研究成果展開事業

研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)

「産業ニーズ対応タイプ」

技術テーマ:

「コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築」

完了報告書

研究課題名:「慣性静電閉じ込め式可搬型コンパクト熱中性子源の開発」

平成30年5月31日 プロジェクトリーダー 機関名:国立大学法人東京工業大学 氏 名:長谷川 純

I.研究計画の概要

1. 研究の目標

加速器駆動型,レーザ駆動型中性子源と比較して、コンパクトで操作が容易な静電加速型 核融合中性子源(慣性静電閉じ込め式(IEC)中性子源)を用いて可搬型コンパクト熱中性子 源を開発する。本開発は企業や大学等が所有しやすく、フィールド運用も可能なコンパクトで 操作が容易、かつ安価な中性子源技術の構築に資するものである。本研究で開発する可搬 型コンパクト熱中性子源は、図1に示すようにIEC中性子源と反射材、モデレータとをパッケー ジ化したもので、60 cm角相当サイズでコンパクトなことに大きな特徴がある。主な開発課題は ①IEC中性子源の小型・高出力化、②2.45 MeV核融合中性子を熱化するためのモデレータ 及び反射材の最適化、③フィールド運用可能な放電及びシステムの高い安定性の実現であ る。本提案では開発課題①、②についての研究開発を進め、③については、その後の産学 連携フェーズ(ステージII)で開発を進める。以下に開発する可搬型コンパクト熱中性子源の 目標仕様を示す。

- ・可搬型コンパクト熱中性子源サイズ:60 cm角相当
- ・可搬型コンパクト熱中性子源重量:100 kg以下
- ・照射位置での中性子フラックス:10⁵ n/s/cm²
- ·装置寿命:10,000時間以上
- ・運用:DC運転,およびパルス運転(10 Hz以上)も可能
- ・操作性:アラインメント,チューニング不要で,数時間で操作を習熟可能

産業分野を中心に中性子を利用した測定,検査技術へのニーズが高まっているが,国内の 中性子源は研究用原子炉や大型加速器などのため,X線検査装置並みに容易に取り扱える 中性子源がなく、中性子の利用機会は制限されてしまっている。このため申請者らは、本研究 開発を経て最終的に上記の仕様を満たす可搬型コンパクト熱中性子源を開発し、他の研究 開発課題で開発されたイメージング技術等と組み合わせることで、2020年までの中性子検 査・測定システムの商品化を産学共同で目指す。



図1 本研究で開発する可搬型コンパクト熱中性子源

研究実施予定表 非公開

2. 研究費 非公開

Ⅱ.研究成果の創出状況

- 3. マイルストーンの達成状況
 - (1) 円筒型 IEC 中性子源で 10⁹ n/s の中性子発生が達成可能であることを, 数値解析を行い確認する。(平成 27 年度末)

〇達成状況

慣性静電閉じ込め(IEC)中性子源における中性子発生率は放電電流に比例する。 また,重水素同士(DD)の核融合断面積は衝突する粒子の運動エネルギー(放電電圧) に強く依存する。これらの事実から、当研究グループの過去の実験データを根拠とする 簡単なスケーリングにより、本事業で予定する動作条件(放電電圧 150 kV,放電電流 100 mA)において、10⁹ n/s の中性子発生率が十分達成できる見込みであることを示した (図2)。

より詳細な検討のため, 試作を予定している IEC 中性子源と同じ電極配置のもとで十 分な核融合反応率を達成できるかを, IEC プラズマ中の荷電粒子(電子 e, 重水素イオ $> D^+, D_2^+$), 中性粒子(D, D₂)の素過程及び核融合反応をモデリングした粒子解析コ ードを用いて評価した。図3に示す数値解析の結果より, 10⁹ n/s の中性子発生率が達成 可能であることを確認した。



図2 中性子発生率のスケーリング



図3 数值解析結果(左:粒子軌道分布,右:中性子発生分布)

(2) 試作した小型中性子源で、150 kV、50 mA の電源を用いて中性子生成量を試験評価し、
 10⁷ n/s の中性子発生を確認する。(平成 28 年度末)

〇達成状況

本事業で試作した小型 IEC 中性子源を図4に示す。試作装置の設計・製作, 特に絶縁 碍管の選定・調達に当初の見込みより時間がかかり, 装置の完成は平成 29 年 5 月にず れ込んだ。そこで, 試作装置が完成するまでの間, 既存の同軸円筒型 IEC 中性子源を 用いて, 本事業で新規に導入した高電圧電源や冷却装置(チラー)の試運転を兼ねて, 中性子発生試験を行った。また, PO のアドバイスに基づき, 長時間安定動作の実証や 中性子イメージングの実施例を取得した。既存の IEC 中性子源を用いた実験では 70 kV, 30 mA の動作条件の下で 5×10⁶ n/s から 10⁷ n/s に迫る中性子発生率(NPR)を長時間 安定に持続できることを確認した(図5)。



