

話 題

J-PARC MLF のビームコミッショニング

明午 伸一郎*

Beam Commissioning of the J-PARC MLF

Shin-ichiro MEIGO*

Abstract

At J-PARC, beam commissioning of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) has been started in May 2008. With only one shot of the proton beam, we succeeded to deliver the proton beam to the neutron production target because of the good preparation of the monitor and the magnet. We also succeeded, by the only one shot of the beam, to recognize that the observed performance of the neutron beam agreed well with the design. Furthermore, we successfully produced the muon beam, so that the fundamental mission of MLF as a secondary beam supplier was completed. In December 2008, MLF was opened for users to use the neutron and the muon beam.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) では物質及び生命の実験的な科学探求のために、中性子とミュオンをプローブとして用いた施設である物質・生命科学実験施設 (Material Life Science Experimental Facility (MLF))¹⁾の建設を2000年より開始した。その後順調に施設は完成し、ビームの受け入れを2008年5月より開始した。

3 GeVの速い繰り返しのシンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron (RCS))²⁾から25 Hzで出射されるビームは約3秒に1回の割合で主リング (MR, 50-GeV Main Ring Synchrotron, 2008年5月より運転開始³⁾)へ輸送される一部を除き、MLFに供給される。出射される殆どのビームは物質・生命科学実験施設に導入され、ターゲットから生じる二次ビームが様々な実験用途に使用される (図1)。MLFには中性子を生成する厚い水銀ターゲット (図2)とミュオンを生成する薄いグラファイトターゲット (厚さ20 mm)がある。ミュオンターゲットは中性子ターゲットの約30 m上流に設置している。ミュオンは4方向からなる二次ビームラインで取り出されるが、2008年10月の時点で1本の建設が終了した。水銀ターゲットで生じた中性子は液体水素 (約20 K)で冷却されたモデレータで減速された後に取り出され中性子実験に使

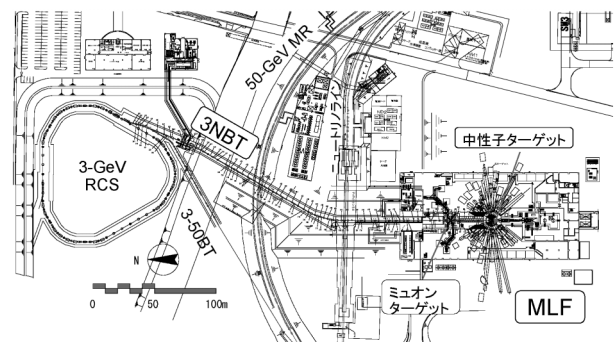


図1 物質・生命科学実験施設におけるターゲット、3-GeV RCS及びビーム輸送ライン (3NBT) の配置

用される。2008年5月の時点で、既に5本のビームラインの建設が終了した。最終的には23本の中性子ビームラインが建設されユーザーが様々な実験に使用する。MLFでは、ビームの供用を平成20年12月から開始する計画としており、コミッショニング開始から十分な期間が無かった⁴⁾。よって、円滑なビームコミッショニングを行う事は非常に重要であった。

1.1 実験施設の構成

MLFでは中性子とミュオンをビーム状に取り出し様々な実験に利用する。実験施設を設計する上で様々なアイデアが登場した。J-PARCの前身であるJHF

* 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター J-PARC center JAEA
(E-mail: meigo.shinichiro@jaea.go.jp)

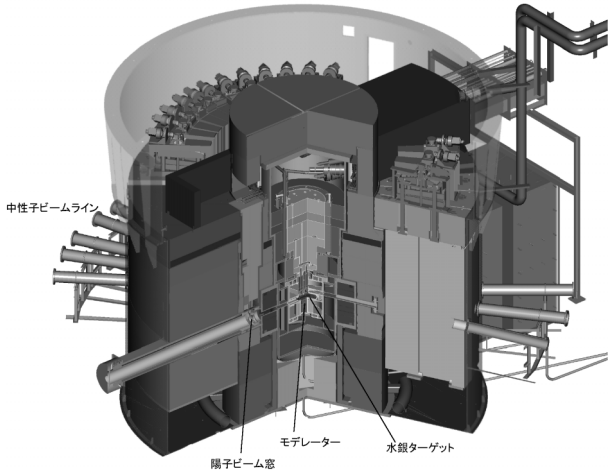


図2 中性子ターゲットステーション

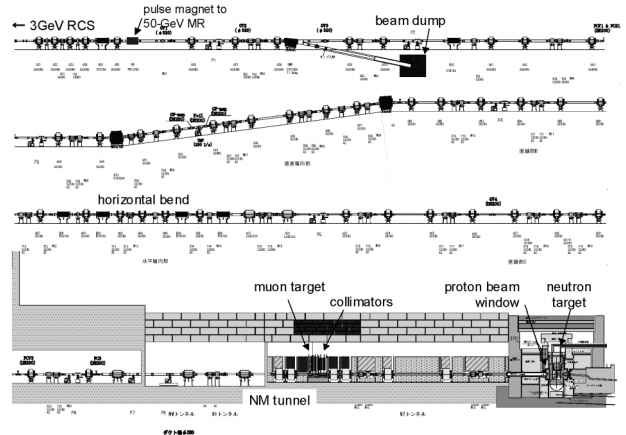


図3 3NBTの全体構成図

(Japanese Hadron Facility) 計画では元々ミュオン施設と中性子施設を独立して建設しパルス偏向電磁石によりビームを振分けることにしていた。しかし大強度のビームを受け入れられるビームダンプを別に製作しなければならないことや、MR との振り分け以外にもパルス偏向電磁石を更に一台設けなければならないことで、この配置は望ましくなかった。また、この配置では中性子とミュオンでタイムシェアをしなければならないのでマシンタイムの確保の点からも望ましくなかった。陽子ビームを最も効率的に利用できるのは、薄いミュオン生成ターゲットと厚い中性子生成ターゲットをカスケード状にする配置である⁴⁾。中性子源の発生効率に着目してみると、最適なエネルギーは1 GeV 付近である。陽子ビームのエネルギーが低い場合には、ミュオンターゲットにおける散乱の影響が大きくなる。J-PARC の場合には陽子エネルギーが3 GeV と最適なエネルギーよりも少し高いものの、ミュオンターゲットでの散乱の影響が小さいために、カスケード配置はビームを有効に利用する上でうってつけの配置であった。

