

JAERI - M
93-126

SPring-8 線型加速器の電子入射部設計計算

1993年7月

吉川 博・中村 直樹・水野 明彦
鈴木 伸介・堀 利彦・柳田 謙一
益子 勝夫・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）で複写による実費頒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 いばらき印刷株

SPring-8 線型加速器の電子入射部設計計算

日本原子力研究所理化学研究所大型放射光施設設計画推進共同チーム

吉川 博・中村 直樹・水野 明彦・鈴木 伸介

堀 利彦・柳田 謙一・益子 勝夫・横溝 英明

(1993年5月31日受理)

大型放射光施設の入射系線型加速器は 1 GeV の電子加速器であるが、将来陽電子を用いることで蓄積リングでのビーム寿命を長くすることも予定している。初期調整運転のために電子を用いて精密なビームを生成することと、陽電子発生のための大電流ビームを生成させることはある意味で相反する要求ではあるが、我々はこれを両立する入射部を設計した。

本論文では、電子加速器の入射部設計計算に用いられるいくつかのシミュレーションコードの概要と比較を述べ、我々の設計に最適な TRACE というコードによって行った計算を示し、設計のためのみならず、実際の運転のパラメータ選択に非常に有用なサーベイを行った。初期の機器配置は電子銃の性能確認がおこないやすいようにしてあるが、陽電子生成のための大電流モードを的確に実現するには、電子銃用モニタ等が置かれている部分のドリフトスペースを短くして最適化する必要があることを示した。

Design of Injector Section for SPring-8 Linac

Hiroshi YOSHIKAWA, Naoki NAKAMURA, Akihiko MIZUNO, Shinsuke SUZUKI
Toshihiko HORI, Kenichi YANAGIDA, Katsuo MASHIKO and Hideaki YOKOMIZO

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

(Received May 31, 1993)

In the SPring-8, we are planning to use positrons in order to increase the beam life time in the storage-ring. For the injector linac, though high current beam production to yield positrons is alternative with accurate low current beam production for commissioning, we designed the injector section to achieve both of the high current mode and the low current mode.

In this paper, overview of some simulation codes for the design of electron accelerators are described and the calculation results by TRACE for the injector section of the linac are shown. That is useful not only for the design of machines but for the selection of sensitive parameters to establish the good beam quality.

Now the injector section, which is settled at Tokai Establishment, is arranged for the case of the performance check of the electron gun. And we present that the layout of this section is needed to be rearranged for the high current mode operation.

Keywords: Injector, Junction Section, TRACE, Helmholtz-coil, SPring-8,
Linac

目 次

1. 序 論	1
1-1 はじめに	1
1-2 SPring-8 線型加速器	1
1-3 電子入射部	2
2. 設計計算	7
2-1 計算の概要	7
2-2 ディスクモデルでの計算	7
2-3 遷移行列での計算	8
2-4 粒子運動方程式での計算	10
3. 計算結果	11
3-1 電子入射部の問題点	11
4. まとめ	18
文 献	18

Contents

1. Introduction	1
1-1 Abstract	1
1-2 SPring-8 Linac	1
1-3 Electron Injector Section	2
2. Design Calculation	7
2-1 Overview	7
2-2 Disk Model	7
2-3 Transfer Matrix	8
2-4 Equation of Particle Motion	10
3. Results	11
3-1 Matters of Injector Section	11
4. Conclusion	18
Reference	18

1. 序 論

1-1 はじめに

大型放射光施設入射系加速器のひとつである線型加速器は、最大300mAの電子ビームを1GeVまで加速するSバンドのRF加速器である。1992年はじめに詳細設計を終え、この年の8月末にはビームの質に最も影響を及ぼす入射部が原研東海研のリニアック棟増設建屋に設置された。これは現地の建屋ができるまえに、ビームの出発点であるこの部分を製作運転して性能を確認すること、開発要素の高いモニタの性能確認と改良のためのデータを得ること、原研で製作する制御ソフトのプロトタイプ用テストベンチとして利用すること、の3点を目的としている。

このうちビームの性能に関する部分は、加速器としての物理設計に実際の機器がどこまで近づけるかにかかっているが、ビームの状態を知るためのモニタを設置できる場所は限られており、ビームに重要な作用を及ぼすバンチャの内部などで実際のビームがどのようにになっているかは後方に設置されたモニタによって間接的にしか知り得ない。したがって、プリバンチャやバンチャの位相や電圧を最適化するためにはシミュレーションによる数値計算との比較が重要な意味を持つ。本論文ではこのビームに関する物理設計とシミュレーション数値計算について述べる。

1-2 Spring-8 線型加速器

大型放射光施設は3つの加速器からなる。全長140mに渡る線型加速器、周長400mのブースタ・シンクロトロン、及びシンクロトロンからのビームを受け取り蓄積する周長1.4kmのストレージ・リングで構成されており、初期には電子を加速蓄積し、将来は陽電子を加速蓄積できるようにする。

線型加速器は200kVの電子銃から電子ビームを引き出し、プリバンチャ1、プリバンチャ2、バンチャの内部に充填されたマイクロ波の電界によって軸方向にビームを圧縮して電流値をあげるとともに、26本の加速管で1.1GeVまで加速してシンクロトロンに渡す。陽電子を用いるときには、電子銃からの電子ビームが250MeVまで加速された所にタンクスチレンのターゲットを挿入して陽電子を発生させ、そこから後方にある加速管で0.9GeVまで加速して同様にシンクロトロンに渡す。シンクロトロンが受け取ることのできるビームのアクセプタンスからエネルギー分散は0.15%となっているので、線型加速器としてはこのエネルギー範囲に必要な電荷量を持つビームを生成することが最低限必要な性能となる。どのような陽電子ビームが線型加速器の出力として得られるかについては、ターゲット直後の集束系の構成に大きく依存し、実器によって輸送

されるビームを測定してみないと不確定な点もあるので、その対応策として E C S (energy compression system) か P A R (positron accumulator ring) の設置を予定している。

26本の加速管はSバンド、 $2\pi/3$ モードの完全定勾配進行波型で結合空洞を含めると83空洞の3メータ管である。これに1対1に対応する35MWクライストロンが平均26MWのマイクロ波を供給することにより、1本当たり約40MVのゲインが得られる。

ビームのアライメントは機械精度0.1mmで規定されているほかに、加速管2本ごとの間隔で設置されているQ磁石の磁場中心にビーム軌道を合わせられるようにステアリング磁石と蛍光板モニタが設置されている。ビームモニタはこの蛍光板モニタのほかに高速応答型と積分型の2種類のコア式（または壁電流式）の非破壊電流モニタが適宜設置されている。またビームのバンチ構造を見るためのチャレンコフモニタやエミッタス測定用のワイヤグリッドモニタ等が用意されている。

この線型加速器は大型放射光施設の定常運転時には1日2回（約12時間に1回）程度の入射運転を行うほか、中エネルギー領域の核物理実験、加速器物理研究等に利用される予定である。

1-3 電子入射部

線型加速器の電子入射部とは、電子銃から50MeVエネルギー分析部までを言う。1992年の9月はじめに日本原子力研究所東海研のリニアック棟増設建屋にこの電子入射部が仮設置され、性能確認が行われている。設置スペースの不足によって電子入射部に含まれる1本の加速管はこの試験用仮設置には含まれておらず、エネルギースペクトルやバンチ構造の観測に若干の困難さをともなっている。

この仮設置によって確認すべき点の主なものは、

- ・ 1ns、14A（仕様値、目標値20A）のビームが発生できること。
- ・ 3つのモードにおける最適なビーム輸送のためのパラメータを得ること。

ヘルムホルツコイルの磁場強度分布

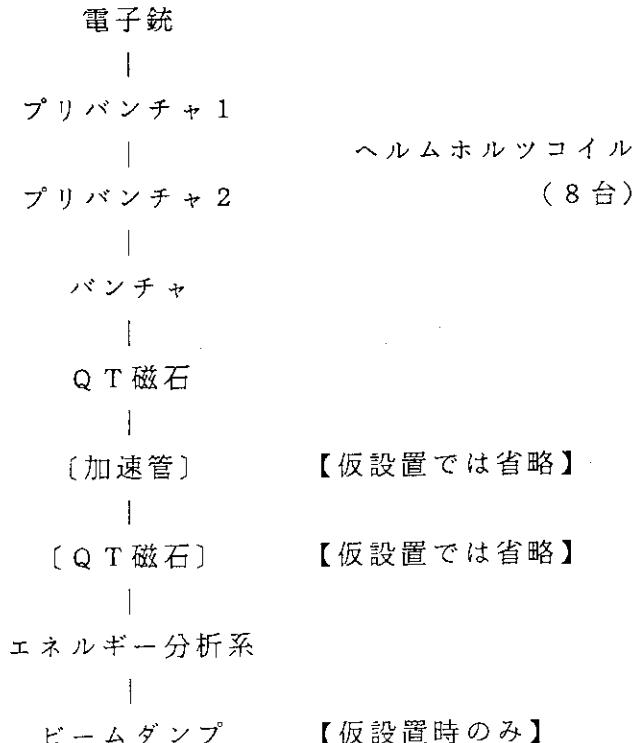
プリバンチャ、バンチャ等のマイクロ波位相とアッテネーション

- ・ ビームのエネルギー分散、エミッタス

である。これ以外にモニタ性能の確認、制御ソフトのテストベンチとしての意義等も重要である。

1 - 3 . 1 電子入射部の構成

電子入射部の構成は上流から以下のようにになっている。



1 - 3 . 2 電子銃

P F N型パルスモジュレータによって発生させた200 kV、 $5 \mu s$ の矩形波を60 p p sでアノードとカソード間に印加する。カソードはアイマック社製の板極管のカソード側だけを切りとったものでY796と呼ばれるカソードアッセンブリである。このカソードは大電流長寿命で電子加速器のカソードアッセンブリとして国際的に知られる一般的なものである。電極形状はピアースガン方式でEGUNによって計算された(図1)。

グリッドパルサは以下の3種類が用意されている。

1. ロングパルス用

トランジスタ方式のスイッチングによる一般的なパルス回路であるが、出力インピーダンスが 50Ω であり、カソードまでの伝送路が短パルス伝送に対して最適化されているために、不整合している。

2. ショートパルス用

ケンテック社製の高圧パルサとディレイラインを組み合わせたもので、立ち上がりのトリガと立ち下がりのトリガを別に与えることでパルス幅が 10 n s から 40 n s まで断続的に切り換えられるようになっている。 50Ω インピーダンスの出力端子が4つあり、これ

を 12Ω パルス伝送ラインの端面に取り付けた 4 つの BNC 端子に全てを接続している。

3. シングルパルス用

ケンテック社の特注高圧パルサとインピーダンス変換伝送路及びパルス幅をクリップするためのスタブを組み合わせたもので、従来からの、伝送路ができるだけ短くする一般的な方式とはまったく異なる新しい方式のパルサである。電力変換効率は無視してパルス整形に主眼を置き、 12Ω の同軸管伝送路を 50 cm 伝送することで負荷端（カソード）での反射が輻輳してダブルパルスが発生することをふせいでいる。

主な特徴は 3 つあり、まず 200 kV という大気絶縁の電子銃としては非常に高い電圧を印加することがあげられる。エミッタースの劣化を抑えて大電流のビームを輸送するにはできるだけ早く高いエネルギーに加速してしまうことが必要で、電子銃の電圧をあげることは最も効果のある方法である。この理由に基づき R F ガンなども開発され一部実用化しているところもあるが、我々の要求する大電流 (20 A) の仕様を満足するものはまだない。将来大電流 R F ガンが実用レベルになった時期に置き換えられる可能性は高い。もうひとつの特徴は、非常に広いレンジのパルス幅に対応している点である。 1 ns から $1\mu\text{s}$ までを 3 台のパルサを切り換えて対応する。これは電子銃電極形状の最適化を困難にする条件であるが、シンクロトロン、ストレージリング及びユーザからの要請として満足しなければならない。3 つめの特徴は 1 ns のグリッドパルサの方式である。一般にナノ秒レベルの短いパルスを生成し負荷に印加する場合、生成回路から負荷までの伝送路による立ち上がり時間の劣化を防ぐため、できるだけその伝送路を短くする。しかし、電子銃のカソード部分のような空間的制限の大きいところでは回路自身の構造や冷却等が問題となり、性能や扱いやすさが犠牲になる場合が多い。これに対し、我々の 1 ns パルサの方式は負荷のインピーダンスに整合させた同軸リジッドの伝送路 (500 mm) を用いて立ち上がり劣化を防ぐと同時に、この伝送路に取り付けたリジッドのクリップラインと併せてパルス整形に積極的に利用している。結果的にこの方式は成功し、前者の負荷と回路を近づける方法で見られる不要なパルストレインの発生（短い伝送路の間をパルスが輻輳することによる）が完全に防げるという利点があることも明らかになった。

1-3.3 プリバンチャ

プリバンチャは全く同じ形状のものが 2 つあり、上流側からプリバンチャ 1、プリバンチャ 2 と呼ぶ。ノーズタイプの単一空洞で、 π モードの定在波のマイクロ波で励振される。入力電力は概ね 3 kW (プリバンチャ 1) と 4 kW (プリバンチャ 2) である。このシステムはビームクウォリティ確保のためできるだけ早く高いエネルギーに加速することを念頭においており、SHB を用いた場合に必

要となる長いドリフトスペースを省き、この2台のプリバンチャでできるだけ短距離のビーム輸送で必要なバンチ長を得ることにした。従って多段のプリバンチャを用いたときの一般的な手法である ΔE を改善するためのデバンチングは行っておらず、2台ともバンチング位相で運転される。

設計値としては、捕獲効率が高いことと速度変調のばらつきが小さいことの両方を満足する最適値として、

プリバンチャ1 :	位相0度、20kV、ギャップ20mm
ドリフトスペース :	220mm
プリバンチャ2 :	位相0度、30kV、ギャップ20mm
ドリフトスペース :	152mm

を採用した(図2)。この部分の小電流ビームでの計算は文献①、②を参照のこと。この2段のプリバンチャによりプリバンチャ1の入り口の68%の電子が、50度の位相角にバンチングされる。

さらに、この論文でおもに述べるTRACEでの計算では、特にプリバンチャ2の電界強度がセンシティブで、バンチャの第2~3空洞に最小位相幅がくるように調節することが実際の運転で肝要であると思われる。

1-3.4 バンチャ

バンチャはサイドカップル型の13連空洞で、これもプリバンチャと同様にπモードの定在波マイクロ波で励振される。入力電力は最大約4MWで、ビームは9MeVのゲインが得られる。バンチャ内でビームの β が大きく変化するので、運転に供するビーム電流がいつも同じ値ならば、すべての空洞の形状を変えて最適化することもできるが、このシステムでは運転モードによってビームの電流値が大幅に変わるために、そのような最適化はできない。また、ビームクウォリティ確保のためできるだけ早く高いエネルギーに加速すること目的として、バンチャは定在波型加速管を使用し加速電界を高くしているので、第3空洞までで2MeV($\beta = 0.979$)を越える。従って第1空洞が45mmである他は、第2空洞以降すべて52.5mmの同型サイズとした。導波管とバンチャ間の結合係数 β は1.52のオーバーカップリングになっており、空洞寸法同様にビームの負荷が100mAであるとしたときに最適化された値である。このバンチャにより入り口で50度の位相角にある電子が $\Delta E = \pm 1.7\%$ で位相角7度にバンチングされる。

このバンチャ加速管は医療用ライナックの加速管として数百本つくられた実績を持つ。サイドキャビティをデチューンすることにより有効空洞数を変えられるなどの工夫も凝らされており、主空洞のスクイーズによる周波数上昇とサイドキャビティのチューンバーによる周波数低下によって中心周波数へのチューニングがしやすく、RF特性が確保しやすい。

1-3.5 ヘルムホルツ・コイル

電子銃のカソードから 50 cm の位置からバンチャの出口の所までに、8 台のヘルムホルツコイルが設置されており、軸方向磁場をビーム軌道上に重畠できるようになっている。それぞれのコイルが独立した電源を持ち、磁場強度分布を変えられるようになっている。また、ビーム軌道上に磁場中心がきちんと重なるように、3 次元磁場測定により測定してアライメントされている。このコイルの励磁量がビームエンベロープを決める。またビームの進行方向に垂直な面内の粒子分布が相対的に変化しないで輸送される条件（ブリリアンフローという）を満足する条件は電流密度と粒子エネルギーで決まってしまうので、このヘルムホルツコイルの生成する磁場構造をどのようなものにするかがオペレーションの重要なポイントになる。

コイルの構造は 1 番から 4 番、5 番から 7 番、8 番の 3 種類に分かれており、1 ~ 4 番、5 ~ 7 番のコイルは 560 G まで、8 番のコイルは 720 G の励磁能力を持ち、1 ~ 4 番と 5 ~ 7 番は冷却能力がことなり、後者の方が実用時の励磁量が高いことに対応している。

1-3.6 モニタ

ビームの断面形状は蛍光板にビームがあたったときの発光を TV カメラで観測するプロファイルモニタ（以下 PM と訳す）を使用する。最も使いやすいモニタのひとつで、ヘルムホルツ・コイルの励磁量を変えることによるプロファイルモニタ画像の変化からビームのウェスト位置がわかる。また励磁量を変えることにより画像の中心が変化するようであれば、磁場のアライメントが乱れていることがわかる。このモニタは破壊型であるので定常的に用いることができない。また、蛍光板表面にチタンコーティング等を施さないと、特にビームのエネルギーが低い場合には電荷が蓄積され、その電荷の放電により蛍光板が破損する可能性がある。

ビームの長さを測るには、回路定数を 1 ns のシングルパルス測定に適するような高速応答型に最適化した壁電流モニタ（以下 SCM-W と訳す）、1 μs のロングパルス測定用に市販の CT を利用したコアモニタ（以下 LCM と訳す）を使用する。仮設置によって確認したい性能のうち、特に 1 ns 14 A のビームが生成できるかが重要であり、SCM-W が電子銃の直後（電子銃カソード面から 680 mm）とバンチャの後方（バンチャ出口から 1000 mm）に設置されており、この 2 つの出力を比較することでバンチャのモジュレーション効果、透過率等が観測できる。特に要求仕様のきびしい SCM-W の周波数特性と出力値校正は精密に行われており、必要な性能が確保できていることが確認されている。このモニタ（SCM-W）の詳細は別稿で述べる。

この他、チエレンコフ発光や OTR を利用してバンチのミクロな時間構造を測定するために高精度の光学系と高速ストリークカメラを用意し、測定系の確立を進めている。これらにより、バンチングされた個別のバンチの長さや、リアルタイムのエミッターンス測定が可能になる予定である。

2. 設計計算

2-1 計算の概要

ビームのエンベロープを計算するには x, x', y, y' と E, ϕ の6次元ベクトルに遷移行列をかけねばよい。同期周波数が算定できるのであれば、 ϕ は z' に置き換えることもできる。これは一つの粒子の軌道を追尾することと同義であり、 x' の分布を $x = 0$ を中心としたガウス分布であると仮定した計算であり、実際のエンベロープと食い違ふ場合もある。つまりビームの位相空間断面内で外側にある粒子は外側にあり続けるという仮定を含んでいるのである。位相空間での楕円の面積すなわち確立分布としてのエミッタансを保存量とし、その楕円の一次変換を計算する。この考え方に基づくシミュレーションコードにはTRANSPORTがある。

計算の式はまったく同等のまま、位相空間で半径の異なる同心楕円上の複数の粒子の軌道を計算するのがディスクモデルである。実際のビームの粒子群は速度分布を持つので、進行方向の軸に垂直な面に到達する時刻にはばらつきがあるが、ディスクモデルではこのばらつきを無視し、粒子間の相互作用はないと仮定している。すなわち、空間電荷効果を扱うことはできない。したがって電流密度の高いビームを計算する場合には実際との食い違いが大きくなる。見方を変えると複数の粒子に対しTRANSPORTの計算をしたものであるともいえる。

さらにこのディスクモデルの状態遷移行列に微小長さの中間点でパルス的に発散力が働くという形で空間電荷効果を取り込み、さらに E, ϕ を実効的に行列要素に組み込んで3次元に拡張したものがTRACE-3Dである。

位相空間でのエミッタансが自由空間で保存することを前提として遷移行列をかけることで計算するのではなく、粒子一つ一つの運動方程式をたて、粒子間相互作用としての空間電荷効果を組み込むためにイタレーションによる収束結果を解とするのがPARMELAである。運動方程式は加速周波数の同期位相にのった粒子を座標系の中心としてたてられる。PARMELAが扱える共振空洞のマイクロ波は定在波のみである。ディスクロード型加速管の進行波は結合空洞近傍では定在波的性質が強く、なかほどでは進行波的性質をもつて取扱いが難しい。

いくつかの計算コードの特徴とその計算例、及び電子入射部の設計評価としてのTRACEによる計算を示す。

2-2 ディスクモデルでの計算

ディスクモデルでの計算は、空間電荷効果を含まないことから小電流ビームの計算に限定しなくてはならない。図2に示された計算結果もディスクモデルでの計算で電流値は100mAとしている。この計算コードで扱うことのできるエレメントはドリフトスペースと定在波空洞のみで、定在波空洞の電界も無限小の厚

みの領域で各粒子の位相に応じた強度が印加されるものとする。したがって複数の空洞を持つ加速管の中での粒子の挙動は電界を受ける面とドリフトスペースの組み合わせで近似することになるが、粒子が受ける速度変調の度合いは位相のみに依存し β の違いによる電界内に滞空している時間の違いは考慮されないので誤差が大きく、加速管のような電界領域が連続するエレメントの計算には不適当である。

今回の我々の設計による入射部には使用しないが、サブハーモニック・バンチャを使用する場合などは特にディクスモデルでの概略設計が有効であり、分周比と電界強度、ドリフトスペースをどのように配置するかを出力の軌道線を黙視することで調整し理解することができる。

2-3 遷移行列での計算

この線型加速器の電子入射加速部より後段の構成（Q磁石と加速管、ドリフトスペース）は TRANSPORT で行われた図3。TRANSPORT による計算も空間電荷効果は考慮されていないので、小電流ビームの計算あるいは充分エネルギーが高い ($\beta >> 1$) 領域での計算に限定するべきである。TRANSPORT が扱えるエレメントは、

P O L E F A C E	: 電磁石のビーム入射角による Q 成分
D R I F T	: ドリフトスペース
B E N D	: 偏向電磁石
Q U A D	: 四極電磁石
S E X T P O L E	: 六極電磁石
A C C E L E	: 加速電界
SOLENOID	: ソレノイドコイル

があり、遷移行列による計算で評価できるエレメントはほとんど備えている。また、

ROTATE	: ビーム軸回転（縦横軸変換で縦のベンドに対応）
CENTROID	: 位相空間での回転
ALIGN	: 設置精度誤差繰り込み
REPETITION	: 同構造繰り返し
ARBITRARY	: 任意の遷移行列

等の行列操作や単位系設定も行える。

実際の使用方法としては、入射ビームの六次元パラメータを与えてドリフトスペースの長さや Q 磁石の励磁量等未知のパラメータをフィッティングで算出し、現実的なパラメータが得られるように全体の設計を調整する。このコードは SLAC で開発され、世界中に頒布されており、詳細なマニュアルもある。③

TRANSPORT もセカンドオーダの評価が可能であるが、原子核実験等に使用するスペクトロメータの設計などを行う場合にはさらに次数の高い成分も評価できる L A Y T R A C E の使用が推奨される。LAYTRACE は設定パラメ

ータが非常に多いため TRANSPORT 等で初期設定をしてから細部の設計を行うときに使用するのが現実的である。

本論文の主題である電子入射加速部の計算は TRACE - 3 D で行った。TRACE も遷移行列の計算を行うコードで入力データの形式は TRANSPORT のデータ形式にも対応できる。TRACE はロスアラモス研究所の加速器グループが開発し、パブリックドメインで各地に頒布された。もとは TRANSPORT と同様の 2 次元のみの計算コードであったが、それぞれのエレメントの行列要素の評価が若干異なっていた。ここで計算に用いたコード TRACE - 3 D は、原研物理部杉本氏が FORTTRAN からターボパスカルに書き換えるとともに、3 次元に拡張し x , y のトランズベースなモーメントの評価だけでなく、進行方向 z の成分も粒子の位相と同義のパラメータとして評価できるようにした。空間電荷効果も模擬的に繰り込むことができるようになっているが、電流値やステップ幅等他の入力データとビームパラメータの相互関係に注意して繰り込み方を指定する必要がある。また TRACE - 3 D の大きな特徴として対話式のマンマシン部分と豊富なグラフィックス表示がある。入力データは、テキストファイルとして作成しプログラムにはデータファイル名として渡されるが、計算結果を見ながら一部分の変更をプログラム内で対話式に行うことができる。表示は x , y , z それぞれの位相空間橿円での表示や断面形状での表示が任意に選択でき、ビームのエンベロープやツイスパラメータの軌道長に沿った表示がそれぞれメニュー選択で自由に切り換えることができる。また、TRANSPORT と同様にある地点でのビームパラメータから上流のエレメントの成分をフィッティングできるので、線型加速器の入射部（粒子の種類によらない）の基礎設計と運転パラメータのサーベイに最適である。入射ビームの初期値は、シグマ行列で与えることもツイスパラメータ行列で与えることもできる。

TRACE で扱えるエレメントは、

D R I F T	: ドリフトスペース
L E N S	: レンズ
Q U A D	: 四極電磁石
D O U B L	: 四重極ダブルレット
T R I P L	: 四重極トリプレット
B E N D	: 偏向電磁石
D I P O L E	: 二極磁場
E D G E	: 二極磁場端
P M Q	: 永久四重極磁場
S O L E N	: ソレノイド磁場
R F G A P	: RF ギャップ
R F Q	: RF 四重極
C A V I T	: 加速空洞
A T A N K	: 加速タンク

A C O L U	: 加速コラム
R O T A T	: ビーム回転角
D E L - I	: 電流変動
R - M A T	: R行列要素
S E X T U	: 六重極レンズ
B U N C H	: バンチャ・デバンチャ
P M L E N	: 永久磁石レンズ
W I G G L	: ウィグラー

等で、ソースコードも公開されているのでR行列指定以外の方法で新しいエレメントをつけ加えることもできる。

2-4 粒子運動方程式での計算

加速される電子ひとつひとつを運動方程式に基づいて追尾する計算コードにPARMELAがある。PARMELAはPhase and Radial Motion in Electron Linacsの略称で、イオン粒子の計算をするPARMILAというコードもあり、計算ステップを時間軸とするか空間軸とするかの違いがある。

PARMELAはロスアラモスが主導となって各地の計算コード開発担当者の共同で開発された。初期の段階からソースコードが広く頒布されたため非常に多くの改造版があり、きちんとしたマニュアルはない。使い方等はソースコードにコメント文として埋め込まれている。扱えるエレメントは、

D R I F T	: ドリフトスペース
S O L E N O I D	: ソレノイドコイル
Q U A D	: 四極電磁石
B E N D	: 偏向電磁石
B U N C H E R	: バンチャ
C H O P P E R	: チョッパー (RFチョッパー)
C E L L	: 加速空洞
T A N K	: 加速空洞 (アルハーヴ型等)
F I E L D	: 直流電界

がある。計算されるのはRFバケットにおさまるひとつのバンチのみで、粒子は参照粒子(リファレンス・パーティクル)の周りに集群しているものとして空間電荷効果を計算する。バケットからはずれた粒子は損失粒子として計算から除外される。実際に使用するときには、まず粒子数1として(すなわち参照粒子のみ)それが同期粒子となるようにRFの位相構造を決めてから、粒子数を増やすとよい。

入射粒子の分布形状も任意に設定でき、加速空洞のRFもフーリエ成分で任意に設定することができるが、CELL、TANKとも定在波のみに対応しており、我々の進行波加速管を含むシステムの計算はできない。また、当然のことながら多数粒子の計算なので高性能な計算機の使用が要求される。PARMELAでの計算は、実験結果の評価とともに別項で述べる。

3. 計算結果

加速器の設計コードは非常に多くの種類があり、ロスアラモスの加速器計算コードグループがまとめた Computer Codes for Particle Accelerator Design and analysis : A Compendium には 247 のコードが掲載されているが、多機能と使いやすさを両立した成熟したコードはまだない。現状では単機能的なコードを適材適所で使うことが肝要であり、不適切なコードで計算すると思いがけない失敗をする事がある。ハードウェアに依存しない形で分かりやすい表示機能を備えたコードが、オブジェクト指向プログラミングによって登場する時期も近いと思われるが、ここで用いた TRACE-3D はその目標に非常に近いものである。

この TRACE による計算で明らかになった電子入射加速部の問題点とその解決方法をまとめる。また、後に示す TRACE の計算結果の見方を図 4 にしめす。

3-1 電子入射部の問題点

大型放射光施設の入射系加速器のひとつである線型加速器は、将来加速粒子を電子と陽電子の両方に対応し、容易に切り換えるようにすることが求められている。完成当初のコミッショニング運転は電子で行われ、100 mA 程度の電流値（空間電荷効果が無視できる小電流）、1 μs 程度のロングパルス（RF コンポーネントの位相調整がビーム電流値と到達エネルギーを知ることで容易に行えるパルス幅）で運転される。一方陽電子の入射要求に応ずるときには、まず大電流（~20 A）、1 ns のシングルパルスのビームでタンクステンのターゲットを叩き陽電子を発生させる。充分な陽電子が得られるならばターゲット以降のビーム輸送は電子を用いるときとあまり違いはなく、問題となるのは電子入射加速部でいかに効率よく大電流ビームを輸送するかである。このように小電流ビームの輸送と大電流ビームの輸送の両方を同一のシステムで行うことになり、小電流ビームの品質を良くするか大電流ビームの電流値を確保するかは選択になり、システムの最適化はできない。我々のシステムでは、ビームはディスクモデル計算で設計している（すなわち 100 mA）が、電子銃は大電流ビームが出せるように最適化されている。また、バンチャ加速管は大電流の負荷に対応して 1.52 のオーバー・カップリングになっている。

問題の第一は、設計がこのように二つの要求に対応するため折衷したものになっていることである。全体としては大電流ビームをきれいに輸送できるシステムが構成できれば、電子銃を別にしてバンチャなどの物理的な構造を変更することなく RF の位相とアッテネーションを調節することで小電流ビームの要求に対応できる可能性がある。電子銃の最適化の問題は、カソードから 200 mm のところにアイリスを設置し、ビームの芯のエミッタスの良い部分を切り出して使うことで対応した。

第二の問題は、原研東海研設置の目的が多用であることがある。実験そのものが目的であるならば、必要なデータがすべて得られるように機器を構成する事ができるが、この電子入射部は実機として西播磨のサイトへ移設し、営業運転のマシンとして使用しなくてはならない。機器の性能を確認するために営業運転では使用しないモニタを本機の性能を損なうことなしに挿入したり、低エネルギービーム（現地ではエネルギーをあげられる）の微弱な信号を帯域限界に近いところで感知しなければならない等の困難さが生じる。

本論文ではこれらの問題点のうち、特にビームの物理設計に関連する項目について述べる。

3-1.1 大電流輸送とドリフトスペース

この電子入射部の最も開発要素の高いエレメントである電子銃の1 n s パルサは、前述のような新しい方式により達成された。原研東海研設置での試験の重要な項目のひとつにこの電子銃性能の確認があった。従って電子銃直後に電流値とビームのパルス幅、断面形状を観測するためのモニタを設置する必要がある。これらのモニタを設置したため電子銃のカソード面からプリバンチャ1までが752 mmにもなっているため、このドリフトスペースで大電流のビームが半径方向だけでなく進行方向にも伸びてしまい、プリバンチャ1に到達したときのピーク電流値が下がってしまうことがわかった。15 A、でSバンドの±90°のバンチを200 mmのドリフトスペースを輸送するときのビームの広がりを図5に示す。空間電荷効果により半径方向に発散していく様子がわかり、この計算によると16 mmのビームが160 mmのドリフトで40 mmのダクトにあたってしまう。また空間電荷効果による進行方向へ発散力により200 mmの輸送で±130°まで広がると同時に、バンチの前の部分は前方方向への発散力で加速され、後半部分は後方への発散力で減速されるため、エネルギー分散も大きくなり、200 mm地点で±30 kVのばらつきが生じてしまっている。

電子ビームをエミッタンスの劣化をさせないように輸送するには、非常に丁寧な扱い（すなわち精密な電場磁場構造等）でビームの出発点でのエミッタンスを保持していく方法と、電子銃の直後からできるだけ早い地点で一気に加速して高いエネルギーを与え、相対論的に空間電荷効果が実行的に弱くなる領域に持ち込む方法とがある。現実的な加速器においては後者が一般的で、R F ガンの着想もここにある。特に大電流領域ではこの配慮が重要で、200 kVという低エネルギーでは、1 Aを越える電流値になると数十 cmに及ぶドリフトスペースを△Eを維持して輸送することは困難であることがわかった。

機器設計時から、電子銃からプリバンチャ1までのドリフトスペースが長すぎることは指摘されていたが、電子銃の性能確認のためのモニタを省くことはできなかった。そこでこの部分の架台をセパレートにし、現地サイトへ移設する際には30 cm分の架台の一部を取り外してドリフトスペースを短くできるようにし

た。その際にはプロファイルモニタ1台と大電流用コアモニタは取り外されることになる。これによりピーク電流値現象とパルス幅伸長の問題が改善される。

3-1.2 軸方向磁場の強度

電子銃からのビームは最大200kVという低エネルギーで輸送されてくる。このビームがプリバンチャ1、2及びバンチャの3番目の空洞あたりへ来るまでは、1MeV以下のエネルギーのまま輸送されて来ることになるので、3-1.1項で述べたように径方向の発散が避けられない。この発散を抑えるためにヘルムホルツ・コイルによる軸方向磁場を重畳して電子にラーマー運動を与える。ラーマー運動は進行方向に垂直な面内での径方向の速度成分が大きければ、それを抑えるためにラーマー半径を小さくするための磁場強度を大きくしなければならない。

