

JAERI-M
83-069

JT-60 NBIの中性化セルの構造設計

1983年5月

松岡 守・堀池 寛・伊藤 孝雄・栗山 正明
松田 慎三郎・森田 洋昭*・小原 祥裕・田中 茂

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

JT-60 NBI の中性化セルの構造設計

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

松岡 守・堀池 寛・伊藤 孝雄

栗山 正明⁺・松田 慎三郎・森田 洋昭^{*}

小原 祥裕・田中 茂

(1983年4月8日受理)

JT-60NBI の中性化セルは、一般的な中性化セルの機能の他に、残留イオンビームの衝突から偏向磁石を保護するために設けられたウォータージャケットへの熱負荷を軽減するように設計された。このような機能をもった中性化セルの設計は、偏向磁石やウォータージャケットなど隣接する他機器の設計と並行して総合的に進める必要があった。本報告では温度および熱応力分布の解析を含めた設計の経緯を述べる。

JT-60 NBI 原型ユニットによる予備的な試験結果も示し、計算結果と比較する。

+ 大型トカマク開発部

* 三菱重工

Structural Design of the Neutralizer for JT-60 NBI

Mamoru MATSUOKA, Hiroshi HORIIKE, Takao ITOH, Masaaki KURIYAMA,⁺
Shinzaburo MATSUDA, Hiroaki MORITA,^{*} Yoshihiro OHARA, and Shigeru TANAKA

Department of Thermonuclear Fusion Research

Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 8, 1983)

In addition to the general function of the neutralizer, the neutralizer for JT-60 NBI is especially designed to reduce the heat flux on a water jacket which protects a reflecting magnet from unneutralized ion beam bombardment. Therefore, the design of the neutralizer is closely related to those of nearby beam line components such as the magnet and the water jacket. In a present report, we describe the design process including the analyses of temperature and thermal stress distributions. Preliminary test results on the prototype NBI for JT-60 are also shown and are compared with the numerical analysis.

Keywords : JT-60, Neutral Beam Injector, Prototype Unit, Neutralizer, Heat Load, Active Cooling, Thermal Stress, HEATING3, SAP-V

+ Division of Large Tokamak Development

* Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 設計条件	2
2.1 基本寸法の設定	2
2.2 中性化セルの受ける熱負荷分布	4
2.3 中性化セルの概略形状の設定	6
3. 温度・熱応力分布の計算	17
3.1 温度分布の計算	17
3.2 熱応力分布の計算	17
4. 構造の決定	22
5. 原型ユニットにおける試験結果	27
6. まとめ	29
謝 辞	29
文 献	29

Contents

1. Introduction	1
2. Design Conditions	2
2.1 Setting of fundamental scales	2
2.2 Heat load distribution on the neutralizer	4
2.3 Setting of fundamental structure	6
3. Analyses of Temperature and Thermal Stress Distributions	17
3.1 Calculation of temperature distribution	17
3.2 Analysis of thermal stress distribution	17
4. Determination of Structure	22
5. Test Results on the Prototype NBI for JT-60	27
6. Summary	29
Acknowledgements	29
References	29

1. はじめに

中性粒子入射装置 (Neutral Beam Injector, 以下NBIと略す)では, イオン源によって発生させた高エネルギーイオンビームを中性化することにより高エネルギー中性ビームを得ている。JT-60 NBIでは, イオンビームは中性水素ガスとの荷電交換によって中性化される。つまりJT-60 NBIの中性化セルは, イオン源より流出する水素ガス及び中性化セル内に余分に注入される水素ガスに対しコンダクタンスを制限して必要排気量を小さく抑えかつ水素ガス綿密度を保つための単なるダクトである。

中性化セルの基本的機能は以上の通り単純である。しかしながら実際には設計上留意すべき点がいくつかある。その1つは, 中性化セルの内壁がイオンビーム及び中性ビームの一部の衝突により熱負荷を受けることである。必要排気量を抑えかつ綿密度を保つには中性化セルの断面積が小さい方が望ましいが, 断面積を小さくすると壁面の熱負荷が急激に増大する。したがって中性化セル断面の最小形状はビームの発散・軸ずれによって決まる。

また中性化セルの磁気シールドが効果的に機能するためには中性化セルの断面形状が小さいことが望ましい。磁気シールドはトカマク本体のポロイダル電流が作る漏洩磁場によりイオンビームが偏向されるのを防ぐためのものである。JT-60 NBIの中性化セル磁気シールドは, シールド係数を大きくする必要から2重磁気シールド方式が採用される¹⁾。2重磁気シールド方式では内外のシールド材のスケール比を大きく設定するほどシールド係数が大きくなる。外側のシールド材の寸法を大きくするとシールド材が吸い込む磁束密度が増すため, シールド材の厚みを大きくしなければならない。また他のビームライン機器との空間的取り合いも難しくなる。代わりに内側のシールド材の寸法を小さくすることが望ましい。このためには中性化セルの全体形状が小さくしなければならない。

中性化セルの概略形状は以上のような条件で決まる。一方JT-60 NBIでは中性化セルにイオンビームリミタとしての機能も持たせることとなった。JT-60 NBIでは(イオン)ビームダンプへの熱流束を低減するため, 反射型の偏向磁石を用いてイオンビームを水平方向に大きく発散させるように設計されている²⁾。この方式ではイオンビームの一部が偏向磁石のポールピース方向に向かう。このようなイオンビームによる熱負荷から偏向磁石を保護するために偏向磁石のイオン源側の面を多数の冷却管から成るウォータージャケットで覆うこととした。ところがこのウォータージャケットは偏向磁石を覆うものであるが故に, イオンビームが磁場で偏向され発散される領域から十分な距離をとることができない。このためウォータージャケットへの熱流束はその形状次第ではビームダンプへの熱流束より大きくなってしまふ。イオンビーム熱負荷計算コード³⁾を用いた詳細なシミュレーションの結果, ウォータージャケットへの熱流束を許容値内に抑えることはこのままでは不可能なことが判明した。この対策として, 中性化セルの出口側を延長しウォータージャケットに当たるイオンビームの一部をここで受けとめることによりウォータージャケット面への熱流束の低減を図った。中性化セルの延長部(フィン)はイオンビームリミタであり, 本来の中性化セルの機能とは関係がないが, 本来の中性化セル

の部分と一体構造となることから以下では延長フィンを含めて中性化セルと呼ぶこととする。JT-60 NBI の中性化セルはこの延長フィンがあるため通常の中性化セルとは異なり、大きな熱負荷のある受熱機器となる。事実、JT-60 NBI 原型ユニットの実験によれば、イオン源で発生するビームエネルギーの約10%が中性化セルで消費される。^{4), 5)}

本報告では、中性化セルの設計のうちこのような受熱機器としての熱的機械的な構造設計と、予備的な試験結果とを示す。上記のように他機器の設計と並行して進めたため、中性化セルの設計過程に用いた計算条件等は最終形状に対するものと多少異なっている。なお中性化セル本来の機能に関する概念設計は文献6)に、ガスの流れに関するより厳密な考察は文献7)に既に報告されている。

第2章では中性化セルの構造設計を行うに必要な設計条件を示し、中性化セルの概略形状を与えられた形状に対して行った温度・熱応力分布の計算結果とその評価を第3章に示す。第4章ではこれらの計算結果を基に定めた中性化セルの最終形状を示す。第5章ではJT-60 NBI 原型ユニットで得た予備的な実験結果と第3章での計算結果とを比較・考察する。最後に第6章にまとめを記す。

2. 設 計 条 件

2.1 基本寸法の設定

第1図にJT-60 NBI 原型ユニットの全体図を示す。JT-60 NBI は上下ユニット合せて14ユニットから成り、本原型ユニットはJT-60 NBI の下ユニットに相当する。以下第1図の原型ユニットについてその構成を説明する。

2台のイオン源から引き出されたイオンビーム(標準定格運転時75 keV, 35 A × 2台, 10秒)は別々の中性化セルで中性化される。2つのイオン源は上下に配置されており、原型ユニットでは下側のイオン源をイオン源I, 上側のイオン源をイオン源IIと呼ぶ。また対応するイオン源のビームの中心軸をイオン源I, II中心軸、中性化セルを中性化セルI, IIと呼ぶ。中性化セル磁気シールドは内層は別々に設けられているが、外層は共通となっている。中性化セル磁気シールドはイオン源を覆うイオン源磁気シールドと磁氣的に接続されている。中性化セルで中性化された中性粒子ビームはイオン源のコンディショニング及びフラッシング時はカロリメータに、インジェクション時はドリフト管を介してターゲット容器内のビームターゲット(JT-60 NBI の場合は本体プラズマ)に打ち込まれ熱化される。中性化セルで中性化されなかった残留イオンビームは偏向磁石により曲げられビームダンプで熱化される。JT-60 本体のポロイダル電流が作る磁場はイオン源のソースプラズマ及び中性化セル内のイオンビームのみならず、偏向磁石からビームダンプに至る残留イオンビームの軌道にも影響を与える。後者に対する対策として、偏向磁石及び中性化セル磁気シールドの周囲に各々巻かれた打消コイルにより逆方向の磁場を発生させ、漏洩磁場を打ち消す能動的磁気シールド方式が採用されている。⁸⁾

2台のイオン源からはそれぞれ12 cm × 27 cm の矩形グリッド面より発散角(ω_{1c}) 1.2° 以

の部分と一体構造となることから以下では延長フィンを含めて中性化セルと呼ぶこととする。JT-60 NBI の中性化セルはこの延長フィンがあるため通常の中性化セルとは異なり、大きな熱負荷のある受熱機器となる。事実、JT-60 NBI 原型ユニットの実験によれば、イオン源で発生するビームエネルギーの約10%が中性化セルで消費される。^{4), 5)}

本報告では、中性化セルの設計のうちこのような受熱機器としての熱的機械的な構造設計と、予備的な試験結果とを示す。上記のように他機器の設計と並行して進めたため、中性化セルの設計過程に用いた計算条件等は最終形状に対するものと多少異なっている。なお中性化セル本来の機能に関する概念設計は文献6)に、ガスの流れに関するより厳密な考察は文献7)に既に報告されている。

第2章では中性化セルの構造設計を行うに必要な設計条件を示し、中性化セルの概略形状を与えられた形状に対して行った温度・熱応力分布の計算結果とその評価を第3章に示す。第4章ではこれらの計算結果を基に定めた中性化セルの最終形状を示す。第5章ではJT-60 NBI 原型ユニットで得た予備的な実験結果と第3章での計算結果とを比較・考察する。最後に第6章にまとめを記す。

2. 設 計 条 件

2.1 基本寸法の設定

第1図にJT-60 NBI 原型ユニットの全体図を示す。JT-60 NBI は上下ユニット合せて14ユニットから成り、本原型ユニットはJT-60 NBI の下ユニットに相当する。以下第1図の原型ユニットについてその構成を説明する。

2台のイオン源から引き出されたイオンビーム(標準定格運転時75 keV, 35 A × 2台, 10秒)は別々の中性化セルで中性化される。2つのイオン源は上下に配置されており、原型ユニットでは下側のイオン源をイオン源I, 上側のイオン源をイオン源IIと呼ぶ。また対応するイオン源のビームの中心軸をイオン源I, II中心軸, 中性化セルを中性化セルI, IIと呼ぶ。中性化セル磁気シールドは内層は別々に設けられているが、外層は共通となっている。中性化セル磁気シールドはイオン源を覆うイオン源磁気シールドと磁氣的に接続されている。中性化セルで中性化された中性粒子ビームはイオン源のコンディショニング及びフラッシング時はカロリメータに、インジェクション時はドリフト管を介してターゲット容器内のビームターゲット(JT-60 NBI の場合は本体プラズマ)に打ち込まれ熱化される。中性化セルで中性化されなかった残留イオンビームは偏向磁石により曲げられビームダンプで熱化される。JT-60 本体のポロイダル電流が作る磁場はイオン源のソースプラズマ及び中性化セル内のイオンビームのみならず、偏向磁石からビームダンプに至る残留イオンビームの軌道にも影響を与える。後者に対する対策として、偏向磁石及び中性化セル磁気シールドの周囲に各々巻かれた打消コイルにより逆方向の磁場を発生させ、漏洩磁場を打ち消す能動的磁気シールド方式が採用されている。⁸⁾

2台のイオン源からはそれぞれ12 cm × 27 cm の矩形グリッド面より発散角($\omega_{1/2}$)1.2°以

下のイオンビームが引き出される。発散角は加速電圧の増大と共に小さくなり、100 kVでは 0.9° 前後となることが既に確かめられている。ビームの発散角が大きい程中性化セルへの熱負荷も大きくなる。そこで設計値としては $\omega_{ire} = 1.2^\circ$ を採用した。磁場によるイオンビームの偏向がない場合には、中性化セルの内面寸法はビームの発散と内壁の許容熱負荷が与えられればその下限値が決まる。内面寸法は14 cm×29 cmとされた。次節に示すように、この寸法は磁場の影響がない場合には熱負荷の点において十分余裕のあるものである。中性化セルの全長は延長フィンを除いて約1.7 mと設定されている。但し、イオン源と中性化セルの間にはイオン源の角度調整機構等が入るので中性化セルの実効的な長さは2.25 mとなる。以下ではこの実効的な長さを尊重して、中性化セル出口と呼ぶ場合には延長フィンの根元（イオン源の加速電極から2.25 m）を指すものとする。即ち、延長フィンは中性化セル出口よりさらに下流に伸びていることとなる。

