

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06794

研究課題名(和文)核融合原型炉の模擬ブランケット体系によるトリチウム増殖比TBRの実験的評価

研究課題名(英文)Experimental evaluation of tritium breeding ratio in fusion blanket mock-up

研究代表者

向井 啓祐 (Mukai, Keisuke)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：70807700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、核融合中性子を発生する放電型中性子源を用いて、実験体系中のトリチウム増殖比の実験的評価を行った。放電条件の最適化を実施し、1秒間に10 n/s以上の中性子を発生させることに成功した。高感度な2次元中性子検出器として中性子イメージングプレートを用い、中性子のエネルギーに依存する輝尽蛍光密度と中性子フルエンスの直線関係を得た。リチウムターゲットへの中性子照射により、 ${}^6\text{Li}$ リチウムの(n, T)反応に起因する"中性子影絵"を取得し、トリチウムの生産量、ならびにトリチウム増殖比が実験的に評価できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブランケットは核融合炉内で燃料(トリチウム)の生産や熱の回収を行う重要な機器であり、特にトリチウム増殖比は炉の燃料自己自給性を示す重要指標である。増殖材への中性子照射実験はトリチウムの回収挙動の解明を目的としたものが中心であり、トリチウム増殖比の評価はシミュレーション研究が中心となっていた。本研究では小型中性子源と中性子イメージングプレートを用い、極微量のトリチウム生産量の評価手法をはじめて示した。本手法は1ピクセルあたり1つの中性子を検知できる感度の高い検出手法であり、微量トリチウムの評価が可能になることから、燃料生産性能の評価実験に利用されると期待される。

研究成果の概要(英文)：This study aims to evaluate tritium breeding ratio experimentally by using a discharge-type DD fusion neutron source. By optimizing the discharge condition of the source (current, applied voltage, and gas pressure), the neutron production rate increased and finally achieved more than 10 n/s. By employing neutron imaging plate with Gd converter, linear relationships between neutron fluence (n/cm²) and photo-stimulated luminescence density (PSL/cm²) depending on neutron energy were obtained. From a neutron "shadow image" caused by ${}^6\text{Li}$ (n, T) neutron capture reaction, tritium production and tritium breeding ratio were successfully evaluated.

研究分野：核融合工学

キーワード：核融合 中性子 ブランケット イメージングプレート 中性子源

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

将来的に化石燃料の枯渇や高騰が懸念されていることから、豊富な資源（重水素やリチウム）から大電力の発電が可能な核融合炉の開発が進められている。核融合炉開発のシナリオとしては、現在フランス・カダラッシュで建築中の国際熱核融合実験炉 ITER（2020 年頃運転開始予定）で総合的な工学知見を得て、核融合原型炉（2040 年頃の運転開始を想定）の定常運転及び発電によって技術的成立性の実証を目指している。核融合炉の燃料には自然に殆ど存在しないトリチウム（三重水素）を用いるため、ブランケット内のリチウムと中性子の反応によってトリチウムを生産し、炉全体のトリチウム生産量が消費量を上回る（トリチウム増殖比 TBR が 1 を超える）必要がある。ITER のテストブランケットでもトリチウムの生産が計画されているが、中性子が遮蔽ブランケットで吸収されて回帰しないため、十分な中性子束が得られず、TBR は 1 を大きく下回ると予測されている。一方、原型炉ブランケットでは、散乱・減速された中性子が隣接ブランケットから流入することで中性子収支がゼロとなるフルトラス構造であるため、高い中性子束と熱中性子の寄与によって TBR>1 が理論的に可能となる。現状ではトリチウム生産に関する研究は、点線源を用いた非フルトラス体系での実験や中性子輸送コードを用いたシミュレーションに限定されてきた。核融合ブランケットで TBR>1 を実験的に示し、燃料自己自給性の確証を得る必要があるため、中性子発生とトリチウム生成を実験的に行う本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、ブランケット模擬体系（フルトラス体系）内での中性子計測及びトリチウム増殖比の実験的評価を見据え、以下を実施することを研究目的とした。(1)円筒放電型 DD 中性子を用いた中性子発生条件の最適化、(2) 中性子イメージングプレートを用いた中性子の二次元検出、(3) トリチウム生成量評価。実験には円筒放電型中性子源を用いて DD 中性子（エネルギー：2.45 MeV）を発生した。中性子の二次元計測にはガドリニウムをコンバータ元素として含む中性子イメージングプレートを用いた。

