

J-PARC 加速器, 特に MR コミッショニングに寄せて

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

吉岡 正和

2009年5月22日

1. はじめに

私が J-PARC 加速器建設に参加したのは 2004 年 4 月で、その後の 5 年間に本誌で J-PARC 加速器について語られたのは山崎氏他:「J-PARC 加速器」(2005 年), 池上氏:「J-PARC リニアックにおける 181MeV 達成」(2007 年), および小関氏:「ビームコミッショニングを開始した J-PARC MR」(2008 年)の 3 編[1,2,3]である。LHC 関連の記事が 2008 年度だけで 4 編あるのに比較すると高エネルギー物理基幹計画には少なく、私たちの努力不足と反省するところである。それはさておき、直近の小関氏の記事(2008 年 9 月)から 8 ヶ月後(2009 年 5 月)までの様子を報告し、今後の展望についても触れたい。なお限られた誌面でもあり、これまでの記事との重複は出来るだけ避け、一般的な説明は最小限に留める。上記 3 編の記事はどれもコンパクトによく説明しており、この機会にご一読いただくことを望む。特に今後 J-PARC で実験を計画している大学の若手研究者にお勧めしたい。なお本稿は高エネルギー関係に重点を置き、MLF(Material and Life Science Facility)については詳しく述べない。

次にコミッショニングの概要を説明する。図 1 に示すように J-PARC のビームコミッショニングは上流から順次、リニアック(2006年11月), RCS(2007年10月), MR@3GeV 入射エネルギー(2008年5月), MR 30GeV 加速(同年12月)と行ってきた。



図1 J-PARC 施設配置とビームコミッショニング年次

2009年2月19日にMRは予定通りハドロン実験ホールへの30GeVビーム取り出し(遅い取り出し, 図2)の施設検査も受けた。このとき短期間の運転により収集したデータで K1.8BR(二次ビームライン名称)の実験グループは後述するような課題を抱えたビームスピン条件にもかかわらず K^+ の同定まで行っていることは注目に値する[4]。

4月23日には30GeVに加速したビームを速い取り出しにより、ニュートリノターゲットステーションに導き、ニュートリノ生成の確認も行った(図3)。これで J-PARC は全施設が稼動したことになったのである。ニュートリノ用ビー

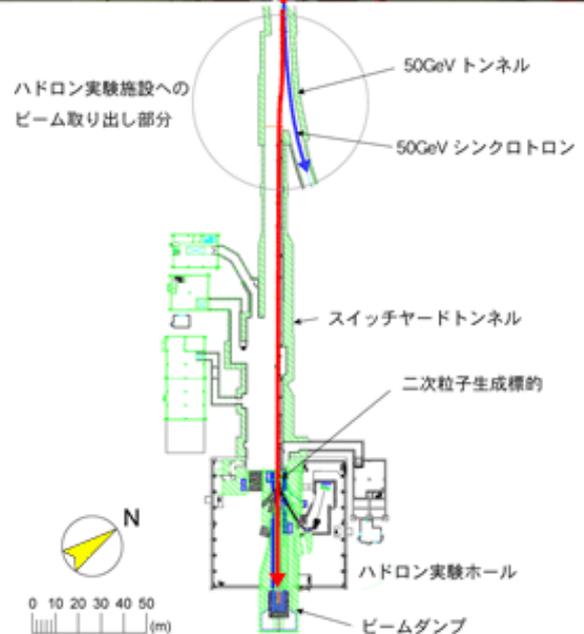


図2 遅いビーム取り出しライン

ムは図 1 に示されるように神岡方向に向けるため、MR の内側へ取り出し、強く偏向させて標的へ送り込む。そのため一次ビームラインは限られた長さで、かつ MR 電磁石より強い磁場で偏向させなければならない。そこで世界初となる超伝導電磁石でかつ combined function 型のビームラインという技術選択となった(図 3, 4)。4 月 23, 24 日には超伝導電磁石を励磁してからわずか 9 ショット目のビームで標的に命中し、図 5 の映像を得た。新方式の超伝導電磁石システムの性能がよかったのは勿論であるが、コミッションを担当したニュートリノ若手グループは「優秀なるスナイパー」でもあった。つまりタイミング制御やモニター類の備えがよかったということだ。この超伝導電磁石の設計、製造に関しては LHC に関する KEK/CERN 協力について触れておきたい。クライオスタット設計は LHC-dipole



図 3 ニュートリノ一次ビームライン

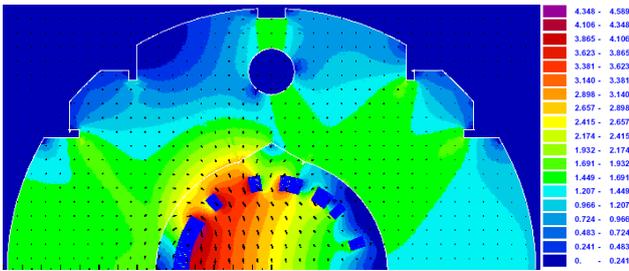


図 4 二次元磁場強度及び磁束ベクトル図[5]

