

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14528

研究課題名(和文)レーザー照射実験用核偏極固体HD薄膜ターゲットの開発研究

研究課題名(英文) Nuclear polarized H-D layer target for the laser illumination experiment

研究代表者

中井 光男 (Mitsuo, Nakai)

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：70201663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：将来の核融合燃料(DT)の核偏極手法の確立を最終目的として、強磁性錯体の内部磁場を利用することにより、従来困難であった10 K程度の高温度での純粋HD(水素・重水素)の核偏極を実現するための基礎研究を行った。磁性錯体によるHDの吸着・脱離実験によってHDの安定保持を確認した。今後の冷却実験を行うためのコンパクトなNMR測定系を有した4Kクライオ実験系を完成した。偏極実験に向けた新たな偏極手法の検討と実験体系の概念設計を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱核融合は次世代のエネルギー源としてその開発が期待されているが、未だ実現されていない。本研究は、核物理学的知見によって、その技術的困難を緩和し、熱核融合開発を促進する基盤技術を開発するものであり、人類に豊かな未来を約束するための基礎研究である。本課題の範囲では、今後、研究を進めるに必要な実験基盤を整備することができた。

研究成果の概要(英文)：Basic research for Nuclear polarization of HD (hydrogen and deuterium molecule) under the high temperature around 10 K was performed aiming to establish the supply method of nuclear polarized fusion fuel in the future. It is expected that polarization of the HD is persisted under the internal high field in the ferromagnetic metal complex material. It was confirmed that HD molecules were kept stably in the Prussian blue analogues. We constructed a cryostat with a compact NMR probing system to confirm the persistency of the nuclear polarization of HD kept in the ferromagnetic complex material. Also a conceptual design of the polarization system for the future laser illumination experiments were presented.

研究分野：慣性核融合

キーワード：慣性核融合 核偏極燃料ターゲット 磁性錯体 コンパクトNMR

1. 研究開始当初の背景

DT 核融合燃料のD (重水素) 及びT (三重水素) を偏極できれば、核融合効率を大きく改善できる。偏極DT 核融合の構想に関するKulsrud 他の論文 に依れば、D とT の核スピンの向きが完全に平行に揃えられたときの核融合断面積は50%増大する。レーザー核融合の極めて短い照射時間では核偏極は持続すると期待される が、これまで所望の偏極核燃料を製作する手法がなく、実験的な検証は行われていない。本申請の連携研究者 (藤原) 等は、加速器施設SPring-8 の偏極固体HD ターゲットを製作した実績を有していることから、この話題に着目した核物理実験を提唱した。慣性核融合実験では、球対称な固体重水素・三重水素燃料ペレットを作製し、それを爆縮することによって高温の燃料プラズマを生成するのであるが、対称性の高い燃料球殻を作成することはそれ自体開発途上の技術である。一方、近年高強度レーザーが進歩し、レーザー照射直接加熱によって高温プラズマを生成して核融合反応を誘起する実験が提案されていた。我々は、偏極された核融合燃料を大阪大学レーザー科学研究所の超高強度レーザーLFEX によって直接照射し、核融合反応生成中性子及びガンマ線並びに放出される荷電粒子の計測から偏極効果を検証することを目的として、平板状の自立した薄膜状の固体水素ターゲット (無背壁固体HD 膜) の開発を開始した。一方で、将来の核融合炉を考えたDT燃料の核偏極においては、T の崩壊熱が障害となって、既存の加速器等での実験に用いられている偏極固体ターゲットの製作手法をそのまま適用することはできない。そのため、より高温で、純粋なHD (並びにDT) を偏極する手法の開発が求められた。

2. 研究の目的

熱核融合とりわけ慣性核融合において、核偏極燃料の利用が有効であることを実験的に検証することを最終目的として、核融合燃料の核偏極の手法を開発する。本研究はその第一歩として、DT と同じスピン統計のHD を用いて、DT 偏極固体ターゲット製作手法の基礎開発並びに偏極固体燃料による慣性核融合レーザー照射実験装置の基本概念設計を行う。DT 燃料の場合、T の崩壊熱が障害となって、現在加速器等での実験に用いられている偏極固体ターゲットの製作手法を適用することはできない。そのため、水素吸着性を有する強磁性錯体の内部磁場を利用することを着想し、4-10 Kの高温における核偏極並びに偏極維持の可能性を調べる。

