

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月8日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340071

研究課題名（和文） 大強度加速器における磁場共有型静電粒子分離装置の完成

研究課題名（英文） Completion of the electrostatic separator with crossed magnetic field at the high-intensity accelerator

研究代表者

皆川 道文（MINAKAWA MICHIFUMI）

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・技師

研究者番号：50391743

研究成果の概要（和文）：原子核・素粒子の基礎物理学実験に最適の二次荷電粒子ビームを供するため、粒子選別機能を有し長く安定に動作する“磁場共有型の静電粒子分離装置”の改良機を製作しビーム試験による性能試験を行った。大強度ビーム環境下にも使用可能な、放射線耐性が高い実機への指針を確立することができた。

研究成果の概要（英文）：A prototype of the electrostatic separator with crossed magnetic field for particle nuclear physics experiments at high-intensity accelerator facilities has been assembled on a trial basis. Beam tuning was performed. The guideline for the radiation-hard separator was been established.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：電気電子工学

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：粒子分離・高電圧・耐放射線・二次粒子・大強度加速器

1. 研究開始当初の背景

中間子や RI 等の二次ビームを利用する実験は、加速器施設の大強度化および測定技術の進展により更なる新しい局面を迎えようとしていた。

π 中間子や K 中間子ビームの利用により、「ハイパー核の殻構造の確認」「ダブルハイパー核の質量の決定」「ハイペロン核子間スピン軌道力の解明」等のストレンジネス核物理の成果が得られ、また、「 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊」「K中間子崩壊における T 非保存」の測定結果は従来の測定限界を凌駕し標準模型

に迫る実験計画が進みつつある。一方、RI ビーム利用では、「中性子過剰核の核構造の探求」により原子核の特異な様相が明らかにされ、超重元素を初めとする「新 RI の発見」と相まって、新しい原子核像が構築されつつある。

国内では、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の原子核素粒子実験施設で、大強度の陽子ビームにより極めて純度の高い二次 K 中間子ビームを利用する実験が進められている。また、理化学研究所において次世代の重イオン加速器施設 RI ビームファクトリーが稼働し、

ウランまでの RI ビームが世界最大強度で供給可能になる。国外では、フランスの GANIL 研究所で RI 施設の増強計画“SPIRAL2”が推進され、さらに欧州各国の共同による RI ビーム施設“EURISOL”計画が提案されている。ドイツやアメリカでも RI ビームの将来計画がある。

このような施設では、生成される中間子や多様な RI の中から注目する粒子を選択的に選び出すために、粒子分離装置が実験の成否に非常に重要な役割を担う。中でも電場と磁場によるウィーンフィルター型の粒子分離装置は、一次ビームライン上の標的に生成される様々な二次粒子の中から質量と電荷の違いにより目的とする荷電粒子を選別し、実験エリアに導くために必須の二次ビームライン要素の一つである。

加速器の大強度化に伴い、生成標的からは様々な大量の二次粒子が発生するとともに、機器は高い放射線環境に曝される。従って、長期間安定にビームを輸送するため、粒子分離装置の放射線耐性は一次ビームライン要素と同等の仕様が要求される。粒子分離装置は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)では 30 年前の発足時から二次ビームライン用に開発・利用し技術的蓄積があり、現在は耐放射線性を考慮した開発を進めている。電磁石は、KEK にて耐放射線技術としては確立している。このように KEK は「放射線耐性が高い磁場共有型の静電型粒子分離装置」を開発し完成させるために必要な基本的技術を有している。

中間子や RI は不安定で、飛行中に崩壊するため、二次ビームラインの全長を短くする必要性があり、粒子分離装置は電場と磁場を同空間に直交させた磁場共有型が望まれる。上述の幾つかの加速器施設や計画では、このウィーンフィルター型の粒子分離装置をビームライン機器として設置することを想定している。しかしながら、今のままでは、真空シール・電極用絶縁材・電磁石部品など、装置は放射線に脆弱であり大強度下での運転は困難であり、高放射線環境下でも耐え、安定に動作する磁場共有型の静電粒子分離装置の完成が待たれた。

