

## J-PARC 加速器の現状と MR の課題・展望

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

小林 仁

hitoshi.kobayashi@kek.jp

2011年2月14日

### 1. はじめに

J-PARC については、2009年5月時点で本誌に吉岡氏がまとめている[1]。この時点は、まさに J-PARC の全施設の建設が終了し、ビームが全実験施設に導かれた時点であった。ここではそれ以後の結果を簡単にまとめる。

また、吉岡氏の稿にもあるように、J-PARC、特に MR においては、どのプロジェクトの遂行でも不可避的に見られる、建設に伴って生じる各種のトラブルの他に、技術選択的課題が含まれており、それらをクリアするため建設遂行中にかなり短期間で大きな決断を迫られた問題もあった。いま MR の速いビーム取り出し(T2K, ニュートリノ実験向け)ではビームパワーが100kWを越え、これから更なるパワーアップに挑戦する時期である。このような時期にもう一度足元を確認しておくことは意義あることと考え、いくつかの重要事項・パラメータの決定プロセスと、これらに伴う諸課題をこの機会にまとめておきたい。

### 2. 各装置の近況概要

#### 2.1 リニアック

リニアックの RFQ は、2009年夏に行った真空系の大規模な増強後はほぼ順調に稼動しており、時折の放電で MPS(装置保護システム)が作動し、短時間のビーム停止はあるものの大きな問題にはなっていない。大排気能力を持つクライオポンプの導入など真空系の強化や、放電現象の影響を克服するコンデショニングのマニュアル化などの基本に立ち返っての対策が実を結んだといえる。しかし、放電の頻度に好不調の波が見受けられる。パワーフロントアマシンは運転時間の積分が重要であり、やはりこのように放電が気に掛かるような状態での運転は好ましくなく、十分な準備を経てのバックアップ機への移行が望まれる。バックアップ機は製作が大きく進み、その低電力での特性試験が終了し、大電力試験に移行するところである。ただ、RFQ の放電により継続運転が損なわれるという症状が発生したのは2008年の秋であり、バックアップ機製造準備を開始し

たのはその後である。このような技術的に難度の高い機器を2年半で作るのは関係者の並々ならぬ努力あつてのことである。図1に低電力試験中の RFQ を示す。



図1 ロー付け完成後の特性試験を行っている RFQ バックアップ機

リニアックにおける最近のトピックスの一つは、今まで原因がすっきりしないままであった下流側でのビームロスには上流部の真空度が大きく関係していることが実験的に確かめられたことである。元々電流を増強する際には真空系の増強は必須と考えていたことであり、それを行う時期に来ているということであろう。

二つ目は、イオン源の改善を進めていることが挙げられる。繰り返し強調しておくが、J-PARC のようにパワーフロントアを標榜する加速器群では、ピーク出力増強とともに出力の時間積分をあげることが性能として重要である。有限な寿命をもつ機器であるイオン源の交換時間の短縮は直接積分性能に関わる運転効率向上に寄与する。我々は交換部をユニット化し交換時間の短縮を果たしつつある。J-PARC では負水素イオンを生成するのに有効なセシウムを使用しないタイプでずっと運転してきた。これはセシウムが電極表面の仕事関数を低下させ、放電の原因になり得るからである。一方、米国 SNS では、少量のセシウムを使用して大電流を生成しつつ、同時に短時間のメンテナンスを実現して既に長期間の運転実績も出来ている。我々も今後の大電流化に向けてセシウム添加方式のイオン源の導入検討も並行して進めているところである。今後のリニアックエネルギー増強が計画されているなか、電流値においても最終目標の50mAを視野に入れて関係者の努力が続いている。

## リニアック 400MeV 増強

リニアック 400 MeV 増強計画の状況について簡単に触れておく。現181MeV 入射から400MeV 入射へのリニアックのエネルギー増強は、50mA 加速とともにRCSの出力1MWへは必須の事項である。増強にはリニアック後半部のビーム加速空洞である、ACS(Annular Coupled Structure)およびそのマイクロ波系の設置が主たる作業となるが、マイクロ波系、ACSの製作、一部機器の設置ともにスケジュールどおりに進んでいる。今の話題は、工事開始から再開までの期間を如何に短縮できるかである。

## 2.2 RCS(Rapid Cycling Synchrotron)

RCSは物質・生命科学実験施設(MLF)向けに2009年11月から120kW運転を、2010年11月からは210kW運転を継続している。2010年の夏に待望の加速パターンにあわせて駆動が可能な6極磁石電源(それまでは直流電源で入射時のみのクロマティシティ補正)が入り、加速全体にわたってクロマティシティの補正が出来るようになった。2010年秋に400kWの試験運転を行い入射時のビームロス量は規定値以内であることも確認できている。稼動初期から今までのビームパワーの推移、稼動状況を図2に示す。