カスケード配置はミュオンターゲットから中性子ターゲットまで整然としたビーム光学を設けることと(図1)、ターゲット散乱に起因する放射化が生じるために様々な困難が伴う。J-PARC のような MW クラスの大強度陽子加速器施設においてカスケード配置を選択するのは容易なことではない。それは中間ターゲットでの散乱によるビーム損失が、当時の世界最大出力を持つ加速器パルス中性子源 (ISIS) の出力に匹敵することからも容易にわかる⁵⁾。そこでまず、核子・中間子輸送コード NMTC/JAM (PHITS)⁶⁾に電磁場の計算を組み込み、ターゲット散

乱に起因する放射線の影響等を可能な限り精度良く計算できるようにした。これにより、ミュオンターゲットから中性子ターゲットまで必要とされる遮蔽体の合理的な設計が行えた。ターゲット付近は著しく放射化するために、メンテナンス作業は遠隔操作により行うとして設計を開始した。

2. ビームライン構成

2.1 RCS 出射部から MLF

RCS 出口から中性子ターゲット (図2) までは、3NBT (3 GeV to Neutron target Beam Transport)^{7,8)} と呼ばれるビーム輸送システムによって成り立つ。また、RCS のコミッションング等のビーム調整にはビームダンプが必要であるがこれを RCS 出射部付近に設置している。

ビームラインの構成を図1, 3に示す。ビーム輸送ラインの長さは300 m 以上にも亘り、1 MW の出力を持つビーム輸送システムとしては世界最長クラスとなった⁴⁾。この輸送ライン(図4)では、機器の共通化を行うために、偏向電磁石の角度は7.5°とした。四極電磁石の形状もボア径の異なる2種類に留め(φ200, 300 mm) 故障時に備える予備の電磁石を少なくする設計とした。

ビームの運動量の分散に起因する横方向の影響を小さくし、アパチャーを広く取るために偏向部を除き全体的にアクロマティックなビームラインの配置とした(図4)。3NBT ではMR トンネルを乗り越えてMLF にビーム輸送するために、垂直方向にビームを偏向するが垂直方向にも分散の影響が発生しない光学とした。

RCS のコリメータのアパチャーは324 πmm mrad となっている。3NBT のアパチャーを決定する上

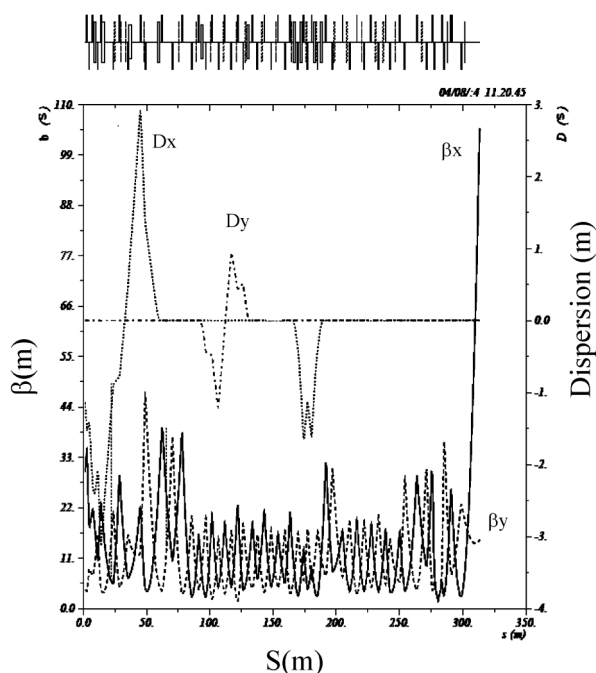


図4 3NBTのオプティクス

で、次の3つの要因が生じてもビームが損失することなく受け入れられるものとした⁶⁾。即ちRCS出射部のキッカー電磁石に流す電流のリングングによるビーム軌道の歪み、不等沈下や据付時の誤差により生ずるミスアライメントの影響、及び電磁石電源の安定性や電磁石の磁場の非均一性による影響である。これらの影響がある条件で $324 \pi \text{ mm mrad}$ 以上のアパチャーが確保できるようにビームダクトと電磁石の設計を行った。偏向電磁石の許容される磁場の非均一性はビーム軌道軸中心から 100 mm 以内において 5×10^{-4} 以下とした。これを達成するために、ウインドウフレーム型のセクター型電磁石を採用し、磁極端部にシムを設け、さらにビーム入出射面にエンドプレートを採用した。また、四極電磁石に許容される磁場勾配分布の非均一性は中心から $\phi 100 \text{ mm}$ 以内において 3×10^{-3} 以下とした。磁極端部にシムを設ける方法や双曲面磁極端部を面取りすることにより一様性を向上させた。

