

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244035

研究課題名(和文) Belle II実験のための高性能新型粒子識別装置の開発

研究課題名(英文) Development of a new high performance particle identification detector for the Belle-II experiment

研究代表者

住吉 孝行 (SUMIYOSHI, Takayuki)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：30154628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：平成28年2月より高エネルギー加速器研究機構で稼働し始めたSuper KEKBを用いるBelle II実験において、粒子識別装置の性能は期待される物理成果を実現するためには非常に重要な要素となっている。本研究ではシリカエアロゲルを輻射体、光検出器としてHAPDを使用するリングイメージ型チェレンコフ検出器を開発し、4での $1/K$ 分離を目指した。電子ビームを用いたプロトタイプ試験により、期待した性能が確認された。現在、シリカエアロゲル輻射体、HAPD、信号読み出し用ASIC、高電圧電源、モニター用光ファイバシステムなど必要な要素がすべて整い、間もなく実機の建設が始まる。

研究成果の概要(英文)：The Super KEKB accelerator started its operation in Feb. 2016. In the Belle II experiment that uses Super KEKB a particle identification detector plays an important role to extract expected physics performance. In this research program we developed a Ring Imaging Cherenkov detector (A-RICH) in which silica aerogel tiles are used for radiators and HAPDs as photon detectors aiming to get a 4 pion/kaon separation. A prototype test using an electron beam reveals that it has enough performance as expected. Currently every element to construct the real A-RICH detector such as aerogel tiles, HAPDs, readout electronics with ASICs, high voltage power supplies, a monitor system with optical fibers are ready for installation and we will start construction soon.

研究分野：素粒子実験

キーワード：粒子識別装置 リングイメージチェレンコフ検出器 シリカエアロゲル HAPD

### 1. 研究開始当初の背景

1999 年より高エネルギー加速器研究機構の B-ファクトリー加速器を用いて開始された Belle 実験では、世界で初めて B 中間子系での CP 対称性の破れを測定し、小林・益川モデルを確認するなど、多大な成果を上げることができた。Belle 実験は 2010 年 6 月に終了したが、引き続き B-ファクトリーの加速器性能を 40 倍にする Super B-ファクトリーへの改造が開始されていた。それに呼応して Belle 測定器を大幅に upgrade した Belle II 測定器への改造も同時進行していた。Belle II 測定器には様々な用途の検出器が設置されるが、中でも B 中間子の崩壊で生成される中間子と K 中間子を  $4\sigma$  の分離能力で識別するための粒子識別装置の開発が急務であった。測定器のパレル部分には TOP カウンターと呼ばれる粒子識別装置、エンドキャップ部にはシリカエアロゲルを輻射体とし、光検出器に浜松ホトニクス社と共同開発を行っていた HAPD を使用するリングイメージチェレンコフカウンター (A-RICH) の導入が計画されていた。しかし、A-RICH で高い粒子識別性能を得るためには、透明度が高くクラックの無いシリカエアロゲルの開発、HAPD の量子効率の向上や放射線耐性の確認、HAPD からの信号読み出しシステムの開発、高電圧電源とその制御システムの開発、HAPD の感度の経年変化を追うためのモニターシステムの開発など、多くの開発要素が残されていた。そして、早期に要素技術を集めて小型のプロトタイプを製作し、ビームを用いた試験で  $4\sigma$  の  $1/K$  分離能力であることを確認する必要がある。

### 2. 研究の目的

上記で既述したように本研究の目的は、Belle II 実験でエンドキャップ部に設置が計画されていた A-RICH を製作することにあった。A-RICH には中間子と K 中間子を  $4\sigma$  で分離できることが要求されており、まず要素技術を集めて小型のプロトタイプを製作し、実際にビーム試験でその性能を確認する必要がある。輻射体としてシリカエアロゲルを使用するが、粒子識別性能の向上には高い透明度とクラックがないことが要求されており、そのようなシリカエアロゲルの製造方法を確立する必要がある。また、浜松ホトニクス社と共同開発を進めていた高性能の光検出器 HAPD (12x12 = 144ch、1 ピクセル  $4.9 \times 4.9 \text{mm}^2$ ) の量産化、受け入れ検査システムの構築、放射線耐性の確認が必要であった。

