

DEVELOPMENT OF LOW-EMITTANCE ELECTRON GUN USING SINGLE-CRYSTAL CeB₆ THERMIONIC CATHODE

Kazuaki Togawa¹

RIKEN/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 671-5148, Japan

Abstract

Development of a low-emittance electron gun for the x-ray free electron laser (XFEL) project at SPring-8 (XFEL/SPring-8) was started in 2001. A single-crystal CeB₆ thermionic cathode was chosen as an electron emitter to satisfy the requirements of the XFEL; low emittance, uniform emission, stability, reproducibility, long lifetime, etc. After several failures and improvements, we succeeded in heating the cathode up to 1500°C using a graphite heater. The cathode assembly was tested at the 500-kV gun test stand. The measured normalized emittance of 0.6 π mm mrad (rms, 90% core part) satisfied the requirement of the XFEL. The CeB₆ gun continues to produce stable low-emittance electron beams at the SCSS test accelerator. The gun will operate in the XFEL/SPring-8 from 2011.

CeB₆単結晶熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃の開発

1. はじめに

X線自由電子レーザー (XFEL) のための低エミッタンス電子銃の開発が2001年よりSPring-8においてスタートした。前年に新竹積 理研主任研究員 (当時、高エネルギー加速器研究機構) が熱電子銃とバンチャーシステムによる低エミッタンス電子入射器を提案したのであるが^[1]、その構想に基づいた電子銃開発である (当初はエネルギー1 GeVの軟X線自由電子レーザー計画であった)。XFEL用電子銃には、1 π mm mrad以下という極めて小さいビームエミッタンスが求められるが、同時に安定性、再現性、長寿命といった実機用電子銃としての総合的特性を備えている必要がある。そこで、電子管デバイスや電子顕微鏡などの主要部品として旧来から広く使用されてきた熱電子銃方式を見直すことになった。

熱電子銃を用いて低エミッタンスビームの生成を実現するためには、いくつかの課題があった。

1) カソード材料の選択とアッセンブリー開発：熱電子ビームのエミッタンスはカソード径と温度で決まる。但し、これは理想的に平坦な表面に対して成り立つことなので、いかに平坦なカソード材料を選択するかが課題であった。本計画では、希土類化合物である六ホウ化セリウム (CeB₆) の単結晶材を採用した。電子顕微鏡用の電子源として広く実績のあるカソード材料である^[2]。希土類化合物は、表面が蒸発することにより、常に清浄で平坦な表面状態を保つことができる^[3]。また、一様な密度のビーム放出も可能となるので、エミッタンス保存の観点からも重要な特性である。

このように、希土類化合物は高輝度電子ビームの生成に適しているものの、動作温度が1500°C以上と、酸化物系カソードと比較して非常に高いといった難

点があった。そのため、カソードを加熱する高温ヒーターを組み込んだカソードアッセンブリーが開発対象となった。

2) グリッドフリー：従来型の熱電子銃は、カソードの直前面にコントロールグリッドを設け、これに高速ゲートパルスを加することで、ナノ秒の短バンチを生成する。しかし、エミッション直後のeV領域の低速ビームを制御するため、グリッド近傍で生じる電場の歪によってエミッタンスが悪化してしまう。本計画ではコントロールグリッドは使用せず、電子銃チャンバーで数百keVに加速した後、ビームディフレクターによりナノ秒バンチを形成することにした。

3) 高電圧電子銃：空間電荷によるビームの発散角度はビームエネルギーの3乗に反比例する。予期せぬ空間電荷効果によるエミッタンス悪化を防ぐためには、電子ビームの初期エネルギーを出来るだけ高くすることが望ましい。本計画では電子銃チャンバーおよびパルス電源を設計するにあたり、大電力クライストロンの高電圧技術を適応し^[4-6]、達成可能と期待できる500 kVを設計電圧とした。

