

J A E R I - M
87-169

JT-60粒子入射加熱装置の設計及び技術開発

1987年10月

栗山 正明・秋場 真人・秋野 昇・荒木 政則
大楽 正幸・海老沢 昇・堀池 寛・伊藤 孝雄
井上 多加志・河合視己人・北村 繁・小又 将夫
松田慎三郎・松岡 守・水橋 清・水野 誠
大内 豊・小原 祥裕・大原比呂志・大賀 徳道
奥村 義和・柴沼 清・柴田 猛順・白形 弘文
鈴木 国弘・田中 茂・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弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

JT-60 粒子入射加熱装置の設計及び技術開発

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部・核融合研究部

栗山 正明・秋場 真人・秋野 昇・荒木 政則
大槻 正幸・海老沢 昇・堀池 寛・伊藤 孝雄
井上多加志・河合視己人・北村 繁・小又 将夫
松田慎三郎・松岡 守・水橋 清・水野 誠
大内 豊・小原 祥裕・大原比呂志・大賀 徳道
奥村 義和・柴沼 清・柴田 猛順・白形 弘文
鈴木 国弘・田中 茂・薄井 勝富・渡辺 和弘

(1987年9月28日受理)

JT-60 粒子入射加熱装置 (JT-60 NBI という。) は、JT-60 の臨界条件を達成するため、
75 keV (70 ~ 100 keV) のビームエネルギーで最大 20 MW / 10 秒の高速中性ビームを JT-60
に打ち込むものである。JT-60 NBI に要求される性能は、従来の NBI 装置の性能をはるかに凌
ぐもので、その設計・製作には従来の技術の枠を大きく越えなければならなかった。このため、
イオン源を中心として構成機器の設計及び試作開発を 10 年以上に渡って進めてきたが、その集大
成として JT-60 NBI を建設し、1986 年、完成に漕ぎ着けた。

この報告書は、JT-60 NBI の設計及び技術開発についてまとめたものである。

The Design, Research and Development of
JT-60 Neutral Beam Injector

Masaaki KURIYAMA, Masato AKIBA, Noboru AKINO, Masanori ARAKI
Masayuki DAIRAKU, Noboru EBISAWA, Hiroshi HORIIKE
Takao ITOH, Takashi INOUE, Mikito KAWAI, Shigeru KITAMURA
Masao KOMATA, Shinzaburo MATSUDA, Mamoru MATSUOKA
Kiyoshi MIZUHASHI, Makoto MIZUNO, Yutaka OHUCHI
Yoshihiro OHARA, Hiroshi OHHARA, Tokumichi OHGA
Yoshikazu OKUMURA, Kiyoshi SHIBANUMA, Takemasa SHIBATA
Hiroyumi SHIRAKATA, Kunihiro SUZUKI, Shigeru TANAKA
Katsutomi USUI and Kazuhiro WATANABE

Department of JT-60 Facility
Department of Thermonuclear Fusion Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 28, 1987)

JT-60 neutral beam injector (JT-60 NBI) injects neutral hydrogen beam into JT-60 with a maximum power of 20MW/10sec at an energy of 75 keV (70-100 keV), to achieve the break even plasma condition in JT-60.

The performances required to JT-60 NBI were by far exceeded the those of former neutral beam injector, and there had not been technical and engineering bases to construct the JT-60 NBI. Therefore, research and development, and design on the ion sources and other NBI components have been performed for over ten years. As a result of these R&D and design, the JT-60 NBI system was constructed and was completed in 1986.

The present report describes the R&D and design processes of JT-60 NBI.

Keywords: JT-60, Neutral, Beam, Injector

目 次

はじめに	1
1. JT-60 NBI の技術開発の経緯	2
2. JT-60 NBI の設計及び開発における基本的考え方	7
3. JT-60 NBI の構成	14
4. 各設備の設計と技術開発	27
5. JT-60 NBI 調整試験及びJT-60へのビーム入射加熱実験	172
6. 終りに	179
謝 辞	182

Contents

Introduction	1
1. The circumstance of research and development in JT-60 NBI	2
2. The fundamental thought for design and development of JT-60 NBI	7
3. The composition and performance of JT-60 NBI	14
4. The design, the research and development of JT-60 NBI components	27
5. The performance test of JT-60 NBI and neutral beam injection to JT-60	172
6. Conclusions	179
Acknowledgement	182

はじめに

JT-60 の臨界条件を達成するための第2段加熱として JT-60 中性粒子入射加熱装置 (JT-60 NBI という。) が主たる加熱方法として計画された。ここで JT-60 NBI に要求された性能は、従来の NBI 装置の値を大きく上まわるものであり、これを開発するためには従来の技術の枠を大幅に越える必要があった。

原研の NBI グループでは、約 12 年前から JT-60 NBI の開発に着手し、種々の研究開発を積み重ねた。それらの結果を基にして JT-60 NBI を設計・製作した。現在、JT-60 NBI は順調に稼動して JT-60 の臨界条件達成の研究に大きく寄与している。

この報告書は、JT-60 NBI の研究開発、設計等についてまとめたものである。

第1章では、JT-60 NBI の研究開発及び設計の経緯について述べ、第2章では、開発及び設計の基本的考え方あるいは条件等について、第3章では、JT-60 NBI の全体構成、性能等について記す。第4章では JT-60 NBI の各設備の技術研究開発、あるいは設計の要点等について記している。第5章は、JT-60 の調整試験及び 1986 年 8 月から開始された JT-60 へのビーム入射試験について記している。

1. JT-60 NBIの技術開発の経緯

JT-60用中性粒子入射装置(NBI)に関する技術開発の源流は、今から13年前の昭和49年度にさかのぼる。当時、世界のトカマク型装置による核融合研究は、より高温のプラズマの生成と閉じ込めを目指しており、原理的限界を有するジュール加熱法にとって代る、新たな加熱法を探り入れようとしていた。その中で、高速の中性子素原子ビームを入射して電離させ、プラズマを加熱する中性粒子入射加熱法は、1972年、ORNLのG.G.Kelley氏らによって提唱されて以来極めて有望な加熱法として各国の研究所で急速に開発が進められ、既に英國カラム研究所のCLEO、米国プリンストン大学のATC、オークリッジ国立研究所のORMAKなどで100kW級のNBIが取付けられ、追加熱の実験が開始されていた。このようなNBIを開発する際、最も困難なものが、イオンビームを発生する大容量イオン源の開発である。プラズマを加熱するには相当なパワーを入射する必要があり、したがってイオン源は数100μA～数mAでも大電流と言われていた他目的のイオン源とは桁外れに大きい数A以上のビーム電流が要求された。幸にも、それまでの核融合分野での技術開発の蓄積があったため、2～3年の間に2つのタイプのアンペア級イオン源が開発された。1つはORNLで開発されたデュオプラズマトロンの変形であるデュオピガトロンであり、他の1つはローレンスバーカー研究所で開発された無磁場アーク放電型イオン源である。いずれのイオン源も、ビームエネルギー20～30keVで数A以上のビーム電流の引出しに成功していた。

(a) 原研におけるイオン源の開発

原研で加熱装置の開発に着手したのは丁度このような時期の昭和49年度のことである(第1-1表参照)。それまで日本では加熱装置の開発は殆んど手がつけられておらず、欧米に比べて5年以上の遅れがあった。そこで、49年度末にITS-1というテストスタンドを建設してイオン源の開発に着手したが、このとき最初に設計製作したイオン源の試作品はアンペア級イオン源の問題点を早急に把握するためORNLの6Aイオン源のデッドコピーに近いものとした。そして、1～2年内に開発すべき目標として、JFT-2NBI加熱装置、最終目標としてJT-60NBI加熱装置を掲げてイオン源の改良研究を進めた。

特に、最終目標とするJT-60用イオン源は、75keV, 35A, 10sという大出力長パルスイオン源であり、研究開発当時の技術水準を大幅に上回るものであり、解決すべき課題として、①大電流化のためのソースプラズマ生成部の大型化、プラズマ一様性の改良、②高エネルギー化のための2段加速システムの開発、③長パルス化のための電極の冷却方式の開発、④陰極の長寿命化、⑤ビーム収束性の改良などがあった。このため、研究を開発して2～3年後には当初の試作品の改良研究の範囲から脱却し、国外の研究の後追いではなく、自ら立てた目標に向って自ら選択した方法で開発を進めるという独自の路線を進めることができるようにになった。原研での開発が国際的にも認知されるようになったのはこの頃からである。更に、開発を進めた結果、⑥ビームエネルギー組成比の改良や、⑦ビーム中の不純物の低減化などビームの“質”的面での改良も必要となり、開発研究は多岐にわたるものとなった。最終目標のイオン源

は、これらの課題を“全て同時に”解決し得るものでなければならず、この点がNBI用イオン源開発の特に難しい面でもあった。

(b) 試作開発と設計及び総合システムの建設

さて、JT-60 NBI加熱装置のような桁外れに大きい総合システムを開発する場合に、最終目標である装置の設計と、段階をふんだ試作開発とは車の車輪にたとえられるべき密接な関係にある。特にJT-60 プロジェクトに於ては開発研究を開始した49年度当時は20 MWの中性ビームを入射したいという性能目標と、JT-60 完成1年後の加熱装置完成という期限の2つだけがはっきりと決っていたが、最終目標とするJT-60 NBI加熱装置の概念も定まっていた訳ではなかった。他方、JT-60 本体の設計の方は先行して進んでおり、両者間の干渉等の問題を後に残さないためにはNBI加熱装置の設計を早急に進めなければならない状況にあった。しかもその設計の基礎となるイオン源や真空排気ポンプ室のコンポーネントは、これから長期の開発を実施して初めて性能や形状の展望が開かれてくるものであり、最終的な姿を見透すことは至難のわざであった。しかし、それを敢えて見透すことによって、最終目標とする装置の設計を行い、また、設計を進めることによって試作開発の目標性能をより明確にしなければならない。しかも今回のように出発時点の技術レベルと、最終目標の技術レベルがあまりにも大きく異なる場合には、コンポーネントの試作開発のみを実施して、つぎに最終目標の装置を作りするという1段階の手法は不可能に近いと判断された。幸にも、プラズマ加熱の物理を調べるという観点から、丁度試作開発に節目を与えるかのように、中間規模の総合システムとしてNBI加熱装置の建設が計画された。即ち、第1段階では昭和50～51年度に建設したJFT-2用NBI加熱装置であり、第2段階ではJFT-2高加熱密度実験用NBI加熱装置である。前者はビームエネルギー25 keV、中性ビーム入射パワー約100 kW の垂直入射システムであり、後者はビームエネルギー40 keV、中性ビーム入射パワー約2 MW の接線入射システムである。これらの装置の開発目標値は、試作開発が進んでいるイオン源の当時の状況から外挿可能な最大限のところに設定され、目標が設定されるとそれに向って開発と製作に間に合せるという具合に、総合システムの製作が、単に試作開発の成果を総合したというのではなく、試作開発そのものも牽引する役割を担っていた。また、技術的観点から重要なことは、総合システムを建設して初めて技術的問題点が明らかになってくるものがあることであり、この意味に於て、特に最初に建設したJFT-2用NBI加熱装置（100 kW 級）は、加熱実験の物理的側面からの成果は既に国外で行われていた実験の追試の域を超えるものでは無かったが、技術的側面からは、イオン源の放電破壊に伴うサージ電圧伝播や、トカマクからの漏洩磁場による影響とその対策など学ぶところが多くあり、これらの問題を解決する過程で培ったノウハウはその後建設する装置に充分反映された。

前述したように、イオン源の開発項目は多岐にわたるものであり、また各項目の改良は実験によって確認し、次の段階に進むという性質のものであるため、1基のテストスタンドでは不充分であり、開発目標に応じて3基のテストスタンドを建設し、並行して試作開発を進めた。更に言及すれば、イオン源用直流電源は大電力の急峻なパルス負荷をとるため電圧変動を抑制することが困難であるばかりでなく、加速電極間で発生する放電破壊の際に電極の損傷を防ぐために電極へのエネルギー流入を抑制する特別な制御を必要とすることが予見されていたが、

これらの対策を考案し、電源の製作に反映させなければならなかったという点で、NBI 総合システム建設のみならず、テストスタンドの建設そのものも一種の試作開発であった。

(c) ビームライン機器の試作開発

さて、イオン源の開発は3基のテストスタンドを中心とする試作開発により、精力的に進められるようになったが、JT-60 NBI 加熱装置の設計を進めるにつれ、大容量真空排気ポンプ、ビームダンプなど高熱流束受熱機器、イオン偏向磁石や磁気シールドなども、過去には見られない厳しい仕様を実現しなければならないことが明らかとなり、これらの機器についても原研で試作開発を実施する方針を固めた。例えば、大容量真空排気ポンプは排気速度100万ℓ/s程度のものが要求されたが、クライオポンプやチタンゲッターポンプ、サエズゲッターポンプなどを比較検討のうえ、再生に対して問題のない凝縮型クライオポンプを選択し、1万ℓ/sの容量のものを段階をふんで試作し、ITS-2に取付けて3.6～4.2Kの極低温下での基礎的特性の測定や、水素ビームによる影響を調べ、設計の妥当性を確認した。

また、高熱流束受熱機器の受熱要素としてはフイン付き冷却管を設計し、ITS-2のビームを利用してパンアウト試験を実施し、設計安全裕度を確認した。

磁気システムの開発は更にやっかいであった。偏向磁石、中性化セルやイオン源の磁気シールドなどの磁性体は相互に影響を及ぼし合うため、これらを一組として全体的に取扱う必要がある。52年度から設計に基づく偏向磁石、磁気シールドの縮少モデルを作成し、磁場分布の概要を把握するとともに、2次元磁場分布計算コードや磁場中のイオン軌道計算コードの開発、整備を進め、イオンによる各部への熱負荷を予測可能とした。しかし54年度に製作した1/2.5縮小モデルによる精密な磁場分布測定の結果、中性化セルと偏向磁石の間の空間はトカマクからの漏洩磁場が増強されて残留することが明らかになり、もはや受動的な磁性材による磁気シールド方式のみでは解決策は無く、2つのコイルを励磁して能動的にこれを打消す方式を付加することとなった。そしてビームダンプ等への熱負荷分布の観点から、偏向磁石磁極形状やビームダンプ形状の最適化設計を実施し、55年度になってようやく解を見出し、最終形状を決定した。

(d) NBI 原型ユニットの建設

JT-60 NBI 加熱装置をビームライン14基構成とするという基本構想は51年頃に固まったが、同時に、実機建設に先立って、その1基分に相当する原型ユニットを製作し性能確認試験を実施しようという開発計画も決められた。この計画に基づいて昭和52年度から54年度にかけて原型ユニットの詳細な設計が、前述したイオン源やビームライン機器の試作開発と並行して進められた。原型ユニットは、過去数年間にわたって行われてきた試作開発の集大成とも云うべきものであった。昭和55年3月に原研では殆んど例が無い構造仕様によって製作を開始し、約1年半の建設期間を経て56年11月中旬に完成した。完成後ただちに性能確認試験に入り、57年3月末までには、JT-60で標準的に使用されるビームエネルギー75keVレベルで所期の性能を確認した。世界の各研究機関はNBIの長パルスを目指した開発でしのぎを削っていたが、原型ユニットで達成した75keV, 70A, 10sのイオンビームは世界で最初の本格的な大出力長パルスピームとして高く評価された。更に1年後には原型ユニットの最大定格である100keV, 70A, 10sのビーム引出しに成功した。これらの試験を通じ、クライオパ

ネル、磁気システム、受熱機器の性能がほぼ設計通りであることを確認した。また、模擬漏洩磁場を印加した場合にも、イオンビームは設計通りに偏向され、受熱機器に異常が無いこと、NBI入射ポート部で中性ビームの再電離によるビーム阻止効果が生じないこと等が確認された。

しかし一方、これらの成果が何の問題も無く、極めて順調に得られたかというと、決してそうではなく、むしろ正反対であった。最大定格の達成は満身創痍の状態で到達したと云っても過言ではない。充分試作開発を行った機器については殆んど問題は生じなかった。しかし100kV直流電源に使用していた出力電圧制御及び高速電流しゃ断制御の機能を持つ高出力四極管

(輸入品)は発振や真空リークの数々のトラブルを生じ、実機への採用を断念し、代ってGTOサイリスタを用いたバルブを開発し置換えた。また、イオン源の引出し電極は80kV以上の運転になると長パルス高熱負荷による変形を生じ問題があることが判り、急きょ強度が大きいモリブデンを母材とする厚肉電極を開発した。更にクライオポンプからの低温熱輻射によりガイドレールが曲がり、カロリメータが上下しなくなってしまい、輻射シールド板を取付ける等の対策を行った。

クライオポンプから30分間に1回程度の頻度で凝縮した水素ガスの放出が見られたが、その原因の究明と対策の実施など数多くの大小さまざまな改善すべき問題点が明らかとなった。これらの問題点はすべて解決策を確認したあと、実機の製作に反映させた。

(e) JT-60 NBI 加熱装置の建設

JT-60 NBI 加熱装置については同原型ユニットの建設や試験と並行して詳細設計や調整設計を実施した。本設計では、既に構造が決っているビームラインユニット以外の主として補機設備や配線、配管などを設計の対象とした。原型ユニットでの試験が完了した、58年11月からJT-60 NBI 加熱装置の建設が開始された。ビームラインユニットは正規の姿勢で輸送することが不可能であるため、原型ユニットに隣接する部屋で組立を開始した。組立が完了したユニットは順次原型ユニットの設備でビーム引出し試験を実施した。この試験の目的は、JT-60へ装着する前にビームラインの健全性を確認し、装着後のトラブルを最少限度に抑えることと、イオン源の長パルススエージングを進めておき、装着後の出力増大を短期に出来る状態にしておくという2つの目的があった。原型ユニットでのビーム引出し試験は毎月1ユニットのペースで実施され、試験が完了したユニットはイオン源を真空に保った状態で保管された。60年8月JT-60のシャットダウンと同様に、ビームラインユニットの据付を開始し、12月末までに全ての据付工事を完了した。翌61年1月から各種の試験を開始し、3月頃にはビーム引出し試験、5月～7月には磁場、打消しコイル調整試験、総合調整試験を実施し、61年7月末、予定通りNBI 加熱装置を完成させた。61年8月からJT-60との結合試験が開始され、有効なプラズマ加熱が確認されたが、10月上旬には早くも定格パワーの20MW入射に成功した。

April 25, 1987

第1-1表 NBI開発用テストstrandとNBI加熱装置の開発

年 度 (昭和)	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
JTS-1	建設		イオン源試作開発											
JFT-2用NBI加熱装置		建設	加熱実験											
JTS-3		建設		イオン源試作開発										
JFT-2高加熱密度実験用 NBI加熱装置				イオン源及びビームライム機器の試作開発										
JT-60用 NBI原型ユニット					建設	加熱実験								
JT-60 NBI加熱装置 能動粒子線計測システム						改 造								
							総合試験							
								建設	加熱実験					
									改 造					
										加 热 実 驗				
											各ユニット試験			
												据付試験	加熱実験	
														JT-60 計測器として 稼動へ装着

2. JT-60 NBIの設計及び開発における基本的考え方

2.1 JT-60 NBIに要求された性能

JT-60 プラズマの臨界条件を達成する上でJT-60 NBIに要求された基本仕様は次の通りであった。

- ① 中性ビーム入射パワー： 中性水素原子ビームで最大 20 MW
- ② ビームエネルギー： 標準定格で 75 keV。ただし運転モードによって 50~100 keV のエネルギーを出せること。
- ③ ビーム入射時間： 最大 10 秒
- ④ ビーム中に含まれる不純物： C, O などの軽元素不純物 ≤ 5 %
Mo, Fe 等の重金属不純物 ≤ 0.5 %
- ⑤ ビーム軸：
 - ・プラズマ中央水平面に対して上下 35.5 °
 - ・プラズマ中心軸に対してトロイダル方向：準垂直
- ⑥ JT-60 本体への流入する室温水素ガス量： 0.05 Pa m³/s 以下

以上の JT-60 プラズマ側からの要求に対して JT-60 NBI 側では

- ⑦ ビームラインユニット数： 14 ユニット及び 2 台のイオン源／ユニットの基本仕様を決めた。

2.2 JT-60 NBI 設計及び技術開発において留意した点

① ビーム通過距離の短縮化

ビーム自身が発散性をもっているので、ビームの幾何学的損失を小さくするためにイオン源加速部からトカマクプラズマまでのビーム通過距離を可能な限り短くする必要がある。この目的のため、ビームライン各機器の配置の最適化を図るとともに、各コンポーネントのコンパクト化を図った。

② 空間的制約

JT-60 の各設備は、JT-60 本体を中心にして放射状が拡がっているため、本体に近づく程、各設備の占有空間は狭くなる。NBI は①項で述べた理由でできるだけ JT-60 本体に近づける必要があるので NBI に許容される空間も厳しく制限された。このため、ビームライン各機器は必要とされる性能を満たしながらできるだけコンパクトに設計する必要があった。

③ 運転の省力化／自動化

イオン源は、設定パラメータが多く運転が繁雑であるが、JT-60 NBI は、このイオン源が 1 ユニット 2 台づつ、計 28 台ある。また冷媒循環系のようにシステム自体が非常に複雑な上に 14 ユニットビームラインのクライオポンプに並列に冷媒を供給しなければならない。このような NBI システムを少人数で、かつ簡便に運転するためには、運転の自動化、簡略化を推進

する必要があった。このため、計算機を使っての自動運転制御により、運転の省力化、簡素化を図った。

④ 高信頼性

JT-60 NBI はシステムが多岐にわたっており、これらの 1 つに不具合が生じてもシステムは停止してしまう。また 14 ユニットビームラインの同時運転となるため、個々のユニットの信頼性を高めて 14 ユニット全体での故障発生確率を減らさなければ定格入射パワー 20 MW での運転が困難になる。

ビームラインについては、技術上の問題を解決することのためと同時にシステムの信頼性を向上させる目的で 14 ユニットのビームライン及びイオン源用電流の製作に先立って原型ユニットを製作した。この原型ユニットを使用して性能確認試験を実施し、この結果を 14 ユニットのビームラインの製作に反映させ、JT-60 への据付け後の手直しをなくするようにした。

更に 14 ユニットのビームラインは、組立完了後、1 ユニットずつテストスタンドに据付けてビーム引出しを含めた調整試験を行ない、システムの健全性を確認した後、JT-60 に据付けた。テストスタンドでの試験はイオン源のエージングも兼ねており、JT-60 の加熱実験開始後、できるだけ早く入射パワーの増大を図れるようにした。

⑤ 設置精度

このビームラインは長パルス、高パワーのビームを扱っていること、及び②項で述べたようにビームラインの各コンポーネントがコンパクトに設計されていること等のため、ビームライン各機器の設置精度が悪くなると、各コンポーネントがビームによって損傷を受ける、あるいは中性ビームのトラスへの入射効率が低下する等の問題が出てくる。このため、ビームライン各機器は、その機器の設計裕度に応じて設置精度を決定した。この設置精度は厳しいもので、0.5 ~ 1 mm 以下、比較的粗いものでも約 5 mm 以下とした。

⑥ 製作メーカーとの対応

ビームライン及びイオン源は、技術的にあるいは物理的にも未踏の領域が数多く含まれているため、多大な技術開発及び研究を必要とした。このため長年に渡って上記機器の開発研究を原研で実施し、これら開発研究の集大成としてビームライン、イオン源の構造を決定した。基本的には、この構造通りにメーカーに製作を依頼し、その性能の保証は原研で持つこととした。

2.3 設計基準

(1) 運転条件

① ビーム条件

- 標準定格運転としてビームエネルギー 75 keV、ビーム電流 70 A とした。最大定格として 100 keV、80 A とした。
- ビームパルス中：最大 10 秒／デュティサイクル $\frac{1}{30}$
- ② 総ショット数 10^6 回又は耐用運転年数 10 年の短い方。

(2) 耐震条件

耐震基準は JT-60 全体の基準に準ずるものとした。JT-60 の耐震基準は、各設備の重要度に応じたクラス分けをしている。JT-60 NBI に設備により以下の分類分けにより耐震基準

とした。

a) クラスA：地震により破損により、人身に危害を加える恐れのあるもの、あるいは、安全な停止が阻害されたり、他の重要な機器設備の破損の原因となるもの。

対象設備：ビームラインユニット（内蔵物込み）及び配管用ヤグラ

水平地震力（下記①、②の大きい方の値）

- (① 震度 $2C_0$ ($C_0 = 0.2 \text{ g}$) から定まる地震力)
- (② 下記項に示す動的地震解析

鉛直地震力

震度 $1.0C_0$ から定まる地震力で、水平地震力と同時に最も不利な方向に作用するものとする。

b) クラスB：クラスA以外のもので、水平地震力の震度 $1.25C_0$ から定まる地震力とする。

動的解析

動的解析は、運転時地震と設計時地震の両方で行った。

① 運転時地震

運転時地震は、NBI装置の運転を1時停止してもすぐに再起動できるもので地震加速度は下記のとおりとした。

地 震 力 (gal)		頻 度 (回／年)
ELCENTRO 波 1940年 NS 成分	TAFT 波 1952年 FW成分	
9.0×2.34	9.0×1.35	2
7.0×2.34	7.0×1.65	3
5.0×2.34	5.0×1.65	5
3.0×2.34	3.0×1.65	10

② 設計地震

NBI装置の使用期間中に1回発生するもので、地震波及び地震加速度は次のとおりとした。

i) 地震波：ELCENTRO 波 1940 年 NS 成分

地震加速度*：(実験棟本体室 1F L で 468 gal
 " キャットウォークで 594 gal

ii) 地震波：TAFT 波 1952 年 E W 成分

地震加速度：(実験棟本体室 1F L で 330 gal
 " キャットウォークで 357 gal

以上 i), ii) の厳しい方の値を採用した。

*) 建屋基礎部での地震加速度 200 gal に対しての建屋の応答加速度

(3) 磁場条件 (JT-60からの漏洩磁場)

ビームラインは JT-60 近傍に設置されるため、JT-60 からの漏洩磁場の影響を受ける。

漏洩磁場によるビームライン近傍での磁場分布を第2-1図に示す。また時間変化は第2-2図のとおりとした。

(4) 放射線条件

JT-60本体から放出される放射線は、硬X線と中性子とし、その総量（装置の使用期間中における）は第2.3図のとおりとした。

(5) 真空条件

ビームラインにおける真空管理基準は次のとおりとした。

ヘリーグ量：○フランジ1ヶ所当たり $1.3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下

○ビームライン全体（ビームライン各機器を内蔵した状態）： $1.3 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下

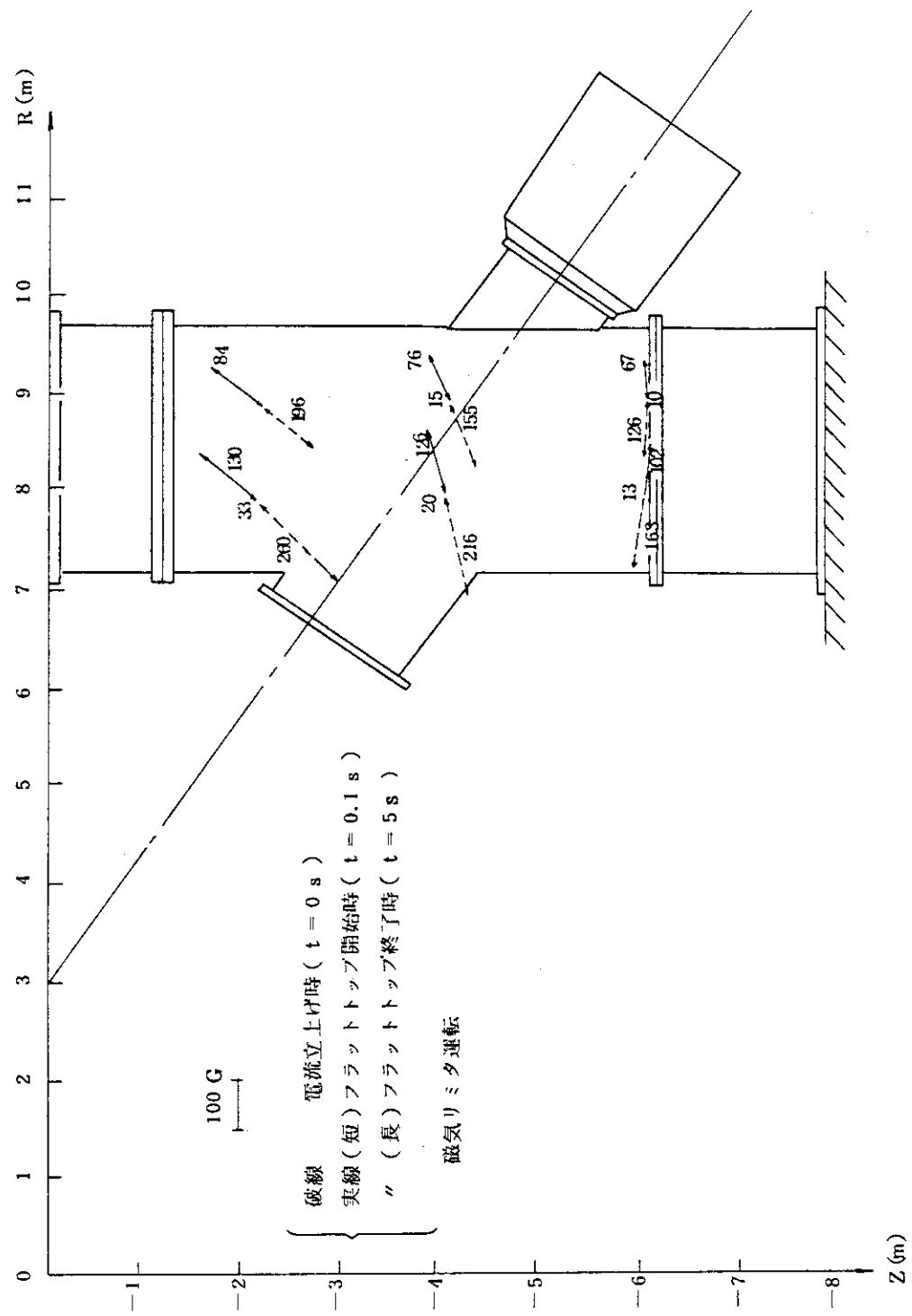
放出ガス量：大気状態から真空引き10時間後において $2.7 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下

(6) その他の一般的基準（主としてビームライン設計について適用）

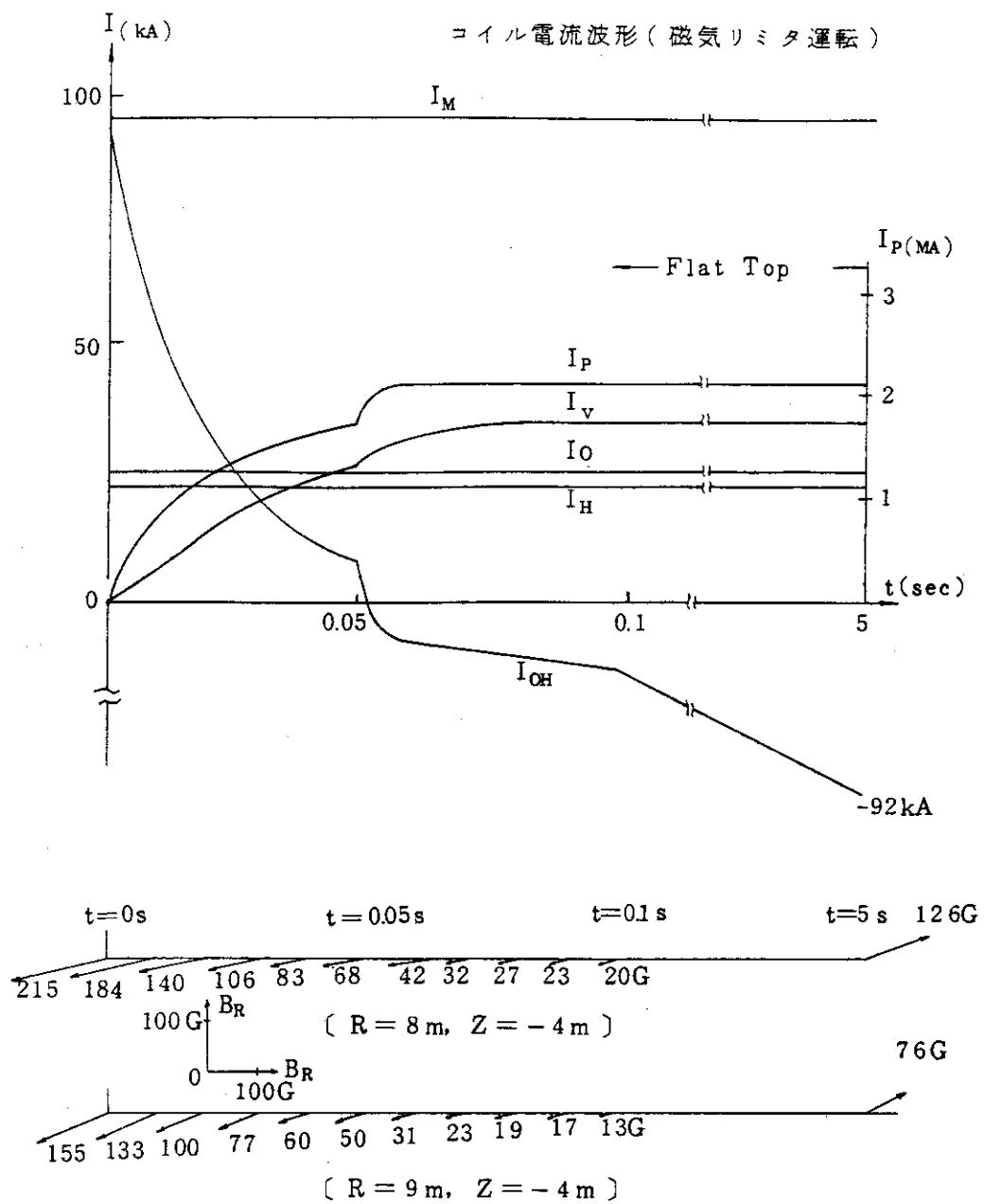
- ① ビームラインとビームライン周辺機器との取合点におけるフランジのO-リング溝は、原則的に主排気タンク側に設けた。
- ② ビームラインのフランジ接合面におけるボルト穴は原則的にセンター振分けとした。
- ③ ビームライン及び取外し頻度の高い機器にあって単位の重量が20kgを超えるものには、アイボルト等の吊り金具を設けた。特に300A以上のフランジには全てアイボルトを設けた。
- ④ ビームラインの真空容器内でM10以上の締付ボルトを使用する場合は、ボルトのネジ部と頭の部分に空気抜きのための溝又は小穴を設けた。
- ⑤ ビームラインの受熱機器に使用される銀ローはすべて融点700°C以上のものとした。
- ⑥ 熱電対の測温部は4mm以上の長さに被測温部と銀ローを接触するようにした。熱電対はCA型シール径1.0φの非接地型とし、ピッチが約10mmの線形とした。また補償導線も線形とした。クライオポンプの熱電対はC-C型とした。
- ⑦ ビームラインに設けられたのぞき窓（ガラス製）は破損した場合でも、その結果生ずるヘリーグ量は内径18φのポートからヘリーグ量を上まらないように防護網又は同等の効果のある保護板を設けた。
- ⑧ 主排気タンク等、真空に晒される面の溶接は真空側片面溶接とした。片面溶接で強度上不都合が生じた場合は大気側に補強用として点溶接を行った。この際、エアポケットができるないようにした。
- ⑨ ビームラインの真空シール部は一部を除き、脱ガス処理をしたバイトンO-リングを使用した。ただしシール部がクライオポンプの近くにあり、低温ふく射に晒される部分についてはコンフラットシールとした。
- ⑩ 主排気タンクと真空に繋がる部分においては、真空シールのためにグリース等は使用しないこととした。

参考文献

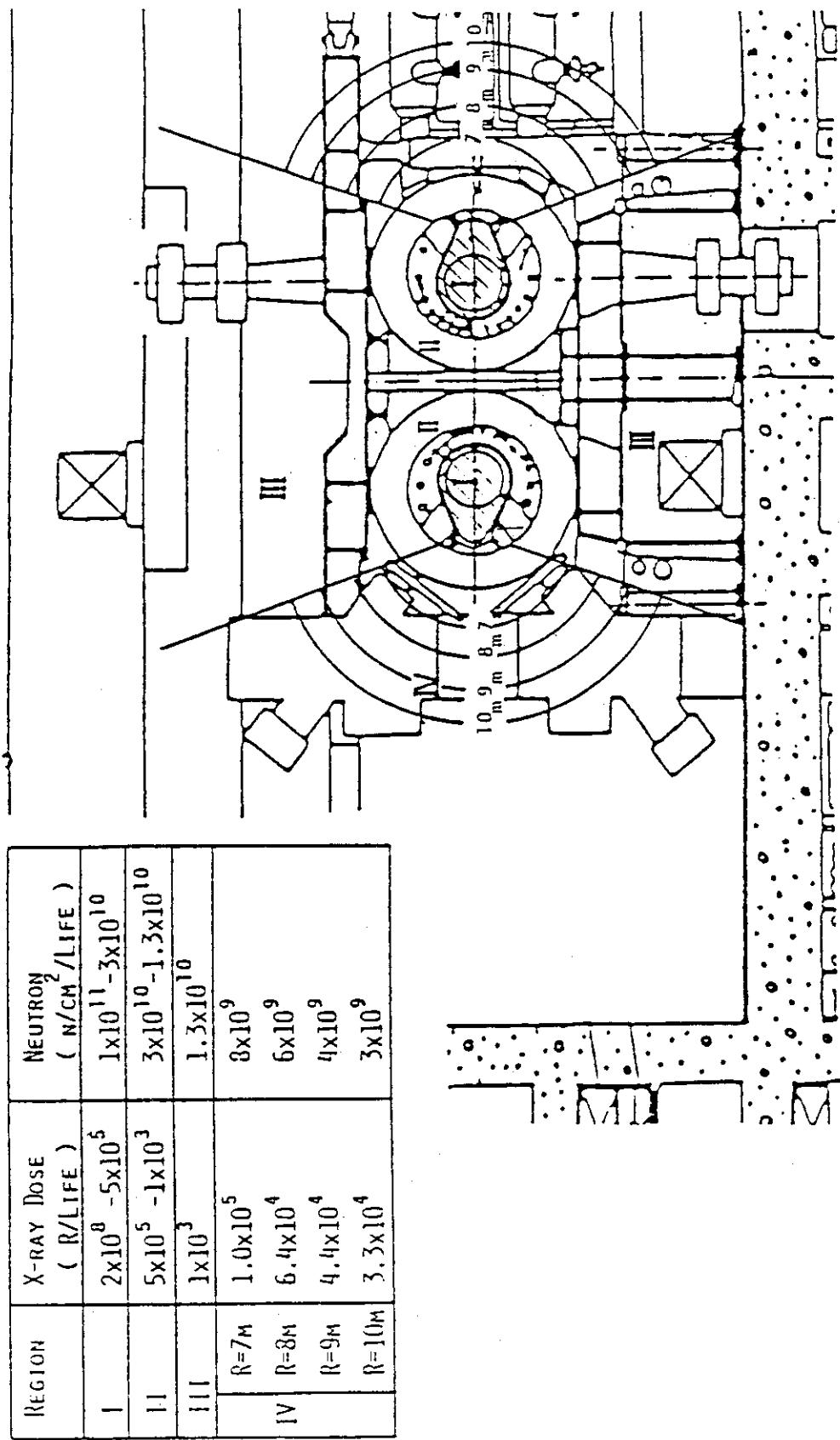
- 1) 松田他：JAERI-M 7655 (1978)



第2-1図 磁気リミタ運転時のもれ磁場分布



第2-2図 JT-60コイル電流波形と磁場ベクトル
(磁気リミタ運転時)



第2-3図 JT-60本体からの放射線

3. JT-60 NBIの構成

JT-60 NBI 加熱装置は、14ユニットから成るビームライン、イオン源、イオン源用電源と、これらに共通に関係する1次冷却系、冷媒循環系、補助真空排気系、制御系及び受配電設備等から構成される（第3-1図参照）。以下の各項でこれらの主要機器の概要及び性能について述べる。

3.1 主要機器の概要

3.1.1 イオン源

イオン源は水素プラズマからイオンのみを加速してビームとして引出すものであり、ソースプラズマ発生部と加速管部とから構成される。

ソースプラズマ発生部へは流量制御された中性水素ガスが導入され、アーク放電によってソースプラズマが生成される。加速管部の引出し電極は $12\text{ cm} \times 27\text{ cm}$ の面積にわたって透過率大略40%のビーム引出し孔が設けられており、各孔から引出されたビーム要素はビームラインの適当な点に集束するように工夫されている。引出し電極には孔配列と交互に水冷パイプが配置され、イオン加速過程に於けるビームの発散や分子等との衝突現象に基づく電極への熱負荷が除去される。同様にソースプラズマ発生部の電極もアーク放電フィラメントの輻射、逆流電子などによる入熱を除去するために水冷される。これらの冷却には抵抗率の大きな純水が使用される。各電極間の絶縁はセラミック（酸化アルミナ磁器）によって行われ、電極材料は無酸素銅及びモリブデンを主としている。

各ビームラインには2台のイオン源がそれぞれ長手方向が上下になるように角度調整機構のイオン源フランジに取付けられ、その外周はイオン源磁気シールドで囲われて外部からの漏洩磁場を遮蔽している。

3.1.2 イオン源用電源

イオン源用電源の各ユニットは既に完成したJT-60用中性粒子入射装置原型ユニットのイオン源用電源に相当するものであり、その構造や構成は基本的には原型ユニットのそれと同一のものであるが、受電条件や設置の許容条件等を考慮して一部の機器および小型化したものである。

イオン源用電源はイオン源2台に共通の電位を与える一式の加速電源、一式の減速電源と、イオン源2台に別々の電位を与える2式のアーク電源、2式のフィラメント電源、2式のソースコイル電源、1式の高電位テーブル・ガスダクト、偏向磁石電源打消コイル電源、制御系、安全設備などから構成される。加速電源と減速電源を合せて引出し電源、偏向磁石電源と打消コイル電源を合せて磁場電源、イオン源ガス導入系、ソースコイル電源フィラメント電源及びアーク電源を合せてPIG電源という。

加速電源は、イオン源の第1正電極及び第2正電極にそれぞれ独立に正の電位を与えるための

ものである。減速電源はイオン源の負電極に負の電位を与える。

アーカ電源、フィラメント電源、ソースコイル電源、ガス導入系などは絶縁トランスに第1正電極電位に持ち上げられた上で各々必要な電位に固定される。

ビームラインの偏向磁石および打消コイルはそれぞれ偏向磁石電源及び打消コイル電源にて励磁される。制御系はこれらの各機器を制御する他、必要な機器の信号をモニターするものである。

3.1.3 ビームライン

ビームラインは合計14ヶのビームラインユニットと7個の配管用ヤグラから構成され、トラス周方向7ヶ所に設置される。14ユニットのうち7ユニットは中性ビームを斜下方からトラスに打込み（これを下ユニットという。）残りの7ユニットは、上方からトラスに打込む（これを上ユニットという。）ものである。上ユニットは下ユニットの上部に取付けられ、下ユニットは真空容器であると同時に上ユニットの支持構造の役目も兼ねている。上ユニットの内蔵機器の配置は基本的には下ユニットとトラス中心面に関して対称である。その支持構造の詳細は異なる。

ビームラインの代表的構成機器の名称を第4.2-1図に示す。ビームラインはイオン源から引出されたイオンビームを中性ビームに変換してトラスに入射するとともに中性化セル通過後もイオンの状態にある残留イオンビームの処理を行う。また、イオン源から中性化セルを通して流出していく室温の中性ガス、ビームが壁面に当ったときに発生するガス等を排気し、トラスに流入する中性ガス流量を許容値内に抑えるための設備である。ビームが持っているパワーは極めて大きいので、これらの熱量を処理するために除熱に関する特別な考慮がなされている。

中性化セルはイオン源から引出された水素イオンビームを荷電交換などによって、中性原子ビームとして取出すためのものである。ガスセルに必要な中性ガスの線密度はイオン源から流出してくれる水素ガスによってほとんどまかなわれ、不足分を中性化セル入口付近に設けられたガス導入口より補われる。

中性化セルに入ってくる1ビームは H^+ イオンの他、 H_2^+ 、 H_3^+ などの分子イオンも含まれ、これらはガスセル中の中性ガスと衝突して荷電交換や解離によって中性原子ビームとなる。中性化セルの壁へは発散性のビームが衝突することによって熱負荷が加えられるので水冷される。また中性化セルを通過する間にイオンビームが曲げられることは好ましくないので外からの漏洩磁場は厳重に磁気シールドされる。中性化セルは荷電交換に必要な線密度を保つとともにイオン源から流出してくれる中性ガス量をコンダクタンスによって抑えるという働きも兼ねている。

中性化セルを通過して出てくる中性ビームはその下流に設けられた偏向磁石や外部からの漏洩磁場の影響を受けず直進する。他方、中性化セルを通過したイオンビームはポールピースが矩形で反射型の偏向磁石によって曲げられ、ビームダンプに当てられる。ただしビームの中に含まれる H^- や不純物イオン等は偏向磁石を通過して他の受熱面（スタッタシールド）に当てられる。中性化セルを出てから偏向磁石に至るイオンビームはビームライン外部から漏洩磁場があると悪い影響があるのでこの近辺の磁場は打消コイルによって打消される。

ビームダンプに当たったイオンビームは熱化され、中性ガスとなって真空排気される。受熱面からの反射粒子やスパッタ粒子が直接クライオポンプを見込まない様にスパッタシールドが設けられる。

スパッタシールドはクライオポンプへのコンダクタンスが充分とれる様、真空排気の考慮もなされている。スパッタシールドはビームダンプの他、ビームライン内の各所に設けられている。

偏向磁石のポール、コイル、ヨーク等は偏向されたビームの直撃を避けるために水冷されたウォータージャケットで保護されている。偏向磁石のコイルは金属ケースにより囲われ真空に面しているが、磁石のポールやヨークの表面は直接真空に晒される。

偏向磁石よりトーラス側にはカロリメータが設けられる。これは中性ビームのパワーや分布を測定したり、中性ビームをトーラスに入射せずにイオン源を運転するときのビームターゲットとして使用するためのものであってビームダンプと同じく水冷却される。中性ビームをトーラスに入射するときはカロリメータは下（上）方向に引下（上）げられ、ビームの進路を妨げないようにになっている。カロリメータへの冷却水の導入はカロリメータ駆動部のシリンドラを通して行われ、シリンドラー部の真空シールはペローズにて行われる。

クライオポンプは中性ビーム発生に伴って生じる室温水素ガスを排気するために設けられるもので合計6個のクライオポンプから構成される。差動排気系を有効に構成させるために主排気タンク内は仕切板及びガスリミター（偏向磁石に取付けられる）によって2つの部屋に分けられ、それぞれ2個ずつクライオポンプが設けられるものとする。この他主排気タンクの一部であるドリフト排気部には小型のクライオポンプ2個が設置され、中性ビームの通路での真空中度を良くするように働く。

中性ビームの通路に沿って、ビームが直接真空容器壁に当らないように水冷されたビームリミタが設けられる。

中性化セルはイオン源接続フランジに取付けられて固定されたが、イオン源接続フランジのイオン源側にはイオン源ゲートバルブが取付けられて、イオン源と中性化セルとの間を真空的に切離すことができるようになっている。これによってクライオポンプを作動させたままイオン源を保守したり、イオン源を大気に晒さずに主排気タンク内を大気にすることができる。

イオン源ゲートバルブとイオン源との間には角度調整機構が取付けられ、イオン源取付フランジの角度は遠隔操作が可能なようになっている。これによってイオン源内部や主排気タンク内を真空状態に保ったまま、精度よく、ビーム軸の角度をトーラスのNBIポートの中心付近に向けさせることができる。

イオン源は外部からの漏洩磁場の影響を受けぬ様磁気シールドされる。磁気シールドの壁面にはイオン源から発生するX線をシールドするための鉛板が内張りされている。

以上のようなビームライン機器を収納する真空容器として主排気タンクがある。主排気タンクの下部にはアンカーフランジに接続される下部スカートが、また上部には上ユニットと接続されるよう上部スカートが取付けられる。ビームライン中心軸に沿ってドリフト排気部及びイオン源部接続ポートが設けられている。

主排気タンクのドリフト排気部端面には高速シャッターが取付けられていてトーラスへビームを入射する前後に開閉し、中性水素ガスの逆流を防止する。

金属シールゲート弁はNBIポートと主排気タンクの間を仕切るためのもので、NBIポートの端面フランジに接続され、本体真空容器支持支柱から支持される。

金属シールゲート弁と高速シャッターとは接続ペローズにて接続される。

ドリフト排気部にはビームの分布を測定するためのビームモニタが設けられ、また本体真空容器内面の表面温度測定用赤外線カメラ用の窓が設けられる。

その他ビームラインには常時モニターのための各種計測機器が含まれる。

配管用ヤグラはビームラインユニットの後方に位置し、配線、配管の支持に使われると同時に、ステージングのサポートや保守作業員のアクセスを確保するためのものである。配管用ヤグラには回転型ジブクレーンが取付けられており、イオン源やイオン源磁気シールド、中性化セル等の解体組立の際に使用される。

ステージングは主排気タンク周辺及び主排気タンクと配管用ヤグラを接続し、配管、配線及び保守作業員のアクセスを確保するためのものである。

安全確保のための設備として高電圧使用区域への立入りを禁止する安全柵、水素ガス検器などが備えられている。

付帯設備としての計測器類とは主としてNBI加熱装置の各種運転に必要となる計測器類を指す。

3.1.4 1次冷却系

1次冷却系は純水閉ループを構成し、ビームラインやイオン源の各受熱機器を冷却する他、イオン源用電源に含まれるレギュレータバルブ（略称RV）等を冷却する。このように冷却対象機器の中に高電位に浮いた状態で使用される機器が含まれるため、1次冷却水の電気抵抗率は常に高い状態に保たれるよう、循環量の一部はつねにイオン交換樹脂を通る。

1次冷却水は1次冷却棟加熱1次冷却ポンプ室に設置されたポンプで加圧した後JT-60地下ダクトを通って実験棟地下のPIG電源室に設けられたマニホールドに送られる。マニホールドは#1～#8ユニット用のものと#9～#14ユニット用の2系統に分かれているため、上記送水管はポンプ室を出るところから2系統に分かれて設置される。マニホールドには実験室1階床面のNBI貫通孔の直下に分岐部が設けられており、そこからたち上った各分岐はヤグラ内で各ユニットに分配され、被冷却機器と接続される。

レギュレータバルブの冷却水は#1～#8ユニット用のものに関しては加熱電源棟地下を通る配管により、また#9～#14ユニット用に対しては地下ダクト内で分岐した配管により圧送される。

3.1.5 冷媒循環系

冷媒循環系は主排気タンクに設けられたクライオポンプを冷却して作動させるためのものでクライオポンプのうちクライオパネルを冷却するための液体ヘリウムループと、シェブロンバッフル及びシールド板を冷却するための液体窒素ループなどから構成される。

液体ヘリウムループはクライオパネルと冷凍機とをトランスファーラインで接続し、大気に触れることなくヘリウムガスを循環させるいわゆる閉ループを構成し、クライオパネルは37Kに冷却されます。またヘリウムを回収するための設備を有する。これら一連の設備は本ループの長時間連続運転を可能とする他、その信頼性、安定性、運転の容易さに於いてもJT-60の目的に耐えるものである。

液体窒素ループは大型貯槽とクライオポンプとをトランスファーラインで接続し、液体窒素を

移送させるもので、クライオポンプでガス化した窒素ガスは窒素ガス加温器を経由した後常温配管を通って大気へ放出される。（オープンループ方式）

3.1.6 補助真空排気系

補助真空排気系は主排気タンクの粗引き、イオン源の粗引きに使用されます。またこれらの個所における真空度がクライオポンプ作動領域に至るまで補助排気するために使用される。

本設備は、ターボ分子ポンプを主ポンプとした乾式排気系統であって、クライオポンプを作動させない場合にも短パルスのビームを処理できる能力を有するものである。

補助真空排気系は主排気タンク近辺に取付けられるターボ分子ポンプを中心とした主排気タンク排気系と実験棟地下室加熱ポンプエリヤに設置されるT MP 背圧ポンプ系、粗引きポンプ系、テスト排気系、ゲートバルブなどの動作源となる圧空系などから構成される。

3.1.7 受配電設備

NBI 加熱装置のための電力は中央変電所より直接送られてくる定常負荷用電力と加熱用発電設備から送られてくる変動負荷用電力とに分けられる。前者は1次冷却系、補助真空排気系、冷媒循環系、制御系など定常に使用するためのもので加熱電源棟に設けられる定常系配電設備により取扱われる。後者はイオン源用電源のうちパルス負荷をとる電源に供給され、加熱用発電設備のMG出力をMG出力分岐盤から供給され、さらに加熱電源棟にて各電源ユニットに供給される。また、前者の中にはNBI 14ユニットのうち1ユニットについてのみ調整試験を行うことが可能な受配電設備も含まれている。

3.1.8 制御系

NBIの制御系は制御棟中央制御室に設置されるNBI操作デスク、グラフィック盤、ビームライン系制御盤、電源系制御盤、NBI計算機システム、制御室CAMAC盤、実験棟に設置される冷媒循環系制御盤、補助真空排気系制御盤、現場CAMAC盤、中継盤などから構成され、NBI加熱装置の全システムを統括する。

3.2 主要機器の性能

3.2.1 イオン源

タイプ：バケット型イオン源

印加電圧：最大 100 kV

イオンビーム電流：最大 40 A

ビームの発散：基準値 1.0° (0.9° ~ 1.2°)

ビームパルス幅：最大 10 秒

引出し電極の大きさ：12 cm × 27 cm (透過率 40%)

イオンビームの成分比：(設計値 75 : 20 : 5
達成値 86 : 12 : 2)

冷却水量： { 電極： $164 \ell/\text{min}/2$ イオン源
 アーキチャンバー上ブタ： $100 \ell/\text{min}/2$ イオン源
 品数： 2台／ユニット

3.2.2 イオン源用電源

(1) 加速電源

- 出力端電圧可変範囲： $20 \sim 100 \text{kV}$ (連続可変)
- 電流容量： $20 \sim 100 \text{kV}$ で 9.6 A
- 負荷パルス幅： $10\text{ms} \sim 10\text{s}$
- 繰返し率： $1/30$ 以下
- 電圧変動率： 受電電圧変動 $+7.5\% \sim -10.5\%$ ，周波数変動 $77.6 \sim 54.2 \text{Hz}$ に対して，出力電圧変動 $\pm 2.5\%$ 以下。
- 第2正電極出力端電圧可変範囲： 第1正電極電位より $- (10 \sim 30) \text{kV}$ 連続可変。
- 第2正電極電流値： $0 \sim \pm 2.0 \text{ A}$
- 電流遮断 (GTO遮断) 時間： $100 \sim 150 \mu\text{s}$

(2) 減速電源

- 出力端電圧可変範囲： $-1 \sim -2 \text{kV}$
- 電流値： 2.0 A
- 電圧変動率： $\pm 2.5\%$ 以下

(3) アーキ電源

- 最大出力： DC $120 \text{V} / 1200 \text{A}$
- 負荷パルス幅： $10\text{ms} + \alpha \sim 10\text{s} + \alpha$ ($1\text{ms} < \alpha < 999\text{ms}$)
- 電圧リップル： $3\% P - P$
- 品数： 2式／ユニット

(4) フィラメント電源

- 出力： DC $15 \text{V} / 300 \text{A} \times 8$ 系統
- 負荷パルス幅： ピームパルス幅 + 最大 6 秒

(5) イオン源ガス導入系

- 最大流量： $5 \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
- 使用最大圧力： $0.5 \text{kg/cm}^2 \text{G}$

(6) 偏向磁石電源

- 出力： DC $65 \text{V} / 1500 \text{A}$ (コイル端において)
- パルス幅： 最大 1.3 秒
- 電流変動率： $\pm 1\%$ 以下

(7) 打消コイル電源

- 出力： DC $160 \text{V} / 1200 \text{A}$
- パルス幅： 1.3 秒

3.2.3 ビームライン（以下の記載は1ユニットにおける仕様）

(1) 中性化セル

- 断面： 14cm×29cm
- 長さ： 167.3cm（延長部を含めると中性化セルA = 186.1cm, 中性化セルB = 210.2cm）
- 材質： OFCu
- 冷却方式：ホロー導体埋設による冷却チャンネル。
- 最大入熱量： 480 KW／本
- 冷却水量： 430 ℥／min
- 員数： 2式／ユニット
- 中性化セルガス導入量 (H_2)： 2.66 Pa・m³／sec

(2) 中性化セル磁気シールド

- 外側シールド 電磁軟鉄
- 概略形状： 110cm×46cm×175cm
- 厚さ： 24mm^t
- 内側シールド μ メタル
- 概略形状： 95cm×30cm×170cm
- 厚さ： 5 mm^t
- シールドファクター 1500

(3) 偏向磁石

偏向方式	71°反射型
重 量	鉄芯部分 4.9ton
最大磁束密度	1.5 KG
起磁力	5.9×10^4 AT
ポールピースギャップ巾	38 cm
ウォータージャケット熱流束	最大 500W/cm ²
ウォータージャケット冷却水量	1100 ℥／min
ガスリミターのコンダクタンス	1.1×10^5 ℥／s

(4) ビームダンプ

最大入熱量	5.6MW 10sec
最大熱流束	500W/cm ²
最大表面温度	300°C
冷却水量	2380 ℥／min
大略寸法	開口 110cm 奥行 150cm
フィンチューブ	内径 10 φ 肉厚 2 mm
材 料	0.2 %銀入り無酸素銅
装着熱電対	2 2 本

(5) カロリメータ

最大入熱量	2.4 MW 0.5sec～1.0sec
-------	----------------------

最大熱流束	$1 \text{ KW}/\text{cm}^2$
最大許容軸ずれ	0.3°
冷却方式	慣性冷却 (ダン子の串差し)
冷却水量	$250 \ell/\text{min}$
上下駆動幅	110cm
駆動方式	ピストン空圧駆動
装着熱電対	17本
最大表面温度	238°C

(6) クライオポンプ

排気速度	P_1 室, P_2 室, P_3 室
	$6.5 \times 10^5 \ell/\text{s}$, $6.5 \times 10^5 \ell/\text{s}$, $3 \times 10^4 \ell/\text{s}$
パネル冷却方式	LHe ブール沸騰
クライオパネル温度	3.7 K
シェブロン, シールド板温度	77~80K
ポンプ概略寸法	$190 \times 1090 \times 4260 \text{h}$
クライオパネル入熱量	定常 30 W パルス 60 W
シェブロン, シールド板入熱量	定常 2200 W パルス 2600 W
シェブロン反射率	1%
シェブロン単位面積当りの排気速度	$9.3 \ell/\text{s}, \text{cm}^2$
材 質	クライオパネルSUS 316 (P_3 室パネルはA ℓ 蒸着処理) シェブロン A ℓ (表面黒化処理)

(7) 第1ビームリミター

形 状	$36 \text{ cm} \times 56 \text{ cm}$ レーストラック
最大入熱量	102KW
最大熱流束	$250 \text{ W}/\text{cm}^2$
最大許容軸ずれ	0.3°
冷却方式	慣性冷却
冷却水量	$22 \ell/\text{min}$
最大表面温度	250°C
材 質	0.2%銀入り無酸素銅

(8) 第2ビームリミタ

最大入熱量	105 KW
最大熱流束	$250 \text{ W}/\text{cm}^2$
最大許容軸ずれ	0.3°
冷却方式	慣性冷却

冷却水量	22 ℓ/min
最大表面温度	250 °C
形状	37 cm × 50 cm レーストラック
材質	0.2 %銀入り無酸素銅

(9) 打消コイル

◦ 第1打消コイル

アンペアターン	59800AT
概略形状	178 cm × 36 cm × 11 cm
冷却水量	14 ℓ/min (圧損 5 kg/cm²G)
コイル	無酸素銅ホロー導体 (15 mm × 13.5 mm)

◦ 第2打消コイル

アンペアターン	12000AT
概略形状	142 cm × 50 cm × 12 cm
冷却水量	12 ℓ/min (圧損 7 kg/cm²G)

(10) 角度調整機構付イオン源ゲートバルブ

イオン源ゲートバルブ

開口	19 cm × 34 cm
シール方式	バイトンO-リング
員数	2式

角度調整機構

角度調整範囲	± 2 °
設定精度	± 0.05 °
ベローズ部寸法	内寸法 19 cm × 34 cm 長さ 8 cm
駆動機構	遠隔手動
員数	2式

(11) イオン源磁気シールド

大略寸法	1400 ℓ × 1700 W × 2000 h mm
外側シールド	SS 15mm ^t 鉛5 mm ^t
内側シールド	μメタル 5 mm ^t
シールドファクター	200

(12) 金属シールゲート弁

口径	600mmφ
ガスケット	バイトンO-リング
閉状態でのHeリーク量	1.3 × 10 ⁻⁹ Pa · m ³ /s 以下
動作時間	約1.5秒

(13) 高速シャッタ

口径	600mmφ
----	--------

開又は閉に要する時間	1秒以下
シャッタ閉時のコンダクタンス	$200 \ell/\text{s}$
ベーン板重量	2.4 kg
揺動角度	60°
リーク量	$1.3 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下

(14) 接続ベローズ

寸 法	内径 600φ, 外径 700φ, 自由長 303mm
	フランジ面間距離 378mm
寿 命	軸直角方向 ± 15mm に対して 1000 回
	軸方向 ± 100mm に対して 1000 回
温 度	-50~150°C
ベローズビームリミター	無酸素銅製 (冷却水量 22ℓ/min)

(15) セラミックリング

寸 法	内径 660mmφ, 外径 830mmφ, 厚み 20mm
材 質	アルミニナキャスティングセラミック
耐電圧	AC 5 kV以上
リーク量	$1.3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下
アウトガス量	$2.7 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}/\text{cm}^2$ 以下

(16) ビームラインガス導入系

a) 中性化セルガス導入系

流量制御	圧電素子弁PV-10の電圧制御
供給ガス量	$2.66 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
中性化セルガス吹出し孔	10mmφ
リザーバ容量 (ビームモニターガス導入系と共に)	30ℓ

b) ビームモニタガス導入系

流量制御	圧電素子弁PV-10の電圧制御
供給ガス量	$2.66 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{h}$

(17) 主排気タンク

寸 法	内径 2500φ, 厚み 20mm, 全体高さ 8000 mm 真空部高さ 5000 mm
材 質	SUS 304
放出ガス量	$2 \times 10^{10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}/\text{cm}^2$ 以下
リーク量	$1.3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下

(18) ビームモニター

検出部	固体素子センサー カメラ
真 空 窓	バイレックスガラス
反射防止板	黒色塗装ハニカム板

(19) 赤外モニター

赤外カメラ	日本アビオニクス製TVS-4100
	フレームタイム 33ms
温度	室温～1000°C
冷却方式	アルゴンガス断熱膨張
反射ミラー	SUS 304に金蒸着
真空窓	サファイヤ(10mm ^t)
可視カメラ	固体素子センサー(赤外画像とのミキシング機構付)
放射線シールド	10mm ^t の鉛

(20) 分光モニタ

分光計	日本分光製CT-25 ND型
測定方式	光ファイバーでの分光信号伝送による遠隔測定

3.2.4 一次冷却系

一次冷却水流量	ビームライン循環系 2100 m ³ /hr
	R V 循環系 760 m ³ /hr
ポンプ吐出圧力	15 kg/cm ² G
1次冷却水電気電導度	2 MΩ・cm 以上
フラッシング時熱負荷	11.3MW×0.5 s × 10 ^{shot} /cycle・unit
実験入射時熱負荷	7.21MW×10 s × 1 ^{shot} /cycle・unit
リザーバタンク容量	216 m ³

3.2.5 冷媒循環系

冷凍機冷凍能力	3.7 K 2400 W
主圧縮機	スクリュー式、ガス処理量 5000Nm ³ /hr × 2
減圧ポンプ	" " " 1100Nm ³ /hr × 2
クライオポンプ冷却方式	プール沸騰閉ループ式
温度制御方式	減圧ポンプによる圧力制御
液体Heデュワー	3000 ℥
He 中圧タンク	100 m ³ × 2
液体窒素貯槽	100 m ³ × 2
液体窒素循環方式	貯槽圧送方式

3.2.6 準助真空排気系

T MP 排気系排気速度	4000 ℥/s (Hz)
粗引系排気時間(大気圧～2 Pa)	3 時間／14 ユニット

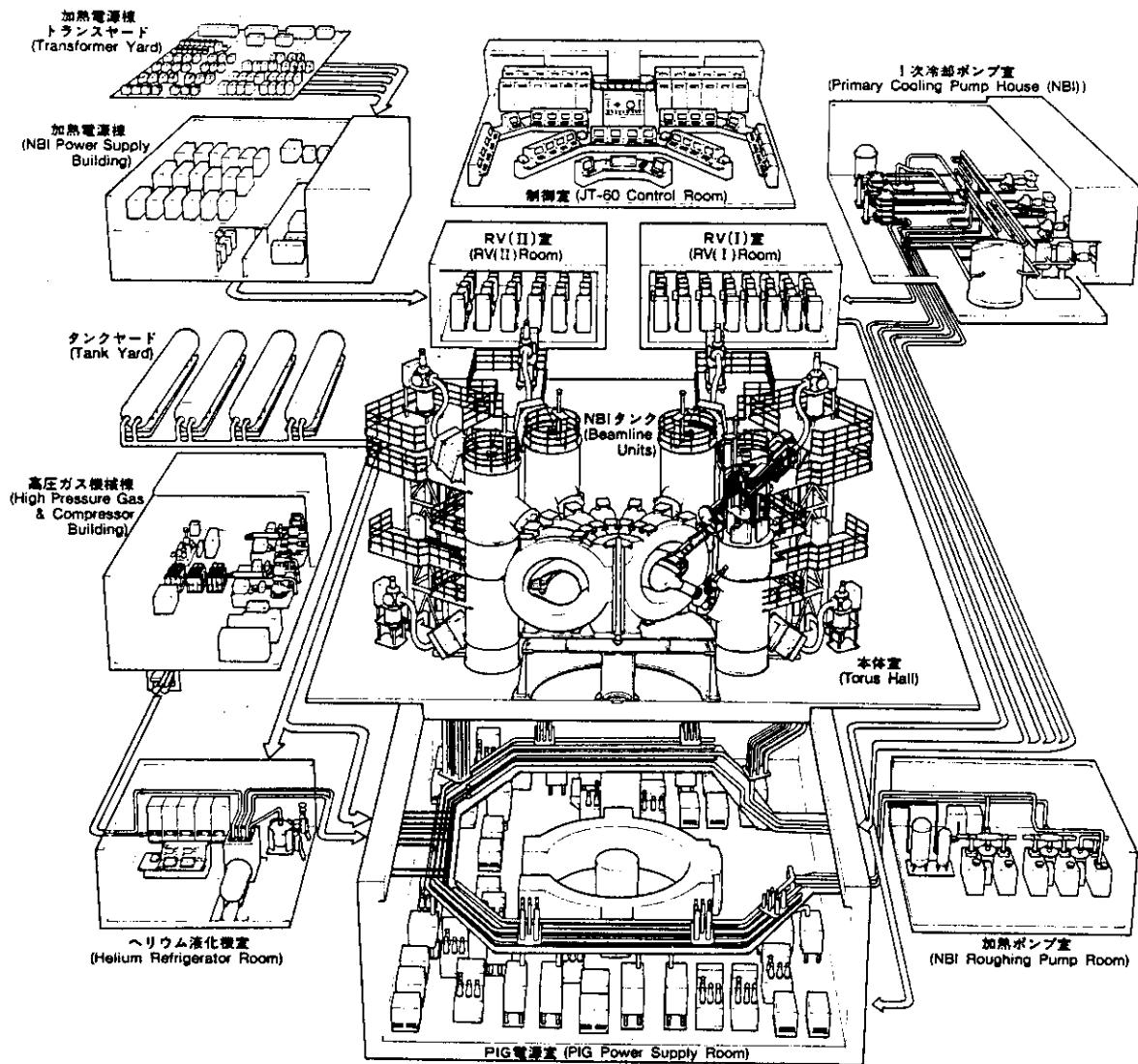
3.2.7 制御系

制御盤システム

NBI計算機システム

3.2.8 受配電設備

変動負荷設備容量	249.2 MVA (加熱MGより受電)
PIG電源系	25.2 MVA
加速電源系	224.0 MVA
定常負荷設備容量	29.45 MVA
常用系	11.2 MVA
非常系	0.25 MVA
単一試験系	18.0 MVA



第3-1図 JT-60 NBI 全体構成図

4. 各設備の設計と技術開発

4.1 イオン源

4.1.1 はじめに

中性粒子入射装置の基本設計及びその基本性能は、イオン源の性能に大きく依存している。すなわち、イオン源の性能が決ってはじめて、ビームラインのパワーフロー、受熱機器への熱流束、必要排気量、電源性能等が決まるのであり、どの程度のイオン源が開発できるかによって、NBIの性能は大きく左右される。しかしながら、イオン源の開発をまってからNBIの設計開発を始めたのでは開発期間が長くなり実機の建設に間に合わすことができない。このため、イオン源の開発を始めた当初は、当時のイオン源性能の状況、JT-60NBI用イオン源として必要とされる性能を勘案して開発目標を定め、テストスタンドを建設してその開発に着手した。高出力イオン源の開発は、英国カラム研究所、米国オークリッジ国立研究所、カリフォルニア大学のローレンスバークレー研究所等がかなり先行しており、その後を追って原研でもイオン源の開発に着手した。既に10数年が経過したが、当時は約25kV, 6A, 0.1秒程度の大電流水素正イオン源が欧米で開発されたばかりであり、それ自体当時としては画期のことであった。しかし、JT-60NBI用イオン源としては、ビームパワーで1桁、ビームパルス幅で2桁近く大きい大電流長パルスイオン源を開発することが必要であった。約10年に及ぶR&Dの結果、イオン源性能の目標値を達成するとともに、高出力イオン源に関しては先発の他の研究所のものに比して同等又はそれ以上の性能を出せるまでになった。¹⁾ 第4.1-1図及び第4.1-1表に、JT-60用イオン源の断面図及び達成した性能を示す。具体的にどの様な点にイオン源開発が行われてきたかについて以下に述べる。