図4 試作した小型 IEC 中性子源(左:碍管部,右:全体)



図5 既存の同軸円筒型 IEC 装置による中性子発生試験

一方,新規に開発した IEC 中性子源は,平成 29 年 5 月より試運転を開始した。当 初,真空容器壁面からのアウトガスの影響により,動作ガス(重水素)の純度が下がり,十 分な中性子発生率を得られなかったが,電気的絶縁のため装置の一部に使用していた 樹脂製フランジに原因があることが判明し,これを熱耐性に優れるセラミックスに置き換え ることでアウトガスの問題を解決することができた。セラミック碍管を用いた本試作機にお いて,96.5 kV,10 mA の動作条件のもとで 1.08×10⁶ n/s の中性子発生率が得られた。し かし,放電を継続したところ,リークによると思われる真空の急激な悪化が発生した。これ は,熱歪みによって発生したセラミックフランジのクラックが原因と考えられた。そこで,セ ラミックフランジの代わりに金属(SUS)フランジを使用して,同様の試験を行った結果,図 6の紫色で示すようにセラミックフランジを使った場合(緑色)と同等の結果が得られた。 放電コンディショニングを継続して行うことにより,日々中性子発生率が増大し,平成 29 年 12 月には,放電電圧 97.8 kV,放電電流 10 mA のときに,最大の NPR として 1.47×10⁶ n/s を確認した(図7の白丸)。



図6 SUS フランジを用いた放電試験結果



図7 新規開発の直線型 IEC 装置による中性子発生試験

さらに性能評価試験の一環として長時間連続運転試験を行った。装置内の重水素ガスの圧力制御に図8に示すようなスロットルバルブを用いたダウンストリーム制御を導入することで、直線型円筒形装置において約40時間にわたり10⁶ n/s以上のNPRで中性子を安定して発生できることを実証した。既存装置では長時間運転時に真空容器壁面が高温になり、中性子発生率が徐々に低下する問題があった。本事業で開発した直線型 IEC 装置は十分な冷却機構を備えていることから、壁面温度を一定に保つことが容易であり、長時間運転に対するロバスト性は従来のIEC 装置に比べ大幅に向上した。



図8 スロットルバルブによる装置内ガス圧の制御と長時間連続運転試験

新規開発装置において,放電電流を増加させて中性子発生試験を行ったところ,放 電電流が 30 mA 以上(投入電力が 3 kW 以上)になると中性子発生率が頭打ちになるこ とが分かった(図10)。大電力投入試験の後,放電管の電極を詳しく観察すると, 陽極表 面の激しい損耗や,その周囲への金属膜の付着が見られた。このことは,直線型円筒形 装置の大電力運転時において,陽極表面への高エネルギー粒子の衝突がスパッタリン グや蒸発を介して電極からの金属原子の放出をもたらしていることを強く示唆している。 放出された金属原子は不純物として燃料ガス(重水素)を汚染し,放電管内で生じるグロ 一放電を不安定にすると同時に核融合反応を大きく阻害する。これが中性子発生率を 抑制する主要因であることが分かった。この課題を解決するには,①直線型円筒形装置 の電極(特に陽極)の冷却効率を大幅に改善するとともに,電極表面に高融点で高スパ ッタリング耐性の材料を使用する必要がある。さらに,②陽極から発生した不純物ガス (主に金属原子)が核融合反応の生じる陰極付近に流入することを防ぐことが重要である。



図10 中性子発生率の放電電流依存性

(3) 10⁵ n/s/cm² の中性子フラックスを達成可能であることを, モンテカルロシミュレーション を用いて確認する。(平成 29 年度 5 月)

〇達成状況

モンテカルロコード(PHITS)を用いた反射体,モデレータ,遮蔽体の数値シミュレーションを実施し,IEC 中性子源中央部において 10⁹ n/s の中性子発生率を仮定したときに,20 cm 離れた中性子取り出し口において 10⁵ n/s/cm²の中性子フラックスが得られることを確認した(図11,12)。



(4) 試作した小型中性子源で、150 kV、100 mAの電源を用いて中性子生成量を試験評価し、
 10⁹ n/s 以上の中性子発生を確認する。(平成 29 年度 10 月)

