

JAERI-M

6 4 3 1

ビーム入射加熱用イオン源テストスタンド(ITS-1)
の構成と試作I型イオン源の初期実験結果

1976年3月

松田慎三郎・伊藤孝雄^{*}・近藤梅夫^{**}・小原祥祐・大賀徳道
柴田猛順・白形弘文・菅原 享^{***}・田中 茂

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

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

ビーム入射加熱用イオン源テストスタンド (ITS-1)
の構成と試作 I 型イオン源の初期実験結果

日本原子力研究所 東海研究所 核融合研究部

松田慎三郎・伊藤孝雄*・近藤梅夫**・小原祥祐・大賀徳道
柴田猛順・白形弘文・菅原 亨***・田中 茂

(1976年1月31日受理)

このレポートは日本原子力研究所・核融合研究部に完成した、イオン源開発のためのテストスタンド (ITS-1) の構成と試作イオン源についての初期実験結果について書かれたものである。核融合実験装置のプラズマを加熱するために高速中性粒子ビームを入射する方法が考えられているが、このテストスタンドはこのとき使われる中性粒子入射加熱装置の中心となるイオン源を開発するためのものであって、加速電圧 30 KV, 引出しビーム電流 12 A までのイオン源のテストが可能である。本テストスタンドは昭和 50 年 2 月に完成し、最初に試作したイオン源 (デュオビガトロン) で 25 KV, 5.5 A の水素イオンビームを得ている。

*) 特別研究生 東海大
**) 外来研究員 日新電機
***) 外来研究員 東芝総研

Constitution of the Injector Test Stand (ITS-1) and
the Preliminary Results with Model - I Ion Source.

Shinzaburo MATSUDA, Takao ITOH,^{*} Umeo KONDOH,^{**}
Yoshihiro OHARA, Tokumichi OHGA,
Takemasa SHIBATA, Hirohumi SHIRAKATA,
Tohru SUGAWARA,^{***} and Shigeru TANAKA

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received January 31, 1976)

Constitution of the 1-st injector test stand (ITS-1) in Thermonuclear Division, JAERI, and the performance of the Model-I ion source are described. Heating a plasma by neutral beam injection is one of the promising means in the thermonuclear fusion devices. Purpose of the test stand is to develop the ion sources used in such injection systems. The test stand was completed in February 1975, which is capable of testing the ion sources up to 12 amps at 30kV. A hydrogen ion beam of 5.5 amps at 25kV was obtained in the Model-I ion source.

* On leave from Tokai University

** On leave from Nissin Electric Co., Ltd.

*** On leave from Research and Development Center,
Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. テストスタンドの構成	1
2.1 イオン源	1
2.2 イオン源用電源	3
2.2.1 加速電源	4
2.2.2 減速電源	4
2.2.3 P I G 電源	5
2.3 真空容器と真空排気系	6
2.4 冷却系	6
2.5 計測設備と付帯設備	7
2.5.1 電氣的測定	7
2.5.2 熱的測定	7
2.5.3 付帯設備	8
3. 初期実験結果	9
4. おわりに	13
5. 文 献	13
Appendix I リアクトルによる加速電源のレギュレーション	14
Appendix II 負電極印加電圧の評価	14

1 はじめに

ITS-1 (Injector Test Stand No.1) はトーラスプラズマの加熱に使われる中性粒子入射加熱装置の中心であるイオン源を開発するためのテストスタンドである。本装置は48年度に計画され、49年度予算によって実施に移され、50年2月に最少限の設備が完成した。その後、ただちに初期実験にとりかかるとともに、付帯設備の整備、改良をはかり、今日に至っている。本装置は次の2つの研究目的を担っている。第1に51年度に予定されている、JFT-2での中性粒子入射加熱実験に使用されるイオン源を開発すること。第2にJT-60 (臨界プラズマ試験装置) に使用されるイオン源を開発するための基礎的技術を開発することである。とくに、JT-60に用いられるイオン源を開発するまでには極めて多くの未解決の問題があり、これらのすべてを4~5年の短期間に解決することは容易なことではない。たとえば、われわれが今回製作した最初のイオン源は、水素イオンビームの出力が25KV, 6A, 持続時間100msec を目標としたものであるが、JT-60用イオン源は1基の出力が75KV, 30A, 持続時間2~10sec 程度を必要とする。即ち、加速電圧で3倍、ピークパワーで15倍、総出力エネルギーで実に1500倍である。更に、トーラスへ流入する冷たいガスを抑えるための排気系の負担を軽減するために、イオン源のガス効率を改善したり、ビームに含まれる不純物を少なくすることも必要である。これらの問題を比較的短い開発期間内に解決するには、十分なマンパワーと少なくとも3台のテストスタンドの建設が必要と考えられる。そしてこれらのテストスタンドはシリーズに存在すればよいというものではなく、数年のオーバーラップが生じるような稼働をしてはじめて、相補的、有機的に機能し、短期間の開発を容易ならしめるものである。今回のテストスタンドはその第1号ともいえるべきものであって、ITS-2, ITS-3等が完成するまでは(ITS-2の完成は51年9月の予定である) これら後続のテストスタンドで試みられる一連の実験の先駆的実験が行なわれる予定であり、ITS-2やITS-3の完成後は、単目的実験に使われるであろう。

ITS-1はイオン源をブラックボックスとし、イオン源用電源、引出されたビームを測定するためのドリフトチェンバー (真空容器)、真空排気系、イオン源電極や測定用ターゲットを冷却するための冷却系、および付帯設備によって構成される。本装置は東海研究所炉心工学研究室モックアップ建屋 (旧JFT-1実験室) に設置された (第1図参照)。

2 テストスタンドの構成

2.1 イオン源

トーラスへの中性粒子入射加熱装置として利用可能なイオン源は、現在世界中で稼働しているトカマク装置の規模に対して、エネルギー20~30KeV, パルス幅10msec 以上でビーム電流は数アンペア以上が望まれる。われわれがイオン源の製作に着手するまでに、国内外で開発された大容量イオン源は大別して2つのものがあつた。その一つは米国オークリッジ国立研

1 はじめに

ITS-1 (Injector Test Stand No.1) はトーラスプラズマの加熱に使われる中性粒子入射加熱装置の中心であるイオン源を開発するためのテストスタンドである。本装置は48年度に計画され、49年度予算によって実施に移され、50年2月に最少限の設備が完成した。その後、ただちに初期実験にとりかかるとともに、付帯設備の整備、改良をはかり、今日に至っている。本装置は次の2つの研究目的を担っている。第1に51年度に予定されている、JFT-2での中性粒子入射加熱実験に使用されるイオン源を開発すること。第2にJT-60 (臨界プラズマ試験装置) に使用されるイオン源を開発するための基礎的技術を開発することである。とくに、JT-60に用いられるイオン源を開発するまでには極めて多くの未解決の問題があり、これらのすべてを4~5年の短期間に解決することは容易なことではない。たとえば、われわれが今回製作した最初のイオン源は、水素イオンビームの出力が25KV, 6A, 持続時間100msec を目標としたものであるが、JT-60用イオン源は1基の出力が75KV, 30A, 持続時間2~10sec 程度を必要とする。即ち、加速電圧で3倍、ピークパワーで15倍、総出力エネルギーで実に1500倍である。更に、トーラスへ流入する冷たいガスを抑えるための排気系の負担を軽減するために、イオン源のガス効率を改善したり、ビームに含まれる不純物を少なくすることも必要である。これらの問題を比較的短い開発期間内に解決するには、充分なマンパワーと少なくとも3台のテストスタンドの建設が必要と考えられる。そしてこれらのテストスタンドはシリーズに存在すればよいというものではなく、数年のオーバーラップが生じるような稼働をしてはじめて、相補的、有機的に機能し、短期間の開発を容易ならしめるものである。今回のテストスタンドはその第1号ともいえるべきものであって、ITS-2, ITS-3等が完成するまでは(ITS-2の完成は51年9月の予定である) これら後続のテストスタンドで試みられる一連の実験の先駆的実験が行なわれる予定であり、ITS-2やITS-3の完成後は、単目的実験に使われるであろう。

ITS-1はイオン源をブラックボックスとし、イオン源用電源、引出されたビームを測定するためのドリフトチェンバー(真空容器)、真空排気系、イオン源電極や測定用ターゲットを冷却するための冷却系、および付帯設備によって構成される。本装置は東海研究所炉心工学研究室モックアップ建屋(旧JFT-1実験室)に設置された(第1図参照)。

2 テストスタンドの構成

2.1 イオン源

トーラスへの中性粒子入射加熱装置として利用可能なイオン源は、現在世界中で稼働しているトカマク装置の規模に対して、エネルギー20~30KeV, パルス幅10msec 以上でビーム電流は数アンペア以上が望まれる。われわれがイオン源の製作に着手するまでに、国内外で開発された大容量イオン源は大別して2つのものがあつた。その一つは米国オークリッジ国立研

研究所で開発され、25KV、8A、200msecの水素ビーム出力を得ていたデュオピガトロンと呼ばれるイオン源である。¹⁾ この流れをくむイオン源は英国カラム研究所、²⁾ フランスフォンテネオローズ研究所、³⁾ 西ドイツガルヒン研究所などでも研究されている。もう一つは米国カリフォルニア大学ローレンスバークレー研究所で開発されたもので20-28本のタングステンフィラメントをプラズマ生成室の周辺に配列し、アーク放電によってソースプラズマを生成し、20KV、12Aの重水素ビームを10msecにわたって引出している。⁴⁾ これらのイオン源は一長一短があつて現在の入射実験に対しても、将来的見通しの点についても優劣はつけ難い。われわれは、これまでにイオン源開発の経験をもたないこと、JFT-2の加熱実験のためのイオン源の開発を目前に控えていること、電極間隔が長いなどの点でデュオピガトロンの方がより改良の余地が大きいこと等を考慮してイオン源の最初のモデルはオークリッジ国立研究所のものと全く同一のものを製作した。そしてその追試実験により、同型イオン源の特徴を調べるとともにただちに改良実験に移ることを指針とした。

第2図は製作したモデルI型イオン源の構成図である。構造及び幾何学的形状は次の3点を除いてオークリッジのデュオピガトロンと全く同一である。第1に、加速減速電極はオークリッジのものがプラズマ密度勾配に整合するように曲率を持たせてあるのに対し、われわれの最初のもの（これをモードI型電極と名付ける）は平板である。これはイオン源の基本的性能を調べる上ではより単純な配位の方が理解し易いからである。第2に絶縁物として一部にエポキシ樹脂が使われていたが、これを酸化アルミナ磁器に変えた。これは不純物の放出を少なくするためである。第3に電極の水冷パイプはすべて銀ロウ付によって接続されていたため、電極を変える毎に支持フランジとの間で水冷パイプのロウ付箇所を切離す必要があつたが、これをコネクタにより脱着可能な構造とし、電極の取換の際の不便をなくした。

イオン源の機能は大別して、ソースプラズマを生成するプラズマ生成部と、イオンのみを引出して加速する加速部に分けられる。プラズマ生成部では種となる電子は中間電極（zwischen）の内側に設けられたフィラメントカソードにより供給され、PIG放電によってプラズマが生成される。電極材料は熱除去と不純物の観点から、すべて無酸素銅（純度99.96%以上）を用いた。フィラメントは1.0mm ϕ のタンタル線（30cm長）に白金網（0.076 ϕ 、100メッシュ程度）を巻き付け、その上にBa, Sr, Ca（混合比60:36:4）を溶かしたバインダーをコーティングして、酸化物陰極としている。また電流導入端子とフランジの接合、及び中間電極の無酸素銅と電磁軟鉄の接合面は真空ロウ付されている。ソースコイルはテトロンガラスで絶縁被覆したホロー導体（外径8×5、内径5×2市販品）を71巻したものにエポキシ樹脂を真空含浸して固めたものである。第3図にノズルから離れた位置での軸上の磁束密度の分布を示す。コイル電流を100A流した場合でも引出し電極の近傍では磁場の強さは約20ガウス程度に過ぎない。加速部の電極（合計3枚）は直径3.75mm ϕ のビーム引出し孔が合計221個設けられた多孔型となっていて、それぞれの孔は3枚の電極を通して一直線に配列されている。孔の加工は数値制御されたボール盤によって行なわれた。加速部の電極には熱除去のために水冷却パイプを配し、正電極、接地電極にあつては3mm ϕ の水冷却パイプが2本（第4図参照）、負電極にあつては1.5mm ϕ の水冷却パイプが合計4本ガイド溝に沿って銀ロウ付されている。これらの電極の厚さは1.6mmあり、また電極間の距離は正-負電極間は

