

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651108

研究課題名(和文)熱外中性子速度選別器の基礎研究

研究課題名(英文)Research on Epithermal Neutron Spin Optics for Velocity Selection

研究代表者

清水 裕彦(Shimizu, Hirohiko)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50249900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：パルス熱外中性子ビームの単色度を向上させる光学系として、拡張したスピNFLIPチョッパーの性能を考察しJ-PARCパルス中性子源に配備した場合の性能を求めた。物質研究における汎用性を勘案し、適用エネルギー範囲を200eV程度まで拡張することを想定して研究を進め、得られるビーム強度の算定までを終えた。この結果をもとにJ-PARCパルス中性子施設に配備する可能性の検討に入った。
なお、この実現には、熱外中性子スピンフィルターと高反射臨界角中性子導管が必要となるため、開発研究に着手することになっている。

研究成果の概要(英文)：Applicability of neutron spin flip chopper to the suppression of the neutron velocity width in epithermal energy region was evaluated for the pulsed neutron beam from the spallation source of Japan Proton Accelerator Research Complex. The possible intensity was estimated in the energy range up to 200 eV mainly for the general application in material researches. The result was reported to KENS and the scientific merit is under discussion.
Additional developments on epithermal neutron polarizer and advanced neutron guide with extremely large reflection critical angle are necessary for achieving the estimated performance. Both of these techniques are valuable common to general neutron researches and we are considering to start the development researches.

研究分野：素粒子原子核物理学

キーワード：中性子光学 熱外中性子 パルス中性子ビーム スピン光学

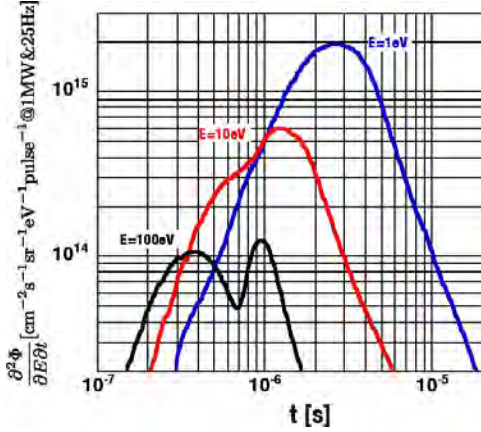


Figure 4: J-PARC 中性子源の中性子パルスの時間構造。J-PARC 中性子源には、二つの陽子ビームバンチを入射させているので、減速による時間幅の広がりに加えて、二つのバンチ入射タイミングの差による時間幅の広がり存在する。一つ目のバンチが入射した時刻を時間の原点として、減速体表面での中性子強度を時間の関数として示している。

これをもとにして、パルスの時間幅を求めた結果が図 5 である。

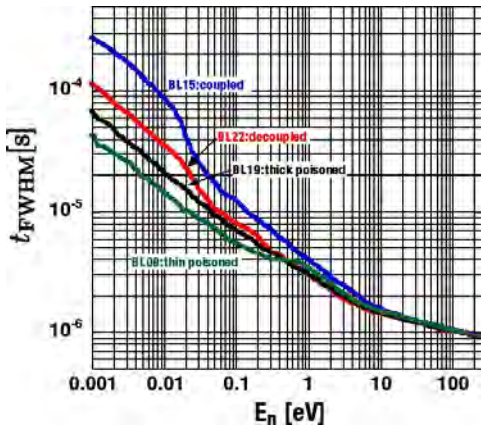


Figure 5: 中性子パルスの時間半値全幅 t_{FWHM} を中性子エネルギーの関数として示したもの。

中性子ビームの時間幅は図 5 に示した通りである。図から分かる通り、時間幅が最も狭くなる減速体は thin poisoned moderator である。この減速体を見込むビームラインのうち、未使用の BL07 の特性を使って研究を進めた。

