

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289340

研究課題名(和文) D-T燃焼放電プラズマ中性子源の実験研究

研究課題名(英文) Experimental study of discharge plasma fusion neutron source with D-T burning

研究代表者

大西 正視(Ohnishi, Masami)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：80089119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：トリチウム安全性を確保した密封型放電プラズマ核融合中性子源(IECF)を開発した。D-T混合ガス(混合比93%:7%)を燃料として用いたとき、Dガス燃料に比較し約8倍の中性子生成の増大を確認した。この増加割合は理論値と一致した。これよりD-T混合比を50%:50%にすること、放電電圧：70kV、放電電流60mAにすることにより、10の9乗台の中性子発生を見込める。この実験結果より、D-T混合ガスを燃料としたIECF中性子源は中性子ラジオグラフィ、癌治療の基礎研究、爆発物検査、隠匿核物質の検出、地雷探査等への中性子利用に使えることが示された。

研究成果の概要(英文)：A sealed discharge plasma fusion neutron source facility (IECF) which secures the tritium safety has been developed for the use of tritium gas. The operation with the D-T mixed gas of the mixture ratio, 93%:7% has achieved 8 times more neutrons than D gas. The multiplication agreed with the theoretical estimation. The use of D-T fuel gas with the mixture of 50%:50% by the discharge voltage 70kV and current 60mA is anticipated to produce ten to the 9th power(1/sec) neutron. The experiments verified the D-T fuel IECF can be a neutron source for radiograph, basic research of the cancer therapy, inspection of explosives and landmine detection etc.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：放電プラズマ核融合中性子源 分析器 窒化水素スペクトル D-T反応 D-D反応 トリチウム 密封型装置 H-D-T存在比 四重極質量

1. 研究開始当初の背景

中性子の応用はリチウムイオン電池等の技術開発に欠かせない中性子ラジオグラフィ、癌治療でその効果が期待をされているホウ素中性子捕獲療法 (BNCT)、港湾で米国向け輸出コンテナの隠匿核物質検査、人道的地雷探査、油田探査等幅広い分野に及ぶ。中性子源としては、現在、原子炉、加速器、放射性同位元素、加速管が用いられている。しかし、原子炉の利用は地域が限定される。また、加速器は巨大で高価である。さらに、放射性同位元素は量が法令で制限され、高い中性子の発生には対応できない。加速管は短寿命で発生量も多くない。研究代表者らは 10 数年にわたり、IEC 中性子源の開発研究に携わってきた。IEC 中性子源装置は直径 300mm 程度の球形状真空容器 (陽極を兼ねる) とその中に直径 50mm 程度の中空陰極が同心円状に配置された形状を持つ。真空容器内に 1Pa. 程度の重水素を充填し、陰極と陽極間に 50-100kV 程度の電圧をかけるとグロー放電を起こす。放電で作られたイオンは球形上陰極中心部に向かって加速され、中空陰極をすり抜け反対側に出る。反対側に出たイオンはまた陰極に引かれ、陰極の回りで往復運動をする。この運動の過程で重水素ガスと核融合反応を起こし、中性子を発生させる。特徴としては、装置が単純、廉価、使用してないとき電源を切るだけで中性子の発生は止まり、取り扱いが容易である。その他、装置の長寿命、小型・可搬、長時間安定動作 (10 時間以上の実績あり) である等の利点により、上で述べた中性子利用に適している。研究代表者は日米科学技術協力事業核融合分野で 1999 年より放電型プラズマ中性子源に関する日米ワークショップの日本側代表者を務め、昨年 10 月 27-30 日 17 回目のワークショップを東京工大で行った。この分野の日本側の研究者とともに、米国の研究者と研究の進展状況、放電型核融合プラズマ物理、関連計測、装置工学等の議論を行い、協力して研究を進めてきた。この日米ワークショップを活用し、この方式で D-D 核融合中性子を  $10^{7-8}1/sec$  生成することに成功している。これは空港での手荷物検査、地雷探査、油田探査に利用できるレベルの生成率である。D-T 燃焼 IEC 実験を行うことにより、その応用範囲は中性子ラジオグラフィ、港湾での核物質のスクリーニング、核融合炉における 14MeV 耐放射線材料開発、ブランケットのトリチウム増殖・回収試験、14MeV のその場計測技術の開発、核燃焼システムでのトリチウム取り扱い技術の開発、ITER 用 14MeV 校正用中性子源など応用範囲は格段に広がる。

