

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560768

研究課題名（和文） マイクロ波加熱型高輝度リチウムビームの引き出し実証実験

研究課題名（英文） High-brightness Lithium Beam Extraction from Micro-wave Heated Ion Source

研究代表者

井口 春和 (IGUCHI HARUKAZU)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：40115522

研究成果の概要（和文）：

新しいプラズマ計測用高輝度リチウムビーム源としてマイクロ波加熱を利用した熱放出型イオン源を開発中である。ここではマイクロ波吸収体として SiC（シリコンカーバイド）を用い、リチウムイオンソースを SiC の放射熱で加熱する。50 ミリ径のイオンソースについて高輝度(10 mA レベル)イオン源として利用するため本研究計画で目標とした 1,500°C を、1.3 kW/2.45 GHz マイクロ波によっては達成できていない。これまでの達成値は 1,200°C である。

研究成果の概要（英文）：

A new type of high brightness lithium ion beam for plasma diagnostic is under development. The ion source is heated by radiation from SiC, which is used as a microwave absorber. The target of this research was to heat the ion source of 50 mm diameter up to 1,500°C using a microwave source of 1.3 kW/2.45 GHz, which is not achieved yet. The achieved temperature so far was 1,200°C.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：プラズマ物理

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：リチウムビーム、イオン源、プラズマ計測、マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合の実用炉を構想するとき、残されている重要課題の一つに、ダイバータ板や第一壁の熱処理の問題がある。ダイバータについては、現在構想されている内置きダイバータでは遠隔放射冷却が唯一の解と考えられているが、これは定常の熱流に対してのみ設計可能である。材料損耗を軽減し、交換頻度を実用的なレベルに押さえるために

は、局所的あるいはパルス的な高熱流を極力避ける運転が望まれる。このような観点から、ELM を代表とするエッジ MHD モードの制御は必須である。一方、灰除去のためには一定レベルの ELM との共存も必要とされている。近年、こうした要請に応えるために、外部磁場コイルによる動的エルゴディック層形成による ELM 制御の実験的な取り組みが進み、一つの光明が見えつつある。しかし、こうした磁場構造に対するプラズマの応答は十分解明さ

れておらず、方法論として確立されたとはいえない状況にある。さらに詳細な研究が必要と考えられる。そのためには、周辺プラズマの構造及びダイナミクスを磁場構造と関連づけて理解することが重要であり、時間的空間的分解にすぐれた計測が必須である。(現在形で記述しているのは、現在においても本質的に変わっていないためである。)

周辺プラズマ研究において、中性リチウムビームを用いた計測が近年再び注目されるようになってきた。この計測法の歴史は古いが、最近になって 30 kV/10 mA レベルのビームが開発され、新たな可能性が開けたことが再評価の理由である。DIII-D トカマクでは、ビーム源としては従来型の固体熱放出型イオンソース（リチウム・ベータユークリプタイト）を使いながら、口径の大きなイオンソースを電子ビームによって加熱する方式でビーム強度を上げた。これによって、H モードに伴う周辺圧力勾配の急峻化と圧力駆動電流の分布測定に成功した。日本では、日本原子力研究開発機構・那珂核融合研究所において、高輝度リチウムビームの開発とそれを用いた ELM 制御研究計画が開始されるという状況にあった (H17-21 年度、科研費基盤研究 (S)、代表者：藤田隆明により、研究が進められた)。一方、核融合科学研究所では、すでにヘリカル装置 CHS や LHD において周辺プラズマ密度分布の測定法としてリチウムビーム計測を進めてきた実績があった。ただし、ビーム強度は 100 マクロアンペアの程度であり、MHD 計測に応用できるだけの時間分解を持つレベルには達していなかった。