3. 研究の方法

円筒放電型核融合中性子源の概念図と外観写真を図 1 に示す。この装置は、真空容器内の両極に設置した陽極と、中央部の円筒型陰極で構成されている。真空容器内は数 Pa 以下の重水素ガスで満たされており、電極間に数十 kV の高電圧を印加し起こったグロー放電により加速されたイオンと陰極表面の重水素との衝突で発生した中性子線を使用する。一般的な慣性静電閉じ込め核融合（IECF）装置は球形グリッド中空陰極を用いるのに対し、本円筒型放電核融合中性子源は円筒型の陰極を採用している。この核融合反応によって得られる中性子線は等方的に放射される 2.45 MeV の高速中性子である。細長い円筒形状の陰極を採用しているため、点線源ではなく、円筒形状の放電管を複数並べることによって面線源として使用でき、反射材で装置周辺を囲めばビーム線源としての利用も可能である。

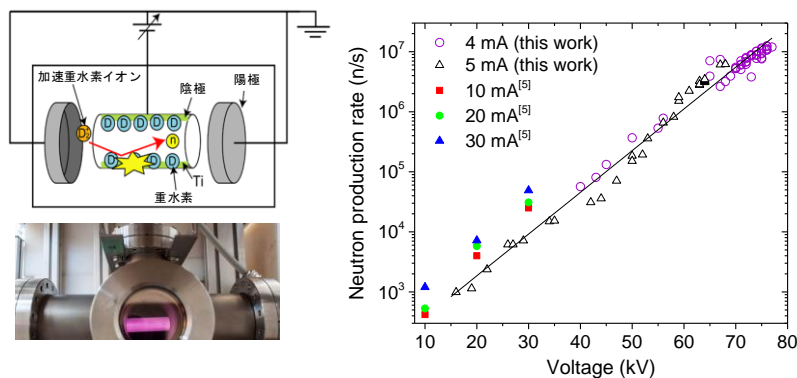
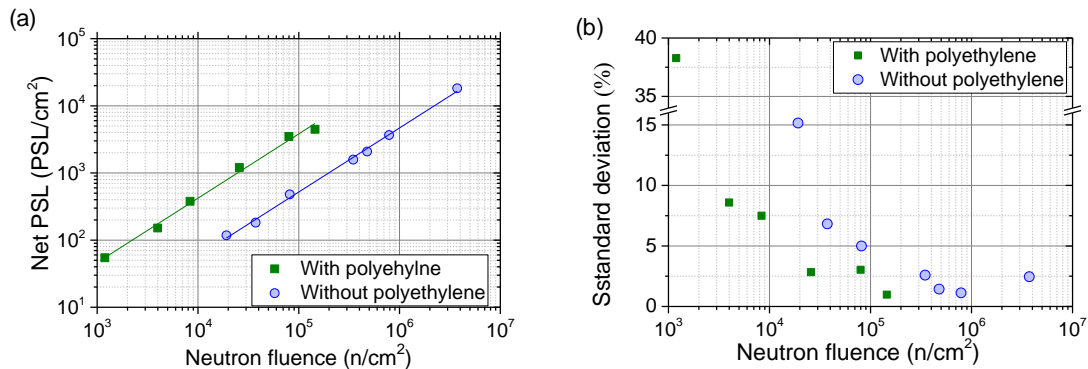


図 1 円筒放電型中性子源の概要図（左上）と外観（左下）、電圧-中性子発生率プロファイル

4. 研究成果

中性子イメージングプレートは面積あたりの入射中性子数と輝尽蛍光密度が直線性を示すことが知られている。ただし、この直線は中性子のエネルギーつまり実験体系に依存するため、中性子発生量が既知のカリフォルニウム中性子源を用いた中性子イメージングプレートの露光実験を実施した。図 2 に露光体系と読み取り結果を示す。発生中性子のエネルギーの影響を調べるために、2 種類の異なる体系で実験を行った。図 2a 体系 (without PE) では、カリフォルニウム線源と中性子 IP の間に鉛を設置した。図 2 右図の体系 (with PE) では、同線源と中性子 IP の間に、鉛ブロックに加えてポリエチレンブロック（厚さ 5 cm）を設置、減速された中性子線による露光実験を行った。線源と中性子 IP の距離は、前者が 5 cm、後者が 10 cm であった。

