

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13526

研究課題名(和文)セシウム薄膜を用いない水素負イオン直接生成法の確立

研究課題名(英文)Production of negative hydrogen ions without Cs layer

研究代表者

吉田 雅史(Yoshida, Masafumi)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教

研究者番号：80638825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：申請者らの研究グループにて見出したセシウム(Cs)薄膜を用いずに負イオンを直接生成する手法を負イオンビーム生成法として導入するために、水素正イオン入射/負イオン引出条件の探索、および負イオンビームとしての性能評価、増大化を目指している。負イオンビームは、10時間以上のプラズマ照射によって安定化すること、高電圧引出条件下で高い発散性を有することが明らかになった。生成された負イオンの最大電流密度は、プラズマの放電電力が0.7 kWの時に0.12 mA/cm²であった。これはITERなどの大型N-NBIの負イオン電流密度の要求値を満たす可能性を示唆できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合プラズマ加熱用ビームの安定供給方法として期待できる。プラズマ電極表面にセシウム(Cs)の薄膜層を形成させ表面の仕事関数を低下させる従来の表面生成法では、Cs薄膜の膜厚制御が極めて困難で、定常的に安定な負イオンビーム生成の大きな課題を呈している。ここで提案する負イオン生成法は、問題となるCsを用いないことが最大の利点である。この生成法の負イオンの生成機構の解明および負イオン量の増大化は、今後の核融合プラズマ加熱だけでなく、素粒子物理・産業・医療などの幅広い分野で利用される負イオンビームの安定供給に貢献し得る。

研究成果の概要(英文)：A method to produce negative hydrogen ions by irradiating an aluminum grid with positive hydrogen ions, and subsequently creating the negative ion beam without cesium is proposed. According to their experiments, as the negative hydrogen ions accumulate on the surface of the aluminum grid, a magnetic deflection mass separator can be used for mass-based separation and collection. The extracted negative hydrogen ions contain <10% electrons and a finite but negligible amount of other impurities. The negative ion amount increases, up to 0.12 mA/cm², at a discharge power of 0.7 kW with an electric field downstream of the grid. Based on the data, we expect their method to scale and produce negative ions in a high-density plasma setting.

研究分野：核融合

キーワード：核融合 負イオン中性粒子加熱 プラズマ セシウム 負イオン

1. 研究開始当初の背景

負イオンビームは、半導体デバイス・微粒子処理等の産業用としての用途だけでなく、核融合研究におけるプラズマ加熱用ビームとして期待されている。従来の負イオンの生成法としては、プラズマ電極表面にセシウム(Cs)の薄膜層を形成させ表面の仕事関数を低下させる表面生成法が主流となっている。しかし、この方法では、Cs 薄膜の膜厚制御が極めて困難で、定常的に安定な負イオンビーム生成の大きな課題となっている。この課題を鑑み、申請者はCsフリーで正イオンが入射する場合に負イオン化する現象を応用した「孔内表面生成法」を提案している。この手法が従来の表面生成法と異なるのはPG 上面に負イオン生成のためのCs 薄膜が無く、プラズマ電極(PG)表面あるいはビーム孔側面にて直接負イオンが生成されることである。つまり、低仕事関数化させずに負イオン生成する可能性が高く、Csフリー負イオンビームの実現に期待できる。これまでに、数 eV 程度の低エネルギー入射が負イオン生成に適することが実験的に分かってきた。しかし、仕事関数以外のどんな表面物性が負イオン化に寄与するか分かっていない。また、負イオンの引出/加速現象は明らかにされておらず、ビームとしての適用可能性については不明である。したがって、上記課題を解明することが、負イオンの生成効率の向上と収束性の良いビーム生成に繋がる。

2. 研究の目的

申請者らの研究グループにて見出したセシウム薄膜を用いずに負イオンを直接生成する新たな手法を負イオンビーム生成法として導入するために、水素正イオンの入射/引出条件、を解明すると共に、負イオンビームとして引き出した際のビーム性能評価、および負イオンビーム電流密度の増大化条件を探索する。

