

## KEKB 入射器コミッショニング報告 (I) 目次

- 1 . はじめに (榎本)
- 2 . コミッショニング (I) 経過 (小川)
- 3 . A 1 電子銃ビーム試験 (大沢)
  - 3-1 動機及び目的
  - 3-2 加速器構成及びパラメータ
  - 3-3 ビーム試験及び結果
  - 3-4 課題
- 4 . 仮入射部ビーム試験
  - 4-1 目的 (榎本)
  - 4-2 加速器構成 (榎本)
  - 4-3 初期パラメータの設定 (榎本)
  - 4-4 ビーム制御
    - 4-4-1 B T データベースの整備 (榎本)
    - 4-4-2 データベースの利用 (古川)
    - 4-4-3 SAD の利用 (小磯)
  - 4-5 ビーム調整
    - 4-5-1 電子銃 (大沢)
    - 4-5-2 バンチャ系 (大沢)
    - 4-5-3 長パルスビームによるタイミング合わせ及びビーム粗調整 (大沢)
    - 4-5-4 短パルスビームのタイミング合わせ (大沢)
    - 4-5-5 輸送パラメータの設定と初期調整 (紙谷)
    - 4-5-6 オプティックスとビームサイズ (小磯)
    - 4-5-7 ソレノイド極性の問題 (大沢)
  - 4-6 エネルギー測定
    - 4-6-1 エネルギー分析系 (紙谷)
    - 4-6-2 エネルギー測定 (山口)
    - 4-6-3 エネルギー幅の調整及び安定化 (大沢)
    - 4-6-4 S L E D 利得の測定 (大越)
  - 4-7 エミッタンス測定
    - 4-7-1 ワイヤスキャナ (諏訪田)
    - 4-7-2 スクリーン測定系 (紙谷)
    - 4-7-3 画像処理システム (古川)
    - 4-7-4 エミッタンス測定解析結果 (小磯)
- 5 . まとめ
  - 5-1 ビーム試験の総括 (生出)
  - 5-2 今後の課題とコミッショニング予定 (榎本)

## 1. はじめに

KEK/PF 2.5-GeV 電子陽電子線形加速器（以下「ライナック」と呼ぶ）は、1994 年度から 5 年計画で始まった B ファクトリ加速器（KEKB）建設で、エネルギーを 3.2 倍の 8GeV、陽電子の強度を従来の約 20 倍の 0.64nC/バンチに増強し、「KEKB 入射器」として生まれ変わるようとしている。

建設は、昨 1996 年 12 月から 9 か月間の長期シャットダウン工事に入り、96 年度末までに、旧 2.5-GeV ライナック 40 ユニット（以下「既設部」と呼ぶ）の改造を基本的に完了した。

入射器のエネルギー増強は、この既設部に新規 17 ユニットの増設して達成する（以下「増設部」と呼ぶ）。その増設建屋が今年 1997 年 1 月に竣工し、4 月から、建設に入った。

改造の完了した既設部は、連休明けの 5 月 13 日から、高周波コンディショニングを始め、6 月 30 日から 2 週間、「仮入射部」によるビーム加速試運転を行った。

一方、増設部のビーム加速試験は 10 月から予定されているが、それに先立ち、既設部より新入射部に移設された KEKB 入射器電子銃の試験を 6 月 9 日から行った。

KEKB 入射器の試運転は、ライナック、リング双方の合同のコミッショニングチーム（現在 5 名ずつ）で進めている。これはライナックからの入射効率がリングの積分衝突ルミノシティを稼ぐ上で重要な役割を果たし、入射器、リングのより緊密な連携による運転が必要になったからである。今回の運転では、毎朝 8 時 45 分からミーティングを持ち、前日の報告とその日の予定を話し合った。

## 2. コミッショニング (I) 経過

### 2.1 A 1 電子銃ビーム試験経過

1997 年 6 月 9 日から 1 週間、A 1 電子銃ビーム試験を行なった。これによって、KEKB ライナックの電子銃からはじめてビームが出たことになる。ビーム試験経過を簡単にまとめると、以下のようになる（図 2-1-1）。

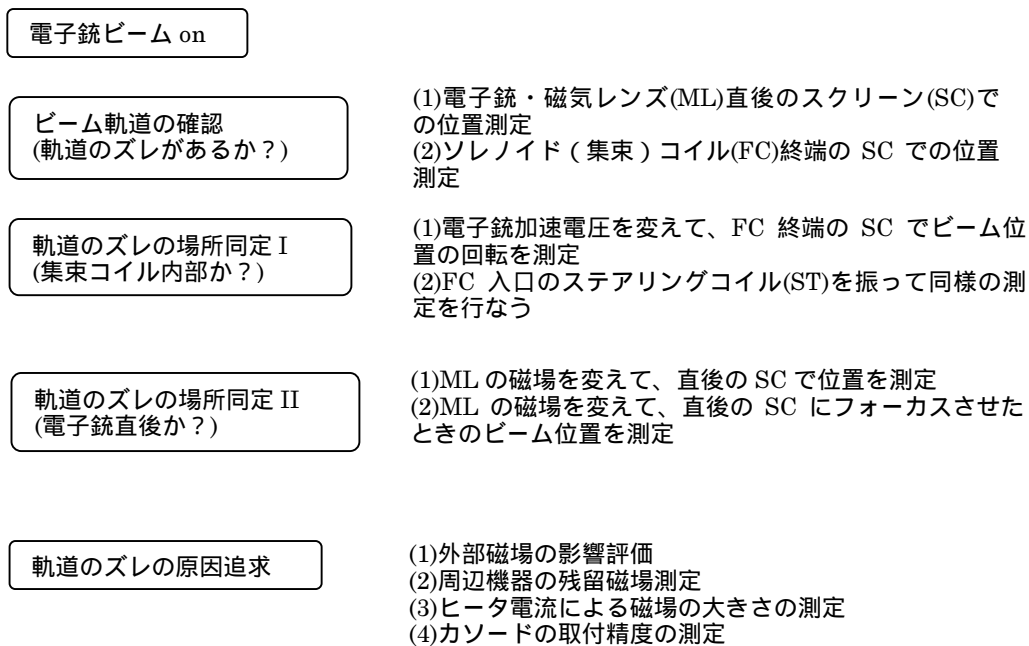


図 2-1-1 A 1 電子銃ビーム試験経過

この試験結果から、電子銃直後でビーム軌道にズレが生じていることが判明した。そこで、その対策として、電子銃の取付精度の改善を行なうとともに、電子銃直後にあらたにステアリングを追加することを検討している。

## 2.2 仮入射部ビーム試験経過

1997年6月30日から2週間の仮入射部ビーム試験の大きな流れをまとめると、次のようになる(図2-2-1)。

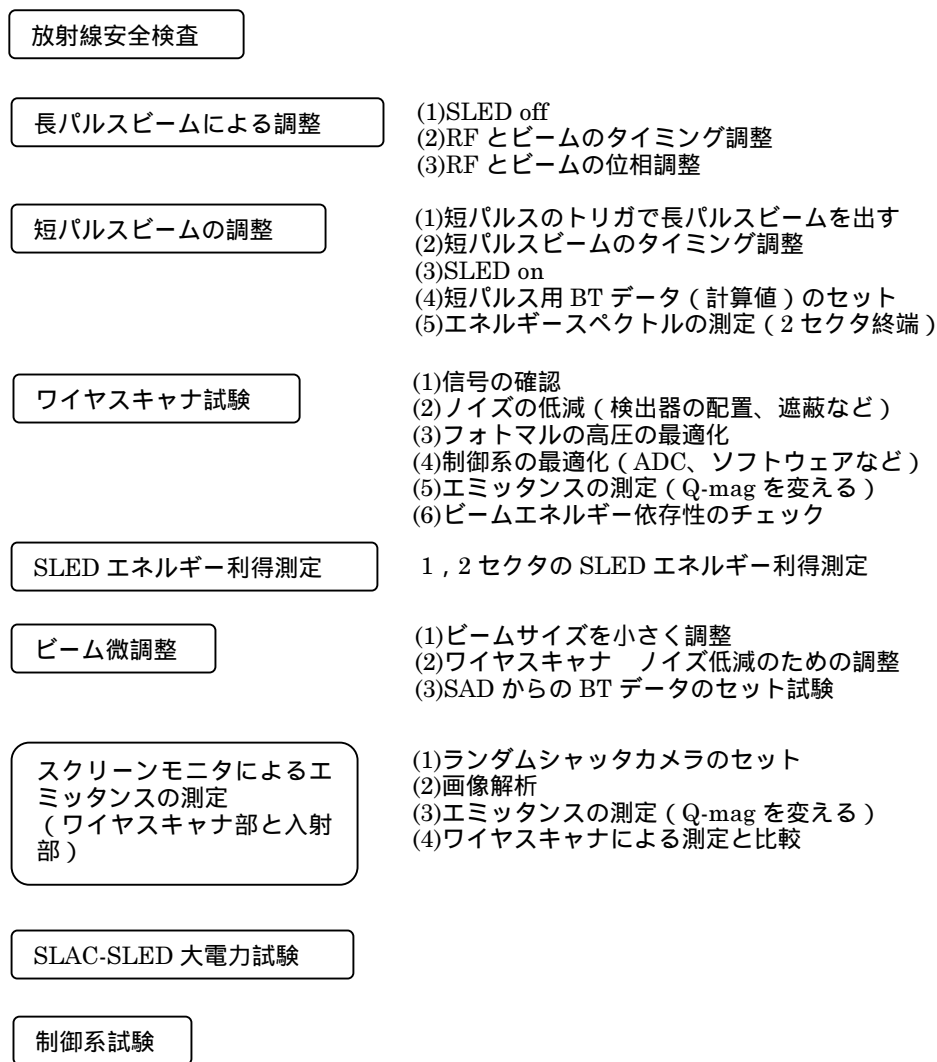


図 2-2-1 仮入射部ビーム試験経過

ビーム試験の間には、いくつかのトラブルや勘違いによるロスタイムがあったが、いずれも臨機応変に対処して事無きをえた。また、そのうちの大部分は、今後のコミッショニングに対する教訓として大いに役に立つものと思われる。ここでは、一つ一つのトラブル、判断ミスを書き留めて、今後のための反省材料としたい。なお、2 週間のコミッショニンググループとそのサポートグループによるビーム試験の詳細な経過については、運転日誌から抜粋・要約したものを本報告の付録として添付するので、興味ある方は参照されたい。

## トラブル、判断ミス、誤操作、故障などの記録

### [1] 電子銃バイアス電源出力短絡

6 / 30(月)18 : 00 wait 状態でもビームが出ていたため、調査した結果、電子銃バイアスが短絡していたことが判明した。

### [2] 長パルスビームのタイミング調整時の判断ミス・誤操作

#### (1) 1セクタタイミング調整

7 / 1(火)13 : 40 ビームローディングを見て1セクタのタイミングを調整するため、長パルス用トリガディレイ全体( ' )、トリガディレイ接続図については、図 2-2-2 参照)を動かした。しかし、Cセクタは、すでに同日 10 : 40 にタイミング調整を行なっているので、それを保つためには反対の方向に同量動かす必要があったにもかかわらず、動かさなかった。この結果、Cセクタのタイミングが狂ってしまった。なお、11 : 00 の時点での1セクタタイミング調整時には、正しくCセクタを反対方向に同量動かしていた。

#### (2) 3セクタタイミング調整

7 / 1(火)17 : 00 RF\_31\_2 の RF 波形を見て、ビームが SLED 用位相反転の後にあることが判明したが、これはビームと3セクタ以降のタイミングは、昨年秋までの運転でタイミング調整済みであったにもかかわらず、長パルス用トリガディレイ全体( ' )を、11 : 00、13 : 40 の時点で、動かしてしまったためである。そこで、長パルス用トリガディレイ全体( ' )を元に戻し、Cセクタタイミングを逆方向に同量動かした。また、1、2セクタのタイミングも同様に調整し直した。

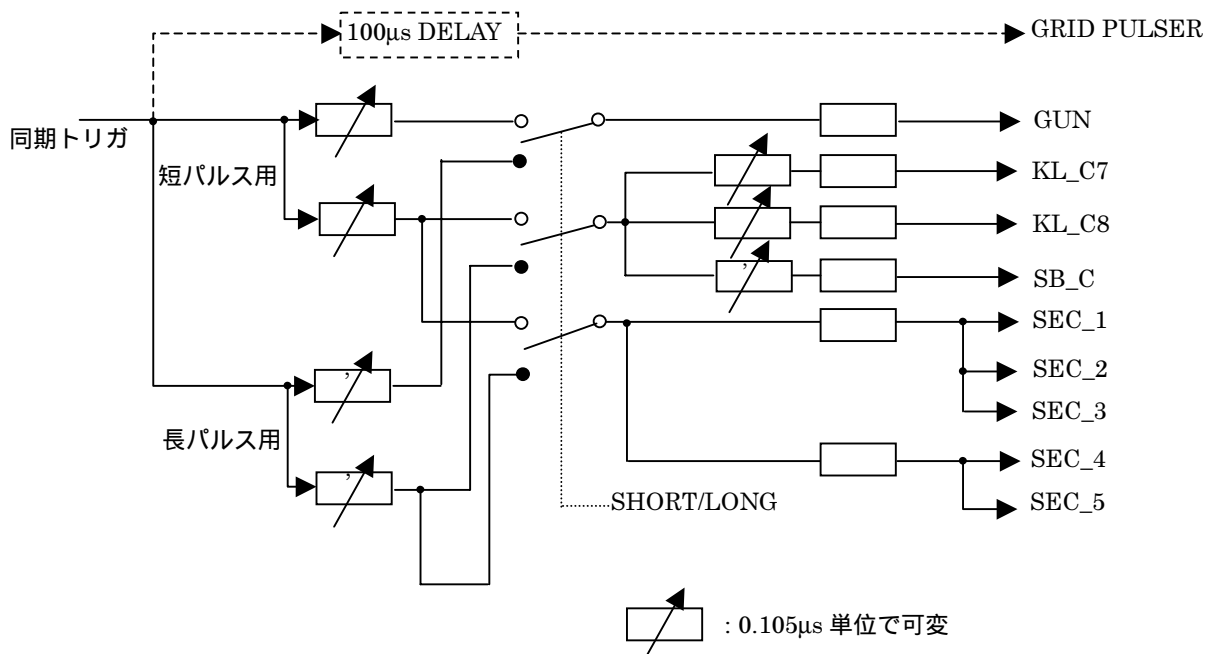


図 2-2-2 主制御室内トリガディレイ接続図

### [3] 短パルスビームのタイミング調整時の誤操作

7 / 1(火)19 : 05 短パルスビームのタイミングを RF 波形を見て合わせるために、短パルスのトリガで長パルスが出るように、電子銃トリガ接続を変えた。さらにC、1、2、3セクタの SLED を on とした。このとき、長パルスビームのト

