

ELECTROSTATIC SEPARATORS AT THE J-PARC HADRON HALL

Michifumi Minakawa #, Masaharu Ieiri, Keizo Agari, Yohji Katoh, Erina Hirose, Ryotaro Muto, Megumi Naruki, Yoshinori Sato, Yoshihisa Shirakabe, Yoshihiro Suzuki, Shin'ya Sawada, Hitoshi Takahashi, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Yutaka Yamanoi, and Hiroaki Watanabe
IPNS, KEK, Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

Electrostatic (ES) separators to select and deliver below 2GeV/c secondary beam are launched out at the secondary beam line at the high intensity proton accelerator facility (J-PARC). The ES separator will generate a 75kV/cm electrostatic field between parallel electrodes along the beam direction. It is designed so as to be radiation-proof and to lower spark rate comparing with the present separators. A checkout by measuring K/π ratio of the line has been performed.

J-PARC ハドロンホールの静電型粒子分離装置

1. 静電粒子分離装置

π 中間子や K 中間子ビーム、反陽子など二次粒子ビームは、ストレンジネス核物理、高密度核物質、質量の起源などの研究に重要な役割を担う。二次粒子は、加速器による一次陽子ビームと金属標的との反応により生成され、その金属生成標的を臨む二次ビームラインにより実験エリアへ導かれる。静電型粒子分離装置(ES(Electrostatic)セパレータ)は、ビームと生成標的の反応により発生する様々な中間子等の二次粒子の中から必要な荷電粒子のみを選別し、実験に供するための必須の二次ビームライン要素である[1]。

ES セパレータは、2枚の対向平面電極に正と負の高電圧を加えることにより高電場を発生させ、通過する荷電粒子の速さを弁別する装置である。二次ビームラインの電磁石群で輸送される運動量において、電場と直交する双極磁場とを組み合わせる事によって、荷電粒子の速さ(質量)の違いを選別する事が可能となる。ES セパレータの主な特徴と構成要素、運転形態等は以下の通りである。

- 対向平面電極は二次ビームの進行方向に数 m の長さを有し、電極幅はおよそ 30cm、電極間の間隙は 10 乃至 15 cm である。材質は陽極側が SUS、陰極側がアルミニウムで、運転時にはそれぞれの電極に+300kV と-300kV 程度の電圧を印加する。
- 平面電極は真空容器に収められ、容器の到達真空度は 1×10^{-4} Pa、He リーク量は、 1×10^{-9} Pa・m³/sec.以下が求められる。
- 二次ビームの多重散乱による粒子分離能率の低下を避けるために、ES セパレータも含め二次ビームが通過するライン全体が真空で繋がっていることが要求される。
- より高い電圧を印加できるように、絶縁ガスとして Ne-He 混合ガスを使用し、容器内真空度を 1×10^{-2} Pa 程度に保つ。従ってガス圧の自動調整機構が必要である。

- コッククロフトウォルトン型の高電圧発生装置を真空容器に直接取り付け、ケーブル等を介さずに電極に直接高電圧を供給する。

運転開始時には、電圧を加える過程でコンディショニングが必要である。また、実験時の定常運転に入った場合、加速器の1マシンサイクル(2~3週間程度)の間は、放電等が少ない安定な状態が続くことが望まれる。

2. ハドロン実験ホールとビームライン

J-PARC のハドロン実験ホールには、現在、粒子分離型ビームライン K1.8 と K1.1BR、中性 K 中間子専用ビームライン KL が共同利用実験に供されている。(図1)