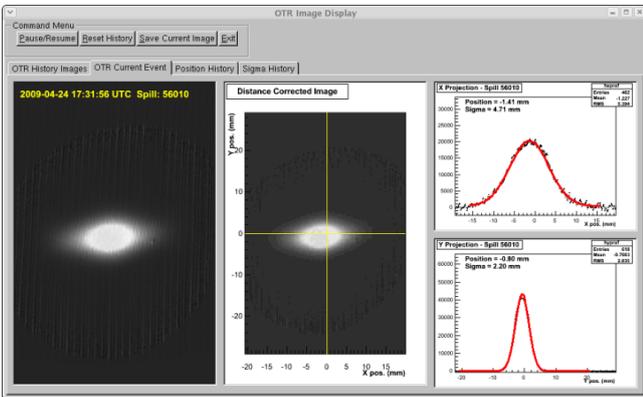


図 5 ニュートリノ生成標的直前に置かれた蛍光板モニターでとらえた 9th ショット(2009 年 4 月 24 日)

をベースにしたため大幅にリスク、コストが低減出来たし、真空容器をはじめ多くの部品調達にあたっては、LHC 向け大量調達に引き続いて行ったため同じ価格で入手できたのである[5]。

リニアックと RCS のビームパワーがランを重ねるごとに記録を伸ばしてきた様子を図 6 に示す。RCS ビームパワーの記録をみると、わずかシングルショットながら最大瞬間値 300kW を記録、210kW で 70 秒間の、そして 100kW では 1 時間の運転を達成した。さらに 2008 年 12 月からは MLF ユーザー運転を 20kW で開始した。現在はリニアックのエネルギー(即ち RCS 入射エネルギー)は元設計 400MeV の 45% (181MeV) である。これを 400MeV に増強するまで RCS の最大設計ビームパワーは 600kW なので、瞬間値 300kW はその 50% に相当する。

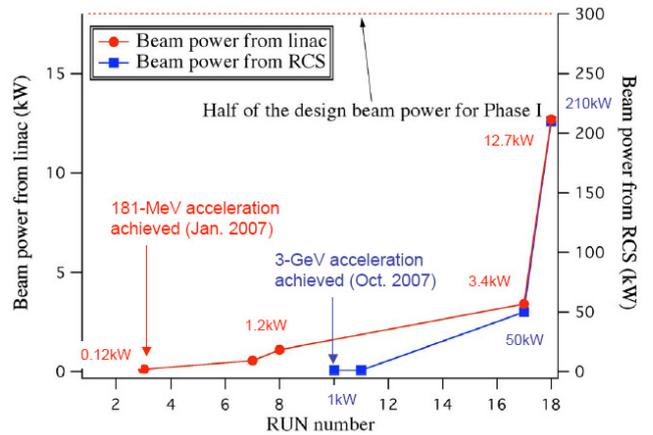


図 6 リニアックと RCS のビームパワー

ここでビームコミッションの初期段階にありながらも、早期に MLF のユーザーランを開始したこと、またチャンピオンデータに挑戦することの意味をまとめよう。J-PARC はいうまでもなくパワーフロンティアを目指す加速器であり、その点において KEKB と同様である。その意味するところは、高いピーク性能を達成し、かつそれを長期間安定に維持することである。しかし KEKB と大きく異なる点があり、それは放射化の問題である。J-PARC 加速器の最大の課題は陽子ビームロスによる機器の放射化といっても過言ではない。ビームロスを抑制・制御しつつ施設全体を長期間安定に運転することが、われわれにとっての最重要課題なのである。チャンピオンデータに挑戦することは、ビームロスについての課題を早期に抽出する上で有効であるし、ユーザーランを行うことは、施設を連続運転することで内包している弱点を炙り出すことに役立つ。言葉を変えると、マシンスタディのための間歇的運転だけではなかなか問題が発現しない場合もあるのだ。次項で述べる RFQ の課題はその典型である。勿論、全体の建設スケジュールの中で、この時期の MLF ユーザーランが決められていたという側面

もある。一方でユーザーランを行うということは、加速器担当者にとって、

ユーザーランという duty を抱えつつ、
課題解決と、
性能向上

の三つのことを同時に果たすこととなり、その負担は実際のところかなり大きい。この事実と、瞬間的に達成したチャンピオンデータは即、実用運転の実力ではまったくなく、ということユーザー諸氏には十分にご理解いただきたいところである。

さて、ここまでに受けてきた公的機関による各段階における放射線施設検査はすべてオンスケジュールで合格を果たしてきた。これを一見すると順風満帆であるかのようだ。しかし内情は困難な課題を抱えて、薄氷を踏みながらの歩みであった(まだ完了形ではない)。勿論それは筆者が経験してきた TRISTAN や KEKB においても、特にコミッション初期においては同様であった。しかし J-PARC の状況、特に MR の様相は大規模プロジェクトに通常付随する、いわゆる「初期トラブル」だけではなく、技術選択や要素開発に由来する課題も含まれる。それらのうち最重要課題について、その情報を率直に開示することにより高エネルギー物理 society と正しい現状認識を共有し、協力を得ながらそれを克服していくべきと考える。これは戸塚洋二氏のスーパーカミオカンデ事故のときの際立った行動をお手本にしたものである。そういうわけでもっとも大きな三つの課題について次項にやや詳しく述べることにする。

2. 三大課題

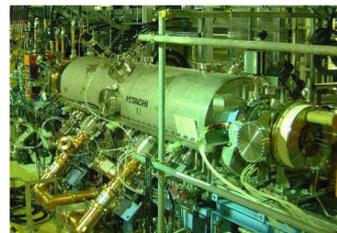
三大課題とは、リニアック最上流部加速管 RFQ の放電、RCS 加速空洞の磁性合金コア損傷、そして MR 主要電磁石電源リップルおよび不十分な制御性能のことである。加速器の上流が動かなければ下流側は手の打ちようがなく、MR から見れば三つの課題は同等の重みを持つ。