2. 研究の目的

放電型プラズマ核融合 (IEC) 中性子源において、燃料として重水素 (D) を用いて、中

性子発生率  $10^{6-7}1/sec$  を達成している。重水素と 3 重水素 (T) の混合ガスを用いれば生成率が 2 桁以上の増加が期待でき、簡便な装置で中性子ラジオグラフィ、癌治療、爆発物検査、隠匿核物質の検出、地雷探査等への中性子利用が可能になる。重水素ガスで動作させていた装置に D-T 混合ガスを用い中性子生成率  $10^91/sec$  以上を達成することが本研究目的である。また、本研究は核融合炉開発上重要課題である 14MeV 中性子に耐える材料開発、14MeV 中性子によるトリチウム増殖・回収試験、トリチウム取り扱い技術、14MeV 中性子計測技術の開発、14MeV 中性子計測のための校正中性子源等新しい分野の研究開拓に大きな貢献が期待できる。

3. 研究の方法

重水素を燃料とする IEC 中性子源は関西大学で稼働している。D-T 混合燃料を用いるため、トリチウム安全上、閉じた系で燃料ガスを供給・排出するシステムを装置に付加する改造を行う。大阪大学オクタビアン研究施設に装置全体を移設し、放電特性 (ガス圧・印加電圧・放電電流特性) を求め運転条件を設定する。D-T 燃料の注入・回収系の動作確認を行い装置が密封環境で動作することを確認する。D-D および D-T ガスを用いた燃焼実験を行う。D-T 燃焼モードにおいて、四重極室料分析器のデータを基に、水素同位体の真空容器内の存在比を明らかにする。第 1 段階実験として中性子発生量  $10^81/sec$  を達成する。この結果を基に、理論的に中性子発生量を外挿し、現行の装置で達成できる中性子生成量を評価する。その結果を踏まえて、実用中性子源 (中性子生成量  $10^{10} 1/sec$  以上) の課題を明らかにし、実用 IEC 中性子源のスペックを検討する。

4. 研究成果

(1) 実験装置 図 1. に示す D-T 燃焼 IEC 核融合装置を製作した。

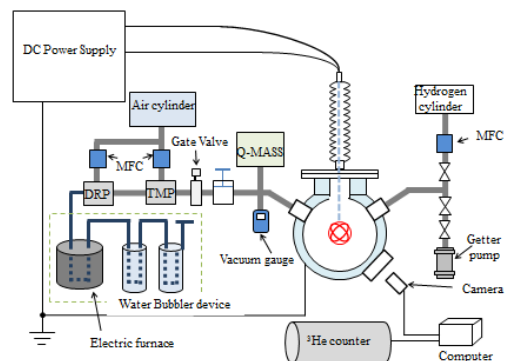


図 1. D-T 燃焼実験装置

球形上真空容器（直径 250mm）は陽極を兼ねる。内部は 50mm の厚さの水冷ジャケットで冷却される構造になっている。陰極は Mo のリボン板で製作され、真空容器内部に同心球状に配置されている。陰極陽極間にコックロフトウオルトン型高压電源で最大 90kV が印加される。最大放電電流は 60mA である。四重極室料分析計で真空容器内部の分四分圧が常時計測される。中性子計測は Am-Be で校正された He3 カウンターで行われる。トリチウムを燃焼させるこの装置は基本的には D-D 装置と同じであるが、トリチウム安全上、密封動作が不可欠であるので、ガスの供給排気はゲッターポンプで行われる。

(2)ゲッターポンプ給気・排気特性 ゲッターポンプの特性を調べるため、水素一重水素 50%-50%の混合ガスを用いて試験した。図 2 にゲッターポンプの温度を変えたときの水素一重水素の分圧の変化を示す。650° になった時水素と重水素の分圧は 0.5Pa および 0.8Pa である。450° に下げたとき、全ガス圧は 0.01Pa に減少する。これらの結果より、動作ガスの供給・排気はゲッターの温度制御だけで可能であることが示された。

