

OPTIMIZATION OF THE BENDING MAGNET FOR A HIGHLY BRIGHT X-RAY GENERATOR*

Takeshi Sakai^{1,A)}, Satoshi Ohsawa^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Noriyoshi sakabe^{B)}

^{A)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{B)} PF, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{C)} Foundation for Advancement of International Science (FAIS),
586-9 Akatsuka, Tsukuba, Ibaraki 305-0062, Japan

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 Cu anticathode. A high-flux electron beam is focused on the inner surface by optimizing the geometry of the bending magnet. In order to minimize the sizes of the X-ray source, the electron beam is focused in a short distance by the leakage magnetic field from the bending magnet which is small and is close to the rotating anticathode. The beam trajectories and bending magnet were optimized by the General Particle Tracer (GPT) and Opera-3d code simulation, respectively. The result of simulation clearly shows that the bending magnet gap surface angle parameters are important to the beam focused in a short distance.

高輝度X線発生装置用集束系の最適化

1. はじめに

科学技術振興機構(JST)より「高輝度X線発生装置の開発」を受託し、新型の回転対陰極を用いた高輝度X線源用の電子銃、集束系の開発を行っている。従来方式の回転対陰極では、輝度 $45\text{kW}/\text{mm}^2$ (負荷 2kW)がほぼ限界であるが、断面がU字型をした新型の回転対陰極を用い、円筒内面に電子ビームを照射する方式を採用することにより、試験機を用いた測定では、これまでに $130\text{kW}/\text{mm}^2$ (負荷 2.3kW)を達成している。当面は $225\text{kW}/\text{mm}^2$ (負荷 9kW)を目標としているが、最終的な開発目標値は輝度 $1\text{MW}/\text{mm}^2$ である^[1]。

この目標値達成には、照射電子ビームの高密度化が必須であり、特に集束磁石の最適化が非常に重要である。これまでに、Vector Fields社のOpera-3d、Pulsar Physics社のGeneral Particle Tracer (GPT)、EGUN^[2]を用いたシミュレーション結果に基づき^{[3],[4]}、試験機を製作し、X線発生試験を行ってきた。試験の際に、磁石形状を徐々に削り、実験を通して最適化を進めていたが、最終的目標値である輝度 $1\text{MW}/\text{mm}^2$ 実現のために、磁石形状のより詳細な最適化、ビーム調整時におけるビーム軌道の最適化が必要となり、今年度からOpera-3d、GPTによる現状の磁石形状によるビーム軌道の再確認と、磁石面の

形状変更によるビーム軌道の最適化を詳細に行っている。本論文では、Opera-3d、GPTを用いて行った現状での磁石形状の検討と、磁石形状を変えた場合の電子ビーム集束系のシミュレーション結果に関して報告する。

2. U字型回転対陰極X線発生装置

2.1 装置概要

従来型の回転対陰極を用いたX線発生装置は、電子ビーム照射時における陰極表面の溶解、放電等による構造的な破損のため、照射する電子ビームのパワーには大きな制限を受け、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おり、X線光源の輝度向上に大きな障害となっている。この従来型では、上で述べたように、リガク製の超高輝度X線発生装置 FR-E+で達成されている負荷 2.0kW で輝度 $45\text{kW}/\text{mm}^2$ がほぼ限界に近く、回転対陰極X線発生装置ではこれ以上は開発が難しいと考えられていた。

そこで、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^[3]。この新型の回転対陰極は、図1に示すような断面がU字型をしており、その円筒内面に電子ビームを照射する方式を採用している。このため、電子銃とターゲット間

*本研究は科学技術振興機構(JST)「高輝度X線発生装置の開発」の支援を受けて行った。

¹ E-mail: takeshi.sakai@kek.jp

での放電は無く、また照射ターゲット表面部が高温になり溶融した場合、従来型はわずかでも表面が融けると遠心力で容易に飛散するが、U字型では回転による遠心力で壁面に押しつけられ、溶融部分が飛散しないといった特徴がある。

