

Fermilab Main Injector における Slip Stacking の現状

Fermilab

清 矢 紀 世 美

kiyomi@fnal.gov

2008 年 5 月 30 日

1. はじめに

Fermilab Main Injector (MI) は, Tevatron の衝突実験用の反陽子生成ターゲットと, ニュートリノ実験用の粒子生成ターゲットに 120 GeV の陽子ビームを供給している。よって, MI の陽子ビームの強度を上げることは, 衝突実験のルミノシティ増強, ニュートリノ実験のフラックス増加に貢献する。

ビームはイオン源, リニアック, ブースターを経て, 8 GeV のエネルギーで MI へ入射され, ここで 120 GeV まで加速され, 各ターゲットへ取り出される。各加速器, ターゲットの配置を図 1 に示す。

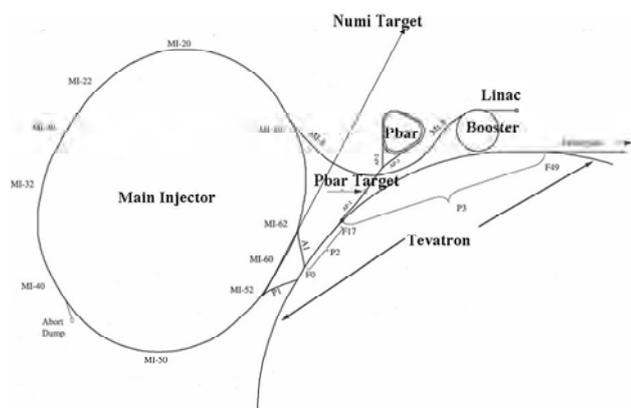


図 1 Fermilab 加速器の構成

MI の加速高周波は 53 MHz, ハーモニックナンバーは 588 である。ブースターのハーモニックナンバーは 84 なので, MI は最大 7 バッチ (1 バッチは 82 バッチから構成される) を同時に加速することができる。一方, 反陽子蓄積リングのハーモニックナンバーは 84, MI から一回にターゲットに送ることが出来るのは 84 バッチである。

MI の加速周期は 1.6 sec, ブースターは 66.7 msec なので, 複数のバッチをブースターから MI へ入射し, それらを同時に 120 GeV まで加速することで, ビームの加速効率を上げることができる。

Slip stacking [1] は, 二つのバッチをブースターから入射し, 入射エネルギーで縦方向の位相空間で重ね合わせることでビームの線密度を 2 倍にし, その後加速することで, 反陽子生成のターゲットに送るビーム強度を上げるために開発された手法である。

2. 120 GeV ビームの運転

Slip stacking を用いて反陽子生成のためのビーム強度を 5×10^{12} particles per pulse (ppp) から 8×10^{12} ppp に増強することが当初の目標であった。また, 1 回の加速サイクルで反陽子生成のための陽子ビーム 1 バッチとニュートリノ実験のための陽子ビーム 5 バッチを同時に加速する mixed mode operation が計画されていたため, slip stacking で 1 バッチの強度を 2 倍にする過程は, 三つ目のバッチがブースターから入射される前, つまり 133 msec 以内に完了しなければならない。さらに, 反陽子生成の効率を高く保つため, 取り出し時のパンチの長さは 1.8 nsec 以下に抑える必要があった。また, 大強度運転による加速器の放射化を考慮し, ビームロス は 5% 以下に抑えなければならない。

結果から先に述べると, MI はこれらの要求を充たし 2004 年 12 月より slip stacking を用いた運転開始, 2005 年 5 月には mixed mode operation により, 7 バッチをブースターから入射し, 二つを反陽子ターゲットへ, 五つをニュートリノターゲットへと取り出した。2006 年 2 月以降, ビーム強度 8×10^{12} ppp - 9×10^{12} ppp を反陽子ターゲットへ, 22.5×10^{12} ppp をニュートリノターゲットへ供給した。図 2 は 8 GeV における wall current monitor (WCM) の信号で, 縦方向のビームの様子を観測している。横軸は $10 \mu\text{sec}$ (MI の周期はほぼ $11 \mu\text{sec}$), 縦軸は 0.5 sec で 256 ターン毎の信号であり, 入射から加速開始までを表す (mountain range plot とよばれる)。Slip stacking されたバッチとほかの 5 バッチの間にはほぼ半分のバッチ長に相当する隙間がある。これは, 反陽子ターゲットへビームを先に取り出すために必要なギャップであり, 取り出しキッカーの電圧の立ち上げ, 立ち下げに使用される。図 3 は 7 バッチが 8 GeV で入射され, 120 GeV まで加速されたことを示す。

