessary for NBI system is 1.4 sec in room temperature and 0.5 sec in high temperature(400°C) experiment when the permissible shots with direct NBI beam bombardment on the liner surface are around  $10^4$ . The recrystallization of the molybdenum liner under untrapped NBI beam bombardment is negligibly small even after  $10^5$  shots in NBI heating experiment. First wall life is still to be evaluated taking into consideration the fatigue strength.

Keyword: Neutral Beam Injection Heating, Fast Neutral Particle Bombardment, JT-60 Tokamak, First Wall, Recrystallization, Untrapped Particle, Delay Time, Ionization, Fatigue, Life Analysis, Molybdenum, Liner Surface

## 目 次

1. 序 論	1
2. NBI加熱に伴なう第1壁の問題点	2
2.1 第1壁の概要	2
2.2 NBI加熱系の概要	2
2.3 第1壁の問題点	2
3. モリブデン第1壁の再結晶の評価	3
3.1 等温再結晶特性	3
3.2 非等温再結晶の評価	4
4. プラズマが無い場合のNBIビームの第1壁衝撃	5
4.1 はじめに	5
4.2 第1壁への熱負荷	5
4.3 第1壁の温度上昇	6
4.4 インタロック時間の評価	7
5. プラズマ突抜けNBIビームの第1壁衝撃	7
5.1 はじめに	7
5.2 プラズマ透過係数の評価	8
5.3 第1壁の温度上昇	10
5.4 NBI加熱へ与える制限の検討	11
6. 結 論	11
参 考 文 献	

付録1. 過渡的温度変化による再結晶を等価な等温再結晶に変換するプログラム

## CONTENTS

1. Introduction -----	1
2. Engineering Problems of JT-60 first wall in NBI heating -----	2
2.1 Outline of first wall -----	2
2.2 Outline of NBI system -----	2
2.3 problems of JT-60 first wall -----	2
3. Evaluation of recrystallization of molybdenum first wall -----	3
3.1 Isothermal recrystallization -----	3
3.2 Non-isothermal recrystallization-----	4
4. First wall bombardment by NBI beam with no plasma -----	5
4.1 Introduction -----	5
4.2 Heat flux to first wall -----	5
4.3 Temperature rise of first wall -----	6
4.4 Evaluation of NBI system delay time -----	7
5. First wall bombardment by untrapped NBI beam -----	7
5.1 Introduction -----	7
5.2 NBI beam attenuation factor -----	8
5.3 Temperature rise of first wall -----	10
5.4 Restriction in NBI heating -----	11
6. Conclusion -----	11
Acknowledgements -----	12
References -----	12
Appendix-1 Computer program " RECRYSTAL " -----	31

## 図 表 の 説 明

- 図 2.1 第1壁の配置を示す真空容器断面図
- 図 2.2 ライナの構造例（ベローズに突出した部分）
- 図 2.3 固定リミタの構造例
- 図 2.4 磁気リミタ板の構造例
- 図 2.5 NBI ビームラインと真空容器との位置関係（ポロイダル断面図）
- 図 2.6 NBI ビームラインと真空容器との位置関係（平面図）
- 図 3.1 等温焼鈍によるモリブデン硬さの変化<sup>(7)</sup>
- 図 3.2 モリブデンの等温再結晶特性<sup>(7)</sup>
- 図 4.1 NBI ビームの入射方向を示す模式図
- 図 4.2 NBI ビームの直撃による、第1壁面上での熱流束のポロイダル方向分布
- 図 4.3 NBI ビームの直撃による、第1壁面上での熱流束のトロイダル方向分布
- 図 4.4 ライナ温度上昇計算モデル
- 図 4.5 プラズマが無い場合のNBI ビームの第1壁衝突による表面温度の過渡変化（常温運転時）
- 図 4.6 プラズマが無い場合のNBI ビームの第1壁衝突による表面温度の過渡変化（400°C運転時）
- 図 4.7 等価な等温再結晶時間のNBI パルス時間依存性
- 図 4.8 NBI ビームによる1回の加熱時間と10%再結晶するまでの加熱回数との関係
- 図 5.1 水素プラズマに高速中性粒子を入射した場合の電離断面積  $\sigma$  (cm<sup>2</sup>)
- 図 5.2 NBI ビームのプラズマ突抜け割合の過渡変化 (Zeff = 1)
- 図 5.3 NBI ビームのプラズマ突抜け割合の過渡変化 (Zeff = 2)
- 図 5.4 NBI ビームのプラズマ突抜け割合の過渡変化 (Zeff = 3)
- 図 5.5 NBI ビームのプラズマ突抜けによる第1壁への熱負荷 (Zeff = 1)
- 図 5.6 NBI ビームのプラズマ突抜けによる第1壁への熱負荷 (Zeff = 2)
- 図 5.7 NBI ビームのプラズマ突抜けによる第1壁への熱負荷 (Zeff = 3)
- 図 5.8 NBI ビームのプラズマ突抜けによるライナ表面温度の過渡変化例
- 表 2.1 JT-60 のNBI 加熱主要諸元
- 表 4.1 インコネル 625, モリブデンの物性値
- 表 5.1 実効電荷数, 初期プラズマ密度, プラズマ密度増加率の各値に対するNBIビームの初期減衰定数および減衰時定数
- 表 5.2 NBI ビームのプラズマ突抜けによるライナ表面温度の過渡変化（初期温度 400°C）
- 表 5.3 ライナ表面温度の過渡変化による再結晶に等価な等温再結晶および許容突抜け回数

# 1. 序 論

JT-60 は、臨界プラズマ条件の達成を目的とした大型のトカマク型核融合装置である<sup>(1)</sup>。主要諸元は、プラズマ主半径 3 m, 副半径 0.95 m, 最大プラズマ電流 2.7 MA, 最大トロイダル磁場 4.5 T である。5~10 keV の高温プラズマを達成する為に、ジュール加熱に続いて第 2 段加熱を行う。その方法の一つとして高速中性粒子入射加熱が予定されており、75 keV の水素ビームがプラズマ中へ合計 20 MW 入射される。

JT-60 級の大型トカマク装置では、従来の小型装置 (たとえば JFT-2<sup>(2)</sup>, DIVA<sup>(3)</sup>) に比較して材料の使用条件は厳しく、使用材料の許容応力や許容温度によりプラズマ実験条件が制限される場合が生じる事も考えられる。本報告は、JT-60 が従来装置 (PLT<sup>(4)</sup>; 2.1 MW 1978 年) に比較して大きな NBI 加熱パワーであることに着目し、NBI 加熱高速中性粒子の第 1 壁衝突による温度上昇や強度劣化から、NBI 加熱実験へ与える制限条件について検討したものである。

2 章では、JT-60 の第 1 壁および NBI 加熱系を簡単に説明し、続いて NBI 加熱に起因する第 1 壁のハード上の問題点について述べる。3 章では、JT-60 の第 1 壁材料に予定されているモリブデンの再結晶反応量の評価手法について述べる。4 章では、プラズマが無い場合の NBI ビームの第 1 壁衝突による再結晶の評価を行い、必要な NBI インタロック時間の評価を行う。5 章では、実験中のプラズマ突抜け高速中性粒子の第 1 壁衝突による再結晶の評価を行い、第 1 壁強度劣化による NBI 加熱回数への制限について検討する。6 章では、以上の検討のまとめを行い、今後の課題を述べる。又、付録 1 には、再結晶を評価する為、過渡的温度変化による再結晶を等価な等温再結晶へ変換するプログラムをつける。



## 2. NBI加熱に伴う第1壁の問題点

### 2.1 第1壁の概要

JT-60の第1壁は、図2.1に示す様にライナ・固定リミタ・磁気リミタ板から構成されており、真空容器内壁にプラズマに面して内張りされる。

ライナは、厚さ0.5cmのモリブデン板であり、取付サポートにより真空容器に取付けられる。ライナは、ベローズをプラズマ熱負荷から保護する事と、プラズマに対する面を希望の材料で内張り可能にする事を目的として設置されている。図2.2に、ライナの構造例を示す。

固定リミタは、厚さ約4cmのモリブデンブロックであり、ライナよりプラズマ側へ2cm突出して取付けられる。固定リミタは、プラズマが直接ライナに接しない様にする事や逃走電子からライナを保護する事を目的として設置されている。図2.3に、固定リミタの構造例を示す。

磁気リミタ板は、厚さ2cmのモリブデン板で、図2.1に示す様に、主プラズマから離れて設置されている。磁気リミタ板は、磁気リミタ運転時に形成されるセパトロクスライン近傍に沿って主プラズマ側より流出する荷電粒子を磁気リミタ板に衝突させ、プラズマ-壁相互作用を主プラズマから離れた所で行わせる事によりプラズマ中の不純物を軽減する事を目的として設置されている。磁気リミタ板のみ、 $N_2$ ガスにより強制冷却されている。図2.4に、磁気リミタ板の構造例を示す。

### 2.2 NBI加熱系の概要

JT-60では、プラズマを5~10keVまで加熱する為、第2段加熱の1つとして高速中性粒子入射(NBI)加熱を予定している<sup>(5)</sup>。NBI加熱の主要諸元を表2.1に示す。又、NBI加熱系と真空容器の位置関係を図2.5および図2.6に示す。エネルギー75keVの中性水素ビームがターゲットプラズマ中へ合計20MW入射される。NBI加熱装置は、トーラス方向7個所にそれぞれ上下1ユニットずつ合計14ユニットから構成されており、14本のNBIポートにより真空容器に結合している。各ユニットは、2台のDuo PIGATRON型イオン源から構成されており、2本のビームが1つのNBIポートにより真空容器内へ入射される。NBIビームの入射方向は、図2.5に示す様に、水平面から $35.5^\circ$ 傾いており、又、磁気軸に対して若干傾きを持つ準垂直入射である。

### 2.3 第1壁の問題点

NBI加熱高速中性粒子の第1壁衝撃により生ずる問題点として次の2つが考えられる。1つは、プラズマへの不純物混入であり、もう1つは、第1壁温度上昇による溶融や強度低下である。前者は、プラズマ中へ入射された高速中性粒子が、プラズマ突抜け損失、荷電交換損失、リップル損失、軌道損失等の損失過程により第1壁に衝突して壁材がスパッタリングによりプ

ラズマ中へ混入する事により生じる。これらの損失過程によるスパッタ量は、K.Tani et al.<sup>(6)</sup>の検討によれば、プラズマ粒子自身によるスパッタ量に比較して約1桁小さい事がわかった。本論文では、後者の問題点について検討を行い、NBI加熱系のインタロック時間やNBI加熱実験への制限条件について議論する。

JT-60の第1壁候補材料であるモリブデンは、高融点(～2600℃)である事や高温強度が大きい事等の利点があるが、電気抵抗が小さい(5μΩ-cm 常温値)為、渦電流が生じやすく大きな電磁力が働く事や、加熱による材料の再結晶の為、強度や延性が低下する事等の欠点がある。NBIビームが衝突する部分のライナに発生する応力は、プラズマ消滅時(時定数1msec)には約20kg/mm<sup>2</sup>と予想されている。この数値は、ライナの設計やプラズマ挙動に大きく依存しており不確定要素が多く、特に400℃高温運転時には厳しい値になる。その為、モリブデン第1壁強度が大きく低下しない様な条件で使用する必要がある。以上の理由から、今後の検討は第1壁としてライナを考えモリブデンライナの許容使用条件は、強度低下が無視出来る10%再結晶とする。モリブデンの再結晶の誘因となるNBI高速中性粒子の衝突による第1壁の加熱は、次の2つの場合に分けられる。

- ① プラズマ不着火の場合に、真空容器中へ入射された高速中性粒子が第1壁へ全部衝突する場合。
  - ② プラズマ実験中に、プラズマ中へ入射された高速中性粒子が種々の損失過程(プラズマ突抜け損失、荷電交換損失、リップル損失、軌道損失)により、第1壁へ衝突する場合。
- ①の場合は、再結晶の他に加熱時間が長ければ第1壁が溶融する可能性もある。その為、NBI装置のインタロック時間の評価が重要となる。これについては、4章で議論する。
- ②の場合は、①に比較して第1壁への熱負荷が少ないので1放電で溶融に致る事は無いと考えられる。むしろ、放電毎に損失高速中性粒子により第1壁が加熱され、多数回後に再結晶が進行し強度が低下する事が考えられる。これについては、5章で議論する。

### 3. モリブデン第1壁の再結晶の評価

#### 3.1 等温再結晶特性

モリブデン第1壁の再結晶反応量を評価する為、等温再結晶特性の測定結果について述べる。図3.1に、モリブデン試料(プランジー社 粉末冶金)を等温焼鈍した場合の硬さの変化を示す<sup>(7)</sup>。この結果によれば、供試材を850℃、900℃、950℃および1000℃で等温焼鈍による再結晶は、それぞれ20時間、4時間、2時間および0.6時間以上の熱処理を必要とすることがわかる。図3.1に示された等温焼鈍による硬度値変化の速度論的解析から再結晶の活性化エネルギー $Q_R$ が得られる。すなわち、図3.1から各温度での50%再結晶に要する時間を求め、これを $\tau$ とすれば、反応速度は $\tau$ に逆比例するから、次式がなりたつ。

$$(\text{反応速度}) \propto \frac{1}{\tau} = Ae^{-\frac{Q_R}{RT}} \quad (3-1)$$

ラズマ中へ混入する事により生じる。これらの損失過程によるスパッタ量は、K.Tani et al.<sup>(6)</sup>の検討によれば、プラズマ粒子自身によるスパッタ量に比較して約1桁小さい事がわかった。本論文では、後者の問題点について検討を行い、NBI加熱系のインタロック時間やNBI加熱実験への制限条件について議論する。

JT-60の第1壁候補材料であるモリブデンは、高融点(～2600℃)である事や高温強度が大きい事等の利点があるが、電気抵抗が小さい(5μΩ-cm 常温値)為、渦電流が生じやすく大きな電磁力が働く事や、加熱による材料の再結晶の為、強度や延性が低下する事等の欠点がある。NBIビームが衝突する部分のライナに発生する応力は、プラズマ消滅時(時定数1msec)には約20kg/mm<sup>2</sup>と予想されている。この数値は、ライナの設計やプラズマ挙動に大きく依存しており不確定要素が多く、特に400℃高温運転時には厳しい値になる。その為、モリブデン第1壁強度が大きく低下しない様な条件で使用する必要がある。以上の理由から、今後の検討は第1壁としてライナを考えモリブデンライナの許容使用条件は、強度低下が無視出来る10%再結晶とする。モリブデンの再結晶の誘因となるNBI高速中性粒子の衝突による第1壁の加熱は、次の2つの場合に分けられる。

- ① プラズマ不着火の場合に、真空容器中へ入射された高速中性粒子が第1壁へ全部衝突する場合。
  - ② プラズマ実験中に、プラズマ中へ入射された高速中性粒子が種々の損失過程(プラズマ突抜け損失、荷電交換損失、リップル損失、軌道損失)により、第1壁へ衝突する場合。
- ①の場合は、再結晶の他に加熱時間が長ければ第1壁が溶融する可能性もある。その為、NBI装置のインタロック時間の評価が重要となる。これについては、4章で議論する。
- ②の場合は、①に比較して第1壁への熱負荷が少ないので1放電で溶融に致る事は無いと考えられる。むしろ、放電毎に損失高速中性粒子により第1壁が加熱され、多数回後に再結晶が進行し強度が低下する事が考えられる。これについては、5章で議論する。

### 3. モリブデン第1壁の再結晶の評価

#### 3.1 等温再結晶特性

モリブデン第1壁の再結晶反応量を評価する為、等温再結晶特性の測定結果について述べる。図3.1に、モリブデン試料(プランジー社 粉末冶金)を等温焼鈍した場合の硬さの変化を示す<sup>(7)</sup>。この結果によれば、供試材を850℃、900℃、950℃および1000℃で等温焼鈍による再結晶は、それぞれ20時間、4時間、2時間および0.6時間以上の熱処理を必要とすることがわかる。図3.1に示された等温焼鈍による硬度値変化の速度論的解析から再結晶の活性化エネルギー $Q_R$ が得られる。すなわち、図3.1から各温度での50%再結晶に要する時間を求め、これを $\tau$ とすれば、反応速度は $\tau$ に逆比例するから、次式がなりたつ。

$$(\text{反応速度}) \propto \frac{1}{\tau} = Ae^{-\frac{Q_R}{RT}} \quad (3-1)$$

ここで、 $A$ は定数、 $R$ は気体定数、 $T$ は絶対温度、 $Q_R$ は再結晶の活性化エネルギーである。  
(3-1)式を変形すれば、次式が得られる。

$$\ln \tau = -\ln A + \frac{Q_R}{RT} \quad (3-2)$$

したがって、 $\ln \tau$ に対して $1/T$ のアレニウスプロットを行えば、グラフの勾配から $Q_R$ が求められる。10%再結晶や90%再結晶の点でグラフを作成しても同様の結果が得られる。図3.2に $1/T$ のアレニウスプロットの結果を示す。10%、50%および90%再結晶についてプロットした。この結果から、再結晶の活性化エネルギー $Q_R$ は、64.4 kcal/moleに相当する事がわかる。

### 3.2 非等温再結晶の評価

前述の様に、過渡的温度変化による再結晶(非等温再結晶)を評価する為に、等価な等温再結晶へ変換する必要がある。以下に、その変換手法について説明する。

再結晶反応速度は、次式の様にアレニウス式により表わされる。

$$(\text{再結晶反応速度}) = B e^{-\frac{Q_R}{R \cdot T}} \quad (3-2)$$

ここで、 $B$ は定数、 $R$ は気体定数(cal/mole·deg)、 $T$ は絶対温度(°K)、 $Q_R$ は再結晶の活性化エネルギー(cal/mole)である。温度 $T$ が時間の関数である場合、 $0 \sim t_2$ までの時間における再結晶反応量は、(3-2)式を積分する事により与えられる。

$$(\text{再結晶反応量}) = \int_0^{t_2} B e^{-\frac{Q_R}{R \cdot T(t)}} dt \quad (3-3)$$