3. 研究の方法

強磁性錯体の強い内部磁場によって、4-10 Kの温度でHDを核偏極させ、かつ偏極保持できることを実証するために、磁性錯体サンプルを保持したガスセルを有し、NMR計測系を備えた極低温実験装置を開発する。

また、同極低温実験装置において、自立した (無背壁) 単結晶HD膜ターゲットの生成手法を確立し、将来のレーザー照射実験を想定した、核偏極並びに照射実験装置の概念設計を行う。

4. 研究成果

(1) 核偏極実験用極低温実験装置の開発

トリチウムの崩壊熱によって想定される温度領域 (1-4 K) での水素吸着性を有する強磁性錯体を用いた効率的な核偏極の可能性を検証することを目的として、磁性錯体のHD ガス吸着特性及びHD 回収特性を実測した結果、24KにおいてH₂換算にて0.5 weight%(吸着水素重量対強磁性錯体重量比) を越える高いHD 吸着回収率を得た。さらに磁性錯体より回収したHD の偏極率の測定を行うために、極低温ガスセル並びにNMR 測定系の

開発を行った。

ガスセルは、4 K-GM 冷凍機の上部に、図 1 の様に、磁性錯体を保持したセルと NMR による偏極率測定のためのセルを有したものが当初予定された。まず、77K 及び冷凍機 4 K での磁性錯体(プルシアン青類縁体)による HD の吸着・脱離による組成変化を調べ、吸着回収した HD の純度が 10^{-4} の精度で劣化していないことにより分子間の移動がほとんど見られないことを確認した。その後、冷却実験を実施しながら、装置の改良を進めた。冷凍機の運転及び温度モニター系の作動が NMR 測定に大きな影響を与えること、温度変化に伴うセル中の HD の揺動が NMR 測定に影響することなどがわかり、これらの不具合を段階的に解消し、最終的に図 2 のセル構成が採用された。また、NMR 測定系に関しては、図 3 の構成の様な PC ベース・ポータブル NMR 偏極測定装置 を本研究の当初に作成し使用したが、計測シャーシ内の複数のユニットを PC で制御するのでは、データ収集速度が遅く、新たにシャーシ内に組み込めるコントローラーを導入し、データ収集速度を 3 倍にすることによって、測定時の S/N 比を大幅に改善することができた。

