

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760828

研究課題名（和文）円筒型核融合装置による分析用小型中性子光源の研究開発

研究課題名（英文）Development of compact neutron beam generator for analytical use by the cylindrical discharge fusion device

研究代表者

登尾 一幸（NOBORIO KAZUYUKI）

京都大学・エネルギー科学研究科・特定研究員

研究者番号：40456827

研究成果の概要（和文）：放電現象と核融合反応を応用した装置に反射材と減速材を組み合わせた分析用小型中性子光源の研究を行った。改良した 2 次元粒子コードによる解析が改良した実験装置による結果と同じ傾向を示すことを確認し、最適な電極配置を求めた。MCNP コードを用いたビーム形成部の解析では、複数の材料を組み合わせた複合反射材や中性子引出管を直線状から屈曲形状に変更することなどで、熱・熱外・高速、それぞれに重点をおいた中性子ビームを生成可能なことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A compact neutron beam generator utilizing electric discharge and nuclear fusion reaction, combined with reflectors and moderators, has been studied. Optimization of electrode arrangement were performed by using a simulation code and a discharge device. By the analysis using the MCNP code, combined reflector which consists of two layers of different materials, inserting a moderator, and bending the extraction channel are effective to generate thermal, epithermal, and fast neutron beams.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：中性子源，核融合，グロー放電，MCNP，粒子コード，慣性静電閉じ込め

## 1. 研究開始当初の背景

X 線や電子線が幅広く産業・医療・研究に用いられているのに対し、中性子線は分析用光源として大きな特徴と利点を持ちながらも広く利用されているとは言い難い。それは現状では中性子を使用できる施設が原子炉や加速器を利用した大型施設もしくは放射性同位元素を用いた（不要時にも中性子線を放出し続ける）線源に限られているからである。これらの欠点を克服し、中性子線利用の閾を下げる線源として、慣性静電閉じ込め核融合（IECF; Inertial Electrostatic Confinement Fusion）装置が研究されてきた

が、本来のコンセプトである、「電界により加速された重水素イオン同士の正面衝突による核融合反応」は限られた条件でしか支配的となり得ないこと、「加速されたイオンと残留ガス分子との衝突による反応」が支配的であるが、イオンの加速エネルギー損失が少なくなる低ガス圧ではターゲットとなる分子密度も小さくなるという本質的矛盾を抱えている、ということを見出した。そこで従来は重視されていなかった「加速されたイオンや中性粒子が電極表面に吸着・吸蔵されている重水素原子に衝突することによる核融合反応」を、電極にチタンコーティングを施

すことにより増加させる、放電型核融合中性子源を提案した。これにより従来の IECF 装置と類似した装置構成と動作でありながら、それを凌駕する中性子発生率を得ることに成功した。

ただし、現状では出力が実用レベルに達していないこともあり、研究の主眼が中性子の発生そのものに向けられており、実用面での検討はまだ始めたばかりであった。

## 2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では、単なる中性子発生装置ではなく、より実用に適した照射形状とエネルギー分布をもつビーム中性子を供給可能な装置の開発を目的とした。

ただし、現状では即実用可能な中性子源に繋がるというわけではない。しかし、具体的な実用化を考えた場合、用途により求められる輝度、フラックスあるいはフルエンス、エネルギースペクトル、ビームの収束等は様々であり、需要に応じて柔軟に設計可能なことを明らかにし、その手法を確立しておくことは、現段階でも有意義であると考えられる。

## 3. 研究の方法

中性子発生部とビーム形成部それぞれについて、実験と計算を組み合わせた研究を行ってきた。

中性子発生部（放電部）に関して、より高出力を得るために必要となる放電条件の改善（高電圧化）、それを実現するための装置（特に電極）形状の改良を行った。この装置の解析のため、それまで球形装置の解析に使用してきた 1 次元粒子シミュレーションコードを円筒座標 2 次元に拡張し、電位形状およびイオン起動計算を元に最適な配置を求め、さらに実験結果との比較を行った。

ビーム形成部に関しては、MCNP コードを使用したニュートロニクス計算により、種々の材料に対して反射材・減速材としての適正や最適な配置や形状等を、高速、熱外、熱中性子それぞれについて調べ、ビームの径や発散性、エネルギー分布といった「質」に対する評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 中性子発生部（放電部）の改良

