

J-PARC MR における FX EDDY SM の配置と故障対策の検討

RESEARCH ON THE PLACEMENT OF EDDY SEPTUM MAGNETS AND FAILURE IN J-PARC MR FAST EXTRACTION

岩田宗磨[#], 石井恒次, 芝田達伸, 上窪田紀彦, 佐藤洋一, 木村琢郎,
杉本拓也, 松本教之, 松本浩

Soma Iwata[#], Koji Ishii, Tatsunobu Shibata, Norihiko Kamikubota, Yoich Sato, Takuro Kimura,
Takuya Sugimoto, Noriyuki Matsumoto, Hiroshi Matsumoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

At J-PARC Main Ring (MR), we are pursuing to improve the beam power from 500 kW to 1.3 MW by reducing the repetition cycle from 2.48 to 1.16 seconds (1 Hz operation). Additionally, we are considering the beam particles increasing by selecting a more optimal tune. For the fast extraction (FX) equipment to the neutrino facility (NU), low-field septum magnets (SM) and most high-field SM will be replaced with new ones in 2021. We report about the new low-field SM that will be changed to eddy current type. The installation positions of these eddy current type SM (Eddy SM) will be optimized fine so that septum plate and beam envelopes simulated from the new expected tunes do not interfere. Beam envelope simulations also show that if Eddy SM misfired, a part of the FX beam passes through to the NU line. We are planning to develop a new safety system to prevent illegal beam irradiation to superconducting magnets on the NU line, and it is necessary to support faster pulse operation of Eddy SM.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR)は、T2K 実験[1]に向けて高強度ビームを供給してきた。ニュートリノ振動測定 of the statistics, CP 対称性の破れの検証のため、さらに高いビームパワーが要求されている。運転周期を 2.48 s から 1.16 s (通称 1 Hz 運転)に短くし、ビーム粒子数も増強することで、ビームパワーを現状の 500 kW から 1.3 MW に増強する計画[2, 3]が進められている。ビーム粒子数の増強に向け、より適した新規チューンに変更することが検討されている。しかし、既存の速い取り出し(FX)ビームラインでは、局所的に残留線量が高い箇所が確認されている。これは、アパーチャとビームエンベロープが近接する箇所と一致[4]しており、高出力化に応じてより放射化する。また、不十分なアパーチャはチューン選択の制限になりうる。そのため、高出力化にはアパーチャ拡張が不可欠であり、FX のセプタム電磁石 (SM)も 2021 年度に交換される事が決まった。低磁場 SM 全てと高磁場 SM のうち SM30, SM31, NU 側の SM32E, Abort 側の SM32A を交換する。新レイアウトの SM33E には、取り外される既存 SM32A の上流/下流を反転させて再利用する。MR における FX の位置とビームラインの概要を Fig. 1 に、SM レイアウト変更の概要を Fig. 2 に示す。

本報告は、交換する SM のうち、低磁場 SM に焦点を置く。既存の低磁場 SM は電流型電磁石だが、交換後は渦電流誘導型になる。アパーチャも変更されるので、新たなビームエンベロープとともに設置位置を見直す必要がある。特に、セプタム面は周囲ビーム、取出しビームの両方に近接するので、詳細

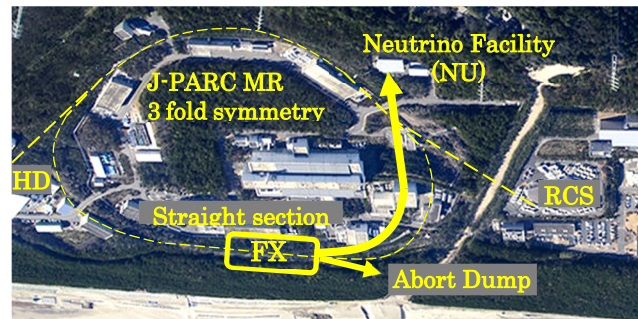


Figure 1: Beam lines of the FX system in J-PARC MR.