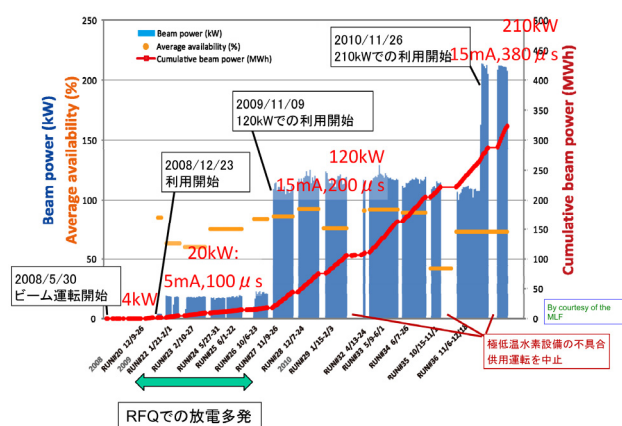


図2 RCSのビームパワーの年次推移  
特記事項が図に記載されている。

## 荷電変換フォイルのサイズとビームロス

2010年の夏にRCSでは荷電変換フォイルのサイズをそれまでの110mm(幅)×40mm(高さ)から、高さを15mmに減らし、周回ビームがフォイルに当たってロスする分を減らした。このフォイルサイズの使用によりロスは約半分になった。

## RCSの400MeV増強対応

RCSについても入射ビームエネルギー400MeV増強の準備について簡単に触れておく。RCSでは、リニアックの400MeV増強に伴ってシフトポンプ磁石を筆頭に、入射用の全機器を400MeV対応に整備することが重要課題となる。いずれの入射用機器においても、大口径で高い磁場を高速で変化させる技術が必要であり、これは極限的で高難度な技術であることは理解しておかなくてはならない。

## RCSのマイクロ波源(RF)

文献[1]に状況が詳しく述べられており、ここではその後の状況に簡単に触れる。J-PARCの加速システムは広い周波数範囲にわたって無同調のマイクロ波源と、MAコア(商品名:ファインメット、飽和磁束密度が高い)を装荷した空洞で構成される。その加速電界の高さ(22.5kV/m)と無同調であるために運転が簡単であることは特筆すべきものである。一方、新たな開発機器に付き物である、生みの苦しみを味わっていることは同じく文献[1]で触れている。主たる課題は二つある。一つは冷却効率最大を得るために、鉄系統のコアを水の中で冷却することに伴うもの、もう一つは、コアは内・外径のアスペクト比の高い大型のテープ巻きにより製造されているが、運転時の高周波損失に伴う熱応力対策である。

一方、先にも述べたように、パワーフロンティア加速器には信頼性フロンティアであることが同時に要請されている。本来、加速空洞のような基本機器は30年程度は通常のメンテナンスで継続使用できるものでなくてはならない。ファインメットの特性を活かしつつ、この条件を満たす加速空洞が望まれる。現機器をきちんとメンテナンスしてハイパワー化と信頼性の向上を推進するとともに、並行して不活性冷媒により冷却する空洞の開発を推進している。冷媒には機器の設置場所が地下トンネルであることを考慮し、不燃性のフッロリナートを使用し、高いアスペクト比対策としては円周方向に3分割することが改造の柱となっている[2]。

後述するが、MRのビーム増強に運転周期の短縮を検討している現在、加速電界としてはさらに高いことが要求される。対応策の一つはRFユニットの設置台数の増加で直接的効果が期待できる。このほかに、従来のファインメットコアの製作において、焼結過程で磁場を加えるとコアのインピーダンスが倍近く上がる可能性があり、新規にそのような材料の開発もはじめたところである[3]。

## 2.3 MR

この原稿を書いている2011年2月の時点では、速い取り出しで135kWのビームをニュートリノターゲットに供給している。また、遅い取り出しは、3kWをその定常運転とし、最大約10kWでの試験運転を行っている。

### 遅い取り出し

遅い取り出しの状況を図3に示す。図3上は、MRリングに蓄積されたビーム量が取り出し時間内(約2秒)で単調に減少していることを示し、マクロに見れば一定電流で出力していることを示す。一方、図3下は、出力電流の微細構造を見たもので、ビームの出方は強弱がまだらになっていることを示す(いわゆるハリハリビーム)。図中 duty と示しているのは出力の平坦具合を示す指標で、これは一層の改善が要求されている。一方、3kW 時の取り出し効率は99.5%と見積もっており、この値はかなり良好な結果といえる。

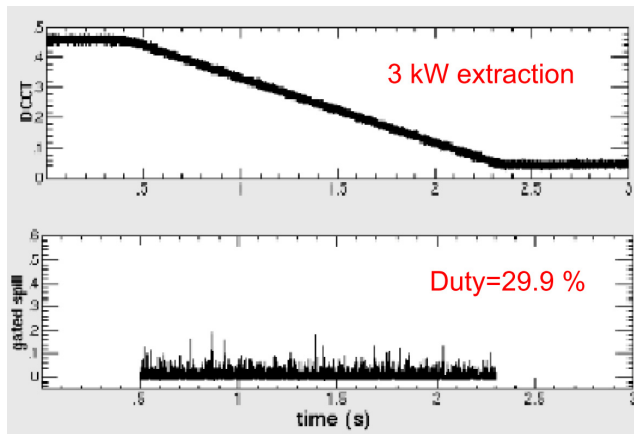


図3 遅い取り出しに伴うリング内電流の減少(上)と、取り出されたビームの時間分布(下)