4.1.2 高電圧化

トカマクプラズマの高密度化及びプラズマ径の増大にともない、プラズマ中心までビームが達するだけのエネルギーをビーム粒子に与える必要があり、ビーム加速電圧は従来の20~30kVから100kVまで上げる必要がある。高電圧化に関しては、特に加速電源の開発が重要となる。電源とイオン源は表裏一体をなすものであり、イオン源だけよくても、また、電源だけよくても本来の性能を発揮することはできない。電源として、加速電圧のみを増大させるのは何ら難しいことではなく、高エネルギー加速器の分野から見れば100kV程度ははるかに低い電圧である。しかしながら、電流としては数10A以上が必要であり、このような大電流で高電圧の制御を行うことは容易ではない。さらに、絶縁破壊時に加速電極に入るサージエネルギーは、加速電圧の2乗に比例して増大するため、サージ対策がイオン源を安定に運転する上で極めて重要である。詳しくは4.3節を参照されたい。

一方、イオン源自体も高電圧化にともなって対策を十分にとる必要がある。すなわち、加速電圧及び加速電極間の間隙の増大にともなって、周辺のガスとビーム粒子との衝突によって生じる

2次粒子、特に逆流電子が増大し、加速電極やアークチャンバー上蓋の熱負荷が増大する。このため、放電ガス圧が数 m Torr 以下の低放電ガス圧のプラズマ生成部の開発を行うとともに、2次粒子による熱負荷が小さくなる様な引出し電極孔の形状について R&D を行った。それでも引出し電極やアークチャンバー上蓋には、 $100 \sim 200 \text{ W/cm}^2$ 以上の熱負荷に晒されることになり、その冷却構造について R&D を行った。詳しくは、以下の 4.1.4 項、4.1.5 項を参照されたい。

4.1.3 大電流化

JT-60 NB I の 1 ユニットあたり必要とされる水素イオンビーム電流は 70 - 80 A である。この電流を発生するため何台のイオン源を用いるかは、当初、議論の別れるところであった。多数のイオン源で分担すれば、イオン源 1 台当たりに要求される性能は低くなるが、電源等のシステムが複雑になる。逆に、単一のイオン源を用いれば、システムとしては簡単になるが、イオン源の開発が困難となる。その結果、選択されたのが 2 台のイオン源を用い、各イオン源の出力を 35 - 40 A とする事があった。

更に、この水素イオンビームを発生するためのイオン源の電極寸法は $12 \text{ cm} \times 27 \text{ cm}$ 、電極の透過度は 40 %、電流密度は $270 \sim 310 \text{ mA/cm}^2$ とする事が決定された。電流密度に関しては、その上限は、空間電荷制限則に基づき加速部に印加可能な電界の上限と、生成可能なソースプラズマの密度の上限から決定される。つまり、電流密度をあまりに高く設定すると、加速部に印加する電界が強くなり過ぎ、ひんぱんに放電破壊が生じるばかりでなく、ソースプラズマの密度が高いため、カソードの寿命が短くなったり、アーキングなどの不安定放電が起り易くなる。当時、 400 mA/cm^2 を越える電流密度も報告されていたが、それらはいずれも短パルスのイオン源であり、JT-60 の様に 10 秒という長パルスのビームを安定に発生させるためには、上述の制限から $270 \sim 300 \text{ mA/cm}^2$ が上限であろうと考えられた。実際、現在、世界で稼動している大出力、長パルスイオン源は全て $200 \sim 300 \text{ mA/cm}^2$ 以下の電流密度で運転されている。

電極の透過度は、電極の冷却構造と電極孔の面取り (shaping) から決定される。即ち、高熱負荷のもとで長パルスの運転を行うためには電極は強制冷却されている必要があるが、そのための冷却チャンネルを確保するためには透過度に上限がある。短パルスのイオン源においては透過度を 50 % 以上にする事も可能であり、実際に JFT-2M などの短パルスイオン源では 50 % の透過度の電極を使用した例もある。しかしながら、長パルスイオン源では、電極孔 1 列ごとに冷却チャンネルを確保する必要があり、そのため、透過度は 40 - 50 % が上限となる。更に、後で述べるように、JT-60 用イオン源は発散の良いビームを発生する事が要求されているが、そのためには加速部の電界の形を最適化するたむ電極孔の面取りを行う必要がある。このことも透過度を下げる一つの要因である。結局、JT-60 用イオン源では透過度は 40 % となった。

円形の電極孔を用いるかわりにスリット形の電極孔を用いれば、透過度を大幅に上げることができる。また、スリット形電極孔の場合、電界がソースプラズマ側へ侵透し易くなるために電流密度を上げることも出来る。この観点からスリット形電極孔の実験も試みた。しかしながら、文献²⁾ にみるように、スリット形の場合には電極孔に対して横方向の熱の逃げがないため、高熱負荷で長パルス運転の際には熱的に電極が破損し易いこと、また、ビームを発散良く引き出すこと

のできる運転領域が狭いこと（パーティアンスマッチの領域が狭い）の2つの理由のために、JT-60イオン源では採用しなかった。

こうして、電流値と電流密度、そして透過度が決れば、必然的に必要な電極面積が決る。電極は長パルスイオン源の場合、冷却チャンネル間のバランスの問題から矩形にならざるを得ない。また、冷却チャンネル方向には、冷却水の温度上昇の問題からその長さに上限がある。これらの事からJT-60イオン源の電極面積は $12 \times 27 \text{ cm}^2$ と決定された。

さて、JT-60用イオン源の開発に着手した当時、原研では 7 cm φの電極面積を持つデュオピガトロン型イオン源から 5 A の短パルスのビームを引き出した経験があるのみであった。³⁾また、世界的にみても、 $12 \times 27 \text{ cm}^2$ という広い面積から高い電流密度での長パルスビームの引出しというのは例がなかった。そこで、まず、問題は、如何にして広い面積に、安定に、しかも濃いソースプラズマを生成するかという事であった。当時、その可能性のあるプラズマ源としてはデュオピガトロン型プラズマ源とフィールドフリー型（無磁場型）プラズマ源とがあった。デュオピガトロン型は主に米国オークリッジ研究所で発展したものであって第4.1-2(a)図にみるように、カソードと中間電極間の放電で生じたカソードプラズマから電子を供給して、アーク放電を起こし（つまり、デュオプラズマトロン）しかも、電子を磁力線で保持して、負電位にバイアスされたプラズマ電極との間で往復運動（PIG運動）させることによりプラズマ生成率を高めたものである。一方、フィールドフリー型は米国バークレー研究所で開発されたものであって、名前の通り、磁場を使用しない方式であって、放電室中にタンゲステンフィラメントを挿入し、大電流アーク放電を起してプラズマを生成する方式である。第4.1-2(b)図にその模式図を示す。これらの他、仏国フォンテネローズ研究所で開発されていたプラズマトロン（第4.1-2(c)図）もNB1用のプラズマ源として有望なものであったが、これはデュオピガトロンの変形と做すことが出来る。

これら2つのプラズマ生成法には一長一短があった。即ち、デュオピガトロンは磁場を使用しているため、電子やイオンの閉じ込めが良く、プラズマ生成効率が高かったが、反面、その磁場のために大きな密度勾配が生じ、広い面積に一様なプラズマを生成することは困難であった。それと対照的に、フィールドフリー型の場合には、磁場を使用しないためにプラズマの空間的一様性は良いが、プラズマの閉じ込めが悪いために生成効率が低い。生成効率が低いということは、濃いプラズマを生成するためには大きなアーク放電パワーを必要とするということであり、それは単に電源の問題ばかりでなく、カソードの寿命の問題、放電の不安定性の問題などを引き起す。

これらの問題のため、開発に着手した当初は、どちらの方式を採用するか決め兼ねていた。ただ、原研としてはデュオピガトロン方式により多くの経験があったため、まず、デュオピガトロン方式を中心を開発を進めた。この方式の欠点である空間的一様性を改善するため、磁場コイルを同軸状にして磁力線を広げるようとした同軸デュオピガトロン⁴⁾、矩形の主放電室とスリット状のカソード室を組み合せた矩形デュオピガトロン⁵⁾等を開発した。いずれも空間的一様性に関してはかなりの改善が見られたものの、効率、放電の安定性等に問題があり、JT-60用イオン源の方式を決定するところまでは至らなかった。

その頃、新しい方式のプラズマ源が、英國カラム研究所で開発された。それは従来あった多極

磁場型プラズマ源を改良、発展させたもので、磁気多極プラズマ源あるいは通称バケットソースと呼ばれるものである。これは、第4.1-2(d)図にみるよう、放電室の周囲を永久磁石で覆い、放電室中に挿入したカソード（通常はタンクスチンフィラメント）と放電室の壁との間のアーケ放電によりプラズマを生成するものである。永久磁石の極性を隣り合うものどうし、あるいは隣り合う列ごとに逆にすることにより放電室の内部に、フィールドフリー型プラズマ源と同様に磁場のない領域ができ、その領域中で電子やイオンは自由に動き回れるため、空間的一様性は極めて良い。また、放電室のプラズマ電極以外の面は全て磁場で覆われているため、デュオピガトロン型と同様にプラズマの閉じ込めが良く、生成効率も高い。このように、磁気多極プラズマ源は、先行する2つのプラズマ源（デュオピガトロンとフィールドフリープラズマ源）の長所ばかりをとつて、しかも、構造を簡単にしたものであり、いわば相対する2つのプラズマ源が止揚されたものと做すことが出来る。

このように、磁気多極プラズマ源は、空間的一様性とプラズマ生成効率に於て優れているばかりでなく、それらに付属することであるが、ガス効率や制御性の面でも優れている。うまく設計された磁気多極プラズマ源は、極めて低いガス圧のもとで（たとえば0.1～0.2 Paという低いガス圧のもとでも）低密度から高密度まで、単に印加するアーケ電圧を調整するだけで変化させることが出来る。ただし、そのような磁気多極プラズマ源を設計するためには、磁場配位、カソードの位置、実効的なアノード面積、カソード面積、一次電子の軌道などについて微妙な最適化が必要である。これらを最適化することなく設計した場合には、製作してはみたが全く放電しない、動作が不安定である、一様性が悪いというような思わぬ事態に遭遇することもしばしばあり、注意が必要である。

ともあれ、原研に於ても何台かの磁気多極プラズマ源を製作し、試験した結果、以上の様な長所が判明したため⁶⁾、最終的にJT-60用イオン源には磁気多極プラズマ源が採用されることとなつた。

なお、現在では、磁気多極プラズマ源を用いて $14 \times 90 \text{ cm}^2$ 程度の領域に 250 mA/cm^2 程度のイオン飽和電流密度をもつプラズマを、安定にかつ効率良く生成できるまでに至っている⁷⁾。また、更に、広い面積に濃いプラズマを生成する事に対する問題は、特に無いように思われる。

4.1.4 長パルス化

イオン源の長パルス運転のために必要な条件は前項迄に述べてきた様な物理的特性を時間的に一定、即ち定常的に維持することである。イオン源の動作をこの様な点から検討すると、定常とは対象とする現象により定義が別れることが判る。即ちアーケ放電についていえば放電プラズマの閉じ込め時間は μs の桁であり、1 ms もすれば放電は充分定常的である。一方放電に与えるガス圧の影響という点ではガスの時定数 体積 / コンダクタンス で決まるが、これ以外にも放電が開始されるとガスの壁面への吸着が増加し、吸着と脱着がバランスする迄の時間が一つの目安となる。更に長いものは熱的、機械的なものでバケットソースへのラインカスプ部へのアーケ放電パワーの集中、カソードのアーケ電流による温度変化及び放電特性の変化、加速電極への熱負荷による電極の歪みとビーム収束の変化等が挙げられる。

これらの内、JT-60とJET以前のイオン源では動作時間は約0.1秒であつて0.5秒も動作

すれば充分長パルスであった。従ってイオン源は0.1秒のパルス長さを一つの標準として発展して来ていたわけで、その段階に於て0.1秒迄の長パルス化は終了している。JT-60イオン源の開発の段階でなお残っていた問題はアーク放電関係ではカソード、カスプへの熱集中、電極の冷却と変形、加速部を逆流する電子束の評価と対策が挙げられる。

(1) 逆流電子束

加速電極にてイオンを加速する際、電極間に残っている中性ガスとビームとの反応により低速のイオンや電子が生成され、加速電圧より低いエネルギーまで加速される。これらはソースプラズマより引出されるイオンに比較すると加速される方向がそろわず、電極に衝突する他電子は逆流電子束となってソースプラズマ生成部に熱負荷を与える。逆流電子束の量は加速領域の中性ガスの厚み($n \ell$)によって決るので、ソースプラズマ生成部の性能が悪くアーク放電の最低運転ガス圧が高い程逆流電子束が大きくなる⁸⁾。

イオン源開発の初期に於ては開発されるソースプラズマ生成部の性能を控え目に評価する必要から大型の逆流電子ダンプを持つイオン源が検討された。⁹⁾それが三角形の上蓋で特徴付けられるラムダトロンであり、開発の初期に於ては逆流電子ダンプによるソースプラズマ閉じ込め性能の劣化が更に逆流電子束の増大を招くという悪循環も見られた。しかし前述の様にソースプラズマの閉じ込めが良好な多極磁場型ソース部が開発されるに及んでこの問題も同時に解決された。即ちソースプラズマ生成部が0.3 Pa以下という低圧力にて0.3 A/cm²以上のビームを加速することが可能となつたが、このソースによって逆流電子束も極めて低いレベルに抑制することが可能となり、逆流電子ダンプはカスプ磁石を取付けた単なる上蓋の一部とする事ができた。JT-60イオン源に於ては上蓋はカスプ磁石の配置された銅板であつて、逆流電子束はビーム加速電力の1%即ち40 kWになるがこれは平均150 W/cm²の熱負荷に相当する¹⁰⁾。カスプ部へ電子束が集中する可能性¹¹⁾も含め念のためにこの受熱板は「吊り天井」方式により真空中に支持され熱サイクルの繰返しによりカスプ部に割れが生じても空気リークが生じない設計とした。その結果原型ユニット用イオン源の完成後6年以上経過した現在でもこの部分に何らの問題も生じておらず、設計の妥当性が確認されたといえる。

(2) 加速電極の長パルス対策

加速電極への熱負荷は前項にても触れた様に加速電力の1%未満である。しかし加速電極は厚さ1.5～2 mmという薄い金属板の40%以上の面積に孔をあけたもので、その熱容量は大変小さい。従って0.1秒定格の電極でもビーム引出し領域(多孔部)に冷却管を配置するのが普通である。詳細な実験によれば、¹²⁾板厚が2 mmの銅板に3.8 mm径の引出孔列と外径1.8 mmの銅の冷却管を交互に配列し、透過率を40%とした場合、マトリックス部分の温度変化の時定数は12 msである。電極全体では冷却管やフランジ部などのマトリックス部以外の熱容量が加わるが、実際の測定では温度が定常値に到達するのに1秒は要しない。従って電極の冷却という点では1秒用電極も10秒用電極もほぼ同じ程度の冷却能力を持たせる必要がある。JT-60イオン源の場合、最も熱負荷の高いのはプラズマ電極であり、標準的動作条件下では加速電力の0.8～1%，ソースプラズマ生成部のガス圧が高い場合には2%の熱負荷が入る。これを除熱するために、4 mmの引出し孔列と内径1.2 mmの冷却管を交互に配列しており、

冷却管 4 本に最大 $25 \ell / \text{min}$ の冷却水を循環させている。この場合管内の流速は 9 m/s となって熱負荷の点からは乱流熱伝達領域にて動作しており、限界熱流束という点からは非常に余裕のある設計になっている。

しかしこの電極は厚さが薄く、且静電的特性がある時間維持することが必要である。その場合電極全体の熱変形が問題となってくる。JT-60イオン源では $12 \times 27 \text{ cm}^2$ の多孔部を約35 cm角の枠で支持しているが、単なる平板状の電極の場合、 20 kW 以上の熱負荷が入る領域では少しづつ熱変形が生じ、ビームON直後とビームONから2~3秒後のビーム集束に大きな変化が認められた。この原因は多孔部の温度上昇が電極板や冷却水マニホールドを通して全体に拡散する過程でたわみが生ずることにあると推定される。この対策として、第4.1-3図に示す様に多孔部を小さく分割しそれをリベットで固定し、リベットのあそびと周囲に設けたベロー構造で熱膨張差を吸収する構造のもの(b)と、多孔部の周囲を厚く(5 mm)し、熱変形は多孔部のみに限定する構造のもの(c)を試作し試験した。その結果変形量は両者共大変小さくなり、ビーム引出しの安定性は大幅に改善された。¹³⁾ 热変形量は前者の方が小さいが、ベロー部の塑性変形、電極の製造工程への配慮によって後者の構造をJT-60イオン源に採用している。

JT-60イオン源の熱的問題が現在の様に非常にシンプルな構造で解決されたことは、 0.3 Pa 以下という低ガス圧で安定に放電できる高性能なソースプラズマ生成部が開発できたことによっており、物理的な研究の進展が熱的構造的な困難の解決にとって本質的であったといえる。

(3) ソースプラズマ生成部のパワーフロー

多極磁場型ソースプラズマ生成部の性能はプラズマの閉じ込め特性に依存しており、閉じ込め特性の向上には強いカスプ磁場でチェンバー壁を覆うことが重要である。カスプ磁場を強くするとカスプ部への損失が減少するが、同時にカスプのリーク幅が狭くなりパワーフラックスは上昇する。カスプ部へのパワーフラックスの値を求めるため熱電対にてパワーリークの分布形状を求めた、又それと独立にソースチェンバー各部への熱負荷を冷却水温度上昇より求め両者をつき合わせる事によってパワーフラックスの絶対値を評価した。¹⁴⁾ その結果JT-60イオン源に於てはカスプ部へ 500 W/cm^2 の熱流束が入ると評価できた。この熱流束は局部的なものであるが、容易に熱疲労を生じさせる大きさであり、長パルス運転のためには到底無視できない。熱応力の検討を行った結果、¹⁵⁾ 材質を銅とし且冷却管をカスプ部の至近距離に配置するという対策を行った。その結果、原型ユニットに於けるステンレス製のソース部に比較して故障が無くなり、現在迄の所トラブルは一件も生じていない。

(4) 陰極開発

イオン源の構成要素で最も激しい損傷を受けるのは陰極であり、陰極の長寿命化は直接的にイオン源の信頼性および耐久性の向上に貢献する。JT-60 NBI用イオン源に用いられる陰極は、放電電流が数百から千アンペアで最大10秒という大電流長パルスの放電に耐え、しかもJT-60の実験期間である2~3ヶ月以上の寿命を有することが必要であり、この点が開発目標であった。

JT-60 NBI用イオン源に採用されたバケット型イオン源では、ビーム引出し電極付近の

プラズマ分布を一様にするため、一次電子を比較的等方的に放出すると考えられる直熱型タングステンフィラメントを用いている。このフィラメントの耐久性を向上するための開発研究を行ってきた。

イオン源で用いられている直熱型タングステンフィラメントの寿命を決定している主な要因として2つある。1つは、フィラメント材の蒸発、もう1つはアーキングと呼ばれる異常放電によるクレーター状の損傷の発生である。前者に関しては、フィラメント径の増大、フィラメント形状の工夫、テーパー型フィラメントの考案等により、フィラメントの長寿命化を図った。一方、後者に関しては、アーク電源への高速アーキング検出遮断回路の採用によりその影響を最小化した。¹⁶⁾ ここでは、蒸発によるフィラメントの断線に対する対策について詳述する。

フィラメント使用温度が同一ならば、フィラメント径が大きいほど寿命が長くなる。この事実に基づき、当初直径1mmであったタングステンフィラメントを次第に太くしていった。またフィラメントの全体形状も単純なU字形であった。この方法は、直径1.5mm位までは有効であった。しかし、フィラメントを一定温度に保つために必要なフィラメント電流もフィラメント径の増大とともに増加する。そして、その電流が周囲に発生する磁場の影響を受けて電子がフィラメント表面より射出しにくくなり、イオン源のアーク効率も低下することがわかった。そこで、互いに逆方向の電流が流れる2本の直線部分の距離を小さくして表面磁場が弱くなるよう、フィラメントの全体形状をヘアピン形とした。この方法によりフィラメント径を1.8mmまで増大することが可能となり、寿命も約2ヶ月間に改善された。またフィラメントの2本の直線部の間隔をさらに小さくしながらフィラメントを太くするために、直径2.7mmのタングステン棒を切削して半円形断面を有するフィラメントも製作された。しかし、ヘアピン形状フィラメントでも、フィラメント径の増大とともにフィラメント電流は増加し、従ってそれが周囲に発生する磁場も強くなっている、電子放出しにくくなる。即ち、フィラメントを太くすることによる長寿命化は、この辺が限界であることがわかつてきた。

そこで、別の方法でさらにフィラメントの長寿命化を図ることが必要となり、思案の未考え出されたのがテーパー型フィラメントである。¹⁷⁾ 以下にその概念を説明する。

直熱型フィラメントでは、加熱用にフィラメント電流を通電しているが、放電時には第4.1-4図のように放電電流の一部がフィラメントに流入する。フィラメントの正端子側では、この流入して来た放電電流の方向がフィラメント電流とは反対であるのに対し、負端子側では同方向である。従って、負端子側では、正味としてより大きい電流が流れ、正端子側に比べてより強く加熱される。このため従来のように断面積が一定のフィラメントの場合には、第4.1-5図(a)に示す計算結果のように、放電時にはフィラメントの負端子側で局所的に温度が上昇し、最高温度点での蒸発が活発となって、そこで断線し易くなる。このことを防止するために考案されたのがテーパー型フィラメントである。このフィラメントは、断面積が正端子側から負端子側に向かって次第に増大しているフィラメントである。第4.1-5図(b)に示す計算結果のように、定常放電時の温度分布は平坦となる。その結果、局所的な蒸発は起らず、フィラメントが長寿命となる。

直径2.5mmのタングステン棒を切削してテーパー状とし、それを屈曲してヘアピン状とした最初のテーパー型フィラメントでは、寿命は3~4ヶ月以上となり当初の目標を達成した。

以上の経緯を第 4.1-2 表に示す。

その後、数次にわたる長パルス放電耐久試験によりテーパー度の最適化を図った。また当初のようなヘアピン状テーパー型フィラメントでは、表面磁場が弱く電子放出しやすい実効陰極面積が大きくなり過ぎて、放電が低効率モードに遷移し易いことがわかったので、フィラメントの全体形状を A 形とした。この形状では、A 形の先端部付近でのみ磁場が弱く、その部分が実効陰極面積になると考えられる。このようにして開発されたテーパー型フィラメントが JT-60NBⅠ 実機イオン源に 1 台当たり 8 本装着されている。

86 年 1 月から 4 月にかけて実機イオン源に装着された $8 \times 28 = 224$ 本のフィラメントのうち、86 年 10 月までの運転で断線したものは 9 本であり、全体の 4% であった。これら断線したフィラメントの断線箇所は、負端子側ではなく、全て正端子側で最も細い位置よりやや中央寄りであった。この位置は、計算上では、フィラメント電流のみ通電時に最高温度になる点の近傍であること、また断線が発生したタイミングがアーク放電中ではなく、その前のフィラメント電流のみ通電中であったこと等から判断して、このフィラメントはまだテーパー度が強過ぎたと思われる。またフィラメント電流をわずか 2 ステップで通常値の 100% まで高めていた運転方法も、フィラメントの最細部付近を過度に高め、また急激なフィラメント加熱による熱応力を増していたと考えられる。このような反省にたち、フィラメントの最細部をやや太くしてテーパー度を弱めた。また今までの純粹タンクステンの代わりに、微量のカリウムやケイ素を添加して高温時のタンクステンの機械的強度を高めた耐サグ性タンクステンをフィラメント材料とした。また、フィラメント電流もイオン源運転開始時 6 ステップで通常値の 100% に至るよう運転方法が改善された。以上のような工夫の結果、86 年 11 月に装着された弱テーパー度の耐サグ性フィラメントに関しては、87 年 9 月現在まだ 1 本も断線していないという良好な結果を得ている。

4.1.5 高輝度化

トカマク装置の限られた寸法の入射口を通して、できる限り大きなパワーを入射するには、ビーム発散角が小さく、かつビーム電流密度が大きい高輝度ビームを発生する必要がある。JT-60イオン源では、電流密度が 270 mA/cm^2 以上で発散角 ($1/e$ の半値幅) を 1 度以下にする必要があった。発散角が 0.1° 変わると入射パワーは 5 ~ 6 % も変わるため¹⁸⁾、発散角のできる限り小さいビームを発生することは NBⅠ の性能を決める上で極めて重要なことである。

40 ~ 50 keV 以下のビームを引出す時は、従来正電極、負電極、接地電極より成る加速 - 減速方式の 1 段加速系が用いられてきたが、JT-60 では 75 keV 以上のビームを発生させるため、第 4.1-6 図に示す様に正電極を 1 枚追加した 2 段加速系を採用している。¹⁹⁾ この理由を具体的に以下に列挙すると、

1. 第 2 正電極を付加することによって、第 2 正電極の上流側と下流側の電界強度の差によるレンズ作用を利用することができます。このため、1 段加速系より、より高輝度のビームを得ることができる。
2. 通常、ビーム光学を最適に保つためには、引出し電圧とビーム電流はチャイルド - ラングミュア則 ($3/2$ 乗則) に従って、パービアンスを変えることなく運転する必要がある。しかし、第 2 正電極電位を変えることによって、そのレンズ作用を制御し、最適パービアンス

を変えることができる。すなわち、低エネルギーで大電流や、高エネルギーで小電流等の運転が可能となり、運転領域を大幅に拡げることができる。

3. 正電極は高い熱流束にさらされるが、この正電極を2つにすることによって、電極の熱負荷が軽減される。

等である。この2段加速系のビーム光学は、1段目と2段目の電界強度の比 f ($f \equiv E_1 / E_2 = (V_{ext} \cdot d_2) / d_1 (V_{acc} + V_{dec})$) の他、各電極の幾何学的形状に大きく依存する。運転上用いている電圧比 Γ ($= V_g / V_{acc}$) は、電界強度比に対応するパラメータである。一定の加速電圧の時、 Γ を小さくするとレンズ作用が弱くなつてビーム発散は悪化するが、最適ビーム電流は大きくなる。逆に Γ を大きくすると、レンズ作用が強くなりビーム発散は小さくなるが、その時のビーム電流は小さくなつてしまつ。最適ビーム電流もその時の最小ビーム発散角もほぼ Γ に比例する。ビームの入射効率を最大にするためには、ビーム輝度 B ($= I_{opt} / w_{min}^2$) を最大にする Γ を選択する必要があるが、当イオン源では最適な Γ は 0.65 ~ 0.7 であることが明らかとなつた。

一方、電極孔の形状はビーム光学上極めて重要な要素であり、第1正電極の孔形状はビームの初期放出角に大きな影響を与える、その形状はピアース型電子銃を参考とし孔周辺をテーパ状に切欠いている。²⁰⁾ しかし、一定の引出し面上にできる限り多くの電極孔を明けようとすれば、隣の孔と干渉するため望ましい形状をとることは難しくなる。JT-60イオン源では、ビーム光学的には、熱除去の点においても満足できる様に、透過度（電極多孔部において孔の明いている部分の面積比）が40%で設計された。又、第1正電極の孔径が電極板厚に比べて大き過ぎると、孔周辺部切欠きの効果が十分とれなくなつてしまつ、高い電流密度で発散の小さいビームを得にくくなる。逆に小さ過ぎると、透過度が十分とれない上、孔周辺の収差の影響を受け、収束性の良いビームが得られない。このため、JT-60イオン源では、1.5 mm 厚の電極板に対して 4 mm ϕ の電極孔を採用している。

第2正電極孔形状も、第1正電極と同様テーパ状の切欠きをつけることによって、電極孔周辺部を通過するイオンがレンズの収差を受けにくくしている。

負電極孔形状は、孔内面に2次粒子が当つて2次電子が放出されても、上流側へ洩れにくくするためにテーパ状の切欠きをもたせている。又、電極孔径は第1正電極の孔径に比べて約10%大きくなっているが、このことはテーパ状の孔形状とともに電極間で発生した H_2^+ , H_0 等の低エネルギー2次粒子が電極に当りにくくする効果を果している。⁸⁾

接地電極はビームプラズマ境界面を決めるためのものであり、ビーム光学上の役割は特にならない。従つて、他の電極に比べて製作精度、据付精度は特別厳しくする必要はない。

最適な加速電極システムは、実験とともに計算機を利用してイオン軌道シミュレーションによって見い出してきた。¹⁹⁾ 第4.1-7図は、一つの最適解であり、75 kV, 30 A, 100 %プロトン、 $\Gamma = 0.63$ の時のビーム軌道に対応している。ビーム成分比 $H^+ : H_2^+ : H_3^+ = \alpha : \beta : \gamma$ ($\alpha + \beta + \gamma = 1$) の時、最適な電流値は 100 %プロトンビームの時の電流値 $I_{opt}(H^+)$ を用いて以下の計算式によって求められる。

$$I_{opt} = I_{opt}(H^+) \times \frac{1}{\alpha + \sqrt{2}\beta + \sqrt{3}\gamma}$$

又、先にも述べた様に、最適なビーム電流は加速電圧の $3/2$ 乗に従って増大していく。しかし、ビーム電流の増大とともにプロトン比も大きくなっていくため、最適なビーム電流は加速電圧の $1.6 \sim 1.7$ 乗に従って増大していく。

第2正電極の電位をかえることによって、運転領域（最適パービアンス）を拡げられることを先に述べたが、実際上は加速電圧は $50 \sim 100$ kV の領域である。 50 kV 以下より低エネルギーで入射パワーを減らすことなく運転する方法として、2段加速電極系の1段目のみ用いる手法が可能であることが示された。この様に、電極間隔を調整することなく、外部結線を変更するのみで低エネルギーで高出力のビームを得ることもできる。

1020 ケの電極孔から放出される各ビームレットを入射ポートの中心に向けて集束するため、第 4.1 - 6 図に示す様に負電極の各電極孔の孔軸を径方向に人為的にずらされている。^{21, 22)}

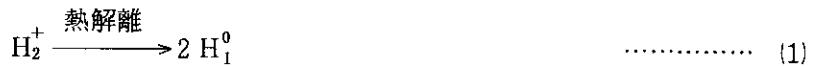
現在使用している電極は、 $\Gamma = 0.7$, $d_2 = 6.5$ mm, $Z_f = 8.3$ m で製作されており、周辺で約 0.5 mm の軸ずれとなっている。 Γ が 0.7 より小さい所で運転すると焦点距離が多少長くなるが、入射効率に影響を与えることはほとんどない。

4.1.6 高プロトン化

イオン源から引き出された水素イオンビームは、通常プロトン (H_1^+) と分子イオン (H_2^+, H_3^+) の三種のイオン種から構成されている。J T -60等の大型の核融合実験装置に於ては、このうちのプロトン比率（プロトン比と呼ぶ）が高い事が要求される。というのは、大型の装置ではプラズマが濃く厚いために、分子イオンが解離、中性化してつくり出した低エネルギー中性粒子はプラズマ中心部まで侵透する事が出来ず、有効なプラズマ加熱ができないからである。

プロトン比はソースプラズマ生成方式、構造、運転条件、プラズマ源の材質等により大きく左右されるが、J T -60用イオン源の開発に着手した当時は、それらの条件を最適化しても 60% 程度のプロトン比を得るのがやっとという状況であった。²³⁾ しかしながら、J T -60用N B I では、プロトン比 75% を想定し、それを目標にイオン源の開発を進めることとなった。

プロトン比を高めるため、米国オークリッジ研究所に於ては、水素ガスを熱解離してアーク放電室に供給する熱解離カソードが考案された。²⁴⁾ これは、



の反応によってプロトンの比率を高めようとするものである。解離してきた H_1^0 の壁での再結合を抑えるために、壁の温度を高くすることにより大幅にプロトン比を高める事に成功した。また、米国バークレー研究所に於ては、磁気フィルターと呼ばれる横方向の磁場をアーク放電室内につくり出す事によって、引き出し電極近傍に於ける電子のエネルギー分布を最適化し、プロトン比の上昇を計った。²⁵⁾ しかしながら、これらの方法は、イオン源の構造を複雑にするばかりでなく、たとえば後者の場合は、プラズマ生成効率が下ってしまうといった問題点があるため、実際のN B I 装置用のイオン源に適用されるには至らなかった。

プロトン比を高めるには、これらの複雑な方法ではなく、もっと単純で確実な方法がある。それは、水素プラズマ中のイオン種に関する理論的考察²⁶⁾ からも導かれる事であるが、イオン及び

解離した水素原子 (H_1^0) の閉じ込め性能を高める事である。即ち、分子イオンを十分に長い時間保持する事によって、たとえば、



の反応によって、プロトンや水素原子に解離させ、更に水素原子の壁での再結合を抑えるため、水素原子に対しても閉じ込めを良くして上記(2)の反応を高めるのである。さて、イオンの閉じ込め時間は、プラズマ体積とイオン損失面積の比 (V_p / S_L -これをイオンロス特性長さと呼ぶ) とともに増大する。また、水素原子に対する閉じ込め時間は、放電室の体積と表面積の比 (V_c / S_o -チャンバー特性長さ) とともに増える。とすれば、プロトン比を高めるには、放電室の体積を大きくし、しかもイオン損失面積を抑えるため、磁場によりイオンを保持してやれば良いという結論が得られる。

この基本方針に基づいて、強磁場バケットソースが開発された。²⁷⁾ 第4.1-8図にその断面図を示す。特徴は放電室の体積を $40\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 34\text{ cm}$ とそれまでに開発されていたバケットソースの2倍以上にするとともに、大きく強力な永久磁石を用いて、しかも、その表面に電磁軟鉄片を取付けることによってラインカスプ磁場を強め、イオンの閉じ込めを改善した事である。このバケットソースは、従来のバケットソースと比べて、より高いプラズマ生成効率とガス効率を有し、世界最高の90%を越えるプロトン比を達成した。動作も極めて安定であり優れていたため、その基本寸法を殆んど変える事なく JT-60用イオン源に採用されることとなった。

バケットソースに於ては、イオンロス特性長さとチャンバー特性長さは、通常、ほぼ比例するためイオンロス特性長さで全体を代表する事が出来る。そのため、多くのバケットソースに於て到達できるプロトン比は、イオンロス特性長さの関数として一義的に決る。第4.1-9図に、原研で開発してきた代表的なバケットソースのプロトン比を、イオンロス特性長さに対してプロットした図を示す。理論的に導かれるプロトン比に関するスケーリング則²⁷⁾

$$\Gamma = \frac{0.23 V_p / S_L}{1 + 0.23 V_p / S_L} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

の曲線も同時に示す。

図からわかるように、イオンロス特性長さの小さな小型のバケットソースでは60%弱であったプロトン比が、JT-60NBⅠ原型ユニット用バケットソースに於ては、80%程度、そしてJT-60用イオン源に於ては90%以上に高められた。

最後に、高プロトン比を得るために注意すべき事をいくつか記しておく。最と重要な事は、極めて高いプロトン比を得るために閉じ込め性能を高めるばかりでなく、高エネルギーの一次電子がプラズマ電極近傍に到達しない様な磁場配位とカソード位置を選ぶ必要があるという事である。無論、高プロトン比を得るために閉じ込め性能が良い事は必要条件であるが、それが満足されて分子イオンの解離が進んでいたとしても、分子をイオン化するに十分なエネルギーを持つ一次電子がプラズマ電極近傍に存在すれば、そこで生成された分子イオンはそのまま引き出されてしまう。高プロトン比を狙う場合には、この寄与は無視できないものとなるからである。

この条件を考えると、バケットソースのラインカスプをビーム軸に対して垂直方向（横置き磁

場)にすることは、高プロトン比を得るために必須であるように思われる。電子の軌道計算によれば、一次電子はラインカスプに沿ってかなり自由に運動する。ラインカスプが垂直方向の場合には、この運動は空間的一様性を改善する方向に働くが、ラインカスプが平行の場合(縦置き磁場)には、一次電子をプラズマ電極近傍に拡散させる方向に働く。このため、縦置き磁場のバケットソースでは、同サイズの横置き磁場のものと比べてプロトン比が低くなる傾向がある。

次に、これも縦置き磁場のバケットソースのプロトン比が低い一因となっている事であるが、ラインカスプが連続していない場合には、その端には大きなイオンロス面積が存在し、プロトン比が下る原因となる。また、プラズマ電極近傍に於て、電極有効面積に比べて不必要に広くプラズマを作った場合には、それらの面積はそのままイオンロス面積となるため、プロトン比は下ってしまう。更に、バケットソースの設計を間違えて、不安定放電を起すような場合にも、当然の事ながらプロトン比は下る。

4.1.7 低不純物化

イオン源から引き出された水素ビームは、主成分の水素イオンの他に、酸素や炭素、水などの軽元素不純物と銅やタンクステンなどの重金属不純物を含んでいる。これらの不純物の量を低減させる事は、粒子入射加熱装置に於て重要な開発項目である。なぜなら、核融合プラズマ中に入射されたそれらの不純物は、高エネルギーを持つ故にプラズマ中に深く侵透し、大きな輻射損失を引き起こすからである。プラズマの加熱という事を考えた場合、ビーム中の不純物は可能な限り少い事が望ましい。

JT-60用イオン源の開発の過程に於ては、まず、イオンビーム中の不純物量が詳細に測定され、続いてそれらの不純物の起源が調べられた。その結果、ビーム中の不純物量が少くなるようなイオン源の動作条件と運転法が明らかとなった。また、同時に、イオン源の材質にいくつかの改良が施された。

デュオピガトロン型とバケット型のイオン源について不純物の測定を行った結果、以下の様な事が明らかとなった。²⁸⁾

- (1) 通常の運転状態に於ては、イオン源から引き出されたビーム中には、数%の軽元素不純物と0.1~0.2%程度の重金属不純物が含まれる。
 - (2) 軽元素不純物の主成分は水と炭化水素であるが、それらはプラズマ源の壁をその起源とする。
 - (3) 重金属不純物として、電極材料の銅、モリブデン、銀、亜鉛がある。これらはスパッタリングによりソースプラズマ中に混入する。従ってその量は、プラズマ電極のバイアス電圧と、アーク放電電圧に大きく依存する。
 - (4) バケット型イオン源の場合、ビーム中に0.1~0.2%という大量のタンクステン不純物が含まれる。これは、フィラメントからの蒸発と、スパッタリングによるものである。カソードが主放電室と隔離されているデュオピガトロン型では、その量は格段に少い。
- 更に、不純物を低減する方法として以下の事が明らかとなった。
- (5) 軽元素不純物は、ソースのコンディショニングにより大きく低減させる事が出来る。特に長パルスの放電によるコンディショニングが有効である。

(6) 銅, モリブデン, 銀, 亜鉛などの不純物は, 電極材料や電流導入端子の材料, 構造を選ぶ事により低減する事ができる。

(7) タングステン不純物の量は, アーク電圧が過大であるとスパッタリングの効果によって増大し, また逆に, アーク電圧が低すぎると, その電圧を維持するためにフィラメントの温度が高くなつて蒸発量が増え, 同じく増大する。最適のマーク電圧は70V程度であり, その時タングステンの量は, 0.05%程度まで下げる。

これらの結果は, JT-60用イオン源とその運転法に反映された。その結果, JT-60イオン源では第4.1-10図にみるように, 軽元素不純物は0.3%程度に, また, 重金属不純物は0.05%程度になっている。

なお, JT-60NB-Iの運転の際には, ビーム入射運転の間にコンディショニングショットとして短パルスのビーム引き出しを行っているが, これは軽元素不純物の低減に寄与している。また, 入射シーケンスに於て, まずアーク放電を0.5秒から1秒間行い, その後に加速電圧を印加しているが, これも軽元素不純物の低減が大きな目的である。第4.1-11図に一例として水(H_2O^+)の不純物量の時間依存性を示す。アーク放射後1秒間程度で, 不純物量が大きく下っていることがわかる。

4.1.8 まとめ

以上の如く, 約10年に及ぶR&Dの結果, NB-I用高出力正イオン源の性能は, 短パルス100kW級から, 長パルス数MW級まで向上し, その設計, 製作法は技術的にはほとんど確立されたと言える。これらの正イオン源の技術の多くは, 表面改質や半導体への元素のドーピング等のための窒素, 酸素, アルゴン等のイオンビームを発生するイオン源の民間企業での開発にも反映されており, 今後もますます発展していくものと思われる。又, 次期装置用粒子入射装置用イオン源として有望視されている高出力負イオン源の開発にも役立つものである。

参考文献

- 1) Y. Ohara: Proc. of the International Ion Engineering Congress, Kyoto, (1983) P.447
 - 2) Y. Okumura, H. Horiike and Y. Ohara: Proc. 3rd Symp. on Ion Source and Ion Assisted Technology, Tokyo, 1979, P.111
 - 3) 小原祥裕, 松田慎三郎, 白形弘文, 田中茂: 日本原子力研究所レポート JAERI-M 6438 (1976).
 - 4) H. Horiike et al.: Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) P.567
 - 5) H. Horiike: private communication
 - 6) 桜庭順二他; JAERI-M 8740 (1980).
 - 7) H. Horiike, et al.: Proc. 11th Symp. on Ion Source and Ion Assisted Technology, Tokyo, 1987, P.109
 - 8) Y. Ohara, M. Akiba, Y. Arakawa, Y. Okumura and J. Sakuraba: J. Appl. Phys. 51, 3614 (1980)
 - 9) J. Sakuraba, M. Akiba, Y. Arakawa, H. Horiike, M. Kawai, Y. Ohara and S. Tanaka: Rev. Sci. Instrum. 52, 689 (1981)
 - 10) M. Akiba, et al.: Rev. Sci. Instrum. 53, 1864 (1982)
 - 11) 秋場真人, 堀池寛, 栗山正明, 小原祥裕, 奥村義和, 柴田猛順, 田中茂: 日本原子力研究所レポート JAERI-M 83-099 (1983).
 - 12) H. Horiike, et al.: Rev. Sci. Instrum. 50, 1453 (1979)
 - 13) H. Horiike, et al.: Fusion Tech. 7, 171 (1985)
 - 14) H. Horiike, et al.: Phys. Fluids 10, (1978)
 - 15) R.P. Wells, et al.: JAERI-M 84-011 (1984)
 - 16) S. Tanaka, et al.: Proc. 8th Symp. on Ion Sources and Ion-Assisted Technology, Tokyo (1984) P.127
 - 17) S. Tanaka, Y. Ohara: Rev. Sci. Instrum. 55, 1625 (1984)
 - 18) Y. Ohara, et al.: Rev. Sci. Instrum. 54, 921 (1983)
 - 19) Y. Ohara: J. Appl. Phys. 49, 4711 (1978)
 - 20) Y. Ohara, et al.: Japan. J. Appl. Phys. 17, 423 (1978)
 - 21) Y. Ohara: Japan. J. Appl. Phys. 18, 351 (1979)
 - 22) Y. Okumura, et al.: Rev. Sci. Instrum. 51, 471 (1980)
 - 23) 柴田猛順, 伊藤孝雄, 白形弘文, 菅原享: JAERI-M 6990 (1977).
 - 24) J. Kim and R.C. Davis: Appl. Phys. Lett. 30 (1977) P.130
 - 25) K.W. Eller and K.N. Levag: Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL-12225
 - 26) A.R. Martin and T.S. Green: Calham Laboratory Report No. CLM-R159, 1976.
- 田中茂, 柴田猛順: JAERI-M 7966, 1978.

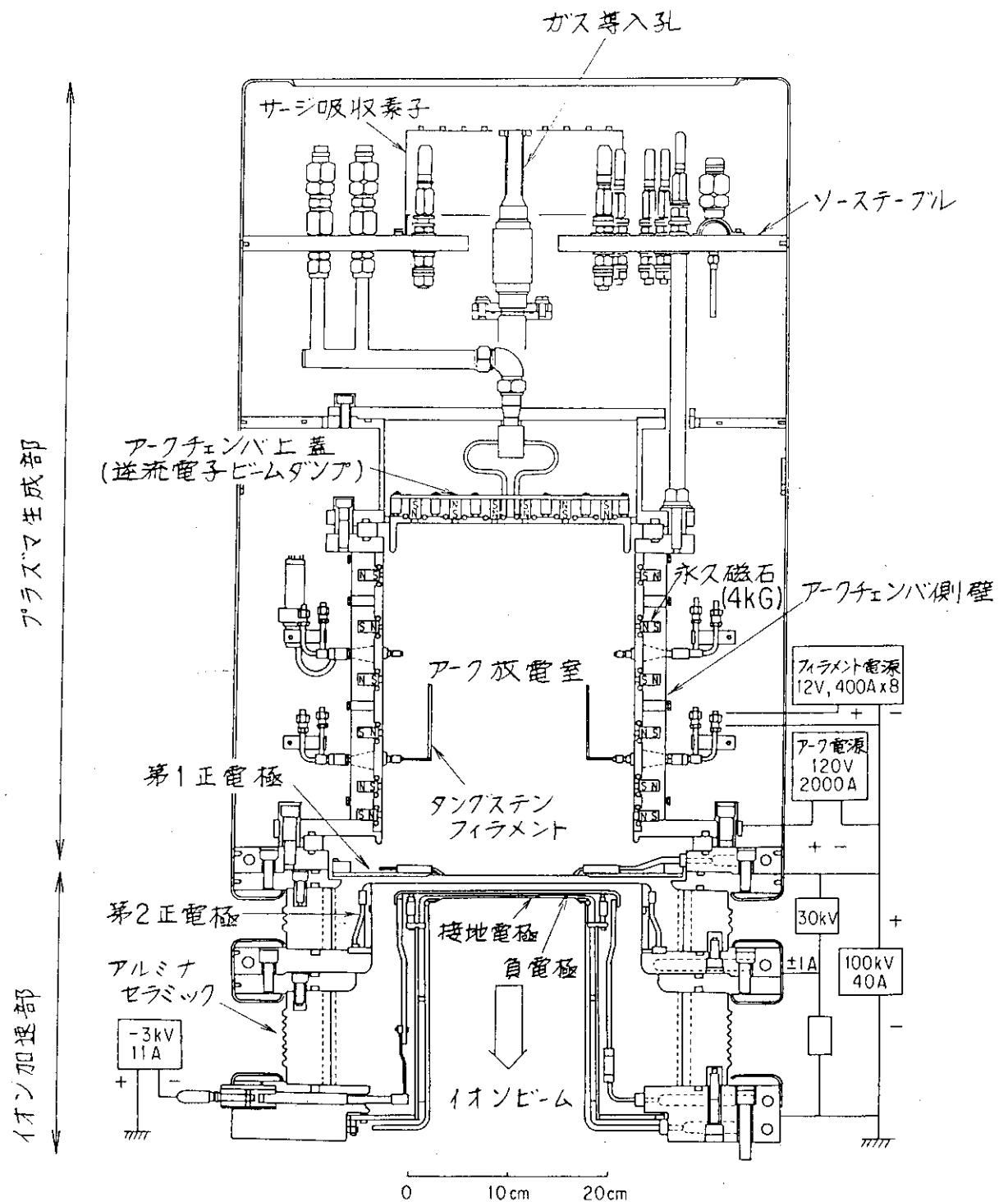
- 27) Y. Okumura, H. Horike, and K. Mizuhashi: Rev. Sci. Instrum. 55 (1984) P.1
- 28) Y. Okumura, Y. Mizutani, Y. Ohara, and T. Shibata: Rev. Sci. Instrum. 52, 1 (1981)

第 4.1 - 1 表 イ オ ン 源 性 能

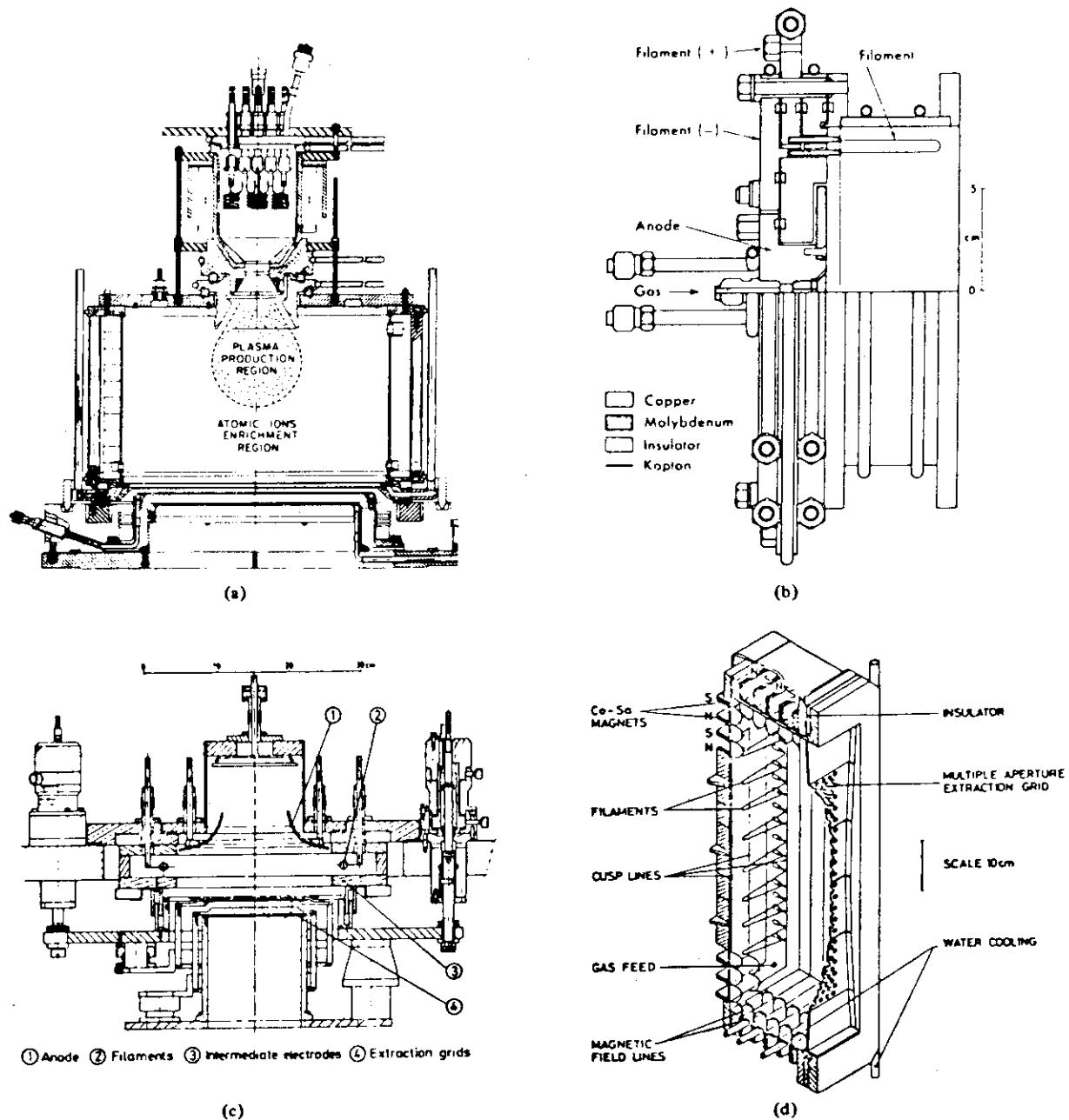
BEAM ENERGY (keV)	75 (30 ~ 100)
BEAM CURRENT (A)	35 (40)
PULSE LENGTH (Sec)	10
GAS SUPPLY INTO ION SOURCES (IS) AND NEUTRALIZER (N) (Pa·m ³ /s)	≤ 1.5 INTO IS ≤ 2.0 INTO N
BEAM DIVERGENCE 1/e (Deg)	1.0 (0.9 ~ 1.2)
ION CURRENT DENSITY (A/cm ²)	0.27 (0.39)
ATOMIC FRACTION (%) $H_1^+ : H_2^+ : H_3^+$	92 : 5 : 3
IMPURITY IN NEUTRAL BEAMS	Low Z ≤ 1 % High Z ≤ 0.1 %

第4.1-2表 直熱型フィラメント陰極の耐久性改善

材 質	形 状	型 名	寿 命	適用イオン源	年 度
タンクステン (W)		1 mm ϕ ヘアピン型	~ 2週間	デュオビガトロン	1976 1978
"		1 mm ϕ ヘアピン型	~ 2週間	バケット	1979
"		1.2 mm ϕ ヘアピン型	2 ~ 3週間	バケット	1979
"		1.5 mm ϕ ヘアピン型	~ 1ヶ月	バケット	1979
"		1.5 mm ϕ 無誘導型	~ 1ヶ月	バケット	1980
"		1.8 mm ϕ 無誘導型	1 ~ 2ヶ月	バケット (原型ユニット) (イオン源)	1981 1983
"		2.7 mm ϕ 半円断面型	2 ~ 3ヶ月	バケット (改良型) (イオン源)	1982
"		2.5 mm ϕ テーパー型	3 ~ 4ヶ月	"	1983
"		2.5 mm ϕ テーパー型	4 ~ 5ヶ月	バケット (JT-60NB1) (イオン源)	1984



第4.1-1図 JT-60用イオン源断面図



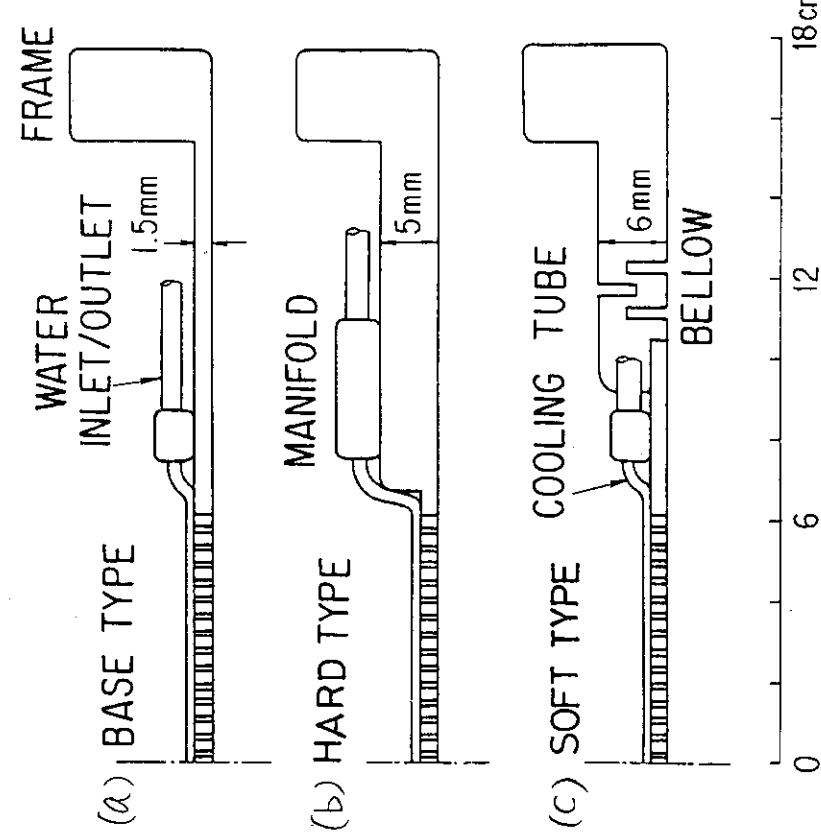
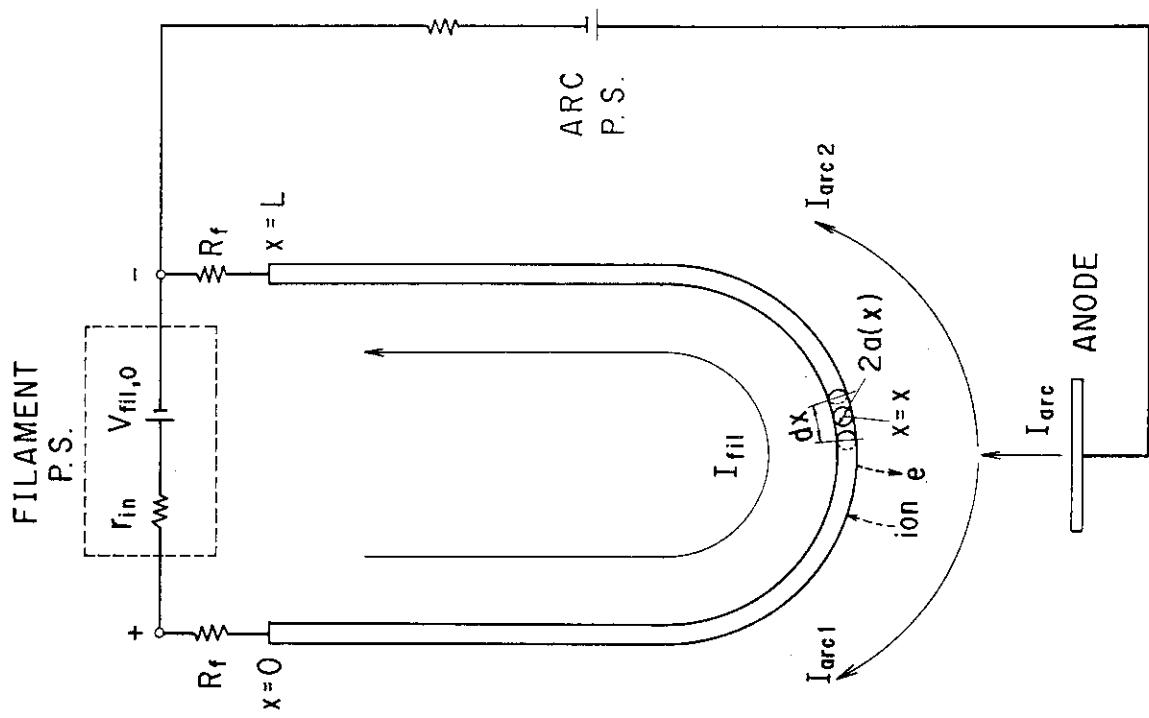
第4.1-2図 各種のプラズマ源

a)デュオピガトロン型 (ORNL)

(c)ペリプラズマトロン (F-a-R)

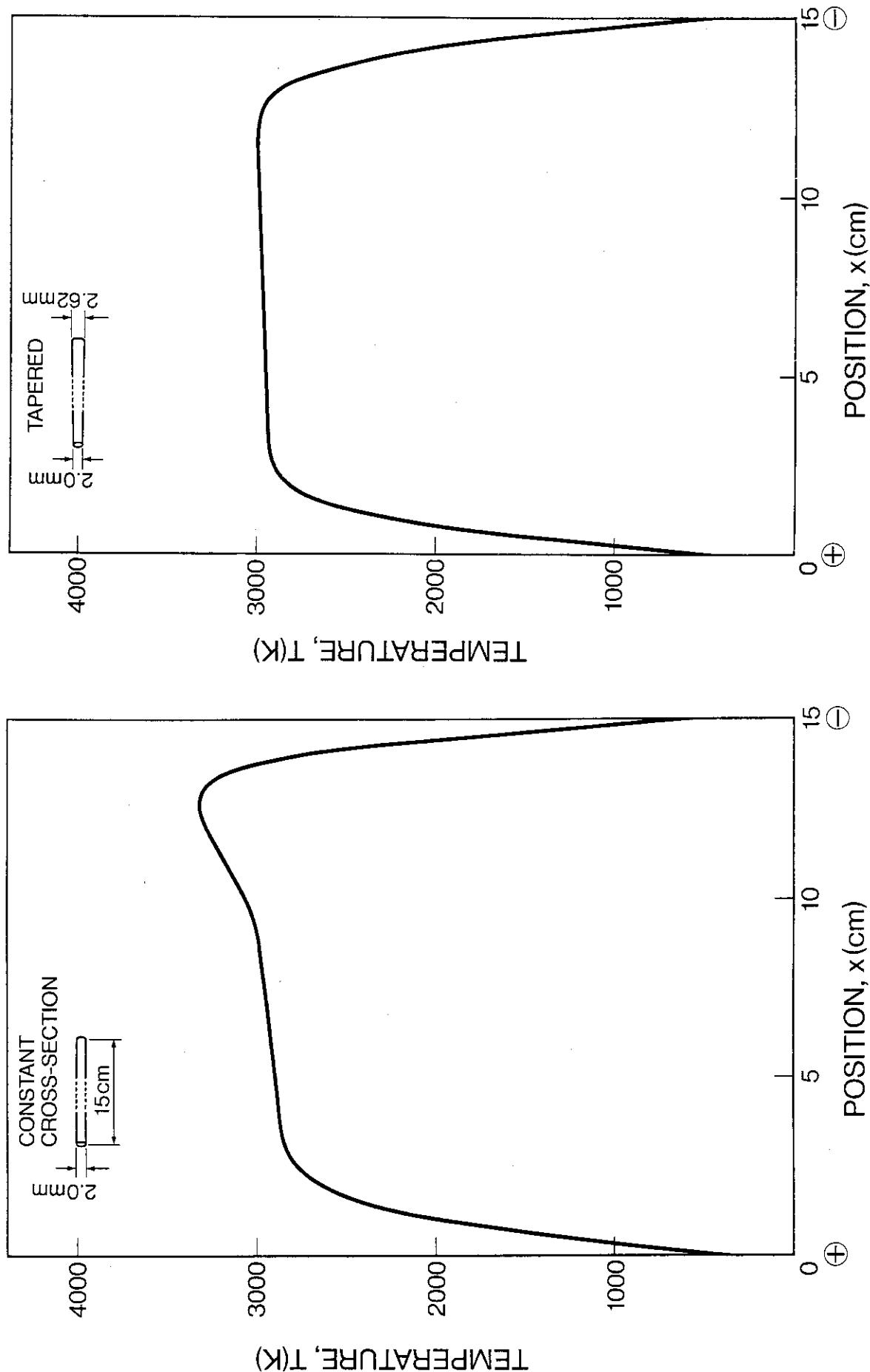
(b)大電流アーカ放電型 (LBL)

(d)バケット型 (Culram)



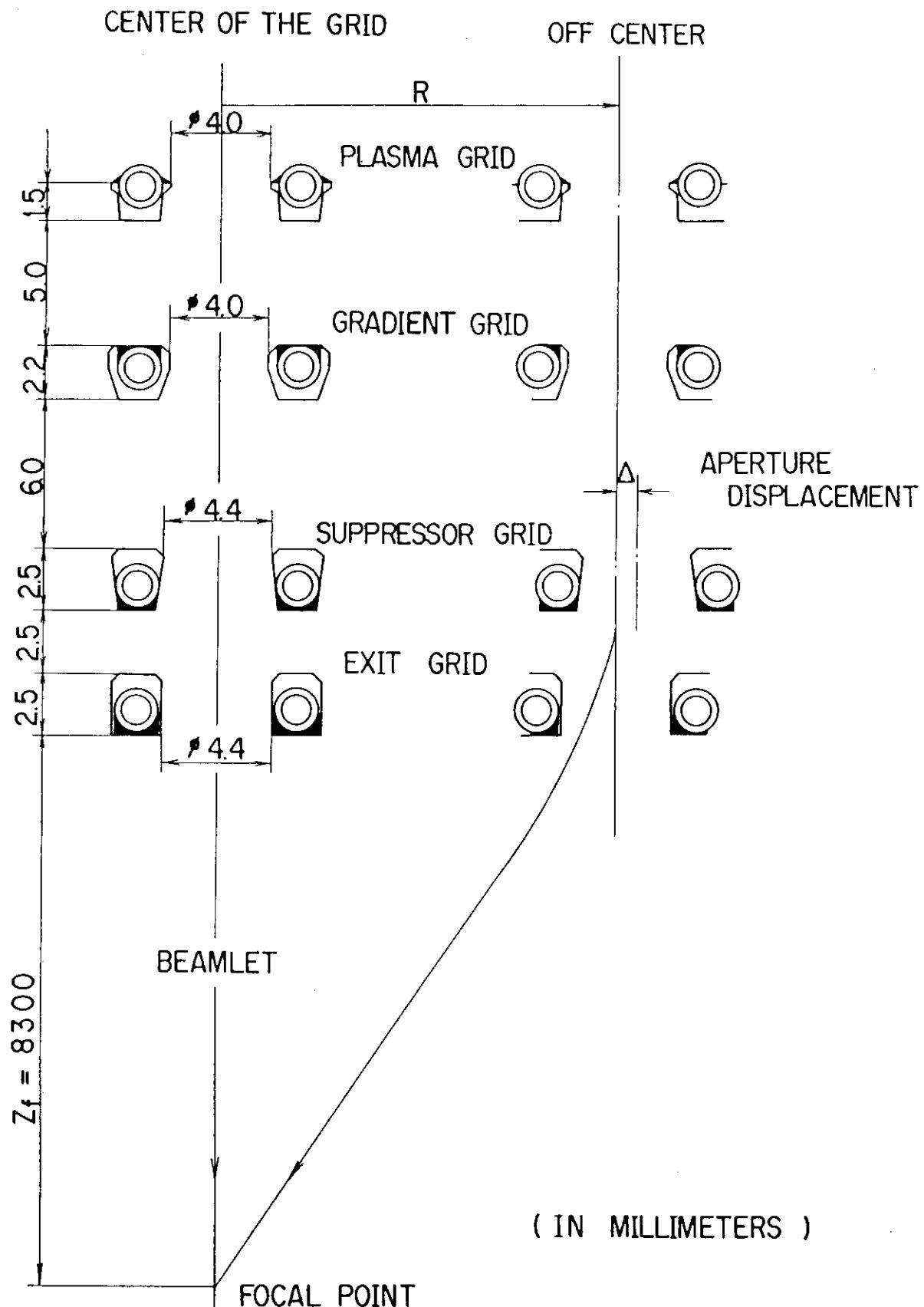
第4.1-3図 電極の多孔部周辺構造

第4.1-4図 直熱型フィラメントのエネルギー吸支モデル



第 4.1 - 5(a)図 フィラメント温度分布 (断面積一定の場合)

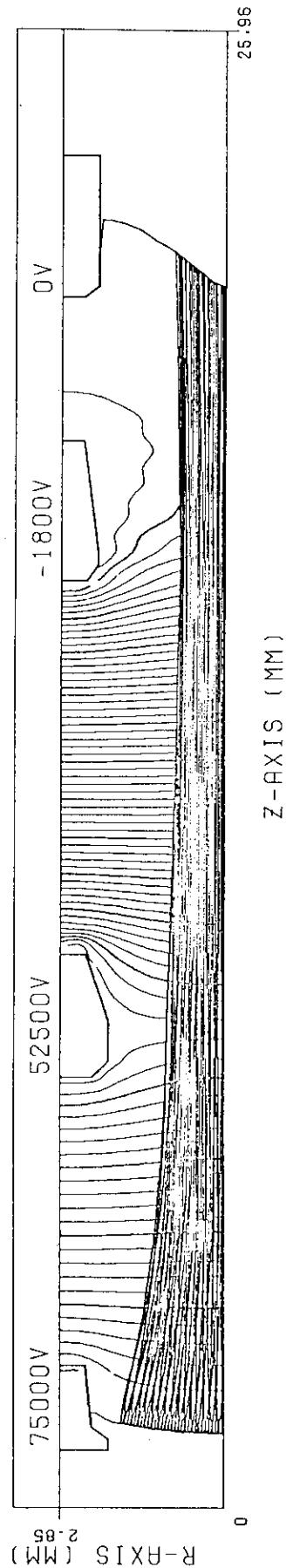
第 4.1 - 5(b)図 フィラメント温度分布 (テーパー形の場合)



第4.1-6図 2段加速系電極

PROTON BEAM ORBITS OF JT-60 ION SOURCE

CURRENT DENSITY = 3.0000E+02 (MA/CM²)
 TOTAL CURRENT = 3.1325E-02 (A)
 PERVEANCE = 1.5251E-09 (R/V*^{1.5})
 MINIMUM POTENTIAL = -5.2810E+02 (V) AT Z = 1.8892E-02 (M)
 DIVERGENCE (RMS) = 7.3286E-01 (DEG)
 ELECTRON TEMPERATURE = 1.0000E+01 (EV)
 ION TEMPERATURE = 1.0000E+00 (EV)



第4.1-7図 イオン軌道シミュレーション

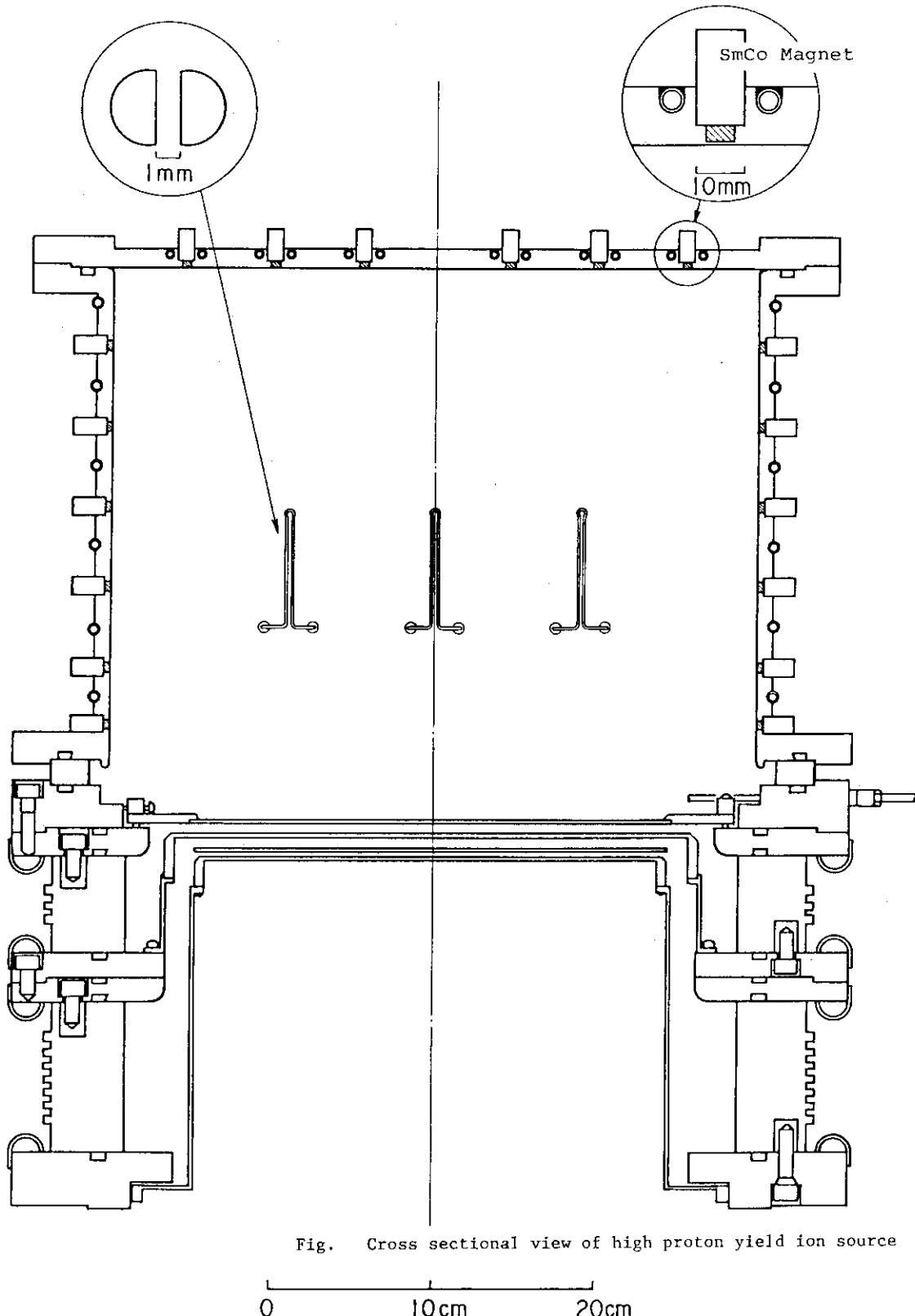
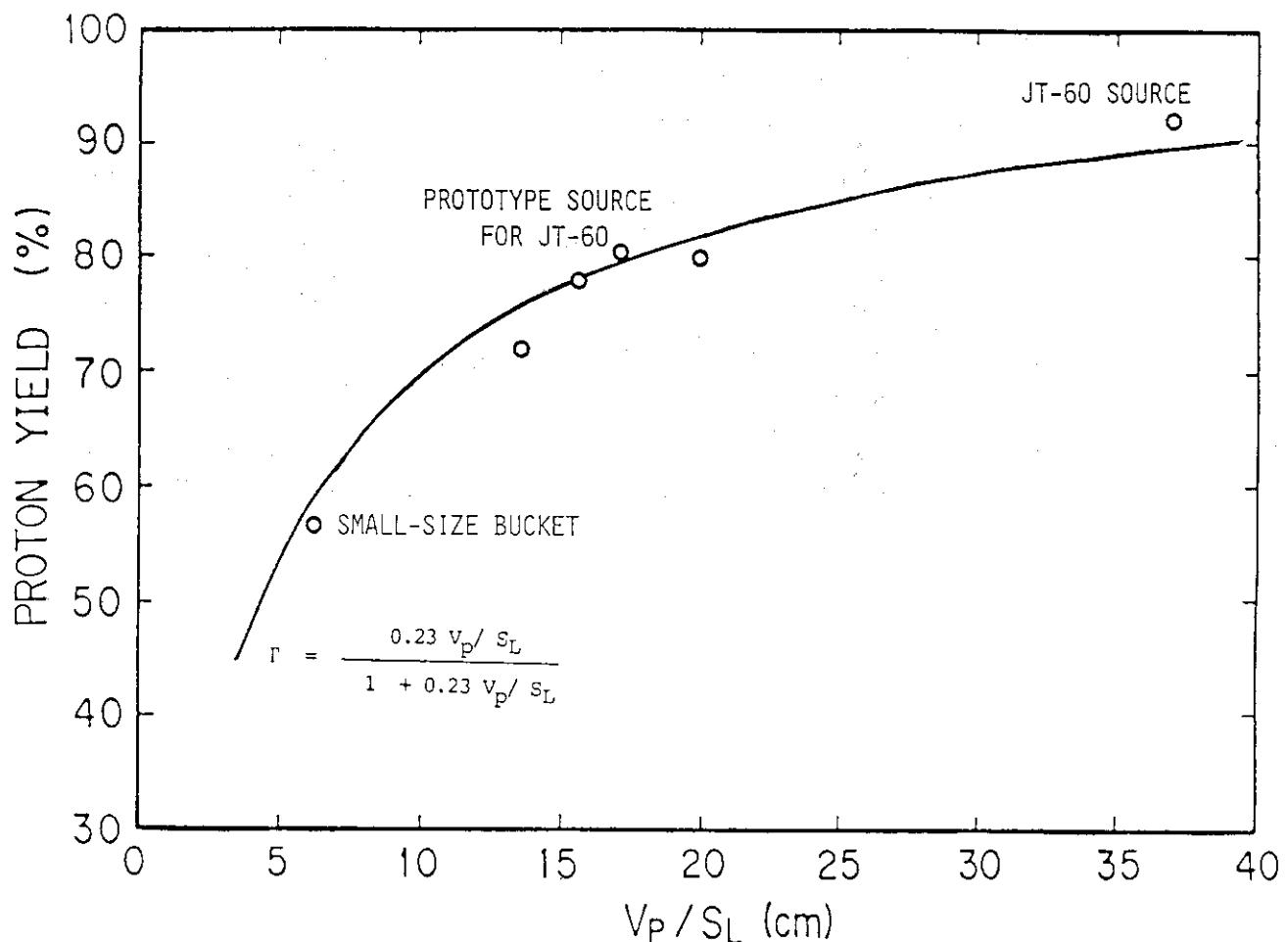


Fig. Cross sectional view of high proton yield ion source

0 10cm 20cm

第4.1-8図 強磁場パケットソース断面図

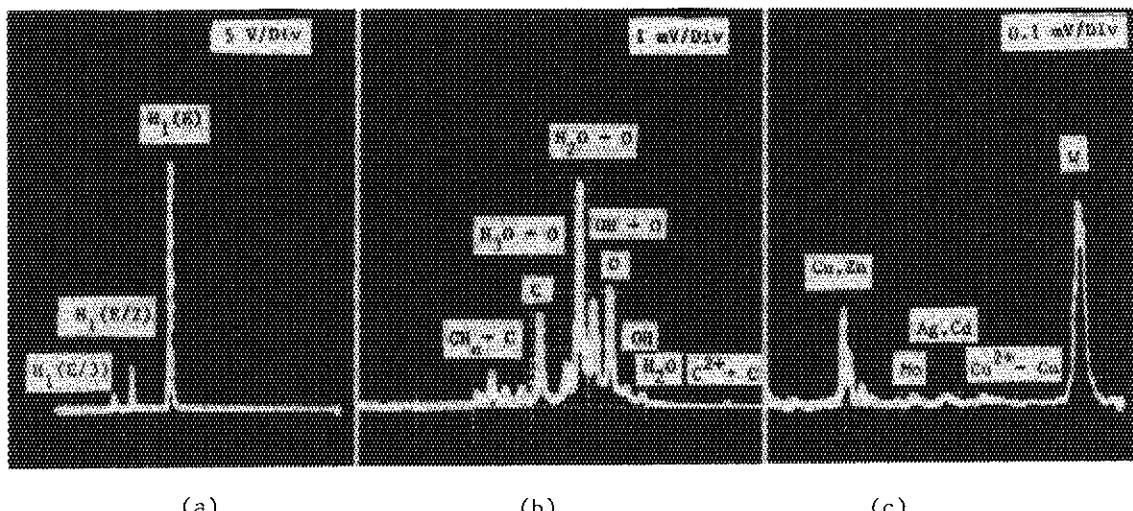
永久磁石の前面に電磁軟鉄片を置くことにより表面磁場も 2.7 KG となっている。



Dependence of proton yield on ion loss characteristic length V_p/S_L of the plasma generator, where V_p is plasma volume and S_L is ion loss area.

