

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340078

研究課題名(和文)蓄積リング実験および原子核実験用の窓なし固体パラ水素標的の開発

研究課題名(英文)Development of the windowless solid para hydrogen target

研究代表者

石元 茂 (Ishimoto, Shigeru)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：50141974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円、(間接経費) 4,530,000円

研究成果の概要(和文)：窓なし固体水素(重水素)ターゲットを用いた実験(IRIS)をカナダのTRIUMFにおいて行った。この固体水素ターゲットの厚さは50～100 micronである。真空中で小型GM冷凍機により4 K以下に冷却された低温の純銀箔(t=5 micron)表面上に室温の水素ガスを吹き付けて固体水素薄膜を作成した。

実験中はビームを用いてターゲットでのエネルギーロス測定し厚さを常時モニターした。ターゲット厚さが固体水素の場合は8～24時間で半減したので、厚さが約1/2になる毎に水素ターゲットを作成し直した。固体重水素の場合は厚さの減少をエネルギーロスで観測できないほど蒸発量が少なかった。

研究成果の概要(英文)：The IRIS-experiment using the windowless solid hydrogen (deuteron) target was conducted at TRIUMF in Canada. The thickness of the solid hydrogen target was 50-100 micron. Hydrogen gas at room temperature was sprayed on the surface of pure silver foil (t=5 micron) at lower than 4 K cooled by the GM-Cryocooler in the vacuum, and the solid hydrogen thin film was created. During this experiment, the beam energy loss in the target was measured and the target thickness was always monitored. Since the target thickness was halved in 8-24 hours, the hydrogen target was re-created. In the case of solid deuterium, the reduction of target thickness could not be observed by the energy loss method.

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核実験 固体水素標的 固体重水素標的 低温

## 様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまで原子核実験とくに不安定核のビームを用いた実験においては、液体水素や液体重水素を固定ターゲットとして用いる散乱実験が行われてきた。しかし、液体水素ターゲットでは 20 K の液体水素を薄膜容器内に保持する必要があることから、1 気圧の水素内圧により薄膜容器窓が変形し均一な厚さのターゲットの実現が困難であった。また、安全上からも差圧 1 気圧以上の耐圧を必要とするため容器材料からのバックグラウンドが避けられない。

水素ターゲットを用いる実験では、できるだけ軽量な容器材料で、可能であれば真空との障壁のない「窓なし」で、しかも「均一な厚さ」の水素ターゲットが求められている。

これらの課題を克服するターゲットとして我々は固体水素ターゲットの開発を継続して行っている。固体水素を温度 3~4 K まで冷却すると、水素蒸気圧が小さくなり容器材料は薄くでき、窓の変形量も最小限に抑えられる。さらに、固体水素では液体水素のようなターゲット密度の時間変化がなく、泡の発生による密度補正の必要もないというメリットがある。

我々はこれまでに断熱真空中に固体水素の表面を露出させることでビーム軸上に容器物質が全く無い「窓なし」ターゲット(厚さ 2~5 mm)を開発した。しかし、厚さ 1 mm 以下の「窓なし」の固体水素は機械的な保持の困難や冷凍機のクールドヘッドとの熱伝達が不十分のため実現が難しかった。

一方、ターゲットの厚さが 50 mm 以上が必要な不安定核ビームの断面積測定などでも容器が軽量でかつ変形が少ない水素ターゲットが必要とされている。この目的のために直径が 50 mm で、長さ 50~100 mm の大きさで厚さがほぼ均一で、かつ固体内部に空洞がない固体水素ターゲットを開発した。

ターゲットの冷却装置としてはこれまで用いられた液体ヘリウムによる冷却から、冷媒を必要としない簡便な G-M 小型冷凍機を用いる方式を試

してきた。

G-M 小型冷凍機の到達温度は約 3.5 K であるが、真空中に窓なしで固体水素を長時間保持するには固体水素の蒸気圧から、常に 4 K 以下に冷却しなければならない。このために輻射シールドの改良などの断熱技術の開発も必要である。