以上の通り、当初計画された装置構成を改良しつつ、予定の装置の完成することができたが、最終的な偏極実験は、今後、引き続き実施していくこととなった。

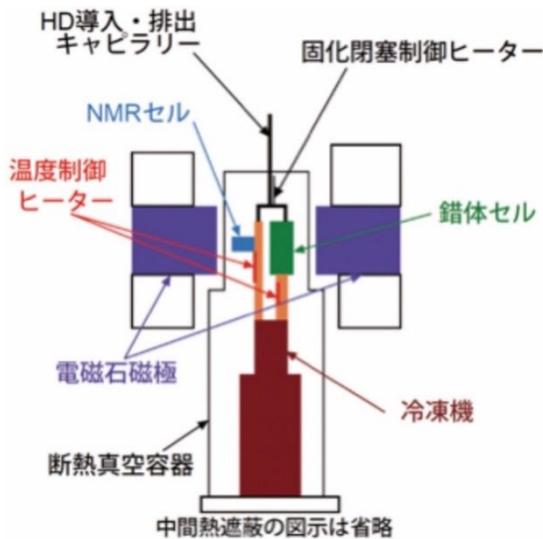


図 1 当初計画時の極低温実験装置構成図

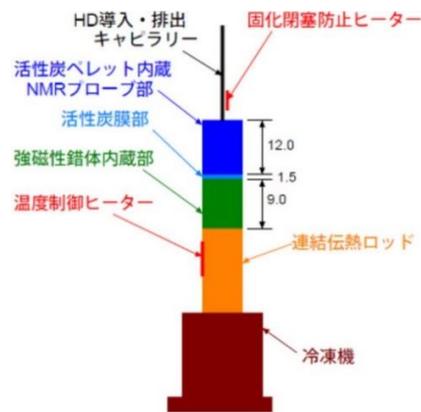


図 2 改良型(単筒型)偏極・測定セル

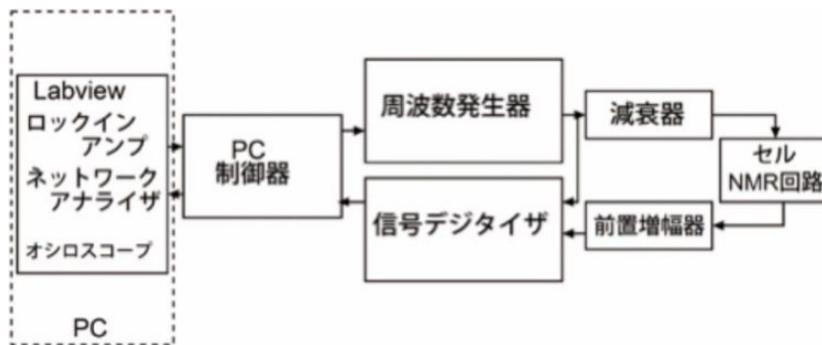


図 3 当初計画時の NMR 測定系統図

(2) レーザー照射固体ターゲット装置の設計

本研究の当初 は、偏極保持の実証を目的として、既に大阪大学核物理研究センター (RCNP) で実績のあ

る HD 固体ターゲットを大阪大学レーザー科学研究所の核融合実験用レーザーによって照射し、DD 反応による中性子発生数ならびに分布、PD 反応によるガンマ線の方向分布を調べることが提案された。そのために、仏国 IPNO (Institute de Physique Nucleaire Orsay) で開発され、Spring-8 での実験のために準備されている固体 HD 偏極ターゲット (図 4) ならびに輸送クライオスタットをレーザー科学研究所の激光 GXII 号レーザー照射実験用に改良することが想定されていた。しかし、将来の研究展開を想定したターゲット開発としては、発生する高エネルギーのガンマ線による付加的なノイズ信号を極力抑えるとともに、ターゲット内部で現象のモデル化を容易にするためには、極力簡素な無垢の水素ターゲットを用い、併せて裏面より放出される荷電粒子の観測が可能な自立した (無背壁) 水素ターゲットの製作が望ましい。そのために、図 5 の様に、レーザー照射実験用真空容器の中で、単結晶薄膜を成長させる手法が考えられた。実験的には、今回構築されたクライオスタットを用い、初期の段階で、銅のブロックに開けたサブミリ径の貫通穴に固体 HD 薄膜を充填することに成功した (図 6)。これらの経験を基に無背壁単結晶固体水素薄膜ターゲットを試作するため、図 7 に示すサブミリ径の貫通孔及びスリットを加工したサファイア膜カートリッジを製作した。核偏極実験装置の製作が遅