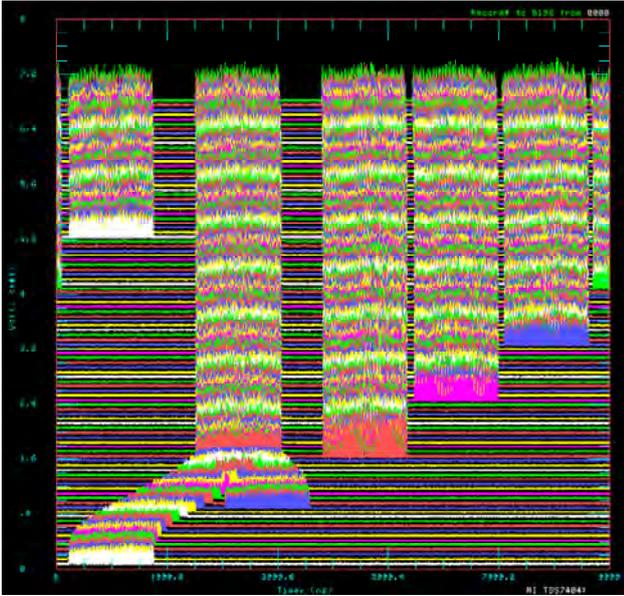


図2 8GeVにおける mountain range plot

横軸は10 μsec (MIの周期はほぼ11 μsec)、縦軸は0.5secで、256ターン毎のWCMの信号による入射から加速開始までの縦方向のビームの様子。

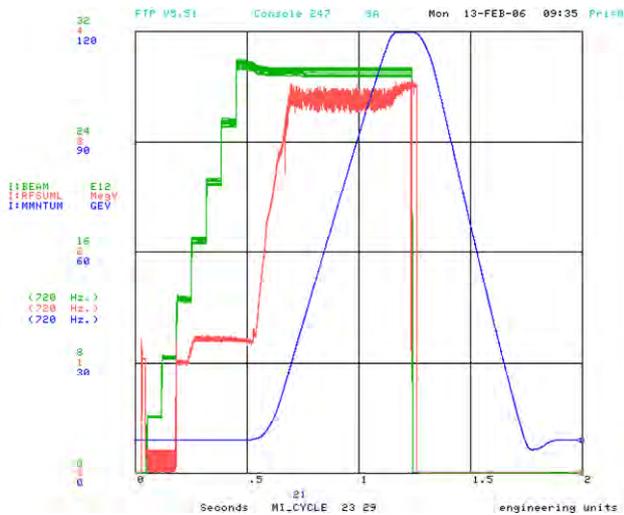


図3 Mixed mode operationにおける7バッチ加速

7-段 green : ビーム強度, パンプ blue : モーメンタム, 2-段 red : 高周波電圧

3. Slip stacking と MI の高周波システム

Slip stacking では異なる周波数を持つ二つの高周波電圧を使用する。まず、1番目のバッチを中心周波数の高周波バケツに入射する。この周波数を下げていくと、バッチは減速され、中心軌道よりも内側を低い周波数の高周波バケツとともに周回する。そこへ2番目のバッチを1番目のバッチと重複しないように入射する。2番目のバッチは、中心軌道を中心周波数の高周波バケツとともに周回する。後に、二つの周波数を上げ、二つのバッチがエネルギー方向

に対称になるようにする。二つのバッチが重なり合った際、中心周波数のより高い電圧の高周波バケツにそれらを取り込む。実際の運転に用いた各周波数の変化、高周波電圧を図4に示す。周波数1は1番目のバッチが入射された後で下がり周波数2が中心周波数となり2番目のバッチが入射される。後に二つの周波数は中心周波数に対して対称になるように上がる。周波数差は常に一定に保たれ、二つのバッチが重複した際に単一周波数、より高い高周波電圧となる。

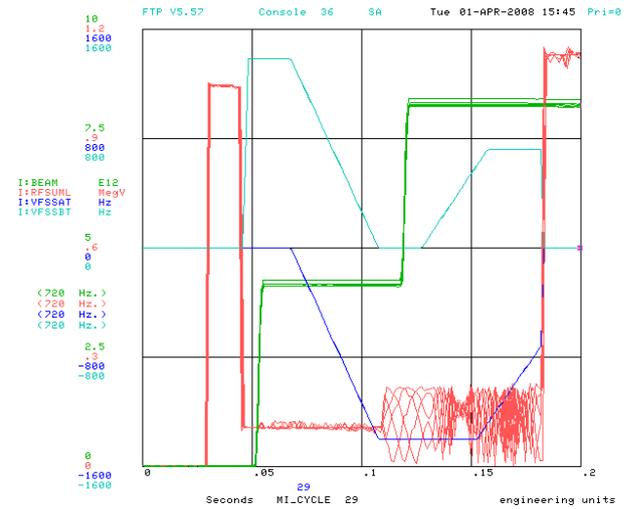


図4 高周波パラメータの変化

2-段 green : ビーム強度, 台形下 blue : 周波数1, 台形上 cyan : 周波数2, 2-柱 red : 高周波電圧

運転に用いた高周波の周波数の値は、シミュレーションとビーム実験により、ビームロスをもっとも低く抑えられるように設定した[2-4]。各バッチは110kVの高周波バケツに入射され、周波数変化に伴い加速、減速する。入射バンチはこの小さい高周波バケツにマッチするため、ブースター取り出し直前に bunch rotation によりエネルギー方向に低く、バンチ長の長いバンチへと変換され、MIの入射バケツに合った形状となる。二つの周波数の周波数差は1400Hzに保たれる。二つのバッチが縦方向に重なった際、これらは、中心周波数である52811400Hzの1.1MVの高周波バケツに取り込まれ、その後120GeVまで加速される。

MIは18台の53MHzの高周波空洞を持ち、そのうち3台が1番目のバッチに、他の3台が2番目のバッチに使用され、最後の取り込み、その後の加速には18台すべてが使用される。

MIの8GeVにおける momentum aperture の測定結果は $\pm 1\%$ 、周波数に直すと $\pm 3000\text{Hz}$ である。よってMIは1400Hzの周波数変化を充分受け入れられる momentum aperture を持つ。

4. 二つの周波数のビームに及ぼす影響

ビームは二つの高周波電圧を同時に受けながら運動するので、周波数のずれた高周波電圧はビームのシンクロトロン振動に影響を及ぼし、エミッタンスを増幅させる。この二つの周波数のビームに与える影響をシミュレーションにより求め、得られた縦方向の位相空間を図5に示す。ここではまず、高周波電圧を110kV、周波数をビームに同期した周波数とし、粒子を高周波バケツ内のエミッタンスが保存される軌道上の周りに置いた。つまり、周波数、電圧をそのまま一定に保つと、図5の左上の位相空間はずっとこの形を保つことができる。そこで二つ目の高周波電圧をかけ、その高周波を中心周波数より1200Hz高く設定した。図5中に二つ目の周波数の位相空間上の粒子に及ぼす影響を時間を追って示す。時間が経過するとともに粒子は軌道を変え、130msec後の位相空間は図5右下となった。この右下の図中にすべての粒子は含まれておらず、一部の粒子は高周波バケツの外に追いやられて、高周波電圧による収束力を受けない。これらの粒子はやがてビームロスへとつながる。

