

超高速電子周回装置  
引き出し電子線ビームの高品質化

*Improvement of the electron beam quality*

*extracted from REFER*

広島大学大学院理学研究科物理科学専攻  
高エネルギーハドロン実験研究室

*M1379021* 野村 信輔

2003年2月10日

## 要旨

広島大学における超高速電子周回装置(*REFER*)は、150MeV 電子ビームの蓄積リングとして設計され、引き出し線ポートを備えていたものの、遅い引き出しを実現する機器を備えていなかった。そのため、引き出しポートから引き出されるビームは、約 2 ミリ秒に圧縮され高度な計測には不向きであった。また、本研究を始める時点では、引き出しポートにおける電子ビームの引き出しパラメータも最適化されておらず、空間的な集束条件も不明確であった。引き出しビームによる散乱実験あるいは高精度の検出器の性能評価実験を行うためには、引き出しビームの高品質化が不可欠であった。

本研究において、直径 1mm のシンチレーションファイバー 22 本を 2 層にしたものを 2 本垂直(十字)になるように接着し *I.I.T(Image Intensifier Tube)* と *CCD* カメラとを組み合わせた実時間ビームプロファイル検出器を制作した。本装置を引き出しポート出口に設置し、その下流にシンチレーションカウンターを設置し、実時間のビームプロファイル測定及び引き出し効率の測定から、引き出しパラメータの最適化を行い、引き出しビームの高品位化を目指した。また、2002 年に高周波加速空洞と引き出しポート分析磁石が導入されたことに伴い、ビームサイズの測定及び引き出し効率の最適化を行った。その手法はオンラインモニターを可能とするために蛍光素子(*CsI*)と *I.I.T+CCD* を用いた位置検出器を開発し、位置検出器及びシンチレーションカウンターを用いた。引き出されたビームの時間特性においては、今後の物理実験あるいは性能評価実験に非常に大切なので、2003 年 1 月に電子線全エネルギー吸収する電磁カロリメータを使い、エネルギースペクトラムを調べる実験を行った。

その結果、集束位置でのビームサイズ及び引き出し効率の最適化ができ、縦方向 2mm、横 3.4mm のビームスポットが得られ、時間特性においては 10 Hz の入射繰り返しに対して、約 90ms の安定した遅い引き出しビームを実現することができ、引き出し電子ビームの高品質化に成功した。

本論文では、以上の手法およびその成果について詳細に論じる。

# 目次

要旨.....	2
<b>第 1 章 序論.....</b>	<b>5</b>
1.1 はじめに.....	5
1.2 実験目的.....	6
<b>第 2 章 REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Research ) .....</b>	<b>7</b>
2.1 REFER の概要 .....	7
2.2 電磁石及び各装置.....	9
2.3 RF(Radio Frequency)の原理.....	11
2.3.1 REFER における RF.....	12
2.3.2 周回装置から電子ビームの引き出し方法.....	13
<b>第 3 章 検出器作成.....</b>	<b>15</b>
3.1 シンチレーションファイバー .....	15
3-2 Image Intensifier Tube .....	16
3-3 CsI シンチレーター付きファイバオプティクプレート .....	18
<b>第 4 章 実験内容.....</b>	<b>19</b>
4.1 電磁石パラメータの最適化.....	19
4.1.1 RF 増設以前の電磁石パラメータの最適化方法 .....	19
4.1.2 RF 導入後の電磁石パラメータ最適化方法 .....	20
4.2 集束条件の調査.....	21
4.2.1 RF 導入前.....	22
4.2.2 RF 導入後.....	23
4.3 時間特性の調査.....	25
4.4 エミッタンス.....	28
4.4.1 エミッタンス算出方法.....	28

<b>第 5 章</b>	<b>結果.....</b>	<b>31</b>
5.1	電磁石パラメータの最適化結果.....	31
5.1.1	RF 増設前の RF 増設後の電磁石最適化結果 .....	31
5.1.2	RF 増設後の電磁石最適化結果 RF 運転なしの場合.....	32
5.1.3	RF 増設後の電磁石最適化結果 RF 運転時 .....	33
5.2	集束条件の最適化における結果.....	35
5.2.1	RF 導入前のビームプロファイル結果 .....	35
5.2.2	Ext.BM2 から 0.254m でのビームプロファイル結果 .....	36
5.2.3	Slit 使用時のビームプロファイル結果.....	37
5.2.4	Ext.BM2 から 0.8m でのビームプロファイル結果 .....	38
5.2.5	Slit 使用時の 0.8m でのビームプロファイル結果.....	39
5.2.6	Ext.BM2 から 1.0m でのビームプロファイル結果 .....	40
5.3	時間特性結果.....	42
5.4	エミッタンスを求める!!! .....	43
5.4.1	RF 増設前のエミッタンス算出.....	43
5.4.2	RF 増設後.....	45
<b>第 6 章</b>	<b>考察.....</b>	<b>48</b>
6.1	ラティス計算.....	48
6.2	ビームプロファイルの考察 .....	49
6.3	時間特性の考察.....	52
<b>第 7 章</b>	<b>まとめ.....</b>	<b>53</b>
	<b>謝辞.....</b>	<b>54</b>
	<b>参考文献 &amp; 参考資料.....</b>	<b>54</b>
	<b>APPENDIX.....</b>	<b>55</b>
	DATA TABLE.....	55
	Optimized parameter at REFER.....	55
	Default Value.....	55

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

加速器は 1932 年に Cockcroft と Walton が陽子を加速し、初めて人工壊変を行って以来、注目をあつめてきた。近年、加速器の利用は原子核、素粒子と言った物理分野にとどまらず様々な分野に広がり続けている。例えば加速器で発生するガンマ線は医学利用され、放射線加工への利用のほか、イオンビーム、放射光、中性子、陽電子、電子といった特色ある加速器が開発されている。つまり、物理の基礎となって来ていると言っていいだろう。広島大学にも加速器が設置されていて本研究はそこで行った。

広島大学 VBL<sup>1</sup>には 150MeV の電子を発生させるマイクロトロンがあり、HISOR<sup>2</sup>(蓄積リング)と電子周回装置に分岐している。(下図参照)そこでは様々な研究が行われていて、本研究は電子周回装置において行った。

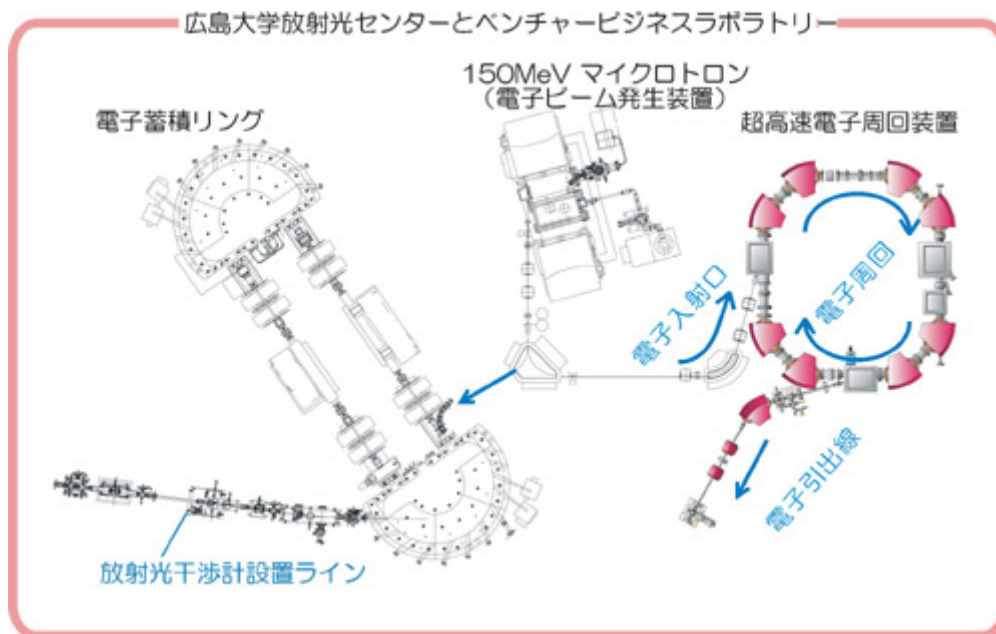


図 1.1 広島大学 VBL 概略図：マイクロトロンで 150MeV の電子ビームを発生させ電子蓄積リングと超高速電子周回装置に入射していることが分かる。基本的にはまず蓄積リングの方に入射する。蓄積リングの方は RF を装備しているため入射しておく実験時間内は蓄積されたままである。一方、周回装置の方は RF を装備していない為実験を行う毎に入射しなければならない。

<sup>1</sup> Venture Business Laboratory

<sup>2</sup> Hiroshima(High) Synchrotron Orbiter Radiation

## 1.2 実験目的

概要で述べたように広島大学 VBL には電子を 150MeV に加速するマイクロトロンがある。そこで加速された電子を超高速電子周回装置(以下 *REFER* とする)に入射し引き出し線で電子を引き出すのだが、ここで行われている主な実験としては、結晶を用いた散乱実験、検出器の性能実験、逆コンプトン実験、内部標的実験などの実験がある。このような実験を行う時にどのような電子ビームを使っているのか解っていないと話にならない。つまり、引き出しビームの特性を調べることは不可欠である。

そこで今まで不鮮明であった引き出しポートにおける電子ビームの引き出しパラメータ及び空間的な集束条件を最適化し、2002 年より RF 及び四極電磁石、偏向電磁石が導入され、設置後の引き出された電子ビームにおける集束条件、時間特性の最適化することが本研究の目的である。また本研究ではエミッタンスも求めた。

## 第2章 REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Research)

### 2.1 REFER の概要

広島大学には 150MeV の電子を発生させるマイクロトロンがある。このマイクロトロンから出た電子ビームは HISOR の方に入射されその後、この超高速電子周回装置に 10Hz のタイミングで電子ビームが入射される。この周回装置に電子ビームの入射及び引き出しにおいて重要となってくる電磁石および各装置がある。まず、その説明を行わないと内容が説明できないので、用語の説明を行っていきたい。

#### Microtron

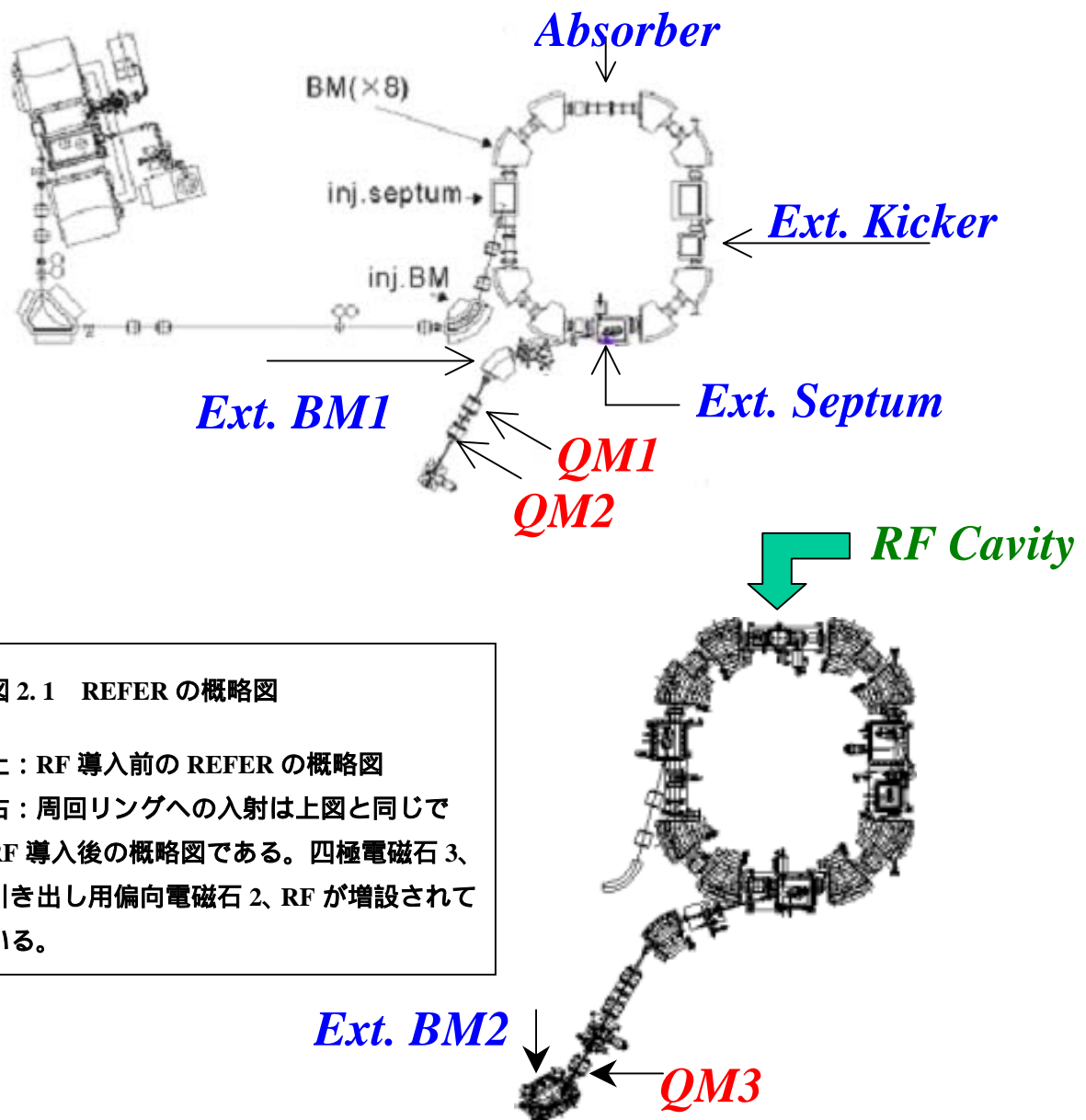


表 2.1 超高速電子周回装置基本パラメータ

電子エネルギー	150 MeV
周長	13.7 m
長直線部	2.5 m
短直線部	0.7 m
極率半径	0.75 m
入射電子エミッタンス	0.54*Pi [mm・m・rad]

表 2.2 マイクロトロン主要パラメータ

出力ビームエネルギー	150 MeV
入射ビームエネルギー	80 keV
ピークビーム電流	2-10 mA
ビームパルス幅	0.2-2μsec
繰返し	0.2-100 Hz
ビームエミッタンス	0.54π mm・mrad (1σ)
エネルギー広がり	±0.1 % (1σ)
偏向磁場強度	1.23 T
磁場勾配	0.14 T/m
磁極間隔	1.0 cm
周回数	25
エネルギー利得/ターン	6 MeV
加速構造	8 セル側結合空洞
加速構造ボア直径	1.0 cm
RF 周波数	2856 MHz
RF 電場勾配	15 MV/m
RF 壁損失	1.5 MW (最大.)
ビーム負荷	> 2.0 MW



## 2.2 電磁石及び各装置

ここでは、前節で述べたように周回装置における電磁石及び各装置について説明していく。まず、マイクロトロンで 150MeV の電子を発生させていることは述べたがそこから周回装置へ入射する時に Inj. BM 及び Inj. Septum がありこの電磁石で周回装置に電子が入射されている。また電子を周回させるために BM が使われている。次に電子ビームを引き出すために Absorber, Ext. Kicker, Ext. Septum, Ext. BM1, 2 が使われている。最後に引き出し電子ビームを集束させるために QM1,2,3 があり、これらの電磁石について説明する。[ ]は和名を示している。

### 1 . Inj. BM ( Injection Bending Magnet ) [REFER 用電子ビームの入射用偏向電磁石]

これは偏向電磁石と呼ばれるもので二極電磁石から成っており、(電子)ビームの軌道を偏向する時に用いられる。荷電粒子が磁場の中を進むと進行方向に垂直にローレンツ力を受け運動の向きが変わる。REFER の場合はマイクロトロンから輸送されてきた電子ビームを周回装置への入射ラインに乗せるための偏向電磁石である。参考までに単位荷電粒子を考えると曲率半径  $R[m]$  は運動量  $[MeV/c]$  と磁束密度  $B[T/m]$  によってよく知られた  $p=300BR$  の関係で求められる。

### 2 . Injection Septum Magnet [入射用セプタム電磁石]

加速器へのビームの入射や引き出しの時に用いられる特殊な偏向用の電磁石で、セプタム(障壁)と呼ばれる薄いコイルを境にして、内側の磁場は一定に保たれ外側には磁場漏れは起こさないような電磁石である。REFER においては Inj. BM で偏向された電子を周回装置の周回軌道に乗せる働きをしている。

### 3 . BM ( Bending Magnet ) [周回用偏向電磁石]

電子ビームを周回させるために  $45^\circ$  偏向をかけるための偏向電磁石。

### 4 . Ext. Kicker Magnet (Extraction Kicker Magnet) [引き出し用キッカー電磁石]

通常、立ち上がり、立ち下りが早い短形波のパルス状磁場をつくる偏向電磁石のことを示し高エネルギー粒子加速器の入射および引き出しに用いられる。REFER の場合、周回電子が Absorber でエネルギー損失しキッカー電磁石の有効磁場領域に入ってきた電子を外側に弾き出す (Kick) のが役目である。

### 5 . Ext. Septum Magnet (Extraction Septum Magnet) [引き出し用セプタム電磁石]

Ext. Kicker Magnet に弾き出された電子を引き出しラインに乗せる働きがある。

## 6 . Quadrupole Magnet 1,2,3 [四極電磁石 1,2,3]

文字通り四つの極を持つ四極電磁石である。磁場は中心軸上でゼロ、磁場勾配が一定の電磁石である。また偏向作用はなくビームの発散を防ぎ集束作用（レンズの作用）をさせる四極電磁石である。以下略して QM1,QM2,QM3 と呼ぶことにする。QM1, QM2, QM3 それぞれ極性があり RF 導入前は、QM1 は縦方向集束横方向発散型、QM2 は横方向集束縦方向発散型、RF 導入後は、QM1 は横方向集束縦方向発散型、QM2 は横方向集束縦方向発散型、QM3 は縦方向集束横方向発散型である。また加速器分野では横方向集束縦方向発散型のことを Focus、縦方向集束横方向発散型のことを Defocus と呼ぶ。

