

MAGNETIC EMITTANCE CORRECTION FOR JAEA-250kV PHOTO-CATHODE ELECTRON GUN

Ryoji Nagai[#], Ryoichi Hajima, Nobuyuki Nishimori
JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

ERL-based next-generation light-sources require an electron beam with an extremely small emittance to generate high brightness, coherent and ultra-short X-rays. In order to satisfy such requirement, the NEA-GaAs photo-cathode DC electron gun has been employed and the development is in progress. It is necessary to take account of so-called magnetic emittance to obtain the electron beam with an extremely small emittance. We have utilized a backing-coil to suppress leakage magnetic field by a solenoid lens on the surface of the cathode. The magnetic emittance correction has been successfully demonstrated in JAEA-250kV photo-cathode electron gun. In this paper, we present details of the magnetic emittance correction with the backing-coil.

JAEA-250kV 光陰極電子銃における磁気エミッタンス補償

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) はこれまでにない高輝度かつ高平均電流の電子ビームを高繰り返しで発生するための新型の電子線加速器であり^[1]、高出力自由電子レーザー、次世代 X 線放射光源、高フラックス γ 線源、高出力テラヘルツ源のような次世代光源を実現するための加速器として期待されている。

ERL で得られる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、電子銃では極めて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るもののひとつは電子の熱運動量および余剰エネルギーによるエミッタンスで熱エミッタンスと呼ばれている。これを小さくするために負性電子親和力 (NEA) を持つ光陰極が採用されている^[2]。この他に、エミッタンスの下限を決めるものとして、陰極表面の磁場による磁気エミッタンスが考えられる。陰極から引き出された電子ビームの空間電荷力によるエミッタンス増大を補償^[3]するためにソレノイドレンズが用いられる。このソレノイドレンズの陰極表面への漏れ磁場により磁気エミッタンスが生ずる。

JAEA-250kV 光陰極電子銃^[4]では、ソレノイドレンズの漏れ磁場を打ち消し、陰極表面の磁場をゼロにすることで磁気エミッタンスを補償するために、ソレノイドレンズにバックリングコイルを設けている。Parmela のシミュレーションとエミッタンスの実測により、バックリングコイルによる磁気エミッタンス補償を実証できたので、その結果の詳細について報告する。

2. 熱エミッタンスと磁気エミッタンス

電子銃から引き出される電子ビームの規格化され

た rms 熱エミッタンス ε_{th} は、よく知られているように、実効的な温度 T を用いて、

$$\varepsilon_{th} = \sigma \sqrt{\frac{k_B T}{m_e c^2}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで σ はカソードに照射するレーザーの rms スポットサイズ、 k_B はボルツマン定数、 m_e は電子の静止質量、 c は光速である。実効的な温度 T を決める要因としては、陰極の実際の温度、電子の余剰エネルギー、励起した電子の熱化過程などが考えられる。従って、陰極を高温にして電子を励起する熱陰極に対して、レーザーで電子を励起する光陰極の方がより小さな熱エミッタンスの電子ビームを得られる。電子が真空中へ放出される際にエネルギー障壁を超える必要のない NEA 光陰極による電子ビームでは引き出された電子の余剰エネルギーを最小に出来るので、実効的な温度が室温程度の熱エミッタンスとなる。

磁気エミッタンスとは陰極表面へのソレノイドの漏れ磁場によるエミッタンスである。陰極から引き出された電子ビームのエミッタンス補償のために通常ソレノイドレンズが用いられる。ソレノイド磁場のような軸対称磁場中の電子の正準角運動量は保存され (ブッシュの定理)、ERL 光源の光源付近ではソレノイド磁場はないので、陰極表面の磁場により次式で表わされる rms 磁気エミッタンス ε_{mag} を生じる^[5]。

$$\varepsilon_{mag} = \sigma^2 \frac{e|B_{z0}|}{2m_e c} \quad (2)$$

ここで、 e は電気素量、 B_{z0} は陰極表面の鉛直方向磁場強度である。一方、イオンクーラーのようなビーム利用においては電子ビームを利用する付近でソレ

[#] nagai.ryoji@jaea.go.jp

ノイド磁場があり、発生する電子ビームにあらかじめ磁化を与えておく必要がある。このような電子ビームを magnetized beam と呼び、磁気エミッタンスに相当する量を magnetization と呼んでいる^[6]。

