

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340146

研究課題名(和文)水素負イオン源プラズマのモデリングと一様大面積負イオン生成・引き出しの物理

研究課題名(英文) Modeling of negative hydrogen plasma sources and extraction physics of H⁻ ion beam with uniform and large area

研究代表者

畑山 明聖 (Hatayama, Akiyoshi)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10245607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：水素負イオンビームは、現在、核融合プラズマ加熱、医療用あるいは素粒子物理学用の加速器などに幅広く用いられている。本研究では、水素負イオン源を対象として、1)放電プラズマ中の負イオン生成、2)ビーム引き出し部への負イオン輸送、3)引き出し部近傍の負性プラズマ電位構造および引き出し界面形成、4)負イオンビーム引き出し・加速という一連の過程の理解を目的として、数値シミュレーションモデルの開発と実験との比較によるモデル妥当性検証を行った。開発したモデルとその結果は、今後、1)一様大面積、2)高電流密度、3)高収束性を有する負イオンビームの引き出しが可能な大型高性能水素負イオン源の開発に有用となる。

研究成果の概要(英文)：Negative hydrogen ion (H⁻) beam has a wide range of applications, such as fusion plasma heating, accelerators for medical use and high energy particle physics. The purpose of this study is to understand and clarify the following process and mechanism in H⁻ ion sources: 1) H⁻ production in discharge source plasmas, 2) H⁻ transport towards the extraction region, 3) electric potential and meniscus formation in the extraction region, and 4) H⁻ beam extraction and acceleration. For this purpose, an integrated numerical simulation model has been developed and validated by comparing with experimental results. The model and the results are useful for further development of large volume and high performance H⁻ ion sources, especially, with 1) spatial beam uniformity, 2) high beam current density, and 3) good beam optics.

研究分野：プラズマ物理、負イオン源プラズマ、数値シミュレーション

キーワード：水素負イオン プラズマ物理 電子エネルギー分布 ビーム引き出し PICモデル ビームハロ 表面生成 メニスカス

1. 研究開始当初の背景

水素負イオン源は、核融合プラズマ加熱、素粒子物理学用あるいは医療用陽子加速器、さらには、産業用半導体加工などの粒子ビーム源として、現在、様々な分野へ応用されている。

とくに、近年、水素負イオン (H^-) ビーム電流の大電流化を目指し、大型の H^- イオン源の研究開発が盛んに行われている。このような大型負イオン源の多くでは、図1のように、放電プラズマ中で電子衝突による水素分子の解離を促進し、解離による原子生成を行う。原子がプラズマ電極 (以下 PG 電極) 表面に到達すると、電極表面から電子を受け取ることにより、 H^- イオンが生成される (表面生成)。このような表面生成 H^- イオンを引き出し電極に電圧を印加することにより、ビームとしてイオン源から引き出し、利用する。

しかしながら、負イオン源大型化と PG 電極の大面积・多孔化に伴い、引き出される負イオンビームの非一様性と、それに伴うビームの発散および引き出し電極への熱負荷の問題が顕在化し、負イオンビーム電流値増大の大きな障害になっている。

これらの問題点の解決には、従来、小・中規模イオン源開発で行われてきた経験的な手法に加え、数値モデリングとその実験との比較による問題点の本質的な理解とその体系化による現状打破が強く望まれていた。

2. 研究の目的

上記、問題点を踏まえ、本研究では、現在、開発の進められている大型マルチカスプ・アーク放電型水素負イオン源を主な研究対象として、1) 放電プラズマ中の負イオン生成、2) ビーム引き出し部への負イオン輸送、3) 引き出し部近傍の負性プラズマ電位構造および引き出し界面形成、4) 負イオンビーム引き出しという一連の過程と、その支配機構、因果関係を数値モデリング、および、その実験との比較により系統的に明らかにすることを目的とする。