4) 安定化バンチャーシステム：電子銃とビームディフレクターで生成したナノ秒短バンチは、バンチャーシステムによる速度変調バンチングの過程を経て初段の加速管に入射される。エミッタンスを壊さず一定のバンチ形状を保つには、極めて安定なバンチャーシステムが必要となる。

本論文では、CeB₆熱電子銃に関わる1)、3)の課題について、出来る限り開発の経緯を辿って報告させて頂く。尚、装置と実験結果については文献7に詳細がまとめられているので、興味のある方は、それを参照して頂きたい。

¹ E-mail: togawa@spring8.or.jp

2. CeB₆カソードアッセンブリの開発

2.1 Vogel型アッセンブリ

最初に着目したのが電子顕微鏡用のVogel型アッセンブリである。これは、高温においても弾性力が保たれるMoRe製電流リード線の先端に、カソード結晶とヒーター材であるピログラファイトを挟み込み、直接通電することで直にカソード結晶を加熱するものである。電子顕微鏡で要求されるビーム電流値は高々マイクロアンペア程度であるので、カソード結晶の断面サイズは0.5 mm角程度、その先端をコーン状に尖らせて高輝度ビームを生成している。一方、XFEL用電子銃は、ピーク電流として1 A以上の大電流が要求されるので、そのままの形状を転用するわけにはいかなかった。XFELのためにはφ3 mmのフラットな放出表面を持つカソード結晶が必要であるため、電子顕微鏡用アッセンブリをスケールアップした設計を行った。図1に最初の設計図面を示す^[8]。

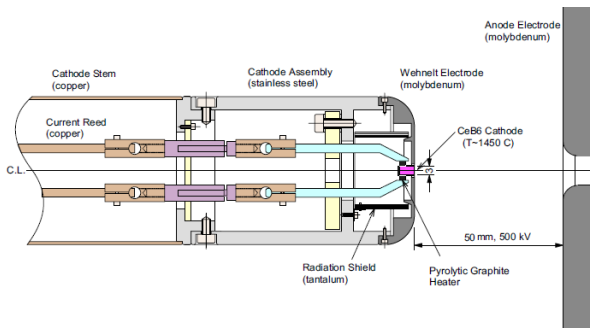


図1：Vogel型アッセンブリの設計

海外のカソードメーカーと何度かやり取りしたのであるが、このような大きいサイズのアッセンブリを製作した経験が無かったこと、大型のピログラファイトブロックが入手できなかったこと等から、設計通りのアッセンブリを製作することができず、出来上がったアッセンブリはφ3 mmのカソード結晶を保持しきれず、カソード結晶が傾いた状態で納入された。その後、カソード結晶を保持する工夫はなされたものの、安定性を最重要視するXFELで使用することは難しいとの判断で、Vogel型アッセンブリの開発は見送り、同時に進めていた傍熱型アッセンブリの開発に転向した。

2.2 傍熱型アッセンブリ

傍熱型アッセンブリは、ヒーターからの輻射熱によりカソード結晶を間接的に加熱するタイプのものである。カソード結晶と加熱ヒーターを分離でき、カソード結晶をしっかりとした基盤に設置できることから、機械的安定性に優れている。その反面、直熱型より加熱効率が悪いことから、ヒーターをより高温に加熱しなければならず、それに耐えうるアッ

センブリを開発する必要がある。図2に傍熱型アッセンブリの最初のモデルを示す^[9]。

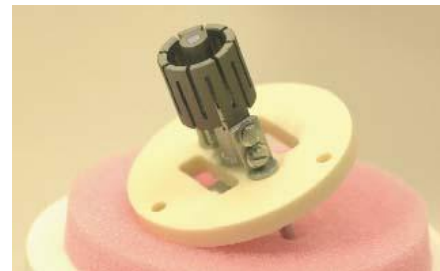


図2：傍熱型アッセンブリの最初のモデル

ヒーター材には、半導体製造装置にも使用されている高純度グラファイトを採用した^[10]。ヒーター本体は1500°Cを大きく超える高温においても安定に動作し、ガスやパーティクルの放出も問題にならない程度であったが、ヒーター周辺のアッセンブリ部品にトラブルが続出した。以下、発生したトラブルとその対策を順に述べさせて頂く。