第2図 a) に側面より見た中性化セル、中性化セル磁気シールド、偏向磁石、ビームダンプ、ビームダンプ面上の熱負荷の位置を示す。同図 b) は上方より見た偏向磁石、ウォータージャケット受熱面、ビームダンプ受熱面と残留イオンビームの軌道である。ウォータージャケットとビームダンプの形状は、想定される最大のビームの軸ずれ、各機器の設置誤差、JT-60からの漏洩磁場によるイオンビームの偏向の効果²⁾を考慮しても、受熱面の熱流束が許容値を越えない曲面となるよう設計された。但し中性化セルに延長フィンがあることを前提としている。ウォータージャケット、ビームダンプはいずれも許容熱流束を 500 W/cm^2 ¹⁰⁾として設計されている^{11), 12)}。第2図 b) から明らかなように偏向磁石の磁場によるイオンビームの折り返し点とウォータージャケットの受熱面とは十分な距離をとることができない。ビームの軸ずれ等を考慮しない場合、つまりイオンビーム軌道の分布を一種に限る場合には、上記の距離が短くてもウォータージャケットの受熱面をイオンビーム軌道にほぼ平行とすることにより熱流束を下げる事ができる。しかしながら予想されるビームの軸ずれ等を考慮した場合には、中性化セルに延長フィンを設けなければウォータージャケットの受熱面での熱負荷を許容値内に抑えることができないことがイオンビーム熱負荷計算コードを用いた計算機シミュレーションにより明らかとなった。中性化セルの延長フィンもビームダンプやウォータージャケットと同様受熱機器として十分配慮した構造とすれば、後者と同様に 500 W/cm^2 程度の熱流束まで許容されるであろう。しかしながら中性化セルの場合はその占める空間が制限されているため、このような限界設計を避け最大熱流束を 300 W/cm^2 と設定して設計を進めた。この条件と次節の熱負荷計算から、中性化セル I, II の延長フィンの長さをそれぞれ17.1 cm, 48 cmとした（但し最終形状では同17.1 cm, 41.4 cmとした）。その結果、計算機シミュレーションではウォータージャケット面での熱流束が許容値内に抑えられることが示された²⁾。したがって、中性化セルの構造設計は延長フィン上の最大 300 W/cm^2 の熱流束に対し温度上昇、熱応力が許容値内に入るようにすることに帰着する。

なお、中性化セル壁面の厚みは1 cmとし自立型とする。これは中性化セルを他機器、例えば偏向磁石から支持をとることは製作上難があること（中性化セルは中性化セル磁気シールドと共にイオン源側のポートから差し込む）、あるいは中性化セル磁気シールドから支持をとった場合には、中性化セルが熱変形する際に中性化セル磁気シールドにも応力が発生し、磁性が悪化

する恐れがあるためである。

2.2 中性化セルの受ける熱負荷分布

中性化セル内壁の熱負荷は中性粒子ビームによるものとイオンビームによるものから成る。磁気シールドが不完全な場合、軌道が曲るためイオンビームによる熱負荷は急激に増す。

まず磁場の影響がない場合、即ち磁気シールドが完全として中性粒子ビーム及びイオンビームの両方による熱負荷をビーム強度分布計算コード「BEMPROF」¹³⁾を用いて計算した。その結果の例を第3図a) b)に示す。計算条件はa)が発散角 1.0° 、軸ずれなし、b)が発散角 1.2° 、軸ずれ有り(横方向 0.3°)で、いずれもビームの発散はガウス分布を仮定している。これらの図より磁場の影響のない場合の概略の傾向がわかる。つまり、①ビームラインに沿っての熱負荷はイオン源近くを除いてほぼ直線的に増加する、②熱負荷は中性化セルの左右が大きく、上下は小さい、こと等である。

次に、磁場によるイオンビームの偏向の効果を入れた場合の中性化セルの熱負荷分布をイオンビーム熱負荷計算コードにより求めた。中性化セル内では荷電交換の過程が進むので、例えばイオンビームが外部磁場により少し偏向されたあと中性化されて直進する、というような粒子も厳密な熱負荷分布を求めるには考慮しなければならない。以下では簡単のためすべてイオンビームとし、中性化されないものとして計算した。これは、外部磁場による偏向で熱負荷が集中するものとすれば実際より厳しい条件となる。

第4図a), b)は中性化セルI, c), d)は中性化セルIIの左右の熱負荷分布である。計算条件は100 keV, 40A×2台に相当するもので、ビーム発散角 1.2° 、軸ずれ有り(イオン源より見て左側に 0.3°)、偏向磁石の磁場、JT-60からの漏洩磁場共ある場合である。イオン種は H^+ _(100 keV)のみとした。偏向磁石の磁場分布には、2次元磁場分布計算コード「TRIM」¹⁴⁾で求めたものを用いた。JT-60からの漏洩磁場については簡単のため同コードで求めた磁場分布を基に関数形で与えた。

偏向磁石による磁場は磁極付近だけでなく、中性化セル磁気シールドの一部をも含む広い領域にわたっている。第5図は偏向磁石の磁力線とイオンビーム軌道の計算結果であるが、この様子が良くわかる。第5図に示される中性化セル出口付近までふくらんだ磁力線により、第2図a)のように偏向磁石に斜めに入射したイオンビームは第2図b)や第5図のように左右に発散される。この作用を用いてビームダンプへの熱流束を低減している。一方中性化セルの延長フィンやウォータージャケットへの熱流束は同じ理由で増す。第4図の熱負荷分布を求めるのに用いた偏向磁石の形状は最終的に採用されたものとは若干異なる。しかし中性化セル出口付近の磁場分布は中性化セル磁気シールド出口端の磁場の吸い込みでほぼ決まる(第5図参照)。したがって中性化セル延長フィンの熱負荷分布は最終形状においても第4図のものとあまり変わらないと考えられる。

JT-60からの漏洩磁場は次式で与えた。

$$B_x(x) = -30 \exp \left\{ - \left(\frac{x-60}{14} \right)^2 \right\} \quad (G, \text{cm})$$

但し座標系は第2図a)に示されているものである。この近似は、当初想定していた漏洩磁場磁気シールドを用いた場合に対するもので、最終的に採用された打消コイルによる能動的磁気シールドを用いた場合には残留漏洩磁場は上式より小さくなる⁸⁾。したがって上式で近似した漏洩磁場は中性化セルの熱負荷について実際より厳しい条件となっている。また B_x を負にとったことにより、イオンビームはイオン源側より見て左側に曲る。これは仮定したイオン源の軸ずれと同方向であり、中性化セルの熱負荷に関しては最も厳しい条件である。

第4図から、中性化セルI、IIの熱負荷はほぼ同等である。中性化セル出口で比較すると中性化セルIの方が熱負荷は大きい。これは中性化セルIの方が中性化セルIIより出口端が偏向磁石に近い(第2図a)参照)ので、イオンビームがより上流側(イオン源側)から磁場で偏向されるからである。

第4図では2次元磁場分布計算コードの結果を磁場データとして用いたので偏向磁石下端のフリンジ磁場の効果が入っていない。偏向磁石下端のフリンジ磁場はイオン源Iからのイオンビームを左右方向に収束するように働く。したがって中性化セルIの熱負荷は第4図a), b)よりは少なくなると考えられる。

第6図は漏洩磁場磁気シールドのない場合の中性化セルIIの熱負荷の計算結果である。計算条件は発散角 1.2° 、軸ずれ有り(左方向 0.3°)である。第4図c)と第6図a)を比較すると、第4図c)では $\ell = 2.3\text{m}$ からなだらかに熱負荷が増すのに対し、第6図a)では $\ell = 2.5\text{m}$ から急激に増す。この違いは漏洩磁場の有無にあると考えられる。

第4、6図に、異なる条件における計算結果を示したがこれらはいずれも最終形状とは異なる。最終形状では漏洩磁場磁気シールドの代りに打消コイルを用い、偏向磁石の磁極形状に改良が施された。この点で第4、6図の計算結果は不完全であるが、以下の理由で第6図を用いて中性化セルIIについて温度上昇・熱応力の評価を行うこととした。まず第4図から中性化セルI、IIの熱負荷はほぼ同等であるが、偏向磁石下端のフリンジ磁場により中性化セルIの熱負荷は減ると予想されることから、中性化セルIIを計算の対象とした。最終形状では打消コイルを採用したので、漏洩磁場磁気シールドのない場合である第6図がより最終形状に近い。第6図では漏洩磁場を考慮していないが、打消コイルを用いる場合は中性化セルの延長フィンの熱負荷に対してはほとんど影響ない程度に磁場を低減できると予想される⁸⁾ことから、第6図の計算結果をそのまま用いることとした。中性化セルの熱負荷としては第3図の中性粒子ビームによる分もある。第6図では全てイオンビーム(中性化効率0%)として計算している。したがって第6図は本来中性粒子ビームとなって磁場の影響を受けない分のビームもイオンビームとして磁場で偏向されとした場合の熱負荷分布である。つまり第6図の熱負荷分布を計算条件とすれば実際より厳しい条件となる。

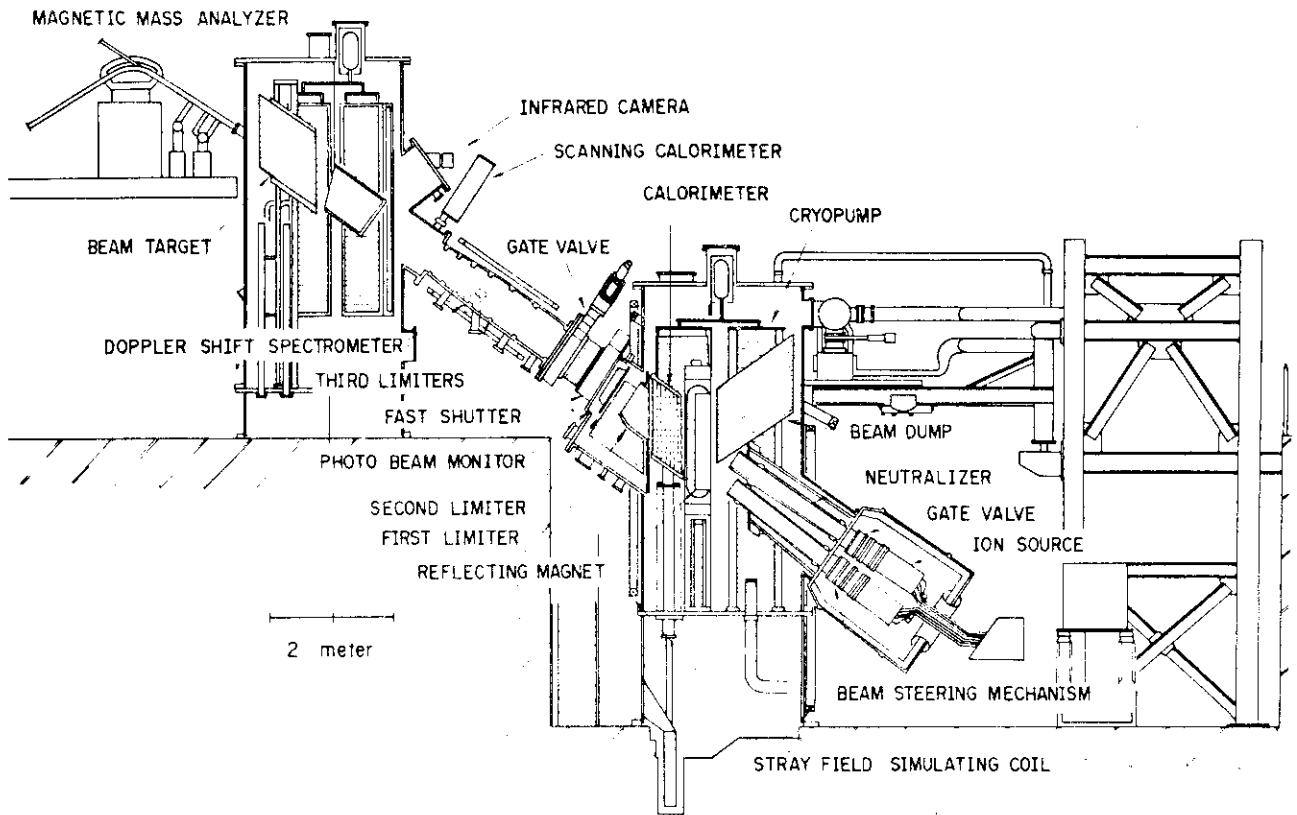
第6図を基にして実際の計算に際し与えた熱負荷分布を第7図に示す。第7図a)の中性化セル左右の熱負荷は中性化セル延長フィンの先端、上下は中性化セル出口のものである。上下の熱負荷は中性粒子ビームによる熱負荷分布(第3図)を基にした。第7図b)はイオン源II中心軸に沿っての中性化セルの左右の壁の熱負荷の与え方を示したものである。第7図a)の左右の熱負荷を基にイオン源引き出し電極からの距離に応じて第7図b)の定数aを乗じて中性化セルの熱負荷とした。中性化セルの上下の壁の熱負荷は、中性化セルの入口($\ell = 55\text{cm}$)で熱負荷を