一方、蓄積リングでの固定ターゲット実験ではこれまで水素ガスジェットターゲットが用いられてきた。しかし反応イベント数を多くするために、より密度の高い、薄くて両面に窓がない固体水素ターゲットの実現が期待されていた。

米国フェルミ研究所(FNAL)では TEVATRON 終了後の将来計画として、反陽子蓄積リング内でビームとリング内部においた固定の固体水素ターゲットを用いた CP 保存則の検証実験の計画が進行中であった。

### 2. 研究の目的

反陽子蓄積リングでの素粒子実験用内部ターゲットとして使用可能で、また高中低エネルギー領域の原子核実験にも使用可能な「薄い両面窓なしの固体パラ水素ターゲットの開発」を目指す。

薄い両面窓なしの固体水素ターゲットは広いビームエネルギー範囲の実験に使用可能で、素粒子・原子核実験において強く要望されている。このための厚さ 3 mm 以下の窓なし固体水素ターゲットの開発を行う。このため、まず真空中で 4 K 以下に冷却した金属上に水素ガスを吹き付ける「ガス吹き付け法」で厚さ 1 mm 以下の薄い窓なしの固体水素ターゲットの開発を開始する。

FNAL での実験ではこれまで行われてきた実験と同様の水素ガスジェットターゲットではガスジェット密度の上限のため、イベント数が不足して十分な統計を得ることができないという問題があった。もし真空と固体水素間に障壁材料を全く用いない「窓なし」で厚さが 2 mm 程度かそれ以下の薄い固体水素ターゲット(SHT)が開発できれば、マシンタイムと統計精度を大幅に改善できる可能性があった。

### 3. 研究の方法

これまで開発を行ってきた、5~25  $\mu\text{m}$  のマイラー薄膜の中に作成した厚さ 1~5 mm, 50~100 mm の2つのタイプの原子核実験用固体水素・重水素の開発を継続するとともにそれらを使用したビーム実験を継続して行っていく。

同時に、不安定核のビーム実験用として新たに小型冷凍機で 4 K まで冷却した極めて薄い金属表面上に水素ガス吹き付け法で固体水素ターゲットを開発する。

この窓なしの固体水素ターゲットではターゲットの温度が保持時間を決定づけるため、到達温度をできるだけ下げようとする技術開発を行う。特に小型冷凍機の到達温度付近における熱侵入を小さくする方法を開発する。この輻射による熱流入を抑えるためには低温側、高温側の両面の輻射率の改善のための技術開発が必要であり、この技術は液体ヘリウム、液体水素などの汎用のクライオスタットにも応用される。

FNAL での反陽子蓄積リングでの実験計画はプロポーザルが不調に終わったため設計と試作による開発研究を行った。

### 4. 研究成果

これまで開発を行ってきた、マイラー薄膜の中に作成した厚さ 1~5 mm および 50~100 mm の2種類の原子核実験用の固体水素・重水素ターゲット用いた開発を継続し、より安全で使いやすいターゲットに改善した。また、これら2種類の固体水素ターゲットを使用した不安定核ビーム実験を行った。

ガス吹き付け方式の固体水素装置は、SHI 製小型 G-M 冷凍機 RDK-415D(冷却能力 1.5W@4.2K)を冷却源とする。その 2nd.ステージ先端部に接合した厚さ 10 mm の無酸素銅(OFHC)プレート表面に厚さ 5  $\mu\text{m}$  の純銀フォイルを接着したものである。断熱真空槽の外部配管系から目的のターゲット厚さに合わせて検量した後、原料ガス(水素や重水素)を供給した。手動バルブにより断熱真空中の焼結金属ディスク(ディフューザー部、ステンレス

mesh 20  $\mu\text{m}$ )から純銀フォイル上に室温の水素ガスを吹き付けて固体ターゲット層を生成する。生成後はディフューザー配管全体を上下駆動機構によりビーム軸上から下方へ逃がしてビーム実験に使用する(Fig-1, Fig-2)。

