

JAERI - M
82-105

JT-60NBI 原型ユニット加速電源の
制御性

1982年8月

松岡 守

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。
入手の問い合わせは、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、お申しこしてください。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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 關高野高速印刷

JT-60NBI 原型ユニット加速電源の制御性

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

松 岡 守

(1982年7月26日受理)

JT-60NBI 原型ユニット加速電源の制御性を調べた。評価を行なうためにまずイオン源の電気的特性を含めた制御性の評価法を示した。実際の制御特性はこの評価法で良く説明できる。さらに制御の質を高めるために本評価法を用いれば効率的に検討を進めることができる。

Control Characteristics on Accel Power Supply
of Prototype Injector Unit for JT-60

Mamoru MATSUOKA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 26, 1982)

Control characteristics on accel power supply of prototype injector unit for JT-60 are studied. Evaluation method of them is shown, where ion source characteristics are included. Several characteristics experimentally obtained can be well explained using this evaluation method. It is available to investigate the method to get better control characteristics.

Keywords; Accel Power Supply, Ion Source, Feedback Control, Regulator Tube, Stray Capacitance, NBI, JT-60

目 次

1. はじめに	1
2. 原型ユニット加速電源の仕様	2
3. 原型ユニット加速電源の構成	6
4. イオン源加速部の静特性	10
5. 加速電源の過渡特性	26
6. 考 察	30
6.1 異常な引き出しモードに移行する閾値	30
6.2 アーク, 加速両電源の立ち上げのタイミング	31
6.3 真空管のアノード降下の変化	32
6.4 イオン源のガス圧の変化	32
6.5 立ち上げ波形の改善法	33
7. まとめ	42
謝 辞	42
参 考 文 献	43

Contents

1.	Introduction	1
2.	Specification Required for Accel Power Supply of Prototype Injector Unit	2
3.	Structure of Accel Power Supply of Prototype Injector Unit	6
4.	Static Property of Accel Part of Ion Sources	1 0
5.	Transient Property of Accel Power Supply	2 6
6.	Discussion	3 0
6.1	Threshold to Abnormal Beam Extraction	3 0
6.2	Timing of Arc and Accel Power Supplies at Beam Initiation	3 1
6.3	Variation of Tube Anode Fall	3 2
6.4	Variation of Gas Pressure in Ion Sources	3 2
6.5	Method to Get Better Waveform at Beam Initiation	3 3
7.	Conclusion	4 2
	Acknowledgements	4 2
	References	4 3

1. は じ め に

日本原子力研究所で建設が進められている臨界プラズマ試験装置 (J T - 6 0) のトーラスプラズマの加熱の一方法として中性粒子入射加熱方式が採用される予定である。

これは中性粒子入射装置 (以下NBI) において静電的に加速したイオンビームを中性化することにより引き出される20 MWに及ぶ高速中性水素ビームをプラズマに入射し、加熱するものである。J T - 6 0に使用されるNBIはJ T - 6 0本体の真空容器に設けられた14個のNBIポートに対応して14ユニットに分かれるが、これら実機NBIの製作に先立って性能を確認するために製作された、実機の1ユニットに相当するJ T - 6 0 NBI 原型ユニット (以下原型ユニット) は昨年11月に完成し、現在は総合試験中である。

原型ユニットは規模においてもまた技術的な難しさにおいても他に例を見ないものであり、製作に先立って詳細な検討が行なわれた¹⁾。

原型ユニットの電源系について見れば、最も困難な技術を含んでいたものは加速電源である。原型ユニットの加速電源は100 kV, 80 A, 10秒に及ぶパワーをイオン源に供給するのであるが、性能の良いイオンビームを得るには定電圧性が必要であり、またイオン源において偶発する放電破壊から加速電極を保護するための高速遮断機能、サージブロック装置を必要とする。加えてイオン源を安定に運転するにはビームの立ち上げ時の電圧波形に特別の配慮を必要とする。このように加速電源は高圧大電流電源であることに加えて高速、高精度の質の良い制御性を持つものでなければならない。

質の良い制御を行うには、負荷であるイオン源の電気的特性を含めた制御性を評価することが不可欠である。これまでの一段加速イオン源においてはその負荷としての電気的特性が比較的単純で特に問題とはならなかった。しかしながら原型ユニットイオン源のような二段加速イオン源では、特に第2正電極の特性が条件によっては負性抵抗的な特性を示し制御を難かしくしていることがわかってきた。

このような事情にもかかわらず、これまで加速電源の制御性を負荷であるイオン源の特性を含めて検討したものは皆無である。これは一つにはイオン源は設計毎に電気的特性が変わることから負荷 (イオン源) の特性が良く理解されていなかったこと、もう一つは負荷の特性を含めた制御性の評価法が確立していなかったことによる。

本報告書は原型ユニットの場合に即して加速電源の制御性の評価法を示し、合わせてこれから得られた制御上の性質のいくつかを実験と比較検討する。なお、加速電源の構成およびイオン源の設計いかんにより制御性も大幅に変わるが、評価法そのものは他にも適用できる一般性のあるものである。第2章において原型ユニット加速電源に要求される仕様を、第3章ではこれに合致するよう設計された加速電源の構成を示す。第4章では原型ユニットイオン源の静的な特性を示し、これをもとに第5章で過渡特性が評価できるように加速電源の浮遊容量も考慮した制御ブロック線図を求める。第6章では本評価法より得られるいくつかの制御上の性質を実験結果と合わせて考察する。最後にまとめを第7章に示した。

2. 原型ユニット加速電源の仕様

本章及び次章の内容はいずれ原型ユニット建設報告の形で刊行されるものの中に含まれるべきものであるので、ここでは本報告書に必要な部分のみ示すこととする。

原型ユニットには2台のイオン源がついており、ソースプラズマを生成するためのアーク電源等は個別に用意されているが、加速電源及び減速電源は2台のイオン源に共通である(第2.1図)。加速電源はこのうち第1, 2正電極に接地電極を基準として独立な電圧を印加する。加速電源が満たさねばならない基本性能は以下の通りである。

a) 第1正電極負荷端

イ) 出力端電圧 (V_{acc}) 可変範囲

20 ~ 100 kV (連続可変)

ロ) 電流 (I_{acc}) 容量

40 ~ 100 kV のとき 80 A

20 ~ 40 kV のとき 40 A

b) 第2正電極負荷端

イ) 出力端電圧 (V_g) 可変範囲

第1正電極電位より- (10 ~ 30) kV。ただし対接地電極電位は20 kV以上(第2.2図参照)。

ロ) 電流 (I_g) 容量

10秒以下のパルスに対し 0 ± 2.0 A

0.5秒以下のパルスに対し 0 ± 3.2 A

ただし3.2 Aは目標値。いずれの場合も立ち上げ時+1.5 A, 20 msの突入電流が許容されること。

c) 第1, 2正電極負荷端に共通な性能

イ) 出力電圧印加方式

常時一定電圧印加方式 } いずれも可能なこと。
パルス電圧印加方式 }

ロ) 高速遮断機能, サージブロック機能を有すること。

以下各項目ごとに説明を補う。

出力端電圧可変範囲

V_{acc} の可変範囲が広いのは、1つにはトカマクの実験に応じて様々なエネルギーの中性ビームを提供する必要があること、もう1つは原型ユニットはイオン源について最適化を行なう必要があり、このため運転範囲が広いことが望ましいからである。 V_g も後者の理由で幅を持たせてある。電圧設定比 V_g/V_{acc} は単一のイオン源でもイオン源の特性を調べるために変えることがあるし、加速電極間隔を変えたイオン源では当然異なる電圧設定比となる。しかしこれは実機では0.6 ~ 0.9の内の一点に固定されるべきものである。

電流容量

イオンビームはソースプラズマ中のイオンを飽和電流の形で引き出すため、 I_{acc} は V_{acc} , V_g にはほとんど依存せず、ソースプラズマの粒子密度及び電子温度に、したがって直流アーク放電でソースプラズマを得ている原型ユニットイオン源ではアークパワーに依存する。しかしながらビームの発散を小さくするためイオンビーム光学上から制限があり、 $V_{acc}-I_{acc}$ の運転範囲は第 2.3 図のようになる。

I_g はその絶対値は小さいものの各パラメータに対する依存性は複雑である。加速電源は V_g , I_g の供給の仕方にしたがって、 V_{acc} の分圧によって供給する方式、2 段積直流電源などいくつかの方式に分かれる。また電圧 ($V_{acc}-V_g$) を増すと I_g も増す (負の値であればその絶対値が減る。 I_g はイオン源に流れ込む方向を正とする。) 傾向があり、これは第 1 正電極へのケーブルを電源の行きのライン、第 2 正電極へのケーブルを戻りのラインと考えると負性抵抗の特性と言える。2 段加速イオン源の加速電源は 1 つにはこの理由で制御が難しい。

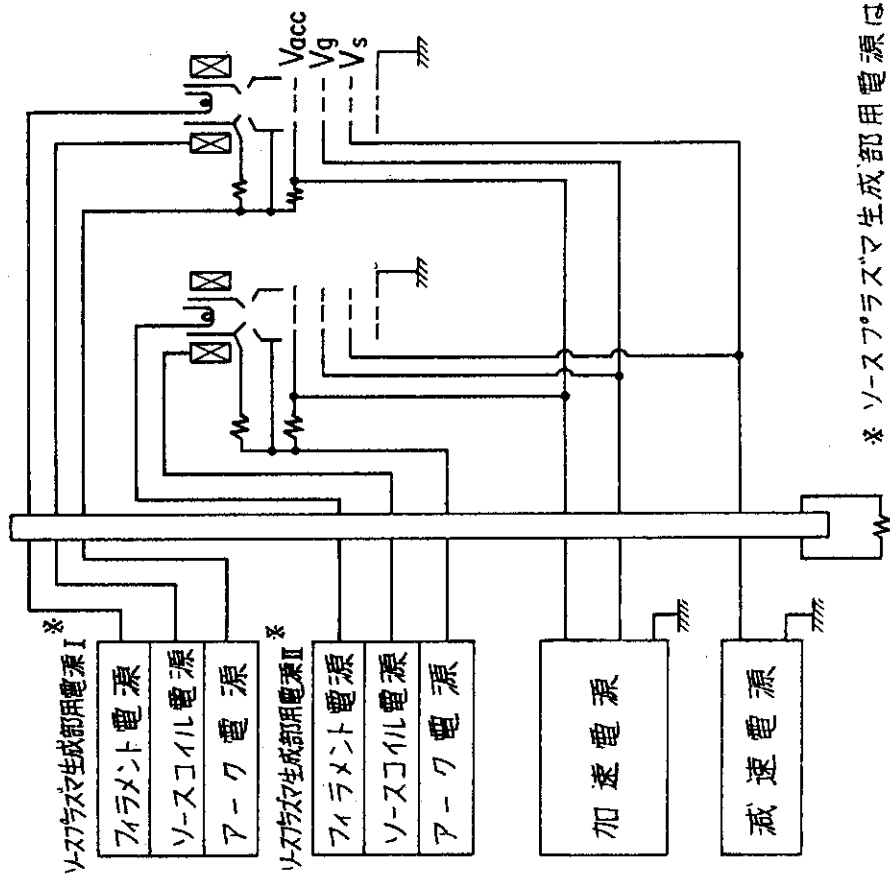
常時一定電圧印加方式

安定なビーム引き出しを確立するにはビーム引き出しの立ち上げに特別の配慮を必要とする。パービアンスを $I_{acc}/(V_{acc}-V_g)^{3/2}$ で定義する (通常は $I_{acc}/V_{acc}^{3/2}$ で定義することが多い。) と、このパービアンスがイオンビームの発散が最小となる最適の値からずれると加速電極間の放電破壊は急に起こり易くなる (第 2.3 図)。実際、スロット型の電極では運転可能な範囲は最適パービアンズ $\pm 5\%$ と言われており²⁾、パービアンスを一定に保ちながらビームを立ち上げるように多ノッチアーク電源を使うなど周到な配慮をしている³⁾。幸い原型ユニットイオン源のような多孔型イオン源では、電極間隔が印加電圧に比して余裕がある場合パービアンズが 0 からでも立ち上げ可能であり、また逆にソースプラズマを先につくっておいてあとで一段目の電圧を印加するという、パービアンズが無大からの立ち上げもある条件のもとで可能である。このことから立ち上げの方法として単純な方式を 1 つ確保するという意味で、原型ユニットではパービアンズ 0 からの立ち上げ方式、つまり常時一定電圧印加方式もとれるようにしている。この方式のタイミングの関係を第 2.4 図 a) に示す。まずソースプラズマのない状態で V_{acc} , V_g を確立しておき、しかるのちにアーク放電によりソースプラズマを生成してビームを引き出す。この方式は単純な点が好ましいが、加速電圧が高くなるにつれてパービアンズの小さい立ち上げ時に放電破壊が起こり易くなり、ある電圧以上では立ち上げが非常に難かしくなる。

パルス電圧印加方式

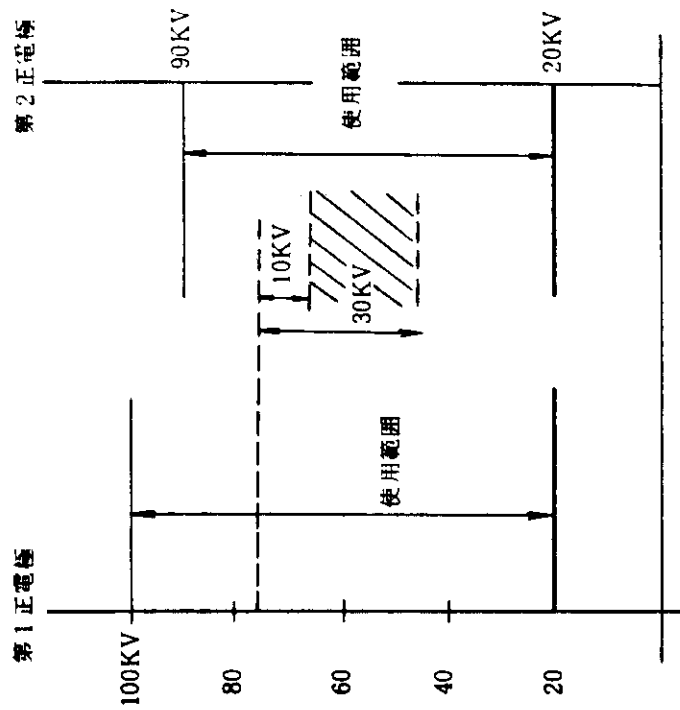
この方式は立ち上げ時にもパービアンズを一定に保ち放電破壊を起こりにくくしたものである。原型ユニットの場合のこの方式のタイミングの関係を第 2.4 図 b) に示す。つまり、いったんアーク放電を起こしておき、その後瞬時の間アーク電流をアークスナバーと呼ばれる回路に側路させ、アーク電流回復時に合わせて V_{acc} , V_g を立ち上げる。パービアンズ一定とするにはアーク、 V_{acc} , V_g の正確なタイミング及び波形が一致していることが必要である。パービアンズには電圧は ($V_{acc}-V_g$) の形でしか現われないが、 V_g そのものの大きさもイオンビーム光学上は重要で V_{acc} , V_g とも一致した立ち上げが望ましい。しかしながら前述のように第 1, 2 正電極負荷端の特性はかなり異なるので両者を一致してアーク波形に合わせて立ち上げるのは容易ではない。

サージブロッカ イオン源Ⅱ イオン源Ⅰ

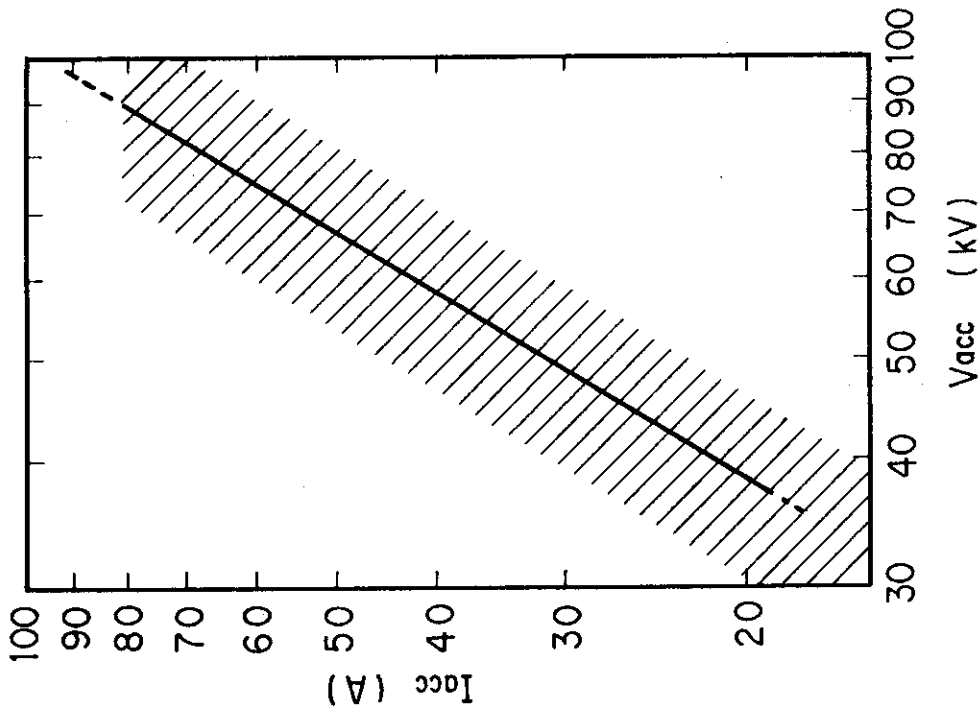


※ ソースプラズマ生成部用電源は
バケットイオン源，デュオビ・ガ
トロニオン源いずれにも対応
できるよう作られている。

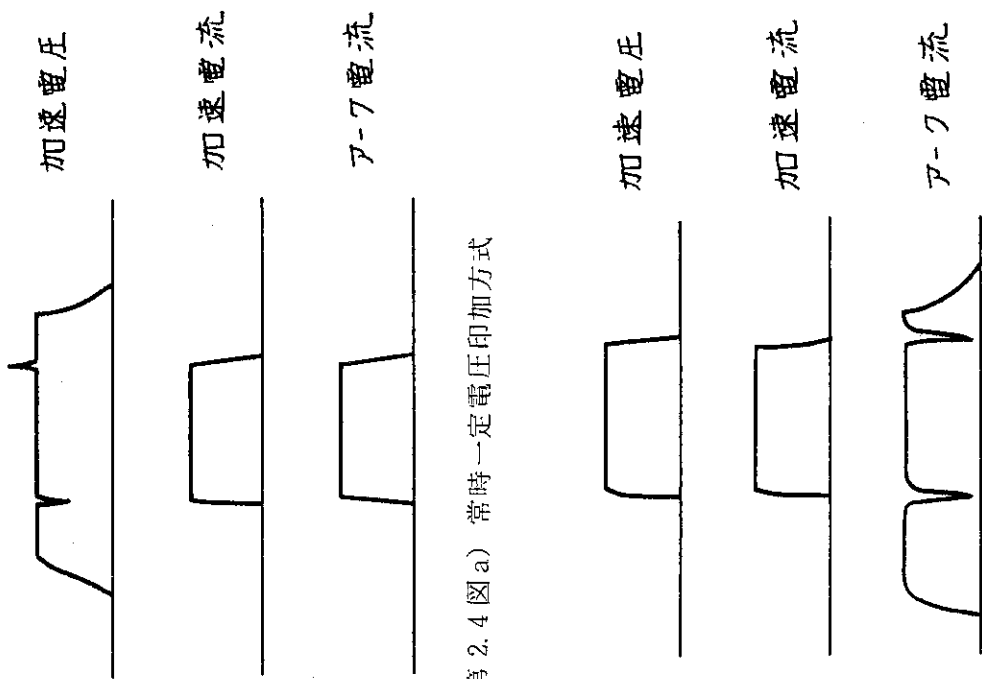
第 2.1 図 イオン源電圧印加方式



第 2.2 図 出力電圧可変範囲



第 2.3 図 V_{acc} , I_{acc} の運転範囲の例。原型ユニトリオン源において電極のギャップが一段目 5 mm, 二段目 6 mm, $V_g/V_{acc} = 0.61$ のもの 2 台の場合を示す。右上りの線はビーム発散が最も小さくなる条件。