それ以外に、420 台の HAPD からの電気信号を読み出すための ASIC の開発と量産、高電圧電源システム (陰極用: 8kV (420ch)、ガード電極用: 500V (420ch)、バイアス用: 500V (1680ch)) の選定と制御プログラムの開発が必要であった。また、実際に A-RICH が Belle II 実験装置に組み込まれた後に、HAPD の生死、および感度の経年変化をモニターするために一定量の光を HAPD に照射するためのモニターシステムの開発も行わなければならなかった。これら、A-RICH が Belle II 実験において粒子識別性能を長期的にわたって保持するために必要な多くの開発研究を行うことが本研究の目的であった。

### 3. 研究の方法

A-RICH が本当に  $\pi$  中間子と K 中間子を  $4\sigma$  で分離できるのか? を実際にビームを用いて確認する必要がある。そのために図 1 に示すように 6 台の HAPD を用いた小型のプロトタイプ検出器を製作した。HAPD の上流には輻射体としてのシリカエアロゲル、厚さ 2 cm のものを 2 枚設置した。上流のシリカエアロゲルは屈折率 1.047、下流側は 1.059 とした。残念ながら、実際には

中間子と K 中間子を使用できなかったため、ドイツの DESY 研究所にある電子

ビームを利用して、平成 25 年 5 月に試験を行った。図 2 に示すように A-RICH できれいなチェレンコフリングが観測できており、期待通りの性能を持つことが分かったので、それぞれ構成要素の性能改善と長期安定性、特に Super KEKB 環境下での放射線耐性に関する研究を進めることになった。まず、輻射体としてのシリカエアロゲルはゾル



図 1 . プロトタイプ検出器

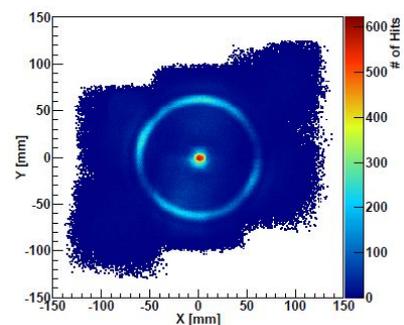


図 2 . ビーム試験で得られたリングイメージ

法で製作されたシリカエアロゲルを最終的には炭酸ガスを用いた超臨界抽出法でアルコールを抽出して製作されるが、使用する材料（オリゴマー）の種類や乾燥法の違いで透明度に大きな差が出るのが分かった。そのため様々な材料での試行、新しく開発したピンホール乾燥法の導入など、透明度と出来上がったシリカエアロゲル中の細かいクラックの有無などを指標にして改善を行った。一方、Belle II の 10 年間の使用において、A-RICH が設置されるエンドキャップ部には中性子として  $10 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 、線として 100Gy が予想されていた。HAPD は半導体検出器なので、この放射線環境下における放射線耐性の確認と対策が必要とされていた。そのために J-PARC の MLF を用いて中性子照射試験を繰り返し行った。線照射は名古屋大学のガンマ線照射装置を使って 100 ~ 1000Gy の照射試験を繰り返した。信号読み出し用の ASIC に関しては、放射線によるノイズ悪化が shaping time を変えることで改善できることが分かったので、shaping time の最適化を図った。HAPD の大量生産に向けて、受け入れ検査体制を構築した。量子効率の測定、144ch の V/I 曲線、ノイズ測定などを光源からの光でスキャンしながら測定した。高電圧電源に関してはいくつかの製造業者の製品を電圧設定精度、安定性、ランプアップ・ダウン時間、パニックシャットダウン機能の有無などを比較検討した。

A-RICH 設置後に容易に HAPD の生死やゲインの変動などをモニターするために、青色 LED を光源とし、その光を光ファイバー束で受け、HAPD 全体にほぼ一樣な光を照射するためのモニターシステムの開発を行った。ファイバーで送られた光は一旦シリカエアロゲルに当たり散乱した光が HAPD に戻ってくるようになっている。

