

J A E R I - M  
86-114

能動粒子線装置の開発

1986年8月

伊藤 孝雄・堀池 寛・松岡 守・松田慎三郎  
小原 祥裕・奥村 義和・藤 守正・竹内 浩  
田中 茂・塚原 美光・薄井 勝富・渡辺 和弘

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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。

入手の問合せは、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、  
お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力広済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡  
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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 Division Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka gun, Ibaraki-  
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

---

編集兼発行　日本原子力研究所  
印　　刷　　日青工業株式会社

## 能動粒子線装置の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

伊藤 孝雄<sup>+</sup>・堀池 寛・松岡 守<sup>+</sup>・松田慎三郎  
小原 祥裕・奥村 義和・部 守正<sup>+</sup>・竹内 浩<sup>+</sup>  
田中 茂・塙原 美光<sup>+</sup>・薄井 勝富<sup>+</sup>・渡辺 和弘

(1986年7月16日受理)

JT-60の中心部のイオン温度を測定する能動粒子線計測装置において、その主要部はエネルギー200KeVの中性ヘリウムビーム入射装置である。この入射装置に要求されるイオン源の性能は、エネルギー200KeV、ヘリウムビーム電流3.5A、ビームの発散0.4度以下で、世界的にみても未開発のものであった。しかし、これは中性粒子入射加熱装置で培われたイオン源技術の延長線上に位置し、十分に実現性があった。電源の調整やビームラインの性能試験も含めつつ、イオン源の開発を能率的に行うため、1983年10月試験室にこの入射装置を建設した。ただちに開発試験を開始し、1985年9月、予定通り目標の中性ヘリウムビーム入射装置を完成させた。

特に、今回開発した多極磁場型ソースプラズマ発生部を持ち、5枚電極から成る3段加速方式のイオン源は200KeV / 3.5A / 発散角0.18度のビームをくり返し引出すことができ、目標性能を遥かに上回るものであった。

この開発によりJT-60のイオン温度測定はより精度良く行うことができると期待される。

Development of Helium Beam Injection for JT-60  
Active Beam Diagnostic System

Takao ITO, Hiroshi HORIIKE, Mamoru MATSUOKA  
Shinzabro MATSUDA, Yoshihiro OBARA, Yoshikazu OKUMURA  
Morimasa SHIDOMI, Hiroshi TAKEUCHI, Shigeru TANAKA  
Yoshimitsu TSUKAHARA, Katsutomi USUI and  
Kazuhiro WATANABE

Department of Thermonuclear Fusion Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-gun, Naka-machi, Ibaraki-ken

(Received July 16, 1986)

A 200 keV neutral helium beam injector is a major component of the active beam diagnostic system to measure the ion temperature at the center of the JT-60 plasma. Specifications of the ion source required for this injector are: beam energy 200 keV, helium ion current 3.5 A, beam divergence below 0.4 degrees. Such an ion source has not been developed so far in the world. However, the ion source is located on the extrapolating line of technology obtained in the R & D neutral beam injectors for heating, and it was expected that such a source could be developed.

To facilitate ion source development, along with adjustment of the power supply and performance test of the beam line components, the injector was installed in a test room in October 1983. The R & D was begun immediately. The desired injector was completed in September 1985 on schedule.

In particular, the final ion source and extract repeatedly 200 keV,

Keywords: JT-60 Plasma, Beam Injection, Helium, Ion Temperature, Ion Source, Plasma Diagnostics

3.5 A helium beams with an e-folding beam divergence of 0.18 degrees.  
It is a magnetic multipole type ion source with a three stage accelerator.  
The achieved performance is more than that of specification. The accuracy  
of measurement of the JT-60 ion temperature can be increased by this  
development.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 各 部 の 性 能 .....	4
2.1 ビームライン .....	4
2.1.1 イオノン源 .....	6
2.1.2 中性化セル .....	10
2.1.3 カロリーメータ .....	10
2.1.4 偏向磁石 .....	11
2.1.5 ビームダンプ .....	12
2.1.6 アパートチャーリミッター及び熱遮蔽板 .....	13
2.1.7 ターゲット容器と突抜けモニター .....	13
2.2 イオン源用電源 .....	47
2.3 制 御 系 .....	50
2.4 真空排気系 .....	51
2.4.1 ビームライン差動排気系 .....	51
2.4.2 ターゲット容器排気系 .....	52
2.5 補機設備 .....	56
3. 能動粒子線装置の開発試験 .....	60
4. 開発成果の位置づけ .....	68
5. ま と め .....	70
謝 詞 .....	71
参 考 文 献 .....	71

**Contents**

1.	Introduction .....	1
2.	Performance of Components .....	4
2.1	Beam line components .....	4
2.1.1	Ion Source .....	6
2.1.2	Neutralizer .....	10
2.1.3	Calorimeter .....	10
2.1.4	Bending Magnet .....	11
2.1.5	Ion Beam Dump .....	12
2.1.6	Aperture Limiter and Beam Limiter .....	13
2.1.7	Target Chamber and Beam Monitor .....	13
2.2	Power Supply for Ion Source .....	47
2.3	Control System .....	50
2.4	Pumping System .....	51
2.4.1	Differential Pumping System of Beam Line .....	51
2.4.2	Pumping System of Target Chamber .....	52
2.5	Auxiliary Equipment .....	56
3.	Research and Development .....	60
4.	Evaluation of Achieved Results .....	68
5.	Summary .....	70
	Acknowledgements	
	Reference	

## 表 目 次

第 2.1.1 表 基 本 仕 様 .....	14
第 2.2.1 表 イオン源電源定格 .....	48
第 2.4.1 表 ターボ分子ポンプ吸入口における排気速度(ヘリウムガス) .....	52
第 2.4.2 表 ビームライン系におけるヘリウムガスの流れ .....	52
第 2.5.1 表 各機器の出口温度一覧表 .....	56
第 3.1 表 200 KV運転主要パラメーター一覧表 .....	62
第 5.1 表 目標値と達成値との比較一覧表 .....	70

## 図 目 次

第 1.1 図 能動粒子線計測概念図 .....	3
第 2.1 図 能動粒子線建家平面図 .....	15
第 2.1.1 図 能動粒子線垂直ビームライン .....	16
第 2.1.2 図 能動粒子線水平ビームライン .....	17
第 2.1.3 図 各プローブ及びイオン源配置図 .....	18
第 2.1.4 図 ビーム軌道とアーチャリミター .....	19
第 2.1.5 図 ヘリウムガスバランス .....	19
第 2.1.6 図 イオン源断面図 .....	20
第 2.1.7 図 カスプ磁場配位 .....	21
第 2.1.8 図 フィラメント形状 .....	21
第 2.1.9 図 ラインカスプ磁場の径方向分布 .....	22
第 2.1.10 図 アーク特性 .....	23
第 2.1.11 図 ヘリウムビーム軌道(計算機シミュレーション) .....	23
第 2.1.12 図 ビームの幾何的効率 .....	24
第 2.1.13 図 イオン源容器及び中性化セル断面図 .....	25
第 2.1.14 図 JT-60 漏洩磁場 .....	26
第 2.1.15 図 軸ずれ角と幾何的効率 .....	26
第 2.1.16 図 イオン源ガス導入系 .....	27
第 2.1.17 図 中性化セル効率 .....	28
第 2.1.18 図 ビームの密度分布計算における座標系 .....	28
第 2.1.19 図 カロリメータ詳細図 .....	29
第 2.1.20 図 カロリメータ形状図 .....	29
第 2.1.21 図 偏向磁石及びビームダンプ設置図 .....	30
第 2.1.22 図 偏向磁石外形図 .....	31
第 2.1.23 図 加速電圧と偏向磁石電流 .....	32
第 2.1.24 図 ビームダンプ側面図 .....	33
第 2.1.25 図 アーチャリミター概略図 .....	34
第 2.1.26 図 アーチャリミター及び熱遮蔽板取り付け図 .....	35
第 2.1.27 図 热遮蔽板概略図 .....	36
第 2.1.28 図 アーチャリミター温度監視システム .....	37
第 2.1.29 図 全ビームプローブ外形図 .....	38
第 2.1.30 図 分布測定プローブ外形図 .....	39
第 2.1.31 図 ビームの分布と発散角 .....	40
第 2.1.32 図 固定カロリメータ外形図 .....	41

第 2.1.33図 ピンホールカメラ配置図	42
第 2.1.34図 ピンホールカメラによる 199 固のビームレット像	43
第 2.1.35図 突抜けモニター外形図	44
第 2.1.36図 突抜けモニターによる発散測定	45
第 2.1.37図 フラディーカップ信号沈形	46
第 2.2.1 図 イオン源用電源系統図	49
第 2.3.1 図 制御系構成図	50
第 2.4.1 図 ビームライン排気系	53
第 2.4.2 図 差動排気系	54
第 2.4.3 図 使用ガス流量と再電離損失との関係	55
第 2.5.1 図 冷却系系統図	57
第 2.5.2.図 SF <sub>6</sub> ガス回収装置系統図	58
第 2.5.3 図 圧空系系統図	59
第 3.1 図 能動粒子線装置開発の工程	63
第 3.2 図 ビームライン機器の入熱量	64
第 3.3 図 ビームの発散角と加速電流	64
第 3.4 図 電極の断面形状図	65
第 3.5 図 200 keV/3.5A のビーム出力波形	66
第 3.6 図 発散角と電極熱負荷の電流依存	67
第 3.7 図 アーク効率	67
第 4.1 図 アンペア級イオン源の性能比較図	69

## 1. 序論

JT-60のようにプラズマ小半径が大きく、粒子密度が高いプラズマの中心部のイオン温度を測定する方法として能動粒子線法が考えられた。<sup>1),2)</sup> その原理は第1.1図に示すように単一エネルギーの中性原子ビームをプラズマ中に入射し、プラズマのイオンと衝突して、ある角 $\theta$ 方向に散乱された粒子のエネルギースペクトルを測定することによりイオン温度を求める方法である。

この計測に用いられる中性粒子ビームは、散乱断面積の大きさや単一エネルギービームが得易い点でヘリウムが良い。中性ビームの粒子数（等価電流）も散乱粒子のS/N比からその下限が決まり、JT-60の場合にはプラズマ中心の直径約5cmの範囲に0.2A以上の中性ビームを入射する必要がある。また、そのビームエネルギーは中性化効率、プラズマ中への浸透度、および散乱強度の3つの条件の積が、 $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の高密度プラズマに対してもできる限り大きくなるよう180~200 keVが必要である。<sup>3)</sup> さらにビームのパルス幅はサンプリングを必要とする時間幅から決められる。また、第1.1図に示したように、イオン温度は散乱角 $\theta$ の関数であるため精度よくイオン温度を求めるためにはビームの発散角はできるだけ小さくする必要がある。

JT-60の製作が進んでいる昭和55年頃、このような計測システムの整備計画が持ち上がりその技術的可能性について大型トカマク開発部及び加熱工学研究室が中心となって真剣なレビューが繰返された。このように高エネルギーで大電流の収束性の優れたビーム源は世界的にみても未開発のものであり、その実現には相当な困難が予想された。しかし、中性ヘリウムビーム発生の原理は既に開発が進められていた中性粒子入射（以後「NBI」と書く）加熱装置のそれと類似のものであり、かつその技術的延長線上にあることから計測グループに協力して本装置の開発をNBI開発グループが担当することになった。

直ちに、テストスタンドITS-2での予備実験が行なわれた。この実験は加熱装置の試作開発用に製作した小型イオン源を用いて行ったもので、加速方式は異なるものの50 keVのビームエネルギーでビームの特性などが調べられた。<sup>4)</sup> このようにして能動粒子線源の開発目標が設定された。ビームエネルギーは180 keV以上、200 keVを目標値とすること、ヘリウムイオン電流値は3.5 A、ビーム発散角0.4度以下、ビームパルス幅0.1秒とすること等が設定された。なお、ビームのパルス幅はトカマク放電の全領域をカバーすることが理想的であるが、この要求を満すためにはJT-60粒子入射加熱装置と同等の大掛りな冷却構造が必要となり、ビームラインが計測器としてのコンパクトさを失い、また、製作費も過大なものとなる恐れがあったため、測定の必要な時刻に合せて最大0.1秒間のパルスを発生する短パルスシステムとした。ただし、S/Nが充分大きい場合、通常パルス幅0.1秒を変えることなく最大0.5秒の範囲内でマルチパルスを発生させ、温度の時間変化を知ることが可能なシステムとした。これによってイオン源引出し電極及びビームラインへの熱負荷を変えることなく、測定点を広げることができるようになった。

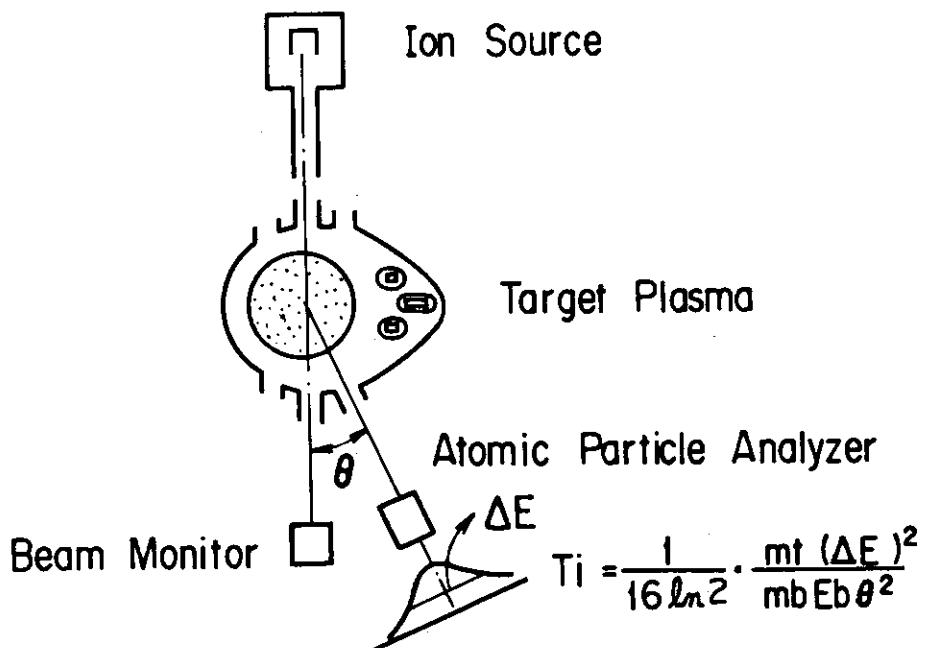
さて、上記の開発目標に対して技術的な閾門は2つあった。一つは言うまでもなく、大出力高性能イオン源の開発である。他の一つは3.5 Aで200 keVという高いエネルギーのビーム電源の開発である。能動粒子線の設計段階において、世界中で中性粒子入射装置の最大エネルギーは米

国TFTR用の120 keVであり<sup>5)</sup> 制御の複雑な加速電源で200 kVの出力を実際に得られるか否かは疑わしかった。

このように、イオン源は試作開発を必要としたこと、電源は高度な技術を要する開発的調整が必要と考えられたことなどから、製作して直ちに能動粒子線をJT-60へ装着することは不可能であると判断された。他方、実機の建設前に原型ユニットを製作して性能を確認することができたJT-60 粒子入射加熱装置の場合のように装置全体を試作開発する時間的余裕は無く、また経済的でもなかった。そこで次のような計画を立てた。まず、NBIの製作経験に基づき殆んど問題なく製作可能と考えられたビームラインについてはJT-60へ装着可能な最終状態を想定して設計製作するが、直接JT-60へは取付けず能動粒子線試験室に設置して、イオン源の試作開発と並行してその総合性能を確認する。ビームラインは、JT-60には垂直方向に設置されるが、この試験段階では試験室に水平方向に設置し、また、JT-60真空容器の代りに模擬真空容器を設置した。開発的調整の必要な電源については最終状態を想定して設計製作し、設置場所も最終状態の能動粒子線電源室とした。制御系については基本的機能は最初から製作し、若干の機能追加により最終状態になるようにした。ビームラインを能動粒子線試験室へ設置し、イオン源の試作開発を中心とした試験を行う時期を第Ⅰ期と呼び、これに対してビームラインをJT-60へ装着した最終状態を第Ⅱ期と呼ぶ。第Ⅰ期の目的は、①イオン源の試作開発を完結し、目標性能のイオン源を完成させる、②ビームライン各機器の性能を確認する、③小角散乱装置を取り付け、計測器として必要なデータを得る、④電源の調整及び改良を完結する、などである。

能動粒子線サブシステムの製作は昭和56年4月より開始され、設計、工場製作、現地据付調整を経て昭和58年10月に第Ⅰ期が納入された。能動粒子線サブシステムは中性ヘリウムビームを発生する能動粒子線装置と、散乱粒子を計測する小角散乱装置から構成される。本報告書はこのうち前者についての設計と試作開発の結果についてまとめたものである。

## Active Beam Diagnostics



$m_t$  : mass of target particle

$m_b$  : mass of injected particle

$E_b$  : energy of injected particle

$\theta$  : scattering angle

$T_i$  : ion temperature of target plasma

$\Delta E$  : energy spectrum broadening

図 1.1 能動粒子線概念図

## 2. 各部の性能

能動粒子線装置は中性のヘリウムビームを発生させるもので、その原理は中性の水素ビームを発生させる中性粒子入射加熱装置と同一である。その構成は、イオン源を含むビームライン、イオン源に電力を供給するイオン源用電源、ビームラインで発生する室温ヘリウムガスを真空排気する真空排気系、受熱部を冷却する純水冷却系などの補機設備、及びこれらの機器を統括する制御系などから成る。前章で述べたように、ビームラインの各機器は第Ⅱ期において JT-60 に装着されるが、第Ⅰ期では第 2.1 図に示す能動粒子線電源室の一画に設けられた試験室に設置された。

### 2.1 ビームライン

能動粒子線装置のビームラインは JT-60 に装着する最終状態、即ち第Ⅱ期を想定して設計された。第 2.1.1 図にその様子を示す。ビームラインの上端には強力なヘリウムイオンビームを発生するイオン源、それから下に向って順に、ヘリウムイオンビームを荷電交換によって中性ヘリウム原子ビームに変える中性化セル、中性ビーム中に混っているイオンビームを偏向し、受熱機器であるイオンビームダンプに導くための偏向磁石、中性ビームパワーの測定やイオン源コンディショニングのビームターゲットとして用いるカロリーメータがある。中性ビームはこのあと JT-60 真空容器に設けられた細長い入射ポートを通りプラズマに入射されるが、イオン温度測定の空間分解能を上げるために、JT-60 真空容器と入射ポートの付け根にはビームの径を小さく規定するアパーチャリミターが取付けられる。また、プラズマを突抜けた下側には中性ヘリウムビームの中心軸の調整や、突抜け中性ビームの時間変化などをモニターするための測定器である突抜けモニターが設置される。

本装置の心臓部を構成するイオン源は中性粒子入射加熱用イオン源の開発を通して培った技術を更に発展させて初めて到達し得るものであるが、計測器として使用できるためには、その上、十分安定に動作するものでなければならない。また、受熱機器の温度モニターなどは、それ自体が本計測器の目的ではないので運転に必要な最小限のものにとどめた。更に、第 1 章でも述べたように計測器としてコンパクトであるべきことを重視し、全ての受熱機器にはビームパルス幅を 0.1 秒に制限することにより慣性冷却方式を採用した。

さてイオン源の開発試験を行う第Ⅰ期においては、以上のように設計したビームラインを第 2.1.2 図に示すように能動粒子線試験室に水平方向に設置した。JT-60 真空容器の位置にはこれを模擬したターゲット容器を設け、また入射ポートの位置には実際のものとほとんど同一形状の模擬ポートを設けた。また、ターゲット容器には第Ⅰ期のみに使用し、ビーム特性を測定する計測器として、ビームラインの中心軸に垂直な断面内でそれぞれ互に直交する 2 本のビーム分布測定用プローブと、アパーチャリミターを通過する高速中性ヘリウムビームを測定する全ビームプローブが取付けられた。

各プローブ類とイオン源との位置関係をまとめて第2.1.3図に示す。

ここで、ビームラインの初期設計について述べる。第1章で述べたように、散乱粒子計測のS/Nの観点から直径5cmの領域に0.2Aの中性ヘリウムビームを入射させる必要がある。ビームの発散角0.4度、中性化効率45%、ビームの軸ずれ角0.05度、イオン源及び中性化セル等でのパワー損失、入射ポート部での再電離損失等を考慮して3.5Aのヘリウムイオンビームを引出すイオン源を設計することにした。ITS-2におけるヘリウムビーム引出しの予備実験から、概略140mA/cm<sup>2</sup>の電流密度でビーム発散角0.4度が得られると予想できたので、3.5Aのビーム電流を得るために、直径9cmの電極領域に、直径4mmの引出し孔を199ヶ設けた透過度40%の電極を設計することにした。

中性化セルは直径10cm、長さ200cmとする。第2.1.4図に示す通り10cmの直径があればアパーチャリミターに入るビームを遮らない。次に、3.5Aのビームを引出すイオン源に必要なガス流量を見積る。先に述べたように140mA/cm<sup>2</sup>の電流密度でビームを引出すためには、ITS-2での予備実験によると、イオン源ソースプラズマ発生部の動作ガス圧は12mTorr必要であった。能動粒子線用イオン源の電極のコンダクタンス $C_t$ は、既存のイオン源電極（NBI原型ユニット用、穴径4mm、穴数1032個）のコンダクタンスが水素ガスで2100l/secと認められていたので、以下のように計算された。

$$C_t = 2100 \times \frac{199}{1032} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{3.5}{4.5}^*$$

$$= 223 \text{ l/sec}$$

中性化セルのコンダクタンスは設計値163l/secであるが、ビーム引出し時のガスの温度上昇で10%増加すると考えて180l/secとした。故に、総合コンダクタンス $C_t$ は

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{223} + \frac{1}{180}$$

$$C_t \sim 100 \text{ l/sec}$$

となり、放電に必要な室温ガス流量は、

$$Q_N = 100 \text{ l/sec} \times 12 \times 10^{-3} \text{ Torr} \\ = 1.2 \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$$

である。

中性化セルに必要なヘリウムガスの線密度を見積る。ヘリウムの荷電交換衝突断面積は、イオン化の衝突断面積 $\sigma_{01} \approx 1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 、中性化の衝突断面積 $\sigma_{10} \approx 1.3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ とすると、完全平衡セルの場合の中性化効率は、

$$\frac{\sigma_{10}}{\sigma_{01} + \sigma_{10}} = 0.56$$

となる。90%平衡セルでは中性化効率は $0.56 \times 0.9 \approx 0.50$ となる。ただし、ヘリウムの2価イ

( \* 電極枚数の比であり、ストリーミング効果も考慮したものである )

オン, 即ち  $\sigma_{12}, \sigma_{21}, \sigma_{20}, \sigma_{02}$  を考慮すると, 中性化効率は  $0.5 \times 0.9 = 0.45$  となる。線密度は、中性化セルの長さ  $L$ , 粒子密度  $n$  とすると

$$1 - \exp \{ -n \cdot (\sigma_{01} + \sigma_{10}) \cdot L \} = 0.9 \text{ より}$$

より

$$n \cdot L = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$$

となる。常温で  $1 \text{ Torr} = 3.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  であるから

$$n \cdot L = \frac{1}{3.5} \text{ Torr} \cdot \text{cm}$$

となり,  $P_0$  を中性化セル入口の圧力とし出口までガス圧の勾配が直線的であるとする

$$n \cdot L = \frac{1}{2} P_0 L$$

と書け,  $L = 200 \text{ cm}$  とすると  $P_0 = 2.9 \times 10^{-3} \text{ Torr}$  となる。中性化セルのコンダクタンスは  $180 \text{ l/sec}$  とすると, 90% 平衡セルとするために必要なヘリウム流量は

$$\begin{aligned} Q_0 &= 180 \text{ l/sec} \times 2.9 \times 10^{-3} \text{ Torr} \\ &= 0.52 \text{ Torr} \cdot \text{l/sec} \end{aligned}$$

であり,  $Q_N > Q_0$  となる。他方,  $3.5 \text{ A}$  のヘリウムイオンビームは約  $0.6 \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$  のガス流量に相当するので, 能動粒子線用イオン源におけるガスの流れは第 2.1.5 図に示す設計とした。

### 2.1.1 イオン源

昭和50年より始められた粒子入射加熱装置用イオン源の試作開発を通して得られた経験から能動粒子線用イオン源の概念が固められた。ソースプラズマ発生方式は運転の容易さ, 一様な空間分布のソースプラズマの得易さ, などから粒子入射加熱装置と同形式の多極磁場型(バケット型)とした。また, イオン引出し電極は直径  $9 \text{ cm}$  の多孔型とすること, これに伴ってソースプラズマ生成部も最も単純な軸対称(円形)とすることなどが決められた。イオン源全体の断面図を 2.1.6 図に示す。

最大の問題は  $200 \text{ keV}$  という未到達の領域までビームエネルギーを上げること及び従来のイオン源で得られている発散角の数分の一という非常に小さい発散角  $0.25^\circ$  (最低限度  $0.4^\circ$  以下)を目指すことである。ところで, ITS-2 での予備実験で, 加速電圧  $50 \text{ kV}$  で発散角  $0.28^\circ$  のビームを得ていること, 加速電圧が  $200 \text{ kV}$  と高くなることも考慮して, 本イオン源の発散角の目標値を  $0.25^\circ$  に設定した。ここでは, イオン源のみならずイオン源を収納するイオン源容器及びイオン源ガス導入系についても述べる。

#### (1) ソースプラズマ生成部

まず, 次の(2)で述べる引き出し電極の大きさ(直径  $9 \text{ cm}$ )に見合ったソースプラズマ生成部の大きさを決めた。ソースプラズマ生成部は, 内径  $178 \text{ mm}$ , 深さ  $154 \text{ mm}$  の無酸素銅製のアーキーチェンバー(陽極として使用する)とその内面に配置されたタンゲステンフィラメント(陰極)

より成る。アークチャンバーの外側面及び上面にはCoSmマグネット(5mm×15mm)が12極より成る多極ラインカスプ磁場を構成する様に配置した(第2.1.7図参照)。アークチャンバーの上面は加速部から逆流電子によって高い熱流束を受けるが、この値は加速電圧の2乗に比例して増大する傾向がある。このため、0.1秒の短パルスイオン源であるが、フィラメントは逆流電子に晒されない位置で、かつ、ラインカスプ磁場が10ガウス以下の所に配した。フィラメントは2.1.8図に示すように外径1.5mmのヘアピン型タンクステンフィラメントであり、6本取付けることが可能とした\*。

さらに、アークチャンバーを設計する上で、ビーム光学に悪影響を与える恐れのある加速部のラインカスプ漏洩磁場強度には特に注意を払った。第2.1.9図にラインカスプ磁場の径方向分布についての計算結果を示す。加速部の磁場強度はビーム光学への影響が無視できる3ガウス以下になっていることがわかる。アークチャンバー側壁のラインカスプ磁場の極(ポール)の方向をビーム軸と平行方向としたのも、一つには加速部の磁場を小さくするためである。

このアークチャンバー内のヘリウムガス作動圧力13mTorrとした時のアーク電圧、電流の特性は第2.1.10図に示すように、フィラメント電圧、従って、フィラメントからの電子放出の度合によく依存してアーク特性が変化するソースであった。

## (2) 加速部

ビーム引き出しは電源の構成やイオン源の構造の観点から1段加速(正電極、負電極、接地電極の3枚より成る)で行うのが最も簡単である。しかし、ビーム光学上2段加速(第1正、第2正、負、接地電極より成る)にした方が小さいビーム発散が得られ、実際、中性粒子入射装置の60~120KVでのビーム引き出しでは2段加速系が採用されている<sup>5)6)</sup>。200KV加速の時も、2段加速でビーム光学上の目標が達成できれば電源構成やイオン源構造がさほど複雑にならないので望ましいが、次に述べる理由により5枚の電極より成る3段加速系を採用することとした。一つには熱的な理由による。即ち、加速電圧の増大と共に電極の熱負荷も比例して増加するが、2段加速で200KVまで加速電圧を上げると2枚の正電極に熱負荷が集中し、大きな熱変形を生じて、ビーム光学を乱す恐れがあった。このため3段加速にして正電極を1枚増やすことにより、各電極の熱負荷分担を軽減することとした。第二の理由は空間電荷の影響を避けるためである。即ち、2段加速で200keVのビームを引き出そうとすれば、2段目の電極間隔が20mm程度となり、ビームレット同志の間隔6mmに比べてかなり長くなってしまう。このため、特に電極周辺部においてビームレットどうしが空間電荷により反発し合い、ビーム軌道が乱される恐れがあった。そこで、径方向電界を打消す役目を持つ電極を1枚追加し、3段加速にすることが必要と考えた。

次に冷却方式であるが、電極多孔部は強制冷却方式ではなく水冷チャンネルのない慣性冷却方式を採用した。この理由を下に示す。

1. ビームパルス幅は0.1秒と短いので強制冷却の効果は期待できない。

\* ) フィラメントの本数は次の3つの理由により最終的に3本とした。

- ① 第1正電極へのフィラメントからの熱負荷を下げる。
- ② アーク放電をより安定とする。
- ③ ソースプラズマに不均一性が生じない最少のフィラメント数とする。

2. 今までのNBI用イオン源の実験結果より、電極に水冷パイプをロウ付すると、パイプに平行方向と垂直方向で発散角に0.1度以上の大きな差が生じる可能性がある。0.25度のビーム発散を目指している時、この差は許容できない。
3. 水冷パイプをロウ付すると、電極の透過度が小さくなり、電極が大きくなる。これに伴って中性化セルが太くなりコンダクタンスが大きくなつて、中性化セルをより長くすをか、ガス流量を増やす必要が生じる。また、電極径が大きくなれば収束のための孔軸の変位量が増大し、ビームレットのビーム強度分布にひずみを生じる可能性がある。
4. ロウ付面は電解研磨が難しく、耐電圧特性を悪くする原因となる。

以上の理由により、5枚の加速電極は慣性冷却方式としたが、この場合、パルス中の温度上昇に伴う多少の熱変形は避けられない。このため、電極の材料としては無酸素銅よりも熱膨張特性、機械的特性の優れたモリブデンを採用することとした。第1正電極に関しては、フィラメントからの輻射やアーク放電からの熱負荷も受け、かつ熱変形量に対する制約もビーム光学上最も厳しいので、多孔部の周辺部分には水冷用銅パイプをロウ付し、冷却時定数を短くしている。

一方、他の4枚の電極は構造上の制約もあるが入熱量も第1正電極より小さいので接触熱伝達による冷却方式としている。このため、ビームのパルスとパルスとの間隔は1分以上とし、電極の熱の蓄積を極力避ける必要がある。

先に述べたように初期設計で、各電極の中心部直径約9cmの領域に、直径4mmの引出し電極孔を199ヶ開けることを決めた。さらに、ITS-2のヘリウムビームの実験結果や第2.1.11図に1例を示ような計算機シミュレーションを数多く行って<sup>7)</sup>、その結果から電極孔形状、電極間隔、電極の厚さ等が決められた。もっとも、これらのパラメータはR&Dによって最終的に確認しつつ決められるべきものである。

モリブデン製の電極表面は、耐電圧を増しエージング時間を短縮するために、電解研磨により鏡面仕上げとなっている。又、電極板は、平行度、平面度とも士0.05mm以下とした。ビーム光学に最も影響する孔開け位置精度については、電極数が5枚と多く合理的な判断が難しいので、NC旋盤で限界の製作精度である士0.02mmとした。これは、原型ユニット用イオン源(4枚電極)電極の孔開け位置精度(士0.05mm)より良く、同イオン源では問題とすべき軸ずれや発散の劣化が生じていないという経験を基に決められた。

各ビームレットをイオン源から8m離れたアパーチャリミター中心に向けて集束することにより、入射効率を改善することができる。第2.1.12図に、幾何学的効率が発散とともにどのように変わるかを、収束した場合( $Z_f=8m$ )としない場合( $Z_f=\infty$ )について示した。

