

JAERI - M
93-030

SPring-8 電子陽電子変換部のシミュレーション

1993年3月

水野 明彦・鈴木 伸介・吉川 博
堀 利彦・柳田 謙一・横溝 英明

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

SPring-8 電子陽電子変換部のシミュレーション

日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム

水野 明彦・鈴木 伸介・吉川 博
堀 利彦・柳田 謙一・横溝 英明

(1993年1月27日受理)

SPring-8 では、蓄積リングでのビーム寿命を確保するために陽電子での運転を計画している。このための電子／陽電子変換部は線型加速器内に設置するが、変換部の陽電子収集効率についてシミュレーションを行ったので報告する。

電子／陽電子変換部については日本原子力研究所東海研究所に R&D 装置を設置し、実験を行っているが、今回のシミュレーションでは、計算の特徴を生かし、また R&D 装置の実験を補完する目的で、実験のできない条件についてもシミュレーションを行った。その結果、陽電子収集に適した磁場形状を得ることができ、そのときの収集効率は 0.27 % に達した。

本報告書は、電子／陽電子変換部の設計の指針となるように、これらのシミュレーションについてまとめたものである。

Simulation of Electron-positron Convertor
for SPring-8

Akihiko MIZUNO, Shinsuke SUZUKI, Hiroshi YOSHIKAWA
Toshihiko Hori, Kenichi YANAGIDA and Hideaki YOKOMIZO

JAERI-RIKEN SPring-8 Project team
2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received January 27, 1993)

In the SPring-8, we are planing to use positrons in order to increase the beam life time in a storage-ring. These positrons are produced at a electron-positron convertor in a linac. In this report, we presented simulations about conversion efficiency of the convertor with various magnetic fields of the convertor system.

We constructed the test aparatus of convertor in Tokai establishment, JAERI. But in this report, we also simulated with the conditions which are not available in the aparatus, so as to cover the results of experiments. And we found the best constitution of magnetic fields for the convertor. The conversion efficiency is up to 0.27% with the best magnetic fields.

The aim of this report is to help designing the positron-electron convertor of the SPring-8 linac.

Keywords: Electron-positron Convertor, EGS4, Beam Tracking Code,
Conversion Efficiency, Pulse Solenoidal Coil

目 次

1. はじめに	1
2. シミュレーションの概要	2
2.1 R&D 設置の概要	2
2.2 シミュレーションコードの概要	3
2.2.1 EGS4	3
2.2.2 ビームトラッキングコード	3
2.2.3 ビームトラッキングコードの構成	5
3. シミュレーション結果	7
3.1 EGS4の結果	7
3.2 ビームトラッキングコードの結果	9
3.2.1 代表的シミュレーション結果	10
3.2.2 パルスソレノイドコイルの磁場強度	11
3.2.3 パルスソレノイドコイルの位置	14
3.2.4 コイル全体の磁場強度	14
3.2.5 陽電子の加速エネルギー	17
3.2.6 磁場形状の最適化	19
3.2.7 加速管の追加	24
3.2.8 パルスソレノイドコイルのチルト, 平行移動の影響	24
4. まとめ	28
参考文献	28
付録1 ソレノイドコイルの磁場	
付録2 ビームトラッキングコードソースリスト	
付録3 磁場で補足されて加速管中を進む粒子の運動	

Contents

1.	Introduction	1
2.	Outline of Simulations	2
2.1	Outline of the Test Apparatus	2
2.2	Outline of the Simulation Codes	3
2.2.1	EGS4	3
2.2.2	Beam Tracking Code	3
2.2.3	Constitution of Beam Tracking Code	5
3.	Results of Simulations	7
3.1	Results of EGS4	7
3.2	Results of Beam Tracking Code	9
3.2.1	Typical Results of Simulations	10
3.2.2	Various Magnetic Field of the Pulse Solenoidal Coil	11
3.2.3	Position of the Pulse Solenoidal Coil	14
3.2.4	Various Magnetic Field of the All Solenoidal Coils	14
3.2.5	Accelerated Energy of Positrons	17
3.2.6	Optimum Constitution of Magnetic Fields	19
3.2.7	Addition of One More Accelerating Tube	24
3.2.8	Tilt and Parallel Movement of Pulse Solenoidal Coil	24
4.	Conclusion	28
	References	28
Appendix 1	Magnetic Field of Solenoidal Coil	29
Appendix 2	Source List of the Beam Tracking Code	31
Appendix 3	Particle Motion in Accelerator Tube with Magnetic Field of Solenoidal Coil	39

1. は じ め に

S P r i n g - 8 では、蓄積リング内の粒子として、電子による運転以外に、イオントラッピングを防ぎビーム寿命を確保するため、陽電子による運転を計画している。陽電子は、入射器となる線型加速器内の電子／陽電子変換部で生成する。この電子／陽電子変換部は、ビームエネルギーが 2 5 0 M e V の所に置かれることになる。現在、線型加速器出口での陽電子のビームパラメータは、パルス幅が 1 nsec、および 1 0 nsec、ビーム電流 1 0 m A を予定している。これに対し、電子／陽電子変換部への入射電子ビーム電流は 1 0 ~ 1 5 A 程であり、線型加速器全体での電子／陽電子変換効率を 0. 1 % 以上に設計する必要がある。このため、原研リニアックに陽電子発生 R & D 装置を設置し実験を行う一方、電子／陽電子変換部のシミュレーションコードを作成してそれを R & D 装置に適用した。

本報告書では、電子／陽電子変換部のシミュレーションコードについて述べ、また、電子／陽電子変換部設計の指針となるように、シミュレーションの結果についてまとめる。

2. シミュレーションの概要

ここでは、シミュレーションの対象としたR & D装置の概要について述べた後、シミュレーションコードの概要、及びその構成について述べる。

2. 1 R & D 装置の概要

陽電子発生R & D装置は、電子／陽電子変換部の試験のため91年夏に原研リニアックに併設した。この装置は、図2-1に示すように、タンクステンターゲット、パルスソレノイドコイル、DC1（ソレノイド）コイル、DC2（ソレノイド）コイル、加速管、及びその他の付随モニター類、電磁石類より構成されている。

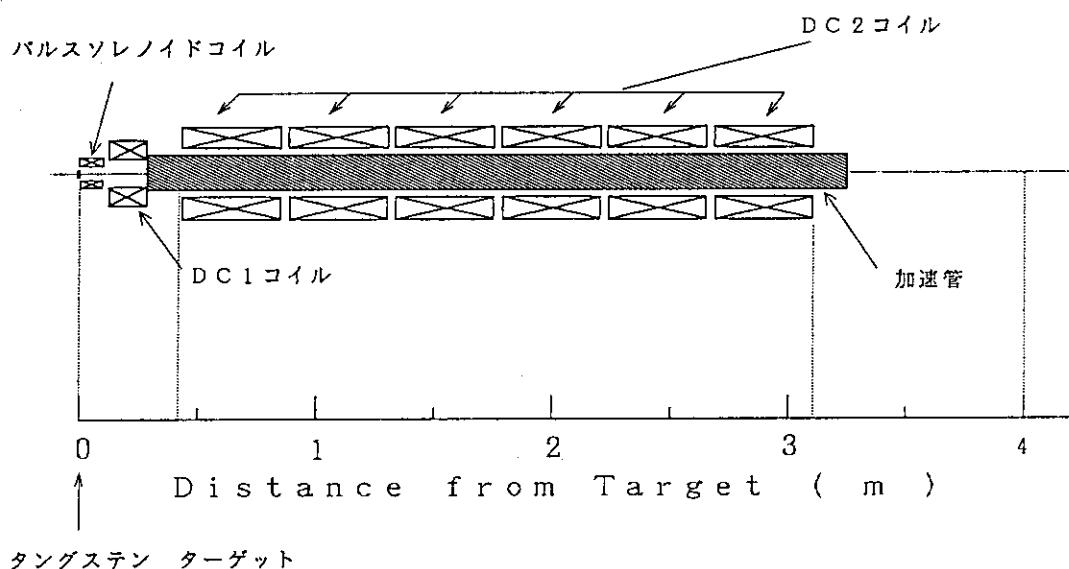


図2-1 R & D装置概略図

タンクステンターゲットは円形平板であり、直径14mm、厚さ6mmである。厚さによる影響を試験するため、厚さ8mmのターゲットのスペアが用意されている。パルスソレノイドコイルはターゲットの直後にあり、強力な磁場で陽電子を補足する。パルスは半波長が $140\mu\text{sec}$ であり、ピークで1Tの磁場を発生する。パルスソレノイド部のダクトは渦電流防止のためセラミック製である。パルスソレノイドの後方には、DC1、および6つのDC2コイルがある。DCコイルは加速管を覆う構造になっているため、内径が大きくなっている。また、パルス的な運転をすると加速管に渦電流が発生するためDC電流を流す必要がある。したがって、パルスソレノイドコイルに比べてたいへんサイズが大きくなっている。DC1コイルの磁場は最大で約0.3T、DC2コイルは約0.2Tである。DC2が囲んでいる加速管はSpring-8の実機に使用するものと同じものであり、加速管長は

約3m、最大で粒子を約50MeV加速することができる。これらの後方に、スリット、偏向電磁石、およびファラディーカップが設置されており、エネルギー分析が行えるようになっている。

ターゲットには、原研リニアックより120MeVに加速された電子を入射し、実験を行う。パルスソレノイドコイルの電源容量のため、ビームは5pps以下で入射される。

2. 2 シミュレーションコードの概要

2. 1節に述べたR & D装置を対象に、電子／陽電子変換部のシミュレーションコードを開発した。このコードは、ターゲットによる陽電子発生を扱う「EGS4」と、陽電子集束システム部のビームトラッキングコードの2つに分かれる。以下に、それについて説明する。

2. 2. 1 EGS4

EGS4 (electron Gamma Shower Version 4)¹⁾は、Stanford大学で開発された電子、光子の輸送を「電磁カスケード理論」を用いてシミュレーションするモンテカルロプログラムである。今回は、これを用いてターゲット部分での陽電子発生を計算した。

EGS4では、変化させることのできるパラメータとして、ターゲットへの入射電子エネルギー、ターゲットの材質、ターゲット形状、ターゲット厚さなどがある。しかし、R & D装置ではターゲット部のパラメータを変化させることは難しい。今回の計算は、R & D装置の実験結果とシミュレーションの結果について比較検討することを目的に行ったので、EGS4では、2つの条件のみについて計算している。これは、R & D装置に対応した入射電子エネルギーが120MeVの場合と、SPring-8の実機に対応した250MeVの場合の2つである。計算は、原研情報システムセンターのM780を用いて行った。なお、ターゲットの厚さについては、タンクステンの場合には6～7mm程度の場合が最も効率がよく、入射エネルギーについては、数百MeVまではエネルギーの高い方が効率がよいという結果がある。²⁾

2. 2. 2 ビームトラッキングコード

ビームトラッキングコードでは、EGS4を用いて計算したターゲット出口での陽電子のエネルギー、ターゲット上での位置、出射角度を読み込んで、集束システム部に於いてトラッキングを行うものである。このコードは、マクスウェル方程式

を4次精度のルンゲクッタ法で解くもので、今回新たに開発したものである。

コードでは、トラッキングの各々の点に於いてソレノイド磁場を計算している。計算では、各々のコイルの位置に円筒電流が流れていると仮定し、任意の点（陽電子の位置）のベクトルポテンシャルを、 $r = 0$ の近傍で橜円関数を展開することにより求める。これより、 B_z , B_r を導く（付録-1 参照）。この手法で計算した中心軸上での B_z , 中心軸より 5 mm 離れたところでの B_r を、

図 2-2 に示す。図 2-2 に於ける中心軸からの距離 r は z によらず一定であるが、実際のトラッキングでは陽電子の軌跡に沿って r の値は変化していく。図 2-2 の値は、R & D 装置の定格値とほぼ等しい値である。

加速管の部分ではビーム進行方向に定常電場があると仮定した。これは、第3章でわかるように、集束システム部で捕獲される陽電子のエネルギーは、少なくとも 10 MeV であり、速度は加速管内の位相速度とほぼ等しいと考えたからである。

以上の計算をターゲット出口部分から 4 m の所まで行う。途中、陽電子位置が中心軸より 17 mm 以上となったものは排除される。（もちろん、この数値は任意に変えることができる。）トラッキングの概念図を図 2-3 に示す。

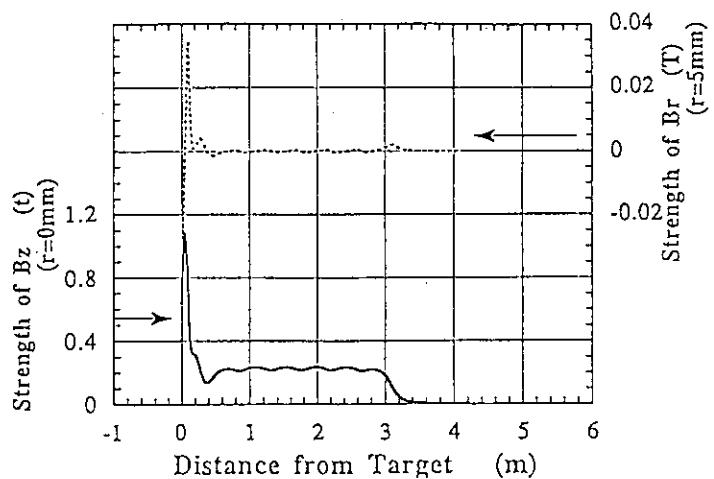


図 2-2 計算による B_z , B_r

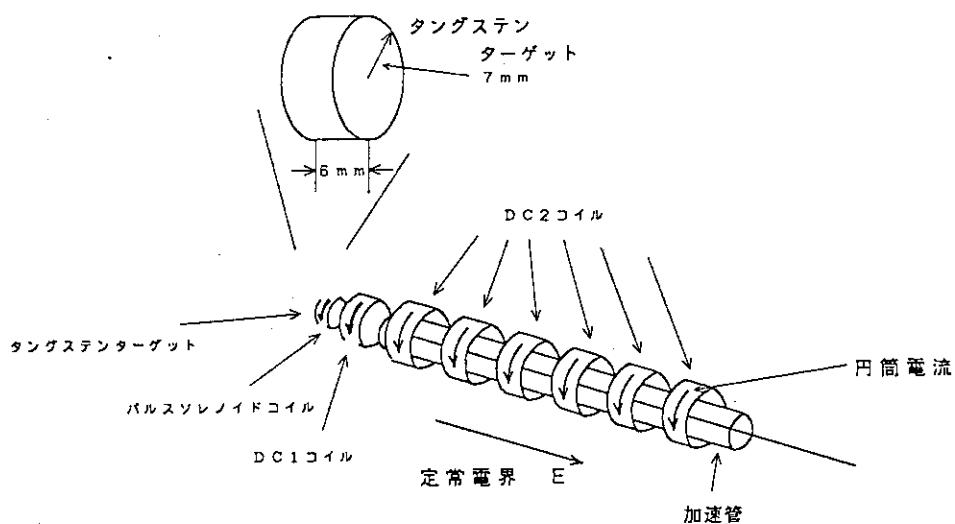


図 2-3 トラッキングの概念図

コードの特徴としては、シミュレーションごとにソレノイド磁場を計算しているため計算時間が増大することが挙げられる。しかし、あらかじめ計算されたファイ

ルを読み込む形式に比べて、様々な磁場形状にすぐ対応できる特徴がある。ただし、集束システム部分の設計が固まれば磁場をファイルにストックするようにしてゆきたい。

計算は、原研情報システムセンターのベクトル演算プロセッサ、V P 2 6 0 0 により、ベクトル的に行う。これは、ビーム電流が小さい ($\sim 10 \text{ mA}$) ため空間電荷の影響が少ないことを利用し、陽電子間の相互作用がないと仮定したためである。