〇達成状況

本事業で開発した新規装置を用いた中性子生成試験において,97.8 kV,10 mA の動 作条件のもと最大で 1.47×10⁶ n/s の中性子発生率が得られた。当初の目標値にはまだ 到達していないが,上で述べたように,陽極部からのアウトガス(主に金属蒸気)の発生 が核融合反応(中性子発生)を阻害し,放電を不安定にする原因であることが明らかにな った。陽極部を強制的に冷却する機構を導入することによりアウトガスの発生を抑制する ことで,この問題を解決できる見通しである。

本事業で得られた結果をもとに電圧及び電流に対する中性子発生率のスケーリング則 を用いると、本事業で開発した小型 IEC 中性子源に 150 kV, 100 mA の電力を投入した 場合に 10⁸ n/s を超える中性子発生率を達成できる見通しが得られた(図13)。



図13 現状実績から予測される中性子発生率

4. 研究計画全体の進捗状況

技術テーマ開発への寄与

研究の目標として掲げた技術テーマは、①IEC 中性子源の小型・高出力化、②2.45 MeV 核融合 中性子を熱化するためのモデレータ及び反射材の最適化、③フィールド運用可能な放電及びシス テムの高い安定性の実現であった。以下、各技術テーマについて進捗状況・成果・課題をまとめる。

① IEC 中性子源の小型・高出力化

本事業で開発した IEC 中性子源では直線型の電極配置を採用し、小型化と高出力化の両立を 目指した(図14)。この電極配置においては高電圧を印加する陰極が真空容器の外に露出してお り、陰極を直接冷却することが可能である。また、高電圧導体を支えるために複雑な形状のフィード スルーが必要なく、真空または絶縁性冷媒中における絶縁沿面距離を確保することで十分な絶縁 耐力を付与できる。電場の集中が少ない単純な電極構成であるため、高電圧化と小型化を両立で きるのがこの IEC 中性子源の利点である。

実際に試作した小型 IEC 中性子源の本体の大きさは ø200 mm×500 mm 程度であり, 非常にコンパクトである。実際は周囲を反射材やモデレータで囲うためこれより大きくなるが, 絶縁耐力に余裕があるため中性子源本体のさらなる小型化により, 装置全体として本事業の目標である 60 cm 角相当のサイズを達成することも十分に可能である。



図14 直線型 IEC 中性子源の電極配置(上:外観図,下:断面図)

本事業においては,最大で2kW(100kV,20mA)程度の投入電力のもとで中性子発生試験を 行った。フッ素系不活性液体(フロリナート™)を用いた冷却装置により,試験運転中は直線型IEC 中性子源本体の表面温度を35℃程度に一定に保つことに成功した。冷却装置の能力は20.3kW と十分高く,将来予定している高投入電力(15kW)運転時においても中性子源本体の問題はない。 この結果より,従来のIEC 中性子源において小型化および高出力化を制限していた高電圧絶縁 および熱除去の問題を,直線型電極配置および直接冷却機構の導入により解決できることを示し た。

一方,中性子源の高出力化については,陽極部からのアウトガスの問題があり,現状では投入電力に制約(最大で2kW程度)がある。投入電力のほとんどは陽極の加熱に使われるため,陽極表面からの効率的な熱除去が課題である。今後,陽極内部に冷媒の循環流路を設けるなどの改良を行うことで,最大15kWの熱入力に対応する予定である。

本事業においては当初, 陽極部にイオン生成機構の導入することを予定していた。イオン生成機構の設計や必要部品(磁石等)の調達はすでに完了しているが, 運転中に陽極が磁石のキュリー 点を超えるほどの高温になることが分かったため, 試験を保留している。今後, 陽極の冷却効率を 改善した後に試験を実施する予定である。

②2.45 MeV 核融合中性子を熱化するためのモデレータ及び反射材の最適化

IEC 中性子源において装置中央部で発生する 2.45 MeV の DD 核融合中性子を効率的に減速 し,熱中性子として取り出すための反射材およびモデレータの設計をモンテカルロコード(PHITS) により行った。反射体の材質および厚さをパラメータとして,実際の装置構成を模擬した図15のよう な体系で解析を行った。反射体として厚さ 15 cm のポリエチレンと厚さ 2 cm の鉛を組み合わせた 場合の典型的な計算結果(熱中性子フラックス分布)を図16に示す。図より中性子源での中性子 発生率が 10⁹ n/s のとき,側面に設けた2つの取り出しポート内に配置したモデレータ直後での熱中 性子フラックスとして約 10⁵ n/s/cm² を確保できることが分かった。実際の運用において,中性子の 取り出しポート以外の領域での遮蔽が重要となってくる。このためボロンやリチウム等の中性子吸 収能が高い物質を含んだ中性子遮蔽材及び, n-γ反応で放射されるγ線遮蔽体とを組み合わせた 遮蔽設計が必要になる。今後,試験装置の試験状況に合わせて詳細な遮蔽設計を行い,遮蔽性 能を検証する予定である。