熱エミッタンスと磁気エミッタンスの式から陰極表面の磁場をどの程度以下にする必要があるかを考える。300K 相当の熱エミッタンスが実現され、陰極表面での rms スポットサイズ 1mm の場合に磁気エミッタンスをこの 1/10 以下にしようとする、陰極表面の磁場を 0.07mT 以下、つまり地磁気程度以下にする必要がある。そこで、陰極表面のソレノイドの漏れ磁場を打ち消すために、ソレノイドレンズにバックリングコイルを設けた^[7]。ソレノイドレンズは図 1 に示すような形状であり、それぞれのコイルにはホローコンダクタを用いており、メインコイルが 36 ターン、バックリングコイルが 12 ターンである。

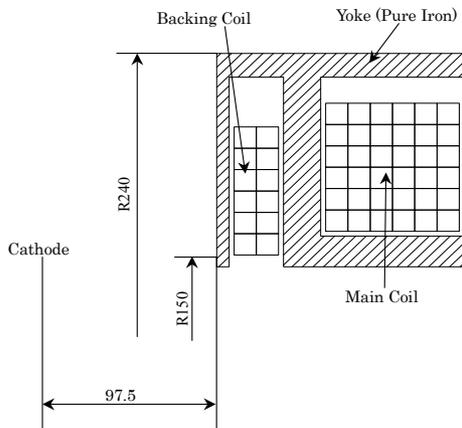


図 1: ソレノイドレンズの構造

3. エミッタンスの計測と数値計算

3.1 スリットスクリーン法によるエミッタンス計測

図 2 に JAEA-250kV 光陰極電子銃とビームラインの構成を示す。電子銃は直流高電圧電源、セラミック管などを収納している高電圧タンク、光陰極を調製するためのプリパレーションチャンバ、高電圧を印加して電子ビームを発生するメインチャンバなどで構成される。光陰極には NEA-GaAs を用いており、今回の計測時の量子効率は励起波長 633nm に対して 0.3%であった。ビームラインの要素としてはエミッタンス補償用のソレノイドレンズ、エミッタンス計測用のスリットとスクリーン、電流を計測するためのファラデーカップがある。ソレノイドレンズはバックリングコイルおよびヨーク付きであり、陰極の近傍に配置されている。ソレノイド磁場のピーク位置は陰極から約 25cm であり、陰極表面の磁場はバックリングコイルにより完全に消すことができる。スリットは陰極から約 1m 離れた位置にあり、幅 50 μ m である。スクリーンはスリットから約 1.4m 離れた位置にあり、厚さ 0.1mm の YAG(Ce)を使用し

ている。表面には電子ビームによる帯電を防止するために、薄くアルミニウムを蒸着してある。

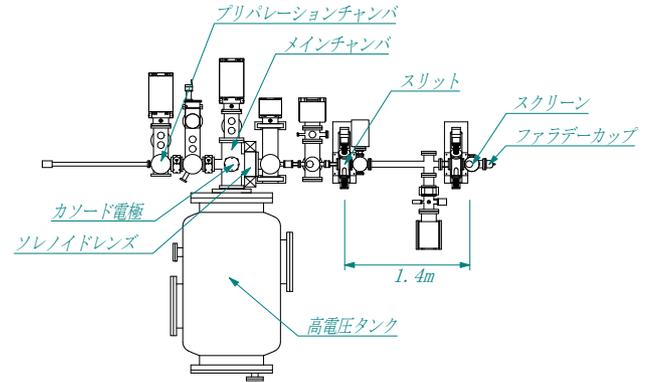


図 2: JAEA-250kV 光陰極電子銃とエミッタンス計測のためのビームライン

スリットをスキャンしながら、スクリーン上でのビームサイズを計測することで、電子ビームの位相空間分布を計測し、エミッタンスを算出した。1回の計測時間は 7 分程度であり、ステップ 70 μ m で、約 6mm の範囲をスキャンした。CCD カメラでスクリーン像を観測しているが、スクリーン像にはごましおノイズと呼ばれるノイズがあり、これをメディアアンフィルタ^[8]で除去した。また、位相空間分布からエミッタンスを算出する際にはバックグラウンドノイズによる影響を避けるため SCUBEE^[9]法を用いた。

