

IMPROVEMENT OF THE COMBINED FUNCTION MAGNET FOR A HIGHLY BRIGHT X-RAY GENERATOR

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

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

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

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

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

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

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

Abstract

A new type of the rotating anticathode X-ray generator has achieved the beam brilliance of 130 kW/mm^2 (at 2.3 kW), in which the electron beam up to 60 keV & 38 mA irradiates the inner surface of a U-shaped Cu anticathode. Higher-flux electron beam is expected from simulation by optimizing the geometry of the combined function instead of fringing field of the bending magnet. In order to minimize the sizes of the X-ray source, the electron beam has been focused in a short distance by the new combined function bending magnet, of which geometrical shape was determined by simulation with the codes of Opera-3D, General Particle Tracer (GPT) and CST-STUDIO. The result of simulation clearly shows that the role of combined functions in both of the bending and the steering magnets is important to focus the beam in small sizes. FWHM sizes of the beam are predicted by simulation to be 0.45 mm (horizontal) and 0.05 mm (vertical) for a beam of 120 keV and 75 mA, of which effective brilliance is about 500 kW/mm^2 . High power test has just been started by using the high-voltage power supply of 120 kV & 75 mA instead of 60 kV & 100 mA for the X-ray generator. The beam focus sizes on the target will be verified in the experiments.

高輝度 X 線発生装置用偏向磁石の改良

1. はじめに

陰極断面が U 字型をした回転対陰極を用いた高輝度 X 線発生装置用の電子銃、ビーム集束系と偏向系の開発を行っている^[1]。この X 線発生装置は、従来型の回転対陰極を用いた X 線発生装置とは違い、 180° 偏向磁石を用い、陰極円筒内面に電子ビームを照射する方式を採用しており^{[2],[3],[4]}、陰極表面照射部が溶けた状態でも飛散や、電子銃とターゲット間の放電による問題を生じない利点を有する。

試験機を用いた測定では、これまでに 130 kW/mm^2 (負荷 2.3 kW) を達成している^[5]。次の目標値は、 300 kW/mm^2 であり、この値を達成するためには、焦点電子ビームの高密度化が必要である。そこで、集束磁石と偏向磁石の最適化を Opera-3D^[6]、General Particle Tracer (GPT)^[7]、CST-STUDIO^[8]を用い行っている。シミュレーション結果では、偏向磁石とステアリングマグネットの磁極面の形状を最適化することにより、ビーム輝度は約 500 kW/mm^2 (ビームエネルギー：120 keV、ビーム電流：75 mA) に達することが示された。現在、高压電源を 60 kV から 120 kV 用に変更し、実験による検証を始めたところである。

本発表では、シミュレーション及び、それに基づ

いて新たに設計製作した集束系を用いた実験結果に関して報告する。

2. X 線発生試験装置と測定系

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、DC 電子銃、集束部、 180° 偏向磁石部の 3 つのセクションで構成される。 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 3mm 揺動させている。X 線は、 $\phi 10 \mu\text{m}$ の Au ピンホールを通し、回

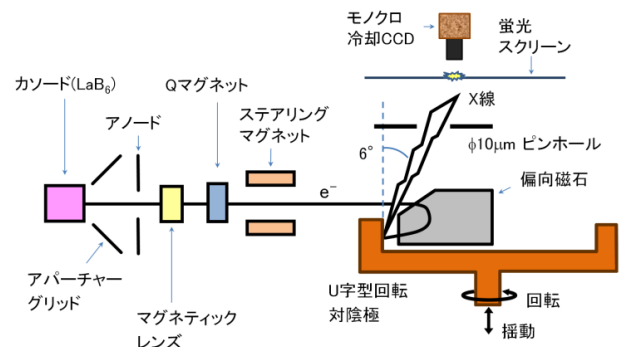


図 1 : U 字型回転対陰極 X 線発生試験装置と X 線測定系概要。装置は主に、電子銃部、集束磁石部、 180° 偏向磁石部で構成されている。回転対陰極と偏向磁石は真空チャンバー内にある。

