

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：36102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820438

研究課題名(和文) 高い信頼性を持つ負イオン源ビーム引き出しモデルの構築とその応用

研究課題名(英文) Development and application of high reliable model for beam extraction in hydrogen negative ion source

研究代表者

松本 新功 (Matsumoto, Yoshikatsu)

徳島文理大学・人間生活学部・准教授

研究者番号：50441598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：実験データに対する高い再現性を持つ、信頼性の高い水素負イオン源・ビーム引き出し領域のシミュレーションコードの実現を目指した。特にイオン源性能の鍵となる、kVオーダーの外部電圧に影響を受けたプラズマの電位構造計算を重視して研究を進めた。結果、イオン源設計時に必要と考えられる自由端境界条件であっても、実験結果に対して概ね妥当なプラズマ電位を得ることができた。一方で、予想外の電位の振動が観測され、さらに信頼性を高める上での課題となることが分かった。また、電子密度の空間分布に関する検証から、磁場を横切る粒子輸送の再現性にも問題があり、こちらも引き続き調査が必要である事が分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, simulation codes for beam extraction region of a hydrogen negative ion source have been developed and improved by validations with experimental results in an actual ion source. The codes were required to obtain high reproducibility to experimental results, especially for spatial potential structure in an ion source plasma affected by beam extraction voltage in kV range which has been considered as one of key factors for ion source performances. As a result, the simulation can provide similar results to the experimental ones, even if it uses open boundary condition in Poisson equation which is probably suitable for a purpose of performance predictions in devise designs of negative ion sources although there is disadvantage to obtain reliable results. On the other hand, unforeseen problems were found in potential oscillation and electron transport across magnetic field, which should be overcome to achieve higher reliability of the simulation.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：イオン源 輸送 ビーム引き出し

1. 研究開始当初の背景

現在の核融合実験装置において、炉心プラズマの生成と保持のために、水素負イオン源を用いた粒子入射加熱が使用され、将来の核融合炉にも導入が計画されている。この用途に対して、さらなる高効率な負イオン源の開発が望まれている。

水素負イオン源ではイオン源装置内に水素プラズマを生成する。その際、プラズマの電子温度を低く抑えることで、プラズマ内部に効率良く水素負イオンが生成されることが知られている。この状態のイオン源に対して図1のように高電圧を印加すると、生じる強電場によりプラズマから負イオンを引き出す(取り出す)ことができる。負イオン源ではこの引き出した負イオンを電場により加速し、ビームとして使用する。

しかしながら、この負イオン源プラズマ中で、水素負イオンがどのように輸送されて最終的にビーム引き出し孔へと至り引き出されるのか、その引き出しメカニズムに関する十分な理解は得られていない。更なる高効率負イオン源開発のためには、負イオン源のパフォーマンスに直結する、引き出しに関する正しい理解が必要である。さらに、負イオン源設計時には、正しい理解に基づいた、より正確にイオン源性能を事前評価できるシミュレーションコードが必要となると考えられる。

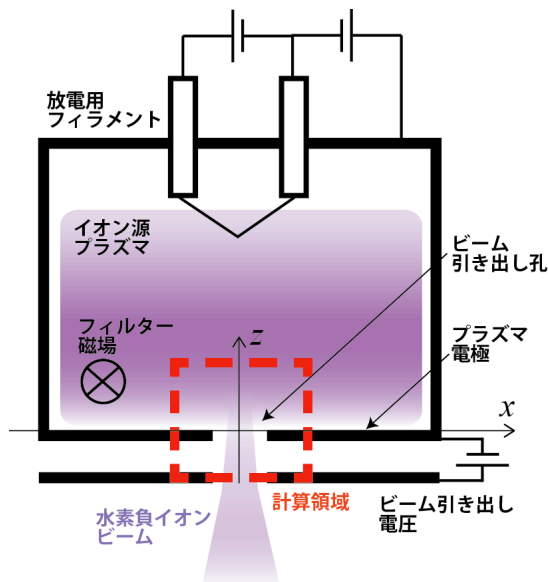


図1 負イオン源概略図

2. 研究の目的

(1) 負イオン源の正確な性能評価が可能な、信頼性の高い計算モデルの開発を目指した。なお、信頼性の確保は小型負イオン源の実験データを用いた、シミュレーション結果の検証を通じて行う。実験データに対する高い再現性を持つ計算コードがあれば、負イオン源の性能及び開発スピードの向上とコストの削減をもたらす事ができる。さらに信頼性の

高いコードで行ったシミュレーション結果を解析することで、水素負イオン源プラズマ内での、負イオン引き出しに関する物理を明らかにできると考えられる。

(2) 水素負イオン源からの負イオンの引き出しは、イオン源内プラズマ電位の空間構造に強く依存すると考えられている。そこで、計算コードがプラズマ電位を正しく再現できる能力を獲得できるよう、この点を特に重視して研究を進めた。