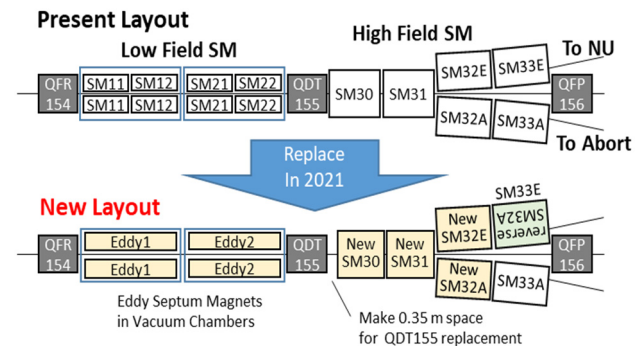


Figure 2: Layouts of the present FX and the new FX.

な検討が必要である。また、励磁についても既存のパターン動作から、速いパルス動作に変わる。励磁に失敗すると、不正なビームが NU に設置された超電導電磁石に照射される恐れがあるため、これを防ぐ新たなシステムも要求される。

ビーム粒子数積み増しのための候補チューンのビームエンベロープを計算し、新しい低磁場 SM の

[#] soma.iwata@kek.jp

詳細な設置位置を求めた結果と、新しい低磁場 SM 故障時の NU ラインへのビーム遮断システムについて以下に報告する。

2. 渦電流誘導型セプタム電磁石

渦電流誘導型セプタム電磁石(通称 Eddy SM) [5-10] の導入の目的は、コイル発熱の軽減、耐久性の向上、アパーチャの拡張および漏れ磁場の低減である。発熱について、Eddy SM はパルス動作になり、通電されている時間は 1 ms 程度であるため、1 Hz 運転でも発熱は無視できる程度となる。また、セプタムコイルが不要となり、渦電流を発生させるセプタム板に代わる。既存の電流型 SM は、セプタムコイル表面にセラミック溶射を行い、絶縁を取っているが、励磁によって生じる振動や応力による劣化が懸念されていた。Eddy SM は、セプタムコイルがないので、その問題から解放される。さらにセプタム板はセプタムコイルより薄いので、磁気シールドを追加しつつ、アパーチャの拡張も期待できる。既存の電流型 SM のセプタム面厚さは 9.5 mm だが、Eddy SM では 6 mm 厚のセプタム板に 2 層の磁気シールドを取り付けた合計厚が 9 mm となり、0.5 mm アパーチャが拡張される。セプタム板に直接取り付ける 1 層目をシールド、周回軌道を覆うダクト型の 2 層目をダクト型シールド[11]と呼ぶ。2 層の磁気シールド厚は共に 1 mm で、セプタム板とそれぞれの磁気シールド間には 0.5 mm の隙間を想定している。それらの磁気シールドにより、漏れ磁場は磁極内磁場に対して 10^{-4} 程度に抑えられ、周回ビームへの影響を大きく軽減する事が期待できる。

Eddy SM は、Fig. 3 に示すように、鏡面对称な 2 台が、NU 側/Abort 側で向い合せて真空チェンバー内に設置される。低磁場 SM の位置は、周回ビームと取出しビームの分離が十分でないため、セプタム面が厚いと設置できない。その上で、取り出し側ダクトを磁極内に設置することを考えた場合、金属製真空ダクトでは渦電流が発生し、磁束が通らなくなる

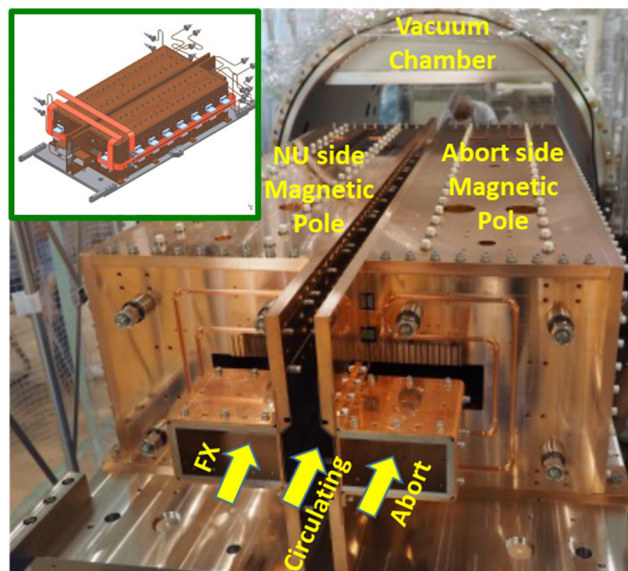


Figure 3: Eddy SM under assembly.

