

カーボンナノチューブ冷陰極の特性測定

大澤 哲^{1,A)}、池田光男^{A)}、杉村高志^{A)}、穂積康文^{B)}

^{A)} 加速器研究機構 加速器研究施設

〒305-8081 茨城県つくば市大穂町1-1

^{B)} 総合研究大学院大学 数物科学研究科

〒240-0193 神奈川県三浦郡葉山町

概要

加速器の電子銃に使える大電流冷陰極を求めて、カーボンナノチューブ (CNT) 陰極の共同研究を進めてきた。その結果、最近になり、放射電流密度がパルスで 3 A/cm^2 を越える CNT 陰極が得られた。この CNT 陰極を中心に、これまでの試験結果について報告する。

1. はじめに

複数の会社の協力を得て、これまで2年間ほど、各種冷陰極の特性測定を行ってきた。CNT 陰極は大電流が期待できるので、測定はもっぱらパルスで行い、パルス幅を変えることにより発熱による真空悪化等の問題を回避した。

最初の年は、CNT 陰極をガラスチューブに封入した真空管を用いた^[1]。これから始めたのは、真空排気系が不要で測定が容易であったからである。翌年は、陰極部分が容易に交換可能な三極管型試験用電子銃を用いて、各種の冷陰極の特性測定を行った^[2]。

その結果、中には放射電流密度がパルスで 3 A/cm^2 を超える CNT 陰極があることがわかった。この値は、市販されている熱陰極の最大放射電流密度に迫るものである。この陰極は、ヒーターが不要である上に、真空度にあまり左右されない等の特徴がある。この特徴を生かせば、取り扱いが容易で単純な電子銃が誕生する可能性がある。また小型化が容易であるから、従来よりもはるかに低エミッタンスの電子銃に応用できる可能性も考えられる。

今回は、CNT 陰極を中心に放射電流密度と寿命について測定したので、その結果について報告する。

2. 測定装置

2.1 測定回路

冷陰極の電流特性を測定するのに、図1に示した回路を用いた。実用的な形に近い三極管型電子銃で、各部に流れるパルス電流を測定した。グリッド接地にしたので、ビームが引き出すのときは陰極に負のパルス電圧を印加し、電圧を高圧プローブで測定した。またグリッドを通過するビームを加速してキャッチャまで導くために、陽極とビームキャッチャにそれぞれ $\text{DC} + 8 \text{ kV}$ (固定) を印加した。ただ

し、ビーム形状を観察する場合は、キャッチャの代わりに蛍光板を用いた。尚、各電流モニターの極性は、+ から - 方向に電流が流れた場合に正のパルス信号が出力されるように接続した。

陰極電流は、そこに掛かるパルス電圧で基本的には制御される。ところが放電等で大電流が流れ、陰極を破損する場合がある。グリッドパルサーの出力に直列に入っている抵抗は、その破損を防止するための保護抵抗である。この値は場合により調整した。

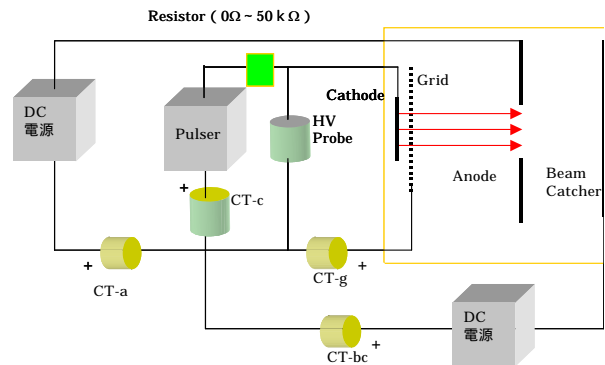


図1：測定回路

2.2 試験装置と陰極部の構造

測定に使用した三極管型の試験用電子銃では、陽極を3本のボルトで固定している。図2の場合は、この陽極に蛍光板が固定されており、陽極と蛍光板



図2：測定に使用した三極管型の試験用電子銃

¹ E-mail: satoshi.ohsawa@kek.jp

の両方に流れた電流が測定される。電流密度が高い場合は蛍光板をはずし、絶縁されたキャッチャに変えて独立に電流を測った。

グリッドはウエネルト電極に固定されている。グリッドと陰極間距離を変える場合は、セラミックスの下に敷いている金属リングの厚さを調整した。

陰極部の形状は、図3のようになっており、平円板の中央に直径6mmの陰極を置いた。この平円板を、絶縁セラミックスや金属リングとともにホルダーに入れると、図4に示したように、相対位置が精度良く決まる構造になっている。



図3：陰極の1例。中央の直径6mm部分が陰極。

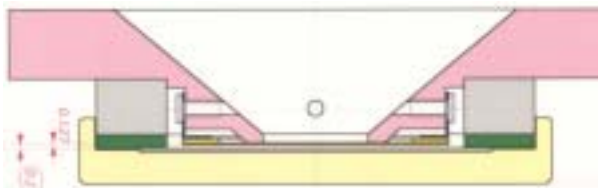


図4：電子銃の陰極・グリッド部の構造

3. ビームのパルス波形とビーム形状

各部に流れるパルス電流とグリッドパルス電圧波形の一例（A2陰極）を次に示す。パルス電流の始まりと終わり部分に、平坦部より大きな電流が流れているが、これは回路の浮遊容量に流れる変位電流であり、陰極電流とは無関係な電流である。この電流

