

核融合装置「ヘリオトロンE」用中性粒子入射装置の技術開発

Engineering Aspects of Neutral Beam Injector for "Heliotron E" Facility

京都大学で提案されたヘリオトロン型核融合装置は、優れた特徴がある。その一つに、中性粒子入射による加熱効率が良いことが挙げられている。今回、非軸対称系トーラスとして世界最大級の「ヘリオトロンE」装置が完成し、ジュール加熱試験後、中性粒子入射装置の取付けが完了した。

この装置は、液体ヘリウム冷凍機により、液体ヘリウムを循環する本格的なクライオポンプシステムをもっていること、イオン源が効率の良いバケットタイプであること、シャッタと弁を兼ねた高速弁を用い狭い空間が利用できたことなどの特徴がある。

本稿は、この装置の技術的問題の概要について述べ、合わせてこの装置の試験結果の一部を紹介する。

宇尾光治*	Kôji Uo
飯吉厚夫*	Atsuo Iiyoshi
大引得弘*	Tokuhiro Oobiki
磯部昭二**	Shôji Isobe
上出泰生***	Taisei Uede
橋本 勲***	Isao Hashimoto
細見信行****	Nobuyuki Hosomi
谷口 昭*****	Akira Taniguchi

1 緒 言

京都大学で昭和30年代初期に提案されたヘリオトロン型閉じ込め磁場配位を用いた核融合実験装置は、画期的な特徴をもっているため、ヘリオトロンA, B, C, D, DMを経て、今回E装置本体が完成した。ヘリオトロン型核融合実験装置は、(1)パルス炉でなく定常炉となれること、(2)高 β のプラズマが閉じ込め得ること、(3)大きなアスペクト比が得られ付属装置の設置、分解及び修理が容易なこと、などの優れた特徴¹⁾のほかに(4)中性粒子入射に対しロスコーンの範囲が狭く加熱効率が良いという大きな特徴²⁾がある。

E本体は昭和55年4月完成し、直ちに実験に入り所期の特性を確認した。中性粒子入射装置は第1次計画として、E本体の周囲に3基(1基に対しイオン源2台)が昭和56年3月取り付けられ、目下調整運転中である。

なお、1基は本体取付けに先立ち単独で試験を行ない、所期の特性を確認した。

本中性粒子入射装置は、我が国で最大の出力をもっているばかりでなく次のような特徴がある。

- (1) 液体ヘリウム冷凍機により、液体ヘリウムを循環する本格的なクライオポンプシステムをもっている。このシステムで運転されている中性粒子入射装置は、本装置が筆者の知る限りでは世界で最初のものである。
- (2) イオン源はサマリウムコバルト系強力永久磁石を用いた、いわゆるバケットタイプである。
- (3) 本体と本装置の間の空間が極めて狭いため、この間に設けられる弁はシャッタと弁を併用した高速弁が設けられた。

本稿はこの中性粒子入射装置の技術的概要として、その仕様、構造、試験結果などを説明し、本技術分野で画期的な進歩をもたらした新技術について述べる。

2 中性粒子入射装置の概要

装置本体部のプラズマ閉じ込め空間を形成する真空容器に多数設けられているポートのうち3個を利用し、中性粒子入

射装置3基が取り付けられた。このとき、補助的に使用されたトロイダルコイルは、中性粒子入射装置の取付けに邪魔にならぬように移動された。図1に本装置を取り付けた「ヘリオトロンE」の外観を示す。

本装置の諸元は表1に示すとおりである。本装置1基にはイオンビーム出力1.05MW(30kV, 35A)のイオン源2台が取り付けられた。したがって、全イオンビーム出力は6.3MWである。各種効率を加算して、入射エネルギーは全体で2.7MWとなる。

本装置はイオン源、イオン源用電源、真空排気系である真空容器及びそれに付属する装置、液体ヘリウム冷凍装置、制御装置から構成される。これらについては、個々に説明するが、一括してその作用の概略を述べると次のようになる。

このイオン源2台ごとにイオン源用電源1セットが設置運転され、イオン源からイオン粒子が発射される。イオン源の

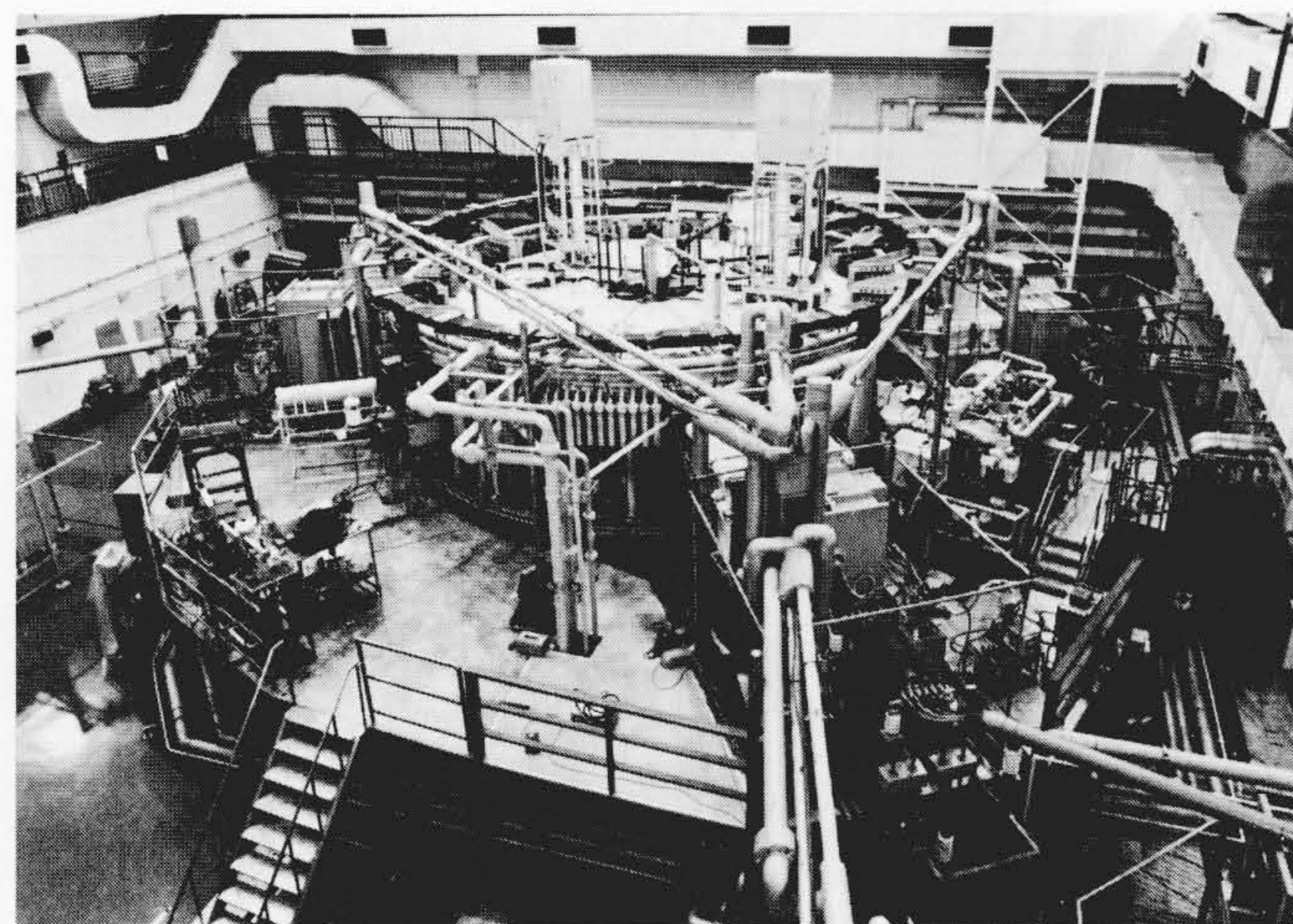


図1 「ヘリオトロンE」本体に取り付けられた中性粒子入射装置
我が国で完成した核融合装置の中性粒子入射装置では、最大規模のものである。

* 京都大学ヘリオトロン核融合センター 工学博士 ** 日立製作所国分工場 工学博士 *** 日立製作所国分工場 **** 日立製作所笠戸工場
***** 日立製作所関西支店

