

**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	:医療用加速器中性子源技術の産業利用への応用に関する研究
プロジェクトリーダー	
機関名	: 国立大学法人 筑波大学
氏名	: 熊田博明

## 1. 研究の目的

筑波大学、KEK、原子力機構はこれまで、直線型加速器(リニアック)ベースの医療用(BNCT)加速器中性子源を開発整備してきた。本事業の目的は、この医療用に開発整備した加速器中性子源技術を応用し、以下に示す研究開発を実施して産業用・量産普及型・小型中性子源装置を安価に製造できる技術基盤を確立し、本事業の終了時点で同装置を発注整備できる状況を整えることを目指す。主な目標は以下の3つである。

- (1) 筑波大学の BNCT 用加速器中性子源の中性子発生装置部のモデレータを改良、機能拡張し、産業利用可能な低エネルギー中性子(エネルギー・ピーク:30~40meV 辺りの熱中性子)をビーム照射孔位置で  $3 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s)以上の中性子束を発生できる産業用ビームポートを開発整備する。
- (2) 開発した熱中性子ビームポートを、本 A-STEP 事業に参加する中性子回折、小角散乱、マルチ即発 $\gamma$ 線計測等の研究グループに提供し、これら中性子利用研究分野の計測機器開発等に寄与する。
- (3) 上記の研究活動を通じて産業用中性子源に求められる要件、機能、性能を把握し、最終的にコンパクトな加速器ベースの産業専用熱~冷中性子源装置を安価に製造できる技術基盤を確立し、産業用・研究用加速器中性子源装置の概念設計を行い、同装置をメーカーに製造発注できる環境を構築することを目指す。

## 2. 研究成果の創出状況

マイルストーン	達成状況
(1) モンテカルロ解析により 2 次モデレータを設計し、陽子ビームの平均電流:2mA で $1.3 \times 10^8$ (n/cm <sup>2</sup> ・s)程度の強度の中性子を発生できることを確認する。(平成28年10月)	モンテカルロコード PHITS を用いた解析から、ポリエチレン製 2 次モデレータを設計。40meV 付近にピークを有する熱中性子を発生し、平均 2mA 時で熱中性子束は、 $1.4 \times 10^8$ (n/cm <sup>2</sup> ・s)を発生できることを確認(平成 28 年 3 月)
(2)2 次モデレータを製作し、実測で目的の中性子束を発生できることを確認する(平成 29 年 4 月)	ポリエチレン製 2 次モデレータを製作。中性子を発生し、金線等を用いて発生する中性子を実測。1mA 運転時で $6.7 \times 10^8$ (n/cm <sup>2</sup> ・s)の熱中性子を発生できることを実測で確認。(平成 28 年 12 月)
(3)照射室を医療以外に利用できるように整備し、ボナー球測定、中性子計測機器の研究等に利用させる。生物実験設備も整備。(平成 30 年 7 月)	放医研グループがボナー球実験を実施。被ばく線量計メーカーや中性子遮蔽材メーカーが当施設での照射実験を実施。OIST グループが細胞、マウス照射実験も実施。(平成 31 年 3 月)

<p>(4) 短パルス中性子を発生する手法を検討する。大強度化に向けた新規イオン源の要素技術開発を実施する。(平成 30 年 7 月)</p>	<p>イオン源の引き出し電圧を高速でスイッチングする方法でビームを切り出すことの見通しを得る。また、マルチカस्प磁場型イオン源に変更。アーク放電型イオン源の基盤技術開発にも着手。ピーク電流:53mA の引き出しに成功。(平成 30 年 7 月)</p>
<p>(5) MEBT の開発整備。ビーム診断輸送システムの高度化により1mA の安定稼働。2mA 以上の稼働を実現。(平成 31 年 4 月)</p>	<p>MEBT の調整高度化により、平均電流 1.4mA で稼働率:90%以上を達成。平均電流:2mA での安定運転試験も継続して実施中(平成 31 年 2 月)</p>
<p>(6) 熱中性子束で <math>2 \times 10^8</math> (n/cm<sup>2</sup>・s) 以上を発生できる加速器中性子源を完成。このビーム環境を研究者に提供し、各種実験を実施できることを確認。(平成 31 年 4 月)</p>	<p>加速器の各種改良、高度化により平均電流:2.8mA での運転に成功。熱中性子束で <math>1.9 \times 10^8</math> (n/cm<sup>2</sup>・s) の熱中性子(カドミ比:約 6)を発生できることを確認。産総研の中性子計測グループなどに照射場を提供。(平成 31 年 2 月)</p>
<p>(7) 低エネルギー中性子を発生できる産業・研究用加速器中性子源の概念設計を実施。</p>	<p>平均電流 10mA で駆動する直線型加速器(陽子エネルギー:8MeV)とベリリウム標的の組合せにより、<math>1 \times 10^9</math> (n/cm<sup>2</sup>・s) の熱中性子を発生できる加速器中性子源装置の見通しを得る。具体的な加速器の概念設計も行う。(令和元年 12 月)</p>