2mm-8mmまで可変、接地-負電極間は2mmで固定となっている。また銀ロウ付による熱的歪みを避けるため、水冷パイプをロウ付した後、仕上げ加工を行ない、最後に孔あけ加工を行なっている。電極の冷却パイプは末端でコネクタが取付けられ、銅リングにより真空シールされる。電極間の絶縁物はセラミック（酸化アルミナ）を用い、O-リング面は精巧に研磨されている。これらのうちで正電極と負電極間の絶縁に用いられたものは外径 380ϕ で片面に10Mボルト用ネジ穴が12個設けられていて、これより上部構造物との接続をこのネジを通るボルトによって行なっている。したがってイオン源を横方向に設置した場合にも正電極よりプラズマ生成部側の電極や磁場コイルのモーメントはすべてこのネジによって支えられる。作動ガスの導入はフィラメント電流導入端子のすぐ横に設けられた2つの導入部（ 6ϕ ステンレスパイプの先端に 18ϕ 用ウィルソンシールが取付けてある）のうちの一つを使って行なわれる。他の一つはフィラメント領域の真空度を測定するためのピラニゲージのために使われている。酸洗をした電極面は組立前に、ブラストビーズをあてて研磨し、蒸留水洗浄、アルコール洗浄のあと組込まれる。

イオン源の主な諸元を第1表に示す。

第1表 Model I型イオン源の諸元

電極材料	無酸素銅 (OFCU99.96%), 電磁軟鉄 (SUY-F), ステンレス鋼 (SUS304)
絶縁材料	酸化アルミナ磁器
加速減速電極	7 cm ϕ 平行平板 (Mode I 電極)
引出し孔	3.75 mm ϕ $\times$ 221個
冷却パイプ	正電極, 接地電極 3 ϕ $\times$ 2本 負電極 1.5 ϕ $\times$ 4本
フィラメント	タンタル 1 mm ϕ , 白金網巻き付け Ba, Sr, Ca 混合の酸化物陰極
磁場コイル	ホロー導体 (断面 8 mm $\times$ 5 mm, 厚さ 1.5 mm 2重テトロンガラス被覆) 71巻
水冷パイプジョイント	真空部分はステンレスコネクタ, 銅リングにより真空シール, テフロンパイプとの接続部は 3/8" カプラ。
真空シール	バイトンO-リング

2.2 イオン源用電源

ITS-1のイオン源用電源について述べる（第5図参照）。イオン源のプラズマ生成部とイオン加速部とに対応して、電源はプラズマ生成のためのPIG用電源と加速部に対応する加速、減速電源とに大別できる。電源の基本的構成はORNLのそれに近く、直流電源を主体としたものであるが、定格、容量等に於て使用電圧により整合するようにつくられている。以下にこれらの個々の電源について述べる。

2.2.1 加速電源

イオン源の正電極と接地電極の間にかかる直流電源で最大 30 KV, 12 A, パルス幅 500 msec の負荷に耐え得る。この電源の主な特徴は多相整流 (12 相) によってリップルを低減していることと, リアクトルと SCR を用いた電流遮断機能である。負荷端であるイオン源の電極間にはしばしば放電破壊が発生するが, このような放電破壊は過電流になり, 電極間の局部に熱が集中するために歪を生じ易く, 電極の損傷の原因となる。したがって電極の損傷を防止するためにも, またイオン源の高エネルギー率の運転^{*}のためにも, 放電破壊が発生したとき, これを吸収したり, 過電流を速やかに遮断したりする機能を備えていることが望まれる。ITS-1 の加速電源はこの意味での機能を 2 つ備えている。まず, 0.5 msec 以内の放電破壊は直流側で負荷と直列に挿入された 1.6 H のリアクトル (Appendix I 参照) によって吸収する。第 6 図にその一例を示す。放電破壊の際に発生した電圧降下と過電流は吸収され, 電圧は 0.5 msec 後に自動的に復帰している。リアクトルのインダクタンスを更に大きくすれば吸収できる電圧降下のパルス幅を大きくすることが可能であるが, 電流の起ち上りや遮断時に生じる誘起電圧 $L \frac{dI}{dt}$ が極めて大きくなるため, 2~3 H を超えるリアクトルを使用することは現実的ではない。リアクトルで吸収できない程度に持続する放電破壊が発生した場合はラインの開閉器を開放しなければならない。しかし, 通常の電磁開閉器では過電流を検出してから完全に電流を遮断するまでに 5~10 サイクル (100 msec ~ 200 msec) を要する。この間の電極の損傷や, かなり数多い放電破壊の発生による接触器の保守等を考慮すると, 電流の遮断のためには遮断時間の短い無接点開閉器が望ましい。このような見地から ITS-1 では SCR を交流側に用いて遮断機能を持たせている。第 7 図に放電破壊時の過電流の遮断波形を示した。SCR スイッチにより, 電流は 10~20 msec 以内に遮断することが可能である。更に加速電源の直流側には過電流の最大値がいかなる時刻に於ても 75 A を超えないように負荷と直列に 100 Ω の抵抗 (最大 500 Ω までとれる) が挿入されていて過電流に対する 2 重の保護が施されている。負荷端電圧は交流側の IVR によって制御され, 0~30 KV 連続可変である。加速電源のうち, 3300 V/200 V 降圧トランス, パワーヒューズ, IVR, 整流器トランス, 限流抵抗器はイオン源より約 10 m 離れた加速電源室に設置され, 電磁開閉器, SCR スイッチは実験室内の制御盤の中に, またリアクトルは高電位テーブル (後述) 上に設置されている (第 1 図参照)。

2.2.2 減速電源

減速電源は負電極に負の電位 (DC 0 ~ -5 KV, 1.5 A) を与えるための直流電源であって, これにより下流で生成した電子^{**}の逆流を防ぐ役割を担っている。その構成は加速電源とほぼ同じであるが, 過電流遮断のための SCR スイッチは設けられていない。正電極と負電

* 通常の回路では放電破壊によって過電流となると, 加速電源のラインを遮断しなければならず, せのためにテストスタンドの運転が一時停止し, 回復までに時間がかかる。

** ドリフトチェンバー内で残留中性ガスとイオンビームとの衝突によって中性ガスがイオン化してプラズマ状態となっている。

極の間に発生する放電破壊による過電流は加速電源のSCRスイッチによって遮断する。負電極と接地電極の間に発生する過電流は減速電源の電磁スイッチによって遮断する。また前者の放電破壊の場合に負電極の電位が正に持ち上げられることがあり得るが、これを防止するために減速電源の負荷端はつねに零以下になるようダイオードスタックによりクランプされている。またダイオードがターンオンとなるより速い時間の電圧上昇に対してはダイオードに並列に設けられたギャップ（ギャップ長標準5mm）を通してバイパスされる。

2.2.3 PIG電源

PIG放電によってソースプラズマをつくるための電源であって、アーク電源、フィラメント電源、磁場コイル電源から構成される。アーク電源はパルス幅が20~500msec、電圧0~350V、電流120Aの容量をもち、繰返し率は10%以下である。アーク電圧パルスの発生は交流側に設けられたSCRスイッチによって行なわれる。また負荷と直列に0~3Ω可変のグリッド抵抗が挿入されていて、アーク電流の安定化に寄与している。アーク電源の正極側はアノードの他に200Ω、1KΩの抵抗を通してターゲットカソード、中間電極に浮動電位を与えている。陰極はフィラメントの一端に接続される。フィラメント電源は0~5V電流容量75Aの直流電源であるが通常20~25Aで使用される。磁場コイル電源は0~10V、電流容量100Aの直流電源である。これらのPIG電源は加速電源の正極側を基準とする浮いた状態にあるため、すべて絶縁トランスを介して高電位側に電力が供給される。ガス導入電磁弁のON/OFF信号も絶縁トランスを通して送られる。

第2表 イオン源用電源性能一覧

1. 加速電源

出力	DC 14.4KV-30KV 12A
負荷	最大 500msec 繰返し10%以下
電圧変動率	40%以下
リップル	±1%以下
ドリフト	±3%以下（但し1時間の運転に対して）
過電流遮断	20msec 以下

2. 減速電源

出力	DC 1-5KV 1.5A
負荷	最大 500msec 繰返し10%以下
電圧変動率	40%以下
リップル	±2%以下

3. PIG電源

アーク電源

出力	100-350V 120A パルス
負荷	パルス幅20~500msec 繰返し10%以下
リップル	±2%以下

フィラメント電源

出 力	D C	1 - 5 V	7 5 A
リ ッ プ ル	± 2 % 以下		
磁場コイル電源			
出 力	D C	2 - 1 0 V	1 0 0 A
リ ッ プ ル	± 2 % 以下		

2.3 真空容器と真空排気系

真空容器はイオン源から引出されたビームのパワーや発散、成分などの特性を調べるとともに、再結合したビームやイオン源から流出してくる中性ガスを排気するための真空ポンプ等の設置可能な空間である。その構造を第8図に示す。真空容器は板厚12mm外径600φのステンレス製でその容積は約870ℓあり、真空シールはすべてバイトンOーリングによっている。イオン源は左端のフランジ、又は上のフランジに取付けられ、ビームは横のラインにも縦のラインにも引出すことが可能である。容器の内面は鏡面研磨されており、フランジ等の溶接箇所はすべて内面溶接である。下面に14吋フランジが3個あり、そのうち2個にはゲートバルブを通して10吋油拡散ポンプが2台取付けられている。また右端のフランジにも10吋油拡散ポンプが1台取付けられている。測定ポートは横のラインに両面で計8個、上面に2個、また縦のラインに7個設けられている。測定窓のうちいくつかは硬質ガラス窓でつくられておりビームラインを直視可能な構造となっている。

真空排気系は上に述べたように10吋拡散ポンプ3系列より成る(第1図参照)。このうち真空容器の下面に取付けられる2系列は、14吋空圧作動ゲートバルブ、フレオントラップ、10吋拡散ポンプ、4吋補助拡散ポンプ各2台と4吋空圧ゲートバルブ油回転ポンプ4台から成る自動真空排気系であって、これはJFT-1(原研ヘキサポール実験装置)で使用していたものを転用した。また残りの一系列はL型手動バルブ、液体窒素冷却トラップ、10吋拡散ポンプ、4吋空圧ゲートバルブ、1600ℓ/min油回転ポンプより成り、これも同じくJFT-1の拡散箱の排気に使用していたものを一部改造して準自動排気系としたものである。これら3系列の拡散ポンプを作動させたとき真空容器内の到達真空度は、ベークিং等特別なことはせずに $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ Torr 程度である。また実効排気速度は $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ Torr の領域で1000ℓ/sec程度と推定される。

2.4 冷却系

高電位(DC30KV程度)にあるイオン源各部および真空容器内に配置されているカロリメータなどの計測器も冷却するため、電気絶縁性の良いイオン交換樹脂を使用した閉回路方式の純水冷却装置を設置した。本冷却系のフローシートを第9図に示す。水槽に貯蔵された一次冷却水(純水)は、ポンプ1によって5kg/cm²に加圧され、熱発生源であるイオン源(図中の熱負荷番号①, ③~⑥)や計測器などに供給される。なお、イオン源冷却管の一部(熱負荷番号④)は、7~10kg/cm²に加圧されて供給されるようになっている。一方、供給一次水の一部(全流量の5~6%)は、水の純度を保持するために、イオン交換樹脂を使用した純水器

を通過して水槽に帰される。次に、熱発生源を通過して温度の上昇した冷却水は、熱交換器で二次冷却水に熱を伝達し、水温を下げて水槽にもどる構成になっている。

本純水冷却装置の主要性能を次に示す。

- ① 一次水流量： 最大 30 l/min (純水)
- ② 一次水出口圧力： 5 kg/cm², 10 kg/cm² (2 系統)
- ③ 冷却水の純度： 運転時 1 MΩ・cm 以上
- ④ 熱交換器冷却能力：最大 50 KW
- ⑤ 二次水流量： 50 l/min 以上 (汚過水)
- ⑥ 純水器能力： 2 ton/day
- ⑦ 一次水水槽容量： 300 l

なお、一次冷却水の純度低下を防止するため、水槽、熱交換器、配管などは、すべてステンレス製とした。また、高電位にあるイオン源へは、長さ 2～3 m のテフロンパイプ (外径 10 mm ϕ) を用いて電気絶縁し、冷却水を供給している。

本冷却系は装置の完成後、現在まで約一年運転を続けているが、順調に作動している。装置完成時に純水器のイオン交換樹脂の処理を行って以来、未だ一度も樹脂の再生を行っていないが、今でも一次水は 4～5 MΩ・cm 程度の純度を保っている。