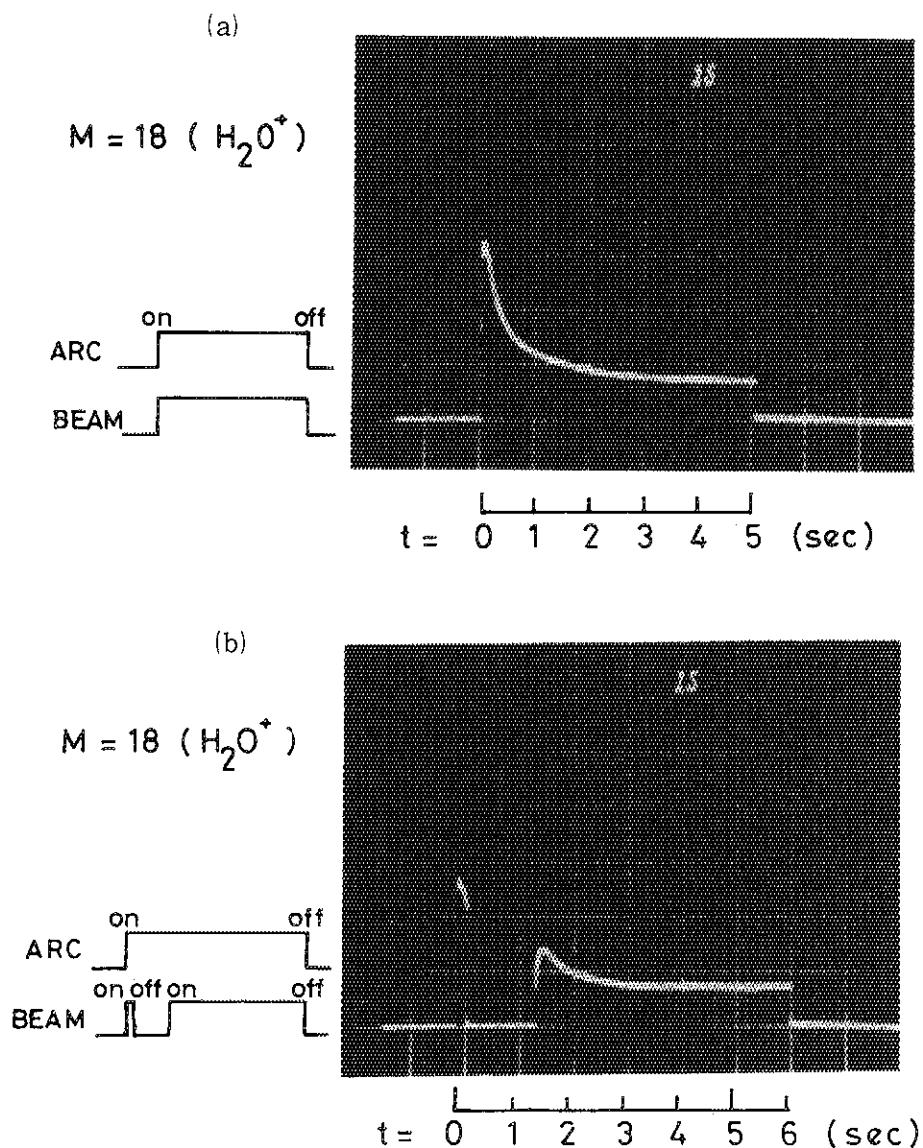
第4.1-9図 プロトン比のイオンロス特性長さ依存性

小型バケットソース、原型ユニット用ソース、
JT-60矩形バケットソースについてプロットす
るとともに理論的に導かれるスケーリング式の
値を実線で述べている。



An example of momentum spectrum of neutral beam, showing (a) hydrogen, (b) low-Z impurities, and (c) high-Z impurities. The neutral beam is analyzed after being re-ionized in hydrogen gas cell, whose line density is 1.2×10^{16} molecules/cm². The beam energy is 75 keV.

第4.1-10図 中性粒子ビームの質量分析スペクトルの一例

第4.1-11図 $M = 18$ の不純物（水）の量の時間依存性

水の不純物量に時間とともに減少する。(b)図においてはビームON後に一旦アーケ放電を続けたまま、ビーム加速のみをOFFしているが、減少の割合は(a)図と同様である。

4.2 ビームライン

(1) ビームラインの概要

ビームラインの主要構成機器の名称を第 4.2-1 図に示す。

ビームラインはイオン源から引出されたイオンビームを中性ビームに変換してトーラスに入射するとともに、中性化セル通過後もイオンの状態にある残留イオンビームの処理を行う。また、イオン源から中性化セルを通して流れてくる室温の中性ガス、ビームが壁面に当ったときに発生するガス等を排気し、トーラス模擬容器に流入する中性ガス流量を許容値内に抑えるための設備である。ビームが持っているパワーは極めて大きいのでこれらの熱量を処理するために除熱に関する特別な考慮がなされている。

(2) JT-60 NBI ビームライン配置

14 ユニットのビームラインは、上下の 2 ユニットを対としたものを JT-60 の周囲 7ヶ所に設置されるが、この設置基準は第 4.2-2 図に示すとおりである。第 4.2-3 図にビーム軸を示すがここで

ビームライン中心軸……………中性ビームの入射方向の平均的中心を決める軸であって幾何学的に決められているものである。トーラスの上下対称面（中央水平面）と実角度 $\pm 35.5^\circ$ の角度を持って交わり、かつ主排気タンクの中心を通る軸を云う。

上下イオン源中心軸……………ビームライン中心軸を含む垂直平面内に於てビームライン中心軸上の M 点（以下この点をビームライン中心軸上の原点に選びこの位置を $z = 0$ とする。）から垂線をたて M 点から 275 離れた点 (I_1, I_2) と、ビームライン中心軸上 $z = 8300$ の点を結び幾何学的軸をイオン源中心軸と呼ぶ。 I_1, I_2 がそれぞれ上部、下部のイオン源の引出し電極の中心になるようイオン源が設置される。上部に位置するイオン源に対応する軸を上イオン源中心軸、下部に位置するイオン源に対応する軸を下イオン源中心軸と呼ぶ。

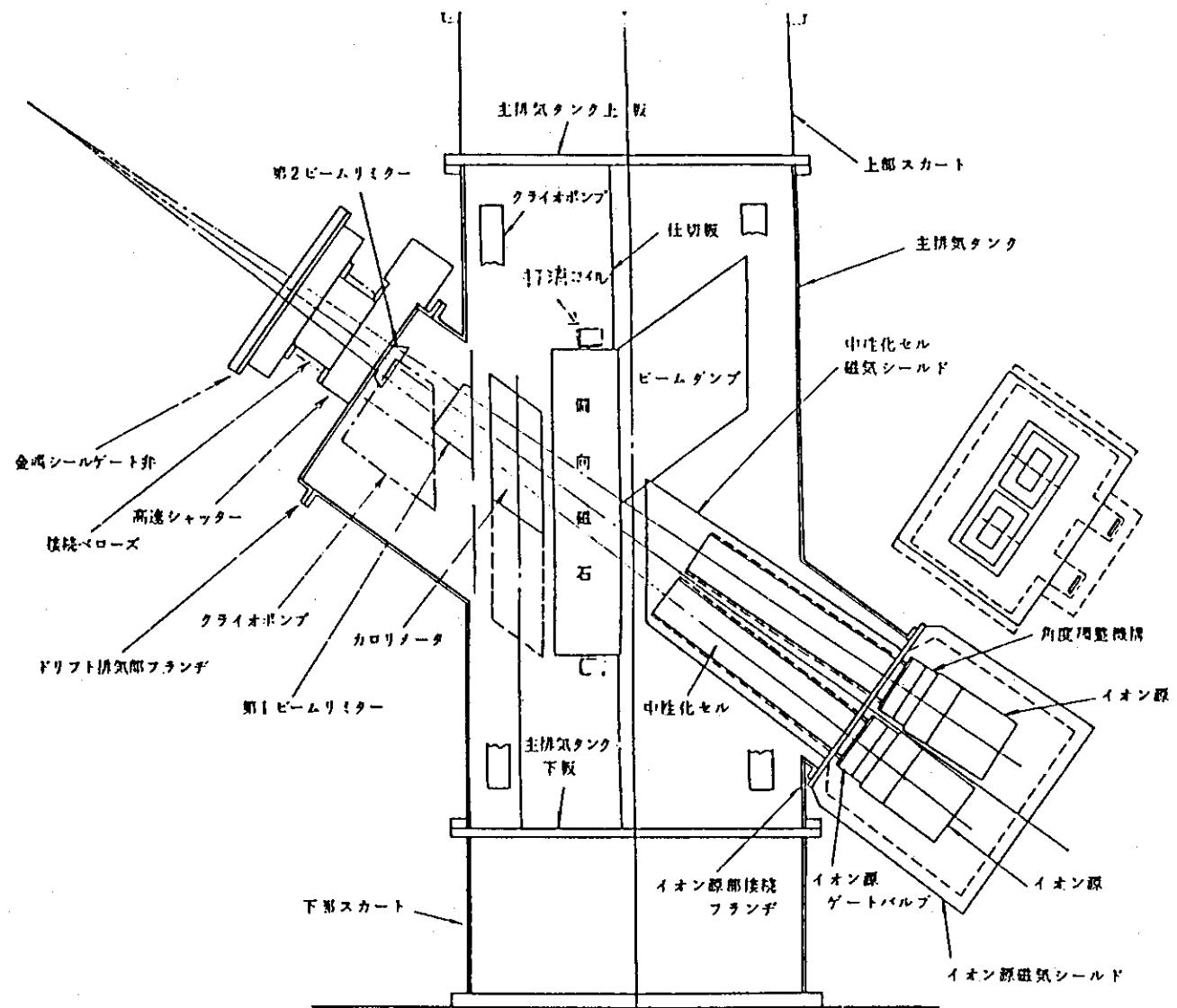
上(下)ビームラインユニット…ビームライン中心軸が中央水平面となす角 35.5° の符号に従って、正の符号をもつビームライン中心軸に対応するビームラインユニットを上ビームラインユニット、負の符号に対応するビームラインユニットを下ビームラインユニットと呼ぶ。

増力ビームラインユニット…主排気タンク内径が 2500ϕ の大きさのもの（非増力ビームラインユニット）と 2800ϕ の大きさのもの（増力ビームラインユニット）

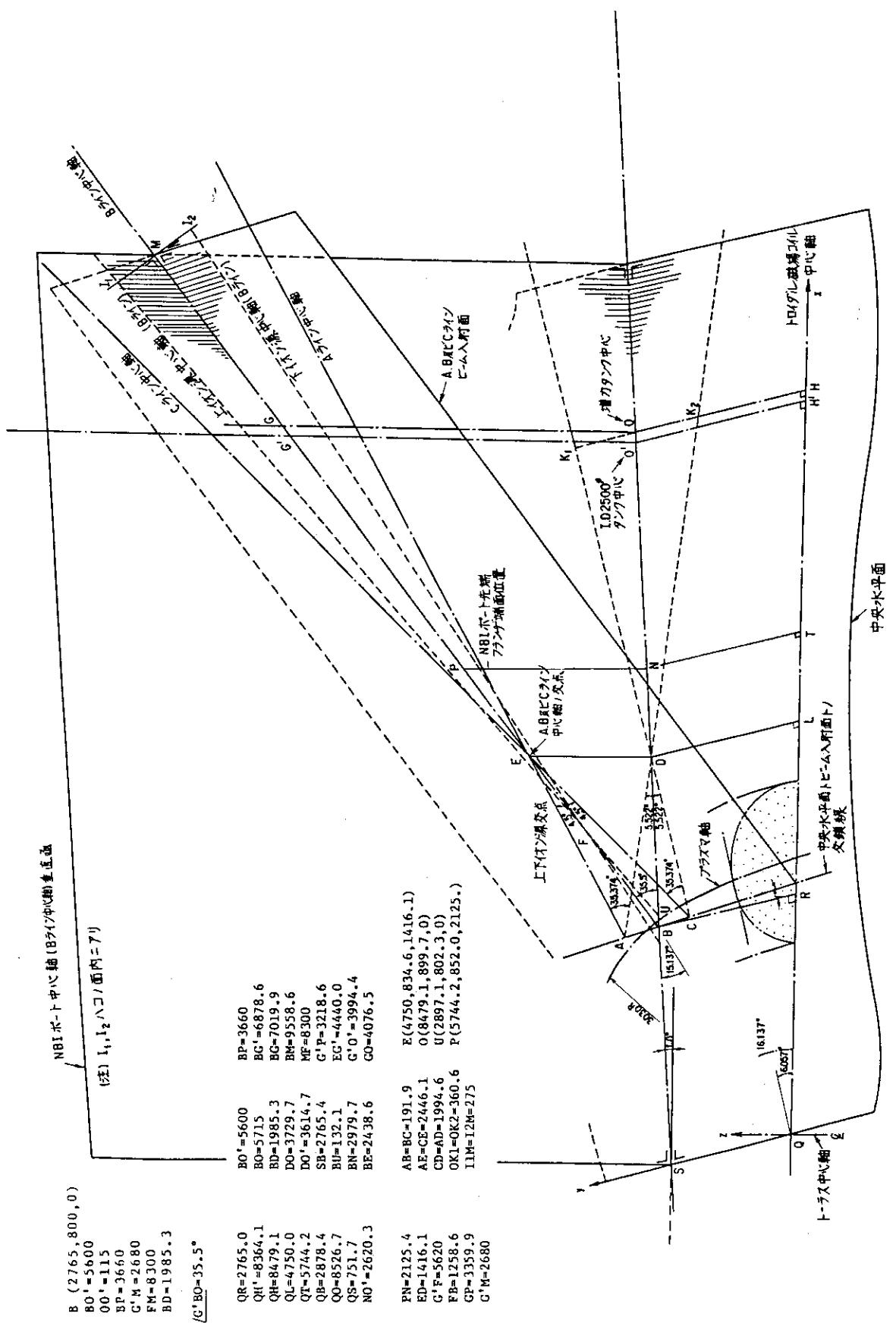
J T - 60 N B I ビームラインの全体図を第 4.2 - 4 図に示す。

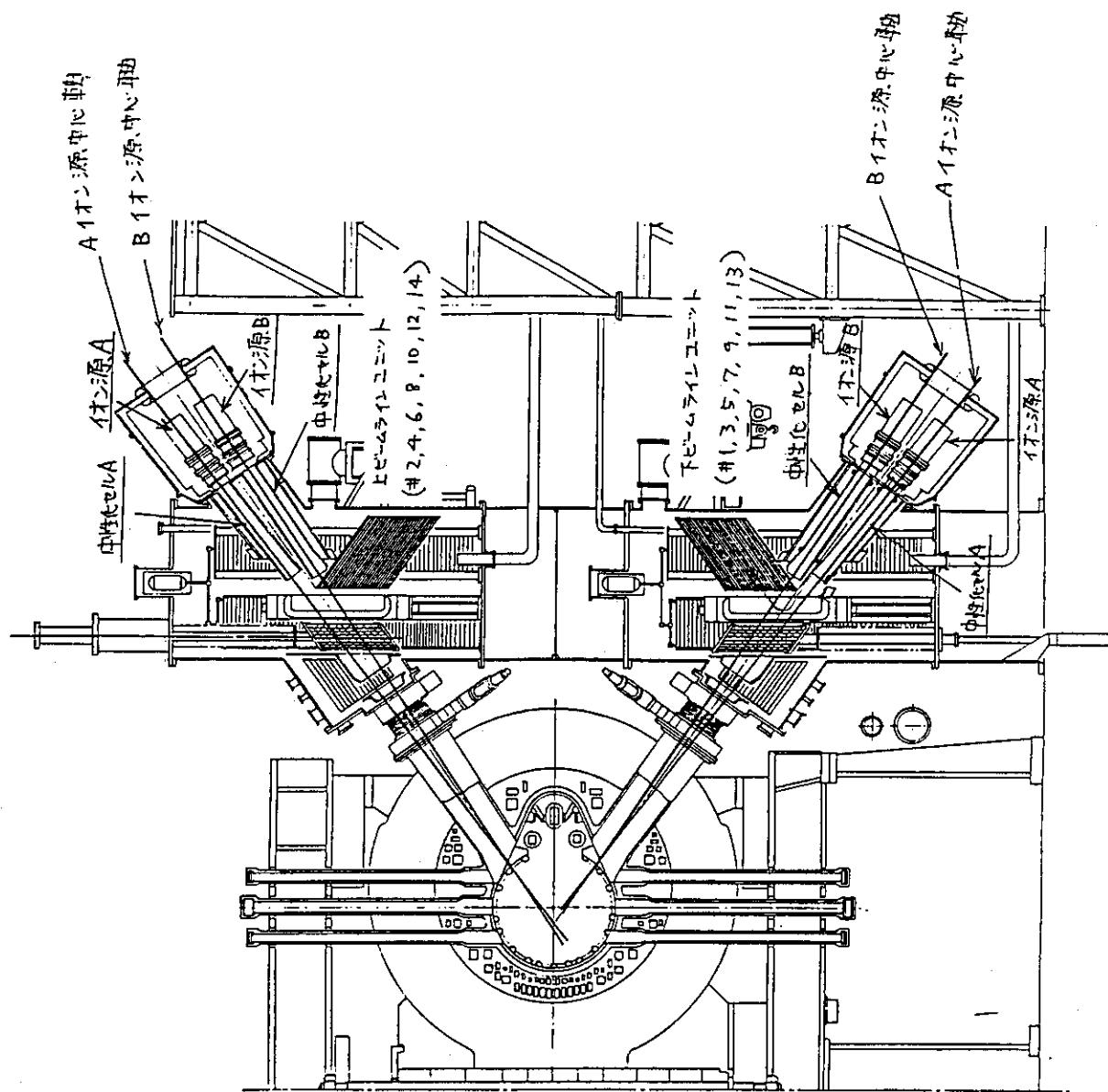
(3) ビームライン受熱機器設計上のビーム条件

- Ⓐ 最大イオンビームパワー : 100 KeV / 80 A / ユニット
- Ⓑ ビームパルス幅及びデューティサイクル : 10 秒 / $\frac{1}{30}$
- Ⓒ ビームの発散 $\omega_{\frac{1}{e}}$: 0.9 ° ~ 1.2 °
- Ⓓ ビームの最大軸ずれ : x, y 方向共 0.3 °
(ただしビームダンプへの熱負荷制限により運転時の x 方向の許容軸ずれは 0.15°)

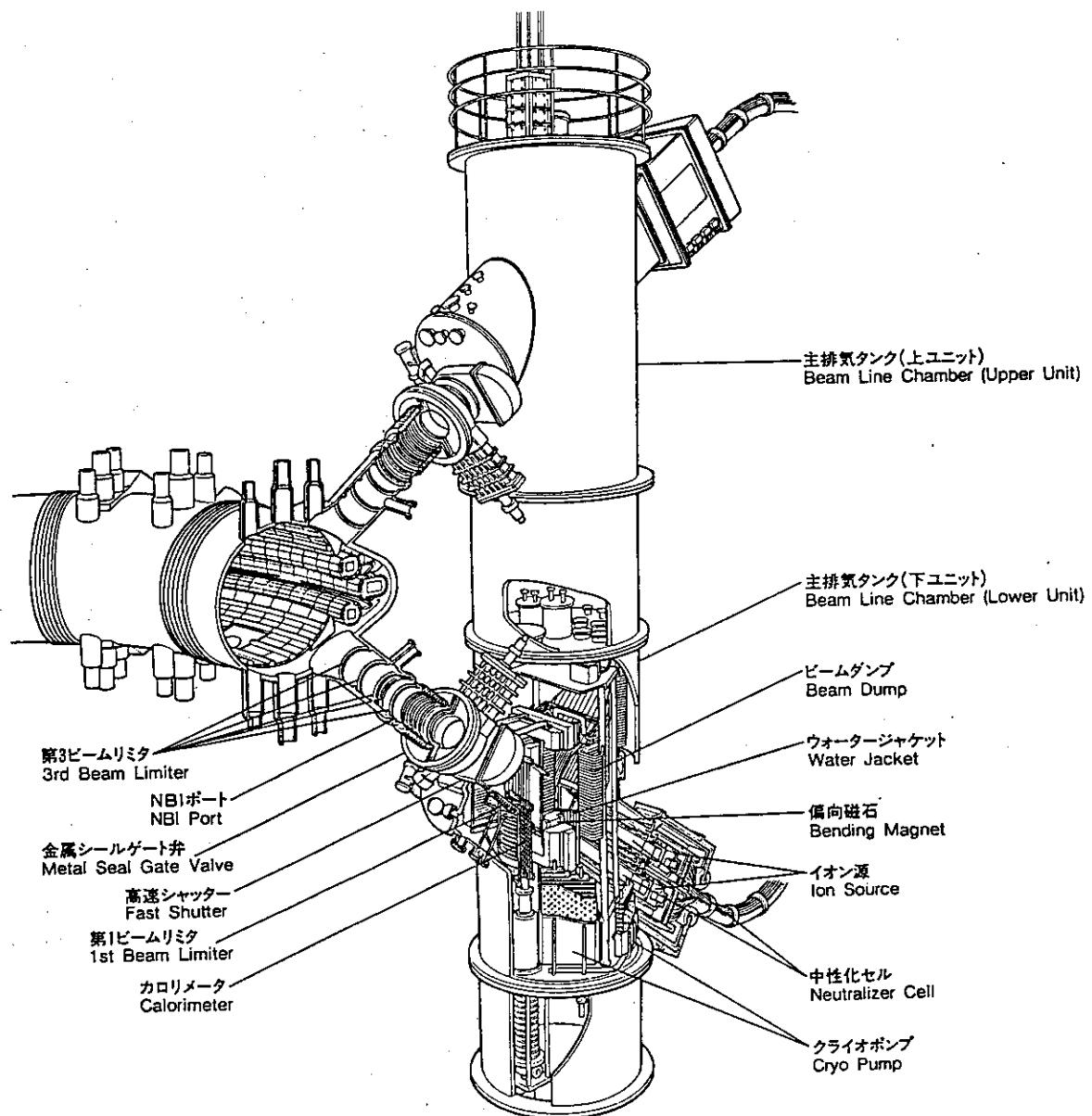


第4.2-1図 ビームライン名称図





第4.2-3図 ビーム軸の名称



第4.2～4図 JT-60 NBI ビームライン全体図

4.2.1 中性化セル

イオン源から発せられた高エネルギーイオンビームは、中性化セルで水素ガスとの荷電交換により中性化される。JT-60 NB Iの中性化セルは、イオン源から流出する水素ガス及び中性化セルに注入される水素ガスによって必要な線密度を保ち、かつコンダクタンスを制限して必要排気量を小さく抑えるための矩形ダクトである。

(1) 設計の経緯

i) 中性化セル形状

中性化セルの内壁はイオンビーム及び中性ビームの衝突により熱負荷を受けるため、断面積が小さくなると熱負荷が急激に大きくなる。一方、水素ガスの線密度を保ち、かつ必要排気量を小さく抑えるには中性化セルの断面積は小さい方が望ましい。更にJT-60からの漏洩磁場を磁気シールドによって効果的に遮蔽するためにも断面積が小さい方が良い。中性化セルの形状は上記条件の他にイオンビームの分布形状、あるいは他のビームライン機器との取合い条件等も考慮して決定した。中性化セルの寸法は以下のとおりである。

断面 : 14 cm × 29 cm

長さ : 中性化セルの実効的な長さは 225 cm。ただしイオン源引出し電極下流側に電極支持部、角度調整機構、イオン源ゲートバルブ等が設置されており、中性化セルダクトとしての長さは 169 cm。

ii) 中性化セル先端部のイオンビームリミタ

JT-60 NB Iでは、イオンビームの処理方法として反射型の偏向磁石を用いてイオンビームを水平方向に発散させてビームダンプへの熱負荷を軽減させている。この方式では、ビームの一部が偏向磁石のポールピース保護用ウォータージャケット（WJ；4.2.2項参照）に当たる訳であるが、イオンビーム軌道計算の結果、WJへの局所的な熱負荷を許容値以下に抑えることは難しいことが判明した。この対策として、中性化セル出口側を延長することによりWJに当たる熱負荷の一部をこの部分で受止めることによってWJへの熱負荷の低減化を図った⁽¹⁾。この中性化セル延長部は、イオンビームリミタとしての役割が主であるが、ここではこの延長部も含めて中性化セルとしている（第4.2.1-1図）。

iii) 除熱構造

主排気タンク内の他のビームライン機器との空間的取合いから中性化セルに許容される空間は狭い範囲に制限されており、また(2)の設計条件で記すように厳しい熱負荷となる。このため限定された空間内で除熱特性の良い構造を採用しなければならない。本中性化セルでは、ダクトの壁の外側に多数の溝を掘り、これらの溝の中にホロー導体を銀ロード付して冷却チャンネルを作り、これらのチャンネルに並列に冷却水を流すことにより狭い空間で最大の除熱性能を出すようにした。（第4.2.1-1図）

iv) ガス導入系

加速電圧が高くなるとイオン源から流出してくる水素ガスのみでは中性化セルに必要な線密度が保持できなくなるので、中性化セル中央部に水素ガス導入口が設けてある。このガス導入系の能力は 0 ~ 2.66 Pa · m³/s である。

(2) 热負荷条件

中性化セルは磁気シールドされており、磁場の影響がないものとすると熱負荷は第 4.2.1-2 図に示すとおりとなる。しかし中性化セル出口部近辺では、偏向磁石の磁場が入り込んでくること、更に中性化セル延長部は一部が磁気シールドから飛び出していることにより、中性化セル先端部には残留イオンビームが衝突して熱負荷は大きくなる。この場合の熱負荷を第 4.2.1-3 図に示す。

(3) 热、応力計算²⁾

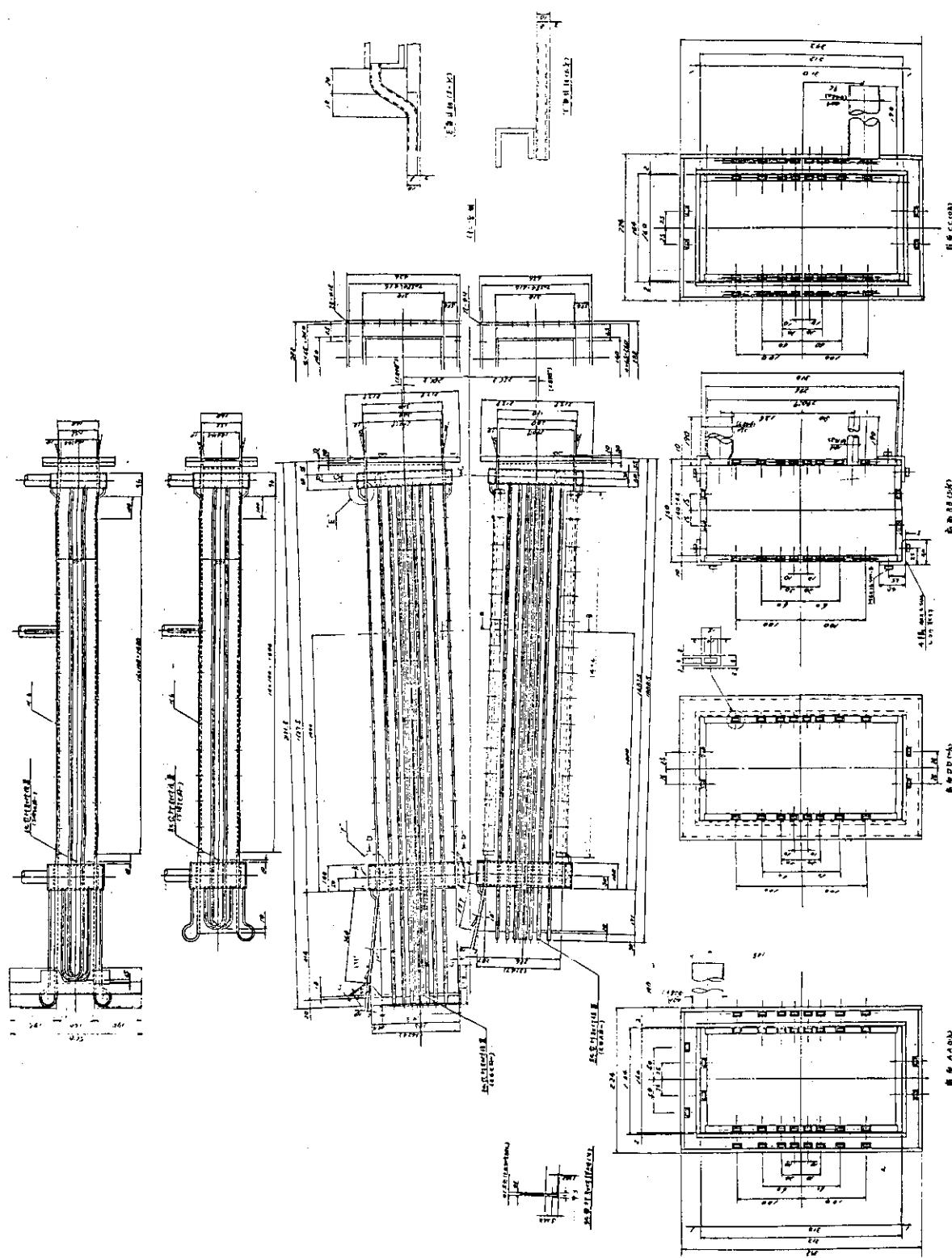
第 4.2.1-2 図及び 3 図に示した熱負荷分布を使っての熱計算結果を第 4.2.1-4 図に示す。ビーム引出し 10 秒後における最大温度上昇は 187 °C でベース温度 40 °C を加えても 227 °C であり、無酸素銅の軟化点（～300 °C）以下になっている。

上記の熱計算結果の使用して熱応力、熱変形の計算を行った。計算は SAP-V の平板シェル要素を使用した。第 4.2.1-5 図に熱変形状態、先端部の熱応力状態を示す。最大変位は先端部で外側に約 4 mm であり、また最大熱応力も約 6 kg/mm² で問題となる大きさではないことが確認された。

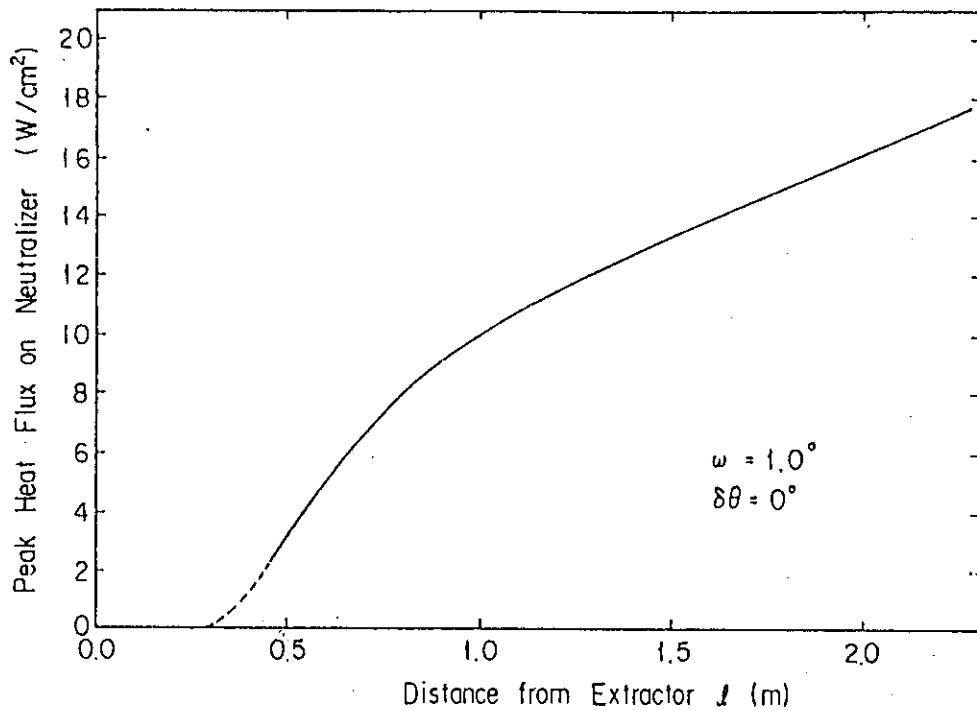
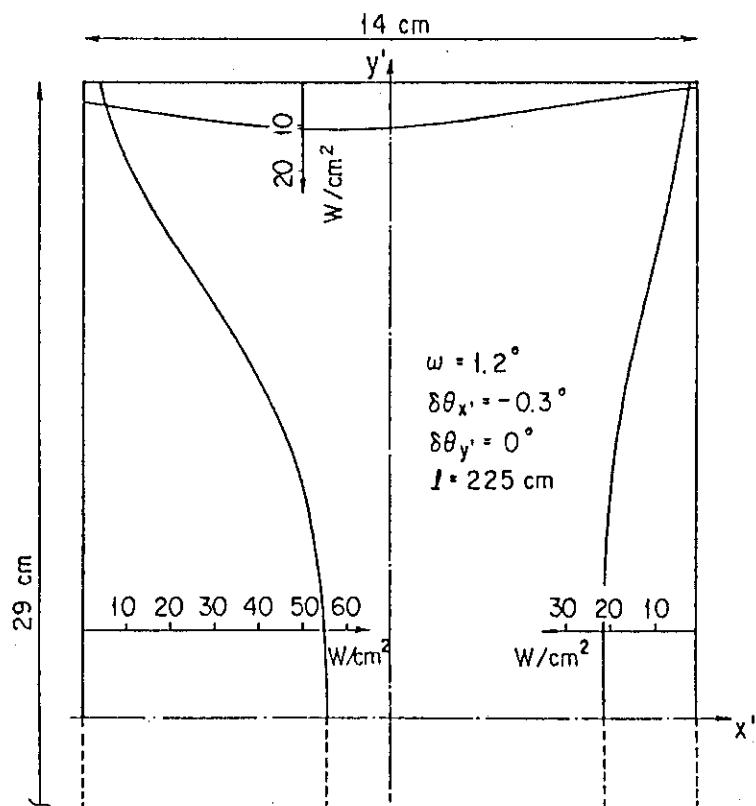
(4) 中性化セルの機器性能

機器性能及び仕様のまとめを以下に記す。

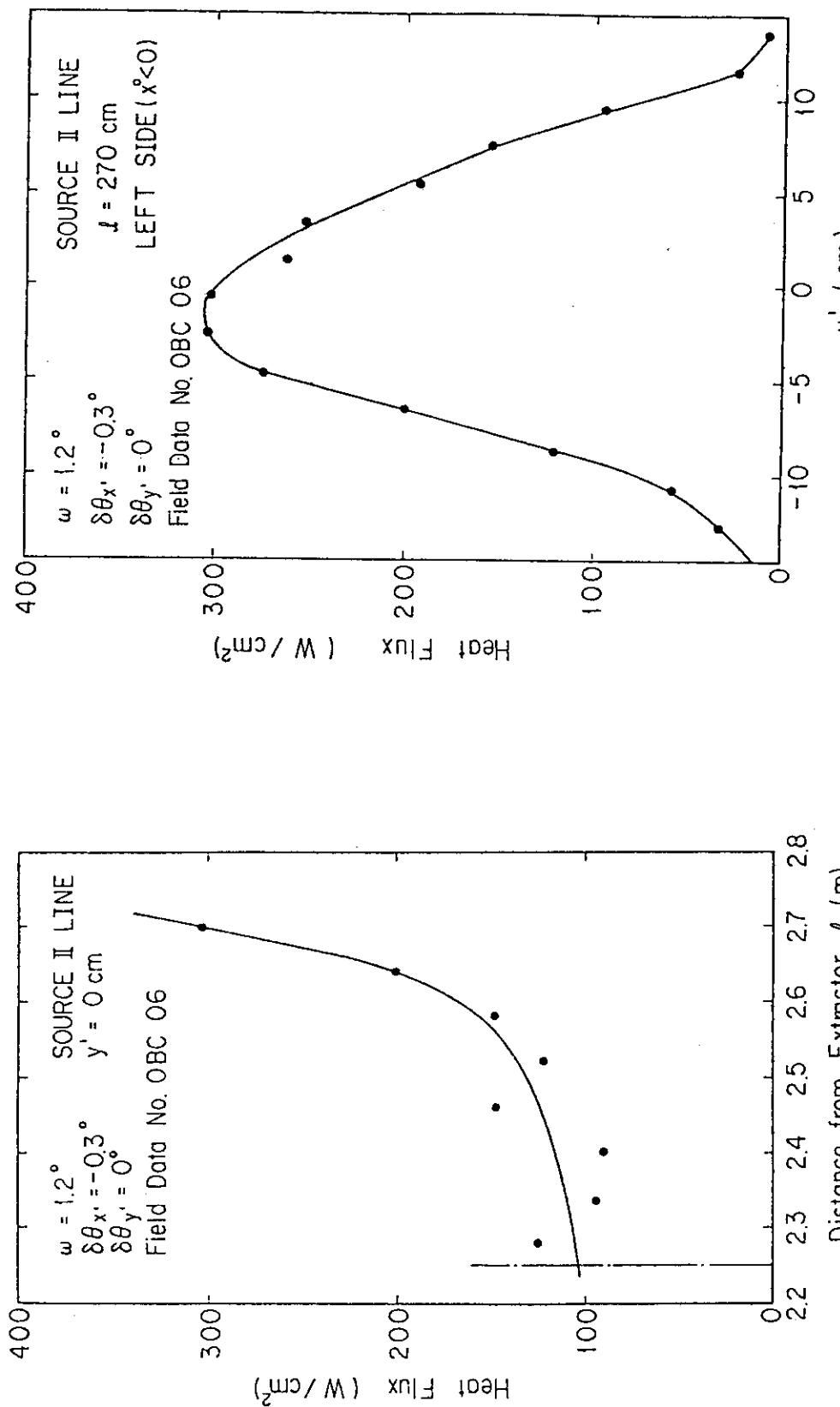
	中性化セル A	中性化セル B
熱負荷 (kW)		
本体部	160	220
延長部	180	210
計	340	430
最大熱流束 (W/cm ²)	300	<300
最大温度上昇 (°C)	190	<190
最大熱応力 (kg/mm ²)	6	< 6
冷却方式 : 矩形ホロー導体冷却チャンネルによる		
コンダクタンス 21 本	2300 ℓ/S	
中性化セルガス導入量	0 ~ 2.66 Pa m ³ /S	



第4.2.1-1図 中性化セル構造

a) 発散角 1.0° , 軸ずれなしb) 発散角 1.2° , 軸ずれ有り (横方向 0.3°)

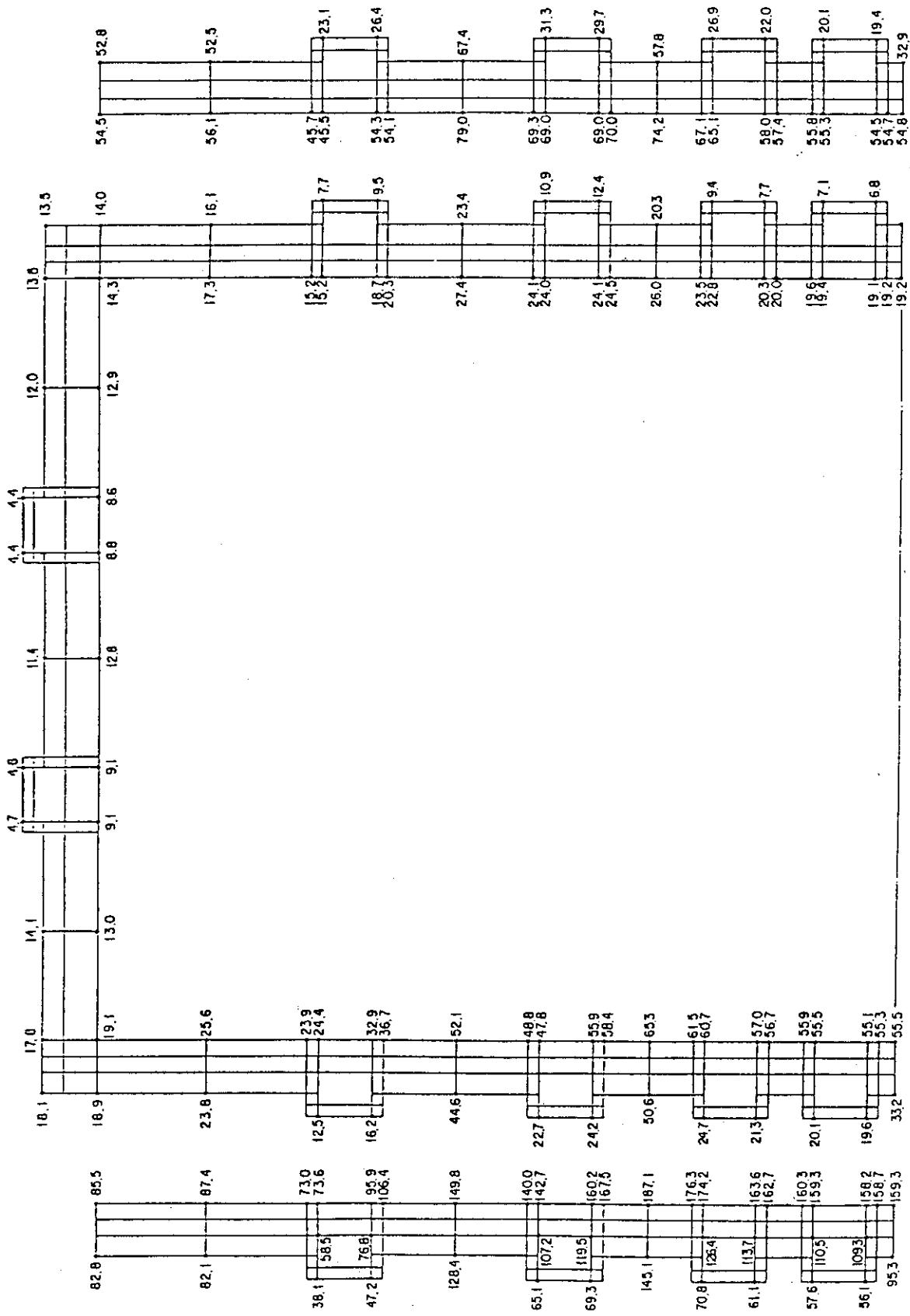
第 4.2.1-2 図 磁場の影響がない場合の中性化セル熱負荷



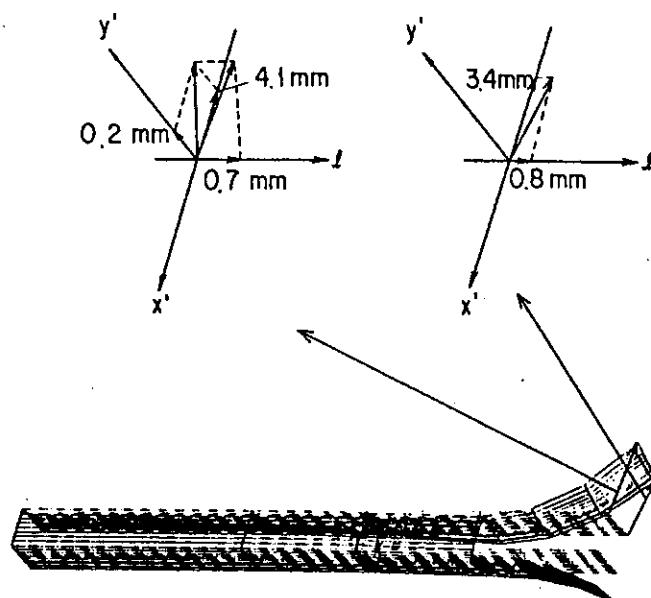
b)

a)

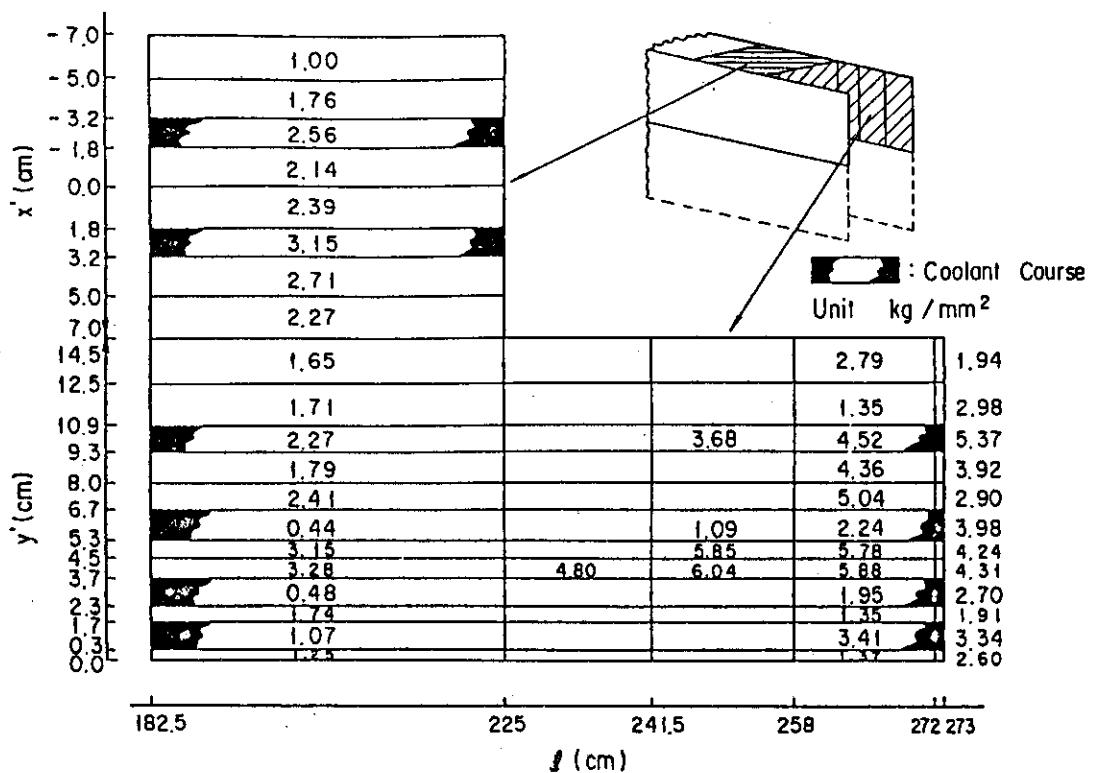
第4.2.1-3図 磁場の影響を入れた場合の中性化セルの熱負荷分布
(漏洩磁場磁気シールドなし, 漏洩磁場なし)



第4.2.1-4 図 ビームオン後10秒経過時の中性化セルBの温度分布, 中央は中性化セル出口 ($\ell = 2.25$ m), 左右は延長フィン先端 ($\ell = 2.73$ m) のものである。



a) 热 变 形



b) 热 应 力 分 布

第4.2.1-5図 热应力计算结果

4.2.2 イオンビームの処理系

偏向磁石¹⁾

偏向磁石は、中性化セルで中性化されなかった高速イオンを磁気的に偏向してビームダンプに導くことをその機能としている。2台のイオン源から引き出される最大8 MW (100 kV, 80 A), 10秒の水素ビームのうち、過半の約6 MWが偏向磁石によりビームダンプに導かれる。即ち、偏向磁石は粒子入射装置内のパワーの流れの大きな分岐点であり、その制御を一つ間違うと入射装置の破壊につながりかねない重要な機器である。

偏向磁石の磁場分布がイオンビームの軌道を規定し、従って偏向磁石通過後のイオンビームの熱負荷分布を決定するので、イオンビームを受けるビームダンプや磁石のポールピースをイオンビームから保護するウォータージャケット等の形状や位置は、偏向磁石の設計と密接に関連付けられて決定されている。

イオンビームの偏向型式としては、ビームが磁石のギャップを通過して入口と反対の側に出てしまう透過型と、ビームがギャップの手前や内部で大きく旋回して入口の方向に戻ってくる反射型がある（第4.2.2-1図参照）。JT-60 NB Iでは、入射角35.5°, 反射角35.5°の反射型偏向磁石を採用した。その理由は、以下の通りである。

① 中性化セル出口でのイオンビームの熱流束は、ビーム軸と垂直な面で受けると数10 kW/cm²という非常に高い値になる。透過型偏向磁石の場合、磁石通過によりイオンビームは収束されるので、焦点距離の2倍以上の距離を走らないと、イオンビームの熱流束は磁石入射位置での値より低くならない。これに対して、反射型偏向磁石の場合、イオンビームはギャップ方向に発散されるので、偏向磁石から少し離れるだけで熱流束は低下し、ビームダンプの熱負荷条件が大巾に緩和される。

② 残留イオンには、パワー比で最も多いH⁺(E)の外、H⁺(E/2), H⁺(E/3), H₂⁺(E), H₃⁺(E), 等の多種のイオンが含まれている。これらイオンは、異なったラーマー半径を有しているので、透過型偏向磁石の場合には、各イオン種は磁石通過により質量分析されて各々異なる角度で出て行く。従って、その各々のイオン種に対応したビームダンプが必要である。これに対して、反射型偏向磁石の場合には、これらイオン種の大半を同一方向に偏向でき、その結果、ビームダンプは一つで良い。また各種ビームをイオン源側に偏向できる点は、高速イオンがビームダンプ等に衝突して生ずる室温中性ガスと高速中性粒子ビームを分離する上で非常に有効である（高速中性ビームの再電離損失を少なくする点で重要）。

以上の理由で反射型偏向磁石を選択したが、イオンビームが発散を始める磁石のギャップ付近では熱流束が依然として高く、ウォータージャケット面での熱流束を如何にして許容値(500 W/cm²)以下に低下させるかが大きな問題であった。

ビーム軌道の反射点がギャップの奥深くにあるほど、ウォータージャケットへの熱負荷が高くなるので、偏向磁石の発生するフリンジング磁場を強くして反射点をギャップ外に出す工夫が必要であった。具体的には、ギャップ中心の磁場を一定に保つよう起磁力を増しつつ、ギャップ巾を40 cmまで拡大した。またウォータージャケットでのビーム入射面積を増大して熱流束を低下させるために、ウォータージャケット面のポールピース面に対する傾角度を大きくする必要があった。この目的のため、励磁コイルをカロリメーター側に平行移動したような磁石構造とした。

その結果、ポールピースの断面は、第4.2.2-2図に示す「象の鼻」のような形状となった。

以上のような検討に必要な磁場分布は、2次元磁場計算コード「TRIM」を利用して求めた。またTRIMの計算精度は、 $1/2.5$ 縮小モデル磁石の実測磁場分布との比較によりチェックした。さらに、この磁場分布によって決定されるイオンビームの軌道およびビームダンプ、ウォータージャケット、中性化セル面上の熱流束分布は、原研で開発した「イオンビーム熱負荷計算コード³⁾」を用いて求めた。第4.2.2-3図にイオンビームの軌道計算例を示す。

これら計算コードを用いて磁石形状およびウォータージャケット、ビームダンプ、延長中性化セルの形状、寸法を最適化した結果、ビームの軸ずれ最大 $\pm 0.15^\circ$ 、また残留磁場(JT-60)からの漏洩磁場とそれを打消すように発生された打消磁場のベクトル和)が存在する条件下でも、各受熱機器での熱流束が許容値(ビームダンプ、ウォータージャケットは 500 W/cm^2 、中性化セルは 300 W/cm^2)以下となるような解を得ることができた。

JT-60 NB I 原型ユニット製作前に、最終的な磁石形状を $1/4$ にした縮小モデルの磁場分布を実測し、それに基づいた熱負荷計算を行なって最終確認をした。JT-60 NB I 実機の偏向磁石は、原型ユニットと同一の形状、寸法を有し、その全体形状は第4.2.2-2図に示す通りである。材質は、磁石鉄心が電磁軟鉄、コイルケーシングはSUS、コイルは銅製中空導体に絶縁テープを巻いたものである。コイルのターン数は、片側23ターン合計46ターンである。偏向磁石の発生する磁場は、イオンビームが常に同一軌道をとるよう、その強度がイオン源加速電圧の平方根に比例するよう制御される。例えば、加速電圧75 kVの場合、ギャップ中心で約0.13 Tの磁場を発生し、その時の励磁コイル電流は1100 Aである。また偏向磁石磁場は、ビームが入射しないカロリメータ側の位置に設置されたホール素子によりモニターされており、異常時にはインターロックが作動するようになっている。

2) ビームダンプと偏向磁石ウォータージャケット

偏向磁場で曲げられたイオンビームはビームダンプに衝突し、ビームのエネルギーは熱となって除去され、粒子はビームダンプ表面にて電子と結合して中性原子となり更には再結合して水素ガスとなって空間に放出され、真空ポンプにて排気される。

ビームダンプの設計時に最初に問題となったのは、ビームダンプ受熱板の表面に入射した高速イオンの表面との相互作用である。スペッタリングについてはイオンビームの入射角度が最も小さい領域でも15度以上と大きく、入射する粒子のエネルギーも50~100 keVの比較的スペッターの小さい領域に停まっているなどの理由によって材料の薄肉化については殆んど問題の無い事が過去のデータに基いて結論付けられた。しかしスペッタされて周囲に飛散し付着する受熱板の原子(ここでは銅原子)の影響は長期的には無視できないものと考えられた。特にクライオパネル用シェブロンに付着すると黒化処理したシェブロンが鏡面化しクライオパネルへの熱負荷が増加する。この対策として受熱面自体をスペッタシールドと称する簾状に並べた薄板で囲むことによって受熱面からスペッタされた原子がクライオシェブロンへ直接到達しない工夫をした。

一方受熱面に入射したイオンが後方散乱を受ける際にどの程度のエネルギーを保有して散乱されてくるかは設計開始時点では明確でなく、実際にテストスタンドに於て後方散乱粒子のパワーを測定することによって評価した⁴⁾。その結果約30 keV程度のエネルギーでは入射イオンは99%の運動エネルギーを受熱板に与えて散乱されることがわかり、後方散乱についてもビームダンプ

設計時に特別の考慮を払う必要のないことが結論付けられた。

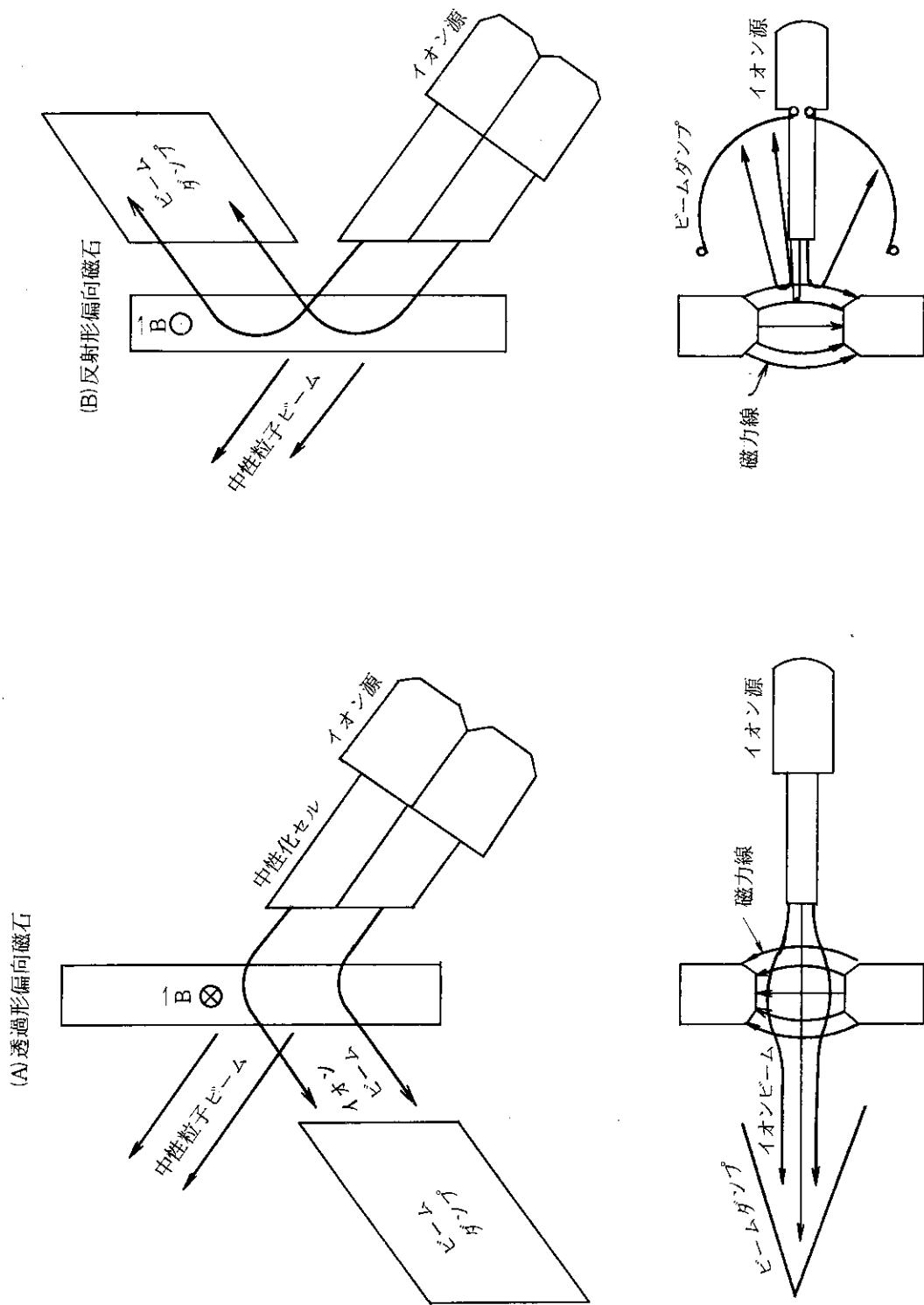
さてビームダンプの熱的な設計については以下に記す通りである。前項にて記したようにビームダンプへ入射するイオンビームの強度分布は偏向磁場の形によって大きく変化し、ビームダンプの設計と偏向磁場の設計は非常に強く結び付いており、トカマクからの漏洩磁場の遮蔽やイオン源から引出されるビームの分布にも影響される。このためビームダンプの形状の検討も含めた偏向磁場の形式も検討を行った。偏向磁場の形式は二つに大別される。その一つは透過型の磁場であるが、この形式は第4.2.2-1図に示すようにイオンビームは発散と収束の両作用を受けるためビームは収束された状態でビームダンプへ入射する。その熱流束は中心部では 10 kW/cm^2 を越えるので受熱面ではそれを広く受ける必要がある、イオンビームの入射角を非常に小さくするようにビームの走る方向に細長い形の受熱面となる。ビームの軸の設定誤差やトカマクからの漏洩磁場によってビームの軸が更に偏向される影響を含めると受熱面は非常に細長いものを精度良く製作する必要があるが、その精度は片面加熱による受熱面の熱変形量と両立しないものと判断された。柔らかい構造にすれば熱変形が局部への熱集中を促進し、非常に堅牢な構造では熱衝撃に耐えられず材料が破断する恐れが大きい。

反射型の磁場では第4.2.2-1図に示す様にイオンは発散作用だけを受けるのでイオンは大きく広がり受熱面の精度の問題からは逃げることができ、細長い形にしなくとも磁極面に垂直な平面上では均一な熱流束を実現できる。この形式の問題点は偏向磁石表面にさえも大きく広がるビームの一部が入射することであるが、透過型磁場の持つ欠点に比較すれば小さく、JT-60では反射型を採用した。その結果受熱面は偏向磁石の磁極を保護するためのウォータージャケットを含め円筒形の比較的コンパクトなものとすることことができた。受熱面の構造は、熱衝撃に対する配慮から第4.2.2-4図の様なΩ字形のフィン付冷却管を並列に配列して構成した。この冷却管の形状はフィンの部分と管の頂点部との両方がビームに晒されるため管の表裏に生成する温度差が、フィンの無い場合に比較して大変小さく、従って管の断面内に生ずる熱応力が小さいと云う大きな利点を有する⁵⁾。磁場が弱くイオンビームがほぼ直進する領域ではビームの進行方向に沿ってこの冷却管を並べる事でビームを受け止める事ができる。一方偏向磁石の近傍ではイオンビームは曲りながら受熱面に入射するので冷却管の山の腹部にビームが入射されるのでこのような冷却管は使用できない。従って偏向磁石ウォータージャケットは第4.2.2-5図に示すように矩形断面の冷却管を並べて構成した。この場合冷却管は片側からのみ加熱されるが、熱負荷を低く抑え冷却管を裏側から固定することによって熱暴走を防いでいる。

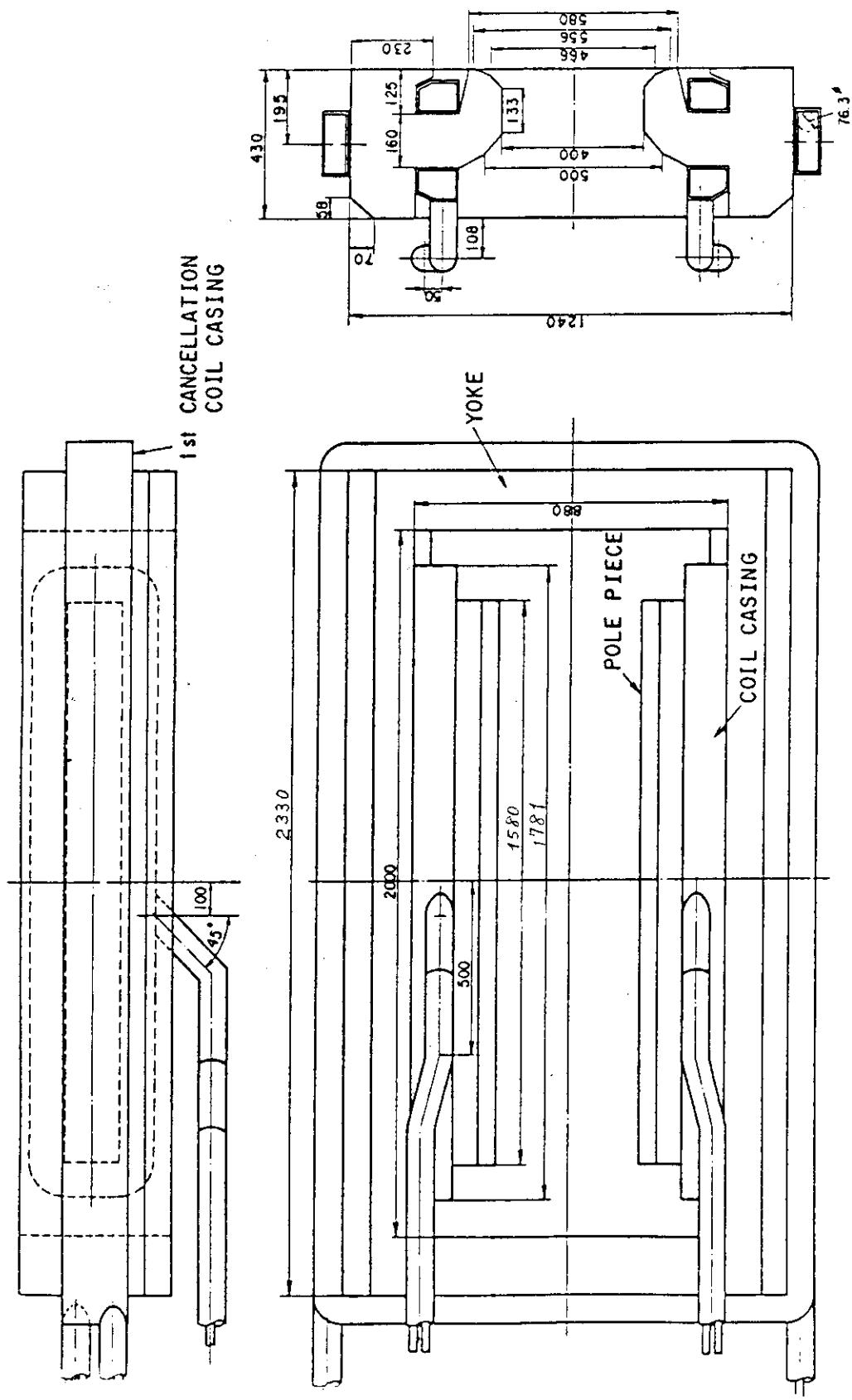
ビームダンプの許容熱流束について図に示す様な管が片面からだけ加熱された場合のデータは少く⁶⁾、ITS-2テストスタンドに於て実際にテストピースをイオンビームにて照射し限界熱流束を求める実験を行った⁷⁾。その際にはテストピースの表面に熱電対を埋込み、表面温度の急上昇を検知して瞬時にイオンビームを遮断したためテストピースを破壊することなく一台のテストピースにて多数の限界熱流束データを得ることができ、沸騰の初期効果等の不確定要素を取り除いた信頼できるデータを得た。この実験の結果及び過去の限界熱流束のデータ⁸⁾を参考に推定される限界熱流束が約 1000 W/cm^2 となる様にビームダンプ冷却管の通水条件を決定し、設計上の許容熱流束を2倍の安全率を見込んで 500 W/cm^2 とした。