[#] takeshi.sakai@kek.jp

回転対陰極ターゲットに対して 6° の角度で外へ取り出している。取り出した X 線を蛍光スクリーンに当てて発光させ、浜松ホトニクス製モノクロ冷却 CCD カメラ C5985 を用いて形状とサイズを測定している^[9]。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 2 台用いて、ビーム照射位置と照射位置から 230° 回転した部分の 2 か所を測定している。

電子銃は、EGUN^[10]を用いたシミュレーションに基づき設計した^[11]。電子銃のグリッドは、エミッタンスとビームによる損傷を考慮し、メッシュグリッドではなく、アパーチャグリッドを採用し、グリッド電圧は、3 kV で最適化している。カソードには $\phi 2$ mm の LaB₆ を使用している。

集束部は、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しており、マグネティックレンズと Q マグネットでビームサイズを調節し、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ている。電子ビームは、 180° 偏向磁石のビーム入射面の漏れ磁場を使い、短い距離での集束と偏向を行っている。表 1 に U 字型回転対陰極 X 線発生試験装置の仕様を示す。

表 1 : X 線発生試験装置の仕様

最大パワー	120 keV、75 mA
回転対陰極	$\phi 100$ mm 、 Cu
陰極回転スピード	6000 rpm
カソード材とサイズ	LaB ₆ 、 $\phi 2$ 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

3. シミュレーションとビームによる検証

3.1 偏向磁石改良前の問題点

偏向磁石の磁場計算を Opera-3D で行い、その磁場データを用いて GPT によるビーム軌道のシミュレーションを行った。図 2 に改良前の偏向磁石での代表的なシミュレーション結果を示す。計算条件は、ビームエネルギー 60 keV、ビーム電流 38 mA であり、空間電荷効果を考慮して計算している。図 3 にビーム条件がほぼ同じ時の X 線のビームプロファイルを示す。シミュレーション結果は収差の状態や、ビーム形状など、実験結果をよく再現しているといえる。

改良前の偏向磁石は、図 1 に示したように、磁極の入射面に角度をつけており、この磁極間に発生する漏れ磁場を使い、短い距離で集束させている。しかし、図 2-(b)からわかるように、ビームが偏向され磁極間に入ると、ビームは集束力を受けられず、偏向のみになり、その結果、図 2-(c)で示されるように、ターゲット上でのビームプロファイルは収差の影響で焦点がずれている。このことから、偏向磁石での収差の影響を小さくするために、収差の少ない偏向磁石への変更が必要であることがわかった。

