

JAERI-Research

94-021



SPring-8電子/陽電子変換部の
実験およびシミュレーション

1994年10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

本レポートは、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、お申し越しください。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）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is 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, 1994

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／陽電子変換部の実験およびシミュレーション

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

(1994年9月8日受理)

SPring-8 では、蓄積リング内でのビームの寿命を確保するため、陽電子による運転を計画している。そのための電子／陽電子変換部は線型加速器内に設置する。

我々は、変換部の設計にあたっての基礎データを得るために、原研リニアックに陽電子発生試験装置を設置し、陽電子発生、および集束の実験を行ってきた。また、同時に変換部のシミュレーションコードの製作を進めてきた。

シミュレーションコードについては、JAERI-M 93-030 で既に発表済みであるが、本論文は、シミュレーションの妥当性を確認するために、陽電子発生試験装置を用いた実験結果とシミュレーションの比較を主としてまとめたものである。

実験とシミュレーションは、定性的に良く一致しており、今回用いたシミュレーションコードによって SPring-8 実機変換部のパラメーター決定が可能であることが示された。

Experiment and Simulation of an 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 September 8, 1994)

In the SPring-8, positron beam will be used for increasing beam-lifetime in the Storage-ring. An electron/positron convertor will be installed in the middle of the Linac.

For designing the convertor, experiments of positron generation and focusing were carried out with a test apparatus which was mounted in the beam-line of the JAERI-Linac. And we had been also developing a simulation code for the convertor.

Simulation was already reported in JAERI-M 93-030, so this paper shows experiment results, and comparison between experiment and simulation.

The experiment data are qualitatively coincident with that of simulation data. So this simulation code turned out to be available for designing the convertor.

Keywords: SPring-8, Positron, Convertor, EGS4

目 次

1. はじめに	1
2. 陽電子発生試験装置の概要	2
2.1 陽電子発生試験装置の構成	2
2.2 各コンポーネントについて	2
2.2.1 ターゲット	4
2.2.2 コイル	4
2.2.3 加速管	8
2.2.4 蛍光板モニタ, およびスリット	9
2.2.5 電磁石	10
3. 実験, およびシミュレーションの概要	11
3.1 スペクトル観測までの調整手順	11
3.2 シミュレーションの概要	13
3.3 各パラメータについて	13
4. 実験結果およびシミュレーション結果	16
4.1 補助実験	16
4.1.1 原研リニアックのビームスペクトル	16
4.1.2 陽電子・および対生成電子のスペクトル	16
4.2 パラメータサーチ実験	19
4.2.1 パラメータサーチ1 - 陽電子のエネルギーゲインの変化	19
4.2.2 パラメータサーチ2 - ソレノイドコイル励磁電流の変化	22
4.3 変換効率について	44
5. SPring-8 線型加速器での展望	47
6. まとめ	48
参考文献	49
付録	50

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the Test Apparatus for Electron/positron Convertor	2
2.1 The Test Apparatus	2
2.2 Components of the Test Apparatus	2
2.2.1 Target	4
2.2.2 Coils	4
2.2.3 Accelerator Tube	8
2.2.4 Profile Monitors and Slits	9
2.2.5 Magnets	10
3. Outline of Experiment and Simulation	11
3.1 Tuning for Experiment	11
3.2 Outline of Simulation	13
3.3 Parameters of Experiment and Simulation	13
4. Results of Experiment and Simulation	16
4.1 Prepare for Main Experiment	16
4.1.1 Beam Spectrums of JAERI Linac	16
4.1.2 Beam Spectrums of Electrons and Pare Created Positrons	16
4.2 Parameter Search	19
4.2.1 Parameter Search 1 — Energy Gain of Positrons	19
4.2.2 Parameter Search 2 — Currents of Solenoidal Coils	22
4.3 Conversion Efficiency	44
5. Plan for the SPring-8 Linac	47
6. Conclusion	48
References	49
Appendix	50

1. はじめに

Spring-8では、蓄積リング内における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。この陽電子は、線型加速器の250MeVの地点に置かれるターゲットで生成し、それに続く集束系によって集束する。設計では、ターゲットへの入射ビームは、パルス幅10nsec、ビーム電流10A以上としており、電子／陽電子変換効率が0.1%以上との仮定の上で、線型加速器出口での電流値を10mAと見積もっている。

Spring-8線型加速器は、1992年6月末に電子銃からバンチャーノの出口までを含む電子入射加速部がすでに完成しており、ビーム電流は、試験的には、電子銃出口において1nsecで22Aが最大値として得られた¹⁾。これにより、バンチャーノ以降の加速部のビームロスを考慮しても、ターゲットへの入射ビームは設計値を確保できることがほぼ確実である。

当初の設計を満足するには、ターゲットから線型加速器出口までのトータルとしての電子／陽電子変換効率を0.1%以上にする事が必要であり、さらに、最近の他所での実験結果などを考慮すると0.2~0.3%以上を目指す事が望ましい。ところが、ビームダイナミクスから見た集束系自体の性質は調べられている²⁾ものの、実際の集束系の設計と変換効率の関係は良く分かっていないのが現状である。

我々は、ターゲット、およびそれに続く集束システムにおける陽電子生成及び集束について計算機シミュレーションを行う一方、1991年夏に、原研リニアックに電子／陽電子変換部のR&D装置（陽電子発生試験装置）を付設し、実験を行ってきた。本報告書は、それらの実験結果、およびシミュレーションとの対応をまとめたものである。実験とシミュレーションデータの内、代表的なものは既に発表済み^{3), 4)}であるが、本報告書ではデータとしてまとめる意味もあり、全ての実験データについて示した。なお、シミュレーション全般についてはJAERI-M 93-030⁵⁾によりすでに報告されている。本報告書はその続きという性格を持つものであるので、是非、併読して頂きたい。

2. 陽電子発生試験装置の概要

2. 1 陽電子発生試験装置の構成

陽電子発生試験装置は、1991年夏に原研東海の原研リニアックビームライン下流に設置した。全体の構成を図2-1に示す。原研東海では250MeVのビームは得られないで、替わりに、ターゲットには原研リニアックより約90MeVに加速した電子ビームを入射する。ターゲットの前部には、調整用のQ電磁石、ステアリング電磁石、および図2-1のようにスリットを設置している。ターゲット以降には、ターゲットから発生した陽電子を集束する為のソレノイドコイルと加速管（陽電子集束部）を設置しており、また、陽電子集束部以降にはQトリプレットに続いて、エネルギー分析電磁石、スリット、ファラディカップによりなるスペクトロメーターを設置している。

ターゲットから陽電子集束部までの概要を図2-2a)、b)に示す。a)は、JAERI-M 93-030でシミュレーションのモデルとした完成当初の構成であり、図2-1に記載した集束部を模式的に表したものである。しかし、ソレノイドコイルの不正磁場のためコイルの改造を行ったので、実際に実験を行ったのはb)の構成である。a), b)とも、基本構成は変わっておらず、上流側からターゲット、パルスソレノイドコイル、DC1コイル、DC2コイルとなる。a), b)の違いは、基本的にはDC2コイルの個数であるが、パルスソレノイドコイル、DC1コイルについては若干のスペック増強となっている。

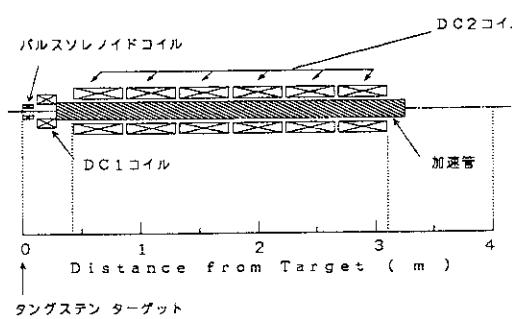


図2-2 a)

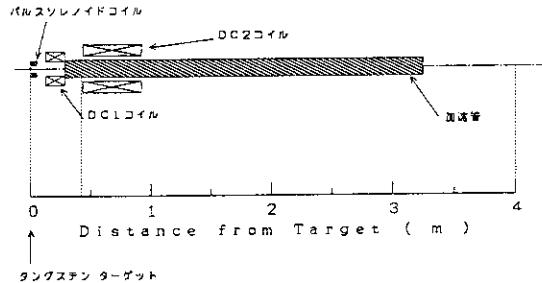


図2-2 b)

陽電子集束部の概要

2. 2 各コンポーネントについて

各コンポーネントについて、実験での調整、使用法についても併せて述べる。

2. 2. 1 ターゲット

ターゲットは、円形平板のタンクスチンであり、直径14mm、厚さ6mmである。ただし、ターゲット部の機械的構造上、電子ビーム入射側からみたターゲットの直径は ϕ 10mmである。なお、タンクスチンターゲットの厚さは、入射電子エネルギー-250MeV(実機対応)において、6mm~7mmの時にターゲットからの発生陽電子数が最大になるというEGS4の計算結果^④に基づき選定した。

ターゲット部の構造は、図2-3、図2-4に示すように、ビームラインへの出し入れが可能な方式とした。これは、陽電子発生試験装置を、原研ライナックのビームラインの内中性子実験用ビームラインの途中に設置したため、中性子実験の時に電子ビームを通過させる必要があるためである。また、本実験でも入射電子ビームと生成陽電子ビームを比較検討する必要があるためである。

ビームラインへのターゲットの出し入れのためにはモーターを2個用いており、1つは、オフラインからビームラインへの挿入用、もう1つは、挿入した後のビームライン方向移動用である。したがって、ターゲットの位置はパルスソレノイドコイルに対してビームライン方向に変化させることができる。ターゲットとパルスソレノイドコイルの相対位置を変化させると、集束部下流で得られる陽電子のエネルギースペクトルの形に変化が現れるという計算結果もあるが^⑤、変化の程度がわずかであるため確認が難しく、同一位置に固定して実験を行った。

2. 2. 2 コイル

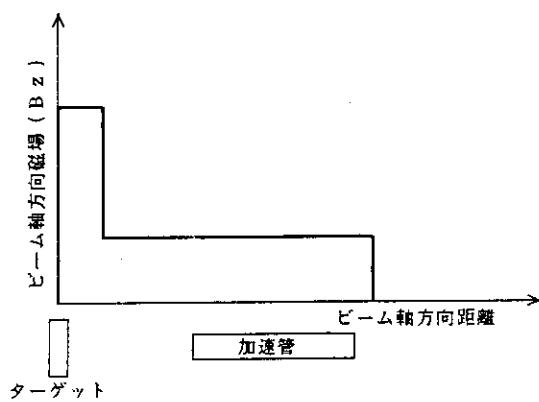


図2-5 QWT磁場構成概念図

集束系は、従来よりよく用いられているQWT(Quarter Wave Transformer)方式^②を採用している。他の方法としてアクセプタンスの大きなAD(Adiabatic device)方式^③などがあるが、QWT方式に比べエネルギースペックが大きくなるという欠点もあり、本装置には採用していない。QWT方式は、図2-5に示す様に、ターゲット直後にビーム方向磁場強度が強くて短い部分があり、その後、磁場強度の弱い部分が続く。磁場の弱い部分には加速管を設置している。磁場強度

が強い部分は1~2T以上の磁場を必要とするため、DC的なソレノイドコイルでは実現が難しい。従って、この部分はパルスソレノイドコイルを用いる。磁場の弱い部分についてはDCソレノイドコイルを用いる。パルスソレノイドコイルの部分のダクトは、渦電流の防止のためセラミックダクトを用いている。

コイルは、当初、図2-2a)の様にパルスソレノイドコイル1台、DC1コイル1台、およびDC2コイル6台の構成であった。これらは全て、ホロコンを

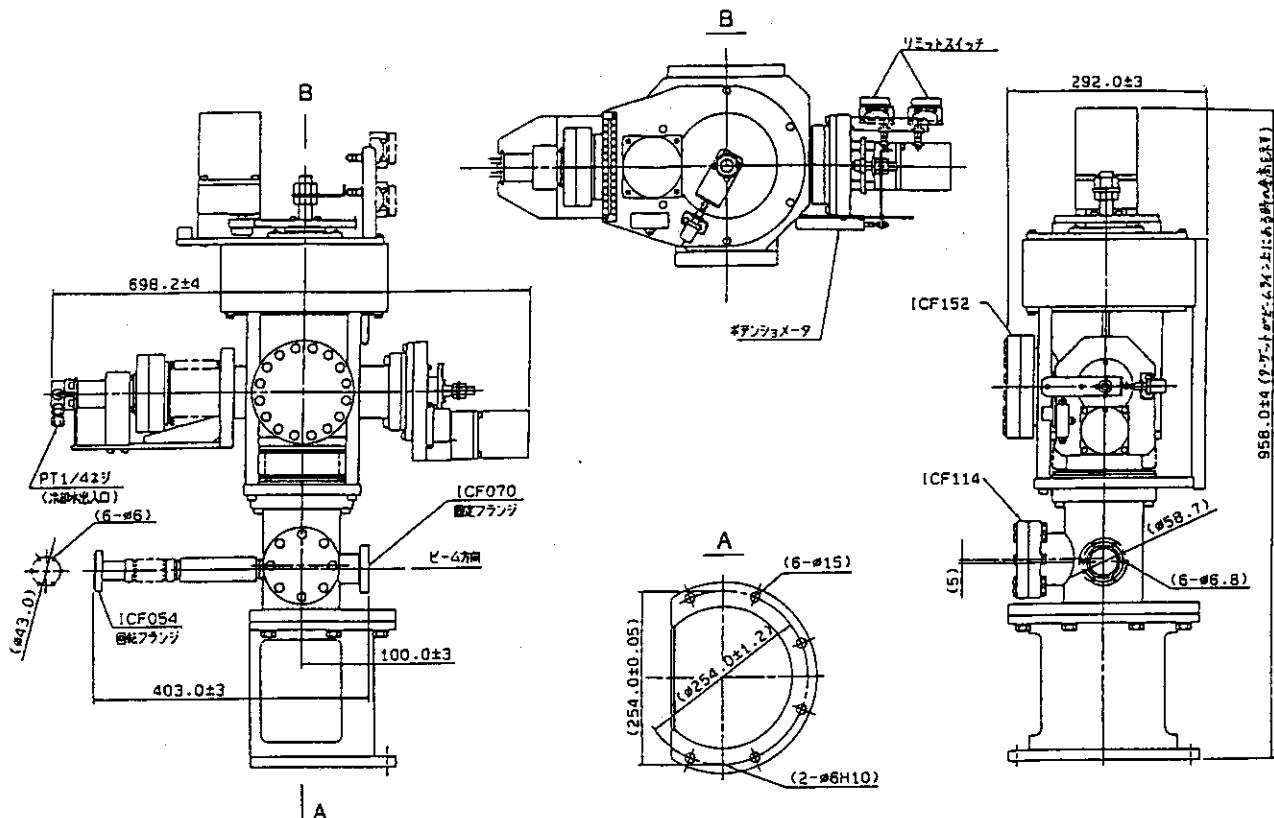


図 2-3 ターゲット外観図

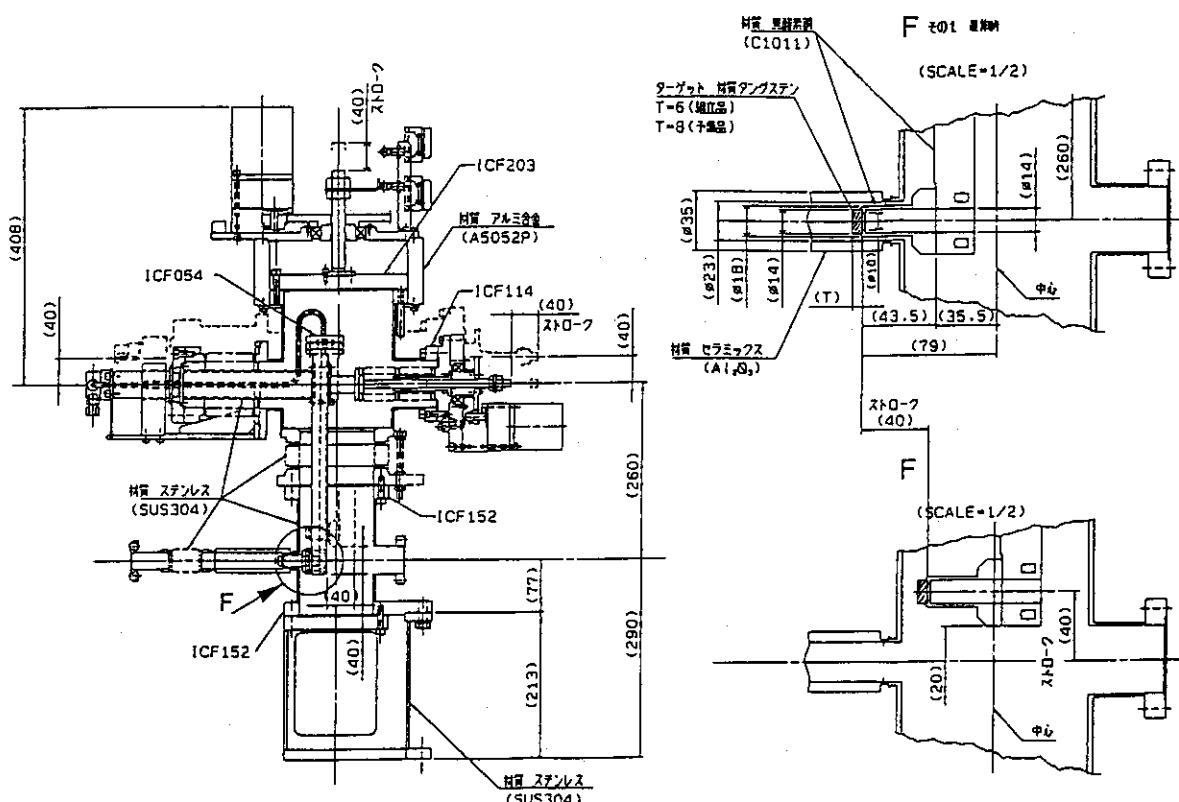


図 2-4 ターゲット断面図

用いた直接水冷方式である。これらのコイルをAタイプとする。

Aタイプのコイルを使用し、実験を行ったところ、パルスソレノイドコイル、DC2コイルについて、陽電子集束のためのコイルにもかかわらず、励磁するにつれて陽電子の収集量が減ってしまう現象が起こった。このため、offライン上でDC2コイルの磁場測定を行った。測定は、図2-6に示すように、DC2コイル端面から内側50mmの面内の、中心点を通るr軸の $-40\text{ mm} < r < 40\text{ mm}$ の範囲内で、3軸プローブにより B_z （ビーム軸方向）、 B_x 、 B_y を測定した。

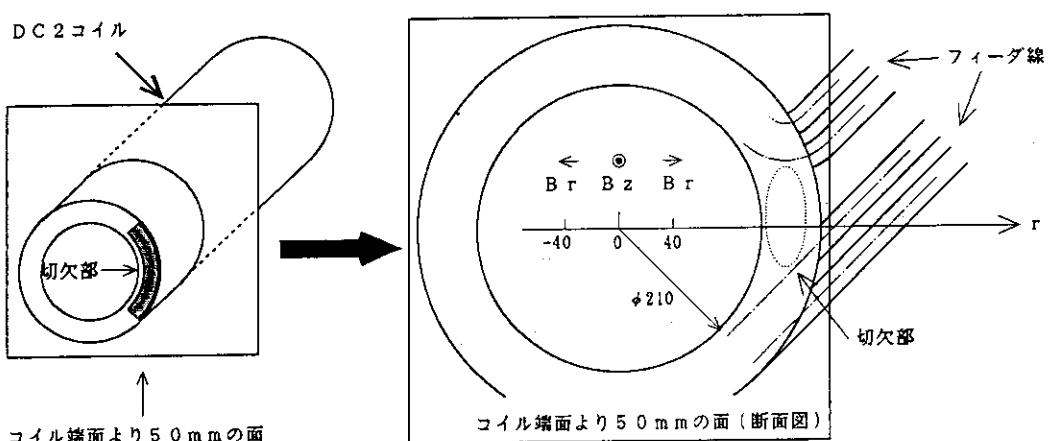


図2-6 DC2コイル磁場測定の概念図

測定データより B_r を計算し、 B_z のデータと共に示したのが図2-7である。ここで、 B_r は絶対値で示しているので、方向は図2-6に示すように $r > 0$ と $r < 0$ で逆となっている。

