

# 1. J-PARC の概要

## 1.1. はじめに

加速器オペレーションの実例を紹介することを目的として、大強度陽子加速器施設、Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) のメインリングのビームコミッショニングについて説明する。

J-PARC は茨城県東海村に建設され、運転の始まった施設で、世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成する加速器と、その大強度陽子ビームを利用する実験施設から構成される(Fig.1)。

J-PARC の加速器はリニアック、3GeV シンクロトロン、メインリング(MR)から構成され、リニアックでは負水素イオン(H<sup>-</sup>)ビームを 181 MeV のエネルギーまで加速する。この H<sup>-</sup>ビームは 3GeV シンクロトロンに入射される。入射直後に H<sup>-</sup>の電子をはぎ取り、陽子とする。この荷電変換プロセスは、入射時にペインティングを行い、細いリニアックビームから空間電荷力が小さくなるように決められた分布のビームを作るために必要で、大強度陽子の加速には不可欠なプロセスとなる。3GeV シンクロトロンは、速い繰り返しシンクロトロン Rapid Cycling Synchrotron (RCS)と呼ばれ、繰り返し周波数が 25 Hz で、20 ms の間で 181 MeV から 3 GeV まで加速する。25 Hz で取り出されるエネルギー 3 GeV の陽子の大部分は、物質・生命科学実験施設に送られ、陽子ビームをそこに設置された標的に衝突させ、発生した中性子、中間子が実験に利用される。

RCS からの 3 GeV 陽子の一部は MR へのビーム輸送ライン(3-50BT)へ送られ、そこから MR へ入射される。MR は陽子を 3 GeV から 30 GeV まで加速するシンクロトロンで、30 GeV の陽子をハドロンホールおよびニュートリノビームラインに取り出すことを目的としている。

ハドロンホールへは遅い取り出しとして、0.7 s の時間をかけて少しずつ取り出した陽子ビームを標的に衝突させる。そこからの K 中間子、 $\pi$

中間子、反陽子、ミューオンなどの二次粒子を原子核および素粒子の実験に利用する。

ニュートリノビームラインへは、速い取り出しとして 1 ターンでビームを取り出す。ビームラインでビームの向きを合わせ、標的に衝突させ、発生した二次粒子のうち  $\pi$  中間子から崩壊したニュートリノを 295 km 離れたニュートリノ観測装置スーパーカミオカンデで測定する。ニュートリノが東海から神岡までの飛行中に別の種類のニュートリノに変わるニュートリノ振動現象を詳細に調べる実験が行われる。

J-PARC は 2001 年度に建設が始まり、2008 年度に第 1 期工事が完成した。MR では 2008 年 5 月よりビームコミッショニングが始まっており、ここではその実際のビームコミッショニングの様子を紹介する。

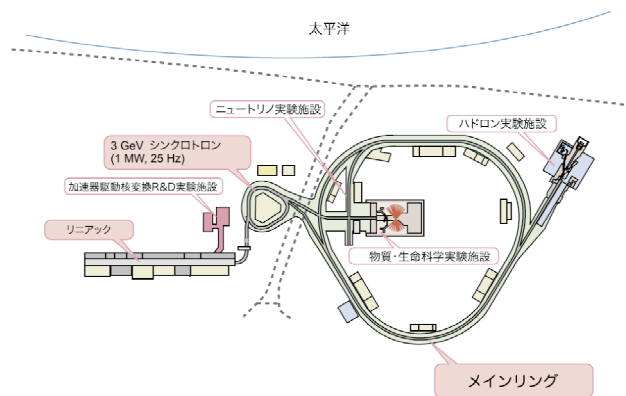


Fig.1 加速器レイアウト

## 1.2. MR の概要

MR は周長 1567.5 m で、3 つアーク部と 3 つの直線部を持つ 3 回対称のシンクロトロンである[1]。1 つのアーク部の長さは 406.4 m で、半径は 194.0 m、32 台の偏向電磁石で 120° のアーク軌道を作る。30 GeV での偏向電磁石の磁場は 1.1 Tesla で、常伝導電磁石で無理なく達成できる磁場となっている。1 つの直線部の長さは 116.1 m で、入射機器、コリメータ機器、3 GeV ダンプへの取り出し機器が直線部 A を占める。直線部 B にはハドロン実験施設への遅い取り出し機器があり、直線部 C にはニュートリノ実験施設およびアポートダンプへの速い取り出し機器がある。3 GeV ダ

ンプおよびアポートダンプは、MR 調整運転中に使用するビームダンプで 3 GeV ダンプは入射ビームのダンプおよび入射エネルギーでの周回ビームのダンプに使用し、アポートダンプは主に加速したビームのダンプに用いている。偏向電磁石 96 台、四極電磁石 216 台、六極電磁石 72 台で周回軌道を作っている。RF 加速空洞は 4 台 (2009 年 6 月時点) で 160 kV の加速電圧でビームを加速している。

### 1.3. MR ラティス

多数のビーム粒子からなるビームバンチを安定に加速するためには RF 加速の位相安定性によりシンクロナス位相に条件がある。エネルギーが低い場合、バンチの運動量分布のうちの高い運動量を持つ粒子は低い運動量を持つ粒子より速く到達するために、シンクロナス位相が  $90^\circ$  以下となる必要がある。しかし高いエネルギーとなり、粒子速度が光速に近づくと、速度の違いよりも運動量に依存した軌道長の違いにより、到達時間が決まり、規則的に偏向電磁石を並べた場合には (モーメントムコンパクションファクター  $\alpha$  が正の場合には)、高い運動量を持つ粒子の方が低い運動量を持つ粒子より経路が長くなることにより、遅く到達することになる。この場合、シンクロナス位相は  $90^\circ$  以上で RF 加速の位相安定性を保つことができる。この場合トランジション  $\gamma$  に対応するエネルギーでシンクロナス位相を速く変化させなければならず、ビームロスの原因となっていた。このことを式で表現すると、運動量の違い  $\Delta p/p$ 、および到達時間の違い  $\Delta T/T$  を使い、次式であらわすことができる。

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta C}{C} - \frac{\Delta v}{v} = \left( \frac{1}{\gamma_T^2} - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{\Delta p}{p} = \eta \frac{\Delta p}{p} \quad (1-1)$$

ここで、 $\eta$  はスリップファクターと呼ばれ、 $\gamma = \gamma_T$  のときに符号が変わる。また、 $\Delta p/p$  と  $\Delta C/C$  の関係は、ディスパージョン関数  $\eta(s)$  を使い次式で表される。

$$\frac{1}{\gamma_T^2} = \alpha = \frac{1}{C} \oint_C \frac{\eta(s)}{\rho(s)} ds \quad (1-2)$$

ここで  $\alpha$  はモーメントムコンパクションファクターと呼ばれる。つまり、 $\alpha$  が負となるラティス、すなわち  $\gamma_T$  が虚数となるラティスであれば、RF 加速の位相安定性が損なわれるトランジションがないようにできる。

MR では、ディスパージョン関数にモジュレーションをつける方法、つまり、偏向電磁石の並びに変化をつける方法で、イマジナリー  $\gamma_T$  ラティスを作っている (Fig.2)。1 つのモジュールは 3 つの FODO ラティスからなり、そのうち 2 つ目の FODO ラティスは偏向電磁石を持たない。こうすることにより、周期条件を仮定したモジュールのラティス計算で、ディスパージョン関数は偏向電磁石の場所で概ね負となり、モーメントムコンパクションファクターも負となる。つまり、高い運動量を持つ粒子の方が低い運動量を持つ粒子より軌道長が短くなり、 $\gamma_T$  が虚数となる。

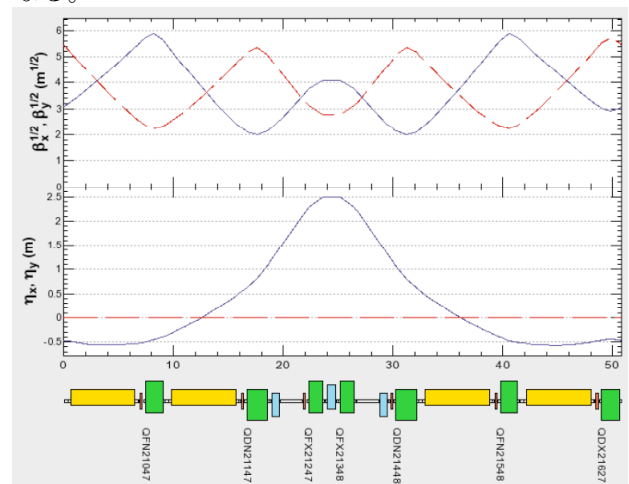


Fig.2 アークの 1 モジュールの  $\beta$  関数および  $\eta$  関数。

ビーム取り出し機器等がある直線部はディスパージョンが 0 であることが望ましい。そのためアーク部でディスパージョンが閉じるようにラティスが設計されている。ディスパージョンが閉じるビームラインはアクロマットと呼ばれ、ベータatron振動の位相進行が  $2\pi$  の整数倍であることが条件となる。1 モジュールの位相進行を  $(3/4)\pi$  とし、8 モジュールを 1 アークとして、1 アークの位相進行を  $6\pi$  とする設計となっている (Fig.3)。