この結果より0.25度の小さいビーム発散を目指す時、その収束は非常に重要となる。収束の方法としては、負電極孔軸の径方向変位方式を採用した。即ち、電極の中心から半径rの位置にある引出し孔の変位量δをrに比例して $\delta = kr$ で与え、 $k = 1/100$ とした。電極外周部の電極孔変位量は約0.45mmであり、孔径より十分小さいためビームレット分布にひずみが生じることはないと言える。

イオン源は、占有できる空間が制限されているため、できる限り小さく作ることが要請された。このため、加速管の絶縁セラミックとフランジはメタライズを介して溶接する方法とした。

メタライズ部の構造については、NBI用イオン源の試作開発の結果に基づいて設計した。また、セラミックの沿面距離をできる限り小さくするために、イオン源の外側は  $1.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  の SF<sub>6</sub> 霧囲気とすることとした。これによって、必要な沿面距離を約  $\frac{1}{3}$  にすることができる、イオン源を小さくすることが可能となった。一方、イオン源にソースプラズマ生成用電力を供給するケーブル類も 200kV の高電位で導かれるため、ここもガス絶縁する必要があり、イオン源と電源ケーブルとは仕切ることなく、一体としてガス絶縁する構造とした。

### (3) イオン源容器、その他

イオン源は、ビーム軸の傾き角を調整できる角度調整機構を備えたフランジで支持され、第 2.1.13 図に示すようなイオン源容器に据付かれている。高電圧から人身を保護するため、イオノス源容器を接地する。また、200kV と高電圧であるため突起の多いソースプラズマ部はアルミニウム製のコロナシールドで全体を覆ってある。さらに、電極用冷却水パイプのイオン源導入部にはパイプ連結部が有り、この金属性突起部についても全て第 2.1.3 図に示すようにコロナシールドを設けた。圧力  $1.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  の SF<sub>6</sub> ガスで満してイオン源と容器内面との距離を詰め、出来るだけ容器の容積を減らした。これは、イオン源を空間的にも重量的にも厳しい条件のある計測架台に設置しなければならないためである。

イオン源は第 2.1.14 図に示すような JT-60 からの漏洩磁場に晒される。正常なアーク放電やイオンビーム軌道への悪影響を避けるため、この漏洩磁場をイオン源附近で数ガウスになるようシールドを設ける必要がある。また、イオン源から X 線が発生するので、容器の外側では 30 mrem / 週以下に減衰させる必要がある。そこで、イオン源容器は第 2.1.13 図に示すように、外層が厚さ、24mm の鉄板に 5mm の鉛板で裏当したものと、内層が厚さ 3mm の  $\mu$  メタルの板とかなる 3 層構造とした。このように、本容器は磁気シールドと X 線シールドを兼ねたものとした。この容器の磁気シールドファクターの設計値は 200 である。実際のシールドファクターについては JT-60 本体に据付けて測定する予定であるが、これまでの NBI での経験から設計値に等しい実測値が得られるものと期待している。X 線の洩れ量は発生源より 50cm の位置で  $7 \times 10^{-4} \text{ R/h}$  以下に抑えるよう設計しており、200 keV ビーム引き出し運転中の実測値 (TLID による) でもバックグランド以下で検出が不可能であった。

イオン源を支持する角度調整機構は直交する 2 つの軸を持ち、それぞれの軸を中心に ±1.5 度の範囲で回転が可能なものである。この角度調整機構を動かして、プラズマへ入射するビーム量が最大となるようにビーム軸の傾きを調整する。第 2.1.15 図はビーム軸のずれ角と幾何学的効率の関係を示したものである。ビームの発散角  $\omega = 0.3$  度の時、僅か 0.1 度ビーム軸がずれるだけで効率即ち入射ビーム量は 10% 減少することがわかる。このため、ビーム軸を ±0.01 度の精度で調整出来るようにした。

イオン源ガス導入系はイオン源にヘリウムガスを供給するための装置であり、その系統を第 2.1.16 図に示す。最大圧力  $150 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  純度 99.9999% のヘリウムガズボンから供給されたヘリウムを 2 台直列のレギュレータで  $1 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  前後に減圧し、圧電素子弁を経由してイオン源に供給する。圧電素子弁の開度を電圧で制御するが、その電圧を設定するデジタルスイッチの分解能は 0.1 V であり、これが 0.08 Torr · l/sec のガス流量に相当することを確認した。また、時間的にはアーク放電の開始に先立って開となり、アーク放電終了と同時に閉となるようにシ

一ケンス制御される。本ガス導入系はイオン源の加速電圧と同電位で運転されるため、SF<sub>6</sub>ダクトに内蔵されている。

### 2.1.2 中性化セル

中性化セルではイオン源から引き出された高速ヘリウムイオンビームをイオン源から流れ出てくる室温中性ヘリウムガスと衝突させ、荷電交換により高速中性ヘリウムビームに変換する。中性化セルは内径10cmのSUSパイプの外側に内径10mmの冷却水用Cuパイプを銀口一付けしたものである。JT-60に能動粒子線装置を据付けた場合、第2.1.14図に示すように230ガウスにも及ぶJT-60からの漏洩磁場がある。イオンビームが中性化する前に漏洩磁場による偏向を受けることを避けるため、磁気シールドにより0.1ガウス以下にシールドする必要がある。これはシールドファクター約2000を得ることを意味する。50mm厚と19mm厚の鉄及び5mm厚のμメタルによる第2.1.13図に示すような三層の磁気シールドによってこれを実現した。

中性化セルでの中性化効率は線密度無限大の平衡セルの場合は衝突断面積のデータ<sup>8)</sup>から第2.1.17図のようになると予想された。能動粒子線装置では、後で述べるカロリーメータでイオン源から引き出したヘリウムビームのパワーを測定する。これも後に述べる偏向磁石を励磁すると高速中性ヘリウムビームのみをこのカロリーメータに入射でき、偏向磁石を励磁しない場合には高速のイオン及び中性ヘリウムビーム、即ち、イオン源からの全ビームをカロリーメータに入射できる。偏向磁場入切、それぞれの場合においてカロリーメータによりビームのパワーを測定し、その比から中性化効率を測定できるが、その結果を第2.1.17図に・印で示した。この時の室温ガス流量は0.64 Torr·l/secで、これから得られる線密度は第2.1.17図の点線に示す95%平衡セルに相当する。実験値は点線によく一致している。

室温ヘリウムガスに対する中性化セルのコンダクタンスは158 l/sec(分子流域)と計算され、イオン源の電極部のコンダクタンスは156 l/sec(分子流域)と計算された。この2者を合せた総合コンダクタンスは78.5 l/secとなる。一方イオン源側から一定ガス流量Qを流して定常状態となった時、イオン源の真空度P<sub>ion</sub>と中性化セル出口の真空度P<sub>1</sub>とを測定し、電極部と中性化セル部を合わせたコンダクタンスC<sub>N</sub>を式

$$C_N = \frac{Q}{P_{ion} - P_1}$$

から求めた結果、コンダクタンスC<sub>N</sub>=77 l/secという値が得られ計算値とよく一致した。

### 2.1.3 カロリーメータ

カロリーメータの設計に際して、これを設置する位置でのビームパワー密度の空間分布を知る必要がある。カロリーメータの設置位置はビームレットの収束点よりかなりイオン源寄りなので、ビームのパワー密度分布はガウス分布からずれている。そこで、電極面を細分化し、各々の要素の中心からガウス分布を有するビームレットが出るものとして多孔型電極を模擬し、計算面(x, y, z<sub>t</sub>)でのビームの密度I(x, y, z<sub>t</sub>)を式

$$I(x, y, z_t) = \frac{I_n}{\pi z_t^2 \tan^2 \omega} \sum_{i=1}^N \exp \left\{ -\frac{l_i^2}{z_t^2 \tan^2 \omega} \right\}$$

$\omega$  ; ビームレットの発散角

$N$  ; 電極の分割数

$I_N$  ; 電極の 1 要素当たりの出力パワー

$l_i$  ;  $i$  番目電極要素のビーム中心軸と計算面の交点と、計算点 ( $x, y, z_t$ ) との距離

で求めることとした。なお、座標系は第 2.1.18 図の通りである。実際に、上式を基に計算機でビームのパワー密度分布を求めた。

カロリーメータではイオン源から引き出された 200kV 3.5 A のビームを全て受ける時熱負荷が最大となり、中心のエネルギー密度は  $23.8 \text{ kw/cm}^2$  となる。カロリーメータはこの熱流束を 0.1 秒間受けられるように設計する必要があった。このためカロリーメータの受熱面はビームに対して傾きを持たせて、受熱面の熱流束を軽減する必要があった。カロリーメータの表面を第 2.1.19 図に示すように各々異った傾きをもつ 8 つのセクションに分けた。これにより、カロリーメータのビーム方向の奥行きが必要以上に深くならないように制限した。第 2.1.20 図に示すよう、カロリーメータは第 2.1.19 図のような形状の 2 枚の銅板を V 字形に置いたもので、表面での最大熱流束は約  $4 \text{ kw/cm}^2$  まで低減されている。この 2 枚の銅板は重量  $6.6 \text{ kg}$  で、ビーム照射により温度上昇するが、これは裏側にロー付された冷却水パイプで除熱される。 $4 \text{ kw/cm}^2$  0.1 秒の熱流束を 20 秒に 1 回の割合でくり返した時、表面の最大温度上昇値は  $440^\circ\text{C}$  と見積られた。 $440^\circ\text{C}$  は銅の軟化点 ( $\sim 300^\circ\text{C}$ ) を越えることになる。この値は、受熱面全体に最大熱負荷が加えられた場合を想定している。従って、実際の使用状態においては、輻射による熱損失や熱伝導等により、表面温度上昇はこれより低くなる事が期待できる。しかし、安全のため、銅板に埋込んだ熱電対によりカロリーメータの表面温度を測定し、 $300^\circ\text{C}$  以上になったらビームを停止するようにインターロックすることとした。

カロリーメータでは冷却水の出入口温度差を時間積分することからビームのパワーを測定できる。これまでカロリーメータで測定した最大ビームパワーは、 $200\text{keV}/3.5\text{A}$  のビームを引出した時で、 $583\text{kw}$  であった。この時カロリーメータではイオンビーム及び高速中性ビームの両方を受けていた。実際には、イオン源から引出されたビームパワーの一部は、カロリーメータに入る前の段階で、イオン源電極部の熱負荷や中性化セルの熱負荷となって損失するため計算上の全パワー ( $200\text{kV} \times 3.5 \text{ A} = 700 \text{ kw}$ ) の 83% に減少した。また、 $200\text{kV}$  付近では電極部での熱負荷が多く、十分な冷却時間をショット間で取る必要があることがわかりビームのくり返しを 50 秒以上に 1 回とした。最大熱負荷が見積りの 83% であったこと、duty が見積りの  $1/2.5$  以下となることなどから、カロリーメータ表面温度上昇でビーム停止に到ることはないと予想された。

なお、能動粒子線装置では、インターロックに使う全ての熱電対について、信号線断線の有無を慎重にチェックし、健全であることを確認した。

#### 2.1.4 偏向磁石

偏向磁石は中性化セルと第1排気室(真空容器)の接続部に設置され、ビーム軸に対して垂直な磁場を与えて中性化セルで中性化されなかった高速イオンビームの軌道を曲げ、ビームダンプに導くものである。偏向磁石とビームダンプの実際の取付け状態を第2.1.21図に示す。即ち、ビーム軸より120mmずれた位置で偏向磁石中心より下流95mm～495mmの間にビームダンプを設置することとした。この位置関係については偏向磁場中のイオンビームの軌道計算を行い、パラメータサーバーによって決定したものである。空間的制限のために近接して設置されるカロリーメータに高速イオンが入らないようにすること、また、数%は存在すると予想されるヘリウムの2価イオンもビームダンプで処理できることなどに注意しなければならなかった。

偏向磁石の外形図を第2.1.22図に示す。鉄心は“C”形をしており、空隙部に第一排気室へのビームの入口となる真空容器が設置される。偏向磁石の72ターンの2個のコイルに最大350Aの電流を流して偏向に必要な3.1キロガウスを得ることができる。

偏向磁石の電流Iは加速電圧 $V_{acc}$ と以下の関係

$$I = K \sqrt{V_{acc}}$$

を保つように、即ち、加速電圧によって自動的に偏向磁場を変化させ、常にイオンビームの軌道がビームダンプから外れないようにしている。それについて、動作の一例を第2.1.23図に示す。加速電圧によって偏向磁石電流が上式に従って変えられる。

### 2.1.5 ビームダンプ

空間的制限からビームダンプは偏向磁場により導かれたイオンビームを第2.1.24図に示すように平面で受けなければならなかった。また、平面の広さはイオンビームの広がりで決まり、特に $H_e^{++}$ も受けることができる広さが必要であった。偏向磁石の中心磁場が2.7KGのとき、 $H_e^+$ ビーム及び $H_e^{++}$ ビームが全てビームダンプ面に入るようにビーム軌道計算からビームダンプの寸法を決定した。本ビームダンプは厚さ10mmのタンクステン板を厚さ30mmの銅に銀ロ一付した39mm×49mmのブロック(5ヶ×8ヶ)を銅板(厚さ10mm)にボルト止めしたものである。ブロックには冷却水用の銅パイプをロ一付けし、これにより冷却を行う。このようにブロック分けして熱応力を緩和し、ブロックや冷却パイプの亀裂を防ぎ、最大9kw/cm<sup>2</sup>という熱流束に耐えることができるよう設計してある。この9kw/cm<sup>2</sup>という熱流束は軌道計算から導いた熱流束の最大値である。この熱流束に対して使用可能な材料はタンクステンで、その時の表面温度上昇値は1400°Cとなることが見積られた。

ビームダンプの熱流束が最大となると予想される位置のブロックに熱電対を埋込み、ブロックの銅製部分の温度が400°Cを越えるとビームを停止するようインターロックすることとした。万一警報が出た時はビーム引出しのくり返しの時間を長くする予定であった。200keV/3.5A/0.1秒で発散角 $\omega_{1/e} = 0.18^\circ$ のビーム引き出し時、これがビームダンプにとっての最も厳しい条件であったが警報は生じなかった。なお、この時のくり返し時間はカロリーメータで述べたようにイオン源電極部への負荷からの制限により0.1秒/50秒であった。

### 2.1.6 アパーチャーリミター及び熱遮蔽板

能動粒子線装置によりイオン温度を測定する際の空間分解能を高くするため、ビーム入射ポートである上 $U_4$ ポートの本体との付根部に第2.1.25図に示すような形状のアパーチャーリミターを第2.1.26図に示す位置に取付けた。アパーチャーリミターはJT-60プラズマからの輻射熱と高速ヘリウムビームの衝突による熱とに晒される。また下 $U_4$ ポートの付根には第2.1.27図に示すような熱遮蔽板を取付け、この付根部にアパーチャーリミター半月部（第2.1.25図参照）を通過するビームの裾野が直接当らないようにした。アパーチャーリミター及び熱遮蔽板を冷却水やガスなどにより冷却することは位置的に極めて困難で不可能と思われたが熱伝導と幅射による冷却は期待できた。10分に1回の入熱であること、ビームのパワー密度分布の裾野で熱流束が比較的小さいことを考えると熱遮蔽板はこの冷却で十分であると考えられた。

しかしアパーチャーリミターにはプラズマからの入熱

$$\begin{aligned} Q_p &= 11 \text{ W/cm}^2 \times 10 \text{ sec} \times 240 \text{ cm}^2 \\ &= 26.4 \text{ kJ / shot} \end{aligned}$$

があり、またビームからの入熱 $Q_A$ は計算によると27kJ（ビームの発散角が大きいほど厳しい条件となるので $\omega_{1/\epsilon} = 0.4$ 度として評価した。）となるので、併せて $Q_p + Q_A = 53.4$ kJとなる。よってアパーチャーリミターは1ショットごとに温度上昇を調べる必要がある。即ち、アパーチャーリミターはタングステン製であるがタングステンの再結晶温度（1700°C）以下に保つことができるか否か監視する必要がある。アパーチャーリミターの温度は第2.1.28図に示すような赤外ミラー（表面金メッキ）、サファイアガラスのポート、赤外カメラ等からなる光学系で監視することとした。光学系の光路長は約5mmと長い。このように光路が長くなり赤外カメラに入ってくる光量が制限されると、この方法で測定した温度は実際より低い温度となる。そこで第Ⅰ期の試験ではこの光学系をアパーチャーリミターに取付けた熱電対で較正した。

### 2.1.7 ターゲット容器と突抜けモニター

ターゲット容器はJT-60真空容器を模擬するとともに、ビームの特性について種々の測定を行うためのものである。アパーチャーリミターを通過した高速中性ヘリウムビームのパワーを第2.1.24図に示す全ビームプローブで測定する。これはタングステンの受熱板に熱電対（CA）を銀ロード付けしたものでパワーを断熱的に測定する。タングステン板（重さ602g）は測定精度を上げるためにセラミックのワッシャーを介して銅板に一本のボルトで固定されている。片端を自由にして、熱応力を逃がす支持構造とした。

ビームの発散角は2本の分布測定用プローブで測定した。分布測定用プローブの外形は第2.1.30図に示す通りで、中心の重さ6gのモリブデン製の測定子に埋込んだ熱電対（CA）により、5mmφの穴を通過するパワーを断熱的に測定する。この分布プローブで求めた200keV/3.5A/発散角 $\omega_{1/\epsilon} = 0.18$ 度のビームの空間分布を第2.1.31図に示す。また、ビームの中心で直径10mm内の熱流束のみを測定する目的で、第2.1.32図に示すような固定カロリーメータをビーム中心軸上に設けた。

ビームの試験では199ヶの各電極孔から引出されたビームレットの発散角と、各ビームレット

の中心軸の方向を調べてその収束位置を求めるためピンホールカメラ<sup>7)</sup>を使用した。ピンホールカメラは、直径1mmのピンホールを持つ水冷却した銅板(ビームストッパー)と、その後方にビームレットの像を焼付けるマイラーシートを固定した銅板(スクリーン板)とからなり、ターゲット容器内に設置された。ピンホールカメラの各部の位置関係は第2.1.33図に示す通りである。なお、ピンホールを設置した位置はほぼビームレットの集束位置である。得られた像の一例を第2.1.34図に示す。その(a)図のビームレット像はほぼ全てが同じ濃さで焼付いており、各ビームレットの中心軸が1点に集束していることを示し、ビームレットの中心軸の方向が各々異った方向を向いていると(b)図のように濃淡のあるビームレット像となる。

能動粒子線装置をJT-60真空容器に据付けた後、ビーム軸の調整やビームの発散測定を行う際に使用する突波けモニターは第2.1.35図に示す構造をしている。なお、ビームの発散測定に際しては角度調整機構によってビームを振って行う。直交する2軸上に対称に2個づつ8個と中心に1個の計9個の測定子からなっている。測定子は熱電対(CA)を埋込んだモリブデン製で4mmφの穴を通過したパワーを測定する。この突抜けモニターで測定したビームの分布を第2.1.36図(この場合はイオン源を固定して測定)に示す。このグラフは140 keV / 1.6 A /  $\omega_1/\omega = 0.17$ 度のビームについての結果である。また、突抜けモニターの中心のセンサーはファラデーカップにもなっていて、プラズマがある時これを透過してきた高速中性ヘリウムビームの時間変化をモニターするために使用する。これは、センサーに高速中性ヘリウムが衝突した時発生する2次電子をコレクターで集めて測定するものである。この時2次電子がJT-60からの漏洩磁場により影響されることを防ぐためコレクターとなる熱測定子取付け板は磁気シールドも兼ね鉄製(SM41)とした。ファラディーカップ信号と加速電流信号について同時に観測したものを第2.1.37図に示す。

表2.1.1 基本仕様

## Specifications for Ion Source

BEAM	He
BEAM ENERGY	40 ~ 200 keV
BEAM CURRENT	3.5 A
BEAM DIVERGENCE	0.4° (1/e)
PULSE LENGTH	0.1 sec

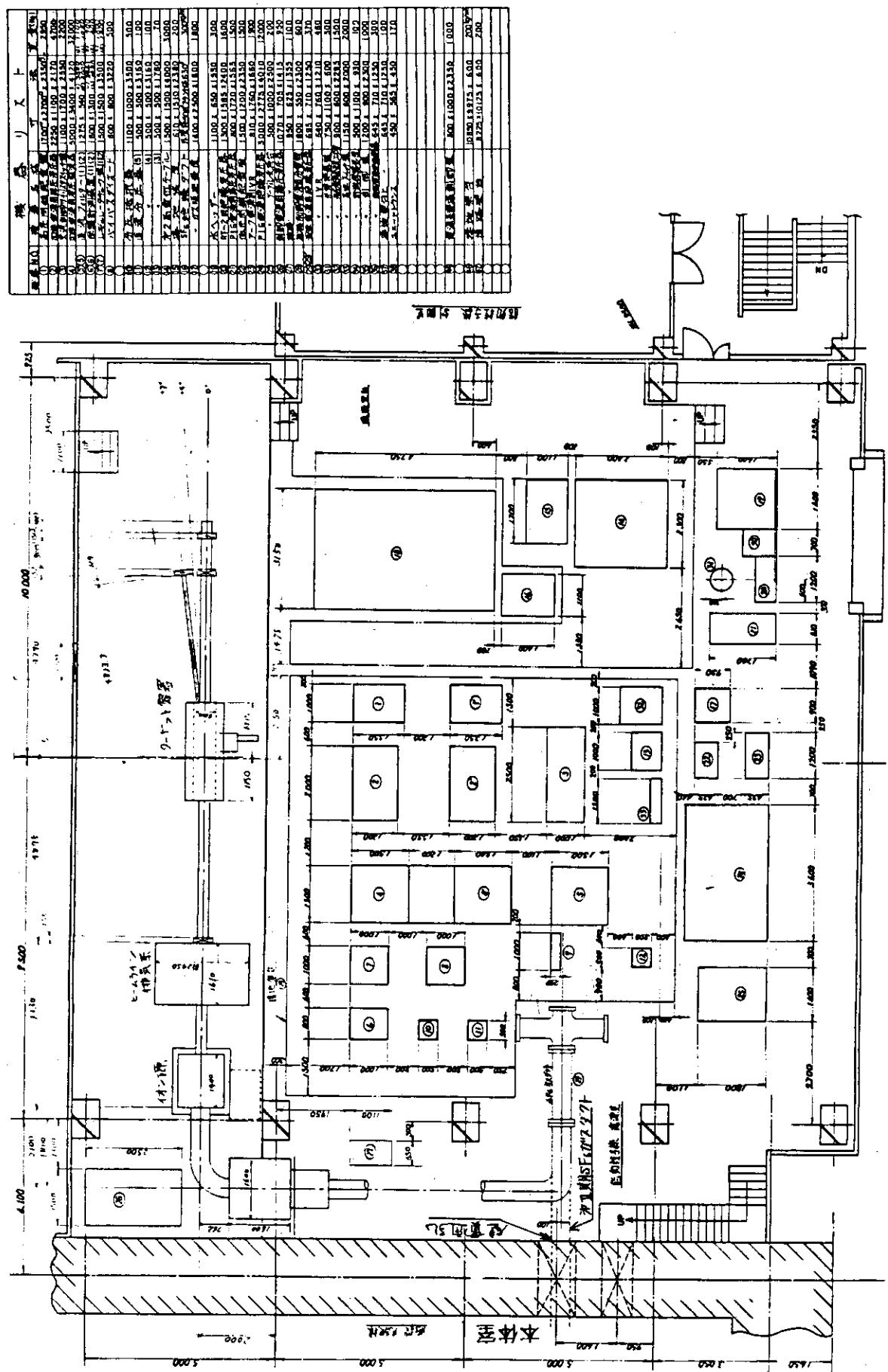


図2.1 能動粒子線建家平面図

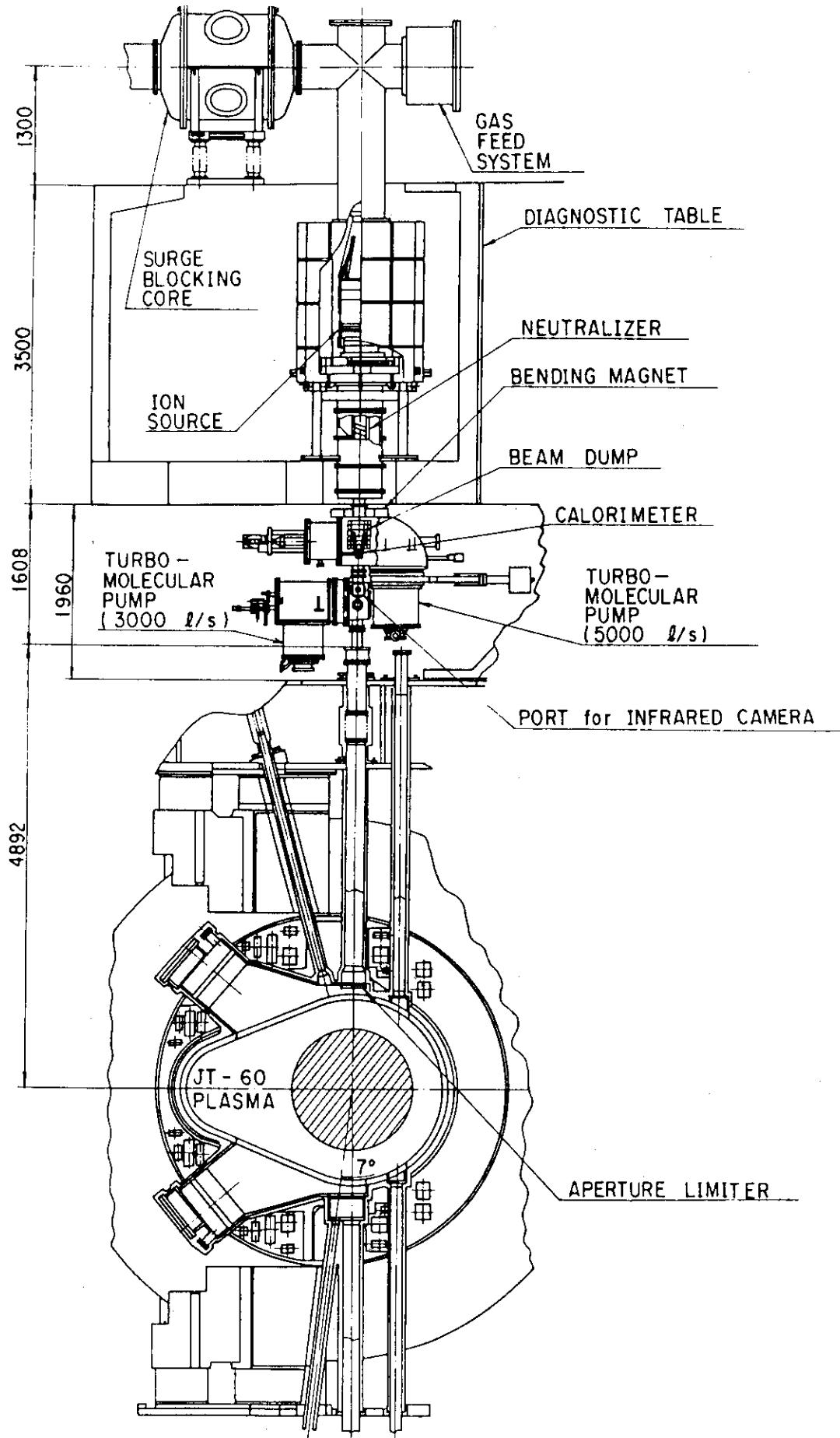
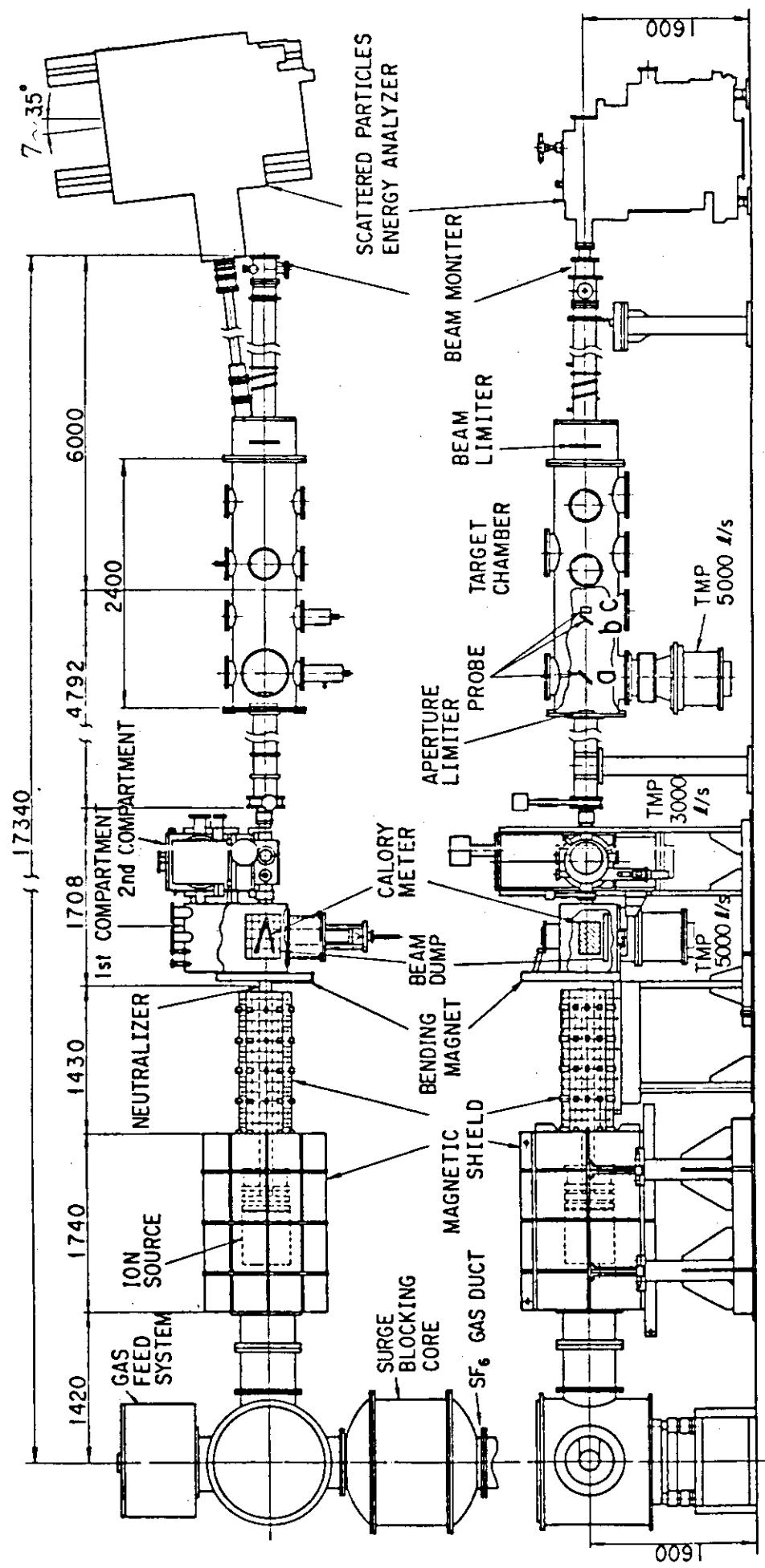
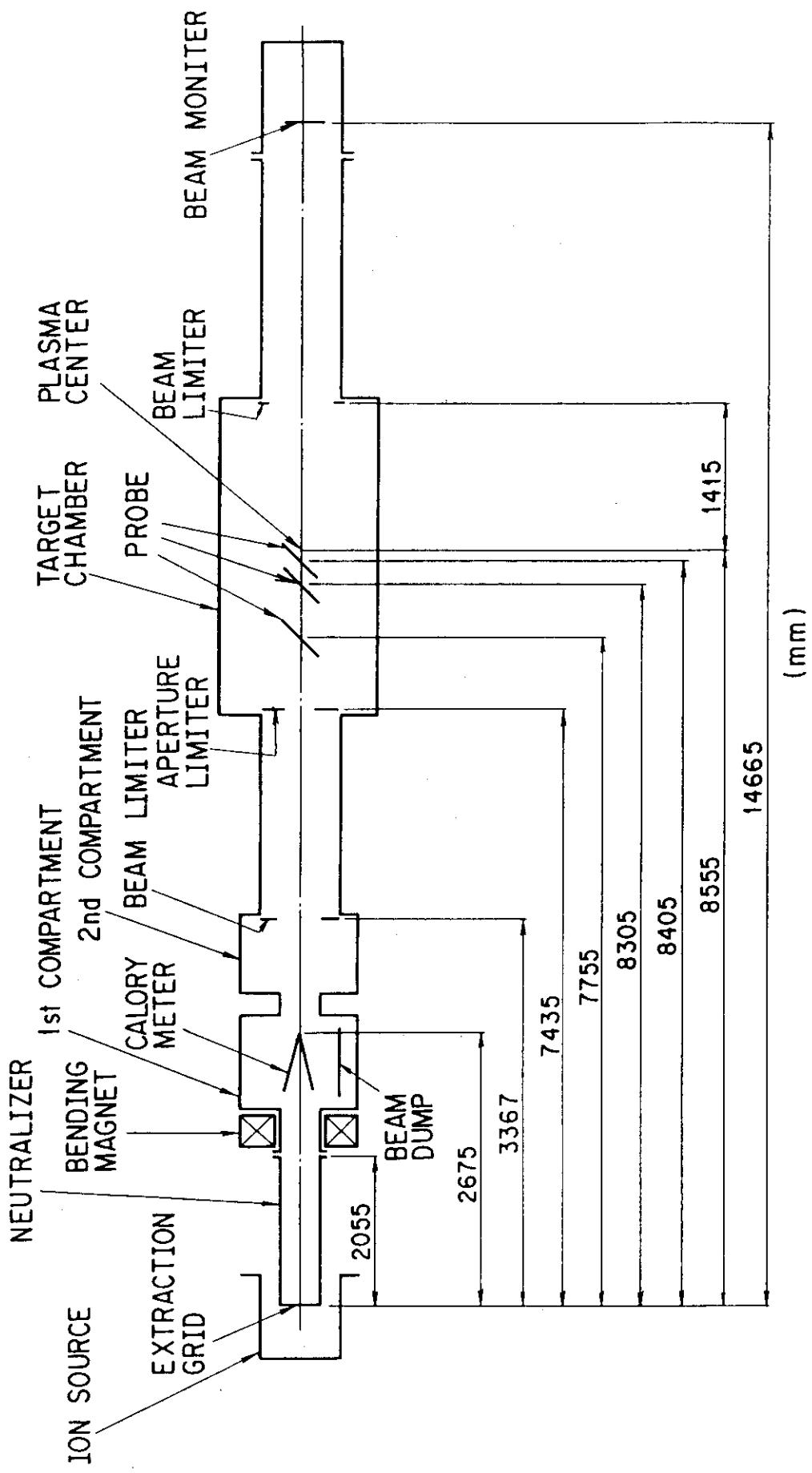