2.5 計測設備と付帯設備

2.5.1 電気的測定

加速電源、減速電源、アーク電源などの電圧、電流などは、分圧器や分流器を通してシンクロスコープにより測定される。このうち、特に加速電源の電圧はイオンビームの加速エネルギーを表わし、電流はその殆んどがイオンビーム電流を表わすので重要である。またアーク電流、電圧は高電位テーブル^{*}上に設置されたシンクロスコープにより測定される。引出されたイオンビームの発散は水冷されたファラデーカップにより測定される。

2.5.2 熱的測定

引出されたビーム (イオンビームの一部はドリフトチェンバー内で中性ガスとの荷電交換によって中性ビームとなる) の発散は直径 10 cm の円板および外径 20 cm, 内径 10 cm の円環の 2 枚のターゲットに入る熱量を冷却水の温度上昇から測定する固定カロリメータによる方法と、2 cm × 1 cm のターゲットを水平面上で移動させ、それに入る熱を同じく冷却水の温度上昇から測定する可動型カロリメータによる方法との二通りの測定法により調べられる。引出されたビームの強度分布がガウス分布であることがわかっている場合には固定カロリメータによってもただちにビームの発散、および全ビーム出力を求めることが出来る。カロリメータの冷却水の温度上昇は流入する水温と流出する水温をそれぞれ定電流電源と白金抵抗体の組合せにより電圧に変換し、差動増幅器により検出する。その感度は 2 mV/℃ である。たとえば流量が 3 l/min あるとき、熱入力 10 KW (繰返し率 1/20) あたり、流体温度差計の出力は約

* 加速電源の正極の電位に浮いたテーブルで P I G 電源の直流側メータパネル、加速電源リアクトル、アーク電源限流抵抗、ガス導入系などが設置されている。

5 mVとなる。イオン源の各電極への熱入力は、同様に冷却水の入口と出口の温度差を測定して容易に求めることができる。

2.5.3 付帯設備

以上に述べた計測設備を含めた主な付帯設備は次の通りである（50年12月現在）。

1. 湿式サンドブラスト装置

電極表面のガラスビーズ処理に使用する。

容積 700mm×500mm×500mm

同上用コンプレッサー 5.5 kg/cm²

2. 10トンプレスセット

電極面の曲面加工に使用する。

3. 流体温度差計

白金抵抗体使用のもの 3台

熱電対使用のもの 2台

4. 可動型ファラデーカップ 1式

5. 可動型カロリメータ 1式

6. 固定型カロリメータ 2台

7. 4吋排気セット 1式

フィラメントの製作や真空部品のテストに使用。

8. 小型トーチ 1式

細管の銀ロウ付，半田付に使用

9. アセチレントーチ 1式

銀ロウ付など一般用

10. 2ペンレコーダ 1台

11. シンクロスコープ

テクトロ 549メモリ 1台

" 5000N 1台

菊 水 553デュアル 1台

" 555Gシングル 1台

3. 初期実験結果

本節ではモードI型電極をもつデュオピガトロンについて、基本的なオペレーションモードでのビームの性能について簡単に述べ、その後引き続いて行なわれた種々の研究テーマについての実験結果の報告は別の機会にゆずる。モードI型イオン源の電極の形状等については2.2に述べたように、221個の引出孔をもつ多孔型平板電極のデュオピガトロンである。以下の実験に於て作動ガスは連続的に導入し、印加した加速電圧は15~27KV、加速電源電流は1~6Aである。一般にアーク電流、ソース磁場コイル電流の大きいときの方が強いビームが得られた。

3.1 負電極に印加すべき電圧

最初に負電極に印加すべき電圧について述べる。第10a図、第10b図は加速電源電流 I_{acc} 、ターゲットカロリメータに入る等価電流（ターゲットは固定カロリメータを加速電極から50cm離れた位置に設置）、及び減速電源電流 I_{dec} の減速電源電圧 V_{dec} に対する依存性を示す。この図から特徴的なこととして、 $V_{acc}=25KV$ のとき V_{dec} を0.8KVより小さくすると加速電源電流が急激に増加するとともにターゲットに入るパワーは減少することである。このことから5A程度のイオンビームを引出すためには V_{dec} は0.8KV以上印加しておかなければならないことが判る。 $|V_{dec}| < 0.8KV$ での加速電源電流の増加の原因は逆流する電子電流によるものであることを推測させる。即ち、1次ビームとしてのイオンビームが真空容器内を通過する間にイオン源から流出してきた中性の水素分子や解離した中性原子をイオン化し（真空容器内の真空度は運転中 $0.5 \sim 5 \times 10^{-3}$ Torr である）、この領域をプラズマ状態とする。プラズマの電位はほぼ接地電位であるが、このうち電子は、負電極の電位が充分低くないと正電極に向って、イオンビームとは逆方向に加速される。負電位の絶対値の最小値は、イオンビームの空間電荷による電位も含めて、ビームラインに沿って kTe より大きい負電位が現われる条件から決められる。イオンビームによる空間電荷の影響は無視できず、とくにソースプラズマに密度勾配があるとき、電極の中央と端とで引出しイオン密度に差が生じ、端の孔に対して負電位が充分な大きさであっても、中央の孔に対しては不十分なことがあり得る。イオンの空間電荷の影響が大きいことは電圧を低くして大きい電流^{*}を引出した実験結果（第10b図）にも現われている。計算機シミュレーションによる V_{dec} の限界値に関しては、くわしくは Appendix II に示される。

負電位の絶対値が小さいとき、加速電源電流の増加が電子電流によるものであることの裏付けは次の実験事実によって支持される。

まず、負電極電位を-1.0KVまで下げておき、逆流電子が存在しないと思われる条件での全出力をカロリメータで測定し、作動ガス圧力、アーク電流、ソースコイル電流、フィラメント

*1 空間電荷制限法則 ($j \propto V^{3/2}$) から25KVで4Aビームを引出したときの方が16KVで2.2Aビームを引出すときに比べ、空間電荷の影響が小さい。

電流その他の条件は一切変えずに V_{dec} のみを -0.65KV に上昇させ、電子逆流電流の存在する条件にもってきてカロリメータへの入力を測定すると同時に PIG 電極への冷却水の温度上昇から PIG 電極への熱負荷の増分を測定した。この結果をまとめると次の通りである。

V_d	V_{acc}	I_{acc}	$V_{acc} \times I_{acc}$	P_{cal}	ΔP_{PIG}
-1.0KV	25.5KV	4A	102KW	107KW	27.6KW
-0.65KV	25KV	5A	125KW	100KW	

ここに P_{cal} はカロリメータによるイオンビーム出力であり、 ΔP_{PIG} は電子電流による PIG 電極への熱入力である。即ち、 $V_{dec} = -0.65\text{KV}$ のときカロリメータへは 100KW 入り、PIG 電極へは $V_{dec} = -1.0\text{KV}$ のときに比べ 27.6KW 余分に入った。その合計は加速電源出力 125KW に一致する。換言すれば 5A の電流のうち 4A はイオン電流、 1A が電子電流であることを示している。

3.2 最大引出電流とビームの発散

モデル I 型電極で今までに得られている最大ビーム電流は、加速電圧が 25KV のとき、加速電源電流で 5.5A (出力 137.5KW) であり、一方 50cm 離れた位置に設置されたカロリメータに入る熱量の測定 (2.5.2 に述べた固定カロリメータ) では 138KW が記録された。また加速電圧が 25.5KV のとき、加速電源電流 6.0A (出力 153KW) でこのうち 140KW がターゲットに入射されている。第 11 図はこのような場合の加速電源の V_{acc} と I_{acc} の典型的波形である。引出されたビームの発散は引出し電極より 150cm 離れた位置に設置された可動カロリメータによって測定される。第 12 図に 26.5KV 、 4A のときの一例を示す。強度分布はガウス分布に近く、その発散は、ビームが点源から出ているとして 3.3° である*)。電極の有限の大きさを考慮すると各孔から引出されるビームレットの平均的発散は 3.1° となる。

異った長さの 3 種類のアノードについて PIG 放電に及ぼす影響を経験的に調べた結果、第 13 図に示すアノードの長さ 9cm のときと 7cm のときはアークプラズマは安定につき、その性質も大差なかった。しかし長さが 4.5cm のときは磁場の強さが極めて弱いとき以外はプラズマは安定に生成されなかった。

3.3 電極への熱負荷

イオンビームを引出しているときの負電極、接地電極への熱負荷は次の通りである。熱負荷は各電極の冷却水の温度上昇から測定した。

P	V_{acc}	I_{acc}	V_{dec}	I_{dec}	P_{neg}	P_{earth}
$2 \times 10^{-3}\text{ Torr}$	25KV	2A	-1.7KV	0.5A	0.76KW	2.21KW
$8 \times 10^{-4}\text{ Torr}$	25KV	2A	-1.9KV	0.35A	0.50KW	2.21KW
$8 \times 10^{-4}\text{ Torr}$	25KV	4A	-1.7KV	0.55A	0.76KW	2.21KW

*) 中心値の $1/e$ に減少する径の半幅を点源が見込む角度で定義する。

ここに P は真空容器内の圧力であり、 P_{neg} 、 P_{earth} はそれぞれ負電極、接地電極への熱入力である。上の3つの場合についてフィラメント領域での圧力は変えず、真空容器内の圧力変化は2台の拡散ポンプのバルブを開閉することによって得ている。上の結果からわかることの一つに、引出しイオンビームの一部が負電極に当ることによって生じる等価電流（0.76 KW のときは0.028 A 相当）と減速電源電流とは大きな差があること、したがって熱負荷にあまり寄与しない荷電粒子による電流が入り込んでいることが判る。とくに接地電極より下流はプラズマ状態になっており、このうちイオンは負電極に向って加速されることが予想される。このことを調べるために第14図に示すような中和のための銅板（円筒にフランジを付けたもの）を接地電極に接続し、ビームライン以外の位置から負電極に入るイオンを妨げたところ減速電源電流 I_{dec} は44%に減少した。この結果は I_{dec} のうち殆んどは下流からの遅いイオンの流入が第1次原因であることを予想させる。各電源回路に流れる電流と電極からはじき出されたり電極に流れ込む荷電粒子の運動との関係は次のようなものが考えられる（第15図）。

① ソースプラズマから飛出し、電極に衝突することなく、また加速-減速の途中、中性粒子との間でいかなる衝突も起すことなく引出されるイオンによる電流で、これを i_1 とする。

② ソースプラズマから飛出し、加速されたイオンが負電極に衝突するとともに2次電子が逆方向に加速されて正電極、又はソースプラズマ生成電極に当たる。このうちイオンによる電流を i_2 とし、電子による電流を i_{2e} とする。

③ ②と同様にイオンが負電極に当たって2次電子を放出するが、2次電子は接地電極に向って加速され、接地電極にあたるか、真空チェンバーに当たる。イオン電流を i_3 とし、電子電流を i_{3e} とする。

④ 加速-減速されたイオンビームが接地電極へあたり2次電子を放出するが、2次電子は再び接地電位にある壁に吸収される。イオン電流を i_4 とする。電子電流は生じない。

⑤ 加速される途中のイオンが中性の水素原子（分子）と衝突し、荷電交換によって高速中性粒子となり引出されるか、電極に当る。荷電交換により発生したイオンはその位置から加速され始める。この過程は中性粒子の圧力がソースプラズマ側に向って高いので加速の初期に生じる確率が多い。

⑥ 加速の途中のイオンが中性水素原子（分子）と衝突してこれを電離し、生じたイオンと電子は加速されて引出されるか、電極に当る。加速の方向等はイオン化される位置により、また⑤と同様にソースプラズマの近くで生じる確率が多い。

⑦ 接地電極より下流はいわゆるビーム・プラズマ状態にある。プラズマイオンは負電極に向って加速されて負電極に当たって2次電子が放出される。2次電子は接地電極に向うものと、正電極に向うものとに分かれる。イオン電流を i_7 とし、電子電流をそれぞれ i_{7eg} 、 i_{7ep} とする。

⑧ その他： H_2^+ 、 H_3^+ などの分子イオンがかなりの割合で含まれている可能性がある¹⁾。これらのイオンについて上に述べたのと同様の過程の他に、解離によって生ずる H^0 などのふるまいも問題となる。

⑤、⑥、⑧の効果は各部の真空度やビーム成分比を測定していない現状では考慮することが困難なのでこれらを見捨てたとすると、加速電源電流 I_{acc} 、及び減速電源電流 I_{dec} はそれぞれ