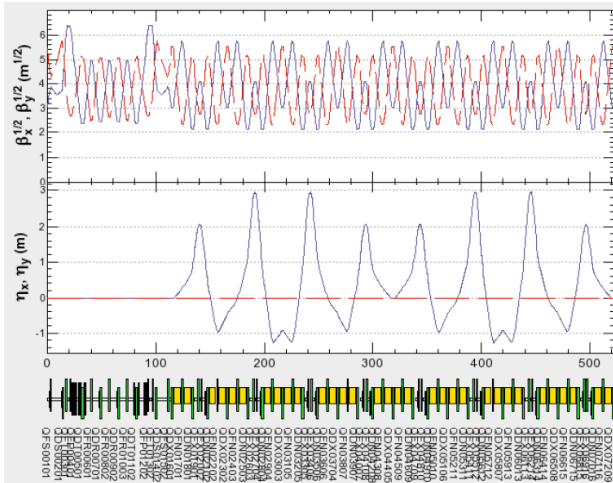


Fig.3 スーパーピリオド A の  $\beta$  関数と  $\eta$  関数。

直線部のラティスは、ビーム入射、コリメータ、取り出し機器が設置できる長さを確保し、またその機能に適したラティスとなるように設計されている(Fig.4)。中心部は 3 つの規則的な FODO セルからなり、その両側にアーク部のツイスパラメータに合わせるためのマッチング部からなる。 $\beta$  関数が規則的に並び、 $\eta$  関数が 0 の部分はビームコリメータに最適な場所となる。その隣の比較的長いハーフセルはビーム入射および取り出し機器の設置に適している。また、遅い取り出しのために静電セプトと呼ばれるビームを削り取る機器が必要で、水平方向  $\beta$  関数が大きいほど、取り出し時のビームロスを少なくできる。QFT,QFP の部分で 40 m 近い  $\beta$  関数を作っている。アーク部で 4 種類の四極電磁石、直線部で 7 種類の四極電磁石、合計で 11 種類の電磁石で構成されている。

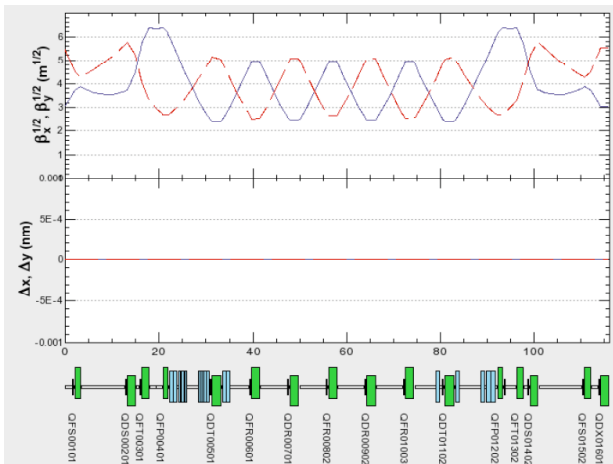


Fig.4 直線部 A の  $\beta$  関数と中心軌道のずれ。

#### 1.4. コミッショニングスケジュール

MR のビームコミッショニングは 2008 年 5 月に始まり、5 月と 6 月をステージ 1 として、3-50BT ビームライン調整、入射調整、周回軌道調整、rf 捕獲、3 GeV ダンプへの取り出し調整を行った [2]。実際に調整を行ったのは 12 日間で、1 日 12 時間程度であり、それも様々な理由で待機時間があり、限られた時間での調整となったが、所期の目標を達成した。7 月から 12 月までは速い取り出し、遅い取り出し機器の設置、および主電磁石電源の調整等が行われた。12 月下旬から 2009 年 2 月までをステージ 2 として、加速調整、アポートラインへの速い取り出し調整、ハドロンホールへの遅い取り出し調整を行った。また、4 月から 6 月までをステージ 3 として、ニュートリノビームラインへの速い取り出し調整を行った。

#### 1.5. ビーム強度

機器の放射化を防ぐために、意図的にビーム強度を絞って、コミッショニングを行っている。MR 調整のための典型的なリニアックのビームパラメータとしては、ピーク電流 5 mA、パルス幅 0.1 ms、チョッピング幅は 280 ns となっている。このビームが RCS 入射され、RCS では一度に 2 バunchを加速可能ではあるが、MR 調整のためには、典型的には 1 バunchのみを使っている。この RCS ビームが 25 Hz ごとに 3 GeV にまで加速されるが、MR に入射されるのは、MR の繰り返す周期（現在は 6 s）のうち、3 回まで可能ではあるが、MR 調整のために典型的には 1 回のみとしている。典型的なビーム強度は  $4 \times 10^{11}$  protons per bunch としている。1 バunchを 30 GeV に加速した場合のビームパワーは 320 W となっている。2009 年秋からのランでの目標は 100 kW で、1 バunchあたりの陽子数を 30 倍とし、6 バunchを加速し、更に加速周期を 6 s から 3.6 s とすることにより目標値を目指す。数年後の目標は 750 kW で、リニアックエネルギーを 181 MeV から 400 MeV にすることにより、1 バunchあたりの陽子数を増やし、MR 加速周期を更に速くすることに

より、目標ビームパワーを目指す。MR 加速周期を速くするためには、主電磁石電源の改造が必要となり、また、取り出し機器のアパーチャーが充分かどうかの確認が必要となる。

## 2. 入射調整

### 2.1. 3-50Beam Transport 調整

3-50 Beam Transport (3-50BT)によって、RCS 出射地点から MR 入射地点まで長さ 230 m、高低差 4.3 m のビーム輸送を行っている。RCS からのビームをパルス偏向電磁石によって物質・生命科学実験施設(MLF)と MR に振り分ける。その後のコリメータによってビームハローを取り除き MR 入射の際にビームロスが起こらないようにする。また、MR 入射地点での  $\beta$  関数および  $\eta$  関数のマッチングを行っている。

電磁石としてはパルス偏向電磁石 1 台、DC 水平方向偏向電磁石が 3 台、垂直方向偏向電磁石が 2 台、四極電磁石が 38 台、ステアリング電磁石が 14 台の構成となっている。また、ビームモニターは、ビーム位置モニター(BPM)14 台、プロフィールモニター(MWPM)6 台 (現在)、ビーム電流モニター(FCT)5 台、ビームロスモニター50 台となっている。

ビーム調整は、まずビームが概ね通るように、FCT と BLM を見ながら、偏向電磁石の調整を行った。更にビームが中心を通るように BPM を見ながら、ステアリング電磁石を調整した。ビームは $\pm 4$  mm 以内で調整されている(Fig.5)。

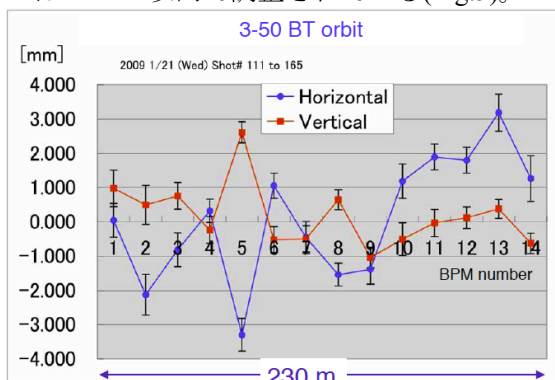


Fig.5 3-50BT の BPM 測定値。

次にビームプロフィールを MWPM で観測し、所定の光学パラメータに合うように、四極電磁石を調整した。調整初期には下流の四極電磁石の調整が不十分で、下流の 3 つのビームサイズが光学パラメータから想定される値とは違っていた。Fig.6 の上から 3 つ目の図が、設計の光学パラメータを想定し  $1\sigma$  エミッタンスとして  $1\pi$  mmmrad を仮定した水平方向ビームサイズで、丸(赤)で調整初期のビームサイズ測定値を示す。ビームサイズの分布が設計どおりとなるように、下流の四極電磁石の設定の再調整を行った。