リガディレーと同量、短パルスのディレーを動かせば大体は良いタイミングとなると考え(これは正しい)、ログブックを見て長パルストリガディレーの最初の時点での変化量を捜し、それと同じだけ短パルスディレーを動かした。ところが、既述のように、長パルスのトリガディレーは、最終的に元に戻しており、むしろ動かす方向は逆であった。この結果、ビームは1セクタで見えなかった。これは、単なるミスであったが、気がつくまで1時間半以上かかった。解決のきっかけは、1セクタのトリガディレーを変えて、ビームをSLED用位相反転前に持ってきて(実はすでに反転前にいたのだが)、さらに11の位相を反転したところ、1セクタでビームが見えたことであった。これにより、短パルスビームのタイミングが、位相反転前であることが判明した。したがって、1セクタのSLEDをonすると逆にエネルギー利得が減ってしまうような位置にビームがきていたことになる。そこで、すべて元に戻し、短パルス用トリガディレーを最初とは逆方向に調整し直したところ、ビームが1セクタを通った。

#### [4] gun vacuum abnormal によるトラブル

7/2(水) 19:50 電子銃の真空に関する gun vacuum abnormal のインターロックが働き、電子銃部のゲートバルブが閉じてビーム調整が中断した。この現象はすでに何回かおきていて、ゲージコントローラの動作不良と考え、ゲージコントローラをリセットして回復させてきたが、この時点で回復不能となったので、担当者(柿原)に調査を依頼した。調査中にインターロック接点付近の端子台で短絡がおきて、シークエンサのボードが壊れたので交換したが、状況は変わらなかった。インターロック接点を短絡し、インターロックを殺した。gun vacuum abnormal の原因については、不明のままである。

#### [5] 仮入射部プレバンチャパワー調整時のトラブル

7/2(水)~3(木) 深夜、プレバンチャの調整中にパワーが制御できないことが判明した。そこで、プレバンチャ系導波管(大気)内にフェライトコア・SiCを入れてパワー調整することにした。

#### [6] Q 電源ヒューズ交換

7/2(水)~3(木) 深夜、QM1-84F, QM2-14F が lock 表示となり、QM2-14F は on できなくなり、ヒューズを交換した。また、QM2-14D も lock 表示となり、ヒューズを交換した。

#### [7] スクリーンモニタ SC\_27\_4 の不具合

7/4(金)~5(土) 深夜、ビーム調整中に SC\_28\_2 でビームを下方に合わせないと通らないことがわかった。BT、スクリーンモニターリミットスイッチ、RF ほかすべてチェックするが、原因不明であった。そこで、トンネルに入り現場をチェックしたところ、SC\_27\_4 が上がりきっていないことが判明した。リミットスイッチの情報では、実際のスクリーンの出入状況は分からなかったことになる。対策としては、SC\_27\_4 を強制的に上に固定し、当面使用禁止とした。

#### [8] QM\_48\_4 下流ゲートバルブの設置不具合

QM\_48\_4 下流ゲートバルブが傾いて設置されているのを発見した。このため、直前のペローズが約 5mm 垂れ下がっていたので、ビーム通過に支障をきたすと考え修正した。

#### [9] クライストロンモジュレータのノイズによるランダムシャッタカメラシステムの動作不良

仮入射部出口でのエミッタンス測定のため、ランダムシャッタカメラを SC\_11\_2 に設置して画像解析しようとしたところ、モニターテレビに同期がからなかった。近くのクライストロンモジュレータ(11~13)のHVをoffしたところ、動作が正常に戻った。

#### [10] 1~2セクタA系(加速管、SLED用)冷却水温度の暴走

7/10(木)8:50 温度上昇に気づきエネルギーセンタに通報した。記録によれば、7:00頃から冷却水温度の暴走が始まり、通常の30からおよそ35まで上昇していた。

### [11] 短パルスビーム on 時のビーム歯抜け現象

7/10(木)10:10 短パルスビームを on するが、歯抜けが頻発するので調査を開始した。その結果、

(1)電子銃トリガモニタ用ケーブルがノイズを拾っていたのを改善

(2)バロンケーブルのシールドを GND に落とす

(3)トリガ用ラックの GND 取り回しの改善

などの処置によって歯抜け現象が改善された。

### [12] 仮入射部フォーカスコイル電源 FC\_CT\_P1/2 の極性反転

7/10(木)12:20 仮入射部でのビーム透過率が低いので、入射部ソレノイド磁場のチェックを行なった。その結果、FC\_CT\_P1/2 の極性が反転していることがわかった。ワイヤスキャナの試験が継続中であったので、当面反転のまま運転することとした。その後、7/11(金)16:45 から、極性を正しく設定してビーム調整を行なった。最終的に、電子銃で約 500pC、入射部で 200pC から 300pC にビームが増え、リニアック終端部までそのままビームが通った。

## 3. A1 電子銃ビーム試験

### 3-1 動機及び目的

電子ビームは、電子銃直後では低エネルギー(200keV)で曲がりやすい。しかし、電子銃からバンチャ出口までは約 1kG のソレノイド磁場中により輸送され、一度中心をはずれたビーム軌道をステアリングで補正することは困難であった。従って、これまでは、バンチャを出た後で、ビームの位置と角度を調整していた。

KEKB リニアックでは大電流ビームを長距離加速するために、ウェーク場によるビームエミッタンスの悪化を阻止しなければならない。従って、低エネルギーでのエミッタンス悪化の種を抑制するため、バンチャ及び第 1 加速管における横方向ビーム位置の初期オフセットをできる限り小さくする(0.1mm 程度)ことが重要である。

従って、電子銃からバンチャまでのビーム軌道についても位置精度の改善が求められる。

そこで秋の運転開始前に、低エネルギー側における問題点の洗い出しと改善の方向をさぐるために、電子銃ビーム軌道の現状を調査し、プレバンチャ入口までのビーム試験を行った。

### 3-2 加速器構成及びパラメータ

図 3-2-1 に A1 ユニットのレイアウトを示す。表 3-2-1 に今回のビーム試験における電子銃及び輸送系の運転パラメータを示す。

表 3-2-1 ビーム試験における電子銃及び輸送系の運転パラメータ

電子銃		
カソード		EIMAC Y-796
カソードパルス	高圧	-160kV
	幅	2μs
グリッドパルス	電圧	200V
	幅	2ns
グリッドバイアス		-150V
ヒータ電流		5.6A
エミッション電流		1A
繰り返し		5pps
輸送系		
ソレノイド磁場		1kG

### 3-3 ビーム試験及び結果

電子銃からプリバンチャ入口までのビーム軌道を調べた結果、以下のことが判明した。尚、114MHz と 571MHz のサブハーモニックバンチャの電力は入力しなかった。

- (1) ステアリングコイルを使用しない状態で運転すると、プロファイルモニター上のビーム位置が明らかに中心からずれている。
- (2) 電子銃の加速電圧を変えて (130~155KV) ビーム位置変化を3ヶ所のプロファイルモニターで測定したところ、変化量 (回転角の差) が集束コイル入口からの距離にほぼ比例した。また最初のステアリングコイルで補正 (x、y 共に1 A) すると、変化量が小さくなる。原因が集束コイル入口以前にある。
- (3) すべての集束コイルをオフにして、磁気レンズ (ML1 or ML2) 電流を変えると、ビーム位置 (第1プロファイル) が左右に移動した。磁気レンズがオフのときビーム位置が左下にあり、磁気レンズの電流を増やすと中央に寄ってくる。また磁気レンズでカソード面を第1プロファイル上に結像させたときに、像がほぼ中央にある。電子銃出口でビームが (磁気レンズに対して左下に) 既にずれている。
- (4) 集束コイルをオンにすると、ビーム位置が第1プロファイル上で左下に固定される。

以上のようなビームずれの原因を追求するために以下の調査を行った。

- (1) 外部磁場の影響評価  
電磁石の on/off と極性反転、近傍の永久磁石とシールド大扉の移動によるビーム位置変動 (第1プロファイル) は見られない。
- (2) 周辺機器の漏洩磁場測定  
電子銃アセンブリには基本的に非磁性体を使用しているが、イオンポンプ等による漏洩磁場の影響を調べた (表 3-3-1)。

表 3-3-1 電子銃周辺機器の漏洩磁場

チェンバーフランジ周辺	最大 3~4 G
カソードフランジ周辺	最大 2~3 G
カソード面	約 1 G
カソード周囲のコパール	約 1 G

- (3) ヒータ電流が発生する磁場測定  
ヒータ電流を流すとカソード近傍に磁場が発生する。ヒータ電流を 2A 流して磁場を測定した。(通常の運転状態では、ヒータ電流が 5.3A である。) 表 3-3-2 に結果を示す。

表 3-3-2 カソード表面付近の漏洩磁場

カソード面からの距離	z=0mm	5mm	10mm
カソード中央 (r=0)	9.5 G	6 G	2 G
カソード中央周辺 (r=5mm)	2 G		

- (4) カソードの取付精度 (上流から見た場合)  
ビームラインからの軸ずれと倒れ (カソードフランジとステムフランジ間の相対距離) を測定した (表 3-3-3)。最初のカソードは、中心が左でやや下向きに取付られている。

表 3-3-3 カソードの取り付け精度

	上	下	左	右
カソード交換前				
軸ずれ(mm)		0.35		0.05
倒れ(mm)	0.03	-0.04	-0.18	0.12
カソード交換後				
倒れ(mm)、補正前	0.00	-0.10	-0.01	0.05
倒れ(mm)、補正後*	0.00	-0.00	-0.01	0.02

\*補正は、フランジの増し締めによる。

尚、カソードフランジとグリッド取り付け面の平行度を、2 個の例で測定したところ、相対距離の変化は 20 $\mu$ m と 40 $\mu$ m であった。

### 3-4 課題

- (1) カソード及び周辺機器の取付精度向上と磁気レンズの磁場測定を行った上で、再度ビーム試験を行う。
- (2) いずれにしてもカソード等の取付精度改善だけ解決するのは困難であると考えられるので、カソード取付精度の向上等とステアリングコイルの追加の 2 本立てで検討する。

## 4. 仮入射部試験

### 4.1 目的

建設第 3 年度の 1996 年度末までに旧 2.5GeV ライナック 40 ユニットの改造を完了した。改造は大規模なものであり、今回のビーム試験の目的は、改造したライナックからビームを出し、秋からの運転に備えて PF リングへの入射ビームを確立するとともに、KEKB 入射器建設の仕上がり具合をみることであった。以下に具体的な課題を上げる。

#### (1) 仮入射部試験

昨年 12 月からの改造工事で旧 2.5GeV ライナックの入射部を KEBB 入射器の入射部 (A1 ユニット) に移設した。その後には、KEKB 入射器建設期間中の PF 入射に供するために、旧陽電子ライナックで使用していた入射部の電子銃～バンチャ間(「仮入射部」と称する)及び#C8 ユニットの設置した。KEKB 入射器増設部と既設部(旧 2.5GeV ライナックの#C8～#58 間)の接続を円滑に行うため、仮入射部の電子銃はビームラインから外し、90 度偏向電磁石によって入射するようにした(「垂直入射電子銃」と称する)。仮入射部の電子銃ビームをプリバンチャ入り口まで導く試験は予め行っていたが、マイクロ波を投入したビーム加速試験により、エネルギースペクトル、エミッタンスを確認するのは今回が初めてであった。

#### (1) 既設部高電界ビーム加速試験

今回のビーム試験で初めて入射部と陽電子発生部を含む#C7、#21 ユニットの除く全てのユニットで 50MW クライストロンと SLED を用いた高電界加速モードでライナックが運転されることになった。加速管等の放電によるトリップがどの程度の頻度で生じるか、十分な加速利得があるか、エネルギー安定度はどうか等を調べる必要があった。

#### (3) ビーム輸送路の試験

新設された仮入射部、C8 ユニット間では輸送路の構成が従来と変わった。又、3 から 5 セクタで 4 極電磁石のポールピース入れ替えの改造工事があった。改造によりユニット加速利得が 2 倍以上増強され、全体としての最大加速エネルギーが約 6GeV になった。この中で、今秋からの PF 入射用 2.5GeV ビームをどう輸送するか、新しいビーム輸送パラメータの確立が必要となった。



#### (4) ビーム制御系の試験

KEKB 入射器ではより高品質で安定したビームをリングに入射するため、マイクロ波、ビーム輸送系等の計算機制御がますます重要になる。その中で、今回は、計算によるライナックのビームプロファイルとモニタした実際のプロファイルを一致させるため、ライナックデータベースの整備を可能な限り精度良く行った。その結果を用いて、運転パラメータから計算したビームプロファイルとモニタした実際のプロファイルの差、モデル計算した電磁石値を設定したときの実際のプロファイルとの差等を調べるのが課題であった。

### 4.2 加速器

#### 4.2.1 レイアウト

仮入射部以降のライナックのレイアウトを図 4.2.1 に示す。詳細は付録のライナック寸法データベース参照のこと。

##### (1) 仮入射部

垂直入射電子銃システム、プリバンチャ、バンチャから成る。集束系はヘルムホルツコイル。モニタは電流モニタ及びスクリーンモニタ。高周波源は当面#C7 ユニットのクライストロンから出力を下げ約 10MW を供給する。#C7 は 1998 年 3 月末の KEKB 入射器増設部と既設部の結合までは仮のビームダンプになっており、加速ユニットは設置されないが、同年 10 月の KEKB リングコミッショニングまでには組み上げる予定である。10 月以降も仮入射部が併用される場合には、#C7 ユニットの高周波電力 40MW のうち 10MW を分配して使用することになる。

##### (2) #C8~#17、#31~#57 ユニット

これらの加速ユニットは標準型の加速ユニットで、2m 加速管 4 本に 50MW クライストロンからの出力を高周波パルス圧縮器（以下 SLED）によって増幅して供給している。1 ユニット当たりの加速利得はクライストロン出力 41MW に対して 160MeV/unit の設計である。SLED によるエネルギー増倍率は 1.85 である。4 極電磁石は#C8 ユニットでは第 2、第 4 加速管の後、#11~#34 ユニットではユニットの後、#36~#58 ユニットでは 2 ユニット毎にユニットの後に設置される。加速管、電流モニタ、スクリーンモニタ、4 極電磁石、ゲート弁等を含めた加速ユニットの全長は 9.6m で加速部の占有率は 78.7%である。

##### (1) #21 ユニット

陽電子生成標的直後にあり、1m 加速管 2 本、2m 加速管 2 本の特殊な加速管構成になっている。これらの加速管は全て 0.5T のソレノイド磁場に浸っている。放電対策上、クライストロン出力は、パルス幅を SLED 使用ユニットの 4 $\mu$ s から 1 $\mu$ s に縮め、60MW 以上出力する。SLED は使用しない。1m 管 2 本は導波管で直列に連結され、2m 管として使用する。1m 加速管 2 本、2m 加速管 2 本へ供給される高周波電力の分配比は 2:1:1 である。加速ユニットの全長は 11.25m で加速部の占有率は 50.4%である。

##### (1) #22、#23 ユニット

2m 管 4 本の加速管構成及び高周波源は標準型だが、4 極電磁石を加速管上に設置し FODO 型の集束系にしている。加速ユニットの全長は 9.9 及び 10.45m で加速部の占有率は 76.3%及び 72.3%である。

##### (5) #24、#26 ユニット

2m 管 4 本の加速管構成及び高周波源は標準型だが、2m 管 4 本それぞれの下流に 4 極電磁石を設置できるように、加速管の間隔を空けて設置している。加速ユニットの全長は 12.25m で加速部の占有率は 61.7%である。