一方、ビームの質を維持して輸送するためにはブリリアン条件を維持することが望ましいとされる。空間電荷効果による半径方向の発散力と軸方向磁界によるビームのトランスペースモーメントの合成により、各粒子の角運動量が中心軸からの半径距離によらず一致して、軌道中心の回りにバンチ全体があたかも剛体であるかのように回転しながら進行するための磁場をブリリアン磁場という。

$$\text{運動方程式} \quad \frac{m_e v^2}{r} - eE - evB_z = 0 \quad \text{と}$$

$$\text{ガウスの定理} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE) = -\frac{N_e e}{\epsilon_0}$$

及び、プラズマ周波数 ω_p 、 B_z のまわりのサイクロotron周波数 ω_c とすると、

$$E = -\frac{m_e}{2e} \omega_p^2 r$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

であるから、 $\omega = v/r$ 、 $\omega_c = eB_z/m_e$ とすると、

$$\omega^2 - \omega_c \omega + \frac{\omega_p^2}{2} = 0$$

$$\frac{\omega}{\omega_c} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\omega_p^2}{\omega_c^2}} \right)$$

となり、 $\omega = \omega_c/2$ のときにビームが剛体回転する。

この条件を

$$m_e r \omega^2 + e \frac{\partial V}{\partial r} - eB(r\omega) = 0$$

に代入すると、

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{r e B^2}{4m_e}$$

となり、ポアソン

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

を中心軸上のポテンシャルを V_0 として書き換えた

$$V = V_0 + \frac{e B_z^2}{8m_e} r^2$$

とあわせて、電荷密度 ρ に置き換えると、

$$\rho = \frac{\epsilon_0 e B_z^2}{2m_e}$$

となる。

200 kV は $\beta = 0.7$ に相当するので、1 ns、20 A のビームを非相対論的に考え、10 mm ϕ の円筒に均一に電子があるとすれば、

$\rho = 8.49 \times 10^{-4}$ (C/m³) で、ブリリアン磁場は 330 G となる。

プリバンチャ、バンチャ内部の電場がある領域では、バンチングによる斥力を打ち消すために、

$$B_z = \frac{4m_e (1 - \beta^2)^{1/2} \pi E}{e \beta \lambda} \sin \phi$$

の磁場をさらに重畳する必要がある。したがって我々のビームでは、バンチャ部分で最大 700 G の磁場を重畳することになる。これがブリリアン磁場であるが、小電流ビームの運転ではビーム径を小さくするためにこれよりもやや強い磁場を印加しても問題なく輸送できるが、大電流ビームの場合には 600 G 以上の磁場を前半部分で印加するとベータ長が 100 mm 以下になり、強集束による散逸が生じる可能性がある。また、ブリリアン磁場を重畳した場合でも、径方向の発散が抑制されたために軸方向の発散力が強まり、自由空間よりもさらにエネルギーディスパージョンの拡大を招くことがわかる。歯磨きチューブをしばるように、軸方向磁場で半径方向の広がりを抑え込むと、進行方向に急激に広がってしまうのである。

磁場強度のバリエーションに対する計算結果を表 I に示す。これは電子銃からプリバンチャ 1 を経てプリバンチャ 2 の入り口までの計算で、一般的なバンチング電場の効果を読むことができる。またそのビームエンベロープを以下の図に示す。

- 図 6 電流値：100 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：150 G
- 図 7 電流値：100 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：200 G
- 図 8 電流値：100 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：250 G
- 図 9 電流値：100 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：300 G
- 図 10 電流値：100 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：350 G
- 図 11 電流値：300 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：150 G
- 図 12 電流値：300 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：200 G
- 図 13 電流値：300 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：250 G
- 図 14 電流値：300 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：300 G
- 図 15 電流値：300 mA、ヘルムホルツコイルの磁場：350 G

- 図 1 6 電流値： 1 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 1 5 0 G
 図 1 7 電流値： 1 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 0 0 G
 図 1 8 電流値： 1 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 5 0 G
 図 1 9 電流値： 1 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 0 0 G
 図 2 0 電流値： 1 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 5 0 G
 図 2 1 電流値： 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 1 5 0 G
 図 2 2 電流値： 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 0 0 G
 図 2 3 電流値： 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 5 0 G
 図 2 4 電流値： 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 0 0 G
 図 2 5 電流値： 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 5 0 G
 図 2 6 電流値： 1 0 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 1 5 0 G
 図 2 7 電流値： 1 0 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 0 0 G
 図 2 8 電流値： 1 0 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 5 0 G
 図 2 9 電流値： 1 0 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 0 0 G
 図 3 0 電流値： 1 0 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 5 0 G
 図 3 1 電流値： 1 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 0 0 G
 図 3 2 電流値： 1 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 2 5 0 G
 図 3 3 電流値： 1 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 0 0 G
 図 3 4 電流値： 1 5 A 、ヘルムホルツコイルの磁場： 3 5 0 G

3 - 1 . 3 プリバンチャの電場強度

バンチャの電場を受けてバンチの位相広がりはエネルギー広がりに変換される。電場は正弦波であるが理想的には零度近傍のリニアな部分のみを使用したいが、そのズレの部分が位相空間で回転するバンチの端の部分が必要な電場を受けることができずに圧縮されたバンチの位相分布のすそ野となって残留する。2段のバンチャを使用する構成では、後段のバンチャをデバンチングに使いエネルギー広がりを抑える場合もあるが、我々の設計は2段ともバンチング位相で使用し、前述のすそ野の部分をできるだけ小さくし捕獲効率を高めるようにしている。

図6から図34のTRACE計算結果は、バンチャの電場強度を1.4MV/mから3MV/mまで0.2MV/m間隔で変化させた場合の位相空間楕円を重畳している。これらの図から、1A程度のビーム電流値であれば与えた電場がそのまま位相空間での回転に寄与しているが、それ以上の電流値になるとドリフトスペースでの拡散を引き戻すために余分な電場を加えなければならず、10A以上では前後のパケットにこぼれてしまっている。

- 図 3 5 は 1 0 0 mA のビームの P B 2 入り口でのエネルギー広がり、
 図 3 6 は 3 0 0 mA のビームの P B 2 入り口でのエネルギー広がり、
 図 3 7 は 1 A のビームの P B 2 入り口でのエネルギー広がり、
 図 3 8 は 5 A のビームの P B 2 入り口でのエネルギー広がり、

図39 は 10 AのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり、
 図40 は 15 AのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり、

図41 は 100 mAのビームのPB2入り口での位相広がり、
 図42 は 300 mAのビームのPB2入り口での位相広がり、
 図43 は 1 AのビームのPB2入り口での位相広がり、
 図44 は 5 AのビームのPB2入り口での位相広がり、
 図45 は 10 AのビームのPB2入り口での位相広がり、
 図46 は 15 AのビームのPB2入り口での位相広がり、

を示している。

また、

図47 は PB1で 1.4 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図48 は PB1で 1.6 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図49 は PB1で 1.8 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図50 は PB1で 2.0 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図51 は PB1で 2.2 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図52 は PB1で 2.4 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図53 は PB1で 2.6 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図54 は PB1で 2.8 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、
 図55 は PB1で 3.0 MV/mを与えたときのエネルギー広がり、

図56 は PB1で 1.4 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図57 は PB1で 1.6 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図58 は PB1で 1.8 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図59 は PB1で 2.0 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図60 は PB1で 2.2 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図61 は PB1で 2.4 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図62 は PB1で 2.6 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図63 は PB1で 2.8 MV/mを与えたときの位相広がり、
 図64 は PB1で 3.0 MV/mを与えたときの位相広がり、

を示している。

また、実際の運転で電流値が変動したときにそれがエネルギー広がりにどのように影響するかを、

図65 ヘルムホルツ磁場が 200 G のときのエネルギー広がり、
 図66 ヘルムホルツ磁場が 250 G のときのエネルギー広がり、
 図67 ヘルムホルツ磁場が 300 G のときのエネルギー広がり、
 図68 ヘルムホルツ磁場が 350 G のときのエネルギー広がり、

にそれぞれ示す。ここでエネルギー広がりがマイナスになっている部分は、空間電荷効果により生じた分散をバンチャの電場では補償できていないことを示している。

以上の計算結果は実際の運転パラメータの初期設定に有用であり、電流値によって磁場強度と電場強度を相互に関連づけた設定が必要であることがわかる。特に1 Aを越える電流値の場合はP B 1の電界設定がかなり微妙で、ある値を越えるところから急にP B 2が有効に作用し始めることが予想される。

ここでの磁場強度は計算回転でのビーム径が同じで電流値のみが変化するものとして与えられているが、実際のエンベロープは電流密度に依存し、実際のビーム径が空間電荷効果で変化し電流密度の変化は計算条件よりも小さくなる。従って磁場強度の変化によるエンベロープの違いは計算よりも緩慢になるだろう。

4. ま と め

大型放射光施設の入射系加速器である線型加速器の入射部は、1992年夏に東海研のリニアック増設棟に設置された。そして電子銃やヘルムホルツコイル、プリバンチャ、バンチャ等個々のエレメントの性能を確認することを第1目的として実験が行われ、同時にビーム輸送性能とバンチング特性が確保できるかどうかを確認する作業も行われている。本論文に述べた計算は、機器配置の設計に使われただけでなく、この実験のために多くのパラメータの中から適当な値を選び出す為に有用である。

東海研設置の構成では、低電流モード(100mA)のビームを設計通りにトランスポートできるが、大電流モード(~20A)のビームはその電流値を維持してトランスポートする事は困難である。

図69 に100mAのビームをアイリスなしでトランスポートした場合の計算、

図70 に 1Aのビームをトランスポートした場合の計算、

図71 に 5Aのビームをトランスポートした場合の計算、

図72 に10Aのビームをトランスポートした場合の計算、

を示す。10Aのビームでは±100kVのエネルギー広がりが生じてしまっている。

小電流モードの運転ではアイリスをいれて電子銃からのビームの芯を切り出させて、図73に示すようなトランスポートになる。

西播磨現地での大電流モードでの運転は、電子銃からP B 1までのドリフトスペースを短くし、図74に示す構成で行う。その場合の磁場強度とエネルギー広がり、位相広がりを調整したビームトランスポートを図75に示す。バンチャの電界強度をどこまであげられるかに依存するが、径方向のビーム広がりはバンチャ内壁にあたらない大きさまで抑え込むことは困難である。つまり、現状のままではかなりの電子がバンチャ内などでロスしており、損失を小さくしてエレガントなビームトランスポートを実現するための改善の手段としては、この系に入射されるビームすなわち電子銃のエミッタنسを改善しビーム径を小さくする以外にない。シングルパルスモードでの大電流ビームを実現するには、R F ガンやフォトエミッションガン等の新技術の投入が必要である。

文 献

- ① SPring-8 Linac Group.: private communication. "JAERI-memo 04-007"
- ② SPring-8 Linac Group.: private communication. "JAERI-memo 04-144"
- ③ K. L. Brown and S. K. Howry.: SLAC-91 "A COMPUTER PROGRAM FOR DESIGNING CHARGED PARTICLE BEAM TRANSPORT SYSTEMS" (1970), July

4. まとめ

大型放射光施設の入射系加速器である線型加速器の入射部は、1992年夏に東海研のリニアック増設棟に設置された。そして電子銃やヘルムホルツコイル、プリバンチャ、バンチャ等個々のエレメントの性能を確認することを第1目的として実験が行われ、同時にビーム輸送性能とバンチング特性が確保できるかどうかを確認する作業も行われている。本論文に述べた計算は、機器配置の設計に使われただけでなく、この実験のために多くのパラメータの中から適当な値を選び出す為に有用である。

東海研設置の構成では、低電流モード(100mA)のビームを設計通りにトランスポートできるが、大電流モード(~20A)のビームはその電流値を維持してトランスポートする事は困難である。

図69 に100mAのビームをアイリスなしでトランスポートした場合の計算、

図70 に 1Aのビームをトランスポートした場合の計算、

図71 に 5Aのビームをトランスポートした場合の計算、

図72 に10Aのビームをトランスポートした場合の計算、

を示す。10Aのビームでは±100kVのエネルギー広がりが生じてしまっている。

小電流モードの運転ではアイリスをいれて電子銃からのビームの芯を切り出させて、図73に示すようなトランスポートになる。

西播磨現地での大電流モードでの運転は、電子銃からPB1までのドリフトスペースを短くし、図74に示す構成で行う。その場合の磁場強度とエネルギー広がり、位相広がりを調整したビームトランスポートを図75に示す。バンチャの電界強度をどこまであげられるかに依存するが、径方向のビーム広がりはバンチャ内壁にあたらない大きさまで抑え込むことは困難である。つまり、現状のままではかなりの電子がバンチャ内などでロスしており、損失を小さくしてエレガントなビームトランスポートを実現するための改善の手段としては、この系に入射されるビームすなわち電子銃のエミッタنسを改善しビーム径を小さくする以外にない。シングルパルスモードでの大電流ビームを実現するには、RFガンやフォトエミッションガン等の新技術の投入が必要である。

文 献

- ① SPring-8 Linac Group.: private communication. "JAERI-memo 04-007"
- ② SPring-8 Linac Group.: private communication. "JAERI-memo 04-144"
- ③ K.L.Brown and S.K.Howry.: SLAC-91 "A COMPUTER PROGRAM FOR DESIGNING CHARGED PARTICLE BEAM TRANSPORT SYSTEMS" (1970), July

表 I TRACE 計算結果

Gauss	PBI (MV/m)	Phi	100 (mA)	dE	300 (mA)	Phi	1 (A)	dE	Phi	5 (A)	dE	Phi	10 (A)	dE	Phi	15 (A)	dE	
350	v1	3	9.933	7.6.587	11.788	75.832	17.409	7.9.391	37.982	104.581	51.67	129.288	61.712	149.96				
	v2	2.8	10.482	71.628	12.397	70.388	18.222	72.229	39.523	90.996	53.728	111.156	64.156	128.408				
	v3	2.6	11.042	66.604	13.019	64.873	19.029	64.976	41.094	77.232	55.825	92.777	66.645	106.573				
	v4	2.4	11.612	61.512	13.651	59.286	19.862	57.624	42.693	63.289	57.96	74.159	69.179	84.45				
	v5	2.2	12.192	56.354	14.236	50.524	20.71	50.181	44.321	60.135	55.292	71.76	62.037					
	v6	2	12.784	51.129	14.952	47.881	21.573	42.649	45.98	34.849	62.35	36.178	74.388	39.332				
	v7	1.8	13.386	45.833	15.621	42.065	22.453	35.019	47.67	20.354	64.605	16.818	77.065	16.329				
	v8	1.6	14	40.471	16.302	36.166	23.349	27.285	49.391	5.729	66.902	-2.951	79.791	-7.034				
	v9	1.4	14.625	35.043	16.997	30.193	24.261	19.467	51.144	-9.344	69.242	-22.74	82.568	-30.628				
300	v1	3	9.907	77.103	11.727	76.58	17.29	77.031	36.188	101.919	48.959	122.885	58.359	141.277				
	v2	2.8	10.455	72.107	12.335	71.091	18.081	70.007	37.664	88.862	50.908	105.662	60.666	120.884				
	v3	2.6	11.014	67.049	12.953	65.533	18.886	62.89	39.166	75.632	52.894	88.209	63.016	100.232				
	v4	2.4	11.583	61.129	13.583	59.904	19.706	55.68	40.697	62.23	54.916	70.522	65.408	79.307				
	v5	2.2	12.163	56.745	14.225	54.205	20.541	48.371	42.255	48.656	56.975	52.597	67.844	58.106				
	v6	2	12.754	51.496	14.878	48.434	21.392	40.97	43.842	34.906	59.072	34.427	70.325	36.621				
	v7	1.8	13.356	46.183	15.544	42.591	22.259	33.474	45.459	21.985	61.208	16.032	72.652	14.855				
	v8	1.6	13.969	40.804	16.223	36.676	23.142	25.885	47.105	6.935	63.384	-2.778	75.426	-7.264				
	v9	1.4	14.593	35.36	16.914	30.669	24.041	18.211	48.782	-7.552	65.599	-21.538	78.047	-29.579				
250	v1	3	9.853	76.881	11.587	76.568	16.851	78.653	34.094	93.276	45.751	110.735	54.22	126.497				
	v2	2.8	10.406	71.912	12.119	71.128	17.631	71.669	35.477	81.079	47.565	94.8	56.354	107.745				
	v3	2.6	10.963	66.879	12.805	65.616	18.426	64.596	36.886	68.725	49.411	78.657	58.527	88.745				
	v4	2.4	11.531	61.783	13.431	60.033	19.236	57.432	38.321	56.203	51.292	62.306	60.739	69.491				
	v5	2.2	12.109	56.622	14.068	54.378	20.036	50.177	39.782	43.52	53.208	45.73	62.993	49.99				
	v6	2	12.699	51.396	14.718	48.651	20.9	42.83	41.271	30.672	55.158	28.943	65.288	30.236				
	v7	1.8	13.299	46.105	15.38	42.852	21.755	35.391	42.786	17.666	57.145	11.952	67.626	10.233				
	v8	1.6	13.91	40.75	16.504	36.98	22.627	27.86	44.33	4.593	59.169	-5.114	70.007	-10.121				
	v9	1.4	14.533	35.328	16.74	31.035	23.514	20.244	45.903	-9.039	61.23	-22.824	72.432	-30.657				
200	v1	3	9.813	76.938	11.453	75.931	16.365	74.037	31.268	90.161	41.479	107.889	48.938	122.536				
	v2	2.8	10.358	71.973	12.05	70.539	17.118	67.38	32.49	78.843	43.143	92.485	50.949	105.282				
	v3	2.6	10.913	66.947	12.657	65.079	17.885	60.631	33.795	67.373	44.836	77.592	52.936	87.807				
	v4	2.4	11.479	61.858	13.276	53.951	19.462	53.666	53.124	53.791	49.553	62.508	46.561	70.106				
	v5	2.2	12.055	56.706	13.906	53.952	19.462	46.861	36.478	43.981	48.317	47.229	57.019	52.177				
	v6	2	12.641	51.491	14.548	48.284	20.273	39.838	37.857	32.058	50.106	31.552	59.117	34.015				
	v7	1.8	13.239	46.211	15.202	42.544	21.099	32.723	39.261	19.987	51.928	16.082	61.254	15.625				
	v8	1.6	13.848	40.866	15.868	36.734	21.941	25.518	40.691	7.812	53.783	1.042	63.43	-3.163				
	v9	1.4	14.469	35.457	16.547	30.854	22.798	18.233	42.148	-4.9	55.673	-15.974	65.677	-21.65				
150	v1	3	9.697	77.152	11.129	76.653	15.369	75.748	27.816	80.639								
	v2	2.8	10.239	72.216	11.717	71.33	16.092	69.258	28.959									
	v3	2.6	10.791	67.218	12.315	65.94	16.829	62.685	30.123									
	v4	2.4	11.353	62.158	12.925	60.482	17.579	56.031	31.308									
	v5	2.2	11.926	57.034	13.546	54.956	18.344	49.344	42.292									
	v6	2	12.51	51.846	14.179	49.359	19.122	42.468	32.515									
	v7	1.8	13.105	46.594	14.824	43.693	19.915	35.559	33.744									
	v8	1.6	13.71	41.278	15.48	37.956	20.723	28.566	36.271									
	v9	1.4	14.327	35.896	16.149	32.15	21.545	21.494	37.57									

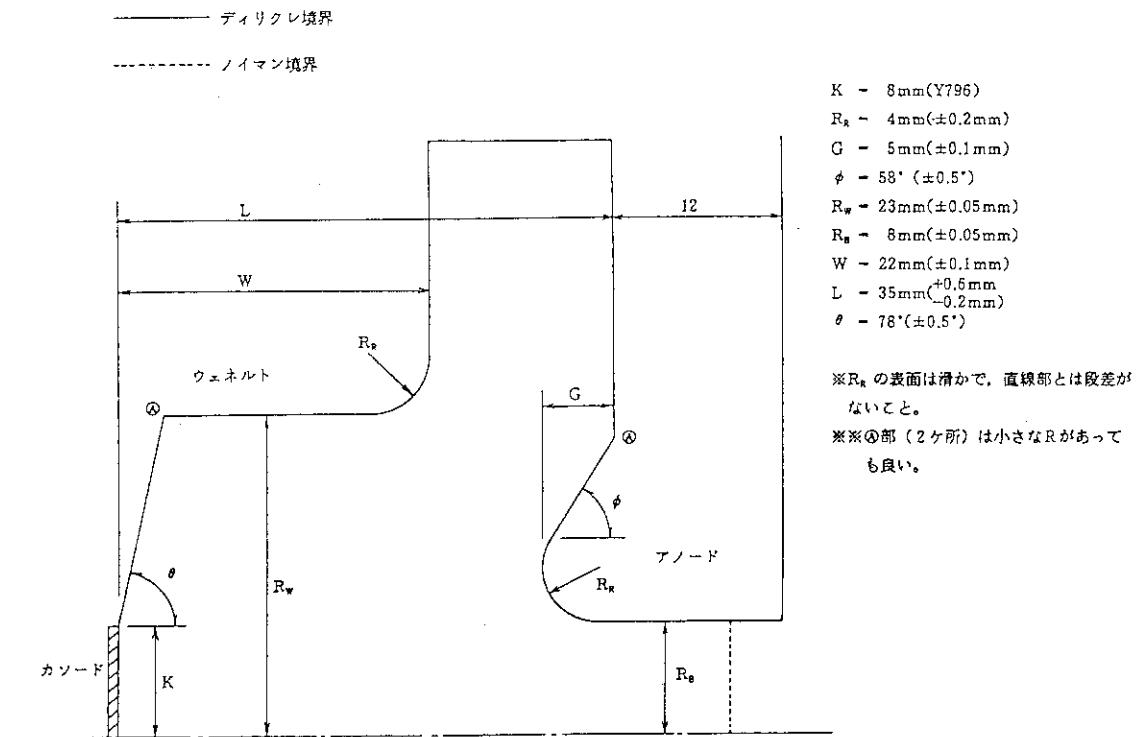


図1 電子銃電極形状

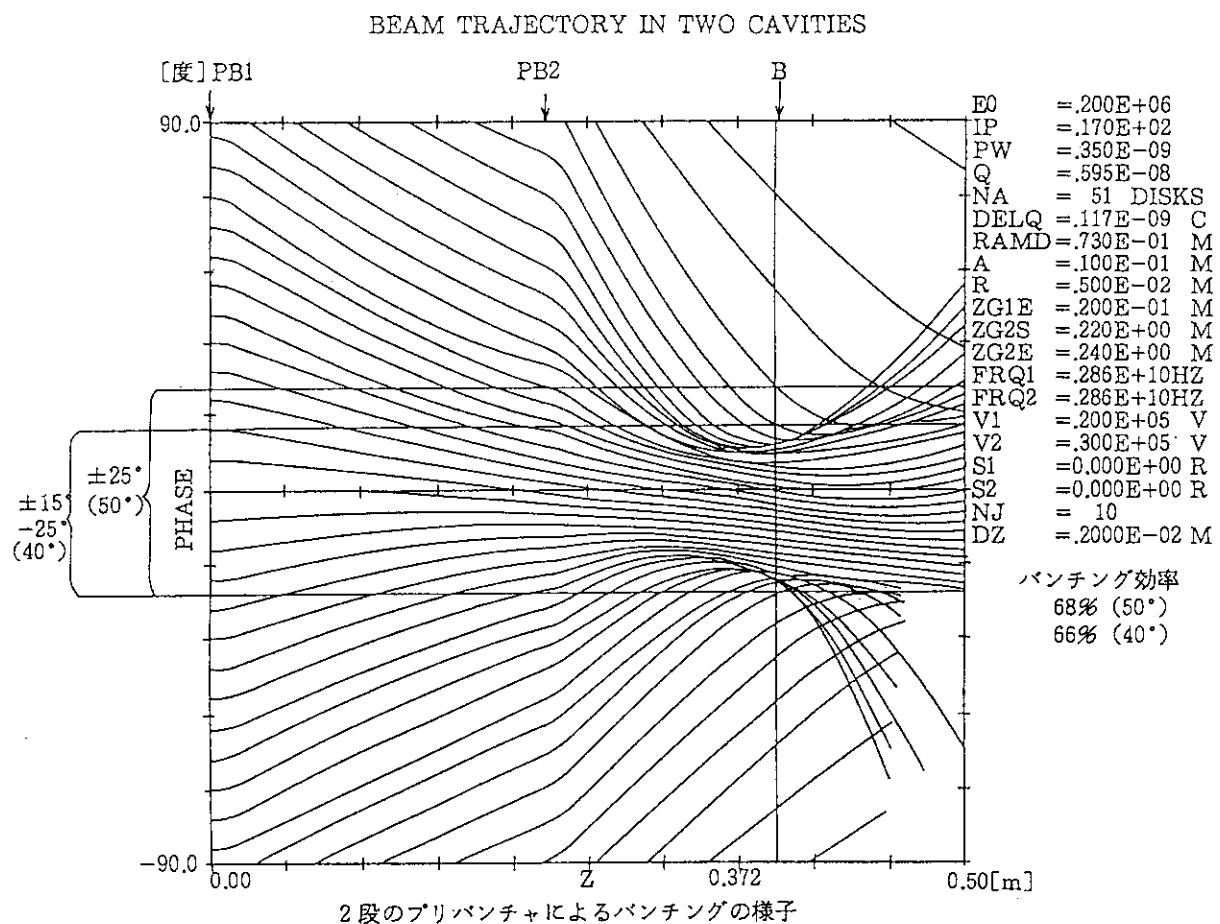
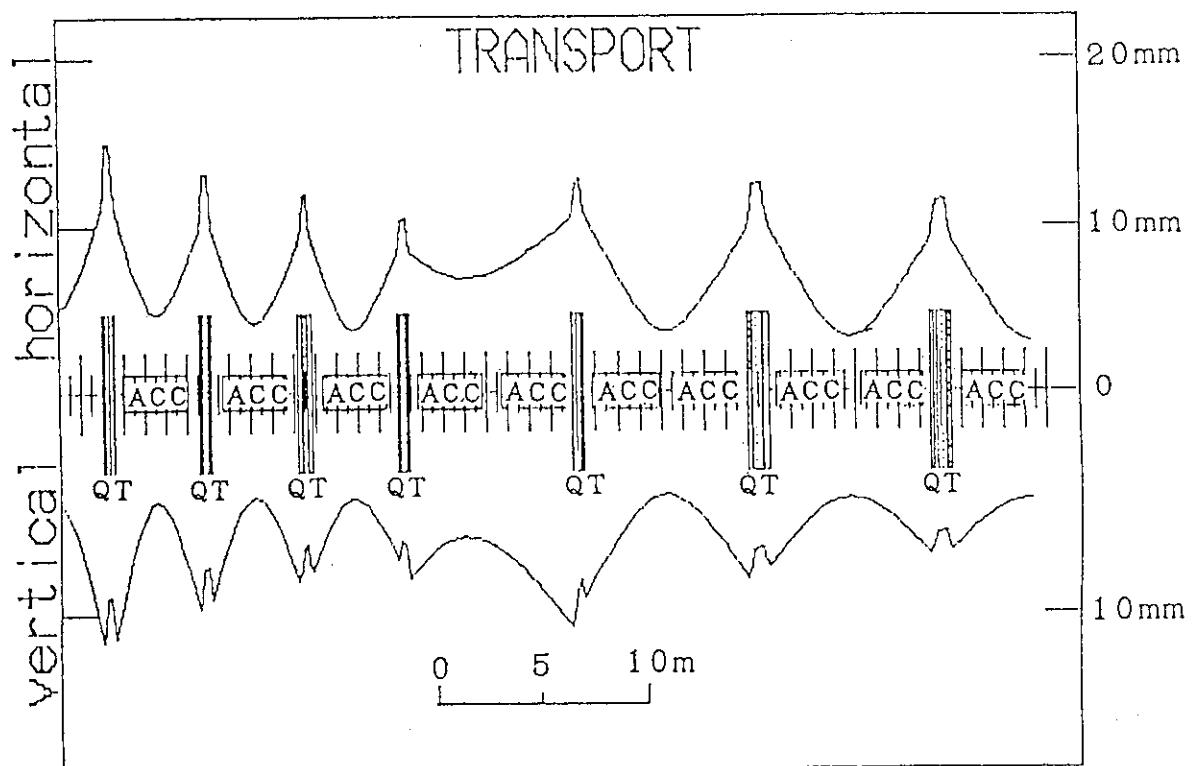


図2 プリバンチャのバンチング効果



MLのNo. 1-AccからNo. 10-Acc部

図3 TRANSPORT計算出力の例

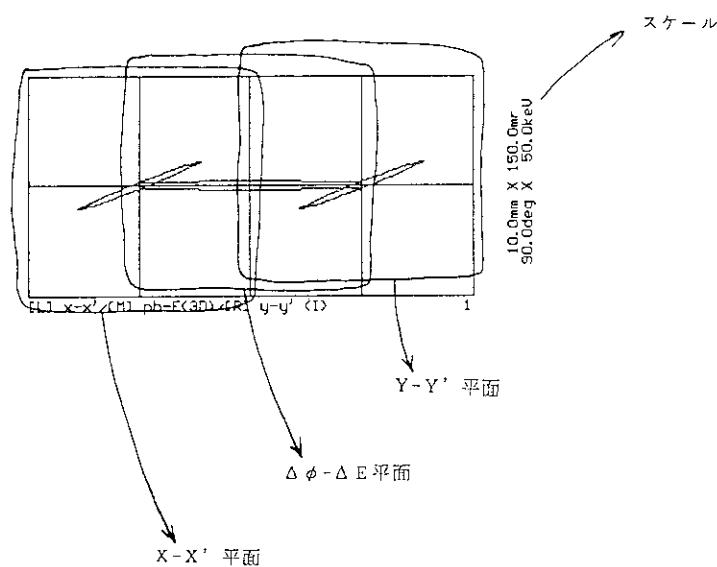
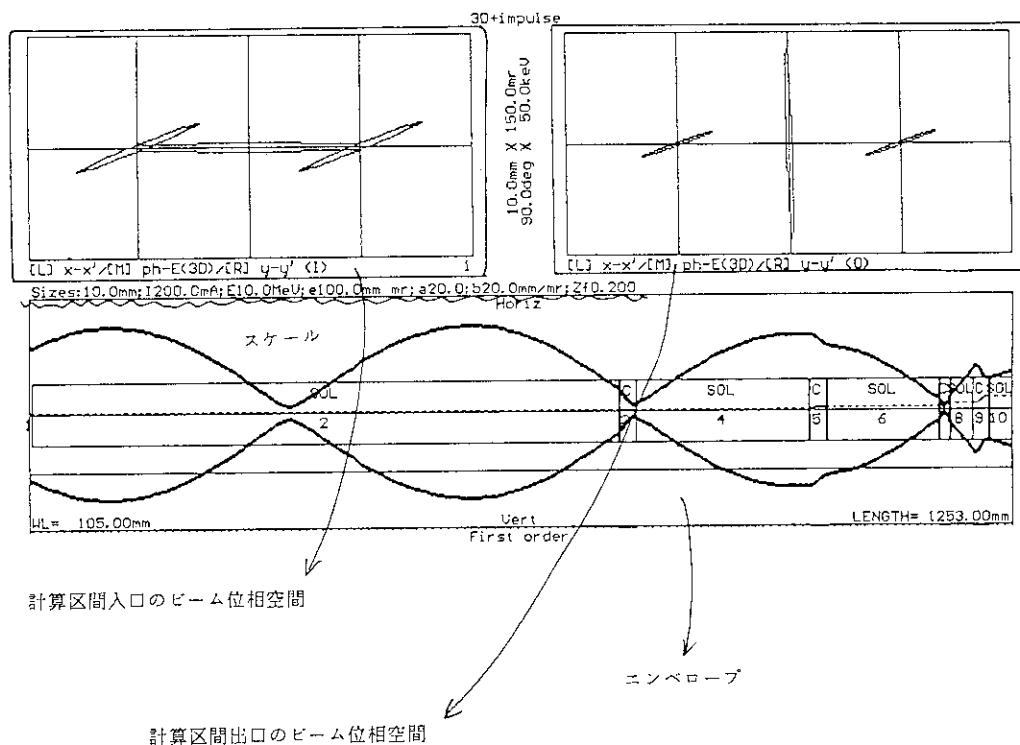


図 4 TRACE 計算結果の見方

hc.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 20A impulse ***

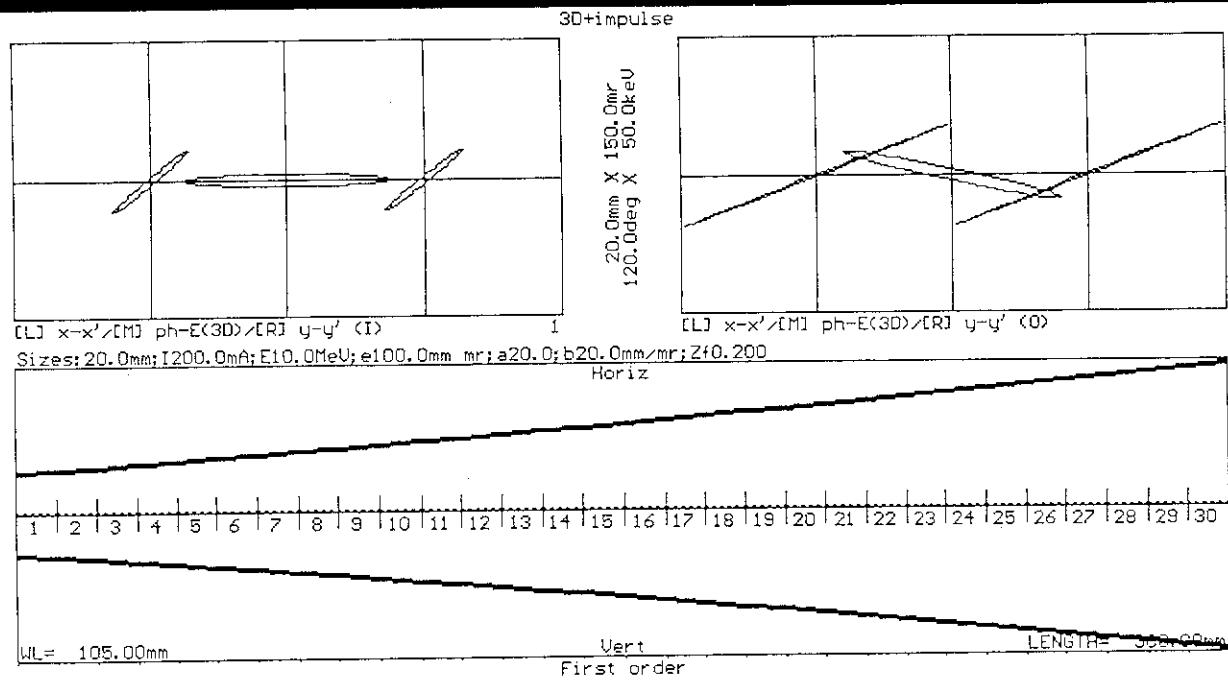


図5 大電流ビームのドリフトスペースでのひろがり

b15v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 100mA, 150G impulse ***

