

令和 5 年 4 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14442

研究課題名（和文）核融合ブランケットの中性子輸送と燃料生産性の実験評価

研究課題名（英文）Experimental evaluation of neutron transport and fuel production in fusion blanket

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では小型放電型核融合中性子源を用い、模擬ブランケット内でエネルギー幅の広い中性子を発生させ、中性子とトリチウム生産率の計測・評価を実施した。中性子発生量増大のために、電極にはチタンコーティングを施した。これにより、中性子発生率が約40%程度向上し、電極の深さ方向分析によって表面濃度の上昇が発生率の向上に寄与していることを明らかにした。単結晶ダイヤモンド検出器を5つの異なる位置（位置A-E）に配置し、中性子輸送実験を実施した。リチウムの中性子捕捉反応に起因するトリトンを検出し、トリチウム生成率を実験的に評価した。小型放電型中性子源でトリチウム生成率が高い精度で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

本研究では、電極表面へのコーティングによって中性子発生率が上昇することを示した。中性子を用いた建築物の診断やラジオグラフィなどの応用に向け、小型中性子源の高性能化に寄与する成果であると考えられる。中性子輸送実験ではモンテカルロ計算との比較により、C/E値（実験値と計算値の比）と測定誤差の評価を行った。線量の低い小型中性子源を用いて三重水素生成率を評価したのは本研究がはじめてであり、高コストな加速器を使用しない実験手法として、ブランケット試験体の燃料生産性能の評価に役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a compact discharge fusion neutron source was used to generate spectral neutrons with a wide energy range, and the neutron and tritium production rates were measured. The electrodes were coated with titanium to increase the neutron production rate. This coating increased the neutron generation rate by about 40%, and depth analysis of the electrodes revealed that the increased surface concentration of deuterium contributed to the increased neutron production rate. Neutron irradiation experiments were conducted with a CVD single-crystal diamond detector placed at five different positions (positions A-E) under discharge conditions of 9 mA and 60 kV. Tritons produced by the capture reaction of lithium were detected, and the tritium production rate was experimentally evaluated. It was shown that the tritium production rate can be evaluated with high accuracy using a small discharge neutron source.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

研究分野：中性子工学

キーワード：核融合中性子 燃料生産性 ブランケット コーティング 中性子発生 オンライン計測

1. 研究開始当初の背景

核融合炉は高エネルギー密度で環境負荷の低い次世代電源として期待される。この核融合炉では自然界に存在しないトリチウム（三重水素）を燃料とし、核融合プラズマの周囲に配置されたブランケットで生産される。日本の原型炉の主要案である水冷却固体増殖方式のブランケットでは、中性子増倍材（ベリリウム化合物）で中性子を増大し、増殖材（リチウムセラミックス）と中性子の反応により燃料トリチウムを生産する。核融合炉におけるトリチウムの生産量と消費量の比はトリチウム増殖比（TBR）と定義される。炉内でのトリチウム生産量が消費量を上回る“ $TBR > 1$ ”を維持しなければ原理的に核融合炉は連続運転ができない。現状、TBR の評価では主にモンテカルロ法による計算コードが使用されている。計算に使用される核データには一定の不確かさが存在する。本計算手法では核融合ブランケットの燃料自給性の確証を得ることが困難であり、トリチウムの生成や中性子の輸送に関する実験的な検証が必要となる。そこで、本研究では小型の核融合中性子源を用い、中性子とトリチウム生産率の計測・評価を実施した。

2. 研究の目的

本研究では構造材、増殖材、中性子増倍材、冷却材、反射材で構成される模擬ブランケット内でエネルギー幅の広い中性子を発生し、核融合炉内での中性子スペクトルを模擬する。模擬ブランケット内で、体型内の中性子束分布及びトリチウム生成量を評価することで、模擬ブランケット内のトリチウム生産性能を実験的に評価する。本目的を達成するために本研究では（1）モンテカルロ計算コードを用いた中性子輸送シミュレーション、（2）電極コーティングによる中性子発生率の増大（3）ニュートロニクス試験によるトリチウム生成率の実権的評価、を実施する。

