

大強度CW電子線形加速器の要素開発（I）

－大電流電子銃の開発（1）－

1992年8月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

大強度CW電子線形加速器の要素開発 (I)

— 大電流電子銃の開発 (1) —

野村昌弘¹⁾、遠山伸一¹⁾、加藤裕子²⁾
早川 健³⁾、田中俊成³⁾

要 旨

現在高出力の電子線加速器の開発を目的に試験用の大強度CW（連続波）加速器の研究開発を行なっている。この研究開発に伴いクライストロン、加速管、電子銃等の要素開発を行なっている。その中でも加速器の最大電流は電子銃で決まると言われている程電子銃は加速器の重要な構成要素の一つである。特に大電流加速器の場合にはその重要性は非常に高くなる。

本報はこの重要な電子銃の開発の現状について書かれたものである。内容は、電子銃を構成する構成要素の中でも特に重要なカソードの材質及び電子の放出方法についての調査、加速電場の種類についての調査及びEGUN と呼ばれる電子軌道解析計算コードによる計算結果である。最後に我々の開発している大強度CW加速器に適した電子銃についてのまとめを行っている。

-
- 1) 大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室
 - 2) (株) 原子カシステム
 - 3) 大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室 客員研究員
(日本大学 理工学部)

The Key Technology Development of High Power CW Electron Linac (I) — Development of a High Current Electron Gun (1) —

M. Nomura¹⁾, S. Toyama¹⁾, Y. Kato²⁾, K. Hayakawa³⁾, T. Tanaka³⁾

Abstract

We are developing a test CW electron linac to develop a high power accelerator. In the key technology development, activity is focused on the developments of electron gun, klystron, and accelerator tube for high power RF. It is very important for a high power accelerator to develop an electron gun, because the beam current depends on electron gun.

This paper presents the present status. We introduce in this paper the cathode material, the emission type, the accelerating field, and preliminary results of electron trajectories calculated by EGUN code.

-
- 1) Frontier Technology Development Section
Oarai Engineering Center
 - 2) Nuclear Energy System Incorporation
 - 3) Frontier Technology Development Section
Oarai Engineering Center
Visiting Researcher from Nihon University

目次

第1章 序	1
第2章 電子銃開発要素	1
第3章 カソード	
3.1 カソード材質	2
3.2 電子放出	4
第4章 DC銃、RF銃	5
第5章 電極形状	
5.1 電場計算	7
5.2 計算結果	8
第6章 まとめ	9
参考文献	9
計算結果図	10
付録：EGUN	16

図リスト

- 第4.1 図 電子銃構成 (DC電子銃)
- 第4.2 図 RF電子銃概念図
- 第4.3 図 RF電子銃+光電子放出カソード概念図
- 第5.1 図 電子銃のパラメータ及び形状
- 第5.2 図 電子銃内での電子の軌道の電流値依存性
- 第5.3 図 電子銃出口でのビームの広がり角の電流値依存性
- 第5.4 図 電子銃内での電子の軌道のカソード径依存性
- 第5.5 図 電子銃出口でのビームの広がり角のカソード径依存性
- 第5.6 図 電子銃内での電子の軌道の電極形状依存性
- 第5.7 図 電子銃出口でのビームの広がり角の電極形状依存性

第1章 序

現在核分裂生成物の核種変換に適用できる高出力の加速器開発を目的に試験用の大強度CW(Continuous Wave)電子線形加速器の研究開発を行なっている。この大強度CW電子線形加速器の主な仕様を以下に示す。

ピーク電流 = 100 mA
 ビームエネルギー = 10 MeV
 デューティファクター = 20 % ~ 100%
 RF周波数 = 1249.135 MHz (L - Band)
 加速モード = $2\pi/3$
 加速管構造 = 進行波還流型

この研究開発に伴い、出力1.2MWのL-Band連続波を供給するクライストロン、進行波還流型の加速管、加速器に電子を供給する源である電子銃等の要素開発を行なっている。中でも電子銃の開発は重要であり、加速器全体から考えてみても最大ビーム電流及びビームの質の大部分は電子銃で決まると言っても過言ではない程、電子銃は重要な位置を占めている。特に大電流加速器の場合にはその重要性は高くなる。この電子銃の開発項目としては大電流を供給するカソード材質の選定、加速電場の種類(RF電場、DC電場)の検討、電極形状の決定等がある。

第2章 電子銃開発要素

開発する電子銃に対する一番の要請は、加速器に大電流を供給できる性能を有する事である。具体的には加速器のピーク電流が100 mAである事から、チョッパーでビームが間引かれる事を考慮すると電子銃出口で約400 mA程度の電流が必要となる。又ビームの質に関しては、大電流電子銃と言う性能を満足する範囲で加速管内でのビーム損失を最小にする為に出来るだけエミッタンスは低くしなければならない。つまり開発する電子銃は約400 mAの大電流で且つ出来るだけ低いエミッタンスのビームを供給できる電子銃である事が必要になる。この様な電子銃は最近ではFEL(Free Electron Laser)用に多くの研究所で精力的に開発が行なわれているが、それらは本報の電子銃の開発概念とは異なり、電流の値そのものよりもビームの質をより重視した電子銃である。

電子銃の開発において常に問題となるのはカソードである。最大ビーム電流と電子銃の寿命はカソードで決まると言っても言い過ぎではない。また大電流の影響、つまり空間電荷効果の影響を最も受けるのは電子の速度が光速に達していない電子銃部分であることから、この影響をできるだけ少なくするような電場の種類及び形状を決定することも重要な開発要素である。FEL用の電子銃では通常のDC電場による加速ではなく、

RF電場により一気に数MeVのエネルギーにまで電子を加速し空間電荷効果の影響を少なくしようとするRF電子銃の開発も行なわれている。その他の開発要素としてはカソードから出た電子のエミッタンスをできるだけ悪くしないような電極の形状の研究も挙げられる。そこで次の第3章から、それぞれの開発要素、カソード、DC電場による加速とRF電場による加速、電極形状についての調査結果及び計算結果について述べる。

第3章 カソード

3.1 カソード材質

先に述べたようにカソードの材質の選定は非常に重要である。ここではまず第一に放出電流密度の高い物質を選ばなければならない。放出電流密度の高いカソードの材質を使用すると小さなカソードの使用が可能となりエミッタンスを小さくすることができる。単位面積あたりの熱電子の放出電流密度は Richardson - Dushman の式、

$$I = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} T^2 e^{-\phi/kT} \quad (1)$$

m : 電子の質量 0.511MeV h : プランク定数 4.135×10^{-21} MeV s
 e : 素電荷 1.602×10^{-9} coulomb T : 絶対温度 K
 k : ボルツマン定数 8.617×10^{-5} eV k^{-1} ϕ : 仕事関数 eV

から求まる。この式によれば放出電流密度を高くするには、仕事関数の小さな材料で温度を高くすることが望ましい。即ち融点の高い材料が必要となる。しかしビームのエミッタンス等を考えた場合には使用温度は低いほうが望ましい。又一般的に言って純粋な金属では融点の高い材質は概ね仕事関数も大きい。このような相い反するような性質を満足させるために色々なカソード材質の開発が行なわれている。以下に代表的なカソード材質（主に熱陰極）についての調査結果¹⁻³⁾を示す。

a) 純金属カソード

実用上良く使われているものは W, Ta, Mo 等である。これらは必ずしも仕事関数が低い訳ではないが、融点が高くて高温で使用できる上に飽和蒸気圧もあまり高くないという特長がある。材料の加工性も比較的良い。W の場合仕事関数は 4.5 eV で、融点は 3665K である。この種のカソードの使用温度は約 2400 ~ 2600 K で、このときの放出電流密度は約 100 ~ 400 mA (DC) である。

b) 酸化物被覆カソード

熱陰極のうちで最も広範囲で使用されてきたカソードである。基体金属 (Ni, W) の上にアルカリ土類金属の酸化物の層を作ったもので仕事関数は 1.0 ~ 1.5 eV と低い値となる。短パルスで寿命を犠牲にした場合には 20 A/cm² 平均で 2 A/cm² の放出電流密度が得られる。寿命を 1000 時間以上にする実用的な連続出力で放出電流密度は約 0.5 A/cm² とされている。動作温度が低い (800° C) のがこの型のカソードの最大の長所であるが、一方で残留ガスなどに弱い点が欠点として挙げられる。

c) 含浸型カソード

これは酸化物被覆カソードの欠点を補って長寿命でかつ堅牢なカソードとして開発されたもので蒸発やイオン衝撃によって失われた Ba を熱拡散によって補給して、常に金属表面に Ba の単原子層を維持するタイプのカソードである。これには空洞貯蔵補給型と含浸補給型 (BI) がある。今日では後者がよく用いられている。使用温度約 1400 K で放出電流密度 10 A/cm² である。実際に連続出力で放出電流密度 2 A/cm² 程度で取り出したとして 10000 時間以上の寿命が期待できる。動作が安定で寿命が長いことため加速器の電子銃はこのタイプに変わりつつある。このカソードも周囲の真空の状態によって影響されるが、寿命は酸化物被覆カソードよりも明らかに長い。

d) LaB₆カソード

このカソードは仕事関数と電気抵抗が低いことため早くから注目されていたが近年 LaB₆ の単結晶の成長技術が確立し、端子にグラファイトを使用することができるようになってきたので電子銃にも使用され始めてきた。

