

# STATUS OF J-PARC LINAC LLRF AFTER THE TOHOKU EARTHQUAKE

Kenta Futatsukawa<sup>\*A)</sup>, Shozo Anami<sup>A)</sup>, Kobayashi Tetsuya<sup>A)</sup>, Zhigao Fang<sup>A)</sup>,  
Yuji Fukui<sup>A)</sup>, Michizono Shinichiro<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Fumiaki Sato<sup>B)</sup>,  
Shinichi Shinozaki<sup>B)</sup>, Etsuji Chishiro<sup>B)</sup>, Toshihiko Hori<sup>B)</sup>, Masayoshi Yamazaki<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

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

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

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

## Abstract

The huge earthquake hit a broad eastern area in Japan, includes Tokai, on March 11, 2011. Although J-PARC linac was damaged, the beam commissioning was resumed at December of that year due to all-out effort. After that we had many kinds of trouble related to the RF source, multi-pactering, strange RF output, and breakdown of the power supply. In this report, I would like to introduce the recovery work of LLRF and some serious trouble after the earthquake.

## J-PARC リニアック LLRF の東日本大地震からの再スタート

### 1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に M9.0 の東日本大震災が発生し、J-PARC のある茨城県東海村でも震度 6 弱の横揺れを記録した。J-PARC の各施設の被害状況も広範囲に及んでおり、当時の運転スケジュールの見直しが必要になった<sup>[1]</sup>。運転を再開するために懸命な復旧作業や点検を行い、同年 12 月にビーム運転を再開、翌年 1 月に利用運転を開始することができた<sup>[2]</sup>。一方で、リニアックの SDTL05B 空洞はマルチパクタと思われる影響で空洞の電界強度が震災前の運転パワー近傍で安定せず、設計値より高いパワーで運転しているなどの問題も生じている。また、平成 24 年 3 月の後半に RFQ-DTL 用のクライストロン高圧直流電源の故障が発生し、原因の究明と故障した変圧整流器の交換のため、約 2 週間の利用運転の休止を余儀なくされた。

本稿では、リニアックの高周波グループが行った復旧作業の内容と運転再開から平成 24 年度の夏季シャットダウンまでに起こった高周波源関係のトラブルについて報告する。

### 2. 復旧作業

東日本大震災は J-PARC リニアックにおいても、建屋と加速器機器の双方に甚大な被害をもたらした。とくに、建屋の損害として、加速器トンネル内で床や壁に生じたひびから地下水漏洩が発生したため、多数の加速器機器が水没の被害にあった。床面は最大 4 cm の高さ及び 3 mrad の傾きの変動が観測され、運転再開前に再アライメントを必要とした。また、DTL 内部のドリフトチューブ (DT) のアライメントの変動が確認されている。空洞間に設置されたモニタの多数が破損、またビームパイプのベローズ部も同様に破損したため、SDTL 空洞は長時間大気に晒されることとなった。本稿では J-PARC

リニアックの低電力高周波制御 (LLRF) の復旧作業に焦点を絞って記載し、その他の被災についての詳細は、参考文献<sup>[3,4,5]</sup>を参照していただきたい。

最大の労力を割いた LLRF の復旧作業は、DTL と SDTL の空洞間の位相の変動を測定・調整したことである。J-PARC リニアックの DTL と SDTL 空洞では、1 台の高周波源で 2 空洞を励振させるシステムになっている。クライストロンからの高周波出力は地上部に設置されているハイブリッド電力分配器で分岐され、導波管 (WR-2300) を通して加速器トンネルまで伝送される。そこで同軸導波管変換器により同軸管 (WX-203D) に変換し、カプラを通じて空洞にパワーが供給される (図 1)。震災前は、分配器後の各伝送経路においてカプラ直前での相対的な位相が揃うように移相器 (3 スタブ方式) で調整されていた。しかし、震災の影響で分配器後の地上部のフレキシブル導波管が目視で確認できるほど変形していたため、2 空洞間の相対的な位相が変動したことが予想された (図 2)。しかし、再調整を行うためには、クレーンが復旧していない作業環境で、分配器より上流側の導波管を取り外してレデューサを取り付ける必要があった。そこで、自営でやぐらを組み立て、チェーンブロックを用いることで、これらの作業を可能とした。加速器トンネルでもカプラ直前の同軸管を取り外してレデューサを取り付けた。測定・調整が終わった後、やぐらは一度解体し、次のステーションで組み上げるという作業を DTL 空洞 3 式と SDTL 空洞 15 式について行った。今回の一連の経験から、クレーンの重要性をその身に痛感した。図 1 にカプラ直前の位相差の測定・調整の結果を示す。フレキシブル導波管の変形は、図 2 写真の水平上に配置されている方が長く、下が短くなる傾向にあったが、これと位相の変動の符号は一致していた。震災の影響で空洞直前での位相差は最大 5° になっていたが、それを震災前の水準まで戻すことができた<sup>1)</sup>。

