

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22604005

研究課題名（和文） 中性子共鳴反応による偏極希ガスの中性子偏極能力検証と応用

研究課題名（英文） Detection and Application of Neutron Polarization of Polarized Noble Gas by Neutron- Nuclear Resonant Reaction

研究代表者

酒井 健二（SAKAI KENJI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究副主幹

研究者番号：40272661

研究成果の概要（和文）：本研究では、中性子・原子核共鳴反応に起因する偏極キセノン（Xe）ガスの中性子偏極能力の検証と応用を提案した。その実現のために、我々はスピン交換光ポンピングと核磁気共鳴法に基づく Xe ガス偏極装置や可搬型偏極 ^3He スピンフリップパーを開発し、偏極 Xe による中性子偏極能力の測定装置を設計・構築し、J-PARC のパルス中性子源を用いた装置の性能試験を実施した。

研究成果の概要（英文）：We proposed to detect and apply a neutron polarizing ability of polarized xenon (Xe) gas caused by neutron-nuclear resonant reactions. For this purpose, we have developed a polarized Xe system and portable polarized ^3He spin flipper based on spin exchange optical pumping and nuclear magnetic resonance technique, designed and constructed the apparatus for measuring the neutron polarization caused by the polarized Xe system, and carried out a feasibility test of our apparatus with a pulse neutron source at J-PARC.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：中性子偏極能力、希ガス偏極、中性子共鳴ピーク、核磁気共鳴、中性子光学、スピン相関項、スピン交換光ポンピング、パルス中性子源

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、スピン交換光ポンピング（SEOP）による偏極技術の発展により、ヘリウム 3（ ^3He ）やキセノン（ $^{129,131}\text{Xe}$ ）など高偏極希ガスの生成が可能になった。本研究では、中性子・原子核の共鳴反応の持つスピン選択性、J-PARC の大強度パルス中性子源など、物理現象や最新技術を駆使して、SEOP で偏極希

ガスを生成し、その中性子偏極能力を希ガス偏極の挙動検知に応用することを提案した。Xe の中性子偏極能力に関する測定データが殆ど無い現状で、本研究は中性子・Xe の核スピン交換相互作用の解明にも寄与することが期待できる。

(2) 偏極希ガスは、原子核散乱実験の偏極標

的、中性子実験のための偏極フィルター・標的、核スピンのラーモア周波数を高精度で測定するためのプローブなど基礎物理分野で幅広く応用されている。物質・生命科学分野では、物質表面でのスピン偏極移行現象の探索、肺の磁気共鳴イメージや血流トレース用の磁気プローブなど幅広い応用が期待できる。しかし希ガス偏極の検出に核磁気共鳴 (NMR) やプローブ光の吸収を利用する従来法は、感度は高いが磁場や光の高度な制御が必要で、周辺環境の制約も多い。中性子偏極能力を希ガス偏極の挙動検知に応用する本研究手法は、偏極希ガスの応用に更なる選択肢を増やすことが期待できる。

2. 研究の目的

(1) 中性子・原子核共鳴反応の持つスピン選択性と中性子断面積の大きな共鳴エネルギーピークに着目し、冷～熱外中性子領域に渡る幅広い中性子エネルギー領域を高分解能で同時測定可能な大強度パルス中性子源を用い、核スピン偏極した希ガス (^3He , $^{129,131}\text{Xe}$) の中性子共鳴ピークに起因する中性子偏極能力を検証する。

(2) 中性子偏極能力を希ガス核スピンの巨視的挙動 (成長、緩和、移行、歳差など) の研究に応用する。そのために必要となる中性子や希ガスの核スピン偏極生成・制御・検出技術の研究開発を行う。

