

ニュートリノの加速器実験 T2K J-PARC

ACCELERATOR BASED NEUTRINO EXPERIMENTS T2K J-PARC

五十嵐進^{#, A)}

Susumu Igarashi^{#, A)}, for the J-PARC MR Beam Commissioning Group

^{A)} J-PARC Center / KEK

Abstract

Observation of the neutrino oscillation was reported from the atmospheric neutrino samples at Super-Kamiokande in 1998. For the accurate measurement of the phenomena the T2K (Tokai to Kamioka) experiment has been collecting data since 2010 and leading the research field. T2K is a long baseline neutrino experiment to produce neutrinos with proton beams from the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) and to measure the neutrino rates with Super-Kamiokande at a distance of 295 km from the accelerator. J-PARC MR is demanded to provide the high intensity proton beams to maintain the lead in the international competition. The beam power of 415 kW has been recently achieved with 2.15×10^{14} protons per pulse and the cycle time of 2.48 s. Main efforts in the beam tuning are to minimize beam losses and to localize the losses at the collimator section. Recent improvements include the 2nd harmonic rf operation to reduce the space charge effect with a larger bunching factor and corrections of resonances near the operation setting of the betatron tune. Because the beam bunches were longer with the 2nd harmonic rf operation, the injection kicker system was improved to accommodate the long bunches. We plan to achieve the target beam power of 750 kW in JFY 2018 by making the cycle time faster to 1.3 s with new power supplies of main magnets, rf upgrade and improvement of injection and extraction devices. The possibility of the beam power beyond 1 MW is being explored with new settings of the betatron tune.

1. ニュートリノ振動実験

1998年にスーパーカミオカンデの大气ニュートリノ測定からニュートリノ振動の観測が発表された。これはニュートリノに質量があることを示し、素粒子の標準模型の枠を超える重要な発見となった。この現象を人工的に発生させたニュートリノで精密測定するため、大強度陽子加速器研究施設(J-PARC)でミューニュートリノを発生させ、295 km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノを測定する長基線ニュートリノ振動実験 T2K (Tokai to Kamioka)が行われている[1]。T2Kは2010年からデータ収集を開始し、2016年5月までに標的での積算陽子数は 1.51×10^{21} となっている。これまでにミューニュートリノから電子ニュートリノへの出現事象を発見している[2]。また、ニュートリノと反ニュートリノ振動確率の違いを探り、CP対称性の破れの探索を行っている。

国際的な競争相手として、FermilabのMain Injectorで発生させたニュートリノを810 km先の遠方検出器で測定するNOvA実験が2014年から行われている。Main Injectorの最近の利用運転のビームパワーは560 kWで、2016年3月までに陽子数 6.05×10^{20} を積算しており、T2Kを追従している。試験ではMain Injectorのビームパワー700 kWのデモンストレーションが行われおり、陽子数の積算を速める努力が行われている。

2. J-PARC MR

J-PARCの加速器は、400 MeV リニアックと3 GeV RCS、30 GeVのMRからなる[3]。MRは周長1567.5 mで三回対称性を持つ(Fig. 1)。直線部1には入射機器と

コリメータがある。RCSからの陽子ビームは輸送ビームライン(3-50BT)を通りMRに送られる。直線部2には遅い取り出し(SX)のための機器があり、ハドロン実験施設に陽子ビームを取り出すために使用される。直線部3には加速空洞とニュートリノ実験施設またはビームアポートダンプへの速い取り出し(FX)のための機器がある。

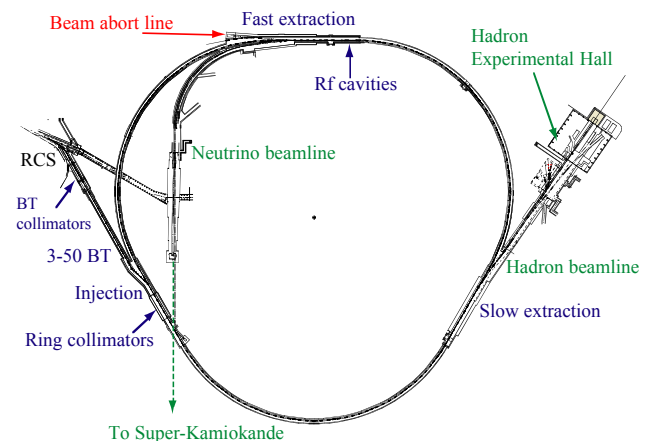


Figure 1: Layout of J-PARC MR.