RFQ

RFQ の構造を図 7 に示す。左図が加速管を格納した真空容器の外観で、右図は加速管本体の内部構造を示す。

この加速管の役割はイオン源からの 50 keV の負水素イオンビームがベーンと称する四つの電極の中心部を通過するとき、バンチ形成と 3 MeV までの加速を行うことである。ビームパルス幅は 500 μsec と長く、しかもベーン表面に現れる最大表面電界強度は 30 ~ 35 MV/m とロングパルスの加速管としては非常に高い。RFQ はイオン源の即下流に位置する加速管である。そのイオン源は水素ガスを流しながらの運転となるため、イオン源と RFQ の間には真空差動排

気システムが設けてある。しかしそれでも条件は厳しく、真空排気設計を重視する必要がある。本設計では ① 複雑な RF 構造と、② ロー付けや溶接などの接合技術により RF 空洞自体を真空容器とするという二つのことを両立させるのが難しく、図 8 に示すように RF 構造を真空容器に収める「間接排気型」とした。



RFQの外観



RFQの内部:上下に貫くロッドがパイモード安定化ループ(PISL)

図 7 RFQ の外観(左)と内部構造(右)

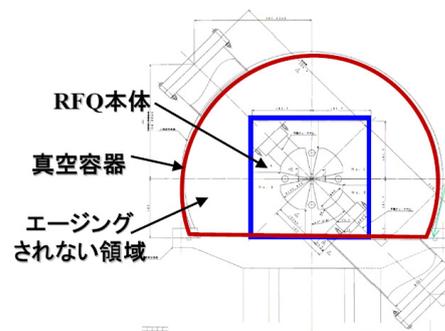


図 8 RFQ 本体と真空容器の関係

この技術選択では RF 設計に対する制限事項が少なくなり、自由度が増すという利点がある。実際、図 7 に示すようにモード安定化ループ[1]を導入することができた。一方では図 8 にからわかるように、真空容器に格納された空洞本体の外部表面積と真空容器内部表面積は空洞本体内部表面積の数倍にもなるため、その領域における吸着ガスは RF 電力を投入してもエージングされることがなく、真空のベース圧力が高いままとなる。さらにはまだ定性的な理解に留まっているが、水素ポンプからイオン源に導入する水素ガスに若干量ながら水分が含まれており、それが蓄積して連続運転を妨げているようでもある。初期の加速器専用スタディでは連続長期運転を行わなかったため、放電問題は顕在化しなかったが、2008 年秋から MLF 向け連続運転を開始したところで、重大な課題であることが認識されるに至った。その後の調査で、高電界加速管としては材質や表面切削精度にも改善の余地があることも分かった。それを受けて直ちにこれらの点を改善したバックアップ機を製造するグループを編成し、急ピッチで検討を進めているところである。バックアップ機と入れ替えが可能になるのは最速でも来年夏以降となるため、現有機をそれまで使いこなしていく必要がある。そのためには、放電により荒れ

た加速管ベーン表面のRFコンディショニングを行うこと、

出来る限りの真空系の増強を行うこと、の二つのことを計画している。①については放電などにより表面に生じたウイスキーを短パルスのRF電力によりこれ以上ベーン表面を荒らさないようにしながら蒸発させ(エネルギーは小さく、電圧だけは高くする)、次いでRFパルス幅を徐々に延ばしていく、という通常行われる高電界加速管のコンディショニング方式を採用した。これにより通常の20%のパルス幅ではそれなりに安定に運転できるようになった。来る夏季停止期間中に について、クライオポンプの導入、ベッキングなどを行い、ベース圧力を下げ、排気速度をさらに上げる努力を行う。これらのことにより、RFコンディショニングの効率が向上し放電条件も緩和されれば、現有機でもパルス幅を現状よりも改善した状態での運転が可能になると期待している。このように記述するとネガティブな面が強調され勝ちであるが、筆者も含め、担当グループがチャレンジを伴う機器の開発姿勢や、複雑な現象の中からその物理的背景・描像を理解する方法論を学んだというポジティブな面もある。

RCS 加速空洞

RCS トンネル内に設置された加速空洞群を図9に示す。RCSとMRの加速空洞はフェライトより特性の優れた磁性合金リボンを材料とするコアを採用した。詳しくは文献[1]に譲るが、加速ギャップあたり15kVという高電界を実現し、かつ空洞のQ値を低い値にして広帯域とし無同調で周波数変調をかけてビームを加速することが実現できた。その大きなメリットは実際にRCSもMRもビームコミッションのときに実感できたことである。しかし一方では、新材料であるために、それを使いこなすまでには、まだまだ多くの努力を払う必要があることも確かだ。3年前の2006年夏に、当時加速器の抱える諸問題を抽出して、大学や他グループからも相当規模の支援を受け解決をはかる努力をしたことをご記憶の方も読者の中に多くおられると思う(加