3. 研究の方法

放電型円筒核融合中性子源によって中性子発生を行った。本装置は真空容器内で負にバイアスされた円筒形のカソードと接地された 2 つのアノードを持つ。真空容器内の D_2 ガス圧力は 0.5-1.4Pa に制御され、ロータリーポンプとターボ分子ポンプで連続的に排気された。高電圧を印加することで、グロー放電プラズマを発生させた。陰極へのコーティングは真空容器内で Ti 電極に通電することで物理蒸着を行った。

${}^2D(d,n){}^3He$ の核融合反応によって 2.45 MeV のエネルギーを持つ高速中性子を発生し、中性子発生量は 3He ガス充填検出器を用いてモニターされた。ポリエチレン減速材、黒鉛反射材、炭酸リチウム（トリチウム増殖材）からなるブランケットモックアップに、DD 核融合中性子を照射した。図 1（右）に示すように、ダイヤモンド箔は、ハウジング内にあり、コンバーターとして 6Li 濃縮フッ化リチウム膜をダイヤモンド箔の正面に配置した。 6LiF 膜のソース中性子あたりのトリチウム生成率 $R_{exp} (/s.n.)$ は、 $R_{exp} = I/k/n$ により求められた。ここで I, k, n はトリトンピーク強度、校正係数、中性子発生数である。

単結晶ダイヤモンド検出器は三種類の実験体系の合計 5 カ所に設置された。位置 A-C の体系はグラファイトとポリエチレンで校正されており、位置 D と E の体系はこれらに加えて増殖材(炭酸リチウム)ブロックが設置された。C の位置の測定のみ 5 時間、それ以外は 2 時間照射した。

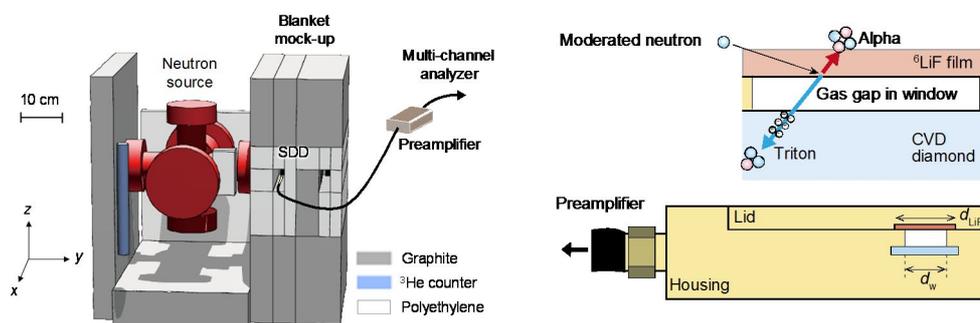


図 1 小型放電型中性子発生装置を用いた試験体系と単結晶ダイヤモンド検出器

4. 研究成果

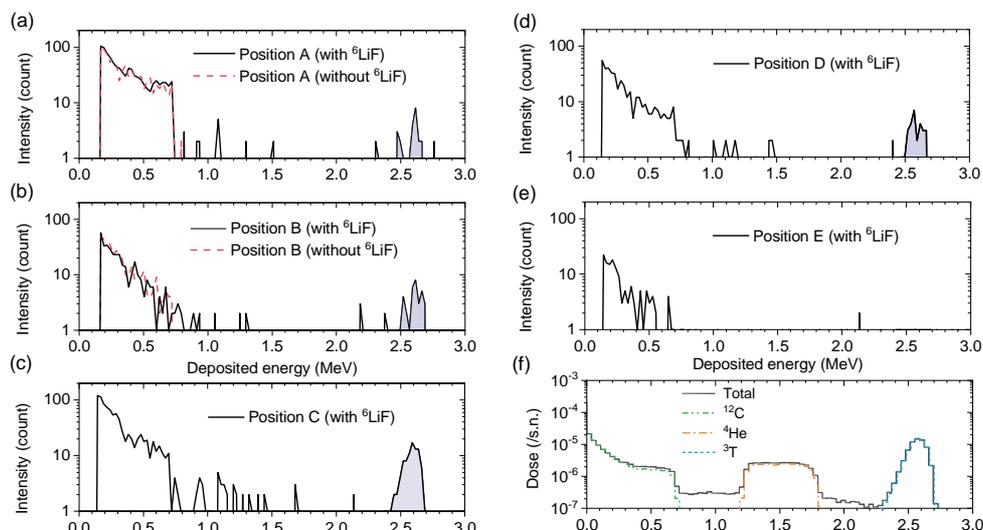


図2 測定位置 A~E における単結晶ダイヤモンド検出器による測定波形 (a-e) とダイヤモンドへのエネルギー付与の計算結果 (f)

