

EMITTANCE COMPENSATION SOLENOID OF A DC PHOTO-CATHODE ELECTRON GUN

Ryoji Nagai^{1(A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Hokuto Iijima^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Nobuhiro Kikuzawa^{A)}, Eisuke Minehara^{B)}

^{A)}Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)}Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

An emittance compensation solenoid magnet is designed for a DC photo-cathode electron gun. The DC gun is now in fabrication at JAEA for an energy-recovery linac (ERL) light-source. The ERL light-source requires very low emittance electron beam to generate coherent X-rays. In order to produce the very low emittance electron beam from the DC gun, a focusing lens is indispensable to compensate the linear emittance growth. A solenoid magnet is employed for the emittance compensation lens. The solenoid magnet consists of a main coil, pure iron yoke, and a backing coil. The compensated emittance is estimated less than 0.6 mm-mrad in the bunch charge of 77pC by PARMELA simulation.

DC光陰極電子銃のためのエミッタンス補償用ソレノイド

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック(ERL)は次世代の放射光源用加速器として世界各国で開発計画が進められている加速器である。ERLの大きな特徴はリニアックの特徴を生かし、フェムト秒バンチ長、回折限界以下の超低エミッタンスの電子ビームを生成できる点にある。この電子ビームにより発生される放射光はフェムト秒、高コヒーレンスであり、これまでの放射光では実験が困難であった生物、化学分野のフェムト秒分解能での実験が期待されている。

ERLでは蓄積リングと異なり、電子ビームの性能は電子銃を含む入射器の性能に大きく左右される。従って、電子銃では十分に小さなエミッタンスの電子ビームを引き出す必要がある。電子銃から引き出される電子ビームのエミッタンスの下限を決めているのは陰極から引き出された電子の持つ余分なエネルギーである。従って、高温で動作する熱陰極や負性電子親和力(NEA)でない光陰極では自ずとエミッタンスの下限が大きくなってしまふので、ERL用の電子銃ではNEA光陰極以外の解はない。

陰極に入射するレーザー光の時間方向プロファイルが平坦ではない時には空間電荷力により、時間スライスごとにx-x'位相空間分布がずれてしまうためにエミッタンスが大きくなる。幸い、このエミッタンスの増大は収束レンズで補償できる^[1]。この補償用のレンズは粒子の位相空間分布が時間方向で混ぜ合わさる前に配置する必要がある。このエミッタンス補償用のレンズとしてソレノイド電磁石を採用した。現在調整中の250kV光陰試験用電子銃^[2]でのソレノ

イド電磁石の位置と強度の最適化をParmela^[3]を用いて行った。ソレノイド電磁石を設計・製作し、得られるエミッタンスを求めた。ソレノイド電磁石のヨーク等の設計はELF/Magic^[4]で行った。この設計を基にPoisson^[5]で計算した磁場分布をParmelaに取り込んでエミッタンスの計算を行った。

2. ソレノイドの位置・強度の最適化

エミッタンス補償のための最適なソレノイドの位置と強度をParmelaで求めた。ただし、ソレノイド磁場については長さ100mmとしてParmelaのsolenoid要素を用いた。250kV光陰試験用電子銃のウェネルト、アノード電極は平行平板でギャップは40mmである。この間の電場をPoissonで求めてParmelaの計算に反映している。陰極表面でのビーム径は最も小さいエミッタンスが得られるものとした。径方向の分布はほぼ矩形とし、時間方向の分布はガウス分布の裾を切り落とした形状とした。

時間方向プロファイルをガウス分布としているので、時間スライスごとに空間電荷力による発散が異なるためにx-x'位相空間での分布に差が生じる。発散が大きい方の分布と発散が小さい方の分布はドリフトしていく間にどんどん離れていく、即ちエミッタンスが増大する。これを補償するには、収束レンズにより位相空間上で分布を回転させ発散の絶対値の大小関係を入れ替え、ある距離ドリフトすると二つの分布が重なる点が現れる。この二つの分布を直線で表した時の補償の様子を図1に示す。これがlinear emittance growthのレンズによる補償である。

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

従って、レンズの強度によってレンズからの補償点までのドリフト距離が変わってくる。実際の加速器で補償をする場合にはある程度加速してスライスがずれないエネルギーになるところを補償点とするようにレンズの強度を調整する必要がある。