##### (6) #27、#28 ユニット

2m 管 4 本の加速管構成及び高周波源は標準型だが、2m 管 4 本それぞれの下流に 4 極電磁石を設置できるように、加速管の間隔を空けて設置している。加速ユニットの全長は 10.83m で加速部の占有率は 69.8%である。

#### (7) #8 ユニット

当面空きユニットになっている。1998 年 10 月までに設置予定。2m 管 3 本の加速管構成。高周波源は標準型で 1:1:1 に電力を分配する。

#### 4.2.2 高周波源の改造と加速ユニットのコンディショニング

1996 年度末までに大電力高周波源、サブブースタ電源等の改造が完了した。旧 2.5GeV ライナックの全モジュレータ電力が 2 倍に増強された。クライストロンは 50MW の大電力クライストロンに置き換えられた。C7、21 を除き SLED が積載された。SLED の使用に伴いドライブシステムも一新された。ドライブ高周波の位相を反転させる低電力系が整備され、サブブースタクライストロンも新型に置き換えられた。

5 月 13 日 17 時から 6 月 2 日 9 時までの 59 シフト、6 月 9 日 9 時から 20 日 17 時までの 33 シフトを、改造の完了した既設部のコンディショニングに当てた。コンディショニングの手順としては、最初 SLED を離調してクライストロン最大出力まで電力を投入する。この状態でクライストロンの入力調整を行い、カソード電流を測って出力データをとる。又、PFN による波形調整などを行う。次に SLED を同調して最大出力までコンディショニングを行う。新品の SLED は低電力で周波数を合わせているので、電力をあげる途中で 2、3 回、周波数調整をやり直す。今回は計算機による自動コンディショニングを試みたが、うまくいかなかった。

新しく SLED を設置したユニット以外は最初の 3 週間で大部分のコンディショニングを完了した。1、2 セクタを中心とする新規設置ユニットでは 5 週間で、平均運転出力である 41MW まで平均として達したが、いくつかのユニットで最大出力までは後しばらくの時間が必要となった。図 4.2.2 にコンディショニングの経過及び結果を示す。

#### 4.2.3 マスタオシレータ及びタイミングシステム

KEKB 加速器では、リングとライナックの高周波同期を精度よくとるため、従来の同期システムを変更する。新しいシステムでは、ライナック/リング共通のマスタオシレータ (571.2MHz: 55f<sub>0</sub>、f<sub>0</sub> は同期周波数で 2856/275MHz) を持つことによって、互いの加速高周波 (linac 2856MHz: 275f<sub>0</sub>, ring 508.887MHz: 49f<sub>0</sub>) 及びリングのビーム回転周波数に同期した基準トリガ信号 (f<sub>0</sub>/h=2.03kHz、h はリングハーモニクナンバ) 等を生成する。ライナックトリガは電源同期の 50Hz と基準トリガ信号との同期をとって生成される。又、トリガー信号は装置に近い副制御室でもう一度 571.2MHz と同期をとってジッタを押さえると同時に、ディレーステップも 2ns に精度が上げられる。しかし、今回の運転では従来通りのシステムで運転した。図 4.2.3 に主制御室から 0.1□s 単位で変更可能なトリガディレーのブロックダイヤグラムを示す。又、1~5 各セクタ副制御室には、0.021□s 単位で変更可能なサブブースタ高周波及びクライストロン毎の高圧のトリガディレーがある。

SLED 運転をすることになり高周波パルスのタイミング合せにも変更が生じた。従来は、モジュレータ電力を最大限活用する観点から、クライストロン高圧パルスよりドライブ高周波パルスのパルス幅を十分長くし、高圧パルスの幅で出力パルス幅を決めていた。従って、ビームとのタイミングは高圧パルスのタイミングを調整していた。しかし、KEKB 入射器では、出来る限り立ち上がりが速く位相の揃った高周波を出力するため、パルス波形の整形し易いドライブ高周波の方で出力高周波のパルス幅を決めるようにした。又、SLED 運転では、4□s の高周波パルス幅のうち位相反転をする後半 0.7□s の部分が増幅され加速に寄与する。従って、高周波の位相反転タイミングをビームと正確に同期させることが必要となった。これらの事情により、クライストロン高圧、ドライブ高周波/位相反転のタイミングは予め高周波グループによって調整し固定した。そして、ビームと高周波とのタイミングは、クライストロン高圧、ドライブ高周波のディレーを全体として動かした。この中で、ドライブ高周波パルスのタイミング調整は従来余り行われなかったせいか、主制御室で遠隔操作できるようになっていなかった。

### 4.3 初期パラメータの設定

#### 4.3.1 クライストロン出力

仮入射部 (#C7) 以降、SLED 付きの加速ユニットとして、#C8、#11~#17、#22~#24、#26~#28、#31~#38、#41~#48、#51~#57 の 37 ユニット、SLED のない加速ユニットとして、#21 の 1 台がある。平均加速利得を、それぞれ 160MeV/unit 及び 80MeV/unit とすると、最大エネルギーは約 6GeV となる。

PF 入射ビームは 2.5GeV なので入射運転では 3GeV の加速エネルギーに相当する約半数のユニットを運転するだけで十分である。

今回の試運転では電力節減もあり、仮入射部、及び、#C8~#34 までの加速ユニットのうちコンディショニングで上がりの悪かった#13 ユニットと SLED のない#21 ユニットの 17 ユニットの加速に使用することにした。クライストロン高圧はコンディショニングの最終結果よりわずか ( $E_s$  値\*で 0.5~1kV 程度) 下げた値を設定した(表 4.3.1)。

#### 4.3.2 高周波のタイミングと位相

仮入射部のある C セクタ、12 月からの工事で SLED を設置した 1、2 セクタでは高周波ドライブシステムの変更があり、ビームとのタイミングも大幅にかわったが、初期値としては従来通りの値でスタートした。位相についても全く従来の運転値は当てにならないため、ビーム負荷の見やすい長パルスビームで調整することにした。参考のため表 4.3.1 にタイミング、位相の初期値を付加する。

#### 4.3.3 仮入射部パラメータ

電子銃パラメータとしては、位相調整のための長パルスビーム (1 $\mu$ s, >20mA) と入射ビームの短パルスビーム (2ns, 200-300mA) が出せることが必要である。プリバンチャ、バンチャは従来の運転値を初期値とした。(表 4.3.3)

#### 4.3.4 集束系パラメータ

位相調整時は長パルスビームを加速するため SLED を離調する。加速ユニットのエネルギー利得が入射ビームのときと異なる。そのそれぞれについて、ライナックデータベース及び設定したクライストロン高圧に対応するエネルギー利得を仮定して、計算コード TRANSPORT で電磁石値を求め、計算機から設定した。

表 4.3.4 に電磁石磁場値、設定電流を示す。

### 4.4 ビーム制御

#### 4.4.1 BT データベースの整備

PF ライナック建設初期の段階に、実際の運転パラメータによる軌道計算をできるだけ高速に表示し、調整を容易にしようとする試みが行われたことがあった。これは、計算機の容量やデータベースの精度の問題で実際に役立てられるには至らなかった。しかし、KEKB 入射器では従来にないビームの品質や安定度が要求され、計算機をベースにしたビーム調整及び制御を避けて通ることができなくなった。

計算機制御のベースとなるライナックのレイアウトや装置に関するデータは膨大なもので、加速ユニット(榎本、大沢、山口、大越)、高周波源(道園)、ビーム輸送系(紙谷、大越)、真空(柿原)、モニタ(小林、諏訪田)など各担当者が作業分担をしてデータを提供し、榎本、小川、古川がまとめた。これらの作業は EXCEL 上で行った。

計算と実際のビームの差はこのデータベースの精度によるものであり、できるだけ詳細なデータベース作成を試みた。

加速器レイアウトでは KEKB 入射器は、入射部、陽電子発生部、アーク部など、PF ライナックとは比べものにならないほど、不規則な加速ユニット、ビーム輸送系が多く、データベース構築は多大な労力を必要とするものであった。しかし、これが計算機制御の基礎となるものと考えて、まずこの作業に全力を注いだ。

このデータベースを用いた計算機制御については、BT パラメータの設定、エミッタスマッチング、エネルギー調整などの基本的な制御のほかに、それぞれについてのフィードバック等が必要になる。これについても分担して作業を進めることが必要であり、ネットワーク上に公開された共通かつ単一のデータベースを作ることを方針とした。

付録に今回ビーム試験を行った時点での、仮入射部以降のデータベースを掲載する。

データベース第 1 列は機器の label であるが、従来のものは統一性に欠ける点もあり、今回一新することになった。形式は DA\_SU\_ZG である。アンダースコアは読みやすくするためのもので、省いてもよい。ここで、DA は機器名(2 文字)、S はセクタ、U はユニット番号、Z はゾーン、G はグループ番号である。

従来、機器名には prm、bpm のように 3 文字が混ざっていたが、今回全て 2 文字に統一した。集束電磁石では水平面を基準にした集束、発散、偏向電磁石では水平偏向か垂直偏向かなどの属性でも名前の区別を行った。モニタに関しては、例えば、従来使用していたプロファイルモニタ、ビーム位置モニタなどには複数の異なる種類が存在するので、スクリーンモニタ(SC)、ストリップラインモニタ(SP)等形式で呼ぶ方法を採用した。表 4.4.1a に機器名一覧表を示す。セクタ、ユニットは従来からの概念だが、従来 S-U と間にハイフンを入れて書き「S の U」などと呼んでいたのを、ハイフンを省いて SU と書き「SU ユニット」と呼ぶように変えた。

ゾーンも従来からあるラベルづけの概念であるが、整理拡張した。標準的な加速ユニットに関しては、第 1 加速管の上流から第 2 加速管の上流までを 1、第 2 加速管以降も同様に 2、3、4 とする。第 1 加速管の上流に直接つくゲートバルブのみ 0 とする。従来 4 と 0 の境界が曖昧だったがはっきり定義した。しばしば、加速ユニットの下流にアナライザ、シケインなどが入って 4 ゾーンが長くなる場合があることを考慮して、加速管以外にも偏向電磁石等の主要機器を指標にゾーンを増やした。又、入射部でも電子銃、バンチャ等を指標にゾーンを新たに定義した。

グループはゾーン内に同種の機器が複数できたときに区別するために、ゾーンを細分する目的で使用する。あくまでもゾーンの中の位置を示すもので、機器毎の通し番号ではなくした。

以上の様に、機器名の後の SU\_ZG は場所がわかりやすいようにすることを優先した。このため、同一機器に注目したときそれがユニットやセクタのなかで何番目であるとか、何台あるとかがわかりにくくなったが、これには目をつぶることにした。付録に、旧 2.5GeV ライナック機器の新旧ラベル対応表を掲げておく。

データベース第 2 列目は type である。軌道計算にデータベースが利用されることを考慮して、各行がビーム輸送上どのような機能を持った区間なのかを示した。これには、計算コード TRANSPORT で定義されている type code を MAD (Methodical Accelerator Design)形式\*注 (D.C.Carey, K.L.Brown, F.Rothacker, Third-order transport, a computer program for designing charged particle beam transport systems, May 1955, SLAC-R-95/462) を用いて記述した。表 4.4.1b に type code 一覧を掲載する。区間の区切り方は、以下の様に、できるだけ詳細にビームライン上の装置の位置を示すようにした。

ドリフトスペースは、装置・ビームダクトの機械長がわかるようにフランジ端面で区切った。又、モニタの計測位置(スクリーン、アンテナ、電流測定用セラミックギャップの位置)、ステアリングによるビームキック中心位置、ユニット基準位置がわかるように、区切った。

偏向電磁石系ではドリフトスペースも含め偏向軌道に沿って測った長さをその長さとして定義した。又、ポール端面の傾き、偏向方向なども TRANSPORT の入力データの記述に従って情報を掲載した。

4 極電磁石、6 極電磁石は物理長を入力した。

KEKB 入射器で使用されるプリバンチャ、バンチャ、及びレギュラー加速管は 3 分の 2 モードディスクロード型進行波管である。これらの進行波管における電子ビームの速さ及び加速高周波の波長は、プリバンチャではそれぞれ 0.7c 及び 0.0734786m (c は光速)、バンチャでは 0.7~1c、0.0734786~0.1049694m、レギュラー加速管では 1c、0.1049694m

となるように設計されている。管は、入力結合空洞（1セル）加速空洞、出力結合空洞（1セル）から構成される。空洞の1セルは隣接するディスクで区切られ、ディスク中心間は3分の1波長の長さになっている。データベースでは、結合空洞と加速空洞を区別した。プリバンチャ、バンチャでは加速空洞をセル毎に区切ったが、レギュラー加速管では9波長（1m管）、18波長（2m管）をまとめて書いた。レギュラー加速管での加速利得は、現時点では、結合空洞では0としている。

ソレノイドはプリバンチャ、バンチャ、レギュラー加速管と重ねて設置されている。データベースでは、その中心位置を示し、長さを0とした。ソレノイドを用いた軌道計算をする場合は別途入力データを工夫して生成する必要がある。

データベース第3列目 PS は4、6極電磁石で電源が同じで、直列に接続されているものを同じ番号で示した。この番号は1セクタ毎の通し番号になっている。

データベース第4列目は区切られた装置、空間の機械長を示した。

データベース第5列目では、ビームラインを真空路として考え、ビームダクト、加速管、モニタ等の全長を示した。

データベース第6列目では、各加速ユニット上流基準点からの装置の位置を示した。

データベース第7列目では、最上流加速ユニット（A1ユニット）基準点から測った装置の位置を示した。

データベース第9～14列は、加速管のデータである。順に、結合空洞を除く加速空洞の全長、加速高周波の波長、同じく充填時間、Q値、減衰係数、シャントインピーダンスを示した。

データベース第15～18列は、加速高周波源のデータである。順に、クライストロン出力を計算する係数（0次）同（1次）SLEDによるエネルギー増倍係数、導波管での減衰率を示した。

データベース第19列は、9～18列のデータによって計算した加速ユニットの単位長さ当たりのエネルギー利得である。

データベース第20～18列は、電磁石に関するデータである。順に、磁場有功長、4、6極電磁石のボア半径又は偏向磁石のギャップ、磁場/電流換算係数（0次）同（1次）同（2次）同（3次）同（4次）同（5次）偏向磁石の偏向角、ポール端面（入口）の傾き、ポール端面（出口）の傾きを示した。

以上のように、データベースにライナックの基本的な寸法、装置のパラメータをまとめることができた。しかし、ライナックのアライメント、磁場設定値、加速利得などの誤差データについては次のステップでデータベースにしていかなければならない。

#### 4-4-2 データベースの利用

KEKBのLinacの運転においては、実験効率がこれまで以上に求められるため、運転中に加速器のBeam TransportのSimulationを行ったり、その結果得られた最適運転Parameterを直接運転に利用したりする、いわゆるModelingの機構は、たいへん重要になる。特に、Beam Orbitを補正したり、加速器の診断を行なうことは日常的に必要なと思われる。

これまでの入射器の運転では基本的な運転Parameterを運転前にOfflineで計算しておき、Beam調整の初期値として利用するが、その後の調整はBeamの挙動をOperatorが判断しながら試行錯誤的に行なうことが多かった。実際、Beam Monitorや制御系との接続などが十分でなく、またBeamの特性についての要求が厳しくない場合には、時間

