

リニアカソード型電子銃の開発

Development of Linear Cathode Electron Gun

技術本部 若元 郁夫*¹ 浦野 晋*²

小島 広次*³

神戸造船所 徳永 一敏*⁴

本研究では高融点金属の蒸着等を対象とする加熱源として長尺線状の電子ビームが比較的低温で得られる電子銃（リニアカソード型電子銃）の開発を実施した。まず低温動作カソード材料の電子放出特性を比較し、カソード材料として雰囲気圧力特性に優れる六ホウ化ランタン（LaB₆）を選定した。さらにこの材料を用いたカソード長 100 mm のリニアカソード型電子銃を試作し、出力 100 kW、ビーム長≒100 mm、ビーム幅≦5 mm の線状電子ビームを得た。また、出力 15 kW において 10 h 連続運転を実施して、ビーム電流安定性±10%（ビーム電流非制御時）であること及びカソード損傷状況がほとんど生じないことを確認した。今後は、さらなる長尺化、大出力化、高加速電圧化等を図っていく予定である。

In this study, a linear cathode electron gun was developed which made a long-line electron beam with a relatively low temperature thermionic cathode. Firstly, the electron emission characteristics of cathodes operating at low temperatures were compared and lanthanum hexaboride (LaB₆) was selected. Secondly, a linear cathode electron gun using a LaB₆ cathode was manufactured and a power of 100 kW, a beam length of approximately 100 mm and a beam width of less than or equal to 5 mm were obtained. Furthermore, a current stability of ±10 % was obtained on the condition that a power of 15 kW, a continuous operating time of 10 hours and non-controlled emission. The performance of this gun will be improved for a longer beam length, a longer life-time, a higher acceleration voltage etc.

1. ま え が き

近年、機能向上を目的としたフィルムや鋼板表面への高融点金属の蒸着等、各種方面に適用されてきている真空蒸着では加熱源として電子ビームが多く利用されている。また電子ビームはこのほかにも滅菌、硬化処理等多岐の分野にわたって実用化されつつある。

電子ビームの照射範囲が広域にわたる場合、従来はスポットビームを走査して使用していたが、蒸気密度変動によりラインスピードに制約を生じる、装置高さが高くなる、電源類が複雑になる等の課題があった。また、陰極（以下 カソードと呼称）材料にはタングステンが広く用いられているが、動作温度が高いため大出力時には熱負荷の面で課題があった。

本研究では前記各課題に対応できる長尺線状の電子ビームが比較的低温で得られる電子銃（以下 リニアカソード型電子銃と呼称）の開発を実施した⁽¹⁾。まず、低温動作カソード材料の電子放出特性を比較して、適切なカソード材料の選択を行った。さらにこの材料を用いたカソード長 100 mm のリニアカソード型電子銃を試作して出力特性等の評価を行った。

2. リニアカソード型電子銃の概要

リニアカソード型電子銃では、く形状のカソードから引き出した長尺線状の電子ビームを外部磁場により偏向してつば中のターゲットに照射する。このため、スポットビームを走査する従来法よりもゆらぎのない安定な蒸着が可能で、蒸着ラインスピードの向上等高性能化が図れる。

3. カソード材料特性試験

3.1 カソード材料の選定

高温物質中の電子が熱的に励起され物質外へ放出される現象を

熱電子放出と言う。このとき温度 T (K) の物質表面から放出される電流密度 J (A/cm²) はリチャードソン・ダッシュマンの式⁽²⁾で表される。

$$J = AT^2 \exp(-\phi/kT) \quad (1)$$

ここで、

A : リチャードソン定数 [A/(cm²·K²)]

k : ボルツマン定数 (eV/K)

ϕ : 仕事関数 (eV)

電子放出材料に一般に使用されているタングステン (W) と比較して、仕事関数が小さく相対的に低温動作が可能でかつ蒸発量が小さいため長寿命化が期待され、さらに電子管も含め使用実績があるカソード材料として六ホウ化ランタン (LaB₆) とバリウム侵食タングステン (Ba-W) がある。本研究ではこれらに W を加えた 3 種類のカソード材料を採用候補として選定し各種性能比較を実施した。