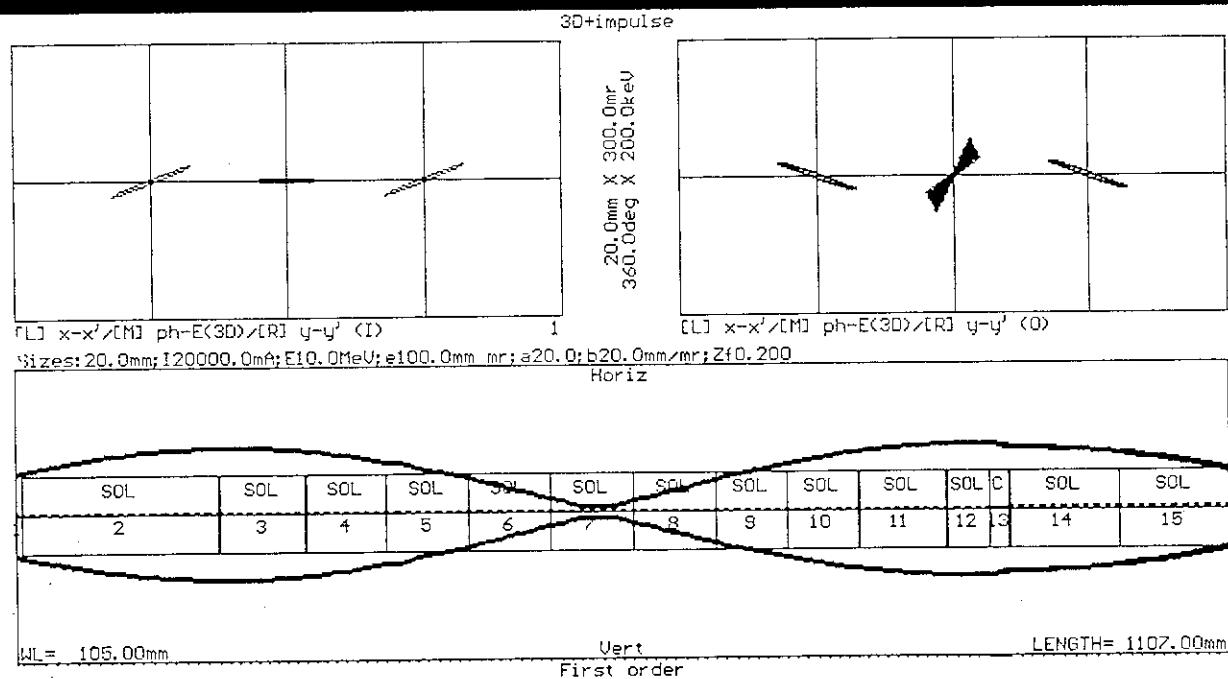


図6 電流値：100mA、ヘルムホルツコイルの磁場：150G

b20v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 100mA,200G impulse ***

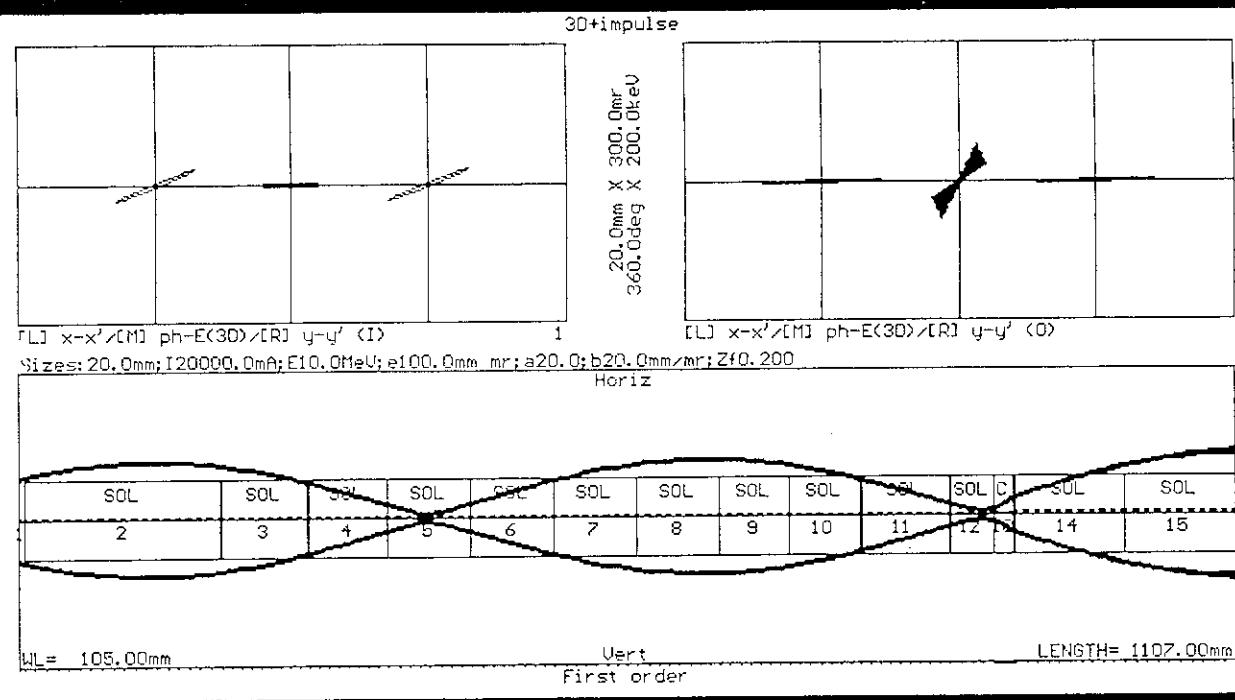


図 7 電流値：100mA、ヘルムホルツコイルの磁場：200G

b25v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 100mA,250G impulse ***

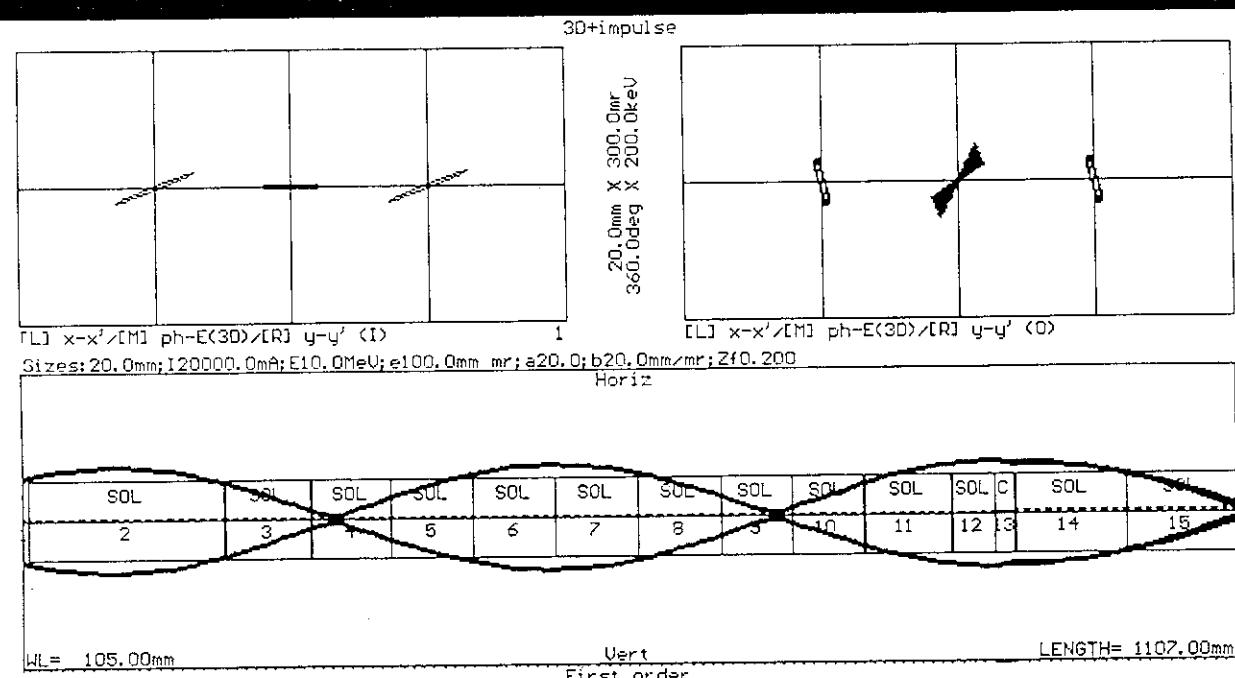


図 8 電流値：100mA、ヘルムホルツコイルの磁場：250G

b30v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 100mA,300G impulse ***

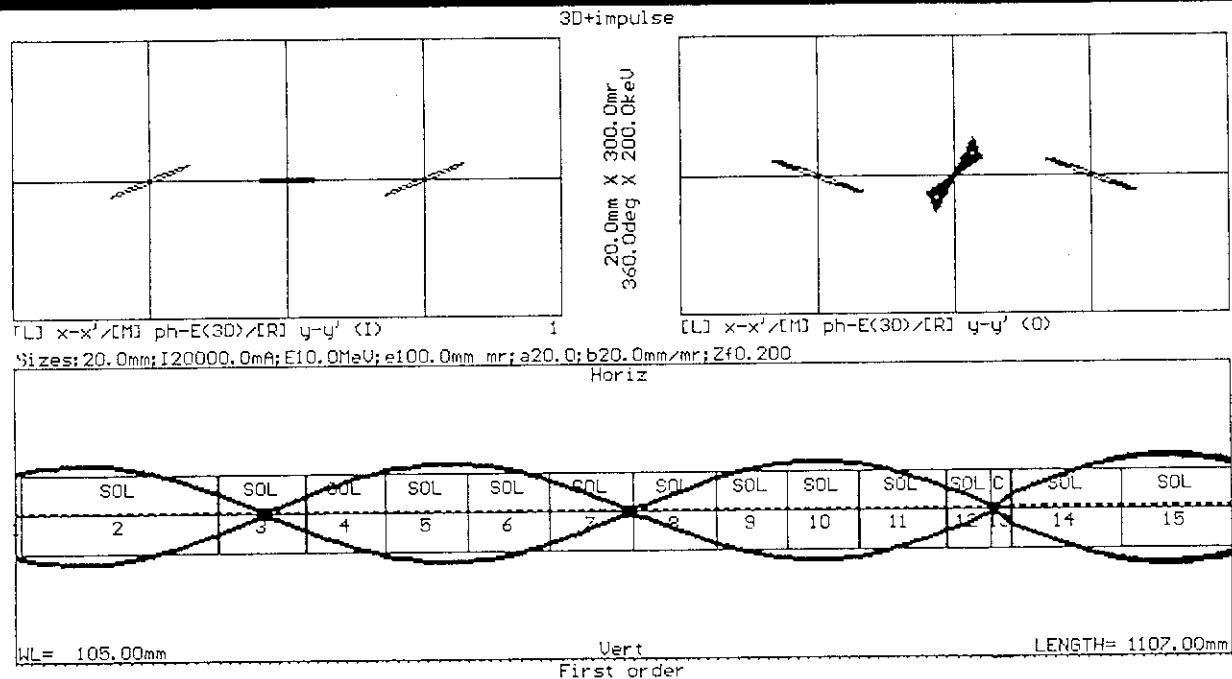


図9 電流値：100mA、ヘルムホルツコイルの磁場：300G

b35v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 100mA,350G impulse ***

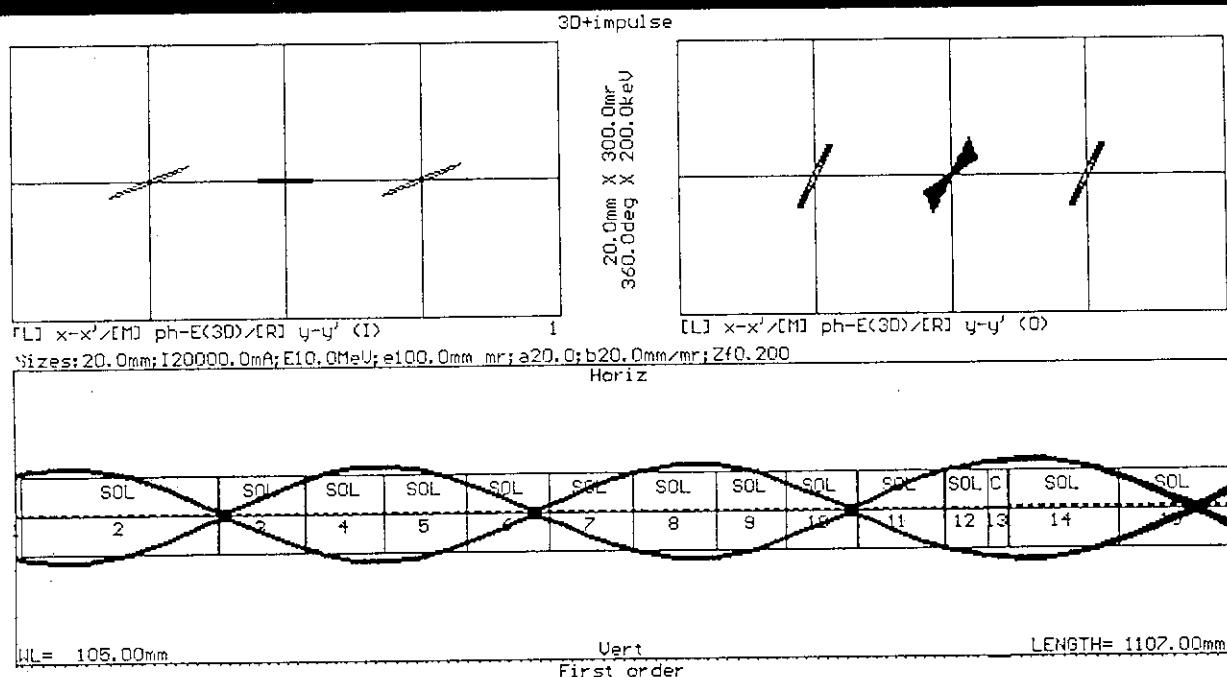


図10 電流値：100mA、ヘルムホルツコイルの磁場：350G

b15v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 300mA,150G impulse ***

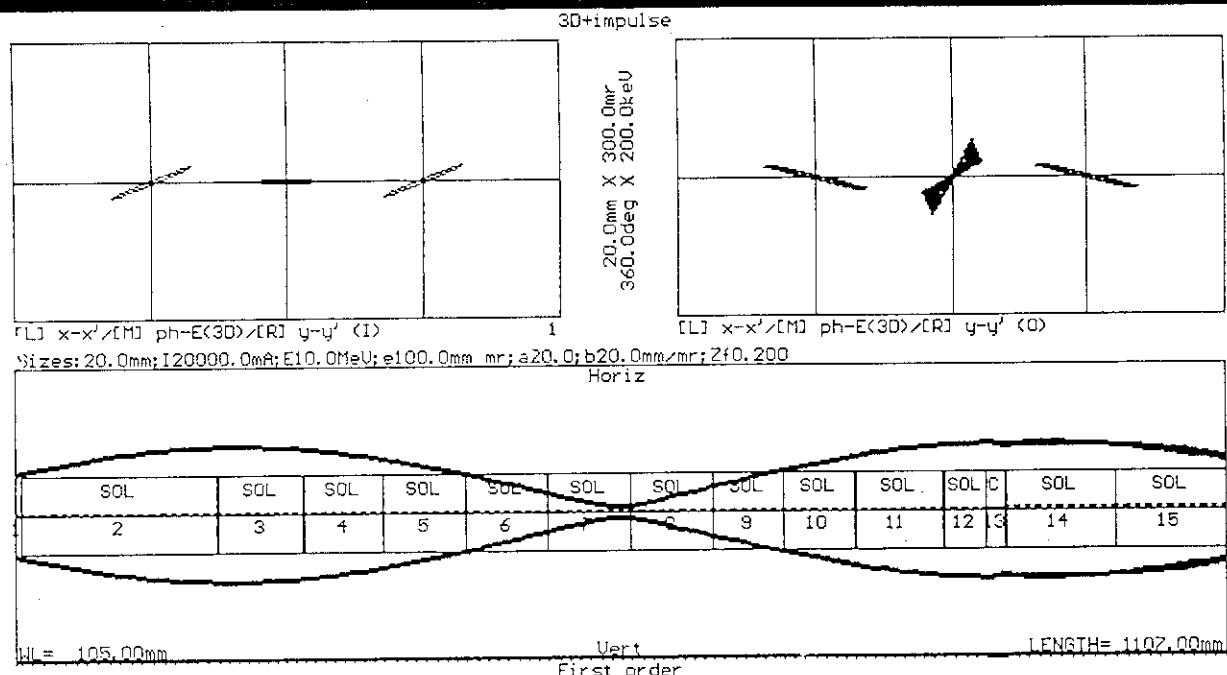


図11 電流値：300mA、ヘルムホルツコイルの磁場：150G

b20v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 300mA,200G impulse ***

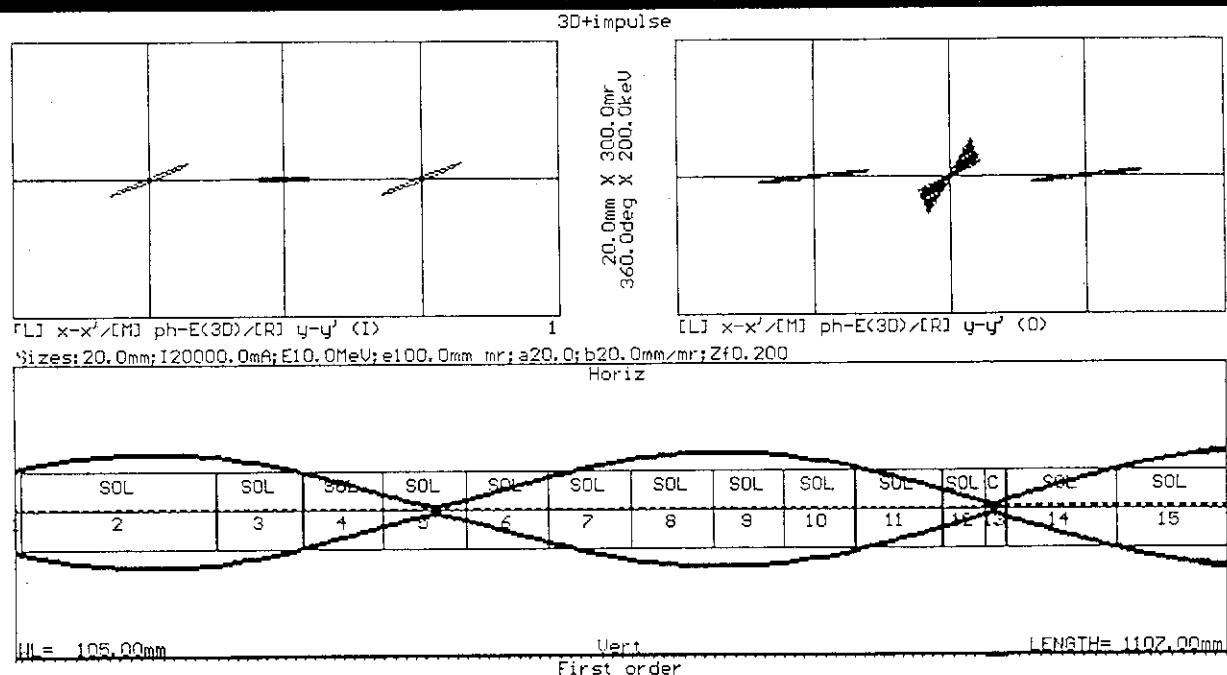


図12 電流値：300mA、ヘルムホルツコイルの磁場：200G

b25v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 300mA,250G impulse ***

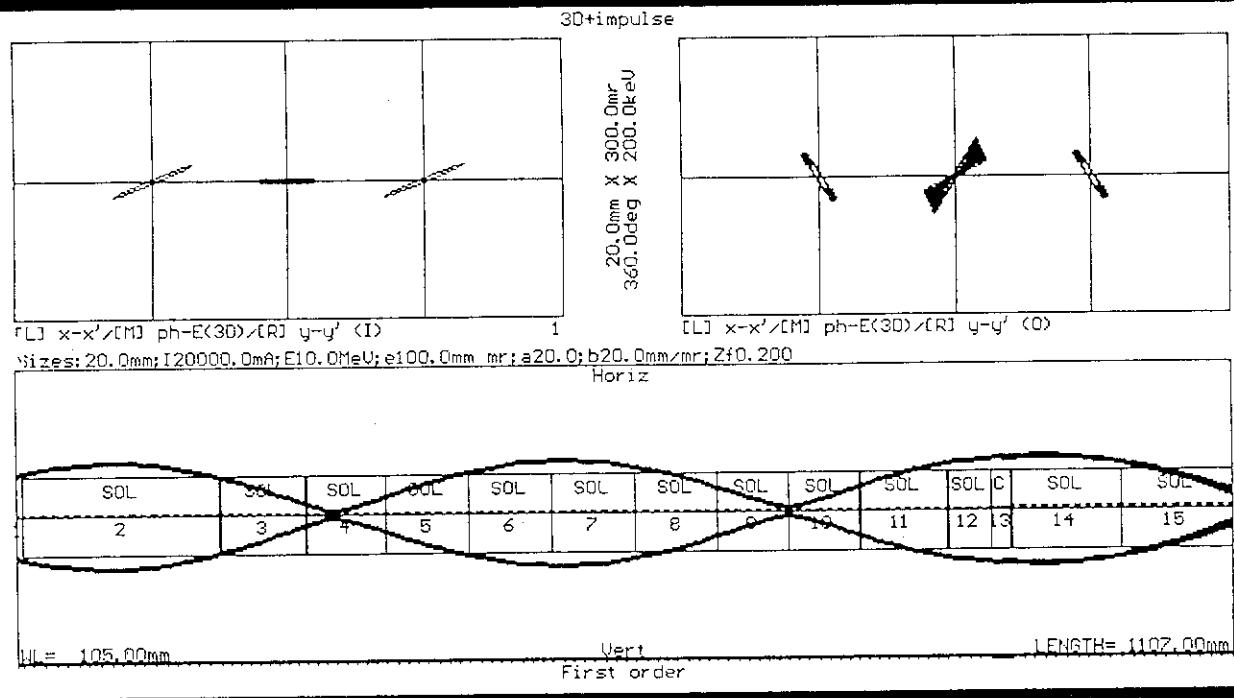


図13 電流値：300mA、ヘルムホルツコイルの磁場：250G

b30v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 300mA,300G impulse ***

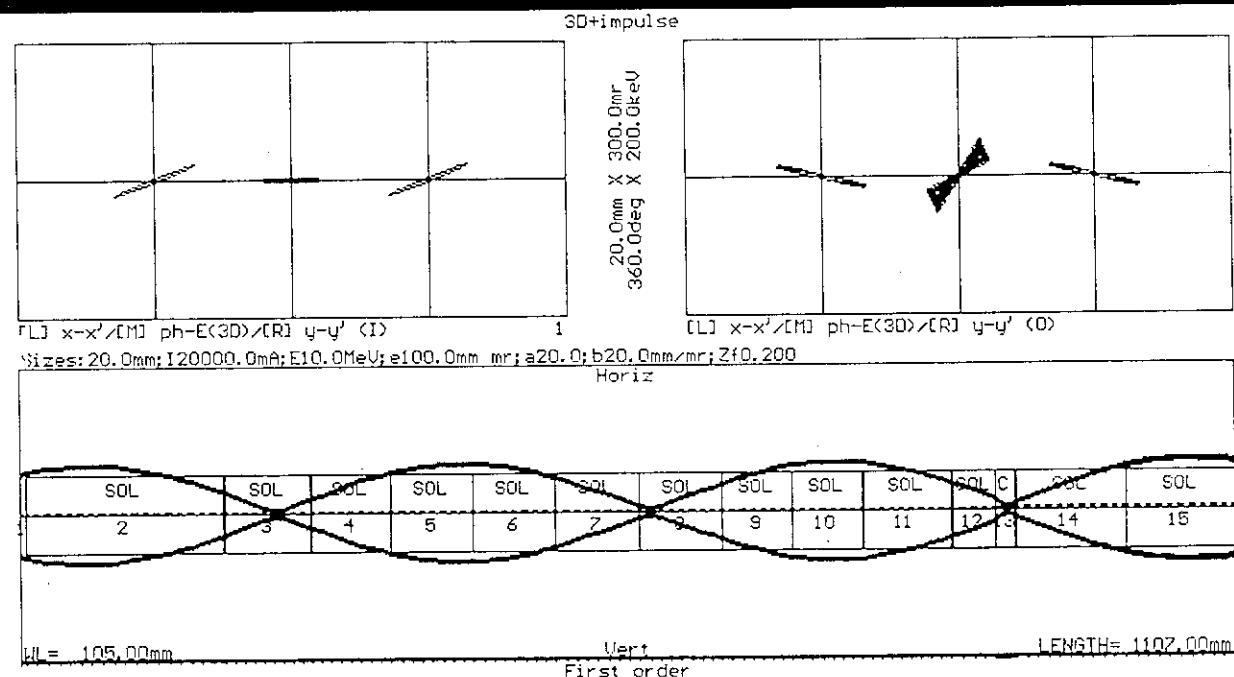


図14 電流値：300mA、ヘルムホルツコイルの磁場：300G

b35v9.DAT:*** SPRING-8 LINAC. BUNCHING SECTION. 300mA, 350G impulse ***

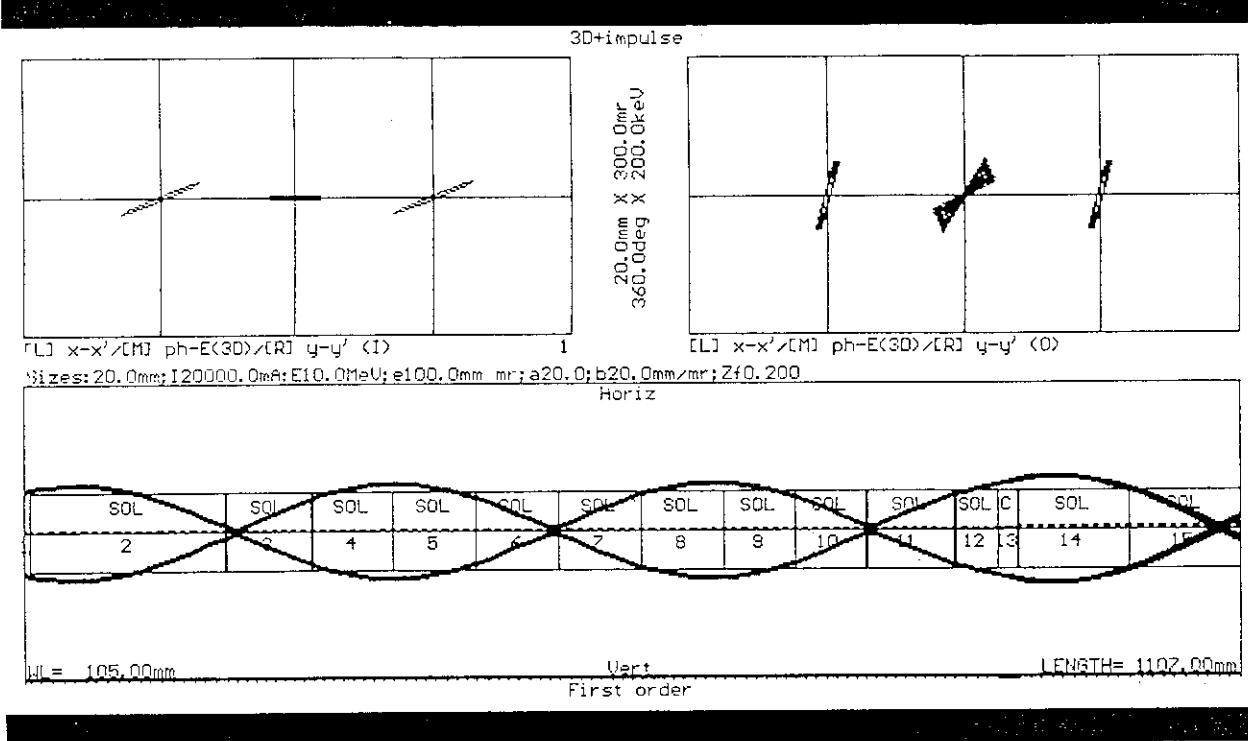


図15 電流値：300mA、ヘルムホルツコイルの磁場：350G

b15v9.DAT:*** SPRING-8 LINAC. BUNCHING SECTION. 1A, 150G impulse ***

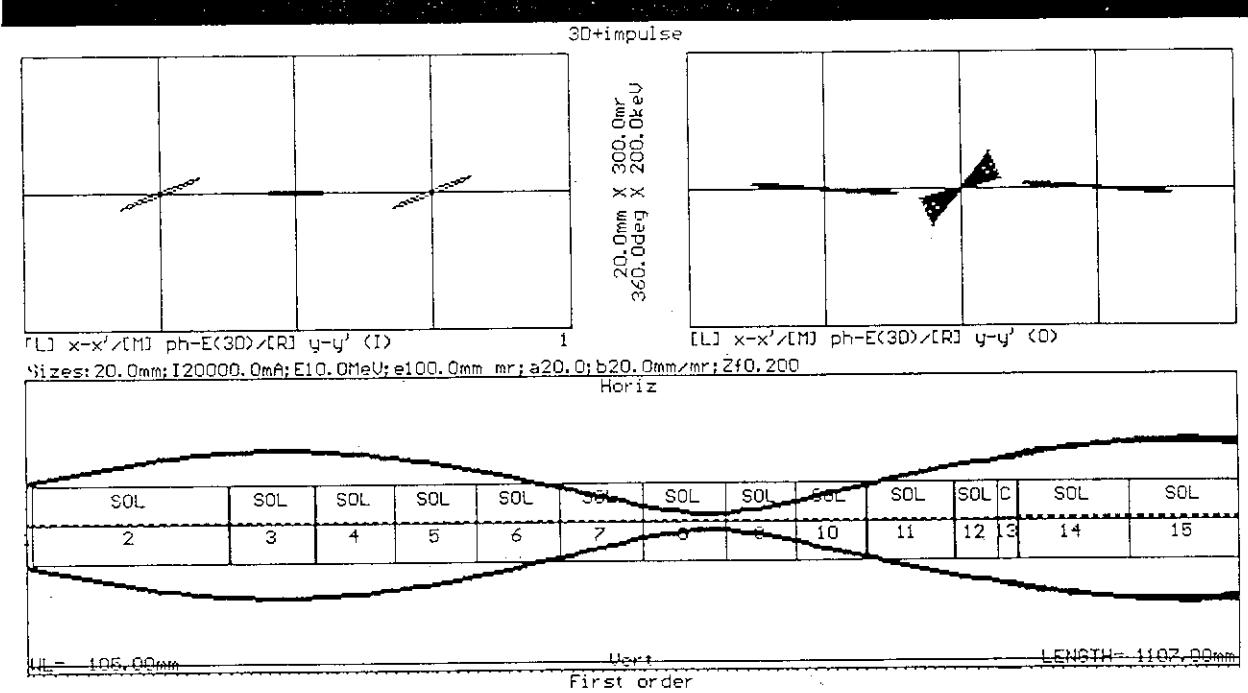


図16 電流値：1 A、ヘルムホルツコイルの磁場：150G

b20v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 1A,200G impulse ***

