

京都大学	博士（理学）	氏名	山田 雅子
論文題目	パルス白色中性子ビーム集光のための強度変調型永久六極磁石を用いた T o F レンズ		
（論文内容の要旨） 中性子線は透過力が高い、水素などの軽元素にも感度がある、磁気構造が探査できるなどの有用な性質から、無機／有機高分子や生体分子から超伝導体内の磁束量子といった広い分野で物質構造及びダイナミクスの解明に用いられている。しかしながら、中性子は核反応を用いて発生するために概してビームエミッタンスが悪い。さらに、電氣的に中性であるため、その制御が荷電粒子に比べて難しい。これらの理由から、発生後散逸する中性子の一部を切り出した中性子線がプローブとして用いられてきた。しかしながら、このような中性子線は強度が弱いため測定に長時間を要したり、微弱な信号の測定に困難がある等の問題がある。中性子源は核分裂原子炉が従来主流であったが、すでに実用上到達可能な中性子ビーム強度の上限値に達している。このため、ピーク強度ではそれを凌駕し、さらに飛行時間法（Time of Flight, ToF）により無駄なくエネルギー分光が可能な加速器を用いた核破砕型中性子源が主流となりつつある。 申請者は、加速器科学で長年培われた荷電粒子ビームに対するビーム制御技術を中性子ビームに適用し、発生中性子の利用効率を向上させるために、中性子レンズの開発を行ってきた。そして、今後パルス中性子が主流になってゆくであろう現状をふまえ、広いエネルギー（波長λ）分散をもつワイドバンドのパルスビームを色収差なく集束できるレンズを、永久六極磁石を用いて実現した。 中性子は電氣的には中性であるが、有限の磁気モーメントを持つため、磁場中でポテンシャルを感じ、磁場の大きさに比例した力を受ける。六極磁場強度は中心からの距離rの二乗に比例して大きくなるため、中性子は六極磁場中でビーム軸からの距離に比例した力を受けて単振動する。これが中性子ビーム集束力の源である。磁場強度G_6と磁石長L_mをもつ六極磁石の集光距離は波長λ^2に比例した量で、白色ビームに対しては色収差が生じる。パルスビームは1パルス内の全中性子に対し共通の時間原点が定義されるため、ある時刻tにレンズ磁石に到着する中性子の波長は一意に決まっている。そのため、磁場強度をt^2に比例して変調し、ビームパルスに同期して集光力の波長依存性を相殺すれば、色収差なくワイドバンドパルスビーム全域にわたって集光距離が一定となり、色収差効果を抑えた集光が可能となる。この原理を用いた新たな手法による磁気レンズを強度変調型永久六極磁石(modulating-Permanent Magnet Sextupole, mod-PMSx)により実現した。開発にあたっては、代表的なパルス中性子源の標準値を参考にして、波長幅2倍（$\lambda_{\max}/\lambda_{\min}=2$）で繰り返し周波数30 Hzのビームを集光できる性能を持つレンズで、波長バンド$27\leq\lambda[\text{\AA}]\leq55$の極冷中性子ビームを集光距離全長2 mで集光できる集光力を目標性能に設定している。 永久磁石は磁石素材と磁石配置によっては超伝導磁石に匹敵する磁場強度を発生することが可能であり、加えて超伝導磁石が必要とするクライオスタットや電磁石が必要とする大型電源などの付随する大型装置が必要ないため、集光レンズシステム全体を小型化するために適している。永久磁石で構築された六極磁石のビームボアに発生する六極磁束密度を変調するため、円筒状の六極磁石を同軸二重リングに分割し、			

(論文審査の結果の要旨)

固定された内輪の周りに外輪を回転させる回転二重リング構造を導入した。これによる磁場強度は余弦関数的に変調されるが、およそ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ の範囲を、ワイドバンドビームの集光に必要な変調 t^2 に対して近似的に用いている。そこで必要な変調域 $G_{6\max}/G_{6\min}$ は波長幅 $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$ の 2 乗としている。

六極磁石構築にあたっては永久磁石を用いて強力な多極磁場を発生させる手法の 1 つである Halbach 磁石配置を拡張した extended-Halbach 磁石配置を採用し、非常に強力な六極磁場強度を発生させている。磁束の集中する磁極のビームボアに近い部分の磁石を飽和磁束密度の大きな軟磁性体で置き換えることで、強度変調する際の最大値が拡大されるだけでなく、最小値も大幅に抑制され、変調域を飛躍的に拡張することに成功している。この結果、開発した磁気レンズはビームボア径 $\phi 15$ mm で磁場変調域 $0.95 \leq G_6 [10^4 \text{ T/m}^2] \leq 5.6$ 、変調幅 5.9 倍 ($G_{6\max}/G_{6\min} = 5.9$) を持ち、集光可能波長幅がこれまで達成されたことのない 2 倍 ($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 2$) を達成している。

この磁場強度をもつ磁石長 66 mm の六極磁石を 3 ユニット直列連結し、有効磁石長 198 mm とした磁気レンズシステムを構築して、その集光距離全長の設計値は 1.79 m を得ている。

製作した mod-PMSx の集光性能を実証するため、フランスのグルノーブルにある Institut Laue-Langevin 研究所の極冷中性子ビームラインにて集光実験を行なっている。その結果、結像位置におけるビームスポットサイズの半値全幅 (FWHM) は集光対象波長バンド $27 \leq \lambda [\text{\AA}] \leq 55$ にわたってソースアパーチャサイズ ($\phi 2$ mm) におおよそ一致し、波長幅 2 倍以上のワイドバンドパルスビームの集光を実証した。この時、実験的に決定した集光距離全長はわずか 1.84 m とコンパクトなビームラインを実現している。結像位置における単位時間・単位面積当たりの中性子数は集光作用を受けない場合に比べて対象波長域で積分すると 85 倍となり、2 桁近く中性子利用効率を向上することに成功した。

Mod-PMSx は冷中性子ビームへの応用も充分可能で、利便性の高いシステムであるため、多くの核破砕中性子源や小型中性子源に設置されているビームラインにおいて標準的に利用されることが期待できる。

いっぽう、よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 25 年 1 月 21 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。