表1 「ヘリオトロンE」用中性粒子入射装置諸元 中性粒子入射装置の主な諸元を示す。

諸	元	数 値
プラズマパラメータ	密 度	$\sim 5 \times 10^{19}/\text{m}^3$
	電子温度	$\sim 1 \text{ keV}$
	容 積	$\sim 1.7\text{m}^3$
イオンビーム出力	全 体	$(30\text{kV} \times 35\text{A} \times 6) = 6.3\text{MW}$
入 射 角 度	—	$0^\circ \cdots \cdots 1 \text{ 基}, 28^\circ \cdots \cdots 2 \text{ 基}$
焦 点 距 離	ビームレット	$0^\circ \cdots \cdots 3.96\text{m}, 28^\circ \cdots \cdots 3.3\text{m}$
ビ ー ム 発 散	—	$< 1.2^\circ$
効 率	中性化効率	65%
	ドリフトチューブ効率	95%
	入射効率	$0^\circ \cdots \cdots 38\%, 28^\circ \cdots \cdots 46\%$
入 射 エ ネ ル ギ ー	全 体	2.7MW

イオン出口には、イオンの電荷交換のため、中性化セルが設けられている。本セル中のガスとイオンが電荷交換され中性粒子となる。イオン源、中性化セルのイオンが共に本体磁場の影響を受けぬように磁気シールドされている。

電荷交換が行なわれなかったイオン粒子は「ヘリオトロンE」本体磁場の影響を受けて曲げられ、本装置の真空容器内に設けられたビームダンプに当たり低速中性ガスとなる。このガスは中性粒子に衝突し、再び中性粒子を再電離すなわちイオン化するため、極めて短時間に排気しなければならず、大きな排気速度をもつクライオポンプが各装置の真空容器に設けられる。クライオポンプ1基は $1.5 \times 10^5 \text{ l/s}$ という高排気速度である。なお真空容器1基ごとに500 l/sのターボ分子ポンプ、ターボ分子ポンプ3基を一括してメカニカルブースタポンプ、油回転ポンプなどの補助排気装置で荒引き排気され

表2 イオン源とその電源の仕様 イオン源関係の仕様をまとめて示した。

項 目		仕 様			
イオン源1台当たり ビームエネルギー		30kV—35A—200ms (目標)			
電 極	種 類	加速, 減速, 接地電極 各1個(イオン源1台当たり)			
	直 径	電極の有効直径 220mm			
	ビーム レット	径 3.8mm, 1,765穴(電極1枚当たり), 発散角 $< 1.2^\circ$			
	焦 点	ビーム焦点 3.3m(2基分), 3.96m(1基分)			
	材 質	モリブデン			
	冷 却	電極支持台水冷			
永 久 磁 石	磁束密度	永久磁石面で3,700G			
	材 質	サマリウムコバルト系			
フィラメント	寸 法	1.5mm直径 12本			
	材 質	タングステン			
	支 持	水冷式 電流導入端子			
磁気シールド	材 質	電磁軟鉄			
入 射 口		420mm×230mm×2, 175mm直径×1			
イ オ ン 源 電 源	項 目	加速電源	減速電源	アーク電源	フィラメント電源
	出力電圧(可変)	10~30kV	—1~—5kV	50~150V	1~13V
	出力電流(可変)	44A×2	5A×2	400A	650A(ピーク1,000A)
	電 圧 変 動 率	3%以下	3%以下	5%以下	3%以下
	設 定 精 度	±3%以下	±3%以下	±3%以下	±3%以下
	リ ッ プ ル	±1.5%以下	±1.5%以下	±1.5%以下	±1.5%以下
	パルス幅(可変)	10~200ms	10~200ms	10~200ms	3~10min
	パルス繰返し時間	3min	3min	3min	3min
	パルス立上り時間	500μs以下	500μs以下	500μs以下	—
	パルス立上り時間	〃	〃	〃	—
	高速遮断時間	50μs以下	50μs以下	200μs以下	—
	安定化方式	真空管	真空管	コンデンサ+サイリスタ	サイリスタ
	ソフト立上り	—	—	—	1~5s可変
	サ ー ジ 保 護	あり	あり	あり	あり

ている。クライオポンプ3基は、50W液体ヘリウムなど冷凍機により液体ヘリウムが循環されている。

また、真空容器内には差動排気のための仕切板、ビームリミッタ、スパッタシールド、カロリメータなどが設けられ、本体と真空容器の狭い空間には高速弁が設置され、中性粒子入射前後の本体と本装置との間の導通、及び遮断を行なう。

3 イオン源

イオン源1基の仕様をまとめると表2に示すとおりである。イオン源の外観を図2に、断面を図3に示す。本イオン源はバケットタイプと言われるもので、別名をマッケンジータイプとも言われ、米国で提案され、英国で開発されたものである²⁾。強力なサマリウムコバルト系の永久磁石を使用し、これにより生ずる多極磁場でプラズマを閉じ込めることになり、イオン源のプラズマ室の壁にプラズマが衝突しないように守っており、構造は簡単である。永久磁石は強力な吸引力があり組立てが困難であるため、イオン源の外壁の周辺に浅い溝を作ること(特許出願中)により、これをガイドとして組み立てられ、支持金具で抑えた。マグネットの配列を決定するに際し、磁束分布を電子計算機プログラムで計算した。イオン源製作後、実際に磁束計で測定したが計算値と実測値がほとんど一致した。

