

# DAMAGE INSPECTION AND EVALUATION OF THE J-PARC MR BEAM INSTRUMENTS AFTER THE EAST JAPAN EARTHQUAKE

Kotoku Hanamura<sup>#,A)</sup>, Masaru Ando<sup>A)</sup>, Susumu Igarashi<sup>B)</sup>, Satoru Otsu<sup>A)</sup>, Yuki Omori<sup>A)</sup>, Kenichirou Satou<sup>B)</sup>, Masaki Tejima<sup>B)</sup>, Takeshi Toyama<sup>B)</sup>, Yoshinori Hashimoto<sup>B)</sup>, Hiroki Fujiyama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-0045

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK J-PARC)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

## Abstract

The 9.0-magnitude great earthquake occurred off the Pacific coast of Tohoku on March 11, 2011. There emerged wall-cracks and water-leaks in the MR tunnel due to the earthquake. Beam operation has been stopped since the earthquake. Damage inspection and evaluation of J-PARC MR beam instruments are under way. Visual inspection, TDR (Time Domain Reflectometry) analysis, insulation resistance measurement were performed. As a result, no damage has been found so far.

## 東日本大震災後の J-PARC MR ビーム診断装置の損傷点検および評価

### 1. はじめに

J-PARC MR のビームモニタは DCCT, FCT (Fast Current Transformer), WCM (Wall Current Monitor), BPM (Beam Position Monitor), BLM (Beam Loss Monitor), MRPM (Multi Ribbon Profile Monitor), SCM (Screen Monitor), IPM (Ionization Profile Monitor), FW (Flying Wire Profile Monitor) から構成される。

2011年3月11日14:46頃、三陸沖を震源としたM9.0の地震が発生しJ-PARCも大きな被害を受け、ビーム運転停止を余儀なくされた。ビーム運転再開に向けて、損傷箇所の特定制と動作確認が必要になっている。

本論文では、震災による被害状況、各ビームモニタ機器の概要、ビーム診断装置の損傷点検の方法、点検結果と評価、今後の予定について報告する。

### 2. 被害状況

J-PARCのある東海村では、震度6弱の揺れに見舞われた。MR地上部では、道路の陥没や地盤の沈下は見られたが、目立った建屋の損壊や機器損傷は見られなかった。トンネル内は、トンネル壁の亀裂による漏水や地盤の歪みやトンネルの継ぎ目のエキスパンションジョイント部における地盤変化が見られた。

ビーム診断装置に関しては、幸いにも外見上の大きな損傷や真空リークは見られなかったがトンネル天井の亀裂からの漏水が、BPMとBLMにかかる被害があった。

また、測量により電磁石が最大でビーム垂直方向に±6mm、横方向+15mm (Ring外側) に、-10mm (Ring内側) に変位が生じたことが判明した。<sup>[1]</sup>

### 3. ビーム診断装置の概要

現在MRには、表1のビーム診断装置が設置されている。<sup>[2]</sup>

表1: MRに設置されているビームモニタ

Monitor	台数
DCCT	2
FCT	6
WCM	3
BPM (COD, turn-by-turn)	186
BPM (stripline)	2
BLM (proportional)	238
BLM (ionization)	36
BLM (scintillator)	2
MRPM (SEEM)	1
SCM (Luminescence screen)	5
IPM	3
Flying wire	2
Exciter	2

#### 3.1 BPM

BPMはビーム重心を計測する装置であり、加速器のビーム軌道を測定する重要な装置である。

MRに設置されているBPMは対角線分割電極で構成され、電極と本体はセラミックで絶縁されている。

#### 3.2 BLM

MRには2種類のBLMが設置されており、比例計数管タイプBLM (P-BPM) と同軸ケーブル空気イオンチェンバー(AIC)がある。P-BLMの構造は、Pt φ50μmが張られ、Ar + CO<sub>2</sub> (約1%) ガスで充

<sup>#</sup> hanamura@post.kek.jp

填されている。MR には Q 電磁石毎に 216 台、その他、3-50BT ビームライン、入射コリメータ部、出射部、ビーム Abort 部に設置されている。<sup>[3]</sup>

### 3.3 DCCT

ビーム強度を測定するために 2 台設置され、トロイダルコアとして、ファインメットを使用している。周波数帯域 DC~約 20kHz,動作レンジ 0.2A, 2A, 20A/10V である。<sup>[4]</sup>

### 3.4 FCT

RF 位相フィードバック用に 3 台、FX (Fast Extraction)キッカー用に 1 台、観測用に 2 台設置され、2 次コイル巻線 50 ターンに 25 Ω (50 Ω 2 並列) 負荷を取り付けている。トロイダルコアとしてファインメットが使用されている。