(3-3)式で与えられる反応量を、ある温度 $T(t_1)$ において同じ量だけ進行させる為に必要な時間を $\Delta t$ とすれば、次式で表わされる。ここで、 $t_1$ は $0 \leq t_1 \leq t_2$ である。

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{\int_0^{t_2} B \exp \left\{ -\frac{Q_R}{R \cdot T(t)} \right\} dt}{B \exp \left\{ -\frac{Q_R}{R \cdot T(t_1)} \right\}} \\ &= \frac{\int_0^{t_2} \exp \left\{ -\frac{Q_R}{R \cdot T(t)} \right\} dt}{\exp \left\{ -\frac{Q_R}{R \cdot T(t_1)} \right\}} \end{aligned}$$

すなわち、 $T(t)$ で表わされる過渡的温度変化により、時間 $0 \sim t_2$ の間に進行する再結晶

は、温度 $T(t_1)$ における時間 $\Delta t$ の間の等温再結晶と同じになる。

付録に以上の変換を行う計算プログラム RECRYSTAL をつけた。

## 4. プラズマの場合のNBIビームの第1壁衝撃

### 4.1 はじめに

プラズマが無い時に、NBI ビームが第1壁を直撃する場合として、次の3通りが考えられる。

- ① NBI 加熱装置調整の為のビーム軸合せの場合<sup>(8)</sup>。(時間は短い)
- ② NBI 加熱中に、ディスラプションによりプラズマが急速消滅した場合。
- ③ プラズマ不着火時に、それを検出するインタロック系が作動せずにNBI 加熱装置が作動した場合。

①~③の場合、NBI ビームの衝突によりモリブデン第1壁が加熱され、再結晶が進行する。又、加熱時間が長ければ第1壁が溶融する事も考えられる。ここでは、上記①~③の場合、モリブデン第1壁は10%再結晶まで許容されるとして、インタロック時間の評価を行う。4.2章では、第1壁への熱負荷の評価を行う。4.3章では第1壁温度の過渡変化を計算する。4.4章では、それらの結果をもとに再結晶反応量を計算し、必要なインタロック時間の評価を行う。

### 4.2 第1壁への熱負荷

真空容器内へ入射されたNBI ビームが全て第1壁へ衝突する場合の熱負荷を評価する。NBI ビームは、14本のポートより真空容器中へ入射される。各ポートには2台のイオン源が付いており、2本のビームがそれぞれ真空容器入口で焦点を結ぶ様に入射される。各ビームライン中心はトーラス内周部の水平面から $37^\circ$ 離れたライナに衝突する。図4.1に、ビームライン中心との位置関係を示す。ビームラインの空間分布は、各ポートのイオン源から距離を $z$ とすれば次式で表わされる<sup>(5)</sup>。ここで、ビームはガウス分布とした。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{\pi r_{1/e}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_{1/e}^2}\right) \quad (4-1)$$

$r_{1/e}$ ; ( $= z \tan \omega_{1/e}$ )

$\omega_{1/e}$ ; ビームが $1/e$ に減衰する発散角 (rad)

$\sqrt{x^2 + y^2}$ ; 距離 $z$ の面でのビーム軸からの距離

$z^2 \tan^2 \omega_{1/e} = 2\sigma^2$ ,  $\omega$  (rad) =  $\theta$  (deg)  $\times \frac{\pi}{180}$  とすれば、(4-1)式は次の様に変形される。

$$f(x, \theta, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4-2)$$

は、温度  $T(t_1)$  における時間  $\Delta t$  の間の等温再結晶と同じになる。

付録に以上の変換を行う計算プログラム RECRYSTAL をつけた。

## 4. プラズマの場合のNBIビームの第1壁衝撃

### 4.1 はじめに

プラズマが無い時に、NBI ビームが第1壁を直撃する場合として、次の3通りが考えられる。

- ① NBI 加熱装置調整の為のビーム軸合せの場合<sup>(8)</sup>。(時間は短い)
- ② NBI 加熱中に、ディスラプションによりプラズマが急速消滅した場合。
- ③ プラズマ不着火時に、それを検出するインタロック系が作動せずにNBI加熱装置が作動した場合。

①～③の場合、NBI ビームの衝突によりモリブデン第1壁が加熱され、再結晶が進行する。又、加熱時間が長ければ第1壁が溶融する事も考えられる。ここでは、上記①～③の場合、モリブデン第1壁は10%再結晶まで許容されるとして、インタロック時間の評価を行う。4.2章では、第1壁への熱負荷の評価を行う。4.3章では第1壁温度の過渡変化を計算する。4.4章では、それらの結果をもとに再結晶反応量を計算し、必要なインタロック時間の評価を行う。

### 4.2 第1壁への熱負荷

真空容器内へ入射されたNBI ビームが全て第1壁へ衝突する場合の熱負荷を評価する。NBI ビームは、14本のポートより真空容器中へ入射される。各ポートには2台のイオン源が付いており、2本のビームがそれぞれ真空容器入口で焦点を結ぶ様に入射される。各ビームライン中心はトーラス内周部の水平面から  $37^\circ$  離れたライナに衝突する。図4.1に、ビームライン中心との位置関係を示す。ビームラインの空間分布は、各ポートのイオン源から距離を  $z$  とすれば次式で表わされる<sup>(5)</sup>。ここで、ビームはガウス分布とした。

$$f(x, y, z) = \frac{1}{\pi r_{1/e}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_{1/e}^2}\right) \quad (4-1)$$

$r_{1/e}^2$ ; ( $= z \tan \omega_{1/e}$ )

$\omega_{1/e}$ ; ビームが  $1/e$  に減衰する発散角 (rad)

$\sqrt{x^2 + y^2}$ ; 距離  $z$  の面でのビーム軸からの距離

$z^2 \tan^2 \omega_{1/e} = 2\sigma^2$ ,  $\omega$  (rad) =  $\theta$  (deg)  $\times \frac{\pi}{180}$  とすれば、(4-1)式は次の様に変形される。

$$f(x, \theta, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4-2)$$

$$\sigma ; (= 1.234 \times 10^{-2} \cdot \theta z)$$

$\theta$  ; ビーム発散角 (deg)

2つのビームライン中心は、第1壁面上 ( $z = 1087$ ) で  $8.57 \times 2$  cm 離れており、それらを合成した実際の分布は次式で表わされる。

$$f'(x, y, z) = \frac{1}{2} f(x+8.57, y, 1087) + \frac{1}{2} f(x-8.57, y, 1087) \quad (4-3)$$

トラス内周部ライナ面上での熱負荷  $q$  ( $W/cm^2$ ) は、(4-3)式を使用すれば、次式で表わされる。

$$q = P \cdot f'(x, y, z) \cdot A \quad (4-4)$$

$A$  ; ビームが第1壁に対して傾いて衝突する事による補正係数 ( $\approx 0.86$ )

$P$  ; NBIポート1本当りの加熱パワー ( $= 1.43 \times 10^6 W$ )

図4.2および図4.3に、(4-4)式により計算したライナ面上での熱負荷分布を示す。図4.2はポロイダル方向分布を、図4.3はトロイダル方向分布を示す。これらの結果によれば、2つの中性ビーム軸間の熱負荷が最大となるビームライン中心での熱負荷は、ビーム発散角が  $1.0^\circ$  および  $0.9^\circ$  の場合で、それぞれ  $890 W/cm^2$  および  $1050 W/cm^2$  となる事がわかる。

### 4.3 第1壁の温度上昇

熱解析は、汎用熱伝導計算コードHEATING-3<sup>(9)</sup>を用いて行った。図4.4に計算モデルおよび境界条件を示す。モリブデンライナは、厚さ0.5 cmで、取付台座を介して真空容器内壁に内張りされる。境界条件として、ライナ表面では真空容器内のライナとのふく射を、ライナ裏面では真空容器内壁とのふく射を考えた。又、真空容器外壁は温度制御層により冷却されその他の面は断熱と考えた。真空容器外壁での熱伝達係数は、今後の設計により明らかになるが、今後の評価に大きく影響しない為、代表値として  $4.12 \times 10^{-2} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$  とした。NBIビームによるライナ表面への熱負荷は、 $1 \text{ kW/cm}^2$  とし、図4.4でx方向へは一様とした。計算に使用した物性値を表4.1にまとめる。計算は、初期温度が常温および  $400^\circ C$  の2通りとし、NBIビームによるライナ表面への熱負荷はパルス幅が  $0.5 \text{ sec} \sim 5 \text{ sec}$  とした。図4.5および図4.6に、常温実験および  $400^\circ C$  高温実験の場合のライナ先端部表面とつけ根部表面温度の過渡変化を示す。これらの結果から、次の事がわかる。NBIビームが直接に第1壁へ衝突する場合、常温運転時には、ライナ先端部温度は、約4秒で融点に達する。その時、ライナつけ根部温度は、 $1800^\circ C$  である。又、 $400^\circ C$  高温運転時には、ライナ先端部温度は約3秒で融点に達する。その時、ライナつけ根部温度は、前と同様に  $1800^\circ C$  である。第1壁を溶融させないという観点に立てば、常温運転時および  $400^\circ C$  高温運転時に必要とされるNBIインタロック時間は、それぞれ3秒および4秒となる。ところが、モリブデンは加熱により再結晶し強度が低下する為、最大応力が生じるライナつけ根部は10%再結晶で抑える必要があり、更に短いインタロック時間が必要となる。又、再結晶反応量は温度ばかりでなく時間にも依存する為、3章で

述べた様な加熱回数を考慮した速度論的解析も必要となる。これについては、次で議論する。

#### 4.4 インタロック時間の評価

4.3 熱計算結果によれば、モリブデン第1壁を溶融させない為には、3~4秒でNBIビームを止める必要のある事がわかった。ここでは、ライナつけ根部を10%再結晶で抑える為に必要なインタロック時間と許容回数について検討する。

図4.6および図4.7に示した過渡的温度変化による再結晶を、3.2で述べた手法による計算コードRECRYSTALを用いて、等価な等温再結晶へ変換する。基準とする温度は、表面温度が最大となるビームが切れる時刻の温度とした。図4.7に、各加熱時間の場合について計算した。等価な等温加熱時間 $\Delta t_{eff}$ を示す。又、各基準温度でモリブデンが10%等温再結晶する時間 $t_{10\%}$ は、図3.2よりわかる。この場合、許容される加熱回数 $N_f$ は、次式で表わされる。

$$N_f = \frac{t_{10\%}}{\Delta t_{eff}} \quad (4-5)$$

以上の手法で計算した $N_f$ と加熱時間の関係を図4.8に示す。この図から、ある時間NBIビームが第1壁へ衝突する場合、10%再結晶するまでに、何回まで許容されるかがわかる。たとえば、 $10^4$ 回まで許容されるとすれば、インタロック時間は常温運転および $400^\circ\text{C}$ 運転の場合、それぞれ1.4 sec および0.5 sec となる。現在、NBIインタロック系の検討が進められているが、 $0.2 \sim 0.3 \text{ sec}^{(9)}$ のインタロック時間は可能と思われ、モリブデンの再結晶を10%以下に抑える為に必要なインタロック時間は実現出来ると考えられる。

## 5. プラズマ突抜けNBIビームの第1壁衝撃

### 5.1 はじめに

5~10 keVの高温プラズマを達成する為に、プラズマ中に入射された高速中性粒子は、突抜け損失、軌道損失、リップル損失、荷電交換損失の過程によりプラズマより失なわれ第1壁へ衝突する。K.Tani et al.<sup>(6)</sup>の検討によれば、上記の全損失はプラズマ密度が低い場合( $\leq 4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )に大きく、突抜け損失が主要なものである事がわかった。又、高密度側( $5 \sim 10 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )では、リップル損失、軌道損失が全損失の大部分をしめる。特に、リップル損失高速中性粒子は副磁気リミタコイル近傍の固定リミタへ集中的に衝突する事が予想される。ここでは、突抜け損失のライナ衝突による温度上昇が強度へ与える影響について検討する。

プラズマへ入射された高速中性粒子は、電子衝突電離、荷電交換やプラズマ粒子との衝突電離等の過程により電離してプラズマ中に捕捉される。ところが、未電離の粒子はプラズマを突抜け、第1壁(主にライナ)に衝突し、第1壁表面温度が上昇する。表面温度上昇により生ずる問題としては、モリブデンライナの再結晶が考えられる。第1壁への熱負荷は、4章の場合



述べた様な加熱回数を考慮した速度論的解析も必要となる。これについては、次で議論する。

#### 4.4 インタロック時間の評価

4.3 熱計算結果によれば、モリブデン第1壁を溶融させない為には、3~4秒でNBIビームを止める必要のある事がわかった。ここでは、ライナつけ根部を10%再結晶で抑える為に必要なインタロック時間と許容回数について検討する。

図4.6および図4.7に示した過渡的温度変化による再結晶を、3.2で述べた手法による計算コードRECRYSTALを用いて、等価な等温再結晶へ変換する。基準とする温度は、表面温度が最大となるビームが切れる時刻の温度とした。図4.7に、各加熱時間の場合について計算した。等価な等温加熱時間 $\Delta t_{eff}$ を示す。又、各基準温度でモリブデンが10%等温再結晶する時間 $t_{10\%}$ は、図3.2よりわかる。この場合、許容される加熱回数 $N_f$ は、次式で表わされる。

$$N_f = \frac{t_{10\%}}{\Delta t_{eff}} \quad (4-5)$$

以上の手法で計算した $N_f$ と加熱時間の関係を図4.8に示す。この図から、ある時間NBIビームが第1壁へ衝突する場合、10%再結晶するまでに、何回まで許容されるかがわかる。たとえば、 $10^4$ 回まで許容されるとすれば、インタロック時間は常温運転および400°C運転の場合、それぞれ1.4 sec および0.5 secとなる。現在、NBIインタロック系の検討が進められているが、0.2~0.3 sec<sup>10)</sup>のインタロック時間は可能と思われ、モリブデンの再結晶を10%以下に抑える為に必要なインタロック時間は実現出来ると考えられる。

## 5. プラズマ突抜けNBIビームの第1壁衝撃

### 5.1 はじめに

5~10 keVの高温プラズマを達成する為に、プラズマ中に入射された高速中性粒子は、突抜け損失、軌道損失、リップル損失、荷電交換損失の過程によりプラズマより失われ第1壁へ衝突する。K.Tani et al.<sup>(6)</sup>の検討によれば、上記の全損失はプラズマ密度が低い場合( $\leq 4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )に大きく、突抜け損失が主要なものである事がわかった。又、高密度側( $5 \sim 10 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )では、リップル損失、軌道損失が全損失の大部分をしめる。特に、リップル損失高速中性粒子は副磁気リミタコイル近傍の固定リミタへ集中的に衝突する事が予想される。ここでは、突抜け損失のライナ衝突による温度上昇が強度へ与える影響について検討する。

プラズマへ入射された高速中性粒子は、電子衝突電離、荷電交換やプラズマ粒子との衝突電離等の過程により電離してプラズマ中に捕捉される。ところが、未電離の粒子はプラズマを突抜け、第1壁(主にライナ)に衝突し、第1壁表面温度が上昇する。表面温度上昇により生ずる問題としては、モリブデンライナの再結晶が考えられる。第1壁への熱負荷は、4章の場合

程大きくはない為、1回の再結晶量は少ないと考えられる。むしろ、多数回加熱により再結晶が10%以上進行し機械的強度が劣化する事が問題になると考えられる。そこで、4章と同様の再結晶反応量の評価を行い、モリブデン第1壁強度の観点から、JT-60で予定しているNBI加熱実験回数へ与える制限について検討した。

5.2では、NBI高速中性粒子のプラズマ中での全電離断面積の評価を行い、突抜け量を評価する。5.3では、5.2の結果をもとにモリブデンライナの温度上昇を計算する。5.4では、再結晶の評価を行いNBI加熱実験への制限について検討する。

## 5.2 NBIビームのプラズマ突抜け係数の評価

プラズマに入射されたNBIビームに対する突抜けビームの割合  $f_{pen}$  は、次式で表わされる。

$$f_{pen} = \exp \left\{ -\sigma_t \int_0^{\ell} n(x) dx \right\} \quad (5-1)$$

ここで

$\sigma_t$  ; 実効的な全電離断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$n(x)$  ; 距離  $x$  での密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\ell$  ; ビームがプラズマへ入射してから第1壁までの距離 ( $\text{cm}$ )

まず、実効的な全電離断面積の評価を行う<sup>(6)</sup>。NBIビームの電離に関する過程として次のものが考えられる。

- ① 電子との衝突電離
- ② プラズマイオンとの荷電交換および衝突電離
- ③ 不純物イオンとの荷電交換および衝突電離

以上の①～③の過程を考えれば、実効的な全電離断面積  $\sigma_t$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{\langle \sigma_e v_e \rangle}{v_B} + \left( \frac{n_i}{n_e} \right) \sigma_{pi} + \sum_z \left( \frac{n_z}{n_e} \right) \sigma_{iz} \\ &= \sigma_{ie} + \left( \frac{n_i}{n_e} \right) \sigma_{pi} + \sum_z \left( \frac{n_z}{n_e} \right) \sigma_{iz} \end{aligned} \quad (5-2)$$

