

平成 22 年 5 月 31 日現在

機関番号： 8 2 1 1 8

研究種目： 基盤研究(B)

研究期間： 2006～2009

課題番号： 1 8 3 4 0 0 7 4

研究課題名 (和文) 原子核実験用窓なし固体水素標的の実用化のための開発研究

研究課題名 (英文) Research and development of windowless solid hydrogen target for nuclear physics experiments

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： 5 0 1 4 1 9 7 4

研究成果の概要 (和文) : 固体水素を新しい方法で作成することにより、いくつかの原子核実験用固体水素標的を開発した。1つめは、薄膜容器を用いたタイプで直径 50 mm、長さ 30 mm と 100 mm のこれまでにない大きさの固体水素標的を開発した。これを用いて理化学研究所におけるビーム実験を2度行った。2つめは、水素ガス吹きつけ方式により直径 5 mm 厚さ 0.35 mm の窓なし固体水素標的を 30 μm の純銀薄箔上に作成することに成功した。こちらは 2011 年から行われる TRIUMF (バンクーバー・カナダ) での原子核実験に用いられる。

研究成果の概要 (英文) : We have developed solid hydrogen targets for nuclear experiments, using newly developed method. First, we have developed large-size solid hydrogen targets, D= 50 mm, L= 30 mm/100 mm in thin films. These targets were used for two nuclear experiments at RIKEN. Second, we have developed a thin windowless solid hydrogen target by hydrogen gas blowing in vacuum on pure silver foil with 30 μm thickness. The target size was 0.35 mm in thickness and 5 mm in diameter. This solid hydrogen target will be used for nuclear experiments at TRIUMF (Vancouver, Canada) from 2011.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2007年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙船・宇宙物理

キーワード：実験核物理、低温物性、固体水素、標的、昇華

1. 研究開始当初の背景

近年、重イオンビームや不安定核ビームを使って運動学的な逆反応を用いることで、従来実験不可能だった反応での原子核実験が可能になってきた。本研究ではこれらの原子核実験に用いられる固体水素標的の開発と実用化を目的とした。

重イオンや不安定核ビームを用いた原子核実験において水素及びその同位体を標的として用いる場合、これまではポリエチレン等を用いて実験が行われてきた。この場合、質量比で水素に比べて6倍大きい炭素からのバックグラウンドが問題となる。この場合炭素標的の実験を行って散乱結果を差し引く必要が

あり、実験精度を著しく下げることになる。

一方、液体水素を用いる場合は、標的容器としてマイラー（ ~ 0.2 mm）やアルミ（ ~ 0.1 mm）などの薄肉材料が用いられる。この場合は標的容器からのバックグラウンドおよび水素の泡の発生や密度変化が問題となる。さらに液体水素は固体に比べて約 10 % 密度が小さい。また薄肉容器で内圧 1 気圧以上を保つためには容器は曲面で構成される必要があり、原子核実験用の水素標的に要求される「均一な厚さと密度を持つ平板標的」を作ることとは極めて困難である。

我々は、今回の開発研究に着手するまでに、これらの問題は固体水素を用いることで大きく改善されるかまたは完全に解決できることを示してきた。この固体水素を実際に様々なタイプの原子核実験に用いるには、それぞれの実験から要求される条件（大きいサイズの限界、可能な薄さの限界、平面度に対する要求等）をクリアする必要があった。

2. 研究の目的

原子核実験用固体水素標的の実用化のための開発研究を行う。固体水素を「窓なし、薄膜、吹きつけ」の 3 種類の方法により開発し、実際の物理実験に使用可能な実用機を製作し物理実験に用いる。

最初に実験する立場からの強い要求があった次のタイプの固体水素標的を開発する。

(1) 理研 Big-RIPS のエネルギー領域における、不安定核と陽子との反応断面積測定のための「厚い固体水素標的の開発」を行う。これまでに実用化されていた固体水素標的の最大厚さは 10 mm 程度である。今回の要求は、直径 50 mm、長さ 30 mm および 100 mm と極めて大きいサイズの開発が必要となる。

このサイズの固体水素標的は J-PARC における中高エネルギー領域でのハドロン実験にも使用できるようになるため、KEK にとっても極めて重要な開発となる。

(2) 阪大 RCNP や TRIUMF で行われてきた不安定核と陽子との散乱実験用として、厚さ 1 mm 以下のバックグラウンド反応が少ない「ガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的の開発」を行う。