## 7 . Ext. BM1,2 (Extraction Bending Magnet 1,2) [引き出し用偏向電磁石]

偏向電磁石 1 では、セプタム電磁石によって引き出し軌道に乗った電子を 45 度偏向する。

## 8 . スリット

水平及び鉛直方向のビームサイズを調整するためのもの。40mm 厚の銅でできていて、< 型のスリットを水平方向から動かし合わせて鉛直方向のビームサイズも調整できようになっている。Slit=30,30 の場合およそ対角線が縦 5mm 横 5mm の菱形である。Slit=20,20 の場合はおよそ対角線が縦 25mm 横 25mm の菱形である。

表 2.1 電磁石

	構造	磁束密度 [T]	偏向角 (度)
Injection Septum Magnet	-	0.417	15
Bending Magnet	ブロック H 型	0.67	45
Absorber	Al	-	-
Extraction Kicker Magnet	-	0.225	5.2
Extraction Septum Magnet	直流	0.417	15
Extraction Bending Magnet 1	ソリッド H 型直流	0.833	45
Quadrupole Magnet 1	Focus	6 [T/m](Max)	-
Quadrupole Magnet 2	Focus	6 [T/m](Max)	-
Quadrupole Magnet 3	Defocus	6 [T/m](Max)	-
Extraction Bending Magnet 2	ソリッド H 型	0.677	60

## 2.3 RF(Radio Frequency)の原理

2002年10月よりRFがREFERに設置された。そのためにここでRFの原理について述べておきたいと思う。



Photo 1 上から撮ったRF空洞の写真である。  
電子は右から左へ周回している。

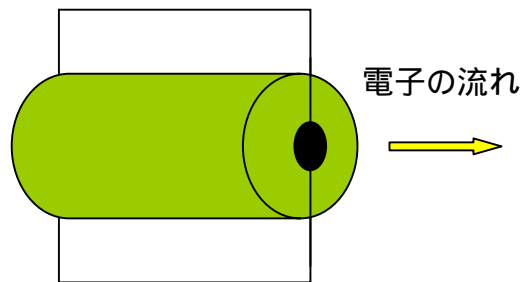


図 2.2 RF の概念図

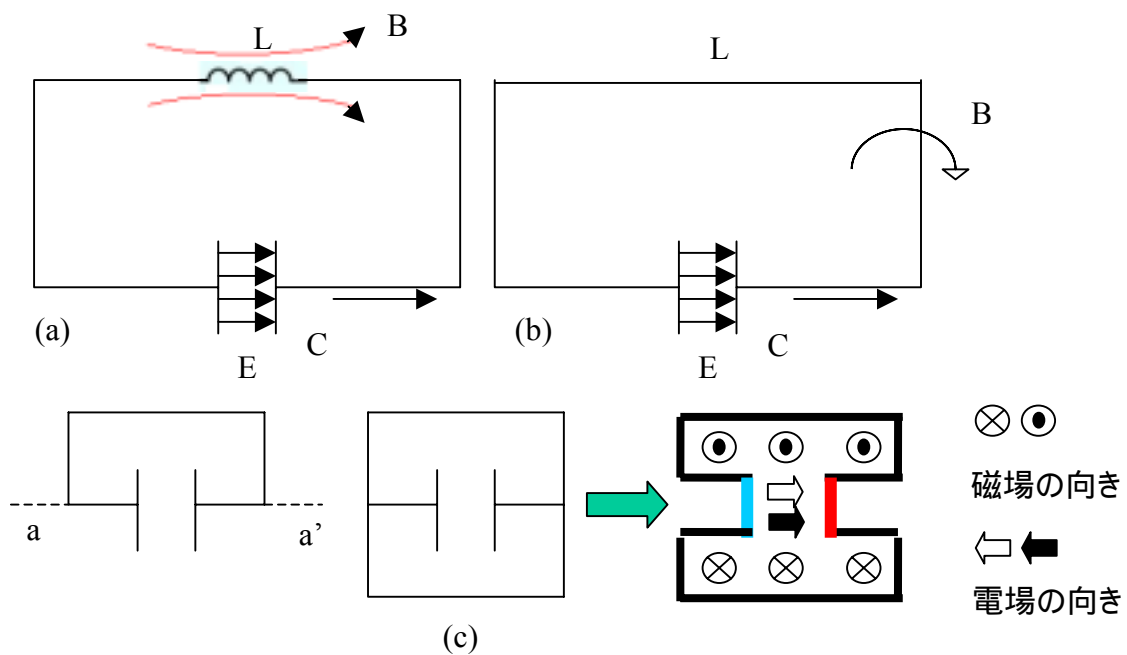


図 2.3 RF の原理図

RF の概念図で書かれている平面を考え、RF の原理を描いている。

高周波加速空洞は導体の壁に囲まれた空洞共振器(cavity)で単純に平行板に高周波電圧を印加しても多重加速できないことは容易に分かる。空洞共振器の原理は LC 回路つまりインダクタンス L とキャパシタンス C で作られる共振回路である。共振周波数はよく知られているように  $\omega^2 = 1/LC$  である。高周波の場合は、LC は小さくてもいいので上図のコイルは一本の線でもいい。また線を通電性のいい金属の壁に置き換えてもよい。これも共振回路である。図 2. 4(b)では電場は C の部分に集中し、磁力線はコイルを横切るように走っているが図 2. 5(c)の場合では電気力線はギャップ部分に集中し、磁力線は動径方向に走っている共振モードが存在している。図 2. 6(c)が図 2. 7(b)と異なる部分は外部に漏れ電磁場が存在しないことである。このことが加速装置としては重要で、これで初めて加速装置として使われることになる。このような空洞共振器の共振周波数は形状のみで決まっています。大幅に変化させることはできない。

### 2.3.1 REFER における RF

2002 年 10 月末より RF が REFER に導入された。(REFER 概略図参照)

RF が導入したことによる主な利点は以下の点である。

1. 周回リングでの電子の寿命が大幅に延びること。

CT(Current Transformer)つまり周回リングを回っている電子ビームのカレントを見る変流器で、その CT を用いて RF 導入前後における周回電子ビームカレントの波形を以下に示す。

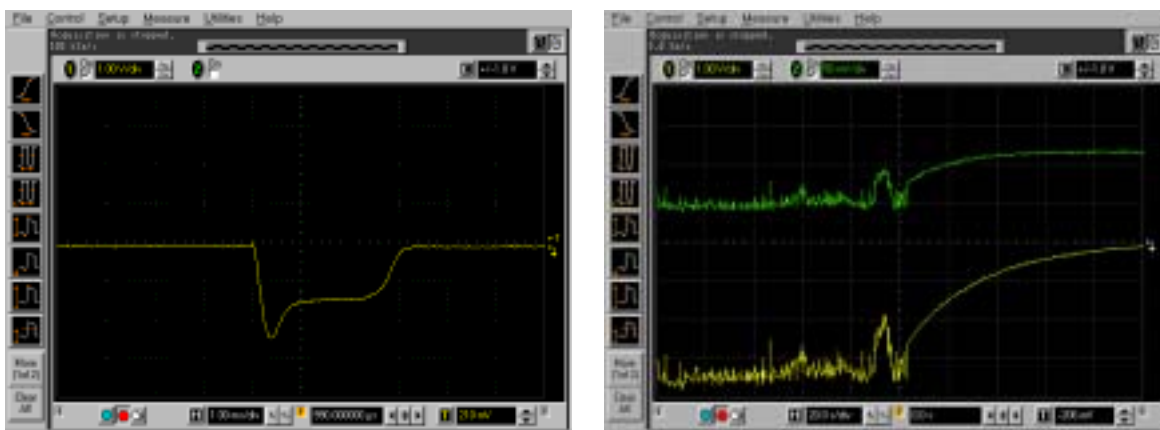


図 2. 8 左図：導入前の周回リングの CT 横軸[1msec/div]、縦軸[1V/div]

右図：上は RF の POWER を示している。下は周回のみで入射を止めてからの RF だけで周回している時の CT である。ちなみに横軸[20s/div] 縦軸[1V/div]。

先ほどのオシロスコープの図について説明したいと思う。まず左図についてだがこれは RF が導入される前の周回装置における電子ビームのカレントを示している、電子ビームの引き出しは行っていない。時間系列を追ってみていくと最初に入射が行われ、理想的には電子は全て周回装置に入射されるのだが実際にはロスがある。そして入射 1msec 後電子は安定して周回し始め、さらに 1msec 後、周回の際における制動放射でエネルギーを失い周回カレントはなくなる。右図は RF 導入後の周回カレントを示している。二つのシグナルが見られるがここでは下のシグナルを見て欲しい。このシグナルも時系列をおって説明する。時間がおよそ半分(図の真中)あたりで前後に分ける。前半部分は RF を運転しさらに 10Hz で入射を行っているが、後半部は電子の入射をストップさせ RF のみで運転させている様子である。およそ 20 秒で周回カレントが半分になっていることが分かる。結果このふたつの CT の波形より周回のみ電子ビームの寿命は 3 msec からおよそ 20sec に延びていることがいえる。

## 2 . 周回電子軌道の安定化。

RF の原理を考えればある共振周波数でしか加速は行われない。つまり言い換えれば共振周波数が決まれば電子の周回軌道もおのずと決まってくるのである。そのため周回軌道は以前に比べ安定なものになっていると考えられる。ちなみに、本研究ではこの調査は行っていない。

3 . 周回電子ビームの寿命が延びることにより遅い引き出し(slow Extraction)が可能になる。周回電子ビームの寿命測定結果より以前より電子ビームの寿命が延びたことが分かった。今マイクロトロンから周回装置への電子ビームの入射のタイミングを考えると入射は 10Hz で行われている。つまり理想的には 100msec での引き出しが可能となってくる。ちなみに RF 増設前は約 0.5~1msec での引き出しであった。

## 2.3.2 周回装置から電子ビームの引き出し方法

### 1 . RF 導入前の引き出し方法

周回装置に電子が周回している前提で考える。まず、Absorber によって電子のエネルギーは失われ電子の軌道は周回装置の内側にくる。これは  $p=300BR$  より周回リングは一定磁場が存在 (BM の作用) しているので電子の運動量が減少すれば当然曲率半径も小さくなる。軌道が内側になった電子は Ext. Kicker Magnet の磁場領域に侵入し Ext. Kicker Magnet により電子は外側の軌道に弾き出される。そのことによって電子は Ext. Septum Magnet に作用され引き出しラインに乗る。さらに下流において電子は偏向電磁石で曲げられ出射する。(REFER 概略図参照)

## 2 . RF 導入後の引き出し方法

ある共振周波数(本実験では 697.51MHz)で電子が周回しているとしよう。大体の引き出し方法は同じなのだが違う点がある。RF を使用する場合 Absorber には衝突させるかである。RF の原理で説明したように共振周波数によって電子の周回軌道はある一定の軌道に決定してしまう。つまりこのままでは Absorber には衝突しないのである。本研究においては FM 変調(Frequency Modulation)を用いた。FM 変調とはある共振周波数を時間的に変化させることである。電子の引き出しにおいてある共振周波数で周回している電子の周波数を FM 変調させることで電子の周回軌道を内側に移動させる。もう少し詳しく述べるとある共振周波数を時間的に減少させれば RF のパワーも減少してくる。(共振周波数の時が RF のパワーが最高にしているため)RF のパワーが減少してくれば加速空洞内の電場が弱まる。つまり、放射光ロスした分が補われずその分周回電子の運動量が減ることにより電子の周回軌道は内側に移動するといった仕組みである。Absorber に衝突した後は RF 導入前と同様に引き出しポートの最後に Ext. BM2 で 60 度偏向され電子ビームが引き出される。

---

---

### 参考

#### 共振周波数の設定

: 東芝の設定では 699.51MHz だったが今回は 697.51MHz を用いた。理由は Absorber の位置に関係してくるのだがまず簡単な手順を追う。まずある共振周波数で RF パワーが最大になるように加速空洞を調子する。これはチューナーと呼ばれる空洞形を変化させるもので、これを覚えてパワーが最大になるようにする。そしてビームを周回させ、周回用の電磁石と周回装置へ入射するセプタム電磁石の二つを変化させ周回カレントが最大になるようにセットする。以上作業を行ったとき 697.51MHz と 699.51MHz では周回用の偏向電磁石が大きく異なる(設計値の方が大きい)。そうすると Absorber を入れたときに周回装置へ入射する電子が FM 変調前に Absorber に衝突し周回カレントが激減してしまう。よってできるだけ RF を運転しない時の電流値(BM)に近づけたかったので 697.51MHz を採用した。

## 第3章 検出器作成

本研究ではビームの形状を見るためにシンチレーションファイバー及び CsI (蛍光素子) シンチレーター付きファイバーオプティクスプレートを用いることにした。以下に作成方法等を述べる。

### 3.1 シンチレーションファイバー

まず、シンチレーションファイバーを使用した理由を述べる。そもそも引き出される電流値は非常に弱いもので周回中の電子を見るなら蛍光板でも可能だがこの場合はそうはいかない。また以前使われていた検出器は 5 ミリ程度までしか測定できなかった。そこで本研究では直径 1 mm のシンチレーションファイバーを用いることにした。

まず、直径 1 ミリのファイバーを 22 本並べ接着する。次に不感領域を減らすためにもう一層同じ物を作り 0.5 ミリずらして接着した。(下図参照) もう一つ作成し 90 度(十字)に接着した。(下図参照) この様に接着することにより電子ビームの縦方向と横方向のビームサイズが測定できるようになる。ここでシンチレーションファイバーの加工にあたって最も重要な点は断面をどうするかである。今一本のファイバーに電子が通過したとしよう。するとシンチレーションファイバーは発光するのだがその光は断面できれいに反射が起らないとシンチレーション光は半減してしまう。今回の作成ではやすりで断面を揃え、研磨剤で磨いたがおそらく半減しているだろう。また断面を揃えておくと I.I.T と接着する際に非常に便利になる。だから断面の研磨は慎重に行うべきである。

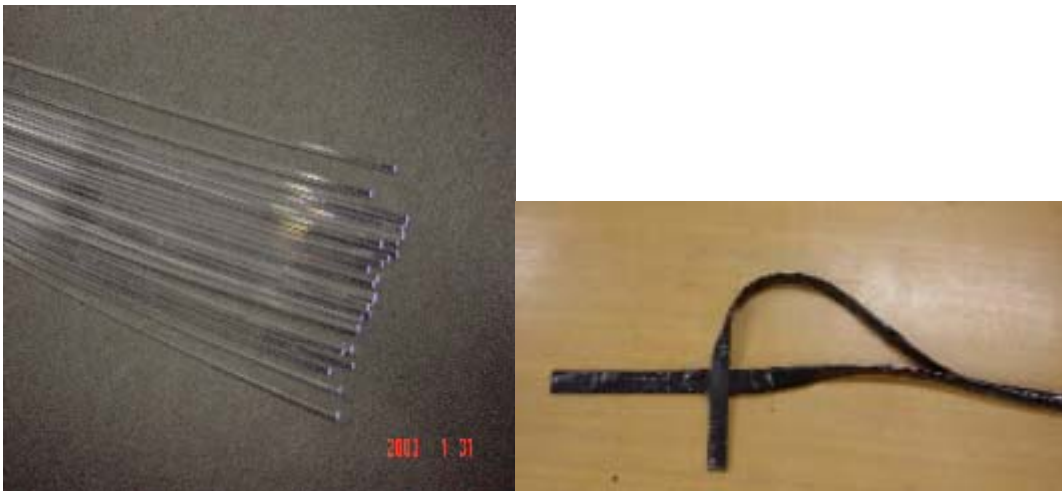


Photo 2 シンチレーションファイバー及び完成図

完成したシンチレーションファイバーは I.I.T とオプティカルグリスで装着すると以下の様になる。実際ビームが当たるのは Beam spot と書かれた位置である。

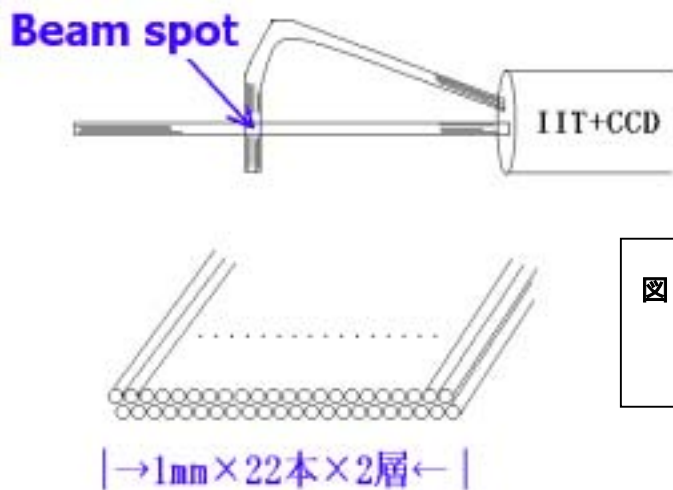


図 3.1 上 . 位置検出器概略図

下 . シンチレーションファイバー構造図

### 3-2 *Image Intensifier Tube*

シンチレーションファイバーの光を I.I.T で見るわけだがここでは簡単な原理について説明したい。下にある写真が実際に用いた I.I.T である。構造を大きく分けると電子増倍部と CCD カメラの部分に分けられる。増倍部において原理を説明していく。