フィラメントは丸状タングステンの成形品であり、これの電流導入端子は純水による直接冷却方式である。

加熱されたフィラメントから熱電子が放出される。フィラメントとプラズマ室の間のアーク放電で、更にガスは電離され、プラズマ化する。プラズマはプラズマ室の永久磁石の多

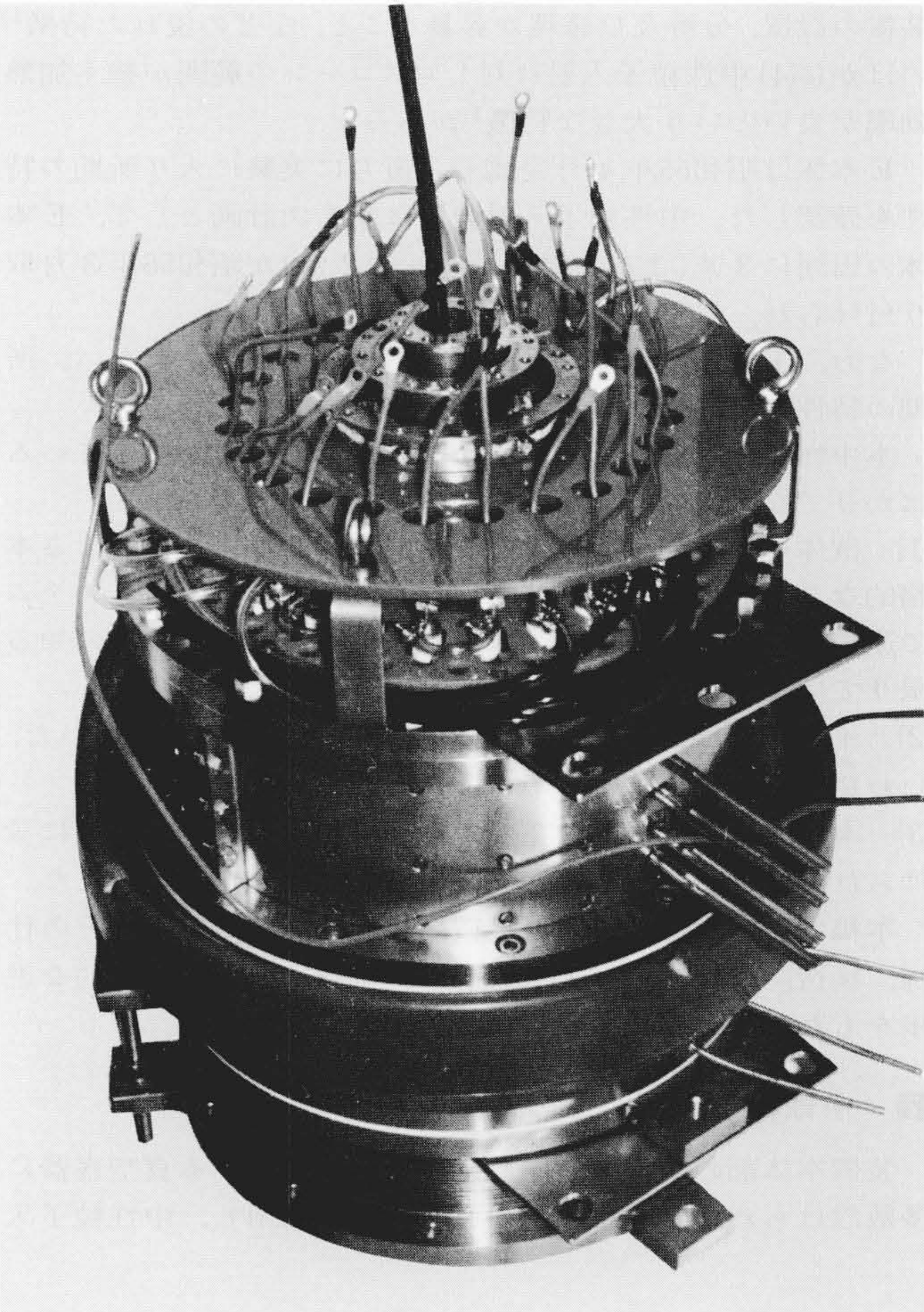
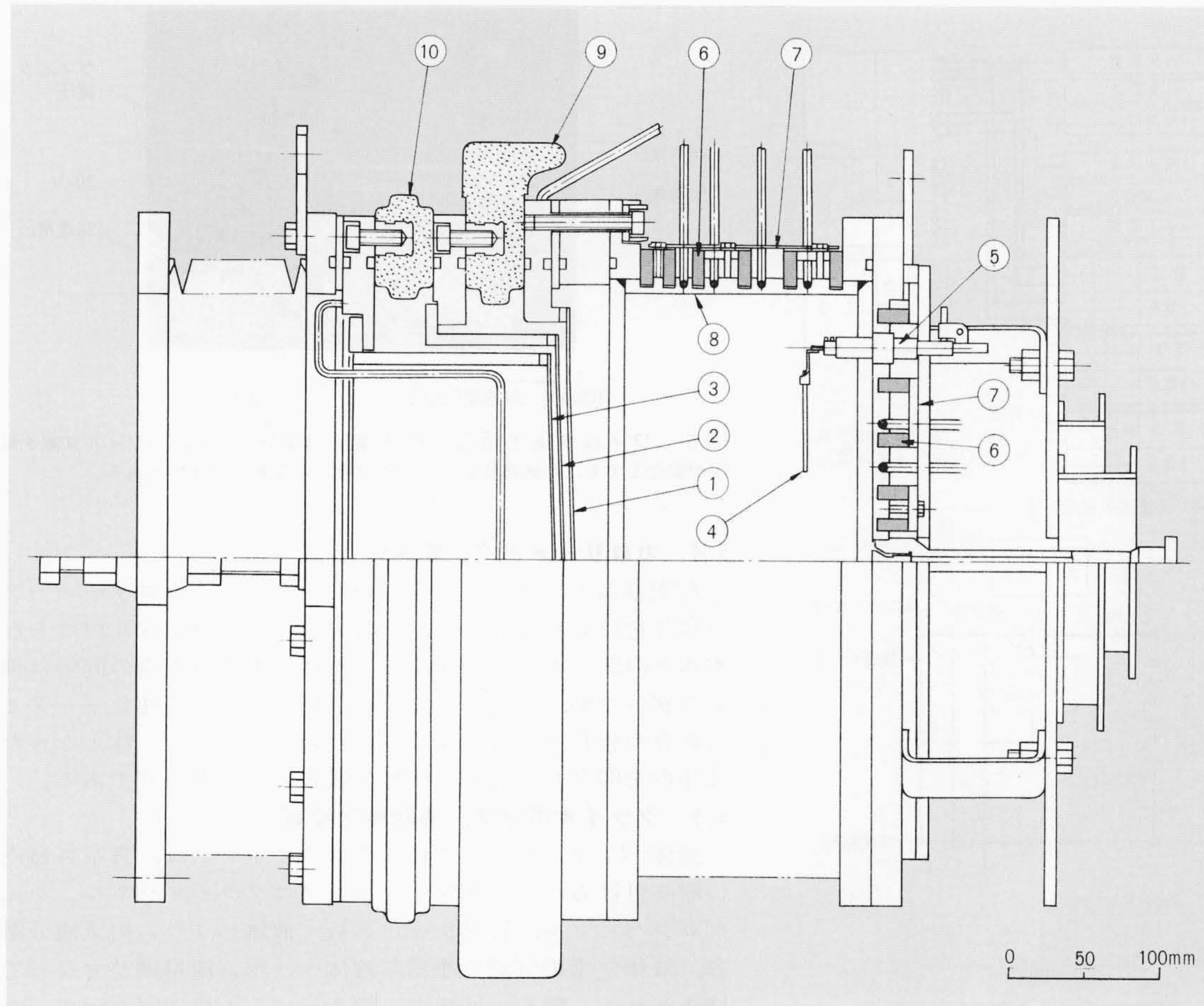


図2 イオン源外観 イオン引出し側が下部に見える。



No.	名 称
①	加 速 電 極
②	減 速 電 極
③	接 地 電 極
④	フィラメント
⑤	電 流 導 入 端 子
⑥	永 久 磁 石
⑦	永久磁石支持具
⑧	プ ラ ズ マ 室
⑨	絶 縁
⑩	絶 縁

図3 イオン源構造
簡単な構造であることが分かる。

極場によりプラズマ室の内壁に衝突できないようになっている。プラズマからイオンが加速電極の加速電圧により引き出され、加速される。減速電極にはマイナスの直流電圧が印加されており、逆流する電子を抑制する。

電極は加速、減速、接地電極から構成され、1.5～2.0mm厚みのモリブデン板からできている。加速電極面から約3m先に中性粒子ビームの焦点が結ばれるように、各電極のアパーチャ孔がNCマシン(数値制御工作機械)により加工された。その焦点の確認は各穴に挿入したピンの三次元の位置を三次元測定器で測定し、その測定値から計算して焦点位置を確認(特許出願中)した。

4 イオン源電源

イオン源電源は加速、減速、アーク、フィラメントの各電源から構成され、図4(a)はその電源系統図³⁾である。表2の中にそれらの仕様も取りまとめ示してある。

4.1 加速電源、減速電源

加速電源は、図4(b)に示すように加速電圧制御系と保護のためのイグナイトロンによるクローバスイッチから構成されている⁴⁾。

電源は330MVAの発電機から供給され、それが規定の電圧変動範囲で変動しても、加速電極に印加される電圧は一定に制御され、かつ電極間で放電が起こった場合、直ちに電圧を遮断して、後続の放電電流を遮断し電極を保護するという制御も行なわれる。これらの制御は真空管EIMAC製Y676により行なわれる、すなわち加速電圧の保持はコントロールグリッド、スクリーングリッド両者の調整により、加速電圧の遮断はコントロールグリッドの電圧を増し、かつスクリーングリッドの電圧を遮断して、この放電電流を遮断する。これら

の制御は光により行なわれる。

電極間放電電流の遮断に万一失敗した場合、クローバスイッチを動作させて保護する。

また、放電による高周波分が他の装置に影響を与えぬように、サージブロックコアにより吸収する⁵⁾。

図5はフィルタ端子電圧と加速電圧の関係を実測したものである。フィルタ端子電圧は同図に示すとおりである。フィルタ端子電圧が変動しても、加速電圧の変動は少ない。

減速電圧は真空管により調整され、減速電極に印加されている。

4.2 アーク電源、フィラメント電源

アーク電源は図4(c)に示したような構成である^{6),7)}。サイリスタブリッジ回路の調整によりアーク電圧は一定に保たれる。アーク電流は加速電圧の印加状況に応じて供給、遮断され、かつ電極間放電が発生すると遮断しなければならない。この高速開閉制御にはGTO(ゲートターンオフサイリスタ)が用いられる。図4で負荷と並列にGTO2を設置し、負荷通電前にこれに通電しておく。負荷通電開始時はGTO1を点弧しGTO2を遮断して、GTO2の電流を負荷に転流する。出力電圧の変動は少ない。