FXモードの繰り返し時間は2.48秒で、加速終了後1ターンでビームを取り出す。SXモードの繰り返し時間は5.52秒で、約2秒のビームスピルを取り出すために2.93秒のフラットトップを持つパターンとなる。

Figure 2に示すようにビームパワーは着実に増加している。最近のFXモードで2016年の1月から5月では概ね390 kWでの利用運転が行われた。その際の加速

[#] susumu.igarashi@kek.jp

された陽子数はパルスあたり 2×10^{14} であった。MR のビームパワーの目標値 750 kW は、この加速陽子数と繰り返しを 1.3 秒に速めることで達成する計画となっている。つまり加速陽子数としてはこの目標を達成したことになる。更にビーム強度を上げる努力は続けられ、最後の 3 日間は 415 kW で利用運転を行った。

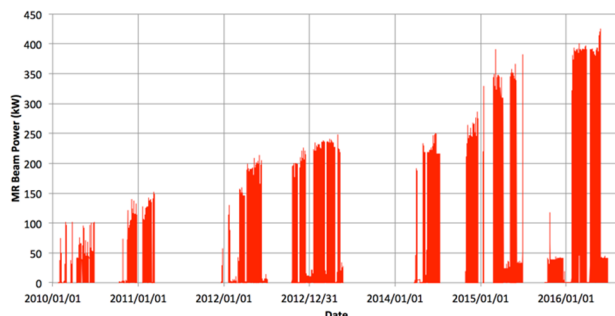


Figure 2: Beam Power Trend Graph.

3. 速い取り出しモードの運転状況

RCS からのビーム 8 バンチを 4 回に分けて 0.13 秒の入射期間中に MR に入射する。1.4 秒かけて加速し、加速された粒子は 1 ターンで取り出す。電磁石電流の回復を 0.94 秒で行い、繰り返し時間は 2.48 秒となっている。Figure 3 にビームパワー416 kW のショットについての DCCT で測定したビーム強度を時間の関数として示す。このショットの場合、入射時のバンチあたりの陽子数は 2.7×10^{13} であり、加速終了時のパルスあたりの陽子数は 2.15×10^{14} となっている。ビームロスは入射期間中に 170 W、加速開始後 0.12 秒間に 417 W と評価されている。このビームロスは MR コリメータの許容量 2 kW の範囲内となっている。3-50BT でのロスは 100 W 以下と評価され、3-50BT コリメータの許容量 2 kW の範囲内となっている。

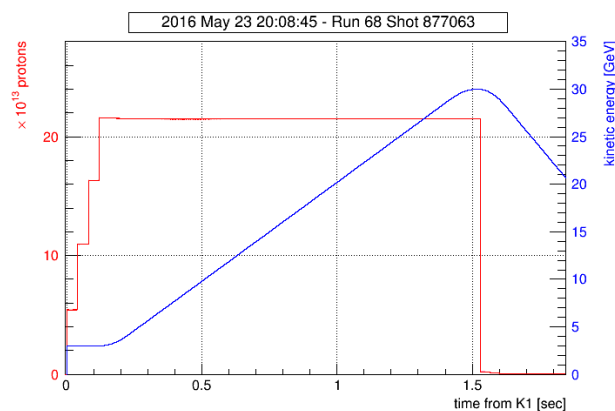


Figure 3: Beam intensity (shown in red) for a user-operation shot of the beam power of 416 kW as a function of the cycle time.