3.2 試験方法

前記各材料をカソードとして使用するために円板状 (φ12× t 2.6 mm) に加工した。表 1 に試験に供したカソード材料の仕事関数等熱電子放出特性、成分及びカソード形状を示す。なお、Ba-W は試験前に活性化処理を行った。

各種出力特性試験において、電子銃はスポット型 180°偏向銃を加速電圧 5 kV のパルス運転で使用した。ターゲットはタングステンである。カソード加熱方式に関して W は直熱式、LaB₆ 及び Ba-W はタングステンフィラメントによる放射加熱式とした。カソード温度は上部の石英ガラスを介して放射温度計により測定した。また、装置内圧力は乾燥空気をリークバルブで供給して $5 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-4}$ Torr の範囲で制御した。

3.3 試験結果

図 1 に各種カソードのカソード温度とビーム電流密度の関係を示す。なお、電流密度は得られた電流をカソードの電子放出面積

*¹ 広島研究所応物・振動研究室主務

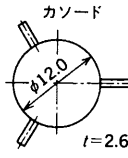
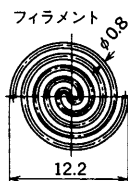
*³ 広島研究所実験課

*² 広島研究所応物・振動研究室

*⁴ 原子力プラント技術部量子システムグループ

表1 カソード材料特性試験供試体一覧

Chemical composition and shape of various test piece for cathode evaluation test

分 類	記 号	熱電子放出特性 ⁽²⁾		化 学 成 分					カソード及び カソード加熱用 フィラメント形状
		ϕ (eV)	A [A/(cm ² ・K ²)]	LaB ₆	BaO	CaO	Al ₂ O ₃	W	
ホウ化物	LaB ₆	2.66	29	100 (wt%)	—	—	—	—	カソード 
含 浸	Ba-W	1.56	1.5	—	18～20 (vol %)			80～82 (vol %)	フィラメント 
					モ ル 比				
					4	1	1		
純 金 属	W	4.5	75	—	—	—	—	100 (wt%)	

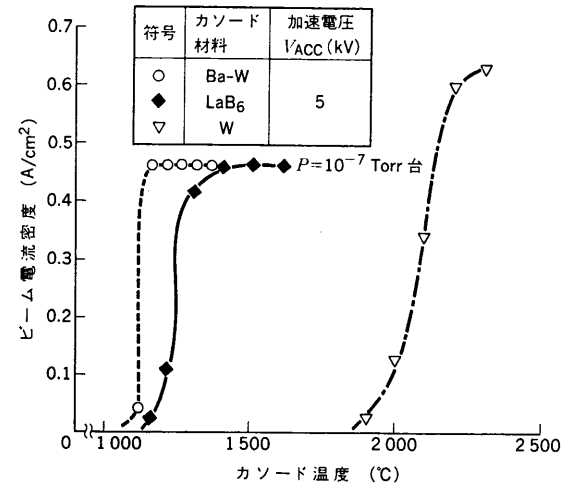


図1 各種カソードのカソード温度と電流密度の関係
Ba-W及びLaB₆の動作温度は従来一般に使用されてきたWよりも1000℃以上低い。
Current density dependence on various cathode temperature

(Wは投影面積)で除して求めた。電流密度はカソード温度を増加させると式(1)に従い増加するが空間電荷制限値に達すると一定値となる。この温度を動作温度とすると、動作温度はBa-Wが1150℃以上、LaB₆が1300℃以上であり、従来カソード材料として一般に使用されてきたWよりも1000℃以上低いという結果を得た。なお、Wに関しては本図中に示す温度範囲では空間電荷制限値に至っていない。また、図2に各種カソードにおける雰囲気圧力とビーム電流変化率の関係を示す。これよりビーム電流を一定値に維持するために必要な電子銃雰囲気圧力は、Ba-Wではカソード温度1250℃において 1×10^{-6} Torr以下であり、1350℃においても 5×10^{-6} Torr以下である。一方、LaB₆ではカソード温度1350~1400℃において 2×10^{-4} Torrの圧力でもよい。これよりBa-Wと比較して動作温度は若干高いものの圧力特性に優れるため、LaB₆の方が真空蒸着時の比較的高い雰囲気圧力条件においても安定に運転できることが明らかとなった。