2. 2. 3 ビームトラッキングコードの構成

以下に、計算結果について議論ができるように、ビームトラッキングコードの構成、およびその機能について簡単に述べておく。

コードは、メインルーチン、及び3つのサブルーチン (TRACK, SOLNID, FIELD) よりなり、FORTRAN で書かれている。コードのソースリストは付録-2 に示す。それぞれのルーチンについて簡単に説明する。

(a) MAIN

E G S 4 の結果として、位置 X ($x(\text{number})$, $y(\text{number})$, $z(\text{number})$)、及び出射角度 U ($u(\text{number})$, $v(\text{number})$, $w(\text{number})$) がファイルに保存されているので、それらを全て読み出し、配列に保存する。次に、TRACK をコールする。TRACK では、ベクトル演算により、全陽電子について1区間分をトラッキングし、 X ($x(\text{number})$, $y(\text{number})$, $z(\text{number})$)、 U ($u(\text{number})$, $v(\text{number})$, $w(\text{number})$) および陽電子の状態符号 $A(\text{number})$ を返す。陽電子の中には、この1区間分で壁などに衝突してトラッキング中途終了となるものや、他の陽電子より先にトラッキングの終点に到達するものもいるので、 $A(\text{number})$ により、状態を識別する。トラッキング終了 (or中途終了) となった陽電子をいつまでも配列の中に保存しておくとベクトル演算の際エラーがでてしまうので、配列 X および U の中の終了した陽電子だけを取り除き、トラッキング続行中の陽電子だけを集めて、その配列要素の添字を順番に付け替えるパッキングという操作を行う。その結果、 number が幾らか減る。これを繰り返し、 number が 0 になったとき、結果を出力する。

(b) TRACK

MAIN より陽電子の位置、横方向運動量、進行方向運動量のデータを受けて、1区間だけトラッキングする。このサブルーチンでは、全ての演算をベクトル演算として処理するので、ほとんどの変数は配列となっている。まず、SOLNID をコールし、陽電子の各々の位置での磁場を計算する。次に、陽電子のエネルギー (ENERGY)、および電場の強さ (EFLD) を決める。このコードでは、加速管の位置に定常電界があると仮定しているので、エネルギーは z の関数として決められる。このとき、同時に、 z の関数としてトラッキングの刻み幅も決められる。これで必要なデータが揃うので、ルンゲークッタ法により1区間のトッラッキングを行う。トラッキング

の結果、陽電子状態の評価（トッラキング中、orトラッキング中止、orトラッキング終了）を行って状態符号を決定し、MAINに返す。

(c) SOLNID

SOLNIDは、FIELDで磁場計算するために、各コイルと、磁場を求める場所の相対位置を記述するものである。従って、コイルのサイズ、およびコイルの配置状態はこのサブルーチンによって決定される。磁場を求める場所とコイルの位置関係を計算した後、FILEDをコールする。

(d) FIELD

ソレノイドコイルによる磁場を計算するためのサブルーチンである。ここでは、2. 2. 2 節で述べたように梢円関数を展開することにより磁場を求めている。計算はコイルの数だけ繰り返す必要がある。従って、全てのパラメータを配列を用いて記述し、DOループを用いることにより、ベクトル演算に対処できるようにしてある。ただし、V P - 2 6 0 0においては2重ループを2つともベクトル化する事はできないので、このサブルーチンについては、強制的に、スカラー演算となるような命令を与えている。

1通りの計算が終わった後、個々のコイルからの寄与を足し合わせて求める磁場とする。したがって、その部分で重みをつけて足し合わせることにより、各コイルの励磁量の変化による影響を計算することができる。

3. シミュレーション結果

以下に、 E G S 4、 およびビームトラッキングコードのシミュレーション結果、 および、 その特徴について述べる。

3. 1 E G S 4 の結果

E G S 4 によるシミュレーションを、 表 3 - 1 の条件の元で行った。

生成された陽電子のターゲットからの出射角度別のエネルギースペクトルを図 3 - 1 a), b) に示す。

図 3 - 1 で、 縦軸はターゲット表面に於ける生成陽電子の数であり、 横軸はターゲット表面に於ける陽電子エネルギーである。 θ は、 ソレノイド中心軸に対する陽電子の出射角度である。 入射電子ビームのエネルギーが a) は 120 MeV、 b) は 250 MeV のときの結果であるが、 いづれも 10 ~ 20 MeVあたりにピークがあることがわかる。 しかし、 出射角度の小さな陽電子はほぼ一様に分布している。 図 3 - 1 に於いて、 入射電子エネルギーが 250 MeV のときの方が収量が低いよう見えるが、 計算の都合上、 250 MeV のときの入射電子数が 120 MeV の場合の約半数であるので、 収量は 250 MeV の場合の方が多い。 これは、 入射電子数によって E G S 4 の計算時間が決定されるため、 生成陽電子数を稼ぐことの出来る 250 MeV の場合については入射電子数を半減させたためである。 図 3 - 1 での変換効率は、 表 3 - 1 に併せて示している。

表 3 - 1

入射電子エネルギー	120MeV, 250MeV
入射電子半径	1.0mm
入射電子角度	0° (ターゲットに対し垂直に入射)
入射電子数	1,026,000 (120MeV) 432,000 (250MeV)
入射電子の分布	ガウス分布
ターゲット	タンゲステン
形状	円形平板
ターゲット半径	10.0mm
ターゲット厚さ	6.0mm (タンゲステンの放射長は 3.5mmである。)
得られた陽電子	
(120MeV)	陽電子発生数 (ターゲット表面) 82,513
	生成効率 8.04%
(250MeV)	陽電子発生数 (ターゲット表面) 80,928
	生成効率 18.70%

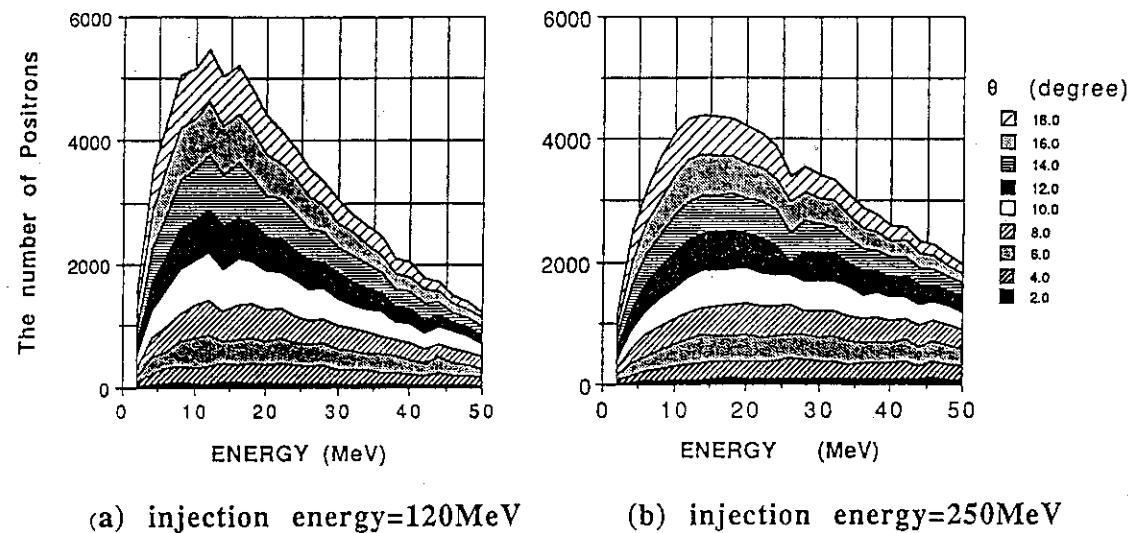


図 3 - 1 E G S 4 による、ターゲット表面上での陽電子エネルギースペクトル

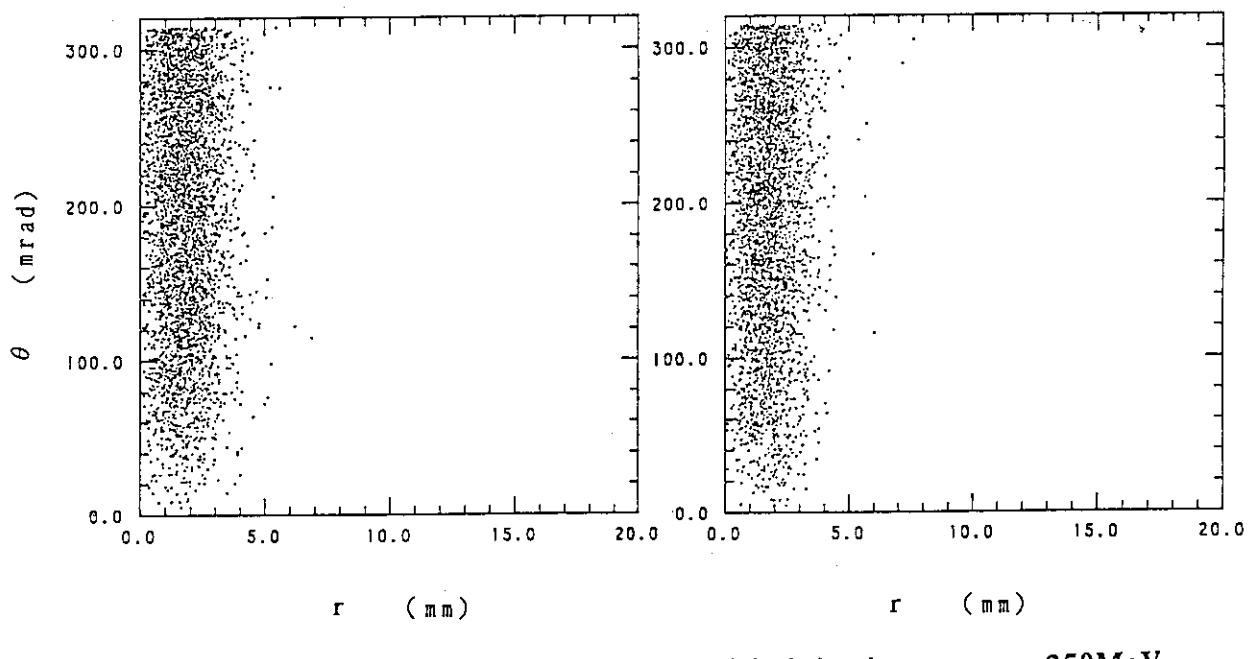
図 3 - 2 ターゲット表面上での陽電子の $r - \theta$ 分布

図3-2 a), b)に、参考までに生成陽電子のターゲット表面での $r - \theta$ 平面分布を示す。ここで r は、ターゲット上での中心からの距離である。図3-2では、陽電子のエネルギーが $10 \text{ MeV} \sim 12 \text{ MeV}$ のときについてのみ示している。この結果を見ると、出射陽電子は、 r 方向については入射電子のビーム半径に比べて約3倍くらいの所まで分布しており、また、 θ 方向にはほぼ一様に分布していることがわかる。これより、入射ビームのターゲット上への絞り込みが陽電子発生に大きな寄与をしていることがわかるが、本報告書では集束系について主眼をおいたので、この点についての詳しいシミュレーションは省略した。

なお、このシミュレーションに於いて、出射角度 18° 以上の陽電子、およびターゲット表面上でエネルギー 50 MeV 以上の陽電子については無視している。また、以下のビームトラッキングシミュレーションにおいては、R & D 装置に対応した入射電子エネルギー 120 MeV の場合においてのみ示している。図3-1を見ると、エネルギースペクトルの形状に大きな差はなく、 250 MeV の時の、加速管出口での収集効率は、 120 MeV の時のほぼ2倍となることは明かである。

3. 2 ビームトラッキングコードの結果

3. 1 節での結果を用い、ビームトラッキングコードによる陽電子集束システムのシミュレーションを行った。

今回のシミュレーションの目的は、R & D 装置に於ける実験結果と、シミュレーション結果の一致点を確認することにより、Spring-8 実機での集束システムの設計をシミュレーションにより実施できるようにすることにある。このためには、R & D 装置で実験できる範囲のパラメータに絞って、できるだけ多くの場合のシミュレーション結果を蓄積しておく必要がある。

R & D 装置で容易に可変可能なパラメータとしては、以下のものが挙げられる。

1. パルスソレノイドコイルの磁場強度
2. DC1 コイルの磁場強度
3. DC2 コイルの磁場強度
4. コイル全体の磁場強度
5. 加速管での陽電子加速エネルギー

また、今回の R & D 装置では変化させることが難しいが、実機の陽電子集束系の設計に必要であろう可変パラメータとして

1. 集束系磁場構造
2. 集束系長（加速管の追加）
3. 各コイルのチルトの影響
4. 各コイルの平行移動の影響

等が挙げられる。本節では、以上の可変パラメータに沿ってシミュレーション結果を示す。

3. 2. 1 代表的シミュレーション結果

まず、代表的なシミュレーション結果を図3-3に示す。また、図3-4には、図3-3を $r-\theta$ 平面に表した結果を示す（陽電子エネルギー10MeV～12MeV）。このときのパラメータのうち、磁場は図2-2と同一であり、加速管での加速エネルギーは50MeV、すなわちR&D装置の定格とも言うべき値である。パラメータ、および陽電子収集効率については表3-2に示す。

表3-2

入射電子数	1,026,000
入射電子エネルギー	120MeV (図3-1の結果を入力として使用)
磁場強度	パルスソレノイドコイル：約1T DC1コイル : 約0.3T DC2コイル : 約0.2T (磁場構造、強度とも図2-2と同一)
陽電子加速エネルギー	50MeV
収集効率	0.119% (0MeV～50MeV) 0.085% (ビーカエネルギー±5MeV)

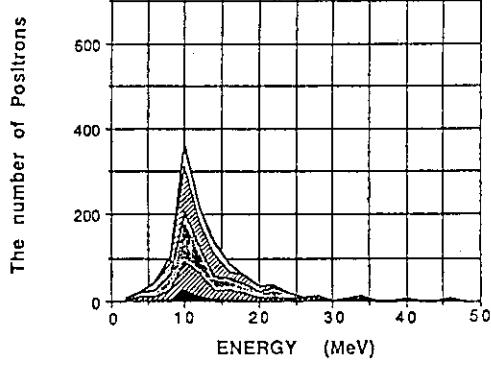


図3-3 ピームトラッキングコード
終了時のエネルギースペクトル

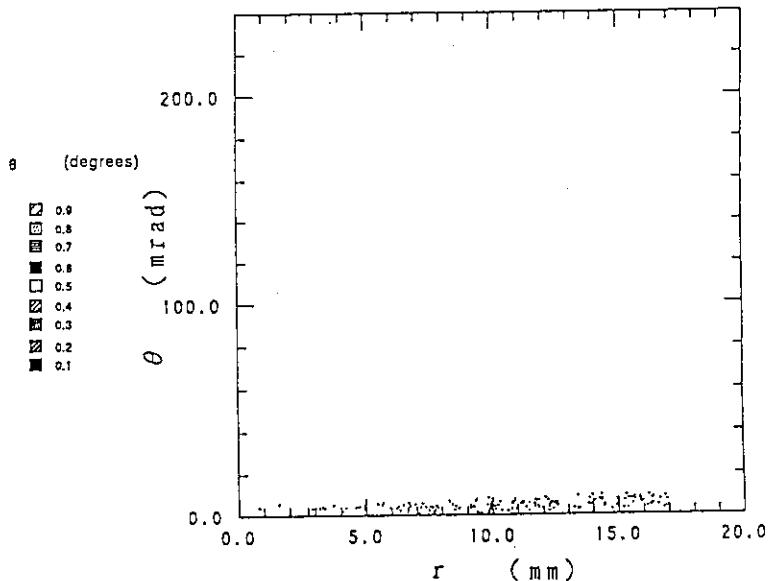
図3-4 $r-\theta$ 平面分布

図3-3において、縦軸はターゲットから4mの点における陽電子数、横軸はターゲット表面における発生陽電子のエネルギーである。横軸をこのように表したのは、加速管において加速エネルギーを変化させたときの評価が行い易いからである。このシミュレーションでは、加速管で50MeV加速しているので、実際の陽電子のエネルギーは横軸に50MeVを加えたものとなる。なお、データの塗り分けは、シミュレーションの終点での陽電子のビーム進行方向に対する角度であり、単位はdegreeである。この表記方法は、3.2.3項を除き、全て同様である。