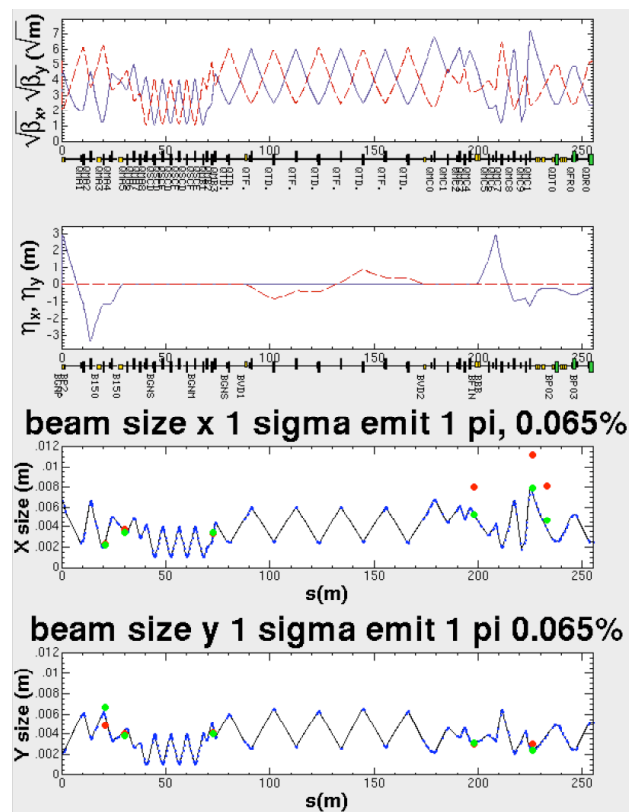


Fig.6 3-50BT の光学パラメータ。上図は  $\beta$  関数(実線(青)で水平方向、点線(赤)で垂直方向)。上から 2 番目の図は  $\eta$  関数(実線(青)で水平方向、点線(赤)で垂直方向)。上から 3 番目の図は、水平方向ビームサイズで、 $1\sigma$  エミッタンスが  $1\pi$  mmmrad の場合のビームサイズを実線(青)で、四極電磁石調整前の測定値を丸(赤)で、調整後の測定値を丸(緑)で示す。下図は垂直方向ビームサイズで、 $1\sigma$  エミッタンスが  $1\pi$  mmmrad の場合のビームサイズを実線(青)で、調整前の測定値を丸(赤)、調整後の測定値を丸(緑)で示す。

## 2.2. 入射調整

3-50BT から MR へのビーム入射はセプタム電磁石、キッカー電磁石、バンブ電磁石によって行われる。セプタム電磁石は薄い導体を持つ電磁石で入射ビームと周回ビームを分けて通す構造を持ち、周回ビームはセプタム磁場がない場所を通り、直進する。入射ビームはセプタム磁場がある場所を通り、入射ビーム軌道をより周回ビーム軌道の向きに合うように曲げる。ただし、これだけでは入射軌道は周回軌道と一致させることはできない。キッカー電磁石は、時間的に速い立ち上がりを持つ電磁石で入射ビームのみを曲げるようにタイミングを調整し、入射軌道が周回軌道に一致するようにする。バンブ電磁石は、アパーチャーを確保するためにバンブ軌道を作るために使用する(Fig.7)。今はまだ入射ビームのサイズが小さく、バンブ軌道なしでもアパーチャーが問題になることはない。

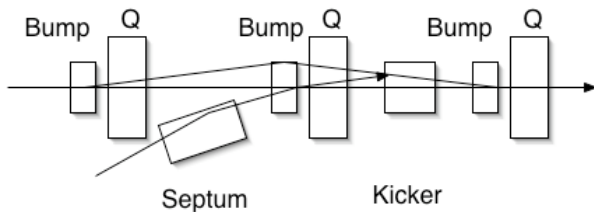


Fig.7 入射システムの概念図。

MR では入射機器として 2 台のセプタム電磁石、3 台のキッカー電磁石、3 台のバンブ電磁石で構成され、ほぼ設計値の設定により、設計どおりの軌道が実現できている[3]。

入射軌道の微調整は、軌道を周回させて行う。リングのビーム位置モニター(BPM)をターンごとに見ると、ベータトロン振動(二極振動)が観測される(Fig.8)。BPM のデータ処理装置には、10 ターン程度の軌道位置の平均を 1 ms あるいは 10 ms ごとに測定する COD モードと、1 ターンごとの位置情報を残す turn by turn モードがあり、ここでは turn by turn モードを使用する。二極振動の振幅が入射の中心軌道のエラーであり、振幅を小さくするように、キッカー、または、セプタム、3-50BT のステアリングを調整する。

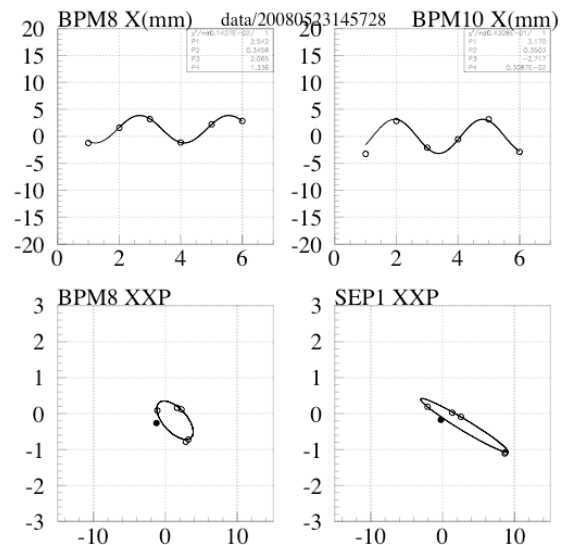


Fig.8 左上図:MR の BPM008 でのターンごとの水平方向ビーム位置。右上図:BPM1010 でのターンごとのビーム位置。左下図:BPM008 と BPM1010 の x 位置情報から、輸送行列の計算値を仮定して、再構築した BPM008 の場所での x-x'空間上での位置。右下図:輸送行列の計算値を仮定して、再構築した Septum1 の場所での x-x'空間上での位置。

次に、3-50BT から MR への  $\beta$  関数のミスマッチを調整する。このミスマッチの場合は、ターンごとのビームサイズの変動が観測される。イオンプロファイルモニター(IPM)による入射直後から 14 ターン目までの水平方向ビームプロファイルを図.9 に示す。大きなミスマッチが四極振動として観測された。

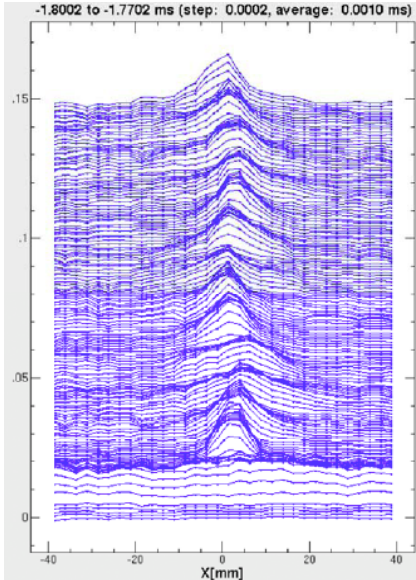


Fig.9 IPM による入射直後から 14 ターン目までの水平方向ビームプロファイル。

前節で説明したように 3-50BT の下流の複数の四極電磁石の設定の再調整を行った。再調整後には四極振動が小さくなっており、その時のビームプロファイル測定結果を Fig.10 に示す。また、若干の二極振動が出ているので、また、入射の中心軌道の調整に戻る必要がある。

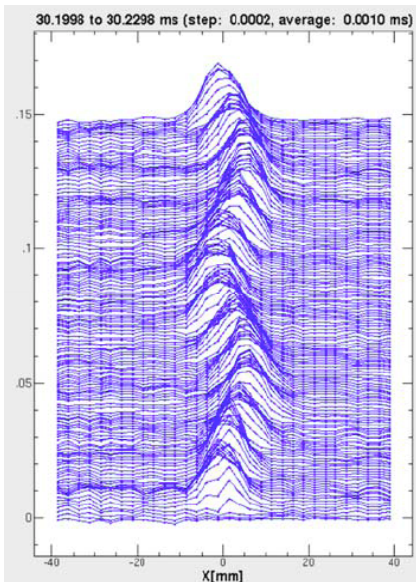


Fig.10 3-50BT 四極電磁石調整後の IPM による水平方向ビームプロファイル。

### 3. 周回ビーム調整

#### 3.1. Rf 調整

ビームが周回した後、rf の電圧を上げ、入射ビームバンチの rf 捕獲を行う[4]。rf 周波数および電圧を調整して、ビームの縦方向の振動、二極振動および四極振動を最小にする。振動の測定は、壁電流モニター(WCM)に依る。Fig.11 に WCM による測定結果を示す。この図によると、二極振動も四極振動も見られるが、細部を拡大して見ていることによるもので、rf 捕獲としての問題はない。

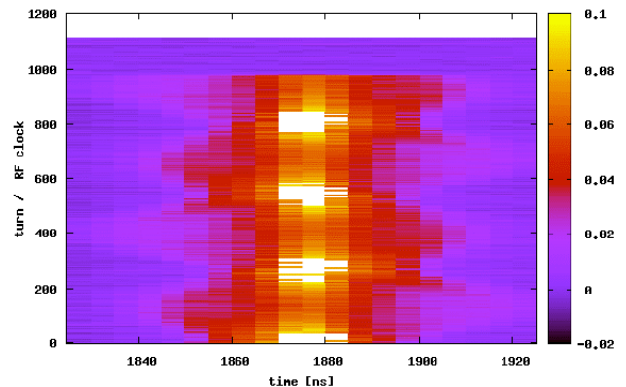


Fig.11 WCM によるビームの縦方向の振動測定。横軸は時間(20 ns 刻み)、縦軸は周回ターン数。

電磁石電流パターンは 3 GeV 相当電流値を連続して流すパターンとして、rf 捕獲によりバンチが保たれた状態で、3 GeV 周回モードを作った。周回時間としては、1000 turn、1 s 等があり、それぞれ対応する時間に 3GeV ダンプ用のセプタム電磁石、キッカー電磁石を励磁して、3GeV ダンプにビームを取り出す。このモードで周回ビーム調整を行っている。

