

**研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム
産業ニーズ対応タイプ 完了報告書(公開版)概要**

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
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
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

1. 研究の目的

加速器駆動型、レーザー駆動型中性子源と比較して、コンパクトで操作が容易な慣性静電閉じ込め(IEC)核融合中性子源を用いて、可搬型でコンパクトな熱中性子源を開発する。本研究で開発する可搬型コンパクト熱中性子源は、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ある。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である。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: 10^9 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いる。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。

2. 研究成果の創出状況

マイルストーン	達成状況
(1)円筒型 IEC 中性子源で 10^9 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)	慣性静電閉じ込め(IEC)核融合中性子源における中性子発生率は放電電流に比例し, 重水素同士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)とともに増加する。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, 10^9 n/s の中性子発生率が達成

	<p>できる見込みであることを示した。また、直線型 IEC 中性子源内部のプラズマ中の荷電粒子(電子 e^-, 重水素イオン D^+, D_2^+), 中性粒子(D, D_2)の素過程及び核融合反応を粒子コードで解析し, 10^9 n/s の中性子発生率が達成可能なことを確認した。</p>
<p>(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, 10^7 n/s の中性子発生を確認する。(平成 28 年度末)</p>	<p>試作した小型 IEC 中性子源の運転試験において, アウトガス発生の原因の特定と対策, および装置内壁のコンディショニングを行うことで, 放電電圧 97.8 kV, 放電電流 10 mA の条件において, 最大で 1.47×10^6 n/s の中性子発生率を達成した(図1)。</p> <p>装置内の重水素ガスの圧力制御にスロットルバルブを用いたダウンストリーム制御手法を適用することで, 試作装置において約 40 時間にわたり 10^6 n/s 以上の発生率で中性子を安定して発生できることを実証した。従来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が, 本事業で開発した小型 IEC 中性子源は十分な冷却機構を備えており, 長時間運転時の動作安定性は従来装置に比べて大幅に向上した。</p>
<p>(3) 10^5 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)</p>	<p>汎用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 10^9 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 10^5 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2)。</p>
<p>(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, 10^9 n/s 以上の中性子発生を確認する。 (平成 29 年度 10 月)</p>	<p>試作した小型 IEC 中性子源において, 放電電圧 97.8 kV, 放電電流 10 mA の条件のもと, 最大 1.47×10^6 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, 陽極を強制的に冷却する機構を導入し, アウトガスを抑制することで, 中性子発生率をさらに向上できる見通しである。本事業で得られた結果をもとに, 放電電圧及び放電電流に対する中性子発生率のスケールリング則を用いると, 本事業で開発した IEC 中性子源に 150 kV, 100 mA の電力を投入したときに, 10^8 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3)。</p>

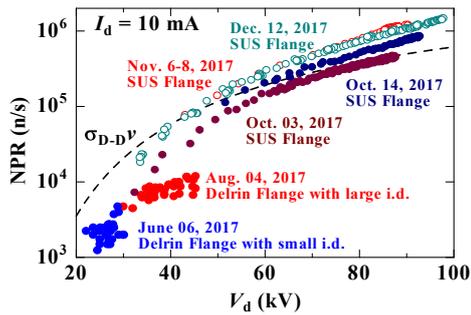


図1 中性子発生率の放電電圧依存性

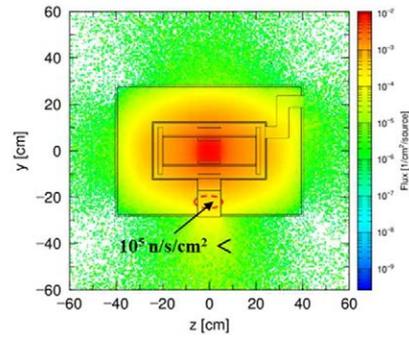


図2 汎用モンテカルロコードによる中性子フラックスの評価

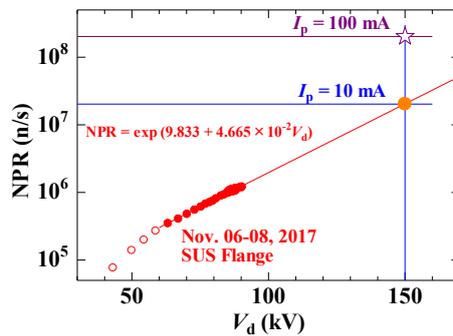


図3 現状実績から予測される中性子発生率

3. 今後の展開

本事業では、高電圧絶縁と熱除去の点で有利な電極配置を持つ小型 IEC 中性子源を新たに開発し、100 kV、10 mA の電力投入時に 10^6 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 10^8 n/s を超える中性子発生率を達成できる見通しを得た。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。

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 管などに比べ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。

IEC 中性子源の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。

以上