

大強度 CW 電子線形加速器用電子銃の開発(1)

— 基本性能ビーム試験結果 —

(研究報告書)

1999年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194

Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

大強度CW電子線形加速器用電子銃の開発(1)

- 基本性能ビーム試験結果 - (研究報告書)

山崎良雄*、野村昌弘*、小又智輝**

要旨

サイクル機構大洗工学センタービームグループでは、大強度CW電子線形加速器を完成させ、本年1月から本格的なビーム試験を開始している。今回、ここで使用されるメッシュグリッド型電子銃の基本性能を測定し、加速器で要求されるピーク電流300mAを安定して供給することを目的にビーム試験を行った。この結果、同じ電流値でもメッシュグリッドの引出電圧によっては、アノードから引き出す際に電子銃内で漏れビームを増加させることが明らかになった。これをもとに、安定した電子銃の動作条件を確立し、電子ビームを加速器ビーム試験に供給できるようになった。

* 大洗工学センターシステム技術開発部 ビーム利用技術開発グループ

** 株式会社 ペスコ

Development of an Electron Gun for High Power CW Electron Linac(1) -Beam Experiment for Basic Performance of Electron Gun-

Yoshio Yamazaki*, Tomoki Komata**, Masahiro Nomura*

Abstract

Presently, the Beam Group of Oarai engineering center in Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC) completed the high power CW electron linac. Then we started full-scale beam experiments after the government permission for a radiation equipment had given last January. Measurements of basic performance for the mesh-grid type electron gun have been done to launch stable beam at 300mA peak current downstream of the accelerator. These experiments disclosed to increase beam loss in the electron gun in some cases of voltage supplied the mesh-grid in spite of same beam current from gun. Consequently, we could find the best condition for mesh-grid voltage and heater current to supply stable beam at 300mA peak current for accelerator study.

* Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC)

** PESCO

目次

第1章 序	1
第2章 メッシュグリッド型電子銃装置系の仕様値および基本性能	2
第3章 メッシュグリッド型電子銃の基本特性に対する数値計算結果	8
第4章 基本特性に対する実験データ	12
4.1 測定条件および測定体系	12
4.2 HV150kVでのグリッドメッシュ引出電圧 およびカソード温度に対する電流値測定	15
4.3 定格電流値300mAを得るためのHV180kV時の グリッドメッシュ引出電圧の最適化	17
第5章 まとめ	21
謝辞	22
参考文献	23

表、図番号目次

表1 電子銃の目標仕様値	2
表2 電源仕様値	3
図1 電子銃の電源回路系統	4
図2 FETを用いたパルス回路	4
図3 電子銃本体全体図	5
図4 電子銃カソードヘッド周辺の詳細断面図	6
図5 カソードヘッド部品写真	6
図6 電子銃の真空排気系	7
図7 数値計算に使われた境界条件	9
図8 EGUNによる数値計算結果	10
図9 電子銃内のビーム軌道の計算結果(HV150kV)	11
図10 電子銃ビームの測定条件	12
図11 磁場レンズの構造と中心軸上の磁場分布(B_z)	13
図12 カソードヒータ電流とカソード表面温度との関係	14
図13 HV150kVにおける引出電流値のヒーター温度およびグリッド引出電圧依存性	15
図14 グリッドホールのビームに与える影響	16
図15 放射線モニター測定体系	18
図16 HV180kVにおける引出電流値のヒーター温度およびグリッド引出電圧依存性	19
図17 電流値300mA、HV180kVのときのヒーター電流、 グリッド電圧の最適値の測定	20

第1章 序

サイクル機構大洗工学センタービームグループでは、大電力の電子線形加速器を開発してきた[1]。その中で、開発された電子銃は、大電流の電子ビームを発生する必要性から、電子ビームを遮らず電流制御可能なアパーチャグリッドを採用している[2]。一方、低電流ビーム用には、パルス時間特性に優れているメッシュグリッド型のカソードも使用可能としている。本報告書では、後者のメッシュグリッド型に絞って記述し、その電子銃の仕様値、基本特性、および電源装置について報告する。

第2章 メッシュグリッド型電子銃装置系の仕様値および基本性能

メッシュグリッド型電子銃の基本性能の仕様、構造的な特徴を示す[3]。後段の加速器からの条件より、電子銃に対する要求仕様は表1のようになっている。この中で、加速エネルギーとして0.2MeVであることから、電源電圧は200kVとする必要がある。また、同時に幅が4msと非常に長いマクロパルスを繰り返し50Hzで制御しなければならない。一般的に、100kV以上でmsオーダーのパルス電源を製作するのは困難であり、パルスのフラットトップの電圧安定性の担保も難しい。このため、200kVの高電圧を印加するため、高電圧電源としては、コッククロフトーウォルトン型の直流電源を採用した。

性能項目	仕様値
エネルギー	0.2MeV
電流値 (ピーク)	100 μ A~400mA
パルス幅	20 μ s~4ms
繰り返し	50Hz
ビーム径	<1cm
規格化エミッタンス	<10 π mm \cdot mrad

表1 電子銃の目標仕様値

メッシュグリッド型カソードアセンブリには、実績のあるEIMAC社製のY646Eの使用を前提に、必要なカソードの加熱用のヒータ電源、電子ビームパルス形成のためのバイアス電源、及びパルス電源を製作した。それぞれの電源に関する仕様値を表2に示す。カソードアセンブリが同軸構造を持ち、グリッドが外側に位置することから、グリッドを高電圧ベースにとるグリッドアース方式を採用した。

・ コッククロフトーウォルトン型高電圧電源出力	
電源電圧	0~-220kV
出力電圧リップル率	±0.5%以下*
出力電圧安定度	±0.5%以下/8Hour*
ピークビーム電流	440mA以下 *
平均ビーム電流	88mA以下 *
デューティー	20%以下
ビーム引出し繰返し	1~50pps又は単発
*出力電圧 -180~-220kV時 電源能力	
・ メッシュグリッドパルス	
出力制御方式	定電圧制御
出力電圧	0~400Vpulse
バイアス電圧	0~-200V
出力電圧リップル率	±0.5%以下 (*1)
出力パルス電流	520mA以下
出力パルス幅	10 μs~4ms (平坦部)
出力パルス電圧平坦度	±0.5%以下 (*2)
出力電圧安定度	±0.5%以下/8Hour (*3)
パルス立上り時間	100ns程度 (*4)
負荷条件	静電容量 200pF以下
(静電容量と抵抗並列接続) 抵抗 769Ω以上	
(*1) 出力電圧0~-200V	
(*2) 出力電圧200~400V時保証	
(*3) 出力電圧200~400V時	
熱平衡状態で電源電圧±10%又は負荷50%変動に対して保証	
(*4) 出力電圧ピーク値の10%から90%に達する時間	
* FETは東芝製2SK1120(1000V,8A DC,24A pulse)	
・ メッシュグリッドバイアス	
出力制御方式	定電流制御
出力直流電圧	0~-200V
出力電流リップル率	±0.5%以下 (*1)
出力電流安定度	±0.5%以下/8Hour (*2)
(*1) 出力電圧-100~-200V時保証	
(*2) 出力電圧-100~-200V時	
・ カソードヒーター	
出力制御方式	定電流制御
出力電流	0.6~6A
出力電圧	10V以下
出力電流リップル率	±1.0%以下 (*1)
出力電流安定度	±1.0%以下/8Hour (*2)
±2.0%以下/8Hour (*2)	
(*1) 出力電流6A時保証	
(*2) 出力電流6A時	

表2 電源仕様値

特に、グリッドパルサー駆動用のパルス電源には、固体素子のFETを使用して所定の電圧を発生させている。一般に、固体素子は真空管などのスイッチング素子に比べて消費電力が小さく、パルスの立ち上がり立ち下りの時間特性が良い。図1に、電子銃の電気回路系統の概略を、図2にFETを用いたパルス電源回路を示した。