0, 中性化セル出口の熱負荷を第7図a)として線形補間した。

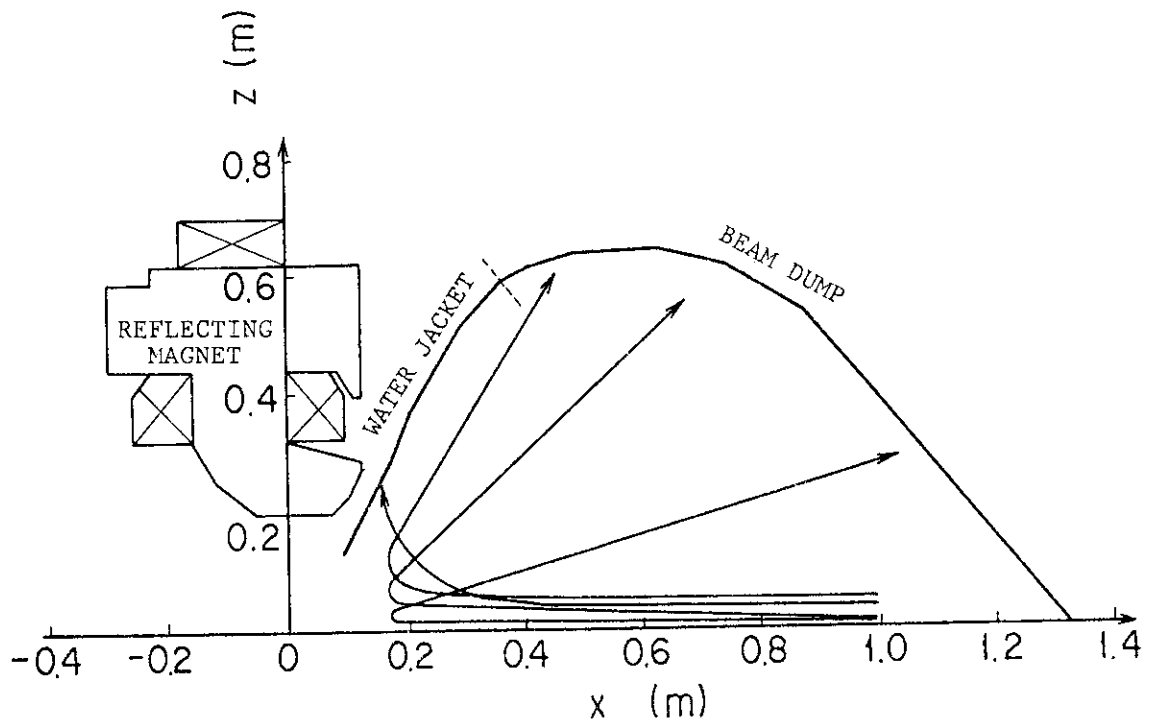
2.3 中性化セルの概略形状の設定

第7図の熱負荷分布を参考に温度上昇・熱応力評価のために中性化セルの概略形状を第8図のように設定した。中性化セルのダクトは1cm厚の壁に冷却用の矩形断面のホロー導体を半埋込状態に銀ロー付けする(同図a)。同図b)は冷却路及び冷却水ヘッダの構造を示したものである。中性化セルのダクト部分は熱負荷を受けて伸びるのに対し、冷却水ヘッダはほとんど温度変化がないので変形しない。そこで冷却水ヘッダを中性化セルのダクト部分から離して熱応力の軽減を図った(同図c)。また延長フィンの先端まで埋め込まれたホロー導体は丸みを持った折り返しを経て冷却水ヘッダに接続する。この構造により延長フィンの変形はホロー導体で吸収される。中性化セルの材料としては温度特性の良い0.2%銀入り無酸素銅を想定した。

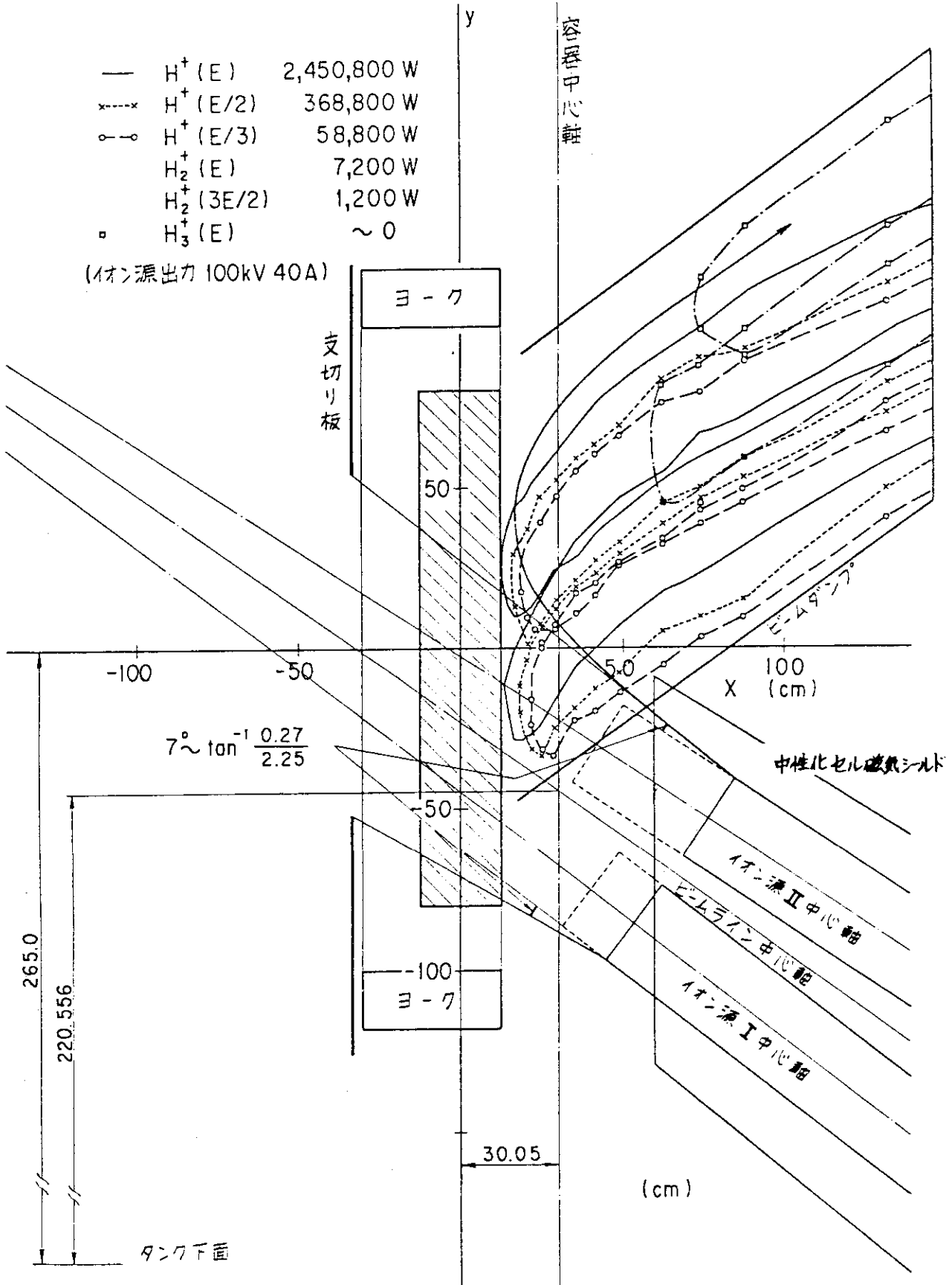
TARGET CHAMBER DRIFT TUBE BEAM LINE CHAMBER



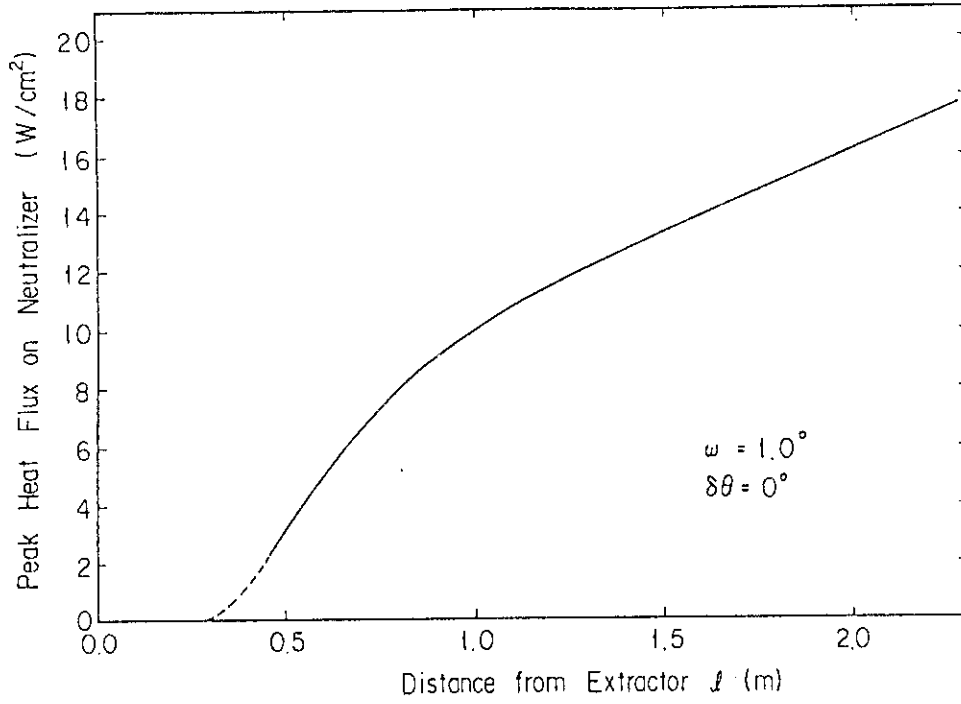
第1図 JT-60 NBI 原型ユニット



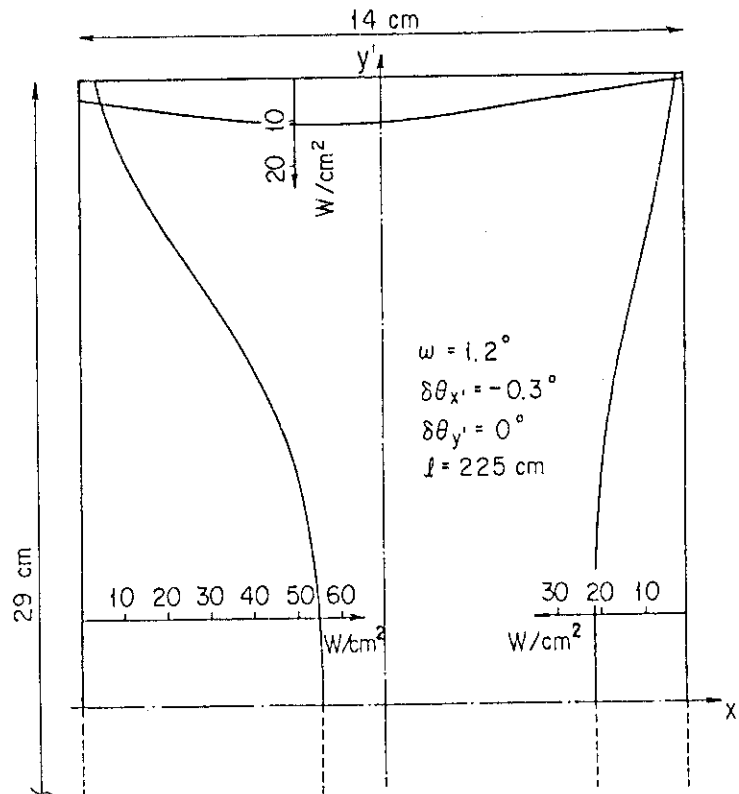
第2図 b) 上方より見た偏向磁石，ウォータージャケット受熱面，ビームダンプ受熱面と残留イオンビームの概略の軌道



