

BEAM POWER UPGRADE SCENARIO FOR J-PARC MAIN RING

Masahito Tomizawa, Katsuya Okamura, Masahito Yoshii
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have proposed a beam power upgrade scenario for the J-PARC Main Ring. This scenario raises an acceleration cycle at a relatively low output energy in order to increase the beam power. We can remarkably save the electric power necessary for an excitation of the MR magnets in this scheme.

J-PARC Main Ringでのビームパワー増強の可能性

1. はじめに

J-PARCの加速器は大強度陽子ビームを様々な目的を持つ実験施設に供給するためのもので、400MeVリニアック、3GeVシンクロトロン(Rapid Cycle Synchrotron, RCS), 50GeVシンクロトロン(Main Ring, MR)から構成される。ただし現在のリニアックはSDTLまでの構成となっておりエネルギーは180 MeVである。早期実現にむけて現在努力がなされているACSリニアックを追加することによって400 MeVまでの加速が可能となる。またMRのエネルギーは現在30 GeVに制限されているが、J-PARCの2期計画で50 GeVのエネルギーまでの加速が可能となる[1]。

RCSのharmonicsは2, MRは9で運転される。図1に示されているように、RCSで加速された2バンチビームを4回MRに入射し、合計8バンチをMRで蓄積し加速する。MRの残りの1バケツは取り出しキッカーの立ち上がり時間にあてられる。図2で示されているMRで50 GeVまで加速するための標準パターン

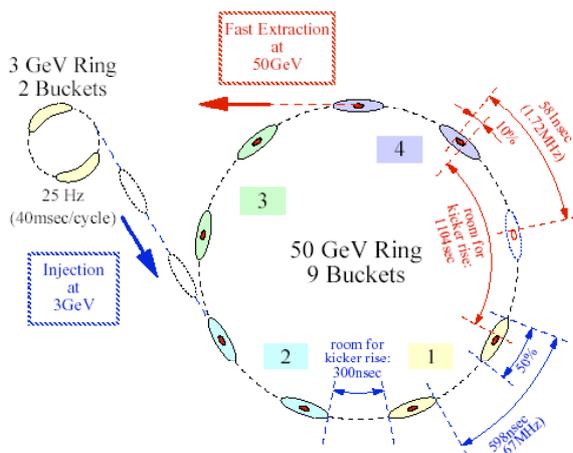


図1 RCSからMRへのビーム入射スキーム
(白壁義久氏の好意による)

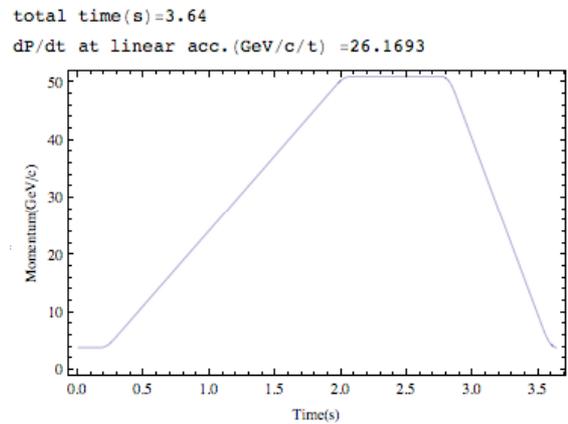


図2 50GeV標準加速パターン

ンでは、入射、加速、フラットトップ、リセットの時間はそれぞれ、0.17, 1.9, 0.7, 0.87秒で、合計の繰り返し時間は3.64秒である。設計加速粒子数は 3.2×10^{14} ppp、平均ビーム電流は15 μ A、50 GeVでのビームパワーは750 kWとなる。フラットトップの0.7秒は遅い取り出しによってビームを取り出すための時間である。このパターンで50 GeV運転を可能とするには1次電力ライン変動を抑えるためにフライホイール発電機またはSMES等の電力貯蔵システムを必要とする。さらにこの設計粒子数をMRで加速するためには、強い空間電荷効果によるビームハローによって引き起こされるビームロスを抑制するためにbunching factorを約0.2から0.4程度まで大きくする必要がある。これは280 kVの基本波加速空洞に加えてその約半分の電圧を発生させる第2高調波空洞の導入によって達成される。