これにより、負イオン源開発、特に将来の大型水素負イオン源において強く望まれる、1) 一様大面积、2) 高電流密度、3) 高収束性など、重要な特性、性能を有する負イオンビーム生成実現に寄与する。

3. 研究の方法

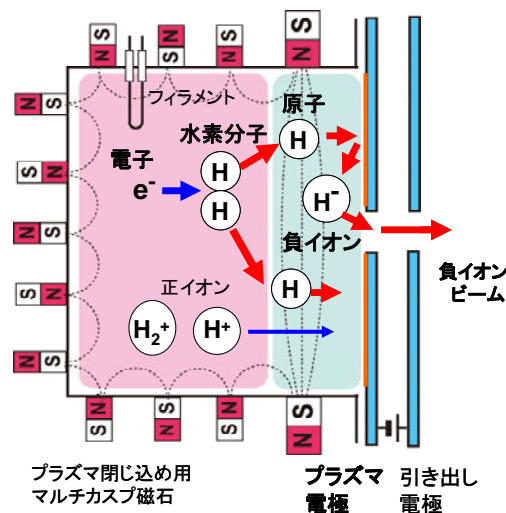


図1 マルチカスプ放電型水素負イオン源

上記、目的達成のため、放電プラズマ中の負イオン生成から引き出しに至る諸過程 (図1 参照) をモデル化し、数値シミュレーションを行い、その実験との比較を行う。

より具体的には、以下の方法を用いる。

(1) 非一様性発現機構の解明: 負イオン源プラズマ、特に電子エネルギー分布関数 (EEDF) および中性粒子輸送モデリングを行い、負イオン源内の解離性中性原子密度、PG 表面への原子流束、負イオン生成空間分布の解析・評価を行なう。これらの解析結果を電子温度・密度分布、水素原子発光線 (H_α 線) 強度分布、負イオンビーム強度分布測定などの実験データと比較し、非一様性発現機構の解明を行う。

(2) 引き出し部プラズマ電位構造・引き出し界面形成機構および負イオン引き出し機構の解明: 運動論的粒子コード (PIC コード) により、正イオン・電子・表面生成負イオンのダイナミクスと電極近傍の電位構造とを自己無撞着に計算する。とくに、多量の負イオン表面生成下でのプラズマ電位形成・負イオン引き出し機構に着目する。さらに、電極近傍のプラズマ電位、負イオン密度、ビームエミッタンス測定などの実験データと比較し、よって引き出し界面 (メニスカス) 形成機構解明とビーム収束性に対する知見を得る。

上記、(1) (2) のモデリングと実験データとの比較においては、核融合科学研究所 (NIFS)、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、欧州原子核研究機構 (CERN) などの研究機関からの測定データの提供を受けた。

4. 研究成果

(1) 非一様性発現機構の解明

① モデリングおよび数値シミュレーションコードの開発

本研究では、非一様性発現機構の解明のため、以下 A、B のようなイオン源プラズマのモデリングとシミュレーションコードの開発・高度化に成功した。これらのモデリングツールは、後述するように、非一様性発現機構解明に大きな役割を果たすとともに、現在、様々なイオン源設計・開発に適用されるようになってきている。

A. マルチカスプ・アーク放電型イオン源内の電子エネルギー分布関数解析コード開発

(以下、KEIO-MARC コードと呼ぶ)

KEIO-MARC コードは、i) イオン源の実形状、プラズマ閉じ込め実磁場配位、熱電子生成フィラメントなどを空間 3 次元で模擬し、ii) 1 次熱電子及びイオン化生成される 2 次電子軌道を追跡する。さらに、iii) 負イオン源内の電子-電子、電子-原子/分子弾性衝突過程および電子による分子解離など複雑な非弾性衝突過程 (反応種: 数百種以上) を考慮し、負イオン源内の EEDF を計算する。

このような計算コードは、国内・外を問わず他に例を見ない。また、この KEIO-MARC コードは、本研究における妥当性検証を経て、最近、医療用 (PET: Positron Emission Tomography) 水素イオン源の設計・開発などへも適用されている。負イオン源設計・開発ツールとしての有用性を示している。

