

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18206096
 研究課題名（和文） 超小型放電型 D-³He 核融合陽子源による PET 用トレーサー生成の研究
 研究課題名（英文） Research on Extremely Compact Proton Source by Discharge-Type D-³He Fusion for PET Isotope Production
 研究代表者
 吉川 潔 (YOSHIKAWA KIYOSHI)
 京都大学・エネルギー理工学研究所・非常勤講師
 研究者番号：00027145

研究成果の概要：

放電型核融合陽子源の研究開発に必須の陽子発生分布計測法を確立し、D-³He および D-D 反応の空間分布の詳細を明らかにした。また、未踏であった超低圧力でイオンを環状入射し中心へ集束させる新方式を提案、装置開発を行った。その結果、従来の核合反応率が電流の 1 乗に比例するのに比べ本方式では 1.7 乗に比例する等、PET 用 RI 製造応用に向けた高出力化に有望なビーム対ビーム衝突反応を示唆する初めての実験結果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	27,700,000	8,310,000	36,010,000
2007 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2008 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	35,900,000	10,770,000	46,670,000

研究分野：小型核融合線源

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：D-³He 核融合、陽子源、PET アイソトープ、マグネトロン放電、グロー放電、慣性静電閉じ込め、イオン源、空間分布

1. 研究開始当初の背景

(1) PET 癌検診：早期癌発見にきわめて有効な PET (陽電子放射断層撮影：Positron Emission Tomography) 装置の導入が速いスピードで進んでいる。特に 2002 年に保険の適用が認められ (精密検査のみ、癌検診には非適用)、また PET 検査に用いられる RI (放射性同位元素：Radioactive Isotope) 製造装置の小型化に伴って、我が国においても 100 台を超える装置が導入され、医療水準の向上と国民の健康増進に大きな貢献を果たしている。

現在、PET 用 RI を製造する装置としては、専ら小型の陽子加速器が用いられている。例えば代表的な PET 用 RI である ¹⁸F (半減期 110

分) は、一例として 50 μ A ($8 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$) 程度の陽子を 15 MeV まで加速して ¹⁸O に照射し、生成している。これらの PET 用 RI に求められる性質として、陽電子を放出することに加え、患者の被曝を最小限に抑えるために半減期が短いことが求められる。このために、PET 用 RI は、製造から使用までを短い時間で行うために、PET 検診を行う施設において製造する必要がある。

(2) PET 用 RI の製造：PET 検診の需要がきわめて旺盛にも関わらず、全国で PET による癌検診を受けられる施設は 70 施設程度にとどまっており、この主要原因として、一般の中規模病院が導入するには PET 用 RI 製造装置

が大型で高価すぎるといふ短所がある。

PET用に用いられる陽子加速器には大別してサイクロトロンとライナックがある。線形加速するライナックでは必要な陽子エネルギーに応じてある程度の長さの装置が必要となり、円形加速するサイクロトロンの場合には陽子を偏向する電磁石を必要とするために重量が増す。いずれにしても電界を用いた加速による限り原理的に小型化には放電限界電界強度で決まる限界がある。

(3) 超小型放電型核融合陽子源：これに対して、本研究で対象としたIECF（慣性静電閉じ込め核融合：Inertial Electro- static Confinement Fusion）装置では、核融合反応エネルギーを利用することで、僅か百kV耐圧程度の小型装置を用いて、印加電圧の100倍以上も高い14.7 MeVの高エネルギー陽子を得られるという利点がある。

この高エネルギー陽子を得られるD-³He核融合反応については、これまでに米国Wisconsin大学と京都大学がIECF装置で生起することに成功しており、Wisconsin大学では既にPET用RI生成の基礎実験が行なわれている。しかし、加速器の陽子束が数μAであるのに対し、IECFで得られている陽子束は数十pAオーダー程度と見積もられており大きな開きがあるのが現状である。IECFによる陽子発生率、すなわち、核融合反応率をさらに4桁ないし5桁上げることが今後の課題であり、本研究の最終的な目標である。

(4) 核融合線源の現状：IECF陽子源も含め、核融合反応を利用した既存の線源（中性子源、陽子源）はいずれも、荷電粒子ビームとターゲット（IECFではガス）との衝突核融合反応を利用しているため、投入電流に比例した出力しか得られない。現在の装置規模での核融合反応率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。

