

# プラズマ対向材料の開発・研究用高熱負荷試験装置ACT

久保田雄輔, 野田信明, 相良明男, 井上徳之, 赤石憲也, 本島 修

(1994年2月23日受理)

NIFS-MEMO-13

1994年3月

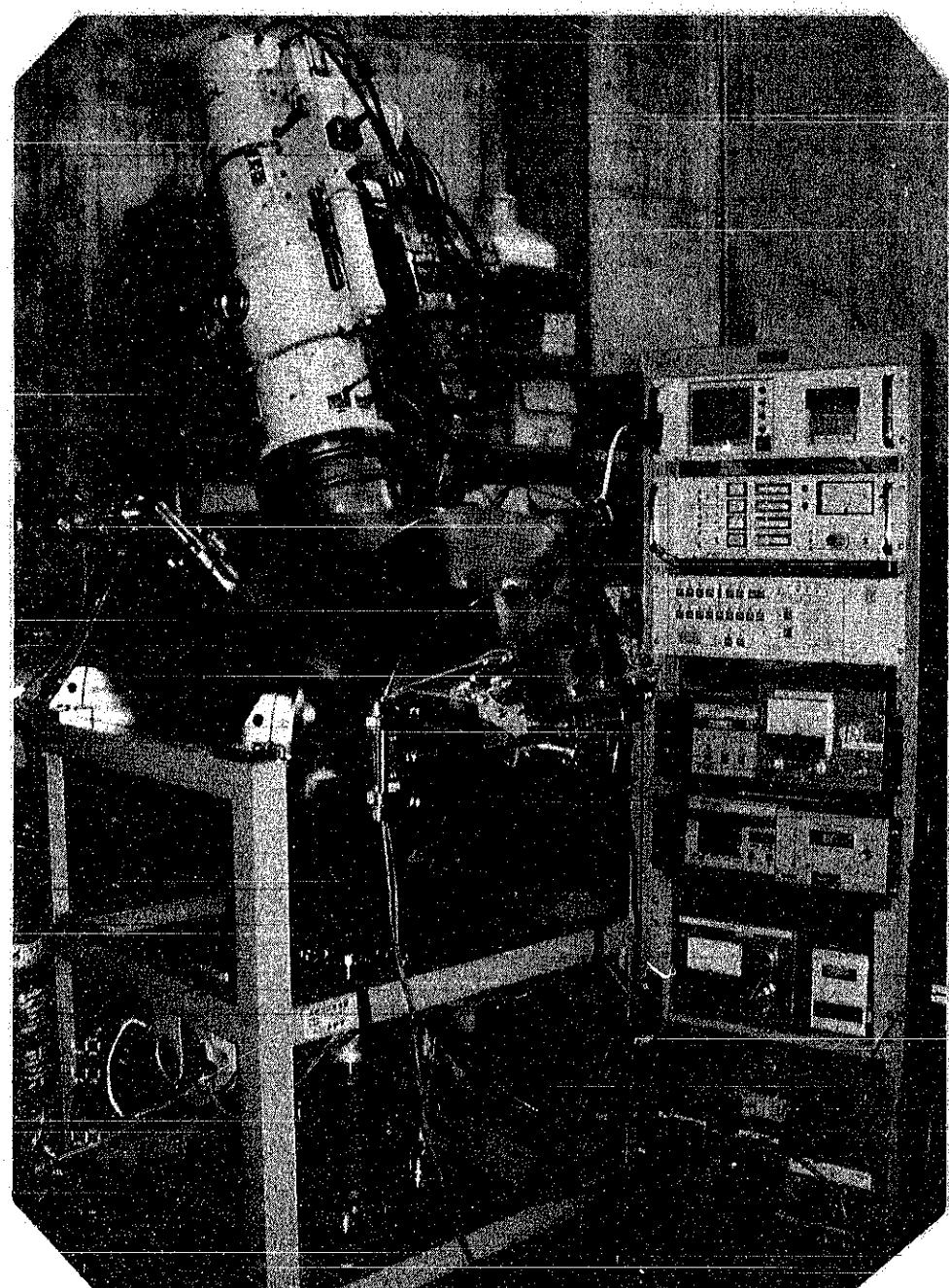
This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

# プラズマ対向材料の開発・研究用 高熱負荷試験装置 A C T

文部省核融合科学研究所

久保田雄輔、野田信明、相良明男、  
井上徳之、赤石憲也、本島修



## 目 次

1 章 序論	2
2 章 热負荷試験装置(ACT)の構造	4
2. 1 はじめに	4
2. 2 電子ビーム源と外部制御系	6
2. 3 真空容器及び真空排気系	8
2. 4 強制冷却用循環ポンプ系	9
2. 5 測定系	10
2. 6 データ処理用MTDシステム	13
2. 7 インターロック系及び装置監視用ポケットベル・モニターシステム	14
3 章 ACTの操作・運転方法	16
3. 1 はじめに	16
3. 2 接合材の取り付け	17
3. 3 真空排気	17
3. 4 電子ビームの発生	18
4 章 ACTの各種特性	20
4. 1 真空特性	20
4. 2 漏洩X線特性	20
4. 3 電子ビームの特性測定	22
5 章 特性評価用接合材料と熱負荷試験	23
5. 1 接合材の種類	23
5. 2 高熱流束負荷試験	24
5. 3 その他の試験	26
6 章 考察	27
7 章 結論及び今後の課題	28
謝 辞	30
参考論文	30
表及び図面	31

# Electron Beam Irradiation Test Facility for Research and Development of Plasma Facing Components

Yusuke KUBOTA, Nobuaki NODA, Akio SAGARA,  
Noriyuki INOUE, Kenya AKAISHI, and Osamu MOTOJIMA

*National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01,*

## ABSTRACT

To develop a reliable divertor plate for large helical device(LHD), a test facility called ACT(Active Cooling Teststand) has been constructed in Toki site. The facility can generate 100 kW electron beams with beam energy of 30 keV as a heat source, which can irradiate with a heat flux of up to 100 MW/m<sup>2</sup> to a test sample piece steadily. The beam irradiation area on the sample can be changed from 1 to 400 cm<sup>2</sup> with a 64 step controller electrically. By using the ACT, the thermal fatigue tests of various kinds of carbon-copper brazed components are being performed under the heat loads of 2.5-14 MW/m<sup>2</sup>. The test results show that several brazed components are applicable as the divertor plates for the first stage of LHD operation, namely with maximum heat load of 10 MW/m<sup>2</sup> for 5 seconds discharge durations.

Keywords: LHD, divertor, ACT, brazed component, heat flux, carbon, graphite, active cooling, electron beam

## 1章 序論

プラズマ対向壁として使われるダイバータ板は、不純物制御、粒子制御、そして熱制御等のプラズマ閉じ込めに関連する重要な機能を有する。反面、高熱流束のプラズマに直接曝される厳しい熱負荷条件と膨大な使用個数から冷却水漏れや接合部劣化、あるいはタイル材の破損などのトラブルが発生し、プラズマ閉じ込め実験を行う上で重大な障害になる恐れがある。そのため大型核融合実験装置の建設においては、苛酷な条件下においても充分信頼して使う事が出来るダイバータ板を、あらかじめ充分開発しておく事が非常に重要なポイントとなっている。

一般にダイバータ板の開発・研究に必要とされる主要な項目としては、①中性子照射による材料への影響、②物理、化学スパッタリング、照射促進昇華(Radiation enhanced sublimation)等による材料の損耗③水素リサイクリング特性、④ガス放出特性、⑤高熱負荷試験等がある。そして、それらの開発・研究は、各々重要であり目的に合った装置を使って、各研究施設で積極的に行われている。この中でダイバータ材の高熱流束負荷試験は、核融合実験装置が巨大化するに従いダイバータ板に要求される熱負荷が極限に近く高くなっているため、特に重要な開発・研究項目となって来ている。このダイバータ板の熱負荷試験行う場合、実際の使用環境と同じ高熱流束のプラズマを使って行うのが本来は望ましい。しかし、効率の良さ、構造の簡単さ、あるいは熱源としての安定性等の理由から、主に電子ビームがその目的の為に使われている。

電子ビームを使った熱負荷試験装置として現在における世界最大出力の装置は、日本原子力研究所のJEBIS<sup>1)</sup>である。この装置は他の熱負荷試験装置とは異なって、プラズマから電子ビームを引き出す形式を採用している。純粋な電子ビーム方式の熱負荷試験装置としては、1991年フランス Framatome 研究所にNET(Next European Torus)<sup>2)</sup>、ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)<sup>3, 4)</sup>、そしてTore Supra用のダイバータ材などプラズマ対向材料の熱負荷試験を行う事を目的とした、出力200 kWの電子源を有する大型熱負荷装置<sup>5)</sup>が設備された。又、SNLA(Sandia National Laboratory, Albuquerque)では従来の30 kW電子源の他に新たに電子ビーム式の1200 kW出力の大型熱負荷装置<sup>6)</sup>が1994年に運転を開始する等、各研究施設で従来以上に積極的にダイバータ板の開発・研究を行おうとしている。これは強制冷却式ダイバータ<sup>7)</sup>やリミター<sup>8)</sup>を大型装置では初めて積極的に使用したTore Supraでの経験から、確実で安定した動作をするダイバータ材の開発が、プラズマの閉じ込め等の実験を円滑に遂行する上で、いかに重要な事であるか認識した結果だと思われる。表1は世界で使われている主要な電子ビーム熱負荷試験装置の主なパラメータを示している。

核融合科学研究所においても平成10年度の完成を目指にして現在建設が行われているLHD (Large Helical Device)<sup>9-14)</sup>で使われるダイバータ板の開発・研究を行っている。そして、平成2年度(1991年3月)には強制冷却構造試験装置と言う名称のダイバータ板用熱負荷試験装置、ACT (Active Cooling Teststand) が土岐地区の低温実

験棟内的一角に設置された。A C Tは、熱源として国内ではJEBISの400 kWに次ぐ100 kW出力の電子源を中心とした熱負荷試験装置である。しかし、設置当初においては測定手段が整備されていなかった事や、ビーム電流制御方法が適切でなかった事が原因で、満足出来る熱負荷試験の結果は得られなかった。そこで、測定手段の整備、装置の改良、そして各種接合材の熱負荷試験を積極的に行う事により、A C Tの測定精度の向上と試験効率の向上を計ってきた。その結果、改良作業も一段落し、測定精度等の点で満足出来る状態になった。その上、必要ならばコンピューター制御により、無人状態での繰り返し熱負荷試験を行えるようになった。A C Tは発生可能なビーム出力が最大100 kW（現在は受電容量の制限により50 kW）と比較的小さい、この種の熱負荷試験には必須な熱分布測定用の赤外線カメラを装備していない、そして短パルスの熱負荷試験が出来ない等、問題はまだ存在するが、他の研究施設の装置に負けない幾つかの優れた点も有る。それらの点を下に列挙する。

- ①小試料に対しては、 $100 \text{ MW/m}^2$ 以上の熱負荷で連続的な試験も可能
- ②ターゲット入射電流により電子源を制御している為、正確な熱負荷を与えられる
- ③コンパクトな構造のため、1人でも容易に熱負荷試験が行える
- ④ノート型コンピュータによるデータ収集と安全管理
- ⑤電子ビームエネルギーが低いため、特別なX線遮蔽対策が不要
- ⑥自動制御による繰り返し熱負荷試験が可能
- ⑦ポケットベルモニターシステムにより、A C Tの動作状況を遠隔地より監視可能

特に、数日間かけて行なわなければならない数千回に及ぶ繰り返し熱負荷試験の場合、ポケットベルと連動した自動運転システムは効果的に動作する。

L H Dダイバータ板の場合、熱負荷は5秒運転モードに関しては最大 $10 \text{ MW/m}^2$ 、10秒運転モードでは $5 \text{ MW/m}^2$ 、そして定常運転モードの場合には、 $0.75 \text{ MW/m}^2$ であるとされる。又、ITERの場合、自己点火運転で $15\text{--}20 \text{ MW/m}^2$ とされているので、L H Dばかりでなく、必要があればITERのダイバータ板の開発・研究にもA C Tを使用する事が出来る。現在、L H D用ダイバータ板の開発・研究の為に、このA C Tを使って、主に各種接合材の接合部の健全性を評価する為の繰り返し熱負荷試験を行っている。試験に使われる接合材料はメーカー数社から提供された平板型とモノブロック型、サドル型のC-Cu（カーボン-銅）蝶付け接合材、そして機械的接合材である。これらの接合材に対し、今までに $2.5\text{--}14 \text{ MW/m}^2$ の熱負荷の範囲で熱応答試験及び100-5100回の繰り返し熱負荷試験を行っている。それらの結果、最高熱負荷が $10 \text{ MW/m}^2$ と考えられているL H Dダイバータ板としても使用できると思われる接合材も幾つか見つかっている。しかし、L H D用の実際のダイバータ板の設計・製作を考えると、より慎重な熱特性の評価が必要なだけではなく、スペッタリング特性、脱ガス特性、水素リサイクリング、製作のし易さ、価格、あるいは修理・交換のし易さなど他の要素についても評価作業が必要である。

なお、A C Tは上で述べたような接合材の熱負荷試験ばかりではなく、大学や産業界

の研究者との共同研究の形で、グラファイトやカーボン複合材を基材とする材料一般の開発・研究にも使用されている。最近ではB<sub>4</sub>C処理材の熱負荷試験や、ボロン入りグラファイト材とSIC材の蒸発実験<sup>15)</sup>が行われている。なお、ベリリウムが低リサイクリングや酸素抑制作用、そしてディスラプション電流に対し強い等により、最近ITERのプラズマ対向壁材として有力視されているが、有毒である事と融点が低い等から、現在の段階ではA C Tにおける熱特性評価の対象材料になっていない。

本報告書では、1章の序論に続き2章において本書における最も主要な熱負荷装置A C Tの構造について述べ、3、4章では操作方法と特性について、5章において試験に使用した接合材と試験の概要を報告する。又、6章の考察においてはA C Tと試験方法などについての議論を進める。最後の7章においては、熱負荷装置としてのまとめ、熱負荷試験の結果、そして今後の課題と予定などについて記述する。なお、本報告書はA C Tの建設報告書としての性格から、接合材の熱負荷試験の結果については簡単な記述に留め、詳しい実験結果の解析やANCISソフトを使った3次元CADによる熱応答等の模擬計算に関しては、別の論文で述べる予定である。また、LHDダイバータ板に関する設計とA C Tの初期の試験結果については、1992年にローマで開かれたSOFT(Symposium on Fusion Technology)の国際会議<sup>16)</sup>で、LHDダイバータの磁場研究については核融合研の所内報<sup>17)</sup>にて報告されている。そして、ダイバータ研究の現状については、プラズマ・核融合学会誌の小特集<sup>18)</sup>において解説されている。

## 2章 热負荷試験装置A C T

### 2. 1 はじめに

A C Tは、序論でも述べたように設置以来性能と測定精度の向上を目指して、数多くの改良を重ねて現在に至っている。そこで、最初にそれらの改造の主要な内容について、熱負荷試験の内容と共に時間的な流れに沿って列記してみる。

年 月	改 造 及 び 試 験 の 内 容
1991. 3	熱負荷試験装置A C Tを土岐地区の低温実験棟に設置
6	安全管理センターによるA C Tの漏洩X線に関する検査
7	強制冷却なしグラファイト・ブロックに対し、初めてビームを照射
1992. 1	電子ビーム電流を制御する為にデジタルプログラム調節計を外部制御系として使用。これにより電子ビーム電流の制御が正確に、かつ容易となった。
2	接合材の冷却を効果的に行うため専用の循環式強制冷却ポンプ系を設置 それにより冷却水の流速が2 m/sから8 m/sに増強
3	接合部の健全性評価のための繰り返し熱負荷試験を開始
3	F/CC材に対しLHDダイバータ板の最大熱負荷である10 MW/m <sup>2</sup> において熱負荷試験を実施

- 8 真空容器真空系のロータリーポンプを300 L/min. より 450 L/min. に強化
- 11 接合材を絶縁して、電子源のビーム電流制御方法を全ビーム電流制御より、接合材入射電流制御に変更。その結果、熱負荷制御の精度が大幅に向上了
- 11 F/IG材に対し 7.4-10 MW/m<sup>2</sup> の熱負荷で 4900 回までの繰り返し試験を実施
1993. 1 M/CC材に対し 10-12 MW/m<sup>2</sup> の熱負荷で 1900 回の繰り返し試験を実施
- 5 ビーム・リミターとして、強制冷却式 C-Mo 接合材を採用。それにより 10 MW/m<sup>2</sup> 以上の大負荷でも安定した熱負荷試験が実現
- 6 F/CC材に対し 10-13 MW/m<sup>2</sup> の熱負荷で 5100 回までの繰り返し試験を実施
- 6 真空容器の真空排気系に 520 L/s のターボ分子ポンプを増設。それにより 2.5 倍に排気速度が向上
- 7 接合材の熱負荷を正確に測定する事が出来る  $\Delta T$  を冷却水の出入口に設置
- 8 停電、断水、運転停止など A C T に異常が発生した場合、直ちに電話回線を経由して、異常項目を自動的にポケットベルに知らせるモニターシステムを設置
- 9 機械的接合材の試作 1 号機に対し 5-7.5 MW/m<sup>2</sup> で熱負荷試験を実施
- 10 M/CC材に対し 13-14 MW/m<sup>2</sup> の熱負荷で 260 回の繰り返し試験を実施
- 11 機械的接合材の試作 2 号機に対し 6.5-13 MW/m<sup>2</sup> で熱負荷試験を実施
1994. 1 機械的接合材の試作 3 号機（並列配置可能型）に対し、熱負荷試験を実施

上に列記した A C T の改造で特筆する点は、電子ビーム電流を制御する為にデジタルプログラム調節計を採用した事、ビームリミターとして C-Mo 接合材を使用した事、そしてビーム電流を制御する方式を全電流制御から、接合材に入射するビーム電流により制御する方式へ変更した 3 点である。これらの改造や変更により、A C T の性能や測定精度が飛躍的に向上した。次に具体的な構造を示す。

A C T 本体の外観と内部構造は図 1 に、そして主要なパラメータについては下の表に示すが、図 2 A)-C) に示す他の大型の熱負荷試験装置 (JEBIS, EB-200, EB1200) に比較すると、小規模で構造が簡単である。ただ、形状から見ると SNLA の EB-1200 と良く似通っている。A C T 全体は、図 3 のブロック図に示すように大きく別けて 100 kW 電子ビーム源、電子ビーム電流制御系、高圧電源部、真空容器、排気系、強制冷却水用水循環ポンプ系、そして測定系を含むデータ処理用 MTD システムとなる。この A C T は狭い場所に他の装置 SUT (SUrface modification Teststand) や HIT (High energy Ion beam Teststand) と混在して設置する必要があるため、各機器は可能な限りコンパクト（例えばポンプ内蔵型冷却水タンクやノート型パソコンの採用）に構成されている。以下にこれらの機器について概説する。なお、SUT とは表面改質実験装置の名称で、ボロニゼーションや放電洗浄の実験を通して、LHD がプラズマ実験を行う場合の最適な不純物抑制法の確立を目指す装置である。

## A C T の 主 要 な 仕 様

最大ビーム出力	100 kW
	(ただし現在は50 kWに制限)
加速ビーム電圧	30 kV(固定)
最大ビーム電流	3.3 A
最高周波数	200 Hz
ビーム照射面積	1~400 cm <sup>2</sup>
	(通常はソフトリミタで10×10 cm <sup>2</sup> に制限)
ビームパルス幅	1s~CW
ビーム制御方式	ターゲット入射電流制御
試料面での熱負荷	0~100 MW/m <sup>2</sup> (for 10cm <sup>2</sup> , CW) 0~300 MW/m <sup>2</sup> (for 1cm <sup>2</sup> , CW)
真空容器体積	400 L
到達真空度	2×10 <sup>-6</sup> Torr
真空容器部排気系	300 L/sと520 L/sのTPM
冷却水ポンプ出力	7.5 kW
冷却水最大流速	8 m/s
試料部での最大水圧	5 気圧

### 2. 2 電子ビーム源と外部制御系

ACTに装備されている電子源は、蒸着装置用として市販されているビーム出力が100 kWの比較的大型の産業用電子ビーム源で、電子源の本体、高圧電源、制御盤、オイルクーラーによる。その全体のブロック図、そして電子源本体の断面図を各々図4、そして図5に示す。電子源のカソード電極からの電子ビームは、第1レンズと第2レンズにより収束され、偏向コイルにより真空容器内の照射場所へ導かれる。第1と第2レンズの間には圧縮空気で動作するバルブがあり、ビーム照射領域の真空度が悪くなった場合( $>10^{-5}$  Torr)や真空容器を大気開放する場合に、電子源部の電極の汚染を避けるため、電子源部を閉め切る事が出来る。なお、電子源内部を高真空に保つため真空容器に付属している排気系とは別に、電子源中央部に170 L/sのTMP(ターボ分子ポンプ)がゲートバルブを介して取り付けられている。この電子源は電子ビームを照射中に、被照射材料からの蒸発物質により電極が汚染されないように配慮して、真空容器面上への垂線に対し約20°の角度で取り付けられている。

元来厳しい条件で使用される蒸着装置のビーム源として開発されている為、電子エミッターとしてはタンタル板をカソード面とする傍熱型カソードを使用している。傍熱型カソードの場合、カソード加熱用のフィラメントがバックイオンやアークから保護され

るので、フィラメントの寿命が長くなる長所がある。反面、カソードの熱容量が大きいので、本電子源の場合のように加速電圧をかけた後、フィラメントに電流を流す方式では、電子ビーム電流の立ち上がり時間が長くなる。本電子源の場合の電子ビーム電流の立ち上がり時間は約30秒である。真空容器内にある試料設置場所での電子ビーム照射面積は、最大 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ （ただし、通常は安全の為リミターにより $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以内に制限）である。ビーム照射面積内のビーム電流の分布は電気的な64ステップコントローラーによって調整する。これはX方向を64ステップに分割して、各ステップ毎にビームのX、Y方向の位置、そこでの滞在時間、そして $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 非点補正コイル4個の値を変えるもので、これを使う事により局所的にビーム電流密度を増加させたり、弱くする事ができる。

加速エネルギーは、他の熱負荷試験用の電子源が通常40kV以上の高い値（例えばJEBISの場合は~100kV、EB-200の場合は~200kV、そしてEB-1200の場合は40kV）であるのに、本電子源の場合は30kVと低く抑えられている。これによりビーム照射試験の際のX線発生量が非常に少なく、特別な放射線遮蔽が必要ないので効率の良い試験が行える。

本電子源のビーム電流の本来の調整方法は、つまりによって行う手動しかなく、当初は電子ビーム電流を正確に制御する事が出来なかった。そこで、一般には温度調整用に使用されているデジタルプログラム調節計（図6）を外部入力型の制御系として使用し、電子ビーム電流の制御を容易にした。これは図7のブロック図で示すように、調節計のプログラムされた信号と、実際に流れているビーム電流の信号を比較・增幅し、その出力信号で電子源の外部入力端子を経由して、ビーム電流を制御する方式である。これにより電子ビーム電流の安定性は大幅に向上し、かつビーム電流の立ち上がり時間も、手動の場合の30秒から15秒に短縮された。その結果、接合材の接合部の健全性を評価する為の繰り返し熱負荷試験も可能になった。しかし、この調節計は、比例動作(P)、積分動作(I)、そして微分動作(D)の3要素からなる自動制御回路を有しているので、正しいPID値を選択しないと、時間遅れやオーバーシュート等が生じる。通常は、あらかじめオートチューニングモードでPIDの値を選び、それを更に細かく調整して最適なビーム電流波形が得られるようにしている。熱負荷試験に使用される電子ビームの電流波形は、最小1秒単位（サンプリング周期は0.1秒）の19ステップでプログラムする事ができるので、電子ビーム電流を一定にするだけではなく、台形状や階段状、あるいはそれら波形の繰り返し波形にも制御する事も出来る。

