

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11929

研究課題名（和文）熱外中性子偏極デバイスの開発と実用化に関する研究

研究課題名（英文）Development and application of an epithermal neutron polarizing device

研究代表者

奥 隆之（Oku, Takayuki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・リーダー

研究者番号：10301748

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）：本研究では、熱外中性子を効率良く偏極して用いるための、スピン交換光ポンピング（SEOP）法に基づくHe-3ガスを用いた中性子偏極フィルターの開発を行った。第一段階として、レーザー波長をSEOP法で用いるアルカリ金属の吸収幅(0.2nm)程度まで狭帯域化した、安定で且つ高出力(100W程度以上)の高強度小型レーザー光学系の開発、第二段階としてアルカリ金属の電子スピン偏極を、He-3核スピンの偏極へ効率良く移行させるために、アルミシリケートガラスにHe-3ガスと共にルビジウム及びカリウムを最適な混合比で封入したセルを開発した。そして、両技術を統合し、熱外中性子偏極フィルターを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

J-PARCの大強度パルス中性子源が稼働し、それ以前はほとんど利用することができなかった熱外中性子等の高エネルギー中性子が得られるようになり、散乱実験やパルス中性子イメージングなど様々な実験で利用できるようになった。その一方で、偏極中性子に関して述べると、世界的に見ても中性子の偏極技術とその利用は、熱中性子（エネルギー数十meV）以下のエネルギー領域に限定されている。熱外中性子を効率良く偏極して用いることができれば、新しい物理を切り開くブレークスルーとなるような基礎物理の研究や物性研究から産業利用まで、その波及効果は極めて大きい。そこで、本研究では、熱外中性子を偏極する技術開発を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a neutron spin filter using He-3 gas based on the spin exchange optical pumping (SEOP) method for efficient polarization of epithermal neutrons.

Firstly, we developed a high-power (>100 W) and compact laser optics with a narrow laser wavelength of 0.2 nm, which is the absorption width of alkali metals used in the SEOP method. Then, we developed an aluminum silicate glass cell which encapsulated He-3 gas, rubidium, and potassium with an optimum mixing ratio to efficiently transfer the electron spin polarization of alkali metals to that of He-3. Then, we integrated both devices and developed an epithermal neutron spin filter.

研究分野：中性子光学

キーワード：中性子 偏極中性子 中性子散乱 中性子偏極子 He-3スピンフィルター SEOP

### 1. 研究開始当初の背景

J-PARC の大強度パルス中性子源が稼働し、パルス中性子の特性を活かした飛行時間法の適用により、それ以前はほとんど利用することができなかった熱外中性子等のエネルギーの高い中性子が、高強度で得られるようになった。そして、回折実験をはじめとする弾性散乱実験や非弾性散乱実験で用いられるようになった[1]。また、新しい実験手法として、共鳴吸収イメージングや磁気イメージングなど、パルス中性子イメージング技術が開発され、注目を集めている[2]。

その一方で、偏極中性子利用の観点で述べると、世界的に見ても中性子の偏極技術とその利用は、熱中性子(エネルギー数十meV)程度以下のエネルギー領域に限定されている。その理由は、以下の通りである。

(1) 熱外中性子以上のエネルギーの高い中性子が高強度で得られる施設が世界的に見ても限られている。( J-PARC と米国パルス中性子源施設 SNS の 2 カ所程度。)

(2) 熱外中性子以上のエネルギーの高い中性子を偏極させるためには、これまで主流だった磁性体結晶(適用エネルギー<50meV)や磁気スーパーミラー(適用エネルギー<20meV)を用いる方法は、原理上、適用不可である。

(3) 熱外中性子以上のエネルギーの高い中性子を偏極させる方法として最も有望なものは、核スピンを偏極させた  $^3\text{He}$  ガスを用いた中性子スピフィルター[3](以下、 $^3\text{He}$  スピフィルターと称する)である。しかし、パルス中性子源施設では、線量の高い放射線が発生するため、実験装置は分厚い放射線シールドの中に設置する必要があるため、中性子偏極デバイスの設置スペースは狭く、また、容易にアクセスできない。

そこで、本研究では、熱外中性子を偏極するための中性子偏極デバイスとして、コンパクトで且つ安定に動作する  $^3\text{He}$  スピフィルターの開発を行うことを目的とする。

