

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740147

研究課題名(和文) K中間子重水素原子分光のためのシリコンドリフト検出器の基礎研究

研究課題名(英文) Basic study of a silicon drift detector for an X-ray spectroscopy of kaonic deuterium atom

研究代表者

佐藤 将春 (Sato, Masaharu)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・協力研究員

研究者番号：50554044

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：K中間子重水素原子X線分光はストレンジネス核物理に於いて長らく実験データが切望されている研究テーマである。それに向けてシリコンドリフトX線検出器(SDD)の基礎研究を行った。バックグラウンドの大幅な除去が期待される水素ガス雰囲気中及び外部磁場中にてSDDがエネルギー分解能等の性能が変化する事無く動作する事を確認した。また性能研究と合わせJ-PARC K1.8BRビームラインにて得られたビーム情報を基に分光実験の実現可能性の検証を行い十分遂行可能という結論を得た。

研究成果の概要(英文)：An X-ray spectroscopy of the kaonic deuterium atom is one of the most important experiments in the strangeness nuclear physics and the data has been eagerly awaited for a long time. Toward the experiment, a basic study of a silicon drift detector was performed. The performances were studied under the external magnetic field and inside the hydrogen gas environment. The energy resolution and the response function are stable under such conditions. Together with the basic study, the precise kaon beam information was taken at the J-PARC hadron hall K1.8BR beam line. With those information, a feasibility for the kaonic deuterium X-ray spectroscopy was studied and was confidently concluded that the experiment is viable at J-PARC.

研究分野：実験核物理

キーワード：シリコンドリフト検出器 K中間子原子

1. 研究開始当初の背景

K 中間子原子とは、通常の原子中の電子が負の電荷をもつ負 K 中間子と置き換わった原子である。一例を挙げると水素原子中の電子が負 K 中間子と置き換わり、水素原子核である陽子と束縛状態を形成したものを K 中間子水素原子と呼ぶ。この K 中間子原子は通常の原子と異なり、K 中間子と原子核間にクーロン力のみならず、強い相互作用が働く為、そのエネルギー準位はシフトし、かつ有限な幅を持つ。その為、状態間の遷移 X 線を測定しシフト及び幅を決定する事によって、K 中間子と原子核中に働く強い相互作用に関する情報を引き出す事が可能となる。

一方、これまで反 K 中間子 ( $\bar{K}$ ) と核子 (N) の低エネルギー領域でのアイソスピン 0 の相互作用が引力的であることが過去の K 中間子水素原子 X 線分光の実験から明らかとなり、K 中間子が原子核に束縛し準安定な状態 (K 中間子原子核) を形成する事が理論的に予想されている。この状態はハドロン形成の機構や、中性子星の内部構造に関する知見などと密接に関連しており、極めて興味深い研究対象である。その様な K 中間子束縛核を探索する実験が世界中で行われているが、未だその存在を確立する決定的な実験データが存在していない。また理論も、K 中間子束縛核を予想する様々な有効模型が存在するが、最も簡単な K 中間子束縛核 (KNN) に対しても、その束縛エネルギー・自然幅に対し異なる値を示しており、統一的理解が存在しない。その一因にエネルギー閾値以下での散乱振幅の振る舞いが、理論的枠組みによって大きく異なることが挙げられる。その為、閾値における不定性の無い基礎物理量を与える K 中間子原子の分光は、理論に対し厳しい制約を与える重要な基礎データである。中でも K 中間子水素・重水素原子の分光は極めて重要な役割を担う。K 中間子水素原子 X 線分光による 1s 準位のエネルギーシフト及び幅は Deser-Trueman 公式により負 K 中間子 - 陽子間の散乱長に直接結びつけられる。K 中間子水素がアイソスピン 0 と 1 の平均で表される為、アイソスピン 0 と 1 の複素散乱長を独立に決定するためには同様に線形結合で表される重水素原子の X 線測定が不可欠であり、水素・重水素で各々得られた結果の線形結合を解く事によって、アイソスピン 0 と 1 の複素散乱長を独立に決定する事ができる。現在まで K 中間子水素原子のデータは過去数例あるが、K 中間子重水素原子 X 線のデータはその重要性が長い間認識されているのにも関わらず未だデータが存在しない。その理由は、大強度 K 中間子ビームを得る事が難しい事、並びに基底状態に遷移する X 線収量が極めて小さい結果、スペクトルの S/N 比が非常に悪くなる事が挙げられる。最新の実験は 2009 年にイタリア LNF 研究所の SIDDHARTA グループによって行われたが、K 中間子重水素原子の遷移 X 線を同定するのには至らなかった。