#### 4 . 研究成果

研究の初年度に行ったドイツの DESY 研究所でのプロトタイプのビーム試験で期待通りに ~ 1 の粒子に対して、チェレンコフ角の分解能として 14.5mrad、検出光子数として 10.7 個が得られ、4 での /K 分離が可能であることが分かった。

シリカエアロゲルの製造方法に関しても、ピンホール乾燥法は高い透明度が得られるものの、クラックが入る確率が高いことが分かり、通常の超臨界乾燥法を使用することにした。A-RICH に必要な 248 枚のシリカエアロゲルが製作された。図 3 に製作されたシリカ

エアロゲルのサンプル写真を示す。

HAPD の放射線耐性に関しては p 層を薄くすることでリーク電流の増加を防げることが分かり、そ



図 3 . 新しい製法で製作された高透明度のシリカエアロゲル

のための最適化を行った。線に対してモアルカリ金属に対する保護膜を除去することで問題が解決できることが分かった。放射線耐性が改善されたので浜松ホトニクス社で HAPD の大量生産が開始された。HAPD は KEK に設置された受け入れ検査システムを用いて全数が検査された。量子効率はピーク波長で 28% が得られている。現在 A-RICH に必要な 420 台が検査を通過しており、支持構造体への設置準備が進んでいる。

HAPD からの信号読み出しのために開発した ASIC は 1680 個必要になるので、2500 個を製作した。全数のゲイン、オフセット調整の可変範囲、ノイズレベルなどを測定し良品を選び出した。図 4 に ASIC (36ch) 4 個が搭載されたフロントエンドボードの写真を示す。

高電圧電源に関しては CAEN 社の製品の導入が決定された。総数 2880ch の電圧の制御を行うためのソフトウェアの開発を行った。ランプアップ

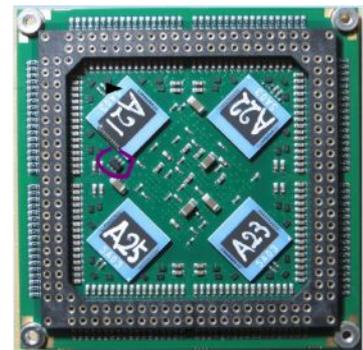


図 4 . 本研究で開発された ASIC を搭載したフロントエンドボード

プ、ランプダウン時間の設定、電流リミットの設定、電圧リミットの設定などが、データファイルからダウンロードされ、一斉に設定できるシステムができています。

モニターシステムを用いて HAPD のゲイン変動を約 2 か月にわたって調査した。電源 ON 時から若干のゲインの減少が見られたが、数時間後からほぼ一定値になることが分かった。モニターシステムの安定性が確認され

た。

以上のように本研究により新型高性能粒子識別装置としての A-RICH に必要な要素すべてが期間内に準備できた。放射線耐性の関しても基準をクリアできている。H28 年の夏に A-RICH の組み立てが終了し、秋には Belle II への設置が予定されている。

#### 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 23 件)

M. Tabata, I. Adachi, Y. Hatakeyama, H. Kawai, T. Morita, T. Sumiyoshi, “Large-area silica aerogel for use as Cherenkov radiators with high refractive index, developed by supercritical carbon dioxide drying,” J. Supercrit. Fluids 110 (2016) 183–192. 査読あり、  
DOI:10.1016/j.supflu.2015.11.022

S. Iwata, I. Adachi, H. Kakuno, H. Kawai, T. Kawasaki, T. Kumita, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 11 名, “Particle identification performance of the prototype aerogel RICH counter for the Belle II experiment “. PTEP 2016 (2016) no.3, 033H01、査読あり、  
DOI: 10.1093/ptep/ptw005

S. Nishida, I. Adachi, K. Hara, H. Kakuno, H. Kawai, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 12 名, “Development of a 144-channel Hybrid Avalanche Photo-Detector for Belle II ring-imaging Cherenkov counter with an aerogel radiator”, Nucl. Instrum. Meth. A787 (2015) 59-63, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.018

S. Nishida, I. Adachi, K. Hara, H. Kakuno, H. Kawai, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 12 名, “Aerogel RICH for the Belle II forward PID”, Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 28-31, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.06.061