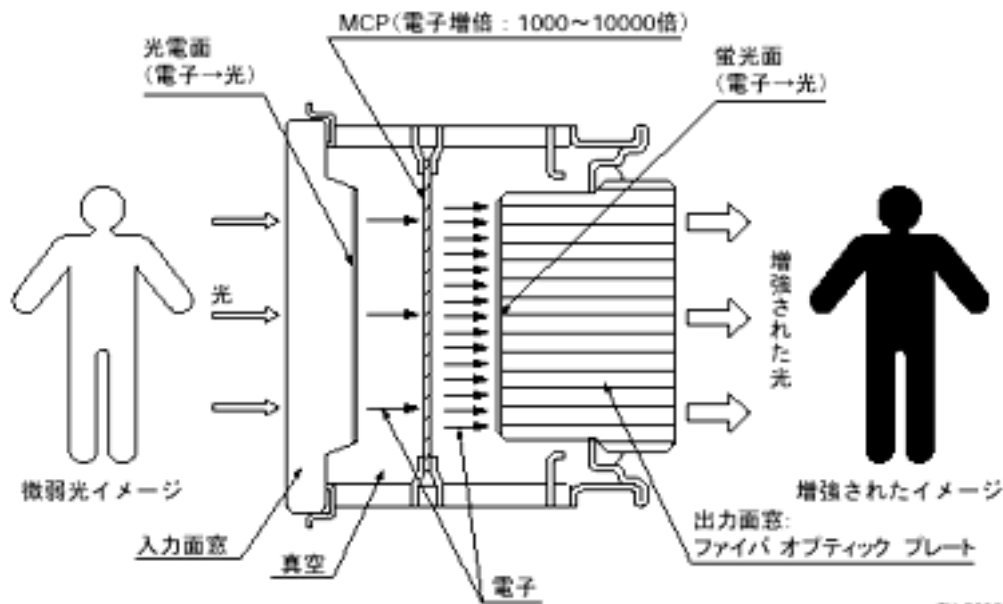


Photo 3 *Image Intensifier Tube*

+CCD camera



## 動作原理



動作原理図を本実験において当てはめてみると、左から観測するシンチレーションファイバーの光が入ってくる。光電面でファイバーからの光電子を電子に変換する。そして、MCP で電子が増幅され蛍光面で増幅された電子を光電子に変化する。そうすると光が増幅されたことになり微弱な光でも観測可能となる。(増幅率による)

ここで、MCP とは Micro Channel Plate の略で構造図は以下に示している通りである。例えば入射電子が1つの場合、電子はチャンネルの内壁に衝突し1次電子、2次電子・・・と電子が発生する。その電子をストリップ電流で出力電子として出力する事によって電子が増幅されている。

## MCPの構造

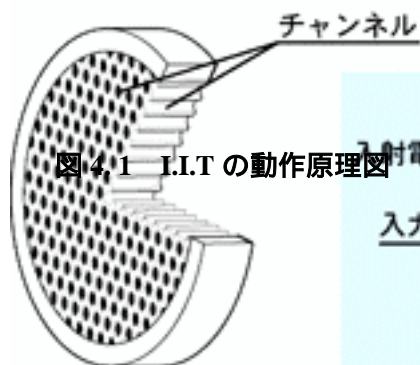
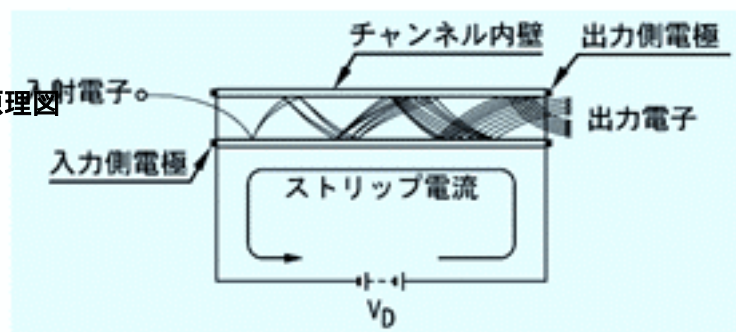


図3.2 MCPの構造図



### 3-3 CsI シンチレーター付きファイバオプティックプレート

RF 導入後からシンチレーター（CsI）付ファイバオプティックプレート(FOS<sup>3</sup>)を使用した。使用利点としては、オンラインでビームの形状が分かることとシンチレーションファイバーと同様に相対強度が測定できることにある。

形状は 30\*20\*3[mm<sup>3</sup>]で表面にシンチレーターが接着されている。シンチレーターで発光した光をファイバオプティックプレートが伝達する仕組みになっている。

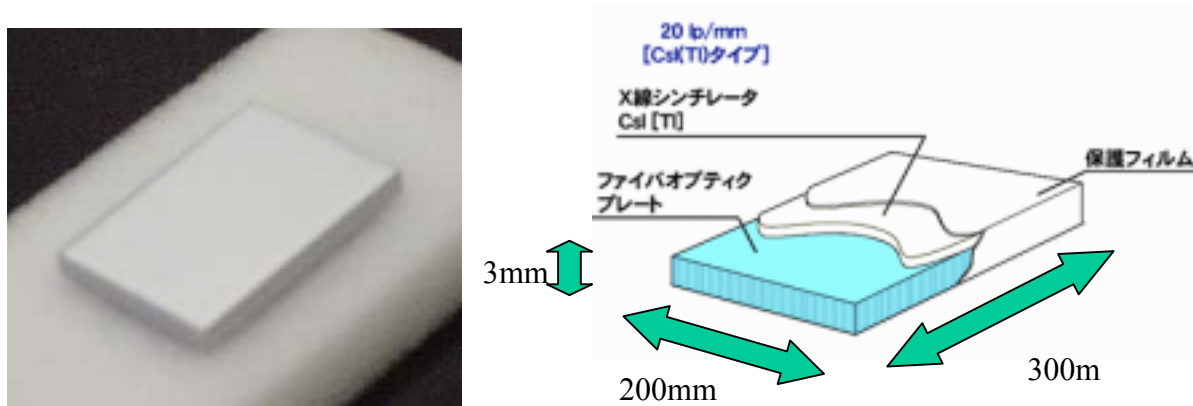


図 3.3 左：FOS の写真

右：FOS 構造図

### ファイバオプティックプレート(FOP<sup>4</sup>)

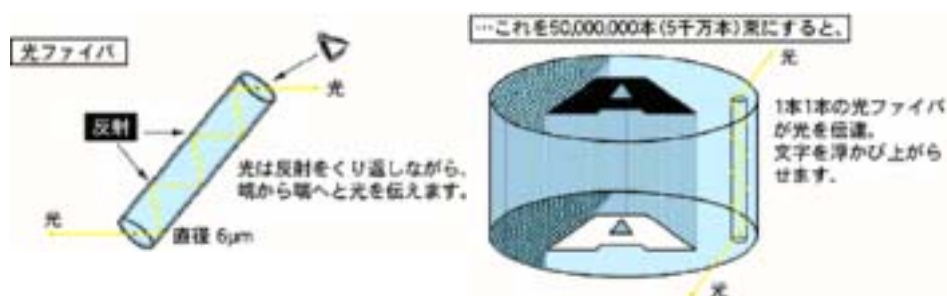


図 3.4 ファイバオプティックプレートの構造図

ここで、注意してもらいたいのがシンチレーションファイバーと混同することである。シンチレーションファイバーは内部の電子が励起状態から基底状態に落ちる時に光を発するのだがファイバオプティックプレートの場合は光を伝えるだけで発光はしない。つまりここではライトガイドの役目を果たしている。また、特長は高解像度、高伝達効率、歪みが少ない、像の拡大縮小が可能なのでレンズに比べ光学系のコンパクト化が可能、といったことが挙げられる。

<sup>3</sup> Fiber Optic plate with Scintillator

<sup>4</sup> Fiber Optic plate

## 第4章 実験内容

### 4.1 電磁石パラメータの最適化

まず、REFER で電子ビームの引き出しを行なう際のすることは、引き出しの強度に関係した電磁石の最適化である。これを行わないと電子ビームが効率よく引き出されない結果になってしまう。セットアップ図は下に示す様に引き出し出口にシンチレーションカウンターを設置し各種パラメータを変化させ最適値を求める。パラメータは 4~5 個あるので変化させないパラメータはある一定の既定値を定めておく。

#### 4.1.1 RF 増設以前の電磁石パラメータの最適化方法

実験方法は引き出しポート出口から 25cm の位置にシンチレーションカウンター(結晶付きの PMT<sup>5</sup>読み出し)を二本設置し、それらの PMT シグナルとマイクロトロンが電子を周回装置に入射するタイミングとの同期を取り Scalar で引き出された電子数を以下のパラメータを各々変化させ測定した。RF 導入前後で電磁石等の設計が変わったため導入前、導入後の結果がある。

表 4.1 既定値

<i>Absorber</i>	-10.0 mm
<i>Ext. Kicker Magnet</i>	128.8 A
<i>Ext. Septum Magnet</i>	123.6 A
<i>Ext. Bending Magnet 1</i>	252.0 A



Photo 4 セットアップの写真

<sup>5</sup> PMT(Photomultiplier tube) 光電子増倍管

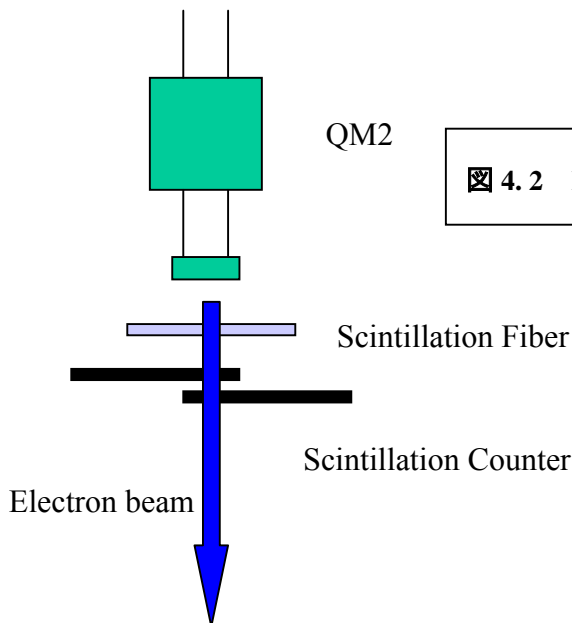


図 4.2 RF 増設前 強度分布測定セットアップ

#### 4.1.2 RF 導入後の電磁石パラメータ最適化方法

RF 導入後は偏向電磁石 2 が増設され、偏向電磁石から 453mm の位置にシンチレーションカウンターを設置した。RF 導入前と同様にシンチレーションカウンター二本の PMT シグナルとマイクロロンが電子を周回装置に入射するタイミングとの同期をとり Scalar で引き出される電子数を測定した。セットアップ図は以下の様になる。セットアップは RF 導入前とほぼ同じなのだが、RF を運転させない場合と RF を運転させた場合二種類の測定がある。RF を運転させずに測定したのは、当時 RF は設置されていたがまだ RF を運転させながら電子ビームを引き出すことはできなかった。そこで、RF 運転なしの時の電磁石の最適化を試みた。最初に基準となる各パラメータの値が必要である。それは以前の実験で行った経験的な値と偏向電磁石 2 においては今回初めて導入されたので東芝が計算した設計値を用いる事にする。基準値は以下に示す。例えば Absorber を変化させた時の引き出される電子数を測定する場合、Absorber 以外は基準値の値を用いる。次に Absorber 以外のパラメータを測定する場合は、Absorber は基準値に戻しておく。このような作業を各パラメータにおいて行った。

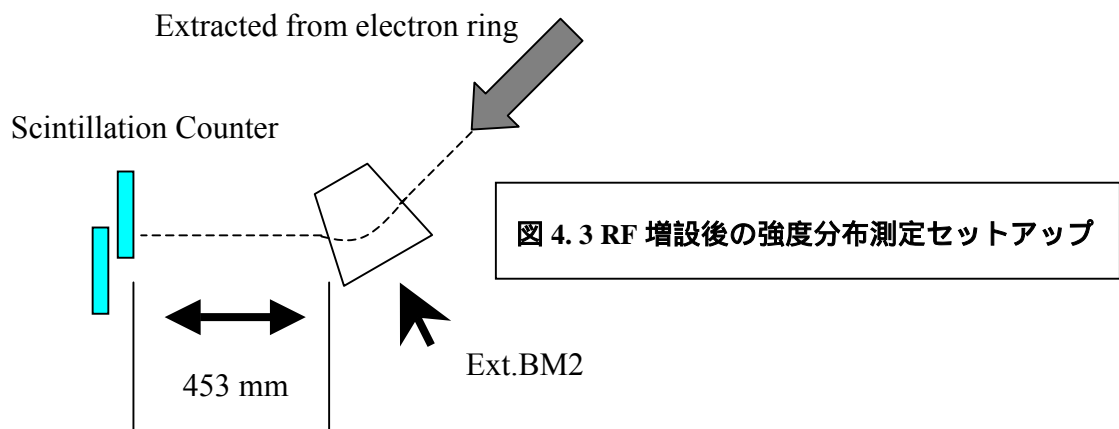


表 4.2 基準となる設計値

<i>Absorber</i>	-7.8 mm
<i>Ext. Kicker Magnet</i>	125.0 A
<i>Ext. Septum Magnet</i>	120.8 A
<i>Ext. Bending Magnet 1</i>	255.2 A
<i>Ext. Bending Magnet 2</i>	31.14 A

## 4.2 集束条件の調査

電子ビーム強度測定による電磁石の最適化の結果より電子数の引き出し効率の良いパラメータが決まり、次に集束条件の最適化に取り掛かる。ここでは QM1、QM2、QM3 を最適化していくのだが、RF 増設前後で極性が変化していることを注意しなければならない。

増設前は QM1 が縦集束横発散(Defocus)で QM2 は横集束縦発散(Focus)であり、この場合変数は QM1 と QM2 の二つである。方法はシンチレーションファイバーと I.I.T を組み合わせた位置検出器で電子ビームの縦方向横方向を測定し最適値を見つける。

初めに RF 導入前の最適化の詳細を述べる。

## 4.2.1 RF 導入前

はじめに、導入前は QM1, QM2 の二つしか存在しておらず、それぞれの極性は Focus (横集束縦発散) Defocus (縦集束横発散) である。これより実験方法を述べていく。

まず、セットアップについてである。検出器はシンチレーションファーマーと I.I.T とを組み合わせた位置検出器を用いた。これを引き出しポート出口に設置し QM1, QM2 の電流値を変化させ電子ビームのプロファイルを行う。実際に電子を引き出している時、モニターには下のように映し出される。当然このままでは画像なので数値的に解析できない。そこで画像 (アスキーファイル) を数値化 (テキストファイル) に変換する。そしてシンチレーションファイバーの中心より半径 0.5mm の領域内を足し合わせ、相対的な明るさ (ビットマップ上では 0~255) を引き出せるようにした。これにより電子ビームの縦方向横方向のサイズが算出できる。さらにガウスフィットを行った図が以下に示してある。この様な作業を QM1, QM2 の電流値を変化させた時に行っていく。そうすると、電流値と の関係が算出でき最適化に近づく。

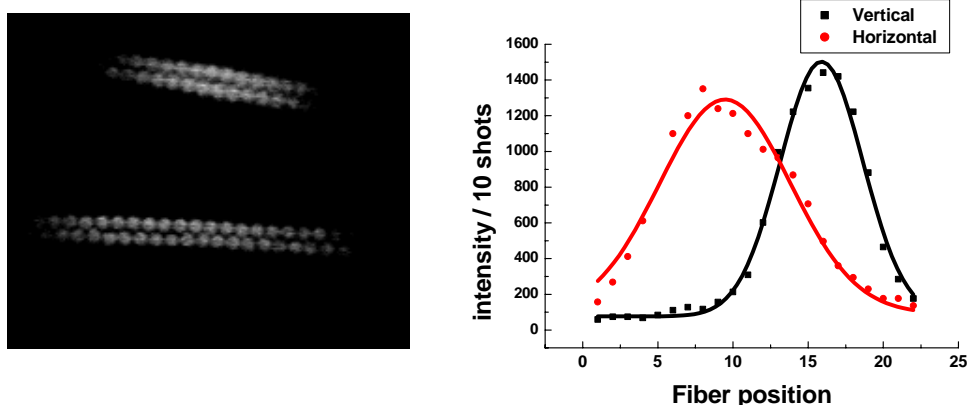


図 4.4 左図：実際に電子が引き出されているときのシンチレーションファーマーの画像。

小さい丸が光っているところがシンチレーションファイバー1本1本を示している。上の二層は電子ビームの縦方向、下の二層は横方向となっている。

右図：左図の縦方向横方向それぞれの強度分布。縦軸が相対強度、横軸がシンチレーションファイバーの座標つまりミリメートルである。

## 4.2.2 RF 導入後

増設後は QM1 が Focus、QM2 も Focus、QM3 は Defocus である。測定方法は以前使っていたシンチレーションファイバーからシンチレーター付きファイバーオプティクスプレートと I.I.T を用いた。増設後は変数が三つになる。始めは設計値（東芝の計算結果）を既定値として QM1、QM2、QM3 の電流値をそれぞれ変化させていき最適値を見つける。セットアップは説明した通りである。実際にモニターには以下の様に映し出される。シンチレーションファイバーの時と違って相対的ではあるが電子ビームの形状がモニターされている。まず、このビットマップの画像をアスキーファイルからテキストファイルに変換する。つぎに 10 ショット撮っているのでテキストファイルを重ねる。当然このときバックグラウンドを引いておく。そして、重ね合わせたものを三次元フィット(x, y, Intensity)を行う。その結果を x VS Intensity の面と y VS Intensity の面に射影してガウスフィットを行うと以下のグラフのような結果が得られる。それを QM の電流値毎に行っていく。