第 2.4 図 a) 常時一定電圧印加方式

第 2.4 図 b) パルス電圧印加方式。放電破壊を防ぐためビームオフ時にもアースナバーを動作させる。

3. 原型ユニット加速電源の構成

第3.1図に原型ユニット加速電源の基本構成を示す。第2正電極の電圧は真空管R T - 2, 抵抗器R - 3による分圧により得ている。この方式は以下の理由により選ばれた。まずITS - 2⁴⁾のように直流電源を2段積みにする方式は、高耐圧の真空管の存在しない時は有効な方式であったがコストが高くつくこと、及び第2正電極は高压側のトランスと直接接続されることになるのでそのままではトランスの2次巻線の対地浮遊容量に蓄えられたエネルギーにより放電破壊時のイオン源の損傷が大きくなると考えられるがこの対策に回路上の困難があることから採用されなかった。次に分圧方式にもその分圧の方法としてLBLのような抵抗分圧方式⁵⁾, 真空管-真空管分圧方式, 及び真空管-抵抗分圧方式が考えられる。このうち抵抗分圧方式は立ち上げ時の速いフィードバックが望めず, 立ち上げがむずかしくなると考えられること, 真空管-真空管分圧方式は第2正電極の電圧を維持するために2個の真空管を制御することとなり制御回路が複雑となることから, 最後の真空管-抵抗分圧方式とされた。この方式において真空管と抵抗の上下関係をどのように選定するかについては立ち上げ時に第2正電極に+15Aの電流を供給する能力が要求されることから真空管が上となる配置にされた。抵抗器R - 3はこれを固定抵抗とすると, 第2正電極については最低電圧値20kVでも±2.0A流す必要からR - 3の抵抗値は $20\text{ kV} / 2.0\text{ A} = 10\text{ k}\Omega$ 以下とする必要があり, このため最高電圧値90kVでは $(90\text{ kV})^2 / 10\text{ k}\Omega = 0.81\text{ MW}$ と消費電力の大きなものになってしまう。このことからR - 3はVgの設定値に応じて変わるタップ付き抵抗となっている。

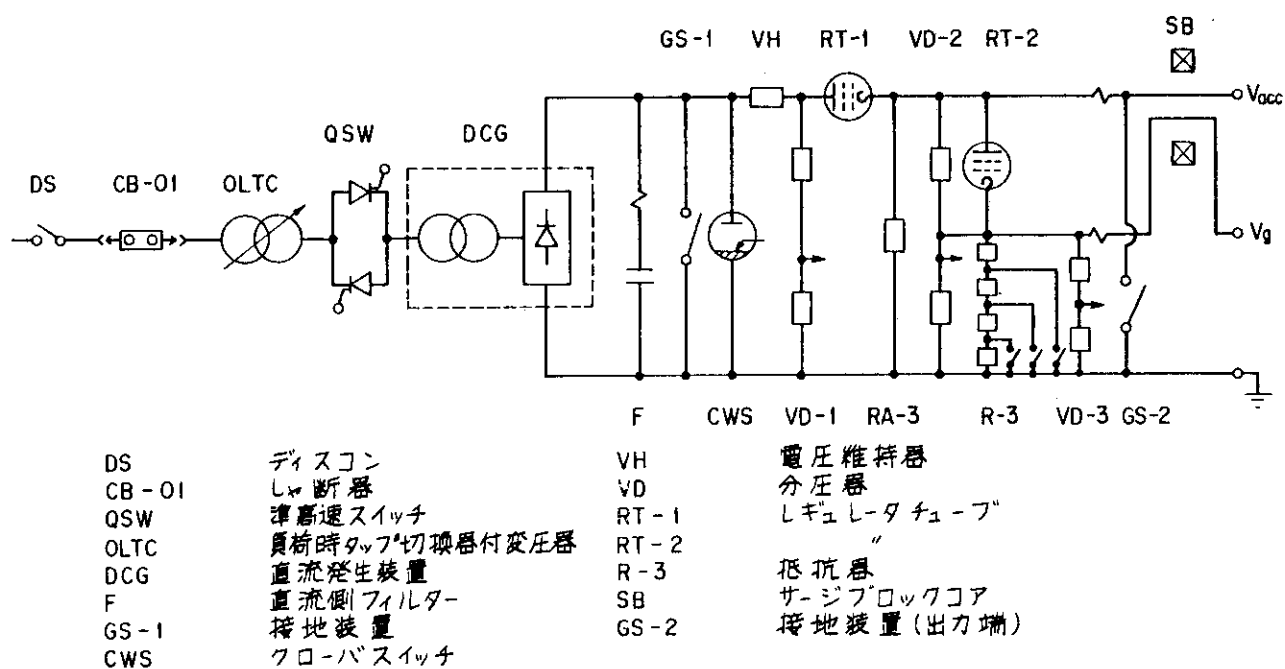
これによりR - 3の最大消費電力は300kW以下に軽減される。R - 3の消費電力は依然として大きい, これに耐えるようにR - 3は水冷式となっている*。

Vaccを調整する要素には負荷時タップ切換器付変圧器OLTC, 準高速スイッチQSW(サイリスタ), レギュレタチューブRT - 1の3つがある。これらの動作責務は以下のように分担されている。OLTCは直流発生装置DCGの出力をビーム引き出し時でVaccの設定値+15kV程度となるようにし, ビーム引き出し時にはタップ切り換えは行なわない。QSWは受電側(OLTCより上流側)のサイリスタの位相制御で補償できる程度の速さの電圧変動を補償する。RT - 1は負荷の変動に伴うRT - 1アノード側のゆっくりした変動とビーム引き出し開始直後の速い変動の補償をする。

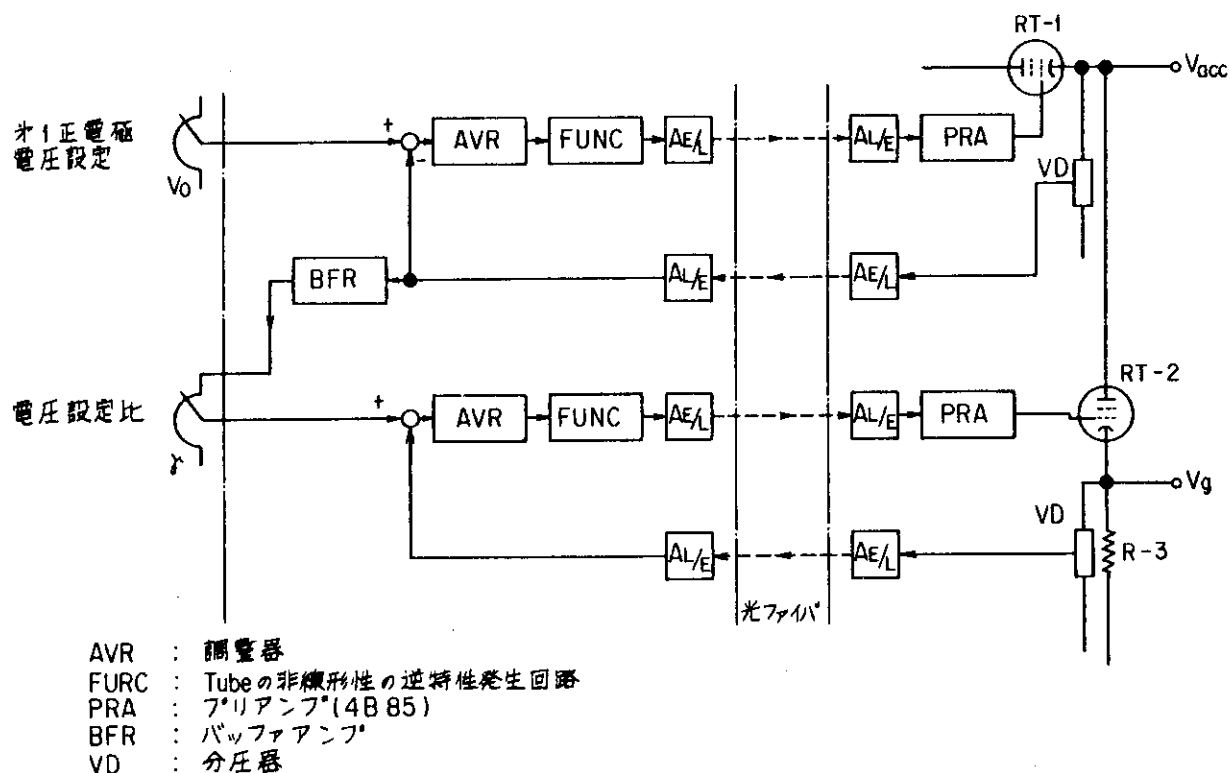
以上のように原型ユニット加速電源は単なる高压直流電源ではなくその構成は複雑である。このうち本報告書で制御性として取りあげるのはRT - 1, 2のコントロールグリッド電圧を制御することによるVacc, Vgの制御性で, これらの評価法を考察したものである。これらは負帰還制御が行なわれるがその概要は第3.2図の通りである。主回路は出力電圧で100kVに及ぶ高压回路であるので制御信号は光ファイバで絶縁してある。Vgの基準信号は設定値Voからとらずに実際に出ているVaccの値を分圧してとっている。これはパルス電圧印加方式の立ち上げ時にはVg/Vaccの値を一定に保ちながら立ち上げることがVgそのものの立ち上げ波形より重要であるからである。RT - 1, 2及びこれらのプリアンプ4B85はカットオフまたはこれに近い状態から使用するため制御グリッド電圧VCGとアノード電流IAとの関係は非線形的である。RT - 1, 2にはそれぞれS94000D(RCA), X2062J(EIMAC)が用いられているが, これらと4B85を

組み合わせたときの静特性を第 3.3 図 a) b) に示す。第 3.2 図中の 2 つの FUNC は以上のような非線形性を補償するために逆の特性を発生する回路である。このため FUNC の機能が完全であれば線形制御と見なすことができる。一般に真空管の $V_{CG}-I_A$ 静特性は遮蔽グリッド電圧 V_{SG} , アノード電圧 V_A に依存するので, FUNC の特性をある V_{SG} , V_A に対して決めた場合, V_{SG} , V_A が変化すると FUNC の特性と真空管の特性とにずれが生じてしまう。原型ユニットの場合もこれは問題となるが, これについては 6 章で改めて考察する。

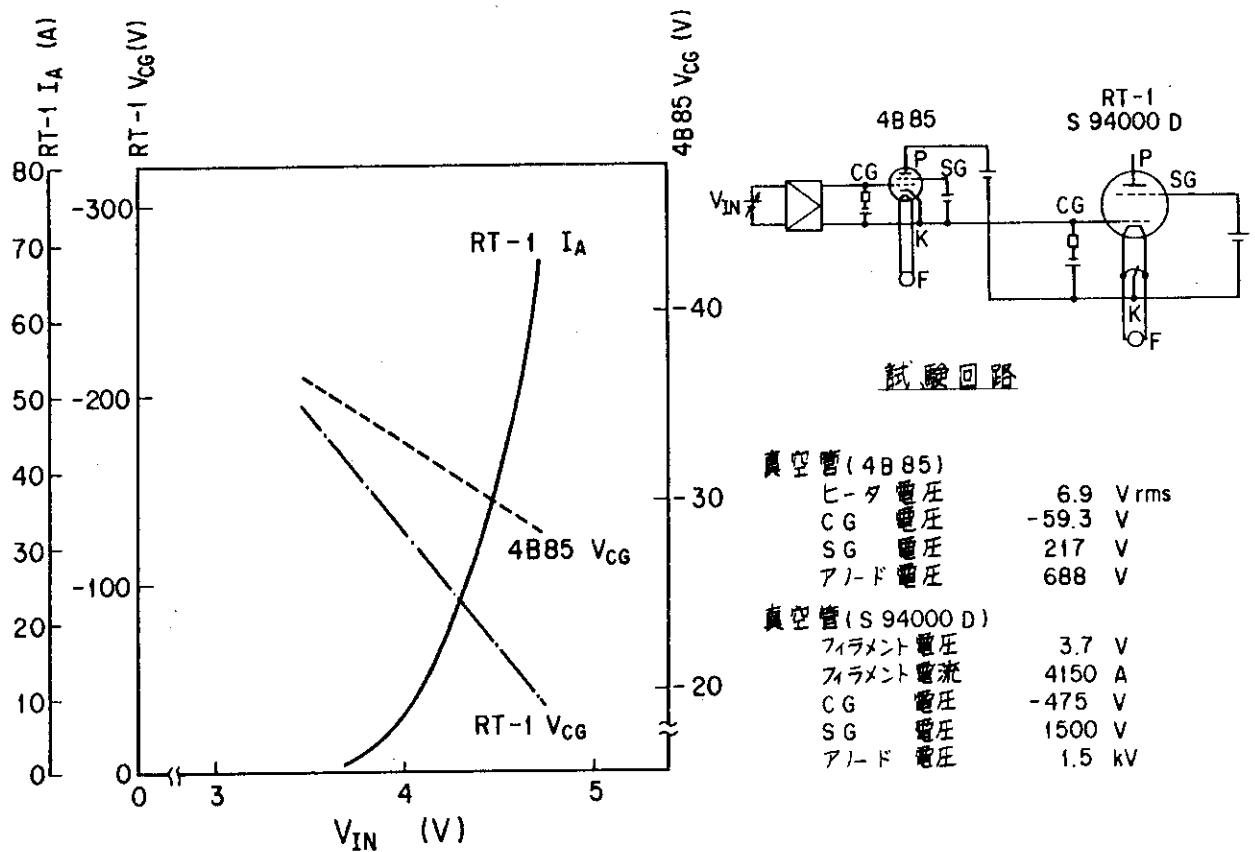
※ セラミック抵抗に電蝕を防ぐためのエポキシ塗装を施したものを水漬けしたもので, 定格の約 30 倍の入力が許容される。この水冷抵抗は原型ユニット電源系の受注先である東京芝浦電気(株)において製作に先立って行なわれた R & D によって開発されたものである。



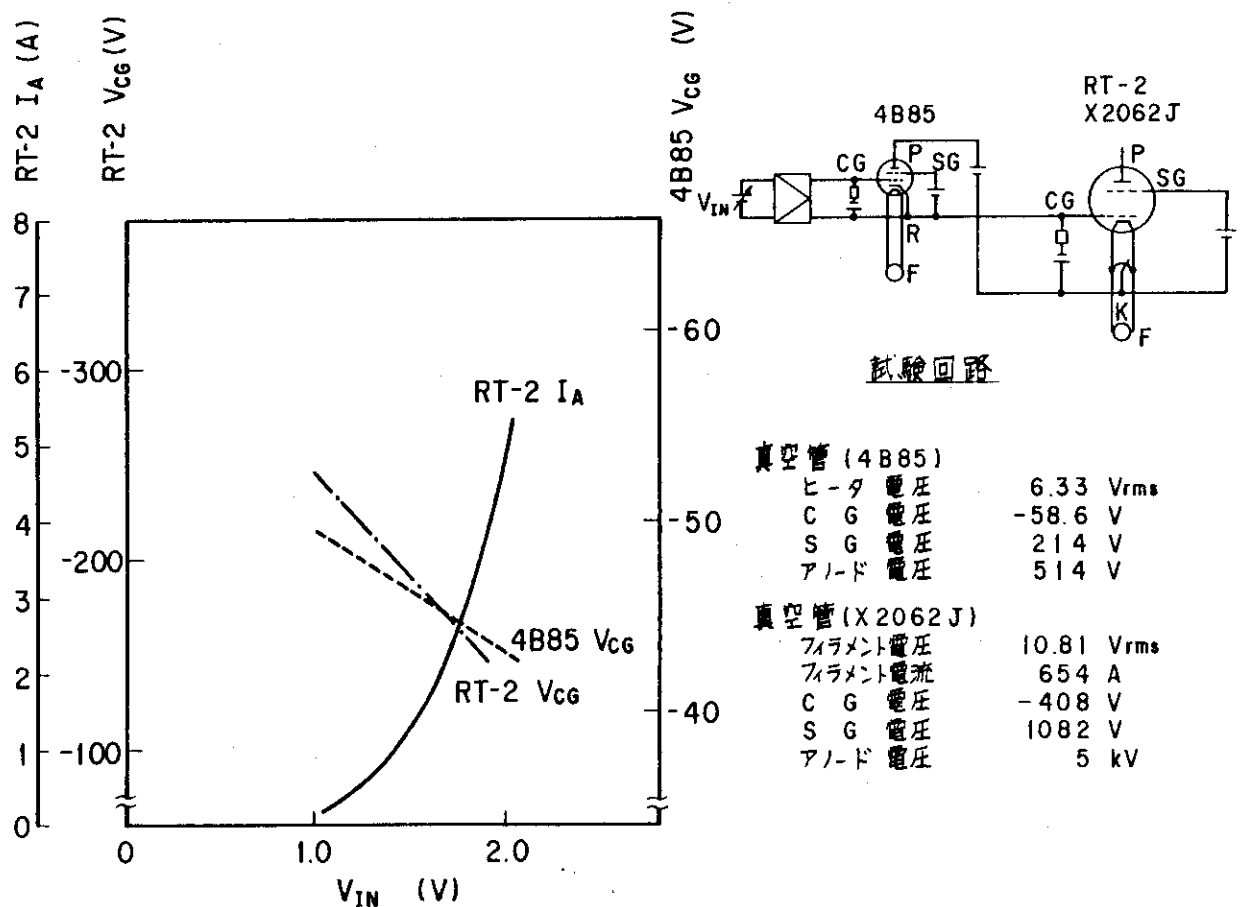
第3.1図 原型ユニット加速電源の基本構成



第3.2図 RT-1, 2 の負帰還制御の信号の流れ



第 3.3 図 a) 4 B 8 5, S 9 4 0 0 0 D を組み合わせたときの静特性



第 3.3 図 b) 4 B 8 5, X 2 0 6 2 J を組み合わせたときの静特性

4. イオン源加速部の静特性

原型ユニット加速電源の負帰還制御を調べるには与えた $RT-1, 2$ のアノード電流 IT_1, IT_2 に対し V_{acc}, V_g の値がいくらになるかといった電源の負荷としてのイオン源の特性を知る必要がある。この特性の中には加速電源の浮遊インピーダンスの効果も含まれねばならないが第1段階としてこの章では静特性に限る。イオン源改速部の電気的特性は V_{acc}, V_g のみならず、アークパワー P 、ガス圧分布の関数であるが、簡単のために以下の仮定を設けた。

- (i) ガス圧分布は時間的に一定とする。
- (ii) I_{acc} は P のみで決まる。アーク効率は $0.9 A/kW$ とする。
- (iii) I_g はパービアンス $I_{acc} / (V_{acc} - V_g)^{3/2}$ のみで決まる。

一般に I_g はイオンビームの発散とガス圧分布に依存する。第4.1図に I_g の流れる機構の概念図を示す⁶⁾。原型ユニットイオン源は1020個の直径4mm（減速電極のみ4.4mm）の円形孔のあいた多孔型イオン源⁷⁾であるが、第4.1図はその1個の孔の断面図に相当する。電極形状はイオンビームの発散が小さくなり、大部分のイオンが図中①のようにそのまま引き出されるよう厳密なシミュレーションを行なって決められる⁸⁾が、第1正電極（Plasma G.）の円孔の周辺より引き出されたイオンはイオンビーム光学上の収差により一部は②③④のように電極に直接衝突する。また電極間隙にはソースプラズマを生成するために流している $10^{-1} Pa$ 台の水素ガスがある。このため加速途中で荷電交換の結果遅いイオンを生じたり（⑤）、水素ガスを電離してイオン・電子対を生じ（⑥）、これらはさらに加速されて一部は電極に衝突する。また接地電極を出たイオンビームはビームプラズマを生じ、そのイオンは減速電圧 V_S によって加速され、一部は減速電極（Supp. G.）に衝突する（⑦）。また、以上のような過程によって電極に衝突した粒子は2次電子を誘起し、2次電子がさらに加速されて対向する電極に衝突することも起こる。これらの過程の総合的な結果として I_g および減速電流 I_S は決まる。このように現象は複雑であるが、原型ユニットイオン源についてはイオンビーム光学上もまた実験的にも次の傾向のあることがわかる。

- 1) 水素ガス圧を増すと I_g は単調に増加する。
- 2) パービアンスが小さいと第4.1図中の③の現象が支配的となり、その結果生ずる2次電子により I_g は増す。
- 3) パービアンスが大きいと同図中の②の現象が支配的となり、 I_g は減る。