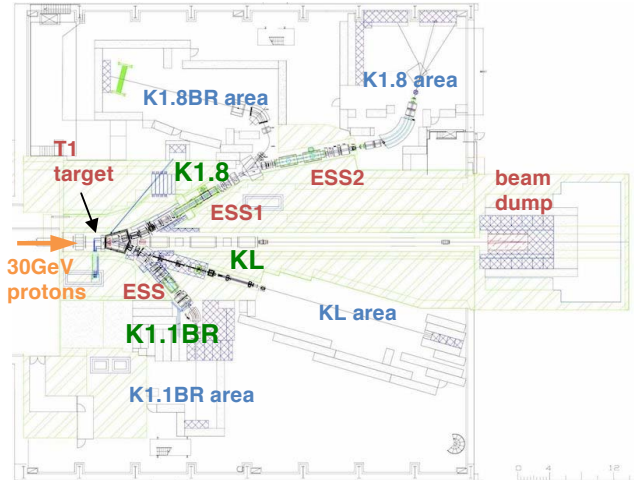


図1: ハドロン実験ホール平面図。

K1.8 ビームラインは 2GeV/c までの二次粒子を対象とし、6m 長の ES セパレータ 2 基を備えた二段分離型ビームラインである。(図2) 一次陽子と金属標的との反応による K 中間子の生成量は π 中間子の 500 分の 1 程度と非常に少ないので、二次ビームとしての K 中間子の純度をより向上させるために二段分離としている[2]。ES セパレータによる鉛直方向電場に対応して粒子分離のための直交する水平

#minakawa@post.kek.jp

磁場は、2基それぞれの上流と下流にある双極電磁石(CM1-CM4)にて発生させる。磁場の強度を調整する事によって、ESセパレータ下流側のスリットを通過する粒子を選択し実験エリアに導く。K1.8は一段目のESセパレータの下流側の双極電磁石(D3)の極性により取り出しを選択できる分岐ラインを設けており、K1.8BRラインとして運用できる。

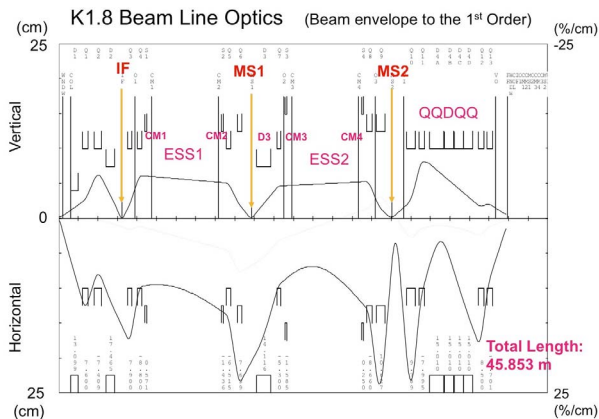


図2：一次のビームトランスポート。IF：中間像スリット、MS1,MS2：質量スリット1及び2。

K1.1BRは1.1GeV/cまでの二次粒子を導くビームラインで、2m長の磁場共有型のESセパレータ1基を有している。将来はK1.1ラインとして、下流側にもう1基ESセパレータを設置しK1.8同様に二段分離型ビームラインとして延伸する計画である。

生成直後の K_s^0 中間子の崩壊による π 中間子、及び、二次粒子と標的近傍の物質との反応により生成した三次の π 中間子などが、二次ビームラインの光学上随所で輸送したいK中間子と混在する。早期にこの不必要な π 中間子を取り除くため、K1.8、及び、K1.1BRどちらのビームラインもESセパレータの上流側に生成標的の像を結ぶ焦点を有し、そこに設けた中間像スリットで標的を発生源とする粒子のみを選択的に通過させるようにしている[3]。

3. 改良

生成標的に近いESセパレータには、一次ビームライン要素に準ずる高い放射線耐性が要求される。既存のセパレータの設計を元に、J-PARCにおける高い放射線環境下でも十分に使用に耐え、かつ、長期的に安定に動作するように設計・製作を進めた。[4]

3.1 耐放射線性に関して

真空封止シールには、従来のEPT材質のOリングではなく、金属Oリング(トライパック)を使用し、真空ポンプには、耐放射線性を高めたターボ分子ポンプ、粗挽き用の真空ポンプとしてオイルフリーのスクロールポンプを使用している。