放電実験後ゲッターポンプでガスを排気しても、ごくわずかのトリチウムが真空容器内に残留している。ターボ分子ポンプおよびドライポンプで排気したガスは水バブラー装置を通して集められる。水バブラーを通されたガス中のトリチウム密度は法令で決められている大気開放トリチウム濃度 70Bq/CC 以下である。この装置を用いることによりトリチウム安全が確保できることを確認した。実験において、混合比 93:7 の重水素・トリチウムガスを持ちいた。トリチウム量は 3.5Gbp である。

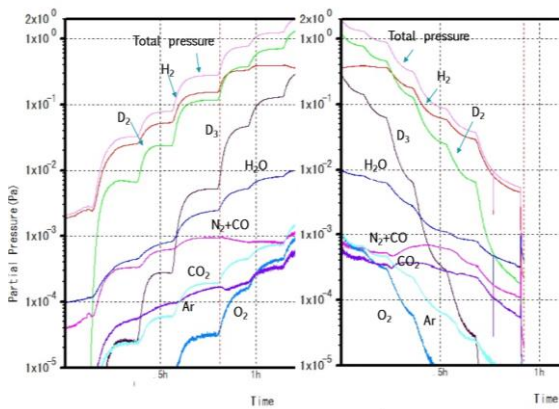


図 2 真空容器内の分子分圧の時間変化. ゲッターの温度は 400° C から 650° C に段階的に変化させている。

(3)中性子生成率 図 3 に D-T 混合ガスおよび D ガスを用いたときの中性子生成率を示す。中性子計測時間は一点につき 30 秒である。この間 D-T 混合ガスは SUS 真空容器表面に吸着され、ガス圧が減少し続ける。これにより放電電流が減少し電圧を一定に保つことが

困難である。横軸の誤差棒が大きいのはそれに起因する。35kV における混合ガスと D ガスの中性子生成比  $R = N_{DT}/N_{DD}$  を評価する。

$$\begin{aligned}
 N_{DT} &= 2n_{D_2} 2n_{D_2} u_D \sigma_{DD(8.8keV)} \\
 &+ n_{DT} 2n_{D_2} u_T \sigma_{DT(8.4keV)} \\
 &+ 2n_{D_2} n_{DT} u_D \sigma_{DT(10.5keV)} \\
 N_{DD} &= 2n_{D_2}^0 2n_{D_2}^0 u_D \sigma_{DD(8.75keV)} \\
 R &= \left( \frac{n_{D_2}}{n_{D_2}^0} \right)^2 \left[ 1 + \frac{n_{DT}}{n_{D_2}^0} \left\{ \left( \frac{E_t m_d}{E_d m_t} \right) \frac{\sigma_{DT(8.4keV)}}{\sigma_{DD(8.8keV)}} + \frac{\sigma_{DT(10.5keV)}}{\sigma_{DD(8.8keV)}} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