これらの傾向もイオン源の引き出し電極孔構造の設計により大きく変わるものである。

第4.2図は原型ユニットイオン源において I_g のガス圧依存を測定したもので、横軸はイオン源のソースプラズマ生成部に流すガス流量 QA 、縦軸は $I_g / I_{acc} \times 100$ である。このように $V_{acc}, V_g / V_{acc}$ が一定でもガス圧の増加と共に I_g は増す。一方ビーム引き出しと共にいわゆるビームポンピングのためにガス圧は変化する。第4.3図はイオン源出口部ガス圧 P_N の時間変化である。 P_N はこれより下流（中性化セル側）及び真空測定系の時定数が関係するためその時間変化は穏やか（ $\tau = 0.2 \sim 1$ 秒）であるが、ソースプラズマ生成部（アークチャンバー内）のガス圧の時間変化はもっと速い。イオンビームが $100\% H^+$ とすると $35 A$ のイオンビームは約 $0.41 Pa \cdot m^3/s$ 相当 (H_2) の流量となる。アークチャンバー容積は約 $36 cm \times 21 cm \times 23.5 cm = 0.018 m^3$ 台である

ので、加速電流波形が完全な矩形波でアークチャンバー内初期ガス圧を1 Pa とするとこれが10% 小くなるに要する時間 $\tau_{10\%}$ は

$$\tau_{10\%} = \frac{0.1 \text{ Pa} \times 0.018 \text{ m}^3}{0.41 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}} = 4.4 \text{ ms}$$

となる。しかしながらパルス電圧印加方式における立ち上げ時間は数100 μs でありこれに比べればガス圧の変化は依然として長い。したがって立ち上げ特性を考察する場合にはガス圧は一定と見なせることから(i)の仮定をおいた。ただしビーム引き出し開始時と定常時とではソースプラズマ生成部のガス圧は数10%異なるため I_g の値は変化し得ることに注意しなければならない。ガス圧の空間分布は中性化セルからもガスを導入した場合には異なるものとなり、 I_g の値も変化すると考えられる。ガス圧の影響については7章で改めて考察する。

一般にアーク効率は V_{acc} にはほとんど依存せずアークチャンバーガス圧 P_A には弱く依存する。いま仮定(i)でガス圧分布は一定とおいたから P_A は一定、したがってアーク効率も一定である。これより I_{acc} はアークパワー P のみに依存する。通常運転する領域は $P_A = 0.2 \sim 1.0 \text{ Pa}$ 程度でこのときアーク効率は $0.7 \sim 1.0 \text{ A/kW}$ であるがここでは初期の値 0.9 A/kW とした。以上が仮定(ii)の理由である。

(i)の仮定の理由ですでに述べたように I_g はイオンビームの発散及びガス圧分布に依存するが、このうちガス圧分布は仮定(i)から一定である。発散はパービアンス $I_{acc}/(V_{acc} - V_g)^{3/2}$ の値のみならず V_g の値にも依存するが、 I_g は特にパービアンスの小さい場合はほとんどパービアンスのみに依存する。この理由は以下の通りである。イオン源の加速電極の形状はイオンビームの発散が小さくなるよう注意深く設計されている。第4.4図a)はイオンビーム軌道計算機シミュレーションの結果の例である⁹⁾。このようにイオンビームのほとんどは電極孔縁から離れた位置を通り、多少発散の悪く(大きく)なる領域で運転してもイオンビームが電極に衝突し I_g を生じるようには見えない。しかしながら実際にはこのような発散の良い条件でも発散に依存して I_g の増減が見られ、イオンビームの一部はやはり電極の一部に衝突しているのがわかる。この理由は同図b) c)のように第1正電極の同孔周辺のごく近傍より引き出されたイオンビームが円孔近傍の乱れた電界によって加速されるからと考えられる。パービアンスが小さいときb)のような軌道を描いて減速電極に衝突するものが支配的となり、その結果生ずる2次電子を第2正電極が受けるので I_g は増える。逆にパービアンスが大きいときはc)のような現象が支配的となって I_g は減ると考えられる。c)の現象は V_g の値には無関係であるし、b)の現象も第1正電極の円孔周辺の乱れた電界が決定的な役割を果たし、 V_g の値の変化はその後の軌道に小さな影響しか与え得ないと考えられる。

以上3つの仮定のもとに第4.5図のように R_{T-1} , 2 を定電流源と考え、 I_{T1} , I_{T2} (記号は同図の通り)を変化させたときの V_{acc} , V_g の変化を与える関数形を段階的に求める。なお、以後イオン源は特にことわらない限り原型ユニットイオン源2台をまとめたものとし、記述の仕方も通常のイオン源の特性の示し方とは違えて加速電源の負荷としてわかり易い方法とした。また数値は原型ユニットの基本設計値 $V_{acc} = 75 \text{ kV}$, $I_{acc} = 70 \text{ A}$, 及び初期の実験に用いた値である $V_g/V_{acc} = 0.644$ を標準として規格化した。

$(V_{acc} - V_g) - I_{acc}$ 関係

常時一定電圧印加方式、パルス電圧印加方式それぞれが理想的になされる場合の本関係における立ち上げの経路を第 4.6 図に示す。仮定(ii)より I_{acc} は P によって一意的に定まる ($I_{acc}(A) = 2 \times 0.9 P (kW)$) ので、常時一定電圧印加方式の場合は P の増大に伴い $V_{acc} - V_g$ を一定 (基本設計値の場合は $7.5 kV \times (1 - 0.644) = 2.67 kV$) に保ちながら定常値 (同 $70 A$) に至る。パルス電圧印加方式の場合は $I_{acc} / (V_{acc} - V_g)^{3/2}$ が一定であるから横軸が $(V_{acc} - V_g)$ の $3/2$ 乗目盛りで描いてある同図では立ち上げ経路は直線で示される。さらにこの場合イオンビームの発散が大きくなって加速電極間の放電破壊を引き起こさないようにするには V_g / V_{acc} も一定に保たれることが望ましい。

 $I_{acc} / (V_{acc} - V_g)^{3/2} - I_g / I_{acc}$ 特性

原型ユニットの実験で得られたデータを仮定(iii)を用いて $V_{acc} - V_g = 2.67 kV$ の場合に換算して示したのが第 4.7 図である。実線はデータ点を結んだものである。 g が負の値になっているデータは $V_{acc} = 37 kV$ で 運転中放電破壊に伴う再立ち上げ時 $V_{acc} - V_g$ が数 kV となってしまったもので、二段加速イオン源としては異常な引き出しモードである。本報告書における評価法の目的も 1 つはこの異常な引き出しモードに移行しない運転領域を見出すことにある。

 $(V_{acc} - V_g) - I_g$ 特性

第 4.7 図の実線に基づいて描くと第 4.8 図が得られる。加速電流が最適値付近 (第 4.7 図で横軸の値が $50 \sim 80$) では g の値がほとんど変化しないことから、第 4.8 図でもこれらの値に対応する点はあまり変わらない。 $I_{acc} / (V_{acc} - V_g)^{3/2}$ の値を増してゆくと I_g は負となりこれと共に $|I_g|$ は急激に増す。 I_g の電源リミットは 10 秒パルスでは $\pm 2 A$ までであり、容易に電源リミットに至ってしまう。先の異常な引き出しモードはこの電源リミットに至っている場合である。第 4.8 図には基本設計値で運転の場合の常時一定電圧印加方式、パルス電圧印加方式における立ち上げ経路も示した。

イオン源を含めた等価回路

仮定(iii)よりイオン源は I_{acc} , I_g とともに P , $(V_{acc} - V_g)$ で決まる定電流源的な特性となる。そこで電源も含めて第 4.9 図のような等価回路を考える。等価回路より

$$V_{acc} = (I_{T1} - I_{acc} - I_{T2}) \cdot R_{A3} \quad (1)$$

$$V_g = (I_{T2} - I_g) \cdot R_3 \quad (2)$$

$$I_{acc} = I_{acc'} - I_g = 1.8 P \quad (P : \text{アークパワー (kW/台)}) \quad (3)$$

$$I_g = I_{acc} \cdot g(V_{acc} - V_g, I_{acc}) / 100 \quad (g \text{ は第 4.7 図}) \quad (4)$$

$R_{A3} = 300 \text{ k}\Omega$	
$R_3 \text{ (k}\Omega\text{)}$	$V_g \text{ の設定値 (kV)}$
9	2.0 ~ 2.8
13	2.8 ~ 4.1
19.5	4.1 ~ 6.1
29	6.1 ~ 9.0

$V_{acc} = 7.5 \text{ kV}$, $V_g/V_{acc} = 0.644$ の場合 $R_3 = 19.5 \text{ k}\Omega$ となるが、立ち上げ特性等は V_{acc} が高い程きびしくなるので $V_{acc} = 100 \text{ kV}$ (最大) のとき参考にし易いよう以下 $R_3 = 29 \text{ k}\Omega$ とした。

$V_{acc} - I_{T1}, I_{T2}$ 特性

①, ③式より

$$V_{acc} = (I_{T1} - I_{T2} - 1.8P) \cdot R_{A3} \quad (\text{kV, A, kW, k}\Omega) \quad (5)$$

P をパラメータにしてこれを図示すると第4.10図のようになる。 V_{acc} は I_{T1} , I_{T2} , P で決まるこの直方体内の一点の値に制御される。 I_{T1} , I_{T2} , P を独立変数と考えると⑤式より,

$$\frac{\partial V_{acc}}{\partial I_{T1}} = R_{A3} \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_{acc}}{\partial I_{T2}} = -R_{A3} \quad (7)$$

$$\frac{\partial V_{acc}}{\partial P} = -1.8 R_{A3} \quad (8)$$

$$(R_{A3} = 300 \text{ k}\Omega)$$

となる。

$V_g - I_{T1}, I_{T2}$ 特性

①, ②, ④式より

$$\frac{V_{acc} - V_g}{I_{acc} R_3} \cdot 100 - g(V_{acc} - V_g, I_{acc}) = \left\{ \frac{I_{T1}}{I_{acc}} \frac{R_{A3}}{R_3} - \frac{I_{T2}}{I_{acc}} \left(\frac{R_{A3}}{R_3} + 1 \right) - \frac{R_{A3}}{R_3} \right\} \quad (\text{kV, A, k}\Omega) \quad (9)$$

右辺は I_{T1} , I_{T2} , $P \left(= \frac{I_{acc}}{1.8} \right)$ を与えれば定まる。これに対応して左辺を $V_{acc} - V_g$ について求めれば V_{acc} は⑤式で与えられるから最終的に V_g が得られる。 $V_{acc} - V_g$ は g および $\frac{V_{acc} - V_g}{I_{acc} R_3} \cdot 100$ を描いた第4.7図より図式的に求められる。ここで、定常状態で用いる範囲は第4.7図において横軸の値が50～80Aであり g の値はほとんど変化しないから $g = 1\%$ (一定) とおくと②, ④式より

$$\frac{\partial V_g}{\partial I_{T1}} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial I_{T2}} = R_3 \quad (11)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial P} = - \frac{1.8}{100} R_3 \quad (12)$$

$$(R_3 = 29 \text{ k}\Omega)$$

g の関数形を考慮するとこれらの関係は複雑なものとなる。

⑤, ⑨式より求めた V_{acc} , $V_g - I_{T2}$ 特性の一例を第4.11図に示す。同図は $I_{acc} = 38 \text{ A}$ ($P = 20 \text{ kW/台}$) 一定の場合である。 V_{acc} は⑦式にしたがって I_{T2} の増加と共に減少する。一方 V_g は複雑な変化をする。 I_{T2} の増加に伴って $V_{acc} - V_g$ が減るといった正常な制御のできる範囲は図示の範囲に限られてしまうことがわかる。例えば制御可能な範囲から I_{T2} のオーバーシュート (V_g のオーバーシュート) により△点に達すると負方向に I_g が増え, I_{T2} で供給しなくても R_3 に流れる電流が多くなり (第4.9図参照), V_g は V_{acc} 近くまで持ち上げられて制御不能になる。これが原型ユニットで時折見られる異常な引き出しモードであると考えられる。逆に I_{T2} が不十分の場合も×点に至るとパービアンスが小さ過ぎて $\partial(V_{acc} - V_g) / \partial I_{T2}$ が正から負にかわり, したがって $RT-2$ の制御が負帰還制御から正帰還になってしまうので制御不能になる筈である。常時一定電圧印加方式ではこの状態を通るが制御不能にはなっていない。これは1つには第4.7図の $g \geq 5\%$ のデータは常時一定電圧印加方式の立ち上げ途中のもの (立ち上げ開始より数ms) をとっており, このためガス圧が定常の低い値に達していないことから多めの値になっていて実際の制御不能域は第4.11図に示した範囲より広いと考えられる。またいったん制御不能になってもその異常な制御が効き始めるよりも早くアークが立ち上がるにしたがって再び制御可能域に入ってくるため制御不能が明確に現われてこないとも考えられる。

第4.11図では I_{T2} に伴って V_{acc} も変化してわかりにくいので V_{acc} が一定に制御されているとして I_{T2} を変化させた場合を第4.12図に示す。常時一定電圧印加方式の立ち上げ時を考えると無負荷 ($P = 0 \text{ kW}$) から始まって最初はパービアンスが小さいため I_g が増えるが, これに抗して V_g を一定に保つには I_{T2} を増さねばならない。 P がさらに増して最適な値 (図の矢印の位置) に近ずくと I_{T2} は小さくて良い。 P をさらに増して P が一定の乙字の右肩に至ると制御がきかなくなって異常な引き出しモードに移行してしまう。第4.12図ではこれらの状況が良く説明できる。

第4.13図は V_g / V_{acc} を一定とした場合の V_{acc} , $V_g - I_{T2}$ 特性である。P が一定ごとに V_g はほぼ相似な曲線上の定点になる。したがってパルス電圧印加方式ではPの小さい立ち上げ時では、パービアンズが大となって異常な引き出しモードになるまでのPに許される増分が小さい。このためパルス電圧印加方式では常時一定電圧印加方式以上にパービアンズが大とならないよう注意する必要がある。

浮遊インピーダンスを無視した場合のブロック線図

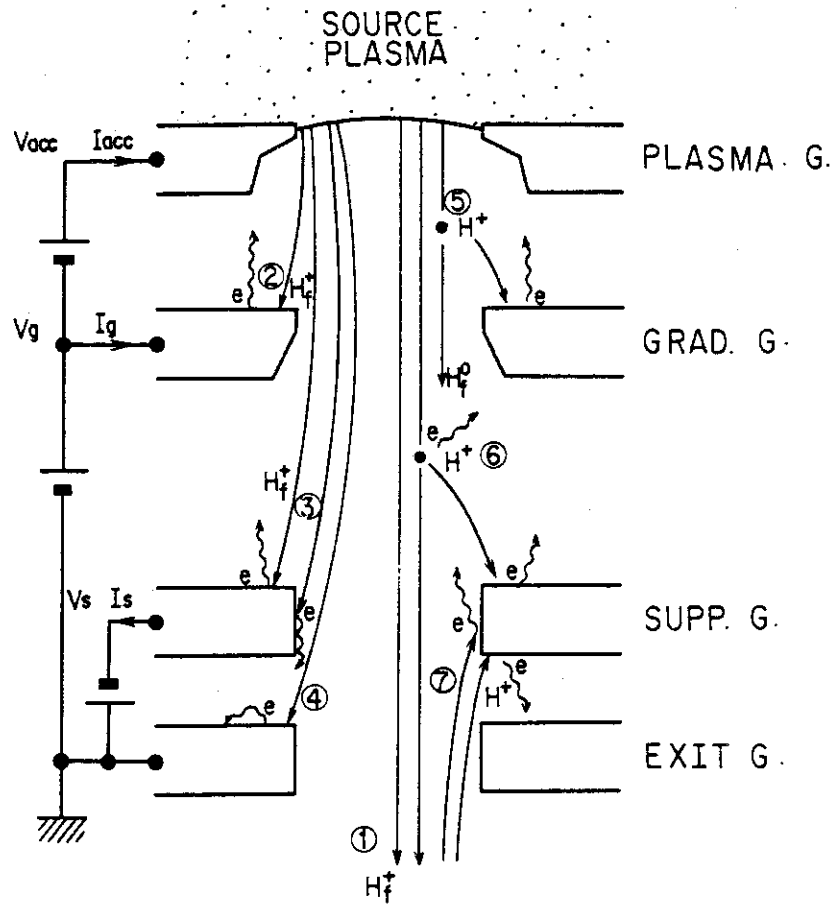
第3.2図に制御信号の流れが、また⑥～⑧, ⑩～⑫式に静的な負荷の特性が近似的に与えられているので、これらよりRT-1, 2以後の過渡特性を無視した場合の制御ブロック線図が描ける。第4.14図a)に電源内の考えられる非線形、遅れ要素を入れたブロック線図を示す。このうち非線形についてはFUNCの機能によって完全に補償されるとして描きなおしたのが同図b)である。ただし、次章の浮遊インピーダンスを考慮した場合の V_{acc} , V_g と区別するために V_{acc}^* , V_g^* とした。

制御性を調整するための回路AVRは現在は第4.15図のようなPI動作(P:比例, I:積分)をするものを用いている。10kΩの半固定抵抗器 R_{H2} , R_{H4} のノッチの位置を0～10で表わすとノッチの位置と第4.14図b)のA, T_1 , C, T_7 の関係は次のようになる。

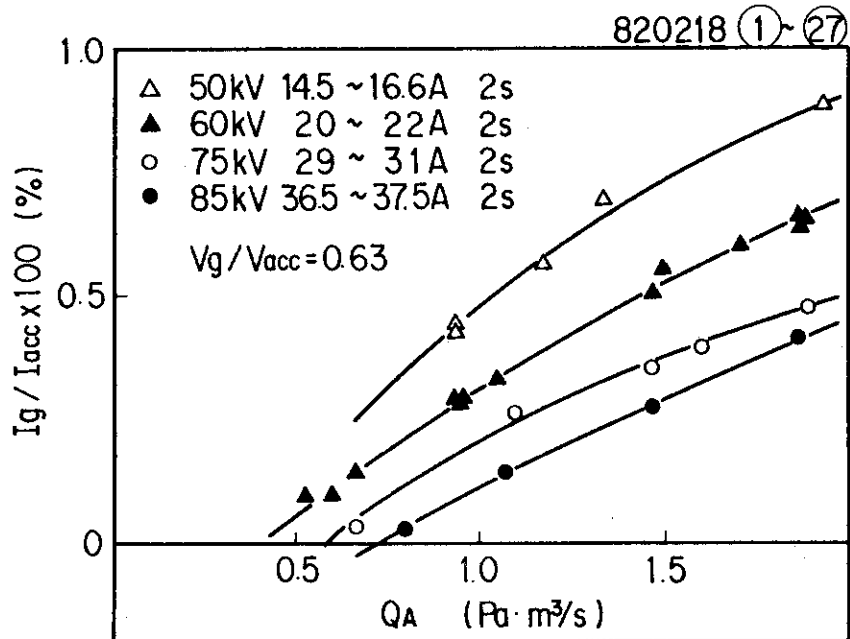
$$A, C = \frac{10}{R_{H2}} \cdot \frac{R_6 + 10^3 R_{H4}}{R_1} \quad (13)$$