<sup>1)</sup>リニアックの高周波源に要求されている位相安定性は、全体で ±1° である。

\*kenta.futatsukawa@kek.jp

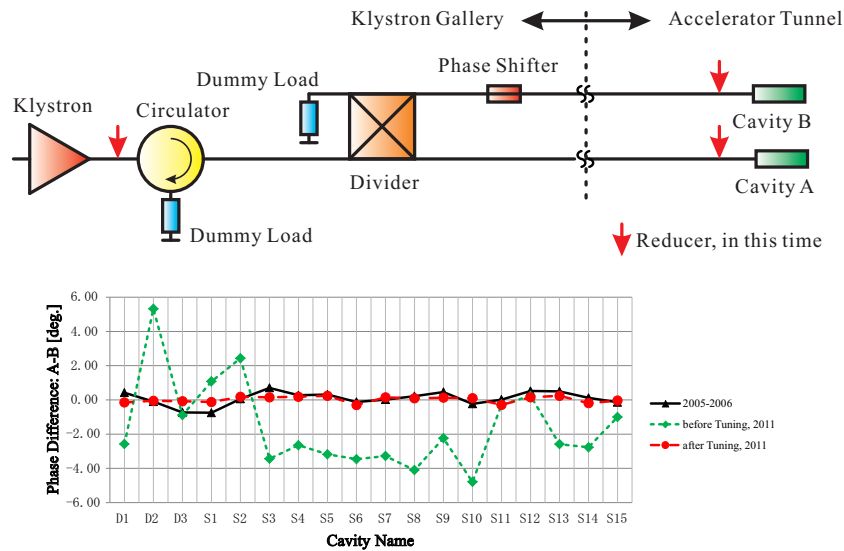


図 1: J-PARC リニアックの立体回路の概略図と測定結果。概略図中の赤矢印の箇所にレデューサを取り付け、空洞入力直前での位相差の測定を行った。位相差分布は、震災の影響で最大  $5^\circ$  になっているが(緑菱形)、震災後の再調整で最初の敷設時の測定値(黒三角)と同レベルになるように調整した(赤丸)。

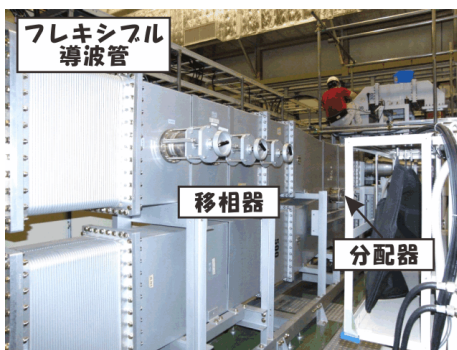


図 2: 立体回路地上部の写真。大電力高周波の伝送経路は紙面奥が上流側であり、途中で2分岐されている。震災の影響で写真のフレキシブル導波管が相対的に上部が長く下部が短くなるように変形した。

また、模擬空洞を用いた cPCI からの低電力高周波出力の確認、50 W アンプの出力の点検、高周波基準信号のラインの断線の有無と光信号のレベルの確認などを行った。1 台 50 W アンプの出力が低下していたが、本震災とは関係がないと考えている。平成 24 年 5 月 9 日の利用運転中に PLC の通信異常が発生し、調査したところ FA リンク用の光ケーブルに断線が見つかった。通信異常発生時にその付近で作業がなかったことを考えると、突然の通信断絶は不自然である。震災でケーブルが破損していたが、通信は辛うじて可能な状態であり、余震等でその通信が完全に途絶えた可能性も有り得ると考えられる。

