

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24710098

研究課題名(和文)大電流重イオン加速のための、プラズマ輸送路による加速器への入射プラズマ制御の研究

研究課題名(英文)Control of plasma ion current density by a plasma transport line for high-intensity heavy-ion acceleration

研究代表者

柏木 啓次(Kashiwagi, Hirotugu)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部  
・研究副主幹

研究者番号：30391303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レーザーイオン源のプラズマ発生部とイオン引き出し部間のプラズマ膨張部にソレノイド電磁石を備えたプラズマ輸送路を導入することで、引き出される電流密度を制御する方法を開発した。磁場中でのイオンの軌道計算を元に設計・製作した電磁石を用いて実験を行い、その磁場を変化させることで約2.4倍までイオン電流密度を増大できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a method to control the current density of an extracted beam from a plasma produced in a laser ion source by introducing solenoid electromagnets between the laser ion source and the beam extraction electrode. Two solenoid magnets are designed and build based on ion trajectory calculation. The experimental study demonstrated that the ion current density was increased up to about 2.4 times by adjusting the solenoidal magnetic field.

研究分野：イオン源工学

キーワード：レーザーイオン源

### 1. 研究開始当初の背景

レーザーイオン源は、固体ターゲットに高強度のパルスレーザーを集光して照射することによってターゲット材料をプラズマ化し、そのプラズマからイオンを引き出すことで、あらゆる固体元素の高強度のパルス重イオンビームを生成可能なイオン源である。

レーザーイオン源で発生したプラズマは、ターゲット表面に垂直な方向に重心速度を持って膨張しながらイオン引き出し部までの自由空間領域を進行する。この特徴を利用して、我々は、プラズマからビームを引き出さずに初段加速器まで輸送し、加速器入り口でビームを引き出して高強度ビームを入射・加速する方法「プラズマ直接入射法」を開発してきた。

プラズマから引き出されて加速器に入射するビームのパルス幅(時間幅)と電流密度には相関があり、パルス幅はプラズマ発生部から引き出し部までの距離に比例して増大するのに対し、電流密度はこの距離の3乗に反比例して減少する。したがって、あるプラズマ発生条件において、必要なパルス幅が得られるようにプラズマ発生位置からビーム引き出し位置までの距離を決定すると、引き出し位置でのイオンの電流密度についても定まるため、引き出されるビームの電流密度を制御することが困難であるという問題があった。

### 2. 研究の目的

これまでではレーザーイオン源のプラズマ発生部からビーム引き出し位置までが図1(a)に示すように自由空間であったため、この領域において、発生したプラズマの膨張過程を制御することができなかつた。

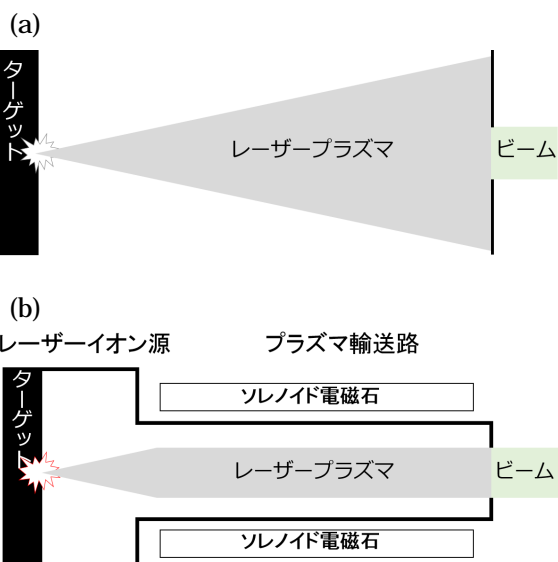


図1:(a)従来の自由空間によるプラズマ膨張 (b)本研究のソレノイド電磁石を用いたプラズマ輸送路による径方向プラズマ閉じ込め

本研究では、図1(b)示すように、レーザーイオン源下流の自由空間領域に、ソレノイド電磁石を備えたプラズマ輸送路を導入することで、径方向、つまり、プラズマの進行方向に垂直な方向のイオンの発散を磁場によって抑制し、その磁場の強度を変えることでイオン引き出し位置での電流密度を制御することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究ではソレノイド磁場を用いたイオン電流密度の制御を実証するため、以下の方法で研究を進めた。

