

IMPROVEMENT OF THE HIGH BRIGHTNESS X-RAY GENERATOR WITH THE U-SHAPED ROTATING-ANTICATHODE

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

^{A)} Foundation for Advancement of International Science (FAIS)

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

^{B)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

^{C)} PF, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

Abstract

A new type of rotating anticathode X-ray generator has been developed, in which the electron beam up to 120 keV & 75 mA irradiates the inner surface of a U-shaped Cu anticathode. The beam brilliance which has been achieved to date in experiment was 130 kW/mm² (at 2.3 kW) by the new X-ray generator with the U-shaped rotating-anticathode. However, the asperity was caused by the repetition of the melt-solidification in the target surface. As a result, we measured a decrease in the intensity of the X-ray beam at irregularity of the target surface. Therefore, the bending magnet has been improved to the oblique incidence type (to the target surface) in order to solve this problem. In the experiment, it was confirmed that X-ray intensity of oblique incidence became several times higher than that of the normal incidence.

U字型回転体陰極を用いた高輝度 X 線発生装置の改良

1. はじめに

U字型回転対陰極を用いた高輝度 X 線発生装置用の電子銃、ビーム集束系、偏向系の開発を行っている。従来型の X 線発生装置と違い、陰極円筒の内面に電子ビームを照射する方式を採用しており、陰極表面照射部が溶融した状態においても、強力な遠心力により飛散しないという特徴がある^{[1],[2]}。試験機では、これまでに最大輝度 130 kW/mm² (負荷 60 kV × 38 mA = 2.3 kW) を達成し^[3]、さらに高輝度化するために、集束磁石と偏向磁石の改良、最適化を行ってきた^[4]。しかし、ビーム照射部の溶融と固化の繰り返しにより、陰極表面に細かい凹凸が生じ、X 線は陰極表面に対して 6° の浅い角度から取り出しているため、取り出される X 線はこの凹凸によって吸収され、予想よりも X 線強度が低くなっていた。そこで、電子ビームを陰極表面へ斜入射することにより、凹凸による吸収の影響を抑え、X 線強度の増強を試みた。CST-STUDIO を用い、45° 入射用の最適な磁極形状を検討し、実際に製作して、ビーム試験を行った。測定の結果、斜入射すると垂直入射と比較して、X 線強度が数倍も増加することが確認された。本発表では、斜入射用磁極を用いたビームシミュレーション及び、測定結果に関して報告する。

2. X 線発生試験装置

2.1 U字型回転対陰極 X 線発生装置と測定系概要

U字型回転対陰極を用いた X 線発生試験装置とその

X 線測定系の概要を図 1 に示す。X 線発生装置は、EGUN^[4]によって最適化されたアパーチャグリッドを用いた 120 kV DC 電子銃 (φ2 mm の LaB₆)^[5]、マグネティックレンズ、Q マグネット、ステアリングマグネットで構成された集束部、180° 偏向磁石部で構成される。180° 偏向磁石と回転対陰極は真空チャンバー内にあり、回転対陰極は 6000 rpm で回転させ、回転軸と平行に幅 3 mm 揺動させることができる。ステアリングマグネットで 180° 偏向磁石への入射角を調整し、偏向磁石のビーム入射面の漏れ磁場を使い、短い距離で集束と偏向を行っている。通常 X 線は、回転対陰極ターゲット表面に対して、6° の角度で取り付けられた φ10 μm の Au ピンホールを通し外へ取出している。このピンホールは、10° の角度にも取り付け可能である。また、取り出した X