接合材の熱応答を評価する熱負荷試験を行う場合は、電子ビーム電流の立ち上げ、平坦部、そして垂下部からなる台形状のビーム電流波形をプログラムとして使用し、接合部の健全性を評価する繰り返し試験の場合は、上記プログラムを繰り返すシーケンスにして使用する。この場合、各領域の時間間隔は標準的に20秒で一周期は標準で60秒となっている。

本電子源の設備初期においては、熱負荷試験中に電子源内部でアークが時々発生する事があった。それが原因でサージ電圧が発生し、制御回路中のIC（集積回路）がそれによりパンクしてビーム電流の制御が不能になる事が発生した。そこで、サージを発生し易い高圧ケーブルと影響を受け易い信号ケーブルに対してシールド処理を施し、パンクし易いICをサージ耐圧が大きいICへ交換する等の対策をした。その結果、アーク発生に伴って生じた制御系への影響はなくなった。なお、電極間アークの発生は、熱負荷試験中における材料からの放出ガスによる真空度低下と、電子源カソードのコンディショニング不良が原因で生じていた。

## 2. 3 真空容器及び真空排気系

### 真空容器

ACTの真空容器は、厚さが5 mmのSUS304ステンレス鋼で作られた直径80 cm、奥行80 cm、そして体積が約400 Lの太鼓型容器である。その容器にはポート（15ヵ所）が目的に応じて取り付けられている。主要なポートは容器上部に20°で取り付けられている電子源用のポート（8"フランジ）、下部に真空ポンプ用ポート（203φ ICF）、前面にサンプル交換用ポート（520φフランジ）、そして背面にサンプルホルダー用のポート（203φ ICF）がある。この電子源取り付け用と、サンプル交換用のポートはOリング気密のフランジを使用しているが、それ以外のポート部は放出ガス低減の為、メタルフランジであるICFフランジを使用している。なお、Oリング使用のポートは、熱負荷試験中の輻射熱により温度が上昇しないよう銅パイプを取り付け、水により冷却している。サンプル交換用の520φフランジには、熱負荷試験中の接合材を観測する為の覗き窓と、光温度計及び写真撮影用のガラス窓が取り付けられている。なお、窓ガラス部にはX線の漏れを防ぐ為に、7 mm厚さの鉛ガラス円板（2 mm鉛厚さ相当）が取り付けられている。また、容器背面のサンプルホルダー用の203φ ICF上には3系統の冷却パイプが溶接されていて、真空容器内のサンプル、サンプルホルダー、そしてビームリミターの冷却に使用される。

熱負荷試験用の接合材は、図8に示されるように真空容器中央にあるサンプル・ホルダー部に電気的に絶縁した状態で固定されている。なお、このサンプルホルダー部分の冷却は機械冷却水を使って行われ、その冷却水の流速は約2 m/sである。この接合材を絶縁する事は、接合材に入射する電子ビーム電流を測定する事と、ビーム電流を制御するための信号源を得る目的で行われている。この接合体は下記に述べる循環ポンプ系よりの冷却水によって冷却されているが、その冷却水の流速は最大8 m/sである。その接合材の上部には、電子ビームの照射範囲を接合体の中心部に限定し、配管等を保護する為のビームリミター（図9）が取り付けられている。このリミターは、以前使用していた自然冷却方式のカーボンと銅の接続体の物と異なって、強制的に冷却する方式のカーボン複合材とモリブデンの接合体である。そのため、10 MW/m<sup>2</sup>以上の高熱流束下での熱負荷実験でも、カーボン複合材表面の温度は余り高くならない。このリミターは、接合材タイ

ルの中心部に限定して照射するよう30 mm×28 mmの開口部を有する。このビームリミターの冷却水は、接合材の冷却水と同様に循環ポンプ系から給水されていて、その流速は最大12 m/sである。なお、ビーム照射中の接合材の熱負荷Peはシャント抵抗を使って測定した入射電流Ie(A)とビームリミターの開口部面積S(m<sup>2</sup>)より次式のように求める。

$$Pe = Ve \times Ie / S \quad (\text{MW/m}^2)$$

ここで、Veは電子ビームの加速電圧で、ACTの場合はVe=3×10<sup>4</sup> Vである。また、S=8.4×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>であるから、上式は次のようになる。 Pe=35.7×Ie (MW/m<sup>2</sup>)

### 真空排気系

本装置の真空排気系としては、電子源用と真空容器用の2系統がある。電子源は排気速度が170 L/sのTMPと300 L/min. のRP(ロータリーポンプ)の組み合わせにより、差動排気されている。そして、真空容器部は公称300 L/sと520 L/sのTMP、そして450 L/min. のRPの組み合わせにより排気されている。この真空容器の2台のTMPの合成排気速度は計算すると、窒素換算で約550 L/sになる。

真空度の測定は、電子源部と真空容器内のピラニゲージと電離真空計によって行われるが、真空容器内の真空度を正常に測定するために、直接あるいは散乱した電子ビームが電離真空計の検出部に入らないよう前部に金属メッシュを置き、かつ真空容器内を検出部が直接見込めない場所に取り付けている。四重極質量分析器(QMA)の場合も同じく、電子や光が直接検出部に入って異常を生じないよう金属メッシュを取り付けたL型管を使って取り付けている。

### 2. 4 強制冷却用循環ポンプ系

電子ビーム照射時におけるビームリミターと接合材の冷却の為、循環式冷却水ポンプ系を使用している。このポンプ系は、狭い場所での使用と騒音の低下を考慮して、ポンプ自体を貯水タンクの中に格納する内蔵型にした。使用ポンプは市販の強力な水中渦巻型ポンプで、発生圧力と吐き出し量は最大15気圧と250 L/min. である。この水中ポンプは直径75 cmφで深さが120 cmのステンレス製のタンクの内部に50 mmφのパイプで上部フランジに固定され、吊り下げられている。タンクの容量は約500 Lであるが、貯水量は約400 Lである。上部フランジ上には接合材等への各種配管、水圧計、水位計、そして自動バルブが取り付けられている。ポンプを起動すると、まず貯水タンクの内の水を吸い込み、往復約6 mのシンフレックス及びステンレスパイプ(内径約10 mmφ)を通し接合材に圧送する。接合材を冷却した水は戻ってタンク内に溜まる。配管の途中に冷却水の流速を測定する流量計、接合部での水圧を推定するための2個(往復路)の水圧計、及び後述する接合材の熱負荷測定用の△Tが取り付けられている。ポンプの定格出力は7.5 kWであり、そのエネルギーは最終的にはほとんど水に吸収される為、冷却水をポンプで単に循環させていただけでは、接合材からの熱入力が無いとしても、次第に水温は上昇する。その温度上昇は時間当たり約25 °Cになる。熱負荷試験中は更に接合材からの熱入

力があるため、急速にタンク内の温度が上昇する。タンク内の水温は温度計でモニターしていて、設定温度以上になると、安全の為に水ポンプを停止させる。その設定温度は、通常40 °Cに設定されている。そこで、タンク内の水温が上昇しないよう、外部の水道水を約20 L/min. の割合で常時タンク内へ導入し、逆にタンク内の余分な温水を下水に排水している。この装置は水道水の給排水と高流速なポンプ循環水の複雑な経路で構成されている為、熱負荷試験を行っていて一番心配されるのは、パイプの継ぎ目からの漏水である。そこで漏水の危険性がある真空容器の内側の底、ポンプ系の床面、そして貯水タンク上部フランジには漏水検出器を取り付けてある。そして、もし漏水が検出されるとポンプを止めると共に、ポンプ送水口直後と水道水給水口に取り付けてある2台の電動バルブ（コンデンサー充電式）を自動的に閉じ、漏水を最小限に留める。また、電子ビームによる熱負荷試験中にビームリミターや接合材用冷却水の流速が下がったり、ポンプが停止した場合は、接合材の温度が上昇し、接合部が破壊される可能性がある。そこで、冷却水経路中に取り付けてある2台の流量計で流速異常を感知すると、直ちに電子源をOFFする信号を出す回路が取り付けてあり、安全面には十分配慮してある。

## 2. 5 測定系

ACTの測定系は、接合材の特性評価に使用されるものと、装置の安全な運転に必要なものに分けられる。熱負荷試験中における接合材の特性を評価する測定手段として、接合材の表面温度を測定する光温度計、接合部上部及び下部の温度測定用の2ヶ所のシース熱電対、ビーム電流測定用シャント抵抗、真空度測定用真空計、ガス分析用の四重極質量分析器(QMA)が使われている。その他接合材の冷却系では、冷却水の給・排水部に取り付けられている水圧計、温度差から熱負荷を測定する為の $\Delta T$ 、そして流速計がある。

これらの測定器の信号は、一部は絶縁アンプを通り、又一部は直接データ処理装置であるMTD(Multi Task assisted Device)システムによってデータ収集され、その結果はリアルタイムでカラーノートパソコンの画面上に表示される。このMTDシステムはデータ処理を行うだけでなく、安全上必要と思われる測定値、例えば接合材の表面温度、接合材上部の温度、ビーム電流、そして真空度に関しては、上限値を初期設定する事により、インターロックの役割も行えるようになっている。しかし、冷却水流速低下、漏水発生や電子源部の真空度悪化など非常に重要な項目に関しては、安全の為このMTDを介さずに、直接電子源のインターロックとして作用する。次に主要な測定器について詳しく記述する。

### 表面温度計

接合材の熱負荷試験をする場合における材料の表面温度測定は、その材料の熱特性を評価する上で、最も重要な測定項目になる。この温度計は、検出部と信号変換部に分かれています、検出部は真空容器正面の520φフランジ上の窓ガラス用ポートに固定されている。そして、常時接合材の測定面を見込む位置にセットされているので、フランジを

開閉しても熱負荷試験時には位置調整をする事無く測定が行える。そして、この検出器の出力信号はケーブルで信号変換部を経由してMTDシステムに送られる。この温度計の主要な仕様を下の表に示す。

#### 光温度計の仕様

光検出部の型式名	DGS500
信号変換部の型式名	DGS501
温度測定範囲	600~3000°C
検出素子名	シリコンフォトセル
測定波長	0.8~1.1 μm
出力周期	1.7 秒

#### シーズ熱電対

接合材接合部の健全性は、接合部の熱伝導率を測定する事により評価している。その為に平板型(F type)の場合は、図10のA)に示すように接合部を挟むタイル部と銅ブロック領域に横方向から3 mmの間隔で開けてある1 mmφの細孔に、2本のシーズ熱電対を挿入している。しかし、図10のB)のようにモノブロック型の場合は、構造上の理由から縦方向(軸方向)から挿入している1本の熱電対しか使用していない。そのためモノブロック型の場合は、接合部における熱伝導率の評価を行う事が出来ない。それらの熱電対の出力信号ケーブルは、真空導入端子を通して大気の外に出し、絶縁アンプに接続する。この場合、接合材は真空容器から絶縁して取り付けてあるので、この熱電対も真空容器から絶縁した状態で大気中に信号を取り出している。接合材の熱負荷試験中に照射電子ビームが直接このシーズ部に当たったり、当たらなくとも常温度限界近辺で使用すると、溶断して使用不能になる場合があるため、遮蔽や使用時間を短縮する事が必要となる。このシーズ熱電対にはアルメル・クロメル式の低温用と白金・ロジウム熱電対の高温用の2種類があり、目的に応じて使い分ける。これらシーズ熱電対の簡単な仕様を下に示す。

#### 熱電対の仕様

種類	クロメル-アルメル	白金-白金ロジウム
形式名	T35-SK-0.75-C-0.65-G	T35-R-0.25-R-1.5-G
測定常用温度	500°C	1400°C
熱応答時間	0.2 秒以下	0.5 秒以下
シーズ直径	0.65 mm	1.6 mm
シーズ材質	SUS316	白金ロジウム合金
温度接点の構造	接地型(G)	接地型(J)
素線径	>0.07 mm	0.3 mm

### 電子ビーム測定用シャント抵抗

電子ビーム源を正確に制御して、接合材に対し必要な熱負荷を与える為に使われる $0.2\Omega$ の抵抗で、接合材とアース電位のサンプルホルダーとの間に挿入されている。接合材に入射した電子ビームは、そのシャント抵抗にビーム電流に比例した電位差を生じるので、その電圧をケーブルで導入端子を使って大気中に引き出し、絶縁アンプを通してMTDシステムに入力する。このシャント抵抗を使っての接合材入射電流により電子源を制御する方法は、当初行っていた全電子ビーム電流により制御する方式に比較して、真空間度の変化に影響されず、接合材に正確な熱負荷を与える事が出来る。なお、このシャント抵抗を真空容器中取り付けておくと、ビームの影響を受ける可能性あるし、又抵抗値を変更する場合の容易さを考えて同軸ケーブルを使い大気中に取り出している。

### 各種の真空計

ACTの真空計は電子源部と真空容器部用に分かれている。前者には電離真空計(IG1)が電子源のインターロックとして使われていて、その動作設定真空間度は、 $5 \times 10^{-5}$  Torrとなっている。それ故、接合材に対し熱負荷試験中に電子源部の真空間度がその値をオーバーすると、電子源はOFFされる。真空容器部には低真空間度測定用にピラニ・ゲージ(PG)が、又高真空間度用にはヌードタイプで自動レンジの電離真空計(IG2)が、そしてガス分析用には、四重極質量分析器(QMA)が使われている。このIG2の信号は熱負荷試験中の真空間度として、MTDシステムにデータ収集される。ここで、IG2とQMAの場合、熱負荷試験中に発生する電子や光が直接検出部に入り、それらの測定器が正常に動作しない事があるので、L型管を使い、その中に金属メッシュを挿入して取り付けている。

### 温度差変換器 $\Delta T$

熱負荷試験中に於ける接合材の熱負荷を正確に測定する為の測定器で、図1-1に示すように接合材用冷却水の給排水口に取り付けて使う。これを使って接合材用の冷却水の入口と出口に於ける温度差を、 $\Delta T$ 本体に組み込まれている10対の熱電対で正確に測定して、その温度差 $dT$ 、冷却水の流量 $V_w$ (cc/s)から接合材に入射した熱量を式(4)のように $Le$ を計算する。ここで、図1-2に繰り返し熱負荷試験を行っている場合の $\Delta T$ からの信号出力を示す。この図から得られた振幅電圧 $\Delta E$ から $dT$ を求めるが、熱電対の出力電圧は非直線特性なため、温度差 $dT$ を単純には算出来ず、8次の多項式を使って補正して出す。

$$Le = 4.19 \cdot dT \cdot V_w \quad (\text{W})$$

上の式から接合材での熱負荷値 $Pe$ (MW/m<sup>2</sup>)を求めるには、ビームリミターの面積 $S$ (m<sup>2</sup>)で割って、  
$$Pe = 4.19 \times 10^{-6} \cdot dT \cdot V_w / S \quad (\text{MW/m}^2)$$

次に、この $\Delta T$ の特性を下に列挙する。

感度 : 0.40 mV/K

測定精度 : ±0.04 K

耐圧 : ~1500 psi

応答時間 : < 0.5 sec

最高使用温度：125°C (320°Cまで製造可能)

なお、この $\Delta T$ は水路内に沢山の熱電対を取り付けてあるので、冷却水に対してコンダクタンスが小さく、 $\Delta T$ を取り付けると結果的に冷却水の流速が20%程下がってしまう。そこで、通常は $\Delta T$ を取り付けずにおき、接合材入射電流法の感度校正を行う際に取り付けるようにしている。

## 2. 6 データ処理用MTDシステム

このMTDシステムは、熱負荷試験中の接合材のデータを収集し、解析画面上にその結果を表示する事と異常が生じた場合、即座に電子源を止め、安全を確保する二つの働きをする。主要な構成は図13のブロック図に示すようにノート型パソコンを本体として絶縁アンプ、各種測定器、そしてインターフェイスからなる。光温度計で計測した表面温度と2組の熱電対で測定した接合部の温度、そしてシャント抵抗で測定したビーム電流の各信号は絶縁アンプを通して、又、IG2とQMAの信号は直接パソコンのインターフェイス(IF)内のA/Dコンバータに入力され、パソコンで処理される。絶縁アンプは、電位が異なる各信号のアースを共通にする為と、出力電圧が小さい信号を増幅してS/Nを良くする2つの目的の為に使われている。各絶縁アンプの絶縁耐圧は、2000Vと高い値を有しているが、これは熱負荷試験中に熱電対等にアークが飛んだ場合、A/Dコンバータ内の耐圧の低いIC類に被害が及ばないようにする為である。絶縁アンプの増幅度は1, 10, 100倍を選択出来るようになっていて、信号電圧が比較的高い表面温度の信号は増幅率が1、信号電圧の低い熱電対とビーム電流の信号は、100倍の増幅率が使われる。ここで使用するパソコン用インターフェイス(CONTEC製ADA12-8/2)は12bitの分解能を持つ8チャンネル(差動増幅の場合は4チャンネル)のA/Dコンバーターと2チャンネルのD/Aコンバータを積載した混載型ボードで、リレーボード(CONTEC製RRY-16)と共に、ノート型パソコンの外付けI/O拡張ボードケースに挿入して使われる。ここで、D/Aコンバータとリレー・ボードはQMAのマス(質量)制御と感度制御に使われる。ビーム電流の信号は、絶縁増幅されパソコンで処理されると共に、自動制御の場合は電子ビーム電流を制御するプログラム・コントローラの為の帰還信号としても使われる。

A/Dコンバータを通してのデータ収集と計算処理、そして画面表示の為にコンパクトで高機能なノート型カラーパソコン(NEC製9801NC)が使われている。このパソコンは32bitのSX386のCPUを使い、クロック周波数が20MHzで小型ながらデスクトップパソコンに負けない性能を有する。データ処理の為のプログラムは、作成や修正等のし易さからベーシック言語構成されているが、この事によって処理速度の遅さが問題になる事はない。使用するプログラムによって、熱負荷試験中の表示は異なるが、繰り返し熱負荷試験用のプログラム(MTD60-15Q)の場合は、光温度計、2種類の熱電対、ビーム電流、そして真空度の時間変化が1秒周期のリアルタイムで、カラー液晶画面上に表示される。この場合、上段には前回の試験結果である平均値と最高値が同時に表示される。繰り返し

試験が終了するとショット回数と各測定値の平均値、あるいは最高値の関係のグラフも表示させる事が出来る。又、1ショット用で熱応答特性を測定する為のプログラム(MTD14G)の場合は、各種の温度の時間変化ばかりでなく、試験中に接合材から発生するガスの分析を行い、任意の6種類のガス成分の時間変化をリアルタイムで液晶画面に表示する。更にガス分析においてはM/e=1~45の全ての質量についてデータを記録しているので、他に表示を希望するガス成分があれば、測定終了後に表示出来る。なお、本パソコンはノート型ではあるが7色を使ってカラー表示するので、測定項目ごとあるいはガス成分毎に色を変えて表示すれば、各グラフの変化が良く識別できる。

測定終了後、収集したデータはユーザーズメモリであるRAMメモリより200 MBのハードディスクあるいはフロッピーディスクにコピーされる。これらメモリしたデータは必要に応じて再現モードで画面に表示出来るし、レーザープリンタや多色プロッタ(グラフテック製MP-2000)にそれらの波形を出力する事が出来る。

## 2. 7 インターロック系及び装置監視用ポケットベルモニターシステム

### インターロック系

接合材接合部の健全性評価のため、各試料について数千回に及ぶ繰り返し熱負荷試験を行うが、この場合昼夜兼行で行ったとしても数日かかる。このように長時間の試験を行う場合、常に人間が付き添って試験状態を監視するのは困難である。そこで、夜間は勿論の事、日中でも必要に応じては無人の状態において、熱負荷試験を行う場合もでてくる。しかし、このACTを使っての熱負荷試験は、大電力と高流速の冷却水を大量に使用するため、無人状態での火災、漏水そして接合材破壊の危険性がある。そのため、それらの危険性を防止するようソフトとハードの面で、幾つかの安全対策がなされている。装置及び接合材の安全を確保する為のインターロック系は、大きく別けて電子源を保護する、試験用接合材を保護する、そして冷却用循環ポンプに関連する3つの系統に分けられる。

#### ①電子源を保護するもの

電子源の保護動作は、基本的には電子源の制御部自身が持つインターロック系によって行われる。この保護動作には電子源用電源(フィラメント、ボンバード、高圧の各電源)をOFFする場合と、電子源部のバルブを閉める場合がある。前者の条件はバルブの閉の状態、真空度の異常、電子源電極温度異常、ビーム電流異常、変圧器オイル温度異常、制御回路異常、そして外部インターロック入力ON信号等である。この外部インターロック入力の要素としては、パソコンよりの接合材各部(表面、接合部上部及び下部)の温度異常、真空度異常信号の他、パソコンを経由しない循環ポンプ系よりの冷却水流速低下と、メーターリレーによるビーム電流異常信号がある。このようなパソコンを通さないで直接ハード的に作用する系統は、時間的な遅れも少ないので、確実に動作する点で重要である。なお、真空度異常やビーム電流の異常については2系統以上のインターロック

が動作するようになっているが、各々の動作範囲及び目的は異なっている。

### ②接合材を保護するもの

接合材の熱負荷試験を行っている場合に心配される事は、冷却水の停止、流速低下、ビーム電流の制御異常等により接合材の表面及び接合部の温度上昇である。温度上昇によって接合材表面が蒸発したり、接合部が劣化する。もし、この場合、人間が配置されている場合は、その異常に気づき直ちに電源をOFFする事も可能である。しかし、無人の場合はそれが不可能で、最悪の場合はバーンアウトにより、冷却用銅パイプが破壊する事態にもなる。そして冷却水が真空容器内に漏れだし、真空ポンプ系などに重大な影響を与える可能性がある。そのような事態を防ぐため幾つかのインター・ロックが取り付けられている。

接合材の表面は光温度計により、接合部上下部は熱電対により測定しているが、それらの値が予め設定した警報値をオーバーした場合は、パソコンはリレー・ボードを介して電子源の電源をOFFする。又、接合材冷却用の冷却水配管の途中には流量計が取り付けられていて、冷却水の流速が設定値以下になるとメーター・リレーを介して即座に電子源の電源をOFFする。これらの対策によって接合部の劣化を防止すると共に、冷却パイプの損傷も防止する。

### ③循環ポンプの保護及び漏水の防止

冷却用循環ポンプは出力が大きいため、接合材に熱入力が無い場合でも水温は上昇し、もし外部からの冷却水の注入が無いと2-3時間で50°Cを越える。このポンプは元来常温仕様(0~42°C)なので、このように高い温度で長時間運転していると故障する可能性がある。そこで、冷却水タンク内に温度センサーを入れ、その温度がある温度(40°C)以上になると、ポンプを自動的に停止するようにしている。