#### 3.2. 誤差磁場によるビーム軌道への影響

主電磁石磁場には主成分のばらつき、多極成分等の誤差磁場がある。設置誤差、回転誤差も誤差磁場となる。また、電源の電流リップルによる誤差も考えられる。

これらの誤差は中心軌道のずれ(closed orbit distortion: COD)、 $\beta$  関数のずれ( $\beta$  modulation)、共鳴となり、ビームへ悪影響がある。磁場測定による偏向電磁石の主成分のばらつきについては、全 96 台の並び方で、COD が小さくなるようにシャッフリングを行い、設置位置を決めた[5]。また、四極電磁石については  $\beta$  関数のずれが小

さくなるように、六極電磁石については 3 次共鳴が小さくなるようにシャッフリングを行って、設置位置を決めた。

磁場測定による偏向、四極、六極電磁石の主成分のばらつき、多極成分の測定値、設置誤差、回転誤差を仮定した場合の COD を Fig.12 に示す [6]。COD はチューンにより大きさが変わり、整数に近い程、COD が大きくなる。この現象が整数共鳴と呼ばれ、チューンが整数に近いところは、オペレーションポイントとして選ばれない。 $\beta$  modulation については、チューンが整数および半整数のところでも大きくなり、これが半整数共鳴と呼ばれる。

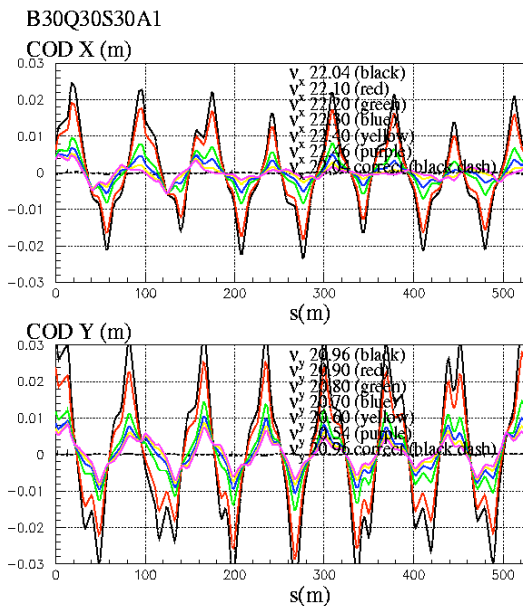


Fig.12 磁場測定による偏向、四極、六極電磁石の主成分のばらつき、多極成分の測定値、設置誤差、回転誤差を仮定した場合の COD

四極電磁石の回転設置誤差等により、水平方向と垂直方向のチューンの和および差が整数となるところで共鳴条件となり、それぞれ和共鳴、差共鳴と呼ばれる。また、六極電磁石のばらつきにより 3 次の共鳴ができる。電磁石の主成分のばらつきおよび多極成分については測定値を、電磁石の設置誤差については  $0.3 \text{ mm}$  を  $1\sigma$  とする乱数ガウス分布を仮定し、回転誤差については  $0.3 \text{ mrad}$  を  $1\sigma$  とする乱数ガウス分布を仮定した誤差磁場がある場合のチューンに依って粒子が安定に周回する Courant-Snyder 不変量を計算し表したものを Fig.13 に示す。和共鳴のところが悪い条件となっており、3 次共鳴、4 次共鳴

の影響も見られる。ここではステアリングによる COD の補正は行っており、運動量のずれは 0 % としている。

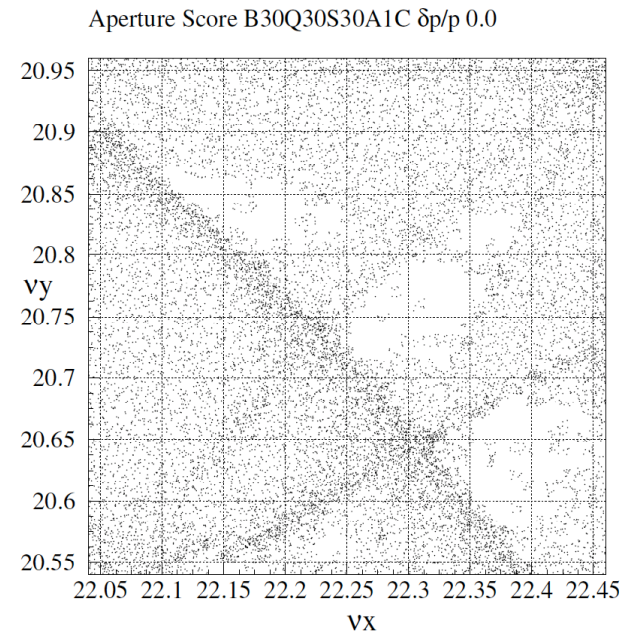


Fig.13 Courant-Snyder 不変量として  $8.1 \pi \text{ mmmrad}$  刻みで  $81 \pi \text{ mmmrad}$  までの 10 個の粒子を 1000 ターンしたとき毎ターン  $81 \pi \text{ mmmrad}$  以下であるかどうかをチェックし、生き残った粒子をスコアとしている。チューンプロット上で、生き残りスコアの悪さを黒点の分布で示す。

### 3.3. 軌道補正

COD はステアリング電磁石により軌道補正する。ステアリングは長さ  $0.2 \text{ m}$  で、最高磁場  $0.2 \text{ T}$  の偏向電磁石である。水平方向のものが 93 台、垂直方向のものが 92 台ある。この BL 積  $40 \text{ mTm}$  は、加速器設計時に主電磁石のばらつきより想定される COD が充分補正できる量として決められた。Fig.14 に実際に補正前後の軌道を BPM で測定した結果を示す。補正前の RMS は  $4 \text{ mm}$  で、補正後には  $0.7 \text{ mm}$  と改善した。垂直方向も同様な改善が確認された。補正前の COD 測定結果は、前節での誤差磁場からの評価よりも若干良く、アラインメントによる電磁石の設置精度が良いことによるかもしれない。

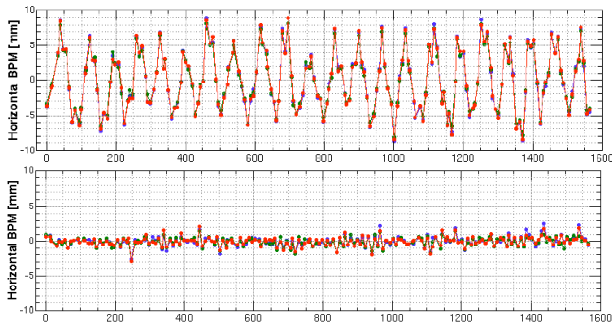


Fig.14 BPM による水平方向軌道、補正前（上図）、補正後（下図）。

### 3.4. チューンサーベイ

3 GeV DC の 1 s 周回モードのときに、チューンを変えてビームの生き残り率を測定した。Fig.15 にビーム強度モニター(DCCT)によるビーム強度測定結果を示す。水平方向チューンが 22.28、垂直方向チューンが 20.79 のときで、入射直後のビーム強度に比べて、0.86 s 後のビームの生き残り率は 0.86 と良い状態となっている。

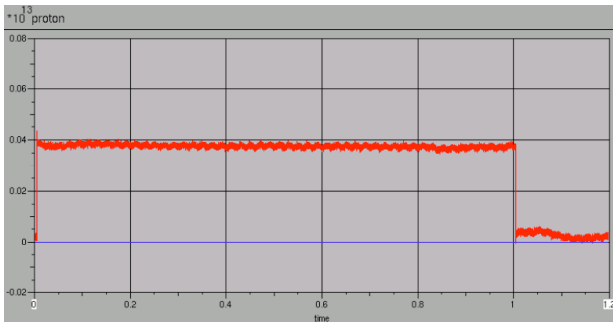


Fig.15 DCCT によるビーム強度測定結果。

Fig.16 に、ビームの生き残り率を水平方向チューン、垂直方向チューンを変えて測定した結果を示す。整数共鳴、半整数共鳴および和共鳴が非常に強く出ている。また、3 次共鳴の影響も見られる。

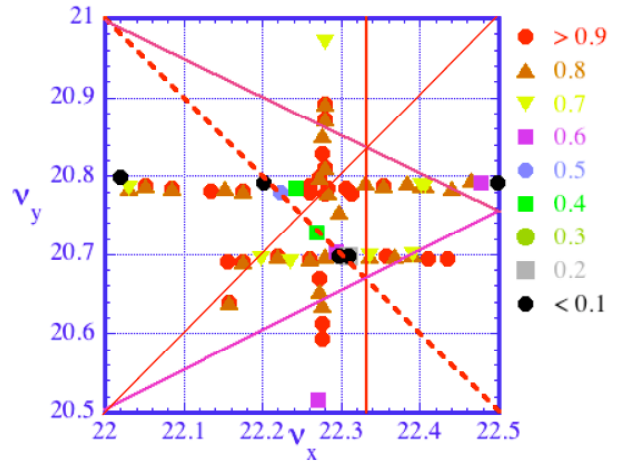


Fig.16 ビーム強度モニター(DCCT)で測定した、入射直後に比べて 0.86 s 後のビームの生き残り率を水平方向チューン、垂直方向チューンを変えて測定した結果。