図3-3より、得られた陽電子のエネルギースペクトルは、エネルギー10MeVの所にピークを持っていることがわかる。また、図3-4を、図3-2と比べてみると、集束系を通過することによって $r-\theta$ 平面上での領域が90°近く回転していることがよくわかる。表3-2で示す収集効率は、上段がターゲット表面上で0MeV~50MeVの陽電子を考慮したもの、下段が、実際に線型加速器で加速可能な範囲に近いものとしてビーカーエネルギー±5MeVの陽電子を考慮したものである。

以下に、様々にパラメータを変化させたときのシミュレーション結果を示す。

3.2.2 パルスソレノイドコイルの磁場強度

パルスソレノイドコイルの磁場強度を変化させたときの陽電子のエネルギースペクトルを図3-5 a) ~ c) に示す。このシミュレーションは、図3-3の結果をベースにパルスソレノイドコイルの磁場強度だけを変化させたものである。パラメータ等のデータは、表3-3に示す。各々の磁場構成は図3-6 a) ~ c) に示す。

表3-3

入射電子数	1,026,000		
入射電子エネルギー	120MeV (図3-1の結果を入力として使用)		
変化させたパラメータ	パルスソレノイドコイル		
	図3-5 a)	:	約0.5T
	図3-5 b)	:	約1T
	図3-5 c)	:	約2T
磁場強度	D C 1 コイル	:	約0.3T
	D C 2 コイル	:	約0.2T
陽電子加速エネルギー	50MeV		
収集効率	パルスソレノイドコイル	0.5T	1T
	0MeV~50MeV	0.053%	0.119%
	ビーカーエネルギー±5MeV	0.031%	0.085%

図3-5より、パルスソレノイドコイルの磁場強度が強いほど、収集効率の良い

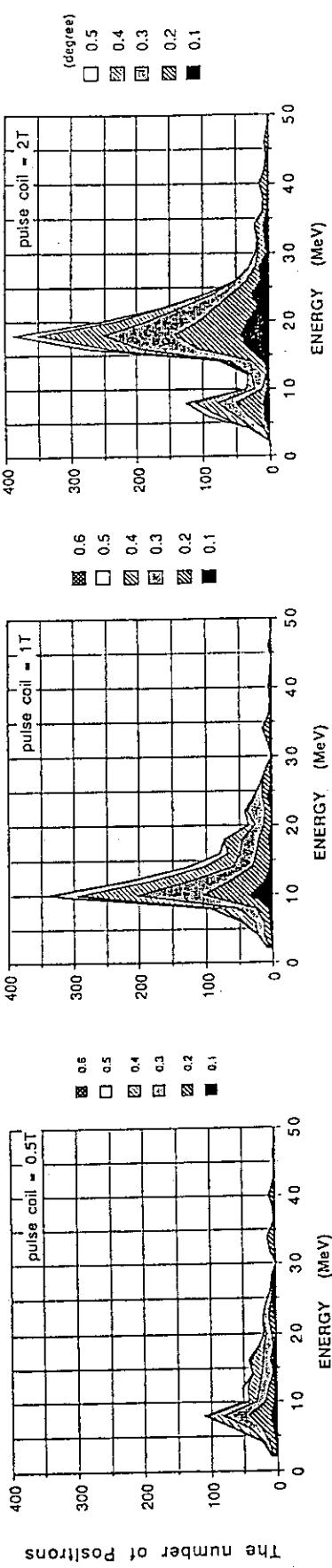


図 3-5 エネルギースペクトル

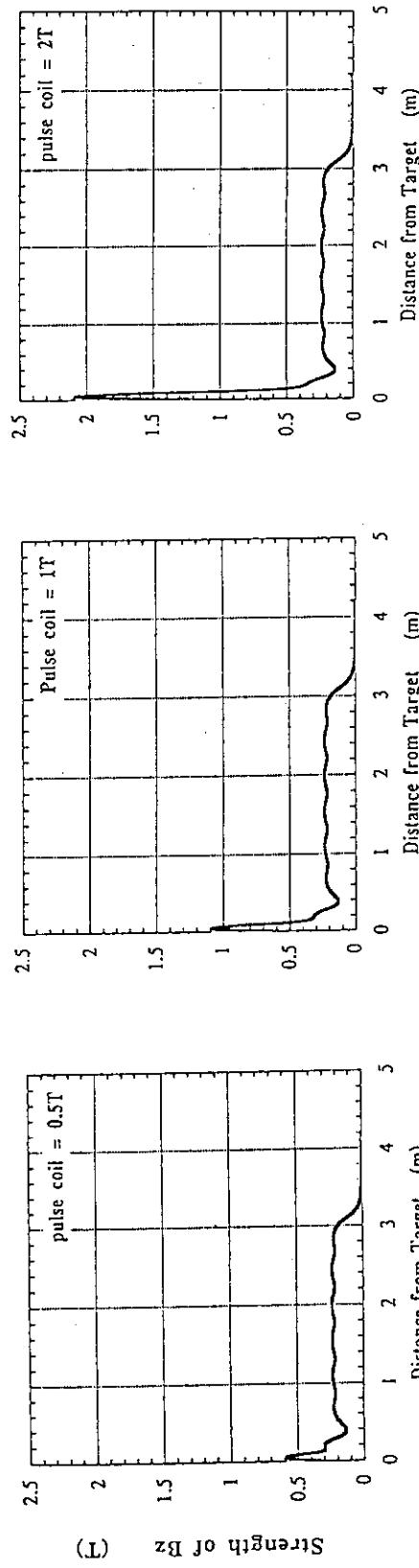
b) $\pi^+ \text{ノイズ/トリガー} : 1 \text{ T}$ c) $\pi^+ \text{ノイズ/トリガー} : 2 \text{ T}$ 

図 3-6 磁場構成

a) $\pi^+ \text{ノイズ/トリガー} : 0 . 5 \text{ T}$ b) $\pi^+ \text{ノイズ/トリガー} : 1 \text{ T}$ c) $\pi^+ \text{ノイズ/トリガー} : 2 \text{ T}$

ことがわかる。また、パルスソレノイドコイルの磁場強度によって、捕獲可能な陽電子のエネルギーに違いのあることがわかる。

図3-7に、パルスソレノイドコイルの集束力について示す。図3-7のように、パルスソレノイドコイルは B_r 成分を持っているために、 B_z の大きさが r 依存性を持つ。図に示した B_z の分布は、コイル内部のものであるが、コイルに入ってきた陽電子が紙面手前方向に運動（回転）しているとすると、太い矢印で表した外側への力を受ける。この力の為、陽電子はコイル内で平行移動する。このとき、コイル内でちょうど半回転し、図のように陽電子が紙面奥方向に運動するようになったとすれば、今度は陽電子はコイル中心に向かう力を受ける。平行移動分、 B_z が強くなっているので、矢印の力もコイルの入り口で受けたものより強く、差引集束力となる。従って、パルスソレノイドコイルが陽電子に対して集束力として働くためには、コイル中で陽電子が $(2n - 1) / 2$ 回転 (n は整数) する必要がある。図3-5に見られるピークエネルギーの差は、この回転数に起因するものと思われる。特に、パルスソレノイドコイルが 2 T の時は、 $1 / 2$ 回転、および $3 / 2$ 回転に起因した2つのピークが得られている。

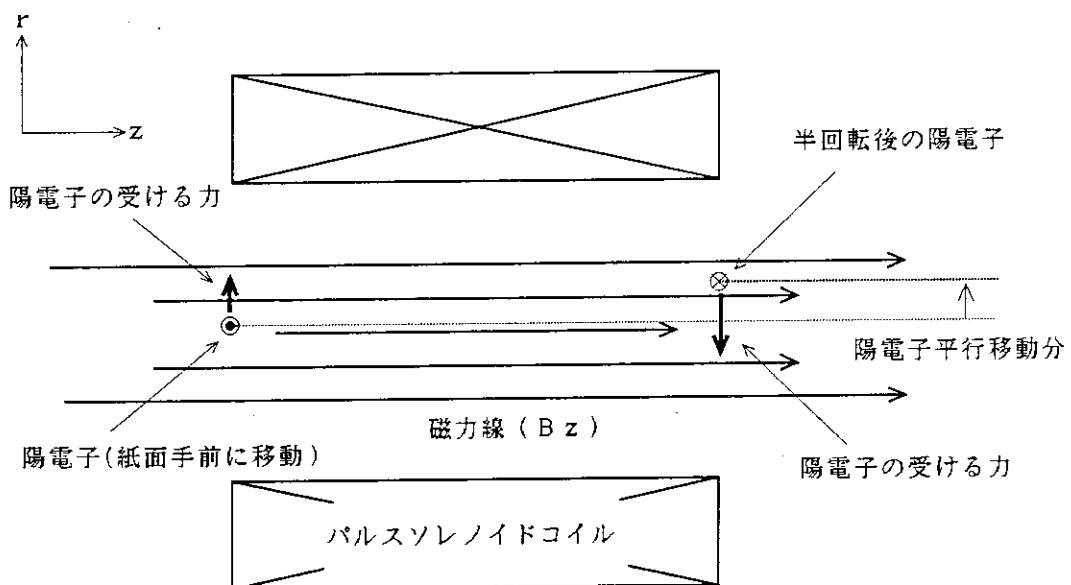


図3-7 パルスソレノイドコイルの陽電子集束の原理

収集効率の違いは、単に磁場強度の違いだけではなく、図3-1に示すターゲット上陽電子のエネルギースペクトル分布にも起因していると思われ、単に、磁場強度が強い方が良いわけではない。 0.5 T の場合の収集効率は異常に少ないが、図3-6a)に見られるように、パルスソレノイドコイル部分とDC1コイル部分の間に磁場の段差ができていることにも原因があると思われる。

3. 2. 3 パルスソレノイドコイルの位置

前項では、パルスソレノイドコイルの強度について述べたが、ここでは、パルスソレノイドコイルの位置をターゲットに対して変化させたときの結果について述べる。

図3-8 a) ~ e) までに、得られた結果のエネルギースペクトルを示す。a) は、ターゲットがパルスソレノイドコイルの手前4.8mmにあるもの、b) は手前2.4mm、c) は、パルスソレノイドコイルの端面とターゲットが一致しているもの、d) は、ターゲットが端面より奥に2.4mm入っているもの、最後のe) は、4.8mm奥に入っている場合である。このときの、データの塗り分けは、ターゲット表面での陽電子の出射角度で表している。ビームトラッキングコードへのインプットデータは、表3-2と同様である。

図3-8より、ターゲットが手前にある場合の方が、エネルギースペクトル中のピークが高エネルギー側に移動していることがわかる。これは、陽電子がパルスソレノイドコイルの磁場を受ける区間の長さが変わり、結果として、パルスソレノイドの磁場強度が変化しているように見えるためだと思われる。得られる陽電子の中心エネルギーを制御するのに役立つかもしれない。

3. 2. 4 コイル全体の磁場強度

図2-2の磁場構成を基本とし、パルスソレノイドコイル、DC1コイル、DC2コイルの全ての磁場強度を同じ割合で変化させたときの結果を図3-9 a) ~ d) に示す。例えば図3-9 a) の磁場構成および磁場強度は図2-2の縦軸を0.5倍にしたものになっている。本報告書では、これを $B_{field}=0.5$ と表することにする。収集効率を磁場強度の関数として図3-10に、シミュレーションパラメータを表3-4に示す。

図3-9より、エネルギースペクトルの形状は、3. 2. 2項に示したパルスソレノイドコイルのみ変化させた場合とほとんど変わらない。しかし、図3-10に見られるように、パルスソレノイドコイルの磁場だけを強くした場合よりも、DCコイルを含めて全ての磁場を強くした場合の方が収集効率が良いことがわかる。

この結果より、DC1コイル、およびDC2コイルには、パルスソレノイドコイルのようなエネルギー選択性は無いか、または少ないと、およびDCコイルの磁場は $B_{field}=2$ までの範囲では強い方が良いことがわかる。

エネルギー選択性の少ない理由としては、DCコイルの内径がパルスソレノイドコイルより大きく、 B_r 成分がたいへん少ないためだと思われる。

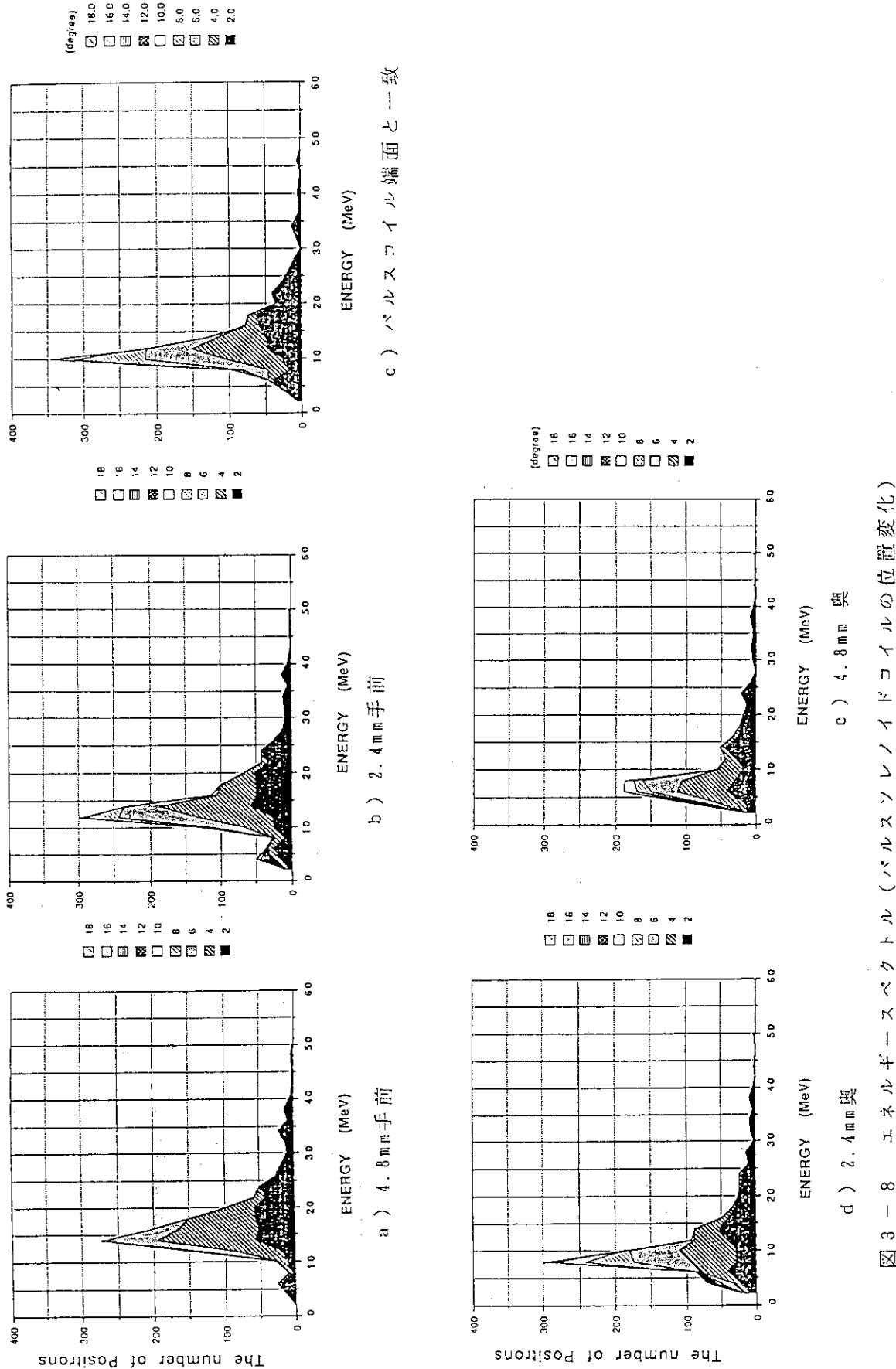


図 3-8 エネルギースペクトル(パルスソレノイドコイルの位置変化)