第一に、中性子発生率の向上を目指し、電極表面に金属水素化物被覆を施した。ステンレス鋼電極のチタンをコーティングし、その後、電流 5~40 mA、印加電圧 20~60 kV の範囲で中性子発生試験を実施した。中性子の発生と計測の結果、カソードに Ti をコーティングすることで、コーティングしていないカソードよりも中性子発生率が約 40% 程度向上することが示唆された[1]。また、グロー放電発光分光法 (GD-OES) によるカソードの深さ方向分析を実施した結果、電極表面 $1 \mu\text{m}$ の領域で重水素密度が上昇していることが確認された。この表面重水素が中性子発生率の向上に寄与したと考えられる。

模擬ブランケットでの中性子照射試験に向け、MCNP コードを用いて体系を作成し、中性子輸送のシミュレーションを行い、ダイヤモンド箔における中性子フラックスを計算した。また、PHITS コードを用い、ダイヤモンドに入射する荷電粒子とその付与エネルギーの計算を行った。

中性子照射実験は、9mA、60kV の放電条件で、単結晶ダイヤモンド検出器を 5 つの異なる位置 (位置 A-E) に配置して実施した。位置 A から E におけるソース中性子の発生数は、 $1.41\text{--}3.27 \times 10^9$ であった。図 2 にダイヤモンド検出器のエネルギースペクトルと PHITS コードによる荷電粒子のエネルギー付与の計算結果を示す。横軸 2.55 MeV で ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反応に起因するトリチウムのピークが検出された。1.0~1.8MeV のエネルギー範囲において微弱な信号を検出しているが、これらは ${}^6\text{LiF}$ 膜中でエネルギーを失った 2.07MeV の粒子であると考えられる。これらのピークは ${}^6\text{LiF}$ コンバータを外した場合には生じなかったが、0.75MeV 以下のピークはコンバータの有無にかかわらず検出されたことから、主にダイヤモンド中の高速中性子の ${}^{12}\text{C}(n,n'){}^{12}\text{C}$ 弾性散乱に由来すると考えられる。このトリチウムピーク強度を積分し、トリチウム生成率を求めた。位置 A~E における発生中性子あたりのトリチウム生成率 ($\times 10^{-7}/\text{s.n.}$) は 2.04 ± 0.17 , 2.73 ± 0.23 , 3.19 ± 0.27 , 2.32 ± 0.20 , 0.129 ± 0.034 と求められた。モンテカルロ計算コード MCNP を用いてトリチウム生成率の計算結果と実験結果の比 C/E を求めたところ、C/E = 0.96~1.41 と求められた。標準偏差と比較すると、位置 A、B、C では 1、位置 D では 3 の範囲で一致した。一方、位置 E では増殖材の背後に設置されていたためトリチウム強度が著しく低く、25%もの誤差があった。この結果、小型放電型中性子発生装置を用いることで艇ノイズな波形からトリチウム生成率が評価できること、そして少なくとも 10^5 n/cm^2 の熱中性子フルエンスが必要であることが示された [2]。

