

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686011

研究課題名(和文) 慣性静電閉じ込めプラズマ中の球状集束ビーム衝突核融合反応機構の解明

研究課題名(英文) Study on Beam Colliding Fusion by Spherical Ion Focus in Inertial Electrostatic Confinement Plasmas

研究代表者

増田 開 (Masuda, Kai)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：80303907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,500,000円、(間接経費) 5,850,000円

研究成果の概要(和文)：従来の核融合反応率が電流に比例するのに対し、提案した環状イオン源駆動型の慣性静電閉じ込め核融合装置においては電流の2乗に比例するなど、高出力化に有望なビーム対ビーム衝突反応を示唆する実験結果を得た。一方で、ビーム対ターゲット衝突反応に起因すると考えられる電流に比例する寄与が依然として支配的であることも明らかになった。電界分布の球対称性の改善によるビームの集束性の向上のため多段電極構造を提案し、数値シミュレーションによりビーム対ビーム衝突反応率の大幅な向上が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new inertial electrostatic confinement (IEC) fusion scheme which aims 'beam-beam' collisions between converging energetic ions with the aid of an internal ring-shaped magnetron ion source. Unlike linear dependence in the other existing IECs, experimental results showed fusion rate proportional to square of cathode grid current, which is encouraging for a drastic improvement in the fusion rate though it is also implied by experiments that a linear contribution from 'beam-target' collisions are still predominant under the present operating conditions. Also, a new scheme employing multistage electrode system was studied. The numerical simulations showed a possible drastic enhancement in the beam-beam fusion rate owing to an improved spherical symmetry of electrostatic potential distribution.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：プラズマ イオンビーム 核融合 慣性静電閉じ込め 空間電荷効果 マグネトロン放電 核融合反応計測 放電シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 小型中性子源への要求と問題点：9.11 同時多発テロ以降も各地で続くテロに対応するため、中性子による核反応を用いた検査技術の研究開発が進められている。このような先端検査技術の高感度化、検査時間短縮、更には、従来技術では原理的に極めて困難な核物質検出にも対応するために、小型中性子源の高出力化が強く求められている。しかしながら、既存の中性子源は、本研究の対象とした慣性静電閉じ込め核融合 (Inertial Electrostatic Confinement: IEC) 中性子源も含め、いずれも重水素 (D) や三重水素 (T) のビームとターゲットとの衝突核融合反応を利用しているため、原理的にビーム電流に比例した出力しか得られない。多くの応用現場で利用可能な装置規模での出力は既に限界に達しつつあり、高出力化の要求に応え続けることは困難である。

(2) IEC 核融合研究の経緯：IEC 核融合装置では、D や T の正イオンを球対称静電界で中心に加速・集束して核融合反応を起こす。1960 年代の米国 Farnsworth や Hirsch らの理論解析では、中心に球状集束する正イオンによる電位を、これに引かれて集束される電子の負電荷が打ち消すこと (球対称 1 次元の正負荷電粒子流の Child-Langmuir Law) でイオンビーム同士の衝突が生じ、その核融合反応率はビーム電流の 2 乗に比例することが予測された。その後の複数の数値解析研究もこの可能性を支持したが、実験においては、Hirsch による最初の実験以来 40 年以上に渡って、いずれの改良型 IEC でも電流に比例した反応率しか得られなかった。

研究代表者のグループでは、約 15 年前に我が国では初めて IEC 研究に着手し、メッシュ状陰極内の IEC プラズマ中の局所電界分布や集束イオンビームエネルギーの分光計測法を確立し、また、原子・分子衝突過程と空間電荷効果を扱う数値解析コードを開発して IEC グロー放電特性の再現に成功した。これらの基礎研究の結果、従来方式の IEC では、ビーム対ビーム衝突の寄与は極めて小さく、イオン生成のために導入されたガスとのビーム対ガス衝突反応が支配的であり、そのために、水素吸蔵固体ターゲットを用いる D-T 中性子管と同様に、核融合反応率がビーム電流の 1 乗にしか比例しないことが判明した。

(3) IEC 研究動向と本研究の位置づけ：Hirsch らの理論・数値解析研究の予測したビーム対ビーム衝突反応の実現と電流の 2 乗に比例した核融合反応率の向上を目的として、ガス分子との衝突荷電交換によるイオンビームの損