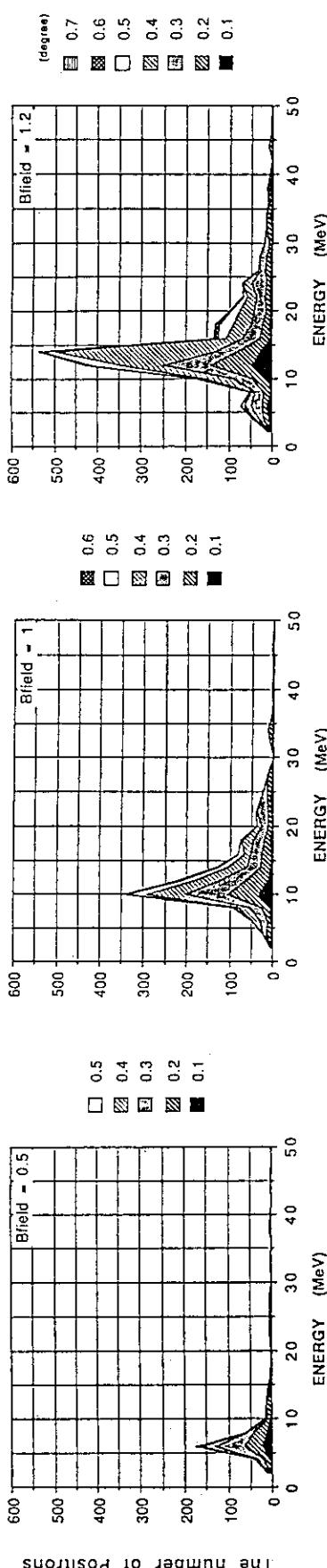


図 3-9 エネルギースペクトル (Bfield変化)

a) Bfield = 0.5 b) Bfield = 1 c) Bfield = 1.2 d) Bfield = 2

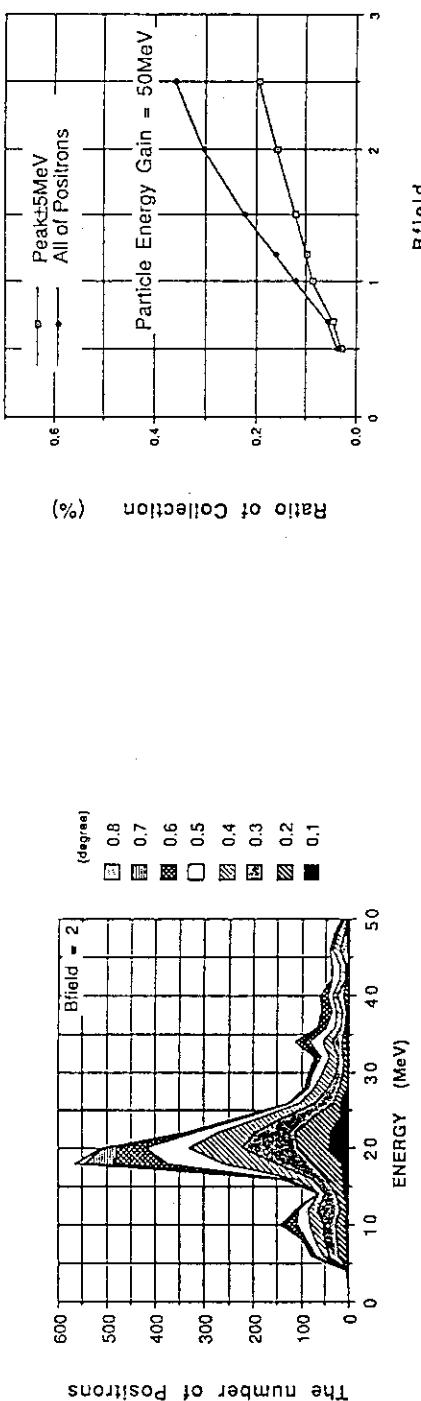


図 3-10 収集効率 (Bfield変化)

表 3 - 4

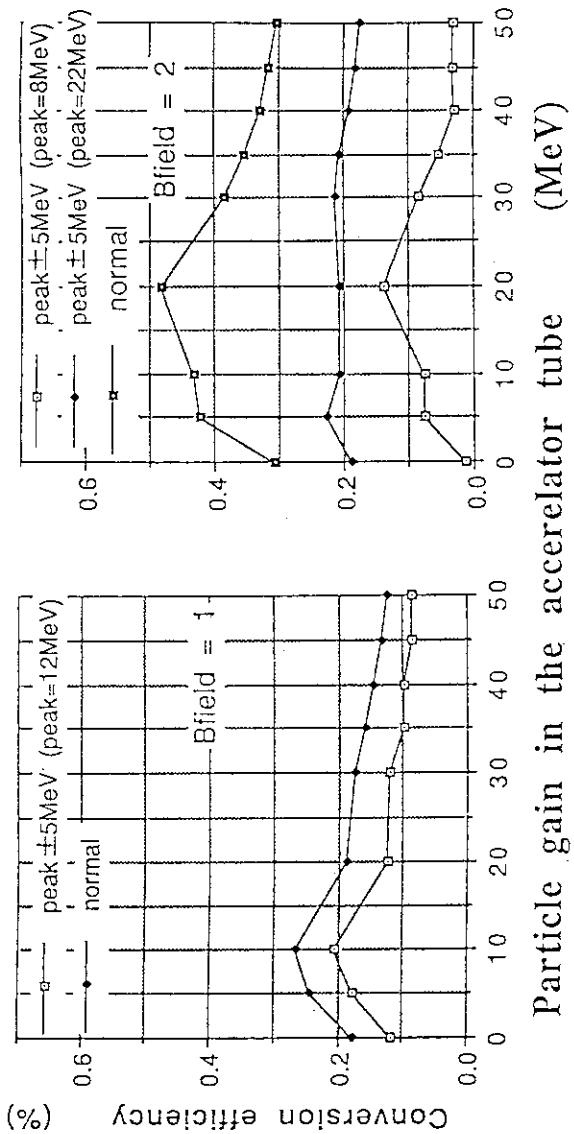
入射電子数	1,026,000															
入射電子エネルギー	120MeV (図3-1の結果を入力として使用)															
変化させたパラメータ	パルス, DC1, およびDC2コイル															
磁場強度	図3-9 a) : Bfield=0.5 (pulse=0.5T:DC1=0.15T:DC2=0.1T) 図3-9 b) : Bfield=1.0 (pulse=1T :DC1=0.3T :DC2=0.2T) 図3-9 c) : Bfield=1.2 (pulse=1.2T:DC1=0.36T:DC2=0.12T) 図3-9 d) : Bfield=2.0 (pulse=2T :DC1=0.6T :DC2=0.4T)															
陽電子加速エネルギー	50MeV															
収集効率	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Bfield</th> <th>0.5</th> <th>1.0</th> <th>1.2</th> <th>2.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0MeV～50MeV</td> <td>0.038%</td> <td>0.119%</td> <td>0.167%</td> <td>0.304%</td> </tr> <tr> <td>t°-エネルギー±5MeV</td> <td>0.030%</td> <td>0.085%</td> <td>0.108%</td> <td>0.173%</td> </tr> </tbody> </table>	Bfield	0.5	1.0	1.2	2.0	0MeV～50MeV	0.038%	0.119%	0.167%	0.304%	t°-エネルギー±5MeV	0.030%	0.085%	0.108%	0.173%
Bfield	0.5	1.0	1.2	2.0												
0MeV～50MeV	0.038%	0.119%	0.167%	0.304%												
t°-エネルギー±5MeV	0.030%	0.085%	0.108%	0.173%												

3. 2. 5 陽電子の加速エネルギー

前項までは、加速管における陽電子の加速は50MeVであったが、加速エネルギーを変化させたときの結果について、収集効率の変化を図3-11に示す。図3-11においては、磁場強度がBfield=1.0に相当するときのものと、Bfield=2.0に相当するときのものを示している。図3-12 a)～c)に、磁場強度がBfield=2.0の場合のエネルギースペクトルを3例示す。Bfield=2の場合には、3. 2. 2項で見られたようにエネルギースペクトル内にピークが2つ存在するため、図3-11には第1ピークと第2ピークについて収集効率を示している。シミュレーションパラメータは表3-5に示す。

表 3 - 5

入射電子数	1,026,000
入射電子エネルギー	120MeV (図3-1の結果を入力として使用)
変化させたパラメータ	加速エネルギー
磁場強度	Bfield=1.0 または Bfield=2.0
陽電子加速エネルギー	0MeV より 50MeV まで可変
収集効率	図3-11を参照のこと。



Particle gain in the accelerator tube

図 3-11 収集効率 (加速エネルギー変化)

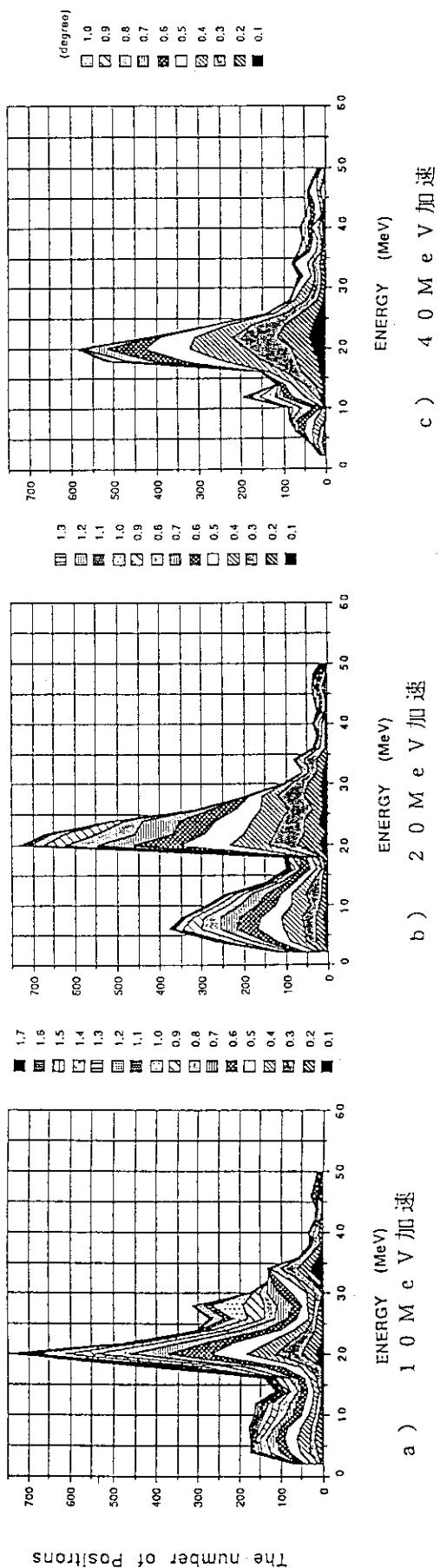


図 3-12 エネルギースペクトル (加速エネルギー変化)

図3-11より、 $B_{field}=1$ の場合においては、加速管で10MeV加速したとき、 $B_{field}=2$ の場合においては、加速管で20MeV加速したときが最も収集効率が良いことがわかる。

高エネルギーに加速した場合の方が収集効率が悪いのは、陽電子をDC2コイル中一定磁場で補足した場合、加速されるにつれてラーマー半径が大きくなり、加速管壁に衝突してしまうためだと思われる。粒子の加速とラーマー半径の関係を付録-3に示す。付録-3によれば、ラーマー半径の初期値は(陽電子の初期エネルギー)/(磁場強度)に比例し、ラーマー半径の大きくなる割合は(加速管内電界)/(磁場強度)に比例する。したがって、 $B_{field}=2$ のときのほうが、 $B_{field}=1$ のときよりも高エネルギーまで加速できることが理解できる。

3. 2. 6 磁場形状の最適化

3. 2. 5項より、加速管部分での軸方向磁場が一定であると陽電子が充分加速できないことがわかった。ここでは、陽電子を加速するために適した磁場を考える。

付録-3に示したように、加速管の中で加速中の陽電子のラーマー半径を一定にするには、DC2コイルの磁場を距離に比例して増加させる必要がある。

必要磁場を計算で特定するのは難しいが、ここでは、(付録-3. 1)式を用い、加速管入り口で40mradの角度を持った20MeVの陽電子が、加速管内で40MeVだけ加速された後加速管出口(入り口から3mと考える)に到達するまで、ラーマー半径を7mmに保つ、という条件で磁場形状を計算した。これをR & D装置に当てはめ、パルスソレノイドコイルの磁場が2T、DC1コイルの磁場が0.6Tの条件のもと、6個のDC2コイルに励磁量を割り振って求めた磁場形状が、図3-13 data1である。このときの、加速エネルギー40MeVでのエネルギースペクトルを図3-14に、また、加速エネルギーを横軸にとった収集効率の変化を図3-15に示す。図3-15において、(data1 all)とは、ターゲット上でエネルギーが0MeV~50MeVまでの陽電子、(data1 20)とは、20±5MeVの陽電子を対象とした収集効率である。