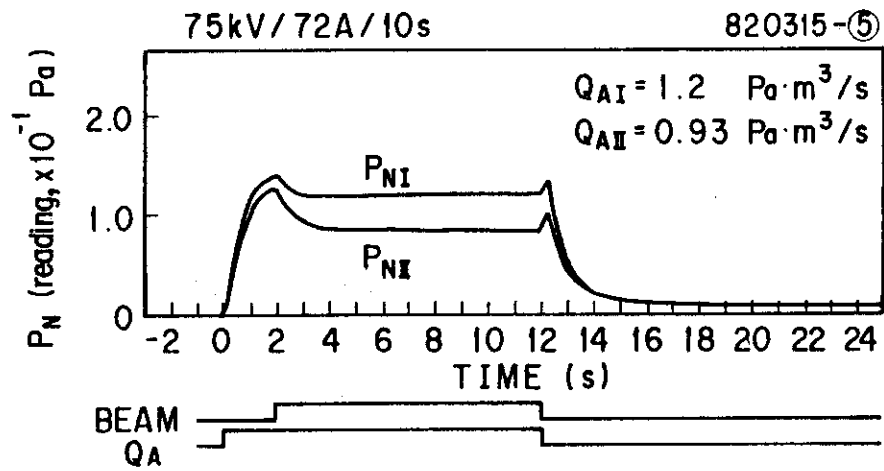
$$T_1, T_7 = C_6 (R_6 + 10^3 R_{H4})$$

したがって R_{H4} は比例動作のみに関係するが、 R_{H4} は比例、積分動作両方に関係する。

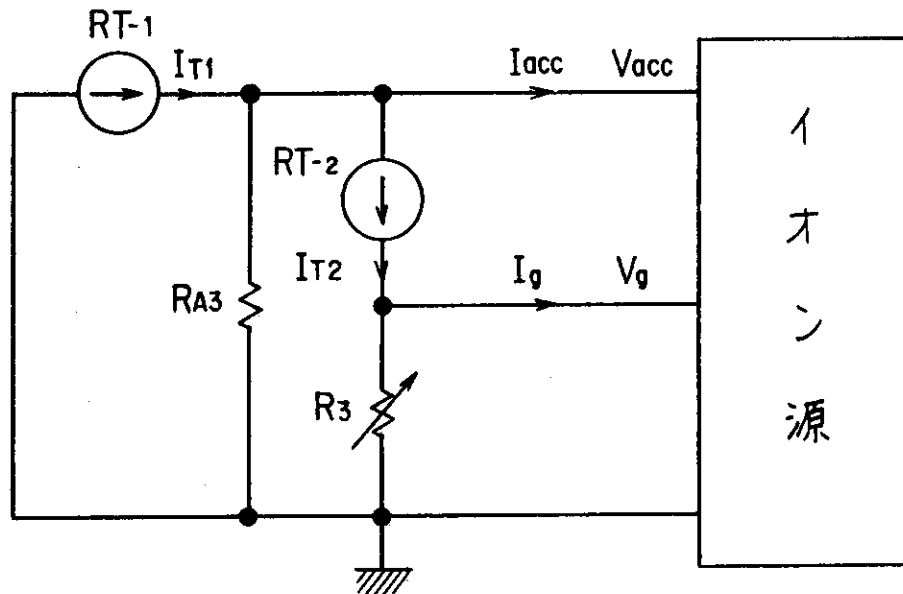


第 4.1 図 第 2 正電極電流の原因となる各過程の概念図

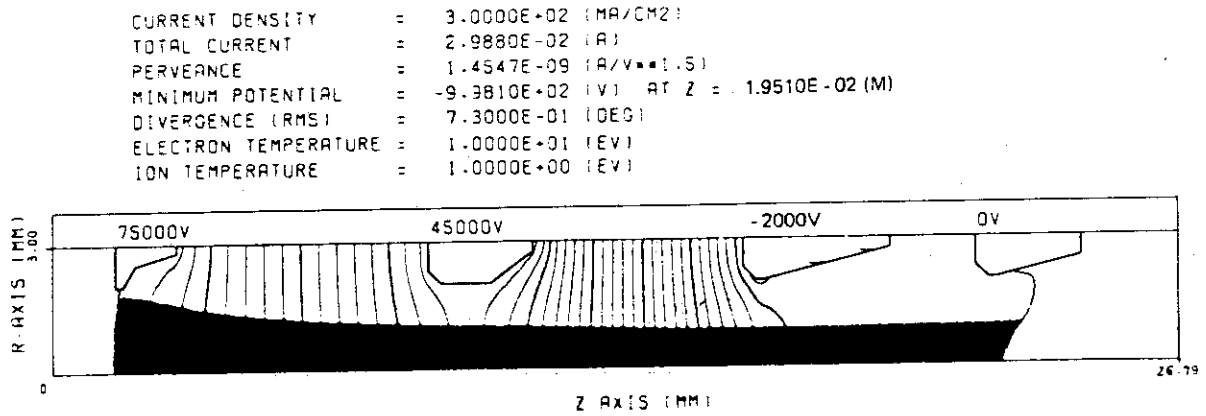
第 4.2 図 イオン源ガス流量 Q_A と第 2 正電極電流 I_g との関係。イオン源Ⅱのみ運転，中性化セルガス導入系不使用時。



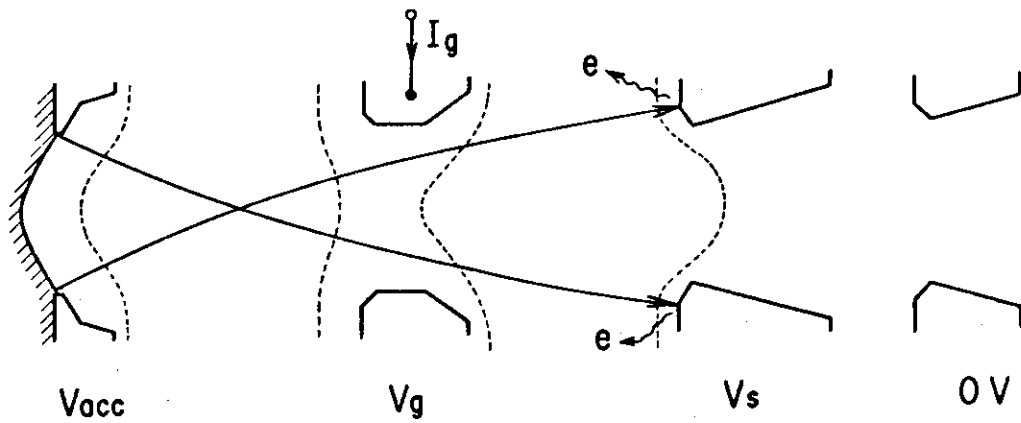
第 4.3 図 イオン源出口部ガス圧の時間変化。中性化セル
ガス導入系不使用時。



