

A SIMULATION STUDY OF THE POSITRON FOCUSING WITH A SUPERCONDUCTING SOLENOID COIL

T. Kamitani, A. Enomoto, S. Ohsawa, K. Hosoyama

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

This paper reports a simulation study on the positron focusing with a superconducting (SC) coil at the KEK positron generator. The result shows that it has a larger energy acceptance than the present pulsed coil. The positron yield is expected to be improved more than twice with the SC coil.

超電導ソレノイドを用いた陽電子収束についてのシミュレーション

1. 始めに

一般的に陽電子ビームを生成するには、電子ビームを金属標的に照射して、カスケードシャワーで起きる電子陽電子対生成反応を用いる。こうして生成された陽電子は標的物質中での多重散乱等により大きな横方向運動量を持つので強いソレノイド磁場を用いて収束し、後ろの収束系のアクセプタンスにマッチングさせることが必要となる。このマッチング・デバイスとして磁場形状の異なる2つの方式がよく用いられる。その一つはKEK入射ライナック陽電子生成部でも用いられている Quarter Wave Transformer (QWT) 方式で、パルスコイル等により生成される磁場長が短く強いソレノイド磁場（ピークで2 Tesla程度）を用いる。QWTは陽電子のエネルギーアクセプタンスに狭いバンドパス特性を持つ。もう一つのタイプはSLACで用いられているadiabatic device (AD) 方式であり、flux concentratorと呼ばれるパルス電流による強い誘導磁場（ピークで6 Tesla程度）を発生させる装置を用いるが、磁場の強さはビーム進行方向に緩やかに減少しadiabaticにマッチングをとるために、QWTに比べて広いエネルギーアクセプタンスを持つ。

KEKではBファクトリー計画のため、陽電子ビームの強度を上げることを目的として陽電子生成部を下流の方へ移動させて1次電子ビームのエネルギーを高くする(0.25 GeV → 3.7 GeV)改造を行ったが、陽電子収束系はこれまでのQWTシステムをほとんどそのまま踏襲している。将来的にさらに陽電子の強度を上げることを考え、その方策の一つとしてQWTの代わりに超電導コイルを使用してAD方式的な特性を持つように改造する可能性について検討を行っている。超電導コイルには以下のようなメリットがある。(1) コイル導線において非常に高い電流密度を達成することができるので、高いアンペア・ターン数を得ることができ高い磁場が作れる。

(2) パルスコイルなどではパルス的大電流(10 kA程

度)が必要なに対して、超電導コイルでは100 A程度でしかもDC電源でよいので簡単で安価ですむ。(3) パルスの変化する磁場の場合渦電流が発生してそれによる磁場が軸対称でないとビームが影響を受けることがあるが、超電導コイルでは定常的な磁場なので渦電流が発生しない。

まず、検討の第一歩として超電導コイルを用いることによりどの程度の陽電子収量の増加を見込めるかについてシミュレーションにより評価を行った。

2. シミュレーションの概要

陽電子収束の様子を調べるために、粒子トラッキングシミュレーションを行った。これは収束磁場及び加速電場中での荷電粒子の運動を、相対論的運動方程式をステップごとに積分することにより追跡する手法であり、詳細については文献[1]に述べたので参照されたい。なお、トラッキング計算の初期値として用いる陽電子の位置、運動量、エネルギー分布についてはEGS4 codeを用い金属標的内での陽電子生成のシミュレーションにより求めたものを使用した。この時、入射電子数=10000、ビームエネルギー=4.0 GeV、ビーム半径(1 σ)=0.5 mm、ビーム長さ(1 σ)=1.3 mmとして、標的で生成された陽電子数は88745であった。これを用いてトラッキング計算を行ったが、その際磁場分布としてはTable.1に示すような収束コイルの仕様値によるものを用いた。

	現パルスコイル	超電導コイル
内径	34 mm ϕ	250 mm ϕ
外径	76 mm ϕ	400 mm ϕ
長さ	43 mm	100 mm
アンペアターン数	10 kA*8 turn	85 A*17040 turn
中心磁場	2.3 T	5.4 T
磁場有効長	45 mm	260 mm

Table. 1 収束コイルの仕様

これらのコイルとその下流の DC ソレノイドコイルにより作られる収束磁場の分布を Fig. 1 に示す。超電導コイルの方が磁場が緩やかに減少しているが、これはコイル長が長くしかも径方向外側にあるためである。