MR 全周でのビームロス分布を Fig. 4 に示す。ビームロスは 216 台の主四極電磁石に設置してあるビームロスモニター[4]で測定している。コリメータ付近を含む 24 台のビームロスモニター(#1 ~ #20, #213 ~ #216)のゲインは低く設定され、その他のモニター(#21 ~ #212)は約 8 倍高く設定されている。コリメータ調整により、ビームロスはコリメータ区間(#6 ~ #11)に局在できている[5]。

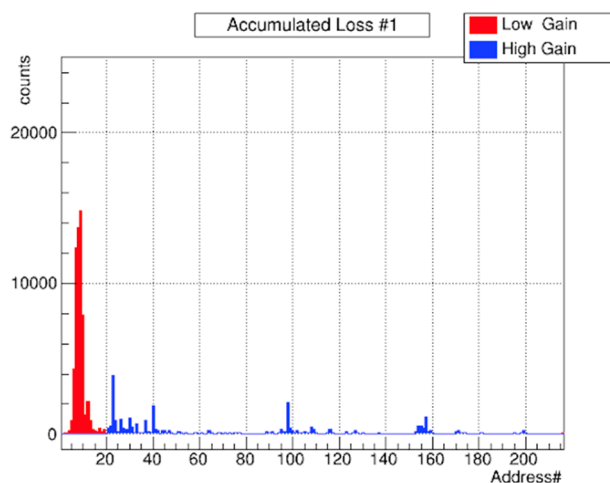


Figure 4: Beam loss distribution measured with beam loss monitors in the circumference as a function of MR address for a shot of the beam power of 416 kW.

4. 最近の改善点

4.1 入射ビーム分布

MR 大強度運転の最適化のために、ペイント条件およびチューン、クロマチシティ等の RCS のビームパラメータ調整が行われている[6]。空間電荷効果を低減するためにピークの低い分布が好ましい。また、ロスを減らすためにテールの少ない分布が好ましい。RCS のビーム調整により、以前はガウス分布であったものが、水平方向、垂直方向ともにパラボラ分布となった(Fig. 5)。入射ビームのプロファイルは 3-50BT で 光学的遷移放射モニター(OTR)で測定している。[7]

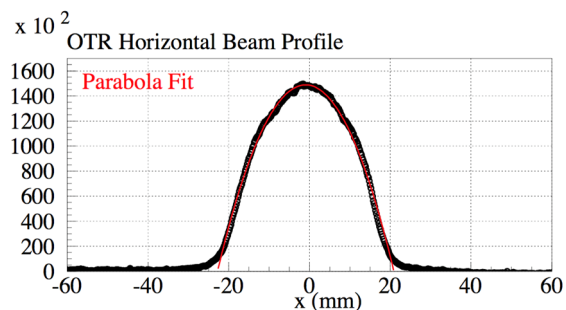


Figure 5: Horizontal beam profile measured with OTR in 3-50BT.

4.2 Rf パターン

2 倍高調波を使った大強度ビームのスタディにより、バンチングファクターを大きくすることができ、ビームサバイバルの改善が観測された。1 バンチ入射で、ビーム強度は入射時の陽子数 3.2×10^{13} とした。2 倍高調波を 0 kV とし、基本波を 100 kV とした場合、バンチングファクターは 0.2 から 0.3 の間であり、バンチ長は 200 ns 程度であった。2 倍高調波を 70 kV とし、基本波を 100 kV とした場合、バンチングファクターは 0.3 から 0.4 の間となり、バンチ長は 400 ns となった。

最近の利用運転では入射期間中は基本波を 160 kV、2 倍高調波を 85 kV とし、空間電荷効果を低減している。バンチングファクターは 0.3 程度であった。加速開始後の 60 ms に基本波は 280 kV まで上げ、加速開始後 0.4 s からは 256 kV に下げ、加速終了までその基本波電圧を保っている。2 倍高調波は加速開始後 0.1 s までは 85 kV 設定で、その後 0 kV に下げている。

4.3 入射キッカー

2 倍高調波を使いバンチ長を伸ばしたことで入射キッカーの改良が必要となった。キッカー回路を改良することにより、立ち上がり時間を速くし、テールを抑制した[8]。この改善だけでは、反射波が残り、周回ビームを不必要にキックしていた。補正キッカーを新たに設置して、反射波による不必要なキックを受けた周回ビームを蹴り戻すようにした[9]。それによりビームロスも改善した。

