

JAERI-M

8 5 3 7

大電流イオン源開発用テストスタンド
(ITS-3) 建設報告

1979年11月

伊藤 孝雄・堀池 寛・河合 視己人・近藤 梅夫*
大賀 徳道・松田 慎三郎・白形 弘文・田中 茂

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

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

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

大電流イオン源開発用テスト・スタンド（ITS-3）建設報告

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

伊藤 孝雄・堀池 寛・河合規己人

近藤 梅夫^{*}・大賀 徳道・松田慎三郎

白形 弘文・田中 茂

（1979年10月11日受理）

この報告書は、ITS-3の建設とその構成、性能についてまとめたものである。ITS-3は、多義にわたるJT-60用中性粒子入射装置のイオン源開発研究のうち、特にイオン源の大電化の研究に使用され、30kV, 30A, ビームパルス幅1秒までのイオン源が試験できるものである。

* 外来研究員 現在日新電機株式会社へ帰任

JAERI-M 8537

Injector Test Stand ITS-3 for Large-Current Ion Source Development

Takao ITOH, Hiroshi HORIIKE, Mikito KAWAI, Umeo KONDOH *

Tokumichi OHGA, Shinzaburo MATSUDA, Hirofumi SHIRAKATA and Shigeru TANAKA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 11, 1979)

ITS-3 is an injector test stand for developing ion sources and beam line hardwares used in a neutral beam injector of JT-60. It is capable of testing ion sources up to 30 A at 30 KV for 1.0 sec.

Keywords : Ion Source, Neutral Beam Injector, Injector Test Stand,
JT-60

*) On leave from Nissin Electric Co., LTD

目 次

1.はじめに.....	1
2.建設の目的と経緯.....	1
3.各部の性能.....	3
3.1 イオン源用電源.....	3
3.1.1 電源の構成.....	3
3.1.2 電源の性能.....	4
3.1.3 電源の制御系.....	5
3.1.4 電源の保護.....	5
(1) 保護方式.....	6
(2) サージ電圧に対する保護.....	8
3.1.5 接地系.....	9
3.2 真空排気系.....	17
3.2.1 真空排気系の概要.....	17
3.2.2 真空ポンプの性能.....	18
3.2.3 真空容器.....	19
3.3 冷却系.....	22
3.4 ガス導入系.....	25
4.建屋・レイアウト.....	26
5.おわりに.....	32
付録.....	33

Contents

1.	Introduction -----	1
2.	Object and Details of Construction -----	1
3.	Performance of Each Component -----	3
3.1	Power Supply for Ion Sources -----	3
3.1.1	Composition of Power Supply -----	3
3.1.2	Performance of Power Supply -----	4
3.1.3	Control System of Power Supply -----	5
3.1.4	Protection System of Power Supply -----	5
(1)	Protection Method -----	6
(2)	Protection from Surge Voltage -----	8
3.1.5	Grounding System -----	9
3.2	Vacuum System -----	17
3.2.1	Outline of Vacuum System -----	17
3.2.2	Performance of Vacuum System -----	18
3.2.3	Vacuum Chamber -----	19
3.3	Demineralized Water Cooling System -----	22
3.4	Pulsed Gas Feed System -----	25
4.	Building and Layout -----	26
5.	Summary -----	32
	Appendix -----	33

1. はじめに

ITS-3は昭和52年11月に完成したイオン源開発用のテストスタンドであり、JFT-2中性粒子入射装置に使用していた電源と純水冷却系を移設改造する他、真空容器と真空排気系を新たに製作して核融合特別研究棟内にまとめたものである。

このテストスタンドは、JT-60用中性粒子入射装置のためのイオン源の開発研究のうち、特に大電流の引出しを目的としたイオン源の改良研究に使用するために建設されたものである。

JT-60の一部製作が開始された現在、大電流イオン源の開発は急務となっているが、高エネルギービームの開発の目的で製作されたITS-2が50～75 keVのビーム収束の研究やイオン源総合性能の試験に使用されるのに比べ、ITS-3は大電流化のためのソースプラズマの大型化や改良研究が容易にできるように、フィラメント電源や、アーク電源などが大きいばかりでなく、真空排気ポンプの排気速度も多量の作動ガス流量を取扱えるよう大型なものとなっている。

一方、安定なビームを引出すことができる中性粒子入射装置を開発するためには単にイオン源のみならず、イオン源の動作と整合した電源の改良も劣らず重要であるが、JFT-2中性粒子入射装置として製作して以来、数々のトラブルを経験し、これらと対処してきた結果ITS-3の電源は大きな問題はなく動作するようになってきた。

ITS-3は昭和52年5月に製作が開始され、同年11月に完成した。その後総合調整を行い昭和53年3月から本格的なイオン源の開発研究に使用されるようになり、既にこれまでに新JFT-2中性粒子入射装置用イオン源が開発される(30 kV, 30 A出力)とともに、JT-60用矩形イオン源ソースプラズマの改良に役立って現在に至っている。

2. 建設の目的と経緯

ITS-3は、JT-60用中性粒子入射装置(NBI)に使用される大電流イオン源の開発研究のために建設されたテストスタンドである。

JFT-2の中性粒子入射加熱実験¹⁾に使用されるイオン源を開発するためのテストスタンドとして昭和49年度にITS-1(30 kV, 12 A)が建設され、また、JT-60 NBI用イオン源の開発のためのテストスタンドとしてITS-2(80 kV, 40 A)が昭和51年度に建設された。しかし、JT-60 NBI用イオン源を4～5年の短期間に開発するにはこれらのテストスタンドだけでは不充分な点が多い。というのは、一方では従来使用されていた低エネルギー(20～40 keV)領域から高エネルギー(50～100 keV)領域へとビームエネルギーを高くするとともに10秒間のビーム引出しに耐える電極構造を開発する必要があり、他方ではビーム出力パワーを増大させるために引出し電流の増大、即ち、大型ソースプラズマの開発が重要な開発項目となり、これら開発の両輪を单一のテストスタンドで行うには開発のテンポの点で無理があるからである。そこで、ビームエネルギーの増大やビームの収束、電極の冷却構造の改良試験やイオン源の総

1. はじめに

ITS-3は昭和52年11月に完成したイオン源開発用のテストスタンドであり、JFT-2中性粒子入射装置に使用していた電源と純水冷却系を移設改造する他、真空容器と真空排気系を新たに製作して核融合特別研究棟内にまとめたものである。

このテストスタンドは、JT-60用中性粒子入射装置のためのイオン源の開発研究のうち、特に大電流の引出しを目的としたイオン源の改良研究に使用するために建設されたものである。

JT-60の一部製作が開始された現在、大電流イオン源の開発は急務となっているが、高エネルギービームの開発の目的で製作されたITS-2が50～75 keVのビーム収束の研究やイオン源総合性能の試験に使用されるのに比べ、ITS-3は大電流化のためのソースプラズマの大型化や改良研究が容易にできるように、フィラメント電源や、アーク電源などが大きいばかりではなく、真空排気ポンプの排気速度も多量の作動ガス流量を取扱えるよう大型なものとなっている。

一方、安定なビームを引出すことができる中性粒子入射装置を開発するためには単にイオン源のみならず、イオン源の動作と整合した電源の改良も劣らず重要であるが、JFT-2中性粒子入射装置として製作して以来、数々のトラブルを経験し、これらと対処してきた結果ITS-3の電源は大きな問題はなく動作するようになってきた。

ITS-3は昭和52年5月に製作が開始され、同年11月に完成した。その後総合調整を行い昭和53年3月から本格的なイオン源の開発研究に使用されるようになり、既にこれまでに新JFT-2中性粒子入射装置用イオン源が開発される(30 kV, 30 A出力)とともに、JT-60用矩形イオン源ソースプラズマの改良に役立って現在に至っている。

2. 建設の目的と経緯

ITS-3は、JT-60用中性粒子入射装置(NBI)に使用される大電流イオン源の開発研究のために建設されたテストスタンドである。

JFT-2の中性粒子入射加熱実験¹⁾に使用されるイオン源を開発するためのテストスタンドとして昭和49年度にITS-1(30 kV, 12 A)が建設され、また、JT-60 NBI用イオン源の開発のためのテストスタンドとしてITS-2(80 kV, 40 A)が昭和51年度に建設された。しかし、JT-60 NBI用イオン源を4～5年の短期間に開発するにはこれらのテストスタンドだけでは不充分な点が多い。というのは、一方では従来使用されていた低エネルギー(20～40 keV)領域から高エネルギー(50～100 keV)領域へとビームエネルギーを高くするとともに10秒間のビーム引出しに耐える電極構造を開発する必要があり、他方ではビーム出力パワーを増大させるために引出し電流の増大、即ち、大型ソースプラズマの開発が重要な開発項目となり、これら開発の両輪を单一のテストスタンドで行うには開発のテンポの点で無理があるからである。そこで、ビームエネルギーの増大やビームの収束、電極の冷却構造の改良試験やイオン源の総

合性能試験は ITS-2 で行うことにして、大電流化を目指したソースプラズマの開発を手がけるテストスタンドがどうしても必要となる。ITS-3 はこのような目的のためにつくられたテストスタンドである。更に、将来の中性粒子入射装置を考えると、その効率を向上させるためにはイオン源とエネルギー回収装置の併用を考えることが必要であるが、ITS-3 は将来このようなエネルギー回収装置の開発研究も可能となるよう考慮して建設された。ITS-3 はイオン源用電源、真空排気系、純水冷却系などから構成される。

ITS-3 用の諸設備は真空容器と真空排気系の大部分を除いて JFT-2 粒子入射加熱実験装置¹⁾(以下 JFT-2 NBI) に用いられた設備を移設改造したものである。この転用は、JFT-2 NBI が設計された時から予定されており、JFT-2 での加熱実験が終了すると、同時に ITS-3 への移設工事が開始された。イオン源用電源は 30 kV, 30 A, パルス幅 1 秒までのビームを引出せるものである。

電源のうち、加速電源と減速電源以外は JFT-2 NBI 2 台のイオン源に対応してそれぞれ独立の PIG 電源を備えていたが、ITS-3 への移設に伴い、2 基のアーク電源を並列運転できるよう改造した。JFT-2 NBI 用電源のトラブルは JFT-2 での実験中にほぼ出そろい、その大部分は既に改良されており、電源の故障により ITS-3 が停止することは少なくなっている。

真空排気系の排気速度が大きいことは、ITS-3 の大きな特徴である。イオン源を大電流化するためには取り扱うガス流量が増加するので大容量の真空排気ポンプが必要となる。このため当初約 30,000 ℥/sec の排気速度をもつ 36 吋拡散ポンプ 1 系統が設置され、その後昭和53 年度に 2 系統に増設されて総合排気速度 55,000 ℥/s が得られるようになっている。イオン源の大電流化を目指す場合はイオン源の口径や真空引き口が大きくなり、それに伴いイオンビームを受けるビームダンプやビーム測定空間が大きなものが必要となるので真空容器は、胴体の太いものとした。真空ポンプは 36 吋の油拡散ポンプ 2 台を使用し、真空容器は内径 1,200 mm, 長さ 3,000 mm のステンレス (SUS 304) 製胴部にイオン源取付けポートや観測孔を設けたものである。

冷却系は、JFT-2 用 NBI で使用していた閉ループ純水冷却系の一部を改造して使用している。加速電源のレギュレーターバルブ (高出力四極真空管 Y676) の冷却水もこの冷却系から賄うこととした^{*)}ため一次側ポンプ吐出圧を上げ、熱交換器の容量を増加させた。また真空排気系の油拡散ポンプ及びメカニカルプースターポンプの冷却水もこの冷却系の二次水側で賄うようにしたので、ITS-3 の冷却系は一系統に統一された。

イオン源へのガス導入系は JFT-2 NBI で使用していたものをそのまま設置した。JFT-2 NBI はガス導入系が 2 系統分あったが、ITS-3 でもイオン源の大電流化に伴い使用するガス流量も増加すると予想されるので 2 系統の使用も可能なようになっている。

前述したように ITS-3 は JFT-2 NBI の電源、冷却系などを移設、改造するとともに真空容器や真空排気系を新たに製作し核融合特研 1 階にまとめたものであるが、ITS-3 の建設全体のとりまとめと電源を伊藤が担当し、堀池は真空容器、真空排気系、冷却系ビームダンプの

^{*)} JFT-2 用 NBI の電源では高電位に浮いた冷却水ループの熱交換器を送風機で冷却する方式を採っていたがこの冷却設備は所要空間が大きく、騒音も大きいので今回的方式に改めた。

製作改造を担当し、河合は電源を担当した。また、ITS-3 完成後の総合調整や一部の改良も上記 3 人が中心になって行った。他の共著者は JFT-2 NBI 建設当時に ITS-3 のもとになる設備の建設を担当したり、ITS-3 の建設に一部協力したものである。

電源及び冷却系の移設改造工事はそれぞれ JFT-2 NBI 電源及び冷却系を製作した日新電機(株)、および三栄技研(株)が請負い、また、真空容器と真空排気系の製作は日本真空技術(株)が行った。

ITS-3 完成後は河合が装置管理者となってイオン源改良研究を支援するとともに、種々の改良を行いながら稼動率の良いテストスタンドにしてきた。現在 ITS-3 は、新 JFT-2 NBI(昭和 55 年春に 1.5 MW の中性ビームを JFT-2 に打ち込む計画で現在建設中)に使用される予定の 30 A 出力のイオン源の開発や JT-60 用矩型ソースプラズマの開発のためにフル稼動している。

3. 各部の性能

3.1 イオン源用電源

3.1.1 電源の構成

ITS-3 のイオン源用電源は、JFT-2 NBI に使用したイオン源用電源を移設し、一部改良を加えたものである。第 3.1 図に電源系統図を示すが、加速電源、減速電源が各 1 基、PIG 電源はアーク、磁場コイル、フィラメントの各電源がそれぞれ 2 基づつ、さらに増設フィラメント電源 1 基から構成される。JFT-2 NBI の時と ITS-3 とで電源の異なる主な点は次の通りである。

- 1) それぞれ 350 V, 200 A の出力を持つ 2 系統のアーク電源は並列に運転され、350 V, 400 A^{*)} の出力のアーク電源として使用される。
- 2) JFT-2 NBI では電源構成機器等が JFT-2 建屋や約 50 m 離れた核融合特研など数カ所に分散して設置されていたが、ITS-3 では核融合特研の加熱電源室内に一括して設置した。
- 3) 大電流フィラメントを使用するイオン源の実験用に、15 V, 1500 A のフィラメント電源を ITS-1 より移設した。
- 4) イオン源の電極間での放電破壊時に電極損傷の原因となるサージ電流を抑制するため、フェライトコアによるサージブロックを新設した。
- 5) 真空排気系電源および冷却系電源に必要な容量が増加したのでイオン源用電流の減速・PIG 電源用開閉器盤の出力側より分岐して 150 kVA の降圧変圧器を新設し、真空排気系および冷却系の電源に電力を供給した。これにより ITS-3 の電力供給系統が一本化され

^{*)} 54 年 3 月にアーク電源の大電流化の改造を行い、400 A × 2 = 800 A の最大出力が得られるようになった。

製作改造を担当し、河合は電源を担当した。また、ITS-3 完成後の総合調整や一部の改良も上記 3 人が中心になって行った。他の共著者は JFT-2 NBI 建設当時に ITS-3 のものとなる設備の建設を担当したり、ITS-3 の建設に一部協力したものである。

電源及び冷却系の移設改造工事はそれぞれ JFT-2 NBI 電源及び冷却系を製作した日新電機(株)、および三栄技研(株)が請負い、また、真空容器と真空排気系の製作は日本真空技術(株)が行った。

ITS-3 完成後は河合が装置管理者となってイオン源改良研究を支援するとともに、種々の改良を行いながら稼動率の良いテストスタンドにしてきた。現在 ITS-3 は、新 JFT-2 NBI(昭和 55 年春に 1.5 MW の中性ビームを JFT-2 に打ち込む計画で現在建設中)に使用される予定の 30 A 出力のイオン源の開発や JT-60 用矩型ソースプラズマの開発のためにフル稼動している。

3. 各部の性能

3.1 イオン源用電源

3.1.1 電源の構成

ITS-3 のイオン源用電源は、JFT-2 NBI に使用したイオン源用電源を移設し、一部改良を加えたものである。第 3.1 図に電源系統図を示すが、加速電源、減速電源が各 1 基、PIG 電源はアーク、磁場コイル、フィラメントの各電源がそれぞれ 2 基づつ、さらに増設フィラメント電源 1 基から構成される。JFT-2 NBI の時と ITS-3 とで電源の異なる主な点は次の通りである。

- 1) それぞれ 350 V, 200 A の出力を持つ 2 系統のアーク電源は並列に運転され、350 V, 400 A^{*)} の出力のアーク電源として使用される。
- 2) JFT-2 NBI では電源構成機器等が JFT-2 建屋や約 50 m 離れた核融合特研など数カ所に分散して設置されていたが、ITS-3 では核融合特研の加熱電源室内に一括して設置した。
- 3) 大電流フィラメントを使用するイオン源の実験用に、15 V, 1500 A のフィラメント電源を ITS-1 より移設した。
- 4) イオン源の電極間での放電破壊時に電極損傷の原因となるサージ電流を抑制するため、フェライトコアによるサージブロックを新設した。
- 5) 真空排気系電源および冷却系電源に必要な容量が増加したのでイオン源用電流の減速・PIG 電源用開閉器盤の出力側より分岐して 150 kVA の降圧変圧器を新設し、真空排気系および冷却系の電源に電力を供給した。これにより ITS-3 の電力供給系統が一本化された。

^{*)} 54 年 3 月にアーク電源の大電流化の改造を行い、400 A × 2 = 800 A の最大出力が得られるようになった。

た。

- 6) 真空容器、高電位テーブル、電力用ケーブル等の床面には銅板を敷き、また接地母線を低インダクタンスとなるよう銅板にして、放電破壊時に接地電位が上昇することによる影響を抑制するようにした。
- 7) 1)項と関連して、PIG電源用制御盤がJFT-2 NBIでは4面であったのを2面にした。以上のような改造を加えたものがITS-3のイオン源用電源である。

3.1.2 電源の性能

本電源のうち、引出し電源系である加速電源と減速電源にはそれぞれレギュレーターバルブ（以下、RV）が定電圧制御と過電流遮断のために設置されている。また、PIG電源系のうちのアーク電源の2基にはそれぞれに高速オン-オフ制御のためのSCRスイッチ（サイリスタチャップ）が設置されている。

本電源を構成する各電源の定格出力は以下のとおりである。

(1) 加速電源

出 力	DC 5 kV ~ 30 kV • 30 A
負荷 パルス幅	10 m sec ~ 1 sec
くり返し	10 %以下
電圧 変動率	10 %以下（於：負荷端）
リップル	± 1 %以下（於：負荷端）