R. Pestotnik, I. Adachi, K. Hara, H. Kakuno, H. Kawai, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 12 名, “Monte Carlo study of a Belle II proximity focusing RICH with aerogel as a radiator”, Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014)

270-273, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.06.064

H. Kakuno, I. Adachi, T. Sumiyoshi, 他 12 名  
“Readout ASIC and electronics for the 144ch HAPD for Aerogel RICH at Belle II”, Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 225-227, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.04.053

S. Korper, I. Adachi, H. Kakuno, H. Kawai, T. Kumita, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 12 名, “A 144-channel HAPD for the Aerogel RICH at Belle II”, Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 145-147, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.05.060

M. Tabata, I. Adachi, H. Kakuno, H. Kawai, K. Hara, T. Kumita, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 12 名, “Silica aerogel radiator for use in the A-RICH system utilized in the Belle II experiment”, Nucl.Instrum.Meth. A766 (2014) 212-216, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.04.030S.

Y. Yusa (for the Belle II collaboration), “ARICH for Belle II”, JINST 9 (2014) no.10, C10015, 査読あり、  
DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/C10015

I. Adachi, for the Belle II collaboration, “Status of Belle II and SuperKEKB”, JINST 9 (2014) C07017 査読あり、  
DOI: 10.1088/1748-0221/9/07/C07017

R. Pestotnik, I. Adachi, K. Hara, H. Kakuno, H. Kawai, T. Kawasaki, T. Kumita, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 14 名, “Aerogel RICH for forward PID at Belle II”, Nucl.Instrum.Meth. A732 (2013) 371-374, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2013.06.080

M. Tabata, I. Adachi, K. Hara, H. Kakuno, H. Kawai, T. Kawasaki, T. Kumita, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 15 名, “Progress in the development of silica aerogel as a RICH radiator in the Belle II experiment”, C13-10-26 Proceedings, 査読あり、  
DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829617

M. Tabata, Y. Hatakeyama, I. Adachi, T. Morita, K. Nishikawa, “X-ray radiographic technique for measuring density uniformity of silica aerogel,” Nucl. Instrum. Meth. A 697 (2013) 52–58. 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.nima.2012.09.001

M. Tabata, I. Adachi, H. Kawai, M. Kubo, T. Sato, “Recent progress in silica aerogel Cherenkov radiator”, Phys.Procedia 37 (2012) 641, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.02.410

S. Iwata, I. Adachi, K. Hara, H. Kawai, T. Kumita, T. Sumiyoshi, 他 15 名, “Development of Ring Imaging Cherenkov counter for Belle II experiment at super KEKB”, Phys.Procedia 37 (2012) 820-829, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.727

S. Nishida, I. Adachi, K. Hara, T. Sumiyoshi, 他 9 名, “Readout ASICs and Electronics for the 144-channel HAPDs for the Aerogel RICH at Belle II”, Phys.Procedia 37 (2012) 1730-1735, 査読あり、  
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.02.499

S. Iwata, I. Adachi, K. Hara, H. Kakuno, H. Kawai, T. Kawasaki, T. Kumita, T. Sumiyoshi, Y. Yusa 他 15 名, “Development of a RICH counter with 144-ch Hybrid Avalanche Photo-Detectors for the Belle II experiment”, C12-10-29, p.1490-1494 Proceedings, 査読あり、  
DOI: 10.1109/NSSMIC.2012.6551358

M. Tabata, I. Adachi, Y. Hatakeyama, H. Kawai, T. Morita, K. Nishikawa, “Optical and radiographical characterization of silica aerogel for Cherenkov radiator,” IEEE Trans. Nucl. Sci. 59 (2012) 2506–2511 査読あり、  
DOI: 10.1109/TNS.2012.2208479

M. Tabata, I. Adachi, Y. Hatakeyama, H. Kawai, T. Morita, K. Nishikawa, T. Sumiyoshi, “Development of large area silica aerogel used as RICH radiator for the Belle II experiment”, C12-10-29 Proceedings, 査読あり、  
DOI: 10.1109/NSSMIC.2012.6551148