2. 研究の目的

放射線耐性を有し安定な電場を発生し、かつ、特殊形状の耐放射線電磁石を融合した磁場共有型の静電型粒子分離装置の完成を目指す。

- ・高電圧発生部などに耐放射線性を考慮した技術について、磁場共有型静電粒子分離装置への適用を図る。
- ・耐放射線電磁石技術を駆使し、放射線遮蔽を考慮しながら、静電粒子分離装置に適合した耐放射線電磁石を開発する。

3. 研究の方法

以下の項目を順次実施する。

- (1) 平行電極や電磁石の配置と形状の最適化を行う。設計には性能ばかりではなく、維持・保守・修理などの観点も考慮する。
- (2) 放射線に対する耐性が高い部品・材料の選定を行う。
- (3) 高電圧印可と励磁による調整
高電圧を印可し耐電圧試験を行う。また、電磁石を励磁して粒子通過部分での磁場測定を行うとともに、磁界による耐電圧特性の影響について基礎データを得る。
- (4) 架台の製作とビームラインへの設置
ビームラインでの本体の修理は行なえず、また取り出す際に人は機器に近づくことができないので、架台は遠方において設置と取り出しができる構造とする。
- (5) ビームラインにおける試運転
設置後ビームラインに繋いだ後に、真空排気、高電圧印可によるコンディショニング、電磁石の励磁等の試運転を実施する。
- (6) 二次ビームによる光学調整と性能評価
実際の二次ビームによりビーム光学の調整を行い、K 中間子などの二次粒子の収量や、静電粒子分離装置の性能の指標となる K 中間子/ π 中間子比の測定を行う。

4. 研究成果

○平面電極部電界の緩和

既存のセパレータの電極をモデル化し、有限要素法計算を使い電界強度の解析を行った。陽電極の縁での電界がもっとも高くなることが分かったので、陽極板となる SUS の板厚を厚くし、縁の曲率を大きくして電界を緩和した。

電界強度の低減の度合いと、設置時等の取扱いの簡便さ等を考慮して、厚さ 10mm、縁の曲率 8mm を採用した。既存の ES セパレータに比べ、25%低い最高電界を実現できた。(図 1)

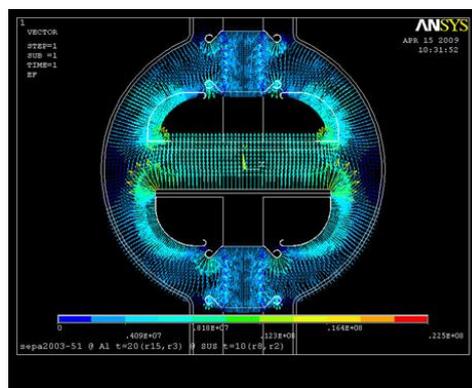


図 1：真空槽内部での平行電極の電界強度の ANSYS による試算。陽極の厚さを 10mm、縁の曲率を 8mm とした。

○磁場測定

2m 長の磁場共有型静電粒子分離装置について、磁場の励磁特性、及び、電極間の磁場分布を測定した。(図2) コイルは真空容器外側に位置している。コイル間のギャップは700mm、ビーム進行方向のコイル長は1800mmである。ギャップが広いために進行方向の磁場分布がなだらかになるとは避けられない。粒子分離の性能に対する、このなだらかな磁場分布の影響は今後の検討項目である。