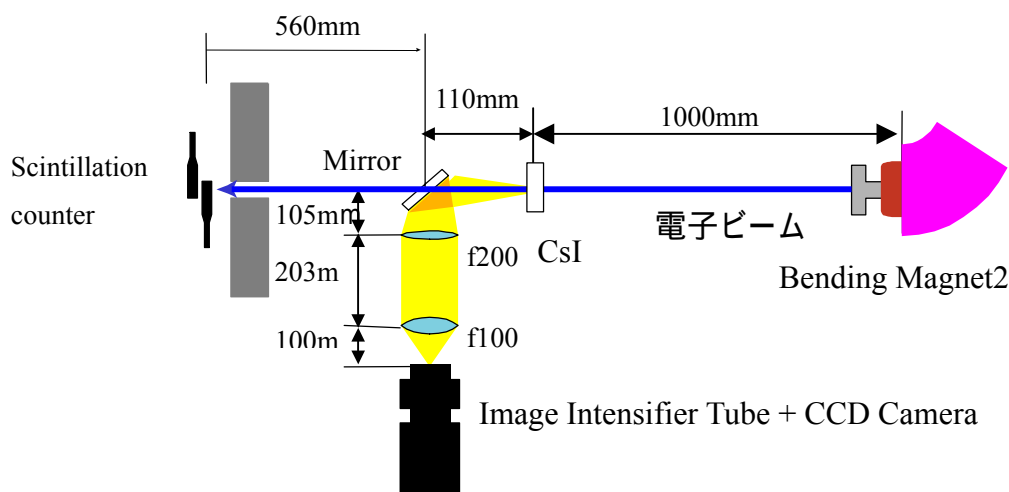


図 4.5 RF 導入後の集束条件の最適化を行うためのセットアップ。測定位置（BM2 から CsI までの距離）は三点ある。

表 4.3 QM1,QM2,QM3 における基準電流値

QM1	0.91 A
QM2	1.22 A
QM3	2.13 A

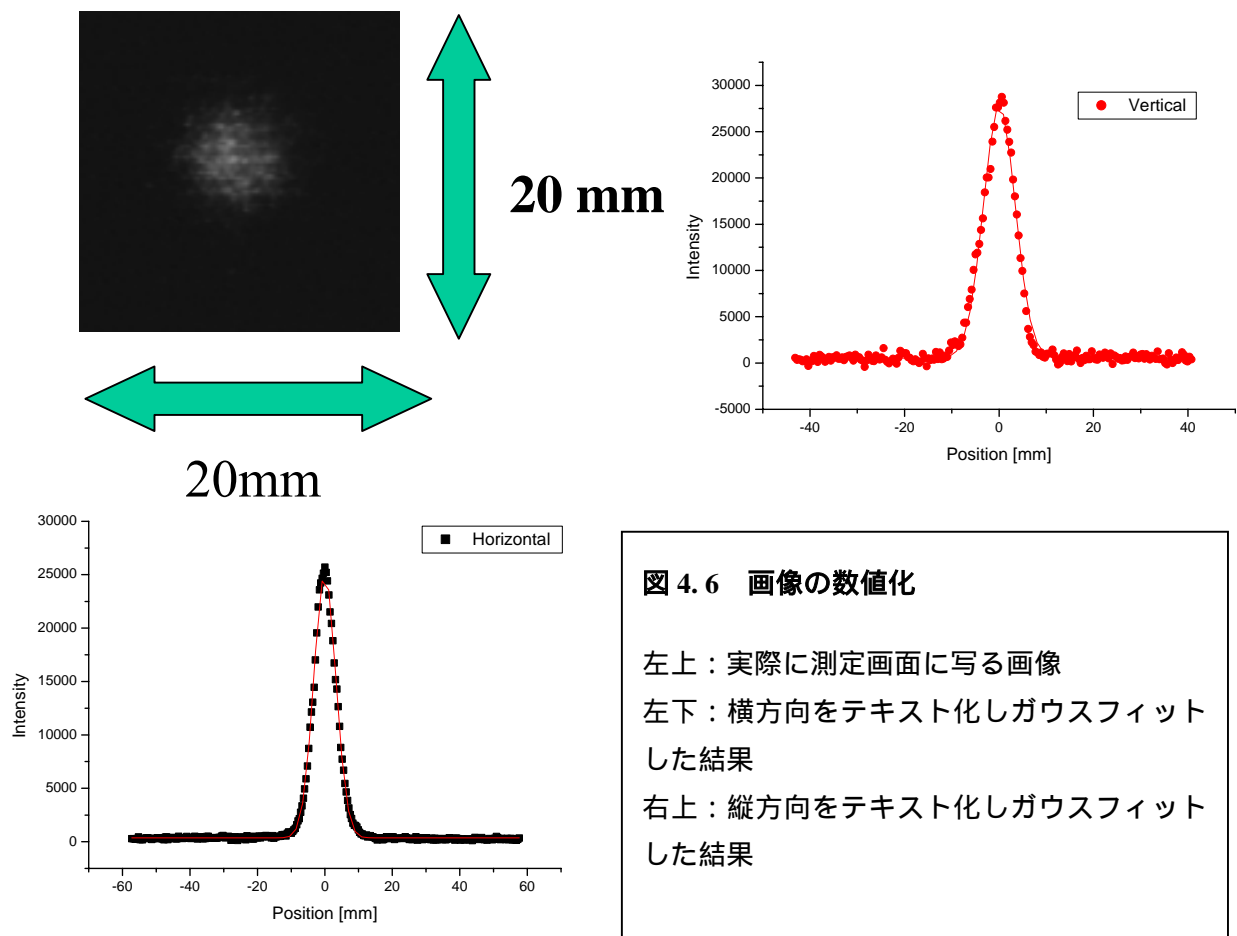


図 4.6 画像の数値化

左上：実際に測定画面に写る画像

左下：横方向をテキスト化しガウスフィットした結果

右上：縦方向をテキスト化しガウスフィットした結果

ここで各測定点について述べておく。

1. 0.254m ( 偏向電磁石 2 から CsI までの距離 )

この位置を選んだ理由は偏向電磁石 2 から最も近い距離でこの実験セットアップを組むためにこの距離にした。

2. 0.8m

結果と考察で詳しく述べるがラティス結果によると横方向と縦方向の Focus Point( QM の電流値 ) が同じ値付近に見られるためこの距離を選択した。

3. 1.0m

東芝の設計値は 1.0m 下流での計算でそのため 1.0m での測定を行った。

4. Slit

スリットは QM2 と QM3 の間に設置されており形状は菱形である。

これを用いた理由はビームの横方向を削りたかったのだがラティス結果 ( 考察で述べる ) より分かるように縦方向の広がりが大きくそのためこの形状のスリットでは縦方向だけが削られてしまっている。詳細は結果と考察で述べる。



### 4.3 時間特性の調査

引き出しの原理は二章で説明した通りでRFの共振周波数を落としていくとにより電子の周回軌道を内側にスライドして吸収体に当て引き出していく方法がとられている。引き出しの時間特性において重要となってくるのがRFにFM変調をかける際の任意関数である。言い換えれば、この任意関数により様々な時間特性を持った引き出し方が可能になってくる。このセクションでは、その任意関数によりどのように変化していくのかを調べた。

実験方法は偏向電磁石2から1m下流にシンチレーションカウンター二本を設置した。当然入射のタイミングと同期を取るのだが、今回の場合は100msecの間一定のカウントレイトで電子が引き出されているかが重要な点である。そこでGate timeを設ける。周回装置への電子の入射は100msec(10Hz)なので、引き出し時間は100msecと考えられる。5msecずつの間隔で3~98msecまで電子数を測定した。3msecから始めた理由はRFの運転をしない場合周回電子ビームの寿命はおよそ3msecであるのでそれをカットしたいためにそうした。また、その際にCTの波形を見てどのように変化するかを調べた。

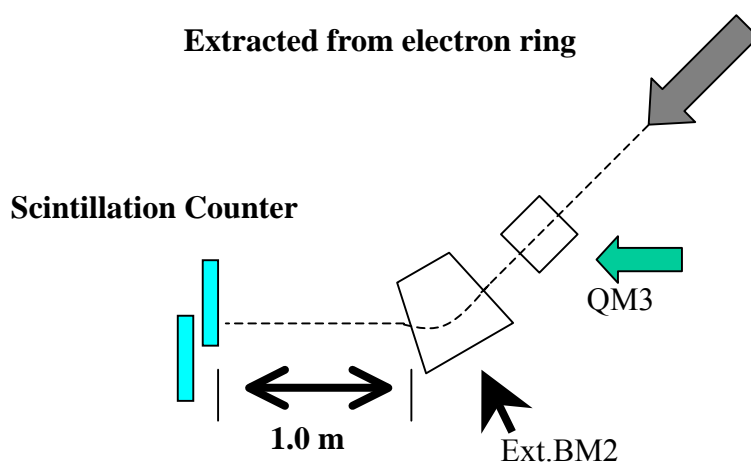


図 4.7 時間特性調査におけるセットアップ図

ここで、基本となる任意波形は東芝の設定した台形波とする。下に示しているがここで詳細を述べる。縦軸は 1V 辺りで周波数は 1MHz 変調するので共振周波数 697.51MHz から周波数 696.71MHz まで FM 変調している。台形波の上底の 10msec は周回装置に電子を入射して安定に周回させる時間が必要でその時間だと考えられる。そして、100msec の繰り返しでこの波形で FM 変調が行われる(周回装置への電子の入射が 10Hz で行われているため)。この台形波を用いて引き出しを行ったときのオシロスコープの波形を見るとおよそ 20msec でしか引き出されていない。これは任意波形の減衰が急激に行なわれているため当然 RF POWER も急激に減衰している。そのため引き出されている時間が短くなっていると考えた。そこで引き出されるとき RF の周波数は上のオシロスコープの結果よりおおよそ推測できると考え、その周波数を中心に考え 100msec かけて緩やかに減衰させる任意波形を考えた。但し、減衰勾配を緩くすればいいというものでもない。マイクロトンから 10Hz でリングに入射が行なわれているわけだが、減衰勾配を緩やかにしすぎると電子は周回しなくなってしまう。その辺を考えると私の提案する任意波形がいいのではないかと思う。更なる後付けとして実際にシンチレーションカウンターで電子数を測定した結果を第五章で示す。

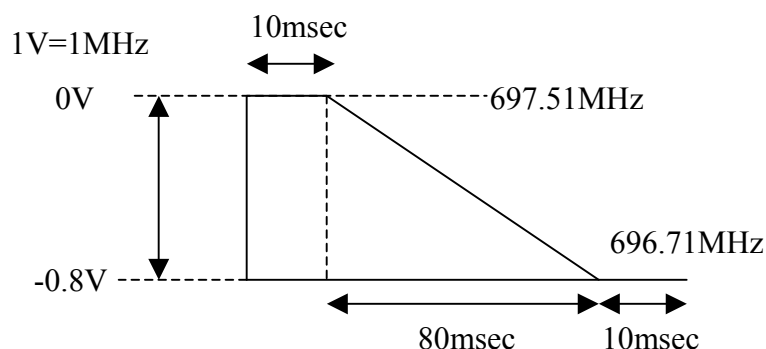


図 4.8 基本となる台形波

共振周波数が 697.51MHz で 80msec かけて 696.71MHz まで減衰させる。

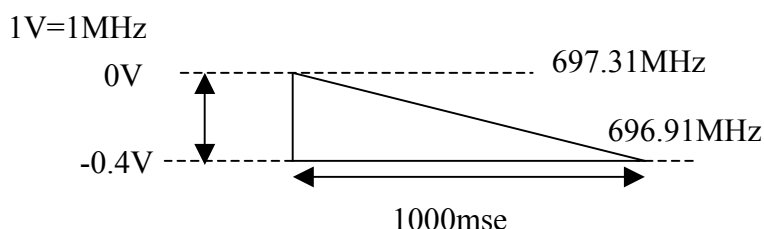


図 4.9 今回作成した任意波形

元々共振周波数からずらして設定している。997.31MHz z から 696.91MHz まで 100msec かけて減衰させている。

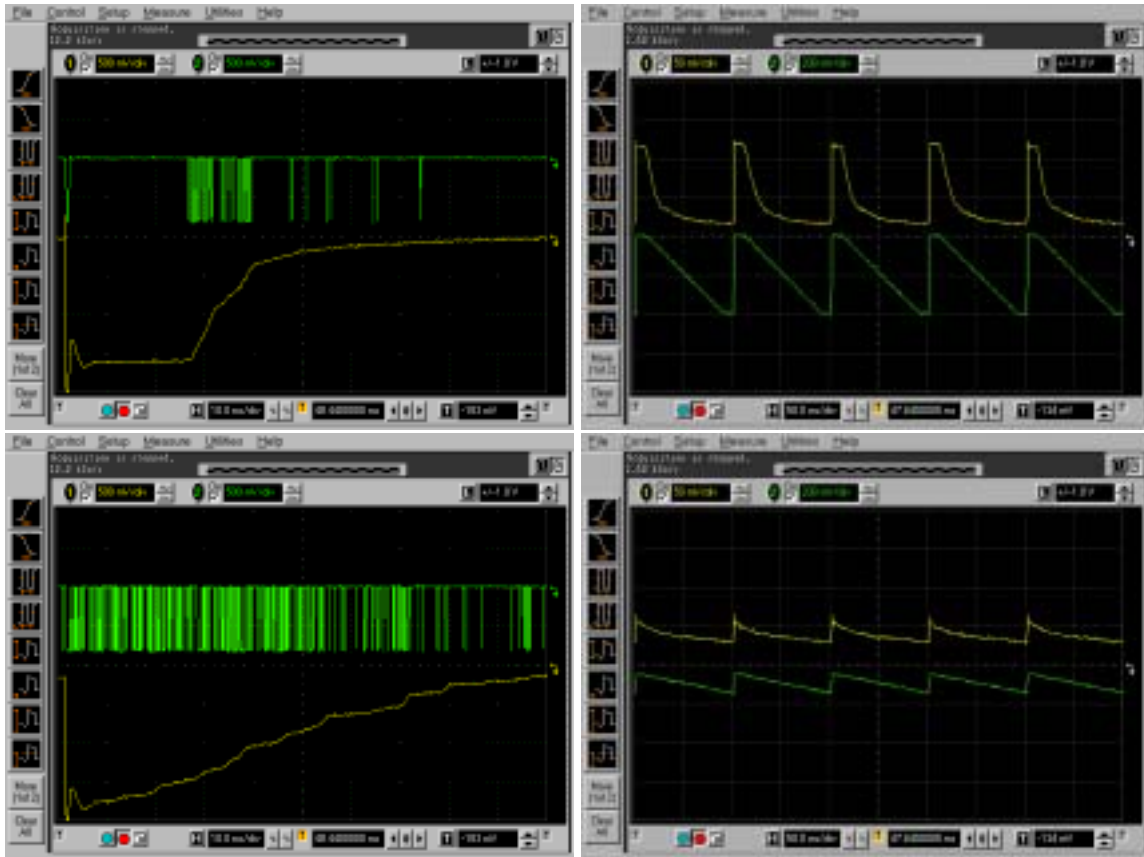


図 4.10 遅い引き出しのシグナル

左上：上のシグナルはシンチレーションカウンターのシグナルで、下は周回リングの CT シグナル。  
縦軸 [500mV/div]，横軸 [20msec/div]。

右上：上は RF POWER 下は東芝の設計した任意波形（FM 変調）。  
縦軸 [50mV/div]，横軸 [200mV/div]。

左下：今回の新しく設定した任意波形で FM 変調をかけた時のシンチレーションカウンターのシグナル及び周回リングの CT シグナル。

右下：RF POWER 及び新設定の任意波形のシグナル。

## 4.4 エミッタンス

### 4.4.1 エミッタンス算出方法

エミッタンス $\varepsilon$ はビームの横方向もしくは縦方向の広がりを表す量で、横軸を $x$ （位置）縦軸を $x'$ （運動量）とする位相空間(Phase space)で電子ビームの分布を示した時の面積で表される。エミッタンスは基本的に不変量である（リウビルの定理）。実際にエミッタンスは以下の様な式で表される。

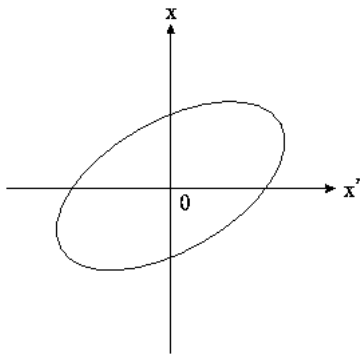


図 4.11 エミッタンス

理想的ビームの横軸を $x'$ （位置）縦軸を $x$ （運動量）ときのビームの分布図。この面積がエミッタンスである。  
参考文献[5]

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon \quad (4.1)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は Twiss parameter と呼ばれるもので関係は以下の様になる。

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1 \quad (4.2)$$

Twiss parameter は出射ポートの中で位置 1 から 2 へ転送されるがエミッタンスは常に保存されている。ここで sigma-matrix を以下の様に定義する。

$$\sigma \equiv \varepsilon \begin{pmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \gamma \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

位置 2 での sigma-matrix は以下になる。

$$\sigma_2 = R \sigma_1 R^T \quad (4.4)$$

ここで、 $R$  は Transfer Matrix である。この転送行列は位置 1 から位置 2 へ sigma-matrix を転送するための行列であり、位置 1 ~ 位置 2 までの電磁石の行列及び空間距離(Drift Space)で決定される。本実験の場合、二種類の電磁石が考えられる。四極電磁石と偏向電磁石 2

である。以下にそれぞれの行列を示す。

### 1 . 四極電磁石(Quadruple Magnet)

四極電磁石は文字通り四つの極を持っており、中心軸上では磁場はゼロで磁場勾配が一定の電磁石である。今、ビーム軸に対して垂直な面を考える。水平方向を  $x$  垂直方向を  $y$  とすると運動方程式は以下の様になる。

$$x'' + Kx = 0, \quad y'' - Ky = 0$$

$$K \equiv \frac{1}{p} \frac{\partial B}{\partial x}, \frac{1}{p} \frac{\partial B}{\partial y} \quad \left( \frac{\partial B}{\partial x} = - \frac{\partial B}{\partial y} \right) \quad (4.5)$$

$$K [m^{-2}], \quad p [GeV/c], \quad \frac{\partial B}{\partial x} \text{ and } \frac{\partial B}{\partial y} [T/m]$$

ここで、 $p$  は粒子の運動量である。

$K > 0$  の時(Focus) :  $x$  方向に集束、 $y$  方向に発散

$$M_{QM}^F = \begin{pmatrix} \cos \sqrt{K}L & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \sqrt{K}L \\ -\sqrt{K} \sin \sqrt{K}L & \cos \sqrt{K}L \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

$K < 0$  の時(Defocus) :  $x$  方向に発散、 $y$  方向に集束

$$M_{QM}^{DF} = \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{|K|}L & \frac{1}{\sqrt{|K|}} \sinh \sqrt{|K|}L \\ \sqrt{|K|} \sinh \sqrt{|K|}L & \cosh \sqrt{|K|}L \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

ここで、 $L[m]$ は四極電磁石の長さである。

### 2 . 偏向電磁石(Bending Magnet)

本実験の場合は引き出しポートの最下流で  $60^\circ$  偏向して、電子ビームを引き出す (REFER 概略図参照)。この電磁石は  $x$  方向には集束作用、 $y$  方向は磁場のない空間(Drift Space)と同じである。

$$M_{BM}^H = \begin{pmatrix} \cos \theta & \rho \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{\rho} & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad M_{BM}^V = \begin{pmatrix} 1 & \rho \theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

