

# 高密度プラズマ生成のための高性能 LaB6 陰極の試作・開発

高木 誠

工学研究科・工学部技術部 装置開発技術系

## はじめに

近年産業面への放電プラズマ応用は顕著で、プラズマ CVD・電子線加速器・各種イオン注入装置など多目的に利用されて来ている。最近放電用陰極の熱電子放出材料としてセラミックである LaB6 が、金属材料であるタングステンなどに比べて熱電子放出に優れ仕事関数が小さく、使用温度が低く抑えられ消費電力も小さくでき、使用中いったん大気にさらしても熱電子放出特性が劣化しないことから用いられるようになってきている。特に高密度プラズマ生成に LaB6 は欠かせない材料として位置づけられ、高い電子放出性能を有する LaB6 陰極の開発が求められているものの、その構造・耐熱対策などの点から現在いろいろ模索が続いている。

高熱流プラズマ発生装置 NAGDIS-II やトロイダル・ダイバータ模擬試験装置の陰極製作に関しても、これまで硬く脆く加工しにくい LaB6 の加工をメーカーに依頼せざるを得なく、プラズマ生成部の開発に限界があった。しかし、近年 LaB6 の微細加工を大学内にある放電加工機で試み成功したのでこれを活用し、これまで LaB6 カソードおよびフィラメントの設計・開発で培ってきた技術を生かし、高密度プラズマ生成のための高性能陰極の試作・開発を行なったので報告する。

## 1. 傍熱型 LaB6 陰極表面構造の最適化による熱電子放出特性の向上

具体的には放電加工機で LaB6 表面に微細な凹凸加工を行ない、後述する試験装置の傍熱型陰極として用い、これまで使用されてきた円板状 LaB6 陰極による生成プラズマの熱電子放出特性と比較した。以下試験装置・そのプラズマ生成部(陰極部)・プラズマ計測装置(高速掃引プローブ)・縦横溝切り LaB6 陰極の試作およびその試験結果について述べる。

### 1.1 傍熱型 LaB6 陰極特性試験装置

傍熱型 LaB6 陰極の特性試験は、高熱流プラズマ発生装置 NAGDIS-II にて行なった。装置の概略図を図 1 に示す。本装置はプラズマ生成部・高周波プラズマ加熱部・プラズマ計測部からなり、直径 194mm 長さ 2.5m

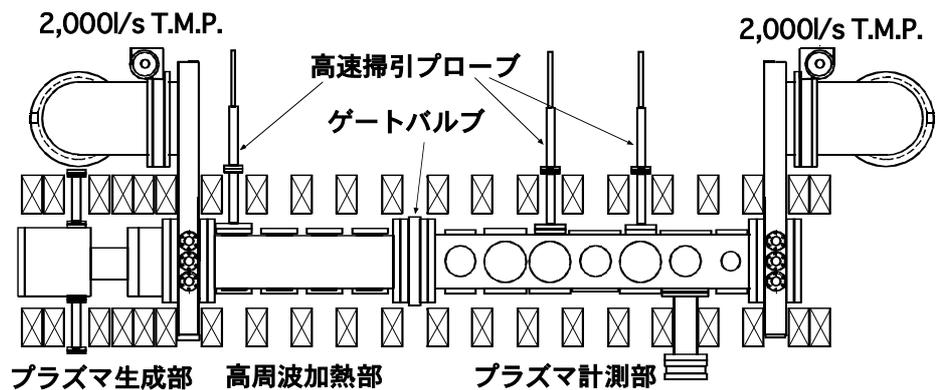


図 1 高熱流プラズマ発生装置 NAGDIS-II

の容器を 2 台のターボ分子ポンプ(排気速度 2,000[l/s])で排気している。またプラズマ生成部にある中間電極及び陽極がオリフィス形状になっており、プラズマがない場合でもプラズマ生成部と高周波加熱部・計測部との間に 10~50 倍程度の圧力差が生み出され、生成部での高圧力

下でのプラズマ生成が可能になっている。そして22個のトロイダルコイル（プラズマ計測部真空容器中心にて最大2.5kGauss<sup>-1</sup>）が一様な磁場を発生させており、直径約2.5cm・長さ約2.0~2.5mのプラズマコラムが生成される[1]。