第2図 a) 側面より見た中性化セル，中性化セル磁気シールド，偏向磁石，ビームダンプ，ビームダンプ面上の熱負荷の位置

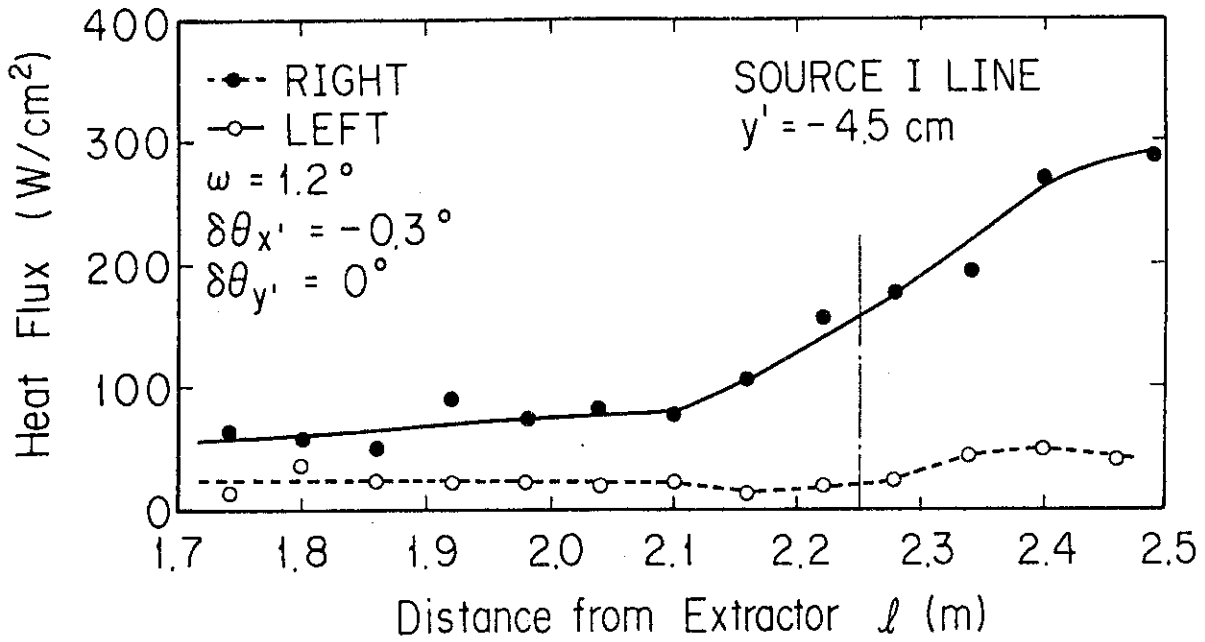


a) 発散角 1.0° , 軸ずれなし

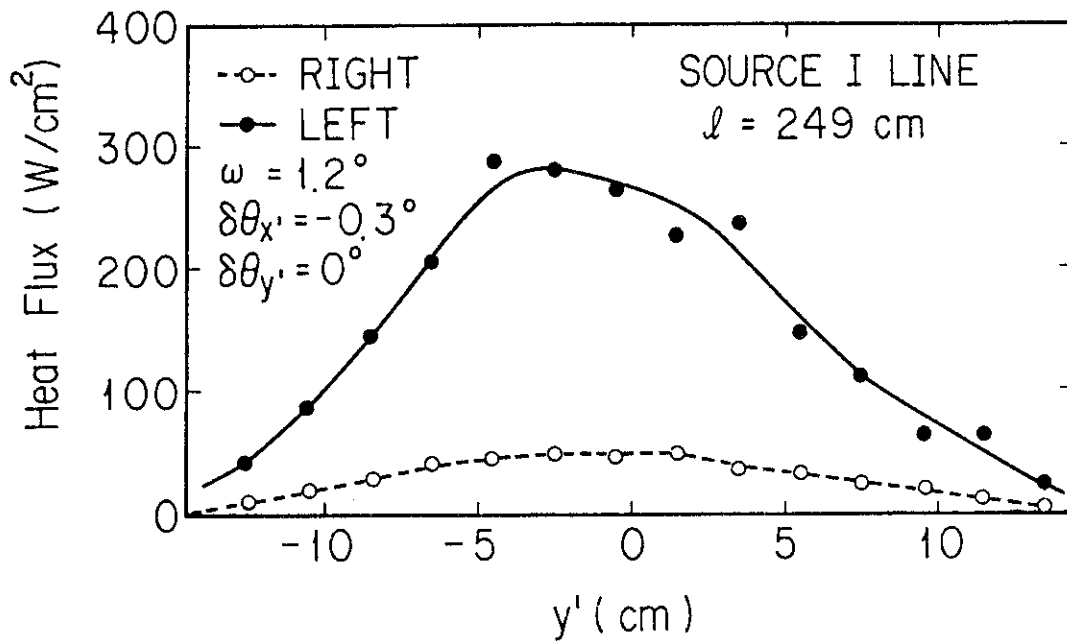


b) 発散角 1.2° , 軸ずれ有り (横方向 0.3°)

第3図 磁場の影響がない場合の中性化セルの熱負荷

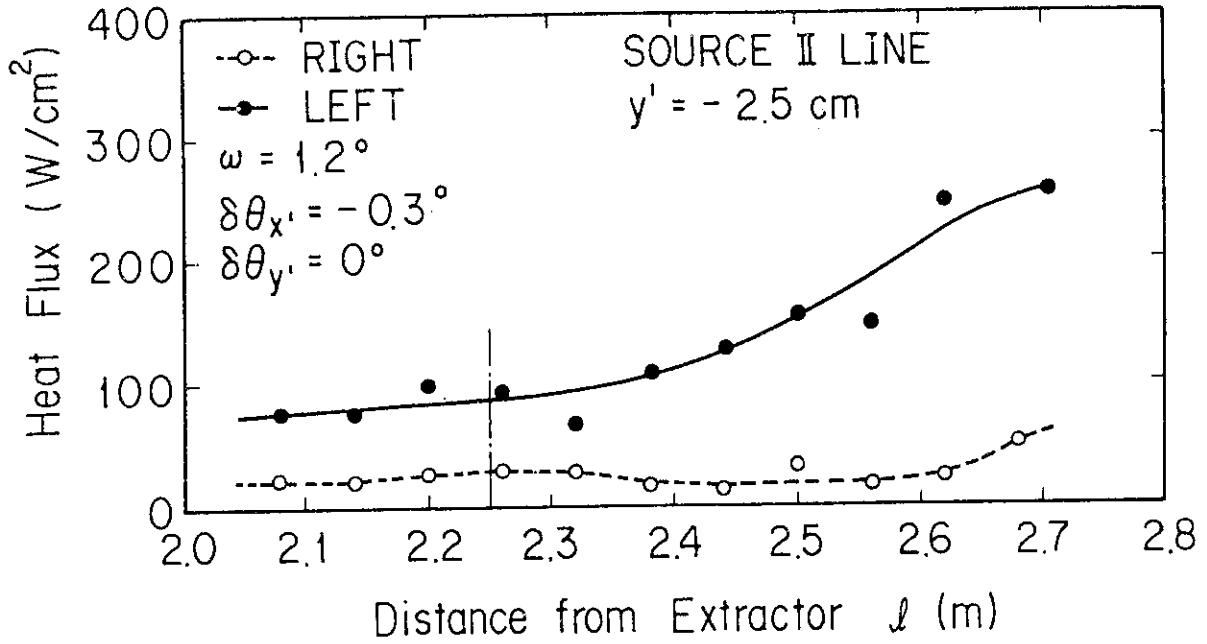


第4図 a)

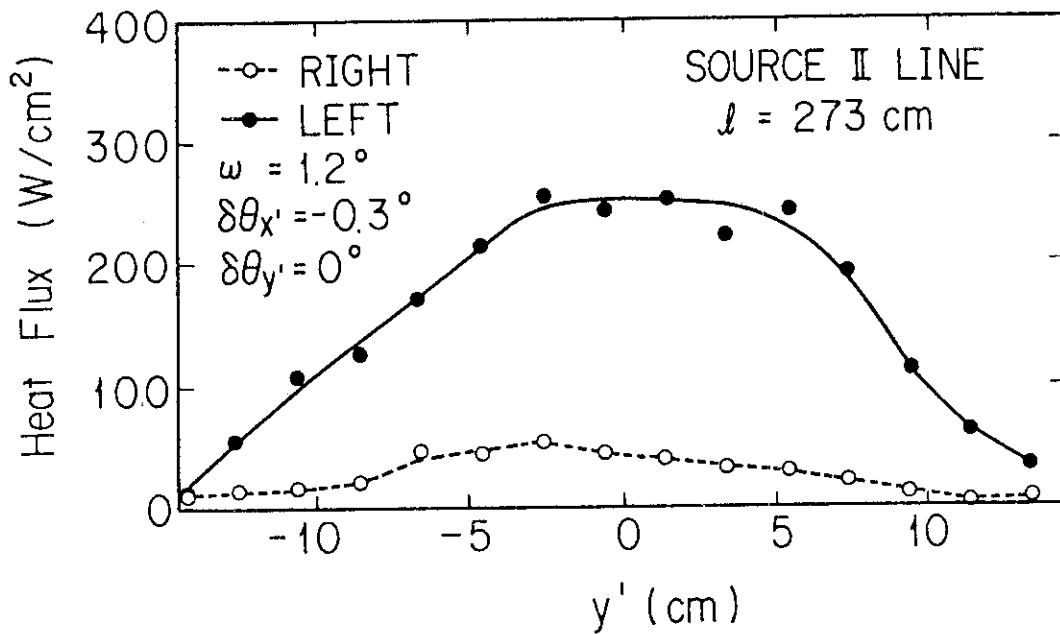


第4図 b)

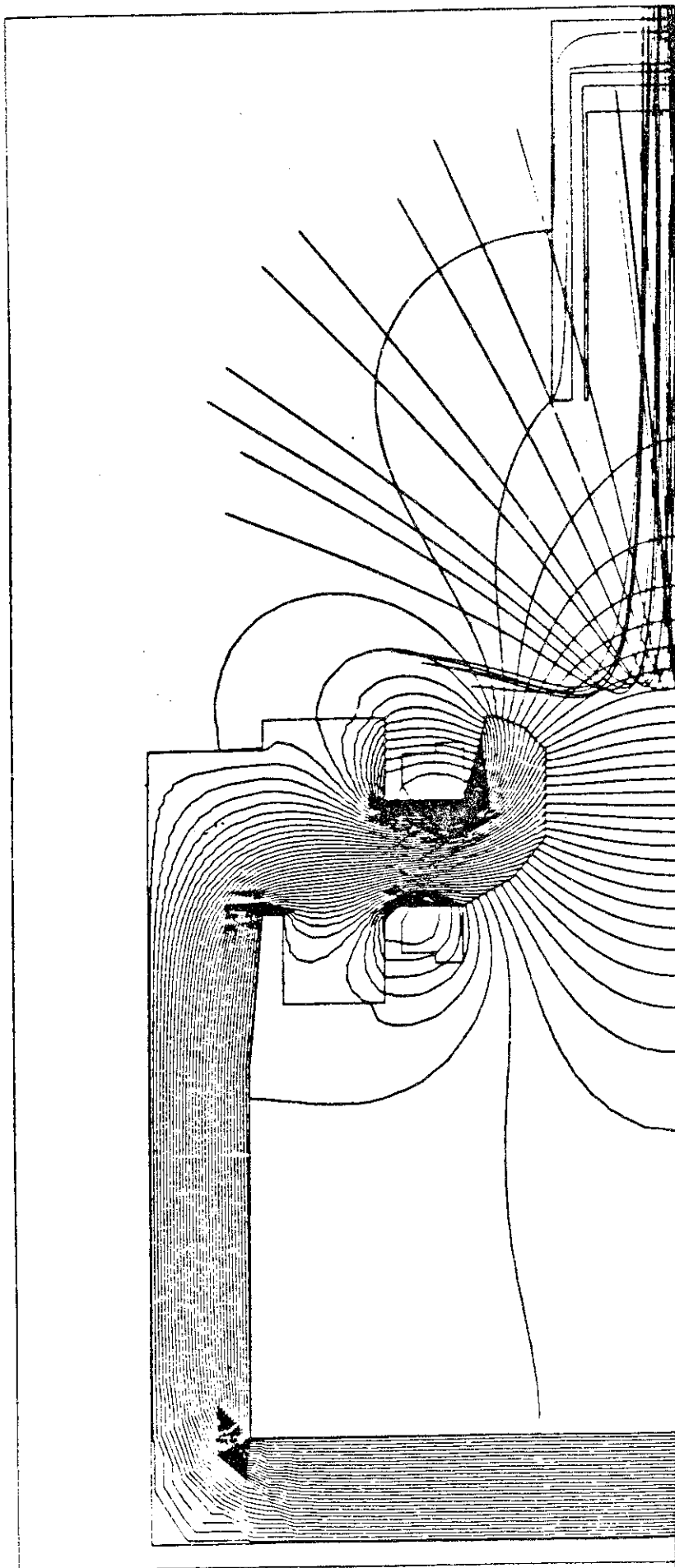
第4図 磁場の影響を入れた場合の中性化セルの熱負荷分布 (漏洩磁場磁気シールド有り) a), b) は中性化セル I, c), d) は中性化セル II のものである。