### 速い取り出し

速い取り出し運転において、出力120kWでは、MRリング内を約 $8 \times 10^{13}$ 個のプロトンが周回しており、これは陽子シンクロトロン加速電荷量としては世界で最高値である。勿論、現状はJ-PARCのMRとして目指すパワーには程遠いわけであるが、ビーム物理の観点からは新たな領域に入っており、大電流に伴う不安定性などが出現することもやむをえない。現在の運転パターンは図4に示すように3.2秒で1周期である。現在、現有の電磁石電源をパターン調整して2.6秒あるいはそれ以下までの短周期にすることを目指している。

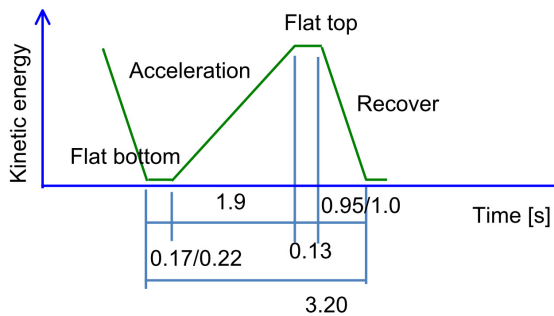


図4 現状でのMR速い取り出しの運転パターン  
3.2秒周期で運転中である。

## 3. MR各課題の現状

### 3.1 速い取り出しキッカー

速い取り出しキッカーが、本来8バンチ対応であるべきところ、6バンチでスタートしたことは既に文献[1]に述べられたとおりである。2010年の夏の作業でこれを本来の8バンチ対応に改修した。このキッカーは集中定数タイプを採用し、かつ非線形素子を用いて速いパルス磁場の立ち上がりを実現している。集中定数タイプの利点は大きい。それまでの高速キッカーは分布定数を形成するため空芯のキャパシタを用いていたが、その場合、高電圧絶縁をフェライトの沿面に持たせざるを得なかった。この集中定数方式では、耐電圧を真空空間で持たせることが出来、耐電圧に対し高い信頼性を期待できる。なお、最近では真空中で、しかも一定程度の放射線環境下で使用できるセラミックベースのキャパシタを用いて、分布定数タイプでも信頼性の高いキッカーを構成できる可能性も出てきていることは注視しておくべきであろう。

8バンチ入射時のMRの蓄積電流を図5に示す。この図中4回蓄積電流が増えている部分が入射であり、1回の入射で2バンチのビームが入射される。

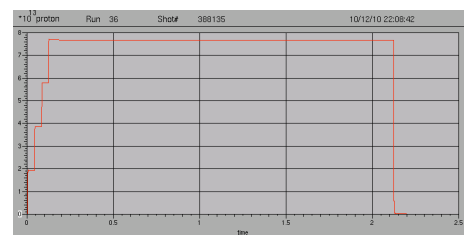


図5 8バンチ入射時のMRリング内電流波形  
4回(1回に2バンチ)入射後加速している。

さて、速い取り出しキッカーについても一つ述べておきたい。夏前に使用していたキッカーではビーム出力パワーが60kW程度まで上がった2010年5月の時点で、キッカーのキックアングルが減じる現象が見られた。調査を進める中でビームによるウェーク場でキッカー内のフェライトの温度が上昇し、キュリー温度に達していることが判明した。2010年6月末のシャットダウンまでそのまま50kW近辺で運転を継続した。「大電流では何が起きるか分からない」が我々の合言葉になっている。それだけに、たとえわずかでも、前倒して電流を増やしての運転を心がけ、問題点の早期洗い出しに努めているが、このときの現象はその最初の注意情報であった。このキッカー温度上昇問題の発生を見て、上述の8バンチ対応のキッカーについても更に念入りに縦方向のインピーダンスを改善するとともに、内部のフェライト部の冷却水配管を施した。各種の検討からこの新8バンチ対応キッカーは750kWまで十分な熱除去が出来ると考えている。

### 3.2 入射キッカー

さて、速い取り出しキッカーで熱の問題が起きたということは、入射キッカーにおいても同様な問題が発生する可能性があるということである。そこで、2010年の夏のシャットダウン時に入射キッカーについても急遽内部に冷却配管を仕込んだ。しかし、この対応はあくまで応急処置である。最近耐電圧の減少が見られる。真空内部での高電圧絶縁のきちんと取れた信頼性の高い入射キッカーへの改修が緊急の課題となっている。