### 1.2 プラズマ生成部（陰極部）

LaB<sub>6</sub> 陰極ディスクが有効な熱電子放出を行なう温度は1,500~1,600である。そのためヒーターには3mm タングステン（W）を用い、ヒーター自身の温度を2,000前後まで加熱する。そこでその熱対策が重要となり、陰極支持用円筒やその台座には融点2,600のモリブデン（Mo）を用いると同時に、それらを固定するための絶縁物として不活性雰囲気使用可能温度2,000~2,500のボロンナイトライド（BN）を使用している。また円筒内に直接挿入する放電用ガスパイプ部分には絶縁と耐熱を兼ねさせるため融点約2,000の酸化セラミックス（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）を使用している。また電流導入端子は熱伝導性に優れた銅製とし、その後方に位置するフランジも放射熱に晒されるためフランジ自体を水冷している。実物を写真1に概念図を図2に示す。



写真1 陰極部及びカソードフランジ

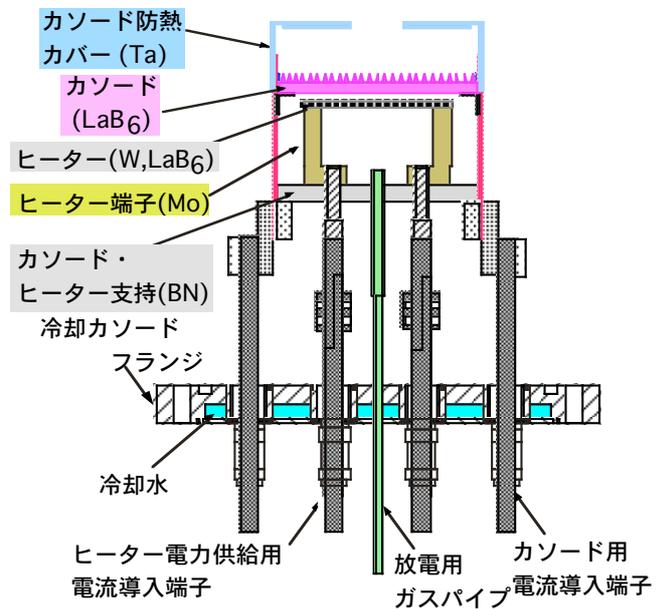


図2 高性能LaB<sub>6</sub>陰極試作・開発用冷却カソードフランジ

### 1.3 プラズマ計測装置

プラズマパラメーターの計測に、定常高熱流プラズマの熱的な損傷を防ぐために高速掃引プローブ計測システムを使用した。圧搾空気シリンダー（ストローク長200mm、往き0.3sec 帰り0.5sec）による駆動と高速ファイバマークセンサによる位置検出により2mm間隔でデータを取り込む[2]。プローブシステムの概略を図3に示す。計測用に3台（上流域・中流域・下流域）が図1に示すように設置しており、今回中流域を使用した。