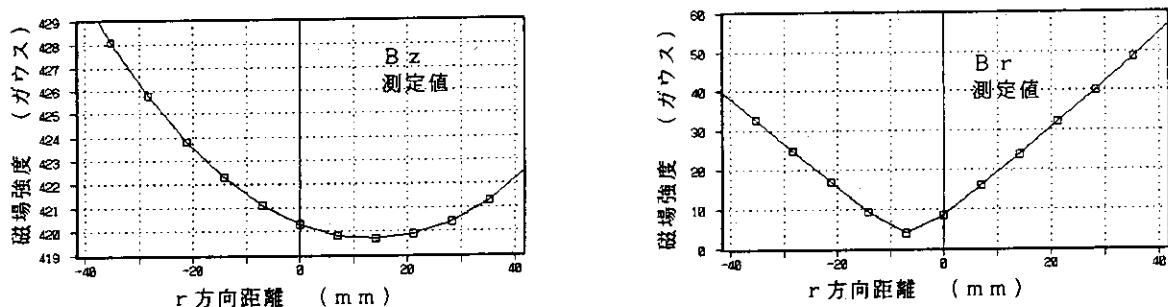


図2-7 DC2コイルの磁場測定データ

図2-7において r 方向距離が0のところがコイルの中心点なので、 B_z 、 B_r ともに歪んでいるのが分かる。

DC2コイルはホロコンが太く、コイルの巻始めと巻終わりの部分（コイルの端面）で、図2-6に示すように、電気的にコイルの巻かれていないと等価である部分（切欠部分）が $1/4$ 周存在する。この切欠部分の、 B_z 、 B_r の歪みに対する効果を調べるために、切欠部を含めて図2-7のシミュレーションでの再現を試みた。このシミュレーションデータが図2-8である。

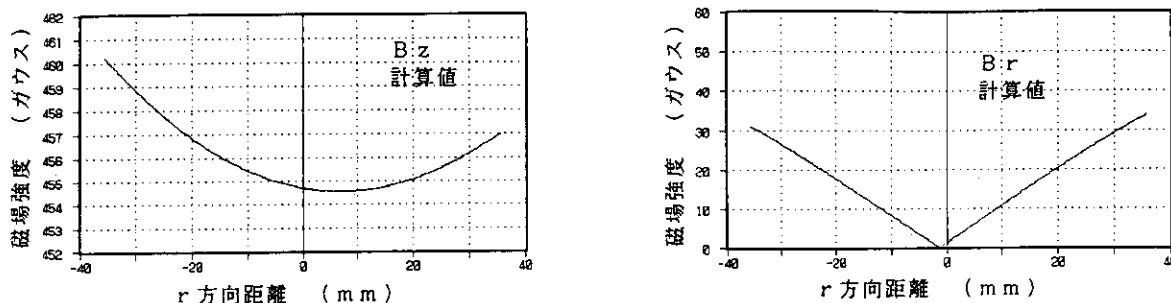


図 2-8 DC 2 コイル磁場のシミュレーションデータ

図 2-8 より、測定値とシミュレーションで磁場の絶対値が若干異なっているものの、シミュレーションで磁場の B_z 成分の歪が良く再現されており、この歪みはほぼ切欠部の為であることが分かる。これに対し B_r 成分は、絶対値が小さい為と、測定プローブの傾きの調整が困難であるため、歪の全てが切欠部の効果であるのかどうか判断できない。

ところで、DC 2 コイル中で陽電子はビーム軸に沿って回転するが、ほとんどの陽電子の回転数は 1 回転にも満たない。したがって、 B_z の歪みによって軌道を曲げられることは考えにくく、陽電子が曲げられるのは B_r によるものと考えられる。

B_r を切欠部によるものとすると、ビーム軸方向に沿った切欠部の前後で B_r の方向は反転するので、ビーム軸に沿った B_r の積分は 0 になる。したがって、切欠部の B_r 成分で曲げられているのではなく、別の要因があることが分かる。

B_z に歪みを起こさず、かつ B_r を生じさせる原因としては、DC 2 コイルのターン数が少なく、ホロコンが太いため、図 2-9 に示すようにコイルを巻くときのホロコンの斜め渡りの部分により B_r 成分が含まれてしまうことが考えられる。

このため、DC 2 コイルについては、ビームの補足について実績のあり、またケーブル径の細いクライストロン用の集束コイルを改造したものを用い、また、パルスソレノイドコイルについては、細



図 2-9 不正磁場発生の様子

いホロコンを用いて自作した。DC 1 コイルについては特に不都合は無かったが、磁場強度の増強を目指し、また、コイルの巻線方法の R & D もかねて、コイル巻線層間の渡り部分を隣どおしのコイルでキャンセルできるような、ダブルパン巻で作り直した。これらのコイルを B タイプとする。A, B 両タイプのコイルのパラメータを表 2-1 に示す。(B タイプの DC 2 コイルのみ、間接水冷である。)

B タイプでは、自作したパルスソレノイドコイルについてのみ、モーターにより簡単な姿勢制御ができるようにした。この結果、励磁電流を増加した場合に収

集量が減少することは無くなった。

これらの改造については予算的な制約もあり、最終的には図2-2 b) のシステムとなった。

本報告書では、以後はBタイプコイルを用いた図2-2 b) のシステムでの実験についてのみ報告する。

表2-1 コイルのパラメータ

a) Aタイプコイル

コイル種類	ハルスリバイトコイル	D C 1 コイル	D C 2 コイル
内径	Φ 60	Φ 120	Φ 210
外径	Φ 96	Φ 282.5	Φ 400
全長	96	160	415
ターン数	22	144	74.5
ホロコンサイズ	7×7	7×7	20×20
最大電流	7 kA	348 A	1485 A
最大磁場(ビーム方向)	約1 T	0.265 T	0.285 T

b) Bタイプコイル

コイル種類	ハルスリバイトコイル	D C 1 コイル	D C 2 コイル
内径	Φ 44	Φ 120	Φ 204
外径	Φ 60	Φ 310	Φ 420
全長	52	153	490
ターン数	22		176
ホロコンサイズ	4×4	7×7	20×2(平角)
最大電流	5.8 kA	348 A	130 A
最大磁場(ビーム方向)	約2 T	約0.3 T	約0.2 T

2.2.3 加速管

図2-2に示すように、加速管はコイルと共に集束系のメインコンポーネントである。本来、D C 2 コイル中で陽電子を加速するものであるが、図2-2 b) に示すように、実際の実験では、加速管のほとんどの部分がD C 2 コイルの外側となっている。この加速管はSpring-8線型加速器で用いるものと同一スペックで先行製作した銀鑑付けタイプ、81セルの完全定勾配、進行波型加速管(全長約3m)である。R F 源としてはピーク出力35MWのクライストロンを用いており、計算上は、30MW運転の場合約50MeVの加速ゲインがある。

加速管を用いて実験する上で障害になるものに、位相をどのように合わせ込む

かという問題がある。位相そのものは移相器により遠隔制御できるようになっていはるが、ターゲットより発生したばかりの陽電子の集束に最適な位相というものを検証することができない。また、この実験ではシミュレーションと比較することが第1目的であるが、シミュレーションでは常に最適位相の場合を仮定している。本実験では実際に陽電子を集束させながら位相を調整し、ファラディーカップでの陽電子電流出力が最大になるところを探した。また、一連の実験中はできるだけ位相を変化させないように、短時間で終わるよう心がけた。

クライストロンよりのRFは繰り返し60ppsまで可能であるが、ターゲットの耐熱性、およびパルスコイル電源の制約により、ビームの繰り返しの最大値は5ppsである。ただし、クライストロンの出力安定化の為、モジュレータの運転は25~50ppsで行った。

2. 2. 4 蛍光板モニタ、およびスリット

この陽電子発生試験装置には、図2-1に示す位置に蛍光板モニタが1台、およびスリットが3台設置されている。図2-1の概念図を図2-10に示す。

陽電子発生の実験では、ターゲットの中心にビームを絞り込むことが肝要である。これは、集束系入り口の位相空間でのアクセプタンスがX'方向に大きいのに比べ、X方向には極端に小さいからである。そのためには蛍光板モニタを見ながら陽電子発生試験装置より上流側にあるステアリング電磁石およびQ電磁石で調整する。したがって、蛍光板がターゲット上にあることが望ましい。しかし、陽電子発生試験装置では、蛍光板モニタの位置がターゲットの約1m手前であり、なおかつ1台しかないとため、これだけでビームを調整するのは難しい。スリット1は、中心部に円筒型の穴の開いている構造であり、蛍光板モニタの前部に位置しているので、これを挿入したときと挿入していないときのビームスポットの位置が蛍光板上ではほぼ変化がないことを確認することにより、ビーム調整の代用とした。なお、それでも調整が困難なときは、集束系出口のQトリプレットの後のダクトを取り除いてビーム窓を設置し、これよりビームを取り出して、外部に設置した蛍光板を用いて位置を確認した。

後部のスリット2、および3は、エネルギー分析用であり、左右の長方形ブロックが移動する構造である。

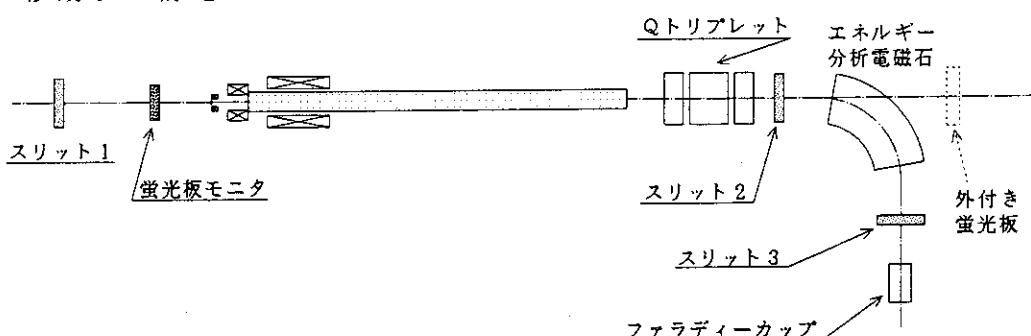


図2-10 陽電子発生試験装置概略図

2. 2. 5 電磁石

電磁石類は、ビーム調整用のステアリング電磁石とQ電磁石、およびエネルギー分析電磁石を使用している。このうち、集束系出口のQトリプレットについては、実際にはほとんど使用しなかった。これは、シミュレーションにおいてQトリプレットの効果を取り込んでいないためと、実験においてはQトリプレットなしでも充分なデータが得られたからである。

エネルギー分析電磁石は、スリット2、スリット3、およびファラディーカップと共にスペクトロメーターを形成している。このスペクトロメーターは93MeVまで測定できる。エネルギースペクトルは、エネルギー分析電磁石電源の出力電流信号、およびファラディーカップの出力信号をXYレコーダに直接取り込むことにより得た。なお、スリット2およびスリット3は、実験では全開で使用した。これは測定陽電子の量を稼ぐためである。また、全開でもエネルギー分解能が充分に得られるためである。エネルギー分解能については4. 2. 3項で述べる。

3. 実験、およびシミュレーションの概要

今回、我々は「2. 陽電子発生試験装置の概要」で示した陽電子発生試験装置を用いて、陽電子発生および集束の実験を行った。この実験の目的は、陽電子発生試験装置での陽電子変換効率について調べること、および、本実験の結果とシミュレーションを比較検討することによってシミュレーションの妥当性を確認することである。

シミュレーションと比較検討する方法としては、集束系のパラメータを変化させ、そのとき得られる陽電子のエネルギースペクトルの変化の様子が実験とシミュレーションで一致するかどうかを確認することとした。したがって、収量を稼ぐよりも、本実験においてはパラメータサーチ実験が主となる。

集束系の特性を調べるという目的からすると、ターゲットへの入射電子ビームの質は常に一定であるのが望ましい。しかし、原研ライナックではビームの安定度が悪く、常に一定のビームを供給することは難しい。従って、ビームの調整の如何によっては結果が変わってくることも考えられる。この章では、まず、陽電子エネルギースペクトル観測までの陽電子発生試験装置の調整手順を示す。また、シミュレーションの概要、およびサーチパラメータについて述べる。

3. 1 スペクトル観測までの調整手順

—手順1— 入射電子ビームの直線性調整

まず、原研リニアックからの電子ビームを、陽電子発生試験装置のターゲットの中心に導く。

ターゲットを引き抜いた状態で陽電子発生試験装置に電子ビームを入射し、図2-10の蛍光板モニタ、外付き蛍光板、およびスリット1などを用いて2. 2. 4項の要領で入射ビームの直線性を調整する。

—手順2— 入射電子ビームのターゲット上への絞り込み

次に、入射電子ビームのターゲット上スポットができるだけ小さくなるように絞り込みを調整する。

ターゲット上でビームスポットを観察することができないので、実際にターゲットを挿入し、発生した陽電子を後方のファラデーカップ出力で確認しながら、出力が最大値をとるように、ターゲット前部のQ電磁石およびステアリング電磁石を調整する。なお、このとき、加速管にはR.F.を入射して加速を行いながら調整した。

—手順3— 入射電子ビームの測定

—手順2—までで、入射電子ビームの軌道は調整できたことになるので、ターゲットを引き抜き、加速せずに、原研ライナックからの電子ビームのスペクトル測定を行う。

測定は、陽電子発生試験装置のスペクトロメーターで行う。加速管へのRF入力が0の場合でも、ビームによる加速管内へのRFの誘起現象によって電子のエネルギースペクトルは変化することがあるが、今回はその影響を無視できるものとした。

-手順4- 加速管での加速エネルギーの測定

加速管における加速エネルギーは、実験上のパラメータとしてできるだけ正確に把握したい。そのため、電子ビームを用いて加速エネルギーの測定を行った。

測定は、実際に原研リニアックからの入射電子ビームを陽電子発生試験装置で加速し、加速していないときのスペクトルと比べれば良い。しかし、陽電子発生試験装置のスペクトロメーターは最高93MeVまでしか対応していないので、約90MeVの入射電子ビームをさらに加速したビームのエネルギーを測定することはできない。そこで、ビームを減速位相にのせて減速をさせ、エネルギースペクトルを測定することにより、加速エネルギー測定の代用とした。

-手順5- パルスソレノイドコイルの調整

今回の実験では、前述のように、パルスソレノイドコイルを姿勢制御可能な方式とした。これを用い、実際に陽電子を発生させながら、パルスソレノイドコイルの姿勢制御を行った。

パルスソレノイドコイルは、表2-1に示すように、他のコイルに比べて全長が短く、内、外径とも小さい。このため、コイルの磁場の内、 r 方向成分が大きくなる。この r 方向成分が存在するために陽電子に集束力が働くのであるが、同時に、アライメントが困難になる⁵⁾。

調整は、まず、-手順2-までで調整のできた電子ビームをターゲットに入射して陽電子を発生させ、パルスソレノイドコイルを励磁し、また、加速管にRFを供給して陽電子を収集する。この状態で、エネルギースペクトルのピーク位置でのファラデーカップ出力を観測し、それが最大になるようにパルスソレノイドコイルの姿勢を調整した。このとき、加速管の位相は（すこしづれていても調整にはあまり影響無いと思われるが）加速位相に調整した。また、パルスソレノイドコイルの励磁電流は、5.8kAとした。

-手順6- 陽電子エネルギースペクトルの観測

各パラメータをセットして、スペクトロメーターで陽電子のエネルギースペクトルを観測する。

陽電子発生試験装置の調整は以上のとおりであるが、これらの手順より分かるように、入射電子ビームのターゲット上での位置、絞り込み、パルスソレノイドコイルの姿勢等の実験条件は、再現性に乏しい。同時に原研リニアックのビーム電流値、エネルギーなども不安定であるため、シミュレーションと一致させるた

めには仮定の部分が大きくなる。シミュレーションとの比較に於いて再現性だけは確保できるよう、一連の実験はなるべく短時間の内に測定するようにした。

3. 2 シミュレーションの概要

シミュレーションについては JAERI-M 93-030 で報告しているので簡単に述べる。

シミュレーションは大きく分けて 2 つの部分より構成される。EGS4⁷⁾によるターゲットでの陽電子生成の部分と、自作のビームトラッキングコードによる集束系での陽電子のトラッキングの部分である。

前者の EGS4 (Electron Gamma Shower Version 4) は、Stanford 大学で開発された電子、光子等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。後者の自作ビームトラッキングコードは、ターゲットから発生する陽電子、すなわち EGS4 の結果 (ターゲット上の陽電子の位置、出射角度、エネルギー) を初期条件とし、ファラディーカップの付近までルンゲクッタ法によりトラッキングするものである。トラッキングコード中では加速電場は定常電場と仮定している。また、磁場の値は、本来は陽電子発生試験装置にコイルをマウントした後、実際の磁場を測定するべきであるが、陽電子発生試験装置設置作業の都合上測定できなかったので、計算値を使用している。この計算は、各コイルの幾何学的中心に円筒電流が存在するものとして計算しており、JAERI-M 93-030 で用いているものと同様である。ただし、2 つのコードとともにタイムドメインの計算はできないので、実験に於けるパルス幅の情報はシミュレーションでは意味がなくなる。