### 2. 研究の目的

本研究では、中性子を用いた物理・物質研究能力の飛躍的向上を目的として、熱外中性子(エネルギー100meV以上、波長0.1nm以下)の偏極技術の開発を行う。

ここで、 $^3\text{He}$  スピフィルターの原理を簡単に述べる。熱中性子に対する  $^3\text{He}$  の吸収断面積 $\sigma$ は、中性子のスピと  $^3\text{He}$  のスピが平行な場合 $\sigma_{\parallel}$  と反平行 $\sigma_{\perp}$  な場合で、それぞれ $\sigma_{\parallel} \sim 0$ 、 $\sigma_{\perp} \sim 10000$  barn(ここで barn は断面積の単位で SI 単位系では  $10^{-28}\text{m}^2$ )である。よって、何らかの方法で核スピンを偏極させた  $^3\text{He}$  ガスのある空間に閉じ込めて、そこに中性子を通すことにより、偏極中性子を得ることができる(図1)。得られる中性子の偏極度  $P_n$  及び中性子透過率  $T_n$  は次式で与えられる[3]。

$$P_n = \tanh(P_{^3\text{He}} \cdot \sigma \rho l) \quad (1)$$

$$T_n = \exp(-\sigma \rho l) \cosh(P_{^3\text{He}} \cdot \sigma \rho l) \quad (2)$$

ここで、 $P_{^3\text{He}}$ :  $^3\text{He}$  のスピ偏極度、 $\sigma$ :  $^3\text{He}$  の中性子に対する吸収断面積、 $\rho$ :  $^3\text{He}$  ガスの原子数密度、 $l$ :  $^3\text{He}$  ガスがある領域の長さである。 $\sigma_{\parallel}$  は、 $\sigma_{\parallel} = \sigma_0/E_n^{1/2}$  となり、元素固有の定数 $\sigma_0$ と、中性子のエネルギー $E_n$ で記述される。式(1)、(2)より、エネルギーの高い中性子の偏極には、 $\rho l$ 、すなわち多くの  $^3\text{He}$  ガス量が必要であることが分かる。

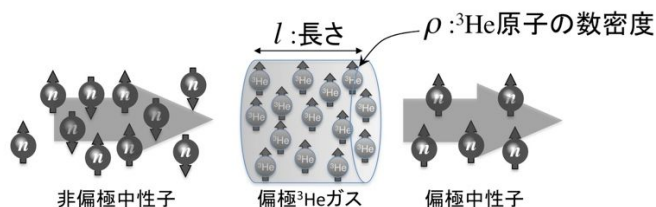


図1  $^3\text{He}$  スピフィルターの原理

$^3\text{He}$  ガスの偏極方法は、最も効率良く  $^3\text{He}$  原子核を偏極できるスピ交換光ポンピング (Spin-Exchanged Optical Pumping; SEOP) 法[4]を用いることにする。上記の目標達成には、式(1)、(2)より、 $Pl = \rho l RT/N_a = 25\text{atm}\cdot\text{cm}$  の  $^3\text{He}$  ガス厚(ガスの気圧 x 長さ)が必要である。ここで、 $P$ : ガス圧、 $R$ : 気体定数、 $T$ : 温度、 $N_a$ : アボガドロ数である。 $^3\text{He}$  スピフィルターの断面積を約  $10\text{cm}^2$ (直径約 3.5cm の円の面積)とすると、必要な  $^3\text{He}$  ガスの量は約 250cc となる。SEOP 法により、 $^3\text{He}$  ガスを十分な偏極度 ( $P_{^3\text{He}} > 80\%$ ) まで偏極させるためには、SEOP 法で用いるアルカリ金属(偏極のシーズ)の吸収スペクトル幅(約 0.15nm)に波長をマッチさせた、 $^3\text{He}$  ガス 1cc

当たり 0.2W の円偏光レーザーパワーが必要[5]であることから、熱外中性子偏極のためには、約 100W の高出力レーザーが必要となる。ここで、研究代表者は、体積ブラッグ回折格子を用いて低出力(約 30W)レーザーを用いた安定でコンパクトな波長狭帯域化レーザー光学系の開発に成功している[6]。そこで、本研究では、小型で、且つ安定な高出力波長狭帯域化レーザー光学系を開発し、SEOP 法に基づく熱外中性子偏極用  $^3\text{He}$  スピンフィルターを開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究で開発を目指す熱外中性子偏極用  $^3\text{He}$  スピンフィルターを実現するために以下の開発に取り組んだ。