図3-15より、加速エネルギーが30MeV~40MeVの所に収集効率のピークがあり、ほぼ、予想どおりの結果となっていることがわかる。

以上の結果をベースに、様々な磁場形状の場合をシミュレーションした。磁場形状は図3-13 data1~data8に示す。また、これに対応した収集効率の結果を図3-16に示す。

data1は、前記の条件より求めたものである。

data2は、充分加速されている後方は磁場は必要ないと考え、軸方向磁場を徐々に減少させたものである。図3-16より、30MeV加速の場合は収集効率がdata1とはほぼ同じではあるが、40MeV以上になると磁場減少の効果が現れ、収集効率が落ちている。

data3は、data1と後方の磁場強度を同一にし、前方の磁場を強めたものである。

この場合、ラーマー半径は加速管中で少し広がることになると思われるが、DC1後の陽電子を効率よく加速管内部へ導くことができるものと思われる。図3-16より、data1に比べてたいへん良い結果が得られていることがわかる。ただし、収集効率のピークは低加速エネルギー側に移ってきており、これはDC2磁場の傾きを抑えた結果だと思われる。

data4は、data3の後方磁場を減少させたものである。図3-16より、data3とほぼ同じ様な変化をしているが、磁場の減少分だけ収集効率が減っている。

data5は、data4の前方磁場をさらに強くしたものである。収集効率のピークが低加速エネルギー側に移っているが、高加速エネルギー側においては効率はほとんど変わらないことがわかる。

data6は、DC2の中程の磁場を強め、DC2磁場の傾きを大きくすることにより、高エネルギー側での収集効率のアップを狙ったものである。しかし、確かに高加速エネルギー側に収集効率のピークは移ったが、全体として収集効率は著しく低下した。これは、DC2コイル前方の磁場が低すぎると、加速管にうまく陽電子が入り込まなかったものと思われる。

data7は、全てのDC2の磁場強度を、data1でのDC2の最大磁場に一致させ、加速管内で磁場強度を一定にしたものである。結果は、data3とほぼ同じである。ただし、高加速エネルギー側では、data3のほうが、若干良いことがわかる。data7の磁場構成では、DC2の磁場が強く、陽電子が加速管に衝突することは少ない。それにもかかわらず結果がdata3とあまり変わらないのは、ラーマー半径が大きくなる分、陽電子が加速管の出口を出るときに r 正方向に速度成分を持つてしまうためだと思われる。

data8は、data3と磁場強度は同じであるが、DC1コイルとDC2コイルの間のギャップを短くしたものである(ギャップ: 15.019cm → 3.5cm)。この結果、収集効率の加速エネルギーに対する分布はdata1と同一ではあるが、収集効率は大幅に向上した。

以上より、DC2磁場の傾きが高加速エネルギーまでに対応できる集束系を実現できること、一定磁場よりも傾きを持った磁場の方が、同じ収集効率という条件下ではコイルへの供給エネルギーという観点からみると優れていること、また、後方の磁場は、場合によっては減少させても良いことなどがわかる。また、DC2コイルの前部の磁場を低くするのは良くないこと、コイル間のギャップは、できるだけ短い方が良いことがわかる。

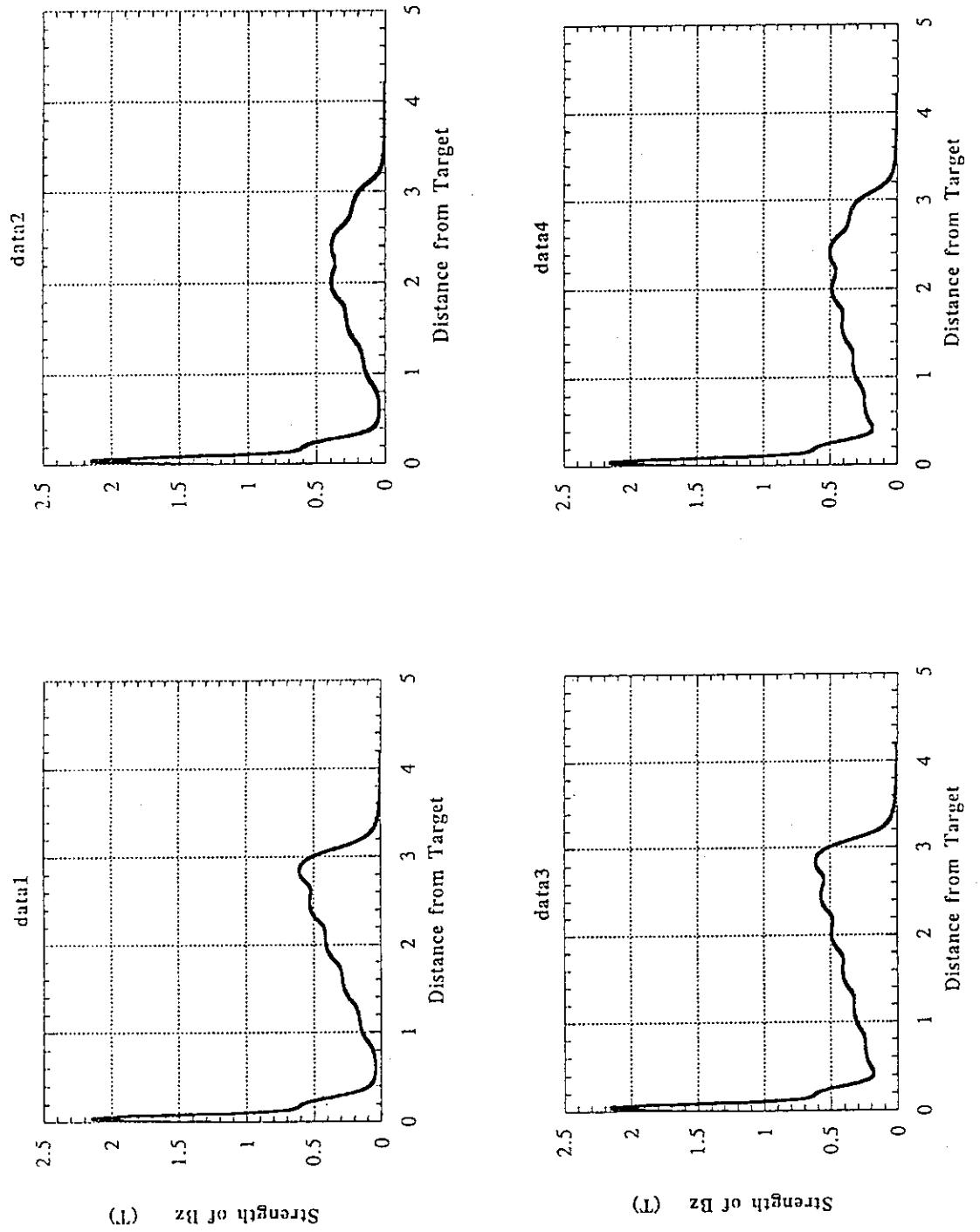


図 3-1-3 様々な磁場形状 (a)

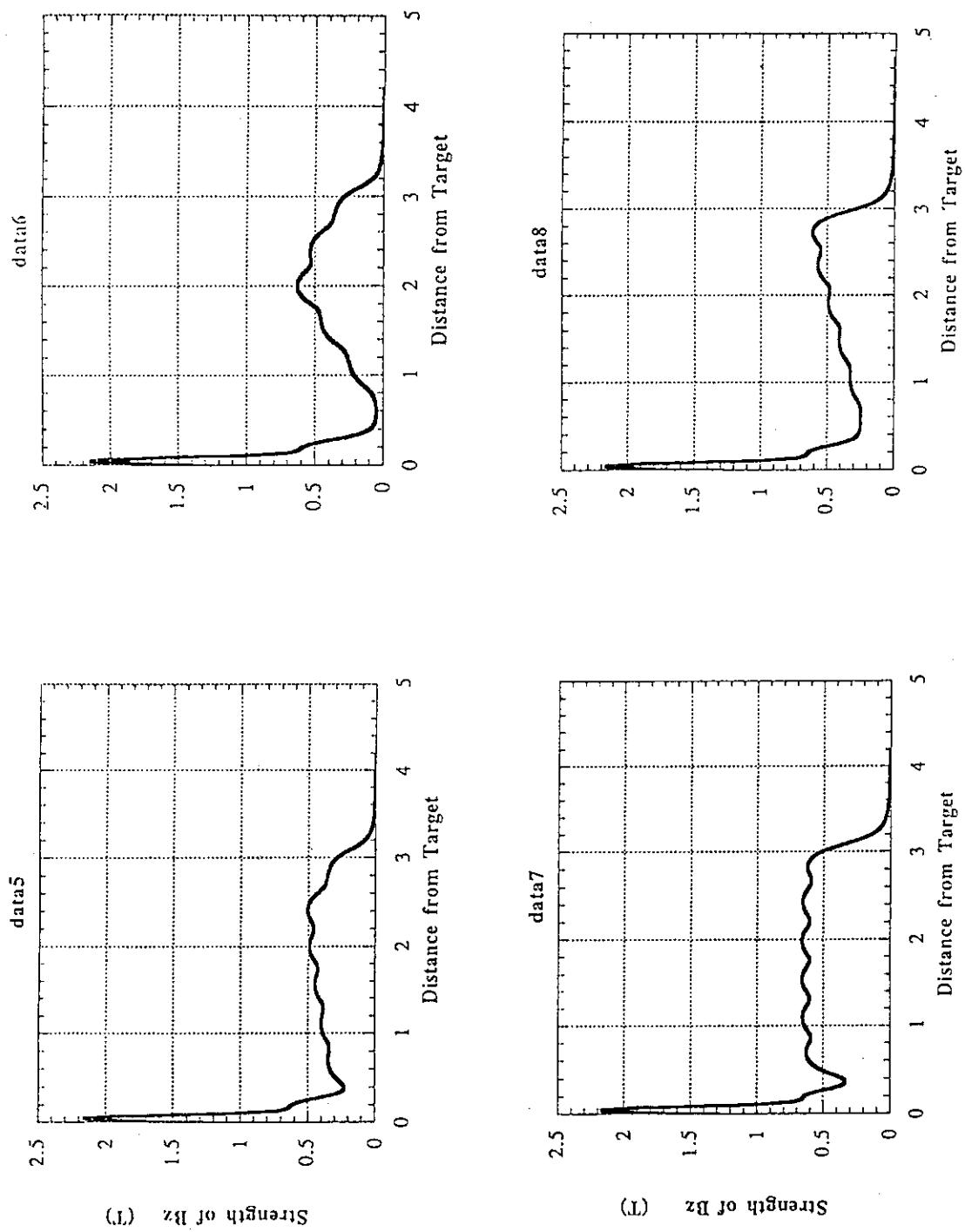


図 3-13 様々な磁場形状 (b)

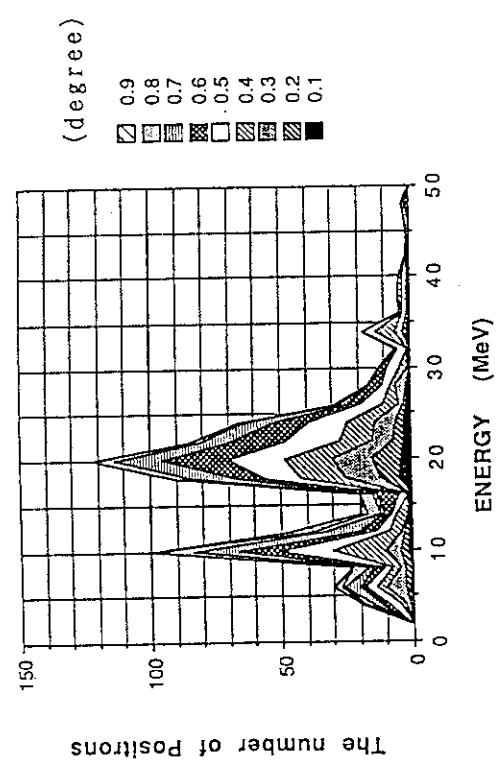
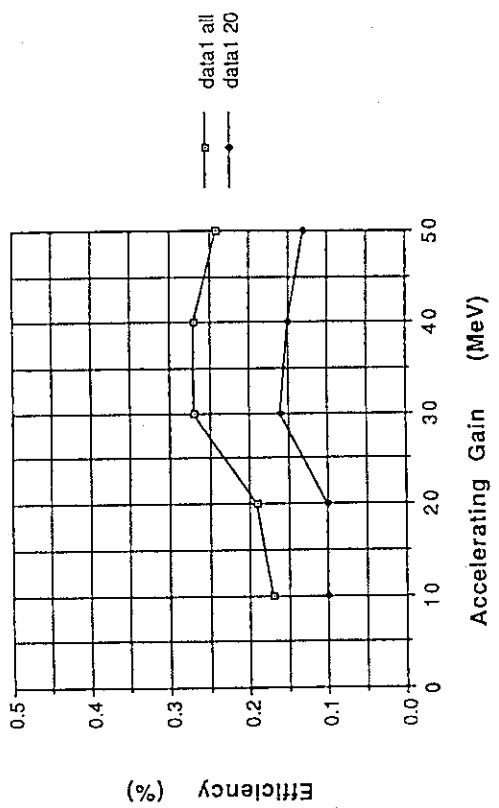
図 3-14 エネルギースペクトル
(data1 加速エネルギー = 40 MeV)

図 3-15 収集効率 (data1)

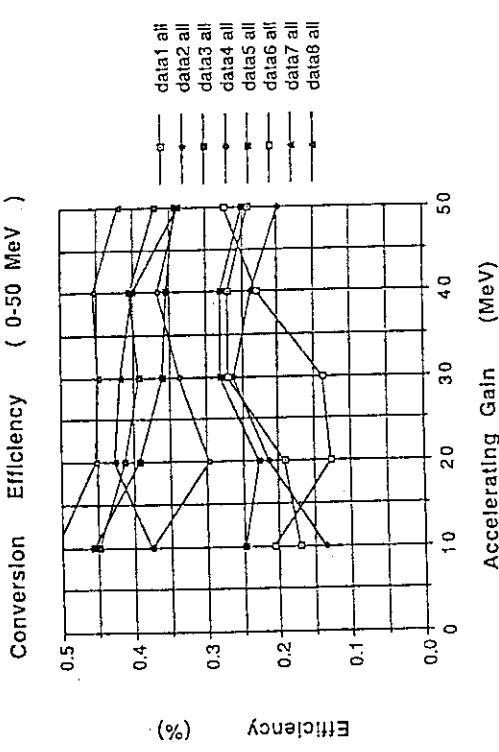


図 3-16 収集効率 (data1 ~ data8)

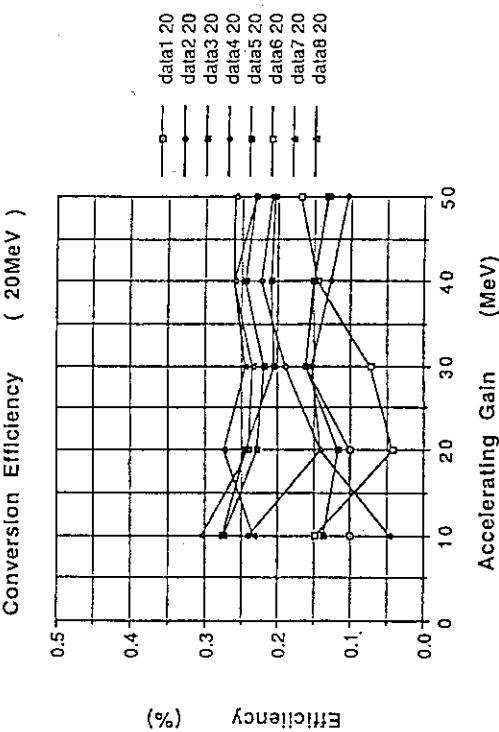


図 3-17 収集効率 (data1 ~ data8)

3. 2. 7 加速管の追加

ここでは、加速管をもう1本追加した場合のシミュレーション結果を示す。このシミュレーションにおいては、ただ加速管を追加しただけで、加速管の間のギャップ、また、Q電磁石の設置などについては考慮していない。3. 2. 5項と同様に、図3-17に磁場形状、図3-18に収集効率を示す。