### 3.5 WCM

RF ビームローディング対策用に 2 台、観測用に 1 台設置されている。ビームダクトのセラミックブレークを跨ぐ抵抗 (92mΩ) に流れる壁電流の作る電圧を 25 Ω 抵抗で観測している。

### 3.6 MRPM

ビームプロファイルを観測するために、カーボングラファイトを用いたマルチリボン型 (MRPM) が設置されている。<sup>[5]</sup>

### 3.7 Flying wire

直径 7 μm のカーボンファイバをターゲットとして、ビームを横切るように移動させて、その際発生するビームの散乱粒子をシンチレータで計測することにより、ビームプロファイルを測定するモニターである。<sup>[6]</sup>

### 3.8 Exciter

特性インピーダンス 50 Ω のストリップラインキッカーを使用して、2 台の 1kW RF アンプにより励振する。

## 4. ビーム診断装置の損傷点検の方法

### 4.1 BPM

#### 4.1.1 対向電極の透過波形確認

電源棟側からパルスを送り、電極での反射波形及び対向電極の透過波形の確認を行った。この試験により、信号ケーブルの断線、BPM ヘッド電極の異常が発見できる。

#### 4.1.2 BPM ヘッド及び信号ケーブルの特性調査

TDR (Time Domain Reflectometry) 法を利用した特性調査 (TDR 試験) を実施した。使用機器に Tektronix 製 DSA8200 (Digital Serial Analyzer), TDR モジュール 80E04 (Rise Time 23psec) を用いた。BPM ヘッドでは電極の反射波形と対向電極の透過波形の測定、信号ケーブルでは特性インピーダンスの測定を実施した。信号ケーブルの測定はトンネル

側から実施した。(ケーブル敷設時は、電源棟側から測定)

#### 4.1.3 BPM ヘッドの絶縁抵抗調査

BPM はビーム強度が定格の約  $4 \times 10^{13}$  proton/bunch まで達すると、ピークで約 100V の電圧が発生すると見積もられている。絶縁抵抗測定を実施した。

### 4.2 BLM

#### 4.2.1 BLM ヘッドの Gain 調査

線源にコバルト 60 ( $0.15 \times 10^9$  ベクレル) を使用して、バイアス電圧 (0V, 500V, 1000V, 1200V, 1400V, 1600V, 1800V, 2000V) での BLM ヘッドの Gain 測定を実施した。<sup>[7]</sup>

#### 4.2.2 BLM 信号ケーブル特性試験

信号ケーブルのキャパシタンス測定と、ケーブルの心線とシールド間の絶縁抵抗測定を実施した。

### 4.3 DCCT

テストパルスを入力して出力波形の観測を実施した。また、DC 電流校正を実施した。

### 4.4 FCT および WCM

#### 4.4.1 ヘッドの出力波形調査

FCT は、入力ポートからテストパルスを入力して出力波形の観測を実施した。

WCM は、ファインメットコアに 1 ターンコイルを巻き、テストパルスを入力して出力波形の調査を実施した。

#### 4.4.2 信号ケーブル特性試験

TDR 試験による、特性インピーダンスの測定を実施した。

### 4.5 MRPM

#### 4.5.1 ターゲットの目視確認

ヘッドの真空パージを行い、ターゲットの目視確認を実施した。

#### 4.5.2 リボンの健全性確認

TDR 試験により、信号伝送線路のペアケーブルの応答波形観測、リボンと対向するベタ電極 (電子収集用) 間の応答波形・透過波形確認を実施した。

#### 4.5.3 駆動試験

駆動機構の動作試験を実施した。

### 4.6 Flying wire

Flying wire ヘッドは、覗き窓からの目視確認 (水平タイプのみ) を実施した。また、エレキが設置されているサブトンネルは、壁の亀裂による漏水で機器が浸水する恐れがあったので、機器の移動を実施した。

#### 4.7 Exciter

ヘッドと伝送ケーブルの絶縁抵抗測定と 1kW RF のパワー試験を実施した。

### 5. 点検結果と評価

#### 5.1 BPM

##### 5.1.1 BPM 信号ケーブル

対向電極の透過波形確認で、異常データは観測されず、伝送ケーブル断線および短絡の様な大きな異常は見られなかった。震災で信号ケーブルには大きな力が働いたと推測されたため、測定分解能を上げ TDR 試験を実施した。より細部の異常発見に努めた。その後行った結果は以下に記す。