ので、厚いセラミック製真空ダクトを使用することになる。ダクト厚さが加わったセプタム面では厚すぎて導入が困難となるため、真空チェンバー内に収めることになった。

Eddy SM は NU 側と Abort 側それぞれに 2 台、ビーム方向に連ねて用意し、上流側を Eddy1、下流側を Eddy2 とする。Eddy1,2 いずれも同型である。

3. ビームエンベロープの計算

ビームエンベロープの計算の条件等について記述する。

3.1 計算コード

ビームエンベロープの計算には、SAD (Strategic Accelerator Design)[12] を用いた。Momentum Compaction Factor は 0.7%、Closed Orbit Distortion は 3 mm とした。

3.2 チューン

ビーム粒子数積み増しのために検討されている候補チューン[13,14]は複数あり、適当な 3 種類を選んだ。それらに加えて、現行の FX チューン、遅い取り出し(SX)用のチューンについてもビームエンベロープを計算した。計算対象のチューンを Table 1 にまとめる。

ビーム粒子数積み増しという点では、New FX tune #2 が最も有力な候補となっている。

Table 1: Tune List

Item	Tune (ν_x , ν_y)
Current FX tune	21.34, 21.44
New FX tune #1	22.18, 22.40
New FX tune #2	21.40, 20.45
Current SX tune	22.286, 20.788
New SX tune	22.286, 22.288

3.3 エミッタンス

周回ビームエンベロープの計算においては、エミッタンスを 81π mm mrad とした。これは入射ビーム(3 GeV)に由来する。ただし、New FX tune #2 では、高磁場 SM 群の最上流にある新 SM30(Fig. 2 参照)の真空ダクトアパーチャで制限され、 81π mm mrad が通らない。この場合は、新 SM30 アパーチャを通る最大エミッタンス約 64π mm mrad でビームエンベロープを計算した。

既存の低磁場 SM 周回アパーチャは 60π mm mrad 程度で設計されているが、これはコリメータで絞られることを考慮したものである。今後は高出力化や放射化低減の都合から、コリメータを使用しないことも想定される。

一方、取り出しビームのエミッタンスは 30π mm mrad とした。これは加速後、30 GeV の 3σ ビームサイズに相当する。

4. ビームエンベロープとアパーチャの拡張

4.1 既存アパーチャと残留線量

現在の運用で使用されているFX用チューン(21.34, 21.44)のエンベロープを既存アパーチャに重ねた。Fig. 4の水平方向アパーチャでは低磁場SMの上流側の収束用四極電磁石QFR154、垂直アパーチャでは低磁場SMの下流側の発散用四極電磁石QDT155の周辺で、アパーチャとエンベロープが近接しており残留線量も100 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の高い値を示している。

取り出し側のビームエンベロープは 2σ 相当(水平 15π mm mrad / 垂直 19π mm mrad)[15]で計算している。残留線量は、その 2σ の外のビームがロスした影響と考えることができる。

4.2 新しいビームエンベロープとアパーチャ拡張

既存アパーチャのままでは、MR高出力化に応じてビームロス量も増え、残留線量も増大する。これを防ぐために、アパーチャの拡張が必要で、既に設計は済んでいる。あるいは実施待ちとなっている。Eddy SMのアパーチャのみ、設置位置が確定していない状態である。ここでは拡張が計画されているアパーチャについて、新しい候補チューンのビームエンベロープと干渉しないか、改めて確認した。

Table 1の各チューンについて、周回ビームのエミッタンスを 81π mm mrad、取り出しビームのエミッタンスを 30π mm mradに大きくし、Fig. 5にアパーチャと重ねてプロットした。既存アパーチャ(黒線)に対して、新SMアパーチャ(赤線)、新QDT155アパーチャ(緑線)、QFR154のダクトとその上流側のダクトをAbort側と対称になるように改造して得られるアパーチャ(青線)が導入されると、水平・垂直ともビームエンベロープと干渉しないことが確認できた。

5. Eddy SM の設置位置

ビームエンベロープとアパーチャが最も近接するのは、Eddy SMのセプタム面である。特に上流側のEddy1については、周回ビームと取り出しビームの分離が十分でなく、セプタム面の両面において、それぞれのエンベロープとのクリアランスが厳しい。したがって、水平方向の設置位置は慎重に検討しなければならない。