今回の実験との比較にあたっては、EGS4、トラッキングコードとともに、実験のパラメータを与えて計算をやり直した。

3. 3 各パラメータについて

今回の実験での固定パラメータは以下の通りである。

ターゲット	材質	タンクステン
形状		円形平板
直径		φ 10 mm
厚さ		6 mm

入射電子ビーム	パルス幅	1 μsec
	エネルギー	約 90 MeV
	繰り返し	5 pps

(注) 入射電子ビーム電流値は実験によって変動があったが、シミュレーションと比較する場合のパラメータとしては認識していない。

また、今回のパラメータサーチ実験での可変パラメータは以下の通りである。

- 1) パルスソレノイドコイル励磁電流
- 2) DC 1 コイル励磁電流
- 3) DC 2 コイル励磁電流
- 4) 加速管での陽電子のエネルギーゲイン

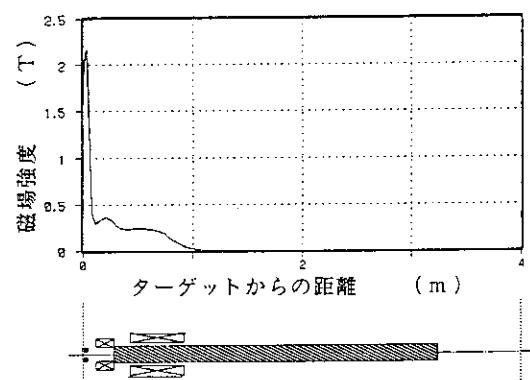
可変パラメータの内、1)～3)は、すなわち集束系内の磁場分布、および磁場強度である。今回の実験での最大励磁電流は

$$\text{パルスソレノイドコイル} = 5.8 \text{ kA}$$

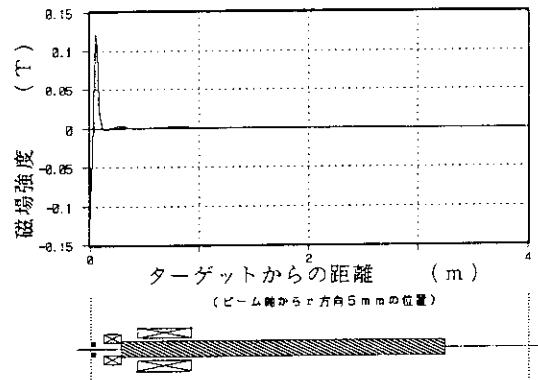
$$\text{DC 1 コイル} = 350 \text{ A}$$

$$\text{DC 2 コイル} = 130 \text{ A}$$

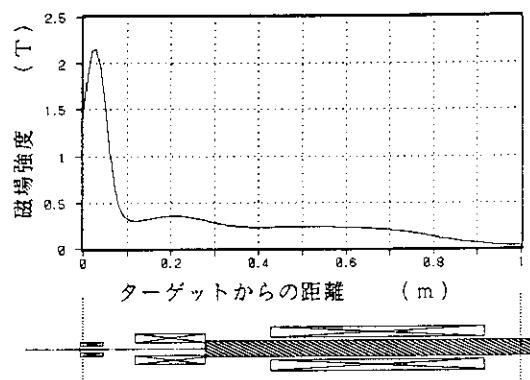
である。このときの実際の磁場分布の測定データはないが、ビーム軸方向（Z 方向）、およびラジアル方向（r 方向）の計算値は図 3-1 のとおりである。



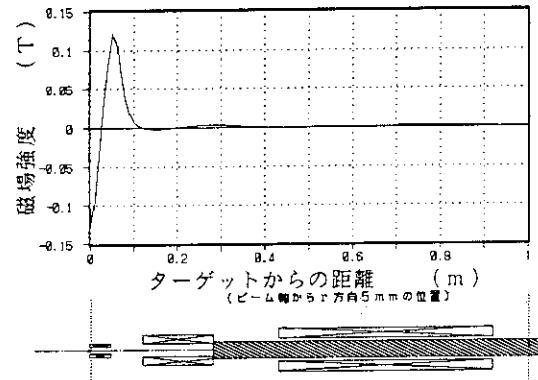
a) ビーム軸方向 (Z 方向)



b) ラジアル方向 (r 方向)



c) ビーム軸方向 (Z 方向) 拡大図



d) ラジアル方向 (r 方向) 拡大図

図 3-1 磁場分布 (計算値)

実験パラメータに対する、シミュレーションでのパラメータを以下に示す。

【 E G S 4 のパラメータ】

・入射電子エネルギー	90MeV
・電子ビーム半径	1.0mm
・電子ビーム入射角度	0° (ターゲットに対して垂直に入射)
・入射電子数	1,026,000
・入射電子分布	ガウス分布
・ターゲット	タンクステン
形状	円形平板
ターゲット半径	10mm
ターゲット厚さ	6.0mm

【トラッキングコードのパラメータ】

トラッキングコードのパラメータは、実験に応じて変化させるものである。変化可能なものについて以下に示す。

- ・パルスソレノイドコイルの励磁電流
- ・D C 1 コイルの励磁電流
- ・D C 2 コイルの励磁電流
- ・加速電場

4. 実験結果およびシミュレーション結果

4. 1 極端実験

パラメータサーチ実験の前段階として測定した2つの実験の結果を示す。

4. 1. 1 原研リニアックのビームスペクトル

3. 1項 -手順3- 及び -手順4- に記述したように、実験の前後において、ターゲットへの入射ビームである原研リニアックのビームスペクトルを測定した。同時に、陽電子集束系の加速管によってビームを減速して、加速管の加速エネルギーを測定した。これを図4-1 (a) および (b) に示す。本報告書で示す実験は数日間に渡って行ったが、このデータは、その中のある1日のものであり、この日に、今回の実験の主となるパラメータサーチ-2の実験(4. 2. 2項参照)を行っている。

(a)、(b)ともに、エネルギーの高い方のピークが原研リニアックからのビームであり、低い方が集束系の加速管によって減速したものである。実験開始前と実験終了後でスペクトルが全く同じとはいえないが、比較的安定している。このときの加速管による減速は33.1MeVであるので、陽電子の加速も33.1MeVであると仮定した。シミュレーションでもこの値を用いて計算している。

図4-1で、縦軸は平均電流を表したものであり、原研ライナックからの電子ビーム電流は、エネルギースペクトルのピーク値で 158.8nA である。この実験では繰り返し5pps、パルス幅 $1.0\mu\text{sec}$ であったので、実際のパルス電流のピーク値は31.8mA である。

4. 1. 2 陽電子・および対生成電子のスペクトル

実際にターゲットを挿入した後、確実に陽電子が発生し、それをスペクトロメーターで測定していることを確認するために、陽電子・および対生成電子スペクトルを測定した。これを図4-2 (a) (b) に示す。このときのパラメータは表4-1のとおりである。(a)と(b)を比べると、電子の場合にスペクトルの低エネルギー側にこぶができるが、その他では、定量的にも定性的にも電子の場合と陽電子の場合でたいへん良く一致している。したがって、対生成による陽電子を観測しているものと判断した。加速管へ入力するRFの、電子と陽電子の場合の位相差が 182° となっているのは、位相調整の方法として、発生陽電子および電子電流が最大となるように調整したため、ちょうど位相差 180° とはならなかったものである。

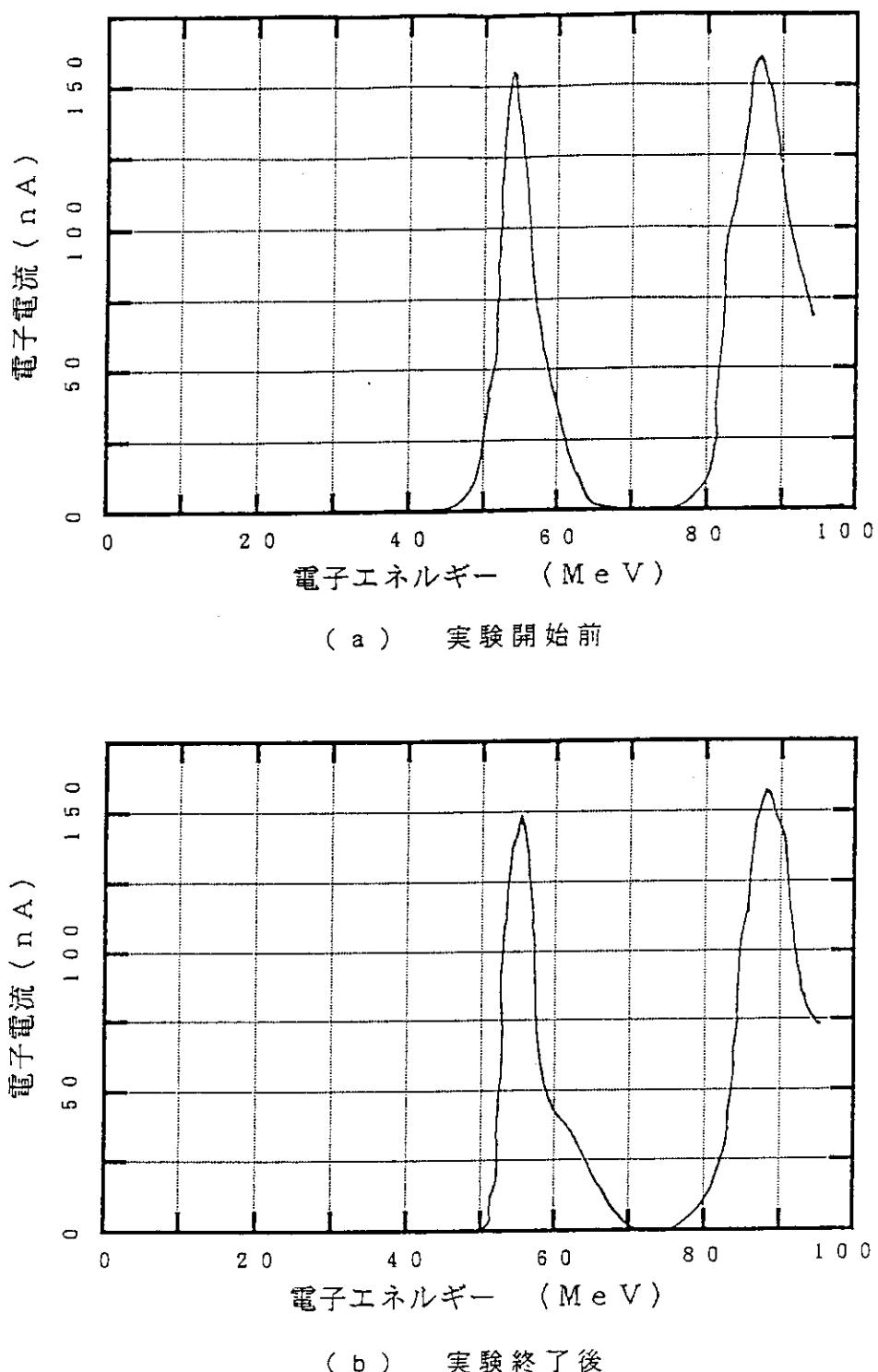
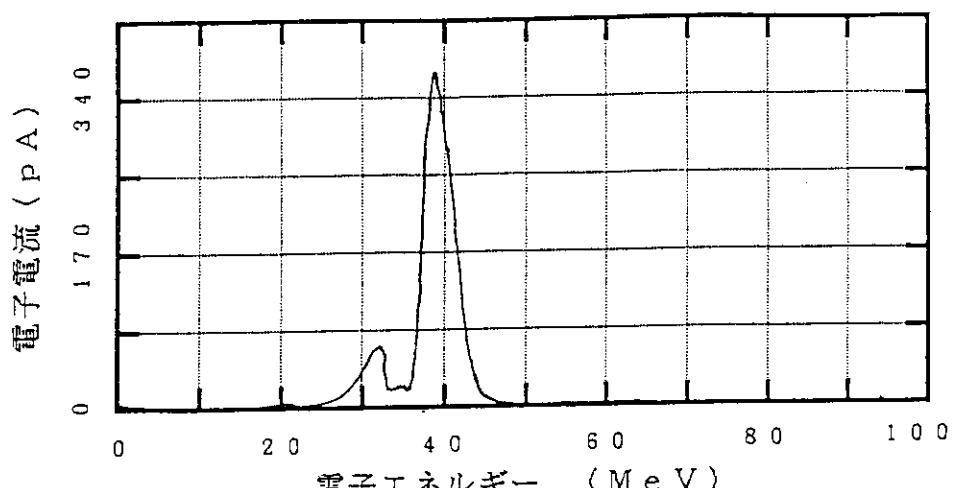
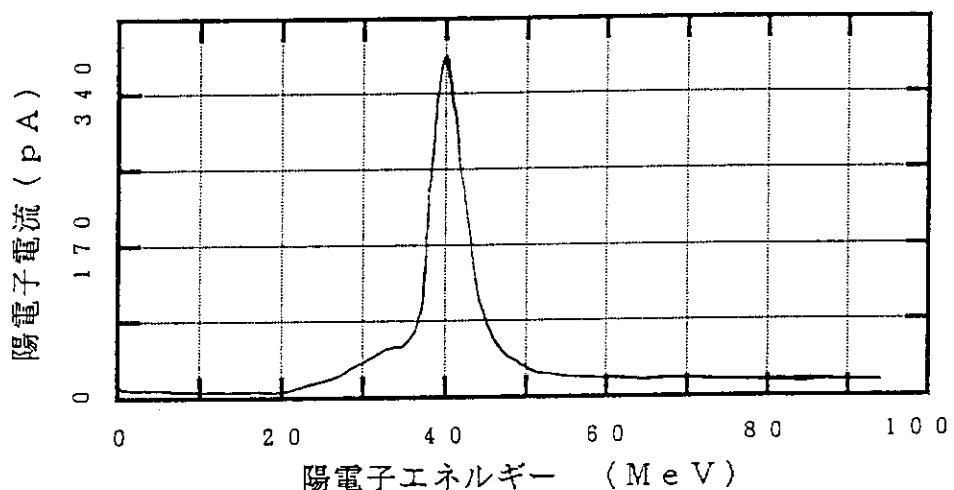


図 4-1 原研リニアックからの電子ビームスペクトル



(a) 対生成電子



(b) 陽電子

図 4 - 2 陽電子・および対生成電子のスペクトル

表 4 - 1

入射電子エネルギー	約 90 MeV
入射電子電流（ピーク平均値）	122.5 nA
発生陽電子電流（ピーク平均電流）	374.0 pA
対生成電子電流（ピーク平均電流）	365.5 pA
陽電子エネルギーゲイン	33.1 MeV
パルスソレノイドコイル励磁電流	4.2 kA
D C 1 コイル励磁電流	150 A
D C 2 コイル励磁電流	100 A
加速管入力 R F の e^+ と e^- の場合の位相差	182°

4. 2 パラメータサーチ実験

以下に、パラメータサーチ実験の結果について述べ、また、その結果をシミュレーションと比較する。ここでいう実験、およびシミュレーションは、21頁から43頁に掲載しているものを指している。

実験でのパラメータについては、本文中、および各データのグラフ中で示している。

シミュレーションでのパラメータのうち、入射ビーム、およびターゲットのパラメータに関しては全シミュレーションで一定である。この値は 3. 2 項で示してある。また、集束系での 4 つの可変パラメータ（パルスソレノイドコイル励磁電流、D C 1 コイル励磁電流、D C 2 コイル励磁電流、陽電子エネルギーゲイン）に関しては、全て、実験パラメータと同一である。

シミュレーションは、3. 2 項で示したようにモンテカルロ法を用いたものであり、結果は集束系を通過できた陽電子の個数で表される。これに対し、実験では陽電子の観測をスペクトロメーターで行うため、エネルギーが高い場所ほど観測されるエネルギー幅が広がる。したがって、スペクトルの形状などの定性的な比較のために、以下に示すシミュレーションのエネルギースペクトルも、エネルギーに対応した重み付けを行い、データを補正している。そのため、異なるパラメータを用いて得たデータ（グラフ）同士による変換効率の相対比較はできるが、絶対値については分からぬ。変換効率については、別の観点から 4. 3 項で述べる。

なお、4. 1. 1 項で述べた原研リニアックのビームスペクトル、および加速エネルギーは、共に実験日が違うと再現できているとはいえない。また、加速エネルギーについては日によって ± 2 MeV 程度の誤差がある。したがって、以下に示す実験は、テーマごとに 1 日の内に完結するように配慮した。

4. 2. 1 パラメータサーチ 1 - 陽電子のエネルギーゲインの変化

パラメータサーチ実験として、まず、図 4 - 3 に、集束系内加速管での陽電子エネルギーゲインをパラメータとして変化させた場合の陽電子スペクトル、およ

びそれに対応するシミュレーション結果を示す。このときの磁場強度および磁場分布は、図3-1と同じである。

エネルギーゲインは、3通りの実験ごとに4. 1. 1項の方法で測定すべきであるが、時間がかかり原研ライナックからのビームの質が変わってしまう恐れがある。そこで、モジュレータのPFN充電電圧よりエネルギーゲインを推定した。モジュレータのPFN充電電圧はそれぞれ38kV, 40kV, 41kVであるが、41kVの時のエネルギーゲインを4. 1. 1項に示す方法で測定しておき、残りの2点は、あらかじめPFN充電電圧と加速管入り口でのRFエネルギーの対応を測定しておいて、外挿した。

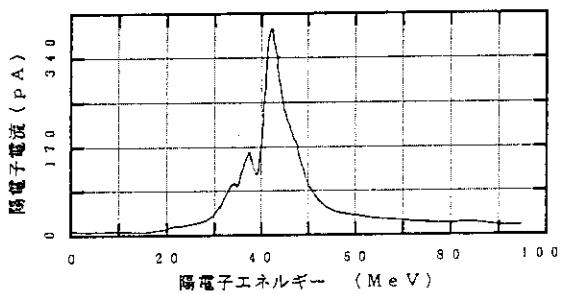
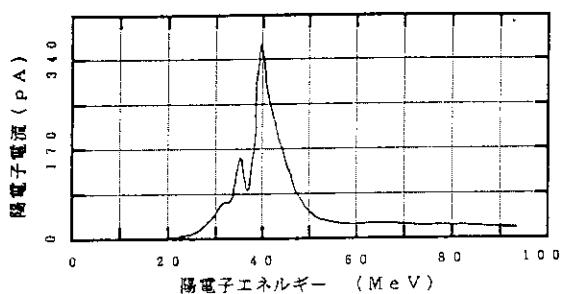
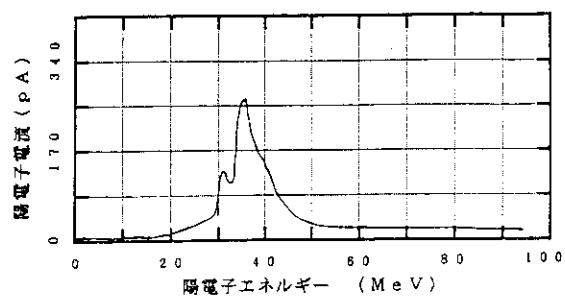
実験でのパラメータを表4-2に示す。

実験、シミュレーションとも、エネルギーゲインが大きいときほど得られる陽電子が多いことで共通している。これは、JAERI-M 93-030に記述したシミュレーション結果、一すなわち磁場中での加速には最適なエネルギーゲインが存在することと矛盾する。これは、今回の陽電子発生試験装置ではソレノイドコイルの数が少なくて、加速管を覆っていないことに起因するものと考えられる。磁場中の加速ではなく、単に加速しただけと考えれば良い。

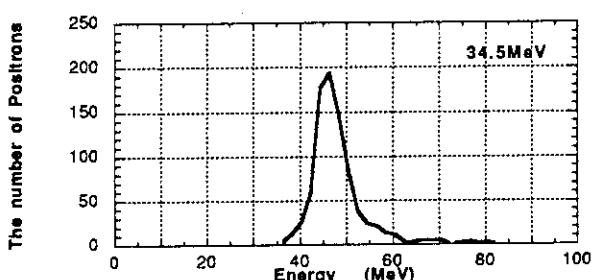
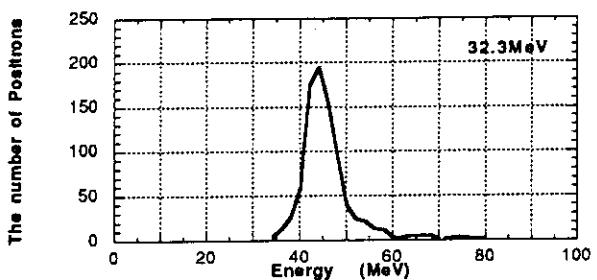
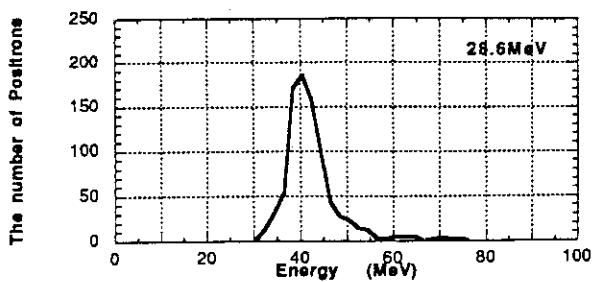
全体に、スペクトルの形については、実験データの低エネルギー側に小さなピークがあるのを除いて良く一致している。後にも述べるが、この小さなピークは、別の日に行った実験では再現されていない。スペクトル中、大きなピークの位置は、実験とシミュレーションでは少しずれており、実験データのピークの方がエネルギー的に高い。これは、シミュレーションの影響ではなく、エネルギーゲイン測定ミス、若しくはエネルギーゲイン測定から実験までの間に陽電子発生試験装置の状態が変化したものと考えている。