4.4 ビーム不安定性の抑制

ビーム不安定性を抑制するためにクロマティシティは負の値としている。入射期間中は典型的には -6 としている。クロマティシティの絶対値が小さすぎると不安定性が観測され、ビームロスが生じる。また、クロマティシティの絶対値が大きすぎるとクロマティックなチューンの広がりが大きくなり、ビームロスが生じる。加速中のクロマティシティもビームロスが最小になるようにパターンを作っている。

バンチバイバンチフィードバックシステム[10]により入射期間中のコヒーレント振動を抑制している。バンチ内の振動を抑えるために、イントラバンチフィードバックシステム[11]と呼ばれるより広帯域のフィードバックを入射中と加速開始から 0.12 s まで使用し、ビーム不安定性を抑制している。

4.5 光学測定および補正

光学補正および閉軌道歪み(COD)補正により有効的なアパーチャーを回復している。ストリップラインキッカーによりビームのベータatron振動を誘起して、BPM によりその振幅を測定し、入射中と加速開始から 0.37 s までのベータを測定している。またディスパージョンについては、rf 周波数を変えて $|\delta| < 1.3\%$ の範囲で運動量のずれを作り、その時の軌道の変化を測定することにより、求めている。チューンについてはエキサイターで誘起したベータatron振動の周波数を測定することによりもとめている。ベータ、ディスパージョン、チューンについて、設定しようとしていた値となるように 11 ファミリーの四極電磁石の電流値に補正をしている。

4.6 空間電荷効果によるチューン広がり

空間電荷効果を考慮した粒子トラッキングシミュレーションプログラム SCTR[12]によって、チューンの広がりを評価した。380 kW 相当のビームパワー、2.48 s 繰り返してバンチあたり 2.5×10^{13} の陽子数について評価した。粒子分布は測定に基づき、横方向 2σ エミッタンスは 16π mm mrad とし、バンチングファクターは 0.3 とした。Figure 6 にマクロ粒子のチューンの分布についてのシミュレーション結果を示す。オペレーションチューンは (22.40, 20.75) とした。チューンの広がりは 0.3 となった。線形結合共鳴 $\nu_x + \nu_y = 43$ および半整数共鳴 $2\nu_y = 41$ 、三次共鳴が懸念すべき共鳴線として存在している。

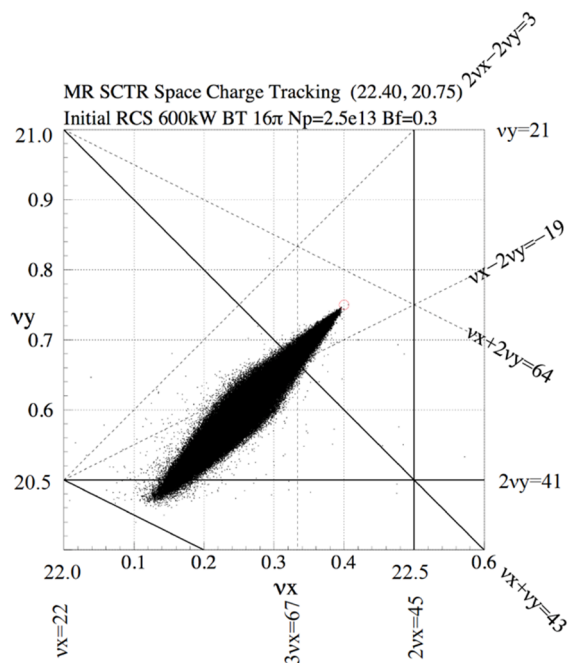


Figure 6: Space charge tune spread and resonances of concern.

4.7 スキュー四極電磁石を用いた線形結合共鳴補正

四極電磁石の回転設置エラーおよび六極電磁石での垂直方向 COD は線形結合共鳴 $\nu_x + \nu_y = 43$ を作る。その補正のために 4 台のスクュー四極電磁石(SQ)を使っている[13]。まず低強度のビームでチューンを共鳴線上(22.28, 20.71)として、ビームロスを最少化するように、SQ の設定を決めた。そして大強度ビームについてビームロスを最小化するように、設定の微調整を行った。

4.8 四極電磁石の補正コイルを用いた半整数共鳴補正

速い取り出しのセプタム電磁石はその漏れ磁場により、周回ビームに望ましくない四極磁場を作る。8 台全てのセプタム電磁石について漏れ磁場を測定し、その合計は 1 台の典型的な主四極電磁石の 3 %となっている。漏れ磁場の効果を相殺するように、セプタム電磁石の近くの四極電磁石の補正コイルの電流値を計算した。この