次のように書き表わすことができる。

$$I_{acc} = i_1 + i_2 + i_{2e} + i_3 + i_4 + i_{7ep}$$

$$I_{dec} = i_2 + i_{2e} + i_3 + i_{3e} + i_7 + i_{7ep} + i_{7eg}$$

ここに $i_{2e} = r_1 i_2$, $i_{3e} = r_1 i_3$, $i_{7ep} + i_{7eg} = r_2 i_7$, また r_1 はエネルギーが $V_{acc} + V_{dec}$ での2次電子放出係数, r_2 は V_{dec} での2次電子放出係数である。

i_7 が真空容器内の圧力と i_1 に比例するとし, I_7 を圧力が 8×10^{-4} Torr $i_1 = 2$ A のときの i_7 の値, $I_c = i_2 + i_3$ とすると*) , 最初に述べた実験結果のうち最初の2ケースは負電極への熱負荷と流入電流の関係から次式が成立する。

$$\begin{cases} 26.9 \text{ (KV)} \times I_c + 1.9 \text{ (KV)} \times I_7 = 0.5 \text{ (KW)} \\ 26.7 \text{ (KV)} \times I_c + 1.7 \text{ (KV)} \times \frac{20}{8} \times I_7 = 0.76 \text{ (KW)} \\ (1+r_1) I_c + (1+r_2) I_7 = 0.35 \\ (1+r_1) I_c + \frac{20}{8} (1+r_2) I_7 = 0.5 \end{cases}$$

最初の2式から $I_7 \approx 0.11$ A $I_c \approx 0.01$ A となり, これをあとの2式に入れると $r_2 \ll r_1$, $r_1 \sim 2.3$ のとき, これらの式が近似的に成立することが判る。2次電子放出係数は電極の表面状態によっても異なるが, これらの値は今までに知られているデータに矛盾していない。接地電極への熱入力は高速イオンビームが主であろう。

以上述べたことから次のことが帰結される。

- (i) 高速ビーム (イオンのみならず荷電交換などによって生じた中性粒子も含めて) が負電極や接地電極に直接当たる割合はビームの数%を超えない。特に負電極に当たるイオンビームは極めて少ない。
- (ii) 減速電源電流のうちかなりの部分は下流のプラズマイオンの逆流によるものである。
- (iii) 接地電極への熱負荷は圧力によらず, 殆んど直接あたる高速ビームによるものである。負電極の熱負荷に比べて3~4.5倍大きい。圧力が 8×10^{-4} Torr のときビーム電流を2 A から4 A に上げて P_{earth} が増加しなかったのはビームの発散が小さくなったためと考えられる。

なお, 本電極を用いて耐熱テストを行なった。繰返し率を一定とし ($1/15$), $V_{acc} \sim 24.5$ KV で $I_{acc} \sim 4.2$ A のときビームパルス幅が300 msec でオペレーションを行なった結果, 接地電極の中心部がほぼ $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ にわたって溶解していた。この場合, 接地電極の冷却水の温度上昇はビームパルス幅が100 msec のときと変化がなかったので平均的な熱除去は問題ではなく, むしろビームON時に冷却効果が現われるまで電極で受持つ熱容量が問題であることが推測される。

*) ビームの発散も引出し電流が同じであるときは変らないと仮定している。

おわりに

ITS-1が完成してから現在までに約10ヶ月を経過した。この間に49年度に不充分であった設備のうち、大部分は改良を加えられ、51年1月完成予定の質量分析器の完成をもってITS-1の最少限の設備は整備されたことになる。また加速電源や減速電源も高出力真空管による電流、電圧制御が可能となった。この間にいくつかのテーマをもった実験が行なわれ、現在10 cm ϕ のイオン源により26KV:8Aのビームを得ている。これらの詳しい報告は別にまとめる予定である。

ITS-1の建設に際して多くの方々の協力を得た。イオン源の構造に関しては工作課山本氏、浜野氏に、真空容器に関しては同じく工作課西口氏に負うところが多い。また大きいトラブルなく、イオン源、同用電源を製作された日新電機株式会社の担当者の方々に謝意を表す。最後に終始励まして頂いた森茂核融合研究部長に深く感謝します。

文 献

- 1) R. C. Davis et al. : ORNL-TM 4657
- 2) D. A. Aldcroft : CLM-P 414
- 3) R. Becherer : EUR-CEA-FC-788 1975
- 4) W. R. Baker et al. : LBL-2425

おわりに

ITS-1が完成してから現在までに約10ヶ月を経過した。この間に49年度に不充分であった設備のうち、大部分は改良を加えられ、51年1月完成予定の質量分析器の完成をもってITS-1の最少限の設備は整備されたことになる。また加速電源や減速電源も高出力真空管による電流、電圧制御が可能となった。この間にいくつかのテーマをもった実験が行なわれ、現在10 cm ϕ のイオン源により26KV:8Aのビームを得ている。これらの詳しい報告は別にまとめる予定である。

ITS-1の建設に際して多くの方々の協力を得た。イオン源の構造に関しては工作課山本氏、浜野氏に、真空容器に関しては同じく工作課西口氏に負うところが多い。また大きいトラブルなく、イオン源、同用電源を製作された日新電機株式会社の担当者の方々に謝意を表す。最後に終始励まして頂いた森茂核融合研究部長に深く感謝します。

文 献

- 1) R. C. Davis et al. : ORNL-TM 4657
- 2) D. A. Aldcroft : CLM-P 414
- 3) R. Becherer : EUR-CEA-FC-788 1975
- 4) W. R. Baker et al. : LBL-2425

Appendix I 「リアクトルによる加速電源のレギュレーション」

加速電源の直流側の基本回路は第5図の様に、整流器、CRフィルター、限流抵抗、のあとにリアクトルが設けられている。そのインダクタンスは1.6 Hである。第6図の電流波形から放電破壊の際にリアクトルの両端に生じる電圧降下は

$$e = L \cdot \frac{dI}{dt} = 1.6 \times \frac{5 \text{ A}}{5 \times 10^{-4} \text{ sec}} = 1.6 \text{ KV}$$

となるが、これは電圧波形に現われた電圧降下がこのリアクトルによるものであることを示している。このことは負荷端に放電破壊が生じて過電流になろうとすると、破壊電流の起き上がりがリアクトルの電圧降下により抑えられることを意味している。必要とされる鉄芯の断面積は巻数を1400巻とすると

$$V \cdot \text{sec} = \frac{2.5 \text{ KV} \cdot 0.5 \text{ msec}}{1400} = 8.9 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{sec}$$

であるから、鉄芯の飽和磁束密度が1.5 Wb/m²の材料を使えば、59 cm²となる。

なお、放電破壊のときとは逆に、負荷電流が切れるとき、リアクトルには逆向きの誘起電圧が発生する。たとえば100 msecの間ビームを引出し、ビーム電流が切れるときには負荷端電圧は無負荷電圧以上にはね上がる。たとえば12 Aのビーム電流が500 μsecで切れるとすると、リアクトルによる誘起電圧は

$$1.6 \text{ H} \times \frac{12 \text{ A}}{10^{-4} \text{ sec}} = 38.4 \text{ KV}$$

にも達する。これが無負荷電圧に重畳されることになるので負荷端には60 KV以上の電圧がかかり得る。これを避けるためにリアクトルには逆電圧をおさえるようにダイオード回路が設けられていて600 Ωの抵抗で消費される。また更に、これと並列に放電ギャップを設け、負荷に対する2重の保護を施している。

Appendix II 「負電極印加電圧の評価」

負電極印加電圧は、空間電荷を考慮したイオンビームの計算機シミュレーションにより評価することができるが、ここでは、いかなる要素により決定されるものであるかを分析する。

最初にイオンビームを考慮しない真空場でのポテンシャル分布を考える。正電極電位 V_{acc} が25 KV、電極のビーム引出し孔直径が3.75 mm ϕ の時、電極間隔 d がそれぞれ4, 6, 8 mmの場合について、孔の中心軸上での最小ポテンシャル V_{min} が、負電極電圧 V_{dec} とともにどのように変化するかを数値計算により求めた(第A-1図)。この結果から、 V_{min} が負から正に

変わる負電極電圧 $V_{dec} = V_{crit}$ を曲線を外挿して求めると、次の結果が得られる。

$d = 4 \text{ mm}$ の時	$V_{crit} \cong -300 \text{ (V)}$
6 mm の時	-200
8 mm の時	-150

次に、イオンビームの空間電荷により、 V_{crit} がどのように変化するかを調べる。まず、半径 a でビーム強度分布が $f(r)$ の一定方向に流れる円筒対称な一次元イオンビームを考えると、径方向電界は、マックスウェルの式

$$\int \nabla \cdot \mathbf{E} \, dv = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = q/\epsilon_0$$

より、

$$E_r = \frac{1}{\epsilon_0 r} \int_0^r r f(r) \, dr$$

$$q = 2\pi \int_0^a r f(r) \, dr = \sqrt{\frac{m}{2e}} \frac{I}{\sqrt{V_{acc}}}$$

によって求めることができる。ここで、 m 、 e はそれぞれビームの質量及び電荷であり、 I はビーム電流である。この式より、径方向の電位差は次式により計算できる。

$$\Delta\phi = \int_0^r E_r \, dr$$

ただし、実際のビームの長さは有限であるので、積分の上限はビームの長さに比して十分小さくないと、上式は意味のないものになることに注意する必要がある。

今、半径 a にわたって一様なビーム ($f(r)=1$, $0 \leq r \leq a$) を考えると、そのビーム中心と周辺でのポテンシャル差 $\Delta\phi_1$ は、

$$\Delta\phi_1 = \frac{1}{4\pi k} \sqrt{\frac{I}{V_{acc}}}$$

で与えられる。ここで $k = \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} = 0.12256 \times 10^{-6}$ である。しかし、実際のビームの半径は負電極孔半径 b に比して小さいものと考えられる。この効果を入れると、ビーム中心と負電極孔内面とのポテンシャル差 $\Delta\phi_2$ は、

$$\Delta\phi_2 = (1 + 2 \ln(b/a)) \Delta\phi_1$$

で与えられる。また、ビーム強度分布が放物線分布とすると、すなわち、

$$f(r) = -\frac{1}{a^2} (r^2 - a^2) \quad 0 \leq r \leq a$$

を仮定すると、ビーム中心と負電極孔内面のポテンシャル差 $\Delta\phi_3$ は、

$$\Delta\phi_3 = \frac{3}{2} \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a}\right) \Delta\phi_1$$

となる。

さらに、ソースプラズマの密度勾配も考慮すると、電極孔の数で平均した電流 I より、電極中心の電極孔からの引出し電流 I_0 の方が大きくなり、その結果、電極の中心部の方が電子の逆流が生じやすくなる。今、引出し電流密度分布を、

$$J = J_0 \left(-\frac{r^2}{2R^2} + 1\right) \quad 0 \leq r \leq R$$

と仮定すると、 $I_0 = 4I/3$ となる。この効果を考慮すると、電極中心の電極孔でのビーム中心と負電極孔側面とのポテンシャル差 $\Delta\phi_4$ は、次式によって評価できる。

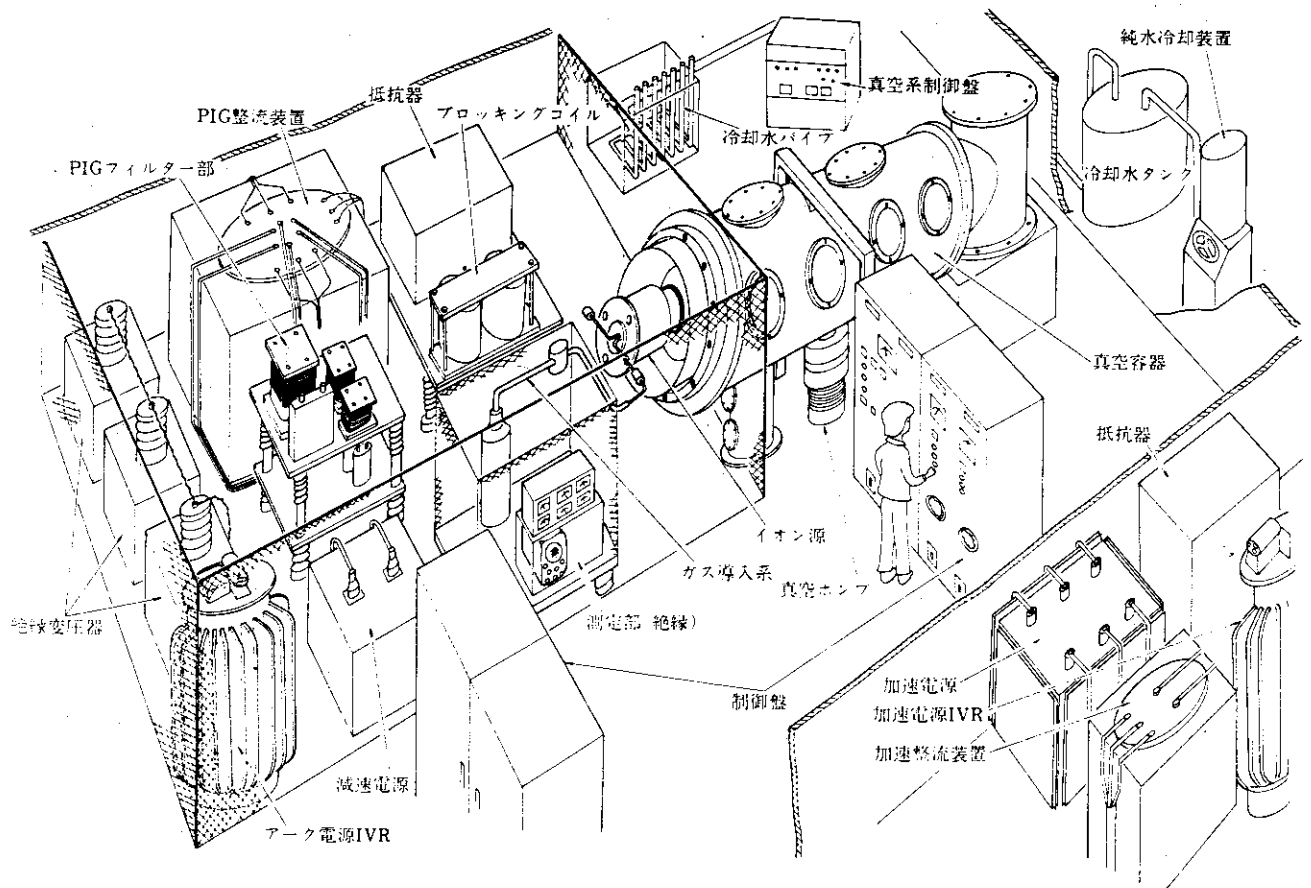
$$\Delta\phi_4 = 2 \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a}\right) \Delta\phi_1$$