### 3.3 MR の RF

MR の RF においては RCS と少し事情が異なる。MR では入射の時点で既にプロトンは、光速の97%程度になっており、その後の加速による速度の変化は少なく、従って RF 周波数変調範囲も小さいため RCS より Q 値の高いシステムとなり、先述の空洞装荷コアをカットして Q 値を高めている。このカット部でコアの熱膨張が吸収されるため、RCS で見られた座屈現象は発生しない。一方では運転に従い、インピーダンスが低下するという現象がみられる。その原因としては、水に直接触れているコアのカット面に冷却水中に溶け込んだ銅が析出することが考えられている。銅イオンは冷却水が電磁石コイルと共通になっているために発生する。さらには直接水に触れているカット面には錆びも生成される。錆問題については東大生産技術研究所の協力を得るなど広くエキスパートに参加をお願いしている。また、当面はまずカット面をシリコン樹脂でカバーして水に触れないよう応急措置を施した。シリコンのようなものが水中でどの程度の耐久性を有するかは不明であるが、現在のところ状況は良い方向である。また加速空洞の冷却水を電磁石系統と分離する工事は2011年夏に予定している。

## 4. MR の重要パラメータの決定

さて、建設期間中にかなり主要なパラメータの設定変更に関与する事象が発生したことは前述の通りである。勿論できる限りユーザーとの協議も含めたつもりではあるが、運転スケジュールを優先して即断を迫られるようなこともあった。今後さらに MR のパワー増強のための議論が活発になると想定されるし、またそれを願うものである。以下にいくつかのことに関して状況をまとめておく。今後の協議に資するところがあれば幸いである。

### 4.1 MR の運転エネルギー設定

ここで誤解を招きがちであるので、MR のようなスローサイクルのシンクロトロン(RCS は速いサイクルのシンクロトロン)においては、出力ビームパワーはオペレーションエネルギーに一次近似では依存しないことをまず述べる。

MR を 40 GeV まで駆動できる電磁石電源があれば(現状電源は一応可能である)、出力電圧  $V$  は  $V = L(di/dt) + Ri$  で与えられる。磁石のインダクタンス  $L$  と抵抗  $R$  は一定であり、電源の出力電圧が決まってしまうと、電流の立ち上がりの傾斜  $di/dt$  も一定となる。つまり、40 GeV に必要な電流にまで立ち上げるには、30 GeV に必要なその 4/3 倍時間がかかる。つまり、エネルギーを下げれば、その分繰り返しを速くでき、加速・減速の電流パターンを相似形にすれば、エネルギーと平均電流の積としての出力ビームパワーはほぼ一定となるのである。ただし、もちろん繰り返し数増加に伴い入射頻度もあがるので、その分のオーバーヘッドは考慮しなければならない。

さて、このような状況で実際の運転エネルギーをいくりに設定するかの問題であるが、前述のように現電磁石での最大エネルギーは電源の能力としては 40 GeV まで可能である。一方、現電磁石は、図 6 に示すように、30 GeV を越えただけから飽和現象が見られる。なお、電源を改造して 50 GeV にする場合は大規模なフリッカー対策が必要となり、元の計画でもこれを実施するのは第 2 期計画に入っていた。

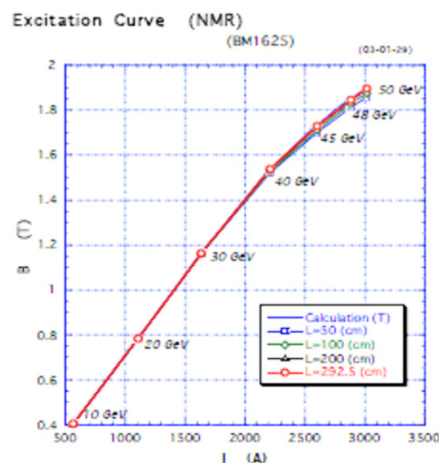


図 6 MR の偏向電磁石の電流(横軸)と発生磁場(縦軸) 30 GeV 近辺から飽和が始まるのが分かる。

このような状況を踏まえ我々は以下に述べる理由により、少なくとも当面は 30 GeV でパワーフロンティアを目指すことを選択した。

- i) 磁気飽和が生じると電流を多く流す必要があり、電源への負担を考慮すれば磁場立ち上げ時間が増大するし消費電力も大きくなる。飽和の見えない最大エネルギーである 30 GeV を最適エネルギーと考えた。
- ii) 飽和があると、磁場に高次モードが出現し、大電流ではビーム不安定が問題になることが想定される。そのような問題を立ち上げ初期に持ち込むことは得策ではない。
- iii) 飽和のため磁場が磁石の外部にはみ出すことにより引き起こされる事象を正確に見積もることは難しい。つまり

磁石の近くにある鉄などに影響を受けるが、その評価には多大な時間を要する。現段階でそれらに時間を費やすことは得策ではない。

- iv) ビーム取り出しパルス機器の励磁を 30 GeV から 40 GeV 対応にすることは、多くの技術課題を持ち込むことになり、現状のマンパワーでは無理がある。