## 4. 加速調整

### 4.1. Rf 加速

4 つの rf 加速ステーションにより、合計 160 kV の加速電圧をかけ、最大 30° 程度のシンクロナス位相の状態ビーム加速を行った。Low level rf はデジタル制御で行い、電磁石パターンに対応する rf パターンを正確に実現するように制御している。調整は周波数の微調整で行い、BPM で測定し、ビーム位置が加速中に中心を通るようにした。Fig.17 に rf 周波数パターンを示す。DCCT によるビーム強度測定で、顕著なビームロスは見られていない(Fig.18)。イマジナリー・トランジションラティスを採用したことに依ると考えられる。

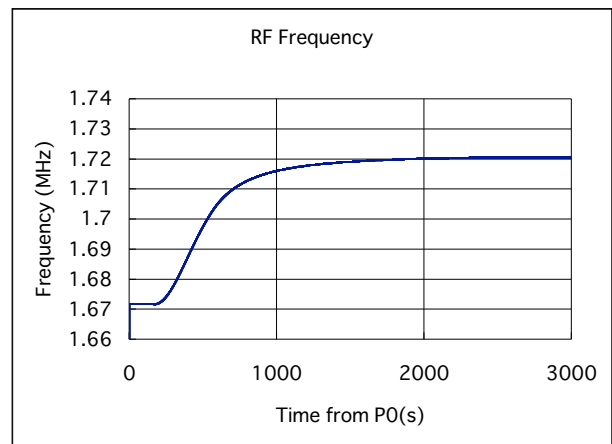


Fig.17 Rf 周波数パターン。



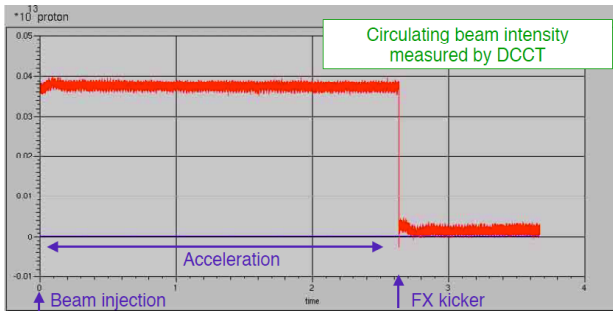


Fig.18 DCCTによる加速中のビーム強度。

## 4.2. B,Q 電磁石の励磁関数

加速中にチューンが変わらないようにするため、B,Q 電磁石の励磁電流と磁場積(BL, GL)の関係を正確に測定することが必要となる。チューンの変化を、22のうち、0.01程度以下としたい場合、励磁関数も同程度、 $5 \times 10^{-4}$ 程度の精度が必要となる。

電磁石には、ヒステリシスがあり、同じ3 GeV相当電流でも、電流を0 Aから上げていったときの磁場と、30 GeVパターン励磁を仮定し、30 GeVから電流を下げて3 GeV相当電流値に至ったときの磁場には違いがある。その違いはBでは1%程度で、Qでは2%程度であった。Fig.19にQのファミリーの1つQDXの励磁関数を示す。30 GeVは700 Aにほぼ対応し、それ以下の電流範囲の測定値を5次の多項式でパラメータ化を行った。

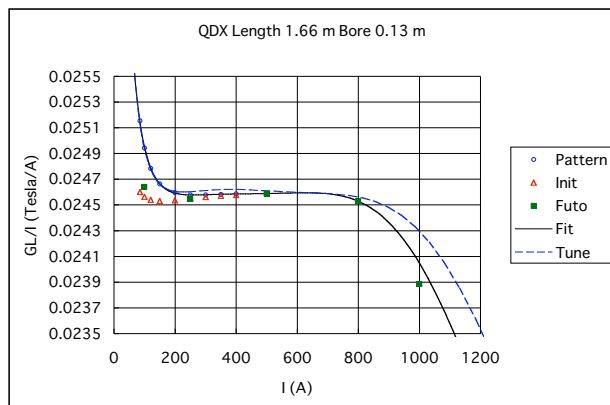


Fig.19 QDXの励磁関数。

チューンメータにより加速中のチューンを測ると、チューンのずれは、水平方向、垂直方向ともに0.05程度あった。Fig.20に加速中の水平方向チューンを示す。数の多いアーク部の4つのQファミリーの励磁関数に0.2%程度補正をすることにより、チューンのずれを0.01程度にな

るようにした。補正後のQDXの励磁関数をFig.19の点線で示す。

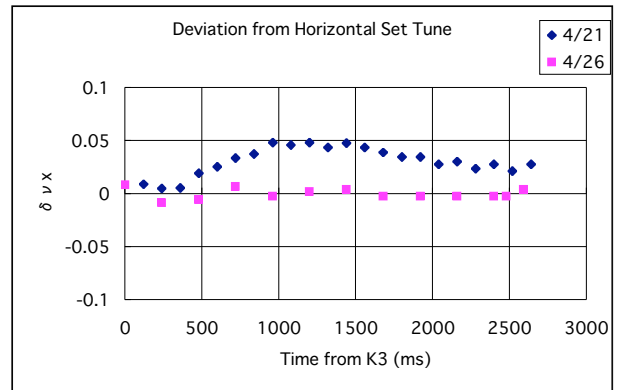


Fig.20 加速中のチューンのずれ、アーク部のQの励磁関数の補正前(ダイア(青))と補正後(四角(紫))。

## 4.3. ビームプロファイル

フライングワイヤーを使って水平方向ビームプロファイルを測定した。ビームプロファイルは加速につれて細くなるのが分かっており(adiabatic damping)、ビームエミッタンスは運動量に反比例する。Fig.21に入射時のプロファイルを示し、Fig.22にエミッタンスの運動量依存性を示す。測定結果はadiabatic dampingを良く再現している。

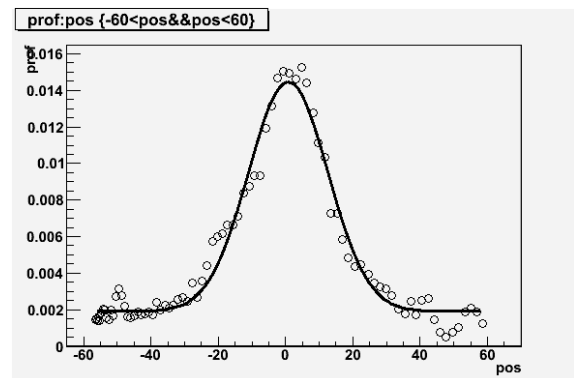


Fig.21 フライングワイヤーによる入射時のビームプロファイル。

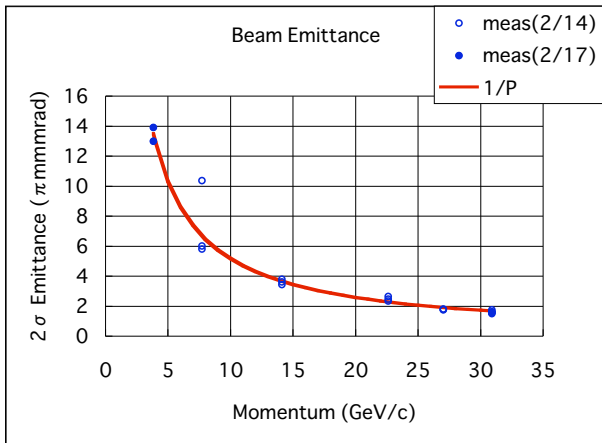


Fig.22 加速時のビームエミッタンスの運動量依存性。

## 5. 光学パラメータの測定

### 5.1. $\beta$ 関数の測定

$\beta$  関数の測定のために、1つのステアリング電磁石のキック量を変え、そのときの軌道の変化を

BPM で測定した[7]。キック量  $\theta$  と軌道の変化  $x(s)$  の関係は次式で表される。

$$x(s) = \frac{\theta \beta^{1/2}(s) \beta_0^{1/2}}{2 \sin \pi \nu} \cos[\varphi(s) - \pi \nu] \quad (5-1)$$

BPM とステアリング電磁石がほぼ同じ位置  $s$  にある場合は、 $\varphi(s)$  が 0 となり、 $\beta(s)$  が求まる。入射周回モードで、ステアリング電磁石全台数の水平方向 93 台、垂直方向 92 台について行った。ステアリング電磁石の蹴り角は  $\pm 0.2$  mrad の設定として、軌道の変化は最大でも 8 mm 程度としている ( $\beta$  を最大 40 m と仮定した場合)。蹴り角設定 0,  $\pm 0.2$  mrad のときの BPM 測定値をリニアフィットすることにより  $\beta$  関数を求めた (Fig.23)。測定結果と設定値は概ね一致しているが、若干のずれも見られ、検討課題となっている。