電磁石の設計はOpera 3D (TOSCA)による3次元計算で行った。また、BL積やGL積はサンプリングを行い代表機に関してホール素子を用いて磁場分布のマッピングを行った。磁場分布は、ほぼ設計通りとなっていることを確認した。

電磁石のアライメントは据付精度 0.2 mm 以下にすることを目標とした。これを達成するために、測量網を構築しレーザートラッカーを用いた手法で行った



図5 3NBTビームラインとレーザートラッカーを用いたアライメント

(図5)。ただし、ミュオンターゲット周辺の遠隔操作により交換する電磁石は基準とするプレートに従い、位置決めピンを基準としアライメントを行った⁸⁾。

2.2 ビームダンプ

ビームダンプはメンテナンスを容易にするために強制冷却無しのタイプとした。これを成立させるために、 4 kW が許容ビーム入力とした。ビームダンプには、次の3つの理由により鉛直方向に曲げ地下にビームダンプを設置する方式を採用した。1)ダンプを地下に設置することにより、ダンプから生成するスカイシャインの放射線が軽減できる。2)電磁石の運搬等の際にダンプへ導入するビームラインが干渉せず障害とならない。3)ダンプ周辺部の冷却が地下水により効率的に行える。2008年9月にRCSから瞬間的に 200 kW のビームを入射した。その際に、ダンプ周辺の温度が 1°C 程度上昇することを観測し、停止後に再び定常的な温度に移行し正常に温度がモニターできていることを確認した。

RCSのビームコミッションングは2007年10月から開始した。この運転においてダンプまでのBTは必要であったので、一緒にコミッションングを行った。ここでの経験がMLFにおけるビームコミッションングにおいて貴重な礎となった。

2.3 MLF内部のビーム輸送ライン

ミュオンターゲット周辺の電磁石は、周辺の残留放射能が高いために、遠隔操作によりメンテナンスを行うことが必要となる。絶縁材には耐放射線性に優れた無機絶縁(MI)ケーブルを用いた⁹⁾。

ミュオンターゲットでの散乱による影響をできる限り小さくするために、ビームオプティクスとしては

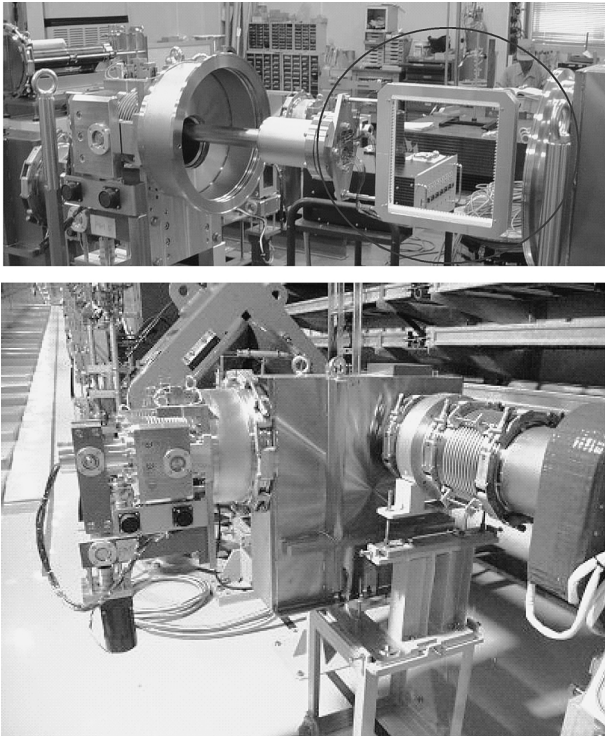


図6 プロファイルモニター（上：フレーム部のみの様子，下：ビームラインに設置した様子．振り子状にマルチワイヤーのフレームを駆動する．）

きる限りビームを絞り，ウエストをターゲット上で持たせるようにした．これを達成するために，ターゲット上流側でビームを広げて，磁場勾配の高い電磁石を用いてターゲット上で絞り，さらに元に戻すオプティクスを用いた（図4）．

2.4 ビームモニター

3NBTには16台のマルチワイヤープロファイルモニター（MWPM）が存在する．ワイヤーにはビームに対する影響と放射線による損傷が低い炭化珪素（SiC）ワイヤー（太さ $\phi 0.15$ mm）を採用した¹⁰．ワイヤーピッチは6 mmとし，水平及び垂直にそれぞれ32本のワイヤーを持つ（図6）．ビーム強度を確認するためのカレントトランスフォーマー（CT）を10台設置した．またビーム中心位置を測定するために，14台のビーム位置モニター（BPM）を設置した．各四極電磁石の上流側にはそれぞれ上下左右方向に4台のビームロスモニターを設置した（図7）．ロスモニターはKEKで使用実績のあるものを参考に設計・製作を行った．ビームライン全体で192台のロスモニターが存在する．

モニターの読み出しは25 Hzの全パルスに対して行い，CAMACベースのADC（テクノランド製）を用いている¹¹．EPICSに対応したCAMACコント



図7 ビームロスモニター（四極電磁石の上流側においてそれぞれ上下左右の4箇所に設置）

ローラ（CC7000/NET）を用いた．MLFでは繰返し25 Hzでビームを受け入れるが，全てのパルスに対して取りこぼし無く情報をデータベースに取り込めるようにした．BPMの信号はDSO（Agilent DSO6014L）で上下左右の4箇所の信号を読み取り，ピークの差分を平均で除する演算処理でビーム中心位置を導出する．