高電圧発生装置(図3)は真空容器の上部に直づけされ、プラグ状の電圧導入部は直接真空容器内に差し込まれる。既存の装置は電圧導入部がFRP(Fiber Reinforced Plastics)で成形されており、真

空容器内では、さらにその部分をセラミック容器で囲い絶縁油を充填していた。このFRPと容器間の絶縁油は放射線に曝される割合も高く、高電圧発生装置自体を保守する際も解体や絶縁油充填に複雑な手順を要していた。

新型の高電圧発生装置では、FRPの電圧導入部自体を放射線耐性の高いセラミックに換え、絶縁油とセラミック容器を不要とし、高電圧発生装置を直接真空容器に取り付けられるようにした。

製造後には高電圧発生装置の単体試験として最大定格の400kVの印加に成功し、ビームラインに設置後の連続運転においても良好な結果を得ている。



図3：高電圧発生装置。電圧導入部自体を放射線耐性の高いセラミックにした。

3.2 内部電界の緩和に関して

真空容器の母管の側面には、高電圧発生装置、電極支持機構、真空排気装置、のぞき窓等を取り付けるため、随所に枝管を設ける。既存のセパレータでは、枝管は真空容器母管に穴を開け、その場所でのつきあわせ溶接により接合し、その後溶接個所の角を研磨していた。この方法では接合部分に十分な曲率を取る事ができず(R11程度)、比較的強い電界が生じ、放電を誘発する要因になっていたと考えられている。



図4：枝管接合部に“引っ張り成形”を施し製作した真空容器。

新型の真空容器では母管に“引っ張り成形”を施

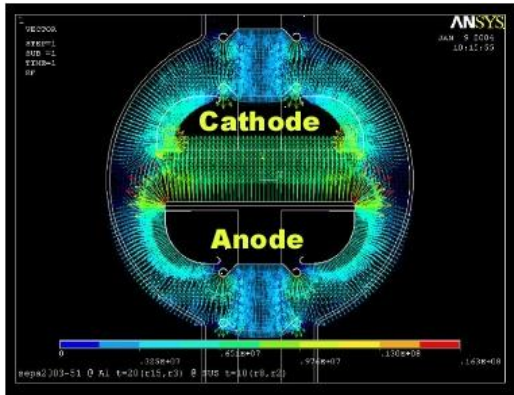
して、枝管との接合部を外側へ張り出す様にした。これにより、接合曲がり部の曲率を大きく取る事ができ (R30 程度)、母管側より離れた外側の平坦になる部分で溶接を行なうことになるので、電界を緩和でき放電要因を大幅に抑制できると期待される。

(図4) 真空容器は、引っ張り成形の後に枝管とフランジを取付け、電界研磨を施した。従来のセパレータは当時の技術によりスコッチブライトによる研磨のみであった。電界研磨を施した新型機は平均粗さで 0.05 ミクロン、最大高さ 0.2 ミクロン程度と見込まれ、面粗さに起因する放電は抑制される。

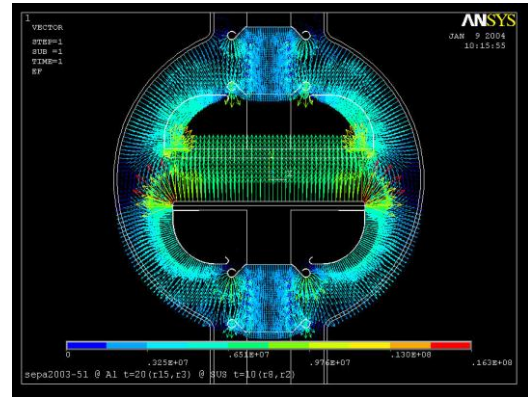
3.3 平面電極部電界の緩和

電界強度の試算結果によると陽電極の縁での電界がもっとも高い。陽極板となる SUS の板厚を変え、縁の曲率を大きくし、縁での電界を緩和する設計を行った。

新型セパレータでは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、 $t=10$ 、 $R1=8$ 、 $R2=2$ を採用した。既存の ES セパレータに比べ、最高電界を 25% 低く抑える事ができた。(図 5(a)、(b))