図 2.1.1 JT-60 能動粒子線イオン温度計測装置



Schematic of the helium beam injector

図 2.1.2 能動粒子線水平ビームライン



Schematic of the helium beam injector

図 2.1.3 各プローブ及びオノン源配置図

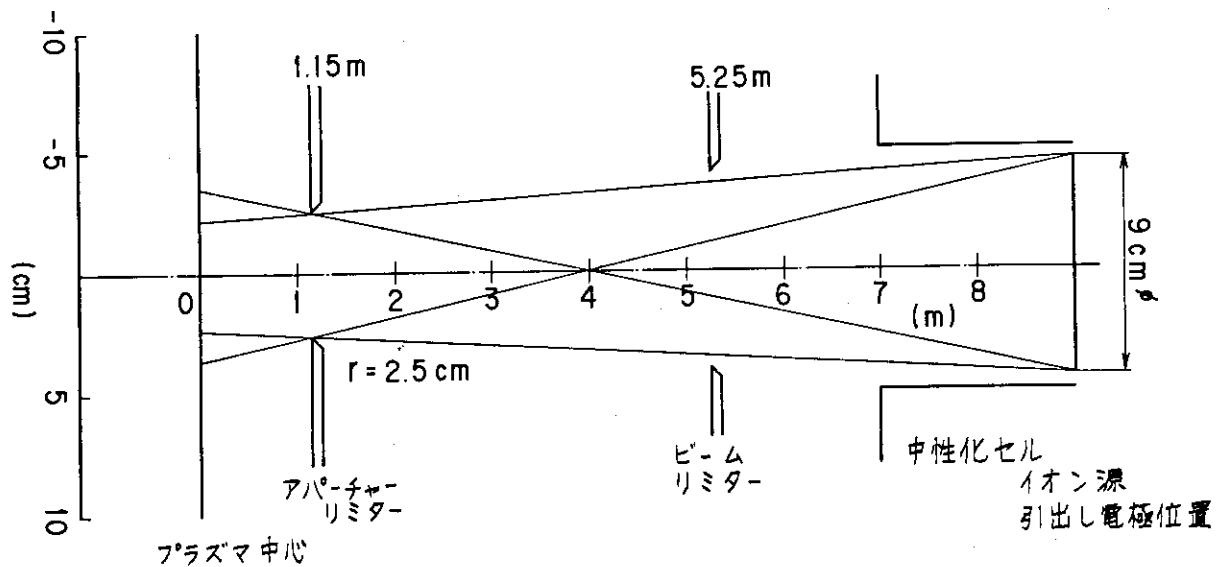


図 2.1.4 ビーム軌道とアパートチャーリミター

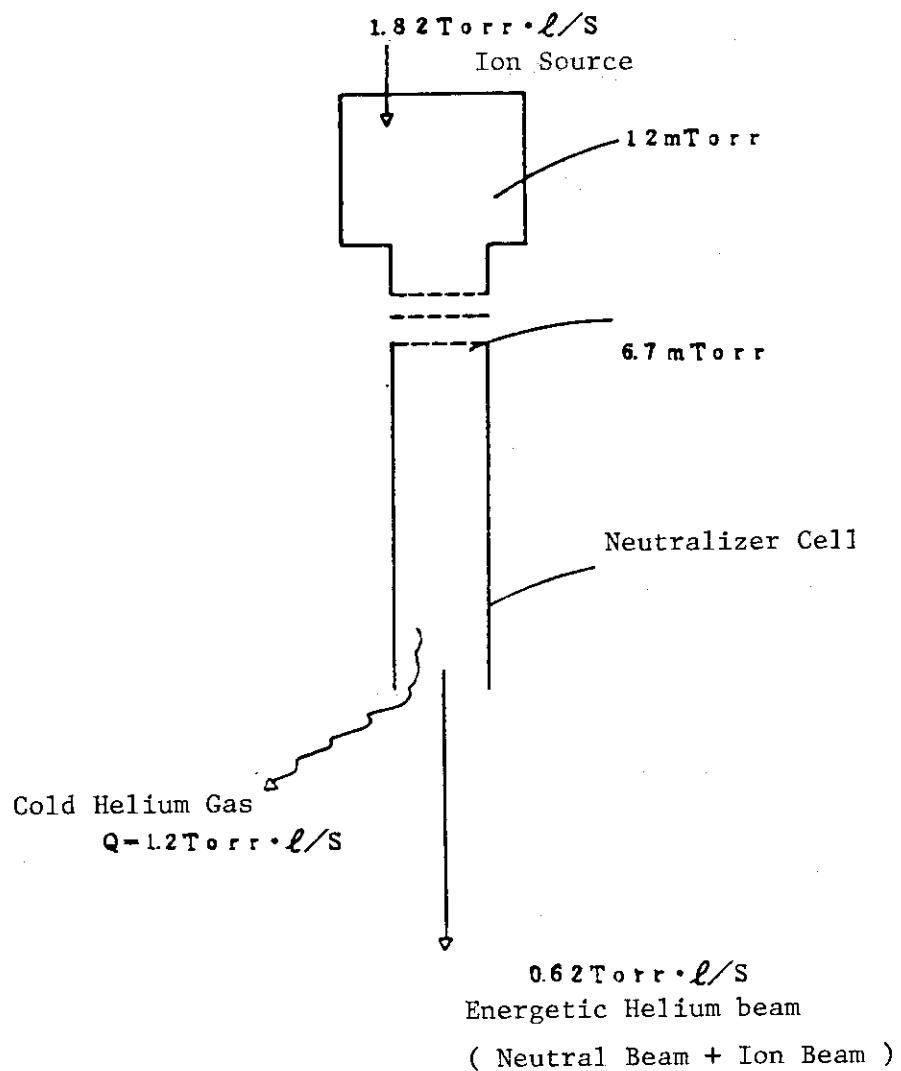


図 2.1.5 ヘリウムガスバランス

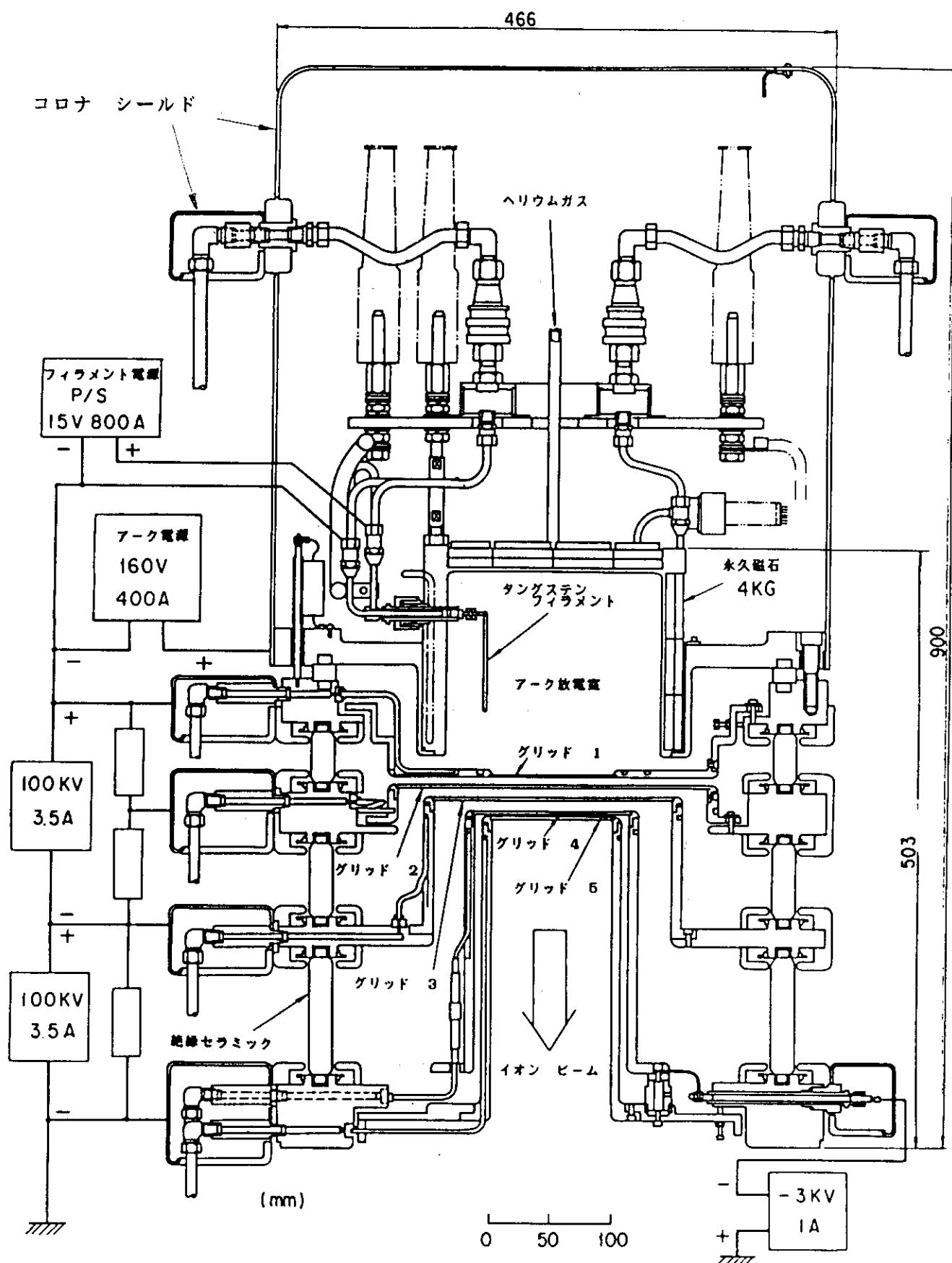


図 2.1.6 イオン源概略図

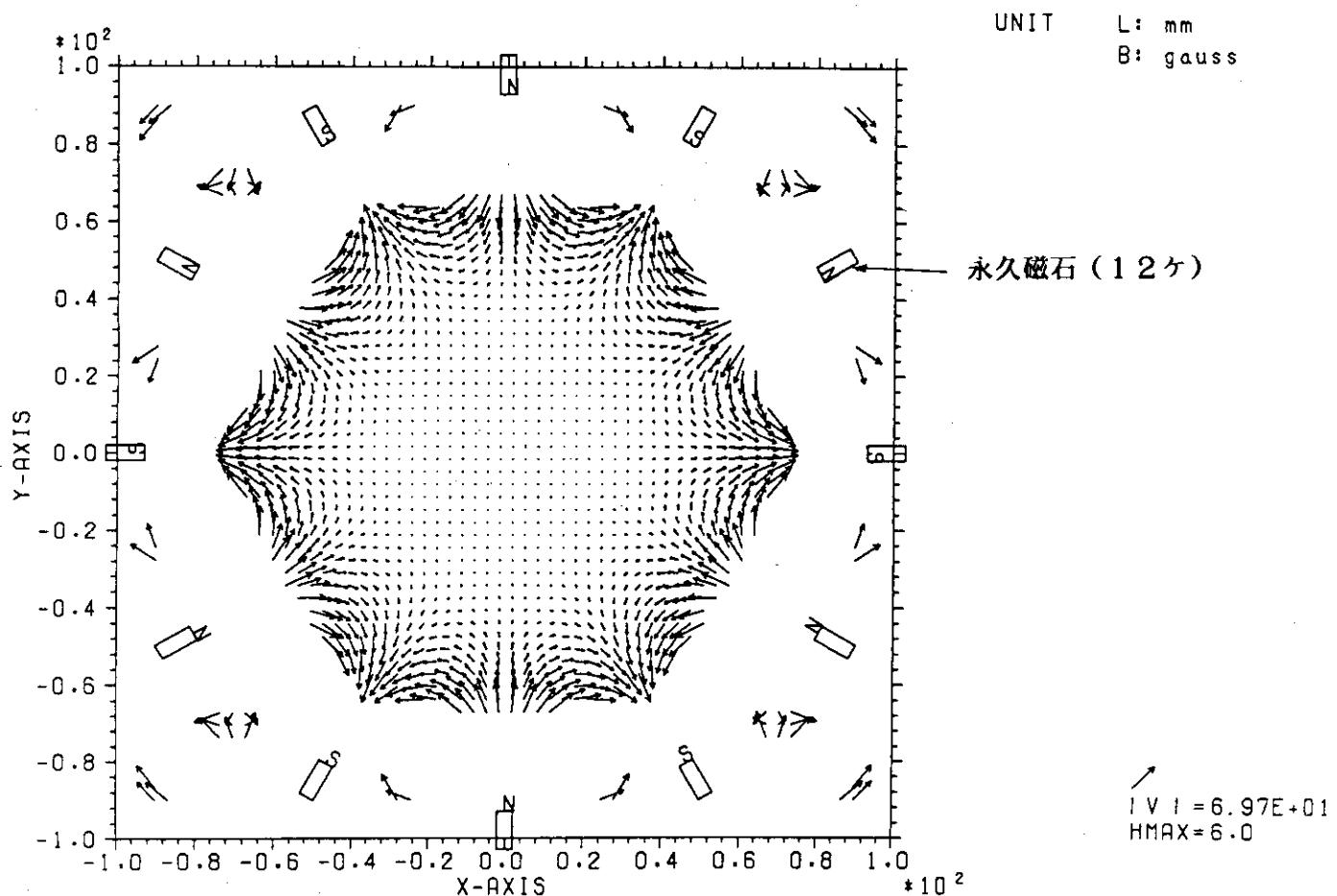


図 2.1.7 アークチャンバー径方向断面における磁場配位

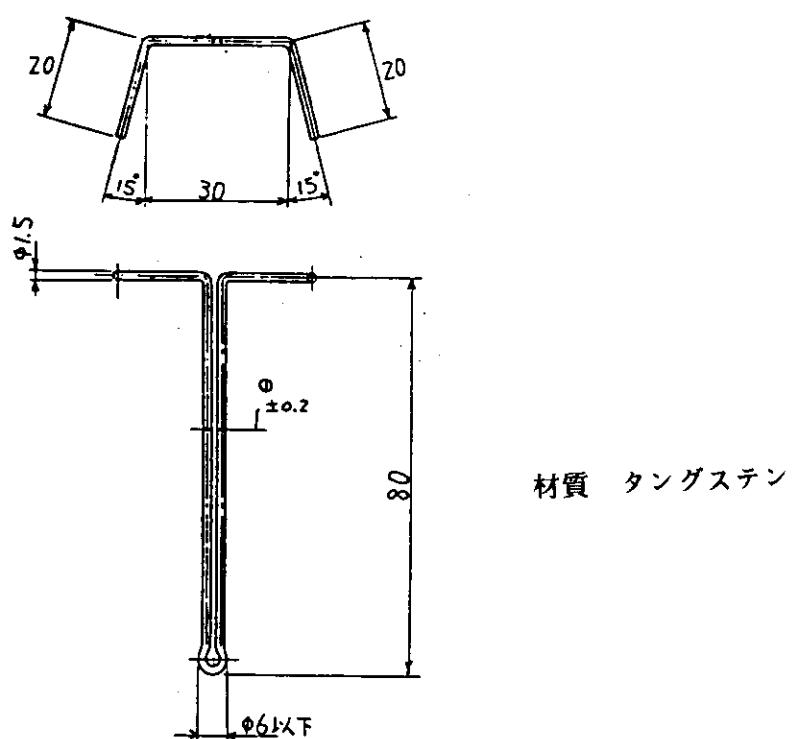


図 2.1.8 イオン源フィラメント図

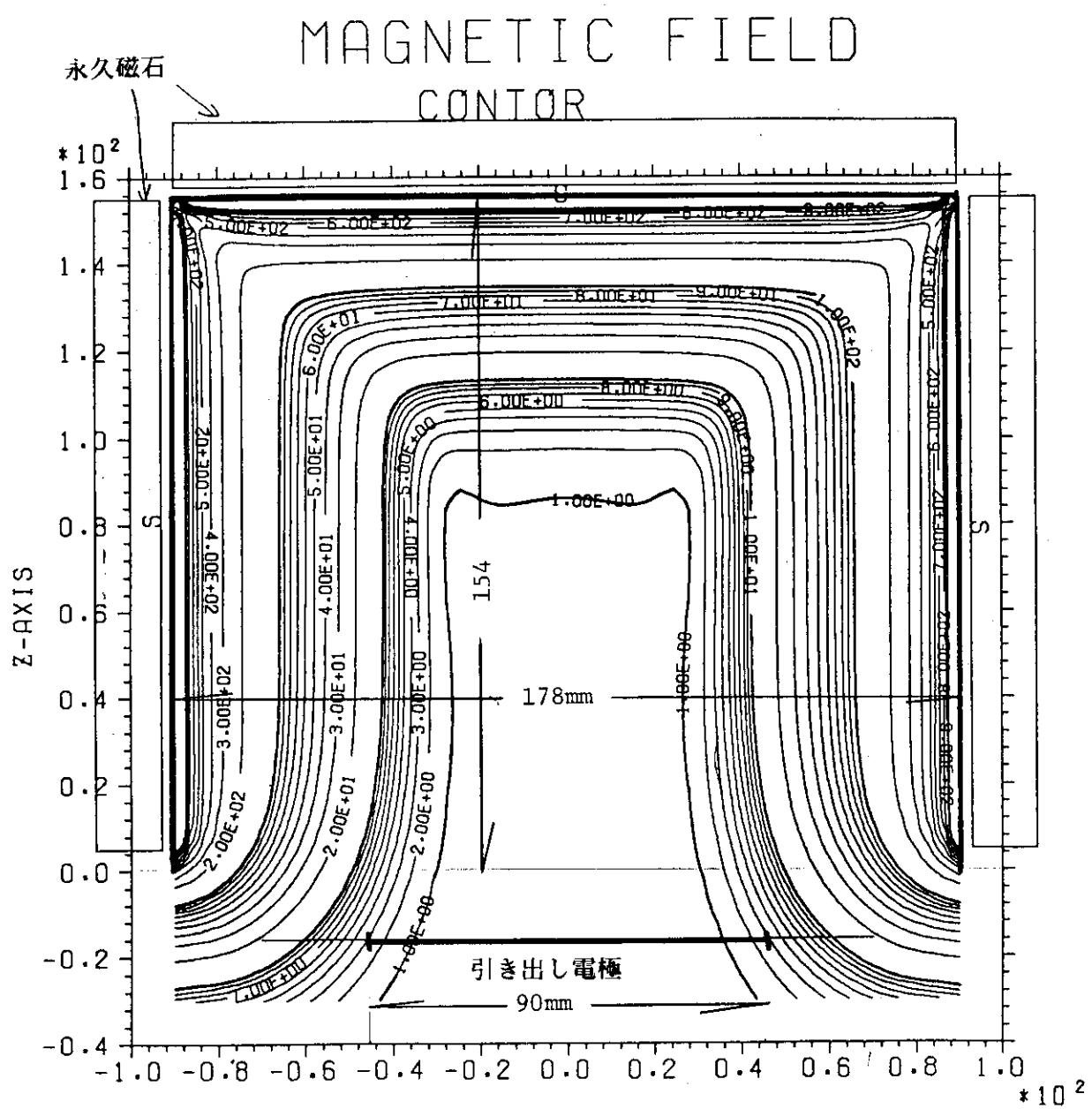


図 2.1.9 ラインカスプ磁場の径方向分布

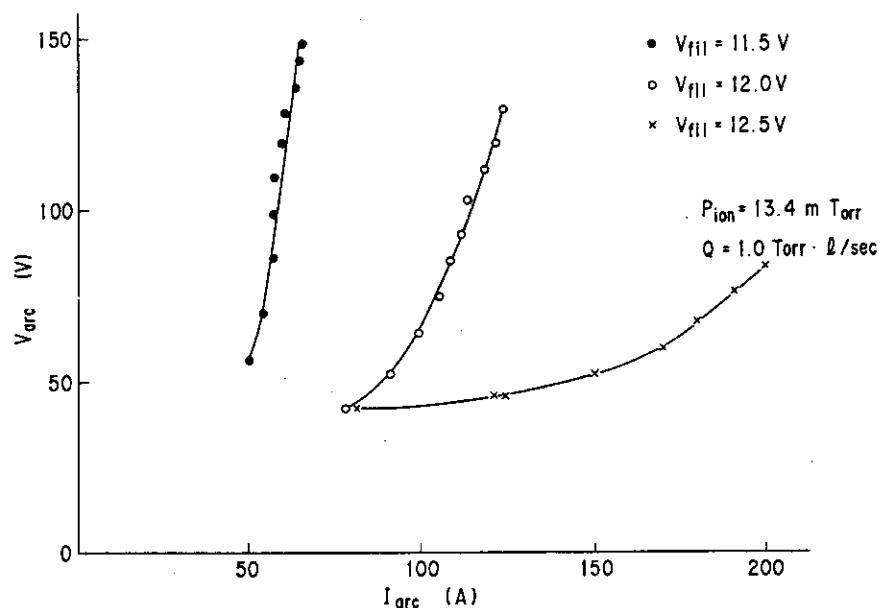


図 2.1.10 アーク特性

## TEST DATA      HELIUM ION BEAM TRAJECTORIES

CURRENT DENSITY      =      1.7000E+02 (MA/CM<sup>2</sup>)  
 TOTAL CURRENT      =      1.7732E-02 (A)  
 PERVEANCE      =      1.9825E-10 (A/V\*\*\*1.5)  
 MINIMUM POTENTIAL      =      -1.1648E+03 (V) AT Z =      3.2314E-02 (M)  
 DIVERGENCE (RMS)      =      3.4726E-01 (DEG)  
 ELECTRON TEMPERATURE      =      1.0000E+01 (EV)  
 ION TEMPERATURE      =      1.0000E+00 (EV)

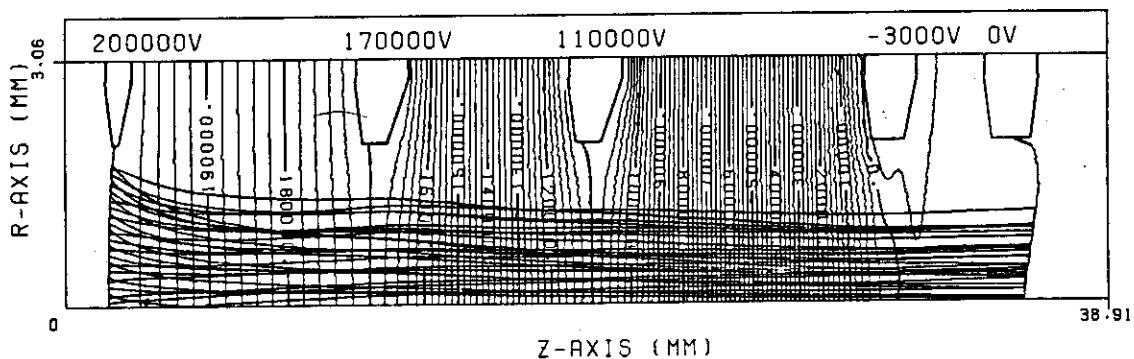


図 2.1.11 ヘリウムビーム軌道(計算機シミュレーション)

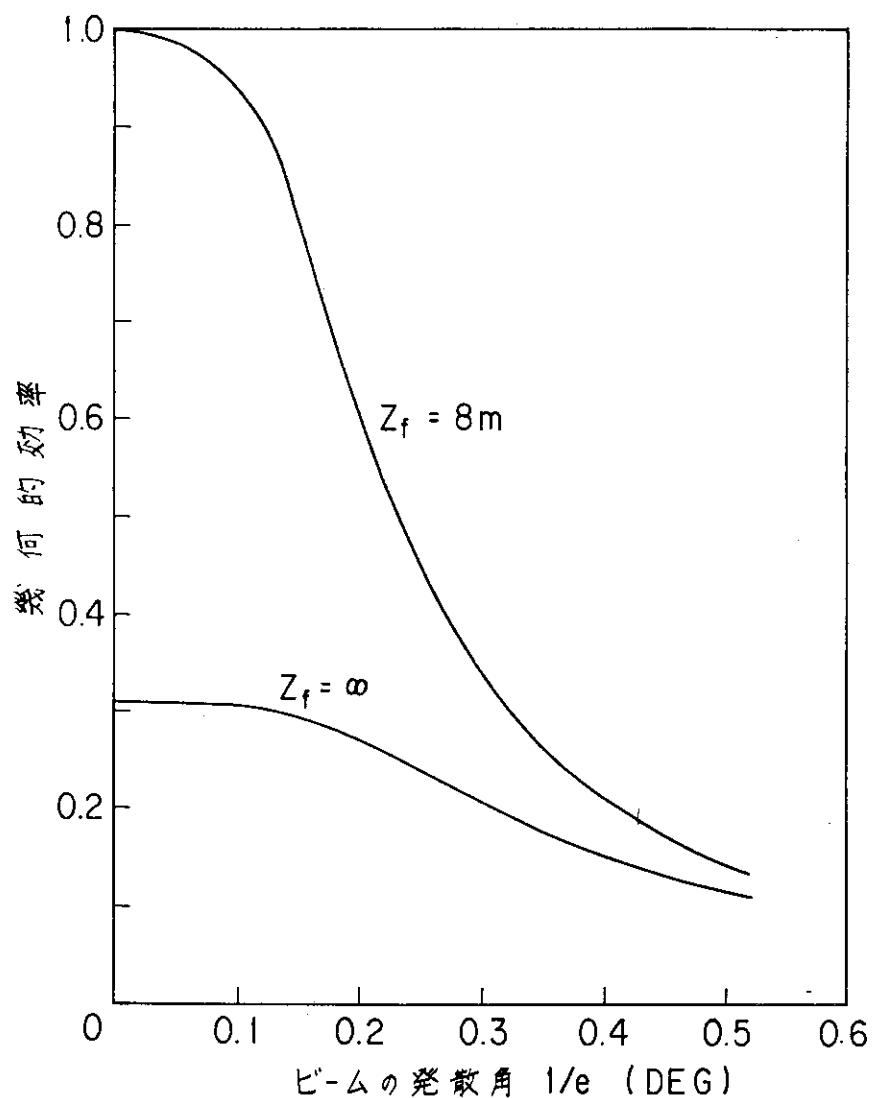


図 2.1.12 ビームの幾何的効率

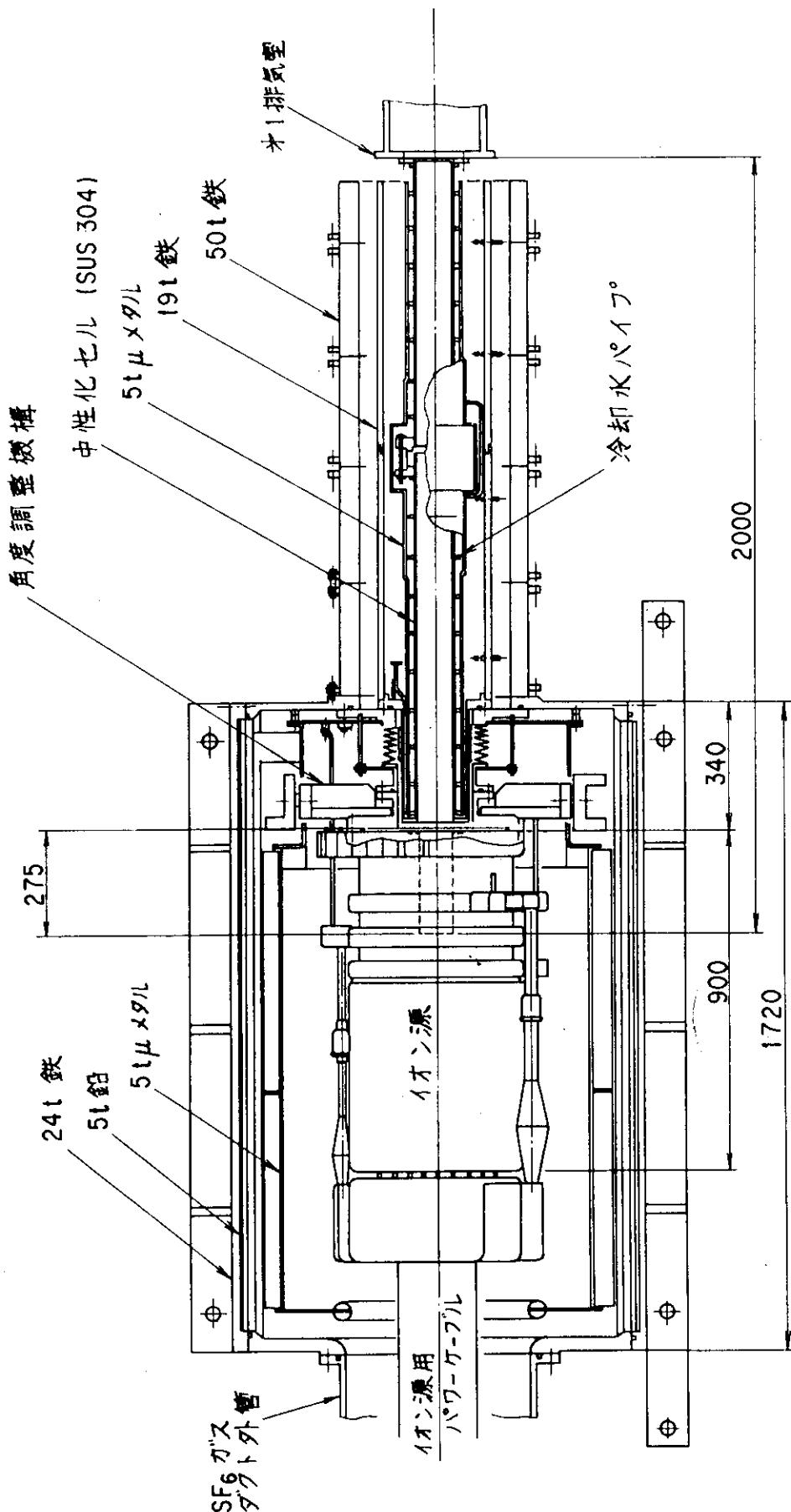


図 2.1.13 イオン源容器及び中性化セル断面図

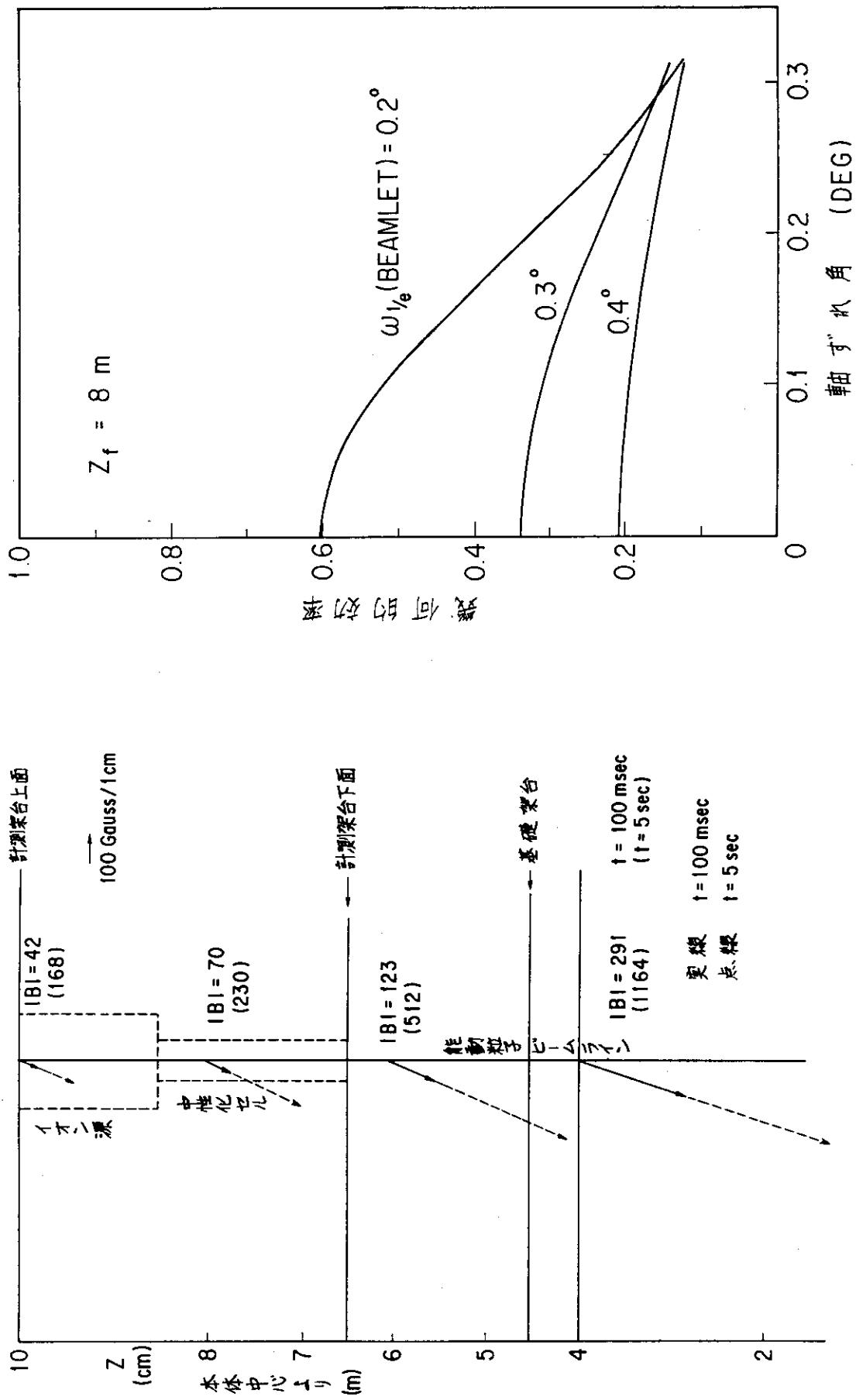


図 2.1.14 JT-60 漏洩磁場

図 2.1.15 軸方位角と幾何的効率

軸方位角 (DEG)