以上の結果より寿命、使用温度、放出電流密度、信頼性及び安定性等から総合的に判断すると、我々の電子銃のカソード材質としては含浸型カソードが一番適していると考

える。そしてある程度エミッタンスは悪くなるものの、面積の広いカソードであるカソード径 3 ~ 4 mm を使用することにより我々の要求する電流値 400 mA を満たすことができると思うが、今後実際に得られる電流値及び寿命についてのテスト実験を行なう必要がある。

3. 2 電子放出¹²⁾

一般に金属中の電子を外に取り出すにはいくつかの方法がある。金属表面にあるポテンシャル障壁を飛び越えるのに必要なエネルギーを金属中の電子に与える方法（熱電子放出、光電子放出）と、金属表面に強電界をかけていわゆるトンネル効果で放出させる方法（電界電子放出）とがある。放出方法によりエミッタンスも違ってくる。そこでそれぞれの方法に於けるカソードからの放出される電子のエミッタンス ε_n を以下に示す。

熱電子放出

$$\varepsilon_n = a \sqrt{\frac{2kT}{m_0c^2}} \quad [\pi m_0c \text{ cm}] \quad (2)$$

光電子放出

$$\varepsilon_n = a \sqrt{\frac{2(h\nu - \phi)}{3m_0c^2}} \quad [\pi m_0c \text{ cm}] \quad (3)$$

電界電子放出

$$\varepsilon_n = a \sqrt{\frac{2\bar{\varepsilon}'}{m_0c^2}} \quad [\pi m_0c \text{ cm}] \quad (4)$$

a : 半径 [cm] , T : 温度 [K] , $h\nu$: 光子エネルギー , ϕ : 仕事関数
 $\bar{\varepsilon}'$: カソード面に平行な方向のエネルギーの平均値

これらの結果からどの電子放出方法においても、低エミッタンスのビームを得る為に

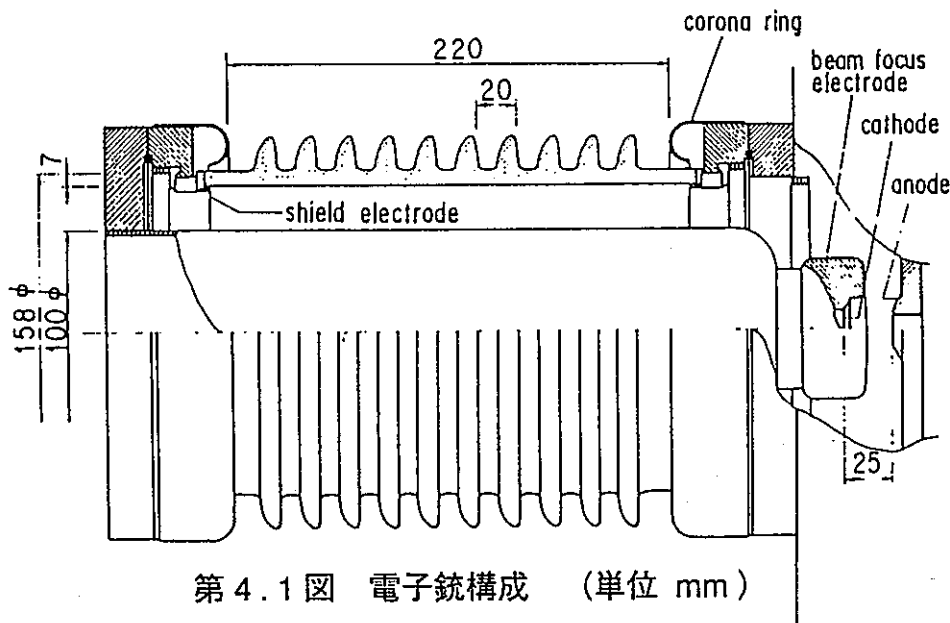
はカソード径を小さくしなければならないことが分かる。熱電子放出方法が最も一般的である事、光電子放出には大強度で安定した光源が必要である事、電界電子放出に関しては動作が不安定である事から、我々の電子銃にとっては熱電子放出方法が一番適当であると言える。但し、光電子放出ではバンチした電子を取り出せると言う大きなメリットがあるので今後も検討を続けていく必要がある。

第4章 DC銃、RF銃

以下にDC銃、RF銃の説明を簡単に行なう。

a) DC銃

DC銃とはカソードからの電子を文字通りDC場で加速する最も一般的な電子銃である。第4.1図にその構造を示す。これは高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリーの2.5 GeV リニアックの電子銃¹⁾である。



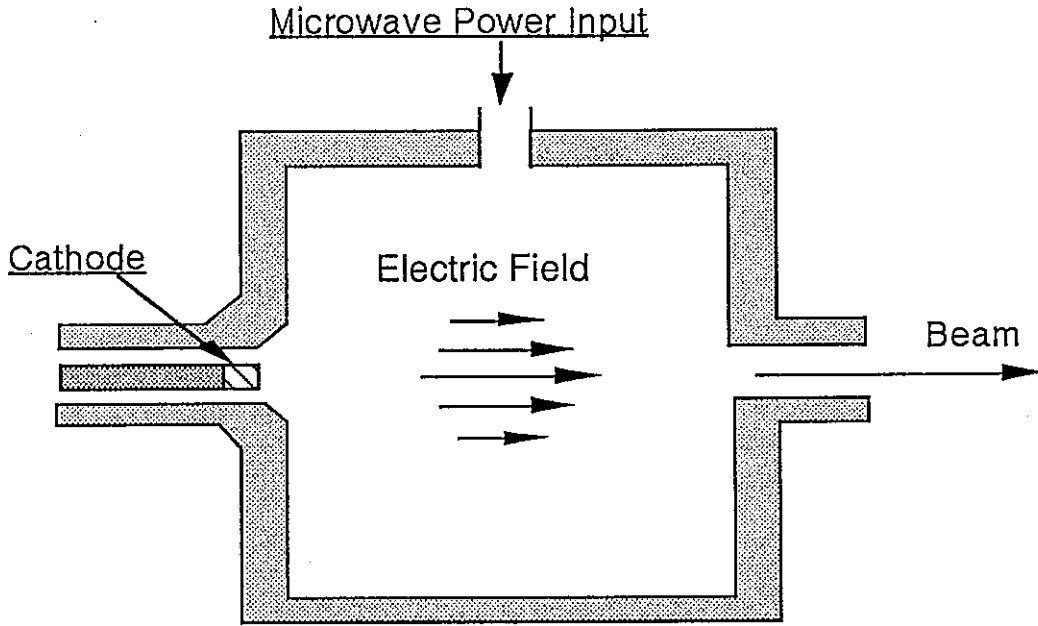
第4.1図 電子銃構成 (単位 mm)