そのため、従来のグロー放電方式IECFにおいては顕著な荷電交換反応によるイオン損失の低減を目的とした低圧力化を目指して、複数の異なる原理に基づくイオン源付きの装置の研究開発が進められてきた。その結果、動作可能圧力領域の拡大について一定の成果は挙げられてきたが、いずれも依然としてビーム対ガス衝突が支配的な状況にある。イオン損失の低減によりイオンの平均エネルギーが向上しても、ビーム対ガス衝突反応による限りは、電流当たりの核融合反応率は核融合反応断面積と荷電交換反応断面積の比で与えられる限界に近づくに過ぎない。

これに対し、中心に集束するイオン同士のビーム対ビーム衝突を効率良く生起することが出来れば、核融合反応は電流の2乗に比例して飛躍的に向上すると理論的に示されていたが、これまでの実験結果はいずれも電流に比例した反応率しか示していない。

2. 研究の目的

PET用RI製造装置の現在の問題点を克服するため、本研究ではD-³He核融合反応陽子（14.7 MeV）を定常的に生成できる、直径1m程度のきわめて構造が簡素で安価な超小型放電型核融合（IECF）陽子源の実現に向けた基礎的研究を行おうとするものである。そのため、本研究期間(H18-20)においては以下の2点を目的とした。

(1) 核融合反応密度の空間分布同定：D-³He核融合反応、並びに、これと同時に競合して生じるD-D核融合反応について、ビーム対ガスあるいはビーム対ビームといった反応機構の解明に極めて有力な情報となる核融合反応密度の空間分布を同定する計測・解析手法を確立する。また、このような空間分布同定は、従来は発生分布を仮定して見積もられていたD-³He陽子の発生率を精度良く評価するためにも不可欠である。

(2) 極低圧力動作新型IECFの開発：従来のIECFにおいては限界出力に達しつつあるビーム対ガス衝突のスキームから脱却し、投入電流の2乗に比例した飛躍的な高出力化が期待されるビーム対ビーム衝突を生起させることを目指し、従来のグロー放電方式IECFより3桁、既存のいずれのイオン源付きIECFよりも1桁以上低く、イオンの平均自由行程が装置サイズと比べて十分長くなる圧力（~1 mPa）での定常動作を可能とする。そのため、先行研究で我々が開発した高性能マグネトン型イオン源（>100 mPaで動作）を改良、大幅に性能向上させてIECF装置に導入する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置：図1にIECF装置の模式図を示す。本研究では図2に示すIECF本体真空容器を設計・製作した。直径610 mm、高さ412 mmの円筒形状のSUS316L製真空容器2つを縦に重ねて、間にパイトンOリングで真空シールをしている。上下容器には各19個の真空ポートを設け、各種計測機器やイオン源の設置を可能とした。また、上面と下面の蓋も含めて2重ジャケット構造を採用して真空容器壁に厚さ約7 mmの冷却水層を持つ構

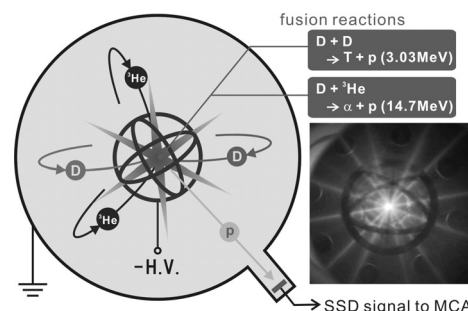


図1 慣性静電閉じ込め核融合装置の断面模式図と中心部の放電の様子

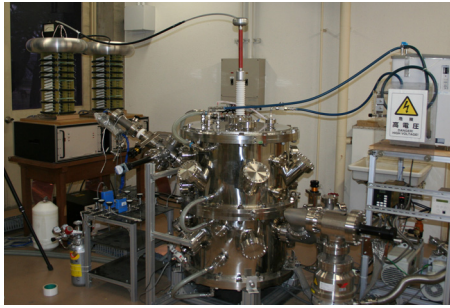


図2 実験装置の外観



図3 メッシュ状球形電極

造とし、特に核融合反応分布計測に不可欠な長時間連続運転を可能とした。また、高い加速エネルギーを必要とする $D-^3He$ 反応を安定に生起させるために、定格電圧 200 kV の高電圧直流安定化電源を導入した (図2の写真左端)。