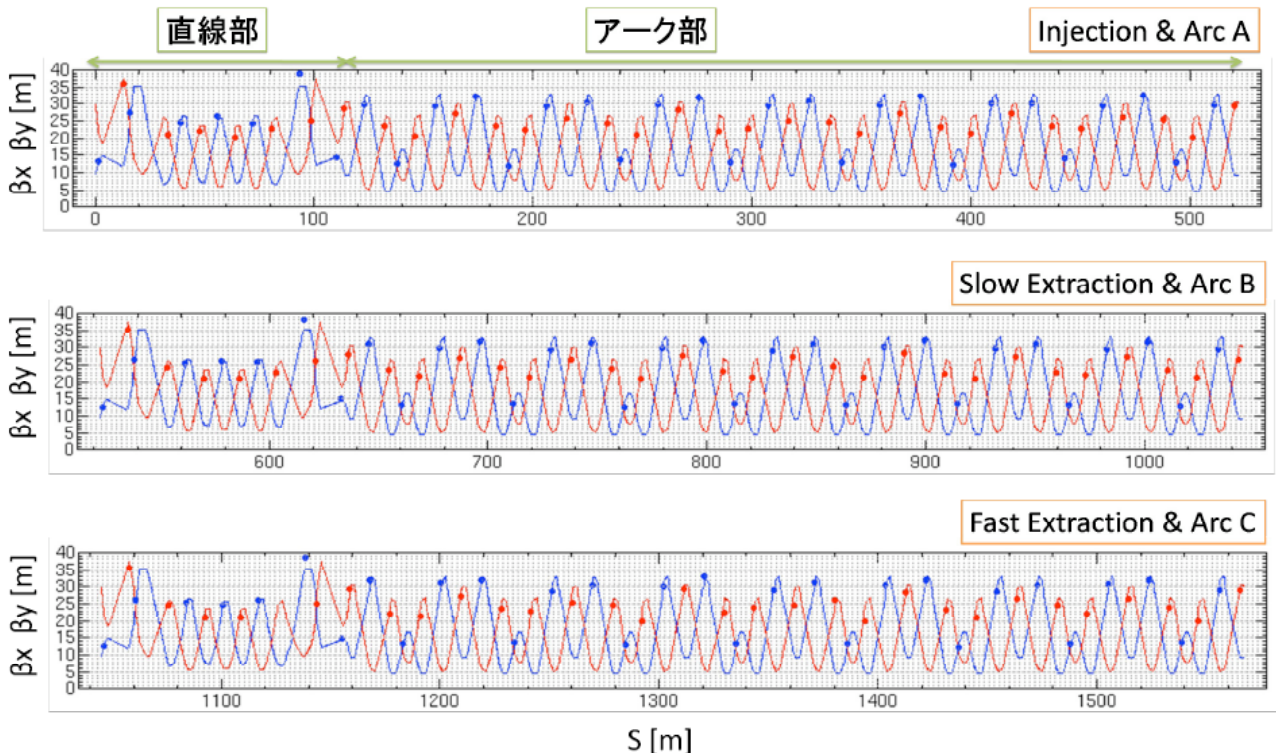


Fig23 水平方向  $\beta$  関数の測定結果(点(青))と設定値(線(青))。垂直方向  $\beta$  関数の測定結果(点(赤))と設定値(線(赤))。

## 5.2. $\eta$ 関数の測定

ディスページョン関数  $\eta(s)$  は、運動量のずれについての水平位置の依存性を示し、次式で表される。

$$x(s) = \eta(s) \frac{\delta p}{p} \quad (5-2)$$

入射周回モードで、シンクロトロン振動の周期より充分長い時間(100 msec)をかけて、rf 周波数を変化させ、アディアバティックに運動量を変えるパターンを作成した[8]。運動量の変化量  $\delta p/p$  を 0.0 %,  $\pm 0.3$  %,  $\pm 0.5$  % とする 5 種類のパターンについて、水平方向の軌道の変化を BPM で測定して、5 点のリニアフィットをしてディスページョン関数を求めた。測定結果を Fig.23 に示す。測定結果は概ね設定値と一致している。

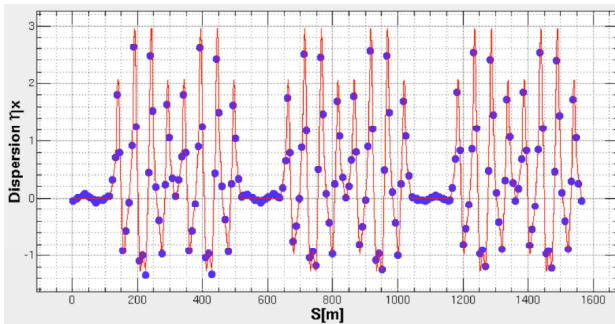


Fig.24  $\eta$  関数の測定結果(点(青))と設定値(線(赤))。

## 5.3. クロマティシティ測定

クロマティシティ  $\xi$  は、運動量のずれについてのチューンの依存性を示し、次式で表される。

$$\delta v = \xi \frac{\delta p}{p} \quad (5-3)$$

入射周回モードで、ディスページョン測定と同様に運動量のずれに対応する rf 周波数の変化を与え、そのときのチューンのずれを測定した。Fig.25 に六極電磁石がオフのときの測定結果を示す。ほぼ計算どおりの大きな運動量依存性が見られる。

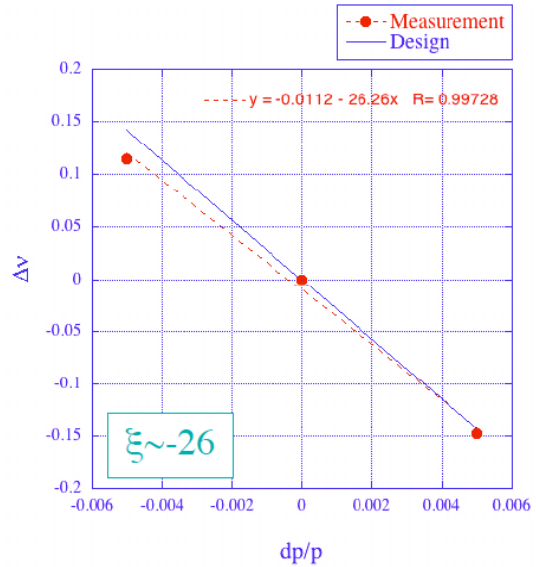


Fig.25 六極電磁石がオフの場合の水平方向チューンの運動量依存性。

このクロマティシティは六極電磁石によって補正され、Fig.26 のように概ね計算どおりの設定で補正されることが確認された。これらは水平方向の結果であるが、垂直方向についても良く補正されていることを確認した。

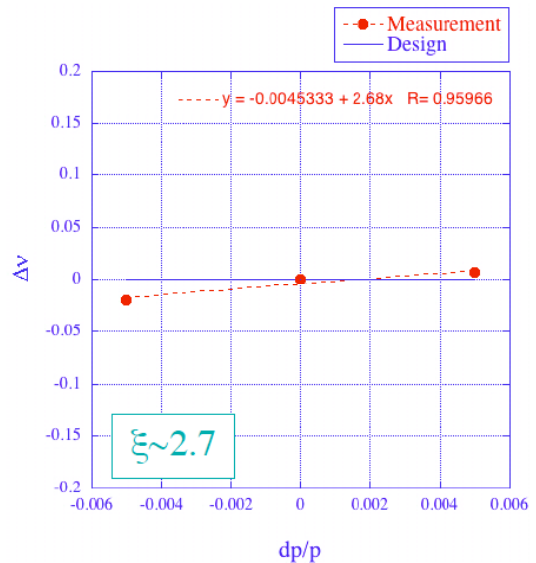


Fig.26 クロマティシティを補正するように六極電磁石を励磁したときの、水平方向チューンの運動量依存性。

## 6. 取り出し調整

### 6.1. 速い取り出し調整

1 ターンで取り出すことを速い取り出しと呼び、キッカー電磁石、セプタム電磁石を使ってビーム取り出しを行う。キッカー電磁石によって、周回ビームを蹴り、セプタム電磁石の磁場に入るようにして、セプタム電磁石の大きな曲げ角により取り出し軌道に乗せる。セプタム導体は、周回ビームに当たらない位置でなければならない。また、キッカー電磁石は十分な蹴り角で取り出しビームをセプタム磁場内に入れる強さが必要となる。セプタム電磁石も四極電磁石を避けて取り出し軌道に曲げるために十分な曲げ角が必要となる。速い取り出しの設計軌道を Fig.27 に示す。

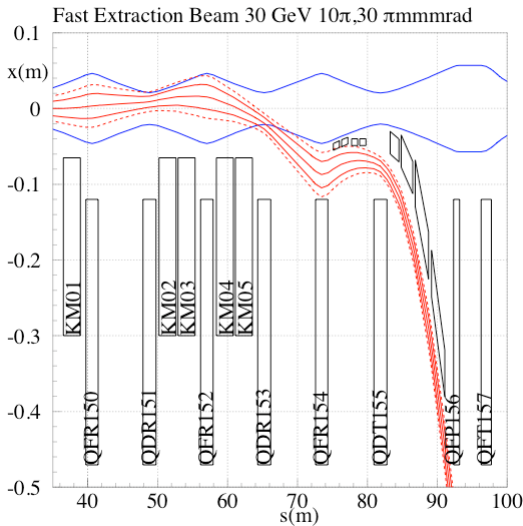


Fig.27 速い取り出しの設計軌道。

取り出し軌道の測定は MR の BPM の 1 ターン測定モードおよびニュートリノビームラインの BPM で行い、ニュートリノビームライン BPM の最初の 2 台の中心にビーム軌道を合わせるように調整を行った(Fig.28)。そのときにビームがセプタム導体等に当たっていないことをビームロスモニターで確認した(Fig.29)。