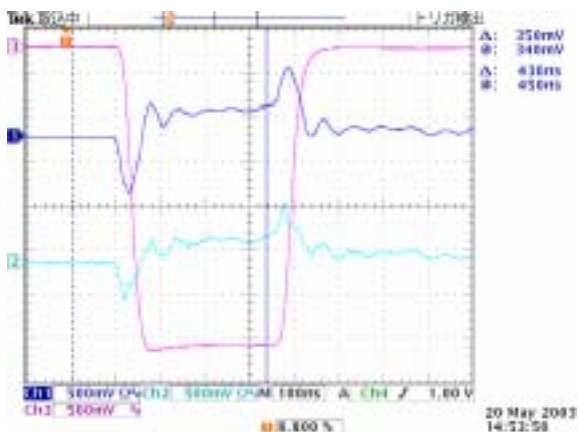


図5：各部の電流パルス波形 CH1:ビームキャッチャが存在する電流、CH2: アノード電流、CH3:グリッド

ド電圧波形ために、ビームのパルス幅を100ns以下に短くするのが困難であった。これ以下にすると平坦部がなくなり、正確な陰極電流が測定できなくなるためである。

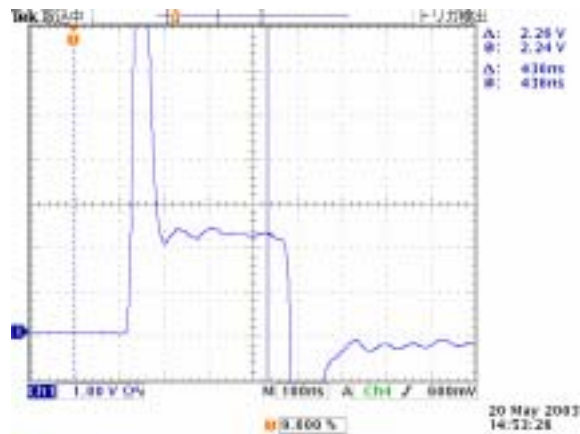


図6：陰極電流のパルス波形（A2陰極）

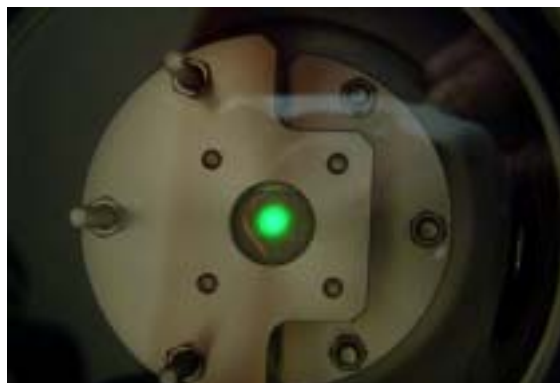


図7：A2陰極のビームで発光している蛍光板

4. 測定結果と考察

冷陰極とグリッド間の電界強度を次第に増やし、陽極側に達する電流変化を測定した結果が図8である。陰極の種類により電流密度が大きく異なるのがわかる。最も最大電流密度の大きかったA2の場合は安定で、 1 A/cm^2 を超えても、放電等の異常はほとんど見られなかった。

これに対し、2番目に成績の良かったCNF2の場合は、 0.1 A/cm^2 を超えたあたりで時々放電が始まった。そのときの電流密度を、陰極から均一に電流が流れていると仮定して計算した結果を図8に示した。異常電流が流れると、陰極に損傷を与えるためであろう。陰極の電界強度を上げて電流は増加しない。V2の場合は損傷がもっと顕著で、測定終了後に見たら、陰極のかなりの部分が剥落していた。

次にA2について少し詳しく見てみよう。陰極電流密度を何度か測定した結果が図9である。測定のために特性曲線が右側にシフトしている。中央の赤のデータを測定後、10Hzで1週間程連続運転した。そ

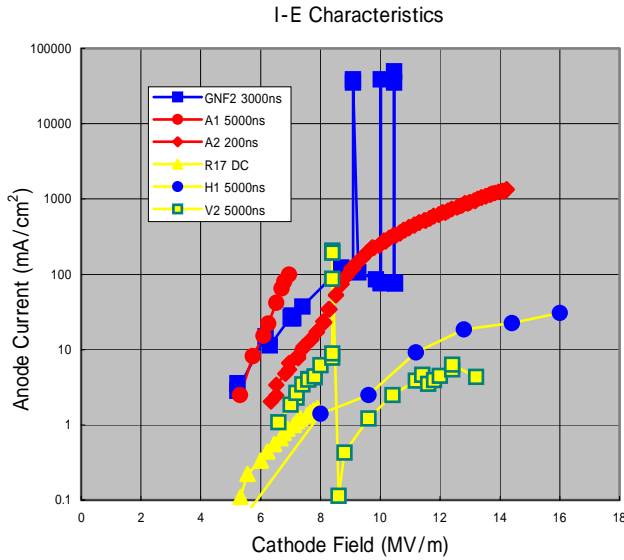


図 8：各種冷陰極のアノード電流密度特性

の時の電流変化を示したのが、図 10 である。赤が陰極電流である。1日あたり 45mA/cm^2 ずつゆっくり減少している。ベイキングせずにターボ分子ポンプで排気しているだけであるから、真空は 10^{-6}Pa 台と必ずしも良くない。ビーム電流の減少と真空は関係あると思われるが、詳細は今後の課題である。