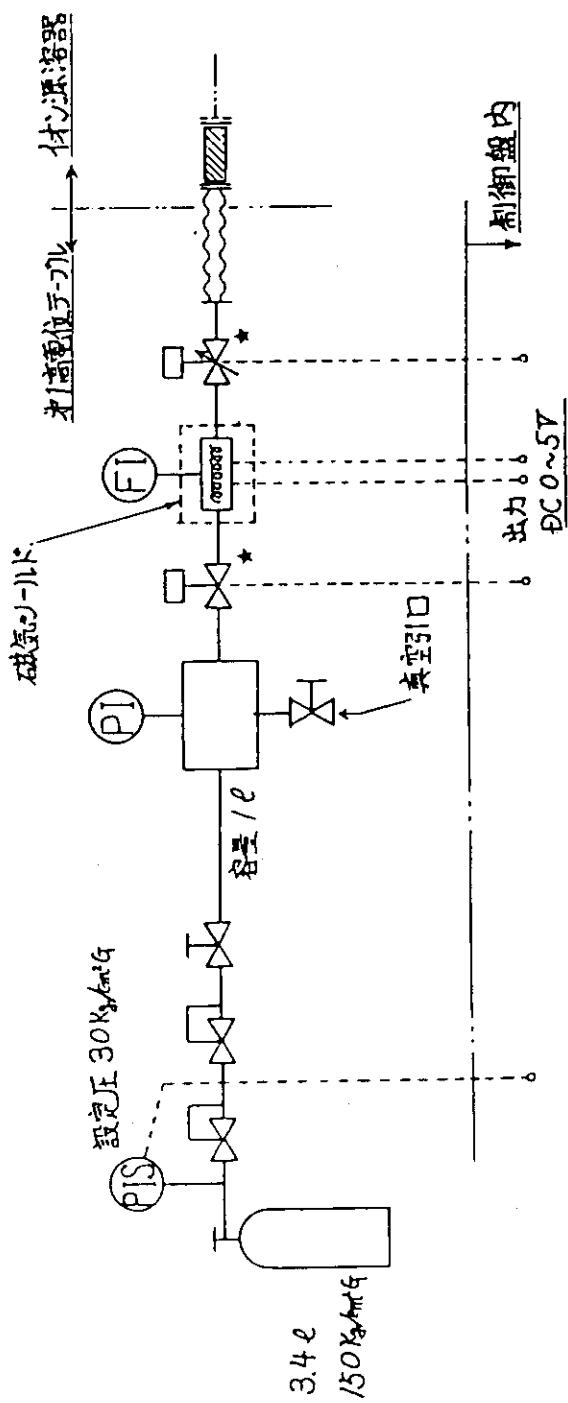
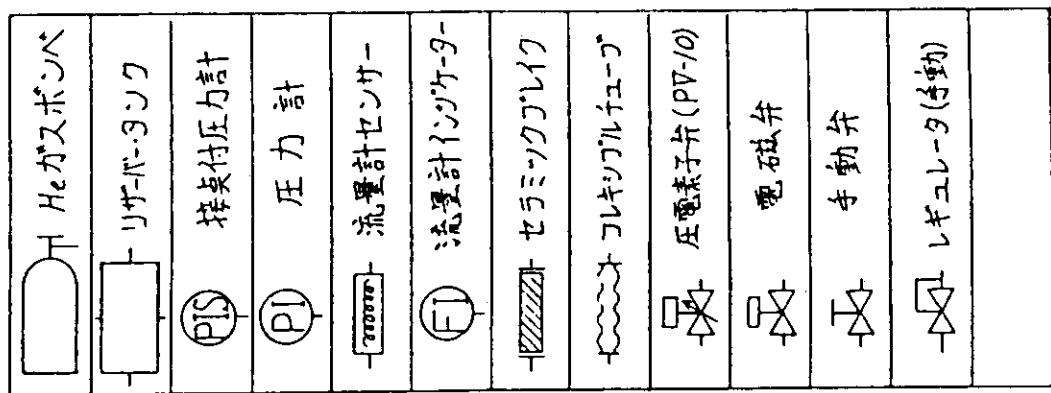