図 2b にこれら 2 種類のジオメトリーで得られた較正直線を示す。横軸は中性子フルーエンス Φ (n/cm^2)、縦軸は正味の輝尽蛍光密度 P_{net} で図示した。中性子フルーエンスはモンテカルロ計算によって求めた中性子フラックスに露光時間を掛け合わせて算出された。入射中性子数と正味の輝尽蛍光密度は 10^3 から 10^7 の範囲で直線性を示し、 $P \propto \Phi^k$ (k : 較正直線の傾き) で表現された。この傾き k は、ポリエチレンブロックなしの体系で $k = 0.95 \pm 0.02$ 、ポリエチレンブロックありの体系で $k = 0.96 \pm 0.05$ であった。過去の研究より、この直線性は少なくとも 10^9 n/cm^2 までは維持されると期待される。図 2c は正味の輝尽蛍光密度の標準偏差を示す。中性子入射数が少ない条件では読み取り誤差が大きく、値の信頼性が得られない。この誤差は中性子



入射数とともに減少し、中性子フルーエンスが 10^5 n/s 以上の条件では 5%以下となった。この結果から 10^5 を超える中性子フルーエンスが得られれば、5%以下の誤差で中性子計測が行える。

図 2 中性子イメージングプレートの較正直線 (a)、読み取り誤差 (b)

ガス圧、電流、電圧を変化させて放電実験を行い、発生中性子数を最大化する実験パラメータの探索を行った。先行研究により、中性子発生数は電流値に比例して増加し、電圧に対しては指数関数的に増加することが報告されている。また、高電力条件では陰極がオーバーヒートし、ポリエチレン系の絶縁体が蒸発し、内部圧力の変化によって出力が安定しないことがわかっている。そこで本研究では、低電流・高電圧条件で放電を行い、電力を抑えつつ発生中性子数の最大化を行った。4 mA の条件では最大 77 kV まで電圧を増加しても安定した放電が維持できた(図 1 右図)。中性子発生量は電圧に対して指数関数的に増加し、75 kV 以上で 10^7 n/s を超える中性子発生率が得られた。過去の研究では、最大印可電圧は 40 kV 程度であり、電流値を小さく設定することで電圧値を大幅に増大させることに成功した。 6×10^6 n/s 以上であれば、1 時間の実験で 10^{10} を超える中性子発生が可能であり、 $10^5 \sim 10^6$ n/cm^2 の中性子フルーエンスが得られる。計測誤差 5%以下が期待される領域であり、中性子イメージングや放射化分析を用いるスペクトロスコーピーに十分な中性子発生率であると言える。

図 3 にターゲット材料の配置と画像解析装置で読み取った中性子画像を示す。IP の読み取り画像と直接比較するために、左写真は左右反転の画像処理を行った。ターゲット材料には熱中性子反応断面積の大きいボロンとリチウムを含む、炭化ホウ素 B_4C 、酸化リチウム Li_2O 、 Li_2TiO_3 を用いた。容器とターゲット材の影響を分離して考慮するために、ターゲット材粉末を充填したプラスチック容器とともに、空のプラスチック容器を設置した。右図に中性子イメージングプレート読み取り結果を示す(カラーバーは各ピクセルの輝尽蛍光密度 PSL を示す)。カドミウム板と 4 つのプラスチック製容器の背後には中性子影絵が得られた。一方、X 線を遮蔽し、中性子を透過する鉛の背後ではこの影は観測されなかった。このことから、本画像で得られた画像は主に中性子によって画像化されていると考えられる。プラスチック製容器では、空の容器の背後でも薄い影が観測され、容器の構成元素(主に水素と炭素)による散乱に起因すると考えられる。ターゲット材料を充填した 3 種の容器背後の影は、それぞれリチウム、ホウ素、カドミウムの中性子吸収に起因し、その濃淡が中性子吸収量を示す。プラスチック製容器の背後における、輝尽蛍光密度 (PSL/cm²) の計測結果は程度で $1000 \sim 2000$ PSL/cm² であり、空の容器背後と比較して、リチウムやホウ素を含んだ容器の背後では輝尽蛍光密度は減少し、その差(中性子減少分)は $2000 \sim 3000$ PSL/cm² であった。各試料背後の輝尽蛍光密度の差は、元素(リチウムとホウ素)の原子密度の違いや各元素の中性子吸収能に由来すると考えられる。この中性子フルーエンスの減少が ${}^6\text{Li}(n, T)$ 反応によって消費されたと仮定し、トリチウム生成量を見積もった結果、増殖材の Li_2O と Li_2TiO_3 でのトリチウム生成量は 2×10^6 atom と 4×10^6 atom と見積もられた。実験体系を計算ジオメトリとして中性子輸送計算を実施した結果、トリチウム生成量(計算値)はそれぞれ 4×10^6 、 7×10^7 atom であり、実験値よりも一桁程度の分離が生じた。この差はターゲット部分における中性子束が低さに起因する誤差(図 2)および中性子の減速が不十分(i. e. 熱中性子エネルギーの割合が低いこと)が原因であると考えられる。