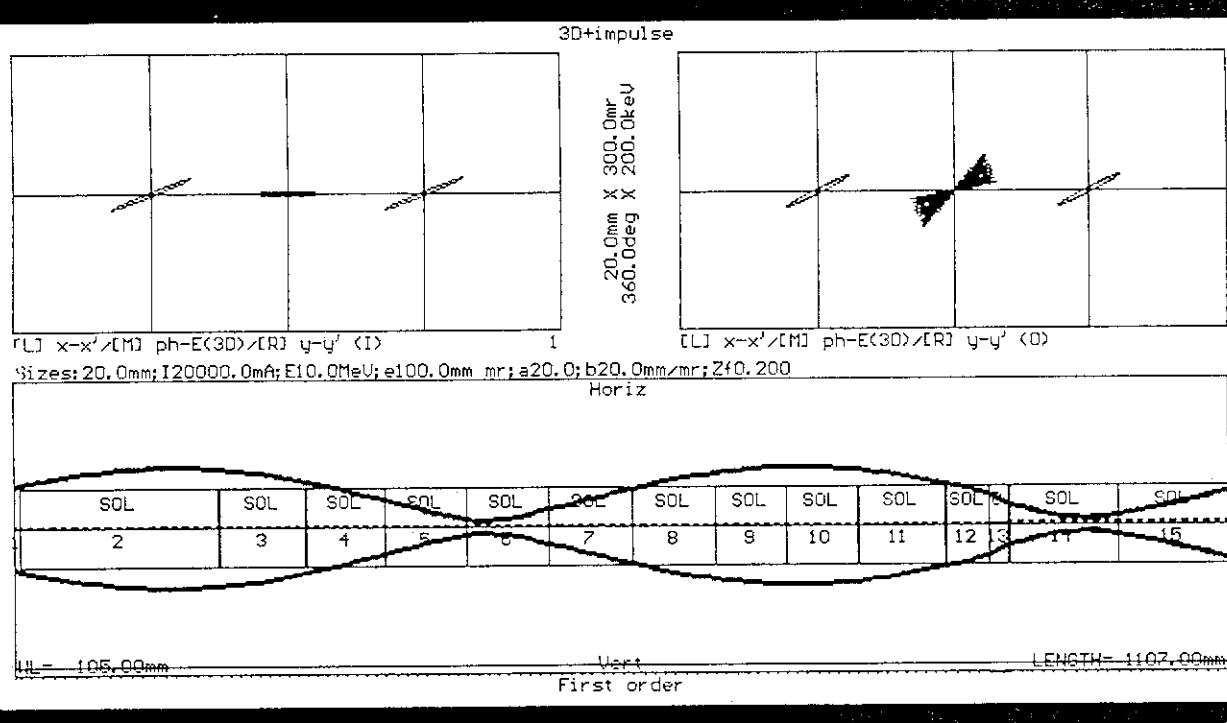


図17 電流値：1 A、ヘルムホルツコイルの磁場：200G

b25v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 1A,250G impulse ***

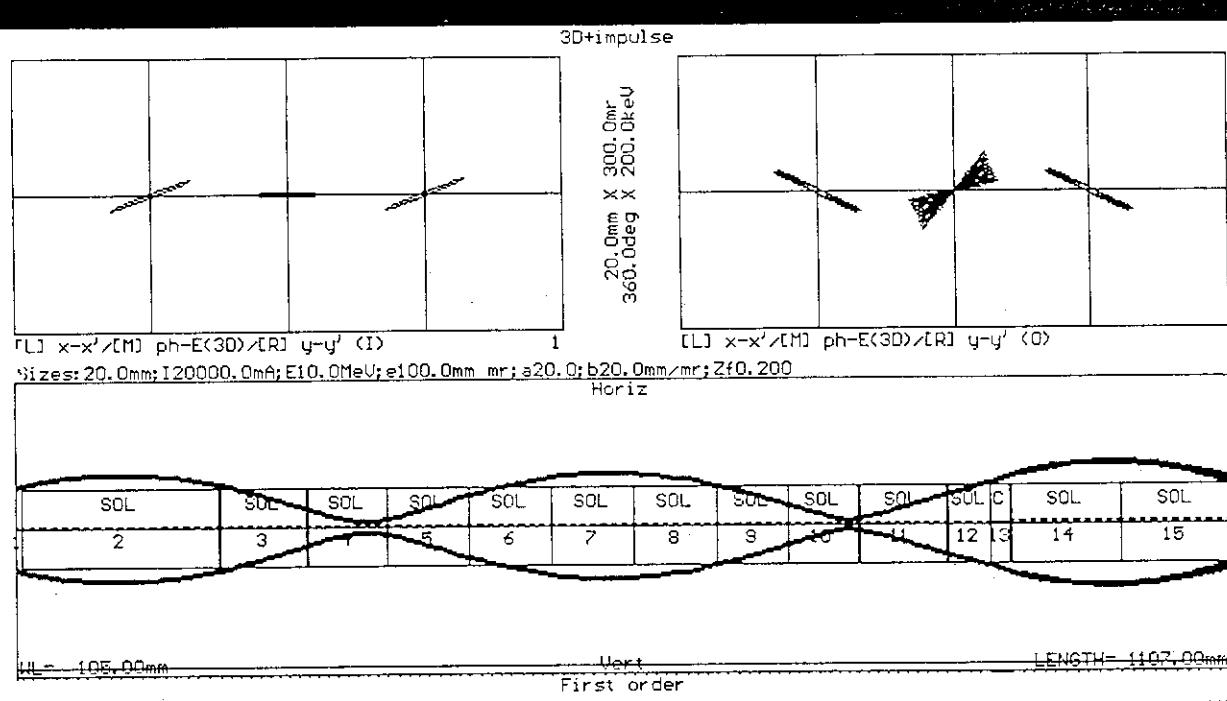


図18 電流値：1 A、ヘルムホルツコイルの磁場：250G

b30v9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 1A,300G impulse ***

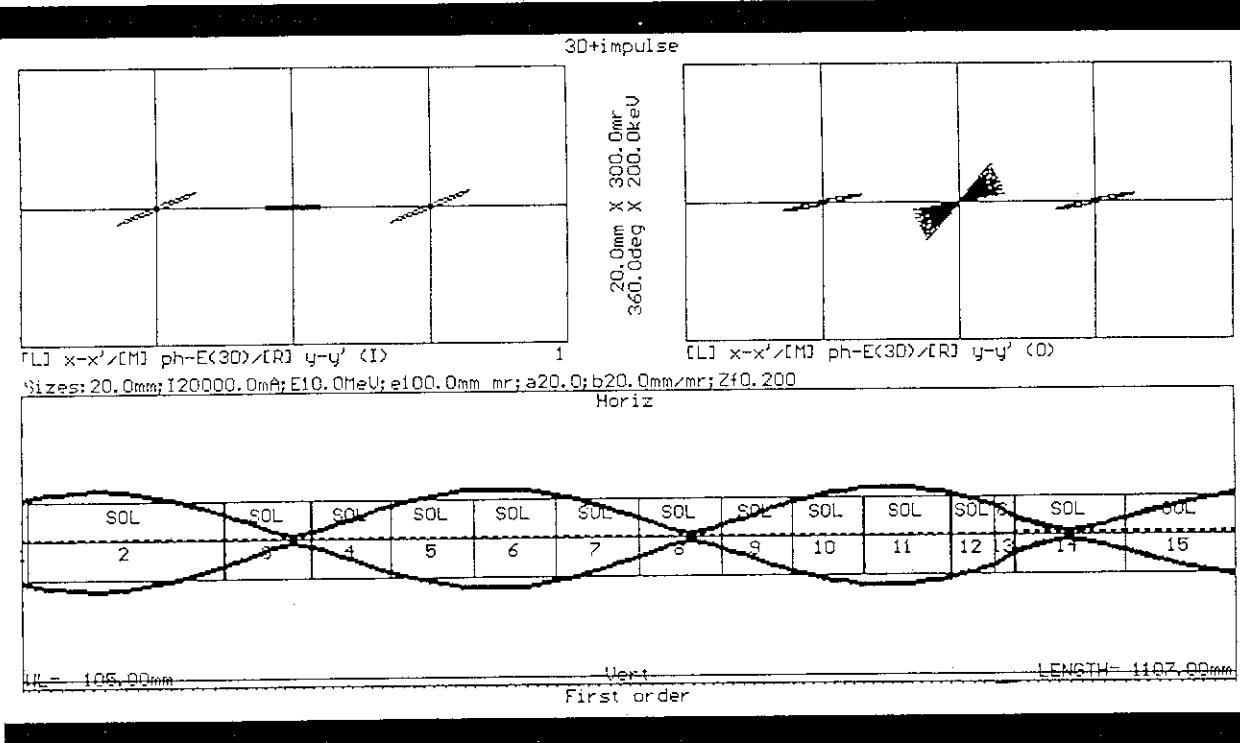


図19 電流値：1 A、ヘルムホルツコイルの磁場：300G

b35v9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 1A,350G impulse ***

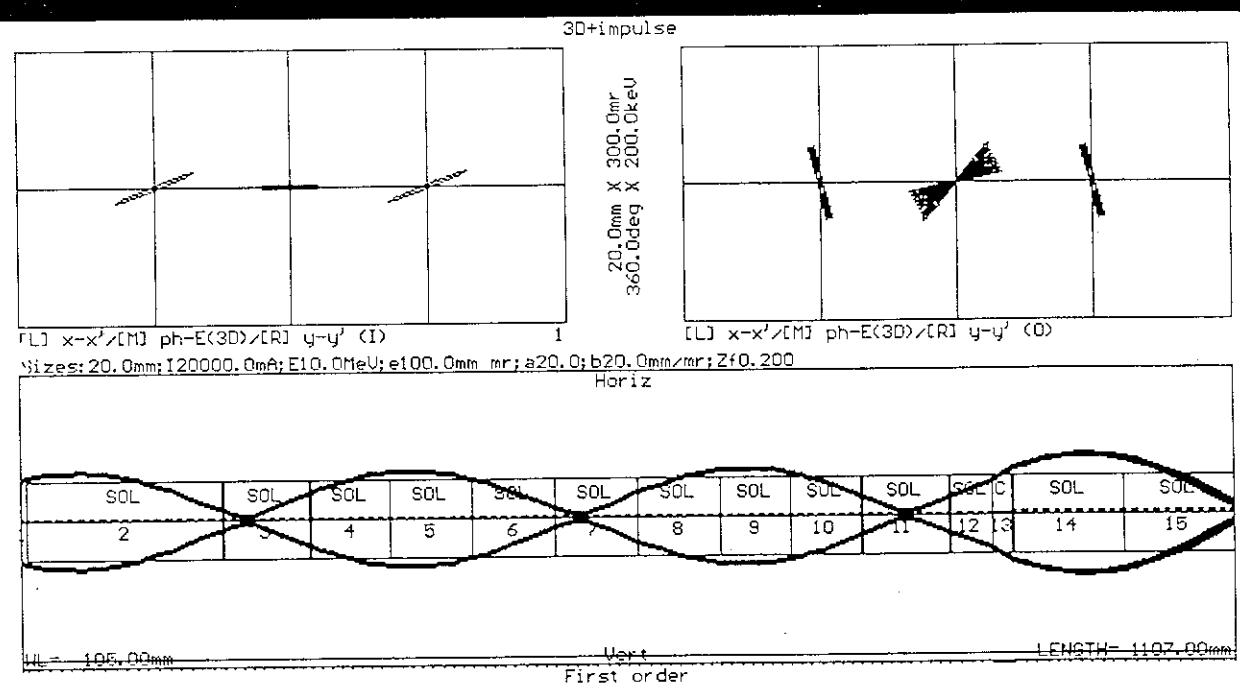


図20 電流値：1 A、ヘルムホルツコイルの磁場：350G

B15U9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 5A,150G impulse ***

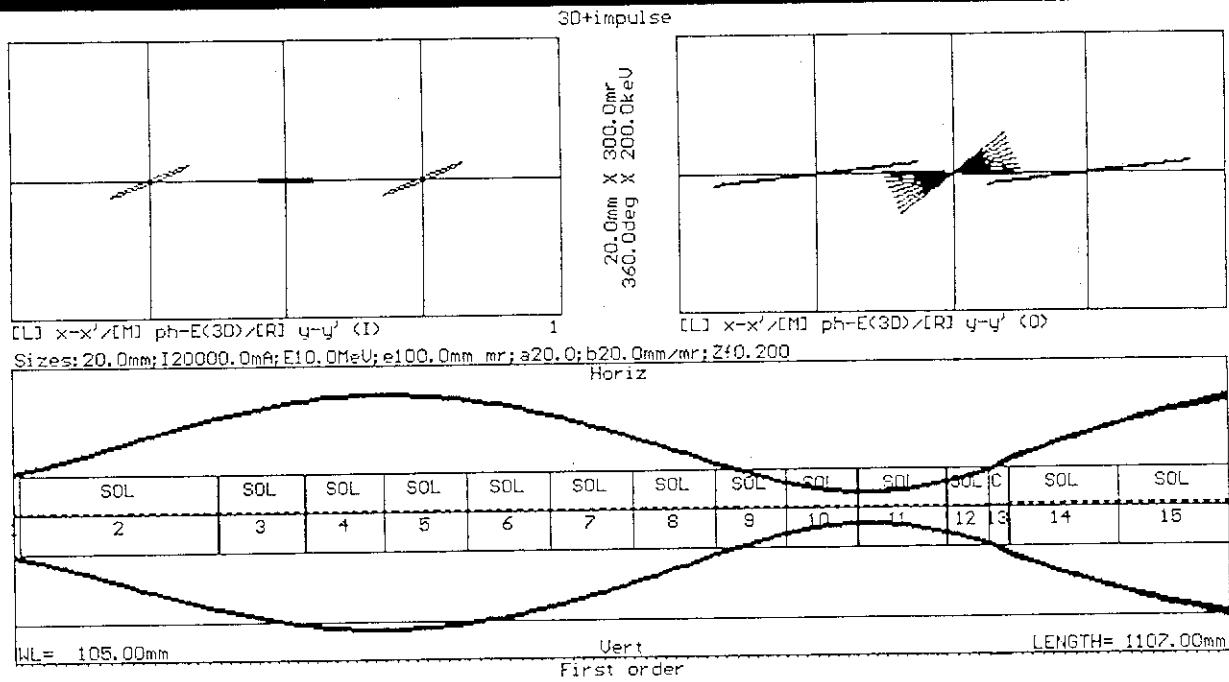


図21 電流値: 5 A、ヘルムホルツコイルの磁場: 150G

B20U9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 5A,200G impulse ***

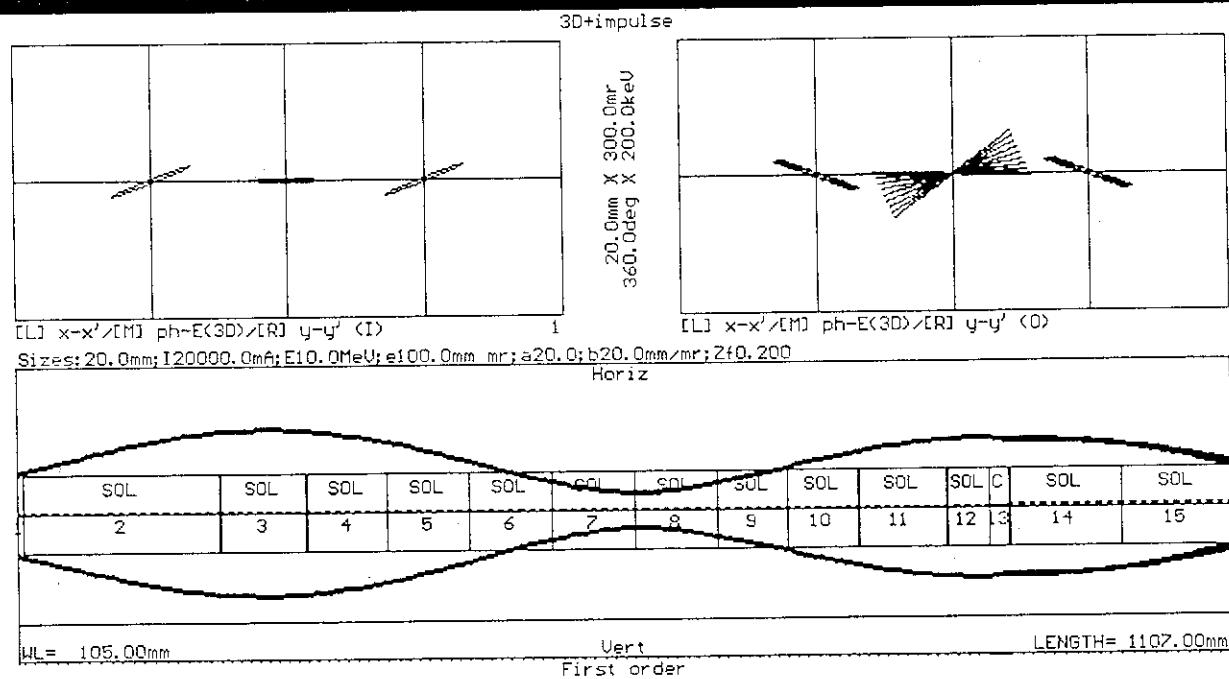


図22 電流値: 5 A、ヘルムホルツコイルの磁場: 200G

B25U9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 5A,250G impulse ***

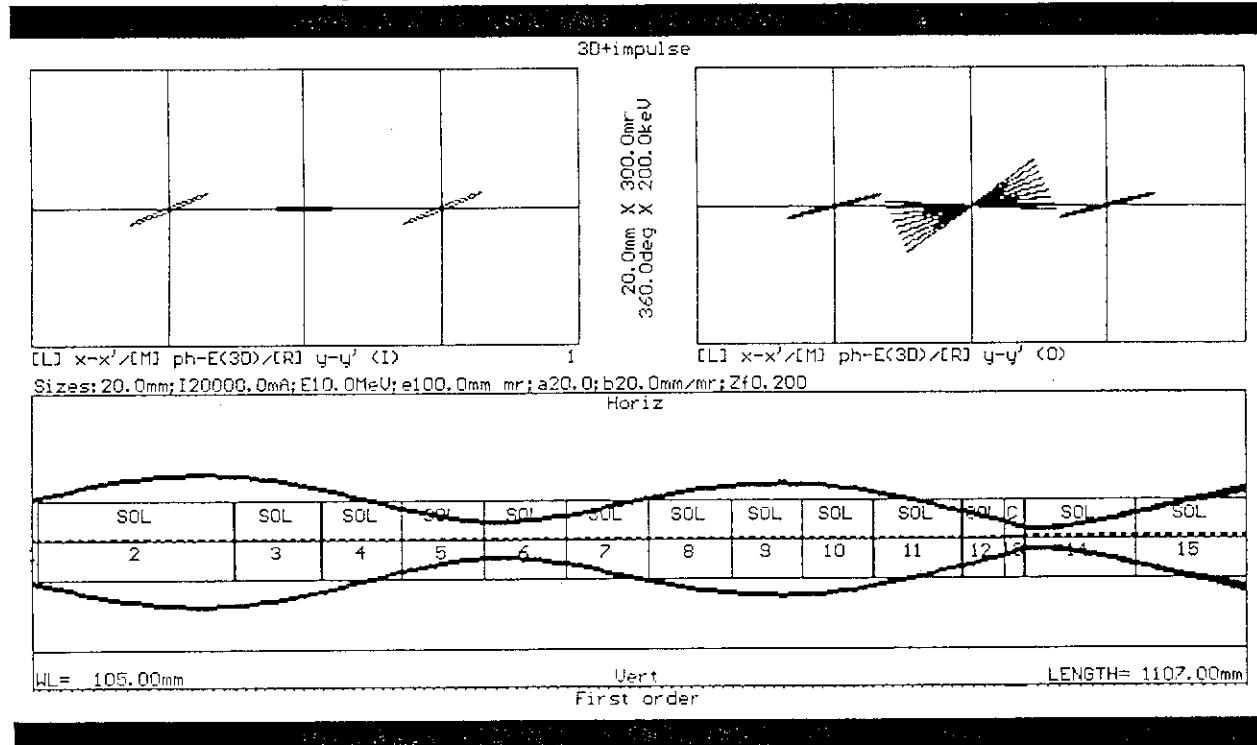


図23 電流値：5 A、ヘルムホルツコイルの磁場：250G

B30U9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 5A,300G impulse ***

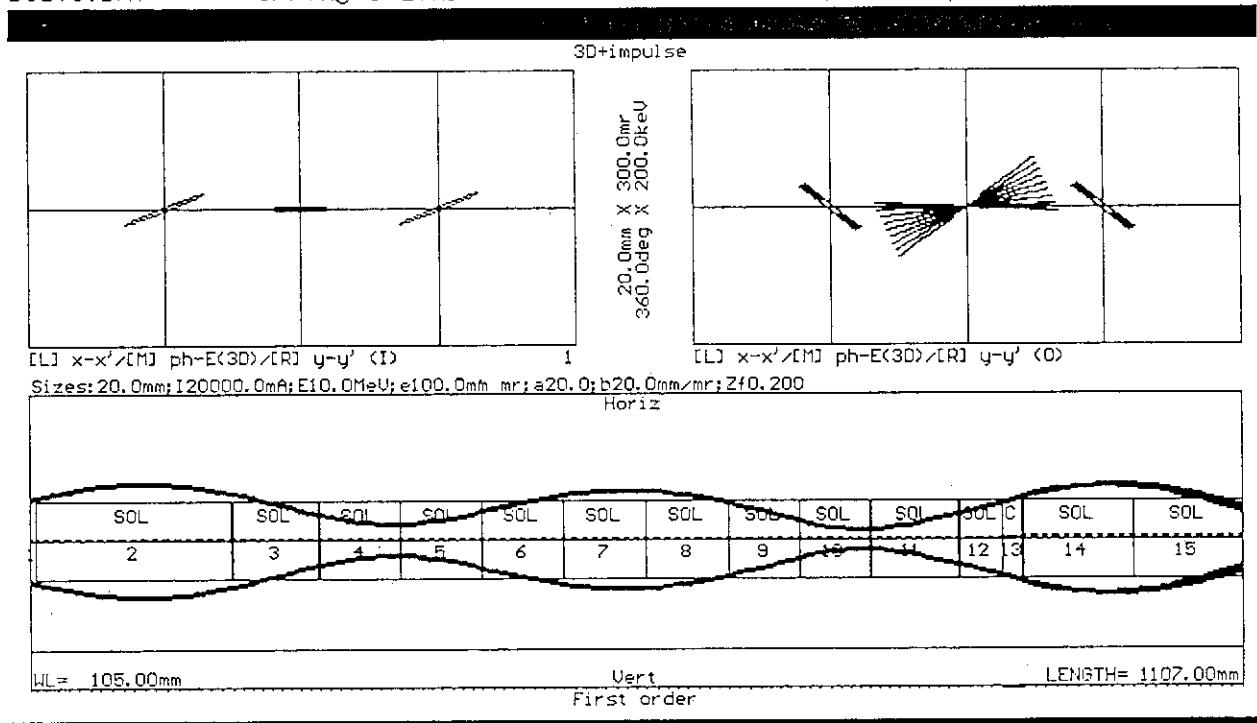


図24 電流値：5 A、ヘルムホルツコイルの磁場：300G

B35V9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 5A,350G impulse ***

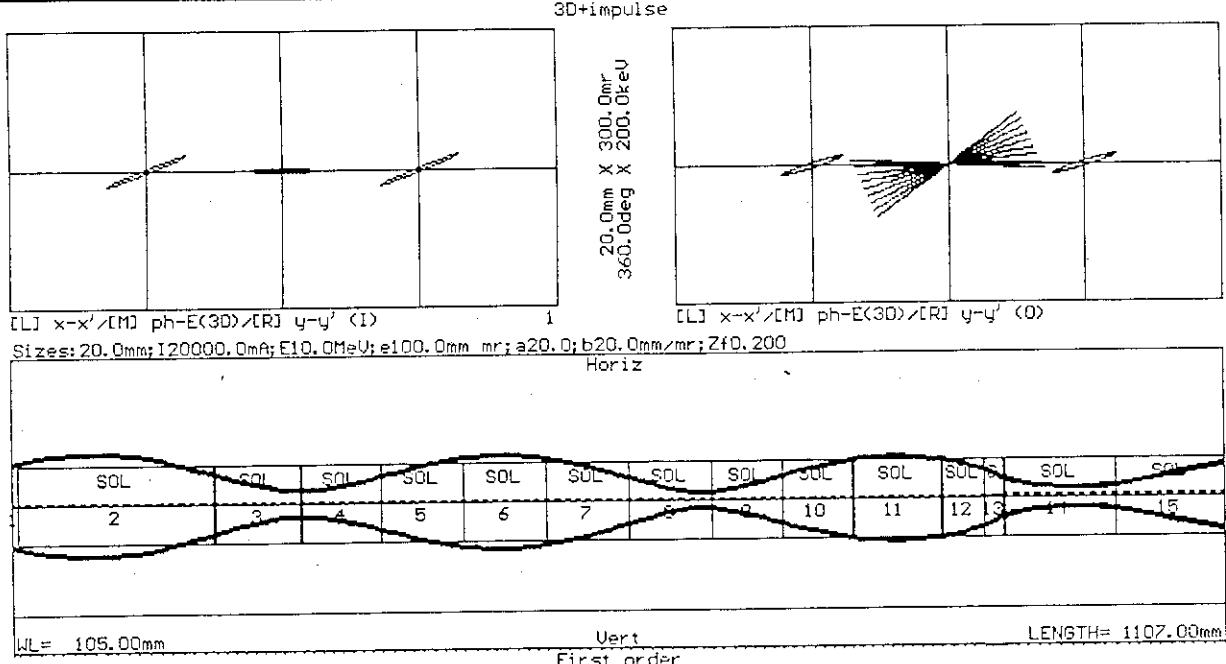


図25 電流値：5 A、ヘルムホルツコイルの磁場：350G

b15v1.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 10A,150G impulse ***

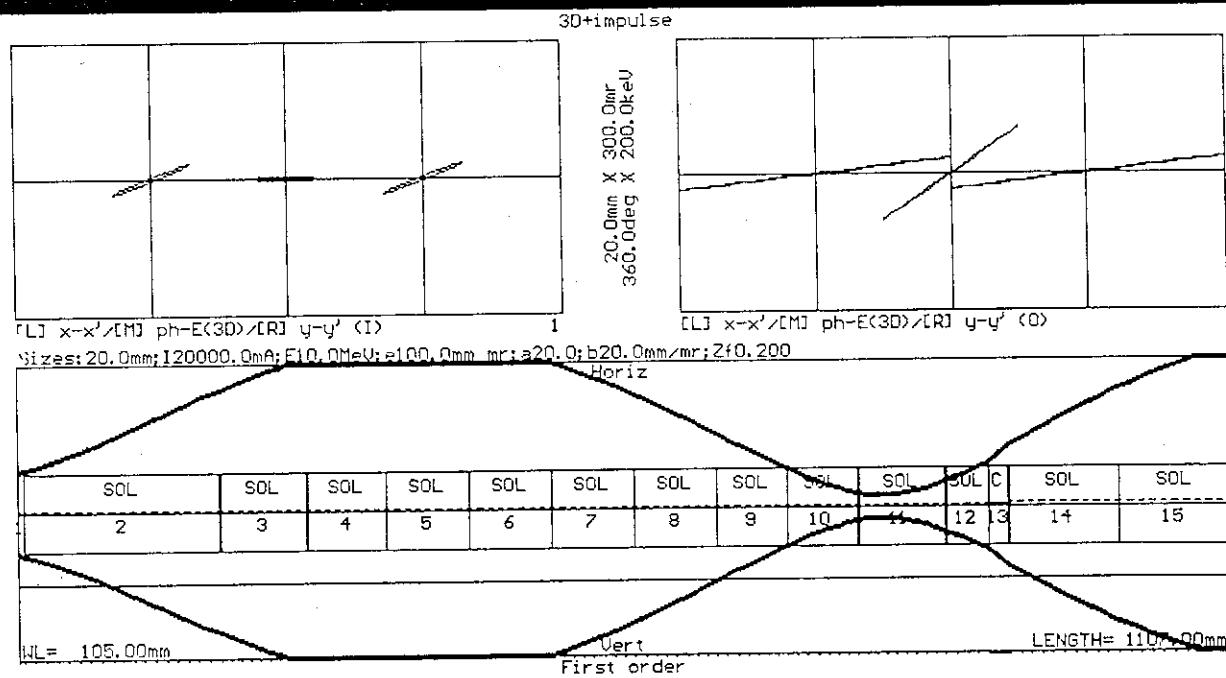


図26 電流値：10 A、ヘルムホルツコイルの磁場：150G

b20v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 10A,200G impulse ***

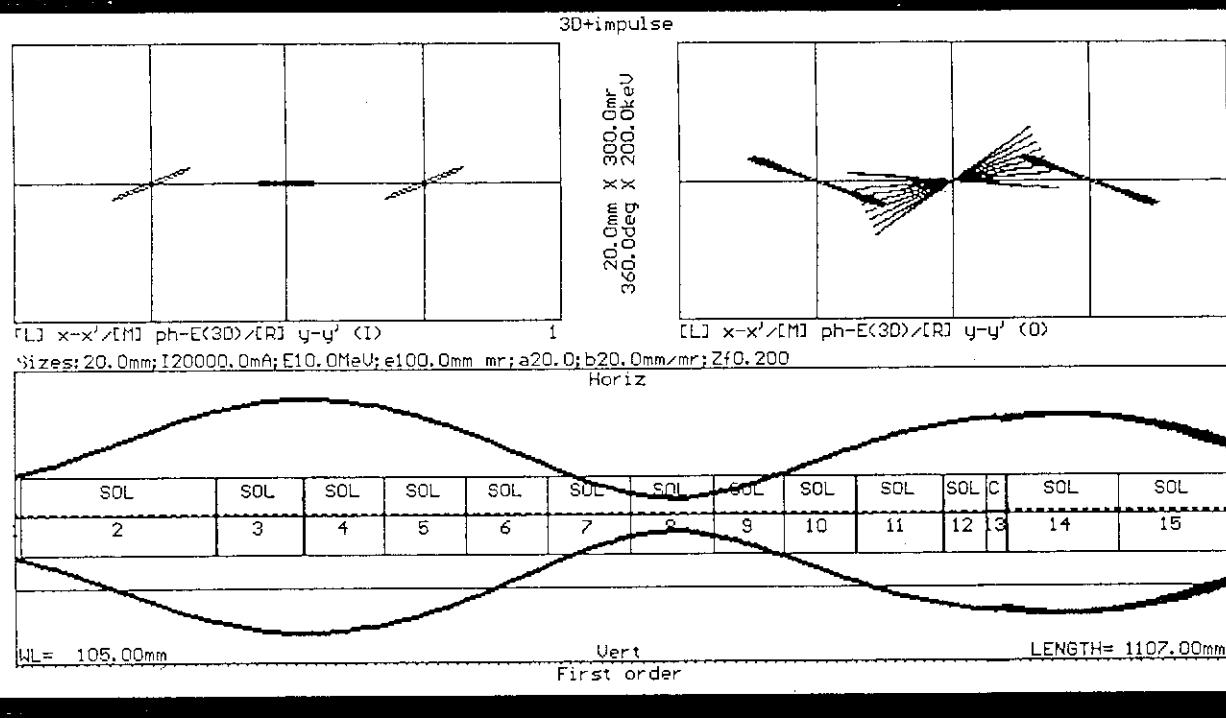


図27 電流値：10A、ヘルムホルツコイルの磁場：200G

b25v9.DAT:*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 10A,250G impulse ***