中性子エネルギー E_n の決定精度 ΔE_n は、飛行時間 t_{TOF} の決定精度 Δt_{TOF} と飛行距離 L を用いて

$$\Delta E_n = 4\sqrt{\frac{2}{m_n}} \frac{E_n^{3/2}}{L} \Delta t_{\text{TOF}} \quad (1)$$

と与えられるので、 ΔE_n は Δt_{TOF} を小さくとるか、飛行距離を大きくとれば改善されることがわかる。 $L = 20\text{m}$ にとった場合の ΔE_n は図 6 のようになる。

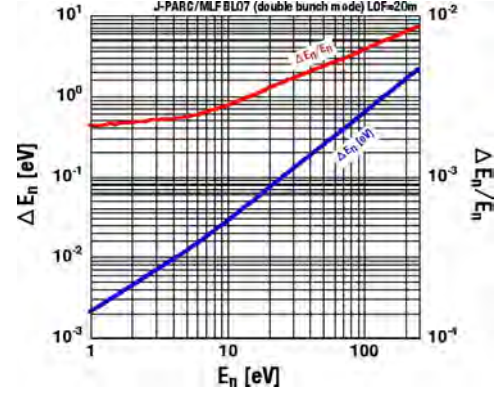


Figure 6: BL07 において、中性子パルス時間幅に起因する ΔE_n (青線) 及び $\Delta E_n/E_n$ (赤線) を中性子エネルギー E_n の関数として示したもの。飛行距離は $L = 20\text{m}$ としている。

図から分かる通り、熱外領域で $\Delta E_n \sim 0.1\text{eV}$ 程度のエネルギー分解能を達成するためには、追加的な単色化光学系が必要である。高分解能中性子非弾性散乱ではフェルミチョッパーが用いられているが、機械駆動チョッパーをそのまま熱外領域に拡張するのは困難である。本研究では、スピンリップチョッパーを用いた電磁的なビーム振分けの適用可能性を考える。スピンリップチョッパーは、中性子スピンの方向によって反射率が大きく異なる磁気中性子ミラーによる反射と、中性子スピンの反転操作を組み合わせて、電磁的に中性子ビームを振り分ける方法である。これは、冷中性子領域で実用化研究が進み、既に BL05 における中性子寿命測定の高精度化に用いられている (K.Taketani et al., Nucl. Instrum. Methods **A634** (2011) 134, T.Ino et al., Physica B **406** (2011) 2424)。

4.1. 単色化光学系の機器配置

偏極した熱外中性子を入射させ、ある速度の中性子に限ってスピンの回転するようにしておいて、磁気ミラーによってスピン方向が反転したものだけを選択的に蹴り出すことで実現することを想定する。本文書では、スピンを回転させるデバイスを spin rotator と呼ぶことにする。Spin rotator は、図 7 に示したように、ある中性子の速度 v と同じ速度で進行する横磁場 B_1 をかけるものとする。

