

DEVELOPMENT OF A NEW HIGHLY BRIGHT X-RAY GENERATOR

Satoshi Ohsawa^{1,A)}, Ikeda Mitsuo^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Noriyoshi Sakabe^{B),C)}

^{A)} Accelerator Laboratory, KEK

^{B)} Institute of Materials Structure Science, KEK

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

^{C)} Foundation for Advancement of International Science

586-9, Akatsuka, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0062

Abstract

A new type of rotating anticathode X-ray generator has been developed, in which the electron beam irradiates the inner surface of a U-shaped anticathode. A high-flux electron beam is focused on the inner surface by means of a small bending magnet which has focusing function. In order to minimize the sizes of the X-ray source, the electron beam is focused strongly in a short distance by the bending magnet which is close to the rotating anticathode. The power of the electron beam can be exceeded the point at which the irradiated part of the inner surface is melted, because the depth of the melted part is expected to be in the order of 20 μ m, and a strong centrifugal force fixes the melted part on the inner surface. We have achieved emission of X-rays 9.7 times more brilliant than can be attained by a conventional rotating anticathode. The development is still in progress. Newest results are reported in details.

新型高輝度X線発生装置の開発

1. はじめに

従来型の回転対陰極を用いたX線発生装置は、電子ビームで回転対陰極材料が熱変形しないパワー領域で使用されてきた。ましてや陰極が融けてしまつては、構造的に破損するため、照射する電子ビームパワーは大きな制約を受け、X線光源の輝度向上にとって大きな障害となつてきた。

この壁はなかなか越えられなかったが、最近、照射部が融けた状態でも使用可能な新しいタイプの回転対陰極が考案された^[1]。これにより、融点以下という制限が無くなったために、X線源の輝度を1桁以上強く出来る可能性が開けた。

この新型の回転対陰極は、断面がコの字型をしており、その円筒型内面に電子ビームを照射する。このため、その表面部分が高温となって溶融しても、遠心力で壁面に押し付けられるので、溶融部分が飛散しない。これに対し従来型は、回転体の外面にビームを照射する方式であるので、わずかでも表面が溶けると遠心力で容易に飛散する。

昨年、コの字型の試作機を用いて、従来型の汎用市販機のX線発生装置を4.3倍上回る高輝度X線の発生に成功した^[1]。この実現には、低エミッタンスの直流電子銃の開発とともに、集束機能を持つ小型の偏向電磁石の開発も欠かせない^{[2][3][4]}。この磁石は、電子ビームの方向を反転すると同時に、短い焦点距離でビームを磁場で強く集束する。これによりコの字型回転対陰極の内面に、ハイパワーでも微小な焦点の電子ビームを照射する道が開けた。

昨年の試験では、偏向電磁石の磁極を大気中に置

く都合上、磁極間(8mm)に真空の薄い壁面を設けた。その壁面の冷却が不十分で、試験の障害になったが、今回はその磁極を真空装置内に収納したので冷却の問題が解消し、より大きなパワー領域でも試験運転をすることが可能となった。

以前から用いているピンホールカメラ方式によるX線光源のサイズ測定の外に、今回はX線源の解像度測定も行った。回転対陰極の表面温度測定と合わせて、新型X線源の性能評価の試験結果を詳細に報告する。

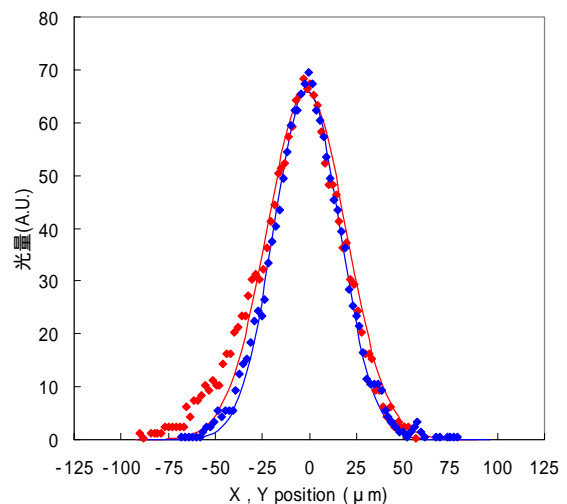


図1：新型X線源の強度分布1.8kW(60kV,30mA)
X線源サイズ (FWHM) 40 μ m \times 49 μ m
電子線輝度 \sim 117kW/mm²

