

ELEMENT R&D FOR X-RAY GENERATOR ELECTRON GUN

Satoshi Ohsawa^{1,A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Masafumi Tawada^{A)},
Yasufumi Hozumi^{B)}, Kouichi Kanno^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory

^{B)} Graduate Univ. for Advanced Studies

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{C)} AET Japan Inc., 1-2-3 Manpukuji, Azabu-ku, Kawasaki, Kanagawa 215-0004

Abstract

A new electron-gun system is under development in order to increase X-ray brightness from a rotating target. In commercial X-ray generators, an electron beam hits a target at outside. Owing to deformation by centrifugal force, there has been a limit on the electron beam intensity. In order to overcome this difficulty, our new system focuses electrons inside of a rotating target. It has an advantage in that a heated-up point has support back side against centrifugal force. It is expected that this merit makes it possible to raise beam brightness to give stronger X-rays with brightness more than 10 times higher. We succeeded in focusing an electron beam of 60keV, 73mA as small as $2.1 \times 0.24 \text{ mm}^2$.

X線発生用電子銃の要素開発研究

1. はじめに

X線発生装置は市販されており、研究室で広く用いられている。その輝度を1桁上げることは出来ないか？ この夢を実現すべく坂部知平氏はコの字型回転対陰極を発案し、その内側に電子ビームを照射することにより、X線の輝度を1桁上げることが出来ると提案した。

この案を実現するためには、コの字型回転対陰極の内部に電子ビームを集束するための小型の集束系が必要である。そこで考えられたのが、小型の永久磁石で180度ビームを偏向し、同時にエッジもしくは勾配磁場で集束する案である。この案の利点は、短い焦点距離で強く集束することにより、ビームサイズを小さくすることが可能であることである。

本研究の課題は、180度偏向磁石を用いた集束系の性能を実験的に評価することである。昨年度後半に科学技術振興機構の委託を受け、ビーム集束系の具体的な設計と製作を始め、現在ビームを用いた性能試験を行っている。

2. 装置の構成

この装置は、電子銃とビームの集束系、及び光学測定系の3つの部分から成る。電子銃から出たビームをまず直径3mmのコリメーターで切り出し、磁気レンズ (ML) と四極磁石で集束した後、偏向磁石で180度曲げ、固定の標的に当てる。その

際、偏向磁石のエッジ集束を用いて、y方向のビームサイズを極小にする。ステアリングコイルは、入射角を変え、エッジ集束の強さを調整するのに用いる。標的に発生した特性X線を、ピンホールカメラの原理を用いた光学測定系で観測し、標的上の電子ビームサイズを測定する。

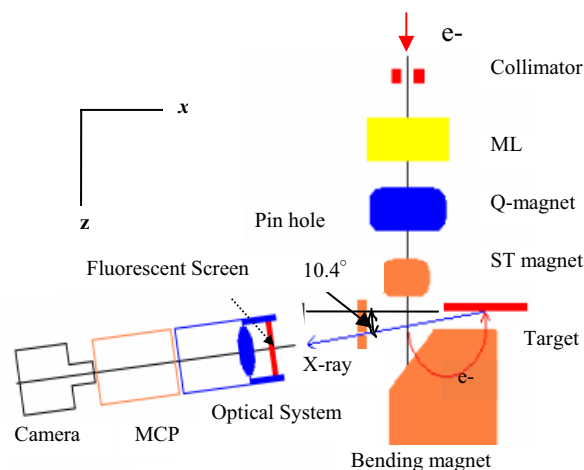


図1: X線発生装置と光学測定系の構成図

3. 実験の経緯と測定結果

3.1 実験の経緯

標的での発熱を避けるために、実験にはマイクロ秒のパルスビームを用いることにした。しかし、予

¹ E-mail: satoshi.ohsawa@kek.jp

備的な実験の結果、ピンホールの径を10 μm まで小さくすると、ビーム像の輝度不足になることが判明した。この問題はマイクロチャンネルプレート(MCP)を導入し可視光を増幅することで解決した。

また180度偏向磁石の漏れ磁場の影響で、その磁場強度を上げると、ステアリングコイルの磁場強度が不足し、最適な入射角が得られないという問題が発生した。これは自作したコイルの巻き数不足によるもので、コイルを再製作して解決した。

3.2 電子ビーム像の測定例

電子ビーム像をピンホールカメラの原理で測定している^[1]。銅板標的の表面で発生する特性X線を用いているので、絶縁物のスクリーンを用いた可視光による測定よりもにじみが少ない利点がある。