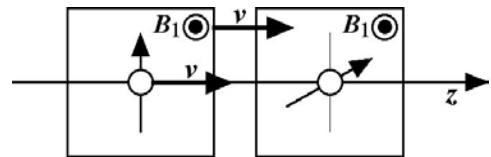


Figure 7: Spin rotator。中性子と同期して並走する横磁場で中性子スピンを回転させる。

磁場を印加する領域の長さを L_{SR} とするとき、磁場の印加領域を通過するのに要する時間 t_{SR} が³

$$t_{\text{SR}} = \frac{L_{\text{SR}}}{v} = \frac{\pi}{\gamma_n B_1} \quad (2)$$

を満たすようにしておくと、速度 v の中性子はスピンの反転する。ただし、 γ_n は中性子の磁気回転比¹である。図 8 のよう

¹ $\gamma_n = 1.83 \times 10^8 [\text{rad s}^{-1} \text{T}^{-1}]$

に、スピンの反転した中性子だけを反射するミラーを置いておくと、蹴りだされた中性子ビームは単色化される。

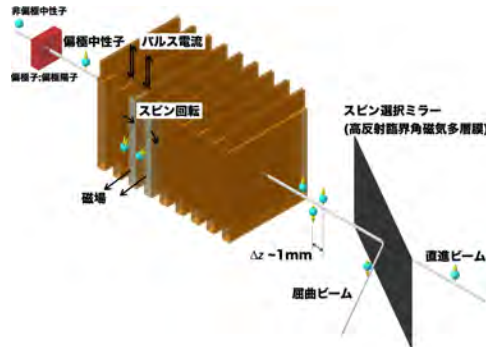


Figure 8: 熱外中性子単色化光学系概念図

各光学機器の配置を図 10 のように定義し、

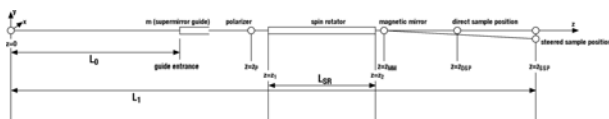


Figure 9: 熱外中性子単色化光学の機器配置図

具体的な諸量を表 1 のようにとる。

中性子エネルギー	$E_n \sim 100$ [eV]
偏極子 解析子	偏極陽子 偏極陽子
導管入口位置	$L_0 = 20$ [m]
導管反射臨界角比	$m = 10$
許容導管反射損失	$A_{loss} = 0.1$
Spin rotator 入口	$z_1 = 20$ [m]
Spin rotator 出口	$z_1 = 20$ [m]
導管内壁面平面度	$R_{rms} < 0.3$ [nm] (空間周期 $0.19\mu\text{m}$ 以下) $R_{rms} < 5.7$ [nm] (空間周期 $0.19\mu\text{m}$ 以上)
磁気鏡反射臨界角比	$m = 10$
ビーム分離距離	$\Delta x \geq 0.05$ [m]
ミラー試料距離	$z_{SSP} - z_{MM} \geq 50$ [m] $z_{SSP} = 50$ [m] $z_{MM} = 100$ [m]

Table 1: 熱外中性子単色化光学の機器配置パラメータ

実際の J-PARC 中性子実験施設の BL07 に配置した場合は、図 10 のようになる。

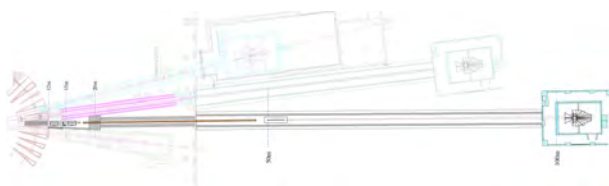


Figure 10: 実際のビームライン構成

4.2. 単色化された中性子ビームの強度

ビーム軸を z 軸とし、飛行時間を t とする。 tz 平面上での磁場 B_1 の印加領域と、中性子の運動を図 11 に示す。

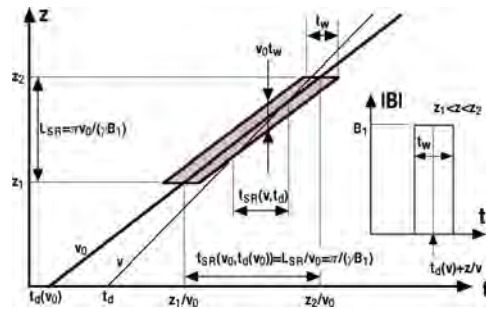


Figure 11: tz 平面上での spin rotator

陽子ビーム入射時を時間の原点に取り、ある速度 v_0 の中性子の強度が最大となる時刻を $t_d(v_0)$ と書くことにする。時刻 $t_d(v_0)$ に減速体表面を出発した速度 v_0 の中性子が磁場印加領域の中央を通るように設定する。磁場の印加時間幅 t_w は

$$t_w = \epsilon t_{TOF} = \epsilon \frac{z_2}{v_0} \quad (3)$$

に取るものとし、印加磁場の立ち上がり時間及び立ち下がり時間は無視できるほどに小さいと仮定する。 $t_w \rightarrow 0$ の極限では、式 2 の条件に適合しない中性子はスピンの回転しないので、磁気ミラーで反射された中性子のエネルギーは単色化されたものとなる。