過電流の場合の電流遮断には直流側にRV（真空管：Y 676）が、交流側にはSCRスイッチがある。RVの遮断に要する時間は100 μ sec以下であり、放電破壊消滅後、ある設定遅延時間後に自動復帰する。一方、SCRスイッチは上記RVの遮断機能が何らかの現因で正常動作しなかった場合に電流を遮断するもので、その遮断時間は20 m sec以内である。

(2) 減速電源

出 力	DC 0 ~ -5 kV • 4 A
負荷パルス幅	10 m sec ~ 1 sec
くり返し	10 %以下
電圧 変動率	5 %以下（於：負荷端）
リップル	± 1 %以下（於：負荷端）

過電流の場合の電流遮断には加速電源と同様にRV（真空管：8T43R）が設置されている。遮断時間は100 μ sec以下であり、この減速RVの遮断動作と連動して加速RVも遮断動作するようになっている。放電破壊消滅後の自動復帰の場合、連動遮断した加速電源が自動復帰する前に、つまりある設定時間以前に復帰する（但し、加速電源のみ、RVで遮断した場合は連動遮断しないのでこの限りでない）。

(3) PIG電源

PIG電源はすべて加速電源の負荷端電位を基準に接地から浮いた状態で使用される。これらのうち増設フィラメント電源を除き、2系統であり、通常は並列接続して2倍の電流容量

をもつて一系統としているが、出力端の一部配線替えを行えば2系統を単独運転することも可能である。

1) アーク電源

出 力	DC 0 ~ 350 V • 400 A*
負荷パルス幅	10 m sec ~ 1 sec
くり返し	10 %以下
電圧変動率	10 %以下 (於:限流抵抗電源側)
リップル	±1 %以下 (於:負荷端)

なお、本電源のオンーオフ制御には直流側にSCRチョッパを使用しており、立上がり時間300 μsec以内、立下がり時間は100 μsec以内である。

2) フィラメント電源

出 力	DC 0 ~ 15 V • 200 A
連続定格	

3) 増設フィラメント電源

出 力	DC 0 ~ 15 V • 1500 A
連続定格	

4) 磁場コイル電源

出 力	DC 0 ~ 15 V • 240 A
連続定格	

5) その他

ガス導入系電源；イオン源への水素ガスの供給電動弁用電源であり、電磁弁にAC100V、圧電素子弁用にDC 0 ~ 100 Vパルス発生器が設置されている。(3.4項参照)

計測用電源；絶縁トランスを介したAC100V電源である。

3.1.3 電源の制御系

本電源を機能的かつ安全に運転するための制御系はイオン源電源制御盤を中心に、高電位テーブル上の計測器類、ガス導入系高電位テーブル上のガス導入系制御機器により構成される。制御盤は4面+1面から成り、タイムシーケンスコントローラー、加速電源および減速電源の出力観測用シンクロスコープなどが盤面上に組込まれており、イオン源用電源の遠隔制御を本制御盤で行うことができる。

3.1.4 電源の保護

ITS-3用電源では、一般の電源と同様に機器の破損等が生じた時にその影響が上流側へ波及することを防ぐ保護機構と、その他にイオン源の放電破壊時に発生するサージ電圧から各機器を保護する機構とがある。JFT-2 NBI用電源の時にも多くの改良が加えられているが、そ

* 昭和54年3月以降 250 V, 800 A の電流が得られるように改造した。但し、くり返しは1 %以下となる。

のほとんどがこれらの保護機構を強化するためのものであった。これらの改良された保護機構は本電源に引き継がれており、1つの特徴となっている。ここでは保護方式と、改良が加えられた機器についてはそれらが改良に至った経緯について詳細に述べる。

(1) 保護方式

1) 受電端

ITS-3 用電源は第 3.2 図に示すように加熱バンクと呼ばれる系統から受電している。本電源の受電端には加速電源用と減速・PIG 電源用とに、限流ヒューズ、電磁接触器等を内蔵した開閉器盤がそれぞれ設置されている。

JFT-2 NBI の実験中に受電端で、常時励磁方式の電磁接触器が遮断容量を越える電流で遮断動作を行うということがあった。これは次のようなことのためであった。その当時の JFT-2 NBI 用の開閉器盤内の電磁接触器は操作用電源内蔵型の常時励磁方式であった。たまたま電磁接触器の負荷側で変圧器の故障による三相短絡を生じ異常に大きな電流が流れ、接触器の操作用電源が電圧降下を起こして接触器が釈放を始めた。この時の短絡電流が接触器の遮断容量を越えていたため、開閉器盤内でアーク噴出が起り限流ヒューズの電源側での短絡に発展した。このように接触器が常時励磁方式の場合、操作用電源の電圧降下で接触器の釈放が起こるので、電圧降下時の接触器の釈放特性と限流ヒューズの遮断特性との協調がとられている必要がある。

ITS-3 の受電端での保護協調曲線を第 3.3 図に示す。限流ヒューズ PF01, PF02 より上流側での短絡では高圧開閉器 045₀₃, 045 等が保護し、限流ヒューズより下流側では電磁接触器 HT ctt 01, HT ctt 02 を過負荷遮断に用いており、接触器の遮断容量を越える短絡時等の故障大電流に対しては接触器の釈放時間よりも早く限流ヒューズが溶断し保護する。このようにして ITS-3 での過負荷、短絡等の異常による影響が上流側に波及しないようにしている。また、減速・PIG 電源系の電磁接触器 HT ctt 01 はその操作用電源が電圧降下を起こした時の接触器の釈放においても限流ヒューズと協調がとられており、接触器の操作方式は操作電源内蔵型の常時励磁方式を採用している。これは本電源の受電電圧 3300 V に大きな変動はないと考えたためであったが、電源系統図に示すように高圧開閉器 045 から分岐する ITS-2 においてイオン源に大きな放電破壊が生じた時にこの 3300 V の電源電圧が瞬時電圧降下を起こしていることがわかった。この瞬時電圧降下のため、ITS-3 の試験運転中に減速・PIG 電源の開閉器盤内の電磁接触器 HT ctt 01 が ITS-3 の運転状態にかかわらず釈放してしまうことが頻発した。これを防ぐためには加熱バンクの変圧器の容量を増して電圧降下を抑えるか ITS-2 の電源とは別系統で受電するなどがあるが、応急的には減速・PIG 電源の開閉器盤の操作電源を別系統の電源から供給することにした。以後このような開閉器盤の誤動作はなくなった。

加速電源用の開閉器盤内の電磁接触器の操作方式にはコンデンサトリップ方式を採用して、短絡時等に接触器がその遮断容量以上で遮断動作を行わないようにしてある。このため接触器 HT ctt 02 は過負荷のみで働き相間短絡等の場合は限流ヒューズ PF 02 とそれより上流の遮断器が動作する。(保護協調曲線第 3.3 図で HT ctt 02 の遮断特性は今回必要なく、書いていない。) なお、加速電源の過負荷保護を増強するため、開閉器盤より負

荷側に過電流継電器、地絡電圧継電器が設置されており、それらが動作した時も HT ctt 02 は釈放される。

2) 交流側

a) 加速電源

加速電源の場合、負荷であるイオン源の電極間での放電破壊に伴う過電流が発生した場合、直流側の RV がその遮断を主に引き受けている。しかし何らかの原因で RV の機能に異常が発生し、遮断機能が動作しなかった場合や RV の入力側（アノード側）の故障の時のために交流側に SCR スイッチが設けられている。この SCR スイッチの入力側に設けられた過電流検出ユニット、又は前出の地絡電圧継電器が異常を検出して動作した場合に SCR スイッチのゲート信号をオフとして 1 サイクル以内に遮断する。この SCR スタックは各相に 2 並列に素子を並べて使用しているが、素子の電流分担が不均一となり易く JFT-2 NBI ではこれが原因と推定される SCR スタック内の部分的素子の破壊が生じたことがある。このため SCR の出力側に電流バランサーを設置して平衡を図る改良を行って、SCR スタックの過電流耐量を増加させた。

b) 減速電源および PIG 電源

減速電源および PIG 電源ではそれぞれの直流発生装置の入力側に電磁接触器が設けられ、過電流検出ユニットが過電流を検出した場合、当該電磁接触器が釈放する。

このうちアーク電源については過電流が起りやすく、かつ重要度の高い電源であるため過電流検出ユニット 2 系列と過電流継電器 1 台とが設けられている。この過電流の検出により、該当するアーク電源主接触器を釈放する。同時にタイムシーケンスコントローラのアークパルスも停止するようになっている。アーク電源においてサイリスタチャップバーを使用して直流側でオン-オフ制御を行っているが、オン状態からオフとするためのオフ指令パルスをチャップバーに加えると同一タイミングでノイズが発生した場合等において、チャップバーが遮断不能となりアーク電流が定格を越えて数秒間流れてしまうことがあり、これはアーク電極の損傷の原因となる。JFT-2 NBI の通常運転中はアーク放電作動用ガスはパルス的に供給していたので、サイリスタチャップバーの遮断不能が生じてもガス圧の低下によりアーク放電は維持されずにチャップバーは遮断状態に復帰していたが、ITS-3 では作動ガスを定常的に流すこともあり得るのでサイリスタチャップバーが遮断不能を起こすということも前提とした保護機構の増強が必要となる。

この目的で、サイリスタチャップバーが遮断不能に陥ってアーク電流がプリセッテッドパルス幅より 50 m sec 以上（この時間は可変）流れた時はタイマーからの信号によりアーク電源主接触器を釈放することによってアーク電流を遮断するように改良を行った。サイリスタチャップバーの遮断不能となる詳しい原因については後に述べるように放電破壊時のサージ電圧によりサイリスタチャップバーのオン-オフ制御回路が誤動作するためと考えられるが、はっきりしたことはわかっていない。

3) 直流側

各電源のうち直流側に過電流等に対する保護機構が入っているのは加速電源と減速電源であり、RV の過電流に対する高速遮断機能である。この RV の高速スイッチ機能は加速お

より減速のイオン源電極を保護するものであり、RV用として使用している高出力真空間は加速電源用が水冷型のEIMACのY676、減速電源用が空冷型のNEC 8T43Rである。RVはこのような高速スイッチとしての機能のほか、定電圧制御の機能も有しており、これらのRVの機能はITS-2建設報告書に詳述されている²⁾。

(2) サージ電圧に対する保護

イオン源の加速-減速電極間及び減速-接地電極間での放電破壊は、それぞれの電源系にサージ電圧を発生させる。このサージ電圧から電源を構成する各機器を保護するために種々のサージアブゾーバーが取り付けられている。特に、サージ電圧にさらされる加速電源系および高電位テーブル上にある機器にサージ対策が集中している。ITS-3電源は、JFT-2NBI電源のサージ対策をそのまま受け継いでいる。このサージ対策は電源設計当初からなされた機器もあるが、JFT-2NBIによる加熱実験中に現場でなされたものも多かった。

第3.4図にイオン源電極に放電破壊が生じた時のY676のカソード・アース間の電圧を示す。放電破壊と同時にRVはカットオフとなりカソード電位は急激に下がるが、その下り方は接地電位を通り越し、約-5kVまで下がっている(測定に使用したシンクロスコープの周波数特性が良くないので、実際にはこれはもっと低い電位まで下がっているものと予想される。)このようなサージ電圧により、加速電源系のこれより絶縁耐圧の低い機器が破壊があることがある。JFT-2NBIで、加速電圧25kV、引出し電流1Aの運転中、RVのアノード・カソード間の絶縁破壊が生じて、RVの電流遮断機能が破壊され遮断不能状態に陥ったことがある。第3.4図に示したようなサージ電圧はカソード電位を負荷端電圧以上に変動させてるので、カソード電位を基準電位とするコントロールグリッド電位やスクリーニンググリッド電位も変動する。前述の場合は、アノード・スクリーニンググリッド間の絶縁が悪かったため、この間で管内絶縁破壊を生じた。この時スクリーニンググリッドの真空シール部にアーク放電が集中したためにシール部にその熱で穴があき、管内の真空劣化をきたした。この管内絶縁破壊は、より直接的なアノード・カソード間のアーク放電へと移行していったものと推定される。最初の管内絶縁破壊におけるアノード・スクリーニンググリッド間の電圧は第3.4図から、瞬間に34kV以上であったと推定される^{*})。Y676の規格表によるとアノード・スクリーニンググリッド間の耐圧は75kVであるが、この種類の真空管には個々に性能のバラツキがあり、規格より耐圧の低いものもある²⁾。とにかくこのようなトラブルから、イオン源用電源の過電流遮断用RV自体に充分なサージ対策を施す必要のあることがわかった。このトラブルが発生した時(JFT-2NBI当時)RVのサージ対策としては、第3.4図に示したようなイオン源電極部で発生したサージ電圧を、RVとイオン源との間に設置されたサージアブゾーバーで吸収する方法がとられていた。当然これに使用されていたアブゾーバーはエネルギーを吸収する種類のものであったが、その機能が充分ではなかったことを反省して、サージアブゾーバーを有効に働かせるために、CRアブゾーバーとLRアブゾーバーを併用する型とした^{*})。

*) アノードの電位は負荷端電圧より4~5kV高くこの時は接地から30kVにあった。またスクリーニンググリッド電圧は1kVであったので、カソードが-5kVとなるとアノード・スクリーニンググリッド間電圧は34kVとなる。

*) このLRサージアブゾーバーの回路定数の選定は日新電機(株)の日和、西台両氏の協力によってなされた付録1に述べる測定結果に基いて取付けられたものである。

ITS-3 では RV カソードと負荷端（イオン源）との間に $L = 1\text{mH}$, $R = 30\Omega$ の LR サージブロックを挿入し、またなお万全を期するために RV のアノード・カソード間に並列に放電用気中ギャップが取り付けられている。

前述の(1)の 2)の a)で述べた加速電源のサイリスタスタックの故障は、直流側で生じたサージ電圧が高圧トランスのストレイキャパシティを通して交流側に伝わり、サイリスタに過電圧が加わったことにより破壊されたものとも推定される。このため、サージアブゾーバーによるサイリスタスタックの保護も必要で、 $R = 30\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$ の RC アブゾーバーがバランサーと直流出力用昇圧トランスの間に入れてある。

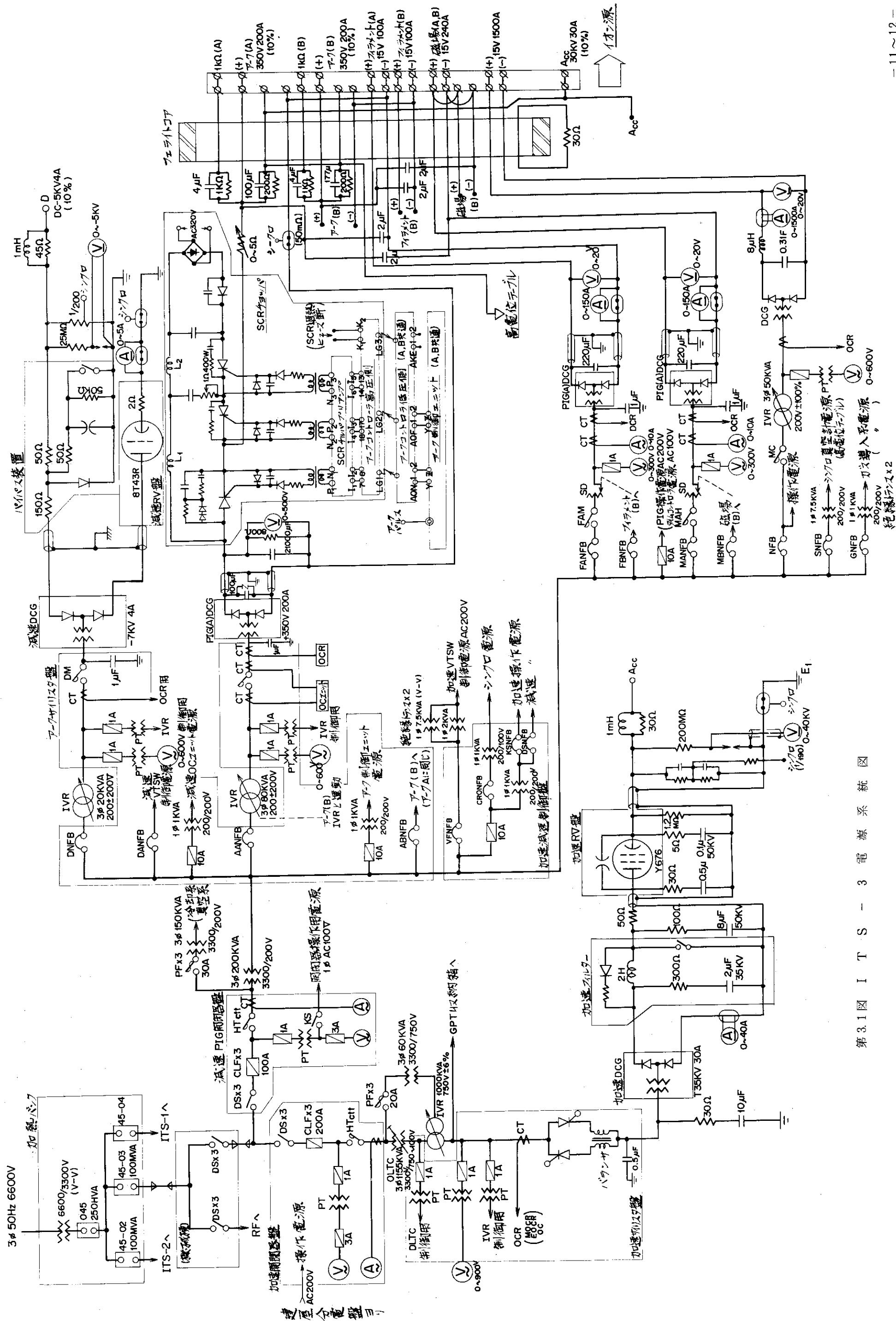
その他、高電位テーブル上にあって AC100V で動作する機器、アーク電流、電圧観測用シンクロスコープ、ピラニおよびダイアフラム真空計、圧電素子弁動作用パルサー等にも第 3.5 図に示す通りのサージ対策がなされている。30 kV 耐圧の絶縁トランスを出た AC100V ラインは $1\mu\text{F}$ のコンデンサーと電圧依存性抵抗素子（ZNR）で高電位テーブルに電位固定され、サージ電圧が伝播してきた場合も高電位テーブルと同時に変動することにより低圧機器内に高い電圧が発生しないようにした。同様に小耐圧絶縁（100V/100V）された各機器類への電源供給線も $1\mu\text{F}$ のコンデンサーで各機器のシャーシー電位に固定され、電源ケーブルとシャーシーの間に異常電圧が生じないようになっている。また、(1)の 2)-b)で述べた、アークサイリスタチップのオン-オフ用制御回路のそれぞれの電源ラインにおいても、第 3.8 図と同じような電位の固定が行われており、高圧直流ラインからアーク電源直流回路へのサージの回り込みを防いでいる。さらに、高電位テーブルよりイオン源へ接続される全ての電線や金属製配管は共通の磁性体環（フェライトコア）を通して 1 ターンコイルを形成し、そのインダクタンスによりイオン源の放電破壊時の di/dt を抑えると共に、その高周波抵抗性により放電ループの電圧分担をこのコイルに負わせて、そこでエネルギーを消費させ、電極へのエネルギーの流入を抑制している。