上式において D-T 混合比 93:7 を代入すると  $R=7.7$  と計算され、実験結果で得られる 5-8 倍と良い一致を示す<sup>①</sup>。

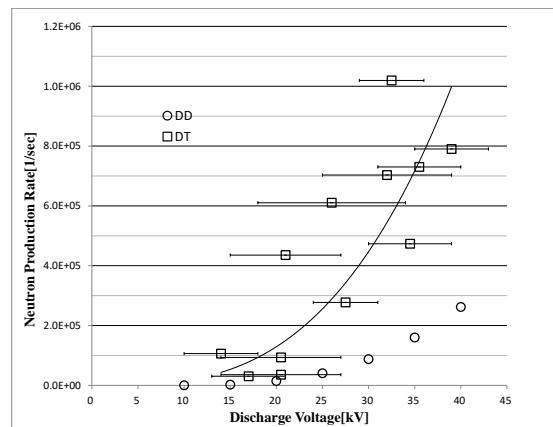


図 3 中性子生成率 vs. 放電電流。  
○ : D-T 混合ガス、△ : D ガス

#### (4)課題と展望

実験に使用した混合ガス量 (3.5Gbp.) が十分でなく、SUS 真空容器に吸着され放電中ガス圧が変動した。十分な量のガスを準備することによりこの問題は解決する。また、本実験は 2015 年 1 月に行った結果であるが、3 月にも同様な実験を行った。1 月の実験後、真空容器を大気開放したため、ゲッターポンプに水 (空気中の水蒸気) が吸着し、分解した水素原子をゲッターは吸蔵していた。このため、3 月の実験では D-T 混合ガスの 50%が水素に希釈されており、中性子生成が重水素放電のときより少ない結果を得た。この解析のために四重極質量分析器から得られる分圧比を用いて、水素一重水素一トリチウムの存在比を同定する新しい手法を見出した。D-T 燃焼実験において、D-T (および H) の存在比の計測は重要であり、今回見出した手法が有効に使えるものと考えられる。

今回の中性子計測結果より、D-T 混合比

50%-50%のガスを用いて、スペック最大で動作させるとすると混合比による増加が4倍、印加電圧を35kVから70kVへ上昇により10倍の増加、放電電流値を50mAとすることにより10倍の増加が期待でき、全体ではDガスをういたときの200倍の中性子生成量の増加が期待でき、D-T核融合IEC中性子源により $10^9$ (1/sec)後半の中性子生成が可能と結論できる。

<引用文献>

- ① M. Ohnishi et al. Tritium burning in inertial electrostatic fusion facility, Fusion Engineering and Design, 2015, DOI:10.1016.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① M. Ohnishi, Y. Yamamoto, H. Osawa, Y. Hatano, Y. Torikai, I. Murata, K. Kamakura, M. Onishi, K. Miyamoto, H. Konda, K. Masuda, E. Hotta, Tritium burning in inertial electrostatic fusion facility, Fusion Engineering and Design, 査読あり, 2015, DOI:10.1016

[学会発表] (計 18 件)

- ① M. Ohnishi, Y. Yamamoto, H. Osawa, Y. Hatano, Y. Torikai, I. Murata, K. Kamakura, M. Onishi, K. Miyamoto, H. Konda, K. Masuda, E. Hotta, Tritium burning, in inertial electrostatic confinement fusion facility, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, 0-3, Oct. 27-30, 2015, Tokyo Institute of Technology (Tokyo), Japan.
- ② M. Ohnishi, H. Osawa, K. Miyamoto, H. Konda, M. Onishi, T. Kato, K. Masuda, Y. Hatano, I. Murata, The D-T burning experiments in the IECF in January 2015, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, 0-15, Oct. 27-30, 2015, Tokyo Institute of Technology (Tokyo), Japan.
- ③ H. Osawa, K. Miyamoto, M. Onishi, H. Konda, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Issues on D-T experiments, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, 0-17, Oct. 27-30, 2015, Tokyo, Japan, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, Oct. 27-30, 2015, Tokyo Institute of Technology (Tokyo), Japan.
- ④ K. Miyamoto, H. Konda, K. Kamakura, M. Onishi, Y. Matsuyama, H. Osawa, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Y. Hatano, Gas analysis on D-T operation, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, P-1, Oct. 27-30, 2015, Tokyo Institute of Technology (Tokyo), Japan.
- ⑤ H. Konda, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Osawa, K. Miyamoto, Y. Matsuyama, K.

Masuda, Y. Hatano, I. Murata, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, P-4, Oct. 27-30, 2015, Tokyo, Japan, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, Oct. 27-30, 2015, Tokyo Institute of Technology (Tokyo), Japan.