## 4.2 MR の電磁石電源問題と配線

MR では電源の、主としてコモンモードノイズに悩まされた[1][4]。しかし、この問題は非常に有意義な形で決着した。これは、佐藤、土岐両氏の長年の研究成果を、図らずも MR を壮大な実験の場として実際に証明してみせたものである[5][6]。大きなコモンモード電流に遭遇した当時(2008年5月)の状況は先の文献[1]に譲るとして、この機会にその意味するところをきちんとまとめておくべきと考え、以下に詳しく述べる。ここで誤解を招かない様に付け加えるが、コモンモードノイズについては理論的な裏付けを得て現場でもすっきりと解決したが、現電源でのノーマルモードリップルの大きさは、この電源本来の基本性能を示すものであって依然として残っている。電磁石電源と電源から電磁石に至る配線の両極間の対称化は高性能電源では必須事項であり、これを行ってはいじめて電源の本来の性能を引き出すことができる。また後述するようにコモンモードノイズは両極間の対称化と磁石接続の方式により磁場にはほとんど影響しない様に改善出来るが、利用目的の要求に見合った精度のノーマルモードノイズの抑制は、電源本来の設計によってのみ達成されるものである。

### 今回の電源問題の教えるところ

IGBT のような大電力・高速素子が、今後も大電力電源製作の主流となることは明らかであるが、その中で今回の問題は素子の発達に見合う電源システムが如何にあるべきかを教えてくれた格好の教材となった。佐藤・土岐理論の教えるところは両極間の対称化が重要ということである。KEK では、12 GeV PS の配線がリングを一周するように配線されていた。まさに J-PARC の MR でもそれに倣ったのである。電源のプラス側から出た線を、主電磁石を数珠繋ぎに繋いでリング内を一周し、電源のマイナス側に接続する。つまり周長 1.6 km のトンネルの径と同じループを作ったのである。通常の電子回路配線においてこのようなループを作るのは厳禁となっているが、大型加速器の電磁石の配線では余り気にしてこなかったようである。配線コストが倍になることがこのような技術選択の大きな要因であろうが、少なくともパワーフロントを目指す加速器では、電気回路として正しい方法を選択しなければならない。

佐藤・土岐理論の教えるところを要約する：

- i) 電源と配線の両方に対称化が必要であり、コモンモードとノーマルモードは対称回路においてはカップルしない。逆にカップルしないようにするには対称化する以外はない。
- ii) 対称化と同義語であるが、配線は多導体で構成する必要がある。

図 7 に同じ電源で配線の対称化の前後で電源のプラスとマイナスに設置した二つの同型電流モニタ信号の差分を示す。上は当初のケーブルが一周して配線されたときを、下は 3 本線を用いての対称化後を示す。対称化した配線ではコモンモードノイズは完全に差し引かれてノーマルモード分のみが残っていることがわかる。後述するように、4 極磁石は電磁石への配線に工夫をしてコモンモードが磁場に現れないようにしたので、この図 7 の下の電流波形がほぼ磁場に現れると考えてよい。

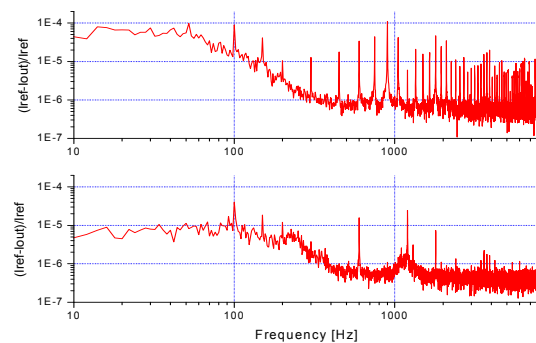


図7 同じ電源で配線の対称化前(上)と対称化後(下)のプラス電極とマイナス電極に設置した同型電流モニタの差  
対称化でコモンモードはきれいに差し引かれる。

### J-PARC 側の工夫

佐藤・土岐理論はコモンモードノイズとノーマルモードノイズは、対称回路でデカップルする、ということを教える。しかし、デカップルしても MR の電源には大きなコモンモードが存在することは事実ある。では、どうすればそのデカップルするという特性を利用できるかである。答えは、4 極電磁石においては、3 線を利用し、1 本はグラウンド線とし、他の 2 本をプラス、マイナスに接続して電流を供給する。このとき、接続方法を従来良くやられているように上半分、下半分に分けて直列接続するのではなく、図 8 に示すように、たすき掛けで、N 極同士、S 極同士を直列接続すれば、コモンモードノイズ起源の 4 極磁場が発生しない。もし MR で当初行っていたように、1 本の線で接続すれば、ノーマルモードもコモンモードも 4 極磁場を発生してしまう。

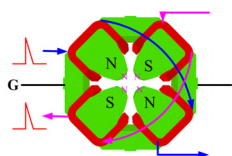


図-8 4極磁石の同極接続

コモンモードノイズは4つの極を同じ極性に励磁する。

同じ3線の配線でも、たすき掛けに同極を接続した場合、上半分、下半分それぞれのNとSを接続した違いをシミュレーションで図9に示す。同極を接続した場合は、コモンモードノイズでは4極磁場は発生せず、ごく小さい8極モードが励起される。しかし、その絶対値は無視できるほどに小さい。一方、上下に分けて接続すると、ダイポール磁場が発生し、その強度は結構強いことに注意が必要である。つまりコモンモード電流そのものは存在しても磁場としては発生しない状況を作ることが出来る。同様な考え方で、偏向電磁石の場合は通常対称化、つまり3本でN極、S極を接続すれば、やはりコモンモードでは2極磁場は発生しない。ただし、非常に小さな4極磁場が発生する。