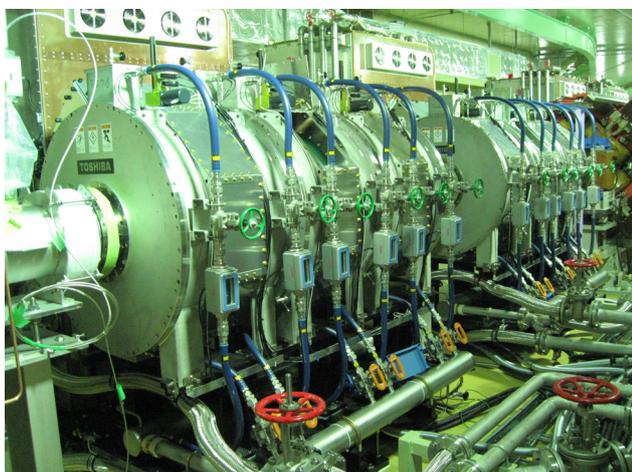


図9 RCS トンネル内に設置された空洞(11台)

速器問題検討会)。この誌面を借りて改めてお礼を申し上げたい。そのときの大きな課題の一つが、図10に示すコアの放電による損傷であった。支援の中には、KEKBの影山グループによる、三次元電磁界分布計算がある。筆者はこれによって加速ギャップに近いコア内部には半径方向に高い電場が発生することを理解した。



図10 コアの放電による損傷

その後、担当者やメーカーの懸命の努力により、放電を避けるようなコア製造方法が開発され、ビームコミッションまでにはすべてのコアについてテストベンチにより300~1000時間のランニングを行った上で装荷し、全空洞をトンネル内にインストールすることができたのである。これらの加速空洞を用いて前に述べたようにビームコミッションをスケジュール通りに行ったのだ。しかし、運転時間を重ねているうちに空洞の一つの加速ギャップのインピーダンスが急速に劣化した。一つの空洞は三つの加速ギャップを持ち、各ギャップ毎に6枚のコアを装荷している。即ち空洞当たり18枚、11空洞で合計198枚のコアを用いているが、劣化したのはその内の一枚である。

空洞を開けて調査したところ、多くのコアの内側部分に「座屈」が起こっていることが発見された。そのうちの一つがコア内筒の突起部にぶつかりリボンに断裂が生じていた(図11は座屈から断裂に至ったもの)。これがインピーダンス低下の原因であった。しかしながら座屈があっても断裂に至らないコアのRF特性には劣化が見られない。これはgood newsでもありbad newsでもある。断裂に至るまで使用に耐えるのはよいが、開けてみるまでダメージの兆候が

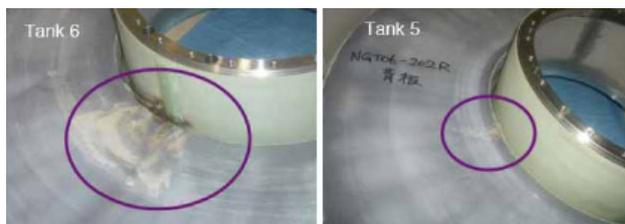


図11 座屈、断裂の生じたコア

わからない。座屈の生じた原因として筆者はコアの熱負荷が均一でなく、コア内側に強烈な圧縮応力が働いたという見方が有力と考えているが、さらなる調査・検討が必要である。影山・東大山下研合同チームの数値解析によれば最悪の場合、応力は数十メガパスカルにも達する可能性もある。現在 RCS グループは対策チームを編成して原因の究明と解決策を探っている。

MR 主電磁石電源

第3の課題はMR 主要電磁石電源である。2008年5月の入射エネルギー3GeVでのコミッショニングの結果、ベータートロンチェーンやビーム軌道が大きくふらつくことがわかった[3]。直ちに電源チームを強化して原因を調査したところ、偏向2極、収束4極、補正6極電磁石の電源それぞれ6台、11台、3台、合計20台のすべてに1%台の大きいコモンモードのリプル電流があることがわかった。さらには電源の操作性が悪く、3GeVから30GeVへのパターン運転もままならない状態であった。もともと設計思想として、IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)という高性能新型高速スイッチング素子を用いることにより、大電力、小型、高効率、低ノイズという夢のような電源になるはずであった。その回路図(偏向電磁石の例)を図12に示すが、AC特高ラインを直接周波数変換してパターン電流を作り出す方式で、実際出来上がった電源は小型になっている。しかし2007年末に電磁石への通電試験を始めたところ多くの課題が浮上した。先ずスイッチングなどに起因する高調波に悩まされた。現状では電源自身だけで抜本的な解決をはかることは困難で、他の機器も含め総合運転したときに基準を満たすことができていない。次に制御性の問題が浮き上がった。パターン運転が出来ないのである。メガワット級の電源を制御するのは、同じ電源筐体にある10mW級の電力で動作する低電力の制御回路である。両者の離隔が理想的であればよいが、特に配慮されていたわけではなかった。そうして最後はリップル問題に行き当たったわけだ。実はこれらの諸問題はそれぞれが独立した事象ではなかった。

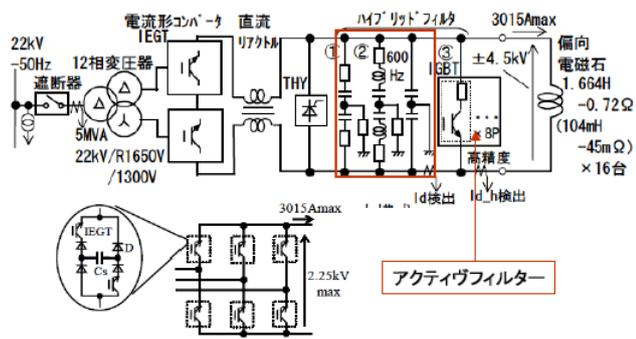


図12 偏向電磁石電源構成(基本構成は全電源共通)