ここで、

$\langle \sigma_e v_e \rangle$  ; 電子衝突電離断面積の速度平均値

$v_B$  ; NBIビームエネルギー

$\sigma_{pi}$  ; プラズマイオンとの衝突電離および荷電交換の断面積

$\sigma_{zi}$  ; 不純物イオンとの衝突電離および荷電交換の断面積

$n_e$  ; 電子密度

$n_i$  ; プラズマイオン密度

$n_z$  ; 不純物イオン密度

不純物イオンに関する断面積は、①や②の過程の断面積に比較して実験データが少ない。

Olson により提案された理論式によれば,  $\sigma_{zi}$  は次式で表わされる<sup>(11)</sup>。

$$\sigma_{zi} = z^{1.4} \sigma_{Pi} \quad (5-3)$$

(5-3) 式で表わされる  $\sigma_{zi}$  を用いて,  $\sigma_t$  を書き直せば次式が与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \bar{\sigma}_{ie} + \left(\frac{n_i}{n_e}\right) \sigma_{Pi} + \sum_j \left(\frac{n_j}{n_e}\right) z^{1.4} \sigma_{Pj} \\ &= \bar{\sigma}_{ie} + \sigma_{Pi} \{ f_i + (1-f_i)^{0.6} (z_{\text{eff}} - f_i)^{0.4} \} \\ &= \bar{\sigma}_{ie} + (\sigma_{ii} + \sigma_{cx}) \{ f_i + (1-f_i)^{0.6} (z_{\text{eff}} - f_i)^{0.4} \} \end{aligned} \quad (5-4)$$

ここで,

$$\begin{aligned} f_i &: \text{プラズマイオン密度と電子密度の比} \left( = \frac{n_i}{n_e} \right) \\ z_{\text{eff}} &: \text{プラズマの実効電荷数} \left( = \frac{1}{n_e} \sum_j n_j z_j^2 \right) \\ \sigma_{ii} &: \text{プラズマイオンとの衝突電離断面積} \\ \sigma_{cx} &: \text{プラズマイオンとの荷電交換断面積} \end{aligned}$$

$f_i$  の値は, 不純物含有量により異なるが, 現在までのプラズマ実験から得られる値は 0.8 ~ 0.9 程度と考えられ, ここでは  $f_i = 0.8$  とした。(5-4) 式の右辺の  $\{ \}$  の値は, 不純物の影響による電離断面積の実効的な増加を表わしている。この値は,  $z_{\text{eff}} = 1, 2, 3$  に対してそれぞれ, 1, 1.21, 1.32 である。各電離断面積の値は Riviere<sup>(12)</sup> によって与えられている実験式を使用する。図 5.1 に, 各断面積値を示す。又,  $z_{\text{eff}} = 1, 2, 3$  に対して (5-4) 式で計算した  $\sigma_t$  も同時に示した。図 5.1 によれば, 50 keV 以下のビームエネルギー領域では, 荷電交換過程が主であるが, 50 keV 以上ではプラズマイオンとの衝突電離過程が主である事がわかる。電子衝突電離は, 他の 2 つの過程に比較して小さい事がわかる。

JT-60 の NBI ビームは, 75 keV の他に 37.5 keV および 25 keV の成分を含んでいる。エネルギー割合は, 75 keV 成分が 60%, 37.5 keV 成分が 30%, 25 keV 成分が 10% である。低エネルギーになれば電離断面積が大きい為, 突抜け量は減少する。ここでは, 突抜け量を 10~20% 多く計算することになるが, NBI ビームエネルギーは 75 keV のみであるとする。

次に電子密度の評価を行う。(5-1) 式中の積分項を次式で近似する。

$$\int_0^{\ell} n_e(x) dx = \bar{n}_e \cdot \ell \quad (5-5)$$

ここで,  $\bar{n}_e$  は平均電子密度,  $\ell$  は突抜け高速中性粒子がプラズマ中を通過する距離。

$\bar{n}_e$  の時間変化は,  $\bar{n}_{e0} + \dot{n}_B t$  の形で表わされると考える。ここで,  $n_{e0}$  は NBI 加熱開始時の初期電子密度,  $\dot{n}_B$  は  $\bar{n}_e$  の上昇率,  $t$  は加熱開始からの時間を  $t$  とする。 $\bar{n}_{e0}$  は, JT-60 のジュール加熱領域では, Murakami の比例則<sup>(13)</sup> によれば,  $2 \sim 3 \times 10^{13} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  が予想される事から, 計算は  $\bar{n}_{e0} = 1, 2, 3 \times 10^{13} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  について行う。 $\dot{n}_B$  は, 第 1 壁での粒子のリサイクリング率  $\gamma$  に依存している。T. Hirayama<sup>(14)</sup> により行われたリサイクリング率を考慮したシミュレーションによると, エネルギー閉じ込め時間  $\tau_E$  は Alcator 則を, 粒子閉じ込め時間  $\tau_p$  は

$\sim 2\tau_E$  を仮定すれば、 $r = 1, 0.7, 0.5$  の場合、プラズマ密度の増加率  $\dot{n}_B$  はそれぞれ、 $3, 2, 1.5 \times 10^{13} (\text{cm}^{-3}\text{sec}^{-1})$  である事が示された。この様に、 $\dot{n}_B$  は  $r$  の値に大きく依存すると考えられ、計算は  $\dot{n}_B = 4.5, 3.5, 2.5 \times 10^{13} (\text{cm}^{-3}\text{sec}^{-1})$  について行う。

以上の仮定を元に (5-1) 式を次式の様に変形する。

$$\begin{aligned} f_{\text{pen}} &= \exp(-\bar{n}_e \sigma_t \ell) \\ &= \exp\{-(\bar{n}_{e0} + \dot{n}_B t) \sigma_t \ell\} \\ &= \exp(-\bar{n}_{e0} \sigma_t \ell) \exp(-\dot{n}_B \sigma_t \ell \cdot t) \\ &= A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5-6) \\ \begin{cases} A = \exp(-\bar{n}_{e0} \sigma_t \ell) \\ \tau = 1/(\dot{n}_B \sigma_t \ell) \end{cases} \end{aligned}$$

表 5.1 に、 $\bar{n}_{e0}$ 、 $\dot{n}_B$  および  $z_{\text{eff}}$  に対する減衰係数  $A$  および減衰時定数  $\tau$  の値を示す。又、表 5.1 の各場合に対する  $f_{\text{pen}}$  の過渡変化を図 5.2 ~ 図 5.4 に示す。 $\bar{n}_e$  の増加と共に、突抜け係数が急激に減少する事がわかる。

### 5.3 第1壁の温度上昇

5.2章で計算したプラズマ突抜け係数を元にして、第1壁(ライナ)の温度上昇を求める。第1壁への熱流束は次式で表わされる。

$$q_{\text{wall}} = q_0 \cdot \sin \alpha \cdot f_{\text{pen}} + q_{\text{pl}} \quad (5-7)$$

ここで

$q_{\text{wall}}$  ; 第1壁面上での熱流束

$q_0$  ; プラズマが無い場合のNBIビームによる第1壁面での熱流束 ( $\approx 1200 \text{ W/cm}^2$ )

$q_{\text{pl}}$  ; 放射損失、荷電交換粒子損失による熱流束 ( $\approx 10 \text{ W/cm}^2$ )

$\alpha$  ; NBIビームが第1壁となす角 ( $\approx 60^\circ$ )

(5-7) 式により計算した第1壁への熱流束を図 5.5 ~ 図 5.7 に示す。計算モデル、計算手法等は4章と同様とし図 4.5 のものを用いた。初期温度は、熱的に厳しい高温第1壁実験を想定し  $400^\circ\text{C}$  とした。表 5.2 に、 $z_{\text{eff}}$ 、 $\dot{n}_B$  の場合について計算したライナ表面温度を示す。温度上昇が最大となるライナ先端部と、曲げ応力が最大となるライナを固定しているつけ根部の表面温度を示した。計算結果の代表例として、 $z_{\text{eff}} = 1$ 、 $\bar{n}_{e0} = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $\dot{n}_B = 3.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$  の場合のライナ表面温度過渡変化を図 5.8 に示す。これらの結果によれば、最も熱的に厳しい場合でも最大表面温度は  $763^\circ\text{C}$  であり、4章の結果から判断すれば1回あたりの再結晶反応量は少ないと考えられる。

次では、再結晶の評価を行いNBI加熱回数への制限について検討する。

#### 5.4 NBI 加熱へ与える制限の検討

5.3 の温度計算結果を用いて、4 章の場合と同様の手法で再結晶反応量を計算し、第 1 壁強度の観点から許容される NBI 突抜け回数の評価を行う。

ライナの再結晶は、4 章と同様に曲げ応力が最大となるライナのつけ根部 (図 4.5 のⓑ部) が 10% 再結晶するまで許容されるとし、その時までの突抜け回数を許容 NBI 加熱回数とする。許容 NBI 加熱回数を  $N_{\text{NBI}}$  とすれば、(4-5) 式と同様に次式で表わされる。

$$N_{\text{NBI}} = \frac{t_{10\%}}{\Delta t_{\text{eff}}} \quad (5-8)$$

ここで、 $t_{10\%}$  はライナつけ根部が基準温度 (最高温度) で 10% 再結晶するまでの時間、 $\Delta t_{\text{eff}}$  は等価な等温加熱時間である。 $\bar{n}_{e0} = 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ,  $\dot{n}_B = 2.5, 3.5, 4.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1}$ ,  $z_{\text{eff}} = 1, 2, 3$  の場合について 5.3 で計算した温度変化を用いて、 $t_{10\%}$ ,  $\Delta t_{\text{eff}}$ ,  $N_{\text{NBI}}$  を計算した結果を表 5.3 に示す。この結果によれば、突抜け量が最も多い  $z_{\text{eff}} = 1$ ,  $\dot{n}_B = 2.5 \times 10^{13} (\text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1})$  の場合でも  $N_{\text{NBI}}$  は  $5 \times 10^5$  回である。JT-60 で予定している NBI 加熱回数 (概略  $10^5$  回程度) や  $400^\circ\text{C}$  高温運転の頻度を考慮すれば、 $N_{\text{NBI}} = 5 \times 10^5$  は十分余裕のある値であり、プラズマ突抜け高速中性粒子の第 1 壁衝突による再結晶は無視出来ると考えられる。

## 6. 結 論

JT-60 の NBI 加熱に起因する第 1 壁の問題点について検討し、モリブデン第 1 壁を 10% 以上再結晶させないという条件から次の事が明らかになった。

- ① プラズマが無い場合の NBI ビーム衝突を  $10^4$  回想定した時、NBI 加熱系に必要なとされるインタロック時間は、常温運転時に 1.4 sec,  $400^\circ\text{C}$  運転時に 0.5 sec である。この程度の時定数は、現在進めている NBI インタロック系の設計から実現可能と考えられる。
- ② プラズマ実験中の NBI 突抜け損失によるモリブデンライナの再結晶は、強度低下が無視出来る程度である。

今後の検討課題として次の項目があげられる。

- (1) 疲労の評価……モリブデン第 1 壁の許容使用条件を、10% 再結晶としたが、熱応力や電磁力による熱疲労や高温疲労を考慮した第 1 壁寿命の評価が今後必要となる。
- (2) リップル損失の評価……リップル損失による高速中性粒子は、副磁気リミタコイル近傍の固定リミタへ衝突する事が予想される為、損失量の評価と、それに対応した設計検討が必要である。

#### 5.4 NBI加熱へ与える制限の検討

5.3の温度計算結果を用いて、4章の場合と同様の手法で再結晶反応量を計算し、第1壁強度の観点から許容されるNBI突抜け回数の評価を行う。

ライナの再結晶は、4章と同様に曲げ応力が最大となるライナのつけ根部(図4.5のⓑ部)が10%再結晶するまで許容されるとし、その時までの突抜け回数を許容NBI加熱回数とする。許容NBI加熱回数を $N_{\text{NBI}}$ とすれば、(4-5)式と同様に次式で表わされる。

$$N_{\text{NBI}} = \frac{t_{10\%}}{\Delta t_{\text{eff}}} \quad (5-8)$$

ここで、 $t_{10\%}$ はライナつけ根部が基準温度(最高温度)で10%再結晶するまでの時間、 $\Delta t_{\text{eff}}$ は等価な等温加熱時間である。 $\bar{n}_{e0} = 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 、 $\dot{n}_B = 2.5, 3.5, 4.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1}$ 、 $z_{\text{eff}} = 1, 2, 3$ の場合について5.3で計算した温度変化を用いて、 $t_{10\%}$ 、 $\Delta t_{\text{eff}}$ 、 $N_{\text{NBI}}$ を計算した結果を表5.3に示す。この結果によれば、突抜け量が最も多い $z_{\text{eff}} = 1$ 、 $\dot{n}_B = 2.5 \times 10^{13} (\text{cm}^{-3} \text{sec}^{-1})$ の場合でも $N_{\text{NBI}}$ は $5 \times 10^5$ 回である。JT-60で予定しているNBI加熱回数(概略 $10^5$ 回程度)や $400^\circ\text{C}$ 高温運転の頻度を考慮すれば、 $N_{\text{NBI}} = 5 \times 10^5$ は十分余裕のある値であり、プラズマ突抜け高速中性粒子の第1壁衝突による再結晶は無視出来ると考えられる。

## 6. 結 論

JT-60のNBI加熱に起因する第1壁の問題点について検討し、モリブデン第1壁を10%以上再結晶させないという条件から次の事が明らかになった。

- ① プラズマが無い場合のNBIビーム衝突を $10^4$ 回想定した時、NBI加熱系に必要なとされるインタロック時間は、常温運転時に1.4 sec、 $400^\circ\text{C}$ 運転時に0.5 secである。この程度の時定数は、現在進めているNBIインタロック系の設計から実現可能と考えられる。
- ② プラズマ実験中のNBI突抜け損失によるモリブデンライナの再結晶は、強度低下が無視出来る程度である。

今後の検討課題として次の項目があげられる。

- (1) 疲労の評価……モリブデン第1壁の許容使用条件を、10%再結晶としたが、熱応力や電磁力による熱疲労や高温疲労を考慮した第1壁寿命の評価が今後必要となる。
- (2) リップル損失の評価……リップル損失による高速中性粒子は、副磁気リミタコイル近傍の固定リミタへ衝突する事が予想される為、損失量の評価と、それに対応した設計検討が必要である。

## 謝 辞

本報告書を作成するに当り、有益なる御意見、御指導を戴いた磯康彦大型トカマク開発部部长、吉川允二大型トカマク開発部次長、飯島勉 JT-60 第 2 開発室長、太田充グループリーダーを始めとする本体開発グループの皆様に深く感謝致します。又、電離断面積の評価にあたり谷啓二氏には有益なる御意見を戴いた事を感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 大型トカマク開発部；臨界プラズマ試験装置設計（1977）内部資料
- (2) N. Fujisawa et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 5th Int. Conf. Tokyo, 1974) 1, IAEA, Vienna (1975) P3.
- (3) M. Yoshikawa, T. Tazima, Y. Shimomura, A. Kitsunozaki, H. Maeda et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, (Proc. 5th Int. Conf. Tokyo, 1974) 1, IAEA, Vienna (1975) P17
- (4) H. Eubank et al., PPPL-1491 (1978)
- (5) 松田慎三郎他, JF60 用中性粒子入射装置概念設計（中間報告）JAERI-M 7655 (1978)
- (6) K. Tani, H. Kishimoto and S. Tamura, Submitted to IAEA Technical Committee Meeting and Work shop on Plasma Physics of Intense Neutral Beam Heating in Tokamaks (April, 1979, ORNL)
- (7) 深谷 清, 材料物性研究室 私信
- (8) 松田慎三郎, 私信
- (9) W. D. Turner and M. Siman-Tov, HEATING3 -- AN IBM360 HEAT CONDUCTION PROGRAM, ORNL-TM 3208
- (10) 谷啓二, 松田慎三郎, 私信
- (11) R. E. Olson and A. Salop, SRI Annual Report, MP-77-59 (1977)
- (12) A. C. Riviere, Nucl. Fusion 11 (1971) 363
- (13) M. Murakami, Nucl. Fusion 16 (1976) 348
- (14) 平山俊夫 私信

表 2.1 JT-60 の NBI 加熱主要諸元

Total NBI power	20 MW
Beam energy	75 KeV
Beam energy component	75 KeV 60 % 37.5 KeV 30 % 25 KeV 10 %
Number of NBI port	14
Injection direction	quasi-perpendicular

表 4.1 インコネル 625, モリブデンの物性値

Material Properties	Inconel 625 (500°C)	Molybdenum (1000°C)
Density (g/cm <sup>3</sup> )	8.44	10.2
Specific heat (cal/g·°C)	0.128	0.075
Thermal Conductivity (cal/sec·cm·°C)	0.042	0.225

表 5.1 実効電荷数, 初期プラズマ密度, プラズマ密度増加率の各値に対する NBI ビームの初期減衰定数および減衰時定数

Z <sub>eff</sub>	$\dot{n}_B$ (10 <sup>13</sup> cm <sup>-3</sup> sec <sup>-1</sup> )	Initial attenuation factor A			Decay time cons -tant $\tau$ (sec)
		$\bar{n}_{e0}$ (10 <sup>13</sup> cm <sup>-3</sup> )			
		1	2	3	
1	2.5				0.844
	3.5	0.623	0.388	0.242	0.603
	4.5				0.469
2	2.5				0.725
	3.5	0.576	0.332	0.191	0.516
	4.5				0.403
3	2.5				0.673
	3.5	0.552	0.305	0.168	0.481
	4.5				0.374



表5.2 NBIビームのプラズマ突抜けによるライナ表面温度の過渡変化  
(初期温度 400°C)