- ⑥ Y. Matsuyama, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Osawa, K. Miyamoto, H. Konda, M. Onishi, I. Murata, Records of the D-T burning experiments in the IECF, The 17<sup>th</sup> US-Japan IEC workshop, P-5, Oct. 27-30, 2015, Tokyo Institute of Technology (Tokyo), Japan.
- ⑦ M. Ohnishi, Y. Yamamoto, H. Osawa, Y. Hatano, Y. Torikai, I. Murata, K. Kamakura, M. Onishi, K. Miyamoto, H. Konda, K. Masuda, E. Hotta, D-T burning experiment in inertial electrostatic confinement fusion, The 12<sup>th</sup> Inter. Symp. On Fusion Nuclear Technology 2015, 9/13-9/18, Jeju, Korea.
- ⑧ H. Osawa, K. Miyamoto, H. Konda, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Y. Hatano, Neutron production rate of inertial electrostatic confinement fusion device with deuterium-tritium gas, The 12<sup>th</sup> Inter. Symp. On Fusion Nuclear Technology 2015, 9/13-9/18, Jeju, Korea.
- ⑨ K. Miyamoto, H. Konda, H. Osawa, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Y. Hatano, Discharge characteristics of hydrogen isotopes in sealed inertial electrostatic confinement fusion device, The 12<sup>th</sup> Inter. Symp. On Fusion Nuclear Technology 2015, 9/13-9/18, Jeju, Korea.
- ⑩ H. Konda, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Osawa, K. Miyamoto, K. Masuda, Y. Hatano, I. Murata, Gas supply/pressure control system in the sealed IECF device for D-T burning, The 12<sup>th</sup> Inter. Symp. On Fusion Nuclear Technology 2015, 9/13-9/18, Jeju, Korea.
- ⑪ M. Ohnishi, Y. Yamamoto, H. Osawa, K. Miyamoto, M. Onishi, H. Konda, T. Takehiro, K. Masuda, Y. Hatano, E. Hotta, I. Murata, D-T burning in IECF, The 16<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2014, 10/2-10/3, University of Wisconsin (Madison), USA.
- ⑫ Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Osawa, K. Miyamoto, M. Onishi, H. Konda, T. Kato, K. Masuda, Y. Hatano, I. Murata, Prepare for the D-T burning in IECF, The 16<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2014, 10/2-10/3, University of Wisconsin (Madison), USA.

- ⑬ H. Konda, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, H. Osawa, K. Miyamoto, M. Onishi, T. Kato, K. Masuda, Y. Hatano, I. Murata, Gas supply/exhausting system with getter pump for D-T burning in IECF, The 16<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2014, 10/2-10/3, University of Wisconsin (Madison), USA.
- ⑭ K. Miyamoto, M. Onishi, T. Kato, K. Kamakura, H. Osawa, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Decontamination of tritium from exhaust gas of IECF device, The 16<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2014, 10/2-10/3, University of Wisconsin (Madison), USA.
- ⑮ M. Onishi, K. Miyamoto, H. Osawa, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Y. Hatano, I. Murata, K. Masuda, D-T burning with inertial electrostatic fusion device, Plasma Conference 2014, 11/8-11/21, Toki-Messe (Niigata), Japan.
- ⑯ M. Ohnishi, Y. Yamamoto, K. Kamakura, H. Osawa, K. Masuda, T. Kajiwara, T. Misawa, Y. Hatano, E. Hotta, M. Nishikawa, I. Murata, D-T burning experiment in IEC, The 15<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2013, 10/6-10/9. Kyoto University (Uji), Japan.
- ⑰ M. Onishi, K. Kamakura, K. Miyamoto, H. Osawa, K. Masuda, M. Ohnishi, Tritium recovery system in the D-T reaction with IEC, The 15<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2013, 10/6-10/9, Kyoto University (Uji), Japan.
- ⑱ K. Kamakura, M. Onishi, K. Miyamoto, H. Osawa, Y. Hatano, T. Murata, K. Masuda, Y. Yamamoto, M. Ohnishi, Construction IEC device for D-T burning, The 15<sup>th</sup> US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, 2013, 10/6-10/9. Kyoto University (Uji), Japan.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大西正視 (OHNISHI, Masami)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：8089119

### (2) 研究分担者

山本 靖 (YAMAMOTO, Yasushi)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：50158309

大澤穂高 (OSAWA, Hodaka)  
関西大学・システム理工学部・助教  
研究者番号：30351498

### (3) 連携研究者

波多野雄治 (HATANNO, Yuuji)  
富山大学・工学部・教授  
研究者番号：80218487

村田 勲 (MURATA, Isao)  
大阪大学・工学部・教授  
研究者番号：30273600

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