3.1.5 接地系

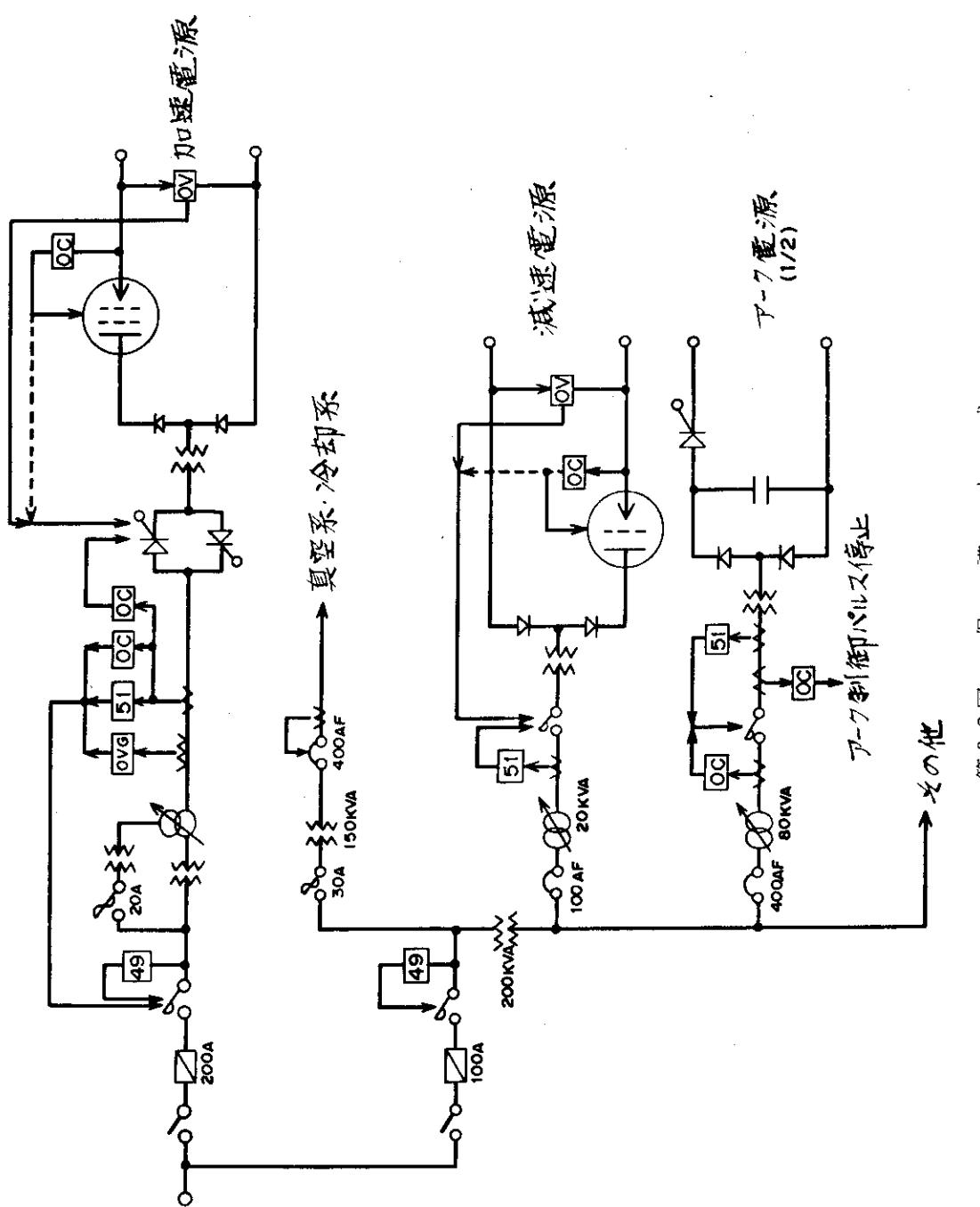
電源を構成する各機器の電位変動を出来る限り小さく抑えることはテストスタンドの安定な運転のために是非とも必要なことである。特に NBI システムやイオン源のテストスタンドにあっては負荷のイオン源電極が本来、放電破壊を頻発させるものであるだけにそれに伴って発生するサージ電圧に対し接地系がしっかりしたものであることが系全体の安定性を決めることがある。ここで接地系がしっかりしたものであるということはサージ電流の伝播に際して接地線の各点での電位差の発生が小さいことを意味し、このためには接地線ができるだけ低インダクタンス導体からできていることが必要である。放電破壊時に発生するサージ電流のエネルギー源は PIG 電源絶縁トランスの対地静電容量、RV ヒータートランスの対地静電容量、直流高圧ケーブルの対地静電容量などに蓄積されている電荷であって放電破壊時にはサージ電流は負荷端（イオン源電極）から接地線を帰路とするのでこれら直流機器に沿って接地線を敷設とともにそのインダクタンスを抑えることが重要となる。

ITS-3 の接地幹線は第 3.6 図に示すようなものであり、真空容器直下を含むイオン源近傍の床面には一面に厚さ 0.3 mm の銅板を張り、これより直流高圧ケーブルに沿って接地幹線を

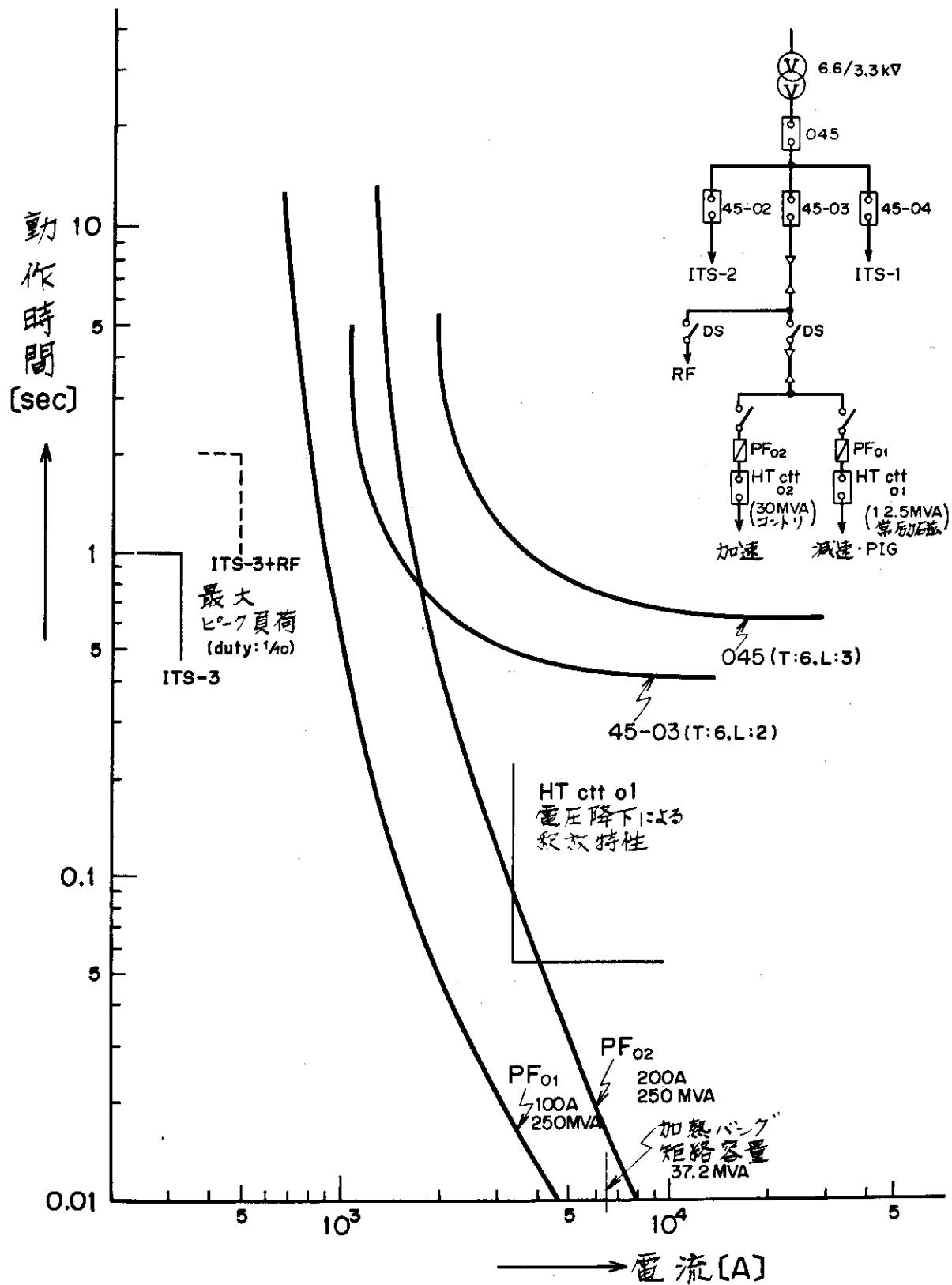
延長している。この接地板とイオン源電源とは接地電極に於て接続されている。また、各機器の履体アースは近接する接地幹線に接続される。この接地幹線は第1種接地であり、真空容器下のピットの地下に埋設された接地抵抗 11Ω の接地極 A と屋外に設けられた接地抵抗 4.5Ω の接地点 B の両方に接続されている。また、降圧トランス 2次側中性点の接地などは上述の接地系とは別に屋外に第2種接地極を設け、これに接続している。



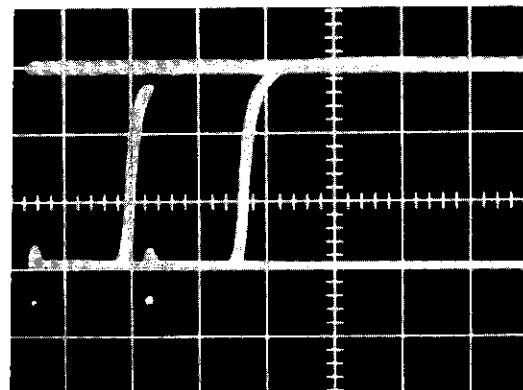
第3.1図 ITS-3電源系統図



第3.2図 保 護 方 式



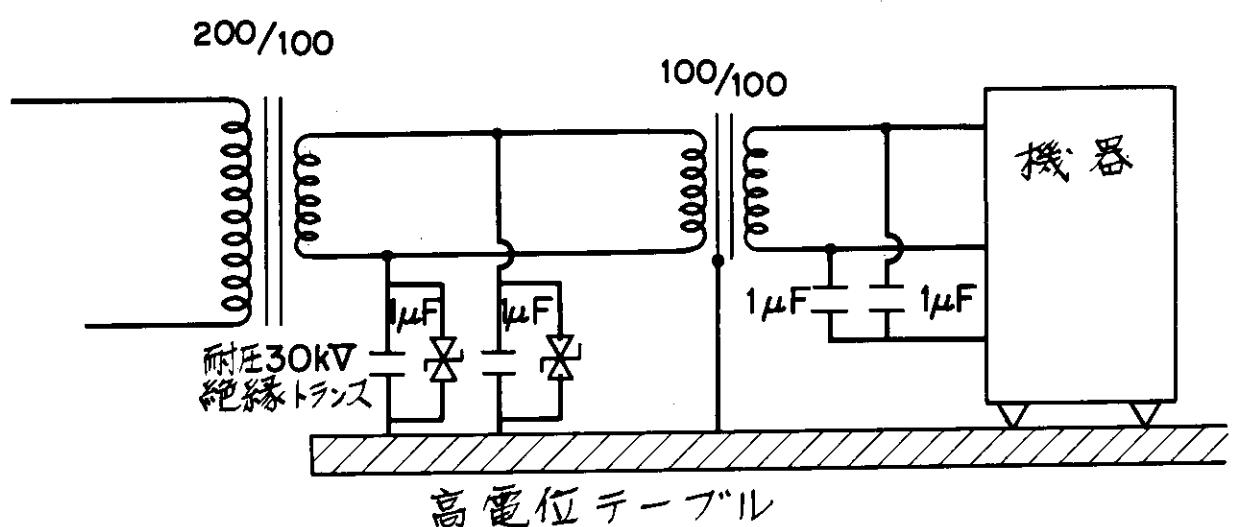
第3.3図 ITS-3電源保護協調図



10 kV/div

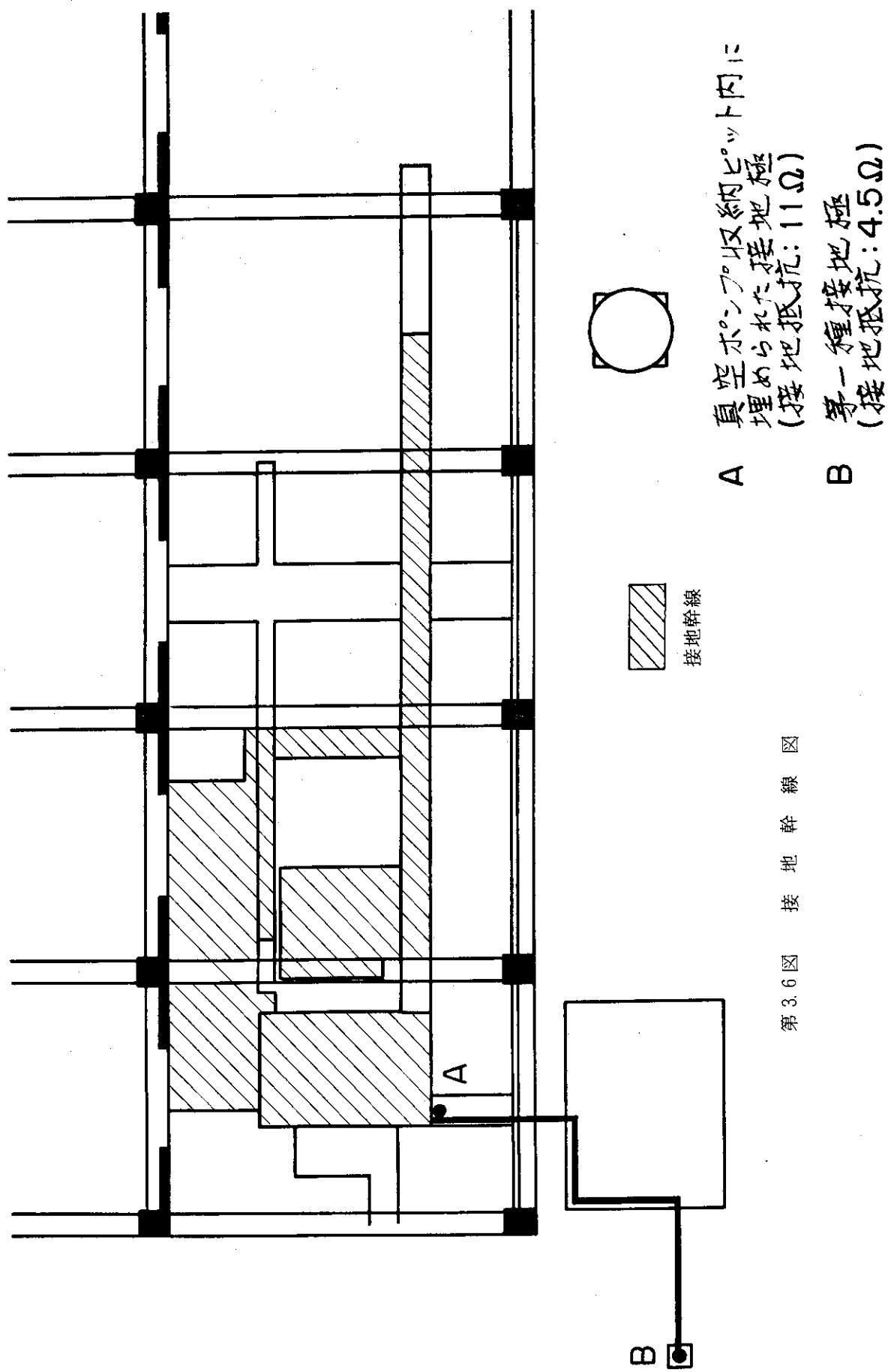
1 ms/div

第3.4図 $R = 10 \Omega$, $C = 0.1 \mu\text{F}$ のアブゾーバーを使用していた時のサージ電圧の例



- | | | |
|----|--|----|
| 機器 | <ul style="list-style-type: none"> • アーク電流・電圧観測用 CRO • ダイアフラム 真空計 • ピラニゲージ • 電離子用パルサー • その他 | 2台 |
| | | 2台 |
| | | 1台 |
| | | 2台 |

第3.5図 高電位テーブル上機器のサージ対策



3.2 真空排気系

3.2.1 真空排気系の概要

(1) 必要排気能力

大容量イオン源から引出される大電流ビームとビームに付随して流れ出す水素ガスを処理するには排気速度の大きな真空ポンプ系が必要である。

30 Aのイオンビームを引出すにはどの程度の作動水素ガスを処理する必要があるかを見積る。水素ビームの成分比 (H^+ : H_2^+ : H_3^+) を (0.6:0.3:0.1) と仮定するとビームを作るのに要するガス量は

$$30 \times \left(\frac{0.6}{2} + 0.3 + \frac{3}{2} \times 0.1 \right) / 1.6 \times 10^{-19} = 14 \times 10^{19} \text{ sec}^{-1}$$

$$= 4 \text{ Torr } \ell/\text{sec}$$

となる。

イオン源でのガス効率を $1/3$ と仮定すると全ガス流量は $12 \text{ Torr } \ell/\text{sec}$ となる。イオン源試作段階での余裕を含めると、最大排気量は $15 \sim 20 \text{ Torr } \ell/\text{sec}$ 必要でありこのガス量を処理するには 48 時拡散ポンプ 2 台が必要である。ちなみに大型拡散ポンプの Q P 曲線を第 3.7 図に示す。ポンプ故障やメンテナンスの際の重疊性を考慮して 36 時拡散ポンプ 2 系列の排気装置を設置する。^{※)} 主たる仕様を以下に示す。

i) 負荷気体	水素ガス
ii) 高真空ポンプ	36 時拡散ポンプ 2 台
iii) 排気速度とその圧力領域	$30000 \ell/\text{sec}$ 以上 ($2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ 以下で)
iv) 無負荷時の到達真空度	$1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$
v) 最大排気量	$10 \text{ Torr } \ell/\text{sec}$
vi) 背圧ポンプ	メカニカルプースタポンプ 油回転ポンプ

(2) 性能

本排気装置は第 3.8 図に示される排気系統とその制御系統からなり、上記仕様の他に次のような性能をもつ。

- i) 拡散ポンプ引口に、フレオノン冷凍バッフルを設け真空ポンプ油の逆流を防いでいる。
- ii) 真空ポンプと容器は 22 時の空圧作動ゲート弁で結合されている。本ゲート弁は開口部 $35 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ 矩形、厚み 15 cm で空気に対して $40000 \ell/\text{sec}$ のコンダクタンスを持つ。
- iii) 本装置に使用されている真空バルブは全て超高真空用オーステナイト系ステンレス鋼製バルブである。
- iv) 制御系の機能