3. 研究の方法

(1) 負イオンの生成・引出

実験装置はプラズマ生成部と負イオン生成/引出部で構成されている。プラズマ生成部では、直流アーク放電により水素プラズマを生成して、ラインカスプ磁場により閉じ込めている。負イオン生成/引出部は、プラズマ電極(PG; Plasma Grid), 制御電極(CG; Control Grid), および引出電極(EXG; Extraction Grid)の3枚で構成されている。プラズマ生成部で生成されるプラズマ中の水素正イオンをPG へ照射することで負イオンが生成される。このときの水素正イオンの照射エネルギーは、プラズマ電位とPG への印加電圧(V_{PG})との差で制御しており、数 eV の照射エネルギーのとき最も負イオン生成量が多くなる。本研究ではアルミニウム製PG(Al-PG)を用いた。負イオンは下流側のCG およびEXG への印加電圧(V_{CG} および V_{EXG})にて静電的に引出される。負イオンが引き出される際に、電子が負イオンに随伴する。その随伴電子を除去するためにCG 内に装填した一対の永久磁石による磁場によって偏向除去した。

(2) 負イオン/電子分離計測

EXG 後方まで引出された負イオンビーム中に存在するわずかな電子を、負イオンと分離計測するために、荷電粒子のラーマ半径の違いを応用した電子除去用の偏向磁場を用いた負イオン-電子分離計測機器を製作してEXG 後方に設置した。荷電粒子の計測部となるコレクターを平板化・大型化することで、電子を除去しつつ負イオンを評価できるようにした。

(3) 負イオンビーム分布計測

引出後の負イオンビームの分布計測するために、直径 1 mm のシングルコレクターをEXG 後方 5 mm の位置で2次元的に挿引した。負イオン引出条件として、 V_{PG} および V_{EXG} をそれぞれ+2 V および+900 V と固定して、 V_{CG} を+2 ~ +900 V まで変化させた。

(4) 損失低減させた負イオンビーム電流密度評価

EXG 直後にカップ型コレクターを製作・設置して、(1)の分離器よりも負イオン電流量の損失を低減した。 $V_{PG} = +2$ V として、 V_{CG} および V_{EXG} を最大+2.9 kV の範囲での負イオンの最大引出電流密度およびその時の引出条件を検討した。

4. 研究成果

(1) 負イオン/電子分離計測

大型の平板コレクターでも偏向磁場を印加することで負イオンを電子と分離することに成功した(図1)。図1の質量スペクトルより、EXG 後方に引出された負イオンビームに含まれる電子の割合は10%以下であることが分かった。次に、負イオンの安定化条件を明らかにするために、清浄なAl-PG をプラズマ実験装置に導入してからの負イオン電流量のプラ

ズマ照射時間依存性を評価した。その結果、負イオン電流量は装置導入から数時間のプラズマ照射中に徐々に増加した。さらに 10 時間以上のプラズマ照射によって、負イオン電流量は安定化することが明らかになった。この状態は、Al-PG を大気に曝した後もほとんど劣化せず、装置に再導入した後に必要な追加のプラズマ照射は少なくて済むことも見い出された。

(2) 負イオンビーム分布計測

V_{CG} を +2 V から +200 V まで上昇させた場合に、ビームの半値幅は 5 mm 程度で、ビーム孔径 (13 mm) に対して半分以下でビームは集束していることが分かった。 $V_{CG} > +200$ V では、ビーム強度が増加するとともに半値幅は 10 mm 以上になり、 $V_{CG} > +800$ V で負イオン電流量が減少した。 $V_{CG} \sim +200$ V 程度の場合、PG-CG 間でプラズマの準中性を保つ効果によって、負イオンと同時に正イオンも CG 近傍まで引出される。この時、正イオンが自己電位を形成することで、CG 孔内では V_{CG} よりも低い電位形成されて孔径方向に井戸型のポテンシャルが形成されることで負イオンの通過可能な領域が狭隘したためと示唆できる。 $V_{CG} > +200$ V では、準中性条件よりも負イオンのみを引出す効果が勝り、チャイルドラングミュラ則に従って負イオン強度が増加したことが示唆できる。

上記の結果より、孔内表面生成法もまたビーム電流量を増加できることが予想できる。ただし、本実験で引出された負イオンビームは高い発散性を有しており、特に高電場引出条件下では、発散したビームの一部がコレクター捕集前に損失している。今後、孔形状や電極配置を改良してビームの収束性を高められるか評価する必要がある。