以上の結果から、負電極印加電圧は、第 A-1 図を用いて $|V_{\min}| = \Delta\phi_4$ となるような V_N を求めればよいことがわかる。 $\Delta\phi_4$ は、ビームの収束性に強く依存し、たとえ同じ強さのビーム電流を引出しているのであっても、そのビームの形状、強度分布に大きく左右されることがわかる。今、典型的な例として $\Delta\phi_4 \approx 4\Delta\phi_1$ とすると、221ヶの $3.75\text{mm}\phi$ 電極孔からの引出し電流が 4 A 及び 8 A の場合、 $|V_{\text{dec}}|$ は下記の値以上にする必要がある。

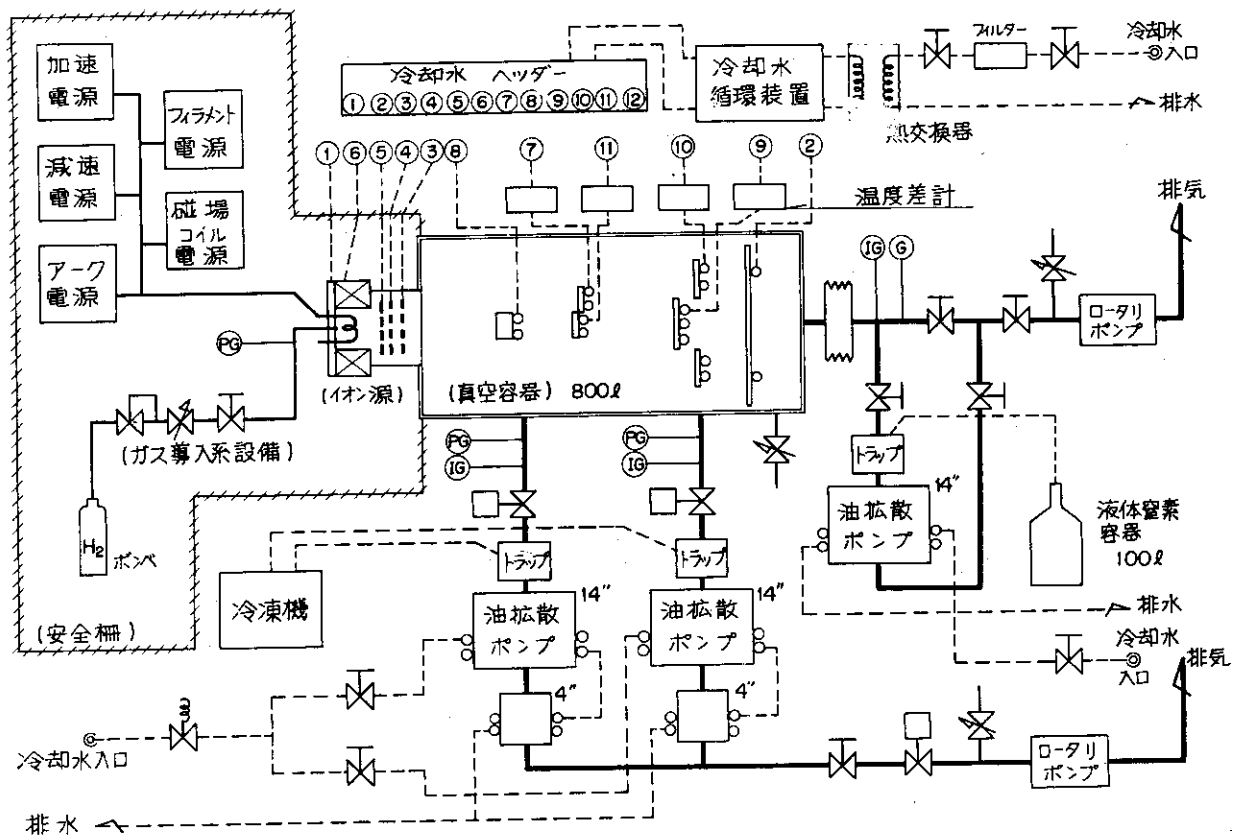
引出し電流	電極間隔	負電極印加電圧
4 A	4 mm	870 V
	6	720
	8	640
8 A	4	1370
	6	1160
	8	1060

この結果は、第 10 a 図に示された実験結果とよく一致している。しかしながら、 V_{dec} は引出し電流や電極間隔ばかりでなく、ビーム形状、収束性、密度分布等に大きく左右されるので、負電極印加電圧には十分な余裕をみておく必要がある。

ビーム入射加熱予備実験装置 (ITS-1) の鳥瞰図

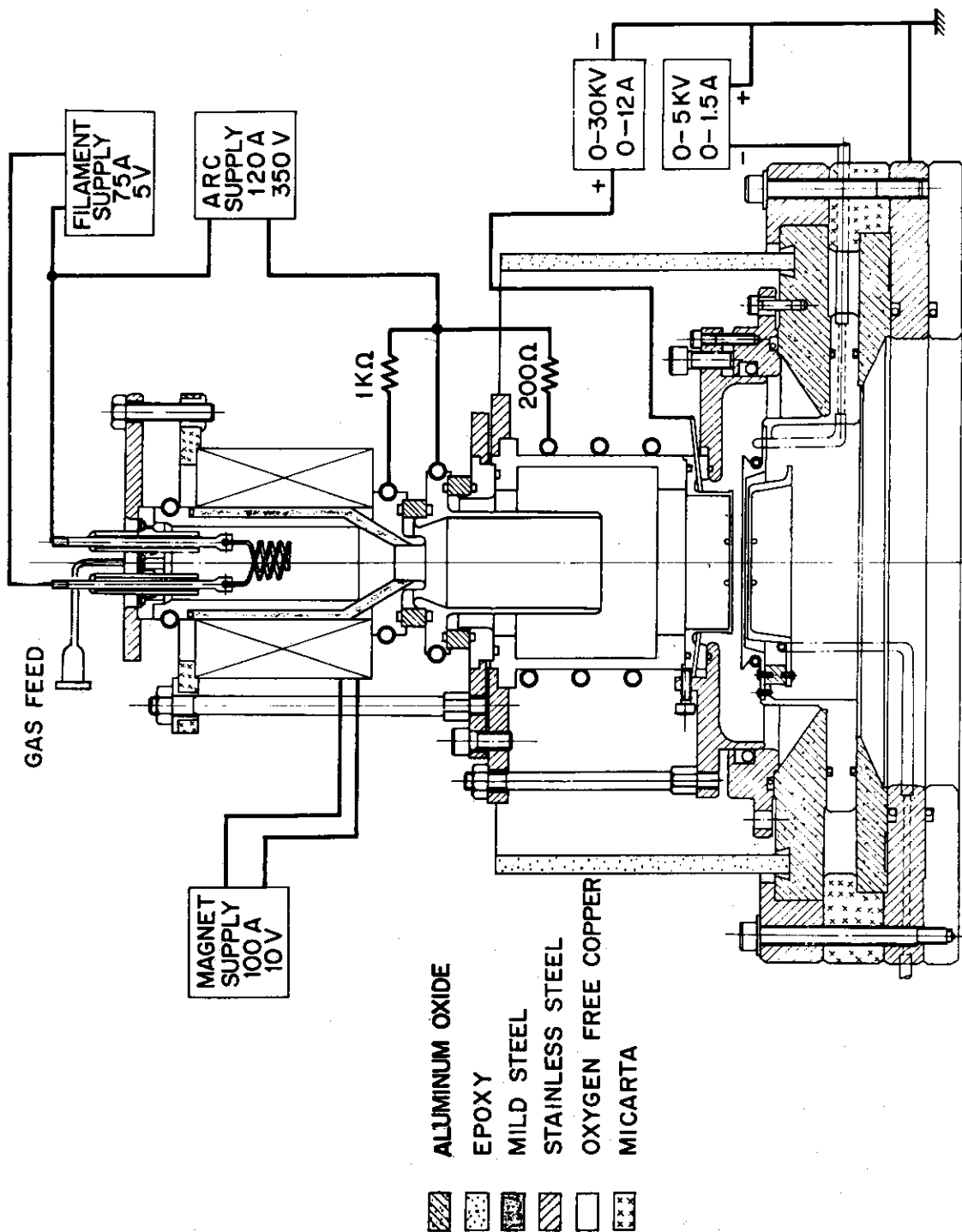


第1a図 ITS-1の鳥瞰図

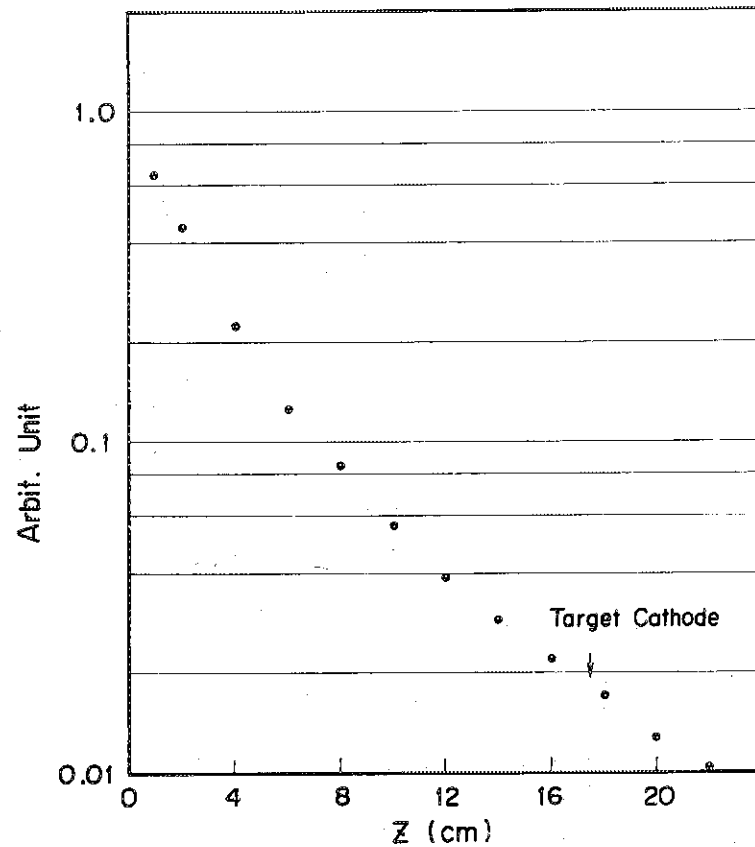


- | | | | |
|-------|----------------|-----|---------|
| ① --- | PIG | --- | 空圧バルブ |
| ② --- | シールド | --- | ストップバルブ |
| ③ --- | 接地電極 | --- | 電磁バルブ |
| ④ --- | 負電極 | --- | 圧力調整バルブ |
| ⑤ --- | 正電極 | --- | リークバルブ |
| ⑥ --- | 磁場コイル | --- | ベローズ |
| ⑦ --- | 可動カロリーメータ (S) | | |
| ⑧ --- | ファラディカップ | | |
| ⑨ --- | 固定カロリーメータ (外側) | | |
| ⑩ --- | 固定カロリーメータ (内側) | | |
| ⑪ --- | 可動カロリーメータ | | |
| ⑫ --- | 予備 | | |