この循環ポンプ系は水道水を使った2次冷却水と、接合材を直接冷却する1次冷却水が混在し、それらが複雑に配管で結ばれている為、冷却水が漏れ出す可能性のある場所が多い。そのため、水漏れの可能性が大きい配管が密集している水タンクの上部フランジ、タンク設置場所の床面、真空容器内底部、そして水道水吸水口付近の4ヵ所に並行銅線からなる漏水検出器を取り付け、もし水分を検出するとリレーが動作して、直ちに循環ポンプを停止すると共に、冷却水発送口と水道水取り入れ口に取り付けてある自動バルブを閉める。このバルブはモーターを使って開閉する方式で、平常時に電気をコンデンサーに充電しているので停電時にも動作する。

### ポケットベル・モニターシステム

A C T (SUTも含む) の状況を監視し、もし異常が発生したら、NTTの電話回線を使って自動的にポケットベルに通報するポケットベルモニターシステムが設備されている。このシステムは図14に示すように装置の異常を検出する検出部、その情報を接点信号に変換するインターフェイス、既存の電話回線にその情報を入力する本体、そして可搬型の和文表示用ポケットベルからなる。登録出来る通報項目は最大5項目であるが、

その登録項目として現在、下記の内容の項目が設定されていて、異常が発生すれば東海3県内のほぼ全域で、その異常発生を瞬時に知る事が出来き、適切な処理を行う事が出来る。ACTが設置されている土岐地区は、停電や断水の起こる確率が高いので、装置及び接合材の保護の面から、このシステムの持つ利点は大きい。なお、このシステム本体の電話回線への取り付けは、従来使用していた電話回線（内外線を問わず）に付属しているモジュラープラグを差し込むだけで終了する。又、電話機のモジュラープラグをシステム本体のモジュラーソケットに取り付けるだけで、電話機も従来通り使用出来る。しかし、電話中に異常事態が発生した場合は、電話が終了してから異常信号を発信するようになっているので、長時間の電話をかける場合は注意が必要である。

#### ポケットヘルモニターシステムの監視する異常項目

1. 100Vまたは200Vの停電
2. 機械冷却水の断水
3. 室温異常(>35°C)
4. ACT運転停止
5. SUTジボランガス漏れ

この他に毎日正午に動作確認の為の信号が発信される。

### 3章 ACTの操作・運転方法

#### 3. 1 はじめに

ACTは2章で記述したように、色々な機器から構成されているので、操作方法は複雑である。主要な点に関してはインターロックが取り付けられていて安全が確保されているが、インターロックがない操作もあるので、正しい操作を行わないと、機器あるいは照射試料に大きなダメージを与える可能性もある。このACTの操作・運転上で特に注意を要するポイントを列記すると、

- ①冷却水関連のバルブ操作（接合材、電子源電極、変圧器等の温度上昇）
- ②電子源部のバルブ開閉（フィラメントの断線、ターボポンプの故障に関連）
- ③64ステップコントローラの操作（正常でないビーム照射位置は接合材や容器を破損）
- ④真空容器大気開放の操作（フィラメントの断線やターボポンプの破壊を招く）
- ⑤電子ビーム電流の手動制御操作（過電流により接合材を破壊）
- ⑥繰り返し熱負荷試験時の制御板におけるリモート・内部制御の切り替え操作
- ⑦その他として、接合材の冷却水配管と固定（水漏れ、絶縁不良、ホルダーの損傷）等がある。

なお、電子源の操作方法に関しては、電子源取り扱い説明書に詳しく解説されているので説明は簡単にしてある。

### 3. 2 接合材の取り付け

先ず、作業性を良くする為冷却式ビーム・リミターをはずす。そして、接合材を上面が水平になるようにして真空容器中サンプルホルダーの所定の場所にセットし、スエージロック継ぎ手 (M12) を使って往復路2本の冷却パイプを取り付ける。この場合、袋ナットはスパナでしっかりと締めておかないと、後で水漏れの原因となる。次にビームリミターの開口部と接合材の中心部が一致するようにして、ビームリミターを取り付ける。これらの作業の後、循環ポンプを数分間程度動作させ、ビームリミター及び接合材の接続部から水漏れがない事を確認する。その後、接合材の接合部上下（ただし、モノブロック型では上のみ）にある1 mmφの細孔にシース熱電対を奥まできっちりと挿入する。そして、電流検出用シャント抵抗は外した状態で、テスター等を使って接合材と容器の間の絶縁を確認する。この場合、抵抗が数 kΩ以上あれば正常で、ゼロに近い場合はどこかで短絡している。その短絡している可能性のある場所としては、接合材の金具とサンプルホルダーの間、絶縁冷却パイプ（シンフレックスチューブ）をビームから保護する為に使われている銅板カバーと継ぎ手の間、そして熱電対の出力ケーブルと真空容器の間である。なお、短絡したままで自動制御により運転すると、ビーム電流の検出が出来ないため、過大なビーム電流が接合材に流れる恐れがある。

### 3. 3 真空排気

電子源にはシャッターバルブが取り付けられているので、真空容器側が大気開放になっていても、電子源部は真空状態に保つ事が出来る。そのため電子源部は真空容器を大気開放している場合でも予め、あるいは常時真空排気しておく。これは電子源の電極に不純物を出来るだけ付着させない為に必要である。接合材の取り付けが終了すると、真空容器正面の大フランジを閉じ、フランジ周辺にX線漏れ防止用の銅板（50 mm幅）を巻く。そして、3個のクランプを使って強く締めつける。このクランプの締付けが足りないと空気がリークして、排気が進行しない事がある（特に蝶つがい近くのクランプ）。容器背面のリーク弁を閉めた後、真空容器用のロータリーポンプをONする。ピラニゲージで観測すると、排気開始後約10分で真空度は1 Torr程度に達するので、真空容器用の2台のターボ分子ポンプ(TMP)をONする。

TMPを運転開始後、約10分でポンプの回転速度は、ほぼトップスピードに達する。その後に電離真空計を動作させて真空度を測定するが、真空度の変化は接合材や真空容器の状態で大きく変化する。しかし、あまり真空度の向上が見られない場合は、リーク弁が閉まっていないか、冷却水が継ぎ手から漏れている可能性がある。水漏れがある場合は冷却水循環ポンプを動作させると、真空度が急速に悪化する。この場合はポンプを停止して、真空容器背面のリーク用バルブを使って大気開放し、接合材の冷却水用継ぎ手の増し締めをもう一度する必要がある。

### 3. 4 電子ビームの発生

真空容器及び電子源部の真空度が共に $5 \times 10^{-5}$  Torr より良くなつた場合、電子ビーム発生を行う事が出来る。準備段階での操作順を列記する。

- ①空中に突き出た配電盤中の電子源の主電源用交流3相440VのNFBをON
- ②電子源の制御盤背面にある主NFBをON、次に前面にある操作系NFBをON
- ③電子源電極、変圧器、そして真空容器とサンプルホルダー用冷却水バルブ（通用口近くの壁側）を給水、排水バルブを全開。又循環ポンプ用水道水バルブを開く
- ④オイルクーラーのNFB（真空容器背面の下側左端）をON
- ⑤真空容器と電子源の真空度を確認の上、電子源部のバルブ用スイッチ（真空容器背面下側の左より2番目）をON
- ⑥循環ポンプ関連のスイッチを全てONし、冷却水用ポンプを動作させる。冷却水試験用接合材とビームリミターを流れると、ラックパネルのデジタル式流量計のパネルが流量を表示し、冷却パイプに取り付けてある2個のアナログ型圧力計が水圧を表示する。

#### ⑦64ステップコントローラーの調整

このコントローラーは、電子銃のレンズ電流及びビーム偏向コイル電流を制御する為に使用されるもので、これを調整して必要な場所に必要な広さのビーム照射領域を決める。しかし、最初に一度設定してパラメータをラムメモリに記録すると、毎回設定する必要は無い。まず、最初の状態はMODE SELECT 内のLOCK用赤ランプが点滅しているから従来のパラメータを使う場合は、RAM RUN スイッチを押してENTER キーを押す。これによってRAM にメモリされている内容で電子ビームの制御が行われる。ビームの照射位置や面積を変更する場合は、

ADDRESSで変更箇所を指定し、DATAキーにより新しい値を入力する。

ADDRESSとDATAの選択は数値キーの下側にあるD/A キーを押す事により交互に選択可能となる。なお、X, Y 方向とは真空容器正面に向かって各々横方向と前後方向で、X の値が大きくなるに従い、電子ビームの中心は右方向へ、又Y の値が大きくなるに従い奥側に移動する。各項目や他の詳しい説明に関しては省略しているので、必要な場合は電子源の取扱い説明書の64ステップコントローラーの項を参照する必要がある。

#### ⑧電子ビーム発生の準備

- \* フィラメント電流制御の確認
- \* ボンバードによるコンディショニング
- \* 加速電圧の確認

#### ⑨電子ビーム発生

##### 手動制御の場合

電子ビームを実際に発生する前に、目的とする場所に電子ビームがセットされているか、64ステップコントローラーパネルの各数値を確認する。又、ビームを発生させた場合でも最初は安全のため、照射場所が確認出来る程度の弱いビーム電流に抑える事。

\* OFFの状態でBOM ONを押すと、BOM ON ランプが点灯しBOMBARD VOLTAGE メータが0.7kVを指示したら、ACC ON スイッチを押す。この操作によりAVメータが30kVを指示する。

\*その後、少し間（10秒程度）を置いてFIL ONスイッチを押すと、CURRENT CONTROLのEMISSIONランプが点灯し、エミッション電流制御状態になる。もし、間を置かないすぐに押すと、FIL ALARMが点灯し、OFF状態になる為、再びBOM ONから始める必要がある。

\* CURRENT CONTROL ツマミ（密）を徐々に時計方向に回していく。すると最初にフィラメント電流が30A近く流れ、次にボンバード電流が流れ始める。ボンバード電流が流れ始めると、EMISSIONメータが振れてビーム電流も流れ始める。しかし、ツマミを回し初めてからビーム電流が流れ始めるまでかなり時間がかかる（～30秒）ので、急激にはツマミを回さないよう気をつける必要がある。ビーム電流が流れ始めたら流れ過ぎに気を付けて、所定の電流に粗と密のツマミを使い分けて調整する。ビーム電流が少ない間は比較的電流は安定しているが、電流が増加するに従い、不安定になるので常時ツマミを回しながら調整する事が必要になる。これは試料等からの放出ガスにより、真空度が高くなる為電子源でのビーム発生が不安定になる事に起因する。なお、ビーム電流が1A以下の時はメーターレンジが1Aで、1Aを越すと自動的にレンジは4Aに切り変わる。

なお、このモードではREMOTE スイッチがOFFなので、コンピュータで行う接合材の温度異常、真空度異常、そしてメーターリレーで行う電流異常に関する各インターロックは、動作しないので注意が必要である。

#### 自動制御の場合

\* 操作パネルのREMOTEスイッチをONに、そしてCURRENT CONTROL のスイッチをEXT側に倒し、緑色のカバーをしてあるプログラム・コントローラー(PC)のスイッチをONする。次に操作盤上ではなくPCの前面にあるBOM, HV, そしてFILの各スイッチを順に押して電子源を動作状態にする。

\* デジタルプログラムコントローラー(DPC)のPTNを希望するパターンに変更し、プログラムのスタートスイッチであるRUNスイッチを押す。

プログラムがスタートして電子ビームが流れ始めると、パソコン上に測定用画面が現れ、表面温度、接合材上下部の温度など測定データが、その画面上にプロットされる。そして繰返し熱負荷試験の場合は1分、応答試験用の場合は約4分で一回の測定は終了し、画面は新たにセットされる。この自動制御の場合は表面温度、接合部上下部、真空度、そしてビーム電流に関して初期画面で上限を設定出来、その値を測定値がオーバーすると、リレーボードを通して電子源の電源をOFFする事が可能になる。しかし、この場合でも電子源のコントロール盤上のREMOTEスイッチをONしていないと自動的にはOFF出来ない。ビーム電流が発振したり時間遅れが生じる等プログラム通りに流れない場合は、PIDの選択が不適切であるからMODE3で適切な値を選択する。又プログラムの偏向は、MODE2画面で行う。

## 4章 ACTの各種特性

### 4. 1 真空排気特性

ACTでの接合材等に対する熱負荷試験を行う場合、真空容器の真空排気特性は測定の精度に影響を与えるばかりでなく、電子ビーム電流の制御や電子源の電極の絶縁破壊にも関係する重要な要素である。又、照射サンプルの取り替えを頻繁に行う場合、真空排気時間が長い事は実験の効率の上からも問題となる。

ACT真空容器の真空排気系の実行排気速度は、計算では550 L/sとなる。そして、真空容器の体積及び内側表面積は約400 Lと32,000 cm<sup>2</sup>である。真空容器内には試験用の接合材がセットされ真空排気されるが、この場合のロータリーポンプをONしてからの真空排気曲線は図15に示される。ここで、実線と点線は接合材を初めて装着した場合と充分に枯れた接合材を取り付けた状態での真空排気特性である。なお、真空度が1 Torrに達した時点でターボ分子ポンプを動作させた。この図から真空度が $5 \times 10^{-5}$  Torr及び $1 \times 10^{-5}$  Torrに達する時間は約50分と4時間で、初めて使用する接合材の場合の方が多少長くかかるが、大きな差は無かった。このように排気時間が長くかかる原因を調べるために、QMAを使って、真空度が $2 \times 10^{-5}$  Torrの時における残留ガス分析を行った。その結果を図16に示すが、水(M/e=18)のピークが圧倒的に大きく、他には水素(2)と炭酸ガス(28)のピークが観測される。酸素(32)のピークも観測されるが、僅かなため空気のリークが特に真空度に影響を与える事はない。そこで、原因を考えると、①サンプル交換用16"フランジに大口径のゴム製オーリング(直径が480 mmで、表面積が512 cm<sup>2</sup>)が、そして真空容器に接続されている電子源は、小口径であるが数多くのオーリングを使用している事、②接合材を絶縁するため、真空容器内の一部にビニール系の材料を使用している事が考えられる。しかし、最も大きな原因是、容器の体積の大きさに比較して、真空排気ポンプの排気速度が小さい事で、通常この大きさの真空容器には、1000 L/s以上の排気速度を有するポンプが使用される。

真空容器の到達真空度は約 $2 \times 10^{-6}$  Torrであるが、そこまで達するのは時間がかかるので、通常は $5 \times 10^{-5}$  Torr以下になったなら熱負荷試験を行うようにしている。

### 4. 2 漏洩X線特性

ACTは電子ビームの発生エネルギーが30keVと低い事、真空容器は5 mm厚さのSUS板で製作されている事、そしてガラス窓は鉛ガラスで覆っているため、外部に漏洩するX線の量は極めて少なく、法律で定める規制の対象装置にはなっていない。ACTからの漏洩X線が問題ないレベルである事は、熱負荷試験を行う以前の1991年の6,7月の2回に渡って、核融合科学研究所安全管理センター（大林センター長、佐久間助教授、山西助手、小平技官）の協力のもとに行われた測定作業と、その後のビーム照射実験で確認された。ここでは、その時の測定結果について簡単に記述する。

測定用機器としてはG-M式計数管、DBM式NaIシンチレーション計数管、電離箱式サーべ

イメータ、TLD(Thermo-Luminescence Dosimeter)、そしてポケット線量計が使用された。ここで、DBMとはNaIが持つ測定感度のエネルギー依存性を解消する目的で使用される感度補正回路である。

#### A C T表面上での漏洩X線測定

A C Tのサンプルホルダー上のグラファイト材に100-700 mAの電子ビームを照射し、A C Tの真空容器表面数カ所の漏洩放射線量を、G-M式計数管と電離箱式サーベイメータにより測定した。しかし、測定の結果バックグランド内の値( $<0.1 \mu\text{Sv}/\text{H}$ )であり、A C Tからの漏洩放射線はないと結論した。

なお、核融合研の内規（名大の内規に準ずる）では装置表面での漏洩X線量が、法律で定められた値の1/3である $100 \mu\text{Sv}/\text{week}$ を越える場合には、放射線発生装置として管理する事にしている。A C Tの運転時間は最大でも週20時間であるが、1週間連続的に運転すると仮定すると、その限界値は $0.6 \mu\text{Sv}/\text{H}$ に相当する。また、一方において装置の表面から10cm離れた場所での漏洩X線量を $0.6 \mu\text{Sv}/\text{H}$ 以内と法律は定めている。

#### 強制的に漏洩させてのX線測定

①図17のA)部のように、真空容器上面に取り付けている真空導入端子のセラミック部には、X線遮蔽の為に1 mm厚さの鉛板カバーが取り付けられている。今回は、その鉛板の厚さを変えて、電子ビーム電流と漏洩X線量の関係を電離箱サーベイメーターを使って測定した。その結果を図18に示している。1 mm厚さの鉛板を用い、電子ビーム電流を0から700 mAまで増加させた場合、漏洩X線量はバックグランド以内の値で特に変化がなかった。しかし、鉛板を0.3 mmに交換すると、ビーム電流と共に漏洩X線量はほぼ比例して増加する。又、鉛板を撤去すると、漏洩量は0.3 mmの時に比べて倍程度で、やはりビーム電流に比例して増加している。そしてビーム電流が500 mAになると、 $10 \mu\text{Sv}/\text{H}$ に達する。このように厚さが1 mmの場合と0.3 mm、そして鉛板なしの場合とで大きな差が生ずるのは、30 keVのエネルギーを持つX線の鉛中での飛程が約0.3 mmである事に起因する。

②メタルパッキングを使っているICFフランジ等と異なって、Oリング式のフランジでは特殊な遮蔽構造にしないと、フランジ間に挟まれたOリングを抜けてフランジの外周から一次や二次X線が漏洩する。そのため、図17のB)部に示すようにA C Tの大フランジの外周にはX線漏れ防止の為、厚さが1 mmの銅板を巻き付けている。今回は、その銅板を除去した状態で、接合材に繰り返し熱負荷試験を行った場合どの程度X線が漏洩するか、外周上にポケット線量計を取り付けて測定した。照射サンプルとしては、グラファイトをタイル材とした平板型の接合材を使用し、それに $6.5 \text{ MW}/\text{m}^2$ の熱負荷で100回の繰り返し試験を行った。この場合、全電子ビーム電流は400 mAで、ビーム出力では12 kWに相当する。この時測定したX線の集積線量値は12 mRで、照射時間から計算すると $110 \mu\text{Sv}/\text{H}$ にもなり、 $0.6 \mu\text{Sv}/\text{H}$ の限界値を遙かにオーバーしてしまう。しかし、その外周に銅板を取り付けると測定限界値以下となり、漏洩X線は発生しない。

以上の結果から、導入端子のセラミック部やOリング式フランジなど裸の状態ではX線が漏洩する可能性のある部位であっても、厚さが1 mm程度以上の鉛板や銅板で必ずカバーしておけば、X線の漏洩は発生しない。従って、カバーを付けた状態のACTは、核融合科学研究所の放射線発性装置には該当しない事が確認された。

#### 4. 3 電子ビームの特性

##### ビームリミターの透過特性

全電子ビーム電流に対するビームリミターを透過して試験用サンプルに入射するビーム電流値の比（透過率）は、真空容器中の真空度や電子ビーム電流値によって変化する。それは真空度やビーム電流が電子ビームの収束性に大きく影響を与えるためである。現在のように試験用サンプルに入射するビーム電流を直接測定し、その値で電子源を制御する場合は、その透過率の変化は余り問題にならない。しかし、ACTを設置した当初のように（現在でも手動制御の場合）電子源の全放出ビーム電流を付属の電流メーターで読み取り、かつその値を使って電子源を制御する場合、その透過率の変化は非常に大きな問題になる。そこで、ここでは透過率が真空度とビーム電流によって、どのように変化するか測定してみた。まず、ビームリミターを通過したビーム電流を一定にするような電子源の制御方式にする。この状態でその全ビーム電流と、ビームリミターを透過して試験材料に入るビーム電流を真空度を変化させながら測定する。ここで、真空度は、ニードルバルブを使って窒素ガスを真空容器内に導入する事により変化させた。また、2系統のビーム電流と真空度の値はMTDシステムによって測定・記録した。そして、電子ビームのサイズを決める $X_{amp}$ 及び $Y_{amp}$ は24に設定した。図19は電子ビーム電流をパラメータにした電子ビームの透過特性を示している。図からわかるようにビームの透過度は、明らかに真空度に依存していて、真空度の向上と共に透過率も向上している。特にビーム電流が180 mAの場合、真空度が $1 \times 10^{-3}$  Torrから $1 \times 10^{-6}$  Torrまで変化する間に、ビームの透過率は約3%増加している。このようにビームの透過比が真空度のよって変化するのは次の理由によると思われる。容器内の真空度が悪い場合は、電子ビームが中性粒子との衝突で散乱し、ビームが拡散してしまうのに対し、真空度が良い場合はその衝突が少ない為ビームの収束性が向上する。この事から全電子ビーム電流による電子源の制御の場合は、真空度を一定にした状態で熱負荷試験を行わないと、正確な試験が行われない事がわかる。事実、全電子ビーム電流制御方によって接合材に対し繰り返し熱負荷試験を行った場合、電子ビーム電流を一定に保っているのに、真空度が変化したため徐々に熱負荷が変わり、結果的に接合部表面温度が大幅に変化した。そのため試験中に生じた表面の温度変化が、熱負荷の変化によるものか、接合部の劣化によるものか区別がつかなかった。その反省から、電子ビームの制御方式を真空度の影響を受けない現在の接合材入射電流によって行う方式に変更した。

次に電子ビーム電流がビームの透過率に与える影響を真空度を一定に保った状態で測定

し、その結果を図20に示す。その図では、全電子ビーム電流に対するビーム電流の透過率を示している。この図ではビーム電流が少ない100 mAの場合、0.38と透過率が低く、電流が大きい600 mAの場合は0.45と、ビーム電流の増加と共に透過率は徐々に高くなっている。

#### ビームリミターを通過した試験材料上における電子ビーム電流密度分布

通常材料に対する熱負荷試験を行う場合、2章で述べたようにビームの照射面積を制限する為の開口部(28×30 mm)がある強制冷却式のMo-C接合ビームリミターを使う。この開口部を通過して、接合材に照射されたビーム電流値を、溝の面積で割った値が熱負荷の値になる。このビームリミターを使った場合の接合材表面での電流密度分布を、図21に64ステップ<sup>o</sup>コントローラーのXampとYampの値を変数として示している。このXampとYampは電子源の照射ビームの面積を決めるパラメーターで、その値が大きい程ビームのサイズは大きくなる。図からわかるようにXampとYampが小さいと、ビームの分布は中心が電流密度が高く、周辺が低い形状をしている。反面、大きくすると、ビーム電流の一様性は向上する。しかし、XampとYampの値をあまり大きくすると、ビームリミターに入射するビーム電流の割合が増加して、ビームリミターの熱負荷が増大する。この場合ビームリミターの温度が上昇し、最終的には接合部が剥離する。そのため、ビーム電流の一様性を犠牲にして、XampとYampの値としては24の値を使用している。ただ、実際のダイバータ板に入射するプラズマの場合の密度分布は、一様ではなくむしろXa=17, Ya=22の場合のようにガウシアン分布に近いので、熱負荷の模擬を行う場合どのような密度分布が適切か充分な検討が必要である。