図3-17 data9は、前項のdata3の磁場構成において、加速管だけ1本加えてターゲットより6mのところまでシミュレーションしたものである。図3-18を見ると大変収集効率が低下しており、ソレノイドコイルの磁場の範囲を第1加速管までに限定すると、その後にQ電磁石を置く必要があることを示している。

data10は、data3の磁場の後ろに、第2加速管区間終了まで同一強度の磁場を追加したものである。収集効率はかなり増加しているが、効率のピークの位置は低加速エネルギー側にあることがわかる。

data11は、第2加速管区間終了までに徐々に磁場を強くしていく場合である。この場合、効率のピークは更に低加速エネルギー側にあり、磁場の勾配が緩いことを反映している。

2本加速管を用いる場合は高エネルギー側に収集効率のピークを持ってくるのが難しく、実際の実験でも、1本の場合のはうが良い結果が得られるかもしれない。

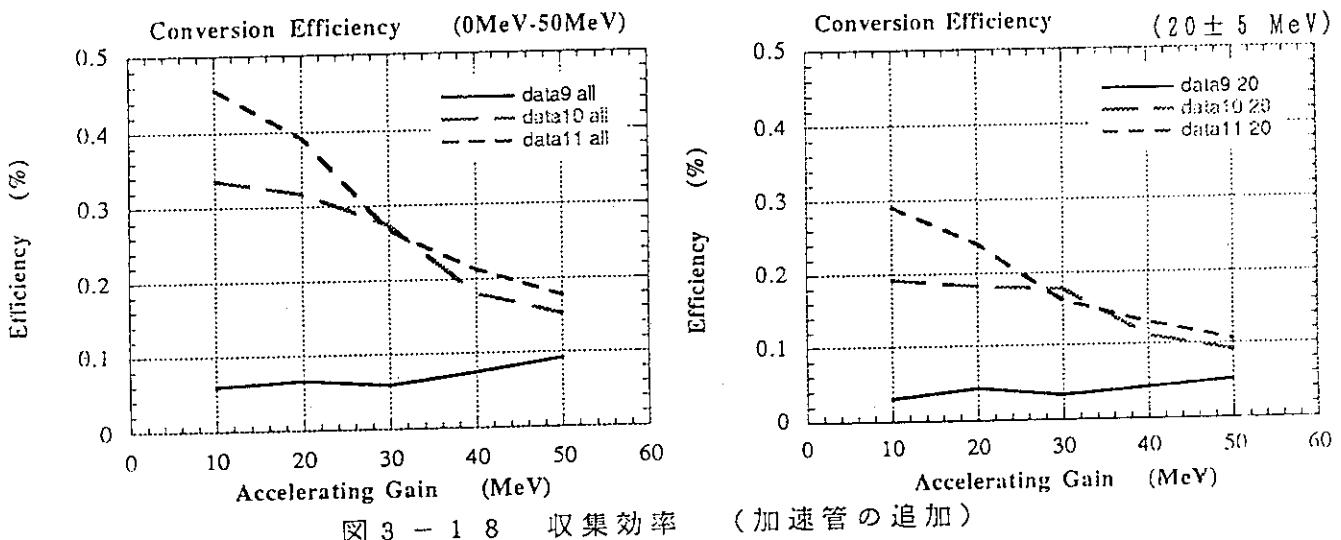


図3-18 収集効率 (加速管の追加)

3. 2. 8 パルスソレノイドコイルのチルト、平行移動の影響

最後に、パルスソレノイドコイルの磁場のミスマッチメントの影響について述べる。ここで述べるシミュレーションは、実際に行った実験に対応して計算したものであるため、上記のものと少し条件が違い、パルスソレノイドコイル1個、DC1コイル1個、DC2コイル1個の集束系での計算である。また、パルスソレノイドコイルの内径、外径、および長さを若干短くし、DC2コイルの長さを若干長くしている。しかし、前項までの結果と比較する目的はないのでミスマッチメントに対する影響について述べる。

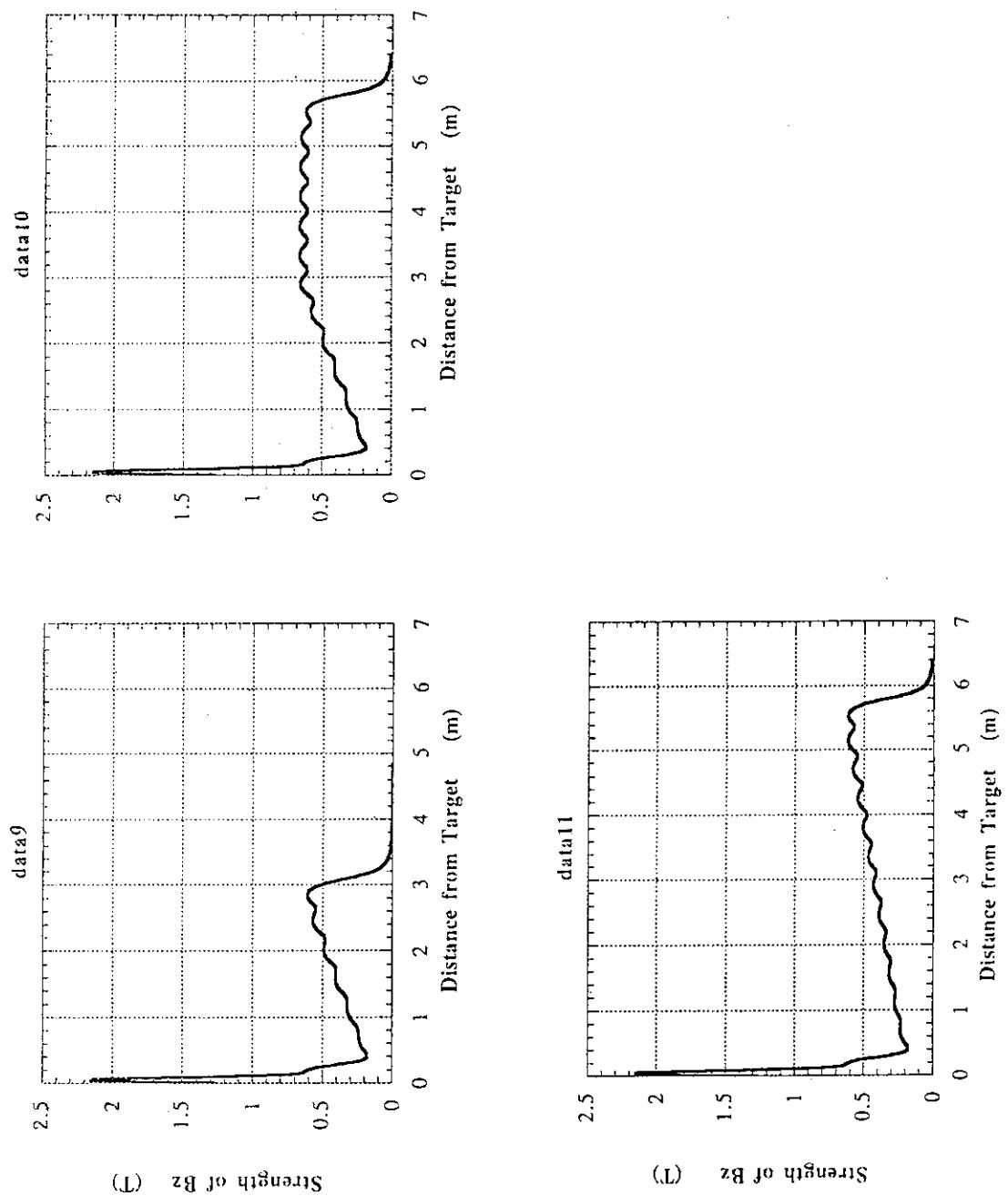


図 3-17 磁場形状 (加速管の追加)

する判断材料にはなり得るものである。シミュレーションのパラメータを表3-6に示す。

なお、この計算にあたっては、サブルーチン FIELD を、大幅に書き換えた。

表3-6

入射電子数	1,026,000
入射電子エネルギー	120MeV (図3-1の結果を入力として使用)
変化させたパラメータ	パルスソレノイドコイルの チルト、および平行移動
磁場強度	pulse : 1T DC1 : 0.1T DC2 : 0.2T
陽電子加速エネルギー	36MeV
収集効率	図3-1 9 a) b) を参照のこと。

まず、チルトについての収集効率の変化を図3-1 9 a) b) に示す。このときのチルトとは、パルスソレノイドコイルの中心を軸としたチルトを言う。a) は実際の収集効率で、b) は、チルト角が0の時の効率を100%としたときの規格化収集効率である。10MeVの表記があるのは、これまでのデータと同じく、10MeV±5MeVの陽電子のみに着目した場合である。

図3-1 9 a) より、パルスソレノイドコイルの性能を発揮できる領域は大変限られており、少なくとも20mrad位の精度で設置する必要がある。パルスソレノイドコイルの長さがたかだか10cmほどであるので、コイル端で1mmの移動に相当する。

次に、図3-2 0 a) b) に平行移動の場合を示す。これは、少しミスマライメントがあったとしても、収集効率の減少が緩やかであるのでチルトほどは気にならないかも知れない。しかし、1mm以下の精度で設置すればするほど、良い結果が得られることがわかる。

以上の精度を実際に実現するためには、パルスソレノイドコイルの磁場中心が機械的の中心に必ずしも一致していないことを考えると、パルスソレノイドコイル自身を遠隔操作で動かすことのできるように設計する必要があると思われる。

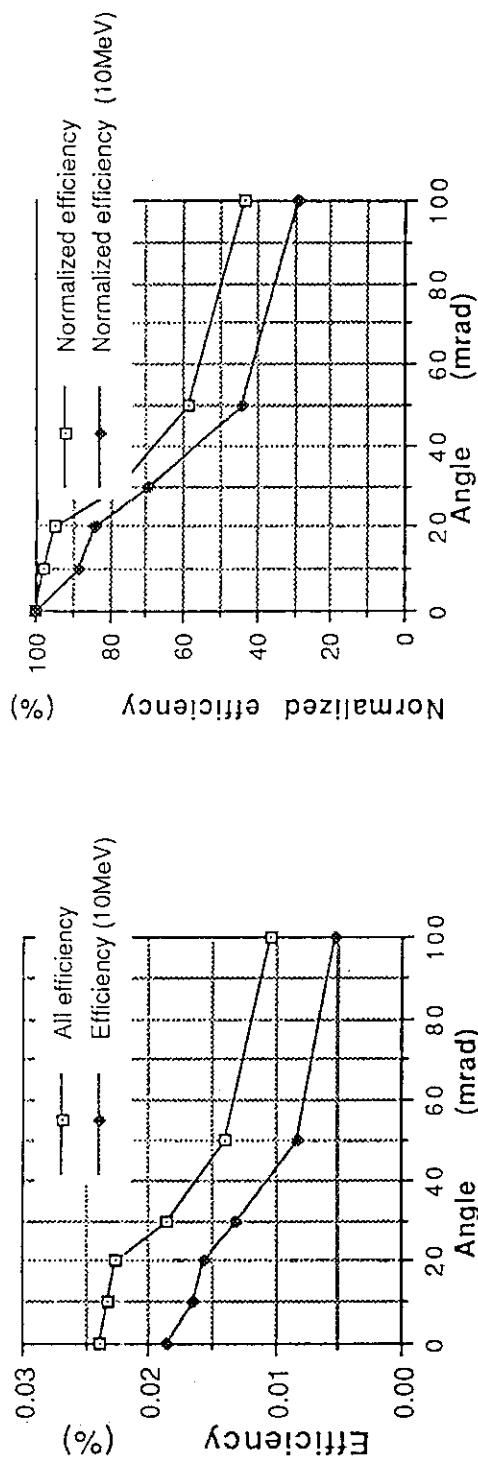
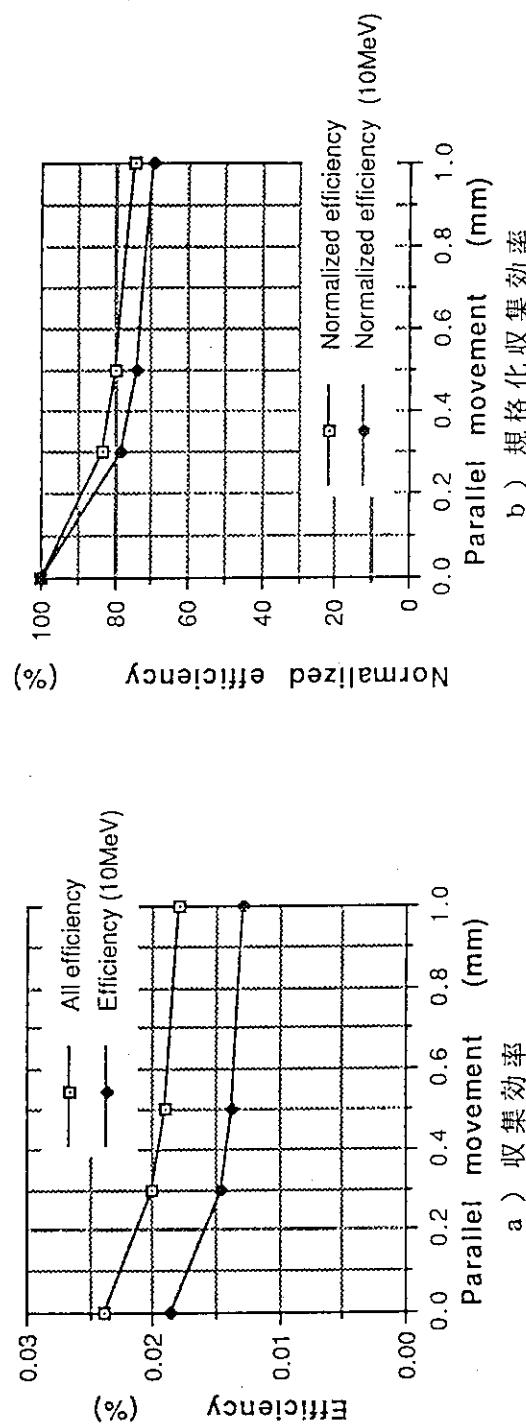


図 3 - 1 9 収集効率 (チルト)
a) 収集効率



b) 規格化収集効率
b) 規格化収集効率 (平行移動)

図 3 - 2 0 収集効率 (平行移動)

4. ま　と　め

S P r i n g - 8 の陽電子発生系の設計のため、新たにトラッキングコードの開発を行い、陽電子発生、および集束システムのシミュレーションを行った結果、以下のような結論を得た。

1. 得られる陽電子のエネルギースペクトル中のピークは、主に、パルスソレノイドコイルによるものである。
2. パルスソレノイドコイル以後の D C コイルは、磁場を強くした方がよい。
3. 加速管中で、陽電子を一定磁場で補足すると、ラーマー半径が大きくなり、加速管壁に衝突する確率が高くなる。
4. 加速管中では、ラーマー半径を一定にするために、磁場を徐々に強くしていくと良い。ただし、極端に磁場の弱いところがあってはならない。
5. パルスソレノイドコイルのミスマライメントは、収集効率に大きな影響を及ぼす。