このタイプで大電流の電子銃としては、SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) のピーク電流:6A、エミッタンス:30 π mm mrad、パルス長:2000 ps の電子銃⁴⁾が挙げられる。

b) RF銃⁴⁾

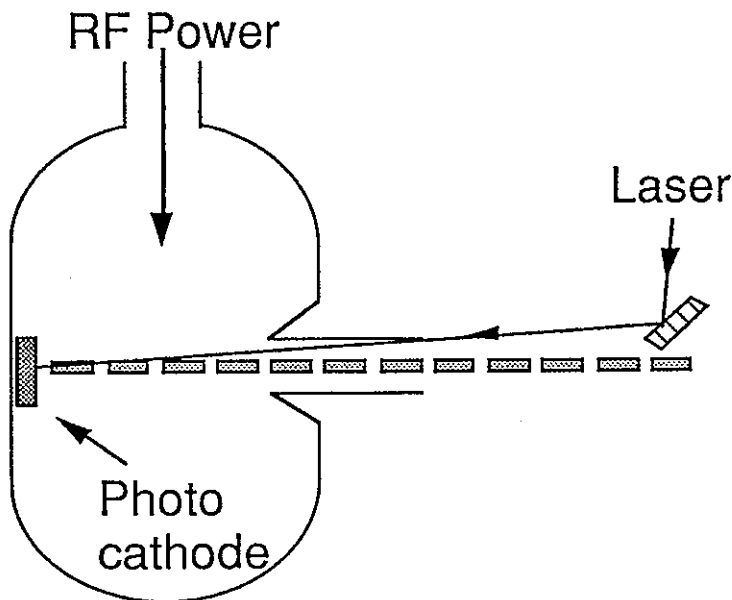
RF銃はFELあるいは衝突型加速器用として開発が進んでいる低エミッタンスで大電流の電子銃である。この銃では大電流の場合常に問題となる空間電荷効果を、RF電場で

一気に数 MeV のエネルギーまで加速することによりその効果を弱めようとするタイプである。第4.2図にその概念図を示す。



第 4.2 図 RF電子銃概念図

このタイプの電子銃は光電子放出による電子放出と組み合わせることにより、大電流のバンチしたビームを取り出せるため世界中の多くの研究所で開発が進められている。このRF電場と光電子放出カソードを利用した電子銃の概念を第4.3図に示す。



第 4.3 図 RF電子銃 + 光電子放出カソード概念図

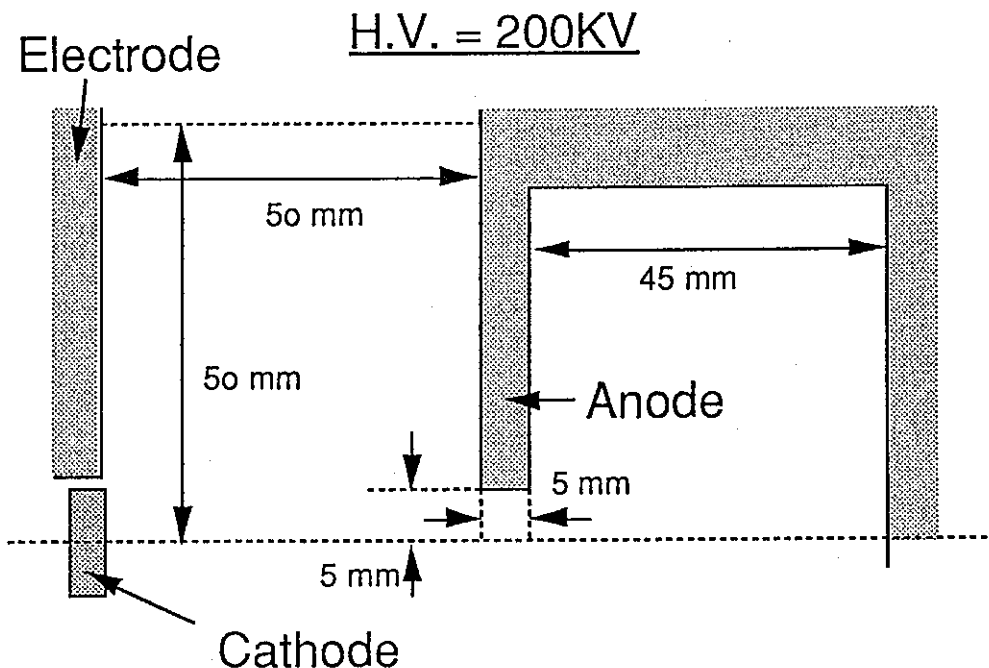
以上の事から大電流、低エミッタンスの電子銃にはRF電場と光電子放出カソードを利

用した電子銃が適していると考ええる。しかし現在の技術から考えたときの開発の困難さ、我々の加速器ではFEL程エミッタンスを低く押さえる必要がない事などから考えて、まずはDC銃の製作を行ないRF銃については検討を続けていくのが良いと考えている。

第5章 電極形状

5.1 電場計算

電子銃の電極形状を決める為には、電子銃内での電子の軌道やエミッタンスの計算が必要となる。これはEGUNと呼ばれる計算コードで行なうことが出来る。EGUNはSLACで開発された電子銃内の電子の軌道を解析する計算コードである。この計算コードには空間電荷効果も含まれており、我々の電子銃のような大電流の電子銃内での電子の軌道も計算することが出来る。計算コードEGUNについての説明は付録で述べている。初めに基本となる電子銃のパラメータ及び形状を第5.1図に示す。



第5.1図 電子銃のパラメータ及び形状

次の5.2節から、先ず大電流の影響を調べる為には、電子軌道及びビームの広がり、電流依存性を見る。そしてそれに引き続いてカソードの大きさ、電極形状を変えた時の

計算を行ない、要求する性能を満たす形状の検討を行なう。

5. 2 計算結果

a) 電流依存性

電流値を 0.1 A, 0.4 A, 1.0 A とした時の電子の軌道及び角度の広がりを第 5.2 図及び第 5.3 図に示す。電流値を上げるに従って空間電荷効果により軌道及び角度が広がっているのが分かる。大電流の電子銃の場合この空間電荷効果の影響を弱めるような形状の電極を考えなければならない。

b) カソード径依存性

次にカソードの半径を 2, 3, 4 mm にした時の電子の軌道及び角度の広がりを第 5.4 図及び第 5.5 図に示す。半径が小さいほど広がりの少ない低エミッタンスのビームを引き出せることが分かる。但し我々の要求するビーム電流 0.4 A を得るためには半径 2, 3, 4 mm に対してカソードの放出電流密度はそれぞれ 3.18, 1.415, 0.796 A/cm² となる。カソードの章で述べたように含浸型カソード (BI) の放出電流密度から考えてカソード径としては 3 ~ 4 mm 程度の大きさは必要となる。

c) 電極形状

最後に上で得られた結果からカソード径を 4 mm、ビーム電流を 400 mA とし電極形状を変化させた時の電子の軌道及び角度の広がりを第 5.6 図及び第 5.7 図に示す。電極形状の変化については非常に単純な場合を仮定し電極の傾きを変化させた場合についてのみ考えた。結果を見てみると先ず第 5.6 図から電極を傾けるほど電子銃出口でのビーム径が小さくなっていることが分かる。更に第 5.7 図から電極を傾けるほど電子銃出口でのビームの角度の広がりが小さくなり一番傾けた場合には電極による収束力のほうが空間電荷効果による反発力よりも強いためビームの角度の広がりが負の値になっていることが分かる。この事は電子銃を出た後、電場あるいは磁場による収束が弱くなった時に非常に強い空間電荷効果による反発力によりビームが広がることを意味する。実際 EGUN で計算されたエミッタンスも電極を一番傾けた場合には悪くなる。以上の様に電極の傾きを変化させただけでもビームの質は大きく変化する。逆にこのことは我々の開発する 400 mA の大電流の電子銃、つまり空間電荷効果の大きい場合でもある程度電極の傾きなどによりビームの広がりを制御できる事を意味する。中段に示す計算結果はビーム電流と電極の傾きのバランスが取れている為ビーム径が小さく且つ角度の広がりも

小さい、つまりエミッタンスの低いビームが得られる事を意味する。

第6章 まとめ

大強度CW電子線形加速器用の電子銃の開発にあたり、カソードの材質及び電子の放出方法についての調査、加速電場の種類についての調査及びEGUN と呼ばれる電子銃内での電子の軌道を解析する計算コードによる計算を行なった。得られた結果を以下にまとめる。