B. 中性原子輸送および衝突輻射 (CR) モデルの開発

上記、KEIO-MARC コードで得られる EEDF をもとに、i) 解離原子の生成分布、ii) 原子のプラズマ中での輸送を計算することを可能とする輸送コードの開発を行った。さらに、iii) 後述する分光測定との比較のために、中性原子の励起準位およびバルマー系列の発光線強度の空間分布の計算を行う CR モデルの開発にも成功した。

本研究で開発した中性原子輸送および CR モデルは、EEDF の非平衡性を考慮できる点において、従来の水素負イオン源におけるモデリングとは大きく異なり、国内外問わず、他に例を見ない。

C. 高周波放電型水素負イオン源のモデリング

上記、A、B は、アーク放電型のみではなく、高周波放電型水素負イオン源プラズマのモデリングにもきわめて有効である。上記、A、B をベースに、プラズマ中の高周波電磁場のモデリングをも行い、高周波放電型イオン源プラズマへの応用展開も可能となった。具体的には、現在、欧州原子核研究機構 (CERN) の直線加速器 (Linac4) 水素負イオン源グループとの共同研究に発展し、我々のモデリングと CERN における水素負イオン源実験との比較を進め、Linac4 水素負イオン源の大電流化に寄与している。

② 実験との比較と非一様性発現機構の解明

開発したモデリングツールを大型マルチカスプアーク放電型水素負イオン源 (JAEA 10A イオン源：図 2 参照) に適用し、実験で観測された負イオンビーム空間非一様性発現機構の解明を行った。

その結果、非一様性の発現は、以下の物理機構/過程により説明されることを明らかにした：i) イオン源マルチカスプ磁場配位に起因する電子の磁気ドリフトの発生、ii) i) によるイオン源長手方向上部における非平衡高エネルギー電子成分の局在化、iii) ii) の高エネルギー電子による分子解離反応および分子イオン解離反応の促進と解離生成原子密度の増大、iv) 上記、過程によるプラズマ電極表面への解離生成原子の表面流束のイオン源長手方向上部への局在化、v) iv) による表面生成負イオン密度の空間的非一様性の発現。

以下、上記理解のもとになる代表的な解析結果を示す。ただし、JAEA 10A イオン源は、図 2 のように高さ (長手方向) 48 cm、幅 (短手方向) 24 cm、奥行 20 cm の箱型イオン源である。以下の結果は、代表的な放電条件 (アーク放電パワー 10 kW、放電電圧 60 V、ガス圧 0.3 Pa) のもとの解析結果である。

図 2 は、KEIO-MARC コードを用いて計算されたイオン源内部における高エネルギー電子成分 (55 eV-65 eV) の粒子位置の空間分布 (スナップショット) を示す。高エネルギー成分は、磁気ドリフトにより、側壁にそって長手方向上部に輸送され、局在化する。

図 3 は、図 2 ABCDE 各点における EEDF を示す。図からわかるように、イオン源長手方向下部の点 C-E では、EEDF は、ほぼ熱平衡 (Maxwell) 分布に緩和している。これに対

してイオン源上部の点 A における EEDF は、平衡分布に十分緩和されず、高エネルギー ($E > 20$ eV) の非平衡テイル成分が存在している。このような高エネルギー領域に対して電子衝突による分子 (あるいは分子イオン) の解離反応の断面積はきわめて大きい。したがって、この領域で解離による原子生成が大きくなり、その結果、プラズマ表面への原子流束、さらには、負イオン生成が局在化する。

