

ELECTRON GUN CHARACTERISTICS FOR AN X-RAYS GENERATOR

Satoshi Ohsawa^{1,A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Masafumi Tawada^{A)}, Yasufumi Hazumi^{A)}, Koichi Kanno^{B)}^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} AET, Inc. 2-7-6 Kurigi, Asaoku, Kawasaki, Kanagawa, 215-0033

Abstract (英語)

A new electron-gun system has been developed in order to increase X-rays from a new type of a rotating target. In commercial X-ray sources electron beams usually hit the target at the outer part. Owing to deformation by centrifugal force, there has been a limit on the electron beam intensities. In order to overcome this difficulty, we developed a new injection system which bombards the inside of the rotating target. It has an advantage in that the heated-up part has supports back side against centrifugal force. This merit allows us to raise the electron beam intensity to give stronger X-rays. X-ray brightness on a fixed target has been measured utilizing a pulsed beam of 0.2 s, 1 kHz and 60keV or 78keV. We achieved the maximum brightness corresponding to $120\text{kW}/\text{mm}^2$ at 240mA in case of a DC beam.

X線発生用電子銃の特性

1. はじめに

市販されているX線発生装置よりも、X線の輝度を1桁上げるために、コの字型回転対陰極の内部に電子ビームを集束する方式について、パルスビームを用いて実験的な評価試験を行った。これは180度偏向磁石でビームをコの字型の内部に偏向すると同時に、そのエッジ集束を用いて短い焦点距離で強く集束する方式である。実験結果は、X線輝度が1桁上がる可能性を示している。これらについて報告する。

現在強力なX線を必要とする研究には専ら放射光が使用されている。しかし放射光共同利用には距離的な制約、時期的な制約、利用時間の制約、機密保持の問題など多くの制約がつかまとう。そこで通常の実験室でも第2世代放射光並の高輝度X線を利用できる高輝度発生装置を開発することを目指した。これは坂部知平氏が考案したコの字型回転対陰極を用いる装置である。

従来のX線発生装置は回転対陰極の外側の極近傍から電子線を照射しているため、放電が生じ易く、放電して表面が融解すると遠心力で飛び散る。放電防止及び遠心力によるターゲット表面の変形を防ぐため電子線照射部位の温度を融点より可成り低く保っている。そのため輝度を上げることは難しく、通常は $0.1\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ に対し 1.2kW の物 ($12\text{kW}/\text{mm}^2$) が汎用型として市販されている。

これに対し、コの字型対陰極は、その内側に電子ビームを照射するため融点まで温度を上げる事が可能である。しかも離れた位置に陰極があるため放電を起こす確率も少ない。しかし実現にはこの発明に見合う電子銃開発が不可欠である。そこで、永久磁石による180度の偏向素子を考案し、ターゲット位置で $0.1\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ に60keV、300mA、即ち

$180\text{kW}/\text{mm}^2$ の高密度電子線を照射することの出来る電子銃実現の可能性を検証する実験を行うことになった。この偏向素子は、収束と発散の機能をあわせ持つ小型なもので、短い焦点距離で強力にビームを収束し、 0.1mm のサイズを実現するものである。従って、これが実現すれば、輝度の比は $180\text{kW}/\text{mm}^2/12\text{kW}/\text{mm}^2=15$ となり、計算上は従来の15倍の高輝度X線発生が可能となる。

2. X線発生用電子銃

2.1 実験装置の構成と機能

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。

ビームの集束が主たる目的であるので、既存のパルス電子銃を用いることにした。簡単のために、電

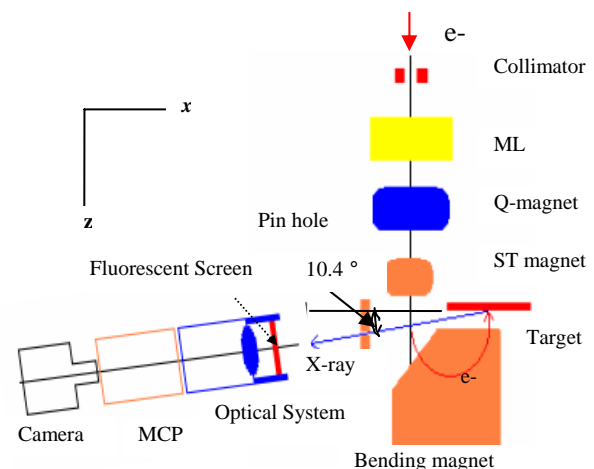


図1: X線発生装置と光学測定系の構成図

¹ E-mail: satoshi.ohsawa@kek.jp

電子銃ビームをまず直径3mmのコリメーター(図2)で切り出し、磁気レンズ(ML)と四極磁石で収束した後、偏向磁石で180度曲げ、固定のターゲット(図3)に当てる。その際、偏向磁石のエッジ収束を用いて、ターゲット上にビームを収束し、紙面に垂直な方向(y方向)のビームサイズを極小にする。ステアリング磁石は、入射角を変え、エッジ収束の強さを調整するのに用いる。標的に電子ビームが衝突すると、そこから特性X線が発生する。このX線をピンホール($\phi 10\mu\text{m}$)を通した後、蛍光スクリーンに照射すると、そこにターゲット上の電子ビーム像が結像する。このピンホールカメラの原理を用いた光学測定系で、標的上の電子ビームサイズを測定した。