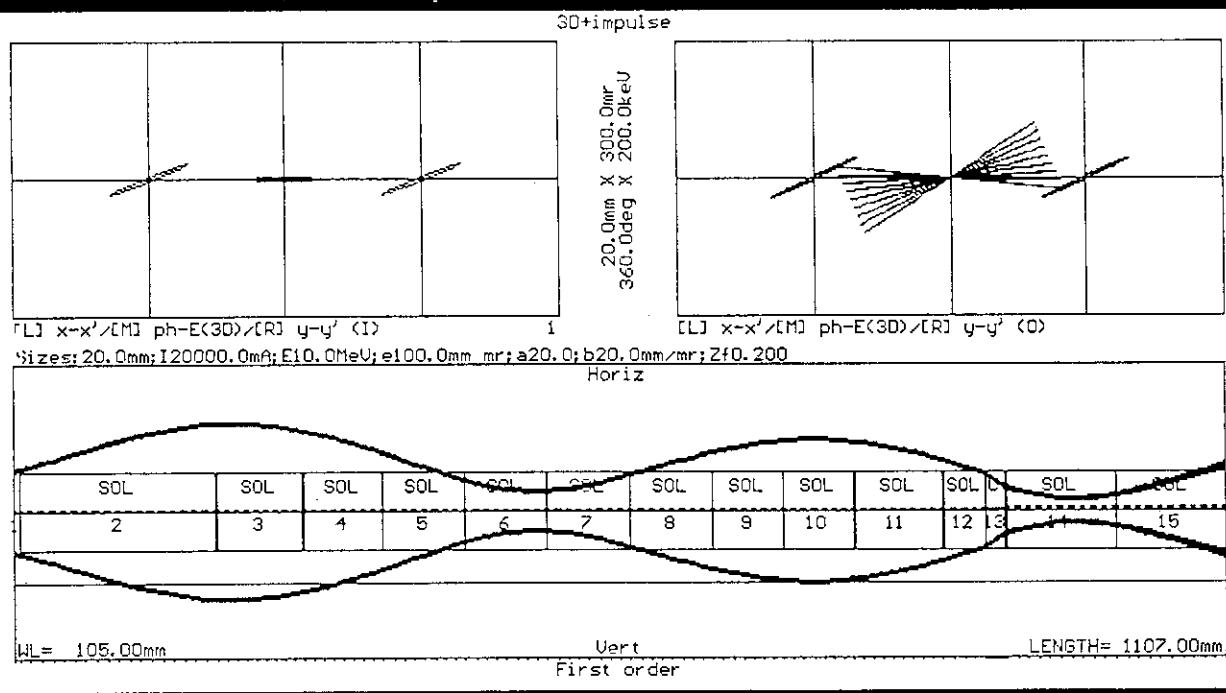


図28 電流値：10A、ヘルムホルツコイルの磁場：250G

b30v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 10A,300G impulse ***

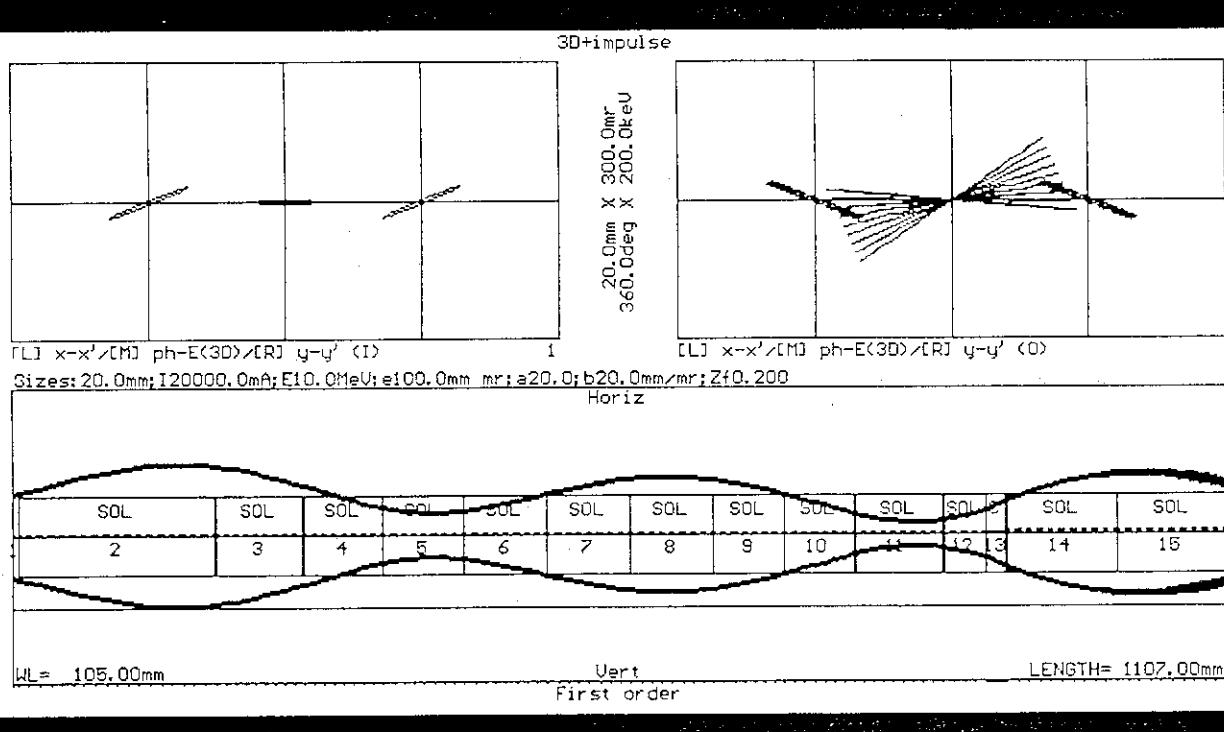


図29 電流値：10A、ヘルムホルツコイルの磁場：300G

b35v9.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 10A,350G impulse ***

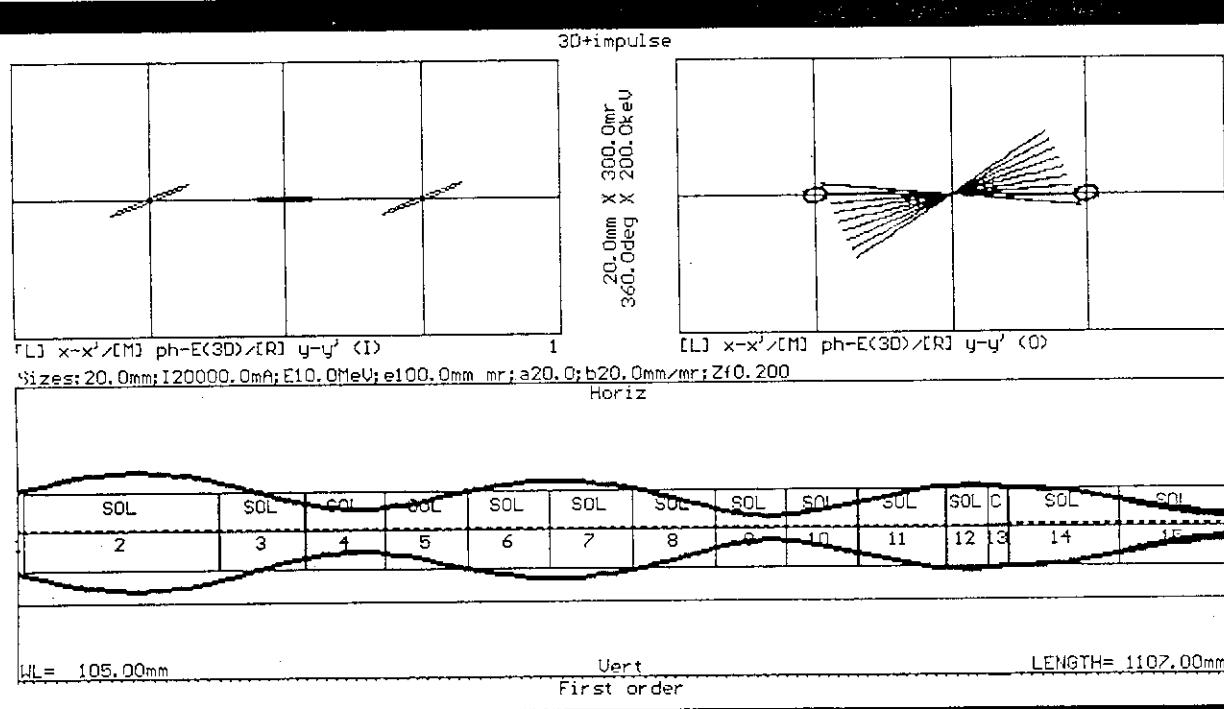


図30 電流値：10A、ヘルムホルツコイルの磁場：350G

b20v9.DAT:*** SPRING-8 LINAC. BUNCHING SECTION. 15A, 200G impulse ***

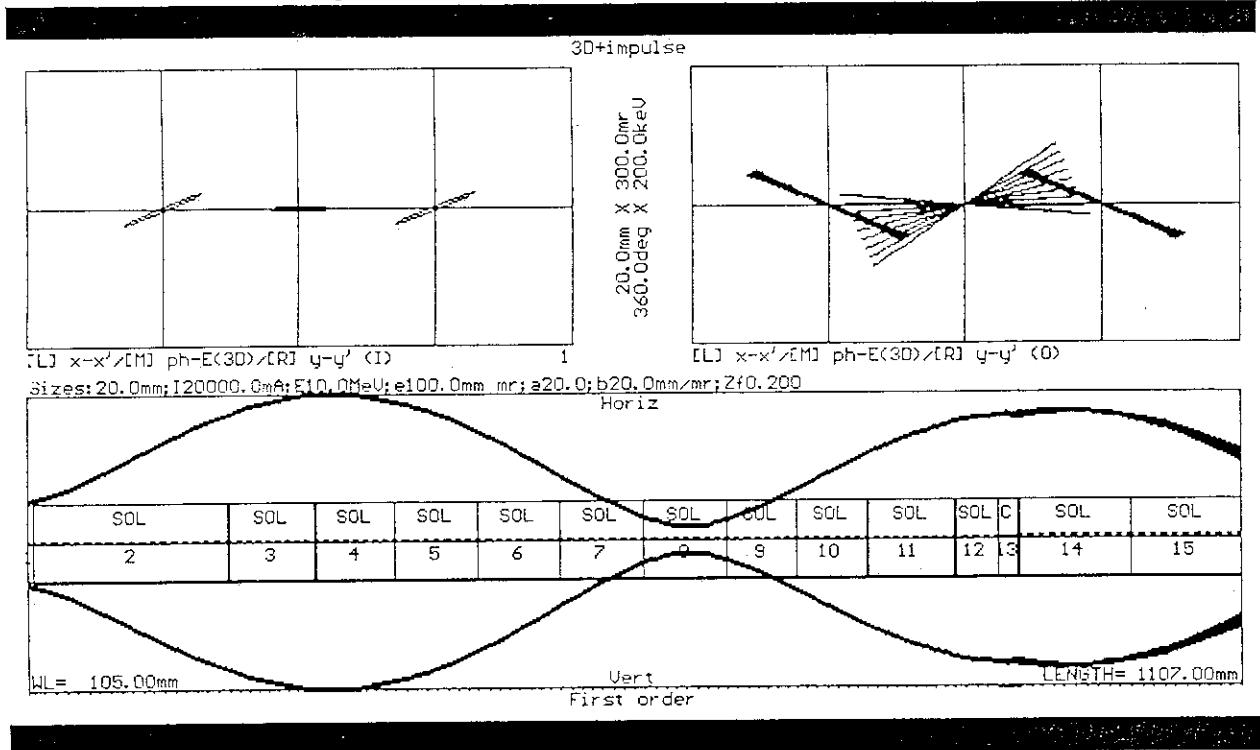


図31 電流値：15A、ヘルムホルツコイルの磁場：200G

b25v9.DAT:*** SPRING-8 LINAC. BUNCHING SECTION. 15A, 250G impulse ***

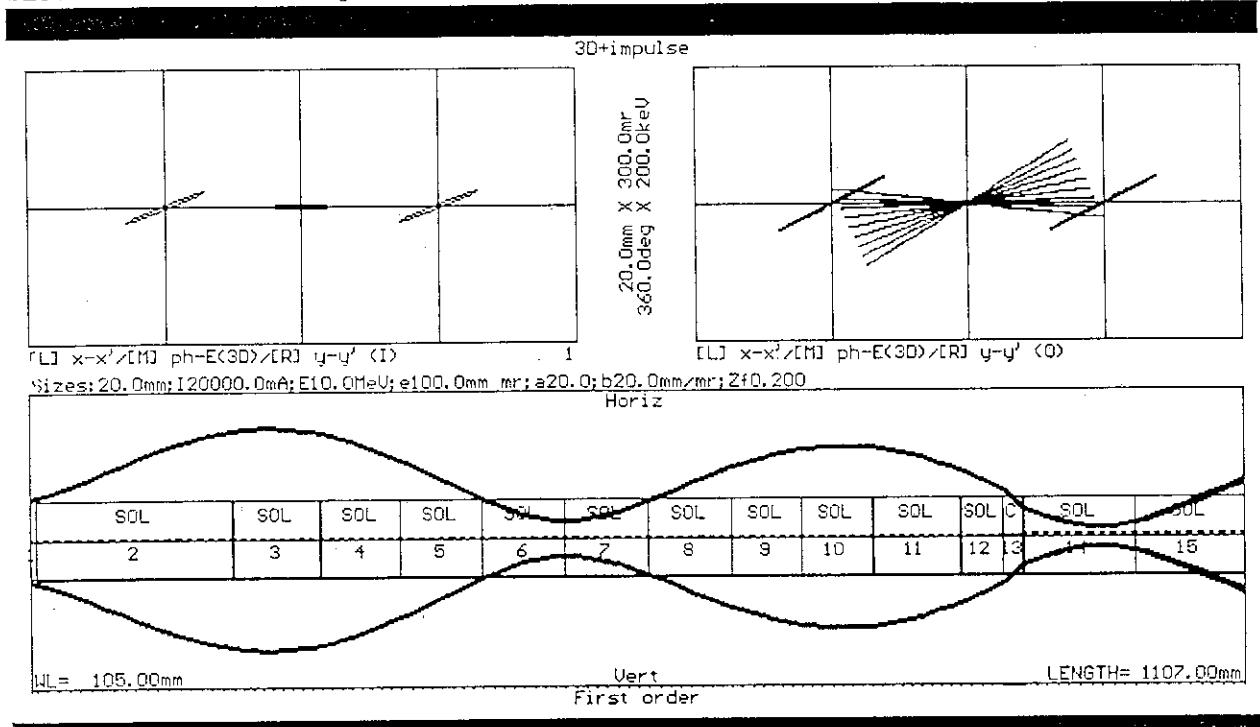


図32 電流値：15A、ヘルムホルツコイルの磁場：250G

b30v9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 15A,300G impulse ***

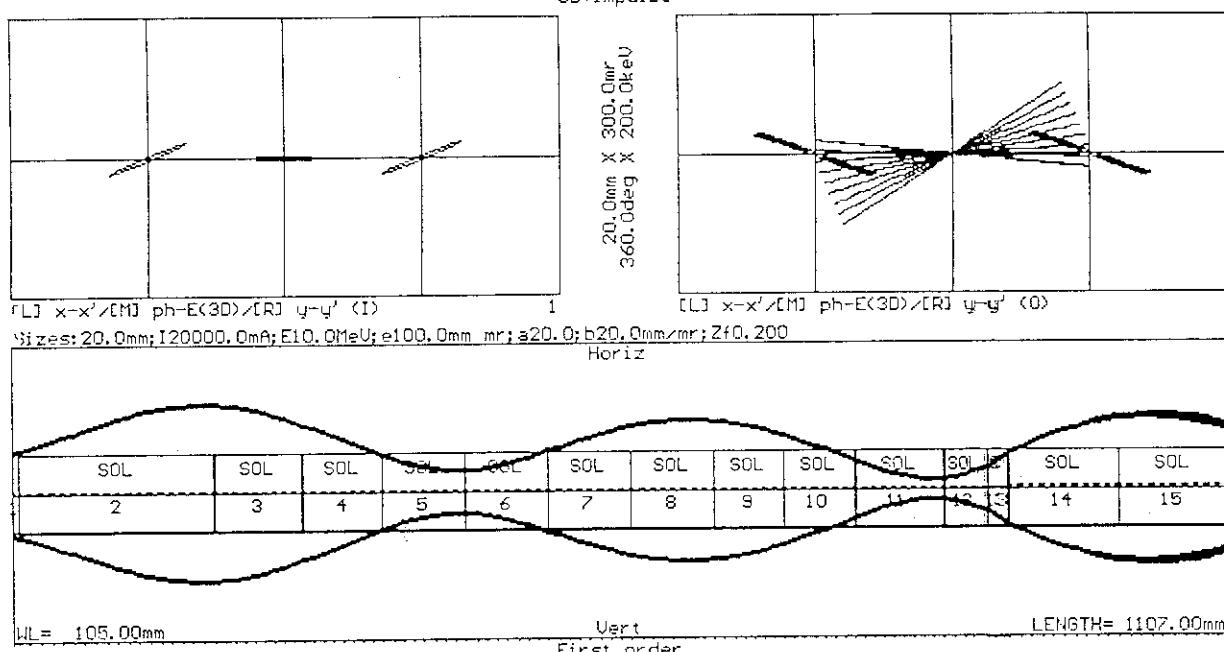


図33 電流値：15A、ヘルムホルツコイルの磁場：300G

b35v9.DAT:*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 15A,350G impulse ***