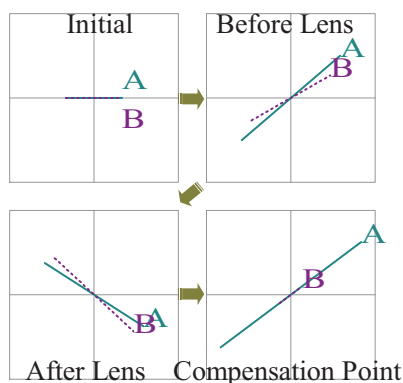


図1 : linear emittance growthの補償

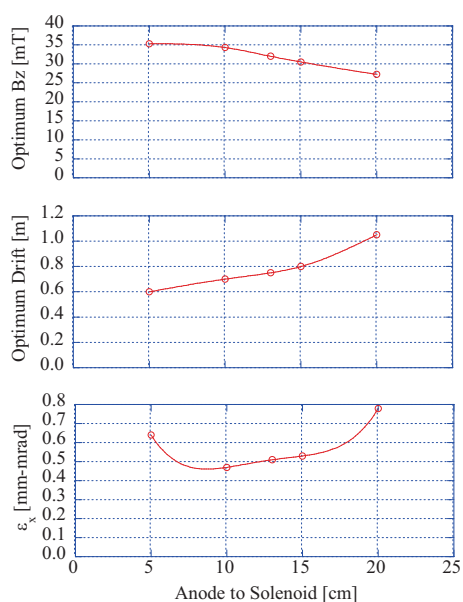


図2 : ソレノイドの最適位置と強度

linear emittance growth だけならエミッタンスは完全に補償できるはずであるが、現実には nonlinear emittance growth のために、完全に補償できない。そこで、アノード電極からソレノイド入口までの距離を変えたときに得られる最適磁場強度、最適ドリフト距離と得られるエミッタンスを求めた。その結果を図2に示す。アノード電極からソレノイドの入口までの距離は10cm付近で磁場強度は30mT程度が最適であることが分かる。

3. ソレノイド電磁石の設計および製作

250kV光陰試験用電子銃においてソレノイドをアノード電極から10cm付近に配置すると、ICF253フランジをソレノイドの中に通す必要があり、ソレノイドのボア径は300mm程度必要となる。このように

大きなボア径では例えヨークをつけたとしても陰極表面への漏れ磁場は避けられない。陰極表面の磁場による規格化エミッタンスは

$$\epsilon_{n,rms} = \frac{er_0|B_{z0}|}{8m_0c}$$

と表される^[6]。ただし、 r_0 はビーム半径、 B_{z0} は陰極表面の磁場である。従って、0.1mm-mrad以下の規格化エミッタンスの電子ビームを得ようとするならば陰極表面でのビーム半径を1mmとすると磁場は1mT程度以下にする必要がある。

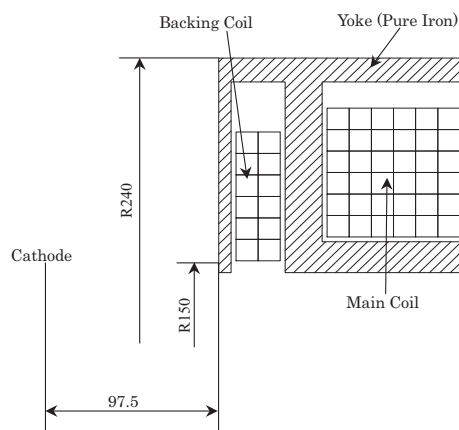


図3 : ソレノイド電磁石の形状

そこで、ソレノイド電磁石にバックング・コイルをつけて漏れ磁場を打ち消すことにした。また、ソレノイドを配置できる箇所は他のチャンバとの干渉を避けるためにアノード電極から10cmの位置(最適位置)より近い場所になってしまう。そこで、陰極への漏れ磁場を減らす目的と磁場の位置を下流側へずらすために図3に示すように横開きのヨークを採用することにした。中央部ヨークおよび主コイルの内側のヨークでは磁束の集中が多いので磁性体の飽和を避けるために太くしてある。ヨークの材料は純鉄とし、ELF/Magicを用いて磁場の分布を求めた。この形状で30mT程度以上のピーク磁場を得るためには、主コイルで10000AT程度必要となる。このコイルの面積でこの電流を流すと発熱が大きいので、除熱の問題からホロー・コンダクタを採用した。図のように主コイルは36turn、バックング・コイルは12turn、主コイルの最大励磁電流は280Aとした。主コイルを280Aで励磁し、バックング・コイルで補正した時の磁場分布の様子(ELF/Magic、Poissonの計算結果と実測)を図4に示す。陰極を出た後もある程度エネルギーが上がるまで磁場が無いほうがよいので、陰極とアノード電極の中央で磁場がゼロになるようにバックング・コイルを調整した。この時、陰極表面での磁場は計算、実測ともに約0.4mTであった。ヨーク中の最大磁場1.32T、比透磁率2586でありヨークで飽和が起きていないことをELF/Magicで確認している。主コイルの励磁電流を変えたときのバックング・コイルの励磁電流とピーク磁場の関係を図5に示す。図4、5ともに、計算した磁場強度と実測値がほぼ一致していることから、