円筒形真空容器内に図3のようなメッシュ状の球形電極を同心球状に配置し、外側の陽極 (直径 445 mm, ステンレス製) を接地、内側の陰極 (直径 150 mm, Mo 製) に高圧直流電源を接続して負の高電圧を印加した。

(2) 核融合反応陽子計測系の改良: 核融合反応により発生する陽子の計数には、本体真空容器の真空ポートに接続した陽子計測用チャンパー内に設置した Si ダイオード型の SSD (固体検出器: Solid State Detector) を用いた。逆バイアス印加により形成された空乏層に入射された陽子は電子・正孔対を生成して、パルス電流として検出される。空乏層の厚さ (検出器の厚さ) が陽子の Si 中の飛程よりも長い場合には、パルス電流の波高値は陽子エネルギーに比例する。この SSD からのパルス信号を増幅器を介して MCA (Multi-Channel Analyzer) に入力し、パルス波高値のヒストグラム、すなわち、入射した陽子のエネルギー分布を取得する。

先行研究では、このような計測系において X 線によると考えられるノイズ (図7(a)に典型的な SSD-MCA スペクトル) により、特に $D-^3He$ 反応と競合して生じる D-D 反応陽子の計数が困難である課題があった。IECF で生じる X 線のエネルギーは印加電圧相当の数十 keV 程度以下と計測対象 (D-D 陽子は 3.0 MeV, $D-^3He$ 陽子は 14.7 MeV) よりも遙かに低いが、X 線束が高いために pile-up (SSD の応答時間内に複数の光子が入射) により SSD に高い波高値の信号 (図7(a)においては約 5 MeV 相当) を生じることが原因と考えられた。

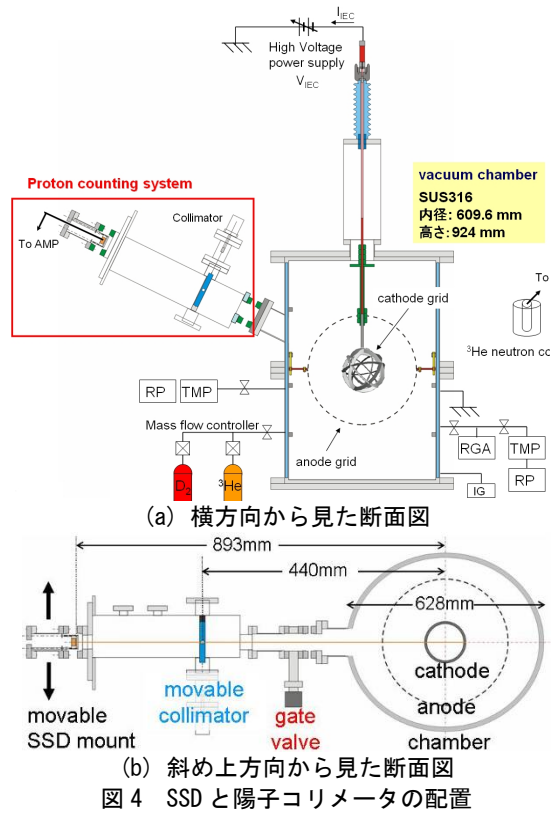


図4 SSDと陽子コリメータの配置

表1 陽子コリメータ配置の改良前後の比較

	previous	refined
SSD diameter		27.6 mm
collimator aperture	60 mm	12 mm
SSD-collimator distance	160 mm	453 mm
view from SSD center	0.22 str	0.0011 str
view limit from SSD	0.47 str	0.012 str
X-ray flux ratio	1	0.012

表2 金属箔通過の後に SSD に入射した核融合反応陽子が SSD 中に与えるエネルギー (計算値) [MeV]

SSD thickness	foil	D-D	$D-^3He$
2 mm	10- μ m Al	2.80	14.6
	15- μ m W	1.77	14.3
0.15 mm	10- μ m Al	2.80	0.91
	15- μ m W	1.77	0.92