的な制約などからこの方法が適当である場合も多かったと思われる。しかし、長期的に見ると加速器の性能向上のために必要な検討項目が曖昧になるなど、弊害も多かったと思われる。

今後は Strip-line 型の Beam 位置モニタなどが整備され、重要な加速器 Component がほとんど制御系から扱えるようになるので、Modeling を生かすために必要な環境が整って来たと言える。

## 入射器の制御

1982 年から運転に使用された入射器の制御系は、1990 年頃から更新後の制御系の設計が始まり、1993 年から更新が実施された。入射器の制御は主として、加速器装置の Controller の物理的な処理を表現する下位層、及び加速器装置の論理的な処理を表現する上位層から構成されており、それらの制御処理 Service が Application Program に提供されている。下位層と上位層、及び上位層と Application Program の間は Network 透過な RPC (Remote Procedure Call) によって接続され、Programmer は通常その存在を意識することはない。

現在の制御の下位層は新しい Hardware の増設のために大幅に変更されつつあり、それに伴って、下位層と上位層の間の取り決め (Hardware 特性情報や制御情報交換 Protocol) も拡張されている。しかし、上位層と Application Program の間の取り決めについての変更は最小限に押えられており、Application Program での変更はほとんど無い。

制御系内で 1993 年以降接続された装置の基本 Network は Ethernet や FDDI など国際標準規格に従ったものである。現場の Network は Klystron Modulator からの Noise を避けるために全て光伝送をしており、また、重要な部分については規格上 2 重化されている FDDI を含めて冗長性を持たせるよう配慮している。また、基本 Protocol としては現在では業界標準になっている TCP/IP (TCP 及び UDP) を使用している。古い Controller を持った装置も数多く使われており、それらについては Loop-2, Loop-3 と呼ばれる Field Network を経由して、TCP/IP 接続された VME に接続され使われている。

入射器の制御用の TCP/IP Network は、安全性確保のため他の Network と独立しており、Firewall を通して所内 Network に接続されている。また、KEKB Ring の制御 Network とは Router を通して接続する準備が進んでいる。Office の計算機と入射器制御用の計算機の間は Firewall を通して一部の機能について間接的に通信が可能である。SAD 計算機と制御用計算機の間も同じ事情であるが、秋の運転からは Ring の制御 Network を通して直接通信させる予定である。

下位層を構成する制御装置としては、Loop-2, Loop-3 といった Field Network に接続された SBC (Single Board Computer System) や TCP/IP Network に直接接続された VME、VXI、PLC、CAMAC などがある。通常これらの装置のための Server Software が装置専用の Server 計算機や全体制御用の Unix 計算機上にそれぞれ独立に存在し、Static Database に従って、装置情報の解釈や障害回避などの処理を行なう。単純な処理の Software については、上位層の Server Software の中に含まれる。

上位層については Unix 計算機上にそれぞれの加速器構成要素ごとの Server Software が用意されており、Hardware によって異なる下位層と通信し、Static Database に従って、Data Caching、単位換算や全体的な障害処理を行なう。

制御 Software で使われている Static Database は、表形式の Disk File を Software 起動時に Memory 上に展開し、Hash Algorithm などを使って検索するもので、単純高速で十分な機能を提供する。

## 電磁石制御

Beam Transport に関係する電磁石については、下位層は Loop3 に接続された SBC や TCP Network 接続の PLC など 3 種類の装置があり（秋からは 4 種類）、それぞれの装置に対応した操作や障害回避などの処理を行なうための Server Software が VME や Unix Server、PC Server 上に作られている。上位層では "mg" と呼ばれる Server Software が Database に従って、それぞれの下位層と通信し、全体的な処理を行なって Application Program からの要求に答える。

これまで加速器運転時の電磁石の制御については電流値を基本としてきたが、加速器運転には磁場または磁場勾配を基本とする方が適していると思われ、その準備を進めてきた。今回の Commissioning Group の作業（特に紙谷氏による磁場勾配情報の整理分析）によって、必要な情報が揃ってきたので、電磁石の上位層の Server "mg" にその操作 Command を実装した。

"mg" Server に対して "bset"、"bget" という Command を送ると、電磁石の磁束密度（勾配）値の設定、読み出しが行なえるようになってきている。それらの内部で電磁石電源に与える電流値ととの間の単位変換を行っており、磁束密度（勾配）の単位には T または T/m を、電流の単位には A を使っている。

電磁石の Static Database は "mgtbl" と呼ばれるが、今回はそれには情報の追加は行わずに、mgttbl という Database を作り、主に 5 次多項式で与えられた電流と磁場（勾配）の関係式を BTdatabase から抽出して収めた。このような関係式には、測定点を全て通るような多項式に焼き直してから、区間ごとに低次の多項式で近似する方法（Tristan Ring で使われた）などがあるようだが、今回の方法でも誤差範囲内で近似が良いようなので、全範囲を一つの多項式で表すことにしている。

当初、磁場（勾配）から電流への変換も別の多項式で表そうと考えていたが、その逆変換と一致しなくなるので、Newton 法によって解くことにした。必要な精度の解を得るために全範囲で Newton 法の繰り返しを 3 回から 5 回になっているので、特に速度などの問題はないと考えている。

#### 加速勾配情報

もう一つの Beam Transport に関連する情報である加速勾配についても、今回の Commissioning Group の作業の中で情報が揃ったので、その値を扱う Software を用意した。現在のところ、加速管という装置について他に扱う情報が無いので、制御上位層の Server Software としては用意しておらず、通常の Application Program として作成した。利用者から見ると大きな違いはないが、将来他の Program から利用する場合に不便である可能性もあるので、入射器標準の Server の形態を用意することも考えている。

この Software "accddata" の中では Klystron と Trigger の Server から情報を集めている。Klystron の Server "kly" からは Klystron の On/Off の状態と印加電圧  $E_s$  の値を取得し、また Trigger の Server "trig" からは Acceleration/Stand-by（その加速管が電子の加速に使われているかどうか）の情報を取得した上で、Klystron の出力を計算し、さらに加速管の平均加速勾配を計算している。その他に加速管の長さを掛けて加速 Gain を算出している。換算に必要な係数や加速管の長さなどの情報は BTdatabase から抽出して、"acrftbl" という Database に収めている。

Klystron の出力については、現在  $E_s$  との関係を使った換算値から求めているが、RF Group では VXI System などを使った測定系も準備しつつあるので、準備でき次第そちらの情報も参照したいと考えている。

Micro 波の位相は最大加速の位置にあると仮定しているが、これは一般的ではないが、その考慮は Simulation Program 側で処理することにしていて、加速勾配としては最大加速勾配を求めることにしている。

## 装置名

入射器の各要素装置の名前については、以前は加速管 Group が取り決めをしてきて、その後 92 年頃から KEKB の計画に伴って制御 Group からいくつか提案をしてきた。装置の名前付けは重要なことであるという認識は入射器全体にあって、新しい Sector の名前などが決まった。しかし、名前とくに装置の Mnemonic について妥協点が見つからないまま、今年になり、やっと Comissioning Group が一般規約を取り決めるにいたった。その結果、名前は、機器名及び属性 (DA)、Sector 名 (S)、Unit 名 (U)、Zone 名 (Z)、Group 名 (G) を使って DA\_SU\_ZG と表されることになった。

今回の Modeling 機構で新しく準備するものは、できるだけ新しい名称を使うことにした。そのために例えば電磁石などについては、これまでの名称の別名として新しい名称を Database "mgtbl" に登録した。(その後、通常の Operation との関係から、新しい名称を本格的に使用するのは、来年 1 月からということになった。)

電磁石について、これまでは、電磁石電源を主な制御対象と考えてきて、名前も電磁石電源に付けてきた。しかし、Beam Transport の計算に絡んでは、電磁石自体を制御対象と考えた方が自然である。現在のところ Database 上で、別名を使って双方が扱えるようにしているが、今後は別階層にすることも含めて整理していきたいと考えている。

## 居室との情報交換

今回作成した Modeling の機構の中では、榎本氏の解説にある BTdatabase が重要な役割を果たしているが、その作成にあたっては関係者の間の情報交換が重要であることが予想された。主な情報交換の媒体としては、Microsoft の表計算 Software である Excel が選ばれたが、利用する機種は Macintosh、Windows、及び Unix (Text Format のみ) と広範囲にわたった。また、計算のための "btfile" と呼ぶ入力 file もいくつかの計算機で共有する必要があった。そのため、これまで Printer Support 以外についてはあまり公開していなかった Unix Server による Office Personal Computer の Support を整備することにした。

Macintosh と Windows との情報交換には Windows NT Server を経由するのが自然であるが、Unix とも情報交換するためには Unix を Server とするのが現在のところ簡単である。Macintosh の AppleTalk を Unix で利用するために、入射器では "CAP" という Free Software を利用してきた。同様に Windows の Lan Manager (NetBIOS, SMB) を利用するために "Samba" という Free Software を利用している。Unix 計算機間の File 共有は NFS が標準である。今回これらを整備して、情報交換をしやすいようにした。

入射器制御開発用の Unix 計算機である "Almond" と "Maple" で、"CAP" と "Samba" の File Sharing Server を動作させ、Macintosh と Windows、Unix が同じ Directory/File を共有できるようにした。それぞれの環境から見える Modeling 用の Directory は以下の通りである。

### Macintosh/AppleTalk/AppleShare の環境

(標準の Chooser の AppleShare で Mount する)

PF-Linac : Linac Control A : Linac-Data という Disk の transport

PF-Linac : Linac Control M : Linac-Data という Disk の transport

### Windows/LanManager(NetBIOS)/SMB の環境

(標準の Explorer の Tool Menu で Mount する)

¥¥ALMOND¥LinacData という Share の transport

¥¥MAPLE¥LinacData という Share の transport



## Unix/NFS の環境

linacfs:/mnt/users2/control/data/transport

almond:/mnt/users2/control/data/transport

通常入射器の Unix からは

~control/data/transport

SAD 計算機 ( acsad2, acsad3 ) からは

/nfs/almond/mnt/users2/control/data/transport

この Directory に Excel の File を入れる場合、Excel の標準形式の File は ".xls" という Filename Extension を持たせることとし、また、Unix から同じ File を読むために、tsv (Tab Separated Values) の形式の File を ".tsv" という Filename Extension で格納することにした。

上の Directory (Folder) "transport" の下に "BTdimension" という Directory (Folder) があり、その中に BTdimension.xls と BTdimension.tsv という入射器全体の Beam Transport 用の Database が収められている。計算用の入力 File である "btfile" は "transport" の直下に置かれる。また、SAD 計算機との情報交換には "transport" の下の "from\_sad" という Directory も使用される。

## Data/Control の流れ

Beam Transport Optics の Modeling/Simulation 用の Program としては、入射器でこれまで使用されてきた "TRANSPORT" と、KEKB Ring の Design Simulation で実績を積む、"SAD" を使用し、それらの特徴を生かすことにした。通常、TRANSPORT は入射器の制御用の計算機 (almond または plum) で実行され、SAD は SAD Cluster の acsad で実行される。

TRANSPORT は入出力を File で行なうので、入射器の Database や制御系と情報をやりとりする場合には、TRANSPORT の規約と合わせるために入力 Data File の準備や、出力 File の解釈を外部で行なわなくてはならない。一方、SAD は自身の制御言語として SAD Script という Interpreter 言語を持っているので、比較的自由に入出力を選ぶことができる。

入力 Data については、今回、いくつかの試行錯誤があったが、結局主に TRANSPORT に合わせた "btfile" と呼ぶ Data File を準備し、SAD からはそれを SAD Script で解釈しながら入力することになった。ひとつの電磁石電源から複数の電磁石に電流を供給する場合の情報の表現が TRANSPORT と SAD で異なることなどの理由で、効果的な共通の中間 File を持つことができなかつたためである。しかし、そのために SAD の Data 入力時に多少時間がかかっているため、改善の必要があるかもしれない。

出力の扱いについては、TRANSPORT では出力 File を外部の Script Program で変換して利用している。SAD については SAD Script から必要な Script Program を直接起動することにした。この SAD Script から起動する Script は、SAD 計算機と入射器の制御用計算機が Firewall によって隔てられているために暫定的に作ったものである。

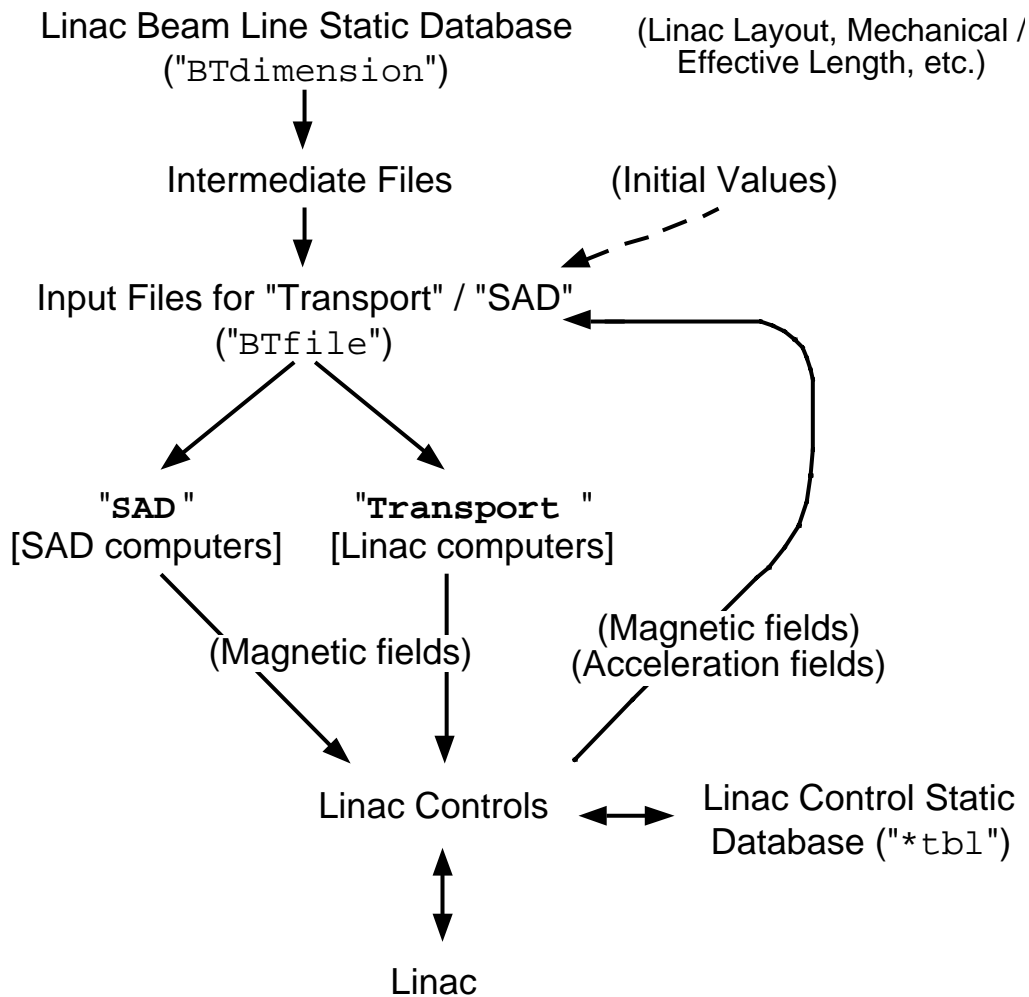


図 4-4-2-1 Simulation 計算における情報の流れ。Beam Line の情報を BTdimension という Static Database から、また、加速器の運転情報を制御系から、それぞれ取り込み、Optrics 最適化などの計算を行なう。その結果は再び制御系を通して運転に反映することができる。