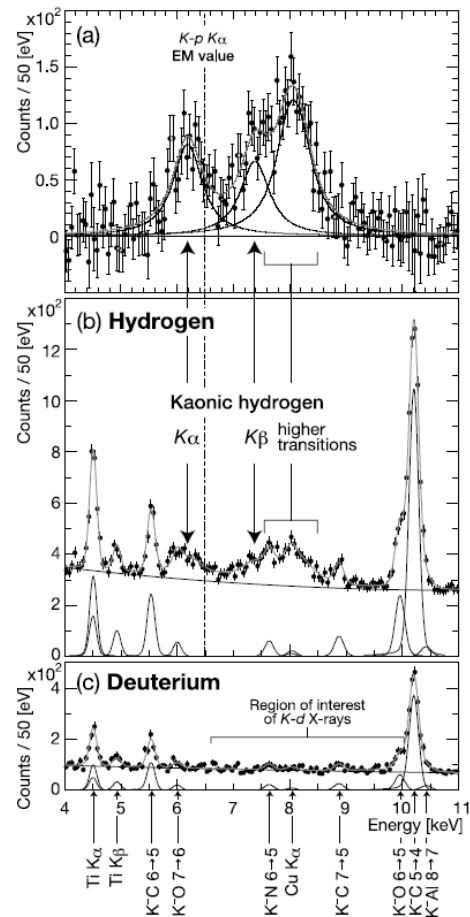


図 1 : SIDDHARTA 実験による K 中間子水素・重水素スペクトル [1]

た (図 1) [1]。以上のように、K 中間子重水素原子分光は未だ実現していない極めて挑戦的な研究課題であると言える。しかし、現在大強度 K 中間子ビームが利用可能な J-PARC が稼働を開始しており、分光実験の実行可能性を検証する事が極めて重要であると考え本研究の発案に至った。

[1] M. Bazzi et al., Phys. Lett. B704(2011)113

2. 研究の目的

K 中間子重水素原子の  $K_{\alpha}$  線は K 中間子水素のそれに比べ桁程収量が小さいと予想されており、極めて難しい実験である。その為、X 線分光の実現には測定手法の改善、S/N 比の向上などが要求される。K 中間子重水素原子の分光で X 線検出器として最も適しているのはシリコンドリフト検出器 (SDD) である。これは測定対象となる X 線の自然幅は数百 eV と大きいことから、SDD の持つエネルギー分解能  $\sim 150$  eV で十分であり、これ以上の分解能の向上は S/N 比の改善に寄与しない。一方で、X 線のアクセプタンスを稼ぐためには、有感面積の向上と複数個設置する事による大立体角化が必須となるが、SDD は  $100 \text{ mm}^2$  と大きな有感面積を持つものや  $3 \times 3$  等パネ

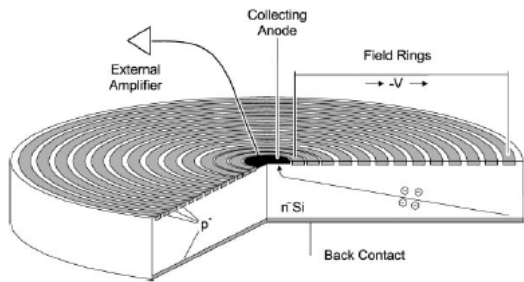


図 2 : シリコンドリフト検出器の概念図 [2]

ル状に複数個配置したものが最近開発される等、比較的容易に大立体角を覆う事ができ、本測定に最も適した検出器であると言える。そこで、本研究では SDD の基礎研究を行い、最終目標とする K 中間子重水素原子 X 線分光の S/N 比の改善を目標とする。