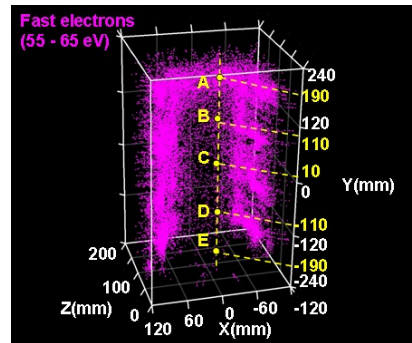


図 2 KEIO-MARC コードによる JAEA10A イオン源内部の高エネルギー電子解析結果。高エネルギー (55-65 eV) 電子位置の空間分布 [発表論文リスト：雑誌論文(1)より引用]。

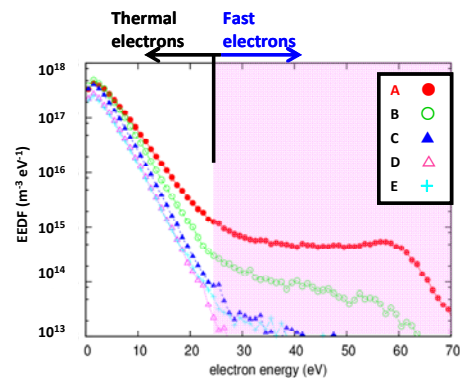


図 3 イオン源各点における EEDF。A、B、C、D、E は、図 2 のイオン源内部中心 (Y) 軸上の各点に対応する [発表論文リスト：雑誌論文(5)より引用]。

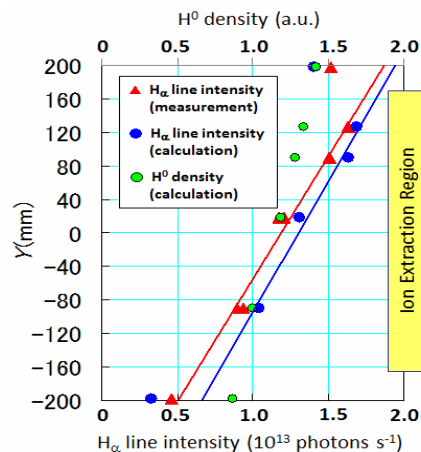


図 4 水素原子密度および水素原子からの H α 線発光強度の空間分布 [発表論文リスト：雑誌論文(1)より引用]

さらに、図4に図2、図3に示した EEDF の空間分布をもとに、開発した中性原子輸送コードから計算したイオン源中心軸(図2のY軸)上での中性原子密度の空間分布を示した。さらに、図4には、CRモデルから計算した水素原子のバルマー系列 H α 線(波長: 656nm)の発光強度の計算結果を、実験結果と比較して示した。両者は良く一致している。

③ 将来の大型負イオン源における非一様性改善の貢献

上記、①②の知見に基づく、非一様性改善の検討もすでに始まっている。例えば、JAEA JT60SA 用の大型負イオン源設計・開発では、磁気ドリフトによる長手方向上部への高エネルギー電子の局在化を防ぐために、従来の磁場配位を変更し、テント型フィルター磁場配位の提案がなされた。これにより、長手方向の非一様性の改善が報告されている。このテント型磁場配位についても、現在、KEIO-MARC コードが適用され、実験との比較が進められている。

(2) 引き出し部プラズマ電位構造・引き出し界面形成機構および負イオン引き出し機構の解明

①モデリングと数値シミュレーションコードの開発

本研究では、PG 電極近傍の引き出し部プラズマ電位構造・引き出し界面形成機構および負イオン引き出し機構解明のため、実空間2次元・速度空間3次元(2D3V)および実空間3次元・速度空間3次元(3D3V)の超粒子(PIC)シミュレーションコードの開発を行った。

本研究では、PG 電極近傍で表面生成される多量の負イオンを含むプラズマとその電位構造の再現には、後述するように、引き出し部のみではなく、より大域的な磁場構造と、それに起因する磁力線平行および垂直方向の電子の損出メカニズムを考慮することが重要であることを初めて指摘した。さらに、これらの効果を、簡単なモデルにより多次元 PIC モデルに導入することにより、大域的な磁力線方向の電子損出効果を考慮し、かつ、現状の計算機性能においても、大規模 PIC シミュレーションが可能となる新しいモデルを開発した。