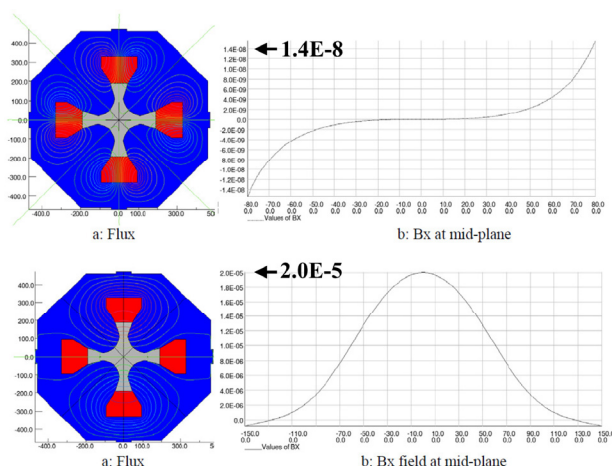


図9 同強度のコモンモード電流を同極接続4極磁石に流した時に発生する磁場(上)と、上半分、下半分で接続した場合のそれ(下) 縦軸メモリは磁場強度の相対強度比較のために示す。

### 配線変更作業

このように佐藤・土岐理論で裏打ちされ、ビームの変動の原因となっているコモンモード電流を配線を対称化することで消せると判断したので、全員一丸となつての配線変更を遂行することとしたのである。勿論、この作業には4極電磁石の配線をたすき掛けに変更した上で、1ターンの配線を複数本にすることも含まれる。幸いなことに、トンネル内の配線は大電流に対応するためケーブル数本を一束にして配線してあったので、それを二つに分けて、つまり電流容量は半分になることを覚悟しての配線の変更を決断したのである。これはこの加速器を将来50GeVにするということで配線にはその余裕を持たせてあったのだ。第1フェーズとしての運転エネルギー30GeVでは電流容量が半分に

なつても幾分かの余裕を取ることが幸いしたものである。その結果、ベータトロン・チューンのふらつきは0.003程度まで減少し、冒頭で記載したような運転状況まではもっていった。それにしても、今つくづく思うことは、このような大きな変更を即決で出来たのは、理論的に裏打ちされていたからである。ここで以下のことは改めて確認しておかなくてはならない。

- i) 対称化によって磁石はコモンモードノイズフリーとなっている。ただし、電源のコモンモードがなくなったわけではない。今でもこの電源ではノーマルモードより1桁大きいコモンモードが流れている。
- ii) 対称化によってノイズが減りフィードバック信号がきれいになった結果としてノーマルモードも良くなっているが、現状のノーマルモードは電源の設計の基本パラメータから説明できるものである。
- iii) 対称化によって、現配線は容量が半減している。もしエネルギーアップのようなことがあれば配線を増強する必要がある。

つまり我々は電源が本質的に抱えている問題を解決したわけではなく、遅い取り出しで要求されるようなビームスピルを実現するためには、電源の大改造を必要とするのである。それは後述するビームパワー増強の観点も含めて行うのが妥当と判断している[7]。現段階で遅い取り出しについて様々な対処を行っているが、そのうち我々がBOSE計画と呼んでいる対処などを紹介しておく。それはリップル成分を検出し、DSP(Digital Signal Processor)で処理し、小型電源でそのリップル分をキャンセルするものである。また全主要電磁石は補正用二次巻線を有するが、それらをビーム取り出しに対応するフラットトップ部においてショートして高周波成分をそこにバイパスする。さらにビームコミッションングでは遅い取り出し機器にフィードバックやビームに変調機能を持たせることでスピルを改善するなどの努力を行っている。前述した遅い取り出しのdutyの改善はこのようにしてなされた結果である。遅い取り出しビームのリップルは電源の電流リップルに非常に敏感に対応する。電源のリップルを極限まで押さえ込むことが本質的に重要であり、電源設計とフィードバック系の整備を総合的に行うべきで、費用対効果を考慮した設計が重要と考える。

## 5. MRにおける今後のコミッションングと課題

J-PARCにおいて一番重要で困難な問題は空間電荷力との戦いである。ビーム同士の非常に強い反発力のもと、1MWに近いビームパワーで1メートル当たり1ワット程度のビームロスが問題となる状況を正確にシミュレートすることは現在のスーパーコンピュータをもってしても困難である。

特に、MR では加速過程が秒のオーダーであり、20 ミリ秒で加速終了の RCS と比しても 1 ケースの計算に膨大な時間を要する。したがって時にはシミュレーションの情報と経験を組み合わせて重要事項を決定することもやむをえない。