このような背景の中で、周辺プラズマ計測の高精度化を達成するために、安定かつ信頼度の高い高輝度リチウムビームが求められる状況があり、それは今日まで変わらず続いている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、固体熱放出型リチウムイオンソースをマイクロ波加熱により温度制御するという全く新しい方式により、世界最強レベルのプラズマ計測用リチウムビーム源を開発し、ビームの引き出しを実証することである。具体的には、直径 50 ミリのポーラスタングステンにリチウム・ベータユークリプタイトを含浸させ、そこから 10 mA レベルのビーム引き出す。これまで CHS 実験などで使用してきたイオンソース (6 ミリ径) の有効径 5 ミリに対して、50 ミリ径のイオンソースは面積比で約 100 倍である。同じ温度で運転し、ビーム引き出し密度を同じとすれば、10 mA レベルの引き出しが可能と考えられる。

3. 研究の方法

< 研究開始当初に考えていた研究の方法 >

本研究課題開始以前までの研究において、小出力マイクロ波焼結炉 (1.3 kW/CW) を用いて、小型焼結釜内を 1,350°C 以上の高温状態に維持できることを実証していた。その上で、これを用いて、直径 50 ミリの無垢タングステン円板をテストピースとし、イオン源として使用する環境 (タングステン円板のビームを引き出す側の表面を開放状態にして、ここからの放射熱損失のある状態) で、その表面温度を 1,200°C に維持することに成功していた。

(科研費補助金基盤 (B) : 「マイクロ波加熱中性リチウムビームの開発とダイバー他プラズマ研究への応用」平成 16 年～平成 18 年) ただし、小型焼結釜は連続的な高温運転に耐えられず、しばしば破壊されることと、不純物の発生によって、高電圧をかけてイオンビームを引き出す環境として必要な高真空を維持することができない問題が残っていた。

そこで、基本的なマイクロ波による加熱方式はそのままに、断熱セラミックなどを用いることによって、高真空状態を保ったまま、タングステン円板を 1,200°C に維持することが可能と判断して、ビーム引き出し実験に入ることを目標とした。1,200°C というイオンソースの運転温度は、当時 CHS 装置におけるリチウムビームの運転条件 (6 ミリ径のイオンソースをタングステンヒーターを用いて加熱する方式) から判断したものである。

4. 研究成果

当初目標は 3 年の期間中には達成できなかった。現在までに達成できたこと、最終目標達成までの課題について、研究の変遷を以下に記録する。

・ 平成 20 年度の到達点

前年度までの実験で、50 ミリ径のポーラスタングステンディスクのテストピース (イオン源としてはこのディスクにリチウム・ベータユークリプタイトを含浸させて用いる) を、2.45GHz/1.3kW CW のマイクロ波で 1,200°C まで加熱できることを実証した。使用する材料の断熱性と高真空で運転するためのアウトガスの問題が残されていたが、これらを解決すれば基本設計は変えなくてよいと考えられた。しかしながら、その後原子力研究開発機構が採用した電子ビーム加熱方式による 50 ミリ径イオンソースのテスト実験において、1,200°C までの加熱では目標とした電流密度 (0.5 mA/cm²) が得られないことがわかった。小型のイオンソースと引き出し電極構造が異なること、ポーラスタングステンを利用することによって (イオンソースの表面電位をフ

ラットに保つため) 実効的なイオン放出面の面積が確保できなくなっていることなどの理由が考えられる。原研グループの実験によれば、目標の電流密度を得るためには、引き出し電極の電位配分を変えるだけでなく、従来よりも高温 (1,500°C程度) にまで加熱する必要があることがわかってきた。そのため、マイクロ波電力ロスを低減するとともに、チャンバーを小型化 (真空体積として約 1/2) してマイクロ波入力密度を上げる設計変更を行った。さらに入射部分は反射を低減するためにテーパ管に変更した。また、それに伴う冷却効率改善のための改造も行った。従来のは、テストピースの出し入れのためチャンバーには大きな窓が設けてあったことや、円筒導波管とチャンバーの継ぎ目はフラットフランジであったことなど、が改善項目の対象となった。