- a. 真空排気装置の真空計、バルブ開閉表示、ポンプ起動表示、警報表示と遠隔運転および安全運転のためのインターロック系の各機能を持っている。
- b. 遠隔操作は自動と手動の操作があり、運転中での手動から自動への切替えが可能で

* 当初は予算の関係で、そのうちの一系を設置し、残り一系は次年度（実際には 53 年 12 月）に設置された。

ある。

c. インターロックの主なものを下記に示す。

- 22吋ゲート弁 真空容器内圧力設定値以下
 真空容器粗引き弁(V2)閉
 メカニカルブースタポンプON
 拡散ポンプ電源投入後時間設定
- 拡散ポンプ 背圧側弁(V3)開
 メカニカルブースタポンプON
 フレオングリーン冷凍機及冷却水ON
- 背圧ポンプ系 拡散ポンプ停止後設定時間内は動作

3.2.2 真空ポンプの性能

i) 油拡散ポンプ

型式	日本真空製	PFL-36
排気速度	窒素	37000ℓ/sec
油量		21ℓ
所要電力	始動時	24 kW
	定常時	12 kW
冷却水量		38ℓ/min
重量		650 kg

ii) メカニカルブースタポンプ

型式	日本真空製	PMB-010A
排気速度		1030 m ³ /hr
到達圧力		5 × 10 ⁻⁴ Torr
所要電力		3.7 kW
冷却水量		3ℓ/min
油量		2.8ℓ
重量		300 kg

iii) 油回転ポンプ

型式	日本真空製	D-950
排気速度		960ℓ/min
到達圧力		5 × 10 ⁻⁴ Torr
回転数		1200 rpm
油量		2.2ℓ
所要電力		1.5 kW
重量		35 kg

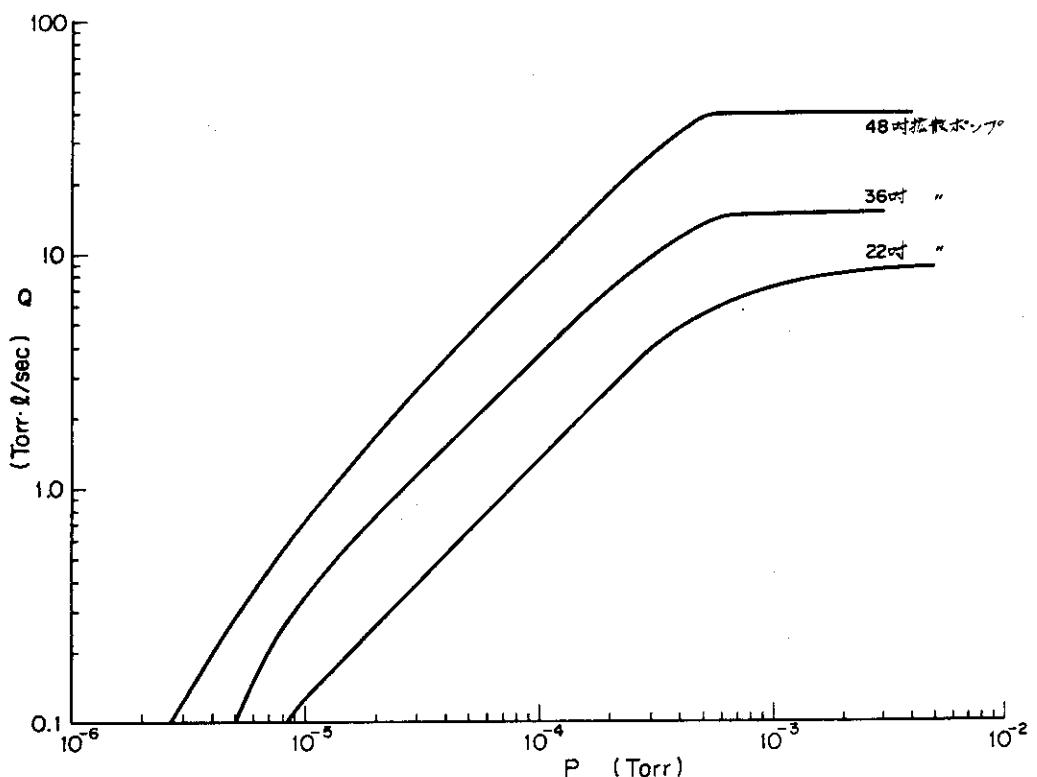
3.2.3 真空容器

ITS-3では引出されるイオンビームの直径が大きいためビームダンパーが大型となる。またイオン源やゲート弁取付用フランジも大型になるため真空容器の寸法は他のテストスタンドに比較して大きなものとなっている。真空容器に水平にビームラインが設けられ、排気用、計測用ポートが設けられている。支持架台と容器はボルト締めで固定され、取外し可能な構造になっている。外観図は第3.9図に示す通りである。主な寸法を以下に記す。

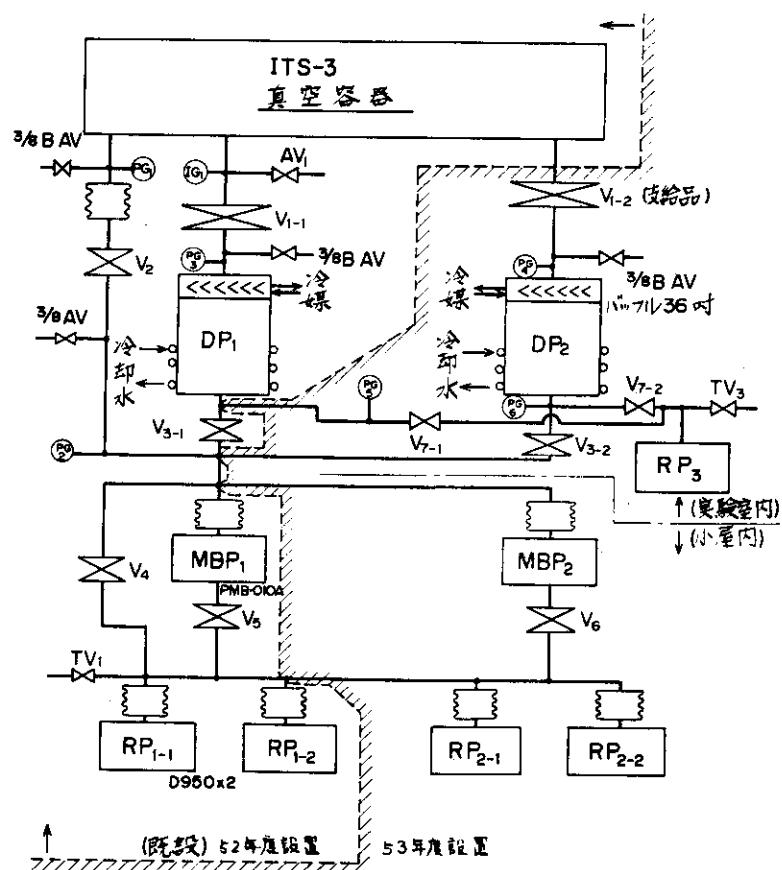
内 直 径	1200 mm
長 さ	3000 mm
容 積	3400 ℥
底面ポート	40 B × 1
イオン源設置ポート	20 B × 1
真空ポンプ接続ポート	22 B × 2
真空粗引き用ポート	6 B × 1
計測用ポート	22 B × 1
"	10 B × 3
"	8 B × 6

この真空容器はOリングとガラスを除き材質は全てSUS304を使用している。各ポートはフランジ接続になっており、バイトンOリングでシールされている。Oリング溝はフランジが水平面内にあるものについては下側のフランジ面に設け、垂直面内にあるものについては真空容器側に設けられている。またフランジのボルト穴はすべてセンター取りわけとなっている。

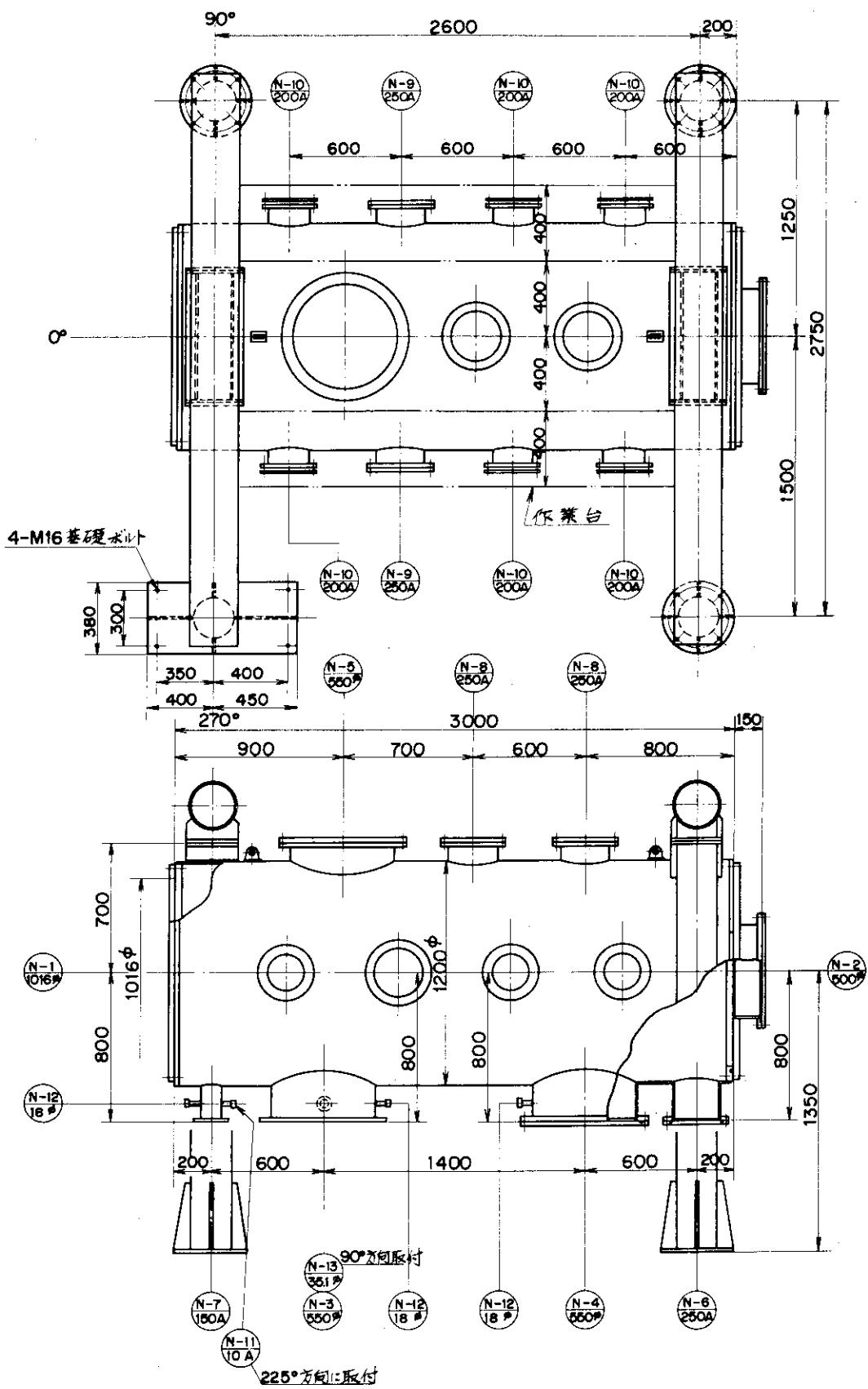
真空容器内面及びフランジ内面は鏡面研磨の上フレオン脱脂され、納入時のリーク量は 1×10^{-7} Torr ℥/sec 以下であった。



第3.7図 大型拡散ポンプQ-P曲線



第3.8図 真空排気系系統図



第3.9図 真空容器外形図

3.3 冷却系

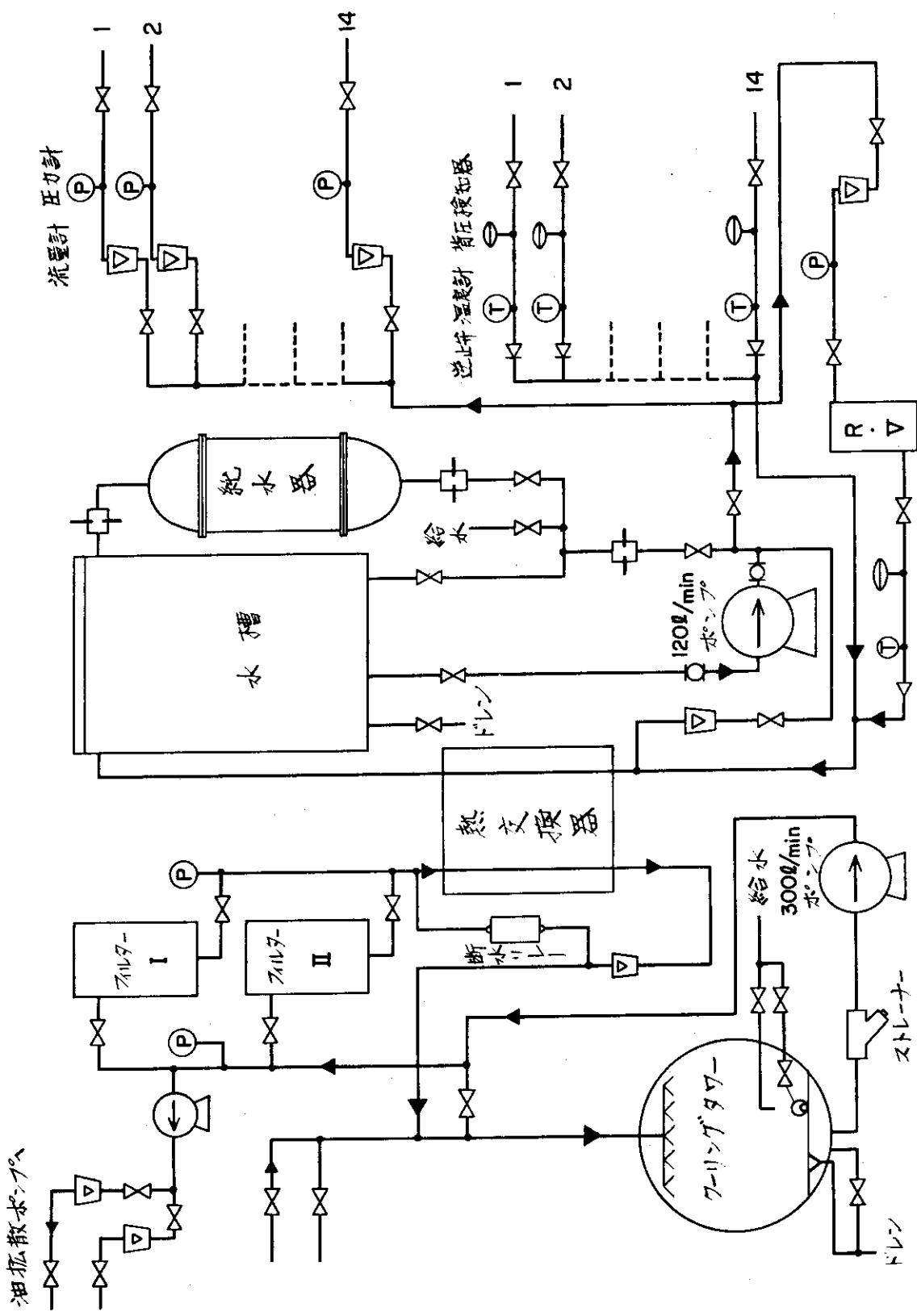
(1) 冷却系の概要

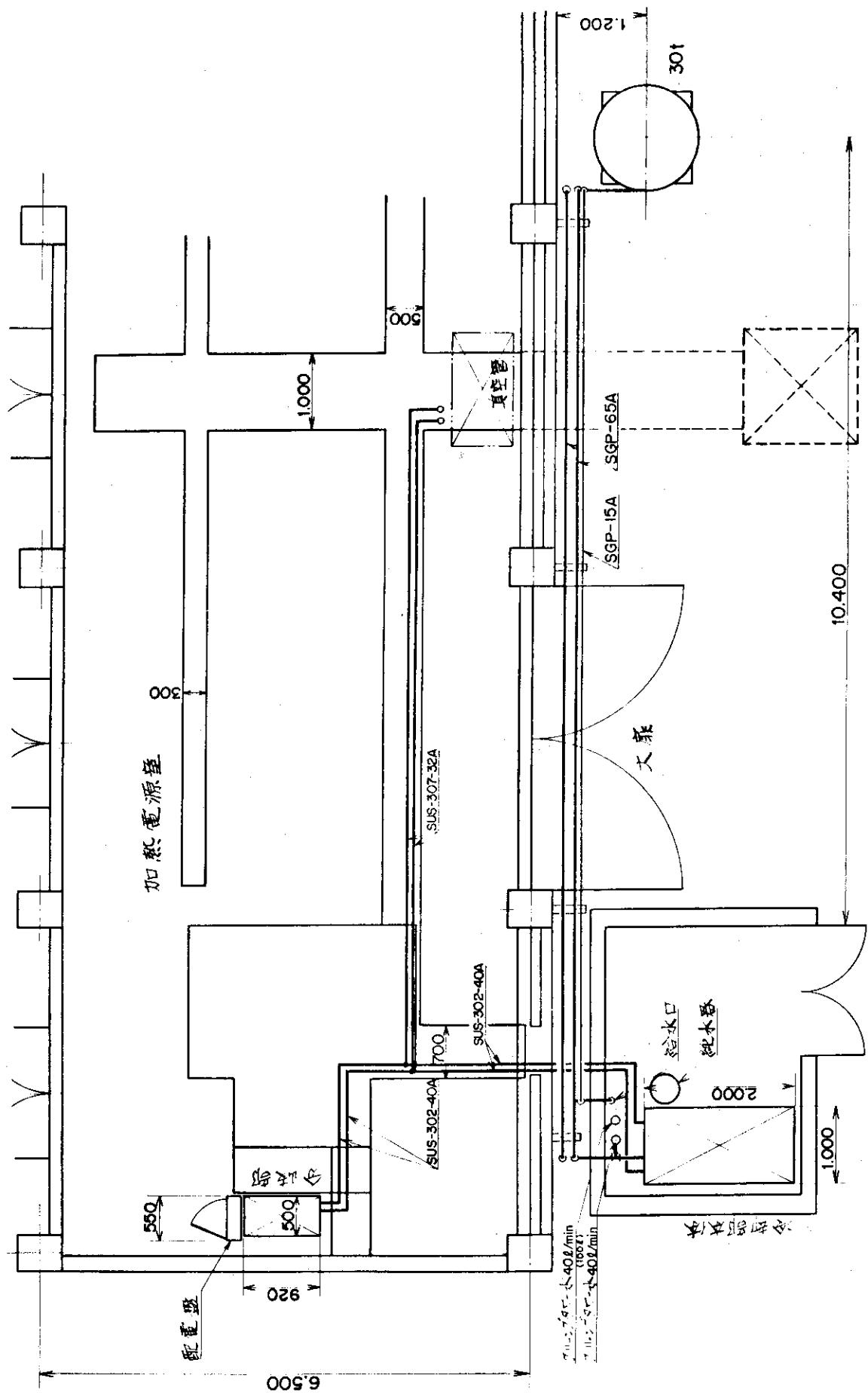
この冷却系は、高電位にあるイオン源の各電極、加速RV用水冷型真空管Y676、真空容器内にあるカロリーメーター、ビームダンパー等を冷却するための純水冷却系（1次冷却系と呼ぶ）と通常水を用いた2次冷却系とから構成され、そのフローチャートは第3.10図に示す通りである。本冷却系の基本性能は以下に示すようなものである。