#### 入力 Data の作成

BTdatabase に計算に必要な入射器の情報が集約されたので、入力 Data をほとんど機械的に準備することが可能になった。BTdatabase は表の形態になっているので、そのような情報の取り扱いがしやすい awk という Script 言語で書いた Program を組合せて情報の抽出を行ない、btfile という入力 Data File を作った。先に述べた mgbtbl や acrttbl といった制御用の Database の抽出も同じ手法によっている。btfile は、先に述べた情報交換用の共有 Directory "transport" に格納されている。(後に、awk の計算精度が単精度 7 桁であることがわかり、多少問題があることがわかった。Perl Script 言語への変換、または C 言語への書換えを考えている。)

btfile の形式は、加速器用の Program で使われることが多く、比較的読みやすい MAD 形式にできるだけ準拠することにした。単位系としては当初 SI 単位の使用を検討していたが、TRANSPORT の制限などから kilo-gauss や centi-meter などが混在している。このため、制御系と接続するための Script や SAD Script では変換が必要になっており、この部分は改良が必要と思われる。現在新しい Version の TRANSPORT での評価を行なっている。

BTdatabase の中で使用した項目は、機器の Type、名前、機械長、加速管の rf 波長、電磁石の有効長、電磁石の Bore

半径または Gap、及び、電源の共有情報である。これらの情報を使って、有効長と機械長の変換計算、電源を共有している電磁石の処理などを行なっている。電磁石磁場強度と加速電界強度を変数としてあり、まずそれらの値が Zero とした File が作られ、それに計算に必要な値を重ねるようになっている。

運転している入射器から初期値として情報を取り込む場合には、先に述べたような制御系の機能を通して、電磁石の磁束密度（勾配）と加速勾配を与える。Micro 波の位相は最大加速の位置にあると仮定しており、そうでない場合には、btfile にその情報を加え TRANSPORT にその計算をさせることが可能であるが、現在のところ、制御系との接続においてはまだ考慮されていない。別に、Energy Analyzer を用いた最大加速位相を求める System を作ることにしているので、そちらを急いで作成し、情報交換する必要があると思われる。

#### 計算結果の設定

TRANSPORT の計算結果の磁場情報を入射器の運転 Parameter に設定する場合には、出力 File を Script Program に処理させて、さらに制御系の mg Server を通して、磁場設定を行なう。処理には現在のところ awk や sed といった単純機能の Program を組み合わせて Script として用いている。

SAD の場合には SAD Script の中から入射器の Firewall を通して SAD 用の磁場設定の Script Program を起動する。この Script は rsh (Remote Shell Execution) を重ねて作ったもので、lsg の member だけが使える。暫定的なものではあるが次のような機能がある。

#### Magnet の数が複数の場合

/nfs/almond/mnt/users2/control/data/transport/from\_sad に適当な file

名、例えば filefile で data を用意する。内容は

```
Q-magnet-name Field-in-Tesla/m
```

...

例えば、

```
QF_12_34 1.5
```

```
GQD2345 -2.5
```

```
QF3456 3.5
```

(符号は無視される。必要なら名前は DA\_SU\_ZG の標準名に変換される。)

その後

```
rsh almond putqmdata_from_sad_a filefile
```

という shell command を呼ぶ。

#### Magnet の数が一つの場合

```
rsh almond putqmdata_from_sad_b magnet_name field_value
```

例えば、

```
rsh almond putqmdata_from_sad_b QFABCD 1.5
```

という shell command を呼ぶ。

(符号は無視される。必要なら名前は DA\_SU\_ZG の標準名に変換される。)

#### 一般的な mg command を実行する場合

```
rsh almond mg_from_sad_b {mg command arguments}
```

例えば

```
rsh almond mg_from_sad_b bget QF_32_4
```

```
rsh almond mg_from_sad_b sts SX_CT_G5
```

(符号、名前の変換は行わない。)

秋の運転では、KEKB Ring 制御用の Network が入射器と接続されるので、そこを經由してより直接的に制御情報を交換できるようになる。また、実用時期は確定してはいないが、EPICS System の基本 Protocol である Channel Access を入射器が Service できるように CA Server と呼ばれる Software も準備している。

EPICS System は KEBB Ring 制御で採用されており、入射器に CA Server が用意されれば、Ring との間での Software の共有・交換がやりやすくなるものと期待される。既に SAD から Channel Access が使用できるようになっているので、磁場値などの設定もより容易になる。また、軌道補正などを行なうための情報の交換も CA Server を通して行ないたいと考えている。

#### TRANSPORT の計算

入力 File として用意された "btfile" に必要な TRANSPORT 計算制御のための Command を追加して、計算を行なうが、この部分はまだ人手に頼っている。SAD と異なり TRANSPORT については計算の制御言語が単純な機能しか持たないので、入射器全体にわたって最適化を行なう場合の計算の繰り返しの指定などが、多少困難である。どの区間をどのような Phase Advance で Transport するか、どのような制限を設けるか、などの指定をするわけであるが、それを単純な Rule で指定できるような Script を用意しようとはしているが、まだ完成していない。

また、多少なりとも計算を行ないやすくするための GUI を Tcl/Tk と呼ばれる言語で、試作している。まだ、機能は不十分で、入出力 Data File の変換や、計算自体、Graphics 表示など、それぞれ別々に起動しているが、手順が確立してきたらできるだけ自動化し、必要に応じて GUI を拡張していきたいと考えている。

このようなことが確立してきたら、起動補正や運転状態の診断などの Application を開発する基盤ができてくるものと期待している。

#### 4-4-3 SAD\*の利用

SAD を利用するに当りまず、ライナック・ビームラインを記述する SAD 用計算台本が必要となる。このため、ワークステーション上の BT データベース (Excel のデータをタブ区切りテキストとしてセーブしたもの、あるいは TRANSPORT 入力形式の BTfile) から、SAD 用台本を自動作成する変換プログラムを用意した。このプログラム自体、SADScript インタープリタ言語で書かれており、SAD/FFS システム上で実行される。変換プログラムのチェックとして、同一の BTfile を読み込んだ場合、TRANSPORT と SAD でオプティクス計算結果が一致することを確認した。

SAD を利用することによって、オプティクス計算、各種データ解析を総合的に行うことが可能になる。今回の運転に関して、オプティクス計算のようにビーム力学に直結したものだけでなく、4-7-4 で述べるエミッタンス測定に関連するデータ解析も全て SAD によって (SAD に備わっているグラフィック関数、フィッティング関数などを用いて) 行われた。さらに、ワイヤスキャナのデータ解析パネルも SAD/Tkinter によって書かれ、X サーヴァ上のアプリケーションとして実用化された。

また SAD から間接的にハードウェアにアクセスすることも可能で、例えば、磁石の設定値を予めワークステーション上のファイルに書き込んでおき、SAD/FFS で

```
System["rsh almond putqmdata_from_sad_a ファイル名"]
```

とすると 4 極磁石の設定値を変更できる。ビームエネルギーを変更した際に、実際にこの方法で全 4 極磁石をエネルギーでスケールした値に設定し直すことができた。

\*SAD の概要については <http://www-acc-theory.kek.jp/SAD/sad.html> を参照。

#### 4-5 ビーム調整

4-5-1 電子銃（大沢）

4-5-2 バンチャ系（大沢）

4-5-3 長パルスビームによるタイミング合わせ及びビーム粗調整（大沢）

4-5-4 短パルスビームのタイミング合わせ（大沢）

#### 4-5-5 輸送パラメータの設定と初期調整

今回の仮入射部からのビーム調整にあたっては、BT パラメータの初期設定値をなるべく妥当なものとするための努力が行われた。

##### （１）ビームラインレイアウト詳細データの作成

榎本、小川両氏を中心としてビームラインの各コンポーネント（加速管、電磁石、モニター類など）の寸法及び配置の精密なデータベースが作成された。このデータベースには電磁石の磁場有効長や励磁特性の情報も収められている。

##### （２）各ユニットでのエネルギーゲインの推定値の算出

山口氏による各加速管のシャントインピーダンスなどのパラメータのデータ（クライストロンから加速管までの導波管での減衰についても含まれている）及び道園氏による各クライストロンの出力パワーのデータを基に各ユニットでのエネルギーゲインが算出された。

これらの情報を基に、(3-3-1) 節に記述されているように、古川氏により TRANSPORT code で使用可能な形式のインプットデータファイルが作成された。これを使用してビームオプティクス計算を行った。

#### 1. ビーム初期 Twiss パラメータ

TRANSPORT code では low beta 領域のビームバンチング部については取り扱えないので、バンチャー管出口の部分をスタート点としてそれより下流の部分について計算を行う。これに用いるビーム初期 Twiss パラメータについては、測定値およびシミュレーションによる計算値がまだ無いため、昨年暮れに KEKB 用入射部についての測定値で代用する。ビームマトリクスで表した値は以下の通りである。

$$\text{sqrt}(s_{11}) = 2.64 \text{ mm}$$

$$\text{sqrt}(s_{22}) = 7.72 \text{ mrad}$$

$$\text{sqrt}(s_{12}) = \text{sqrt}(s_{21}) = 0$$

$$\text{gex} = 520 \cdot 10^{-6} \text{ p.mm.mrad (2-sigma spread)}$$

$$\text{sqrt}(s_{33}) = 2.64 \text{ mm}$$

$$\text{sqrt}(s_{44}) = 7.72 \text{ mrad}$$

$$\text{sqrt}(s_{34}) = \text{sqrt}(s_{43}) = 0$$

$$\text{gey} = 520 \cdot 10^{-6} \text{ p.mm.mrad (2-sigma spread)}$$

$$P_0 = 10.0 \text{ MeV/c}$$

なおこの値はシングルバンチ大電流加速の際のものであるので、今回の仮入射部よりのビームに比べてエミッタンス値がかなり過大評価されていると考えられる。また Twiss パラメータ（ビームマトリクス形状）についても、入射部の収束磁場の強さの違い、バンチング条件の違いなどによりかなり現実とは異なる可能性があるため、これらについてはオプティクスのマッチングの修正調整が必要になるとと思われる。

#### 2. 仮入射部からレギュラーセクションへのマッチング

旧 0-1 部や A-1 部では、ある程度エネルギーが上がるまで加速管 1 本ごとに QM をおいてアクセプタンスを大き

くし、しかもスクリーンモニター等も多く設置してビームをロス無く通過させる調整がしやすいように設計されているが、仮入射部からのビーム加速については、レイアウト上の制約によりバンチング部の直後からレギュラーユニットになる。少しでもアクセプタンスを大きくするためにこの C-8 ユニットの 2 本目と 3 本目の加速管の間に QM を追加したが、その代わりにスクリーンモニター、ビーム電流モニターを撤去したため、ビームの様子を見ることが出来る場所はこの次のユニット中央部 ( 11\_2 ) までない。

周期的なオブティクスは QM\_11\_4 のところから始めることにする。この第 1 セクター部はレギュラーユニット ( 1 つのユニットに QM が 1 台ずつ : QM\_18\_4 のみがトリプレットであることを除いてほかは全て同じ形状のダブレット ) であり、ベータトロン位相シフトが 90deg/unit(=9.6m) となるようなオブティクスを設定する。QM\_11\_4 の手前の BPM 電極位置をマッチング基準点とすると、ここでマッチングさせるべき Twiss パラメータの値は、

( P0 = 356.96 MeV/c )

$$\begin{aligned} \text{sqrt}(s_{11}) &= 2.023 \text{ mm} & \beta\text{-x} &= 5.500 \text{ m} \\ r_{12} = s_{12}/\text{sqrt}(s_{11}*s_{22}) &= 0.4043 & \alpha\text{-x} &= -0.4421 \\ \text{sqrt}(s_{33}) &= 2.694 \text{ mm} & \beta\text{-y} &= 9.749 \text{ m} \\ r_{34} = s_{34}/\text{sqrt}(s_{33}*s_{44}) &= 0.6468 & \alpha\text{-y} &= -0.8481 \end{aligned}$$

である。QM\_CT\_B9、QM\_C8\_2、QM\_C8\_4 の 3 台 ( defocus Q と focus Q は独立に動かせるから、全部で 6 つのパラメータが可変になる ) を用いてマッチングを取る。このあたりではエミッタンス ( の絶対値 ) がまだ大きいので、ビームサイズが大きくなる。このためビームサイズをあまり大きくしないようなオブティクスでマッチングを取る必要がある。計算上では、マッチングを取ることはそれほど難しくはないが、ビームサイズが大きくなるようにすることはできなかった。これは QM の間隔が長いためにアクセプタンスが確保できないためで、ある程度は仕方がない。またバンチング部出口での Twiss パラメータもあまり良くなく、これを調整できればまだ改善の余地があるようであった。このようにビームサイズが大きくなりすぎることによるビームロスが予想されたので、当初は C-8 ユニットの SLED をオフにして運転する予定であったが急遽 R F グループのご協力により SLED を入れて運転できるようにコンディショニングしていただいた。これにより加速電界が高くなって収束が楽になりビームロスはかなり改善されたと思われる。

### 3 . 第 2 セクター ( 陽電子収束系 ) でのビームオブティクス

2-1 ユニットには陽電子生成ターゲットとソレノイド集束系が設置されている。そしてこの下流は 2-8 ユニットまで、電子に比べてエミッタンスがほぼ一桁大きい陽電子ビームを通すために QM を密に並べた収束系になっている。しかし、電子ビームを通すにはそれほど強く収束を効かせる必要はない。また 2-2 および 2-3 ユニットについてはシングレット QM の FODO 系になっており、電源接続の関係で特定の Q のみ効かせてダブレット或いはトリプレットとして動かせるのは難しい。そこで 23\_4 部のトリプレットより上流の FODO 系の QM は全てオフにする。すると FODO の手前の QM\_21\_K5 から QM\_23\_4 まで QM の無い区間は約 2 ユニット分の長さになるが、これを 90deg 位相シフトのオブティクスでビームを通すことはアクセプタンスから考えて問題がない。そしてこれより下流も約 2 ユニット長おきにある QM のみ効かせて、ベータトロン位相シフトが 90deg/2-units(≈20m) となるようなオブティクスを設定する。

なお、第 1 セクターからのオブティクスとのマッチングは、QM\_21\_K5 の手前で

Twiss パラメータの値が、

( P0 = 1205.18 MeV/c )

$$\begin{aligned} \text{sqrt}(s_{11}) &= 2.049 \text{ mm} & \beta\text{-x} &= 19.04 \text{ m} \\ r_{12} = s_{12}/\text{sqrt}(s_{11}*s_{22}) &= 0.6660 & \alpha\text{-x} &= -0.8927 \\ \text{sqrt}(s_{33}) &= 2.049 \text{ mm} & \beta\text{-y} &= 19.04 \text{ m} \\ r_{34} = s_{34}/\text{sqrt}(s_{33}*s_{44}) &= 0.6634 & \alpha\text{-y} &= -0.8868 \end{aligned}$$