フィラメント電源は始動時にはサイリスタによるソフトスタートを行ない、常時は定電圧制御である。

5 真空排気系

真空排気系に含まれる装置の仕様は表3に示されている。

5.1 中性化セル

イオン源からのイオンビームは中性化セルを通過することにより、荷電交換で中性化される。イオンビームの中性化効率は、中性化セル内のガス圧とイオンビームの加速電圧によ

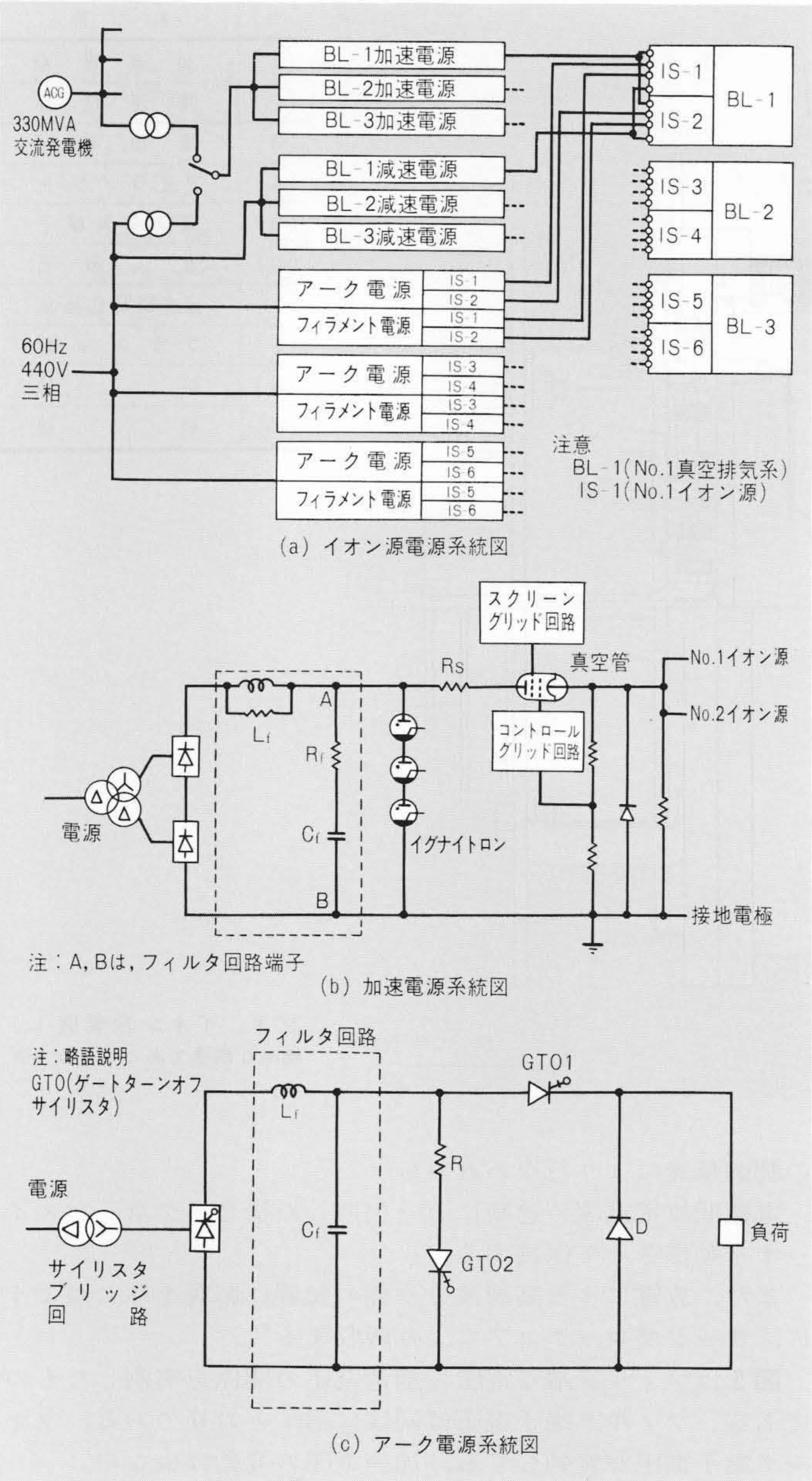


図4 イオン源電源 加速電源は、真空管(Y676)を、アーク電源はGTOを採用している。

り決定される。本装置の場合は、中性化セル内圧力 1.5×10^{-3} Torrと加速電圧30kVで計算すると中性化効率65%となる。また、中性化セルは本体からの磁場の影響を受けぬように磁気シールドされている。

5.2 真空容器

入射前の真空容器内の真空はクライオポンプにより 2×10^{-8} Torr程度になっており、ガスの導入とともに圧力は上昇するが、真空排気タンクは中央部でリミッタ部を除いて仕切られているため、中性粒子入射時の本体側の圧力の上昇は比較的少ない。このため、中性粒子の再電離率は極めて少ない。この関係は真空排気タンクなどをネットワークにシミュレート^{8),9),5)}して、中性粒子入射時の圧力変化を計算した⁴⁾。

5.3 ビームダンプ、ビームリミッタ及びスパッタシールド

中性化できなかった粒子は本体からの磁場により曲げられ、ビームダンプに衝突し低速中性ガスとなる。また、ビームダンプやビームリミッタにイオンや中性粒子が衝突することにより発生する金属スパッタが、クライオポンプに当たaraぬようにスパッタシールドが設けられている。