(a) 既存の陽極に近い形状
($t=5$, $R1=3$, $R2=2$ [mm])
最高電界 : 2.23×10^7 [V/m]



(b) J-PARC用新型
($t=10$, $R1=8$, $R2=2$ [mm])
最高電界 : 1.67×10^7 [V/m]

図 5 : 真空槽内部での平行電極の電界強度の ANSYS による試算

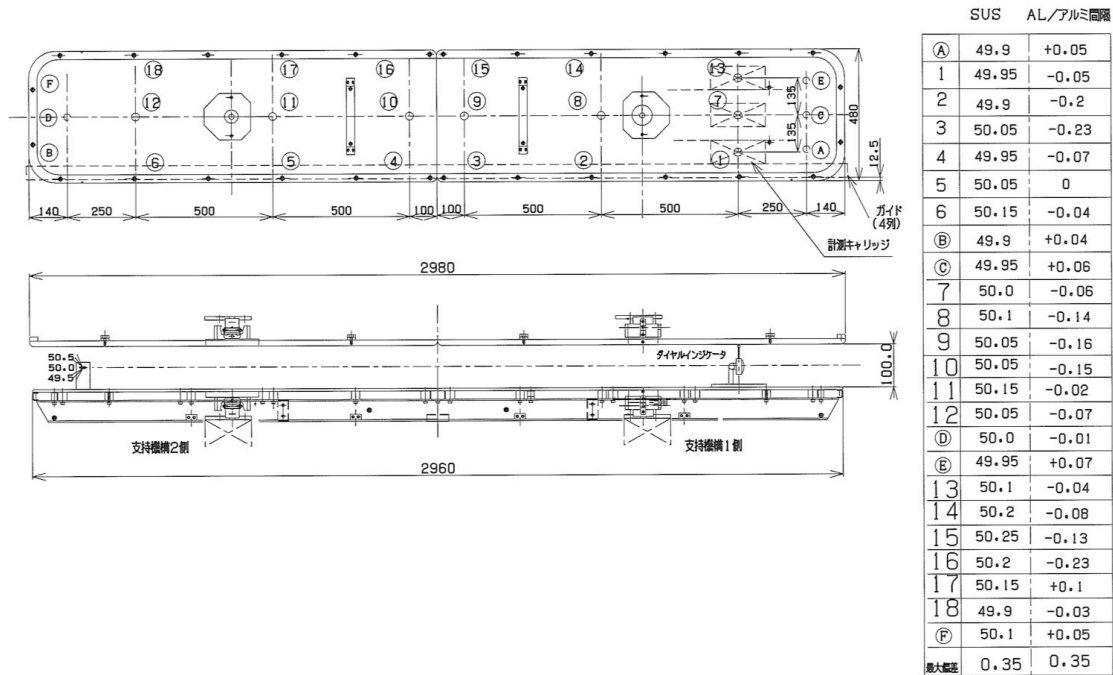


図 6 : SUS 電極 (正極 [下側]) の水平性と SUS 電極とアルミ電極 (負極) の平行性。図の右側の表において、第 1 列 : 左図の測定箇所、第 2 列 : ビーム面から SUS 電極までの距離 (50mm が理想位置)、第 3 列 : SUS 電極とアルミ電極間距離の 100mm からのずれを示す。最大差で 0.35mm に収まっている。

4. ES セパレータの組立て

ES セパレータは、電極、真空容器を 3m 単位で製作し、二つを繋ぎ合わせ全長 6m の構成としている。下流側の真空容器には正と負の高電圧発生装置を取付けている。