ここで、 $l$  [m]は偏向電磁石の極率半径、 $\theta$  [rad]は偏向角度である。

### 3 . Drift Space

磁場のない空間の行列

$$M_{DS} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

ここで、 $l$  [m]は磁場のない空間の距離を示している。

Transfer Matrix は電磁石と空間距離の行列の組み合わせで決定する。

ここで、(4.1)(4.2)よりこの様になる。

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} R_{11}^2 & -2R_{11}R_{12} & R_{12}^2 \\ -R_{21}R_{11} & 1+R_{12}R_{21} & -R_{12}R_{22} \\ R_{21}^2 & -2R_{22}R_{21} & R_{22}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix}_1 \quad (4.10)$$

$$\sigma_{11}^{P1} = R_{11}^2 \sigma_{11}^{P2} + 2R_{11}R_{12} \sigma_{12}^{P2} + R_{12}^2 \sigma_{22}^{P2} \quad (4.11)$$

ここで

$$\sqrt{\sigma_{11}^{P1}} = \sigma_{exp} \quad (4.12)$$

である。すると、左辺は実験値で求まり、右辺は $\sigma_{11}^{P2}$ 、 $\sigma_{12}^{P2}$ 、 $\sigma_{22}^{P2}$ と電流値だけの変数

になる。つまり、実験データをプロットすると $\sigma_{11}^{P2}$ 、 $\sigma_{12}^{P2}$ 、 $\sigma_{22}^{P2}$ は決定され以下の式よ

りエミッタンスは算出される。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sqrt{\sigma_{11}^{P2} \sigma_{22}^{P2} - (\sigma_{12}^{P2})^2} \\ \alpha &= -\sigma_{12}^{P2} / \varepsilon \\ \beta &= \sigma_{11}^{P2} / \varepsilon \\ \gamma &= \sigma_{22}^{P2} / \varepsilon \end{aligned} \quad (4.13)$$

# 第5章 結果

## 5.1 電磁石パラメータの最適化結果

### 5.1.1 RF 増設前の RF 増設後の電磁石最適化結果

RF 増設前の電子ビームの強度測定による結果を示す。さらにここではガウスフィットを行いフィット後のピーク値を最適値とする。

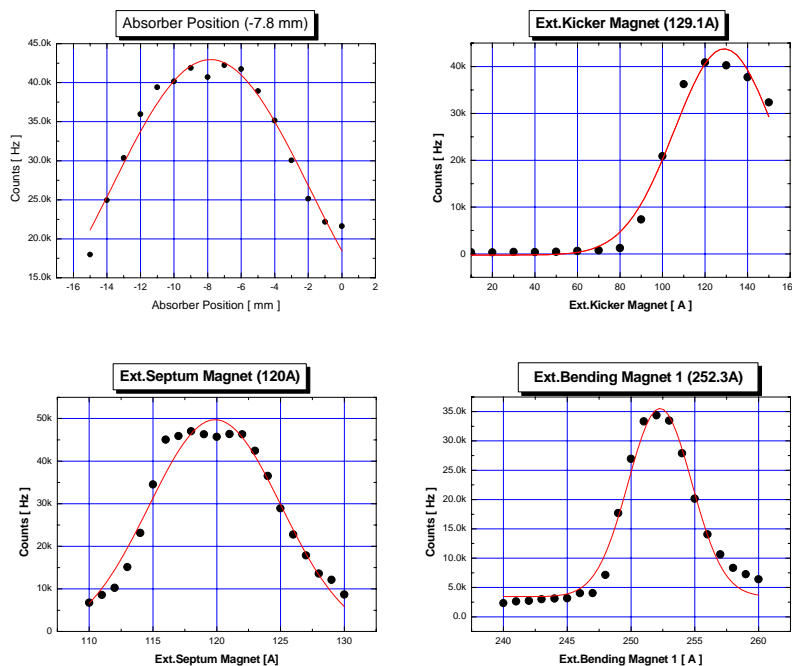


図 5.1 RF 導入前の強度分布測定結果（括弧内の数値が最適値）

左上：Absorber 位置を変化させたときの引き出し出口での電子のカウント数の結果にガウスフィットを行った。縦軸は電子数[Hz]横軸は位置[mm]。

右上：Ext. Kicker Magnet の電流値を変化させたときの引き出し出口での電子のカウント数の結果にガウスフィットを行った。縦軸は電子数[Hz]電流値[A]。

左下：Ext. Septum Magnet の電流値を変化させたときの引き出し出口での電子のカウント数の結果にガウスフィットを行った。縦軸は電子数[Hz]電流値[A]。

右下：Ext. Bending Magnet 1 の電流値を変化させたときの引き出し出口での電子のカウント数の結果にガウスフィットを行った。縦軸は電子数[Hz]電流値[A]。

## 5.1.2 RF 増設後の電磁石最適化結果 RF 運転なしの場合

これは RF 増設後初めて引き出した電子数を測定した結果である。以前とは違い偏向電磁石 2 が増設されたため新たに最適化する必要があった。

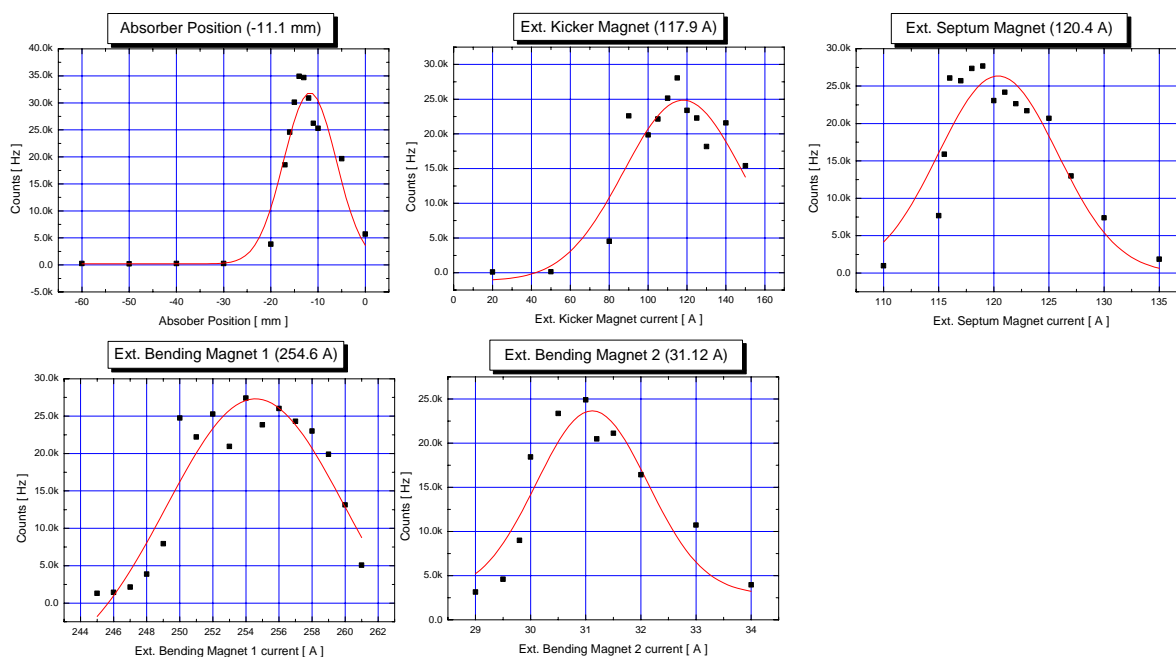


図 5.2 RF 増設後の強度分布 (FM 変調なしでの引き出し)

括弧内の数値が最適値を示している。

左上図：Absorber の位置のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：位置[mm]。

中上図：Ext. Kicker Magnet の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

右上図：Ext. Septum Magnet の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

左下図：Ext. BM1 の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

右下図：Ext. BM2 Magnet の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]



### 5.1.3 RF 増設後の電磁石最適化結果 RF 運転時

RF 増設後の FM 変調を使用して電子ビームを引き出した時の強度測定結果。

この場合は遅い引き出しを行っている。入射タイミング 100msec の内 3~95msec での強度測定結果である。

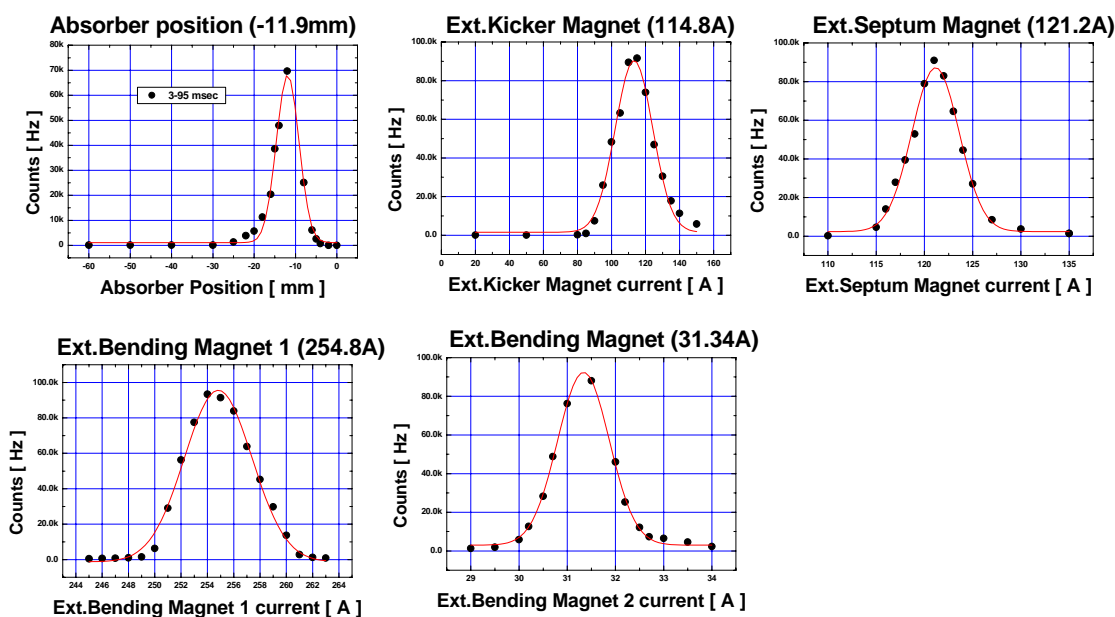


図 5.3 RF 増設後 (FM 変調での引き出し)

括弧内の数値が最適値を示している。

左上図：Absorber の位置のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：位置[mm]。

中上図：Ext. Kicker Magnet の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

右上図：Ext. Septum Magnet の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

左下図：Ext. BM1 の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

右下図：Ext. BM2 Magnet の電流値のみを変化させた時の引き出し電子数の結果である。

縦軸：電子数[Hz]、横軸：電流値[A]

以上の電子ビーム強度測定結果より電子ビームの引き出し効率のよい電磁石の設定ができた。最終結果を以下に示す。RF 増設後（FM 変調有り）がこの後行われた実験は全てこのビームパラメータが使用されている。

表 5.1 電磁石の最適化結果

	RF 増設前	RF 増設後 (FM 変調なし)	RF 増設後 (FM 変調あり)
<i>Absorber [mm]</i>	-7.8	-11.1	-11.9
<i>Ext. Kicker Magnet [A]</i>	129.1	117.9	114.8
<i>Ext. Septum Magnet [A]</i>	120.0	120.4	121.2
<i>Ext. BM 1 [A]</i>	252.3	254.6	254.8
<i>Ext. BM 2 [A]</i>	-	31.12	31.34

## 5.2 集束条件の最適化における結果

引き出し効率の最適化は第一節で述べたように決定し、次に集束条件の最適化調査を行った。この節では結果のみをお見せします。これに対する考察は次章で述べています。

### 5.2.1 RF 導入前のビームプロファイル結果

RF 導入前の引き出される電子ビームのプロファイルの結果を以下に示していく。

下の結果においてまず左上のグラフを見て欲しい。これは QM2 の電流値を固定したまま QM1 の電流値を変化させた時の横方向のビームサイズを表している。右上は縦方向、左下は QM2 の電流値を変化させた時の縦方向横方向のビームサイズを表している。

QM1 (Defocus)は縦方向集束横方向発散型であるので横方向の結果を QM2(focus)は横方向集束縦方向発散型なので横方向の結果に注目して欲しい。すると QM1 は 3.5A、QM2 は 4.25A 付近で集束している。つまりそこが最適値となる。

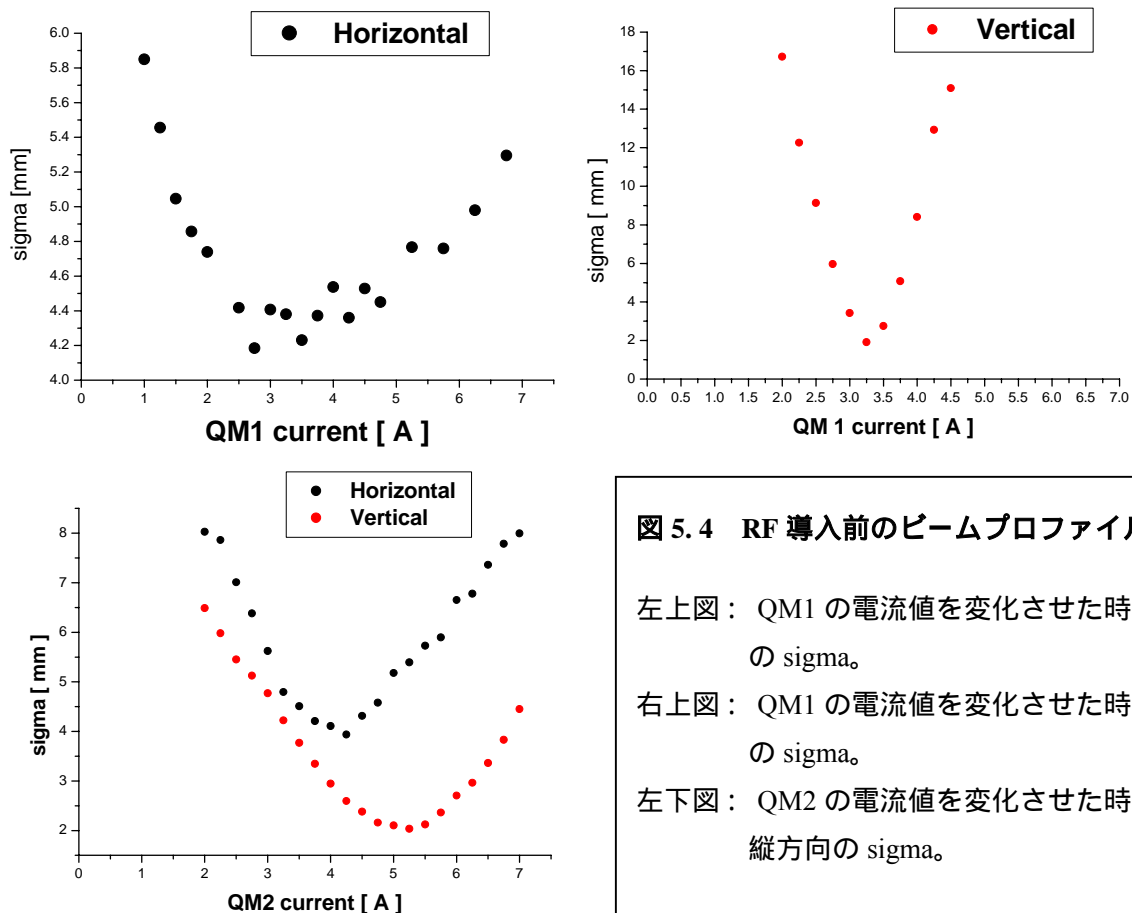


図 5.4 RF 導入前のビームプロファイル結果

左上図： QM1 の電流値を変化させた時の横方向の sigma。

右上図： QM1 の電流値を変化させた時の縦方向の sigma。

左下図： QM2 の電流値を変化させた時の横方向縦方向の sigma。

## 5.2.2 Ext.BM2 から 0.254m でのビームプロファイル結果

RF 導入後の Ext.BM2 から 0.254m でのビームプロファイルを以下に示していく。

下の結果を見て欲しい。左上は QM2, QM3 の電流値を固定したまま QM1 の電流値を変化させた時の縦方向横方向のビームサイズを表している。右上は QM1, QM3 の電流値を固定したまま QM2 の電流値を変化させた時の縦方向横方向のビームサイズを表している。左下は QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向のビームサイズを表している。

QM1 (focus)は横方向集束縦方向発散型であるので横方向の結果を見るとどこで集束しているか分からず、この結果では最適値は決定できない。QM2(focus)も同様に横方向集束縦方向発散型なので横方向の結果に注目して欲しい。するとまた似たような結果になって最適化できない。QM3(Defocus)においては 3.0A で集束している。現時点では QM3=3.0A しか最適化はできない結果である。この距離での結果は一番サイズの小さい所にしておくと QM1 = 0A、QM2=0A、QM3=3.0A となる。