3. 研究の方法

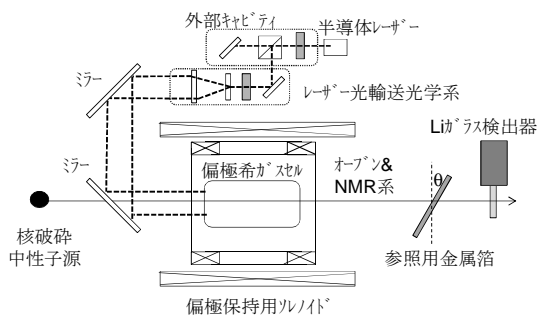


図1 偏極Xeの中性子偏極能力を測定する実験装置体系

(1) 図1は、中性子偏極能力検証のための実験装置概要を表す。実験はJ-PARC/物質・生命科学実験施設 (MLF) の中性子ビームライン10 (BL10) で実施する。図1で、核破砕中性子源から供給されたパルス状中性子ビームは、偏極Xeセル、金属箔を透過し、中性子源から約14m位置に設置されたLiガラス検出器で検出される。実験では、無偏極中性子ビームが偏極及び無偏極Xeセルを透過する際の中性子透過率の変化 ΔT_n を、 ^{129}Xe の共鳴ピーク ($E_s \approx 9.6\text{eV}$) 近辺で、中性子飛行時間 (TOF) 法を用い、高エネルギー分解能で測定することで、中性子スピン s と核スピ

ン I の相関項 $s \cdot I$ に起因する ^{129}Xe の中性子偏極能力を検証する。

①天然Xeを1-3気圧封入したガラスセルをBL10内に設置し、Xeの共鳴ピーク付近でのTOFスペクトルを測定する。それに基づき、統計精度と偏極能力測定に最適なガス厚 (気圧・cm) を評価する。

②中性子透過率変化 ΔT_n を高精度で検出できる中性子計測システムを開発・整備する。特に本測定では、ゴニオメータ上に参照用金属箔を設置し、 ^{129}Xe と金属箔の共鳴ピークを比較することで、時間的揺らぎなど計数率の系統誤差を補正して高精度の測定を目指す。

(2) 本研究で構築するSEOP希ガス偏極装置は、半導体レーザー、レーザー光輸送光学系、及び約30cm長の偏極保持用ソレノイドなどで構成するが、BL10内の狭い空間に設置できる程度のコンパクトサイズとする (図1)。ソレノイド内には、1-3気圧の希ガスと少量のRbを封入したガラスセルを挿入したオープンが設置される。偏極希ガスは、波長795nmの円偏光レーザーを照射して得られるRb原子偏極を、超微細相互作用を通じて希ガス偏極に移行することで生成する。オープンの温度は適量のRb蒸気を得るため、350-450K程度に保たれる。セル周辺には、断熱高速透過 (AFP) 法により希ガス偏極を制御・検出するためのNMRコイルを据え付ける。

①SEOP偏極装置とAFP-NMR系を開発・整備して、オフビームで偏極度 P_{Xe} などセル特性を評価できるようにする。特に ^3He からXeの P_{Xe} 校正ができるように、 ^3He , ^{129}Xe 両原子核の偏極制御が可能なAFP-NMR系を構築する。

②ガラスセル製作装置を整備して、1-3気圧の天然Xeや濃縮 ^{129}Xe ガスを封入した5-10cm長のガラスセルを作成する。Rb原子の減偏極がガス圧に大きく依存するXeセルの場合、ガス圧の低い濃縮 ^{129}Xe セルで高い P_{Xe} を実現することが望まれる。

(3) Xe核偏極の巨視的挙動研究まで展開するには、予言値が大きな測定量を利用することが重要である。そのために偏極 ^3He スピンフリップパー (PHSF) を開発し、偏極中性子ビームによる中性子スピン非対称度 A_I やスピン回転角 ω などの測定が可能なシステムを構築する。