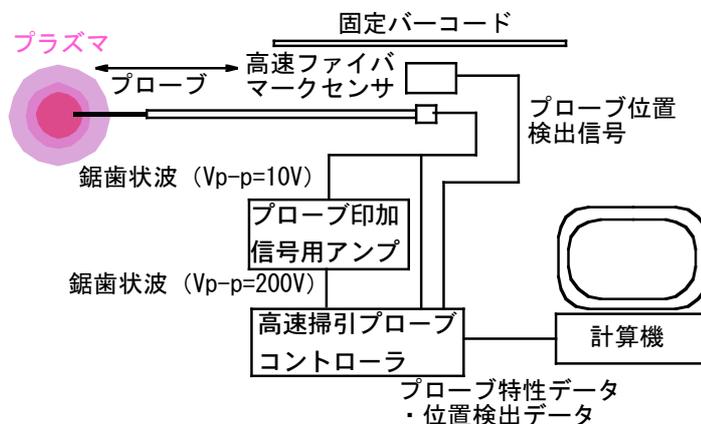


図3 高速掃引プローブ計測システム

#### 1.4 傍熱型縦横溝切り LaB6 陰極の試作

これまで使用されてきた LaB6 (六ホウ化ランタン) 陰極は直径 108mm 厚さ 6mm の円板であるが、外径を幅 9mm のリングで固定しているため、陰極としての有効径は 90mm となり、表面積は 64cm<sup>2</sup> である。今回この LaB6 の表面積を可能な限り大きくするために、その表面に深さ 3mm・幅 0.25mm (0.2mm ワイヤー使用のため) の溝を縦横 0.5mm 間隔に入れることにした。これは 2 年前学内のワイヤー放電加工機を使っての LaB6 セラミック加工で、溝間隔 0.4mm (長さ 70mm 厚さ 55mm 幅 1.5mm の材料に楕形状) の縁が多少欠けたものの試作の成功をベースとしている [3]。しかし今回の形状の加工ではワイヤーと LaB6 との放電距離が長く、加工中の真鍮ワイヤー切断回数や溝の欠けが多く、加工も長時間に及ぶ可能性が出て来たために縦横の溝間隔を 1.5mm に変更することになった。その結果表面積がこれまで使用されてきた陰極より約 11 倍の 696cm<sup>2</sup> となった。実際には LaB6 陰極は円板状ではなく、高温のひずみによる割れを防ぐために四分割で製作 (図 4) され、それを四つまとめ固定し陰極として使用する (写真 1)。