2.5 陽子ビーム窓

陽子ビーム窓は加速器とターゲットの間に存在する最も重要なインターフェースのうちの一つである．この窓により，加速器の高真空領域とターゲット周辺のヘリウム雰囲気領域を隔離することができる．窓は常に大強度のビームが照射されるために，寿命や廃棄シナリオ等に注意が必要な機器の一つである．LANLの核破砕中性子源（LANSCE）の使用実績から，陽子ビーム窓の材料としては当初インコネルを用いることとしていた．しかし，スイスのPSIの核破砕中性子源（SINQ）における使用実績や窓によるビーム散乱の影響を低くするためには原子番号の低い材質を採用した方が望ましいことがシミュレーション計算¹からわかったのでアルミ合金（A5083）を採用することとした．

陽子ビーム窓を図8に示す．陽子ビーム窓は遠隔操作により，交換及び廃棄できるようになっている．陽子ビーム窓は遠隔操作により着脱可能とするために，真空シールにはピローシールと呼ばれるダイヤフラム状の薄い金属板を膨らませ，対向フランジと密着させ更に差動排気によりシールする仕組みになっている．ピローシールは，ミュオンターゲット自身やターゲット周辺の真空機器のシールとして使用されてい

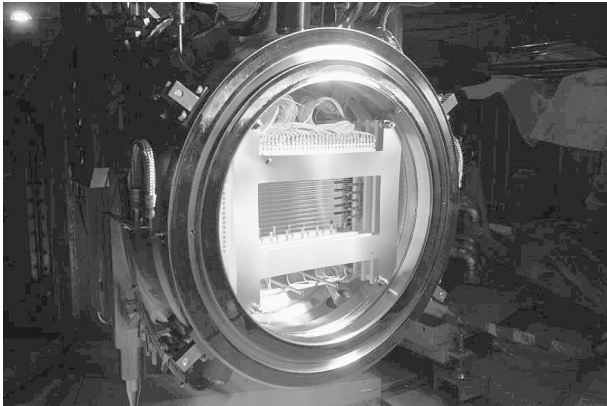


図8 陽子ビーム窓とプロフィールモニター

る. このシールは KEK 北カウンターホールや PSI などで使用した実績はあるが, 陽子ビーム窓の直径は $\phi 500$ mm と大きく, さらに高真空が必要とされるシンクロトロン加速器と隔離されることなく接続され使用するの初めての挑戦であった. ミュオンターゲット周辺の真空は2桁ぐらい悪くなるものの, シンクロトロンとの取り合いとなる上流側は目標としていた 1×10^{-6} Pa 以下を達成することができた.

3. ビームコミッションング

3.1 水銀ターゲット位置でのプロフィール測定

ターゲットの位置のプロファイルを知ることは非常に重要である. ミュオンターゲット位置にはマルチワイヤー型のプロファイルモニターを設置しているが, 中性子ターゲットの位置にはモニターが存在しない. 米国の SNS (Spallation Neutron Source) ではターゲットと反射体の周辺に十分な隙間があるので, この隙間を利用してアルミナ蛍光板によるプロフィール測定を行った. このビームモニターには冷却システムが無いために, ビーム出力が弱い時期のみの使用に限られていた. その結果 SNS ではターゲット上でビームが数度傾いていることが観測された. これはセプタム電磁石での四極スキュー成分が大きいためであると SNS では考えている. ビームが回転しているとマルチワイヤー型のプロファイルモニターでは正確なピーク密度を得ることができないために, スキュー成分確認のためにコミッションングにおいて二次元のイメージを持つ診断系が必要となった.

その一方で J-PARC の中性子源 (JSNS) では中性子の生成効率を高めるために, ターゲットと反射体の間には余分な隙間は殆ど無い. 中性子源の性能としては SNS の約 2 倍の生成効率を持つ¹⁾ものの, 陽子