ニュートリノ振動等の実験では、陽子のビームエネルギーは許容範囲が広く、重要なのはビームパワーである。ビームパワー(P)は次のように書くこと

ができる。

$$P(\text{kW}) = T(\text{GeV}) \times I(\mu\text{A}), \quad (1)$$

ここで、 T は陽子ビームの運動エネルギー、 I は陽子ビームの平均電流である。平均電流は次のように表わされる。

$$I(\text{A}) = e n_p / t_{\text{rep}} (\text{s}), \quad (2)$$

ここで e は陽子の電荷、 n_p はリング内の粒子数、 t_{rep} は加速の繰り返し時間である。従って(1), (2) 式より、加速エネルギーを下げ、その分加速繰り返しをあげることで粒子数を増やさなくても同じビームパワーを得ることができる。また、同じ粒子数でも繰り返しを上げられるならばビームパワーを増強できることになる。このシナリオの1つの大きなメリットは、最大運転磁場を下げることができるので、電磁石の消費電力を減らすことができる点である。反対に問題となる可能性があるのは、以下の通りである。取り出しエネルギーが下がると **adiabatic damping** 効果が小さくなるため取り出しビームサイズが大きくなる。取り出し軌道のアクセプタンスが十分でない場合はビームロスを引き起こす可能性がある。この解決策として、MRの速い取り出し軌道を現状のキッカー、低磁場セプタム磁石、高磁場セプタム磁石の組み合わせを、低磁場セプタム磁石の部分で大口径キッカーで置き換える案が提案されている[2]。また、繰り返しを上げる場合、平均電流が上がるため、RCSからMRまでのビーム輸送系やMRにおける入射エネルギーでのビームロスは繰り返し時間に反比例して増えることに注意が必要となる。

本論文ではこの低エネルギー・高繰り返しシナリオの具体例を示し実現可能性と検討課題について報告する。

2. 前提条件

リニアックのエネルギーは180 MeVと400 MeVの両者を考える。RCSの設計加速粒子数は、400 MeVリニアックを想定した場合 8×10^{13} 個である。標準運転ではRCSのハーモニクス(h)は2、バンチ数は2である。この場合バンチあたりの粒子数は 4×10^{13} 個となる。MRではこのRCSからのビームを4回入射する。従ってMRの加速粒子数は 3.2×10^{14} 個となる。

一方、RCSのハーモニクスを1で運転することも今後の1つのシナリオとして考えられる。この場合RCSのRF空洞は制御装置を中心としたローレベル高周波の改造で済むと考えられている。MRの h は9で、8回入射を行い8バンチを加速する。RCSが $h=1$ の場合、

RCSの1バンチあたりの粒子数は 8×10^{13} 個まで可能であるが、この粒子数を持つバンチをMRに8つ溜め込むことはできないことに注意が必要である。MRで高調波空洞の導入をした場合でも、全粒子数 3.2×10^{14} 個が、スペースチャージに起因するビームロスからくる現状のリミットとなっているからである。これはスペースチャージを取り入れたORBIT等のコードで今まで得られた結果から推測される[3]。従ってRCSを $h=1$ 、MRを $h=9$ で運転した場合でも、バンチあたりの粒子数は 4×10^{13} 個としておくのが正しいと考えられる。

現状ではリニアックのエネルギーは180 MeVでありRCSの入射時のスペースチャージの影響により、RCSで加速できるバンチあたりの粒子数は、 $h=2$ では 4×10^{13} 個の6割と見積もられている[4]。従ってMRを $h=9$ 、8バンチで運転した場合、ビームパワーは設計の60%となる。RCSを $h=1$ で運転できれば、バンチあたり 4×10^{13} 個の粒子をMRに8回入射することにより、入射にかかる時間の減少分を無視すればほぼビームパワーは回復する。以下の議論では速い取り出しのみを考える。今回の議論ではMRに高調波空洞が導入されていることを前提にしている。

3. 低電力ビーム増強のシナリオ

3.1 現状から設計ビームパワー

現状ではリニアックのエネルギーは180 MeVである。従ってRCSで加速できる粒子数は 8×10^{13} 個の6割である 4.8×10^{13} 個である。MRの加速エネルギーは30 GeVである。RCSを $h=2$ 、2バンチ運転で4回MRに入射した場合のMRの加速パターンの1つの例が図2に示されている。パターンは運動量を時間の関数として表現している。入射時間は0.17秒で実際の入射にかかる時間0.12秒に入射前に磁場の安定性を確保