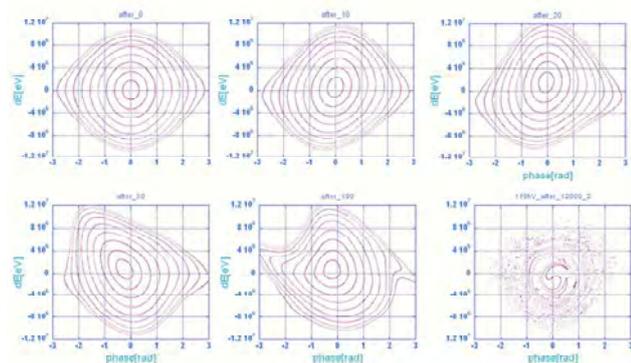


図5 シミュレーションにより得られた位相空間上の粒子分布の時間変化

左上より0, 10, 20, 50, 100, 12000 ターン後の様子。
縦軸： ± 12 MeV，横軸： ± 3 radians

このシミュレーションから得られた粒子の時間変化を逆向きに追うことで、130msec後に粒子が高周波バケツ内に留まるには入射時にどこに位置すればよいか、つまり、二つの周波数を持つ際の高周波バケツのアクセプタンスが求められる。図6は実際に運転に用いられたパラメータの高周波バケツである。ブースターから入射されるパンチでこの中に納まらない部分は失われる。

測定により得られたブースターのエミッタンス $0.12 \text{ eV} \cdot \text{sec}$ を用い、slip stackingの行程をシミュレートし、得られた位相空間を図7右に示す。図7左は実際の測定から得られたslip stacking終了時の位相空間である。この測定結果は、WCMの信号をphase space tomographyのソフ

トウェアを用い解析したものである。測定、シミュレーション両方の結果から、slip stacking終了時のエミッタンス $0.35 \text{ eV} \cdot \text{sec}$ とビームロス5%を得た。

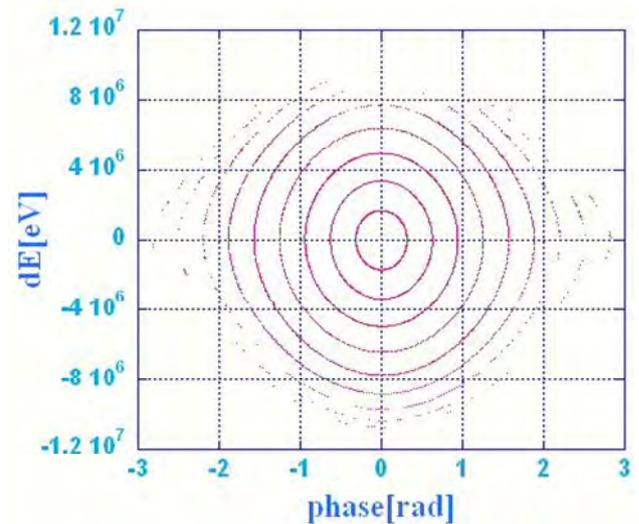


図6 二つの高周波周波数を受ける際の縦方向のアクセプタンス

高周波電圧は各110kV，周波数差は1400Hzに設定。

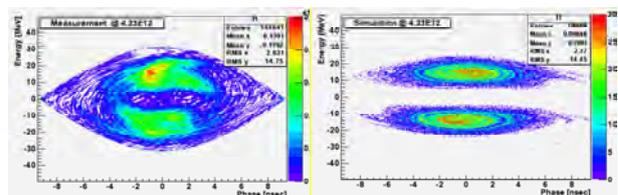


図7 Slip stacking終了時の位相空間

左が測定結果，右はシミュレーションにより得られた結果。
縦軸： ± 50 MeV，横軸： ± 9 nsec

5. ビームローディングの影響

Slip stackingでは通常より低い高周波電圧を用いるため、ビームはビームローディングの効果を受けやすい。そこで、ビームローディング効果のビームに及ぼす影響を、シミュレーション、ビームスタディにより推測し、高周波増幅器の増強を行った[5]。

ビーム強度を 4×10^{12} ppp まで上げると、フィードフォワードによる電圧補償がない場合、ビームローディングの効果がWCMの信号で顕著に確認された。図8から解るように、電圧補償がない場合、バッチの後方に位置するパンチはビームローディングの効果をを受けて広がっている。そこで従来のフィードフォワードの電圧補償ゲイン、14dBを適用すると、パンチはもとの大きさを保つことができた。しかし、ビーム強度をさらに上げるとビームローディングの効果を受け、後方のパンチは広がりをみせた。

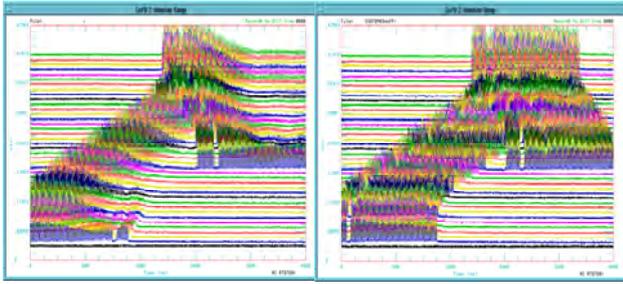


図8 ビーム強度 4×10^{12} ppp における mountain range plot 電圧補償がない場合(左)とフィードフォワードによる電圧補償が14dBの場合(右)。

大強度運転にむけて、ビーム強度を 10^{13} ppp まで上げるためのシミュレーションを行い、必要なゲインを計算した。図9はシミュレーション結果から得られた slip stacking 終了時の位相空間上の二つのバッチの様子で、上は14dB、下は20dBのフィードフォワードの効果を入れて計算を行った。図9から解るように、14dBの場合、各バッチはともに広がり、20dBの場合、もとの形を保っている。