加えて、イオン源内の引き出し部のみではなく、加速部におけるビーム輸送まで含めた統合 PIC シミュレーションを世界に先駆けて実施した。従来の加速部における負イオンビーム輸送シミュレーションは、イオン源内のビーム放出界面(メニスカス)形状を仮定として与えていた。これに対して、我々は、メニスカス形状とビーム輸送とを自己無撞着に解くことに初めて成功した。

②引き出し部プラズマ電位構造・引き出し界面形成機構とビーム収束性

開発したモデリングツールを用い、数値シミュレーションを行い、実験結果との比較を通して以下の知見を得た。

A. イオン性プラズマの再現

NIFS 大型ヘリカル装置(LHD)実機 1/2 スケールイオン源(以下、NIFS-R&D 負イオン源と呼ぶ)の実験では、多量の表面生成負イオ

ン存在下では PG 電極近傍に正イオン-負イオンのみからなり、電子がほとんど存在しない、いわゆる“イオン-イオン”プラズマ(以下、イオン性プラズマと呼ぶ)が観測されている。このイオン性プラズマの理解は、引き出しビームの大電流化やビーム収束性向上に重要である。

我々は、上述の 2D3V PIC 法によりモデル化および数値シミュレーションを実施し、数値シミュレーションとして初めてイオン性プラズマの再現に成功した。従来、欧州で開発された 3D3V PIC モデルでは、未だ、イオン性プラズマが再現されていない。これに対して、我々は上述したように PG 電極近傍に存在するフィルター磁場を横切る電子拡散と磁力線に沿っての電子損失の兼ね合い

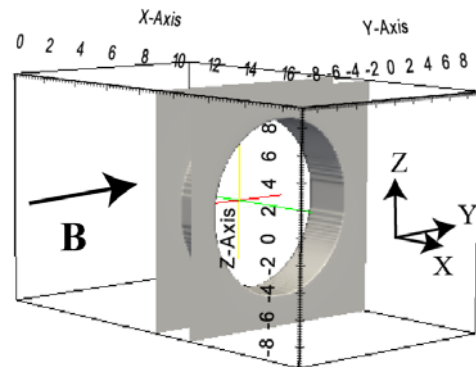


図5 3D3V PICモデル計算体系[発表論文リスト: 雑誌論文(3)より引用]

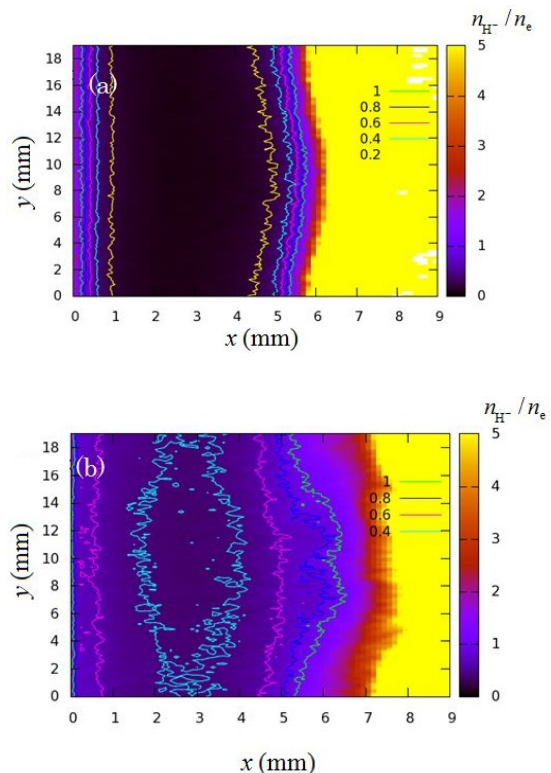


図6 引き出し領域中の負イオン密度・電子密度比 (n_{H^-}/n_e) の2次元空間分布(図5の $x-y$ 平面内)における2次元分布であり、 $x=9$ mm が PG 電極イオン源内表面位置に相当): (a)電子損出: 大 $\sqrt{\tau_{||}/\tau_{\perp}}=0$, (b)電子損出: 小 $\sqrt{\tau_{||}/\tau_{\perp}}=0.016$.