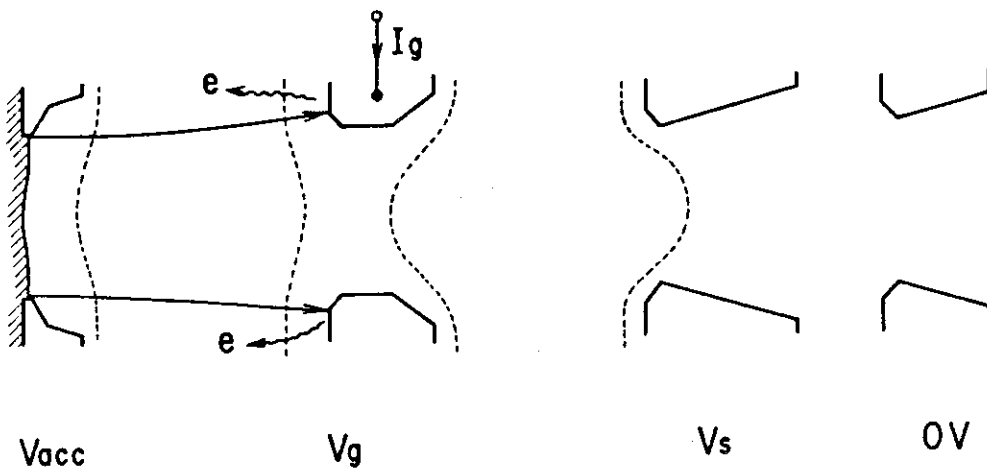
第 4.5 図 原型ユニット加速電源の静的な等価回路



a) イオン電流密度 0.3A/cm^2 , 加速電圧 75KV の場合のプロントビームの軌道

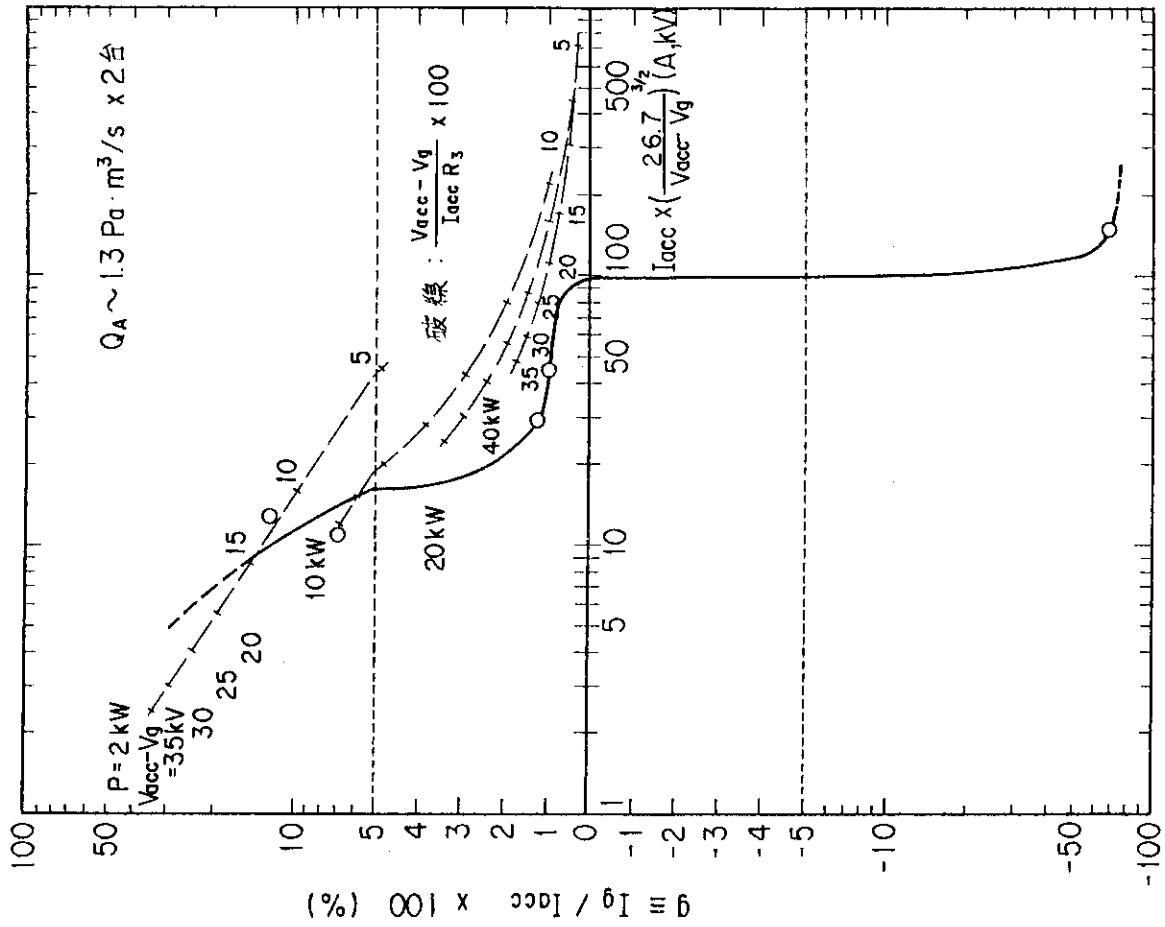


b) アンダーデンス ($I_{acc}/(V_{acc}-V_g)^{3/2}$: 小) の時

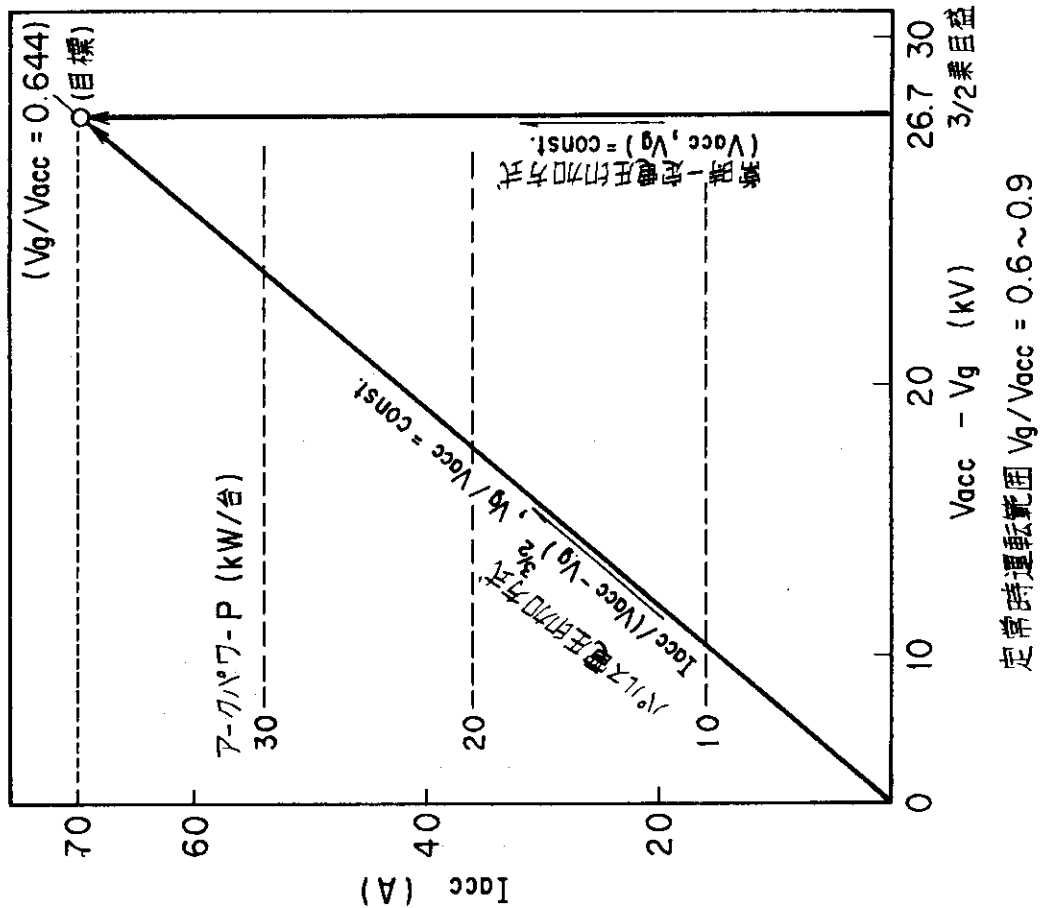


c) オーバーデンス ($I_{acc}/(V_{acc}-V_g)^{3/2}$: 大) の時

第 4.4 図 イオンビームの発散に関する I_g の増減。a) 図は 9) による。

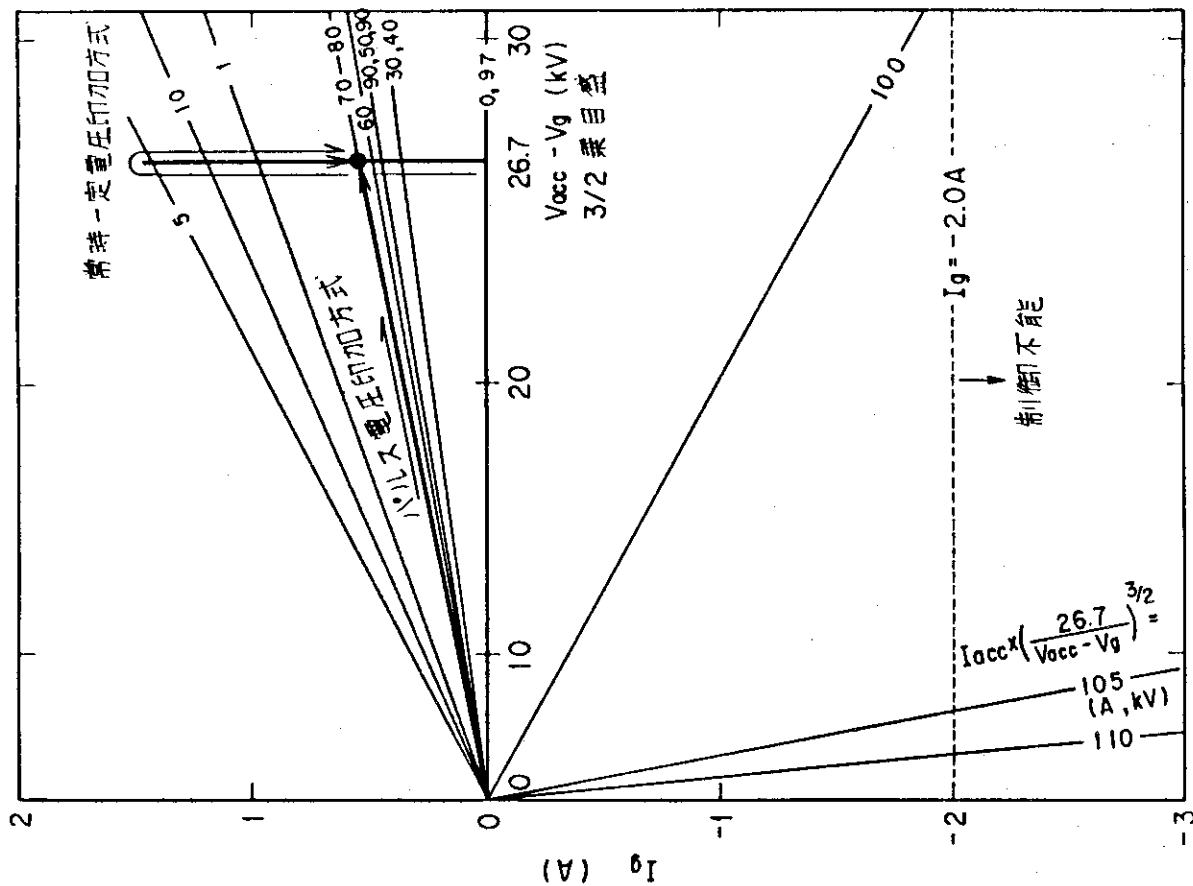


第 4.7 図 $I_{acc} / (V_{acc} - V_g)^{3/2} - I_g / I_{acc}$ 特性

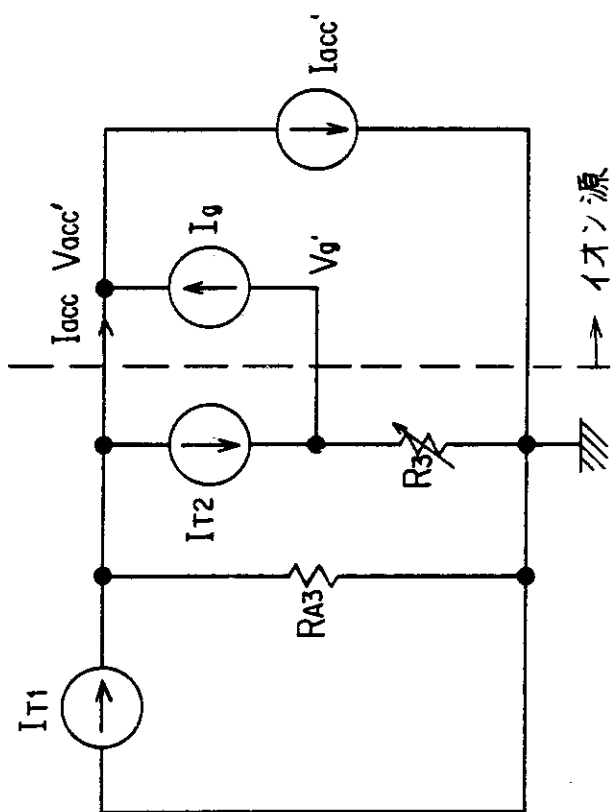


第 4.6 図 $(V_{acc} - V_g) - I_{acc}$ 関係。アーク効率を 0.9A/KW

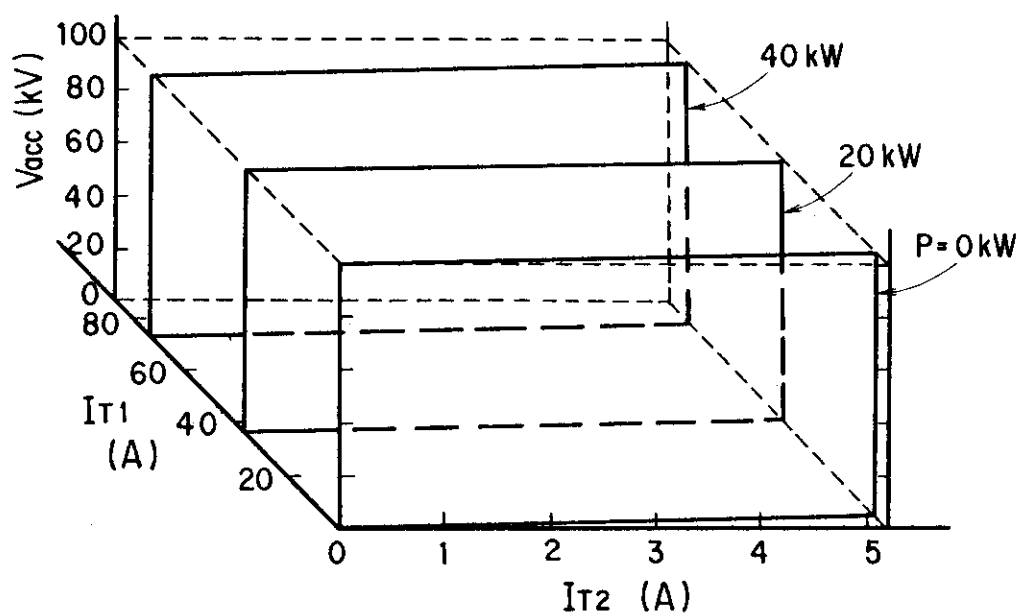
としたとき。



第 4.8 図 $(V_{acc} - V_g) - I_g$ 特性

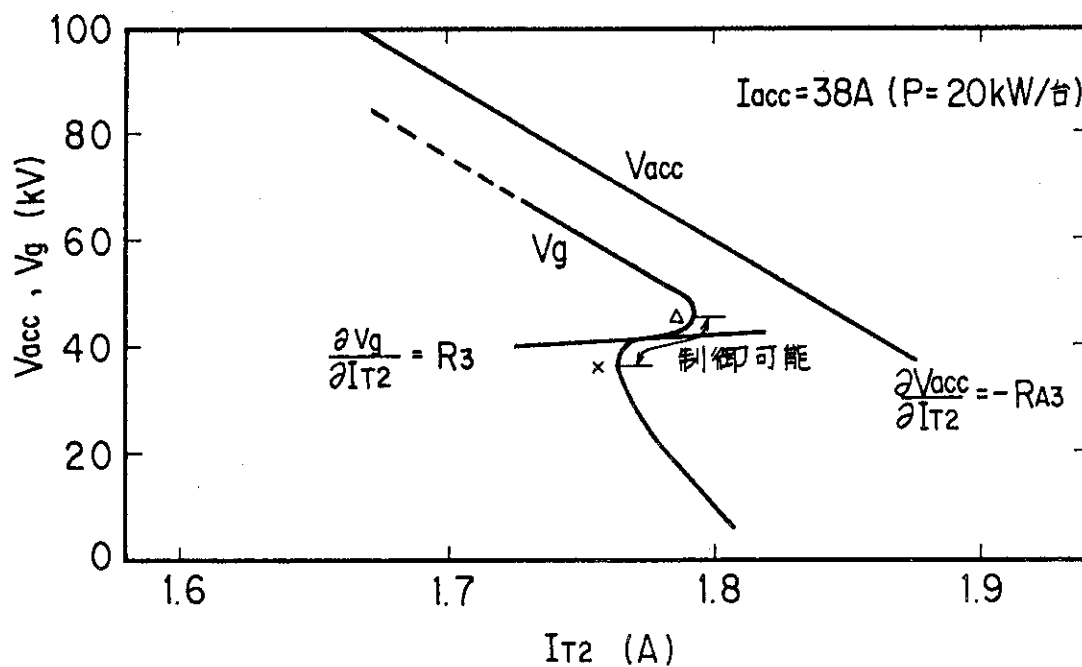


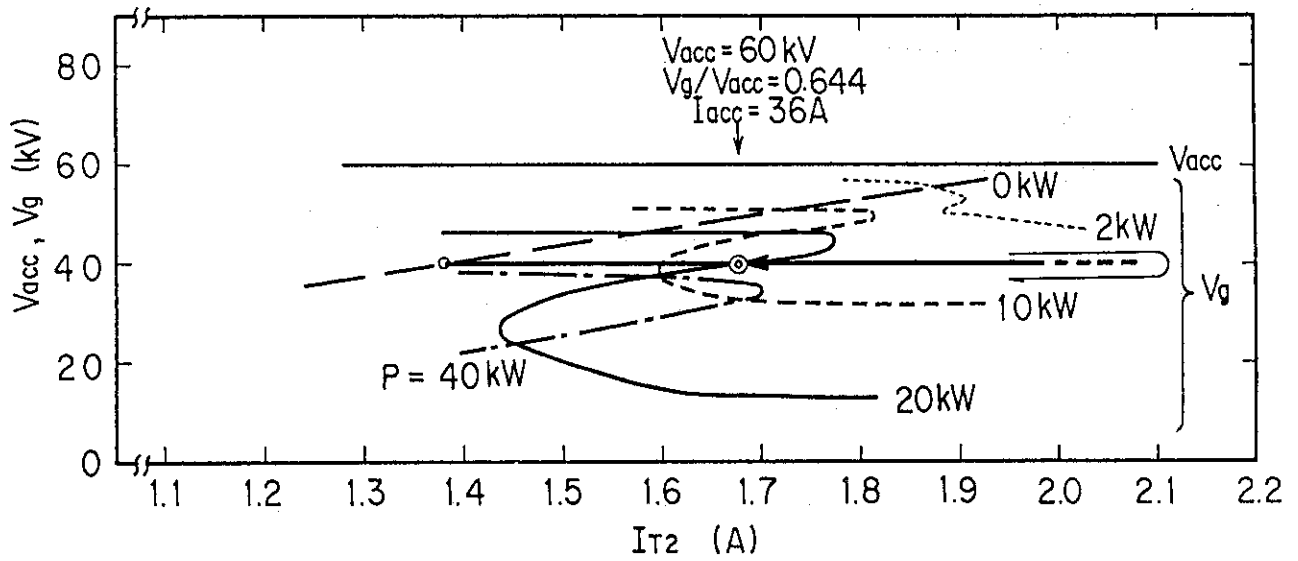
第 4.9 図 イオン源を含めた静的な等価回路



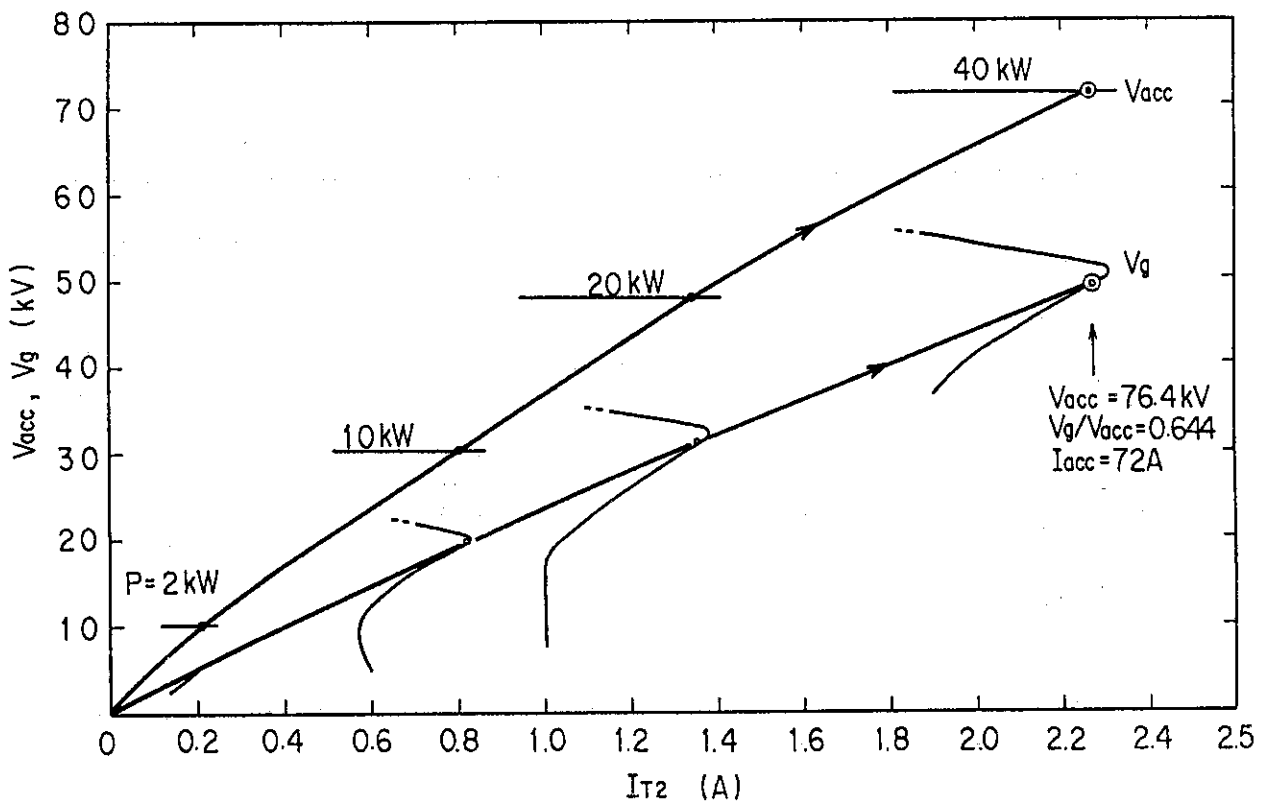
$$V_{acc} = (I_{T1} - I_{T2} - 1.8P) \times R_{A3} \quad (\text{kV, A, kW, k}\Omega)$$

$$R_{A3} = 300 \text{ k}\Omega$$

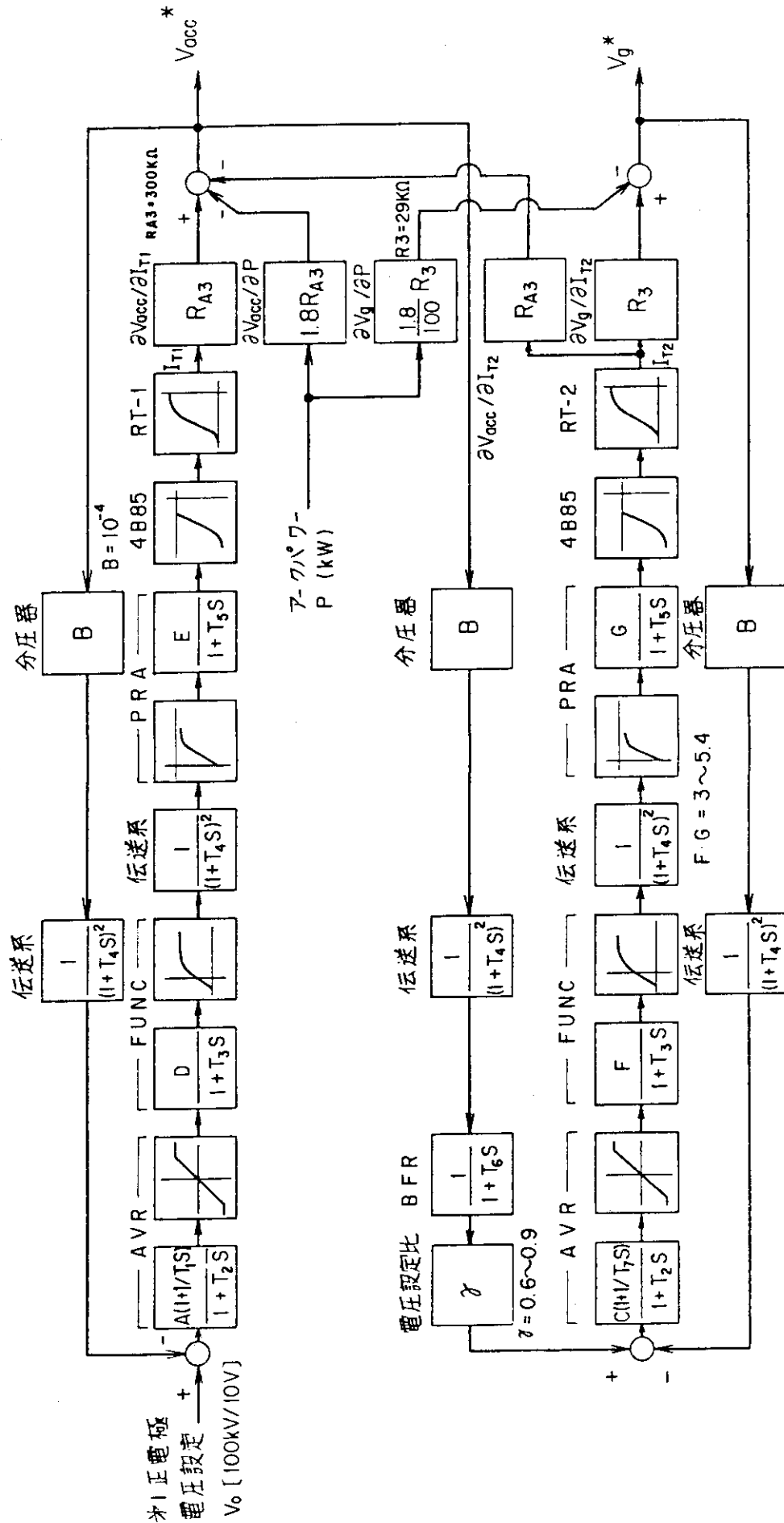
第 4.10 図 $V_{acc} - I_{T1}, I_{T2}, P$ 特性第 4.11 図 $V_{acc}, V_g - I_{T2}$ 特性 (I_{T1}, P : 一定)



第 4.12図 一定電圧印加方式における立ち上げ



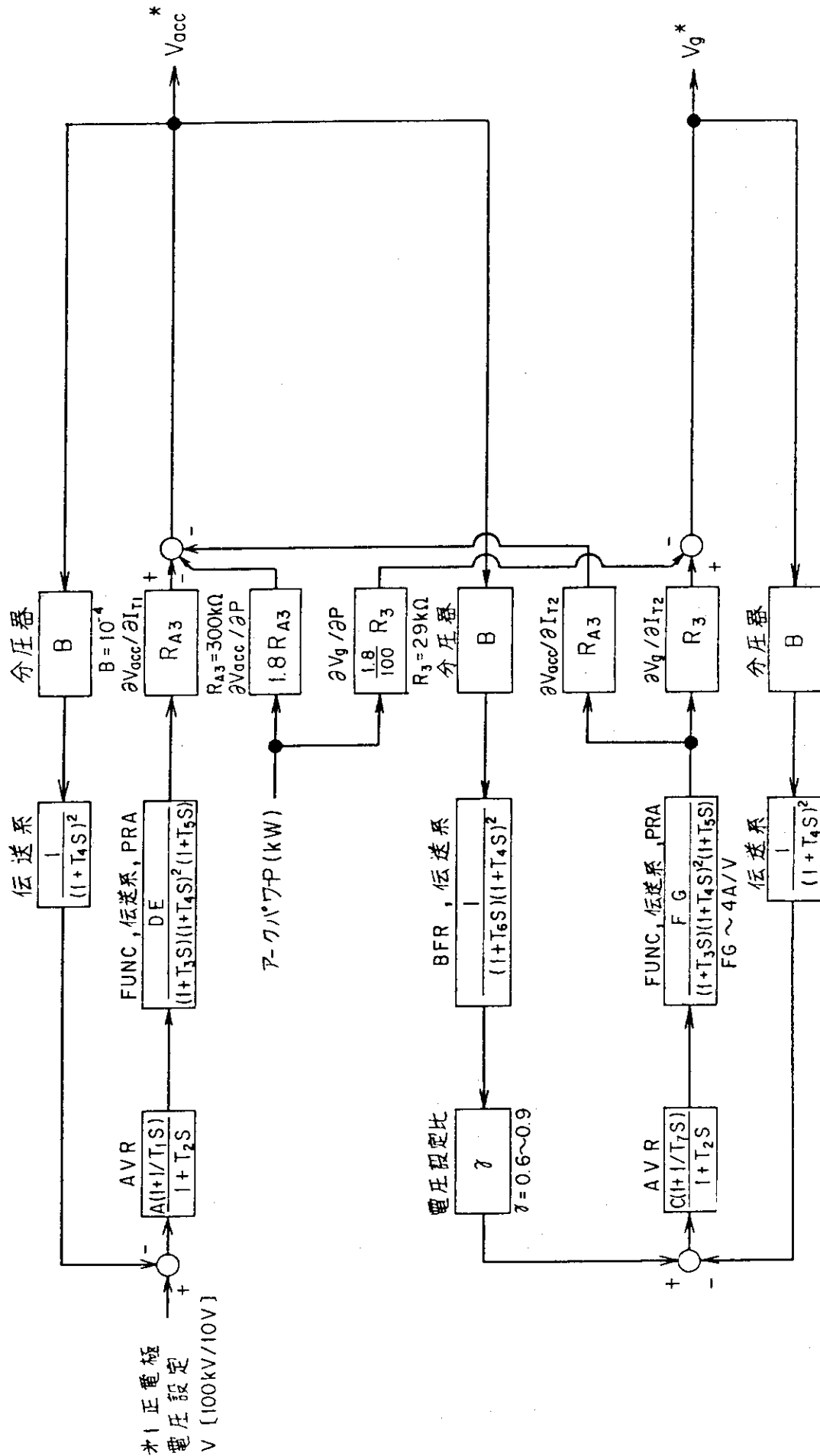
第 4.13図 パルス電圧印加方式における立ち上げ



図中の曲線は非線形の大路の形、

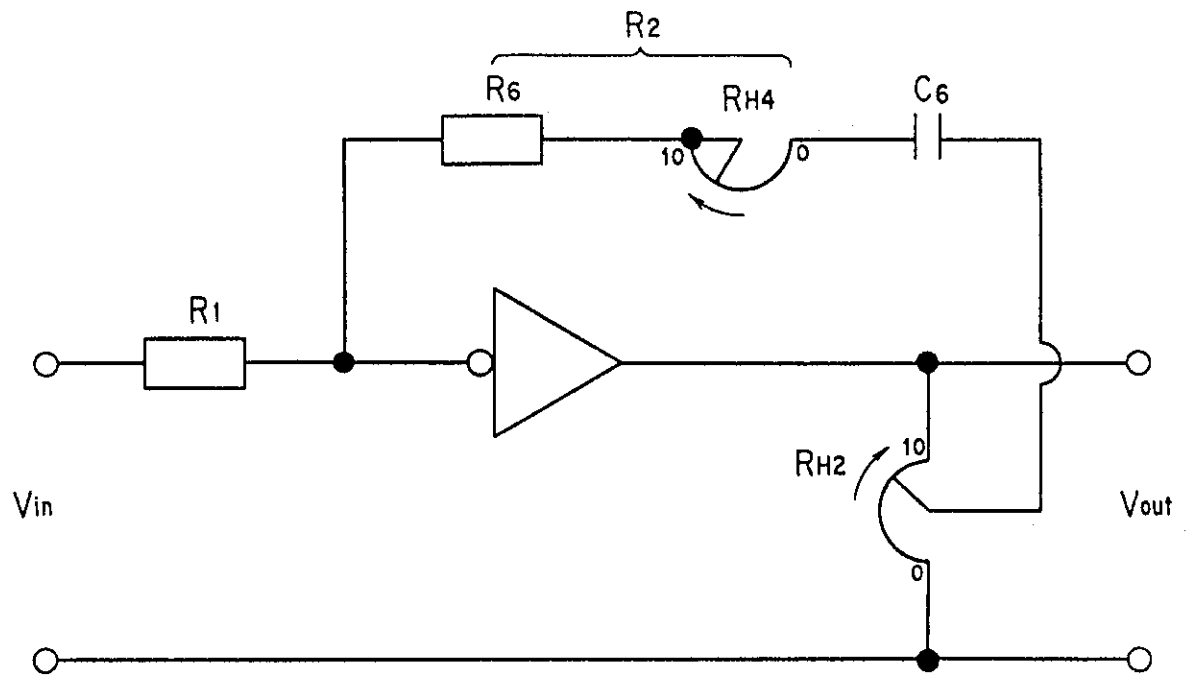
a) 浮遊インピンダーダンスのみ無視

第 4.14 図 浮遊インピンダンス，非線形性を無視した場合のブロック線図



b) 浮遊インピーダンス, 非線形性無視

第 4.14 図 浮遊インピーダンス, 非線形性を無視した場合のブロック線図



第 4. 15 図 AVR の回路構成

5. 加速電源の過渡特性

第 5.1 図は実体配線図的に浮遊容量の分布を示したものである。イオン源で放電破壊が生じた際の速い過渡現象を取り扱うには回路のインダクタンスも加えて総合的に考慮しなければならないが、立ち上げの応答を調べる場合はその時定数が $100 \mu s$ 以上であるので浮遊容量の充電のみを考慮すれば良い。RT-1, 2 を定電流源と考えるとき、これらにより充電される浮遊容量は V_{acc} 電位の対接地容量 $C_1 \sim 20000 pF$ (RT-1 のフィラメント電源及びソースプラズマ生成部用電源のトランスである PIG トランスの浮遊容量), V_g 電位の V_{acc} 電位に対する容量 $C_2 \sim 7000 pF$ (第 2 正電極へのケーブルは V_{acc} 電位のダクト内を絶縁ケーブルを用いて配線しておりそのケーブルの容量) 及び V_g 電位の対接地容量 $C_3 \sim 1300 pF$ (RT-2 のフィラメント電源の浮遊容量) に大別される。これらの浮遊容量を考えた等価回路は第 4.9 図の静的な場合から第 5.2 図のように変わる。同図より

$$V_{acc} = V_{acc}^* - (C_1 + C_2) R_{A3} s V_{acc} + C_2 R_{A3} s V_g \quad (14)$$

$$V_g = V_g^* + C_2 R_3 s V_{acc} - (C_2 + C_3) R_3 s V_g \quad (15)$$

ただし V_{acc}^* , V_g^* は第 4.14 図 b) のものである。このように浮遊容量を考慮した場合の V_{acc} , V_g は考慮しない場合の V_{acc}^* , V_g^* に浮遊容量に流れる電流の補正をしたものと考えれば 4 章の結果を利用できる。⑭ ⑮ 式より

$$V_{acc} = \frac{(1 + T_A s) V_{acc}^* + T_B s V_g^*}{1 + 2 T_E s + T_F^2 s^2} \quad (16)$$

$$V_g = \frac{T_C s V_{acc}^* + (1 + T_D s) V_g^*}{1 + 2 T_E s + T_F^2 s^2} \quad (17)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} T_A &= (C_2 + C_3) R_3 && \sim 0.24 \text{ ms} \\ T_B &= C_2 R_{A3} && \sim 2.1 \text{ ms} \\ T_C &= C_2 R_3 && \sim 0.20 \text{ ms} \\ T_D &= (C_1 + C_2) R_{A3} && \sim 8.1 \text{ ms} \\ T_E &= \{ (C_1 + C_2) R_{A3} + (C_2 + C_3) R_3 \} / 2 && \sim 4.2 \text{ ms} \\ T_F &= \{ (C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1) R_{A3} R_3 \}^{1/2} && \sim 1.23 \text{ ms} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