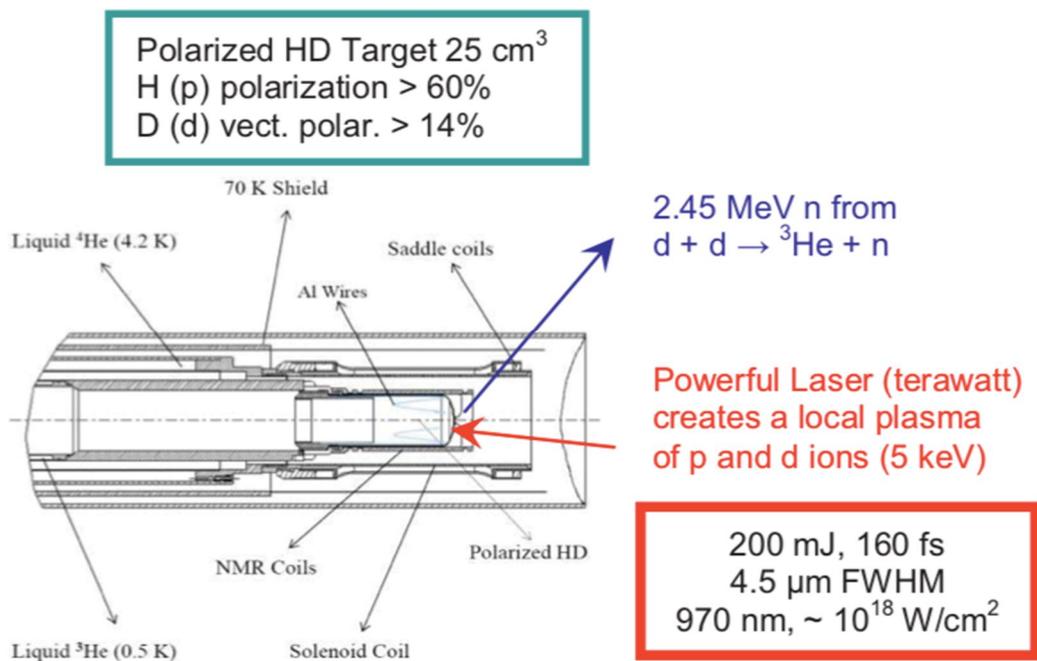


図 4 固体 HD 偏極ターゲット (引用文献) 仏国 IPNO で開発された基本形状。

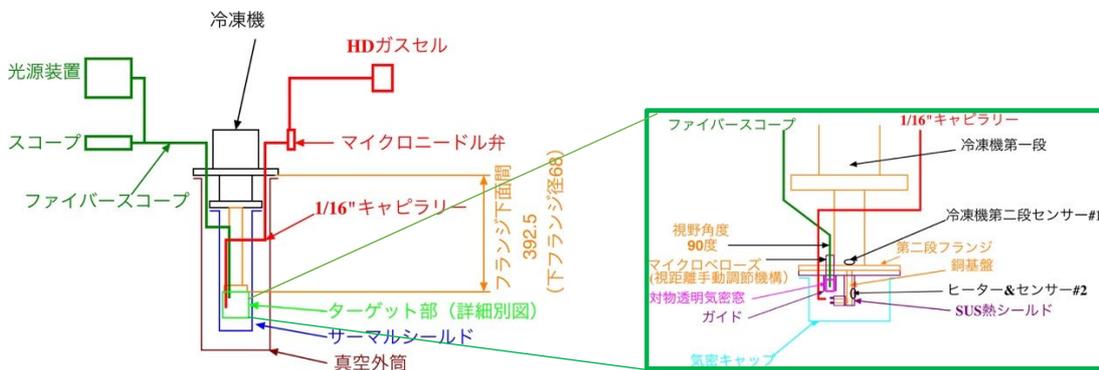


図 5 レーザー照射用無背壁水素固体ターゲット製作装置基本設計



図6 予備実験として行った銅カートリッジ
(6mmx10mm)の無背壁HD薄膜固化試験



図7 スリット加工サファイア膜
カートリッジ(外径 10 mm x 全長 15 mm)

れ、単結晶薄膜の実験は、今後の課題となった。

一方、Frozen-Spin(一旦偏極したスピンは、ターゲット温度が数K程度であれば、数十時間は保持される)により、昇華ガスを経由して、再固化させることによって最終的なターゲットを製作することを想定すると、磁性錯体による比較的高温での偏極保持が効果的なりザーバーと考えることができる。RCNPで採用されている偏極方法は、17Tの強磁場下でのゼーマン分離によって、十分な偏極が得られる極低温度(10mK)で熱平衡を実現する方法であるが、十分な偏極率を達成するには、現時点で、1ヶ月程度の時間が必要と考えられている。一方、レーザー誘起偏極法では、比較的高温でも維持される電子スピン偏極をレーザーによって誘起し、平衡時の核偏極比率を希望する方向にシフトする。これによって、比較的高温で高い偏極率が実現されると期待され、図8のシステムを構想するに至った。今後、図8に示す様に、レーザー誘起核偏極に偏極分離と開発中の強磁性体保持の技術を応用することによって、液体ヘリウム温度程度で高い偏極率が実現されるシステムの開発を目指す。