となるように、QM\_17\_4、QM\_18\_4、QM\_21\_45 の 3 台のパラメータを調整してとる。

### 4 . 第 3 セクター以降のビームオブティクス

第3セクター前半では、第2セクターに引き続き、ベータatron位相シフトが 90 度/2-units( $\approx 20\text{m}$ ) となるようなオプティクスを設定するが、QM\_36\_4 部以降では KEKB 8.0 GeV 電子ビームのオプティクスに類似させて、45 度/2-units( $\approx 20\text{m}$ ) となるようにする。これは 8-GeV ビームの場合、90 度位相シフトにするには、磁場勾配強度が足りないためである。また、磁場勾配が低いほうが QM の中心をずれてビームが通過した場合の横運動量キックが小さいのでステアリング調整がやりやすい。

ただ PF 入射のみに関係していれば、ビームエネルギーは 2.5 GeV であるから 90 度位相シフトを実現することも可能であり、実際のビーム調整においてそれに近いオプティクスに調整することでビーム透過率が良くなった。

計算値により初期設定としては 45 度位相シフトとし、QM\_36\_4 部手前で Twiss パラメータの値が、  
( $P_0 = 2695.88 \text{ MeV}/c$ )

$\text{sqrt}(s_{11}) = 1.616 \text{ mm}$              $\beta\text{-x} = 26.49 \text{ m}$   
 $r_{12} = s_{12}/\text{sqrt}(s_{11}*s_{22}) = 0.3585$              $\alpha\text{-x} = -0.3840$   
 $\text{sqrt}(s_{33}) = 1.621 \text{ mm}$              $\beta\text{-y} = 26.66 \text{ m}$   
 $r_{34} = s_{34}/\text{sqrt}(s_{33}*s_{44}) = 0.3557$              $\alpha\text{-y} = -0.3806$

となるように、QM\_32\_4, QM\_44\_4 の2台のパラメータを調整してマッチングをとる。

## 5 . "TRANSPORT" 計算値に基づく BT パラメータ設定

TRANSPORT code による計算値では、結果は QM の磁場勾配値で与えられる。これを基に、各電磁石の励磁特性を考慮して各電磁石電源の設定電流値へ換算し、それを設定させるソフトウェアが古川氏により開発された。これにより、計算値が得られるとすぐにそれを運転用 BT パラメータとして設定することができる。また、逆に設定されている BT パラメータから、"TRANSPORT" 計算用のインプットファイルを作ることもできる。これにより、現在の設定値によるオプティクスがどのようになっているかをすぐに計算することが可能になった。

今回のビーム調整でショートパルスビーム用初期値として用いたオプティクスの計算値を図#に示す。

## 6 . ビーム初期調整

まず RF 加速位相調整のためのロングパルスビーム用の BT パラメータ計算値 (SLED をオフで加速するためエネルギーゲイン値が異なる) を設定し、ビーム調整を始めた。RF パルスとビームのタイミングの調整、ビームローディングを見ての加速位相の粗調整などが行われたが、それにより BT パラメータは初期設定値のままでもある程度のビーム電流がずっと下流まで通過している。わずかに数台の QM の強さとステアリングの微調整でかなりのビーム電流値が第3セクターまで通り、ビーム誘起波による RF 加速位相調整を行うことができた。

そこでいよいよ各 SLED をオンにして入射用ショートパルスビーム用の BT パラメータ計算値を設定して、ビーム調整を始めた。するとこれまた、BT パラメータは初期設定値のままでもある程度のビーム電流が通っている。後はスクリーンモニターのビームスポットの形状及び位置が良くなるように、そしてビーム電流モニターでなるべく下流までたくさんのビーム電流が通るように QM および ST を調整したが、ごくわずかな台数を調整するだけでもかなり通過電流値が増えた。あとは、ワイヤスキャナーによるビームサイズ測定試験のためビームロスによるバックグラウンドを減らしてほしいとの要望に応じて、詳細な調整を行なった。また小磯氏によるオプティクスを大きく変更しての調整も行われ、これについては次節に詳述されるが、収束を強くすることによりビーム透過率の改善が見られた。

## 7 . まとめ

今回得られた最大の成果は、ビームラインレイアウト詳細データ、電磁石特性データ (磁場有効長、励磁特性) とエネルギーゲインの推定値を用いたオプティクス計算による BT パラメータが実際の運転に十分有効であることが示されたことである。

今後の課題を列記する。

(1) 秋からの増設部のビーム調整の際には、まずオプティクス計算の初期値となるバンチング部出口でのビームパラメータをなるべく正確に測定し、それに基づいた BT パラメータを用いるようにしたい。

(2) 各ユニットのエネルギーゲイン値を推定値でなく、エネルギーアナライザーで測定したより正確な値を使用でき

るようにしたい。

(3) 計算値によるオプティクスはビーム調整初期値としては有効であったが、調整後の実際のオプティクスについての計算値は、測定されたビームエンベロープの形状を必ずしもうまく再現するものではなかった。この不一致についての原因がどこにあるかを探る必要がある。

#### 4-5-6 オプティクスとビームサイズ

ビーム収束系の初期調整後、スクリーン・モニターで観測されるビームサイズを小さく且つ水平/垂直サイズ比 $\sim 1$ とするという方針で、収束系の手動調整を行い、2種類のオプティクスを用意した。

1. 強収束系 (btfile3.txt) - 第1のオプティクスは4極磁石設定値を強める方向に調整を行った。その結果、3セクタ初めから4セクタ終りまで(ほぼ8ユニットセル分に対応する)の位相進行は水平方向 $\sim 5$ 、垂直方向 $\sim 4$ で、セル当たり位相進行に換算すると90度以上となった。このオプティクスは過収束ぎみでバックグラウンドが多く、ワイヤスキャナ測定に不適當であった。
2. 弱収束系 (btfile4.txt) - 第2のオプティクスは第1のオプティクスを元にして、上流側は変更せず、3セクタ以降の4極磁石設定値を半分程度に弱め再調整を行った。3セクタ初めから4セクタ終りまでの位相進行は水平垂直ともに $\sim 2$ (セル当たり位相進行が $\sim 45$ 度に対応する)。この弱収束系オプティクスをワイヤスキャナ測定システムのテストに使用した。

これらのオプティクスについて、SADで計算した2ビームサイズを図3.4.7-1に示す。計算にあたって、エミッタンス、Twissパラメタの初期値は入射部での測定結果(表3.6.5-2参照)を、磁場・加速電場は設定値を読み返したものを、使用した。5セクタ前半まで、2ビームサイズは両オプティクスとも10mm以下に収まっている。

図 3.4.7-1 SAD で計算した 2 ビームサイズ

(上) 強収束系 (btfile3.txt) (下) 弱収束系 (btfile4.txt)

#### 4-5-7 ソレノイド極性の問題(大沢)

### 4-6 エネルギー測定

#### 4-6-1 エネルギー分析系

今回のエネルギー測定には2.8ユニット下流のエネルギーアナライザーを用いた。分析系のレイアウトを図#に示す。

偏向電磁石は、以前2.5 GeVアナライザーとして用いられていたものと同型器である。この磁極形状はrectangular型で、磁極長=1999.5 mm(実測値)、磁場有効長=2047.6 mm(磁場分布の台形積分より算出)、磁極幅=200mm、磁極間距離=25mm、最大磁場値=1.63 T@450A(実測値)である。アナライザーラインの偏向角は20度である。実効曲率半径は $r = L/2/\sin(\text{alp}/2) = 2047.6/2./\sin(20./2) = 5895.8$  mmであり、磁場強度とビームエネルギーの関係は $pc$  [GeV] =  $0.29979*B*r = 1.767*B$  [T]となる。励磁特性については5次式でフィットしたデータが図#にあるので、正確な値が必要な時はそれを用いる。

アナライザーの性能値として、スクリーンでの位置のDispersionの大きさを求めると(TRANSPORT codeによるpole face rotationを考慮した値として)、1台目と2台目のスクリーンのそれぞれの位置で、 $D(s1) = 1.313$  m、 $D(s2) = 2.922$  mとなる。



#### 4-6-2 エネルギー測定 (山口)

##### エネルギー利得の計算

定電界型加速管の加速電界強度,  $E$  は次式で与えられる:

$$E = \sqrt{\frac{(1 - e^{-2\tau})P_i r_0}{L}} \quad (1)$$

ここで,  $\tau$ : 加速管の減衰定数,

$P_i$ : 加速管に投入される RF 電力,

$r_0$ : 加速管の単位長さ当たりのシャント抵抗,

$L$ : 加速管の長さ=34.99 [mm]/セル×54セル=1.88946[m].

入射器の加速管は準定電界型であるから, (1)式を用いるのは厳密には正しくないが, ここでは, とりあえずこの式を用いることにする.

$\tau$  の値は, RF の充填時間,  $t_f$  の測定値(平均値)より次式を用いて算出した:

$$\tau = \frac{\omega t_f}{2Q} \quad (2)$$

$Q, r_0$  の値は, SUPERFISH(v 4.12) により計算した(表 1 参照).

$P_i$ の値は次式より計算した:

$$P_i = P_k \alpha l \quad (3)$$

ここで,  $P_k$ : クライストロンの出力電力,

$\alpha$ : 導波管(WRJ-3)での減衰,

$l$ : 導波管の長さ=14.8[m].

$P_k$  の値は, パルス電源の  $E_s$  の値と出力電力の関係を一次関数に最小自乗フィッティングした式を使って求めた.

$\alpha$  の値は, 次式より計算した:

$$(4)$$

ここで,  $R_s$ : 管壁の表皮抵抗=0.01394 [ $\Omega$ ],

$\xi$ : 自由空間の波動インピーダンス=376.73 [ $\Omega$ ],

$\lambda$ : RF の自由空間波長=104.969 [mm],

$a$ : 導波管の幅=72.1 [mm],

$b$ : 導波管の高さ=34.0 [mm].

(4)式に数値を代入すると,  $\alpha = 0.00023806$  [Np/m] = 0.0207 [dB/m]. これに導波管の長さ,  $l=14.8$ [m]をかけると,  $\alpha l = 0.30636$ dB 0.932 となる.

表 1 加速管のパラメータ

加速管 タイプ	入口			出口			平均		$t_f$ [ $\mu$ s]	$\tau$
	$2a$ [mm]	$Q$	$r_0$ [M $\Omega$ /m]	$2a$ [mm]	$Q$	$r_0$ [M $\Omega$ /m]	$Q$	$r_0$ [M $\Omega$ /m]		
A	26.950	14093	54.200	20.900	14052	61.823	14106	58.012	0.4696	0.299
B	24.650	14089	54.723	20.600	14049	62.410	14073	58.567	0.4930	0.314
C	24.350	14086	55.264	20.300	14046	63.010	14069	59.137	0.5150	0.328
D	24.050	14082	55.798	20.000	14063	63.610	14073	59.704	0.5429	0.346
E	23.750	14079	56.346	19.700	14041	64.219	14060	60.283	0.5692	0.363

#### 4-6-3 エネルギー幅の調整及び安定化（大沢）

#### 4-6-4 S L E D利得の測定（大越）

### 4-7 エミッタンス測定

#### 4-7-1 ワイヤスキャナ

KEKB は、ファクトリ・マシンであり、ルミノシティを稼ぐために、できうる限り短時間で最適条件に到達し、かつできうる限り安定に運転を続ける事が求められる。そのためには、ビーム状態を診断及び監視するためのビーム診断/モニタ・ツールが重要である。KEKB 電子陽電子入射器（入射器）及びビーム輸送路（BT）において、その様なツールの一つとして、ワイヤスキャナ（WS）の設置が予定されている。WSの特徴は、ビームを破壊せずに、ビーム形状、ビームサイズを精密に測定できる事である。このWSを入射器とBTの必要とされる場所に4台を一組として設置し、ビームのエミッタンス及び Twiss パラメータを測定する事に用いられる。この Twiss パラメータは、ビーム輸送の光学的マッチングに用いられるなど、ビーム・チューニング上重要なツールになる。設置場所は、具体的には、入射器においては、入射部、アーク部の入口/出口、5セクタ終端の総計4ヶ所（14台）、一方、BTにおいては、第1アーク手前の直線部に電子陽電子用のWSが2ヶ所（8台）設置が計画されている。WSは、それぞれ4台を一組として設置されるが、入射器の入射部は、1台のみを設置する予定である。

本年4月に、入射器/BTの合同メンバによるWSの開発グループが発足した。WS自体の開発は、過去に、入射器/BT双方において開発を行っていたが、試作機の製作という段階にとどまり、マンパワーの関係で、ビームテストには至っていなかった。今回、BTが開発した試作機を用いて、ビームテストを行った。今回の実験の主目的は、とにかく、初めてのビームテストなので、信号が見えるか、バックグラウンドレベルはどのくらいか、検出器の設置をどうすればよいか、また、システム動作のチェック等といった基本的なテストに重点をおいた。中でも、ビームバックグラウンドは、マシンやマシンの運転状態に大きく依存するので、実際のビームで試してみる意味が大きいと考えられた。

#### 実験準備と測定器の配置

WSの信号検出は、ワイヤとビームの衝突により生じる2次電子或いは光子の検出により行う。ワイヤをビーム軸に垂直な面上で、水平（又は垂直）方向に移動させながらこれらの散乱粒子の強度変化を検出することにより、水平（又は垂直）方向のビームサイズを精密に測定することができる（図1参照）。散乱粒子は、主に以下の二つの過程により発生する。

(a) Moller scattering による2次電子

(b) Bremsstrahlung による光子

ビームの前方向では(b)が、また大角度方向では(a)が、それぞれ主成分であると思われる。この事をより定量的に評価するために、現在、EGS4を用いた計算を準備している。

本実験では、図2に示すように、ビーム軸超前方に光子検出器( $g_1, g_2$ )を2台、WSすぐ後方に電子検出器( $e^-$ )を1台、ビームラインと同じ高さに設置した。この時の、検出角度及び検出立体角は、電子検出器に対し $65^\circ, 1.7 \times 10^{-3} \text{sr}$ 、光子検出器に対し $10.2^\circ, 1.1 \times 10^{-4} \text{sr}$ 、及び $13^\circ, 4.1 \times 10^{-5} \text{sr}$ である。また、各検出器は鉛ブロックで十分遮蔽し（1検出器当たり100個の鉛ブロックを使用した）WS中心を見込むように設置した。検出器設置におけるポイントは、以下の通りである。また、これらの課題は、本実験における主要目的である。

°鉛シールドは、十分か？

°光子検出器の設置角度の違いで、S/Nがどのように違うか？

°電子検出及び光子検出のどちらが、S/Nよく測定できるか？

°ビームチューニングの効果は、どれくらい有効か？

ここで、S（シグナル強度）は、ある程度計算に乗るが、N（バックグラウンド）は、実際にやってみて判断するしかない。

WS本体は、入射器の第4セクタ終端部に設置した。実験で用いたビーム条件を以下に示す。

ビームエネルギー：2.7GeV

ビーム電流：0.2nC/pulse

ビームパルス幅：1ns (FWHM)