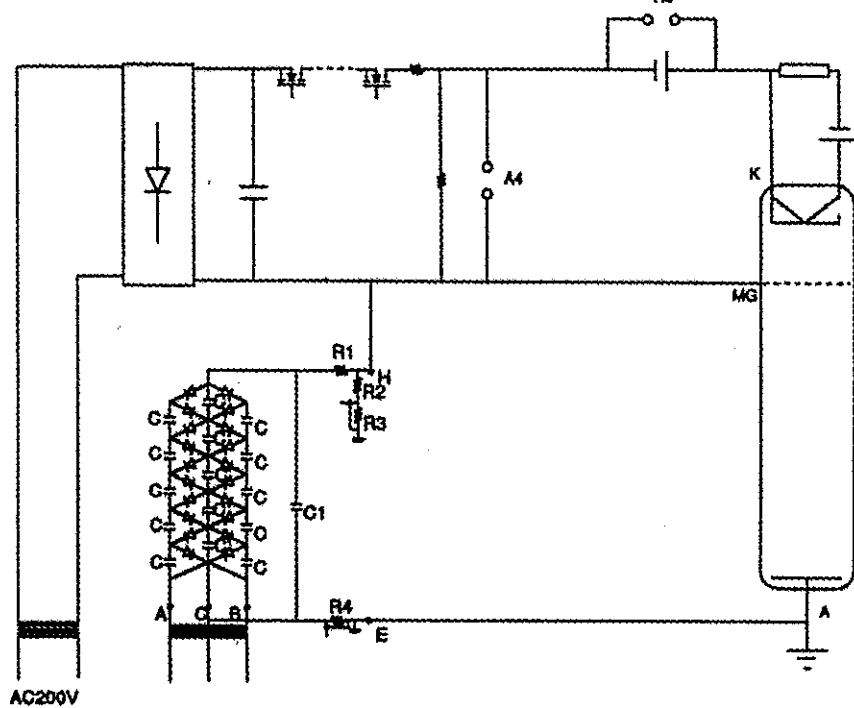


図1 電子銃の電源回路系統

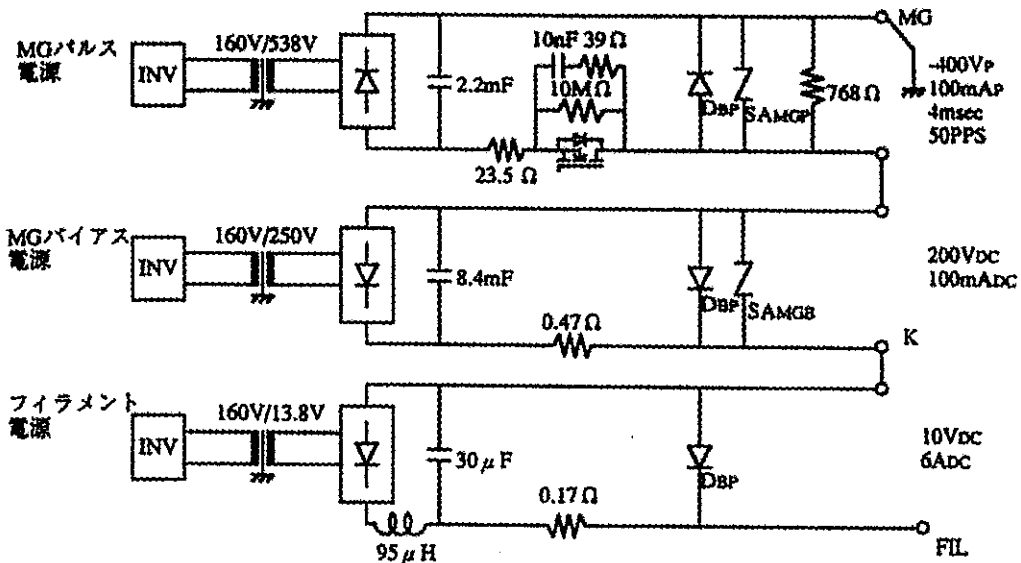


図2 FETを用いたパルス電源回路

開発されたメッシュグリッド型電子銃の全体図を図3に示す。特徴としては、通常と同軸構造ではなく、カソードを支えているステムがビーム軸と直交する縦形構造を取っていることである。さらに、ステム軸中心にカソードヘッドを回転可能とすることで、ビームポートを複数設置することができ、真空を破ることなく、電子銃ビームのメインビームラインへの出射や、テストベンチでの電子銃の基本特性の測定等を行うことができる。また、電場の対称性を考慮すれば、側面に大きなメンテナンスポートも設置することができる。それは、カソードの交換だけでなく、カソードの観測や光電子カソードのためのレーザー光導入も可能となる。このように電子銃自身が電子銃カソードの総合的なテストチャンバーとしての機能を持ち合わせている。図4に電子銃カソードヘッド周辺の詳細断面図を、図5にカソードヘッド部品の写真を示した。