前述の様に受熱面の形状は偏向磁石の形状と密接に結びついており、受熱面の構造は偏向磁石

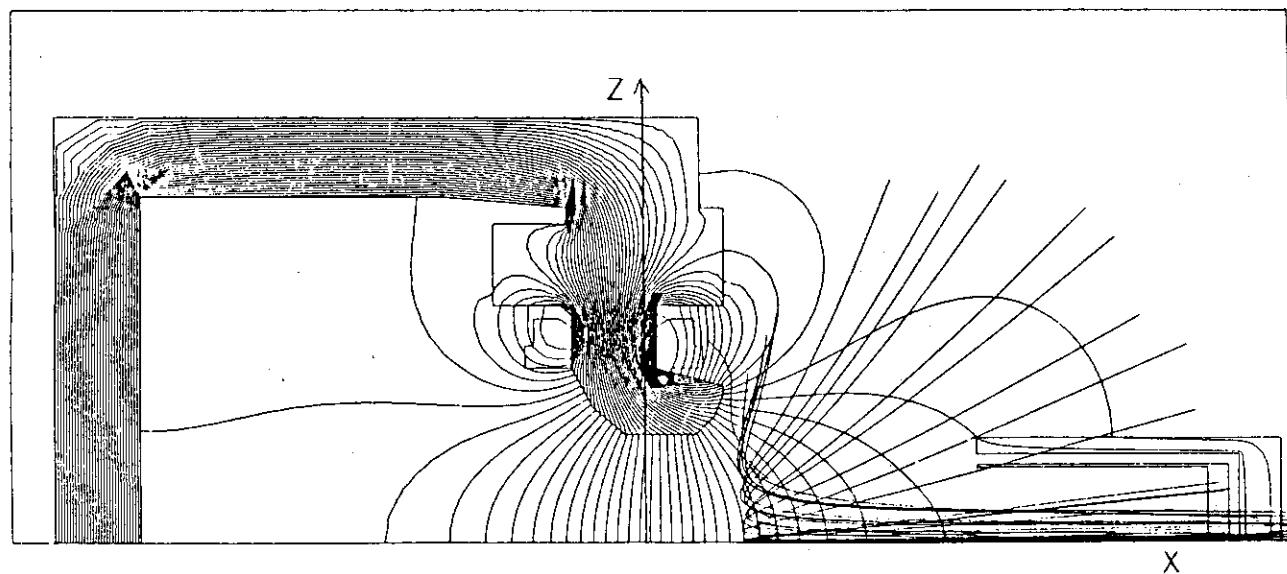
の構造と同時に両立するように決定した。具体的にはイオン源から引出されるビーム粒子を数値的に追跡する³⁾事により、中性化セルの寸法形状、偏向磁石の形、ウォータジャケット及びビームダンプ受熱面の形状の最適化を計った。これは軸の設定誤差、漏洩磁場等の想定される条件変動の下でも受熱面上の熱流束分布があらゆる運転条件に対して許容熱流束以下となるように磁場の分布と受熱面の形状を決定するものであって、決定すべきパラメータの多さや各々のパラメータの保有する情報量の多さのために膨大な作業を必要とした。その結果受熱面は第4.2.2～6図に示す形に決定された。



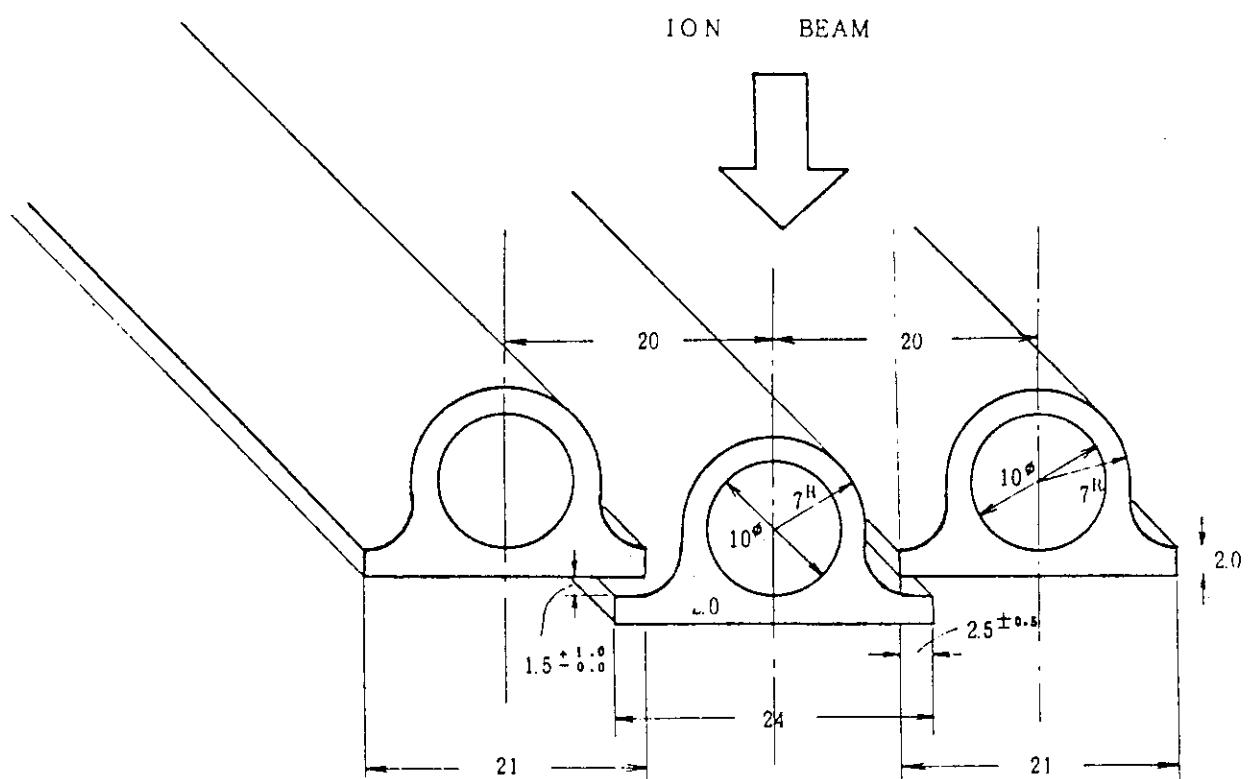
第4.2.2-1図 偏向磁場のタイプ



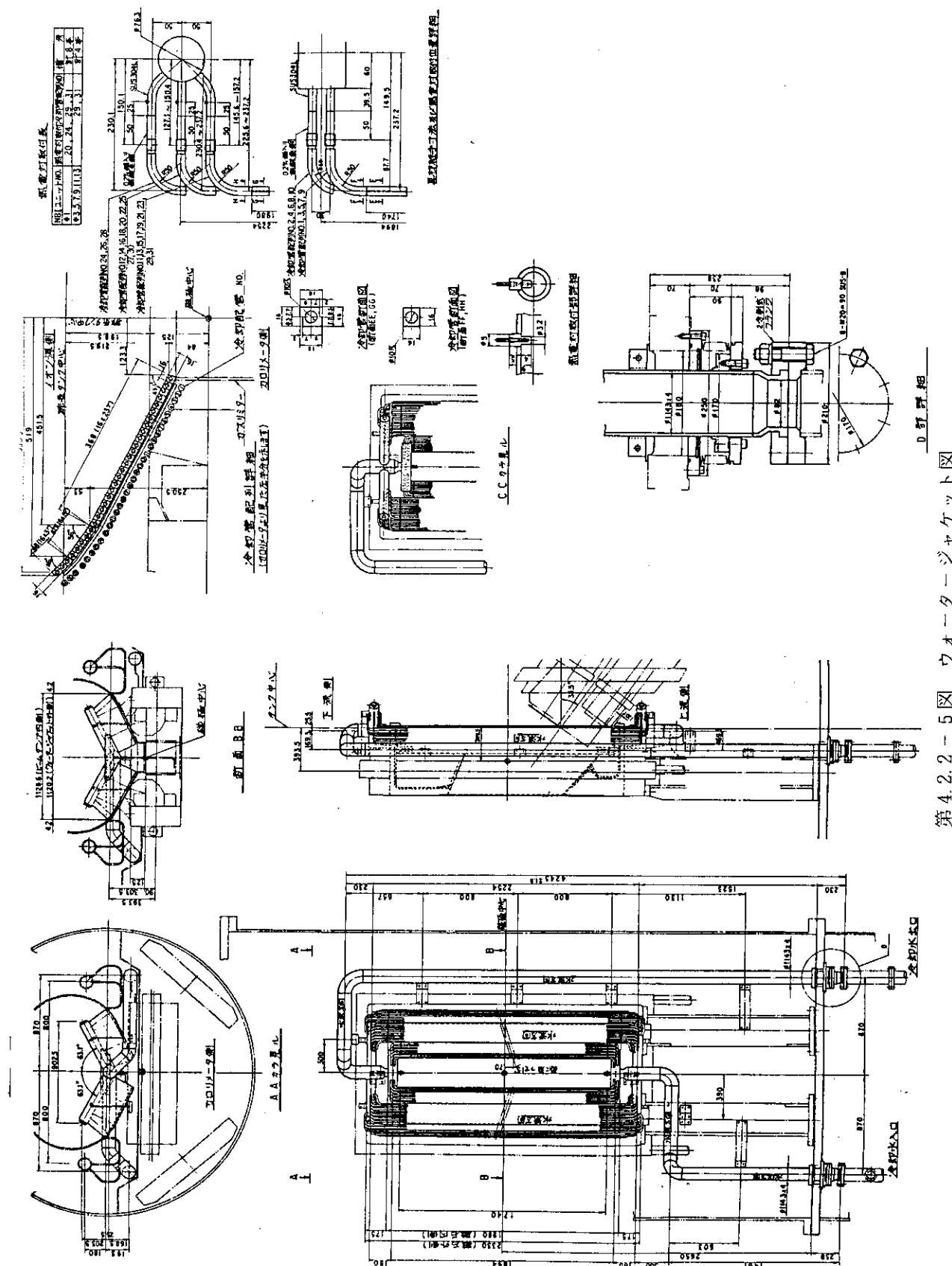
第4.2.2-2図 偏向磁石寸法



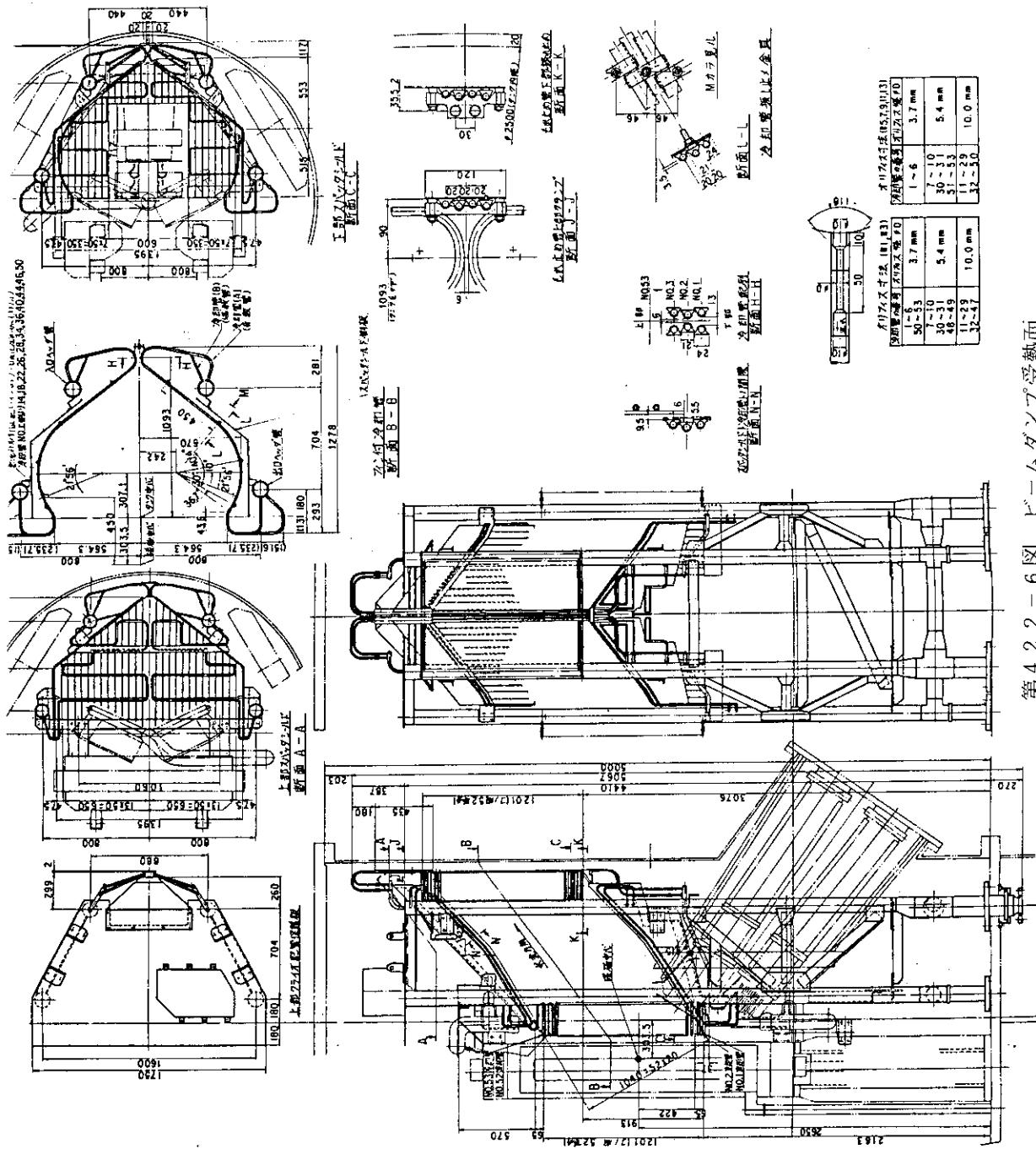
第 4.2.2-3 図 偏向磁石フリンジング磁場とビーム軌道



第 4.2.2-4 図 ビームダンプの受熱部断面



第4.2.2-5 図 ウォータージャケット図



第4.2.2-6 図 ビームダンプ受熱面

4.2.3 磁気シールド系

JT-60 NB I は、 JT-60 トカマク本体に近接して設置されるため、本体のプラズマ電流、ポロイダルコイル電流を発生源とする漏洩磁場にさらされる。この磁場によるイオン源性能やイオンビーム軌道への悪影響を小さくするため、イオン源および中性化セル、また中性化セル出口より偏向磁石を経てビームダンプに至る領域を磁気遮蔽する必要がある。

このうち、イオン源と中性化セルに関しては、磁気遮蔽すべき空間の体積が比較的小さいため、磁性体で領域を囲い領域内に侵入する磁場を弱くする受動的磁気遮蔽方式を採用した。しかし、中性化セル出口よりビームダンプに至る空間については、遮蔽すべき空間の体積が大き過ぎ、必要な遮蔽度を得るために磁性体の厚み、大きさ、重量とも大きくなり過ぎると判明したため、打消コイルにより領域内の漏洩磁場を打ち消す能動的磁気遮蔽方式を採用することとした。

磁気シールド系を設計する上で重要な点は、磁気系を構成する各々の要素が単独で磁場中に存在すると考えて設計を行うのではなく、各々の要素が相互に作用しあっている集合体として全体をとらえる必要があることである。例えば、偏向磁石は磁気シールドではないが、磁性体であるので、付近の漏洩磁場が吸い込まれ内部を通過している。このため付近の漏洩磁場の分布は、偏向磁石がない場合とは大きく異なっている。従って、そのことを考慮せずに打消コイルシステムや中性化セル磁気シールドを設計すると誤った結果を得る危険性がある。この観点から、磁気系設計のための R & D に用いた縮小モデルに関しては、イオン源磁気シールド、中性化セル磁気シールド、イオン源部接続フランジ、偏向磁石、打消コイルといった磁気系構成要素全てをそろえた状態で、磁気シールド効果の実験や磁場分布測定を行なった。

イオン源および中性化セル磁気シールド⁹⁾

イオン源部および中性化セル部を磁気遮蔽しなければならないのは、以下の理由による。もしイオン源部に強い外部磁場が存在すると、イオン源のプラズマ生成部においては、陰極から放出された電子の軌道が影響を受けアーケ特性能が変化したり、プラズマ密度の一様性が悪化したりする¹⁰⁾。これにともないビーム発散も悪影響を受ける。またイオン源の引出し電極部では、加速部の逆流電子ビームの軌道が影響を受けてグリッドへの熱負荷を増大したり、また加速途中のイオンが磁場の影響を受けて引出されるイオンビームの発散が悪化したりビーム軸がずれる。一方、中性化セル部に強い磁場があると、セル内のイオンの軌道が曲げられてセル壁にビームが入射し、ビーム損失が増加するとともにその部分の熱負荷が急増して危険になる。また磁場によって曲げられた後に中性化する粒子の一部は、そのまま中性化セルを出ても下流のビームリミターやドリフト管壁に衝突して結局ビーム損失となり、トーラスへ入射する中性粒子パワーが減少する。

JT-60 本体からの漏洩磁場は、トカマクの運転条件によって変化し、しかもトカマク放電の 1 ショットの間にも時間変化する。しかし、磁気シールドの設計上からは、シールド位置での磁場の絶対値が最大となる場合を想定すれば良い。この場合、JT-60 NB I のビーム軸に沿っての漏洩磁場の絶対値の分布は、磁性体が全く無い時、JT-60 本体から離れるほど磁場が弱くなってしまい、イオン源部では、0.006 ~ 0.007 T、中性化セル部では 0.007 ~ 0.014 T である。また漏洩磁場のベクトルの向きは、ビーム軸に垂直ではないので、横磁場（ビーム軸に垂直な方向の磁場）に対する磁気遮蔽のみでなく、縦磁場（ビーム軸に平行な方向の磁場）に対する磁気遮蔽も、必要に応じて考慮に入れて磁気シールドを設計する必要がある。しかし、ビーム進行方向と

垂直な横磁場は、ビーム全体の軌道に直接的に大きい影響を与えるので、目標とする磁気遮蔽度は横磁場を主体にして決定した。

イオン源部および中性化セル部で許容される外部横磁場は、各々 6×10^{-5} T と 1.45×10^{-5} T であるので、最低限確保すべき磁気遮蔽度は、横磁場に対して、各々 $7 \times 10^{-3} / 6 \times 10^{-5} = 117$ ，
 $1.4 \times 10^{-2} / 1.45 \times 10^{-5} = 965$ である。

イオン源部および中性化セル部の空間的制約条件を考慮して一次設計を行ない、イオン源部については外層が 1.5 cm 厚の電磁軟鉄、内層が 0.5 cm 厚のミューメタル、中性化セル部についても外層が 1.2 cm 厚の電磁軟鉄、内層が 0.5 cm 厚のミューメタルの二層シェル構造の磁気シールドとした。またイオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドの境界であり両シールドが両面から各々固定されるイオン源部接続フランジには、両シールドが磁気的にもしっかりと接続するよう、SUS 製フランジ内に 2 つの矩形枠形の電磁軟鉄を組み込み、そこへ両シールドの内外層を各々固定する構造とした。

以上の設計で磁気系の 1/10 縮尺モデルを作成し、磁気シールドの磁気飽和実験を行なったところ、中性化セル磁気シールドが磁気飽和する危険性があることが判明した。その原因として考えられたことは、以下の通りである。イオン源磁気シールドと中性化セル磁気シールドが各々独立に漏洩磁場中に存在する場合、イオン源磁気シールド外層に流入する縦磁場による磁束は、中性化セル磁気シールド外層のそれの約 3 倍である。

両磁気シールドは磁気的に結合しているため、縦磁場に関しては、イオン源磁気シールドが吸い込んだ磁束のかなりの部分が中性化セル磁気シールドにも流入する。その結果、中性化セル磁気シールドの磁性体が磁気飽和を起こし、磁性体内部を通過し切れない磁束が外部にあふれ出してビーム通過部に強い磁場を発生する。即ち、磁気飽和に関しては、縦磁場が重要な役割を演じていると考えられた。

この後、1/10 縮尺モデルで中性化セル磁気シールド外層を 2.0 cm 厚相当、2.6 cm 厚相当の厚みに変えて実験を行ない、磁気飽和に関するスケーリングのデータを得た。このデータに基づき、中性化セル磁気シールド外層の厚みを最終的に 2.4 cm と決定した。この厚みで磁気飽和しないことは、この後製作した磁気系の 1/4 縮尺モデルでも確認している。

最終的設計に基づき製作された JT-60 NBI 原型ユニットにおいて、JT-60 本体の周囲と同様な磁場分布を主排気タンク付近に発生するために設置された模擬漏洩磁場発生コイルに通電して、上下のイオン源軸に沿っての磁場分布を測定した。その結果、横磁場については、イオン源磁気シールド中心で $5 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-5}$ T、中性化セル磁気シールド中心で $1 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-5}$ T の磁場値が得られ、設計目標を満たしていることがわかった。

JT-60 NBI 実機の磁気シールドは、原型ユニットと同じ材質、形状、寸法で製作されており、実際の運転に際して、磁気シールドに関係した問題は発生していない。

打消コイルシステム¹¹⁾

本システムは、中性化セル出口から偏向磁石を経てビームダンプに至る空間に存在する漏洩磁場の影響を抑えるため、反対方向の磁場（打消磁場）を発生するものである。

中性化セルを通過しても中性化しなかったイオン（残留イオン）は、偏向磁石によりビームダンプ方向へ曲げられるが、ビームダンプ受熱面とウォータージャケットのビームダンプ側受熱面

での熱流束は、許容限度に近いため、漏洩磁場によりイオンビーム軌道が大きく乱されると熱流束が局所的に許容値を超え、非常に危険な状態となる。粒子軌道の問題であるから、漏洩磁場により偏向される位置が上流側であれば、下流側で偏向される場合より軌道終端でのずれの程度が大きい。偏向磁石-ビームダンプ間は下流にあたること、また偏向磁石通過後のイオンビームの軌道と漏洩磁場の方向がほぼ一致することから、この区間の漏洩磁場は問題とならず、中性化セル出口-偏向磁石間の漏洩磁場の打消しがより重要である。

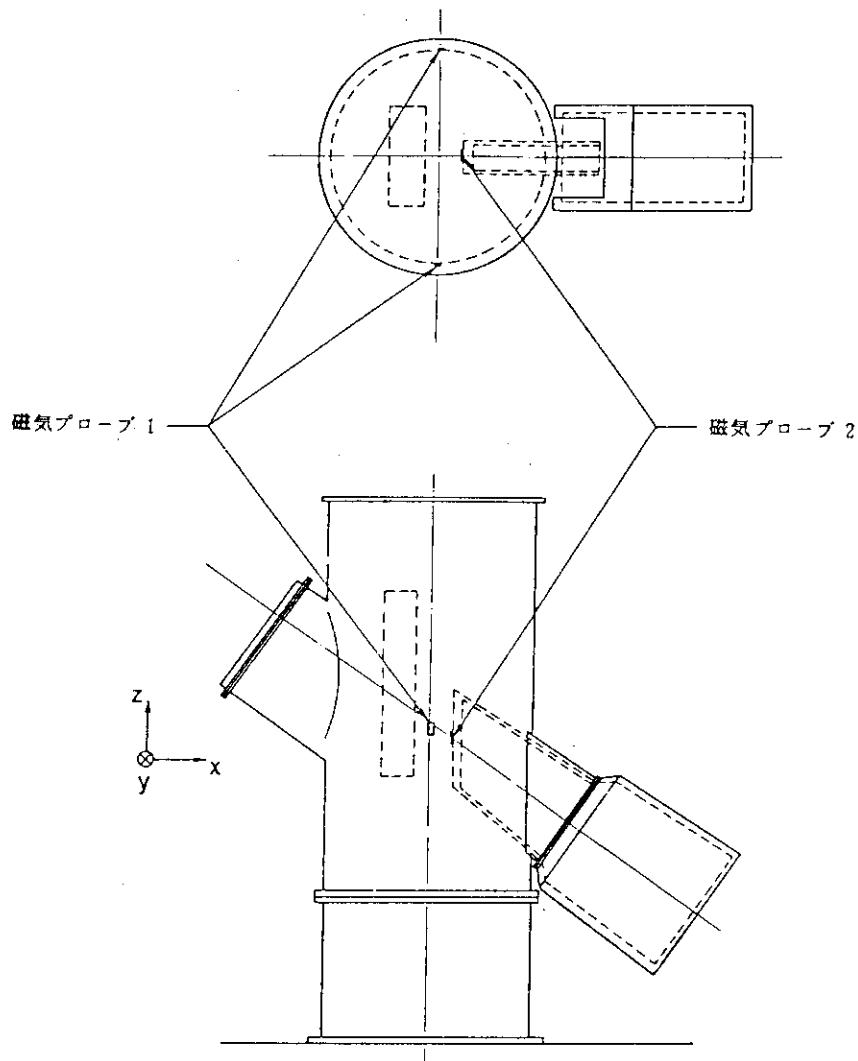
中性化セル出口と偏向磁石との間では、漏洩磁場の向きはほぼ水平である。この磁場と方向が逆の磁場をこの区間に発生するため、偏向磁石のまわり（第1打消コイル）と中性化セル磁気シールド先端（第2打消コイル）にコイルを設置した。システムの容易性を考慮すると、いずれか一方の打消コイルのみで済ませる越したことではない。しかし、磁気系の1/10縮尺モデルで測定した結果では、各々一方のコイルのみでは漏洩磁場の分布によく対応した打消磁場は得られず、両コイルの起磁力の比を適当に選んだ場合に最も漏洩磁場分布に近い打消磁場が得られた。またこの点は、二次元磁場計算コードTRIMを用いた計算でも確認された。

漏洩磁場は時間変化するものであるから、打消コイルシステムを用いる場合、コイル電流を制約して漏洩磁場の時間変化に追従させることも設計上重要な点である。制御の精度を高めるため、打消された後の磁場（残留磁場）を測定して負帰還をかけることとした。しかし、打消磁場の分布は、漏洩磁場の分布と完全に相似関係にあるわけではないから、磁場の打消しは場所によって不均一であり、単純に残留磁場測定点の磁場が零となる制御が最適なものではない。イオンビーム軌道に関して最適な磁場の打消しを行うには、測定点において印加される漏洩磁場の値に比例した値の磁場を残すといった制御を行う必要がある。従って、打消コイルの制御には印加される漏洩磁場と残留磁場を測定する2つの磁気プローブを必要とする。第4.2.3-1図に制御のブロック線図を示す。主排気タンク横外壁に設置された磁気プローブ1により漏洩磁場の大きさを測定し、それに対する磁気プローブ2の位置（中性化セル磁気シールド出口）における目標磁場値を求める。そして、漏洩磁場と打消し磁場の合成（残留磁場）がその目標値となるように打消コイル電源の制御を行う。

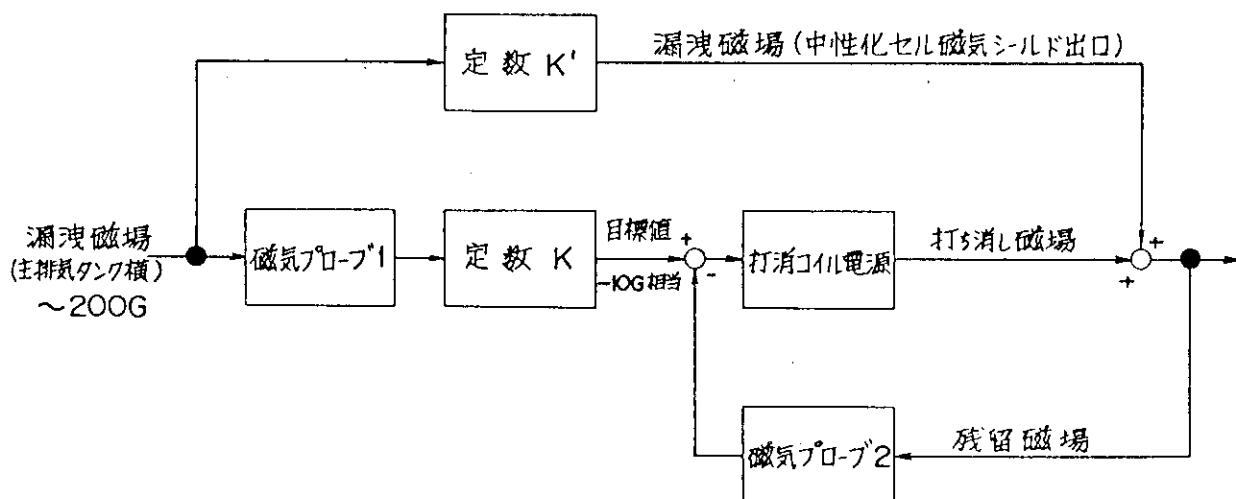
1/4縮尺モデルで中性化セル出口と偏向磁石の間の漏洩磁場と打消し磁場の精度の高い分布測定を行なった。そしてそれに基づいてウォータージャケットおよびビームダンプ上の熱負荷分布計算を行ない問題の無いことを確認した。

JT-60 NBI 原型ユニットでは、模擬漏洩磁場発生コイルでビームラインに外部磁場を印加した状態で打消コイルシステムを実際に動作させ、さらにその中を最大定格に近いイオンビームを走らせて各部への熱負荷の測定を行なった結果、ウォータージャケット、ビームダンプ等の熱負荷分布に異常なく10秒間の長パルス運転ができることが確認された¹²⁾。

JT-60 NBI 実機でも原型ユニットと同様の打消コイルシステムが採用されている。但し、本システムが誤動作状態で高出力のイオンビームを引き出すと重大な事故に結びつく恐れがあるので、実機ではインターロックシステムが厳しく強化された。また実機では、原型ユニットの場合と異なり漏洩磁場が実際に激しく時間変化し、そのパターンも多種多様である。そのため、実機では打消コイルシステムの初期調整に相当な時間と注意が払われたが、調整終了後は順調に稼動し、同システムはNBI 加熱実験の円滑な進行に大きく寄与している。



(a) 打消コイル電源制御用磁気プローブの位置。磁気プローブはビームラインユニット毎に左右いずれかとする。



(b) 打消コイル制御ブロックダイアグラム

4.2.4 カロリメータ

カロリメータは、中性ビームのパワー測定あるいはイオン源コンディショニング時のビームターゲットとして使用するものであり、トカマクにビームを入射する際には、移動することによってビームの通路をあける。このため、カロリメータは、ビームを受ける受熱部と、この受熱部を移動するための駆動部から構成されている。

(1) 設計の経緯

JT-60 NB I のビームラインは、非常に狭い空間に設置されること、またビームの発散による幾何学的ロスを最小にするためイオン源から入射ポートまでの距離を短くする必要があることからカロリメータの許容空間は非常に狭いものとなった。

一方、カロリメータ位置での中性ビームのパワー密度は第 4.2.4-1 図に示すように、ピーク値で約 6 KW/cm^2 になる。このパワー密度に対してカロリメータ受熱面を傾けることによって受熱面での熱流束を下げる訳であるが、上述の空間的制約から熱流束は 1 KW/cm^2 までしか下げることができない。（受熱面での熱流束は、イオン源から入射ポートまでの距離を長くして（この場合、入射効率は下がる）、カロリメータの許容空間を大きくすれば、 1 KW/cm^2 以下に下げることは可能であるが、カロリメータの役割からしてビームパルス巾は 0.5 秒程度あれば十分であり、現在の技術レベルから $1 \text{ KW/cm}^2 / 0.5 \text{ sec}$ は設計可能な値であった。）

以上からカロリメータ受熱部は、受熱面に対する最大熱流束が 1 KW/cm^2 になるような V 字形受熱面を決定した。（第 4.2.4-2 図）

上記の $1 \text{ KW/cm}^2 / 0.5 \text{ sec}$ の高熱負荷／短パルスの場合の受熱面は、受熱部でビームからの熱を一端蓄えてショット間に冷却すると言う慣性冷却型が適しており、本カロリメータはこの慣性冷却型を採用した。

この慣性冷却型受熱面の特徴は、ビームパワーを一旦受熱面に蓄え、その後に徐々に冷却するため、冷却能力が小さくて済むと言うことであるが、このためには受熱面の熱容量を大きくするつまり受熱部の厚みを厚くする必要がある。受熱面の厚みが増すと、厚み方向の温度差が大きくなり、温度差による熱応力の問題を解決する必要がある。この熱応力を減少させる手段として受熱面を格子状に分割する方式とした。格子状に分割した受熱面としては様々なタイプが検討されたが、除熱性と熱応力低減の観点から、本カロリメータ受熱部としてセグメント（第 4.2.4-2 図）の集合体で受熱面を構成する構造とした。このセグメントの特徴は、ビームによるパワーはセグメントの厚肉部で一旦吸収し、ビームパルス後の休止期間中に冷却できる熱伝導のパスを確保し、同時に厚肉部で発生した熱応力が冷却パイプ接続部に伝播し難い構造になっていることである。

カロリメータ受熱部の材質として、0.2%銀入無酸素銅（0.2% Ag-OFCu）を選んだ。これは次の理由による。

- 比較的高温（～400°C）での機械的強度が大きい。
- 热伝導率が OFCu とほぼ同じ。
- 加工性が良い。

(2) 設計計算¹³⁾

カロリメータセグメントに 1 KW/cm^2 の熱流束が入った時の温度応答を第 4.2.4-3 図に示

す。またこの時の熱変形を第 4.2.7 - 4 図に示す。0.5 秒パルスの場合、最大温度上昇は 218 °C であり、0.2% Ag - OFCu の軟化温度～400 °C より十分小さい。また熱疲労破壊に対する検討も合わせて行ない、10⁶ 回以上のショットに対して安全であることを確かめた。

(3) カロリメータの受熱部の構造

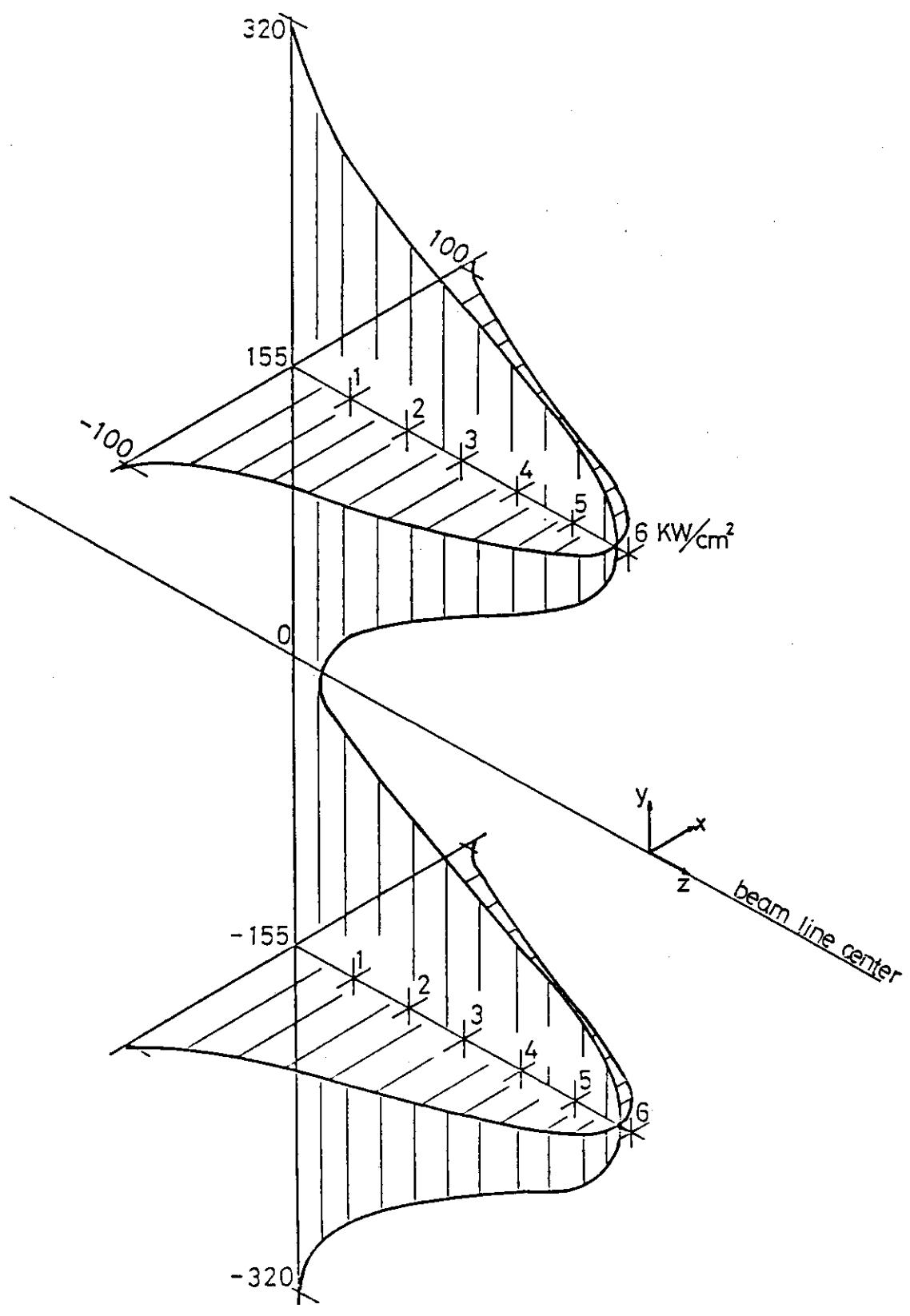
カロリメータ受熱部は、810 個のセグメントの配列で構成されており、これらのセグメントは、30 個づつ 27 本の冷却パイプに銀ロー付されている。セグメントの形状は製作性を考慮して第 4.2.4 - 2 図に示す 2 種類のタイプのみで全受熱面を構成している。

冷却パイプの両端は、パイプ自身の熱伸びを吸収するため、ベント部が設けられている。このベント部の形状はパイプの熱伸びによってパイプ自身に生ずる熱応力を計算し、その値が最小となるように決定した。

カロリメータ受熱部には、ビーム分布測定のため及び受熱部の保護インターロック用として 17 本の CA 型シーズ熱電対が埋込まれている。

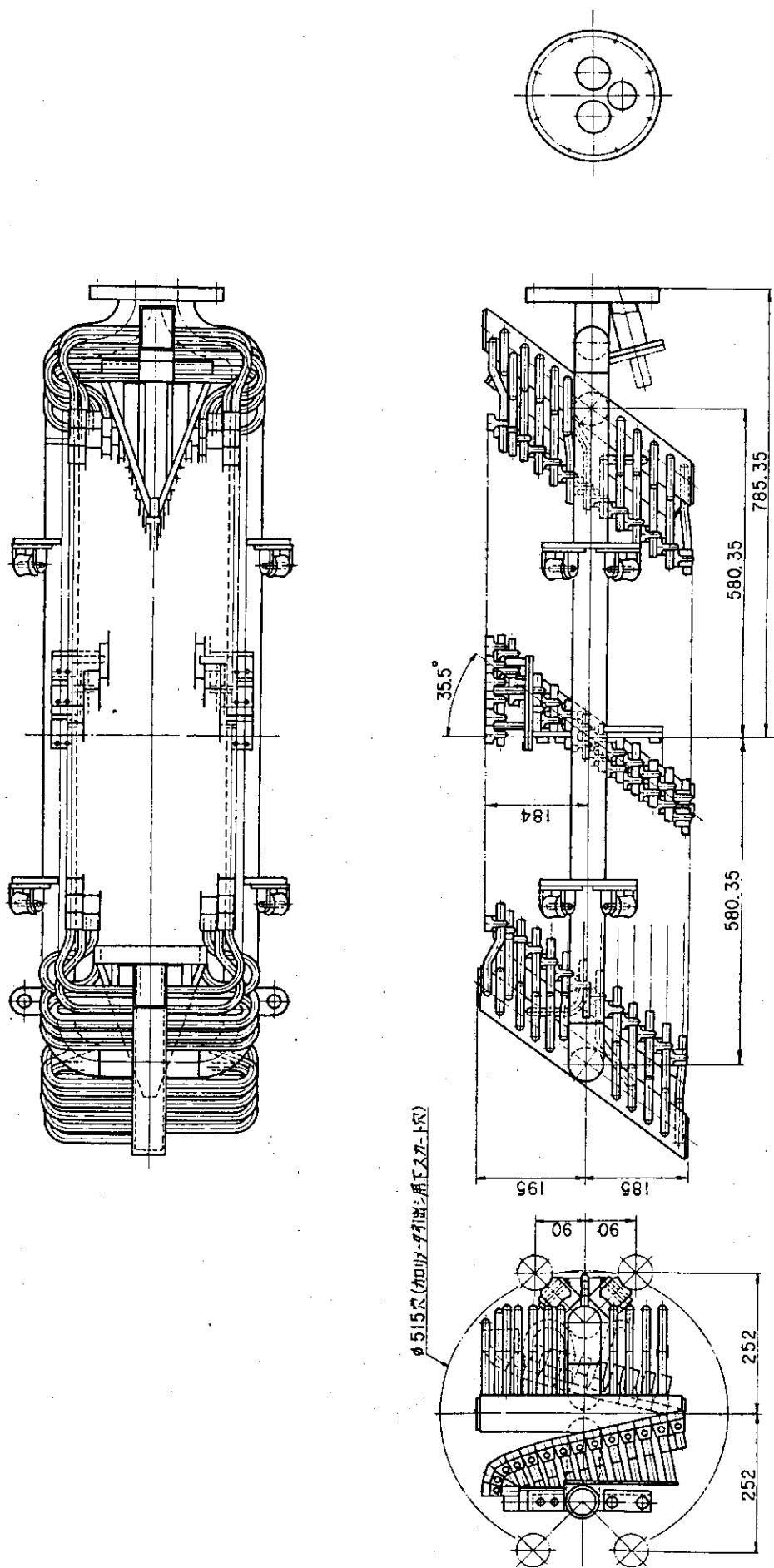
(4) ビーム分布の測定例¹⁴⁾

カロリメータによって測定したビーム分布の一例を第 4.2.4 - 5 図に示す。本測定では、ビームパルス幅 1.35 秒まで測定した。この時の熱電対の温度指示は 200 °C であった。

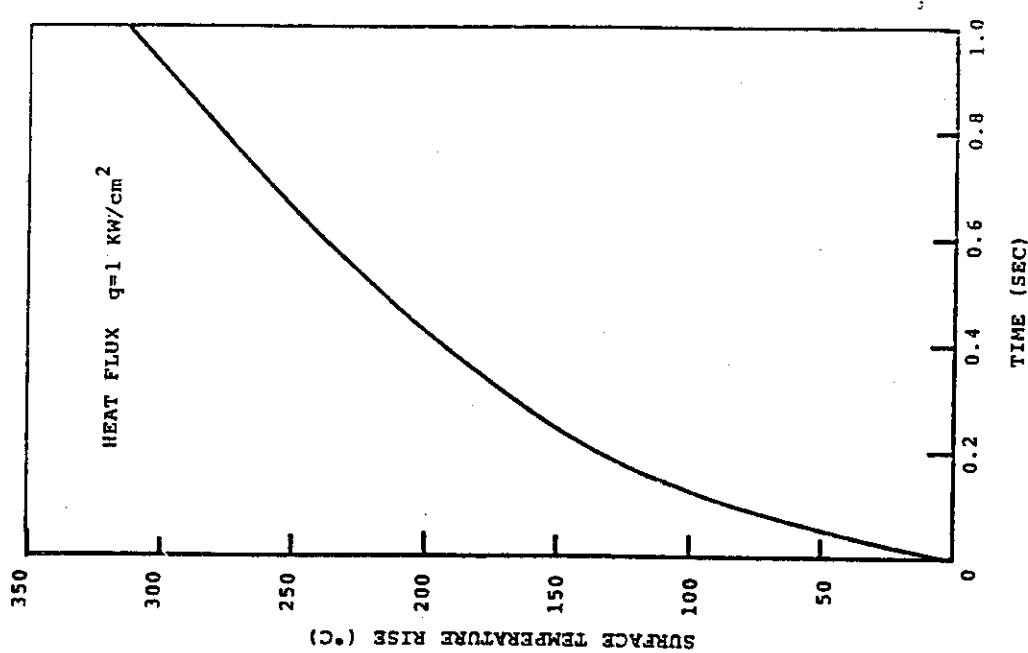


Beam power profile at the calorimeter section.

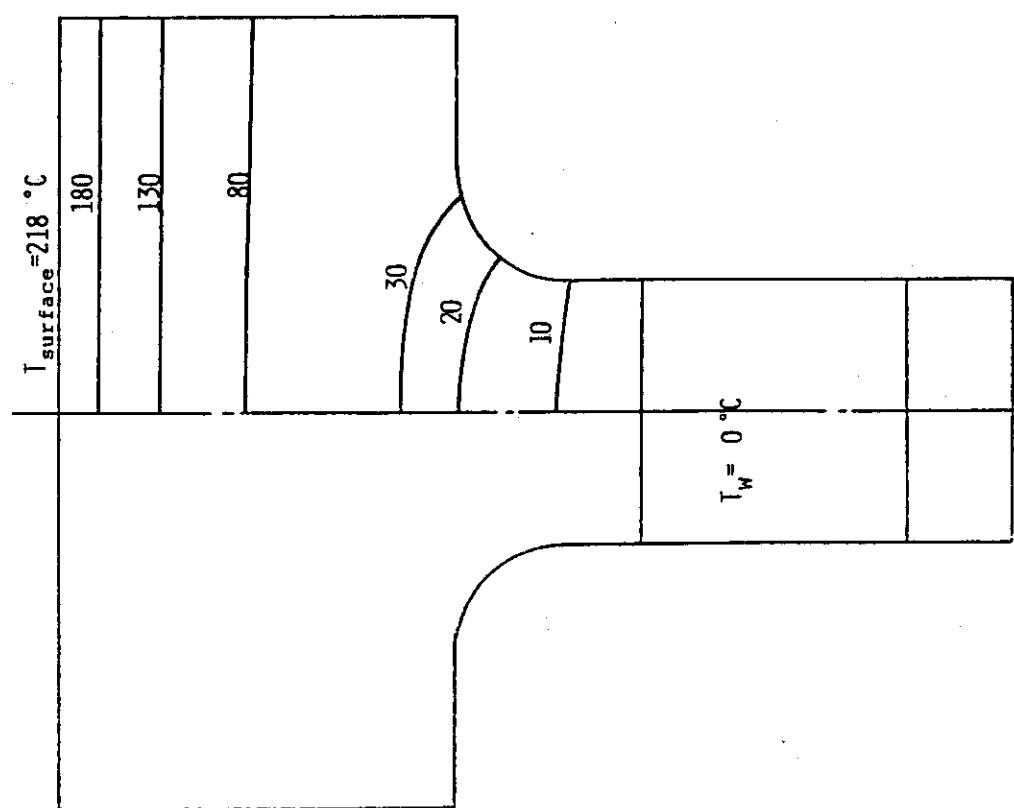
第4.2.4-1図 カロリメータ部熱負荷分布



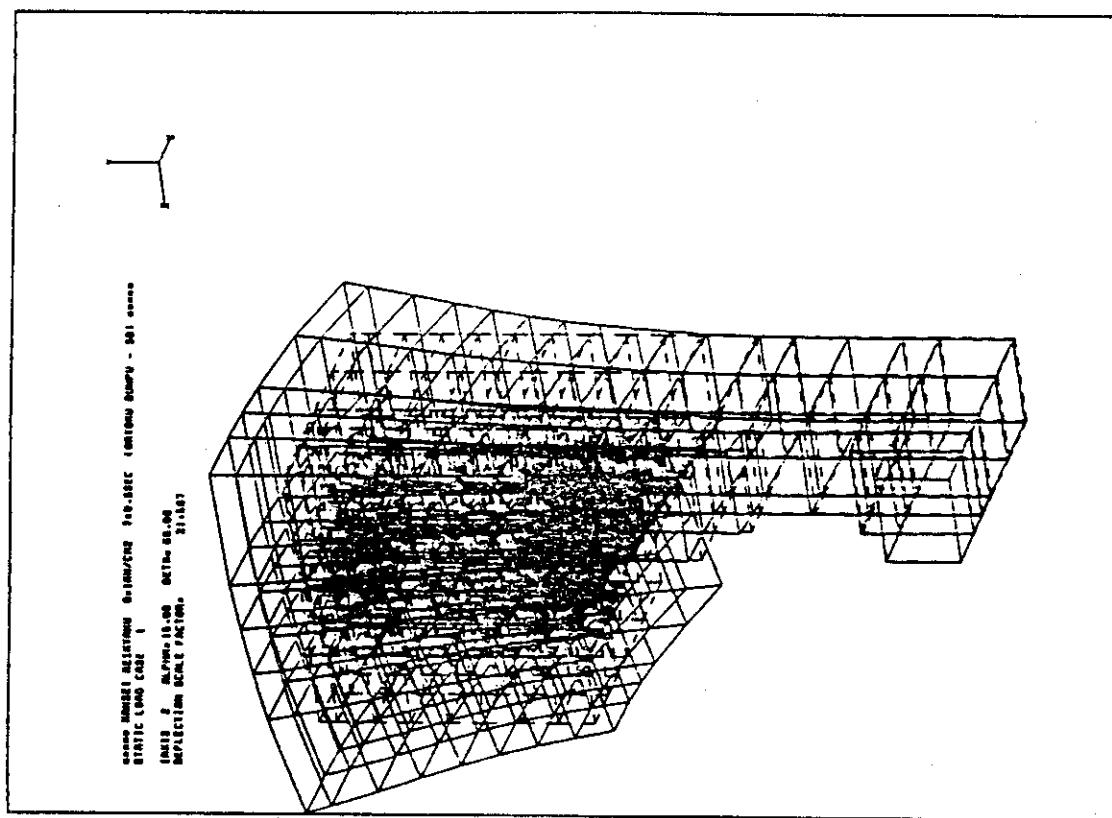
第4.2.4-2図 カロリメータ受熱部



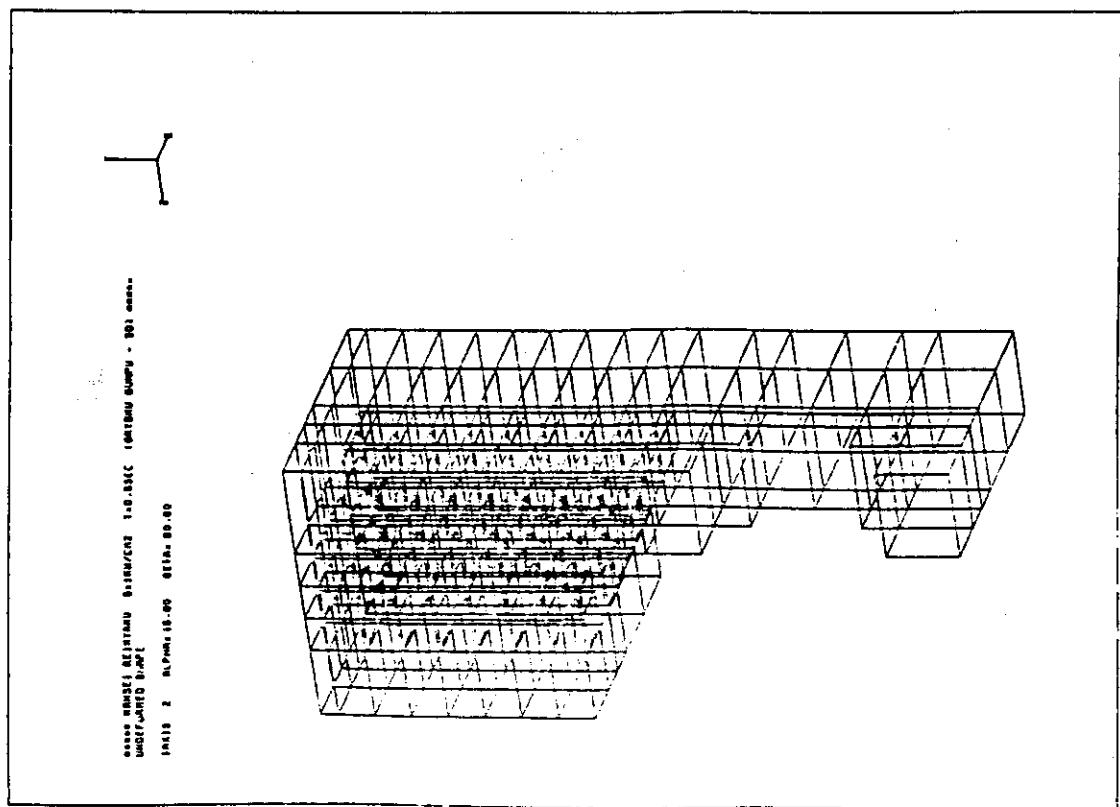
Transient temperature of the dump surface.



Elevated temperature distribution at $t = 0.5 \text{ sec}$

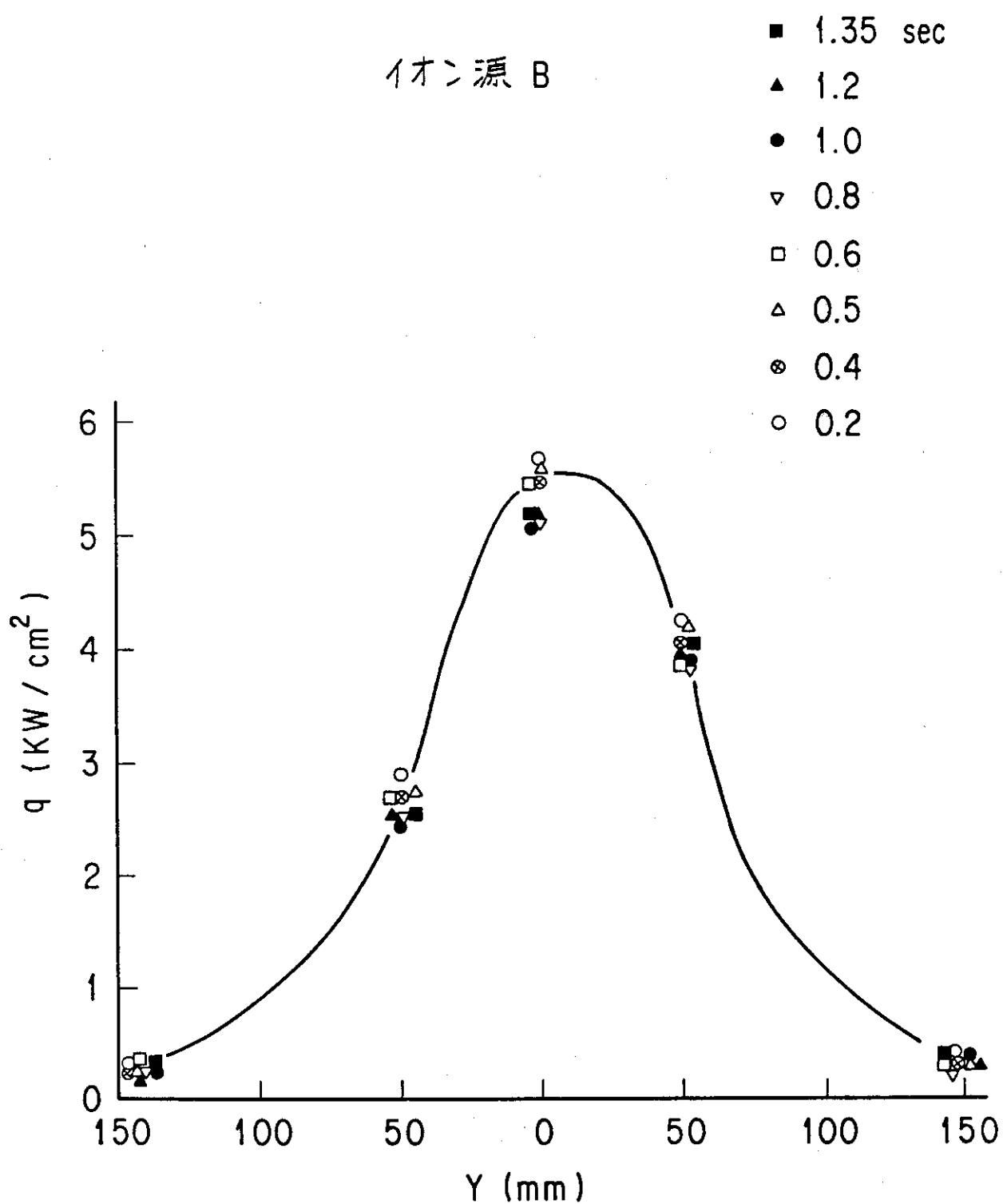


The deformation figure of the dump.



The calculation model for stress analysis.

第4.2.4-4図 热应力計算結果



第 4.2.4-5 図 ビーム分布測定例

4.2.5 クライオポンプ

イオン源より流れ出す数 $\text{Pa m}^3/\text{sec}$ の水素ガスを効率よく排気して、ビームライン内の圧力を 10^{-3} Pa 程度にして、高速水素原子が偏向磁石通過後、残留ガスと衝突して再びイオン化することを抑える必要がある。このため、ビームライン内を $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上の排気速度で排気しなければならず、大きい排気速度を持ち、長時間の連続運転が可能で、しかも確実に実現可能な排気装置として液体ヘリウム使用の凝縮型クライオポンプがビームラインの主排気装置として選定された¹⁵⁾。クライオポンプは第 4.2.5-1 図に示すように 4 個の主クライオポンプモジュール、2 個のドリフト部モジュール、気液分離器及びこれらを結ぶ配管より構成され、各クライオポンプモジュールは真空容器内壁に沿って設置される。また、クライオポンプは、中性化セルより流れ出す水素ガス、ビームダンプ等により再放出する水素ガスをより少ない排気容量で効率よく排気するために差動排気系が構成され、第 4.2.5-2 図に示すように、真空容器はイオン源から P_1 , P_2 , P_3 の 3 つの部屋に仕切板によって仕切られ、それぞれの部屋に 2 個のクライオポンプモジュールが設置されている。

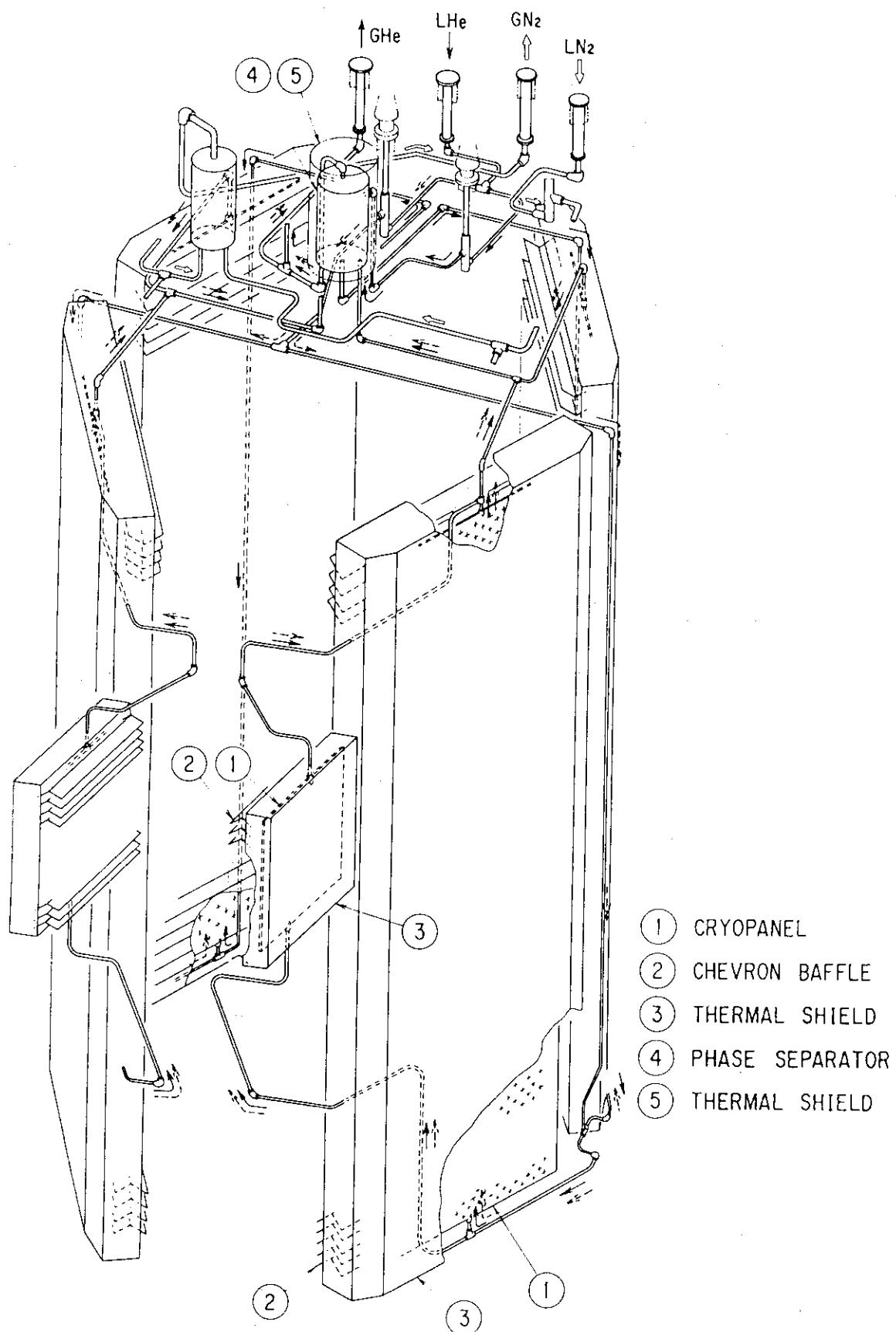
クライオポンプの排気速度はドリフト部での再電離損失が 5 % 以下になるように、 P_1 , P_2 , P_3 室のポンプの排気速度が決定され、それぞれ $650 \text{ m}^3/\text{sec}$, $650 \text{ m}^3/\text{sec}$, $70 \text{ m}^3/\text{sec}$ で合計 $1370 \text{ m}^3/\text{sec}$ とした¹⁵⁾。クライオポンプ単位面積当たりの排気速度は小型クライオポンプの排気実験で得られた $90 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{m}^2$ として各パネルの面積を求め、クライオパネルの面積の合計を 15 m^2 とした¹⁵⁾。

各クライオポンプモジュールはステンレス鋼をキルティング構造にしたクライオパネル、アルミニウムのシェブロン、アルミニウムの熱シールド板から構成され、水素ガスはシェブロンを通過してクライオパネルに凝縮され排気される。また、トーラスプラズマからのサイクロトロン放射による熱負荷を軽減するために、ドリフト部のクライオパネルには約 $1 \mu\text{m}$ のアルミニウムをコーティングする¹⁶⁾。シェブロンは 100° に曲げられたアルミニウム板をすだれ状に並べ、常温からの放射を吸収しクライオパネルへの熱負荷を軽減するために黒化処理が施されている。各クライオパネルに液体ヘリウムを供給するための配管のうち、熱シールド板より放射シールドされていない配管には、各断熱層を同心円状に巻きつけることができ、しかも 10 層の断熱材を同時に巻きつけることのできる一体型多層断熱材が使用され、配管の熱負荷は従来の一体型多層断熱材の $1/3$ 以下に低減される¹⁷⁾。

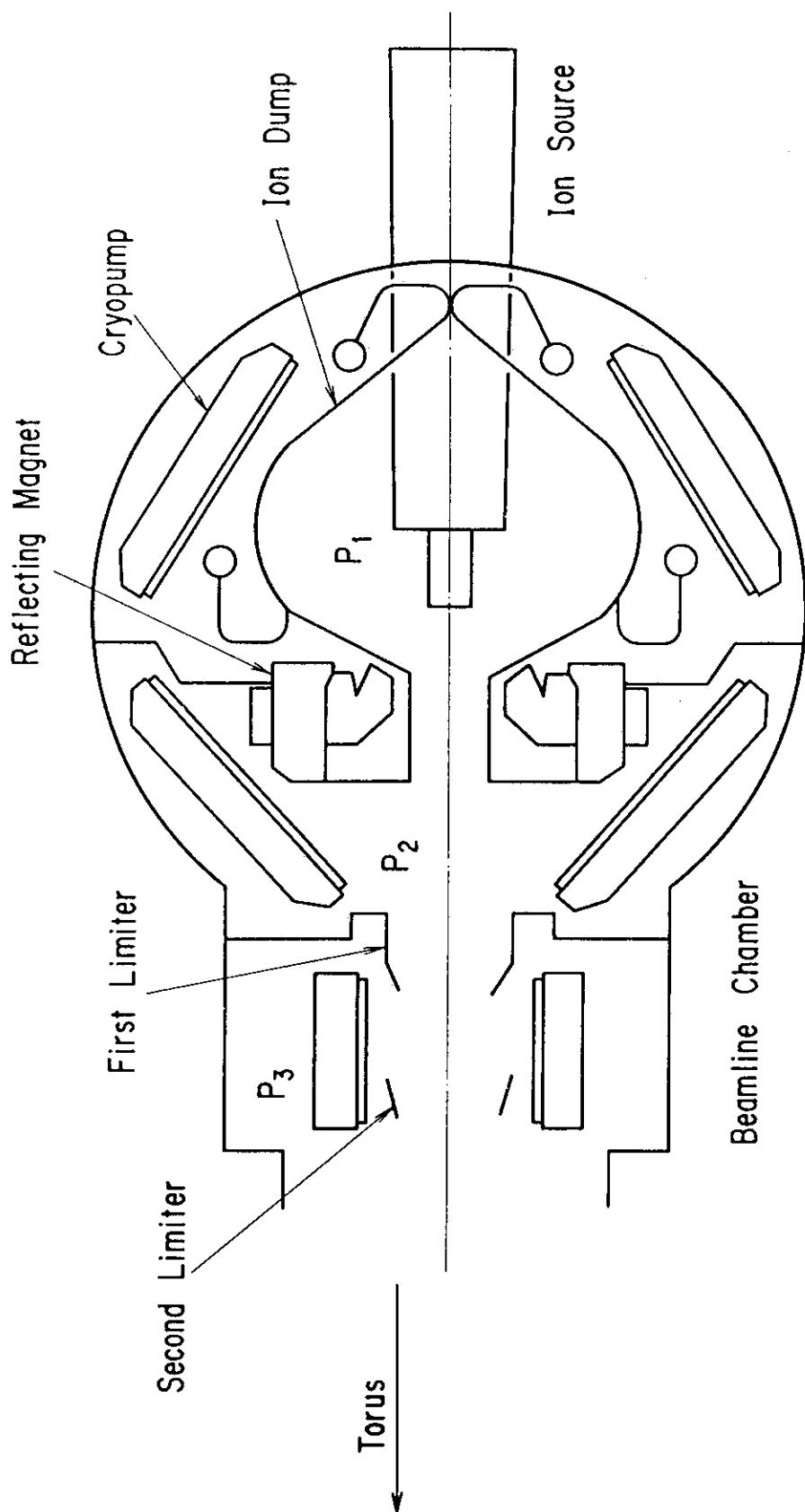
クライオポンプ運転中に、水素ガスを安定に排気するためには、1 ユニット当たり 6 枚のクライオパネルに液体ヘリウムを安定に供給することが必要である。クライオポンプ定常時において、熱的にも位置的にも異った 6 枚のクライオパネルに液体ヘリウムを安定に供給するためには、最も液体ヘリウムが供給しにくいクライオパネルに対して、必要供給量以上の液体ヘリウムを供給する必要がある。しかも、クライオポンプから液体ヘリウムがオーバーフローすることなしにこの条件を満足する液体ヘリウム供給方式として、第 4.2.5-3 図に示すように、気液分離器とクライオパネルを結ぶ循環ループを構成し、クライオパネルへの熱負荷による熱サイフォン効果を利用した自然循環方式を採用した。これらの自然循環方式による液体ヘリウムの 6 枚へのクライオパネルへの安定化供給はガラスモデルによる可視化実験及び原型ユニットクライオポンプの改造実験によりその有効性が実証された¹⁸⁾。以上により、6 枚のクライオパネルへの液体ヘリウ

ムの供給は、定常時においては自然循環により気液分離器から行われ、予冷時においてはヘリウム冷凍機からのガスヘリウムは液体ヘリウムを予冷弁を通してクライオパネル下部から直接行われる。液体窒素のシェブロン及び熱シールドへの供給も定常時は液体ヘリウムの場合と同様に、自然循環によって気液分離器よりシェブロン、熱シールド板に供給される。液体窒素は液体ヘリウムに対して蒸発潜熱が10倍程大きいので、予冷時も特別の予冷弁、予冷ラインを用いず、気液分離器から自然循環により液体窒素を落下させて行われる。