繰り返し数：5 Hz

ビーム輸送モード：PF入射モード

## 測定システム

図3にWSの内部構造を示す。図4-(a)にWS本体の写真を、また、図4-(b)に光子検出器の設置様子を示す。ワイヤは、図3に示すようにワイヤホルダに一筆巻に巻かれていて、それぞれ、V-ワイヤ(垂直方向スキャン)、U-ワイヤ(45度方向スキャン)、H-ワイヤ(水平方向スキャン)と呼び、この3つのワイヤにより3方向にビーム断面を横切る。ワイヤホルダは、パルスモータからの回転運動をボールネジを通して、直線導入器(リニアガイド)により直線運動に変換し、斜め45度の方向(U-ワイヤに垂直な方向)に駆動する。試作機では、2台のリニアガイドがホルダ両端部に接続しているので、ワイヤ駆動に伴うブレは、非常に小さくなる設計になっている(10 mm程度と考えている)。図5に、検出器測定系及びワイヤ駆動系のシステムブロック図を示す。512Hzのパルス列発生器(PTG)により発生したパルス列は、チュ-ナ-コントローラを経由し、モータドライバを駆動しパルスモータを回転させる。このチュ-ナ-コントローラは、定常運転時はバイパスされるが、テスト運転時には、マニュアルで、パルス列を発生し、駆動試験等に用いられる。一方、ワイヤ駆動位置は、マグネスケールにより検出され、そのデータは、RS-232C(光ファイバ)経由で、VMEのCPUに取り込まれる。パルスモータの最小駆動距離及びマグネスケールの最小読取精度は、両者共に1  $\mu$ mである。検出器系は、CAMAC/ADC(LeCroy2249W)により、フォトマル出力信号の電荷積分を測定する。また、ビーム強度変動を補正するために、短パルス用電流モニタ(壁電流モニタ)の信号も同時にADCにより測定する。ADCへのゲート信号は、ビームトリガ信号を用いてNIMのゲート信号発生器により供給した。この測定系によりビーム強度のパルス毎でのモニタが可能となる。

## ビームテスト

### ビームチューニング

本格的なビームテストに入る前に充分ビームチューニングを行った。ここでいうビ-ムチューニングとは、WS上流でのビ-ムロスが、バックグラウンドの原因になるので、このビ-ムロスをできる限り小さくする、つまりビ-ム輸送効率を高める事を意味する。予備的な信号計測で、ビームチューニングによるS/Nの変化は劇的によくなることを確かめた。WSでよいデータを取るためには、丹念にビームチューニングを行うことは、非常に重要であり、もちろんこの事は、最適な運転条件を探すという意味でも必要であることは言うまでもない。本実験では、よって、ビームチューニングとビーム計測を平行して行うことにし、ビームチューニングの効果を調べた。

### フォトマルの設置方法

まず、最適なフォトマル(PM)の設置方法を定めるために、いくつかの種類のパルスマルを用意した。最適な設置方法とは、S/Nが最大にするような置き方である。すなわち、ビームバックグラウンドに強い設置の仕方と言える。図6にその設置の仕方を模式的に示した。ポイントは、フォトマルの縦置き及びライトガイド付きのフォトマルを使用して、設置高さをビームラインから極力離して配置しビームバックグラウンドの影響がどうなるかを調査することにある。

### HVスキャン

次に、PM用高電圧(HV)を最適値に調整した。図7は、1例として、セットアップ[1-a]における電子検出器に対するHV曲線を示す。測定は、高電圧を変化させながら、電子検出器又は光子検出器からの出力パルス波高値をオシロスコープにより計測し行った。図中のグラフは、ワイヤがビームに当たっている(ワイヤオン)状態から、ワイヤが引込んでいる状態(ワイヤオフ)のパルス波高値を差引いた値(すなわち、ビームバックグラウンドを差引いたもの)とそのS/NをそれぞれHVの関数としてプロットしたものである。HVの最適値は、S/Nを最大にするという条件から決めた。すなわち、HV値が大きくなりすぎると、PMの線形応答領域から外れるためにシグナル(S)が小さくなるために、S/Nが小さくなり、また逆に、HV値が小さくなりすぎると、ノイズ(N)がリニアに小さくならない(あ

るいは一定値にとどまる)のために、やはり $S/N$ が小さくなることにより、 $S/N$ の最大値が、決まると考えられる。HV値は、電子検出器に対し $HV = -800V$ 、 $g1$  検出器に対し $HV = -800V$ 、 $g2$  検出器に対し $HV = -950V$ をセットした。また、このHV調整は、検出器セットアップを変更したり、ビーム調整又は条件を変更した時には、その都度行き最適値をセットした。

## テスト結果

### PM設置方法の最適化

次に、PMセットアップの最適化を行った結果について述べる。前章で述べたように、検出器のセットアップを図6に示す場合について、 $S/N$ の違いを調べた。図6に得られた $S/N$ を示す。ただし、計測した $S/N$ は3本のワイヤによる測定値の平均値とした。この結果より、電子検出の方([1-a]又は[1-b])が、光子検出に比べビームバックグラウンドに対して有利であることがわかる(定量的には、 $S/N$ は約10倍違う)。これは、光子検出器は、ビームライン超前方に設置しているために、上流で発生したビームバックグラウンドを同時に検出しやすいためであると考えられる。一方電子検出器は、ビームラインに対し大角度で設置しているので、鉛シールドの効果により充分遮蔽されていると考えられる。また、大角度に検出器を置いた場合、直接見るビームパイプの長さが、(小角度の場合に比べて)短くなることもバックグラウンド抑制に有利に働く。一方、大角度の場合、検出粒子の強度が小さくなるが、今回のPM設置方法では、検出立体角が、(小角度の場合に比べて)かなり大きく、このことが $S$ の低下(による $S/N$ の低下)を抑えている。電子検出器を見ると縦置き横置きに対し、 $S/N$ にはそれほど違いはない。設置方法[1-3]は、鉛シールドを少し薄くした場合(ビーム上流側の側面のブロックを1層取り省いた)で、やはり、この結果からシールドは充分必要であることがわかった。

### ビームサイズ測定

次にビームサイズの精密測定結果を述べるが、その前に、ビームサイズ測定におけるWS駆動系の設定条件を以下に示しておく。

- (a) ビームサイズに対し充分な測定点数が得られるくらいワイヤのステップ(駆動)長を短くすること(0.7 mm/step, 測定点数 135 点),
- (b) ワイヤの停止時/駆動開始時にワイヤの振動を極力押さえるために測定開始までに若干の待ち時間(20 ms)を考慮したこと,
- (c) 1つのデータ点を10回平均により測定を行うこと,
- (d) 3本のワイヤが完全にビーム断面を横切ること(全駆動距離 85 mm)

以上の条件及び計測時間をなるべく短くするという兼ね合いのもとで、1回の計測時間は約10分となった。図8-(a), (b), (c)に、セットアップ e-[1-a],  $g1$ [1-a],  $g2$ [1-c]における測定結果をそれぞれ示す。電子検出及び光子検出に対し、それぞれ、きれいな3つのピークが見えているのがわかる。この時のビームサイズ(1)は、電子検出器によると垂直方向に対し、0.79 mm、水平方向に対し、1.2 mmであった。この値は、WSの5m前後に設置されているスクリーンモニターによる観測とほぼ一致していることを確かめた。なお、この計測は充分なビーム輸送系の調整があって初めて観測に成功した。

### $S/N$ とバックグラウンド

充分なビームチューニングの後( $S/N$ が良くなった後)、 $S/N$ に対する種々の測定量を定量的に議論するために、WSの39.2 m上流に位置する四重極電磁石(QF4-44)の強さを標準設定値に対して最大 $\pm 15\%$ 変化させ(これは、疑似的にビームバックグラウンドを大きくすることに相当する)、ビームバックグラウンド、 $S/N$ 比、ビームサイズ及びその測定精度の変化を調べた。また、このデータは、そのまま、エミッタンス計測のデータとして使用し解析を行った。図9は、バックグラウンドレベルに対して、検出器の $S/N$ がどう変化するかを調べたもので、このグラフから、 $S/N$ は、バックグラウンドレベルに対して、指数関数的に増加することがわかる。また、電子検出器の $S/N$ は、最大400程度に達するのに対し、光子検出系の方は、双方ともに、電子検出器に比べて低い(最大100程度)。図10は、電子

検出に対する光子検出の  $S/N$  の相関をプロットしたもので、明らかに、電子検出の方が、 $S/N$  がよいことがわかる（最大で、1 ケタ違う）。バックグラウンドの主な原因は、上流部でのビームロスに伴い発生した  $g$  線及び 2 次電子線が、ビームラインにほぼ平行に走り、下流部の検出器にまで到達してしまうのが原因と考えられる（5.1 参照）。また、バックグラウンドを極力避けるために、光子検出器の方は、設置角度を変え  $g g 1$ 、 $g g 2$  の 2 台のセットアップを行ったが、双方ともにバックグラウンドは余り変わらず、本物の信号の方が小さくなってしまった。また、 $g 2$  セットアップは、設置角度が大きすぎることがわかった。次に、図 1 1 に電子検出器と光子検出器により測定したビームサイズの相関を調べた。図中直線は、双方の検出器において、ビームサイズが一致する線である。本来なら、この直線上に測定誤差の範囲内で分布するはずであるが、光子検出器の方が、やや太って見える。データ点数が少ないので、何とも結論できないが、可能性として WS 本体のビーム下流側面のチェンバ（厚さ：SUS 1 cm）に、散乱光子が当たって、電磁シャワーを起し見掛け上ビームサイズが大きくしているのではないかと考えている。また、電子検出器の方は、WS 本体すぐ近くに設置したため、取出窓から取り出される散乱電子に対するアパーチャが取出窓の口径或いは鉛ブロック遮蔽入口の口径により制限されているのではないかと指摘されたが、後者に関しては、実験後の測定器配置の再調査により可能性を排除した。この問題は、EGS による詳細なシミュレーションを行って定量的に評価すべきと考えている。

### 精度

次に、ビームサイズ測定の精度であるが、図 1 2 に示すように、 $S/N$  に対するビームサイズの測定精度をプロットすると都合がよい。ここで、測定精度とは、ビームサイズ（1 s）の統計誤差のビームサイズに対する比（ $ds/s(\%)$ ）である。図から、明らかなように、 $S/N$  が大きいほど、精度よく計測できることがわかる。本実験の達成精度は、データ点を外装することにより約 3 % である。また、 $S/N$  値が 100 近い所で、その精度は頭打ちになっているが、これは、統計誤差に起因するもの、すなわち、WS の駆動ステップを小さくするかデータ取得回数を増やせば改善されると考えている。また、KEKB 入射器の本番の運転では、50 Hz の繰り返しで運転されるので本実験に比べ 10 倍の統計が増分するので、本実験で得た達成精度は、充分改善すると考えている。

### エミッタンス計測

前節で議論したように、WS 上流の四重極電磁石の強さを変えながら、ビームサイズの変化を計測し、パラボラ関数フィッティングによりエミッタンスを導出した。水平（x）方向、垂直（y）方向に対するエミッタンス曲線を図 1 3 - (a)、(b) にそれぞれ示す。測定結果は、それぞれ、 $g_{ex}=110 \text{ pmm} \cdot \text{mrad}$ 、 $g_{ey}=82 \text{ pmm} \cdot \text{mrad}$  で、この結果は、5 m 下流に位置するスクリーンモニタを用いた計測結果と測定誤差の範囲内でほぼ一致した。スクリーンモニタを用いた計測システム及び測定結果については、他章で詳しく述べられる。

### 電子測定系電子取出窓について

本実験では、散乱電子の取出時の減衰を極力小さくするために、取出窓として 76mm 厚のカプトンシートを用いたが、これを実機に採用するのは、真空漏及び耐久性を考えると好ましくない。実機では、金属箔を使用すべきと考えている。よって、金属箔を用いた時の散乱電子の減衰量を調べることにした。テストでは、カプトン窓の直前に SUS (200mm 厚) の窓を置いて信号強度の減衰を調べた。信号強度は、SUS の窓を置くことにより約 1/3 になった。この結果により実機における取出窓は、SUS100mm 厚程度のもを用いれば問題なく使えると考えている。また、SUS100mm 厚は、真空大気圧間の圧力差を考慮し十分な厚さである。

### ビームエネルギーを半減させた時のビームテスト

最後に、3 セクタ後半のクライストロンをオフすることによりビームエネルギーをほぼ半減し（1.5 GeV に設定、これは、入射器アーク部のビームエネルギーに対応する）検出量が十分かどうかを測定した。結果は、信号強度についてはほぼ同程度の強度を得たので、入射器アーク部に設置しても、充分使用できると考えられる。

### 結論

° WS 実験において丹念なビームチューニングは、重要かつ必須の作業であることがわかった。

- 試作機によるビームテストでは、電子検出器の方が光子検出器に比べ S / N が約 1 桁大きく ( S / N の最大値 ~ 4 0 0 , なおこの値は、ビームチューニングに大きく依存する ) 有効であることがわかった。
- 鉛シールド厚は、標準ブロック ( 1 0 \* 2 0 \* 5 cm<sup>3</sup> ) を用いると少なくとも 1 0 cm 厚必要であることがわかった。
- 検出器としてのフォトマルの置き方は、ビームラインと同じ高さにセットし、縦置き又は横置きの場合を比べると、S / N の観点からはどちらも同程度であった。また、光子検出器に対しても、フォトマルの置き方に対する S / N の変化は同程度であった。
- 電子検出器により測定したビームサイズは、光子検出器によるサイズを比べると後者の方が、やや大きく ( 1 0 % 程度 ) 測定された。この問題は、現在調査中である。
- ビームサイズの測定精度は、本実験において約 3 % を達成した。この値は、ワイヤ駆動のステップ長を小さく、及びビーム繰り返しを上げることにより 1 % は実現できると考えている。
- 電子取出用真空窓 ( 実験ではカプトンを用いた ) は、SUS200mm 厚の真空窓を用いても問題無いことがわかった。この時の信号強度は約 1 / 3 になった。
- ビームエネルギーを 2.7 GeV から 1.5 GeV にほぼ半減して検出をおこなったが、信号は、ほぼ同程度の強度が得られた。この結果から、入射器アーク部 ( ビームエネルギー 1.5 GeV ) での使用は、可能と考えている。
- WS の 39.2 m 上流に位置する四重極電磁石 ( Q F 4 - 4 4 ) の強度を変化させて、エミッタンスを計測した。計測結果は、水平垂直方向それぞれに対し、 $g_{ex}=110 \text{ pmm} \cdot \text{mrad}$ ,  $g_{ey}=82 \text{ pmm} \cdot \text{mrad}$  であった。この結果は、スクリーンによる計測結果と誤差の範囲内 ( 2 0 % 程度 ) で一致することを確かめた。

#### 今後の開発予定 ( 本年度 )

- 実機タイプによる試作機の製作
  - 片持ちリニアガイド
  - ワイヤ厚を 100 mm に変更する。
  - 電子取出窓を SUS100 mm に変更する。
  - モータドライバコントローラの変更により高速駆動化を計る ( 目標 1 分 / スキャン )
  - ワイヤ位置読取機構は、耐放射線を考慮し巻き線タイプのロータリエンコーダを用いる。
- 実機タイプによる試作機のワイヤ駆動に伴う横 / 縦ブレの精密測定を行う。
- EGS 4 コードを用いた散乱粒子の実際の測定系を考慮した検出効率の定量的評価を行う。
- エミッタンス測定の自動化 ( ソフトウエア開発 )