従来装置では接地電極（陽極）を兼ねた金属真空容器内に絶縁体で支持した陰極を固定する構造（図 1）であったが、陰極の固定精度が悪く、また陽極以外の金属容器（特にエッジ部）への意図しない放電の発生のため高電圧での放電が安定して行えないという問題が生じていた。そこで図 2 に示すように陽極と陰極間に円筒形絶縁材（本研究ではテフロンを使用）を直接固定する方式に変更し、この問題の改善を試みた。

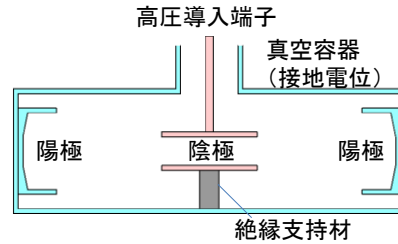


図 1：従来装置の構造

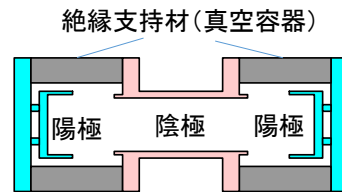


図 2：改良装置の構造

### ① 電極配置の効果

従来装置では安全上の理由から金属真空容器を接地電位とせざるを得なかったが、改良装置では陰極・陽極どちらを接地電位とすることもできる。そこで、まず接地電極が放電に与える影響を明らかにした。なお、1 次元コードでは原子分子衝突過程を組み込み、放電の直接シミュレーションを実施していた。今回新たに開発した 2 次元コードでは、計算時間等の問題から電極により形成される電位によるイオンの運動のみを取り扱い、ある位置に初速ゼロでおいたイオンが電極や絶縁体に衝突するまでの飛行距離で放電の良否を判断した。すなわち、イオンの飛程が長い方がよりバックグランドガスを電離させる機会が増えるため、より低いガス圧でも放電が維持できると考えた。また、実際の放電では特定の領域だけが放電路として働いていると思われるため、各条件において平均飛程ではなく最大の飛程で評価した。

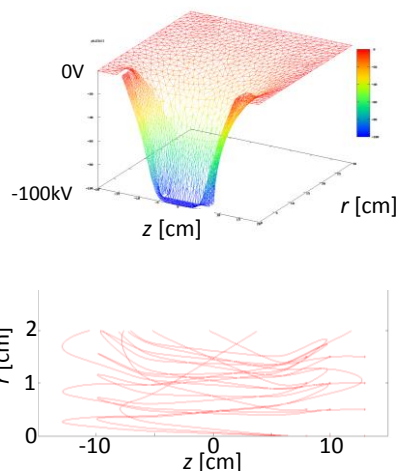


図 3：陽極接地とした場合の電位分布およびイオン軌道の計算結果

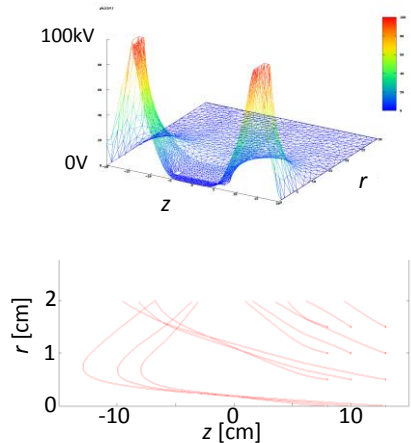
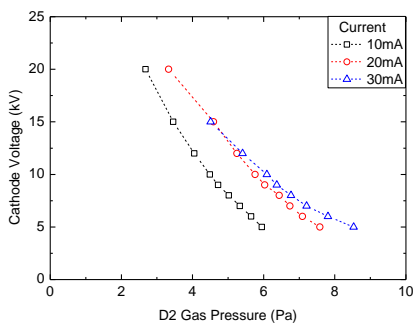


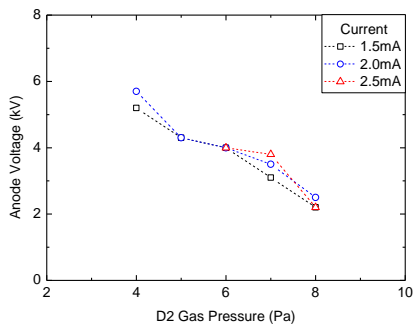
図 4：陰極接地とした場合の電位分布およびイオン軌道の計算結果

陽極接地とした場合の電位形状とイオン軌道を図 3 に、陰極接地とした場合を図 4 に示す。図から明らかのように、陰極・陽極間の相対電位が同じでも、接地電極により電位形状に大きな違いが生じることがわかる。陰極接地とした場合は半径方向にイオン軌道が発散してしまうのに対し、陽極接地とした場合にはイオンは円筒軸上に収束し、軌道長が長くなることから、陽極接地の方がより低ガス圧でも放電が可能であると予想できる。