表4-2

入射電子エネルギー	約90MeV
入射電子電流 (peak, ave.)	162.5nA
陽電子エネルギー	28.6MeV, 32.3MeV, 34.5MeV
パルスソレノイドコイル励磁電流	5.8kA
DC1コイル励磁電流	350A
DC2コイル励磁電流	130A



実験データ



シミュレーションデータ

図4-3 陽電子エネルギースペクトル

(陽電子のエネルギーゲインの変化)

Solenoid Coil Parameter Pulse:5.8kA, DC1:350A, DC2:130A

4. 2. 2 パラメータサーチ 2 - ソレノイドコイル励磁電流の変化

2番目のパラメータサーチ実験として、陽電子のエネルギーゲインは一定(33.1MeV)とし、3つのソレノイドコイルの励磁電流をパラメータとして変化させた場合の結果を示す。実験は、3つのソレノイドコイルの励磁電流を表4-3の様に変化させ、全ての組み合わせ、36通りを実験し、各々についてシミュレーションを行った。この実験時のターゲットへの入射ビームは4. 1. 1項で示したものである。

表4-3 ソレノイドコイルの励磁電流

パルスソレノイドコイル	: 5. 8 kA, 4. 0 kA, 2. 0 kA, 0 A
D C 1 コイル	: 350 A, 200 A, 0 A
D C 2 コイル	: 130 A, 50 A, 0 A

以下、25頁から43頁に示す、パラメータサーチ2のデータは、左から実験結果、シミュレーション結果、およびそのときの集束系の磁場分布である。

まず、1つ1つのソレノイドコイルの効果を見るために、以下の様なデータを示す。

- 図4-4 : Pulse:variable, DC1:350A, DC2:130A の場合
- 図4-5 : Pulse:5.8kA, DC1:variable, DC2:130A の場合
- 図4-6 : Pulse:5.8kA, DC1:350A, DC2:variable の場合
- 図4-7 : Pulse:variable, DC1: 0A, DC2: 0A の場合
- 図4-8 : Pulse:0kA, DC1:variable, DC2: 0A の場合
- 図4-9 : Pulse:0kA, DC1: 0A, DC2:variable の場合

図4-4～図4-6までは、実験とシミュレーションが比較的一致しているが、図4-7～図4-9までは一致がみられない。ここで、図4-4～図4-6をAグループ、図4-7～図4-9をBグループとする。

Aグループでの内でも、図4-5については一致の程度が悪い。図4-5中の3つのグラフの変化がD C 1 コイルだけの原因によるものとすれば、D C 1 コイルのコイル形状、位置などによる実際の磁場分布が、シミュレーションで計算した磁場分布と一致していないことが考えられる。これに対し、図4-4、および図4-6はたいへん良く一致している。

実験でもシミュレーションでも、スペクトルのピークは複数存在し、その位置、数ともに一致している。図4-4、図4-5、図4-6各グラフの中で、それぞれにピークの変化のしかたが違う。これは、ピークの変化の様子が、それぞれのソレノイドコイルに対応していることを示しており、それぞれのソレノイドコイルに対応したピークがあるものと考えられる。

図4-4では、位置、大きさ共に変化している。これに対して、図4-5、図4-6では、ピークの大きさは変化するものの、ピークの位置は変化していない。これは、パルスソレノイドコイルの励磁電流を変化させたときのみピークの

位置が変わる、すなわちパルスソレノイドコイルにはエネルギー選択機能があるという、シミュレーション結果（JAERI-M 93-030 参照）と一致している。パルスソレノイドコイルだけにエネルギー選択機能があるのは、図3-1に示すように、パルスソレノイドコイルの磁場の r 方向成分がDC1, DC2コイルに比べて極端に大きいためである。すなわち、パルスソレノイドコイルの励磁電流を変化させると磁場の r 方向成分も大きく変わるためエネルギー選択機能を持つが、DC1, DC2コイルでは r 方向成分がほとんど変わらず、パルスソレノイドコイルも含めたもともとの幾何学的形状のみでエネルギーアクセプタンスが決まっているためだと考えられる。

図4-4の実験とシミュレーションの結果を見ると、パルスソレノイドコイルの励磁電流を大きくしてゆくにつれて、低エネルギー側のピークが徐々に高エネルギー側に移動してゆき、5.8 kA励磁したところでDC2に起因するのではないかと思われるピークと一致し、集束系全体として収量が上がっている様子が分かる。このように、1つ1つのコイルに起因するピークを一致させるように集束系を設計することが重要であると考えられる。

Bグループは、1つ1つのコイルの効果を正確に観測する事を目的として行った実験であるが、シミュレーションと実験とで一致しているとは考えにくいデータである。これは、磁場の強度が弱いために得られる陽電子の数が少なくなり、モンテカルロシミュレーションとしての精度が信頼できなくなってくる為だと考えている。例えば、Aグループに入る図4-4最下段において、シミュレーションではターゲットへの入射電子数1,026,000個のうち、得られた陽電子数は785個である。これに対し、Bグループの図4-9最下段では、（Bグループの内では多く得られている方であるが）得られた陽電子数は86個であり、図4-4での場合より1桁少なくなっている。

精度を上げるために、入射電子数を10倍に増やせば良いのであるが、計算時間が10倍かかる。EGS4の計算では、入射電子約100万個で計算した場合現在用いているワークステーションHP9000で460分程かかる。入射電子を10倍に増やすと、単純に計算すれば76時間かかる。また、この結果をビームトラッキングコードに入力すると、1つのパラメータの場合を計算するのに、同じワークステーションを用いて120分程の計算時間を要するので、1ケースにつき20時間を消費することになる。したがって、今回は入射電子数1,026,000個でのシミュレーションのみを行った。

図4-9最上段は磁場を加えずに33.1MeVの加速をしたものである。この実験結果と、EGS4のシミュレーション結果、すなわちターゲット出口での陽電子スペクトルの比較を図4-10に示す。このシミュレーションデータは、ターゲット表面上の陽電子スペクトル分布そのものであるが、実験データと比較の為に各陽電子のエネルギーに33.1MeVを加えている。直接比較できるものではないとしても形状としては良く一致しており、シミュレーションの精度を上げることによってBグループでも実験と一致することが想像できる。

なお、図4-4のパルスソレノイドの励磁が5.8kAの場合は、ほぼ、図4-3の

32.3 MeV 加速の場合に対応する。全体的な形状は一致しているが、図 4-4 の場合ではスペクトルの低エネルギー側のピークが現れておらず、同じ条件で測定したつもりでも日によって違う結果が得られている。この理由は特定できないが、今回のパラメータとして特に再現性が悪いものとしては、入射ビームのターゲットへの絞りや位置、入射電子エネルギー、およびパルスソレノイドコイルのビーム軸に対する位置などがあり、これらの内のパラメータが若干異なっていたと考えている。

次に、36通りの実験全ての結果を図 4-11～図 4-22 に示す。

- 図 4-11 : Pulse: 5.8 kA, DC1: 350A, DC2=variable の場合
- 図 4-12 : Pulse: 5.8 kA, DC1: 200A, DC2=variable の場合
- 図 4-13 : Pulse: 5.8 kA, DC1: 0A, DC2=variable の場合
- 図 4-14 : Pulse: 4.0 kA, DC1: 350A, DC2=variable の場合
- 図 4-15 : Pulse: 4.0 kA, DC1: 200A, DC2=variable の場合
- 図 4-16 : Pulse: 4.0 kA, DC1: 0A, DC2=variable の場合
- 図 4-17 : Pulse: 2.0 kA, DC1: 350A, DC2=variable の場合
- 図 4-18 : Pulse: 2.0 kA, DC1: 200A, DC2=variable の場合
- 図 4-19 : Pulse: 2.0 kA, DC1: 0A, DC2=variable の場合
- 図 4-20 : Pulse: 0 kA, DC1: 350A, DC2=variable の場合
- 図 4-21 : Pulse: 0 kA, DC1: 200A, DC2=variable の場合
- 図 4-22 : Pulse: 0 kA, DC1: 0A, DC2=variable の場合

まず、全体として、実験でもシミュレーションでもスペクトルにピークが複数有るものと無いものがあり、ピークの数を含むスペクトルの形状については、図 4-19、図 4-22 等の一部例外を除き概略一致している。

ただし、陽電子発生量の変化については、ほぼ一致しているものと一致していないものがある。DC1コイルを350A励磁している図 4-11、図 4-14 等の場合ではほぼ一致しているが、DC1コイルを励磁していない図 4-13、図 4-16 等の場合には一致していない傾向がある。これは、図 4-5 の中で、実験とシミュレーションが一致していないのと同様の効果であると考えられる。

パルスソレノイドコイルの励磁が弱い、図 4-17 から図 4-22 までの場合、パルスソレノイドコイルの励磁が強い場合に比べて、実験の収集効率がシミュレーションから予想されるよりも良い傾向がある。これは、図 4-7～図 4-9 (B グループ) での結果と同様の理由によるものと思われる。

全体に、細部まで実験をシミュレーションで再現することは困難であり、それ故、実験とシミュレーションの一一致の確認、すなわちシミュレーションの妥当性の確認をする事は難しい。しかし、パラメータの変化による形状の変化については、かなりの部分、一致したと考えている。特に実際のオペレーションで予定される磁場強度 (パルスソレノイドコイル: 約 2T, DCコイル: 0.3～0.4T) の範囲内では信頼性の高いデータが得られているため、今回の集束系の形状に於いては、

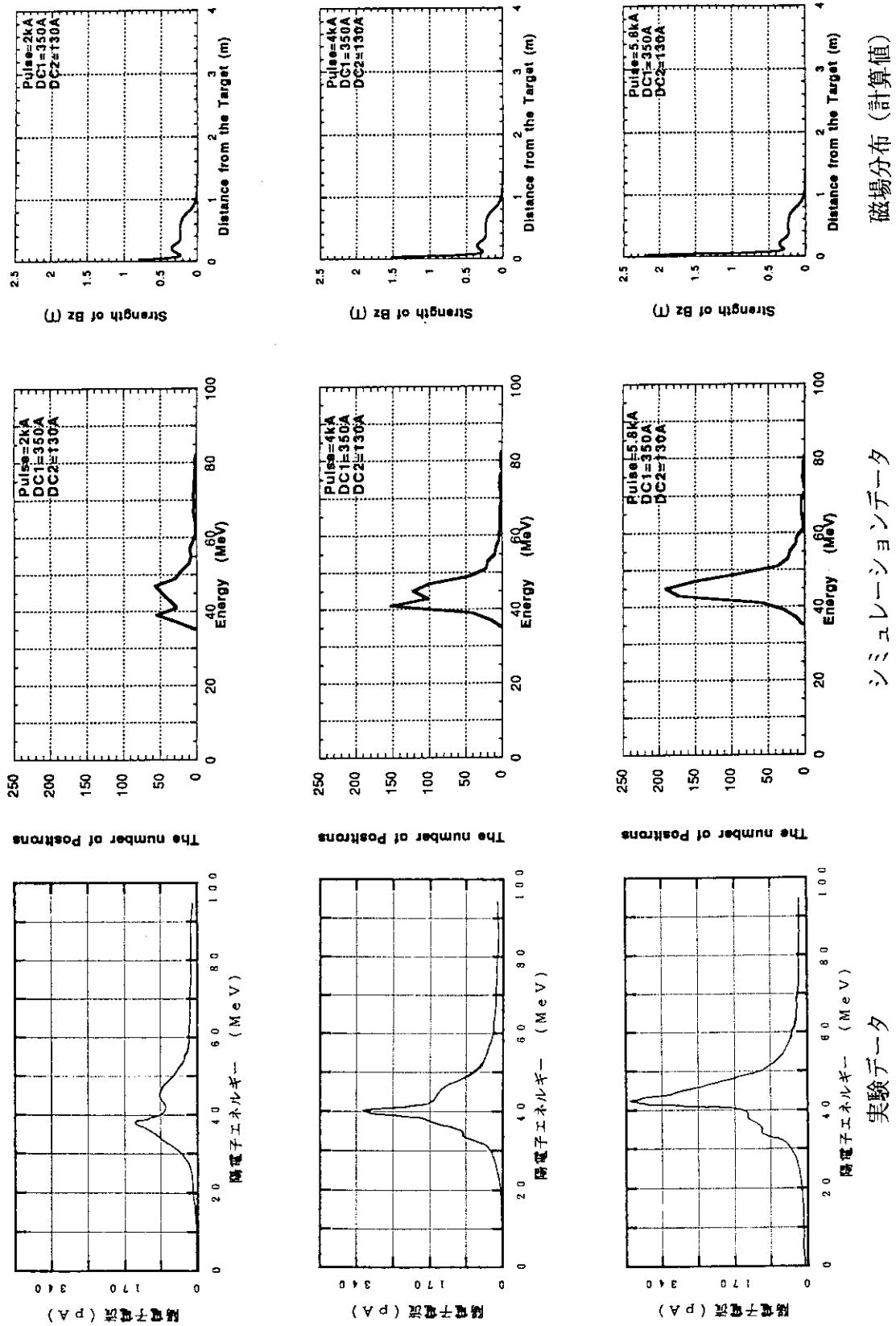
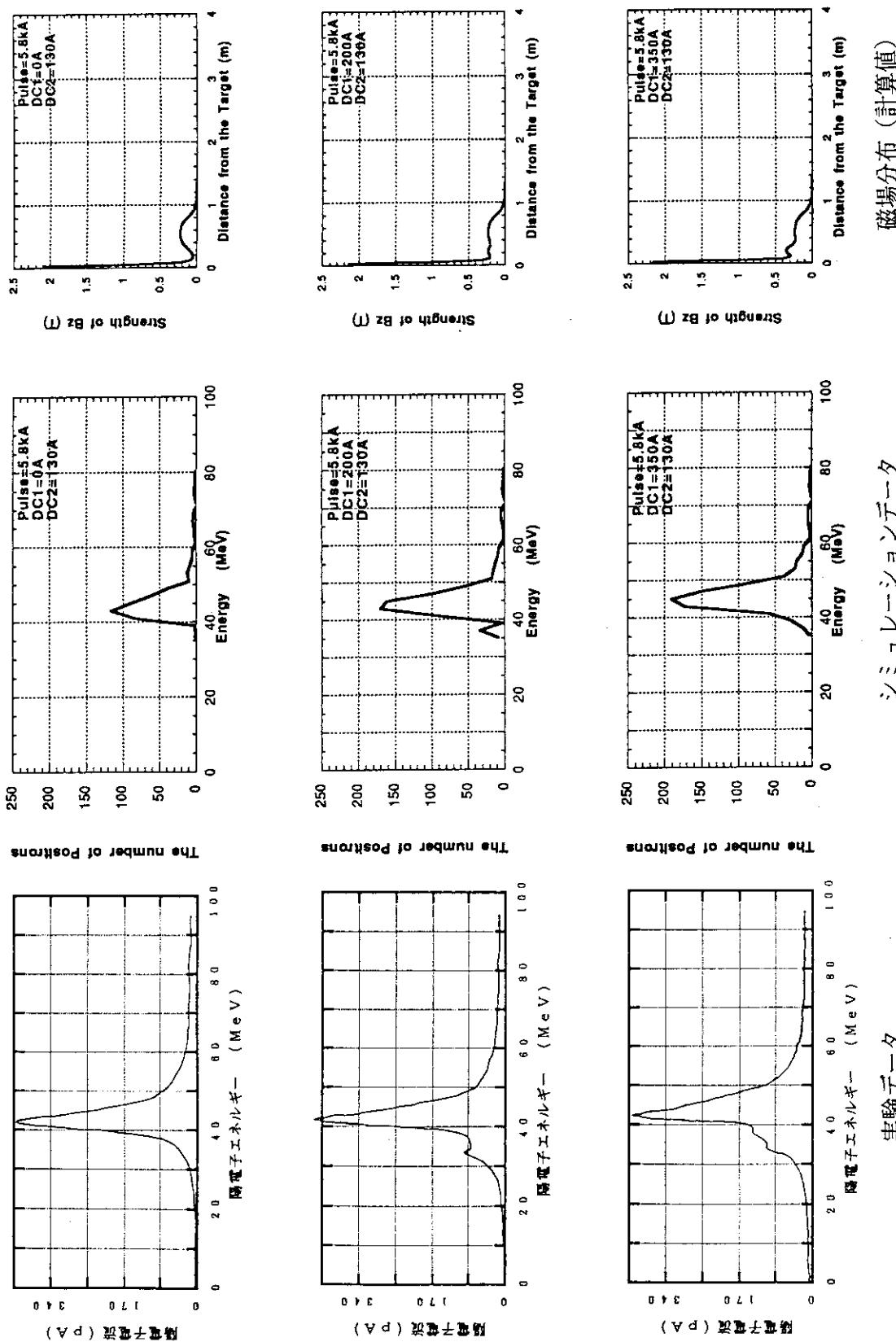


図4-4 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:variable, DC1:350A, DC2:130A

磁場分布 (計算値)