さて、MR のコリメータ(ビームロスはこのコリメータ部に局在化する)とアパーチャの基本設計についてはデザインレポート[8]にも比較的短く記述されているのみである。しかし、RCS のコリメータアパーチャが  $324\pi$  mm-mrad (以下単位を  $\pi$  のみで示す) に対し、MR の 3-50BT コリメータ(RCS から MR へのビーム輸送路)が  $54\pi$  と小さいことに対するの危惧は、筆者が MR 建設に参加した当時も何人かの人から指摘されており、当時定期的に行っていた加速器デザインレビュー委員会でも議論された(同委員会の第 1 回 2004 年 6 月 1 日と第 12 回 2004 年 10 月 19 日)。特に RCS において加速に伴う断熱減衰を考慮して求める出射エミッタンスを 1.5 倍(安全係数)して 3-50BT のコリメータアパーチャを決定しているが、入射時のエミッタンスとして何を基準にするかは議論が白熱した。リニアックから RCS へ入射のとき、空間電荷力緩和のためにビーム入射領域を広げる(ペインティング)がそのペイントエリア  $144\pi$  からの断熱減衰を仮定し、その 1.5 倍をもって 3-50BT のコリメータを  $54\pi$  と設定している。同委員会でもペイントエリアからの断熱減衰ではなく、RCS のコリメータアパーチャ  $324\pi$  からの減衰を想定する方が現実に近いとの意見もあった。勿論この値はコリメータにとどまらず MR のアパーチャ全体に及ぶ問題である。ここではそのような厳しい議論があったことの記録にとどめる。

## 5.1 シミュレーションの状況

前述のような状況があり、MR のアパーチャのことはずっと気になりつつも加速器の機器製作・設置時期の忙しさは格別で、RCS 内のビームダイナミクスと MR の入射までのビームシミュレーションを組織的に積極的に進めることが出来るようになったのはようやく 2010 年になってからである。その状況を簡単にまとめる。

現段階でのシミュレーション結果を図 10 に示す[9]。RCS に現状のエラーを含めた場合とまったくエラーがないと仮定した二つの場合について、RCS の 25 Hz で相当する出力ビームパワーを横軸に、そのときの 3-50BT のアパーチャ  $54\pi$  のコリメータでロスするビームパワーを縦軸に示す。ただし、ここでは後述するパワー増強シナリオを先取りして MR の繰り返し周期を現状の 3.2 秒ではなく 1.28 秒と仮定していることに注意が必要である。3-50BT のコリメータにおけるロスが急激に増加する様子がわかる。このコリメータの容量は 2010 年夏に 450 W から 2 kW に増強してある。それでも現在のシミュレーションが示すところは、RCS 600 kW

弱相当(1 パルスあたり  $5 \times 10^{13}$  個)のビーム入射が 3-50BT の受け入れの限界である。これは言うまでもなく MR ビームパワーを設計通りにするためには不足している。MR ではこの 3-50BT のコリメータのみではなく、リング内の入射部下流にもコリメータが設置してあり、ここでもほぼ同様なビームロスを覚悟しなければならないが、現状でその容量は 3-50BT コリメータの元の容量と同じ 450 W でしかなく、早期に 4 kW まで増強する予定である。

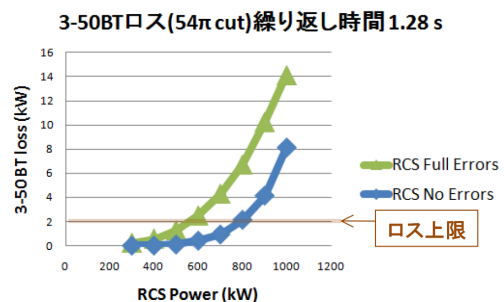


図 10 RCS からのビーム強度と 3-50BT のコリメータでのビームロスのシミュレーション

現状でのエラーを想定すると RCS 出力 600 kW 弱相当のビーム強度でコリメータでの許容容量限界に達することになる。

## 5.2 運転繰り返し増によるパワー増強シナリオ

詳細なシミュレーションの結果を得ることの出来る以前から、可能性として RCS でのフル電荷量ビームを受け入れられない場合の対応を考えてきた。図 10 を見ても分かるように、空間電荷力を原因とするビームロスは RCS からの 1 パルス内に含まれる電荷量に対して指数関数的に増大する。一方、ビームの繰り返しとビーム損失はリニアな関係を仮定できる。そこで MR のビームパワーを増加する方法としては MR の繰り返しを増やすことを最優先に検討してきた。

幸いといってよいか、我々は前述のコモンモード問題で偏向電磁石電源を、それまでの直列接続の 1 台の電源から独立の 6 電源に分離し(このとき電源台数は実質 1 台から 6 台に増加した)、各電源のトラッキング性能をベースに運転できることを学んだ。つまり数の増えた異なった電源のトラッキングを合わせる精度は非対称配置に伴うノイズレベルよりも小さく出来る。余談であるが、CERN の LHC の偏向電磁石電源もまったく同じ思想で構成している。これを利用し、1 台の電源が励磁する電磁石群(ファミリーと称する)を駆動する電源を適当な個数に分割し、適当な出力電圧で駆動すれば、今の給電用ケーブル配線の耐電圧の範囲内で高繰り返し化を実現できる。当面は以下の二つの問題に取り組む。ただし、この他に入出射機器の高繰り返し化をはじめ、影響は全体に及ぶことを覚悟しなければならない。特に、我々がシステムコミッショニングと呼んでいる配線、電源配置、冷却水などのユーティリティに大きな課題があり、常にそれらと折り合せながら進める必要がある。