電磁石を励磁するという事は、特高受電→電磁石電源→地上電源室から地下電磁石までを接続する長尺の給電用ケーブル配線→トンネル内に配置された多数の電磁石群といった一連のラインに大きな電磁エネルギーを流すということだ。そのエネルギー流路にはインダクタンス(L), キャパシタンス(C), 抵抗(R)がずっと分布している。それらは定数の判った回路素子だけでなく、実際にはラインもインダクタンスを持ち、浮遊キャパシタンス、分布した抵抗もあって複雑だ。しかも流れるエネルギーは高い周波数成分まで含む広帯域の電磁エネルギーである。大人しく回路図に引かれたラインを流ればならない。随所に危険なLCR共鳴回路が寄生的に構成され得るし、エネルギー流路が不十分であれば電磁エネルギーの一部は空間に逃げたり、電源回路の上・下流部に流出するしかなくなる。ここまでに述べた 高調波、操作性、リップルの諸問題の根本はここにある。では真の理想電源とはいえば図13に示すように実は佐藤・土岐理論というのがあり、既にHIMACにおいて実現されていたのである[6,7]。重要なことは全システムにおいて、アースされた中点に対して対称性を確保し、ノーマルモード、コモンモード双方に対してフィルターを設けるということに尽きる。その第一原理は勿論マックスウェル理論であるが、これを実際に大規模に展開された加速器電磁石システムに対応した理論体系が作られたことはわれわれにとって心強い。MRでは給電ケーブルの配線も対称性を考慮せず、各電磁石のコイルをシリーズに、トンネル内を一周するような配線にしてあった。全システムの根本的な解決は簡単ではないが、2008年秋には図14(収束電磁石の例)に示すように偏向、収束電磁石の電源から電磁石

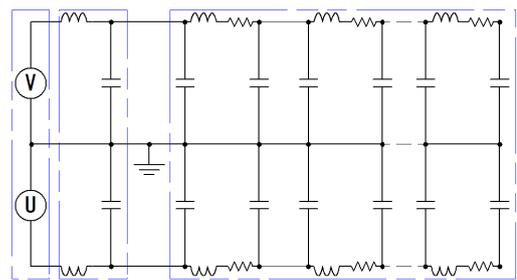


図13 対称性をもった理想電源[6]

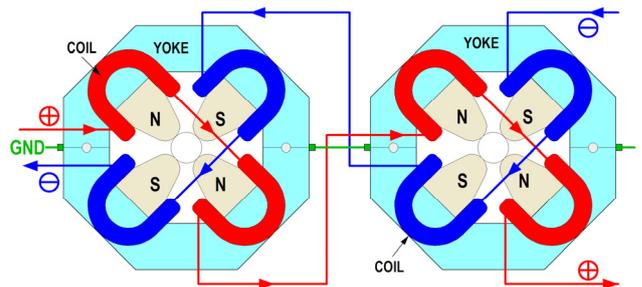


図14 収束4極電磁石給電システム対称化

への給電ケーブルだけでも対称化を図るという大きな決心をし、厳しいスケジュールながら作業を断行した。そうしてギリギリのタイミングで12月末からのビーム加速実験を迎えたのである。また電源に回路定数などの相当大掛かりな改造・調整を施し、ようやく加速パターン運転も可能となった。特に効果が高かったのは配線の対称化で、コモンモード電流に起因するリップル電流は劇的に減少し、全体として0.01%台になった。スケジュールを堅守すべく、自分たちで完全に電源回路内容を掌握してことに当たった担当チームの健闘は特筆に値する。

3. MR 遅い取り出し, 速い取り出し

ほとんど電子陽電子コライダーの経験しかない筆者にとって、固定標的の、しかも陽子シンクロトロンは初めてであった。コミッションングはビームをシングルショットモードにして行く。これが可能になるためには、運転の良好な再現性が大前提となるが、リニアックおよび2台のシンクロトロンとも、最近のデジタル制御技術の進歩もあって、優れている。このことによって機器を無駄に放射化することなくマシンスタディを行うことが可能となった。ニュートリノ一次ビームラインのコミッションングで、わずか9ショットで標的までビームを導いたのはその典型である。またRF加速は先に述べたコア問題は別として操作性は優れている。さらに大きかったのは、MRは3GeVで入射したビームを30GeVまで加速する間に遷移エネルギーを通過しなくて済む光学設計(imaginary transition energy optics)が採用された世界初の大型陽子シンクロトロンであることだ。旧KEK PSの経験のない筆者にとって、最近のビーム光学理論の進歩からいって当たり前のような気がしていたが、かつて苦勞した人たちの感慨はひとしおだったと思われる。以下、大きな三つのマイルストーン、最初の30GeV加速、遅いビーム取り出し(以下SX: Slow Extractionという)、および速いビーム取り出し(以下FX: Fast Extractionという)毎にコミッションングの様子を紹介しよう。

2008年12月23日

電源改修、電磁石配線対称化の作業終了を待って、クリスマス前に最初の30GeV加速を行った。ビームの行き先はFX部のリング外側への取り出しラインの先にあるビームアポートダンプである。キッカー、セプタム電磁石ともに両極性にしてあり、極性を反転させれば、ビームはリング内側のニュートリノ一次ビームラインへと行く。