なお、核融合実験炉や加速器等の大規模負イオン源では、kV オーダーの電圧がビーム引き出し電圧としてイオン源に印加される。この電圧により誘起された強電場が、図1に示したビーム引き出し孔を通じてイオン源プラズマの端部に影響することが知られている。この「引き出し電場の染み出し」と呼ばれるプラズマ電位への影響が、負イオン引き出しの効率を大きく左右すると考えられている。本研究では、このようなkV オーダーの引き出し電圧が印加された条件における、プラズマ空間電位の正しい再現を目指した。

(3) 図1中、ビーム引き出し孔を持つ「プラズマ電極」の形状がプラズマ電位の空間分布に影響し、負イオン源のパフォーマンスに影響する可能性がある。そこで、信頼性を高めた計算コードによる応用研究として、イオン源の電極形状を変化させ、引き出しに最適な構造の特定を目指した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では(A)2次元のプラズマ電位計算コードと(B)3次元の水素負イオンの輸送計算コードでプラズマ電位と負イオン輸送を個別に計算するアプローチを取り、これら二種類のコードを開発、さらには信頼性を高める作業を行った。これは(A)のプラズマ電位の計算負荷が大きく、3次元計算では非常に長い計算時間がかかってしまう事に因る。(A)に関してのみ2次元コードによる計算で時間の短縮を図り、そこで得られたプラズマ電位の空間分布を(B)の計算コードに初期条件として入力し、水素負イオンの3次元輸送軌道を追跡した。

(2) (A)のプラズマ電位計算には、Particle-In-Cell (PIC)法を採用した。これは粒子の位置を2次元空間で、速度を3次元空間で計算する、2D3V と呼ばれる計算コードである。

コードには小型の負イオン源装置と同等の装置条件を入力している。なお図1に示したように、負イオン源には「フィルター磁場」と呼ばれる磁場を、引き出されるビームの進行方向に対して垂直にかける。これは水素負イオンの生成効率向上のために使用される磁場であるが、同時にイオン源プラズマの特

性にも大きな影響を与える。この磁場の実測値もコードに反映させている。

なお、同様の PIC コードが大型負イオン源のモデリングにも採用されているが、計算機の能力限界から、装置内の全領域を計算対象とするのは難しく、図 1 のように引き出し孔近くのプラズマのみを切り出して計算するのが一般的である。この領域設定においてポアソン方程式を解き電位を求める際、プラズマの切断面に対して何らかの境界条件を設定する必要がある。報告されている先行研究では、計算の安定性確保等の目的で、境界部分の電圧値を仮定し、これを固定端境界の条件として使用しているものが多い。しかしながら、特にイオン源設計時における性能評価ツールとして計算コードを活用する場合、装置作成前にイオン源プラズマのパラメータを実験等で正確に知ることはできないため、このタイプの境界条件を使うことは適切ではない可能性がある。そこで本研究では、電位の絶対値を必要としない自由端境界を採用した。

以上の計算条件のもと、得られた計算結果を実験結果との比較により評価し、コードの修正を行った。

(3) 3次元の水素負イオンの輸送コードとして Monte Carlo 法による水素負イオンの軌道計算コードを用いた。このコードは、PIC 計算等により予め準備したプラズマ電位の空間分布を入力データとして使用する。運動方程式を用いて、その電位分布上で水素負イオンを走らせ、引き出し孔へと至る軌道を 3 次元的に追跡し、引き出し特性を評価した。なお、このコードにも実際のイオン源の装置条件を反映させている。

4. 研究成果

(1) PIC 計算で得られたイオン源プラズマの空間分布を図 2 に示す。初期条件として、電子密度が実験値と同等の絶対値を持つよう、粒子密度を設定している。なお、ここではビーム引き出し電圧を印加していない。この計算条件に対応する実験では、約 3V 程度のプラズマ電位が観測されるが、計算結果も同オーダーの電位を得ることができている。

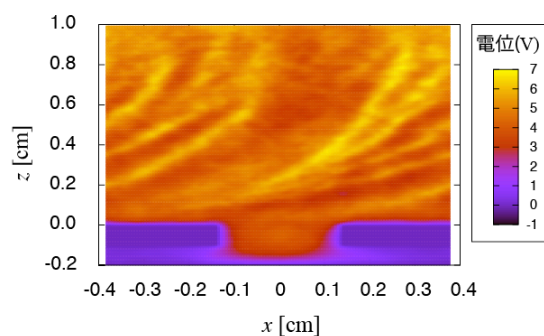


図 2 プラズマ電位の 2 次元分布

他の研究報告より、イオン源に対する PIC 計算では、実験値よりも大きな電位が得られる傾向があり、一桁以上大きな値となる例も少なくない。しかしながら今回、自由端の境界条件であっても、実験値に対してほぼ妥当なオーダーの電圧値を得られることが分かった。また、空間分布の傾向に関して、実験結果と同様な傾向を得ることができている。

