

研究課題：メートル級大型負イオン源の負イオンの生成機構の解明と一様生成に関する理論的研究
研究代表者：畑山明聖（慶應義塾大学大学院理工学研究科）

原子力機構担当者：花田磨砂也

研究協力者：柴田崇統（慶應義塾大学大学院理工学研究科 現:高エネルギー加速器研究機構）、
吉田雅史（原子力機構）、山本尚史（慶應義塾大学大学院理工学研究科 現：東京電力）、
柏木美恵子（原子力機構）、小島有志（原子力機構）、

研究期間：平成 25 年度-27 年度

1. 研究目的・意義

日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）では、JT-60SA 中性粒子入射装置(NBI)用メートル級大型負イオン源で問題となっている負イオン生成分布の空間的非一様性を改善するために、非一様性の主要原因となっている負イオン源磁場配置の改良を進めている。本共同研究の目的は、慶應義塾大学が開発してきた負イオン源内プラズマの数値シミュレーションコードを本イオン源に適用し、これまで十分な解明に至っていなかった負イオン非一様性発生の詳細な物理機構を解明し、負イオンを一様に生成するための負イオン源磁場配位、及びフィラメント陰極位置の改善などの工学的対策を明らかにすることにある。本報告では、非一様性発生の物理機構に関して、数値シミュレーション及びその実験との比較から得られた知見を中心に研究成果をまとめる。

2. 非一様性発生機構解明のための数値計算モデル

水素負イオン源プラズマ中での負イオン生成は、主として“表面生成反応”により行われる。すなわち、放電プラズマ中で電子と水素分子との衝突反応により解離生成された中性水素原子がイオン源内壁（プラズマ電極）に入射し、壁表面で負イオンが生成される。電子衝突による分子解離反応断面積は電子エネルギーに大きく依存し、高エネルギー領域（ $E > 20\text{eV}$ ）で大きな値をとる。このため、負イオン生成空間分布の非一様性の解明には、放電プラズマ中の電子エネルギー分布関数(EEDF)とその空間分布の解析がきわめて重要となる。

本共同研究では、慶應義塾大学で開発してきた KEIO-MARC (Kinetic Electron transport code of IOn source plasmas in the Multi-cusp ARC-discharge) コードにより、JAEA 大型マルチカスプイオン源プラズマ中の EEDF の解析を行った。KEIO-MARC コードでは、放電条件（3次元真空容器形状、マルチカスプ実磁場配位、アーク電圧、アーク電流、初期ガス圧など）を入力パラメータとして、放電プラズマ中の EEDF の 3次元空間分布を求めることができる。この EEDF から放電容器内部の巨視的な物理量（電子密度、電子温度など）の 3次元空間分布を計算し、実験と比較することができる。さらに、非一様性発生機構解明に重要な解離生成中性原子の数密度空間分布、バルマー系列の発光線（主として $H\alpha$ 線）強度分布、壁への中性原子粒子束なども評価できる。

従来の水素負イオン源を対象とした解析は、マルチカスプイオン源内の電子軌道解析にとどまっていた。これに対して、KEIO-MARC コードでは、実空間での電子輸送に加えて、電子-電子クーロン衝突、分子解離、分子振動励起、分子イオン化など 500 種類にも及ぶ衝突過程を Monte Carlo 法を用いて考慮し、陰極シースで加速された電子のエネルギー緩和過程を模擬できる。水素負イオン源プラズマの EEDF 3次元空間分布解析が可能なのは、現状、KEIO-MARC コードのみであり、国際的にも他に例をみない。

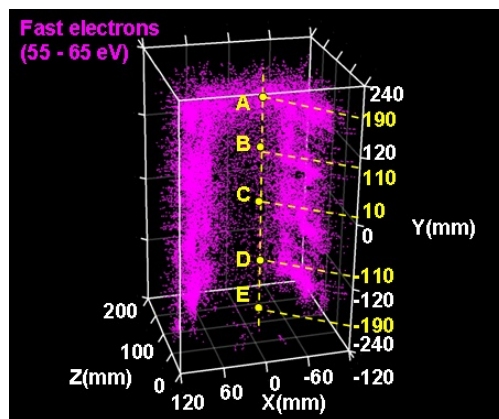


図1 KEIO-MARC コードによる JAEA10A イオン源解析結果。分子解離に重要な高エネルギー（ $E=55\text{-}65\text{eV}$ の範囲）を持つモンテカルロテスト粒子のイオン源内 3次元空間分布。成果リスト文献[①-4]