図15は横軸が時間、縦軸がビーム強度だ。この図からわかるように、遷移エネルギーを経ないため、加速途中にビームロスは見られない。30GeVに加速した後、取り出された

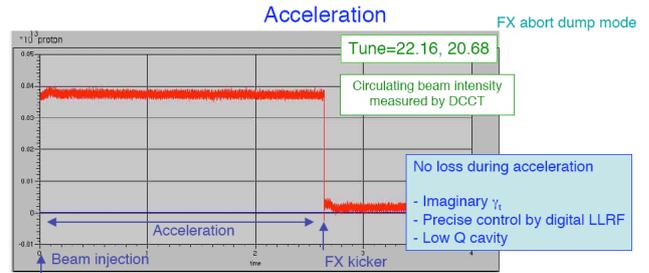


図15 加速中のビーム強度

ビームを最初に確認できたのはビームダンプ直前に設置されたビームプロファイルモニターのほぼ中心部に信号を見たときである。このときは、このわずか半年間で電磁石電源を加速パターン運転ができるところまで緊急改修やケーブルの対称化作業を行ったこと、先述した2006年夏の加速器問題検討会以来わずか3年間で、技術的に大きな困難に直面していたキッカー電磁石やセプタム電磁石を、とにかくDay-1までに使えるところまで大幅改修ができたこと、そしてそれらを直接担当した若手チームの驚異的な努力に思いが馳せ、現場慣れた筆者といえども深い感動を覚えた。

2009年1月27日

年が明けて直ちにハドロン実験ホールへのSXビーム取り出しを開始した。ニュートリノ実験のためには加速されたビームをそのタイミングでキッカー、セプタム電磁石を励磁して一気に周回軌道の外に取り出せばよいが、ハドロンホールでの実験はカウンター実験なのでビームが一気に来てしまっただけでは同時計測実験が出来ない。できるだけゆっくりと一様な強度で取り出したい。このようなSXはFXに比較して相当に難度が高い。実験する方々にもそのことを理解しておいていただきたいので、やや詳しく原理を説明しておく。 k, l, m を整数としたときビームの水平、垂直ベータトロン振動数(ν_x, ν_y)が

$$k\nu_x + l\nu_y = n$$

の条件を満たすと共鳴を起こしてビームは不安定になる。MRでは8台のSX専用6極電磁石を使って $3\nu_x = 67$ という三次共鳴を励振し、(ν_x, ν_y)動作点をこの共鳴線に近づけながら振幅を徐々に大きくし、最終的には数秒かけてゆっくりとビームを取り出す。SX部上流には静電セプタム(ESS)が2台設置してある(図16)。ESSには周回軌道内側に25mm

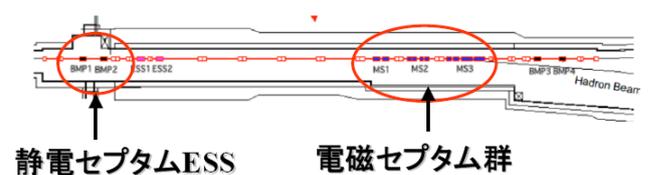


図16 SX部の静電セプタムおよび電磁セプタム配置

ギャップの二つの電極があって強い電場(104kV)が印加してある。周回軌道側の電極はビームが横切するため不可避免的にビームロス即ち放射化が起こるため、物質量はできるだけ少なくしなければならない。今設置してある ESS では厚さ $30\mu\text{m}$ のタングステンレニウムリボンを使っている。周回軌道から外れたビームがこのリボンを横切って電場領域に入り軌道が曲げられ、次いで下流に設置してある複数の電磁セプタムを通過して無事に SX ビームラインへと取り出されるのである。このように SX は複雑な過程であり、かつ不可避免的ビームロスがあるのだ。図 17, 18 には SX 時のビーム強度の時間変化を示す。図 17 は図 15 と同様であるが取り出し部が「撫肩」になっているのがお分かりいただけると思う。図 18 は取り出しの部分拡大したもので、二つのショットが重ね書きしてある。