これは(1)の目的で開発してきた方法では実現不可能で、4 K かそれ以下に冷却した金属上に断熱真空中にて水素ガスを吹きつけて金属表面に固体水素を形成する方法となる。さらに、TRIUMF での実験では使用する金属の重量が極めて制限され、純銀の厚さが 3 \sim 30 μ m で、熱伝達が制限を受け温度上昇が生ずるという厳しい状況となる。

3. 研究の方法

今回の固体水素標的の開発では、最近急速に発達してきた約 4 K まで冷却可能な GM 方式の小型冷凍機を用いて、液体ヘリウムを用いない簡便なクライオスタットを製作することにした。

実験する側から、水素の蒸発速度や実験時間、真空度などにさらに厳しい要求がある場合は、3 K 以下の冷凍機を用いる必要がある。

これは GM 方式やパルスチューブ方式の冷凍機の進歩で近い将来実現できる状況である。今回、約 4 K まで冷却可能な現存の冷凍機で固体水素標的を開発しておけば、3 K 以下の冷凍機が容易に入手できるようになった場合にはそのまま移行可能である。

2-(1)の「厚い固体水素標的の開発」では大きな体積内に固体水素を隙間がないように埋める方法を開発する必要がある。また固化した水素ガスを安全に元のタンクに回収する方法を確立する必要がある。これらの課題を試行錯誤の中でクリアしてゆく。

2-(2)の「ガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的の開発」では、供給する水素ガスと実際に固化する水素量の比率が重要である。すなわち固化せずに断熱真空の排気ポンプから逃げてゆく水素量を少なくし、システムを断熱可能な真空度（ $\sim 10^{-4}$ mbar）以下に保つ必要がある。また、水素ガスの吹き出し部を工夫して作成する固体水素の厚さができるだけ均一になるようにしなければならない。これらを評価するために固体水素の厚さの測定方法を確立する必要がある。

4. 研究成果

(1) 厚い固体水素標的の開発

直径 50 mm で長さが 30 mm および 100 mm のターゲット容器を設計し、小型冷凍機の 4 K コールドヘッドに取り付けた。(図 1)

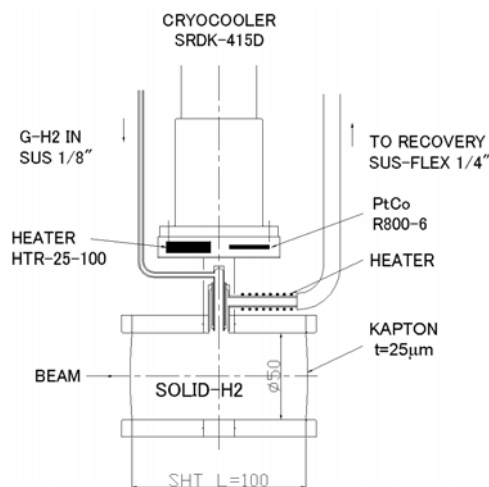


図 1 ; 厚い固体水素標的 (D=50 mm, L=100 mm) の概要図

ガス供給配管とガス回収配管に巻き付けられたヒーターは、実験終了後にこれを用いて水素を固体から徐々に液体にすることで水素ガスのタンクへの回収を安全でスムーズに行うためのものである。

この固体水素標的の開発段階では、水素ガスを供給する途中で水素ガスが固化し、配管をブロックして空洞が生じたり、固化後の固体水素の熱収縮により大きな欠陥（ヒビ）が生じたりしないような水素供給条件を見つけるための条件探索を行った。

供給する水素ガスの圧力を自動コントロールバルブにより設定することで、供給する水素の流量を変えて固体水素の作成を試みたところ 133 mbar 以下の場合には固体に空洞ができ、その圧力以上では空洞は生じないが圧力の上昇とともに生ずる欠陥（ヒビ）の量が徐々に大きくなることがわかった。

図2は最適圧力 133 mbar で作成した場合の連続写真である。固体作成の初期には銅でできた標的容器の周囲から固体が成長する。約半分固体になったところで、中心付近の温度が三重点(13.8 K, 70.4 mbar)となって液体部が生じる。このことで下部から液体と固体が容器を満たしてゆく条件が整うことになる。もし供給流量が少なくて途中で配管に固体水素が生ずると空洞が残ることになる。