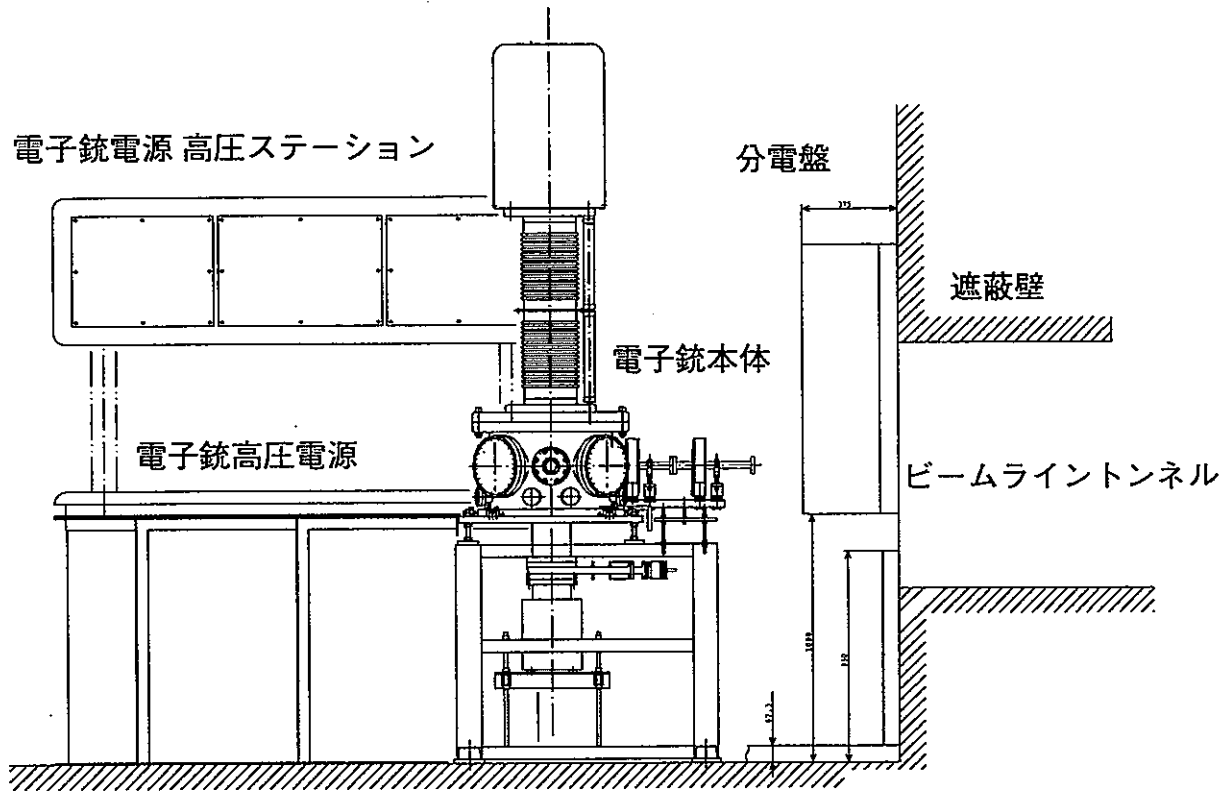


図3 電子銃本体全体図

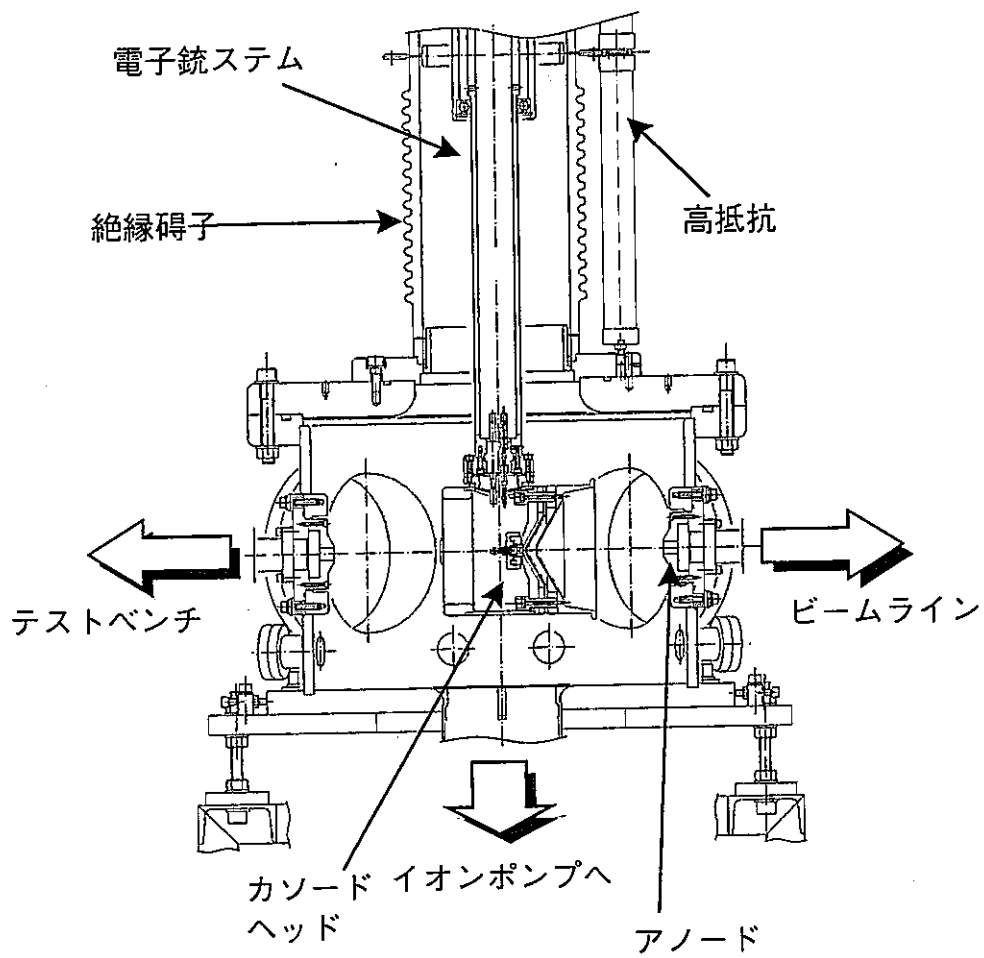


図4 電子銃カソードヘッド周辺の詳細断面図

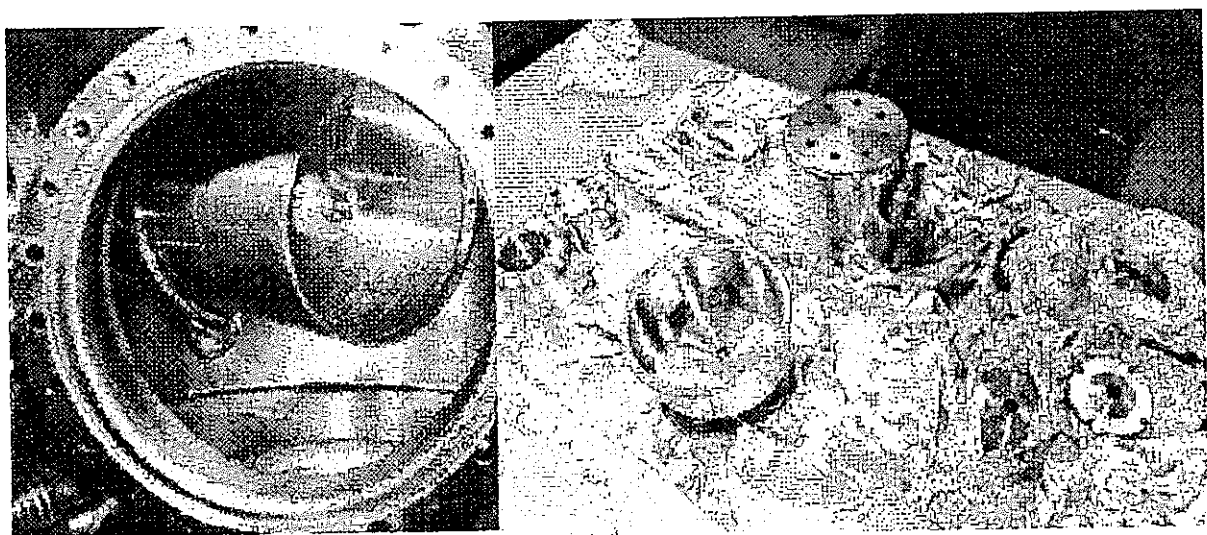


図5 カソードヘッド部品写真

電子銃の真空排気系の概略図を図6に示す。真空の荒引きは、電子銃本体チャンバー側面のメンテナンスポート (ICF253) の一つから300l/sのターボ分子ポンプが、高真空は電子銃本体下方のポート (ICF203) にゲートバルブを介して150l/sのイオンポンプが配置されている。また、電子銃のカソードヘッドが取り付けられているステムを回転させるため、上部の機構には独立に8l/sのイオンポンプが設置されており、複雑な機構を持った部分からの脱ガスが、電極付近に悪影響を与えないようにしている。チャンバー内の真空度を把握し、残留ガスを分析するために、ヌードゲージや四重極質量分析計がメンテナンスポート下方の補助ポート (ICF70) に取り付けられている。到達真空度は、ベーキング処理を行わず、十分に高電圧エージングを行った後は、ヌードゲージで約 6×10^{-9} Torrである。

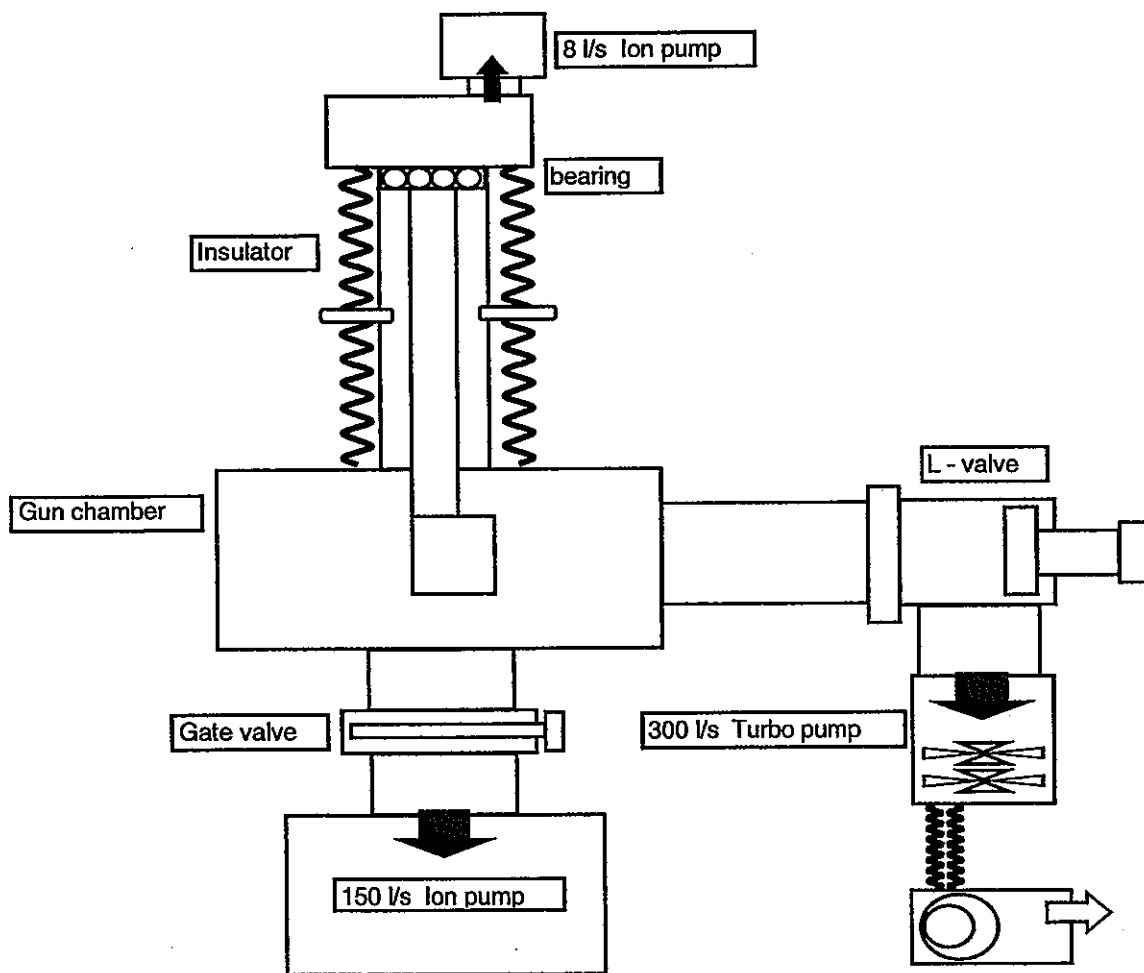


図6 電子銃の真空排気系

第3章 メッシュグリッド型電子銃の基本特性に対する数値計算結果

メッシュグリッド型の電子銃の設計を行う際には、通常まずグリッドメッシュの効果は無視して、アノードとカソードのみの2極管を検討する。本電子銃は、必要とされる最大電流が300mAであるため、空間電荷制限電流に多少余裕をもたせ、定格電圧200kV印加時に最大400mAを、引き出せるように設計した。また、アパーチャグリッド型の電極と交換可能であることを前提とした。数値計算には、SLACで開発された電子銃ビーム軌道解析コードEGUN[4]を用いた。実際の電子銃のビームは、メッシュグリッドを含んだ3極管であり、カソードからの低エネルギーの電子ビームは容易にグリッド電位の影響を受け、詳細な電子ビーム軌道を決定するのは困難である。しかし、電子銃の基本特性である引出電流の印加電圧の依存性を計算する上では2極管として近似し、ウェーネルト電極やアノード電極の位置関係でほとんど計算することができる。図7に計算条件のための境界条件の形状を示す。また、図8に、数値計算の結果をまとめた。カソードから空間電荷制限領域で得られる電流値に関する結果として、軌道やビーム径、エミッタンス等も含め得られる。計算条件に熱陰極の初期段階の熱運動による効果、カソード表面でのエミッションの不均一性、カソード表面の形状効果、カソードエッジからの電流放出などの条件が考慮されていないため、実際にはこの結果よりも大きな値になることが予想される。しかしながら、2極管近似の良く成り立つ条件であるメッシュグリッド電位がカソードーアノード間の電界によって形成される等電位面に一致する場合には、この計算結果のビーム軌道に近くなるはずである。典型的なビーム軌道の計算結果を図9に示す。特に、検討過程で、電子銃カソードからのビームがアノードホールで遮られないように、十分大きなものとした。図9からも明らかのように、この電子銃形状ではアノード出口でのビームは、収束ビームであり、また、この収束ビームの焦点はアノード出口から約150mmの付近であることがわかる。