シミュレーションデータ

実験データ

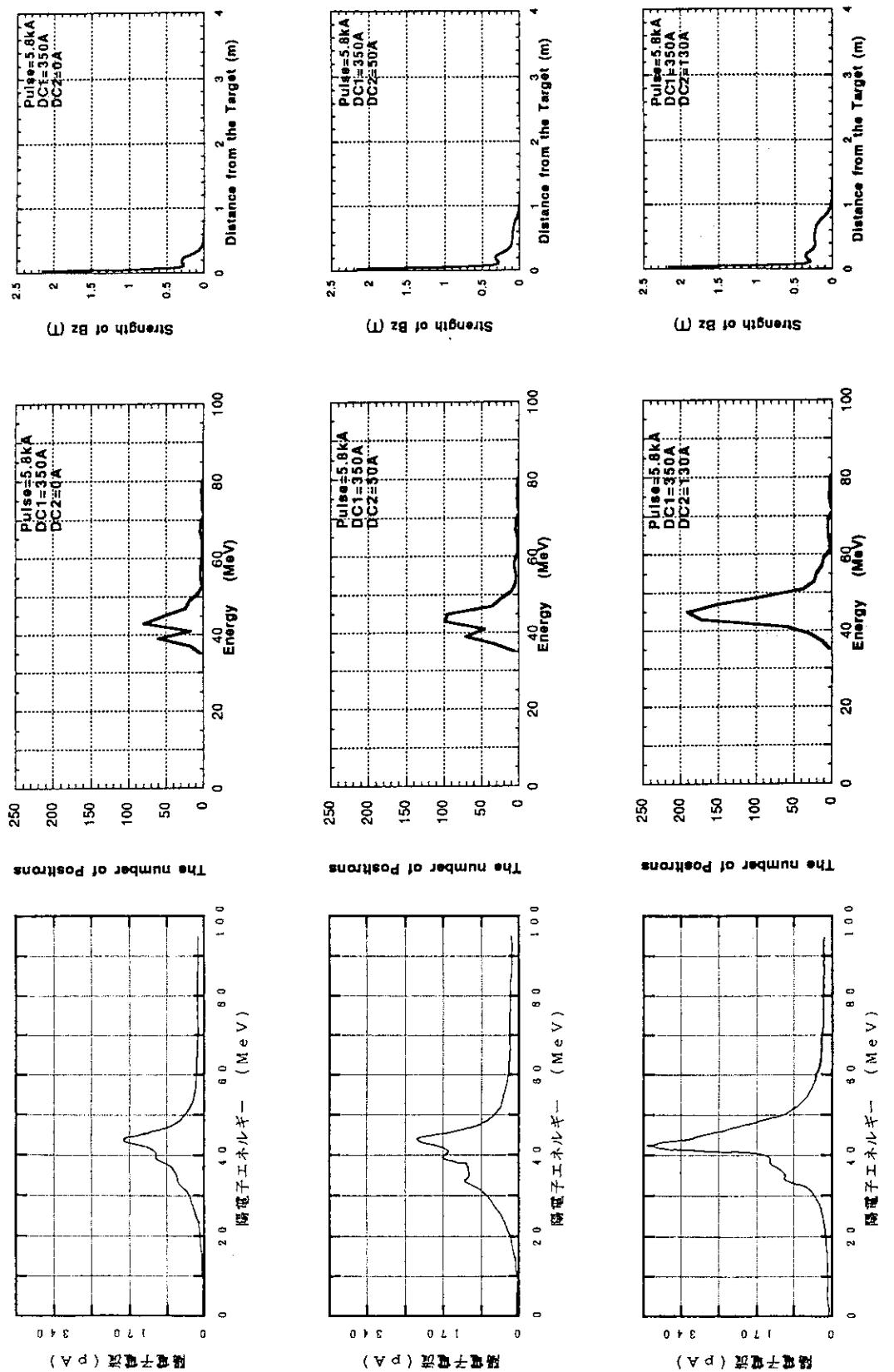


磁場分布(計算値)

シミュレーションデータ

実験データ

図 4-5 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:5.8kA, DC1:variable, DC2:130A



磁場分布（計算値）

シミュレーションデータ

図 4-6 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:5.8kA, DC1:350A, DC2:variable

実験データ

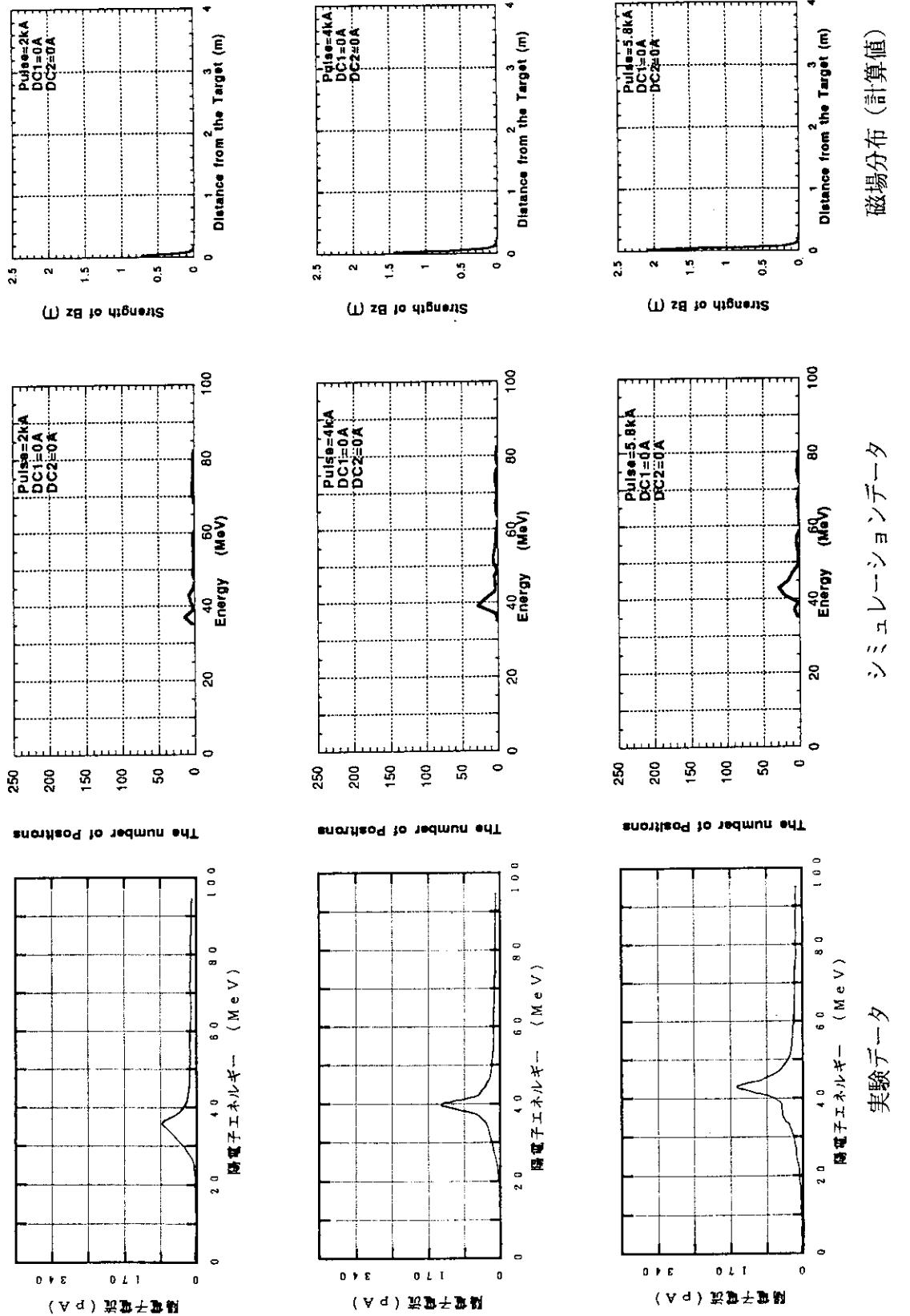


図4-7 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse variable, DC1:0A, DC2:0A

シミュレーションデータ

実験データ

磁場分布 (計算値)

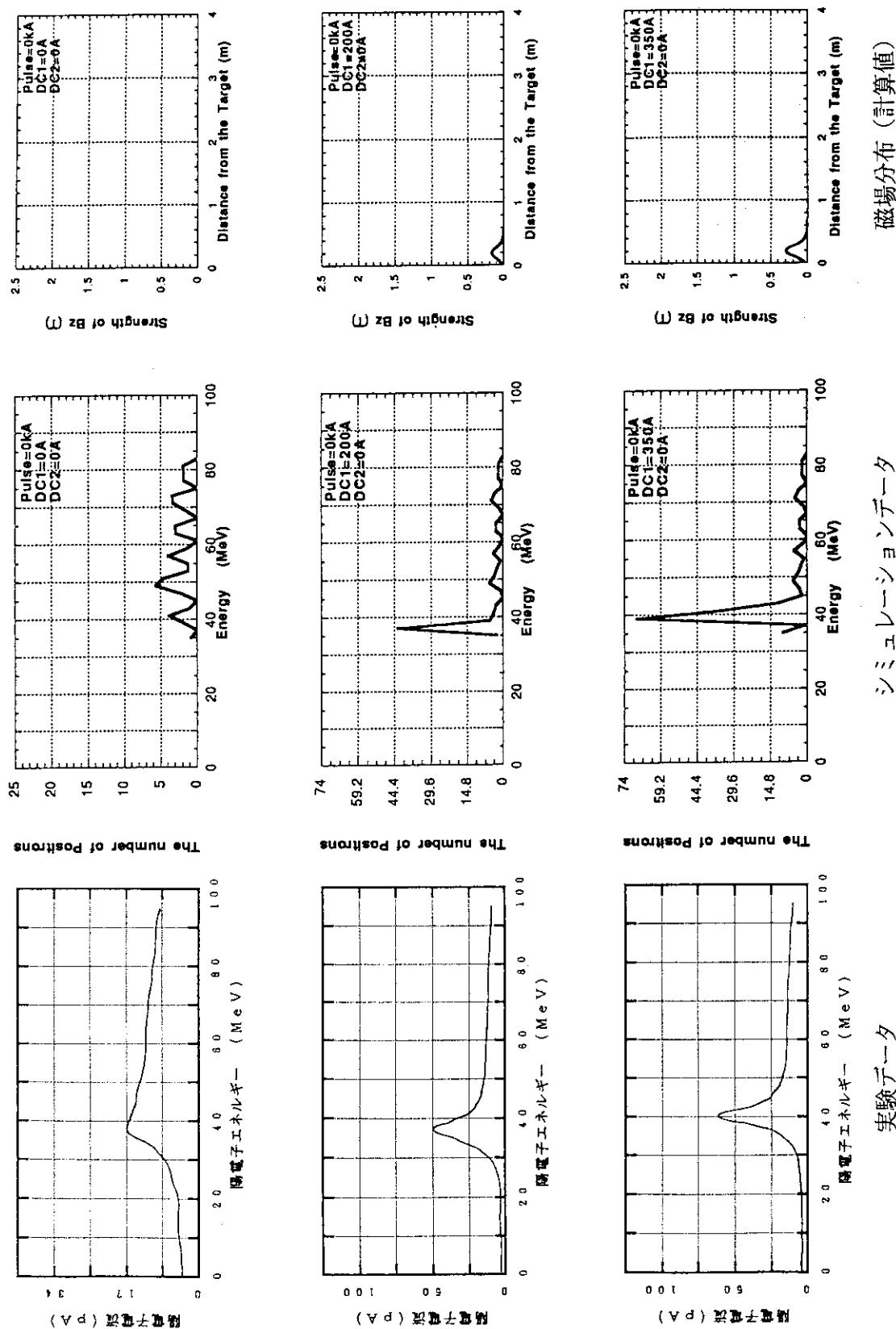


図4-8 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:0kA, DC1:variableA, DC2:0A

シミュレーションデータ

実験データ

磁場分布 (計算値)

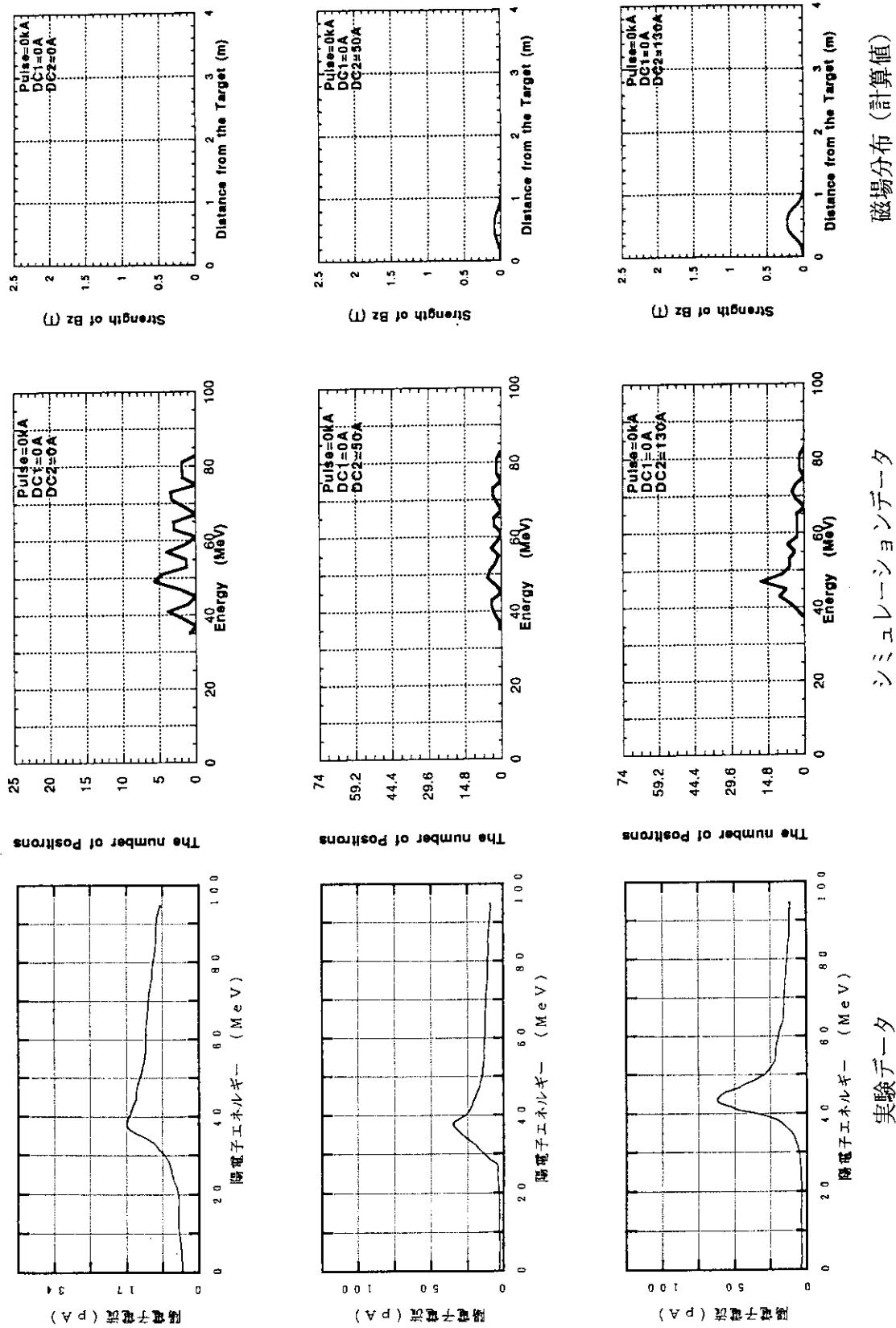
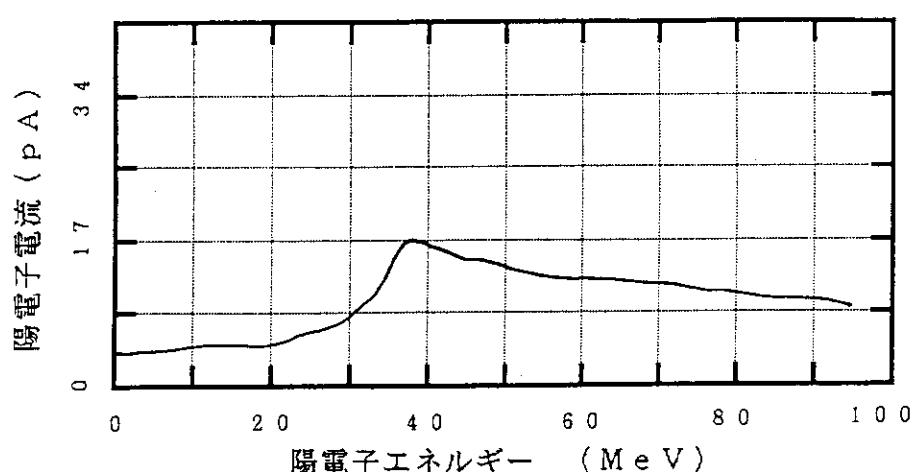


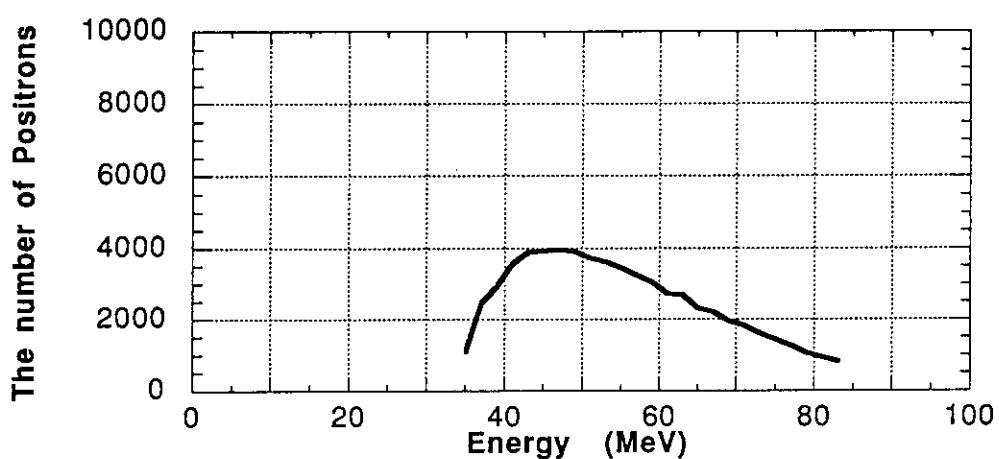
図4-9 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:0kA, DC1:0A, DC2:variable

シミュレーションデータ
実験データ

磁場分布 (計算値)