開発項目 1: レーザー波長をアルカリ金属の吸収端にマッチさせた安定で高出力(100W 程度)の高強度レーザー光学系の開発。

開発項目 2: アルカリ金属の電子スピン偏極を  $^3\text{He}$  核スピンの偏極へ効率よく移行させるために、特殊アルミシリケートガラスに  $^3\text{He}$  ガスと共にアルカリ金属であるルビジウム Rb とカリウム K を適切な混合比で封入したセル(以下、ハイブリッドセルと称する)の開発。

そして、開発したレーザー光学系及びハイブリッドセルを用いて  $^3\text{He}$  スピンフィルターを構築し、J-PARC 物質・生命科学実験施設において、パルス中性子の偏極実験を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) レーザー光学系の開発

レーザー出力 100W で Rb の吸収端に波長をマッチさせたファイバー型のレーザーを用いて、図 2 に示す SEOP 用レーザー光学系を開発した。本光学系では、ファイバーから出射した無偏光レーザーを偏光ビームスプリッターを用いて、縦偏光した 2 つのレーザー光に分岐させ、それぞれをさらに  $\lambda/4$  波長板を用いて円偏光に変換し、 $^3\text{He}$  ガスセルの両側から照射する光学系を開発した[7]。

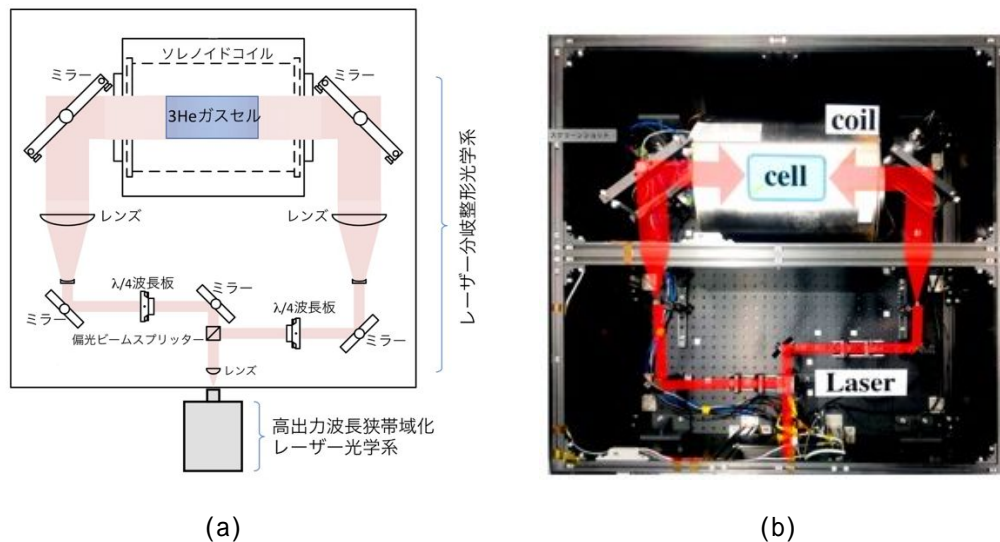


図 2 本研究で開発した SEOP 用レーザー光学系。(a)構成図、(b)実機の写真。

#### (2) ハイブリッドセルの開発

$^3\text{He}$  スピンフィルターでは、特殊アルミシリケートガラスを用いて製作したセルに、 $^3\text{He}$  ガスと共にアルカリ金属 Rb と K を封入したセルを用いるが、高性能な  $^3\text{He}$  スピンフィルターを実現するためには、そのセル内から水素や酸素などの不純物を徹底的に除去することが重要である。そのために、セルにガスやアルカリ金属を封入する前に、セルを超高真空装置に接続し、高温でベーキングしながら、セル内の不純物を十分に取り除く必要がある。今回の研究開発では、ベーキング後の到達真空度が  $10^{-7}\text{Pa}$  台になるようにベーキング条件を調整し、セル製作を行った。