この測定では標的の発熱を回避する為に、パルスビームを用いた。そのために暗視カメラ像の光量が不足したので、MCP(マルチチャンネルプレート)を用いて光量を増幅し、精密なビームサイズ測定を可能にした。

2.2 電子銃ビームの電流測定法

図3のように、銅のターゲットを同軸型の真空導入端子の芯線に固定し、電子銃パルスビームのサイズと同時に、ピーク電流をオシロスコープで測定した。

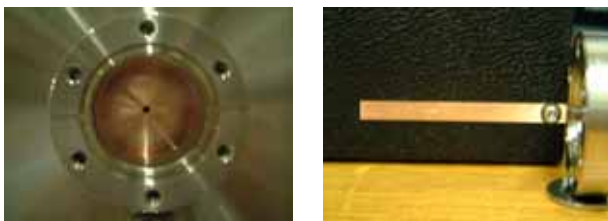


図2：ビーム コリメーター (3 mm ϕ)

図3：銅ターゲット(3.5mm x 1.0mm x 42mm)

3 . 実験の経緯と測定結果

3.1 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

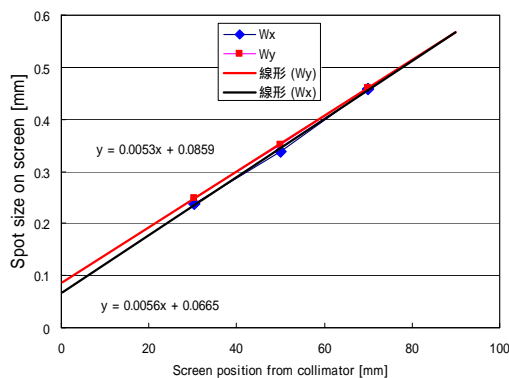


図4：蛍光板の位置を変えて測定したX線スポットサイズの変化

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 $10\mu\text{m}$ と暗視カメラの画素のx方向とy方向の大きさ ($17.0\mu\text{m}$ 、 $18.5\mu\text{m}$) およびMCPと光学系に起因する像のボケである。

3.2 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 は無限小光源によるピンホール像の増大分である。

3.3 電子ビームサイズの測定結果

調査項目は、ターゲット上におけるビームサイズと、そのビーム電流依存性を100 ~ 300mAを含む電流領域で調査することである。以下にその結果を示す。

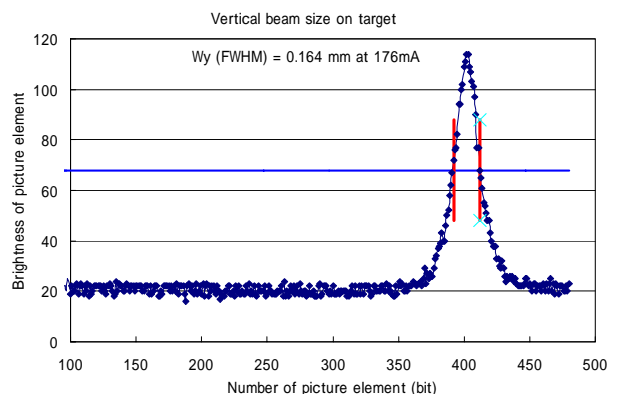
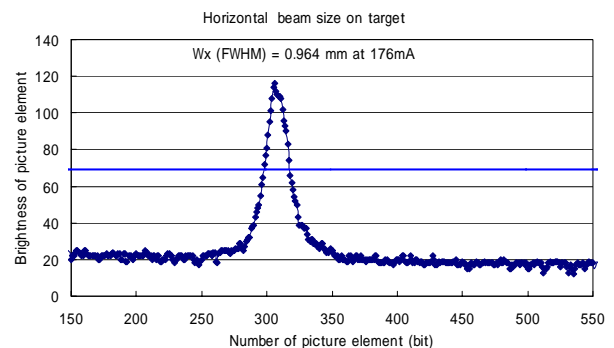


図5 a,b：蛍光スクリーン上におけるX線輝度分布それぞれ水平方向と垂直方向である。これらはビーム電流が176mAの場合の測定例である。電子銃の加速電圧は240mA、77kV の1点を除き全て60kV である。