真空容器内部には平行電極が納められており、上側に一電極、下側に+電極の構成になっている。電極は水平に、かつ、正負の電極の対向距離が 100mm となるよう平行に設置し、電極の水平度、及び、電極間の平行度は $\pm 0.5\text{mm}$ 以下になるように調整している。(図 6)

5. ES セパレータの設置

ビームラインの床面には、電磁石等で使用しているものと同じ仕様のピボットとポールを有するベース鉄板を採用した。(図 7)

設置には専用吊り具を使用し、クレーンによりビームラインへの設置および取り外しを行う。6m 長の ES セパレータは下流側 3m の真空容器の上部と左側に高電圧発生装置を取付けているために、前後左右の荷重バランスが均等ではない。水平に吊れるようにチェーンの長さを調整しながら設置作業を行う。ビームライン床面のベース板から立っているポールに、主架台横に設けているコーン状の筒を合わせることによって大まかな精度 ($\pm 5\text{mm}$) でビームライン上に降ろすことができる。ポールとピボットを有するベース板は、6m 長セパレータの上流側と下流側に 5.5m の距離をおいて 2カ所に設置した。主架台の底面のピボット用の穴とベース板のピボットとが 2カ所で勘合することによって、ビームラインに精度良く設置できる。(図 8)

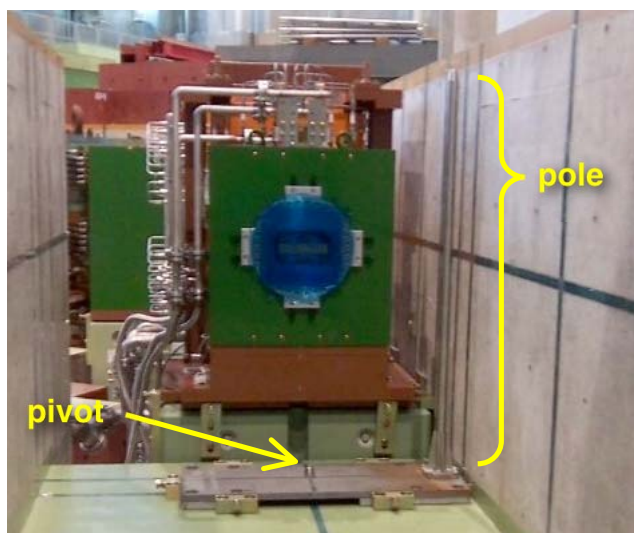


図 7 : ビームライン床面に設置されたベース板(下流側)。設置ガイド用ポール(pole)とピボット(pivot)が取付けられている。

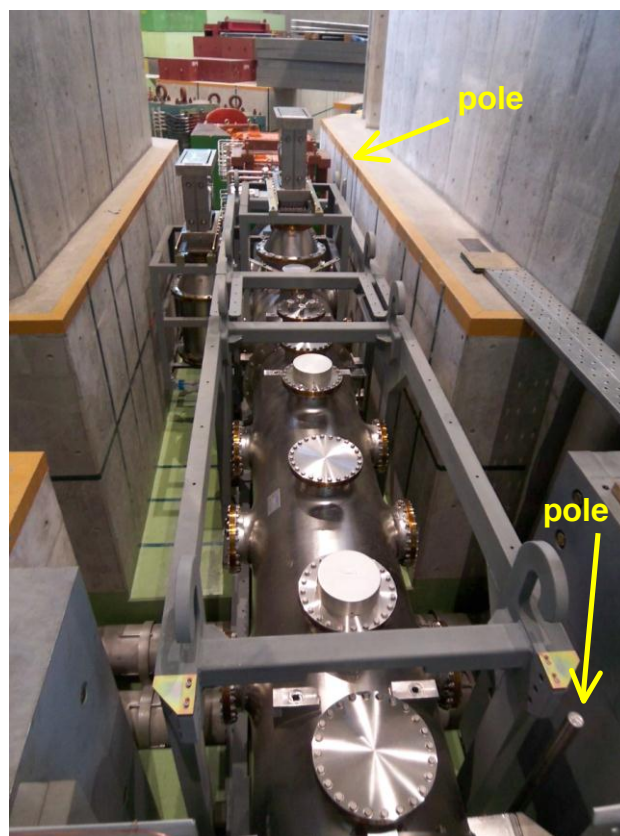


図 8 : ビームラインに設置が完了した K1.8 第 1 セパレータ。セパレータ右側にベース板に取り付けられた 2本のガイド用ポールが見える。