製作の不具合が無いことが分かる。また、図5から磁性体の飽和などの影響がなく直線的に励磁できていることが分かる。

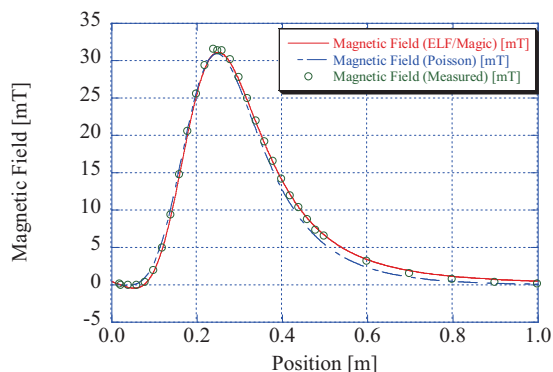


図4：ソレノイド電磁石の磁場分布

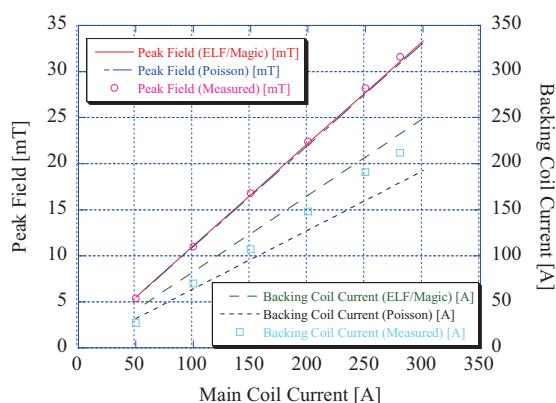


図5：主コイルの励磁電流に対するピーク磁場強度とバックリング・コイルの励磁電流

4. エミッタンスの評価

Poissonで計算した磁場分布を用いて、Parmelaで補償後得られるエミッタンスを電荷量77pCと7.7pCの場合について求めた。それぞれの場合の規格化エミッタンスとビームサイズの変化の様子を図6に示す。電荷量7.7pCの場合にはピーク磁場25.1mTで規格化エミッタンス0.11mm-mrad、電荷量77pCの場合にはピーク磁場23.8mTで規格化エミッタンス0.59mm-mradが得られた。

ソレノイドを設置する際の精度を明らかにするために、角度および位置ずれによるエミッタンスの変化を計算した。その結果を図7に示す。エミッタンスの増加を1%程度以下にするために必要な位置精度と角度精度はそれぞれ、0.3mmと5mradであることが分かる。この精度は3次元測距器で設置可能な精度である。図7の等高線が斜めに傾いているのは、横開きヨークを採用したために、磁場分布の中心がソレノイドの機械中心に対して下流側にずれているためである。

5. まとめ

DC光陰極電子銃のためのエミッタンス補償用ソレノイド電磁石を設計・製作した。このソレノイドに

より0.6mm-mradのエミッタンスを電荷量77pCの電子ビームで得られることをParmelaのシミュレーションで示した。

電子銃の電極形状についての最適化は未だされておらず、電極形状の最適化でさらに低いエミッタンスを得られることが期待される。

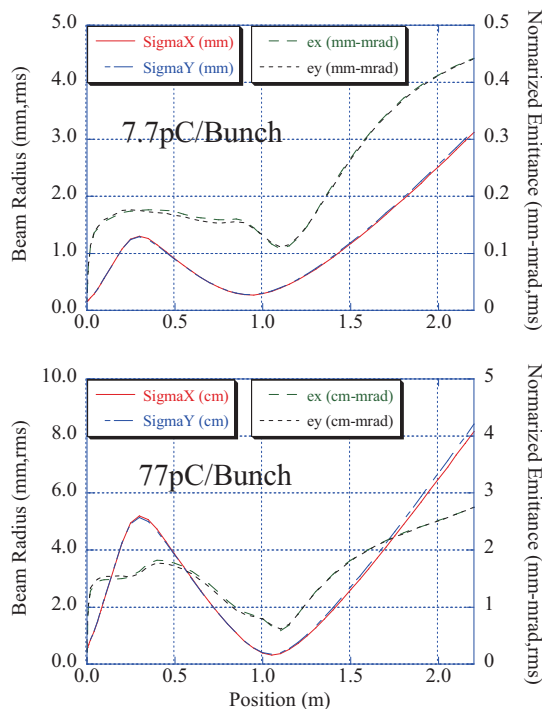


図6：ソレノイドによるエミッタンス補償

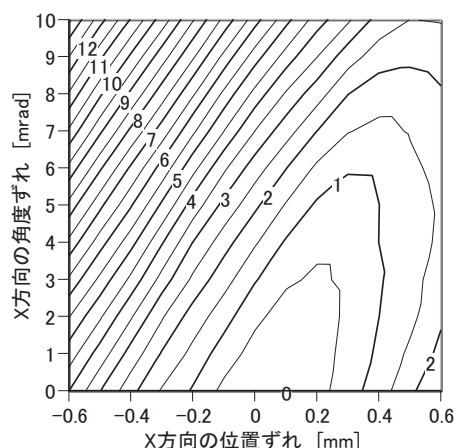


図7：ミスアラインメントの影響

参考文献

- [1] B.E. Carlsten, Nucl. Instr. Meth. **A285** (1989) 313-319.
- [2] 飯島北斗、他、"原子力機構における250kV-50mA フォトカソードDC電子銃開発の現状"、本論文集。
- [3] Parmela ver. 3.40; L. M. Young, LA-UR-96-1835.
- [4] <http://www.elf.co.jp/product/elfnagic.html>
- [5] Poisson ver. 7.16; J.H. Billen, LA-UR-96-1834.
- [6] D.T. Palmer, et al., Proc. of the 1997 PAC (1997) 2843-2845.