(3) 損失低減させた負イオンビーム電流密度評価

発散性の高いビーム成分も電流量として評価できるように、カップ型コレクターにて計測した。その結果、捕集した負イオン電流量は、分離器で計測したものに比べて約 2 倍に増大した (図 2)。また、 $V_{CG} > +1$ kV でも負イオンを損失無く計測できた。負イオン生成に適した $V_{PG} = +2$ V を固定して、負イオン電流量の最大となる引出条件を評価したところ、 $V_{CG} = +800$ V および $V_{EXG} = +2500$ V であった。このときの負イオン電流密度は、電子の存在比を考慮するとプラズマ放電電力 0.7 kW の時に 0.12 mA/cm² であった [1]。ITER などを用いる大型 N-NBI での負イオンビーム電流密度の要求値は、数十~数百 kW 相当の放電電力の高プロトン比プラズマを用いて >10 mA/cm² である。このことを考慮すると、本研究グループの提案する負イオン生成法が、Cs 薄膜を用いずに負イオンビームを生成する手法の一つとして有望視し得ることが見い出された。今後、負イオンビームが発散する原因を解明するとともに、実機負イオン源で使用する電極形状を用いて収束性を高めたビーム生成だけでなく、実機相当の放電電力下での負イオンビーム電流実証を目指す。

<引用文献>

① M. Yoshida, R. Watano, Y. Morinaga, T. Kamikawa, and W. Oohara,

“Extraction of negative hydrogen ions produced with aluminum plasma grid”,
Physics of Plasmas, **26** (2021), pp.033512-1-7.