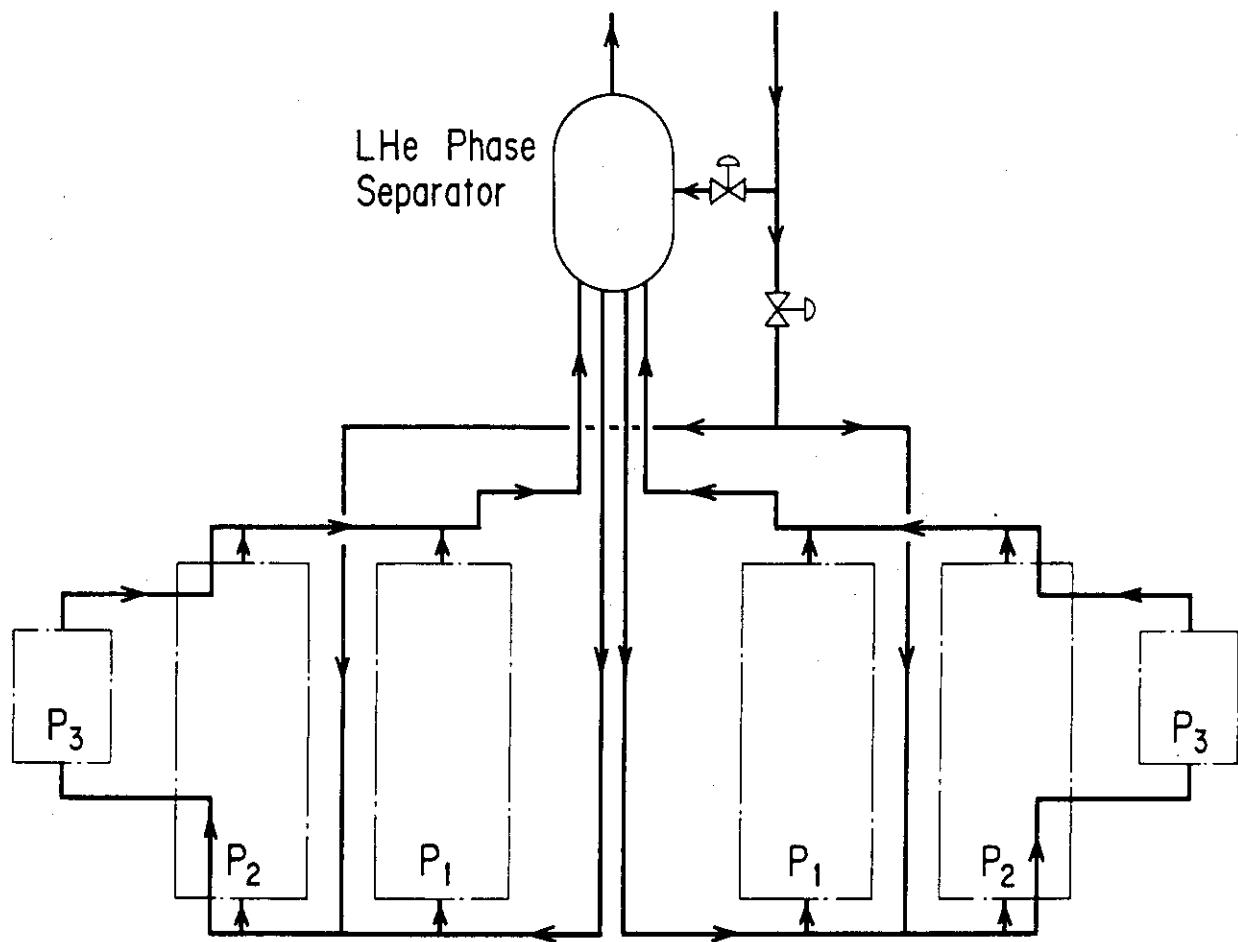
クライオパネルの温度は3.7K以下で運転される。第4.2.5-4図のように真空容器内の水素ガス圧が 1×10^{-3} Pa程度でも十分大きい排気速度をもつためには、クライオパネル面での水素の平衡蒸気圧を 1×10^{-3} Paよりずっと小さくする必要があり、変動磁場による渦電流発熱等のパルス熱負荷によるパルス表面温度上昇を考慮して、パネル温度を3.7K以下とした¹⁾。このため、クライオポンプの液体ヘリウムの圧力は大気より減圧して-35cmHg以下で運転される。



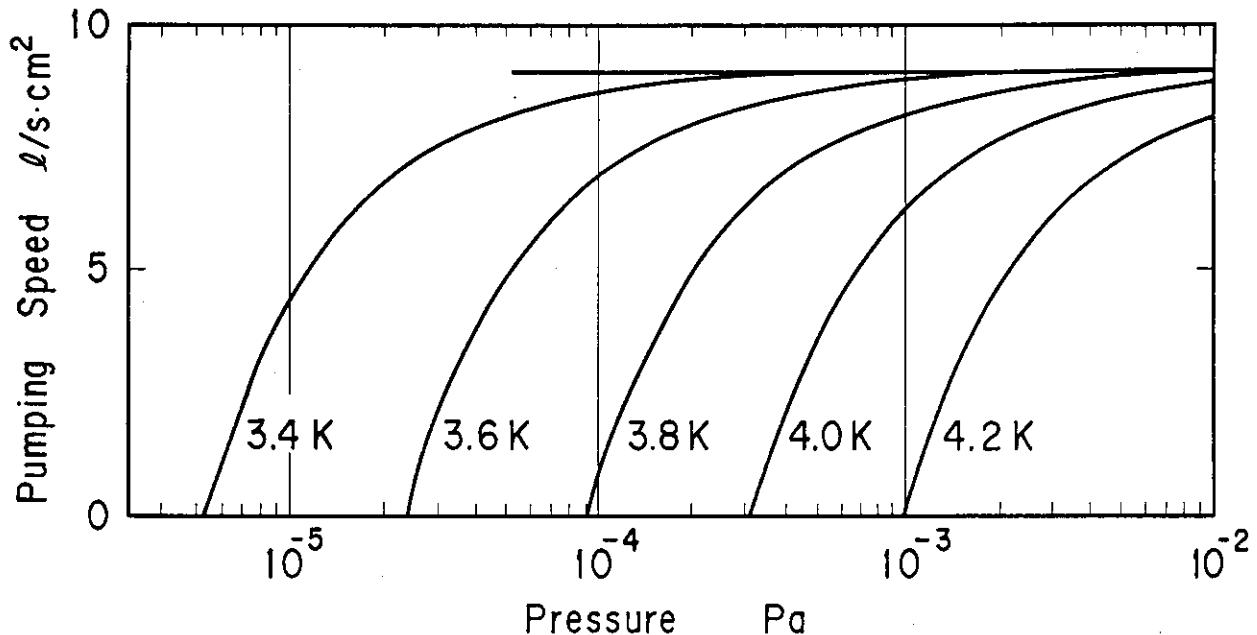
第4.2.5-1図 JT-60NBI用クライオポンプ（下ユニット）



第4.2.5-2図 差動排気系構成のためのクライオポンプ
モジュールの配置



第4.2.5-3図 自然循環方式によるクライオポンプヘリウムライン



第4.2.5-4図 クライオパネル温度の違いによる排気速度への影響（水素ガス）

4.2.6 ビームリミタ

ビームリミタは、ビームのテールの部分を切ってビームの形状を整え、高速シャッタ、NBIポート内壁等にビームが当たるのを防ぐためのもので、主排気タンク内に第1、第2ビームリミタ、NBIポート内7ヶ所に第3ビームリミタが設置されている。第1リミタはP₂室、P₃室間のコンダクタンスを小さくするガスリミタの役割も果している。

i) 第1、第2ビームリミタ

ビーム通路周辺のビームライン機器にビームが当たるのを防止し、かつビームの幾何学的入射効率を低下させない最適な形状は、第4.2.6-1図に示すように

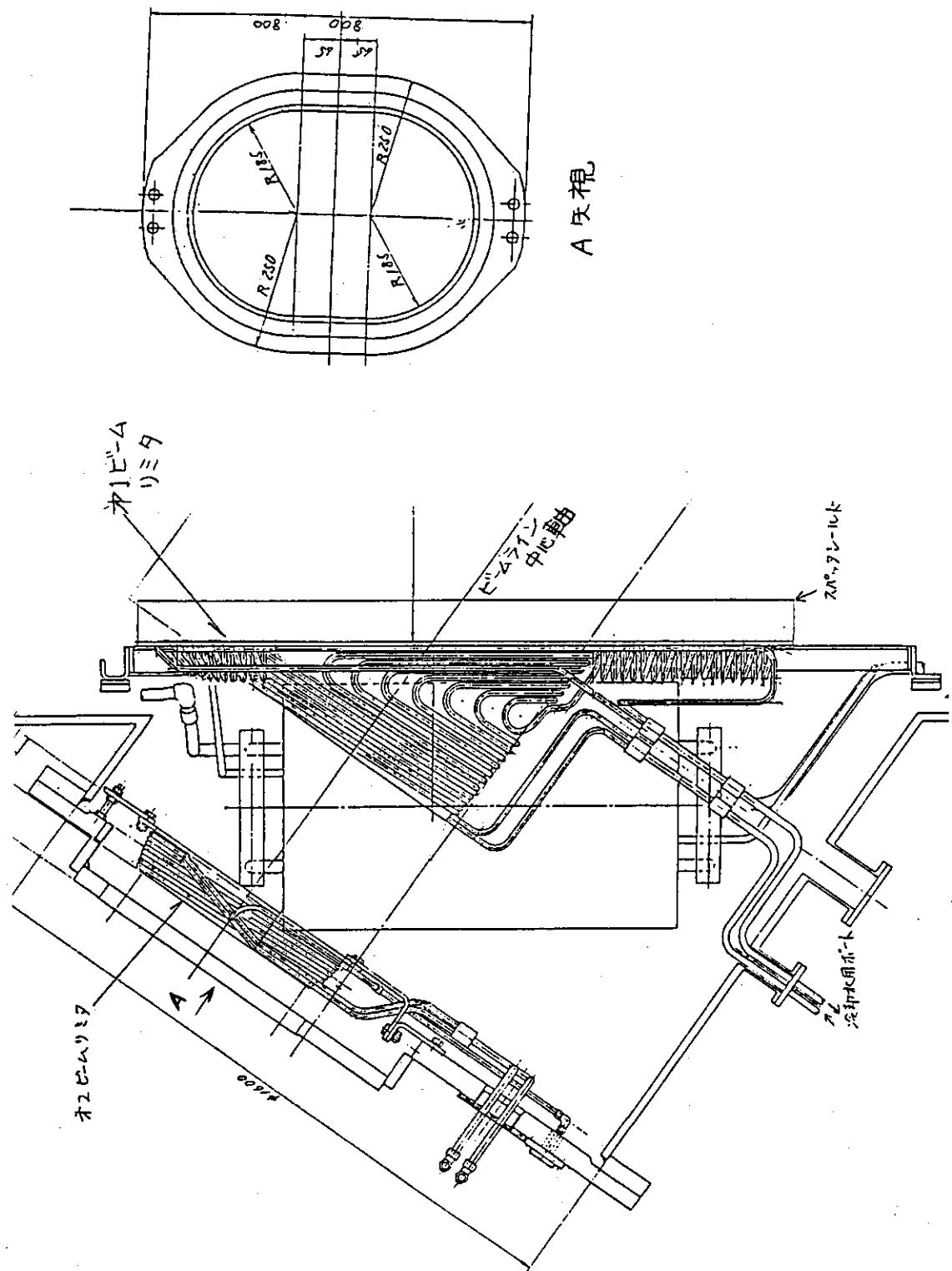
第1リミタ 36 cm × 56 cm レーストラック

第2リミタ 37 cm × 50 cm "

である。この寸法形状の場合、ビーム軸に直交する面での熱流束は約 1 KW/cm² にもなるので、ビームの当たる面を傾けて受熱面での熱流束を 250 W/cm² 以下になるようにした。除熱構造は、円錐状のリミタの外側に冷却チャンネルとして内径 10 φ の銅パイプを密に巻きつけて銀ロー付したものである。第1リミタの平板部（第4.2.6-1図参照）には、酸素等の不純物イオンが偏向磁石によって曲げられて当るようになっており、これら不純物イオンのビームダンプの役割も果している。このためこの部分にも冷却管を銀ロー付してある。

ii) 第3ビームリミタ²³⁾

第3ビームリミタは、NBIポート内壁にビームが当り、壁から脱ガスによってポート内にビームが閉塞するのを防止するためのものでNBIポート内6ヶ所に設置されている。本リミタは、最大 500 W/cm² のビーム負荷を受けるが、本リミタの設置位置が JT-60 真空容器に仕切弁なしで接していることから冷却水を使用することができずにガス冷却方式である。このため、リミタ材として耐熱温度が高く、かつ本体真空容器第1壁と同じであるモリブデンが選定された。このモリブデン製リミタは、インコネル 625 製台座（内部にガスの冷却チャンネルが設けられている。）にボルトにより締付けられている。リミタに入った熱はリミタと台座との間の接触熱抵抗、台座を介して冷却チャンネルに運ばれる間接冷却型の除熱構造である。



第4.2.6-1図 第1, 第2ビームリミタ

4.2.7 ゲートバルブ、高速シャッタ等

4.2.7.1 金属シールゲート弁

金属シールゲート弁（以下ゲート弁と呼ぶ）は、JT-60 本体と NBI 装置を真空的に切り離すためのもので、非常に厳しい真空管理が要求される。

(1) 設計の経緯

本ゲート弁は、当初 JT-60 真空容器のベーキング（真空容器本体 500 °C、ポート部 250 °C）に合わせてベーキングできるように弁板シールにメタルリングを使用することで検討した。

本ゲート弁の口径は 600 mm ϕ と従来にない大きさであり、製作技術における未知の部分が数多くあった。このため、弁板シールのメタルリング、真空中での摺動機構、駆動機構等の試作開発^{*}を実施した。弁板シール用のメタルリングは、H式ガスケット¹⁹⁾を採用し、常温及び高温(250 °C) ベーキング時のシール性能、あるいは開閉回数の寿命等の試験を実施した。H式ガスケットでの開閉回数寿命を伸ばすため、ガスケットの試作開発を行って、最終的には室温あるいは 150 °C 霧囲気で、500 回以上の寿命があることが確認された。この時の He リーク量は 1.3×10^{-9} Pa. m³/s 以下である²⁰⁾。

上記の試作開発の結果に基づいて原型ユニット用金属シールゲート弁を製作した。（第 4.2.7-1 図）このゲート弁を原型ユニットに装着して H式ガスケットのシール性能試験、250 °Cまでのベーキング試験を実施した。ゲート弁ベーキングの際、ゲート弁ケーシング及びゲート弁と NBI ポートとの接続部の真空シール部（メタル中空O-リング）からリークが生じた。この真空リークは、ゲート弁の昇温速度がある一定以上の値になるとゲート弁内の温度差あるいはゲート弁とフランジ間の温度差が大きくなつて熱変形を起こし、真空リークが生ずることが判明した²¹⁾。一連のベーキング試験から真空リークが生じないベーキング条件を見出し、更にゲート弁ケーシングのメタル中空O-リングによる真空シール部を溶接構造にする等の対策を明かにした。

弁板シールを H式ガスケット→バイトンO-リングへの変更：上記のベーキング試験により真空リークの生じないベーキング条件あるいは、ゲート弁ケーシングの溶接構造化等により真空リークの恐れは少なくなったが、しかし JT-60 NBI では、14 台のゲート弁があること、ゲート弁と NBI ポートの温度管理が複雑であること、等のため真空リークのリスクを負わなければならないことが明らかとなつた。このため、ゲート弁及びゲート弁近傍の NBI ポートのベーキングは実施しないこととし、代りに NBI ポートの内面洗浄用としてグロー放電洗浄ができるようにした。

ゲート弁はベーキングしないことにしたことから、弁板のシールガスケットはメタルリングの H式ガスケットを使う必要がなくなり、取扱いが簡便でかつシールリングの寿命の長いバイトンO-リングを使用することにした。このバイトンO-リングシールの採用により、ゲート弁構造は大幅に簡略化でき、またケーシングのサイズもかなり縮少することができた。上記 2 つのゲート弁の比較を第 4.2.7-1 表に示す。

(2) JT-60 NBI 用金属シールゲート弁の構造

本ゲート弁の構造を第 4.2.7-2 図に、仕様を第 4.2.7-1 表に示す。

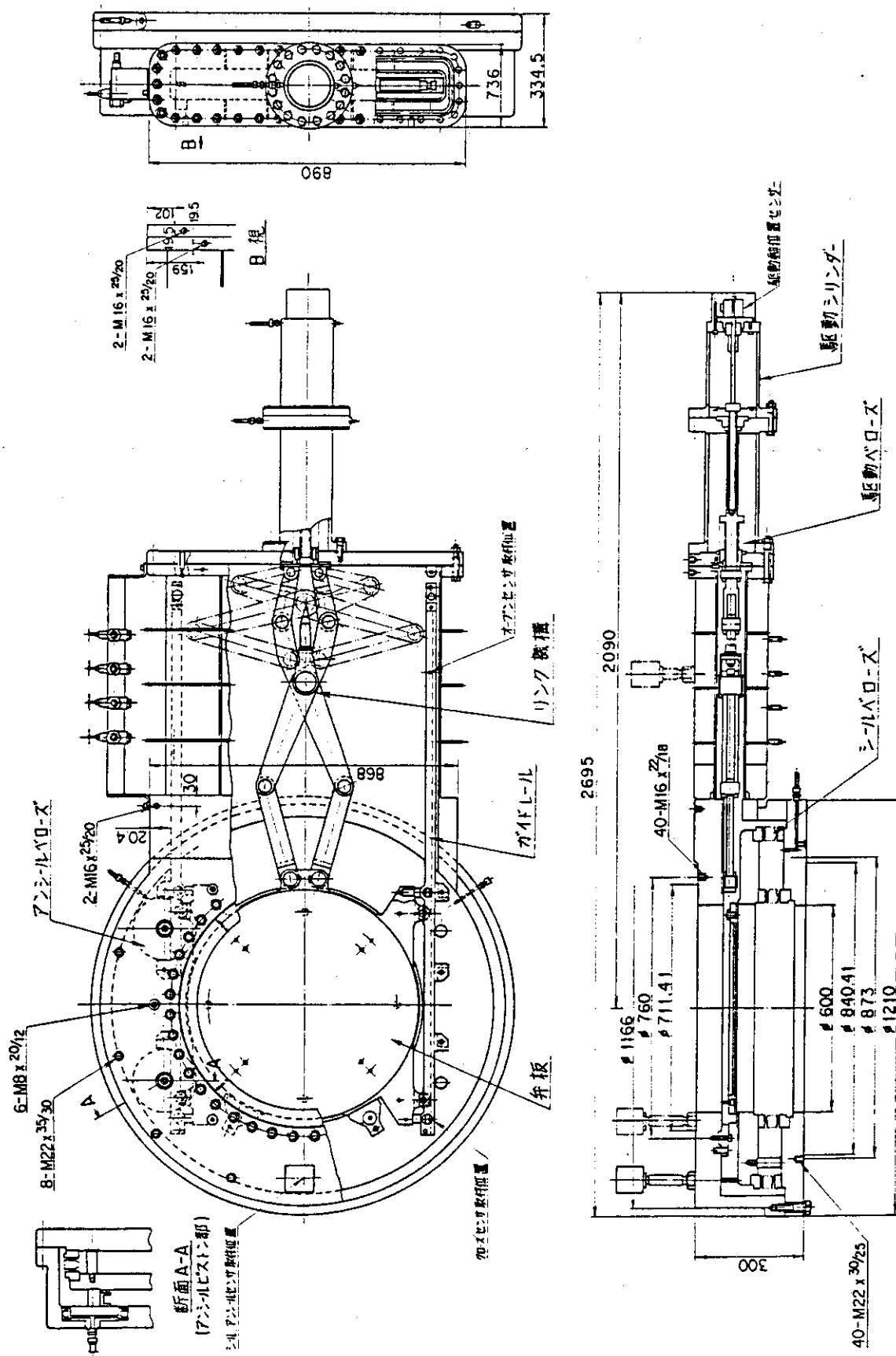
*) 金属シールゲート弁、高速シャッタの試作開発は株三菱重工の協力を得て実施した。

本ゲート弁には、ビーム入射中に生ずるスパッタリングからバイトンO-リングを保護するためのスパッタシールドが取付けられており、ゲート弁開で弁板が弁箱に収納されている時には、弁板シールリングからビーム通路を直接見込まない様にした。

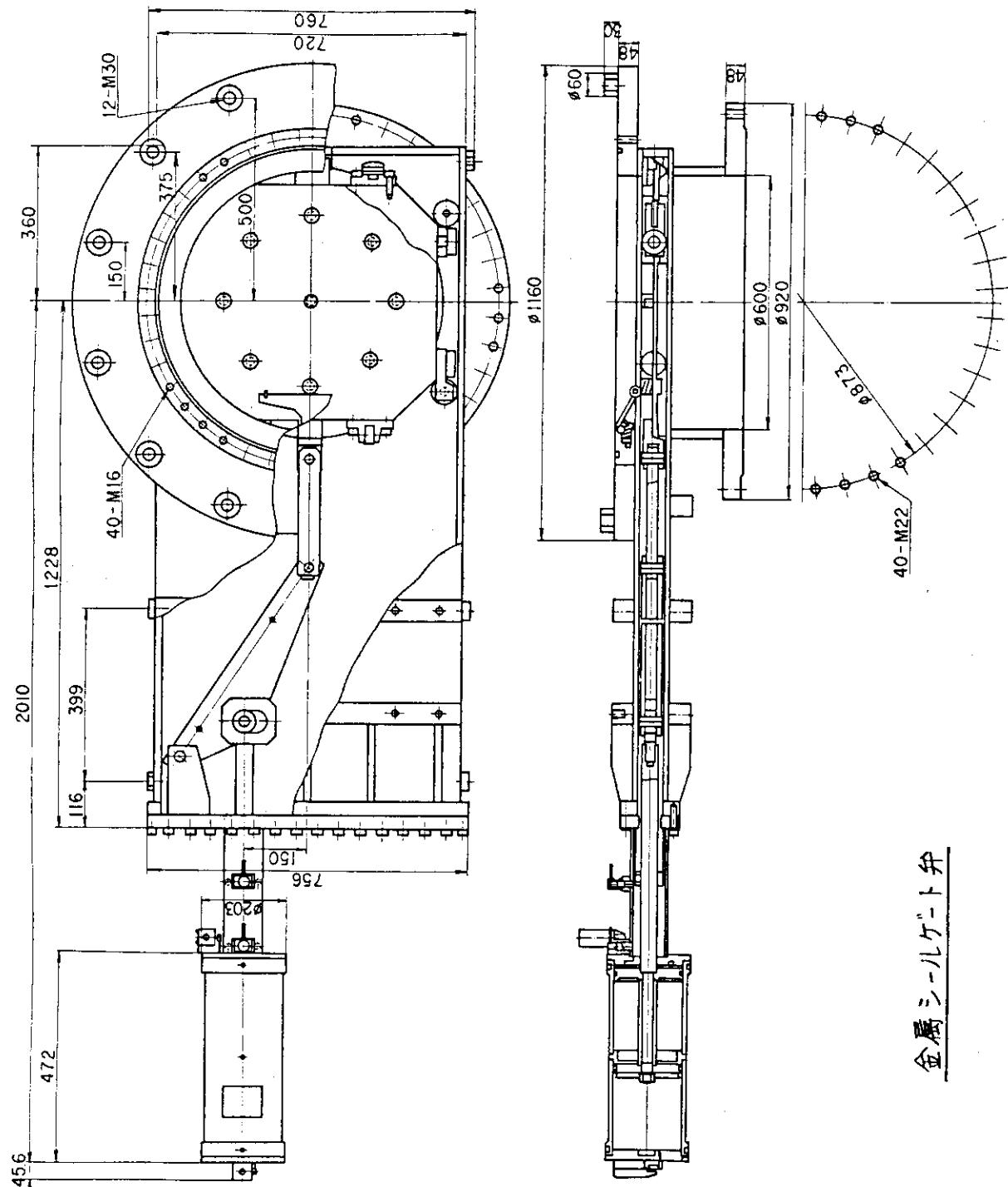
シール用O-リングは、ゲート弁を取付けた状態で交換できる構造としてあり、O-リング消耗あるいは破損時の交換の省力化を図っている。O-リング交換は弁板を半開の状態で実施する。

第4.2.7-1表 ゲート弁比較表

	原型ユニット用ゲート弁 (H式ガスケットゲート弁)	JT-60 NBI用ゲート弁 (バイトンO-リングシールゲート弁)
弁板駆動方法	空気シリンド及びリンク機構	←
弁板シール方法	圧縮空気導入によるベローズ の伸縮によって弁板シール	カム方式による弁板シール (弁板移動の一連の動作)
重 量	1900 kg	1040 kg
圧空動作圧	◦ シール／アンシール用 8.3 kg/cm ² G ◦ 弁板駆動用 5 kg/cm ² G	7 kg/cm ² G
ベーキング温度	250 °C	~ 100 °C
最高使用温度	150 °C	室 温
弁板シール ガスケット	H式ガスケット	バイトンO-リング
シールガスヶ トの寿命	500 回	3000 回以上
耐久動作回数	20,000 回以上	←
開閉時間	~ 30 秒	~ 15 秒
弁開閉許容差圧	3.9×10 ³ Pa 以下 (正逆共)	←



第 4.2.7-1 図 H 式ガスケット金属シールゲート弁



第4.2.7-2 図 バイトンシール型金属シールゲート弁

4.2.7.2 高速シャッタ

高速シャッタは、ビームON直前に開とし、ビームOFF直後に閉として、トカマクからNBIへのガスの流入を少なくしてクライオポンプの負荷を軽減するためのものである。

(1) 設計の経緯

高速シャッタの開及び閉の動作時間は、当初0.2秒以下が要求されていた。（しかしJT-60 NBI用の14基の高速シャッタを製作する時点で、後述の理由により、動作時間は0.2秒→1秒以下に変更した。）口径600mmの開口部を0.2秒以下で開、閉するためには、技術的飛躍が必要なため、各種のR&Dを実施しながら開発を進めた。

a) シャッタ形式の選択

シャッタ形式としては、往復並進運動する形、揺動運動するベーン形等があるが、高速シャッタを設置する位置の空間的制約、真空中の摺動部の有無、構造の簡単さなどからベーン形を選択した。このベーン形高速シャッタは第4.2.7-3図に示すように高速空気シリンダーの往復運動は、シャッタ板に取付けられた連結ロッドと1体になっている軸受アームを介して揺動運動に変えられる。この運動は揺動ベローズを介してケーシング内のシャッタに伝えられて開閉動作を行う。

b) 揺動ベローズの開発

ベローズを高速度で伸縮させることは、ベローズの局所的な応力集中あるいは局所的な変形のため、耐久性を著しく短かくする。このため、速度が比較的遅い回転中心近くにベローズを設置する、あるいは、直径の異なるベローズを2段に組合せて、一定の揺動角に対して伸縮量を小さくする等の工夫を凝らしている。更にベローズの材質は機械的強度の大きいインコネル618とした。

この揺動ベローズの耐久動作試験（60°の揺動角に対して0.2秒で動作）を実施し、30,000サイクルの動作後でも真空リークのないこと、及び外観形状の変化のないことを確認した。

c) 高速空気シリンダーの開発

高速シャッタに使用される空気シリンダーは、瞬間的に3~5m/sの速度が要求される。通常の空気シリンダ（0.2~0.5m/s）はUパッキンを使用しているが、このパッキンの代りにピストンリングシールを使用することにより高速の空気シリンダーを開発した。またシールの耐摩耗性を調べるため、ピストンリングシール及びピストンロッドパッキングの摩耗試験を行った。この試験は1万回と3万回の動作試験で摩耗量の差を見るものであるが、これら2つの動作回数でピストンリングシール及びピストンロッドパッキングに摩耗量の有意差は認められなかった。

作動ガスとしての空気は圧縮性であるため、圧力が所定の値になるまで時間がかかり、又供給を遮断して後も急激には圧力が下がらないと言う作動遅れの問題がある。この対策としてシリンダー近傍に設けた空気チャンバーに予め必要な空気量を貯めておき、この空気で駆動し、更に空気シリンダーの吐出側の排気口を締め切っておけば、ピストンの移動に伴なって制動がかかり、動作終了時に滑らかに止めることができる。この動作概念図を第4.2.7-4図に示す。空気チャンバーの弁を開いた瞬間は、駆動側圧力 P_D が制動側圧力 P_B よりも大きく、ピストンが加速され、動作の後半になると、 $P_B > P_D$ となり、ピストンは減速される。

上記機構を採用した高速空気シリンダーを試作して所定の時間内に動作することを確認した。

d) 原型ユニット用高速シャッタの製作

高速シャッタの各構成要素の試作開発を行った後、原型ユニット用高速シャッタを製作した。(第4.2.7-3図) この高速シャッタを使用して更に必要な動作試験を実施した²²⁾。この動作試験で、通常の開閉動作(10秒サイクルでの開閉)では正常に動作することが確認されたが、動作サイクルを1秒程度まで縮めていくと、シリンダ内の空気が完全に抜け切れないため、制動側圧力P_Bが大きくなり過ぎて、完全に閉になり切れない問題が生じた。これは本高速シャッタの本質的な問題であるため、この対策として駆動側圧力を下げ、かつ負圧側のリリーフ弁の開度を大きくして、遅い速度で駆動してゆっくり減速する動作に変更した。このため高速シャッタの動作時間が多少延びることとなった。

(2) JT-60 NB I用高速シャッタの仕様

(1)項で述べたように技術的には0.2秒の開、閉時間で再現よく動作する高速シャッタを製作できることが確認されたが、一方JT-60でのNB I加熱実験でのビーム入射シーケンスの詳細な検討から高速シャッタ動作時間が1秒程度まで許容できることが判明した。更に製作コスト等の問題もあり、JT-60 NB I用高速シャッタの動作時間をこれまでの0.2秒→1秒に変更した。動作時間を1秒に変更することにより、高速シャッタの構成は単純になり大巾な軽量化がはかれた。JT-60 NB I用高速シャッタの構造を第4.2.7-5図に示す。この高速シャッタの動作シーケンスを第4.2.7-6図に示す。開動作の場合、開指令信号からシャッタベーン板が動き出すまで0.26秒、動作時間が0.74秒で計1秒となっている。閉動作の場合もほぼ同様である。

4.2.7.3 イオン源ゲートバルブ

イオン源ゲートバルブは、イオン源と主排気タンクの間を真空的に仕切るためのものである。このゲートバルブは、イオン源角度調整機構と1体構造となっている。

(1) 基本仕様

- 開口部 190 mm × 340 mm
- 弁板シール：バイトンO-リング
- 動作時間：約5秒
- He リーク量： 1.3×10^{-9} Pa·m³/s 以下
- 耐用開閉回数：10⁴回以上

(2) 構造

a) ゲートバルブケーシングの強度

イオン源ゲートバルブは、イオン源及び角度調整機構の重量を片持ちで支える必要があるため、そのケーシングを剛構造として、荷重による歪によってシール性能の低下を防止しなければならない。またイオン源部には地震加速度として1.1Gの加速度が作用する。この加速度に対しても十分に剛性を持つ構造とした。

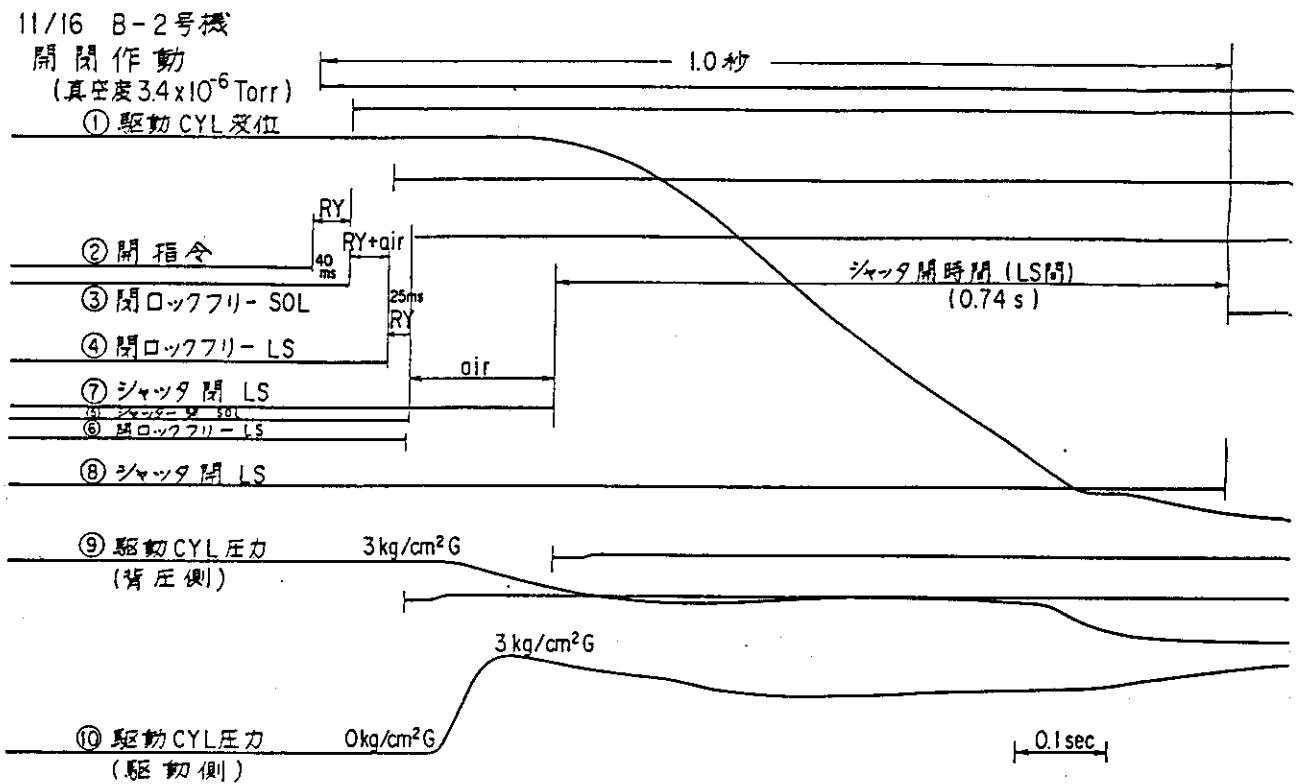
b) スパッター保護板

イオン源ゲートバルブの設置箇所は、イオン源直下で中性化セルの一部にもなっているため、ビームプラズマが発生し、かつ周辺の金属のスパッタリングも存在する。これらのビームプラ

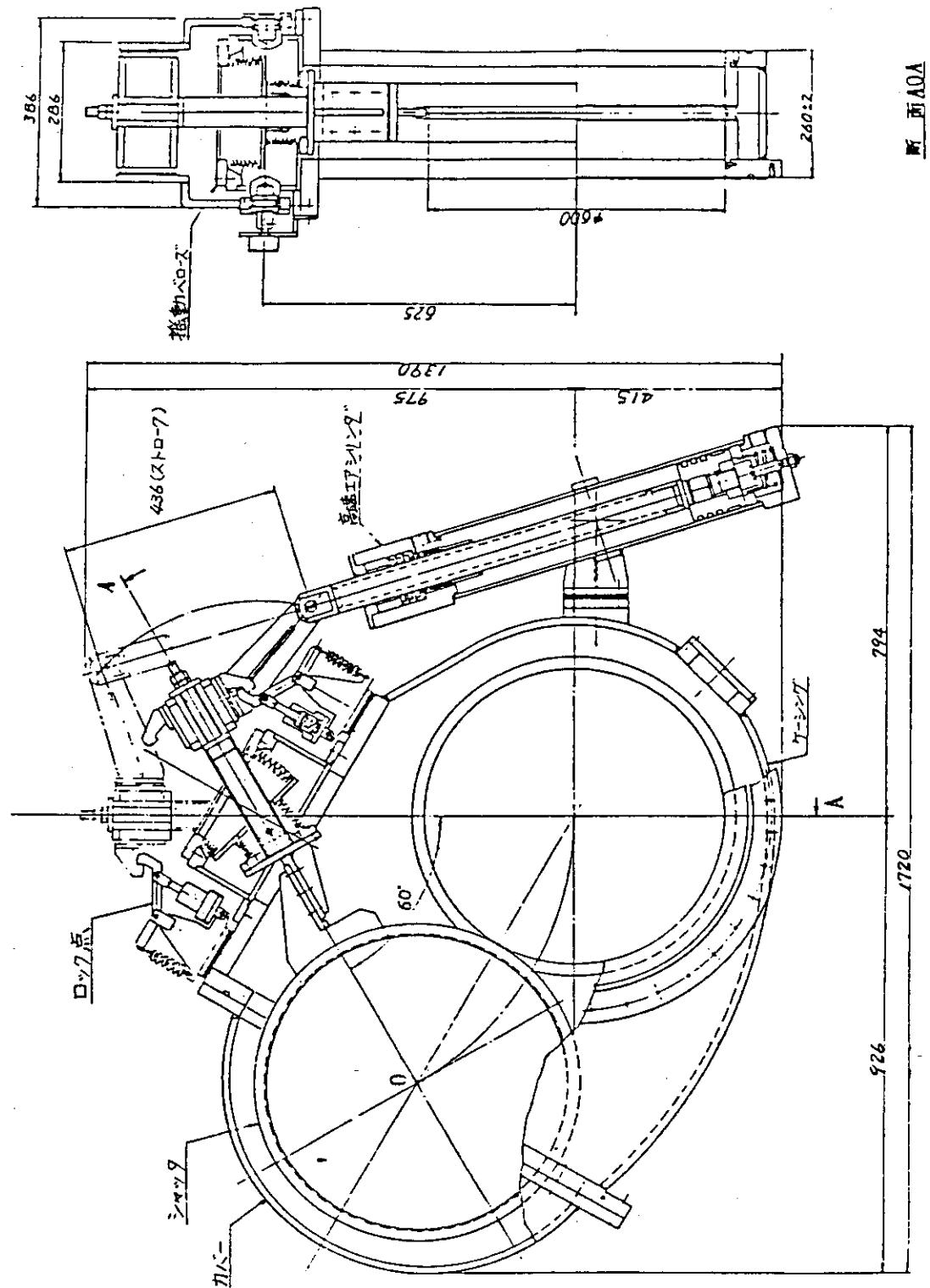
ズマあるいはスパッタリングは、弁板シール用のバイトンO-リングの硬直化等を引き起す。これを防止するために、ゲートバルブ開時に弁板シールリングがビーム通路を直接見込まないように保護板を設けた。この保護板により弁板シールリングの劣化を防止できた。

c) イオン源真空引口

ゲートバルブケーシングには、イオン源を真空引きするための排気口（50 A）が設けてある。これは、イオン源と JT-60 入射ポートの距離をできるだけ小さくするためイオン源排気ポートの空間を節約するためである。

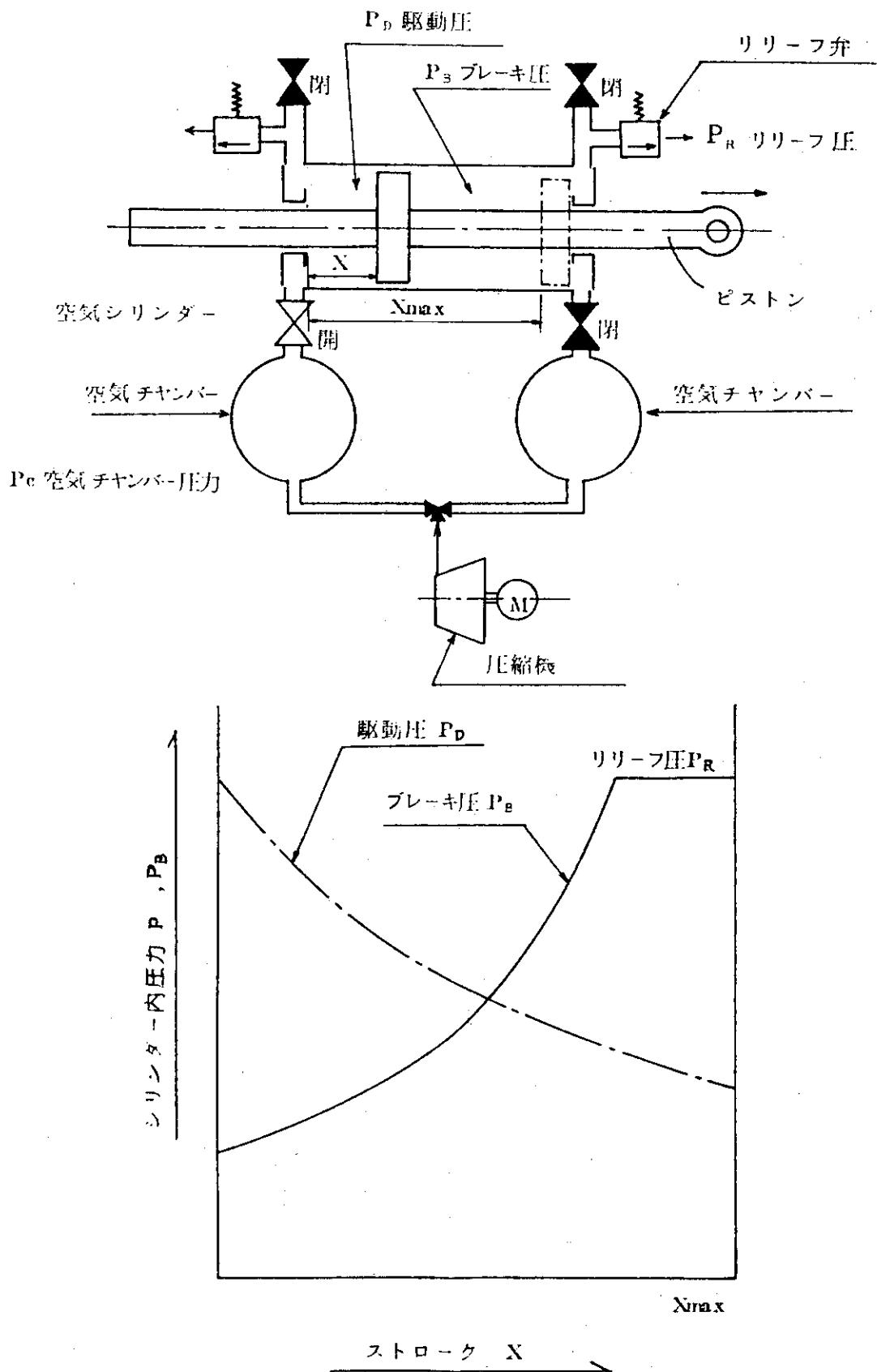


第 4.2.7 - 6 図 高速シャッタ動作シーケンス

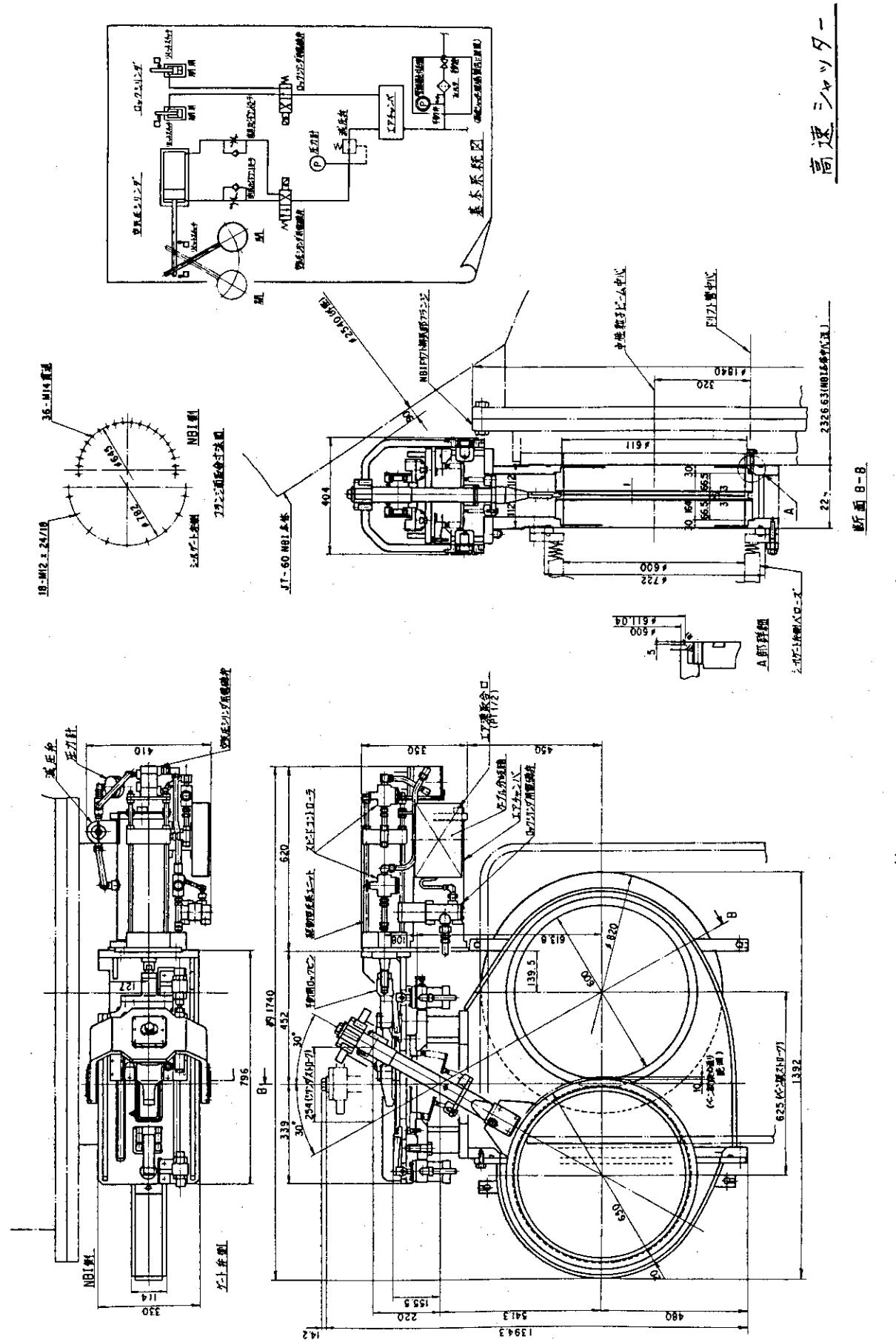


原型ユニット高速シャッタの構造

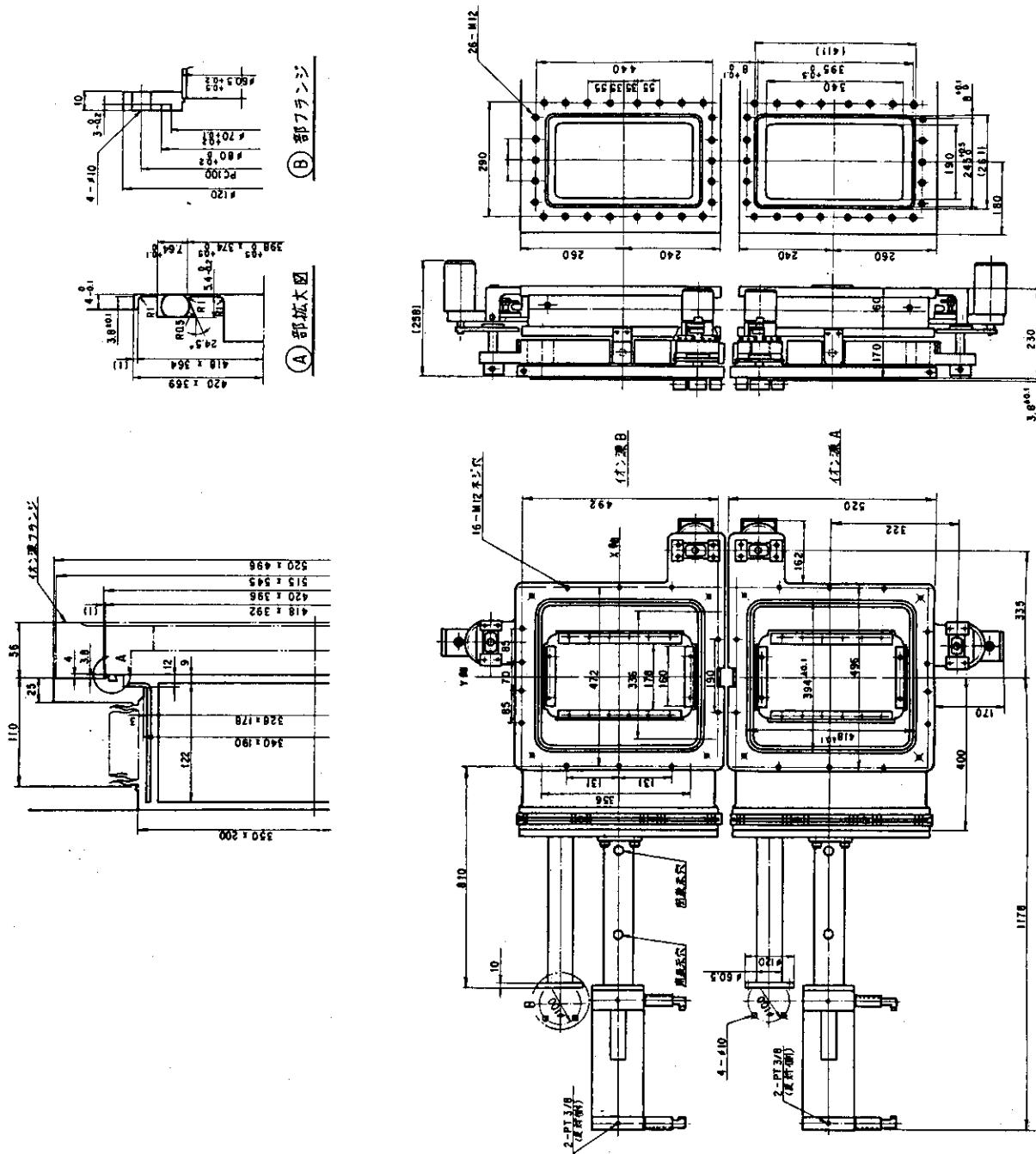
第4.2.7-3図 原型ユニット用高速シャッタ



第4.2.7-4図 原型ユニット高速シャッタ動作概念図



第4.2.7-7図 角度調整機構付イオン源ゲートバルブ



4.2.8 ビーム計測

プロファイルモニタ

中性粒子入射加熱装置に於て、ビームパワーの空間的分布、即ちビームプロファイルの測定は、入射条件の最適化のために極めて重要である。従来、その測定は、ビーム中にプローブ等を挿入する事によって、電気的あるいは熱的に行なわれてきた。しかしながら、JT-60 NB I のようにビームパワー密度が高く、しかも長パルスのビームを発生する装置では、それらのプローブは熱のために破壊され使用できなくなる。このため、強いビーム中に検出器を入れる必要のない光学的計測法が開発された。

光学的にビームプロファイルを測定するには、水素ビームが真空中を走行する際に、真空中に残存する水素分子と衝突して、励起され、放出する光を用いる。その方法として、当初、

- (1) 多数の光ダイオードを横に並べ、その出力分布を測定することによってビームの光の分布を求める方法
- (2) ビームの光を分光することにより、その光の波長の広がりから粒子の横方向の速度を求める方法

の2つが考えられた。(2)の方法は、同時にビーム組成も知る事のできる一石二鳥の方法であるが、ビームプロファイルの測定という観点からは、精度が劣る。特に、ビーム軸の絶対的位置に関しては測定不能と思われた。そこで、(1)の方法を選択し、多チャンネルプロファイルモニタを開発して²⁴⁾、原型ユニットに適用した²⁵⁾。この計測器は、原型ユニットに於て正常に動作し、JT-60 NB I に適用可能である事が実証された。しかしながら、同時に、いくつかの問題点も明らかとなった。最大の問題点は、各チャンネル間の個体差の問題である。集光のためのスリットとレンズの位置関係、光ダイオードの感度が各チャンネルで微妙に異なるため、精度の高い測定を行うためには、定期的な面倒な較正作業を行う必要があった。また、チャンネル間の間隔が広いため、空間的分解能が劣っていた。そこで、これを解決する方法として

- (3) 固体撮像素子のテレビカメラを用いる方法を考案した²⁶⁾。

固体撮像素子は、近年の急速な半導体技術の進歩によって使用可能になったものであって、次のような特徴を有している。

- (1) 光と出力の直線性が良い。
- (2) 像のゆがみがない。
- (3) 磁場の影響を受けない。
- (4) 強い光のもとでも焼き付かない。
- (5) 残像がない。(時間応答性が良い)

これらの特徴は全て、プロファイル測定用の検出器として必要な条件である。また、極めて小型、軽量であり、これも、空間的な余裕のない JT-60 NB I への適用に好都合な条件であった。

第4.2.8-1図に、開発したプロファイルモニタの模式図を示す。ビームの光は適当なF値に調整されたレンズにより、CCD固体撮像素子上に結像される。固体撮像素子は、12.7 × 9.7mmの領域に 384 × 489 の受光素子が並んだものである。得られたビームの像の情報は、あらかじめ

設定された時間間隔においてデジタルビデオメモリに記憶され、計算機により処理される。得られたビームプロファイルの一例を第4.2.8-2図に示す。

固体撮像素子は、いわば、極めて多数の、特性のそろった光ダイオードが並んだものであるから、従来の方式と比較して、空間分解能の優れた、信頼性の良いデータが得られる。例えば、JT-60 NBIに適用したプロファイルモニタに於てはビーム軸の測定感度は、約20cmの直径のビームに対して1mm以下であり、精度に関しても、従来のカロリメータとの比較によれば5mm以下という結果を得ている。

さて、本プロファイルモニタを開発する過程でいくつかの解決を要する問題があった。以下にそれらを列挙する。まず、問題のひとつは光の反射であった。ビームの光は真空容器内で乱反射し、それがノイズとなって精度が悪くなることがある。これを防ぐため、対向面に黒化処理をした板を置き、その上にアルミハニカム板を取り付けた。黒化処理の板だけだと、ビームによるスパッタリングのためにたちどころに灰色に変色し、その機能を果さなくなるからである。アルミハニカム板は、黒化処理をしていないが（しても無駄である）、完全黒体の様な働きをし、一見、黒く見えて、乱反射の防止に有効である。

固体撮像素子カメラの設置精度も問題であった。たとえ精度良くカメラを設置しても、JT-60にNBIが取り付けられた後、JT-60の震動や地震などでカメラの軸が狂うことが考えられた。そこで本プロファイルモニタに於ては、対向面のビーム軸中心位置に小さな窓をつけ、そこに光ファイバーで光を導入した。これにより、カメラの設置精度が悪くても、それらの光をカメラで見ることで、幾何学的中心と絶対寸法を容易に知る事が出来るようになった。

次の問題は、カメラの出力信号の光に対する直線の問題である。固体撮像素子自体は、通常の状態では、入射した光に対して、それに比例した出力を発生するが、一般に市販されているカメラは、テレビのブラウン管や人間の眼に合せて、直線線を故意にくずしている。そこで、本プロファイルモニタに使用するカメラは、特別に直線性が良い様に調整したものを使用した。今後、JT-60 NBIのカメラを新品と交換する場合には、特別仕様になっているかどうか注意が必要である。

また、固体撮像素子の時間応答性も問題となった。固体撮像素子は、従来の撮像管と比べて時間応答性がはるかに良いが、それでも0.1秒といった短い時間に光の量が大幅に変化する時には、追随できない事がある。このため、JT-60 NBIのプロファイルモニタは、短パルスのビームに対しては（特に、クライオ運転時のビームの光が弱い場合には）正確なプロファイルを測定することが出来ない。この問題は、固体撮像素子自体の問題であり、解決できないままJT-60 NBIは製作された。しかしながら、最近開発された撮像素子は、この時間応答性が1桁以上良くなっている、それを使用すればこの問題は解決される。実際、新しい素子を用いた試験が原型ユニットに於て行なわれ、10 msec程度の短パルスのビームに対しても、十分にプロファイルが測定可能な事が確認されている。

撮像管と比較して、固体撮像素子の欠点は、耐放射線性に劣ることである。JT-60に於ては、プロファイルモニタを設置する位置で、その生涯の間に 10^5 R程度のX線に照射されると見積られている。半導体は一般に放射線に対して弱いため、固体撮像素子の耐放射線試験を、原研高崎

研究所の協力のもとに行った。その結果、MOS（酸化金属半導体型）の撮像素子は 10^3 Rという低い線量で、また、CCD（電荷結合素子型）の素子は $1 \sim 2 \times 10^4$ Rでそれぞれ機能障害を起した。このため、撮像素子としてはCCDを用いることにし、また、カメラのコントロール部のMOS-ICを含む部分は、鉛シールド箱中に入れた。もし、JT-60からのX線が予測通りであれば、プロファイルモニタのカメラは1~2年で交換する必要がある。

分光モニタ

中性粒子入射加熱装置に於て、水素ビームの組成（エネルギー分布）とビーム中に含まれる不純物の量も重要なパラメータである。それらは単に、プラズマ加熱効率に寄与するパラメータであるというばかりでなく、入射装置自身の健全性を占うことが出来るパラメータでもある。例えば、もしイオン源に何らかの異常（異常放電や空気リークなど）が起れば、ビーム組成や不純物量は大きく変動し、異常とその原因を知る事が出来る。この意味もあって、JT-60 NBIでは各ユニットに、ビーム組成と不純物量を測定するための分光モニタが装着されている。

分光モニタは、高速の水素ビームが発する光が、ドップラーシフトすることを利用して水素ビームの速度分布（エネルギー分布）を知ろうとするもので、その測定原理と、基礎となる測定技術は、文献27)に詳しく述べられている。しかしながら、JT-60 NBIにこの測定法を適用するに当っては、大きな問題があった。それは、次の2点である。

- (1) 中性粒子ビームの組成を測定する必要があるが、偏向磁石より下流のドリフト管の周囲には、分光器を設置する空間的余裕がない。
- (2) 測定を行うためには、分光器の調整など人間の手の必要な面倒な作業が必要であるが、JT-60運転中は、人間がJT-60 NBIの近傍に立ち入ることが出来ない。

これらの問題を解決するため、光ファイバーを用いたシステムを考案した。それは、第4.2.8-3図に示すように、まず、ビームの光を望遠レンズで集光し、大口径光ファイバーに導入する。そして、光ファイバーにより、人間が自由に立入る事の出来る別室までその光を伝送して、分光するものである。本システムを用いれば、望遠レンズにより遠方の光を集光できるため、検出器を空間的余裕のある遠方に設置することが出来るばかりでなく、分光器に人間が自由にアクセスすることが出来る。

望遠レンズの焦点距離(f)と口径は、レンズからビームまでの距離 ℓ と、光ファイバーのコア径 d 、測定したいビームの視野範囲 w から決り、

$$f \approx \frac{d \ell}{w}$$

で与えられる。JT-60 NBIの場合には、 $\ell \approx 2500$ mm, $d = 0.8$ mm, $w \approx 100$ mmであるので、 $f \approx 20$ mmとなる。焦点距離が決ると、口径もほぼ決定される。というのは、光を集光するには口径の大きなレンズ程有利なのは無論であるが、F値のあまりに小さな（つまり明るい）レンズは高価となり、非現実的となるからである。JT-60 NBI用のレンズは、口径16 mm、焦点距離20 mmのものを使用している。

光ファイバーは、多数の小口径の光ファイバーを束ねたバンドル型ファイバー、中口径の光ファイバーを縦に並べたもの、そして、大口径の単一の光ファイバーの3つの候補があった。前2

者は、長いものまで製作可能で、しかも許容曲げ半径が小さいため工事が易しい。また、前2者は、ファイバー径を自由に大きくできるため、伝送可能な光の絶対量は大きい。しかしながら、分光器とのマッチング、及び、光の輝度を考慮して、最終的には大口径の単一光ファイバーが選択された。（分光器の出力は光の絶対量ではなく輝度に依存する。）JT-60 NBIに於て使用している光ファイバーは、コア径0.8 mm、クラッド径1.0 mmのものであり、その全長は、最大150 mである。また、光ファイバーは、耐放射線性を考慮して、不純物の少いステップインデックス型を用いている。光ファイバーによるその減衰量は15 dB/km以下である。

各ユニットからの光は、分光器の直前に置かれた切換器で、選択され、収束されて分光器に導入される。14台の分光器を並べれば、14ユニット同時に測定できる訳であるが、分光器を設置するスペースもその必要もないと判断された。また、14本の光ファイバーからの光を高速でスイッチングして、1台の分光器で、14ユニット同時に測定する案もあったが、将来の検討項目となった。ともあれ、現在のシステムは、ドラム状の切換器を回転させることによって、極めて簡便に、14ユニットのうちの1ユニットを選択できる構造となっている。

本システムによって得られた分光データの一例を第4.2.8-4図に示す。

赤外モニタ²⁸⁾

中性粒子入射装置によりプラズマ中に入射されたビームの一部分は、プラズマに吸収されることなく透過して対向面に衝突し、熱負荷を与える。また、ディスペラプション等が起って、プラズマが急速に消滅した場合には、入射されたビームは直接、対向面に当る。これらのビームによる熱負荷から対向面を守るために、対向面には、ひとつの面あたり5個の熱電対が埋め込まれている。しかしながら、熱電対の応答速度は遅いため、過大な熱負荷のもとでは熱電対が追随できず、表面溶融を起こす恐れがある。そのため、より早い応答速度を持つインタロックシステムが求められた。その役目を担うのが、ここで述べる赤外線カメラを使った対向面温度監視装置－赤外モニターである。

赤外モニタに要求される性能には、次のようなものがあった。

- (1) 可能な限り速い応答速度を持つこと。表面溶融を防ぐためには、0.1秒以内の応答速度を有する必要がある。
 - (2) JT-60 NBIのドリフト管のNBI側に設けられた、小さなポート（内径70 φ、長さ440 mm）に設置すること。
 - (3) 対向面の監視領域は、400 φ以上であること。空間分解能は10 mm以下であること。
 - (4) 400 Gaussの漏洩磁場のもとで正常に動作すること。
 - (5) 10^5 RのX線に対して健全であること。
 - (6) 遠隔にて、メンテナンス及び制御が可能であること。
 - (7) 測定温度範囲は、0 °Cから1000 °Cとする。
 - (8) 温度上昇のプロファイルから、入射ビームの強度分布を容易に知る事の出来るシステムであること。
- (1)の条件から、使用する赤外線カメラの機種が決定された。即ち、0.1秒以内の応答速度を有するためには、インタロックに必要なリレーの動作速度等を考慮して、赤外線カメラのフレーム

速度（一画面掃引するのに必要な時間）は 0.05 秒以下である必要がある。当時、この条件を満足する赤外線カメラの機種は、数種類であった。更に、温度の絶対値の測定が可能であること。検出器を冷却するための方式がメンテナンスに容易なものであること、インターロック用のアラーム出力を行うための改造が容易であること、等の条件を鑑みて、最終的に、現在使用している機種（日本アビカニクス（株）製 TVS-4000）が選定された。

(2)及び(3)の条件は、本システムの光学系を設計する上で最も問題となった点である。というのは、単に(3)の条件だけであるならば、通常の望遠レンズ（勿論、赤外線用の望遠レンズ）を取り付け、400 ϕ 以上の視野を確保すれば良い話であるが、問題はそれを細長いポートを通して行うという事である。当初、通常のガリレカ式の望遠レンズを使用するとして評価したところ、視野中心から少し離れた位置からの赤外線は、細長いポートによってカットされるため、正確な温度が測定できる範囲（均一視野範囲）は、120 ϕ に過ぎない事が判明した。そのため、望遠レンズはケプラー式とし、入射ひとみの位置をレンズ前方に置くとともに、入射ひとみ径を最適化した。その結果、計算上は、均一視野範囲を 490 mm ϕ にする事が可能となった。但し、ケプラー式の望遠レンズのため、通常の屈折式天体望遠鏡と同時に、得られる熱画像は倒立像となっている。なお、均一視野範囲については、JT-60 NBIに取り付け後、JT-60 本体内に黒体を持ち込んで測定したところ、400 mm ϕ 程度になっている事が確認されている。また、同時に、空間分解能も測定され、5 mm 程度である事が判明している。

(4)の条件を満すためには、磁気シールドが必要であった。磁気シールドなしの状態で外部磁場を印加して、影響を調べたところ、50 Gauss 程度の磁場で掃引速度が遅くなる事が判明した。このため、JT-60 NBI に於ては、赤外カメラを 18 mm 厚の電磁軟鉄で覆った。電磁軟鉄の厚みは、磁気シールドの 9 倍（一辺あたり 3 倍）の広さの磁力線を全て集めたとしても、電磁軟鉄が飽和しない様に決定された。最近、JT-60 が 2 MA のジュール電流を流して運転している時に、漏洩磁場の影響の有無が調べられたが、正常に動作している事が確認されている。

放射線に対しては、赤外線カメラの検出器 (InSb) は比較的強く、 10^5 R 程度の照射線量まで耐え得る事が確認されている。従って、問題は、検出器の近くにある MOS-IC などの電子回路であると考えられる。このため、赤外線カメラの検出器を、10 mm 厚の鉛シールドで覆った。

(6)の条件を満すためには、光ファイバーを用いた信号伝送システムによって、中央制御室の操作デスクから、赤外モニタに関する全ての操作が可能な様に赤外線カメラのコントローラを改造した。また、(8)の条件を満すため、赤外線カメラの映像を、画像記憶装置に記録し、計算機によってデータ処理が可能なシステム構成となっている。

この他、本システムに於ては、可視像ミキシングが取り入れられた。これは、第 4.2.8-5 図の模式図に示すように、対向面からの可視光線を赤外線カメラの手前の特殊なフィルターによって赤外線から分離し、可視カメラに導く事によって対向面の可視像を得、それと赤外像とを画像ミキシング技術により重ね合せるものである。これにより、赤外線カメラで監視している対象物の位置関係が明瞭となり、本システムの有用性と信頼性が、大幅に高められた。第 4.2.8-6 図に、ビーム入射時の対向面の赤外像と可視像の一例を示す。

なお、赤外モニタのアラーム出力は、当初、画面中の一点でも設定値以上の温度を持つ点があれば、出力されるようになっていた。しかしながら、この方式だと、対向面に、たとえば、ゴミ

状のものが付着して、局的に異常に高い温度を示した時にも、アラームが outputされる恐れがあった。そこで、現在は画面中のある領域の温度の平均値が設定値を越えた時のみに、アラーム出力される様なモードも選択可能となっている。

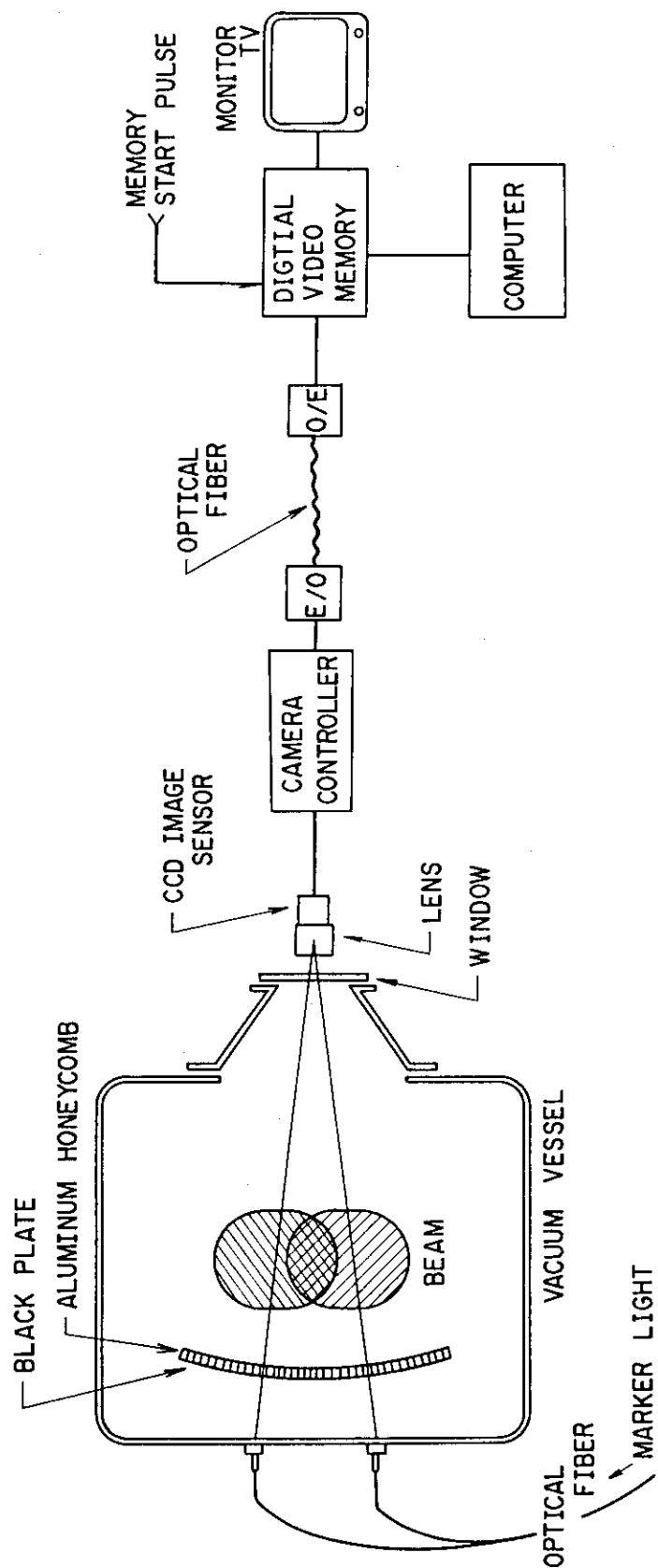
第 4.2.8-1 表には、赤外モニタと対向面熱電対によるインターロック時間（応答速度）の実測値を示す。赤外モニタの応答速度は熱電対に比べて遙かに速く、70 ミリ秒以下でビームをインターロックする事が可能である。

第 4.2.8-1 表 赤外モニタと熱電対の応答時間の比較

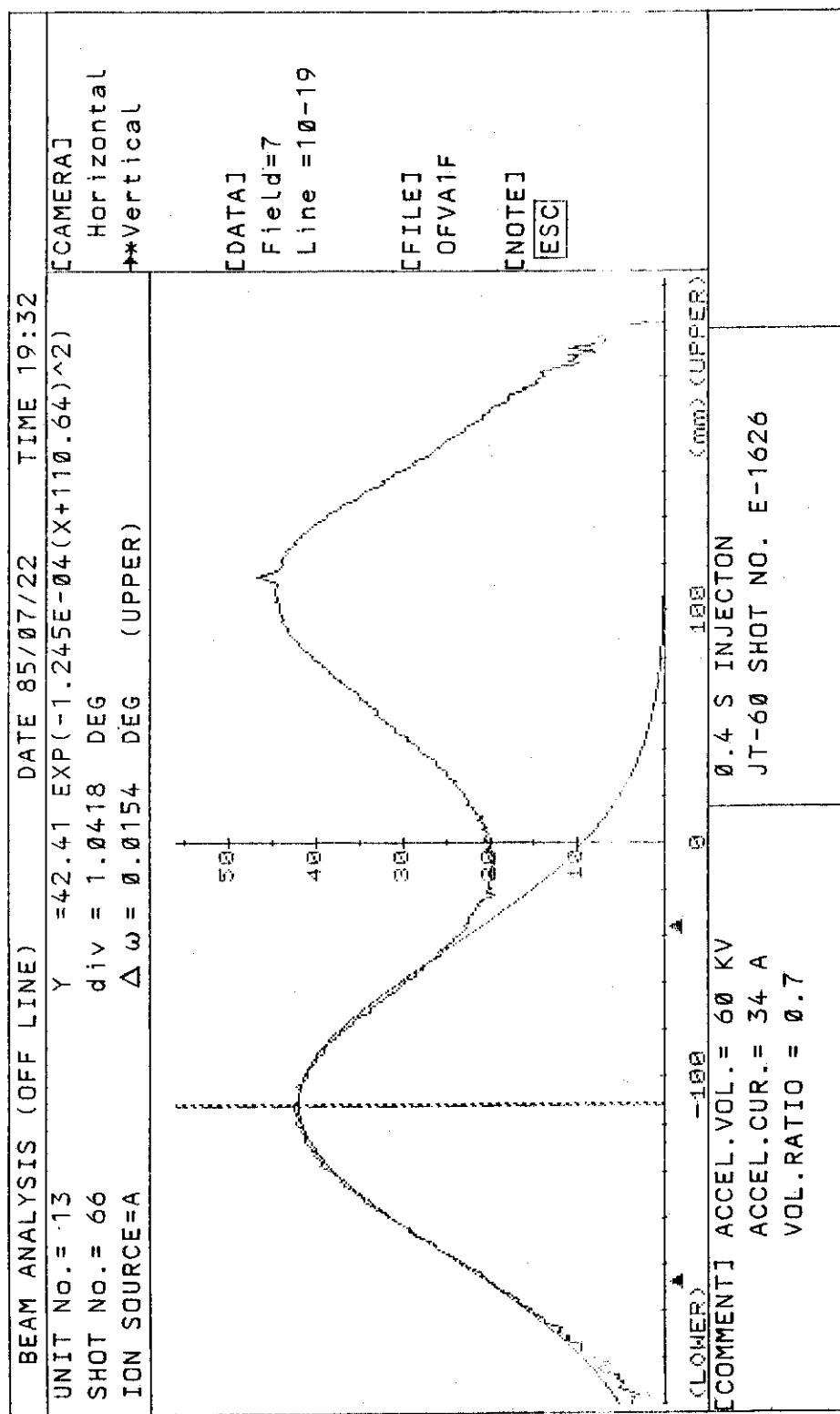
応答時間は対向面の温度が設定値を起
えてから、インターロックによりビー
ムが実際に止まるまでの時間である。