(1)ソレノイド電磁石の設計:ソレノイド電磁石によるプラズマ膨張過程における径方向の発散抑制について明らかにするため、ソレノイド電磁石による軸方向磁場中に入射したレーザープラズマの運動について、計算による解析を行った。また、この解析に基づき、レーザーイオン源下流に設置するソレノイド電磁石の設計を行った。

(2)測定・制御プログラムの開発:実証実験で用いるレーザーイオン源とビーム電流測定装置を備えたテストベンチにおいて、効率的に各種測定や制御が行えるようなプログラム開発を行った

(3)プラズマ電流密度制御実験:製作したソレノイド電磁石をレーザーイオン源の下流に設置し、その磁場強度を変化させることで、発生したレーザープラズマの発散を抑制し、プラズマ電流密度を制御する実証実験を行った。

### 4. 研究成果

(1)ソレノイド電磁石の設計:ソレノイド磁場を備えたプラズマ輸送路におけるレーザープラズマの運動の計算では、プラズマ発生部を始点として0.3mの外力の働かない自由空間領域とその下流のソレノイド電磁石による1mの軸方向磁場領域で構成される輸送路を想定し、Shifted Maxwell-Boltzmann分布のプラズマがドリフト領域入り口で発生すると仮定した。

計算の結果、軸方向磁場下流出口におけるイオン電流波形の時間幅はおおよそプラズマ発生部からの距離に比例して増加するが、電流密度に関しては軸方向磁場が比較的弱い場合はイオンのサイクロトロン運動に起因した周期的な変化が見られるとともに、輸送路出口におけるイオン電流波形が磁場の大きさに応じて変化することが明らかになった。

また、実証実験で用いる炭素プラズマについて、400mJの波長Nd:YAGレーザー(波長1064nm)によって発生した炭素6価イオンのエネルギー分布の測定データを基に、軌道計算を行った。プラズマは、発生部からソレノイド磁場領域の間の自由空間領域で自由膨張するが、ソレノイド磁場領域内では、印加された軸方向磁場により、径方向への直線運

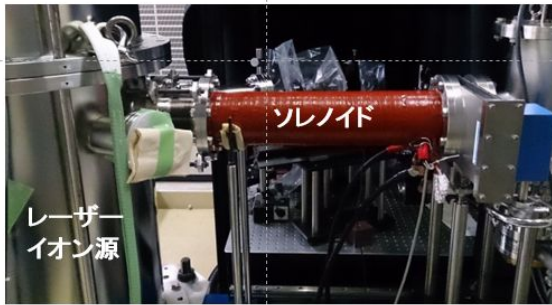


図2：製作したソレノイド電磁石（1台）

動が回転運動に転換され、径方向にプラズマが閉じ込められて発散が抑制されることを確認した。

この計算を基に、実証実験に用いる最大中心磁場 0.1T、長さ 1m (0.5m×2 個) のソレノイド電磁石の設計・製作を行った。レーザーイオン源下流への接続を容易にするため、真空フランジを備えた単管に導体を巻きつけた構造とした。検討の結果、水冷が必要であったため、導体にはホローコンダクターを用いた。

製作したソレノイド電磁石（図2）の中心軸上の軸方向磁場分布をホール素子にて測定した。その結果を図3に示す。励磁電流 150A にて設計最大磁場の約 0.1T が得られることが確認できた。