1次冷却水全流量	120 ℓ/min
1次冷却水出口圧力	5 kg/cm ²
1次冷却水純度	1MΩ・cm以上
1次冷却水冷却能力	80000 kcal/hr
クーリングタワー冷却能力	117000kcal/hr
1次水水槽容量	1000 ℓ
純水器能力	1000 ℓ/hr
2次水流量	300 ℓ/min
所要電力	8.5 kW 3相 200 V 50Hz

なお、本冷却系の基本的な構成はJFT-2NBI用純水冷却系と同一であるが、相違点としては1次冷却水側に流量50 ℓ/minのRV(Y676)用のループを設けてあることと、2次冷却系水側に流量40 ℓ/minの油拡散ポンプとメカニカルプースターポンプ用の2系統のループを設けてあることである。電源の最大定格運転時を考慮し、さらにRV用冷却水の增加分等も見込んで、熱交換器の除熱能力を約250 kW相当分増加する必要があり、ITS-3ではその除熱能力をJFT-2NBI用冷却系での68400 kcal/hrから80000 kcal/hrに増力した。

冷却系の配管の敷設図を第3.11図に示す。純水(1次冷却水)用の配管にはステンレス(SUS302)製パイプを使用しており、端末にはテフロンパイプが使用されている。

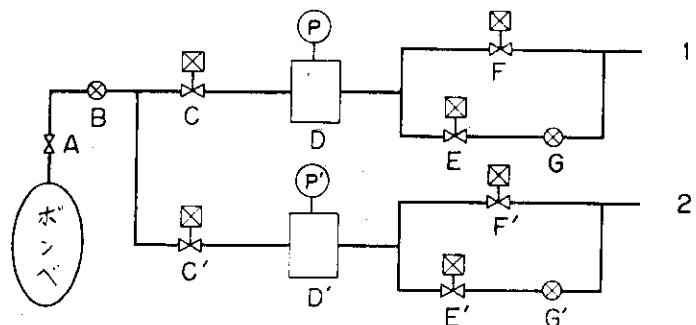




第3.11図 冷却系配管敷設図

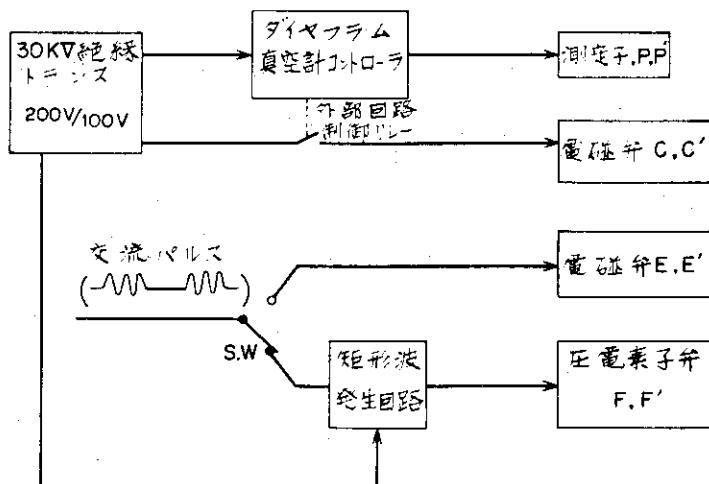
3.4 ガス導入系

ガス導入系は、JFT-2NBIで使用していた2系統をそのまま設置している。これはITS-3ではイオン源の大電流化に伴い、使用するガス量が増すことおよび大口径イオン源内のガス圧を一様にしておくために2方向からのガス導入が必要になることなども予想したためである。このガス導入系は第3.12図に示す通りである。³⁾ 電磁弁C, リザーバーD, ダイヤフラム測定子P, 圧電素子弁F, 電磁弁E, 可変リード弁Gをもって1系統を構成している。第3.13図はこのガス導入系の制御系のブロックダイヤグラムである。リザーバーD内の圧力はダイヤフラム真空計と電磁弁Cとによりコントロールされ、常にダイヤフラム真空計で設定できるある一定値に自動的に保たれるようになっている。イオン源に供給される高純度水素ガスの流量は圧電素子弁Fを動作させる矩形波の電圧を調整することにより制御される。この圧電素子弁駆動用パルサーを含めて、ガス導入系は全て接地電位より30kV高電位に浮いた状態にあるが、パルサー出力の調整は高電圧印加時にも接地側ができるようになっている。圧電素子弁Fの故障等を考慮して、電磁弁E, 可変リード弁Gが用意されており、制御系の配線を一部変更することにより、簡単に切替えができる。



A;圧力調整弁 B;ニードルバルブ C,C';電磁弁 D,D';リザーバー
E,E';電磁弁 F,F';圧電素子弁 G,G';可変リード弁
P,P';ダイヤフラム測定子

第3.12図 ガス導入系



第3.13図 ガス導入系の制御方式

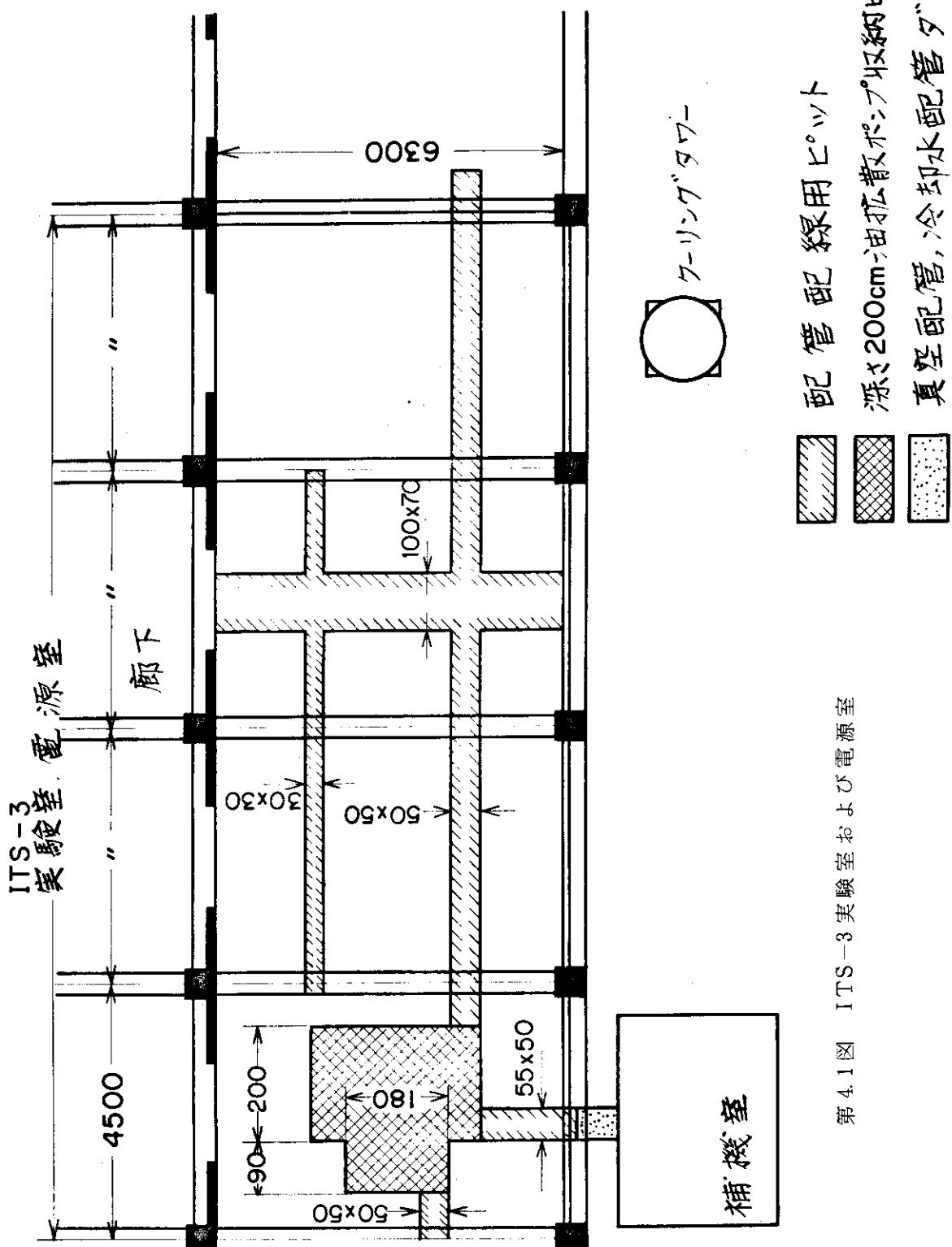
4. 建屋・レイアウト

ITS-3装置は、核融合特研建屋内1階の元のJFT-2 NBI用電源室と、ITS-3用に用意されていた予備室を合せた4スパンの部屋に設置されている。この部屋は巾6.5m、奥行18m、高さ4mであり、その床荷重は1.5トン/m²である。この部屋は安全柵により、電源室と実験室とに仕切られている。第4.1図に電源室と実験室の平面図を示す。斜線で囲まれた部分にはピットが掘られ、巾50cm、深さ50cmのピットと巾30cm、深さ30cmのピットが平行に走っている。これらのピットに電源ケーブル、冷却水配管を通すことにより、床面上にそれが這うことを防ぎ、作業空間及び点検保守のための通路が確保されると同時に、ケーブルや水配管自体の安全も確保されている。

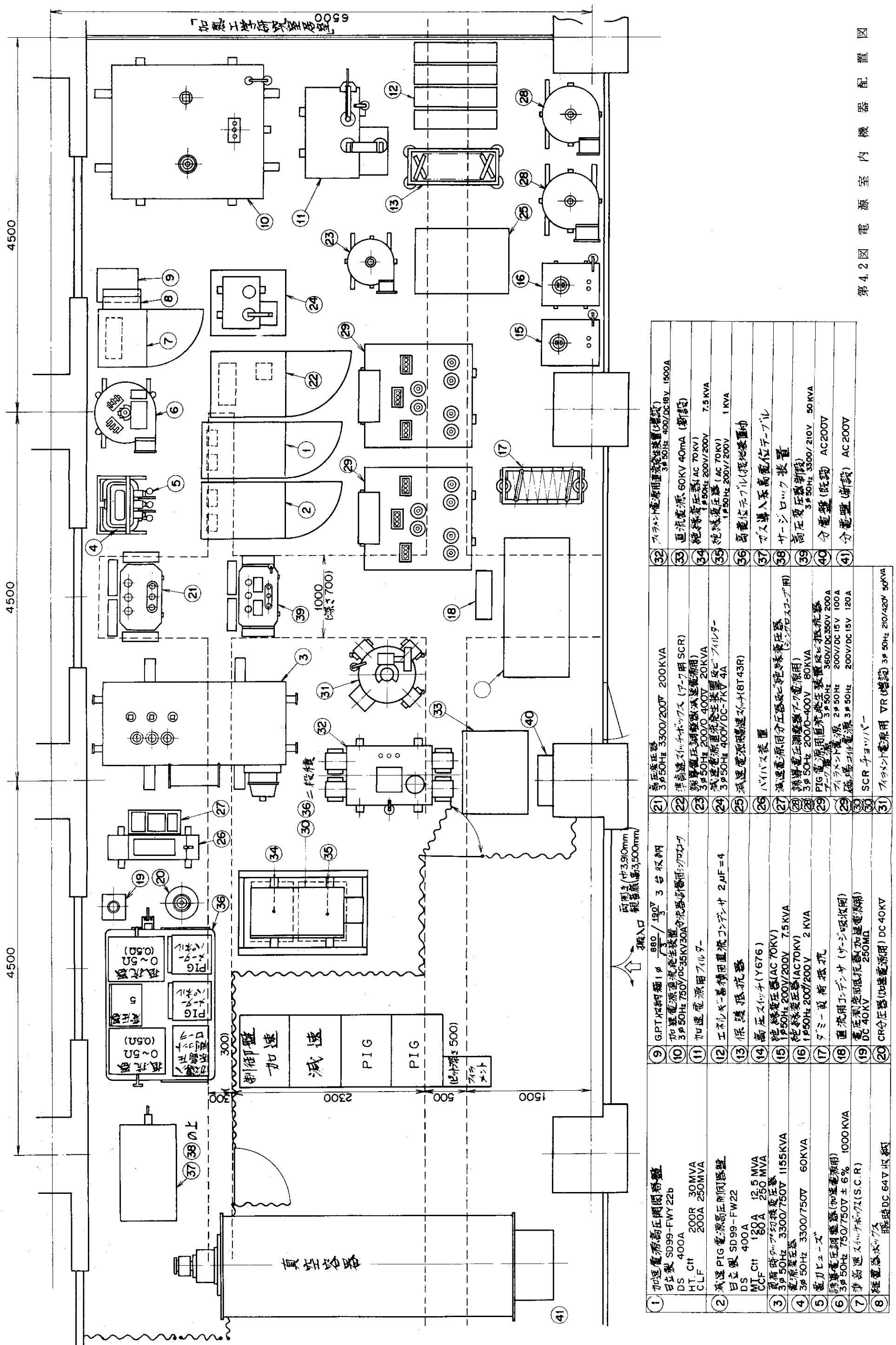
電源室は、部屋の総床面積の5/8を占めており、ITS-3全ての電源各機器が設置されている。電源室内の機器の配置は第4.2図の通りで、電源室の占める床面積がなるべく少なくなるよう配置されている。また、これらの配置には電源の保守点検が安全、且つ容易に行えるように考慮されている。

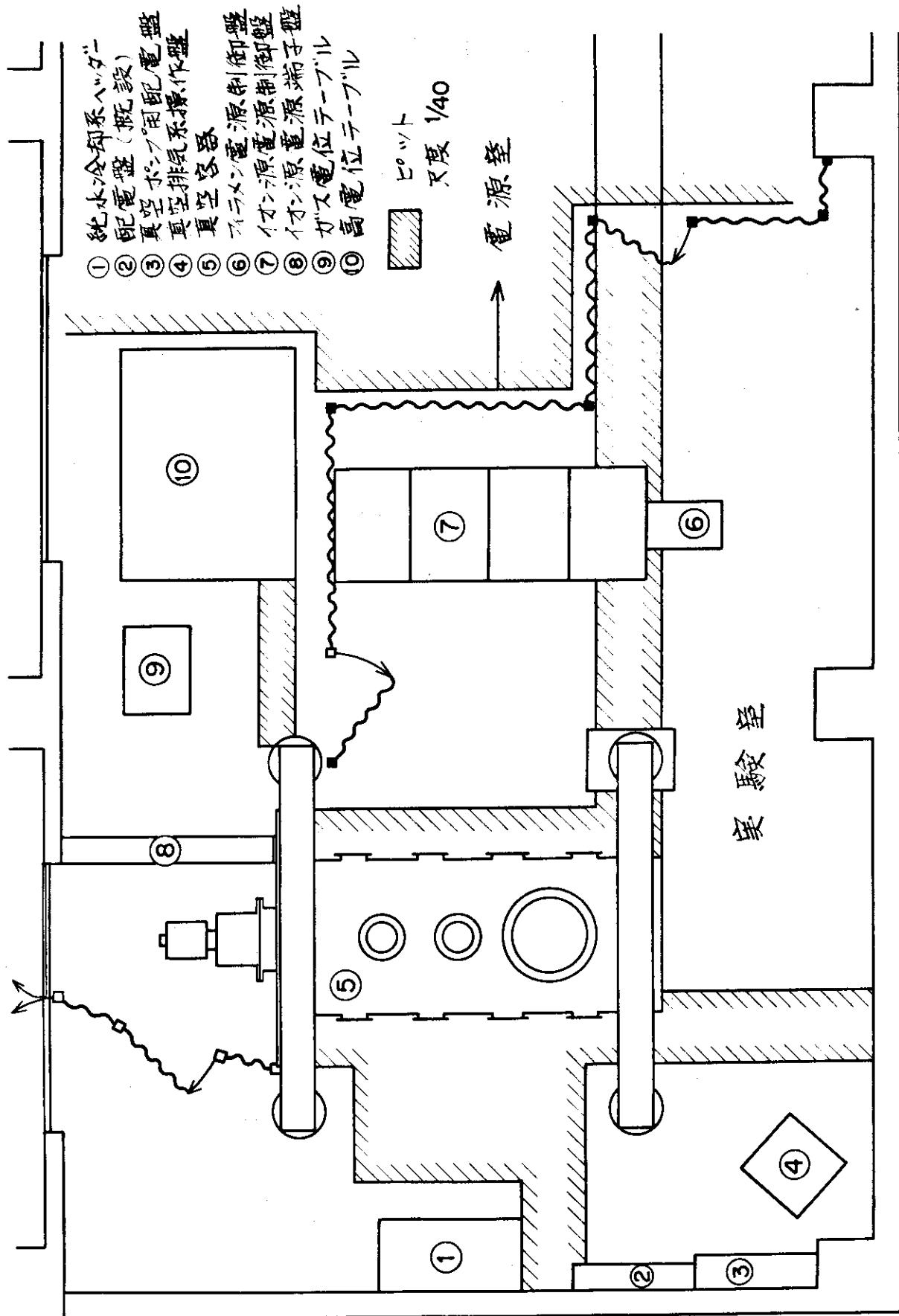
実験室には、真空容器、真空排気系の36吋油拡散ポンプ、イオン源用電源制御盤、真空排気系制御盤、冷却系一次水分岐部及び冷却系操作盤等が配置されている。特に、36吋油拡散ポンプは床面からの深さが2mのピット内に設置されており、真空容器はイオン源の取付け、取外しなどの作業、ビーム観察等を容易に行える高さに設置されている。実験室における機器の配置は第4.3図の通りである。真空容器は、油拡散ポンプが設置されているピットの上に4本の支柱によって支えられている。イオン源の近くにはガス導入系、電源の端子盤が設置されている。電源制御盤は、高電位テーブル上のPIG電源用メーター等を監視しながら運転できるように配置されている。冷却水末端部は、イオン源までのテフロン配管が床面を這わないでピット内を通すように、ピットわきに配置されている。その他、実験室の天井には荷重1トンのホイストが設置されており、イオン源の取り外し、取り付け、油拡散ポンプの保守等に使用されている。