[2] P. Lechner et al., Nucl. Instrum. and Meth. A458 (2001)281

### 3. 研究の方法

本研究では、SDD の基礎性能を評価すべく、様々な条件で試験を行う。SDD は原理的にはペルチェで到達可能な程度の冷却温度で動作するが、過去の測定より 100 K 付近まで冷却する事によってエネルギー・時間分解能とも最高の性能が得られる事が分かっている為、液体窒素による冷却方式によって SDD を冷却する事とした。液体窒素バッファを有するテストベンチクライオスタットを用いて冷却を行い、エネルギー分解能の指標としては  $^{55}\text{Fe}$  密封線源によるマンガン  $K_{\alpha}$  線(エネルギー 5.98 keV)の幅を用いて評価する。これは K 中間子重水素原子の  $K_{\alpha}$  線と比較的近いエネルギー領域にある為、非常に都合が良い。窒素冷却用クライオスタットは 2012 年度には J-PARC ハドロンホール内で J-PARC E17 実験用に容易したクライオスタットを用いていたが、2013 年度初頭にハドロンホールにて放射線漏洩事故により、ホール内での性能試験が困難な状況となったため、理化学研究所内に新規にセットアップを構築した。図 3 が製作した液体窒素クライオスタットであり、約 1 リットルの液体窒素バッファを有しており、その直下に SDD を保持・冷却するコールドヘッドがある。シグナル及び温度センサーの読み出しラインは上部フランジからハーメチックコネクタを介して取り出し、SDD のアンプは真空槽外に設置した。使用した SDD はドイツ KETEK 社製、有感面積 100 mm<sup>2</sup> のものを用いた。後段のシェーピングアンプには CAEN N568B を使用し、ピークホールド ADC 及び TDC は各々 CAEN V785、V775 を使用した。

上記、SDD の性能試験と並行して、分光実験を行う予定である J-PARC ハドロンホール K1.8BR ビームラインにて K 中間子ビーム調整並びに、K 中間子原子核探索実験 (J-PARC E15 実験) を行い、詳細な K 中間子ビームプ



図 3 : SDD 冷却用クライオスタット

ロファイルの実測および、SDD 以外の検出器性能に関する情報を得ることにより、より実際の条件に即した K 中間子重水素原子 X 線分光実験の実行可能性の検証を行った。

### 4. 研究成果

- ・ J-PARC K1.8BR ビームラインに於ける K 中間子ビームコミッショニング

J-PARC ハドロンホール K1.8BR ビームラインにて J-PARC E15 実験を行い、運動量 1 GeV/c の K 中間子ビームのプロファイル及び収量を実測した (図 4)。これらの値を基に、静止 K 中間子の最適化、K 中間子重水素原子 X 線スペクトルの S/N 比等の評価のモンテカルロシミュレーションを行い、実験条件の決定及び、必要ビームタイムの算出などを行った。オーストリアステファンマイヤー研究所の J. Zmeskal 氏等と議論を進め、2014 年 5 月に行われた第 18 回実験課題委員会 (PAC) において新規実験提案 (J-PARC P57) を行った。現段階で継続審議であり、Stage-1 採択に至っていないが引き続き議論を進め、今後の PAC において Stage-1 ならびに Stage-2 採択を目指している。