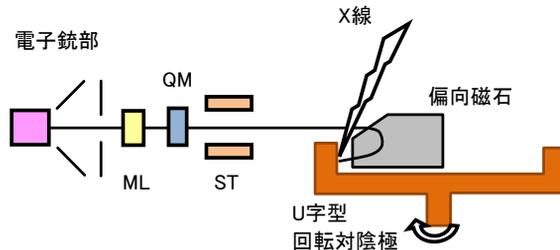


図1:U字型回転対陰極を用いたX線発生装置概略図。従来型と違い、電子銃とターゲット間で放電が無く、ターゲット部が溶融しても、回転による遠心力により飛散しない。

2.2 U字型回転対陰極X線発生装置試作機

U字型回転対陰極X線発生装置試作機の外観写真を図2に示す。装置は、市販されているX線回折装置の筐体外側を用い、その中に高圧電源、制御装置、各種測定装置、真空排気装置等をすべて収めている。X線光源のサイズ測定には、回転対陰極面に対して6°の方向にセットした直径10μmのAuピンホールスリットを通して、冷却CCDカメラを用いて測定している^{[1],[5]}。回転対陰極本体は、回転軸と平行に幅3mmを揺動させることができる。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の2色式温度計を2台用いてビーム照射位置、照射位置から230°回転した部分の2か所から測定している。表1に試作機のスペックを示す。

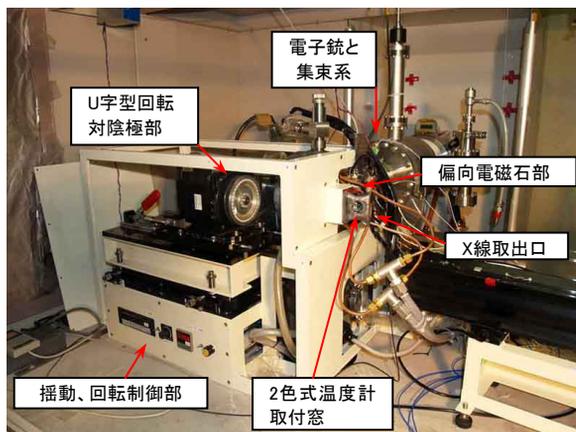


図2：試作機概要写真。各装置は筐体内にすべて納めている。ビームサイズは陰極面に対して6°の方向へ直径10μmスリットを通して冷却CCDカメラで測定。ターゲット表面の温度は、2色式温度計を用い2か所から測定。

表1：U字型回転対陰極X線発生装置試作機スペック

最大パワー	60kV、100mA
回転対陰極	直径100mmのCu
陰極回転スピード	100回転/sec
電子銃グリッドタイプ	アパーチャグリッド
電子銃カソード	LaB ₆
カソード径	2.0mm

3. 電磁石とビーム軌道解析

これまでにEGUN、Opera-3d、GPTによる概念設計に基づき、試作機を製作し、X線発生試験を通して磁石の形状を変えながら最適化を行い、X線の高輝度化を進めてきた^{[1],[3],[4],[5]}。しかし、最終目標値の輝度1MW/mm²実現には、これまでの実験結果に基づいた、より詳細な磁石形状の最適化が必要であった。そこで現状を把握するために、現段階での磁石形状から磁場、ビーム軌道解析を行い、その結果を踏まえ、詳細な磁石形状の最適化を進めた。

3.1 集束偏向電磁石解析

磁石部の解析は、図3に示すような形状で行った。ただし、実際の磁石部全体の形状とは違い、ギャップ部周辺のみ正確に形状を入れ、必要のない部分は簡略化した形状で行った。ビームは矢印の方向から入射を行い、ビーム入射口部のヨークギャップ面は一部削った形状をしており、この端部での漏れ磁場を使い、ビームの集束を行っている。また、磁場強度は実際の磁石設置前に測定した値に基づき、実測値に近い値になるようにコイル電流量を微調整した。

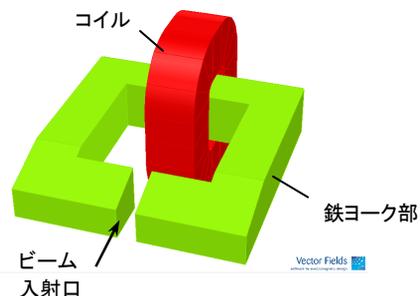


図3:解析時の磁石形状例。ビーム入射口のギャップ面を一部削った形状。ヨークギャップ付近のみ詳細に計算し、他は簡略化した。

3.2 ビーム軌道解析

ビーム軌道解析は図1に示した電子銃、マグネティックレンズ、Qマグネット、ステアリングコイルを配置し、図3に示した磁石形状での、ギャップ周辺の磁場データをGPT用に変換し、解析を行った。ML、Q、STの各値はそれぞれ調整し、ビームが通る条件に合わせた。解析条件は、ビームエネルギー：60keV、ビーム電流：30mA、粒子数：20000個、空間電荷効果を入れて行った。図4(a)にビーム