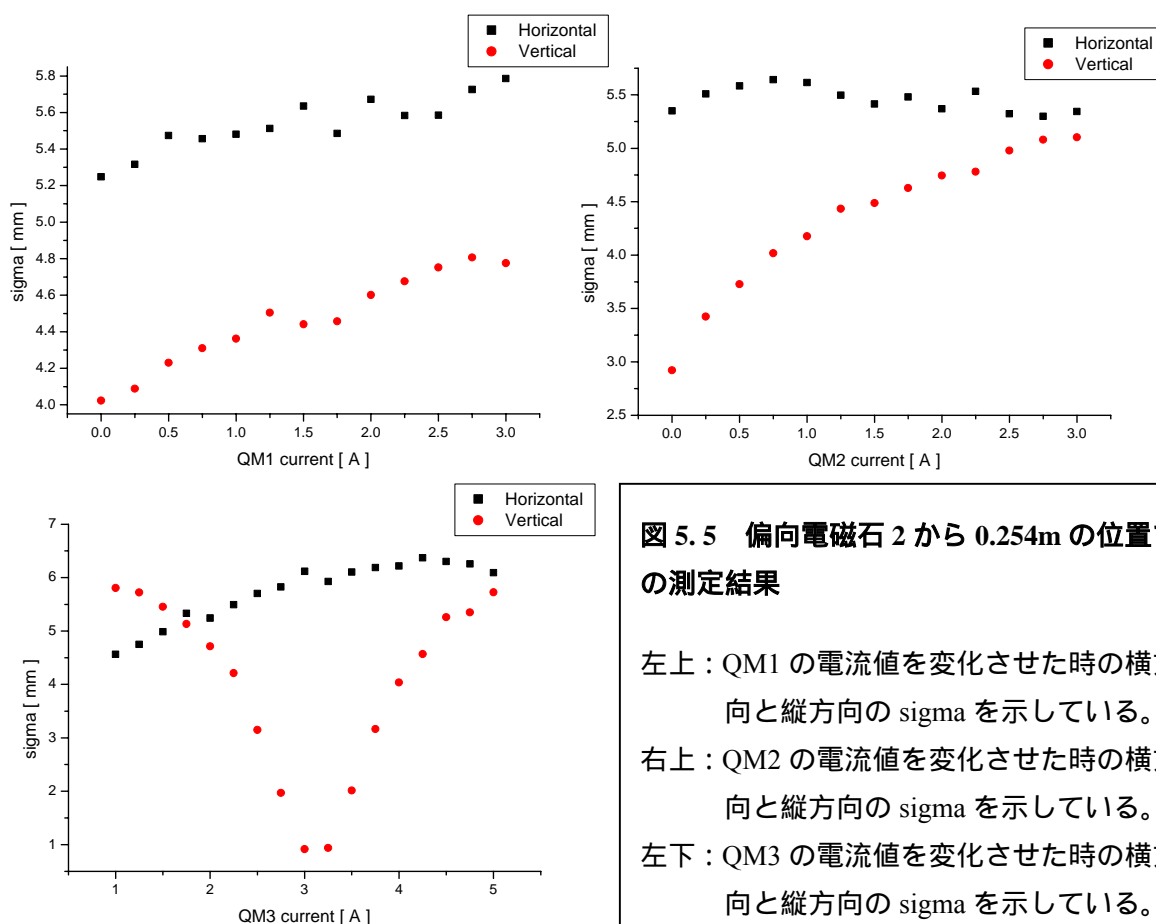


図 5.5 偏向電磁石 2 から 0.254m の位置での測定結果

左上：QM1 の電流値を変化させた時の横方向と縦方向の sigma を示している。  
 右上：QM2 の電流値を変化させた時の横方向と縦方向の sigma を示している。  
 左下：QM3 の電流値を変化させた時の横方向と縦方向の sigma を示している。

### 5.2.3 Slit 使用時のビームプロファイル結果

Ext.BM2 から 0.254m でスリットを使用した時のビームプロファイル結果を下に示している。スリット毎に QM3 のみを変化させてそのときの引き出される電子ビームのプロファイルを見ている。そもそも、スリットを用いたのは横方向の変化（集束）を見たいためである。だが、横方向の変化を期待したのだがこの結果では見るできない。これがここでの結果である。

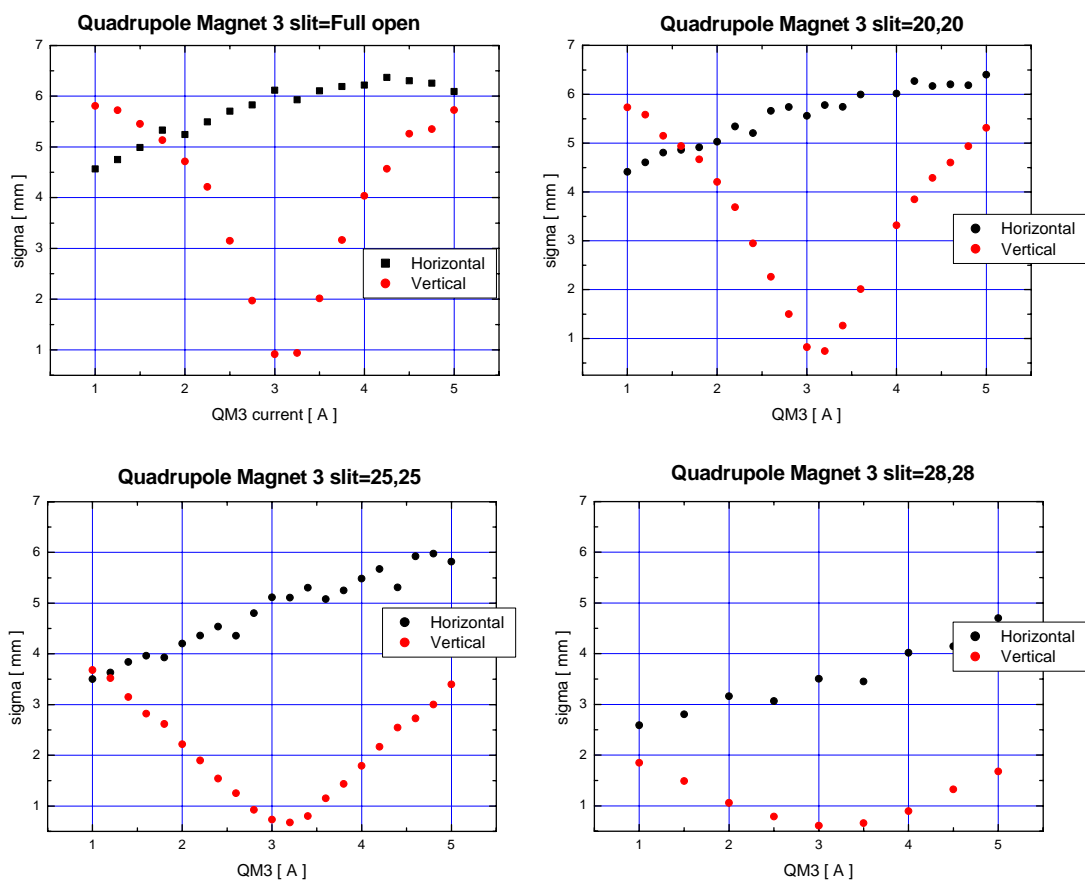


図 5.6 偏向電磁石 2 から 0.254m での Slit を変化させた結果

左上：Slit なしでの QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。  
 右上：Slit=20,20 での QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。  
 左下：Slit=26,26 での QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。  
 右下：Slit=28,28 での QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。

## 5.2.4 Ext.BM2 から 0.8m でのビームプロファイル結果

RF 導入後の Ext.BM2 から 0.8m でのビームプロファイルを以下に示していく。

下の結果を見て欲しい。QM1 と QM2 においては 0.254m での結果とあまり変化しない。また、縦方向の集束が見えかけているが横方向はこの結果では 0A が最適値である。QM3 においては縦方向の結果を見れば 2.5A が最適値である。

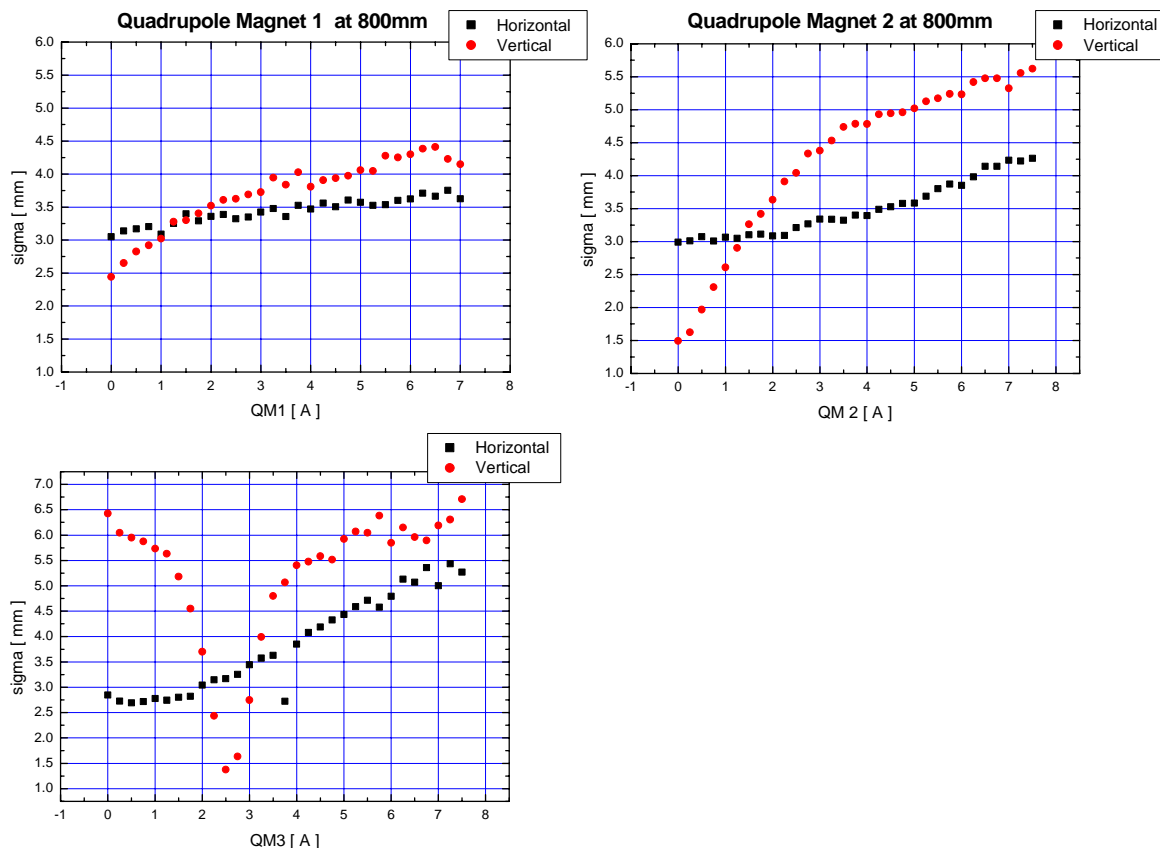


図 5.7 偏向電磁石 2 から 0.80m での測定結果

左上：QM1 の電流値を変化させた時の横方向と縦方向の sigma を示している。

右上：QM2 の電流値を変化させた時の横方向と縦方向の sigma を示している。

左下：QM3 の電流値を変化させた時の横方向と縦方向の sigma を示している。

## 5.2.5 Slit 使用時の 0.8m でのビームプロファイル結果

Ext.BM2 から 0.8m でスリットを用いてビームプロファイルを行った結果を以下に示す。これも先ほどのスリットの結果と同様に横方向の変化はあまり見られない。だがスリット 16,16 の場合は少し絞れている兆候が見られているのかもしれない。

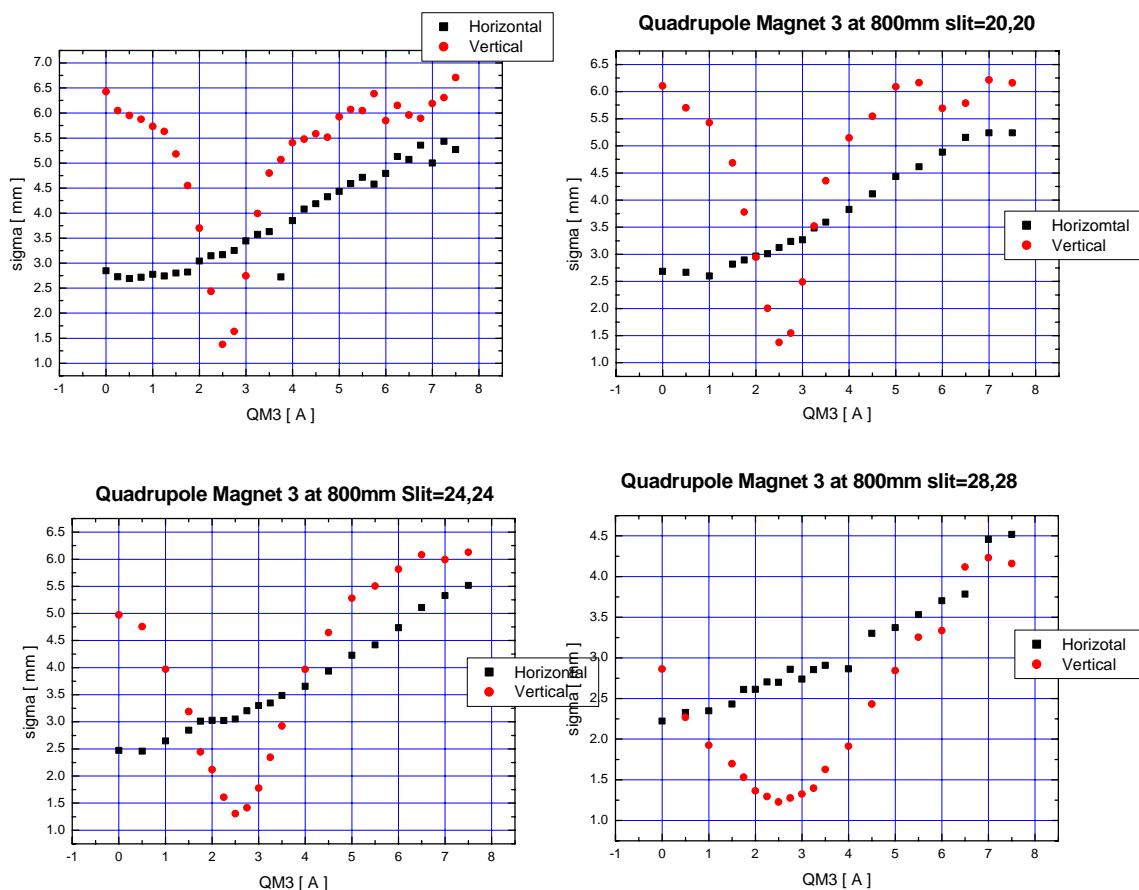


図 5.8 偏向電磁石 2 から 0.80m での Slit を変化させた時の結果

左上：Slit なしでの QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。  
 右上：Slit=20,20 での QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。  
 左下：Slit=24,24 での QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。  
 右下：Slit=28,28 での QM3 の電流値を変化させた時の縦方向横方向 sigma を示している。

## 5.2.6 Ext.BM2 から 1.0m でのビームプロファイル結果

ここでの結果は Ext.BM2 から 1.0m でのビームプロファイル結果を示す。

左上は QM1、QM2 を設計値で固定した上で QM3 の電流値を変化させた時の引き出された電子ビームの横方向縦方向のビームサイズ測定結果を示している。これより QM3=2.5A が決まる。そして QM=3.0A を固定し、QM2=1.22A (設計値) も固定し QM1 のみを変化させた時の結果である。通常通りの極性(Focus)では今までと同様に横方向の集束は見られなかった。しかし、極性を反対(Defocus)にしてみると初めて横方向の集束点 (QM1=3.0A) が見られた。だが横方向の集束は非常に悪くなっている。

ここで QM1、QM2 の極性は同じで設計値もおおよそ同じである。そこで QM1=QM2 にして電流値を変化させてみた結果が右下である。これもまた横方向は反極性で集束が見られている。以上のような結果が得られた。

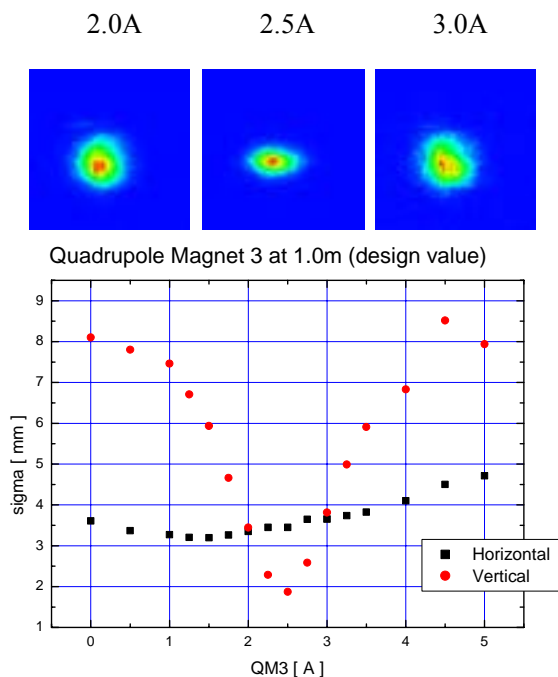


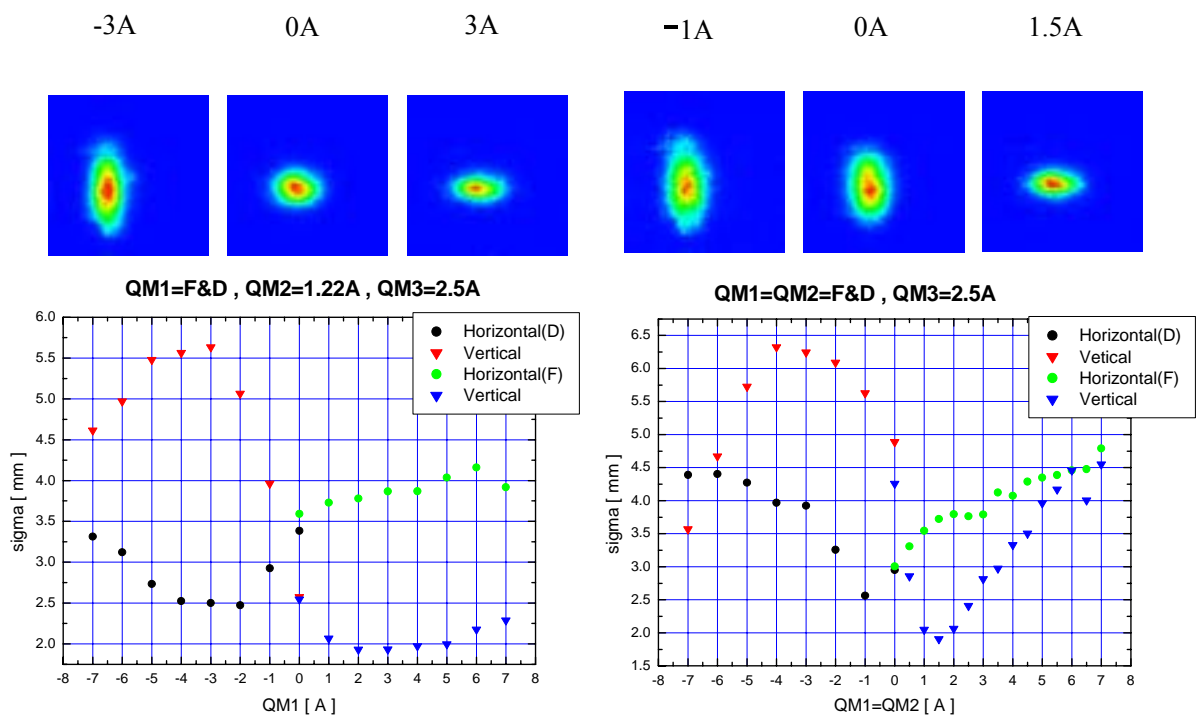
図 5.9 偏向電磁石 2 から 1.0m での測定結果

上：QM1QM2 を設計値に設定しておき QM3 の電流値を変化させた時に結果。

左下：QM2QM3 を設計値に設定しておき QM1 を変化させた時の結果。(マイナスは Defocus)