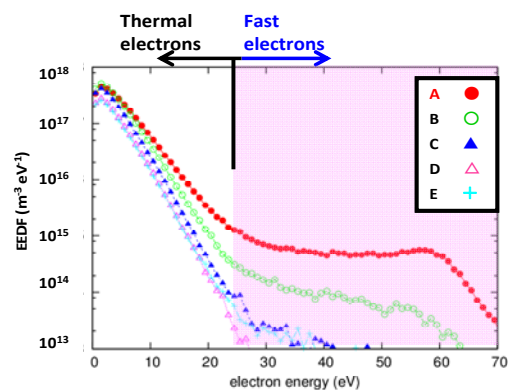


図2 JAEA10A イオン源内の EEDF。図1の A、B、C、D、E 各点の計算セルにおける EEDF。イオン源上部（点 A、B）では、高エネルギー電子テイル成分（ $E > 20\text{eV}$ ）が存在する。成果リスト文献[①-1]

3. 主な研究成果

JT-60SA NBI 用メートル級大型負イオン源の解析に先立ち、中型サイズのマルチカスプ負イオン源 (JAEA 10 A イオン源) に KEIO-MARC コードを適用し、計算モデルの妥当性の検討を行った。図 1 は JAEA 10 A イオン源真空容器内部における高エネルギー電子の空間分布を示す。また、図 1 の真空容器内部各点 (A、B、C、D、E) における EEDF を図 2 示す。シミュレーション結果から、1) 分子解離反応への寄与が大きい高エネルギー電子はイオン源長手方向 (Y 方向) 上部に局在化すること、2) 局在化の原因は、10 A イオン源磁場配位に起因する磁気ドリフトであること、3) この高速電子の局在化は、上で述べた解離中性原子生成分布の局在化を招き、4) そのため負イオン表面生成分布も局在化されることを明らかにした。特に、1)、3) については、実験結果とラングミュアプローブ測定、および $H\alpha$ 線強度測定結果との比較から、実験的にも確かめられた (図 3)。

上記、磁気ドリフトによる局在化を抑制するため、JAEA は JT-60SA NBI 用メートル級大型負イオン源において、従来のマルチカスプ磁場配位を改良したテント型フィルター磁場配位を提案し、適用した。一方、慶應義塾大学ではこのテント型フィルター磁場配位に対して、KEIO-MARC コードによる解析を実施し、以下のことを明らかにした (図 4 参照)：

1) テント型フィルター磁場配位では、イオン源内部に磁気ドリフトによる X-Y 面内での電子の循環が形成され、従来の磁場配位に比較して EEDF の長手方向の非対称性は弱められる、2) しかしながら、未だ電子の循環は不十分で、特に長手方向上下端部において電子の循環が弱められる、3) 2) は、上下端部でカスプ磁場が強いため、EEDF 高エネルギー成分の循環が妨げられることによる。

JAEA は、これを踏まえ、電子循環をさらに促進し、一様性を一層改善するため、テント型フィルター磁場配位を改良したロの字型フィルター磁場配位を提案した。KEIO-MARC コードによる解析でも、長手方向端部まで到達した電子が短手方向のドリフトを受けることで、電子の循環が促進され、EEDF の空間的一様性が改善されることが確かめられた (図 4)。電子のイオン源全体にわたる循環によって、長手方向端部 ($|Y| \sim 500$ mm) でも分子解離による中性原子生成が促進され、テント型配位に比べ、ロの字型配位における H の生成領域が長手方向に広がることを明らかにした (図 5)。

その後、JAEA は短手方向の一様性の改善も行い、JT-60SA NBI 用メートル級大型負イオン源全体の負イオン生成一様性の改善と引き出しビーム電流の大電流化に成功している。

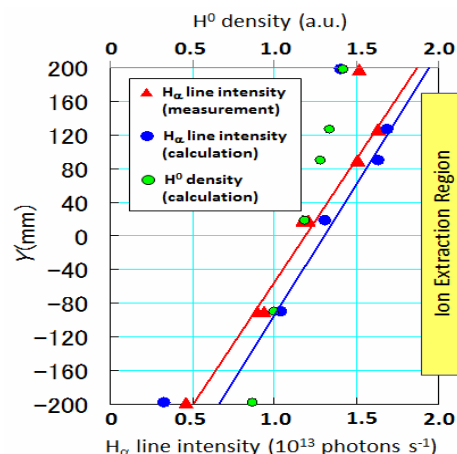


図 3 10A 負イオン源内の水素原子による $H\alpha$ 線発光強度分布の測定結果 (▲)・解析結果 (●) 及び分光計測ポートの視野領域内における平均原子密度分布の解析結果 (●)。成果リスト文献[①-4]