次に、陽極接地とした場合および陰極接地とした場合の放電特性（ガス圧に対する放電電圧）を図 5 に示す。実験結果においても、陽極接地の方がより低いガス圧・高電圧・大



(a) 陽極接地



(b) 陰極接地

図 5：陽極接地(a)および陰極接地(b)の場合それぞれの円筒装置による放電特性

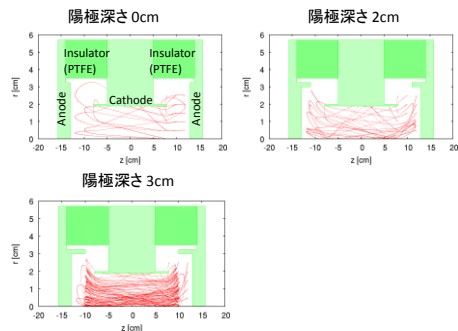


図 6：陽極深さによるイオン軌道の変化

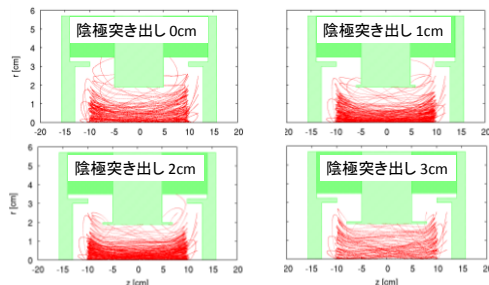


図 7：陰極突き出し長によるイオン軌道の変化

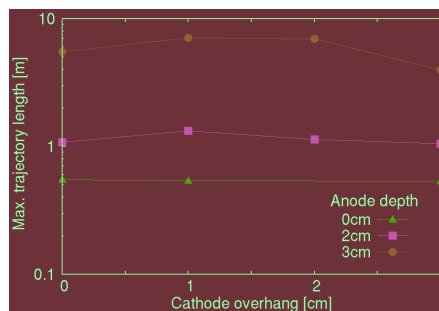


図 8：陽極深さ、陰極突き出し長に対する最大イオン軌道長さ

電流で放電が可能であることが示された。したがって、これ以降の評価はすべて陽極接地とした。

## ②電極形状の効果

次に、同様の手法を用いて電極の形状の最適化を行った。電極フランジ間距離（＝絶縁体厚み）は固定とし、陽極の深さおよび陰極のフランジからの突き出し長さを可変パラメータとした。陽極深さを 0, 2, 3cm とした場合のイオン軌道計算結果を図 6 に示す。これより、陽極深さが大きくなるにつれイオン軌道が中心軸上に収束することがわかる。また、陽極深さが 3cm の場合の陰極突き出し長さが 0, 1, 2, 3cm の場合についても同様に軌道を図 7 に示す。これより、陰極突き出し長が 1, 2cm の場合にイオン密度が大きくみえるが、3cm まで伸ばすと低くなってしまい、陰極突き出し長は長ければ良いというわけではなく、最適値が存在することがわかる。陽極深さ・陰極突き出し長に対する最大イオン軌道

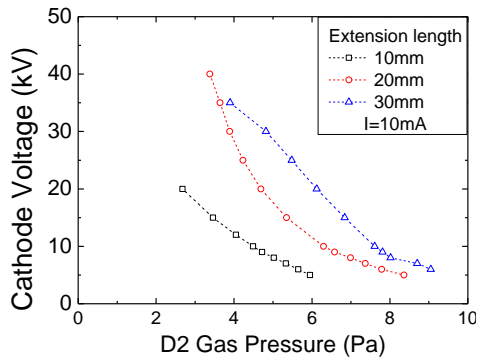


図 9：陰極突き出し長の変化による放電特性の違い

長を図 8 にまとめて示すとおり、陰極突出し高さ 1cm, 2cm, (0cm), 3cm の順に軌道が長いことがわかる。また、陽極深さ 3cm、陰極突き出し長を 1, 2, 3cm とした場合の実験による放電特性（ガス圧に対する放電電圧）を図 9 に示す。これより、陰極突出し長さ 1, 2, 3cm の順に低いガス圧で放電が可能であり、計算結果の傾向と一致することがわかる。