また、屋外には第4.1図に示されるように、真空排気系および冷却系の補機室および冷却系のクーリングタワーが設置されている。このうち、補機室はその大きさが縦2.7m、横3.6m、高さ2.2mであり、真空排気系の粗引きポンプ類、ゲートバルブ用圧空系のコンプレッサー、バッフル用フレオン冷凍機等および冷却系の1次水循環用ポンプ、1次水タンク、純水器（イオン交換樹脂使用）、2次水フィルター等が設置されている。この補機室と実験室とはダクトで連絡されている。



第4.1図 ITS-3 実験室および電源室





第4.3 実験室内機器配置図

5. おわりに

ITS-3 装置は完成後、約 2 年が経過したがその間に、タンゲステンフィラメント実験、大電流化イオン源の開発を目的としたソースプラズマの実験、各種イオン源による大電流ビームの引出しの実験が進められている。

ITS-3 装置は、その約 80% が JFT-2 NBI 装置からの移設であるが、このように順調に実験が始められたことは、本装置の建設に携わった関係各位の努力によるものであり、ここに、補機室の建設、実験室内の改修、ピット工事、接地工事等に協力して載いた技術業務課の諸氏に、また電源の移設とその改良に協力された日新電機（株）をはじめ、日本真空技術（株）、三栄技研（株）の担当者の方々に謝意を表します。最後に、終始適切なる御指導を載いた森茂副所長兼核融合研究開発推進センター長、小幡行雄核融合研究部長に深く感謝します。

文 献

- 1) T. Sugawara et al. ; JAERI-M 7043
- 2) 大賀徳道 他 ; JAERI-M 7604
- 3) 田中茂, 柴田猛順 ; JAERI-M 6778

付 錄

今回、JFT-2用NBIの加速電源回路に亘長100mのレントゲン・ケーブルを接続し、矩形波パルスを注入して、サージ特性を調査し、サージ障害軽減対策の基礎データを得た。

1. 供試ケーブルの仕様

品名：レントゲン・ケーブル
 形名：XV-75（日立電線）
 素線数／素線径：19本／0.32mm
 線心絶縁体厚さ：1mm
 より合せ外径（導電線心を含む）：6.3mm
 エチレンプロピレン絶縁体外径：16.2mm
 同上比誘電率：3.3～4.0
 最大導体抵抗：13.1Ω/km
 しゃへい編組厚さ：0.45mm
 仕上がり外径：19.4mm
 耐電圧 { 導体間：DC 4kV
 導体線心としゃへい間：DC 120kV

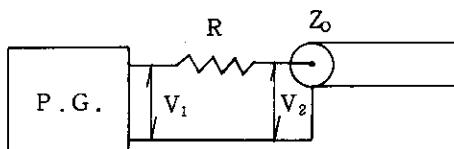
2. 供試ケーブルの特性測定

1) サージインピーダンスの測定

第1図の回路を構成しP.G.より矩形波を印加しV₁, V₂を測定した。

サージインピーダンスZ₀は

$$Z_0 = \frac{V_2}{V_1 - V_2} R \quad \text{で与えられる。}$$



第1図 サージインピーダンス測定回路

○測定結果

	I	II
R ₁ (Ω)	100	300
V ₁ (V)	20	20
V ₂ (V)	6	2.5
Z ₀ (Ω)	42.9	42.9

但し

パルス発生器(P.G.) :

測定器(オシロスコープ) : 5403/D41-5A48 (SONY-TEKTRONIX)

2) ケーブルの静電容量

測定結果: $0.023 \mu\text{F} / 100\text{m}$

$$= 2.3 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

測定器(万能ブリッジ): "4260 A" (YHP)

3) サージ伝播速度

ケーブルの一端にサージを印加したとき、印加点の抵抗がサージインピーダンスに比して充分小さく、一方他端が開放端の場合は、進行波2往復で一周期となる定在波が現われる。Photo. 2は、この状態を示すもので

一周期 約 $4 \mu\text{s}$

従って、一方向(100m当たり)進行速度は約 $1 \mu\text{s}$

$$\therefore v = 1.0 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

1), 2) 項の測定結果より伝播速度を求める

$$Z_0 = 42.9 \Omega \quad C = 0.023 \mu\text{F} \text{ より}$$

$$L = 4.23 \times 10^{-7} (\text{H/m})$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{4.23 \times 10^{-7} \times 2.3 \times 10^{-10}}} = 1.01 \times 10^8 (\text{m/sec})$$

となり、波形観測結果とよく一致する。

3. サージ伝播特性の測定

1) 測定方法

JFT-2用NBIの高電位テーブルとレギュレータバルブ間に供試ケーブルを接続し、サージを模擬して、イオン源部より矩形波パルスを注入し、種々のサージ抑制回路条件に於いて各部の電圧を測定して、合理的なサージ抑制対策の見当をつけることにした。

サージ抑制対策として、並列 $L \parallel R$ によるブロッキング方式及びアース間 $C - R$ によるサージ吸収回路を採用した。

手順として、供試ケーブルを実系統に接続する前にケーブルのみについて、予めサージ抑制策を調査し、実系統に接続した後、確認することにした。

a) ケーブルのみについての測定

第2図: サージ抑制未対策回路

第3図: $C - R$ サージ抑制回路

第4図: $L - R$ サージ・ブロック回路

第5図: $L - C - R$ サージ・ブロック回路

パルス発生器(P.G.):

測定器(C.R.O.) : 5403/D41-5A48 (SONY-TEKTRONIX)

b) 実系統についての測定

第6図: (a) サージ抑制未対策回路

" : (b) $C - R$ サージ抑制回路

" : (c) $L - R$ サージ抑制回路

パルス発生器 (P.G.) :

測定器 (C.R.O.) : ① 5403/D41-5A48 (SONY-TEKTRONIX)

(V₁ 及び V₂ 測定用)

② "549" (TEKTRONIX)

(V₃ 測定用)

2) 測定結果

a) ケーブルのみについての測定結果

電源電圧 photo 1

第7図 (a) C-R サージ抑制回路 photo. 3 ~ photo. 10

" (b) L-R サージ抑制回路 photo. 11 ~ photo. 16

b) 実系統における測定

電源電圧 photo 1

第8図 (a) C-R サージ抑制回路 photo. 21 ~ photo. 24

" (b) L-R サージ抑制回路 photo. 25 ~ photo. 26

4. 考察

4-1) 測定条件について

本実験ではパルス入力端をサージインピーダンスの約3%に相当する低抵抗 (1.25Ω) で終端しているので、負荷条件を変えても入力波形はパルス発生器の原波形と殆んど変わらない。

入力端が低抵抗のため出力端を開放しても、入力端に対する反射電圧が逆極性になるので、出力端電圧は2倍を越えることはない。

photo. 1 は注入パルス波形で、矩形波立上り部に 5~10MHz の減衰振動が観察される、これは入力抵抗が低いため、残留インダクタンスが影響していると見られるが、長尺ケーブルのサージ特性に於いては問題とならない。パルス巾は 20μS としたが、この値がケーブルの出力端に達するまでの時間より短いときは、ケーブルの出力端が充電完了するまえに充電々荷がなくなるので、反射による電圧の尖頭値は実際の値より低くなる。一方 photo. 2 でも解るようにケーブルの往復反射による尖頭電圧は、第1波以降減衰しているので、端末時定数を極めて長くしない限り注入パルス巾を拡げる必要はない。

4-2) C-R アブゾーバー

第3図で C が大なら、高周波に対し、Rc で終端したことになるが、矩形波パルスで C を充電するとインピーダンスは漸次増大する。Rc の値はケーブルのサージインピーダンスそのものより小さい（本件では約 70%）値で最も良好な結果が得られている。

C の目やすとしては、略次式が考えられる。

$$\frac{V_o}{V_s} = 1 + \frac{C_0}{C_0 + C} \quad C_0 : \text{ケーブルの全容量}$$

4-3) L-R ブロック回路

L はケーブルの全インダクタンス 42μH に対して充分大きく選ぶと、固有振動数はケーブルの全容量と L のインダクタンスで決まる。第4図の回路で Re = ∞ とすると、ケーブルの静

電容量 $0.023 \mu\text{F}$ と L のインダクタンス 0.97 mH で固有振動数は、 33.7 kHz と算出され、 実測値 (photo. 15) $\frac{1}{2f} = 14 \mu\text{s}$ と略等しい。

R_e は、 ケーブルのサージインピーダンスと同程度とすることにより、 出力端に現われるパルス電圧のピーク値は最も少なくなる。

但し、 $R_L = Z_0$ とした時は、 負荷端でのパルスの立上りが早く障害波としての要素がある。第 5 図は $L - R$ ブロックの電源側にコンデンサを置いた場合で負荷端のパルス立上りは、 緩和されている。実回路では絶縁変圧器の漏遊容量等によってこのコンデンサと同様の効果が現われ、 photo. 26 に示す如く立上りは緩やかとなっている。

5. 結論

本実験では、 亘長 100 m のレントゲンケーブルのサージ特性を測定し、 実回路について、 同様の確認を行った。 $C - R$ アブゾーバー、 $L - R$ ブロッキング回路ともサージ抑制効果はある。

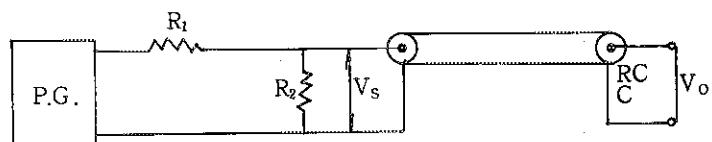
$C - R$ 回路では、 ケーブルの容量に対して充分大きな C を用いる必要があり、 大容量長尺ケーブルでは、 C を実験値以上に大きく選ぶ必要性が生じ、 イオンソースの電極損耗に与える影響も無視できない上、 直列真空管による電圧制御機能にも悪影響が考えられ、 採用には充分検討が必要である。

$L - R$ ブロック回路は、 電源・構成上でも問題は少なく採用しやすい方式である。

注) オシログラム photo. 1 ~ 26 について全て

掃引速度 $2 \mu\text{s}/\text{div}$

偏向速度 $0.1 \text{ V}/\text{div}$



$R_1 : 91 \Omega / 2$

$R_2 : 10 \Omega / 8$

第2図 サージ抑制未対策回路（ケーブルのみ）

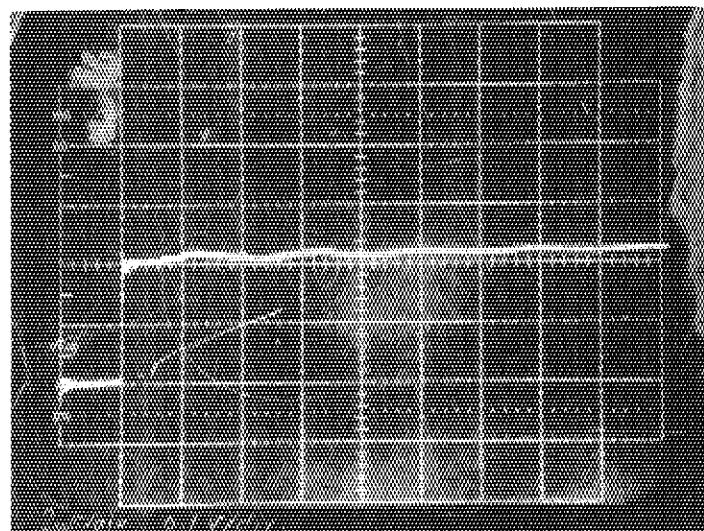


Photo. 1

Vs波形

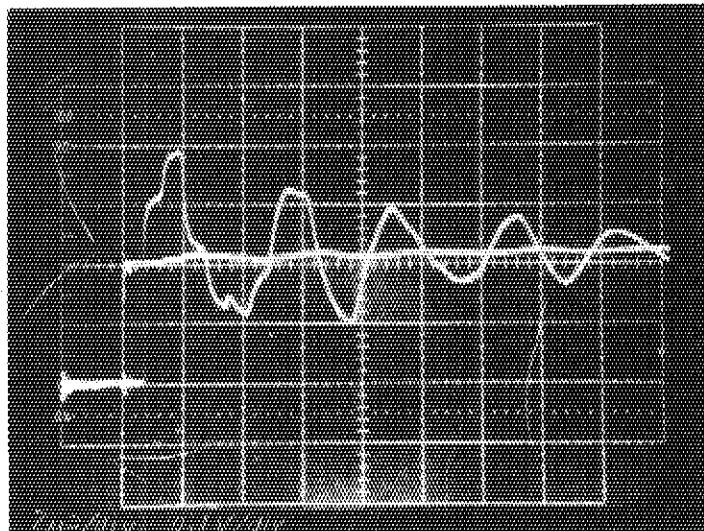
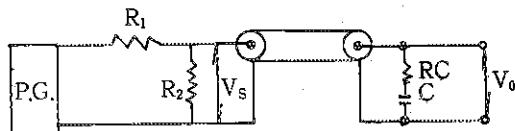


Photo. 2

Vo波形

 $R_1 : 91 \Omega / 2$ $R_2 : 10 \Omega / 8$ $R_c : 0 \sim 50 \Omega$ $C : 0.02 \mu F, 0.1 \mu F, 0.2 \mu F$

第3図 C-Rサージ抑制回路（ケーブルのみ）

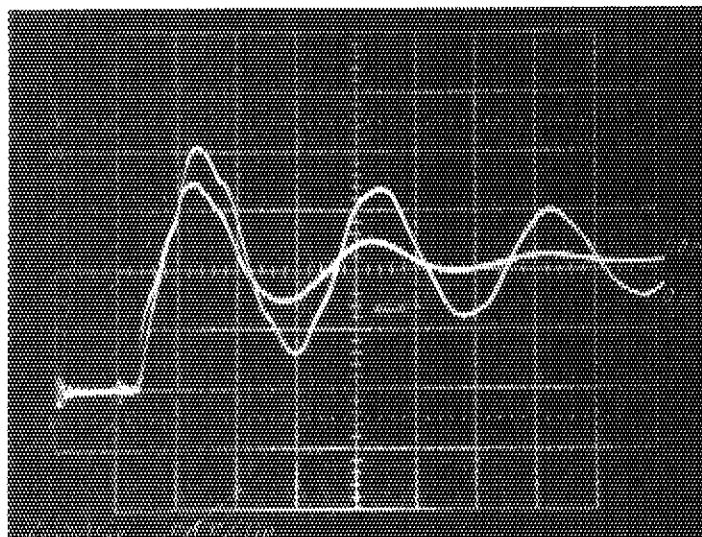


Photo. 3

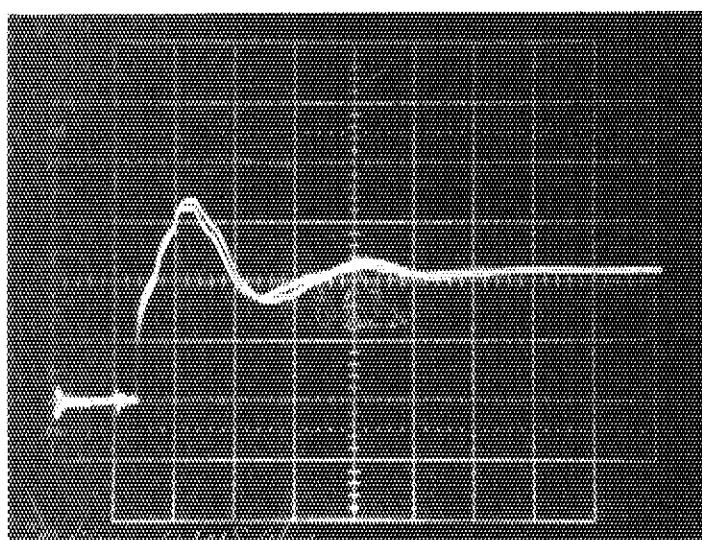
第3図 V_o 波形振巾大; $R_c = 0 \Omega$ " 小; $R_c = 20 \Omega$ $C : 0.02 \mu F$ (V_s ; Photo. 1)

Photo. 4

第3図 V_o 波形振巾大; $R_c = 50 \Omega$ " 小; $R_c = 30 \Omega$ $C : 0.02 \mu F$ (V_s ; Photo. 1)

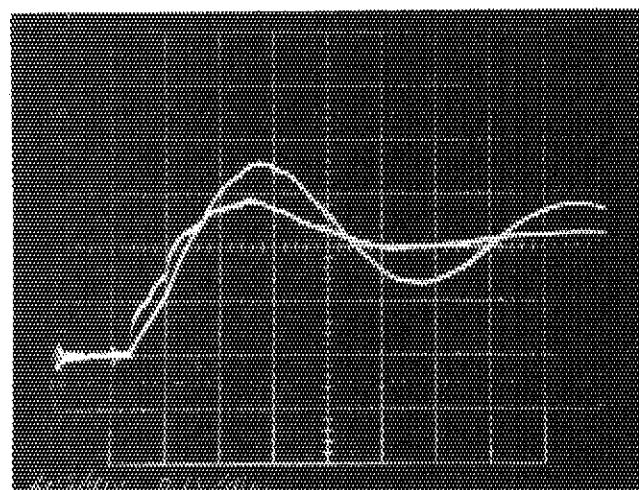


Photo. 5

第3図 V_o 波形
振巾大 ; $R_c = 0 \Omega$
" 小 ; $R_c = 10 \Omega$
 C ; $0.1 \mu F$
(V_s ; Photo. 1)

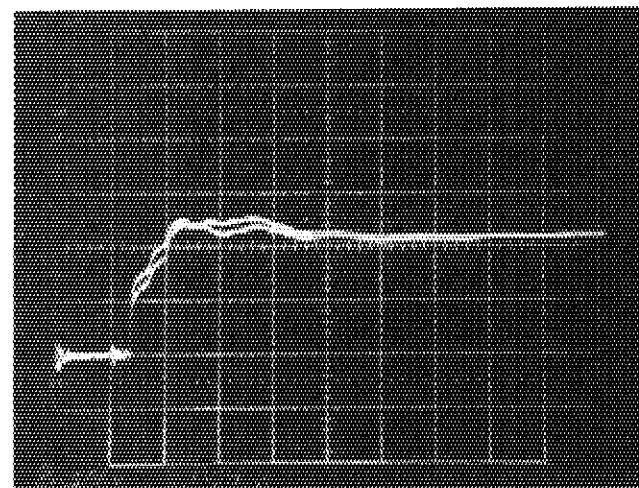


Photo. 6

第3図 V_o 波形
振巾大 ; $R_c = 20 \Omega$
" 小 ; $R_c = 30 \Omega$
 C ; $0.1 \mu F$
(V_s ; Photo. 1)