このシミュレーションの結果、得られた収集効率の最大値は、入射電子エネルギー120MeVの場合、磁場形状を様々に変化させてみた結果、0.27%程に達した(ピーク±5MeVの陽電子のみを考慮した場合)。入射エネルギー250MeVの実機対応のシミュレーションでは0.5%内外となるはずである。しかし、この数字は、シミュレーション中の仮定を全て受け入れた場合の数字である。すなわち、加速管中で、全ての陽電子は同一加速を受けること、また、ターゲットからの出射角18°以上の陽電子は無視すること、集束系の形状が細かなところで実際と違うこと、入射ビームがターゲットの中心を叩く保証の無いこと、入射ビームがエネルギー分散を持っていることなど、これらは何も考慮されていない。従って、実験結果と照らし合わせて理解することが重要である。

このシミュレーションと、今後行う実験との傾向が一致するかどうかを確認した上で、結果を S P r i n g - 8 陽電子集束システムの設計に用いる予定である。

参　考　文　献

- ¹⁾ Walter R. Nelson, Hideo Hirayama and David W.O. Rogers, "THE EGS4 CODE SYSTEM", SLAC-Report-265, 1985
- ²⁾ 1 G e V 線型加速器の設計資料集, JAERI-memo 04-144 (原研所内刊)

4. ま　　と　　め

S P r i n g - 8 の陽電子発生系の設計のため、新たにトラッキングコードの開発を行い、陽電子発生、および集束システムのシミュレーションを行った結果、以下のような結論を得た。

1. 得られる陽電子のエネルギースペクトル中のピークは、主に、パルスソレノイドコイルによるものである。
2. パルスソレノイドコイル以後の D C コイルは、磁場を強くした方がよい。
3. 加速管中で、陽電子を一定磁場で補足すると、ラーマー半径が大きくなり、加速管壁に衝突する確率が高くなる。
4. 加速管中では、ラーマー半径を一定にするために、磁場を徐々に強くしていくと良い。ただし、極端に磁場の弱いところがあってはならない。
5. パルスソレノイドコイルのミスマライメントは、収集効率に大きな影響を及ぼす。

このシミュレーションの結果、得られた収集効率の最大値は、入射電子エネルギー120MeVの場合、磁場形状を様々に変化させてみた結果、0.27%程に達した(ピーク±5MeVの陽電子のみを考慮した場合)。入射エネルギー250MeVの実機対応のシミュレーションでは0.5%内外となるはずである。しかし、この数字は、シミュレーション中の仮定を全て受け入れた場合の数字である。すなわち、加速管中で、全ての陽電子は同一加速を受けること、また、ターゲットからの出射角18°以上の陽電子は無視すること、集束系の形状が細かなところで実際と違うこと、入射ビームがターゲットの中心を叩く保証の無いこと、入射ビームがエネルギー分散を持っていることなど、これらは何も考慮されていない。従って、実験結果と照らし合わせて理解することが重要である。

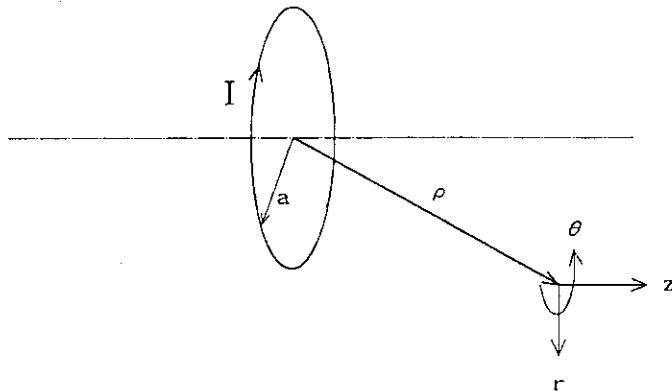
このシミュレーションと、今後行う実験との傾向が一致するかどうかを確認した上で、結果を S P r i n g - 8 陽電子集束システムの設計に用いる予定である。

参　考　文　献

- ¹⁾ Walter R. Nelson, Hideo Hirayama and David W. O. Rogers, "THE EGS4 CODE SYSTEM", SLAC-Report-265, 1985
- ²⁾ 1 G e V 線型加速器の設計資料集, JAERI-memo 04-144 (原研所内刊)

<付録-1> ソレノイドコイルの磁場

以下のような円環電流があるとき、 ρ の位置でのベクトルポテンシャルは



A_θ のみとなり、

$$k = \frac{2\sqrt{a\rho}}{\sqrt{(a+\rho)^2+z^2}} \quad \text{とすると、}$$

$$A_\theta = \frac{\mu I}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{\rho}} \left\{ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right\} \quad \text{で表される。}$$

このとき、

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k^6 + \dots \right\}$$

$$E(k) = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \frac{k^4}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \frac{k^6}{5} - \dots \right\} \quad \text{である。}$$

これより、 A_θ は次のようになる。

$$A_\theta = \frac{\mu I}{2k} \sqrt{\frac{a}{\rho}} \left\{ \frac{1}{16} k^4 + \frac{3}{16} k^6 + \frac{75}{2048} k^8 + \frac{245}{8192} k^{10} + \frac{6615}{512^2} k^{12} + \frac{22869}{1024^2} k^{14} + \frac{1288287}{8192^2} k^{16} + \dots \right\}$$

ここで、

$$B_r = -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \quad B_z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\theta) \quad \text{より、}$$

$$B_r = \frac{\mu I z}{8\sqrt{a\rho^3}} \left\{ \frac{3}{16} k^5 + \frac{15}{64} k^7 + \frac{525}{2048} k^9 + \frac{2205}{8192} k^{11} + \frac{72765}{512^2} k^{13} + \frac{297297}{1024^2} k^{15} + \frac{19324305}{8192^2} k^{17} + \dots \right\}$$

$$B_z = \frac{\mu I}{2\sqrt{a\rho^3}} \left\{ \frac{a}{8} k^3 + \frac{6a-3\rho}{64} k^5 + \frac{45a-30\rho}{512} k^7 + \frac{700a-525\rho}{8192} k^9 + \frac{11025a-8820\rho}{131072} k^{11} + \frac{87318a-72765\rho}{1024^2} k^{13} + \frac{693693a-594594\rho}{8\times 1024^2} k^{15} + \dots \right\}$$

となる。

ソレノイドコイルの磁場を B_{sol_z} B_{sol_r} とし、コイルの z 方向の長さを d とすると、

$$B_{sol_z} = \int_{z-\frac{d}{2}}^{z+\frac{d}{2}} B_z dz \quad B_{sol_r} = \int_{z-\frac{d}{2}}^{z+\frac{d}{2}} B_r dz \quad \text{となる。} \quad \text{①}$$

このとき、

$$\int k^n z dz = \frac{4}{n-2} a \rho [-k^{n-2}] \quad \text{②} \quad \text{である。}$$

また、

$$k = 2\sqrt{a\rho} \cdot I \quad I = \frac{1}{\sqrt{z^2 + C}} \quad C = (a + \rho)^2 \quad \text{のとき、}$$

$$F_3 = \int I^3 dz = \frac{z}{C\sqrt{z^2 + C}}$$

$$F_5 = \int I^5 dz = \frac{1}{C^2} \left[\frac{z}{(z^2 + C)^{1/2}} - \frac{z^3}{3(z^2 + C)^{3/2}} \right]$$

$$F_n = \int I^n dz = \frac{z}{(n-2)C(z^2 + C)^{(n-2)/2}} + \frac{(n-3)F_{n-2}}{(n-2)C} \quad (n \geq 7) \quad \text{より、}$$

$$\int k^n dz = 2^n \sqrt{a^n \rho^n} \cdot F_n \quad \text{③} \quad \text{である。}$$

①式は、②式、および③式より計算できる。

<付録-2> ビームトラッキングコードソースリスト

【MAIN】

```

C*****PROGRAM BFIELD2*****
C*****MAIN PROGRAM*****
C*****SUM AND BFIELD*****
COMMON/BFD/NUMBER,WO,X,Y,Z,U,V,W,E,A,RB,ZB
INTEGER ITOT,K,NUMBER,A(0:43000)
REAL WO(43000),XNORM,R(6000),W(43000),E(43000)
+      ,X(43000),Y(43000),Z(43000),U(43000),V(43000)
+      ,WW(6000),EKE(6000),WWO(6000),RB,ZB
C*****OPEN*****
OPEN(11,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1015)')
OPEN(12,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1016)')
OPEN(13,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1017)')
OPEN(14,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1018)')
OPEN(15,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1019)')
OPEN(16,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1020)')
OPEN(17,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1021)')
OPEN(18,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1022)')
OPEN(19,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1023)')
OPEN(20,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1024)')
OPEN(21,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1025)')
OPEN(22,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1026)')
OPEN(23,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1027)')
OPEN(24,FILE='J4712.EGS4.DATAP(DATA1028)')
OPEN(70,FILE='J4712.EGS4.DATAEXP(DATA5014)')
C***** CONSTANT DATA *****
K=0
ZB = 4.0
RB = 0.017
NUMBER=0
A(0)=1
C***** READ DATA *****
DO 10 I=11,24
    READ(I,50) ITOT
50   FORMAT(////////,5X,I4)
    NUMBER=NUMBER+ITOT
    DO 20 J=NUMBER-ITOT+1,NUMBER
        READ(I,100) X(J),Y(J),U(J),V(J),W(J),E(J)
100   FORMAT(1X,F6.3,1X,F6.3,1X,F9.6,1X,F9.6,1X,F9.6,
+                  1X,F9.6)
20 CONTINUE
10 CONTINUE
C***** DATA INITIARISE *****
DO 25 J=1,NUMBER
    WO(J)=W(J)
    X(J)=X(J)/100
    Y(J)=Y(J)/100
    Z(J)=0

```

```

U(J)=U(J)*SQRT(1-1/(E(J)/0.511+1)/(E(J)/0.511+1))*3.0E8
V(J)=V(J)*SQRT(1-1/(E(J)/0.511+1)/(E(J)/0.511+1))*3.0E8
W(J)=W(J)*SQRT(1-1/(E(J)/0.511+1)/(E(J)/0.511+1))*3.0E8
25 CONTINUE
C***** CALCULATION *****
40 CALL TRACK
C***** PACKING *****
I=0
J=NUMBER+1
11 I=I+1
IF (A(I).NE.0.AND.I.LT.NUMBER) GOTO 11
12 J=J-1
IF (A(J).EQ.0.AND.J.GT.0) GOTO 12
IF (I.LT.J) THEN
  X(I)=X(J)
  Y(I)=Y(J)
  Z(I)=Z(J)
  U(I)=U(J)
  V(I)=V(J)
  W(I)=W(J)
  E(I)=E(J)
  WO(I)=WO(J)
  A(I)=A(J)
  A(J)=0
  GOTO 11
ENDIF
16  CONTINUE
  IF (A(I).EQ.0) THEN
    I=I-1
    GOTO 16
  ENDIF
  NUMBER=I
  I=0
  J=NUMBER+1
13 I=I+1
  IF (A(I).NE.2.AND.I.LT.NUMBER) GOTO 13
14 J=J-1
  IF (A(J).EQ.2.AND.J.GT.0) THEN
    K=K+1
    R(K)=(SQRT(X(J)*X(J)+Y(J)*Y(J)))*1000.
    XNORM=SQRT(U(J)*U(J)+V(J)*V(J)+W(J)*W(J))
    WW(K)=ACOS(W(J)/XNORM)*1000.
    WWO(K)=ACOS(WO(J))/XNORM)*1000.
    EKE(K)=E(J)
    GOTO 14
  ENDIF
  IF (I.LT.J) THEN
    K=K+1
    R(K)=(SQRT(X(I)*X(I)+Y(I)*Y(I)))*1000.
    XNORM=SQRT(U(I)*U(I)+V(I)*V(I)+W(I)*W(I))
    WW(K)=ACOS(W(I)/XNORM)*1000.
    WWO(K)=ACOS(WO(I))/XNORM)*1000.
    EKE(K)=E(I)
    X(I)=X(J)
    Y(I)=Y(J)
    Z(I)=Z(J)
  ENDIF

```

```

U(I)=U(J)
V(I)=V(J)
W(I)=W(J)
E(I)=E(J)
WO(I)=WO(J)
A(I)=A(J)
A(J)=2
GOTO 13
ENDIF
18   CONTINUE
      IF (A(I).NE.1) THEN
          I=I-1
          GOTO 18
      ENDIF
      NUMBER=I
      IF (NUMBER.EQ.0) GOTO 701
      GOTO 40
C***** OUTPUT DATA *****
701  WRITE(70,710) K
710  FORMAT(/,5X,I4)
      DO 600 I=1,K
          WRITE(70,700) WW(I),R(I),EKE(I)+50.00073,WWO(I)
700    FORMAT(/,5X,F7.3,5X,F6.3,5X,F6.3,5X,F7.3)
600  CONTINUE
C*****CLOSE*****
      CLOSE(11)
      CLOSE(12)
      CLOSE(13)
      CLOSE(14)
      CLOSE(15)
      CLOSE(16)
      CLOSE(17)
      CLOSE(18)
      CLOSE(19)
      CLOSE(20)
      CLOSE(21)
      CLOSE(22)
      CLOSE(23)
      CLOSE(24)
      CLOSE(70)
END

```

【 T R A C K 】

```

***** SUBROUTINE TRACK *****
C*          SUBROUTINE TRACK          *
C***** SUBROUTINE TRACK *****
COMMON/BFD/NUMBER,W0,X,Y,Z,U,V,W,E,A,RB,ZB
INTEGER NUMBER,A(0:43000),EOP
REAL DELTAT(43000),P(8,43000),L(8,43000),EFLD(43000)
+   ,EMASS(43000),FK,W0(43000)
+   ,X(43000),Y(43000),Z(43000),U(43000),V(43000)
+   ,W(43000),E(43000),ENERGY(43000),BX(43000),BY(43000)
+   ,BZ(43000),M(8,43000),ZB,RB
DATA EOP/50/
***** CALCULATION *****
DO 230 I=1,NUMBER
A(I)=1
CALL SOLNID(X(I),Y(I),Z(I),BX(I),BY(I),BZ(I))
IF (Z(I)*100.LT.43.169) THEN
  ENERGY(I)=E(I)
  EFLD(I)=0
  IF (Z(I).LT.0.2) THEN
    DELTAT(I)=1E-12
  ELSE
    DELTAT(I)=1E-11
  ENDIF
ELSEIF (Z(I)*100.LE.309.669) THEN
  DELTAT(I)=1E-11
  ENERGY(I)=EOP/266.5*(Z(I)*100-43.169)+E(I)
  EFLD(I)=EOP*1.0E6/2.665
ELSE
  DELTAT(I)=1E-11
  ENERGY(I)=E(I)+EOP
  EFLD(I)=0
ENDIF
EMASS(I)=1.758241758E11/(ENERGY(I)/0.511+1)
P(1,I)=DELTAT(I)*FK(V(I),W(I),BZ(I),BY(I),0.0)
P(2,I)=DELTAT(I)*FK(V(I)+P(1,I)/2,W(I)+P(1,I)/2,
+   BZ(I),BY(I),0.0)
P(3,I)=DELTAT(I)*FK(V(I)+P(2,I)/2,W(I)+P(2,I)/2,
+   BZ(I),BY(I),0.0)
P(4,I)=DELTAT(I)*FK(V(I)+P(3,I),W(I)+P(3,I),
+   BZ(I),BY(I),0.0)
P(5,I)=DELTAT(I)*U(I)
P(6,I)=DELTAT(I)*(U(I)+P(5,I)/2)
P(7,I)=DELTAT(I)*(U(I)+P(6,I)/2)
P(8,I)=DELTAT(I)*(U(I)+P(7,I))
L(1,I)=DELTAT(I)*FK(W(I),U(I),BX(I),BZ(I),0.0)
L(2,I)=DELTAT(I)*FK(W(I)+L(1,I)/2,U(I)+L(1,I)/2,
+   BX(I),BZ(I),0.0)
L(3,I)=DELTAT(I)*FK(W(I)+L(2,I)/2,U(I)+L(2,I)/2,
+   BX(I),BZ(I),0.0)
L(4,I)=DELTAT(I)*FK(W(I)+L(3,I),U(I)+L(3,I),
+   BX(I),BZ(I),0.0)
L(5,I)=DELTAT(I)*V(I)
L(6,I)=DELTAT(I)*(V(I)+L(5,I)/2)
L(7,I)=DELTAT(I)*(V(I)+L(6,I)/2)