$H\alpha$ 線強度測定結果との比較から、実験的にも確かめられた (図 3)。

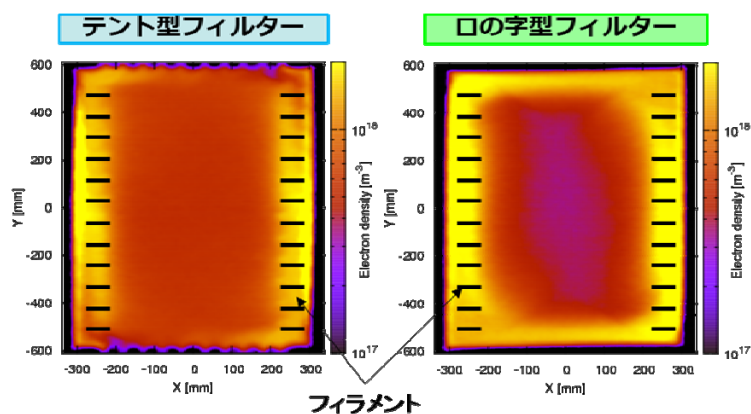


図 4 JT-60SA 負イオン源内のテント型 (左図) およびロの字型フィルター (右図) 磁場配位における電子密度の長手 (Y)・短手 (X) 方向分布 (PG との距離 $Z = 160$ mm の平面) [山本：慶應義塾大学理工学研究科 修士論文]。

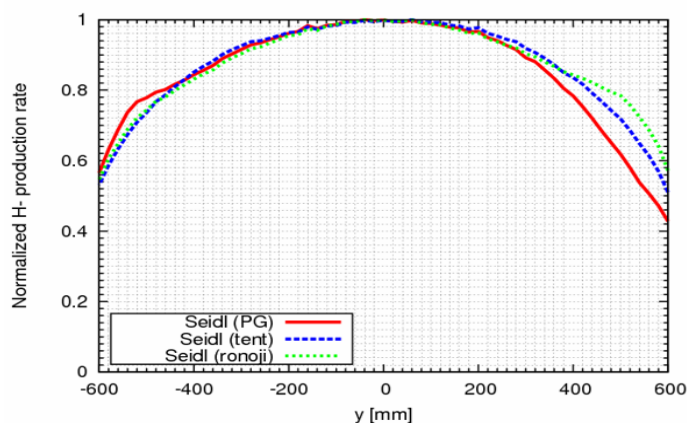


図 5 JT-60SA 負イオン源内の a) 従来型 (赤線), b) テント型 (青線), c) ロの字型 (緑線) フィルター磁場配位に対する H の生成量のイオン源長手方向分布 (短手方向の積分値) [山本：慶應義塾大学理工学研究科 修士論文]。

成果リスト（口頭発表含む）

① 学術雑誌(査読有)

1. 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 function”, *Journal of Applied Physics* **114**, 143301 (2013).
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 (invited)”, *Review of Scientific Instruments* **85**, 02B510 (2014).
3. T. Yamamoto, T. Shibata, M. Kashiwagi, A. Hatayama, K. Sawada and M. Hanada, “Numerical analysis of atomic density distribution in arc driven negative ion sources”, *Review of Scientific Instruments* **85**, 02B125 (2014).
4. T. Shibata, M. Kashiwagi, A. Hatayama, K. Sawada, T. Inoue and M. Hanada, “Numerical Study of the H^0 Atomic Density and the Balmer Line Intensity Profiles in a Hydrogen Negative Ion Source with the Effect of Non-equilibrium Electron Energy Distribution Function”, *Plasma and Fusion Research* **9**, 1401011 (2014).
5. A. Kojima, et al., “Long-pulse production of the negative ion beams for JT-60SA”, *Fusion Eng. Design* **88** (2013) 918-921
6. A. Kojima, et al., “100 s extraction of negative ion beams by using actively temperature-controlled plasma grid”, *Review of Sci. Instrum.* **85**, 02B312 (2014)
7. M. Yoshida, et al., “Origin of Non-Uniformity of the Source Plasmas in JT-60 Negative Ion Source”, *Plasma and Fusion Research*, Volume 8, 2405146 (2013)
8. M. Yoshida, et al., “Improvement of uniformity of the negative ion beams by Tent-shaped magnetic field in the JT-60 negative ion source”, *Rev. of Sci. Instrum.* **85**, 02B320 (2014)
9. A. Kojima, et al., “Progress in long pulse production of powerful negative ion beams for JT-60SA and ITER”, *Nuclear Fusion* **55** (2015) 063006
10. M. Yoshida, et al., “22A beam production of the uniform negative ions in the JT-60 negative ion source”, *Fusion Eng. Des.*, 96-97 (2015) 616-619
11. M. Yoshida, et al., “Time evolution of negative ion profile in a large cesiated negative ion source applicable to fusion reactors”, *Rev. of Sci. Instrum.*, **87** (2016) 02B114.

