

DEVELOPMENT OF HIGHLY BRIGHT X-RAY GENERATOR WITH A APERTURE GRID ELECTRON GUN

Takashi Sugimura^{A)}, Satoshi Ohsawa^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Tawada Masafumi^{A)}, Noriyoshi Sakabe^{B)},
Nobuhisa Watanabe^{C)}, Kyoyu Sasaki^{D)}, Ken'ichi Ohshima^{E)}, Masao Wakatsuki^{F)} and Kiwako Sakabe^{B)}

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

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

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

586-9 Akatsuka, Tsukuba, Ibaraki 305-0062

^{C)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

Foro-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8603

^{D)} Nagoya University

Foro-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8603

^{E)} Institute of material science, University of Tsukuba

1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573

^{F)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565

Abstract

A new highly bright X-ray generator is under development. Its specification values, such as extraction voltage, current and beam size at a target are 60 kV, 100 mA and $1.0 \times 0.1 \text{ mm}^2$, respectively. Beam examinations have been performed with the first prototype X-ray generator. In the pulsed beam test, beam current of 85.7 mA and FWHM beam sizes of $0.79 \text{ mm} \times 0.13 \text{ mm}$ have been achieved on the target. In the DC beam test, the beam current recently reaches nearly 60 mA with improvement for heat problems.

アパーチャグリッド式電子銃を利用した高輝度X線源の開発

1. はじめに

ラボ向けの超高輝度X線発生装置の開発を行っている。このX線発生装置はコの字型回転対陰極を有しており、陰極金属の融点付近まで高輝度化出来ることが大きな特徴である^{[1][2]}。昨年以來、アパーチャグリッド付の熱陰極電子銃の製作およびビーム試験を行い、試作第1号機にインストール後、試験を続けている。この試作機では、60 kV、100 mAのDCビームを回転対陰極上で $1.0 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ の大きさにフォーカスさせることを目標としている。本発表では、ビーム試験の状況を報告する。

2. パルスビーム試験

最初にパルスビームで試験を行った。発熱の問題を回避し、速やかに目標とする100mAに近いところで電子ビームの集束状況を確認するためである。この試験では固定ターゲットを用い加速電圧一定の条件下でグリッド電圧を変えながらビーム電流を測定した。その結果グリッド電圧 2.8 kVを印加したとき85.7 mAの測定値を得た^[3]。最初エージング不足による放電が多発したため、それ以上のグリッド電圧の印加は控え、回転ターゲットを用いた試験に移

行した。空間の制約により、回転ターゲットに組み込んだ電子銃には25 mの長い高圧ケーブルを用い、離れたところにある高圧電源から加速電圧、グリッドパルス、ヒーター電力を供給した。とくにグリッドパルスについては3重同軸ケーブルを用いて伝送を行ったため、電子銃部とのマッチングをとるためにはトランスを挿入する必要があった。このトランスのおかげでグリッドパルスからの出力電圧は従来の1/5程度で済ませることが出来た。反面、電子銃の放電の際には同軸ケーブルに蓄えられたエネルギーも放出されるので、発光と音を伴う大規模な放電となった。電子銃周りの浮いた金属を徹底的に接地する対策と、徐々に高圧を上げる慎重なエージングを行った結果、放電の問題はほぼ解決した。トランスポート系の若干の変更に伴い電磁石の設定を最適化したところグリッド電圧 1.2 kVに相当するグリッドパルスの印加により 80 mAのビーム電流を得た。回転ターゲットからのX線をピンホールで拡大した像を蛍光スクリーンで観測しそのサイズを測定したところ、回転ターゲット上で $0.79 \text{ mm} \times 0.13 \text{ mm}$ (FWHM)であり、ほぼ仕様を満足していることが分かった。これらの結果によりDCビームに移行すべきであるとの判断をし、パルスビームによる試験を終えDCビーム試験に移行した。

3. DCビーム試験

3.1 DCビーム試験 1

DCビームによる試験では数mA程度の電流でも容易に金属を溶かしてしまう危険性があるため慎重に電流を制御する必要がある。DCビーム試験の初期に於いてはパルスビーム試験時と同じくグリッド電圧を変化させることでビーム電流を制御した。また高圧電源はパルス試験時に使用したものでは電流容量が不足する(最大で 3 mA)ので、途中で60 kV, 100 mAの仕様のものにつなぎ変えた。この電源は常時 10 mA程度以上の電流を流していないと±10%程度の電圧変動が起こることが判明したので、現在は 4.8MΩの抵抗を並列に接続し、電圧変動を抑制している。図1にビーム試験装置の概略図を示す。

グリッド電圧を -400 Vから徐々に0 Vまで上げていくとビーム電流は 6 mAに達した。このときのビームサイズはおおよそ 0.23 mm x 1.3 mmであり、パルスビームでの測定時に比べ非常に大きくなっていった。さらに、ビームダクト周辺で異臭がしておりマグネティックレンズが直接手でさわれない程度の高熱になっていることも判明した。これらに対処するためにビームダクトに熱電対を取り付け、温度測定を行いながら温度上昇を抑えるように光学系の調整を行ったがビーム電流 6 mAで 48℃程度の発熱があり、ビームサイズも大きいままであった。