速い取り出しには、ニュートリノビームラインへのビーム取り出しの他に、水平方向のほぼ逆向きにアポルトダンプへの取り出しの機能があり、キッカー電磁石の極性を逆にするにより、ビーム調整用にアポルトへの取り出しを行っている。アポルトへは加速ビームだけでは

なく 3 GeV ビームも取り出せるように設計されている。

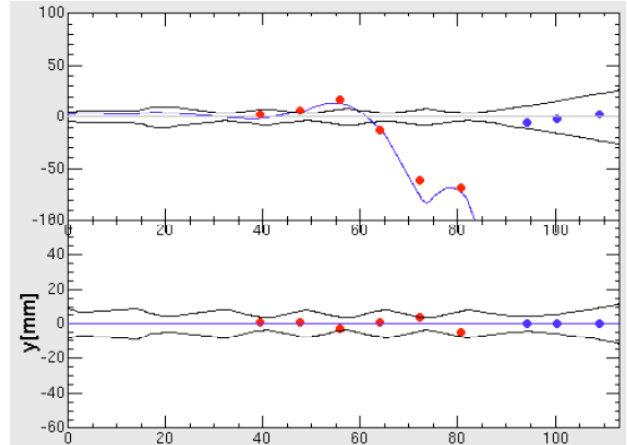


Fig.28 取り出し軌道の測定値。水平方向軌道（上図）、垂直方向軌道（下図）。

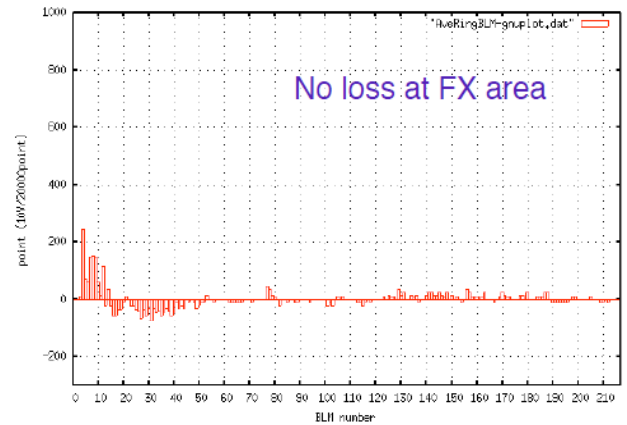


Fig.29 速い取り出しモードでの BLM によるビームロスの積分値。

### 6.2. 遅い取り出し

フラットトップ期間(0.7 s)で、ビームを少しずつ取り出すことを遅い取り出しと呼んでいる。遅い取り出しのために使用する機器は、バンプ電磁石 4 台、共鳴六極電磁石 8 台、静電セプタム 2 台、セプタム電磁石 10 台、および四極電磁石の 1 つのファミリー-QFN で、Fig.30 で示すパターンで励磁する[9]。フラットトップに入った後に、バンプ電磁石を励磁して、取り出し軌道を補助するバンプ軌道を作る。意図的に 3 次共鳴を励起するために共鳴六極電磁石を励磁する。四極電磁石の 1 つのファミリー-QFN のパターン励磁により、フラットトップ時間内で水平方向チューンを変化させる。静電セプ

タム ESS でビームを削り出す。セプタム電磁石で取り出し軌道へ導く。

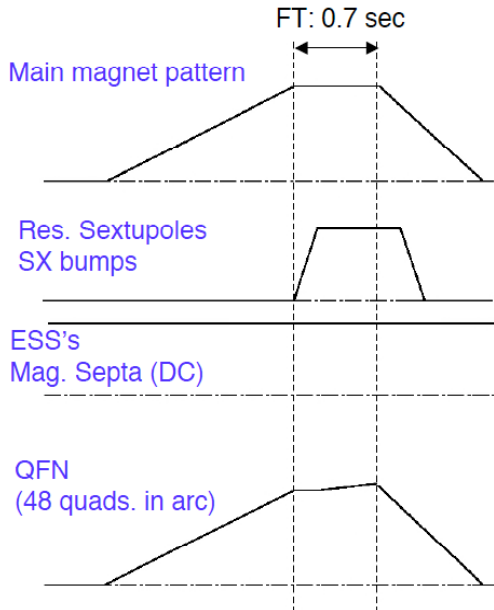


Fig.30 主電磁石パターン（上図）、共鳴六極電磁石およびバンプ電磁石パターン（上から 2 番目の図）、ESS およびセプタム電磁石パターン（上から 3 番目の図）、QFN パターン（下図）。

共鳴六極電磁石が励磁された状態で、水平方向チューンを変化させ、22.33 となると 3 次共鳴が起こり、Fig.31 のように粒子がターンごとに少しずつ外に出ていく現象が起こる。この図は ESS のところでの粒子の位相空間での位置を計算により予想したもので、水平方向位置  $x$  で -55 mm より外を通る粒子は ESS による電場でキックされ、取り出し軌道に乗るようにしている。ESS は厚さ  $30\mu\text{m}$  のリボンと 25 mm 程度離れた場所にある電極の間に 100 kV 程度の電圧をかけ、そこに入った粒子のみを取り出すものであり、リボンが薄いことが取り出しの際のビームロスを減らす重要な要素となっている。

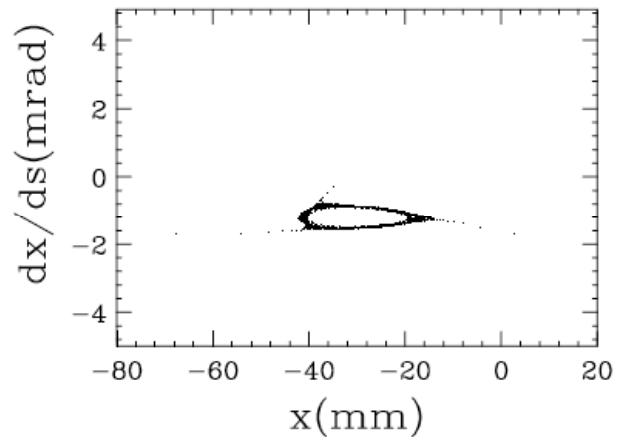


Fig.31 計算による ESS での粒子の位相空間での位置。

ESS により削り出された粒子は、ベータトロン振動の位相進みが  $(3/2)\pi$  程度後にあるセプタム電磁石により取り出し軌道へ向けて曲げられる。最初のセプタム電磁石(SMS10)のセプタム導体の厚さは 1.5 mm と薄く作られており、取り出しビームとも周回ビームとも当たらない位置を探せるようにモーターによる移動機構を持つ (SMS10,SMS11)。更に、残りのセプタム電磁石によりハドロンホールへの取り出し軌道を作っている(Fig.32)。

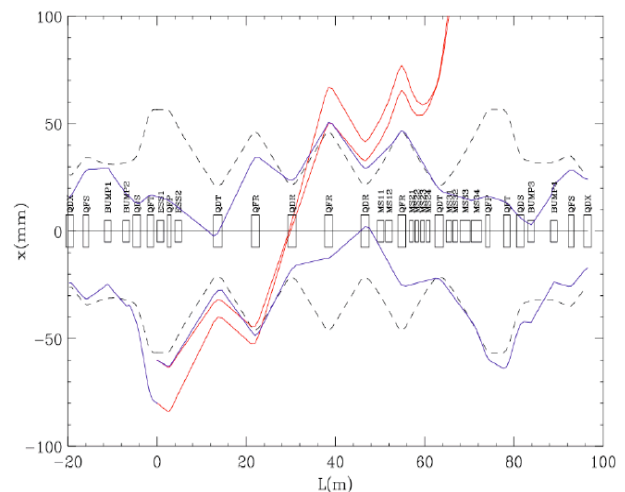


Fig.32 遅い取り出し軌道(線(赤))と周回軌道(線(青))。

実際の調整では、4 台のバンプ電磁石と 5 台のステアリング電磁石でほぼ設計どおりのバンプ軌道をつくり、その場合に取り出し時のビームロスが最小になっていた(Fig.33)。予想されたように ESS でのビームロスが分布としては一番多く