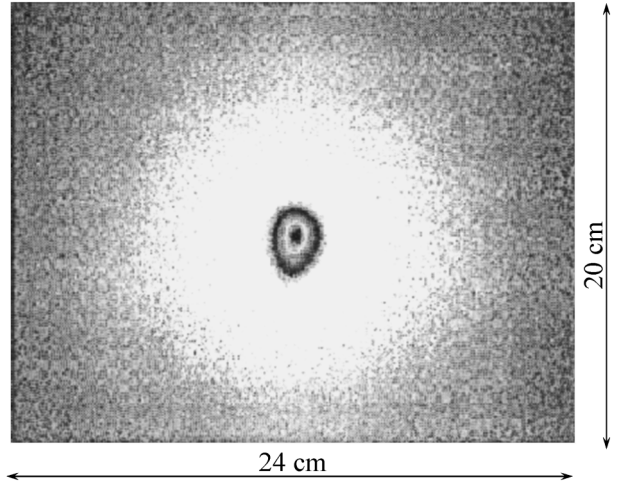


図9 AGS における核破砕中性子源実験での 24 GeV 陽子ビームを用いた放射化法によるビームプロフィール測定結果

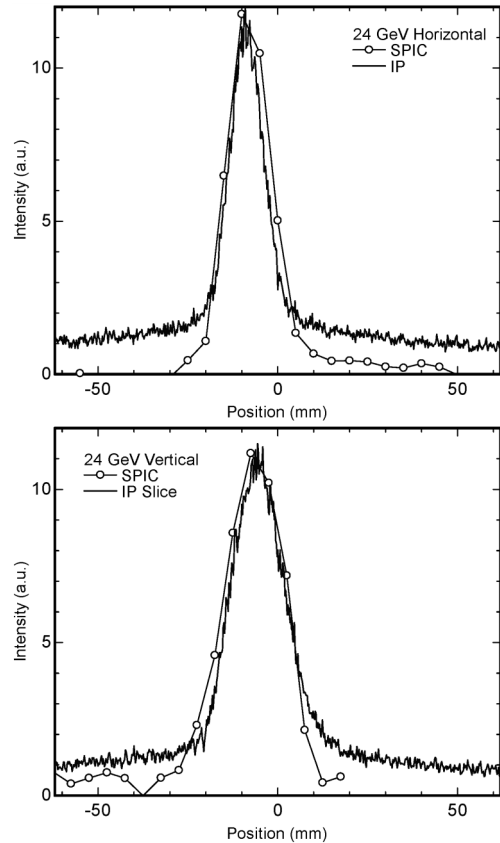


図10 IP を用いた放射化法と SPIC (Segmented Parallel Ionization Chamber) を用いた測定法による比較¹²⁾

ビームの診断系を置くスペースが殆どない. そこで殆どスペースを必要としない放射化法による手法を試みた.



図11 ターゲット先端部とプロフィール測定用に先端部に貼り付けたアルミフォイル（厚さ 0.3 mm）

この方法は、アルミや銅等の金属フォイルをターゲット直前に貼り付け、陽子ビームにより放射化させた後にフォイルを取り出し、その分布をイメージングプレート（IP）で読み取るものである。AGSにおける核破碎中性子実験において、我々はこの方法を採用し、信頼性は他のモニターと比較することで確認した（図9）¹²⁾。図10に放射化法と別の手法による測定結果を比較する。ピークから外れた裾野部分にはターゲット自身から生じる放射線を感じてしまうために違いがあるものの、ピーク付近は良く一致しており、ピーク部に関しては信頼性のある測定ができることを示している。

3.2 放射化法によるプロフィール測定

放射化法はオフラインの測定であるために、この方法を成立させるためには、少数のショット数でビームを調整することが必要である。その後に安定した定常的なビーム照射が必要である。照射後に人が接近してターゲットからフォイルを取り外すために、ターゲット周辺を高度に放射化させないためにパルス数を制限する必要がある。フォイルの取り出しにおける残留放射線を考慮して、ビーム総ショット数は3000ショット以下に制限した。

3.3 プロファイル測定結果

サンプルには厚さ0.3 mmのアルミフォイルを用い、これを水銀ターゲット容器の直前に貼り付けた（図11）。コミッションングでは僅か19ショットでビーム調整は終了することができ、その後に2000ショットの定常ビームをターゲットに照射した。BPMの測定結果からビーム位置は非常に安定していることがわかり、放射化法で懸念されていた必要な条件をクリアすることができた。

ビーム照射後に冷却期間を経てフォイルの取り出しを行った。取り出し時におけるフォイルの線量は約

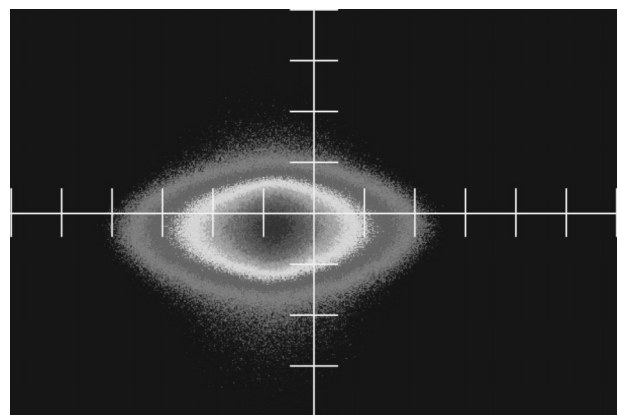


図12 放射化法で得られたビームプロフィール。水平方向と垂直方向のスケールは10 mm 間隔である。

30 $\mu\text{Sv/h}$ であった。フォイルをIPに密着させ、放射線によるイメージをIPに記録した。この方法では主に $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反応で生成する ^{24}Na （半減期15時間）からの β 線を計測していると思われる（図12）。ガウス関数によるフィッティングを行った結果を図13に示す。ビームの幅は4章で述べるQスキャンから得られたオプティクス予想より広がった。これは、陽子ビーム窓における散乱による影響であると考えられる。

3.4 ファーストビームの測定

3.4.1 陽子ビームの測定

コミッションングの第一歩として、最下流に位置したCTの生波形をオシロスコープで観測した。さらに、最下流に位置したBPMの信号も測定した。これを図14に示す。正真正銘のたった1発でターゲットまでビームが輸送することができた。ビームのエミッタンスは定格に比べれば非常に小さいものであったためもあるが、偏向電磁石の磁場設計が正しく行われていたのも主要な要因である。

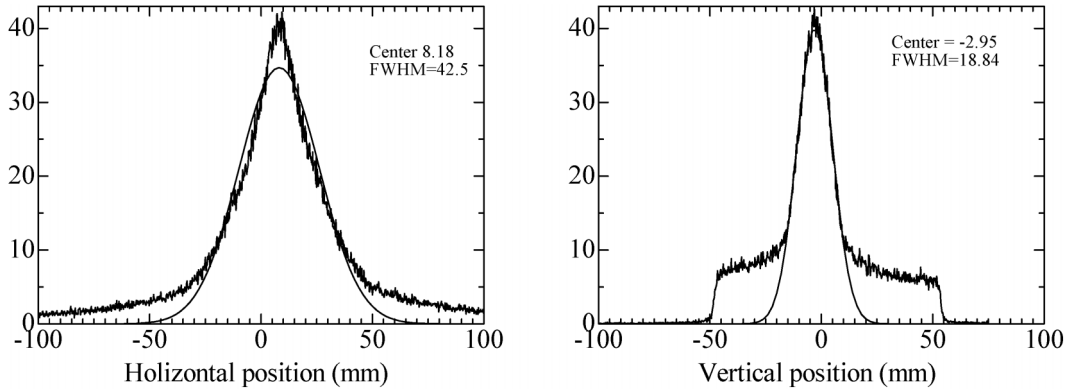


図13 放射化法で得られた水平方向と垂直方向のビームプロファイル. 図にはガウス関数によるフィッティングも示す.