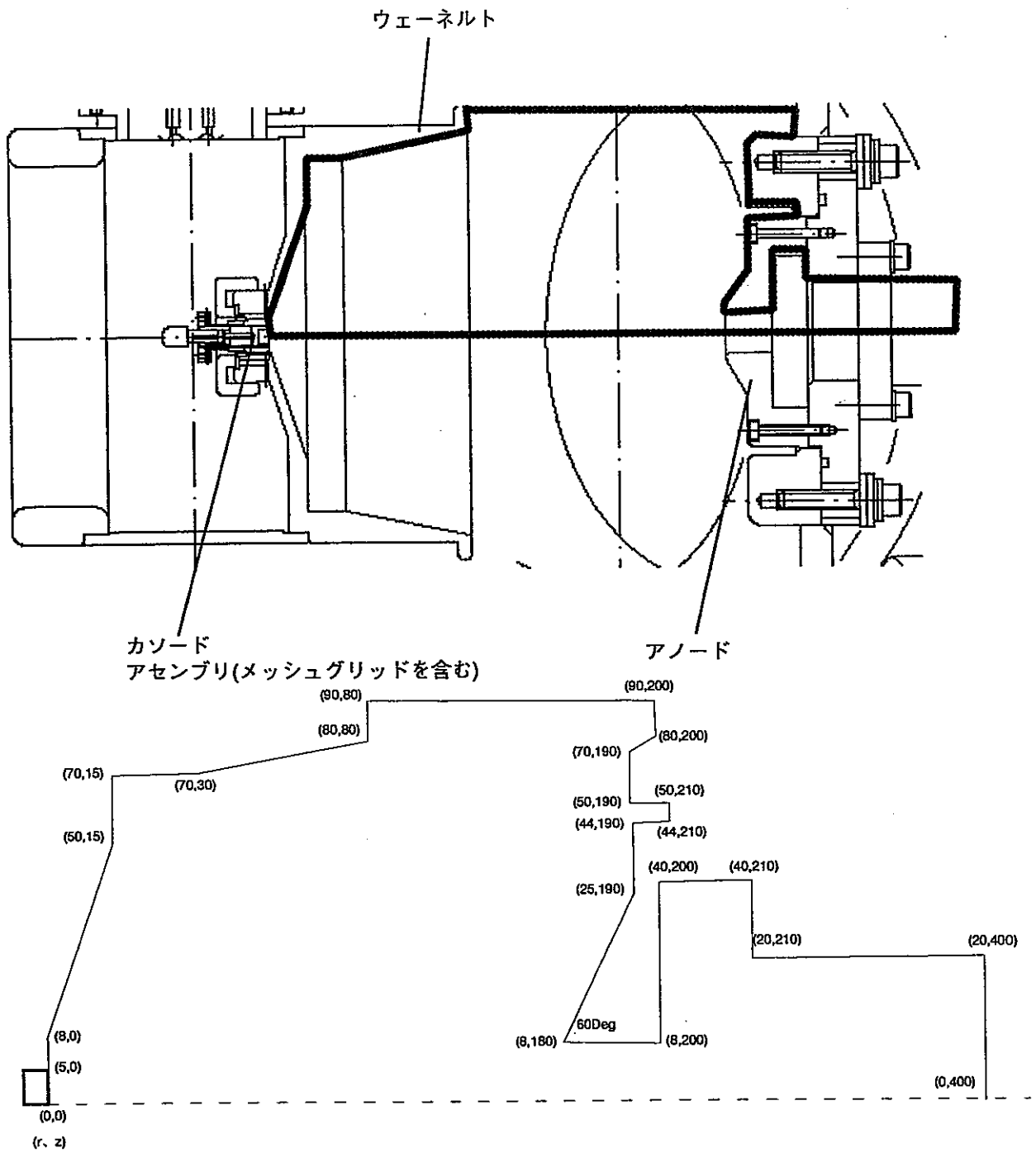


図7 数値計算に使われた境界条件

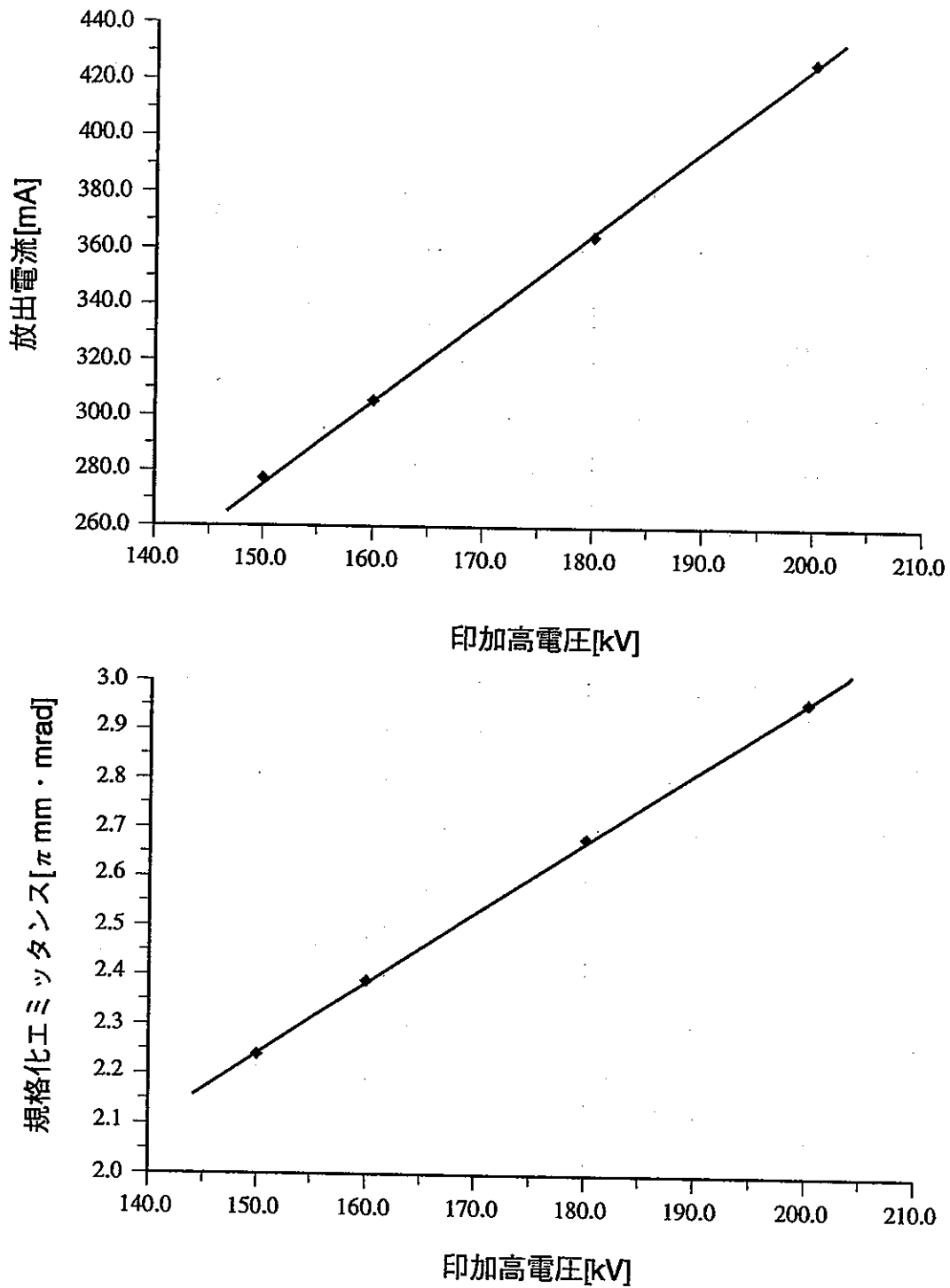


図 8 EGUNによる数値計算結果

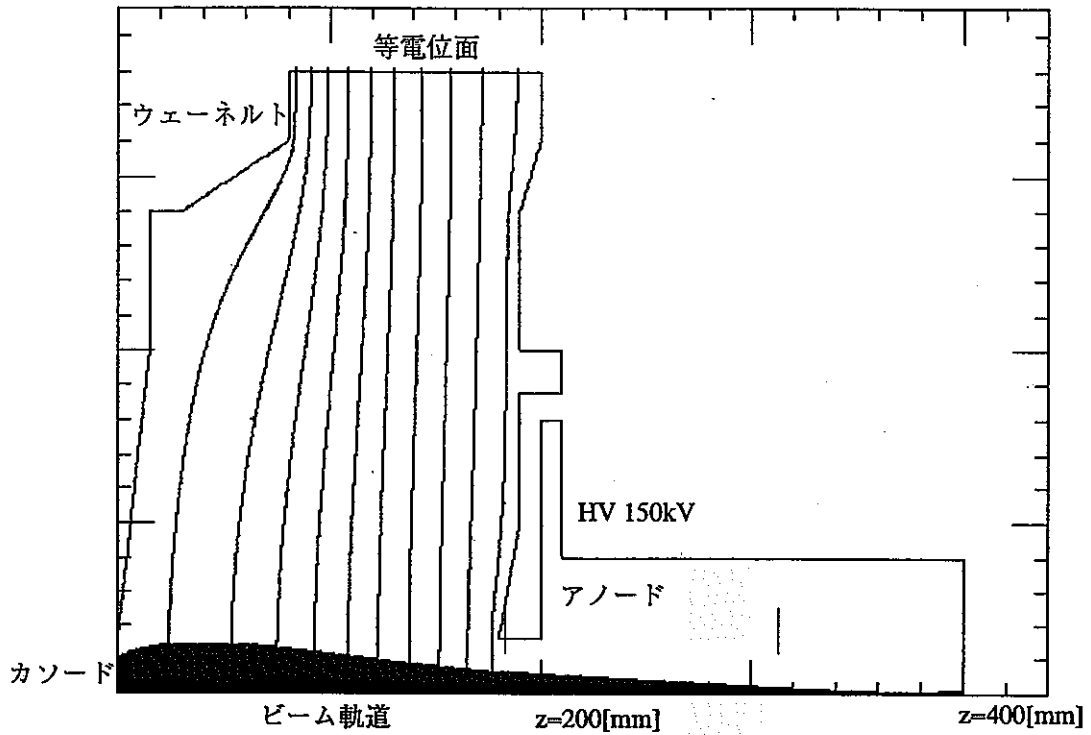


図9 電子銃内のビーム軌道の計算結果(HV150kV)
(180、200KVの場合もほぼ同様)

第4章 基本特性に対する実験データ