#### 4-7-2 スクリーン測定系

スクリーンによるエミッタンス測定において、通常のビデオカメラを使用するとビームにより蛍光板が発光する時間に対してカメラのビデオシャッターがさまざまなタイミングで撮影されてしまうため、発光中と光が減衰した時とで測定されるスポットサイズが変化してしまい測定値の大きな誤差となる。これを防ぐため、ビームトリガーに同期してシャッターが切れるランダムシャッターカメラ ( 竹中システム機器 TM720 ) を用いた。

また通常のカメらは明るいところでも暗いところでもよく見えるように、ゲインが自動調整になっているがこれでは光量の絶対強度の比較ができなくなり、またスポットサイズの見え方も変化する危険があるので、このカメラはゲインが一定で光量に対して出力がリニアに変化するような特性 (  $\gamma = 1$  ) にしてある。このため、光量が強すぎると出力が飽和してしまい半値幅の算出に誤差を生む。そこでまずビデオ出力をオシロスコープで測定しながら、ビームスポットがもっとも小さくなり明るくように QM を設定して、さらにビームとシャッターのタイミングを調整し出力が最大になるようにした上で、スポット中心部でも飽和しないようなシャッター開放時間 ( 1 msec 程度 ) を設定する。

なお今回の測定においてはビデオ信号をイメージ解析システムで処理することにより、スポットサイズを求めた。このシステムの詳細については古川氏による記述を参照されたい。

#### 4-7-3 画像処理システム

入射器では以前 Personal Computer を利用した、画像処理 System があったが、制御系との接続の問題などで、有効活用するにはいたらなかった。現在の処理 System は、画像を Digitize する部分と、それを処理して表示する GUI の部分に分かれている。それらは TCP/IP Network で結ばれており、制御系とは直接接続が可能であるとともに、将来それぞれの Hardware を交換可能なように考慮している。

現在、画像 Digitizer は 入射器制御用の VME の予備を利用して構築されている。画像は最も単純な Frame Grabber Board で取り込まれ、OS9 を Operating System とした Motorola 68040 CPU で、情報を UDP Packet として、GUI 側に送り出している（図 4-7-3-1）。現在はこの CPU が他の計算機などに比べ速くないので、律速段階になっている。将来はこの部分を交換することによって、速度の向上をはかる可能性がある。

GUI 側は Unix 計算機上に X-Window の Application として作られており、X11/Xt を使用して Operator の指示を受けながら、画像に対して処理を行なうことができる。現在は、処理範囲の指定、画像の大きさの校正、Background Level の設定と引き算、縦横方向への積分、移動平均処理、Beam Size の半値幅の算出などが行なえる。しかし、運転に使用するためには機能が不足しており、まだ Software にも問題が残っているので、増強が検討されている。

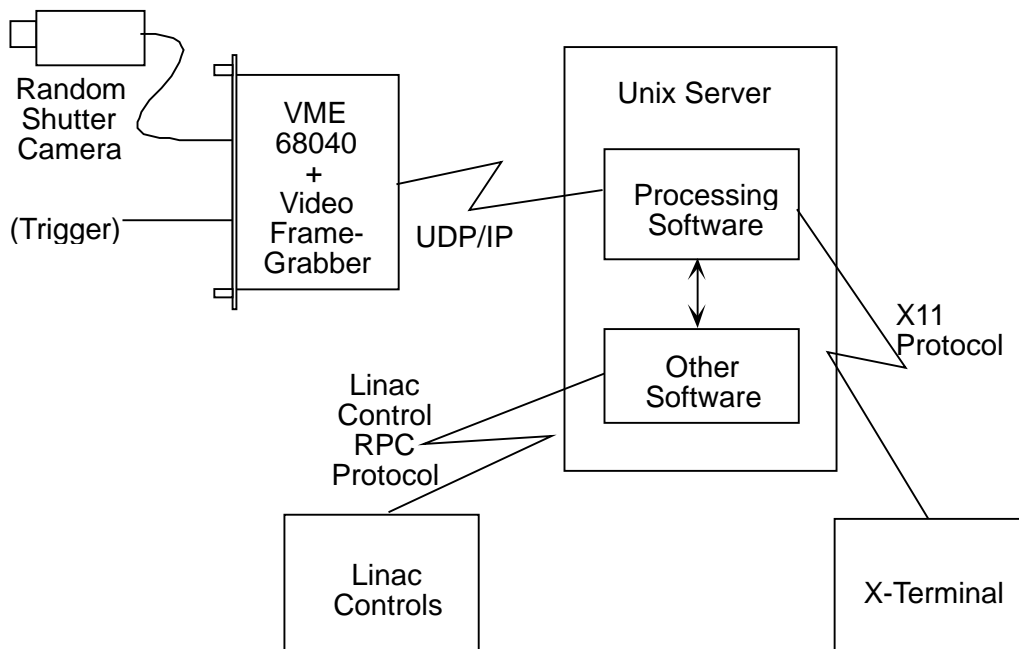


図 4-7-3-1 現在の画像処理 System の構成。Camera から得られた画像信号が VME の Frame Grabber で Digitize され、処理 Software に送られる。X-Window 上で Operator の指示にしたがって処理が行なわれる。

#### 4-7-4 エミッタンス測定解析結果

##### 1) 原理

1 台のビームサイズ・モニタでエミッタンスを測定するには、ビームライン上流の適切な 4 極磁石 1 台の設定値を変えて、それにとともなうビームサイズの変化をモニタで測ればよい。4 極磁石を薄レンズ近似で考えると、モニタ位置でのビームサイズ 2 乗  $\times 2$  は、エミッタンス、4 極磁石入口における Twiss パラメタ、4 極磁石出口からモニタまでの転送行列  $m$ 、4 極磁石の有効積分磁場勾配  $k_{1eff}$  によって次式のように表わせる。

$$\sigma_x^2 = \varepsilon \left( \beta (m_{11} - m_{12} k_{1eff})^2 - 2\alpha (m_{11} - m_{12} k_{1eff}) m_{12} + m_{12}^2 \frac{1 + \alpha^2}{\beta} \right) \equiv a(k_{1eff} + b)^2 + c$$

ここで、 $k_{1eff}$  は 4 極磁石有効長  $L_Q$  の 1 次までとって、  
とする。(  $k_1$  は通常の積分磁場勾配。)測定されたビームサイズ 2 乗を  $k_{1eff}$  の 2 次多項式としてフィットし、係数{a,b,c} を求めれば、以下の関係式からエミッタンス と Twiss パラメタ , が得られる。

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a c}}{k_{1eff}^2} \beta k_1 \sqrt{\frac{a k_1^2}{c}} L_Q / 6 \sqrt{\frac{a}{c}} \left( b + \frac{m_{11}}{m_{12}} \right)$$

精度の良い測定結果を得るには、測定範囲にビームサイズの極小点が含まれるように 4 極磁石の設定値を振る必要がある。

## 2) 測定条件

4 セクタ終端 ~ 5 セクタ先頭 (ビームエネルギー 2.70 GeV) と C セクタ終端 ~ 1 セクタ先頭 (ビームエネルギー 0.18 GeV ) の 2 カ所で合計 6 種類の測定 (A)~(F) を行った。測定結果のまとめを表 3.6.5-1, -2 に、使用した 4 極磁石とモニタ (ワイヤスキャナ WSCAN、スクリーン SC112, SC512 ) の配置を図 3.6.5-1 に示す。図中のビームサイズは測定結果から計算した一例を表わしている。4 セクタにおける測定は、ワイヤスキャナとスクリーンの両方で行なったが、C セクタではスクリーンのみを使用した。

測定時のオプティクスは btfile4 (弱収束系) で、測定に使用する 4 極磁石 1 台のみ設定値を変化させ、他は標準設定値に固定して測定を行った。但し、C) の場合のみ、QD484 をオフにし ( QF484 からモニタまでが単なるドリフト空間となるように )、QF484 を標準設定値の 1/2 のあたりで変化させて測定した。

## 3) 解析結果

データ解析には QuadEmit1D ( coded by K.Oide with SADScript) 及びその改良版を使用し、最小 2 乗法によりエミッタンス等を求めた。解析結果 ( 図 3.6.5-2A ~ -2F) を測定時間順に表 3.6.5-1, -2 にまとめてある。ワイヤスキャナによる測定値としては、電子シグナルから得られた結果のみを用い、生データから非対称ガウシアンを仮定してビームサイズを求めた際のフィッティング・エラーを測定誤差として与えた。一方、スクリーンによる測定値に関しては、誤差についてははっきりとした指標がないので、測定誤差が一定として解析を行い、自由度当たりの  $\chi^2$  が 1 となるように測定誤差を見積もった。誤差の与え方を変えれば ( 例えば、測定誤差の測定値に対する割合が一定とすると )、結果は 10 ~ 20% 変化する。結果について全般的傾向をまとめると、

- ・規格化エミッタンスは ~ 10<sup>-4</sup> m で、小電流時のエミッタンスとしては妥当な値と思われる。なお、測定 C) は異常値を与えているが、これについては今だ原因不明。

- ・垂直エミッタンスが水平エミッタンスよりも小さい。

- ・4 セクタにおける規格化エミッタンスは、C セクタの 1.5 ~ 2 倍。

また、4 セクタにおけるワイヤスキャナとスクリーンモニタによる測定の間で測定結果に整合性はあるが、現状ではワイヤスキャナによる測定の方が、1) 1 点の測定時間が長く (これは、繰り返しが上がれば大幅に改善される)、2) ビームの変動に敏感で 4 極磁石の変動範囲が狭い、ため測定範囲及び測定点数が限られているので、今後の改良が望まれる。一方、スクリーンモニタに関しても、データの飛びや極小値近傍での頭打傾向などパラボラからの系統的ずれが見られることがあるので、画像解析システムを再検討し、併せて測定誤差の評価を行う必要がある。

表 3.6.5-1 ビームエネルギー 2.70 GeV。Twiss パラメタは全て QF444 入り口での値に換算した。 QF444 を

用いた測定 A), B) について、ワイヤスキャナとスクリーンの結果は、垂直方向 Twiss パラメタ以外、1.5

以内で一致している。 QF484 とスクリーンを用いた測定 C) のみ、エミッタンス値が数倍大きい。上で述べ



た測定条件の違いには注意を要するが、今のところ原因不明。(続けて行われたワイヤスキャナによる測定 D)では、エミッタンス値は小さくなり A),B)に近づいている。)

date	x (10-4 m)	x	x (m)	y (10-4 m)	y	y (m)	goodness/ <sup>2</sup> H(上),V(下)	quad monitor
A) 7/8 23:00~23:30	0.907 ±0.133	-9.65 ±2.17	54.74 ±11.36	0.600 ±0.029	4.99 ±0.39	26.77 ±2.15	.466/31.0 .466/31.0	QF444 SC512
B) 7/9 14:00~18:00	1.226 ±0.106	-7.19 ±0.87	40.29 ±3.96	0.879 ±0.199	9.66 ±0.85	53.26 ±5.36	.108/9.0 .372/4.3	QF444 WSCAN
C) 7/9 17:30~22:00	4.169 ±0.086	-22.27 ±0.45	105.11 ±2.06	2.143 ±0.911	10.30 ±4.30	53.10 ±21.08	.462/25.0 .462/25.0	QF484 SC512
D) 7/9 22:00~00:40	1.264 ±0.515	-15.72 ±5.89	80.85 ±31.50	1.444 ±0.068	13.55 ±0.82	67.69 ±4.04	.396/1.9 1.4e-4/22.8	QF464 WSCAN

表 3.6.5-2 ビームエネルギー 0.18 GeV。Twiss パラメタは全て QDC84 入り口での値に換算した。E),F)はの結果は 1.5 以内で一致している。垂直エミッタンスが小さく、垂直 / 水平エミッタンス比 ~ 1/2。

date	x (10-4 m)	x	x (m)	y (10-4 m)	y	y (m)	goodness/ <sup>2</sup> H(上),V(下)	quad monitor
E) 7/11 ~16:00	0.607 ±0.042	-1.55 ±0.15	1.51 ±0.13	0.267 ±0.008	-1.40 ±0.07	3.36 ±0.18	.463/26.0 .463/26.0	QFC84 SC112
F) 7/11 16:00~	0.565 ±0.012	-1.34 ±0.06	1.46 ±0.06	0.245 ±0.009	-1.62 ±0.10	2.98 ±0.20	.466/30.0 .460/22.0	QDC84 SC112

図 3.6.5-1 エミッタンス測定に使用した四極磁石、モニタ配置。(上)WSCAN(ワイヤスキャナ), SC512 近傍 (下)SC112 近傍。

## 5. まとめ

### 5-1 ビーム試験の総括(生出)

今回のリナックのコミッショニングは多くの人々の協力で幸先のよいスタートを切ることができたと思います。技術的な面では、大部分の加速管で SLED を用いて、今回の到達目標である PF 入射条件を満たすビームを安定に達成したこと、ワイヤ・スキャナによるビーム診断に成功したこと、加速器のモデルと現実の統合へ一歩を進めたことなど、いくつかの達成があったと思います。これはコミッショニングチームのメンバーの方々のおかげで意欲的な努力の結果でもあり、同時に、ハードウェア・グループの方々がかつて整備されてきた機器の完成度の高さを表わすものであると思います。

今回はまた、これまでリング・リナックそれぞれに属していた方々がさまざまな面で協力することができたのではないかと思います。既にリングの人々の何人かは自分でリナックのビームの調整をできるようになりつつあります。これは、ひとえにリナックの方々の適切な指導と多少の過誤をもゆるす寛容さに支えられた結果であると思います。

また、今回は毎朝 8 時 45 分から短いコミッショニングミーティングを持つことができ、だれもが前日の到達点と、当日の課題をある程度認識でき、問題に素早く対処できたのは素晴らしいことであると思います。私は KEKB 全体のコミ

ッショニングに向けてもこのようなスタイルを強化すべきであると信じております。

## 5.2 今後のコミッショニング予定と課題

KEKB 入射器の試運転は、(1)1997 年 6 月の KEKB 入射器電子銃試験及び既設部ビーム加速試験、(2)1997 年 10~12 月の増設部 A~B セクタビーム加速試験、(3)1998 年 2~3 月の増設部 A~C セクタビーム加速試験、(4)運転の 4 ステップに分けて行われる。

今回の KEKB 入射器電子銃試験で電子銃ビームのソレノイド磁場への入射軸がずれていて改善が必要なことがわかった。仮入射部を用いた既設部ビーム加速試験では、データベースと計算機システムの整備により、ライナックビームの診断と制御に前進がみられた。

この秋からいよいよ増設部の試運転にはいる。10~12 月の増設部 A~B セクタビーム加速試験では、新しい高周波システム、制御システムによるシングルバンチ 10nC の大電流ビームの生成と加速が最初の課題となる。そのためのハードウェア、ソフトウェアの整備が現在進められている。

1998 年 2~3 月の増設部 A~C セクタビーム加速試験では、アークの試験を中心課題として増設部全体の性能試験が行われる。

メインイベントとなる、1998 年 5~6 月の A~5 セクタ総合試験では大電流ビームを標的まで導き、陽電子を生成、加速すること、電子/陽電子ビームの加速モードの切り替え、BCS/ECS によるビーム品質の改善などの大課題があり、それぞれについて細かな作業テーマがひしめいている。