Z <sub>eff</sub>	$\dot{n}_B$ (10 <sup>13</sup> cm <sup>-3</sup> sec <sup>-1</sup> )	posi- tion	Time (sec)									
			0	1	2	5	20	120	180	300	420	600
1	2.5	A	400	408	667	763	751	678	636	571	527	483
		B	400	406	605	628	601	532	510	482	464	445
	3.5	A	400	408	622	671	663	613	583	534	499	465
		B	400	406	567	570	550	500	484	463	449	435
	4.5	A	400	408	589	620	614	575	551	511	483	455
		B	400	406	539	537	522	481	468	452	441	429
2	2.5	A	400	408	630	695	687	631	598	544	507	470
		B	400	406	575	585	564	508	491	468	453	438
	3.5	A	400	408	587	622	616	577	553	513	484	455
		B	400	406	539	539	523	482	469	452	441	429
	4.5	A	400	408	558	582	577	546	527	494	470	446
		B	400	406	515	514	501	467	457	443	434	424
3	2.5	A	400	408	612	668	661	611	581	533	499	465
		B	400	406	560	568	549	499	483	462	449	435
	3.5	A	400	408	573	602	597	562	540	504	477	451
		B	400	406	527	527	513	475	463	448	438	427
	4.5	A	400	408	544	568	561	534	516	486	464	442
		B	400	406	504	504	492	462	452	440	431	422

← NBI ON → Discharge OFF

← Joule Heating

表 5.3 ライナ表面温度の過渡変化による再結晶に等価な  
等温再結晶および許容突抜け回数

$Z_{\text{eff}}$	$\dot{n}_B$ ( $\times 10^{13}$ $\text{cm}^{-3}\text{sec}^{-1}$ )	Initial penetra- -tion heat flux ( $\text{w}/\text{cm}^2$ )	Max surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{eff}}$ (sec)	$t_{10\%}$ (hr)	Permissible numbers of NBI heating
1	2.5	633	628	21	$3 \times 10^3$	$\sim 5 \times 10^5$
	3.5	"	570	29	$8 \times 10^4$	$\sim 1 \times 10^7$
	4.5	"	537	36	$6 \times 10^5$	$\sim 6 \times 10^7$
2	2.5	586	585	26	$4 \times 10^4$	$\sim 6 \times 10^6$
	3.5	"	539	35	$6 \times 10^5$	$\sim 6 \times 10^7$
	4.5	"	514	44	$3 \times 10^6$	$\sim 2 \times 10^8$
3	2.5	562	568	29	$1 \times 10^5$	$\sim 1 \times 10^7$
	3.5	"	527	39	$1 \times 10^6$	$\sim 1 \times 10^8$
	4.5	"	504	49	$5 \times 10^6$	$\sim 4 \times 10^8$

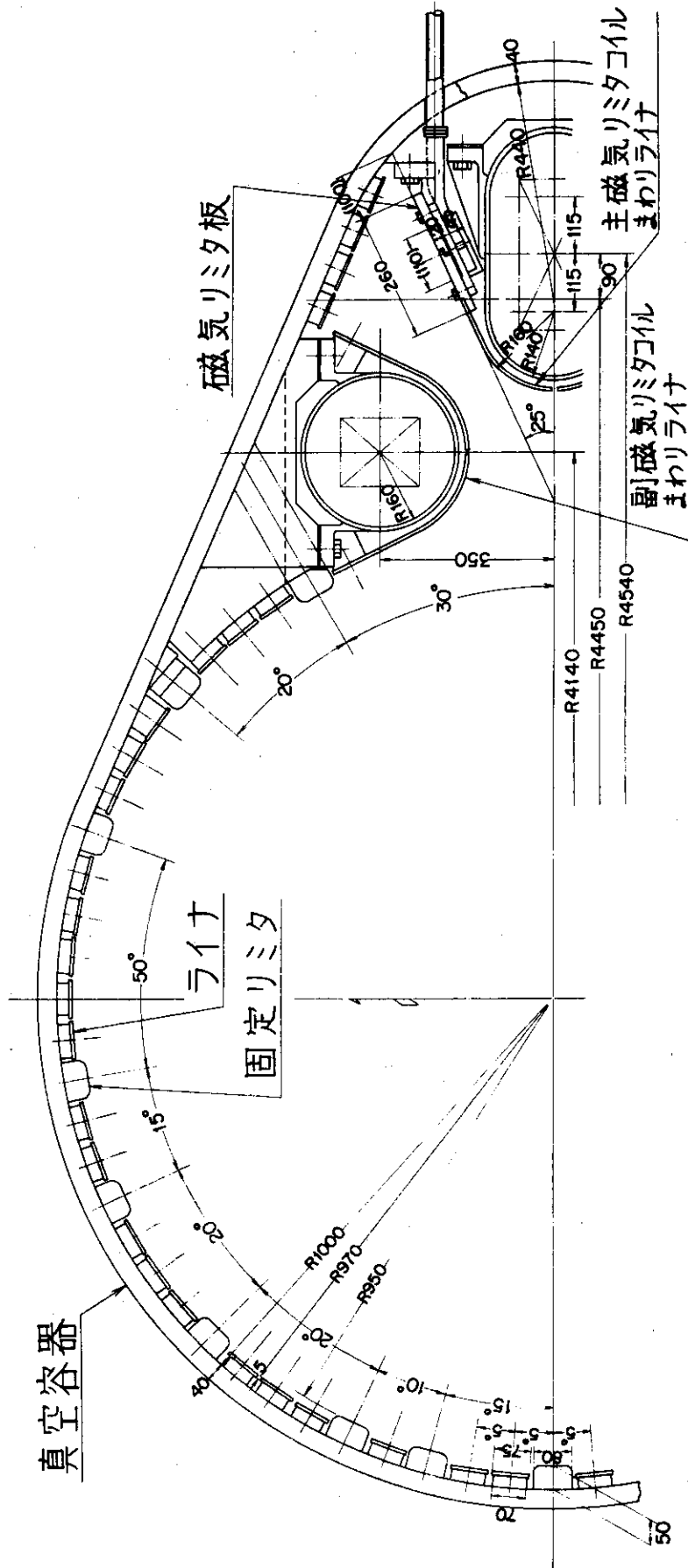


図 2.1 第 1 壁の配置を示す真空容器断面図

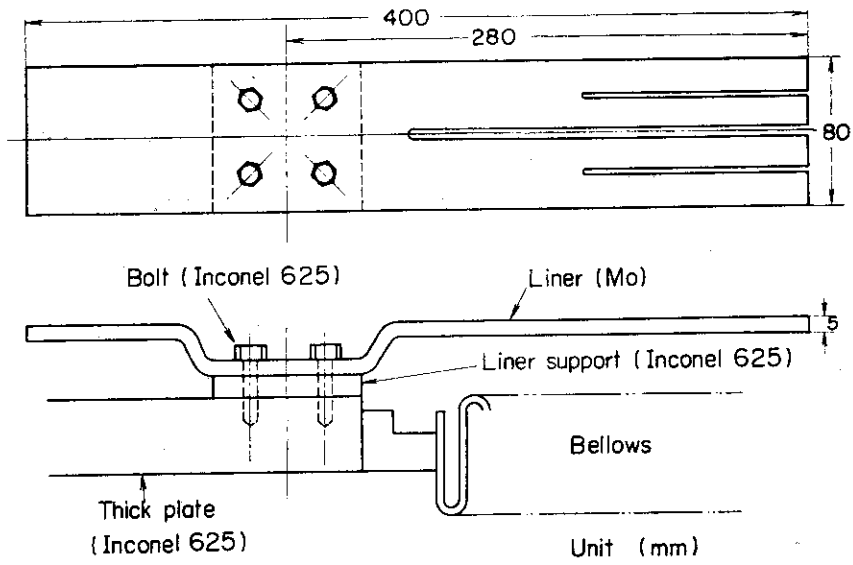


図 2.2 ライナの構造例 (ベローズに突出した部分)