補正の効果の確認のために、その時点で運用可能であった補助コイル電源 1 台を用いて、半整数共鳴 $2\nu_y = 41$ の近くの(22.19, 20.54)にチューンを設定し、補正前後のベータを測定し、とくに垂直方向のベータの変調が補正後に小さくなっていることを確認した。現在では 3 台の四極電磁石の補正コイルについて、補正を適用して、利用運転を行っている。

4.9 三次共鳴補正

$\nu_x + 2\nu_y = 64$ と $3\nu_x = 67$ の三次共鳴補正は六極電磁石の補正コイルを使って行っている。まず、チューンを $\nu_x + 2\nu_y = 64$ の共鳴線上の(22.42, 20.78)に設定し、低強度ビームについてビームロスを最小化するように、2 台の六極電磁石の補正コイル電流設定を最適化した。そして Eq. (1)で示す共鳴の強さ $G_{1,2,64}$ を求めた。

$$G_{1,2,64} = \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2} \beta_y k_2 \exp[i(\phi_x + 2\phi_y)] \quad (1)$$

$3\nu_x = 67$ の三次共鳴補正についても同様に、チューンを共鳴線上の(22.34, 20.75)と設定し、2 台の六極電磁石の補正コイルの電流設定について、ビームロスを最小にするように最適化した。そして Eq. (2)で示す共鳴の強さ $G_{3,0,67}$ を求めた。

$$G_{3,0,67} = \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2} k_2 \exp[i(3\phi_x)] \quad (2)$$

$\nu_x + 2\nu_y = 64$ と $3\nu_x = 67$ の三次共鳴を同時に補正するために、4 台の六極電磁石の補正コイルの設定について、Fig. 7 と 8 に示すように 2 つの共鳴の強さを同時に満たすように連立方程式を作り、解を導いた。この 4 台の設定値を、低強度ビームについて 2 つの三次共鳴線上のチューンでビームロスが最小化できていることを確認した。更に大強度ビームに適用し、ビームロスの改善を観測した。

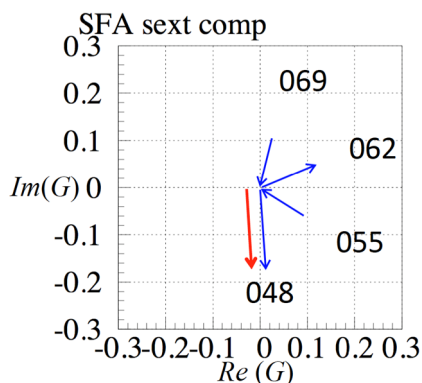


Figure 7: Each contribution of SFA magnets for resonance strength of $\nu_x + 2\nu_y = 64$ in the complex plane at the tune of (22.33, 20.83) with the trim coil correction of SFA048 of +1.1 A (red vector) and with the trim coil correction of four sextupole magnets; SFA048 +1.1 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A (blue vectors).

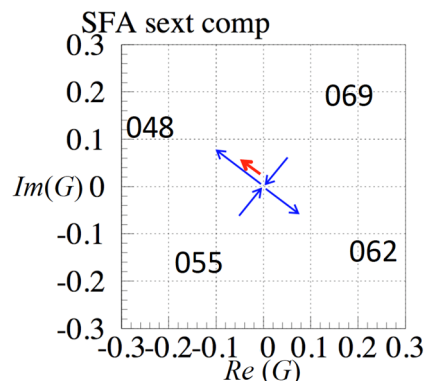


Figure 8: Each contribution of SFA magnets for resonance strength of $3\nu_x = 67$ in the complex plane at the tune of (22.33, 20.83) with the trim coil correction of SFA048 of +0.3 A (red vector) and with the trim coil correction of four sextupole magnets; SFA048 +1.1 A, SFA055 -0.69 A, SFA062 +0.81 A, SFA069 -0.69 A (blue vectors).