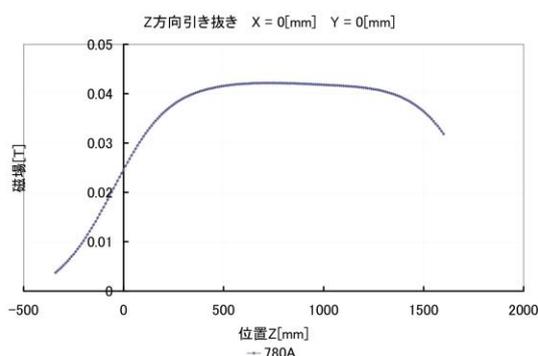


図2 ビーム進行方向の磁場分布

○ビームラインへの設置

一次ビームラインの電磁石等で使用しているものと同じ仕様のピボットを有するベース鉄板を採用した。ピボットは上流側と下流側に配置し、上流側のピボットでビーム軸方向と左右の位置を、下流側のピボットで左右の位置を決める。



図3 設置のためのピボット(上)と設置完了時の本体の底板との嵌め合いの様子(下)

静電粒子分離装置本体側の底板には、ピボットと嵌め合いになる穴を設けている。高さ方向は最初の設置時に現場での調整が必要となるものの、2回目以降はクレーンにて降ろすだけで前後、左右、上下ともに±0.1mmの精度での設置を可能とした。



図4 ビームラインに設置した磁場共有型の静電粒子分離装置。下流側から撮影。中央に見える封止フランジを外し下流側のビームダクトに接続する。上部に負極の高電圧発生部が取り付けられている(橙色)。

○電源コントロール

電源の操作は、プログラマブルロジックコントローラ(PLC)とプログラマブル表示器を使い行う。



図5 静電粒子分離装置の制御用ラック。右端が電源操作盤本体、中央が真空ポンプの制御電源と真空計など、左端が電源コントロールのためのプログラマブル表示器

以前は、高電圧操作盤のヘリポットにより手で操作し、人が電圧を徐々に上げて行くコンディショニング等を行っていた。操作する人の違いにより、電圧の上げ方に差異が生じ、電極等に負担がかかる場合も見受けられた。今回 PLC とプログラマブル表示器を使う事により上げる幅や判断をコンピュータに制御させる事で、電圧の印加の速さや、放電、漏れ電流への応答が一定となる様にした。



図6 電源コントロールのためのプログラマブル表示器のタッチ画面。

○二次ビームによる光学調整と性能評価
原子核素粒子実験施設の K1.1BR ビームラインに磁場共有型の静電粒子分離装置を設置後、実際の一次陽子ビームと発生する二次粒子を用い、 K/π 比と K 中間子の収量を最大にする様にビーム光学の調整を行った。一次陽子ビーム強度は 3.5kW、二次粒子生成標的には白金を使用した。電界強度は 50kV/cm (±250kV) である。K1.8BR ビームラインのアクセプタンスを十分に広げた状態ではないものの、0.8GeV/c の K^+ 中間子にて、実験エリアに輸送される K 中間子の強度が 25,000 個/スピル、及び、 K/π で比 3.7 を実現した。

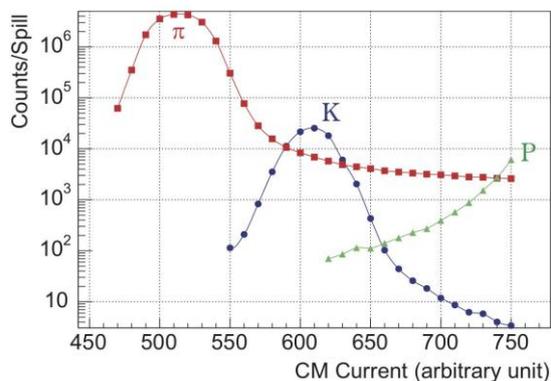


図7 K1.1BRにて、0.8GeV/c の K^+ 中間子を導くビームライン設定にける、粒子分離曲線。 K/π 比で 3.7 を実現した。

○展望

本基盤研究の経費で、磁場共有型の静電粒子分離装置の電極形状、ビームラインへの設置、及び、電圧印加の際の制御方法などについて、有効な指針が得られた。また、実際のビームを用いた試験により、安定に動作する事、及び、実験に供する事ができる粒子分離能力を有する事が実証された。