```

```

L(8,I)=DELTAT(I)*(V(I)+L(7,I))
M(1,I)=DELTAT(I)*FK(U(I),V(I),BY(I),BX(I),EFLD(I))
M(2,I)=DELTAT(I)*FK(U(I)+M(1,I)/2,V(I)+M(1,I)/2,
+ BY(I),BX(I),EFLD(I))
M(3,I)=DELTAT(I)*FK(U(I)+M(2,I)/2,V(I)+M(2,I)/2,
+ BY(I),BX(I),EFLD(I))
M(4,I)=DELTAT(I)*FK(U(I)+M(3,I),V(I)+M(3,I),
+ BY(I),BX(I),EFLD(I))
M(5,I)=DELTAT(I)*W(I)
M(6,I)=DELTAT(I)*(W(I)+M(5,I)/2)
M(7,I)=DELTAT(I)*(W(I)+M(6,I)/2)
M(8,I)=DELTAT(I)*(W(I)+M(7,I))
U(I)=U(I)+(P(1,I)+2*P(2,I)+2*P(3,I)+P(4,I))/6*EMASS(I)
X(I)=X(I)+(P(5,I)+P(6,I)*2+P(7,I)*2+P(8,I))/6
V(I)=V(I)+(L(1,I)+2*L(2,I)+2*L(3,I)+L(4,I))/6*EMASS(I)
Y(I)=Y(I)+(L(5,I)+L(6,I)*2+L(7,I)*2+L(8,I))/6
W(I)=W(I)+(M(1,I)+2*M(2,I)+2*M(3,I)+M(4,I))/6*EMASS(I)
Z(I)=Z(I)+(M(5,I)+M(6,I)*2+M(7,I)*2+M(8,I))/6
IF (SQRT(X(I)*X(I)+Y(I)*Y(I)).GT.RB) THEN
    A(I)=0
ELSEIF (Z(I).GE.ZB) THEN
    A(I)=2
ELSEIF (W(I).LT.0.0) THEN
    A(I)=0
ENDIF
230 CONTINUE
RETURN
END

```

【FUNCTION FK】

```

C*****FUNCTION FK*****
C*
REAL FUNCTION FK(X1,X2,X3,X4,X5)
REAL X1,X2,X3,X4,X5
FK=X1*X3-X2*X4+X5
RETURN
END

```

【 SOLNID】

```

C*****SUBROUTINE SOLENOID*****
C*          SUBROUTINE SOLENOID          *
C*****SUBROUTINE SOLENOID(X,Y,Z,BX,BY,BZ)
      SUBROUTINE SOLNID(X,Y,Z,BX,BY,BZ)
      REAL PL,PG,D1L,D1G,D2L,D2G,X,Y,Z,BX,BY,BZ,
      + R,S(14),DLG
      DATA PL,PG/0.096,0.0255/
      DATA D1L,D1G/0.16,0.15019/
      DATA D2L,D2G/0.415,0.035/
      R=SQRT(X*X+Y*Y)
      S(1)=Z-PL/2
      S(2)=S(1)-PL/2-PG-D1L/2
      S(3)=S(2)-D1L/2-D1G-D2L/2
      DLG=D2L+D2G
      S(4)=S(3)-DLG
      S(5)=S(4)-DLG
      S(6)=S(5)-DLG
      S(7)=S(6)-DLG
      S(8)=S(7)-DLG
      S(9)=S(8)-DLG
      C S(10)=S(9)-DLG
      C S(11)=S(10)-DLG
      C S(12)=S(11)-DLG
      C S(13)=S(12)-DLG
      C S(14)=S(13)-DLG
      CALL FIELD(S,R,BZ,BX)
      BY=BX*Y/R
      BX=BX*X/R
      RETURN
      END

```

【FIELD】

```

C*****SUBROUTINE FIELD*****
C*          SUBROUTINE FIELD          *
C*****TOTAL,SCALAR
*VOCL TOTAL,SCALAR
    SUBROUTINE FIELD(POSI,R,BZ,BR)
    REAL PARA(14),BPZ(14),BPR(14),BMZ(14),BMR(14),BZ,BR
    + ,C(14),SL(14),RADI(14),R,BFDZ(14),BFDR(14),KEISUU(14),
    + RT(14),F3(14),F5(14),F7(14),F9(14),POSI(14),BZ2(14),
    + F11(14),BR1(14),BR2(14),BR3(14),BR4(14),BZ1(14),
    + BZ3(14),BZ4(14),BZ5(14),RDIL(14),RRT(14),RDIR(14)
    DATA (SL(I),I=1,14)/0.096,0.16,12*0.415/
    DATA (RADI(I),I=1,14)/0.039,0.1006,12*0.1515/
    DATA (KEISUU(I),I=1,14)/1.95976E-3,0.0043088,12*0.0056838/
    DO 100 I=1,8
    C(I)=(RADI(I)+R)*(RADI(I)+R)
    PARA(I)=POSI(I)+SL(I)/2
C*****CALCULATE*****
    RT(I)=SQRT(PARA(I)*PARA(I)+C(I))
C*****R DILECTION*****
    RDIL(I)=RADI(I)*R/RT(I)/RT(I)
    BR1(I)=-RDIL(I)*RADI(I)/4/RT(I)
    BR2(I)=3*RDIL(I)*BR1(I)
    BR3(I)=3.125*RDIL(I)*BR2(I)
    BR4(I)=29.4/11*RDIL(I)*BR3(I)
    BPR(I)=BR1(I)+BR2(I)+BR3(I)+BR4(I)
C*****Z DIRECTION*****
    RRT(I)=RT(I)*RT(I)
    F3(I)=PARA(I)/C(I)/RT(I)
    F5(I)=F3(I)*(1/C(I)-F3(I)*F3(I)*C(I)/3)
    F7(I)=F3(I)/5/RRT(I)/RRT(I)
    F9(I)=F7(I)*5/7/RRT(I)
    F11(I)=F9(I)*7/9/RRT(I)
    F7(I)=F7(I)+4/5/C(I)*F5(I)
    F9(I)=F9(I)+6/7/C(I)*F7(I)
    F11(I)=F11(I)+8/9/C(I)*F9(I)
    RDIR(I)=RADI(I)*R
    BZ1(I)=RADI(I)*RADI(I)/2
    BZ2(I)=BZ1(I)/2*R
    BZ3(I)=BZ2(I)/2*RDIR(I)
    BZ4(I)=BZ3(I)/4*RDIR(I)
    BZ5(I)=BZ4(I)/8*RDIR(I)
    BZ1(I)=BZ1(I)*F3(I)
    BZ2(I)=(6*RADI(I)-3*R)*BZ2(I)*F5(I)
    BZ3(I)=(45*RADI(I)-30*R)*BZ3(I)*F7(I)
    BZ4(I)=(700*RADI(I)-525*R)*BZ4(I)*F9(I)
    BZ5(I)=(28665*RADI(I)-17640*R)*BZ5(I)*F11(I)
    BPZ(I)=BZ1(I)+BZ2(I)+BZ3(I)+BZ4(I)+BZ5(I)
    PARA(I)=POSI(I)-SL(I)/2
C*****CALCULATE*****
    RT(I)=SQRT(PARA(I)*PARA(I)+C(I))

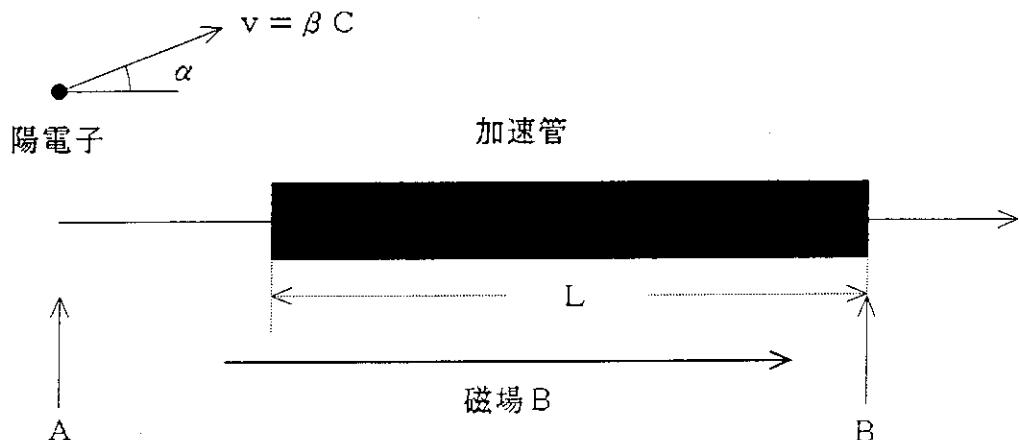
```

```

C*****R DIRECTION*****
RDIL(I)=RADI(I)*R/RT(I)/RT(I)
BR1(I)=-RDIL(I)*RADI(I)/4/RT(I)
BR2(I)=3*RDIL(I)*BR1(I)
BR3(I)=3.125*RDIL(I)*BR2(I)
BR4(I)=29.4/11*RDIL(I)*BR3(I)
BMR(I)=BR1(I)+BR2(I)+BR3(I)+BR4(I)
C*****Z DIRECTION*****
RRT(I)=RT(I)*RT(I)
F3(I)=PARA(I)/C(I)/RT(I)
F5(I)=F3(I)*(1/C(I)-F3(I)*F3(I)*C(I)/3)
F7(I)=F3(I)/5/RRT(I)/RRT(I)
F9(I)=F7(I)*5/7/RRT(I)
F11(I)=F9(I)*7/9/RRT(I)
F7(I)=F7(I)+4/5/C(I)*F5(I)
F9(I)=F9(I)+6/7/C(I)*F7(I)
F11(I)=F11(I)+8/9/C(I)*F9(I)
RDIR(I)=RADI(I)*R
BZ1(I)=RADI(I)*RADI(I)/2
BZ2(I)=BZ1(I)/2*R
BZ3(I)=BZ2(I)/2*RDIR(I)
BZ4(I)=BZ3(I)/4*RDIR(I)
BZ5(I)=BZ4(I)/8*RDIR(I)
BZ1(I)=BZ1(I)*F3(I)
BZ2(I)=(6*RADI(I)-3*R)*BZ2(I)*F5(I)
BZ3(I)=(45*RADI(I)-30*R)*BZ3(I)*F7(I)
BZ4(I)=(700*RADI(I)-525*R)*BZ4(I)*F9(I)
BZ5(I)=(28665*RADI(I)-17640*R)*BZ5(I)*F11(I)
BMZ(I)=BZ1(I)+BZ2(I)+BZ3(I)+BZ4(I)+BZ5(I)
BFDZ(I)=KEISUU(I)*(BPZ(I)-BMZ(I))/RADI(I)/RADI(I)
BFDR(I)=KEISUU(I)*(BPR(I)-BMR(I))/RADI(I)/RADI(I)
100 CONTINUE
      BZ=BFDZ(1)+BFDZ(2)+BFDZ(3)
      +      +BFDZ(4)+BFDZ(5)+BFDZ(6)
      +      +BFDZ(7)+BFDZ(8)
      BR=BFDR(1)+BFDR(2)+BFDR(3)
      +      +BFDR(4)+BFDR(5)+BFDR(6)
      +      +BFDR(7)+BFDR(8)
      RETURN
      END

```

<付録-3> 磁場で補足されて加速管中を進む粒子の運動

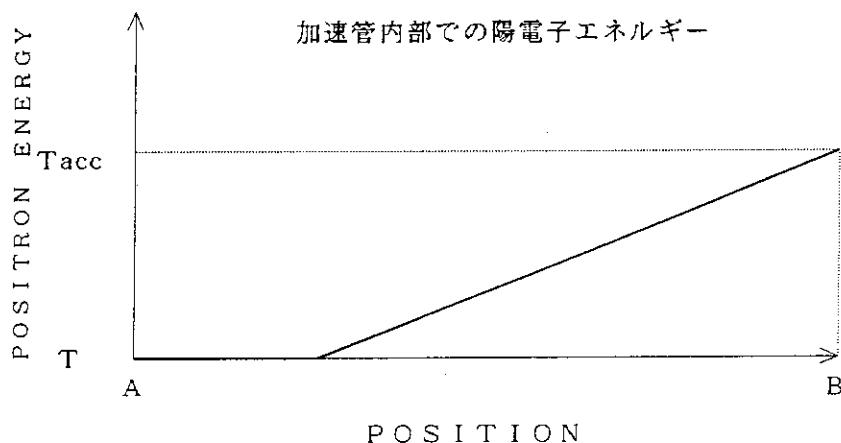


$$t = 0$$

$$ENERGY = T_0$$

$$t = \frac{L}{\beta C \cos \alpha}$$

$$ENERGY = T_0 + T_{acc}$$



上図のように、 $t = 0$ の時、速度 βC の陽電子が A 点においてビームライン方向に対し α の角度で運動しているとする。このとき、加速管中での時間 t における陽電子の運動エネルギー $T(t)$ は、陽電子の静止質量を m_0 、ラーマー半径を ρ 、陽電子の加速管に入る前の運動エネルギーを T_0 、加速管の長さを L とすると、 γ を時間の関数として、

$$T(t) = (\gamma(t)-1)m_0C = \frac{T_{acc}\beta C \cos \alpha}{L} t + T_0$$

ただし、陽電子は加速管中で一様に加速されると仮定した。

これより、 $\gamma(t)$ は、

$$\gamma(t) = \frac{T_{acc}\beta C \cos \alpha}{m_0 C^2 L} t + \frac{T_0}{m_0 C^2} + 1$$

$$\text{また、 } \gamma(t)m_0 \frac{(\beta C \sin \alpha)^2}{\rho(t)} = eBC \sin \alpha \cdot B \quad \text{より、 ラーマー半径 } \rho \text{ は、}$$

$$\rho(t) = \frac{T_{acc}\beta^2 \sin \alpha \cos \alpha}{eBL} t + \frac{\beta \sin \alpha}{eBC} (T_0 + m_0 C^2) \quad \text{となる。}$$

ここで、 t を加速管入り口からの距離 x に変換し、 $\beta \approx 1$ として無視すると、

$$\rho(x) = \frac{T_{acc} \sin \alpha}{eBC L} x + \frac{\sin \alpha}{eBC} (T_0 + m_0 C^2) \quad \text{となり、 加速管の中でラーマー半径が大きくなっていく様子がわかる。}$$

従って、ラーマー半径を一定に保ちたい場合、ラーマー半径を ρ_0 とすると、

$$B(x) = \frac{T_{acc} \sin \alpha}{eC\rho_0 L} x + \frac{\sin \alpha}{eC\rho_0} (T_0 + m_0 C^2) \quad (\text{付録 - 3. 1})$$

のように、加速管中での磁場を距離に対して線形に増加させてゆく必要がある。