## 5章 特性評価用の接合材料と熱負荷試験

### 5. 1 接合材の種類

ダイバータ板の接合材としては、大きく分けて蝶付けによりタイルと、冷却部を接合する接合材とボルト等を使って機械的に接合する接合材がある。前者は接合部の熱伝導率が高く、冷却効率が高いという利点があるが、製作費が高くつく事と、タイルが破損してもタイルだけを交換修理する事が出来ないと言う不利な点がある。それに対し、機械的接合材はタイルの交換が容易であるし、製作費も大幅に安い。しかし、接合部の熱抵抗が高いため冷却効率は蝶付け接合材に比較すると大幅に悪いとされる。そのため熱負荷が比較的低い場合は機械的接合材を使い、熱負荷が大きい場合は蝶付け接合材を利用する。しかしながら機械的接合材であっても接合方法の最適化によっては、LHDのダイバータ板のように10 MW/m<sup>2</sup>程度の高熱負荷でも使用できる可能性があり、現在蝶付け接合材の開発・研究と平行して、その点の開発・研究もしている。

ダイバータ板の開発・研究用に使っている蝶付け接合材には各種の形式があるが、大きく分類すると、図22及び下に挙げるよう3種類に分類される。

①平板型接合材(F type)・・・冷却パイプを持つ銅ブロックの上にグラファイトあるいは

- はカーボタイルを蝶材で接合した形式
- ②モノブロック型接合材(M type)・・・グラファイトあるいはカーボンの角柱の中心に冷却パイプを蝶材で接合した形式
- ③サドル型接合材(S type)・・・冷却パイプを挟んで上側にタイル材、そして下側に銅材又はタイル材を接合した構造で、上下で分割出来るようにしてある。

なお、上記3種類の接合材を表す記号として、使用タイルの材質を示すCC(carbon carbon composite), IG(graphite)と共に ①はF/CC, F/IG、②はM/CC, M/IG、そして③はS/CC, S/IGを使う。しかし、同じ種類の接合材であっても、製造メーカーによって形状や使用材料、処理条件等が異なり、その結果として熱特性も各々異っている。その意味で細かな分類分けをすれば、核融合研において現在熱負荷試験の為に用意されている4蝶付け接合材の種類は、表2に示すように16種類で計36個になる。この内29個に関しては何らかの熱負荷試験を行っている接合材である。なお、この中には最近注目されている表面にB4C処理した接合材も含まれている。

次に機械的接合材の場合、接合部での熱伝導率が蝶付け方式の接合材に比較して、低い値しか得られないという欠点はあるが、利点もいくつかあるので、蝶付け接合材の開発・研究に平行して、機械的接合材の試作・開発も開始した。今までに試作した機械的接合材は4種類、そしてアイディアの段階での接合材が3種類であり、それらの構造は図23に示される。その中でA)の接合材は機械的接合材としては最も構造が簡単である。それに対し、B)-D)の接合材は、構造が少し複雑である。これは接合部での熱伝導率の低い点をカバーする為に接合部の面積を出来るだけ増やす為に考えられている。そのためA)に比較してB)-D)の場合は、接合部面積で約2倍大きい。D)の接合材は接合部の面積だけでなく、タイルの面積もほぼ2倍にして、こう熱流束に対しても使用できるように考えて試作された。一方、B)とC)の接合材ではタイル材を側面のボルトによって取り付けているため、接合材を多数並列配列した場合にタイル材の交換が出来ないという問題がある。しかし、A)とD)の場合は並列配置した場合でも支障無く、タイル材の交換が出来る。また、B)は接合部中心部の熱抵抗が大きいので、その抵抗を下げる目的でC)が考案されている。これらの他に、E)-G)の接合材は試作していないが、今後それらに関しても検討及び試作を通じて評価していく。

## 5. 2 高熱流束負荷試験

次に、これらの接合材に対し行った熱負荷試験について簡単に記述する。ACTを使って各種接合材に対し、LHDのダイバータの最高熱負荷である $10 \text{ MW/m}^2$ を中心とした熱負荷で繰り返し試験を行い、温度や接合部の健全性の点で問題がないかどうか熱特性の評価を行っている。接合部の健全性を評価するには最終的には、数万回以上の繰り返し熱負荷試験を行う必要があるが、全部の接合材に関してそのような試験を行う事は時間的にも労力的にも不可能である。そこで、最初は1000回程度までの繰り返し熱負荷

試験を行い、表面温度と接合部の健全性の両面で評価して、特性の優れた接合材に対し、最終的に数万ショットまでの繰り返し試験を行う事を予定している。

図24に代表的な蝶付け接合材の形式である①平板型接合材と②モノブロック型接合材について各々タイル材として複合材とグラファイト材を使った場合の4種類(F/CC, F/IG, M/CC, M/IG)について、 $10 \text{ MW/m}^2$ の熱負荷における代表的な熱応答波形を示す。この図からわかるように接合材の種類によって、同じ熱負荷であっても最高温度、接合部温度、あるいは熱応答性は異なっている。接合部の熱伝導率は接合材の良否に直接影響する要素であるが、それは接合部上下部に取り付けた2本の熱電対により測定した温度差から求める。

試作した機械的接合材に対し熱負荷試験を行い、その表面温度の熱応答特性を測定した。図25は典型的な例としてB)とC)のCC材使用の機械的接合材の場合について示す。接合材に加えた熱負荷は、前者が $6.5 \text{ MW/m}^2$ 、そして後者は $10 \text{ MW/m}^2$ で、冷却水の流速は $8 \text{ m/s}$ あった。それらに熱負荷をかけると、時間と共に表面温度は徐々に上昇していく、最終的には共に約 $1000^\circ\text{C}$ に達する形状をしている。このような熱応答性波形は、図24に示す蝶付け式接合材の場合の応答波形と多少異なっているが、これは蝶付け接合材と機械的接合材の構造の差に起因するものと思われる。

次に各種接合材に対し行った繰り返し熱負荷試験について記述する。図26に示すような、約1分周期の繰り返しシーケンスで行われる。1周期は、立ち上がり時間が20秒で、20秒の平坦部、そして20秒間の冷却時間からなり、通常は同じ熱負荷で1000回の繰り返しを行う。各ショットにおける表面温度と接合材各部の温度は測定され、その平坦部における最大値と平均値が、MTDシステムによりショット回数、熱負荷、真圧度と共に記録される。図27は、繰り返し熱負荷試験の1例として、 $7.5 \text{ MW/m}^2$ の熱負荷で行われたF/IG(グラファイトをタイル材とした平板型)接合材に対する熱負荷試験の結果を示す。ここで、A)は以前に行っていた全電子ビーム電流による熱負荷制御で行っていた場合の試験結果で、B)は現在行っている接合材入射電流により熱負荷を制御する場合の結果を示す。二つのグラフ共に真圧度の変化を示していないが、これらの試験中において真圧度は $10^{-4} \text{ Torr}$ 台より $10^{-5} \text{ Torr}$ 台までの約1桁変化している。この真圧度の変化は4章の4.3で記述したようにビームの収束に大きく影響する。その結果、A)の場合は全電子ビーム電流を一定にしているのに、あたかも接合部が劣化したように表面温度等が大幅に変化している。それに対し、B)の場合は、真圧度が変化しても熱負荷が変わらないので、表面温度などは一定値を示している。現在までに、このような方法で、16種類の接合材に対し、計41回に及ぶ繰り返し熱負荷試験を行い、その結果の内代表的な試験についてショット回数と熱負荷の関係を図28に示している。なお、測定精度の点で問題がある1992年10月以前に行った全電子ビーム制御方法による繰り返し試験の結果は除外している。これらの試験では、熱負荷が $2.5-14 \text{ MW/m}^2$ の範囲で行われ、最長の繰り返し回数は5100回であった。

なお、接合材の健全性の評価は、接合部の熱伝導率の変化を測定する事によって行われるが、それは接合材に対して行う繰り返し試験の前後に図29に示すような段階的な負荷を加え、表面温度と接合部温度の変化を測定する事により行う。この測定では各負荷に対応する接合部の熱伝導率が1回の測定で判明し、繰り返し試験前の伝導率と試験後の伝導率を比較する事により定量的な変化が得られる。

### 5. 3 その他の試験

#### 差温度検出器 $\Delta T$ と接合材入射電流から得られる熱負荷値の比較

熱負荷試験中の接合材に加わる熱負荷を正確に測定する事を目的に、冷却水の出入口に $\Delta T$ なる名称の差温度検出器を取り付けている。そこで、M/CC接合材を使って、入射するビーム電流から計算する熱負荷と、同時に測定した $\Delta T$ から得られる熱負荷を比較したので、その結果を表3に示す。なお、 $\Delta T$ で測定した値 $P_{\Delta}$ の中には、接合材表面からの輻射熱による熱損失と、冷却水の経路中における真空容器への熱損失は含まれていない。接合材表面よりの損失は、黒体輻射に関する次式より求めて $P_r$ とする。

$$P = \sigma T^4$$

ここで、 $\sigma$ はステファン・ボルツマンの定数で、 $4.88 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{ K}^4$ である。熱負荷の対応表から分かるように、熱負荷を $7.5 \text{ MW/m}^2$ から $13 \text{ MW/m}^2$ まで変化させて比較しているが、輻射損失を加えた熱負荷 $P_r$ は、ビーム電流から計算した熱負荷 $P_e$ の値と比較すると95-97%であり、両者の間に大きな差はない。更に、 $\Delta T$ では測定できない冷却水の経路における熱損失を約2%と仮定すると、その差は僅かになり、ほぼビーム電流と $\Delta T$ から測定した熱負荷と一致すると言える。

この結果、現在のように接合材入射ビーム電流から熱負荷を計算する場合は、特別に $\Delta T$ を必要としないが、以前のように全電子ビーム電流で制御する場合は、 $\Delta T$ は精度の良い熱負荷測定器として意味が生ずる。又、現在のビーム制御方式であっても、感度校正を行う上で、この $\Delta T$ は有効な熱負荷測定装置と言える。

#### 接合材各部温度の冷却水流速依存性

接合材の表面温度と接合部上下部の温度が冷却水の流速によって、どのように影響を受けるか接合材としてF/CC材を使い、 $10 \text{ MW/m}^2$ の熱負荷で流速を $4.7-8 \text{ m/s}$ の間で変化させ測定した。その結果は表4に示す。なお、接合材領域における冷却水の水圧は、ほぼ5気圧に固定した。冷却水の流速が最低の $4.7 \text{ m/s}$ から最高の $8 \text{ m/s}$ まで変化させた場合、表面温度は $16^\circ \text{C}$ そして接合部上部の温度は $3^\circ \text{C}$ 下がった。しかし、接合部株の温度は逆に $2^\circ \text{C}$ 上がっている。このように今回の結果からは、流速による表面温度や接合部領域に与える影響はあまり無かったと言える。

## 6章 考察

A C T を使って接合材に対し熱負荷試験を行う場合、幾つかの点で問題がある。そこでここでは、それらの点について考察してみる。

1) A C T の設置場所が狭い場所のため大型の冷却水供給設備はなく、2章で記述したようにコンパクトなタンク内蔵型のポンプ系を使っている。その為冷却水の流速は最大8 m/sとLHDのダイバータ板冷却用に考えている5-10 m/sの流速をカバーするだけの値は可能である。しかし、A C T のポンプ系は開放型のため水圧を接合部において最大5気圧程度しか上げられない。そのためLHDで考えている閉回路方式で、最高30気圧程度のポンプ系に比較して大幅に圧力が低く、接合材の模擬熱負荷試験を行う場合に問題となる。例えば接合材中における冷却水の沸騰開始熱負荷値が、10 m/sの流速のもとにおいて0.5 MPa(約4.5気圧)の水圧では4.7 MW/m<sup>2</sup>、1.0 MPaでは5.7 MW/m<sup>2</sup>、そして5.0 MPaでは8.9 MW/m<sup>2</sup>という計算結果<sup>19)</sup>もある。そのため安全サイドとは言え、A C T での接合材の試験結果の評価が低めにできる可能性がある。そのため熱特性優れていてLHDのダイバータ板に応用可能な接合材に対して、最終的には水圧を高くした状態で熱負荷試験を行えるSNLAのEB-1200等の装置で熱特性を測定する必要がある。

2) 電子ビームの制御方法を全電子ビーム制御から接合材入射電流制御に改造した結果、接合材に対する熱負荷は、真空度によってほとんど影響は無くなつた。しかし、図2-7のB) 図のように、必ずしも接合材の表面温度は繰り返しの回数に対し一定ではなく、僅かではあるが変化している。これは接合部接合部の熱伝導率が変化した事に起因するのではなく、やはり真空度の変化によるビームの収束性の変化によるものと思われる。現在の方式では、接合材に入射するビーム電流は真空度によらず一定であるが、ビームリミターと接合材の間隔が5 cmある為図3-0に模式的に示すように、接合材上のビーム照射面積が少しではあるが変化する。その為に温度測定の場所である接合材中心部の面積当たりの熱負荷が変化するものと思われる。これは接合材のタイルが3分割されているので、特に影響が強くなる。それ故、正確な接合材に対する熱負荷試験を行うためには現在のような入射ビーム電流制御方式であっても、繰り返し試験中は真空度を一定に調整しておく事が必要となる。真空度を一定にするには、先ず試験を始めるまでに真空度を充分良くしておく( $<1 \times 10^{-5}$  Torr)。そして、窒素ガスをリークバルブを通して真空容器内に導入し、ニードルバルブを調整して真空度を一定にする。しかし、現在の排気系でそのような状態で、繰り返し試験を行おうとするとかなりの時間がかかるてしまうので、より大排気速度(>1000 L/s)の真空排気系に変更する必要がある。

3) 接合材に対し繰り返し熱負荷試験を行っている場合、接合部が劣化して熱伝導率が低下すると、接合部上部の温度と表面温度が上昇するので、現在はそれらの温度上昇を検出したなら接合部の劣化が生じたと判断している。しかし、急激にかつ大幅に温度変化

が生ずれば、明らかに接合部が劣化したと判断できるが、少しづつ温度が変化する場合は判断が難しい。特に1000回程度の少ない繰り返し試験では、温度が僅かに増加する場合、ほとんど変化しない場合、時には逆に温度が低下する場合もある。これは真空度の変化などにより実際の熱負荷が変化する場合もあるが、劣化ではない接合状態の変化や他の要素も考えられる。また、1000回までは問題なくとも、それ以上の回数で急激に接合部が劣化する場合もある。そのため繰り返し試験回数が少なくても、熱特性の変化から接合材の寿命を正確に予測できる方法について検討している。

## 7章 結論及び今後の課題

A C T の建設後約3年が経過したが、数々の改造と熱負荷試験を行い、現在では測定精度の点や試験効率等の点でほぼ満足出来る熱負荷試験を行えるようになり、大量の接合材の熱負荷試験のデータが得られるようになった。そこで、ポイントになる結果、改良点、問題点、そして今後の課題及び予定を列挙する。

### 先ず A C T のまとめとしては

- A)電子源のビーム電流を市販のデジタルプログラム調整計を使う事により安定化させ、そして繰り返し熱負荷試験を可能にした。
- B)ビームリミターとして、強制冷却したMo-C接合材を使用する事により $10 \text{ MW/m}^2$ 以上の高熱負荷でも試験が容易に行えるようになった。
- C)全電子ビーム電流ではなく、接合材の入射電流により電子源を制御する事で、真空度の変化による熱負荷への影響を除去する事が出来た。
- D)接合材の熱負荷を正確に測定できる $\Delta T$ を冷却水の出入口に取り付け、それから得られた熱負荷の値に輻射損失と真空容器への熱損失を足した値は、接合材への入射電流から計算した熱負荷値とほぼ一致した。
- E)ノート型カラーパソコンを使ったM T D は、データ処理ばかりでなく、A C T の管理も行えるので、必要なら無人状態での繰り返し熱負荷試験も可能になった。
- F)ポケットベルモニターシステムの採用により、停電や断水などA C T周辺の異常発生を即座に把握でき、適切な対応が敏速に取れるようになった。
- G)各種の蝶付け接合材に関して $2.5\text{--}14 \text{ MW/m}^2$ の熱負荷で、最高5100回までの繰り返し熱負荷試験を行った。その結果、表面温度と接合部の健全性の面でL H D のダイバータ板への応用条件をほぼ満足する接合材もいくつか存在した。
- H)機械的接合材を試作し、その3種類の接合材に対し $5\text{--}13 \text{ MW/m}^2$ の熱負荷条件で熱応答試験を行った。その結果、構造が異なるため単純な比較は注意が必要であるが、蝶付け接合材の特性に匹敵する良い結果を示した。

### 次に問題点としては

- I)電子源が傍熱型のカソードを使用している為、ビームの立ち上がり時間が長く、パルス幅の短い熱負荷の試験を行う事が難しい。ただし、ビームを瞬間的にシフトさせる

方式を使うと、1-2秒程度までのパルス幅は可能である。

J)光温度計の測定範囲が600 °C以上である事と時間分解能が1.7秒と長いので表面温度を正確に測定する事が困難である。

K)真空容器の排気系の排気速度が低いので、新しい接合材の熱負荷を行う場合は、長い脱ガス処理時間が必要になるし、熱負荷中にQMAを使ってガス分析を行う事が難しい。

#### 今後の課題としては

L)現在使用している光温度計では、接合材表面における1点の温度測定しか出来ないので、表面での温度分布を測定可能な赤外線カメラを装備する事

M)試験効率と測定精度の向上のため、真空容器の排気系を自動化と排気速度の更なる強化を行う事

N)現在の傍熱型カソードを使った電子ビーム発生方式では、数秒以下の短パルス電子ビームの発生が困難なので、電子源の制御方式を変更し1秒以下の短パルスビームの発生も可能なようにする。

O)接合材の冷却のために使われている冷却水ポンプ系の発生可能圧力を、現在の最大5気圧から少なくとも20気圧に強化する。

#### 接合材の熱負荷試験の予定に関しては

P)特に特性の優れた接合材に関しては、熱負荷を20 MW/m<sup>2</sup>以上まで上げた熱負荷試験を行い、接合材の限界熱負荷の値を調べる。

Q)標準的な繰り返し熱負荷回数は現在1000回であるが、特定の接合材に関しては10000回程度までの繰り返し熱負荷試験を行う、

R)蝶付け接合材と平行して、機械的接合材に関しても開発を積極的に行う。

S)熱負荷中における接合材接合部の劣化をどのように評価するかを確立する。

T)電子ビーム照射による熱負荷で接合材の熱特性を測定する前に大気中の段階である程度熱特性が判明する方法を開発する。

U)同一種類の接合材を使って、接合部の寿命予測曲線を得るために熱負荷試験を行う。

## 謝辞

A C T の建設以来現在の状態に至るまでの間、各方面の方々に色々とお世話になりました。東洋炭素、川崎重工、日立製作所、そしてペルネジャポン/ル・カーボン社の方々には接合材やタイル材料を提供していただき、また電子源の設備、移設、そして改良に関しては、大阪真空（株）と日本電子（株）に御協力していただきまして心よりお礼申し上げます。

A C T は、超伝導コイルの開発・研究を行う低温実験棟の一角に間借りの形で設置されていますが、A C T (SUTも含めて)を維持・管理していく上で、山本純也装置技術研究系主幹をリーダーとする超伝導コイル開発研究グループの方々には、色々の面で大変お世話になりました。又、A C T の漏洩X線測定に際しては、核融合科学研究所安全管理センターの大林センター長を始めとしたスタッフの方々に御協力いただきました。更に、本報告書の作成に関しては、宮原昭先生に有益なコメントをいただきました。これらの先生方には深く感謝申し上げます。

## 参考論文

- 1) M.Akiba,M.Araki et al.,IEEE,13th Symp. on Fusion Engi.(1989)529.
- 2) E.Franconi,V.Rado et al.,Fusion Technology,(1989)819.
- 3) P-H. Rebut,D.Boucher et al.,Fusion Technology,(1992)7.
- 4) J.Schlosser,P.Chappuis et al.,Fusion Technology,(1992)367.
- 5) G.Mayaux,A.Cardella et al.,Fusion Technology(1992)317.
- 6) R.Watson et al.,Japan-US Workshop for HHF(1992).
- 7) M.Lipa,R.Aymar et al.,Fusion Technology,(1988)874.
- 8) P.Chappuis,R.Aymar et al.,Fusion Technology,(1988)879.
- 9) 飯吉厚夫：日本物理学会誌,44(1989)309.
- 10) O.Motojima et al.,Fusion Tech.(1988)402.
- 11) A.Iiyoshi, M.Fujiwara et al.,Fusion Technology 17(1990)169.
- 12) O.Motojima et al., In Plasma and Controlled Nuclear Fusion Research 1990,IAEA,Vienna 3(1991)513..
- 13) O.Motojima, K.Akaishi, M.Sato et al.,NIFS Report NIFS-51(1990).
- 14) 大型ヘリカル装置設計グループ,1990年6月.
- 15) 藤田一郎、日野友明、山科俊郎、北大・工研究報告、第166号、平成5年、P.51.
- 16) N.Noda, Y.Kubota et al.,Fusion Technology, vol.1(1992)325.
- 17) N.Ohyabu, T.Watanabe, and et al.,NIFS-239(1993).
- 18) 石田真一、嶋田道也、他、69,10(1993)1125.
- 19) 山崎、鈴木等：川崎重工報告書、KHS92-019(1992).