- ・ バックプレーン読み出しによるタイミング情報の改善

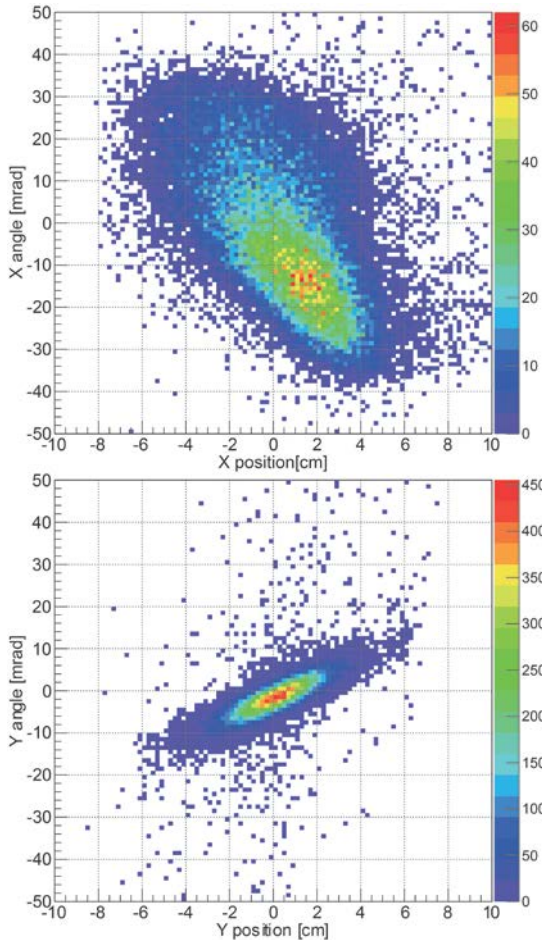


図 4 : K1.8BR ビームラインに於けるビームプロフィール

SDD の時間分解能はおおよそ数 100 ns であり、これは生成された電子が中心に配置されたアノードに到達する時間が X 線ヒット位置によって異なる為、応答時間に広がりを持つと考えられる。これは時間分解能の温度依存性とシリコン内の移動度から予想される結果とコンシステントである。SDD の有感面積が  $100 \text{ mm}^2$  と立体角を稼ぐ為に大きい必要がある一方、厚さは  $0.45 \text{ mm}$  と薄い事からバックプレーンからの空孔読み出しによってヒットタイミング情報を引き出す事が出来れば、電子・空孔の移動度の違いを考慮しても時間分解能が改善するはずである。そこで、アノードからの読み出しに加え、バックプレーンからの空孔読み出しによるタイミング情報を得ることを目指した。試作基板として、新たに JFET (2N4416) を搭載した HV 印可基盤を製作しバックプレーンの電圧ラインからコンデンサを開始し信号を取り出し、かつ後段の作成したチャージアンプにより増幅する。図 5 が製作した読み出し基板を取り付けた SDD であり、まず初めにアノード側のエネルギー分解能が十分に出ているかの検証を行った。当初は非常にノイズに弱く、 $^{55}\text{Fe}$  線源のスペクトルで  $K_{\alpha}$  線 ( $5.9 \text{ keV}$ ) と  $K_{\beta}$  線 ( $6.5 \text{ keV}$ ) が分離できないほどグランドレベルが

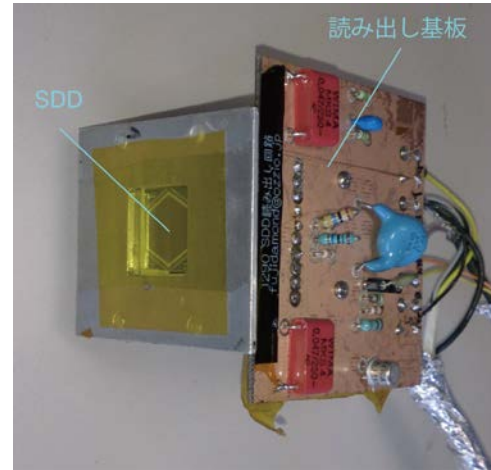


図 5 : バックプレーン読み出し基板

不安定だったが、ノイズ除去対策を十分に行った結果、最終的にはエネルギー分解能  $160 \text{ eV}$  (FWHM) まで改善する事が出来た。これは本来の SDD が持つエネルギー分解能よりは少し劣るが、最終的な測定対象である K 中間子重水素原子  $K_{\alpha}$  線の自然幅が数百 eV と広い事から、この程度の劣化は問題とならない。これによって、アノードからの X 線エネルギーの読み出しに関しては問題が無くなった。次にバックプレーンからの読み出しを行い、時間情報に関してアノード読み出しとの比較を行った。 $^{55}\text{Fe}$  線源ではタイミング情報が得られない為、 $^{90}\text{Sr}$  線源を用い、かつ  $1 \text{ mm}$  厚プラスチックシンチレーターと光電子増倍管からなるカウンターを SDD の直前に設置し、時間分解能の測定を行った。バックプレーンからの信号は極めて小さいながらも問題無く信号を取り出す事が出来た。図 6 がシェーピングアンプの後の信号をオシロスコープで見たものであり、時間分解能を評価するのに十分な信号である。結果、アノード読み出しとほとんど変わらない時間分解能となっており、この理由は現在調査中であるが、バックプレーンからの空孔読み出しに成功し、

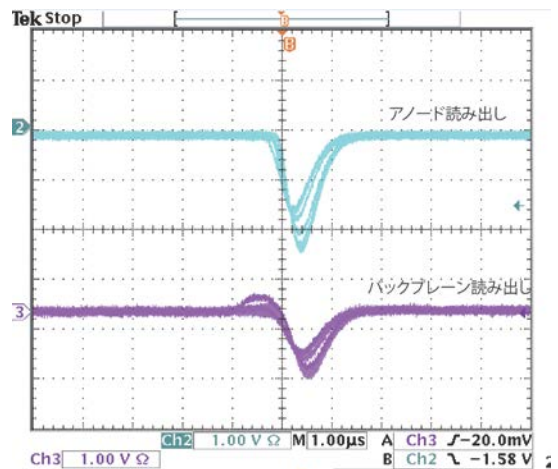


図 6 : アノード読み出し信号 (上) とバックプレーンからの読み出し信号 (下)