### 3. SDTL 空洞の現状

リニアックでは、平成 23 年の 11 月から空洞のハイパワーコンディショニングを開始した。震災直後にリニ

アックの加速器トンネル内が地下水が漏洩している中、空洞が大気開放されたこともあり、コンディショニングは約 1 ヶ月の期間をかけて丁寧に行われた。しかし、SDTL05 空洞で運転領域の 300~400 kW で反射のみが増加し、パワーが空洞に入らない現象が生じた<sup>[6]</sup>。この症状は震災以前から観測されていた現象であったが、不安定領域が拡大して運転パワーに重なったため、深刻な問題になっている。図 3 に SDTL05B 空洞の VSWR のクライストロン出力パワー依存性を示す。図 3 のデータは全て震災後のものであるが、4 月と 6 月の結果を比較してもその不安定領域は高いパワーに向かって拡大する傾向にあるのが見て取れる。

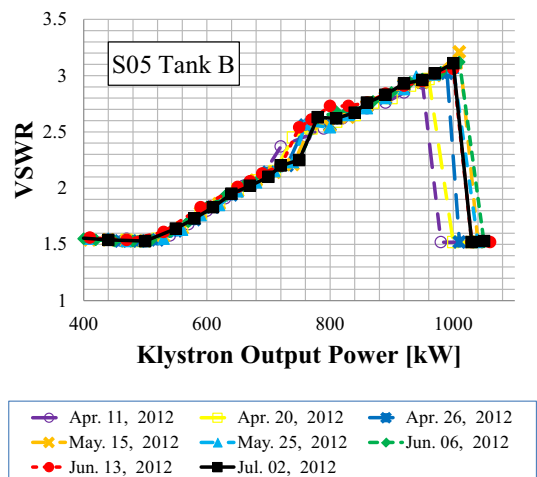


図 3: SDTL05 のクライストロン出力と B 空洞の VSWR との相関 (FB OFF)。空洞のパワーが入らない (VSWR が大きくなる) 不安定領域が存在し、徐々にその領域は拡大傾向にある。尚、SDTL07 以降の空洞の VSWR が、クライストロン出力に依存せず、一定となることは確認している。

他の SDTL 空洞についても調査を行い、SDTL04 と SDTL06 空洞にも同様のパワー領域に不安定領域が存在していることが明らかになった。幸いにもこれらの空洞の不安定領域は運転パワーと重ならず、顕著な領域の拡大も認められない。SDTL01~03 空洞は、設計値の電界強度がこのパワー領域まで到達していない。一方で、SDTL07 より下流の空洞ではこれらのパワー領域でも不安定な現象は確認できない。ここを境に、チューナ・カプラの位置が SDTL01~06 空洞はギャップ横と SDTL07 以降の空洞は DT 横と、空洞の構造上に違いがある。また、SDTL07 以降の空洞では真空粗挽き系としてオイルフリーのポンプを使用しているという相違点もある。

平成 24 年 3 月の利用運転から SDTL05 空洞の加速電界を設計値より 16% 上げて、不安定領域の上の電界で運転している [9, 10]。現在の J-PARC リニアックの LLRF システムでは自由振動減衰時の位相勾配から離調度を計算し、これをゼロにして共振するように空洞の自動チューナの制御を行っている [7, 8]。不安定領域の上の電界で運転している場合、自由振動減衰時に不安定なパワー領域を通過するため、自動チューナを誤った方向に動かしている可能性が疑われた。高周波波形を解析し、測定した位相の微分から計算した離調度とそのときの空洞パワーとの相関を図 4 に示す。SDTL05 と SDTL06 の空洞の 300~400 kW 領域で計算された離調度が隆起していることが観測された。懸念されていたように、空洞パワーがこの不安定領域を通過する際には、空洞状態の正確な測定できていないと考えられる。また、SDTL01~06 の空洞で 120 kW 近傍域にも規模は小さいが同様な離調度の隆起が確認された。SDTL07 より下流の空洞では、計算された離調度は空洞パワーに依存せず一定である。現在の SDTL05 と SDTL06 の自動チューナ制御では、不安定領域を通過していないときの自由振動減衰時の位相から離調度を計算するように設定している。

