

[1 a - 7]

## Development of a New Simulation Code for Electron Gun

Tsukahara D., Yamamoto Y., Ohnishi M.,  
Toku H., and Yoshikawa K.

Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto 611, Japan

### Abstract

A 2-dimensional simulation code for electron gun has been developed based on 2-D beam direct conversion simulation code KUAD, which uses finite element method (FEM) for potential calculation. It is found that the new code is very useful for analyzing large electron guns compared with the EGUN code developed at SALC.

The area near the cathode is found to be very important because electron beams have little energy and are affected by small electric fields. The new code makes it possible to divide this area more smaller meshes and to observe potential profiles, the latter helps optimization of the electrodes greatly.

Using this code, we tried to optimize the electron gun for a steady-state high power electron accelerator under development at PNC and have gotten 365mA acceleration currents and greatly improved emittance with a small modification of cathode electrode.

## 電子銃用シミュレーションコードの開発

### 1. はじめに

電子銃内部などでの電子軌道を計算するコードとしては、SLAC で開発された EGUN コード<sup>1)</sup>が有名であり、パソコンでも利用できるなど多くの利点を持っている。しかし、公開コードの最終版は 1988 年と古く、EGUN コードに用いられている等間隔正方要素による差分法を用いた計算手法は、記憶容量・計算時間との兼ね合いから、複雑な電極形状や計算領域の縦横比が大きく異なる場合など、対応の難しい場合に直面することが多々ある。そこで、大きさが可変の三角要素による有限要素法を用いたコードを開発し、EGUN コードとの比較、およびそれをを用いた電子銃の最適化を行った。

本コードは、当研究室で開発してきたイオンビームよりの直接エネルギー回収用の 2 次元シミュレーションコード (KUAD : Kyoto University Advanced DART)<sup>2)</sup>を基本にして、電子ビームを扱うために運動方程式への相対論的効果の取り込み、エミッタンスなどの評価ルーチンの追加、および電子銃特有の形状を入力するためのプリプログラムの追加により作成した。

### 2. 電子銃シミュレーションコード

計算に用いた基本方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{d(\gamma m \mathbf{v})}{dt} &= -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho / \epsilon_0 \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} \end{aligned}$$

であり、軸対称 2 次元として定式化を行い、粒子の運動はラウス関数の使用により、回転方向の運動を単純化している。計算手法としては、

- (1) 電位計算は、三角形一次要素を用いた有限要素法
- (2) 荷電粒子の軌道追跡は、三角形要素内での解析解を利用した高速軌道追跡法

を用いている。領域の要素分割には、半自動的な汎用要素分割プログラムとその入力データを作成する電子銃用のプリプロセッサプログラムを使用している。電位計算における行列解放には、行列がスパースであることからメモリーが節約できる ICCG 法を用いている。

EGUN コードとの比較すると、以下のような利点が考えられる。

(a)環状三角形一次要素による有限要素法の使用

大きさ可変の三角形要素の利用により、複雑な形状の電極形状を正確に取り扱うとともに、縦横比が大きく異なったり、空間電荷効果の著しい領域が全体に比較して小さい計算対象にも容易に対処できる。取り扱える実用的な要素数は、同一記憶容量では EGUN コードと大きく異ならないが、FEM の採用により、メッシュ数を有効に配分することができる。

(b)障害物の正確な記述

EGUN コードでは、電極を正確に記述できないことから、電極に衝突するビームが確実に処理されないため、透過電流・エミッタンスなどの計算にふらつきがあるが、本コードではこのような問題はない。

(c)等電位面の拡大詳細図の表示

本コードでは、計算モデル内の任意の部分を拡大表示させる機能を持たせることにより、電子軌道に大きな影響を与える、電極下部などでの等電位面の乱れなどを観察することが可能であり、電極形状の最適化を図れるようになった。