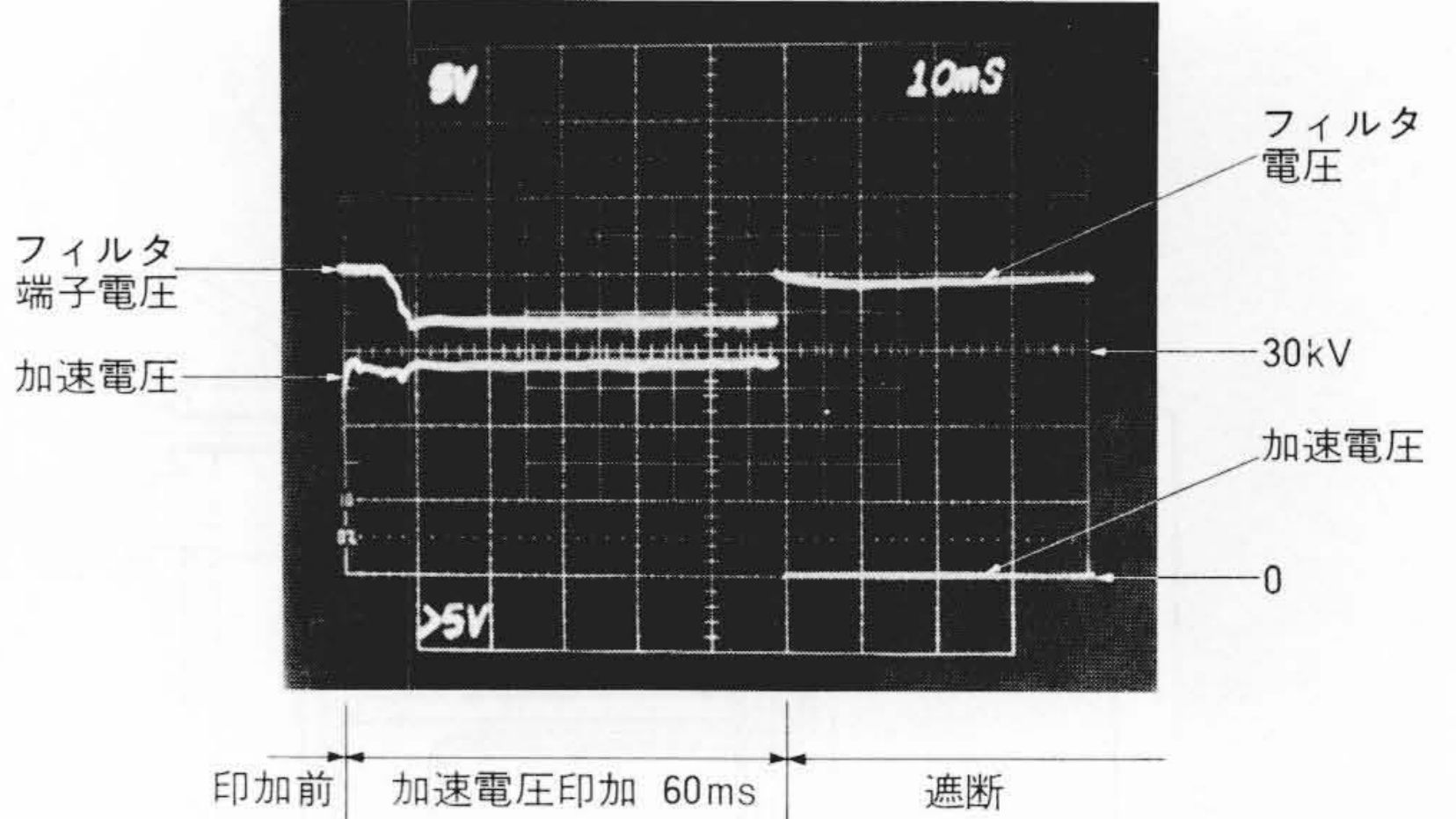


図9のフィルタ端子電圧が変化しても、加速電極にかかる加速電圧の変動はわずかである。

5.4 カロリメータ、高速弁

真空容器の端にはビームの強度を測定するカロリメータが取り付けられる。また、その先には高速弁が取り付けられ本体との間の導通を開閉する。本体と本装置の間隔は極めて狭いため、一般に行なわれているような高速シャッタと自動弁の組合せができなかったため、これらが一体となった高速弁を開発した。その仕様は表3に示すとおりである。

5.5 クライオポンプ、補助真空装置

液体ヘリウムで冷却されるクライオポンプは、真空容器内に取り付けられた。クライオポンプはクライオパネル、シェブロンバッフル、放射シールド板、液体ヘリウム用気液分離器、液体窒素用気液分離器、液体ヘリウム流量調整弁などで構成される。図6に外観を、図7(a)にその構造図を示す。クライオパネルは3.5Kの液体ヘリウムにより冷却され、凝固温度22Kの水素ガスをその表面に凝固させ、高速排気する。液体ヘリウムへの侵入熱を減じ、液体ヘリウム冷凍設備の増大

表3 真空排気系諸設備及び液体ヘリウム冷凍機仕様一覧 真空排気系の諸設備及びヘリウム冷凍機仕様を取りまとめたものである。

項 目		仕 様
真 空 排 気 系	真空容器	基 数 3基 (ただし、1基に対しイオン源2台取付け) 材 質 SUS 到達真空度 2×10^{-8} Torr以下 本体へのガス流入量 1×10^{-1} Torr l以下
	中性化セル	数 量 イオン源1台に対し、1個 材 質 シールド：電磁軟鉄、パーマロイ 圧 力 1.5×10^{-3} Torr $\pm 10\%$
	カロリメータ	数 量 イオン源1台に対し1個 測 定 水温上昇を熱電対で測定、可動式
	ビームダンプ	材 質 受熱部：銅、その他 SUS 304 数 量 真空チャンバ1基に対し、1台 材 質 銅
	高速弁	数 量 真空チャンバ1基に対し、1台 材 質 SUS 開 閉 時 間 開 0.1秒、閉 5秒
	補助真空装置	数 量 ターボモレキュラポンプ500l/sは3台 (真空チャンバ3基に各1台)、メカニカルブースタポンプ600m ³ /hは1台、ロータリポンプ1,200l/minは1台
	クライオポンプ	数 量 真空チャンバ1基に対し、1基 材 質 パネル SUS 306L、シェブロン 銅 冷 媒 パネル：液体ヘリウム 3.5K、シェブロン：液体窒素 排 気 速 度 1.5×10^5 l/s
	液体ヘリウム冷凍機	液 化 方 式 クロードサイクル 冷 凍 能 力 (LN ₂ 使用) 50W (at 3.5K) * 圧 縮 機 油潤滑スクリュウ2段 熱 交 換 器 アルミプレートフィン式 膨張タービン 動圧気体軸受ファン制動式

注：* 冷凍能力50W (at 3.5K)はクライオパネルへ供給できる冷凍能力を示す。

を防止するため、クライオパネルの前面にはシェブロンパツフルで、背面、側面、上下面はシールド板で囲う。これらは液体窒素で冷却されている。シェブロンパツフルは同図(a)に示すようにブラインド構造になっており、ガスは導入させるが熱輻射の侵入は防ぐ。先の表3にクライオポンプの性能を示してある。同図(b)は工場内で測定した排気速度の実測値とその試験方法原理で、計算値とほぼ一致している¹⁰⁾。

本格的核融合装置に装着され、液体ヘリウム冷凍機と直結運転された液体ヘリウムを循環するシステムは、筆者の知るかぎりでは世界で最初である。

補助真空装置として各真空容器ごとにターボ分子ポンプが取り付けられ、これに3基一括してメカニカルブースタポンプ、油回転ポンプが取り付けられた。

6 液体ヘリウム循環装置

クライオポンプに液体ヘリウムを循環するため、日立製液体ヘリウム冷凍機が使用された。図8に本液体ヘリウム冷凍機の外観を、先の表3にその性能を示す。

本液体ヘリウム冷凍機は、トランスファラインにより各クライオパネルに接続され、3.5Kの液体ヘリウムをクライオパネルに供給する。本機は大形液体ヘリウム冷凍機としては日立製作所社内用300W(at 4.5K)、100 l/hの液化冷凍機¹¹⁾に次ぐ製品であり、社外納入品としては最初のものである。本機の実績をもとにして、日本原子力研究所納めJT60NBI原型ユニット用が製作され、目下調整運転中である。