4.10 チューン(21.35, 21.43)でのオペレーション

これまで(22.40, 20.75)のチューンで運転を行ってきたが、そこには強い線形結合共鳴 $\nu_x + \nu_y = 43$ が存在する。補正を行っているが、完全に影響を排除できていないかもしれない。Figure 9 のようにチューンが水平・垂直ともに 21.0 ~ 21.5 の範囲で線形結合共鳴が存在せず、そこで新しい設定を探索した。詳細なチューンスキャンを行い、400 kW 程度の大強度ビームについて(21.35, 21.43)でビームサバイバルが最も良くなることがわかった。速い取り出しセプタム電磁石の漏れ磁場および $\nu_x + 2\nu_y = 64$ と $3\nu_x = 64$ の三次共鳴のための補正を行った。線形結合差共鳴 $\nu_x - \nu_y = 0$ を SQ によって補正した。さらにビームロスを最小化するように 2 台の八極電磁石の電流設定の最適化を行った。Rf 電圧パターンは(22.40, 20.75)のときの設定と同じ前述のものとしている。バンチバイバンチフィードバックとイントラバンチフィードバックの設定は新しいチューン用に調整しなおした。クロマティシティは-7 に設定した。440 kW のビームパワーでビーム試験を行い、入射中のビームロスは 443 W で、加速開始時には 795 W であった。この合計はコリメータの許容量より小さくなっている。しかし、通常の利用運転時よりは大きく、ロスを更に低減させる努力が必要となっている。

このチューンでは入射キッカーと補正キッカーの位相進みが適切ではなく、補正キッカーは使用しなかった。補正キッカーの極性を変更することにより解決可能であり、ビームロスの低減が期待され、次のビーム調整の機会に試験を行う予定となっている。

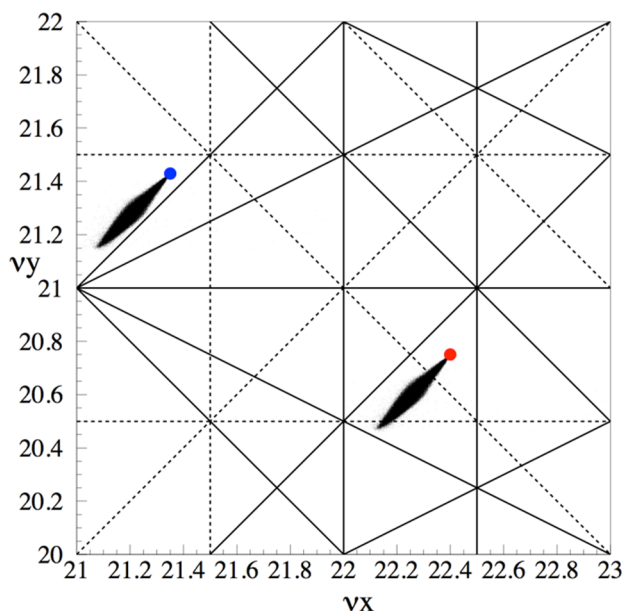


Figure 9: Structure resonances of up to 3rd order (solid lines) and non-structure resonances of half integer and linear coupling resonances (dashed lines). Space charge tune spread shown for the tune of (22.40, 20.75) and (21.35, 21.43) for the beam power of 380 kW.

5. 750 kW そしてそれ以上のビームパワーへの増強計画

繰り返し時間を 2.48 s から 1.3 s に早くすることにより、ビームパワーを 750 kW を達成することを計画している。新しい主電磁石電源は 2018 年度までに完成予定で [14]、3 棟の新しい電源棟の建設も予定されている。加速空洞も速い繰り返し運転のために増強されている [15]。コリメータは 3 kW 程度の許容量となるように増強が検討されている [5]。速い繰り返しのために入射・出射機器も対応が必要で、入射セプトラム [16] と出射セプトラム [17] が開発されている。また、前述の新しいチューン設定で加速陽子数を増やす努力を行い、1 MW を超えるビームパワー実現への可能性を探っている。