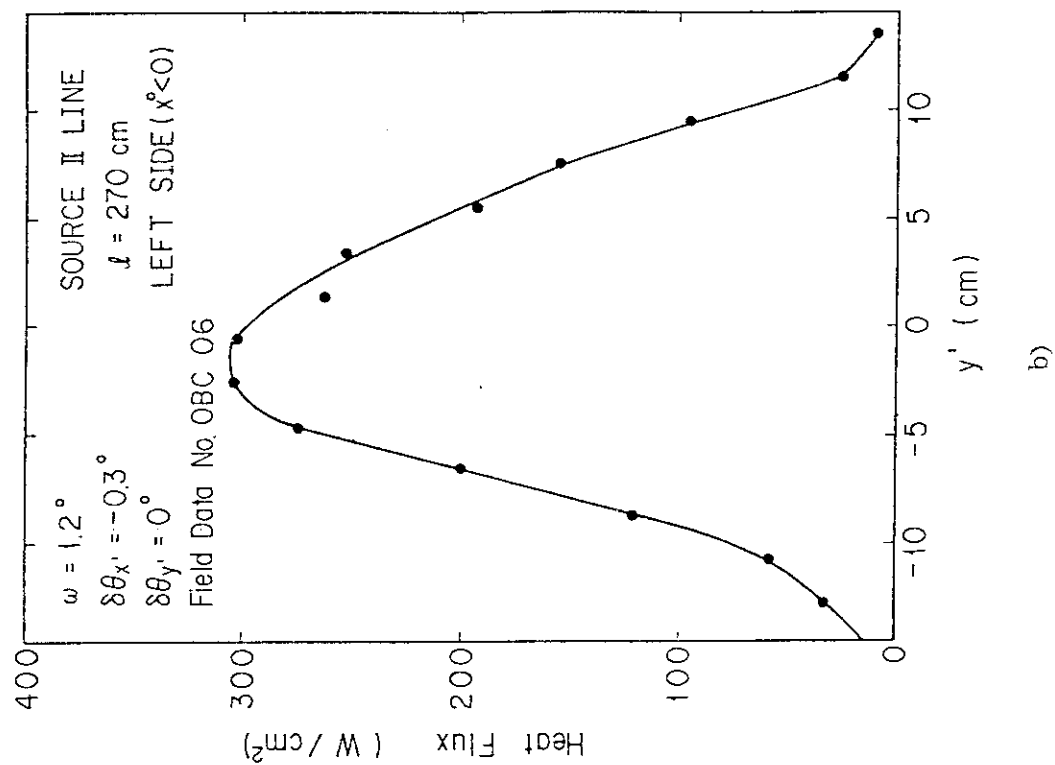
第4图 c)



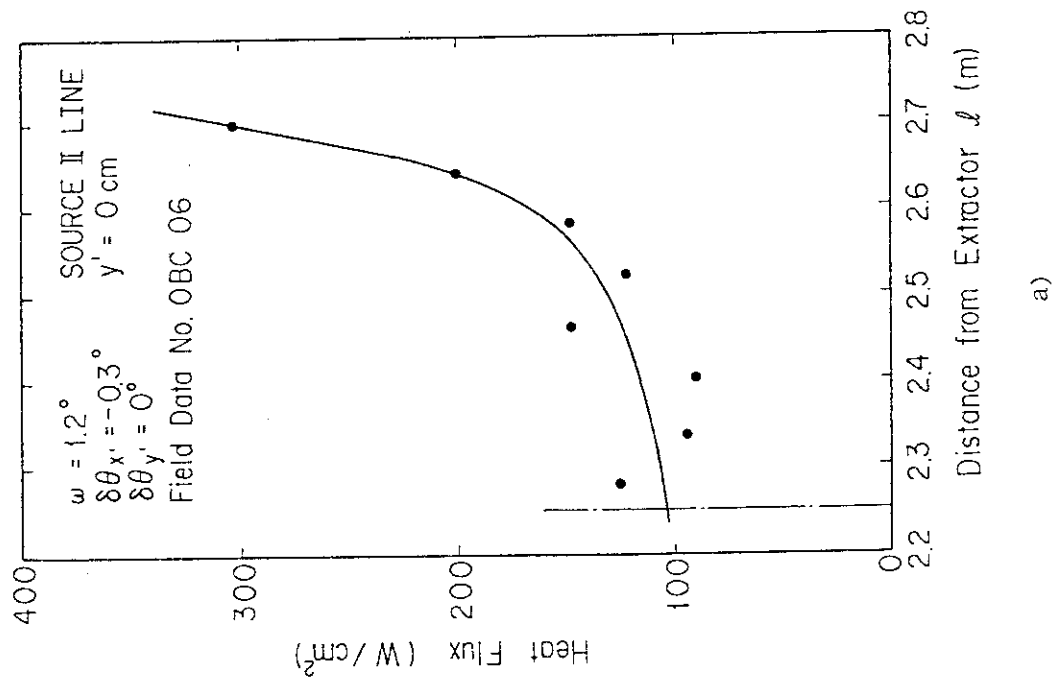
第4图 d)



第5図 偏向磁石の磁力線とイオンビーム軌道の計算結果

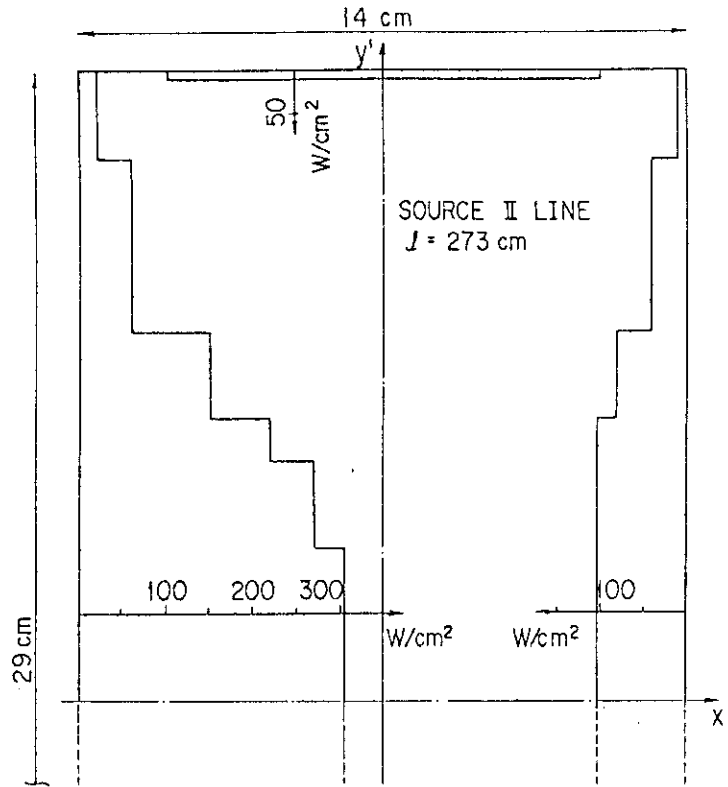


a)

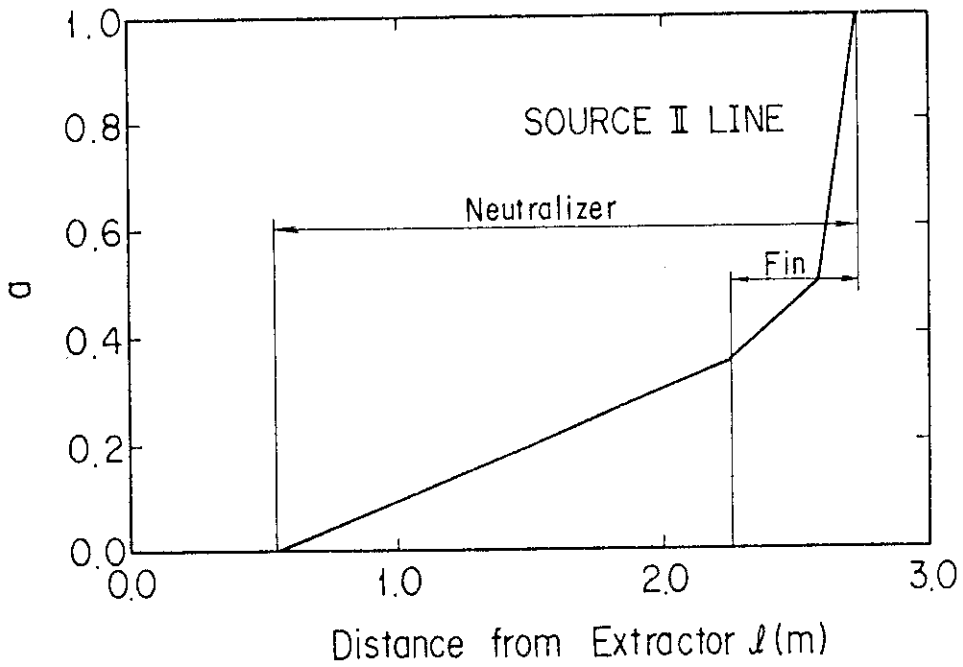


b)

第6図 磁場の影響を入れた場合の中性セルの熱負荷分布 (漏洩磁場磁気シールドなし, 漏洩磁場なし)

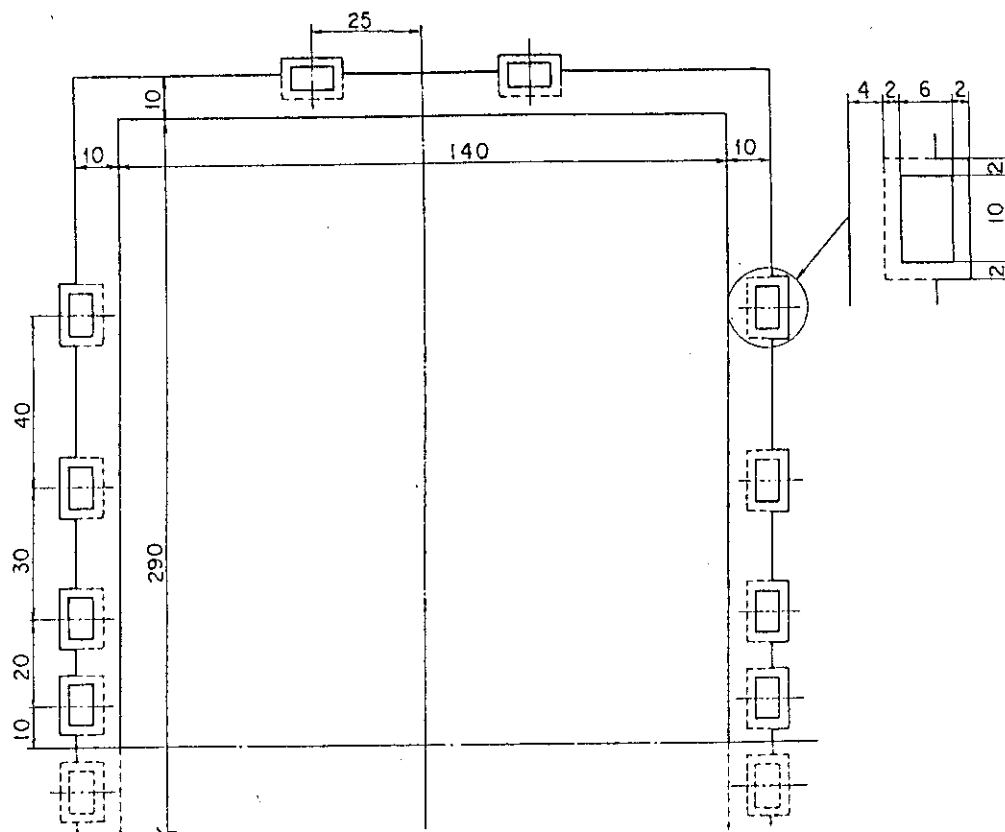


a)

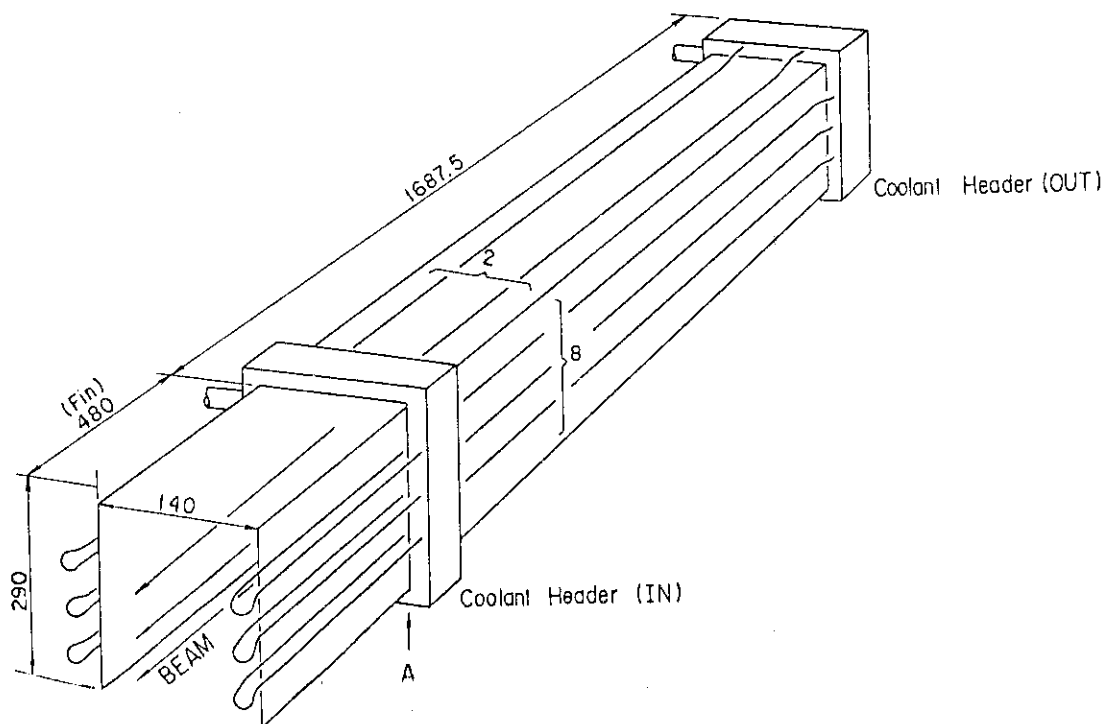


b)