表1 電子ビーム方式によるプラズマ対衝壁の開発研究用の主要な熱負荷試験装置

装置名	発生可能出力(kW)	加速電圧(kV)	ビーム電流(A)	パルス幅	最高熱負荷(MW/m <sup>2</sup> )	ビーム照射面積(cm <sup>2</sup> )	設置施設名	備考
EB-1200	1200	0~40	~30	~CW	1000 for 12cm <sup>2</sup> 4 for 3000cm <sup>2</sup>	50×150	#ガバ17研究所(USA)	600kWを2台で構成、1994年稼働
JEBIS	400	20~100	~4	1ms~CW	2000	30×60	日本原子力研究所	プラズマから電子ビームを引出す
EB-200	200	200	~1	3ms~CW	1000 for 3ms	60×60	FRAMATOME研究所(仏)	ITER,NET,ToreSupraのPFC開発用
ACT	100(50)	30	~3.3	1S~CW	100 for CW	20×20	土岐核融合科学研究所	LHDのPFC開発用に設備
REBA	60	100	~0.6	10ns~CW	170 for 1.7cm <sup>2</sup> 20 for 14cm <sup>2</sup>	4×4	川崎重工株式会社 野田工場	
EMO-60	60	15~22		10ms~100s	30 for 464cm <sup>2</sup>	464	D.V.Efremov研究所(ロ)	
EBTS	30	~30	~1	2ms~CW	250 for 0.1S	30×60	#ガバ17研究所(USA)	ITER,NET,Tore Supra用PFCの開発
EBHHS	3	~20	~0.15	0.1s~CW	60	0.1~2cm <sup>2</sup>	九州大学応力研	TRIAMのPFCを開発研究する装置

表2 接合材リスト

(1994.2現在)

接合材の種類	製造メーカー名	数量(試験済)	備 考
	接合材 タイル材		
F/CC	T. T+T. T	4(4)	
F/IG	"	3(2)	
M/CC	"	3(3)	
M/IG	"	"	
F/CC	K. H+T. T	2(2)	銅ブロック部が3分割式
F/IG	"	3(2)	"
M/CC	"	2(1)	タイル部の形状は円筒
M/IG	"	"	"
F/CC	H +H. K	2(2)	
F/IG	"	"	
"	"	"	表面はB <sub>4</sub> C処理
M/CC	"	2(1)	上下に2分割
M/IG	"	"	"
"	"	"	"、B <sub>4</sub> C処理
F/CC	K. H+L. C	1(1)	
M/CC	"	"	
MC/CC	NIFS+T. T	3(3)	機械的接合材

表3 電子ビーム電流の値から求めた熱負荷と、 $\Delta T$ から得られた熱負荷との比較

$P_{heat}$ (MW/m <sup>2</sup> )	接合材表面温度 $T_s$ (°C)	輻射損失 $P_{rad}$ (MW/m <sup>2</sup> )	$\Delta T$ からの熱負荷 $P_{\Delta T}$ (MW/m <sup>2</sup> )	合計した熱負荷 $P_{rad} + P_{\Delta T}$ (MW/m <sup>2</sup> )	熱負荷の比率 $(P_{rad} + P_{\Delta T}) / P_{heat}$
7.5	842	0.08	7.08	7.16	95.4%
8.6	884	0.09	8.12	8.21	96.6
10.0	950	0.11	9.40	9.51	95.1
12.0	1124	0.19	11.41	11.60	96.7
13.0	1245	0.26	12.24	12.50	96.2

表4 接合材冷却用冷水の流量が接合材各部の温度に与える影響

冷却水流速 (m/s)	表面温度 (°C)	接合部上部温度 (°C)	接合部下部温度 (°C)
4.7	1283	536	198
5.6	1286	535	198
6.3	1276	535	199
7.3	1269	531	203
8.0	1262	524	200

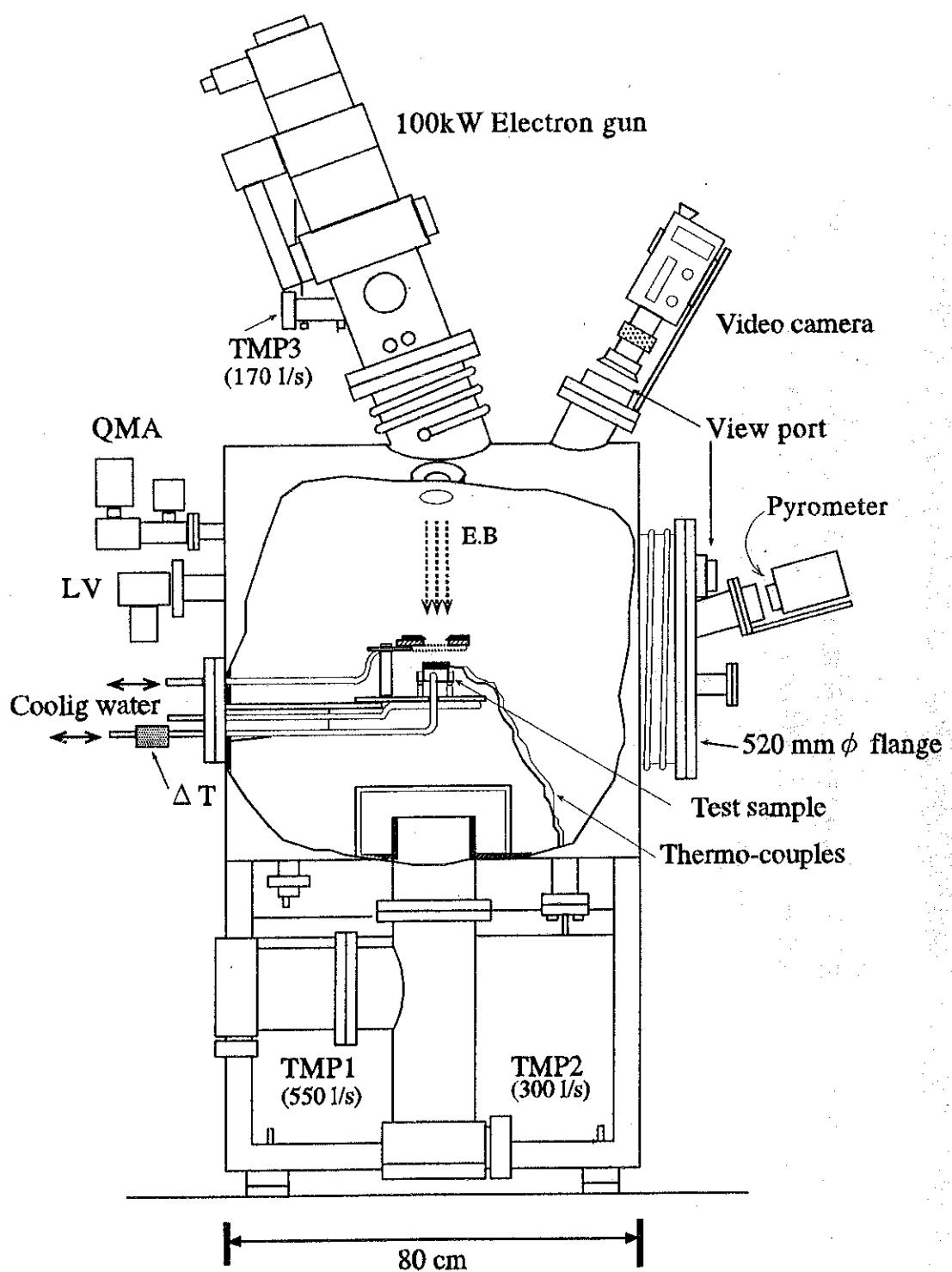


図 1 A C T の外観及び断面図

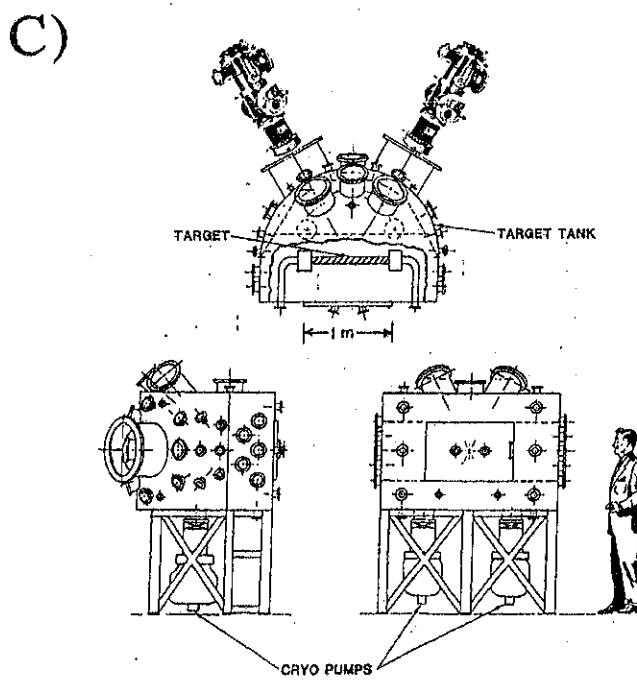
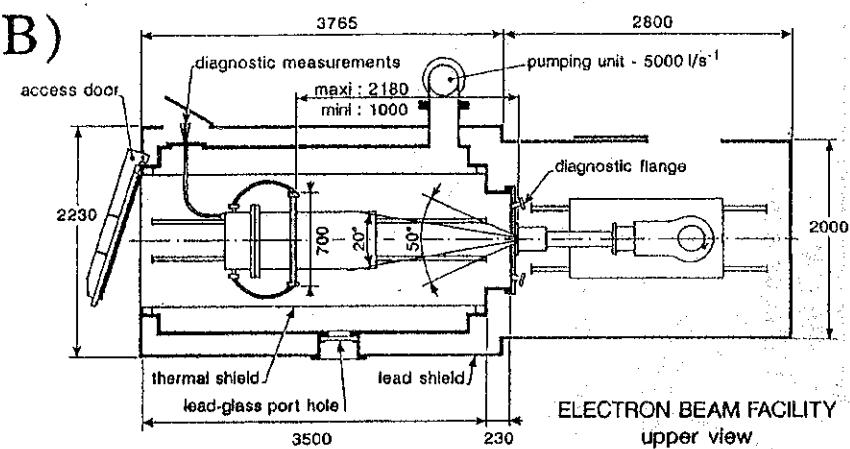
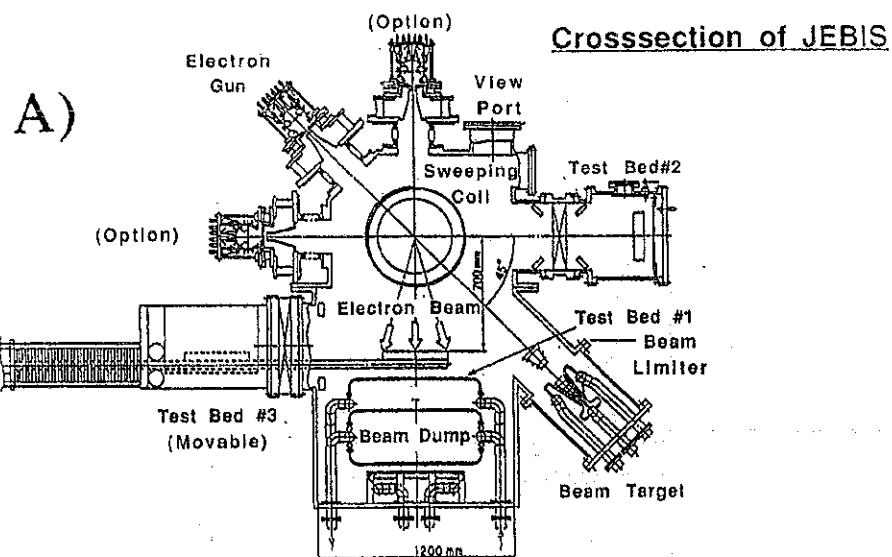


図2 代表的な電子ビーム式熱負荷試験装置 A) JEBIS, B) EB-200, C) EB-1200.