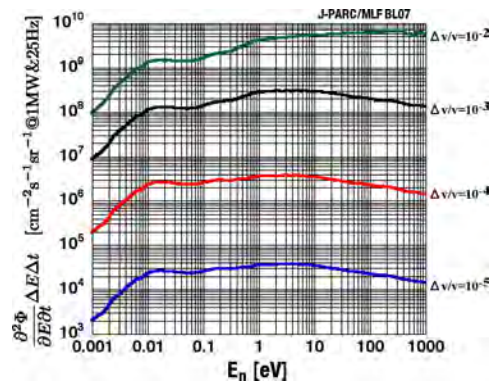


Figure 12: $\Delta v/v$ に対応するエネルギー幅 ΔE 及び時間幅 Δt の範囲に存在する BL07 の減速体表面での中性子流束。

$\Delta v/v$ をパラメータとして、対応するエネルギー幅 ΔE 及び時間幅 Δt の範囲に存在する中性子流束を示したものが図 12 である。

実際には磁場印加時間幅 t_w は 0 ではなく、また中性子パルスには時間幅がある。よって異なるエネルギーの中性子が反転条件を満たす場合があり、単色度は低下する。磁場印加時間幅を小さくしたり、磁場印加距離を長くする等して、単色度を向上させることが出来るが、その分、ビーム強度が減少する。 $z_1 = 20\text{m}$ 、 $z_2 = 50\text{m}$ として、spin rotator 出口でのエネルギースペクトルを計算したものが、図 13 である。この計算では、中性子のフライトパスが透過度 100% の導管でつながれているものとして、spin rotator 終端位置 $z_2 = 50$ [m]、磁気

ミラー位置 $z_{MM} = 50$ [m]、単色化ビーム試料位置 $z_{SSP} = 70$ [m] という条件で計算している。

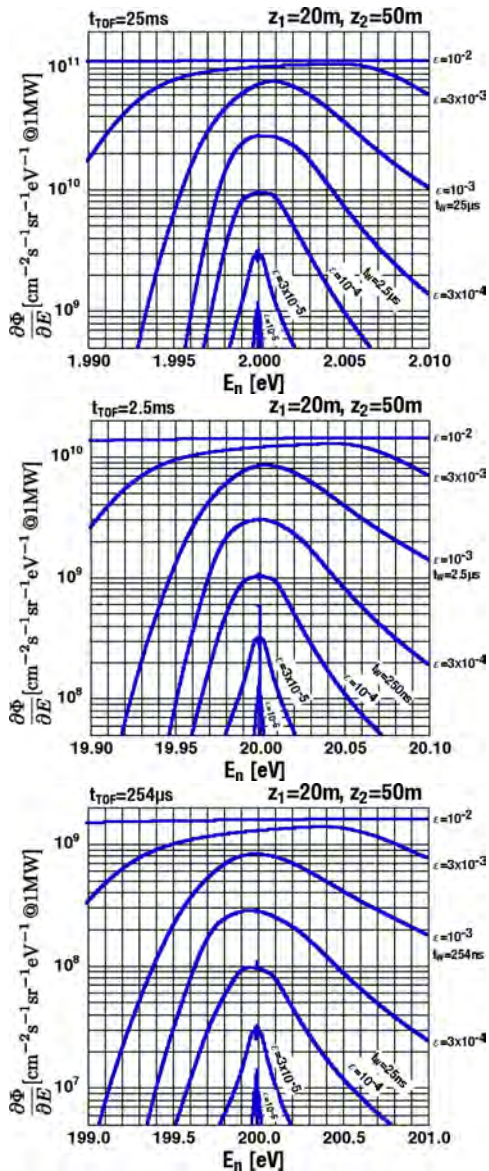


Figure 13: ビーム分離振り分け後の中性子流束。

導管の反射臨界角を考慮するために、ビーム軸に垂直な方向の中性子速度を求めたものが図 14 である。 $L_0 = 20$ 、 $m = 10$ 、 $\epsilon = 10^{-4}$ の場合について、図 ?? の中性子流束と図 14 の緑色の線から換算した立体角を用いて求めた spin rotator の出力ビーム強度を求めたものが図 15 である。