NB ARMOR PLATE INTERLOCK SYSTEM

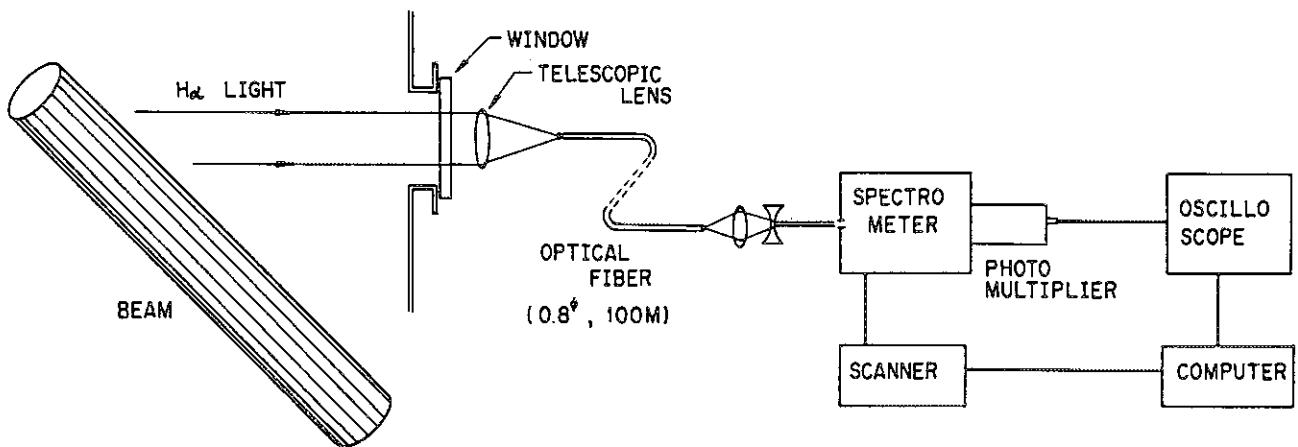
	Response Time
IR Camera	60 - 70 msec
Thermocouples T	340 - 400 msec
Thermocouples dT/dt	300 - 350 msec



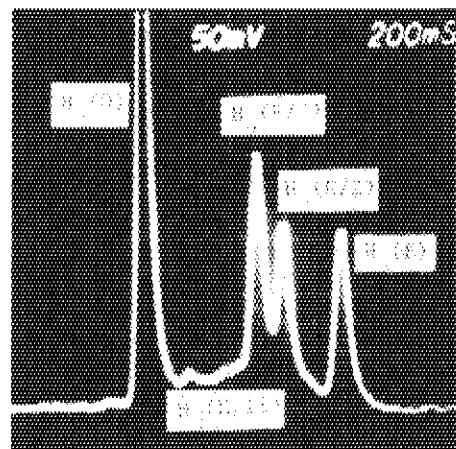
第4.2.8-1図 プロファイルモニタの構成図
JT-60 NBIには各ユニットにそれぞれ
垂直及び水平方向用の2台のカメラが装
着されている。



第4.2.8-2図 プロファイルモニタで得られたビームプロファイルの一例

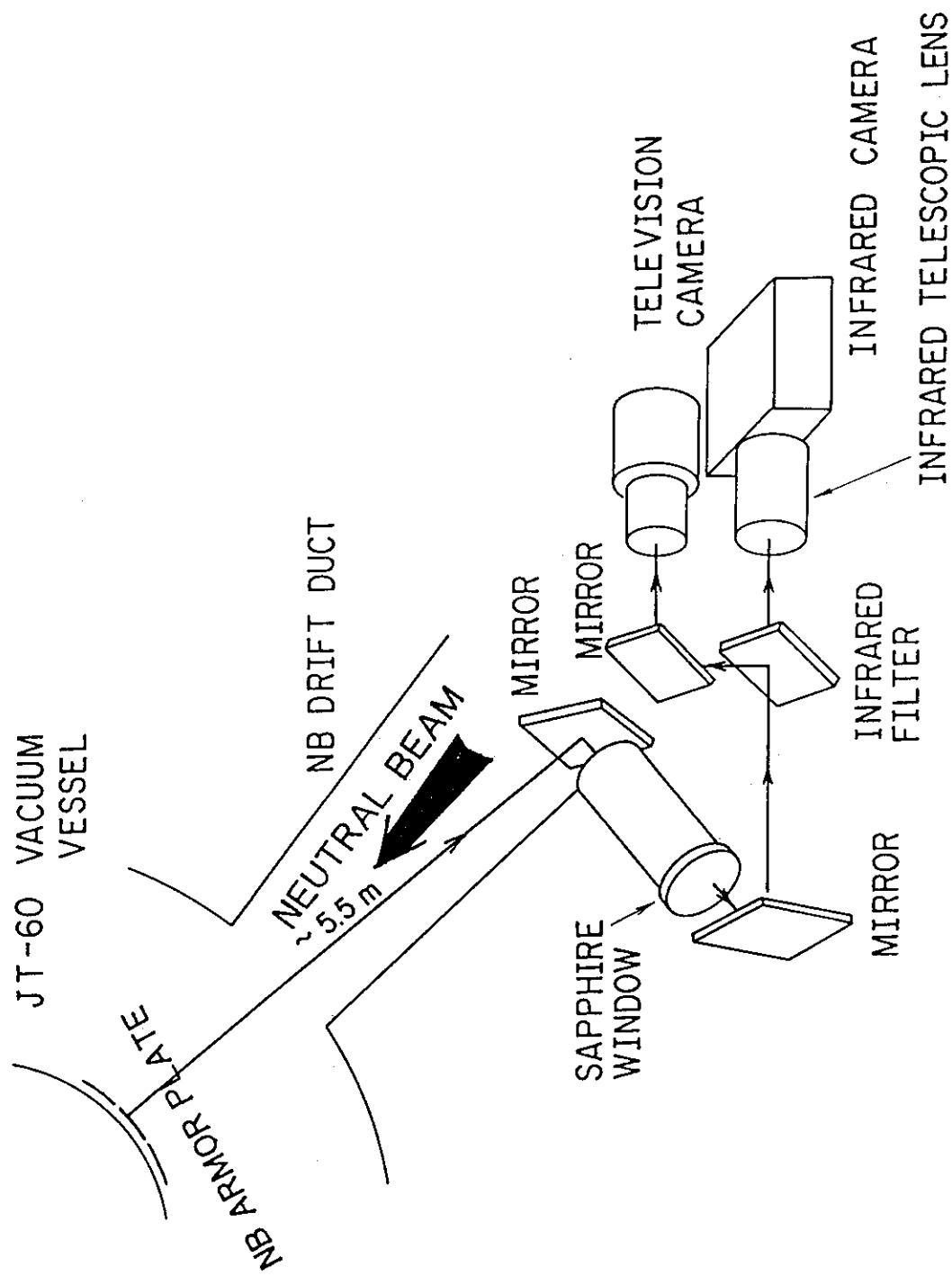


第 4.2.8-3 図 分光モニタの構成図

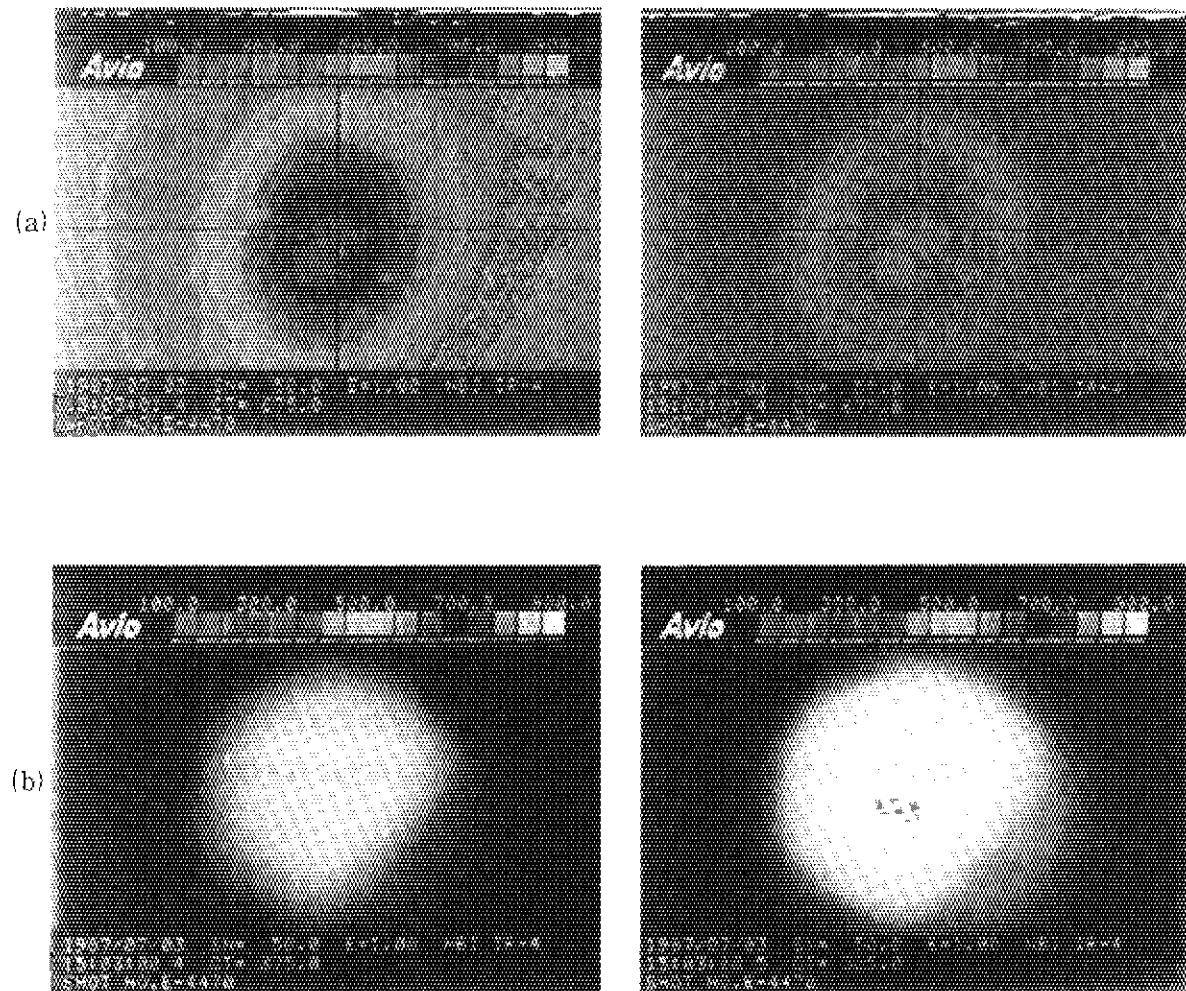


第 4.2.8-4 図 分光モニタで得られた分光スペクトルの一例

水素の 3 つのビーム成分 ($H(E)$, $H(E/2)$, $H(E/3)$) の他に H_2O^+ から解離した水素のピーク ($H(E/18)$) が見える。



第4.2.8-5図 赤外モニタの構成図、対向面の位置関係を正確に把握するため、
赤外線カメラと可視カメラが使用されている。赤外線と可視光線
はフィルターによって分離されている。



JT-60 NBI 赤外モニタ出力画像

赤外線カメラで測定したイオンビーム受熱面の温度分布
(上図) である。JT-60 NBI では、これに可視カメラで得られた
画像(下図)がミキシングされて一つの画面に表示され異常
温度上昇を監視するために使用される。

第 4.2.8 - 6 図 ビーム入射時の対向面の赤外線(a)と可視像(b)

4.2.9 ビームラインの真空的特性及び真空計測

(1) 真空的特性

ビームライン及び内蔵機器の材質は、SUS 304、無酸素銅、アルミニウム、電磁軟鉄等である。これらビームライン機器のアウトガス量を少なくして、良質の真空を得るために、金属表面はバフ研磨等によって仕上げられており、また比較的アウトガスの多い電磁軟鉄は、表面にNiメッキを処し、防錆と共にアウトガス量の低減を図っている。更にビームライン製作過程でも油脂類の付着を可能な限り少なくし、小形部品等においてもアウトガス量の多いものは出来るだけ使用しない様にした。

14ユニットビームラインの到達真空度及び大気圧より真空引きを開始してから10時間後のアウトガス量を第4.2.9-1表に示す。これらの値は、バフ研磨されたステンレス板の真空引き開始後10時間のアウトガス量 $1.8 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}/\text{cm}^2$ ²⁹⁾ とほぼ同程度である。

ビームライン内の残留ガス分析結果の一例を第4.2.9-1図に示す。ビームラインタンク内は、ベーキングされていないことから、水分がかなりの割合を占めている。

(2) 真空計測

ビームを入射している時のビームラインの真空度が $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ Pa}$ の領域にあることから、この領域での真空度の正確な測定が必要である。このために電離真空計を中心とした真空計測システムによりビームラインの真空度をモニターできるようにした。

なお、ビームラインは、3つの部屋 (P_1, P_2, P_3 室) に分けて各部屋にクライカポンプを設置することによる差動排気システムを採用しているので、これら各部屋の真空度が計測できるようにしてある。

i) 電離真空計

電離真空計は応答速度が速く $10^{-6} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$ の圧力範囲を精度良く測定するものとして、全ユニットの P_1, P_3 室および中性化セルA, Bに各々1個、 P_2 室については#1, #2ユニットにのみ代表で取付けた。

電離真空計はその測定原理が電離したイオン電流を測定していることから外部磁場の影響を受けやすく、JT-60 NBI 加熱装置のようにJT-60からの漏洩磁場が多い環境下では充分な注意と対策を講ずる必要があった。

電離真空計の選択にあたっては磁場の影響のより少ないシュルツ型も考えられたが、広範囲の圧力領域で感度が一定しているB-A型を採用した。また、 P_1, P_2, P_3 室に設置した電離真空計への磁場の影響については原研独自で開発した磁気シールド付電離真空計によって最大500 Gの漏洩磁場を受けても感度変化が1%以下になるようにした³⁰⁾。(第4.2.9-1図参照)しかし、中性化セルA, B用の電離真空計についてはその取付け位置がイオン源磁気シールド内であることから特別な対策を施さなかった。

ii) ピラニー真空計

全ユニットの P_3 室に取付けた本真空計は $0.2 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ の圧力範囲の真空度を測定するとともに、そのリレー設定値 8 Pa によって次の制御操作を行っている。

- ① 金属シールゲート弁、イオン源用ゲート弁の差圧正常信号を発信し、本条件が満足されない場合には弁の開操作はできない。又、条件が破れた時点で開いている弁は閉動作に移る。

- ② 本真空計測系の他の真空計（電離真空計、ペニング真空計）の保護に使用し、8 Pa 以下でないと上記真空計の電源は投入できない。又、投入されているものは開放される。
- ③ クライオ再生運転時の排気開始指令信号を発信し、クライオの再生を開始した後 8 Pa をこえた時点でクライオ再生後の排気開始指令を補助真空排気系に発信して補助排気系での水素排気が開始される。

ピラニー真空計には定温度型と定電圧型とがあるが、応答性が速く広範囲の圧力測定が可能であり、更に、環境温度の変化に対して誤差の少ない定温度型を採用した。

iii) ペニング真空計

ペニング真空計は $1.3 \times 10^{-3} \sim 1$ Pa の圧力範囲を測定するものとして全ユニットの P₁ 室、中性化セル A, B に取付けた。また、そのリレー接点は次の制御に使用した。

- ① P₁ 室に設置したペニング真空計は 0.1 Pa の設定によって、水素ビーム引出し許可条件を成し、0.1 (Pa) 以下でないと水素ビームの引出し運転はできない。
- ② 中性化セル入口に設置したペニング真空計の設定値 0.08 Pa 以下では 85 kv 以上でのビーム引出し運転を禁止し、中性化効率が悪化することによるビームダンプへの過大な熱負荷のかかるのを防止している。
- ③ P₁ 室に設置したペニング真空計の測定値等により、クライオ再生完了信号を発信し、クライオ再生時の排気開始指令信号をリセットして補助排気系の排気モードを水素排気から大気排気に移行させる。

iv) その他

上記以外の真空計測機器としては、バラトロン、圧力伝送器、残留ガス分析計等が設置されている。

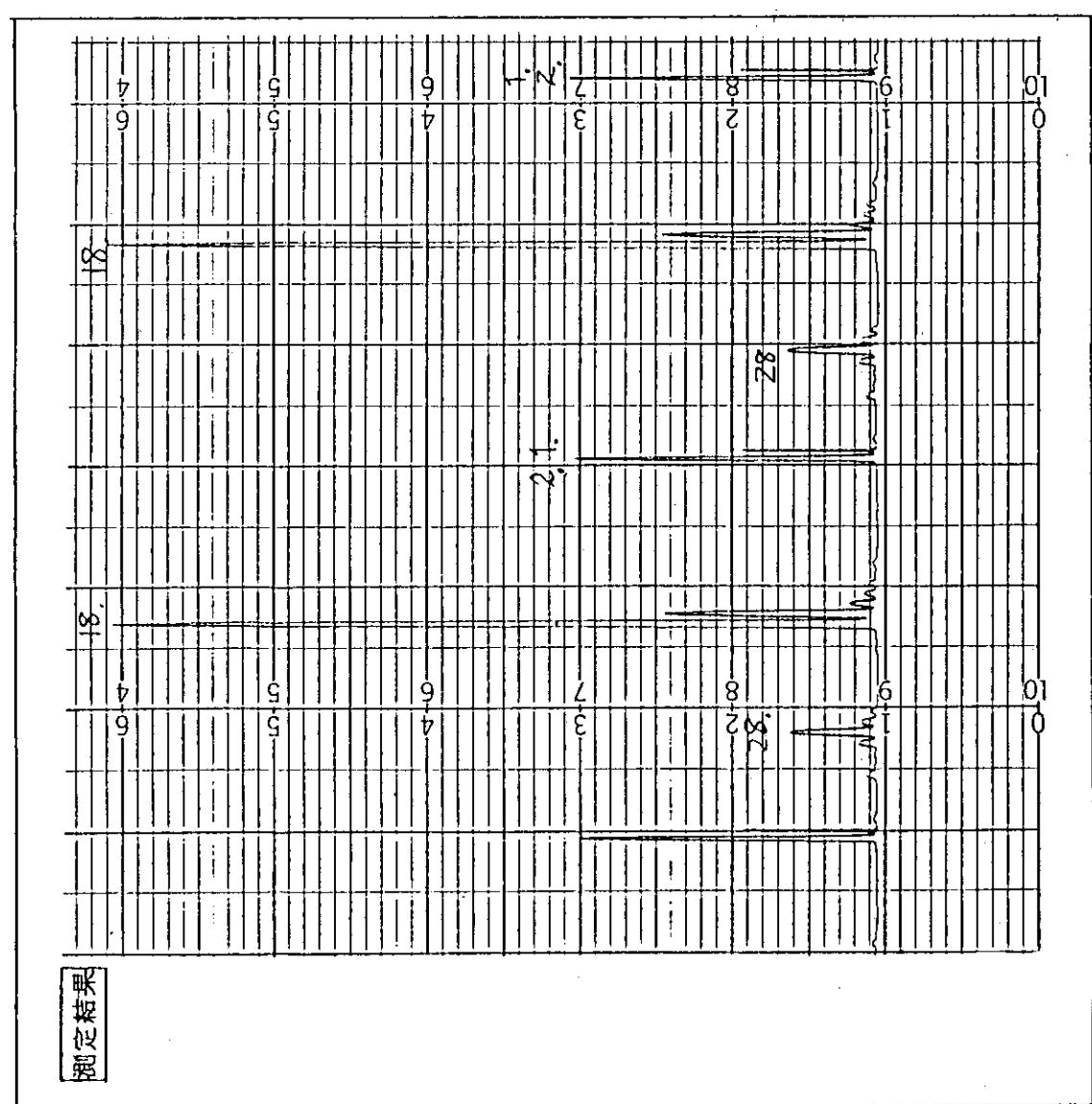
第4.2.9-1表 アウトガス量測定結果 (大気圧より真空引き 10 Hr 経過後)

ユニットNo.	測定時の真空圧力 PE 1I (Pa)	アウトガス量 (Pa・m ³ /s・cm ²)	到達真空度 PE 1I (Pa)
# 1	3.68×10^{-3}	6.49×10^{-11}	1.1×10^{-4}
# 2	4.08×10^{-3}	8.12×10^{-11}	1.0×10^{-4}
# 3	3.50×10^{-3}	7.00×10^{-11}	5.0×10^{-5}
# 4	3.23×10^{-3}	7.22×10^{-11}	8.1×10^{-5}
# 5	3.65×10^{-3}	7.12×10^{-11}	1.0×10^{-4}
# 6	3.34×10^{-3}	6.88×10^{-11}	9.3×10^{-5}
# 7	3.65×10^{-3}	8.38×10^{-11}	5.2×10^{-5}
# 8	3.83×10^{-3}	9.90×10^{-11}	6.4×10^{-5}
# 9	3.43×10^{-3}	7.75×10^{-11}	8.0×10^{-5}
# 10	3.50×10^{-3}	9.53×10^{-11}	1.1×10^{-4}
# 11	3.25×10^{-3}	7.35×10^{-11}	9.0×10^{-5}
# 12	3.92×10^{-3}	9.25×10^{-11}	6.4×10^{-5}
# 13	3.68×10^{-3}	8.21×10^{-11}	5.1×10^{-5}
# 14	4.04×10^{-3}	9.98×10^{-11}	6.7×10^{-5}

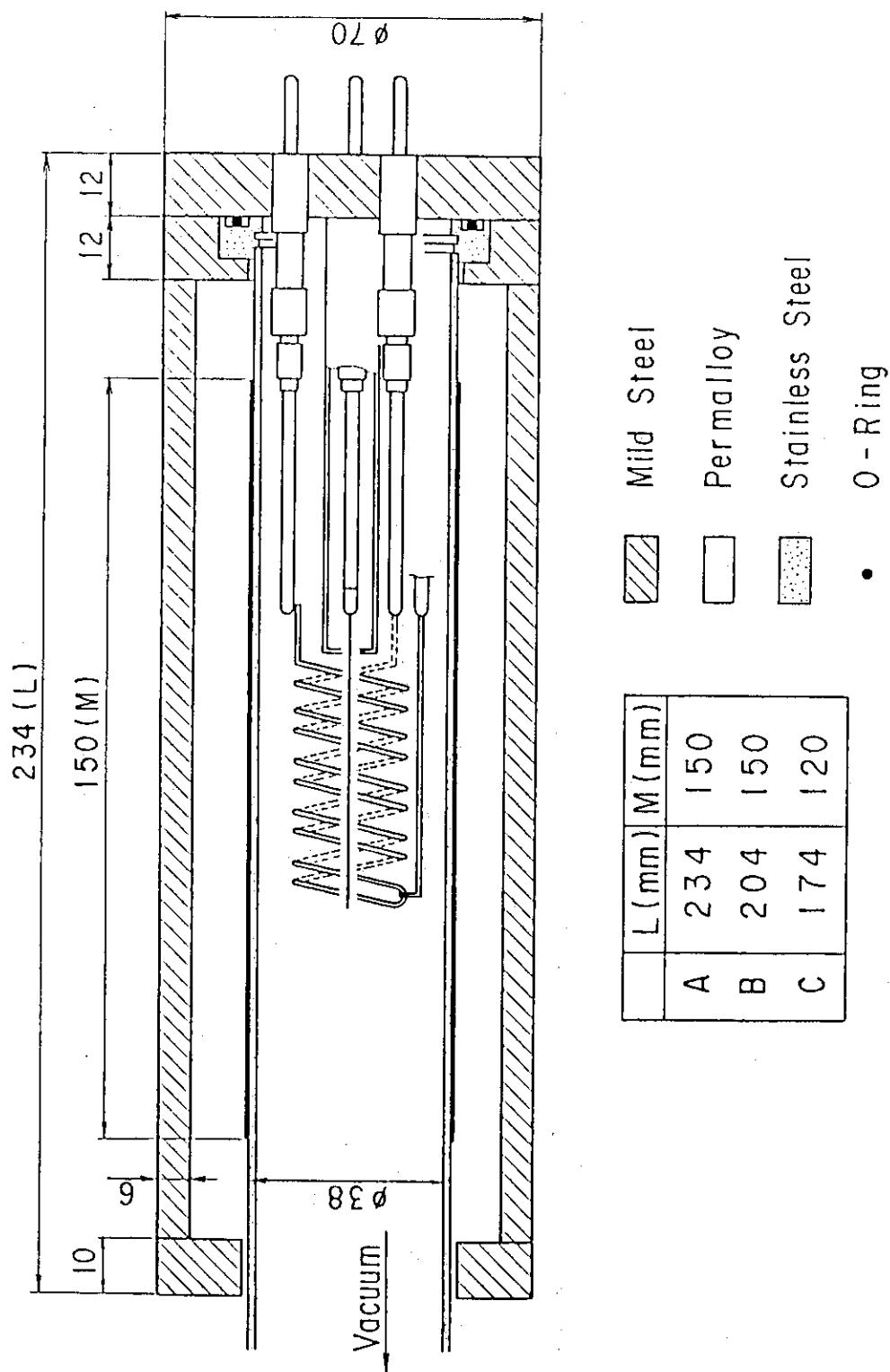
2. アウトガス量算出式

$$Q_0 = \frac{P_V \cdot V_Q}{t \cdot S_Q} \quad (\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \cdot \text{cm}^2)$$

 P_V ; 真空圧力の変化 (Pa) V_Q ; ビームラインの内容積 (m^3) = 26.8 m^3 t ; 真空圧力の上昇を実施した時間 (秒) = 600 S S_Q ; ビームライン内部の表面積 (cm^2)下ユニット = $7.78 \times 10^6 \text{ cm}^2$, 上ユニット = $7.92 \times 10^6 \text{ cm}^2$



第4.2.9-1図 残留ガス分析結果の一例



第4.2.9-2図 磁気シールド付電離真空計

参考文献

- 1) 伊藤他 ; JAERI-M 82-131 (1982).
- 2) 松岡他 ; JAERI-M 83-069 (1983).
- 3) 伊藤他 ; JAERI-M 9226 (1980).
- 4) S. Tanaka, et al.: Jap. J. App. Phys.
- 5) 栗山他 ; JAERI-M 9746.
- 6) M. Seki, et al.: J. of Nucl. Sci. and Tech. 16 (11), 838 (1979)
- 7) H. Horiike, et al.: Nucl. Tech./Fusion, Vol.2, 637 (1982)
- 8) W.R. Gawbill: Nucl. Safety, 9 (6), 467 (1968)
- 9) 田中他 ; JAERI-M 82-140 (1982).
- 10) S. Tanaka, et al.: Rev. Sci. Instrum. 57, 145 (1986)
- 11) 松岡他 ; JAERI-M 9599 (1982).
- 12) S. Tanaka, et al.: Fusion Technology, 7, 391 (1985)
- 13) 栗山他 ; JAERI-M 8988 (1980).
- 14) 栗山他 ; 投稿予定
- 15) 松田他 ; JAERI-M 7655 (1978).
- 16) 柴田他 ; JAERI-M 8935 (1980).
- 17) 柴沼他 ; 投稿予定
- 18) 柴沼他 ; 投稿予定
- 19) G. Havikoshi, et al.: 7th Int. Vac. Conf. & 3rd Int. Conf. Solid Surfaces, Vienna (1977)
- 20) S. Kurabayashi, et al.: 12th SOFT (1982)
- 21) 重松他 ; 私信
- 22) 向田他 ; JAERI-M 83-154 (1983).
- 23) 荒木他 ; JAERI-M 86-085 (1986).
- 24) 河合視己人, 大賀徳道, 奥村義和, 柴田猛順 ; JAERI-M 8778 (1980).
- 25) 河合視己人, 秋場真人 ; JAERI-M 82-209 (1982).
- 26) Y. Okumura, M. Akiba and K. Mizuhashi: Rev. Sci. Instrum. 55 (1984)
P.2027
- 27) 奥村義和, 小原祥裕, 柴田猛順 ; JAERI-M 9653 (1981).
- 28) Y. Okumura, et al.: to be submitted for publication
- 29) 熊谷他 ; 「真空の物理と応用」(裳華房)
- 30) 柴田他 ; 真空, 30-5, P 350 (1987).

付-1 ビームラインの耐震解析

主排気タンクは、2段積みされてJT-60に据付けられるため高さは約1.5mにもなり、また配管用ヤグラ(2.7m[□])の高さも約1.4mになる。このように縦に長い構造物については耐震上十分に注意して設計する必要がある。このため主排気タンク(内蔵機器も含めて)及び配管用ヤグラの動的耐震解析を行ない、地震に対しての安全性を確認し、更にこれらの耐震解析の結果はビームライン構造物の強度設計にフィードバックさせた。計算に使用した地震波及び加速度は2.3項に記した耐震条件を使用した。解析モデルは、主排気タンクは3次元殻要素、またビームライン各機器は梁、バネ、質点系でモデル化した。地震時の応答解析結果を付図-1、2及び付表-1に示す。

配管用ヤグラは、パイプ構造物のため、梁要素でモデル化した。結果の一例を付図-3及び付表-2に示す。

この耐震解析結果から、ビームライン各機器及び配管用ヤグラが耐震上安全であることを確認した。

付表-1 主排気タンク加速度応答特性

応答加速度 (gal), 変位 (mm)

		TAFT	EL CENTRO	TAFT	EL CENTRO
加振加速度 (gal)	329	468		329	468
加振周波数 (Hz)		—		—	—
加振方向	x	x		z	z
	応答加速度	315	462	318	458
401	応答倍率	0.96	0.99	0.97	0.98
	変位	0.6	0.4	0.2	0.3
	応答加速度	475	584	384	521
424	応答倍率	1.44	1.25	1.17	1.11
	変位	9.1	6.2	3.0	4.5
	応答加速度	638	686	428	605
447	応答倍率	1.94	1.47	1.30	1.29
	変位	15.4	10.4	4.8	7.2
	応答加速度	1015	936	541	837
469	応答倍率	3.09	2.00	1.65	1.79
	変位	30.8	20.6	9.4	14.0
	応答加速度	351	511	352	480
406	応答倍率	1.07	1.09	1.07	1.03
	変位	3.2	3.2	1.7	2.5
	応答加速度	340	481	319	460
415	応答倍率	1.03	1.03	0.97	0.98
	変位	2.0	1.4	0.4	0.6
	応答加速度	328	462	338	444
99	応答倍率	1.00	0.99	1.03	0.95
	変位	0.1	0.1	0.7	1.2
	応答加速度	772	772	470	692
402	応答倍率	2.35	1.65	1.43	1.48
	変位	15.2	14.7	6.5	9.8
	応答加速度	941	886	518	789
412	応答倍率	2.86	1.89	1.57	1.69
	変位	27.9	18.6	8.4	12.6
	応答加速度	1028	947	552	859
212	応答倍率	3.13	2.03	1.68	1.84
	変位	31.7	21.1	9.7	14.5

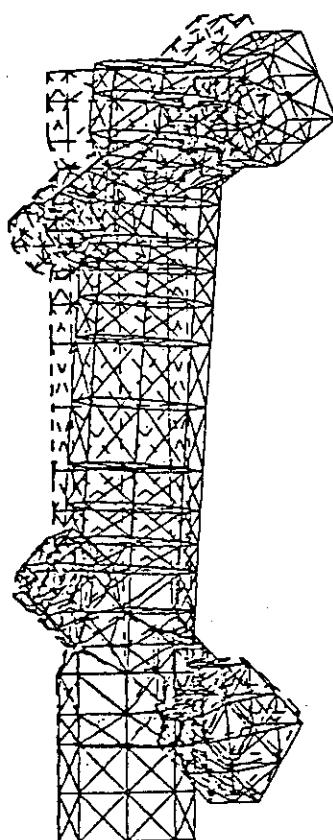
付表-2 ヤグラ頂上部の変形量

(単位 mm)

地震波条件	節点番号	X - 変位	Y - 変位	Z - 変位
Z 方向 加震	39	0.3605	0.5603	3.347
	40	1.7061	0.6315	3.303
	41	1.6920	0.4715	5.555
	42	0.3233	0.5623	5.572
X 方向 加震	39	1.5133	0.5284	0.512
	40	1.7077	0.6959	0.510
	41	1.7053	0.5376	0.722
	42	1.5145	0.6909	0.729

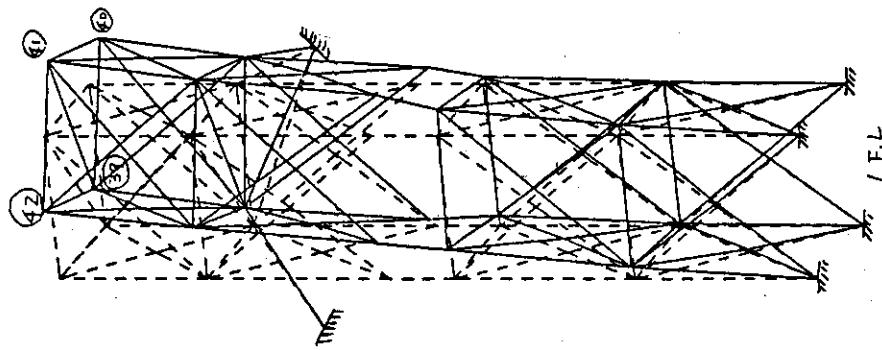
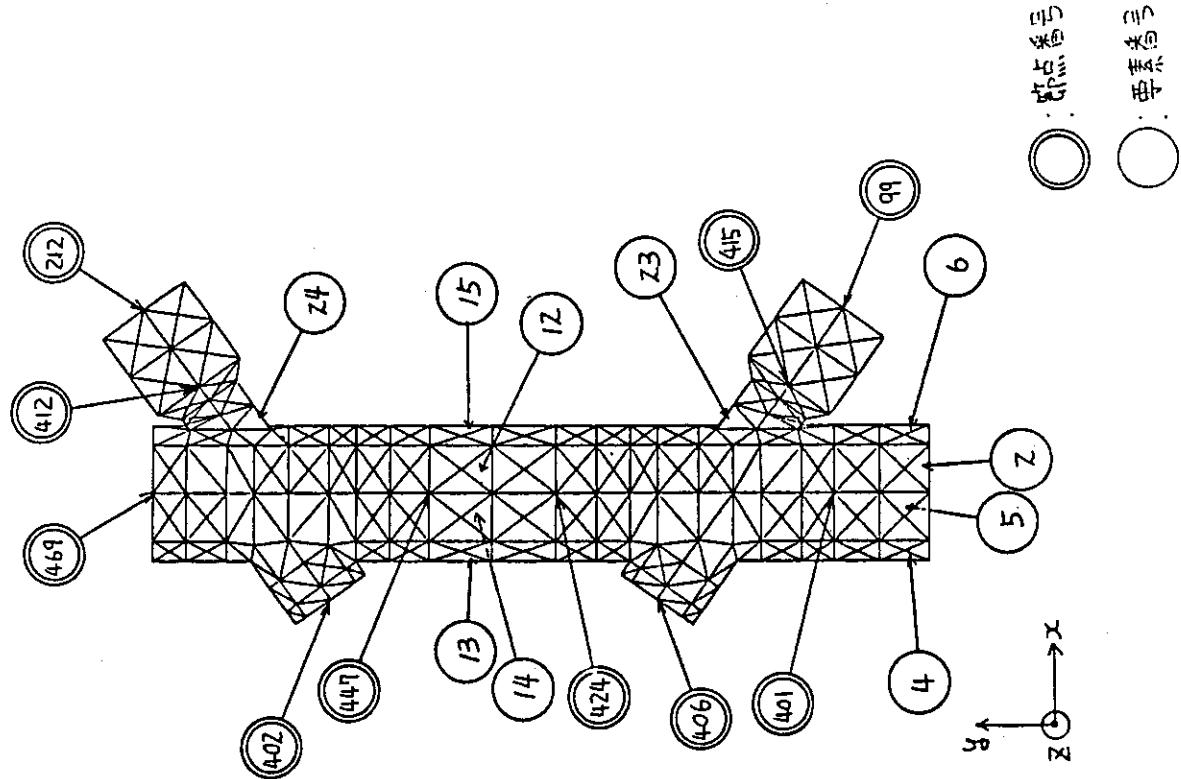
- 建家への地震波 : EL CENTRO波
- 地震 加速度 : • 1 F.L 468 gal
• キヤックウォーク 594 gal

MODE NO. 1. 3.5 Hz



付図-1 主軸タンクモード図

MODE NO. 1. 8.4 Hz



PARALLEL PROJECTION

4.3 イオン源電源

JT-60 NBI は最大 100 keV, 20 MW, 10 秒の中性水素ビームを入射する装置で 14 ユニットから構成され、それぞれのユニット毎に電源が用意されている。第 4.3-1 表は 1 ユニットあたりのイオン源用電源の仕様で、第 4.3-1 図はその単線結線図である。通常イオン源用電源と言う場合は、ソースプラズマ生成部用電源と加減速電源を指すが、本項では偏向磁石電源と打消コイル電源も含めて記述する。1 ユニットに 2 台設置されているイオン源に対し、加減速の電圧とイオン源ガスは並列に供給される。加速電源はイオンを加速する電力を供給するもので、2 台のイオン源に最大 100 kV, 94 A まで供給できる。これと同時に加速電圧を分圧することにより、中間の電圧を第 2 正電極に供給する。減速電源は加速電圧により電子がイオン源上流部へ加速されるのを防ぐために、ビーム出口の減速電極に負電界を印加するためのもので、-2 kV, 20 A まで供給できる。アーク電源はアーク容器壁とフィラメント間に直流電圧を印加してソースプラズマを生成させるためのものである。フィラメント電源は 2 台のイオン源にそれぞれ 8 本あるフィラメント陰極加熱用の電源である。アーク電源のマイナス側はフィラメントのプラス側に接続される。偏向磁石電源は中性化セル通過後の残留イオンビームをビームダンプに導くための偏向磁石に電力を供給するものである。残留イオンビームが加速電圧の大小にかかわらず常にビームダンプの適切な位置にビームが行く様に加速電圧に連動して制御されている。打消コイル電源は JT-60 本体からの漏洩磁場を打消すための打消コイルに電力を供給するための電源である。この電源は漏洩磁場検出出力をもとにフィードバック制御されている。第 4.3-2 図にイオン源用電源の配置を示す。

本電源の大きな特徴は、① 加速電源の直流高速スイッチとして従来使用されてきた高出力四極真空管に代って、半導体素子である GTO (ゲートターンオフサイリスタ) が採用されていること。② ビーム電力をパルス間に変えることができる、ビームパワープレプロ制御が可能であること等である。①により、真空管における誤動作、寄生発振、内部短絡等の信頼性低下原因が取り除かれ、信頼性が飛躍的に向上した。②は、電源各部交流側電力制御部に、タップ切替え型変圧器や誘導電圧調整器の様に機械的に動くものを排除し、サイリスタ位相制御回路の採用による完全なソリッドステート化によって可能となったもので、加熱実験範囲を大幅に拡大するものである。

各部の詳細な構成等は設計報告書に譲りここでは各電源の有する特徴を示す。

4.3.1 加速電源

a) 加速電源直流スイッチへのGTOの採用

従来 NBI 加速電源には、電圧制御やイオン源での放電破壊時に高速しゃ断を行わせるため高出力真空管が用いられてきた。しかし高出力真空管は電力損失、寿命、寄生発振などにより信頼性に問題があった。これらの問題は半導体スイッチ (Gate Turn off Thyristor 略して GTO) を用いることにより解決されるが、一方で GTO の素子自体には電圧制御機能をもたないという欠点がある。そこで、第 4.3-3 図に示すような GTO を使用しつつ電圧制御機能を有した制御回路を考案し、¹⁾ 適用した。GTAS が高速しゃ断用のメインスイッチ (遮断速度 100 μs) GTAR が電圧制御機能を有する回路で、それぞれ 96 個及び 24 個の GTO 素子直列回路で構成

されている。GTAR 内の各GTO には並列に非線形抵抗が接続され、GTO のオンする個数を制御することにより 1 kV 単位で出力電圧を制御することができる。この機能は、主にビームのオン時或いはイオン源放電破壊における高速しゃ断後再立上げ時のオーバーシュート抑制に有効で、ビームの安定出力に大きく貢献している。GTAR が働いている様子を第 4.3-4 図(a) (b) に示す。もし GTAR の有する機能が無ければ、パルスのON 直後に V_{IN} の電圧が直接出力される。もし V_{IN} が V_{acc} より大なる時（例えばイオン源ブレークダウンによって GTAS が OFF し、ラインのインダクタンスによって C-A が過充電されている時）には、イオン源の耐量以上の電圧が印加され、再びブレークダウンに至ってしまう。第 4.3-4 図を見ると、ビーム初期にも V_{acc} に等しい電圧に制御されていることがわかる。

(b) 真空管と抵抗の分圧による第 2 正電極電位出力方式

第 4.3-3 図右端部に示すように真空管 RT-A と抵抗 WR-A の分圧によって第 2 正電極電位 V_g を得ている。ビームの立上げ時には短時間ではあるが第 2 正電極に大きな電流が流れ、単なる抵抗分圧だと第 2 正電極電位が大きく変動し、放電破壊に至ったり、第 1 正、第 2 正電極の電位的接触（いわゆる 1 段加速モード）が生じ、その結果、安定にビームを得られなくなる。^{2), 3)} ところが、真空管には電圧制御機能があること、短時間なら大電流を流せることから上記のような問題は生じ難い。さらにビームの定常時には、ブリーダ電流を低く押えることができるので純抵抗分割に比べて損失を少なくすることが可能である。また、電圧比 $\Gamma = V_g / V_{acc}$ を容易に変えられるので、プレプロ制御⁴⁾ を可能ならしめている。

(c) 誘導電圧調整器等の機械的に動く要素の削除と半導体スイッチの採用

商用電源に代って力率 0.62 まで許容される加熱用発電設備から電力をとるため、低電圧大電力で高調波、無効電力が大きくなるサイリスタ位相制御のみによる出力制御が可能となり、交流側出力制御には全てサイリスタが用いられている。（第 4.3-1 図参照）これによって可能となったものにビームパワー・プレプロ制御がある。これは、ビームパルス中（最長 10 秒）に加速電圧、加速電流等をプレプログラムにより変化させるものであり、加熱実験の自由度を大幅に拡張するものである。

サイリスタによる交流側電力の位相制御は加速電源ばかりでなく、フィラメント電源、アーク電源、減速電源、偏向磁石電源、打消コイル電源にも採用されている。

4.3.2 減速電源

(a) 高速スイッチとして GTO (GT-D) の採用

これも従来の真空管に代って採用され、信頼性の向上に大きく貢献している。出力が -2 kV と加速電源に比べて小さく過電圧は問題とならないので GT-D には電圧制御機能はない。

（第 4.3-1 図参照）

(b) サージ電圧抑制回路

加速電極と減速電極間が放電破壊を起すと、減速電極は過渡的に高い正の電位に持ち上げられる。この現象による減速電源の破損及びイオン源電極導入端子の絶縁破壊等を防止するため、イオン源直前にダイオードと非線形抵抗（制限電圧 4 kV）の並列によるクランプ回路を設けてある。この回路はスペース上イオン源磁気シールドの外側に設けられているが、この他にイオ

ン源の極く近傍にサージ電圧抑制のためのマイカコンデンサ $0.044 \mu\text{F}$ 、 6kWV が接続されている。

4.3.3 アーク電源

高速アーキング検出回路

従来アーキング検出は、アーク電源直流側出力の過電流検出によって行われてきた。ところがこの系では、数 $100 \mu\text{s}$ ~ 数 ms という高速のアーキング現象に追従できずフィラメントの断線或いはアークチャンバー壁の溶融に到り、イオン源の寿命を著しく低下させてしまう。そこで第 4.3-5 図(a), (b) に示す高速アーキング検出回路が考案採用された。この検出回路はフィラメントに分流しているアーク電流のアンバランスを検出するものであり、検出回路部のみの動作試験においては、動作時間 $50 \mu\text{s}$ を確認した。実際には、これにアーキングが生じアンバランスが検出されるまでの時間が加えられるが、今までの処、アーキングによるフィラメントの断線は全く生じていない。

4.3.4 打消コイル電源

JT-60 NBI では、4.2.3 項で述べたように、磁気シールドによる受動的な磁場の遮蔽に加えて、打消コイルを使用することにより、漏洩磁場の変化に応じた能動的な磁場打消しを行っている。この打消コイルを励磁するための打消コイル電源の回路図を第 4.3-6 図に示す。この電源の極性は単方向で、プラズマ電流を反転して運転する時には、極性切換器 72 U を切り換える必要がある。また本電源は高速応答が要求されるので、平滑コンデンサーは使用されていない。

4.3.5 接地系

(a) 直流接地系と交流接地系の分離

NBI はイオン源電極間で放電破壊が頻繁に生じる装置であるが、放電破壊に伴って発生するサージ電圧、電流によってシステムが誤動作してはならない。このため接地系の設計には注意を要する。特に JT-60 NBI においては以下の点を考慮する必要がある。

- ① 100kV の高電圧であり、負荷端で放電破壊が頻繁に生じる。
- ② 多数のユニット間の相互干渉の可能性。
- ③ 負荷端と電源間及び電源相互間の距離が長い。

JT-60 NBI では接地系を直流接地系と交流接地系とに分離した構成とした。

直流接地系とは加速電源直流発生装置の出力側から負荷端に至るまでの間に設置される機器及び加速電源の出力電位に固定される他の機器、減速電源直流側機器の接地系を指す。これらの機器は直流側接地線に接地される。交流側接地系は NBI 装置の一般の交流機器や筐体などの接地系を指す。これらの機器を最近接の交流側接地線に接続する。直流側接地線は負荷端の主排気タンクにおいてのみ交流側接地線と電気的に接続される。この点以外において直流側接地系は建家や交流側接地系と絶縁されている。これはイオン源での放電破壊に伴って生じるサージ電流の流路を可能な限り直流側接地線に限定し、システム全体の安定性を保とうとするものである。

第4.3-7図に1ユニットについての交流側接地系及び直流側接地系の概略図を示す。各電源盤の筐体から各電源室の基準接地端子へ接続されているIV線が交流側接地系であり、変圧整流器 \ominus 側、高耐圧ケーブル外部導体RV室における床から絶縁されたプレート、さらに高耐圧ケーブルの外部導体、SF₆ガスダクト外管、ダクト出口とNBIタンクを結ぶ銅板が直流側接地系である。

各接地線のサイズは、故障電流計算によってそれぞれ決まるサイズとした。（交流側接地系における各電源室の基準接地端子はJT-60総合基準接地に接続されている。）

各ビームラインユニットやヤグラはC型マニホールドに沿った低インダクタンス接地線（W600の銅板）に接地される。ビームラインユニットやヤグラはJT-60真空容器や架台、建家の配筋からは電気的に絶縁されているが床コンクリートとは接触している。

(b) 加速電源マイナスラインの低インダクタンス化

イオン源での放電破壊の際に生じるサージ電圧を極力低く抑えるために、直流側接地系のインダクタンスを小さくする必要がある。このため、高耐圧ケーブルにおいては、同軸の外部導体を用い、RV室等の直流高圧機器を配置する所においては、広い導体板を用いた。RV室におけるGTO盤やレギュレータチューブ盤などの高電位機器は、これらの接地板上に絶縁碍子を介して設置される。PIG室における第2高電位テーブルも同様に接地板上に碍子によって絶縁設置される。PIG絶縁変圧器の筐体は変圧器内部の静電シールド板とともに上記接地板に電位固定される。本体室とPIG電源室間を結ぶ高電位ケーブルは、3.7節で述べたSF₆ガスダクト内管内を通される。SF₆ガスダクト外管のPIG電源室端は上記の直流側接地線に接続され本体室側端部は銅板によってNBIタンクに電位固定されている。従って、SF₆ガスダクト外管も直流通じては接地電位であるが、イオン源の放電破壊時には過渡的に電位変動するので床及びヤグラ等から絶縁して設置してある。加熱電源棟とRV室、RV室、PIG室間の同軸状高耐圧絶縁ケーブルも同様である。

直流側接地系は加速電源変圧整流器出力 \ominus 側を中心に構成されるが、変圧整流器の筐体のみは例外的に交流側接地系に電位固定する。これは、変圧整流器において地絡故障が発生したとき、地絡電流が直流接地線を逆上りNBIタンク～C型マニホールド～ヘリウム液化機室～地下ダクト～電源棟という長いパスをとってもどることを避けるためと、変圧整流器内部の対筐体容量は出力側に付加される大容量コンデンサによってマスクされるので問題にならないからである。

直流接地線及び接地プレートの対建家及び近接する交流側機器に対する絶縁耐圧はインパルス25kV以上とした。これについてはサージ解析計算によても充分であることを確認した。

以上、本接地系の採用により、100kV出力時にブレークダウンが生じても、機器は全く誤動作せず安定に動いてい。

参考文献

- 1) M. Matsuoka, et al.: JAERI-M 84-112 (1984)
- 2) R. Berckerer, et al.: Euratom Report, EUR-CEA-FC-1147 (1982)
- 3) 松岡他; JAERI-M 82-105 (1982).
- 4) M. Matsuoka, et al.: Proc. of the 13th Symp. on Fusion Tech. 1984, P.911-917

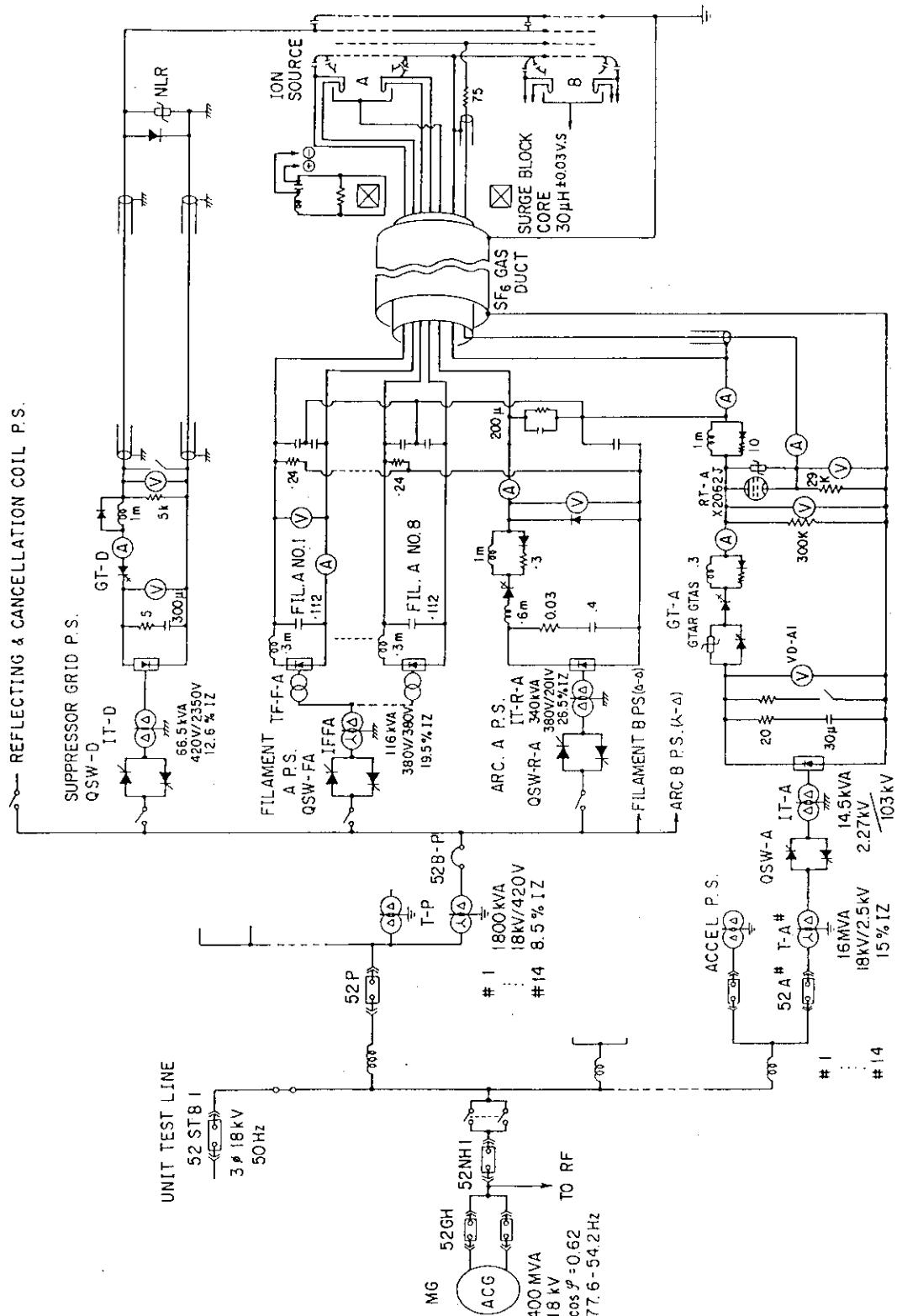
第4.3-1表 1ユニットあたりのイオン源用電源の定格

	電圧	電流	パルス幅	ディューティ*	リップブル
加速電源					
第1正電極	20~100kV	94A(80A)	10S	1/30	2% p-p ($\geq 50\text{ kV}$)
第2正電極	20~90kV **	-2~-+2A	"	"	"
減速電源	- (1~2)kV	20A	"	"	3% p-p
アーキ電源	120V	1200A×2	11S	-	3% p-p ($\geq 300\text{ A}$)
フィラメント電源	5~15V	300A ($\sim 200\text{ A}$) × 8 × 2	16S	-	5% p-p ($\geq 50\text{ A}$)
イオン源ガス導入系	[5 Pa · m ³ /s]		-	-	-
偏向磁石電源	65V	1500A	13s	-	2% p-p
打消コイル電源	160V	1200A	13s	-	"

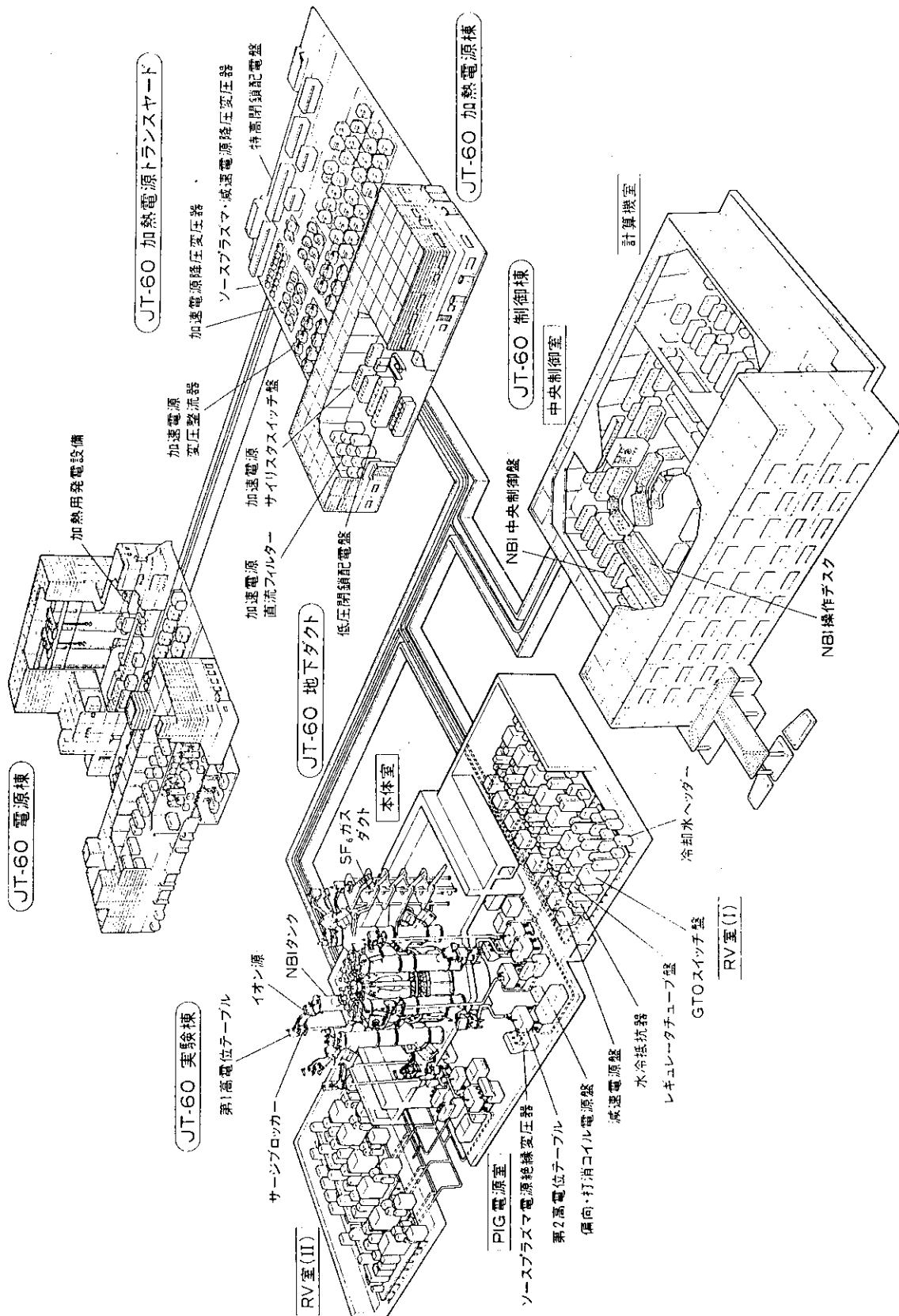
() 内の数値は負荷であるイオン源により決まる上限値である。

* 最短繰返し周期は30秒である。

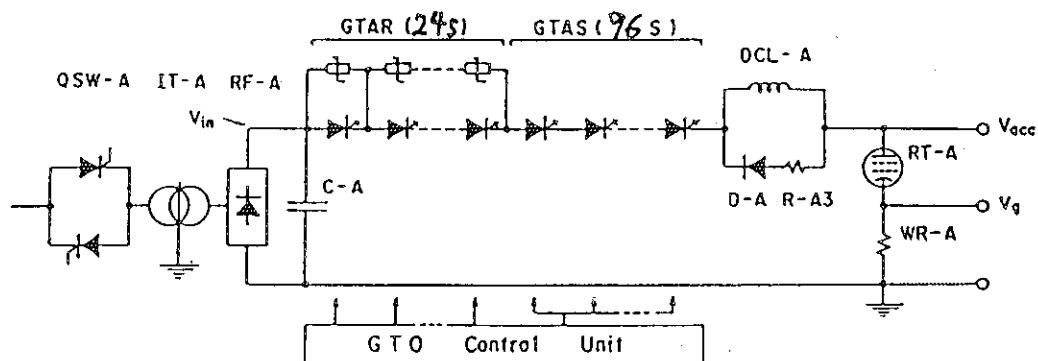
** 第1正電極電圧 - (10~30kV) の範囲に限られる。



第4.3-1図 イオン源用電源の単線結線図

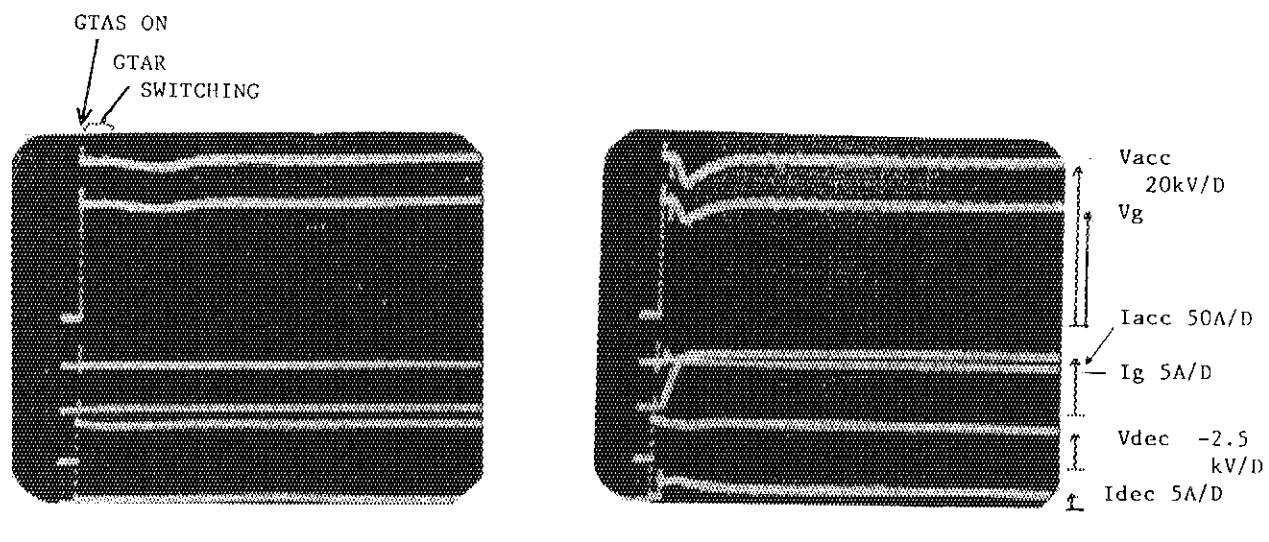


第4.3-2図 イオン用電源の配管



Accell Power Supply

第4.3-3図 加速電源



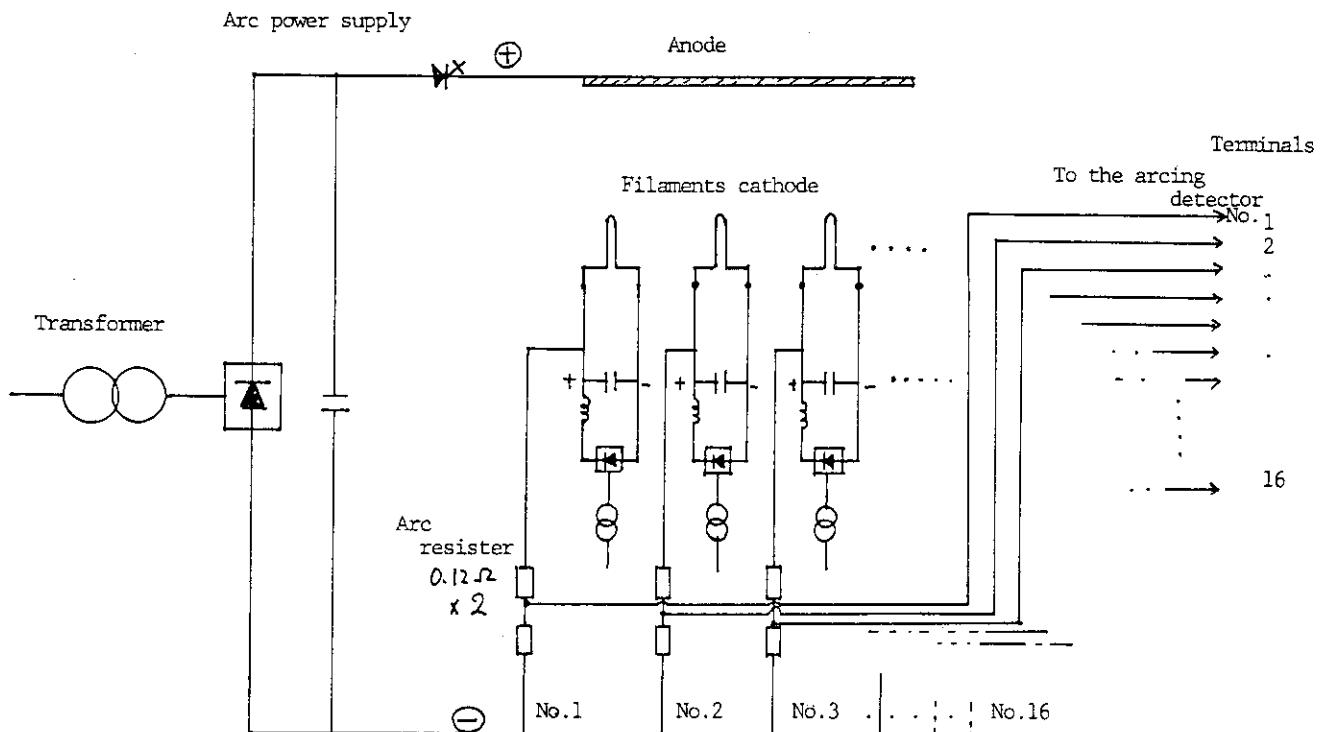
Wave forms of GTAR action.

(a)

Waveforms of beam initiation.