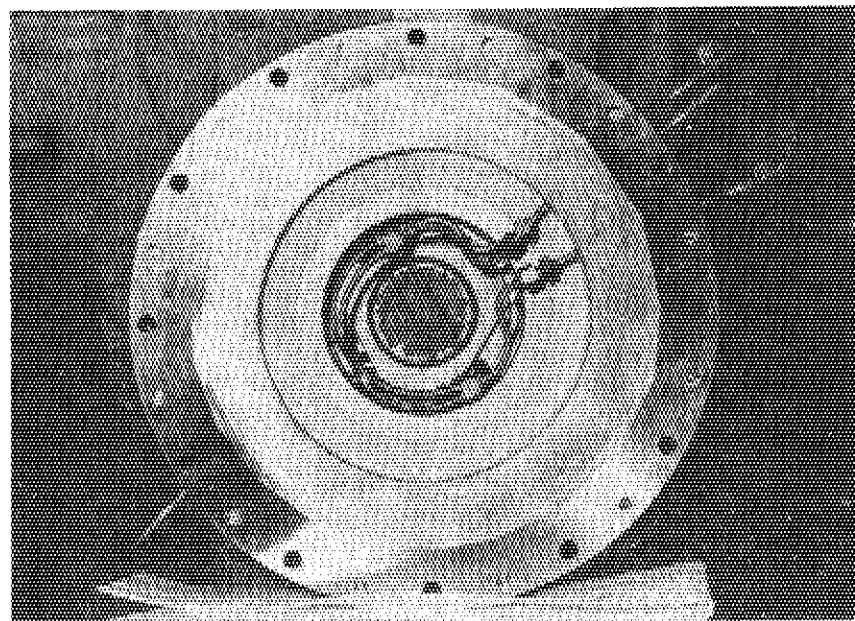
第1b図 ITS-1の構成図



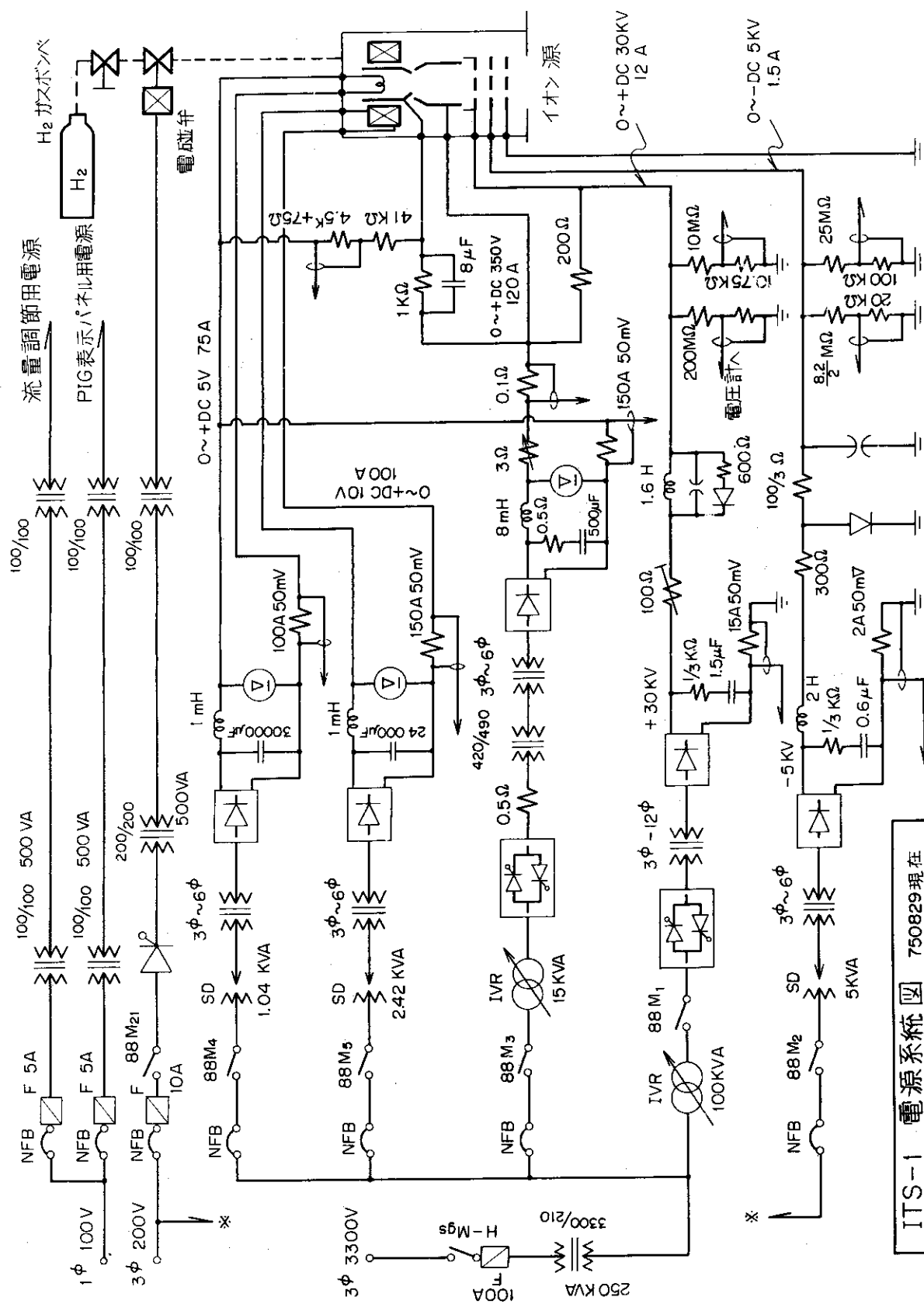
第2図 Model-I型デュオピガトロンの



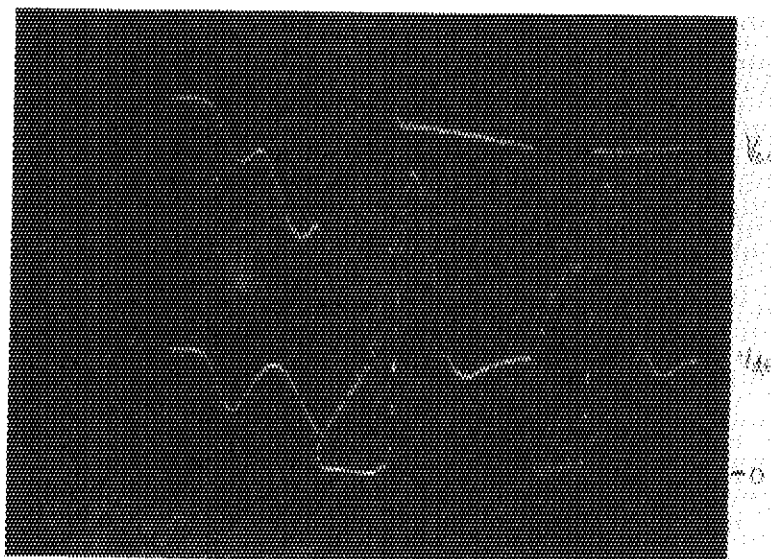
第3図 ソースコイルを励磁したときの磁束密度の軸方向成分 B_z の軸方向分布。 $z=0$ は中間電極（ノズル）の開口部端面である。
ターゲットカソード（正電極）は矢印の位置にある。



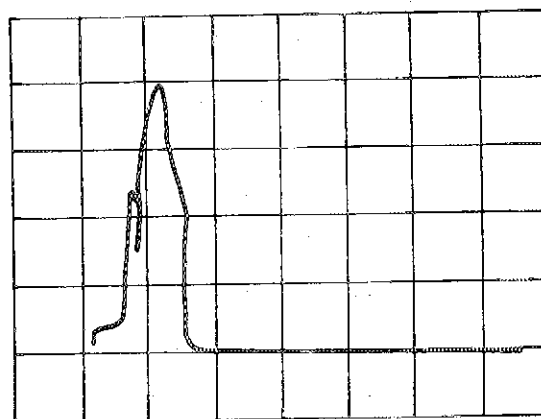
第4図 イオン源引出し電極と冷却パイプ。接地電極を真空容器側からみた写真である。



第5図 ITS-1 電源の構成図

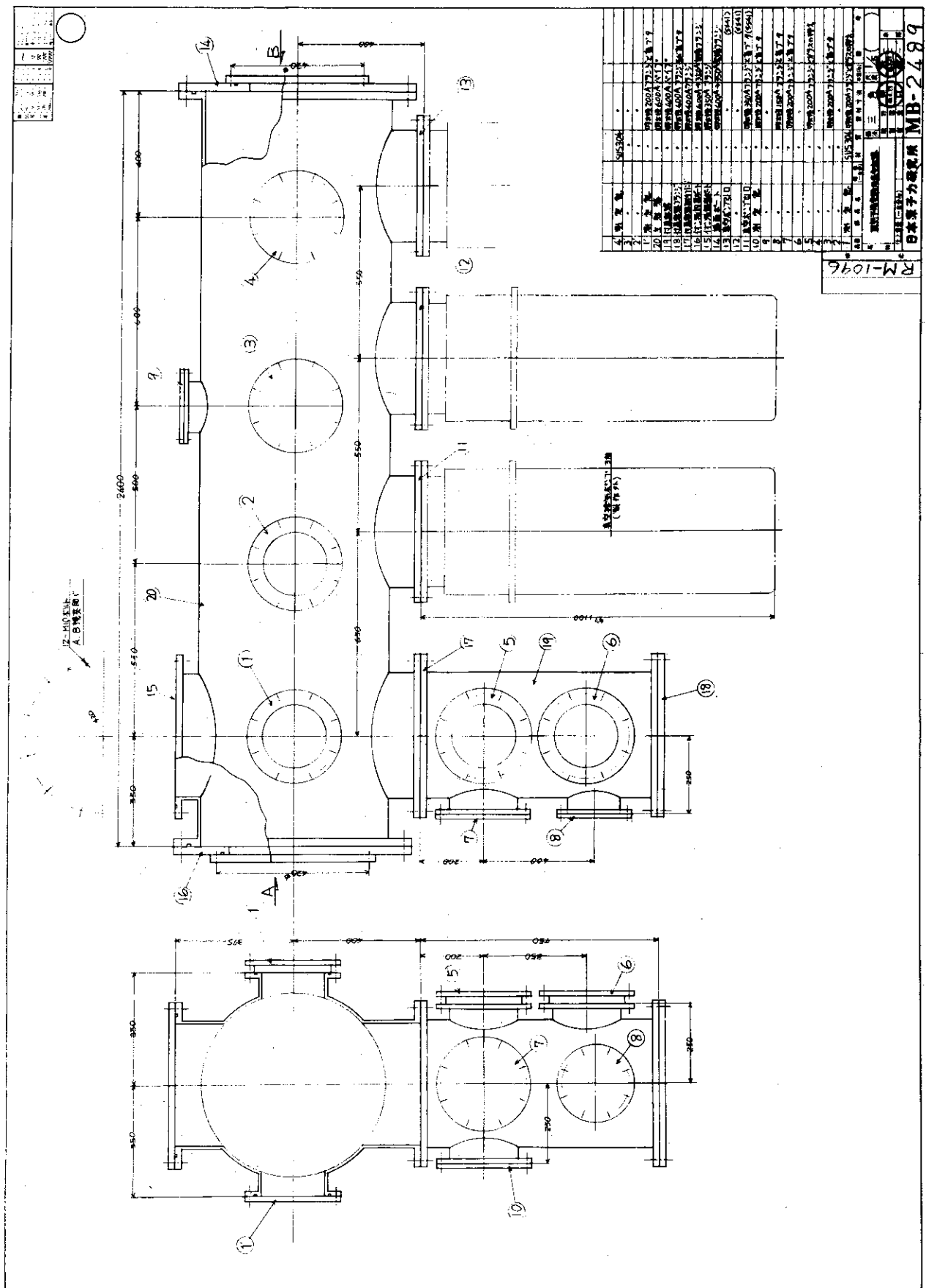


第6図 放電破壊時における加速電源電圧 V_{acc} と減速電源電圧 V_{dec} の変化。上のトレースが V_{acc} , 下のトレースが $-V_{dec}$ である。アーク放電開始後約 40 msec の間に2度放電破壊が生じ、いずれも 0.5 msec の時間内に復帰していることが判る。 $-V_{dec}$ が放電破壊が切れる際に逆にふれるのはリアクトルにクロバダイオード回路がないためである。