失を低減するために低圧力・大電流動作を目指した様々な方式の装置開発が米・豪・韓・日の研究機関で進められてきたが、依然としてビーム対ガス衝突が圧倒的に支配的な状況にあった。

ビーム対ビーム衝突反応率がビーム対ガス衝突反応率を上回るためには、極めて単純化して考えると、ビームの集束する中心におけるイオン密度が、ガス分子の密度を上回る必要がある。研究代表者は、これまでに提案された構成の IEC 装置ではこの条件の達成は困難であると考え、本研究で対象とした新方式である環状イオン源駆動 IEC を提案して、初めて電流の 2 乗に比例した核融合反応率を観測することに成功した。

しかしながら、この環状イオン源駆動 IEC において同じ運転パラメータ (電圧、電流、ガス圧力) でも、核融合反応率の電流への依存性が従来の 1 乗となる場合もあり、何が電流への依存性を決定しているのか未解明であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、この新奇な現象 (電流依存性の 2 乗への遷移) を決定している物理機構、すなわち Hirsch らのこれまでの理論・数値解析研究が考慮しなかった何が、この現象を支配しているのかを解明することにある。

さらに、この新奇な非線形効果を利用した核融合反応率の飛躍的向上に向けて、環状イオン源の大電流化や、入射されたイオンビームの軌道制御・改善を目差した。

3. 研究の方法

(1) 実験装置：従来のグロー放電方式 IEC 装置 (図 1) は、基本的に陽極と陰極のみからなり、両電極間のグロー放電で生成したイオンを中心に集束させている。

一方、本研究で提案した環状イオン源駆動 IEC 装置の概念図を図 2 に、実験装置の断面模式図と装置内部写真を図 3 に示す。従来の IEC 装置を構成する同心球状の接地陽極 (直径 450mm) と陰極 (直径 80mm, マイナス数十 kV 印加) との間に、環状永久磁石列 (直径 360mm, マイナス数 kV) を設置した (図 3)。本装置の動作原理は図 2 に模式的に示すように、永久磁石列と球形陽極との間に直流マグネトロン放電を生起して環状プラズマを生成する。生成された正イオンは磁石列の負電位に引かれて、一部は磁石列電極に衝突して二次電子を放出してマグネトロン放電の維持に寄与する。残りは磁石間の隙間を通過して、中心のグリッド陰極に加速・集束されて核融合反応に寄与すると期待される。

従来の取り組みの多くは、Hirsch らの最初の実験も含め、IEC の基本構成である中心の球形グリッド陰極と球形陽極に加えて、外部イオン源を設置し、差動排気により球形陽極内を低圧力に保つ方式であった。しかしながら、到達可能な圧力は数十 mPa 程度に留まり、また、外部イオン源からの引出しに加速電界が必要なためイオンが対向する陽極に到達して失われる可能性もあった。これらの既存のイオン源付 IEC に無い本提案方式の特長は、数 mPa の低圧力での動作が可能、接地陽極内側の負電位でのイオン生成のためイオンが陽極に到達して失われることが無く、また、従来の複数イオン源からの線形ビーム同士の衝突とは異なり、環状のイオン源から半径方向中心にイオンを集束するため、中心部で高い電流密度が期待できる。

(2) 研究の方法：背景に前述の通り、この方式により初めて電流の 2 乗に比例した核融合反応率を観測することに成功したものの(図 4)、運転パラメータ(電圧、電流、ガス圧力)でも、核融合反応率の電流への依存性が従来の 1 乗となる場合もあり、何が電流への依存性を決定しているのか未解明であった。そこで、これらの動作パラメータに対する核融合反応率や、その電流への依存性の変化を実験で明らかにした。また、電位分布の非対称性や原子・分子衝突過程を考慮した数値シミュレーション、さらには、イオンビーム入射による金属電極への重水素吸蔵も考慮した解