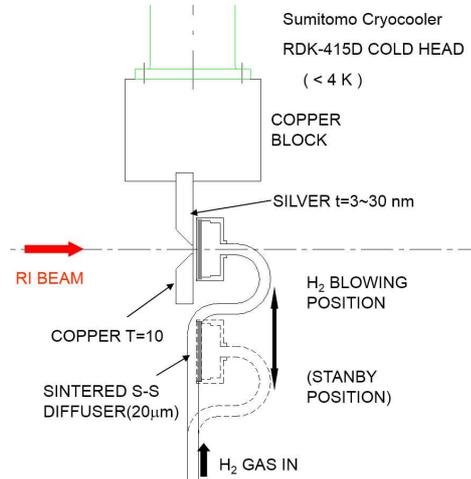


Fig-1: 固体水素・重水素ターゲット部の構造

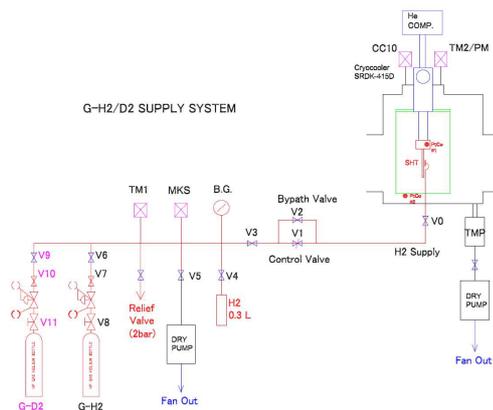


Fig-2: 水素・重水素ガス供給システム

4K 小型冷凍機を用いて新規に開発した「水素ガス吹き付け方式」の薄い窓なし固体水素ターゲットを用いて 2012 年夏から TRIUMF で IRIS 実験(代表 Saint-Mary 大・R. Kanungo)を行った。Fig-3 は TRIUMF の ISAC2 における IRIS 実験のセットアップで、固体水素ターゲット本体は上部から散乱真空槽に挿入される。断熱真空はゲートバルブを介してビームラインとも共通で、粒子検出器とともに同一の真空チェンバー内にセットされる。このゲートバルブは水素ガスの吹き付け時は閉じられ、ビームラインとは遮断される。加速器からのビームが通過する範囲と、ターゲット

ットと粒子検出器間には輻射シールドなどの物質を置くことはできない。

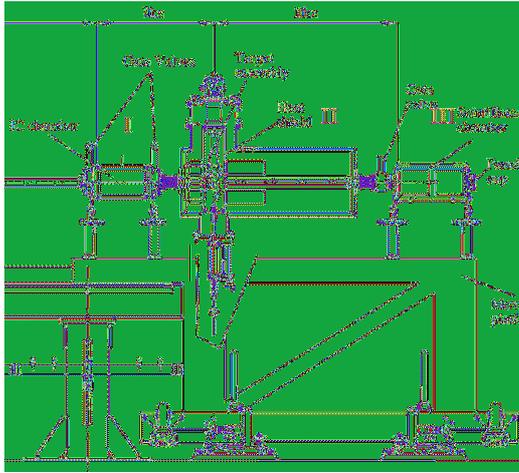


Fig-3; TRIUMF/IRIS セットアップ図, (I)Beam detection ion chamber, (II)Reaction chamber and SHT, (III)Beam counting.

Fig-4 はこの装置のために開発した温度、圧力、真空度等のターゲットモニターシステムで PC 上の表示画面である。

2013年6月には重水素ガスの配管を増設し、水素と重水素の2種類のターゲットを切り替えながらビーム実験を行った。さらに、IRIS 実験からの要請により到達温度をできるだけ低く保ったまま散乱立体角を広がるように、クライオスタットの30 K 輻射シールドの改造を行った。