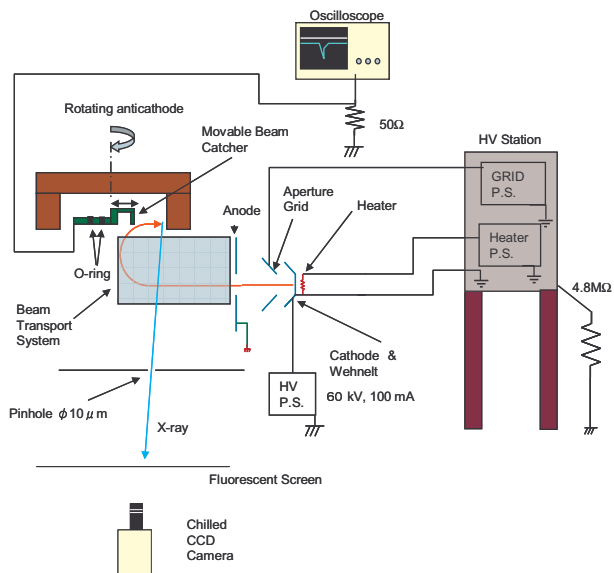


図1 ビーム試験装置概略図

3.2 発熱対策

本格的な対策としてビームダクトの内径をφ6 mmからφ10 mmまで長さ10.5 cmにわたって拡大した。また、電磁石はすべて自然空冷であったものを12 cmのファンを取り付けて強制空冷に変更した。

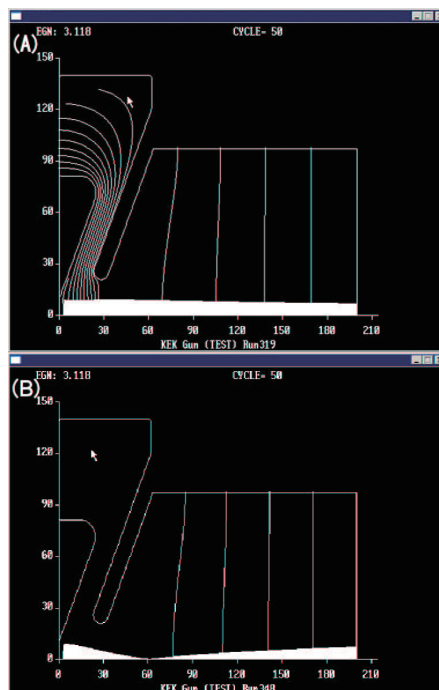


図2 EGUNによるビーム軌道シミュレーション (A)グリッドに3 kVを印加した場合。(B)グリッドに1 Vを印加した場合。

ヒーター電源をリモートでコントロール出来るようにし、加速電圧、グリッド電圧を正規の電圧に設定した後に、ヒーター電源を調整することで、ビーム電流をコントロールすることにした。これは電子銃の設計の際にはグリッド電圧を 3 kVで使用することを前提として最適化を行ったため、グリッド電圧が 0 V付近の領域では、ビームの集束が強すぎて逆に広がるのが予想されたからである。図2にEGUNによるシミュレーション結果の比較を示す。図2(A)はグリッド電圧を3 kVとしたときのビーム軌道を示しており、図2(B)は (A) から、グリッド電圧のみを 1.0 Vに変えてシミュレーションを行った結果である。(A)ではほぼ平行にビームが引き出されているが、(B)では広がっているのが分かる。シミュレーションによるビーム電流は (A) の場合には 145 mAであったのに対し (B) では 5.9 mAである。これらの値は、空間電荷制限によって決まる値であり、試験時に得られたビーム電流とほぼ一致している。正規のグリッド電圧を与えることで、ビームサイズが小さくなり、ビーム電流が増やせることが期待された。

3.3 DCビーム試験 2

これらの対策後のDCビーム試験では対策の効果によりビームダクト部には深刻な温度上昇がなくなったため、徐々にビーム電流を増加していった。27 mAに到達したときのビームプロファイルを図3に示す。このときのプロファイルからガウスフィットによりFWHMビームサイズを求めると、回転ターゲット上で0.77 mm x 0.11 mm となりパルスビーム