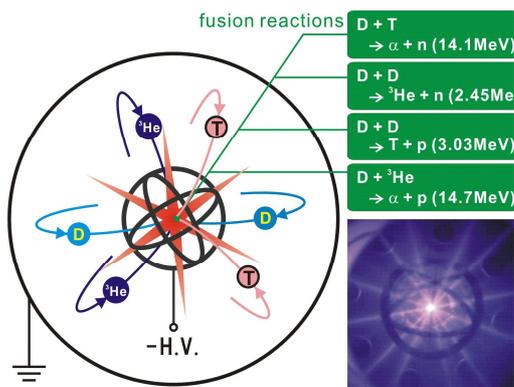


図 1 従来型 IEC の模式図と放電の様子

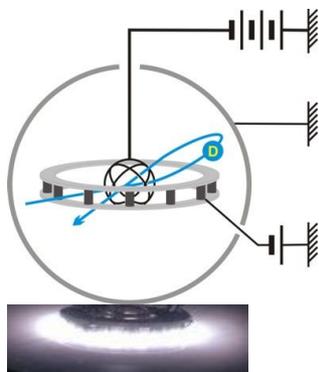


図 2 環状イオン源駆動 IEC の模式図と小型予備実験装置でのマグネトロン放電の様子

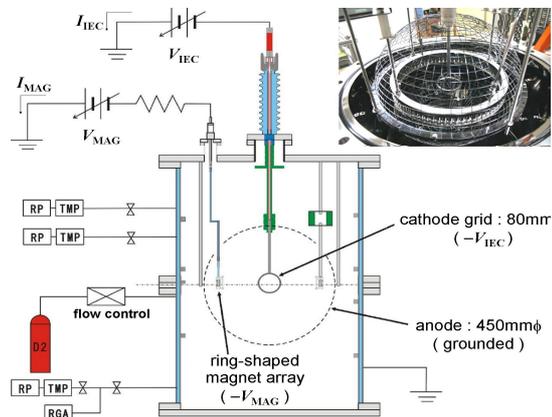


図 3 環状イオン源駆動型 IEC 実験装置

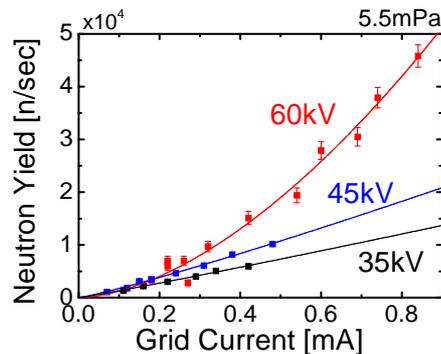


図 4 環状イオン源駆動 IEC による中性子発生率の圧力と電流への依存性：圧力が 10mPa を下回り、電圧が 60kV を上回ると、電流依存性は 1 乗から 2 乗へ遷移した。

析等により、実験結果を説明できる物理モデルの構築を目指した。

一方で、環状イオン源から供給されたイオンビームの軌道を制御・改善するため、多段電圧導入端子による新たな電極構造を提案し、数値シミュレーションによる設計、試作機の製作などを行った。イオンビームの軌道を変えて中心への集束性を向上させることが出来れば、電流の 2 乗に比例すると考えられるビーム対ビーム衝突反応率の向上が期待できる。同時に、本研究でその重要性が明らかになったビーム対ターゲット衝突反応率はビーム軌道には依存しないことから、ビーム軌道を変化させて核融合反応率を計測することで両者の寄与の割合に関する情報も得ることができると期待される。

4. 研究成果

(1) 核融合反応率の電流への依存性：図 3 の実験装置において、重水素ガス圧力 $P = 5.5$ mPa の低圧力下で、中心グリッド陰極電圧 $V_{IEC} = 60$ kV としたまま磁石列への印加電圧 $V_{MAG} < 3$ kV を変えることで中心グリッド陰極電流を $I_{IEC} = 0.1 - 0.9$ mA の範囲で変化させて中性子発生率 (NPR) を測定したところ、NPR は I_{IEC} の 1.7 乗に比例し、従来方式の IEC とは明らかに異なる電流依存性を示した (図

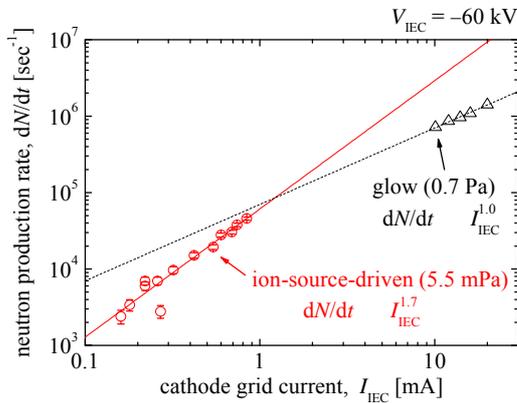


図5 中性子発生率 NPR の電流 I_{IEC} への依存性 (従来のグロー放電方式による高圧力動作の場合との比較)