② 国内・国外学会発表

1. 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 (invited)”, 15th *International Conference on Ion Sources*, 9 – 13 September 2013, Makuhari Messe International Convention Complex, Chiba, Japan.
2. 畑山明聖, 「水素負イオン源モデリング・シミュレーション研究の現状」, 平成 25 年度 負イオン研究会, 平成 25 年 12 月 25-26 日, 核融合科学研究所
3. 山本尚史, 「水素負イオン源における水素原子密度分布解析」(ポスター発表), 第 30 回プラズマ核融合学会年会, 平成 25 年 12 月 3-6 日, 東工大
4. 柴田崇統, 「アーク放電型負イオン源内の負イオン表面生成分布解析」(ポスター発表), 第 30 回プラズマ核融合学会年会, 平成 25 年 12 月 3-6 日, 東工大
5. A. Kojima et al., “100 s extraction of negative ion beams by using actively temperature-controlled plasma grid”, 15th *International Conference on Ion Sources*, 9 – 13 September 2013, Makuhari Messe International Convention Complex, Chiba, Japan.
6. 小島有志, 「JT-60 負イオン源の大電流超パルス化に向けた研究開発」, 平成 25 年度 負イオン研究会, 平成 25 年 12 月 25-26 日, 核融合科学研究所
7. M. Yoshida et al., “Improvement of uniformity of the negative ion beams by Tent-shaped magnetic field in the JT-60 negative ion source”, 15th *International Conference on Ion Sources*, 9 – 13 September 2013, Makuhari Messe International Convention Complex, Chiba, Japan.
8. 吉田雅史, 「テント型磁場配位による JT-60 負イオン源の負イオンビームの非一様性の改善」, ポスター, 第 30 回 プラズマ核融合学会年会, 2013 年 12 月 3-6 日, 東工大
9. 吉田雅史, 「JT-60 負イオン源でのテント型磁場配位を用いた負イオンビーム一様性の改善」, 平成 25 年度 負イオン研究会, 平成 25 年 12 月 25-26 日, 核融合科学研究所
10. 吉田雅史, 「JT-60 負イオン源のテント型磁場配位によるビーム一様性の改善」, ポスター, 原子力

学会北関東支部 若手研究者発表会, 2014 年 4 月 18 日, 東海村

11. 吉田雅史, 「JT-60 負イオン源でのビーム一様性改善に向けた磁場構造最適化」、ポスター、第 10 回エネルギー連合講演会、2014 年 6 月 20 日、つくば市
12. M. Yoshida, *et al.*, “22 A production of uniform negative ion beams in the JT-60 negative ion source”, *SOFT2014*, 29 Sep. ~ 3 Oct. 2014, San Sebastian, Spain.
13. A. Kojima, *et al.*, “Long-pulse production of high current negative ion beam by using actively temperature controlled plasma grid for JT-60SA negative ion source”, *NIBS2014*, 6-10 Oct. 2014, IPP Garching, Germany.
14. M. Yoshida, *et al.*, “High current production of the uniform beams by modifying the magnetic filter in JT-60 negative ion source”, *NIBS2014*, 6-10 Oct. 2014, IPP Garching, Germany.
15. 吉田雅史、「改良型磁気フィルターを用いた大面積一様負イオン生成の開発」、口頭、Plasma2014, 2014 年 11 月 18-21 日, 新潟市
16. 小島有志、「JT-60SA および ITER に向けた大電流負イオンビームの長時間生成」、招待講演、Plasma2014, 2014 年 11 月 18-21 日, 新潟市
17. 小島有志, 「JT-60SA 用負イオン源の開発状況」, 平成 26 年度負イオン研究会, 平成 26 年 8 月 27-28 日, 核融合科学研究所
18. 吉田雅史, 「JT-60SA 用負イオン源での大電流一様負イオンビーム生成」, 平成 26 年度負イオン研究会, 平成 26 年 8 月 27-28 日, 核融合科学研究所
19. M. Yoshida, *et al.*, “Time evolution of negative ion profile in a large cesiated negative ion source applicable to fusion reactors”, 16th International Conference on Ion Source, New York City, USA, August, 2015.
20. 吉田雅史, 「大型負イオン源のセシウムリサイクリング」, 口頭、平成 27 年度 負イオン研究会, 平成 27 年 9 月 24-25 日, 核融合科学研究所
21. 吉田雅史, 「ITER, JT-60SA 用負イオン源に向けた負イオンの長パルス生成」, シンポジウム、第 32 回 プラズマ核融合学会年会、2015 年 11 月 24-27 日、名古屋大学
22. 小島有志, 「ITER, JT-60SA 用負イオン源に向けた負イオンの長パルス加速」, シンポジウム、第 32 回 プラズマ核融合学会年会、2015 年 11 月 24-27 日、名古屋大学