(2) 1kV のビーム引き出し電圧を印加した条件で PIC 計算を行った。図 3 に z 軸上における電位の 1 次元分布を示した。本研究開始時点での解決すべき大きな問題として、kV オーダーの引き出し電位をイオン源プラズマに印加すると、イオン源内のプラズマ電位が計算領域全体に渡って 100V 程度まで上昇してしまい、実験と大きくかけ離れた結果が得られてしまう状況があった。しかしながら現状のコードでは、電圧印加に伴って主としてビーム引き出し孔近傍の電位のみが局所的に上昇する結果が得られている。これは実験結果に対して、定性的に妥当な結果であり、不自然な電位上昇の問題点を大幅に改善することができた。イオン源では kV オーダーの引き出し電圧を印加することが一般的である。大型イオン源設計時の事前性能評価ツールとしてのシミュレーションの利用を想定した時、自由端の境界条件を採用した上で、kV オーダーの引き出し電圧にて、妥当な計算結果が得られたことは有意義な前進であると考えられる。

このような電場の染み出し効果を詳細に議論するためには、図 3 の計算結果に対して、電位の上昇が見られる領域の深さや電位上昇の高さを調べて行く必要がある。しかしながら次項に挙げる問題により、現在の計算結果は詳細な解析に耐えうる十分な正確性を確保できているとは言えず、引き続きコードの改善が必要な状況にある。

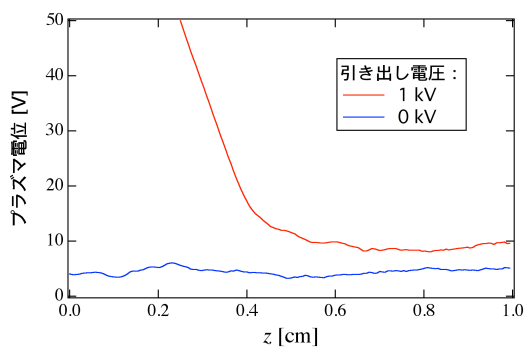


図 3 ビーム引き出し電圧印加有無における、z 軸上のプラズマ電位の 1 次元分布

(3) プラズマ電位に無視できないレベルの、比較的大きな振動が観測された。これは当初想定していなかった新たな問題である。図 4

に数種類の計算時刻における z 軸上の電位分布を示す。なおこれらの結果は、プラズマ振動周期の 10 倍程度の時間で得られた 1000 個の計算結果を平均したものであり、かつ引き出し電圧の印加は行っていない。ホワイトノイズのような細かな振動と、計算領域全体が上下するような大きな振動の、二種類の振動が存在する。振幅に関して、計算条件によっては、プラズマ電位の絶対値と同程度の大きさを持つ事が分かっている。一方で、実験ではこのような電位の振動は確認できておらず、計算モデル固有の現象である可能性が高いと考えられる。

実験結果との詳細な比較を行う上で、これが大きな問題となっており、次のステップへ進む前にこの問題を解決する必要がある。原因はまだ特定できておらず、引き続き調査を進めねばならない状況である。現在のところ、フィルター磁場を用いない場合でも、質は変化するものの、振動自体は存在することを確認しており、磁場による粒子輸送への影響が第一要因ではないと予想している。現在、自由端境界の利用、又は、コードの欠陥を原因として考えており、これらのチェックと今後の展開に備えて、遠回りではあるが、境界条件を柔軟に変更できる別の PIC コードを新規に作成中である。

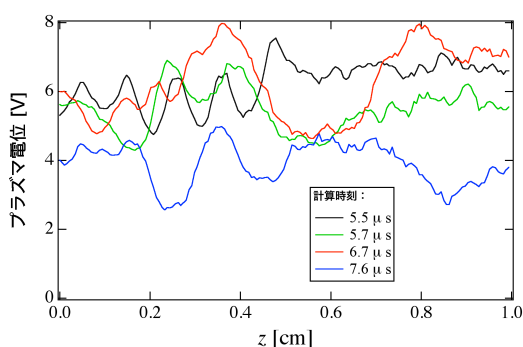


図 4 種々の計算時刻におけるプラズマ電位の 1 次元分布

(4) 粒子密度の空間分布を計算し、実験データとの比較を行った。結果として、実験データよりも急峻な密度勾配を持つ結果が得られた。一方で、フィルター磁場が存在しない時には、実験に近い密度分布を得る事ができる。すなわち、磁場を横切る粒子の拡散度を正しく再現できていない可能性がある。こちらも作成中の新コードによる対策を予定している。

(5) 「3. 研究の方法」で述べた、PIC で得られた電位分布を用いての 3 次元水素負イオンの軌道計算、並びに最適な電極構造の探索に関しては、PIC 計算が安定した後に実施す

る。なお、3 次元の輸送コードの準備は既に完了しており、PIC 計算が安定すれば直ちに計算を実施できる状態にある。

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 1 件)

- ① 松本新功 他, 「PIC 法を用いた水素負イオン源内プラズマ空間電位とビーム引き出し電場の相関」, 日本物理学会 第 70 回 年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都)

[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]

特に無し。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 新功 (MATSUMOTO, Yoshikatsu)

徳島文理大学・人間生活学部・准教授

研究者番号: 50441598