(a) Pulse=DC1=DC2=0A 33.1MeV加速の場合の
陽電子エネルギースペクトル



(b) EGS4の結果 (ターゲット表面上の陽電子エネルギースペクトル)
(注) 各陽電子に33.1MeVのエネルギーを加算している。

図4-10 磁場をかけない場合の実験結果と、EGS4の結果

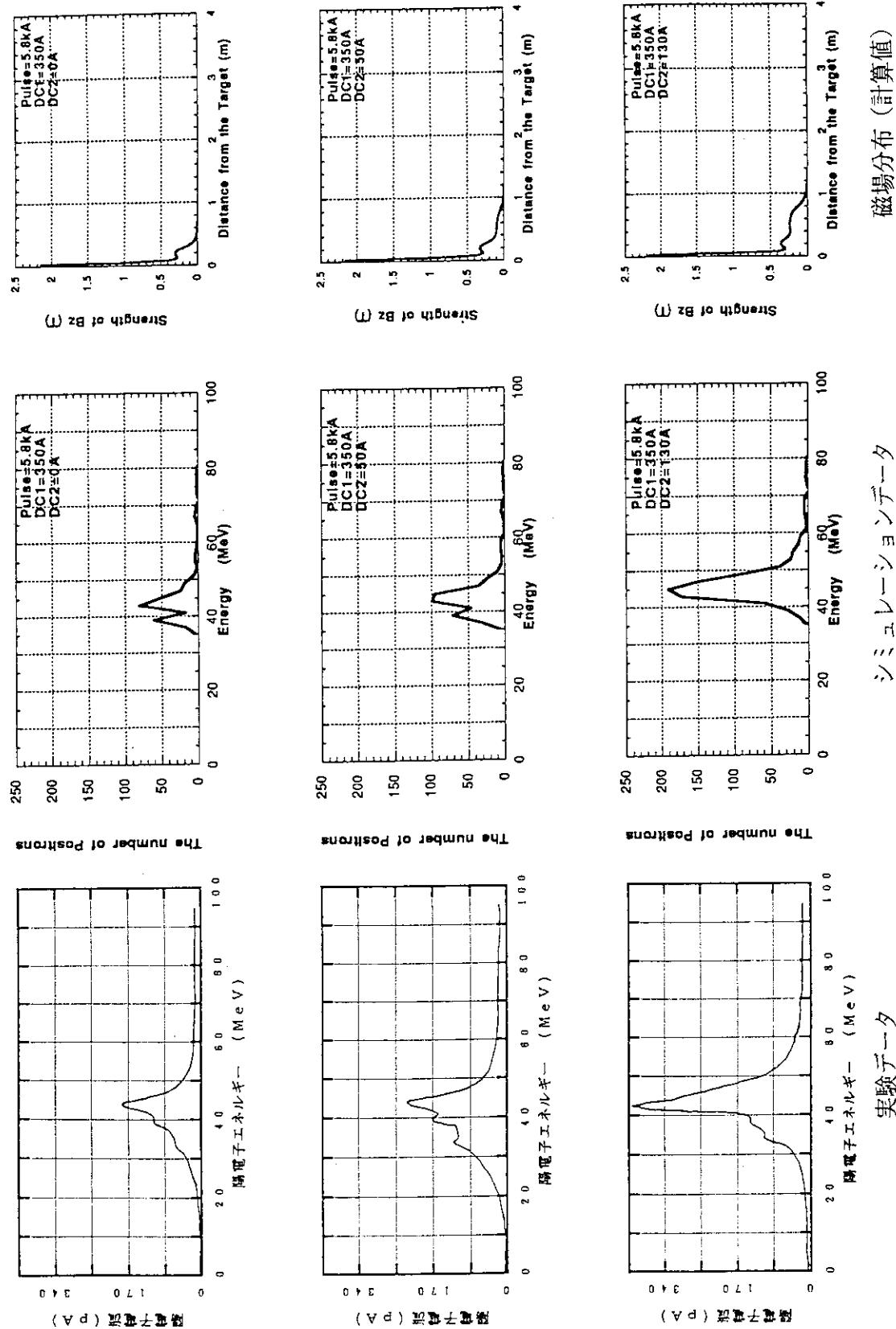
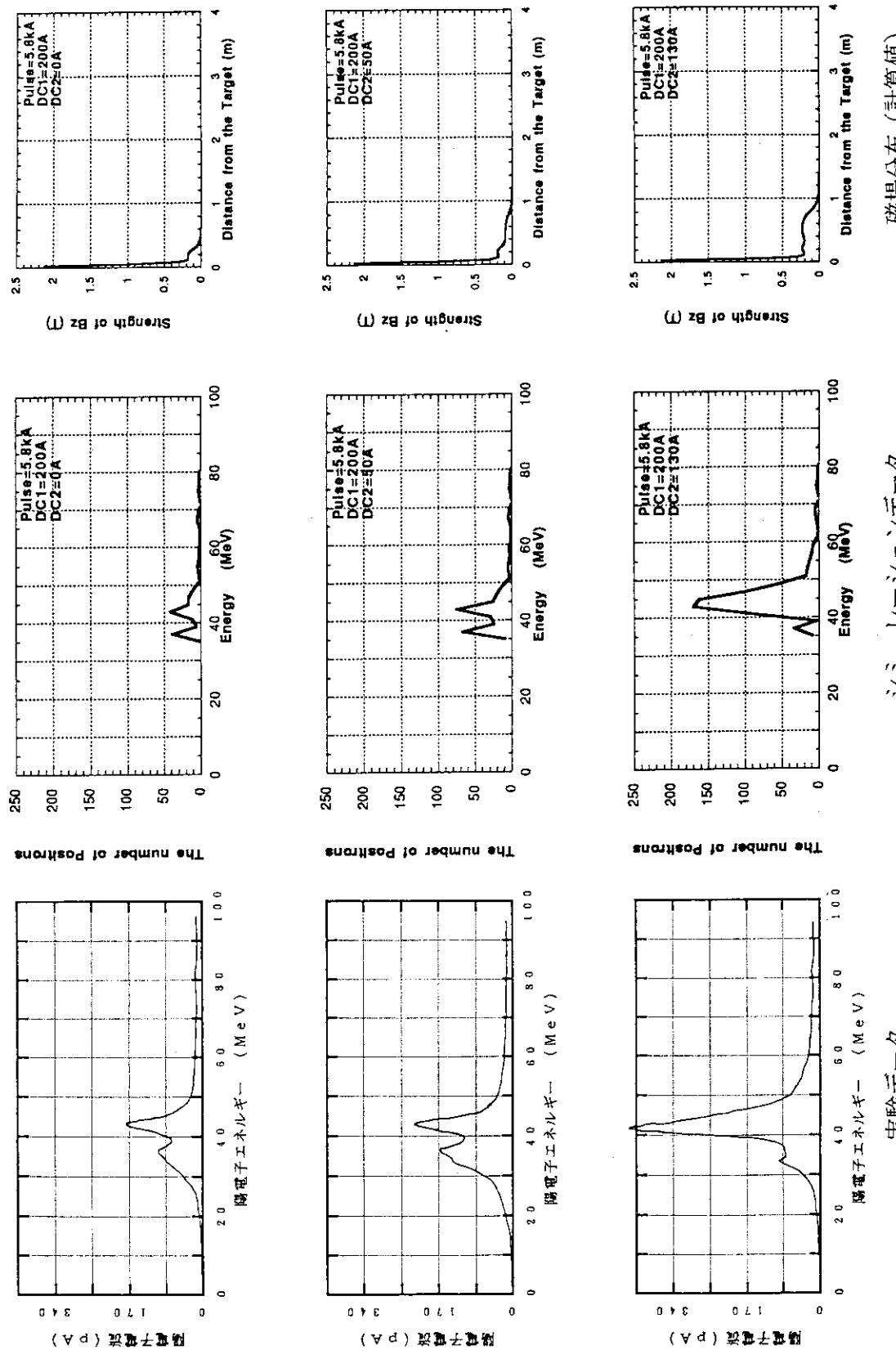


図 4-11 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:5.8kA, DC1:350A, DC2:variable

シミュレーションデータ 実験データ
磁場分布 (計算値)



磁場分布（計算値）

シミュレーションデータ

実験データ

図 4-12 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:5.8kA, DC1:200A, DC2:variable

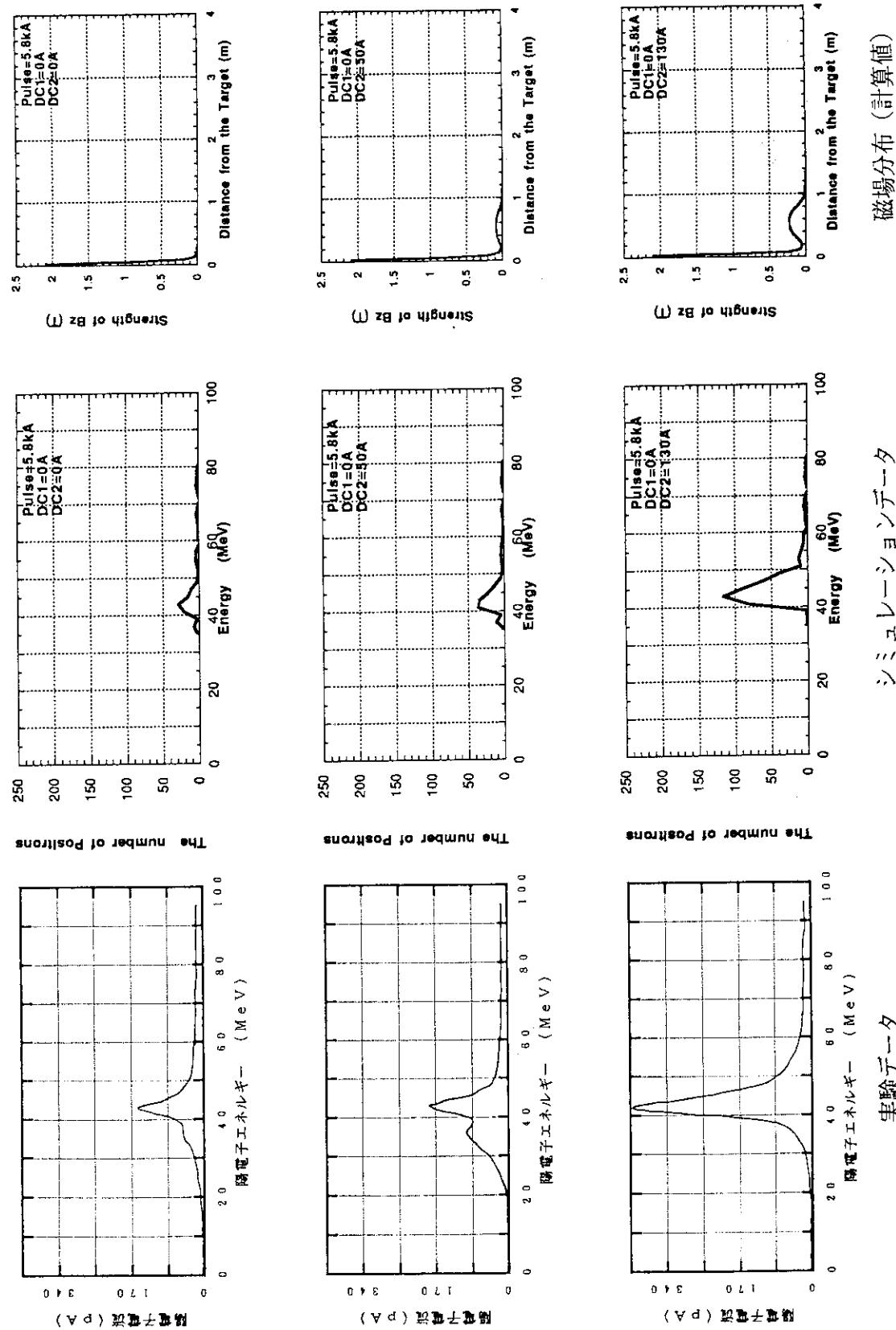
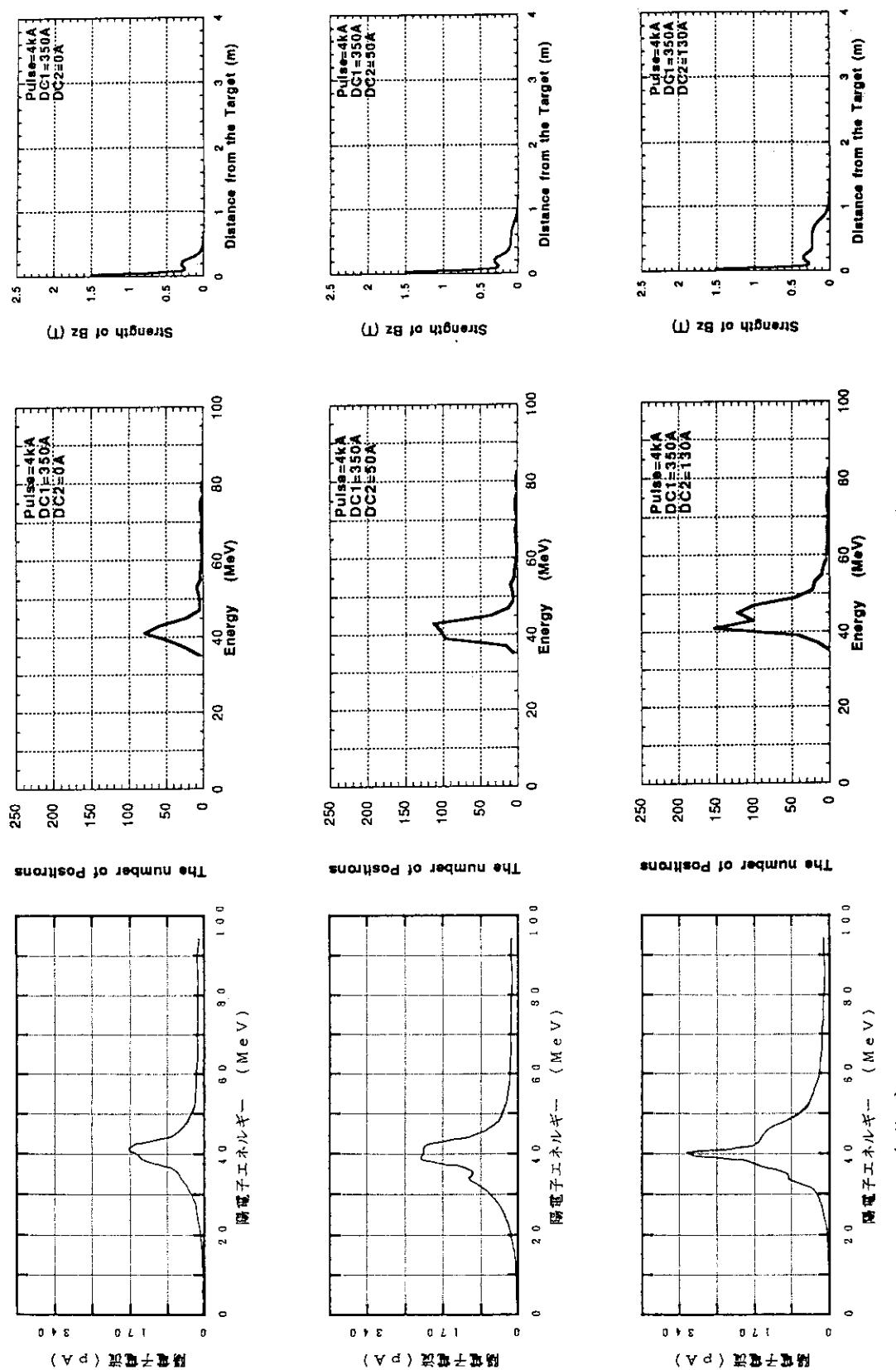


図4-13 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:5.8kA, DC1:0A, DC2:variable

実験データ

シミュレーションデータ

磁場分布(計算値)



磁場分布（計算値）

シミュレーションデータ

実験データ

図4-14 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:4kA, DC1:350A, DC2:variable

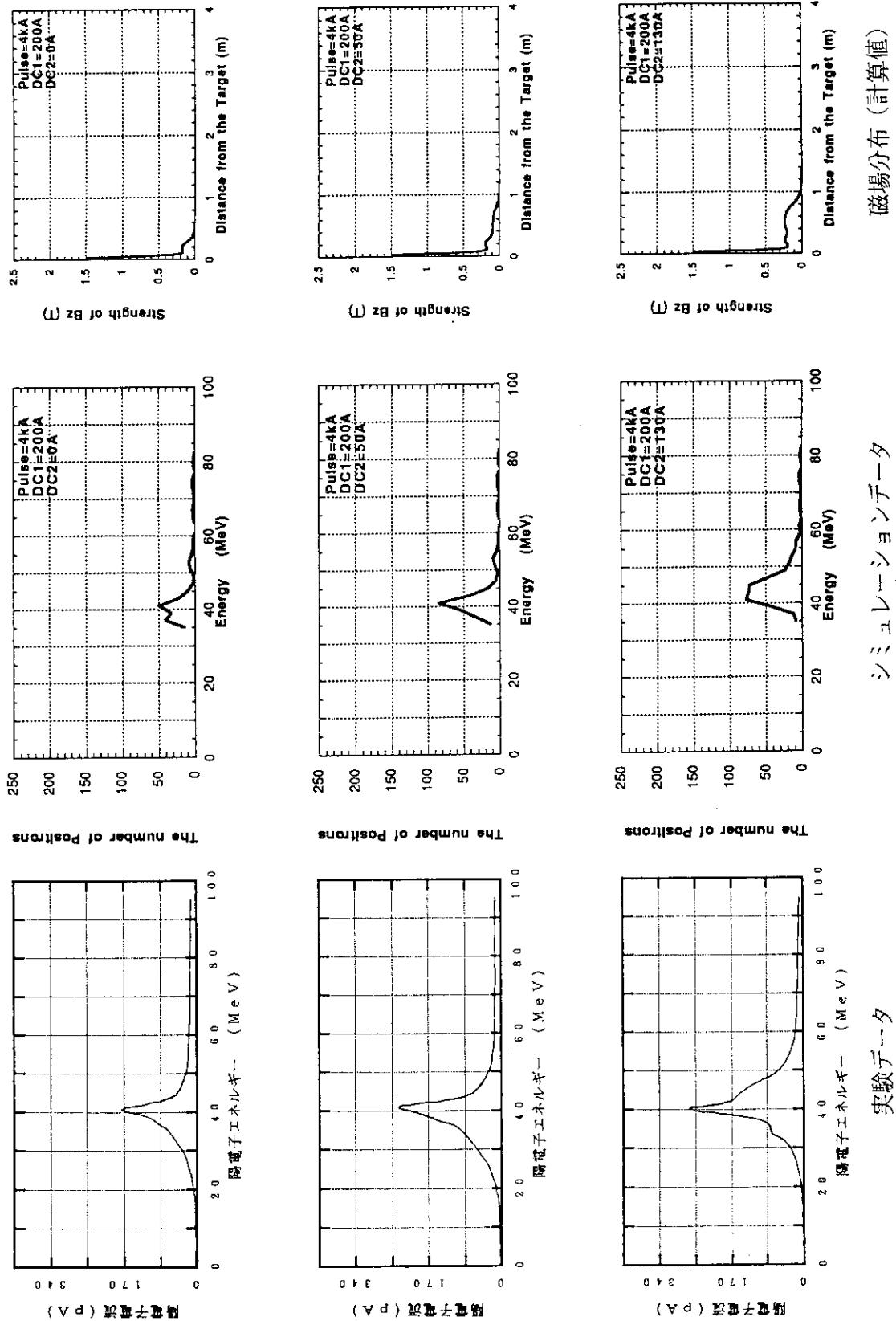
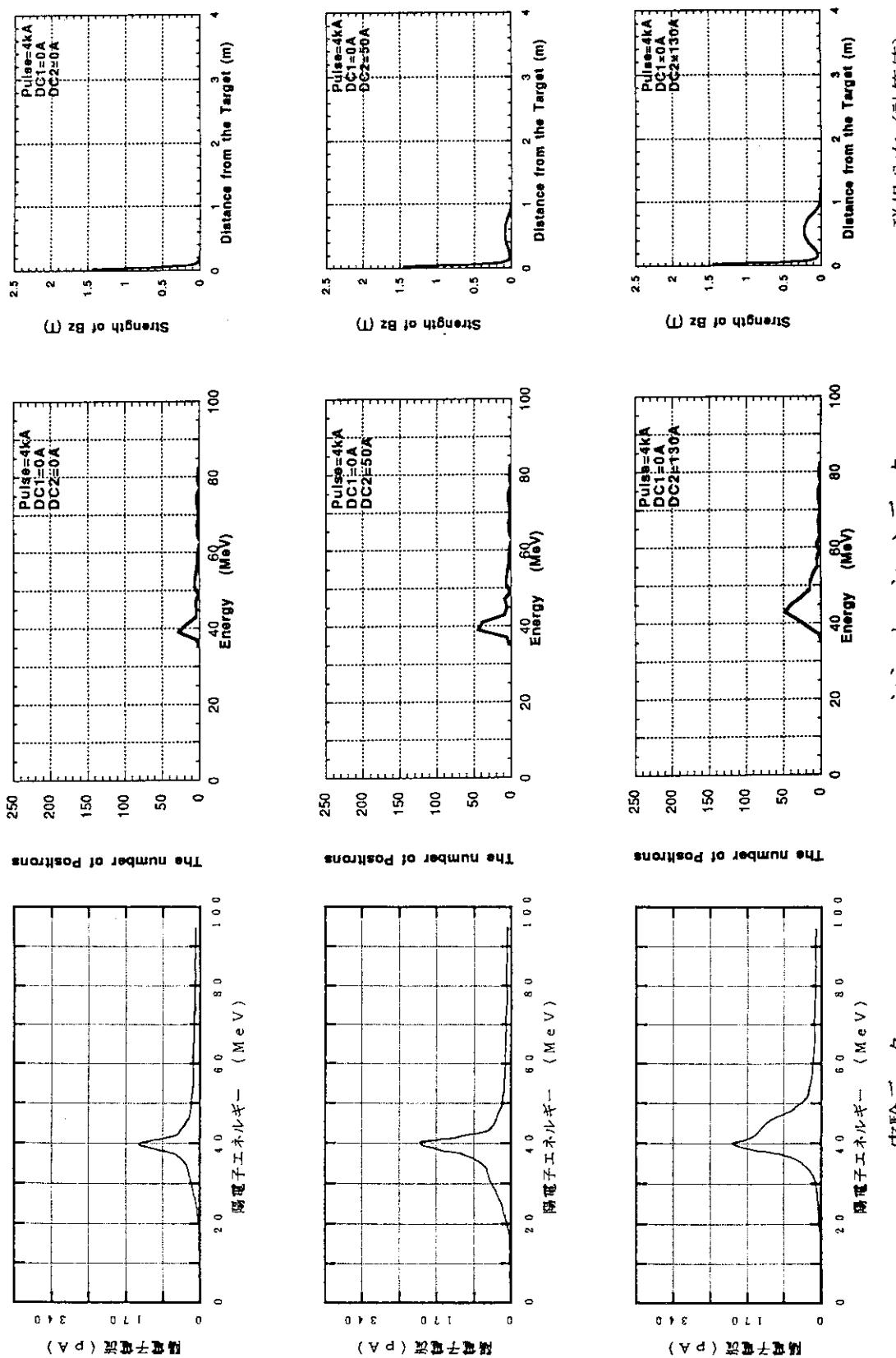