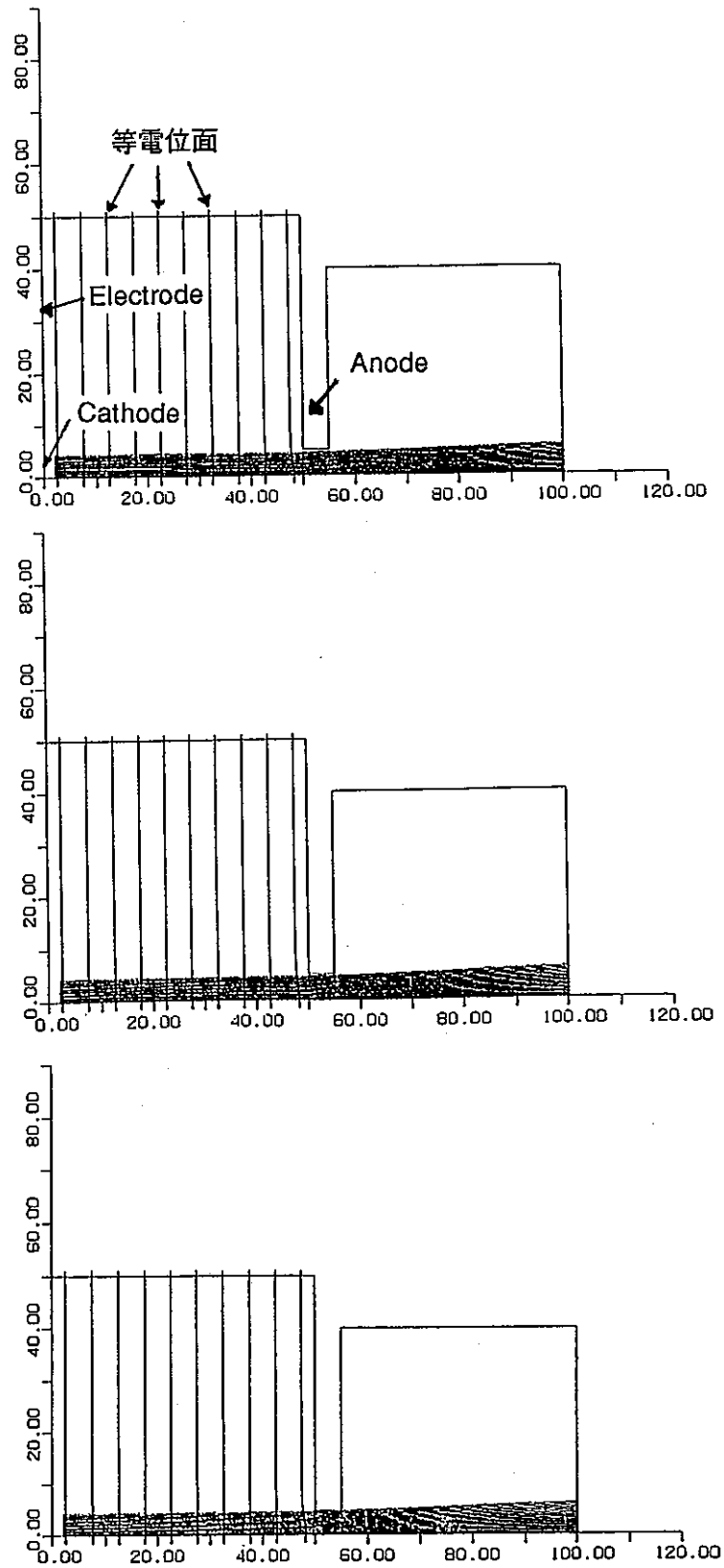
カソード径 4 mm 程度の含浸型カソード（熱電子放出）を使用することにより我々の要求する値 400 mA を満たすことができると考える。これについては今後実際に得られる電流値及び寿命についての実験を行なう必要がある。

我々の加速器に要求される電流値、エミッタンスから考えて加速電場についてはDC電場で行なえる。但し今後より低いエミッタンスのビームを得る為にRF電場による加速についても検討を続けていく必要がある。

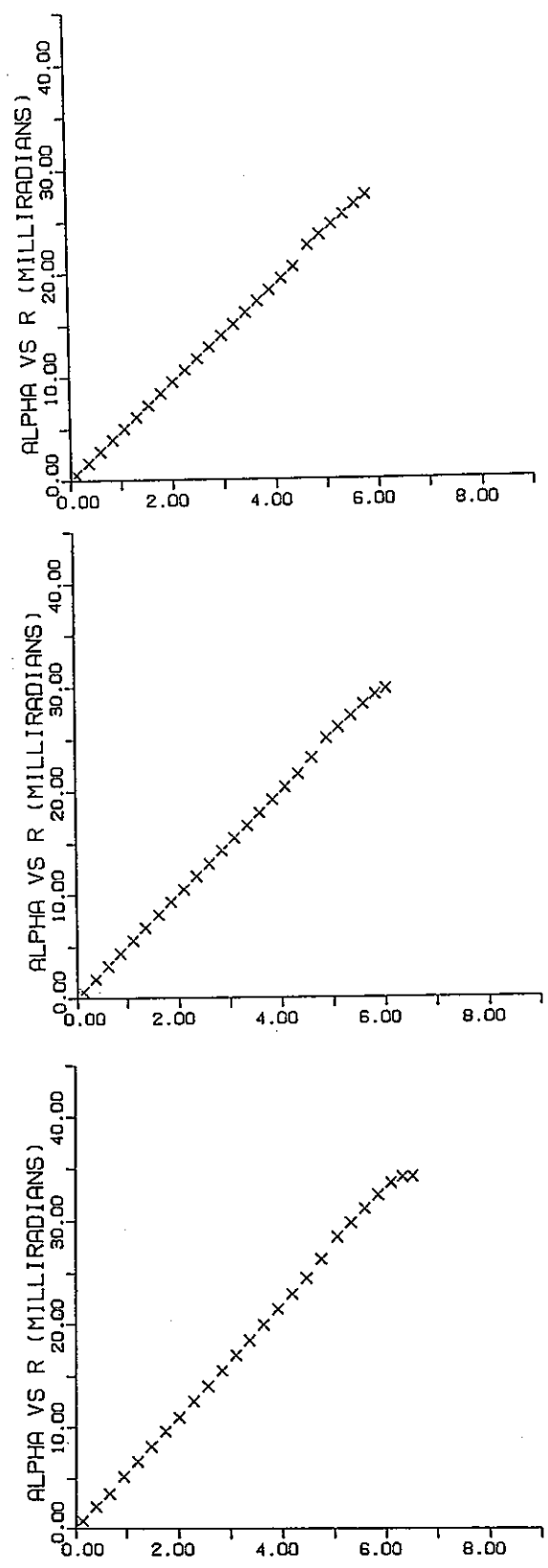
電極形状の変化については、非常に単純な場合を仮定し電極の傾きを変化させた場合についてのみ考えた。EGUN による計算結果から我々の開発する 400 mAの大電流の電子銃、つまり空間電荷効果の大きい場合でもある程度電極の傾きなどによりビームの広がりを制御できる事が分かった。