検討において、周回ビームは何度も通過するため、ワンプスの出射ビームに比べると、ビームロスへの影響が大きいので、周回ビーム側になるべく余裕を持たせるようにする。出射ビーム側については、上流側に設置されたキッカー電磁石(KM)の出力上限が、取り出しビームの軌道をNU側に曲げる限界となり、セプタム面を周回ビームから遠ざける制限となる。

尚、ビーム方向と高さ方向の設置位置は、それぞれ一意に決まるため、調整の余地はない。

5.1 Eddy1 の設置位置

まずは、ビーム軸を 0 mradとしたときの水平面内の回転角度を、最も角度が小さいエンベロープに合わせる。

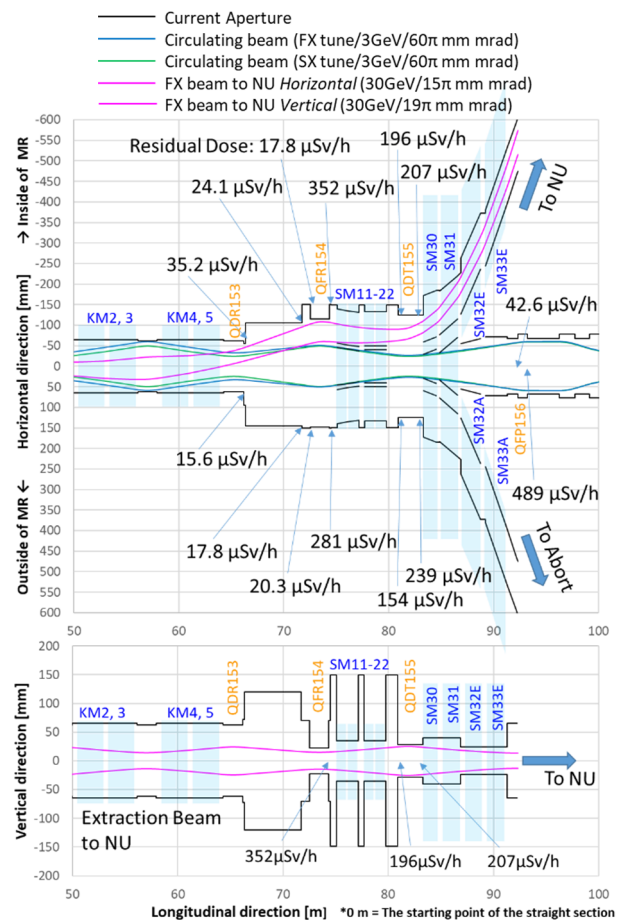


Figure 4: Beam envelopes and the current aperture with residual doses.

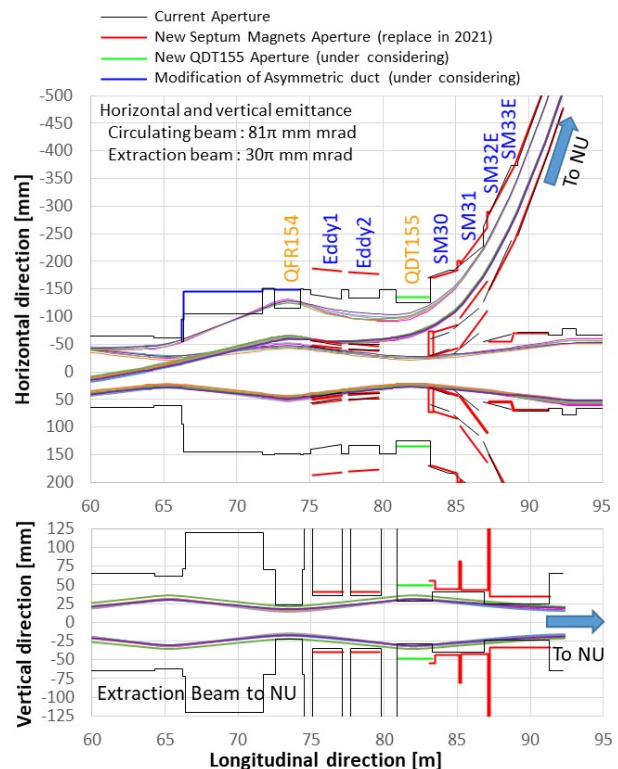


Figure 5: New Aperture plans and beam envelopes.