そこで本研究では、図4に示すような陽子計測系を製作した。従来の配置と比べて、表1に示すように計測対象と SSD との距離を長くし、さらに、間に配置するコリメータの穴径を小さくして、SSD から見える計測対象の立体角を約 1/100 とした。これにより X 線と同時に陽子の計数率も 1/100 となるため長い計数時間を要するが、結果として、X 線の pile-up 信号が計測対象エネルギー領域にオーバーラップすることを抑制でき、本方法が極めて有効であることが分かった。

さらに、スパッタによる SSD への堆積を避けるために前面に設置する遮蔽箔の厚さ (材質) と、SSD の厚さを、表2に示すようにそれぞれ 2 通りを用意し、実験で比較を行った。SSD の厚さ (2 または 0.15 mm) はそれぞれ

D-D 陽子と D-³He 陽子の Si 中の飛程より僅かに長くなるように選んだ。遮蔽箔には、従来の W 箔に加えて、より薄い Al 箔を用いた。

D-D 陽子と D-³He 陽子の SSD へのエネルギー付与は、いずれの組み合わせの場合にも表 2 に示した通り異なるため、区別して計測することが出来る。SSD は薄い方が、また、遮蔽箔は厚い方が X 線の計数率、したがって、pile-up 信号の波高値は低くなるが、計測対象である陽子の検出エネルギーも低くなる。実験で比較を行った結論として、D-D と D-³He 陽子を同時に 1 つの SSD で計数する場合には 2 mm の SSD と薄い遮蔽箔の組み合わせで最も高い S/N 比が得られることが分かった。

最後に、この計測系を用いて SSD とコリメータを動かして (図 4(b)参照), D-D と D-³He 陽子を同時に計数し、先行研究で開発した数値解析法で陽子発生空間分布を再構成した。

(3) 環状イオン源駆動 IECF の開発: ビーム対ビーム衝突反応を現出させるためには、極めて単純化して考えると、ビーム対ガス衝突反応率が電流とガス圧力に、ビーム対ビーム衝突反応率が電流の 2 乗に比例することから、電流とガス圧力の比を向上させることが有効である。

従来の取り組みの多くは、IECF 装置の基本構成であるメッシュ球状電極に加えて、外部イオン源を 2 台 (あるいは 6 台) 対向させて設置し、差働排気により陽極内を低圧力に保つ方式であった。この他に、Wisconsin 大学では外部イオン源を用いず、メッシュ陽極外部への熱電子放出用フィラメントの設置と中心陰極への高電圧印加 (パッシュェンの法則に従い電圧が高いほど低圧力) により 30 mPa の低圧力動作を可能にしている。一方、パルスで大電流を投入して電流対圧力の比を向上させる試みも行われているが、いずれの装置でも核融合反応率は電流に対して比例もしくはそれより弱い依存性を示している。

本研究では、図 5 の模式図、図 6 の装置断面図のような環状イオン源駆動 IECF 装置を提案し、製作した。従来の IECF 装置を構成する同心球状の接地陽極 (直径 450 mm) と陰極 (直径 80 mm, マイナス数十 kV 印加) との間に、環状永久磁石列 (直径 360 mm, マイナス数 kV) を設置した。永久磁石列と球形陽極との間に、目標としている 1 mPa 程度の低圧力下でも放電維持可能な DC マグネトロン放電を生起して環状プラズマ (図 5 中の写真) 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、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 (図 5 の模式図参照), 中心の陰極に加速・集束されて核融合反応に寄与する。

本提案方式の特長は: ●目標圧力 (~1 mPa)