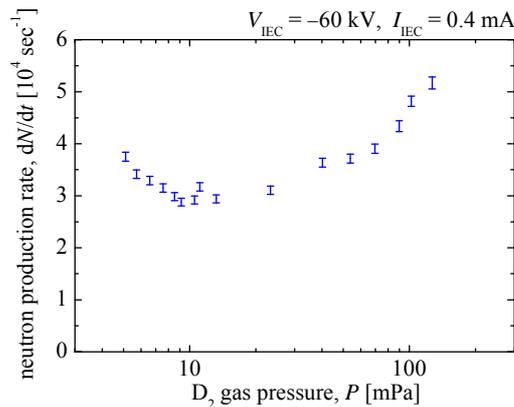


図6 中性子発生率 NPR の重水素ガス圧力 P への依存性

5). この実験結果を、電流に比例する成分 (ビーム対ガス衝突) と 2 乗に比例する成分 (空間電荷効果を無視できる場合のビーム対ビーム衝突) とに分けると、 $I_{IEC} = 0.9$ mA において後者は前者の約 4 倍となっている。

次に、 $I_{IEC} = 0.4$ mA において P を 5 - 100 mPa の範囲で変化させたところ、興味深い依存性を示した (図 6)。すなわち、10 mPa 程度までは圧力低下に伴い NPR は減少したが、それより低圧力の領域では増加に転じた。今回の圧力範囲では重水素イオンの平均自由行程は陽極-陰極間距離と比べて十分長いいため、圧力低下によるイオンエネルギー向上が原因とは考えられない。したがって、ビーム対ガス衝突の寄与は、ターゲットであるガス密度の低下と平均自由行程の伸びとが相殺して一定となるか、もしくは、減少すると考えられる。すなわち、10 mPa 以上の領域での圧力低下に伴う中性子発生率の減少はビーム対ガス衝突の寄与の減少によるもので、一方 10 mPa 以下の領域での中性子発生率の上昇は、ビーム対ビーム衝突の寄与が支配的になったためであると考えられる。

数日後、再度同じ運転条件で実験をしたところ、NPR の I_{IEC} への依存性の非線形性は消失し NPR は I_{IEC} の 1 乗に比例した。さらに、

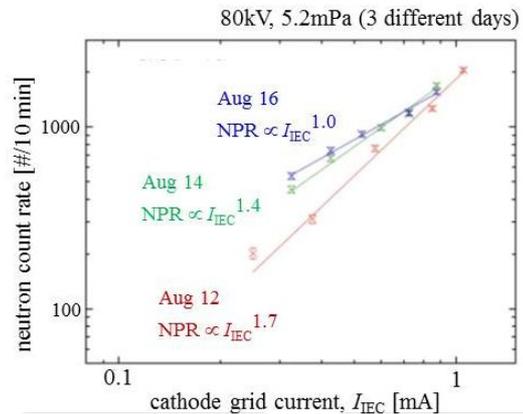


図7 中性子発生率 NPR の電流 I_{IEC} への依存性の推移

電圧を $V_{IEC} = 60$ kV から $V_{IEC} = 80$ kV に上昇させると、再び非線形性が現出し $P = 5.2$ mPa では NPR は I_{IEC} の 2.1 乗に比例した。

このような NPR の I_{IEC} への依存性の遷移の原因を調べるため、数日間断続的に $P = 5 \sim 10$ mPa の低圧力での運転を続け、NPR の I_{IEC} への依存性を数日間に渡って計測した。その結果、図 7 に示すように、NPR は数日間に渡って徐々に増加しながら、その I_{IEC} への依存性は 2.1 乗から徐々に弱くなり最終的に 1 乗となった。この間の NPR の増加は $V_{IEC} = 80$ kV、 $I_{IEC} = 0.3$ mA では 4 日間で約 2.5 倍にも及んだ。また、NPR の電流依存性が線形となった状態では、NPR は P にも依存しないことも分かった。

これらの実験結果から、この NPR の増加の原因として、陰極グリッドへ入射された重水素ビームが徐々に陰極グリッドに蓄積してビーム対ターゲット反応の寄与が増加したことが考えられる。また、当初観測された電流への非線形な依存性は、線形依存性を示すビーム対ターゲット反応が徐々に増加することで、相対的にビーム対ビーム反応の寄与が小さくなり観測されなくなったと考えられる。