6. ビームによる性能評価

K1.8BR、K1.8、K1.1BR の各実験エリアにて、ES セパレータによる二次粒子の分離能力を測定した。

K1.8BR では $0.75\text{GeV}/c$ の運動量において、ES セパレータ電圧を $\pm 200\text{kV}$ に設定し、上流と下流の双極磁石の磁場を変えながら、質量スリットを通過し実験エリアに導かれる二次粒子の計数を測定した。 π 中間子、K中間子、反陽子がよく分離されている。(図 9)

K1.8 では $1.8\text{GeV}/c$ において、二基の ES セパレータを $\pm 200\text{kV}$ 、上流と下流の計 4 台の双極磁石の磁場を K 中間子用に設定して、実験エリアにて輸送されてくる粒子を測定した。測定器群は K 中間子用に調整されているので、輸送されてくる粒子の中で K 中間子を選択的に取り出していることになるけれども、ES セパレータを使用すると二次粒子中の K 中間子の純度が大幅に改善している。(図 10)

K1.1BR では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、 $0.8\text{GeV}/c$ の K^+ 中間子を導くビームライン設定において、実験エリアに輸送される粒子のほぼ半数を K 中間子 (π/K 比で 1.14) とすることができた。(図 11)

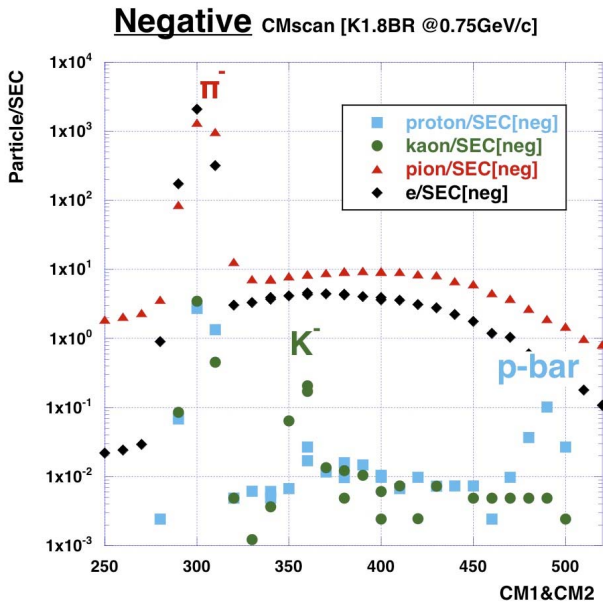


図 9 : K1.8BR において 0.75GeV/c の負の二次粒子に対し、ES セパレータ電圧を±200kV に設定した際の、質量分離曲線。上流と下流の双極磁石の磁場を変えながら、質量スリットを通過し実験エリアに導かれる二次粒子の計数を測定した。π⁻中間子、K⁻中間子、反陽子がよく分離されている。