図 2.1.16 JT-60 能動粒子線イオン源ガス導入系系統図

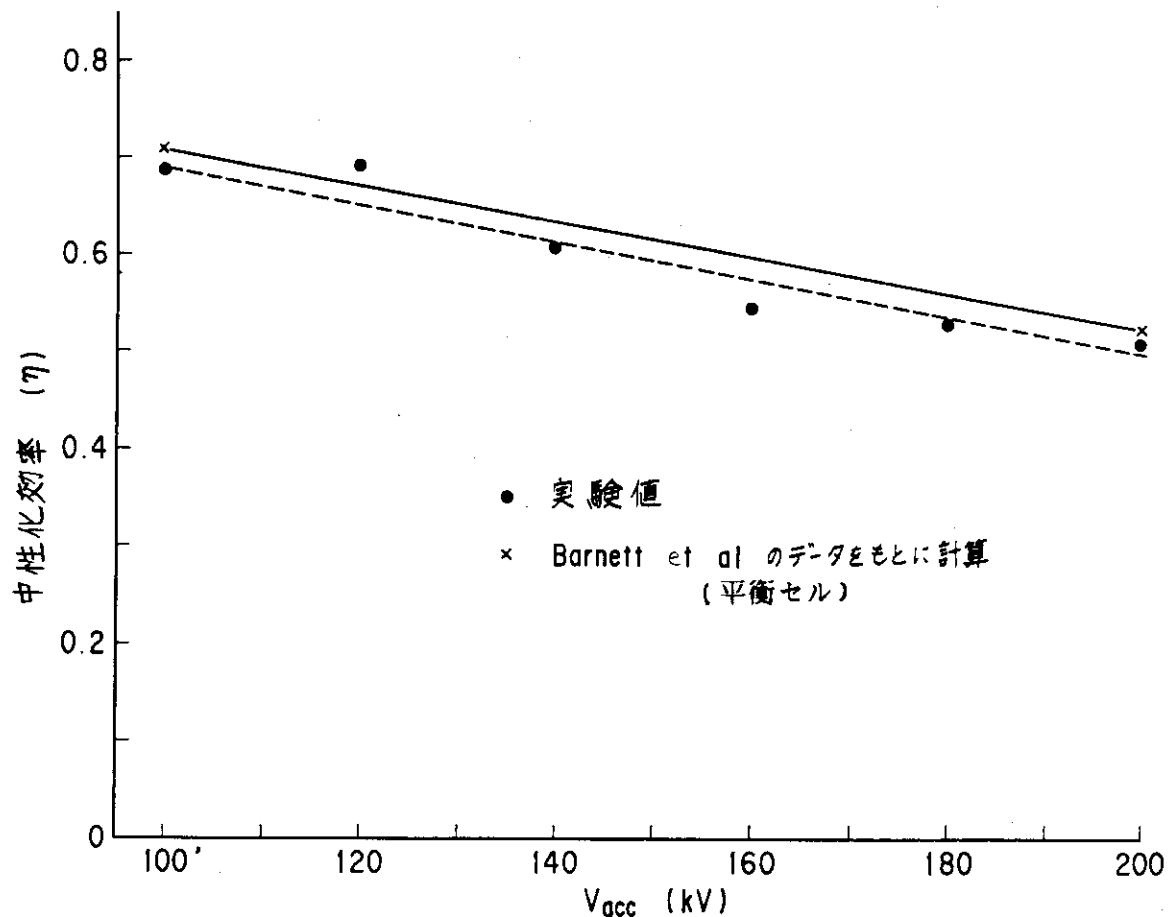


図 2.1.17 中性化セル効率

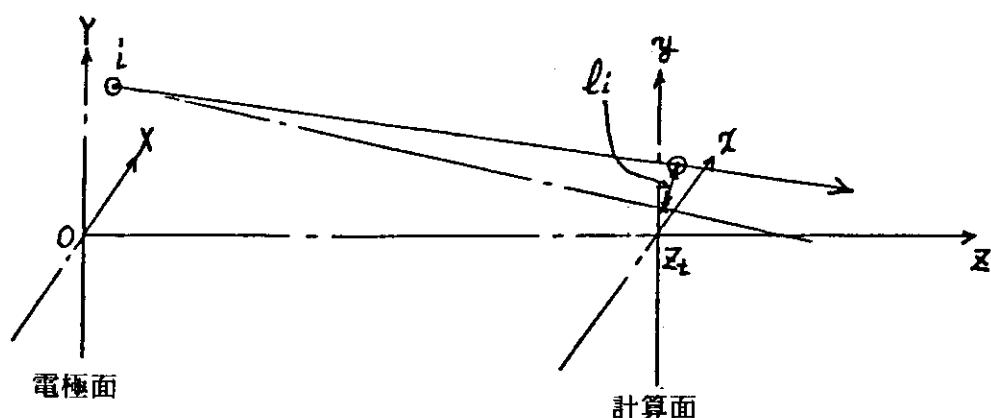


図 2.1.18 ビームの密度分布計算における座標系

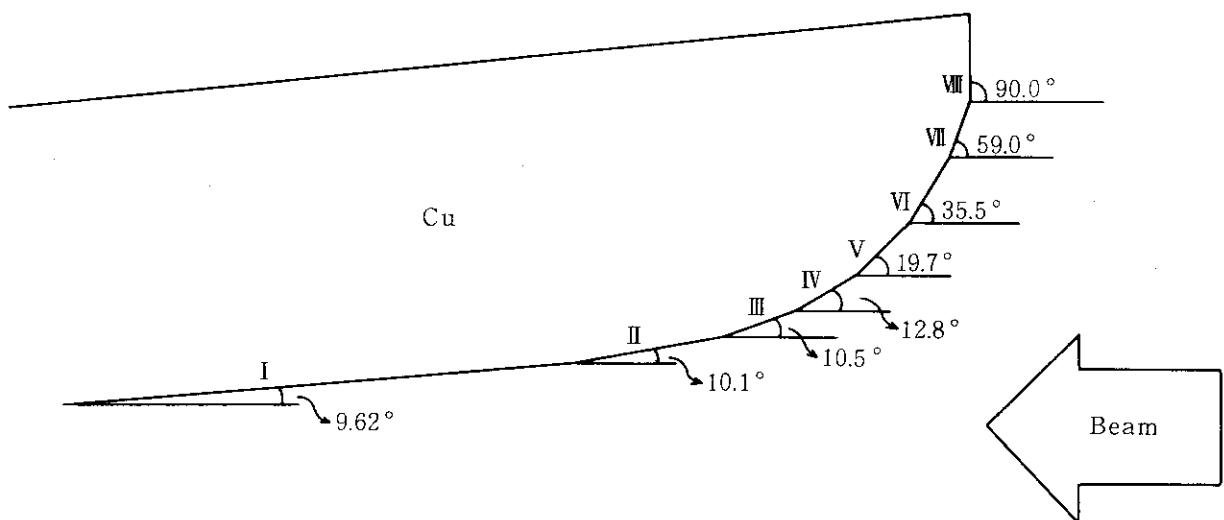


図 2.1.19 カロリーメータ詳細図

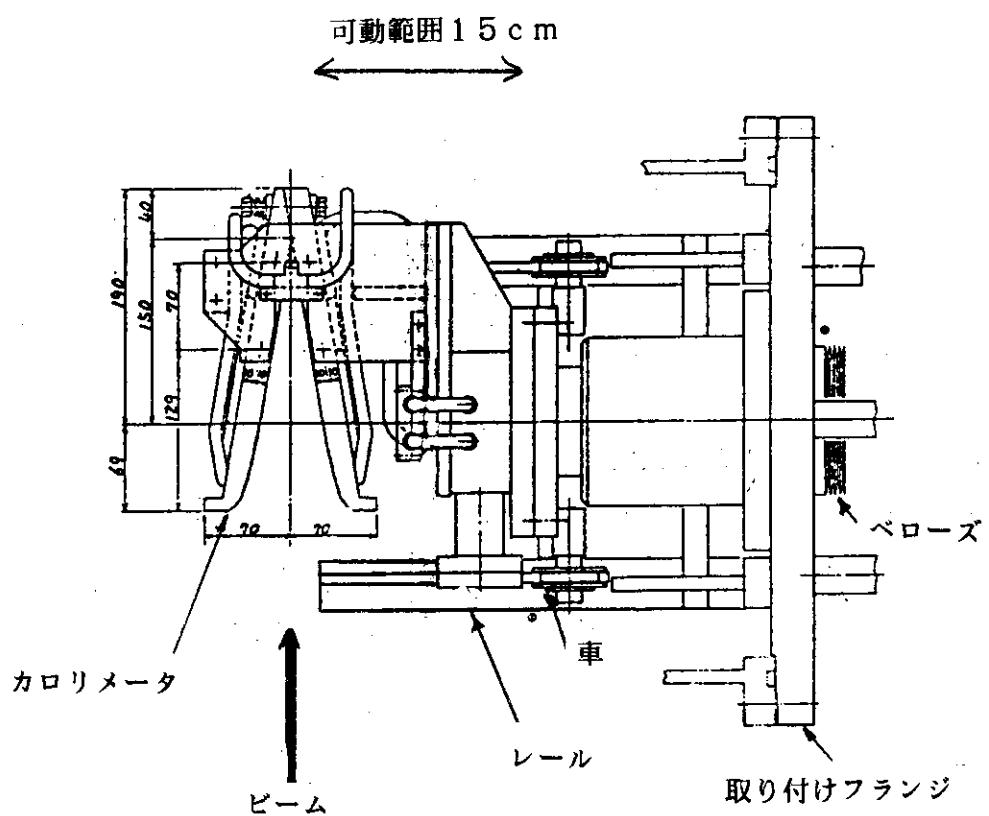


図 2.1.20 カロリーメータ形状図

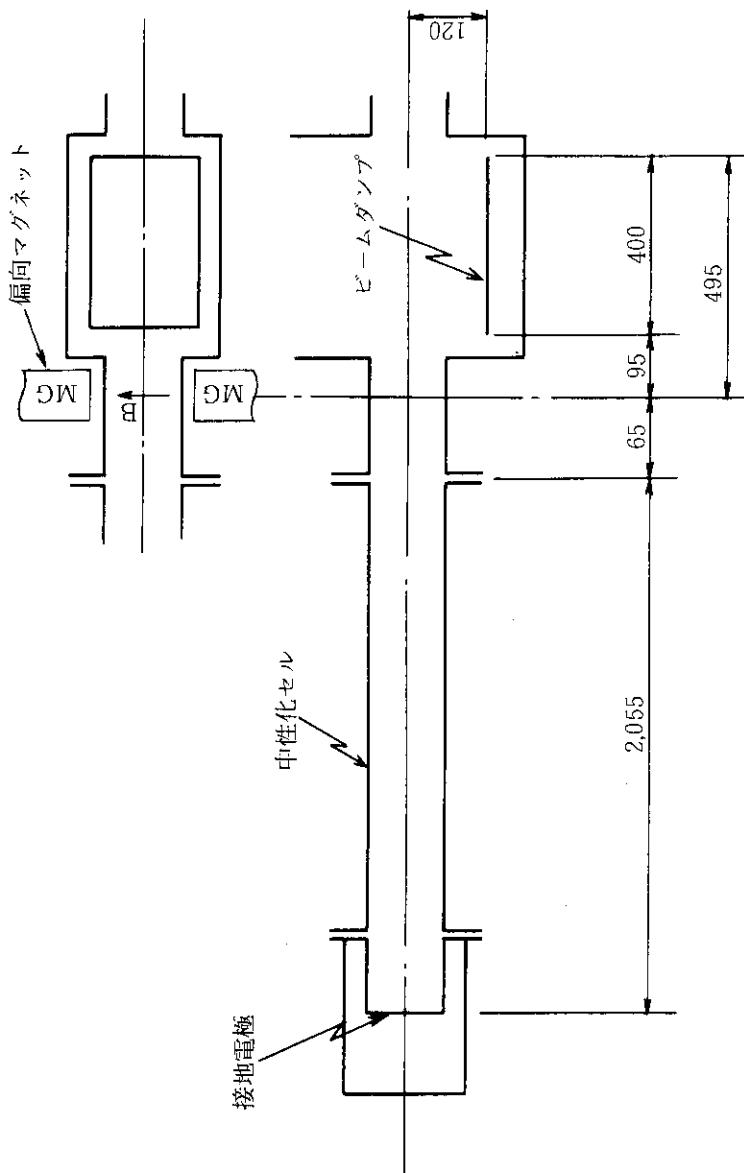


図 2.1.21 偏向磁石及びビーム・ダップ設置図

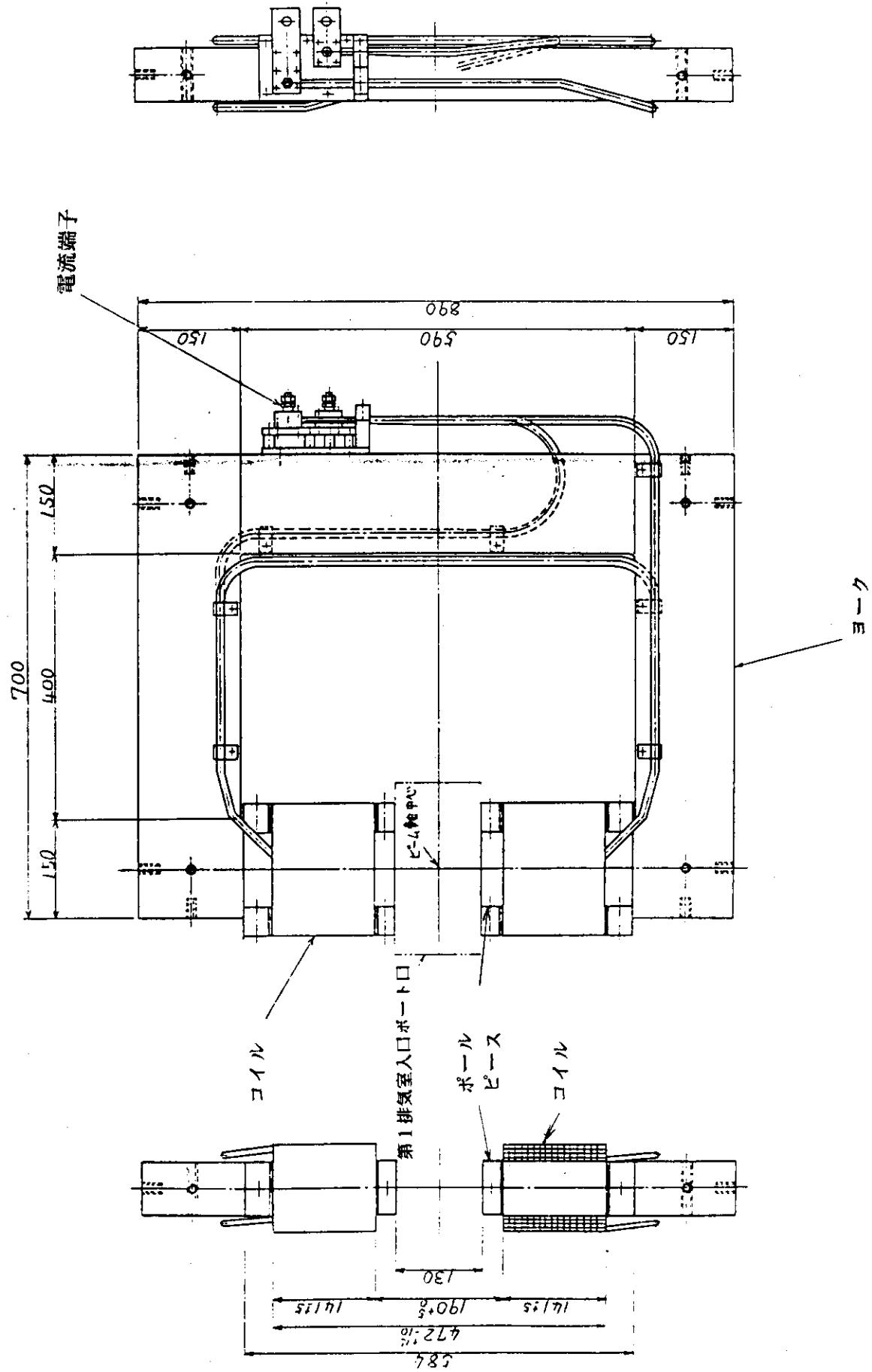


図 2.1.22 偏向磁石外形図

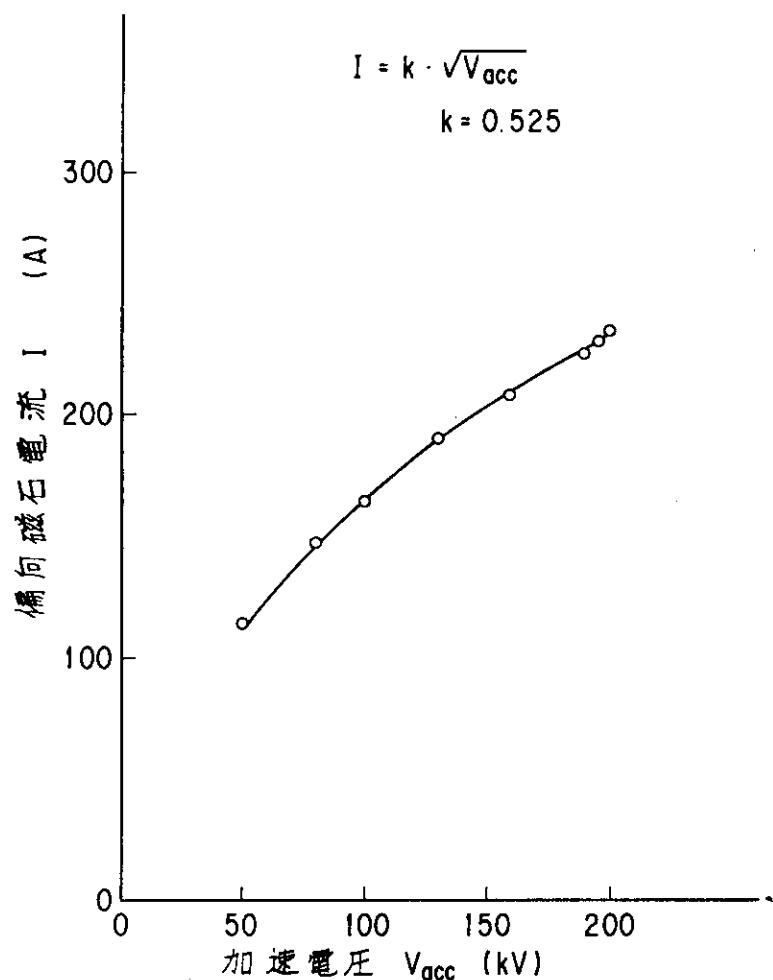


図 2.1.23 加速電圧と偏向磁石電流

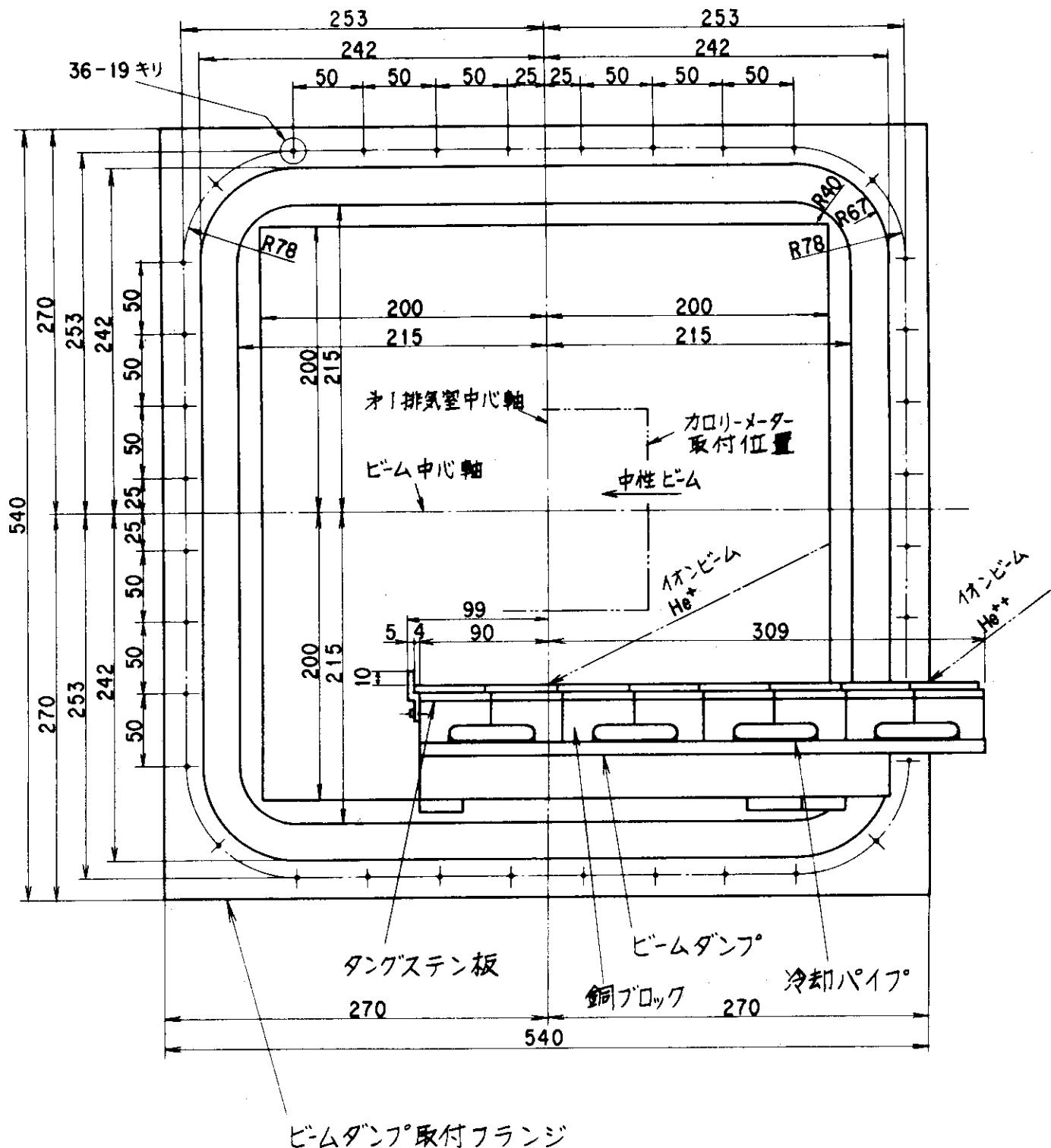


図 2.1.24 ビームダンプ側面図

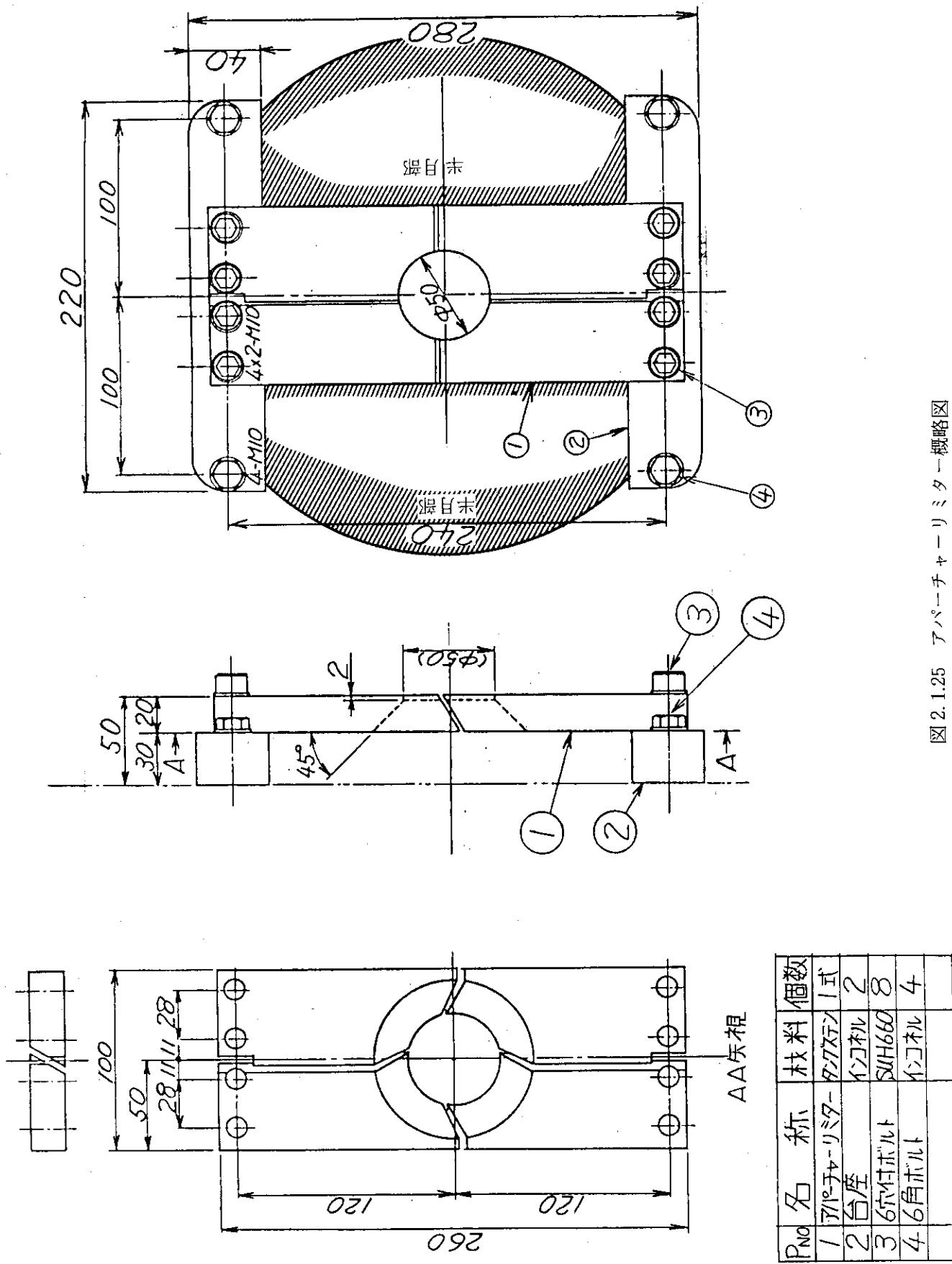


図2.1.25 アーチチャーリミタ-タグステン概略図

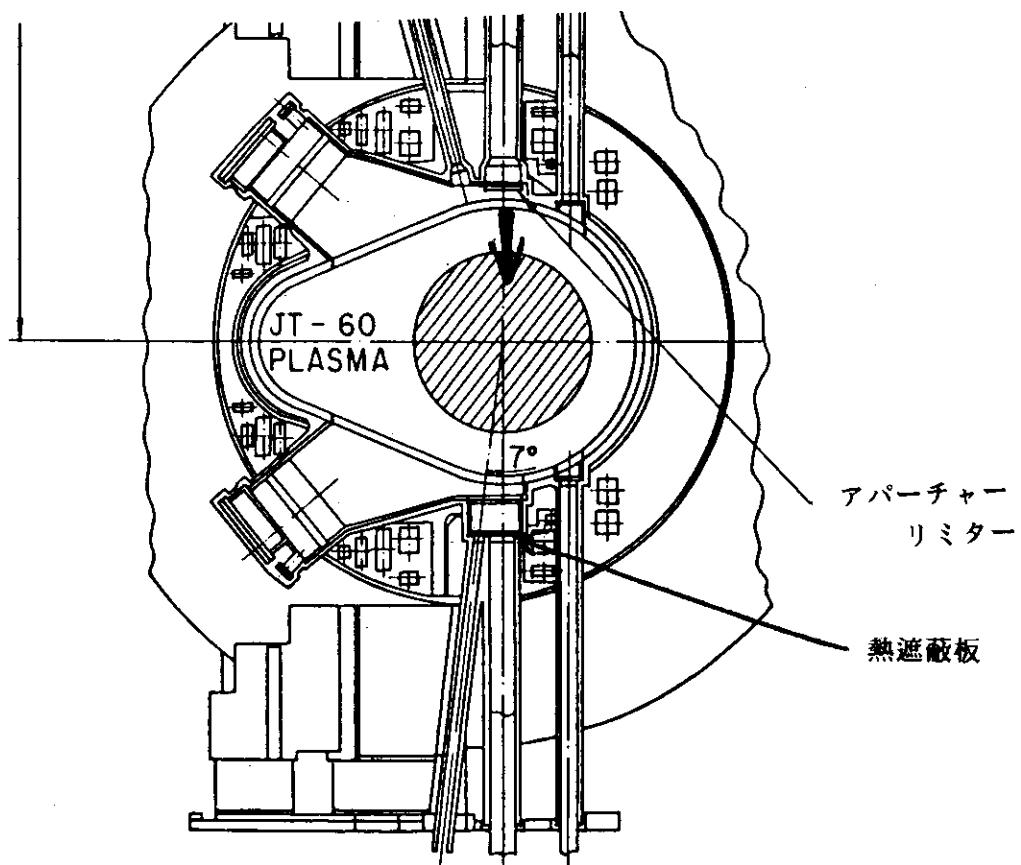


図 2.1.26 アーチャーリミター及び熱遮蔽板取り付け図

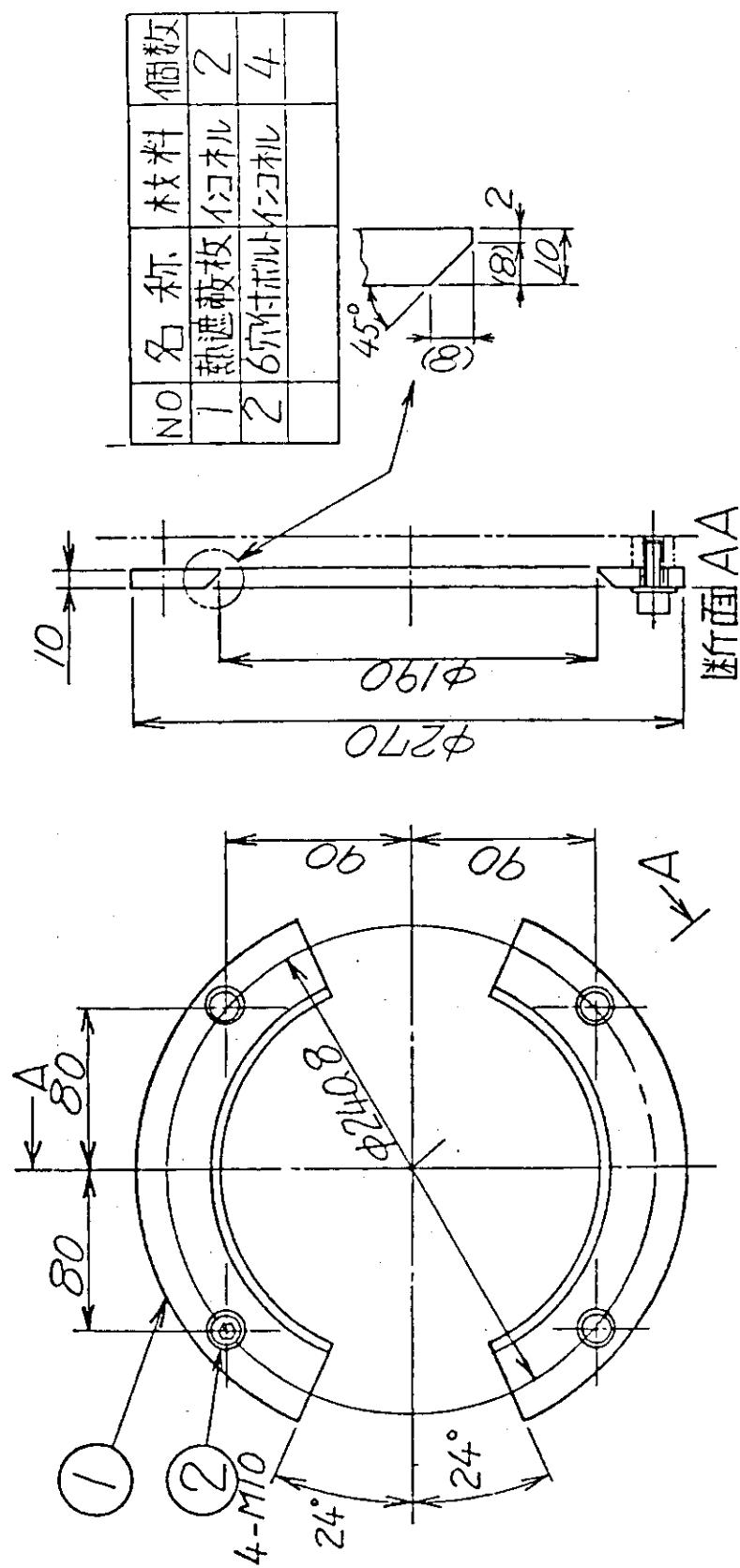


図 2.1.27 热遮蔽板概略図

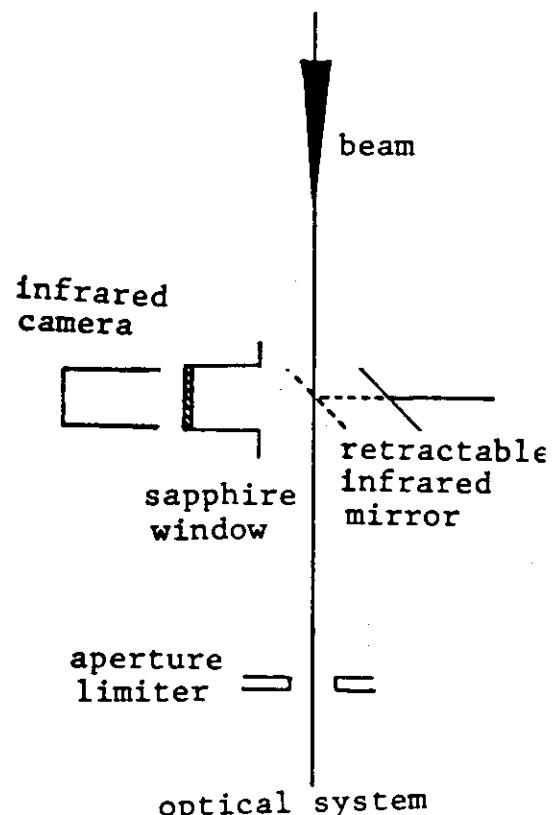


図 2.1.28 アパーチャーリミター温度監視システム

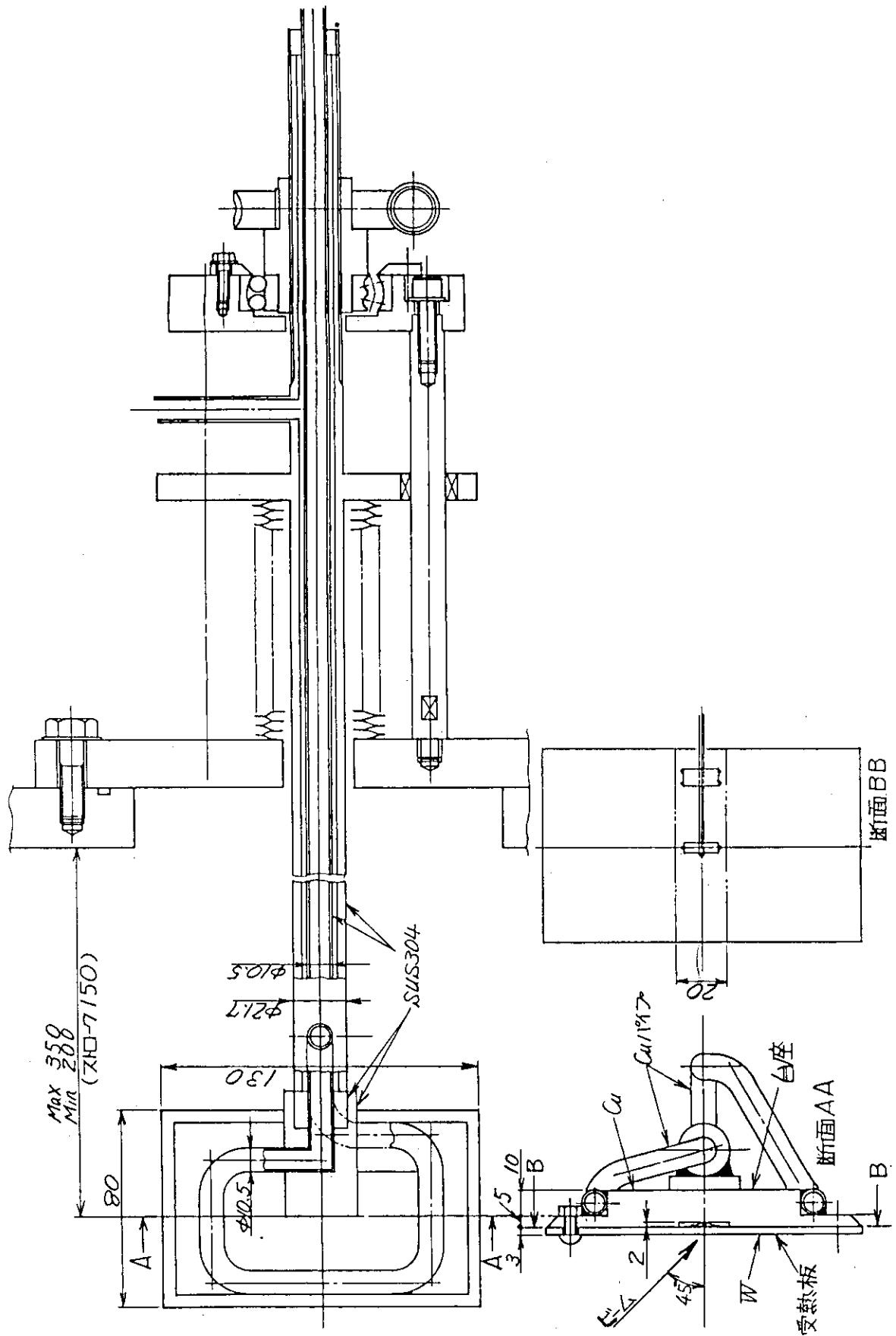


図 2.1.29 全ビームプローブ外形図

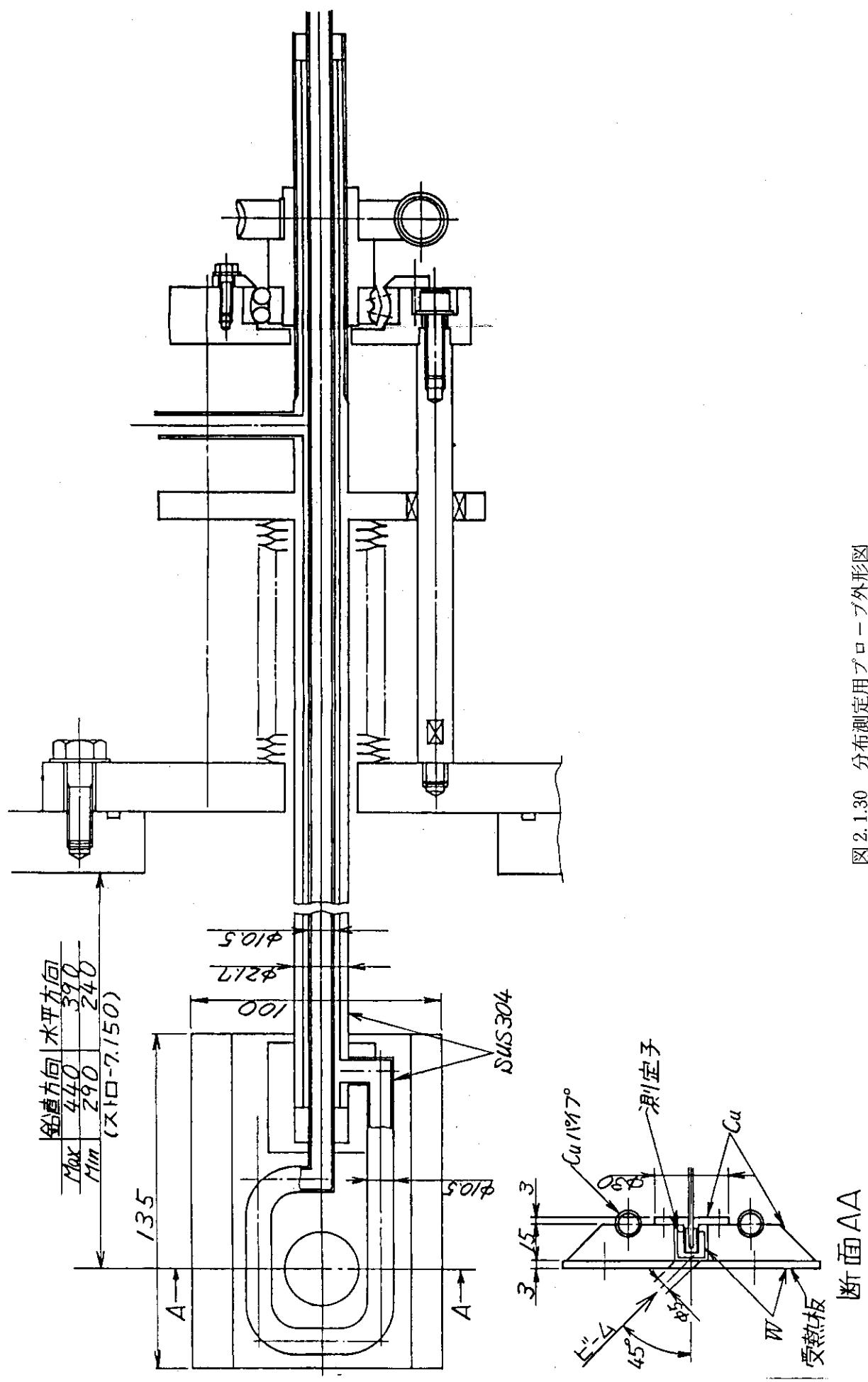


図 2.1.30 分布測定用プローブ外形図

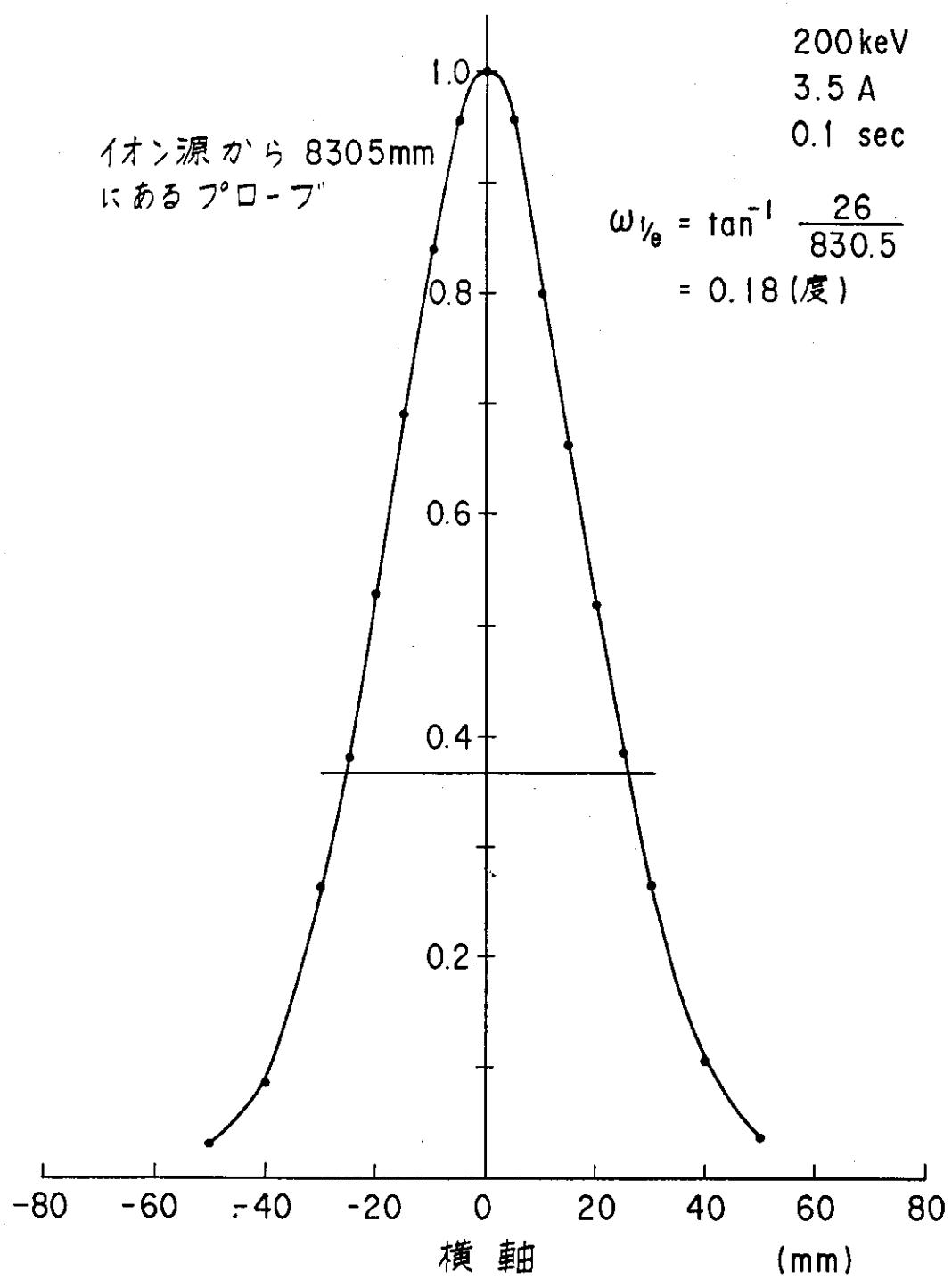


図 2.1.31 ビームの分布と発散角

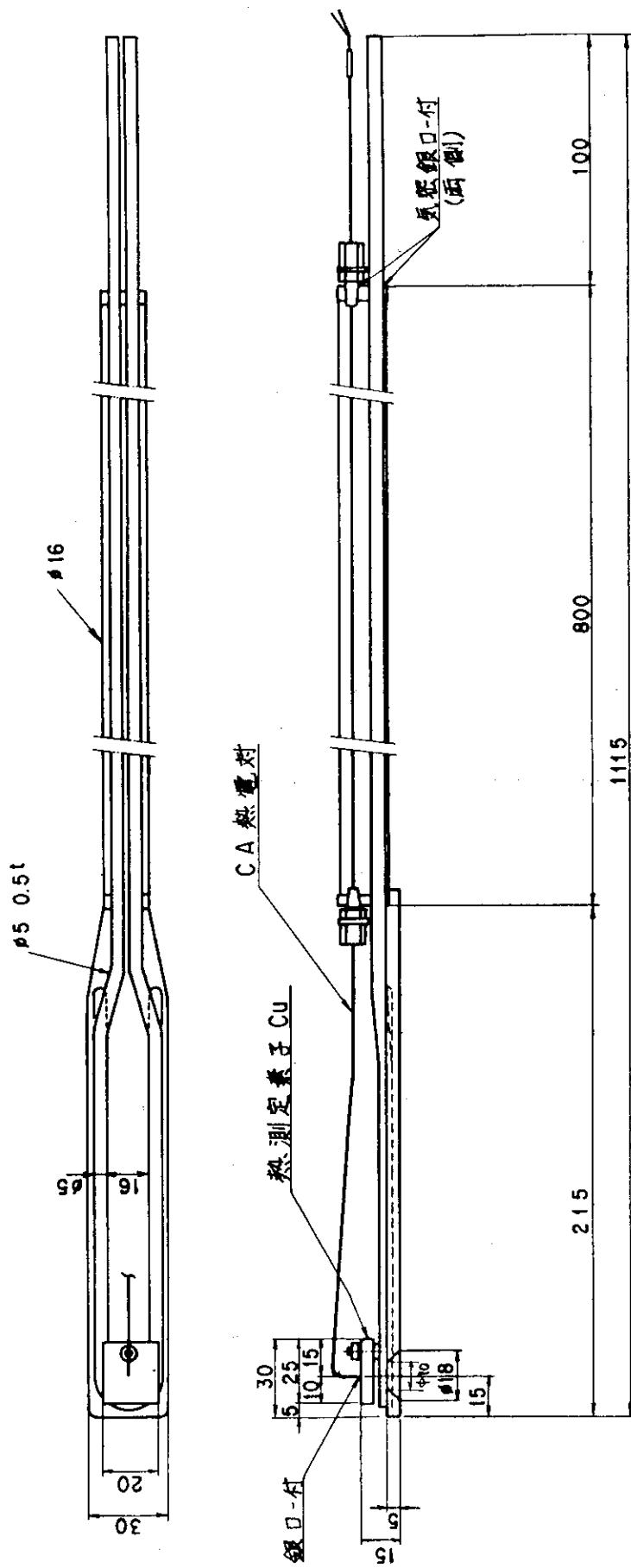


図 2.1.32 固定力口リーメータ外形図

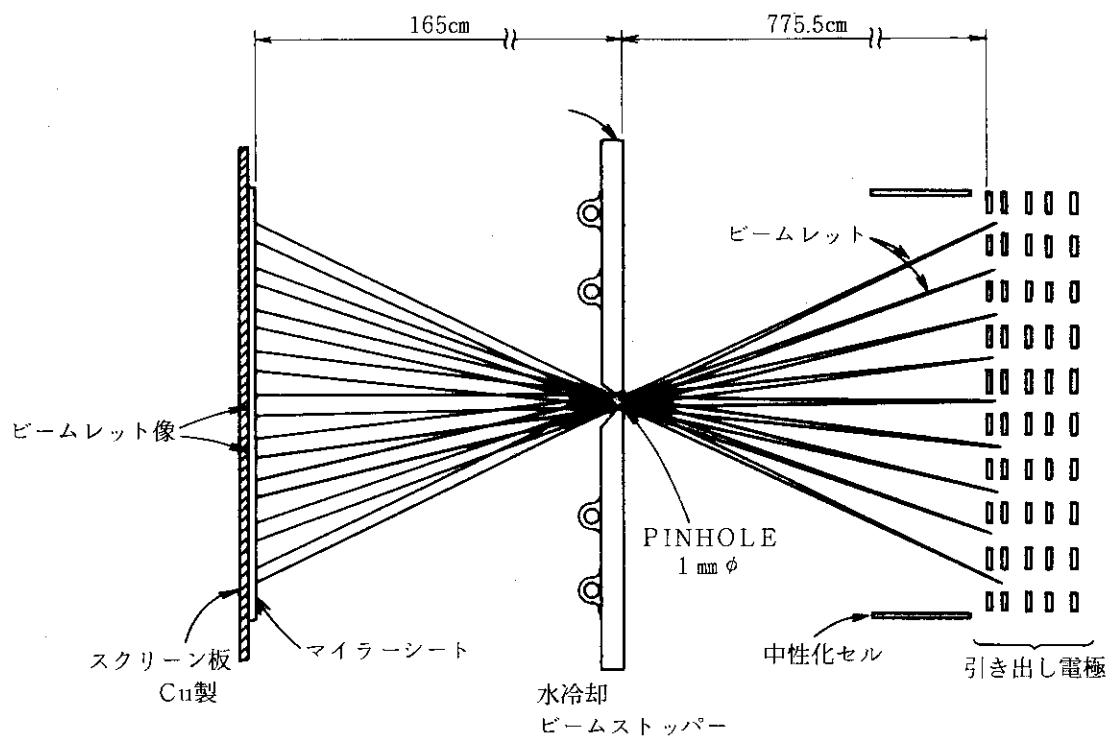
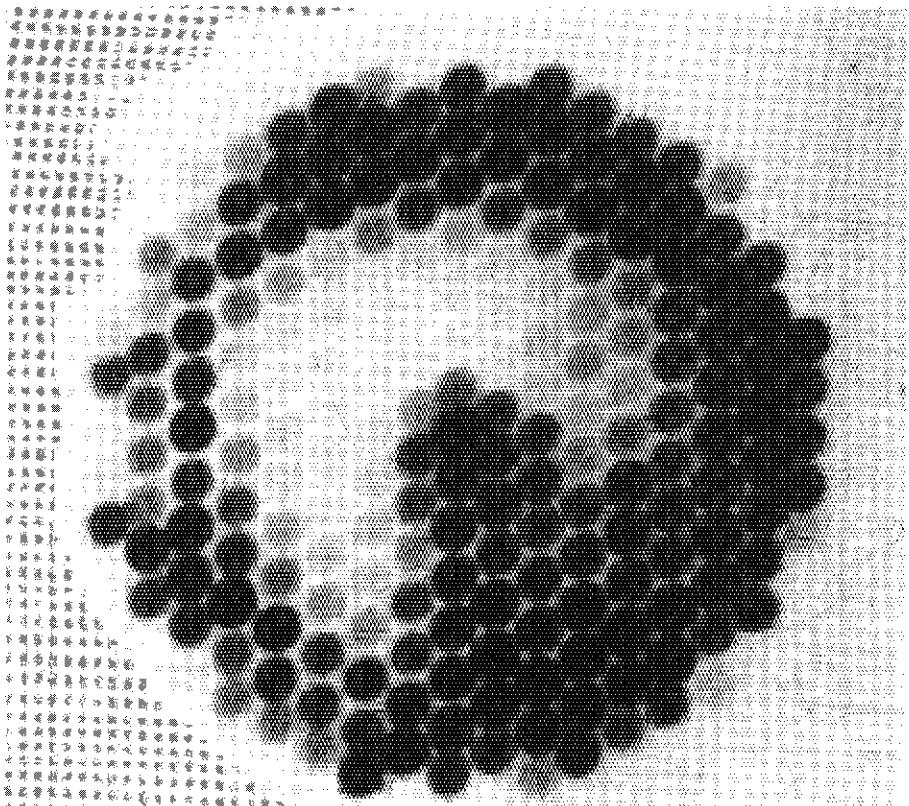
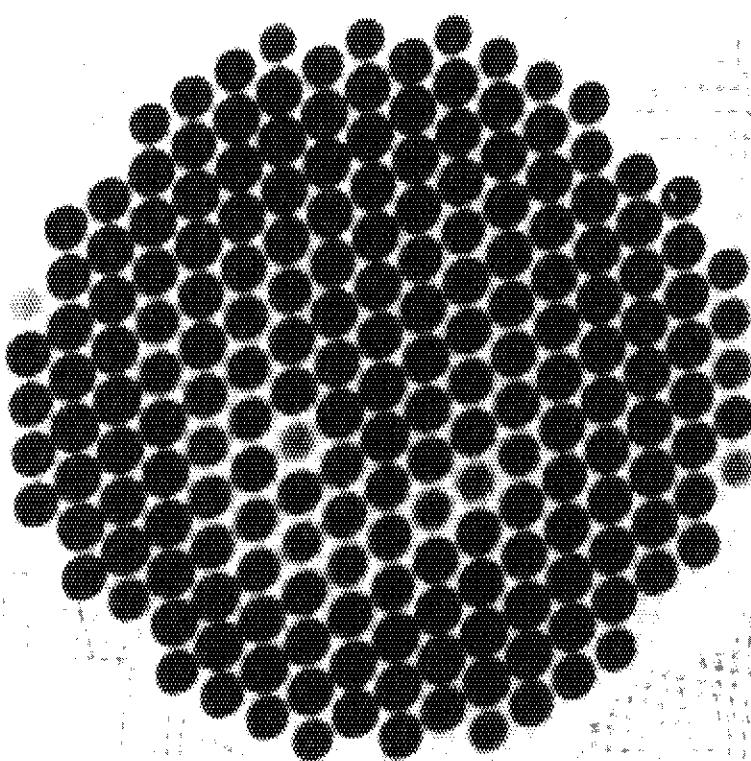