③フィールド運用可能な放電及びシステムの高い安定性の実現

IEC 中性子源を実際にフィールドに持ち出す際には、システム全体としての動作安定性と信頼性が重要となる。この技術テーマについては、課題申請時は次のステップ(本事業終了後の次のプロジェクト)において検討することを想定していた。しかし、IEC 中性子源の具体的な適用例を提示することと、長時間にわたり安定動作が可能であることを示すことを PO から求められたため、急遽、本事業の枠組み内でこれらの検討を行った。

IEC 中性子源の適用例として、本事業では中性子イメージングを選択した。既存の IEC 中性子 源を用いて 10⁶ n/s-10⁷ n/s の中性子発生率のもとで中性子イメージング試験を行った。γ線やX線 などのバックグラウンドの影響を排除するために間接法を採用した。ジスプロシウム薄膜の前面に 被写体 (B₄Cパウダーを充填したステンレス製ブレード)に IEC 中性子源からの熱中性子 (10 cm 厚 のポリエチレンブロックで減速)を照射し、その後、ジスプロシウム薄膜の放射化分布をイメージング プレートに転写した。その結果を図17に示す。ブレードのパターンおよび B₄Cパウダーが欠損して いる様子 (イメージ中の白色部)を撮像することに成功した。



図17 イメージング試験の結果(左:2×10⁶ n/s, 3 hr 照射, 右:5×10⁶ n/s, 6 hr 照射)

一方,中性子イメージング等への応用では IEC 中性子源を長時間にわたり安定に動作させ,中 性子発生率を一定に保つことが求められる。IEC 中性子源では重水素イオンの生成と加速に希薄 気体中でのグロー放電を利用している。グロー放電電圧(加速電圧)は重水素ガスの密度(一定温 度下では圧力)に強く依存するため,圧力変動が中性子発生率の安定性を損なう一因であった。 そこで本事業では,この技術テーマを解決するためにダウンストリーム圧力制御機構を導入した。 真空排気系統に設置したスロットルバルブの開度を,測定圧力をもとにフィードバック制御すること で,中性子発生率の変動を数%以内に抑えることに成功した(図8)。これにより中性子イメージン グ試験においても長時間安定運転が可能になり,中性子透過像のコントラストの改善に成功した (図17右)。

中性子発生率の安定度をさらに上げるには、放電電圧や中性子発生率などの参照値をもとにした高度なフィードバック制御機構を導入する必要があり、今後に残された技術的課題である。また、将来の商品化において他の方式のコンパクト中性子源(DD 管など)との差別化をするには、IEC 中性子源の長時間安定性だけでなく長寿命性を示すことも重要である。IEC 中性子源では「燃料」となる重水素ガスは常に外部から供給されており、また装置寿命を制限する要素が非常に少ないことから、DD 管などに比べて長期間にわたるメンテナンスフリーでの運用が可能であり、ランニングコストの面で非常に有利であると考えられる。

産業力強化に資する基礎的な研究としての新たな知見の創出

高出力化(中性子発生率の増大)の観点から、同じ入力電力において、電圧あるいは電流のい ずれを増大させた方が良いか検討した。中性子発生率は電流に比例するものとし、核融合断面積 σ(barn)については M. Ragheb が求めた下式を用いた。

 $\sigma(E) = \frac{482.0}{E[\exp(47.88E^{-1/2}) - 1][(1.177 - 3.08 \times 10^{-4}E)^2 + 1]}$

ここでEは重水素原子の速度(keV)である。規格化された核融合断面積の傾き $\frac{E}{\sigma}$ 、 $\frac{\Delta\sigma}{\Delta E}$ が1より小さく

なった場合は電流を増大させた方が有利となる。計算の結果,規格化された核融合断面積の傾きが1となるのは,重水素エネルギーが157 keV のときである(図18)。したがって,重水素エネルギーが放電電圧で加速され,その最大エネルギーで核融合を起こすとすれば,放電電圧は157 kVまでとするのが良い。本研究開発において,最大電圧を150 kVとしているのは妥当である。



図18 核融合断面積の重水素粒子エネルギー依存性

次節の「5.研究実施状況」でも述べるが、サーモグラフィーによる電極温度の測定から、陰極温 度が陽極温度に比べて非常に低いことがわかった。これは、高速イオンが円筒陰極の中心部を通 過し、陰極にはほとんど衝突しないためであると考えられる。この知見は、装置設計において、イオ ン軌道の解析が重要であること、また適正に設計された電極構造では陰極の冷却は重点項目に ならないことを示している。一方、接地陽極側は高エネルギー電子の衝突に起因して高温になるこ とが示唆され、陽極の冷却機構が重要であることがわかった。