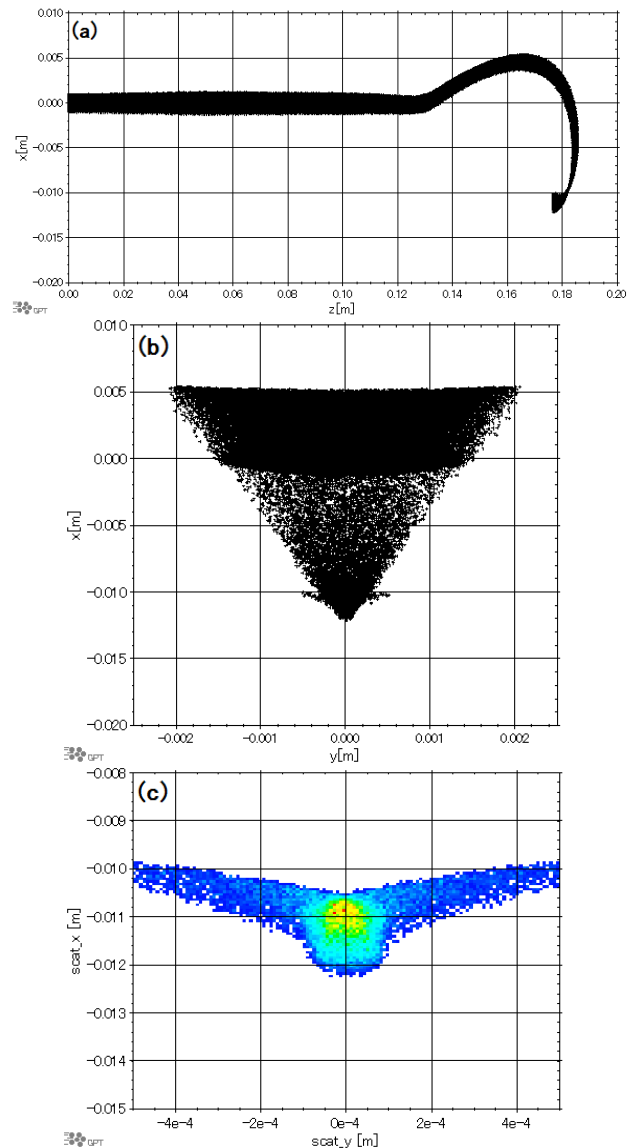


図 2 : 偏向磁石改良前の代表的なビーム軌道シミュレーション結果。ビーム条件は 60 keV、38 mA、空間電荷効果を考慮している。(a) 側面から見たビーム軌道。(b) 正面から見たビーム軌道。(c) ターゲット上でのビームプロファイル。

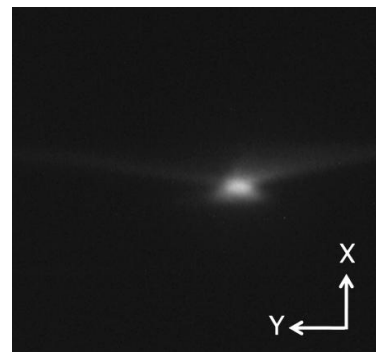


図 3 : ビーム条件 60 keV、38 mA 時の X 線プロファイルの様子。収差による影響が見られ、シミュレーション結果とよく一致している。

3.2 機能結合型偏向磁石への改良

上で述べたように、改良前の X 線発生試験装置では、ビーム偏向中のビーム集束の状態に問題があることがわかった。そこで、偏向磁石の磁極面に傾斜をつけ、ビーム偏向中でも常に集束力をビームへ与えられるようにするために、機能結合型偏向磁石への検討を行った。また、それに合わせ、偏向磁石の入射直前に使用している、ステアリングマグネット磁極面の角度も集束に有効であることがわかったため、その磁極面も合わせて検討した。