### 3. 今後の展開

筑波大学がこれまで整備してきた医療用加速器中性子源装置:iBNCTは、本事業を通じて以下の特徴を有する性能、機能を確保した。

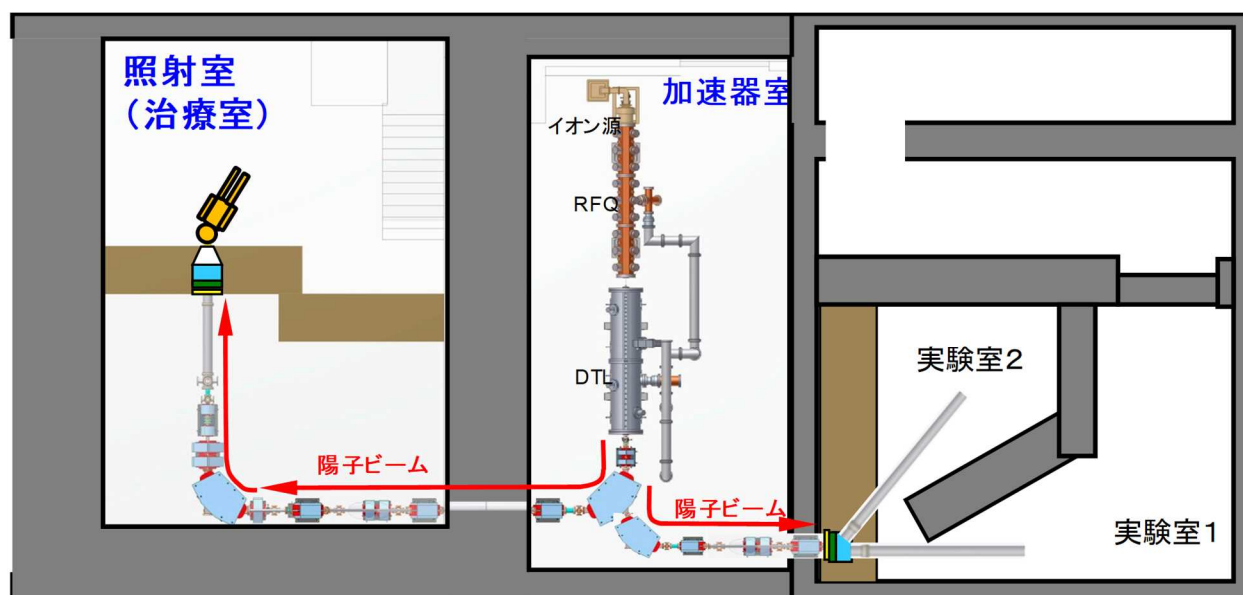
- ・40meV にピークを有する熱中性子を発生
- ・陽子の平均電流:1.4mA の運転条件下で熱中性子束:約  $1 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>・s) を発生
- ・同運転条件下で 90%以上の安定稼働
- ・陽子の平均電流:2.8mA で稼働し、中性子を発生。
- ・理化学研究所の RANS の約 50 倍以上(～100 倍)の熱中性子を発生
- ・GLP に準拠した生物実験施設を併設
- ・筑波大学と共同研究を締結することで当該施設を用いた中性子照射実験を実施可能

これを踏まえて、本事業終了後も、当該施設を利用して種々の中性子照射実験を実施したい研究グループを可能な限り受入れ、各種研究開発活動に寄与したい。将来的には当施設を共同利用施設として登録し、より多くのユーザーが容易に使える中性子実験施設として確立させたいと考える。特に当施設は立地的に J-PARC に隣接した場所にあることから、当施設で様々なシーズ研究を実施し、将来的により大きな成果が期待できるテーマを J-PARC に繋がられるような連携体制を構築できると良いと考えている。直近の目標としては、J-PARC と RANS を使って研究活動を実施している茨城大学の小泉先生や東京大学の高橋先生のグループと引き続き情報交換を行い、当施設を使った実験を実現させたい。

当施設は、現在は中性子を発生できる照射室が医療(BNCT)用の治療室しかないため、医療以外の実験を実施する場合も、この治療室を用いなければならず、将来的には治療を優先せざるを得ない状況が生じてくる。

しかし、当装置を設置している「いばらき中性子医療研究センター」には他にも実験可能な部屋があり、ビームを分岐してその部屋に陽子ビームを導くことが可能である。そこにベリリウム標的と熱中性子発生用専用モデレータを設置することで、医療照射とは独立し、かつ、医療側の制限を受けることなく実験を実施できる環境を整備できる可能性がある(下図参照)。施設の遮蔽や各種許可申請など、様々な課題はあるが可能性を模索したい。さらには、隣接する駐車場側に別の実験建家を設置して陽子ビームを導くことができれば、より大規模な中性子実験(冷中性子発生も視野に入れる)を実施することも可能となる。これらの中性子ビーム装置、照射施設の拡張は、KEK、JAEA や茨城県、東海村との連携と協力が不可欠であり、予算の獲得も必要であるが、これらの働きかけを実施していきたい。

装置の普及の観点では、当グループは、医療用加速器中性子源の製造に関しては東芝エネルギーシステムズ社と連携しているが、本事業を通じて得られたノウハウ、技術は同社に技術移転するとともに、同社には医療用装置としてだけでなく、産業用・研究用の中性子源としても製造販売していくことを促したい。勿論、そのためには大幅な低コスト化が必要であるが、そのための検討を同社とKEK、JAEAとも連携して実施していきたい。



陽子ビームを分岐し、産業・研究専用中性子場として使用する一案

以上