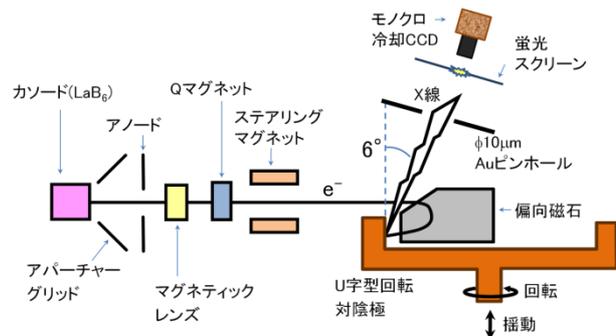


図 1 : U字型回転対陰極 X 線発生試験装置と X 線測定系概要図。装置は電子銃部、集束磁石部、180° 偏向磁石部で構成されている。回転対陰極と偏向磁石は真空チャンバー内にある。

sakai@accuthera.com

線は浜松ホトニクス製モノクロ冷却 CCD カメラ CS985 を用いて、形状とサイズを測定している^[5]。X 線の出射効率を測定する場合は、Au ピンホール出口前に SDD を置き測定している。電子ビーム照射中のターゲット表面温度は、三井オプトロニクス製サーメラ二色式温度計システムを用いて、ビーム照射位置と照射位置から 230° 回転した部分の 2 か所を測定し、ターゲット面の温度が上がりすぎないようにモニターしている。表 1 に試験装置の各仕様を示す。

表 1 : X 線発生試験装置の仕様

最大パワー	120 keV、75 mA (9 kW)
回転対陰極	φ 100 mm、Cu
陰極回転スピード	6000 rpm
カソード材とサイズ	LaB ₆ 、φ 2 mm
グリッドタイプ	アパーチャグリッド
グリッド電圧	3 kV
ピンホール	Au、φ 10 μm

2.2 X 線取出しにおける問題点

試験機を用い、ビーム電圧 120kV までの CuKαX 線の出射効率を測定した。測定は X 線取出し口直後に SDD を設置し、X 線の取出し角度を 6° または 10° に設定して、ビーム位置は出射強度が最大になるよう調整した。測定結果を図 2 に示す。通常、出射角 6° と 10° では大きな違いはないが、取り出し角度 10° の場合は、80~90 kV 付近にピークが見られ、取り出し角度 6° では、全体的に強度が約 30 % 低下し、70~80 kV 以降変化が小さく、平坦になった。原因としては、実際に部品交換の際にターゲット表面にできた凹凸が確認でき、ターゲット表面に対しビームを垂直入射し、取出しを浅い 6° の方向から行っているため、ターゲット表面にできた凹凸が障壁になり、発生した X 線が吸収され減少していることが考えられる。実際に部品交換の際にターゲット表面にできた凹凸を確認している。

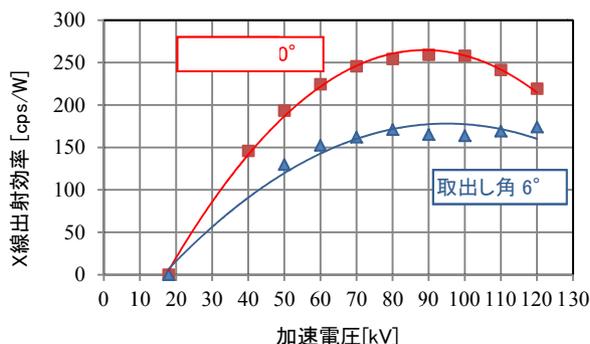


図 2 : X 線取出し角度の違いによる X 線発生強度の比較。取出し角 10° に対して、6° では約 30 % 低下した。ターゲット表面の凹凸による吸収が原因で減少していると考えられる。

3. ビーム斜入射用偏向磁石の製作と測定

3.1 斜入射用磁石の設計

上で述べたように、ターゲット表面が熔融と固化を繰り返すことでターゲット表面に凹凸が生じ、X 線をターゲット面から浅い角度で取り出す際、この凹凸により X 線が吸収され、取り出された X 線強度が予想よりも下がっていた。そこで、ターゲットの凹凸による影響を抑えるために、電子ビームをターゲットに対して斜めに入射することにした。