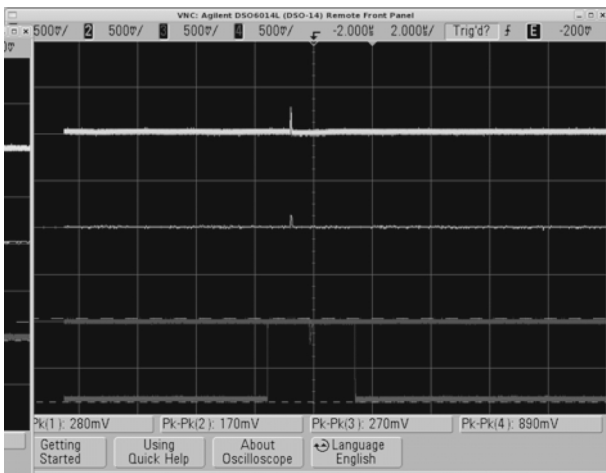


図14 ターゲットに初めて輸送したビームによるモニターの生信号. 上から BPM の信号, その差分, CT の生信号およびゲート信号を示す. (2008 年 5 月 30 日 10 時 15 分)

3.4.2 中性子ビームの測定

中性子の飛行時間スペクトルをカレントモード TOF 法 (CTOF 法)¹³⁾ で測定した. これは, ^6Li ガラスシンチレータと結合した光電子増倍管 (PMT) からのアノード信号をデジタルオシロスコープで読み取る方法である. 飽和を抑制した PMT に適切な印加電圧を与えることにより, パルスカウンティング法に匹敵する精度で測定できることが知られている¹³⁾. CTOF 法は非常に簡単な方法で回路の調整が殆ど無いために, フェースト中性子ビームの測定に適用された. CTOF 法で得られた中性子の飛行時間スペクトルを図 15 に示す. 図では 13 meV に相当するエネルギーにピークを生じている. MLF の中性子源のモデレータでは液体水素 (20 K) を用いて中性子を減速させるが, パラ水素とオルソ水素の散乱断面積の違いにより生成する中性子スペクトルのピークエネルギー

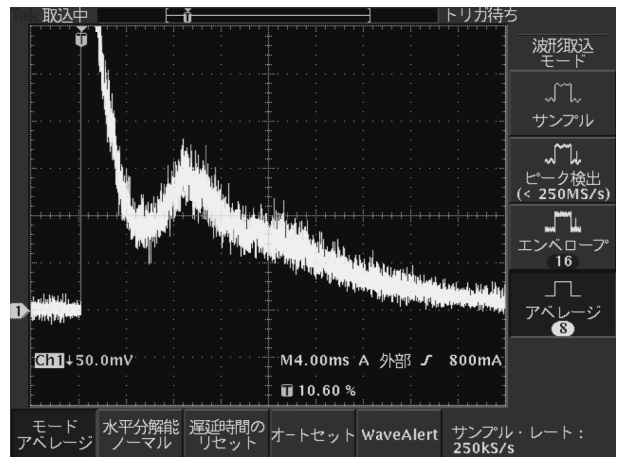


図15 初中性子ビームの飛行時間スペクトル (2008 年 5 月 30 日 14 時 25 分)

が異なる. もし設計通りならばパラ水素 100% の状態なら断面積が極端に違う 10 meV 領域にピークを持つが, そのような状態になっていることが確認できた. また, 絶対的な中性子強度は計算と良い一致を示し, 僅か一発のビームで中性子源が設計通りの性能を有することが確認できた. 中性子ビームを確認した記念写真を図 16, 17 に示す.

3.4.3 ミュオンビームの測定

ミュオンビームのコミッショニングは中性子ビームよりも少し遅れ 2008 年 9 月に行った. 表面ミュオンのビームラインにおいてミュオンの確認を μSR で行った¹⁾. 生成したミュオンビームをアルミ試料に入射すると, ミュオンは原子と原子の間で止まりその場所の磁場を受けながら歳差運動をしつつ崩壊して陽電子を放出する. この陽電子の歳差運動を調べることによりミュオンの発生を確認した. ミュオンビームを確認した記念写真を図 18 に示す.



図16 MLF での初中性子ビーム生成記念写真



図17 J-PARC 中央制御室における初中性子ビーム生成記念写真



図18 MLF での初ミュオンビーム生成記念写真

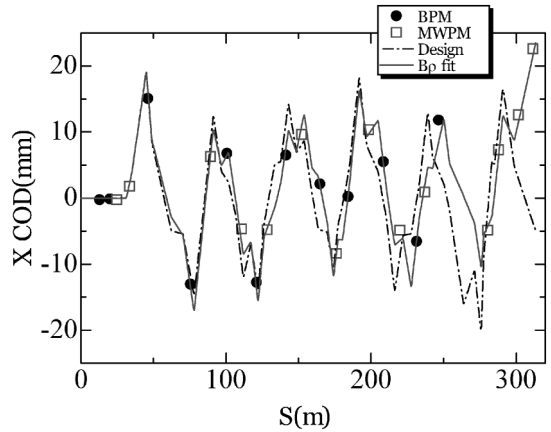


図19 水平補正電磁石によるレスポンス測定. ●と□はBPM, MWPM の測定結果を示す. 一点鎖線は設計値に基づく結果を示す. 実線は最下流部のみ実験に一致するように四極電磁石の磁場勾配を一律に規格化した結果.