本事業で採用した直線型 IEC 装置は電極の幾何学的形状・配置が従来の IEC 装置と大きく異なる。上で述べたように、実用化を見据えた小型化・高出力化の観点から本方式を採用した訳であるが、直線型 IEC 装置を用いた中性子発生試験の実績はこれまで非常に限られていた。本事業を通じて、直線型 IEC 装置においても従来と遜色のない中性子発生率が達成可能であるという新たな知見が得られたことは、産業界における IEC 中性子源の競争力強化という観点から非常に大きな成果と言える。つまり、IEC 中性子源は電極形状・配置を含め装置設計の自由度が非常に高く、適用例に応じて最適な形状、サイズの中性子源を設計することが可能であることを本事業において改めて実証できた。

5. 研究実施状況

本事業は、東京工業大学において学生を含む小規模の研究チームで実施した。具体的には PL の他に教授クラスの研究開発担当者2名、博士課程学生2名(うち1名は社会人)、修士課程学生1 名、技術支援員1名の合計7名が参画した。小規模である分、小回りがきくことは本事業を遂行す る上で非常に大きな利点であった。日々の連絡は本プロジェクト専用のメーリングリストで行い、2 週間に1度のミーティングにおいて、プロジェクト遂行上の様々な意思決定、役割分担を効率よく実 施した。本事業を当初進めるにあたり学生の役割分担をどうすべきかが1つの課題であった。つま り、博士論文、修士論文のための研究と、実用化に向けた装置開発をどう両立させれば効率的に プロジェクトを遂行できるかを考えた。PL の判断により、学生2名には基礎研究を重点的に行って もらい、その成果を試作装置の開発研究に生かすこととした(基礎研究チーム)。一方、実用化を 目指した試作装置の開発はこれまで IEC 中性子源に長年にわたり携わってきた研究員と社会人 博士課程の学生1名を中心に取り組んでもらうこととした(試作装置開発チーム)。結果的にこの実 施体制はうまく機能し、チーム間の連携もスムーズであった。プラズマ診断に関する基礎研究と、 試作装置の開発およびそれを用いた応用研究を同時並行で実施することで2年弱の短期間にお いて多くの成果を上げることができた。

1)基礎研究チームの成果

試作装置と全く同じサイズ,形状で,絶縁碍管にパイレックスガラス管を用いた装置を製作し,大 気圧中に設置した。この方式では絶縁冷却媒質中に設置されないため,最大印加電圧や電流に 制限を受けるが,ガラス管を通して放電形態(図19)を観測できること,電極部を直接観察できるこ となどの利点がある。荷電交換で生じる高速中性粒子から放出される線スペクトルのドップラー変 位より,印加電圧と荷電粒子速度分布の関係を求めた。その結果,粒子速度の最大値はほぼ印 加電圧に対応しているが,速度分布は低速度領域にまで広がっているため,イオン生成を接地陽 極近傍で行うことの重要性が示唆された(図20)。さらに、サーモグラフィーによる電極部の温度計 測により,陽極温度がかなり高いことが見出され,陽極部を重点的に冷却する必要性が改めて確 認された。



図19 ガラス管装置における放電の様子



図20 Ha線のドップラーシフトから求めた粒子速度分布

2)試作装置開発チームの成果

試作装置開発チームでは、実用化を念頭にガラス碍管ではなく耐熱性・耐久性に優れるセラミックス碍管を採用した試作装置の開発を行った。この装置は電気絶縁性に優れるフッ素系不活性液体を用いた冷却機構を伴っており、最大 15 kW の発熱を十分に除去できる設計とした。上で述べたとおり、新規 IEC 装置の製作中の時間を有効利用して、既存の IEC 装置を用いた中性子利用研究も試作装置開発チームが中心となって進めた。具体的には、同軸円筒型 IEC 中性子源を用いた間接法による中性子イメージングの実施例を初めて示すことができた。(成果の具体的な中身については、「3. マイルストーンの達成状況」「4. 研究計画全体の進捗状況」においてすでに述べたのでここでは省略する。)

産学の対話の活用状況

産学共創の場においてビームーバックグラウンド核融合だけではなく,放電電流の二乗に比 例して中性子発生率が増大するビームービーム核融合についても検討するよう指摘があった。 そこで,ビームービーム核融合について考察した。