ターゲットへのビーム入射角度は、理想的には、取出し角度と同じ角度であれば、ターゲットの凹凸による死角がなくなり、影響は小さくなると思われる。しかし、現在の試験機の構成上、全体の大部分の交換が必要となるため、現在のシステムに入れられることが可能な角度の 45° で検討を行った。設計を行った磁極形状を図 3 に示す。ビームラインのスペース上、ターゲットと干渉してしまうため、先端部などを加工し逃した形状をしている。

図 4 に斜入射時ビーム軌道とビームプロファイル例を示す。この図はビーム電圧 90 kV、ビーム電流 75 mA 時の例である。計算には、CST-STUDIO^[7]を用い、電子銃からターゲットまで全体をシミュレーションしている。ビームプロファイルには収差の影

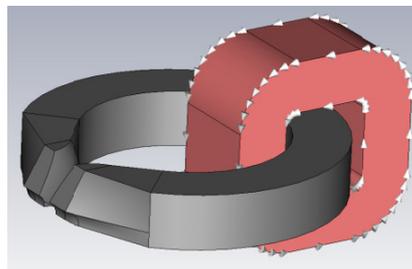


図 3 : 電子ビーム斜入射用磁極形状の例。他と干渉してしまうため、先端部は加工し逃している。

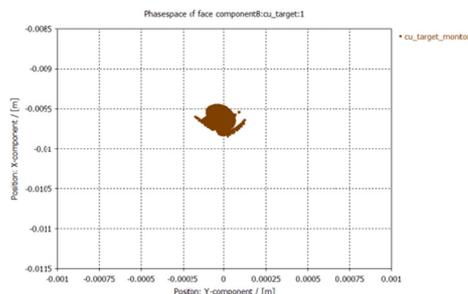
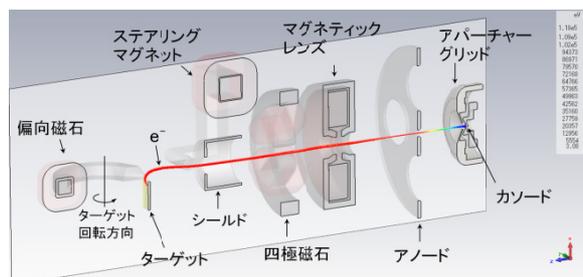


図 4 : 斜入射時のビーム軌道とビームプロファイル例。

響による広がりも見られるが、斜入射のビーム照射条件においても、集束可能であることがわかった。

3.2 斜入射磁石の製作とビーム試験

シミュレーション結果を元に、斜入射用の磁石を製作した。垂直入射用磁極から斜入射磁極へ交換後、CCD カメラを用い、ビームプロファイルの確認を行った。実際のビーム入射角度は測定できないため、角度は不明であり、ビーム軌道としては、かなりビームダクトに近いところを通っているが、ビームプロファイルは確認できた。ビームプロファイルの確認後、X 線の出射効率の測定を行った。測定には、X 線取出し口直後に SDD を設置し、ビーム位置は出射強度が最大になるよう調整した。ピンホールは角度は 6° で行った。

測定結果を図 5 に示す。表面に凹凸が無い場合は、45~50 kV の辺りにピークのあるカーブが得られた。表面に凹凸ができれば、凹凸による吸収と考えられる低下が見られ、強度は 30 %程度まで低下し、50 kV をピークとしたなだらかなカーブが得られた。しかし、表面に凹凸が有る状態でも斜入射用磁極を用いたら、強度が約 2 倍、凹凸面に照射した場合と比較すると約 6 倍も強くなった。このとき加速電圧 65~75 kV 付近にピークがシフトした。これより、ビームをターゲットに斜入射することにより、ターゲットの凹凸に対する有効性が確認できた。ただし、試験機は、ビーム斜入射を考慮した作りになっていないため、ビーム軌道に無理があり、シミュレーションで求めた理想的角度、軌道よりも大きくなっている可能性が高いことや、ビームの一部がビームダクトに当たっているなどの可能性もある。