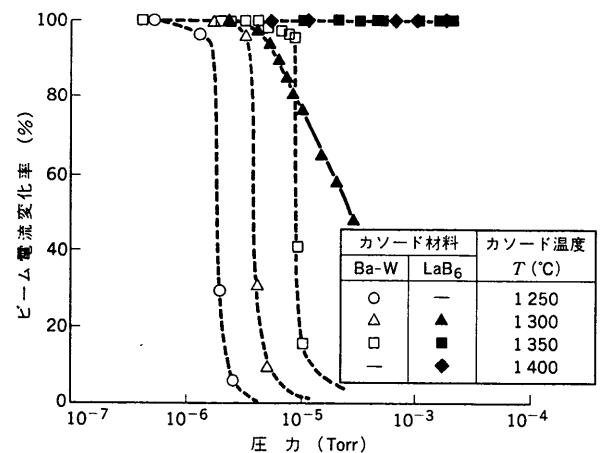


図2 各種カソードの雰囲気圧力と電流密度変化率の関係
LaB₆はBa-Wよりも高い電子銃雰囲気圧力下においても安定に動作する。
Stability of current density dependence on pressure

4. リニアカソード型電子銃の試作

4.1 電子銃の基本設計

熱陰極電子銃はビーム電流値がカソード温度により決定される温度制限領域と加速電圧及び電子銃電極構造により決定される空間電荷制限領域に囲まれた領域で動作する。温度制限領域における最大ビーム電流 I (A)は以下の式から求まる。

$$I = JA \quad (2)$$

ここで、

J : 電流密度 (A/cm²)

A : 電子放出面面積 (cm²)

またアノードとカソードから構成される電子銃において、カソードを空間電荷制限領域で動作させた場合のビーム電流 I (A)と加速電圧 V (V)の関係は以下の式から求まる⁽³⁾。

$$I = PV^{3/2} \quad (3)$$

ここで、 P はパービアンズ (A/V^{3/2}) と呼ばれ、構造寸法により定まる定数である。一般に 1×10^{-6} (A/V^{3/2})以上の電子銃が高パービアンズ型と呼ばれる。

一方、ビーム断面がく形状のリニアビームの場合、パービアンズ P は以下の式から求まる⁽³⁾。

$$P = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{A}{d^2} = 2.334 \times 10^{-6} \frac{A}{d^2} \quad (4)$$

ここで、

ϵ_0 : 真空の誘電率 (F/m)

e : 電子の電荷 (C)

m : 電子の質量 (kg)

A : 電子放出面面積 (cm²)

d : カソード-アノード間距離 (cm)

本研究では加速電圧30 kV以下、ビーム電流3.4 A以上、最大出力100 kWを目標に、式(2)~(4)を基にカソード形状及びカソード-アノード間距離を設定した。なお、パービアンズは $1 \sim 2 \times 10^{-6}$ A/V^{3/2}に設定した。さらに、有限要素法による電子ビーム軌道解析を実施して詳細電極形状を設定した。図3に270°偏向位置の集光性に及ぼすカソード構造の影響を軌道解析した結果の一例を示す。通常のカソード構造では電子は電界による引出しが及ぶカソード全面から放出されるため、カソード表面中央以外から放出された電子の270°偏向位置でのビーム全幅は30.4 mmである。一方、カソード中央部のみから放出される場