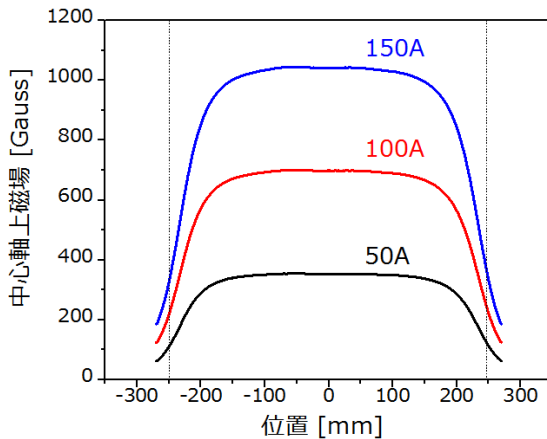


図3：製作したソレノイド電磁石の磁場測定結果

(2) 測定・制御プログラムの開発：実証実験を効率的に行うための制御・測定プログラムを National Instruments 社の LabVIEW にて作成した。

本研究に用いるレーザーイオン源では、レーザー装置(Continuum社製 Nd:YAG レーザー Surelite I-10: 波長 1064nm、パルス幅 5-7ns) から出射したレーザー光をイオン源チェンバー内に設置されたレンズにより固体ターゲット上に集光してターゲット材料をプラズマ化する。この固体ターゲットは平板形状であり、ステッピングモーター駆動の xyz3 軸ステージ上に搭載され、必要に応じてレーザーの照射ごとに新しい照射箇所へ移動す

ることができ、常に同条件の照射箇所をプラズマ化することが可能である。

レーザーの照射制御に必要なフラッシュランプの ON/OFF、Q スイッチタイミング、シャッタ走査をプログラム制御し、これによるレーザー照射とステッピングモーター動作制御を同期させてレーザー照射ごとにステージが移動可能な照射制御プログラムを作成した。

また、発生したプラズマのイオン電流はチェンバー下流のファラデーカップによって測定される。プラズマはこのファラデーカップまでプラズマの状態のまま膨張・進行する。

ファラデーカップは丸穴コリメータ、円環形状のサプレッサー電極及び円筒形の電流計測用カップ電極から成る。コリメータによって径が規定されたプラズマが、最大-5kV の電圧が印可されたサプレッサー電極による電場中に進行するにすることで、プラズマから電子が分離され、イオンのみがカップ電極に入射する。これにより、コリメータを通ったプラズマのイオン電流のみを測定することが可能である。カップ電極で検出されたイオン電流をオシロスコープを用いることによりイオン電流波形を測定する。

ファラデーカップに印加する電圧制御、及びオシロスコープによる測定データの自動取り込み、さらにソレノイド電磁石の励磁用電源制御を先の照射制御プログラムに統合することで照射・電源制御・測定の全てが可能でソフトウェア環境を構築し、各種パラメータを変更しながらの測定が効率的に行えるようになった。

(3) プラズマ電流密度制御実験：ソレノイド電磁石をレーザーイオン源下流に接続し、ターゲットにグラファイト板を用いて炭素プラズマのソレノイド磁場による輸送実験を行った。

その結果、ソレノイド電磁石を励磁することで、磁場が無い 0A の場合に比べ、プラズマの径方向の発散が抑制されてビーム電流密度が増加することが確認できた。励磁電流を増加させることで最大 2.4 倍まで電流密度を変化させることができた。

以上により、ソレノイド電磁石をプラズマ輸送路として用い、その磁場を変化させることでビーム電流密度を制御することができることが本研究で示された。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

柏木啓次、山田圭介、倉島俊、レーザーイオン源による炭素プラズマの生成、第 10 回高崎量子応用シンポジウム、2015

年 10 月 8 日～2015 年 10 月 9 日、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市）

柏木啓次、山田圭介、倉島俊、高強度重イオンビーム発生用レーザーイオン源の開発、第 9 回高崎量子応用シンポジウム、2014 年 10 月 9 日～2014 年 10 月 10 日、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

柏木 啓次（KASHIWAGI HIROTSUGU）

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部 研究副主幹

研究者番号：30391303