右下：QM3=2.5A での QM1=QM2 を変数として QM1 = QM2 を同時に変化させた結果。



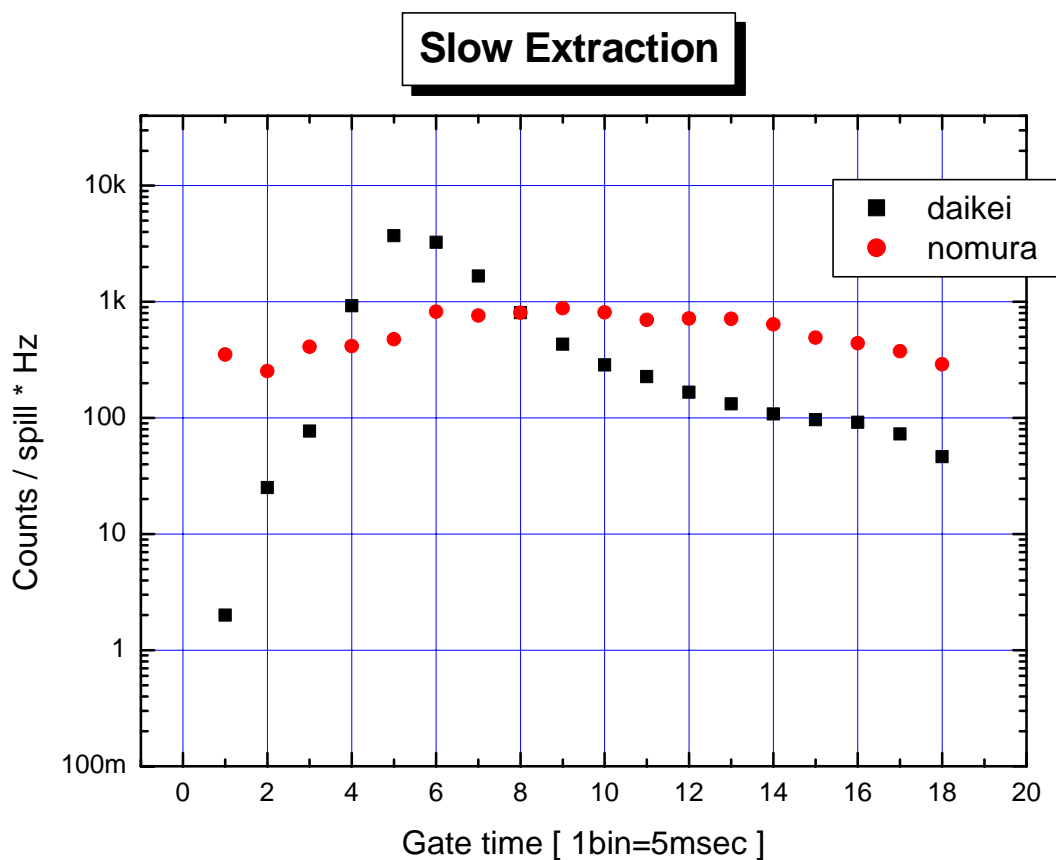


**図 5.10 偏向電磁石 2 から 1.0m での測定結果**

左下：QM2QM3 を設計値に設定しておき QM1 を変化させた時の結果。（マイナスは Defocus）  
 右下：QM3=2.5A での QM1=QM2 を変数として QM1 = QM2 を同時に変化させた結果。

### 5.3 時間特性結果

ここでは RF 導入後の電子ビームの引き出しにおける時間特性調査における結果を示す。今回行った実験では二つの任意波形について調べた。詳細は実験内容の章を見てもらいたい。一つは台形波もう一つは新しく作った任意波形である。下の結果はその二つにおける波形の比較を行っている。黒は台形波による結果、赤は新しい任意波形(nomura)である。これを見ると分かるように新しい任意波形の方はおよそ 90msec 同じカウントレイトで引き出せていることが分かる。



図

#### る測定結果

: 黒は東芝の設計した台形波、赤は今回の実験で設計した任意波形による結果  
 ここで注意してもらいたいのが横軸及び縦軸の単位である。横軸は 1bin が 5msec になっていて最初の bin1 の時は 3~8msec を示している。ちなみに最後の bin18 は 93~98msec である。縦軸は 1spill あたりになっている。

## 5.4 エミッタンスを求める！！！！

第四節では RF 増設前の引き出し電子ビームのエミッタンス及び、RF 増設後の引き出し電子ビームのエミッタンスの算出を行う。

### 5.4.1 RF 増設前のエミッタンス算出

ここで簡単にセットアップを思い出してもらいたい。左下図がセットアップ図になっている。RF 増設前なので四極電磁石は QM1Q、M2 の二つだけである。引き出しポートより 280mm のところにシンチレーションファイバーを設置しビームの広がりを測定してきた。その結果よりその時のエミッタンスを求める。右下図は転送行列(Transfer Matrix)を求める際の概念的な図である。転送行列は電磁石の行列を位置 1 (測定点)でのビームサイズに作用させることにより位置 1 から位置 2 でのビームサイズを算出する行列である。

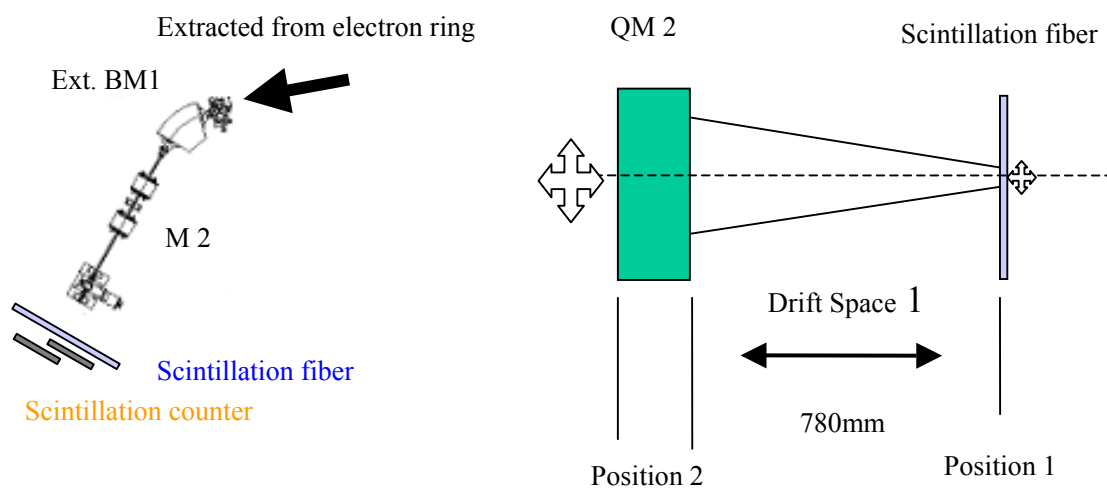


図 5.13 転送行列の概念図

まず、RF 増設前における Transfer Matrix を求める。今エミッタンスはどの位置でも一定なのでどの位置で求めてもよいので QM2 の前で求める。すると転送行列は DS1(Drift Space 1)と QM2 の行列で表すことができ、

$$R_x = M_{DS} M_{QM2}^F \quad R_y = M_{DS} M_{QM2}^{DF} \quad (5.1)$$

となる。

さらに(4. 14), (4. 15), (4. 16) より

$$\begin{aligned}
 R_x &= \begin{pmatrix} 1 & l_{DS1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \sqrt{K_{QM2}} L_{QM2} & \frac{1}{\sqrt{K_{QM2}}} \sin \sqrt{K_{QM2}} L_{QM2} \\ -\sqrt{K_{QM2}} \sin \sqrt{K_{QM2}} L_{QM2} & \cos \sqrt{K_{QM2}} L_{QM2} \end{pmatrix} \\
 R_y &= \begin{pmatrix} 1 & l_{DS1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{|K_{QM2}|} L_{QM2} & \frac{1}{\sqrt{|K_{QM2}|}} \sinh \sqrt{|K_{QM2}|} L_{QM2} \\ \sqrt{|K_{QM2}|} \sinh \sqrt{|K_{QM2}|} L_{QM2} & \cosh \sqrt{|K_{QM2}|} L_{QM2} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{5. 2}$$

が導かれる。

転送行列が算出されたところで、エミッタンスを求める。

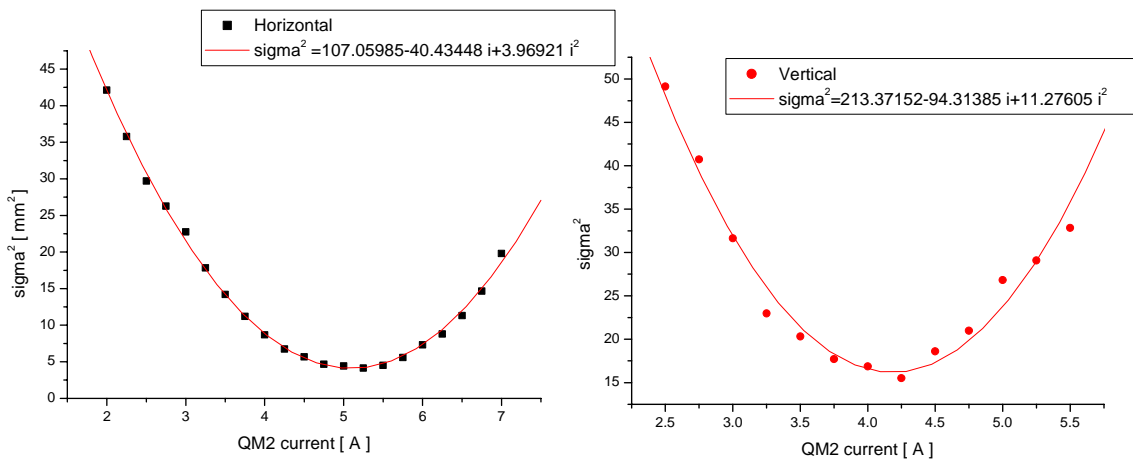
$$\sigma_2 = R \sigma_1 R^T \text{ より}$$

$$\sigma_{11}^{P1} = R_{11}^2 \sigma_{11}^{P2} + 2R_{11}R_{12} \sigma_{12}^{P2} + R_{12}^2 \sigma_{22}^{P2} \tag{5. 3}$$

ここで  $\sqrt{\sigma_{11}^{P1}} = \sigma_{exp}$  である。

すると、左辺は実験値で求まり、右辺は  $\sigma_{11}^{P2}, \sigma_{12}^{P2}, \sigma_{22}^{P2}$  と電流値の変数になる。

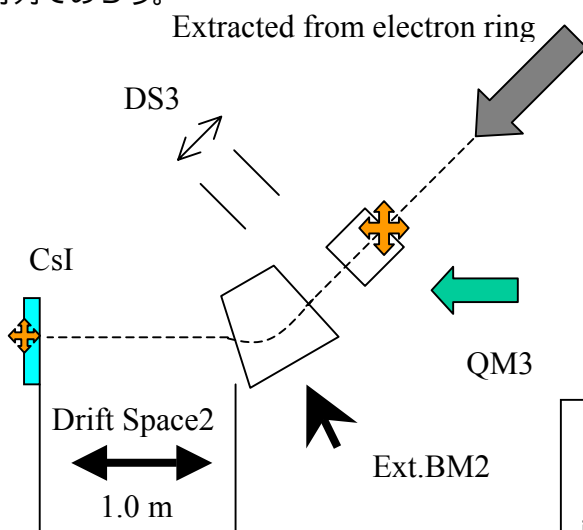
下に示すプロット式からある電流値のシグマの二乗が算出される。これは  $\sigma_{exp}$  に決定に相当する。プロット式より電流値とシグマの関係が 3 つ出てくれば変数は 3 つなので上式の右辺は算出され(4. 17)よりエミッタンスが算出される。



上：QM2 と  $\sigma^2_x$  (横方向) の関係で近似式は  $(\sigma^2 = 107.05985 - 40.43448 i + 3.96921 i^2)$   
 下  $\sigma^2_y$  (縦方向) の関係で近似式は  $(\sigma^2 = 213.37152 - 94.31385 i + 11.27605 i^2)$

### 5.4.2 RF 増設後

ここでは RF 増設後の Ext.BM2 から 1m の集束条件調査のデータを用いてエミッタンスを求める。まず、このときのセットアップを思い出してもらいたい(下図)。Ext.BM2 から 1m のところに CsI が置かれている。転送行列を求める際に効いてくるのは Ext.BM2 と QM3 の行列であろう。



**図 5.15 RF 増設後の概念図**  
 転送行列を求める際に Ext.BM2 と QM3 の行列が重要になってくる。

実際に転送行列を求める。転送行列は以下の様に記述でき、

$$R_x = M_{DS2} M_{BM2}^H M_{DS3} M_{QM2}^{DF}, \quad R_y = M_{DS2} M_{BM2}^V M_{DS3} M_{QM2}^F \quad (5.4)$$

となる。(4. 18), (4. 19), (4. 20), (4. 21) を代入すると

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & l_{DS2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \rho \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{\rho} & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_{DS3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{|K_{QM3}|} L_{QM3} & \frac{1}{\sqrt{|K_{QM3}|}} \sinh \sqrt{|K_{QM3}|} L_{QM3} \\ \sqrt{|K_{QM3}|} \sinh \sqrt{|K_{QM3}|} L_{QM3} & \cosh \sqrt{|K_{QM3}|} L_{QM3} \end{pmatrix}, \quad (5.5)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} 1 & l_{DS2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \rho \theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_{DS3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \sqrt{K_{QM3}} L_{QM3} & \frac{1}{\sqrt{K_{QM3}}} \sin \sqrt{K_{QM3}} L_{QM3} \\ -\sqrt{K_{QM3}} \sin \sqrt{K_{QM3}} L_{QM3} & \cos \sqrt{K_{QM3}} L_{QM3} \end{pmatrix}$$

となる。

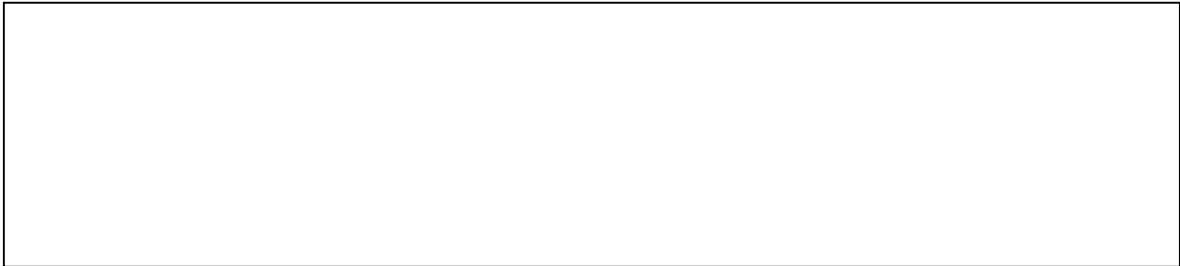
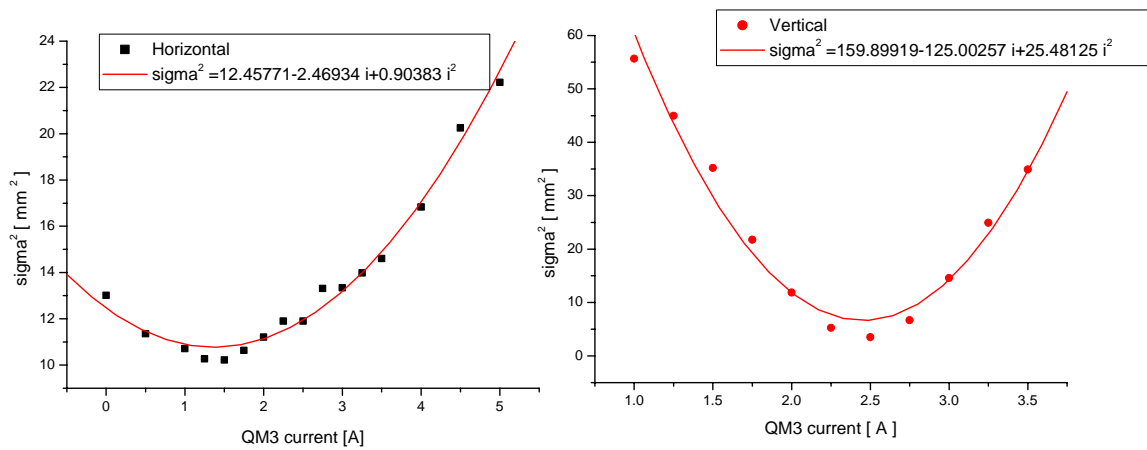
ここまでであれば

$$\sigma_{11}^{P1} = R_{11}^2 \sigma_{11}^{P2} + 2R_{11} R_{12} \sigma_{12}^{P2} + R_{12}^2 \sigma_{22}^{P2} \quad \text{に}$$

下に示すプロット結果を代入し $\sigma_{11}^{P2}$ ,  $\sigma_{12}^{P2}$ ,  $\sigma_{22}^{P2}$ を算出できれば

後は(4. 22)でエミッタンスが算出される。

ここでの結果は最後のテーブルで示す。



## 結果

表 2 RF 増設前の結果

	<i>Horizontal</i>		<i>Vertical</i>
$x [m \cdot rad]$	$1.32 \times 10^{-5}$	$y [m \cdot rad]$	$3.96 \times 10^{-5}$
$x$	-2.02	$y$	5.92
$x$	2.62	$y$	2.61
$x$	1.94	$y$	13.8