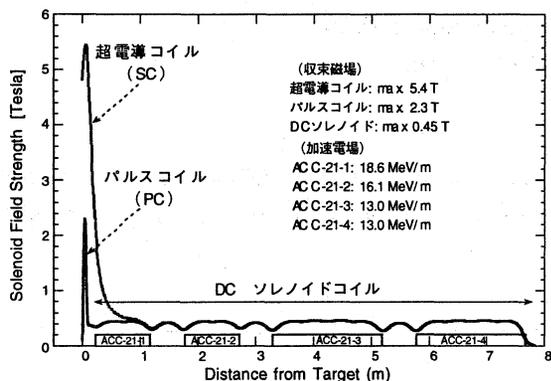


Fig. 1 収束磁場分布

図中にも示してある通り、この領域には4本の加速管が設置され、この全長にわたってDCソレノイドによる収束磁場によりカバーされている。所々、磁場強度がくぼんでいるのは導波管を通すためにコイルが分割されてギャップがあるためである。またビームの通るアパーチャー(開口径)は加速管部分では半径10 mm、ビームダクト部分では半径15 mmとしている。

3. アクセプタンス特性の比較

まず、QWT収束系と超電導コイル収束系の特性の違いを見るために、DCソレノイド磁場の終端での陽電子の位相空間分布を比較する。Fig. 2, 3 に横方向位置、横方向運動量の分布を示すが、このどちらも超電導コイルにしても変化がないことがわかる。これはソレノイド収束系での横方向のアクセプタンスはソレノイド磁場のもっとも弱いところの磁場強度とそこでのアパーチャーの大きさのみで決まり、強磁場部にはよらないという一般的な性質から予測される通りである。次に縦方向位相空間の分布を見てみよう。Fig. 4 に縦方向位置分布、すなわちバンチの長さ方向の粒子分布を示す。超電導コイルの方がやや裾の部分が多いが、ほとんど大差はない。そこで Fig. 5 にエネルギー分布の比較を示す。これを見ると超電導コイルがずっと広いエネルギーアクセプタンスを持っていることを示している。これは超電導コイルによる磁場が adiabatic device と同じような特性を持つことを示している。