(2) ビーム形成部の検討

本課題を開始する以前より、すでに反射材の効果について調査を行ってきた。各種材料の特徴を表 1 に示す。

① 複合反射材の検討

表 1：中性子ビーム化に関する各種材料の特徴

材料	特徴
PE(ポリエチレン)	水素、炭素原子による減速・反射効果。
D <sub>2</sub> O(重水)	減速と反射。軽水と比較して少ない吸収。
Fe	反射。ただし共鳴領域が広い
W	反射。共鳴吸収が少ない
V	高エネルギーでよく反射

表 1 に示した特徴をもつ各種材料は、それ単独でも反射や減速効果を有するが、それぞれにエネルギーに対して特徴的な挙動を示す。そのため、複数の材料を組み合わせ、あるエネルギー領域に特化した分布をもつビームの引き出しを検討した。表 2 に、検討し

表 2：複合反射材として用いた材料と目的とする中性子ビーム

反射材材料		目的とするビーム
外側	内側	
W	V	少ない共鳴吸収と反射による高速中性子ビーム
W	Fe	高輝度の高速中性子ビーム
PE	Fe	特定のエネルギーを持つビーム
PE	D <sub>2</sub> O	高輝度の熱中性子ビーム

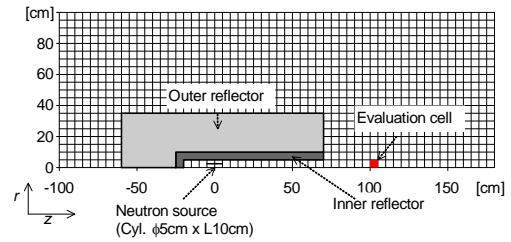


図 10：複合反射材の計算に用いた円筒座標上のモデル

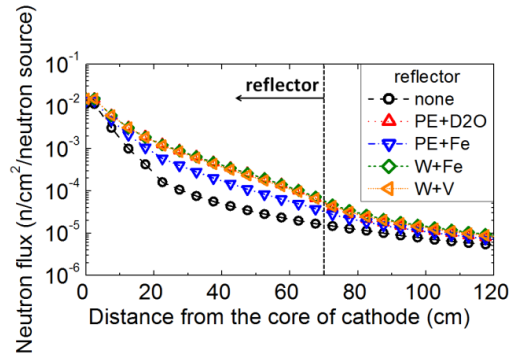


図 11：各複合反射材を用いた場合の中心軸上の中性子束分布

た組み合わせと期待した効果を示す。また、図 10 に検討に用いた複合反射材の形状モデルを示す。

表 2 に示す材料を図 10 に示す形状として入力し、解析した結果を以下に示す。まず中心軸上に沿った中性子の分布を各複合反射材についてプロットしたものを図 11 に示す。図 11 には比較のため、反射材がない場合の分布も同時に示す。これらを比較すると、反射材がない場合には中心からの距離の 2 乗に反比例して中性子束が減衰していくのに対し、反射材の導入によりいずれも強くなっていることがわかる。W(外側)と Fe(内側)の組み合わせにて最も高強度(反射材出口位置で反射材がない場合の約 3.2 倍)の中性子束が得られた。

次にビームの収束性を評価した。図 12 に、中心軸に対する角度上での中性子束(中心軸上の値により規格化)を示す。中心軸上の値の半分になる角度(半値角)は、反射材の種類によらず 18° であり、材料による差異はみら