加速電圧 180kV、電流 1 μ A 以下の電子ビームについて、ソレノイドレンズのメインコイルの励磁電流を 105A として、バックリングコイルの励磁電流、レーザーのスポットサイズを変えてエミッタンスを計測した。この計測ではレーザーの陰極表面でのスポットサイズを正確に知っておく必要がある、陰極と等価な位置に CCD カメラを設置し、スポットサイズを変えるための凸レンズの位置に対するスポットサイズの校正を行った。その結果を図 3 に示す。ほぼ設計通りにスポットサイズを変えることができ、陰極表面ではほぼガウス分布形状のプロファイルが得られた。

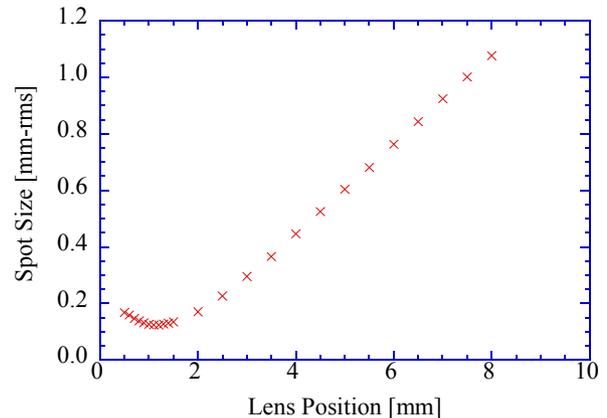


図 3: レンズ位置に対するスポットサイズ

3.2 Parmela によるエミッタンスの算出

Parmela を用いて計測と同じ条件でのエミッタンスを数値計算により算出した。電子銃の電界分布とソレノイドレンズの磁場分布については Poisson を用いて計算し、その結果を Parmela に取り込んで粒子の軌道計算を行った。ビーム電流は十分に小さいので空間電荷力の影響は考慮していない。陰極を照射しているレーザーのプロファイルは、ほぼガウス分布であったので、Parmela での初期の電子分布もガウス分布とし、陰極の外径は 15mm であるので、15mm 以上の部分は切り落とした。

4. 結果

熱エミッタンスはスポットサイズに比例しており、磁気エミッタンスはスポットサイズの 2 乗に比例している。従って、磁気エミッタンスの影響はスポットサイズが大きいほど顕著に現れる。そこで、スポットサイズを設定可能な最大の大きさにして、バックアップコイルの励磁電流に対するエミッタンスの変化の様子を観測した。スポットサイズ 1.076mm-rms で、バックアップコイルの励磁電流に対するエミッタンスの変化の様子を図 4 に示す。×は計測値で、○は Parmela の計算によるものである。エミッタンスの最少となるバックアップコイルの値が計測と計算で異なっているが、エミッタンスの最小値はほぼ一致していた。バックアップコイルの励磁電流に対する変化の様子の差はソレノイドレンズのヨークの B-H 特性によるものと思われる。