放射線耐性をより高めるための幾つかの改良点についても明らかになった。耐放射線性を考慮した K1.8 の静電粒子分離装置の技術を適用し、K1.1 ビームラインを早期に二段分離のビームラインとして運転可能とすることで、K 中間子の収量とその純度を向上させ、実機を原子核・素粒子実験に供して行く。

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)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 皆川道文、KEK 技術賞 受賞論文集、KEK Internal 2012-1 (2012) 23-30、査読無
- ② K. Agari, S. Enomoto, H. Fujioka, Y. Fujiwara, T. Hashimoto, R. S. Hayano, T. Hiraiwa, E. Hirose, M. Ieiri, Y. Igarashi, M. Iio, J. Imazato, K. Inoue, Y. Ishiguro, K. Itahashi, M. Iwasaki, Y. Katoh, S. Kawasaki, A. Kiyomichi, H. Kou, M. Minakawa, R. Muto, T. Nagae, M. Naruki, H. Noumi, H. Ohnishi, H. Outa, Y. Sada, F. Sakuma, M. Sato, Y. Sato, S. Sawada, H. Shi, Y. Shirakabe, Y. Suzuki, H. Takahashi, T. Takahashi, M. Takasaki, K. H. Tanaka, M. Tokuda, A. Toyoda, K. Tsukada, M. Ukai, H. Watanabe, T. O. Yamamoto, and Y. Yamanoi, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 02B009、査読有
- ③ M. Ieiri, M. Minakawa, K. Agari, E. Hirose, Y. Katoh, R. Muto, M. Naruki, Y. Sato, S. Sawada, Y. Suzuki, H. Takahashi, T. Takahashi, M. Takasaki, K. H. Tanaka, A. Toyoda, H. Watanabe, Y. Yamanoi, Int' l Particle Accelerator Conf. (2010) THPEC045、査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① “Electrostatic Separators in the Hadron Experimental Facility at J-PARC”, M. Ieiri, M. Minakawa, K. Agari, E. Hirose, Y. Katoh, R. Muto, M. Naruki, Y. Sato, S. Sawada, Y. Suzuki, H. Takahashi, T. Takahashi, M. Takasaki, K. H. Tanaka, A. Toyoda, H. Watanabe, Y. Yamanoi, 国際会議

- EMIS2012、松江、2012年12月2日-7日
- ② “Electrostatic Separators at the J-PARC Hadron hall” M. Minakawa, M. Ieiri, K. Agari, Y. Katoh, E. Hirose, R. Muto, M. Naruki, Y. Sato, Y. Shirakabe, Y. Suzuki, S. Sawada, H. Takahashi, K. H. Tanaka, A. Toyoda, Y. Yamanoi, and H. Watanabe, 第8回日本加速器学会年会、つくば、2011年8月1日-3日
- ③ “Electrostatic Separator and K1.8 Secondary Beamline at the J-PARC Hadron-Hall”, M. Ieiri, 第1回国際加速器学会、京都、2010年5月23日-28日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

皆川 道文 (MINAKAWA MICHIFUMI)
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・技師
研究者番号：50391743

(2) 研究分担者

家入 正治 (IEIRI MASAHARU)
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・教授
研究者番号：50192472

(H24：連携研究者)

加藤 洋二 (KATOH YOHJI)
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：20391740

(H24：連携研究者)

里 嘉典 (SATO YOSHINORI)
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・准教授
研究者番号：30342603

(H24：連携研究者)

広瀬 恵理奈 (HIROSE ERINA)
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・技師
研究者番号：90391763

(H24：連携研究者)

高橋 仁 (TAKAHASHI HITOSHI)
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・准教授
研究者番号：60353372

(H24：連携研究者)

渡辺 丈晃 (WATANABE HIROAKI)
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・准教授
研究者番号：00415043

(H24：連携研究者)

田中 万博 (TANAKA KAZUHIRO)
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・教授
研究者番号：90171743

(H24：連携研究者)

武藤 亮太郎 (MUTO RYOTARO)
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・助教
研究者番号：50392147

(H24：連携研究者)