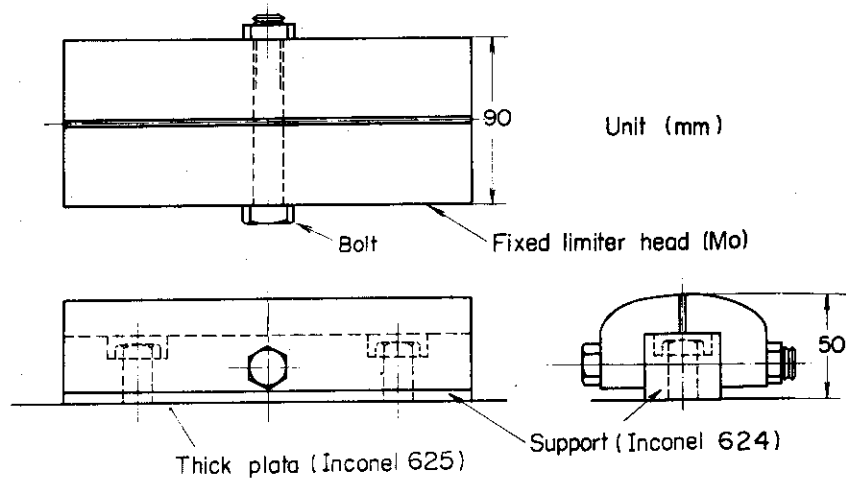


図 2.3 固定リミタの構造例

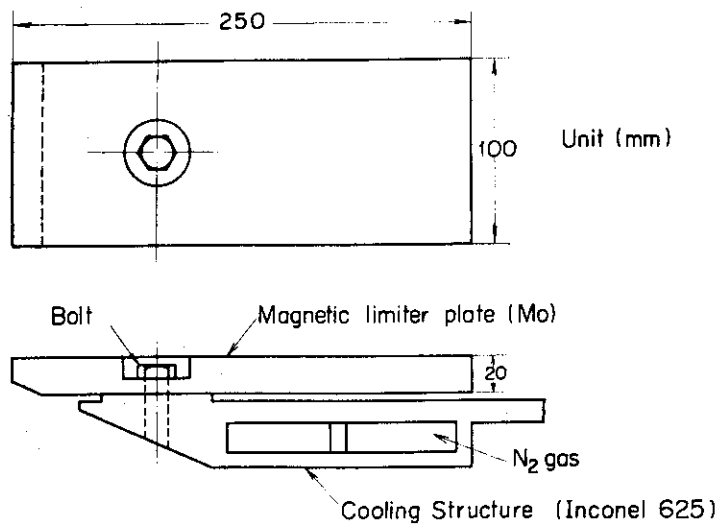


図 2.4 磁気リミタ板の構造例



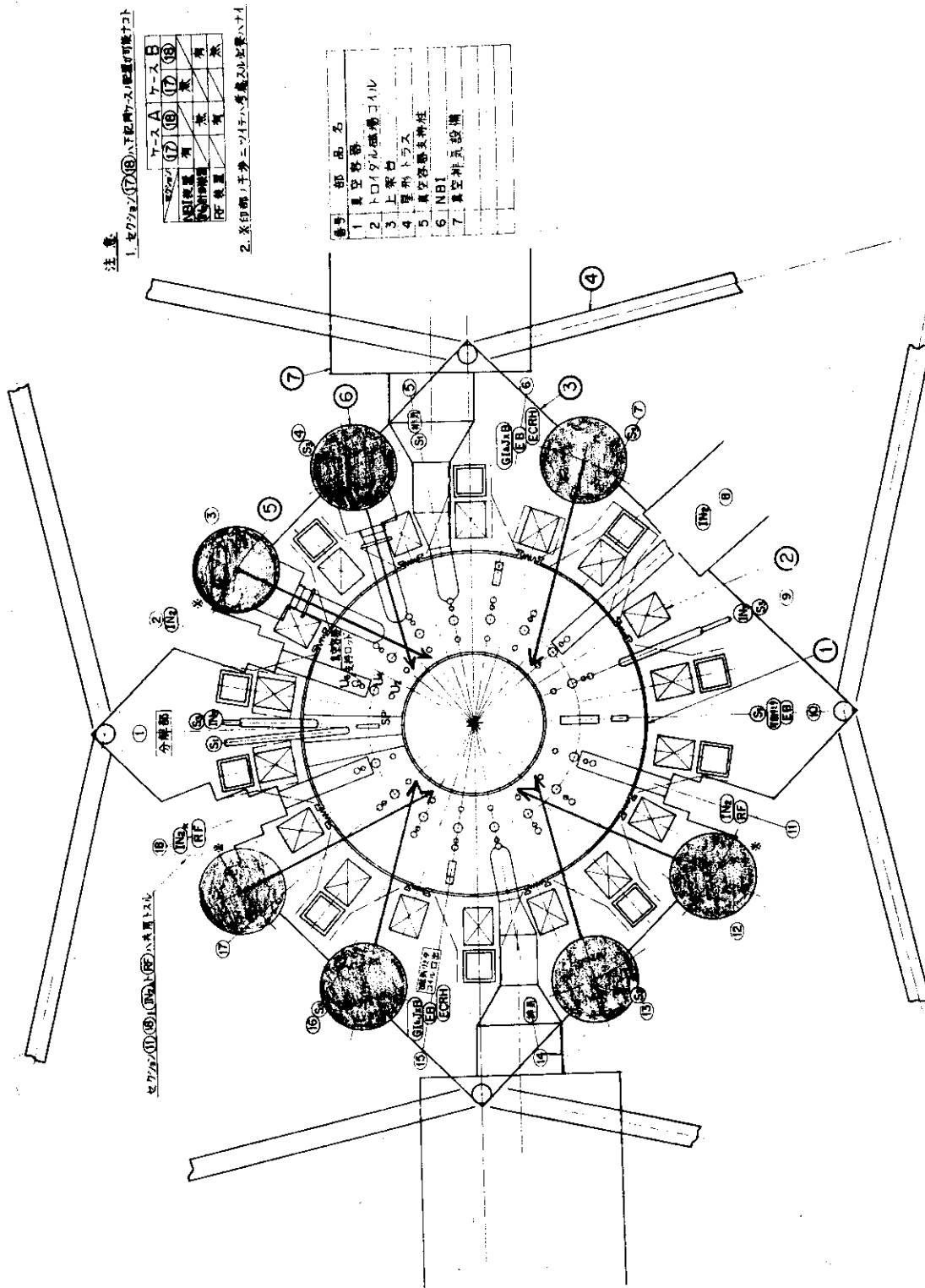


図 2.6 JT-60 本体機器配置概念図

注意  
1. 表ワタシ(17)(18)の下記機アス(17)の位置が可換ナリ

	A	トラス	B
NBI設置	有	(17)	(18)
RF設置	有	有	有

2. 表印機(1)ナリニツリテハ考慮スル必要ナリ

番号	部 品 名
1	真空容器
2	トロイダル磁場コイル
3	上室口
4	上室トラス
5	中性粒子注
6	NBI
7	真空排気設備

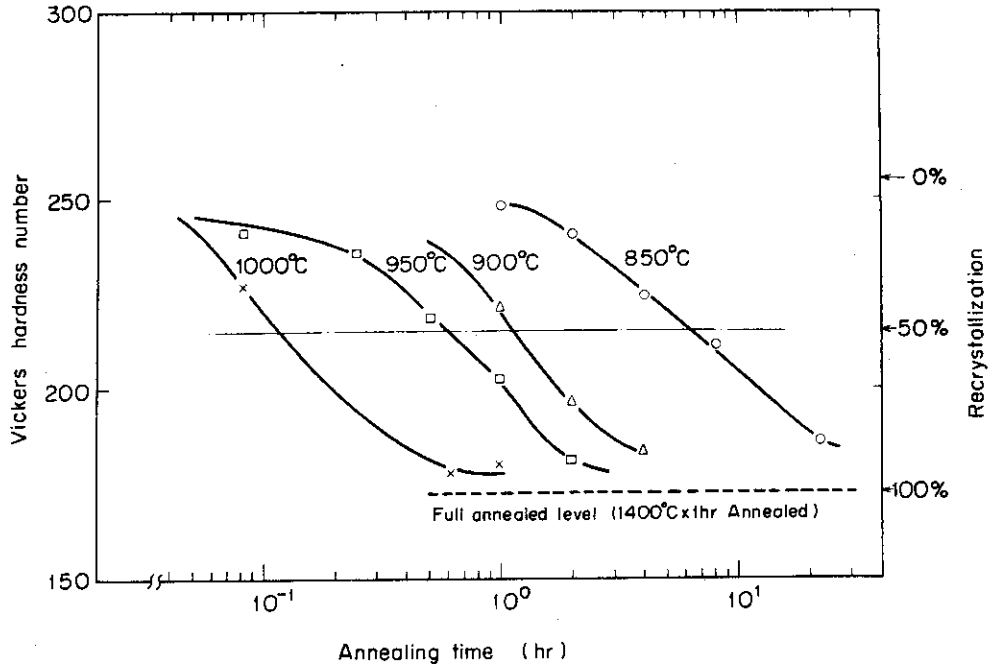


図 3.1 等温焼鈍によるモリブデン硬さの変化<sup>(7)</sup>

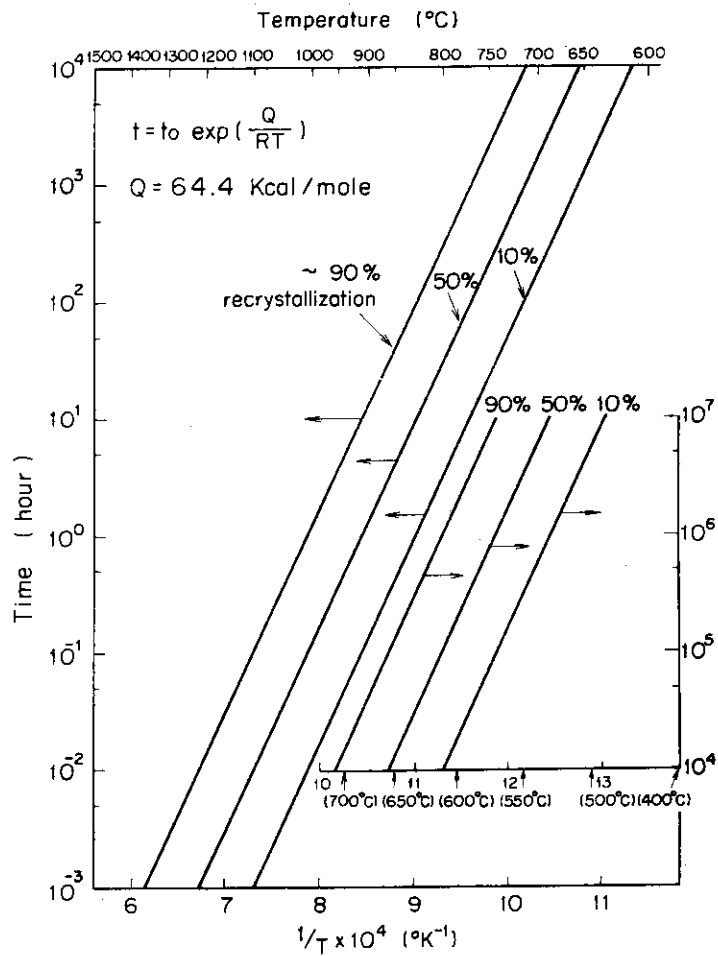


図 3.2 モリブデンの等温再結晶特性<sup>(7)</sup>

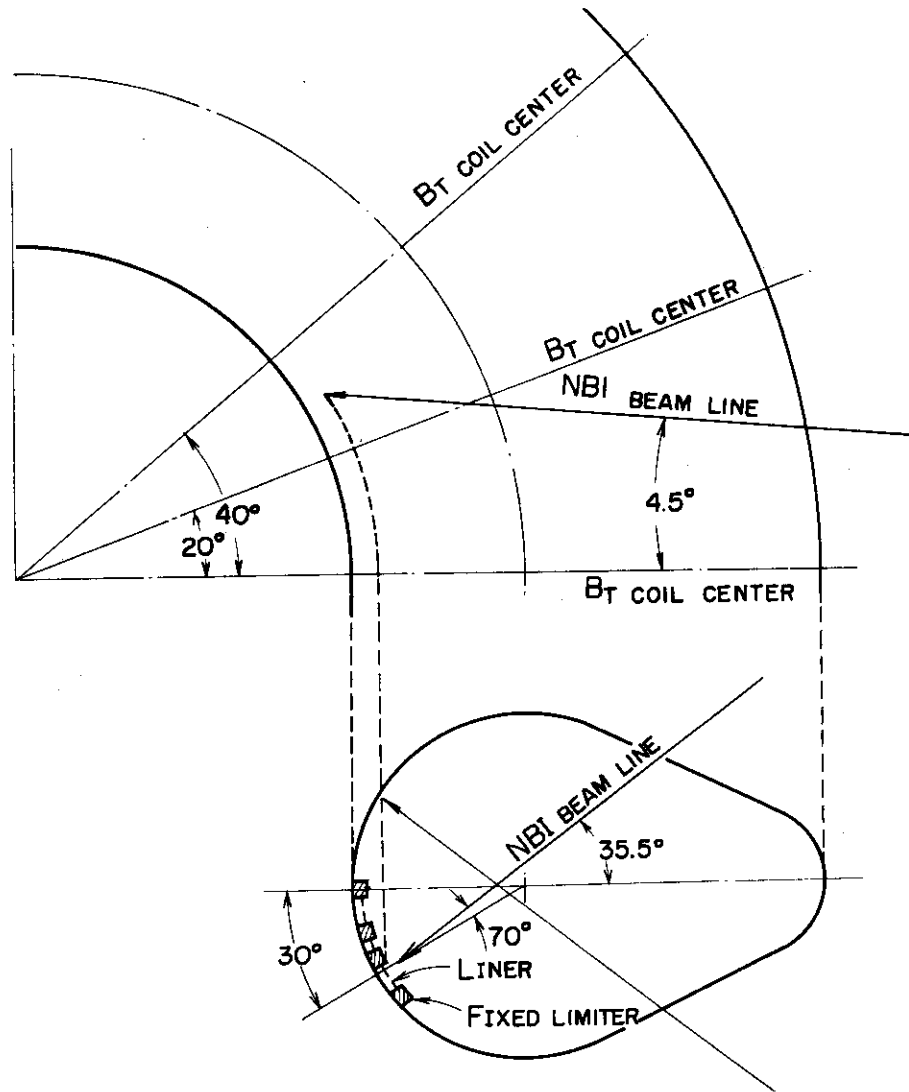


図 4.1 NBIビームの入射方向を示す模式図

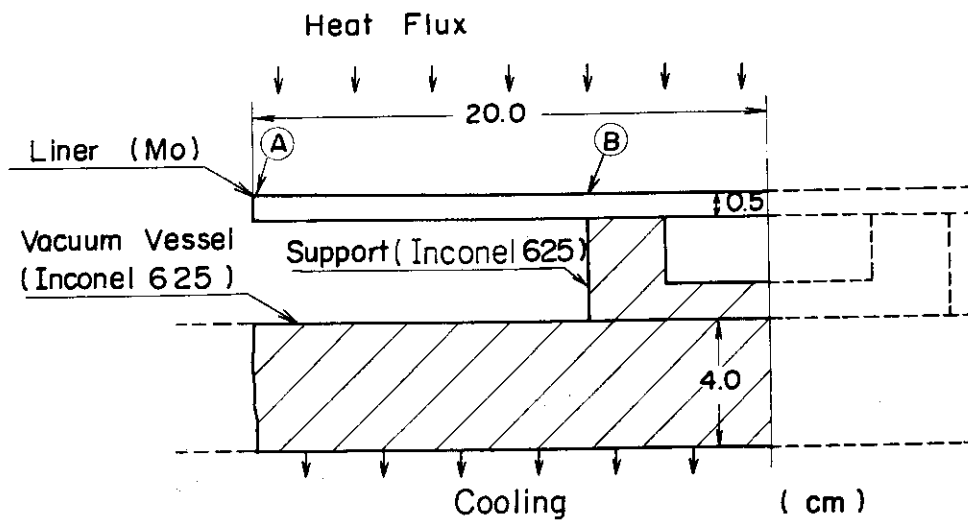


図 4.4 ライナ温度上昇計算モデル



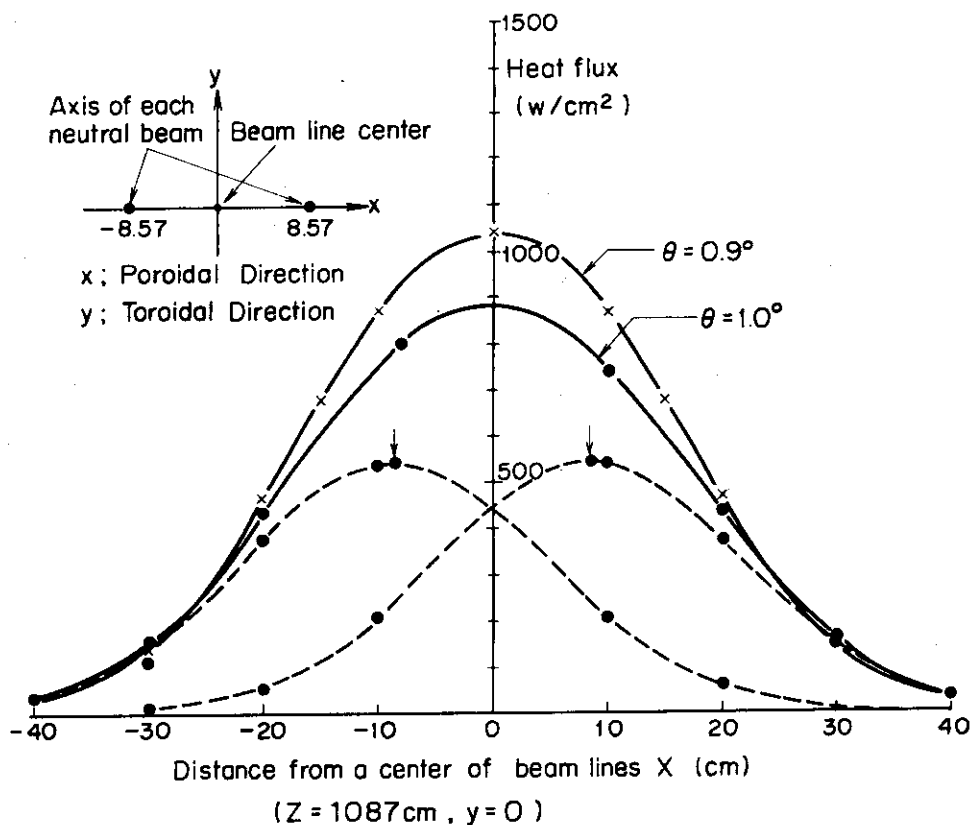


図 4.2 NBIビームの直撃による、第1壁面上での熱流束のポロイダル方向分布

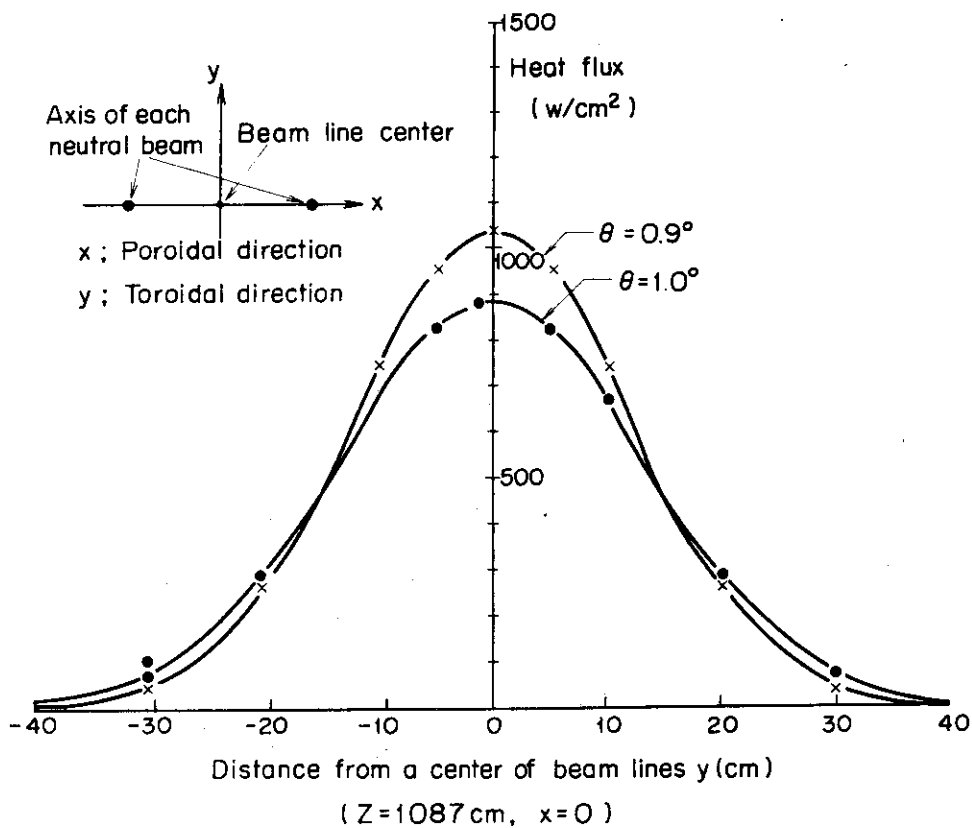


図 4.3 NBIビームの直撃による、第1壁面上での熱流束のトロイダル方向分布

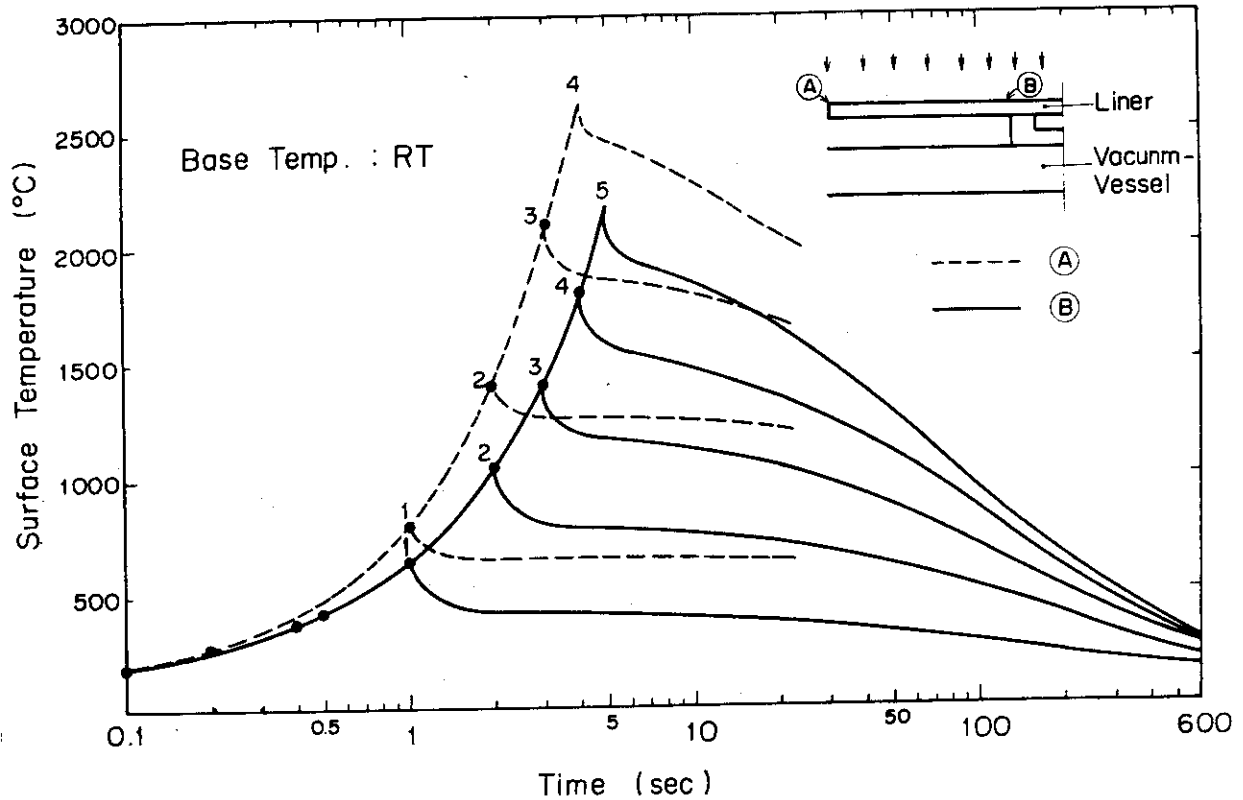


図4.5 プラズマが無い場合のNBIビームの第1壁衝突による表面温度の過渡変化 (常温運転時)

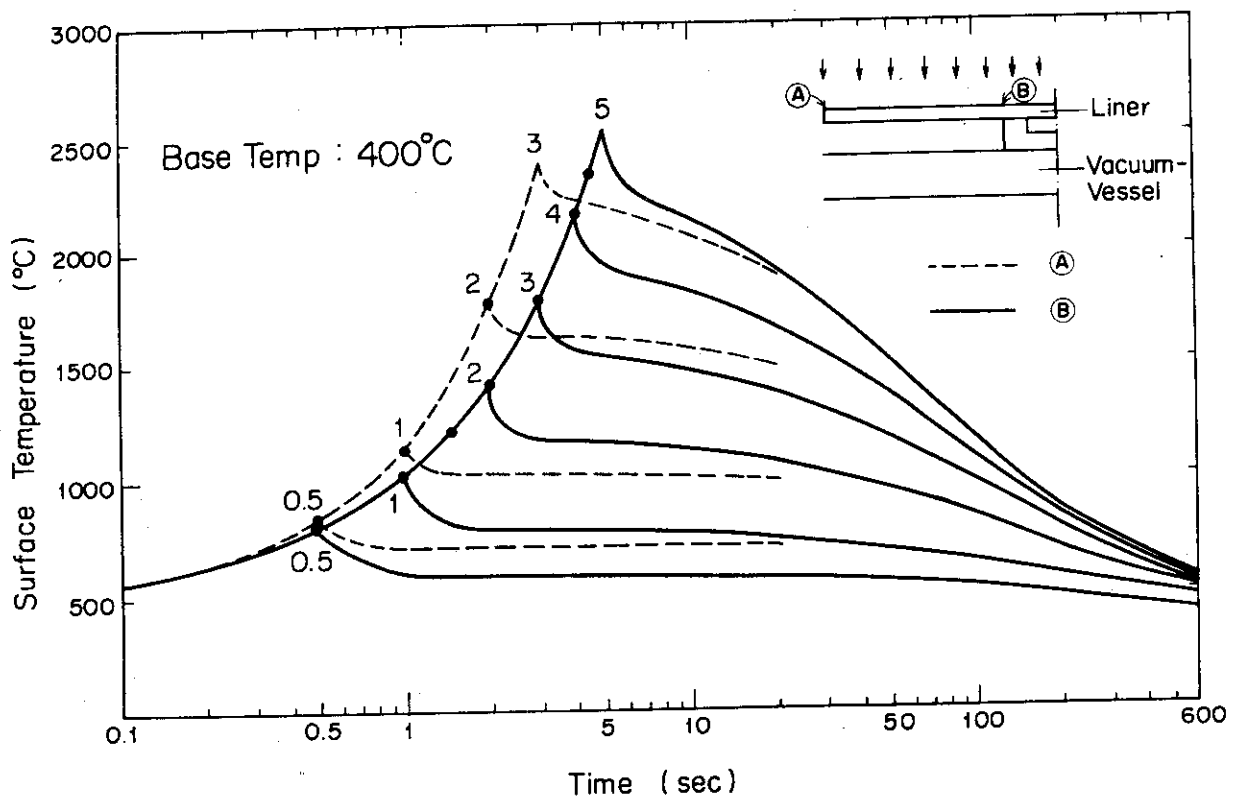


図4.6 プラズマが無い場合のNBIビームの第1壁衝突による表面温度の過渡変化 (400°C運転時)