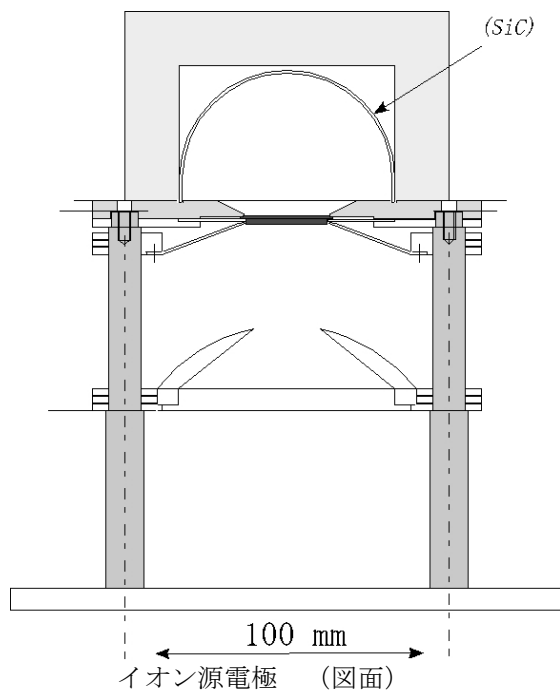
新しい配位におけるチャンバーの写真を下に示す。

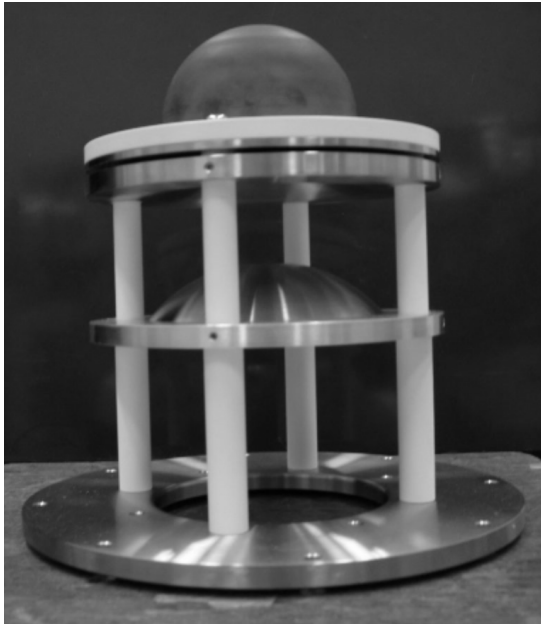


イオン源チャンバー

平成 21 年度の到達点

この年度では、ビームの引き出し電流密度を上げるための改良を行った。一般にビームの電流密度は引き出し電極の $3/2$ 乗に比例して増大するので、ビームエネルギーを上げれば電流密度も大きくなる。しかし、計測の目的として空間分解能のよいことが要求されているため、ビームのエネルギーを必要以上に上げることはできない。それはビームの励起から放射するまでに有限の時間 (準安定状態の寿命) がかかるため、ビームの速度が大きすぎると、ある空間位置で励起された結果としての放射光の分布が広がってしまい、空間分解能が劣化するためである。当面の利用では 10-15 KeV 程度が最適と考えている。このような条件下で引き出し電極部において高い電界強度を与える手段として、引き出し電極の電位を負にする設計に変更した。これは中性粒子加熱用イオン源で採用されている方式と同じである。そのために新たな高電圧負電源 (-10 kV/30 mA) を導入した。この構造は電子の逆流を抑止する役割を果たすことも重要な要素となっている。(この役割は従来の小電流イオンソースでは必要とされなかった。) 新しい電位構造の設計を取り込んで製作したイオン源を下図に示す。ただし、今回の改造では、まず原理実証を目指すため、イオンソースの直径は 30 ミリ径で設計を行った。これまでの実験の経緯と所有のマイクロ波電力から、段階を追って問題点を解決しつつイオンソースの径を拡大することが適切と判断したためである。