4. 陽電子収量の比較

前節ではソレノイド収束系を出たところでの陽電子ビームの位相空間分布を比較した結果、超電導コイルを用い

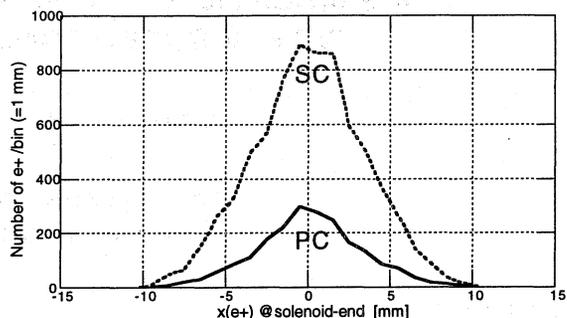


Fig.2 横方向位置分布

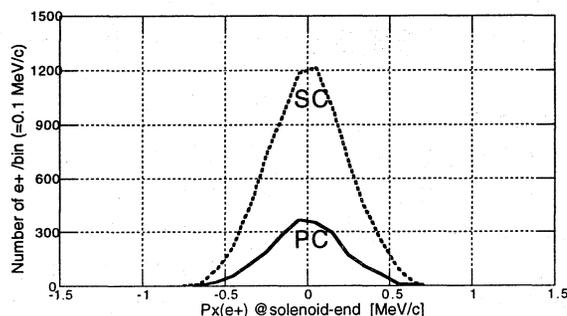


Fig.3 横方向運動量分布

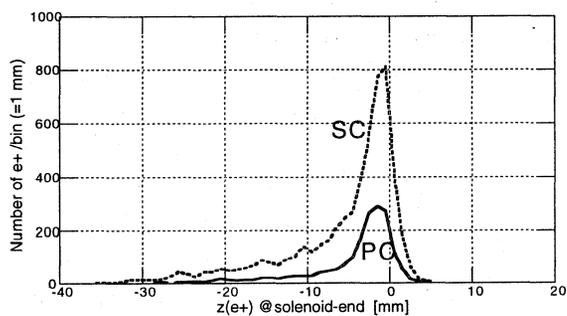


Fig.4 縦方向位置分布

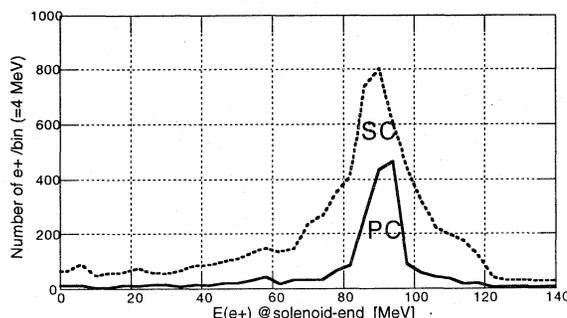


Fig.5 エネルギー分布

ると非常に広いエネルギーアクセプタンスが得られることがわかった。しかしライナック終端で最終的に得られる陽電子収量を考えた場合、陽電子ビームのエネルギー拡がりが多いということは、この後ろの加速ユニットにおけるQマグネットによる長距離のビーム輸送系のエネルギーアクセプタンスを外れる陽電子のロスの割合も大きいということである。また横方向位相空間のアクセプタンスについても、ソレノイド収束系よりQマグネット収束系の方が少し狭いので、これによるビームロスもある。これらを考慮した上で、パルスコイルの場合と超電導コイルの場合で得られる陽電子収量の比較を行う必要がある。そこで、前節の粒子トラッキングシミュレーションをソレノイド収束系だけでなく、もう少し先のQマグネット収束系のところまで行い、ビームロスの評価を行うことにする。まず、Fig. 6にソレノイド収束系の下流にあるマッチングセクションと次の加速ユニットのFODO収束系でのビームオプティクスの様子を示す。但し、これはある決まったビームエネルギーおよび加速管での加速を仮定した計算であり、これから大きくずれたエネルギーを持つ粒子の軌道はこのビームエンベロープからはみ出して加速管やビームダクト等の壁に衝突してロスしてしまう可能性がある。

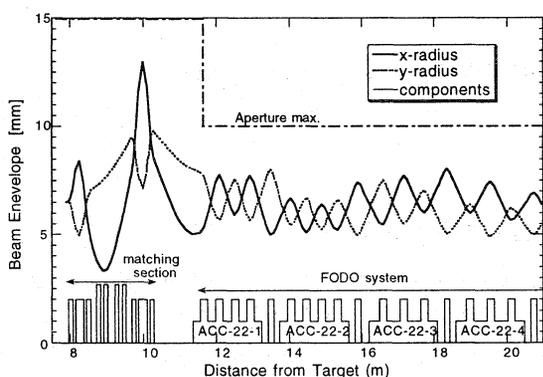


Fig. 6 QM収束系でのビームオプティクス

ともかくこの計算値による磁場値を仮定して、ソレノイド収束系の始まりから次のユニットのQマグネット収束系まで全体を通してビームトラッキングを行い、ビームが収束系を先に進んで行くとき陽電子粒子数がどのように減少していくかを示したのがFig. 7である。まず、ソレノイド収束系の始めの方で大きく陽電子数が減少することがわかる。これは標的で生成された陽電子全体のエミッタンス、エネルギー拡がりは、QWTや超電導コイル収束系のアクセプタンスに比べてずっと大きいためである。ソレノイド収束系の途中で粒子数変化にいくつか段がついているが、これはFig. 1でわかるように、収束磁場強度が所々へこんでいる部分によるビームロスであ

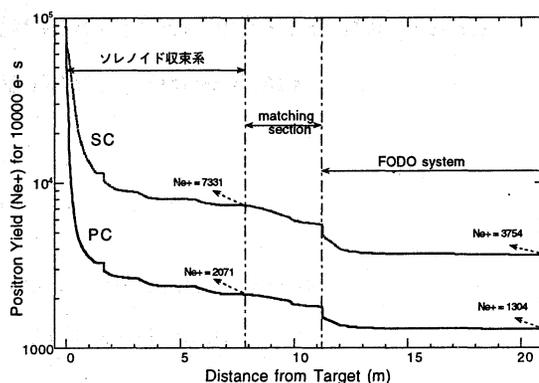


Fig. 7 陽電子数の変化

ると考えられる。さらにマッチングセクションでもかなりロスを起こし、FODO系に入ったところで大きくロスすることがわかる。そしてこのFODO入り口でのロスは割合として、超電導コイルの場合の方が大きい。これはビームのエネルギー拡がりが多いためであると考えられる。FODO系を少し進むとビームロスは小さくなり、そこから先は陽電子数があまり減少せずに通過している。これより陽電子変換効率を求め、エネルギー規格化値 ($Ne+/Ne-/Ee- : \%/GeV$) で示したものがTable .2である。これによれば、FODOのところでも超電導コイルにより陽電子収量が2倍以上増加する事がわかる。

	現パルスコイル	超電導
ソレノイド収束系出口	5.2 %/GeV	18.3 %/GeV
2.2ユニット出口 FODO 中点	3.3 %/GeV	9.4 %/GeV

Table. 2 電子陽電子変換効率

5. まとめ

現在の KEK 陽電子生成部の QWT 収束系とパルスコイルの代わりに超電導コイルを用いた収束系について、粒子トラッキングシミュレーションを行った結果、超電導コイルを用いることにより広いエネルギーアクセプタンスを得て、陽電子収量が2倍以上増加することがわかった。

6. 謝辞

この研究を行うにあたり、動燃大洗工学センターの江本隆、武井早憲、谷本育津の各氏との議論が非常に有益であったので、ここに感謝いたします。

7. 参考文献

[1] T. Kamitani et.al, Linac 92 conference, 1992 August, Ottawa, Canada, proceedings, p377