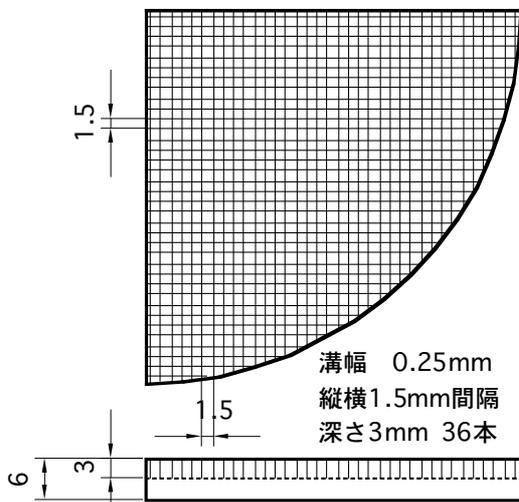


図 4 縦横溝切り四分割加工 LaB6

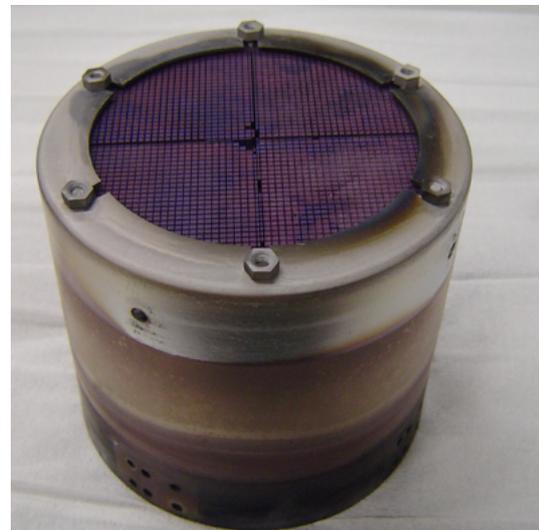


写真 2 LaB6 陰極部

#### 1.2 試験結果

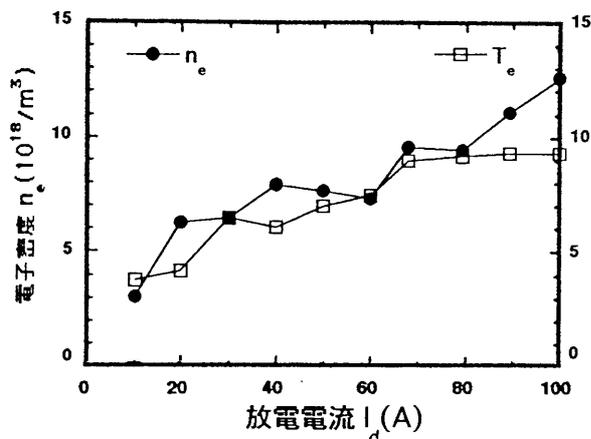


図 5 (これまでの陰極使用)  
ヘリウムガス 320sccm 供給時の放電電流に対する電子密度・電子温度

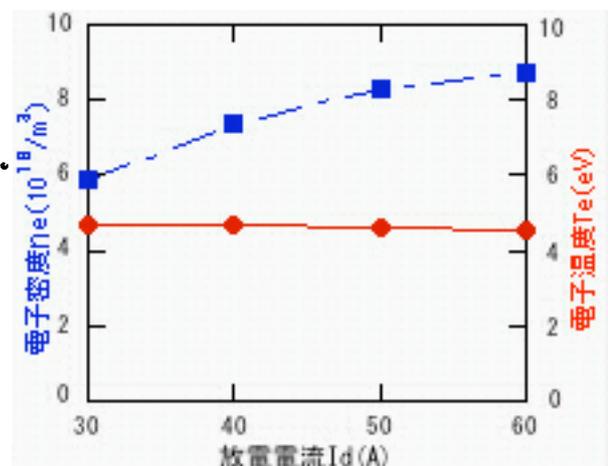


図 6 (今回試作した縦横溝切り陰極使用)  
ヘリウムガス 400sccm 供給時の放電電流に対する電子密度・電子温度

これまで使用してきた LaB<sub>6</sub> 陰極による生成プラズマのデータを図 5 に示す。ガスはヘリウムで 320sccm の時の放電電流に対するプラズマ電子密度・電子温度は、放電電流 30A の時  $6.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3} \cdot 6.5 \text{eV}$ 、60A の時  $7.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3} \cdot 7.5 \text{eV}$  とそれぞれ放電電流の増加と共にプラズマ電子密度・電子温度ともにやや上昇している。図 6 は今回試作した縦横溝加工 LaB<sub>6</sub> 陰極による生成プラズマのデータである。ガスはヘリウムで 400sccm 供給されている時の放電電流に対するプラズマ電子密度・電子温度である。ガスの供給量が残念ながら同じになっていないが、放電電流 30A の時  $6 \times 10^{18} \text{m}^{-3} \cdot 5 \text{eV}$ 、60A の時  $9 \times 10^{18} \text{m}^{-3} \cdot 5 \text{eV}$  となっており、放電電流の増加につれ電子密度が増え電子温度はむしろ減少傾向にある。これらのことから、これまで使用してきた LaB<sub>6</sub> 陰極では供給電力が電子温度増加に多く使われ電子密度があまり上がらなかったのに比べ、今回試作の LaB<sub>6</sub> 陰極は縦横溝の効果から供給電力が電子密度の増加に使われ、より効率のいい陰極となったと考えられる。

## 2. まとめ

傍熱型 LaB<sub>6</sub> 陰極表面構造の最適化のひとつとして、今回 LaB<sub>6</sub> 表面に幅 0.25mm・深さ 3mm の溝を縦横 1.5mm 間隔に切り、表面積を増やすことによる熱電子放出特性の向上を試みた。しかし試験の直前に装置のプラズマ生成部特に LaB<sub>6</sub> 陰極部にこれまでになかった症状 - Mo や BN が LaB<sub>6</sub> 陰極表面に付着し、汚染される - が現れたため、悪条件の中で試験をすることとなった。このため十分確信が持てる結果が得られなかったが、電子密度の増加が見られたことは陰極表面の増加が熱電子放出特性の向上に一定の効果があったと言えるだろう。今後 LaB<sub>6</sub> 陰極部の汚染を取り除き再度試験をする予定である。また今回は表面積を増やすことのみで試作を終えたが、傍熱型 LaB<sub>6</sub> 陰極表面構造の最適化にはその表面に電界の集中する針状加工を施すなどが考えられる。LaB<sub>6</sub> セラミック材料は高価であり、その加工が放電加工機以外には難しく加工形状が限られること、加工費用が高いこと、脆く破損しやすいため陰極としての使用回数が限られるなど試作試験に困難さが伴うが、それらの制約を除きつつ高密度プラズマ生成のための高性能 LaB<sub>6</sub> 陰極の試作開発を更に進める。

なお、この試作・開発は平成 16 年度科学研究補助金(奨励研究)の交付を受けて行なった。

## 謝辞

この試作・開発に関し、ご指導ご教示いただいた名古屋大学エコトピア科学研究機構エネルギー科学研究部門大野哲靖助教授と、LaB<sub>6</sub> 陰極の試験をしていただいた名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻後期課程大学院生西島大君に深く感謝申し上げます。また LaB<sub>6</sub> 陰極を製作していただいた名古屋大学全学技術センター工学技術系装置開発中西幸弘技術職員に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 成田 茂, “高熱流プラズマ源の開発と水素放電機構に関する研究”, 平成 8 年度名古屋大学大学院工学研究科博士課程(前期課程)修士学位論文, 平成 9 年 3 月
- [2] 高木 誠, “高速掃引プローブの開発と高気圧・高熱流プラズマ 3 次元分布測定のための改良”, 平成 14 年度東京大学総合技術研究会報告集, 平成 15 年 3 月, P2-37~P2-39
- [3] 福森 勉, et al, “LaB<sub>6</sub> を用いた薄型電子銃の製作”, 平成 14 年度東京大学総合技術研究会報告集, 平成 15 年 3 月, P1-21~P1-22