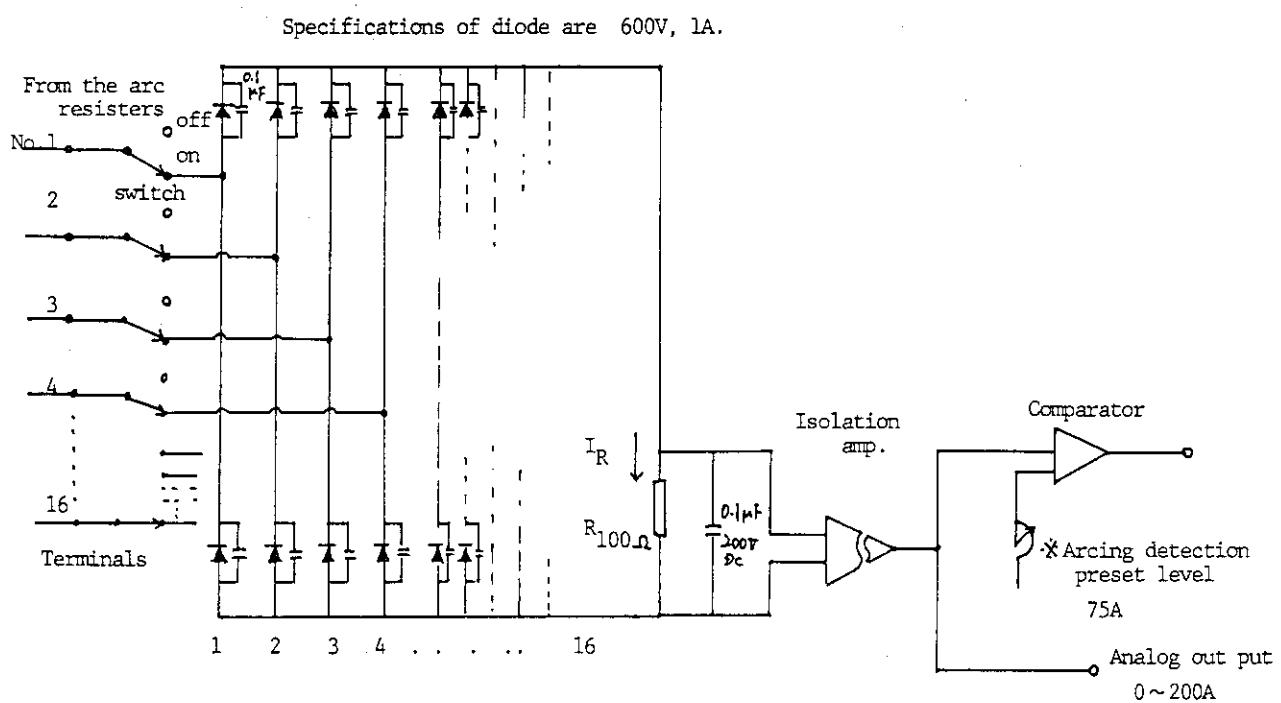
(b)

第4.3-4図 G T A R の波形



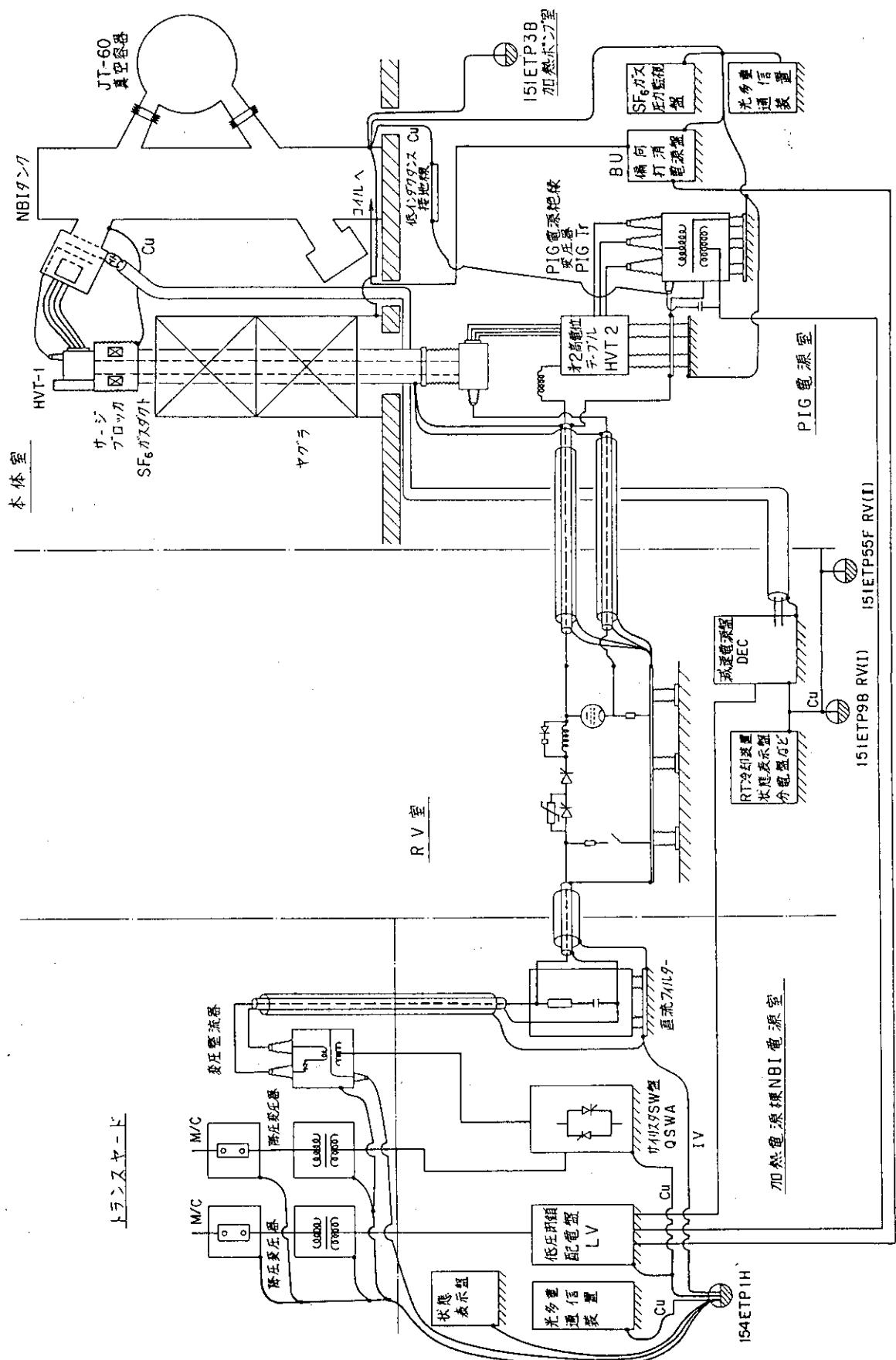
Filaments and arc power supplies

第4.3-5(a)図 フィラメント、アーク電源



Arcing detector

第4.3-5(b)図 アーク検出回路



第4.3-7 図 接地系

4.4 冷媒循環系

4.4.1 概要

冷媒循環系はビームライン内に設置されている 14 基のクライオポンプを作動させるために液体ヘリウムと液体窒素を供給するためのもので、第 4.4-1 図のように主に水素を排氣するためのクライオパネルを 3.7 K 以下の液体ヘリウムで冷却するための液体ヘリウムループと水素ガスの予冷とクライオパネルへの常温からの放射を軽減するためシェブロンとシールド板を冷却するための液体窒素ループから構成される。

液体ヘリウムループはクライオパネルとヘリウム冷凍機とをトランスファーラインで接続し、液体ヘリウムとガスヘリウムを循環させる完全なクローズドサイクルであり、減圧ポンプを用いてクライオパネル内を大気圧以下に減圧することによってクライオパネルの温度を 3.7 K 以下に冷却する。このヘリウムループは完全なクローズドサイクルであり、システムを簡素化するために、基本的にはヘリウムガスの精製はヘリウム冷凍機運転中にコールドボックス内の液体窒素温度に冷却された活性炭を使用した内部吸着器のみで行い、特別のヘリウム精製器をもたない設計である。標準的な運転サイクルは 2 週間の連続運転の後 1 週間の停止があり、この 1 週間の停止期間中に内部吸着器の再生を行い、クローズされたヘリウムループ内ヘリウムガス中の不純物の量を常に 10 ppm 以下に保たれる。

液体窒素ループは液体窒素タンクからトランスファーラインを通して、クライオポンプのシェブロンとシールド板及びヘリウム冷凍機に液体窒素を圧送により供給するもので、大気開放の開ループ方式である。第 4.4-2 図に示すように液体ヘリウムのトランスファーラインと並行する部分ではヘリウム配管と同一のトランスファーライン内を流れ、ヘリウム配管のシールド板も冷却しながら、クライオポンプの液体窒素気液分離器に液面制御によって液体窒素が供給される。これによって、トランスファーライン内のシールド板に一定の液体窒素が安定に供給され、ヘリウムラインの熱負荷の変動が抑えられることにより、液体ヘリウムが安定にクライオポンプに供給される。クライオポンプで蒸発した窒素ガスは加温器で常温にされ大気へ放出される。

クライオポンプを含めたヘリウム冷凍機は制御用計算機により完全な自動運転が行われる。14 基のクライオポンプは各々独立に、停止、予冷、定常、再生の 4 つの運転モードを選択することができる。

4.4.2 ヘリウム冷凍機の冷凍能力

ヘリウム冷凍機の冷凍能力は 14 基のクライオポンプ及びコールドボックスとクライオポンプを接続するトランスファーラインの定常時における推定侵入熱の合計より決定した。クライオポンプの推定熱負荷は NBI 原型ユニットクライオポンプの測定値 52 W¹⁾ を基に 14 基で 730 W とした。またヘリウムのトランスファーラインは全長で約 450 m であり、その推定熱負荷はバイオネット継手、弁等も含めて 810 W である。合計推定熱負荷は 1540 W であるが、特に 14 基のクライオポンプの並列運転時における予冷運転を容易にすることと予冷に要する運転時間を短縮するために、ヘリウム冷凍機の冷凍能力を 3.7 K、2400 W とした。第 4.4-3 図に 3.7 K、2400 W のヘリウム冷凍機の T-S 線図を示す。また、この冷凍能力によるクライオポンプ 14 基定常までの推定運転時間は 25.5 時間である。

4.4.3 計算機による自動制御運転

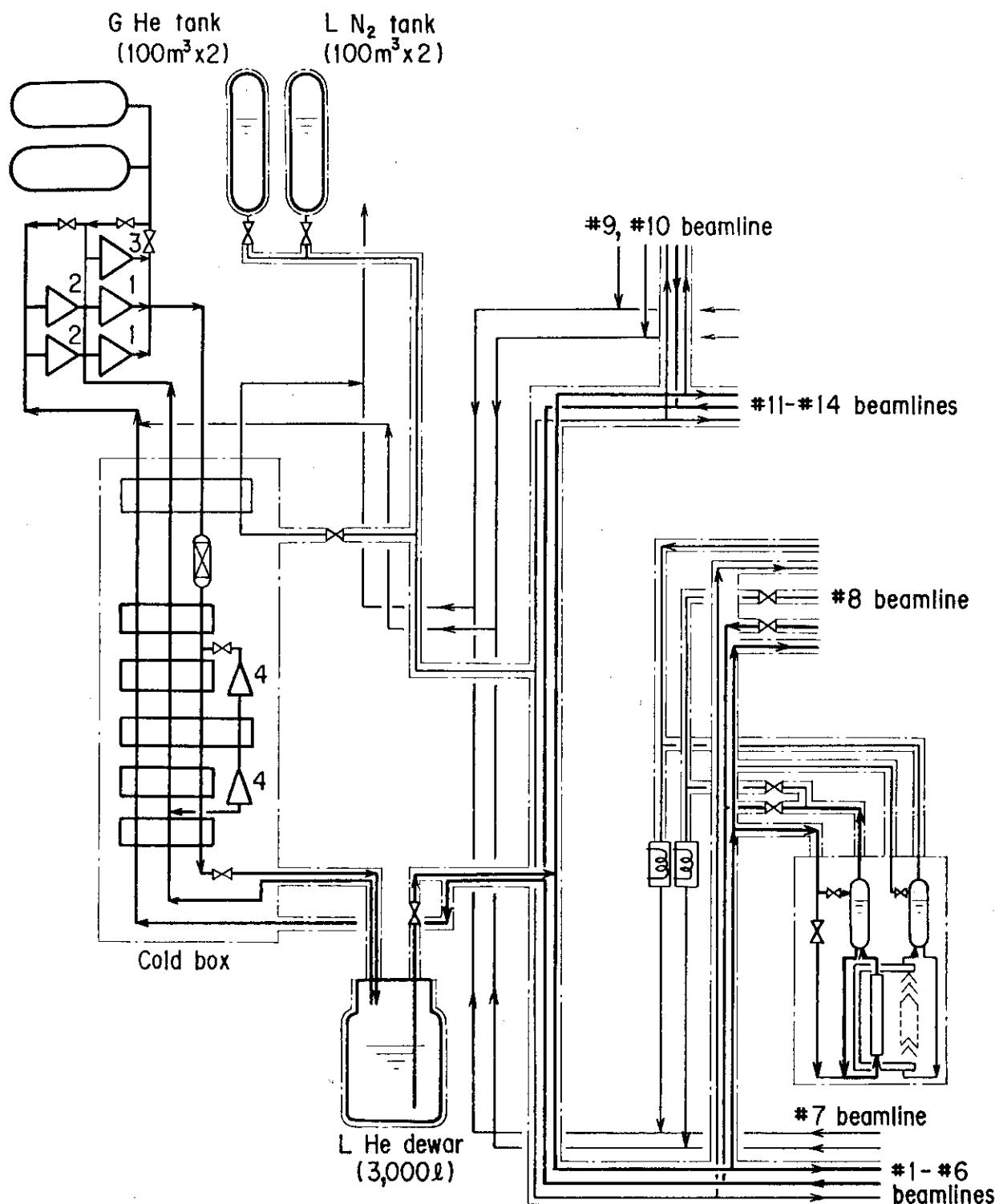
14基のクライオポンプとヘリウム冷凍機の運転は昼夜連続で行われるために、運転員の負担を大幅に軽減し、再現性のある安定な運転を行うために計装用計算機（日立製作所製 EX シリーズ）により自動制御運転が行われる。本自動制御運転は、約 500 m の長尺トランスマーケットを介して多岐に分岐された 14 基のクライオポンプの並列運転を安定に行うために以下の特徴を有している。

- i) クライオポンプの予冷、液溜及び定常時における安定な冷却制御
- ii) 14 基のクライオポンプ間の予冷過程における不均衡冷却抑制制御
- iii) クライオポンプの液溜時、異常時、再生時等によるクライオポンプからの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御

ヘリウム冷凍機の自動制御運転は独立した 1 台のマルチループコントローラ（MLC）により行い、起動時における弁の開閉確認、タービン起動、予冷、定常、停止、停止後の弁の開閉確認まで、基本的には第 4.4-4 図に示すようにステップ 1 よりステップ 46 までのシーケンス制御により行う。また、クライオポンプの負荷変動に対応したヘリウム冷凍機の安定化制御を行うためのタービン入口弁、JT 弁、液体ヘリウム供給用デュワー元弁等の制御に重要な役割を果たす弁はシーケンス制御内にループ制御を組み込んだシーケンスとループの複合制御にて制御される。クライオポンプの予冷は各ユニット毎に、入口温度をモニターし、ほぼ一定のヘリウムガスが各クライオポンプに流れるようにクライオポンプの予冷弁が制御される。さらに、各ユニット毎にクライオパネルの温度をモニターし、14 基のクライオパネルの平均温度との偏差により、各クライオポンプの予冷弁の弁開度の修正を行うことによって、14 基のクライオポンプ間の冷却過程における不均衡冷却抑制制御が行われる。²⁾

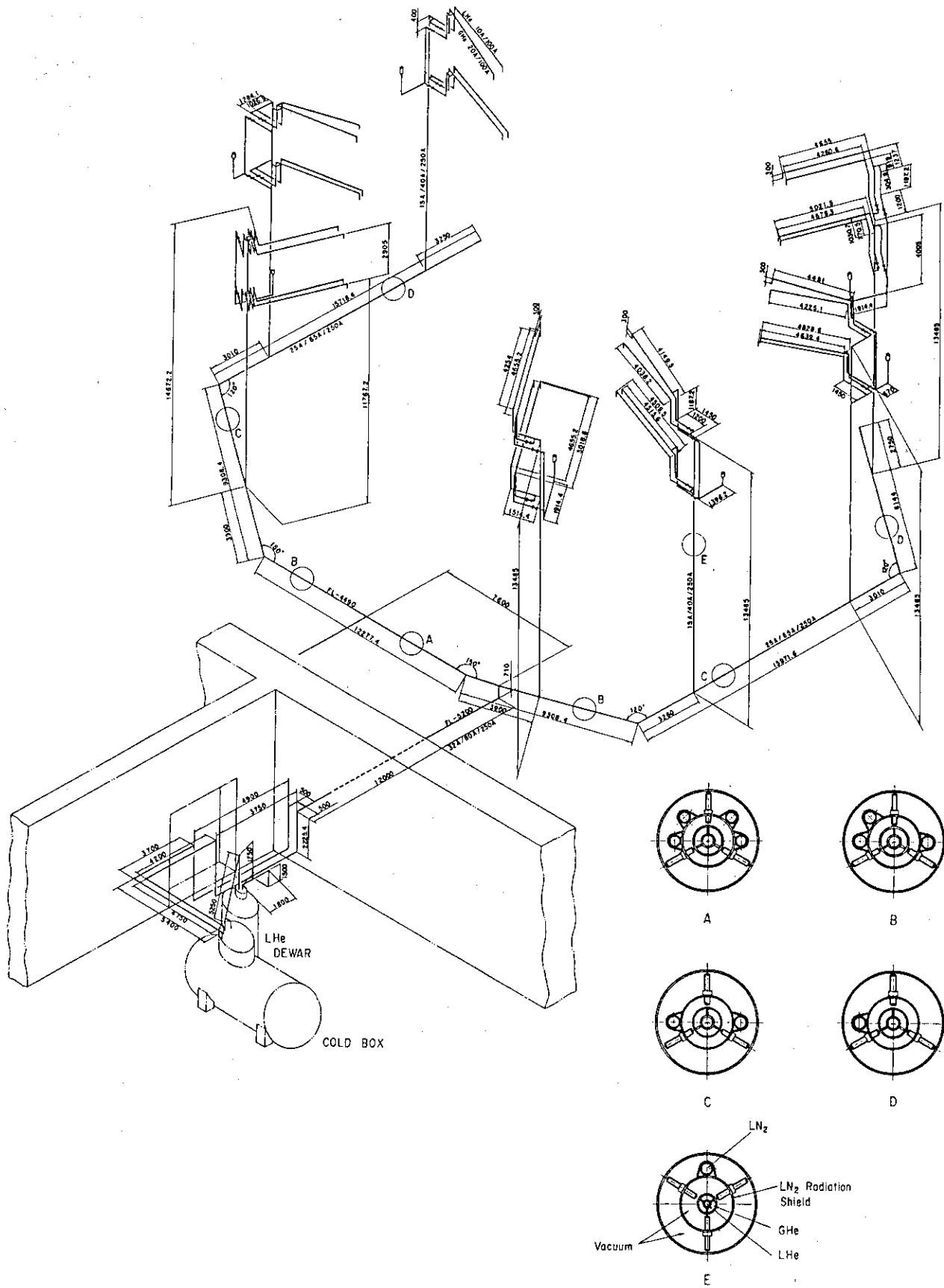
参考文献

- 1) T. SHIBATA et. al ICEC 9 (1982) 612.
- 2) 柴沼 清他、投稿予定

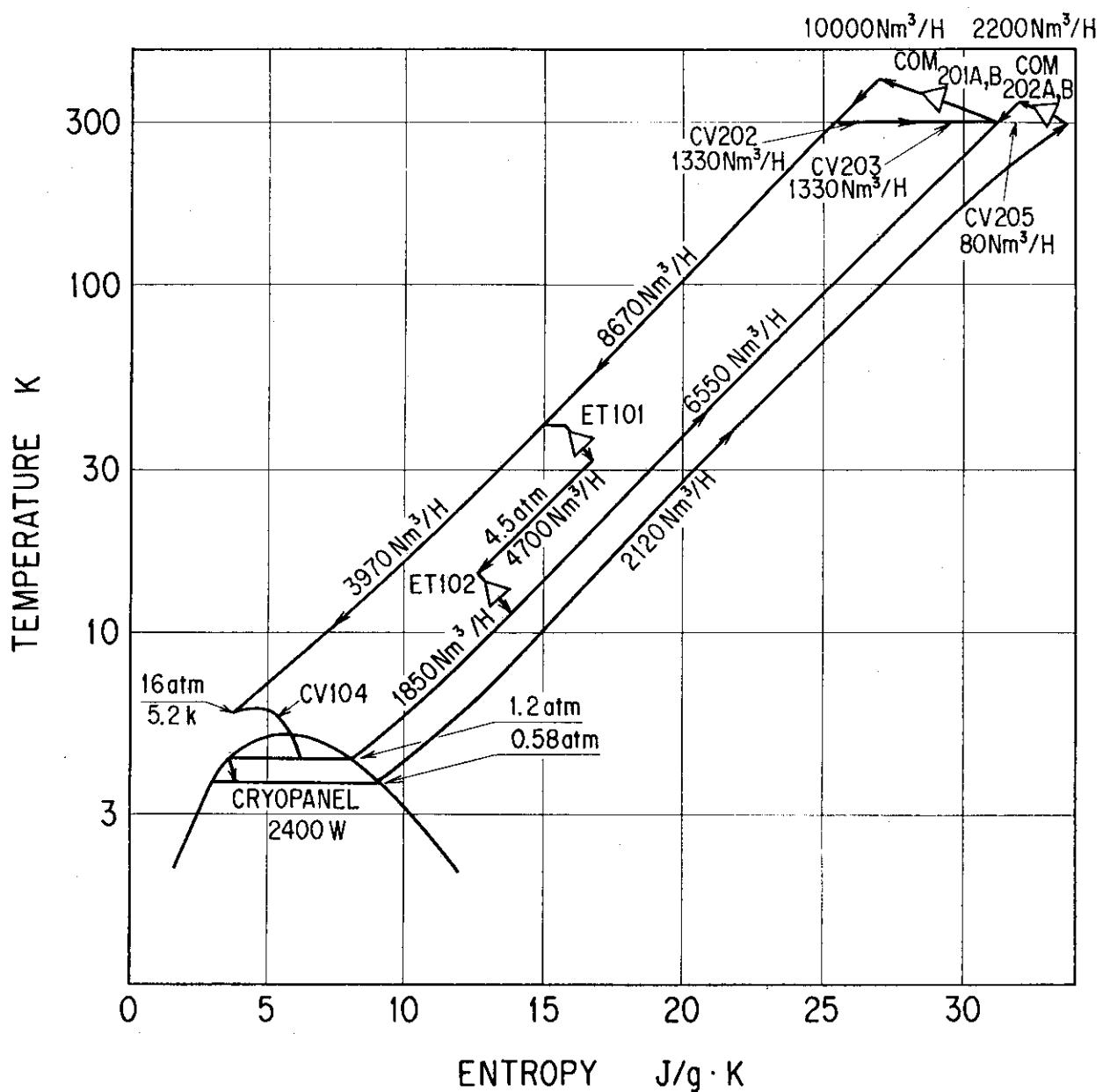


1. Main compressor (5,000Nm³/h x 2)
2. Pumping compressor (1,100Nm³/h x 2)
- 3 Recovery compressor (100Nm³/h)
- 4 Exp. turbine

第 4.4 - 1 図 冷媒循環系概略フロー図



第4.4-2図 液体窒素シールド付液体ヘリウム用トランスマーカーライン



第4.4-3図 3.7 K, 2400 W ヘリウム冷凍機のT-S線図

第4.4-4 [図] ヘリウム冷凍機の自動制御運転用 シーケンスマップ

4.5 補助真空排気設備系

NBI 加熱装置が正常に動作するためには真空容器内（ビームライン）の真空度が常に 10^{-2} pa 以内にあることが必要であり、ビーム発生時に外部から導入する水素ガス（動作ガス $\sim 5 \text{ pa m}^3/\text{s}$ ）の内余分なものを素早く排気しなければならない。この目的のために使用されるのが $1430 \text{ m}^3/\text{s}$ の排気速度を有するクライオポンプである。しかし、クライオポンプにはその動作領域に制限があり大気からの排気はできない。また、その動作原理が霧囲気のガスを冷却されたパネル面に物理的に吸着されるものである事から、ある時期にパネル面の活性化（再生）をしてやる必要がある。

このために NBI 加熱装置では、クライオポンプの他にターボ分子ポンプを主体とした補助真空排気設備を設けている。即ち、補助真空排気設備はクライオポンプが設置されている真空容器内を大気圧からクライオポンプの作動領域（約 3×10^{-3} pa 以下）にまで排気する事、及び、クライオポンプの再生時にパネル面から放出される水素ガスを安全かつ円滑に排気する事を主目的として設けられた。また、NBI 加熱装置用の大型クライオポンプを動かすためには高圧ガス取締法に規制を受ける上に、動かす都度、多くの経費が必要となるため 1 ショット当りのビーム発生時間が 0.5 秒以下であるコンディショニング運転時には作業性、経済性の両面から補助排気設備だけの運転によっても安定な NBI 加熱装置の運転が可能な排気速度を持つことが補助排気系に對して要求される。

4.5.1 補助真空排気設備の構成、性能

第 4.5-1 図に補助真空排気系全体の系統図を示す。図に示されているように、被真空排気容器は 1 台当りの容積が 26.8 m^3 、内蔵物を含めた総表面積 $8 \times 10^6 \text{ cm}^2$ 、設計時目標最大アウトガス量 $1 \times 10^{-10} \text{ pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ である大型の真空容器 14 台である。各真空容器の排気口には 400 A の L 型バルブ (V 101) と 200 A の L 型バルブ (V 102) が取付けられており、これを介して補助真空排気設備と接続されている。 400 A L 型バルブのあるラインが主排気ラインであり、 5000 l/s 排気速度を有するターボ分子ポンプ (TMP) 含めだ主タンク排気系、それに C 型のマニフォールド 1 を通して TMP 背圧ポンプ系に接続される。また、 200 A L 型バルブのラインが粗引きラインであり C 型のマニフォールド 2 を通して粗引きポンプ系に接続される。ここで、各真空容器から配管された各々 14 本ある主タンク排気ライン、粗引き排気ラインは C 型のマニフォールドで各々一括された後、TMP 背圧ポンプ系、粗引きポンプ系に接続されている。なお、TMP 背圧ポンプ系は -10°C に冷却される冷凍トラップ (RE) 1 台、 $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ の排気速度をもつメカニカルブースタポンプ (MBP) 2 台、 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ のロータリーポンプ (RP) 2 台あり構成されている。また、粗引きポンプ系も同じ性能の冷凍トラップ 1 台、メカニカルブースタポンプ 1 台、ロータリーポンプ 2 台から構成されている。

冷凍トラップはロータリーポンプのオイルの上流側へ拡散するのを防止するために設けたものであり、 -10°C におけるオイルの蒸気圧は $6.65 \times 10^{-6} \text{ pa}$ である。

（性 能）

本補助真空排気設備に要求される主な性能としては次のようなものがある。

① 3時間以内に大気圧である14台の真空容器の粗引きが完了すること。但し、粗引き時間とは大気圧から2paになるまでの時間である。

② 真空容器と補助排気系との取合い点において、水素に対する排気速度が3500ℓ/s以上あること。

③ 以上の2点の主な排気性能に加えて、次の様な制御上の性能を有していること。

まず、手動運転、自動運転の両方の運転が可能であり、更に、遠隔運転も可能であること。また、14ユニットある真空容器の内選択された任意の台数の同時排気起動ができる。更に、選択された任意の複数ユニットを大きく2グループに分割し、第1グループの起動中においても次の第2グループの起動予約が行えて、第1グループの全ユニットがTMPによる定常運転になった時点で自動的に次の第2グループの排気が開始されること。

これらの要求を満たすため、真空度の異なるいくつかのユニットを同時に排気する場合の逆流(圧力の高い真空容器から圧力の低い真空容器にガスが流れこむこと)を考えて、圧力区分を大きく次の4つに分けた。

① 大気圧であるもの ② 大気圧から100paまで

③ 100paから2paまで ④ 2pa以下のもの

この区分に従って幾つかのユニットを同時に起動した場合の運転例を第4.5-2図に示す。まず、第1グループの#1、#14の大気圧であるものの粗引き①Aと#11の2pa以下のもののTMP排気が開始される①B。但し、TMP排気されるまでにはTMPが定常の回転数になるまでの時間がかかる。つづいて、大気圧であったものが100pa以下になった時点②Aで100pa～2paの範囲にあるユニット(#5)の粗引きが開始される②B。そして第1グループの大気圧～100paの間にあるユニット(#4)を除く全ユニットが2pa以下になった時点③Aで、粗引排気系から主タンク排気系に切り換わる(V102が閉じてV101が開く)。また同時に、第2グループの排気が開始され、大気圧であるもの(#7)および2pa以下のもの(#6)の粗引きと主タンク排気系によるTMP排気が開始され③B、以下第1グループの時と同じ経過を2排気運転がつづけられる。ここで、第1グループの排気が定常に達して、第2グループの排気が行われている間に次のユニットを選択して新たな第2グループとして予約起動をすることも可能である。即ち、旧第2グループが起動する前に他のユニットの予約起動をかけると旧第2グループと同じタイミングで起動する。ここで、大気圧から100paの間にあるものは逆流するガスの量が多いことから制御上無視され自動での排気運転はできない。よって、この範囲のものは手動運転によって注意深く運転するか、あらかじめ圧力を整えておく必要がある。ただし、本NBI加熱装置においてはこの圧力範囲になることはほとんどない。また、こうした制御にしたのは14ユニットあるクライオポンプを同時に再生しても個々のクライオポンプによって再生に要する時間が異なるため、全ユニットを同時に真空引きしようとすると多大の時間がかかる。よって、再生が完了したユニットから任意のグループごとにまとめて随時真空引きを行うと、作業性の向上が計られるためである。

4.5.2 動作結果

4.5.2.1 粗引排気速度、排気時間測定

14台の真空容器を同時に大気圧から粗引きした時の真空容器1台当りの排気口における排気速度の測定結果を第4.5-3図に示す。同図はメカニカルブースタポンプの吸入口における設計排気速度特性曲線(A)をもとにその1/14の値を用いて、真空容器までの配管(200A-22m, 300A-73m)によるコンダクタンスの影響を考慮した計算結果(B)上にマクレオード真空計を用いて測定した実測値をプロットしたものであり設計値とほぼ良い一致を示している。

配管のコンダクタンスの計算はKnudsenが中間領域に対して提示した長い円形導管のコンダクタンスを求める次の実験式を用いた。¹⁾

$$C = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{D^4}{\eta L} \cdot \bar{P} + \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \cdot \frac{D^3}{L} \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{M}{RT}} \cdot \frac{PD}{\eta}}{1 + 1.24\sqrt{\frac{M}{RT}} \cdot \frac{PD}{\eta}}$$

20°Cの空気については

$$C = 1350 \frac{D^4}{L} \bar{P} + 121 \frac{D^3}{L} \cdot \frac{1 + 189 \bar{P} D}{1 + 235 \bar{P} D} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

ここで、 D : 配管の直径 (m)

L : 配管の長さ (m)

\bar{P} : 平均圧力 (pa)

また、実測した排気速度Sは次によって求めた。

$$S = \frac{Q}{K \cdot P}$$

ここで、 Q : C型ノズルによる空気の供給量 (Torr, l/s)

P : マクレオード真空計の読み (Torr)

K : マクレオード真空計の較正係数

同図より明らかなようにこの配管系のコンダクタンスの影響が生じるのは 5×10^{-1} Torrあたりからである。また、図の排気速度曲線から各圧力値における排気速度及び排気時間は次のようになる。

圧力範囲	平均排気速度	排気時間
760～150 Torr	84 m ³ /h	0.54 h
150～50	110	0.28
50～20	135	0.19
20～1	145	0.58
1～0.3	145	0.23
0.3～0.1	130	0.24
0.1～0.04	100	0.26
0.04～0.015 (2 Pa)	65	0.42
		合計 2.74 時間

計算式

$$t = 2.3 \frac{V}{S} \cdot \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

t : 排気時間 (h)

V : 配管も含めた容積 27.9 m³S : 排気速度 (m³/h)P₁ : 初めの圧力 (Torr)P₂ : 終りの圧力 (Torr)

以上、実際に 14 台の真空容器を大気圧から 2 Pa になるまでの排気時間を測定した結果を第 4.5-4 図に示す。この結果 2.53 時間とほぼ計算通りの排気時間 (2.74 時間) を測定した。

4.5.2.2 TMP による真空容器の排気口における排気速度の測定

NBI 加熱装置の各真空容器には 400 A の L 型バルブを介して、水素に対する実排気速度が 6000 l/s であるターボ分子ポンプが取付けられている。このターボ分子ポンプによる各真空容器の排気口における排気速度はターボ分子ポンプと排気口までの配管形状、即ち、L 型バルブの形状によって決定され、この間のコンダクタンスを計算することによって求められる。よって、第 4.5-5 図に従ってコンダクタンスを次の通り見積ったが、計算は空気に対して行い最終結果を水素に換算した。

C₁ : A 部の 400 φ × 400 L 円筒管のコンダクタンス

$$C_1 = 12.1 d^3 / \ell = 1.936 \times 10^4 \text{ l/s}$$

C₂ : B 部の弁体がない時の胴部直角曲線としてのコンダクタンス

$$C_2 = 12.1 d^3 / (\ell + 4 / 3.0) = 2.43 \times 10^4 \text{ l/s}$$

$$\ell = (65 / 2 - 3.5) + (24.5 - 3.5) = 50$$

$$D = 65$$

C₃ : ① → ② への膨脹コンダクタンス

$$C_3 = 11.6 A_1 \times A_2 / (A_1 - A_2) = 2.67 \times 10^4 \text{ l/s}$$

$$A_1 = 65 \times (49 - 6.5) = 2762$$

$$A_2 = \pi (40/2)^2 = 1256$$

C₄ : 弁体による縮流コンダクタンス

$$C_4 = 11.6 A_1 \cdot A_2 / (A_1 - A_2) = 486 \times 10^4 \text{ l/s}$$

$$A_1 = \pi (65/2)^2 = 3316$$

$$A_2 = \pi/4 \times (65^2 - 43.2^2) = 1851$$

C₅ : 弁体による同心円筒の中間コンダクタンス

$$C_5 = 21.1 \times K_a (d_1 - d_2)^2 \times (d_1 + d_2) / \ell = 5.26 \times 10^5 \text{ l/s}$$

$$K_a = 1.31 \quad d_1 = 65 \quad d_2 = 43.2 \quad \ell = 2.7$$

(B) → (C)

C₆ : 弁シート部の縮流によるコンダクタンス

$$C_6 = 9.1 \times d_1^2 \times d_2^2 / (d_1^2 - d_2^2) = 2.25 \times 10^4 \text{ l/s}$$

$$d_1 = 65 \quad d_2 = 39.5$$

(C) → (D)

C₇ : 弁シート部の膨脹によるコンダクタンス

$$C_7 = 9.1 \times d_1^2 \times d_2^2 / (d_1^2 - d_2^2) = 6.18 \times 10^4 \text{ l/s}$$

$$d_1 = 45 \quad d_2 = 39.5$$

C 部

C₈ : 弁シート部のコンダクタンス

$$C_8 = 12.1 \cdot d^3 / \ell = 2.13 \times 10^5 \text{ l/s}$$

$$d = 39.5 \quad \ell = 3.5$$

C₉ : (D)部のコンダクタンス

$$C_9 = 12.1 d^3 / \ell = 7.1 \times 10^4 \text{ l/s}$$

$$d = 45 \quad \ell = 15.5$$

C₁₀ : TMP 用吸入口金網のコンダクタンス

$$C_{10} = 1.15 \times 10^4 \text{ l/s}$$

C_{air} : 全コンダクタンス

$$C_{air} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6} + \frac{1}{C_7} + \frac{1}{C_8} + \frac{1}{C_9} + \frac{1}{C_{10}}$$

$$C_{air} = 3134 \text{ l/s}$$

以上、空気に対する全コンダクタンスは C_{air} = 3134 l/s であり、水素に換算したコンダクタンスは 3.8 倍 C_{H₂} = 1.19 × 10⁴ l/s と見積られる。よって、排気系内におけるアウトガス量は無視できるものとして、ターボ分子ポンプによる真空容器の排気口での排気速度は

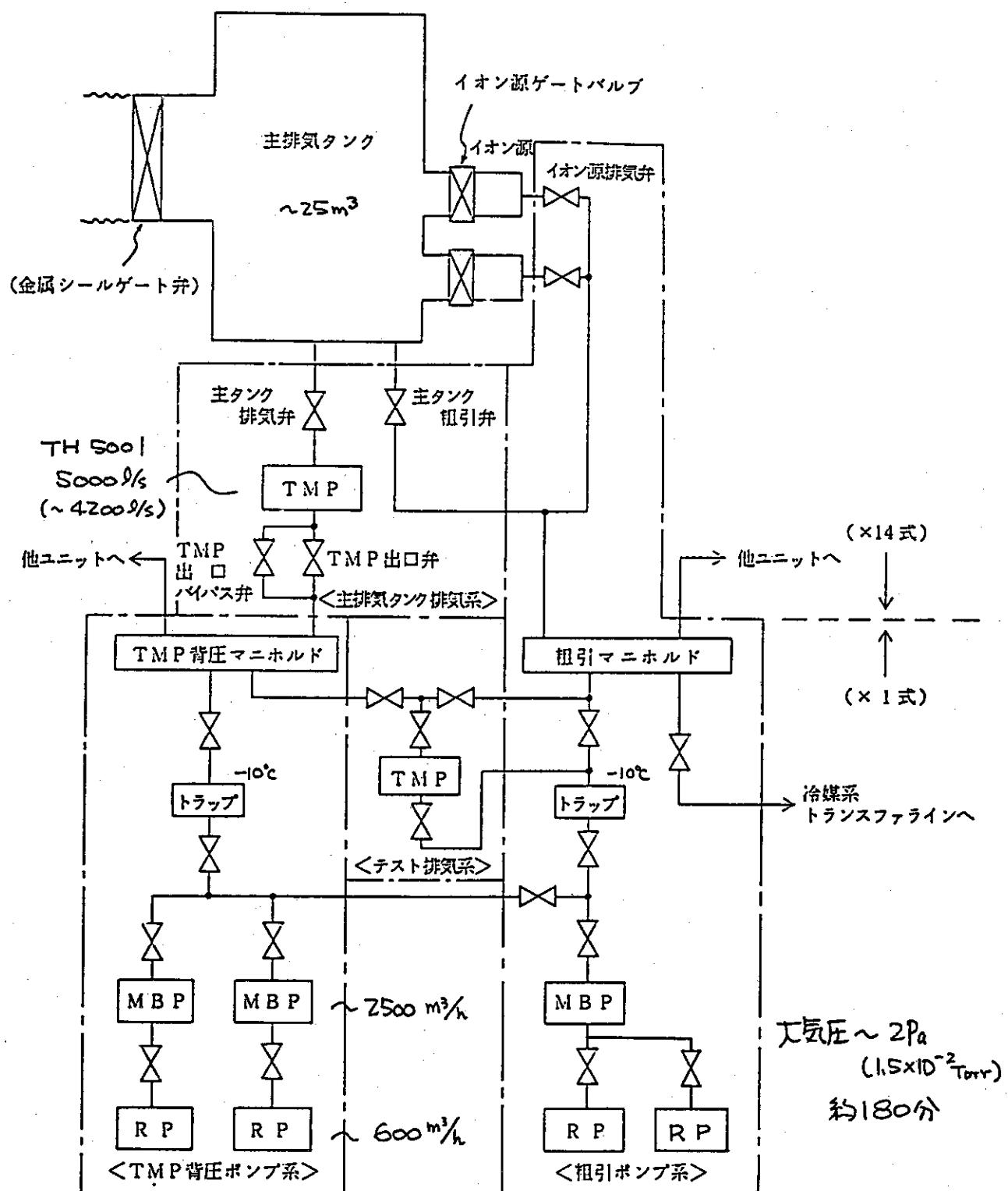
$$\frac{6000 \times 11900}{6000 + 11900} = 3489 \text{ l/s}$$

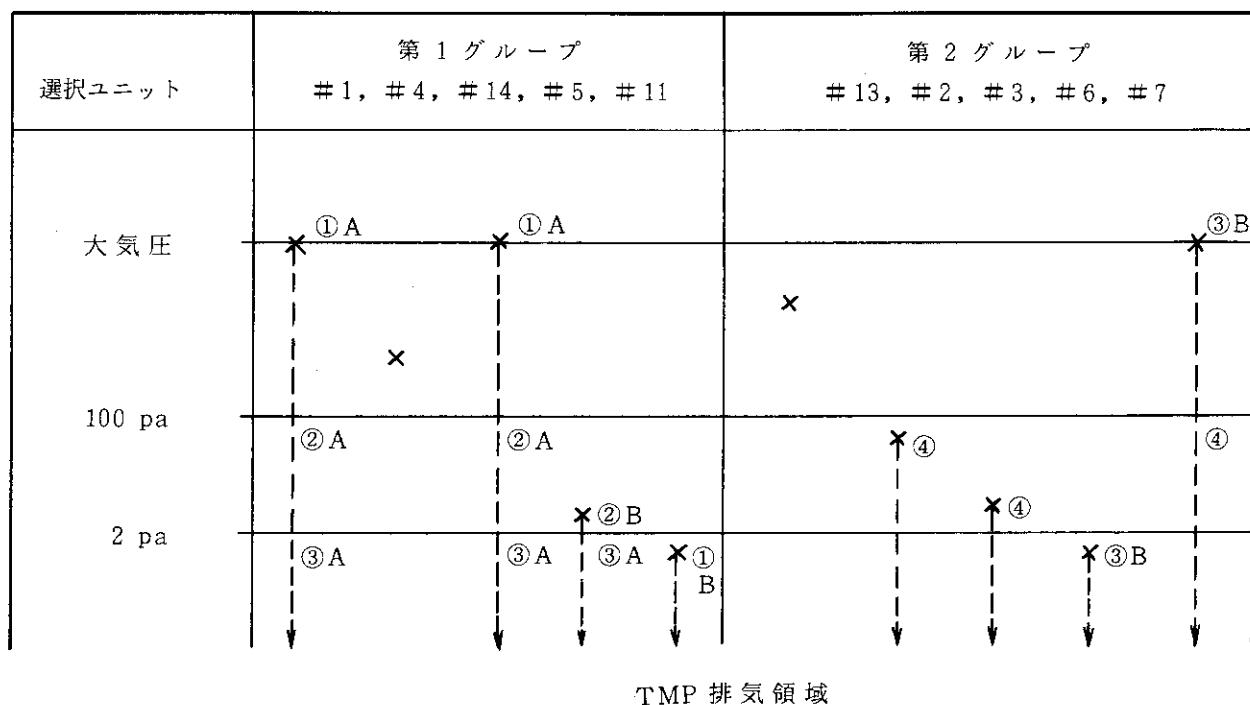
と計算され、次に示す実測値4200 ℓ/s とほぼ良い一致を得ている。

真空容器の排気口における排気速度の測定は第4.5-6図に示す測定系でビューレット法²⁾を用いて測定した。その測定結果を第4.5-7図に示した。図より明らかなように平均排気速度4200 ℓ/s を得ている。

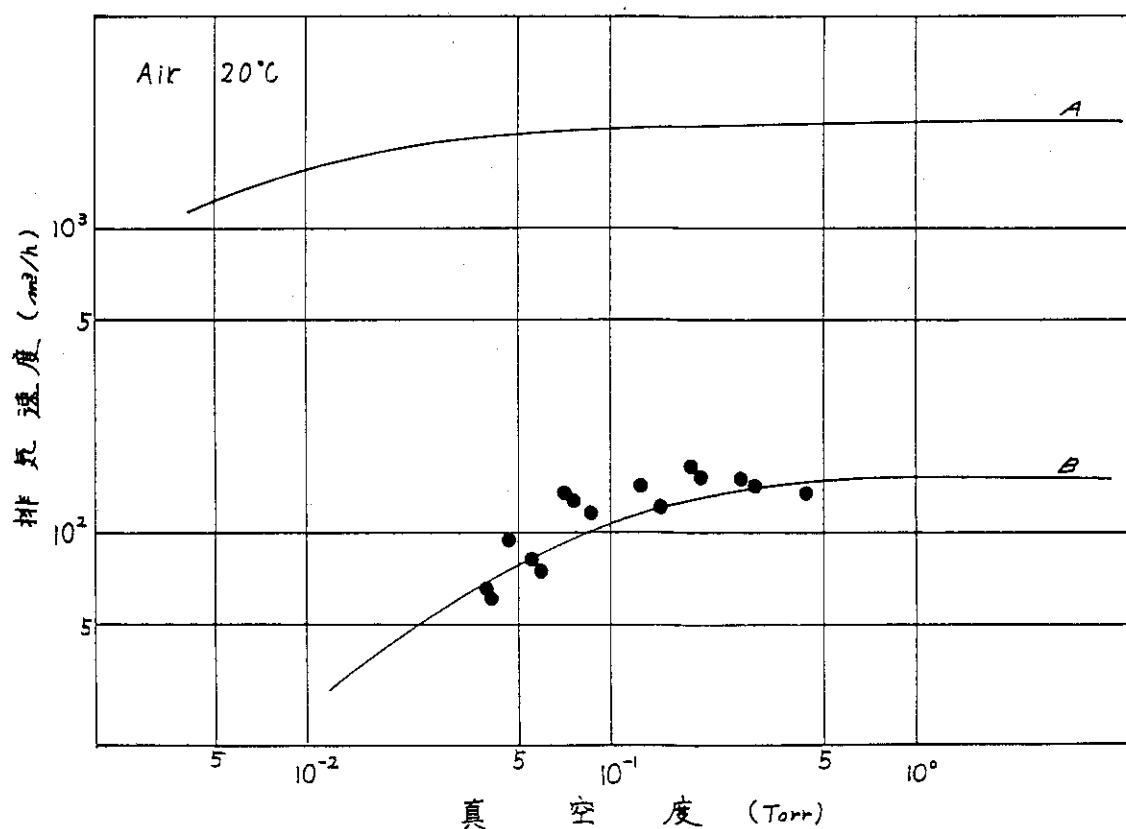
参考文献

- 1) 林他：「実験物理学講座4, 真空技術」

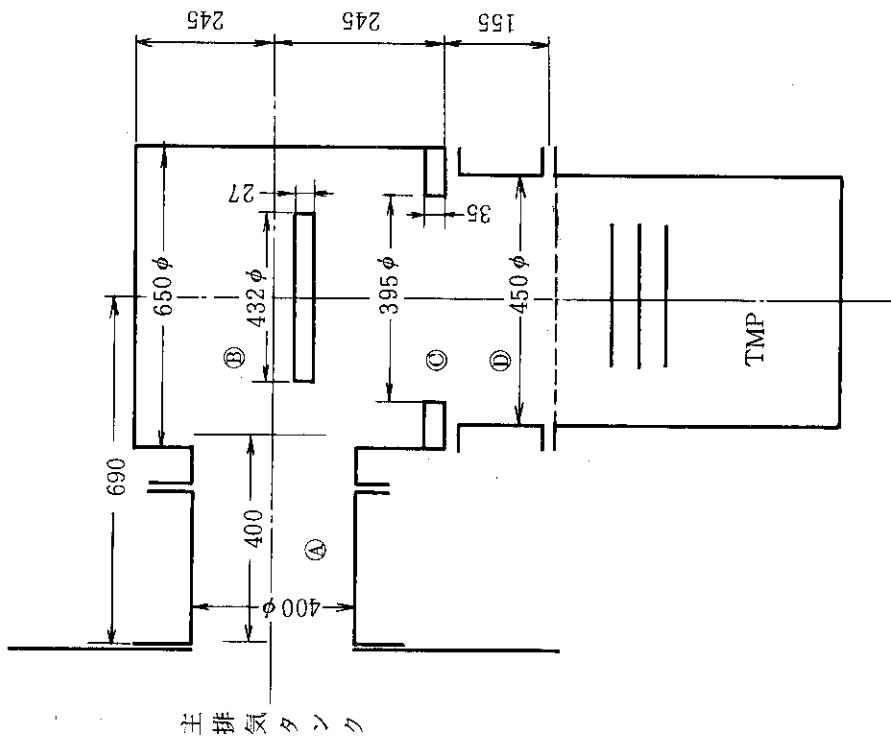




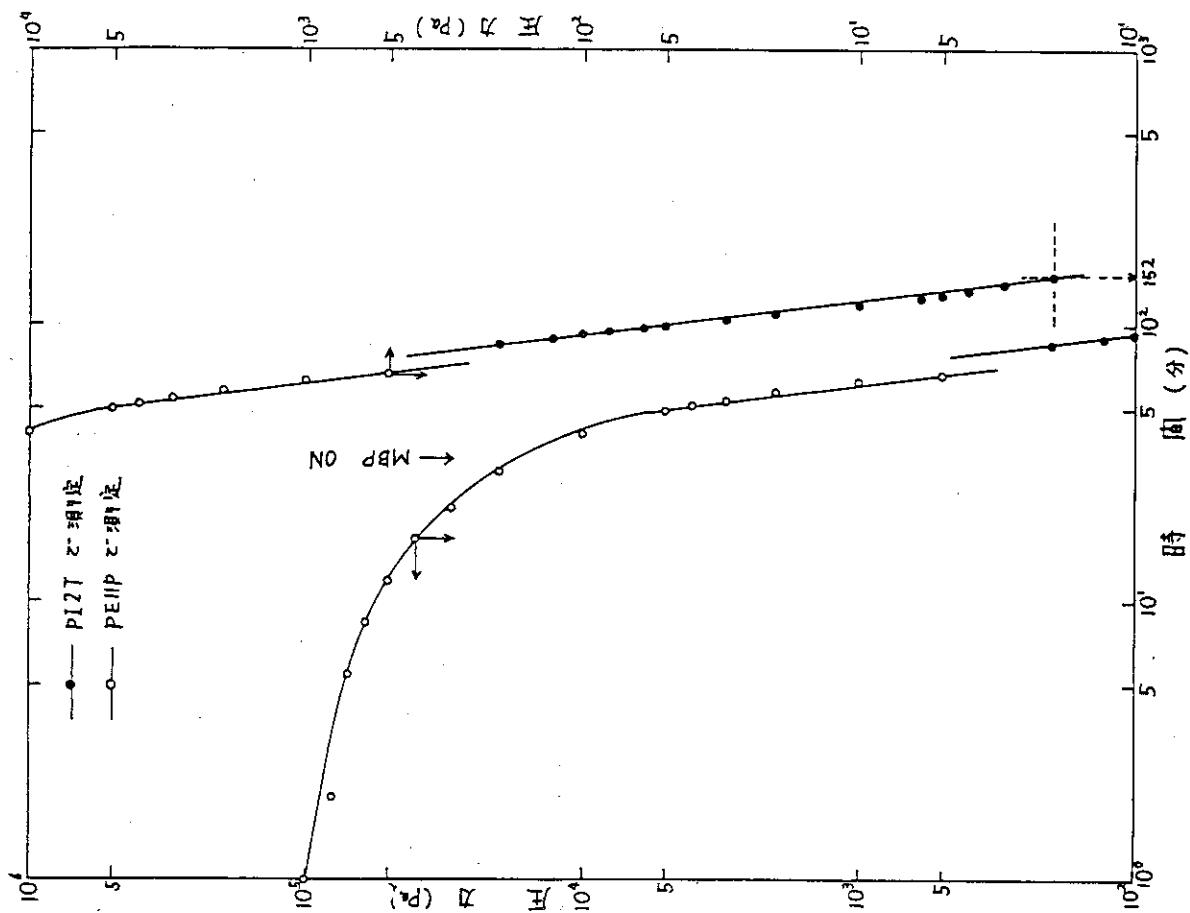
第4.5-2図 真空系起動例



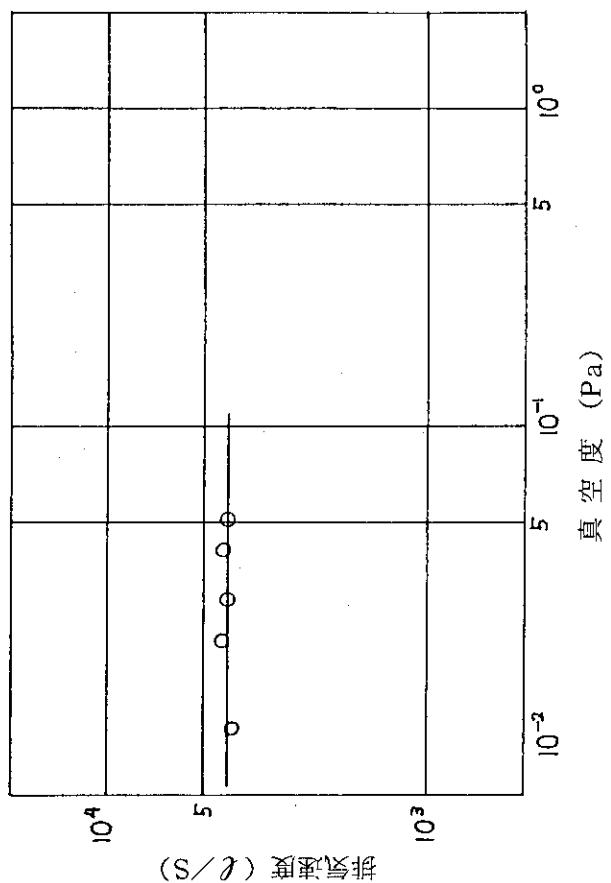
第4.5-3図 粗引系排気速度



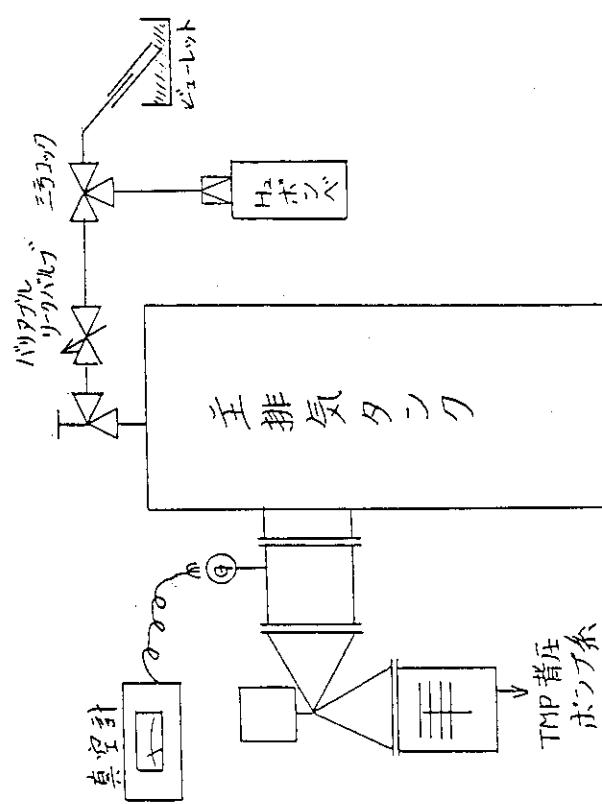
第4.5-5図 400 AL型バルブ系



第4.5-4図 粗引系によるビームラインの排気時間



第 4.5-7 図 T MP 系排気速度



計算式

$$S = \frac{Q}{P} (\ell/s)$$

但し # 2 については到達圧力が悪い為

$$S = \frac{Q}{(P - P_r)} (\ell/s)$$

S : 排気速度
P : 圧力 (水素換算値)
Pr : 到達圧力

$$P = \frac{k P''}{R_A} \quad (Pa)$$

Q : 流量
K : 準正係数 (別紙参照)
R_A : H₂ と N₂ の相対感度 0.44

$$Q = \frac{V P_0}{t} \quad (Pa \ell/s)$$

V : ビューレット内変化量
P₀ : 大気圧

第 4.5-6 図 試験系統図

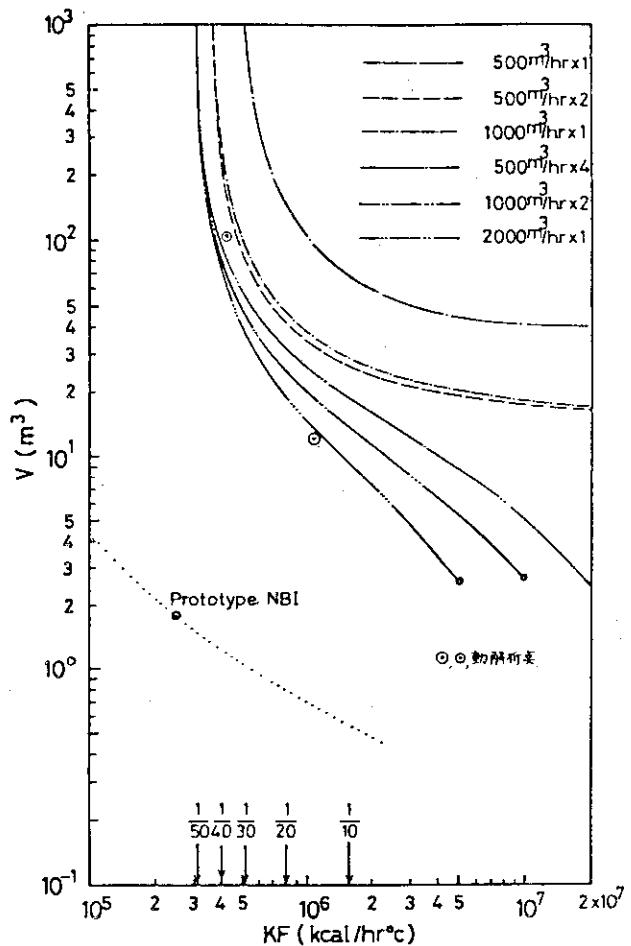
4.6 1次冷却系

1次冷却系は、パルス状熱負荷を系外に除去するものである。パルス状熱負荷を除去する方法としては、i) パルス状熱負荷を定常熱負荷とみなして取扱う方法、ii) パルス状熱負荷を時間平均して、平均的な定常熱負荷として取扱う方法等があるが、本冷却系に適用してみると、i) の方法では、パルス状熱負荷が数 10 MW と非常に大きいため、1次冷却系は非現実的な設備となる。また ii) の方法では、パルス状熱負荷が冷却水に入った時の冷却水温度変化が大きく、適当ではない。そこで本冷却系の設計にあたっては、パルス状熱負荷の時間変化を考慮して、次のパルス状熱負荷が入るまでに全入熱を除去し、規定温度以下で1次冷却系が定常状態になるように設計した。ここで変数となるものは、熱交換器容量(熱交換比)とリザーバータンク容量であることに着目して新たに系全体が考慮できる流体の動特性計算手法を確立し、これにより、熱交換器容量とリザーバータンク容量との相関々係を明確にし、システムとして、合理的なものとした。第 4.6-1 図に JT-60 NBI 1 次冷却系の場合の熱交換器容量とリザーバータンクとの相関々係を示す。なお、本図は単に数値的な関係を示したものであり、機器の規模を決定するためには、さらに、熱交換器単位容量当たりの価格とリザーバータンク単位容量当たりの価格を乗じて決定された。本冷却系の場合、同図中◎印で示す熱交換器容量、リザーバータンク容量の時、最も合理的なシステムとなり、上記の i) に述べた方法で冷却系を設計した場合の約 1/10 の規模まで小型化することが可能となった。これら詳細は文献 1) に示されており、ここでは省略する。次に、本冷却系では、ポンプの吐出量をできる限り少なくして、システムを小さくする配慮がなされている。つまり、受熱機器のうち、ビームダンプのように圧力損失は小さいが、多流量を必要とする機器を冷却した後の冷却水を利用して、他の受熱機器を冷却するもので、このようにすることにより、ポンプ吐出量は上記のような配慮を実施しない場合に比べ、約 1/2 となっている。本フロー図を第 4.6-2 図に示す。また、全熱量を少流量の冷却水で処理するので、ビーム入射実験時の水温上昇が比較的高く、2次冷却水との温度差が大きくとれることにより、熱交換器の熱交換効率が高くとれ、結果として、システムを小型化することに役立っている。

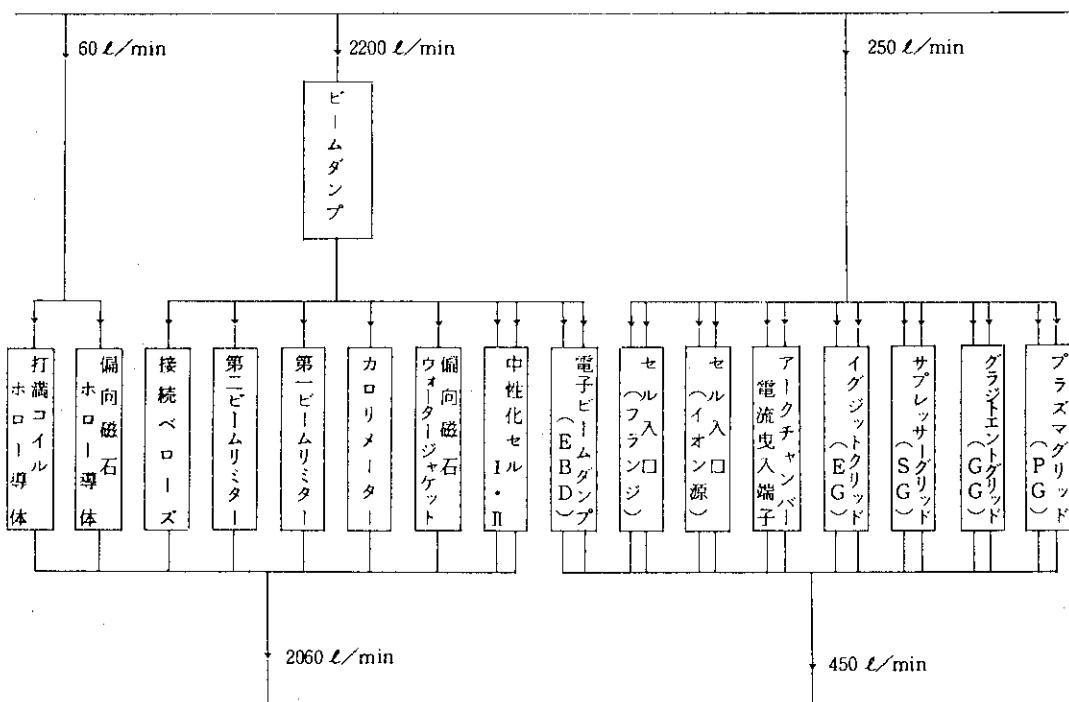
本冷却系のもう一つの特徴として凍結防止運転モードが上げられる。本モードは冬期及び、クライオ凍結防止運転と呼ばれるもので、凍結防止ポンプにより、系全体又は特定機器に少量の冷却水を流し、冷却水が凍結することを防ぐものである。これは、水温が 0 °C となっても冷却水に流れがあれば、流路を閉塞することがないという考え方にもとづくもので、本運転モードを導入することにより、定常運転時の約 1/5 の冷却水が各必要機器に供給されるので、消費電力及び各受熱機器接液面のエロージョンを軽減することが可能となった。

参考文献

- 1) 荒木他 ; JAERI-M 9198 (1980)



第4.6-1図 バッファータンク有効容積-熱交換器交換熱量相關関係図



第4.6-2図 NBI 1ユニットの流路系統図

図中の流量については、NBIビームイン系統流量

$$G_0 = 2510 \text{ m}^3/\text{hr}$$

4.7 制御系

JT-60 NBI の制御系についての基本的設計方針は参考文献の 1), 2), 3) に述べられておりである。ここでは現状システムについての設計根拠及び特徴的機能などについて、特に計算機システムを中心に述べる。

4.7.1 制御系の全体構成及び基本的機能

制御系の全体構成図を第 4.7.1 図に、機能概要を第 4.7.1 表にそれぞれ示す。全体的な構成・機能に関する設計根拠は上述の文献に示されるとおりであるが、主な項目をあげると次のとおりである。

- ① NBI 制御系は JT-60 全系制御設備（全系）とはルーズカッピングとする。NBI 設備内の冷媒循環系設備の制御装置とも同様である。JT-60 全体の中における NBI, NBI の中における冷媒循環系のそれぞれの運転形態の特殊性、装置規模の大きさ等により、それぞれの守備範囲を分担させるのが合理的である。
- ② NBI を構成する 14 基の各ユニットは NBI 運転モードや CPU 運転／マニュアル運転の運転方式の選択をはじめとして、各ユニットそれぞれ独立の運転形態をとることができる。あるユニットのトラブルを他ユニットへ波及させないこと及びイオン源の状態その他のユニット間の個体差に対応できることなどが必要であるため。
- ③ NBI の運転制御は中央制御室からの集中遠隔制御方式であり、イオン源の運転は計算機システムを介する運転法（CPU 運転）と介さない運転法（マニュアル運転）のいずれも選択により NBI 操作デスク（CP1）より操作可能である。このため、第 4.7-1 表に示すように、計算機システム以外の制御盤と計算機システムの 2 つに分類した時、各種インターロックの管理等の基本的機能を前者が、データ処理やイオン源の自動運転などの応用的機能を後者がそれぞれ機能分担している。イオン源の運転法その他応用的機能に関する分野に開発的要素が数多くあり、計算機システムはこの分野に集中し、基本的機能に関する分野はこれまでのテストスタンド等での実績をベースに計算機システム以外のハードウェアを基本とした系とするのが合理的である。

計算機システムの詳細については第 4.7.2 項で述べ、以下に計算機システム以外の制御盤の構成・機能等について述べる。

(1) 制御盤の構成

第 4.7-1 図のように NBI 中央制御盤の主なものは CP1～5 の 5 種類である。これらの詳細を第 4.7-2 図に示す。同図のように、CP1 及び CP2 はシーケンスコントローラ（プログラマブルコントローラ）の系とタイミング制御系を中心構成され、CP3～5 はリレーにより構成されている。CP2 はイオン源運転時の各ユニット毎の各種インターロックやタイムシーケンスを統括管理するものである。

シーケンスコントローラの系は RMX と呼ばれる専用交信装置により、CP1 と 14 面の CP2 の間、さらに CP2 の 2 面と LP-T21・22（電源系設備交流側機器の制御・モニタ用の

現場盤；光多重通信装置と呼ぶ）の間の交信も行っている。このシーケンスコントローラの系を導入した理由は CP 1 のマニュアル運転機能において 1 ユニット分の操作器具を用いて各ユニット単独にも複数ユニット同時にイオン源の運転が可能でなければならないこと、CP 2 における電源系運転のための各種インタロックのロジック変更が初期の間は極めて高頻度が予想されること、中央制御室と現場間の信号伝送を標準方式で光伝送とできることなどである。プログラマブルコントローラの導入により、CP 1・2 の試験調整時のロジック変更の必要な場合^{注)}の対処を迅速に行うことができた。特に CP 2 においてはその機会も面数も多かったため、そのメリットは絶大なものであった。その反面、CP 1・CP 2 共その処理量が非常に多かったため、処理速度の遅さが問題となつた。特に CP 1 においてはそれが顕著であり、当初 CP 1 内の PLC は 1 台であったが、これを 2 台とすることにより処理速度の向上を図り、現状は許容範囲内としている。また、CP 2 においては保護インタロック項目を逐一検討し、高速保護動作の必要な項目はすべてタイミング制御系その他高速ルートを別途確保することにより対処している。

タイミング制御系は第 4.7-1 図、同 2 図の TDG、TSC を中心として構成される。TDG は 14 ユニット共通の信号や全系タイミング指令信号、各ユニット毎のスタート／ストップ指令などを主に扱い、TSC との間は光交信を行っている。TSC は各ユニット毎の各機器で必要とするタイミング指令をすべて扱っている。ビーム引出し中のビームライン機器等の保護動作はこれらのタイミング制御系が中心となっており、その動作の高速性、信頼性は特に重要視される。タイミング制御系は多数情報を入力し、それを論理演算し、各種タイミング指令を適確に ON／OFF する一連の動作を高速かつ確実に行う必要がある。このため、TDG、TSC 共マイクロプロセッサー（Z-80）によるソフトロジックを中心に、部分的に特に高速処理を要する所をハードロジックとした、本システム専用の装置を採用している。これらのソフトロジックの変更はメモリ（ROM）の IC を交換することにより行う方式であるため、部分的にロジック変更が必要な場合の対応は簡単ではない。

CP 3～5 はリレーを用いた制御盤である。これは CP 1・2 に比べると複雑なインタロックも特に高速動作を要する制御対象もないことなどから、リレーを用いている。なお、これら制御盤と各現場間の信号伝送は、これらの制御対象機器がノイズ発生源より遠いことからハーディウェア方式を採用している。

(2) NBI 運転モード

NBI 運転モードは各ユニット毎に、半停止、クライオ再生、準備運転、コンディション（INJ）の計 6 種が定義されている。これらのインタロックは CP 2 のプログラマブルコントローラによりロジックが組まれている。これら各モードへの移行のためには、該当ユニットの運転状態や外部からの許可信号等が移行可能な条件をすべて満たしている必要があります。一方、運転モード信号により NBI 内各設備の操作に一定の制約を設けている。このことにより、NBI 運転モードは NBI の全体としての運転の協調をとると同時に、各種インタロック信号

注） プログラマブルコントローラは RAM／ROM 切換式であり、試験調整時は RAM を、現在は ROM を使用している。

の有効／無効のロジックに使用され、無用な運転禁止状態を作らない役目も果たしている。

(3) タイムシーケンス

CND, BAAの各モード及びINJモードのFLA(フラッシング)中のタイムシーケンスは基本的には同一である(FLAは全体の動作としては放電シーケンス管理下にあるという点では異なるがその1ショット分をとってみれば全く同一である)。これらのタイムチャートを第4.7-3図に示す。

CND／FLA時の最大ビームパルス幅は1.0秒、BAA時には2台のイオン源のうち1台のみの運転が可能で最大ビームパルス幅は0.2秒となっている。これはCND／FLA時にはカロリメータの許容受熱量で、BAA時にはJT-60真空容器内のNBI対向面の許容受熱量で上限値が決まっているためである。

INJモード中の実験入射(EXINJ)時のタイムチャートを第4.7-4図に示す。入射開始／中断は全系からのタイミング指令による。NBI側より入射開始指令を受けられる状態にあることを示す信号を全系側にユニット別に送信し、全系側ではこれをみて加熱実験上必要な入射パワーから必要ユニット数を算出して該当ユニットに入射開始指令を発信するようになっている。

INJモード全体のタイムシーケンスを第4.7-5図に示す。FLAは計算機間交信により開始／停止を行い、EXINJはタイミングシステムからの指令により実行される。FLAはEXINJ前のイオン源のビーム引出し電極のエージングの効果の他、イオン源フィラメントの休止後の断線防止の役目も果たしている。

タイムシーケンスの動作には通常の運転用の他、試験用のモードもある。これをタイマテストモードと呼び、さらにTST, UNI, SIMの3種に分類される。TSTは全系の動作試験(NBIタイムシーケンス試験)シーケンスに従って、INJモードのシーケンスの健全性をチェックするためのものでカロリメータ、高速シャッタは実動作するが、イオン源は無負荷運転を行う。UNIはイオン源用電源を構成する各電源を単体で運転する場合に用いるもので、選択された電源に対してのみ運転指令を発する。電源自身の単体試験用である。ただし、計算機の機能であるビームエネルギー可変制御のためのプレプロパターン作成時にも特例としてこのUNIモードで偏向磁石電源の空打ち運転等を行う。SIMはTSCの単独動作試験用のモードであり、各設備へのタイミング指令はすべてOFFのまま、TSCだけが動作し、各部動作のチェックを行う。

(4) 保護インタロック

NBIにおける保護内容としては、高電圧から的人身の保護、ビームパルス中のビームライン機器等の溶損防止、各設備単独の過負荷等防止などが主なものである。

NBIの電源系は加速電源の最大出力100KVを中心に高電圧・大容量の設備より構成されている。これら高電位部分の周辺には安全柵を設置し、みだりに人が近寄ることを防止すると共に、この出入口扉は施錠され、解錠状態では電源投入等を不能としている。出入口扉付近には接地棒が設置され、これが所定格納位置にない時も解錠状態(扉開状態)と同様のインタロックをとっている。また、安全柵内作業中に電源投入を禁止するためのスイッチ、及び非常時のための非常停止スイッチも設置され、それぞれインタロックが組まれている。他に、安全上

の現場表示として電源投入状態等を示す表示盤・警告灯も設置されている。

ビームパルス中のビームライン機器等の溶損防止のインターロックは装置保全上、特に重要でビームパルス中の各種状態信号、警報信号を常時監視して非標準事態が検知された場合、ビームを即遮断して未然に保護を行うものである。この保護動作はその性格上タイミング制御系が中心となって機能する^(注)。

各設備単独の過負荷等防止のためのインターロックはそれぞれ自身の保護を目的としているが、その保護動作が他設備の運転に支障を与える場合は当然ながら当該設備も保護連動する。

(5) マニュアル運転

イオン源の運転方式としてCPU運転とマニュアル運転があり、前者は計算機システムによる各種自動運転機能やCRTのマン・マシン機能により操作性の向上、省力化を目指したもので通常の運転時に用いられる方式である。一方、後者のマニュアル運転はCPU運転機能が何らかの原因で使用できない時のバックアップ用、制御系あるいは電源系の試験・調整時用などに用いられる方式である。マニュアル運転はNBI操作デスク(CP1)上の1ユニット分の操作器具により、ユニット単独の操作も複数ユニット同時の一括操作も可能な方式を採用している。複数ユニットの一括操作はブロック運転と呼ばれ、ブロック1～5に任意のユニットを割付けることにより、そのブロックに指定されたユニット(最大14ユニット)は同一条件の運転が行われる。マニュアル運転の場合、操作部と同じくイオン源用電源の電圧・電流モニタは1ユニット分選択式である。なお、マニュアル運転の場合にも計算機のデータ収集・処理機能を利用することもできる。

マニュアル運転は通常、CP1から行われるが、さらにCP1をも切離して、電源系制御盤(CP2)に試験用台車を接続することにより1ユニットのイオン源の運転を行うことも可能である。試験用台車はCP1のマニュアル運転部相当の操作・表示部、TDG模擬回路等から構成され、可動式で任意のユニットと接続することができる。試験用台車の数は2台である。試験用台車はCP2以下の制御系の試験・調整時に使用するもので、特に、CP2内蔵のTSCの試験・調整時に有用なものである。試験用台車を用いることにより、TSCの単体試験、電源系の単独試験、ビーム引出し試験と広範囲の試験運転が可能である。

4.7.2 計算機システム

(1) 計算機システムからみたNBIシステムの特徴

計算機システムからみた時、NBIシステムは同じ構成を持つ14の入射装置として考えることができる。各々の入射装置は異なる加速電圧、加速電流、さらに30秒周期で異なるタイムシーケンスで運転出来なくてはならない。また、計算機が収集するデータ量も膨大なものとなる。JT-60 NBIシステムは約5名の運転員による制御を想定しており、これは従来のシステムでは1つの入射装置に2人の運転員が配置されたことを考えると、運転員の負荷が極めて大きいことを意味する。この様な要求を実現するために計算機システムは、CAMAC、GPIBシステムを用いることにより、計算機の負荷を軽減するとともに、運転員の負担を軽

注) 詳細は別途資料。

くするために、マンマシンインターフェースに特に配慮するとともに、自動運転機能を大幅に採用した。

(2) 計算機システムのハードウェア

計算機システムのハードウェア構成を第4.7-6図に示す。メインコンピューターは32bit CPUで、8 MBの主メモリを持っている。ハードディスクは2台有り、92 MBのディスクはシステムのオペレーティングシステム、及びシステムプログラムを登録するのに用いられ、256 MBのディスクは収集したデータの保存、及びユーザープログラムの保存などに用いられる。収集されたデータは1台の磁気テープ装置により、磁気テープに記録することができる。小量のデータ、及び、プログラムなどは2台のフロッピーディスクドライブにより、フロッピーディスクに保存することが可能である。プリンターとしては、漢字シリアルプリンターとラインプリンターの2種類があり、漢字シリアルプリンターはシステムの警報メッセージや、状態に関するメッセージを出力するのに用い、ラインプリンターはメモリーのダンプ、プログラムのリスト出力などに用いられている。コンソールCRTは計算機自身の稼働状況を確認したり、計算機のOSの核に最も近いところで計算機と対話を行なうためのもので、ハードコピーが付いている。5台のキャラクターディスプレーは運転員との対話を行なうためのもので、ライトペンと5つの設定値変更キーが付いている。また、画面のコピーを取るための2台のハードコピーを持っている。