- 1) アルミナセラミック基板が高温に耐えきれず破損。対策として、熱衝撃に強い窒化珪素 (Si₃N₄) 製セラミック基板に変更。高温により窒素成分が蒸発して絶縁性が落ちることが心配されたが、問題なく長期間使用できている。
- 2) 破損には至らなかったが、銅製のリード線が高温による膨張で湾曲。薄い銅板を重ねた緩衝機構をリード線に設けることで対処。
- 3) カソードシステムに組み込んだ実機試験に踏み込んだのであるが、電流導入端子部の加熱が進み、銅製の接続端子が溶解 (図3)。ビューポートが蒸着される程、大量の蒸発した銅が真空チャンバー中に飛来した。

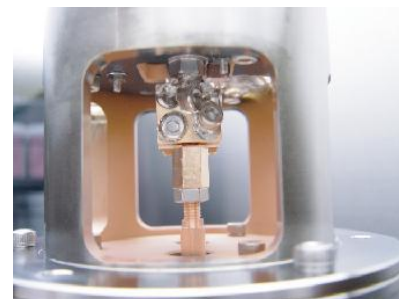


図3：溶解した銅製電流導入端子

これを機に、ヒーターサイズ等のアッセンブリのデザインを大幅に変更することにした。まず、熱負荷を低減するために、ヒーターの外径をφ17 mmからφ12 mmとし、表面積を30%削減した。小型化により、ヒーターの形状パターンを加工する刃物を入れる余裕がなくなったが、幸いグラファイト製品をワイヤーカットで加工してくれるメーカーが見つかったので、そこに依頼することにした^[11]。実は、カソード結晶をグラファイトスリーブに安定に保持

する方法が見つからず困っていたのであるが、グラフィットスリーブの穴径をカソード結晶より数十 μm 分小さくしておき、ワイヤーカットでスリーブ先端に十字型のスリットパターンを加工し、グラフィットの弾性を利用してカソード結晶をスリーブに圧入する方法をこのとき思いついたのである。グラフィットへの圧入は、ヒーターとモリブデン端子の接続箇所にも適用している。完成したカソードアセンブリと加熱したカソード結晶を図4、5にそれぞれ示す^[12]。

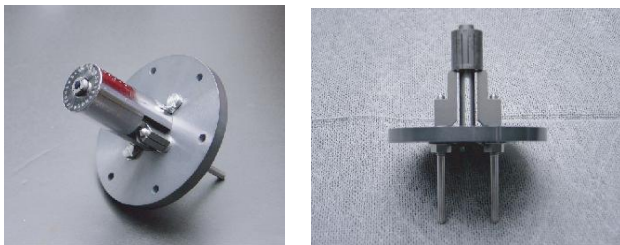


図4：完成したCeB₆カソードアセンブリ

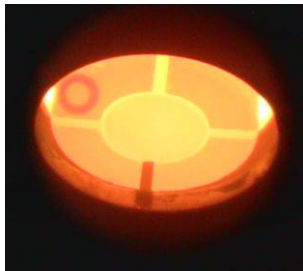


図5：電子銃チャンバー内で加熱するCeB₆カソード

3. 電子銃テストスタンドにおける試験

2003年の終わりに、並行して開発を続けてきた500 kV電子銃テストスタンドにCeB₆カソードアセンブリを組み込み、ビーム試験を行った。

パルス電源であるC-band用変調器電源、電子銃パルスバンクのプルストランスやダミー抵抗など数多くの高電圧機器で構成されるシステムであったが、ビーム試験までにシステムの試験と改良が完了していたため、順調にビーム試験を開始することができた。