第 4.14 図 b) と ⑯ ⑰ 式より、浮遊容量を考慮した場合のブロック線図は第 5.3 図のようになる。このように浮遊容量の効果はミリ秒オーダーの遅れ要素となり、さらに V_{acc} , V_g を複雑に絡み合

わせるので $RT-1, 2$ の負帰還は独立なものとは言えなくなる。

さて、第 5.3 図中の記号を用いると次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned}
 b &= V_0 - a_4 V_{acc} \\
 V_{acc}^* &= a_1 b - a_9 a_{10} c - 1.8 R_{A3} P \\
 V_{acc} &= a_2 a_3 V_{acc}^* + a_{12} a_3 V_g^* \\
 c &= a_8 V_{acc} - a_4 V_g \\
 V_g^* &= a_9 a_{11} c - \frac{1.8}{100} R_3 P \\
 V_g &= a_7 a_3 V_{acc}^* + a_{13} a_3 V_g^*
 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

⑨ の関係より、 V_{acc} 、 V_g についての一巡伝達関数を求めると

V_{acc} :

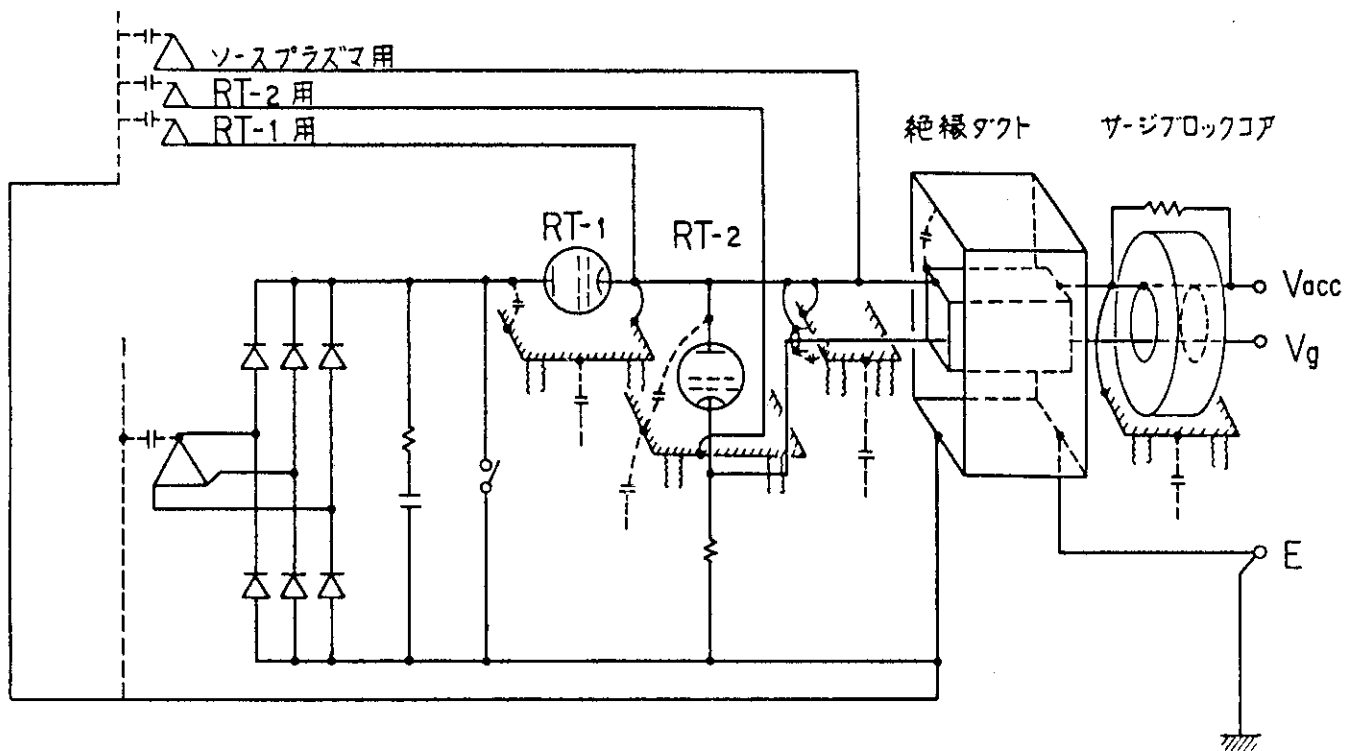
$$\frac{a_4 V_{acc}}{b} = \frac{a_1 a_2 a_3 a_4 + (a_1 a_2 a_3^2 a_4^2 a_9 a_{11} a_{13} - a_1 a_3^2 a_4^2 a_7 a_9 a_{11} a_{12})}{1 + (a_2 a_3 a_8 a_9 a_{10} + a_3 a_4 a_9 a_{11} a_{13} - a_3 a_4 a_7 a_9 a_{10} - a_3 a_8 a_9 a_{11} a_{12})}$$

V_g :

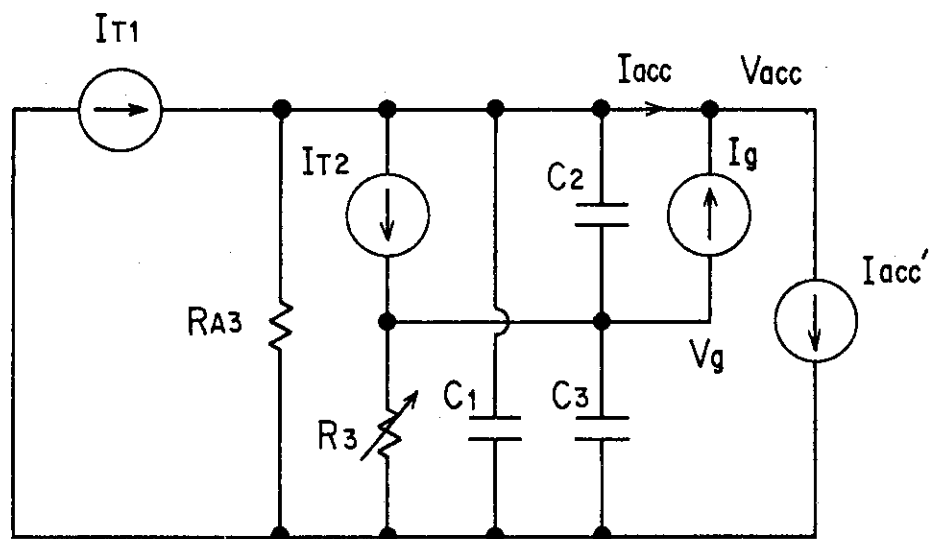
$$\begin{aligned}
 \frac{a_4 V_g - a_8 V_{acc}}{c} &= a_3 a_4 a_9 a_{11} a_{13} \\
 &+ \frac{a_2 a_3 a_8 a_9 a_{10} - a_3 a_4 a_7 a_9 a_{10} - a_3 a_8 a_9 a_{11} a_{12} - a_1 a_3^2 a_4^2 a_7 a_9 a_{11} a_{12}}{1 + a_1 a_2 a_3 a_4}
 \end{aligned}$$

⑩

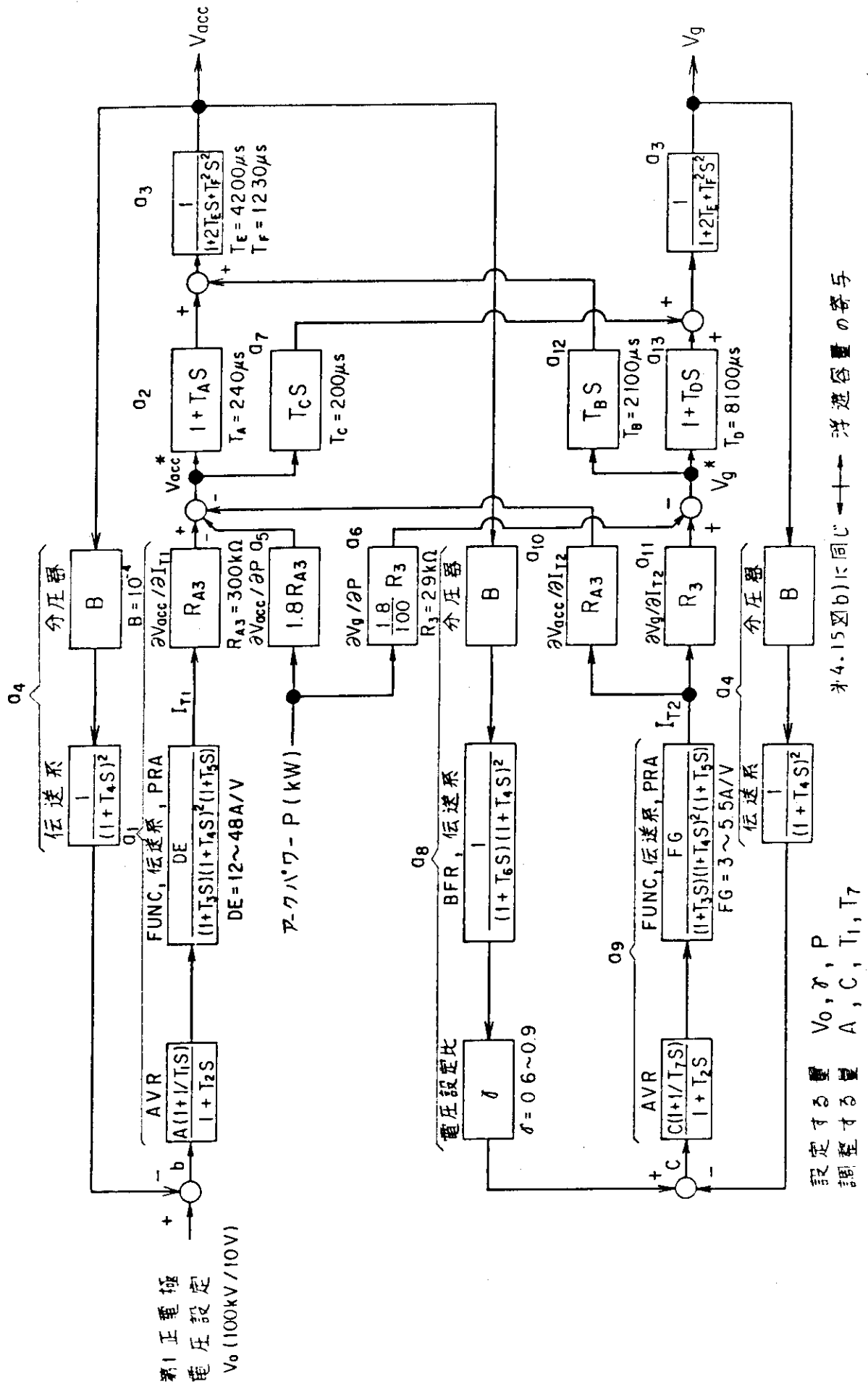
これらの式を調べることにより、線形の近似の範囲で $RT-1, 2$ の制御の安定性等を評価することができる。



第 5.1 図 加速電源に係る浮遊容量の分布



第 5.2 図 浮遊容量を考慮した等価回路



第5.3図 浮遊容量を考慮したブロック線図

6. 考 察

第6.1図に100 kV, 32 A, 0.5 秒(イオン源1台のみ運転)の場合の電圧電流波形の例を, また第6.2図には $V_{acc} = 75 \text{ kV}$ の場合について負荷なし, 負荷ありの立ち上げ波形を示す。いずれもパルス電圧印加方式である。AVRの調整により $V_{acc} = 100 \text{ kV}$ でも比較的安定に立ち上げができるようになっている。しかしながらその立ち上げ波形は無負荷時は滑らかであるが負荷がある場合は振動的である。このような立ち上げ波形の特性は本報告書に示した評価法にしたがって説明がつく。以下項目ごとに示す。

6.1 異常な引き出しモードに移行する閾値

第4.1図の説明では $\partial V_g / \partial I_{T2} > 0$ の領域のみ制御可能で I_{T2} を増していって $\partial V_g / \partial I_{T2} < 0$ となる点(△点)に至ると $V_{acc} - V_g$ が数kVの異常な引き出しモードに移行するとした。第6.3図はパルス電圧印加方式における立ち上げの途中で異常な引き出しモードに移行した場合の波形の例である。立ち上げ時第1, 2正電極負荷端のインピーダンスが負荷をとるにつれて急激に小さくなると加速電源の制御が追いつけず V_{acc} , V_g は一時ドロップする。一方 I_{acc} はアークの立ち上げに伴って増え続けパービアンス大となり, 立ち上げ開始より $550 \mu\text{s}$ で異常な引き出しモードに移行する。その後 $50 \mu\text{s}$ 程度で電圧が0となるのは異常な引き出しモードでイオンビームの発散が悪いため加速電極間で放電破壊が起こりRT-1の遮断が働いたためである。この例に代表されるような異常な引き出しモードに移るか否かは V_{acc} , V_g がいかに精度良く制御されるかによる他に, イオン源の特性にも密接な関係がある。

I_{T2} が与えられたとき V_g がいくらになるかは, ⑨式をもとに第4.7図から図式的に⑨式の右辺の値に一致する左辺 $(V_{acc} - V_g) / (I_{acc} R_3) \times 100 - g$ に対応する値から $V_{acc} - V_g$ を求めた。この解法からわかるように $I_{T2} \rightarrow$ 大のとき $(V_{acc} - V_g) \rightarrow$ 小となる正常な制御のきく範囲は第4.7図中の破線と実線との縦の差が横軸 $\rightarrow$ 大と共に狭まる範囲に対応することがわかる。したがって負荷として取り付けられるイオン源の第4.7図に対応する特性いかんにより異常な引き出しモードに移行する条件が変わる。

第6.4図a)に原型ユニットイオン源において $V_{acc} = 65 \text{ kV}$ の場合の $I_g - I_{acc}$ の関係を, 同図b)に比較のために6)よりとった別のイオン源の同特性を示す。第6.5図a) b) は対応するイオン源の加速電極孔の形状である。孔径, 孔数が異なるので比較しにくい, イオンビームの発散の最小の部分(第6.4図a)では各電圧設定比のカーブについて I_g 最小付近)が I_g の特性の対応する点と考えれば傾向の違いを比較することができる。6)で用いたイオン源では発散最小ではほぼ $I_g = 0$ となり, さらに I_{acc} を増してゆくと I_g は負になるが, 原型ユニットイオン源では I_g は再び増し始めるといった明らかな違いが見られる。この違いは第6.5図a) b) の電極孔形状の違いによる他に, 原型ユニットイオン源では各電極孔より引き出されたビームレットを電極より8.3 mの距離に集束させるために減速電極のみ電極の周辺の穴を偏芯させていることがある。減速電極は穴の電極中心よりの距離を $x \text{ mm}$ とすると $\delta = 4.47 \times 10^{-3} \times x \text{ mm}$ 偏芯させている。原型ユニットイオン源の電

極で穴のあいている範囲は $130\text{ mm} \times 270\text{ mm}$ であるので偏芯は最大 $4.47 \times 10^{-3} \times$

$\sqrt{130^2 + 270^2}/2 = 0.67\text{ mm}$ にもなる。したがって減速電極は加速されたイオンの衝撃を受け易くなり、その結果生じる2次電子による I_g が大きいため第6.3図a)のような特性になると考えられる。このようにイオン源の加速電極の設計いかんにより I_g の特性はかなり異なることが知られる。

第6.4図b)のような特性のイオン源を原型ユニットに取り付けた場合、異常な引き出しモードに移行する閾値は $I_g = 0\text{ A}$ 付近となりこれ以上の I_{acc} はとれなくなると考えられる。このような現象は V_g を V_{acc} の分圧で供給する際に生じる固有のもので、原型ユニットを含むこの方式の電源に対しては第6.4図a)のような特性を持つイオン源となるように設計する必要がある。逆に各種のイオン源をテストするためのテストスタンドの加速電源としては負荷のイオン源の特性に制約のある分圧方式は不向きで④のような2段積み式の加速電源が向いていると言えよう。

第6.6図は第4.7図に対応するデータで第6.4図a)他のデータより描いたものである。横軸のように規格化した I_{acc} について 3.5 A 以下では条件の異なる V_{acc} , V_g に対して g はほぼ一致するが 3.5 A 以上ではばらついてくる。本報告書に示した評価法ではこれが完全に一致するとして解析したがより正確には第6.6図のデータをもとに評価する必要がある。ただ基本的な傾向は本報告書に示した方法のままで調べることができるだろう。第6.6図で $V_g/V_{acc} = 0.65$ について V_{acc} が 65 kV , 75 kV のものを比較すると I_{acc} の大きい所では g は 75 kV の方が小さい。つまり電圧設定比、パービアンスとも一定とした場合でも電圧を増すと I_g は I_{acc} に対し相対的に減る。したがって I_g に関する負性抵抗性は本報告書中で考慮したパービアンスの変化に伴う負性抵抗性のみの場合より実際は強く、制御はよりむずかしい方向にあると考えられる。

第6.6図で I_{acc} の大きい側で各条件のデータ点が途切れているのは、その点よりさらに I_{acc} を増そうとすると立ち上げ時に異常な引き出しモードに移行してデータがとれなかったことによる。この異常な引き出しモードに移行する I_{acc} を $V_{acc} - V_g$ についてプロットすると第6.7図のようになる。この I_{acc} の値は4章に示した近似では $(V_{acc} - V_g)^{3/2}$ に比例する筈であるが第6.7図では $V_{acc} - V_g$ にほぼ比例している。この理由は近似の妥当性の他に、立ち上げ波形が第6.1, 2図のように現時点では完全ではなく、パービアンスを一定としても I_{acc} を増すと共に振動波形が大きくなる傾向にあることが考えられる。立ち上げ波形が改善されれば第6.7図に示されている閾値を高めることができると考えられる。

6.2 アーク、加速両電源の立ち上げのタイミング

パルス電圧印加方式におけるアークスナバーを用いたアークの立ち上げと加速電源の立ち上げは第2.4図b), 第4.6, 8図に示したように一致させるのが理想的である。しかしながら立ち上げの過程では第4.13図のように小さなタイミングのずれで容易に異常な引き出しモードに移行し得ることと、第6.2図a)で明らかなように V_g は第1, 2正電極に係る浮遊容量(第2正電極へのケーブルによる)のため V_{acc} 近くまで持ち上げられ異常な引き出しモードになり易いことから、アークの立ち上げのタイミングを加速電源の立ち上げより遅らせパービアンス小から立ち上げがされるようにしている(第6.2図b)の V_{acc} と $I_{arc II}$ の立ち上げのタイミング参照)。浮遊容量の効果は第6.2図a)で負荷なしの状態でも立ち上げ時正の I_{acc} ($\sim 1\text{ A}$) が流れ、負の I_g ($\sim -1\text{ A}$) が流れることからわかる。第2正電極へのケーブル長は原型ユニットでは 30 m 程度であるのに対し実機では