3. 計算対象：大強度定常電子線加速器用電子銃

計算対象には、動力炉・核燃料開発事業団で開発中の大強度定常電子線加速器用の電子銃<sup>3)</sup>を用いた。本電子銃の特色をまとめると以下のようになる。

- (1)引き出し電子ビームエネルギーは 200keV、電流制御範囲は 0.1~400mA と広い。
- (2)定常ビームを引き出すために、メッシュグリッド型ではなく、アパーチャグリッド形状の電極を採用している。
- (3)保守・テストのために、陽極と陰極部が別構造になっており、電子銃を回転することが可能である。しかし、このために電位印可領域が大きくなっている。

4. 計算結果

(1)最適設計

基本設計および最適化後における電子ビームの

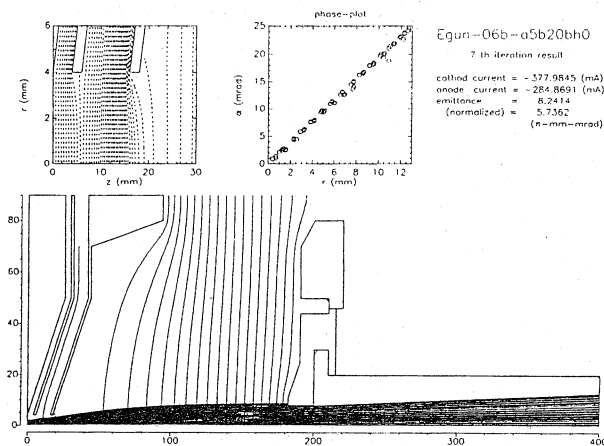


図1 基本設計での計算例

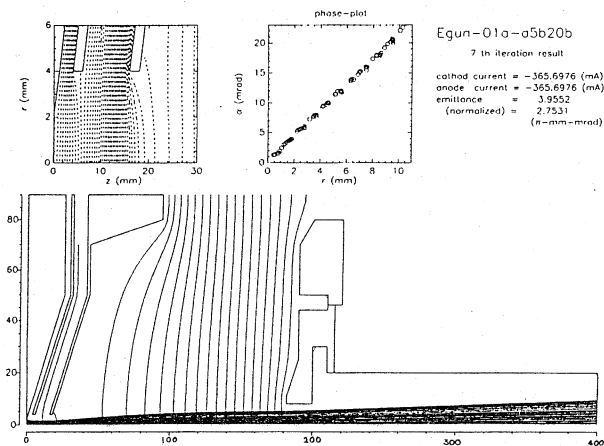
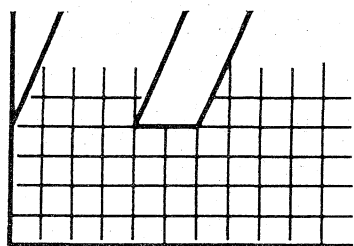


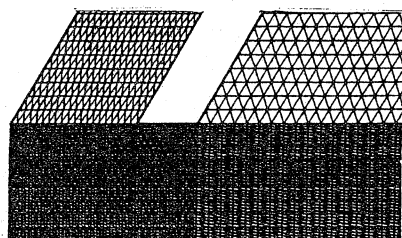
図2 電極形状の最適化後の計算例

軌道計算結果、グリッド付近での等電位面形状の拡大図およびエミッタンス図を図1・2にそれぞれ示す。目標引き出し電流は、400mAである。また、EGUN との比較のために、接点数をほぼ同じとしたときの陰極付近のメッシュ分割の比較図を図3に示す。有限要素法の利用により、陰極付近での分割数は数10倍になっている。

図1より、基本設計では、電子ビームへの収束力が不十分でありビームの大半がアノードに衝突していることがわかる。収束力を増加するためにグリッド電極の間隔、傾斜角度、印可電圧の増大などを調べた結果、陰極引き出し面での電界形状を制御することが最も有効であることが判明し、図2のように陰極付近の電極形状を変えた結果、365mAの引き出し電流を得ることができ、エミッタンスも大幅に引き下げられた。