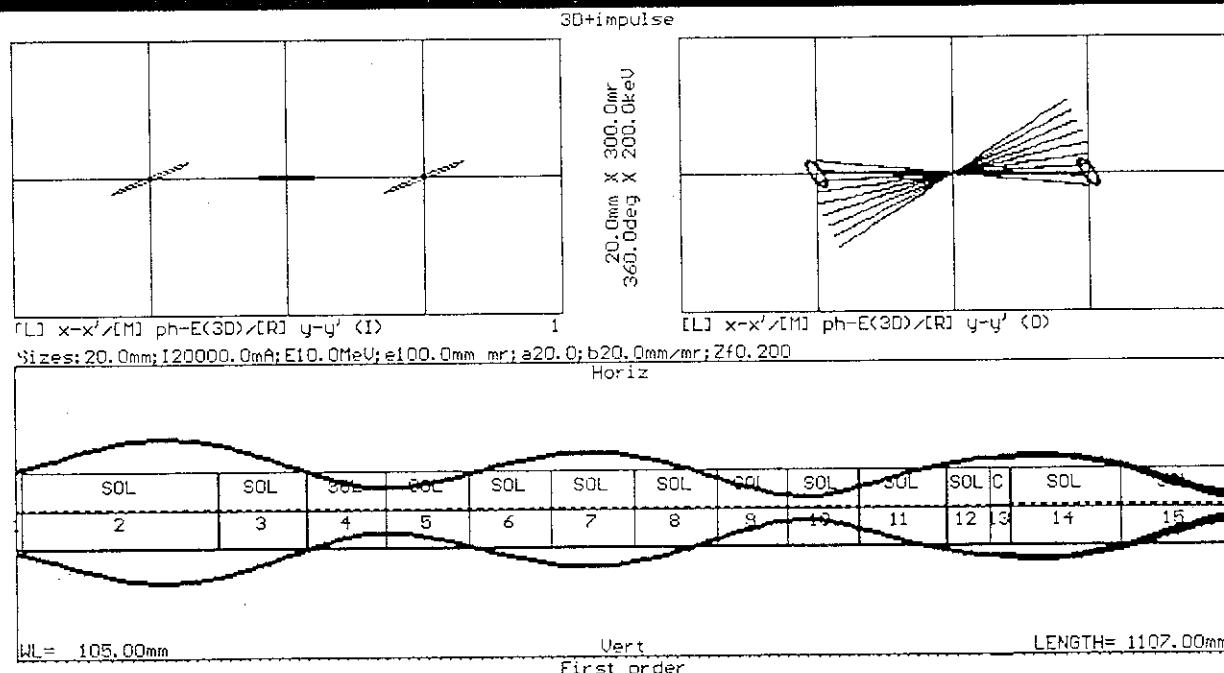


図34 電流値：15A、ヘルムホルツコイルの磁場：350G

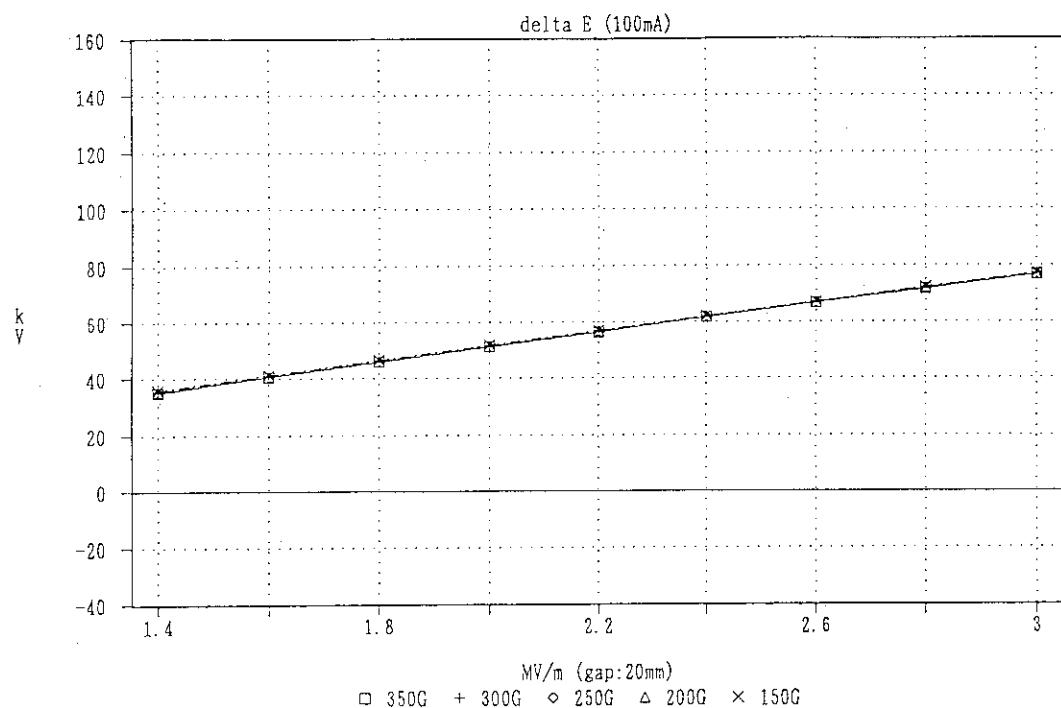


図35 100mAのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり

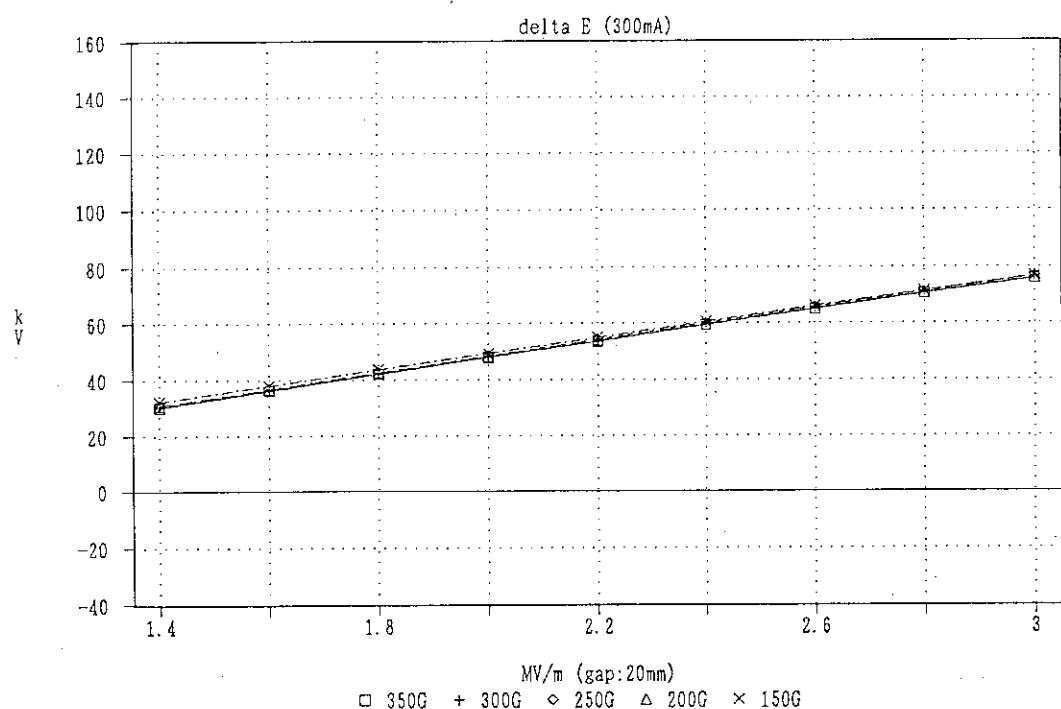


図36 300mAのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり

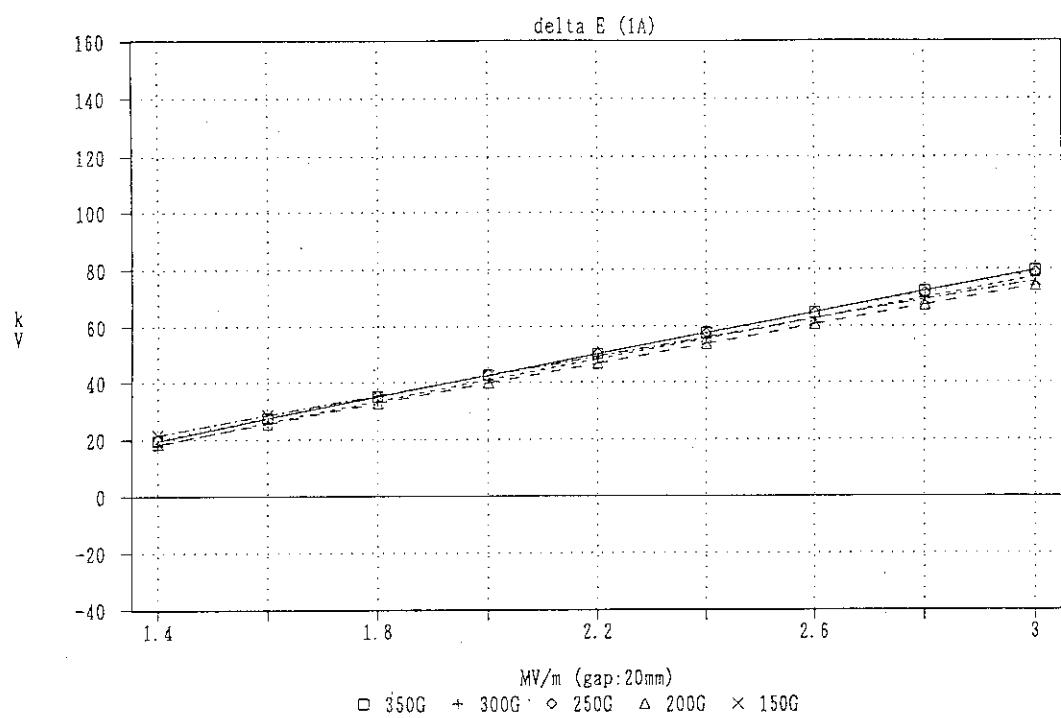


図37 1 AのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり

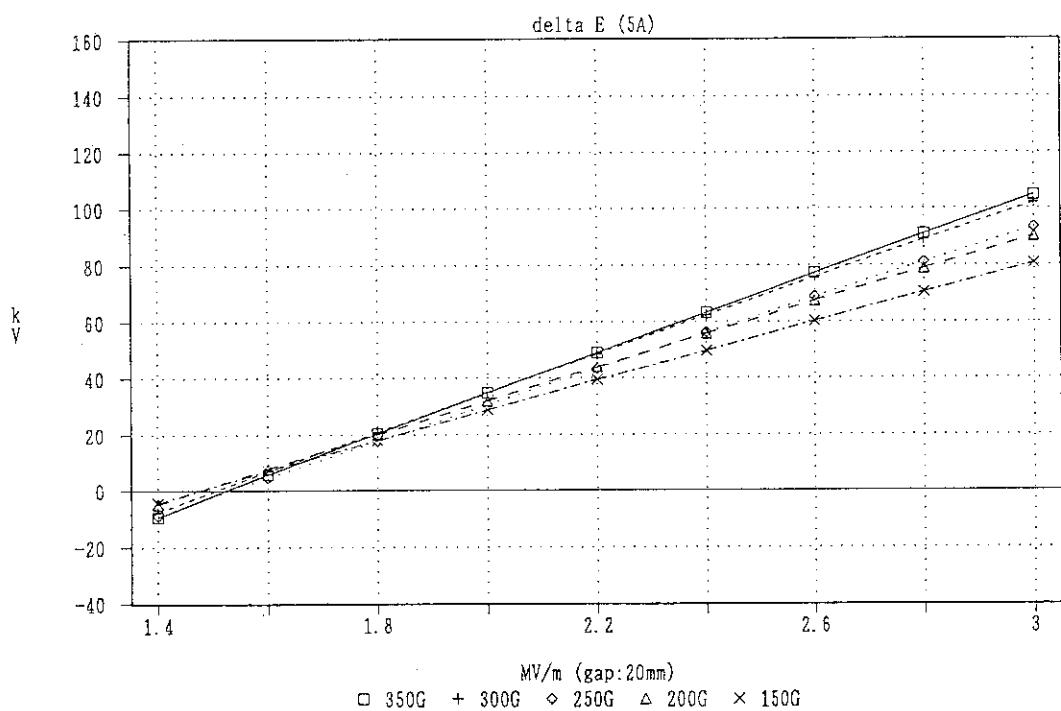


図38 5 AのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり

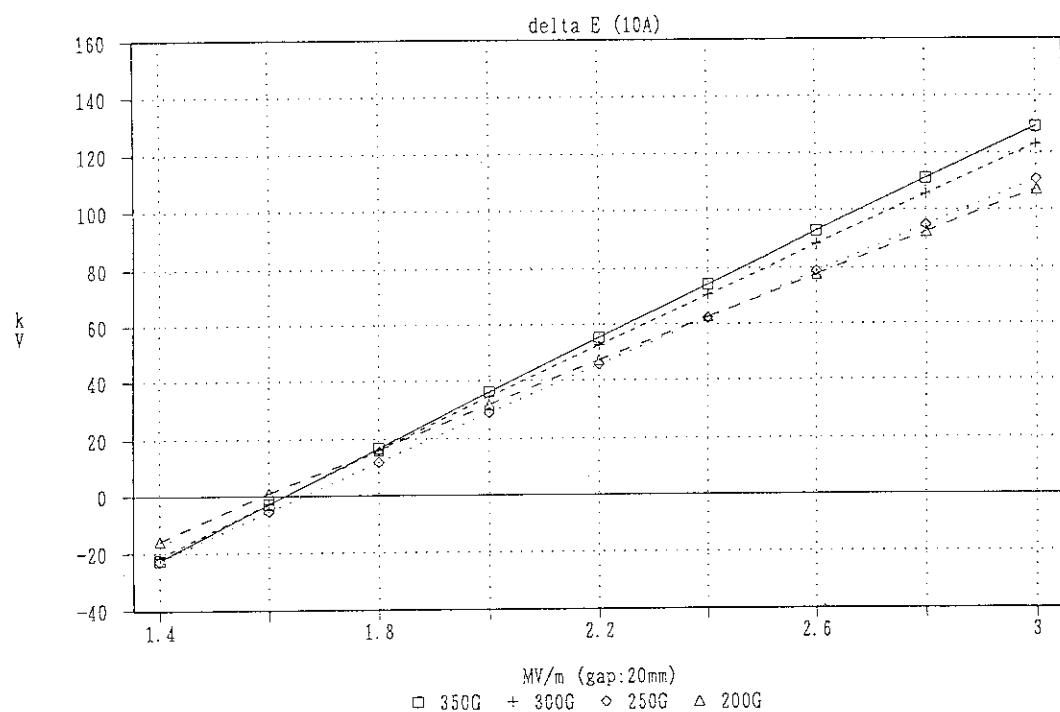


図39 10AのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり

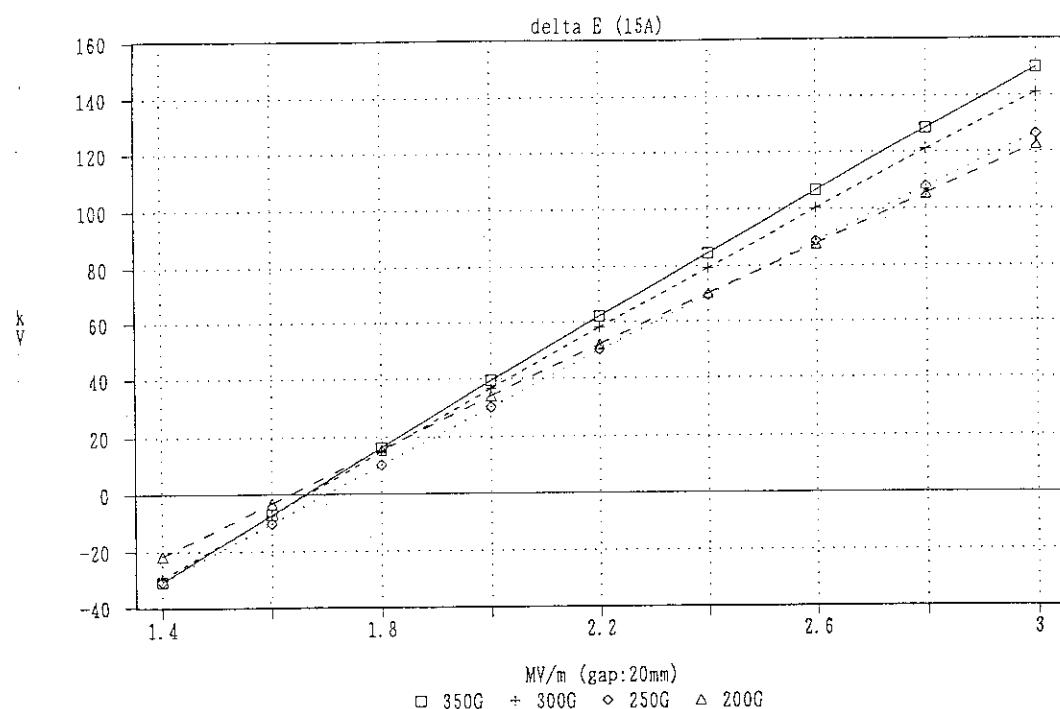


図40 15AのビームのPB2入り口でのエネルギー広がり

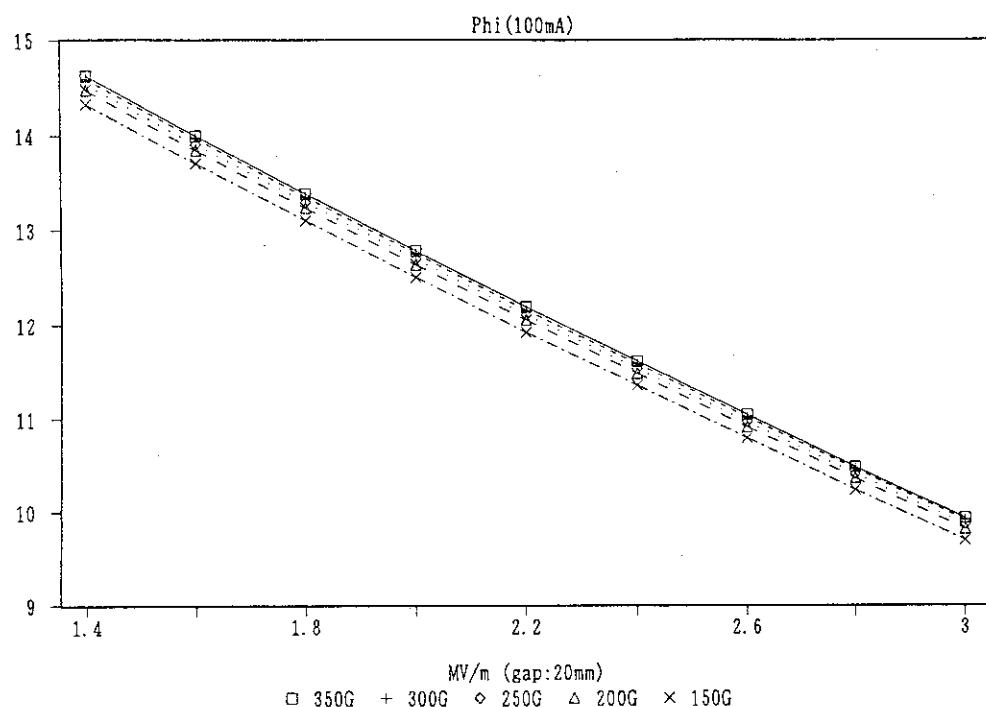


図41 100mAのビームのP B 2入り口での位相広がり

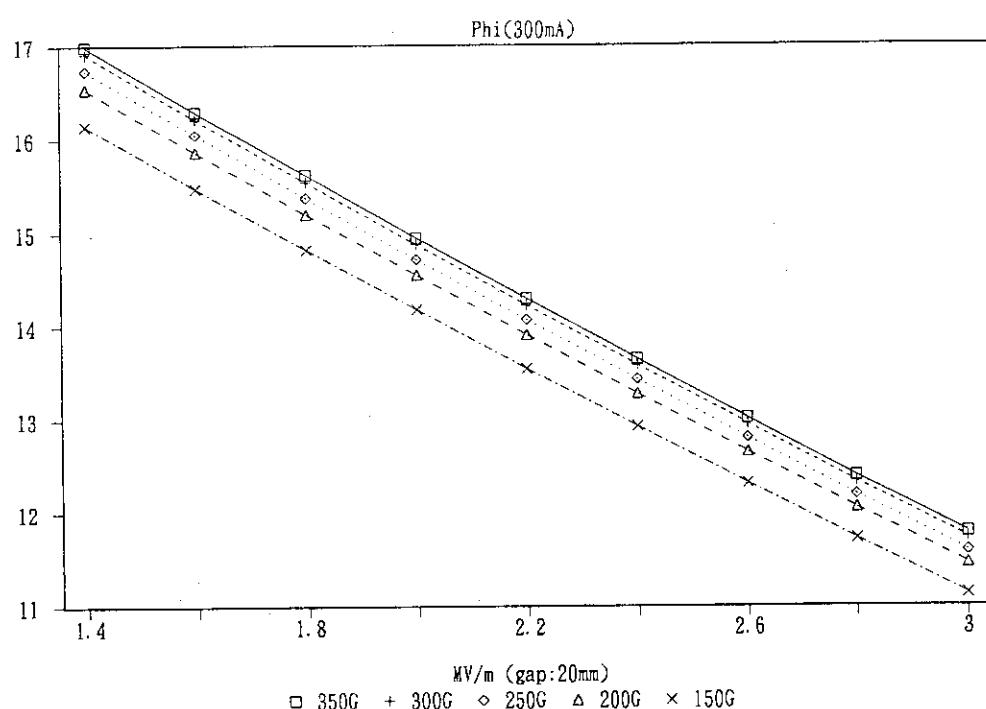


図42 300mAのビームのP B 2入り口での位相広がり

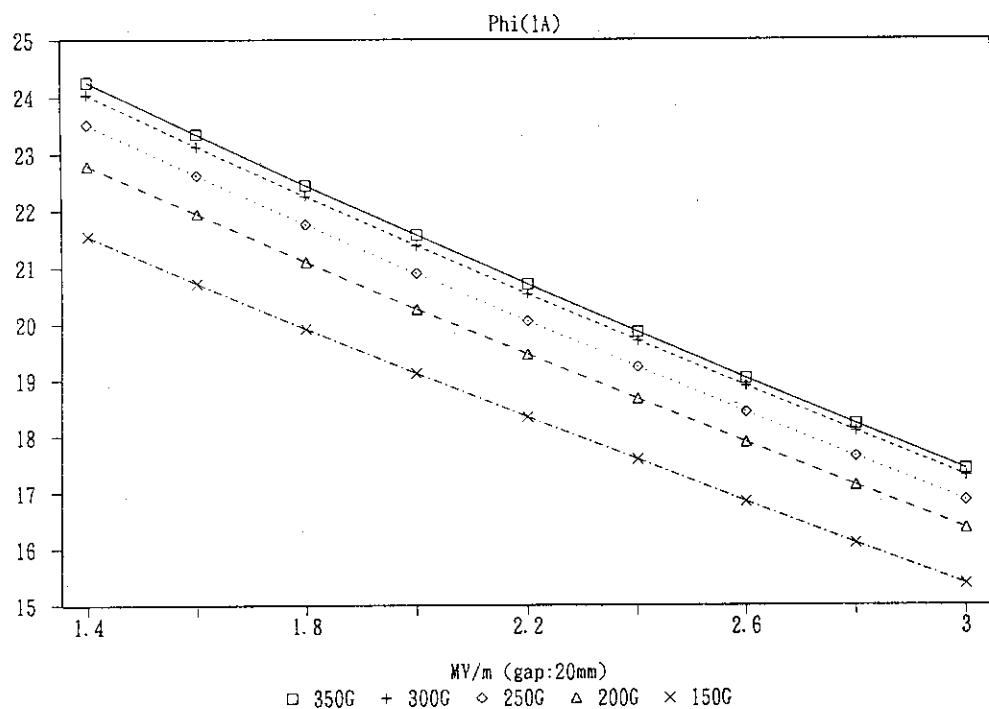


図43 1 AのビームのPB2入り口での位相広がり

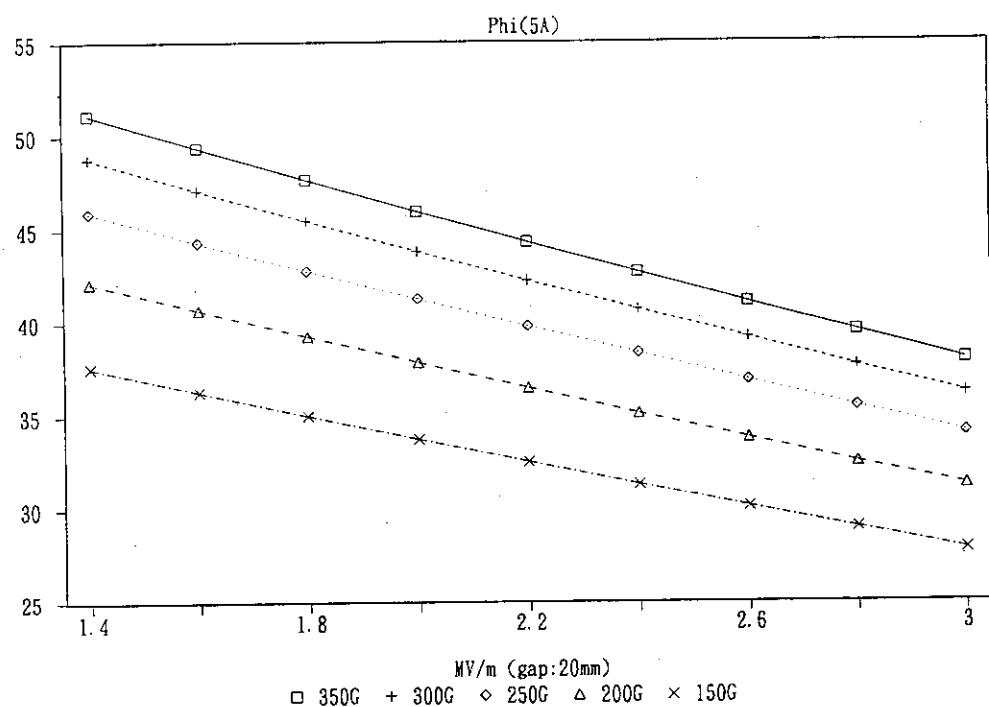


図44 5 AのビームのPB2入り口での位相広がり

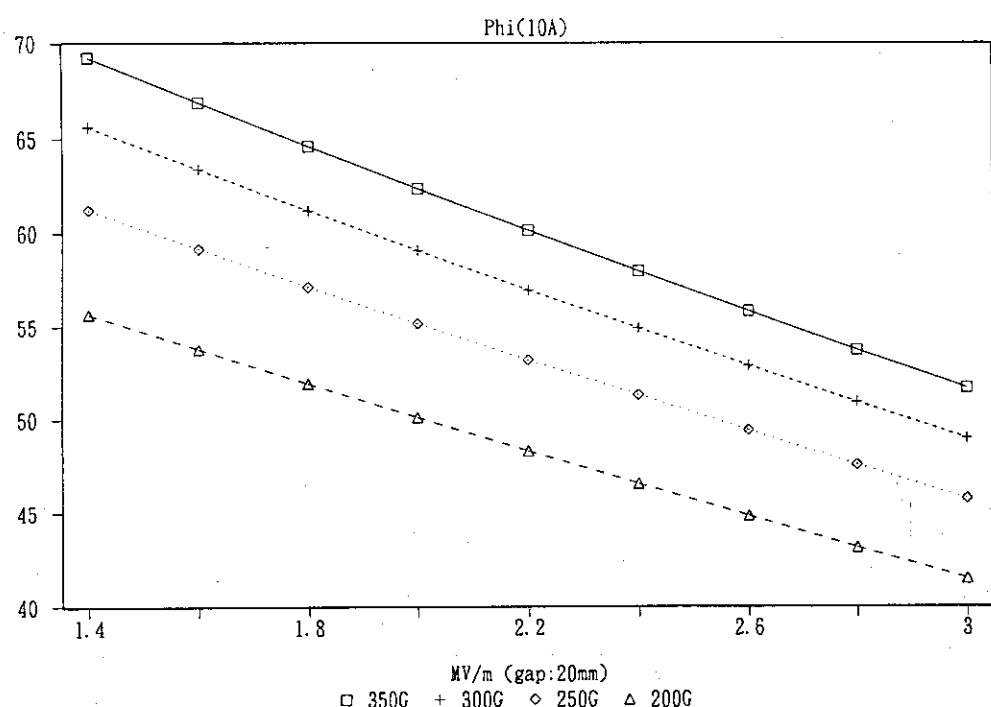


図45 10AのビームのPB2入り口での位相広がり

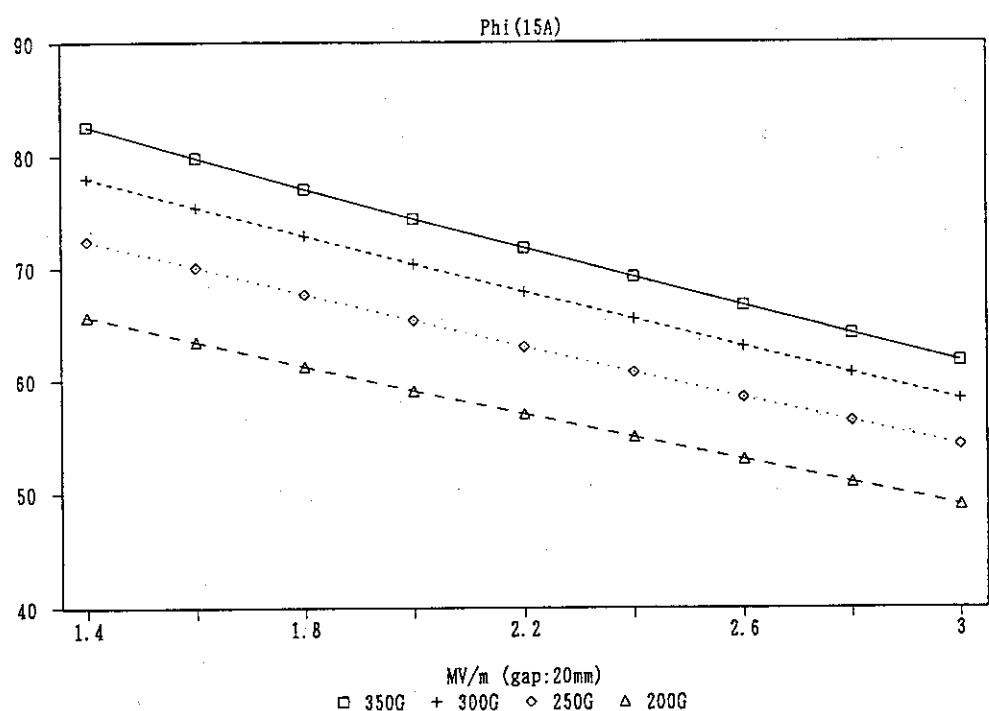


図46 15AのビームのPB2入り口での位相広がり

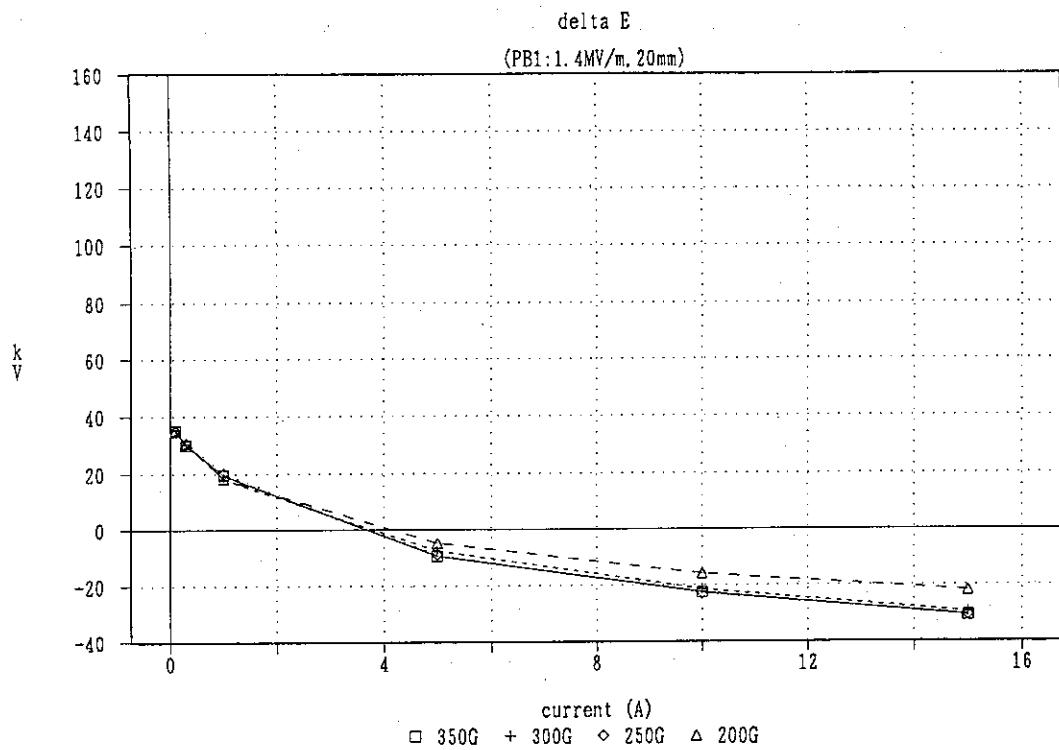


図47 PB 1で1.4MV/mを与えたときのエネルギー広がり

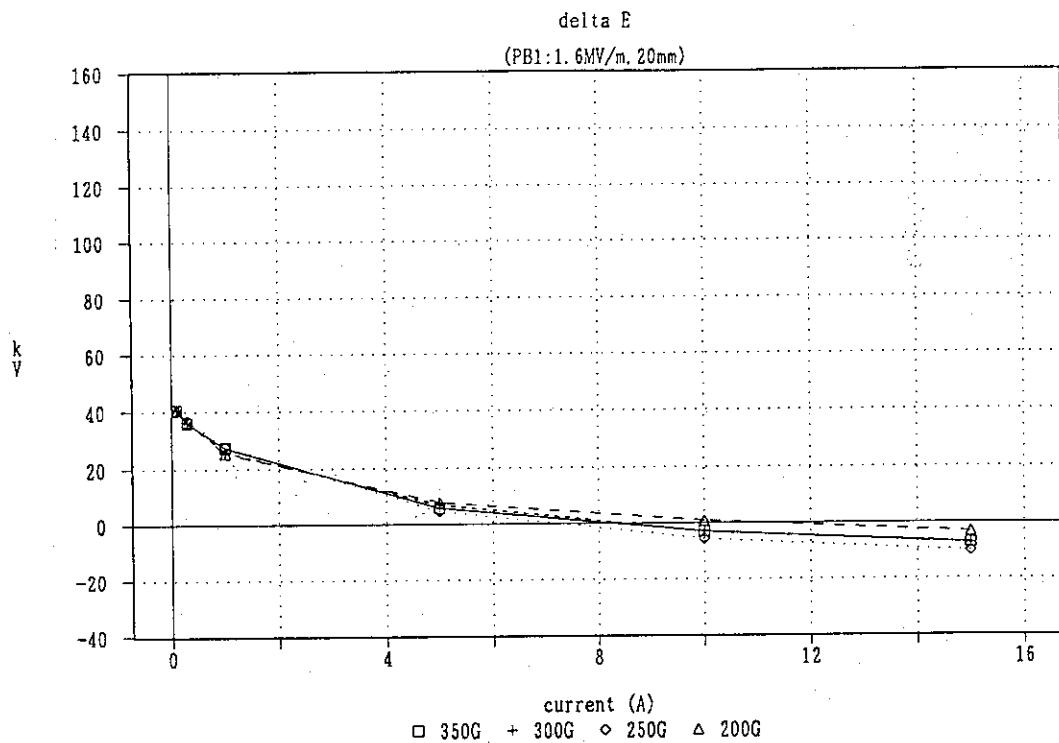


図48 PB 1で1.6MV/mを与えたときのエネルギー広がり

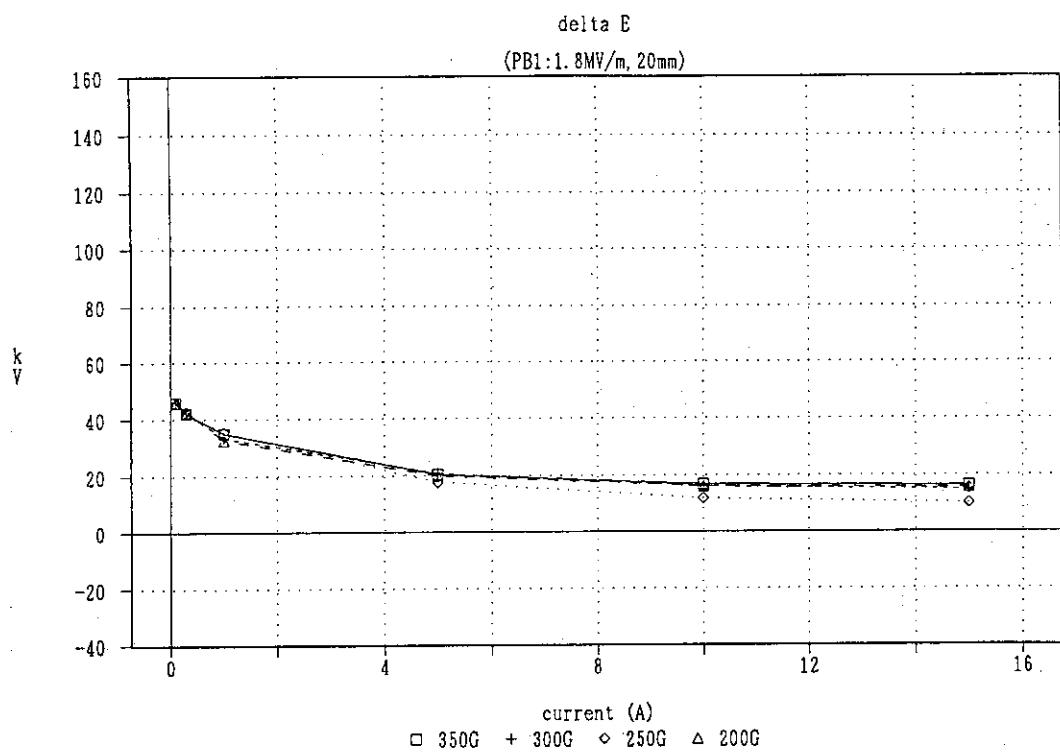


図49 PB1で1.8MV/mを与えたときのエネルギー広がり

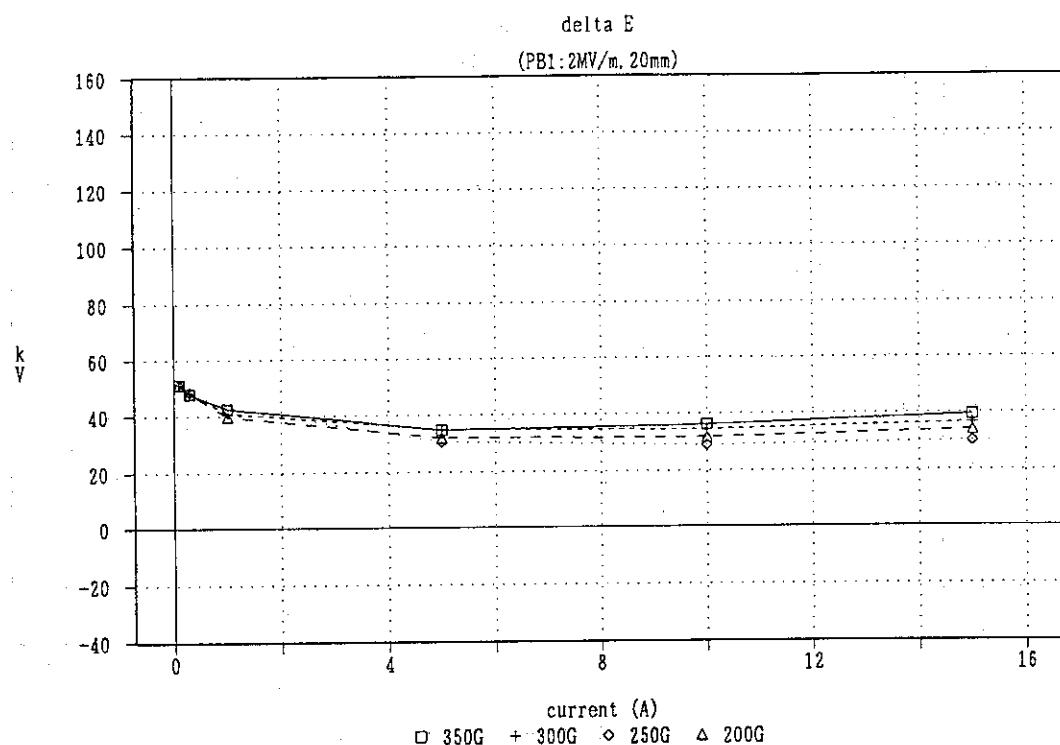


図50 PB1で2.0MV/mを与えたときのエネルギー広がり

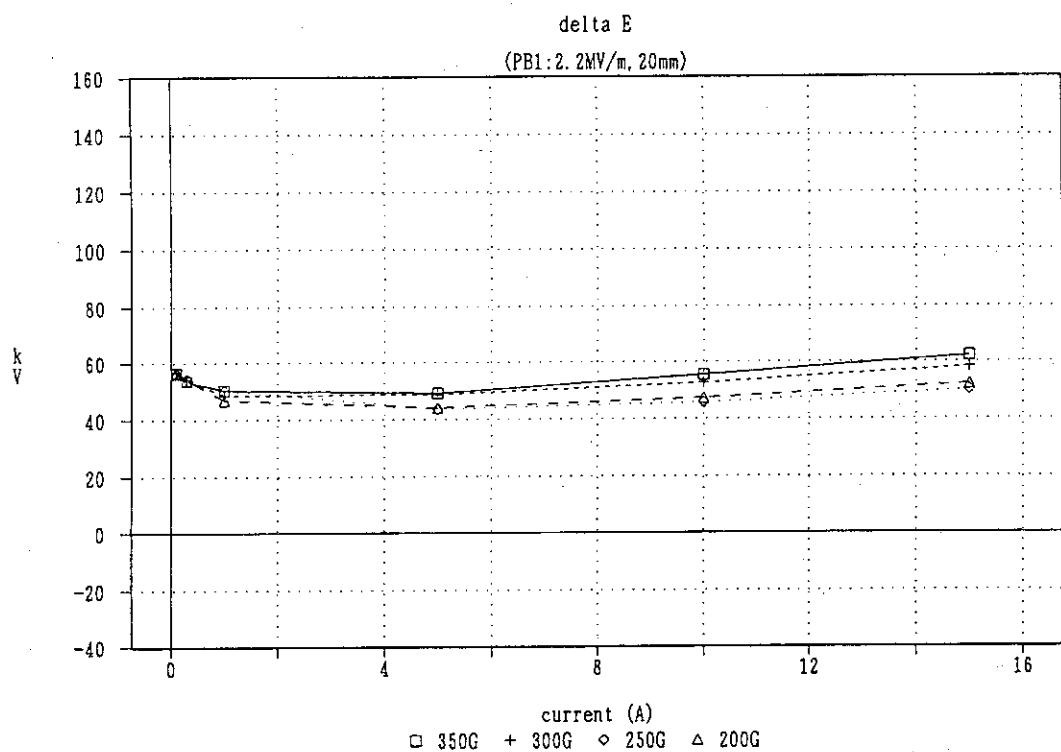


図51 PB 1で2.2MV/mを与えたときのエネルギー広がり

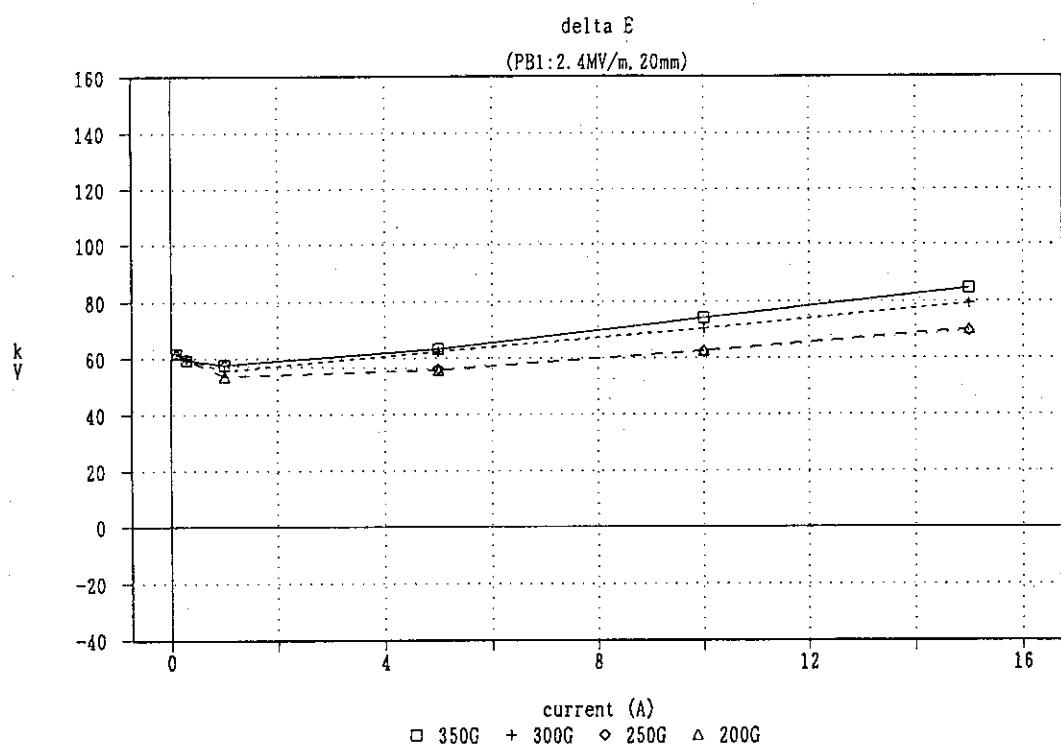


図52 PB 1で2.4MV/mを与えたときのエネルギー広がり

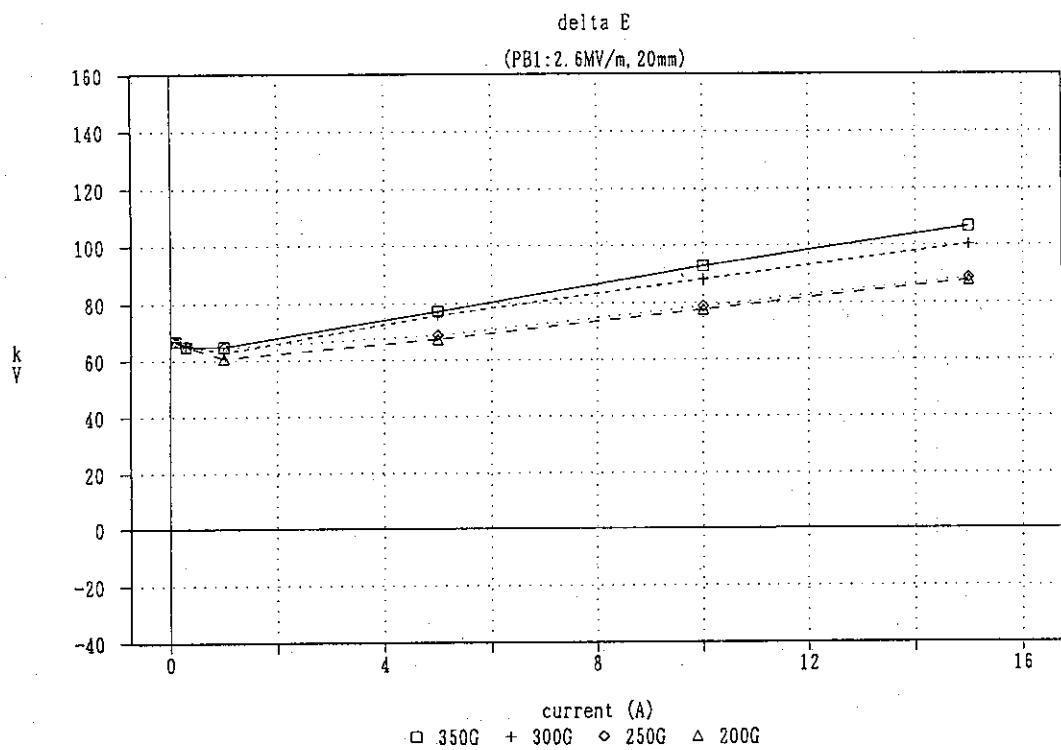


図53 PB1で2.6MV/mを与えたときのエネルギー広がり

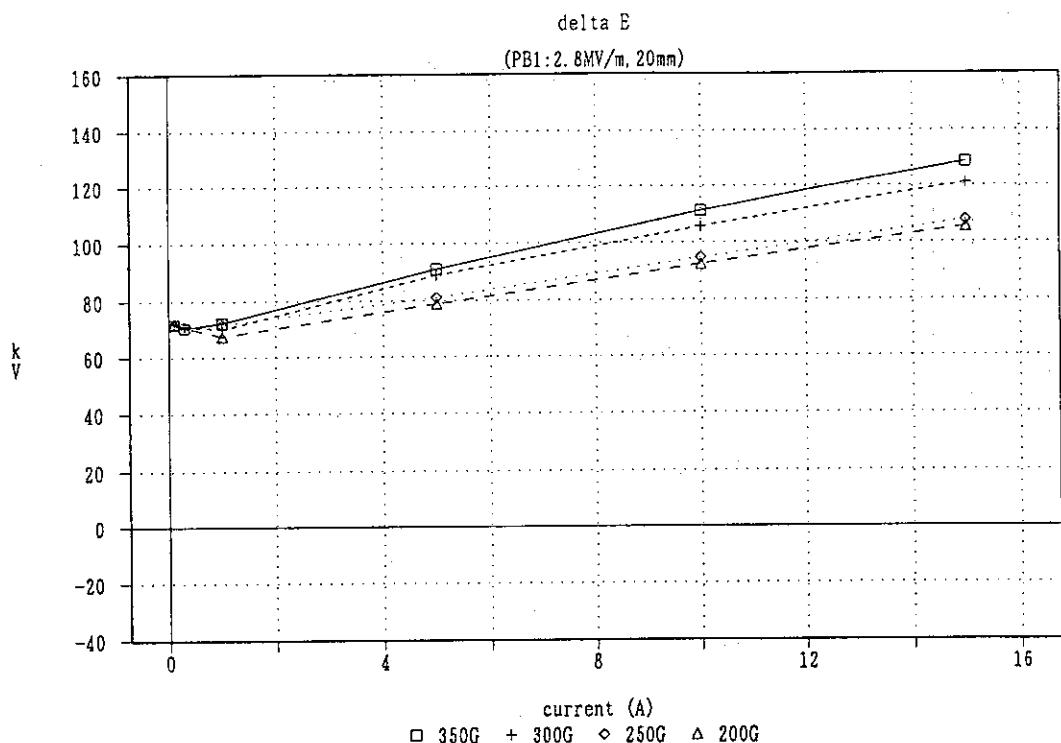


図54 PB1で2.8MV/mを与えたときのエネルギー広がり