ユニットによっては100mにも及ぶ。浮遊容量はケーブル長に比例して増すのでタイミングもこれに合わせてさらにずらす必要がでてくると考えられ、立ち上げがむずかしくなる可能性がある。この浮遊容量の影響は原型ユニットで模擬実験を行なう予定である。

6.3 真空管のアノード降下の変化

第6.1図の加速入力電圧と加速電圧の差、つまりRT-1のアノード降下電圧を見ると立ち上げ時と立ち上げ後の値が変化する。これはビームを出しているときRT-1のアノード降下が過大とならないように第3.1図のQSWの点弧角を I_{acc} の大きさに応じて自動調整していることによる。この差は I_{acc} が大きい程大きく、ビーム途中で放電破壊が生じRT-1でいったん遮断したのち再立ち上げする場合のアノード降下は最初の立ち上げ時より大きくなってしまう。本報告書中では真空管は定電流源としたが、一般に弱いアノード電圧依存性を示しRT-1, 2の場合この特性はそれぞれ第6.8図a)¹⁰⁾ b)¹¹⁾のようである。このようにアノード電圧が大きくなると同じ制御グリッドバイアスでもアノード電流が増える。したがって遮断後再立ち上げをする場合には最初の立ち上げ時より立ち上げ速度が速くなる。実験的にもこの傾向が見られ、 I_{acc} が多くなると再立ち上げがしにくくなっている。再立ち上げも最初の立ち上げと同様の波形とするには制御回路の見直しを要すると思われる。

さらにアノード降下電圧が変わると第3.3図a) b)に示される非線形のカーブが横にシフトするので非線形性を補償するFUNCの逆特性との間にずれが生じてしまう。したがって制御に非線形性があらわれていると考えられる。

6.4 イオン源のガス圧の変化

4章に示したようにガス圧はビームオン後数msの時定数で減少する。加速電極間の放電破壊でビームをいったんオフした時は同じ時定数でガス圧は回復するので、10ms程度の間をおいて再立ち上げを行えばガス圧については最初の立ち上げとほぼ同じ条件と考えられる。一方ビームオンの定常時においてはガス圧が低く、 I_g は第4.2図にしたがって小さくなるが I_{acc} はむしろ増す方向であることが実験でわかっている。 I_{acc} はガス圧の変化によるものの他に、アーク電流がフィラメント電流に重畳しフィラメントがさらに加熱される結果、アークインピーダンスが小さくなってアークパワーが増すことにもよる^{*}。立ち上げはパービアンス大程むずかしくなることから I_{acc} の時間変化を逆に利用して立ち上げ時は少なめの I_{acc} とし、定常に達したとき所望の値になるようにすればより安定な運転ができると考えられる。事実原型ユニットにおいてイオン源のコンディショニングが不十分なきにはこのような立ち上げ方法によってのみビームを引き出すことができた。

第6.7図に示した異常な引き出しモードに移行する閾値はイオン源に流すガス流量を一定としたときのデータであるが、この閾値はガス流量を減らすと下がる（移行し易くなる）傾向が見られ、アークの放電する限界まで極端にガス流量を下げた場合にはアークパワーを十分に下げてパービアンス小の条件としても正常なビームの引き出しができなくなる。これは第4.1図の各過程のバランスが崩れて第4.7図の横軸で $30A \lesssim I_{acc} \lesssim 80A$ にある制御可能域がガス流量低下と共に狭まるからと考えられるが明らかではない。

※ アークインピーダンスの変化による I_{acc} の変化はアーク電源のインピーダンスを通常のアークインピーダンスの値に合わせればほぼなくすることができる¹²⁾。一般に負荷と電源のインピーダンスを等しくとれば負荷のインピーダンスの微小変化に対して負荷に入るパワーは変化しない。 I_{acc} はアークパワーにはほぼ比例するので I_{acc} もほとんど変化しないことになる。原型ユニットのアーク電源はより大電流においてインピーダンスが合うように作られており、イオン源1台に対し約 $30\text{ m}\Omega$ である。これに対しアークインピーダンスは $I_{acc} = 35\text{ A}$ として代表的な値は $60\text{ V} / 600\text{ A} = 100\text{ m}\Omega$ で負荷のインピーダンスが大きい。したがってフィラメントに流れる電流を増すなどアークインピーダンスを下げると I_{acc} は増す。

6.5 立ち上げ波形の改善法

ビームを引き出す際、その立ち上げ波形は第6.1図のように振動的である。 V_{acc} の目標電圧（第5.3図中の V_0 ）はアークの立ち上げの速さと合わせるために階段信号ではなく階段信号の一次遅れの波形を入れている。第6.1図の波形はこの目標電圧の付近をオーバーシュート、アンダーシュートを繰り返しながら立ち上がる波形である（第6.9図参照）。4章に示したように現在原型ユニット加速電源のレギュレータチューブの制御の調整に用いているAVRは単一の回路でPI動作をさせている（第4.15図）。一般にオーバーシュートに対しては微分動作が有効で、第6.10図に示すようにAVRをPID動作とすれば立ち上げ波形の改善ができると考えられる。立ち上げ波形についてはさらに原型ユニットにおいて調べる予定である。またその制御性については②～④式で微分動作を加えた式に置き換えたものについて吟味を行なえば調べることができる筈である。

100 kV / 32 A / 0.5 Sec OPERATION

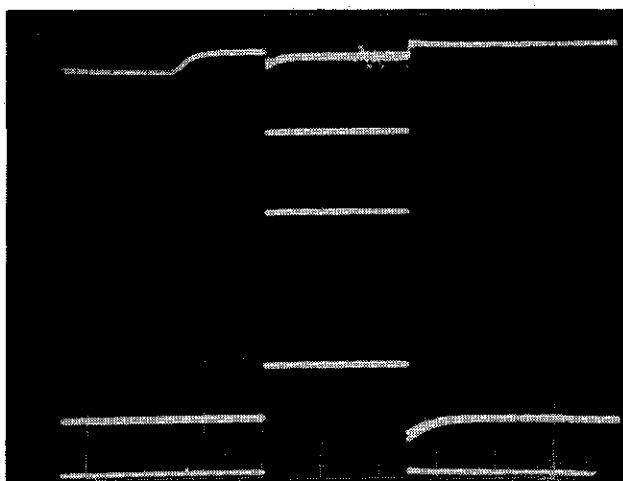
820319

INPUT VOLTAGE (20kV/div)

ACCELERATION VOLTAGE (20kV/div)

GRADIENT GRID VOLTAGE (20kV/div)

SUPPRESSOR GRID VOLTAGE (1kV/div)

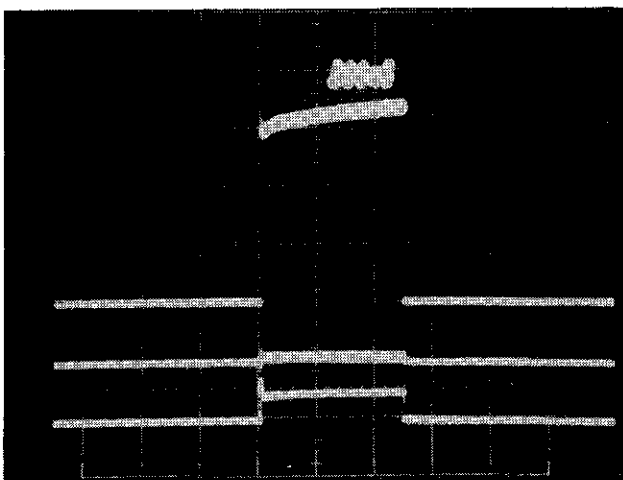


200 mSec/div

ACCELERATION CURRENT (10A/div)

GRADIENT GRID CURRENT (0.5A/div)

SUPPRESSOR GRID CURRENT (5A/div)



200 mSec/div

ACCELERATION VOLTAGE (20kV/div)

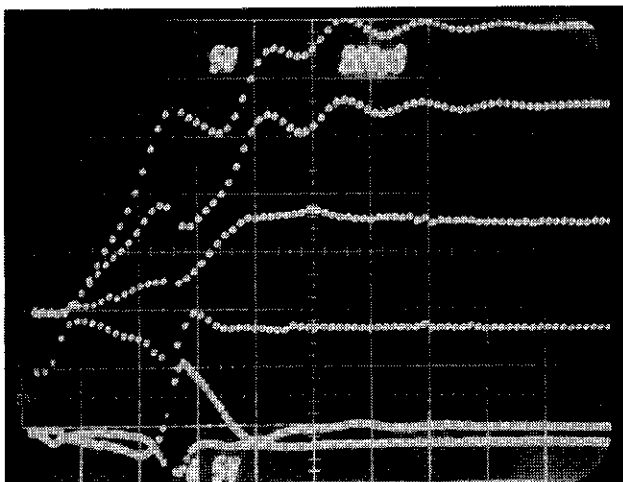
GRADIENT GRID VOLTAGE (20kV/div)

ACCELERATION CURRENT (20A/div)

SUPPRESSOR GRID VOLTAGE (2.5kV/div)

GRADIENT GRID CURRENT (2.5A/div)

SUPPRESSOR GRID CURRENT (12.5A/div)

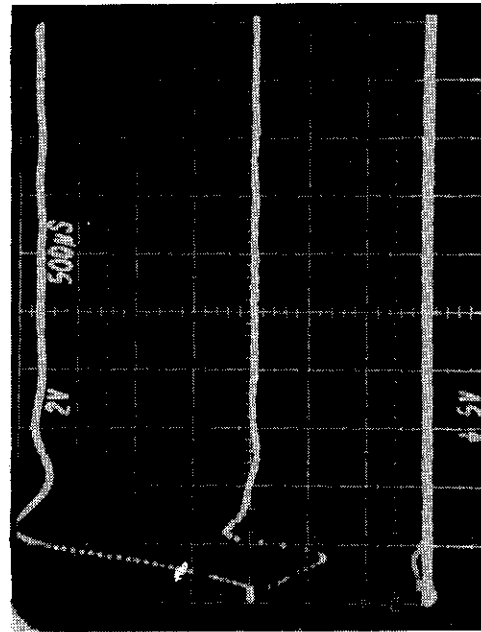
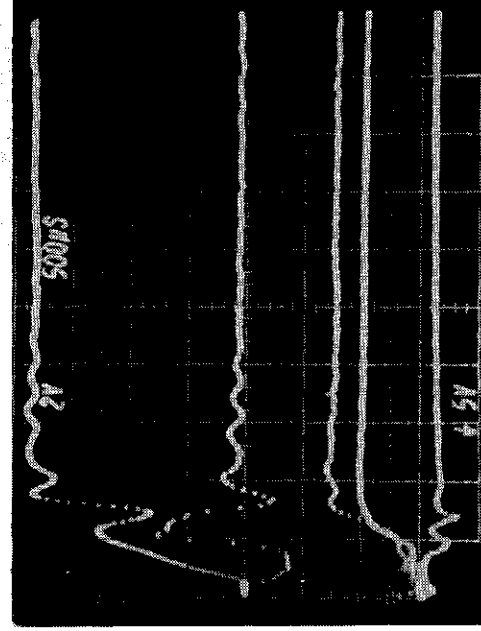
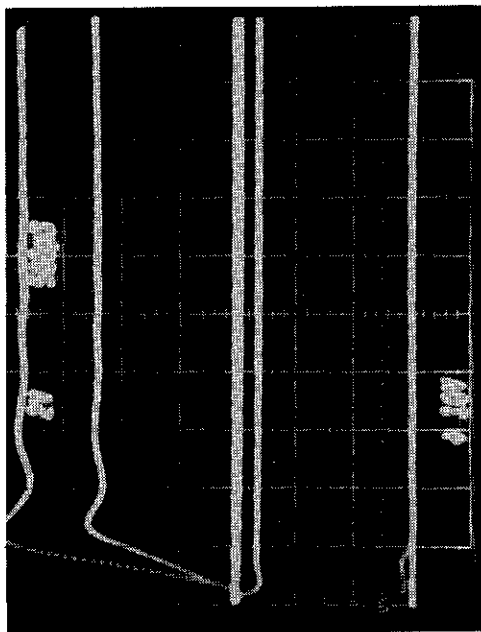
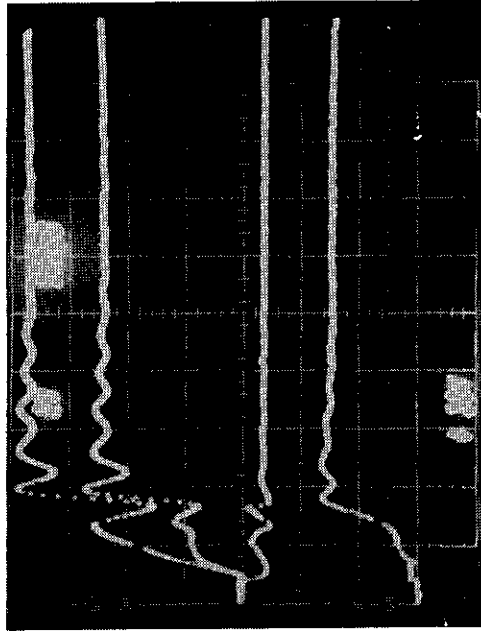


200 μSec/div

第 6.1 図 $V_{acc} = 100 \text{ kV}$ の場合の電圧電流波形の例

(イオン源は 1 台のみ運転)

820408

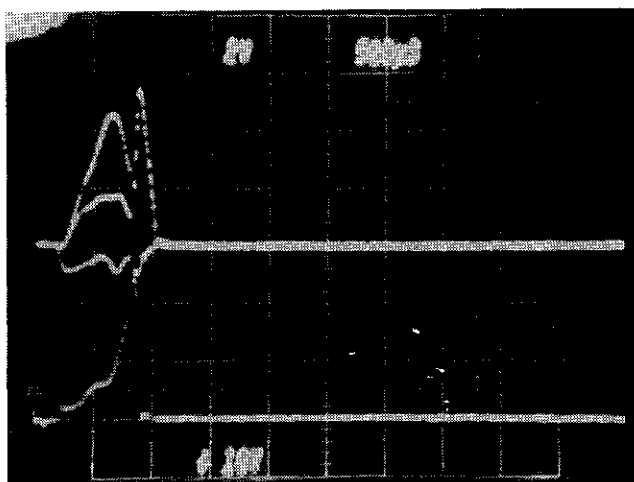


b) with load

a) without load

第 6.2 図 立ち上げ波形の例 (Vacc = 7.5 kV, イオン源は 1 台のみ運転)

820408



V_{ACC} (20kV/D)

V_G (20kV/D)

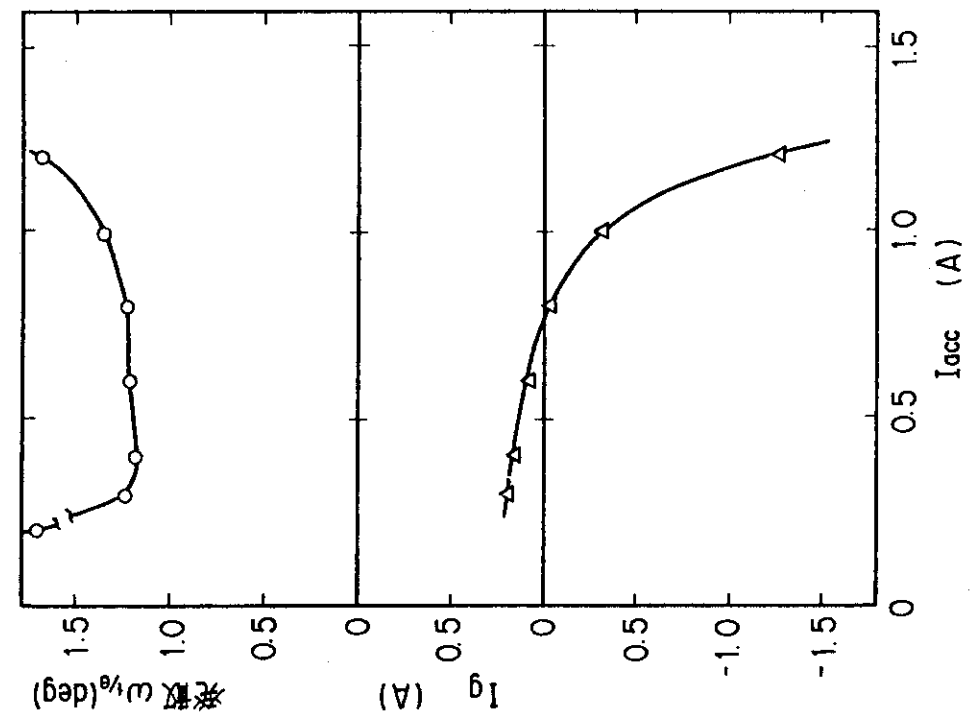
V_S (5kV/D)

I_{ACC} (10 A/D)

500μs/D

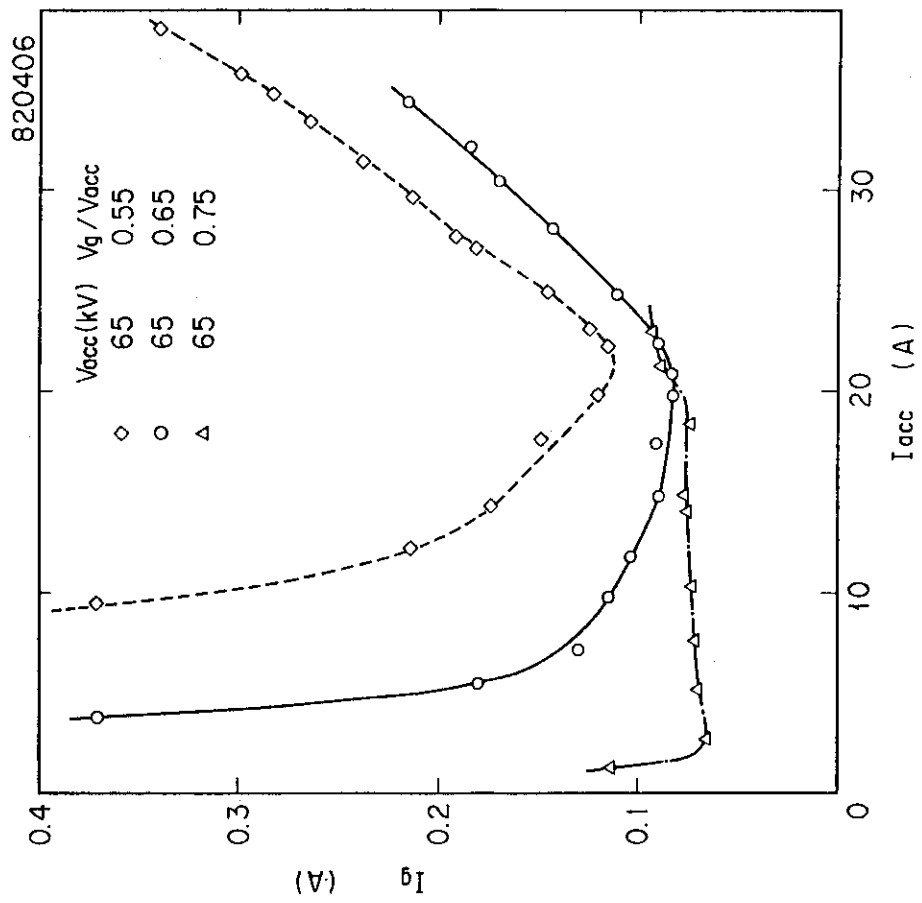
第 6.3 図 異常引き出しモードへの移行の例

(イオン源は 1 台のみ運転)