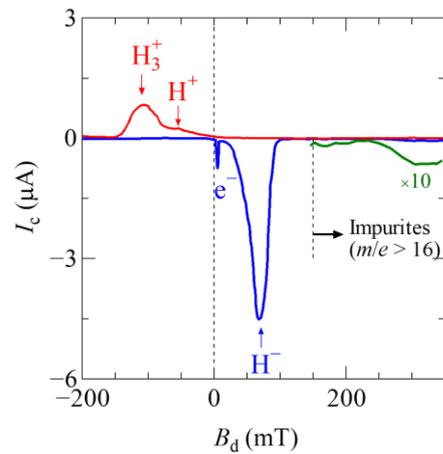


図 1: 典型的な偏向磁場質量スペクトル。

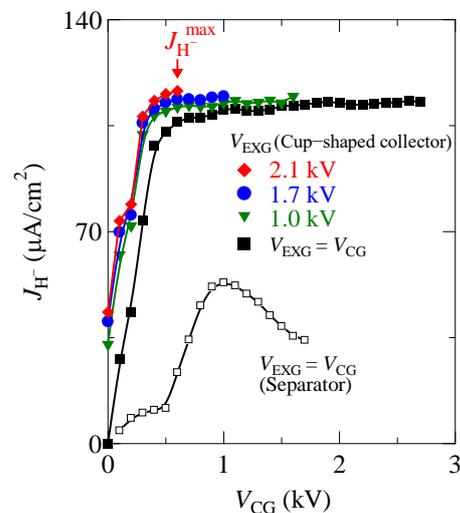


図 2: 負イオンビーム電流密度の引出電圧 (V_{CG}) 依存性。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida M., Watano R., Morinaga Y., Kamikawa T., Oohara W.	4. 巻 28
2. 論文標題 Extraction of negative hydrogen ions produced with aluminum plasma grid	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 033512 ~ 033512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0038262	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計33件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 弘瀬和正, 藤井征志, 瀨本康平, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 後進波と逆進行波が伝搬する水素イオン性プラズマ
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第24回 支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中陸太, 綿野稜真, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 層厚の異なる酸化アルミニウムの仕事関数に及ぼす水素プラズマ照射の影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第24回 支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 紀幸志郎, 丸崎優太, 前田哲志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 アルミニウムプラズマグリッドを通過した水素正イオンのエネルギー分析
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第24回 支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀨本康平, 加治龍矢, 弘瀬和正, 藤井征志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 大口径テーパ構造のアルミニウムプラズマグリッドを用いた水素イオン性プラズマの生成
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第24回 支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田哲志, 紀幸志郎, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 タンデム型水素プラズマ源のプロトン比最大条件の探索
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第24回 支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田雅史, 森永悠太, 綿野稜眞, 田中陸太, 大原渡, 津守克嘉, 木崎雅志, NIFS NBIグループ, 市川雅浩, 平塚淳一, 小島有志, 柏木美恵子
2. 発表標題 AIを用いたCsフリー表面生成法による負イオンの引出特性とビーム適用性
3. 学会等名 負イオン研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 7. 田中陸太, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡, 津守克嘉, 木崎雅志, NIFS NBIグループ
2. 発表標題 水素プラズマ照射されたアルミニウム表面の仕事関数
3. 学会等名 負イオン研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 弘瀬和正, 藤井征志, 瀧本康平, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素イオン性プラズマにおける後進波の周波数帯と振幅の関係
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 紀幸志郎, 丸崎優太, 前田哲志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素プラズマへ入射された高エネルギー正イオン成分のエネルギー散乱
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧本康平, 加治龍矢, 弘瀬和正, 藤井征志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 大口径水素イオン性プラズマの生成
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田哲志, 紀幸志郎, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 金属グリッドで仕切られたタンデム型プラズマ源によるプロトン比制御
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中陸太, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡,
2. 発表標題 酸化アルミニウムへの水素プラズマ照射が仕事関数へ及ぼす影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 弘瀬和正, 藤井征志, 平岡勇人, 渡井雅巳, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素イオン性プラズマにおける軸対称励起電極による静電波の分散関係
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綿野稜眞, 森永悠太, 藤井征志, 白石崇, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素負イオン電流密度を最大化する条件探索
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加治龍矢, 濱元康平, 藤井征志, 渡井雅巳, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 金属表面磁場によって保護される水素イオン性プラズマ
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井征志, 弘瀬和正, 平岡勇人, 渡井雅巳, 加治龍矢, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 高密度水素イオン性プラズマ生成に最適な負イオン引出し
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 弘瀬和正, 藤井征志, 平岡勇人, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素イオン性プラズマにおける分散関係に及ぼす正イオンビームの影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中陸太, 平松幸己, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素プラズマ照射された酸化アルミニウム仕事関数のその場分析
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綿野稜眞, 森永悠太, 紀幸志郎, 白石崇, 藤井征志, 加治龍矢, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 アルミニウム製プラズマグリッドから引出される水素負イオンの最大電流密度
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第23回支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白石崇, 前田哲志, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 酸化アルミニウム膜の水素プラズマ照射による導電性の発現
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第23回支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中陸太, 平松幸己, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素プラズマ照射に伴うアルミニウム仕事関数の変化
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第23回支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加治龍矢, 濱元康平, 藤井征志, 渡井雅巳, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 偏向磁場印加された金属表面近傍の水素イオン性プラズマへ正イオンビームが及ぼす影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第23回支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井征志, 弘瀬和正, 平岡勇人, 渡井雅巳, 加治龍矢, 綿野稜眞, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素負イオンの崩壊条件と積極的な崩壊
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第23回支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 弘瀬和正, 藤井柁志, 平岡勇人, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 正イオンビームを重畳した水素イオン性プラズマ中の後進波
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第23回支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綿野稜眞, 森永悠太, 白石崇, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 プラズマグリッドへ印加した水素負イオン引出電場の効果
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林大晃, 綿野稜眞, 白石崇, 巽優祐, 渡井雅巳, 藤井柁志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 偏向磁場付制御グリッドを介して引出された水素負イオン分布
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白石崇, 森永悠太, 小林大晃, 綿野稜眞, 渡井雅巳, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 正イオンビーム重畳時の水素負イオン質量分析
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森永悠太, 綿野稜眞, 白石崇, 渡井雅巳, 高森暁, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素負イオン生成量が最大となる条件探索
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 綿野稜眞, 森永悠太, 白石崇, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 偏向磁場配位一定でAI プラズマグリッド孔へ印加した負イオン引出電場分布の最適化
3. 学会等名 第22回 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森永悠太, 綿野稜眞, 白石崇, 渡井雅巳, 高森暁, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 水素負イオン生成量が最大となるプラズマグリッド材質
3. 学会等名 第22回 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林大晃, 綿野稜眞, 白石崇, 巽優祐, 渡井雅巳, 藤井柁志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 偏向磁場付制御グリッドを介して引出された水素負イオンの二次元分布
3. 学会等名 第22回 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白石崇, 森永悠太, 小林大晃, 綿野稜真, 渡井雅巳, 藤井征志, 吉田雅史, 大原渡
2. 発表標題 正イオンビーム重畳による水素負イオン引出電流の増加
3. 学会等名 第22回 プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 支部大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関