¹ E-mail: satoshi.ohsawa@kek.jp

2. 測定結果

2.1 X線源のサイズと分解能

ピンホールカメラの原理で、X線光源のサイズを測定した。直径10 μm のピンホールスリットを用いて、回転対陰極面に対し、取り出し角6度の方向で測定した。図1に示した例は、ビームパワーが1.8kWの場合である。焦点サイズがx方向とy方向で、共に50 μm 以下になり、輝度は目標とした汎用型(12kW/mm²)の殆ど10倍である117kW/mm²に達した。

このビームの場合に、MTFチャートがどこまで分解出来るかをCCDカメラで確認した。図2に示した写真は、10 μm のスリットをはずし、CCDカメラとX線光源の間に、MTFチャートを置いて撮影した4.7倍の拡大写真である。医療診断用としては最も細いスリットである25 μm の線幅が分離して見えている。

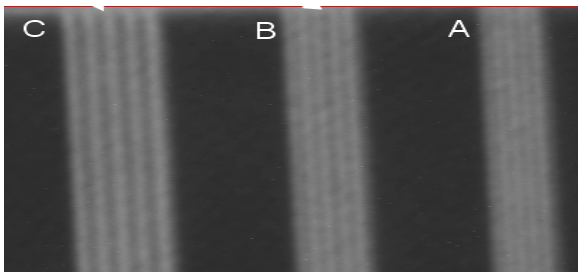


図2：MTFチャートによる解像度の確認測定

- A: 20 line pairs/mm : 線幅25 μm
- B: 16 line pairs/mm : 線幅31 μm
- C: 12.5 line pairs/mm : 線幅40 μm

2.2 照射部の温度測定

上述した1.8kW(60kV,30mA)ビームのCCDカメラ

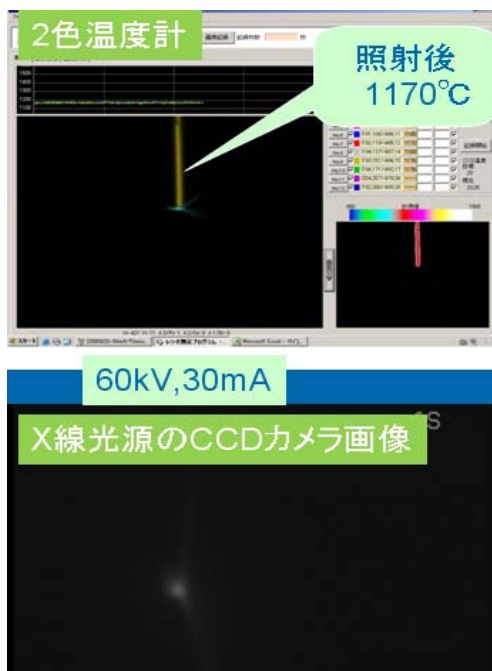


図3：2色式温度計による温度測定(上)とX線光源のCCDカメラ画像(下)

画像(下)と、そのビームを回転対陰極に照射したときの温度分布画像(上)を図3に示す。回転対陰極は写真の下から上方向に回転しており、中央にビームが照射された直後から温度が上昇し、その状態が上方まで続いている。(詳細は図6を参照。)

2.3 焦点サイズとビーム電流

焦点サイズがビーム電流に対して変化する依存性を測定し、その結果を図4に示した。市販品のカタログと同様に、半値全幅を直径とする楕円の面積を焦点面積 S として、電子ビームのパワーと焦点面積 S の比を輝度 B と定義した。焦点面積 S は、空間電荷により、ビーム電流 I とともに増加している。