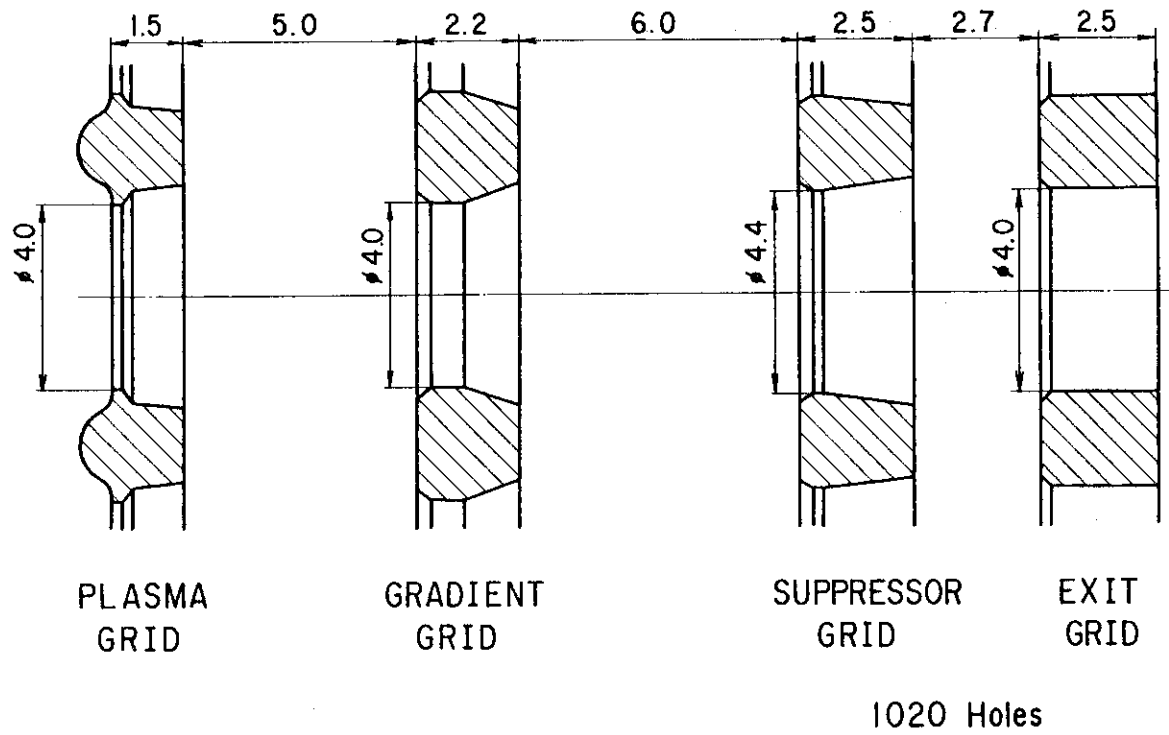


第 6.4 図 a) 原型電子銃イオン源の $I_{acc} - I_g$ 特性

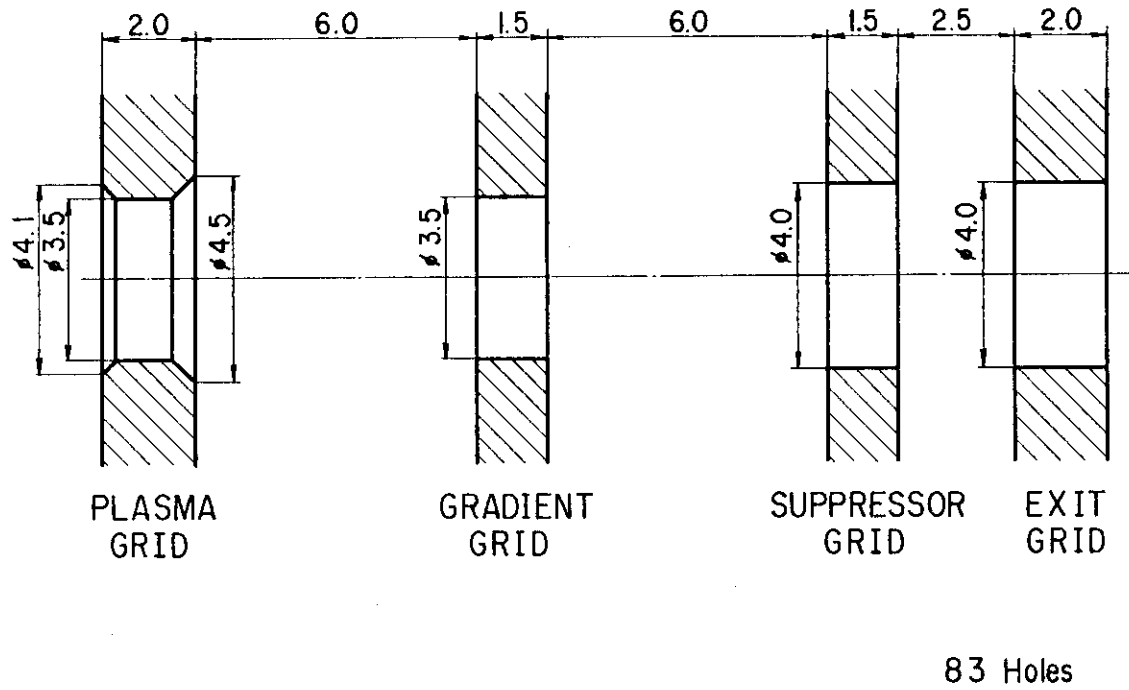
(イオン源Ⅱのみ)



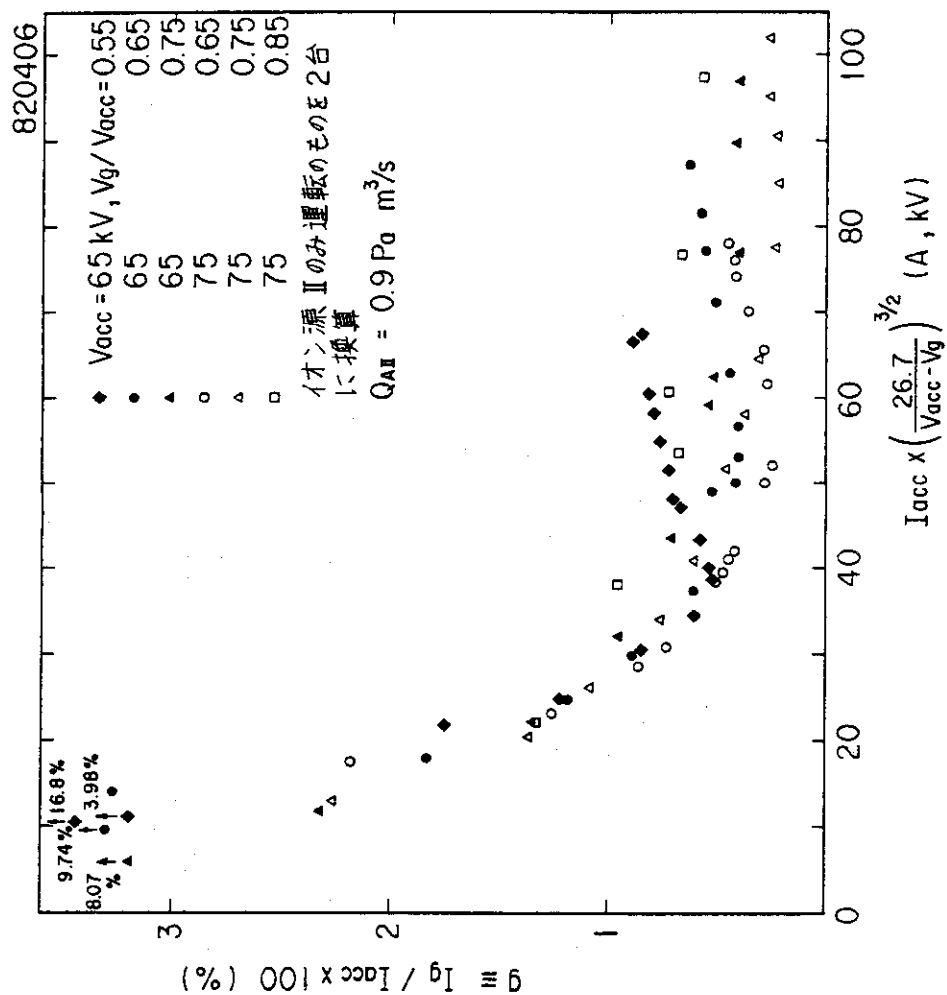
第 6.4 図 b) 6) に用いたイオン源の $I_{acc} - I_g$ 特性



第 6.5 図 a) 原型ユニットイオン源の電極形状

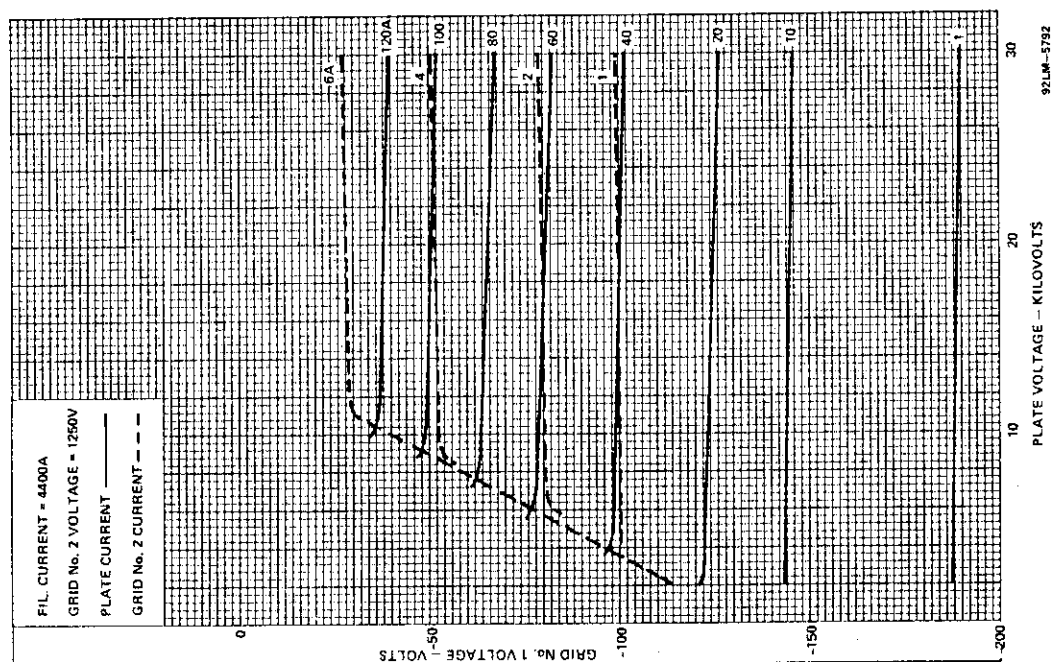


第 6.5 図 b) 6) に用いたイオン源の電極形状



$-V_g)^{3/2}$ 特性

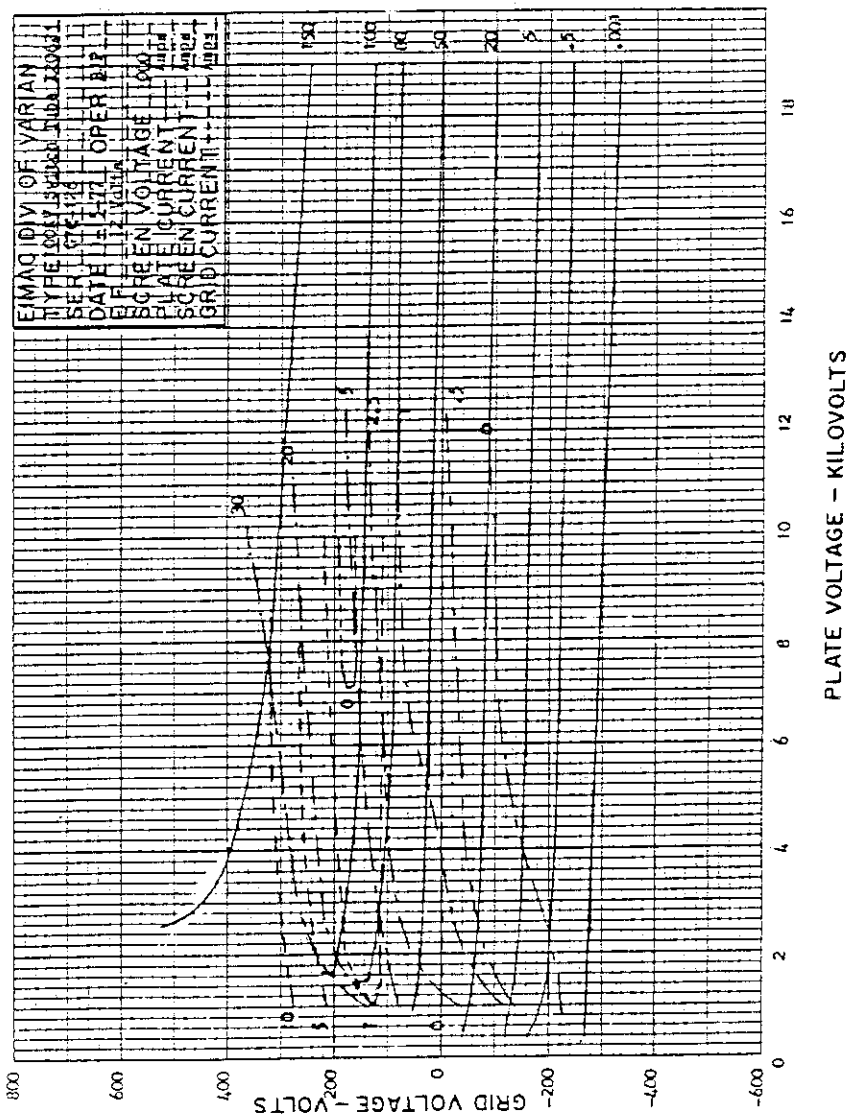
第6.7図 異常引き出しモードに移行する閾値



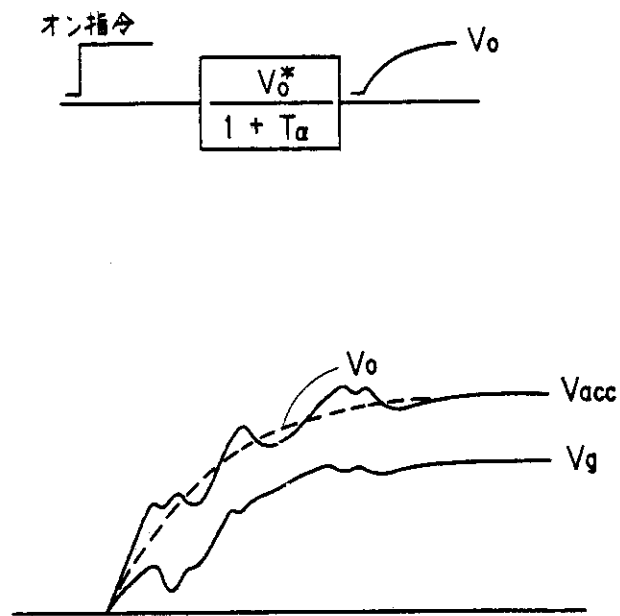
Typical Constant Current Characteristics
 ($E_{c2} = 1250 \text{ V}$)

第 6.8 図 a) S94000D の静特性

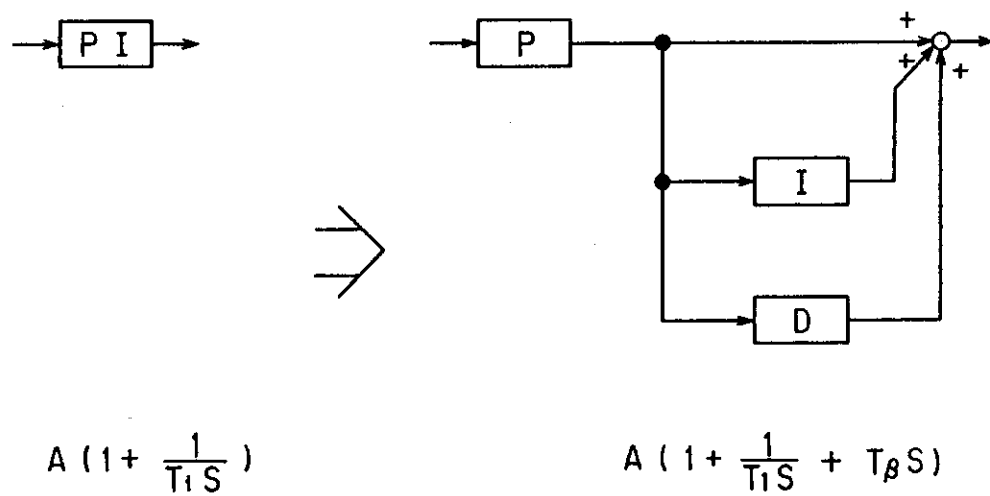
GROUNDED CATHODE
 CONSTANT CURRENT CHARACTERISTICS



第 6.8 図 b) X2062J の静特性



第 6.9 図 加速電圧の立ち上げ波形の説明図



第 6.10 図 AVR の変更

7. ま と め

原型ユニット加速電源の中の真空管による負帰還制御の制御性をイオン源の特性を含めて評価した。まず加速電源の負荷としてのイオン源の特性を求めた。その結果2段加速型である原型ユニットイオン源の第1, 2正電極の特性は比較的単純な定電流源として近似できることがわかった。これを用いてまず静的な制御の関係を求め、次いでこれをもとに浮遊容量の効果を加えて制御ブロック線図を求めた。以上のような手順によって求めたブロック線図は近似的に線形なものとでき、通常の線形制御の評価法を用いて吟味することができる。

原型ユニットにおいてはすでに基本設計値である75 kV, 70 A, 10秒の運転を行なうのに多数回成功している¹³⁾。しかしながらその立ち上げ波形は満足なものではない。そのために立ち上げのタイミングの調整が微妙であり、またイオン源のコンディショニングがかなり進んでいるにもかかわらず、立ち上げ時に放電破壊し易い。また再立ち上げが加速電流の増加と共にむずかしくなることも問題である。さらに近く行なう100 kV, 70 A, 10秒運転でも安定であるように加速電源の制御性についてさらに調整を進める必要がある。これには本報告書の評価法を用いれば見通しの良い調整ができると信ずる。

謝

辞

本評価法を調べるにあたり、有益な議論をして戴いた松田慎三郎副主任研究員をはじめとする加熱工学第1研究室およびJT-60第4開発室の諸氏に感謝致します。また原型ユニット電源系の受注先である東京芝浦電気(株)にあっては製作、調整にあたって並ならぬ努力を払って戴いたことにお礼を申し上げます。最後に不断の激励を戴いた磯康彦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、田中正俊加熱工学第1研究室長、白形弘文JT-60第4開発室長に感謝致します。

7. ま と め

原型ユニット加速電源の中の真空管による負帰還制御の制御性をイオン源の特性を含めて評価した。まず加速電源の負荷としてのイオン源の特性を求めた。その結果2段加速型である原型ユニットイオン源の第1, 2正電極の特性は比較的単純な定電流源として近似できることがわかった。これを用いてまず静的な制御の関係を求め、次いでこれをもとに浮遊容量の効果を加えて制御ブロック線図を求めた。以上のような手順によって求めたブロック線図は近似的に線形なものとでき、通常の線形制御の評価法を用いて吟味することができる。

原型ユニットにおいてはすでに基本設計値である75 kV, 70 A, 10秒の運転を行なうのに多数回成功している¹³⁾。しかしながらその立ち上げ波形は満足なものではない。そのために立ち上げのタイミングの調整が微妙であり、またイオン源のコンディショニングがかなり進んでいるにもかかわらず、立ち上げ時に放電破壊し易い。また再立ち上げが加速電流の増加と共にむずかしくなることも問題である。さらに近く行なう100 kV, 70 A, 10秒運転でも安定であるように加速電源の制御性についてさらに調整を進める必要がある。これには本報告書の評価法を用いれば見通しの良い調整ができると信ずる。

謝

辞

本評価法を調べるにあたり、有益な議論をして戴いた松田慎三郎副主任研究員をはじめとする加熱工学第1研究室およびJT-60第4開発室の諸氏に感謝致します。また原型ユニット電源系の受注先である東京芝浦電気(株)にあっては製作、調整にあたって並ならぬ努力を払って戴いたことにお礼を申し上げます。最後に不断の激励を戴いた磯康彦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、田中正俊加熱工学第1研究室長、白形弘文JT-60第4開発室長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田他 ; JAERI-M 7655 (1978)
- 2) W. S. Cooper , LBL-12673 (1981)
- 3) G. J. DeVries et al. , Proc. 8th Sympo. Eng. Problems of Fusion Research ,
San Francisco , 1979
- 4) 大賀他 ; JAERI-M 7604 (1978)
- 5) A. Deitz et al. , Proc. 8th Sympo. Eng. Problems of Fusion Research ,
San Francisco , 1979
- 6) Y. Okumura et al. ; JAERI-M 7696 (1978)
- 7) S. Tanaka et al. , Proc. 8th Sympo. Eng. Problems of Fusion Research ,
Chicago , 1981
- 8) Y. Ohara ; JAERI-M 8357 (1979)
- 9) Y. Ohara et al. , J. Appl. Phys. 51 (1980) 3614
- 10) RCA S94000E Data sheet
- 11) Eimac X2062J Preliminary Technical Data
- 12) 荒川他 ; JAERI-M 8741 (1980)
- 13) M. Akiba et al. ; JAERI-M 82-045 (1982)