参考文献

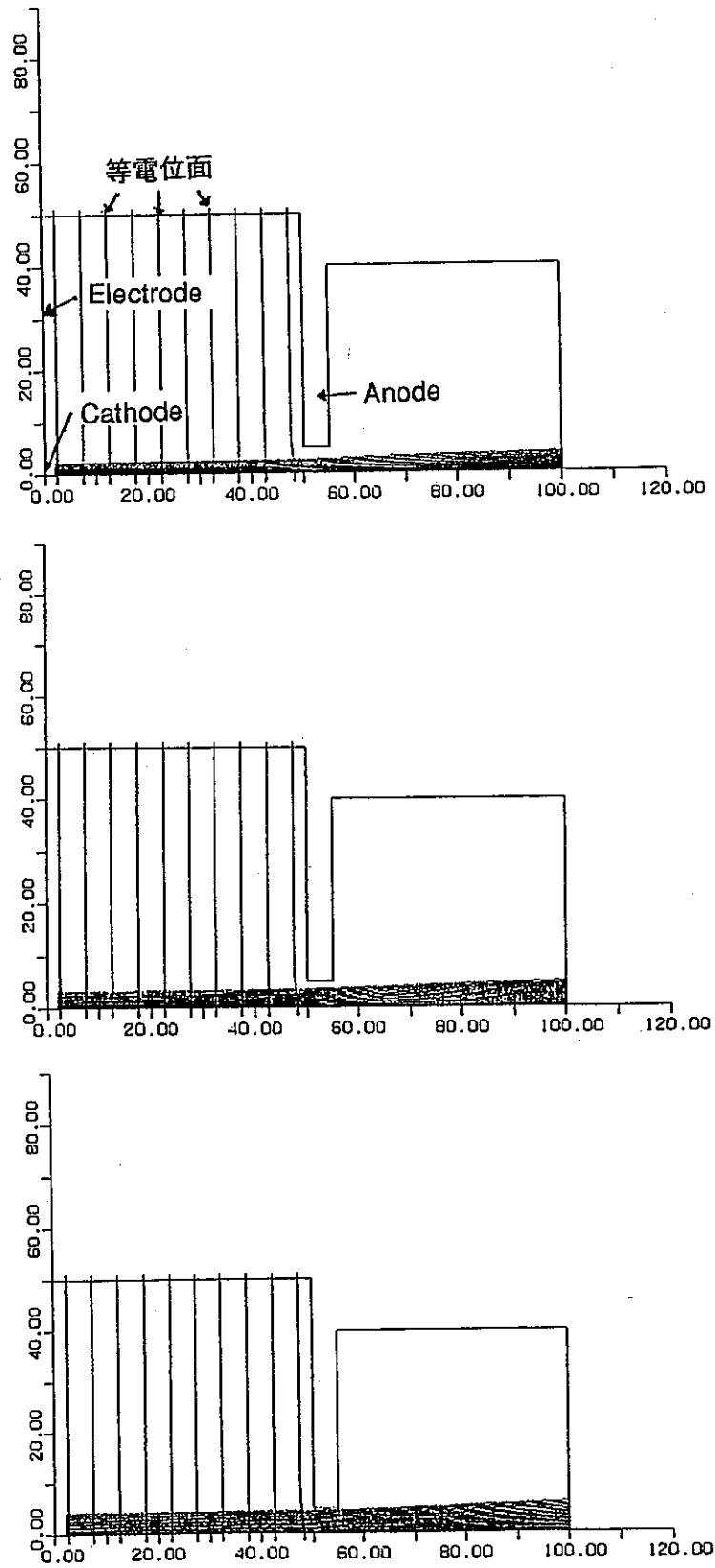
- 1) 大沢 哲 : 加速器セミナーテキストOHO'90 電子銃 4-1~4-29
- 2) 福田茂樹 : 加速器セミナーテキストOHO'88
クライストロンとその周辺 5-1~5-37
- 3) 小林 仁 : 加速器セミナーテキストOHO'88
電子線形加速器 4-1~4-32
- 4) C.Travier : Particle Accelerators 36 (1991) 33



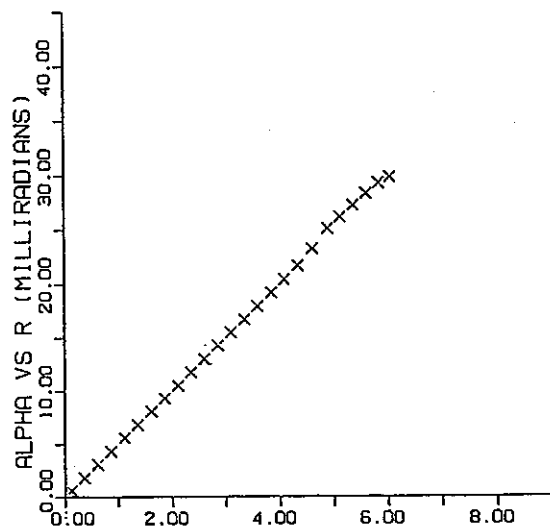
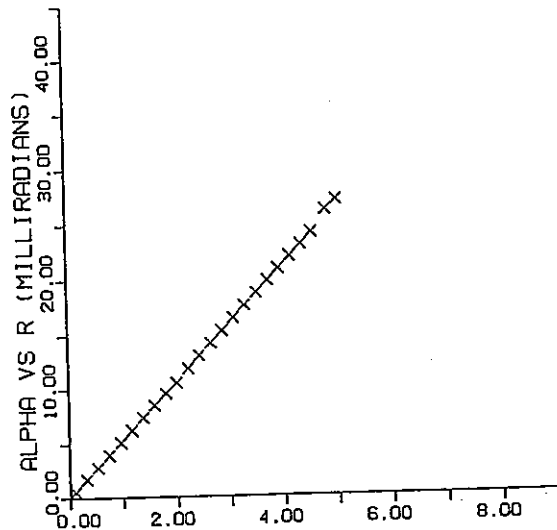
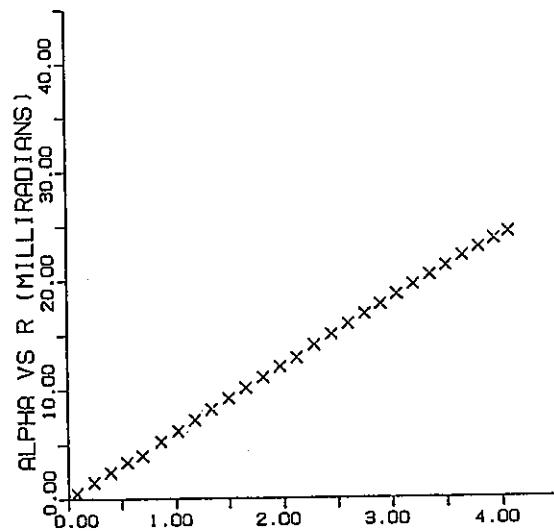
第 5.2 図 電子銃内での電子の軌道の電流値依存性
 縦軸横軸はそれぞれ動径座標及びビーム方向を示す。(単位 mm)
 電流値は上から 0.1 A, 0.4 A, 1.0 A である。



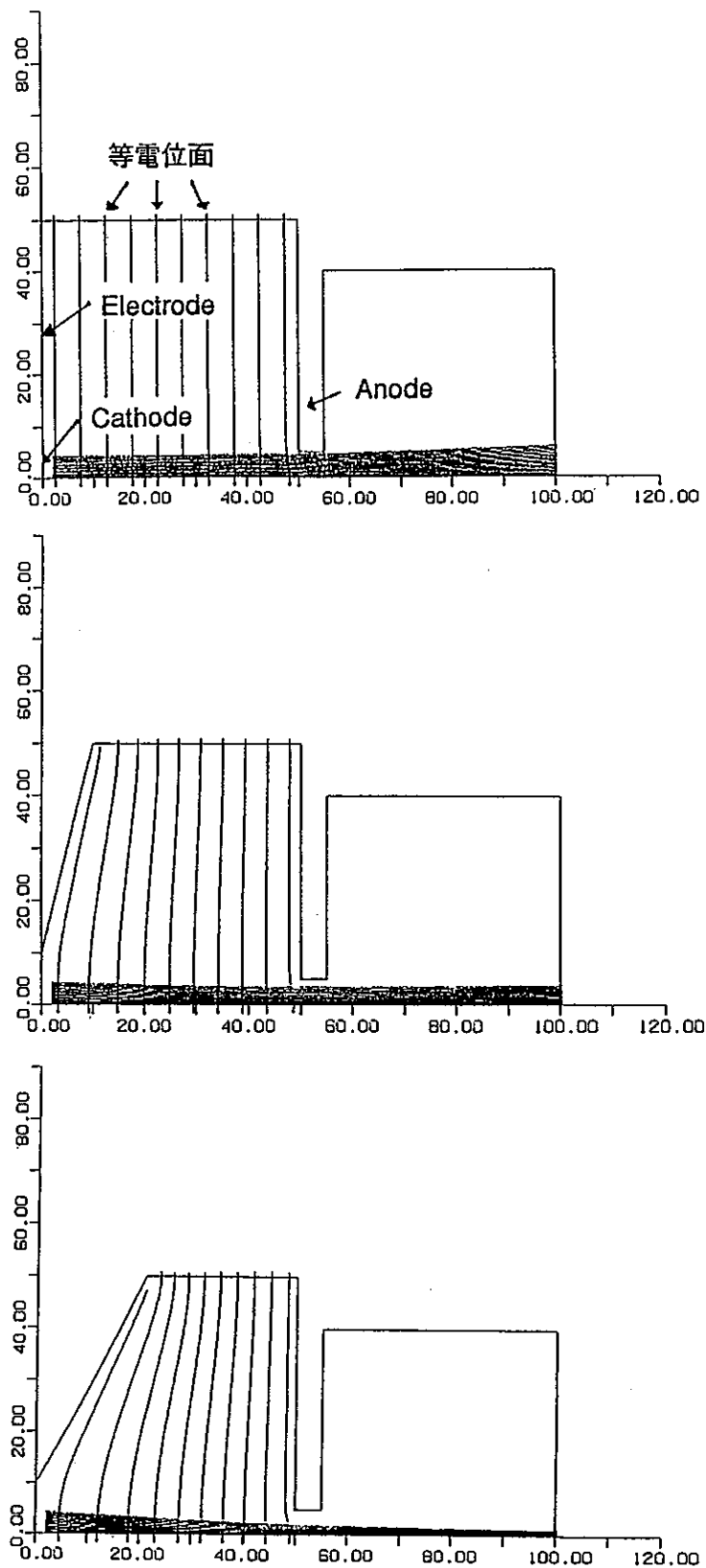
第 5.3 図 電子銃出口でのビームの広がり角の電流値依存性
 縦軸横軸はそれぞれビームの広がり角 (単位 mrad) 及び電子銃出口での動径座標
 (単位 mm) を示す。電流値は上から 0.1 A, 0.4 A, 1.0 A である。