表 3 RF 増設後の結果

	<i>Horizontal</i>		<i>Vertical</i>
$x [m \cdot rad]$	$9.28 \times 10^{-6}$	$y [m \cdot rad]$	$7.67 \times 10^{-6}$
$x$	$-2.7 \times 10^{-3}$	$y$	-2.52
$x$	0.679	$y$	5.20
$x$	1.47	$y$	1.41

## 第6章 考察

まず、実験結果の考察に入る前に RF 導入後の REFER においてどういった集束条件で設計されたのかを考えてみる。東芝に設計を依頼したのであるがその初期値というのが以下の様になっている。

### 6.1 ラティス計算

ラティス計算とは電磁石の配列計算のことで Ext.Septum の直前で以下の初期条件の電子ビームが来た時に Ext.BM2 から 1m のところでどのような電子ビームが引き出されるか？といった計算を行う。

表 6.1 ラティス計算における初期条件と東芝への依頼条件

---

初期条件	
水平方向 関数：	$x = 1.14\text{m}$ 、 $y = 0.345$
垂直方向 関数：	$x = 1.14\text{m}$ 、 $y = 0.345$
水平方向エネルギー分散関数：	$x = 1.5\text{m}$
垂直方向エネルギー分散関数：	$y = 0\text{m}$
依頼条件 (1m 下流)	
水平方向 関数：	$x < 5.0\text{m}$
垂直方向 関数：	$y < 5.0\text{m}$
水平方向エネルギー分散関数：	$x < 1.0\text{m}$

---

この初期条件で Ext.BM2 から 1m 下流での引き出し電子ビームのラティス計算を行ってみると以下のような結果が得られた。結果は 1m 下流で  $x = 3.015\text{m}$   $y = 4.569\text{m}$  水平方向エネルギー分散関数 = 0.925 m となっている。上の表の依頼条件内に当てはまっているようだ。下図の結果より考察すると横方向は立縦方向に比べ、もともと絞られていてほとんど QM1QM2 で Focus 磁場を与えなくても集束していることが分かる。また縦方向については QM1QM2 で大きく発散していることが分かる。そのため QM3 で縦集束のための磁場が効いている。

ただ、ここで言えるのは本当にこの初期条件が正しいのか？ということである。そもそもこの初期条件も実測された訳ではなくマイクロトロンから電子が出射した位置での条件は測定されていてそこから引き出しセプタムの直前で初期条件を計算から見積もっている。つまり定量的にはどこまでの精度があるのか分からない。そこで本実験の考察ではこのラティス結果を定性的に説明するために用いた。



以上のことを念頭に置いた状態で先ほどの実験結果の考察に移る。

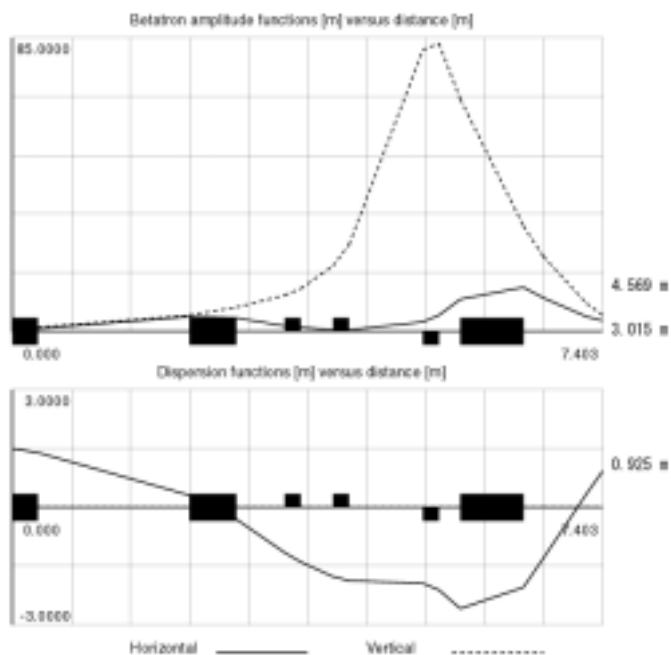


図 6.1 ラティス結果 Ext.BM2 より 1m 下流

$x = 3.015 \text{ m}$     $y = 4.569 \text{ m}$    Dispersion Function (水平方向エネルギー分散関数) =  $0.925 \text{ m}$   
 黒のボックスは左から Ext.Septum、Ext.BM1、QM1、QM2、QM3、Ext.BM2 となっている。

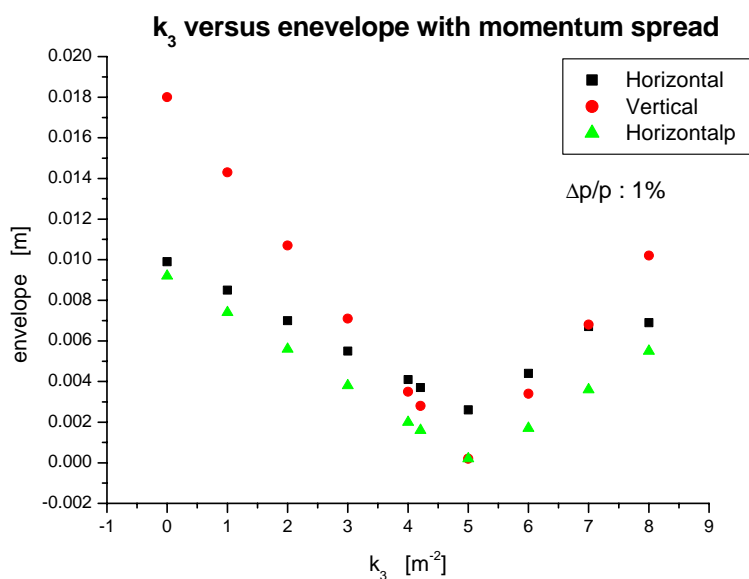
## 6.2 ビームプロファイルの考察

引き出し電子ビームのビームプロファイルは実験結果よりもわかるように、横方向の集束がおかしな振る舞いをしている。ここではそこに視点を置いて考えてみた。

まず、0.254m での実験結果を見ると、QM3 においては電子ビームの横方向の集束が見てとれる。だが、QM1、QM2 においては横方向集束型なのだが一向にその振る舞いを見せていない。ここで上のラティス結果を見てもらいたい。0.254m は Ext.BM2 のすぐ後ろに当たり、Ext.BM2 直後で横方向は急激に変化している。この場所で測定したのではないかと推測している。そのためにおかしな振る舞いをしているのだと現時点ではそう考えていた。次にスリット使用時の結果においてであるが、スリットを用いた理由としては、スリットは QM2 と QM3 の間に設置してありこの地点で電子ビームを点光源にし、横方向の振る舞いを見たいがためである。しかし、ラティス結果より横方向より縦方向広がりが大きいため縦方向だけがスリットで削られている様が見られる。そこでこの場所だけでは議論が進まないため 0.8m での考察に移る。

0.8m の地点でも同じように QM3 は最適化できるが QM1、QM2 は最適化が難しい。この地点を選んだ理由は、下図のラティス結果より、0.80m では縦方向と横方向の Focus Point が同じ地点つまり QM3 の同じある電流値で横と縦が絞られている筈であるからである。だから、0.80m を選択したのだが結果はそうはなっていない。なぜか？

ラティス計算における初期条件において誤差があるのかもしれない。初期条件は説明した通り測定結果ではなくマイクロトロンから出射直後でのベータトロン関数より計算により見積もられたものである。つまり、引き出しセプタムの直前では実際に測定されたことがない。そのため本当にセプタムの直前で横方向と縦方向が点光源になっているのか定かではない。しかし定性的に述べると、実験結果は設計通りに動いていると言える。下の結果を見てもらうと分かる。この時の初期条件は上で説明したものをを用いて Beam envelope と QM3 の K 値 ( $K_3$ ) の関係を示している。定量的には比較できないが振る舞いとしてはよく似たものになっている。



値  
 の関係は付録のデータテーブルを見てもらいたい。  
 三角は電子ビームに運動量分散を 1%加味した結果である。

1m の位置は東芝への依頼条件の位置である。QM3 の横方向をみると少し絞れている傾向が見えているのかもしれないのだが、縦方向と比較すると全然絞れていないと言うより、そういった設計なっているようだ。ここで下のラティス結果と解析結果を比較してもらいたい。すると定性的に似たような振る舞いになっていることが分かる。

ここでは、まず設計値で測定し QM3 つまり縦方向の最も集束されているところ QM3=2.5A で固定し QM1QM2 の電流値を変化させたが横方向は絞れなかった。そこで QM1 と QM2 の電流値を同じにして (QM1=QM2 とみなした) QM1=QM2 と QM3 で変数を三つから二つにして測定したが結果はおなじであった。次に考えたのは極性が合っているのか? という事である。QM1 と QM2 の極性を変えてみると Focus Point が見つかった。だが今度は縦方向が絞りきれない結果となる。つまり、一方の方向だけしか絞れないのである。このままでは最適化できない結果になってしまうが、だがよく考えると横方向はさほど変化せずにある程度絞れた形で引き出されている。すべての QM で縦方向を絞ってしましかな。そうするとおのずと実験結果より最適化は可能となる。以上の条件より QM の電流値の最適化を行った。

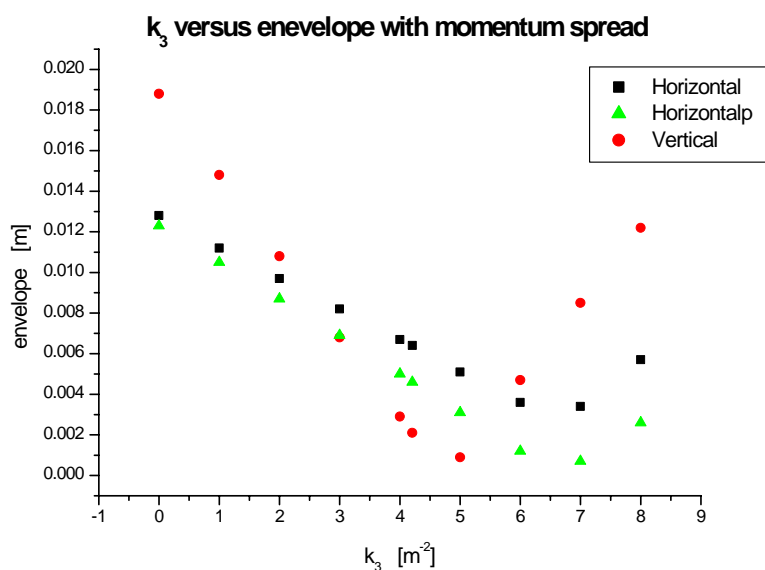


図 6.3 ラティス結果 (Ext.BM2 から 1.0m)

縦軸がビームの広がり[m],横軸が QM3 の K 値[ $m^{-2}$ ]  
 K 値と電流値の関係は付録のデータテーブルを見てもらいたい。  
 三角は電子ビームに運動量分散を 1%加味した結果である。

まとめると横方向が絞れない理由は以下の点が指摘される。

- 1．四極電磁石の極性が間違っている。
- 2．QM1、QM2 の設置場所と電子ビームの Focus Point が一致している。
- 3．設計上の理由により必然的な振る舞い。
- 4．セプタムの上流での引き出しライン入る直前のビームがおかしい。つまり初期条件ではセプタムの直前は点光源に設定しているが本当に点光源なのか？

以上の原因が考えられる。将来の展望として周回装置から引き出される直後及び Ext.BM2 の直前でのビームプロファイルを行って欲しい。

### 6.3 時間特性の考察

遅い引き出しにおいては実験結果をみると新たに設計した任意波形が東芝の設計した任意波形よりも遅い引き出しができていけると言える。しかしながらこれは現時点での結果であり実際さらに試行錯誤すればさらに適した任意波形が見つかると思う。

ここで、遅い引き出しを可能にすると物理実験をする際にどういった利点があるのか少し述べておく。例として本研究室で行われているカロリメータ（放射線検出器）の性能評価実験を例に挙げて述べる。この性能評価実験は分解能を測定することが目的である。そのため REFER の引き出し電子ビームを用いて実験を行っている。そのときに正確に 150MeV のシングルエレクトロンが引き出されている事が条件となる。RF 導入前ではおよそ 1msec で電子が引き出されていた。そのためある時間幅を設けた時にシングルやダブルのエレクトロンが測定される（パイルアップ）。それでは正確な分解能は算出されない。そして RF 導入後は、およそ 90msec で引き出し可能となったそのため当然パイルアップの確率も減少する。そうすればより正確な分解能が求められるわけである。

ここではカロリメータを例に挙げて述べたが他の物理実験にも遅い引き出しは有効利用されている。

## 第7章 まとめ

本実験は REFER における引き出し電子ビームの高品質化を目的にしている。そこで実験後どう高品質になったのかをまとめる。

まず大きく変わったことは時間特性である。以前の REFER における周回寿命は 2~3msec であったが今回の RF 導入で周回寿命はおよそ 20sec(入射せず及び引き出さずに RF の供給のみで電子を周回させた時)である。当然周回寿命が変われば引き出しにおける時間特性もまた変わってくる。以前は 0.5msec~1msec がいいところであったが現在はおよそ 90msec での引き出しが可能となった。今回の実験では 10Hz での入射だったため任意波形の減衰を 100msec 毎にしかできなかった。資料によるとマイクロトロンにおける周回リングへの入射は 0.2~100Hz の可変である。つまり RF が増設したことにより様々な引き出しビームが可能となった。

表 7.1 時間特性

項目	RF 導入前	RF 導入後
周回電子寿命	2~3 msec	20 sec
引き出し時間	0.5~1 msec(10Hz 入射)	90 msec (10Hz 入射)
周回軌道	不安定 (導入後と比較)	安定

集束条件においてはどこが一番良いとはいえない結果で、Ext.BM2 から 1m 下流では設計値 (QM1=0.91A, QM2=1.22A, QM3=2.13A) で縦 2.3mm 横 3.4mm, 今回の実験結果として QM1=1.5A, QM2=1.5A, QM3=2.5A の時、縦 3.7mm 横 1.9mm、QM1=0.91A, QM2=1.22A, QM3=2.13A の時縦 3.8mm 横 1.9mm などがあるがどれも縦方向に比べ横方向は広がりが生じている。しかし本研究結果では以上の三点が最適ではないと考えた。

従って本研究によって引き出し用偏向電磁石 2 から 1 m 下流において縦方向 1.9mm~2.3mm 横方向 3.4mm~3.8mm の電子ビームがおよそ 90msec の遅い引き出しが実現した。

表 7.2 Ext.BM2 から 1m 下流でのビームサイズ

QM1	0.91A	1.5A	2.0A
QM2	1.22A	1.5A	1.22A
QM3	2.13A	2.5A	2.5A
Sigma x	3.4mm	3.7mm	3.8mm
Sigma y	2.3mm	1.9mm	1.9mm

## 謝辞

まず、杉立先生、本間先生最後まで面倒を見て頂き有難う御座いました。また、諸先輩方には物理だけでなく様々なことを教えて頂きました。そして個性的な後輩に恵まれ有意義な研究が行えました。REFER においては光子研の高橋先生、飯沼先生、遠藤先生、及び生田君にも大変お世話になりました。さらに VBL の後藤さん、高林さんそして大垣さん、僕はたくさんの人たちに助けられこの修士論文が完成しました。皆様本当に有難う御座いました。

## 参考文献 & 参考資料

- [1]熊谷寛夫                      加速器
- [2]熊谷寛夫                      加速器（核物理学講座 6）
- [3]亀井、木原                    パリティ物理学コース 加速器科学
- [4] Helmut Wiedemann          Particle Accelerator Physics
- [5]後藤公德                      Measurements of electron beam distribution in phase space  
[http://photon.adsm.hiroshima-u.ac.jp/lab/thesis/master/goto/beam\\_survey.pdf](http://photon.adsm.hiroshima-u.ac.jp/lab/thesis/master/goto/beam_survey.pdf)
- [6] 蜂谷 崇                      電磁シャワーイメージング検出器の開発  
[Development of an Electro-Magnetic Shower Imaging Detector](#)
- [7]小原亮太                      [Lead tungstate crystals for a high performance electromagnetic calorimeter](#)
- [8]平田光司                      加速器とビームの物理
- [9] T. Okugi *et al*                Evaluation of extremely small horizontal emittance  
(Phys. Rev. ST AB Vol.2, 022801)
- [10]東芝                          超高速電子周回装置技術検討書
- [11]東芝                          高品位電子ビーム実験システム技術仕様書
- [12]東芝                          高品位電子ビーム実験システム高周波電源設計諸元表

# APPENDIX

## DATA TABLE

<b>Optimized parameter at REFER</b>			
			<i>Value</i>
<i>RF [MHz]</i>			697.51
<i>Tuner</i>			7.5
<i>Absorber [mm]</i>			-11.9
<i>Ext. Kicker Magnet [A]</i>			114.8
<i>Ext. Septum Magnet [A]</i>			121.2
<i>Ext. Bending Magnet1 [A]</i>			254.8
<i>Ext. Bending Magnet2 [A]</i>			31.34
<i>QM1 [A]</i>	0.91	1.5	2.0
<i>QM2 [A]</i>	1.22	1.5	1.22
<i>QM3 [A]</i>	2.13	2.5	2.5
<i>Emittance (Horizontal)</i>		$9.28 \times 10^{-6} \text{ [m}\cdot\text{rad]}$	
<i>Emittance (Vertical)</i>		$7.67 \times 10^{-6} \text{ [m}\cdot\text{rad]}$	
<b>Default Value</b>			
<i>Distance [m]</i>		<i>Value</i>	
<i>QM1</i>		0.2	
<i>QM2</i>		0.2	
<i>QM3</i>		0.2	
<i>QM3~Ext. BM2</i>		0.29	
<i>Radius of curvature</i>		<i>Value</i>	
<i>Ext. BM 2 [m]</i>		0.75	
<i>Bending Angle</i>		<i>Value</i>	
<i>Ext. BM 2 [rad]</i>		Pi/3	
<i>QM1 (K value)[m<sup>-2</sup>]</i>		$K_{QM1}=1.868i+0.1095$	
<i>QM2 (K value)[m<sup>-2</sup>]</i>		$K_{QM2}=1.872i+0.1047$	
<i>QM3 (K value)[m<sup>-2</sup>]</i>		$K_{QM3}=1.903i+0.1072$	