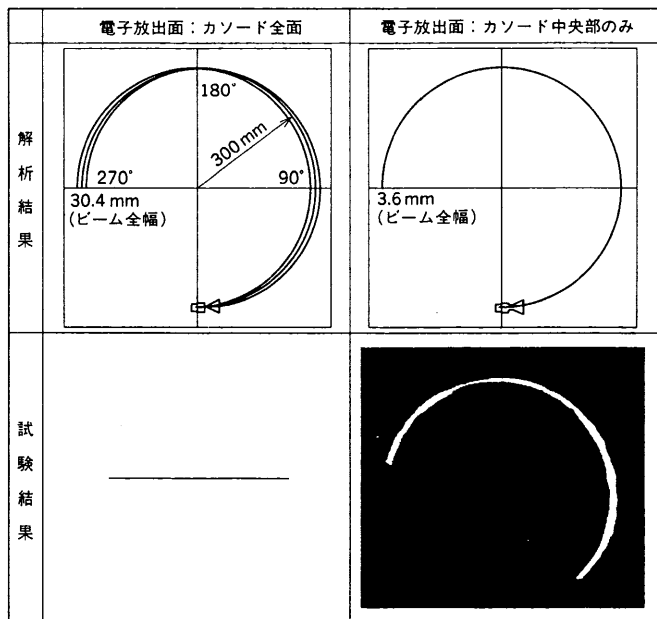


図3 電子ビーム集光性に及ぼすカソード構造の影響 カソードは表面中央からのみ電子放出させる構造が集光性が良い。なお、実験でも当該構造の有効性は確認できた。
Effect of cathode type on electron beam trajectory



図4 試作リニアカソード型電子銃外観 本研究で試作したカソード材料 LaB_6 、カソード長 100 mm の低温動作傍熱式リニアカソード型電子銃の外観を示す。
Appearance of manufactured linear cathode electron gun

合は 3.6 mm となる。これにより良好な集光性を得るためにはカソード表面中央からのみ電子放出させる構造とする必要があることを明らかにした。

4.2 電子銃の試作

カソード材料に LaB_6 を選定し、温度制御性、ビーム集光性及びビーム電流制御性に優れたカソード長 100 mm のグリッド付き傍熱式リニアカソード型電子銃を試作した。本電子銃はカソード、カソード加熱用フィラメント、グリッド、アノード等から構成される。なお、カソードは基本設計結果を参考に LaB_6 を比較的反応しにくい高融点金属構造体に挿入した構造とした。図4に試作したリニアカソード型電子銃の外観を示す。

5. リニアカソード型電子銃特性評価試験

5.1 試験方法

図5に試験装置構成を示す。本装置を用いて電子ビームを外部磁場で 180° 又は 270° 偏向後、るつば中のタングステン又は銅タ

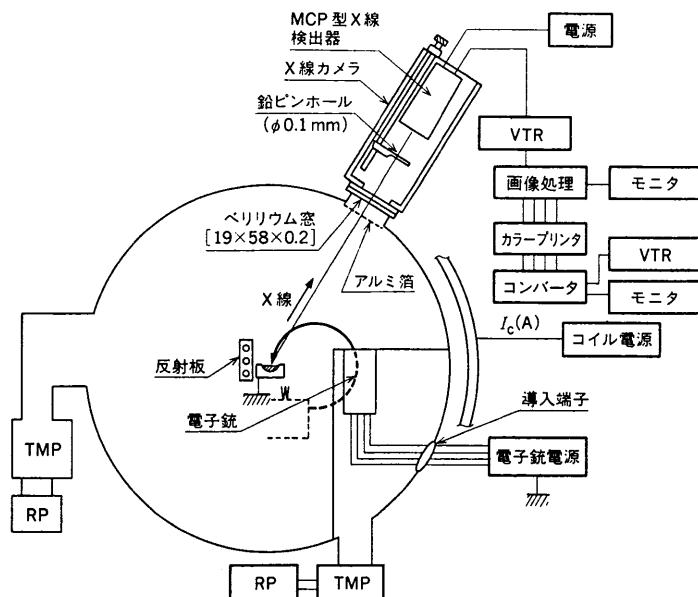


図5 リニアカソード型電子銃特性評価試験装置構成 リニアカソード型電子銃特性評価試験で使用した試験装置構成を示す。
Apparatus for performance evaluating test of linear cathode electron gun

ーゲットに照射して各種出力特性試験を行った。なお、ビーム形状及び出力密度分布は当社開発済みの X 線カメラ⁽⁴⁾⁽⁵⁾により測定した。X 線は制動放射という現象により高エネルギー電子が物質中に入射した際に放射され、その強度は入射電子エネルギー、電流値、物質の原子番号等により決定される。X 線は人体に悪影響を及ぼすため、試験時には真空容器胴体部及び X 線カメラ周辺には必要厚さの鉛板を設置して X 線遮へい対策を施した。