4.1 測定条件および測定体系

電子銃から後段の加速器要素に電子ビームを安定して供給するために、電子銃の基本特性である引出電流に特に着目して測定を行った。その結果を以下にまとめる。今回使用した測定条件の概略図を図10に示す。測定では、電子ビームを実際の加速器後段に出射するために、ビームライン上のビームモニター系には制限がある。

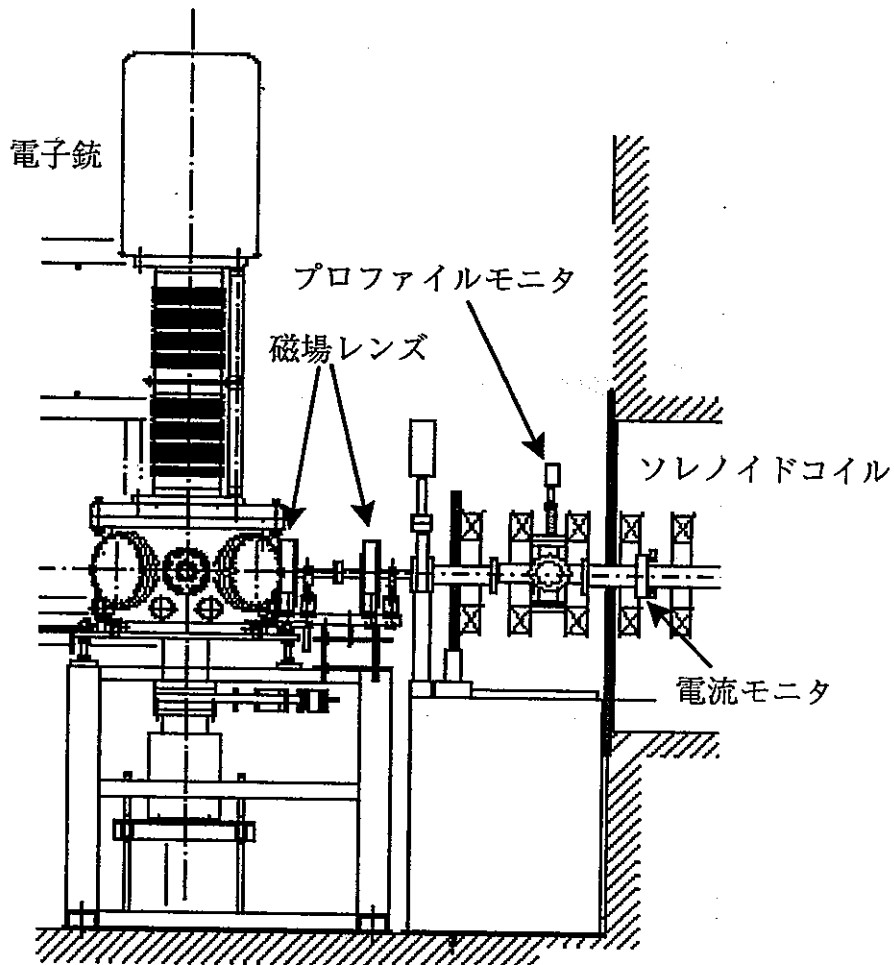
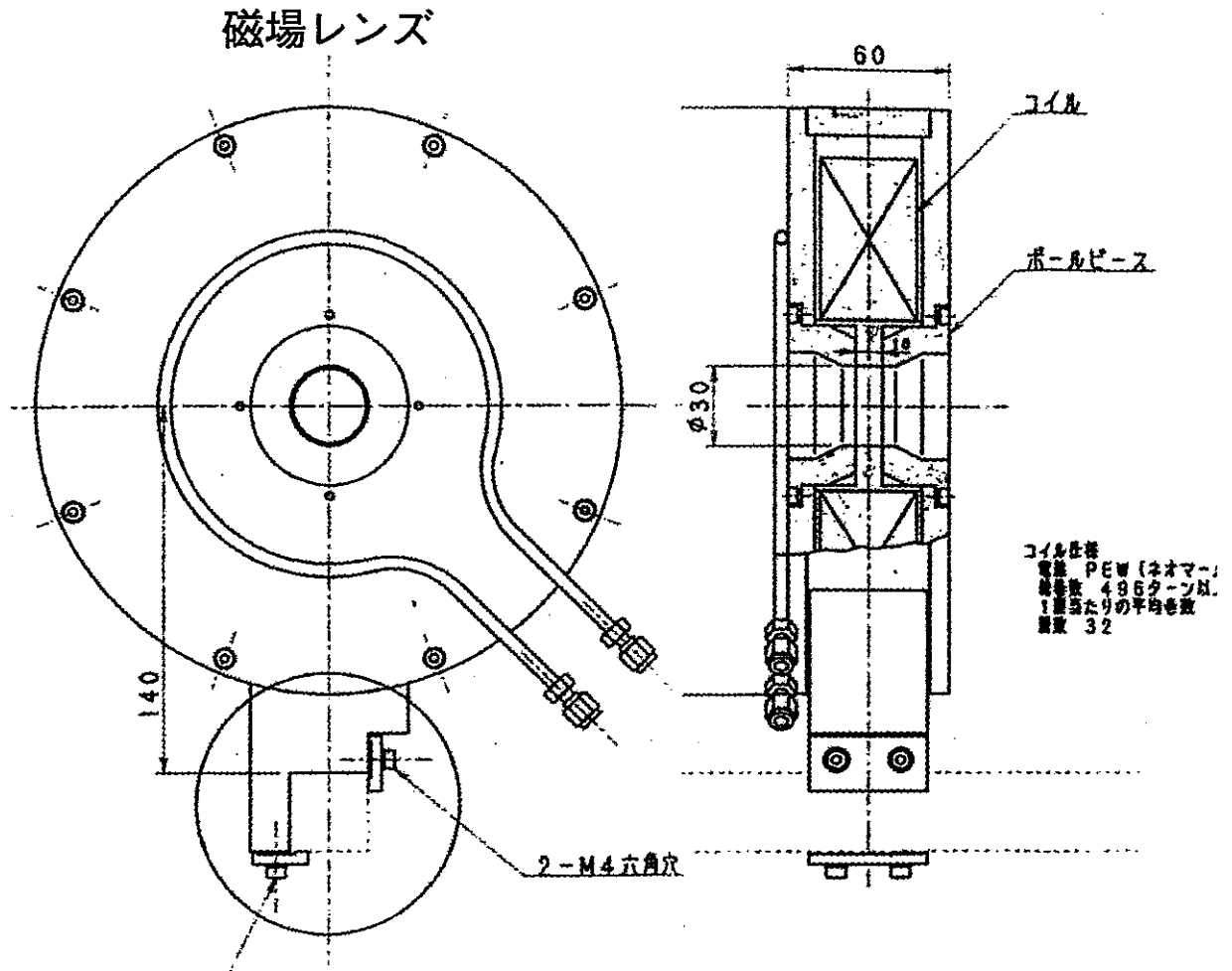