現行 FX チューンや New FX tune #2 が約 3 mrad だったため、回転角は 3 mrad で決定した。この回転角を保持し、水平方向の最適な設置位置を求める。

次に、セプタム板の周回ビーム側に取り付けられるダクト型シールド(長さ 2244 mm)の上流側端部に注目する。その位置で周回ビームエンベロープが最大となるチューンは New FX tune #1 で、周回ビーム中心から 48.3 mm となっている。

また、セプタム板の取り出しビーム側の上流側端部に注目し、KM 出力が 100% となるときの取り出しビームエンベロープを調べると、New FX tune #2 が最も周回ビーム側に近づく。セプタム板の取り出し側の面がそのエンベロープに接する位置にある場合、ダクト型シールド上流側端部の位置は、周回ビーム中心から 49.0 mm となる。

よって、セプタム板の回転角は 3 mrad で、かつダクト型シールド上流側端部の周回ビーム中心からの位置は、48.3 mm~49.0 mm の範囲にしなければならない。前述の通り、周回ビーム側を優先し、周回ビームエンベロープからなるべく遠ざけたいので、ダクト型シールド上流側端部の位置を 49.0 mm に設定する。詳細な配置寸法を Fig. 6 に示す。

尚、既存の低磁場 SM アパーチャと比較した場合、セプタム面周回側上流端で既存の 46.2 mm に比べて 49.0 mm となるので、2.8 mm 拡張されたことになる。

81 π mm mrad の各候補チューンの周回ビームエンベロープに対しても 0.7 mm 以上遠ざけることができた。これは、Table 1 以外のチューンを選択する場合や、同じチューンでも四極電磁石(QM)磁場勾配の分配を調整するといった場合に、対応できる余地を広げることになる。逆に、取り出しビーム側のアパーチャは、セプタム面取り出し側上流端で約 2.0 mm 狭くなる。KM の負荷は増えるが、KM の最大許容出力は 110% であり、想定している KM 出力は 100% 以下であるため、KM への負荷は大きな問題にはならない。

5.2 Eddy2 の設置位置

Eddy1 の下流側ある Eddy2 は、周回ビームと取出しビームの間隔がより大きくなることから、設置位置の自由度は高い。周回ビームへの影響が、Eddy1 未満で、かつ取出しビームのアパーチャを広くとることができる設置位置を求める。

Eddy1 と SM30 の間には QDT155 がある。QDT155 は水平面でビームを発散させるので、Eddy1 のダクト型シールド下流側端部と新 SM30 の周回側アパーチャ上流側端部の両方に近接する周回ビームエンベロープが存在したとしても、それらを結んだ線より取り出し側に Eddy2 を配置すれば、決して周回ビームエンベロープに干渉することはない。よって周回ビームへの影響は Eddy1 未満である。

取出しビーム側は、Eddy1 の故障時に Eddy2 のみで運用するといった冗長性を考慮したときに、Eddy2 はより周回側にある方が、アパーチャが大きくなり都合がよい。したがって、Eddy2 は Eddy1 のダクト型シールド下流側端部と新 SM30 の周回側アパーチャ上流側端部を結んだ線上に設置することとする。

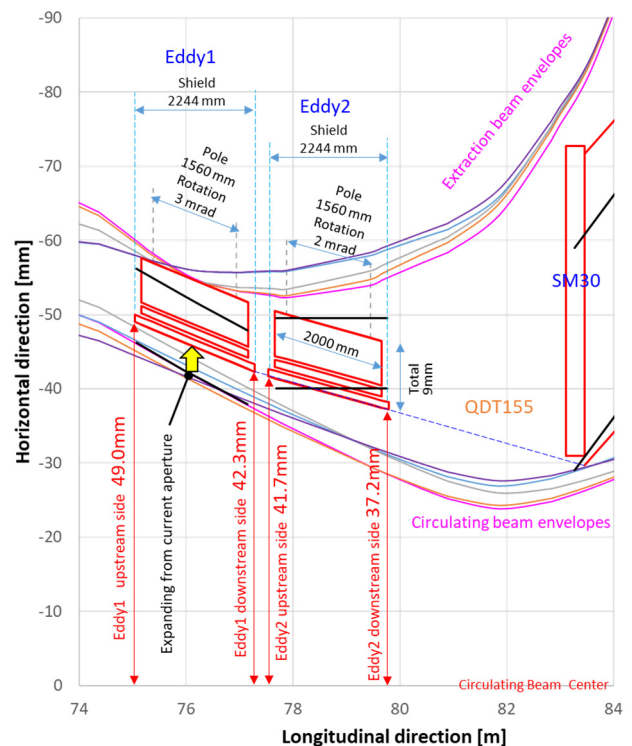


Figure 6: Installation position of Eddy SM.