第7図 温度・熱応力分布計算に用いた中性化セルⅡの熱負荷分布

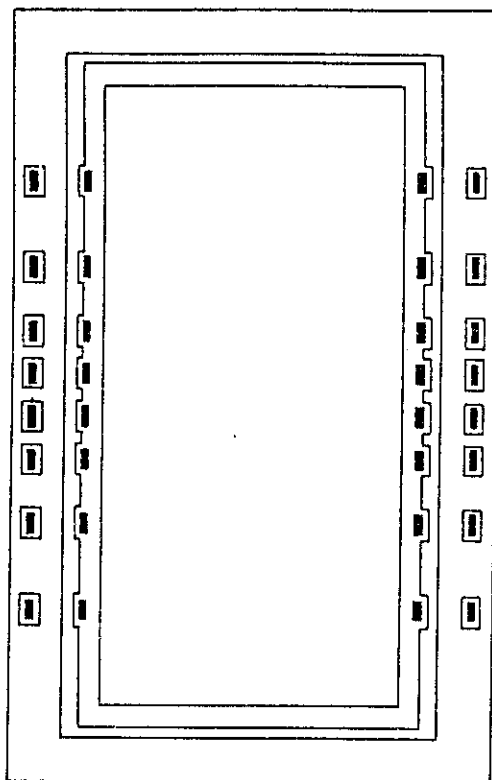


a) 断面図



b) 外観図

第8図 温度・熱応力分布計算に用いた中性化セルⅡの形状



第8図c) A部断面

3. 温度・熱応力分布の計算

3.1 温度分布の計算

第7図の熱負荷分布を基に、温度分布計算コード「HEATING 3」¹⁵⁾を用いてビームオン後10秒経過時の中性化セルの温度分布を計算した。簡単のため中性化セル断面に関して2次元で計算した。実際には中性化セルの長手方向にも熱は拡散するが、断面方向よりも温度勾配が小さいためその量は小さい。断面方向のみの熱拡散を考慮した計算結果はより厳しい条件となる。荒い3次元の熱計算の結果と比較すると温度上昇が最大の点で約10°の温度上昇の差(2次元計算の方が大きく出る)が得られた。用いた計算条件・物性値は以下の通りである。

○ 0.2%銀入り無酸素銅

熱伝導率	$\lambda = 3.86$	W/cm \cdot K
密度	$\rho = 8.96$	g/cm 3
比熱	$c = 0.385$	J/g \cdot K

○ 冷却水

水温	40°C一定
等価直径	$d_e = \frac{2 \times 6 \times 10}{6 + 10} = 7.5$ mm
流速	$v = 4.5$ m/s
レイノルズ数	$Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu} = 6.97 \times 10^4$
ヌッセルト数	$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.023 \times (6.97 \times 10^4)^{0.8} \times (3.02)^{0.4} = 268$
熱伝達率	$h = \frac{Nu \cdot a}{d_e} = \frac{268 \times 6.5 \times 10^{-3}}{0.75} = 2.32$ W/cm $^2 \cdot$ K

計算結果を第9図に示す。最大温度上昇は187°で最高温度は40+187=227°Cとなる。これは0.2%銀入り無酸素銅の軟化点(～300°C)より低い。また無酸素銅の軟化点(250～300°C)と比べても低い。通常の銅の軟化点(150～200°C)は上回る。中性化セルの同一部分の内外の温度差は約100°となる。

3.2 熱応力分布の計算

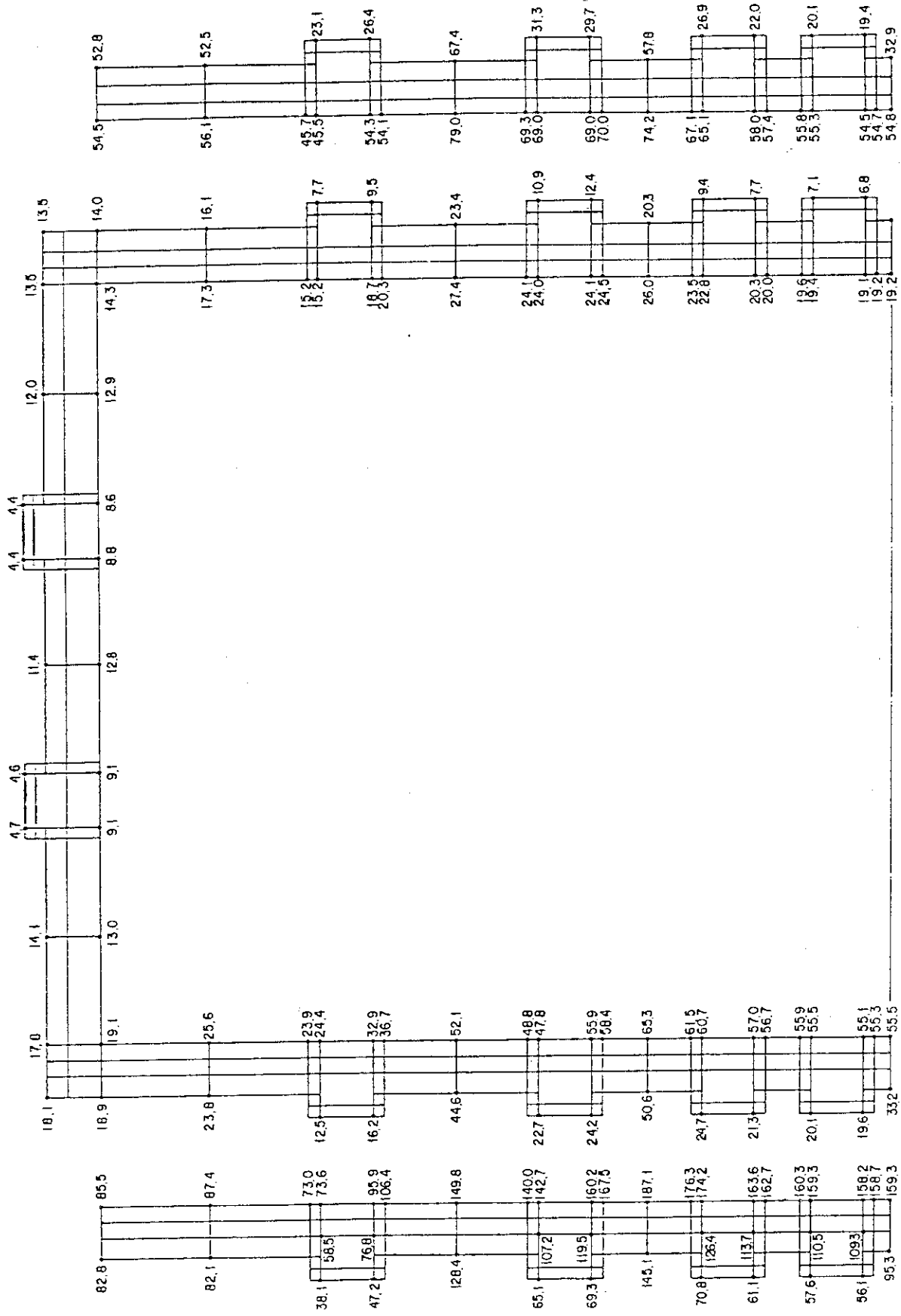
第9図の温度分布を基に応力計算コード「SAP-V」を用いて熱応力・変形を求めた。用いた計算条件・物性値は以下の通りである。

無応力温度	40°C
-------	------

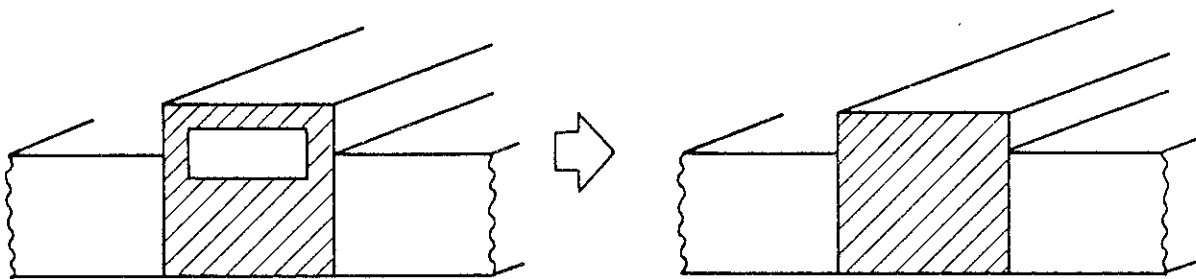
ヤング率	$E = 12500 \text{ kg/mm}^2$
ポアソン比	$\sigma = 0.33$
熱膨張係数	$\alpha = 1.68 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

計算は平板・シェル要素を用いた。冷却水流路については第10図に示すように剛性が等価となるような中実平板として計算した。

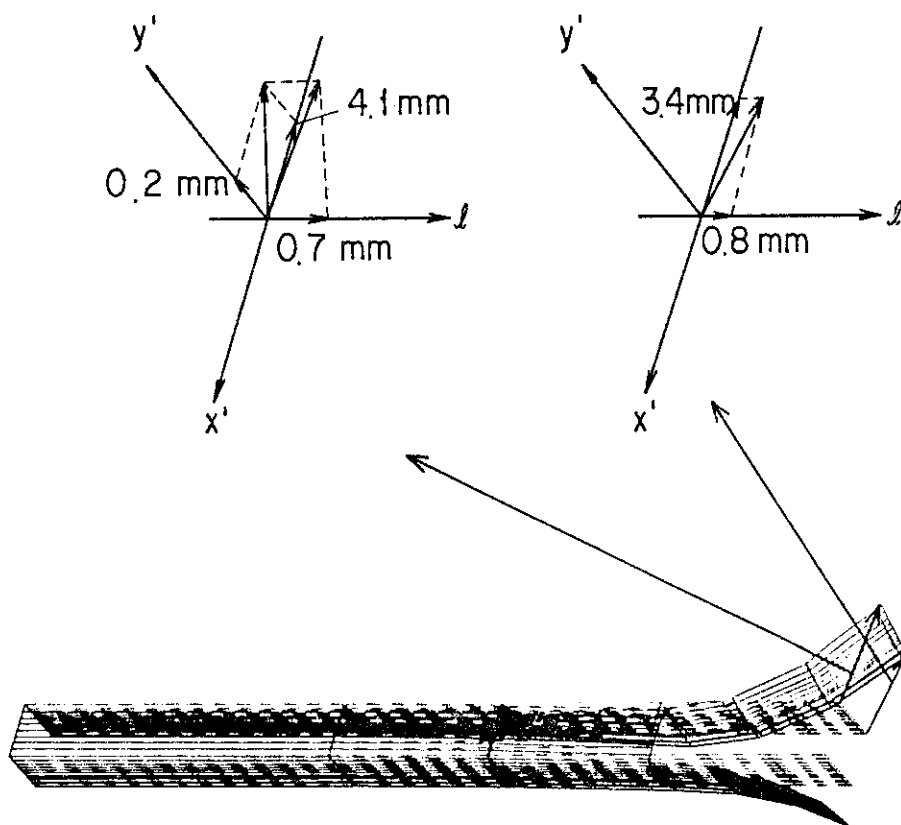
第11図 a) に変形の様子を， b) に先端部の熱応力分布を示す。a) にはメッシュの切り方も示されている。メッシュは特に長手方向に荒く，計算結果は厳密とは言えない。最大変位は延長フィンの先端で4.2 mm，最大熱応力は約6 kg/mm²となる。これは0.2%銀入り無酸素銅の許容応力9 kg/mm²を下回っており，熱応力上も問題ないことがわかった。