図10 電子銃ビームの測定条件

電子銃のアノードからのビームを、後段のソレノイドコイルに入射し、安定してソレノイドコイル中を輸送するためには、一般に収束されたビームの焦点をソレノイドコイルの入口付近になるように、磁場レンズで調節することが必要である。このビームラインでは、仮にアノードから発散ビームが出射されたとしても、磁場レンズの持っている収差の影響をできるだけ少なくするように、2段の磁場レンズを配置している。また、ソレノイドコイルの漏れ磁場が電子銃の方に影響を与えないように、鉄板による磁気シールドを施

されている。磁場レンズには、薄肉レンズ近似に近い、小ギャップの磁気ポールピース型を用いている。図11に磁場レンズの構造図と磁場解析コードPOISSON[5]による解析結果を示す。この磁場レンズはRamberg近似の関数形が数値計算の結果と良く一致した。



POISSONからの結果

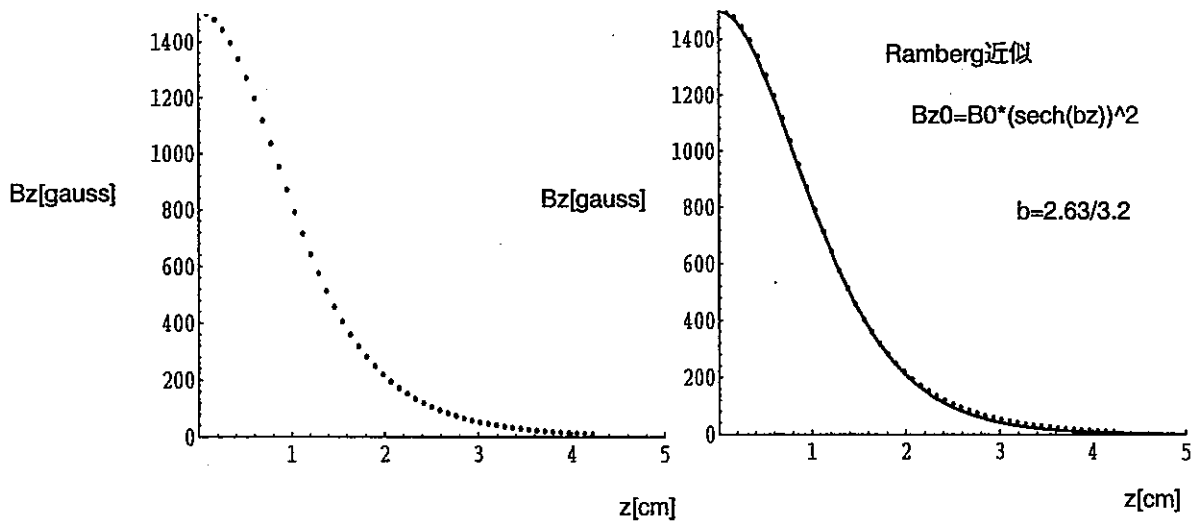
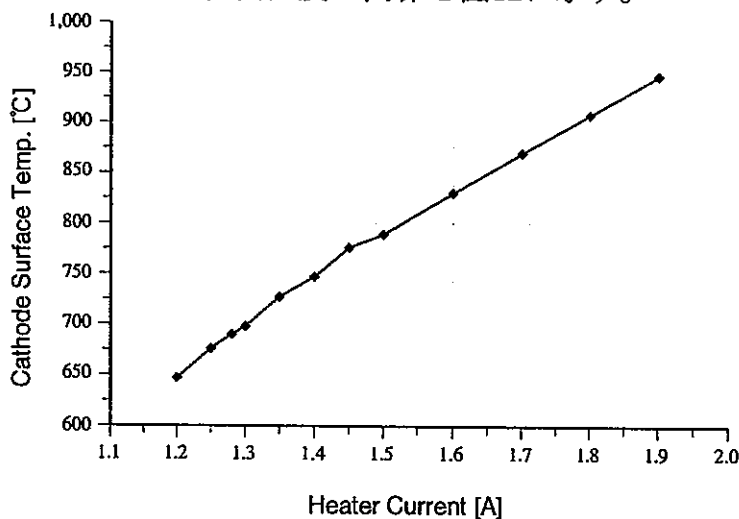


図11 磁場レンズの構造と中心軸上の磁場分布(Bz)

電子銃からのビームは磁場レンズによって、ソレノイドコイル中に輸送され、発光体にデマルケスト板を用いたプロファイルモニターでビーム断面のプロファイルを観測、ソレノイドコイルの中のビームライン上に設置されたコアモニターで電流値を測定した。しかし、この体系では電子銃アノードからモニターまでの距離が長く、かつ磁場による輸送系が設置されているために、ビームの一部がこぼれ落ち後段に輸送されない場合には、モニターの信号を過小評価する恐れがある。そこで、極力電子ビームがこぼれないような条件で測定するために、電子銃の観測窓付近と磁場レンズのビームライン付近に、ビームがこぼれた場合の判断の目安として放射線モニター（SSD）を配置した。この設置によって、電子銃本体での高電圧印加に伴う放電によるX線発生や電子銃内のカソードアノード間のこぼれビーム、磁場レンズで輸送できなかったビームを敏感に観測することができる。ただし、ビームが壁面に衝突する方向等でモニターされるX線のエネルギーが異なるため、X線測定から逆に漏れビームの電流値を定量的に把握することは困難である。以上のことを前提に、測定結果をまとめた。放射線の測定方法および結果は次章に詳しく述べる。電子銃の定格電圧は200kVであるが、高電圧印加で生じる放電現象のため安定した測定条件がまだ得られていない。このため、今回の試験では150kV、180kVの場合で測定を行った。この結果をもとに後段に供給するビーム条件を決定した。

カソードアセンブリに用いたEIMAC社製Y646Eの温度特性を把握するため、本電子銃の体系に組み込み、カソード観測ポートからカソード表面温度をパイロメータで測定した。カソード電流とカソード表面温度の関係を図12に示す。