- i) 電源の高繰り返し化を進める。高繰り返しにする際に最大の問題は磁石が蓄積する磁界エネルギーの蓄積(加速時)と放出(戻り)に伴うフリッカーである。大きなコンデンサバンクを有し、磁石とコンデンサでエネルギーをやり取りし、正味の電力消費のみ供給するようにする。図 11 に基本回路構成案を示す[10]。今後の R&D の進展に期待する。
- ii) RF の高電圧化もまた大きな問題である。現在 RF のために有する直線距離で単純に2倍に繰り返しを上げるには2倍の加速電圧が必要で、いまのままの RF の電界強度(単位長さに発生できる加速電圧)であれば2倍の直線距離が必要となる。加速空洞の電界強度を2倍にするには4倍の RF パワーを空洞に供給することが必要となり、実際問題としては非現実的である。現状では新たにインピーダンスの高いコアの開発に取り組んでいることは前述の通りである[3]。勿論ここでも新規の挑戦に伴う幾多の問題が想定され、今までの経験を生かしての着実な取り組みが必要である。

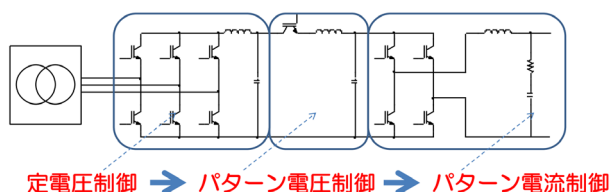


図 11 高繰り返し、フリッカー対策電源の検討例

## 6. 終わりに

現在到達している速い取り出しの MR のパワーは 135 kW と少ないように見えるが(実際設計値は 750 kW), 既にシンクロトロンとしては、1 周期で加速する電荷量において世界最高を達成していることを忘れてはいけない。つまり未踏の領域に既に入っているわけで、付随して生じる問題はこれからも多いであろう。それを一つ一つ解決しながら、まずは現状の機器でシミュレーションとの整合から達成が期待できるパワーを出来るだけ早期に実現しなければならない。既に少しのビーム揺らぎがあってもそれが引き金となって不安定性を増幅する現象も見え始めている。空間電荷力に対する、バンチ・バイ・バンチのフィードバックシステムの更なる整備も急務である。一方では、ニュートリノ物理では厳しい世界競争の真っ只中にある。物理実験用の運転とビームスタディを効率よく組み合わせなければならない。このような点では KEKB での経験が役に立つであろう。

まず現システムで潜在能力を最大限引き出すことは非常に重要で、そのためにはフィードバックをはじめ各種機器の高精度化への要求が目白押しになるであろう。当面の日々の運転で既設の機器の性能に基づき着実に最大の積分パ

ワーをため続けることがもっとも重要で、それだけでも非常に多くの仕事がある。その上で、一方では上記のように、高繰り返し化のために必要な電源の開発や高電界加速システムなどの新しい取り組みを並行して進めることも同じように重要である。加速器は非常に広い技術分野から構成され、金属の錆の専門家に相談したり、金属内のスピンの揃い具合の測定に協力いただくなど、既に幅広い分野の専門家に協力いただいている例は枚挙に暇がないが、今後とも多くの方のご協力、ご指導、ご鞭撻をお願いして稿を閉じる。

## 謝辞

J-PARC は非常に多くの方の献身的努力でここまでできているものである。この報告はそれらの努力の成果をまとめたものであり、関係者全員のご努力に感謝する。また、本稿には、私事で恐縮だが 2011 年 3 月末をもって退職するに当たり特に気になっていることを個人の意見としてまとめた部分がある。それらに関しては間違いなどもあるかもしれないが、それは偏に筆者の責任である。

## 参考文献

- [1] 吉岡正和, “J-PARC 加速器, 特に MR コミッショニングに寄せて”, 高エネルギーニュース, **28**(1), 26(2009).
- [2] 森田 裕一, 影山 達也, 亀田 純, 山下 了, “不活性冷媒液冷式ファインメット磁性体装荷高周波加速構造の開発” 第 7 回加速器学会, 姫路 2010.
- [3] C. Ohmori, *et al.*, “DEVELOPMENT OF MAGNETIC ALLOY CORES WITH HIGHER IMPEDANCE FOR J-PARC UPGRADE”, IPAC10, Kyoto, May 23-28, 2010.
- [4] H. Kobayashi, “BEAM COMMISSIONING OF THE J-PARC MAIN RING”, PAC09, Vancouver, May 2009.
- [5] K. Sato and H. Toki, “Synchrotron magnet power supply network with normal and common modes including noise filtering”, Nucl. Instrum. Meth. A **565**, 351-357 (2006).
- [6] H. Toki and K. Sato, “Three Conductor Transmission Line Theory and Origin of Electromagnetic Radiation and Noise”, J. Phys. Soc. Japan **78**, 094201 (2009).
- [7] MR コストレビュー答申, 座長 生出勝宣, 2009 年 7 月 29 日.
- [8] “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- [9] 佐藤洋一, 私信.
- [10] 小関国夫, 栗本佳典, 私信.