図4-15 陽電子スペクトル (ノブノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:4kA, DC1:200A, DC2:variable

実験データ
ミュレーションデータ

磁場分布 (計算値)



磁場分布（計算値）

シミュレーションデータ

実験データ

図 4-16 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:4kA, DC1:0A, DC2:variable

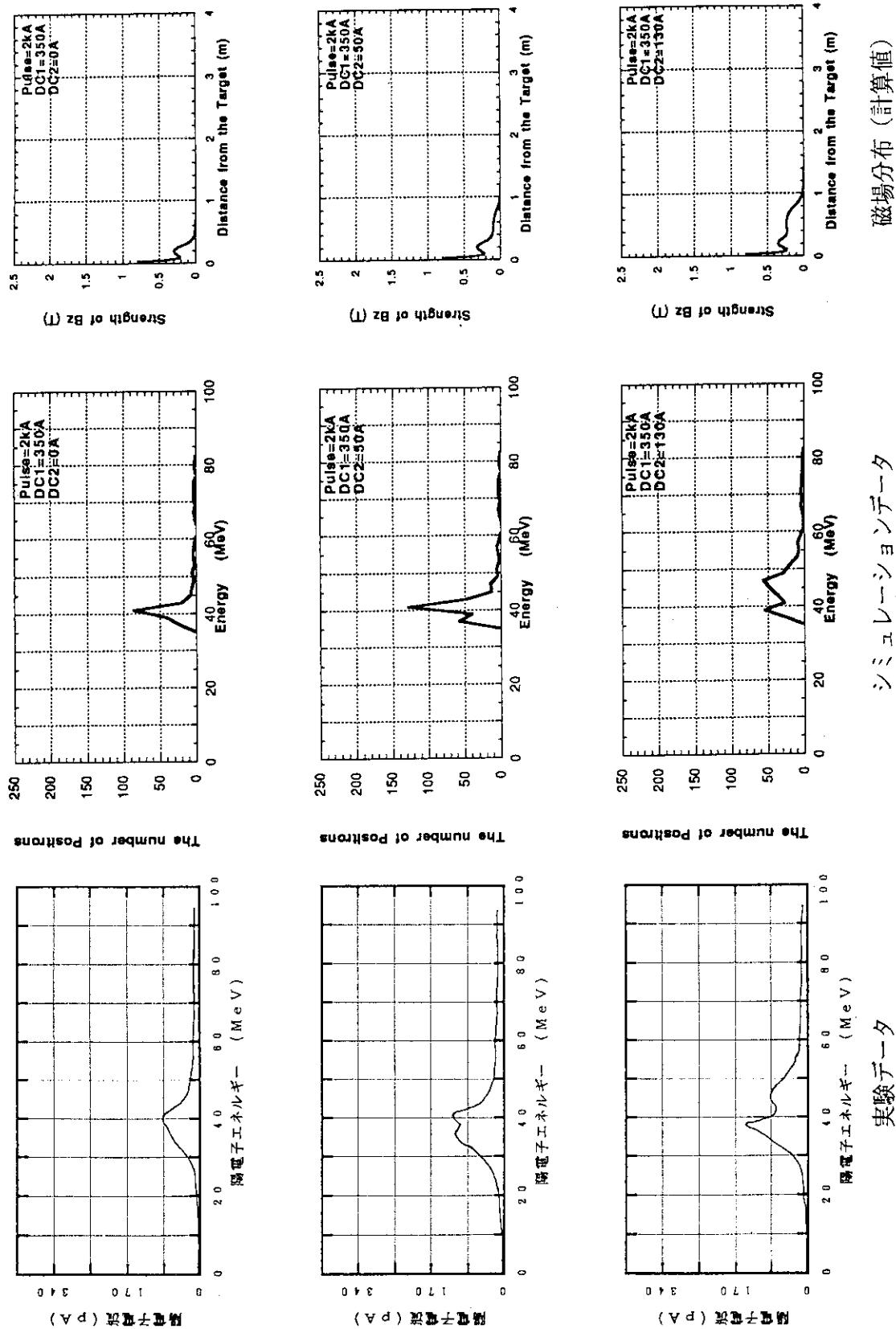
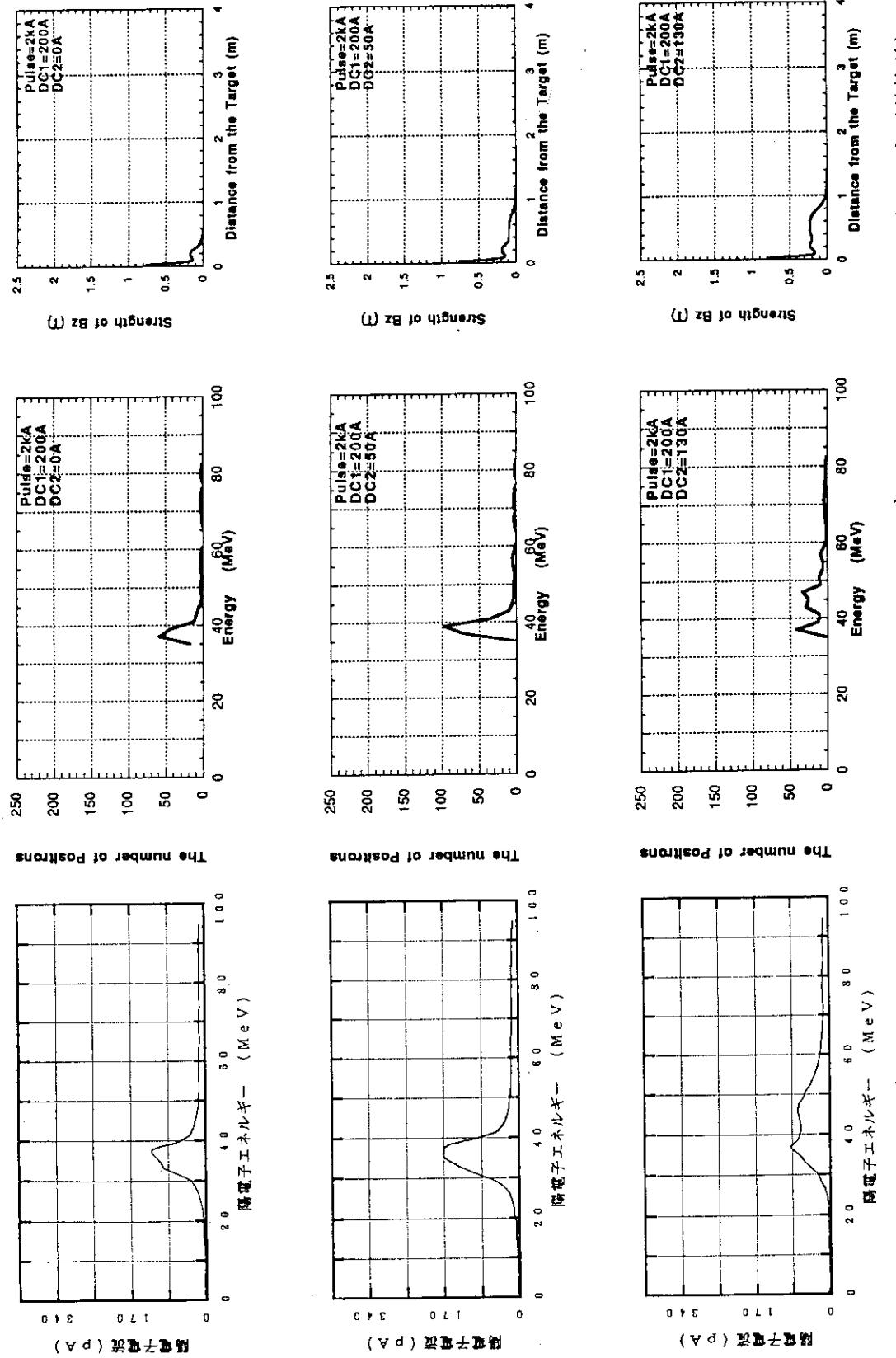


図4-17 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:2kA, DC1:350A, DC2:variable

実験データ
シミュレーションデータ

磁場分布 (計算値)



磁場分布(計算値)

シミュレーションデータ

実験データ

図 4-18 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:2kA, DC1:200A, DC2:variable

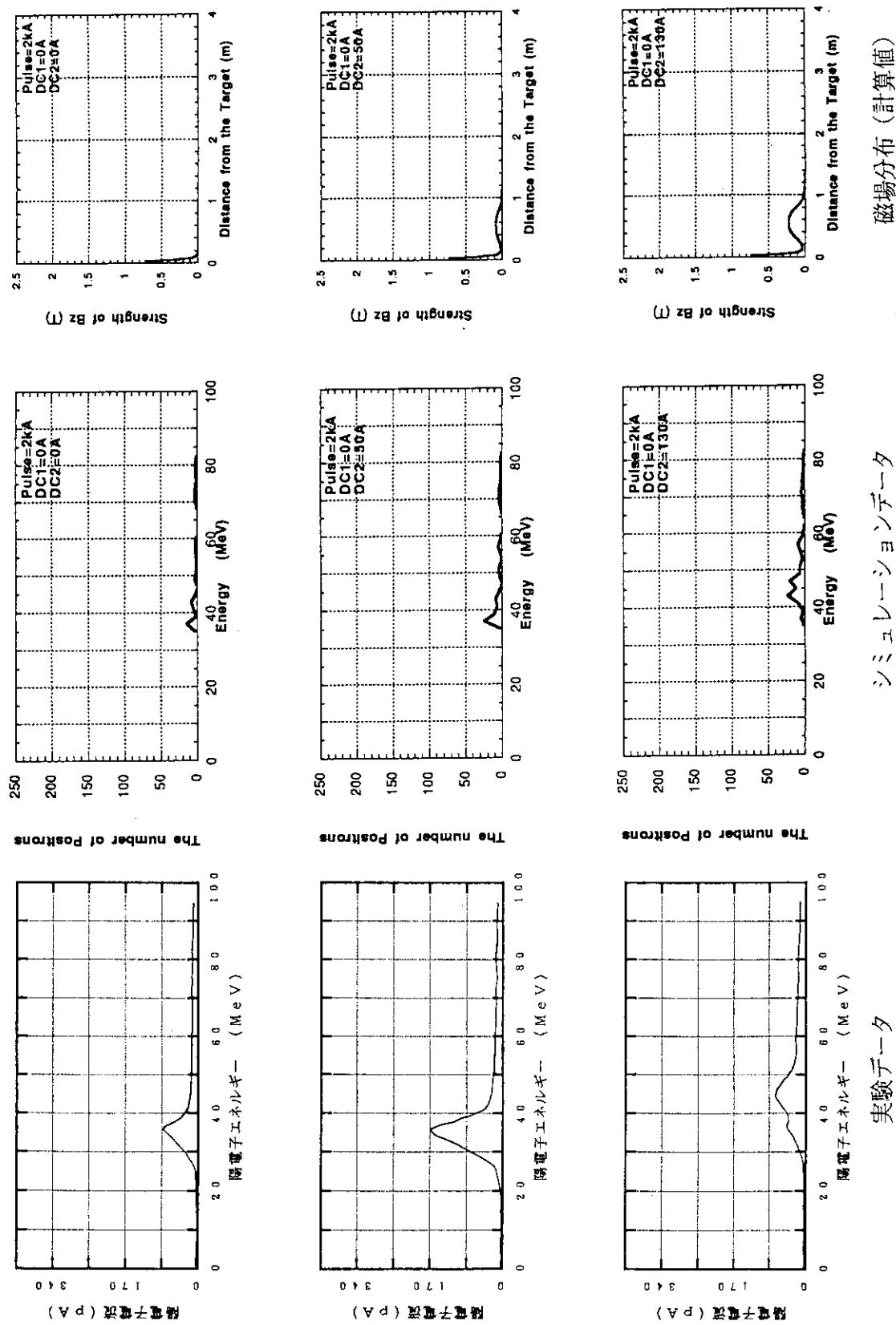


図4-19 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:2kA, DC1:0A, DC2:variable

実験データ シミュレーションデータ
磁場分布(計算値)

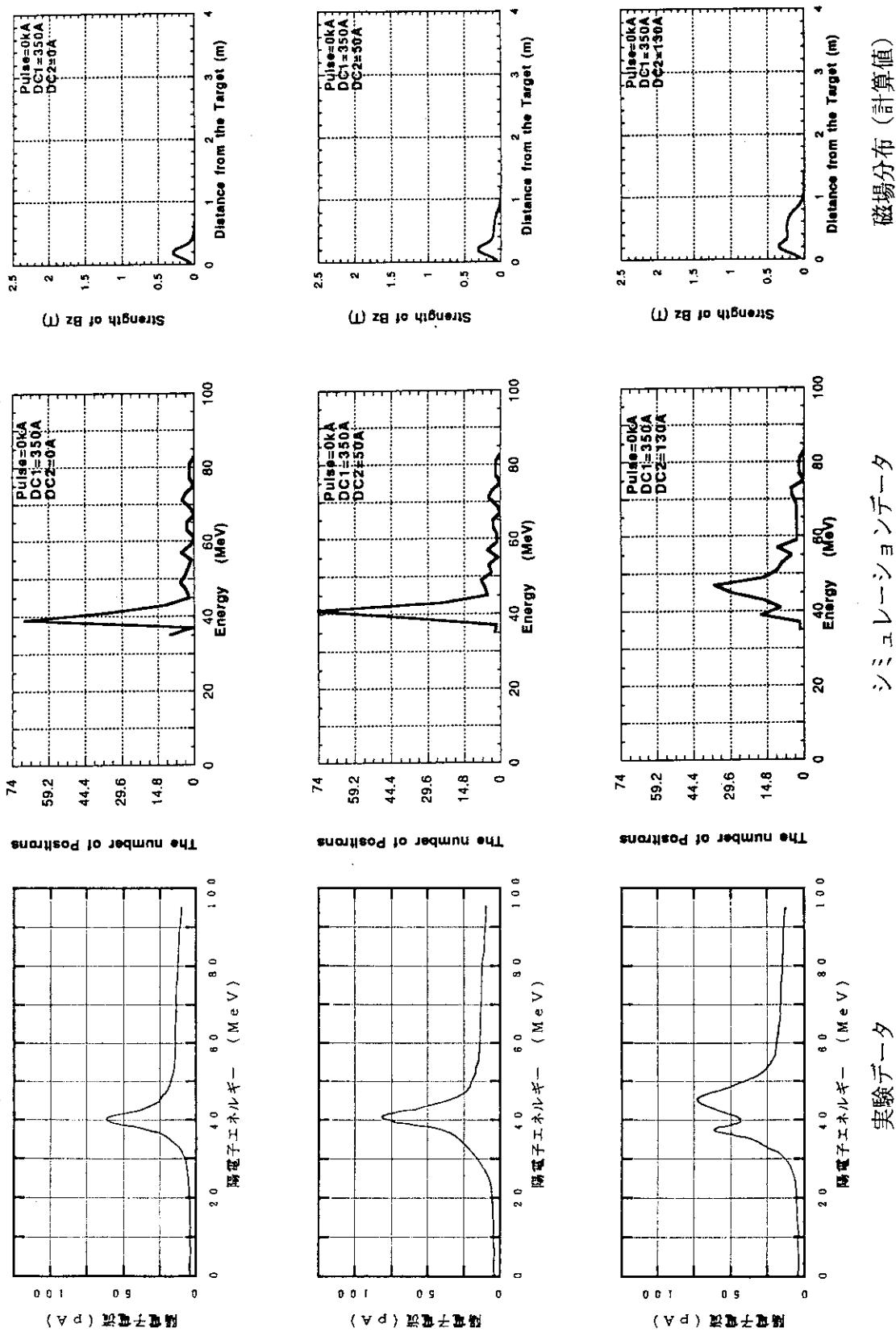
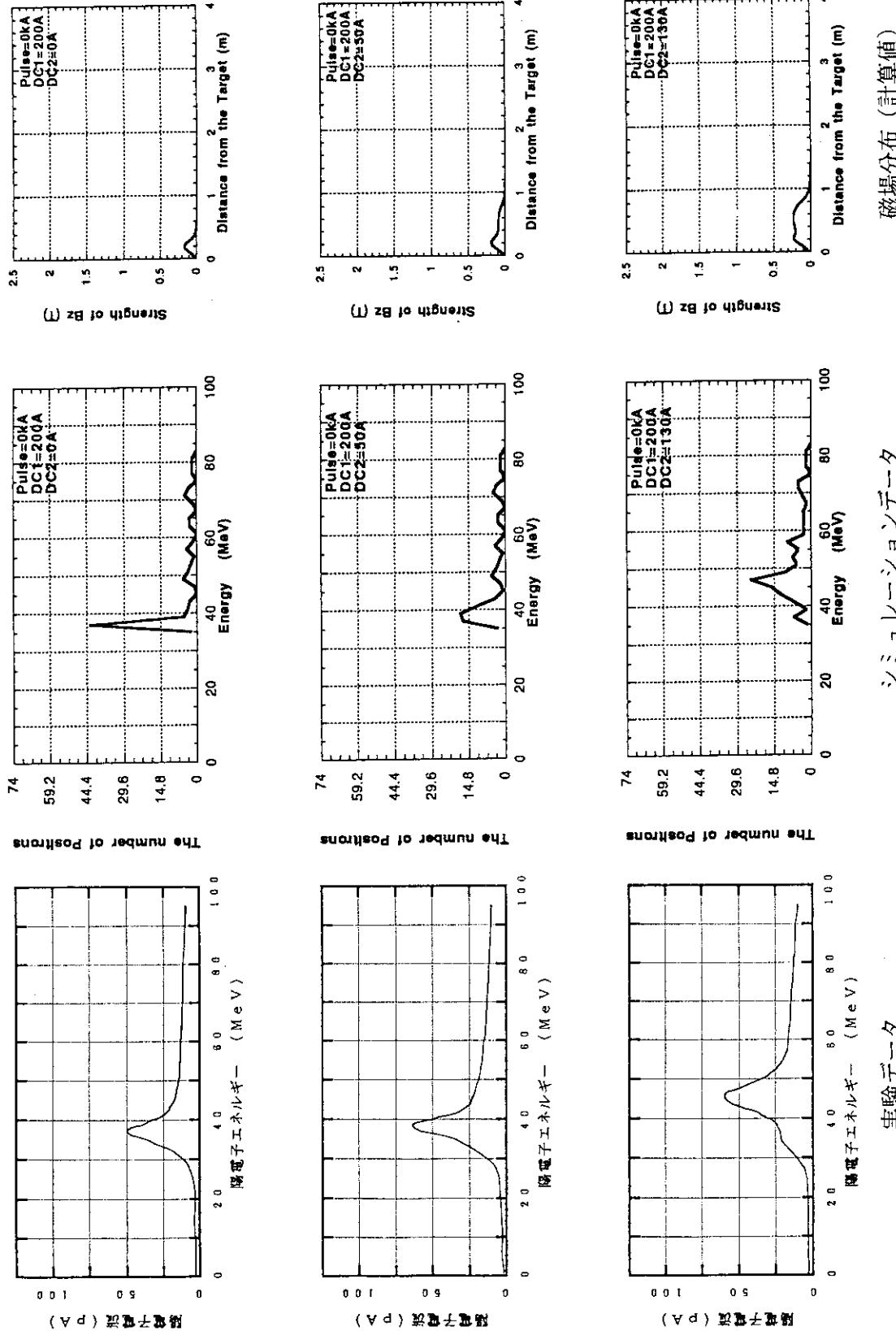