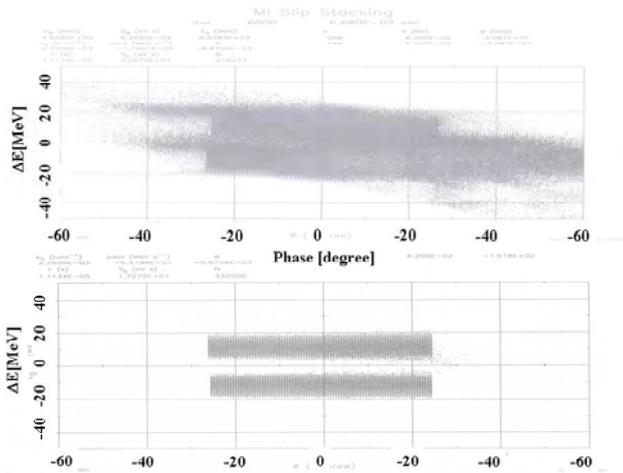


図9 ビーム強度 10^{13} ppp を仮定した場合のビームローディング効果を考慮したシミュレーション結果から得られた slip stacking 終了時の位相空間の様子

上はフィードフォワードゲイン14dB、下は20dBの場合

フィードフォワードゲインを14dBから20dBに上げるために、2004年8月のシャットダウン中に各18台の高周波システムに前段増幅器を追加し、そのパワーを4kWから8kWへと増強した。図10はスペクトラムアナライザにより得られた高周波ギャップに発生する電圧の周波数スペクトラムである。フィードフォワード電圧補償により、ビームローディングにより誘起される電圧は24dB減少した。2004年12月以降の運転において入射ビーム強度を 9.5×10^{12} ppp まで上げたが、ビームローディングの効果はビームに影響を及ぼしていない。

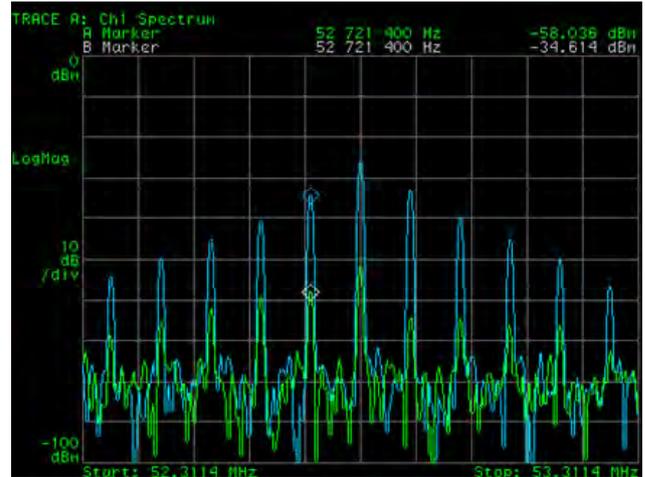


図10 スペクトラムアナライザにより得られた高周波ギャップに発生する電圧の周波数スペクトラム

低 green : フィードフォワード電圧補償あり,
高 blue : 電圧補償なし

6. 11 バッチ運転のための slip stacking

Slip stacking を用いてニュートリノターゲットへのビーム強度を上げようとする計画、“Proton Plan”では11バッチをブースターからMIに入射し、2バッチを反陽子生成のターゲットへ、9バッチをニュートリノターゲットへ取り出す[6]。反陽子生成のターゲットへのビーム強度は 8×10^{12} ppp に保ち、ニュートリノターゲットへのビーム強度を 22.5×10^{12} ppp から 37×10^{12} ppp へ上げ、2.2secの周期で取り出す。よってトータルのビームパワー、400kWを供給することが目的である。

2005年8月よりビームスタディが開始され、multi-batch slip stacking の手法が実証された[7,8]。Multi-batch slip stacking とは10バッチをブースターから入射し、それらを slip stacking を用いて線密度が2倍の5バッチにした後、さらにもう1バッチを入射し、合計11バッチを同時に120GeVまで加速しようとするものである。Multi-batch slip stacking では、まず5バッチを入射し、それらを減速する。前に述べたように、MIは7バッチ分の高周波バケツが存在する。よってさらにバッチを入射することができる。そこで6番目のバッチを、中心周波数を持つ高周波バケツへ入射する。5バッチの周波数はずれているため、6番目のバッチからみて、それらは縦方向にスリップする。6番目のバッチが5バッチと重なった後、さらにバッチを入射する隙間ができるので、そこへ7番目のバッチを入射する。これを10番目のバッチまで繰り返す、エネルギー方向に高い5バッチ、低い5バッチが重なった後、大きな高周波バケツで取り込む。Multi-batch slip stacking に用いられた周波数差は1425Hz、各高周波電圧は110kVである。図11は8GeVにおける mountain range plot で、11バッチ入射の様子と multi-batch slip stacking 終了後、1個の slip stacking

バッチ, 4 個の slip stacking バッチ + 1 バッチ, それらの間に存在する取り出しキッカーのためのギャップが観測できる。図 12 は 11 バッチが入射され, 120GeV まで加速されたことを示す。

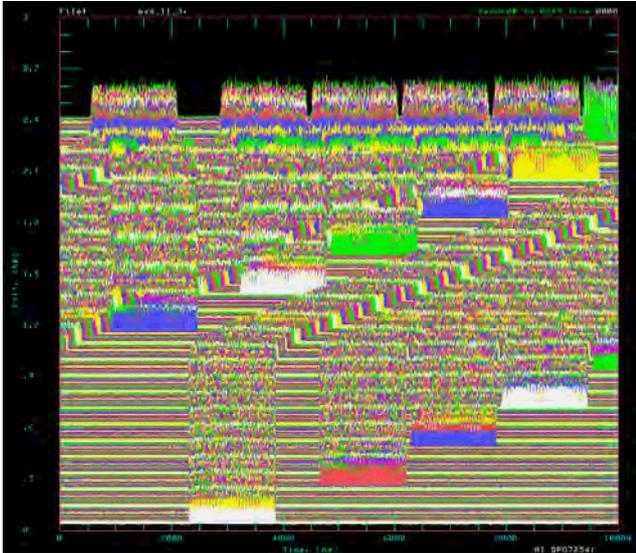


図 11 Multi-batch slip stacking の mountain range plot
入射から multi-batch slip stacking 終了後までの様子。