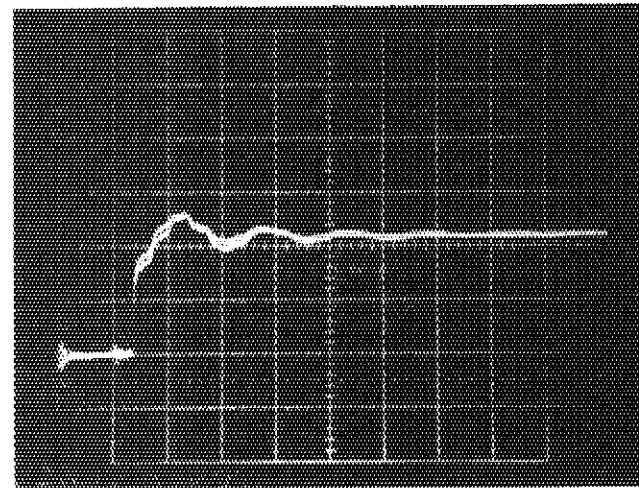


Photo. 7

第3図 V_o 波形
振巾大 ; $R_c = 50 \Omega$
" 小 ; $R_c = 40 \Omega$
 C ; $0.1 \mu F$
(V_s ; Photo. 1)

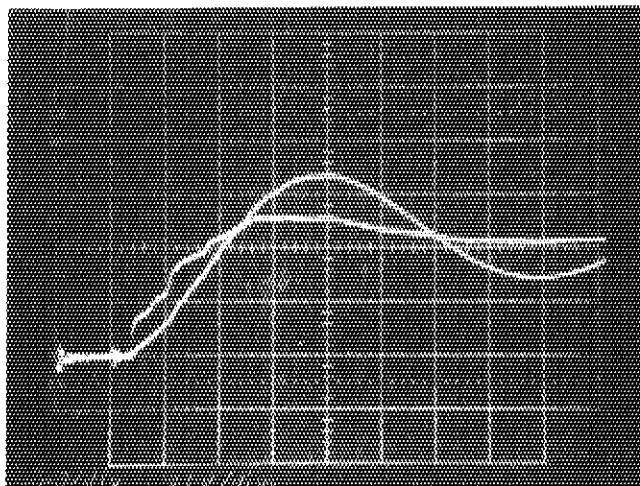


Photo. 8

第3図 V_o 波形
振巾大; $R_c = 0 \Omega$
" 小; $R_c = 10 \Omega$
 $C = 0.2 \mu F$
(V_s ; Photo. 1)

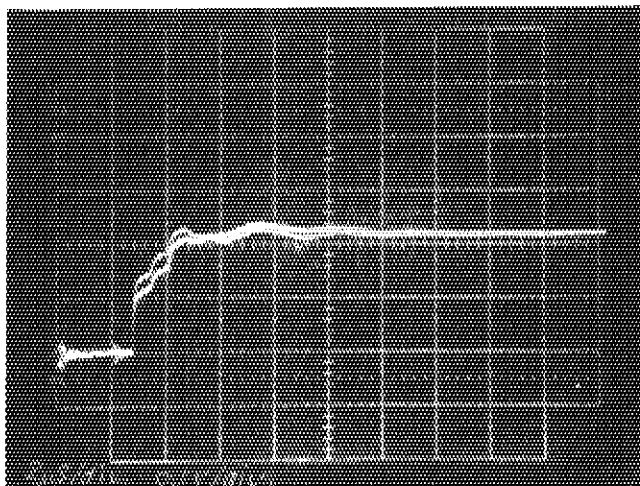


Photo. 9

第3図 V_o 波形
振巾大; $R_c = 20 \Omega$
" 小; $R_c = 30 \Omega$
 $C = 0.2 \mu F$
(V_s ; Photo. 1)

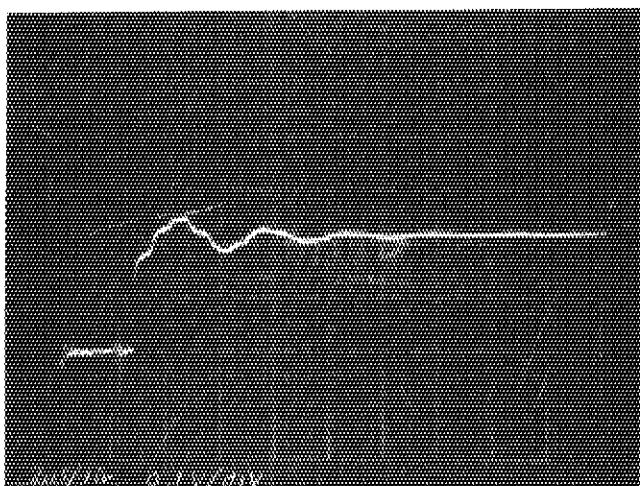
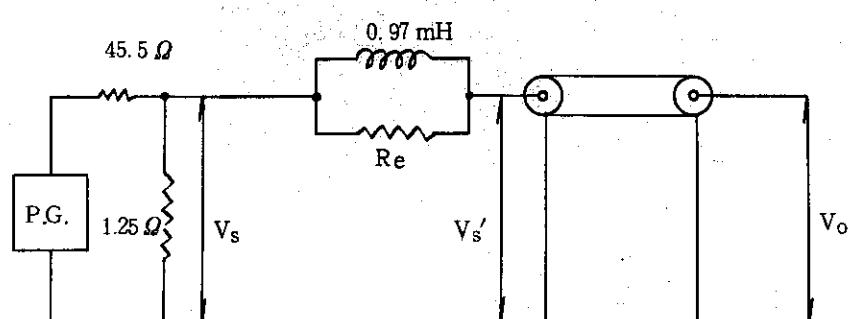


Photo. 10

第3図 V_o 波形
 $R_c = 50 \Omega$
 $C = 0.2 \mu F$
(V_s ; Photo. 1)



第 4 図

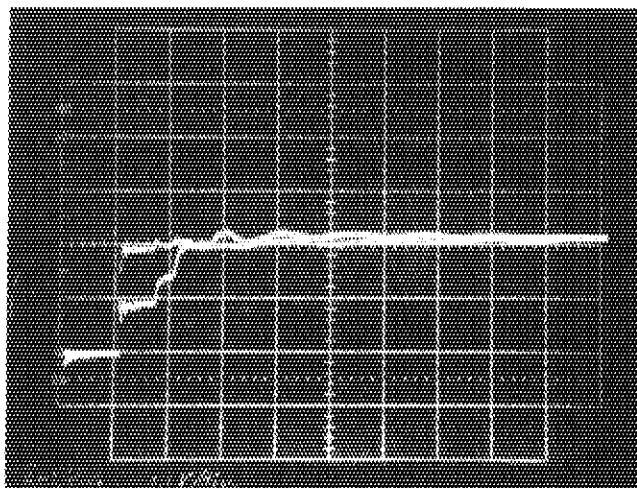


Photo. 11

第4図 V'_s 波形

直角波; $R_e = 0 \Omega$

緩頭波; $R_e = 50 \Omega$

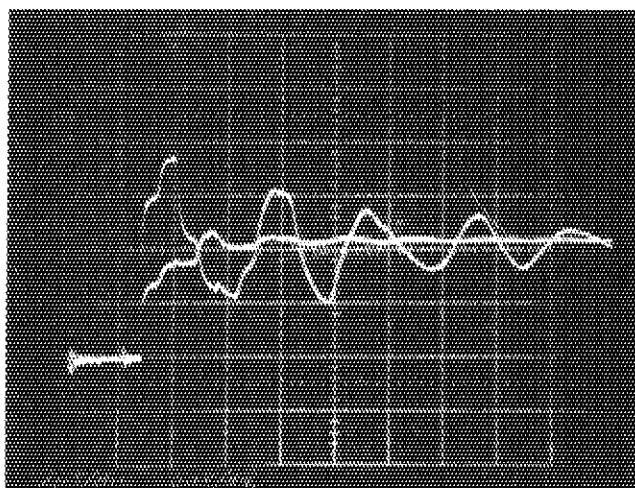


Photo. 12

第4図 V_o 波形

振巾大; $R_e = 0 \Omega$

振巾小; $R_e = 50 \Omega$

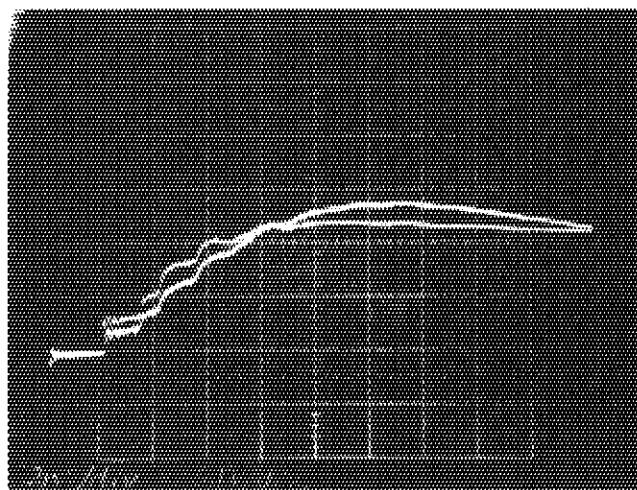


Photo. 13

第4図 V'_s 波形

振巾大; $R_e = 200 \Omega$

振巾小; $R_e = 100 \Omega$

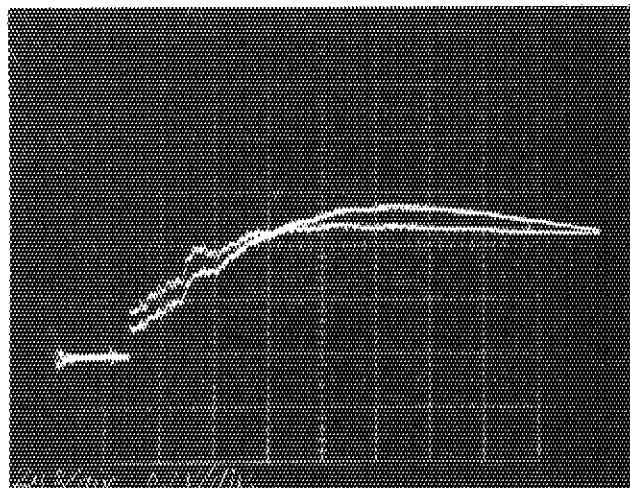


Photo. 14

第4図 V_o 波形
振巾大; $R_e = 200 \Omega$
振巾小; $R_e = 100 \Omega$

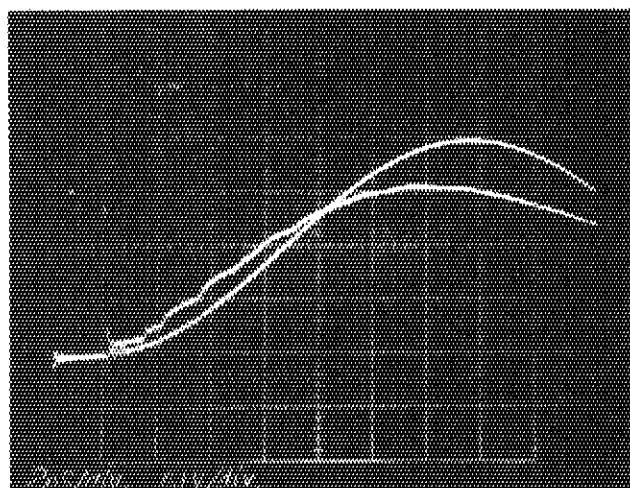


Photo. 15

第4図 V'_o 波形
振巾大; $R_e = \infty$
振巾小; $R_e = 400 \Omega$

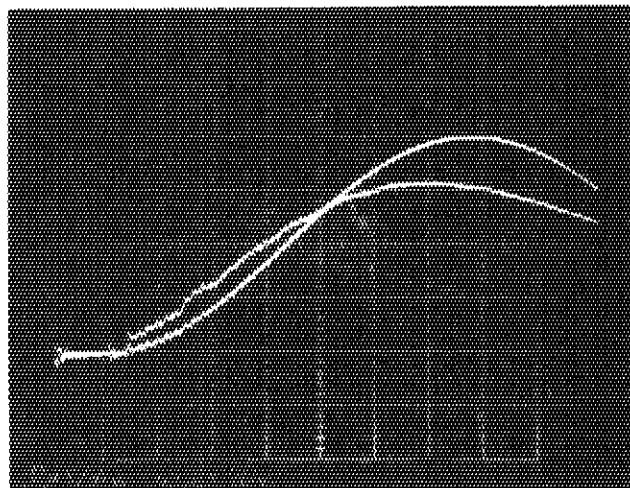


Photo. 16

第4図 V_o 波形
振巾大; $R_e = \infty$
振巾小; $R_e = 400 \Omega$

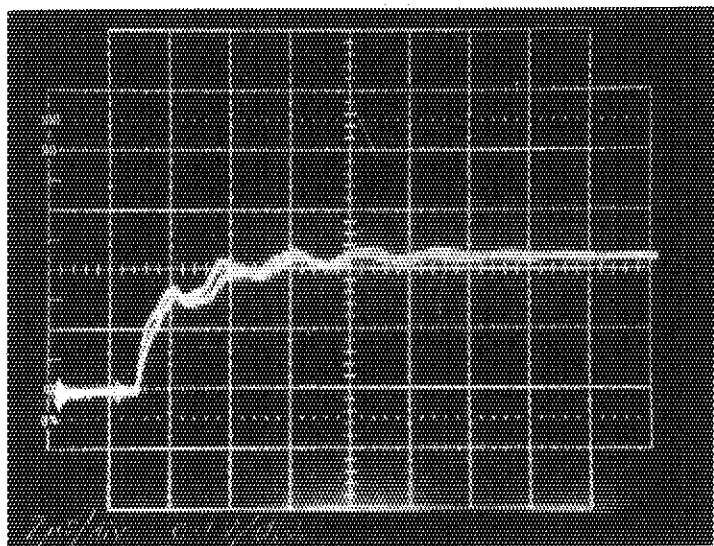
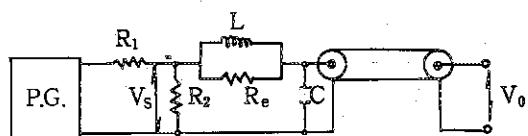


Photo. 17

第5図 V_o 波形上; $C = 0.01 \mu F$ 下; $C = 0.02 \mu F$ (V_s 波形; Photo. 1)

$$R_1: 91 \Omega / 2$$

$$R_2: 10 \Omega / 8$$

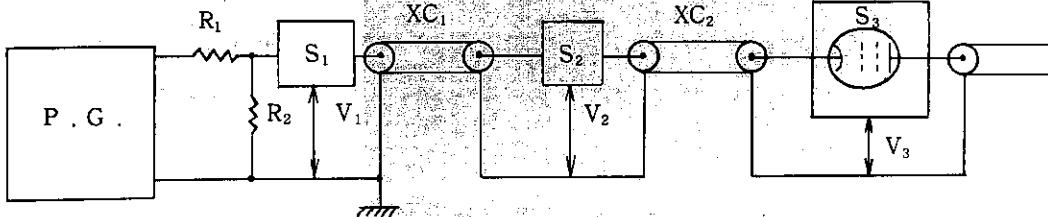
$$L: 0.97 \text{ mH}$$

$$R_e: 50 \Omega$$

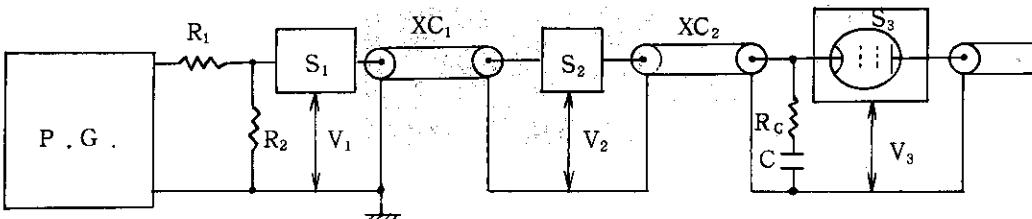
$$C: 0.01 \mu F, 0.02 \mu F$$

第5図 L-C-R, サージ抑制回路(ケーブルのみ)

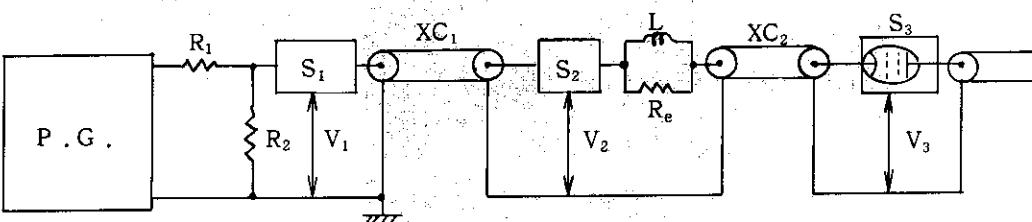
a) サージ抑制未対策回路



b) C-R サージ抑制回路



c) L-R サージ抑制回路

 S_1 : イオン源室内ガス導入系ケーブル R_1 : $91\Omega/2$ V_1 : 同上対地間電位 R_2 : $10\Omega/2$ S_2 : 電源室B内高電位テーブル R_c : 0, 10, 20, 30, 50 Ω V_2 : 同上対地間電位 C : 0.01, 0.1, 0.2 μF S_3 : 補機室内R.V.高压側制御盤 L : 0.97 mH V_3 : 同上対地間電位 R_e : 50, 100, 200 $\Omega \infty$ XC_1 : X線用ケーブル XC_2 : 供試X線用ケーブル第6図 R.V.高压制御盤 - イオン源間
サージ伝播特性測定回路図

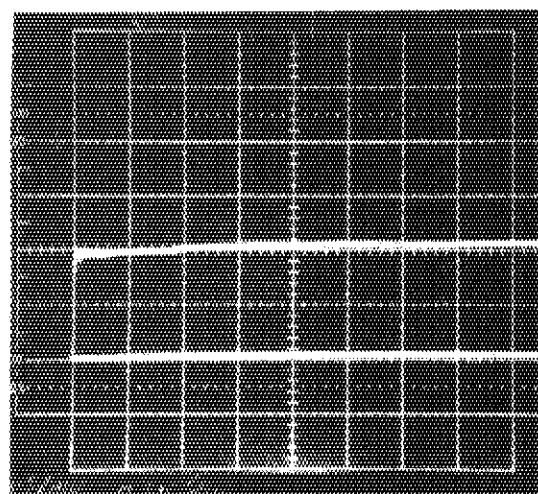


Photo.18

第6図 (a), (b), (c)

V₁波形

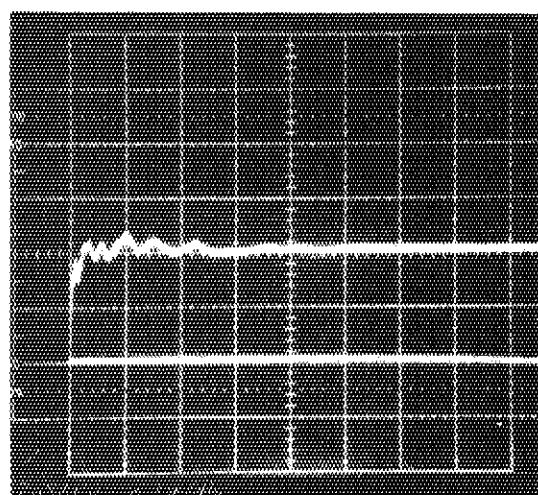


Photo.19

第6図 (a), (b), (c)