他 4 件、すべて査読あり

〔学会発表〕(計 43 件)

[国際会議等での講演]

L. Santelj , 14<sup>th</sup> Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, 2016 Feb.15-19, “Behavior of HAPD for the Belle II Aerogel RICH in Magnetic Field”, oral

S.Nishida , 2014 International Conference on New Developments in Photodetection, Tours, 2014 June 30-July 4, “Development of a 144-channel HAPD for Belle II Aerogel RICH”, oral

I.Adachi, 2014 Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, 2014 Feb.24-March 1, “Status of Belle II and SuperKEKB”, oral

Y. Yusa, Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR14), 24 February - 1 March, 2014, Novosibirsk, Russia, “ ARICH for Belle II”, oral

S. Kakuno, 8<sup>th</sup> International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detector, 2013 Dec. 2-6, Shonan, Kanagawa, “ Readout ASIC and electronics for the 144ch HAPD for Aerogel RICH at Belle II, poster

Y. Yusa, The 2013 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2013), 18-24 July, 2013, Stockholm, Sweden. “ The ARICH detector at Belle II experiment”, oral

I.Adachi, 13<sup>th</sup> Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, 2013 Feb.15-19, “Study of Highly Transparent Silica Aerogel for the Belle II RICH Counter”, poster

I.Adachi, The 3<sup>rd</sup> Internatioanl Workshop on New Photon-Detectors, Orsay, 2012 June 13-15, “Study of 144 Channel Multi-Anode Hybrid Avalanche Photo-Detector for the Belle II RICH Counter”, oral

Y. Yusa, The 2013 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2013), 18-24 July, 2013, Stockholm, Sweden. “ The

ARICH detector at Belle II experiment”, oral

他 15 件

[日本物理学会での講演]

2016 年 日本物理学会第 71 回年次大会  
東北学院大

・米永匡伸、「Belle II 実験 A-RICH 用  
高電圧電源制御システムの開発」, 3 月 19  
日

他 4 件

2015 年 日本物理学会 第 70 回年次大会  
早稲田大学

・吉田圭佑、「Belle II 実験における  
Aerogel RICH 用読み出しシステムの現  
状」, 3 月 23 日

他 1 件

2014 年 日本物理学会 秋季大会 佐  
賀大学

・吉田圭佑、「Belle II 実験における  
Aerogel RICH 用読み出し ASIC の量産  
品性能評価」, 9 月 21 日

2014 年 日本物理学会 第 69 回年次大会  
東海大学

・西田昌平、「Belle II Aerogel RICH 用  
の光検出器 HAPD の量産とその性能評  
価」, 3 月 27 日

他 2 件

2013 年 日本物理学会 秋季大会 高  
知大学

・浜田尚、「Belle II 実験 A-RICH 用光検  
出器 HAPD の放射線耐性試験」, 9 月 22  
日

他 3 件

2013 年 日本物理学会 第 68 回年次大会  
広島大学

・山見仁美、「Belle II 実験の A-RICH の  
ための読み出し電子回路とその品質評価  
システムの開発」, 3 月 27 日

2012 年秋季大会 京都産業大学

・田畑誠「チェレンコフ検出器のための  
高透明度シリカエアロゲル副車体の開  
発」, 9 月 11 日

他 2 件

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www-hep.phys.se.tmu.ac.jp/research/belle2/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

住吉 孝行 (SUMIYOSHI, Takayuki)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 30154628

(2)研究分担者

足立 一郎 (ADACHI, Ichiro)

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: 00249898

(3)研究分担者(平成 24~26 年度)

川崎 健夫 (KAWASAKI, Takeo)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 00323999

(4)研究分担者

河合 秀幸 (KAWAI, Hideyuki)

千葉大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 60214590

(5)研究分担者(平成 27 年度のみ)

遊佐 洋右 (YUSA, Yousuke)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号: 80612704

(6)連携研究者

角野 秀一 (KAKUNO, Hidekazu)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号: 70376698

(7)連携研究者

原 康二 (HARA, Kouji)

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: 90432236

(8)連携研究者

汲田 哲朗 (KUMITA, Tetsuo)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号: 30271159