6. Eddy SM 故障時の対策

6.1 Eddy SM 故障時の影響

Eddy1 もしくは Eddy2 が励磁されなかった場合のビームエンベロープをそれぞれ求めた。Eddy2 の例を Fig. 7 に示す。NUラインとの取合い点において、Eddy1 励磁なしで約 50%、Eddy2 励磁なしで約 80% のビームが NU ラインへ通過してしまうことが分かった。この場合は励磁なしの条件だが、例えば設定値の 50% 励磁といった場合は、より多くのビームが通過するはずである。

NUラインとの取合い点からおおよそ 80 m 下流側で超電導電磁石が使われており、高強度ビームが照射されると、発熱によるクエンチが懸念される。

したがって、Eddy SM の励磁異常を検知した場合は、NU ラインへのビームを遮断する必要がある。

6.2 励磁異常時のビーム遮断システムの条件

既存の低磁場 SM がパターン動作であるのに対し、Eddy SM は速いパルス動作になっている。励磁開始から出射まで、前者は 1 s 程度に対し、後者は約 380 μ s である。このため、電源等の異常検知で KM 励磁極性を、Abort ライン側へ切り換え、ビームを蹴り出す既存の Abort トリガ(通称 ms-Abort)システム[16]では間に合わない。

その速いパルス動作に対応した、新たな Abort トリガシステムを用意しなければならない。

6.3 励磁異常検知の方法

励磁異常検知について、電流出力波形を直接監視する。あらかじめ用意しておいた正常な出力波形と比較することで、異常を判断する。理想的には出力立ち上がり部分の全範囲で比較できればよいが、動作時間を考え

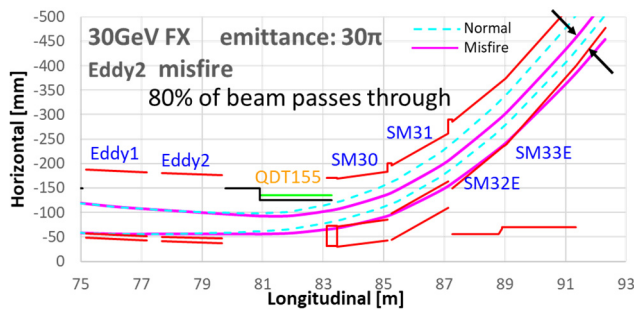


Figure 7: Simulation of the Eddy SM failure.

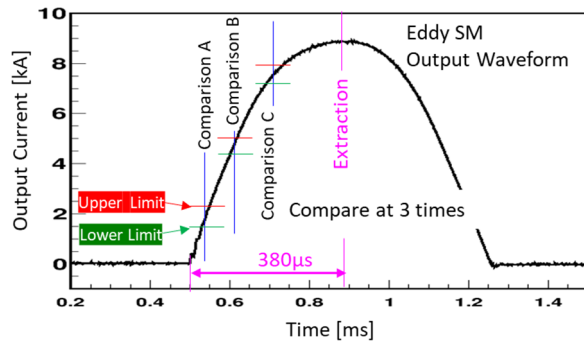


Figure 8: Scheme of the output waveform monitoring.

ると、より単純な方がよい。Figure 8, 9 に示すように、時間をずらして 3 回比較を行う回路を考えている。

正常時の波形から得られる、各比較点での波高について、再現性や時間ジッタ、ノイズ等を考慮した上限値/下限値を設定する。いずれかの比較点で、上限/下限値の範囲外だった場合は、励磁異常と判断し、Abort トリガを出力するものとする。