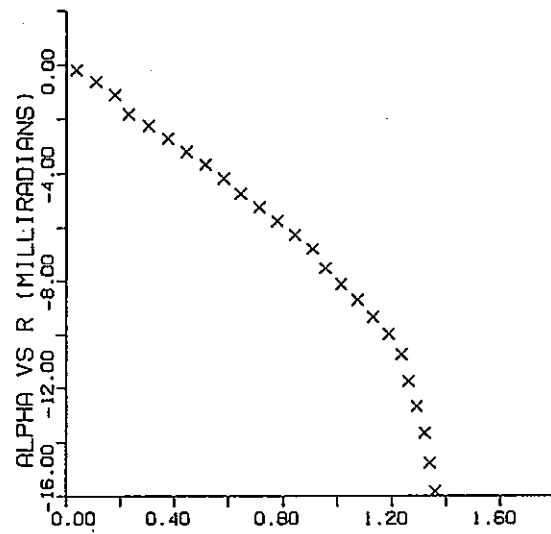
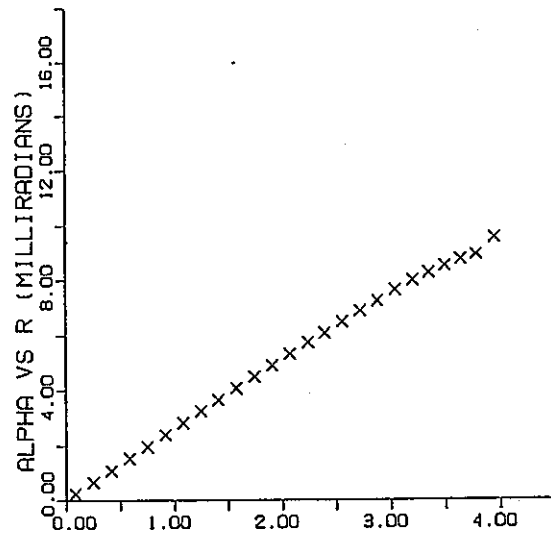
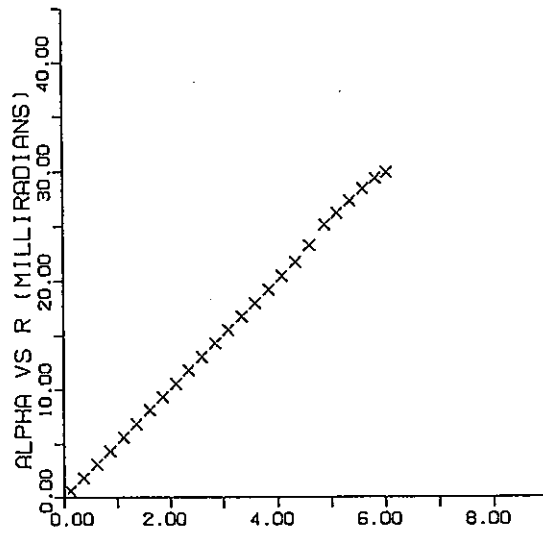
第 5.4 図 電子銃内での電子の軌道のカソード径依存性
 縦軸横軸はそれぞれ動径座標及びビーム方向を示す。(単位 mm)
 カソード径は上から 2 mm, 3 mm, 4 mm である。



第 5.5 図 電子銃出口でのビームの広がり角のカソード径依存性
 縦軸横軸はそれぞれビームの広がり角 (単位 mrad) 及び電子銃出口での動径座標
 (単位 mm) を示す。カソード径は上から 2 mm, 3 mm, 4 mm である。



第 5.6 図 電子銃内での電子の軌道の電極形状依存性
縦軸横軸はそれぞれ動径座標及びビーム方向を示す。(単位 mm)



第 5.7 図 電子銃出口でのビームの広がり角の電極形状依存性
 縦軸横軸はそれぞれビームの広がり角 (単位 mrad) 及び電子銃出口での動径座標
 (単位 mm) を示す。

付録：EGUN

1.特徴

EGUN はSLAC のW.B.Herransfeldt により開発された電子の軌道解析を計算するコードである¹⁾。特徴としては、

- 1) 2次元の相対論的電子軌道解析プログラムである。
- 2) 空間電荷効果を含む。
- 3) 境界は短形メッシュと関連して入力し差分方程式で Poisson 解を求める。
- 4) 磁場を含む解析が可能である。
- 5) 電子軌道の Starting Condition に数種類の Option がある。
- 6) 広く使用され実績のあるProgram である。

2.プログラム構成及び内容

プログラムは先ず初めに Input Data から、Mesh 情報、ポテンシャル、制限パラメータ、磁場に関する Data 及びBoundary Data を読み込み、格子点の構成を行ない、Laplace eq. の初期値を決める。引き続きElectron Trajectory condition 等のデータを読み込む。

次に、与えられた初期値からLaplace 方程式

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{A1})$$

を解き、電子銃中での電場を求める。そしてこの求めた電場中での電子の軌跡を相対論的 Lorentz 方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \vec{v} \right) = -e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{A2})$$

(電場Eは最初の iteration では、Laplace 方程式つまり空間電場を考えていない場合で解いているので、電子間に働く動径方向の静電場を考慮し、計算を行なわない。Bは Beam の自己磁場を含んでいる。)

より求める。今度はこの求めた電子の軌跡を使い、空間電荷を含んだ電子銃中での電場

をポアソン方程式

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{A3})$$

より求める。今度はこの電場を用いて電子の軌跡の計算を行なう。この様にして求めた電場を使って軌跡を計算し、次にこの軌跡を使って再び電場を求めるという作業を繰り返す。空間電荷効果を含んだ電場及び電子の軌道計算を図に出力する。プログラム構成をA.1 図に示す。またこの計算コードでは、電子の軌道の他にBeam の質を示す2つの計算結果が出力される。1つは電流密度でもう1つは最終面でのBeam の拡がり角 α

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{dr}{dz} \right) \quad (\text{A4})$$

である。EGUN ではこの値を使って、以下の式で位相空間内での面積を求めている。

$$A_x = \frac{3\pi}{2} \left[\frac{\sum_i I_i \left\{ \frac{dr_i}{dz} \left(\sum_j I_j r_j \right) - r_i \left(\sum_j I_j \frac{dr_j}{dz} \right) \right\}^2}{\left(\sum_i I_i \right)^3} \right]^{1/2} \quad (\text{A5})$$