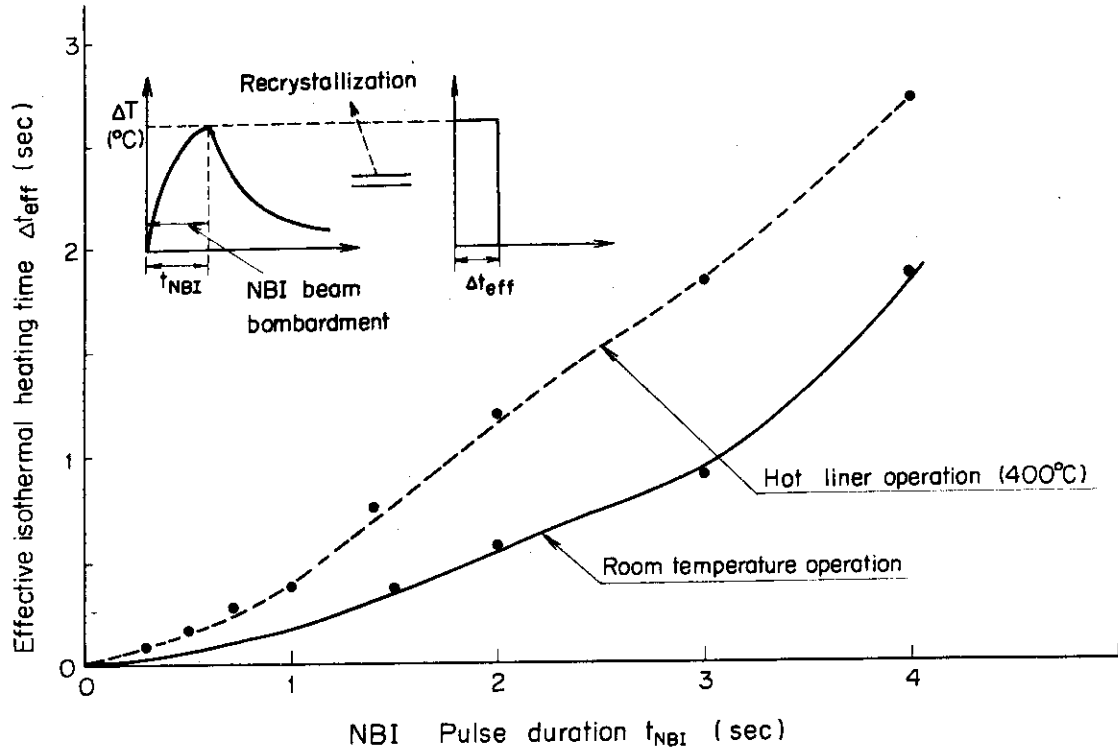


図 4.7 等価な等温再結晶時間のNBIパルス時間依存性

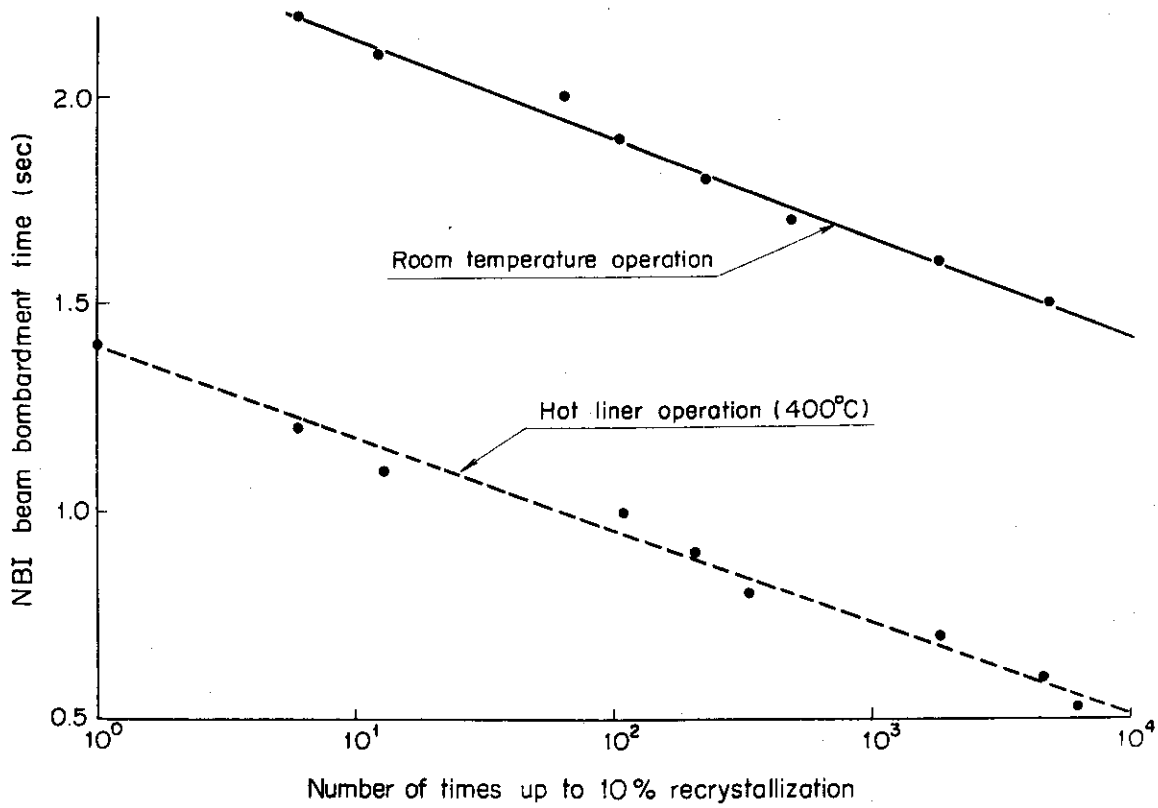


図 4.8 NBIビームによる1回の加熱時間と10%再結晶するまでの加熱回数との関係

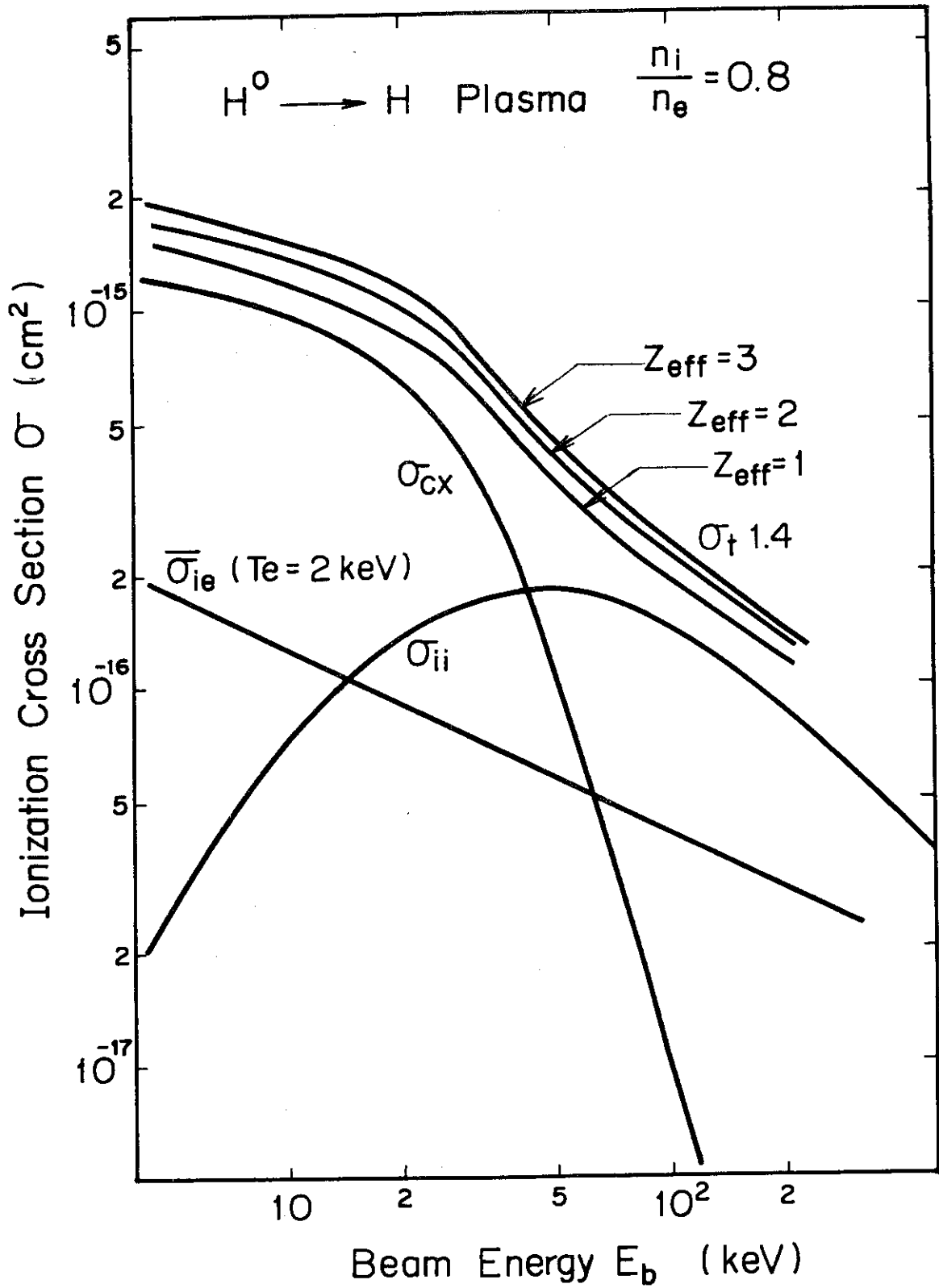


図 5.1 水素プラズマに高速中性粒子を入射した場合の実効電離断面積  $\sigma$  (cm<sup>2</sup>)

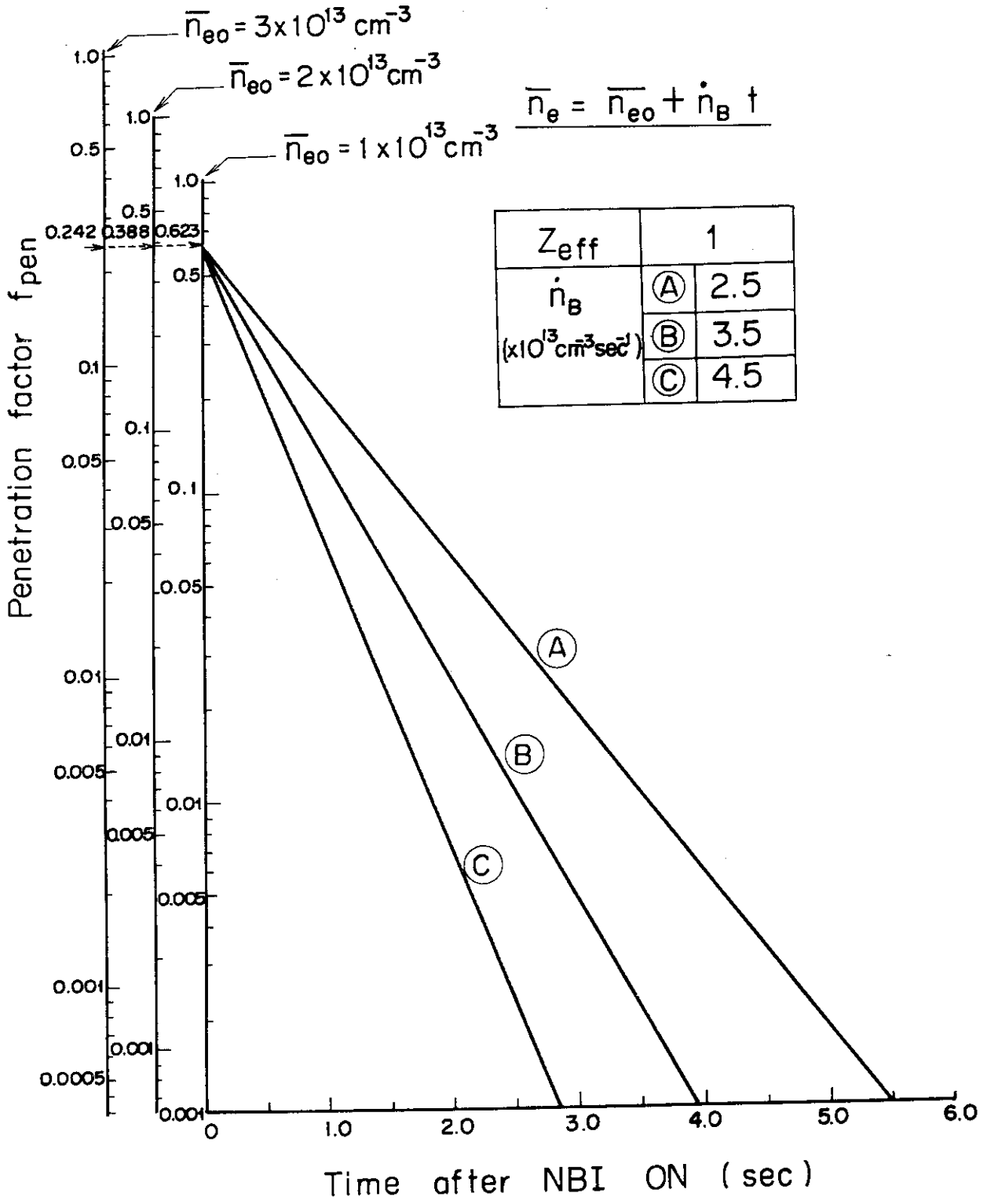


図5.2 NBIビームのプラズマ突抜け割合の過渡変化  
( $Z_{eff} = 1$ )

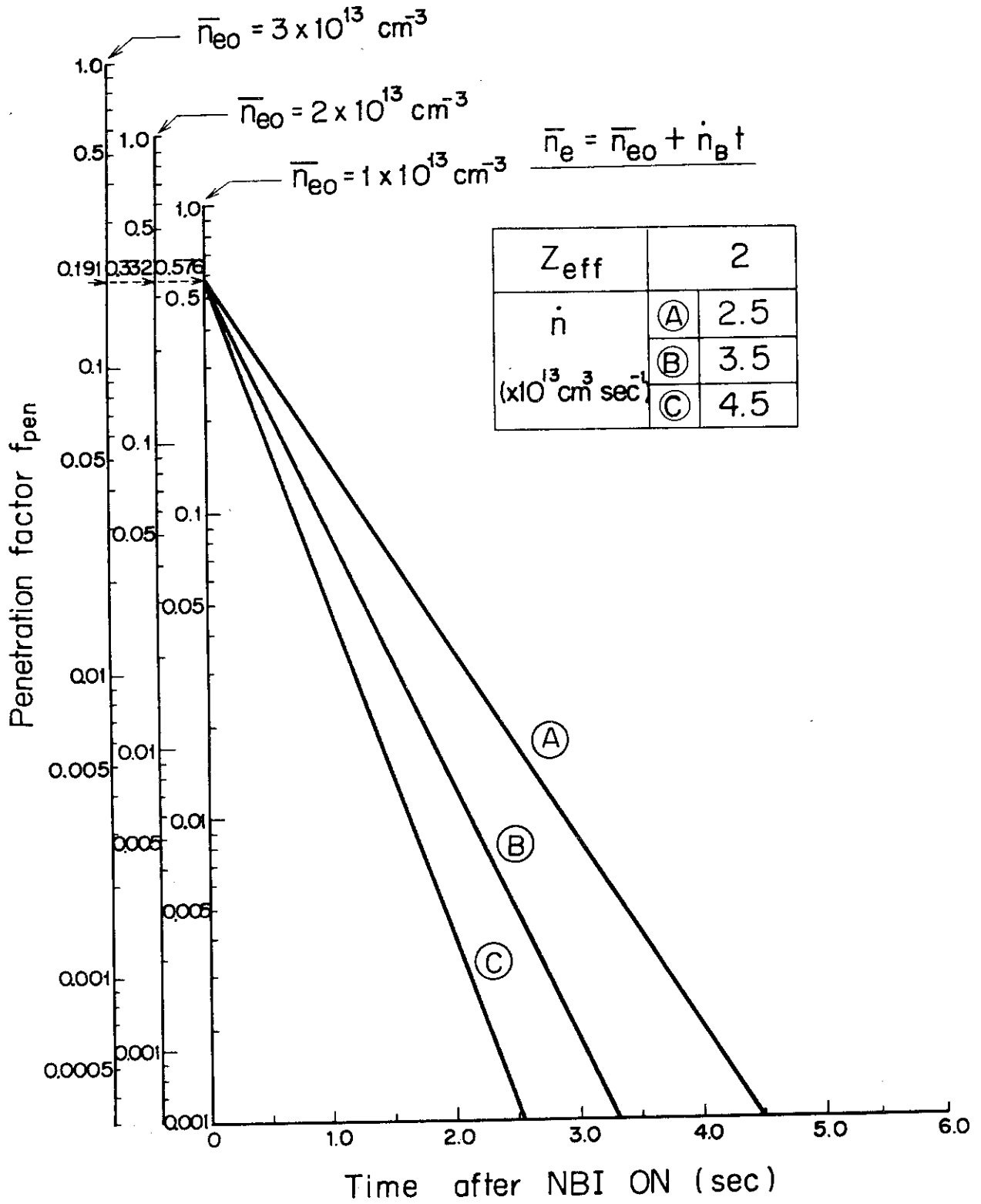


図 5.3 NBI ビームのプラズマ突抜け割合の過渡変化 ( $Z_{eff} = 2$ )