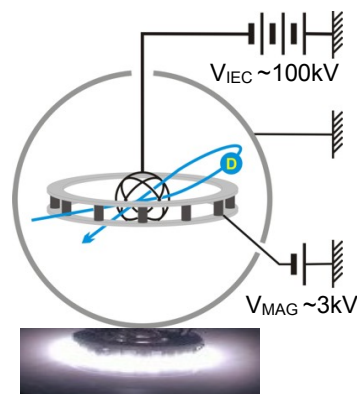


図 5 環状イオン源駆動 IECF の模式図と小型予備実験装置でのマグネトロン放電の様子

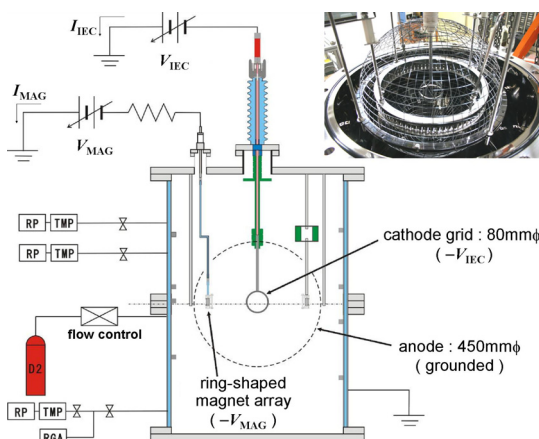


図 6 環状イオン源駆動 IECF 実験装置

でも動作可能なマグネトロン放電を採用したことで差働排気を不要とした。これにより、●従来のイオン源による線状ビーム集束と比べて中心で高いビーム密度の期待できる環状ビーム集束が、極めて単純な装置構成の単一イオン源で可能となった。また、●イオン生成場所を球形陽極内側の僅かに負の電位 (マイナス数 kV) とできたことで、正電荷を持つイオンが中心メッシュ陰極を通過した後も陽極に到達して損失することがなく、中心の陰極に再入射される。

この提案新方式について、先ず 1/10 サイズの小型試作機を用いて予備実験を行って、到達可能な圧力と電流を左右する永久磁石列の間隔 (永久磁石の本数) や磁石列と陽極との距離などを検討し、最終的に図 6 の断面図と写真のような装置を設計・製作して、重水素ガスを用いた実験を行った。

4. 研究成果

(1) 核融合反応密度の空間分布同定

①陽子計測の S/N 比向上: ノイズの問題 (図 7(a)) の原因が X 線による信号の pile-up であることを突き止め、コリメータ配置の改良と遮蔽箔と SSD 厚さの選定により、X 線によるノイズを遙かに低減することに成功した (図 7(b))。これにより、D-³He と同時に D-D によ

る陽子も計数可能となり、また、可動コリメータによる計数結果から陽子発生分布を数値解析によって再構成するために必要な高

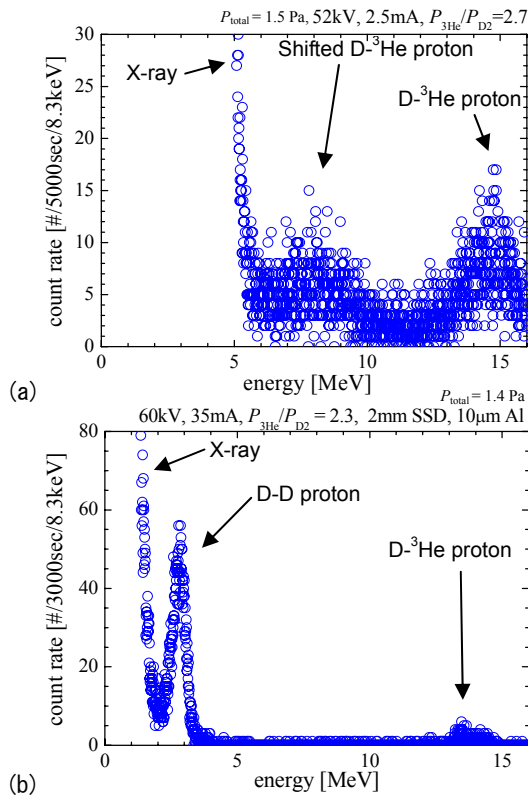


図7 陽子計測系の (a) 改良前と (b) 改良後の SSD-MCA スペクトルの比較 (グロー放電駆動 IECF)