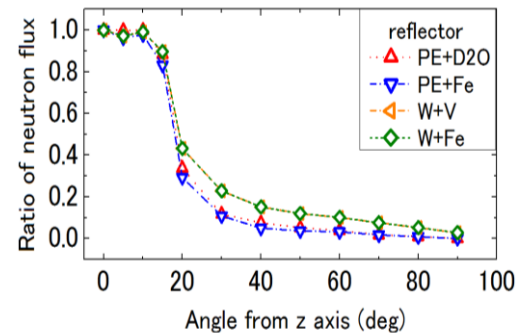


図 12：中性子束の角度分布

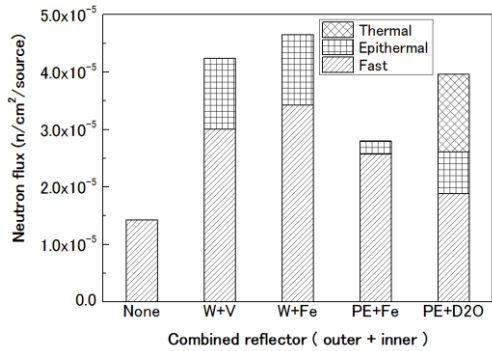


図 13: 各複合反射材により得られるビーム中の中性子エネルギー構成

れなかった。

形状だけでなく、エネルギー分布もまたビームを特徴づける重要な要素である。中性子ビームに含まれる中性子のエネルギーを、熱(0.1eV以下)、熱外(0.1eVから1MeV)、高速(1MeV以上)と分類し、各反射材を用いた場合のビーム中のエネルギー割合を示したのが図 13 である。図より PE と Fe の組み合わせにより、90%以上が高速中性子であるビームを得ることができ、また、PE と D<sub>2</sub>O の組み合わせにより、熱化された中性子が 30%を占めるビームを得られることがわかる。

### ②複合反射材と減速材の組み合わせ

PE と D<sub>2</sub>O の複合反射材により熱中性子の割合の多いビームを得られるが、より高エネルギーをもつ中性子も含まれている。そこで、減速材を反射材の中に挿入し、その厚みを変化させた場合のエネルギー構成を図 14 に示す。同図からわかるように、減速材の厚みを増していくと高速、熱外中性子の数が減少していく一方、熱中性子はそれほど減少しないため、結果として熱中性子がほとんど(厚みが 30cm, 40cm の場合に 90%以上)を占めるようになり、熱中性子ビームの引き出しに有効なことがわかる。

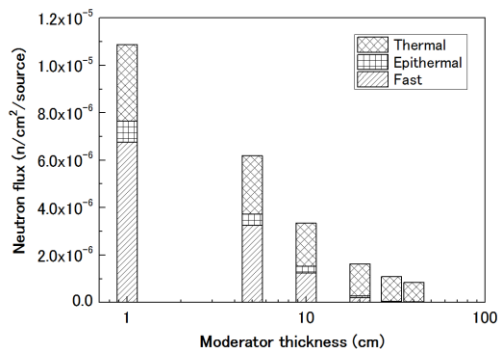


図 14: 複合反射材に減速材を入れた場合の中性子エネルギー構成

### ③屈曲形状引き出し管

軽い元素と衝突して反射された中性子はそのエネルギーのほとんどを失い、熱化され

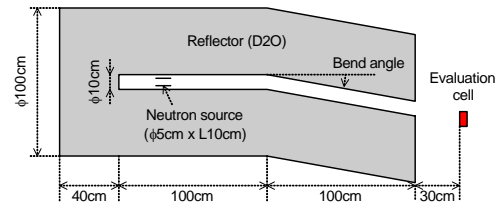


図 15: 屈曲引出管のモデル断面図

る。そのため、これらの元素を含む反射材を用いれば、減速材を用いずとも引き出された中性子ビームは図 13 に示したように熱領域を多く含むようになる。逆にその場合に含まれる高エネルギー成分は反射せずに直接線源部から出口に到達した中性子である。そこで、引き出し管を曲げ、出口から線源が直接見込めないようにすれば、これら高速中性子のみを効率的に除去できると考え、図 15 に示すモデルについて計算を行った。屈曲角度を変えて得られたエネルギー構成を図 16 に示す。角度が 20° の場合には熱中性子割合が 80%以上のビームが得られ、また 10° の場合には熱外中性子が約 40%を占めるビームを得ることができる。