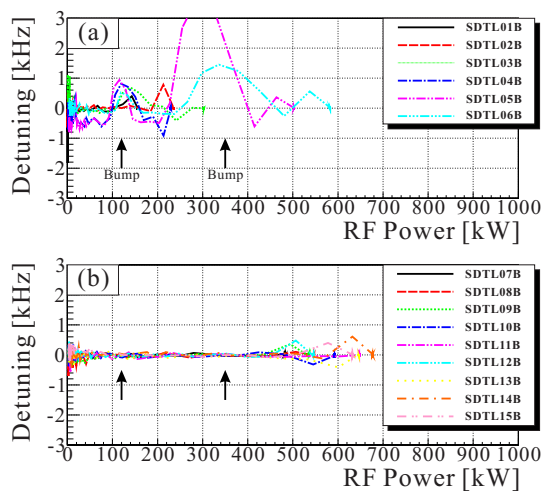


図 4: SDTL 空洞の自由振動のときの位相の傾きから計算した離調度と空洞パワーとの相関。(a) は SDTL01~06 の離調度の空洞パワー依存性を示して、300 kW と 120 kW 近傍のパワー領域で離調度が有限の値を示す。一方で、SDTL07 より下流の空洞 (b) では、これらの領域でも離調しているという結果は出ない。

また、様々な原因調査の中で理由は不明だが、SDTL05 の離調度をマイナスに有限の値に設定してチューナを制御すると、パワーの入らない領域を縮小できることが分かった。実際に、平成 24 年 5 月の Run#43 への運転の切り替え時から離調度を  $-12^\circ$  として運転している。この離調度設定をすることは、ビーム形状には大きな変化をもたらさないが、最終的なビームの通過位置に影響を与えることが分かっている<sup>2</sup>。これは、Digital FB システムにより 2 空洞の電界のベクトル和は一定に保たれているが、僅かにそのバランス (比) が変更したためではないかと考えられる。

シミュレーションと内部監察の結果から空洞壁面でのマルチパクタにより、この現象が引き起こしている可能性が疑われている [6]。また、このパワー領域で空洞内の真空が悪化することもマルチパクタ関与を示唆している。しかし一方で、空洞壁面でのマルチパクタが原因だとすると、SDTL01~06 と SDTL07~15 の空洞の傾向の違いを合理的に説明することができない。真空粗挽き系のポンプの違いはあるが、SDTL07 より上流と下流の空洞での現象の有無が非常に顕著に現れていることから、空洞の構造的な違いが原因であるようにも思われる。平成 24 年夏季シャットダウン中の現在、真空排気系の強化を行うなど、状況の改善に懸命な努力が続けられている。

#### 4. クライストロン高圧直流電源の故障

平成 24 年 3 月 22 日に、RFQ-DTL 用のクライストロン高圧直流電源 HVDC#01 の故障が発生し、利用運転は約 2 週間停止することを余儀なくされた。最終的にはこの高圧直流電源の変圧整流器 HVDPS#01 を破棄し、ACS 空洞用に保持していた別の変圧整流器 HVDPS#11<sup>3</sup> を設置することにより利用運転を再開した。詳細については、参考文献 [11] をご覧になっていただくとして、本稿ではトラブル発生から運転再開までの時系列 (表 1) を紹介する。

表 1: 変圧整流器の故障から運転再開までの時系列

03/22 04:10	HVDC#01 ダウン → ダイオードの一つの故障が疑わしい
03/23 16:00	HVDC#01 復旧計画の打合せ
03/23~29	復旧作業 (ダイオード物理的破損の確認)
03/29	無負荷印加試験 → 50 kV の 30 分持続 → 100 kV 印加直後にダウン ダイオードの別の一つが故障 → 変圧整流器交換のシナリオに変更
03/30~04/04	変圧整流器・RFQ の KLY の交換、調整
04/03	無負荷印加試験, KLY 印加試験 RFQ 用 KLY の高圧エイジング開始
04/04	RFQ の入出力特性測定
04/04~05	RFQ と DTL の LLRF の FB 調整
04/05 09:00	リニアックコミッション開始
04/08 12:09	MLF 利用運転再開
04/08 22:34	NU 利用運転再開