(a) EGUN



(b) New code

図3 陰極付近のメッシュ分割の比較

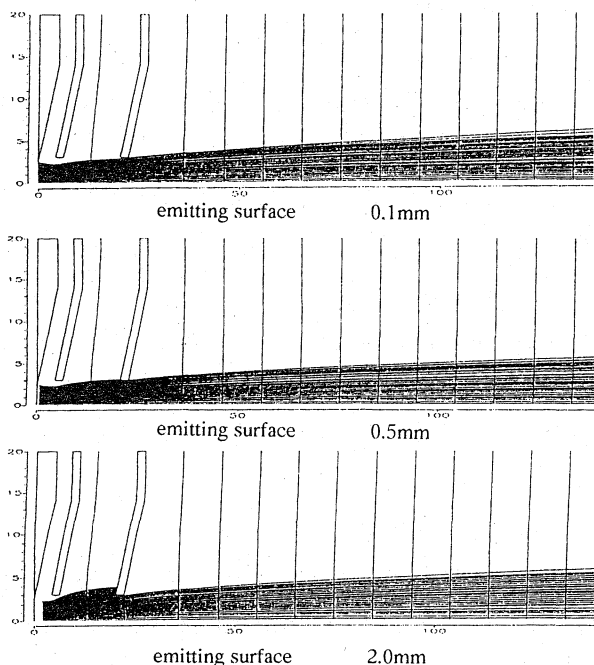


図4 電子放出面の位置による電子軌道変化

(2) 電子放出面の影響

電子軌道の計算は、陰極表面より1メッシュ分程度離れた位置から計算を始めるのが通例であるが、この付近の分割数と放出面の位置による計算結果への影響を調べてみた。

図4に開発したコードを用いて陰極付近を十分に細かく分割した状態で、電子放出の位置を変化させた時の電子ビーム軌道の変化を示す。電子軌道が

放出面の位置により大きく変化していることが分かる。これは、図5に示すように、電子放出面が陰極より離れると陰極付近の電極形状により作られる収束力の効果が計算に反映されないことによると考えられ、等電位面形状の観察と電子放出面の選択が重要であることを示している。

5. まとめ

有限要素法を電子銃シミュレーションコードを開発した。SLACのEGUNコードと比較検討した結果、電界印可領域の大きな電子銃の解析では少ない接点数で良い制度の計算ができること、また加速部におけるより詳細な情報を表示することにより、形状の最適化が容易になることを確認した。

参考文献

- [1] W.B. Herrmannsfeldt, EGUN-An Electron Optics and Gun Design Program (1988).
- [2] Y. Yamamoto, et al., "Development of a two-dimensional Simulation Code (KUAD) including Atomic Processes for Beam Direct Energy Conversion," Proc. 12<sup>th</sup> Symp. Fusion Engineering, 1222, IEEE(1987).
- [3] 山崎良雄、野村昌弘、"大強度CW電子線加速器の電子銃の開発"、日本原子力学会1994年秋の大会予稿集、H43(1994).
- [4] 塚原大輔、"有限要素法を用いた電子銃の特性解析"、卒業論文、京都大学工学部電気工学第二学科(1994).

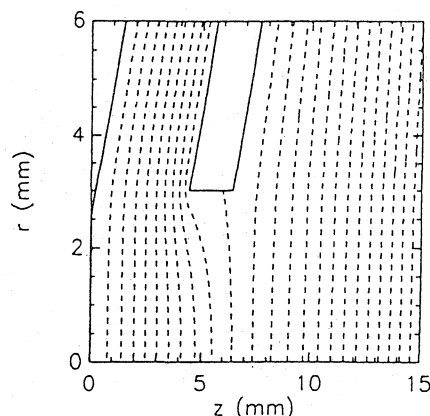


図5 陰極付近の電位分布