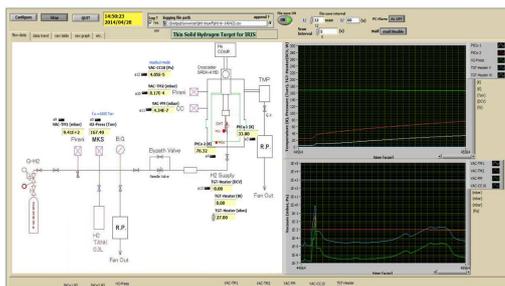


Fig-4; 固体水素ターゲットモニターシステム

Fig-5 は実際の実験中の冷却時間と水素ガス吹き付けの時間記録である。冷凍機運転開始から約2.5時間で温度は4 K に到達し、水素ガス吹付けが可能となる。水素ガスの吹き付けは約5分間で完了する。水素ガスディフューザー一部をビームライン上から引き下げて散乱実験が可能となる。

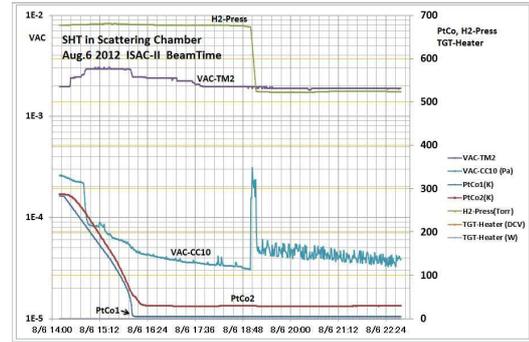


Fig-5; 固体水素ターゲットの初期の冷却時間

Fig-6 は冷却停止後の温度と断熱真空度の変化で、真空度の上昇から、残った固体水素の全量と冷凍機を含む低温部に吸着した空気などの残留ガス成分が確認できる。

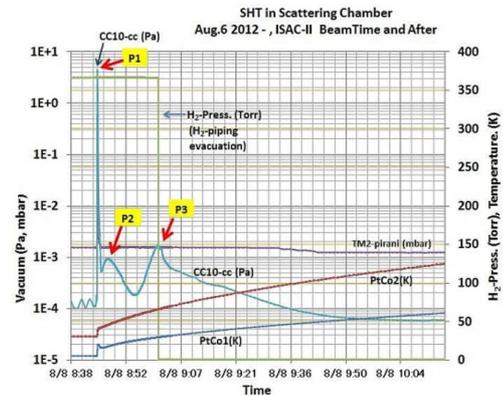


Fig-6; 停止・昇温時の温度・断熱真空度の変化

水素ガスを吹き付ける面に薄い純銀フォイル(5 μm)を使用したことで、これまで片側のみの窓なしであったガス吹き付け方式の固体水素ターゲットを、透過型のビーム実験に適用することができた。今回 IRIS 実験で使用した固体水素ターゲットの厚さは40~100 μm である。水素の蒸気圧が高い固体水素ターゲットの場合、数日間以上の実験に使用できた。より蒸気圧の低い固体重水素ではターゲット厚さの減少が無視できる程長期間維持できることがわかった。(Fig-7)

IRIS 実験は現在も継続中で、同時に散乱実験データの解析が進んでいる。(Fig-8, Fig-9)

バックアップの熱伝達材料として使用した純銀フォイルのほか、散乱実験の目的により純アルミやダイヤモンドフォイルの使用も検討されている。

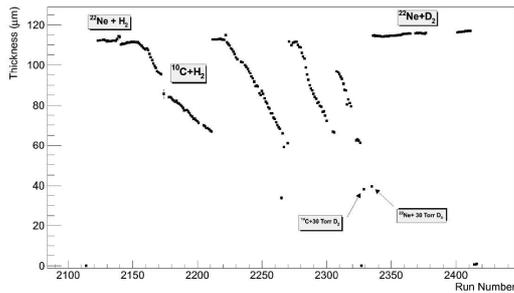


Fig-7; ビーム実験中における 5 日間の固体水素ターゲットの厚さ測定結果と、2 日間の重水素ターゲットの厚さ変化 (引き続き計 4 日間の実験を行ったが厚さに変化は見られなかった。