$^3\text{He}$  核スピンは SEOP 法で偏極させるが、レーザー照射を止めると、 $^3\text{He}$  核スピンの偏極度  $P_{3\text{He}}$  は時間  $t$  と共に減少する。その偏極度の時間変化は次式で表される。

$$P_{3\text{He}}(t) = P_0 \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

ここで、 $P_0$  はレーザー照射停止時  $t=0$  での  $^3\text{He}$  核スピンの偏極度、 $\tau$  は緩和時間である。 $\tau$  は次式

で表される。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{B_0}} + \frac{1}{\tau_{\text{dipole}}} + \frac{1}{\tau_{\text{impurities}}} + \frac{1}{\tau_{\text{wall}}} \quad (4)$$

$$\tau_{B_0} = \frac{p}{6700 |\nabla B_x|^2 + |\nabla B_y|^2} [h] \quad (5)$$

$$\tau_{\text{dipole}} = \frac{810}{p} [h]$$

(6)

$\tau_{B_0}$  は外部磁場の不均一性に依存する成分、 $\tau_{\text{dipole}}$  は  $^3\text{He}$  同士の双極子相互作用に依存する成分、 $\tau_{\text{impurities}}$  はセル内の不純物に依存する成分、 $\tau_{\text{wall}}$  はセル内壁との相互作用に依存する成分、 $p$  はセル内部の  $^3\text{He}$  ガスの圧力である。 $\tau_{B_0}$  と  $\tau_{\text{dipole}}$  は式(5)及び(6)で評価できるため、緩和時間 $\tau$ を測定することにより、セルのクオリティに基づく、 $\tau_{\text{impurities}}$  と  $\tau_{\text{wall}}$  を評価することができる。本研究で製作した  $p=3.1\text{atm}$  のセルについて緩和時間を測定したところ、 $\tau=200$  時間であった。式(6)より  $p=3.1\text{atm}$  の場合、 $\tau_{\text{dipole}}=261$  時間である。よって、

$$\frac{1}{\tau_{\text{impurities}}} + \frac{1}{\tau_{\text{wall}}} \leq \frac{1}{856}$$

となり、セル内の不純物やセル内壁との相互作用に依存する成分は、 $^3\text{He}$  同士の双極子相互作用に依存する成分に対して十分小さいことが分かった。

次に、このセルを上述のレーザー光学系に設置し  $^3\text{He}$  スピンフィルターを構築し、それを J-PARC 物質・生命科学実験施設の中性子ビームライン BL10 に設置して中性子透過実験を行った(図3)。中性子透過率の測定結果から  $^3\text{He}$  核スピン偏極度  $P_{^3\text{He}}$  を評価した結果、 $P_{^3\text{He}}=85\%$  が得られた(図4)。この値は  $^3\text{He}$  スピンフィルターとして世界最高レベルの値であり、世界最高レベルの  $^3\text{He}$  スピンフィルターの開発に成功した[7]。