4. ビーム測定結果

4.1 オプティクス

偏向電磁石の BL 積とアライメントが正しいものとしてエネルギーを導出した. 偏向電磁石の励磁電流と偏向角度から導出したビームのエネルギーは 3.006 GeV, RCS の高周波空洞から導出したエネルギーである 2.989 GeV と 0.6% 以内で非常に良い一致を示した.

水平補正電磁石によりビームを 1 mrad 振った場合のビーム中心位置の測定と計算の比較を図 19 に示す. 計算は実験とほぼ良い一致を示しているものの, 最下流部付近で食い違いがある. そこで, 最下流付近の位置が再現するように四極電磁石の磁場勾配の積分値を補正した. その結果, 磁場勾配を設計値から全体的に 2.3% 低くすることにより, 測定結果全体とかなり良い一致を示すようになった. これは, 四極電磁石の磁場勾配が実際のものよりも低くなっていることを示している. この原因には, 設計時の計算における磁場勾配の積分に用いたメッシュ間隔等に問題があったこと等が考えられる.

ビームのパラメータ取得のために, 最下流部の電磁石の磁場勾配を変化させる Q スキャンを行った. ビームの広がりや陽子ビーム窓に設置したプロファイルモニターで観測し, ガウス関数にフィッティングすることにより導出した. 図 20 にフィッティングの結果を示す. 暫定的な結果ではあるが, フィッティングからビームのエミッタンス (rms) は水平, 垂直共に $1.6 \pi \text{mm mrad}$ となった. シミュレーションの結果は

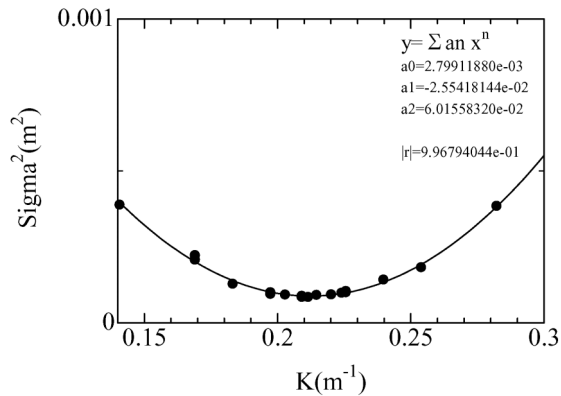


図20 最下流部の四極電磁石のQスキャンの結果. 横軸に四極電磁石の強度を, 縦軸にビームの広がり の二乗を示す

水平 1.5π , 垂直 3.1π mm mrad¹³⁾ でほぼ等しい値となった. 垂直方向にやや違いが見られるが, これに関しては今後の検討が必要である.

4.2 ミュオンターゲットによる影響

ミュオンターゲットは上下駆動が可能であり, 陽子ビームをミュオンターゲットに照射する場合としない場合との比較を行い, この影響を評価した. ミュオンターゲットの下流側に設置したCTでターゲットの透過率を測定した. 測定で得られた透過率は93.1%であり, 計算による予想値の94.0%⁷⁾と良い一致を示し, ミュオンターゲットに起因する損失は計算通りとなっていることがわかった.

またプロファイルモニターでミュオンターゲットに起因するビームの広がりを観測した. ターゲットでの散乱により, 少し広がっているものの大きな変化は無いことが示された. これは計算で予測しており, ビームオプティクスはほぼ設計通りになっていることを示している.

4.3 ビーム損失

現在のところビーム損失は殆ど無くロスモニターによる値はバックグラウンドレベルである. またビーム運転終了直後の残留放射線の測定においてもバックグラウンドレベルとなっており, ミュオンターゲット付近を除き有意なビームロスはない. 今後のビーム強度増強に伴い, ロスモニターの絶対値化は重要であるが, 次に述べる方法で行う予定としている. ダンプにビームを入射する場合には, ダンプ自身から放出される放射線やダンプと真空領域の間にある仕切り膜から発生する放射線が発生する. これらから生じる放射線の強さは計算で予測可能であり, この応答からロスモニターの絶対化を行うことが可能である³⁾. つまり, 計

算によりロスモニターの応答と吸収線量の関係を得ることができる. これにより, どの程度のビームが損失したのか, ビームロスモニターで得ることができる. なお, ダンプにビームを入射する際には, ロスモニターでは10 mW/mと等しい吸収線量を観測している.

5. 今後の課題

大強度陽子を水銀ターゲットに入射する際にターゲット容器にピッチング¹⁴⁾と呼ばれる孔上の損傷が発生することが施設建設開始時期に発見された. これは, ホプキンソン棒を用いた測定やLANLのWNR (Weapons Neutron Research Facility) での実験により解明されつつある. この損傷はターゲット上でのピーク電流密度の4乗に比例する可能性があり, ビームはできるだけピーク密度を抑えたものが望ましい¹⁶⁾. これを達成するために, 一つの方法として, RCSに入射する際にペインティング入射を用いることによりピーク密度を減少することが考えられる. また, 八極電磁石による非線形の効果を利用し, ピーク密度を減少する方法も考えられる. ビームとは独立に, ピッチングによる損傷はヘリウムガスの細かいバブルを水銀中に入れることにより大幅に低減できることが最近の研究によりわかってきたので, マイクロバブルにより低減する方法を試みる予定である.