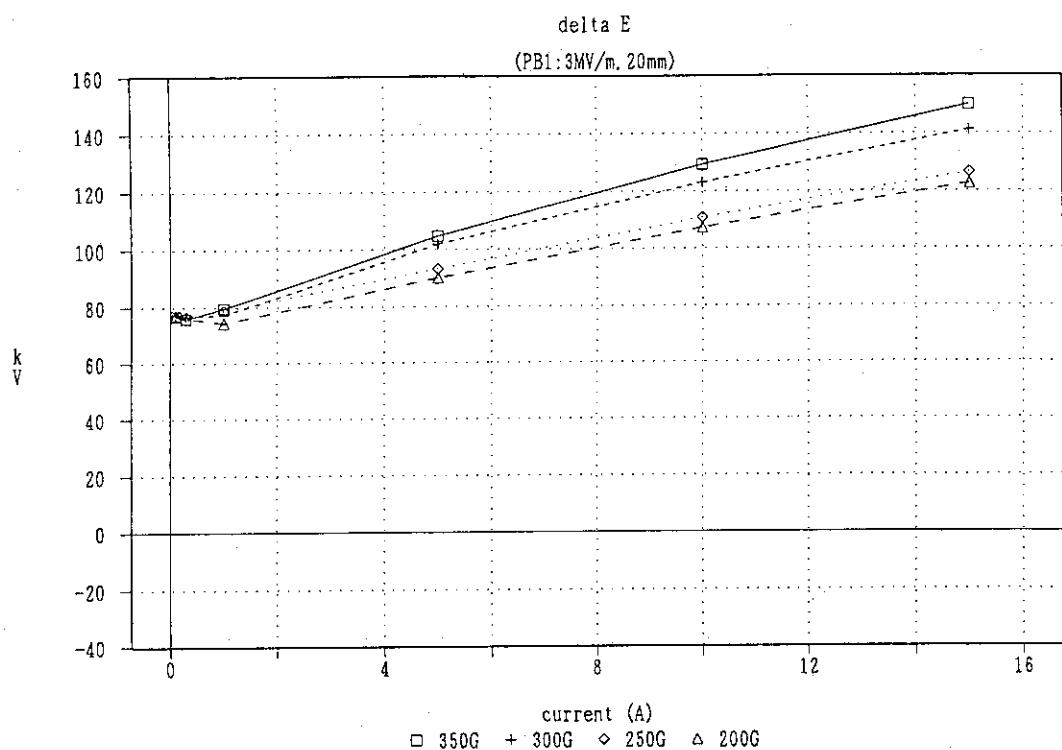


図55 PB1で3.0MV/mを与えたときのエネルギー広がり

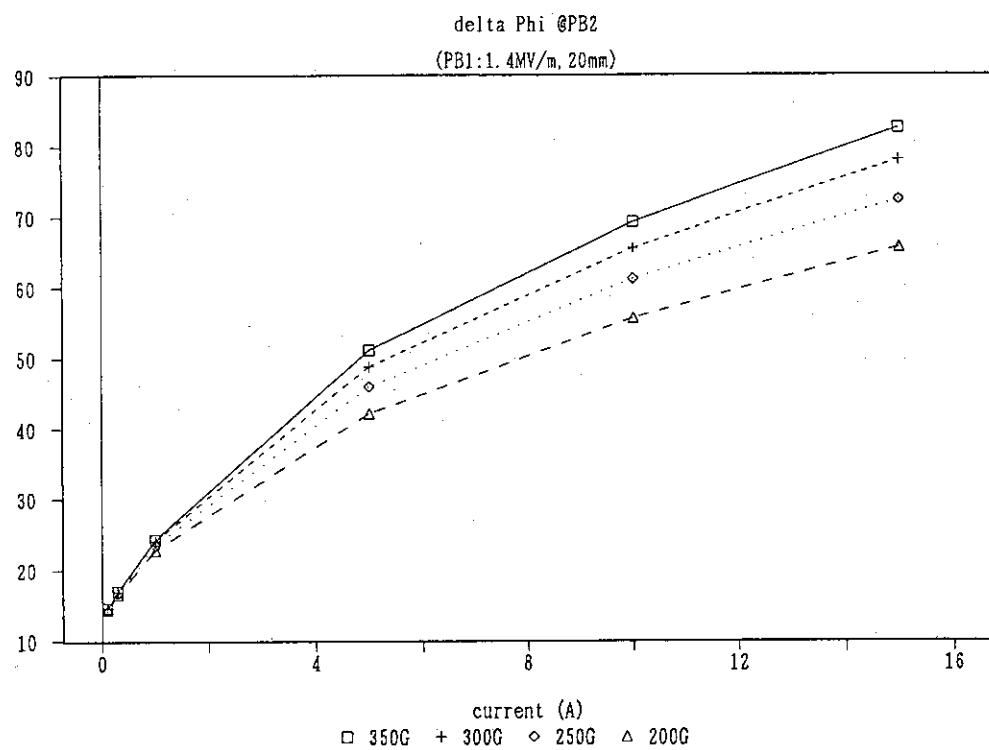


図56 PB1で1.4MV/mを与えたときの位相広がり

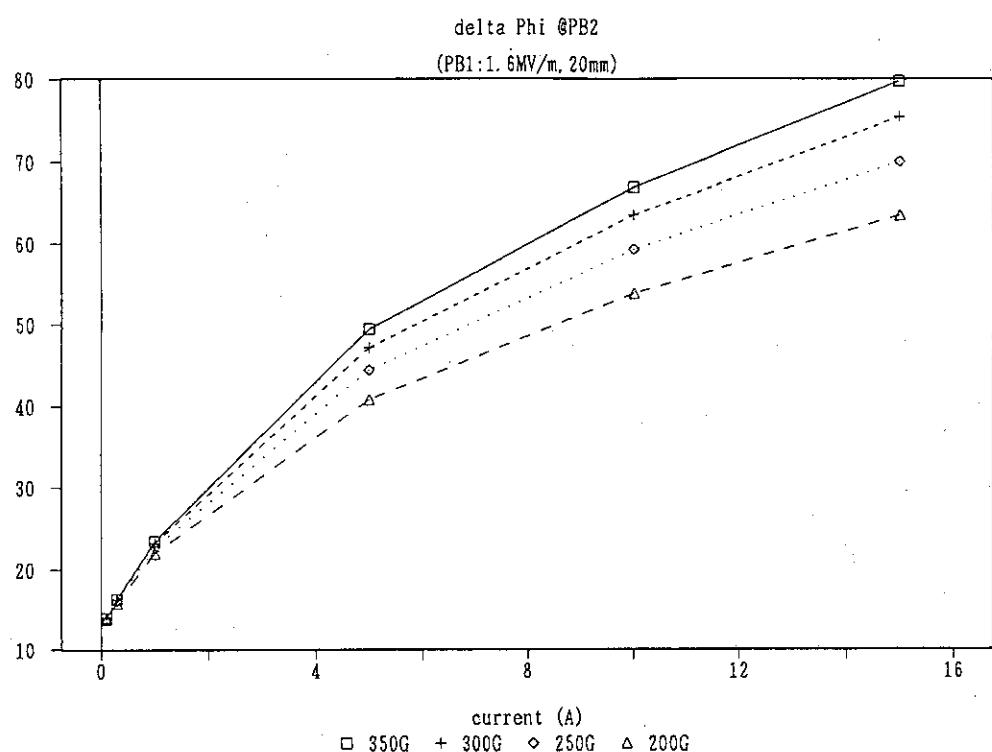


図57 PB1で1.6MV/mを与えたときの位相広がり

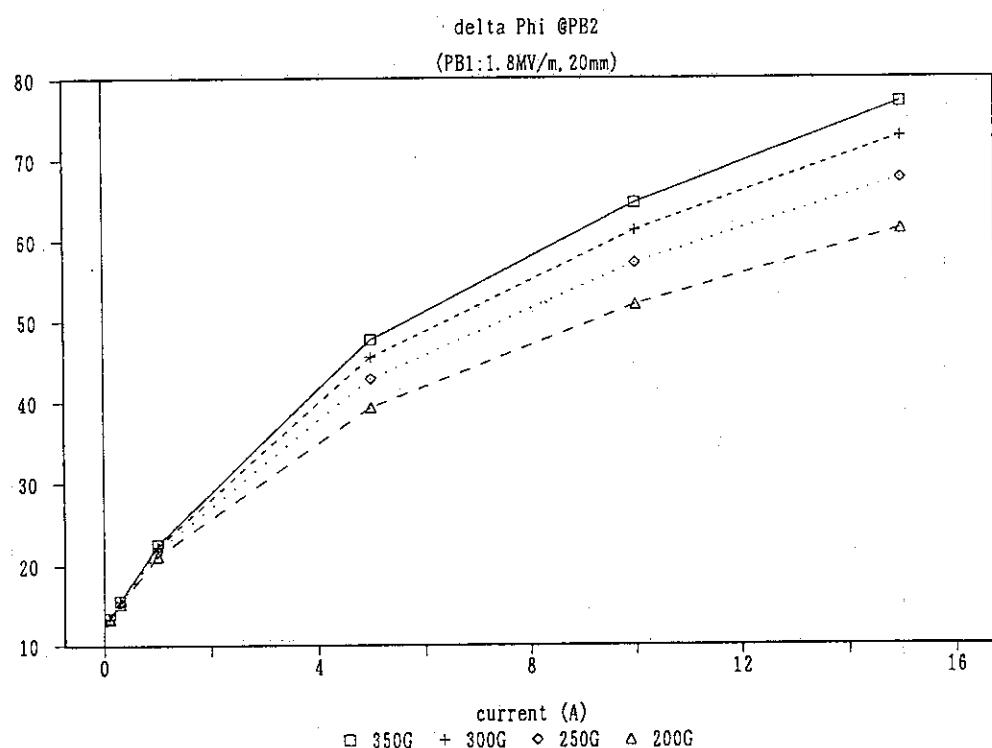


図58 PB1で1.8MV/mを与えたときの位相広がり

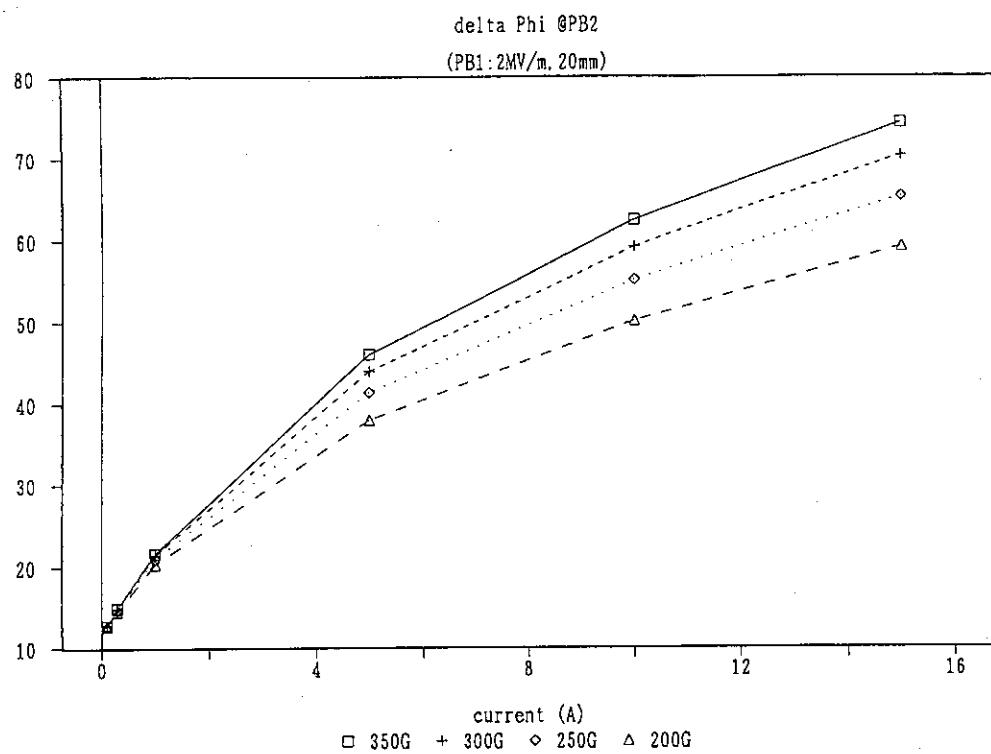


図59 PB1で2.0MV/mを与えたときの位相広がり

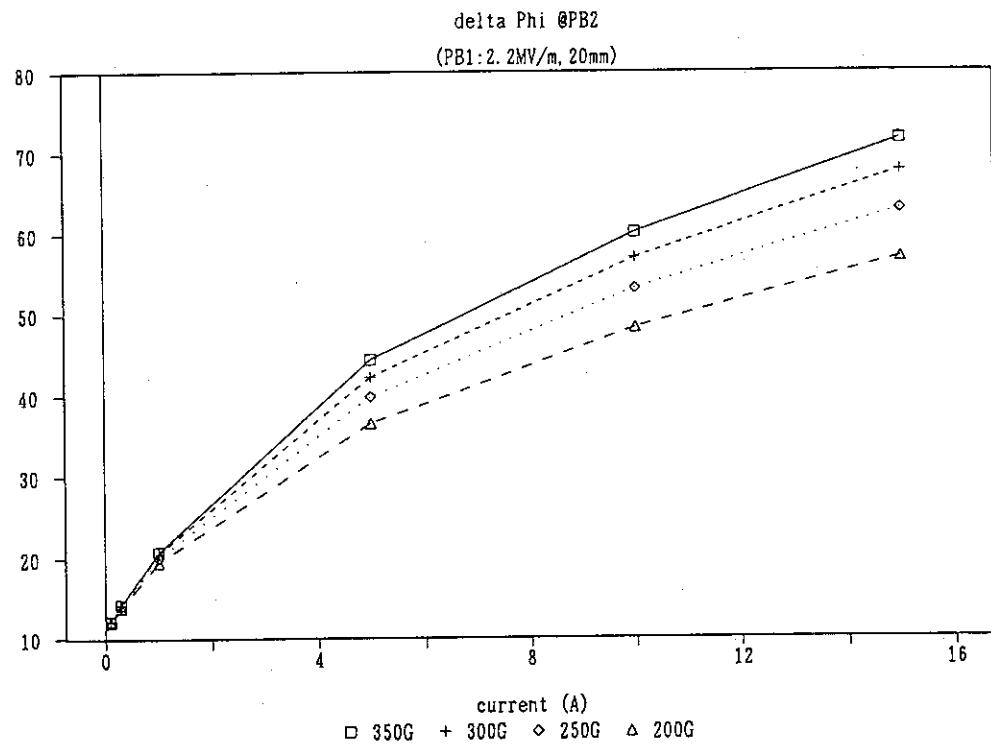


図60 PB1で2.2MV/mを与えたときの位相広がり

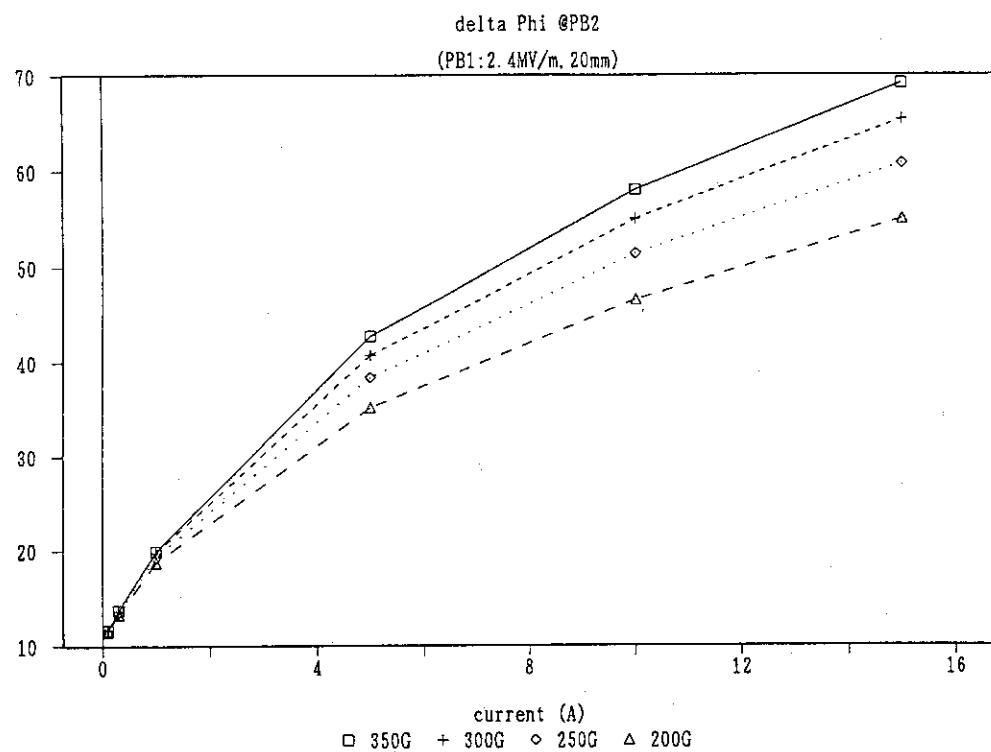


図61 PB1で2.4MV/mを与えたときの位相広がり

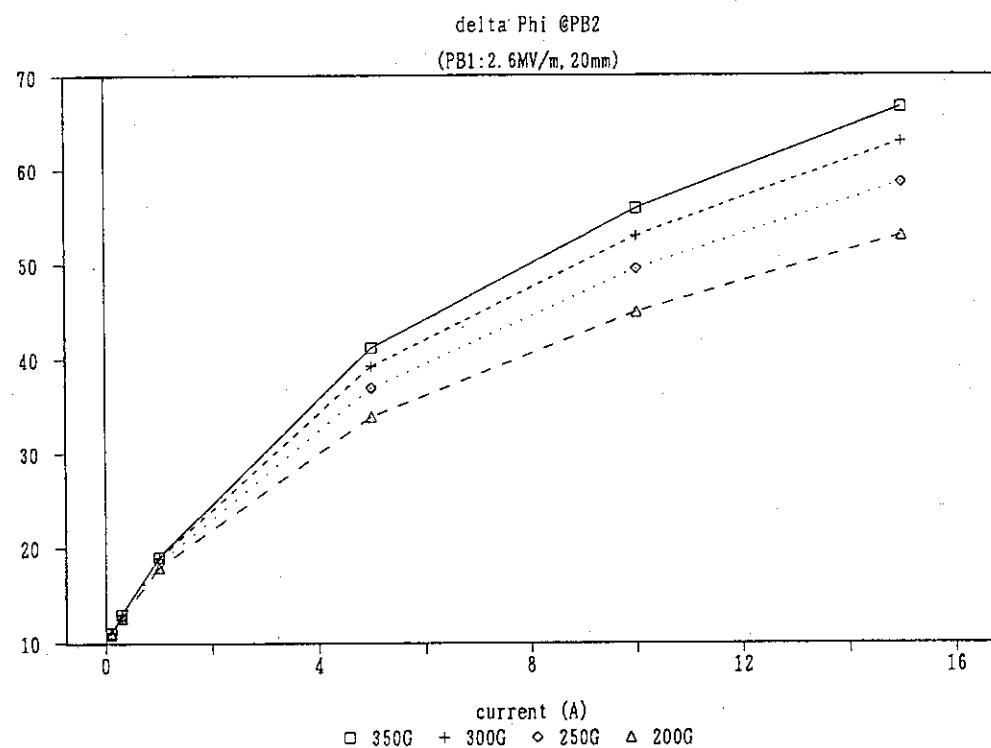


図62 PB1で2.6MV/mを与えたときの位相広がり

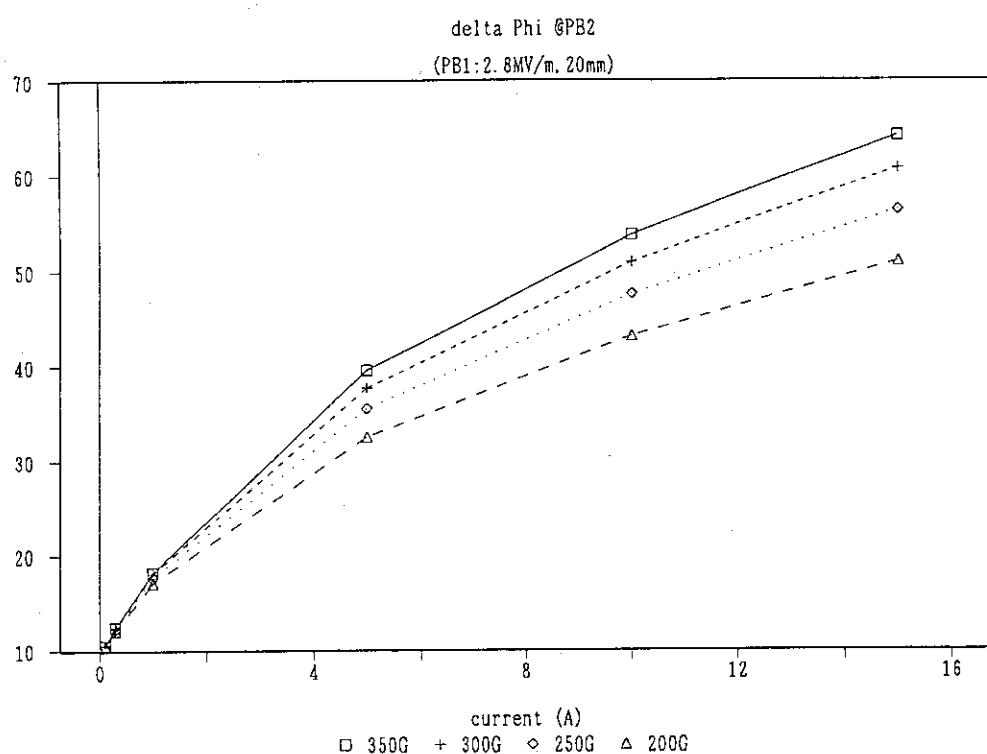


図63 PB1で2.8MV/mを与えたときの位相広がり

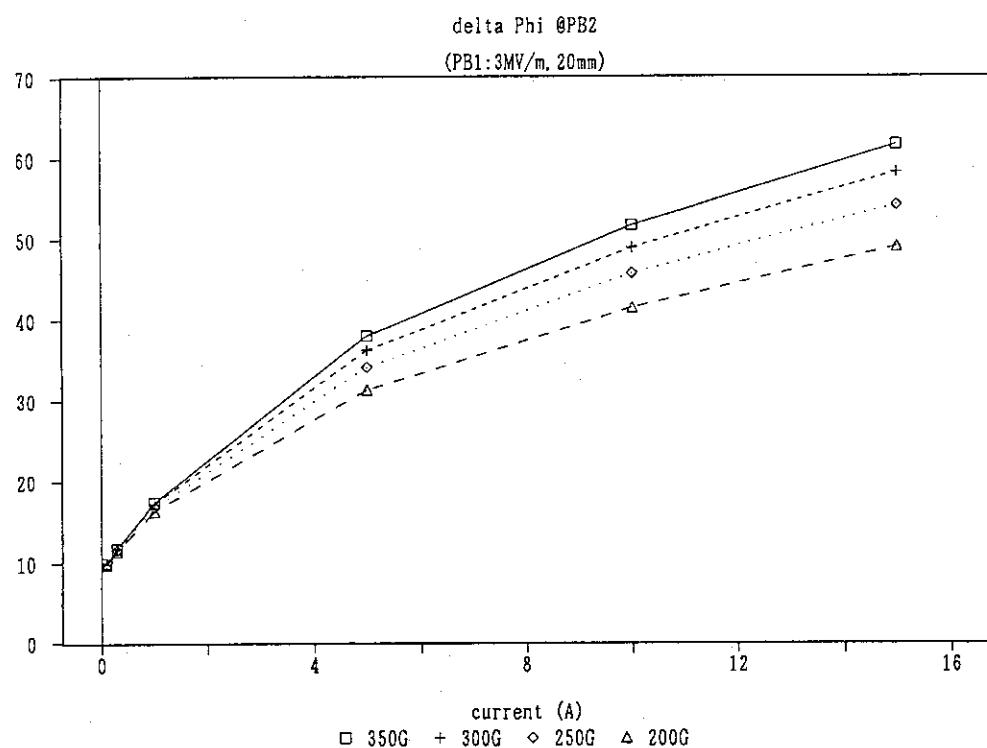


図64 PB1で3.0MV/mを与えたときの位相広がり

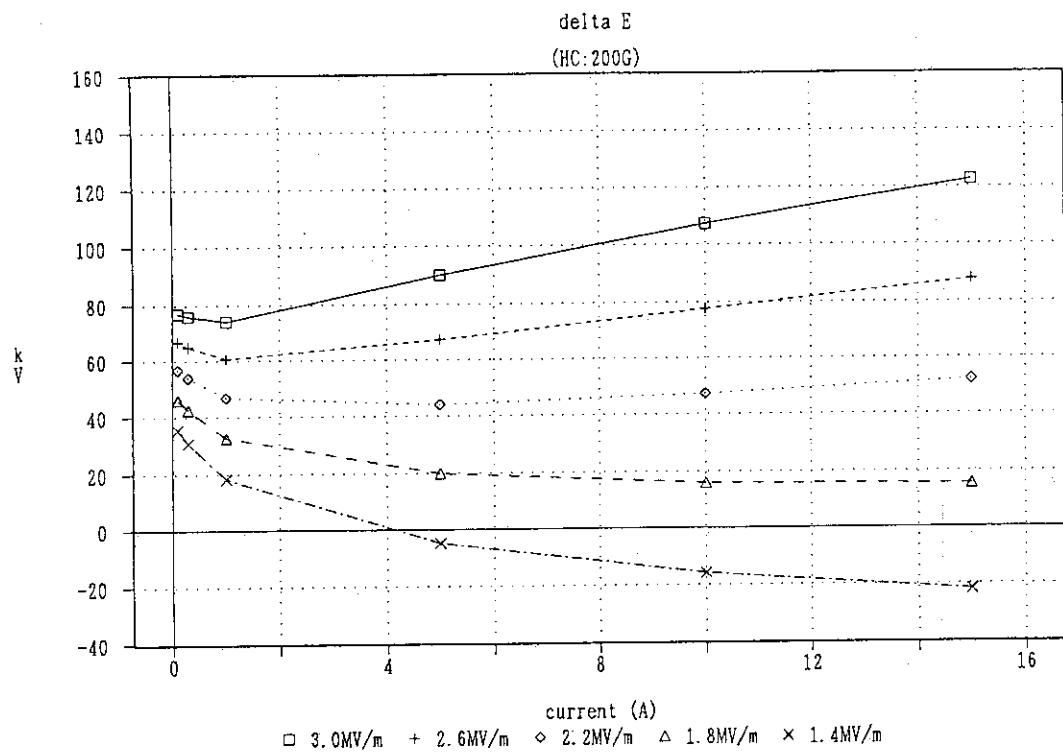


図65 ヘルムホルツ磁場が200Gのときのエネルギー広がり

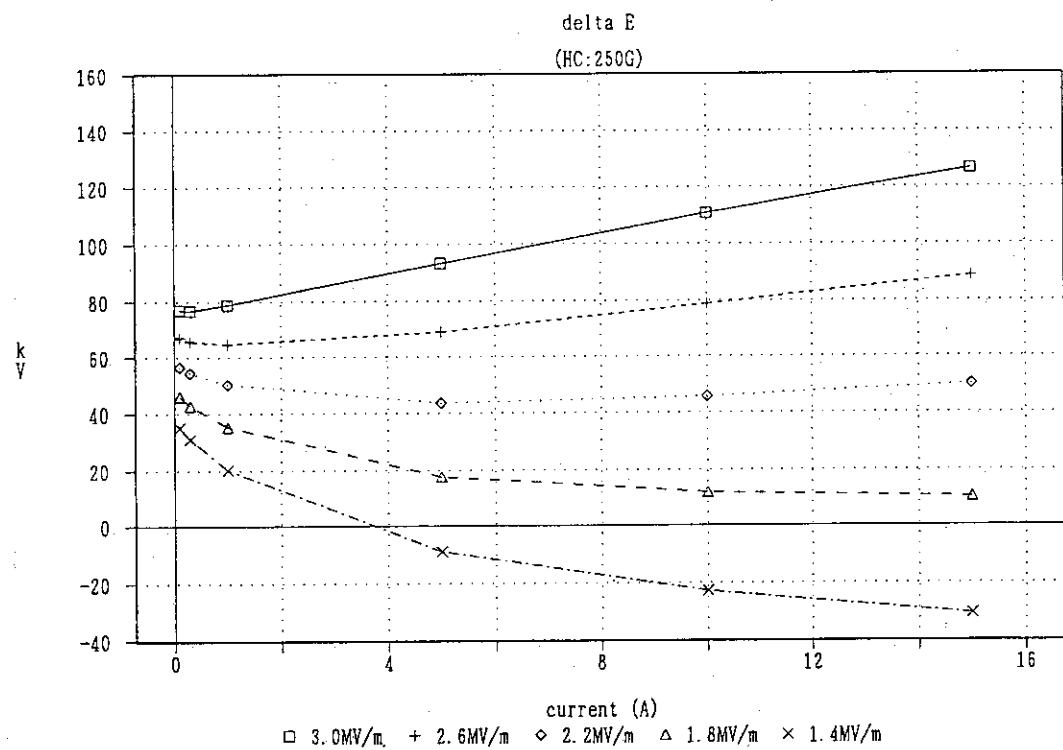


図66 ヘルムホルツ磁場が250Gのときのエネルギー広がり

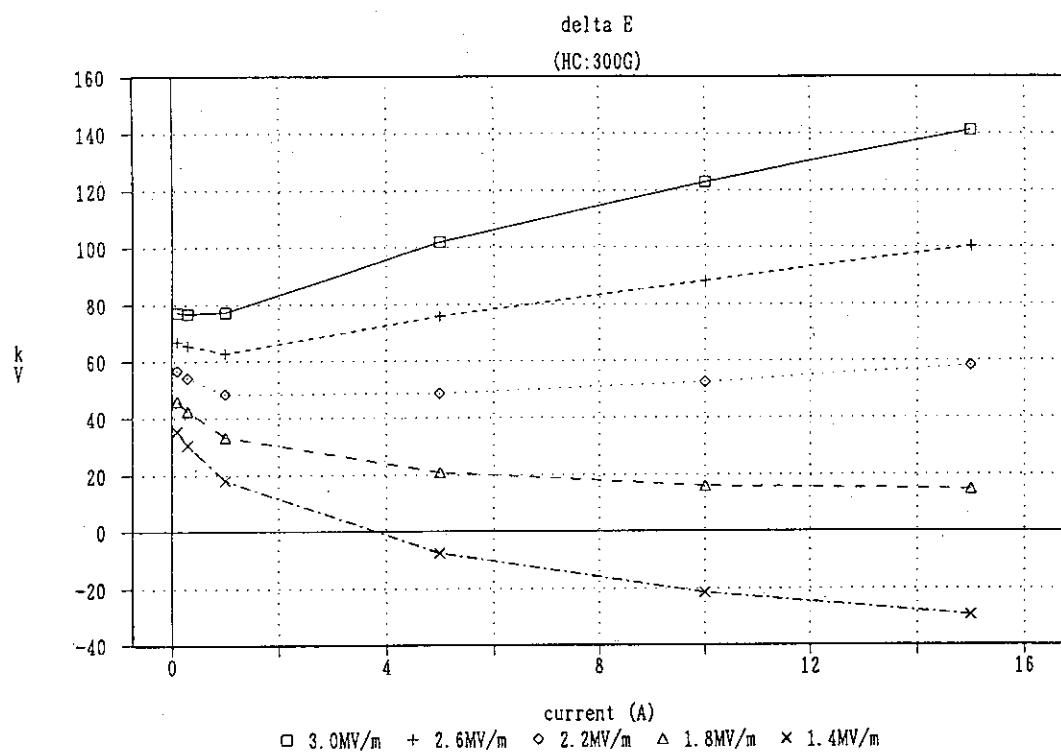


図67 ヘルムホルツ磁場が300Gのときのエネルギー広がり

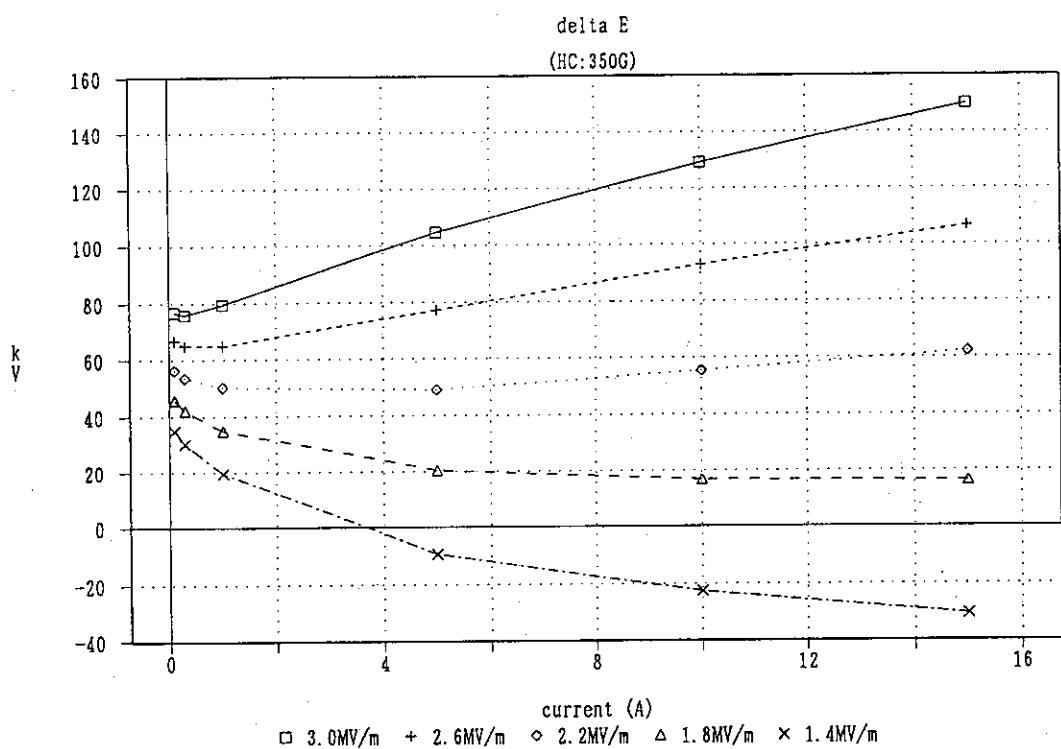


図68 ヘルムホルツ磁場が350Gのときのエネルギー広がり

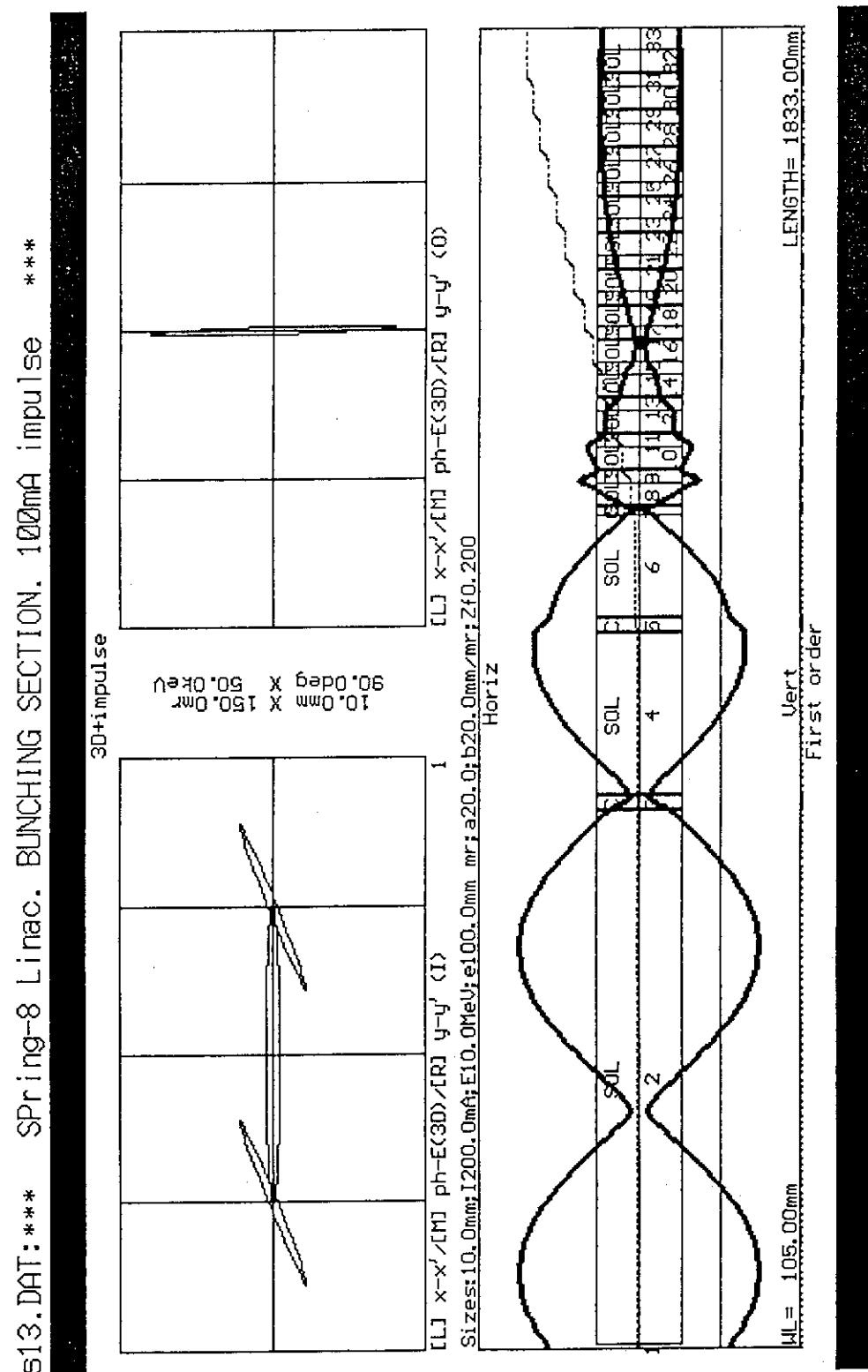


図69 低電流モードのビームトランスポート

List of DATA 100mA. [filename:S13.DAT]

```

*** Spring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 100mA impulse ***
*ER,W,Q,DP/P
0.511 0.185 -1.0 0
*XISMAX,EXI,EYI,EZI,WAVEL(mm),PQSMAX
100.0 10.0 26.0 26.0 200.0 104.99877 10.0
*BEAMI:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
-7.0 1.2 -7.0 1.2 0 40.0
*BEAMF:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
0 0 0 0 0 0
*dummy(FREQ),XM,XPM,XYM,EMM,ALM,BEM,XIM,WWM,PHM,DPM,EDPM,ZMfactor
2855.2 10.0 150.0 10.0 100.0 20.0 20.0 200.0 10.0 90.0 50.0 100.0 0.2
*N1,N2,NV,MT,PQEXT,SEC,isChromatic,isImpulse,itersc,XLi,YLi,ALi,FSL
 1 33 0 0 1.0 0 0 1 5 126 170 0 2000.0
*ME,MP,CONV,MVCE,MVCP,SAFAC