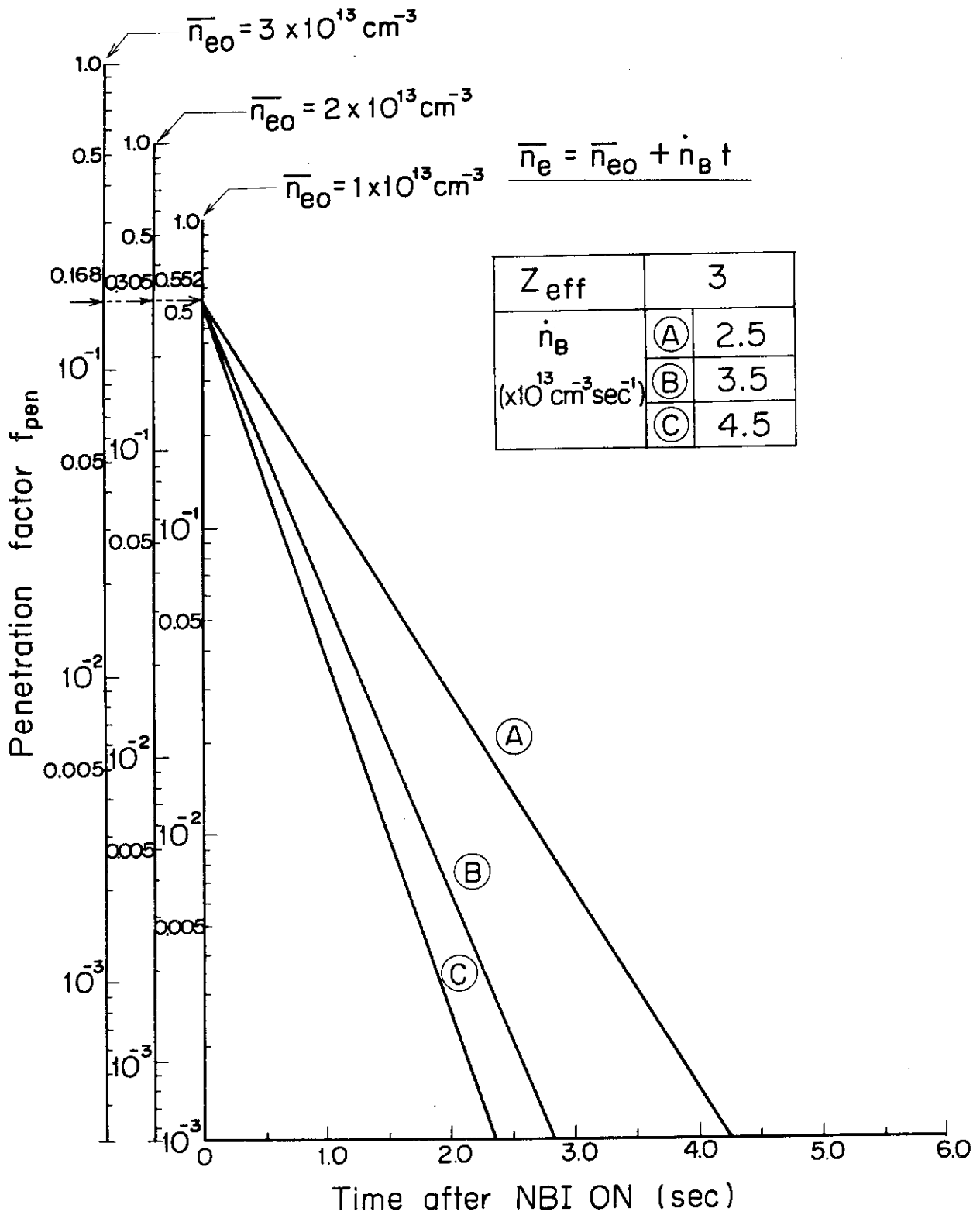


図 5.4 NBIビームのプラズマ突抜け割合の過渡変化  
( $Z_{eff} = 3$ )

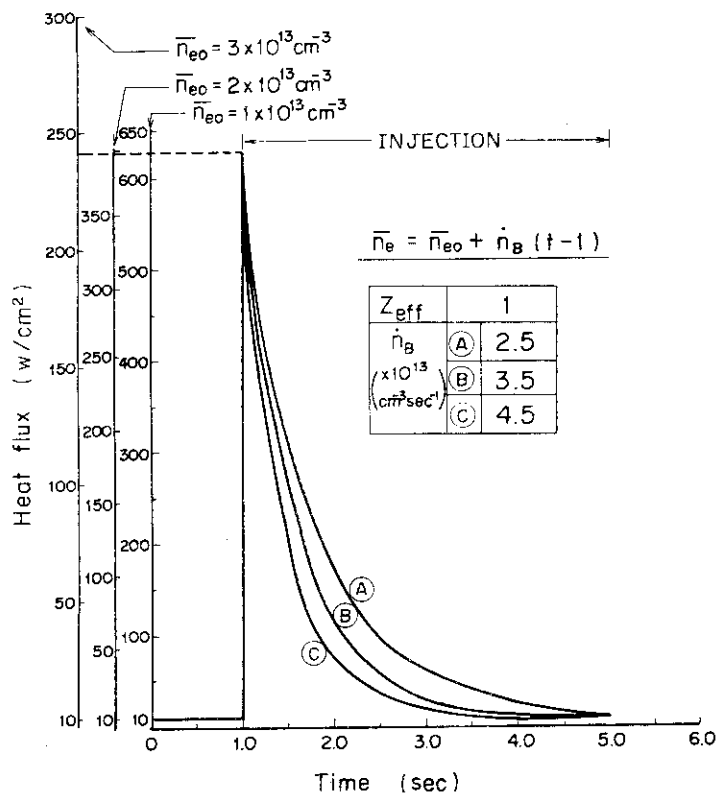


図 5.5 NBI ビームのプラズマ突抜けによる第 1 壁への熱負荷 ( $Z_{eff} = 1$ )

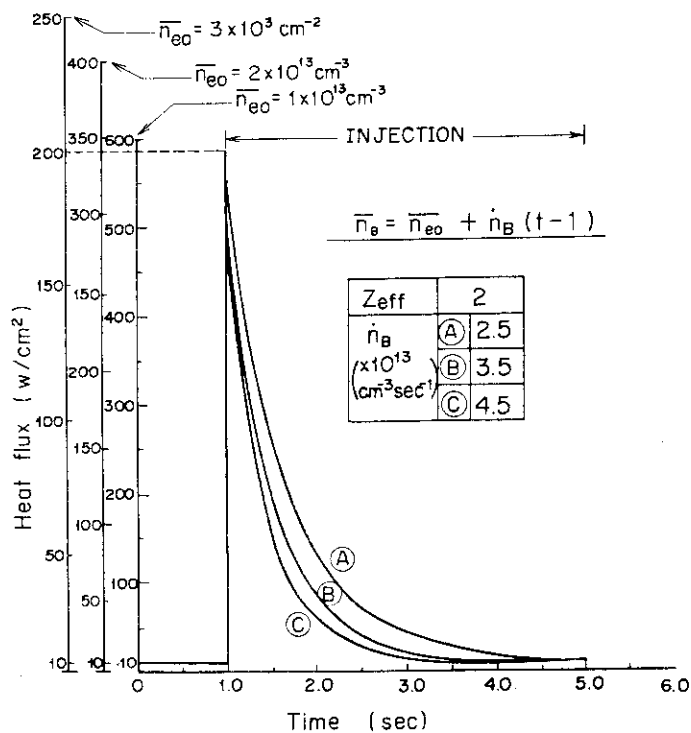


図 5.6 NBI ビームのプラズマ突抜けによる第 1 壁への熱負荷 ( $Z_{eff} = 2$ )



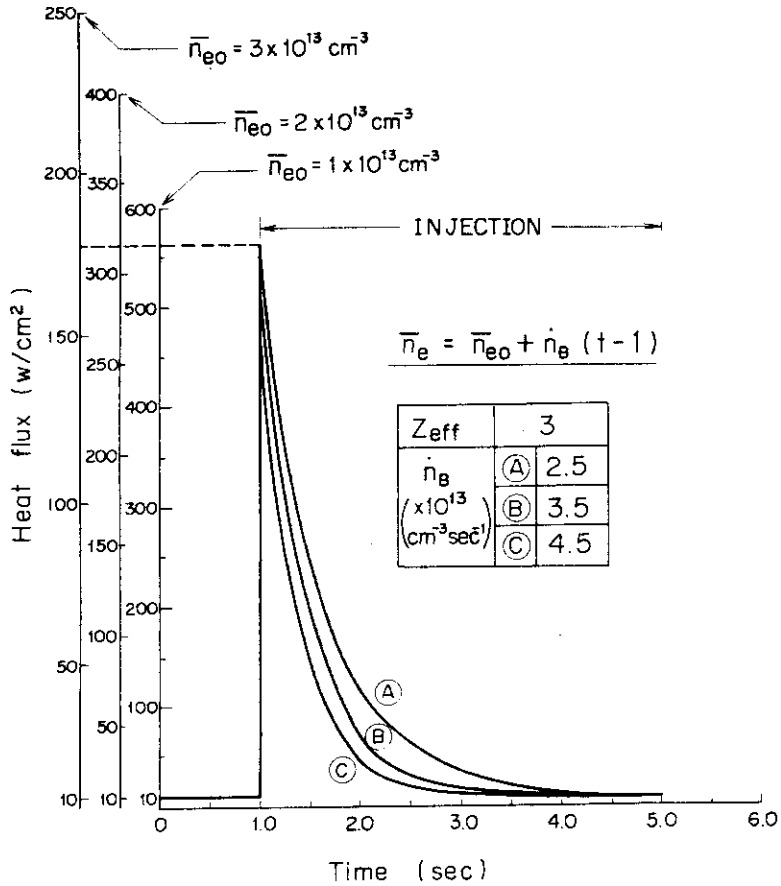


図 5.7 NBI ビームのプラズマ突抜けによる第 1 壁への熱負荷 ( $Z_{eff} = 3$ )

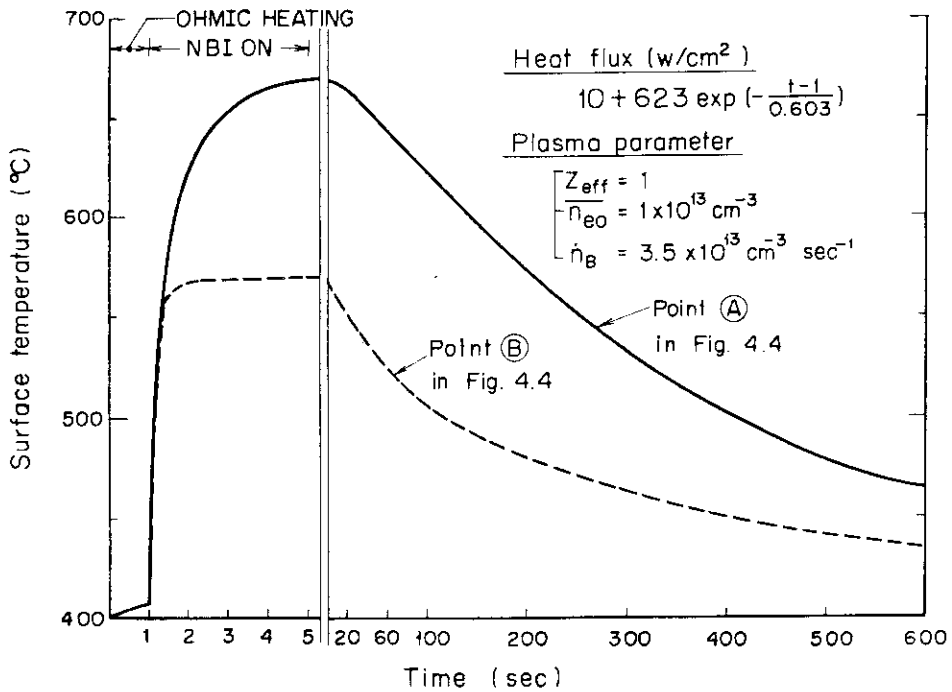


図 5.8 NBI ビームのプラズマ突抜けによるライナ表面温度の過渡変化例

## 付録1. 過渡的溫度変化による再結晶を等価な 等温再結晶に変換するプログラム

### 計算コードの概要

計算コード「RECRYSTAL」のフローチャートを付図1に示す。フローチャートに従って、説明する。

まず、INDATAにおいて、再結晶の活性化エネルギー、気体定数、各時刻における温度を読み込む。各時刻間は、それぞれ1つの区分とされ、更に細分割される。この分割は、温度変化の大きい部分を十分に行う必要がある。次に、GRADIEにおいて、各区分での温度勾配を計算する。各時刻間は、直線で近似する。RATEでは、細分割された時刻について、反応速度を計算する。(3.4)式の指数項のみを計算する。SIMP2Sでは、それぞれの時刻までの反応量を計算する。(3.5)式の定数Bを除いた部分である。SRATEでは、全体の再結晶反応量に対する、各時刻までの反応量の割合を計算する。DTIMEでは、以上までの結果をもとに、等温再結晶の実効加熱時間を計算する。

### コードの使用方法

プログラムリストは、付録1に示す。

#### カード1 (2F9.3)

QR ; 再結晶の活性化エネルギー (cal/mole)

R ; 気体定数 (cal/mole·deg)

#### カード2 (2(F9.3, I9))

T1 ; 等温再結晶に変換する際に基準とする温度の時刻2章の $T(t_1)$ に相当する。

IT1; 上記T1のデータ番号

T2 ; 最終時刻

IT2; 上記T2のデータ番号

#### カード3 (99(8F9.3I))

TIME ; 時刻 (sec)

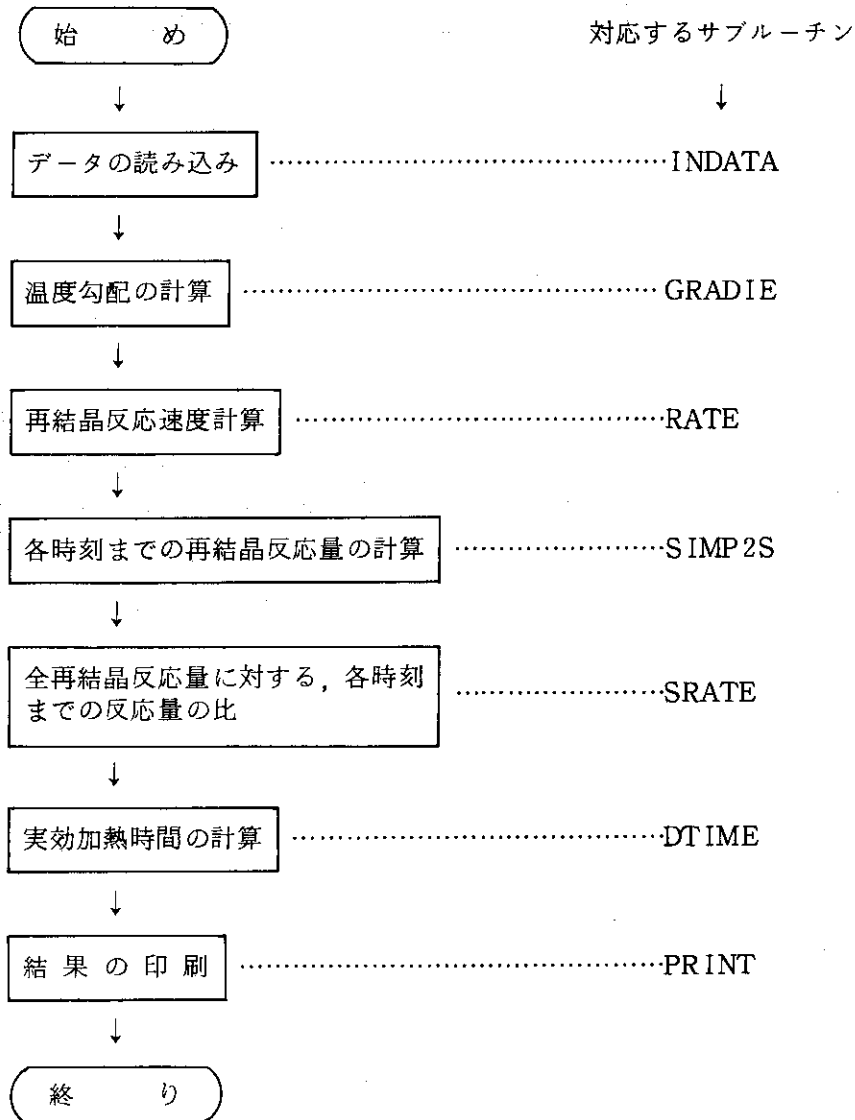
TEMP ; 上記時刻における温度 (°C)

カード3は、1枚以上でも良いが、最終カードは、TIME, TEMPのデータは3組以下にする。

#### カード4 (99(8I9/))

NDIV ; 各時刻 (TIME) 間の分割数

カード4も、1枚以上でも良いが、最終カードは、NDIVは7組以下にする。



付図1 計算プログラムのフローチャート

\* SOURCE STATEMENT \*

```

C *****
C *****
C ***** CONVERSION PROGRAM FROM RECRYSTALIZATION DUE TO *****
C ***** TRANSIENT TEMPERATURE TO RECRYSTALIZATION DUE TO *****
C ***** CONSTANT TEMPERATURE *****
C *****
C *****
C *****
1 COMMON/BANT13/TEMP(20),TEMP(20),GRAD(20),C(20),TEMPE(200),
   * PRATE(200),TT(200),NDIV(20)
2 COMMON/BANT14/SUM(200),SR(200)
3 DO 5 IX=1,20
4   TIME(IX)=0.0
5   TEMP(IX)=0.0
6   GRAD(IX)=0.0
7   C(IX)=0.0
8   NDIV(IX)=0
9   DO 6 IY=1,200
10    TEMPE(IY)=0.0
11    PRATE(IY)=0.0
12    TT(IY)=0.0
13    SUM(IY)=0.0
14    SR(IY)=0.0
15 CALL INDATA(@R,R,I1,I1,I2,I2,IE)
16 CALL GRADIE(IT2)
17 CALL RATE(@R,R,IE,IT2)
18 DO 1 I1=3,IE
19   N=I1
20 CALL SIMP25(TT,RRATE,N,S,ILL)
21 IF(ILL.E0.0) GO TO 2
22 WRITE(6,3) ILL,S
23 STOP
24   2 SUM(I1)=S
25   1 CONTINUE
26   STOTAL=SUM(IE)
27 CALL SRATE(STOTAL,IE,IT2)
28 CALL DTIME(STOTAL,IT1,DELTA,T,@R,R)
29 CALL PRINT(DELTA,T,@R,R,I1,I1,I2,I2,IE)
30 STOP
31 3 FORMAT(1H0,///,10X,1** ERROR ** ILL=*,15,
   *          5X,1** S=*,E 9.3)
32 END