5.2 試験結果

5.2.1 出力特性

図6に試験結果を示す。(a)に示すカソード温度特性から加速電圧 20 kV 以上でほぼ設計値のビーム電流が得られたこと及び(b)に示す加速電圧特性からパービアンスは基本設計値のほぼ $1 \times 10^{-6} \text{ (A/V}^{3/2})$ が得られたことが分かる。また別に、カソード温度 1450°C において加速電圧 25 kV 及びグリッド電圧 1.5 kV の条件においてビーム電流 4 A、出力、100 kW を達成した。

図3中に蛍光板を使用して撮影した電子ビームの可視化状況を示す。電極間距離とグリッド電圧の最適化により平行ビームが得られ、良好な集光性を示している。

図7に X 線カメラによる溶融金属面上のビーム形状例を示す。これより、均一出力の線状電子ビームが得られたことが分かる。また、X 線カメラの光学系の倍率からビーム長約 100 mm、ビーム幅 5 mm 以下であることを確認できた。

5.2.2 寿命特性

15 kW で連続 10 h の銅蒸発試験を行いビーム電流の安定性及びカソード損傷状況を調査した。その結果、ビーム電流非制御時でのビーム電流安定性が $\pm 10\%$ あること及びカソード重量に変化が見られないことが明らかとなった。

5.2.3 まとめ

以上の結果から、リニアカソード型電子銃の設計の妥当性を検証するとともに真空蒸着装置等比較的圧力の高い雰囲気においても安定的に利用可能である LaB_6 を用いたリニアカソード型電子銃の採用見通しを得ることができた。今後はより幅広い蒸発面の形成と長時間連続運転が可能となるように、さらにビーム長尺化

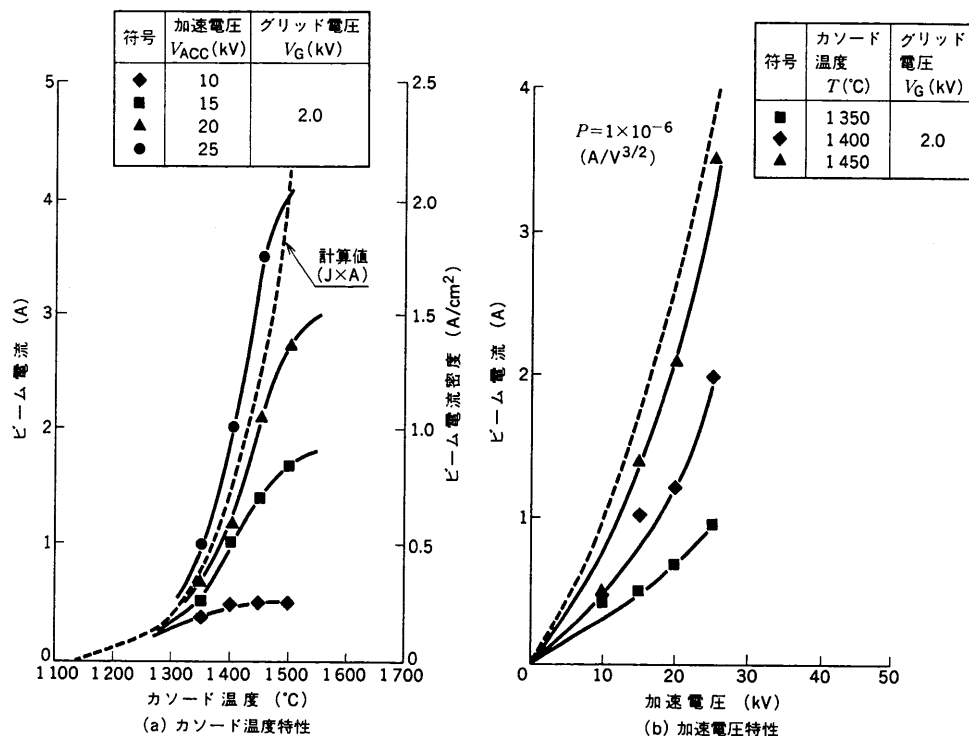


図6 リニアカソード型電子銃の出力特性 (a)から加速電圧20 kV以上ではほぼ設計値のビーム電流が得られたこと及び(b)から設計値のパービアンスが得られたことが分かる。
Output characteristics of linear cathode electron gun