- ・ スパイク状の特性インピーダンス低下

局所的に特性インピーダンス低下 ( $0.5\ \Omega$  以上) が発生した場所を分析すると、ケーブルラックの立ち上がり部分 18 箇所、トンネル内の床上でケーブルが曲がる部分 16 箇所、ケーブルを結束バンドで固定した部分 11 箇所、その他 11 箇所に分類される。ケーブル敷設時にも、同様の測定を行っていたが、レンジを拡大した、細部に渡る測定を行っていなかったため、震災の影響であるかは判断できない。

スパイク状のインピーダンス低下は最大で  $\Delta 4.7\ \Omega$  (BPM#186 ch.1) 時間幅約 1nsec 程度で、MR のビーム運転には支障のないレベルであることが確認できた。

なお最大のスパイクが観測された BPM#186 ch.1 のケーブルは、絶縁抵抗測定 (500V, 1 分間) を行い、オーバレンジ ( $2000\ \text{M}\ \Omega$  以上) であることを確認した。

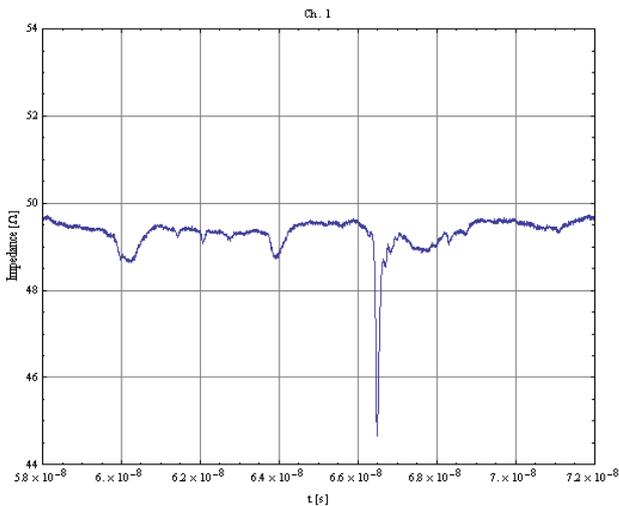


図 1 : BPM#186 ch.1 cable の特性インピーダンス

- ・ 周期的な特性インピーダンスの低下

20 箇所で 260MHz 程度の周期で特性インピーダンスの低下が観測された。(図 2) この様なインピーダンスの低下が発生した原因は不明である。

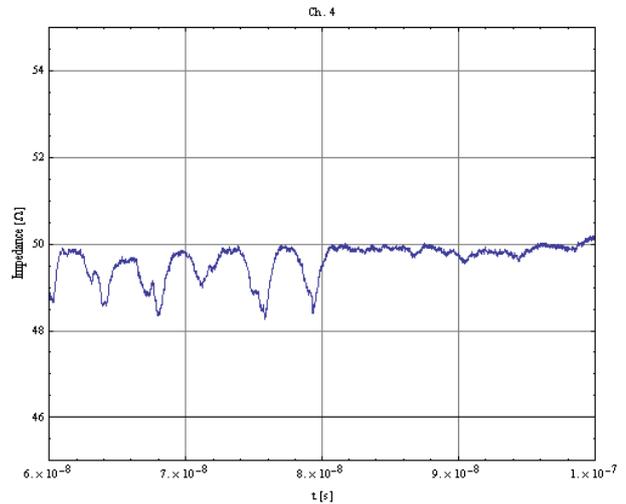


図 2 : BPM#177 ch.4 cable の特性インピーダンス

- ・ 断続的な特性インピーダンスの低下

BPM#196 ch.2 のケーブルで 14.2m (114nsec) に渡り、インピーダンスの低下が見られた。敷設時のデータにも同様の特性インピーダンス低下 (図 3) が見られた。ビームの周波数スペクトル <math><40\text{MHz}</math> では影響は無視できる。

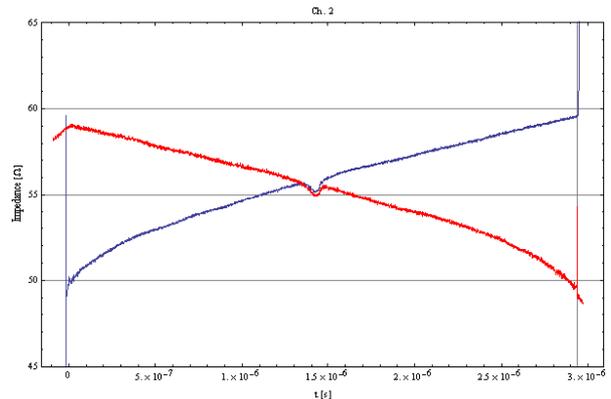


図 3 : BPM#196 ch.2 cable の特性インピーダンス  
赤 : ケーブル敷設時のデータ 終端  $50\ \Omega$  term  
青 : 震災後のデータ 終端 open