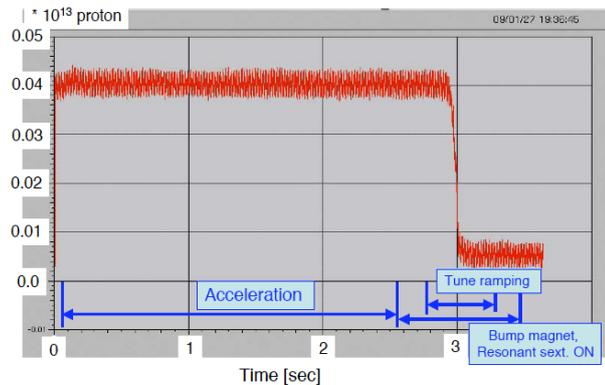


図 17 遅い取り出しにおけるビーム強度の時間変化

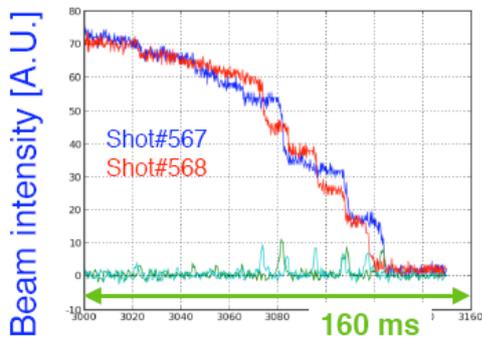


図 18 図 17 のビーム取り出し部だけの拡大図

図 17 の時間スケールで見るとビーム取り出しに特に問題ないように見えるが、図 18 のように拡大すると二つのショットともにビーム強度が階段状に変化しているのが見える。これをハドロンビームラインに設置されたさらに時間分解能のよいモニターで見たのが図 19 である。ビームスピルがいわゆる「ハリハリ状態」になっている。その原因は第 3 の課題として紹介した電磁石電源のリップルを反映しているためである。このときのランは電源故障のため中断し十分なマシンスタディが行えなかったが、それが施設検査終了直後であったのはまだ幸運であった。このランを終了すると実験グループはハドロンホールの二次ビームラインの建設に入った。

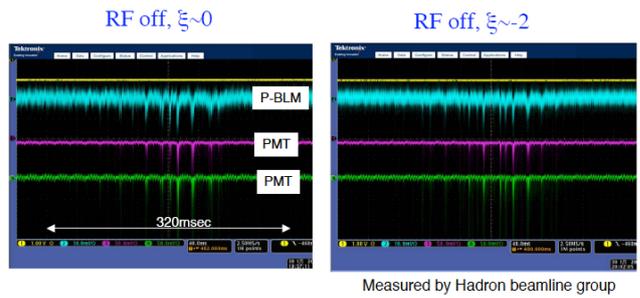


図 19 HD ビームラインのビームスピル

SX ビームロスのスタディ

SX では不可避免的なビームロスがあり、ビーム取り出し効率は原理的に 100% にできない。KEK PS では最大でも 90% 程度であった。つまり 5kW のビーム取り出し時に 500W のロスがあった。世界的に見ても最大 95~97% にとどまっている。仮にロスを 1% にできたとしても 100kW のビームを取り出そうとすると 1kW ものロスになる。KEK PS の 500W ロスの経験では、これを高放射化場での作業の上限値としなければならない。電源がダウンする前のわずかな時間であったが、ビームロスのスタディを行った。結果を図 20 に示す。このときの取り出し効率は 90% 程度であったが、やはり大部分のロスがビーム取り出しのタイミングで、SX 部で起こっていることがわかる。

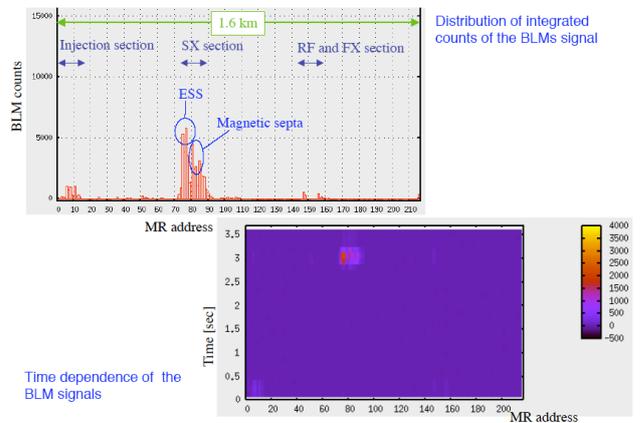


図 20 SX 部におけるビームロススタディ

2009 年 4 月 23 日

SX コミッショニングのあと、3月はターゲットステーションも含めたニュートリノ施設コミッショニングのための PPS(Personal Protection System, 人的保護システム)切り替えのためビーム運転は休止した。もちろんこの間を利用して、加速器は高密度の作業を行っている。中でも第 1 の課題として紹介した RFQ は、いったん運転不能に陥ったが基本に忠実なコンディショニングにより再生させたのもこの時で、PPS 切り替え後の 4 月の運転再開に不十分な運転条件ながらも綱渡りで間に合った。実験グループも加速器担当者同様にハードスケジュールで予定通り準備作業を完

了させた。ニュートリノ生成標的へのビーム取り出し、一次ビームライン調整については1章で既に述べたとおりである。この稿を書いている時点では5月末の放射線施設検査に向けた準備を行っている。

4. 今後の展望

今年夏までの予定

5月末に予定されている放射線施設検査をクリアするとJ-PARC 全施設の第一段階施設検査がすべて終了することになる。その後加速器は6月22日から3ヶ月余の停止に入る。それまでのMRの課題の一つが6バンチ運転である。実はここまでのコミッションはほとんどがシングルバンチ運転で、また4月ランの最後に2バンチ運転を試行したにとどまっている。MRのバンチ数は本来は8バンチだが、FXキッカー電磁石の立ち上がり時間が対応できないため、現状では6バンチが上限であり、夏前にそこまでは到達しておきたい。夏季停止中には三大課題に関わる作業を実施する。①RFQの真空系増強、RCS加速空洞コアの一部入れ替え、そしてMRはSXスピル制御のためのフィードバック用電磁石システムのインストールや、補正6極電磁石の給電ケーブル対称化(偏向2極、収束4極電磁石は2008年末までに終了している)などを行う。三大課題関係以外にも、保守作業も含めて多くの作業を予定している。実験グループもハドロンホールでは二次ビームライン建設が続けられるし、ニュートリノ・ターゲットステーションでは電磁ホーン#2、#3のインストールなど多くの作業が目白押しで、これらは10月中旬までの予定である。