新しい磁石形状を用いたシステムでのシミュレーションは、先程と同様に、Opera-3D と GPT を用いて行った。図 4 に、ビームエネルギー120 keV、

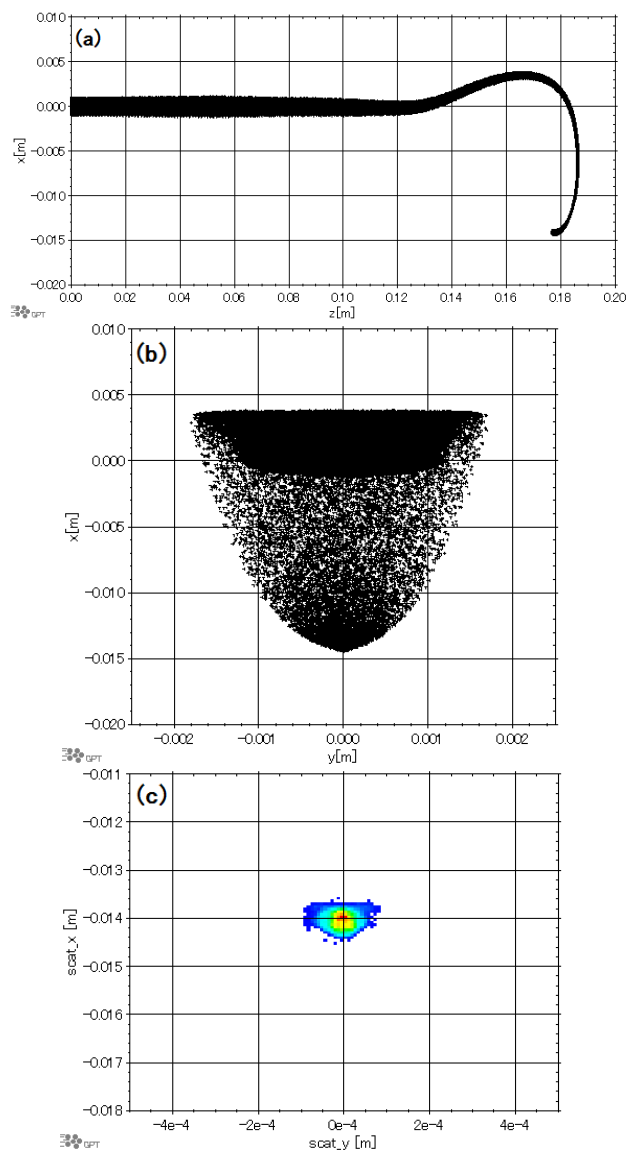


図 4：偏向磁石、ステアリングマグネット改良後のビーム軌道シミュレーション結果。ビーム条件は120 keV、75 mA、空間電荷効果を考慮している。(a)側面から見たビーム軌道。(b)正面から見たビーム軌道。(c)ターゲット上でのビームプロファイル。収差による影響が小さくなり、十分集束されていることが分かる

ビーム電流 75 mA、空間電荷効果を考慮したシミュレーション結果を示す。図 4-(b)から、ビームは偏向中も常に集束力を受けており、ターゲット上で集束されていることがわかる。ターゲット上でのビームの半値幅は、図 4-(c)から、ガウス分布を仮定すると縦横それぞれ、0.45 mm(x:水平方向)、0.05 mm(y:垂直方向)と求まり、ビーム輝度は約 500 kW/mm²(楕円形で補正)であった。

シミュレーションの結果から、まず偏向磁石の設計製作を行ない^[12]、ビームを用いた集束状態の確認後、ステアリングマグネットも交換し、検証を始めた。現段階では試験開始直後のため、60 keV、3 mA、グリッド電圧 3 kV のビーム条件まで試験を行った。図 5-(a)にビームエネルギー60 keV、電流 3 mA 時の X 線プロファイルを示す。比較のため、図 5-(b)に改良前の低パワー時(ビーム条件 60keV、12mA)の X 線プロファイルを示す。まだ検証したビームパワーは低い、磁極の改良によりビーム収差は明らかに小さくなっていることがわかる。



図 5：(a)磁石改良後の X 線プロファイル(ビーム条件 60 keV、3 mA)。(b)改良前の低パワー時の X 線プロファイル(ビーム条件 60 keV、12 mA)。低パワー時は収差による影響が小さいが、明らかに収差が見られる。

4. 今後の課題

磁極形状を改良することで球面収差の影響が減り、ビーム輝度は改善したが、コンポーネントの配置や、今回改良していない他の集束系に関して、最適化されていない部分が残っている。特に図 6、7 に示すように、ステアリングマグネットはスペースの都合上、複雑な形状をしており、必要となる磁極間以外に漏れ磁場が発生している。ビームライン上に

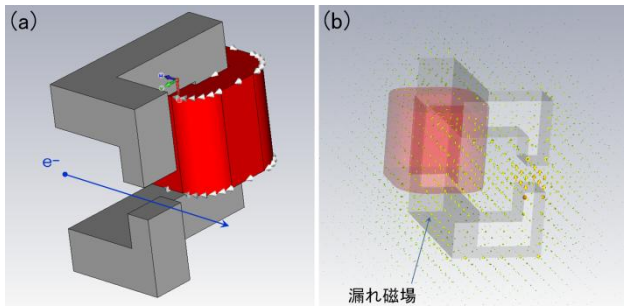


図 6 : (a) ステアリングマグネットの外観図。マグネット設置スペースの都合から複雑な形状である。(b) CST-STUDIO で計算した磁場の様子。必要となる磁極間以外のビーム軌道上に漏れ磁場が発生していることがわかる。