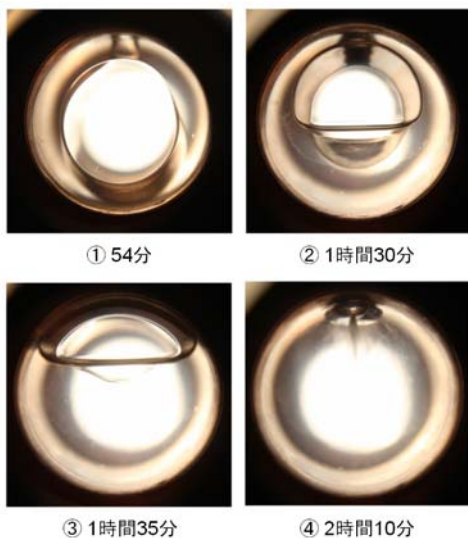


図2；厚い固体水素標的 (L=100 mm) の成長過程 (時間はガス供給開始時から)

約 2 時間 30 分で図3のような透明でほぼ完全な形の固体水素標的ができる。上部のガス供給部下方の黒い部分はヒビ割れで、固体水素が三重点から 4 K 程度まで冷却される際の熱収縮により生じるものである。このヒビ割れはあまり好ましくはないが、今のところ避ける手段はない。しかし、ビームサイズからも実験上の大きな支障とはならない。

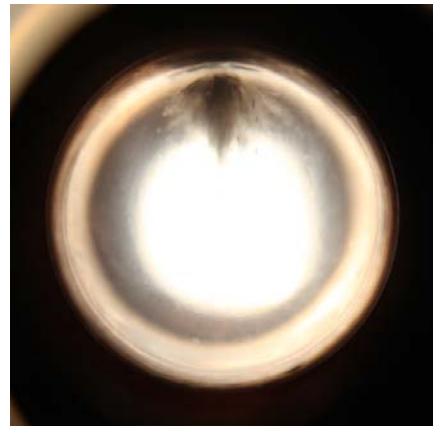


図3；水素供給開始から2時間30分後に出来上がった厚い固体水素標的。黒い部分は固体水素の熱収縮により生じるヒビ割れ

(2) 厚い固体水素標的での実験と固体水素の形状測定

この厚い固体水素標的を用いて、理研 Big-RIPS および RIPS において二つのテーマで実験を行った。図4は理研 Big-RIPS で散乱実験中の固体水素標的である。

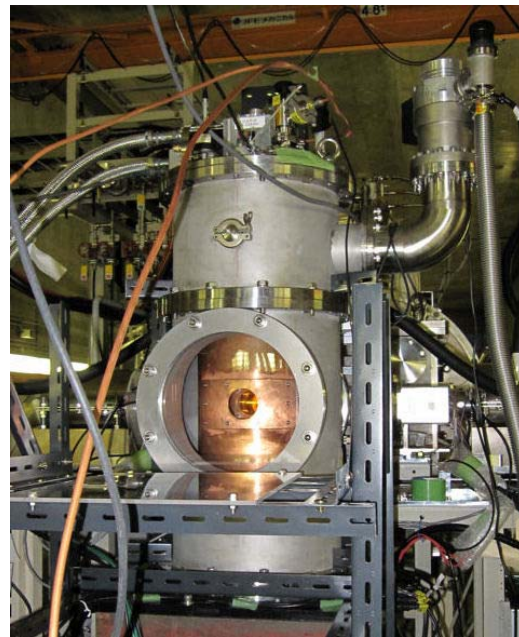


図4；散乱実験中の固体水素標的 (理研 Big-RIPS にて)

この実験は、 $^7\text{Li-p}$ の反応断面積測定であるので、固体水素標的の厚さと形状が重要なパラメータとなる。このため標的表面の形状測定を2つの方法で行った。