金属へのイオンビーム入射による重水素の吸蔵効果を考慮した数値解析を行った結果、上記のような仮説で矛盾無く実験結果を説明できることも分かった。

(2) 多段電圧導入端子: 図 3 に示した現在の実験装置では、図 8 に示すように、中心球形陰極への電圧導入端子の存在により、電位分布の球対称性が損なわれている。このために、環状イオン源から入射されたイオンは、高々平均 5 回の往復軌道を描いた後、電圧導入端子に衝突して失われていることが数値シミュレーションにより判明した。

そこで、図 9 に示すように、4 つの中間電位の電極を導入することにより、電位分布の球対称性の向上を図った。空間電荷効果も考慮した自己無撞着イオン軌道計算の結果、環

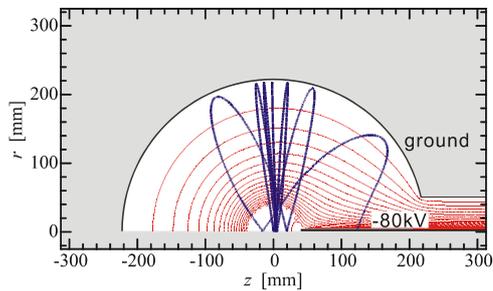


図 8 環状イオン源駆動型 IEC 装置内の電位分布とイオン軌道．入射されたイオンは平均 5 回往復した後，中心の球形グリッド陰極への電圧導入端子（-80kV）に衝突して失われている．

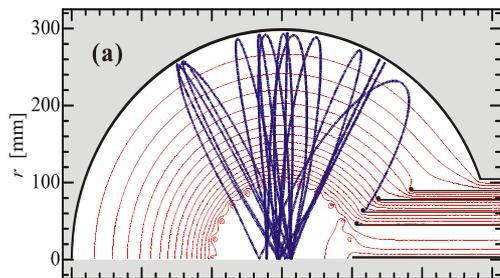


図 9 中間電極の導入による電位分布とイオン軌道の改善．電極電位はそれぞれ中心から，-200, -160, -120, -80, -40 kV で，球形陽極は接地電位．電位分布の改善により，イオンの往復運動の回数が約 3 倍向上している．

状イオン源から入射されたイオンの往復運動の回数を約 3 倍向上させることが可能であることが分かった．この電極構造の改良により，ビーム対ビーム衝突反応による NPR は 6 ないし 7 倍程度向上することが期待される．

この設計に基づいて，図 10 に示すような多段電圧導入端子を製作し，真空試験，耐圧試験，グロー放電試験を順調に完了した．残念ながら本研究期間内には実施できなかったが，今後，環状イオン源と組み合わせた実験を予定している．

(4) まとめ：本稿では紹介できなかったが，本研究期間内においては，これらの成果の他に，本新方式 IEC におけるイオン電流の供給源であるマグネトロン放電型環状イオン源の大電流化の検討や，装置内の核融合反応の空間分布計測法の開発なども行い成果を挙げた．前者の大電流化は，本研究で見出した新奇な非線形効果を核融合反応率増大に繋げるために必要であると同時に，電流への依存性が 1 乗である成分に比して 2 乗の成分を顕在化させ，計測を容易にするためにも有効であると考えられる．後者の計測技術は，3(2)節で述べた仮説を検証するために極めて有効な手段となると期待している．

本研究では，提案した新方式 IEC により初めてビーム対ビーム衝突に起因すると考えられる電流の 2 乗に比例した核融合反応率が



図 10 製作した多段電圧導入端子．5 段分割セラミック管と分割抵抗により，4 つの中間電極に電位を与える（上図）．これらの中間電極は 4 つの径の異なる 4 段の同軸円筒電極（下図）に接続されており，図 9 に示した電位分布を生成する．

得られることを示した一方，陰極グリッドへ入射された重水素ビームが徐々に陰極グリッドに蓄積し，平衡状態ではビーム対ターゲット反応が支配的となることを示唆する結果を得た．今後，このモデルの検証を進め，最終的には，この新奇な非線形効果を中性子発生率の飛躍的向上に繋げたい．多段電圧導入端子，イオン源大電流化，各種計測手法など，そのために必要かつ効果的な要素技術を本研究で整えることができたと考えている．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

K. Masuda, K. Inoue, T. Kajiwara and R. Nakamatsu, “Compact Intense Neutron Generators based on Inertial Electrostatic Confinement of D-D Fusion Plasmas”, *Proc. of Nuclear Physics and Gamma-ray Sources for Nuclear Security and Nonproliferation (NPNSNP)*, Tokai, Ibaraki, Japan, Jan. 28 – 30, 2014, in press. (査読有り)