図 2.1.33 ピンホールカメラ配置図



(b)



(a)

図 2.1.34 ピンホールカメラによる 199 個のビームレット像

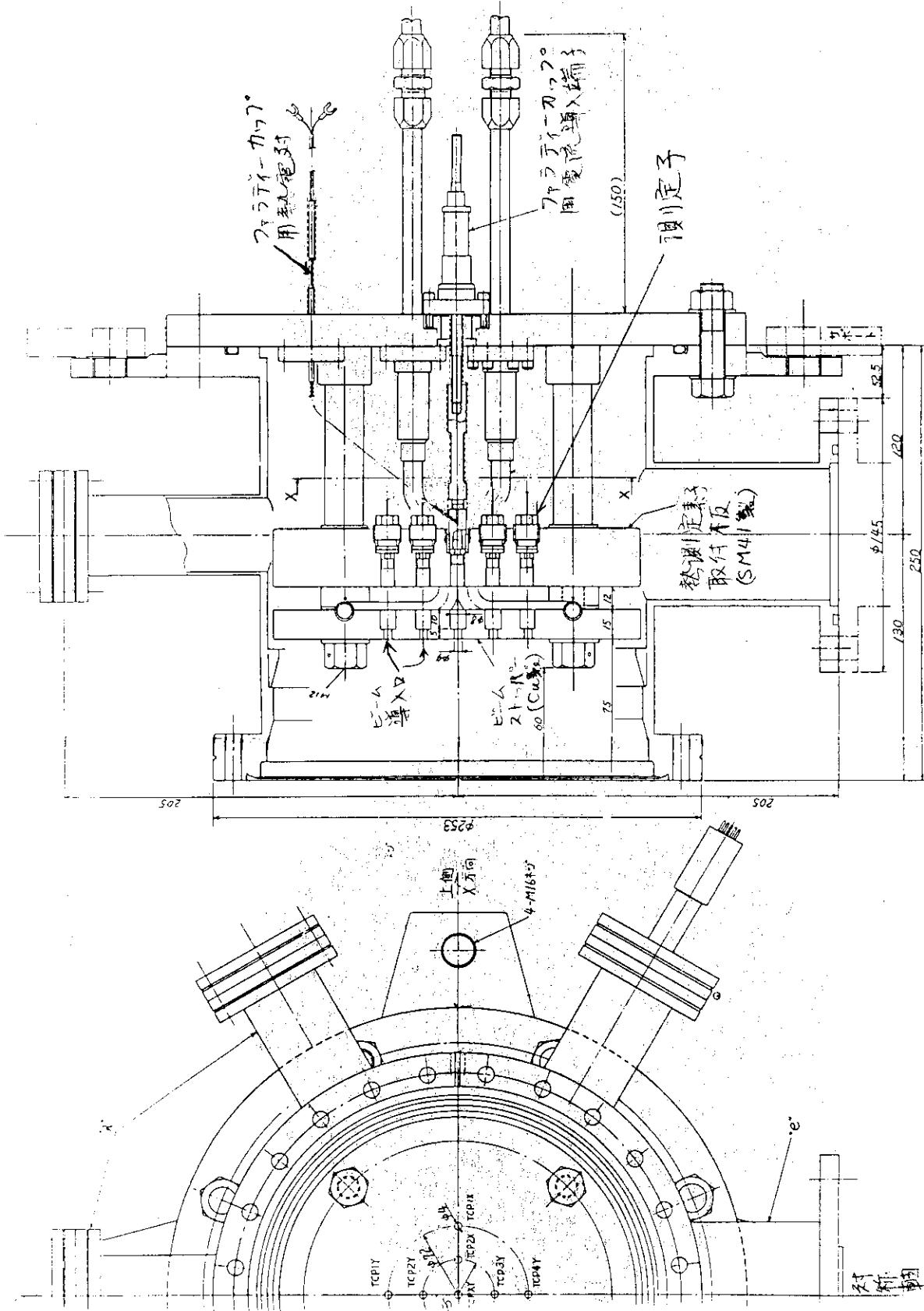


図 2.1.35 突抜きモニター外形図

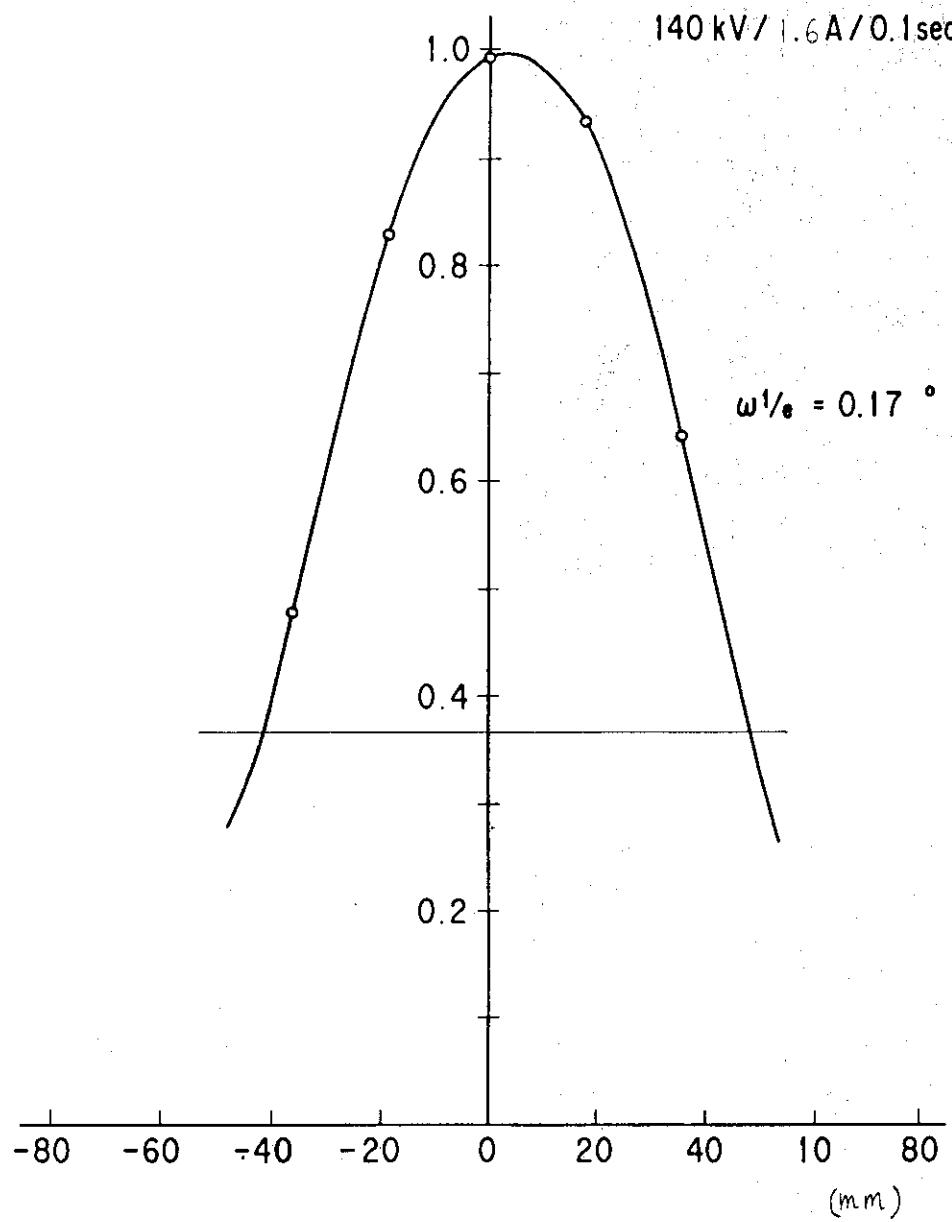


図 2.1.36 突抜けモニターによる発散測定

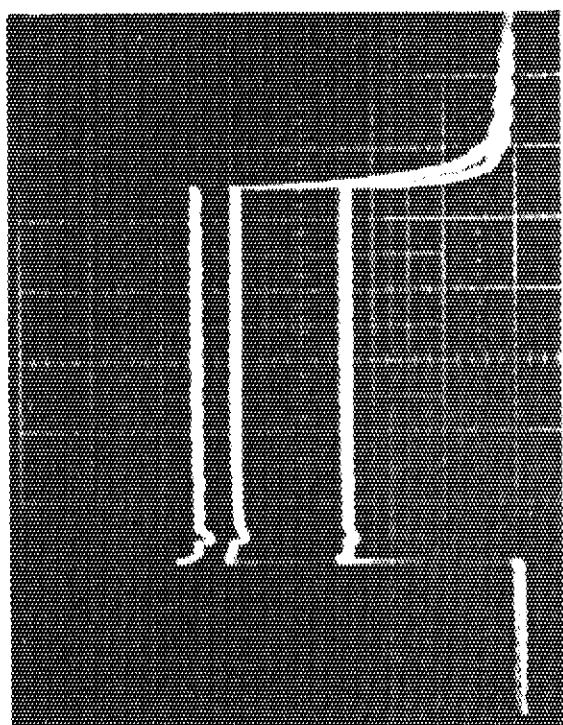
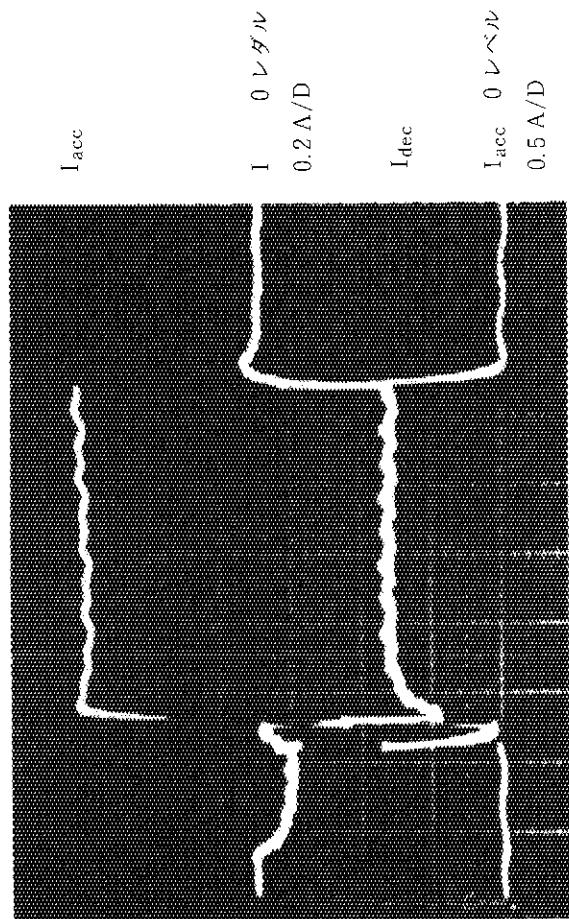
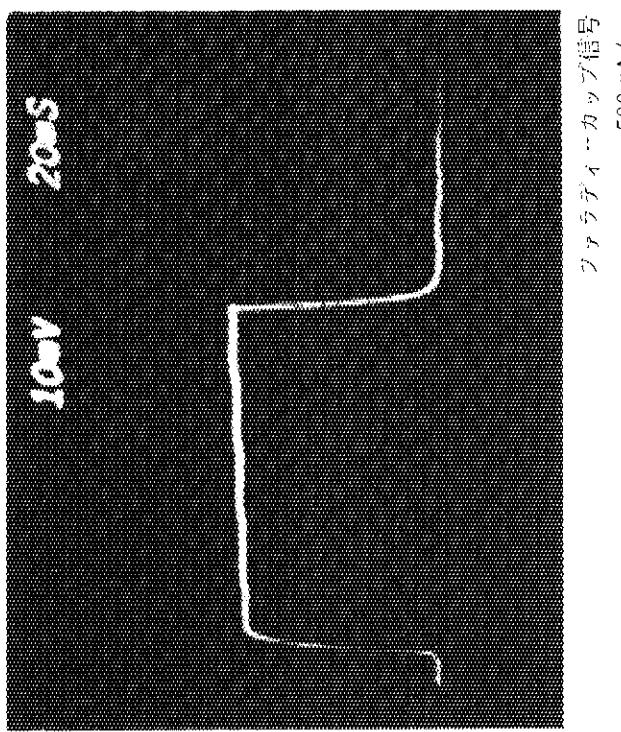


図2.1.37 フラッシュ回路の波形

## 2.2 イオン源用電源

本電源はイオン源に電力を供給し、最高 200 keV, 3.5 A のビームを得るためのものである。第 2.2.1 図に示す回路から解るとおり大別してビームの種となるヘリウムイオンを生成するためのフィラメント及びアーク電源と、生成されたイオンを電界によって加速するための加速電源及び逆流電子抑制のための減速電源とで構成されている。それぞれの電源の定格を第 2.2.1 表に示す。加速電圧 200kV の出力を得るために、それぞれ 100kV 出力の直流電源 2 個をカスケード接続して用いている。能動粒子線装置は計測器として用いられるために、時間変化の少ない一定エネルギーのビームを出力させることが必要である。つまり電源は高速かつ高精度の電圧制御機能を有した定電圧電源でなければならない。このために、100kV のそれぞれの電源には、スイッチング及びレギュレーション用に高出力四極真空管（CQK200-4；BBC 社製）を負荷と直列に接続して使用した。100kV の電源 2 個で 200kV 出力の電源を構成したのは上記のような開発済のレギュレータチューブを使用できるということ、また、第 3 正電極に流入する電流が予想より大きい場合にもカスケード構成の場合には第 3 正電極の電圧制御が可能であるという利点を考慮したからである。イオン源では引出し電極間で放電破壊が生じ易く、その結果、加速電源は負荷短絡が頻繁に起る直流電源であるという特殊性を有している。放電破壊が生じた場合に放電電流が流れ続ければ、イオン源電極が溶損する。これを防ぐために、放電破壊を検出してから  $20 \mu\text{sec}$  以内に二つのレギュレータチューブ RT-1, RT-2 が同時に電流をカットオフし、放電破壊を消散させる。さらに一定時間のカットオフ後再びオンして出力する。万一レギュレータチューブがフラッシュオーバーなどによりカットオフ機能を喪失した場合を考慮して変圧整流器一次側にはサイリスタスイッチ QSWA を設け、これにより出力をオフする。この場合の電流遮断に要する時間は  $20 \text{ m sec}$  であり、この間にレギュレータチューブに入るエネルギーを許容値以下に抑えるために、レギュレータチューブのプレート側に保護抵抗 ( $250 \Omega$ ) を設けている。このサイリスタスイッチは位相角制御によって、整流器出力電圧のフィードバック制御も行っている。このようにイオン源放電破壊時に加速電源からイオン源に流入するエネルギーは充分小さく抑えられるが、レギュレータチューブより負荷側の加速電位に設置したフィラメント電源、アーク電源に電力を供給する 200 kV 絶縁トランスの浮遊静電容量に蓄えられたエネルギーはそのままイオン源に流入し電極に放電痕を生じさせ耐圧を劣化させてしまう。このエネルギーがイオン源に流入するのを防止するとともに、その大部分を吸収してしまうのがサージブロックコアであり、電圧時間積  $0.03 V \cdot sec$  のフェライトコア、 $5 \Omega$  の二次抵抗さらに、コアの  $V \cdot sec$  を有効に動作させるためにビーム電流によるコアの磁化を打消しさらに逆方向に磁化させておくためのバイアス電源回路より構成されている。サージブロックコアは 200kV の放電破壊が生じても、イオン源へ流入するエネルギーを  $8 \text{ joul}$  以下とするように設計した。この設計に際しては「電磁気過渡現象解析プログラム (EMTP)」を使い、放電破壊時の放電電流を計算した。流入エネルギー  $8 \text{ joul}$  は、この計算コードから得られたピーク値  $4 \text{ kA}$  の放電電流波形を時間積分し、放電破壊時のイオン源電極間電圧を  $100 \text{ V}$  と仮定して求めた値である。

ロゴスキーコイルを用いた実測においては、200kV での放電破壊時の電流ピーク値は約  $1.5 \text{ kA}$  であり、放電破壊時の電極間電圧を  $100 \text{ V}$  と仮定して、得られた電流波形を時間積分して計算し

た結果、イオン源流入エネルギーは約 1 joul 以下であり設計値を下まわる値であった。このような違いが生じた原因は、浮遊容量が見積りの80%程度であったこと、見積りでは考慮していなかった直流抵抗分が約 $20\Omega$ と予想外に大きかったことや、等価的な線路のインダクタンスが見積より大きかったためと考えられる。

以下、イオン源用電源について簡単に述べたが、放電破壊時の電流測定等も含めた詳細については別に報告する予定である<sup>10)</sup>

表 2.2.1 イオン源電源定格

ACCEL POWER SUPPLY			
FIRST POSITIVE GRID	DC	40 KV - 200KV	5 A
SECOND POSITIVE GRID	DC	160 KV $\pm$ 10 KV	17.5 mA
THIRD POSITIVE GRID	DC	100 KV $\pm$ 10 KV	35 mA
DECCEL POWER SUPPLY			
	DC	- 3 KV	1 A
ARC POWER SUPPLY			
	DC	160 V	400 A
FILAMENT POWER-SUPPLY			
	DC	15 V	800 A

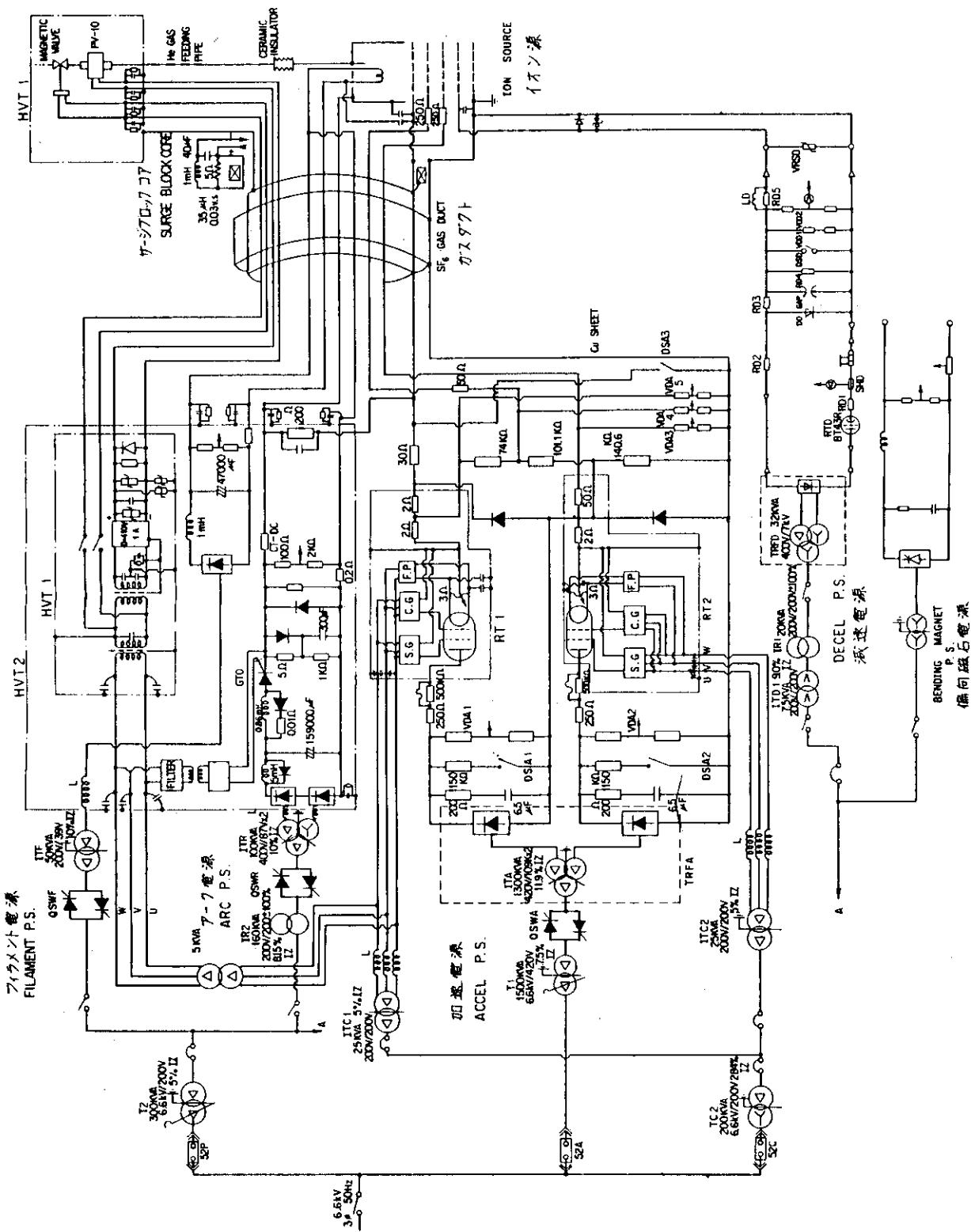


図2.2.1 イオン源用電源系統図

### 2.3 制御系

電源の制御系は、直流高電圧電源を安全かつ安定に動作させるものであり、その頭脳部である。制御室に設けられた制御デスク（CONTROL DESK）、制御盤（CONTROL PANEL）と電源室に設置された現場盤（CP3）より構成される。制御にはプログラマブルシーケンスコントローラが使われており、最低1mVの電圧で制御を行っている。本制御系は電気ノイズに大変敏感なので第2.3.1図に示すような構成とした。高圧部と制御部は光ケーブルによって完全に電気的絶縁が保たれ、導体ケーブルを伝播するサージによる誤動作差を防ぐ構造となっている。光ケーブルによって絶縁された制御室のデスクや盤は誤動作を生じなかつたが、電源室の各機器は、それぞれ制御及び計測ケーブルによって繋がっているために電源の出力上昇試験において、イオン源で放電破壊が発生するとサージの伝播によって誤動作を生じることが多かった。これらの対策として、JFT-2 NBIやNBI原型ユニット等の経験を基に、サージをバイパスさせるCRフィルターや盤内部機器の電位固定の強化を行った。その結果、現在200kV放電破壊時でも、全ての機器において誤動作が全く無く、安定に動作するようになった<sup>11)</sup>。本制御系は約2年間の運転でビームのショット数が15万を越えていることからも健全であると言える。

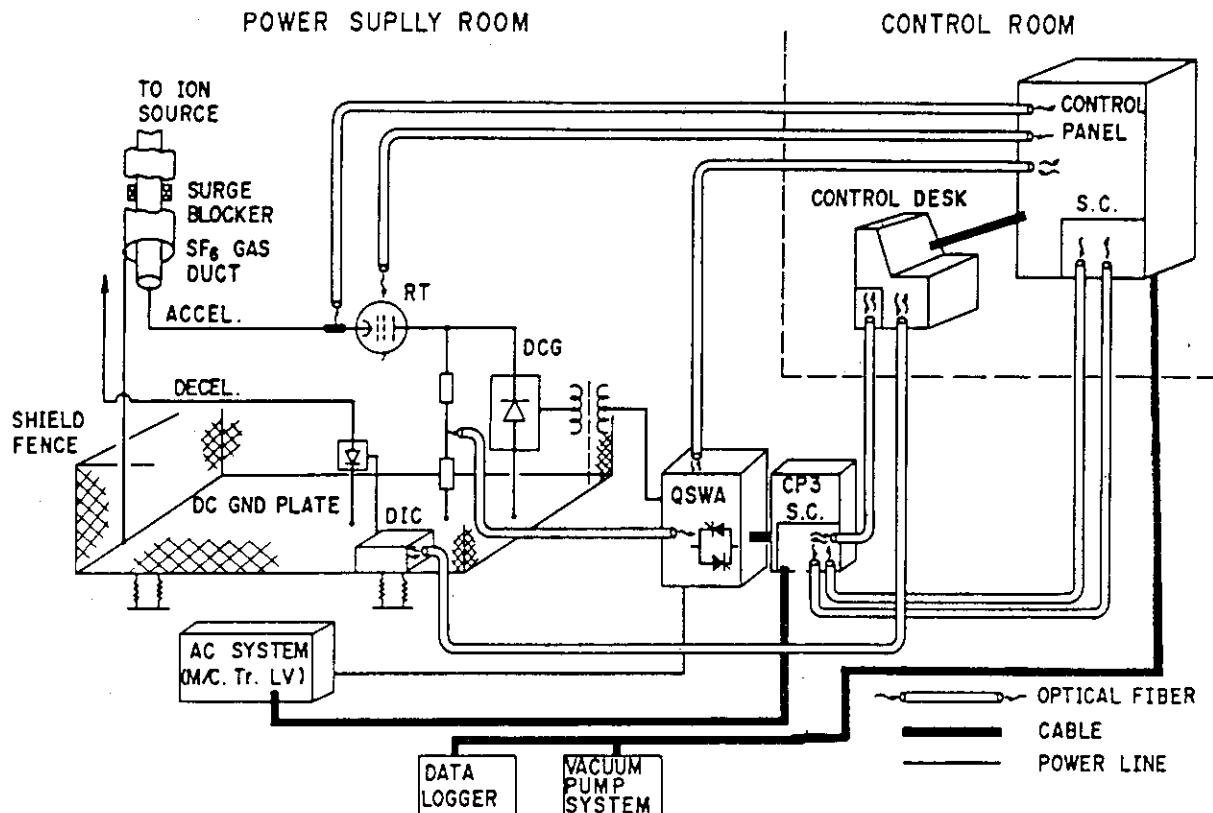


図2.3.1 制御系構成図

## 2.4 真空排気系

能動粒子線装置において、イオン源からのヘリウムガスを真空排気するターボ分子ポンプ（以後 TMPと書く）2台からなるビームライン排気系と JT-60 真空容器を模擬するターゲット容器を真空排気するターボ分子ポンプ1台とからなるターゲット容器排気系とがあり、また、これらのポンプの背圧を真空引きしたり、ビームラインやターゲット容器を粗引きするためのメカニカルブースターポンプ2台とロータリーポンプ4台とからなる補助ポンプ系とがある。そのシステム構成を第 2.4.1 図に示す。

### 2.4.1 ビームライン差動排気系

ビームライン排気系はイオン源からのヘリウムガスを真空排気するとともに、高速中性ヘリウムビームが再電離されることを極力抑えるためその通過空間を高真空中に排気する役割を担っている。真空排気の効率を高くするため差動排気系を採用した。差動排気はイオン源に近い第1排気室と下流の第2排気室とに区切ることによって行う。ビームラインは JT-60 本体に装着時（第Ⅱ期）には垂直方向に設置するが、第Ⅰ期試験期間中には能動粒子線電源室に水平方向に設置した。本排気系の設計においては、第Ⅰ期、第Ⅱ期どちらの場合でも排気性能に差違がないこと、第Ⅱ期には計測架台と本体上架台との限られた極めて狭い空間に機器を設置しなければならないことなどを特に注意した。差動排気系は第 2.4.2 図の通りで、TMP とビームの間の真空配管はコンダクタンスが大きくなるように可能な限り太くかつ短く設計した。垂直と水平のビームラインで排気系の機器配置の違いは第 2.4.2 図に示した通りである。第Ⅰ期（水平ビームライン）の差動排気系（(a)図参照）において、AA' 矢視の第1排気室を上段に BB' 矢視の第2排気室を下段に繋いで（(b)図参照）第Ⅱ期（垂直ビームライン）の差動排気系を作れるように設計製作した。第1排気室にはカロリーメータ、ビームダンプ等が内部に設置されるが、水平から垂直へのビームラインの変更に際しては、これら機器の取付けフランジを90度回転することで対処できるよう設計製作した。

この差動排気系において、ビームライン軸と第1排気室の TMP1 及び第2排気室の TMP2 との間の真空配管のコンダクタンスは、 TMP1 側が  $2.13 \times 10^4 \text{ l/sec}$ 、 TMP2 側が  $1.37 \times 10^4 \text{ l/sec}$  である。O<sub>1</sub>点、O<sub>2</sub>点での排気速度がそれぞれ 4400 l/sec、2700 l/sec 以上となるように TMP1 と TMP2 は第 2.4.1 表に示す性能のものを使用した。

これらの値は 3.5 A のイオンビームを引出し、完全平衡値（200 keV の場合、中性化効率 45%）の 90% 以上の変換値が得られるように 1.8 Torr · l / sec のヘリウムガスを中性化セルに流した時、第1排気室から JT-60 プラズマまでのビーム通過空間における再電離損失が 14% 以下となるよう決めたものである。なお、第 2.4.1 表の TMP1 と TMP2 の吸入口での排気速度はビュレット法で測定したものである。

実際に一定流量 Q のヘリウムガスを流して定常状態での各室のガス圧から O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub> 点で排気速度を算定したところ O<sub>1</sub> 点で 5130 l/sec、O<sub>2</sub> 点で 2820 l/sec であり、前述の要求を満すことを確認した。

次に再電離損失について述べる。まず、ビーム引出しに必要なガス流量を見積っておく。3.5

Aのヘリウムビームを実際に引出す場合、安定なアーク放電を得るために1.22 Torr·l/sec以上のガス流量を確保する必要があった。一方、後に述べる電極への入熱量を抑えるという点から、ガス流量はできるだけ低く抑える必要があり、1.22 Torr·l/secは上限に近かかったのでこの値で運転した。

第2.4.3図に使用ガス流量と再電離損失の関係を示す。これは、一定ガス流量を流し、TMP1, TMP2及び後で述べるターゲット容器のTMP3も動作させ、各室で定常状態となった真空度を測定して、その値から計算で求めたものである。この測定はビームの引出しを停止して行った。使用した電離真空計はバラトロンで全て較正した。この結果、再電離損失は1.22 Torr·l/secのガス流量の場合11%と見積られ設計値以内となると予想できた。なお、ビームライン排気系におけるヘリウムガスの流れの実測値を第2.4.2表に示す、JT-60真空容器に流入する室温ガス流量は全体の2%以下と予想された。

#### 2.4.2 ターゲット容器排気系

ターゲット容器は長手方向の長さ2400 mmがJT-60真空容器中のビーム軸方向の長さを模擬している。JT-60真空容器内の真空度はプラズマ放電時 $3 \times 10^{-3}$  Torrとなる。小角散乱装置の試験は、ターゲット容器でこれと同じ水素ガス圧にして行われる。この試験に室温ヘリウムガスの影響が生じないようにするために、ヘリウムガス分圧を水素ガス分圧のほぼ50分の1以下にすることが要求された。ターゲット容器に流入するヘリウムガス流量 $Q_T$ はビームも含めて全流量が

$$Q_T = \frac{0.6}{\text{ビーム}} + \frac{0.45}{\text{室温ガス}} + 1.8 \times 0.02$$

$$\approx 0.31 \text{ (Torr} \cdot \text{l/sec)}$$

となる。ターゲット容器の排気速度 $S_T$ は

$$S_T = \frac{0.31}{6 \times 10^{-5}}$$

$$\approx 5200 \text{ l/sec}$$

となり、2.4.1表のTMP3を使用することとした。

表2.4.1 ターボ分子ポンプ吸入口における  
排気速度(ヘリウムガス)

定格 / 実測値		
TMP 1	5600 l/sec	6100 l/sec
TMP 2	3300 l/sec	4000 l/sec
TMP 3	5600 l/sec	6100 l/sec

表2.4.2 ビームライン系における  
ヘリウムガスバランス  
(実測値)