本研究では、円筒放電型中性子源と中性子イメージングプレートを用い、極微量のトリチウム生成量の実験的な評価をはじめて実施。放電条件の最適化により、中性子発生数 $> 10^7$ n/s が得られた。また、中性子イメージングプレートを用いてトリチウム生成量を二次元に評価で

きることを実験的に示すことに成功した。発生した中性子数（ヘリウム計数管での計測値）とトリチウム生成量から、トリチウム増殖比の生成量の評価が可能であることが示された。また、本検出手法はイメージングプレートを複数配置することで中性子束分布の3次元計測への展開も可能であり、今後の研究では、中性子発生数の増大や体系の最適化により、さらに中性子束測定精度の向上を目指す。

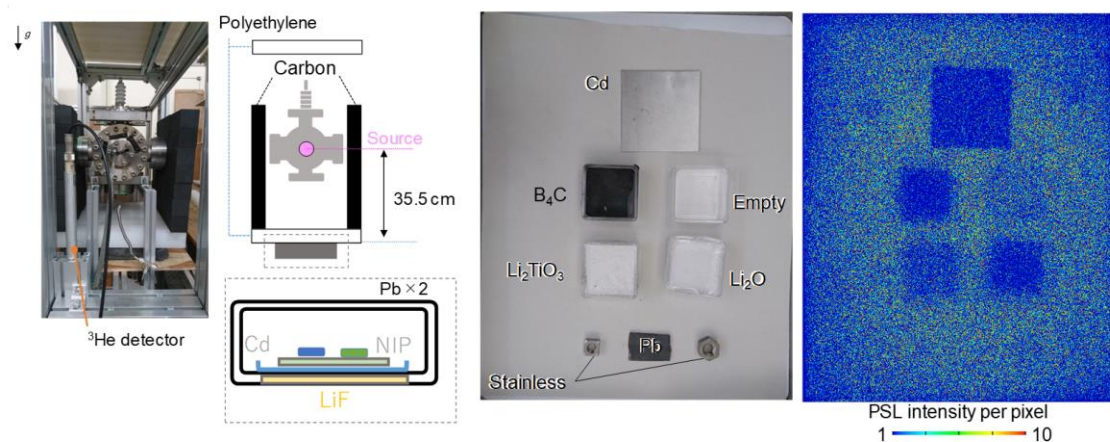


図3 実験ジオメトリ（左）、中性子イメージングプレート上のターゲット配置（中）と中性子画像の読み取り結果（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① [Keisuke Mukai](#), Satoshi Konishi, Preparation for a neutronics experiment using a discharge fusion device and an imaging plate neutron detector, *Fusion Engineering and Design* 2019, 査読有 DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.005 (印刷中)
- ② Yasuyuki Ogino, [Keisuke Mukai](#), Juro Yagi, Satoshi Konishi, Preliminary Results of Neutron Transport in Blanket Module by MCNP with Profile Analysis using Imaging Plate 2019 *Fusion Science and Technology* 査読有 (印刷中)

〔学会発表〕（計 5 件）

- ③ 荻野 靖之, [向井 啓祐](#), 八木 重郎, 小西 哲之, 放射化金属およびイメージングプレートを用いた中性子束の空間分布評価, 日本原子力学会 2019 春の年会, 茨木大学 (2019 年 3 月 20-22 日)
- ④ [向井 啓祐](#), 荻野靖之, 八木重郎, 小西哲之, 中性子イメージングプレートを用いたトリチウム生産量の評価, 第 35 回 プラズマ・核融合学会 年会, 大阪大学 (2018 年 12 月 3-6 日)
- ⑤ [Keisuke Mukai](#), Satoshi Konishi, Fusion neutron generation and two-dimensional neutron measurement by imaging plate detector, 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT), Sicily, Italy (16-21, September, 2018).
- ⑥ Yasuyuki Ogino, [Keisuke Mukai](#), Juro Yagi, Satoshi Konishi, Benchmarking of Neutron Transport in Blanket Module by MCNP with Profile Analysis with Imaging Plate, 23rd Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, Florida, U.S.A (11-15, November, 2018).
- ⑦ [向井 啓祐](#), 八木 重郎, 小西 哲之, 放電型 DD 核融合中性子源を用いた実験体系中の中性子束分布の評価, 日本原子力学会 2018 春の年会 大阪大学吹田キャンパス (2018 年 3 月 20-22 日)

6. 研究組織

- (1) 研究分担者：なし
- (2) 研究協力者：なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。