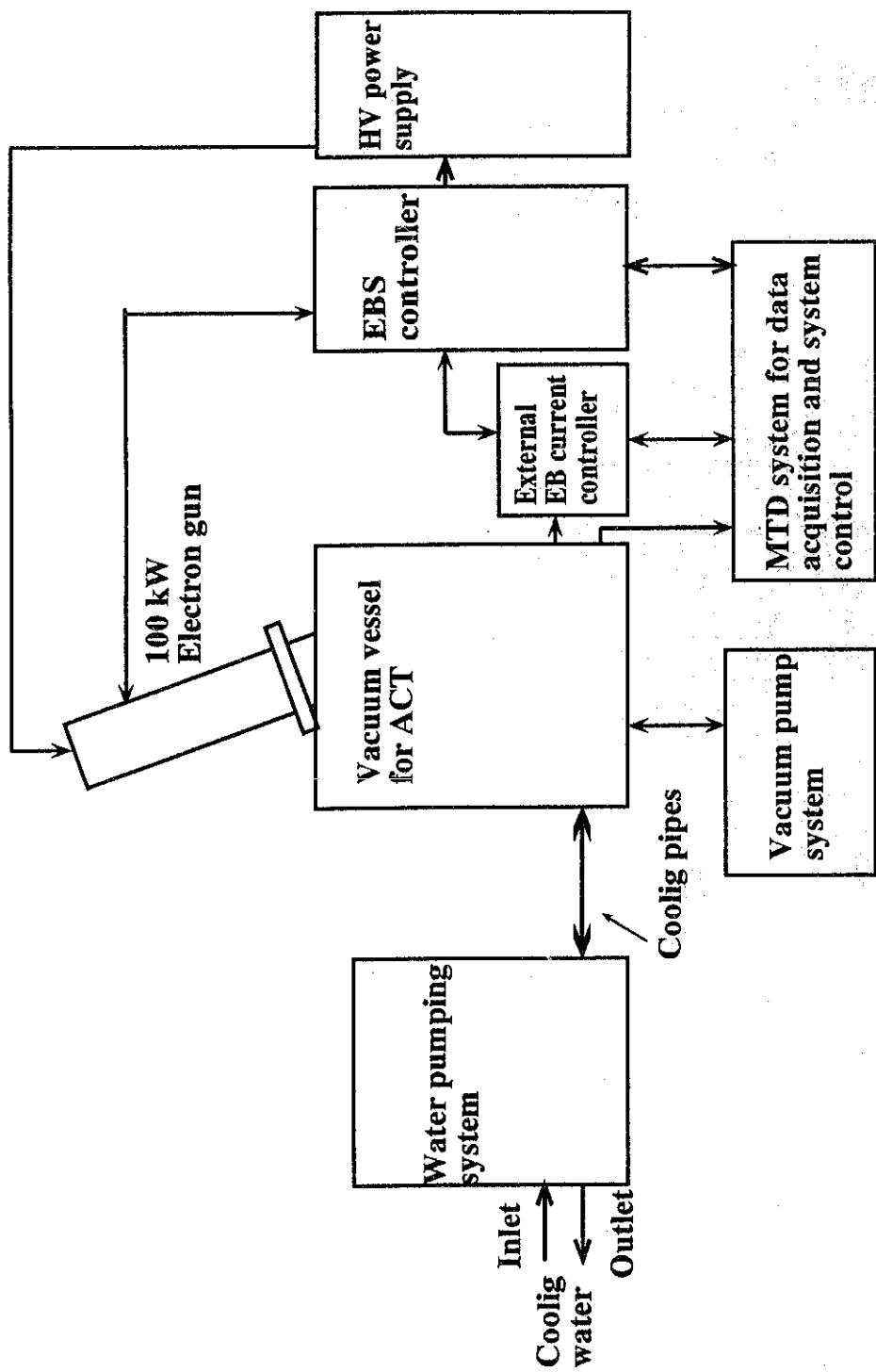


図3 ACTのブロック図

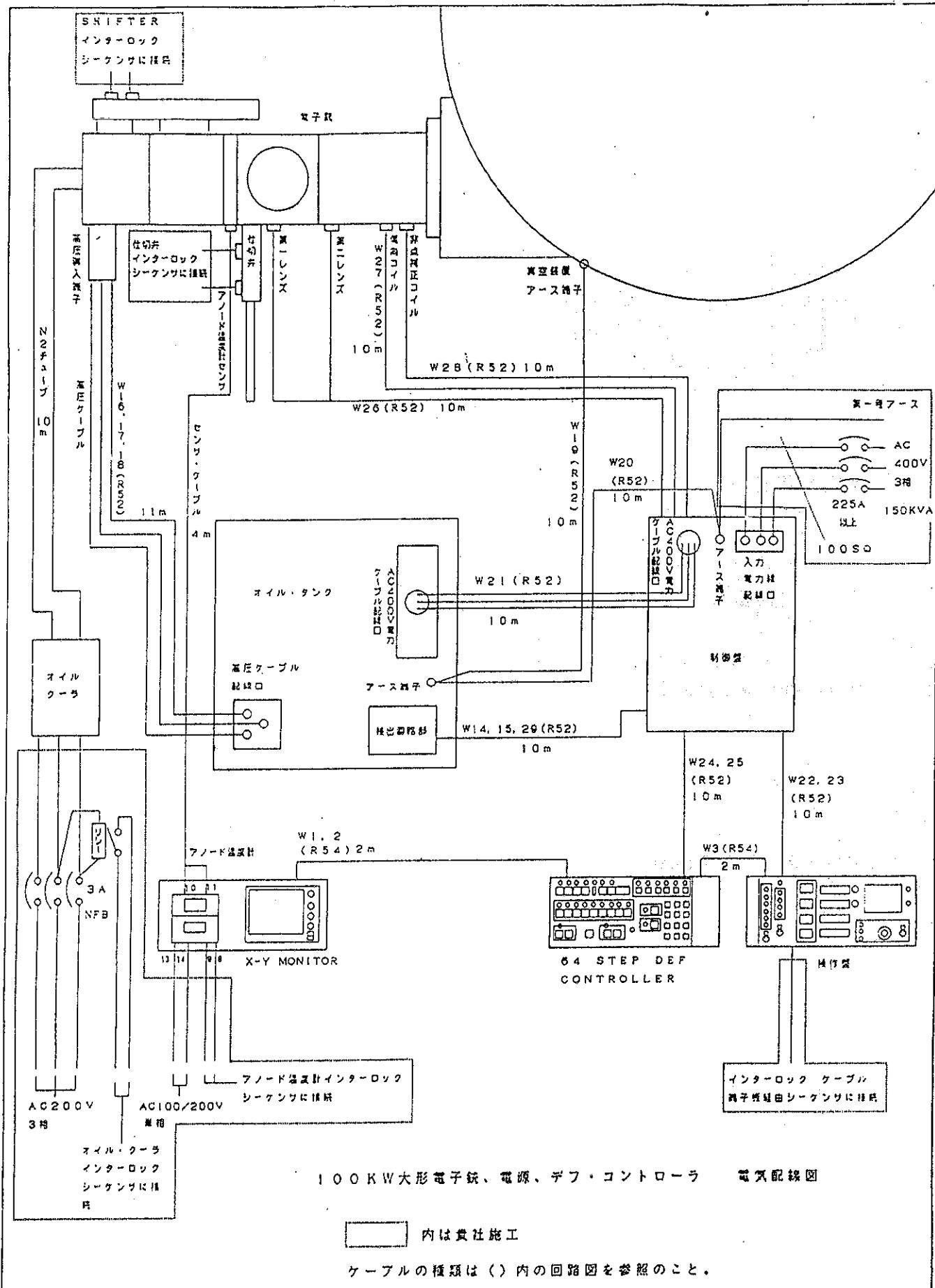


図4 100 kW電子源の構成ブロック図

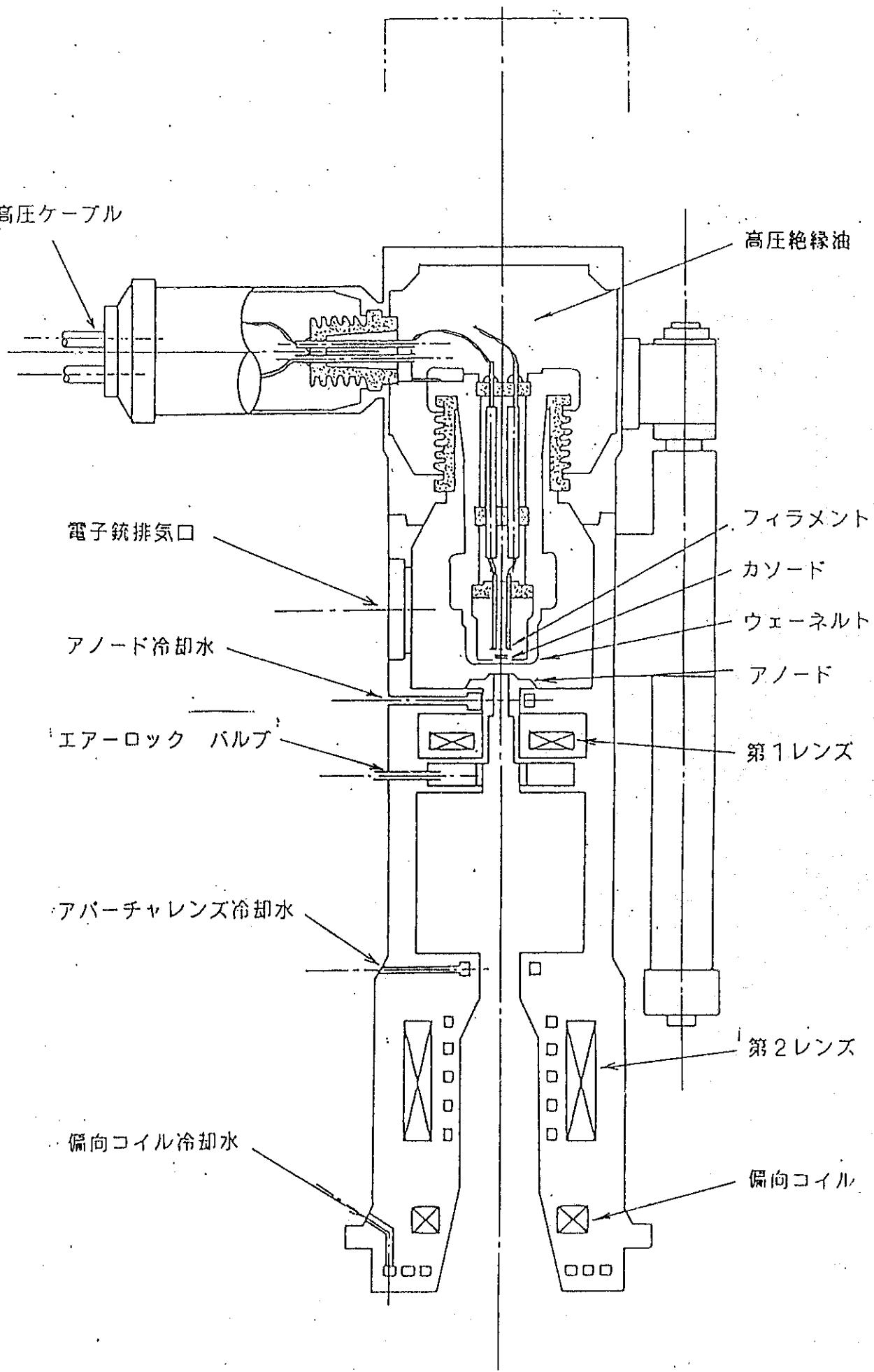


図5 100 kW電子源本体の断面図

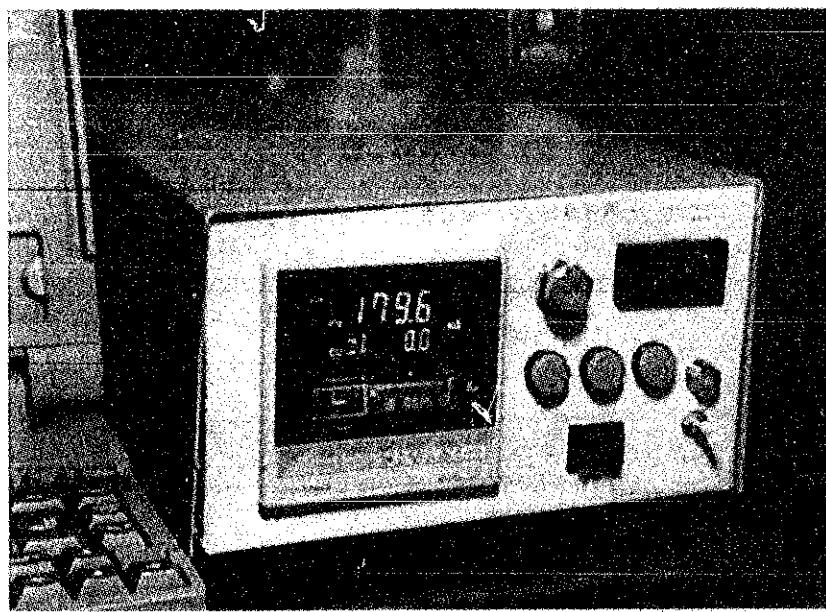


図 6 電子ビーム電流制御用の外部コントローラー

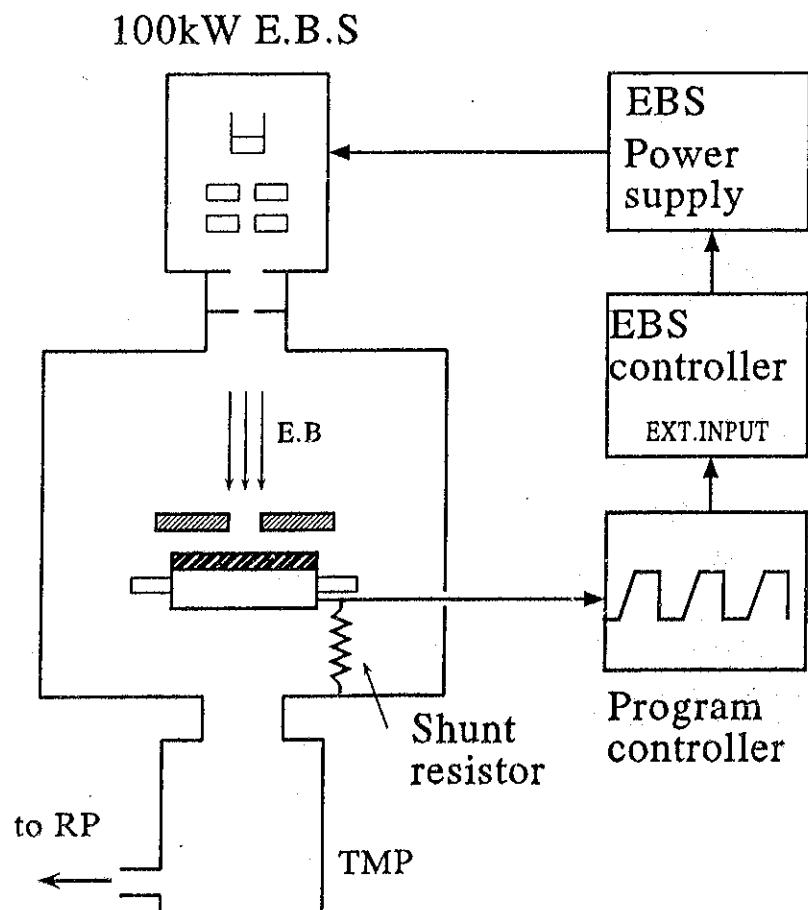


図 7 A C T の電子ビーム制御に関するブロック図

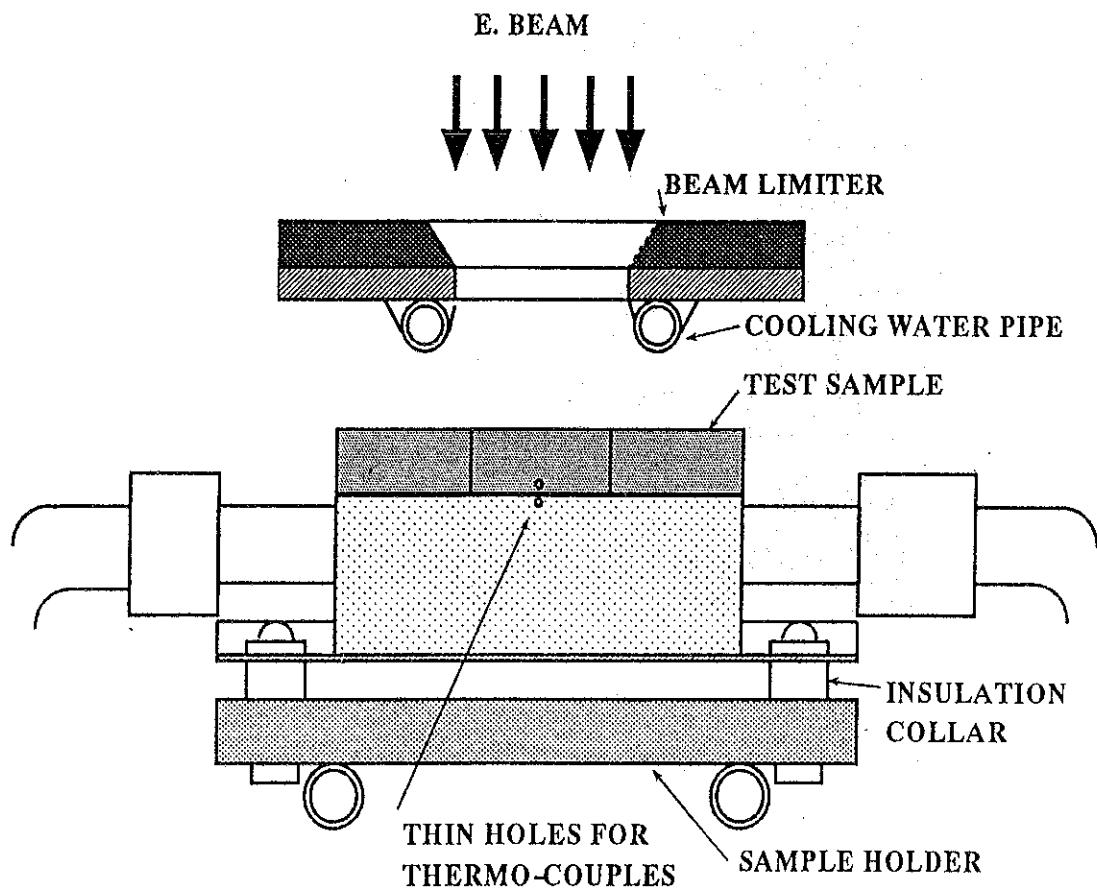


図 8 热負荷試験のために絶縁された状態で固定された接合材

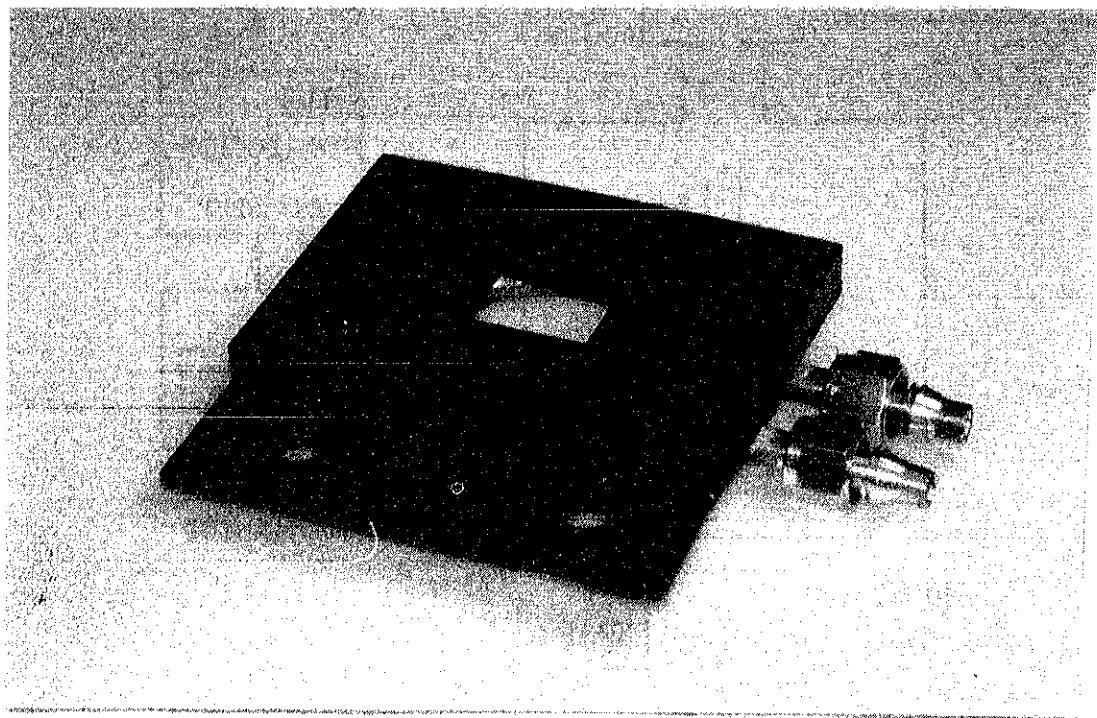
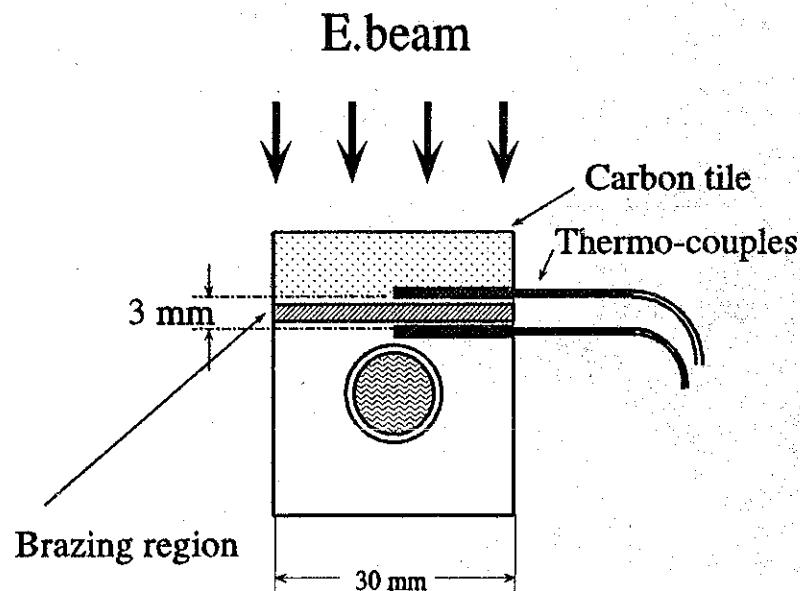