重水素イオンビームの速度(相対速度)を v_B ,ビーム粒子数密度を n_B ,核融合反応断面積 を $\sigma(v_B)$,被衝突粒子数密度(バックグラウンド中性粒子数密度)をnとして、ビームーバックグ ラウンド核融合反応率 R_N は $R_N = \sigma v_B n_B n$ と表される。ところで、0°Cでの換算気圧を p_0 [Torr] とすると、中性粒子数密度 n_0 は $n_0 = 3.54 \times 10^{22} p_0 [m^{-3}]$ で与えられる。一方、放電電流をI, 放電路の断面積をAとしたとき、eを素電荷として、電流密度jは $j = \frac{l}{A} = e n_B v_B$ で与えられる。 さらに、ビームービーム核融合では、粒子間の相対速度が大きいので、100 keV 程度の領域 ではビームービーム核融合の反応断面積の方が大きくなるが、この影響については無視する (オーダーが異なるほどの差はない)。

以上の仮定の下では、ビームーバックグラウンドとビームービームの核融合反応率は、粒子 数密度に比例することになる。したがって、加速電圧 V、粒子質量Mを用いると

$$\frac{ \breve{U} - \bot - \nvdash y / y / J = f = f = R_N}{ \breve{U} - \bot - \dddot{U} - \bot k = k = k} = \frac{R_N}{R_B} \approx \frac{3.54 \times 10^{22} p_0 \text{ [Torr]}}{j} \sqrt{\frac{2e^3 V}{M}}$$

と表される。上式に、重水素の質量 $M = 3.343 \times 10^{-27}$ [kg], $e = 1.602 \times 10^{-19}$ [C]を代入して

が得られる。

本事業の目標値である加速電圧 150 kV, ビーム電流 100 mA の場合には, ビーム断面積 を 1 mm²とすると, $j = 1 \times 10^5$ [A/m²]であるから

となる。

ビーム-ビーム核融合がビームーバックグラウンド核融合を上回るためには,

$$\frac{ビーム - バックグラウンド核融合}{ビーム-ビーム核融合} = \frac{R_N}{R_B} \approx 1.52 \times 10^5 p_0 [\text{Torr}] < 1$$

より, $p_0 < 6.57 \times 10^{-6}$ [Torr]となり, ビームーバックグラウンド核融合を利用する DC 放電の 場合の圧力である数 mTorr に比べて 2 桁以上も低い圧力である。したがって, DC 放電の場 合には, NPR~1×10⁷ [n/s]程度しか得られない。ビームービーム核融合でも、これと同程度 の中性子発生率しか得られないと考えられるので、中性子発生率の絶対値は低くなり、ビーム ービーム核融合の優位性はないことがわかった。 6. 創出された研究成果(企業との共同研究,特許,論文など)のリスト

①企業との共同研究等(共同研究,サンプル・ノウハウの提供など) 非公開
 ②-1論文・著書(査読付き)
 (国内) 該当なし

(海外)

[1] Kei TAKAKURA, Takayuki SAKO, Haruo MIYADERA, Kenichi YOSHIOKA, Yoshiji KARINO, Kohichi NAKAYAMA, Tsukasa SUGITA, Daisuke UEMATSU, Kohei OKUTOMO, Jun HASEGAWA, Toshiyuki KOHNO and Eiki HOTTA, "Neutron Radiography Using Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion", Plasma and Fusion Research, 13, 2406075 (2018).

②-2論文·著書(査読無し)

(国内)

[1] 奥友航平,長谷川純,堀田栄喜,河野俊之,渡辺正人,高倉啓,"慣性静電核融合(IECF)装置の高出力化に向けたイオン源の開発",平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論 文集, (2016-09-01), 5-P-16.

[2] 高倉啓,長谷川 純,河野俊之,渡邊正人,奥友航平,堀田栄喜,"慣性静電閉じ込め式核融 合中性子源の高出力化",平成28年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集,(2016-09-01), 5-D-a2-5.

(海外)

[1] Kohei OKUTOMO, Florian AYMANNS, Eiki HOTTA, Kei TAKAKURA, Jun HASEGAWA, Toshiyuki KOHNO, "Development of an Inertial Electrostatic Confinement Neutron Source and Its Application to Neutron Imaging", NIFS-PROC-110, p.23-26 (2018).

③学会発表(招待講演含む)

(国内)

[1] 高倉 啓, 奥友 航平, 板垣 智信, 長谷川 純, 河野 俊之, 堀田 栄喜, 毎田 充宏, 宮寺晴夫, 吉岡 研一, 日塔 光一, "中性子ラジオグラフィイメージングプレート転写法のスキャナ特性", 日本原子力学会 2018 年春の年会, 大阪大学吹田キャンパス, 大阪, 2018 年 3 月 26 日, (口頭).