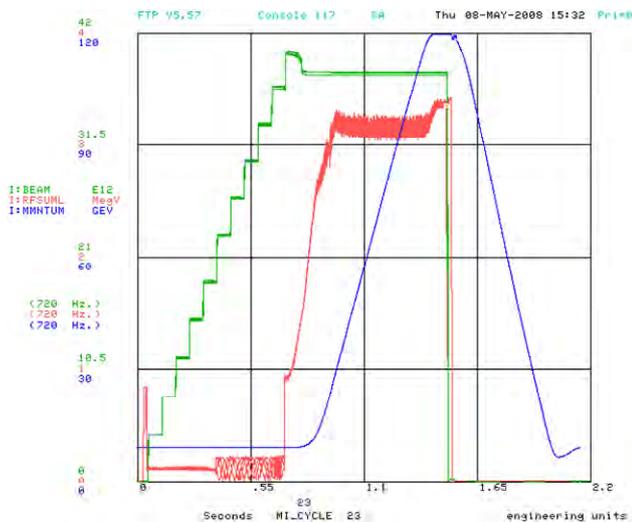


図 12 Multi-batch slip stacking operation の 11 バッチ加速
11-段 green : ビーム強度, パンプ blue : モーメンタム,
2-段 red : 高周波電圧

Multi-batch slip stacking は 2008 年 1 月より通常運転に用いられ, 現在, 8×10^{12} ppp を反陽子生成のためのターゲットへ, 30×10^{12} ppp をニュートリノターゲットへ供給している。ビームスタディにおいては, ビーム強度 46×10^{12} ppp を 120GeV まで加速した。図 13 は Multi-batch slip stacking 運転開始時からのこれまでの MI のトータルビームパワーの変化を示す。2008 年 5 月の時点で, 340kW を安定に供給し, 現在これを 400kW まで上げるためのビームスタディ, チューニングを行っている。

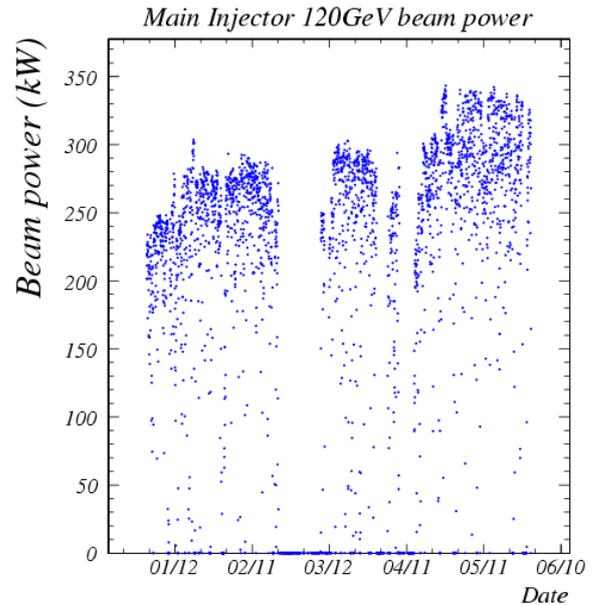


図 13 Multi-batch slip stacking 運転開始時からの現在までの MI のトータルビームパワーの変化

7. ビーム損失の原因と対処

Multi-batch slip stacking による大強度運転において, ビームロスを 5% 以下に抑え, ビームロスの場所を特定し, それをモニター, コントロールすることが現在の重要な課題である。図 14 はブースターから入射されたトータルのビーム強度と, MI 内のビーム強度を示す。つまり二つの差をとると, これらは MI 内で失われたビーム, すなわちビーム損失である。Multi-batch slip stacking におけるビーム損失の原因をビームスタディ, シミュレーションにより測定した結果, ビーム損失には大きく分けて四つの種類があることが解った。以下, “ビーム入射時の損失”, “加速開始時の損失”, “8GeV におけるスローロス”, “ビーム取り出し時の損失”について, 形成過程と対処方法を述べる。