V₂波形

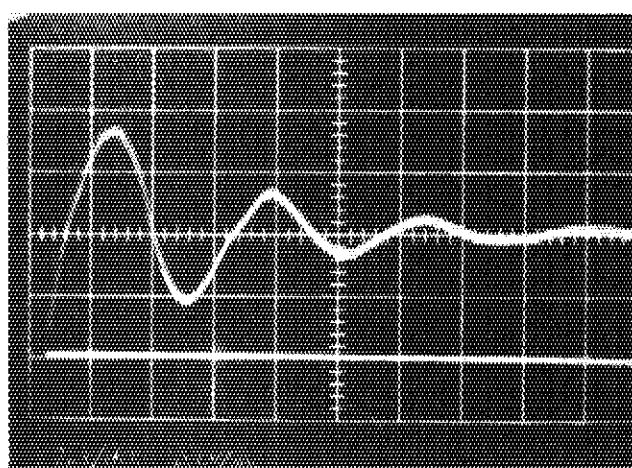


Photo.20

第6図(a) V₃波形

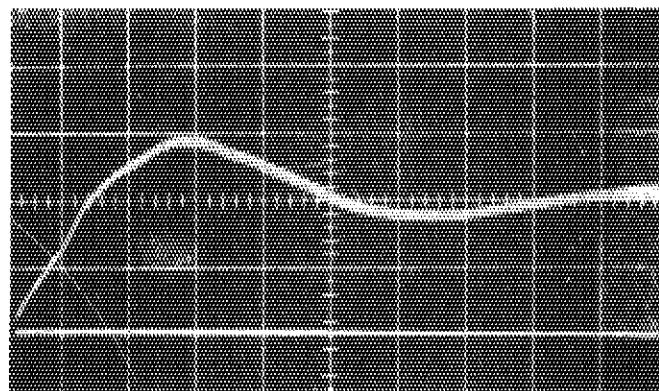


Photo .21

第 6 図(b) V_g 波形

$C = 0.1 \mu F$

$R_c = 10 \Omega$

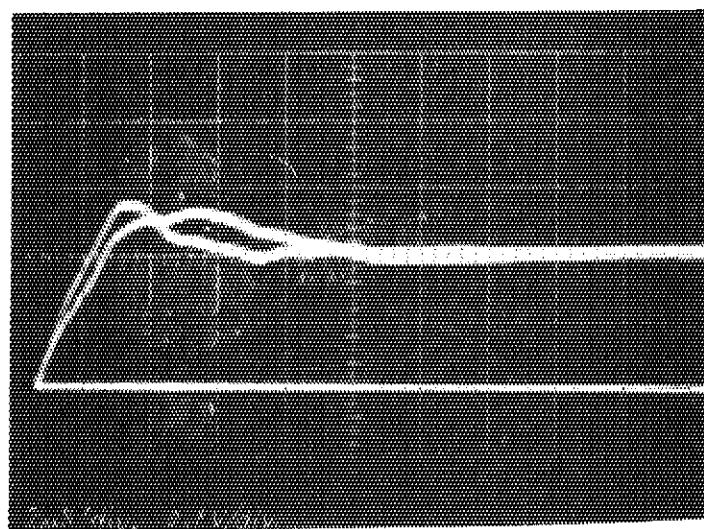


Photo .22

第 6 図(b) V_g 波形

$C = 0.1 \mu F$

立上り時間大; $R_c = 20 \Omega$

" 小; $R_c = 50 \Omega$

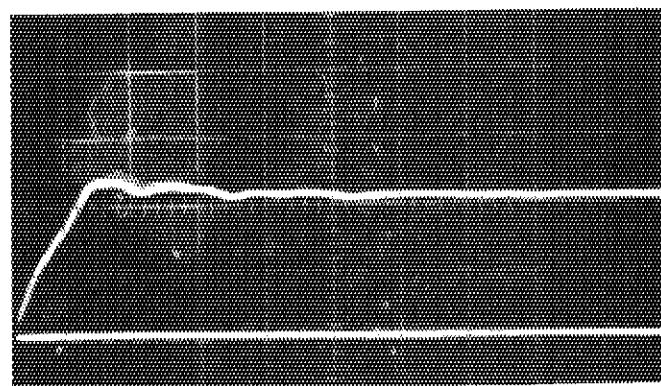


Photo .23

第 6 図(b) V_g 波形

$C = 0.1 \mu F$

$R_c = 30 \Omega$

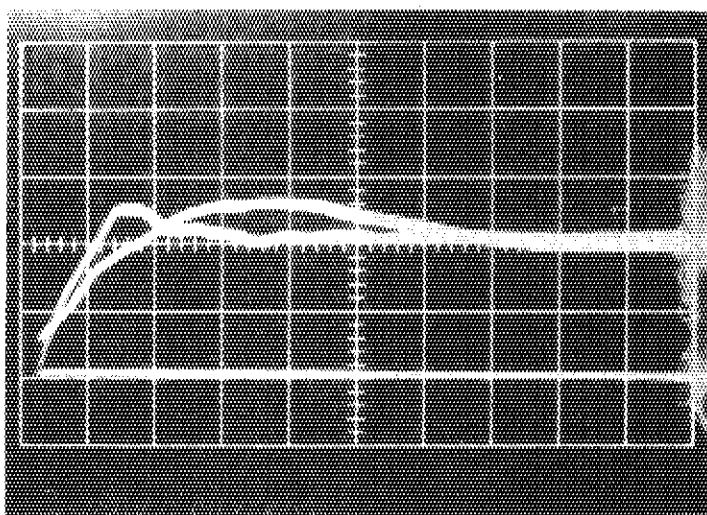


Photo. 24

第6図(b)

V_g 波形

$C = 0.2 \mu F$

立上り時間大; $R_c = 10 \Omega$

" 小; $R_c = 50 \Omega$

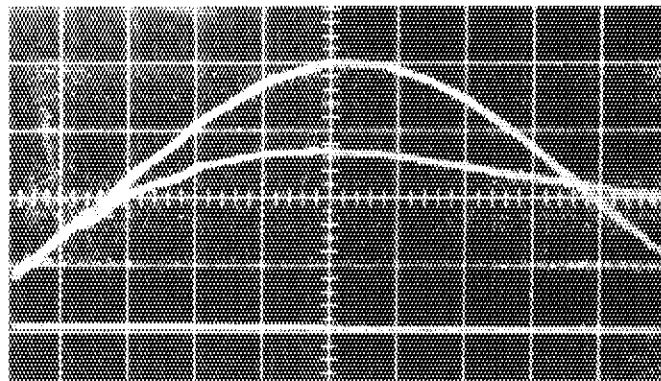


Photo. 25

第6図(c)

V_g 波形

振巾大; $R_e = \infty$

振巾小; $R_e = 200 \Omega$

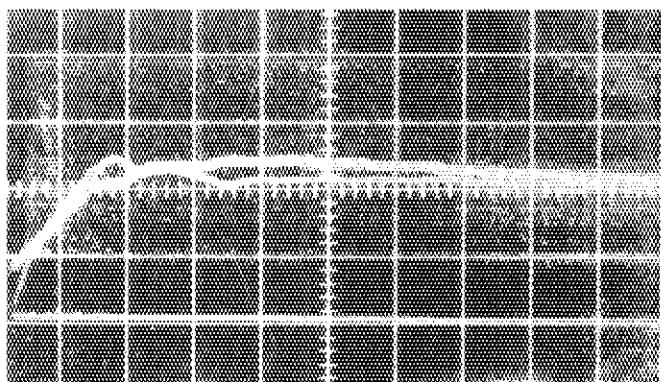


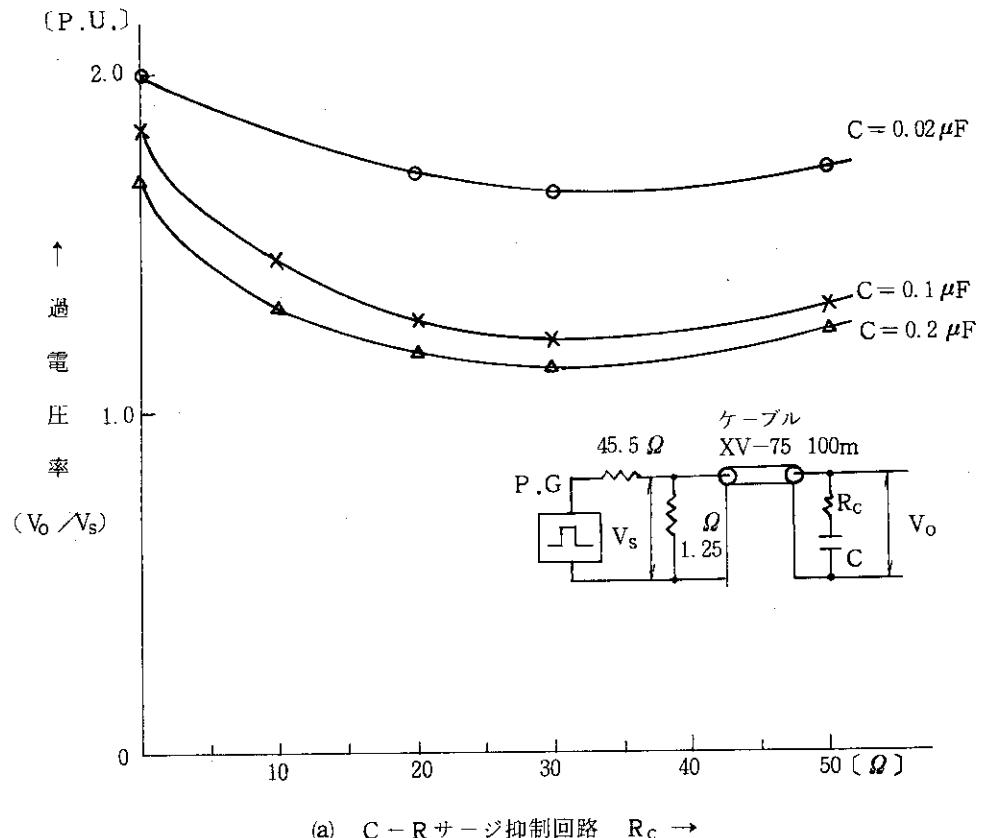
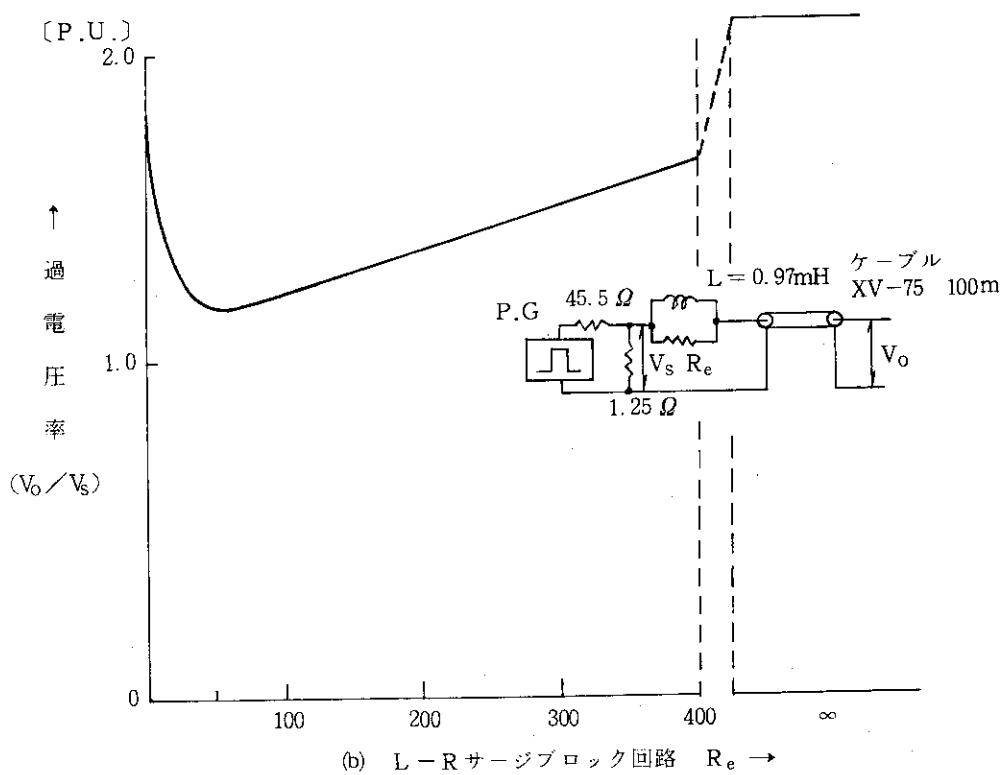
Photo. 26

第6図(c)

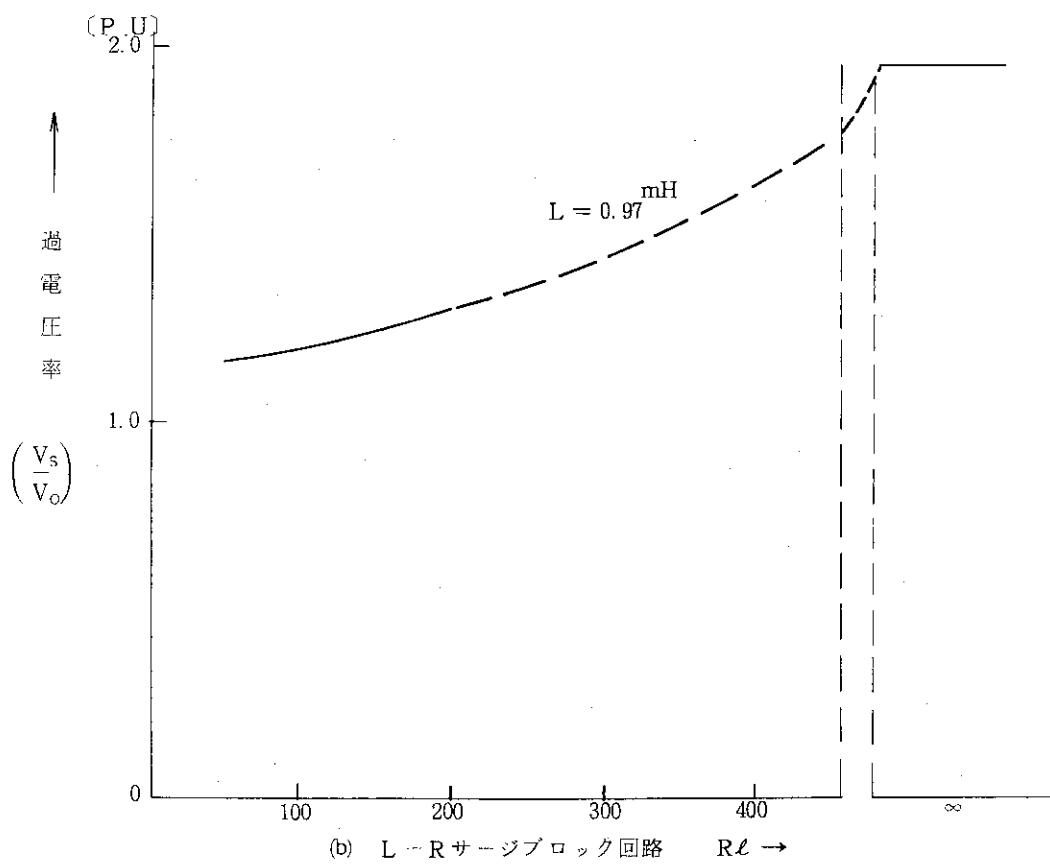
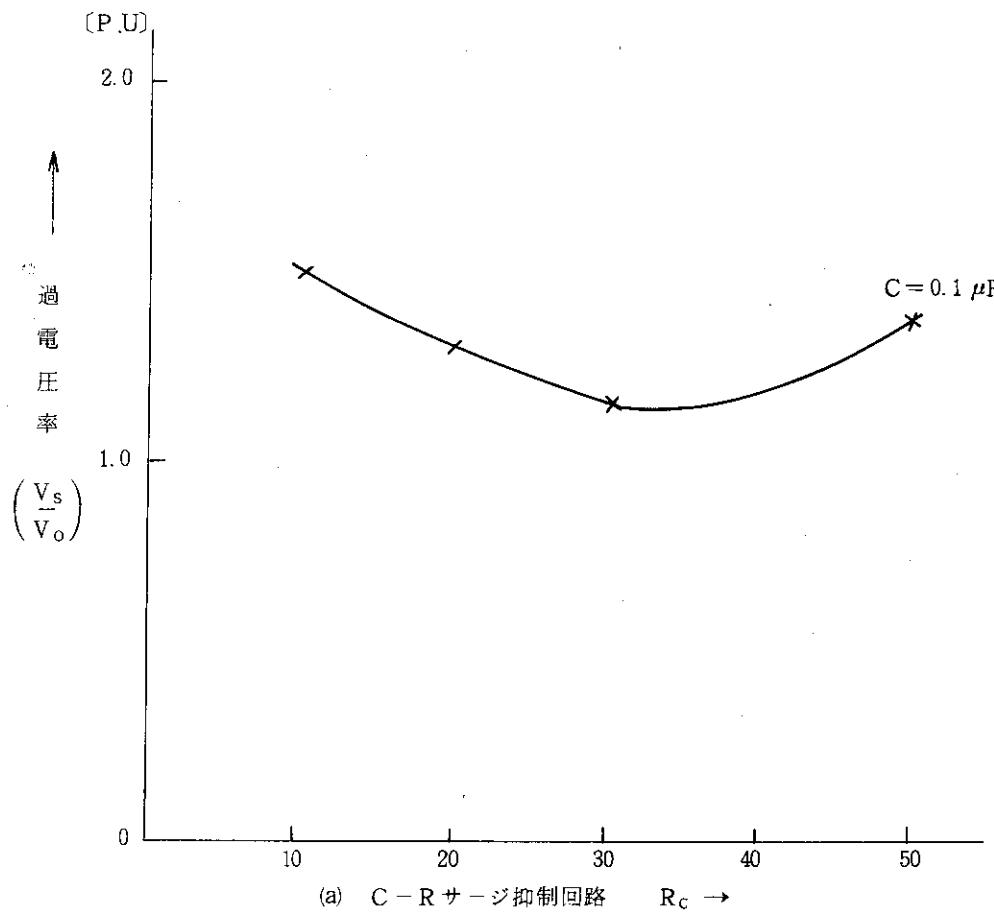
V_g 波形

立上り時間大; $R_e = 100 \Omega$

" 小; $R_e = 50 \Omega$

(a) C - R サージ抑制回路 $R_c \rightarrow$ (b) L - R サージブロック回路 $R_c \rightarrow$

第7図 ケーブルのサージ特性



第8図 実系統におけるサージ特性