[2] 長谷川純, 奥友航平, 板垣智信, 高倉啓, 河野俊之, 堀田栄喜, "直線型慣性静電閉じ込め 核融合中性子源の解析", 電気学会全国大会, 九州大学伊都キャンパス, 福岡, 2017 年 3 月 16 日, (口頭)

[3] 堀田栄喜, 奥友航平, 板垣智信, 高倉啓, 河野俊之, 長谷川純, "直線型慣性静電閉じ込め

核融合中性子源の特性",電気学会全国大会,九州大学伊都キャンパス,福岡,2017 年 3 月 16 日,(口頭)

[4] 板垣智信, 奥友航平, 長谷川純, 堀田栄喜, 高倉啓, 河野俊之, "直線型慣性静電閉じ込め 核融合(IECF)装置の分光解析", 平成 29 年度核融合科学研究所共同研究形式研究会「パルスパ ワーおよび高密度プラズマ生成とその応用」, 核融合科学研究所, 土岐, 2017 年 12 月 26 日, (口 頭)

[5] 長谷川純,奥友航平,板垣智信,堀田栄喜,高倉啓,河野俊之,"直線型慣性静電閉じ込め 核融合装置の数値解析",平成29年度核融合科学研究所共同研究形式研究会「パルスパワーお よび高密度プラズマ生成とその応用」,核融合科学研究所,土岐,2017年12月26日,(ロ頭) [6] 堀田栄喜,"パルスパワーとプラズマ応用",電気学会東京支部山梨支所合同研究会,山梨,

2017年11月14日,(招待)

[7] 板垣智信,奥友航平,堀田栄喜,長谷川純,高倉啓,河野俊之,"直線型慣性静電閉じ込め 核融合中性子源における粒子エネルギー分布",日本原子力学会 2017 年秋の大会,岩手大学, 岩手,2017 年 9 月 13 日,(口頭)

[8] 奥友航平, 奥友航平, 堀田栄喜, 高倉 啓, 長谷川純, 河野俊之, "慣性静電閉じ込め核融合 装置における水素放電プラズマの発光スペクトルに関する研究", 電気学会プラズマ/パルスパワ ー/放電合同研究会, 京都工芸繊維大学, 京都, 2017 年 5 月 13 日, (ロ頭)

[9] 奥友航平, Florian Aymanns, 堀田栄喜, 高倉啓, 長谷川純, 河野俊之, "円筒型 IEC 中性子 源の開発と中性子イメージングへの応用", 平成 28 年度核融合科学研究所共同研究形式研究会, 核融合科学研究所, 土岐, 2017 年 1 月 5 日, (口頭)

[10] 高倉啓, 佐古貴行, 松宮浩志, 宮寺晴夫, 吉岡研一, 長谷川純, 河野俊之, 渡邊正人, 奥友航平, 堀田栄喜, "核物質管理のための慣性静電閉じ込め式コンパクト中性子源の開発", 第 37 回核物質管理学会日本支部年次大会, 東京工業大学, 東京, 2016年11月17-18日, (口頭)

[11] 高倉啓,長谷川純,河野俊之,渡邊正人,奥友航平,堀田栄喜,"慣性静電閉じ込め式核融 合中性子源の高出力化", 5-P-16,平成28年電気学会基礎・材料・共通部門大会,2016年9月 5日,九州工業大学戸畑キャンパス,北九州,(口頭)

[12] 奥友航平,長谷川純,堀田栄喜,河野俊之,渡辺正人,高倉啓,"慣性静電核融合装置の 高出力化に向けたイオン源の開発",平成28年電気学会基礎・材料・共通部門大会,2016年9月 5日,九州工業大学戸畑キャンパス,北九州,(ポスター)

[13] 長谷川純,高倉啓,河野俊之,渡邊正人,堀田栄喜,"慣性静電閉じ込め式熱中性子源開 発ー概要および予備実験結果-",第11回核融合エネルギー連合講演会,2016年7月14日, 九州大学,福岡,(ポスター)

[14] 高倉啓,長谷川純,河野俊之,渡邊正人,堀田栄喜,"慣性静電閉じ込め式熱中性子源開 発-粒子シミュレーション評価-",14P126,第11回核融合エネルギー連合講演会,2016年7月 14日,九州大学,福岡,(ポスター)

(海外)

[1] Eiki HOTTA, Kohei OKUTOMO, Tomonobu ITAGAKI, Kei TAKAKURA, Toshiyuki KOHNO, and Jun HASEGAWA, "Compact Linear IEC Neutron Source Project at Tokyo Tech", 19th US-Japan workshop -Fusion Neutron Source for Nuclear Assay and Alternate Application, Kansai University, Osaka, Japan, Oct. 17-19, 2017. (口頭)