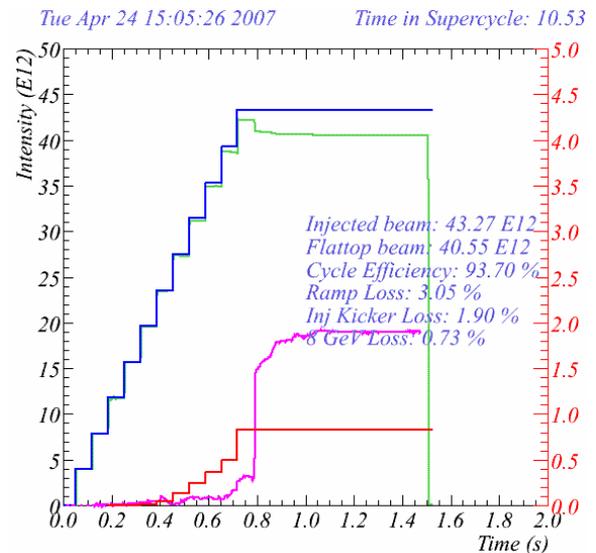


図 14 11-段上 blue: ブースターから入射されたトータルのビーム強度, 11-段下 green : MI 内のビーム強度

7.1 ビーム入射時の損失

図 14 を詳しくみると、各バッチの入射毎に、ブースターから入射されたビーム強度と MI のビーム強度と間に差があり、これはブースターから新しくバッチを入射すると同時に、MI 内に存在していたビームを失っていることを示す。図 15 はシミュレーション結果より得られた縦方向の位相空間で、6 - 11 番目の各バッチ入射直前の様子である。左上の図に注目すると、中心エネルギー付近に多くの粒子が減速されないまま滞在していることが解る。これらは slip stacking に用いられる二つの周波数の影響により、高周波バケットの中に留まることのできなかった粒子である。図 16 左はバンチ 1 個を位相空間の中心、0 [bucket] に入射し、中心周波数とそれより高い周波数の高周波電圧をかけた場合の位相空間の様子である。エネルギーの高い粒子は収束力を失い、バケットの中に留まることができず、バケットの外を周回して位相方向に広がっている様子が窺える。図 16 右は逆に中心周波数よりも低い周波数をかけた場合を示す。このように収束力を失った粒子は高周波バケット内に存在しないので、slip stacking の過程において周波数を下げても減速されず、そのまま中心エネルギー付近に残存することになる。よって、図 15 左上において、6 番目のバッチを入射すると同時に、中心エネルギー付近の粒子を入射キッカーにより蹴り出すことになる。

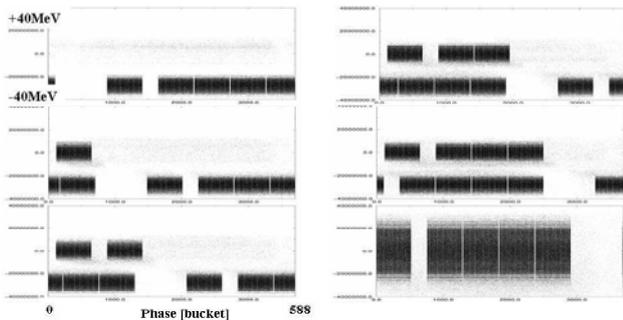


図 15 シミュレーション結果より得られた 6 - 11 番目の各バッチ入射直前の縦方向の位相空間の様子

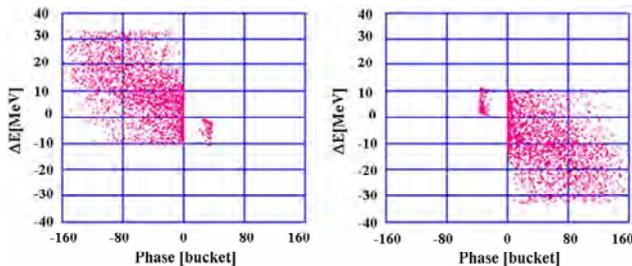


図 16 バンチ 1 個を中心エネルギー 0 [bucket] の位置に入射し、中心周波数とより高い周波数の高周波電圧をかけた場合（左）とより低い周波数の場合（右）の位相空間の様子

現在 gap clearing kicker の建設中であり、このキッカーを各入射の少し前に立ち上げることで、入射キッカーギャップに存在するビームをビームダンプへと送った後、ブースターからバッチを入射することができる。これにより、入射キッカー付近に局所的にビーム損失が集中してキッカーが放射化されることを防ぐ。

7.2 加速開始時の損失

図 14 より 0.8sec に明らかな損失が見受けられる。これは加速のために磁場が励起されるタイミングである。図 17 はシミュレーションより得られた加速直前と 8GeV から 10GeV まで加速された後の位相空間である。Slip stacking 終了時に大きな高周波バケットに取り込むことができなかった粒子は加速されず、そのまま低いエネルギーに滞在することが解る。これらの粒子はやがて momentum aperture を越え、ビームパイプに当たってビーム損失となる。

2007 年 9 月のシャットダウン中に 4 台のコリメータが MI ヘインストールされた。エネルギー差のある粒子は加速開始時にコリメータへと収集される[9]。現在ビーム強度を上げるとともに、コリメータとビーム軌道のチューニングを行っている。

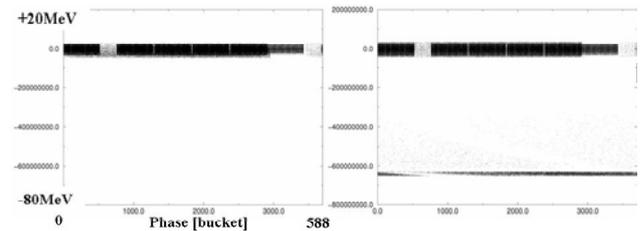


図 17 シミュレーションより得られた加速直前と 10GeV まで加速された後の位相空間

7.3 ビーム取り出し時の損失

Multi-batch slip stacking によるビームを反陽子生成のためのターゲットへと取り出したところ、MI の取り出しキッカー付近と、取り出しビームラインにおいてビーム損失が観測された。取り出し時のビームを WCM により観測したところ、取り出しキッカーギャップ上に小さなバンチが存在していることが分かった（図 18）。図 17 にもみられる様に、slip stacking 時に高周波バケットの外を漂っていた粒子の内、slip stacking 終了時に大きな高周波バケットによって取り込まれ、そのまま加速されているものがある。これらの粒子が 120GeV において小さなバンチとして観測される。

図 15 からわかる様に、最初に入射された反陽子生成のためのバッチの直後のギャップ（右側のギャップ）には 10 番目のバッチの入射まで中心エネルギーを持つバッチが重複しない。そこで 8GeV において bunch by bunch transverse

damper を用い horizontal と vertical にビームを anti-damp し、横方向のエミッタンスを増加させることで逆にビーム損失を起こす[10]。よって右側の取り出しキッカーのギャップに存在していた粒子は bunch by bunch transverse damper により 8GeV で掃き出される。これにより、ビーム損失を 120GeV ではなく 8GeV で起こし、MI の放射化を抑えている。図 19 はビーム取り出し直前の WCM の信号で、bunch by bunch transverse damper による anti-damp によって、120GeV において取り出しキッカーギャップ内にバンチが存在しないことを表している。