1つはレーザー測長計を用いたセル薄膜 (カプトン、25 μm) の変位量測定である。このレーザー測長計による測定方法と測定結果を図5と図6に示す。

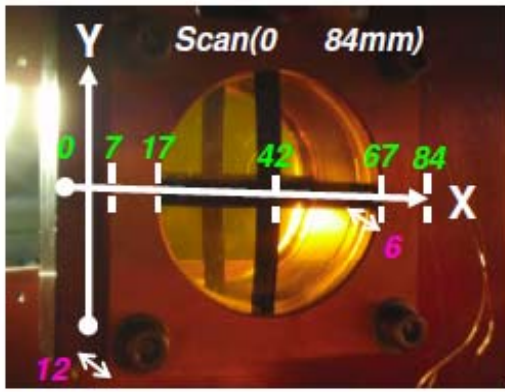


図5；レーザー測長計を用いた固体水素標的の膜変形（膨らみ）の測定方法。黒い帯はレーザー光の透過を防ぐために用いられた。

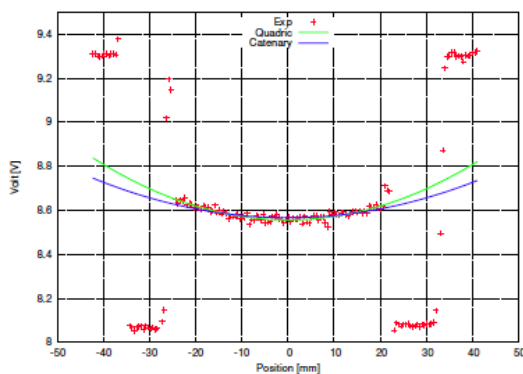


図6；レーザー測長計を用いた固体水素標的の膜変形（膨らみ）の測定結果

2つめは、 ${}^{11}\text{Li}$ ビームを用いたエネルギー損失の測定から固体水素標的の長さから計算により求める方法で、得られた測定結果を図7に示す。

これらの結果から固体水素容器の膜形状が決まり、膨らみはセル中央部で約 1.2 mm であった。これらの結果を用いて現在反応断面積の実験結果を解析中である。

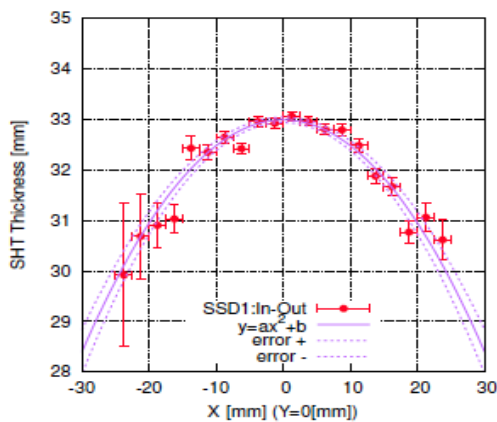


図7； ${}^{11}\text{Li}$ ビームのエネルギー損失から求めた固体水素標的の長さ測定結果

(3) ガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的の開発

低エネルギー原子核実験にとって重要な厚さ 1 mm 以下の窓なし固体水素標的の開発を行った。これは小型冷凍機を用いた水素ガス吹きつけ方式の固体水素標的である。小型冷凍機で 4 K 以下まで冷却された厚さ 30 μm 、直径 5 mm の純銀フォイル上に厚さ 0.35 mm の固体水素ターゲットを作成することに成功した。

図8はガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的クライオスタットで、4.2 K において冷凍能力 1.5 W の小型冷凍機を用いて冷却される。



図8；ガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的クライオスタット。上部にGM方式の小型冷凍機があり、横方向にセットされているのは排気速度 150 1/s のターボ分子ポンプである。

図9にガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的の構造を示す。4 K コールドヘッドに取り付けられた熱伝達用の厚さ 10 mm の無酸素銅板の中央部に直径 5 mm の穴が開けられており、その銅板には厚さ 30 μm の純銀箔が低温用接着剤で接着されている。水素ガスの吹きつけ部は直径 30 mm のパイプとなっており、端部には粒径 20 μm のステンレスの粉を焼結して作られた厚さ 2 mm、直径 30 mm のガス拡散装置 (Diffuser) が取り付けられている。純銀箔と Diffuser の間隔は約 2 mm である。Diffuser は固体水素作成後には下方に約 60 mm 引き下げられてビーム実験が行われる。