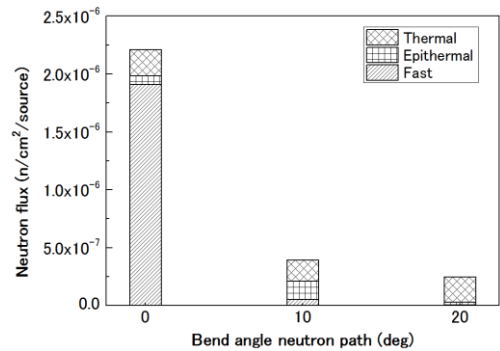


図 16: 屈曲引出管における屈曲角度に対する中性子エネルギー構成

### (3)実験とあわせたエネルギー分布の評価

ビーム形状とともにエネルギー分布も重要であることは既に述べたが、これを実験的に直接計測して検証することは難しい。そこで、中性子線に対して異なる挙動を示す材料(フィルター)で検出管(熱領域に感度を有する <sup>3</sup>He 比例計数管を使用した)を囲った場合について、MCNP を用いた計算から予測されるカウント数と実際に計測されたカウント値を比較した。フィルター材として直径 36cm および 21cm のポリエチレンブロック、厚み 1mm のカドミウムシート、そして比例計数管のみの場合について計算と実験を行った。なお、計数値は計数管の感度に依存するため、計数管を 2 本用意し、一方を裸のまま特定の場所に固定し、これに対する相対値を求めた。図 17 に、実験と計算結果を併せて示すが、両者がよい一致をみていることがわかる。このことから、円筒放電型核融合装置より発生

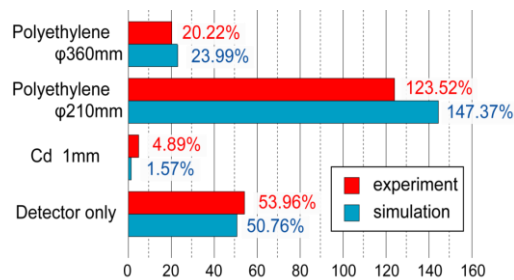


図 17:  $^3\text{He}$  比例計数管をフィルターで囲った場合のカウント数の実験値と計算結果の比較

した中性子ビームのエネルギー分布は、MCNP コードを用いた計算により正しく評価できているといえる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) N. Matsui, K. Noborio, T. Maegawa, Y. Yamamoto, and S. Konishi, “Neutronics Analysis on the Beam Optics from Cylindrical Discharge Type Fusion Device”, Fusion Science and Technology, 2013, 5pages
- (2) K. Noborio, S. Konishi, T. Maegawa, Y. Yamamoto, “Numerical Calculation of Reactions on Electrode Surfaces and in a Volume of a Discharge Type Fusion Neutron Source”, Proc. 2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering, 2011
- (3) T. Maegawa, K. Noborio, S. Konishi, Y. Yamamoto, “Generation of Neutron Beam with the Cylindrical Discharge Type Fusion Device”, Proc. 2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering, 2011

[学会発表] (計 7 件)

- (1) 登尾一幸, 松井直也, 小西哲之, 山本靖, 「2 次元粒子コードによる円筒放電型核融合中性子源の電極構成の解析」, 日本原子力学会 2012 年秋の大会, 2012 年 9 月 19-21 日, 広島大学東広島キャンパス
- (2) N. Matsui, K. Noborio, T. Maegawa, Y. Yamamoto, and S. Konishi, “Neutronics Analysis on the Beam Optics from Cylindrical Discharge Type Fusion Device”, ANS 20th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy,

August 27-31, 2012, Nashville, TN, USA.

- (3) 登尾一幸, 松井直也, 笠田竜太, 山本靖, 小西哲之, 「円筒放電型核融合中性子源の電極形状・配置の最適化」, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 28-29 日, 神戸国際会議場
- (4) 松井直也, 前川隆洋, 登尾一幸, 笠田竜太, 山本靖, 小西哲之, 「円筒放電管型核融合中性子源を用いた中性子ビームのニュートロニクス計算」, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 28-29 日, 神戸国際会議場
- (5) 前川隆洋, 登尾一幸, 松井直也, 小西哲之, 「放電管核融合装置による中性子ビームの光学とエネルギースペクトルにおける複合反射材の影響」, 日本原子力学会 2012 年春の年会, 2012 年 3 月 19-21 日, 福井大学文京キャンパス
- (6) K. Noborio, S. Konishi, T. Maegawa, Y. Yamamoto, “Numerical Calculation of Reactions on Electrode Surfaces and in a Volume of a Discharge Type Fusion Neutron Source”, 2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering, June 26-30, 2011, Chicago, Illinois, USA.
- (7) T. Maegawa, K. Noborio, S. Konishi, Y. Yamamoto, “Generation of Neutron Beam with the Cylindrical Discharge Type Fusion Device”, 2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering, June 26-30, 2011, Chicago, Illinois, USA.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

登尾 一幸 (NOBORIO KAZUYUKI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・特定研究員 (グローバル COE)

研究者番号: 40456827