4. まとめと今後の課題

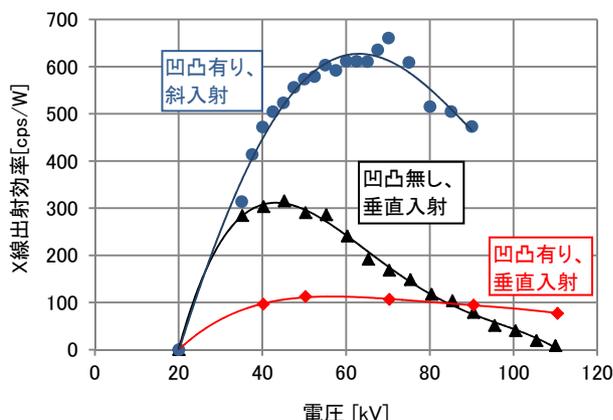


図 5: ビーム入射角度の違いによる X 線発生効率の比較。ターゲットへのビーム垂直入射の場合に比べ、斜入射の場合は表面に凹凸が有っても発生効率が数倍高くなっていることがわかる。

回転対陰極表面の溶融と固化の繰り返しにより細かい凹凸が発生し、この凹凸が原因と考えられる X 線の吸収がおき、表面に凹凸が無い状態に比べ、X 線発生強度は約 30 %に低下した。ターゲットの凹凸

による吸収の影響を抑えるために、電子ビームをターゲット面に対して斜めに入射する方法を試みた。ターゲット面に対して 45° 入射用の磁極を設計、製作し、垂直入射の場合と X 線の発生強度の違いを比較した。測定の結果、凹凸の無いターゲット面の場合に比べて強度ピークは 45 kV から高圧側の 65~75 kV へシフトし、強度としては約 2 倍、凹凸面に照射した場合と比較すると約 6 倍も強くなった。この結果、ビームをターゲットに斜入射することにより、ターゲットの凹凸に対する有効性が確認できた。

今後の課題としては、ターゲットへの電子ビーム照射位置は 2 色温度モニターで確認できるが、確実性は低く、それに伴い入射角度も正しく測定できず、確かめられないため、外光を入れる構造へ変更するなどし、位置を正確に測定できるようにする必要がある。また、現在の試験機では、斜入射用を想定した構造ではないため、ビームを通す際に、非常に無理な軌道を通している。そのため、入射角度を更に浅くするためには、ビームラインにゆとりをもたせ、斜入射時にもビームダクトなどと十分距離が取れる構成に作り直す必要がある。さらに、X 線の取出し角度に関しても同様に、斜入射を想定し設計していないため、各装置との干渉などの問題も考えて設計し直す必要がある。

謝辞

KEK の吉田光宏氏には CST-STUDIO に関してアドバイスしていただきました。片岡章氏、株式会社トヤマの飯野氏、酒井氏には、試験装置治具作成、設置、遮蔽強化などサポートをしていただきました。リガク株式会社からは、高圧電源、CCD カメラを提供していただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Sakabe, (1995). US Patent No. 6 229 871 B1.
- [2] N. Sakabe et al., "Highly bright X-ray generator using heat of fusion with a specially designed rotating anticathode", J. Synchrotron Rad. (2008), 15, pp.231-234
- [3] S. Ohsawa et al., "Development of a New Highly Bright X-ray Generator", Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, (2008), pp.539-541
- [4] T. Sakai et al., "Development of the Focusing System for a Highly Bright X-ray Generator", (2010) Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, pp.199-201.
- [5] Herrmansfeldt, W. B. (1988). SLAC Report 331. SLAC, CA, USA.
- [6] T. Sugimura, et al., "Performance of an electron gun for a high-brightness X-ray generator", J. Synchrotron Rad. (2008), 15, pp.258-261
- [7] M. Ikeda et al., "Precise measurement of small sized beam from electron-gun using characteristic X-rays", (2005) Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tosu, July 20-22, 2005, pp.723-725. (In Japanese).
- [8] <http://www.cst.com/>