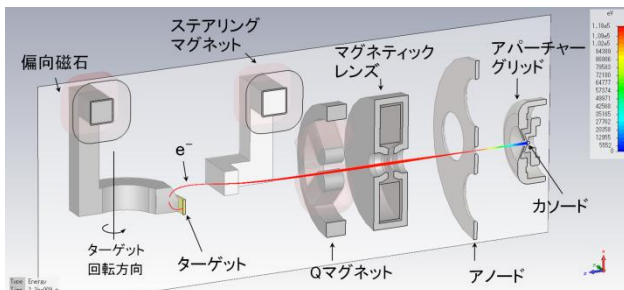


図 7 : CST-STUDIO による電子銃からターゲットまでの計算モデルの断面図。ビーム 120 keV、75 mA、グリッド電圧 3 kV 時のシミュレーション例。

この漏れ磁場が発生しているため、ビーム軌道へ影響を及ぼしている。これは、磁気シールドを置か、単純な形状の磁石(C タイプ等)へ置き換えるなど検討が必要である。また集束系の各コンポーネントの間隔が比較的長いことも問題であり、最適化することで、コンパクトで且つ更に良い集束状態を作ることが可能であると考えられる。そこで、さらにビーム輝度を上げるためには、より現実的なシミュレーションが必要であり、CST-STUDIO を用い、図 7 に示すような電子銃からターゲットまでの全体を通して、詳細に現実的なビームシミュレーションをして、一括して最適化できるように検討をする予定である。

5. まとめ

シミュレーションと実験結果から、試験機における偏向電磁石と集束系の問題点を明らかにし、偏向磁石とステアリングマグネットの両方の磁極面を改良した。その結果、ビーム集束時の球面収差が減り、ビーム輝度が増加することが示された。ビームエネルギー120 keV、電流 75 mA の条件では、ビーム輝度は約 500 kW/mm² に達することがシミュレーションで示された。偏向磁石については、磁極面の改良とその結果について以前報告(IPAC2010)した。最近ステアリングについてもシミュレーション結果に基づいて磁極面を改良し、ビーム集束試験を始めた。確認したのは、まだエネルギー60 keV、3 mA の

ビームまでであるが、これまでの集束状態に比べ、収差の影響が小さくなっていることがわかった。

今後、装置の調整を進め、120 keV、75 mA までの高電力試験による集束状態の確認を行う予定である。また、ビーム輝度をさらに向上させるために、電子銃からターゲットまで全体を一括した現実に近いシミュレーションを行うことで、より詳細な最適化を進める予定である。

謝辞

KEK の多和田正文氏、吉田光宏氏には Opera、CST-STUDIO に関してサポートしていただきました。片岡章氏には、発生装置全体のシールド強化や測定系のサポートをしていただきました。リガク株式会社からは、120 kV 高圧電源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] T. Sakai et al., "Optimization of the Bending Magnet for a Highly Bright X-ray Generator", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan, pp.900-902. (In Japanese)
- [2] N. Sakabe, (1995). US Patent No. 6 229 871 B1.
- [3] 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
- [4] S. Ohsawa, (2004), JP Application No. 2004-241301; US Patent Application No. 11/204967; EP Application No. 05018063.7
- [5] S. Ohsawa et al., "Development of a New Highly Bright X-ray Generator", Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, (2008), pp.539-541
- [6] <http://www.vectorfields.com/>
- [7] <http://www.pulsar.nl/>
- [8] <http://www.cst.com/>
- [9] 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).
- [10] Herrmansfeldt, W. B. (1988). SLAC Report 331. SLAC, CA, USA.
- [11] T. Sugimura, et al., "Performance of an electron gun for a high-brightness X-ray generator", J. Synchrotron Rad. (2008), 15, pp.258-261
- [12] 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.