が、イオン性プラズマの生成に重要であることを早い段階から指摘してきた。実際に、2D3V PIC モデルにおいて、磁場を横切る電子拡散時間 τ_{\perp} と磁場に沿った電子損失時間 τ_{\parallel} を用いた電子輸送酔歩モデルを提案し、磁力線方向の損失が大きく ($\tau_{\parallel}/\tau_{\perp} \rightarrow$ 小) になると、イオン性プラズマが生成されることを示した[発表論文リスト：雑誌論文(4)]。

このモデルを最近 3D3V PIC に導入し、前頁図5に示した計算体系で解析した[詳細な計算条件などは、発表論文リスト：雑誌論文(3)参照]。その結果、3次元モデルにおいても、前頁図6に示したように、磁場に沿った電子損失の増大に伴い、PG 前面に生成されるイオン性プラズマ層の厚さが増大することが確認された。すなわち、3次元モデルにおいても、2次元モデルと同様に、磁場に沿った電子損失がイオン性プラズマの生成要因として重要であることが示された。

B. 引き出し-加速統合シミュレーションとビームハロ生成機構の解明

JAEA JT-60U 負イオン中性粒子ビーム入射加熱 (N-NBI) 装置を模擬した計算モデル体系 (図7参照) に対して、①で述べた 2D3VPIC モデルによる引き出し-加速統合シミュレーションを行った。

その結果、以下の知見を得た：i) JT-60U 負イオン源引き出し部の典型的なプラズマパラメータに対してもイオン性プラズマが生成されることが示された、ii) このようなイオン性プラズマにおける負イオン引き出し界面は、平面ではなく、湾曲し、曲率を持ちやすい、特に、この傾向は、PG 電極近傍で顕著となる、iii) ii)が原因となり、PG 近傍から引き出されるビーム成分が過収束し、加速部で発散成分となる (図8参照)、iv) これが、ビームハロと呼ばれるビーム発散成分の原因となり、ビーム収束性を損ない、電極の熱負荷の原因となる可能性がある。

従来、ビームハロは電極への熱負荷の原因の一つと考えられ、ビーム大電流化の大きな妨げになると考えられる。しかしながら、その形成機構は未解明であった。

本研究でその物理機構が上の i)-iv) の物理機構によって説明される可能性があることを、初めて示唆した[発表論文リスト：雑誌論文(4)、(6)、(7)及び国際会議論文(1)参照]。図7に示した計算結果では、電極に入射するビーム粒子数は、加速部で A1G, A2G, GRG 電極の順に下流側ほど大きくなっている。この傾向は、実験と同様の傾向を示している。

さらに、上記、引き出し部のイオン性プラズマの挙動については、上述の 3D3V PIC モデルにより確認された。ビームハロ成分のビーム全体に対する割合は5~8%程度となり、定量的にも実験とほぼ一致する結果となっている[発表論文リスト：雑誌論文(3)参照]。

③ 大電流ビーム引き出しとビーム収束性向上に向けての今後の課題

本研究により、イオン性プラズマにおける負イオンビーム引き出し界面 (メニスカス) の制御が、引き出されるビームの収束性の向

上に不可欠であることが示された。特に、大電流ビーム引き出しの際のビームハロの生成とその電極への熱負荷の抑制には、イオン性プラズマとメニスカスの制御が不可欠であることが示された。

本研究で得られた知見と開発した数値モデリングとシミュレーションコードは、現在、さらに、メニスカスを制御するための外部パラメータ (例えば、PG および EXG の電極形状、PG 電極に対するバイアス電圧) 依存性の理解などの詳細な検討に適用されている。また、実際のイオン源設計・開発への応用展開が可能であり、JT60SA 用 N-NBI イオン源開発などへの適用が開始されている。