更にこれに運動量をかけ、加速に際しても保存される量の値も計算されている。

以上述べたようにEGUN は空間電荷効果を含んだ電子の軌道に、更にBeam の性質を計算できるコードである。

3. 計算例

EGUN 付属のSample problem の計算効果（電子軌道、電流密度、角度）をA.2～4 図に示す。

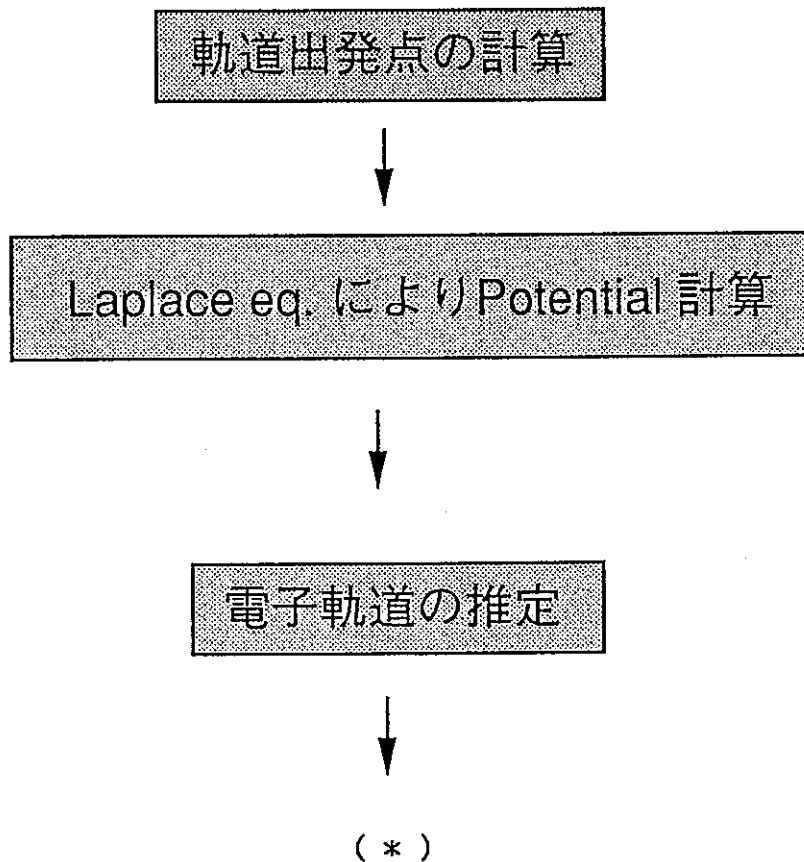
参考文献

- 1) William.B.Herrmannsfeldt , SLAC-226, Electron Trajectory Program,1979

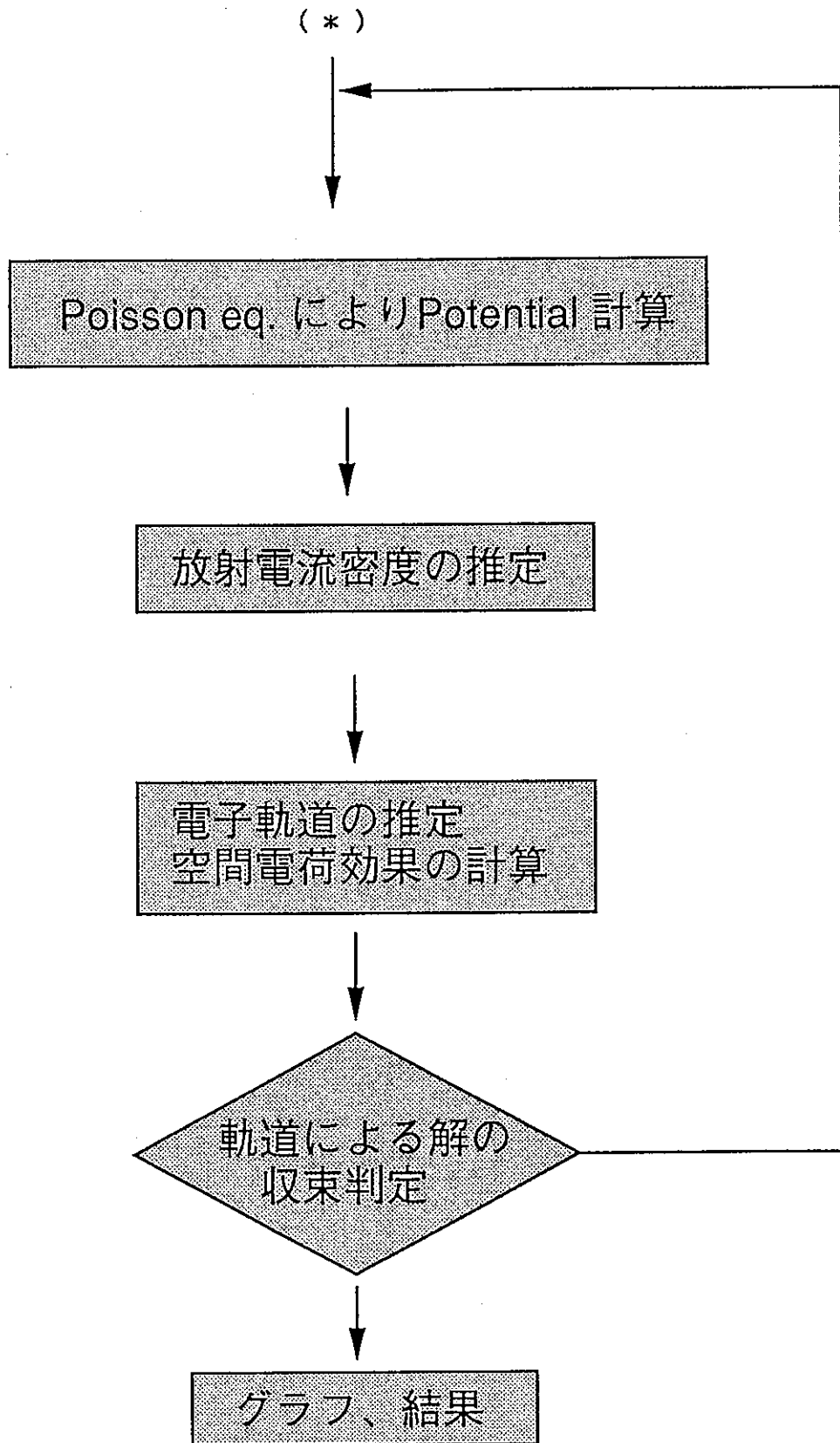
Program 構成

Input Data

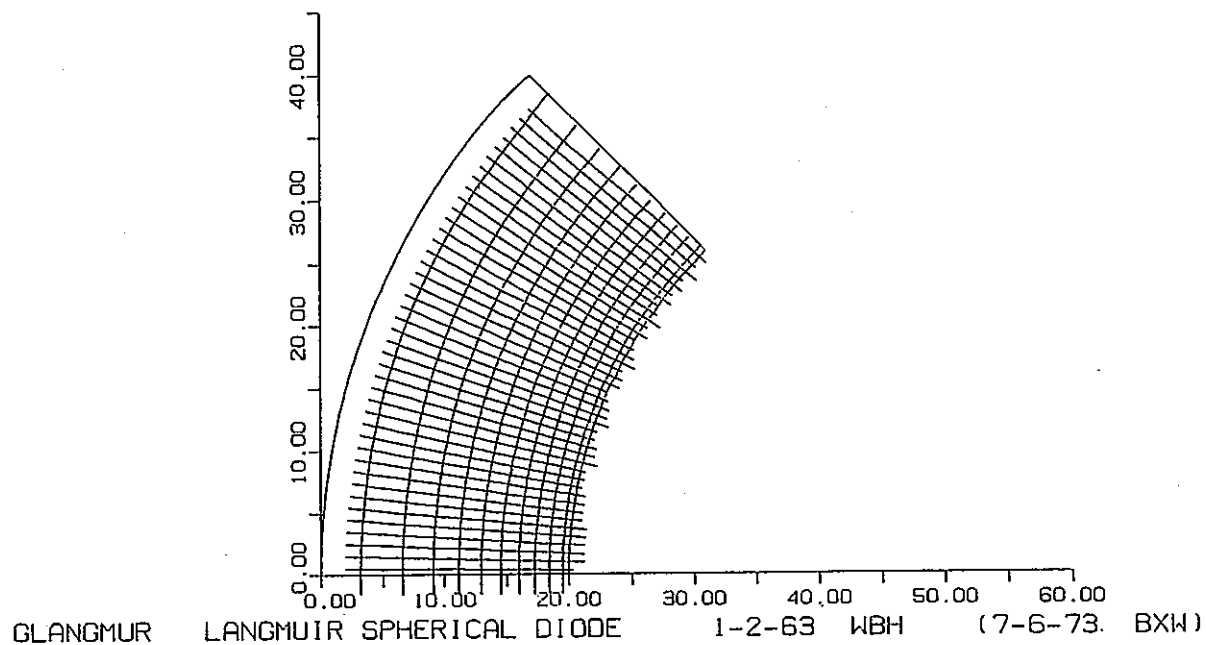
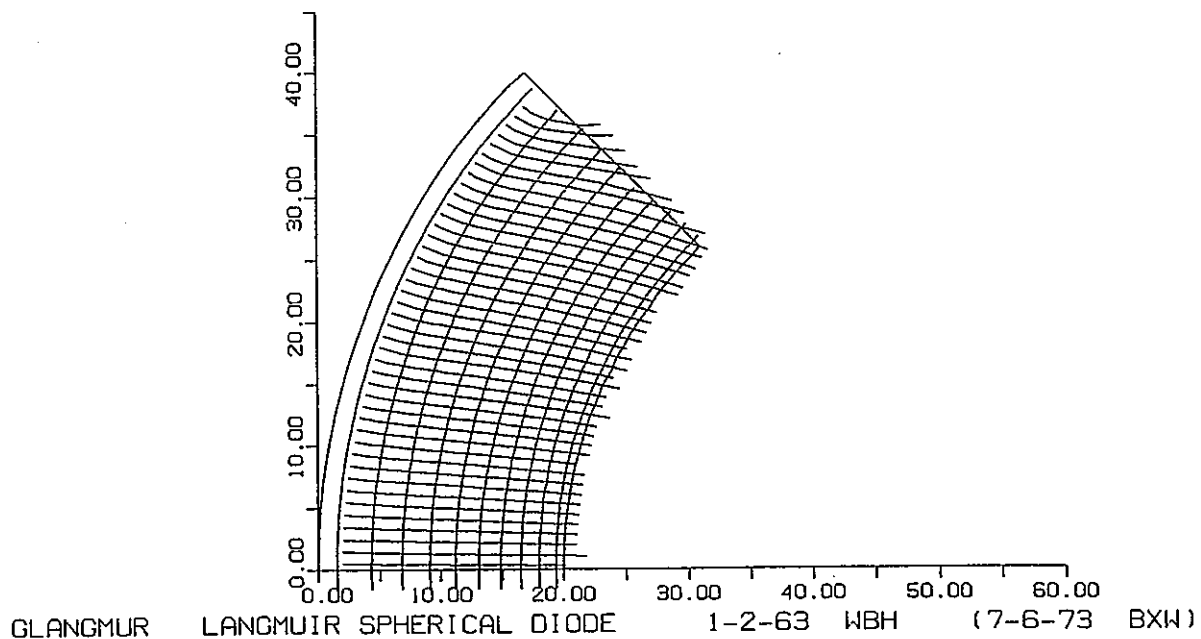
- (1) Title