```

MAIN- 20  
 MAIN- 25  
 MAIN- 30  
 MAIN- 31  
 MAIN- 32  
 MAIN- 33  
 MAIN- 34  
 MAIN- 35  
 MAIN- 36  
 MAIN- 37  
 MAIN- 38  
 MAIN- 39  
 MAIN- 40  
 MAIN- 41  
 MAIN- 42  
 MAIN- 60  
 MAIN- 70  
 MAIN- 80  
 MAIN- 90  
 MAIN-100  
 MAIN-110  
 MAIN-120  
 MAIN-140  
 MAIN-150  
 MAIN-160  
 MAIN-170  
 MAIN-180  
 MAIN-190  
 MAIN-200  
 MAIN-210  
 MAIN-220  
 MAIN-225  
 MAIN-230

\* SOURCE STATEMENT \*

```

1 C
2 SUBROUTINE INDATA(OR,R,IT1,IT2,IT2,IE) DATA- 10
3 COMMON/BANT13/TIME(20),TEMP(20),GRAD(20),C(20),TEMPE(200), DATA- 20
4 * RRATE(200),IT(200),NDIV(20) DATA- 30
5
6 C
7 READ(5,10) OR,R DATA- 40
8 READ(5,20) IT1,IT2,IT2 DATA- 50
9 READ(5,40) (TIME(I),TEMP(I),I=1,IT2) DATA- 70
10 IT2A=IT2-1 DATA- 75
11 READ(5,50) (NDIV(IA),IA=1,IT2A) DATA- 80
12 * WRITE(6,60) OR,R DATA- 81
13 * WRITE(6,70) TEMP(IT1),IT1,IT2 DATA- 82
14 * WRITE(6,80) (TIME(I),TEMP(I),I=1,IT2) DATA- 83
15 * WRITE(6,90) (IA,TIME(IA),TIME(IA+1),NDIV(IA),IA=1,IT2A) DATA- 84
16 * FORMAT(2F9.3) DATA- 90
17 * DATA-100
18 * DATA-120
19 * DATA-130
20 * DATA-139
21 * DATA-140
22 * DATA-141
23 * DATA-142
24 * DATA-143
25 * DATA-144
26 * DATA-145
27 * DATA-146
28 * DATA-147
29 * DATA-150
30 * DATA-151
31 * DATA-160
32 * DATA-170
33 *
34 *
35 *
36 *
37 *
38 *
39 *
40 *
41 *
42 *
43 *
44 *
45 *
46 *
47 *
48 *
49 *
50 *
51 *
52 *
53 *
54 *
55 *
56 *
57 *
58 *
59 *
60 *
61 *
62 *
63 *
64 *
65 *
66 *
67 *
68 *
69 *
70 *
71 *
72 *
73 *
74 *
75 *
76 *
77 *
78 *
79 *
80 *
81 *
82 *
83 *
84 *
85 *
86 *
87 *
88 *
89 *
90 *
91 *
92 *
93 *
94 *
95 *
96 *
97 *
98 *
99 *
100 *
101 *
102 *
103 *
104 *
105 *
106 *
107 *
108 *
109 *
110 *
111 *
112 *
113 *
114 *
115 *
116 *
117 *
118 *
119 *
120 *
121 *
122 *
123 *
124 *
125 *
126 *
127 *
128 *
129 *
130 *
131 *
132 *
133 *
134 *
135 *
136 *
137 *
138 *
139 *
140 *
141 *
142 *
143 *
144 *
145 *
146 *
147 *
148 *
149 *
150 *
151 *
152 *
153 *
154 *
155 *
156 *
157 *
158 *
159 *
160 *
161 *
162 *
163 *
164 *
165 *
166 *
167 *
168 *
169 *
170 *
171 *
172 *
173 *
174 *
175 *
176 *
177 *
178 *
179 *
180 *
181 *
182 *
183 *
184 *
185 *
186 *
187 *
188 *
189 *
190 *
191 *
192 *
193 *
194 *
195 *
196 *
197 *
198 *
199 *
200 *
201 *
202 *
203 *
204 *
205 *
206 *
207 *
208 *
209 *
210 *
211 *
212 *
213 *
214 *
215 *
216 *
217 *
218 *
219 *
220 *
221 *
222 *
223 *
224 *
225 *
226 *
227 *
228 *
229 *
230 *
231 *
232 *
233 *
234 *
235 *
236 *
237 *
238 *
239 *
240 *
241 *
242 *
243 *
244 *
245 *
246 *
247 *
248 *
249 *
250 *
251 *
252 *
253 *
254 *
255 *
256 *
257 *
258 *
259 *
260 *
261 *
262 *
263 *
264 *
265 *
266 *
267 *
268 *
269 *
270 *
271 *
272 *
273 *
274 *
275 *
276 *
277 *
278 *
279 *
280 *
281 *
282 *
283 *
284 *
285 *
286 *
287 *
288 *
289 *
290 *
291 *
292 *
293 *
294 *
295 *
296 *
297 *
298 *
299 *
300 *
301 *
302 *
303 *
304 *
305 *
306 *
307 *
308 *
309 *
310 *
311 *
312 *
313 *
314 *
315 *
316 *
317 *
318 *
319 *
320 *
321 *
322 *
323 *
324 *
325 *
326 *
327 *
328 *
329 *
330 *
331 *
332 *
333 *
334 *
335 *
336 *
337 *
338 *
339 *
340 *
341 *
342 *
343 *
344 *
345 *
346 *
347 *
348 *
349 *
350 *
351 *
352 *
353 *
354 *
355 *
356 *
357 *
358 *
359 *
360 *
361 *
362 *
363 *
364 *
365 *
366 *
367 *
368 *
369 *
370 *
371 *
372 *
373 *
374 *
375 *
376 *
377 *
378 *
379 *
380 *
381 *
382 *
383 *
384 *
385 *
386 *
387 *
388 *
389 *
390 *
391 *
392 *
393 *
394 *
395 *
396 *
397 *
398 *
399 *
400 *
401 *
402 *
403 *
404 *
405 *
406 *
407 *
408 *
409 *
410 *
411 *
412 *
413 *
414 *
415 *
416 *
417 *
418 *
419 *
420 *
421 *
422 *
423 *
424 *
425 *
426 *
427 *
428 *
429 *
430 *
431 *
432 *
433 *
434 *
435 *
436 *
437 *
438 *
439 *
440 *
441 *
442 *
443 *
444 *
445 *
446 *
447 *
448 *
449 *
450 *
451 *
452 *
453 *
454 *
455 *
456 *
457 *
458 *
459 *
460 *
461 *
462 *
463 *
464 *
465 *
466 *
467 *
468 *
469 *
470 *
471 *
472 *
473 *
474 *
475 *
476 *
477 *
478 *
479 *
480 *
481 *
482 *
483 *
484 *
485 *
486 *
487 *
488 *
489 *
490 *
491 *
492 *
493 *
494 *
495 *
496 *
497 *
498 *
499 *
500 *
501 *
502 *
503 *
504 *
505 *
506 *
507 *
508 *
509 *
510 *
511 *
512 *
513 *
514 *
515 *
516 *
517 *
518 *
519 *
520 *
521 *
522 *
523 *
524 *
525 *
526 *
527 *
528 *
529 *
530 *
531 *
532 *
533 *
534 *
535 *
536 *
537 *
538 *
539 *
540 *
541 *
542 *
543 *
544 *
545 *
546 *
547 *
548 *
549 *
550 *
551 *
552 *
553 *
554 *
555 *
556 *
557 *
558 *
559 *
560 *
561 *
562 *
563 *
564 *
565 *
566 *
567 *
568 *
569 *
570 *
571 *
572 *
573 *
574 *
575 *
576 *
577 *
578 *
579 *
580 *
581 *
582 *
583 *
584 *
585 *
586 *
587 *
588 *
589 *
590 *
591 *
592 *
593 *
594 *
595 *
596 *
597 *
598 *
599 *
600 *
601 *
602 *
603 *
604 *
605 *
606 *
607 *
608 *
609 *
610 *
611 *
612 *
613 *
614 *
615 *
616 *
617 *
618 *
619 *
620 *
621 *
622 *
623 *
624 *
625 *
626 *
627 *
628 *
629 *
630 *
631 *
632 *
633 *
634 *
635 *
636 *
637 *
638 *
639 *
640 *
641 *
642 *
643 *
644 *
645 *
646 *
647 *
648 *
649 *
650 *
651 *
652 *
653 *
654 *
655 *
656 *
657 *
658 *
659 *
660 *
661 *
662 *
663 *
664 *
665 *
666 *
667 *
668 *
669 *
670 *
671 *
672 *
673 *
674 *
675 *
676 *
677 *
678 *
679 *
680 *
681 *
682 *
683 *
684 *
685 *
686 *
687 *
688 *
689 *
690 *
691 *
692 *
693 *
694 *
695 *
696 *
697 *
698 *
699 *
700 *
701 *
702 *
703 *
704 *
705 *
706 *
707 *
708 *
709 *
710 *
711 *
712 *
713 *
714 *
715 *
716 *
717 *
718 *
719 *
720 *
721 *
722 *
723 *
724 *
725 *
726 *
727 *
728 *
729 *
730 *
731 *
732 *
733 *
734 *
735 *
736 *
737 *
738 *
739 *
740 *
741 *
742 *
743 *
744 *
745 *
746 *
747 *
748 *
749 *
750 *
751 *
752 *
753 *
754 *
755 *
756 *
757 *
758 *
759 *
760 *
761 *
762 *
763 *
764 *
765 *
766 *
767 *
768 *
769 *
770 *
771 *
772 *
773 *
774 *
775 *
776 *
777 *
778 *
779 *
780 *
781 *
782 *
783 *
784 *
785 *
786 *
787 *
788 *
789 *
790 *
791 *
792 *
793 *
794 *
795 *
796 *
797 *
798 *
799 *
800 *
801 *
802 *
803 *
804 *
805 *
806 *
807 *
808 *
809 *
810 *
811 *
812 *
813 *
814 *
815 *
816 *
817 *
818 *
819 *
820 *
821 *
822 *
823 *
824 *
825 *
826 *
827 *
828 *
829 *
830 *
831 *
832 *
833 *
834 *
835 *
836 *
837 *
838 *
839 *
840 *
841 *
842 *
843 *
844 *
845 *
846 *
847 *
848 *
849 *
850 *
851 *
852 *
853 *
854 *
855 *
856 *
857 *
858 *
859 *
860 *
861 *
862 *
863 *
864 *
865 *
866 *
867 *
868 *
869 *
870 *
871 *
872 *
873 *
874 *
875 *
876 *
877 *
878 *
879 *
880 *
881 *
882 *
883 *
884 *
885 *
886 *
887 *
888 *
889 *
890 *
891 *
892 *
893 *
894 *
895 *
896 *
897 *
898 *
899 *
900 *
901 *
902 *
903 *
904 *
905 *
906 *
907 *
908 *
909 *
910 *
911 *
912 *
913 *
914 *
915 *
916 *
917 *
918 *
919 *
920 *
921 *
922 *
923 *
924 *
925 *
926 *
927 *
928 *
929 *
930 *
931 *
932 *
933 *
934 *
935 *
936 *
937 *
938 *
939 *
940 *
941 *
942 *
943 *
944 *
945 *
946 *
947 *
948 *
949 *
950 *
951 *
952 *
953 *
954 *
955 *
956 *
957 *
958 *
959 *
960 *
961 *
962 *
963 *
964 *
965 *
966 *
967 *
968 *
969 *
970 *
971 *
972 *
973 *
974 *
975 *
976 *
977 *
978 *
979 *
980 *
981 *
982 *
983 *
984 *
985 *
986 *
987 *
988 *
989 *
990 *
991 *
992 *
993 *
994 *
995 *
996 *
997 *
998 *
999 *
1000 *

```

\* SOURCE STATEMENT \*

```

1 C
2 SUBROUTINE GRADIE(IT2) GRAD- 10
3 COMMON/BANT13/TIME(20),TEMP(20),GRAD(20),C(20),TEMPE(200), GRAD- 20
4 * RRATE(200),IT(200),NDIV(20) GRAD- 30
5
6 C
7 DO 100 IB=1,IT2-1 GRAD- 40
8 CT=TIME(IB+1)-TIME(IB) GRAD- 45
9 GRAD(IB)=(TEMP(IB+1)-TEMP(IB))/CT GRAD- 50
10 CA=(TIME(IB+1)*TEMP(IB)-TIME(IB)*TEMP(IB+1))/ GRAD- 60
11 C(IB)=CA/CT GRAD- 70
12 CONTINUE GRAD- 80
13 RETURN GRAD- 90
14 END GRAD-100

```

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -760820- V06-L08 79.04.24 PAGE 4

\* SOURCE STATEMENT \*

```

C
1 SUBROUTINE RATE(OR,R,IE,IT2)
2 COMMON/BANT13/TIME(20),TEMP(20),GRAD(20),C(20),TEMPE(200),
  * RRATE(200),TT(200),NDIV(20)
C
3 IE=0
4 IT21=IT2-1
5 DO 200 IC=1,IT2-1
6 DT=(TIME(IC+1)-TIME(IC))/NDIV(IC)
7 ND=NDIV(IC)
8 IF(IC.EQ.IT21) ND=ND+1
9 DO 300 ID=1,ND
10 IE=IE+1
11 TT(IE)=TIME(IC)+DT*(ID-1)
12 TEMPE(IE)=GRAD(IC)*TT(IE)+C(IC)
13 AA=OR/RR*(TEMPE(IE)+273.0)
14 AA=AA/10.0
15 RRATE(IE)=1.0/((EXP(AA))*10)
16 300 CONTINUE
17 200 CONTINUE
18 RETURN
19 END
RATE= 10
RATE= 20
RATE= 30
RATE= 40
RATE= 45
RATE= 50
RATE= 60
RATE= 70
RATE= 74
RATE= 80
RATE= 85
RATE= 90
RATE= 100
RATE= 110
RATE= 115
RATE= 120
RATE= 122
RATE= 124
RATE= 130
RATE= 140
    
```

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -760820- V06-L08 79.04.24 PAGE 5

\* SOURCE STATEMENT \*

```

C
1 SUBROUTINE SRATE(STOTAL,IE,IT2)
2 COMMON/BANT14/SUM(200),SR(200)
C
3 DO 400 IJ=3,IE
4 SR(IJ)=SUM(IJ)/STOTAL
5 400 CONTINUE
6 RETURN
7 END
SRATE=10
SRATE=20
SRATE=40
SRATE=50
SRATE=60
SRATE=70
SRATE=80
    
```

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -760820- V06-L08 79.04.24 PAGE 6

\* SOURCE STATEMENT \*

```

C
1 SUBROUTINE DTIME(STOTAL,IT1,DELTAT,QR,R)
2 COMMON/BANT13/TIME(20),TEMP(20),GRAD(20),C(20),TEMPE(200),
  * RRATE(200),TT(200),NDIV(20)
C
3 AAL=QR/(R*(TEMP(IT1)+273.0))
4 AAL=AAL/10.0
5 RRATE1=1.0/(EXP(AAL))*10
6 DELTAT=STOTAL/RRATE1
7 RETURN
8 END
    
```

DTIME-10  
DTIME-20  
DTIME-30  
DTIME-40  
DTIME-45  
DTIME-50  
DTIME-60  
DTIME-70  
DTIME-80

FACOM 230-75 (M7) FORTRAN-D -760820- V06-L08 79.04.24 PAGE 7

\* SOURCE STATEMENT \*

```

C
1 SUBROUTINE PRINT(DELTAT,QR,R,T1,IT1,T2,IT2,IE)
2 COMMON/BANT13/TIME(20),TEMP(20),GRAD(20),C(20),TEMPE(200),
  * RRATE(200),TT(200),NDIV(20)
3 COMMON/BANT14/SUM(200),SR(200)
C
4 WRITE(6,500)DELTAT,TEMP(IT1)
5 WRITE(6,505)
6 WRITE(6,510)(TT(IK),TEMPE(IK),RRATE(IK),
  * SUM(IK),SR(IK),IK=1,IE)
7 500 FORMAT(IH1,5(/),10X,*** RESULT ***,2(/),
  * 10X,EFFECTIVE TIME OF CONSTANT TEMPERATURE=,
  * F9.3,(SEC),/,
  * 505 FORMAT(IH0,///,10X,*** CONSTANT TEMPERATURE =,F9.3,(DEGREE),
  * 10X,*** TIME ***,5X,*** TAMP ***,5X,
  * 10X,*** RATE ***,5X,*** SUM ***,5X,
  * 10X,*** RATIO ***,
  * /10X, (SEC) 1,5X, (C) 1,5X,
  * (1/SEC) 1)
9 510 FORMAT(IH0,10(99( 7X
  * F10.3,1X,/)))
10 RETURN
11 END
    
```

PRIN- 10  
PRIN- 20  
PRIN- 30  
PRIN- 35  
PRIN- 40  
PRIN- 45  
PRIN- 50  
PRIN- 60  
PRIN- 70  
PRIN- 80  
PRIN- 82  
PRIN- 90  
PRIN-120  
PRIN-130  
PRIN-140  
PRIN-150  
PRIN-160  
PRIN-170  
PRIN-180  
PRIN-190  
PRIN-200