今後も引き続き調査を行っていく。

#### ・磁場中での動作性能確認

K 中間子重水素原子 X 線スペクトルのモンテカルロシミュレーションの結果、荷電粒子による電離によって生じた低エネルギー電子がバックグラウンドとなるが、外部磁場により電子を捕獲し SDD に到達させない事で大幅にバックグラウンド事象を除去可能という結論を得た。その為、実験セットアップに外部磁場を印可する必要があるが、これは現在 K1.8BR ビームラインに設置済みの中央型飛跡検出器(CDS) が利用可能である。そこで、磁場中で SDD を動作させる事が出来れば、バックグラウンド除去により S/N 比を改善する事が可能なため、磁場中での性能の確認試験を行った。当初、J-PARC ハドロンホール内、K1.8BR に設置してあるビーム掃引用電磁石内に設置し、ビームによって励起した金属フォイルからの特性 X 線で動作確認する事を考えていたが、放射線漏れ事故により研究期間内にビーム利用が難しい事が判明したため、磁場強度としては十分ではないが、ネオジム磁石を用いた動作確認を行う事とした。SDD の両側に直径 25 mm のネオジム磁石を数個取り付けて (図 7) SDD 外部磁場有り無しでのエネルギースペクトルの違いを評価した。磁場の向きとしては、SDD の表面と並行な向きとし、これは実際の実験での CDS のソレノイド磁場の方向と同じにした。試験の前にガウスメータ (Lakeshore 420) を用いて磁場の値を実測し、SDD 素子の付近で 0.1~0.12 T

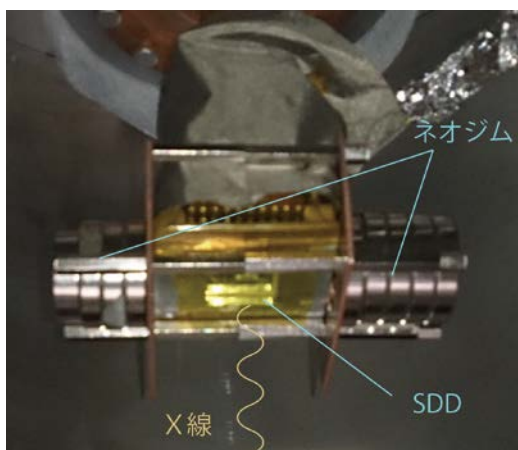


図 7 : 磁場印可テストセットアップ

であった。第一段階の動作試験としては十分な値と考える。得られた  $^{55}\text{Fe}$  線源によるスペクトルが図 8 である。図中黒が外部磁場無し、赤が磁場ありのスペクトルでエネルギー分解能はともに 160 eV (FWHM) であり磁場による劣化は見られなかった。また、低エネルギー側のテール成分等の SDD の応答関数も程同等である。わずかながらゲインが下がっているが、これが外部磁場によるものなのか、SDD 温度変化等の測定の系統誤差に起因するものなのかは、今後の試験で明らかにしていく

が、動作性能上の問題は無いと考える。結果、第一段階として磁場中での動作試験に成功

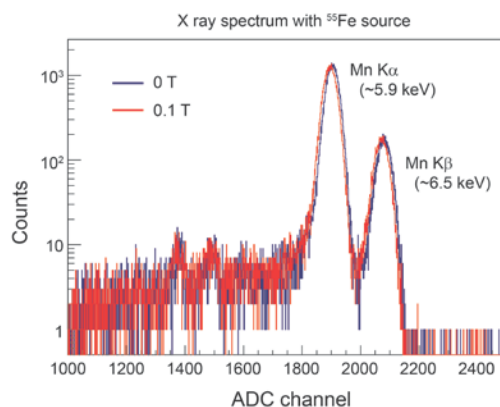


図 8 : 磁場有り無しでの X 線スペクトル

した。今後は、電磁石を用いて、より高磁場での試験を行い、最終的に S/N 比等を考慮したうえで本実験に於ける最適磁場の値を決定する。

#### ・水素ガス雰囲気中での動作試験

K 中間子重水素原子はシュタルク効果による収量の減少を防ぐ為、ガス標的が必須となる。X 線のエネルギーは 7 keV 付近であり、このエネルギー近傍の X 線の透過率は低いため、標的セルにおける吸収で X 線の統計量が減少する。また、K 中間子ビームは重水素ガスのみならず標的セルに静止し K 中間子原子 (酸素、窒素) 脱励起 X 線のバックグラウンドを生じる事が SIDDHARTA 実験のスペクトル上にも見て取れる (図 1)。その為、SDD を水素ガス中で動作させる事が出来れば、そのような重水素ガス以外に止まった K 中間子起因のバックグラウンドの大幅な除去が出来る。過去、KEK で行われた K 中間子水素原子 X 線分光実験では Si(Li) 検出器を水素ガス中に設置した例はあるが、SDD では試した例が無かった。そこで、水素ガス雰囲気中で SDD が動作可能であるかどうかを検証すべく、断熱真空槽内