- (2) Mesh 情報、Potential
- (3) 磁場に関する Data
(Bx , By) array
- (4) Boundary Data
(Potential , R , Z , dR , dZ)
- (5) Electron Trajectory の Starting Condition
Other Data



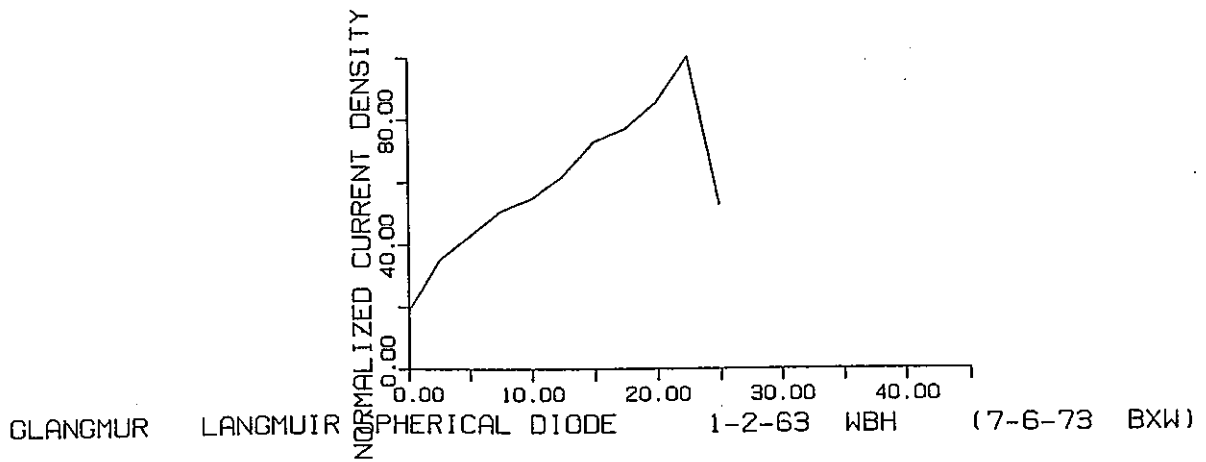
A.1 図 EGUN プログラム構成図



A.1 図 EGUN プログラム構成図 (続き)

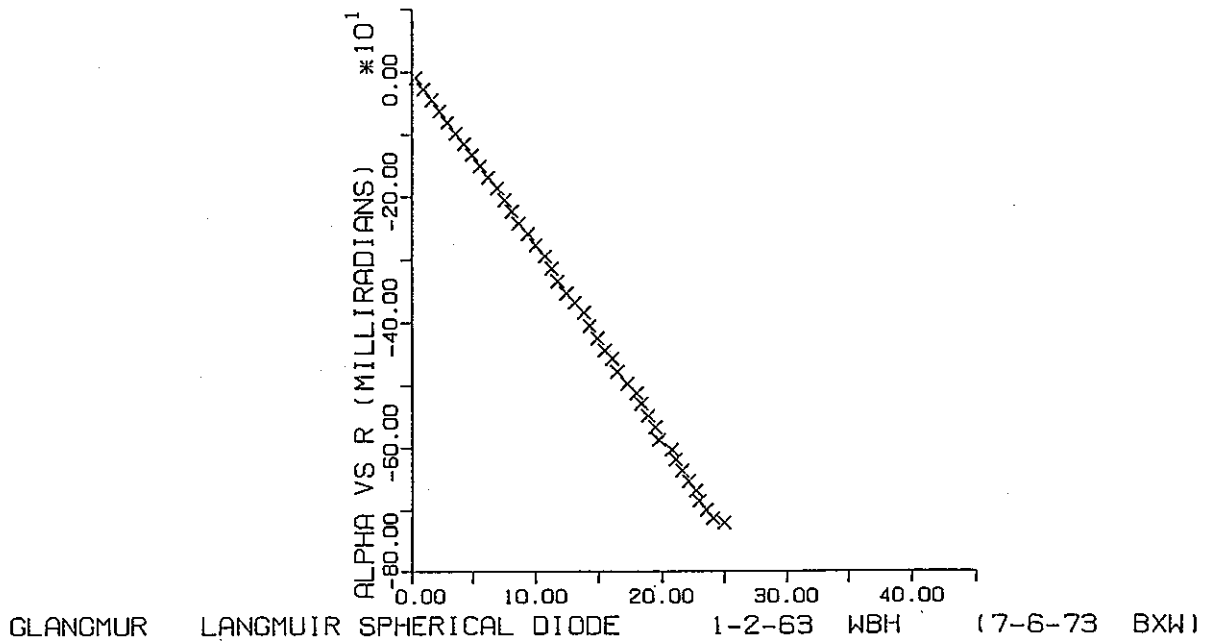


A.2 図 電子銃内での電子の軌道



A.3 図 規格化電流密度

縦軸横軸はそれぞれ規格化電流密度及び電子銃出口での動径座標を示す。



A.4 図 電子銃出口でのビームの広がり角

縦軸横軸は電子銃出口でのビームの広がり角及び電子銃出口での動径座標を示す。