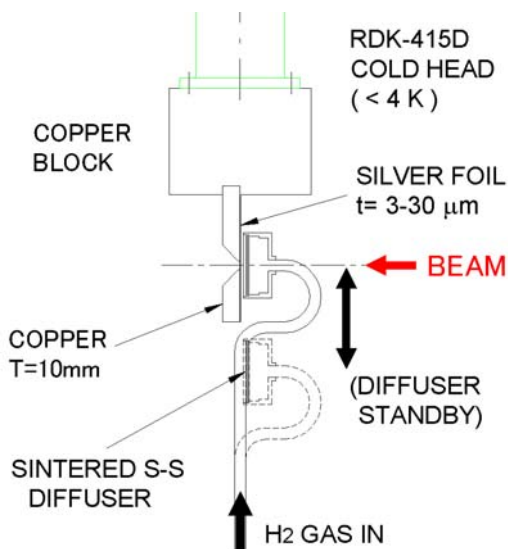


図 9；ガス吹きつけ方式薄肉窓なし固体水素標的の構造

図 10 はガス吹きつけ方式の固体水素標的用のガスハンドリングシステムである。

水素ガスは標的の厚さに応じて供給量が変わるが、供給された水素ガスはほぼ全て低温の金属表面上で固体となるため、 300 cm^3 の水素ガスを供給した場合、厚さは約 0.35 mm と見積もられる。供給時間は 5~10 分で、クライオスタットの真空度は、水素ガス供給前が $\sim 10^{-8}\text{ mbar}$ で水素ガス供給中は $\sim 10^{-7}\text{ mbar}$ まで上昇する。

吹きつけが終了すると真空度はほぼガス供給前の到達真空度 $\sim 10^{-8}\text{ mbar}$ まで戻る。このことから真空中に置かれた固体水素標的は散乱実験の間、蒸発せずに十分長時間保持できることが分かった。

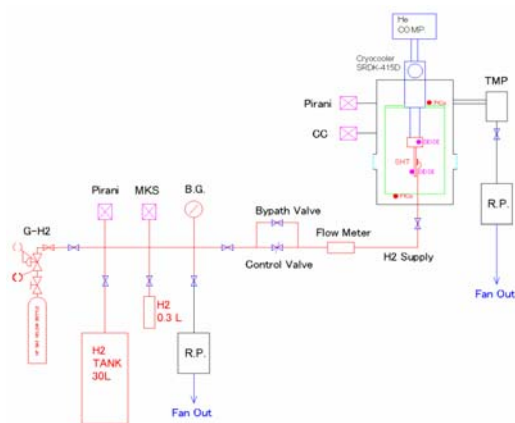


図 10；ガス吹きつけ方式薄肉窓なし固体水素標的用のガスハンドリングシステム

図 11 はガス吹きつけ方式による薄肉窓なし固体水素標的のために開発した、GP-IB と PC 上での LabView を用いた各温度・圧力等のデータ収録ソフトの画面キャプチャである。このデータ収録システムは LAN によるリモートオンラインモニターが可能となっている。

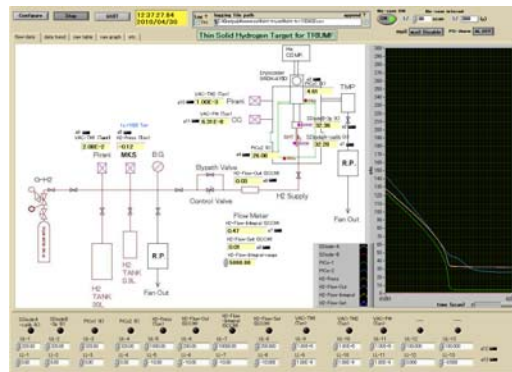


図 11；ガス吹きつけ方式薄肉窓なし固体水素標的のデータ収録中の画面キャプチャ

図 12 は作成された薄肉窓なし固体水素標的の写真で、Diffuser を下方に約 60 mm 下げられる前の状態である。わずかに固体水素の状態が見える。

現在もこの装置を用いて、TRIUMF での原子核実験に向けて開発を継続している。今後の予定としては、まず固体水素の蒸発速度測定などの詳しい性能試験を行う予定である。さらに散乱実験のバックグラウンドレベルを下げるために、純銀フォイルの厚さを $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ の極限まで薄くする。また、輻射シールドの開口部を広くとり、散乱粒子検出器への立体角を大きくするなどの開発を行う予定である。来年 (2011 年) 春に今回開発した固体水素標的を用いて TRIUMF でビーム実験が計画されている。

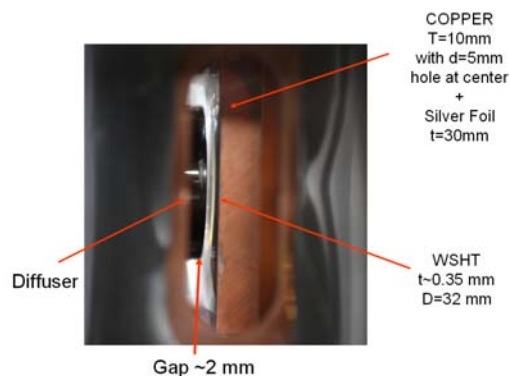


図 12；作成されたガス吹きつけ方式薄肉窓なし固体水素標的の写真 (Diffuser を下方に下げる前の状態)