4. 研究成果

(1) 中性子光学に基づき、相関項 $s \cdot I$ に起因する各測定量 (断面積スピン依存性 $\Delta\sigma_I$ 、ス

ピン回転角 ω)を評価した。特に各測定量の中性子共鳴ピークや相関項間の干渉まで考慮することで、Xeの共鳴ピーク付近での $\Delta\sigma_I$ や ω の中性子エネルギー依存性を具体的に提示し(図2)、冷~熱外中性子領域に渡る測定の重要性を示した。更に偏極 ^{129}Xe の共鳴ピーク($E_S \approx 9.6\text{eV}$)で中性子透過率変化 ΔT_n を測定する実験を詳細に検討し、濃縮 ^{129}Xe ガス厚 ≈ 10 気圧 $\cdot\text{cm}$ 、偏極 $P_{Xe} \approx 10\sim 20\%$ というセル条件で、 $\Delta T_n \approx 0.3\sim 1.2\%$ という測定目標値を算出した。

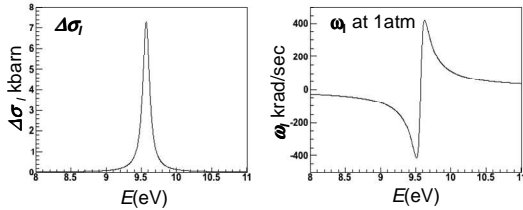


図2 偏極 ^{129}Xe 共鳴ピークでの $\Delta\sigma_I$ 、 ω の中性子エネルギー依存性

(2) BL10にガス厚5-15気圧 $\cdot\text{cm}$ の天然Xeを封入したガラスセルを設置し、 $^{129,131}\text{Xe}$ の中性子共鳴ピークを実測して ΔT_n 測定に適したガス厚を評価した。また中性子透過率の測定精度を向上するために、イベントデータ対応型のデータ収集系を導入した計測系の開発・整備を実施した。それを用いて、 ^{129}Xe の中性子共鳴ピーク($E \approx 9.6\text{eV}$)と $10\mu\text{m}$ 厚Ag箔の共鳴ピーク($E \approx 5.2\text{eV}$)を中性子TOFスペクトルで同時に比較測定(図3)することで、計数の時間揺らぎの補正が可能なシステムを構築した。更にゴニオメータを回転させてAg箔の実効厚を変えることで、 ^{129}Xe の偏極 P_{Xe} による中性子透過率変位 ΔT_n を模擬した測定を行い、 $\Delta T_n \approx 1\%$ 程度の精度を得られることを示した。

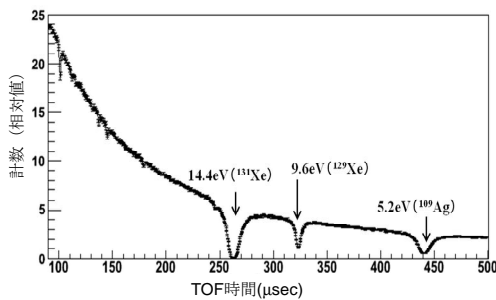


図3 天然XeとAg箔の中性子TOFスペクトル

(3) ^3He とXeガスセルで共用可能なNMR系を備えた可搬型SEOP偏極装置を開発しBL10に設置して、希ガス偏極生成、ビーム照射、NMR測定という ΔT_n 測定のための一連の実験手順を踏んで、測定環境・条件・時間などの評価を実施した。更に偏極 ^3He のNMR信号を中性子ビームと同時測定することでNMR系の校正を行い、Xeの偏極度 P_{Xe} が

NMRシグナルから導出できるようにした。図4は、2011年1月のビームサイクル中にBL10内で測定した ^3He とXeのNMR信号例を示している(ガス厚15気圧 $\cdot\text{cm}$ の天然Xeセルで $P_{Xe} \approx 1\%$ に相当)。更に偏極装置のレーザーや光学系を逐次増強・最適化することで、最終年度(2012年度)には、ガス厚5気圧 $\cdot\text{cm}$ の天然Xeセルで $P_{Xe} \approx 9\%$ 、15気圧 $\cdot\text{cm}$ セルで $P_{Xe} \approx 4\sim 5\%$ まで偏極度を向上させた。