夏以降の予定

長期停止後の運転は、まずは夏の作業の効果を確認するところから始まる。特にビーム強度がどの程度期待できるかはRFQの性能次第というところがあり、そのためのスタディは最優先であろう。現状のRCS 20kW (MR 7kW 相当)から、これまでの最高レベルのRCS 100kW (MR 33kW 相当)にどこまで近づけるかだ。国際競争の激しいニュートリノ実験は一刻も早いパワー増強を必要としており、特に来年は出力100kWで 10^7 秒間の運転を実現することを当面の目標としている。それを目指したスタディを中心とする。SXに関してはスピル制御のためにインストールした装置の性能を発揮させるためのスタディや、夏前には短時間しかできなかったビームロスに関するスタディを行い、パワー増強に繋げたい。

2010年以降および中期展望

パワー増強のためビームロスの理解とその制御のためのマシンスタディの優先度が高い。またいよいよ加速器とし

て実験課題採択委員会(PAC)で認められた物理実験に順次対応していくべきで、そのための企画・調整の仕組みを加速器・物理が協力して作りつつある。加速器としては2009年からの3年間を以下に述べる事情からテークオフの期間と捉えている。この間は条件としてRCS入射エネルギーは181MeVのままである。幸い400MeVへのエネルギー増強のためのリニアックの予算が認められたので、その実現が待たれる。周知のようにMRの設計出力パワーは750kWだが、それはビームエネルギーが50GeVの場合である。ところがMRの主要電磁石は30GeV以上では飽和が始まり、例えば40GeVでは必要電力は2倍に、50GeVではさらにその2倍必要となる。飽和に伴い磁場のgood field regionも狭まる。そのため当面は飽和がない30GeVで運転する計画だ。このとき電流が同じであればビームパワーは60%になるので、750kW達成のためには何らかの方法でその分を回復しなければならない。もう一つはMRのアーチャーで、主としてFX部機器のアーチャーを30GeVビーム取り出しに十分なように拡大することが必要である。同時にビームハローをカット・吸収し、ロスを局在化するためのコリメーター容量の増強も必要となる。この3年間でこれらの改造を実施する、という意味でテークオフ期間と呼んだ。ここで誌面が尽きたので筆を擱くことにする。

5. おわりに

加速器は厳しい現実を抱えながらもオンスケジュールでマイルストーンを実現してきた。この状況認識を共有したいがため、詳しい内情をも明かしたつもりである。また2009年を初年度とした向こう3ヵ年の目標も示した。その先の見通しについて述べるためには、もう少し議論を重ねて、また近いうちに機会をいただければと思う。MRで達成し得るビームパワー(P_M)は、第一近似ではRCS出力パワー(P_R)、それをMRが受け取る率(ε)およびMRのエネルギー E_M に比例する。

$$P_M \sim \varepsilon E_M P_R$$

MRのエネルギーは当面は30GeVにするので、 ε を上げる方法を考えねばならない。そのときビームが入射エネルギーにあるときの空間電荷効果をもっとも厳しい条件となる。このように将来の見通しについて考えるとき、最近のKEKBの快挙、クラブ交差でのルミノシティ記録更新に筆者は大いに勇気付けられていることを付け加えたい。15年前、筆者がKEKB建設に専念していたとき、「今の實力ではSLACに“周回遅れ”でついていけば十分」と言う人がいたことが印象に残っている。現実にはKEKB運転開始後2年目にSLACをキャッチアップ、4年目に設計値を突破、10年目に設計値の2倍を達成したのだ。そして今アップグレー

ドに取り組もうとしている。かくのごとく将来予測は難しい。KEKBは優れた基本設計がベースにあつてプロジェクトのもっとも健全なライフサイクルをたどっている。一方、J-PARCは多くの課題を抱えていることは事実であるが、ぜひともKEKBに倣いたい。

本稿はJ-PARC加速器建設およびビームコミッショニングに携わったすべての方々の方々の努力の結果について、筆者の視点でまとめたものである。多くの図表はKEK/JAEA加速器メンバーが様々な機会に発表したものから再録させていただいた。ここで感謝申し上げます。特に松本浩、小関忠、上窪田紀彦、山本昇、竹内康紀、長谷川和男、金正倫計の各氏には原稿に目を通していただいたことに感謝いたします。

参考文献

- [1] 山崎良成 他, “J-PARC 加速器”, 高エネルギーニュース **21**(1), 11 (2005).
- [2] 池上雅紀, “J-PARC リニアックにおける181MeV加速の達成”, 高エネルギーニュース **25**(4), 177 (2007).
- [3] 小関 忠, “ビームコミッショニングを開始した J-PARC MR”, 高エネルギーニュース **27**(2), 63 (2008).
- [4] 田中万博, J-PARC センター報告(私信).
- [5] 荻津 透 他, “J-PARC ニュートリノビームライン超伝導電磁石システム”, 第1回小島・平林記念シンポジウム, 2009年4月, KEK.
- [6] K. Sato and H. Toki, “Synchrotron magnet power supply network with normal and common modes including noise filtering”, Nucl. Instr. Meth. A **565**, 351-357 (2006).
- [7] H. Kobayashi, “BEAM COMMISSIONING OF THE J-PARC MAIN RING”, PAC09, Vancouver, May 2009.