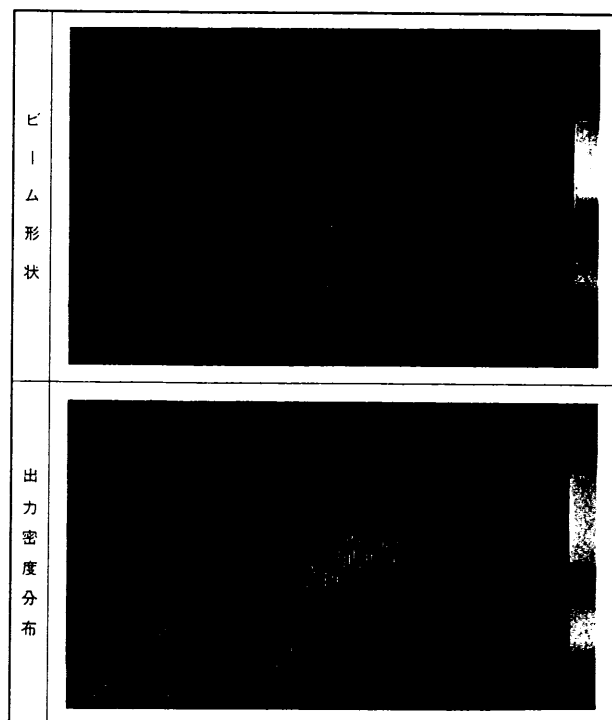


図7 リニアカソード型電子銃のビーム形状及び出力密度分布
X線カメラを用いて評価したリニアカソード型電子銃における
ビーム形状及び出力密度分布を示す。
Shape of linear beam and beam density distribution of linear
cathode electron gun by X-ray camera

及び大出力時の長寿命化について検討していく予定である。

電子ビームを利用した各種電子ビーム照射分野においては、連続的処理を行うために電子ビームを薄膜を介して大気中に出して利用しているものも多い。このような利用目的を対象として、今後は高加速電圧化、大気中への取出し技術及び発生するX線

対策の構築等を行い、各種電子ビーム照射分野に供する小型で長尺のリニアカソード型電子銃の開発を行っていく予定である。

6. む す び

低温で動作するカソードを用いたリニアカソード型電子銃の開発を実施して以下の結果を得た。

- (1) 従来からカソード材料として利用されてきたタングステンよりも低温で動作するカソード材の特性を把握し、比較的雰囲気圧力依存性の小さい六ホウ化ランタンを選定した。
- (2) 六ホウ化ランタンを用いたカソード長100 mmのリニアカソード型電子銃を試作し、出力100 kW、ビーム長約100 mm、ビーム幅5 mm以下の線状電子ビームを得た。また15 kWで連続10 hの銅蒸発試験を行い、ビーム電流安定性 $\pm 10\%$ (ビーム電流未制御時)を得た。

これより、真空蒸着装置等比較的圧力の高い雰囲気においても安定的に運転可能であるLaB₆を用いたリニアカソード型電子銃の実用見通しを得ることができた。

今後は、更なるビーム長尺化、大出力時の長寿命化、高加速電圧化等について検討する予定である。

参 考 文 献

- (1) 若元郁夫ほか、リニアカソード型電子銃の開発、溶接学会全国大会講演概要 第51集 (1992) p.340
- (2) 中 重治ほか、電子材料セラミクス、オーム社、(昭和61年) p.156
- (3) 日本学術振興会第132委員会、電子-イオンビームハンドブック (第2版)、(昭和63年) p.115~145
- (4) 手島和範ほか、超高感度X線カメラの開発、第39回応用物理学会関係連合講演会予稿集 30 a-SNC-25 (1992) p.563
- (5) 若元郁夫ほか、電子ビームプロファイルモニタ装置の開発、三菱重工技報 Vol.30 No.4 (1993) p.329