

CHALLENGES TO ACHIEVING HIGH-POWER OPERATION OF THE J-PARC MR

Hitoshi Kobayashi^{1,A)}, Hiroshi Matsumoto^{A)}, Masakazu Yoshioka^{B)}

A) KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Accelerator Laboratory

B) KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Institute for Particle and Nuclear Studies
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

Physics runs of the Neutrino experiment began in January 2010, and the first neutrino event at the Super-Kamiokande was observed in February 24, 2010. Thus J-PARC is in full operational mode for some users, and their access to a stable machine has to be preserved. However, the original MR design had issues, which must be overcome in order to achieve the J-PARC design beam power and to perform the T2K experiment. This paper takes up the efforts which will be required to realize the MR design beam power for the next step MW-class beam power neutrino experiment as described in the KEK-road map.

J-PARC MRのハイパワー化に向けた課題

1. はじめに

J-PARCは図1に示す全加速器施設の初期コミッショニングを終え、ユーザー運転を行いながら並行して性能向上のための加速器スタディを行なっている。加速器性能向上に向けた目下の最大課題は、入射リニアックエネルギーを現行181MeVから、本来の設計値の400MeVに増強し、そのビームを3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)に入射することによってRCS出力を設計値の1MWにすることである。そのためには入射エネルギーの増強に加え、加速器のImperfectionを理解し、共鳴補正を行い、かつ空間電荷効果の影響を、チューンを制御する(チューンスプレッドや位相空間内でのビーム分布など)ことにより低減することも必要である。幸いRCSはフル・アパーチャー設計となっているため、いくつかの技術課題は内包するものの、諸課題をクリアすれば着実な性能向上が見込める。

一方50GeVシンクロトロン(MR)の事情は異なる。最近のシミュレーションスタディで次のようなことが明らかになりつつある。1バンチ当たりの電荷量がある閾値を越えると、急激にコリメーターにおけるビームロスが増大し、それ以上は入射ビームを増やしてもビーム出力を増加できない可能性が大きい。これはKEK旧PSでも同様な経験をしている。図2に示すように、J-PARCではビームロスを局在化するため、旧PSにはなかったビームハローに対するコリメーターを、RCS/MR間およびMR軌道上の2箇所を設置している。その容量は各450Wと過小であり、現在その増強を進めてはいるが、それを増強しただけでは根本解決にはならないことがわかってきた^[1]。本論文はそういった知見を踏まえつつ、MRハイパワー化の具体策を提案するものである。

さらにJ-PARCはパワーフロンティアの加速器であり、

そのためにはピークパワー増強だけではなく、ユーザーマシンとして年間5000時間以上の安定ビーム供給を目指さねばならない。そのための大きな課題は、基本運転モードを数ヶ月間の「長期連続運転」とすることである。「長期連続運転」を実現する上での具体的課題についても述べる。

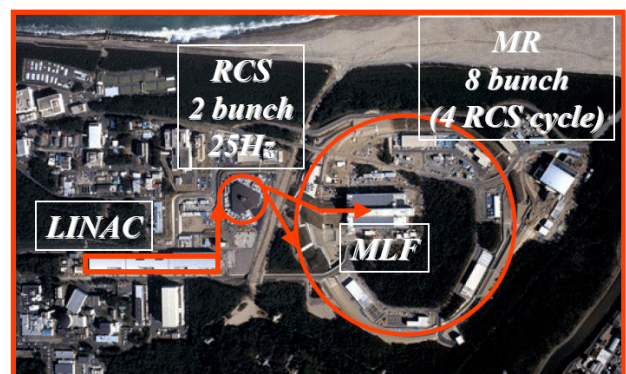
2. MRハイパワー化の基本方針

MRのビームパワー P_{MR} はMRのエネルギーとサイクル時間をそれぞれ E_{MR} 、 MR_{cycle} 、RCSのビームパワーを P_{RCS} としたとき、次の式で表すことが出来る:

$$P_{MR}=0.16 (E_{MR}/3\text{GeV})P_{RCS}/MR_{cycle} \quad (1)$$

ここでビーム加速率 dB/dt が一定であれば E_{MR}/MR_{cycle} は第一近似ではMRのエネルギーによらず一定値となることに注意すべきである。

図1: J-PARC加速器のレイアウト



つまりビームパワー達成のためMRエネルギーを高く

¹ E-mail: hitoshi.kobayashi@kek.jp

することと、サイクル時間の短縮は同等である。MR電磁石は30GeV以上で飽和が始まり、例えば50GeVのときの電力は30GeVの4倍も必要となるし、ビーム取り出し用パルス機器の技術的難度も、パルス電流が増加すると格段に高くなる。そのことを踏まえれば、MRハイパワー化の基本方針は E_{MR} アップでなく MR_{cycle} 短縮が合理的である。図3にそのシナリオを示す。RCS600kW相当で、 MR_{cycle} を現在の3.2秒から2.2秒まで短縮したとき P_{MR} は単純計算では400kWになる。