参考文献

- [1] T. Sakabe, S. Kenjo, Y. Ogino, K. Mukai, M. Bakr, J. Yagi, S. Konishi, Effects of Metal Hydride Coatings at the Electrodes on Neutron Production Rate in a Discharge-Type Fusion Neutron Source. *IEEE Transactions on Plasma Science* 50 (2022) 4500-4505.
- [2] K. Mukai, Y. Ogino, M.I., Kobayashi, B. Mahmoud, J. Yagi, K. Ogawa, M. Isobe, S. Konishi, Evaluation of tritium production rate in a blanket mock-up using a compact fusion neutron source. *Nuclear Fusion* 61 (2021) 046034.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kenjo Shunsuke, Ogino Yasuyuki, Mukai Keisuke, Bakr Mahmoud, Yagi Juro, Konishi Satoshi	4. 巻 47
2. 論文標題 Employing of ZrCo as a fuel source in a discharge-type fusion neutron source operated in self-sufficient mode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 3054 ~ 3062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2021.10.250	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mukai Keisuke, Kenjo Shunsuke, Iwamatsu Naoto, Mahmoud Bakr, Chikada Takumi, Yagi Juro, Konishi Satoshi	4. 巻 47
2. 論文標題 Hydrogen permeation from F82H wall of ceramic breeder pebble bed: The effect of surface corrosion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 6154 ~ 6163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2021.11.225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mukai Keisuke, Ogino Yasuyuki, Kobayashi Makoto I., Mahmoud Bakr, Yagi Juro, Ogawa Kunihiro, Isobe Mitsutaka, Konishi Satoshi	4. 巻 61
2. 論文標題 Evaluation of tritium production rate in a blanket mock-up using a compact fusion neutron source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 046034 ~ 046034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/abe4e7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ogino Yasuyuki, Mukai Keisuke, Yagi Juro, Konishi Satoshi	4. 巻 168
2. 論文標題 Simulations for practical measurement methods of spatial neutron distribution inside blanket mock-up irradiated with DT neutrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112417 ~ 112417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2021.112417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bakr Mahmoud, Wulfk?hler Jan-Philipp, Mukai Keisuke, Masuda Kai, Tajmar Martin, Konishi Satoshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Evaluation of 3D printed buckyball-shaped cathodes of titanium and stainless-steel for IEC fusion system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 012706 ~ 012706
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0033342	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bakr Mahmoud, Mukai Keisuke, Masuda Kai, Yagi Juro, Konishi Satoshi	4. 巻 167
2. 論文標題 Characterization of an ultra-compact neutron source based on an IEC fusion device and its prospective applications in radiography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 112346 ~ 112346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2021.112346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 向井 啓祐、見城 俊介、岩松 尚杜、バクル マハムド、近田 拓未、八木 重郎、小西 哲之
2. 発表標題 固体増殖材ペブル充填層のF82H壁面における水素透過挙動
3. 学会等名 日本原子力学会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 燃料の自己供給回収システムを備えた放電型核融合中性子源の開発
2. 発表標題 見城 俊介、荻野 靖之、向井 啓祐、Mahmoud Bakr、八木 重郎、小西 哲之
3. 学会等名 日本原子力学会
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 K. Mukai, R. Knitter, T. Hoshino, T. Terai, S. Kenjo, N. Iwamatsu, T. Chikada, J.o Yagi, S. Konishi
2. 発表標題 Structural analysis and chemical behavior of tritium breeding materials
3. 学会等名 20th International Conference on Fusion Reactor (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 S. Kenjo, Y. Ogino, K. Mukai, M. Bakr, J. Yagi, S. Konishi
2. 発表標題 Self-sufficient system for a compact discharge-type fusion neutron source using ZrCo as a fuel source
3. 学会等名 20th International Conference on Fusion Reactor (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Ogino, Keisuke Mukai, Juro Yagi, Satoshi Konishi
2. 発表標題 Simulations for practical measurement of spatial neutron distribution inside blanket mock-up irradiated with DT neutrons
3. 学会等名 31st Symposium on Fusion Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荻野 靖之、向井 啓祐、八木 重郎、小西 哲之
2. 発表標題 中性子輸送計算によるブランケット模擬体系内部の中性子空間分布の計算および実験にむけた検討
3. 学会等名 日本原子力学会 2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向井啓祐、荻野靖之、小林真、Bakr Mahmoud、八木重郎、小川国大、磯部光孝、小西哲之
2. 発表標題 放電型核融合中性子源による模擬ブランケットへの中性子照射とトリチウム 生成率計測
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

燃料自己自給型の核融合中性子源を開発 https://bit.ly/3EcTZbW ペブル充填層壁の腐食と水素透過の抑制効果 http://www.atomic-energy.iae.kyoto-u.ac.jp/2021/12/20/hydrogen-corrosion-ceramicbreeder/ 放電型核融合中性子源を使ったブランケット中性子輸送試験 http://www.atomic-energy.iae.kyoto-u.ac.jp/?p=3921 3Dプリンタで製造された電極を用いた核融合中性子の発生 http://www.atomic-energy.iae.kyoto-u.ac.jp/?p=3903

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
エジプト	Assiut University			
英国	Bristol University			