軌道解析結果を、図4(b)にターゲット表面(図4(a)の四角の位置)におけるビームプロファイルを示す。電子銃は0mに、磁石端面は0.18mにある(ただし図は途中からのみ表示)。図4(b)のY方向の広がり、は、ビーム偏向時の球面収差の影響で広がりが見えている。図4(a)に示したように、現状の磁石形状の場合、磁石入り口前でビーム軸から大きく軌道を振り入射しなくては、ターゲット面上で集束しにくいことがわかった。またX方向のビーム焦点が偏向電磁石の内側にあり、ターゲット表面では広がりがやすくなるため、磁石形状を変え焦点を磁極端の外側に出す工夫が必要である。

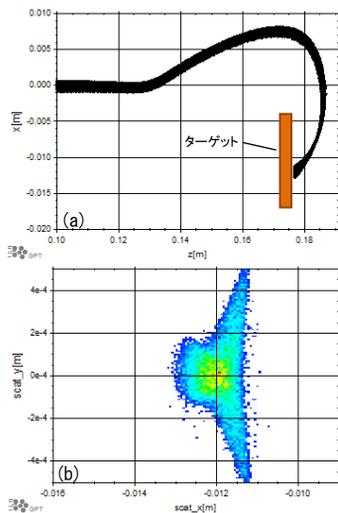


図4:現状の偏向電磁石での計算例。(a)ビーム軌道解析結果。図中の四角がターゲット面。(b)ターゲット面でのビームプロファイル。

3.3 電磁石形状の最適化とビーム軌道解析

3.2節での結果を踏まえ、磁石のギャップ形状を変化させ(削り角度はそのまま)、最適化を試み

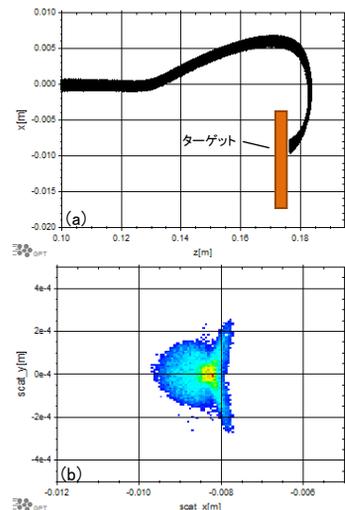


図5:磁石ギャップ形状変更時の計算例。(a)軌道解析結果。(b)ターゲット面ビームプロファイル

た。現状の磁石ギャップは平行に設置しているが、ビーム入り口側のギャップを狭く、奥を広くした場合を想定し行った。ギャップ間隔変更によるビーム軌道解析結果を図5(a)に、ターゲット表面での電子ビームプロファイルを図5(b)に示す。図4(b)と同様に偏向時の球面収差の影響がまだ少し出ている。各要素は、図4と同様の位置にあり、解析条件も3.2節と同様の値で行った。ただし、ML、Q、STの値は磁場の変化に合わせて微調整を行った。

図4(a)と比較して図5(a)では、電子ビームは磁石面内で強く集束されておらず、図5(b)に示したように、ターゲット表面でビームが図4(b)に比べさらに集束しており、ギャップ間隔の最適化を行えば、ターゲット面でのビーム焦点を小さくできる可能性があることがわかった。

4. まとめと今後の課題

現状の磁石形状から磁場および、ビーム軌道解析の結果を踏まえ、磁石の最適化を試みた。解析の結果、現状では、ターゲット表面に電子ビームを集束させるには、磁石入り口前でビーム中心軸から大きく振り入射する必要があり、さらに磁石面内のビーム集束位置を磁極端外側へ出す必要があることがわかった。現状の磁極における解析結果から、ビーム入り口側のギャップを狭く、奥を広くした場合を想定し解析したところ、電子ビームの焦点位置が磁石内から外側にずれ、ターゲット面でのビーム焦点を小さくできる可能性がある事がわかった。

今後の課題として、本結果に基づきギャップ形状を変更し、X線発生試験により集束状況を確認する。また、今回は、磁石ギャップ面の1パラメータのみの変更であったが、もう1自由度加えた形状変更や、ビーム偏向時に常時集束力を受けるような楕円型磁極なども検討を行い、さらに最適な形状を決めX線の高輝度化を目指す。

謝辞

KEKの多和田正文氏にはOperaに関して、サポートをしていただきました。心より感謝致します。

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] Herrmansfeldt, W. B. (1988). SLAC Report 331. SLAC, CA, USA.
- [3] 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.
- [4] S. Ohsawa, et al., "High Brightness Electron Gun for X-ray Source", Proceedings of PAC2005, Knoxville, U.S.A., 1488-1490, (2005).
- [5] S. Ohsawa, et al., "Development of a New Highly Bright X-ray Generator", Proceedings of the 24th International Linear Accelerator Conference (LINAC2008), 531-533.