MR beam collimator and its capacity

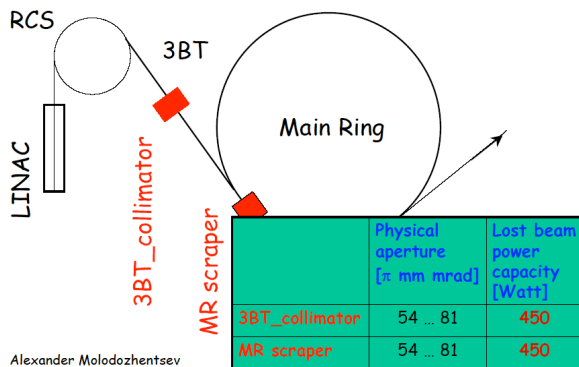


図2: MR用コリメーター (3 BT: 3-50BTコリメーター、MR scraper: リングコリメーター)、Courtesy of A. Molodjontsev

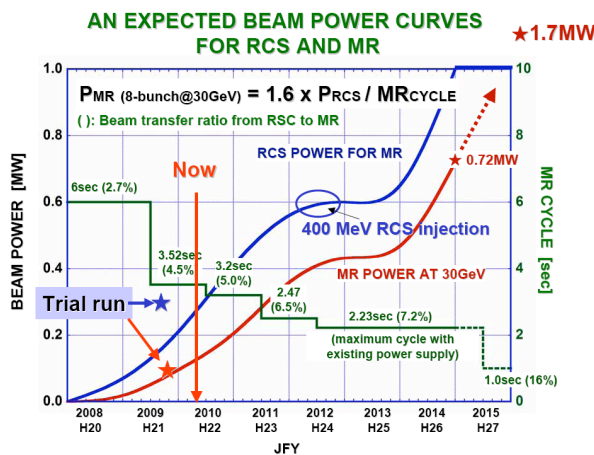


図3: パワーアップシナリオ

ところが空間電荷効果に関する最近の数値スタディによれば (RCS入射エネルギーが181MeVの場合)、RCS出力が増加するとコリメーター部のビームロスが急激に増加することがわかってきた^[2]。具体的に示すと、RCS600kW相当のビームをMRに入射すると、3-50BTコリメーターロスはそのアパーチャが54πのとき3.9kWになり、かつMRコリメーターではそのアパーチャが60πのときのロスが入射中で1.4kW、加速中も10GeV付近までは断熱減衰より空間電荷効果の影響が勝り、1.4kWになる。即ち図2に示すコリメーター容量は不足しているのである。現在3-50BTコリメーター容量を2kW程度まで増強する工事を行なっている。この区間の地上部には、図1

に見られるように八間道路という放射線一般区域があり、これ以上の増強は難しい。同コリメーターロスの実用限界は、実際のビーム運転時の地上部における放射線レベルと、機器の残留放射線レベルおよび保守技術とのバランスで決まるが、2kWを大幅に上回ることは望めない。容量が不足するときは3-50BTコリメーターのアパーチャを54πより拡げて、リングコリメーターとロスを分担するしかない。リングコリメーターロスの許容限界を増強する工事は、来年度から実施する予定であるが、高放射化場における保守経験から、4~5kWが限界と考えている。

以上をまとめると、現在までのシミュレーション結果では、RCS600kW相当のビームをMRへ入射することが既に両コリメーターの大幅改造を前提にしても困難を伴う。つまりMRビームパワー設計値達成の条件である、RCS1MW相当のビームをMRに受け入れて、KEKロードマップを目指すときには、図3に実線で示す現電源改造による繰り返しアップの限界である2.23秒の達成だけでは不十分で、図中に破線で示す1Hzあるいはそれ以上の高繰り返し化を行うことは必須である。高繰り返し化に伴い、新たに生じる渦電流の影響に対する評価 (真空ダクトや磁石コアの発熱、および真空ダクト内の磁場) が必要なのは言うまでも無い。高繰り返し化の鍵となる技術は、電磁石電源の改造・置き換えと、高周波加速電圧の増強 (高電界化and/orユニット数増強) の二つである。

なお、これまでのシミュレーションは、RCS入射を通常のペイント入射した場合である。今後ペインティングをしないでセンターに入射する場合や、RCS400MeV入射の場合も含めて、MR入射用に特化したRCSビーム・ハイパワー化の最適解を求めていく必要がある。