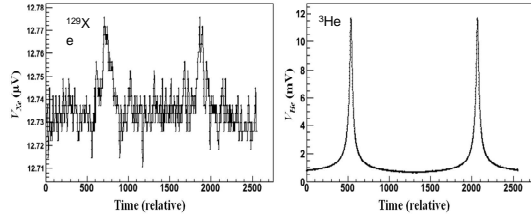


図4 天然Xe、 ^3He セルのNMR信号

(4) 偏極中性子によるスピン非対称度 A_I やスピン回転角 ω 測定を視野に入れ、AFP-NMR系の磁場掃引シーケンスを改良することで、偏極 ^3He セルを応用した白色中性子対応型スピフリップパー(PHSF)を開発した。更にPHSFを2台組合せた中性子スピン偏極解析装置を構築し、BL10のパルス中性子ビームで、磁場に起因する中性子ラーモア回転運動で ω を模擬した測定を実施し、熱外中性子領域(0.3eV程度)まで検知可能なことを示した。図5は偏極中性子がコイルを通過する際に生じるスピン回転周期をTOFスペクトルの計数変化として検知したもので、図5の振動周期から中性子が通過した場所の積分磁場を求めることができる。

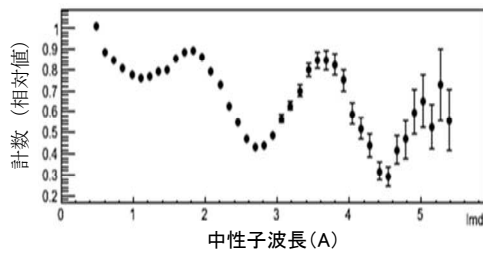


図5 スピン解析装置による磁場積分強度の測定例

(5) 2011年3月に起こった東日本大震災で、開発した装置以上に実験室やビーム照射施設など周辺設備が大きな影響を受け、2011年度は多くの時間をその復旧に費やした。特にセル作成装置周辺の整備に時間がかかってしまい、新たなセル作成が進まず、結果として偏極 ^{129}Xe の ΔT_n 測定が遅れている。一方で、中性子計測システム、NMR系、SEOP偏極装置、PHSFなどの技術開発は順調に進展しており、濃縮 ^{129}Xe セルや高圧 ^3He セルなどの希ガスセルを作成すれば、 ΔT_n だけでなく、 A_I や ω も十分測定可能な技術レベルに達している。また本研究で実証した可搬型PHSF

を2台用いた中性子スピン偏極解析の手法は、偏極ミラーでは測定不可能な熱外中性子領域での中性子磁気イメージングなどに既に応用されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① K. Sakai, T. Oku, T. Shinohara, H. Kira, M. Ooi, et al
Development of polarized Xe gas target for neutron experiment at J-PARC, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 340, 2012, 012037

[学会発表] (計4件)

- ① 酒井健二, 奥隆之, 他,
J-PARC/MLFでの可搬型偏極He-3スピンフリップパーの開発、中性子科学会第12回年会、2012年12月11日、京都
- ② 酒井健二, 奥隆之, 他
中性子偏極実験のためのHe-3偏極スピンフリップパーの開発、第4回MLFシンポジウム、2012年10月11日、東京
- ③ K. Sakai, T. Oku, T. Shinohara, H. Kira, M. Ooi, et al
Development of polarized Xe gas target for neutron experiment at J-PARC, 5th European Conference on Neutron Scattering, 2011年7月20日、プラハ(チェコ)
- ④ 酒井健二, 奥隆之, 篠原武尚, 坂口佳史, 吉良弘, 大井元貴, 他
中性子実験のための偏極Xeガスフィルターの研究開発、第2回MLFシンポジウム、2011年1月17日、つくば

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 健二 (SAKAI KENJI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARCセンター・研究副主幹
研究者番号：40272661

(2) 研究分担者

大井 元貴 (OOI MOTOKI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARCセンター・研究員
研究者番号：90446401

篠原 武尚 (SHINOHARA TAKENAO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・

J-PARCセンター・研究副主幹
研究者番号：90425629

奥 隆之 (OKU TAKAYUKI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
J-PARCセンター・研究主幹
研究者番号：10301748