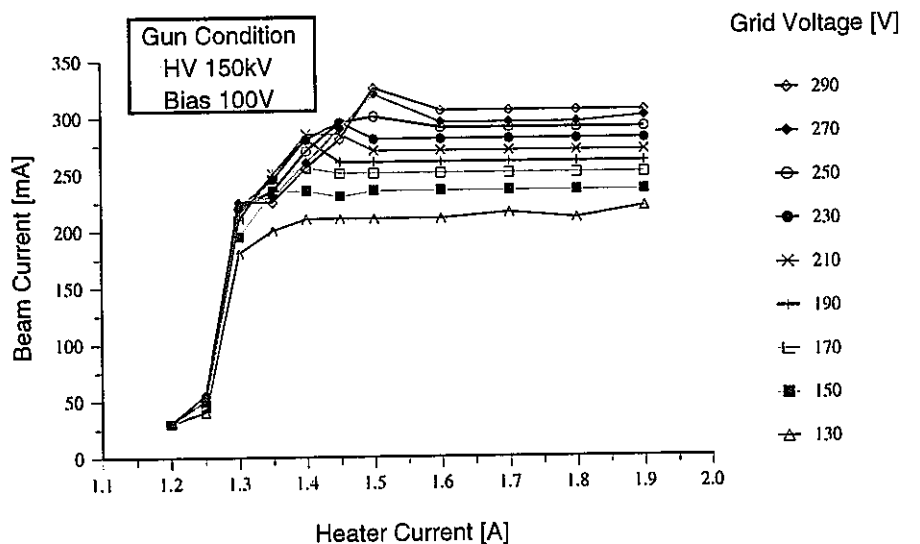


Heater Current - Cathode Surface Temp. 特性

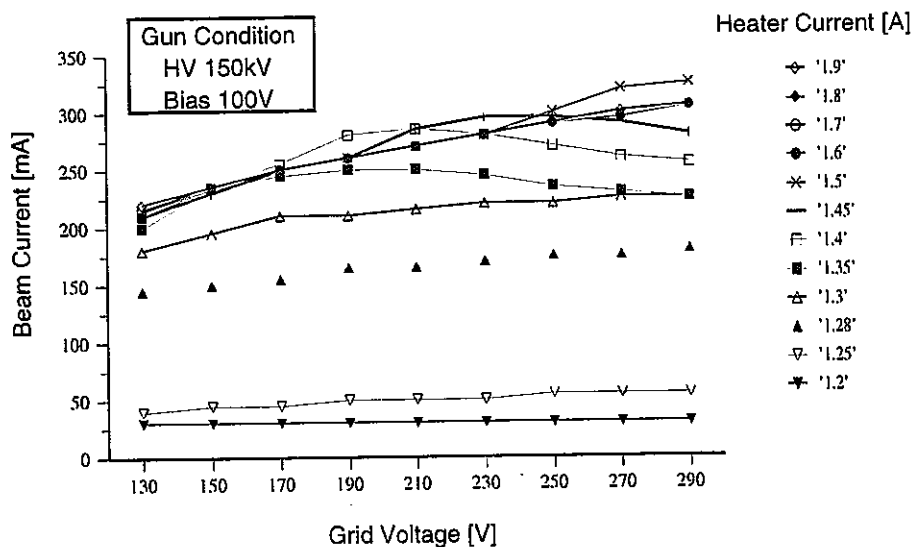
図12 カソードヒータ電流とカソード表面温度との関係

4.2 HV150kVでのグリッドメッシュ引出電圧およびカソード温度に対する電流値測定

メッシュグリッド型3極管電子銃において、メッシュグリッド引出電流に関する電流特性は重要である。また、引出される電流値は、カソードからの放出電流密度に依存し、これらは熱陰極型電子銃の温度制限電流領域および空間電荷制限電流領域として一般的に知られている。測定結果を図13に示す。ただし、測定では電流モニターでビームを過小評価しないために、磁場レンズ、ソレノイド磁場を最適化してビームライン上でのビーム損失がない条件を確立している。



Heater Current - Beam Current 特性



Grid Voltage - Beam Current 特性

図13 HV150kVにおける引出電流値のヒーター温度およびグリッド引出電圧依存性

図13の上図で、ヒーター電流を上げカソード表面温度を高くして行くにつれて、初期は急激に引出電流が増加していることがわかる。この領域が温度制限領域で、グリッドの引出電圧によらず一定の電流値が引き出されている。その後、同じ引出電圧であれば電流値が一定となる領域へと移行する。これが空間電荷制限領域で、引出電圧を上昇させてグリッド-カソード間の電界強度を増加させれば、引出電流が上昇する。図13の下図に、横軸を引出電圧にした場合を示す。ここで注目すべきは、引出電圧を上昇させることで電流値も増加する傾向が、高引出電圧の領域では逆転していることである。これは、メッシュグリッドの形成する電界が、カソードとアノード間の電界強度に比べ極端に強くなる結果、カソードからのビームを強く発散させることに起因していると考えられる。つまり、電子銃本体で失われる電流値の割合が増えるためである。理解を助けるために、図14に原理的な図を示す。2極管の場合は、カソードからのビームは、カソード-アノード間の印加電圧によって形成される電界で加速されるが、グリッドが存在する場合には、そこに印加される引出電圧の強度によって、図のようにビームに対してグリッドホール一つ一つが収束レンズあるいは発散レンズの効果を生じさせる。また、電子の一部は、グリッドそのものにトラップされ流れ込む。その割合が、引出電圧を高くするほど上昇する。その結果、グリッド自身に流れる電流によってグリッド表面温度が増加し、グリッドそのものから電流の放出の可能性も出てくる。この現象はグリッドエミッションと呼ばれ、本装置のようなDC電圧印加の場合には、加速系後段部にそのままDCビームを供給するため、漏れビーム上昇の原因になる。

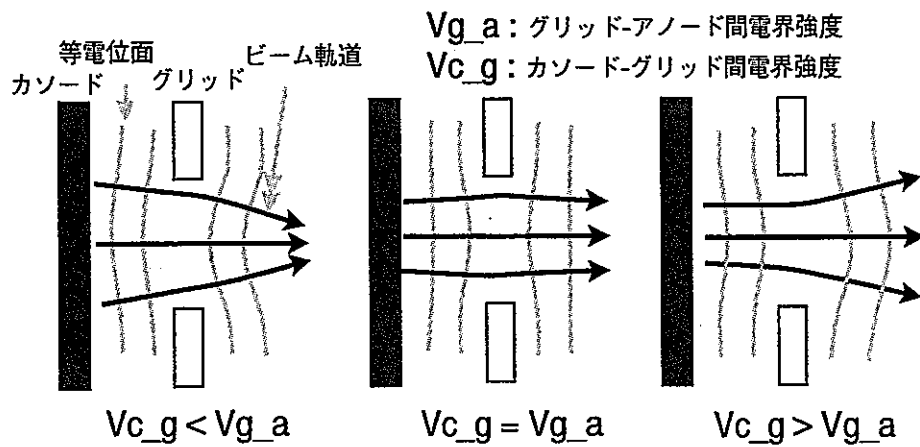


図14 グリッドホールのビームに与える影響

4.3 定格電流値300mAを得るためのHV180kV時のグリッドメッシュ引出電圧の最適化

前節では、HV150kVでメッシュグリッド型3極管電子銃の基本特性を測定し、メッシュグリッドに印加される引出電圧を最適化しなければ電子ビームの一部が電子銃本体で失われ、電子銃本体からの放射線発生が増加、グリッドエミッションの原因になることを述べた。そこで、本節では、グリッドの引出電圧の最適化について述べる。加速器後段で要求されているピーク電流は300mAであり、この電流値を出すため電子銃の最適な動作条件をサーベイする必要がある。グリッドの最適な電圧は、直接的に知ることは困難であるために、漏れビームが最小となる値とした。このため、電子銃本体及び磁場レンズ付近に放射線モニタ(SSD)を設置し、測定した。図15に測定体系を示す。また、同時に放電による脱ガスをイオンポンプ電流で監視し、放射線発生が放電によるものかどうかを区別した。その結果、電流300mAを引出すための条件としては、150kVでも180kVでも可能であることがわかった。しかし、後段のバンチャ管の設計がビームエネルギー200keVを前提にした設計となっているため、エネルギーが低いと輸送中にバンチからビームがこぼれる。したがって、電子銃の動作条件は180kVを前提に条件サーベイを行った。