- ・ チョークコイルの異常

ケーブル終端部の波形異常が観測された (図 4)。電源棟制御室の BPM 処理回路直前に、信号ケーブルから入るノイズを減少させるための共通モードチョークコイルがある。異常箇所についてはチョークコイルを交換後、再測定を行い、異常が見られないことを確認した。

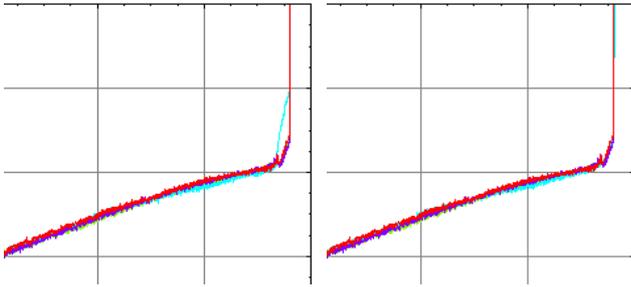


図 4 : BPM#151 Cable 終端部の特性インピーダンス  
左 : 交換前、右 : 交換後

この様に TDR 試験でケーブルの特性インピーダンス測定を行った結果、細かな異常が観測されたが、BPM からの信号の主要な周波数成分は 40MHz 以下であり、この周波数では影響を受けない。

・ 敷設時のデータとの比較

震災後の TDR 試験でも、電源棟側からの測定を 14 箇所を実施した。敷設時のデータと比較を行い震災が原因と思われる大きな異常は見られなかった。

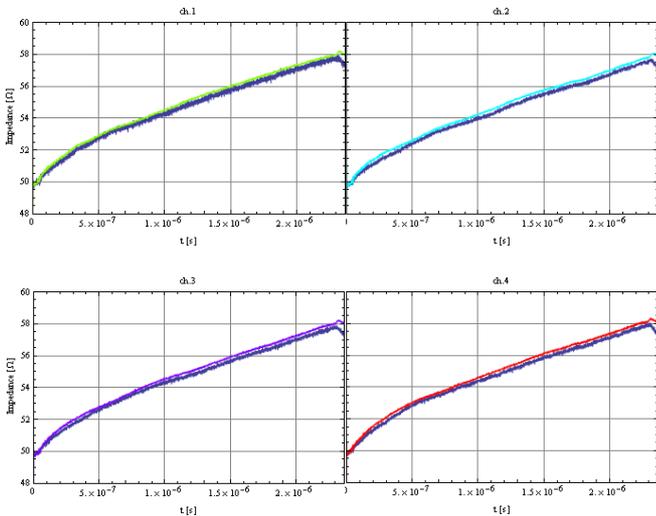


図 5 : BPM#174 cable 震災後とケーブル敷設時のデータ比較

5.1.2 BPM ヘッド

BPM ヘッドの TDR 試験では、異常波形は観測されず、正常であることを確認した。

BPM ヘッドの絶縁抵抗測定 (125V, 1 分間) では、オーバレンジ (40MΩ 以上) で、正常であった。

5.1.3 セミリジッドケーブル

セミリジッドケーブルの TDR 試験では、特性インピーダンスの ch 毎のばらつきは大半で±1Ω 以内の範囲に収まり、最大でも±1.5Ω 以内で良好な結果を得られた。

5.2 BLM

5.2.1 BLM ヘッド

全ての BLM で所定の Gain を得ることが確認できた。最大バイアス電圧 2000V では、Gain 平均 : 20236, 標準誤差 : 209 であり、統計的に大きな誤差がないことを確認した。<sup>[7]</sup>

5.2.2 BLM 信号ケーブル

ケーブルのキャパシタンス測定では、異常は見られなかった。

絶縁抵抗値測定では、1 箇所異常が見つかった。原因調査の結果、電源棟側のケーブルコネクタの接触不良であった。震災との因果関係は不明である。異常コネクタについては、交換予定である。