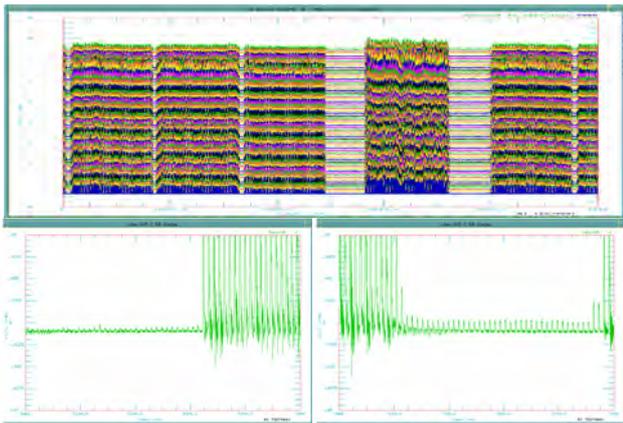


図 18 (上) ビーム取り出し時のビーム mountain range plot
(下) 上の測定結果より取り出し直前のトレースを反陽子ターゲットへのバッチ付近で拡大した図

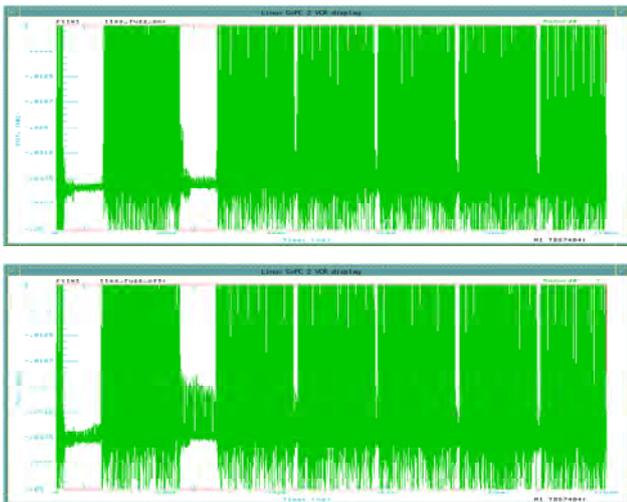


図 19 取り出し時の WCM の信号

Bunch by bunch transverse damper による anti-damp あり (上), なし (下) の比較

7.4 ビーム損失の測定とシミュレーション

各ビーム損失の割合を測定し、シミュレーションによる値と比較した。シミュレーションを始める前に、ブースターより入射されるビームの縦方向のエミッタンスを、ビーム強度を変えながら測定した。結果は表 1 のとおりである。

表 1 各入射 1 バッチのビーム強度に対するバンチ長、エネルギー方向への拡がりの測定結果

Intensity	Energy spread	Bunch length
1.77×10^{12} ppp	± 6.88 MeV	± 2.94 nsec
2.65×10^{12} ppp	± 7.62 MeV	± 3.36 nsec
3.44×10^{12} ppp	± 8.99 MeV	± 3.56 nsec
4.23×10^{12} ppp	± 9.37 MeV	± 3.58 nsec

これらの値は WCM の信号を phase space tomography (図 20, 図 21) を用いて解析し得られたものである。図 20 からわかるように、入射 1 バッチのビーム強度を 1.77×10^{12} ppp から 3.44×10^{12} ppp まで上げるにともない、バンチ長、エネルギー方向への拡がりはともに増加する。図 21 はビーム強度 4.23×10^{12} ppp において 4 回測定を繰り返し、その結果得られたものである。位相空間上の粒子の分布は測定ごとに変化しているうえ、図 21 右上に関しては、二つのピークがある。表 1 中の値はこれらの平均値をとったものである。

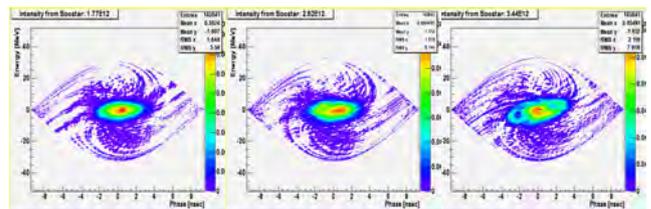


図 20 ビーム強度 1.77×10^{12} ppp, 2.65×10^{12} ppp, 3.44×10^{12} ppp の場合の測定より得られた位相空間上のビームの分布

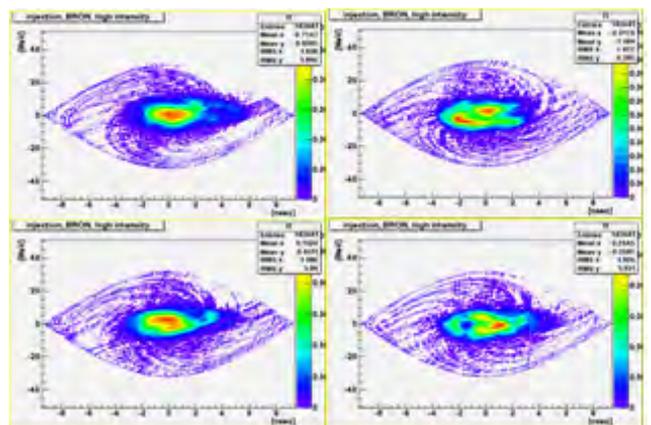


図 21 測定より得られたビーム強度 4.23×10^{12} ppp の場合の位相空間上のビームの分布

表の値を用いビーム入射時の損失、加速開始時の損失をシミュレーションにより求めた結果を図 22 に示す。また、いくつかの異なるビーム強度に対してビーム損失の測定を行った結果を図 22 に重ねて示す。測定結果はシミュレシ

オン結果とほぼ一致し、双方の結果ともブースターからのビーム強度が高いほどビーム損失が大きくなることを示している。また、図 21 は Proton Plan で要求される入射 1 バッチのビーム強度 4.3×10^{12} ppp 付近においてビームの分布が安定しないことを表している。