図 9 ビームの照射領域を制限する強制冷却式Mo-C接合式ビームリミター

### A) Flat plate type



### B) Mono-block type

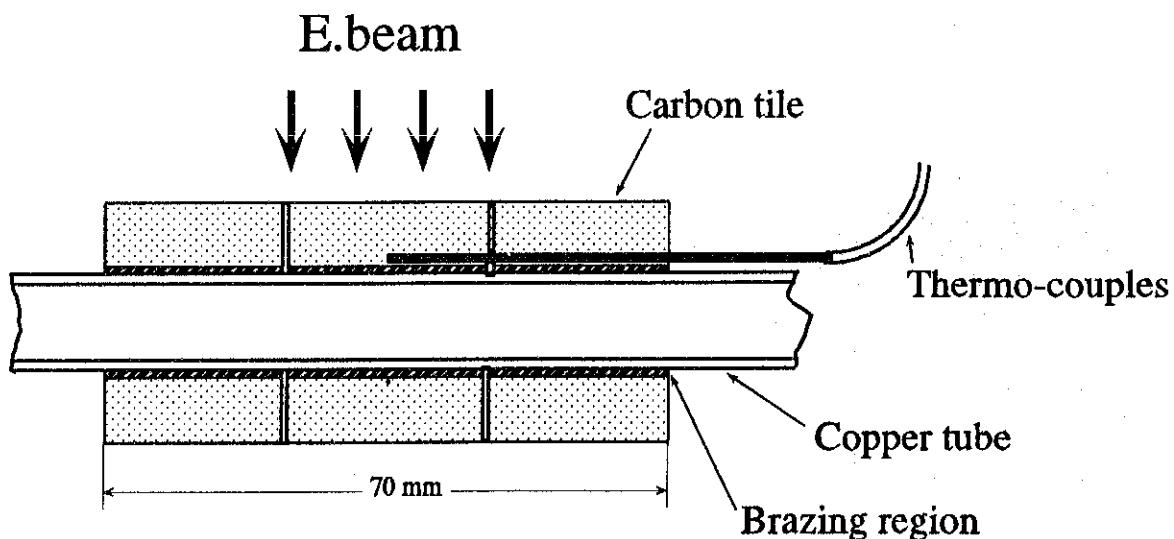


図10 接合部温度の測定用シーズ熱電対の取り付け方法 A)平板型接合材の場合、  
B)モノブロック型の場合

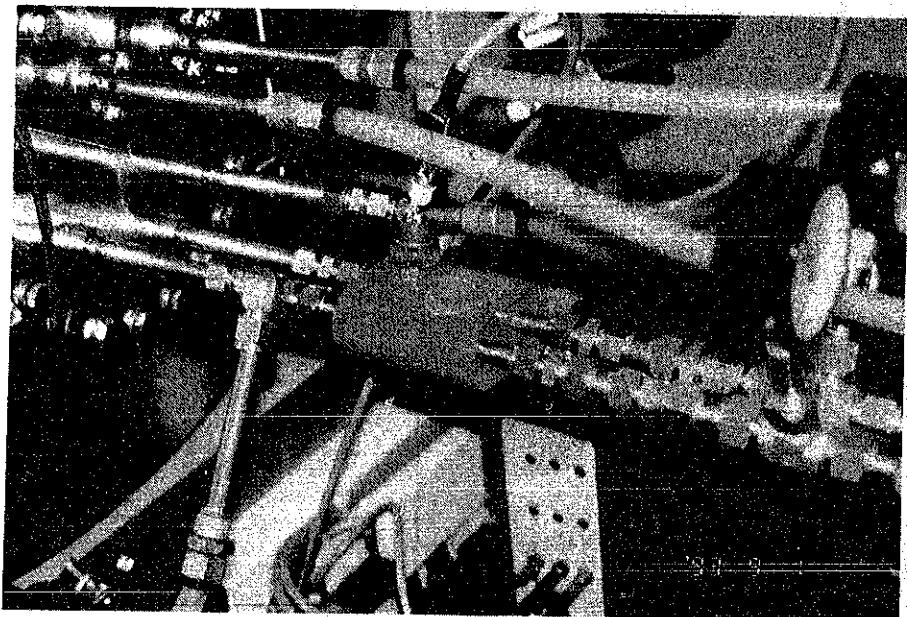


図11 真空容器背面上の接合材用冷却水出入口に取り付けられた熱負荷測定用 $\Delta T$

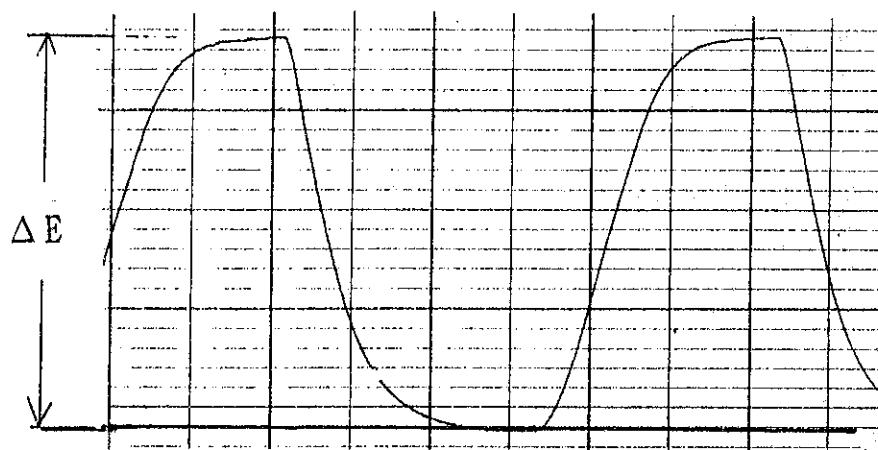


図12 繰り返し熱負荷試験中における $\Delta T$ の出力信号波形 X:20 sec/div

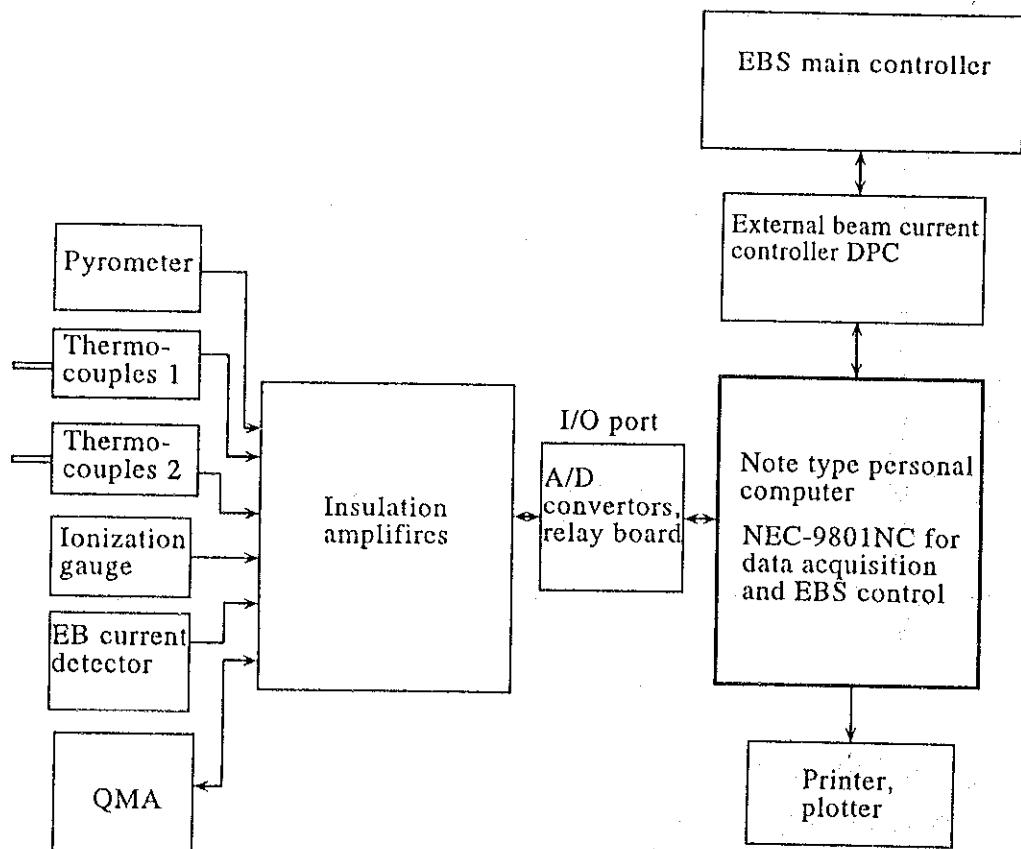


図13 データ処理用MTDシステムのブロック図

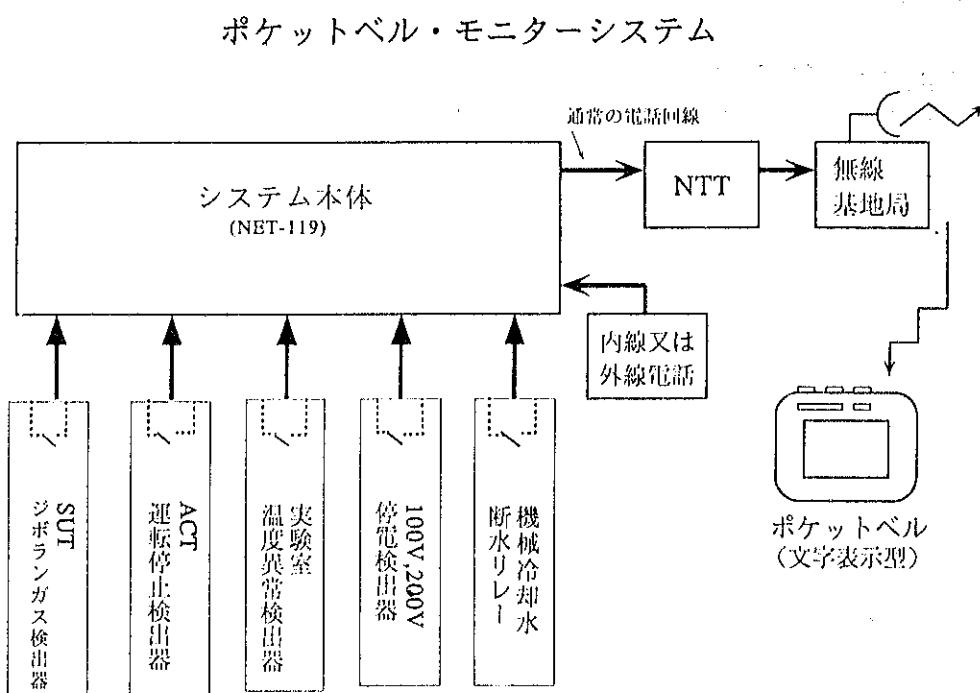


図14 A C T 及び周辺状態監視用ポケットベルモニターシステムのブロック図

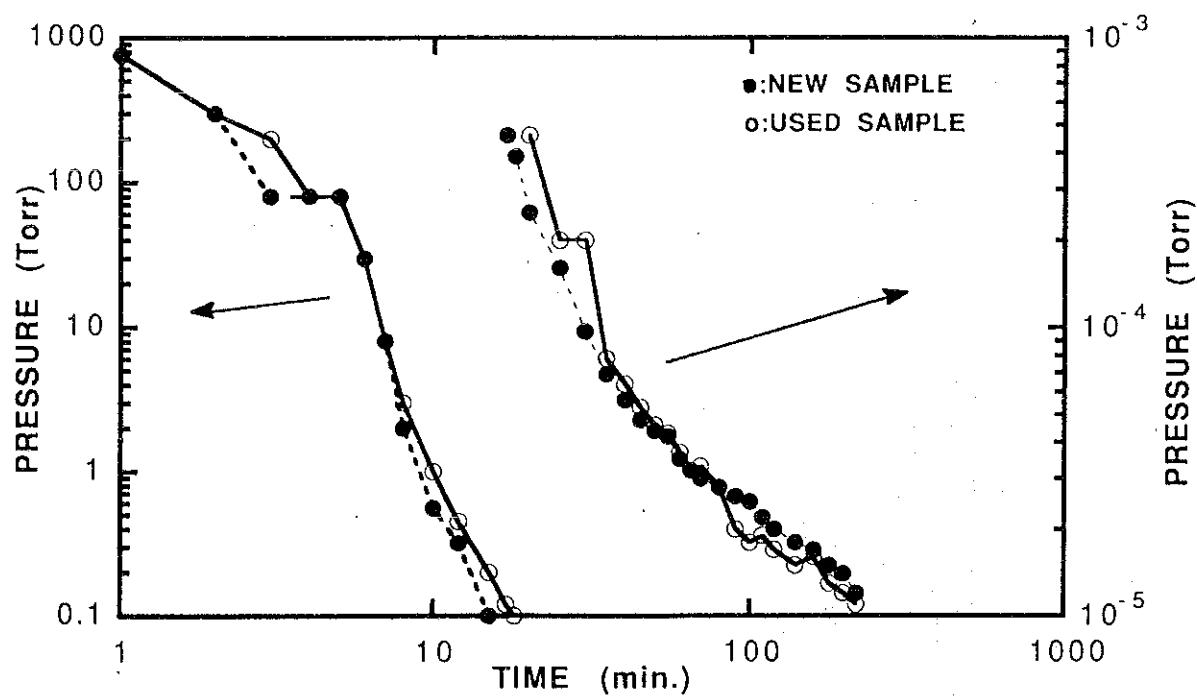


図15 真空容器の真空排気特性、○：未使用の接合材の場合、●：熱負荷試験を行った事がある接合材をセットした場合

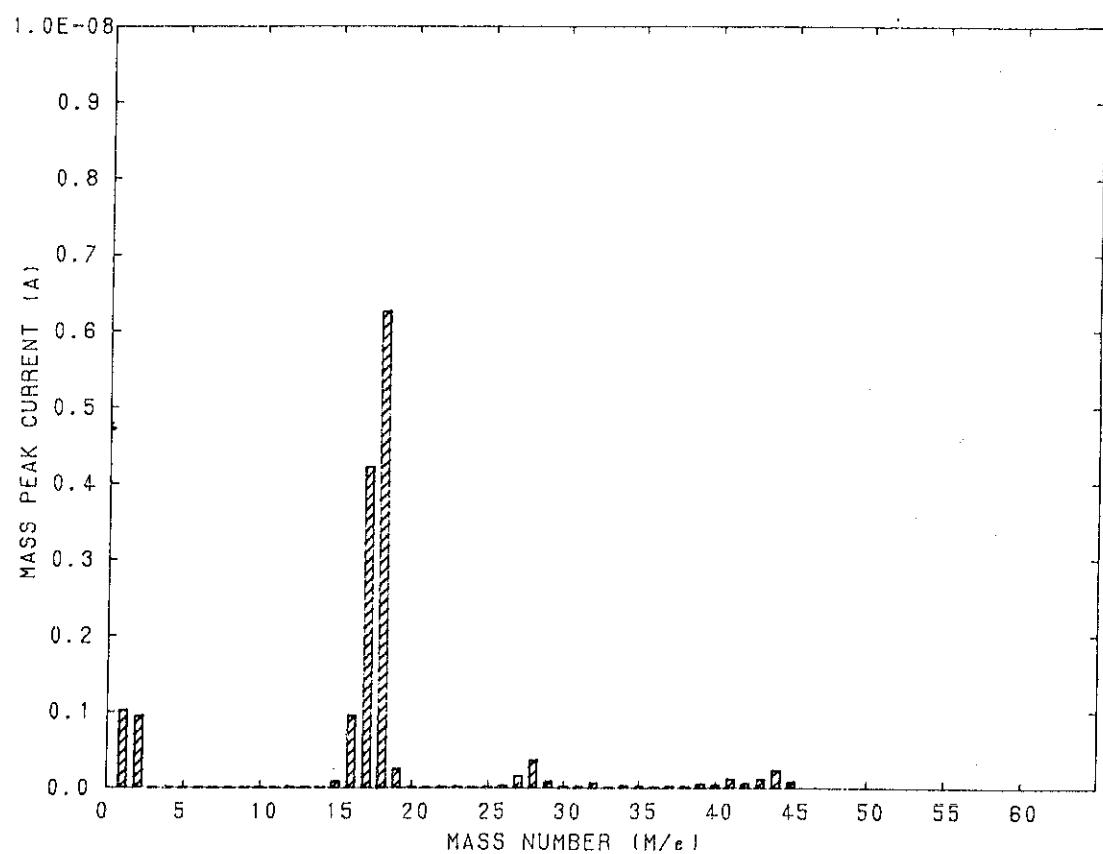


図16 真空容器内の残留ガス分析のマススペクトル

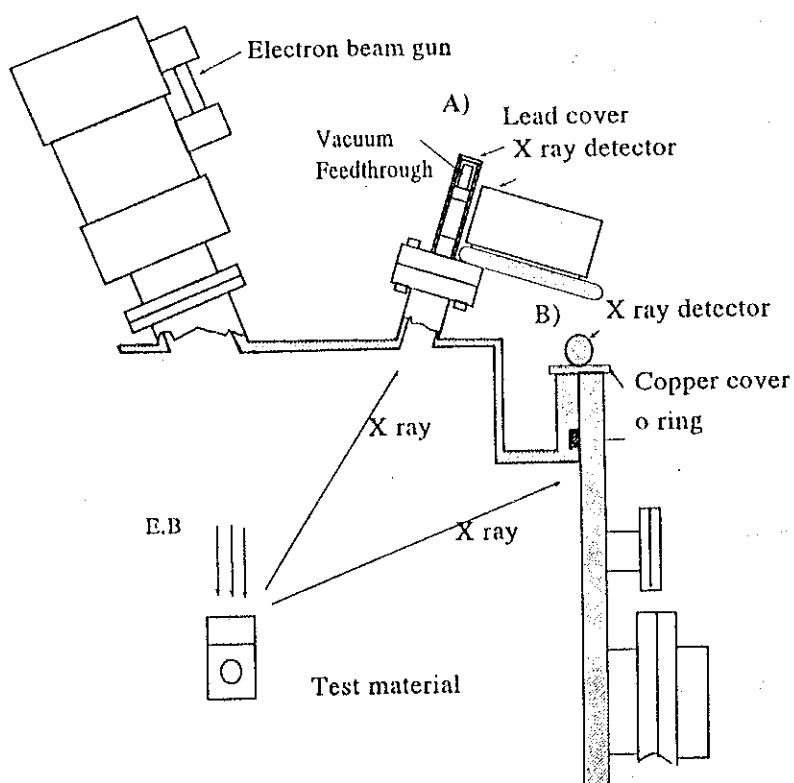


図 17 ACT 真空容器での漏洩 X 線測定箇所と方法

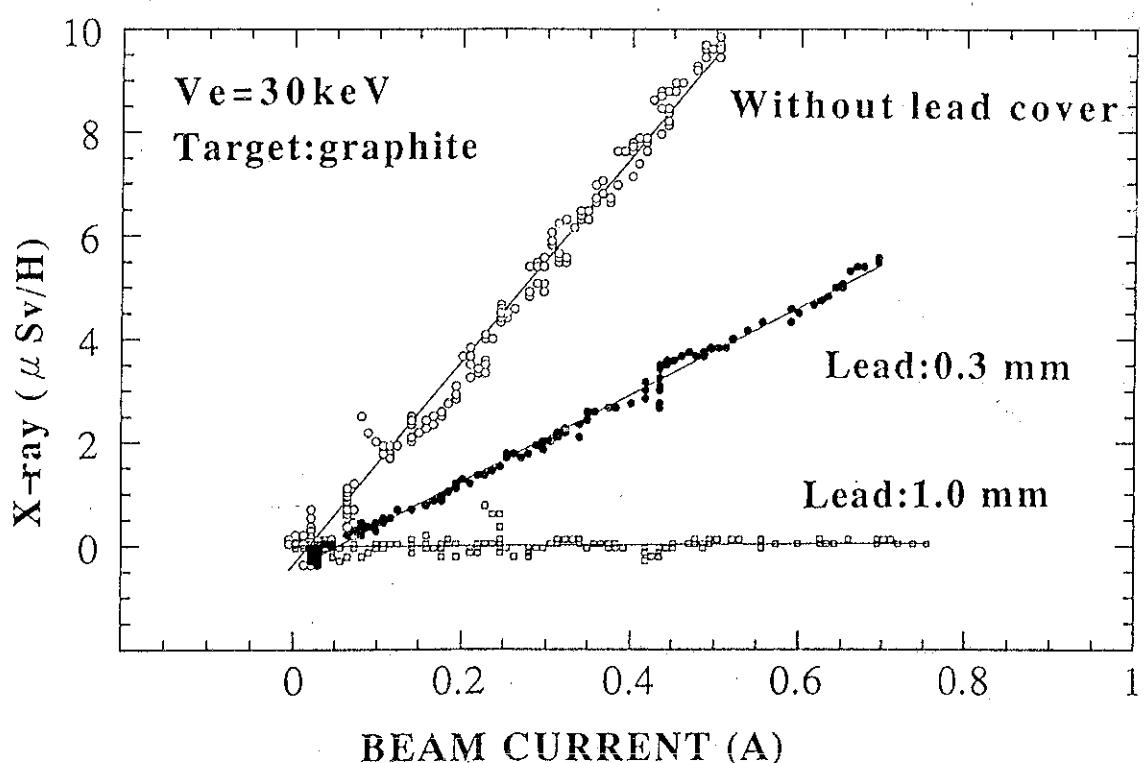


図 18 遮蔽板の厚さを変えて行った真空導入端子部からの漏洩 X 線測定結果

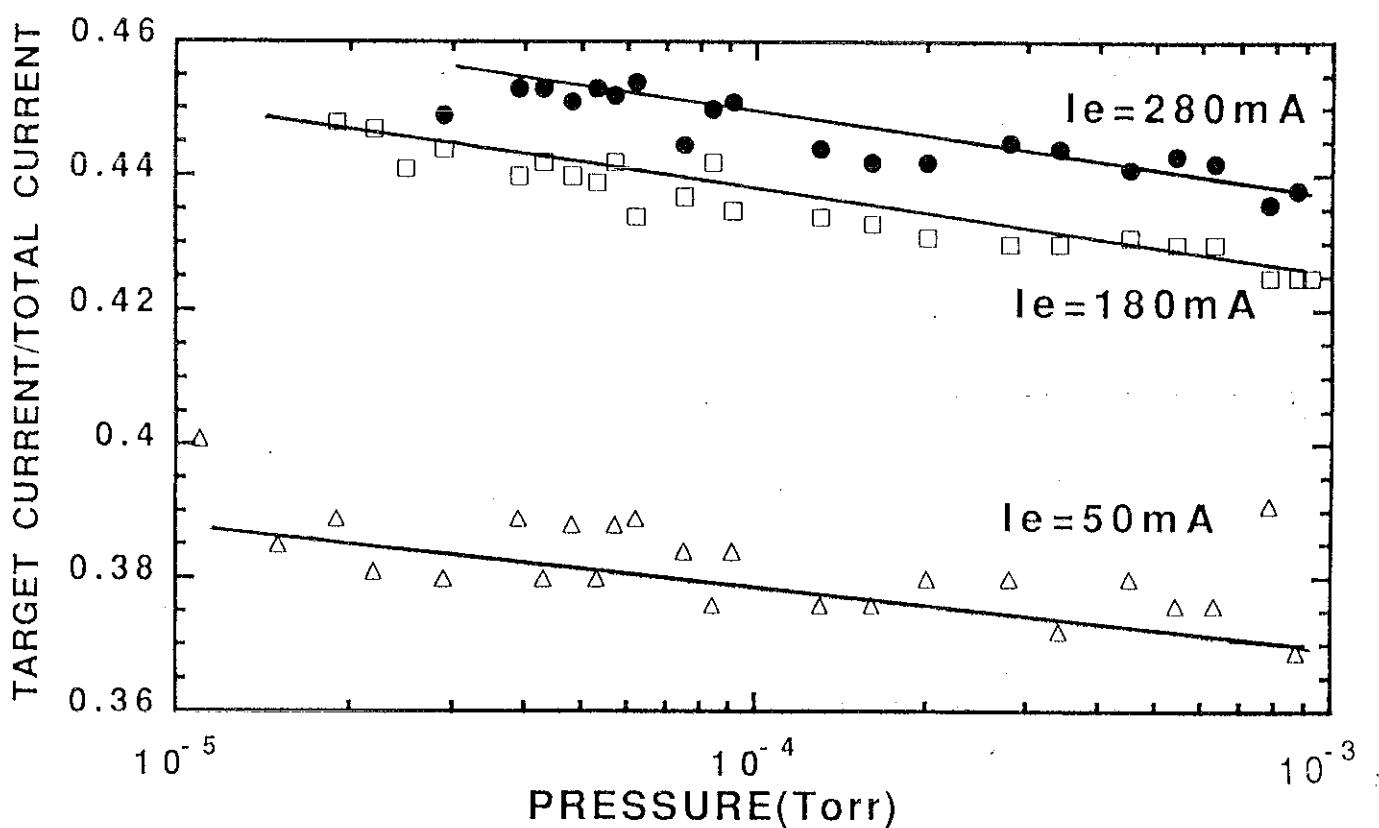


図 19 電子ビームの透過率に与える真空度の影響

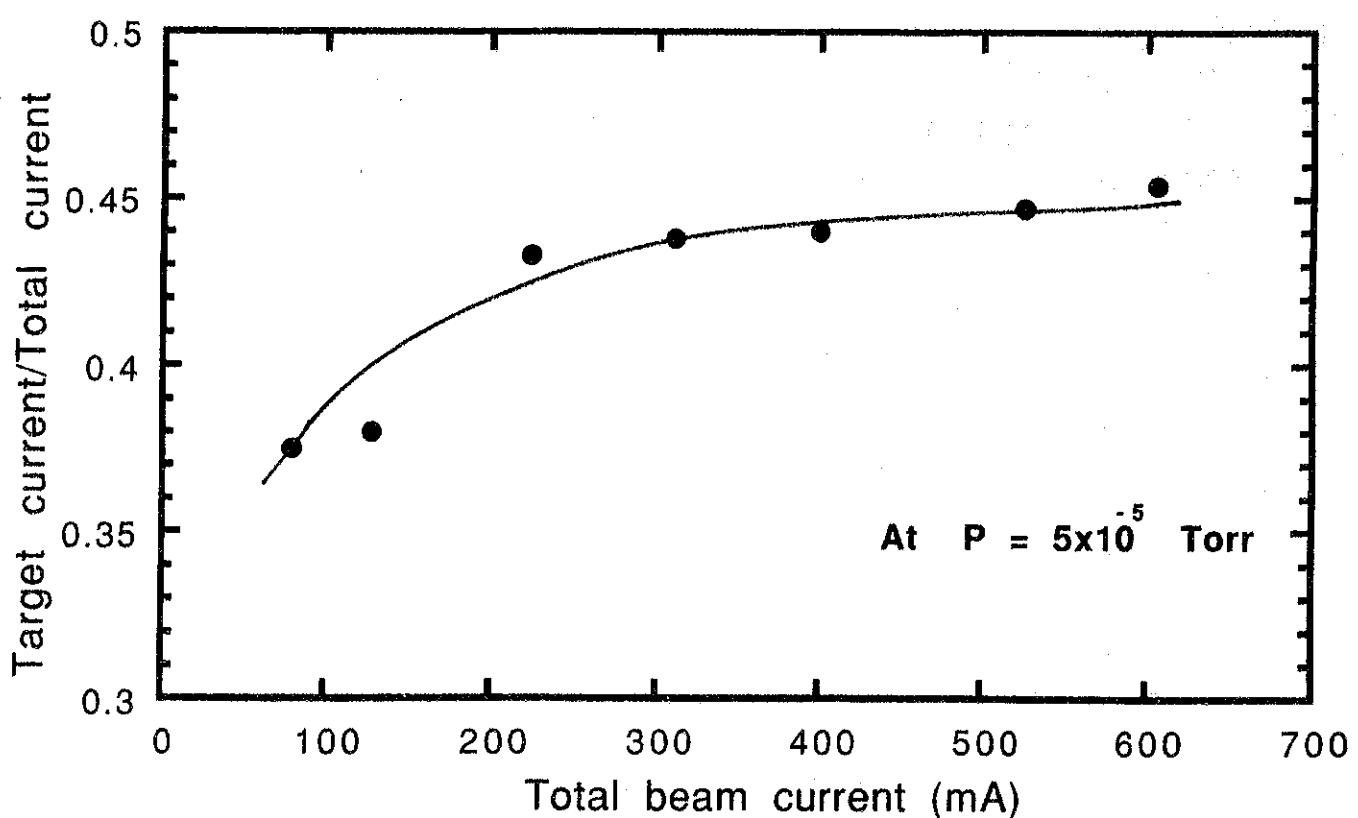


図 20 電子ビーム電流の透過率に与えるビーム電流の影響

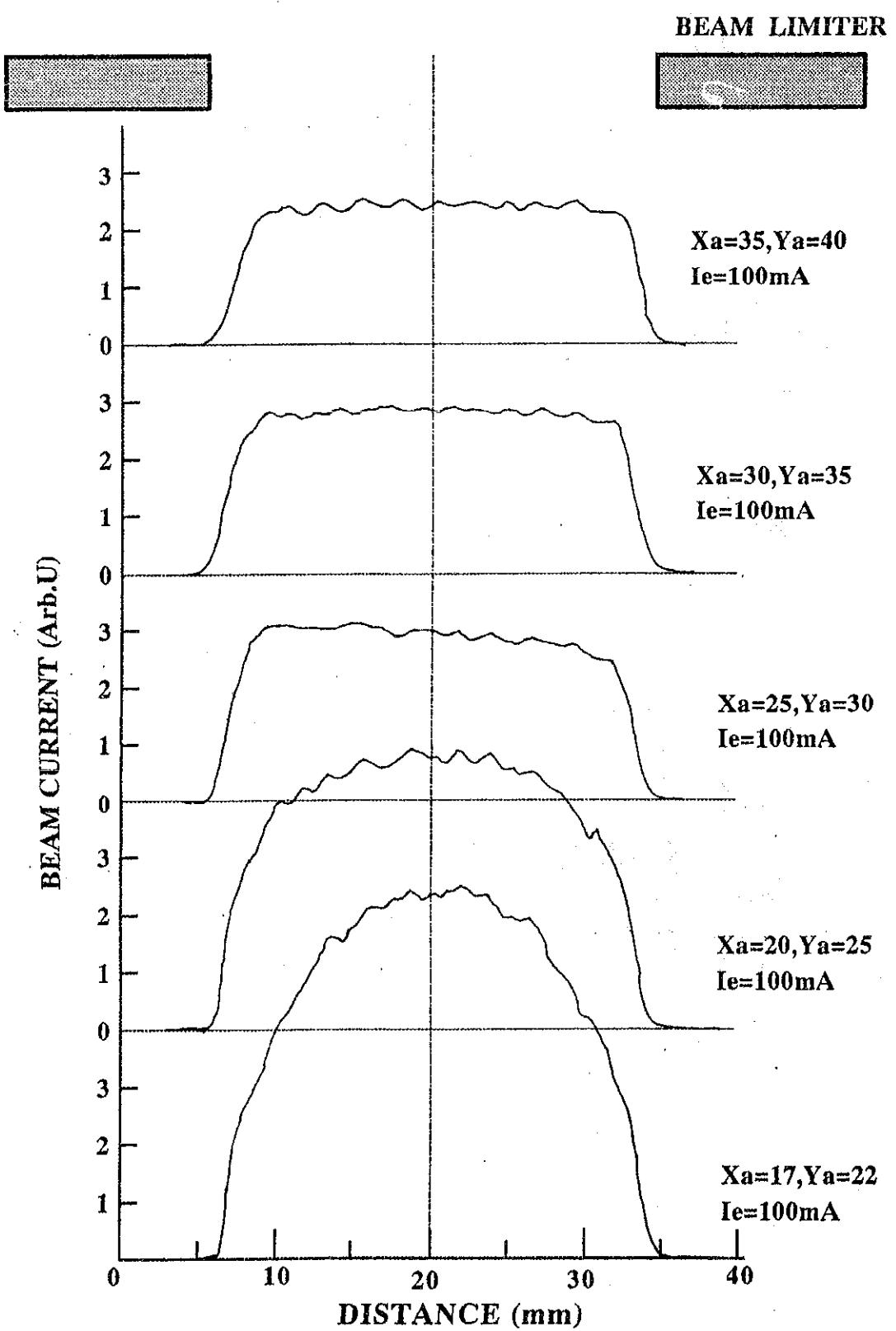


図21 ビームサイズ( $X_a, Y_a$ )を変化させた場合における接合材表面上のビーム電流分布

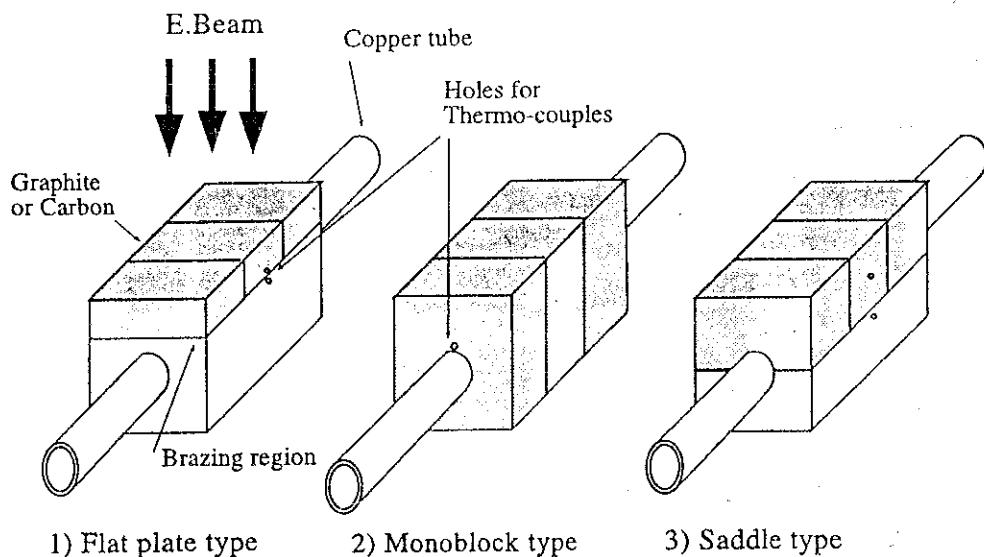


図 2 2 蝶付け接合材の代表的な3種類の構造

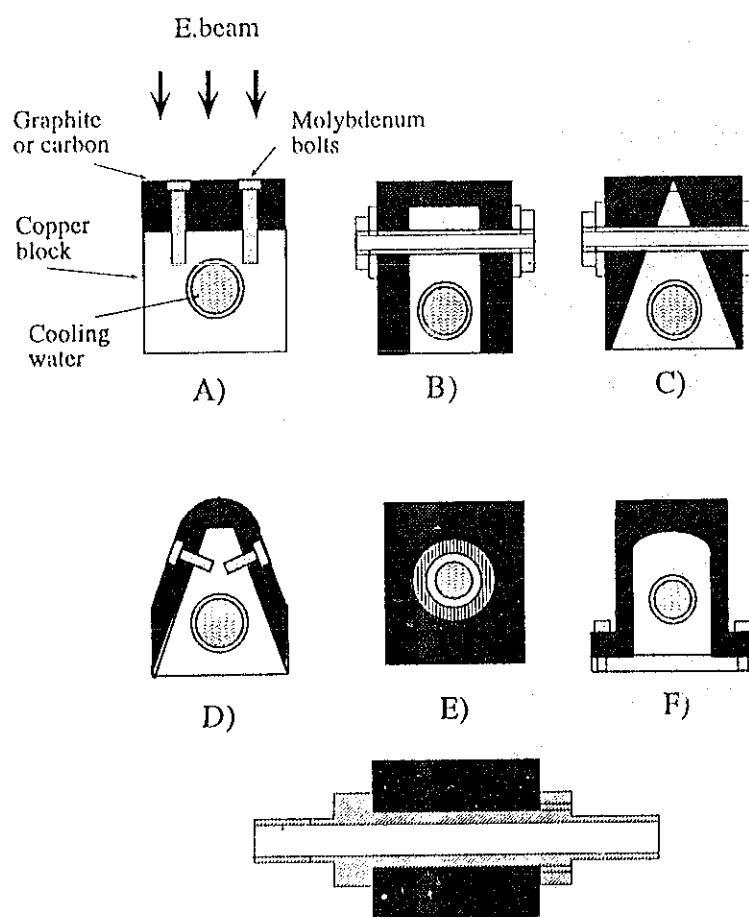


図 2 3 6種類の機械的接合材の構造。なお、一部の接合材に関しては試作し、熱特性を測定している。

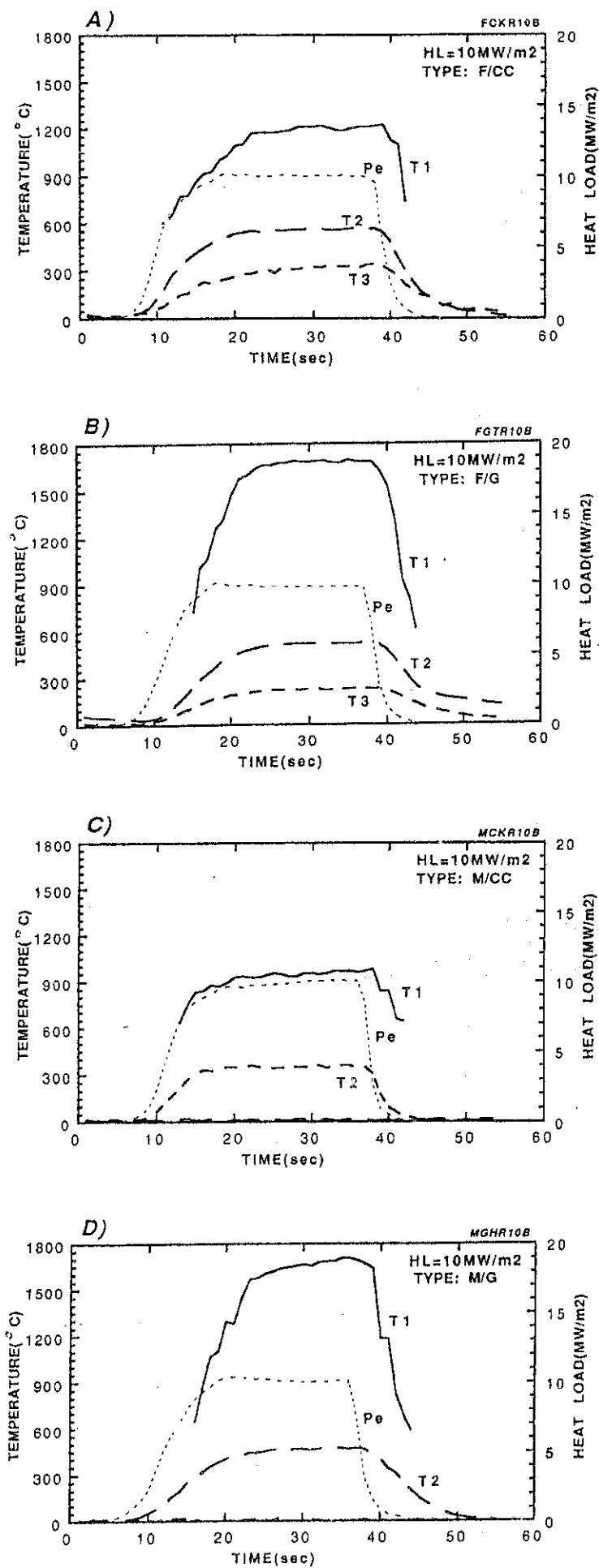


図 2.4 平板型(F/CC, F/IG)とモノブロック型(M/CC, M/IG)に関する代表的な熱応答波形  
Pe:熱負荷値、T1:表面温度、T2:接合材上部温度、T3:接合材下部温度