6. まとめ

J-PARC MR は T2K ニュートリノ振動実験のために、2.48 s 繰り返しでパルスあたりの陽子数 2.15×10^{14} で、ビームパワー 415 kW を達成している。ビームロス は 600 W 観測され、概ねコリメータセクションに局在化できている。最近の改善点は、バンチングファクターを改善して空間電荷効果を低減するために 2 倍高調波 rf を使った運転および共鳴補正による光学口径の回復等が挙げられる。目標ビームパワーの 750 kW を達成するために、2018 年度までに主電磁石電源および加速空洞、入射出射機器の増強を行い、繰り返しを 1.3 s とする。さらに新しいチューン設定により、1 MW を超えるビームパワー実現への可能性を探っている。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.* (T2K collaboration), “The T2K experiment”, *Nucl. Instrum. Meth.*, A659, 2014, pp. 106-135.
- [2] K. Abe *et al.* (T2K collaboration), “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, *Phys. Rev. Lett.*, 112, 061802, Apr. 2014.
- [3] Y. Yamazaki *et al.*, “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, <http://hadron.kek.jp/~accelerator/TDA/tdr2003/index2.html>
- [4] T. Toyama *et al.*, “Beam Diagnostics at the First Beam Commissioning of the J-PARC MR”, in *Proc. PAC09*, Vancouver, BC, Canada, Nov. 2009, paper WE4GRC01, pp. 1964-1966.
- [5] M. Shirakata *et al.*, “New Arrangement of Collimators of J-PARC Main Ring”, in *Proc. HB2016*, Malmo, Sweden, July 2016, paper THAM4Y01.
- [6] H. Hotchi *et al.*, “1-MW Beam Operation Scenario of the J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron”, *JPS (The Physical Society of Japan) Conf. Proc.*, vol. 8, 012013, Sep. 2015.
- [7] Y. Hashimoto *et al.*, “Two-Dimensional and Wide Dynamic Range Profile Monitor Using OTR / Fluorescence Screens for Diagnosing Beam Halo of Intense Proton Beams”, in *Proc. HB2014*, East Lansing, MI, USA, Nov. 2014, paper TUO2AB04, pp. 187-191.
- [8] T. Sugimoto *et al.*, “Upgrade of the Injection Kicker System for J-PARC Main Ring”, in *Proc. IPAC2014*, Dresden, Germany, Jun. 2014, paper MOPME069, pp. 526-528.
- [9] T. Sugimoto *et al.*, “Performance of the Compensation Kicker Magnet for J-PARC Main Ring”, in *Proc. IPAC2016*, Busan, Korea, May 2016, paper THPMW021, pp. 3588-3590.
- [10] Y. Kurimoto *et al.*, “The Bunch by Bunch Feedback System in the J-PARC Main Ring”, in *Proc. DIPAC2011*, Hamburg, Germany, May 2011, paper TUPD74, pp. 482-484.
- [11] K. Nakamura *et al.*, “Intra-bunch Feedback System for the J-PARC Main Ring”, in *Proc. IPAC2014*, Dresden, Germany, Nov. 2014, paper THOAA03, pp. 2786-2788.
- [12] K. Ohmi *et al.*, “Study of Halo Formation in J-PARC MR”, in *Proc. PAC07*, Albuquerque, NM, USA, Jun. 2007, paper THPAN040, pp. 3318-3320.
- [13] J. Takano *et al.*, “Linear Coupling Resonance Correction of the J-PARC Main Ring”, *JPS Conf. Proc.*, vol. 8, 012022, Sep. 2015.
- [14] Y. Morita *et al.*, “Development of the J-PARC Main Magnets Power Supplies for High Repetition Operation”, *JPS Conf. Proc.*, vol. 8, 012006, Sep. 2015.
- [15] M. Yoshii *et al.*, “Status of the J-PARC Ring Rf Systems”, in *Proc. IPAC2014*, Dresden, Germany, Jun. 2014, paper THPME062, pp. 3376-3378.
- [16] T. Shibata *et al.*, “The Development of a New High Field Injection Septum Magnet System for Main Ring of J-PARC”, in *Proc. IPAC2016*, Busan, Korea, May 2016, paper TUPMR039, pp. 1337-1339.
- [17] T. Shibata *et al.*, “The Development of a New Low Field Septum Magnet System for Fast Extraction of Main Ring of J-PARC”, in *Proc. IPAC2016*, Busan, Korea, May 2016, paper TUPMR040, pp. 1340-1342.