3. 電磁石電源の課題

3.1 現電源の課題と対策

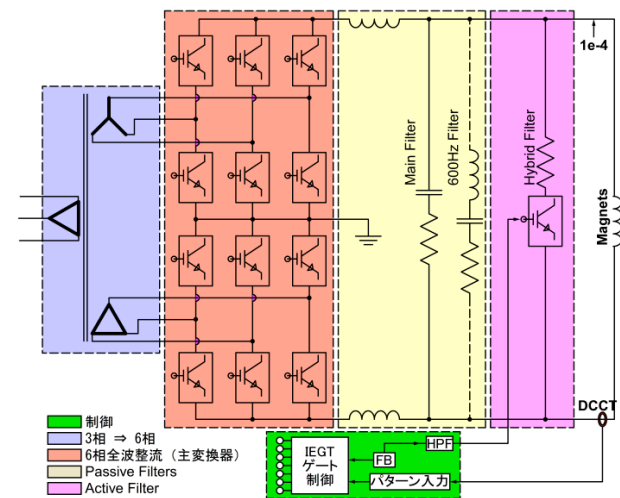
現行電源の状況を整理する。ニュートリノ実験に関しては、当面は問題ないとする。しかし前節で議論した様にパワー増強のためには繰り返しを上げることが必須であり、それが最大課題である。一方、本格的なハドロン実験のための課題は、リップル問題である。その解決策として、現行電源の改造だけでは不可能で、パッシブおよびアクティブフィードバック技術の開発は必須である。そのとき電源性能の目標値を明示することが重要で、加速器・実験双方の共同作業とすべきである。

現行電源の最大課題の一つである主なリップルは、50Hz、100Hzおよび600Hzにある。その本質を整理する (図4の回路図を参照)。

- ①50Hz: 制御回路のオープンループ利得が小さいので、今後改造を試みても低減はほんの僅かしか期待できない。
- ②100Hz: 3相交流のアンバランスが主因であり、対応は困難である。
- ③600Hz: 3相→6相全波整流を直接周波数変換する方

式で行っているため、原理的に発生する($\sim 10^2$)のもので、それをフィルターで低減しようとする場合、電源が不安定にならないよう制御回路の見直しが必要となる。

次に繰り返し周波数について述べる。現行電源の改造では図3に示すように原理的には2.23秒まで可能であるが、検討を進めた結果2.54秒(ビーム入射0.12秒、加速1.3秒、フラットトップ0秒、立下げ1.12秒)が現実的には限界にかなり近いことがわかってきた。立下り時間のさらなる短縮のためには回路の発振を制御するため、アクティブフィルターをブリッジ化するなど大きな手当てが必要で、次に述べる次世代機への切り替えを行なうこと



が望ましい。

図4: 現行電源の回路図

以上まとめると、リップル問題および高繰り返し化の両面から、原理的な技術課題により、現行電源の改造だけでは限界があることは明らかである。その努力と並行に、第二世代の電源を開発し、順次置き換えていくべきと考える。

3.2 小型・分散化電源

現行電源の設計思想は、多数の電磁石を大電力の電源で駆動するところにあるが、第二世代機については逆に小型分散化を基本方針とする。電磁石コイル両端の電圧 V は、電流を I 、抵抗を R 、電磁石のインダクタンスを L としたとき、

$$V = L(dI/dt) + RI \quad (2)$$

となる。 V の実用的上限値は4~5kVとなるので、 dI/dt を大きくするためには電磁石を大グループでなく小グループにするしかない(極端例→電磁石:電源=1:1)。当然のことに電源数は増加するが、トラッキングについては今日の進歩したデジタル制御技術により対応可能である。実際、偏向電磁石は既に元々1台の電源であったものを6分割にした。現状で元々のQ電磁石11ファミリーと6極電磁石3ファミリーの合計20台の電源を使用しているが、ト

ラッキングについて目に見える問題はない。

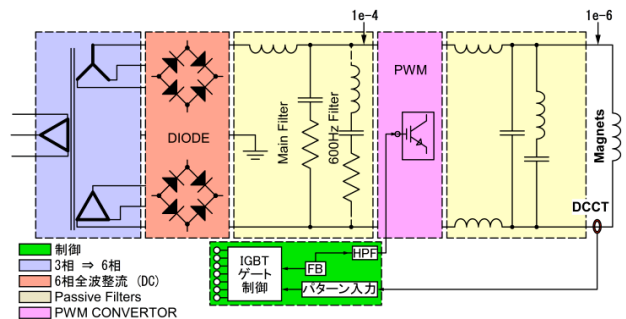
小型分散型電源を基本とし、図5に回路設計の概念を示す。

① 回路方式は3相交流から通常の6相全波整流回路+LCフィルターとして 10^4 の精度を達成することが基本である。

②パルス幅変調(PWM)主変換器で 10^2 の精度とし、第①項と合わせて全体の安定度を 10^6 とする。

このような設計思想に基づき、現在小型分散型電源のモデル機を開発中である。

ここで、通常のパターン電源の場合は、電磁石コイルに蓄積されたエネルギーの放出(減速)時に、商用ラインに変動(フリッカー)を及ぼすことが大きな問題となる。それを軽減するという条件を満たすような新たな回路方式