なっており、10%程度のビームが取り出し時のロスとなっていると考えられる。ロス量の正確な評価を含めて、ロスを減らす調整が今後必要となる。

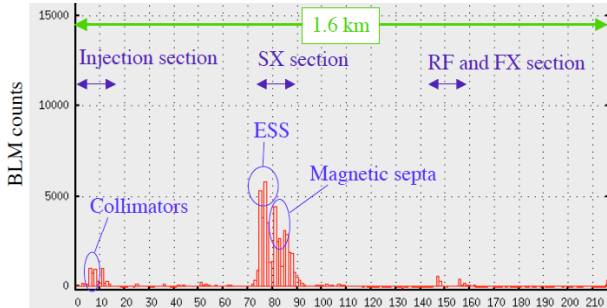


Fig.33 遅い取り出し時のビームロス分布。

また、主に四極電磁石のリプルにより、ビームスピルが非常に悪い状態となっている。電磁石電源の改良により電流リプルを小さくすることが最優先の課題となる。同時に、スピル制御用の四極電磁石(EQ,RQ)を新たに設置して、取り出しスピルを観測しながら、EQ と RQ についてフィードバック制御を行い、スピルを制御するシステムが製作されている。

## 7. 大強度ビーム調整のために

### 7.1. 複数バンチ運転

複数バンチのビーム加速運転の試験も行っている。最大で3バッチ、6バンチのビームを加速し、アポルトダンプへの取り出しを行った。粒子数は $4.4 \times 10^{12}$  protons per pulseであり、もし6 s 周期の連続運転を行ったとしたら、3.5 kW のビームパワーとなる。DCCT 測定のレベルで顕著なビームロスは見られなかった(Fig.34)。秋からのランでバンチあたりの粒子数を増やすこと、および繰り返し周期を短くすることにより、100 kW 相当のビーム加速を目指す。

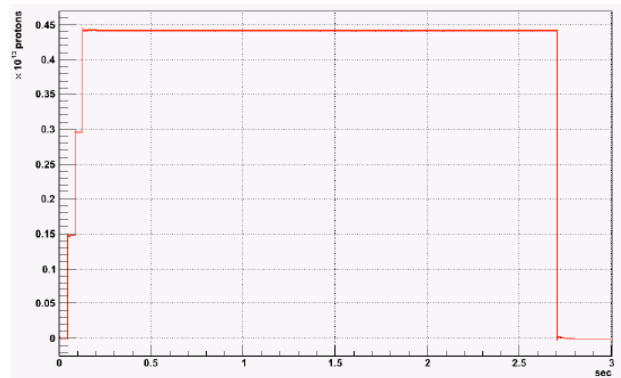


Fig.34 6バンチ加速運転におけるDCCTによるビーム強度。横軸はP0(電磁石パターン時間基準)からの時間(s)。

### 7.2. 線形結合共鳴の補正

ビーム強度を上げていくと、バンチ内の陽子は空間電荷効果によりバンチ内の陽子どうしの反発力を受ける。これは、四極電磁石による収束力とは逆向きの力となり、陽子それぞれのチューンが小さくなる。そのチューン・シフトはそれぞれ陽子の分布位置により違いがあり、チューンの分布は、インコヒーレント・チューン・スプレッドと呼ばれる。100 kW 相当のビームパワーのとき、ビーム分布を $36 \pi$  mmmrad のガウス分布を仮定した場合の、シミュレーションによるチューン・スプレッドを Fig.35 に示す。ラティスのチューンは、水平方向 22.41、垂直方向 20.8 を仮定している。この場合、分布の一部が和共鳴にかかっている。和共鳴は非常に強く、ビームロスが大きいことが測定で分かっている。従って、この状態では100 kW 運転も大きなビームロスが予想される。

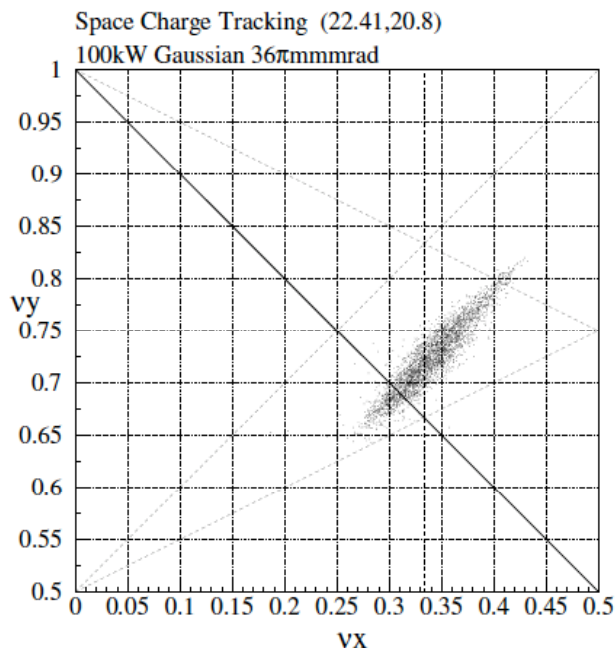


Fig.35 100 kW 相当のビームパワーのとき、ビーム分布を  $36 \pi \text{ mmmrad}$  のガウス分布を仮定した場合の、シミュレーションによるチューン・スプレッド。ラティスのチューンは、水平方向 22.41、垂直方向 20.8 を仮定している。

チューン・スプレッドを考慮して、共鳴を避けるように、ラティスのチューンを設定することが重要である。また、この和共鳴自体を、補正により、弱くすることを行っている。

和共鳴の主な原因は、四極電磁石の回転設置誤差、および六極電磁石での垂直方向 COD である。つまり、六極電磁石の垂直方向軌道をうまく調整することにより、和共鳴を補正することが可能となる。位相の異なる 2 台の六極電磁石で垂直方向にローカルバンプリングを立てることで和共鳴の補正試験を行った。条件に合う六極電磁石が SDA019 と SDB028 で、2 つの場所でそれぞれローカルバンプリングをつくり、共鳴が補正されているかどうか探索した。結果的に SDA019 で +5 mm、SDB028 で -5 mm の場合、共鳴が弱くなっていることが確認された。ビームの生き残り率が良くなっており (Fig.36)、ビームサイズの増大が緩和されていることにより、確認を行った。

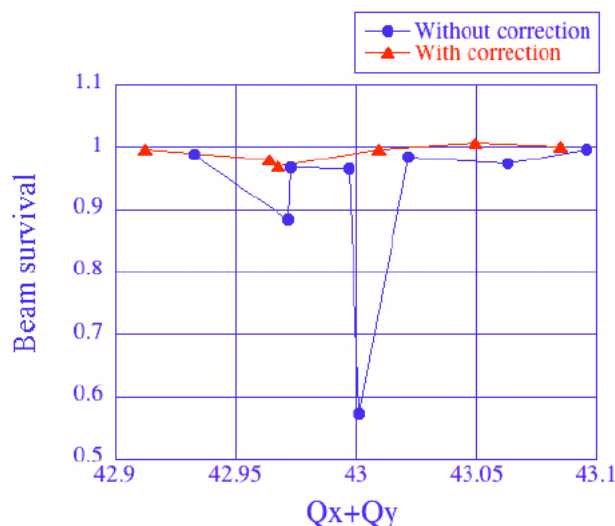


Fig.36 ビーム生き残り率の水平方向チューンと垂直方向チューンの和についての依存性。補正前を丸(青)、補正後を三角(赤)で示す。

## 8. まとめ

2008 年 5 月より J-PARC MR のビームコミッショニングを始め、ビーム入射、周回調整、加速調整、取り出し調整を行い、予定どおり当初の目標を達成している。このことは、ほとんどの機器がほぼ目標どおりの性能に達し、安定に稼動していることに依っており、長い年月におよぶ建設段階での努力の成果の現れである。

MR のビームコミッショニングは、MR グループメンバー全員の貢献はもとより、リニアック、RCS グループメンバーの協力により可能となっている。また、取り出しビーム調整には、ビームライン・グループ、ユーザー・グループと協力して調整を行っている。3-50BT 調整および運転の干渉と言う点で、MLF グループの協力も欠かせない。

MR の機能としては、ビーム強度の小さい状態での試験が済み、今後はビーム強度を上げていく調整が始まる。そのためには、一部まだ目標の性能に達していない機器の改良が必要である。また、現在の機器あるいは性能を持って、数年後の目標が達成可能であるかどうかの確認がもう一度必要となる。

## 参考文献

- [1] Accelerator Group JAERI/KEK Joint Project Team, "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, J-PARC 03-01, March 2003.
- [2] T. Koseki, "J-PARC MR ビームコミッションングの現状", 第6回加速器学会年会
- [3] G.H. Wei et. al., "Beam Injection and Fast Extraction Tuning of J-PARC MR", 第6回加速器学会年会
- [4] M. Yoshii, "J-PARC リング高周波の現状", 第6回加速器学会年会
- [5] M. Tomizawa et. al., "Position Shuffling of the J-PARC Main Ring Magnets", Proceedings of the EPAC2006, Edinburgh, Scotland, Jun 26-30, 2006
- [6] S. Igarashi et. al., "Study of the J-PARC MR Beam Orbit based on the Magnetic Field Measurements", 第4回加速器学会年会
- [7] J. Takano et. al., "ステアリング電磁石を用いた J-PARC MR の $\beta$ 関数測定", 第6回加速器学会年会
- [8] J. Takano et. al., "J-PARC MR Dispersion 測定", 第6回加速器学会年会
- [9] M. Tomizawa, "J-PARC MR の遅い取り出し", 第6回加速器学会年会