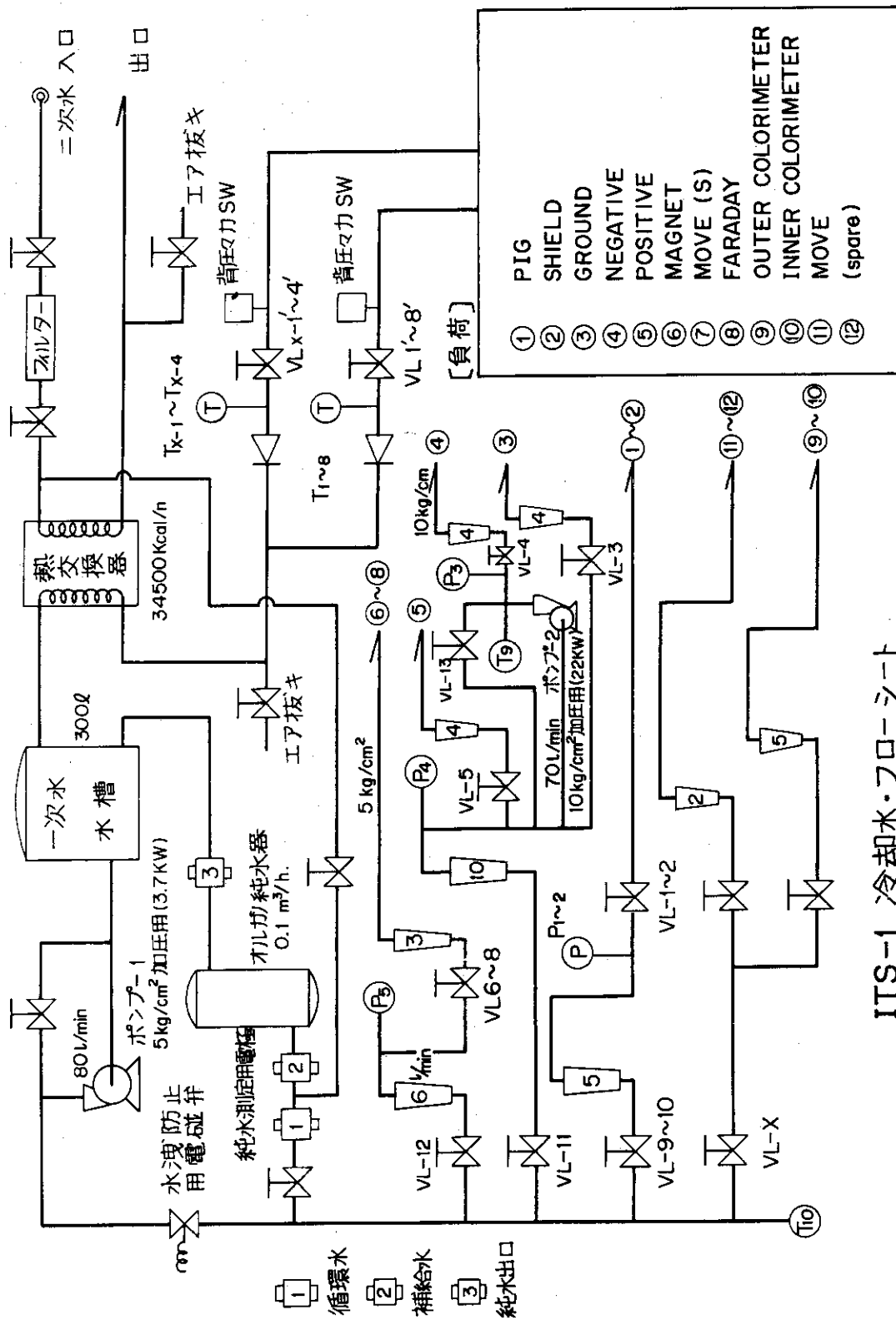


10 Amp/div. 20 ms/div

第7図 過電流時における加速電源電流 I_{acc} の時間変化。



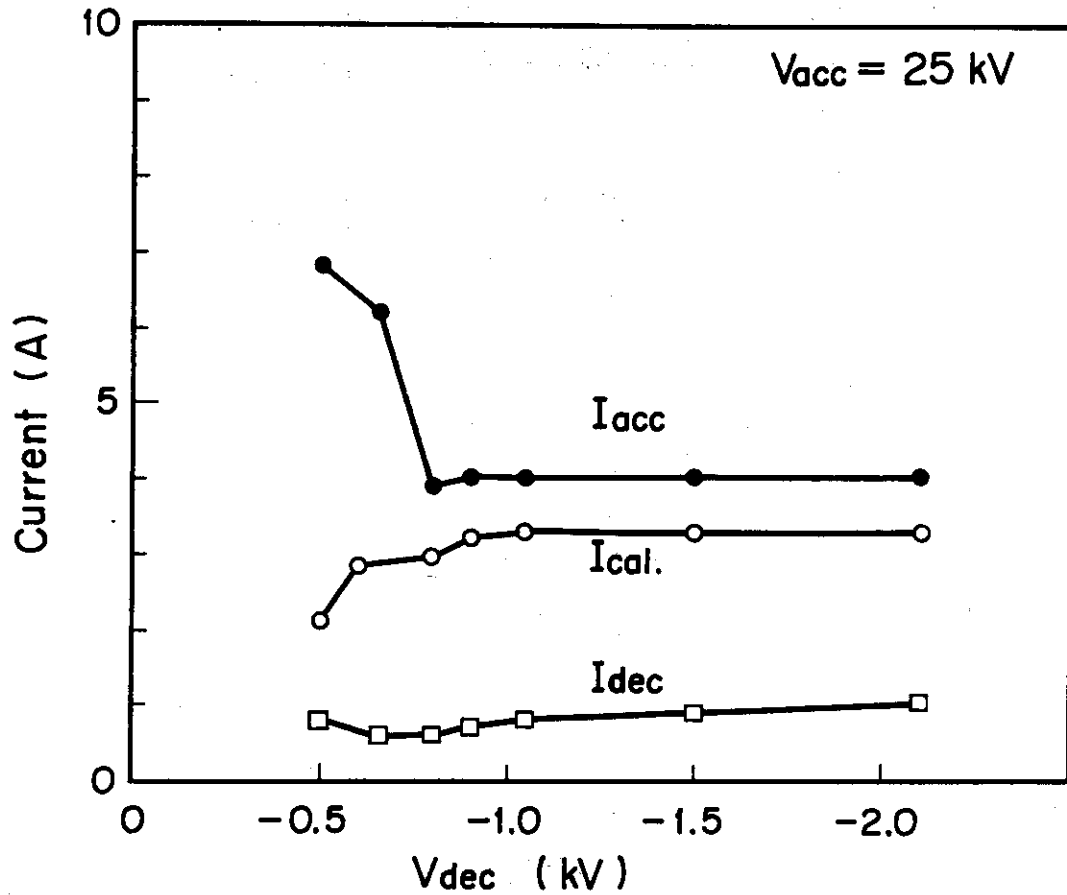
第8図 ITS-1の真空容器



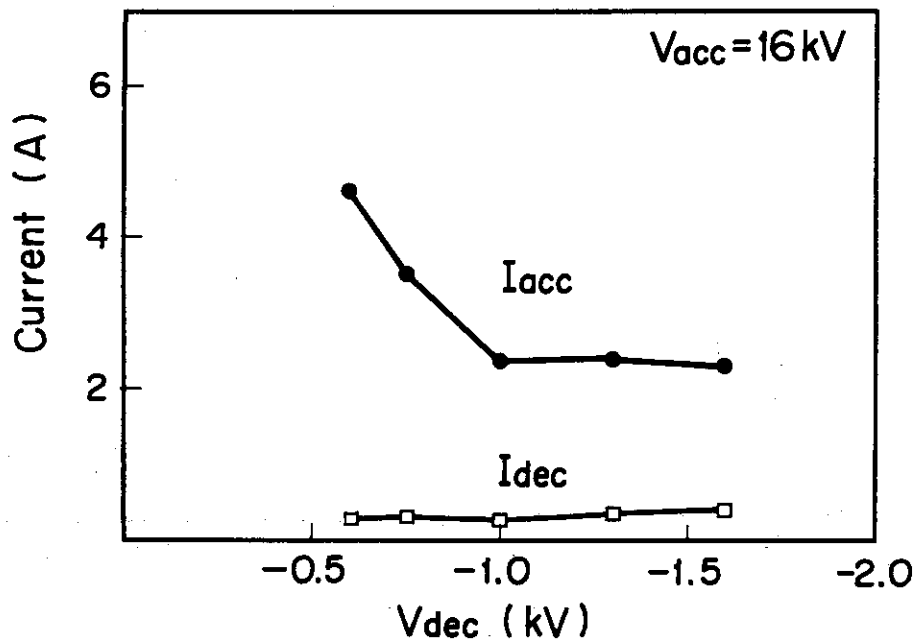
ITS-1 冷却水・フロ-シート

750825

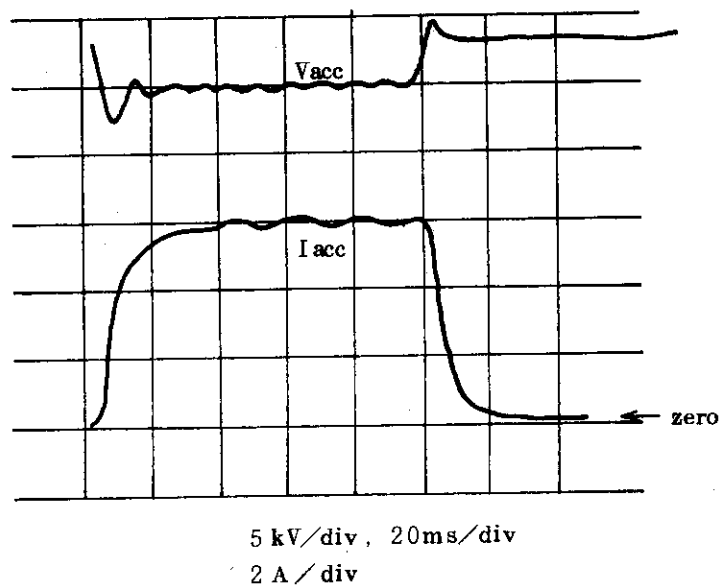
第9章 I T S - 1 の純水冷却系



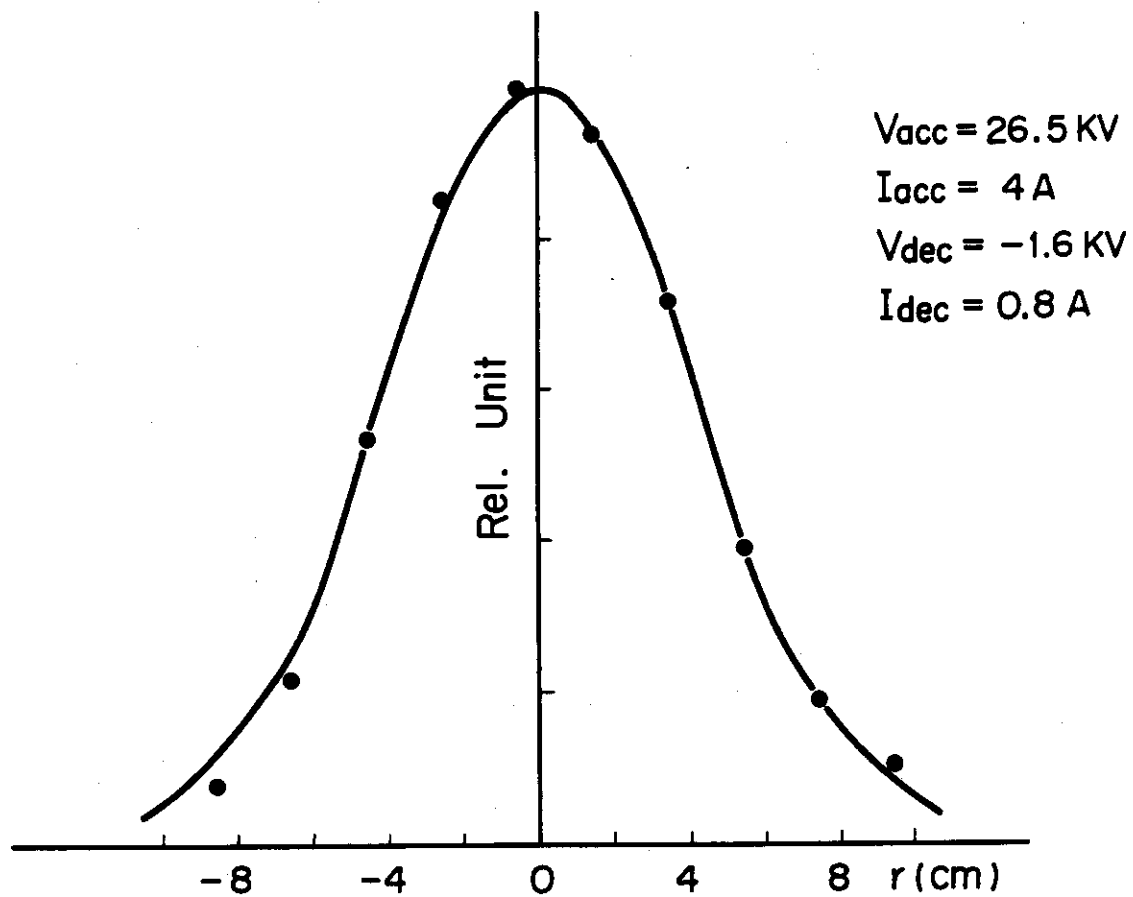
第10 a 図 負電極電位 V_{dec} を変化させたときの加速電源電流 I_{acc} , 減速電源電流 I_{dec} , 及びターゲットに入るパワーから求めた等価電流 I_{cal} の変化。 $V_{acc} = 25 \text{ KV}$