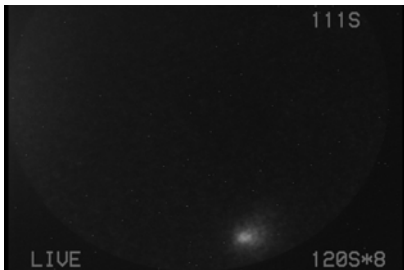


図2：光学測定系で観測した蛍光板上のX線スポット像

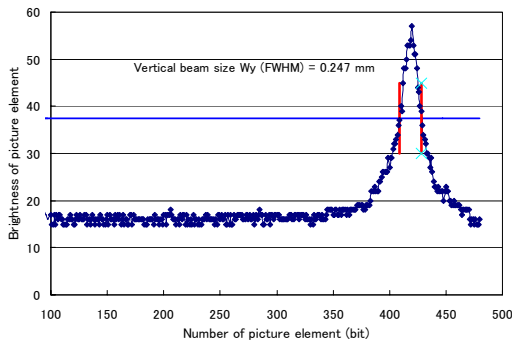


図3：上のX線スポット像の垂直断面輝度分布。このデータから、y方向の電子ビームサイズ(半値幅)が0.25mmと算出される。

3.3 測定装置の分解能

X線蛍光板の位置を変えて、X線スポットサイズの変化を測定した結果が図4である。2本の直線とy軸の交点の値 dx 、 dy が、x及びy方向の分解能を示しており、それぞれ $dx = 67\mu\text{m}$ と $dy = 86\mu\text{m}$ である。これらの内訳は、ピンホールの大きさ10 μm と暗視カメラの画素の大きさ17.0 μm (x方向)、18.5 μm (y方向)、およびMCPと光学系に起因する像のボケである。

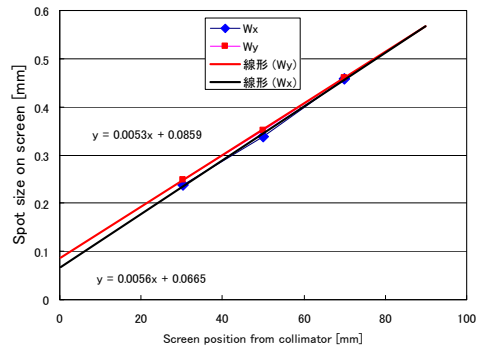


図4：蛍光板の位置を変えて測定したX線スポットサイズの変化

3.4 電子ビームサイズの算出式

光学測定系で観測した蛍光板上のX線スポットサイズ Δx 、 Δy から、標的上の電子ビームサイズ W_x 、 W_y を算出するのに次式を用いた。

$$W_x = (\Delta x - dx - \beta d_c) / \beta \sin \theta$$

$$W_y = (\Delta y - dy - \beta d_c) / \beta$$

ここで dx 、 dy は上の3.3で求めた分解能で、 β は光学系の倍率(コリメーターから測ったスクリーンまでの距離と電子ビームスポットまでの距離の比)を表す。また θ は標的面と測定系のなす角度である。 d_c はコリメーターの直径で、 βd_c は無窮小光源によるピンホール像の増大分である。

3.5 電子ビームサイズの測定結果

以下に集束条件を様々に変えて測定した電子ビームサイズの変化の様子を示す。いずれも、蛍光板の位置を $\beta = 1.15$ 、 $\theta = 10.4^\circ$ に固定して測定した。

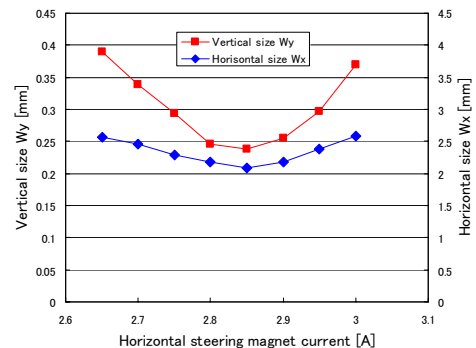


図5：ステアリングコイル電流とビームサイズ

図5は、180度偏向磁石に入る入射角を変えて、エッジ集束の強さに対する応答を見ている。図6は、四極磁石の電流に対するビームサイズの変化で、図7はその時のターゲットに照射したビーム

電流である。また図8は、180度偏向磁石の強度を変えた場合のビームサイズ変化である。いずれの磁石の変化に対しても、ビームサイズの最小値が $W_x = 2.1mm$, $W_y = 0.24mm$ 付近にある。このときのビーム電流は $73mA$ である。