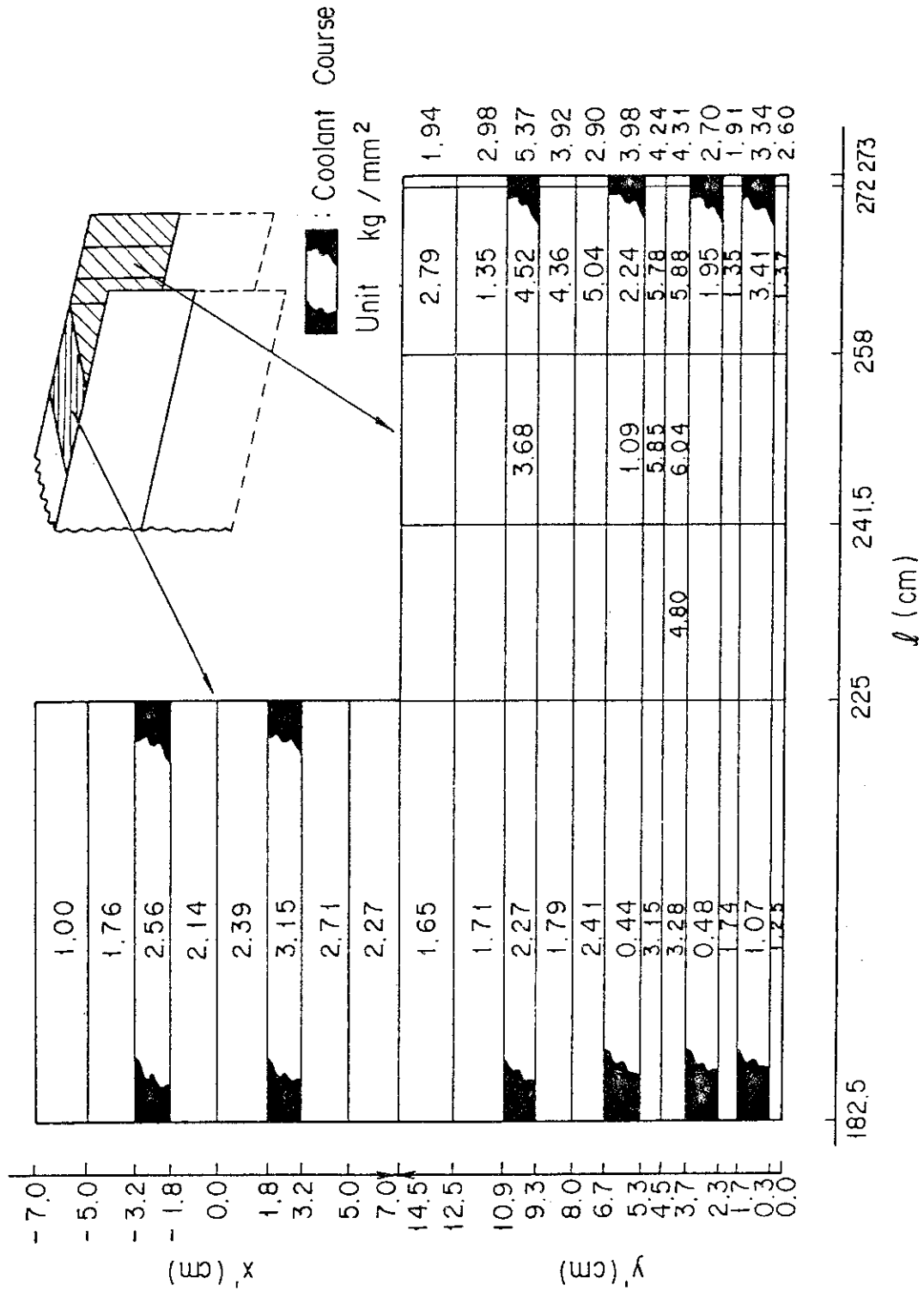
第9図 ビームオン後10秒経過時の中性化セルIIの温度分布，中央は中性化セル出口 ($\ell = 2.25$ m)，
左右は延長フィン先端 ($\ell = 2.73$ m) のものである。



第 10 図 冷却水流路の等価変換



第 11 図 a) 中性化セルの熱変形



第11図b) 中性化セルの熱応力

4. 構造の決定

第3章の計算結果を基に中性化セルの構造を第12図のように最終的に決定した。基本的には第8図のものと同じである。以下変更点・追加部分について説明する。

- ① 中性化セルⅡの延長フィンの長さを48 cmから41.4 cmに短縮した。

その後の計算機シミュレーションにより、41.4 cmでもウォータージャケットへの熱流束が許容値を越えないことが確かめられたことによる。この変更により、中性化セルⅡの熱負荷は第3章で用いた計算条件より軽減される。

- ② 冷却水流路を半埋込状態から完全埋込状態に変更した。また流路断面形状を10 mm × 6 mm から10 mm × 4 mmに変更した。

外面を平にすると表面処理が簡単になるため、強度はほとんど変わらないが、熱除去の点からは良くなる。

- ③ 中性化セルの上部にも延長フィン設けた。

これは中性化セルⅠについては延長フィン上部に設置される磁気プローブをイオンビームから保護するため、中性化セルⅡについては中性化セル磁気シールド上部をイオンビームから保護するためである。熱負荷を小さくするため、上部延長フィンは上側に角度をつけてある。さらに上部、左右延長フィンの先端に保護板を設けた。これは中性化セル磁気シールド出口端にイオンビームが当たるのを避けるためである。計算機シミュレーションからこの部分の熱負荷は10 W/cm²以下と見積られている。

- ④ 素材を0.2%銀入り無酸素銅から無酸素銅に変更した。

第3章の計算によると最高温度は227℃で無酸素銅の軟化点(250~300℃)を下回っているが、最大熱応力は6 kg/mm²と無酸素銅の許容応力4.6 kg/mm²(100℃)を上回っている。しかしながら、計算の根拠とした条件は最悪のものがすべて加わるように重なるとしたもので実際にはほとんどあり得ないこと、銅は塑性変形し易く、たとえ許容応力以上の応力がかかっても小さな変形で応力が開放されることから、経済的な無酸素銅とした。

- ⑤ 熱電対、中性化セルガス導入用・真空度測定用配管、磁気プローブを追加した。

熱電対は中性化セル出口の上下中央、延長フィンの先端の左右に取り付ける。熱電対出力は「中性化セル温度高」としてビームを停止させるインターロック信号とする。配管は冷却水ヘッダに至る冷却水用も含めベンドを設け、中性化セルの変形が吸収されるようにした。磁気プローブは打消コイル電源制御用である。

熱電対は中性化セル内面より1 mmの所に測定点がある。したがってビームオン後10秒経過時第9図と等価な状態となるときの左側(高熱負荷側)延長フィンの概略の熱電対出力は

$$\frac{95.3 \times 1 + 159.3 \times 9}{10} = 152.9^\circ$$

第9図では最高温度は40+187.1=227.1℃である。無酸素銅の軟化点を250℃とし、軟化点以下で使用するものとする、熱電対出力が

$$152.9 \times \frac{250 - 40}{187.1} = 171.6^\circ$$

以下であれば良い。インターロックとしては許容応力の点から $\Delta T = 150^\circ$ と設定しておくのが妥当と考えられる。

最終形状に対する熱負荷の設計値は第1表のようになる。このうち最終形状に対する計算は熱負荷についてのみ行った。

第1表 中性化セル設計値

材質：無酸素銅，冷却水温・無応力温度：40℃

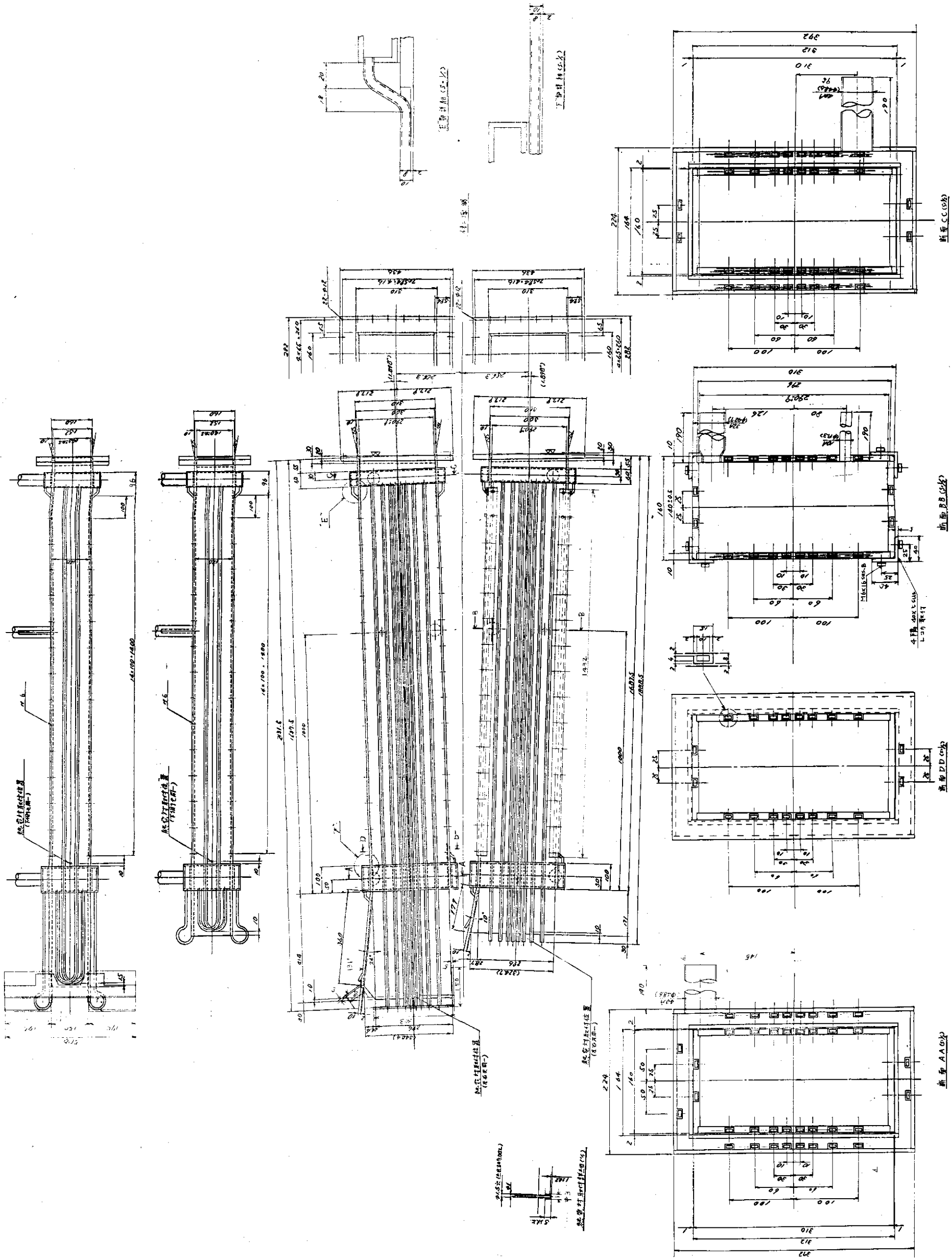
中性化セル		I	II
熱負荷	(kW)		
本体部	[A]	160	220
延長フィン	[B]	180	210
計	[A + B]	340 (12.8%*)	430 (16.5%*)
最大熱流束	(W/cm ²)	300	< 300
最大温度上昇	(度)	190	< 190
最大熱応力	(kg/mm ²)	6	< 6

条件 100 keV, 40 A × 2 台, 10 秒, 軸ずれ: 0.15°(熱負荷以外)

75 keV, 35 A × 2 台, 10 秒, 軸ずれ 0.3°(熱負荷)