いずれも、蛍光スクリーンの位置を $\beta = 1.60$ 、 $\theta = 10.4^\circ$ に固定して測定した。

まず蛍光スクリーン上におけるX線の輝度分布を示す。これからもとめたターゲット上の電子ビームサイズ W_x (FWHM)は0.96mmと W_y (FWHM)は0.16mmである。

3.4 輝度とビームサイズ (汎用型に対する相対値)

このような輝度分布の半値幅から、ターゲット上の電子ビームサイズを上式に従って算出した結果を図6に示す。

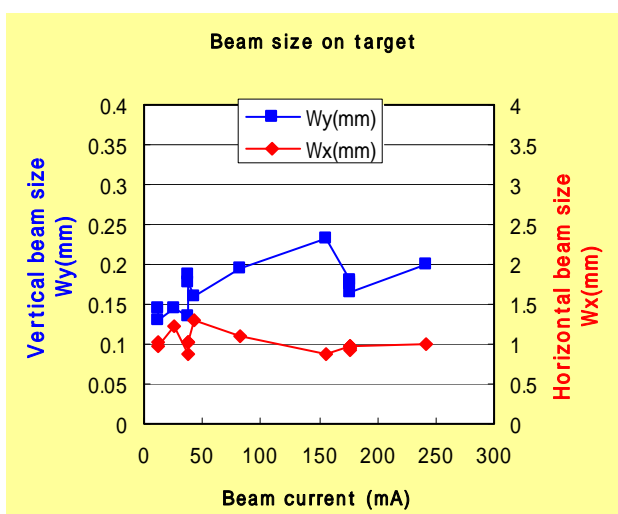


図6：ターゲット上における電子ビームサイズ
電子銃の加速電圧は60kV。240mA のデータのみ76kV で測定。パルス幅と繰返しは0.2ms,1kHzであった。

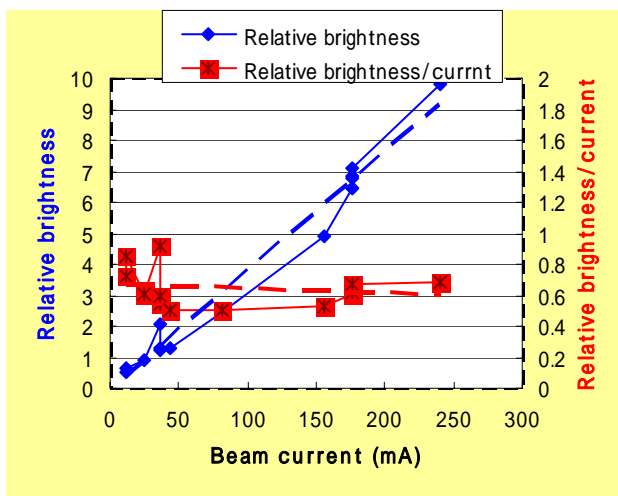


図7：汎用型X線発生装置に対する相対なX線輝度
1.2kW (1mm x 0.1mmで輝度 12kW/mm²)
の汎用型と比較した相対値。×は相対輝度で、

菱形はビーム電流当たりの相対輝度を表す。
電子銃の加速電圧は60kV。240mA のデータのみ76kV で測定。パルスビームの運転条件は0.2μs,1kHz。

測定結果は、水平方向は概ね1mmとなったが、垂直方向のサイズが予定よりも1.4-2倍大きくなった。この結果、ピーク電流で規格化した相対的な輝度(図12の紫線)が、汎用型X線発生装置の輝度に対して8倍程強くなるという結果を得た。また電流まで考慮した輝度の相対比は、最大値が240mAで得られた約6倍であった。これらの値はシミュレーションの予想値のおよそ半分であるが、実験に用いた装置が当初の理想的な寸法と異なることを考慮すれば妥当な値である。

従って今回の測定結果から、180度偏向磁石のエッジ磁場を用いる収束方式が、従来よりもかなり大きな電流領域でも電子ビームを小さなサイズまで収束するのに有効な方法であることが示された。この字型対陰極と組み合わせ使用すれば、X線発生装置の輝度を大幅に上げられる可能性が大きいと結論される。

4. 結論と今後の方針

パルス電子ビームを用いた試験で、180度偏向磁石のエッジ集束等を用いると、汎用型X線発生装置よりも、X線の輝度をおよそ1桁上げられることが実証された。

次の課題は、水冷したコの字型回転対陰極を用いて、DCビームで相対的なX線輝度が1桁上がることを実証することである。

5. 謝辞

本研究は科学技術振興機構の委託により行われたものである。支援に対し、改めて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Ohsawa, et al., "X線発生用電子銃の要素開発研究", Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Saga, July 20-22, 2005.
- [2] 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, 723-725,(2005)
- [3] S. Ohsawa, et al., "HIGH BRIGHTNESS ELECTRON GUN FOR X-RAY SOURCE", Proceedings of PAC2005, Knoxville, U.S.A., May 16-20, U.S.A., 1488-1490, (2005)