7 制御系

制御系は本装置のイオン源電源、真空排気系、受変電設備などの設備を運転制御するとともに、監視機能、保護機能を

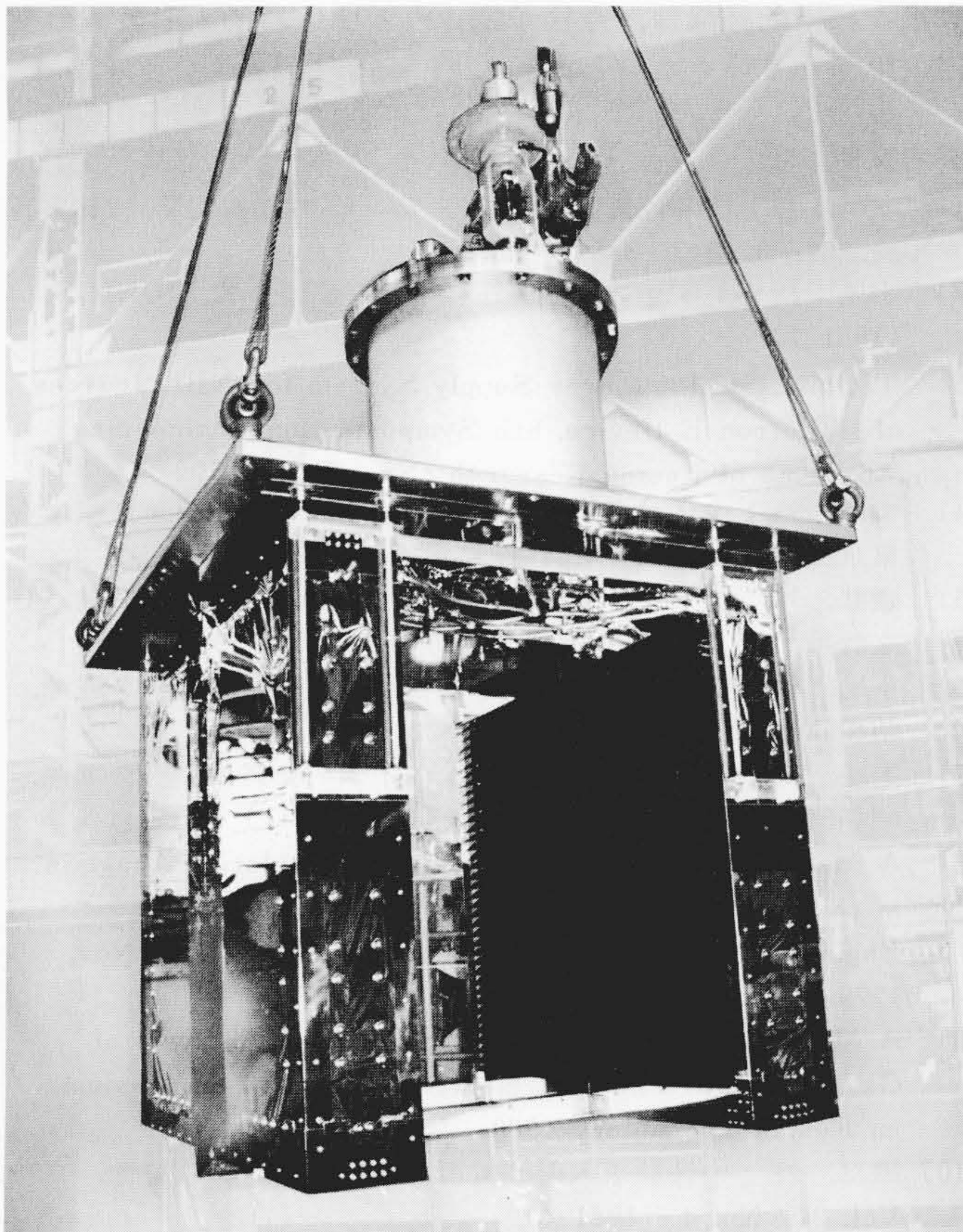
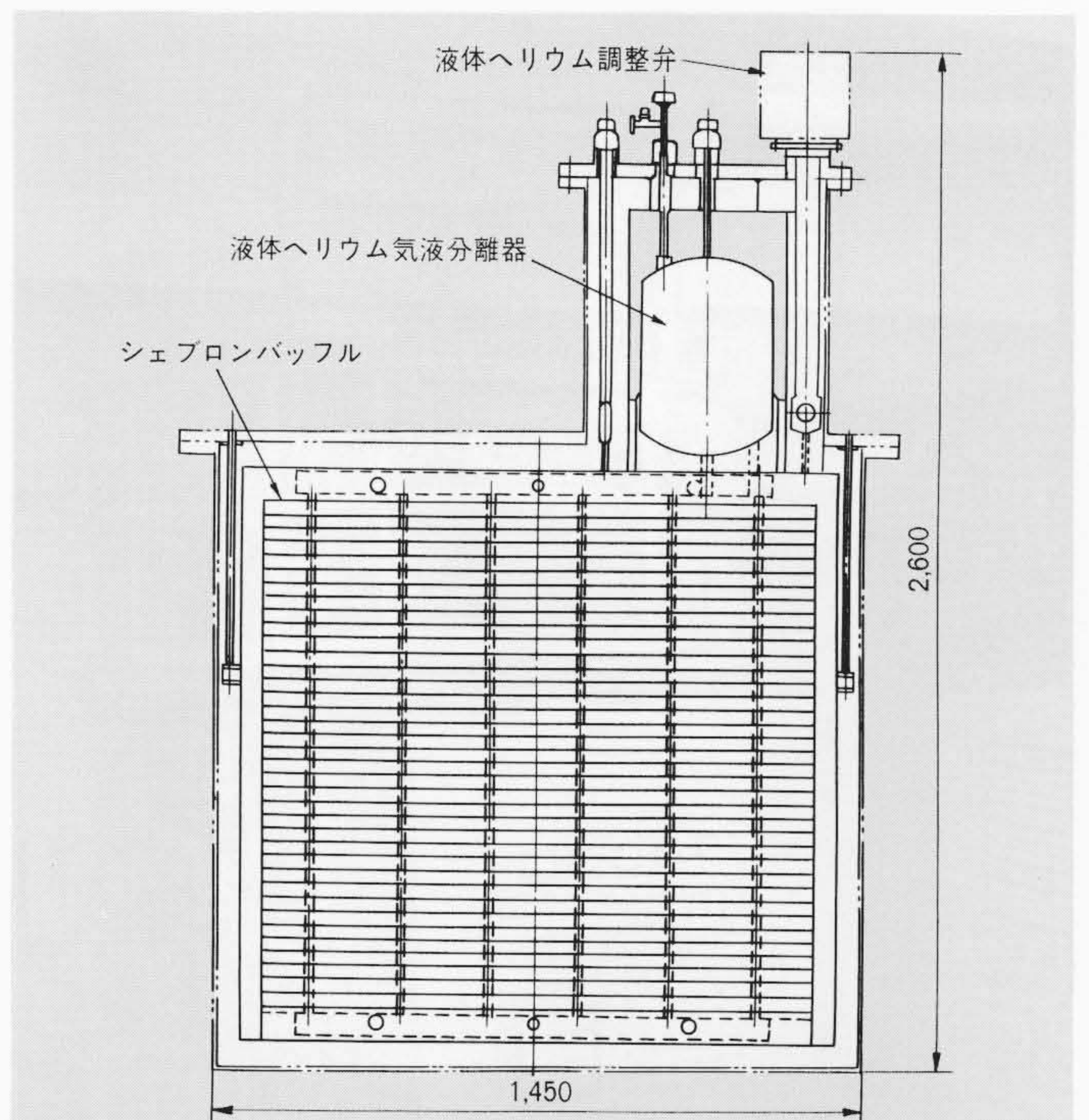
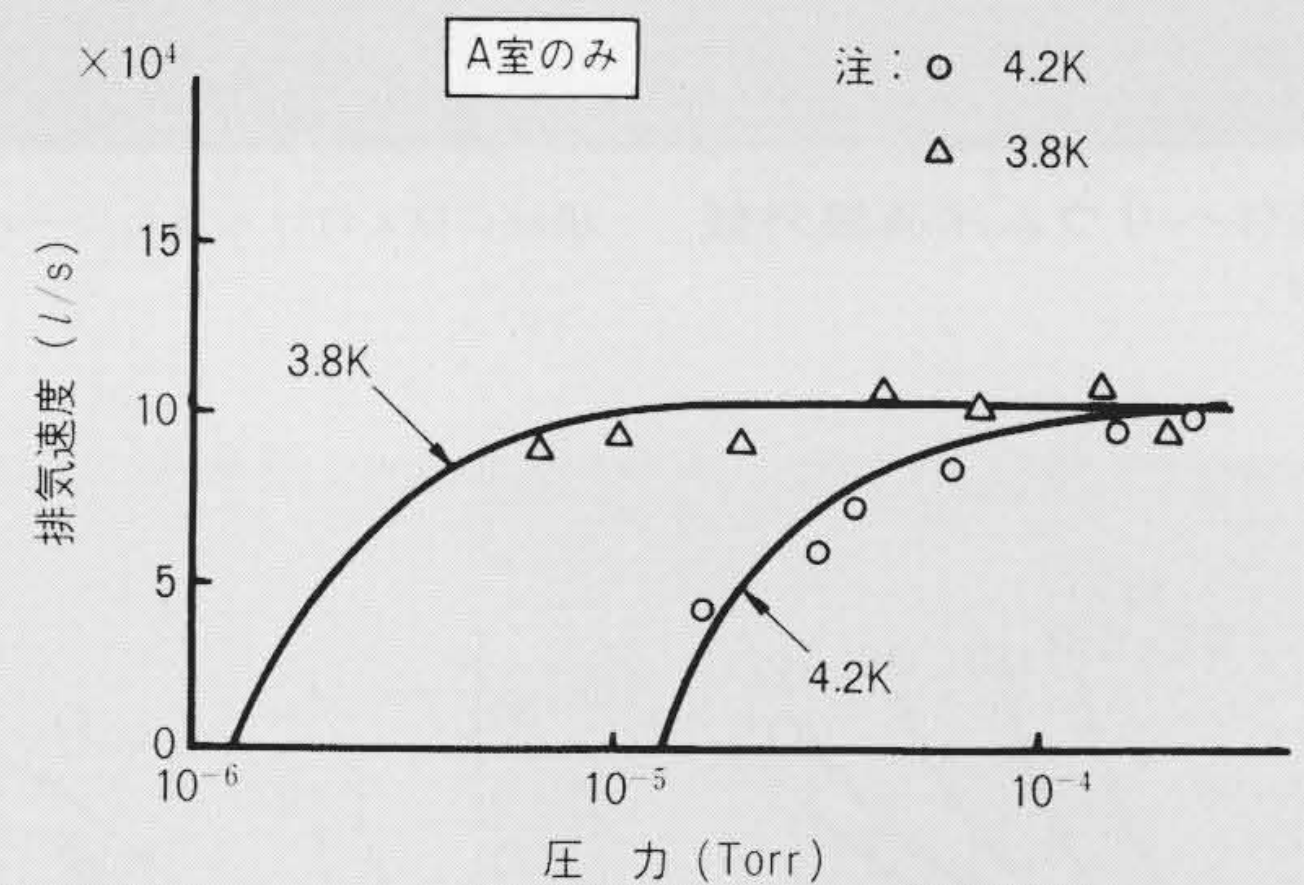