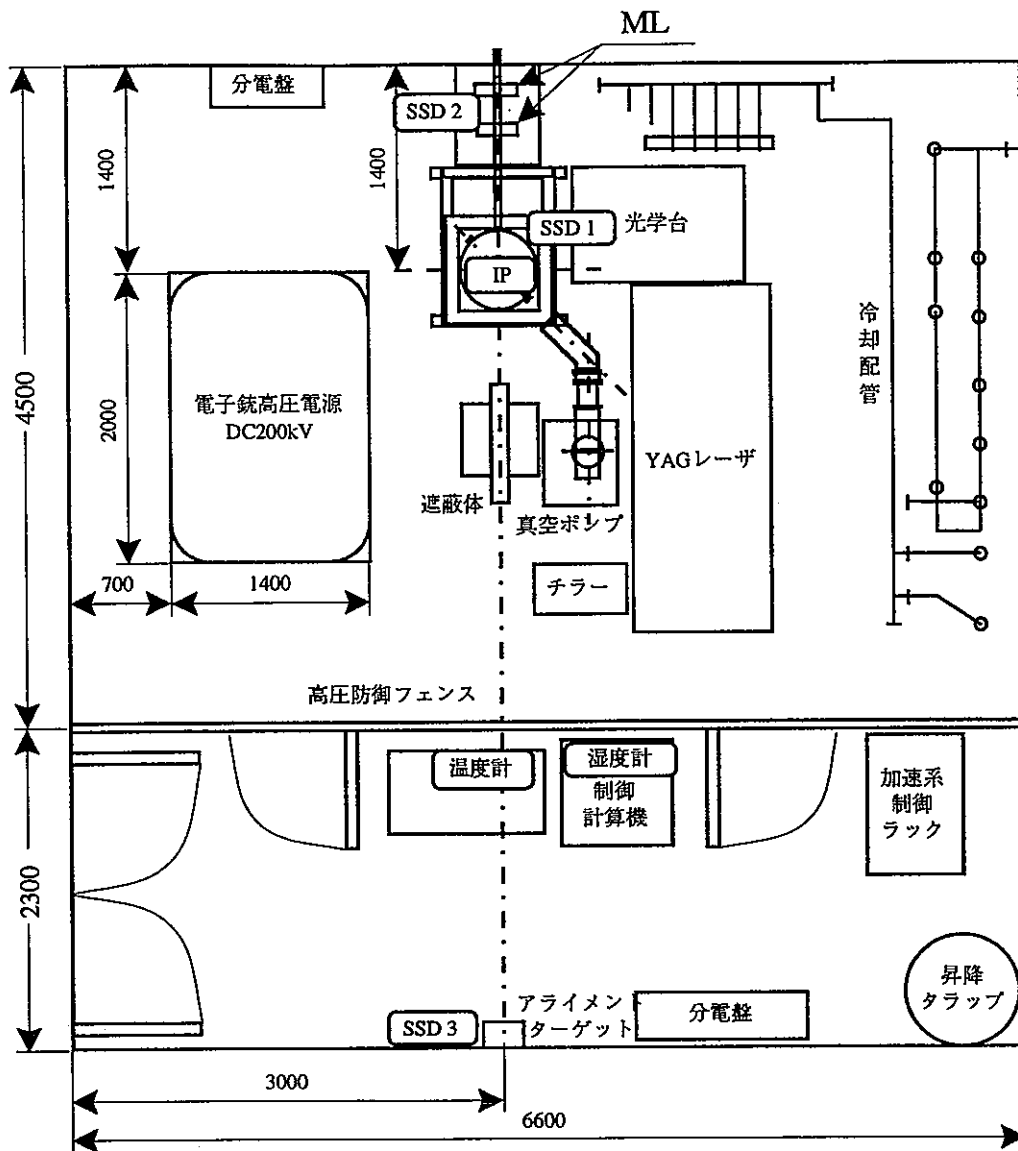


図15 放射線モニター測定体系

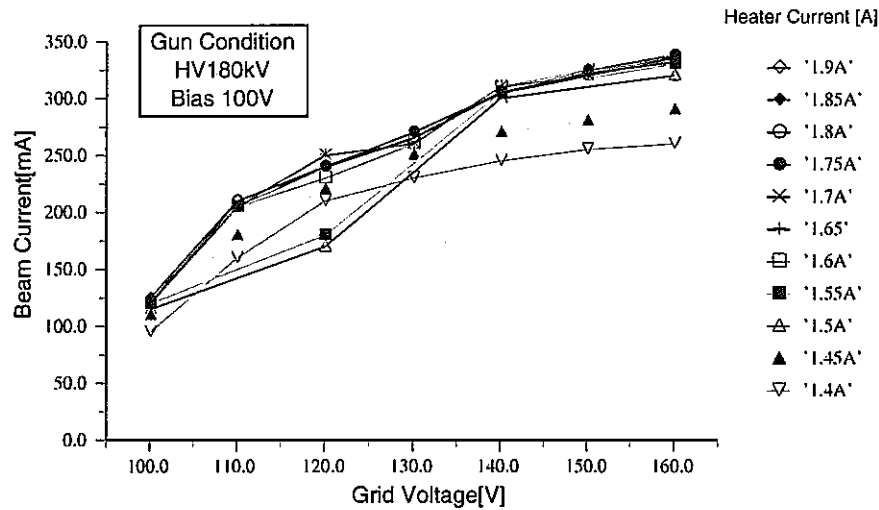


図16 HV180kVにおける引出電流値のヒーター温度およびグリッド引出電圧依存性

HV180kVでの測定結果を図16に示す。数値計算では、150kVでは300mAに達しないが、グリッド電極で強く引出すため、2極管の場合よりも電流値が高い。また、180kVの場合は測定結果から、空間電荷領域に達していないと判断される。引出電圧が低い場合にはパルス波形が乱れるため、これも考慮に入れる必要がある。図17は、ピーク電流を300mAに固定し、カソードヒーターの電流値とグリッドの引出電圧をパラメータとして、2箇所を設置されたSSDの測定値をプロットしたものである。SSD1は電子銃本体の観測ポートに設置され電子銃本体でのビームロスを判断できる。また、SSD2は磁場レンズ付近に設置されており、磁場によるトランスポートによるビームロスを反映している。ただし、このときの磁場レンズの条件は、ビームの主な成分をほぼ後段に輸送できることをプロフィールモニターで確認した条件を用いている。ヒーター電流はできる限り低く設定した方が良いが、300mAを引き出すためにはグリッド引出電圧を高くしなければならない。逆に、カソードヒーターの値を高くすることで、ある程度グリッド電圧を低くできるが、カソード温度が上昇することで、グリッドを加熱しグリッドエミッションが増える可能性がある。図7のSSD1から、ヒーター電流1.5から1.6あたりに極小値があることがわかる。また、同時に、SSD2もほぼ一致していることから、ヒーター電圧を1.55付近に設定し、グリッド電圧を145から150V程度で動作させることが最適であると判断された。これらの条件から今後、動作条件としてこの付近に設定し、加速器後段にビームを供給するものとした。

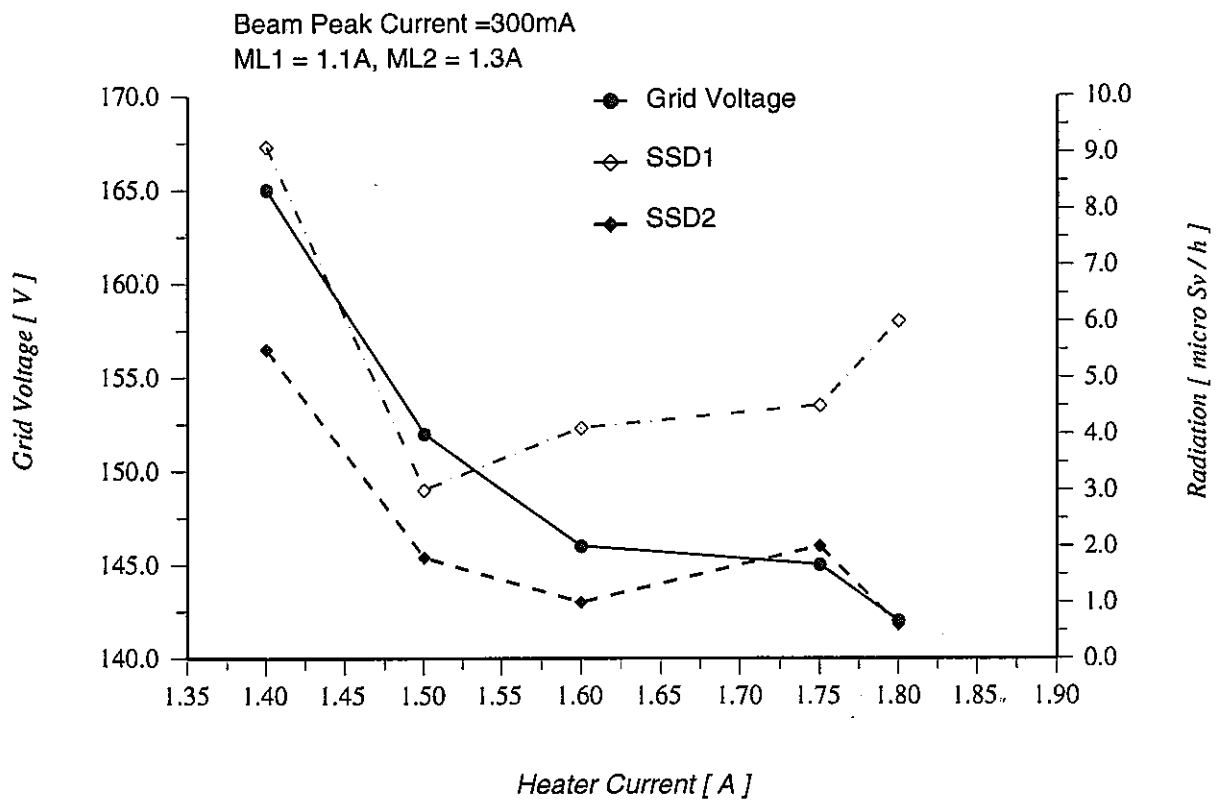


図17 電流値300mA、HV180kVのときのヒーター電流、グリッド電圧の最適値の測定

第5章 まとめ

今回のメッシュグリッド型電子銃ビームに関する測定で、加速器からの要求であるピーク電流300mAの電流値を安定して供給することができた。また数値計算による、設計段階の引出電流の値もほぼ満足することができた。その過程で、メッシュグリッドの設定値によっては電子銃内部での漏れビームが増加し、後段へのビームが減少することがわかった。このことは、ビームの質から判断するとメッシュグリッドの引出電圧に最適値が存在することが、実験的に確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、いろいろなサポートをして頂いたチームグループのスタッフ全員に感謝いたします。また、本電子銃の開発に当たっては、高エネルギー研究開発機構(KEK)の小林仁教授には、有益な議論をして頂いた感謝いたします。

参考文献

- [1]遠山、谷「大電流電子線形加速器の開発」,動燃技報,No88,p.19-28,1993.
- [2]山崎、野村「大強度CW電子線形加速器の要素開発(V) 大電流電子銃の開発(2)」
PNC ZN 9410 94-172、1994年5月
- [3]山崎、野村「大強度CW電子線形加速器の要素開発(VII) 大電流電子銃・電源の開発」
PNC ZN 9410 96-037、1996年2月
- [4]W.B.Herrmannsfeldt, "EGUN an electron optics and gun design program",
SLAC-Report-331, Oct,1988.
- [5]M.T.Menzel,H.K.Stokes, Los Alamos Acc. Code Group, "User's Guide for the
POISSON/SUPERFISH Group of Codes", LA-UR-87-115, Jan, 1987.