5.3 DCCT

出力波形に異常は見られなかった。DCCT の精密校正を行った。<sup>[8]</sup>

5.4 FCT

5.4.1 FCT ヘッド

1%以下の良好な直線性を得ることができ、異常は見られなかった。

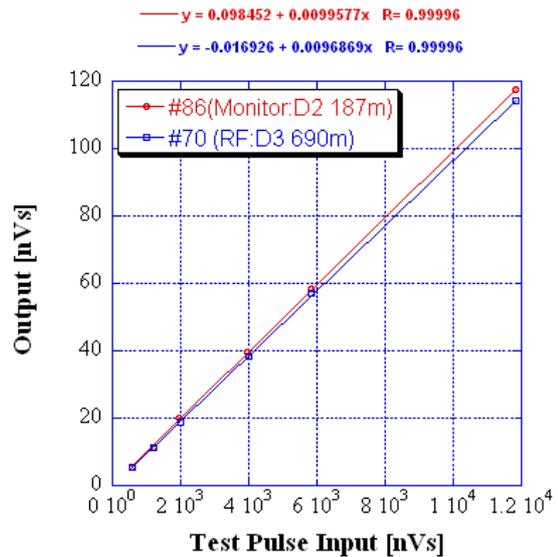


図 6 : FCT 出力波形

5.4.2 FCT 信号ケーブル

スパイク状の特性インピーダンス低下は見られず、その他の異常も見られなかった。

5.5 WCM

5.5.1 WCM ヘッド

1%以下の良好な直線性を得ることができ、異常は見られなかった。

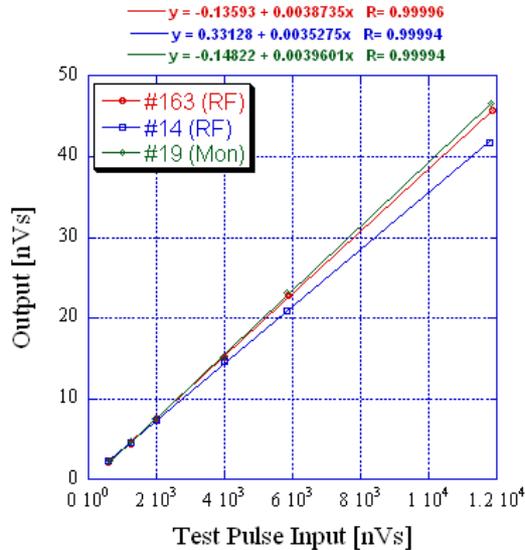


図 7 : WCM 出力波形

### 5.5.2 WCM 信号ケーブル

スパイク状の特性インピーダンス低下は見られず、その他の異常も見られなかった。

### 5.6 MRPM

ターゲットの目視確認を全数行い、ターゲットの変形、破断は見られず異常はなかった。また、TDR 試験による波形の異常も見られなかった。駆動試験でも正常な動作を確認した。

### 5.7 Flying wire

Wire の目視確認（水平タイプのみ）を実施して、カーボンファイバの破断は見られなかった。

### 5.8 Exciter

絶縁抵抗測定では Horizontal-2 で 85.6M Ω (500V) であった。この値は、運用には問題がない。その他 Horizontal-1, Vertical-1,2 については、オーバレンジ (2000M Ω) であった。また、1kW RF パワー試験も異常は見られなかった。

## 6. 今後の予定

BPM 信号ケーブルの TDR 試験（電源棟側から）を継続し、敷設時のデータとの比較・分析を実施する。

FCT, WCM 以外のモニタに関してはアラインメントが必要なモニタである。電磁石のアラインメント後に、レーザトラッカにより精密に設置位置を測定する。特に BPM は、Q 電磁石の基準座からの距離を精度良く測定しておく必要がある。<sup>[9]</sup>

## 7. まとめ

震災後、ビーム診断装置の損傷箇所、異常箇所の点検を実施した。ビーム運転に問題を生じる様な大きな損傷は見られなかった。また、モニタヘッド部

や信号ケーブルの細部に渡る試験でも、細かな異常は観測されたが、ビーム運転には影響がないレベルであった。今後も詳細な点検を進め、ビーム運転再開に備える。

## 参考文献

- [1] Masashi Shirakata, et al., these proceedings.
- [2] Takeshi Toyama, et al., “J-PARC MR のビーム診断”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, August 1-3, 2007
- [3] Kenichirou Satou, et al., “J-PARC MR の BLM システムの現状”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5-7, 2009
- [4] Yoshinori Hashimoto, et al., these proceedings.
- [5] Yoshinori Hashimoto, et al., “カーボングラファイトリボンを用いた 2 次電子放出型ビームプロファイルモニター”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5-7, 2009
- [6] Susumu Igarashi, et al., “J-PARC MR でのフライングワイヤーによるビームプロファイルの測定”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, 2010, Himeji, Japan
- [7] Kenichirou Satou, et al., these proceedings.
- [8] Yuki Omori, et al., these proceedings.
- [9] Kotoku Hanamura, et al., “J-PARC MR BPM の測量結果”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Higashihiroshima, August 6-8, 2008