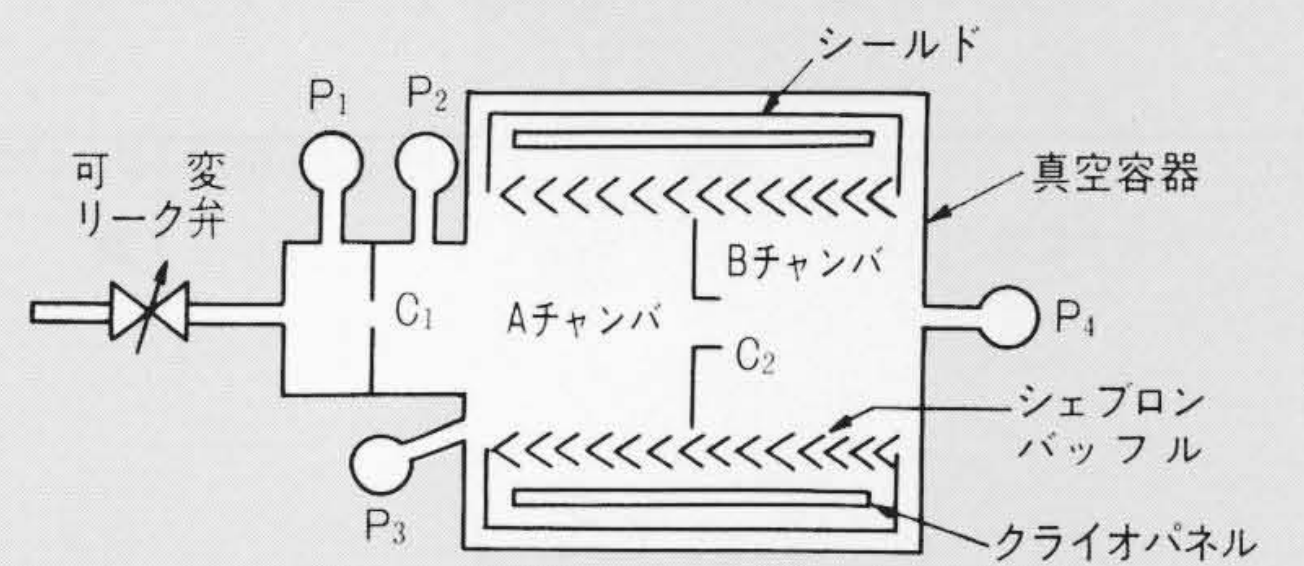
図6 クライオポンプ外観 液体ヘリウムにより冷却されるクライオポンプとしては、我が国最大の排気速度をもつ。写真は工場完成時のものである。



(a) クライオポンプ構造、クライオパネルはシェブロンパツフルとシールドで囲まれ、液体ヘリウムはその下部から供給される。



(b) クライオポンプ片側の排気速度を示す。A室のみ、B室はC₂により無視。



(c) 試験方法、コンダクタンスC₁の両側の差圧で、排気速度を測定する。

図7 クライオポンプの構造とその排気速度 クライオパネルは、3.5Kの液体ヘリウムにより冷却されている。

もっている。

商用電源と330MVA発電機からの電源切替が可能であり、中性粒子入射装置3基が、共通でも単独でも運転できる。

コンデショニングはカロリメータをビームターゲットとし、イオン源を運転しながら出力を高め、粒子引き出しの制御を行なう。本体のプラズマに粒子を入射するため、プラズマ発生信号により一定時間だけイオン源電源を入力し、ガス導入バルブを開いてガスを導入しイオン源にプラズマを発生させて粒子を入射する。

異常状態が発生した場合、イオン源電源など各装置を遮断する保護インタロックが作動する。

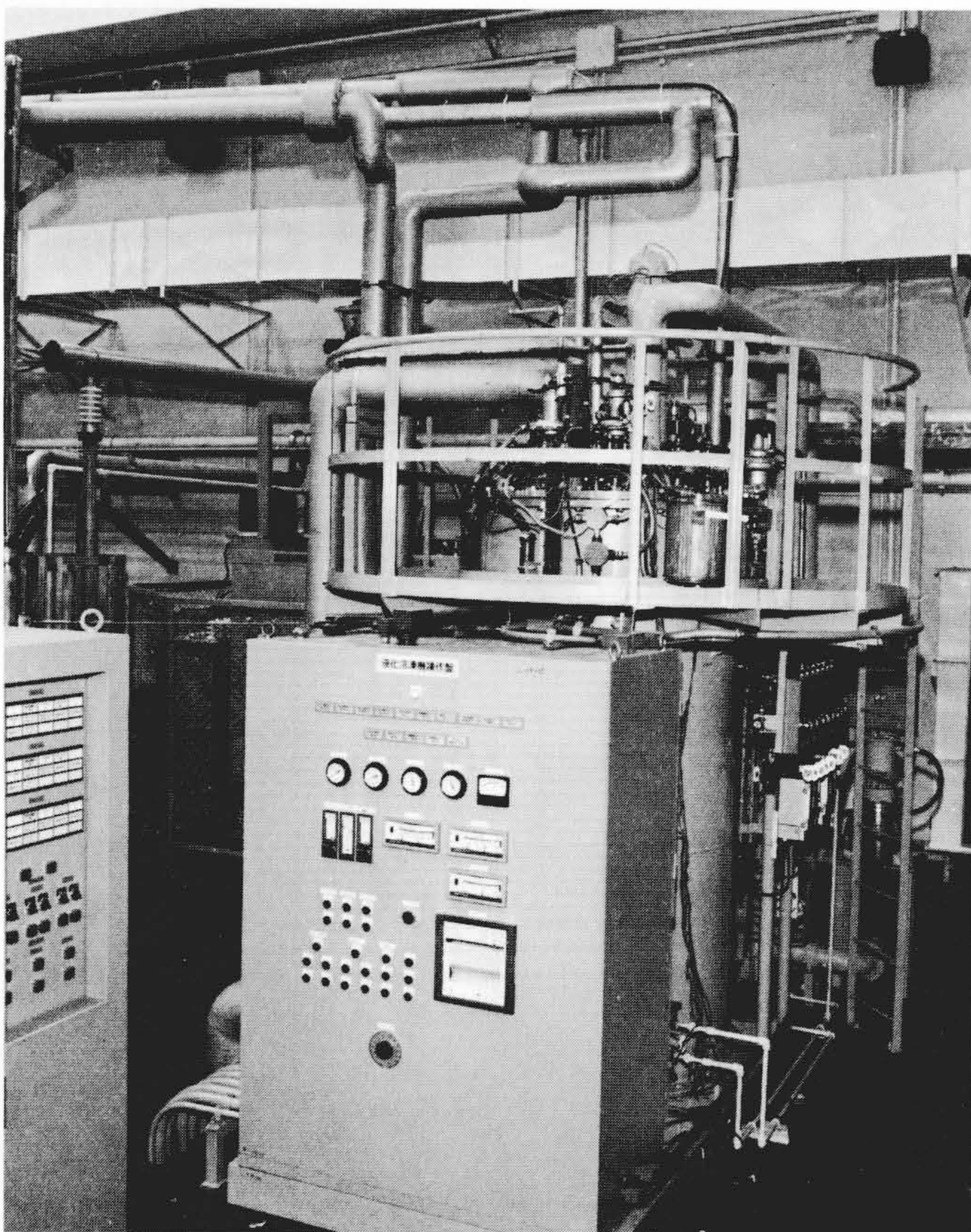


図8 液体ヘリウム冷凍機外観 現地に据え付けられたコールドボックスを示す。

8 試験結果³⁾

本装置のイオン源2台は、本体取付けに先立ち試験用真空容器に取り付けられ、単独に試験を行なった。試験結果を図9に示す。アーク放電の電流電圧特性〔同図(a)〕、イオン源プラズマ密度分布〔同図(b)〕、加速電圧と粒子ビームショット回数〔同図(c)〕、粒子ビーム引出電流及び粒子ビーム発散角の圧力依存性〔同図(d)〕などである。