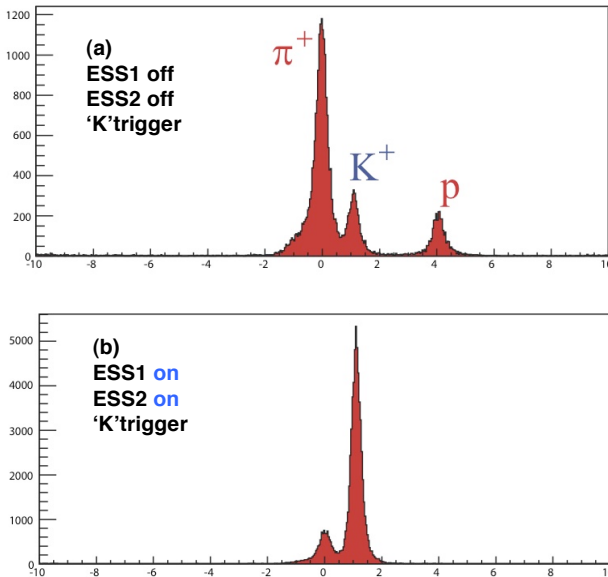


図 10 : K1.8 で 1.8GeV/c において、二基の ES セパレータを±200kV、上流と下流の計 4 台の双極磁石の磁場を K 中間子用に設定して、実験エリアにて輸送される粒子を測定した。測定器群は K 中間子用に調整されている。ES セパレータを使用しない場合 (a) に比べ、ES セパレータを使用する (b) では、二次粒子中の K 中間子の純度が大幅に改善している。

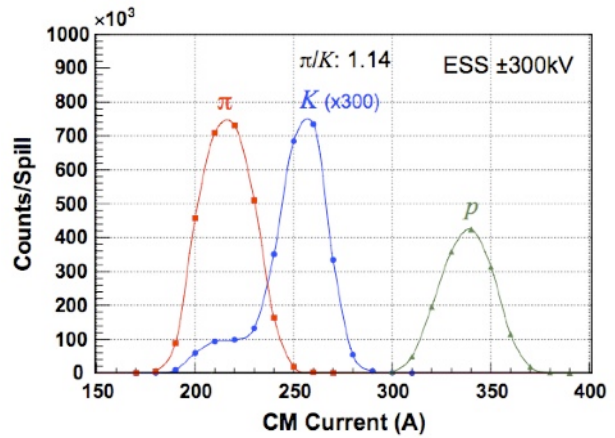


図 11 : K1.1BR にて、0.8GeV/c の K⁺中間子を導くビームライン設定において、実験エリアに輸送される粒子のほぼ半数を K 中間子 (π / K 比で 1.14) とすることができた。

K1.8BR では、実験に供する事ができるビームライン性能を得ることができた。

今後は、K1.8 においては四極電磁石や高次の電磁石群の詳細調整、及び、より高い ES セパレータ電圧での粒子分離能力の評価を行う。また、K1.1BR では、二次粒子の収量を増加させるためにビームラインアクセプタンスを広げて K 中間子の純度の向上を試みる。

謝辞

新型 ES セパレータの設計や改良では高エネルギー加速器研究機構の山本明氏の助言により、対放射線性や電界の緩和を実現できました。

K1.8BR、K1.8、K1.1BR の各実験エリアでのビームによる性能評価の測定は、J-PARC の E17、E19、E06 の各実験グループの協力のもと実施することができました。

本研究の一部は科研費基盤研究(B) (21340071)の助成を受けています。

参考文献

- [1] A. Yamamoto et al., Nucl. Instr. and Meth. 148(1978)203-207; A. Yamamoto et al., Nucl. Instr. and Meth. 203(1982)35-43; S. Kurokawa et al., Nucl. Instr. and Meth. 212(1983)91-100; M. Takasaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A242(1986)201-207.
- [2] P. H. Pile et al., Nucl. Instr. and Meth. A321(1992)48-5.
- [3] K. H. Tanaka et al., Nucl. Instr. and Meth. A363(1995)114-119.
- [4] M. Ieiri et al., Nucl. Instr. and Meth. B266 (2008) 4205-4208.; M. Ieiri et al., Int'l Particle Accelerator Conf. (2010) THPEC045.