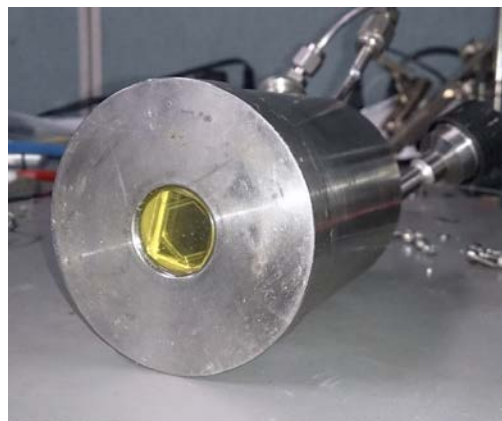


図 9 : 水素ガスセル

に設置可能な小型のガスチェンバーを製作した (図 9)。化学的性質が水素と重水素で

ほぼ同等な事と同位体効果による違いは重水素のほうが反応速度が遅い事から、水素ガスで動作試験を行えば十分であると考えた。水素ガスを導入する前段階の試験として、不活性ガスである窒素を用いて、温度 100 K 付近でのエネルギー分解能のガス圧力依存性の測定を行った。結果、1 気圧程度までの圧力による分解能の悪化などは見られず、エネルギー分解能は一定であるという結論を得た。引き続き、水素ガスを導入して動作試験を行った。結果、窒素ガスの場合と同様、1 気圧程度までの圧力依存性は無く、水素ガス雰囲気中でもエネルギー分解能が劣化する事無く、SDD が動作するという結論を得た(図 10)。これによって、K 中間子重水素原子分光を実行に向けて、SDD を標的ガス中に設置する事が可能である事がわかり、S/N 比に寄与する効果は大きいと期待される。今後、より詳細なモンテカルロシミュレーションと合わせて、実験条件の最適化のスタディーを進めていく。

## 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)

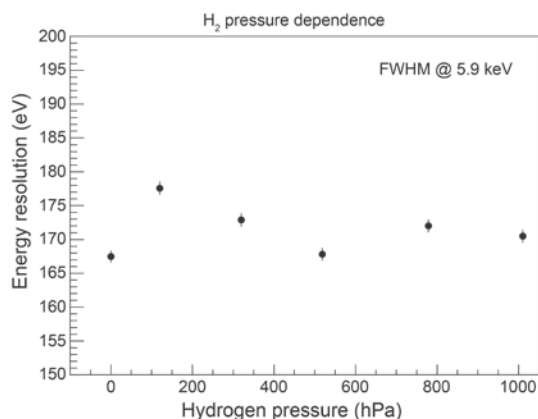


図 10 : 水素ガス中でのエネルギー分解能の圧力依存性

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① J. Zmeskal, M. Sato, S. Ajimura, M. Bazzi, G. Beer, C. Berucci, H. Bhang, D. Bosnar, M. Bragadireanu, P. Buehler et al., Acta Physica Polonica B46(2015)1 (査読有) DOI:10.5506/APhysPolB.46.101
- ② K. Agari et al., Progress of Theoretical and Experimental Physics 02B009 (2012) (査読有) DOI:10.1093/ptep/pts036
- ③ K. Agari et al., Progress of Theoretical and Experimental Physics 02B011 (2012) (査読有) DOI:10.1093/ptep/pts039
- ④ M. Iio, S. Ishimoto, M. Sato, S. Enomoto, T. Hashimoto, S. Suzuki, M.

Iwasaki, R. S. Hayano Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A687(2012)1 (査読有) DOI:10.1016/j.nima.2012.05.080

[学会発表] (計 2 件)

- ① M. Sato, “Search for kaonic nuclei by in-flight K- reaction on  $^3\text{He}$  at J-PARC” 会議名称 “Strangeness in the Universe”, 2013 年 10 月 24 日、トレント、イタリア
- ② M. Sato, “Precision spectroscopy of kaonic atoms at J-PARC” 会議名称 “New trends in the low-energy QCD in the strangeness sector: experimental and theoretical aspects”, 2012 年 10 月 19 日、トレント、イタリア

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤将春 (SATO MASAHARU)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・協力研究員

研究者番号：50554044