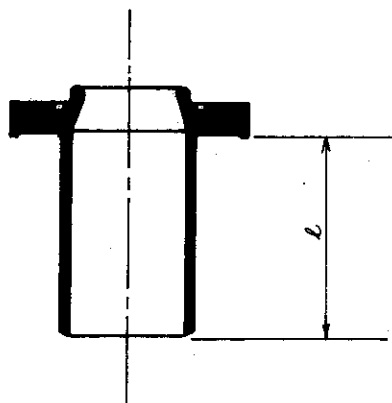
第10 b 図 加速電圧が 16 KV のときの V_{dec} に対する I_{acc} , I_{dec} の変化。



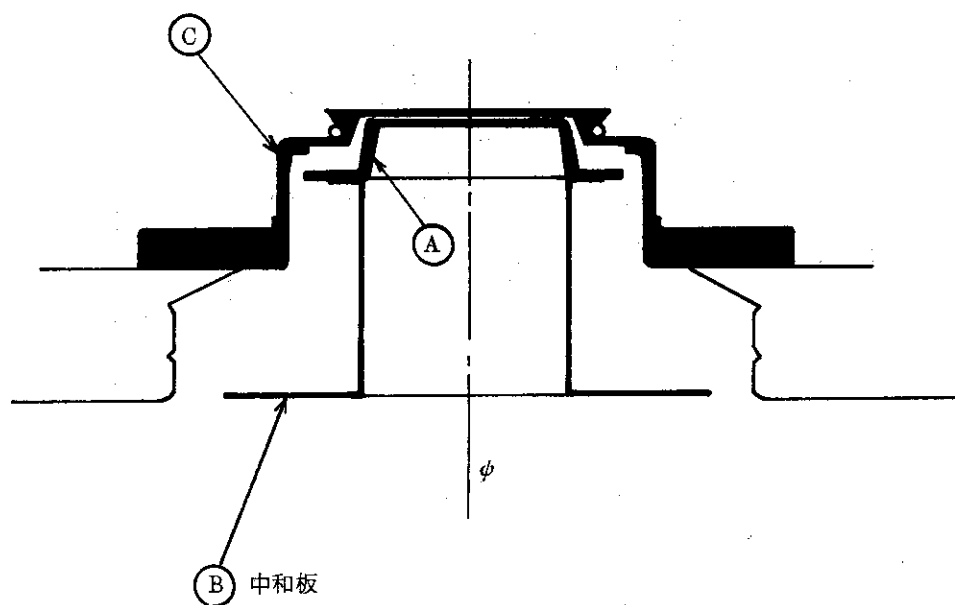
第 1 1 図 パルス幅が 100 msec のときの加速電源電圧 V_{acc} と電流 I_{acc} の波形



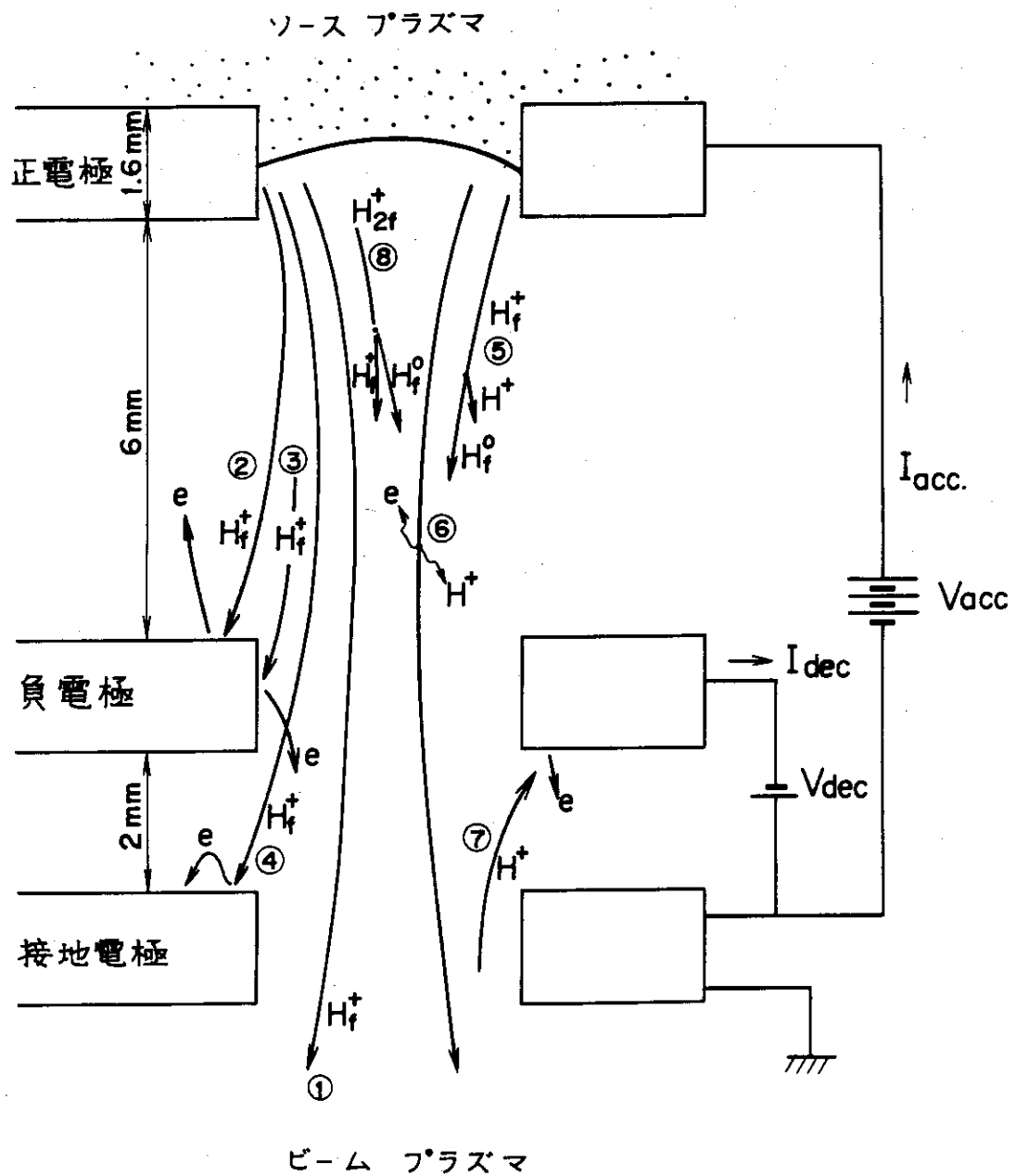
第 1 2 図 可動カロリメータで測定したビームの径方向分布。測定位置は引出し電極面より 1.5 m である。



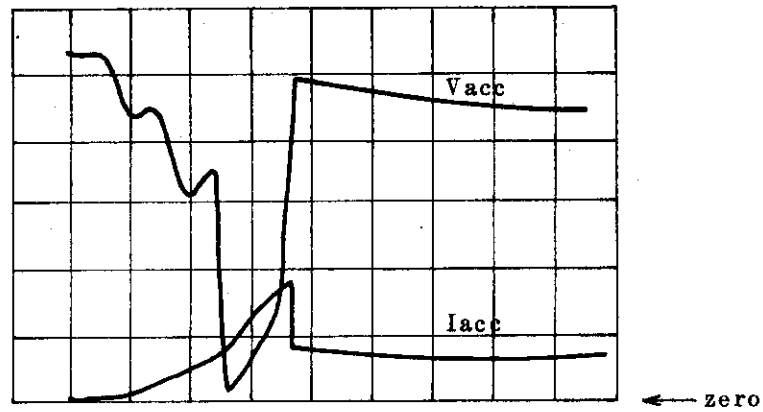
第13図 アノードの形状。長さ l を9 cm, 7 cm, 4.5 cmの3種類のものを試みた。



第14図 接地電極と中和板。接地電極④の下流に中和のための筒⑤を設け、④のビーム引出し孔以外の部分から負電位にある電極③へ直接当るイオンを消滅させた。

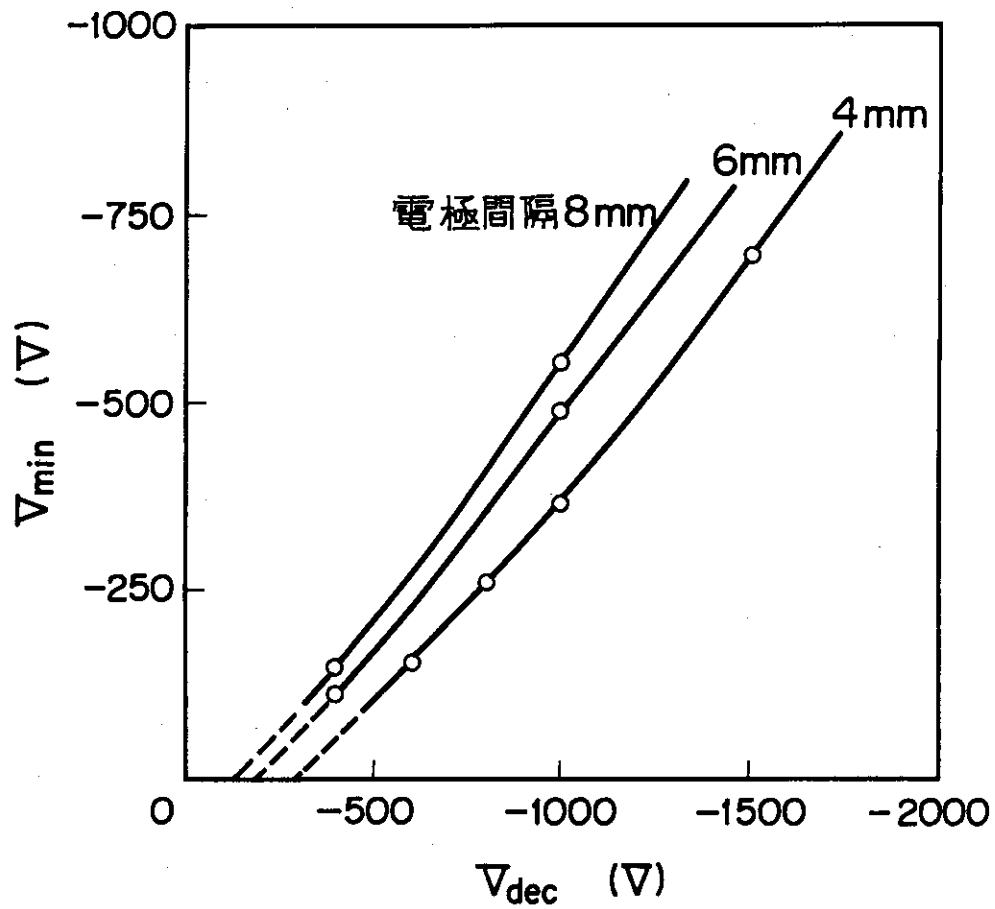


第15図 電極とビームの相互作用。引出し孔の一つについて概念的に書いたものである。



V_{acc} : 5 kV/div
 I_{acc} : 5 A/div
 時間軸 : 0.5 ms/div

第 16 図 ビームパルス ON の直後に発生した放電破壊時における加速電源電圧 V_{acc} と電流 I_{acc} の変化の様子。リアクトルにより放電破壊は約 0.5 msec 後終了している。



第 A - 1 図 真空場での負電極印加電圧 V_{dec} と軸上での最小ポテンシャル V_{min} の関係