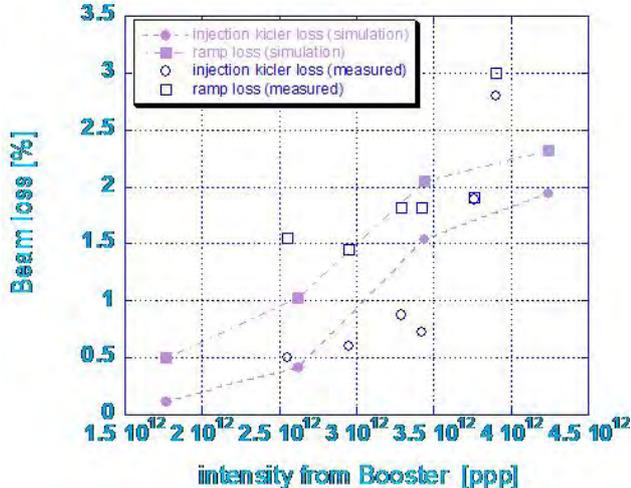


図 22 測定、シミュレーションにより得られたビーム入射時の損失と加速開始時の損失

図 23 はシミュレーションにより得られたビーム取り出し時のビーム損失であり、ビーム損失を反陽子生成のためのバッチの右側と左側のキッカーギャップに分けて導出した。この結果も図 18 と同様に、右側のギャップのほうの粒子が多いことを示している。

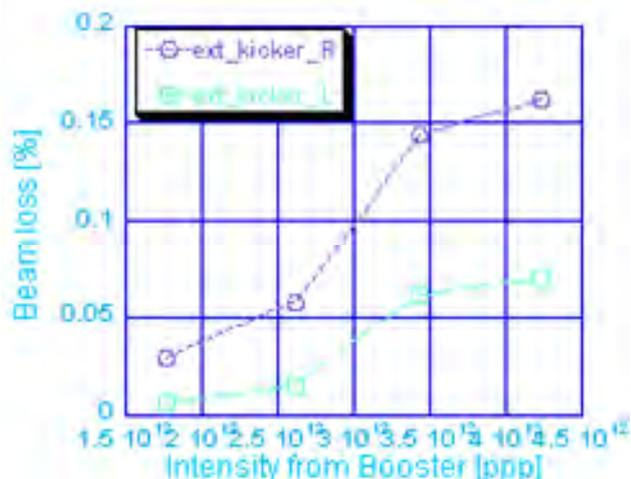


図 23 シミュレーションにより得られたビーム取り出し時の損失、右側と左側のキッカーギャップの比較

以上三つの損失とも、ブースターから入射されるビームの縦方向のエミッタンス、安定度に強く依存する。現在ブースターではトランジションにおける四極振動抑制のための damper の改良を行っている。

“8 GeV におけるスローロス” について今回触れなかったが、この損失は横方向のエミッタンスが 8 GeV においてゆっくりと増加することにより発生する。運転では bunch by bunch transverse damper を用い chromaticity を -20 から -3 に下げるによりエミッタンスの増加を最小限に抑えている。現在ビームスタディ中である。

8. まとめ

Fermilab MI において、反陽子生成のターゲットに送るビーム強度を上げる手法として slip stacking の開発が行われた。ビームスタディとシミュレーションの結果より、slip stacking に用いる高周波のパラメータを最適化した。また前段増幅器を強化することで大強度運転におけるビームローディング効果の補正を行った。2004 年 12 月より slip stacking による運転を開始し、反陽子ターゲットへのビーム強度は 5×10^{12} ppp から目標値であった 8.5×10^{12} ppp へと増強された。

Slip stacking の手法を用いてニュートリノターゲットへのビーム強度を上げようとする計画、“Proton Plan” において、multi-batch slip stacking の開発が行われた。Multi-batch slip stacking におけるビーム損失をビームスタディとシミュレーションにより理解し、それに対する対処を行った。Multi-batch slip stacking は 2008 年 1 月より通常運転に用いられ、 8×10^{12} ppp を反陽子生成のためのターゲットへ、 30×10^{12} ppp をニュートリノターゲットへと供給している。現在、トータルのビームパワーを 340 kW から目標値である 400 kW まで増強するためのビームスタディ、チューニングを行っている。

Multi-batch slip stacking を用い、将来計画である 700 kW のビームを用いたニュートリノ実験へビームを供給することが検討されている。

参考文献

- [1] K. Koba, “Status of the Fermilab Main Injector”, PAC01, Chicago, June 2001.
- [2] K. Koba, “Slip Stacking at Low Intensity – Status of the Beam Studies”, MI-0294, February 2003.
- [3] K. Koba, “Slip Stacking experiments at Fermilab Main Injector”, PAC03, Portland, May 2003.
- [4] K. Seiya *et al.*, “Status of Slip Stacking at the Fermilab Main Injector”, PAC05, Knoxville, May 2005.

- [5] J. Dey *et al.*, “53 MHz Beam Loading Compensation for Slip Stacking in the Fermilab Main Injector”, PAC05, Knoxville, May 2005.
- [6] I. Kourbanis, “Present and future high energy accelerator for Neutrino experiment”, PAC07, Albuquerque, New Mexico, June 2007.
- [7] K. Seiya *et al.*, “Multi-batch slip stacking in the Main Injector at Fermilab”, PAC07, Albuquerque, New Mexico, June 2007.
- [8] K. Seiya, “Slip stacking”, CARE-HHH-APD workshop “BEAM’07”, Geneva, Switzerland, 1-5 October 2007.
- [9] B. Brown *et al.*, “Collimation System for Beam Loss Localization with Slip Stacking Injection in the Fermilab Main Injector”, EPAC08, to be published.
- [10] P. Adamson *et al.*, “Operational performance of a bunch by bunch digital damper in the Fermilab Main Injector”, PAC05, Knoxville, May 2005.