試験結果のうち、特記すべき結果を説明する。図9(c)の加速電圧と粒子ビームショット回数では、電極が定格の電圧で放電を起こすことなく印加できるまでの電圧印加によるエージングの特性である。電極面が電圧印下のショットにより、しだいに慣らされてゆくのである。すなわち、電極を電解研磨することにより、ショット回数が著しく少なくなったことを示している。同図(b)のイオン源プラズマ密度分布では、非常に均一な密度分布を得ており、これが発散角1.15度という良い結果を得た原因の一つと思われる。同図(d)の粒子ビーム引出電流及び粒子ビーム発散角の圧力依存性では、所定の電圧で所定の出力電流を得ていることを示し、発散角が1.15度という結果を得ていることを表わす。

9 結 言

非軸対称形トーラスの核融合実験装置の中で、現在世界最大級の装置「ヘリオトロンE」に取り付けられる中性粒子入射装置が設置され、目下調整運転中である。本装置は間もなく稼動を開始するが、その成果が期待される。本装置には技術的にも画期的な新しい試みが多く採り入れられており、核融合装置の技術の進歩に寄与するところが大きいと確信している。京都大学では、本装置の設計から試験、据付け、試運転に至るまで日立製作所を指導し、担当させてきた。これらの貴重な技術的経験は、今後予定される中性粒子入射装置の製作に生かしていきたいと願っている。

参考文献

- 1) 宇尾, 外: 核融合装置「ヘリオトロンE」の技術開発, 日立評論, 62, 5, 343~348 (昭55-5)
- 2) 宇尾: ヘリオトロンEの中性粒子入射について, IONICS, (1981-1)
- 3) T. Obiki, et al.: Power Supply System for NBI Sources of Heliotron E Device, 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research (San. Nov. 1979)
- 4) 宇尾, 外: 中性粒子入射装置用加速電源, 昭和54年電気学会東京支部大会 293 (昭54-11)
- 5) 磯部, 外: プラズマ加熱用中性粒子入射装置の技術開発, 日立評論, 62, 5, 375~380 (昭55-5)
- 6) 宇尾, 外: 定電圧制御方式中性粒子入射装置用アーク電源, 昭和54年電気学会東京支部大会32 (昭54-11)
- 7) 宇尾, 外: 定電流制御方式中性粒子入射装置用アーク電源, 昭和54年電気学会東京支部大会33 (昭54-11)
- 8) A. Maekawa, et al.: New Transient Simulation Analysis of the Vacuum System in NBI, 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research (San. Nov. 1979)
- 9) A. Maekawa et al.: Transient Simulation Analysis of Gas Feed into The NBI Neutral Cell, 11th Symposium on Fusion Technology 1980
- 10) 磯部, 外: 中性粒子入射装置用クライオポンプの特性, 真空, Vol. 24, No. 4 (1981-4)
- 11) 蜂谷, 外: 核融合用ヘリウム液化冷凍装置の開発, 日立評論, 62, 5, 387~390 (昭55-5)

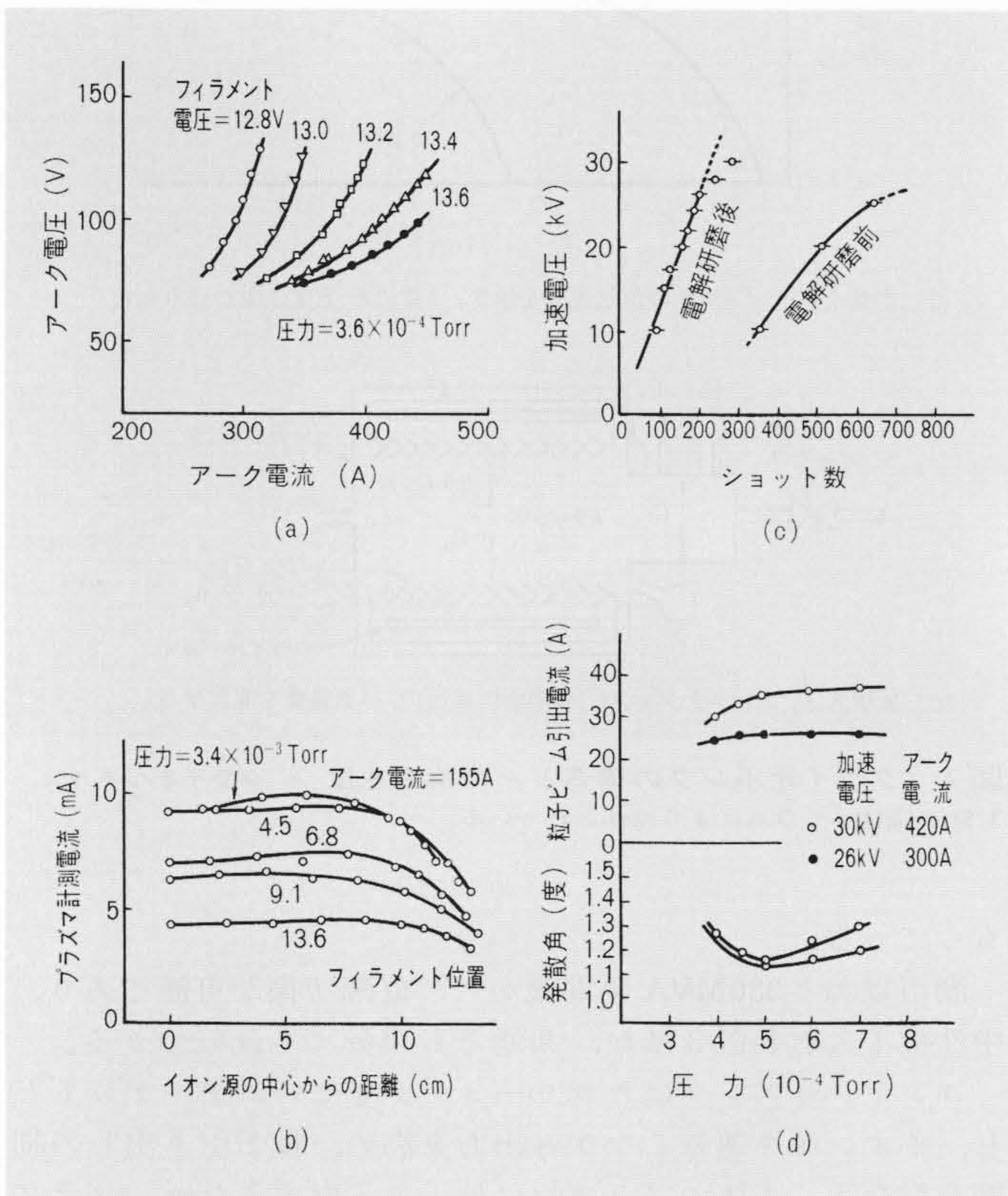


図9 イオン源試験結果 (a) イオン源アーク放電の電流電圧特性、仕様は定電圧制御⁶⁾であるが、場合により定電流制御⁷⁾でも使用できる。(b) イオン源プラズマ密度分布であり、非常に均一である。(c) 加速電圧と粒子ビームショット回数、電極の電解研磨により少ないショット回数で定格電圧がだせる。(d) 粒子ビーム引出電流及び粒子ビーム発散角の圧力依存性を示すもので発散角は小さい。