計算機システムは計算機の負荷の増大を抑えるために、収集するデータの性格や、システムの目的に応じて最適なシステムを採用することにより、負荷の分散を図っている。これについて次に述べる。

① (現場) データ収集システム

ビームラインの受熱機器、冷却系などの熱電対などの信号、真空系の信号などはJT-60の本体室(7面)とヘリウム液化器室II(1面)に設置されたデータ収集盤により収集される。これらの信号は常時200 msの周期で収集されるため、各データ収集盤は3台のマイクロコンピューターによりデータを収集し、200 ms毎に、メインコンピューターへGPIBバスを用いて送信している。

② CAMAC データ収集システム

NBIシステムのデータの中には、ビームと同期して収集するデータがある。これらのデータを収集するために、CAMACデータ収集システムがJT-60中央制御室に設置されている。CAMACデータ収集システムはショットと同期して、10 ms、及び200 msの周期でメインコンピューターが直接収集している。

また、CAMACデータ収集システムは、ビームライン系の異常情報も収集しており、これらは割り込み処理により、メインコンピューターへ通知される。

③ デジタルメモリー

ブレークダウン時等の高速の現象を捕らえるために、7台のデジタルメモリーが電源系制御盤に設置されている。GPIBバスによりメインコンピューターに接続されている。

④ 制御用CAMACシステム

制御用CAMACシステムはマイクロコンピューターを持つCAMAC クレート3台から

構成されており、1台のクレートで最大5台の入射ユニットを制御することが可能である。5台のキャラクターディスプレーより入力された制御データはメインコンピューターより、各クレートへ送信される。

また、制御用CAMACシステムは、メインコンピューターより送られたデータにしたがって、40msの周期で加速電圧、加速電流などを制御するビームエネルギー可変制御機能も持っている。

⑤ データリンクユニットによる交信機能

計算システムはデスクのシーケンスコントローラーと交信するために、データリンクユニット(DLU)を装備している。電源系の異常情報は集約されて、デスクのシーケンスコントローラーより計算機へこのDLUを介して送信され、計算機からは、タイムシーケンスなどの制御情報がシーケンスコントローラーを通して、電源系のタイミング制御部へ伝達される。

⑥ 全系とのコミュニケーション機能

NBIの計算機システムは全系(JT-60の中央制御システム)の運転系計算機、放電系計算機、実時間制御計算機と交信を行なっている。運転系、及び放電系計算機とは、コンピューター・リンク・アダプターを介して交信し、実時間制御計算機とは、実験入射中に、CAMACのコミュニケーションクレートを用いてリアルタイムで交信し、NBIの入射状況などの情報を送っている。

計算機システムは既に述べたように運転の合理化、及び運転員の負荷の軽減のために、マンマシンインターフェースに特に配慮している。その一つに、ライトペンと、5個の設定値変更キーを用いたキーボードレスオペレーションの実現がある。マンマシンインターフェースとしては、この外に、トラックボール、マウス等を検討したが、計算機に与える負荷の大きさや応答速度の速さを考慮して最終的に上に述べた組合せが選択された。さらに、ライトペンを効率的に運用するために、デスクの形状を変更した。其の様子を第4.7-7図に示す。

(3) ソフトウェアの特徴

以下では計算機システムのソフトウェアの特徴について述べる。本計算機システムの設計に於て最も注意を払ったのは以下にしてより簡単な運転環境を実現するかということであった。この目的のために、ハードウェアにおいてはライトペンによるキーボードレスオペレーション方式を採用した。ソフトウェアにおいてはハードウェアの特徴を生かすためにメニューの表示、選択方式に工夫を凝らすと共に、イオン源の運転の自動化を最大限に取り入れた。ここでは先ず、ハードウェアと密接な関係にある画面表示、入力方式について述べ、次に、イオン源運転の自動化について述べ、最後に、全く新しいビームの入射技術であるビームエネルギー可変制御について述べることにする。

① 画面表示及び画面入力

画面の表示、入力方式はハードウェアと一体の関係がありマンマシンインターフェースの設計と同時に画面設計も並行して行われた。画面の切り替え及びメニューの選択にはアイコンとサブメニューの組合せを採用することにより画面上で全ての操作が出来るようになっ

ている。アイコンは画面下に常に表示されライトペンでヒットすることにより必要な画面をすぐに表示させることができる。アイコンによるメニューには、システムの状態に関する画面を選択するためのメニューAとイオン源の運転に関するメニューBとがある。アイコンのメニューにより呼び出された画面は必要に応じて更に詳細な情報を選択できるサブメニュー画面を持っている。本システムのメニュー構成を第4.7-8図に示す。

本システムでは設定値の入力方法として5個の設定値入力キーとライトペンを組み合わせた方法を採用している。値を変更する設定値はライトペンで変更する項目を選択し、設定値変更キーを押すことにより其の値を増減することができる。設定値変更キーを押している間は、変更中の値が画面に表示され、運転員は常に変更中の値を確認することが可能となっている。さらに、変更中の値は常時計算機により設定範囲が、チェックされており、不当な入力が行なわれないようになっている。特に、加速電圧、加速電流の設定値は画面のグラフ上にドットで表示され、グラフと値の両方で確認することが可能となっている。

② 自動運転機能

計算機システムは運転員の負担を軽減するために、自動コンディショニング機能を取り入れている。其の基本機能は計算機による学習機能である。これは、ショット毎に設定値と実際に得られた実験値をひかくして、自動的に設定値と等しい実験値が得られるように各電源出力を調整する機能である。いま、実験値をE、設定値をSとし、電源への出力指令値をVとしたとき、次の関係式により、出力指令値Vを求める。

$$V = a * S + b$$

$$a = (V - b) / E$$

a、bは係数であり、設定値の種類により、a、b両方またはaのみがショット毎に変化する係数となっている。この様なショット毎のフィードバックを行なうことにより運転員による調整を行なうことなく、設定値どおりの実験値が得られることになる。

この学習機能をもちいてイオン源の自動コンディショニング機能が実現された。これは目標の加速電圧と加速電流を指定すると、其の値まで自動的に計算機がイオン源をコンディショニングすると言う機能である。途中でイオン源のブレーカダウンが連続して発生したときは加速電圧を下げるなどの機能も持っており、コンディショニングのロジックには過去10年間にわたる原研に於けるイオン源開発の経験が生かされている。

③ ビームエネルギー可変制御

プラズマを効率よく加熱するためには、プラズマ密度に対応して最適のビーム加速エネルギーで入射することが必要である。従来は加速電源の構成上ビーム引出し中に電圧を変更することは不可能であったが、JT-60 NBIの電源システムでは加速電源にGTOを用いて、ビーム引出し中でも電圧を変化させることができた。そこで、本加熱装置では計算機に予め加速電圧、加速電流などのパターンを入力し、其のパターンにしたがってNBI加熱装置を制御することに成功した。予め入力するパターンは予想されるプラズマ密度の時間変化より決定される。パターンは40 msの周期で作成され、実験入射直前に制御用CAMAC

クレートへ送信される。40 ms という値は、偏向磁石の時定数によって決まっている。この機能は従来の NBI 加熱装置にはないまったく新しいビーム入射技術であり、特に低密度のプラズマからのビーム入射に威力を発揮している。第 4.7-9 図に本機能を用いて入射したときの加速電圧、加速電流の波形を示す。

(4) データ処理機能

計算機システムは収集したデータを基に必要なグラフを描いたりするデータ処理機能を持っている。この機能は対象とするデータの種類やデータの編集の方法により実験データ処理、ショットデータ処理、履歴処理、監視データ処理、等から構成される。

① 実験データ処理

本機能はあるショットのデータを基にグラフを描いたり、データを修正してグラフを描くものである。この外に、運転メニューにある画面を再現したり、実験入射時の結果データの画面を再現したりすることが可能である。

② ショットデータ処理

これは複数のショットのデータを基にグラフを描いたり、データの編集を行う機能である。必要なショットを選ぶために、データの検索機能を持っている。但し、一度に扱えるデータの量は最大 300 ショットである。検索したデータを基に回帰分析や近似曲線を描くことが可能である。また、データを入力することにより任意のグラフを描くことも出来る。

③ 履歴処理

これはある一つのユニットの一つの項目に付いて長期間のデータを集めて表示する機能である。

④ 監視データ処理

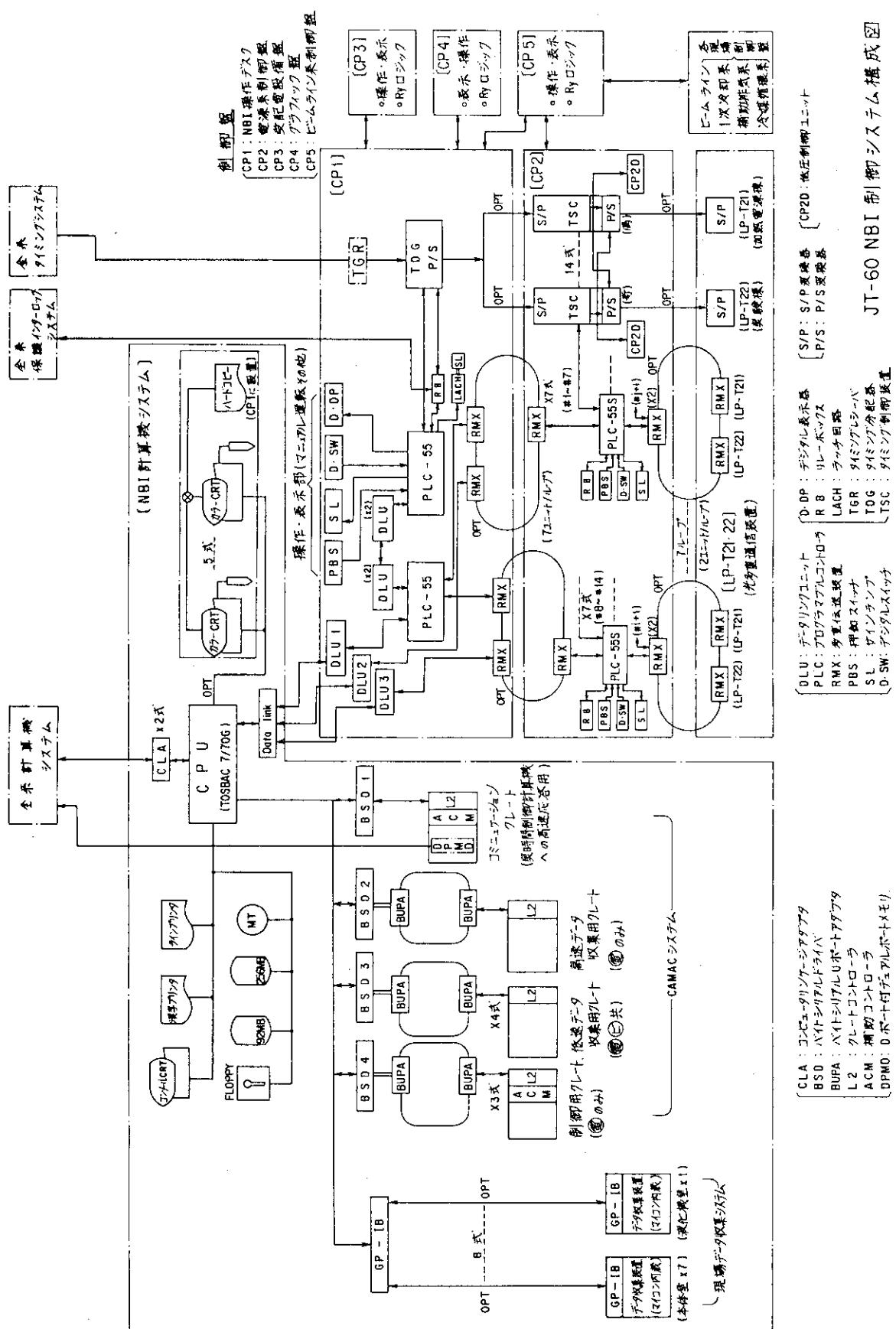
計算機システムはシステムの重要なデータについて、2 分毎の最大値と最小値を常時保存している。これらのデータを表示するのがこの機能である。監視データとしては、真空度、冷却系の流量や水温などがある。

参考文献

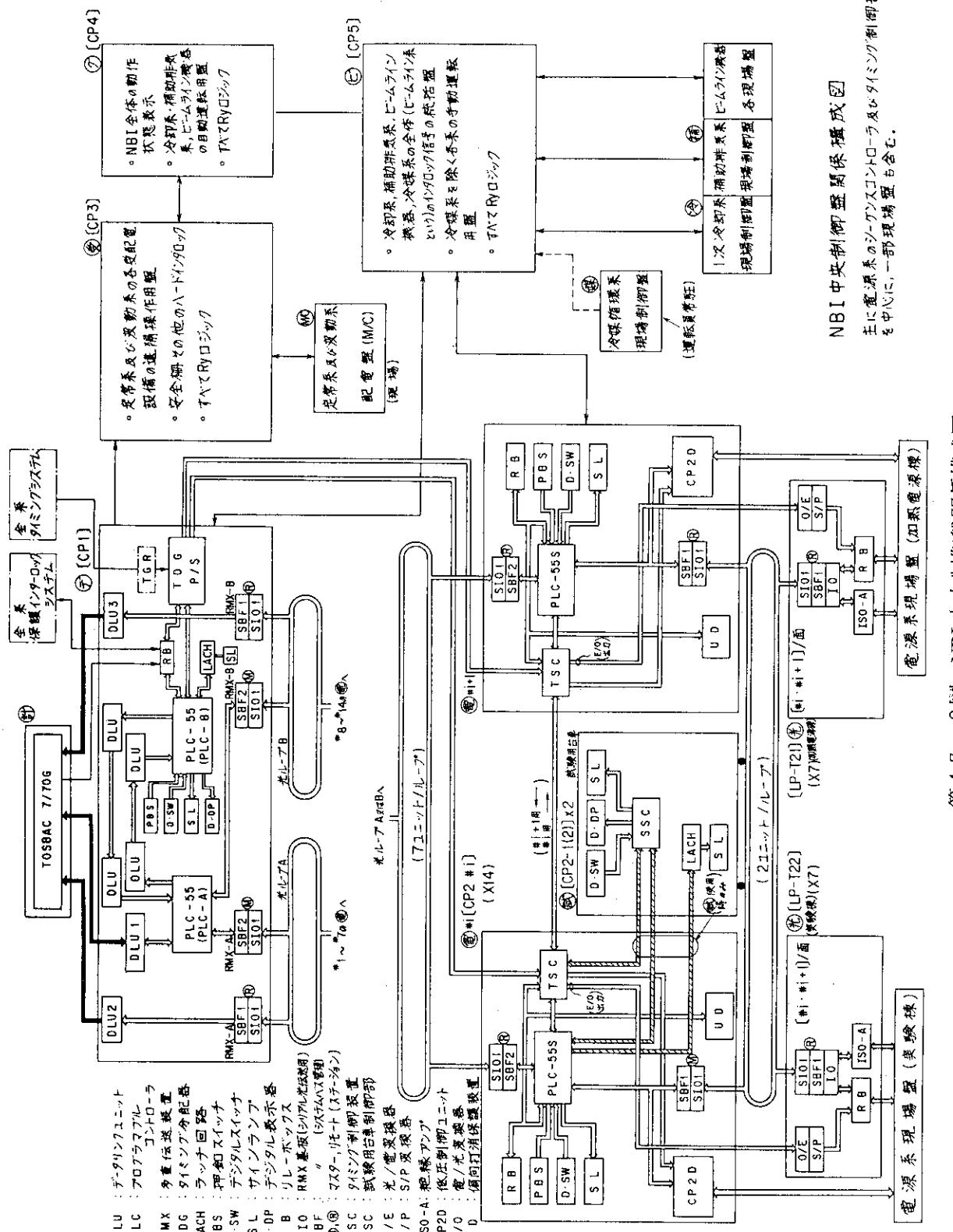
- 1) 松田他 ; JAERI-M 7655 (1978)
- 2) 河合他 ; 私信
- 3) 河合他 ; 私信

分類	項目	主たる分担
全体統括	<ul style="list-style-type: none"> • NBI 運転モードの管理（各ユニット毎） • 保護インターロック • 運転許可インターロック • タイムシーケンスの管理 • 全系制御設備との交信 	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> } <div style="display: flex; gap: 10px;"> 制御盤 計算機 制御盤 </div> </div>
基本運転	<ul style="list-style-type: none"> • 状態表示、故障表示 • ビームライン系運転（真空、水、可動機器） • イオン源運転 <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> (マニュアル運転) ユニット運転 ブロック運転 </div> <p style="text-align: center;">.....試験用台車</p>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> } 制御盤 </div>
データ／収処理	<ul style="list-style-type: none"> • データの収集、編集、保存 • 状態／警報の詳細情報の表示、記録 • ショット時データの表示、監視 • オペレーションガイド 	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> } 計算機 </div>
イ※オ自動源運転	<ul style="list-style-type: none"> • 自動コンディショニング • ビームエネルギー・プロファイル制御 • 加速定電流制御 <p style="text-align: center;">※(C P U 運転と呼ぶ。)</p>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-between;"> } 計算機 </div>

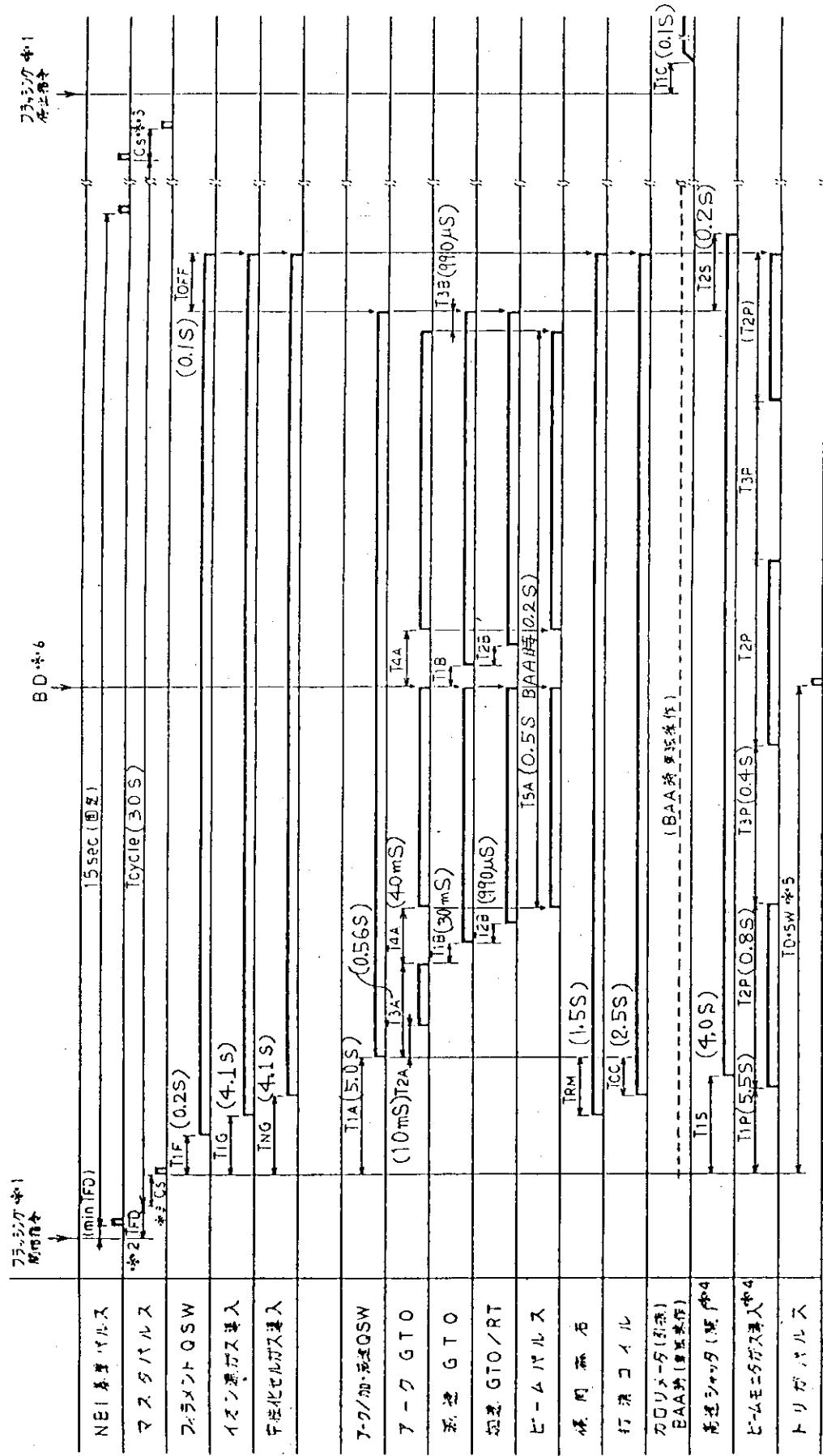
第4.7-1表 NBI 制御系の機能概要



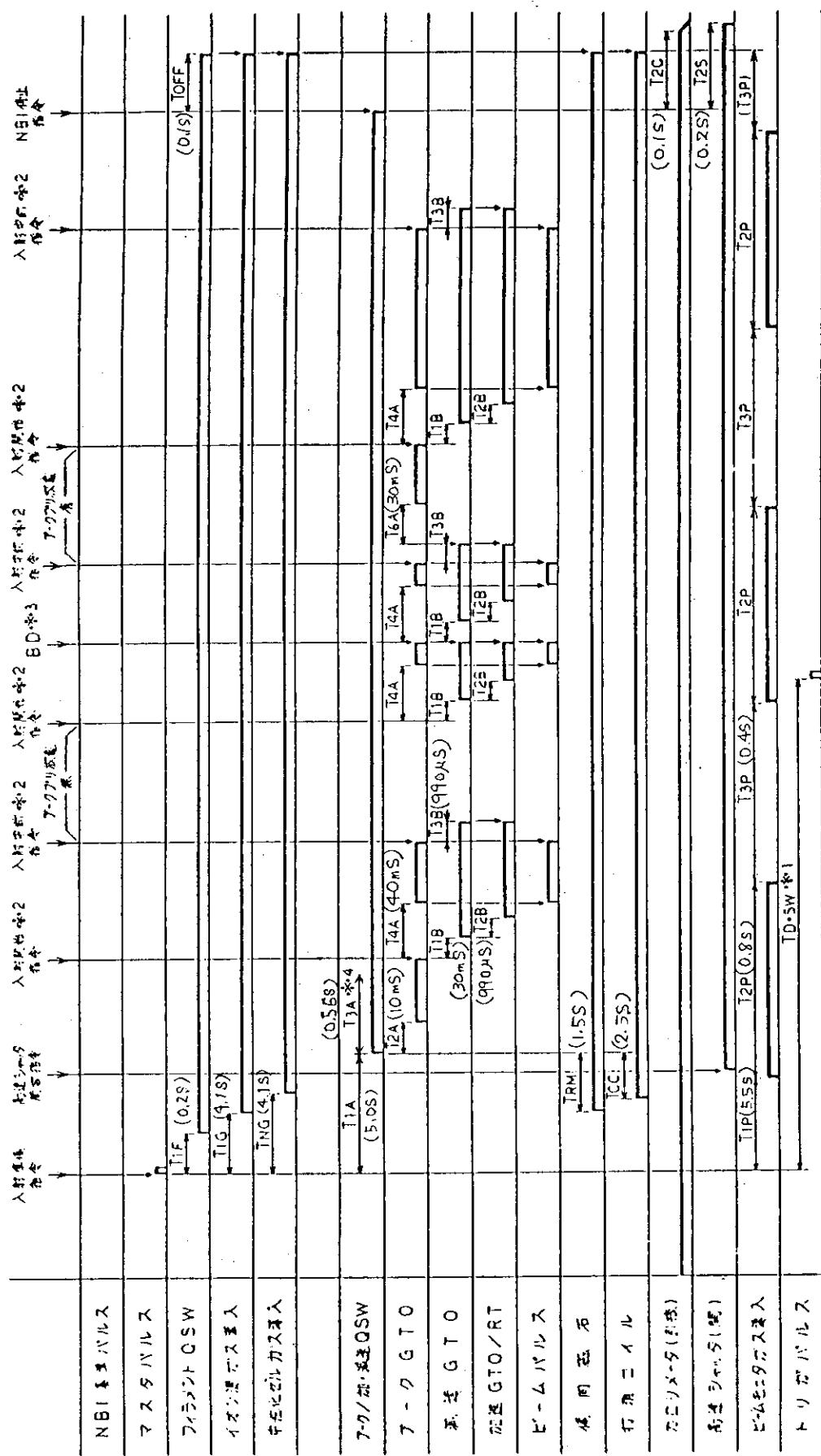
第4.7-1図 JT-60 NBI制御システム構成図



第 4.7 - 2 図 NBI 中央制御盤關係構成図

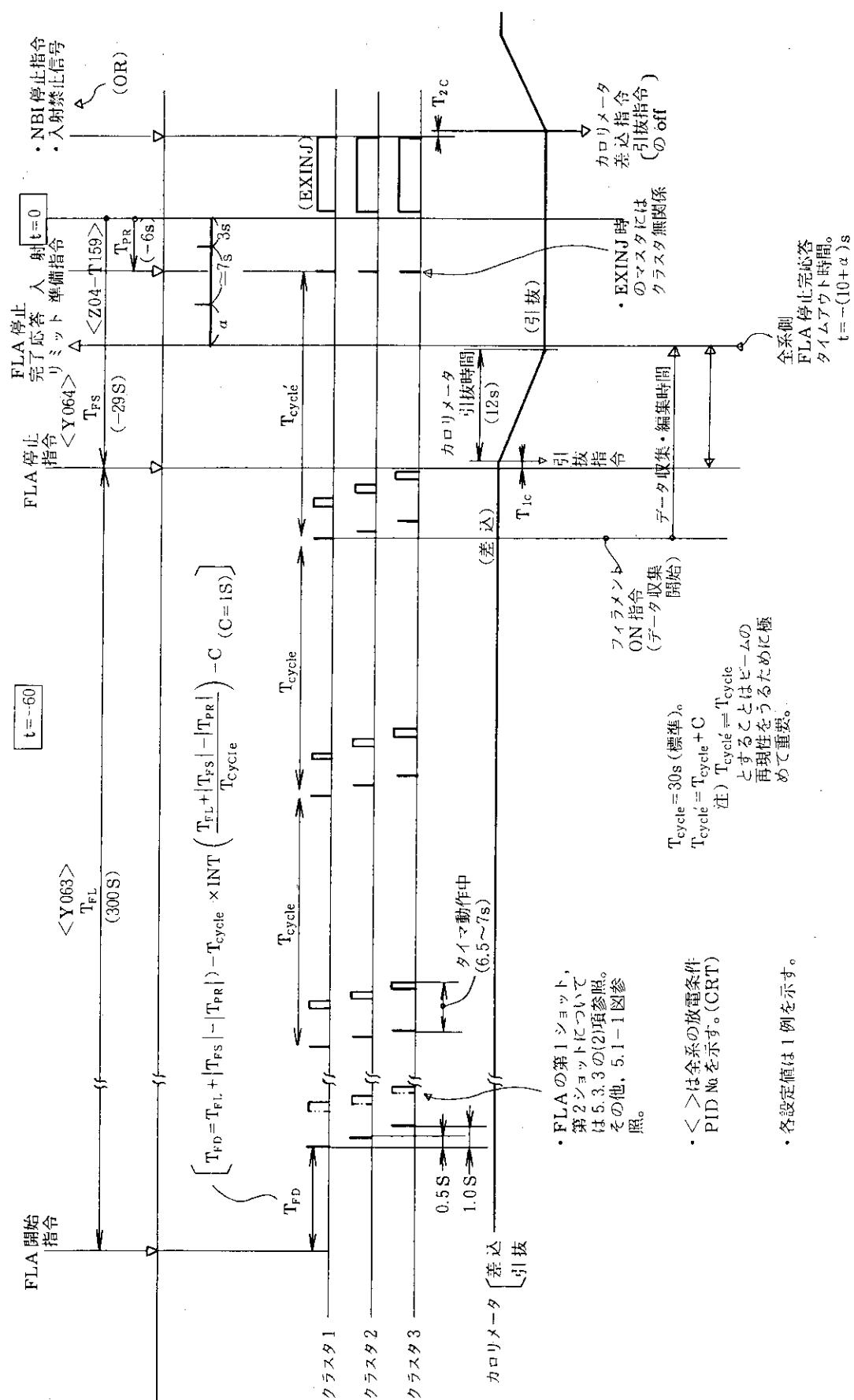


第4.7-3 図 CND等のタイムチャート

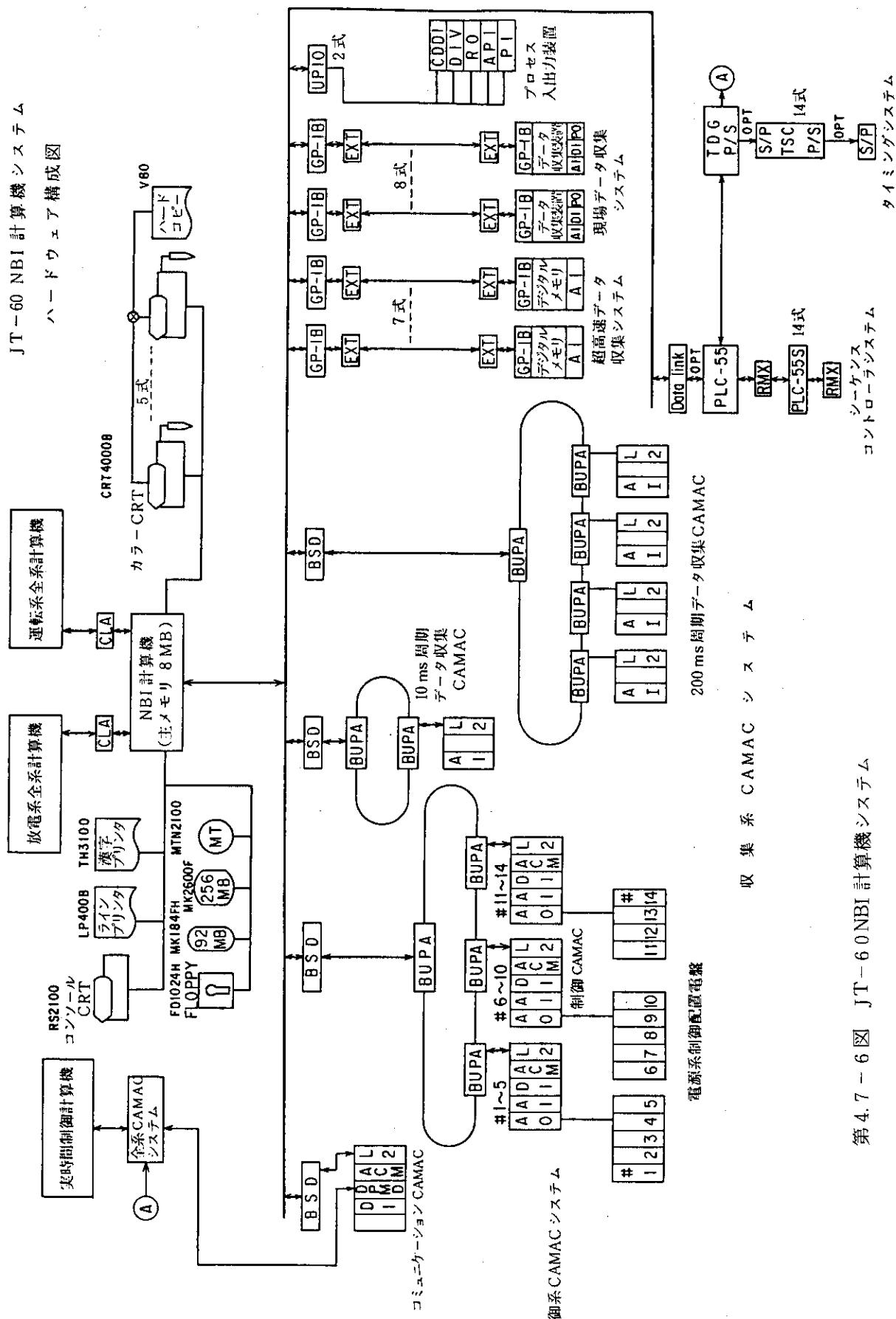


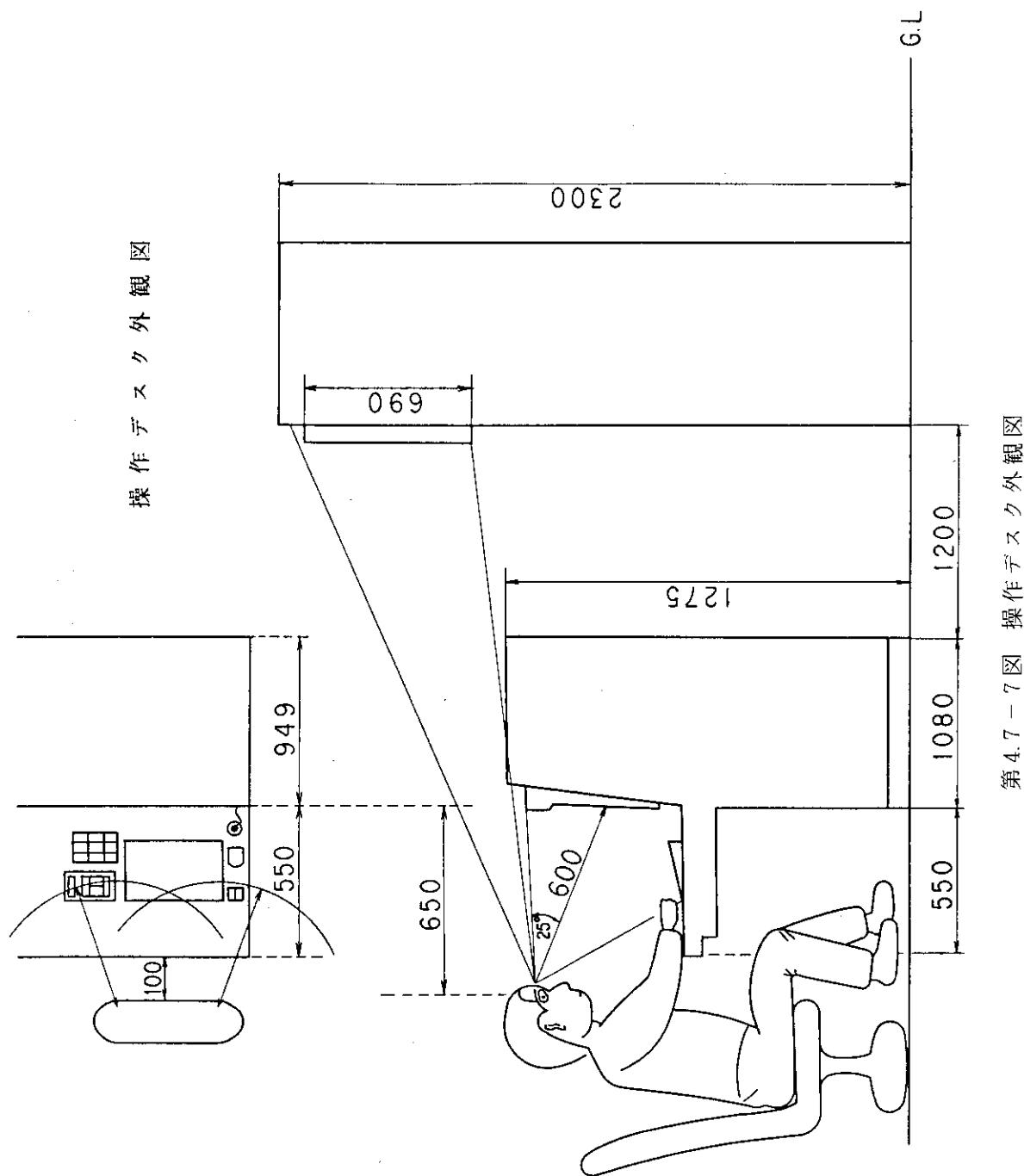
注記) ① : TDSW,...,TSUGI-5, TC1~5, TM1, TE1.2 を示す。
 ② : 入行規則／入出力規則／IP 断線規則 ($t=0$) から
 10ms 制限規則を省いて 10ms 4ms 一矢式で示す。
 ③ : 90 ms フレーミングを示す。
 ④ : TM1 のみの表示。

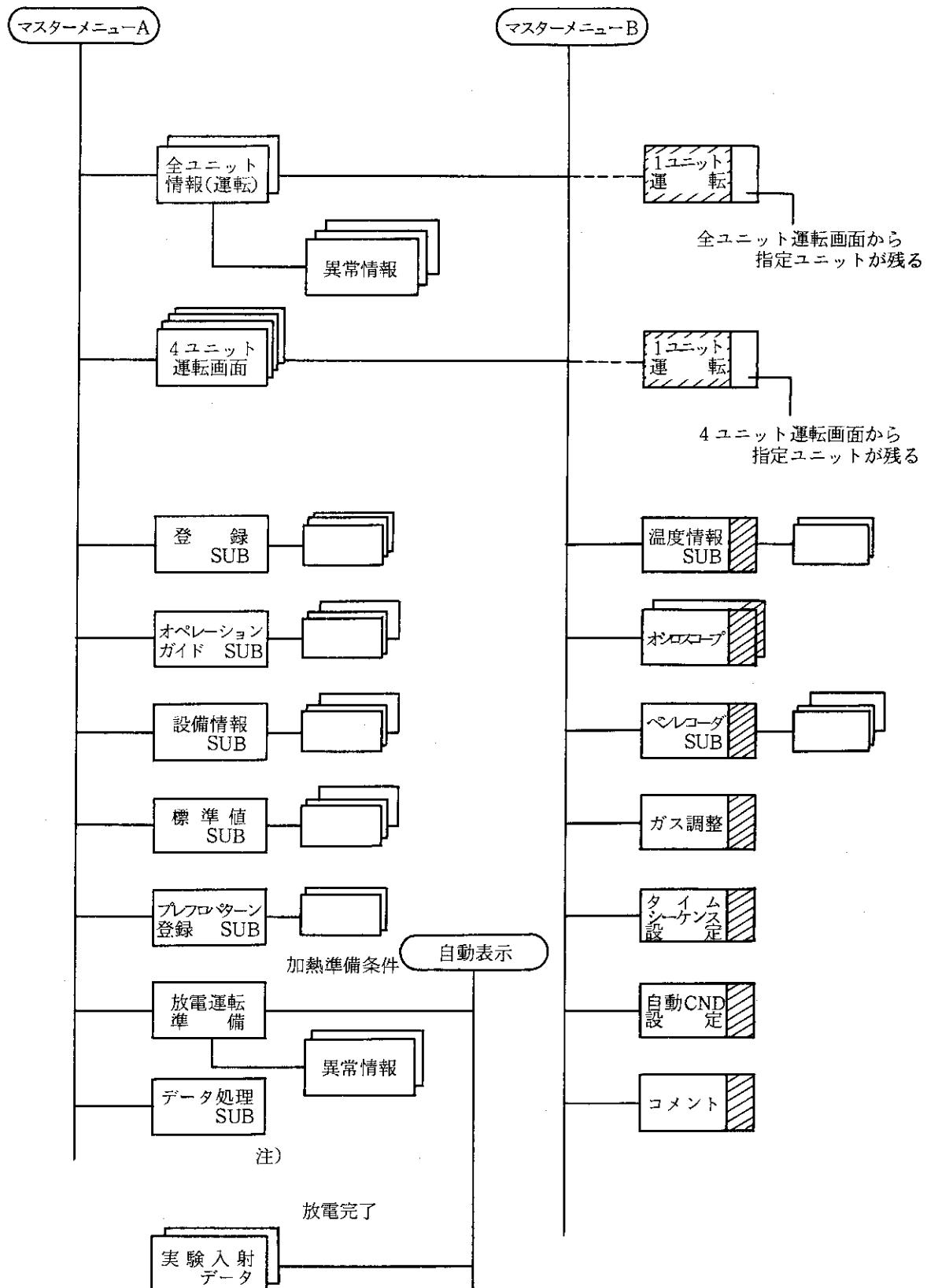
第4.7-4図 EXINJ時のタイムチャート



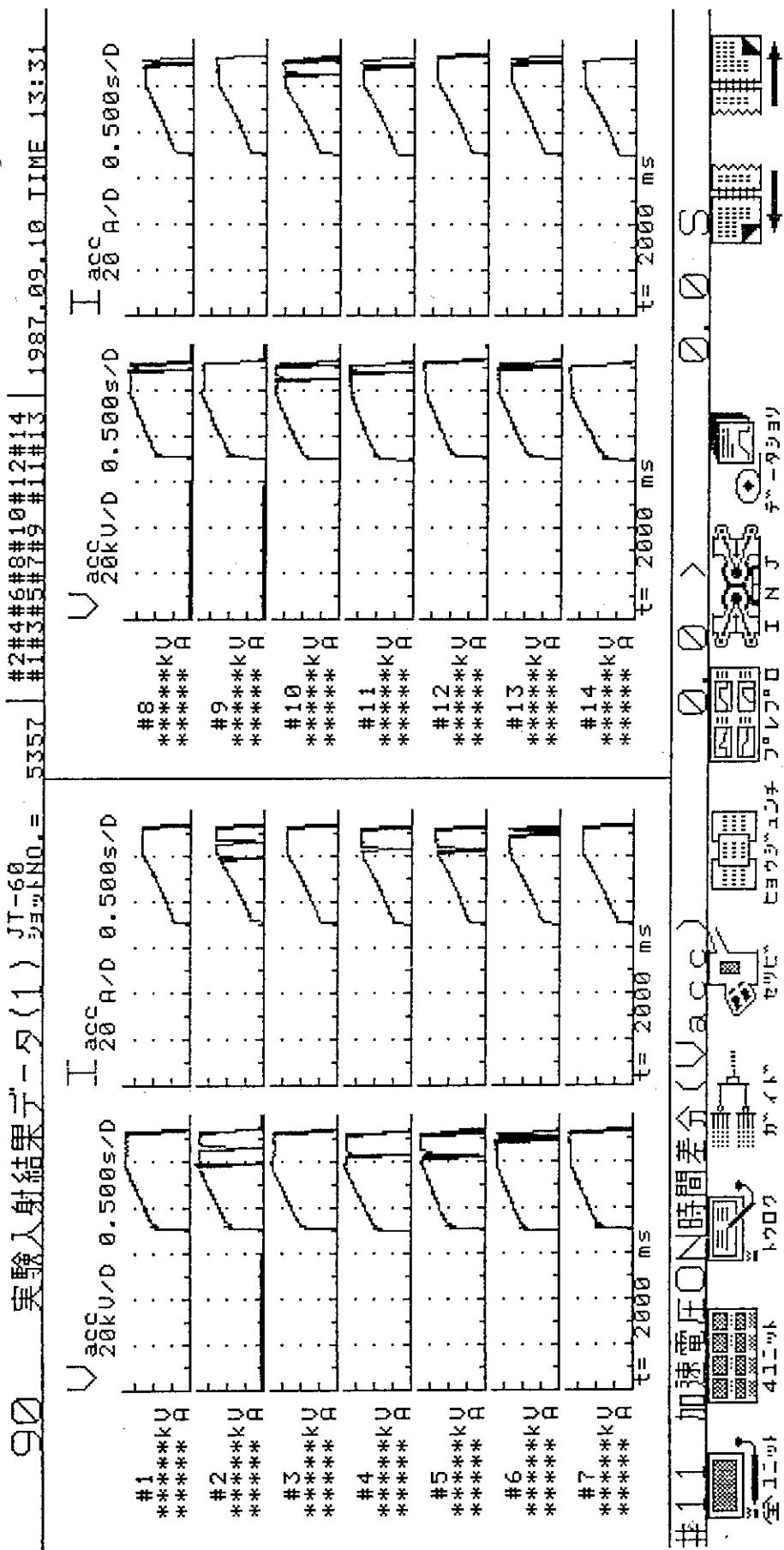
第4.7-5 図 INIモードの動作フロー







第4.7-8図 CRT画面メニュー



第4.7-9図 プレブロでのビーム入射データの一例

5. JT-60 NBI調整試験及びJT-60への ビーム入射加熱実験

JT-60 NBI 装置の組立て、あるいは据付けが完了した後を受けて各システム毎の単体試験、システム間のブロック試験を実施し、各システムの健全性を確認した後、NBI システム全体でビーム引出しを含めた調整試験を開始した。一連の調整試験で NBI 装置全体が正常に動作することを確認した後、1986 年 8 月からは JT-60 プラズマとの結合試験を開始して実質的なビーム入射加熱実験を開始した。

5.1 JT-60 NBI 調整試験

JT-60 NBI 装置における調整試験の概略フローを第 5-1 図に示す。以下、順を追ってシステム毎の単体試験、システム間でのブロック組合せ試験、NBI 全システムによるビーム引出し試験等主要な試験について述べる。

5.1.1 システム毎の単体試験

i) ビームライン

ビームラインは、JT-60 本体に据付ける前に、ビームラインの健全性を確認して据付け後の不具合をなくすこと、及びイオン源のエージングを進めて JT-60 へのビーム入射実験での立上がりを早くすることの目的で、1 ユニット毎にビームライン調整スタンド（原型ユニットを改造して上及び下ユニットビームラインのビーム引出し試験ができるようにしたもの）に据付けてビーム引出しを含めた試験を行った。調整スタンドにおけるビームライン健全性試験のフローを第 5-2 図に示す。この調整スタンドにおける試験は、1 ユニット当たり約 1 ヶ月のペースで進められた。この 1 ヶ月のうち、前後の 2 週間はビームラインの据付け及び撤去に要するので、正味 2 週間がビームラインの試験にあてられた。この調整スタンドでの主な試験は第 5-2 図中に記載してあるが、この中でイオン源のエージングを兼ねたビーム引出し試験の結果を第 5-1 表に示す。本試験は約 15 ヶ月に渡って実施され、14 ユニットビームライン全体が正常に動作することを確認した。

ii) 冷媒循環系

冷媒系構成機器の耐圧、気密あるいは動作等の試験が終了した後、冷凍機冷凍能力試験を行った。本試験では冷凍能力が 3.7 K、3000 W 以上であることが確認され、設計値（3.7 K、2400 W）を十分満たすことが確認された。

iii) イオン源用電源

14 ユニットからなるイオン源用電源は、単体における絶縁耐圧、動作、ノイズ、応答等の各試験を実施し、その後ユニット毎に無負荷耐圧試験、ダミー負荷による負荷試験を行ない、14 ユニットの電源が正常に動作することを確認した。

iv) その他

一次冷却系、補助真空排気系、制御系等は、それぞれ各機器単体での動作確認、シーケンス・インターロック試験等を実施し、それぞれの機器が単体で正常に動作することを確認した。

5.1.2 ブロック組合せ試験

この試験は、NBI装置の2つ以上のシステムを組合せで行うもので、第5.1-1図に示すように各システム間のシーケンス・インターロック試験、補助排気系の真空排気速度、冷媒循環系のクライオポンプ排気速度試験、一次冷却系の通水試験、流量確認試験等が実施され、全てが健全であることを確認した。

5.1.3 JT-60全系制御設備とのリンクエージ試験

JT-60 NBIがJT-60プラズマにビームを入射する際には、全系設備の指令のもとにシーケンスが動作することになるため、NBI装置と全系設備側との信号の授受の確認試験を実施した。この試験により、NBI側の信号及び入射ビームのデータが全系側に正常に送られ、また、全系側の指令信号、インターロック信号等が正常にNBI側で受け取ることが確認された。

5.1.4 ビーム引出し試験

5.1.3項で述べた試験によりNBI装置の各システムが正常であることを確認した後、NBI装置の全システムを組合せてカロリーメータをビームターゲットとしたビーム引出し試験を実施した。この試験では、先ずマニュアル操作によりビームなしの無負荷試験、次に、低パワー、極短パルスビーム引出しという形で順を追って進め、各ステップ毎に各機器の異常の有無を確認しながら実施した。またユニット数も1ユニットから始めて順次、運転ユニット数を増やしていく。更に計算機を使ったCPU運転でのビーム引出し試験でも同様の手順を踏み、最終的には14ユニット同時のビーム引出しを行った。この試験によりNBI装置単体では正常に動作することが確認された。

5.1.5 BAA試験

この試験は、極短パルスビーム(0.2秒以下)をJT-60真空容器(プラズマのない状態)に打ち込み、イオン源のビーム軸を調整して、ビームの幾何学的ロスを最小にして最大の入射パワーを得るために実施した。この試験では、JT-60真空容器のNBI対向面が直接、ビームに晒されることから、NBI対向面保護のため、上記の0.2秒以下のビームパルスで実施し、更にイオン源も1台ずつの運転として対向面での熱負荷を小さくした。この試験は14ユニット/28台のイオン源について1台ずつ行ない、全ユニットのイオン源が最適な方向になるように調整した。

この試験と並行して、NBI対向面保護インターロック用の熱電対及び赤外カメラの健全性確認試験、応答速度試験等も同時に実施し、正常であることを確認した。

5.1.6 打消コイル調整試験

JT-60と同期運転することにより、JT-60からの漏洩磁場環境下において打消コイルシステムが正常に動作することを確認するために行った。先ず、漏洩磁場下でホール素子が正常に磁

場を検知し、その結果に基いてフィードバック制御が正常に行なわれ、打消コイルによって漏洩磁場が打消されることを確認した。この後、この磁場下で、カロリメータをターゲットとして短パルスのビームを引出し、漏洩磁場によってビームの偏向が全く無くなるようにフィードバックの制御定数を調整した。これらの試験により、JT-60との同期運転が正常に行なわれることを確認した。

5.1.7 JT-60への極短パルスビーム入射試験

調整試験の最終段として、全系制御設備の指令によりJT-60プラズマに正常にビーム入射するための試験を行った。これは、5.1.3項で述べたリンクエージ試験を実負荷で行うものである。この試験では、最初1ユニットから始めて異常の有無を確認しながら、同時運転のユニット数を増して行って、最終的には極短パルスながら14ユニットの同時ビーム入射を行った。この試験により、一連の調整試験が終了し、JT-60 NBIが設計通りに正常に動作することを確認した。

5.2 JT-60へのビーム入射試験

前項に記した一連の調整試験が完了した後、直ちにJT-60へのビーム入射試験が開始された。この試験では、NBIポートのエージング状態、ターゲットプラズマの生成状況等を見ながら徐々にビーム入射パワーを増大し、ビームパルス幅を伸した。この過程でNBI装置の初期トラブルが発生したが、これらを1つ1つ解決することによってNBI装置をより信頼性の高いものにして行った。第5-3図にトラブル件数の推移を示す。運転日数と共にトラブル件数が減少していることがわかる。

第5-4図は、JT-60へのビーム入射パワーの推移を示しているが、ビーム入射試験開始後、約2ヶ月（実質運転日数20日）でJT-60 NBIの定格入射パワーである20MWのビーム入射を達成した。この後も順調に稼動しておりJT-60のプラズマ加熱実験に供されている。

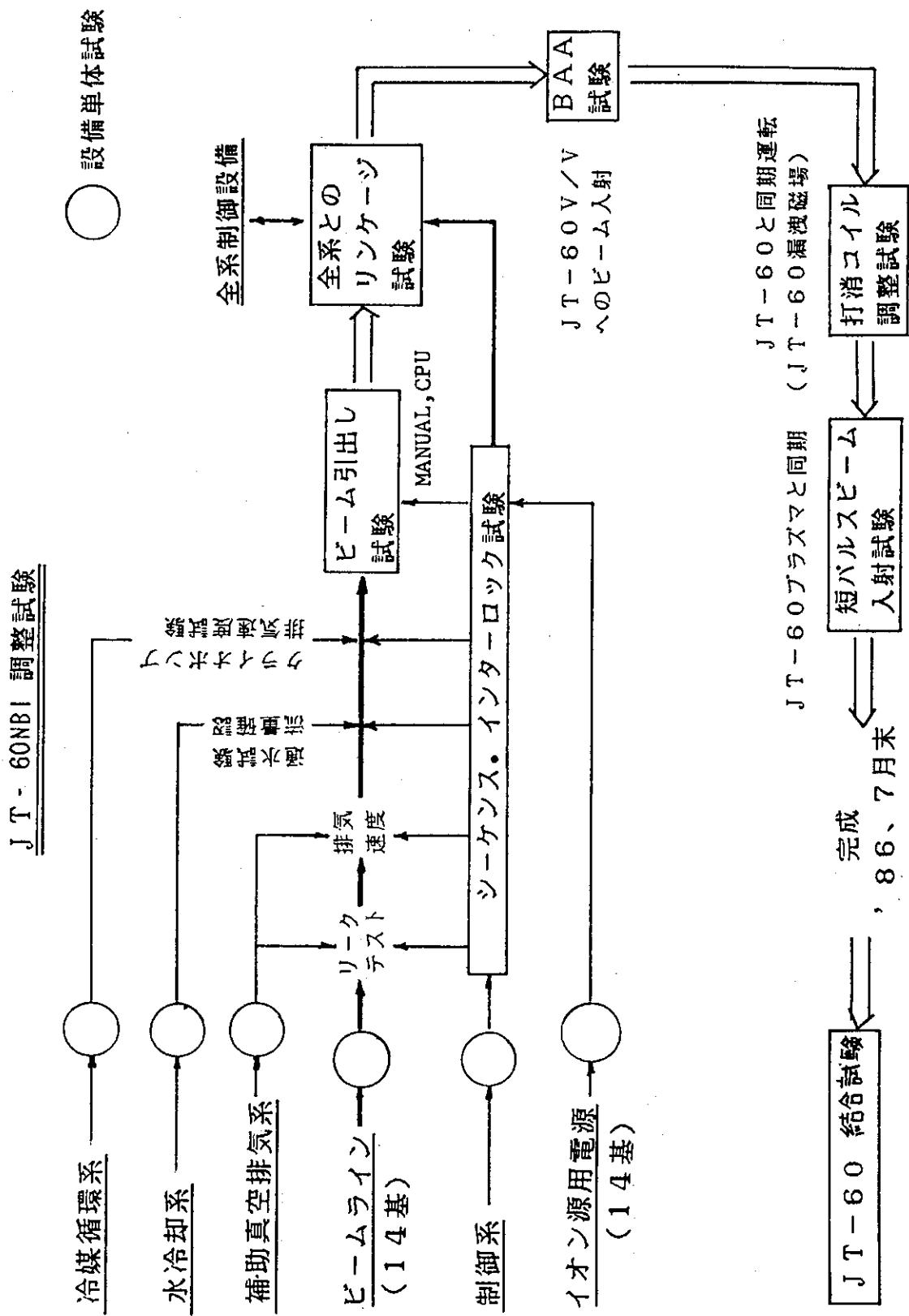
第5-1表 調整スタンドでのビーム引出し試験結果

RESULTS IN BEAM LINE TEST STAND

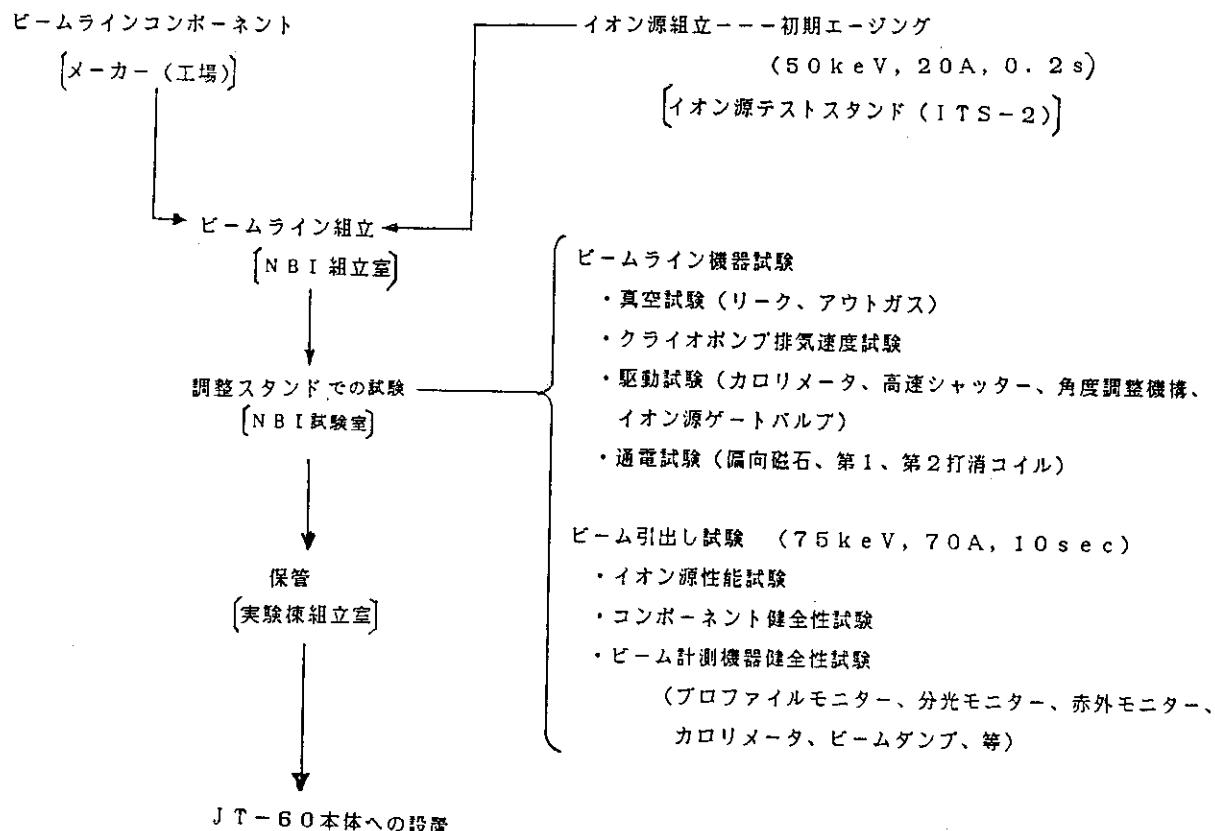
UNIT NO.	LONG PULSE SHOT			HIGH BEAM ENERGY SHOT			TOTAL SHOT NUMBER
	Vacc kV	Iacc A	DURATION sec	Vacc kV	Iacc A	DURATION sec	
#1	75	66	7	75	66	7	14076
#2	75	70	10	88	70	0.5	5847
#3	75	75	10	99	81	1	6833
#4	77	73	10	100	70	0.5	7019
#5	75	70	10	97	67	4	9144
#6	75	69	10	90	70	0.5	6420
#7	75	70	10	90	80	1	7564
#8	71	61	10	90	70	0.5	4145
#9	70	64	8	86	70	1	6851
#10	76	74	10	100	75	2	6498
#11	75	60	10	93	73	1	8439
#12	75	71	10	92	74	1	5586
#13	75	70	10	88	70	1	7363
#14	77	73	10	85	70	1	3998

*The voltage ratio $\Gamma(\Xi V_g/V_{acc})$ was kept at the constant value, 0.7.

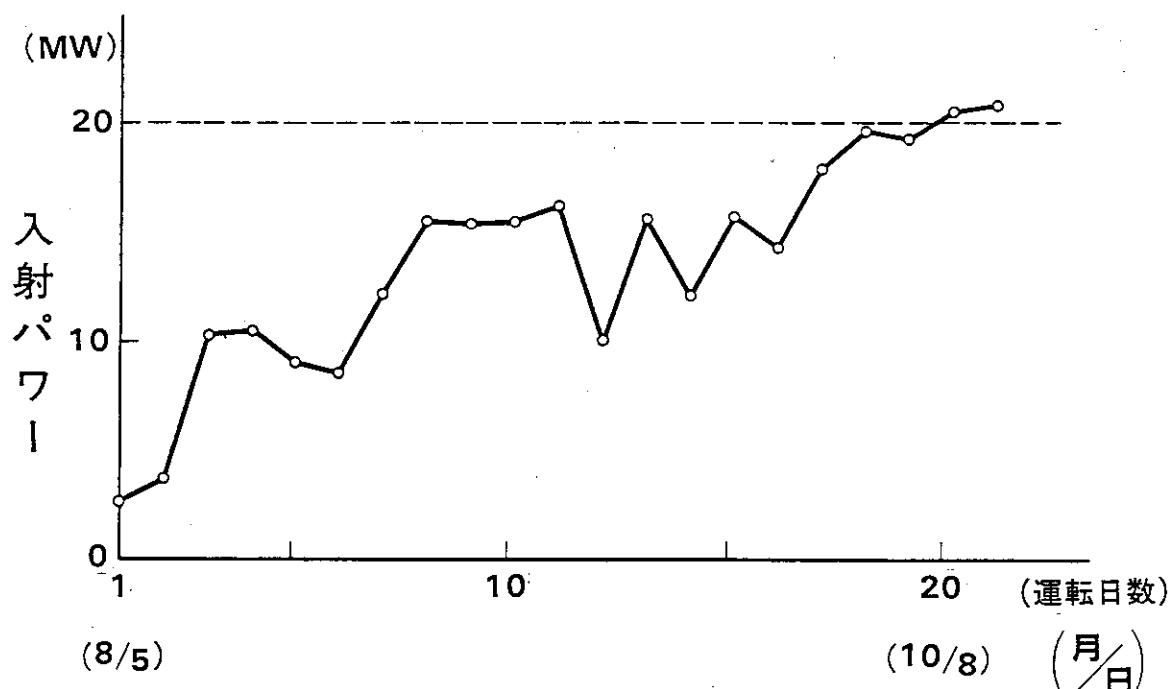
*The standard rating: 75kV, 70A, 10sec.



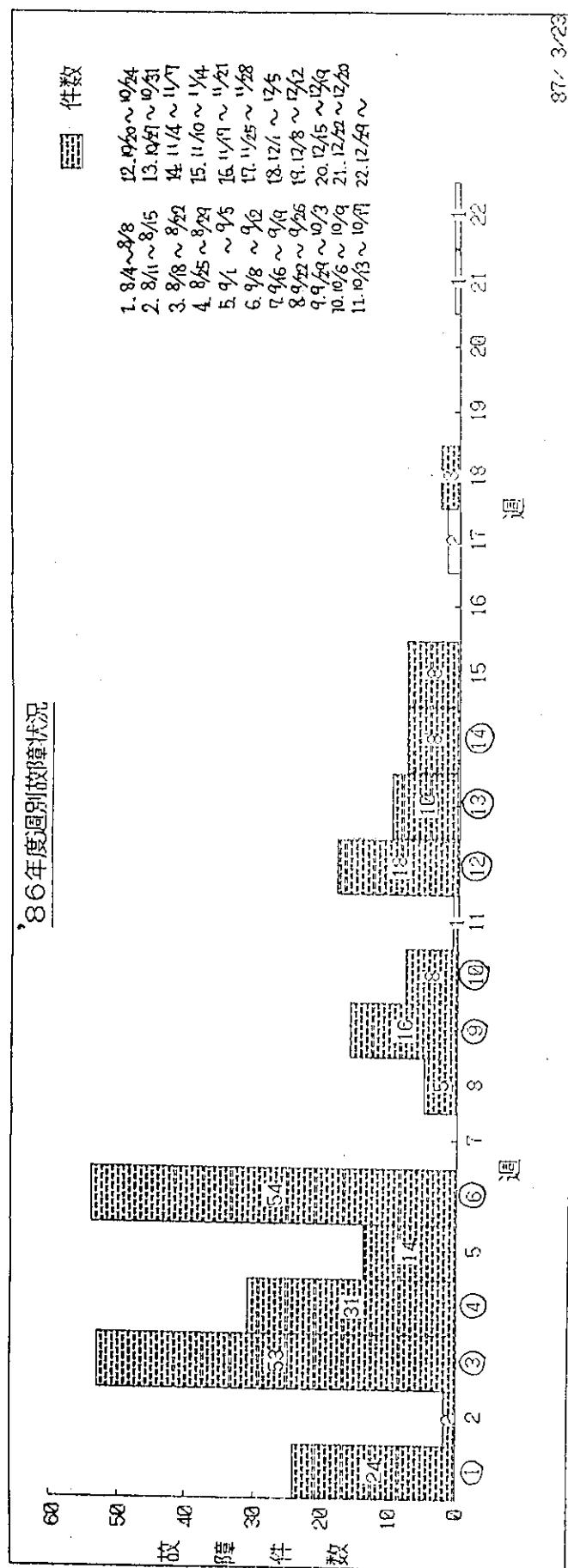
第5-1図 JT-60NBI装置調整試験フロー



第5-2図 調整スタンドでの試験



第5-4図 JT-60 NBI 入射パワーの推移



第5-3図 JT-60NBIのトラブル件数の推移

6. 終りに

JT-60 NBI 開発のために実施してきた研究開発の集大成として、JT-60 NBI の 1 ユニット分に相当する原型ユニットを建設した。昭和 56 年に完成した後、直ちに性能確認試験に着手した。原型ユニットにおける試験結果の一例を第 6-1 表に示す。一連の原型ユニットの試験でビームエネルギー 75 KeV で、中性ビーム入射パワー 1.43 MW / 10 秒が達成されるなど、当初の目標値はすべて達成することができた。またこの試験を通して、構造上改良すべき点もいくつか見出され（第 6-2 表）、これらの結果は、14 ユニットから成る JT-60 NBI の製作に反映された。以上のように、細部でのいくつかの改良点は見出されたものの、原型ユニットの試験を通して、JT-60 NBI の技術開発、設計の正しさが確認された。

更に 14 ユニットビームラインの JT-60 NBI の建設が昭和 61 年 8 月に完成し、直ちに JT-60 へのビーム入射実験が開始された。同 10 月には、実質運転日数 20 日間で定格入射パワーの 20 MW 入射を達成した。

第6-1表 原型ユニットの試験結果

.820323
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF JT-60 PROTOTYPE NBI

	DESIGN VALUE	ACHIEVED VALUE		
BEAM ENERGY (keV)	75 (50~100)	75	75	85
BEAM CURRENT (A)	70 (80) TWO SOURCES	70 TWO SOURCES	71 TWO SOURCES	37 ONE SOURCE
PULSE LENGTH (Sec)	10	10	10	2
GAS SUPPLY INTO ION SOURCES (IS) AND NEUTRALIZER (N) (Pa·m ³ /s)	<2.67×2 INTO IS <2.67×2 INTO N	1.30×2 INTO IS 0.53×2 INTO N	0.93×2 INTO IS 0.53×2 INTO N	1.47 INTO IS 0.67 INTO N
BEAM DIVERGENCE 1/e (Deg)	1.0 (0.9~1.2)	1.05 1)	1.1 1)	0.95 1)
ION CURRENT DENSITY (A/cm ²)	0.27	0.27	0.28	0.29
ATOMIC FRACTION $H_1^+ : H_2^+ : H_3^+$ (%)	75:20:5	—	82:13:5 3) 77:12:11 4)	—
IMPURITY IN NEUTRAL BEAMS	Low z ≈ 1 % High z ≈ 0.1 %	—	Low z ≈ 0.3 % 3) High z ≈ 0.5 % 4) High z ≈ 0.1 % 3)	—
SIMULATING STRAY FIELD	ON	OFF	ON	OFF
RE-IONIZATION LOSS (%)	5	—	4	—
COLD GAS FLOW THROUGH THE INJECTION PORT (Pa·m ³ /s)	0.05	—	0.07 ~ 0.08	—
CRYO PANEL PUMPING SPEED (m ³ /s)	1.3×10^{-3}	1.43×10^{-3}		
REFRIGERATION CAPACITY (W)	300 at 3.7°K			
NEUTRAL BEAM POWER THROUGH THE INJECTION PORT (MW)	1.43	1.31	1.26	1.44
			0.72	0.73

1) Beam divergence of 0.1 Sec neutral beam measured at the focal point 8 m apart from the ion source.

2) Extrapolation by the data of 75 kV beam divergence.

3) Measured by the magnetic mass analyzer.

4) Measured by the doppler shift spectrometer at the beam current of 60 A.

第6-2表 JT-60NBI原型ユニットにおける改良点

項目	問題点	対策
1) ガロリメータ用ガイドレールの構造変更	クライオポンプからのおく射冷却による温度差によってガイドレールが変形し、カロリメータの円滑な動作が出来なくなつた。	1. ガイドレールの熱収縮が解放される構造とした。 2. ガイドレール内に温度差が出来ない構造とした。
2) イオン源ゲートバルブ及び金属シールゲート弁へのスパッタ保護板の取り付け。	上記ゲートバルブあるいはゲート弁近傍でビームによりスパッタされた粒子がバイオーリングに付着し、0-リングを劣化させて真空シール性能を悪化させた。	弁開の時に弁板を収納している弁箱のビーム通路側に可動型弁板保護板を設けて、弁板0-リングへのスパッタ粒子の付着を防止した。
3) 偏向磁石ホール素子ケーブル導入バンジの真空シールをバイオボンプのふく射冷却により温度が低下し 真空シール性能が劣化した。	ケーブル導入用バイアの接続フランジのバイトン0-リングがクライオボンプのふく射冷却により温度が低下し 真空シール性能が劣化した。	真空シールをメタル0リング(コシフラット)に変更した。
4) イオン源接続フランジのビーム通過ポートのサイズ変更	左記フランジのビームのビーム通過ポートとイオン源ゲートバルブ間の接続位置でポート部がビーム通路側に張出す段差があつたため、発散の悪いビームが当たつて溶損した。	ポートのサイズを大きくして内側に無酸素銅製の保護板を設けてポート部を保護した。この保護板は中性化セルに接続して中性化セルに熱を逃がす構造とした。

謝 辞

J T - 60 プロジェクトの一環として、J T - 60 N B I 加熱装置の技術開発、設計、製作、試験等を通して終始、変わらぬ御指導と激励を戴きました。森茂副理事長、磯康彦理事、苦米地顕那珂研究所所長、吉川充二臨界プラズマ研究部部長、飯島勉 J T - 60 試験部部長、田中正俊核融合研究部部長田村早苗臨界プラズマ研究部部長代理に感謝致します。また本装置の建設を進めて行く過程で有益な議論をして戴きました臨界プラズマ研究部、J T - 60 試験部、核融合研究部の皆様に心から感謝致します。

また本報告書をまとめるに当り、御協力と激励を戴きました国枝俊介第4試験室長、蛭田和治同室長代理を始めとする第4試験室の皆様、加熱工学第1研究室の皆様に深く感謝致します。

更に J T - 60 N B I 及び原型ユニットの製作に協力して戴きました（株）日立製作所、（株）東芝、（株）日新電機、（株）三菱重工業の関係者の皆様に感謝致します。