6.4 出力波形監視システム

ビーム調整においては、異常検知の上限/下限値や、比較タイミングの頻繁な変更が必要になるので、ローカ

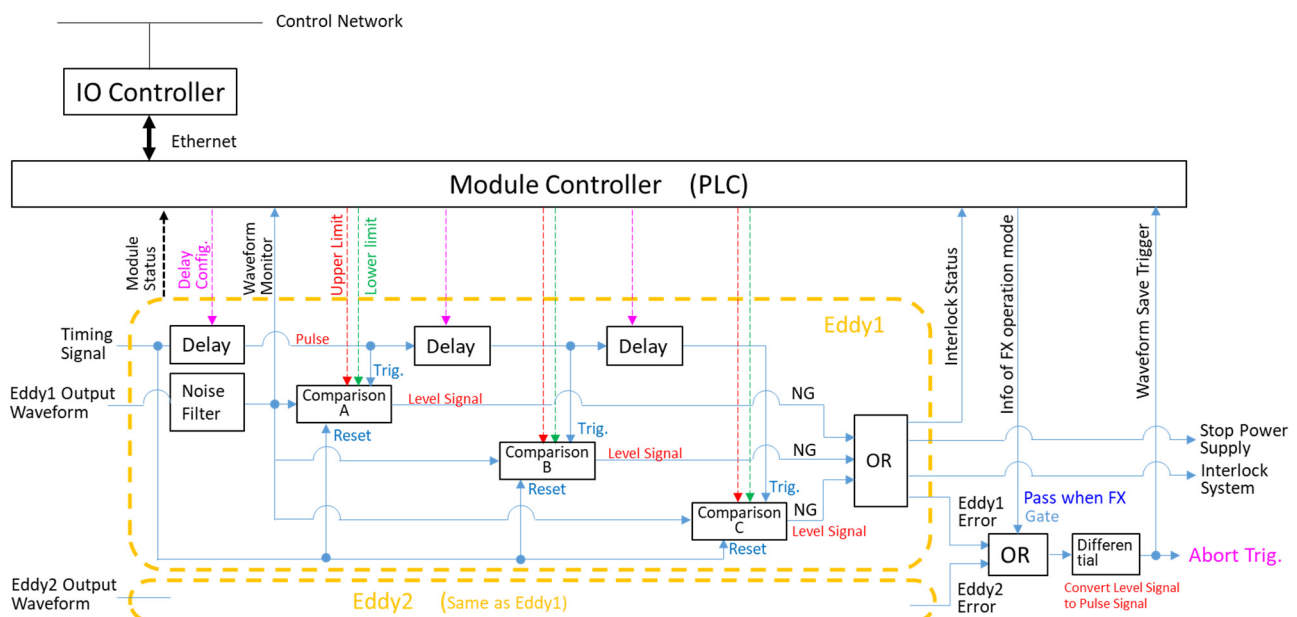


Figure 9: Overview of the output waveform monitoring module.

ル制御に加えて、遠隔制御もできるようにする。インターロック信号の処理や異常時の波形保存などその他の機能追加も考えている。

2021 年度内に詳細設計を進め、2022 年秋のユーザーランまでに導入する。

7. まとめ

MR 高出力化に向けてビーム粒子数積み増しのために検討されている候補チューンについて、ビームエンベロープを計算し、 81π mm mrad の周回ビーム、 30π mm mrad の出射ビームに干渉しない Eddy SM の設置位置を決定した。2021 年度内のインストールで反映させる。

また、Eddy SM の速いパルス動作に対応する新たな故障対策を検討した。Eddy SM の出力波形を監視する独立した回路を用意し、既存の Abort トリガに挿入する。2022 年秋のユーザーランまでの導入を目指す。

参考文献

- [1] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/t2k.html>
- [2] S. Igarashi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 033G01.
- [3] KEK Report 2021-2, June, 2021.
- [4] S. Iwata *et al.*, Proc. of IPAC, 2021, WEPAB204.
- [5] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2014, p.86-90.
- [6] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2016, p.1204-1208.
- [7] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2017, p.1051-1055
- [8] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.499-503.
- [9] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2019, p.361-365
- [10] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2020, p.594-598.
- [11] T. Shibata *et al.*, Proc. of PASJ, 2021, MOP015.
- [12] SAD code; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/index.html>
- [13] S. Igarashi *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.799-802.
- [14] K. Ishii, private communication, May, 2020.
- [15] S. Igarashi *et al.*, Proc. 61th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2018), Daejeon, Korea, Jun. 2018, pp. 147-152.
- [16] T. Kimura *et al.*, Proc. of PASJ, 2018, p.609-612.