上で述べた 1 週間の連続運転後に測定したデータが、図 9 の紫の四角に示されている。連続運転中にビームが減少したが、陰極の電界強度を上げると電流は復帰した。ただし 3A/cm^2 を超えたところで放電が始まり、しばらくその状態にした後再度測定したところ、特性曲線が更に右にシフトした。 20MV/m

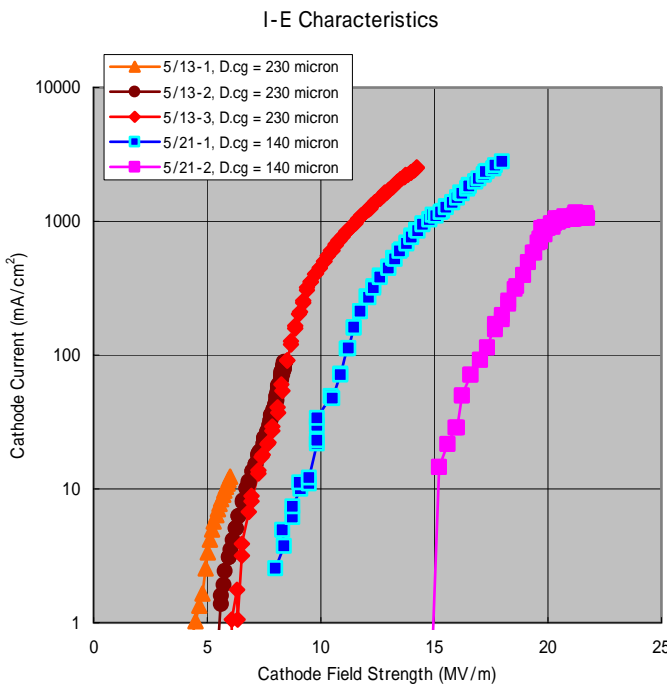


図 9：A2陰極のアノード電流密度特性

のところ電流が頭打ちになってのは、放電のために陰極が損傷したためと思われる。

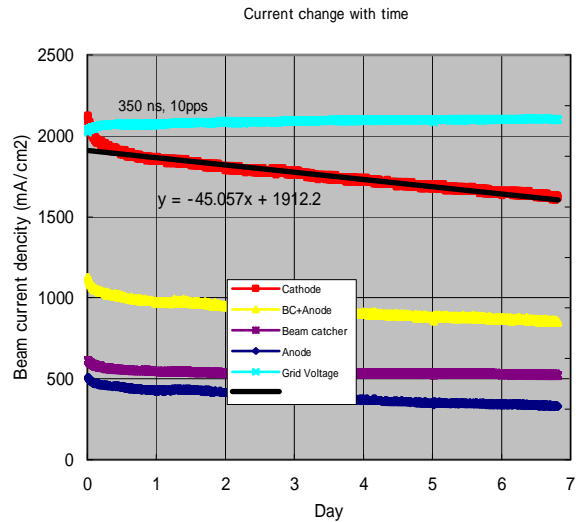


図10：A2を陰極にした電子銃各部の電流密度変化

5. 今後の方針

これまでの調査で有望な特性を持つCNT陰極が見つかったので、今後はこの陰極を用いて、加速電圧 100kV 程の実用的なCNT電子銃の開発をめざす。その際、ビームのパルス幅を実用的なレベルまで出来るだけ縮める。このことにより、最大電界強度が上がり、結果的に最大放射電流密度が増加するものと期待される。一方、この陰極自体の放射電流密度を高めることも大切であるので、こちらの共同研究も更に進める。

6. 謝辞

本件の研究は 2 年前に、当時物構研所長であった木村嘉孝先生のお勧めで始まったもので、木村先生と前の機構長の菅原寛孝先生にCNT陰極の研究費を援助していただいた。また産総研の湯村守雄氏の紹介でノリタケ伊勢電子(株)との共同研究が一昨年にスタートし、昨年は石川島播磨重工(株)にも参加していただいた。本件の研究成果は、これらの共同研究によるところが大である。なお(株)アルバックにも、陰極資料の提供でご協力ねがった。関係者の皆様に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Saito, et al. "Cathode Ray Tube Lighting Elements with Carbon Nanotube Field Emitters.", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37 (1998) pp. L346-348, Part 2, No. 3B, 15 March 1998
- [2] A. Yamamoto, et al., "The Research on the Carbon Nano Tube Cathode", Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference., Portland, Oregon, May 12-16, 2003