発散 1.2°

* 全ビームエネルギーに対する割合



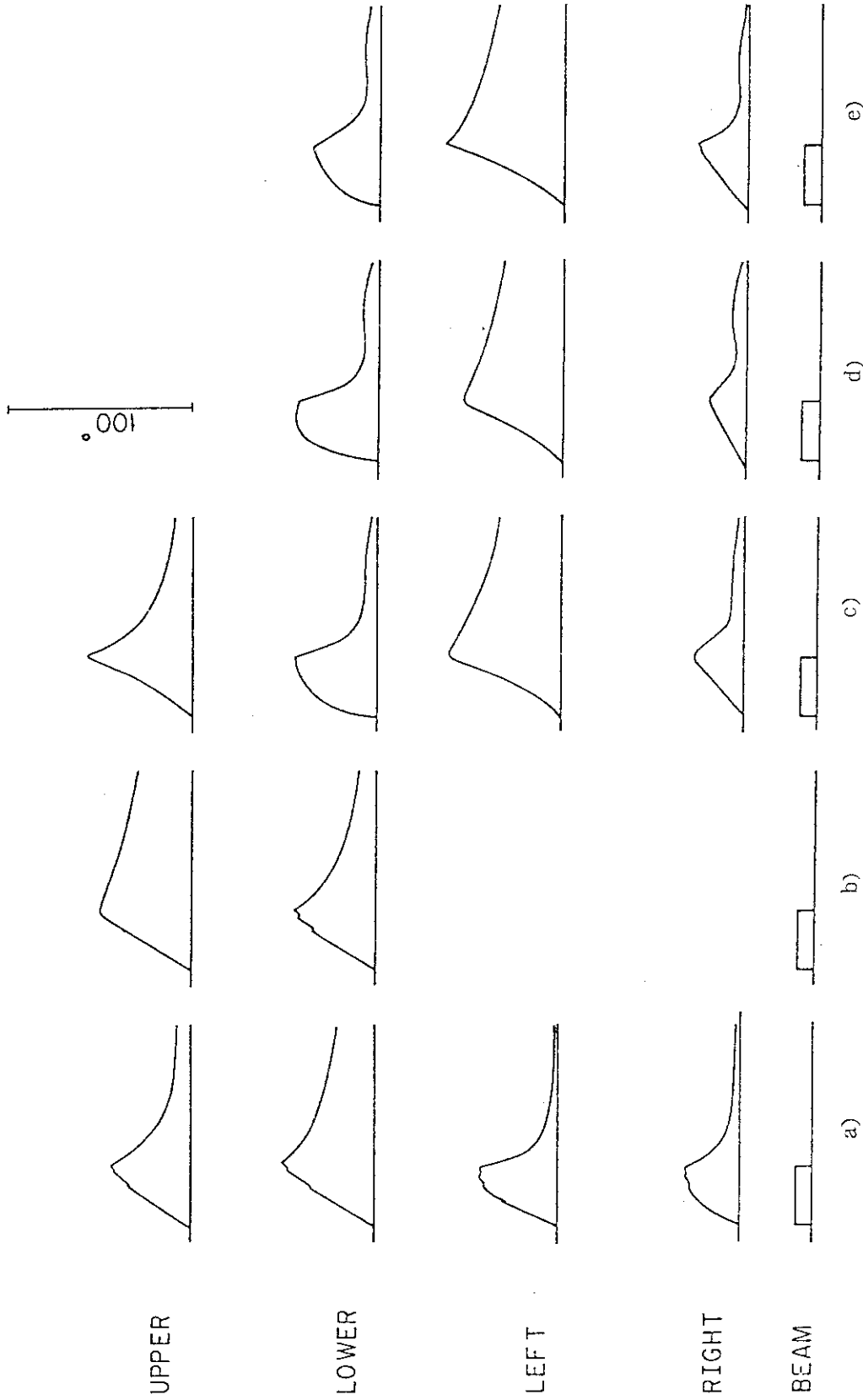
第12図 中性化セルの最終形状

5. 原型ユニットにおける試験結果

第13図は原型ユニットで得られた中性化セル熱電対出力の例である(熱電対の位置は第12図参照)。a)～e)全て10秒パルスの場合である。a), b)は66 keV × 34.5 A (2台合せて)の場合で同一ショットのものである。中性化セルⅠ, Ⅱの熱電対出力はほぼ同等となっている。なお、温度上昇時の起伏はイオン源の放電破壊で短い時間ビームが止められたためである。c)はイオン源1台(Ⅰ)で標準定格運転(75 keV × 35 A)を行った場合である。a), b)に比べ加速電圧、電流共増しているが、温度上昇はあまり変らない。これは加速電圧が高くなるにつれてビームの発散が小さくなるためである。d), e)は標準定格運転で漏洩磁場あり・なしを比較したものである。磁場の影響は中性化セルⅠの方がⅡより出ると考えられる(中性化セル磁気シールドから延長フィンがよりはみ出しているから)が、熱電対出力はほとんど変らない。

c)～e)を見ると左右の熱電対出力は設計値(軸ずれ側190°, 反対側55°)に比べ高々60°と小さい。一方上下については設計値12.8°に比べ40～60°と大きい。左右の温度上昇が小さいのはビームの発散が設計値1.2°より小さいことと軸ずれがほとんどないことによる。その一方で上下については設計値を3倍近く上回っている。中性化セル全体の熱負荷は設計値に近い。これらは熱負荷が中性化セルの先端に集中せず、全体に広がっていることを示している。この理由としては、①ビームの発散がガウス分布でなく、すその部分が伸びている、② H_2^+ , H_3^+ は解離すると解離エネルギー分だけ発散が大きくなる、ことが考えられるが明らかではない。中性化セルとしては特定の部分に熱負荷が集中していないので熱応力上は問題ないであろう。

昭和58年3月時点で既にイオン源Ⅰ, Ⅱ共個別にはあるが最大定格運転(100 keV, 40 A, 10秒)も多数回行っている。全ビームショット数は長短(0.1～10秒)合せ、10万ショットを越えているが、目視では中性化セルに異常は認められない。



第13図 原型ユニットで得られた中性化セル熱電対出力の時間変化。熱電対の取付位置は第12図を参照。ビームはいずれも10秒パルスである。

a) 中性化セルII熱電対出力, 運転条件 66 keV × 34.5 A (I+II), ショット番号 8112
 b) 中性化セルI熱電対出力, 運転条件 66 keV × 34.5 A (I+II), ショット番号 8112
 c) 中性化セルI熱電対出力, 運転条件 75 keV × 35 A (I), 入熱量 350 kW, ビーム発散角 ~ 1.1°, ショット番号 820226 ⑥
 d) 中性化セルI熱電対出力, 運転条件 75 keV × 73 A (I+II), 入熱量 280 kW (I), 370 kW (II), ショット番号 820226 ⑨
 e) 中性化セルI熱電対出力, 運転条件 75 keV × 72 A (I+II), 入熱量 320 kW (I), 420 kW (II), 漏洩磁場有り, ショット番号 820226 ⑩

6. ま と め

中性化セル出口左右に延長フィンを設けイオンビームリミッタの機能を併せ持たせることにより、イオンビームによるウォータージャケットへの熱流束を低減した。延長フィンの形状は偏向磁石の形状、ウォータージャケットの形状の設計と併せて進められた。その結果設定された中性化セルの形状について温度・熱応力分布計算を行い、構造的に問題のないことを確認した。原型ユニットにおける予備的な試験によれば一部計算結果とは異なる温度上昇が得られたが、構造的に使用に耐えるものであることが確認された。

謝 辞

本設計を進めるにあたり、協力・有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室、JT-60 第4開発室の皆様へ感謝します。また不断の激励を頂いた白形弘文 JT-60 第4開発室長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合センター所長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中, 堀池, 伊藤, 栗山, 松田, 松岡, 小原, 白形: JAERI-M 82-140 (1982)
- 2) 伊藤, 堀池, 栗山, 松田, 松岡, 田中: JAERI-M 82-131 (1982)
- 3) 伊藤, 堀池, 松岡, 松田, 小原, 田中: JAERI-M 9226 (1981)
- 4) M. Akiba, M. Araki, H. Horiike, T. Itoh, M. Kawai, M. Kuriyama, S. Kitamura, S. Matsuda, M. Matsuoka, H. Kuriyama, Y. Oguchi, Y. Ohara, T. Ohga, H. Ohtsuki, Y. Okumura, K. Shibanuma, T. Shibata, H. Shirakata, and S. Tanaka, Rev. Sci. Instrum. **53**, 1864 (1982).
- 5) Y. Ohara, to be submitted to the 7th symposium (1983 international) on ion sources and ion assisted technology & the 4th international conference on ion and plasma assisted techniques.
- 6) 松田, 荒川, 堀池, 伊藤, 河合, 近藤, 森田, 小原, 大賀, 奥村, 桜庭, 柴田, 白形, 田中: JAERI-M 7655 (1978)
- 7) 奥村, 秋場, 小原, 柴田: JAERI-M 9852 (1981)
- 8) 松岡, 伊藤, 堀池, 松田, 田中: JAERI-M 9599 (1981)
- 9) Y. Ohara *et al.*, to be submitted to Rev. Sci. Instrum.
- 10) H. Horiike, M. Kuriyama, and H. Morita, Nuclear Technology/Fusion **2**, 637

6. ま と め

中性化セル出口左右に延長フィンを設けイオンビームリミッタの機能を併せ持たせることにより、イオンビームによるウォータージャケットへの熱流束を低減した。延長フィンの形状は偏向磁石の形状、ウォータージャケットの形状の設計と併せて進められた。その結果設定された中性化セルの形状について温度・熱応力分布計算を行い、構造的に問題のないことを確認した。原型ユニットにおける予備的な試験によれば一部計算結果とは異なる温度上昇が得られたが、構造的に使用に耐えるものであることが確認された。

謝 辞

本設計を進めるにあたり、協力・有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室、JT-60 第4開発室の皆様へ感謝します。また不断の激励を頂いた白形弘文 JT-60 第4開発室長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合センター所長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中, 堀池, 伊藤, 栗山, 松田, 松岡, 小原, 白形: JAERI-M 82-140 (1982)
- 2) 伊藤, 堀池, 栗山, 松田, 松岡, 田中: JAERI-M 82-131 (1982)
- 3) 伊藤, 堀池, 松岡, 松田, 小原, 田中: JAERI-M 9226 (1981)
- 4) M. Akiba, M. Araki, H. Horiike, T. Itoh, M. Kawai, M. Kuriyama, S. Kitamura, S. Matsuda, M. Matsuoka, H. Kuriyama, Y. Oguchi, Y. Ohara, T. Ohga, H. Ohtsuki, Y. Okumura, K. Shibamura, T. Shibata, H. Shirakata, and S. Tanaka, Rev. Sci. Instrum. **53**, 1864 (1982).
- 5) Y. Ohara, to be submitted to the 7th symposium (1983 international) on ion sources and ion assisted technology & the 4th international conference on ion and plasma assisted techniques.
- 6) 松田, 荒川, 堀池, 伊藤, 河合, 近藤, 森田, 小原, 大賀, 奥村, 桜庭, 柴田, 白形, 田中: JAERI-M 7655 (1978)
- 7) 奥村, 秋場, 小原, 柴田: JAERI-M 9852 (1981)
- 8) 松岡, 伊藤, 堀池, 松田, 田中: JAERI-M 9599 (1981)
- 9) Y. Ohara *et al.*, to be submitted to Rev. Sci. Instrum.
- 10) H. Horiike, M. Kuriyama, and H. Morita, Nuclear Technology/Fusion **2**, 637

6. ま と め

中性化セル出口左右に延長フィンを設けイオンビームリミッタの機能を併せ持たせることにより、イオンビームによるウォータージャケットへの熱流束を低減した。延長フィンの形状は偏向磁石の形状、ウォータージャケットの形状の設計と併せて進められた。その結果設定された中性化セルの形状について温度・熱応力分布計算を行い、構造的に問題のないことを確認した。原型ユニットにおける予備的な試験によれば一部計算結果とは異なる温度上昇が得られたが、構造的に使用に耐えるものであることが確認された。

謝 辞

本設計を進めるにあたり、協力・有益な議論をして頂いた加熱工学第1研究室、JT-60 第4開発室の皆様へ感謝します。また不断の激励を頂いた白形弘文 JT-60 第4開発室長、田中正俊核融合研究部次長、小幡行雄核融合研究部長、磯康彦核融合センター所長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中, 堀池, 伊藤, 栗山, 松田, 松岡, 小原, 白形: JAERI-M 82-140 (1982)
- 2) 伊藤, 堀池, 栗山, 松田, 松岡, 田中: JAERI-M 82-131 (1982)
- 3) 伊藤, 堀池, 松岡, 松田, 小原, 田中: JAERI-M 9226 (1981)
- 4) M. Akiba, M. Araki, H. Horiike, T. Itoh, M. Kawai, M. Kuriyama, S. Kitamura, S. Matsuda, M. Matsuoka, H. Kuriyama, Y. Oguchi, Y. Ohara, T. Ohga, H. Ohtsuki, Y. Okumura, K. Shibanuma, T. Shibata, H. Shirakata, and S. Tanaka, Rev. Sci. Instrum. **53**, 1864 (1982).
- 5) Y. Ohara, to be submitted to the 7th symposium (1983 international) on ion sources and ion assisted technology & the 4th international conference on ion and plasma assisted techniques.
- 6) 松田, 荒川, 堀池, 伊藤, 河合, 近藤, 森田, 小原, 大賀, 奥村, 桜庭, 柴田, 白形, 田中: JAERI-M 7655 (1978)
- 7) 奥村, 秋場, 小原, 柴田: JAERI-M 9852 (1981)
- 8) 松岡, 伊藤, 堀池, 松田, 田中: JAERI-M 9599 (1981)
- 9) Y. Ohara *et al.*, to be submitted to Rev. Sci. Instrum.
- 10) H. Horiike, M. Kuriyama, and H. Morita, Nuclear Technology/Fusion **2**, 637

(1982).

- 11) 堀池他 JAERI-M 投稿予定
- 12) M. Kuriyama, H. Horiike, S. Matsuda, H. Morita, and K. Shibamura: JAERI-M 9746 (1981)
- 13) 小原, 栗山: JAERI-M 82-066 (1982).
- 14) J. S. Colonias, UCRL-18439 (1968).
- 15) W. D. Turner and M. Siman-Tov, ORNL-TM-3208.
- 16) SAP-V. 2, *A structural analysis program for static and dynamic response of linear systems* Univ. South Calif. (1972).