さて、目標電圧が500 kVと非常に高かったので、電子銃チャンバーのウェネルト電極の材料には清浄ステンレス鋼を使用した。但し、印加電圧が直流ではなくマイクロ秒パルスであること、CeB₆カソードが残留ガスや暗電流に対して非常に強い特性を持っていることから、究極の鏡面仕上げは行わず、切削加工時に混入したオイルなどの汚染物質を除去する目的で、化学研磨と超純水洗浄を施す程度に留めた。実際、高電圧を印加してみると、予想外にスムーズにプロセッシングが進み、半日で500 kVを達成することができた。但し、セラミックス等が予期せぬ高電圧破壊を起こしかねないので、最初のプロセッシング時には慎重に時間をかけて昇圧することにして

いる。

その後、徐々にヒーター出力を上げ、最終的にエネルギー500 keV、ピーク電流1 Aのビーム生成を達成した。そして、ダブルスリット法によりエミッタンス測定を行い、規格化エミッタンス0.6 π mm mrad (rms、90% core part) を確認した^[7]。

4. SCSS試験加速器における運転

開発したCeB₆熱電子銃は、XFELのための実証用試験器として2005年に建設されたSCSS試験加速器において、最終性能を確認することとなった^[13]。2006年には最初のレーザー増幅の観測に成功し、2007年にはレーザー出力の飽和が達成された^[14]。この時点で、低エミッタンス電子源としての基本性能が実証されたわけであるが、重要なのは、日々の連続運転に耐えうるかどうかである。SCSS試験加速器では、2008年度より極端紫外レーザー光を利用した本格的なユーザー運転が開始された^[15]。CeB₆熱電子銃は日々、安定な低エミッタンスビームを発生し、様々なユーザーのためにレーザー光を提供している。2011年にはXFELの運転が始まる^[16]。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、新竹積先生には研究全般に渡り的確な指導をして頂きました。馬場斉先生、松本浩先生には変調器電源や電子銃トランスなどの高電圧機器に関する指導をして頂きました。稲垣隆弘氏、尾上和之氏とは常に議論を交わし実験においても惜しみない協力を頂きました。田中隆次氏にはエミッタンス測定において解析ソフトの開発を行って頂きました。田中均先生、大竹雄二先生、運転員および研究員の皆様にはSCSS試験加速器における電子銃の実用化において多大なご指導、ご協力を頂きました。この場をお借りして、感謝の意を述べさせていただきます。

参考文献

- [1] T. Shintake *et al.*, Proceedings of SPIE **4500** (2001) p.12
- [2] Applied Physics Technologies, <http://www.a-p-tech.com/>
- [3] 栗原俊一 他, 第17回リニアック技術研究会(1992)p.25
- [4] J. Haimson *et al.*, Proceedings of PAC1997 (1998) p.2808
- [5] J.D. Sprehn *et al.*, SLAC-PUB-8346 (2000)
- [6] 稲垣隆弘 他, 第28回リニアック技術研究会(2003)p.129
- [7] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. ST-AB **10** (2007) 020703
- [8] 渡川和晃 他, 第26回リニアック技術研究会(2001)p.147
- [9] 渡川和晃 他, 第28回リニアック技術研究会(2003)p.117
- [10] イビデン株式会社, <http://www.ibiden.co.jp/>
- [11] 株式会社大起, <http://www.h7.dion.ne.jp/~daiki/>
- [12] 渡川和晃 他, 第1回日本加速器学会年会(2004)p.93
- [13] 東谷篤志 他, 第3回日本加速器学会年会(2006)p.305
- [14] T. Shintake *et al.*, Nature Photonics **2** (2008) p.55
- [15] 渡川和晃 他, 第6回日本加速器学会年会(2009)本年度
- [16] <http://www.riken.jp/XFEL/jpn/index.html>