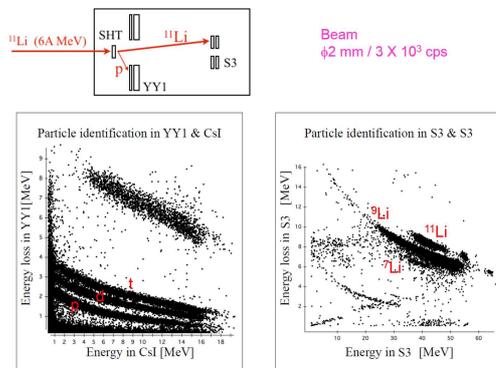


Fig-8; Kinematics curve for  $^{11}\text{Li}$  elastic on proton

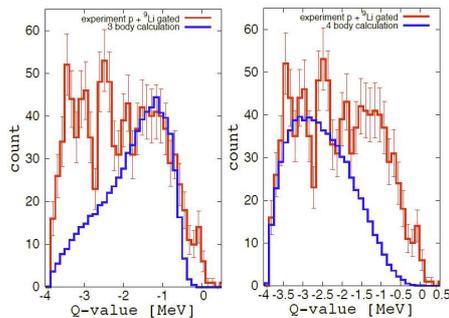


Fig-9: Phase space of 3-body and 4-body final states overlaid on top of the experimental spectrum. The left panel shows the three-body reaction phase space and right panel shows four-body reaction phase space. Normalizations are arbitrary. Refer the shape only.

## 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は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Density distribution of  $^{14}\text{Be}$  from reaction cross-section measurements, T.Moriguchi, A.Ozawa, S.Ishimoto, Y.Abe, M.Fukuda,

I.Hachiuma, Y.Ishibashi, Y.Ito, T.Kuboki, M.Lantze, D.Nagae, K.Namihira, D.Nishimura, T.Ohtsubo, H.Ooishi, T.Suda, H.Suzuki, T.Suzuki, M.Takechi, K.Tanaka, T.Yamaguchi, 査読有, Nucl. Phys. **A929**, 83 (2014).

- (2) Charge-changing cross sections of  $^{30}\text{Ne}$ ,  $^{32,33}\text{Na}$  with a proton target, A.Ozawa (48人中1番目), S.Ishimoto (48人中12番目) ほか, 査読有, Phys. Rev. **C89**, 044602 (2014), DOI:10.1103/PhysRevC.89.044602
- (3) Density distributions of  $^{11}\text{Li}$  deduced from reaction cross-section measurements, T. Moriguchi, A.Ozawa, S.Ishimoto, Y. Abe, M. Fukuda, I. Hachiuma, Y. Ishibashi, Y. Ito, T. Kuboki, M. Lantz, D. Nagae, K. Namihira, D. Nishimura, T. Ohtsubo, H. Ooishi, T. Suda, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, K. Tanaka, and T. Yamaguchi, 査読有, Phys.Rev. **C88**, 024610 (2013). DOI:10.1103/PhysRevC.88.024610
- (4) A 2.5m long liquid hydrogen target for COMPASS, E. Bielert, J. Bremer, N. Doshita, R. Geyer, R. Hashimoto, N. Horikawa, S.Ishimoto, T. Iwata, K. Kondo, G.K. Mallot, H. Matsuda, T. Matsuda, Y. Miyachi, G. Nukazuka, O. Pirotte, H. Suzuki, S.Suzuki, B. Vullierme, 査読有, Nucl.Instrum.Meth. **A746**, 20(2014), DOI:10.1016/j.nima.2014.01.067

[学会発表] (計 10 件)

- (1) TRIUMF-ISAC2 における陽子非弾性散乱による  $^{11}\text{Li}$  の低励起状態探索実験、田中純貴, Rituparna Kanungo, Alisher Sanetullaev, 石元茂、日本物理学会第 69 回年次大会(東海大), 2014 年 3 月 27 日
- (2) TRIUMF-IRIS 実験用窓なし固体水素ターゲットの開発、石元茂, 小澤颯, 小林俊雄,