第1排気室 TMP1	87	%
第2排気室 TMP2	11	%
ターゲット容室 TMP3	2	%

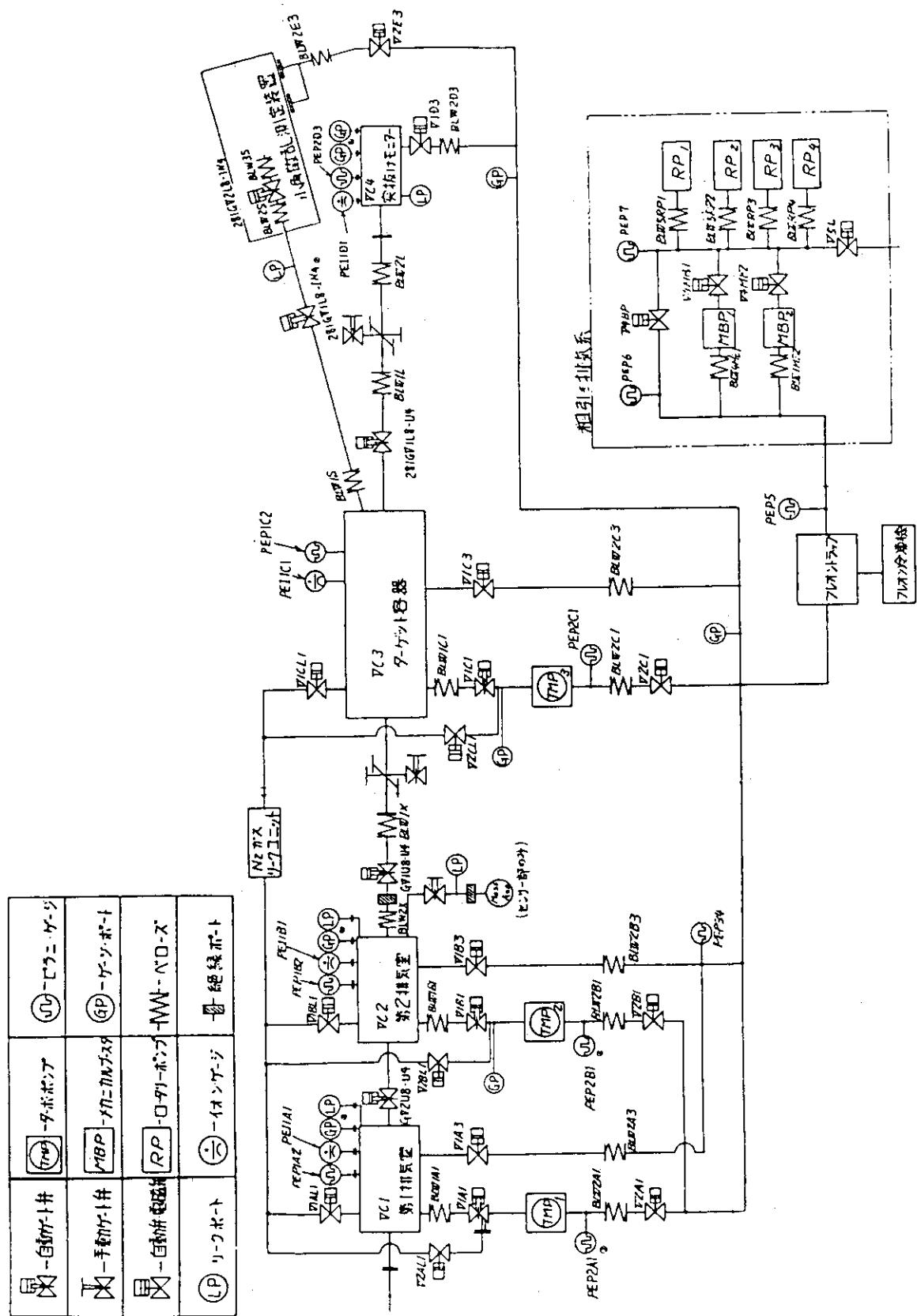


図 2.4.1 JT-60 能動粒子線真空排気系系統図

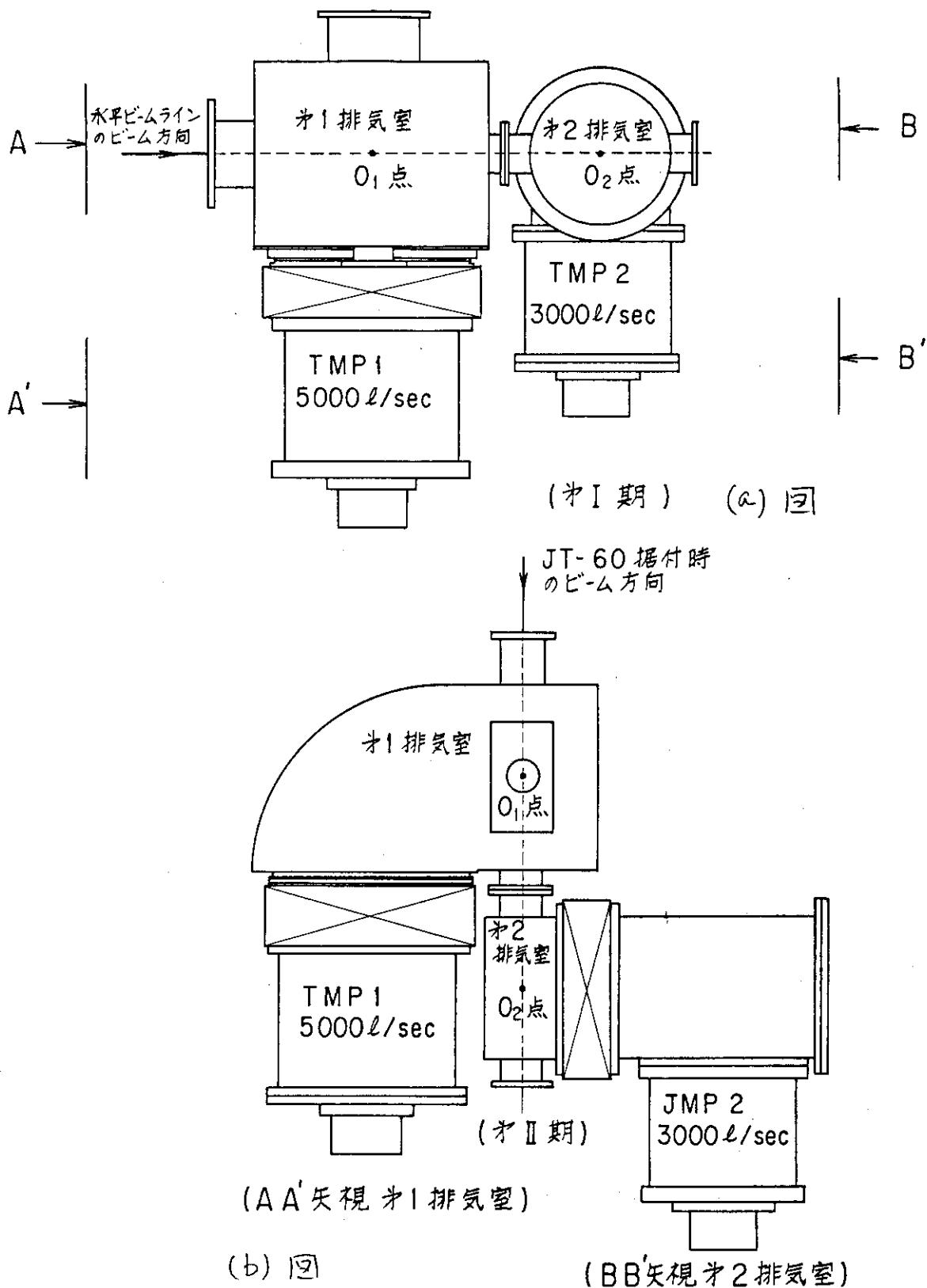


図 2.4.2 差動排気系

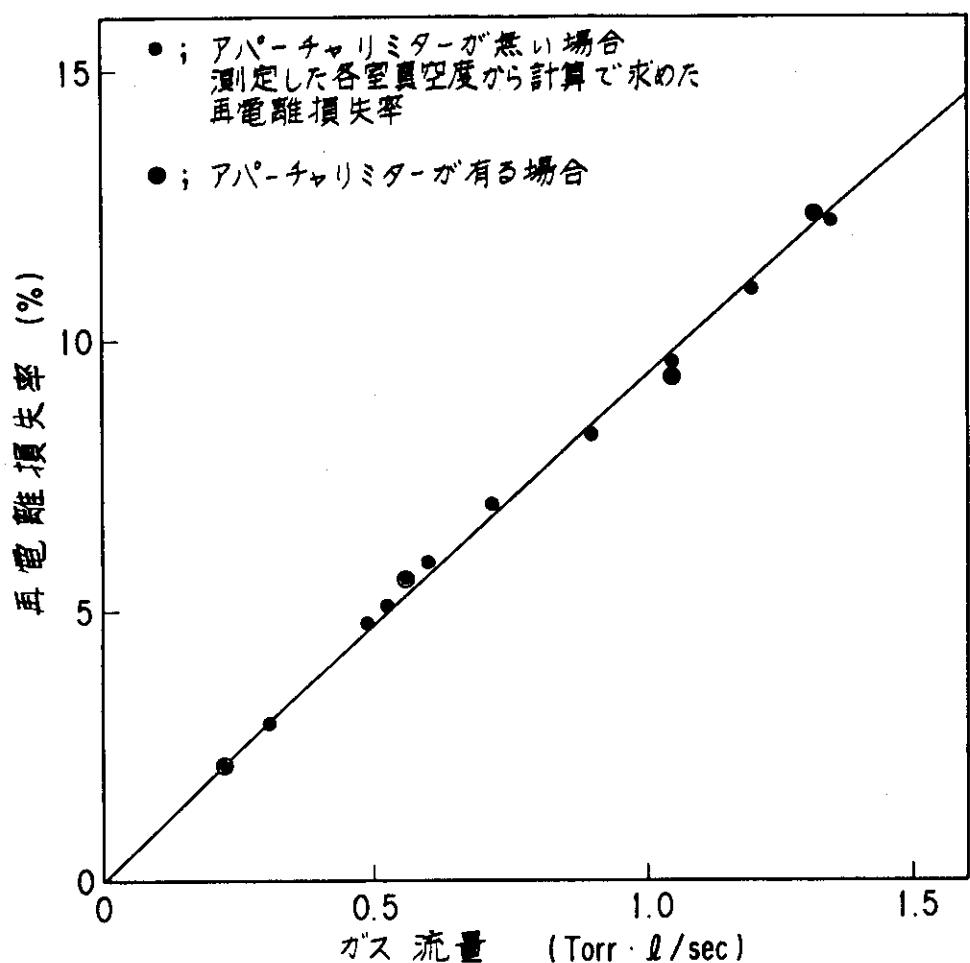


図 2.4.3 再電離損失率

## 2.5 補機設備

能動粒子線の補機設備としてはイオン源、ビームライン及び電源系のレギュレータチューブを直接冷却する一次冷却系（純水）、熱交換器を介して大気に放熱する二次冷却系、イオン源容器及びイオン源までの高電圧パワーケーブルを導く管路に SF<sub>6</sub> ガスを充填回収する SF<sub>6</sub> ガス回収装置、真空バルブ類の開閉に必要な圧縮空気を供給する圧空系などがある。

第 2.5.1 図に一次及び二次冷却系の系統図を示す。一次冷却系の冷却熱量は 43.8 kw となり各機器の出口温度は第 2.5.1 表の通りとなるよう設計製作されており、フルパワー運転に際しても十分な冷却能力を発揮した。

第 2.5.2 図に SF<sub>6</sub> ガス回収装置の系統図を示す。本装置の設計に当っては使用圧力を 10kg / cm<sup>2</sup> 以下となり、また、充填回収に要する時間を作業能率を上げる上で一晩以内とするように注意した。充填回収の時間は実際 6 時間となった。

第 2.5.3 図に圧空系の系統を示す。

表 2.5.1 各機器の出口温度一覧表  
各々の機器の温度上昇

番号	機器名称	流量 l/min	熱量 kw	温度上昇 °C	機器出口温度 °C
1	レギュレータチューブ	250	19.7	1.2	37.4
2	ビームライン	73.4	9.08	1.8	38.0
3	突抜モニター 小 角 散 亂	46.1	2.26	0.7	36.9
4	イオノン源	25	4.18	2.4	38.6
5	純水ポンプ		8.6	0.3	36.2
	計		43.82		

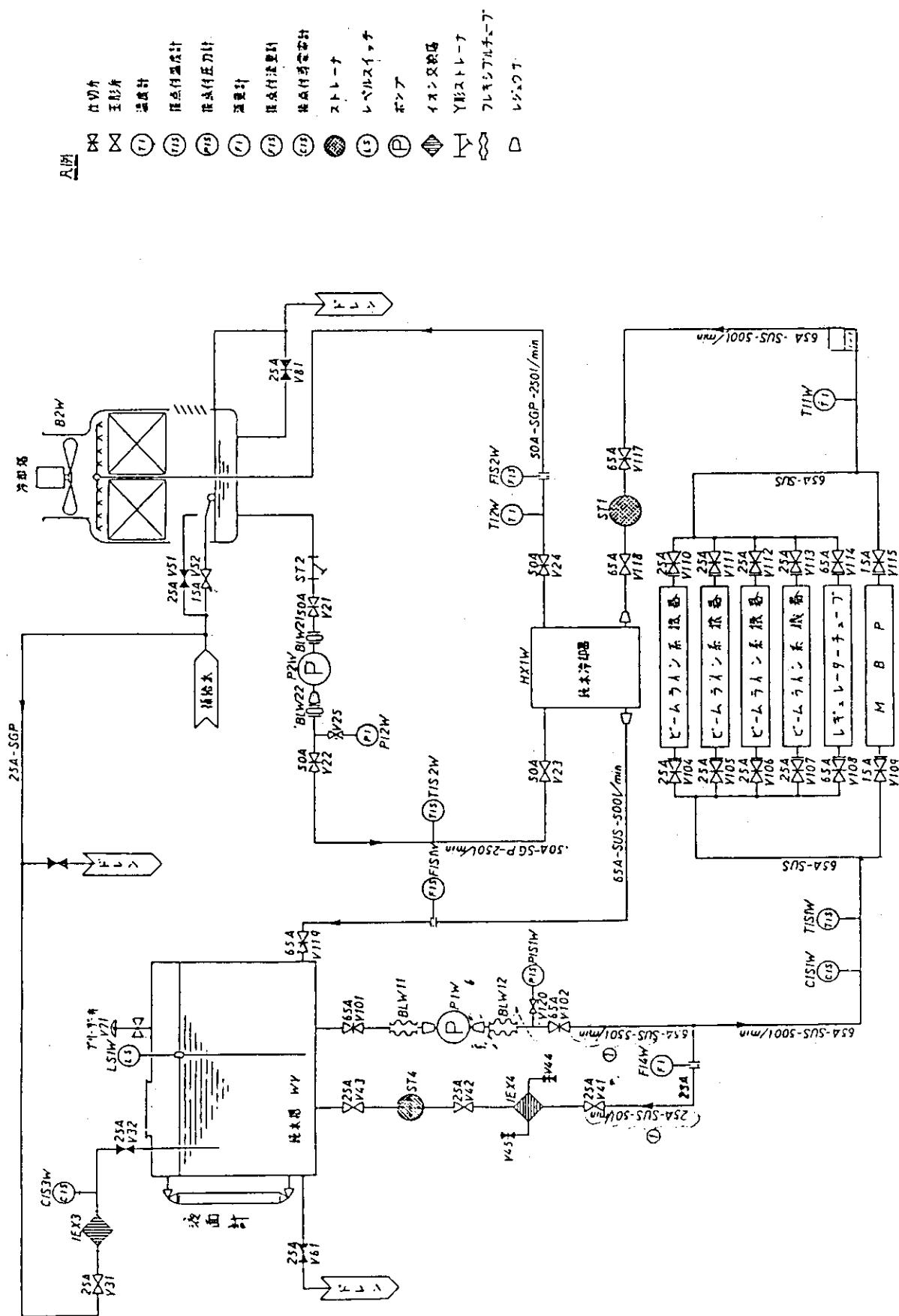
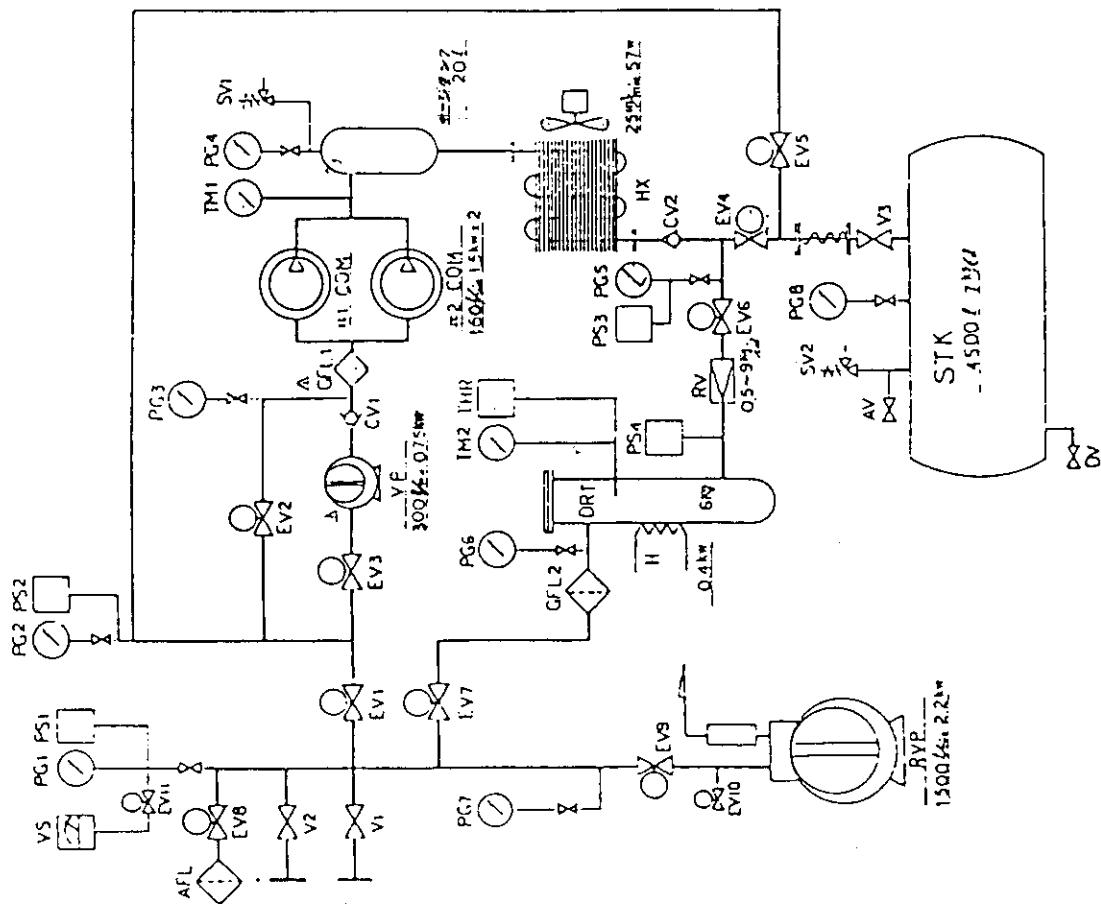


図2.5.1 冷却水系統図

AFL	エアーフィルター
PG9	連成計
PG8	"
PG7	"
PG6	"
PG5	"
PC4	"
PC3	"
PC2	運転成計
VS	電空計
PS1.2	圧力スイッチ
PS3.4	圧力スイッチ
EV11	電磁弁
EV10	"
EV9	"
EV8	"
EV7	"
EV6	"
EV5	"
EV3.4	電空ボンブ
EV1.2	電空ボンブ
VP	バルブリーコンプレッサー
COM	バルブリーコンプレッサー
HX	アーティーラー
CV1.2	遮止弁
SV2	安全弁
SV1	安全弁
RV	レギュレーター
GFL	ガスフィルター
RVP	バルブリーコンボンブ
DV	ドレンボンブ
AV	エアーバルブ
H	パンダヒーター
THR	サーモスタット
TM2	温度計
TM1	温度計
DRT	ドライバー
STK	ストレージタンク
SYM	NAME

図 2.5.2 SF<sub>6</sub> ガス回収装置系統図

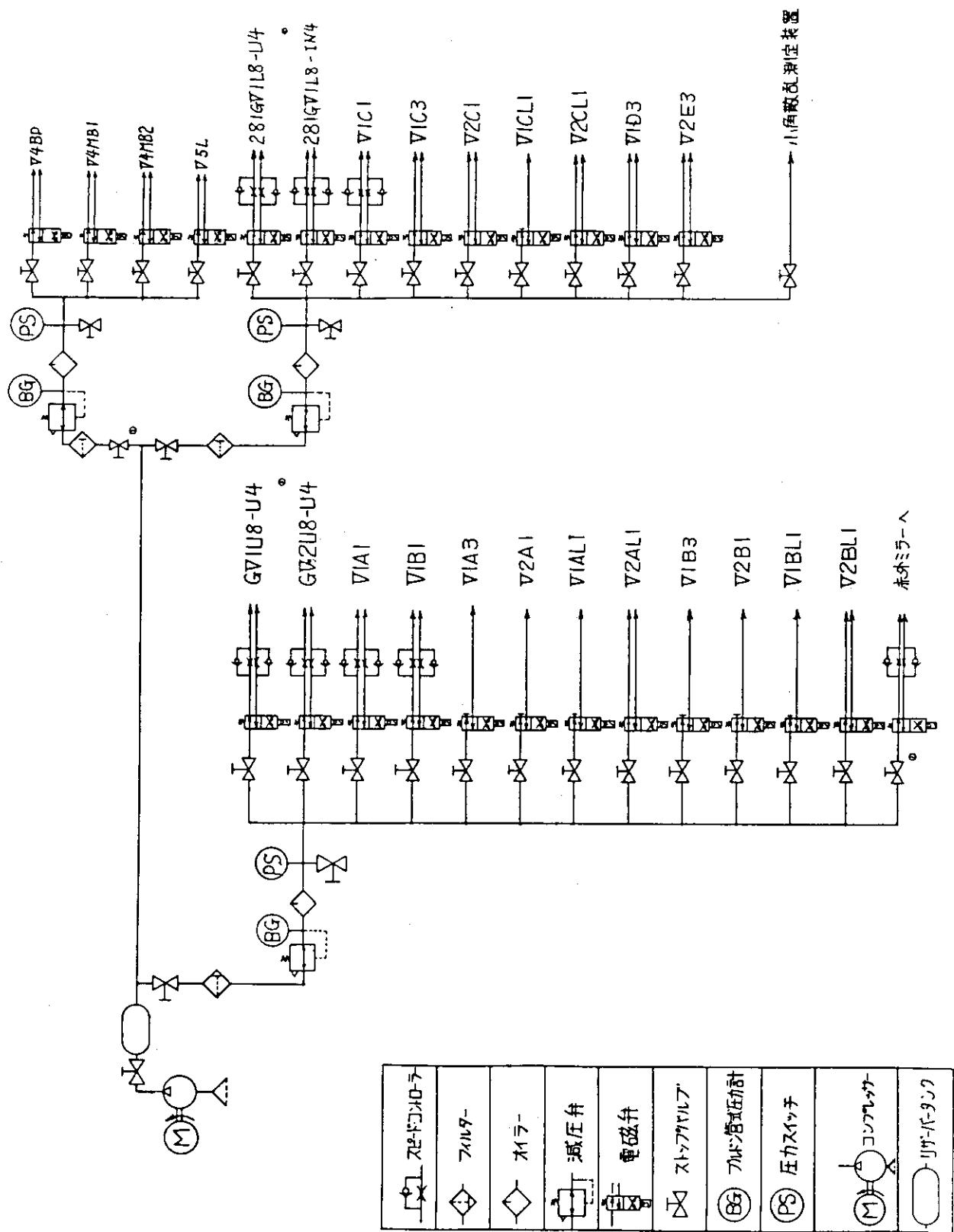


図 2.5.3 圧空系系統図

### 3. 能動粒子線装置の開発試験

能動粒子線装置の試験として、1項で述べたように、イオン源の開発試験、電源系の調整及び改良試験、ビームラインの性能試験とがあった。これらの試験を昨年9月までに完了し、目標性能を上わまわる装置の開発に成功した。開発試験の経過は第3.1図に示す通りであった。

約2年間の試験期間中、ほぼ6ヶ月を費して電源系の調整試験を行った。これは、電源系をイオン源及び制御系を含めた全体と整合性のとれたものとするために行うものであった。即ち、2.2項で述べたように、イオン源では電極間放電破壊が頻発するが、このような場合にも、電源はこの放電破壊を検出して、電流を遮断し、放電破壊が消滅すると再び電圧を印加するという一連の動作を正常に行なうことが望まれる。また、このような放電破壊の頻発する悪い環境下においても、加速電流、電圧及びビームライン各機器の水温等に到るまで全てのデータ収集を正常に行なうことが計測器の一部としての能動粒子線装置に要求される。調整試験の詳細については、別にまとめるものとするが<sup>8)</sup>集中的に電源系の調整試験をした結果、電源系は勿論、制御系も安定に動作するようになり、以後のビームライン性能試験及びイオン源の開発試験を順調に行なうことができた。このように電源系の調整試験を集中的に行なった背景には、本装置で使用している制御機器やデータ収集機器をこのころ設計が始まったJT-60 NBI実機でも使用することが予想されたため、調整試験で得た知見をその設計に反映させるためでもあった。

ビームラインの性能試験は、イオン源の最高出力において、受熱機器が十分使用に耐えるか否かを判断するために行われる。よって、その最終試験は、イオン源が200 keV / 3.5 A / 発散角  $\omega_{1/e} = 0.18$  度のビームを出した時行われた。結果は2項で述べた通りでまとめると第3.2図に示すように受熱機器の熱負荷が設計値以内であることが解る。また、JT-60 プラズマに入射できる高速中性ヘリウムビームは当初目標0.2 Aに対し0.6 Aであった。よって、計測器として、充分使用に耐えるものであると確信できた。

イオン源の開発試験は、予想通り試験期の3/3を占め、困難な局面が何度もあった。この試験においては、200 keV / 3.5 A / 発散角  $\omega_{1/e} = 0.25 \sim 0.4$  度のビームを引き出せるイオン源が具体的な目標であった。ビームの特性について調べ始め、最初に発散角を測定したところ、140 keV / 2.0 A / 発散角  $\omega_{1/e} = 0.4$  度と目標限界であった(第3.1図 '84 6月)。

ところで、ビーム全体の発散は次の二つの要素によって決定される。それは、電極に設けた199ヶの孔から引き出される各ビームレット自体の発散と一つ一つのビームレットの中心軸を1点に集める収束とである。2.1.7項で述べたピンホールカメラはこのビームレットの発散とビームレットの収束を同時に調べることを目的として製作したもので、これを用いて大きい発散角の原因を調べたところ、ビームレット自体の発散は0.23度程度と良好で、ビームレットの収束が悪いことが解った。

即ち、各ビームレットの中心軸は設計通りの焦点に向っておらず、ばらばらの方向を向いていることが判った。そこでイオン源を分解して調べた所、第一正電極と第三正電極とに各々0.2 mm, 0.5 mm程度の変形があることが判明した。これは電極への入熱量が予想より多いため電極が座屈

して生じたものである。変形のない電極による後の実験で、第3.3図に示すような 140 keV / 2.1 A /  $\omega_{1/e} = 0.25$  度のビームを得ることができた。この電極も、この後行った 200 keV を目指す出力上昇試験で変形してしまい（第3.1図 '84 9月），目標のような発散の良いビームを得ることができなかった。しかし、これは入熱量を抑えて電極の座屈を無くすることができれば、目標のイオン源が開発できるとの確信を得る実験となつた。電極への入熱を減らすことが開発のテーマとなつた。

第3.3図は加速電流に対するビームの発散角の関係について、第一正電極と第三正電極との電圧を一定として第2正電極電圧を変化させた時の測定結果を示したものである。この図から明らかなように、3段加速システムで構成した能動粒子線用イオン源では第2正電極の電圧を、加速電圧のわずか 2 %相当分だけ変化させただけでビームの発散は劇的に変化することが判つた。これは3段加速システム特有の新しい発見である。2.1.1項で述べた設計における計算機シミュレーションのような粗いパラメータサーバーではこれを発見できなかつたが、実験後に行った詳細なパラメータサーバーを目的とした計算機シミュレーションでは第3.3図の点線で示す結果を得ており、定性的によく一致した。

この結果は以後の発散に関する実験の大きな道標となつた。発散角の小さいビームを得る目的でパラメータサーバーを行おうとすると、今回の場合電極数が5枚と多いため大変長い時間を費やすと予想された。確かに第3.3図の結果を得るのには丁寧なパラメータサーバーを必要とし労力を要した。しかし、この結果が得られてからは、発散角の小さいビームを求めるには第2正電極電圧のみをパラメータとして搜せばよく、実験が非常に容易となり開発期間を短縮できた。

電極への入熱量を抑えるため以下の改良を行つた。第1正電極へソースプラズマからの入熱があり、これを抑えるため、それまで6本使用していたフィラメントカソードを3本とし、また、それまで30秒に1回であったアーケ放電の周期を50秒に1回にし、ソースプラズマで発生する熱を減らした。次に、実験結果から電極への入熱量がイオン源に導入するヘリウムガス流量に比例することが判つたので、ヘリウムガス流量を中性化に必要な線密度を確保しつつ、安定なアーケ放電に必要な最小限に制限した。即ち  $Q \leq 1.22 \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$  とした。また、電極に直接当るイオンビームの一部も入熱となるためこれを減らす目的で、電極の引出し孔の径を第1正電極は4 mm ø 不変とし、他の4枚の電極は4 mm ø から5 mm ø に広げた（第3.4図参照）。さらに、電極への入熱による座屈を防ぐため、各電極を平均1.5倍に厚くし熱伝導度と機械的強度を増す改良も行つた。

実験の詳細については別の機会に報告するが、これらの改良の結果、第3.5図で示すような 200 keV, 3.5 A のビームを得ることができた。また、ビームの発散角は  $\omega_{1/e} = 0.18$  度に達した。5枚の電極で最も熱負荷が多い第3正電極の熱負荷と引出し電流  $I_{\text{acc}}$  との関係についての実験結果を第3.6図に示す。この図にはビームの発散についても引出し電流との関係を示してある。我々は、電極に座屈が生じない電極の許容熱負荷が最大24kwであることを計算機シミュレーションによって得ており<sup>12)</sup> この図から第3正電極の熱負荷が17kwであり 3.5 A のビームを引出しても電極の変形は生じないと確信した。事実、100ショットほど 200 keV, 3.5 A のビームを引出した後、ビームの発散角を測定したところ、発散角は 0.18 度のままであり、電極自体の調査でも変形が見られなかつた。

今回、開発したイオン源のアーク効率は第3.7図に示す通りで、黒マル印が実験値で、0.26A / kwとなっており、アーク電源には十分余裕があることが解った。また、ガス効率は2.4.1項で述べたように安定なアーク放電に必要なガス流量が1.22 Torr · l / secであり、3.5 A のヘリウムビームは0.58Torr · l / secであるので0.58 / 1.22から0.47となる。JT-60真空容器内に入る室温ヘリウムガス流量と高速ヘリウムビームとの比は

$$\frac{1.22 \times 0.02}{0.6 \times 0.16}$$

$$\approx 0.25$$

となる。

以上、200 keV, 3.5 A, 発散角0.18度の運転パラメータは第3.1表の通りである。このように、仕様を上わまわる性能のイオン源を開発でき、計測器として充分使用に耐える能動粒子線装置を得ることができた。

表3.1 200 KV運転主要パラメータ

第1正電極電圧 / 電流	200 KV / 3.5
第2正電極電圧 / 電流	174.3 KV / 0.25
第3正電極電圧 / 電流	105.7 KV / 0.1
減速電圧 / 電流	-2.8 KV / -0.4 A
アーク電圧 / 電流	110 V / 130 A
フィラメント電圧 / 電流	13.6 V / 390 A
偏向磁石電流	250 A
ヘリウムガス流量	1.22 Torr · l / sec
パルス幅	0.1 sec
Duty	1 / 500

試験項目	年	'83												'84												'85											
		8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12							
○ 電源系																																					
○ 調整試験																																					
○ 改良試験																																					
○ 制御系調整試験																																					
○ ピームライン性能試験																																					
○ イオン源																																					
○ ピームの発散試験 (三段加速度特性試験)																																					
○ 電極变形原因調査 (電極入熱量測定)																																					
○ 電極入熱量抑制試験																																					
○ 電極C Type試験																																					
○ ラズマ改良試験																																					