K. Masuda, Y. Yamagaki, T. Kajiwara and J. Kipritidis, “Numerical Study of Ion Recirculation in an Improved Spherical Inertial Electrostatic Confinement Fusion Scheme by Use of a Multistage High-Voltage Feedthrough”, *Fusion Science and Technology* **60** (2011) 625. (査読有り)

J. Kipritidis, K. Masuda, T. Kajiwara, Y. Yamagaki and K. Nagasaki, “Modeling the time-variation of beam-grid fusion reaction rates in a RS-MIS IEC device”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **53** (2011) 45006. (査読有り)

K. Masuda, T. Nakagawa, J. Kipritidis, T. Kajiwara, Y. Yamagaki, H. Zen, K. Yoshikawa and K. Nagasaki, “Cathode Grid Current Dependence of $D(d, n)^3He$ Reaction Rates in an Inertial Electrostatic Confinement Device Driven by a Ring-Shaped Magnetron Ion Source”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **52** (2010) 95010. (査読有り)

〔学会発表〕(計15件)

K. Masuda et al., “Compact Intense Neutron Generators based on Inertial Electrostatic Confinement of D-D Fusion Plasmas”, *Nuclear Physics and Gamma-ray Sources for Nuclear Security and Nonproliferation (NPNSNP)*, Tokai, Ibaraki, Japan, Jan. 28 – 30, 2014.

K. Masuda et al., “Overview of IEC Research at Kyoto University”, *14th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, University of Maryland, MD, USA, Oct. 14 – 17, 2012.

T. Kajiwara et al. “Study on Enhancement of Discharge Current in the Ring-Shaped Magnetron Ion Source for the Low Operating Pressure IEC Device”, *ibid.*

K. Masuda et al., “Overview of IEC Research at Kyoto University”, *13th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, The Menzies Hotel, Sydney, Australia, Dec. 7 – 8, 2011.

T. Kajiwara et al., “Study on Upgrade of the Magnetron Ion Source for High Current Operation of the Low Pressure IEC Device”, *ibid.*

Y. Yamagaki et al., “Experimental Results

from an IEC Device Employing a 5-Stage High Voltage Feedthrough”, *ibid.*

Y. Yamagaki et al., “Improvement of Neutron Production Rate in Inertial Electrostatic Confinement Fusion by Use of a Multi-Stage Feedthrough”, Plasma Conference 2011, Kanazawa, Ishikawa, Japan, Nov. 22 – 25, 2011.

T. Kajiwara et al., “Enhancement of Ion Current in a Magnetron Ion Source for an Inertial Electrostatic Confinement Fusion Device”, *ibid.*

梶原泰樹他、「環状イオン源駆動型慣性静電閉じ込め核融合装置における陽子計測を用いた核融合反応空間分布計測」, 日本原子力学会 2011 年秋の大会、北九州国際会議場、2011 年 9 月 19 ~ 22 日。

K. Masuda et al., “Overview of IEC Research at Kyoto University”, *12th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion*, KKR Hotel, Osaka, Japan, Oct. 20 – 21, 2010.

J. Kipritidis et al., “Down to the wire: distinguishing beam-grid from beam-beam reactions in RS-MIS IEC”, *ibid.*

T. Kajiwara et al., “High Spatial Resolution Proton Measurement System in Low Pressure IEC Device”, *ibid.*

Y. Yamagaki et al., “Simulation of Ion Recirculation in IEC Using a Multi-Stage Feedthrough for Improved Spherical Symmetry of Electric Field”, *ibid.*

山垣悠他、「イオンの再入射回数の向上を目的とした IECF 装置の設計に関する数値解析」, 日本原子力学会 2010 年秋の大会、北海道大学、2010 年 9 月 15 ~ 17 日。

J. Kipritidis et al., “Inertial Electrostatic Confinement Fusion Driven by Ring-Shaped Magnetron Ion Source; Experimental Neutron Production Rates and Proton Collimation Tomography”, *ibid.*

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 開 (MASUDA, Kai)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：80303907

(2) 研究協力者

KIPRITIDIS, John

京都大学・エネルギー理工学研究所・研究員

梶原 泰樹 (KAJIWARA, Taiju)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・博士後期課程学生