鈴木祥仁, 田中純貴, 谷畑勇夫, 森本喜三夫, Alisher Sanetullaev, Rituparna Kanungo、日本物理学会 2013 年秋季大会(高知大), 2013 年 9 月 20 日

- (3)  $d(K,n)$ 反応による  $\Lambda(1405)$ 粒子の精密分光実験のための液体重水素標的の開発、川崎新吾, 野海博之, 飯尾雅実, 石元茂, 鈴木祥仁, 佐藤将春、日本物理学会 2013 年秋季大会(高知大), 2013 年 9 月 21 日
- (4) 2.5m 長液体水素標的を用いた 2012 年 COMPASS-DVCS 実験の報告、岩田高広, 石元茂, 近藤薫, 鈴木肇, 堂下典弘, 糠塚元気, 橋本亮, 堀川直顕, 松田達郎, 松田洋樹, 宮地義之、日本物理学会第 68 回年次大会(広島大), 2012 年 3 月 26 日
- (5) CERN-COMPASS 大型水素標的に用いるナノ銀コート加工 CFRP の輻射率測定、五十嵐健祐, 岩田高広, 石元茂, 近藤薫, 鈴木肇, 堂下典弘, 糠塚元気, 橋本亮, 堀川直顕, 松田達郎, 松田洋樹, 宮地義之、日本物理学会第 68 回年次大会(広島大), 2012 年 3 月 29 日
- (6)  $d(K,n)$ 反応による  $\Lambda(1405)$ 粒子の精密分光実験のための液体重水素標的の開発、川崎新吾, 野海博之, 飯尾雅実, 石元茂, 鈴木祥仁, 佐藤将春、日本物理学会 2012 年秋季次大会(京都産業大), 2012 年 9 月 14 日
- (7) COMPASS-GPD プログラムのための大型水素標的の製作、堂下典弘, 岩田高広, 石元茂, 近藤薫, 鈴木肇, 糠塚元気, 橋本亮, 堀川直顕, 松田達郎, 松田洋樹, 宮地義之、日本物理学会 2012 年第 67 回年次大会(関西学院大), 2012 年 3 月 27 日
- (8)  $d(K,n)$ 反応による  $\Lambda(1405)$ 粒子の精密分光実験のための液体重水素標的の開発、川崎新吾, 野海博之, 飯尾雅実, 石元茂, 鈴木祥仁, 佐藤将春、日本物理学会第 67 回年次大会(関西学院大), 2012 年 3 月 25 日
- (9) J-PARC E13 実験用液体ヘリウムターゲットの開発、石元茂, 鶴養美冬, 小池武志,

白鳥昂太郎, 鈴木祥仁, 田村裕和, 山本剛史、日本物理学会 2011 年秋季大会(弘前大), 2011 年 9 月 16 日

- (10) 2 中性子ハロー核  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{14}\text{Be}$  の密度分布、森口哲朗, 小沢顕, 石元茂, 阿部康志, 福田光順, 八馬功, 石橋陽子, 伊藤由太, 久保木隆正, Mattias Lantz, 長江大輔, 波平晃佑, 西村太樹, 大坪隆, 大石寛人, 須田利美, 鈴木宏, 鈴木健, 武智摩耶, 田中鐘信, 山口貴之、日本物理学会 2011 年秋季大会(弘前大), 2011 年 9 月 18 日

## 5. 研究組織

### (1) 研究代表者

石元 茂 (ISHIMOTO, Shigeru)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：50141974

### (2) 研究分担者

鈴木 祥仁 (SUZUKI, Shoji)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・専門技師

研究者番号：00391722

### (3) 研究分担者

澤田 真也 (SAWADA, Shinya)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：70311123

### (4) 研究分担者

小沢 顕 (OZAWA, Akira)

筑波大学・数理物質科学科 (系)・教授

研究者番号：80260214

### (5) 研究分担者

今井 伸明 (IMAI, Nobuaki)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：8037273