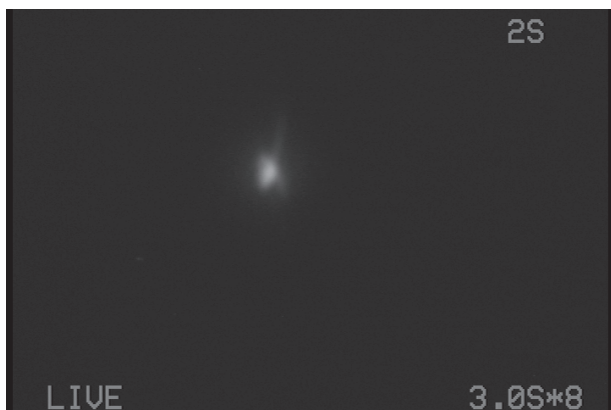


図3 ビーム電流が 27 mA に到達したときのビームプロファイル。回転ターゲット上の大きさは 0.77 mm x 0.11 mm (FWHM) である。

試験時とほぼ同様の値を得られた。ただし、回転ターゲットの入った真空チェンバーがコンプレッサーからの空気の吹きつけによる冷却にもかかわらず 100°C 近くまで発熱していることが分かった。さらに回転ターゲット近くに設置したビーム電流測定用の可動式ビームキャッチャーに 0.4 mA 程度のビームが当たっていることが分かった。このビームによる入熱は約 24 W であるが、熱容量が小さいためかなりの高温になることが予想され、絶縁と真空止めを兼ねたリングへの影響が懸念された。図4に回転ターゲットと真空チェンバーの写真を示す。回転ターゲットは銅製であるが、中心部を除き黒光りがするようになっていた。また回転ターゲット部

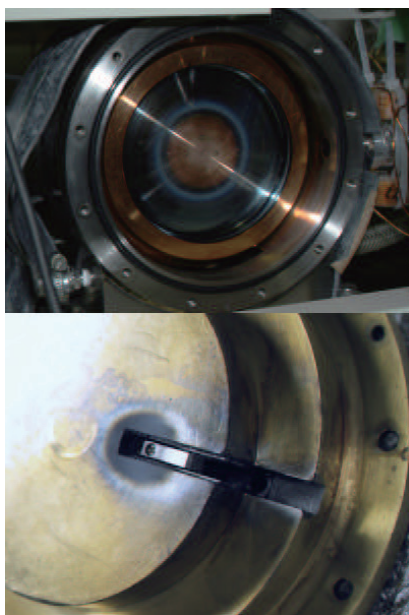


図4 上：回転ターゲット 下：真空チェンバー裏面 溝の中にビームキャッチャーが見える。その周辺が変色している

を被う真空チェンバーの裏側のビームの通過する付近には銀色の金属光沢がみられた。これらは、リングに塗布したシリコングリスが蒸発し電子ビームにより分解してシリコンが付近に蒸着したものである。ビームキャッチャーに当たっているビームは、ビームの周辺部であると考えられ、格納時のビームキャッチャーとビームの軌道中心との距離 0.5 mm が小さいために起こると考えられた。ビームキャッチャーの形状を変更しビームキャッチャーとビームの軌道中心との距離を 3.1 mm に離してみたところ、1/6 程度に電流が低減したが、まだ不十分であった。次回の真空作業時にビームキャッチャーは撤去する予定である。また、真空チェンバーには水冷配管を取り付け、水冷、空冷の両方式による冷却を行うことにした結果、発熱は 40°C 程度緩和した。現在も、真空状態に注意しつつ徐々に電流を増加させているところであるが、45 mA に達したときのビームサイズを測定したところ、FWHM で、0.65 mm x 0.08 mm であった。これはターゲット上でのビームが 2 次元のガウス分布をしていることを仮定すると、X, Y それぞれの方向の半値幅を長径、短径とする楕円内に入るビームのビームパワーを楕円面積で割った実効輝度で 34 kW/mm² であり、ビーム電流が 45 mA であることを考慮するとこの段階では十分に輝度が高い。ビーム電流値では約 60 mA に到達したところであり今後も増加させる予定である。

4. まとめ

コの字型回転対陰極を有する超高輝度X線発生装置の開発を行っており、その試作1号機のビーム試験を行っている。このX線発生装置はビーム電流 45mA の時にターゲット上でビームサイズ 0.65 mm x 0.08 mm を達成しており、今後のビーム電流の増加に従い目標輝度の達成が十分に期待できる。ビーム電流に関しては、発熱に注意しながら、徐々に増加させているところであり、現在のところ 60 kV で約 60 mA を達成している。

参考文献

- [1] S. Ohsawa, M. Ikeda, T. Sugimura, M. Tawada, Y. Hozumi and K. Kanno, "HIGH BRIGHTNESS ELECTRON GUN FOR X-RAY SOURCE", Proc. PAC2005, Knoxville, TN, USA (2005) pp1488-1490
- [2] T. Sugimura, S. Ohsawa, M. Ikeda, Y. Hozumi, and K. Kanno, "Development of a DC/Pulse electron gun with an aperture grid", Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan) pp532-535
- [3] T. Sugimura, S. Ohsawa and M. Ikeda, "DC/PULSE ELECTRON GUN WITH AN APERTURE GRID", Proc. PAC2007, Albuquerque, NM, USA (2007) <http://pac07.org/proceedings/PAPERS/THPMN029.PDF>