ターゲットや陽子ビーム窓の寿命はピーク強度に依存する. 機器の寿命を長く保つためには, ピーク強度を低くすることが有効である. その一方でビームを広げすぎると, 反射体等の周辺機器が著しく温度上昇するために, 周辺機器の温度を観測しながら慎重に広げなければならない. ビーム強度が上がるに連れ, 如何にピークを低く抑えることができるのかが今後の鍵となってくる.

またターゲット容器や陽子ビーム窓は直ちに製作できるものではないため, 寿命を予測し予備を確保することが重要となる. 今までの経験からピーク電流密度の上昇を概算で見積もり, 陽子ビーム窓は平成21年度頃に交換することを目標としている.

6. 最後に

5月末は非常に幸運であった. 数々の問題があったものの, タイミングよく芋蔓式に別の問題が発見でき, 結果的にコミッションングをスムーズに進行させることができた. これは, 神懸り的なものであったと言っても過言ではない. 中性子源のモデレータに供給する極低温水素の配管継手におけるトラブルのために

計画は少し遅れることとなった。しかしこれにより時間的余裕が生じ、筆者等は CTOF 法による中性子スペクトル測定の準備を進めることができ、結果的に一発のビームで中性子の測定に成功した。さらに、上記トラブルの確認のために、ターゲット台車を動かす必要が生じたが、この時にプロファイル測定用のフォイルが破損していることが発見できた。中性子ターゲット周辺は真空排気後にヘリウムガスを充填するが、フォイルが薄すぎたため真空排気時に破損していた。そこでフォイルを厚いものに交換し、放射化法によるプロファイルを得ることに成功した。何とか目標としていた“5月中に中性子ファーストビーム”を達成できたばかりでなく、運良く他の成果も得ることができたのには感動を覚えずにはいられなかった。

今後加速器の出力増強に伴い 100 kW 以上のビーム輸送と受け入れの準備を進めており、これにより今後は世界最高性能となるパルス中性子源およびミュオン源の施設となるために鋭意努力を重ねていく。

謝辞

我々はビームラインの設計・製作に関して経験がなかった。それでも何とかやってきたのは、設計時に中心的な役割を果たされた渡辺昇先生のご尽力の賜物である。また、何時も安定ビームを精力的に供給していただいた LINAC, RCS の加速器グループの皆様を始め、特に 3NBT の設計に関して親身なアドバイスを頂いた入江吉郎氏には厚く御礼を述べる。さらに、設計当初は頭を抱えたミュオンターゲット周辺で数々の助言をいただいた田中万博氏を初めとするハドロングループの皆様に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 物質・生命科学実験施設建設チーム, “大強度陽子加速器プロジェクト 物質・生命科学実験施設機器技術設計書”, JAERI-Tech 2004-001 (第1分冊), JAERI-Tech 2004-001 (第2分冊) (2004)
- 2) H. Hotchi, “Beam Commissioning of J-PARC 3 GeV RCS”, *J. Particle Accelerator Society of Japan*, 5(1), pp. 1-14 (2008).
- 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ズ Vol. 27 p. 63 (2008).
- 4) S. Meigo *et al.*, “Beam commissioning for neutron and muon facility at J-PARC”, to be published *Nucl., Instr. Method A*.
- 5) 明午伸一郎, “大強度陽子加速器計画における NME 施設内 3 GeV ビーム輸送ラインに関する検討”, JAERI-Tech 2000-088 (2001).
- 6) K. Niita *et al.*, “High energy particle transport code NMTC / JAM”, JAERI-Data / Code 2001-007 (2001).
- 7) 坂元真一 他, “大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 3 GeV 陽子ビーム輸送施設 (3NBT) 技術設計書”, JAERI-Tech 2004-020 (2004).
- 8) S. Sakamoto *et al.*, “Advanced design of high-intensity beam transport line in J-PARC”, *Nucl., Instr. Method A* 562 p. 638 (2006).
- 9) H. Fujimori *et al.*, “Radiation Resistant Magnets for the J-PARC Muon Facility”, to be published *Nucl., Instr. Method A*.
- 10) S. Meigo *et al.*, “JSNS Proton Beam Profile Monitor Using Silicon Carbide Wire”, ICANS-XVII, 17th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, April 25-29, 2005, Santa Fe, New Mexico LA-UR-06-3904, 455.
- 11) M. Ooi *et al.*, “Present Status of EPICS System Development for Control of 3 GeV Proton Beam Transport Line in J-PARC”, ICANS-XVII, 17th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, April 25-29, 2005, Santa Fe, New Mexico LA-UR-06-3904, 1152.
- 12) S. Meigo *et al.*, “Measurement of Profile and Intensity of Proton Beam by an Integrating Current Transformer and a Segmented Parallel-Plate Ion Chamber for the AGS-Spallation Target Experiment (ASTE)”, JAERI-Data/Code 2001-014 (2001).
- 13) S. Meigo *et al.*, “Development of Current Mode Time-of-Flight Technique for Measurement of Thermal Neutron Spectrum”, *J. Nucl. Sci. and Technol.*, Vol 37 Suppl. 1 p. 789 (2000).
- 14) S. Meigo *et al.*, “Evaluation of the 3-GeV proton beam profile at the spallation target of the JSNS”, *Nucl., Instr. Method A*, 562, p. 569 (2006).
- 15) M. Futakawa *et al.*, “Pressure wave issues in high power mercury target”, *Nucl. Instr Meth A*, 562, p. 676 (2006).
- 16) 石倉修一 他, “ターゲット容器の構造強度及び寿命評価に関する技術資料”, JAERI-Tech 2004-28 (2004).