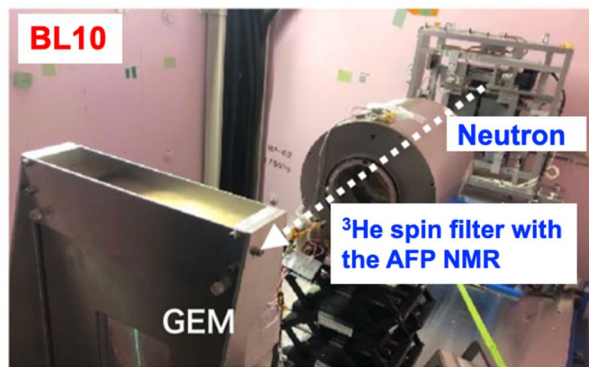


図3  $^3\text{He}$  スピンフィルターの中性子透過率測定実験のセットアップ。中性子検出のは GEM 型中性子検出器を用いた。

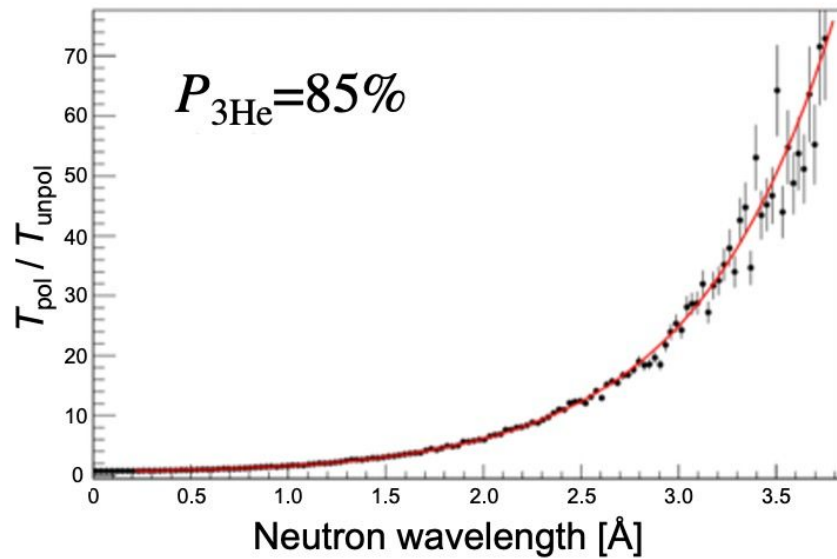


図4  ${}^3\text{He}$  スピンフィルターの中性子透過率測定実験の結果。 $T_{\text{pol}}$  は  ${}^3\text{He}$  核スピンの偏極している時、 $T_{\text{unpol}}$  は  ${}^3\text{He}$  核スピンの無偏極の時の中性子透過率である。

#### 参考文献

- [1] M. Arai et al., Proceedings of the 21st meeting of the international collaboration on advanced neutron sources (ICANS-21).
- [2] T. Shinohara et al., J. Phys.: Conf. Ser. 746 (2016) 012007.
- [3] T.R. Gentile, et al., J. Appl. Cryst., 33 (2000) 771.
- [4] S. Boag, et al., Physica B, 404, 2659 (2009).
- [5] T.E. Chupp, et al., Phys. Rev. C 36, 2244 (1987).
- [6] T. Oku et al., JPS Conf. Proc. 8, 036009 (2015).
- [7] T. Okudaira et al., NIM-A 977 (2020) 164301.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okudaira T., Oku T., Ino T., Hayashida H., Kira H., Sakai K., Hiroi K., Takahashi S., Aizawa K., Endo H., Endo S., Hino M., Hirota K., Honda T., Ikeda K., Kakurai K., Kambara W., Kitaguchi M., Oda T., Ohshita H., Otomo T., Shimizu H.M., Shinohara T., Suzuki J., Yamamoto T.	4. 巻 977
2. 論文標題 Development and application of a <sup>3</sup> He Neutron Spin Filter at J-PARC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164301 ~ 164301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto T., Shimizu H. M., Kitaguchi M., Hirota K., Okudaira T., Haddock C. C., Oi N., Ito I., Endo S., Takada S., Koga J., Yoshioka T., Ino T., Asahi K., Momose T., Iwata T., Sakai K., Oku T., Kimura A., Hino M., Shima T., Yamagata Y.	4. 巻 22
2. 論文標題 Development of a Neutron Spin Filter for a T Violation Search in Compound Nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conference proceedings	6. 最初と最後の頁 011018-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.22.011018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 平賀 晴弘、山口 泰男、丸山 龍治、奥 隆之、猪野 隆	4. 巻 28
2. 論文標題 偏極中性子	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 波紋	6. 最初と最後の頁 144-149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164301	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Takayuki Oku	
2. 発表標題 Development and application of a spin-exchange optical pumping <sup>3</sup> He neutron spin filter at J-PARC	
3. 学会等名 中性子散乱アジア・オセアニア会議 (招待講演) (国際学会)	
4. 発表年 2019年	



1. 発表者名 Takayuki Oku
2. 発表標題 A neutron depolarization measurement of a single crystal Fe by using a 3He neutron spin filter and magnetic super-mirrors
3. 学会等名 3rd J-PARC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥 隆之
2. 発表標題 単結晶鉄試料の透過中性子偏極度解析実験
3. 学会等名 日本中性子科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Oku
2. 発表標題 A neutron depolarization measurement of a single crystal Fe by using a 3He neutron spin filter and magnetic super-mirrors
3. 学会等名 Polarized Neutrons for Condensed Matter Investigations (PNCMI) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	酒井 健二  (Sakai Kenji)  (40272661)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARCセンター・研究主幹    (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------