(4) ガス吹きつけ方式によるバックアップ メタルなし窓なし固体水素標的の開発

近い将来、このガス吹きつけ方式をさらに発展させて、純銀等のバックアップメタルがない厚さ 1 mm 以下の窓なし薄肉固体水素標的の開発を計画している。

これはFNAL (アメリカ・イリノイ州) の陽子・反陽子散乱実験に使用する固体水素標的で、高真空の反陽子蓄積リング中で実験を行う計画である。実際に高真空 ($\sim 10^{-10}$ mbar) でメタルバックアップなしの薄い固体水素標的が実現可能かどうかのテストを今回開発したガス吹きつけ方式の固体水素標的装置を用いてテストする。

この固体水素標的は、従来水素ガスジェット方式で行われている内部標的にとって代わることになり、反応イベント数を画期的に大きくできるという利点がある。このアイデアは今回の開発経験からヒントを得たもので、実現されれば画期的なものとなる。

(5) 新開発した固体水素標的の他への応用

今回開発した固体水素標的の作成方法は、ヘリウム以外の他の低温ガス (D_2 , Ne, Ar, N_2 , O_2 等) へも容易に拡張可能で、各種の原子核標的に応用できる。またこれまでより容器の物質質量を格段に少なくできるため高精度な実験が可能となる。

さらに、作成できる固体水素標的の厚さの最大と最小の両方の限界を大きく広げることができたため、実験可能なビームのエネルギー範囲を拡大することができた。

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 4 件)

- (1) Measurement of the reaction cross section for ${}^{11}\text{Li}$ using solid hydrogen target, T. Moriguchi, A. Ozawa, H. Suzuki, Y. Ito, H. Ooishi, Y. Ishibashi, Y. Abe, S. Ishimoto, T. Suzuki, T. Yamaguchi, T. Kuboki, I. Hachiuma, K. Namihira, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suda, M. Takechi, M. Lantz, K. Tanaka, and T. Ohtsubo, RIKEN Accel. Prog. Rep. 43 (2010), 査読有, to be published.
- (2) Thin Windowless Solid Hydrogen Target, S. Ishimoto, S. Suzuki, K. Morimoto, I. Tanihata, Y. Takahashi, T. Kobayashi, A. Ozawa and R. Kanungo, RCNP Prog. Rep. 2010, 査読有, to be published.
- (3) Development of thick solid hydrogen target, T. Moriguchi, A. Ozawa, S. Ishimoto, K. Tanaka, M. Takechi, Y.

Yasuda, Y. Ito, K. Ogawa, H. Ooishi and Y. Ishibashi, RIKEN Accel. Prog. Rep. 42 (185)2009, 査読有.

- (4) (p,2p) reactions on C-(9-16) at 250-MeV/A, T. Kobayashi, K. Ozeki, K. Watanabe, Y. Matsuda, Y. Seki, T. Shinohara, T. Miki, Y. Naoi, H. Otsu, S. Ishimoto, S. Suzuki, Y. Takahashi and E. Takada, Nucl. Phys. A805:431-438, 2008, 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

- (1) Windowless Solid Hydrogen Target for Antiproton Experiment at FNAL, S. Ishimoto, S. Suzuki, I. Tanihata and D. Kaplan, Antiproton Physics Workshop, May-2010, FNAL, Illinois, USA.
- (2) Solid Hydrogen Target, S. Ishimoto and I. Tanihata, IRIS Pre-Gate2 Review Meeting, Nov-2009, TRIUMF, Vancouver, Canada.
- (3) 日本物理学会 (2008 春)
高エネルギー反応断面積実験用の固体水素ターゲットの開発, 五十嵐智, 石元茂, 小沢顕, 鈴木祥仁, 武智麻耶, 田中鐘信
- (4) 日本物理学会 (2008 春)
J-PARC ハドロン実験用低温ターゲットのための樹脂薄膜成形法の開発, 石元茂, 飯尾雅実, 中嶋大輔, 鈴木祥仁

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

鈴木 祥仁 (SUZUKI SHOJI)

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・専門技師
研究者番号: 00391722

竹田 浩之 (TAKEDA HIROYUKI)

独立行政法人理化学研究所・延興放射線研究室・基礎科学特別研究員
研究者番号: 30392020

(H20~H21: 連携研究者)

大西 哲也 (OONISHI TETSUYA)

独立行政法人理化学研究所・RI ビーム科学研究室・基礎科学特別研究員
研究者番号: 50360516

(H20~H21: 連携研究者)