[2] Kei TAKAKURA, Shinya MATSUDA, Haruka KAJIWARA, Haruo MIYADERA, Kenichi YOSHIOKA, Yoshiji KARINO, Takayuki SAKO, Kohei OKUTOMO, Tomonobu ITAGAKI, Jun HASEGAWA, Toshiyuki KOHNO, and Eiki HOTTA, "IEC neutron source for subcriticality monitoring in spent-fuel pool of LWR power plant", 19th US-Japan workshop -Fusion Neutron Source for Nuclear Assay and Alternate Application, Kansai University, Osaka, Japan, Oct. 17-19, 2017. (□ 頭)

[3] Kei TAKAKURA, Takayuki SAKO, Haruo MIYADERA, Kenichi YOSHIOKA, Yoshiji KARINO, Daisuke UEMATSU, Kohei OKUTOMO, Jun HASEGAWA, Toshiyuki KOHNO, and Eiki HOTTA, "A waterproof palm-sized neutron generator using inertial electrostatic confinement (IEC) fusion", CLES/LANSA'17, Yokohama, Japan, Apr. 18-21, 2017.(口頭)

[4] Eiki Hotta, Kei Takakura, Masato Watanabe, Toshiyuki Kohno, Florian Aymanns, and Jun Hasegawa, "Compact Fusion Neutron Source Project at Tokyo Tech.", 18th US-Japan IEC Workshop - Fusion Neutron Sources for Nuclear Assay and Alternate Applications, University of Wisconsin-Madison, Nov. 7 & 8, 2016. (口頭)

[5] Kei TAKAKURA, Takayuki SAKO, Kohichi NAKAYAMA, Haruo MIYADERA, Kenichi YOSHIOKA, Jun HASEGAWA, Toshiyuki KOHNO, Masato WATANABE, Kohei OKUTOMO, and Eiki HOTTA, "High-yield neutron generator with inertial electrostatic confinement (IEC) fusion", B13-1, The 5th International Symposium on Innovative Nuclear Energy Systems (INES-5), Oct. 31, 2016. (口頭)

④知的財産(特許権,実用新案権など)

(i)特許出願

(国内) 非公開(海外) 該当なし

(ii)特許登録

(国内) 該当なし (海外) 該当なし

Ⅲ. 今後の展開

7. 成果の今後の展開

本課題で開発を進めた慣性静電閉じ込め(IEC)型中性子源の基本動作原理は非常にシンプル であり、放電電圧や放電電流に対する中性子発生率のスケーリングは比較的よくわかっている。 我々は本事業において動作電圧および電流を 150 kV, 100 mA にスケールアップし, 10⁹ n/s レベ ルの中性子発生率を達成することに挑戦した。高電圧絶縁と熱除去の点で有利な電極配置を持 つ直線型 IEC 中性子源を開発し, 100 kV, 10mA の電力投入時に 10⁶ n/s 以上の発生率で中性子 を長時間安定して発生できることを実証した。現時点までに得られた結果から, 投入電力を 150 kV, 100 mA まで上げることで 10⁸ n/s を超える中性子発生率を達成できる見通しが得られた。今後, 高 投入電力(15 kW)での試験を実施するために, 陽極部の冷却機構の改良を行う予定である。

中性子発生率で比較すると、IEC 中性子源は加速器駆動の小型中性子源には現時点では敵わ ないが、IEC 中性子源はコンパクトで低コスト、長寿命という特徴をもち、産業界や大学等で利用す る際に非常に有利である。中性子発生管(DD または DT 管)が IEC 中性子源と最も競合する先行 技術であるが、IEC 中性子源では核融合反応のための固体標的を用いる必要がなく、燃料も外 部から持続的に供給できるため、DD 管などに比ベメンテナンスサイクルを極めて長くすることがで きる。したがって、取り扱いの容易さ、ランニングコストの低さなどから、IEC 中性子源は製品として 十分な競争力をもつと言える。また、IEC 中性子源では装置の形状やサイズを制限する要因が少 なく、利用方法に合わせたフレキシブルな装置設計が可能であることも重要な特徴である。

IEC 中性子源の設計自由度の高さを生かし, 産業界への展開を加速するには, 様々な利用例を 具体的に提示していくことが必要である。本事業においては, 中性子イメージング試験を実施し, 比較的低い中性子フラックスでも十分にクリアな透過画像を取得できることを示した。IEC 中性子源 の高出力化とともに, フラットパネルディテクタなどの高感度な中性子検出器と組み合わせることに より, コンパクトで安価な中性子検査システムを産業界や大学等に具体的に提示し, 将来の製品 化につなげていきたいと考えている。

21