(A type)  $\omega_{pe} = 0.3^\circ$   
 $200 \text{ keV}$   
3.0 A

(B type)  $\omega_{pe} = 0.18^\circ$   
 $200 \text{ keV}$   
3.5 A

\* ; 電極の変形が発生

図 3.1 能動粒子線装置開発の工程

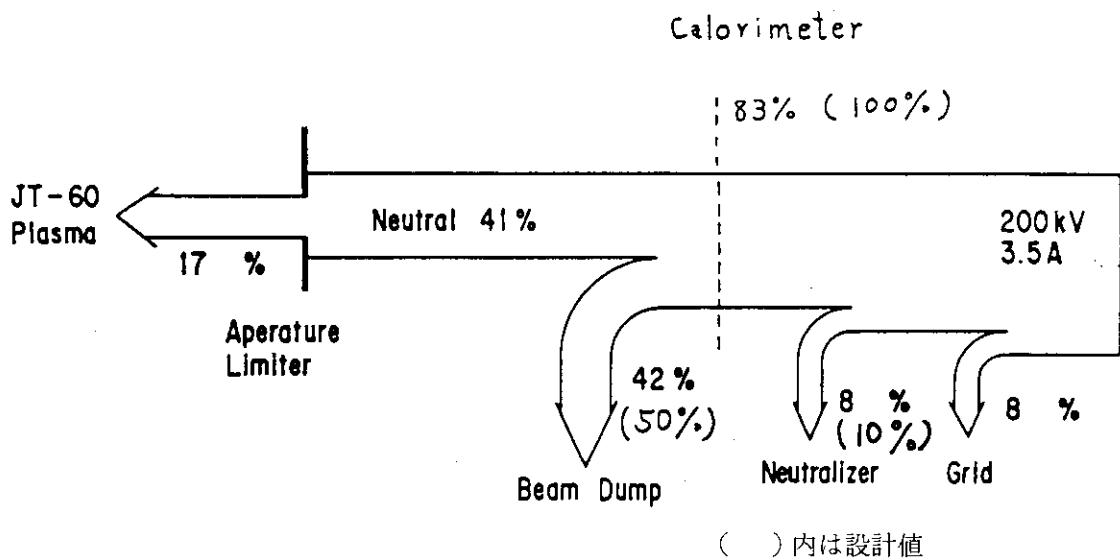


図3.2 ビームライン機器の入熱量 200KeV/3.5A/0.18°

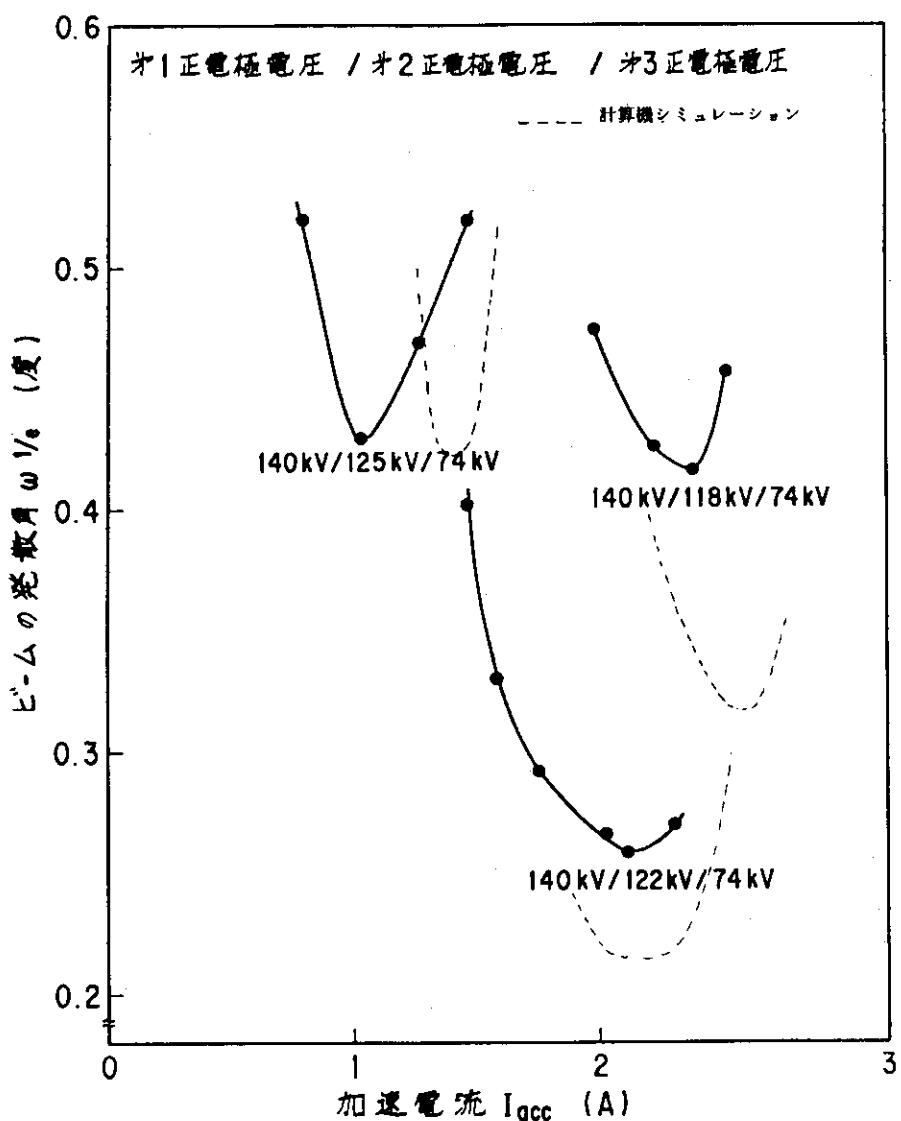


図3.3 ビームの発散角と加速電流

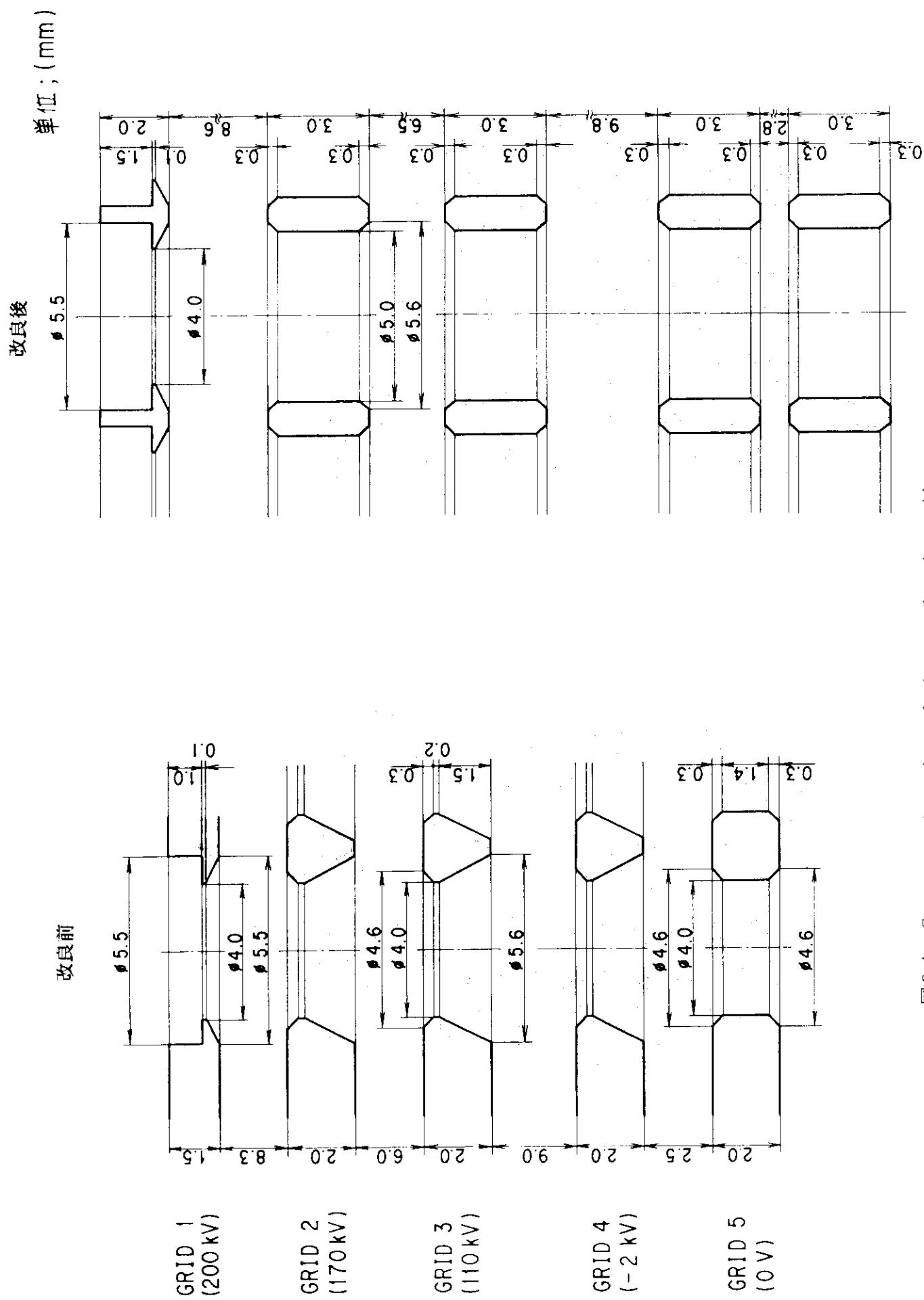


図 3.4 Cross-section view of the acceleration grid

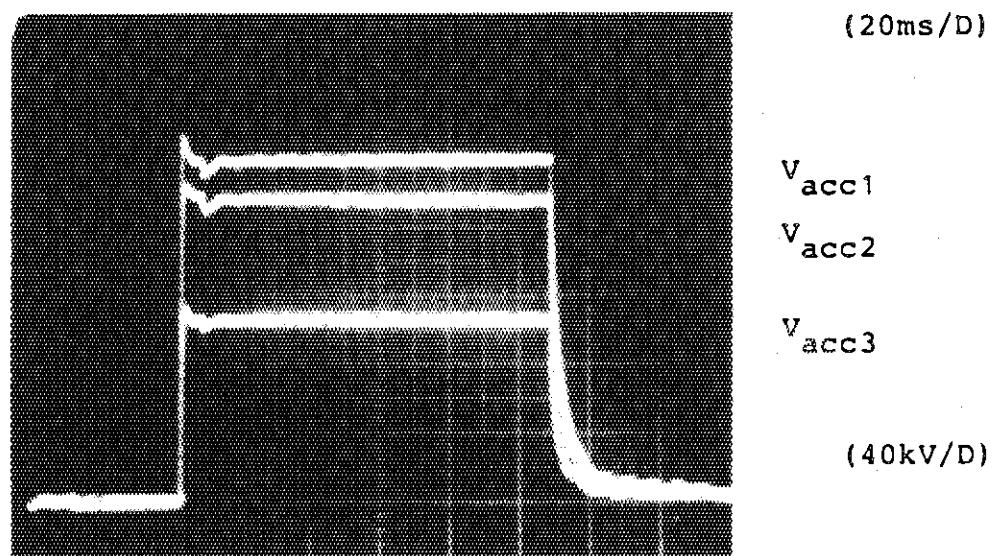
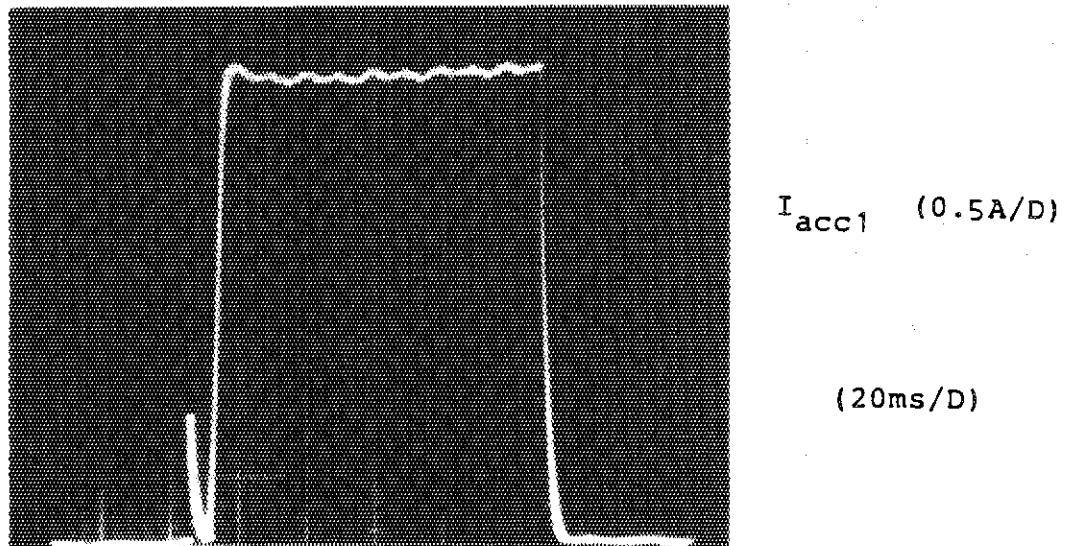


図 3.5 200 KeV/3.5 A のビーム出力波形

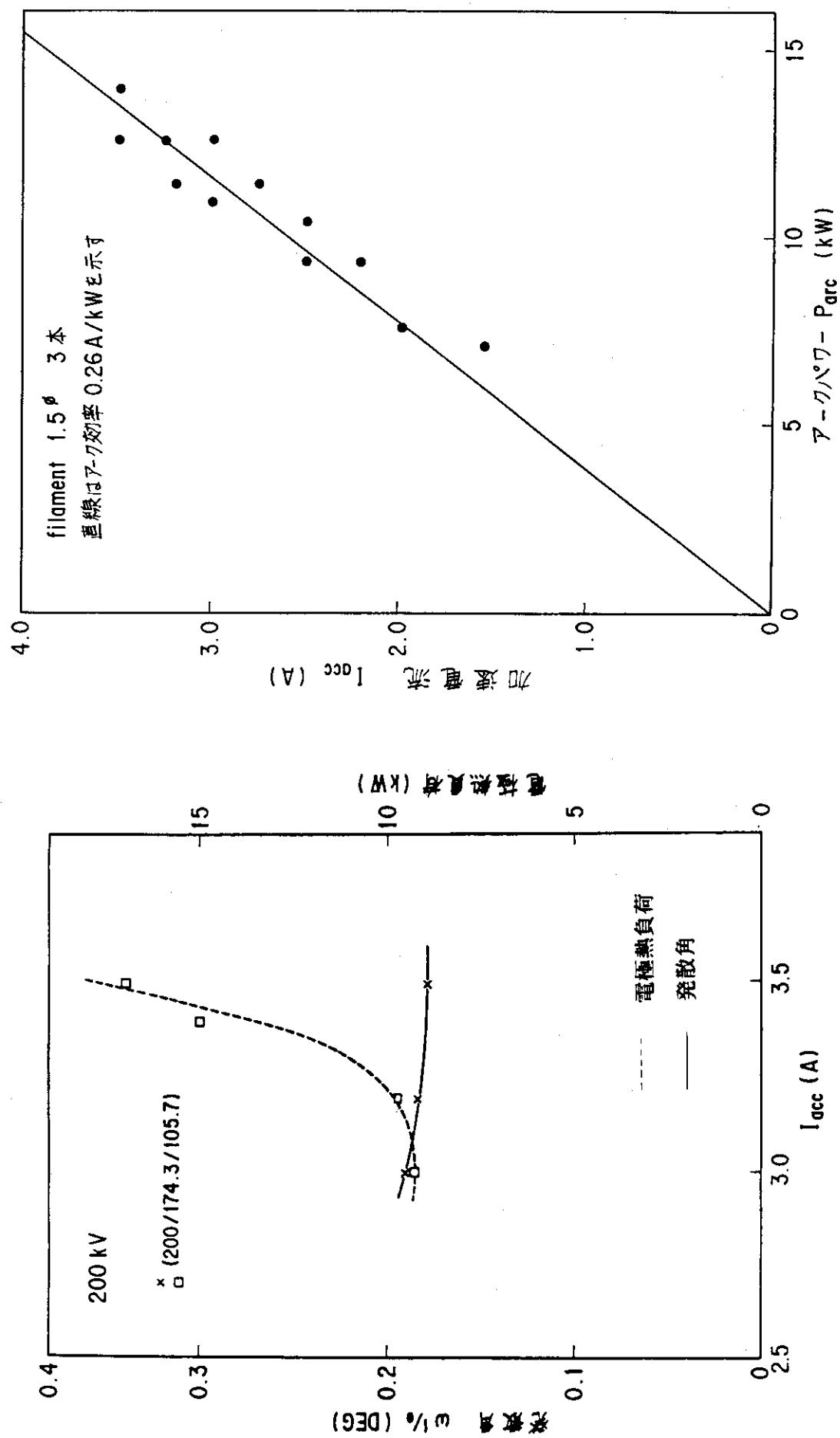


図3.6 発散角と電極熱負荷の電流依存

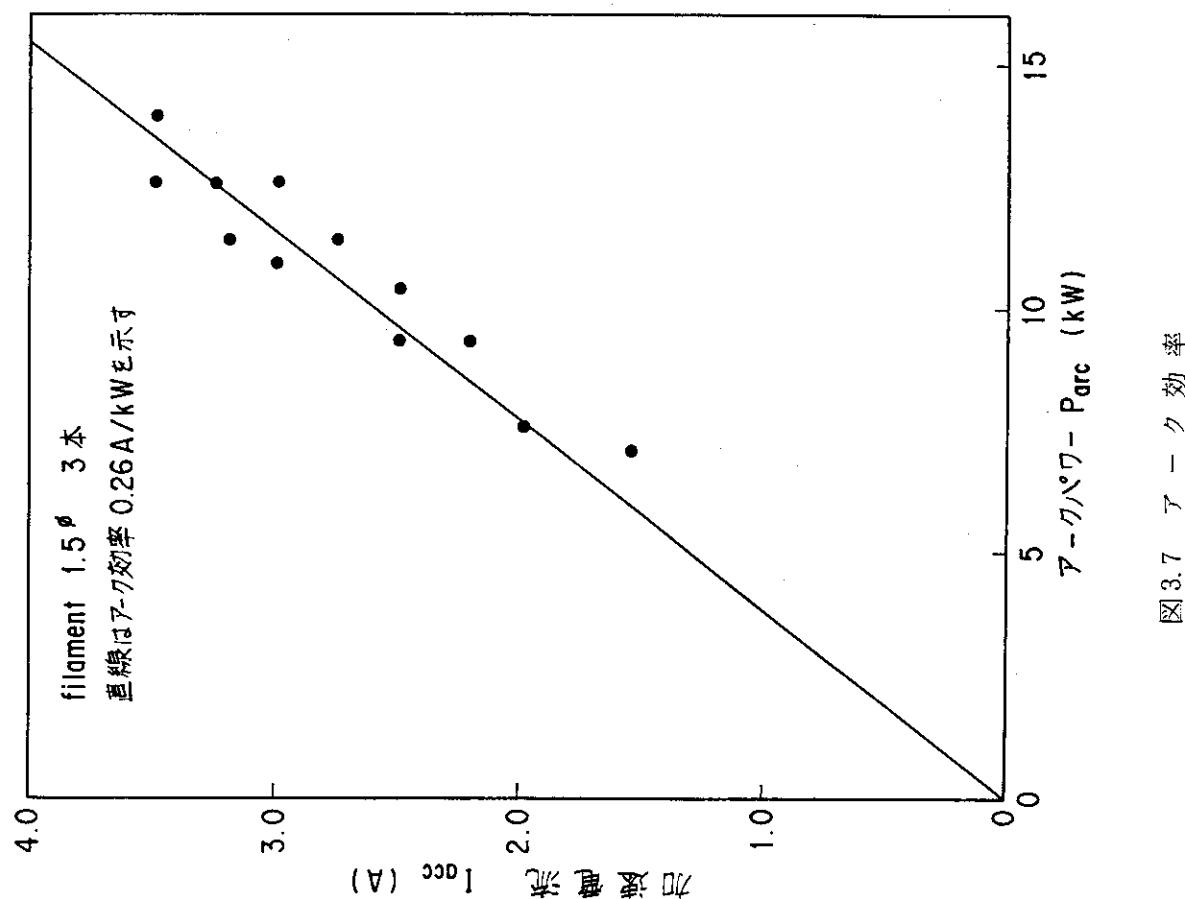


図3.7 アーケ効率

#### 4. 開発成果の位置づけ

前章までに述べた開発試験によって得られた成果は、単に JT-60用計測器として目標性能を超えるものが開発できたということにとどまらない。

まず、核融合加熱装置技術という観点では、次期核融合粒子入射加熱装置では 300 keV~500 keVというビームエネルギーが要求され、一方、現状ではようやく 100~160 keVのシステムが開発されたばかりであることを考えると、200 keVレベルのビーム引出し技術を確立したことは、次期核融合装置に向って中間ステップを完成させたという点で大きな意義がある。更に開発されたビームは従来加熱装置用に開発されてきたビームに比べて驚くほど収束性が良く、極めて強輝度のビームが得られたことは特筆に値する。イオン源からある距離だけ離れた断面でビーム強度分布を測定したとき、そのピーク値の全引出し電流に対する割合（ビーム収束度と呼ぶ）はビーム発散角の自乗に反比例するが、能動粒子線で得られたビーム収束度を従来開発されてきた加熱装置用イオン源のものと比べると、第 4.1 図のとおりとなる。即ち、ビーム収束度は従来のものに比べ約 1 衍改善されたことになる。

更に、高エネルギーで大電流が得られたことは、今後の開発次第では強力中性子源としての利用の可能性も示唆した事を意味する。

他方、イオン源の工業的応用という観点からは、最近イオンビームの半導体製造、材料加工、金属材料の改質などの分野への応用は目覚しいものがあるが、能動粒子線の 200 keVというエネルギー領域は、最大のイオン電流が得られているものでも 0.1 A（イオン種  $O^+$ ）であり、如何に能動粒子線が強力であるかがわかる。能動粒子線用イオン源のソース部はこのまま  $N^+$  ビームを引出すことは可能であり、また、多少の改造を加えれば、 $O^+$  ビームを引出すことができる。このように、加熱装置で蓄積された定常化技術と能動粒子線の高電圧技術を組合せれば、工業的応用分野に於ても従来とは比肩できない位強力な手段を得ることになろう。

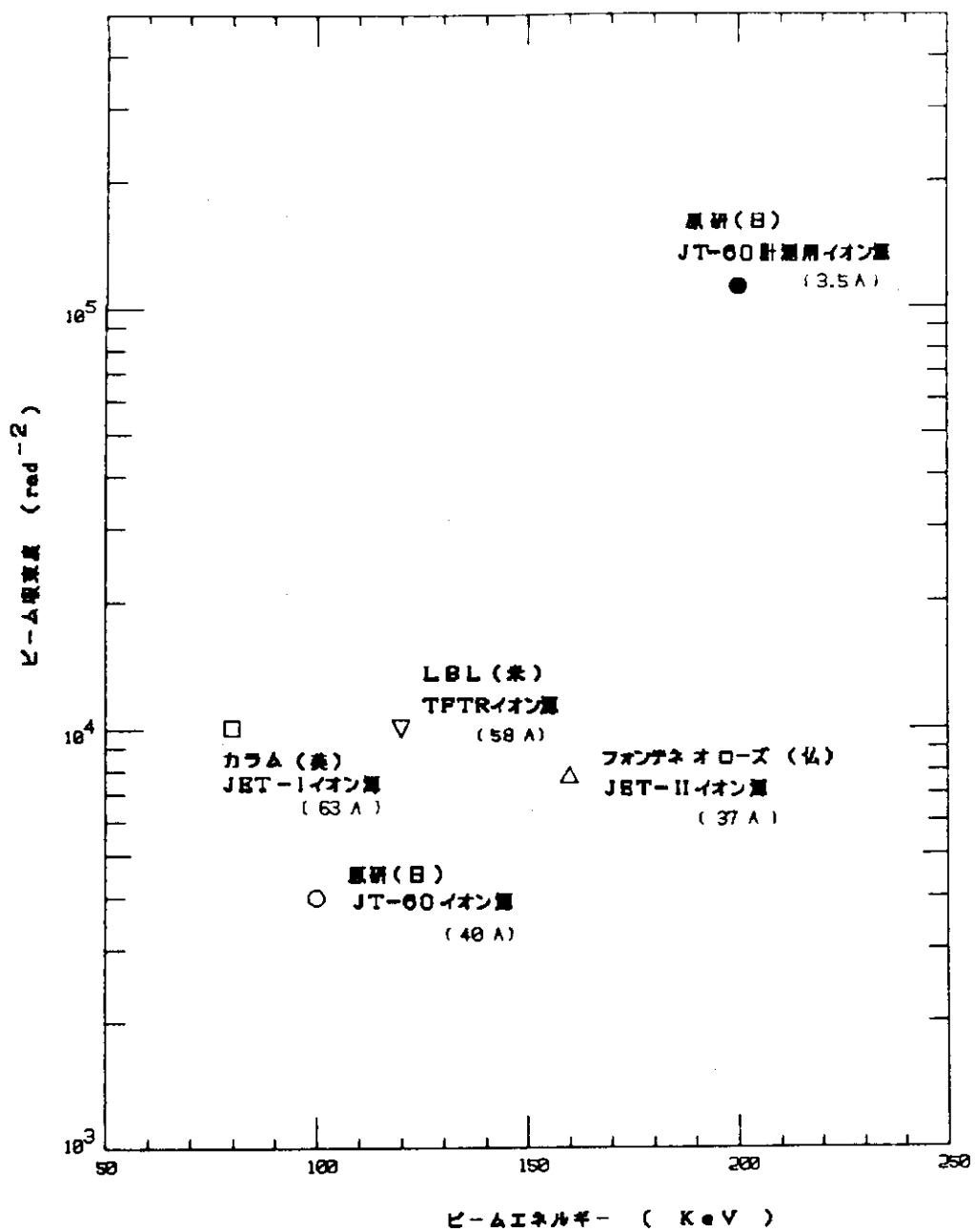


図 4.1 アンペア級イオン源の性能比較図

従来の粒子入射加熱装置用イオン源の最高エネルギーは 160 KeV であったのに対し、JT-60 計測装置用イオン源はこれを破る 200 KeV を達成し、また、ビームの収束度は前者に比べ約 10 倍改善された。

## 5. ま と め

能動粒子線装置の開発試験では世界最高の技術的成果を得た。本装置のイオン源は第5.1表に示す通り目標を上わまわる性能となり、JT-60のイオン温度測定をより容易にするものと期待される。また、本装置を測定器として信頼性の高いものにすると同時に、200 kVという直流高電圧取扱い技術を確立し、将来のNB1技術の足掛りを作った。第2正電極のわずかな電圧の変化がビームの発散に大きく影響するという3段加速特有の新しい発見を行いビーム集束技術の進歩に寄与した。ビームレットの発散と個々のビームレットの方向を同時に測定できるピンホール法を確立した。

表 5.1 目標値と達成値との比較一覧表

	目 標 値	達 成 値
BEAM ENERGY	40 ~ 200 keV	200 keV
BEAM CURRENT	3.5 A	3.5 A
BEAM DIVERGENCE	$\geq 0.4^\circ (1/e)$	$0.18^\circ$
PULSE LENGTH $H_e^0$	0.1 sec $\geq 0.2 A$	0.1 sec 0.6 A

## 謝　　辞

本能動粒子線装置の開発は臨界プラズマ計測開発室に協力して行ったものであるが、設計や建設において前田彦祐主任研究員（現在プラズマ実験室）、志甫諒副主任研究員、鈴木康夫臨界プラズマ計測開発室長には予算面での配慮や支援を、また、本装置の仕様決定に際して、下村安夫臨界プラズマ実験室長に有益な御助言を戴いた。

また、当初第Ⅰ期の開発試験の実施場所（建家）に苦慮していたが岸本浩計画室長らの御尽力によりJT-60実験棟の一角に設けることができ、合理的に計画を進めることができた。

本装置の設計や建設にあたって、柴田猛順副主任研究員（現在同位体分離研究室）、電極の熱変形に対して栗山正明副主任研究員と荒木政則研究員の両氏、受電設備や建家の設計に対し大賀徳道氏と北村繁氏の両氏、制御系の設計に対し河合視己人氏、ほか加熱工学第1研究室及び臨界プラズマ加熱開発室の同僚に有意義な議論や援助をして戴いたことを深く感謝します。

最後に、本装置の開発に対し暖い御支援を戴いた、白形弘文臨界プラズマ加熱開発室長、田中正俊核融合研究部長、吉川允二臨界プラズマ研究部長、磯康彦理事、苦部地顕那珂研究所長に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) E.L. Berezovskii et al ; Sov. J.Phys 6. 760, Nov 1980
- 2) V.G. Abramovet et al ; Sov. Phys - Tech. Phys 16, 1520, Mar 1972.
- 3) K. Tobita & H. Takeuchi ; To be published
- 4) T. IToh, et al ; Proc. Internat. Ion Engineering Congress, Kyoto, 1 483, Sept 1983.
- 5) L.C. Pittenger, et al ; Seventh Sympoon Engineering Problemsot Fusion Research, Knoxville, Tennessee Oct. 1977.
- 6) Y. Ohara ; JAERI-M 8357, 1979.
- 7) Y. Ohara ; JAERI-M 6757, 1976
- 8) Barnett, et al ; ORNL 5206, 1977
- 9) P.M. Ryan, et al ; Rev. Sci. Instrum. 53 (2), 154, Feb 1982.
- 10) K. Watanabe ; JAERI-M 86-104
- 11) T. IToh, et al ; Proc. Internat Symp. on Heating in Toroidal Plasmas Rome, Italy, March 21 - 28, 1984.
- 12) M. Araki ; 私信 .

## 謝　　辞

本能動粒子線装置の開発は臨界プラズマ計測開発室に協力して行ったものであるが、設計や建設において前田彦祐主任研究員（現在プラズマ実験室），志甫諒副主任研究員，鈴木康夫臨界プラズマ計測開発室長には予算面での配慮や支援を、また、本装置の仕様決定に際して、下村安夫臨界プラズマ実験室長に有益な御助言を戴いた。

また、当初第Ⅰ期の開発試験の実施場所（建家）に苦慮していたが岸本浩計画室長らの御尽力によりJT-60実験棟の一角に設けることができ、合理的に計画を進めることができた。

本装置の設計や建設にあたって、柴田猛順副主任研究員（現在同位体分離研究室），電極の熱変形に対して栗山正明副主任研究員と荒木政則研究員の両氏、受電設備や建家の設計に対し大賀徳道氏と北村繁氏の両氏、制御系の設計に対し河合視己人氏、ほか加熱工学第1研究室及び臨界プラズマ加熱開発室の同僚に有意義な議論や援助をして戴いたことを深く感謝します。

最後に、本装置の開発に対し暖い御支援を戴いた、白形弘文臨界プラズマ加熱開発室長、田中正俊核融合研究部長、吉川允二臨界プラズマ研究部長、磯康彦理事、苦部地顕那珂研究所長に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) E.L. Berezovskii et al ; Sov. J.Phys 6. 760, Nov 1980
- 2) V.G. Abramovet et al ; Sov. Phys - Tech. Phys 16, 1520, Mar 1972.
- 3) K. Tobita & H. Takeuchi ; To be published
- 4) T. IToh, et al ; Proc. Internat. Ion Engineering Congress, Kyoto, 1 483, Sept 1983.
- 5) L.C. Pittenger, et al ; Seventh Sympoon Engineering Problemsot Fusion Research, Knoxville, Tennessee Oct. 1977.
- 6) Y. Ohara ; JAERI-M 8357, 1979.
- 7) Y. Ohara ; JAERI-M 6757, 1976
- 8) Barnett, et al ; ORNL 5206, 1977
- 9) P.M. Ryan, et al ; Rev. Sci. Instrum. 53 (2), 154, Feb 1982.
- 10) K. Watanabe : JAERI-M 86-104
- 11) T. IToh, et al ; Proc. Internat Symp. on Heating in Toroidal Plasmas Rome, Italy, March 21 - 28, 1984.
- 12) M. Araki : 私信 .