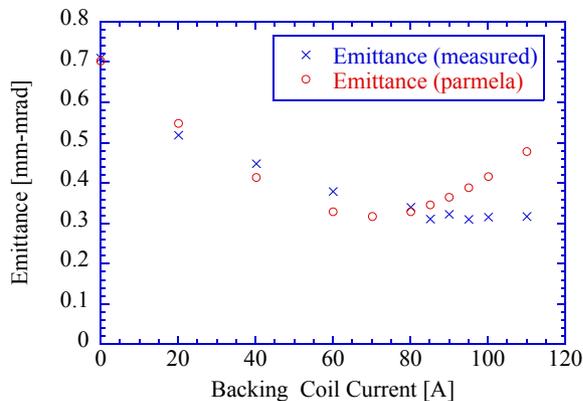


図 4: バックアップコイルの励磁電流に対するエミッタンスの変化

図 4 に示す結果から磁気エミッタンスが補償されていることが分かる。しかし、この結果だけでは、磁気エミッタンスが完全に補償され、熱エミッタンスだけになっているか明確でない。そこで、エミッタンスが最小になった条件で、スポットサイズに対するエミッタンスの変化を計測および計算した。その結果を図 5 に示す。

赤はバックアップコイルを励磁したもの、青は励磁してないものであり、×は計測値で、○は計算値である。図 5 から分かるように計測値と計算値は、ほぼ一致している。バックアップコイルを励磁した場合のスポットサイズに対するエミッタンスの変化が線

形であることから、磁気エミッタンスが完全に補償されていることが分かる。また、それぞれの計測値について、フィッティングして熱エネルギーと陰極表面磁場を求めたところ、それぞれ 41.6meV と 2.0mT となった。今回計測された、熱エネルギーは B. M. Dunham らの結果^[10]とほぼ一致する値である。また、陰極表面磁場についても Poisson の計算結果は 1.82mT であり、ほぼ一致している。

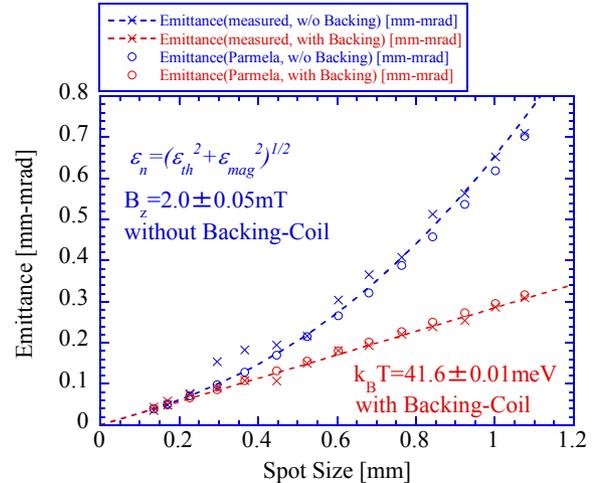


図 5: スポットサイズに対するエミッタンスの変化

5. まとめ

JAEA-250kV 光陰極直流電子銃において、エミッタンス補償用のソレノイドレンズの漏れ磁場による磁気エミッタンスの存在とバックアップコイルによる磁気エミッタンスの補償を実測および数値計算において実証できた。

ERL 放射光源で求められるような高輝度電子銃においては陰極表面への漏れ磁場に十分に配慮する必要があることが実測および数値計算により示され、陰極表面の漏れ磁場は地磁気程度以下にする必要があることが分かった。また、ソレノイドレンズの漏れ磁場がある場合でも、バックアップコイルで消磁することで、磁気エミッタンスを完全に補償できることが分かった。

参考文献

- [1] R. Hajima, Proc. of the 2009 Part. Acc. Conf., 97-101 (2009).
- [2] I. V. Bazarov, et al., J. Appl. Phys., 103, 054901 (2008).
- [3] B.E. Carlsten, Nucl. Instr. Meth. A285, 313-319 (1989).
- [4] H. Iijima, et al., Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 897-899 (2009).
- [5] D.T. Palmer, et al., Proc. of the 1997 Part. Acc. Conf., 2843-2845 (1997).
- [6] X Chang, et al., BNL-73192-2004-CP-CP (2004).
- [7] R. Nagai, et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 673-675 (2009).
- [8] T. Hamamura and B. Irie, Proc. of FIT2002, 141-142 (2002).
- [9] M. P. Stockli, R. F. Welton, and R. Keller, Rev. Sci. Instrum., 75, 1646-1649 (2004).
- [10] B. M. Dunham, et al., Proc. of the 1996 Part. Acc. Conf., 1030-1032 (1996).