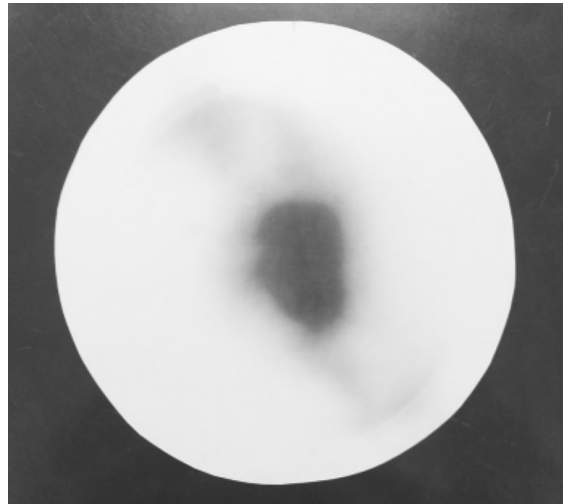
イオン源電極 (写真)

イオンソース部は、電流密度を稼ぐために実質的にリチウム・ベータユークリプタイトの実効表面積を大きくすることを意図して、単純なポーラスタングステンでなく、タングステンディスクにメッシュを張ってベータユークリプタイトを隙間に充填させることにした。

平成 22 年度の到達点

これまでのところ、3年間の研究計画として当初目標とした高輝度ビーム(10 mAレベル)の引き出し実証を達成することができなかった。イオンソースへのエネルギー注入効率が最適化できていないことも一つの要因と考えられる。

そこで、基礎データの取得が必要と判断し、改造チェンバー内のマイクロ波の電界強度パターンを測定した。イオンソース加熱のためのマイクロ波吸収体 (SiC) の予定設置位置 (グランドレベルから18 cm) に感熱紙をおいて焼きパターンを測定したものを下図に示す。これによれば、改造したチェンバーにおいては、放射強度の強い部分が円筒チェンバーの軸付近にあり、軸上のイオンソースを加熱するためにふさわしい状況にあることはわかった。しかし、チェンバーを小型化したことにより、内部の電界分布が定在波の構造を持つことが予想され、軸方向の最適化も必要である。そのため、チェンバー内の電界分布を立体的に測定することが必要である。本報告書執筆の時点で、これらの実験を準備中でありその結果はまだでていない。



感熱シートによるマイクロ強度パターン測定
導波管の短軸方向は、上図で 11.25 度北北西
(ただし、上側を北と見なす)

しかしながら、これらの実験を通して、SiC をマイクロ波吸収および発熱体とするイオンソース間接加熱方式 (タングステン基盤材使用) の改良案のほか、同軸ケーブルとヘリカルアンテナを使ったイオンソース直接加熱方式 (イオンソース本体材料をマイクロ波吸収体に改良) の可能性も新たに展望され、開発の方向性が見えてきたことを付記しておく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Atsushi KOJIMA, Kensaku KAMIYA, Takaaki FUJITA, Hirotaka KUBO, Harukazu IGUCHI, Naoyuki OYAMA, Takahiro SUZUKI, Yutaka KAMADA and the JT-60 Team, “Development of a Lithium Beam Probe and Density Pedestal Measurement in JT-60U” Plasma Fusion Res. 5, 015 (2010).

(2) A. Kojima, K. Kamiya, H. Iguchi, T. Fujita, H. Kakiuchi and Y. Kamada, “Development of a High-Brightness and Low-Divergence Lithium Neutral beam for a Zeeman Polarimetry on JT-60U”, Rev. Sci. Instrum. Vol. 79, 093502-1/5 (2008).

[学会発表] (計 2 件)

① 小島有志、神谷健作、大山直幸、藤田隆明、久保博孝、井口春和、鈴木隆博、鎌田裕;” JT-60U におけるリチウムビームプローブを用いた周辺密度分布の研究”

第 25 回プラズマ・核融合学会年会 2008 年.
②藤田隆明、神谷健作、小島有志、井口春和、
大山直幸、鈴木隆博、鎌田裕；
” JT-60U におけるリチウムビーム偏光計測装
置の開発”、第 7 回核融合エネルギー連合講演
会（青森）2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井口 春和 (IGUCHI HARUKAZU)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・
准教授
研究者番号：40115522