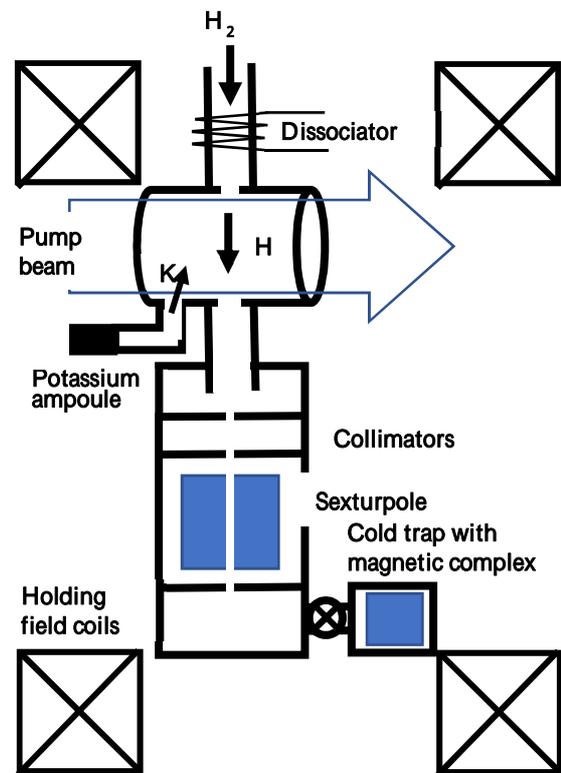


図8 レーザー誘起核偏極システムの概念図

<引用文献>

- R. M. Kulsrud et al., Phys. Rev. Lett. 49 (1082) 1248.
- R. M. More, PRL 51 (1983) 396.
- J. P. Didelez, C. Deutsch, M. Fujiwara, M. Nakai and M. Utsuro, *J. Phys.: Conf. Ser.* 688 (2016)012015.
- "Nuclear Fusion with Polarized Fuel", Springer Proceedings in Physics 187.
- T.Ohta et al., Nucl. Instrum. Methods A633 (2011)46.
- S. Bouchigny et al., Nucl. Inst. And Meth. A 607 (2009)271.
- M. Fujiwara, Acta Phys. Polonica B37(2006) 57.

T. Nakajima, Phys. Rev. Lett.99, 024801(2007).

B. Clasié et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A536(2005)260-265; Phys. Rev. A 73, 020703(R)(2006).

5 . 主な発表論文等

〔学会発表等〕(計2件)

宇津呂雅彦、中井光男、郡英輝、太田岳史、今野巧、井頭麻子、藤原守、「温度約1~10Kの領域における重水素化水素 HD プローブの NMR 及び固体 HD 薄膜の作成(V))方法、光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2018、2018年5月8、9日。

宇津呂雅彦、中井光男、郡英輝、太田岳史、今野巧、井頭麻子、藤原守、「温度約1~10Kの領域における重水素化水素 HD プローブの NMR 及び固体 HD 薄膜の作成(IV))方法、光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2017、2017年5月9、10日。

〔その他〕

機関報告書 レーザー科学研究所 共同利用・共同研究報告書(平成28、29、30年度)
核物理研究センター Annual Report RCNP 2015 及び 2017

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：宇津呂 雄彦

ローマ字氏名：Masahiko Utsuo

所属研究機関名：大阪大学

部局名：核物理研究センター

職名：協同研究員

研究者番号(8桁)：50027421

研究分担者

研究分担者氏名：井頭 麻子

ローマ字氏名：Asako Igashira

所属研究機関名：明治大学

部局名：法学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：20379275