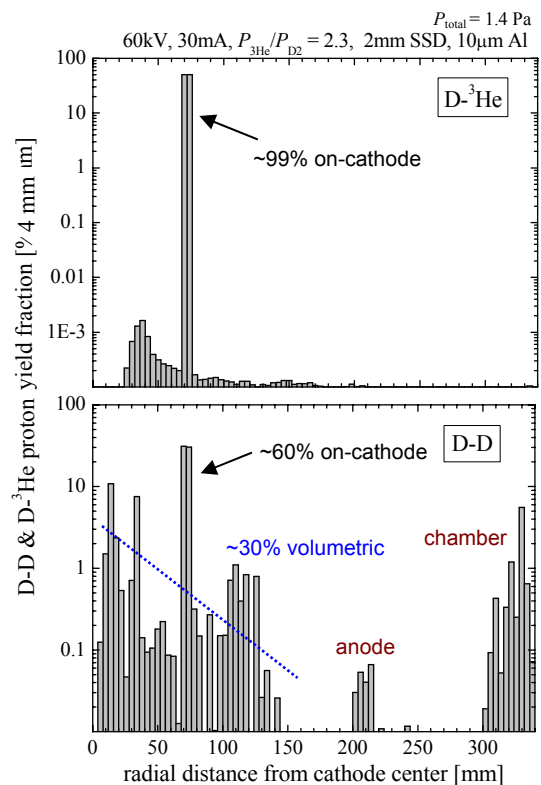


図8 D-D 及び D-³He 反応陽子発生の空間分布 (グロー放電駆動 IECF)

S/N 比の計数を、現実的な計数時間で得ることが可能となった。

また、今後更に、厚さの異なる SSD の同時使用により短時間で高 S/N 比の計測が可能であることが分かり、そのための遮蔽箱やコリメータ設計の指針も得ることができた。

②D-D/D-³He 核融合反応空間分布の同定: 従来のグロー放電による動作 (D₂ / ³He 混合ガス ~1.4 Pa) について、改良した計測系を用いて図8に示すような D-³He および D-D 反応の空間分布を同定することに成功し、以下のような結果を得た: (i) D-³He 反応は陰極メッシュ上でのビーム対ターゲット反応が支配的である. (ii) 一方, D-D 反応は陰極上のビーム対ターゲットと, 陰極付近のビーム対ガス反応が同程度で, (iii) 陽極メッシュと真空容器壁でのビーム対ターゲット反応も約 10%程度存在する.

いずれも投入電流に比例する成分が支配的であることが明らかになった. 特に D-³He 反応については, ³He イオンビームによる寄与は少なく, 陰極に吸蔵された ³He と重水素イオンビームとの反応が支配的であることも他の実験結果から分かった. PET 用 RI 製造への応用に必要な飛躍的な陽子発生率向上には, 2 価の ³He イオンの生成・加速による反応率向上も期待される ³He イオンの供給や, ビーム対ビーム反応の生起を可能とする新たなスキームの開発が必須である.

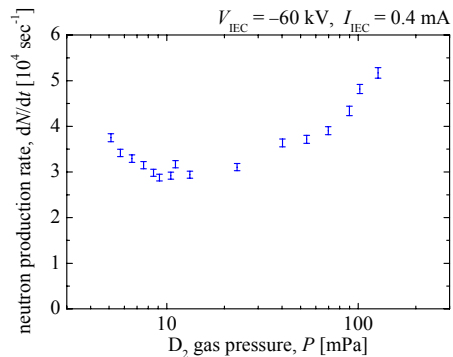


図9 D-D 中性子発生率の D₂ ガス圧力依存性

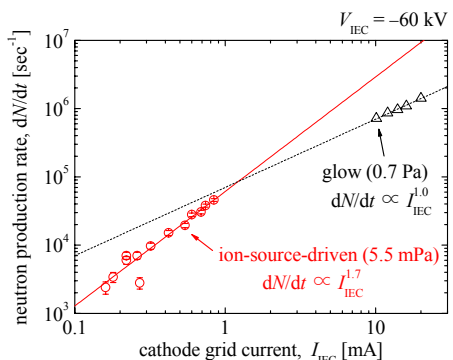


図10 D-D 中性子発生率の陰極電流依存性: 従来方式 (グロー放電駆動) と提案新方式 (環状イオン源駆動) との比較

(2) 環状イオン源駆動 IECF

①動作圧力領域の拡大：従来のイオン源付 IECF の到達圧力の約 1/10 の 5.5 mPa での動作 (D_2 ガス, 1 mA) が可能となった。ターゲットである D_2 ガスの圧力低下と共に核融合反応率は減少したが、約 10 mPa を下回ったところで増加に転じた (図 9)。このとき、前述の本提案方式の特徴である負電位でのイオン生成と環状イオン集束も相まって、以下のような従来見られなかった電流依存性を観測することができた。

②電流への非線形な依存性：5.5 mPa において図 10 のように、核融合反応率は電流の 1.7 乗に比例して増加した。図 10 には比較のために、グロー放電駆動 (図 5 中の V_{MAG} を 0 V とした) の場合の実験結果も示している。