```

1 DRIFT 5.0

*PE_PP_PCONV

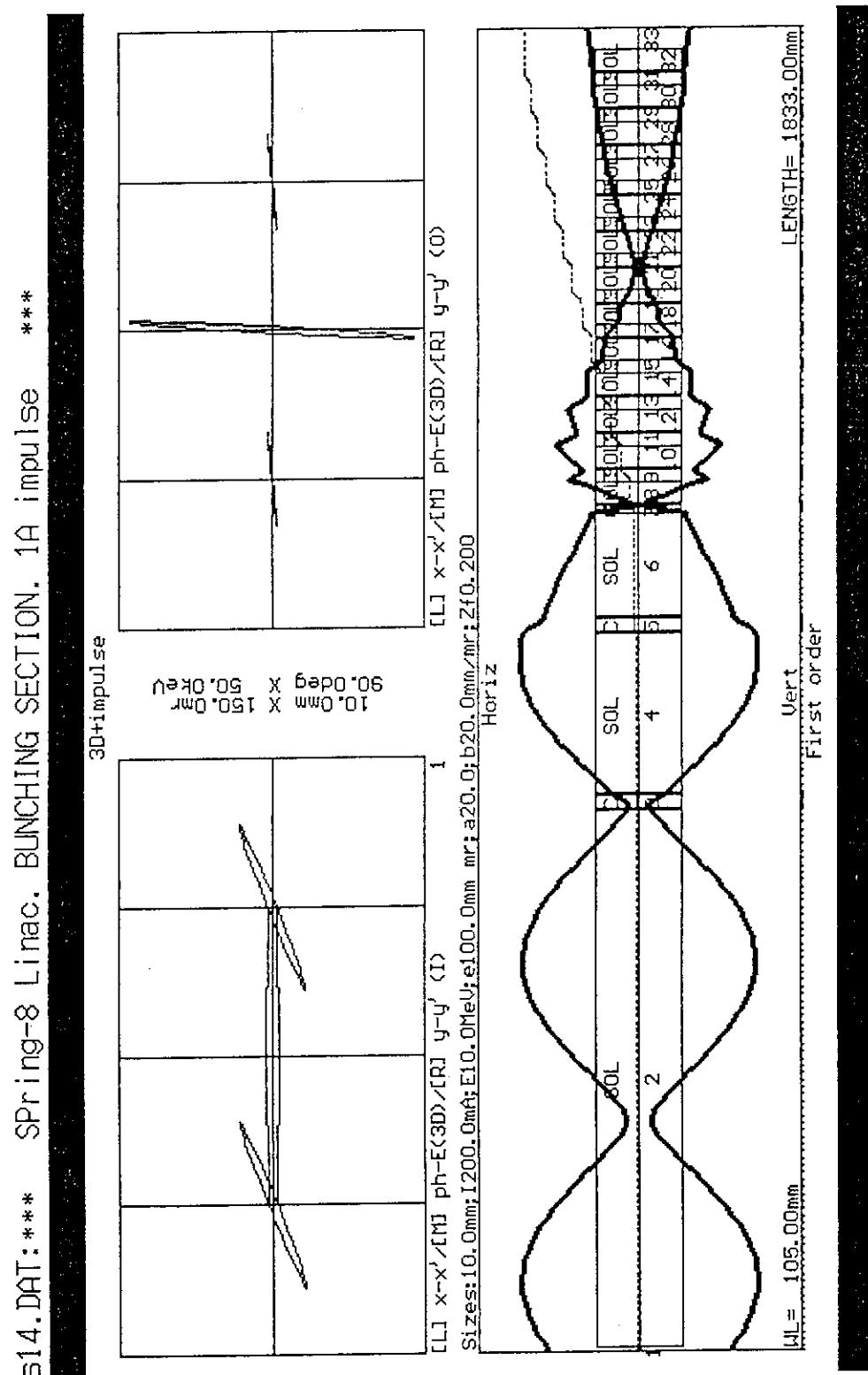


図70 電流値：1 A のビームトランസポート

List of DATA 1Amp. [filename:S14.DAT]

```

*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 1A impulse ***
*ER,W,Q,DP/P
0.511 0.185 -1.0 0
*XISMAX,EXI,EYI,EZI,WAVEL(mm),PQSMAX
1000.0 10.0 26.0 26.0 200.0 104.99877 10.0
*BEAMI:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
-7.0 1.2 -7.0 1.2 0 40.0
*BEAMF:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
0 0 0 0 0 0
*dummy(FREQ),XM,XPM,XYM,EMM,ALM,BEM,XIM,WWM,PHM,DPM,EDPM,ZMfactor
2855.2 10.0 150.0 10.0 100.0 20.0 20.0 200.0 10.0 90.0 50.0 100.0 0.2
*N1,N2,NV,MT,PQEXT,SEC,isChromatic,isImpulse,iterse,XLi,YLi,ALi,FSL
 1 33 0 0 1 0 0 0 1 5 126 170 0 2000.0

```

*ME, MP, CONV, MVCE, MVCP, SAFAC

*COMMENTS,NE,NT,PARAMETERS

	1 DRIFT	5.0
	2 SOLEN	250.0 747.0 0
	3 CAVIT	3.0 22.0 -10.0 1.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
PB1	4 SOLEN	260.0 220.0 0
	5 CAVIT	3.0 22.0 -15.0 2.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
PB2	6 SOLEN	260.0 142.0 0
B1	7 CAVIT	30.0 15.0 -22.0 3.0 3.0 1.0 0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	8 SOLEN	350.0 30.0 0
B2	9 CAVIT	50.0 20.0 -28.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	10 SOLEN	350.0 30.0 0
B3	11 CAVIT	50.0 20.0 -32.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	12 SOLEN	350.0 30.0 0
B4	13 CAVIT	50.0 20.0 -35.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	14 SOLEN	350.0 30.0 0
B5	15 CAVIT	50.0 20.0 -37.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	16 SOLEN	350.0 30.0 0
B6	17 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	18 SOLEN	350.0 30.0 0
B7	19 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	20 SOLEN	350.0 30.0 0
B8	21 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	22 SOLEN	350.0 30.0 0
B9	23 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	24 SOLEN	350.0 30.0 0
B10	25 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	26 SOLEN	350.0 30.0 0
B11	27 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	28 SOLEN	350.0 30.0 0
B12	29 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	30 SOLEN	350.0 30.0 0
B13	31 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	32 SOLEN	350.0 30.0 0
	33 DRIFT	30.0

*PE,PP,PConv

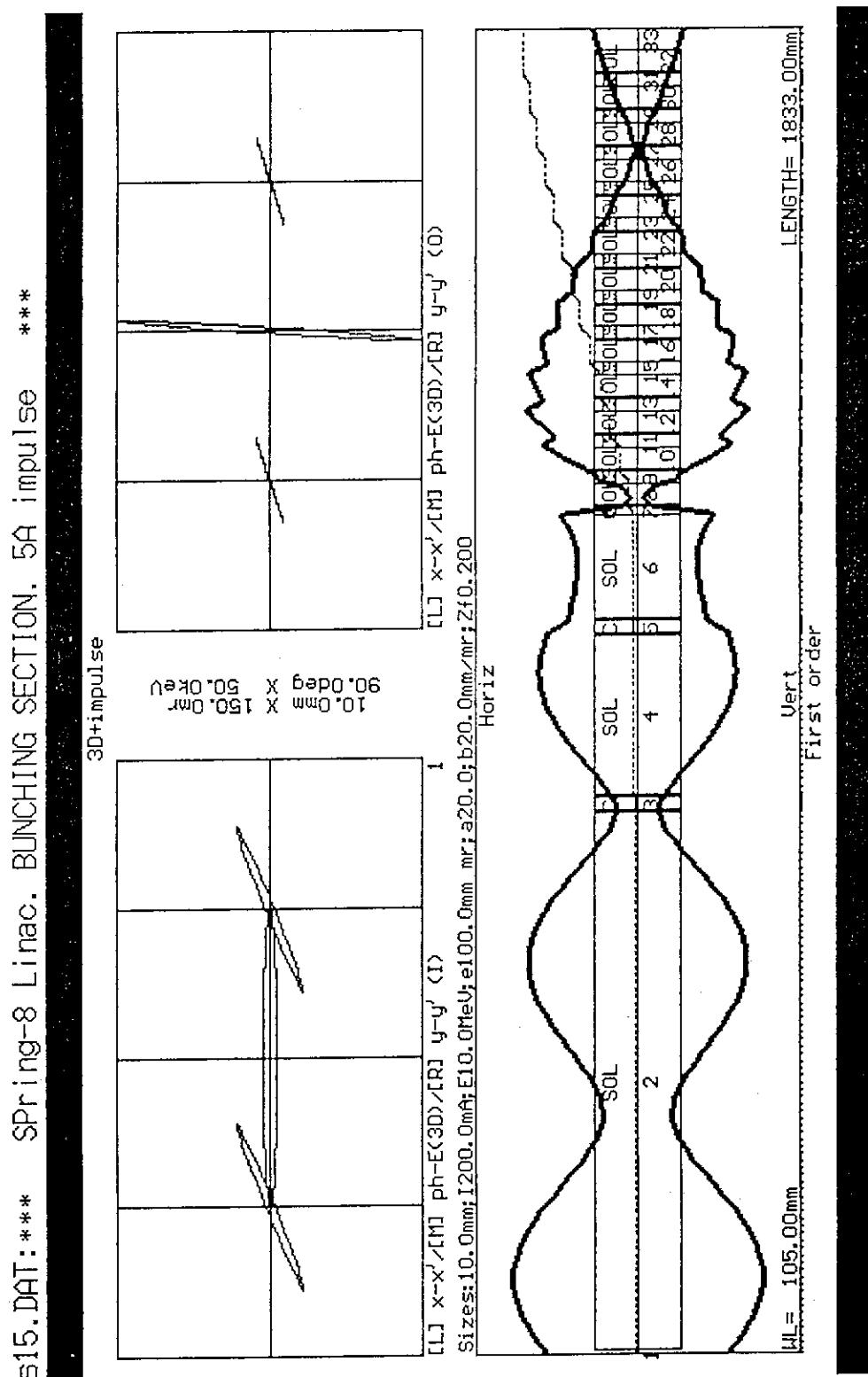


図71 電流値 : 5 A のビームトランスポート

List of DATA 5Amp. [filename:S15.DAT]

```

*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 5A impulse ***
*ER,W,Q,DP/P
0.511 0.185 -1.0 0
*XISMAX,EXI,EYI,EZI,WAVEL(mm),PQSMAX
5000.0 10.0 26.0 26.0 200.0 104.99877 10.0
*BEAMI:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
-7.0 1.2 -7.0 1.2 0 40.0
*BEAMF:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
0 0 0 0 0 0
*dummy(FREQ),XM,XPM,XYM,EMM,ALM,BEM,XIM,WWM,PHM,DPM,EDPM,ZMfactor
2855.2 10.0 150.0 10.0 100.0 20.0 20.0 200.0 10.0 90.0 50.0 100.0 0.2
*N1,N2,NV,MT,PQEXT,SEC,isChromatic,isImpulse,itersc,XLi,YLi,ALi,FSL

```

MANUFACTURERS' SALES

Journal of Economic and Management Sciences

*PE,PP,PConv

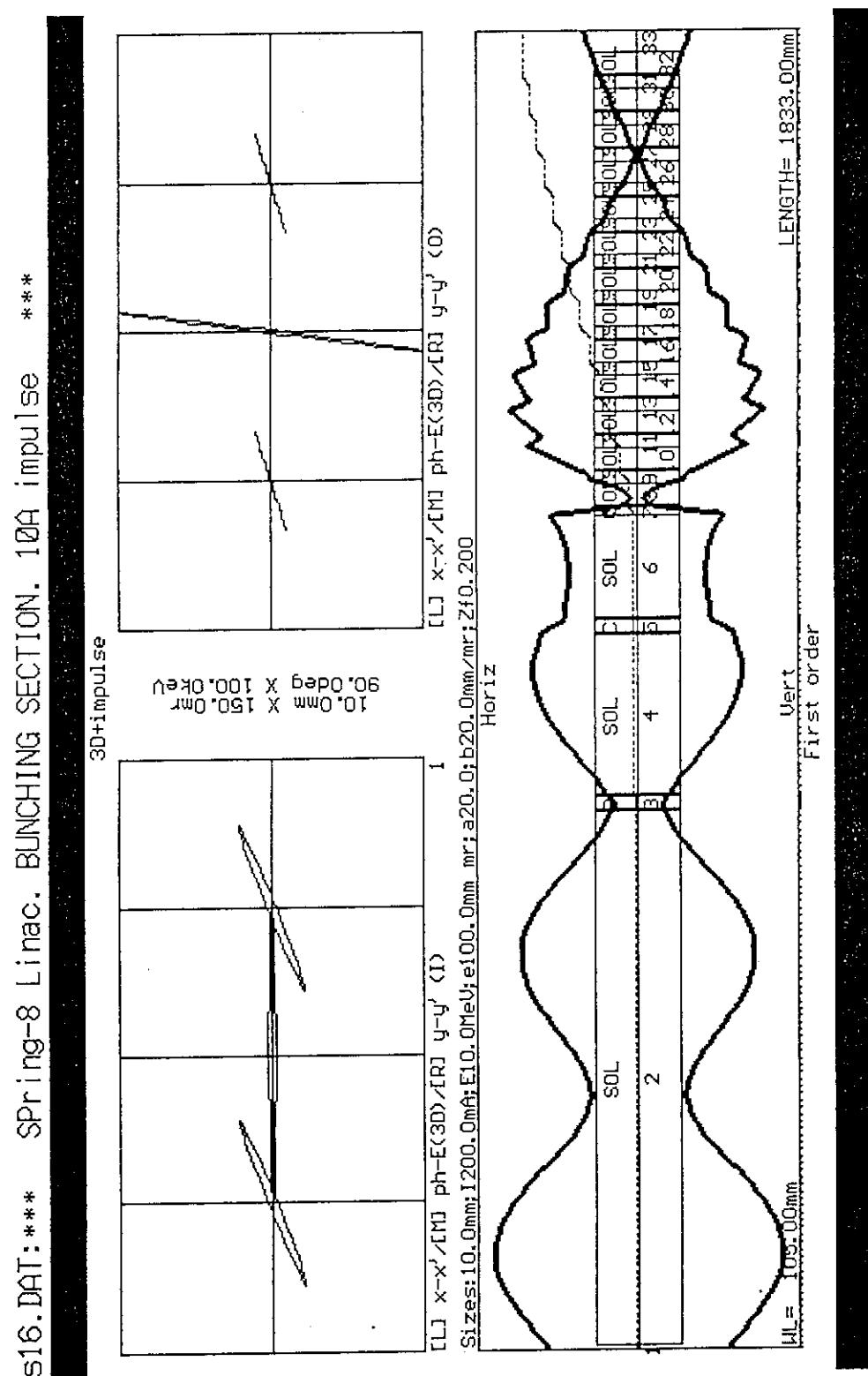


図72 電流値：10Aのビームトランスポート

List of DATA 10Amp. [filename:S16.DAT]

```

*** SPRING-8 Linac. BUNCHING SECTION. 10A impulse ***
*ER,W,Q,DP/P
0.511 0.185 -1.0 0
*XISMAX,EXI,EYI,EZI,WAVEL(mm),PQSMAX
10000.0 10.0 26.0 26.0 200.0 104.99877 10.0
*BEAMI:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
-7.0 1.2 -7.0 1.2 0 40.0
*BEAMF:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
0 0 0 0 0 0
*dummy(FREQ),XM,XPM,XYM,EMM,ALM,BEM,XIM,WWM,PHM,DPM,EDPM,ZMfactor
2855.2 10.0 150.0 10.0 100.0 20.0 20.0 200.0 10.0 90.0 100.0 100.0 0.2
*N1,N2,NV,MT,PQEXT,SEC,isChromatic,isImpulse,itersc,XLi,YLi,ALi,FSL
1 33 0 0 1.0 0 0 1.5 126 170 0 2000.0

```

*ME, MP, CONV, MVCE, MVCP, SAFAC

*COMMENTS,NE,NT,PARAMETERS

	1 DRIFT	5.0
	2 SOLEN	320.0 747.0 0
PB1	3 CAVIT	4.0 22.0 -10.0 1.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	4 SOLEN	360.0 220.0 0
PB2	5 CAVIT	4.0 22.0 -15.0 2.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	6 SOLEN	400.0 142.0 0
B1	7 CAVIT	30.0 15.0 -22.0 3.0 3.0 1.0 0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	8 SOLEN	400.0 30.0 0
B2	9 CAVIT	50.0 20.0 -28.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	10 SOLEN	400.0 30.0 0
B3	11 CAVIT	50.0 20.0 -32.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	12 SOLEN	400.0 30.0 0
B4	13 CAVIT	50.0 20.0 -35.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	14 SOLEN	400.0 30.0 0
B5	15 CAVIT	50.0 20.0 -37.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	16 SOLEN	400.0 30.0 0
B6	17 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	18 SOLEN	400.0 30.0 0
B7	19 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	20 SOLEN	400.0 30.0 0
B8	21 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	22 SOLEN	400.0 30.0 0
B9	23 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	24 SOLEN	400.0 30.0 0
B10	25 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	26 SOLEN	400.0 30.0 0
B11	27 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	28 SOLEN	400.0 30.0 0
B12	29 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	30 SOLEN	400.0 30.0 0
B13	31 CAVIT	50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	32 SOLEN	400.0 30.0 0
	33 DRIET	30.0

*PE,PP,PConv

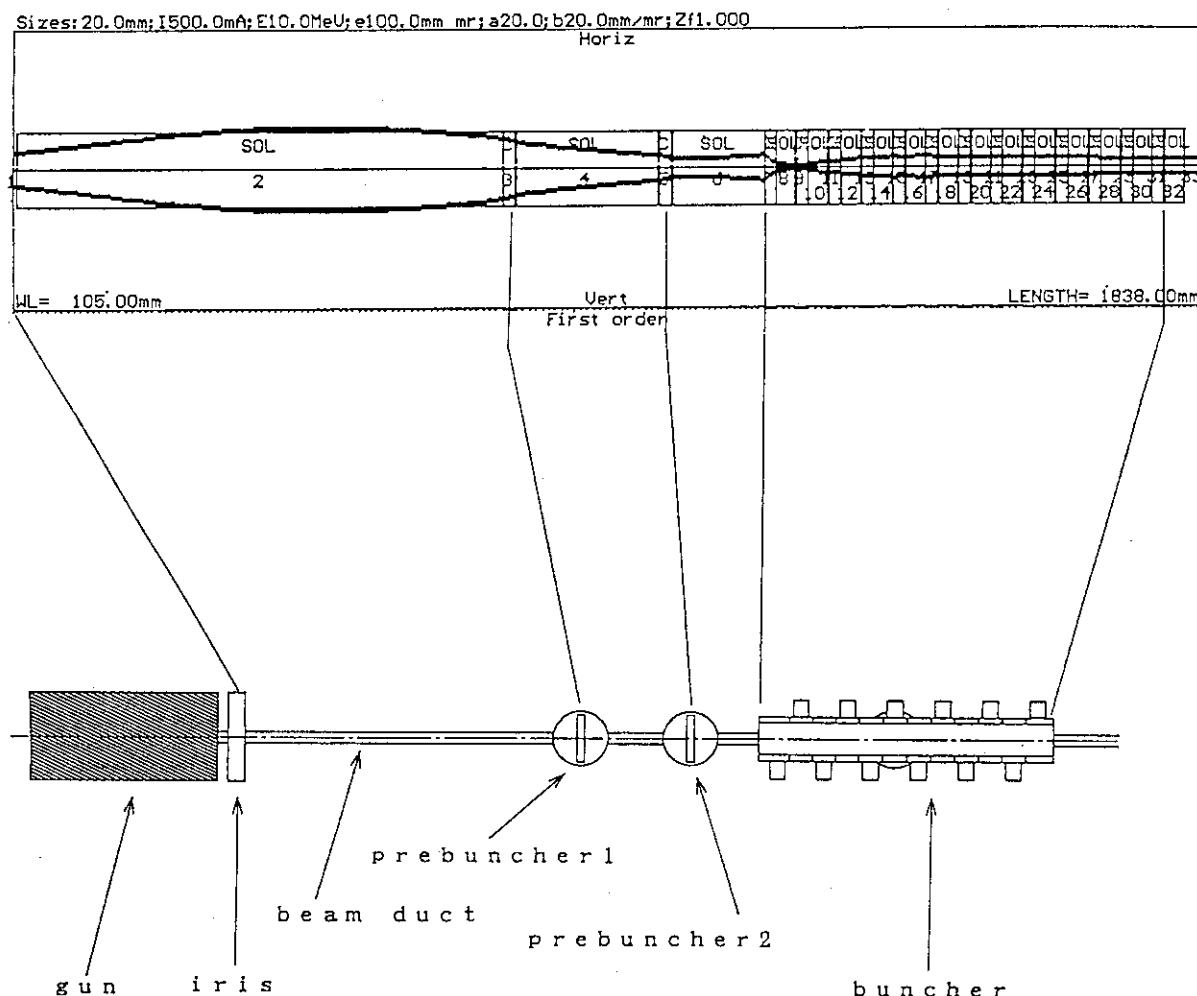


図73 アイリスを使ったときの低電流ビームトランスポート

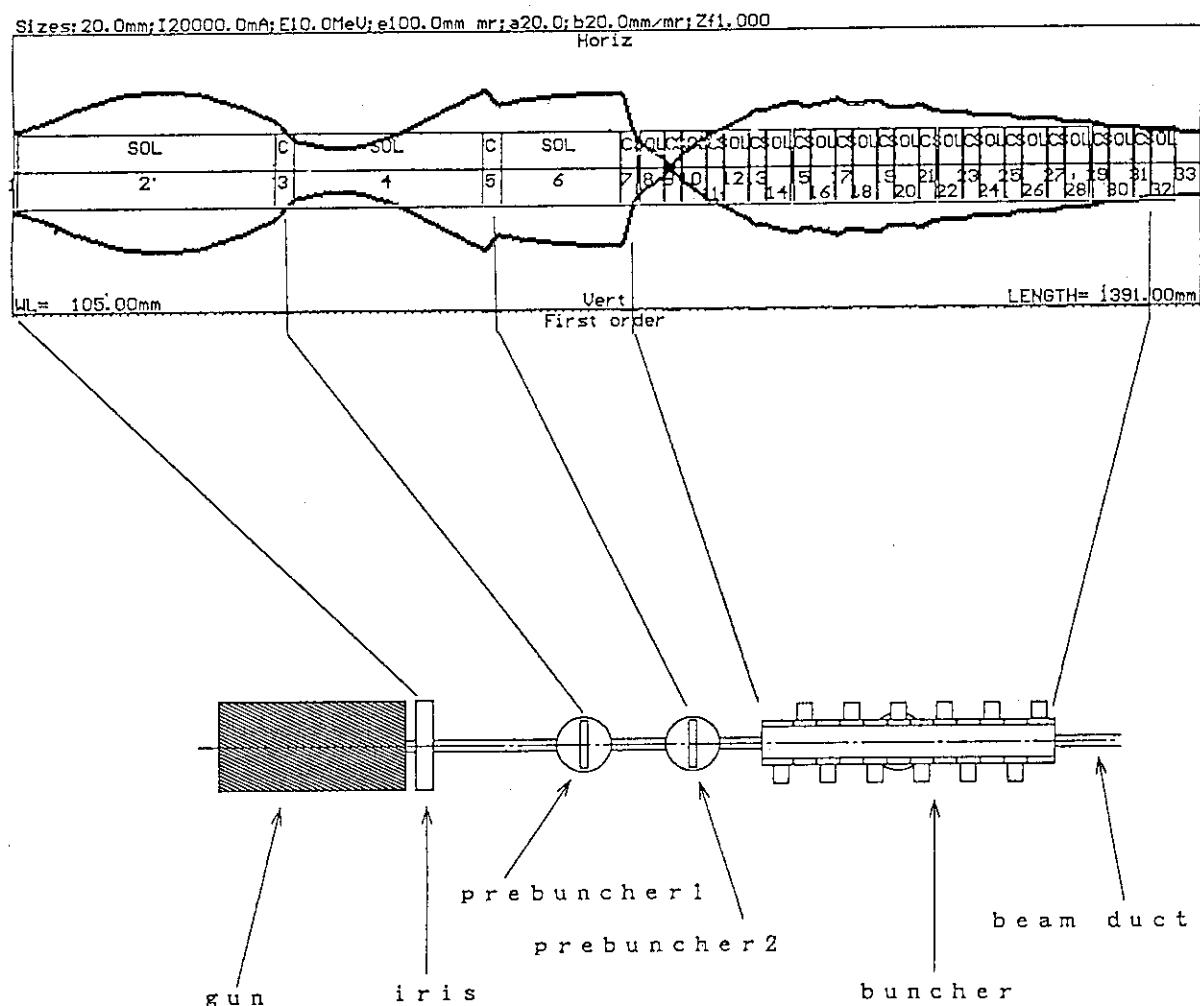


図74 短いドリフトスペースの時の大電流ビームトランスポート

S17.DAT:*** SPRing-8 Linac. BUNCHING SECTION. 15A impulse ***

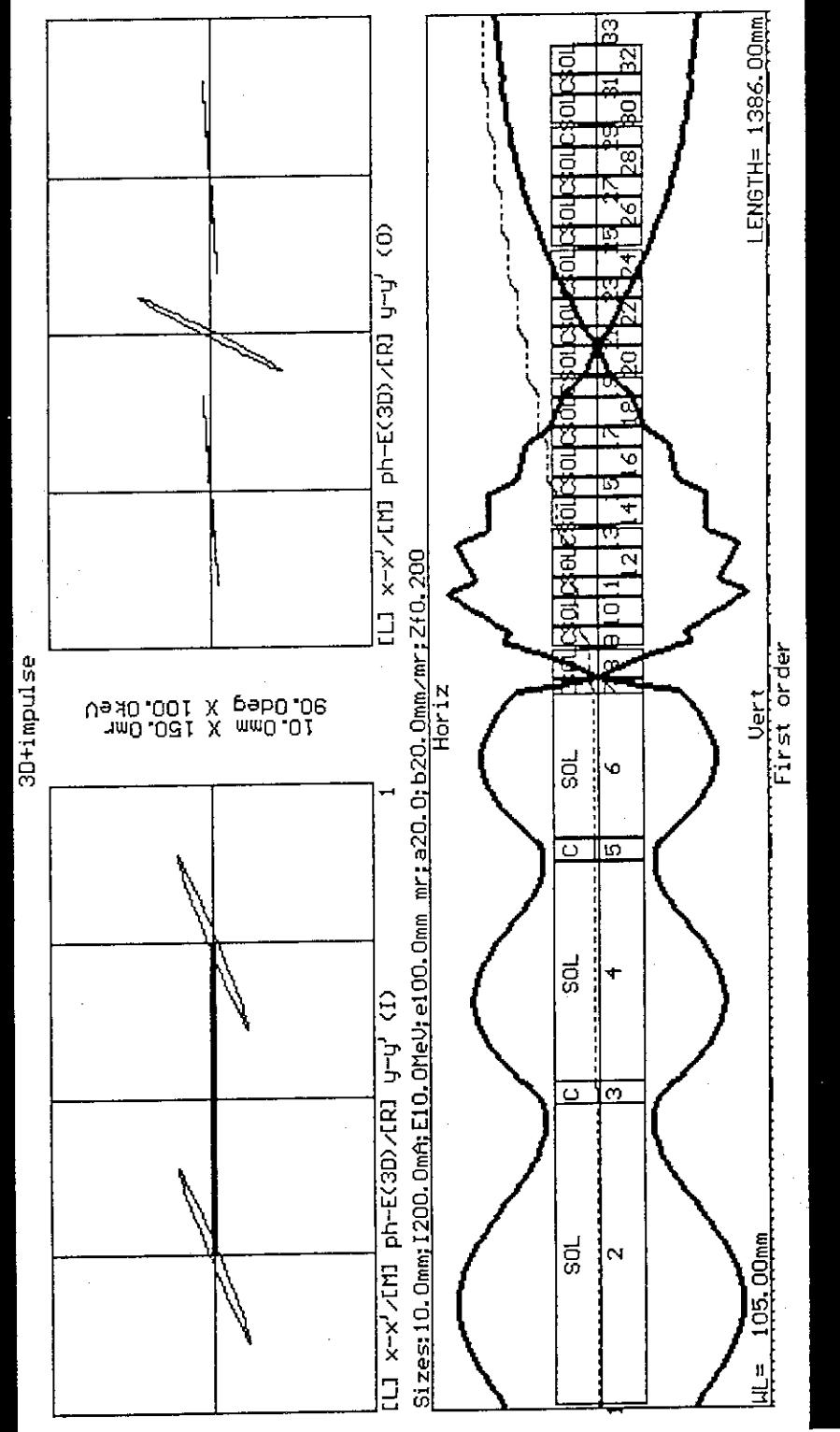


図75 西播磨設置での大電流ビームトランスポート

List of DATA 15Amp. [filename:S17.DAT]

```

*** SPring-8 Linac. BUNCHING SECTION. 15A impulse ***
*ER,W,Q,DP/P
0.511 0.185 -1.0 0
*XISMAX,EXI,EYI,EZI,WAVEL(mm),PQSMAX
15000.0 10.0 26.0 26.0 200.0 104.99877 10.0
*BEAMI:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
-7.0 1.2 -7.0 1.2 0 40.0
*BEAMF:alphaX,betaX,alphaY,betaY,alphaZ,betaZ
0 0 0 0 0 0
*dummy(FREQ),XM,XPM,XYM,EMM,ALM,BEM,XIM,WWM,PHM,DPM,EDPM,ZMfactor
2855.2 10.0 150.0 10.0 100.0 20.0 20.0 200.0 10.0 90.0 100.0 100.0 0.2
*N1,N2,NV,MT,PQEXT,SEC,isChromatic,isImpulse,itersc,XLi,YLi,ALi,FSL

```

*COMMENTS,NE,N1,PARAMETERS
 1 DRIFT 5.0
 2 SOLEN 400.0 300.0 0
 PB1 3 CAVIT 6.0 22.0 -10.0 1.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 4 SOLEN 490.0 220.0 0
 PB2 5 CAVIT 8.0 22.0 -20.0 2.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 6 SOLEN 700.0 142.0 0
 B1 7 CAVIT 30.0 15.0 -22.0 3.0 3.0 1.0 0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 8 SOLEN 750.0 30.0 0
 B2 9 CAVIT 50.0 20.0 -28.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 10 SOLEN 750.0 30.0 0
 B3 11 CAVIT 50.0 20.0 -32.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 12 SOLEN 750.0 30.0 0
 B4 13 CAVIT 50.0 20.0 -35.0 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 14 SOLEN 750.0 30.0 0
 B5 15 CAVIT 50.0 20.0 -37.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 16 SOLEN 750.0 30.0 0
 B6 17 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 18 SOLEN 750.0 30.0 0
 B7 19 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 20 SOLEN 750.0 30.0 0
 B8 21 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 22 SOLEN 750.0 30.0 0
 B9 23 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 24 SOLEN 750.0 30.0 0
 B10 25 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 26 SOLEN 740.0 30.0 0
 B11 27 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 28 SOLEN 730.0 30.0 0
 B12 29 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 30 SOLEN 720.0 30.0 0
 B13 31 CAVIT 50.0 20.0 -40.5 4.0 3.0 1.0 0.1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 32 SOLEN 710.0 30.0 0
 33 DRIFT 30.0

*PE_PP_PCONV