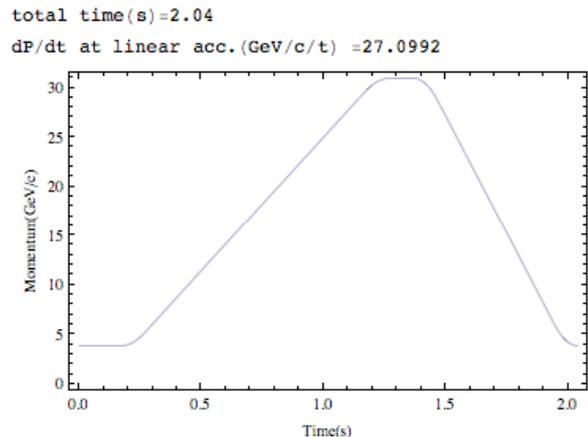


図3 30GeVの2.04秒周期の加速パターン

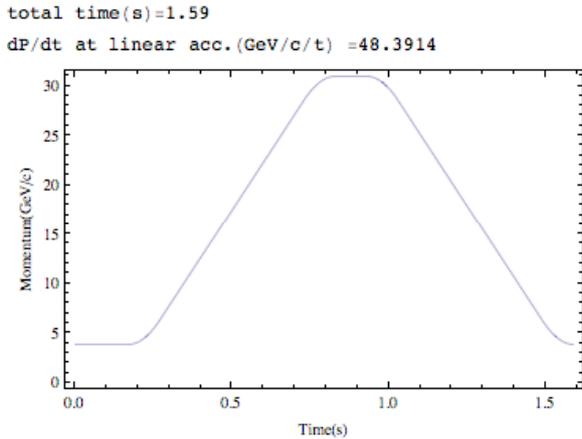


図 4 30GeV, 1.59秒周期のパターン

するための0.05秒を加えている。加速、リセットは直線で、加速直後、フラットトップの直前・直後、フラットボトム直前にそれぞれ0.1秒のパラボラ部を設けている。フラットトップは0.1秒としている。従って加速周期は2.04秒となる（図3参照）。このパターンでの加速勾配は27GeV/c/sで50GeVの標準パターンと同等である。必要な基本波RF空胴の電圧は280 kVであり、50GeV標準パターンに必要な電圧と同じである。このときビームパワーは470 kW、平均電流は15.7 μ Aとなる。

一方、RCSをh=1で運転しMRをh=9で8回入射する場合、バンチあたりの粒子数は 4×10^{13} 個である。入射時間は0.33秒で加速周期は2.2秒となる。ビームパワーは0.73 MWが期待される。

リニアックのエネルギーが400 MeVまで回復した場合は以下の通りとなる。RCSをh=2、バンチ数2で運転した場合、バンチあたりの粒子数は 4×10^{13} 個となり、MRをh=9で運転し4回入射した場合の加速周期は2.04秒となるので、期待されるビームパワーは0.78 MW、平均電流は26.1 μ Aとなり、30 GeVのエネルギーでも設計のビームパワーを期待できることになる。このパターンでは電磁石の平均電力は18 MWと計算され、50GeVの標準パターンに必要な50 MWと比較するとかなり少なくてすむ。

3.2 1MWビームパワー

次のステップとして、MRの加速エネルギーは30GeVのままで、加速勾配を上げて繰り返しをあげて考える。リニアックのエネルギーは400 MeV、RCSはh=2、バンチ数2、MRはh=9、8バンチ運転を想定する。MRにおいて48.4 GeV/c/sの加速勾配にした場合、パラボラ領域を含んだ加速時間は0.66秒となり、リセット時間も0.66秒とした場合、加速周期は1.59秒に短縮される（図4参照）。その結果期待されるビームパワーは1.0 MWに達する。このとき平均電流は33.5 μ Aである。この加速勾配を達成するためには電磁石電源の増強に加えて、500 kVの

基本波RF空胴と対応した高調波RF空胴が必要となる。リセット時間をさらに短くとればさらにビームパワーを上げることができる。繰り返しを上げたことによる電力増加はそれほど大きくなく、電磁石の平均電力は21 MW程度である。このシナリオまでは電力貯蔵システムは必要ないとされている。

3.3 2MWビームパワー

さらにMRの加速勾配を65 GeV/c/s程度まであげて考える。この場合700 kVの基本波RF空胴と対応した高調波空胴が必要となる。RF空胴を置くためのスペースが問題となる場合は現在の空胴よりさらに高い電圧勾配を持つ空胴を用意する必要がある。電磁電源の一次側には、フライホイール発電機等の電力貯蔵システムが必要となる。電磁石電源自身もかなりの規模の増強が必要となる。パターンにおいて入射の前に確保してあった0.05秒をやめ、加速の前後のパラボラの時間を半分に、フラットトップやリセットの前後のパラボラの時間を無視できる程度に設定できると仮定すると、加速周期は0.85秒まで減らすことができる。このときビームパワーは約1.9 MWに達し、平均電流は60 μ Aを超える。

4. おわりに

J-PARC MRの電磁石での電力を抑えながらビーム強度をアップグレードするシナリオを示した。

さらに同じエネルギーでビーム増強を目指す場合、繰り返し時間をさらに短縮するために加速パターンのパラボラ部やリセット時間のさらなる短縮が必要となる。入射時間を事実上ゼロにするために、MRと同じ周長の蓄積リングを用意しRCSからのビームを一旦このリングに蓄積し、MRの加速直前に蓄積されていたビームをMRに入射する方法も考えられる。加速勾配はRF空胴の電圧で決まる。将来さらなる高電圧加速空胴が開発されれば、加速周期をさらに短くできビームパワーを増やすことが可能となる。もちろんこのためには、電磁石電源の増強やeddy current対策のため真空チェンバーの交換などが必要となる可能性がある。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki et al., "Accelerator Technical Design Report", KEK Report 2002-13
- [2] M. Tomizawa et al., "New Beam Optics Design of Injection/Fast Extraction/Abort Lines of J-PARC Main Ring", Proc. of 2007 Particle Accelerator Conf., 2007, p. 1508-1510
- [3] A. Y. Molodozhentssev, private communication
- [4] S. Machida, private communication