図4-20 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:0kA, DC1:350A, DC2:variable

シミュレーションデータ
実験データ

磁場分布 (計算値)

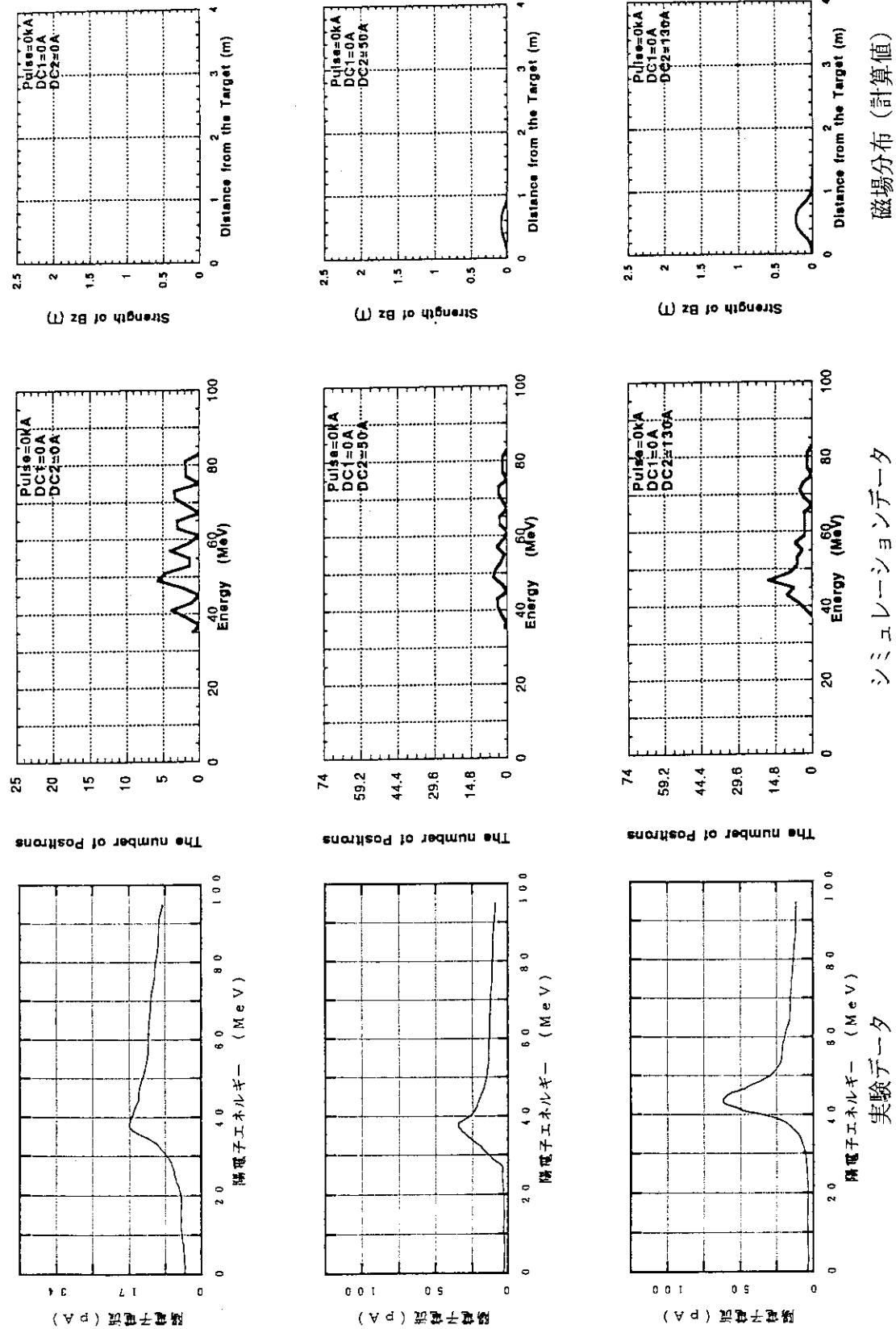


磁場分布（計算値）

シミュレーションデータ

実験データ

図4-21 陽電子スペクトル (ソレノイドコイルの励磁量変化)
Solenoid Coil Parameter Pulse:0kA, DC1:200A, DC2:variable



このシミュレーションコードの妥当性を確認できたものと考えられる。

4. 3 変換効率について

パラメータサーチ実験の内、スペクトル形状については、ほぼ一致していることを確認した。ここでは、図4-6の最下段に示したデータ (Pulse:5.8kA, DC1:350A, DC2:130A) について、変換効率の議論を行う。再度比較のため、入射電子、得られた陽電子、およびシミュレーションのスペクトルを図4-23に示す。

シミュレーションについては、入射電子個数と、得られた陽電子個数の比で変換効率を表す。得られた陽電子として、スペクトルのピーク±1MeVを対象とする場合、ピーク±5MeVを対象とする場合、および0~50MeVの陽電子を対象とする場合、それぞれの変換効率は表4-4の様になる。

表4-4 シミュレーションの変換効率

入射電子数 1,026,000

種別	対象陽電子数	変換効率 (%)	
ピーク±1 MeV	182	0. 018	①
ピーク±5 MeV	633	0. 062	②
0 MeV~50 MeV	785	0. 077	③

実験データについては、電流値の比によって変換効率を表すが、シミュレーションと比較するためには以下のように補正を行う。

シミュレーションでは、入射電子1,026,000個全てのエネルギーが90MeVであるとして計算している。これに対し、実験では、図4-23に示すように入射電子はエネルギー分布を持っている。陽電子発生試験装置の、実験時における分解能では、90MeV付近の測定エネルギー幅は約±2.25MeVであるので、全入射電子を対象とするには、図4-23の様に4.5MeVづつの電流値を加算する必要がある。ピークよりエネルギーの高い方は、分析電磁石で測定できなかつたので正確な値は分からぬが、図4-23のA点からD点までを加算すると、414.5nAとなり、これが、シミュレーションでの入射電子数に対応する。これに対し、陽電子のスペクトルを見ると、ピークは40MeV付近であり、この辺りでは測定されるエネルギー幅は約±1 MeVである。したがって、陽電子スペクトルのピークの電流値、416.5pA (at 42.9MeV) と、入射電流値414.5nAによって得られた変換効率が、実験データとして、シミュレーションデータである表4-4の①と比較できる。この変換効率は

変換効率(実験データ) : 0.01%

となる。ただし、この変換効率は、あくまで表4-4の①と比較できるデータという意味であり、集束系としての最大限可能な変換効率という意味ではない。

0.01%をシミュレーション結果0.018%と比較すると、実験結果はシミュレーション

ン結果の55%となり、大変小さくなる。シミュレーションの結果の方が良いことにに対する理由としては、実際の陽電子発生試験装置ではビームトランスポートラインの内径が場所によって大きく変化しているが、シミュレーションでは細かなところまで反映されていないこと、また、陽電子発生試験装置でのビームの調整が充分にできていないこと等が挙げられる。ただ、陽電子発生試験装置の分解能については、陽電子ビームのプロファイルによっても変化するものであり、正確な値を示すことができない。また、図4-23で入射電子のエネルギースペクトルとしたものは、3.1項一手順3-で述べたように、正確にはターゲット後の加速管を通過したものであり、ターゲット表面のものではない。したがって、正確に変換効率を測定することは難しい。

なお、今回の陽電子発生試験装置をSPring-8実機に設置したと仮定した場合、ピーク±5MeVの範囲内の陽電子が線型加速器の最下流部までトランSPORTできると考えればシミュレーション上では表4-4の②(0.062%)となり、実際に得られる変換効率は、シミュレーションの55%であると仮定すると0.034%となる。

また、JAERI-M 93-030での実機対応でのシミュレーションでは、ピーク±5MeVの範囲内の陽電子に対する変換効率の最大値は0.5%となっており、今回の実験とシミュレーションの変換効率の割合がそのまま適応できるとすれば、変換効率は0.28%が得られる

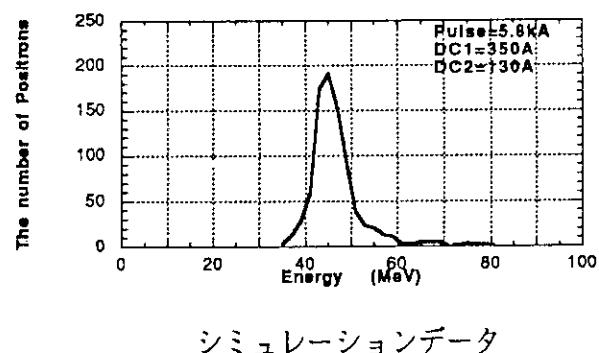
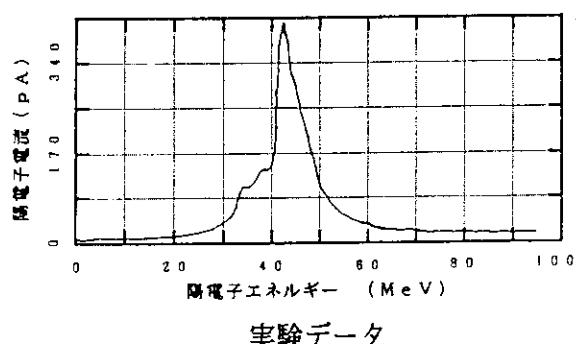
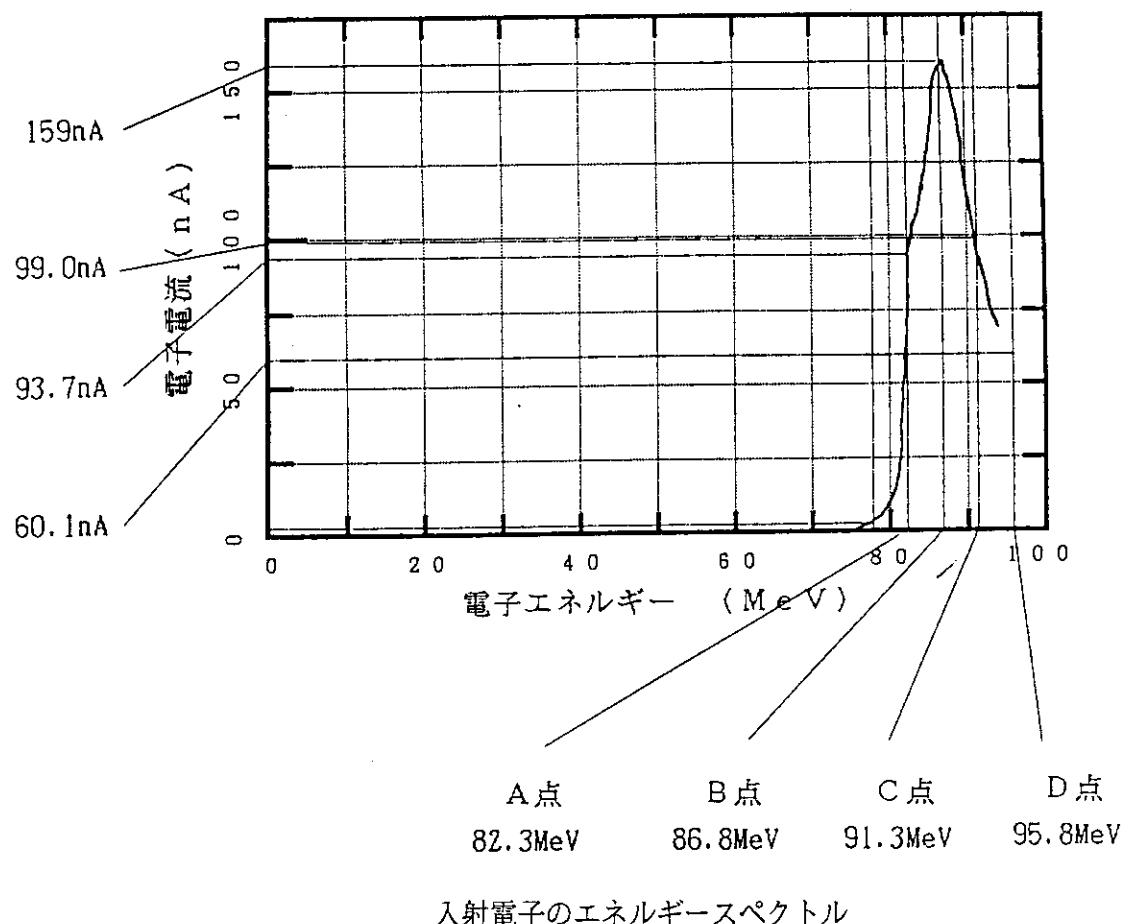


図4-23 変換効率の算出について

5. SPring-8 線型加速器での展望

以上、実験データとシミュレーションデータの比較を行った。細かなところまでは一致していないが、大筋で、実験データをシミュレーションで再現できたと考えている。本実験での陽電子発生試験装置の構成は、2. 1項の図2-2b)に示したものであり、SPring-8の実機で計画している図2-2a)のような構成では実験していない。実機構成でのシミュレーションの結果はJEARI-M 93-030に示してあるが、厳密に言えば、集束磁場中での陽電子の加速についてはシミュレーションの検証ができなかったことになる。

集束磁場中での加速についてもシミュレーションがほぼ適応できるとすれば、JEARI-M 93-030で示すようにシミュレーション上は0.5%程度の変換効率が予想され、実際には0.28%程度になると見積もられる。変換効率の評価の精度は不確定であるが、今回の実験ではQ電磁石を用いておらず、実機ではこれよりも増えることが予想される。

SPring-8実機での陽電子集束部の設計では、JEARI-M 93-030でのシミュレーションの結果に基づいて、DC2コイルを複数個として個別に励磁できるようにしている他、パルスコイルについては、遠隔で精度良く姿勢制御できる構造とする。また、ターゲット上でのビーム位置も確認できるようになるので、今回よりも精度の良い検証実験ができるものと考えている。変換効率については、今回の実験よりも陽電子発生量が増加すること、および集束系後方で電子と陽電子が分離できることから、今回の実験では測定できていないターゲット後での陽電子電流の直接測定が壁電流モニタなどを用いて可能となり、変換効率についても精度の良い値が測定できるようになる。

6. ま　と　め

Spring-8 線型加速器での陽電子発生、および集束部の設計のため、原研リニアックに陽電子発生試験装置を付設し実験を行った。また、これと並行して実験条件でのシミュレーションを行い、比較検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. 集束系の内、パルスソレノイドコイルだけにエネルギー選択機能があることが、実験、シミュレーションを通して確認できた。
2. 得られる陽電子のエネルギースペクトルには各々のソレノイドコイルに起因するピークが現れ、このピークの位置は実験とシミュレーションで一致した。したがって、集束系設計の際には、全てのピークを一致させる様に設計する必要があることが分かった。
3. 集束系の磁場強度が比較的強く、Spring-8 実機での実際のオペレーションに近い状態（本文中 A グループ）では、実験とシミュレーションで、得られる陽電子のエネルギースペクトルが定性的に良く一致した。
4. 集束系の磁場強度が比較的弱いときには（本文中 B グループ）、実験とシミュレーションが精度良く一致しなかった。この原因是、磁場が弱いために発生する陽電子数が少なくなり、その結果、モンテカルロシミュレーションとしての精度が信頼できなくなったためであると思われる。
5. 本実験での陽電子発生試験装置の構造では、変換効率を正確に議論することは難しいが、本報告書での議論から推定すれば、Spring-8 実機での変換効率は、線型加速器最終部で 0.28% が得られることが予想される。

上記 1. ~ 3. より、本シミュレーションコードを実機の運転パラメータ決定に利用できる根拠が得られたと考えている。

変換効率については、本実験でのデータの評価が難しいが、実際にはシミュレーションのデータよりも少なめになるものと考えられる。しかし、上記 5. および Q 電磁石の効果を考慮すると、実機に課せられた最低限の課題である電子／陽電子変換効率 0.1% 以上は確実に達成できるであろう。

ただ、集束系の内、集束磁場中の加速についてはシミュレーションを評価したことにはならないので、実機による検証を待つ必要がある。

参 考 文 献

- ¹⁾ S. Suzuki et al., "Initial data of Linac Preinjecter for SPring-8",
1993 PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, Washington D.C., May, 1993
- ²⁾ 例えば R. Chehab, "POSITRON SOURCES", Proceedings of CERN Accelerator
School, Hotel Regio, Salamanca, Spain, 19-30 September 1988; CERN89-05
- ³⁾ A. Mizuno et al., "Test apparatus of electron/positron conversion
system for SPring-8 Linac", Proceedings of THE 18TH LINEAR ACCELERATOR
MEETING IN JAPAN, KEK, Tsukuba, 1993
- ⁴⁾ A. Mizuno et al., "Test and Simulation of the Positron Convertor for
the SPring-8 Linac", Proceedings of the 9th Symposium on Accelerator
Science and Technology, KEK, Tsukuba, 1993
- ⁵⁾ 水野他, "S P r i n g - 8 電子陽電子変換部のシミュレーション",
JAERI-M 93-030, 1993
- ⁶⁾ SPring-8 Linac Group, :private communication. "1 G e V 線型加速器の設計
資料集", JAERI-memo 04-144, 1992
- ⁷⁾ Walter R. Nelson, Hideo Hirayama, and David W.O. Rogers, "THE EGS4 CODE
SYSTEM", SLAC Report-265, 1985

<付録> JAERI-M 93-030 の訂正について

JAERI-M 93-030 「Spring-8 電子陽電子変換部のシミュレーション」の、3. 2. 5 項「陽電子の加速エネルギー」中で、

【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 DC 2 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。】

という記述があるが、ビーム進行方向のみに加速するにつれてラーマー半径が大きくなることはなく、間違いであるので、おわびして訂正する。正しくは、加速するにつれて、加速される粒子が 1 回転する間にビーム進行方向に進む距離が長くなる。なお、「付録-3」に、

【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。】

という記述があるが、 $B(x)$ を（付録-3. 1）式のように線形増加させると、粒子が 1 回転する間に進む距離が一定となる。

従って、3. 2. 6 項「磁場の最適化」において、加速管内でラーマー半径ができるだけ増加させないようにした場合、収集効率が増えたという報告は、1 回転する間に粒子が進む距離ができるだけ増えないようにした場合に、収集効率が増えた、と訂正されることになる。