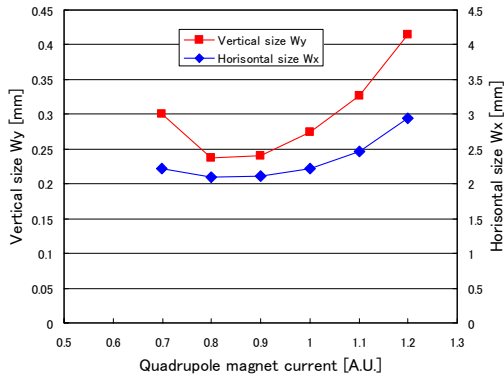


図6：四極磁石電流とビームサイズ

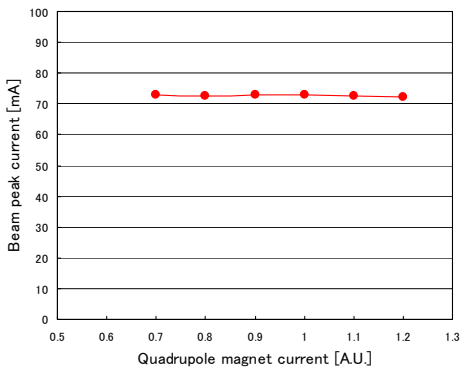


図7：図6の各測定値に対応するビーム電流

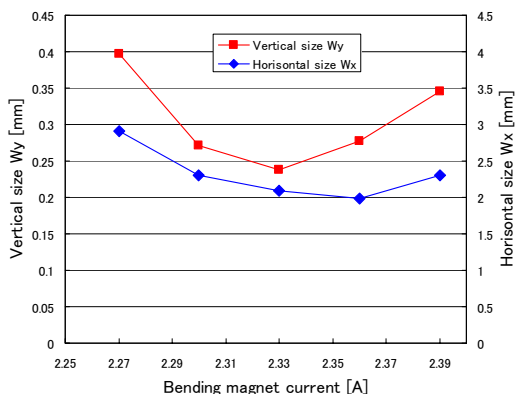


図8：180度偏向磁石電流とビームサイズ

図9は、ビーム電流と電子銃グリッド電圧の関係を表している。高電圧側でビーム電流が減少しているが、この理由は、電流が増すと陽極とコリメーター間（15cm）でビームが空間電荷でより広がるためであり、陰極電流が減少しているためで

はない。また図10は、このときのビームサイズの変化を表している。

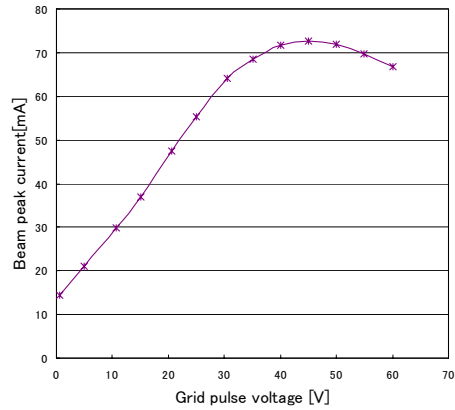


図9：ビーム電流と電子銃グリッド電圧

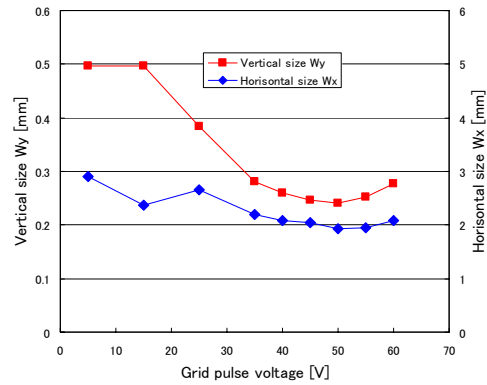


図10：ビームサイズとビーム電流

4. 考察

シミュレーションではビームが $(1mm, 0.1mm)$ [2] になるが、測定値が $(2.1mm, 0.24mm)$ に制限されている理由は、電子ビームのエミッタンスの差にあると考えられる。実際と配置はシミュレーションと異なり、陽極とコリメーターの間に15cmの空間がある。EGUNの計算によると、この間でエミッタンスが約2倍に悪化する。従って、この空間を無くせば、予定通りのビームサイズが得られると期待される。

5. 謝辞

坂部知平先生には、X線測定について多大なるご助言とご協力を頂きました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Ikeda, et al., “特性X線を用いた電子銃ビームの微小サイズ精密測定”, Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Saga, July 20-22, 2005
- [2] S. Ohsawa, et al., “HIGH BRIGHTNESS ELECTRON GUN FOR X-RAY SOURCE”, Proceedings of PAC2005, Knoxville, U.S.A., May 16-20, 2005