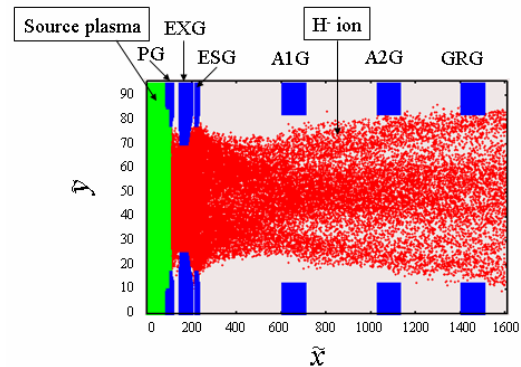


図7 引き出し-加速 2D3V PIC 統合シミュレーション計算体系と H⁻ビーム粒子位置スナップショット。PG、EXG、ESG、A1G、A2G、GRG は、各々、プラズマ、引き出し、引き出し補助、第一加速、第二加速、接地の各電極を表す[発表論文リスト：雑誌論文(7)より引用]。

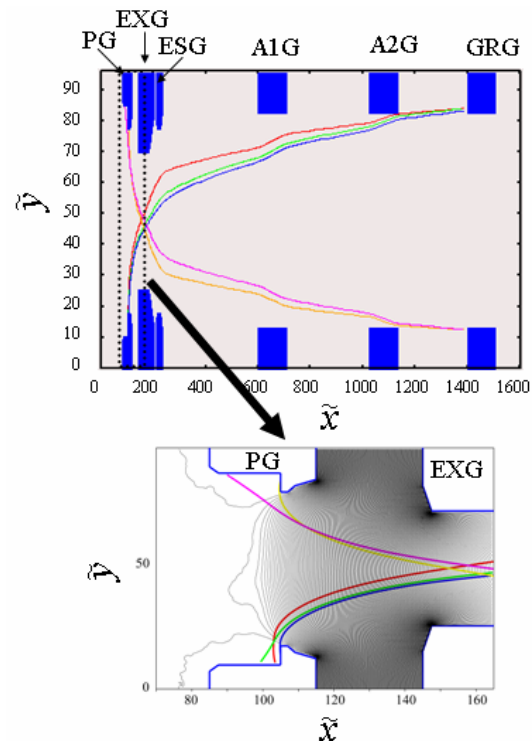


図8 典型的なビームハロ成分の H⁻ビーム粒子軌道：(a) 計算体系全体におけるビーム粒子軌道、(b) PG および EXG 電極近傍の拡大図。粒子軌道とともに電位の等高線も同時に示した[発表論文リスト：雑誌論文(7)より引用]。

5. 主な発表論文等

雑誌論文] (計 25 件)