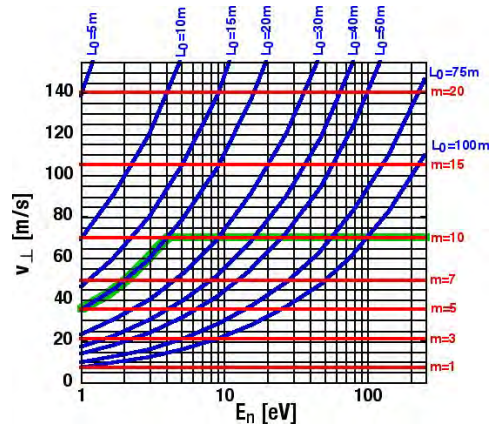


Figure 14: ビーム軸に垂直な方向の中性子速度の最大値 v_{\perp} を中性子エネルギーの関数として表したものである。青線は、中性子源からの距離 L_0 において、幅 0.1m の領域に到達する中性子のみが輸送された場合である。赤線は、ビーム輸送に全反射臨界角比 $m = \phi_c / \phi_{c, Ni}$ のスーパーミラー導管を用いた場合である。ある L_0 と m に対する値のうちで小さい方が有効になる。具体的には、 $L_0 = 20$ mかつ $m = 10$ の場合には、図中の緑色の線が有効である。

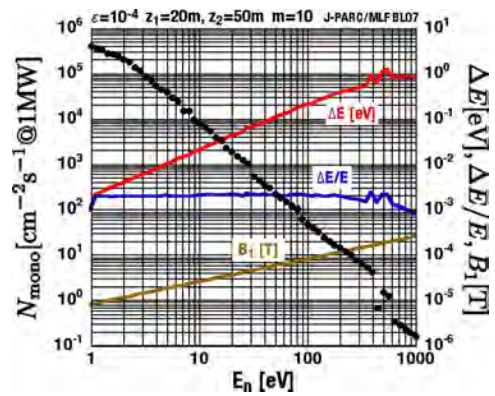


Figure 15: Spin rotator の出力ビーム強度。印加する横磁場の大きさ B_1 も合わせて示す。

4.3. まとめ

中性子単色化光学として、拡張したスピンフリップチョッパーの性能を考察し、J-PARC に配備した場合の性能を求めた。この実現のためには、熱外中性子の偏極子と熱外中性子導管が必要になる。熱外中性子の偏極子には、1eV 付近では偏極 ^3He スピンフィルター、より高いエネルギー領域 (100eV 付近) では偏極陽子フィルターを用いるのが適当と考えられる。熱外中性子導管としては、 $m = 10$ という巨大な反射臨界角のスーパーミラー導管を用いることが望ましい。現状ではそのような導管の作成に成功した例は報告されていないが、 $m = 10$ に相当する広帯域モノクロメータの作成は成功しており、J-PARC BL05 において超冷中性子発生に用いられている。

以上の成果は、J-PARC 中性子実験施設における研究の展開が、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 中性子共同利用実験審査委員会に対して提案され、S 型課題 (複数年度課題) 2015S12 として検討されることとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計1件）

1. 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 9 日
中部大学 領域 10 講演番号 9aAE-3 「熱外中性子
ビーム単色化光学系」清水裕彦、岩下芳久、北口
雅暁

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計0件）
- 取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 裕彦 (SHIMIZU, Hirohiko)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50249900

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

岩下 芳久 (IWASHITA, Yoshihisa)
京都大学・化学研究所・准教授
研究者番号：00144387

原田 秀郎 (HARADA, Hideo)
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学部門・研究主
席
研究者番号：80421460