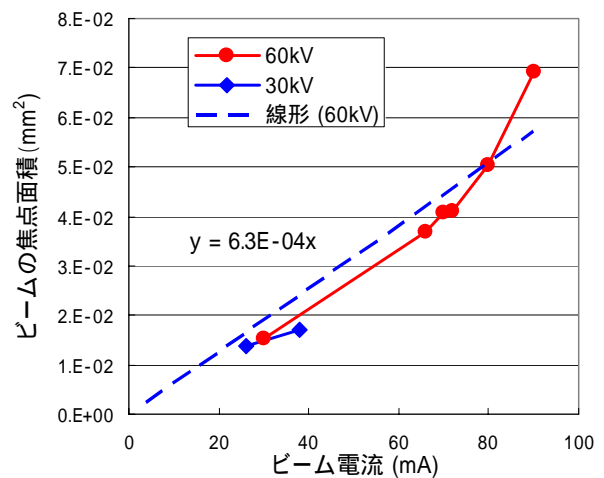


図4：ビームの焦点サイズとビーム電流の関係

2.4 輝度とビームパワー

図5に示したように、ハイパワー領域で試験機の輝度が落ちているが、その理由は、焦点面積 S が電流 I の1次関数よりも速く増加するためである。このことは焦点面積 S を $S \sim k_1 I + k_2 I^2$ と表すと、輝度 B が $B = VI/S \sim V/(k_1 + k_2 I)$ と成ることからも分かる。

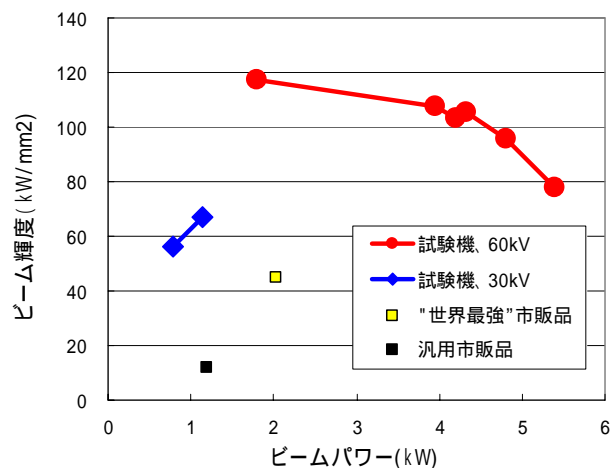


図5：市販品と新型試験機の輝度の比較

我々の新型試験機の輝度は、1.8kWで117kW/mm²に達し、汎用市販品の輝度(12kW/mm²)の10倍(120kW/mm²)の目標に近付いている。試験機と汎用品は、回転対陰極の直径が共に10cmであるが、これを28cmまで大きくし回転数も上げたものが“世界最強”の市販品である。我々の試験機は既に、これらの市販品の性能を、輝度とパワーの両面で超えたが、今後どこまで伸ばせるかが次の課題である。

2.5 回転対陰極の表面温度

ビーム照射前後で回転対陰極の表面温度の変化を測定し、結果を図6に示した。当然のことながら、温度上昇は照射ビームの集束状況によって大きく異なる。72mAから90mAにビーム電流を増やした場合は、表面温度が逆に下がっているが、これは焦点サイズが増加していることと合致している。