を検討しているところである。

図5: 小型・分散化電源

4. 高周波加速システムの課題

4.1 現システムの課題と新方式の推進

空洞のコアとして、磁性合金(ファインメット)を採用したが、実際の運転時にその効果は非常に大きい。RCS、MRとも高電界加速を実現し、かつ加速時に無同調で周波数をスイープすることが可能である。一方、新材料採用の難しい課題としてはその冷却方法である。現在J-PARCではコアにコーティングを施した上で、直接水冷方式を採用した。いままでの運転実績では、コアの座屈問題や運転中の空洞インピーダンス低下問題などにより、加速器の稼働率を下げる要因の一つとなっている。それらの課題の解決策として、コアを円周方向に分割する方式やフロリナートによる冷却方式の開発がなされている^[3]。また今後、設置台数を増やすためには現状コストの大幅な削減も必要である。

もう一つの試みとして空洞のさらなるハイインピーダンス化の開発を行なっている。コアの製造過程で磁性合金がまだアモルファス状態にあるとき、ナノ結晶を成長させるための加熱処理を施すが、それを磁場中で行なうのである^[4]。その結果、スピンの揃う事によりさらなるハイインピーダンス化が実現する。リング1周の加速電圧を上げる方法としては、空洞の設置台数を増やすことが基本であるが(空洞台数が増えた分、リニアに加速電圧も増加する)、空洞のさらなるハイインピーダンス化を推進する

ことも重要である。

4.2 長直線部以外への増設

MR設計の大きな特徴は、遷移エネルギーを回避する Imaginary γ opticsの採用である。その鍵として多数の missing bend区域(短直線部)が導入され、そのために全体として周長が長くなっている。そのことが高い加速電圧を必要とする要因ともなっている。ここの区域にも加速空洞を設置することができれば、Imaginary γ Opticsと、高電界加速が両立し、この光学設計の完成度が上がる、ということになる。

しかし、そのためには有限な分散を有する区域への加速機器設置についてのビームダイナミクスの検討と同時に、トンネル内、電源棟およびケーブル経路のそれぞれに、スペースが確保できるか、実際作業が可能であるか、冷却水系統が成立するか、などの現場レベルの検討が必要である。

5. 加速器の稼働率

2010年1~6月の6ヶ月間の運転において、実日数181日のうち46%の83.3日間で保守に当てられた。さらに、加速器立ち上げや、機器故障を除くと物理実験は、実日数の23.5%の42.5日間であった(立ち上げ初期であることは考慮する必要がある)。共同利用加速器の基本は長期連続運転であり、J-PARCもそれを目指すことは重要課題である。

長期連続運転を実現するにはイオン源の保守間隔を長くする必要がある。現在のサイクルの考えは実際のイオン源の保守作業形態もさることながら、陽子加速器の運転はそうあらねばならない、といった今までの歴史的思い込みによるものかもしれない。長期運転の実現には建設開始当時(10年近く前)にセットした1ヵ月に1度イオン源を保守することをベースとした運転サイクルの考え方の見直しが必要となる。

J-PARCイオン源グループはSNS(米国オークリッジ研)でのほとんど連続運転に近いイオン源を調査し、その方向でJ-PARCのイオン源も構築する方向に進んでいる^[5]。これらの努力によりJ-PARC加速器を早期に連続運転に移行することは最優先の課題である。

その他にも今後、大電流運転に伴い様々な課題に直面することが予想される。MRの出射用キッカーのビームウエーク場による発熱により、連続運転のビーム出力を50kWに制限したことは一例である。現在、ビーム取り出しキッカーについては、既に第二世代機に置き換える作業を行っており、間もなく結果が出るので、その詳述の報告は別の機会に譲る。

謝辞

本論文は、J-PARC加速器チーム全員の長年にわたる努力による成果を踏まえたものである。またKEK素粒子原子核研究所ニュートリノグループのメンバーとは、課題

抽出にあたり共同作業を行なっている。これらのことに筆者一同感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Kobayashi, H. Matsumoto and M. Yoshioka, "J-PARC Accelerator Complex Construction", Proc. of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto, Japan, May 24-28, 2010, p612 - 614
- [2] Y. Sato, H. Hotchi, M. Tomizawa, S. Igarashi, K. Ohmi, T. Koseki, H. Kobayashi, private communication
- [3] Y. Morita, T. Kageyama, J. Kameda, S. Yamashita, "Development of an RF accelerating structure loaded with FINMET magnetic cores cooled by a chemically inert liquid", Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, 2010, Himeji, Japan
- [4] C. Omori, private communication
- [5] H. Oguri, K. Ikegami, A. Miura, K. Kazami, private communication