今回、ビーム対ビーム衝突反応を示唆する初めての実験結果を得ることができた。今後は、今回開発した陽子発生空間分布計測法を駆使して、この新たな現象の理解を進めると共に、環状イオン源を更に改良して、従来方式を大きく上回る陽子発生率が期待される数十 mA を目標に電流増加を図る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① K. Masuda, T. Fujimoto, T. Nakagawa, H. Zen, T. Kajiwara, K. Nagasaki and K. Yoshikawa, “Diagnostic System Development for D-D and D- 3 He Reaction Distributions in an Inertial Electrostatic Confinement Device by Collimated Proton Measurements”, *Fusion Science and Technology*, in press, 査読有。
- ② K. Masuda, T. Nakagawa, T. Kajiwara, H. Zen, K. Yoshikawa and K. Nagasaki, “Built-In Ion Source for Inertial Electrostatic Confinement in Low Pressure Regime”, *Fusion Science and Technology*, in press, 査読有。
- ③ K. Masuda, T. Takamatsu, K. Yoshikawa, T. Misawa, S. Shiroya, Y. Takahashi, T. Fujimoto, T. Nakagawa, T. Kajiwara and K. Nagasaki, “Research and Development of Compact Neutron Sources based on Inertial Electrostatic Confinement Fusion”, *AIP Conference Proceedings* **1099** (2009) 587-590, 査読有。
- ④ K. Masuda, K. Yoshikawa, T. Ohishi, S. Ogawa, H. Zen and T. Takamatsu, “Spatial Distribution of D-D/D- 3 He Advanced Fuels Fusion Reactions in an Inertial Electrostatic Confinement Device”, *Proc. 21st IAEA Fusion Energy Conference*, IAEA CN-149 (2007) IC/P7-9, in CD-ROM, 査読有。

[学会発表] (計 6 件)

- ① 中川知也, 増田開, 吉川潔, 長崎百伸, 全

炳俊, 梶原泰樹, 「マグネトロニオン源を用いた慣性静電閉じ込め核融合装置の低圧力動作」, 原子力学会 2009 年春の年会, 2009 年 3 月 23-25 日, 東京工業大学大岡山キャンパス。

- ② T. Nakagawa, K. Masuda, T. Kajiwara, H. Zen, K. Yoshikawa and K. Nagasaki, “Development of an IEC Device Driven by a Magnetron Ion Source for Low Pressure Operation”, 10th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, Dec. 9-11, 2008, Kyoto, Japan.
- ③ 中川知也, 増田開, 吉川潔, 長崎百伸, 「慣性静電閉じ込め核融合装置用円環状マグネトロニオン源の開発」, 原子力学会 2008 年秋の大会, 2008 年 9 月 4-6 日, 高知工科大学。
- ④ T. Fujimoto, T. Oishi, H. Zen, T. Takamatsu, K. Masuda and K. Yoshikawa, “Intensity Distribution of D- 3 He Fusion reaction Rate in an IEC Device”, IEEE/NPSS 22nd Symposium on Fusion Engineering (SOFE2007), June 17-21, 2007, Albuquerque, NM, USA.
- ⑤ K. Masuda, S. Ogawa, T. Takamatsu and K. Yoshikawa, “Simultaneous Measurements of Neutrons and Energetic Protons from D-D and D- 3 He Fusion Reactions in an Inertial Electrostatic Confinement Device”, 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV2006), September 25-29, 2006, Matsue, Japan.
- ⑥ 大石琢也, 小川聡, 全炳俊, 高松輝久, 増田開, 吉川潔, 「慣性静電閉じ込め核融合 (IECF) 装置における D- 3 He 核融合の空間分布」, 日本原子力学会 2006 年秋の年会, 2006 年 9 月 27-29 日, 北海道大学。

[その他]

- ① 吉川潔, 山本靖, 増田開, 督寿之, 堀田栄喜, 山内邦仁, 大西正視, 大沢穂高, 代谷誠治, 三澤毅, 多幾山憲, 久保美和, 「慣性静電閉じ込め核融合研究の現状」, プラズマ・核融合学会誌, **83**-10 (2007) 795-811.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 潔 (YOSHIKAWA KIYOSHI)
京都大学・エネルギー理工学研究所・
非常勤講師
研究者番号：00027145

(2) 研究分担者

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