

**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	:産業用コンパクト中性子源陽子加速器システムの小型化開発
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	:林崎 規託

## 1. 研究の目的

加速器技術の発展にともない、従来の電子線、イオン、X線に加えて、中性子やミュオンなどの量子ビームをプローブとした物質構造の観察や新しい科学現象の解明に社会の期待が寄せられているが、電子顕微鏡やX線分析装置などと比べると中性子利用のハードルは高かった。我が国における中性子利用は、日本原子力研究所(日本原子力研究開発機構)や大学の研究用原子炉(研究炉)を中心に、北海道大学や東北大学などのパルス加速器中性子源、また、高エネルギー加速器研究機構の核破砕パルス中性子源施設 KENS の利用によって、長年進められてきた。その後、社会情勢の変化や維持管理負担の問題により大学設置の研究炉は廃炉が続き、他方、加速器中性子源については、2008年から J-PARC における中性子利用がスタートし、既存の小型加速器中性子源との相補的な利用が期待されている。

近年の興味深い動きとしては、理化学研究所、京都大学、名古屋大学など、大学や研究機関を中心に陽子線ベースの小型加速器中性子源の稼働または整備が進んできている。しかし、その多くの加速器が海外からの輸入製品となっており、加速器が輸入製品であったとしても中性子利用の普及および需要創出の観点からは好ましいことであるが、我が国の産業競争力の維持・向上の観点からは改善が必要である。また、小型といえども設計・製作・運転の全段階に専門家の関与が不可欠な「F1 マシン」であり、大学や研究機関だからこそ実現できたと考えられる。

このような状況のもと、本プログラムの技術テーマ「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」を達成する研究課題として、本研究開発は「小型中性子源の早期商品化」に必須と考えられる「加速器システムの小型化」に取り組む。小型中性子源のデファクトスタンダードが存在しない現状での商品化の方向性としては、①大量に中性子を発生可能なハイパワーマシンと、②手軽に導入可能なエントリーマシンの2タイプが考えられるが、ハイパワーマシンについては当面のあいだ既存の中性子施設を活用してもらい、本研究開発では企業や大学などが導入しやすい加速器駆動型エントリーマシンの小型化開発をおこなう。

加速器駆動型中性子源に用いられる代表的な中性子生成反応としては、陽子線による  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 、 ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 、電子線による光核反応などがあるが、本研究開発では  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  を選択し、リチウムの反応断面積、加速器の小型化、中性子遮蔽の容易さを考慮して、陽子線の加速エネルギーは最大 2.5MeV とする。陽子加速器の方式としては高周波四重極(RFQ)線形加速器を選択し、運転周波数が 200MHz の一般的な RFQ 線形加速器で 2.5MeV の陽子を加速するには 3m 以上の長さを必要とするため、高周波化により小型化を図ると同時に、製作方法も 3 分割構造型を採用して低廉化を実現する。陽子線の最大平均強度は  $100\ \mu\text{A}$  を目標とし、ビームパワーとしては 250W、中性子生成量  $10^{11}\text{n/s}$  を見込んでいる。

## 2. 研究成果の創出状況

マイルストーン	達成状況
<p>(1) 650MHz-RFQ 加速空洞の設計として、ビーム軌道解析と高周波電磁場解析によって、運転周波数 650MHz、全長 2m 以内の条件下で、加速エネルギー 2.3~2.5MeV、陽子ビームピーク電流 20mA の設計結果が得られていることを確認する。(平成 28 年 9 月)</p>	<p>650MHz-RFQ 加速空洞の設計として、ビーム軌道解析コード「LIDOS RFQ Designer Complete Professional」と、3次元高周波電磁場解析ソフトウェア「CST STUDIO」を用いた連成解析を実施した結果、運転周波数 650MHz、加速エネルギー 2.5MeV、陽子ビームピーク電流 20mA、全長 2m を満たす結果が得られた。平成 28 年 7 月に 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 同年 8 月に第 13 回日本加速器学会年会において発表した。(達成率 100%)</p>
<p>(2) 2.45GHz-ECR イオン源のビーム試験によって、ピーク電流 25mA の陽子ビームが出力されることを確認する。(平成 30 年 3 月)</p>	<p>ビーム電流値の測定精度を向上するためにファラデーカップの改良をおこない、水素ガス流量、マイクロ波パラメータ、コイル電流量などの条件を変化させながら陽子ビームの引き出し実験を進めた結果、デューティ 1.0% 運転の場合に必要なとされるイオン源ピーク電流 12mA の陽子ビーム電流を安定に取り出せる性能を確立した。(達成率 100%)</p>
<p>(3) 650MHz-RFQ 加速空洞を製作し、ネットワークアナライザを用いたローレベル高周波試験によって、加速空洞の共振周波数が 650MHz、無負荷 Q 値の計算値に対する再現性が 90% 以上であることを確認する。(平成 30 年 3 月)</p>	<p>サイトビジットにおいて指摘を受けた運転周波数の変更について検討後、中間評価会で運転周波数を 650MHz から 500MHz に変更するとともに、運転デューティを 1.0% に引き上げて陽子ピーク電流を 10mA に抑える提案をおこない承認を得たので、3分割構造型の 500MHz-RFQ 加速空洞の実機プロトタイプ的设计製作をおこなった。低電力高周波特性試験により無負荷 Q 値の計算値に対する再現性は 85% であった。(達成率 95%)</p>

## 3. 今後の展開

1 社に 1 台をキーワードに、産業界における現在の中性子ユーザーや、中性子に興味をもっているユーザー候補者の方々との情報交換や意見交換を通じて、企業にとって導入しやすく使いやすい総合的な装置の開発を、本プログラムのシナジー効果も活かしながら、陽子ビーム加速実験や中性子発生実験による実証も含めて展開していきたい。

以上