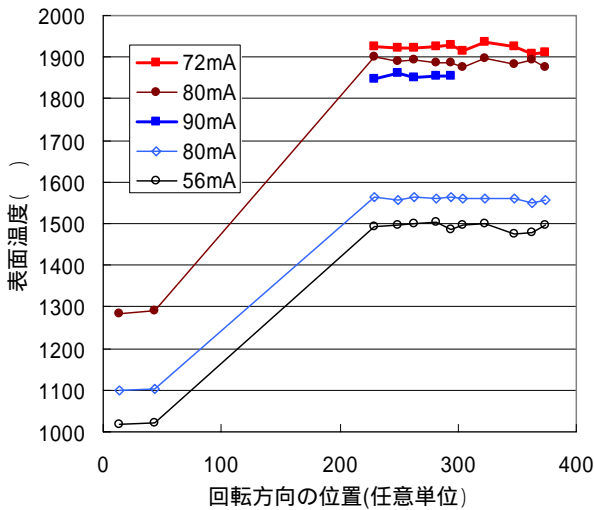


図6：電子ビーム照射前後に於ける回転対陰極の表面温度変化

試験に使用した回転対陰極は、銅の表面を炭素被膜で覆ったものである。回転数は基本的には6000回/分で試験した。回転対陰極が、照射時の温度上昇に何度まで耐えられるか、その限界はまだ不明である。しかし更に輝度を増やすためには、照射電子ビームの密度を上げることが必要であり、回転対陰極の径を大きくすると共に、回転数を上げることが不可避と考えられる。

2.6 回転対陰極の表面上昇温度と回転数

回転対陰極の回転数を変えて、照射部の表面上昇温度と回転数の関係を測定した。最も単純な関係式では、温度上昇 ΔT は、回転数 f と直径 D の積の平方根の逆数に比例する。つまり $\Delta T \propto (fD)^{-1/2}$ である。図7に示した測定値は、この関係を支持している。その他の関係する係数は、直線の傾きの中に実験値として組み込まれている。

この実験値を用いて、回転対陰極の回転数と直径が異なる場合の温度上昇を外挿した。回転数を9000回/分とし直径を28cmとすると、現状よりも温

度上昇が1/2になると期待される。これは照射密度を上げれば、輝度を更に2倍まで増強出来る可能性があることを示唆している。もしこれが実現すれば、新型試験機の輝度は234kW/mm²となり、“世界最強”と称する市販品の、実に約5倍の輝度になる。

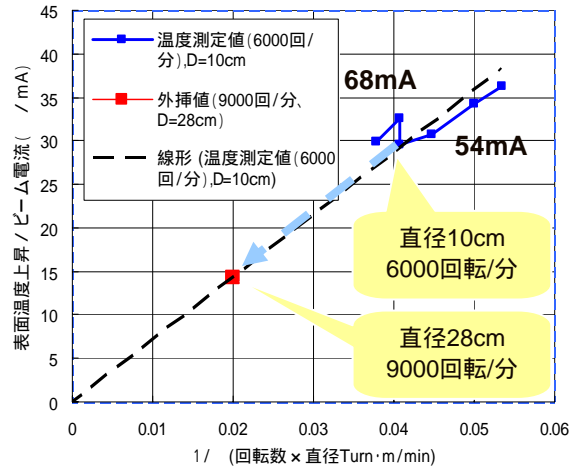


図7：回転対陰極の温度上昇と回転数と直径の関係

3. 今後の課題

試験機では、表面を炭素被膜で覆った銅の回転対陰極を使用した。照射により、銅の融点以上に炭素皮膜の表面温度が上昇したが、その影響と被膜の耐久性は未確認である。まもなく直接観察して確認する予定である。

ビームの最終集束にも、改善すべき課題がある。照射ビームのハイパワー領域で輝度が落ちているが、電子光学系の改善で、全領域で輝度を更に上げることが次の課題である。

4. 謝辞

PFの兵頭一行氏と霍慶凱氏には、MTFチャートによる解像度とX線強度の測定をして頂いた。お二人のご協力に感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Sakabe, et al., “Highly bright X-ray generator using heat of fusion with a specially designed rotating anticathode”, (2008), Journal of Synchrotron Radiation. 15, part3, 231-234.
- [2] T. Sugimura, et al., “Performance of an electron gun for a high-brightness X-ray generator”, (2008), Journal of Synchrotron Radiation, 15, part3, 258-261.
- [3] S. Ohsawa, et al., “Electron Gun Characteristics for an X-rays Generator”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 717-719, (2006)
- [4] S. Ohsawa, et al., “High Brightness Electron Gun for X-ray Source”, Proceedings of PAC2005, Knoxville, U.S.A., 1488-1490, (2005)