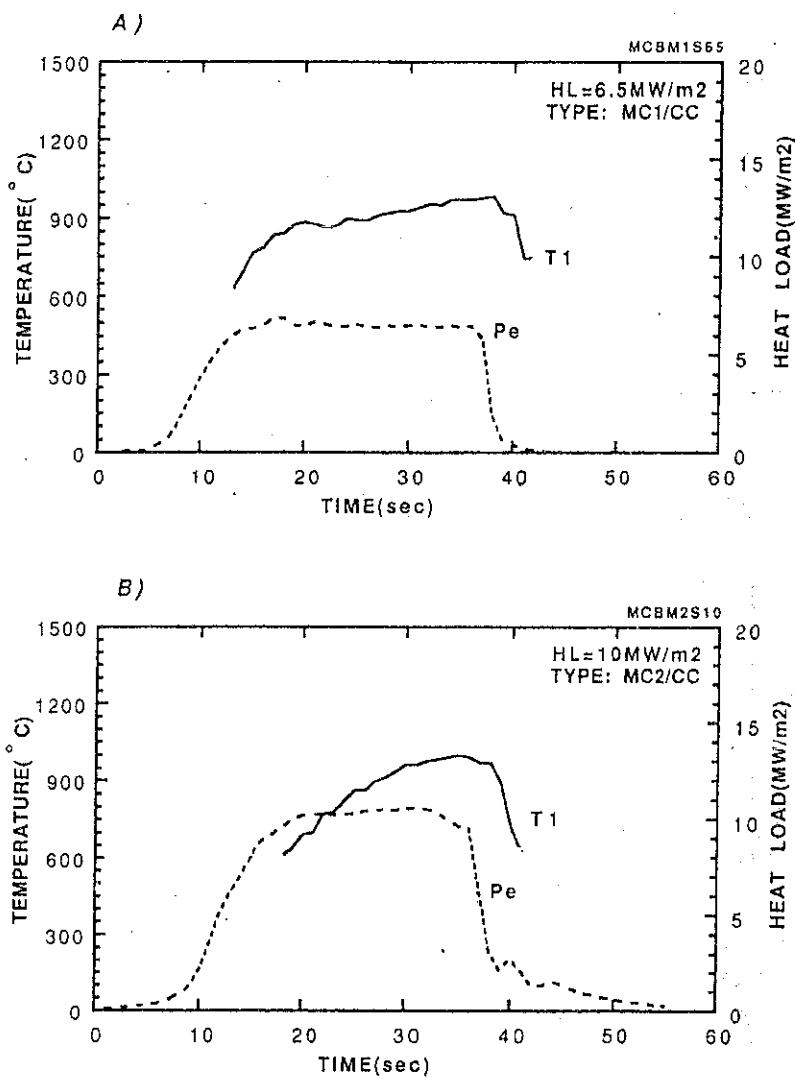


図 2.5 機械的接合材の熱応答波形、A):図 2.3 のB)の場合で熱負荷は $6.5 \text{ MW/m}^2$ 、  
B):図 2.3 のC)の場合で熱負荷は $10 \text{ MW/m}^2$

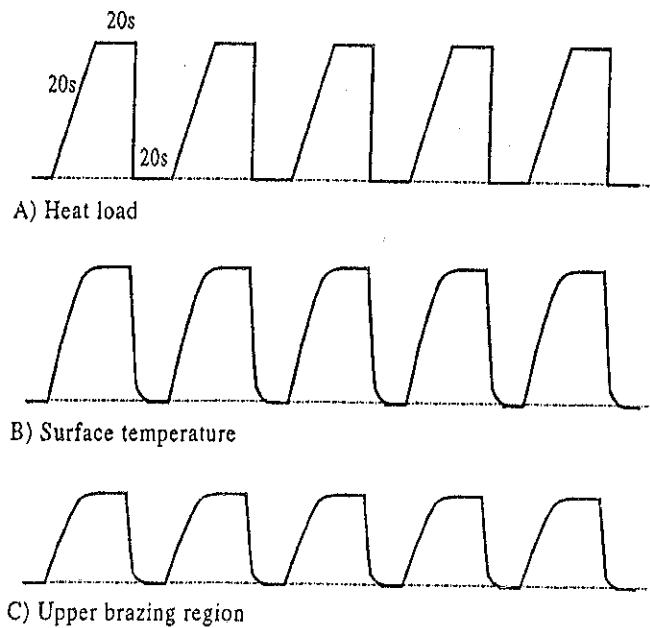


図 2.6 繰り返し熱負荷試験を行う場合の標準的熱負荷シーケンスと接合材の温度変化

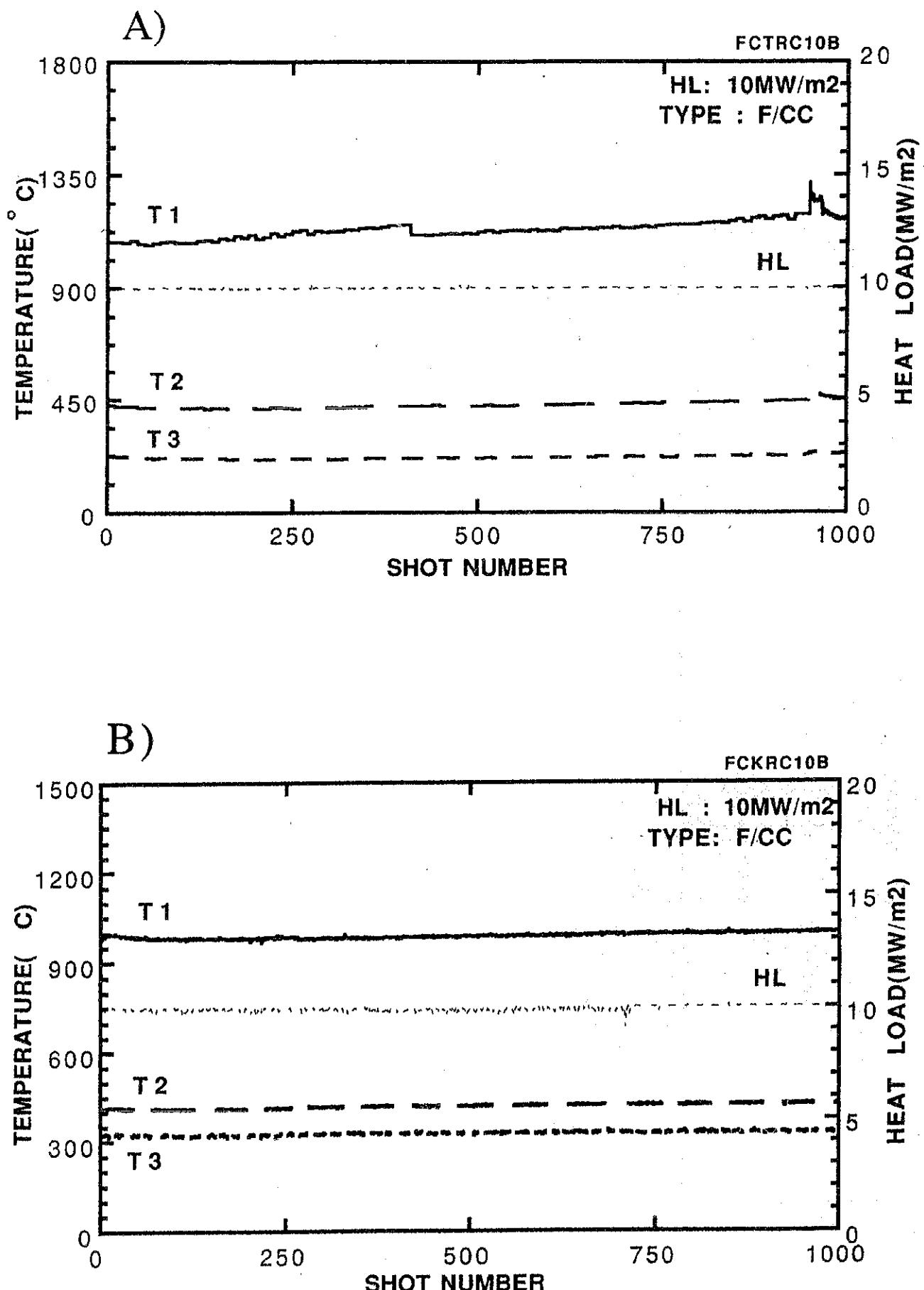


図27 繰り返し熱負荷試験の結果 A):全ビーム電流制御法で行った場合の各部の温度変化、B):接合材入射ビーム電流制御法で行った場合の各部の温度変化

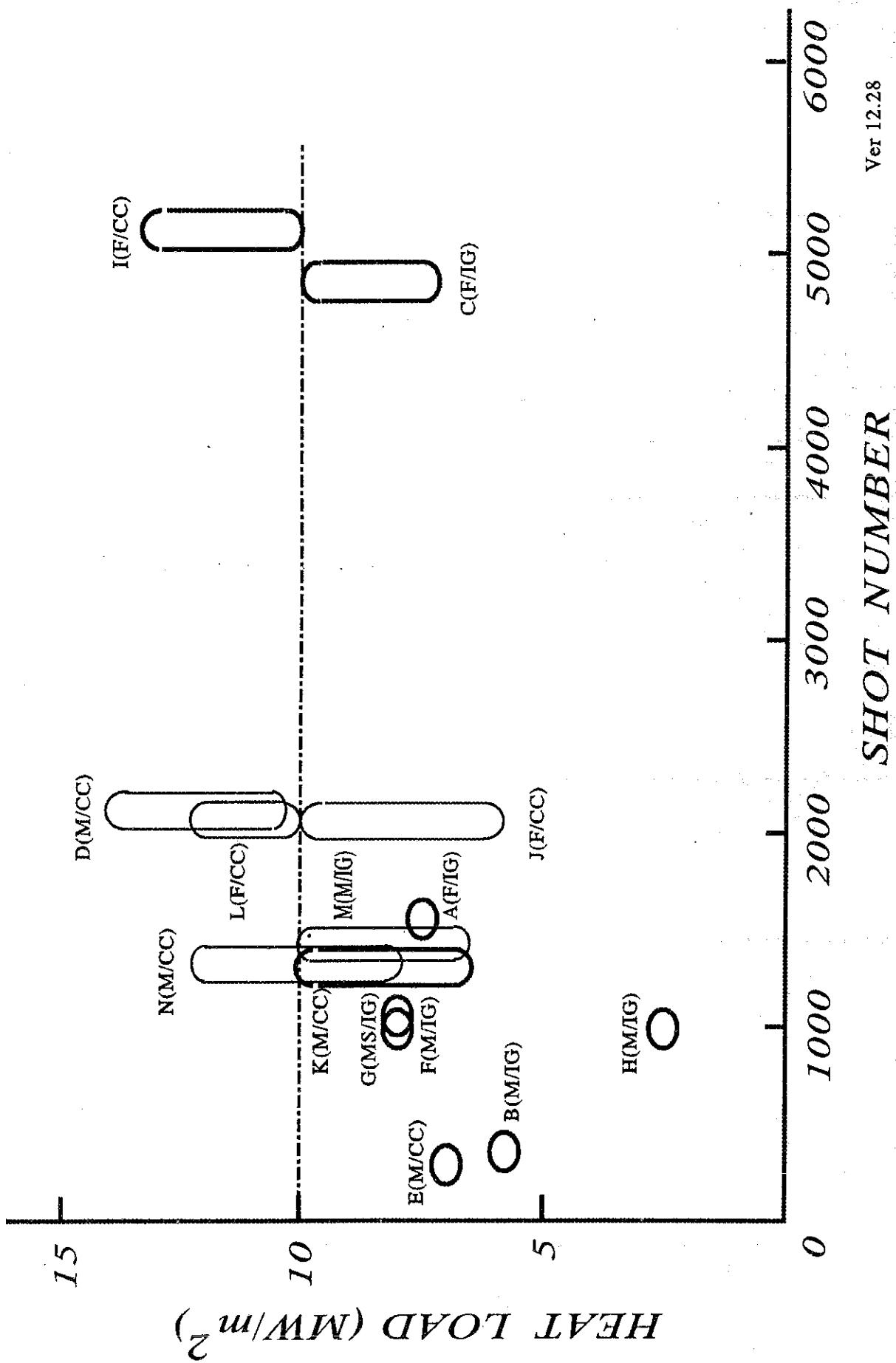


図 28 蟻付け接合材に対し今までにに行った繰り返し試験の結果で繰り返し回数とその場合の熱負荷条件の関係を示す。

SHOT NUMBER

Ver 12.28

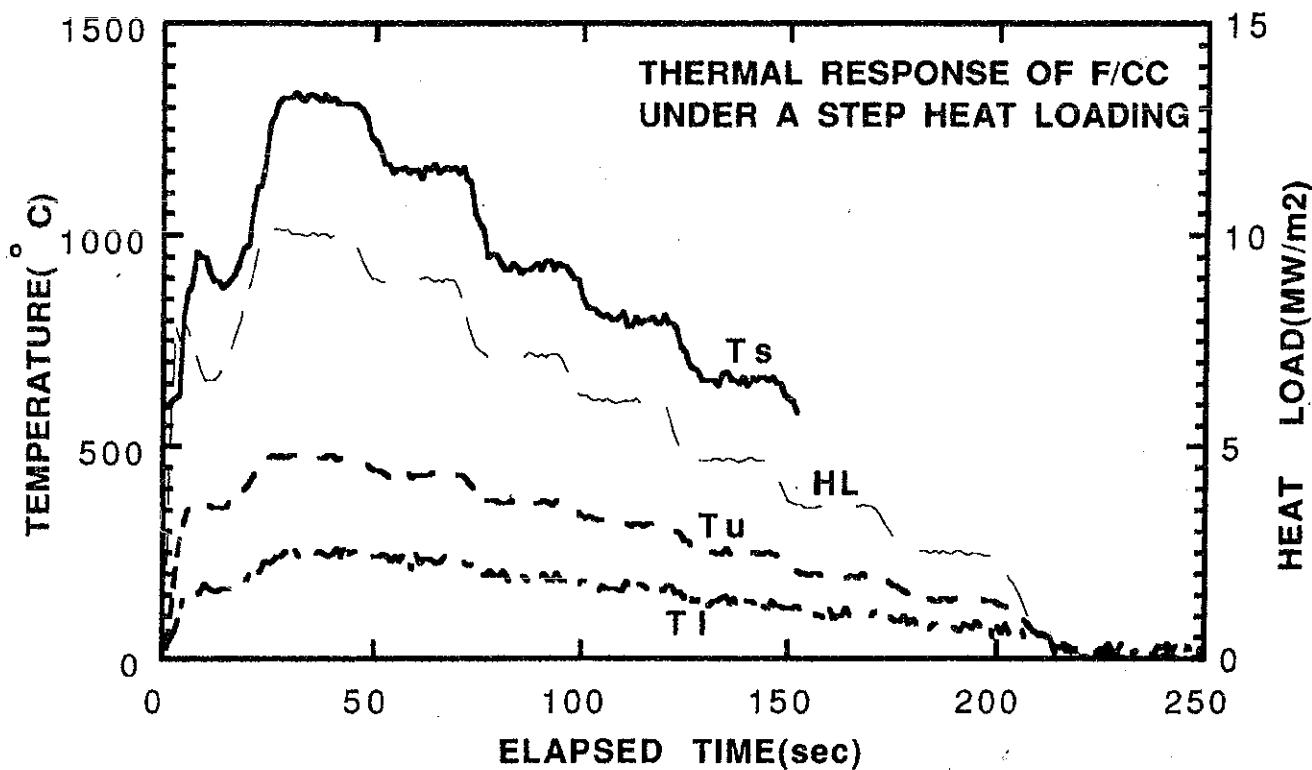


図29 繰り返し熱負荷試験を行う前と、行った後に接合部の熱伝導率の変化を評価するための階段状熱負荷試験の熱応答波形。

Ts:表面温度、HL:熱負荷、Tu:接合部上部温度、T1:接合部下部温度、

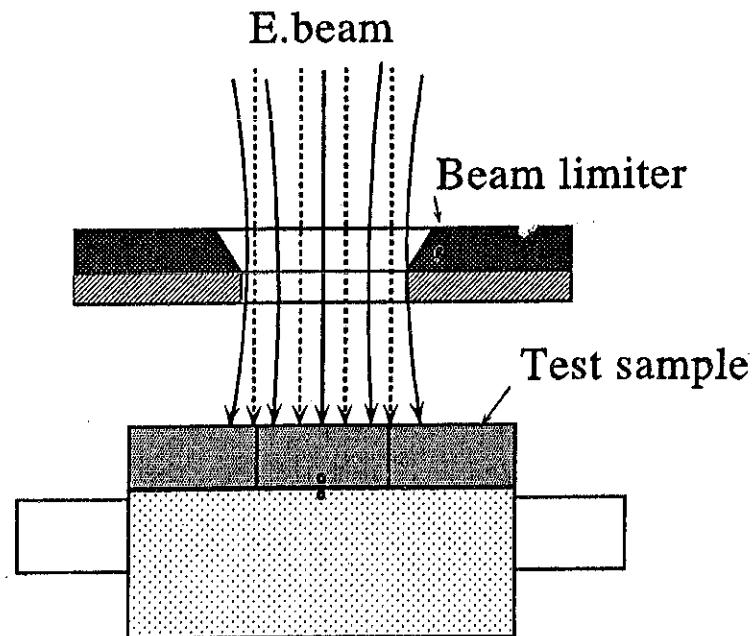


図30 真空度の変化が接合材表面上の電子ビーム照射領域に与える影響の模式図

実線：真空度が悪い状態で熱負荷試験を行う場合の電子ビーム軌道  
点線：高真空状態で熱負荷試験を行う場合の電子ビーム軌道

NIFS-MEMOシリーズ出版リスト  
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-1 都築哲哉、東井和夫、松浦清剛、「パソコンによる JIPP T-IIU プラズマの平衡位置フィードバック制御」1991年4月  
T.Tsuzuki, K.Toi and K.Matsuura, "Feedback Control of Plasma Equilibrium with Control System Aided by Personal Computer on the JIPP T-II Tokamak" ; Apr.1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-2 久保田雄輔、大林治夫、宮原昭、大野和子、中村光一、堀井憲爾、「環境磁界の研究(I)三次元積分磁束計の開発」1991年7月  
Y.Kubota, H.Obayashi, A.Miyahara, K.Ohno, K.Nakamura and K.Horii, "Development of Three-Dimensional Compact Magnetic Dosimeter for Environmental Magnetic Field Monitoring" , July,1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-3 「核融合科学研究所技術研究会」 1991年3月19、20日 土岐文化プラザ」  
1991年8月  
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories; Mar. 19, 20, 1991" Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-4 「プラズマ中におけるカオス現象」1991年8月  
"Chaotic Phenomena in Plasmas" , Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-5 山崎耕造、「ファジー論理のトロイダルプラズマ制御への応用」  
1992年2月 "Fuzzy Logic Application to Troidal Plasma Contol" , Feb. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-6 平成3年度 核融合科学研究所 支援調査共同研究報告書 「大出力マイクロ波源の開発に関する調査研究」1992年4月  
"Development of High Power Microwave Source" , Apr. 1992  
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-7 平成3年度 核融合科学研究所 共同研究(調査支援研究)研究成果報告書  
「プラズマにおけるカオス現象」1992年11月  
"Chaotic Phenomena in Plasma, II" , Nov. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-8 NIFSシンポジウム報告書「核融合炉材料照射用強力中性子源の設計と大学の役割」1993年1月  
"Design of Intense Neutron Source for Fusion Material Study and the Role of Universities" , Jan. 1993 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-9 平成2、3、4年度 核融合科学研究所共同研究研究会研究成果報告書  
「開放磁場における電位と輸送機構」1993年4月  
(Ed.) K. Yatsu and T. Hatori "Potential Formation and Transport in Open Field Line Systems" , Apr. 1993  
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-10 伊藤公孝、「人口太陽は燃えるか -核融合研究最前線-原子力オープン・スクール講演」1993年5月  
K. Itoh, Reports of NIFS Collaboration Workshop from 1990 to 1992 at National

Institute for Fusion SCience.

"At the Front of Fusion Research -Introductory Lecture Open to Public-",  
May 1993 (In Japanese)

NIFS-MEMO-11 (Ed.) T. Kato

"Atomic Physics and Radiation in Divertor and/or Disruption Plasmas",  
Aug. 1993 (In English)

NIFS-MEMO-12 平成 4 年度 核融合科学研究所 共同研究（調査支援研究）研究成果報告書  
「プラズマのカオス現象（まとめ）」1993年10月  
"Chaotic Phenomena in Plasma, III", Oct. 1993  
(In Japanese)