- (1) T. Shibata, M. Kashiwagi, A. Hatayama, K.Sawada, T. Inoue and M. Hanada, “Numerical Study of the H0 Atomic Density and the Balmer Line Intensity Profiles in a Hydrogen Negative Ion Sources with the Effect of Non-equilibrium Electron Energy Distribution Function”, Plasma Fusion and Research, 査読有, **9**, 2014,1401011-1-8. doi :10.1585/pfr. 9.1401011
- (2) A.Hatayama, T. Shibata, S. Nishioka, M.Ohta, M.Yasumoto, K.Nishida, T. Yamamoto, K. Miyamoto, A .Fukano and T. Mizuno, “Kinetic Modeling of Particle Dynamics in H- Negative Ion Sources - Recent progress and Open Questions -”, (**Invited Paper**) Review of Scientific Instruments, 査読有, **85**, 2014, 02A510-1-7. doi:10.1063/ 1.4852300.
- (3) S. Nishioka, K. Miyamoto, S .Okuda, I.Goto, A. Hatayama, A. Fukano, “Study of plasma meniscus and beam halo in negative ion sources using three-dimension in real space and three-dimension in velocity space particle in cell model”, Review of Scientific Instruments, 査読有, **85**, 2014, 02A737-1-3. doi:10.1063/1.4854976
- (4) K. Miyamoto, S. Okuda, S. Nishioka, and A. Hatayama, “Effect of basic physical parameters to control plasma meniscus and beam halo formation in negative ion sources”, Journal of Applied Physics, 査読有, **114**, 2013, 103302-1-7. doi:10.16/1.4820571
- (5) T. Shibata, M. Kashiwagi, T. Inoue, A. Hatayama and M. Hanada, “Numerical study of atomic production rate in hydrogen negative ion sources with the effect of non-equilibrium electron energy distribution functions”, Journal of Applied Physics, 査読有, **114**, 2013, 143301-1-7. doi:10. 16/1. 4824366
- (6) K. Miyamoto, S. Okuda, A. Hatayama, “Meniscus and beam halo formaiton in a tandem-type negative ion source with surface production”, Applied Physics Lettes, 査読有, **100**, 2012, 233507-1-3. doi:10.1063/1.4726262
- (7) K.Miyamoto, S .Okuda, A.Hatayama, M.Hanada and A.Kojima, “Study of beam optics and beam halo by integrated modeling of negative ion beams from plasma meniscus formation to beam acceleration”, Applied Physics Letters, 査読有, **102**, 2012, 023512-1-4. doi:10.1063/1.4788725

[国際会議論文] (計 12 件)

- (1) K. Miyamoto, S. Nishioka, I. Goto, A.Hatayama, M.Hanada, A. Kojima, “Study of negative hydrogen ion beam optics using the 3D3V PIC model”, AIP Conference Proceedings, 査読有, **1655**, 2015,

05004-1-9, doi: 10.1063/1.4916461

[学会発表] (計 66 件)

- (1) “ダイバータと負イオン源のマルチスケールシミュレーション研究”, 畑山 明聖、第 10 回核融合エネルギー連合講演会—発電実証に向けた核融合研究の進展と拡がり—、つくば国際会議場、茨城県つくば市(2014 年 6 月 19 日~20 日)

[その他]

本研究期間中(2013 年 9 月)に、水素負イオン源のモデリングに関する国際ワークショップ会合を企画・実施した(<http://www.ppl.appi.keio.ac.jp/arecre/work13.html>参照)。このワークショップを契機に、負イオンビーム引き出しに関する数値シミュレーションコードの国際的なベンチマークテスト活動が開始された。このベンチマークテストには、ドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所などから研究者が参加し、現在も継続して活発に行われており、2014 年 10 月にも第 2 回目の会合を行った。このようなベンチマーク活動においても、上で述べたように本研究の支援により、国際的にも主導的な立場で 3D3V PIC 粒子コードの信頼性向上と高度化に寄与してきた。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畑山 明聖 (Hatayama Akiyoshi)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 10245607

(2) 研究分担者

- ①宮本 賢治 (Miyamoto Kenji)
鳴門教育大学・大学院学校教育研究科・准教授
研究者番号: 00532996
- ②深野あづさ (Fukano Azusa)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・教授
研究者番号: 90259838
- ③水野 貴敏 (Mizuno Takatoshi)
玉川大学・工学部・准教授
研究者番号: 80512459

(3) 連携研究者

- ①竹入 康彦 (Takeiri Yasuhiko)
核融合研・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 60179603
- ②津守 克嘉 (Tumori Katutoshi)
核融合研・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 50236949
- ③池田 勝則 (Ikeda Katunori)
核融合研・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 20321614
- ④井上 多加志 (Inoue Takashi)
原研・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号: 00354639
- ⑤澤田 圭司 (Sawada Kenji)
信州大学・工学部・教授
研究者番号: 40262688

(4) 研究協力者

- ① J. Lettry
CERN, 上席研究員