<sup>2</sup> 離調度の変更時にも再度位相スキャンは行っている。

<sup>3</sup> 来年度 (25 年度) のリニアックのエネルギー増強の際に使用する予定であった。



平成 24 年 3 月 22 日の未明に、RFQ-DTL 用の高圧直流電源 HVDC#01 の直流過電流のインターロックが発報して、ビーム運転が停止した。原因を究明すると、変圧整流器 HVDPS#01 内のダイオードの一つが破損しているという重度の故障が疑われた。そこで、HVDPS#01 を運び出し、油中を目視で確認したところ、ダイオードスタック 1 本の物理的破損が認められた。そこで、破損したスタックを保持していた予備品と交換し、変圧整流器を再配置した。しかし、交換後に行った無負荷試験で、100 kV を印加した直後に別のダイオードを破損したことが分かった<sup>4</sup>。そこで、当該 HVDPS#01 を破棄し、ACS 空洞用に保持していた別の変圧整流器 HVDPS#11 を設置するシナリオに変更した。ただし、HVDPS#01 は RFQ 用の 80 kV と DTL 用の 110 kV の 2 つの高圧を引き出すことができる特殊な仕様になっており、変圧整流器の交換は RFQ にも 110 kV を印加することを意味していた。RFQ 用クライストロンは 110 kV に耐圧がなかったために、震災の影響でギャラリのクレーンが自由に操作できない状況で、このクライストロンの交換も余儀なくされた。また高圧印加前に、クライストロン出力後の導波管を取り外し、そこに全負荷ダミーロードの接続する作業を行った。このとき、皮膚にも震災のときに培った自前でやぐらを組み立てる技術が活躍した。これにより、クライストロンを交換して高圧印加後に、迅速にエイジング、特性測定・パラメータ最適化を行うことができた。低電力関係では、LLRF のパラメータを最適化を行うとともに、その Digital FB システムにより高い精度で故障前の電界強度を再現することができ、運転パラメータの最適化の時間を短縮できた。

## 5. cPCI の出力不安定現象

平成 24 年 4 月 8 日に、SDTL01 空洞内電界の振幅と位相が異常値を示す現象が発生した。図 5 (a) と (b) にこの現象が発生したときの振幅と位相のトレンド図を示す。本来、Digital FB システムによって一定に保たなければならない空洞内の振幅と位相が、8 日以降に不可解なスパイクを示していることが分かる。図 6 は空洞ピックアップの出力を検波器を通してオシロスコープで観測したときの結果である。この画像からも不可解な現象が観測できている。また、図 5 (c) のビームロスモニタ (BLM) から、この現象が起因となってリニアックのビームロスの増加を招いていることが読み取れる。この測定電界の不安定現象が発生したときは利用運転中であったために、原因調査は運転を止めずに行えることに限られ、クライストロンより上流側、即ち低電力システムの RF 出力に問題があるところで止まってしまった<sup>5</sup>。4 月 11 日に半日メンテナンスのために利用運転を停止したが、一度 RF を落とすと出力の不安定現象は確認できなくなった。

20 日の半日メンテナンスの後のビーム調整中に、同様な原因と思われる不安定現象が再び SDTL01 ステーション

で発生した。このときに、空洞内の電界を測定している ADC 情報から、IQ 成分の I 成分が不可解な挙動をしていることが分かった。また、cPCI をスポットエアコンで冷却すると、不安定現象が消失した。以上より、同空洞内の電界強度異常は、cPCI のモジュールに起因している可能性が高いと考えられる。このときも、この電界強度の不安定現象は自然に消失し、その後はこのステーションでは確認されていない。

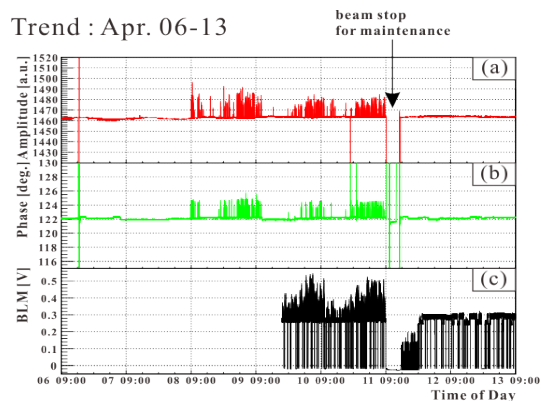


図 5: SDTL01 空洞用の cPCI の出力不安定現象。(a) と (b) は空洞内の電界測定の振幅と位相をトレンド図として示し、4 月 8 日から 11 日まで異常値が測定されていることを分かる。(c) はビームロスモニタの信号値で、電圧が高いほどロスが大きい。このロスモニタは平常運転では 3 V 程度であるが、cPCI の異常出力が見られたときは 4~5 V の電圧出力を示している。尚、11 日の半日メンテナンスの後は、これらの現象は消失している。

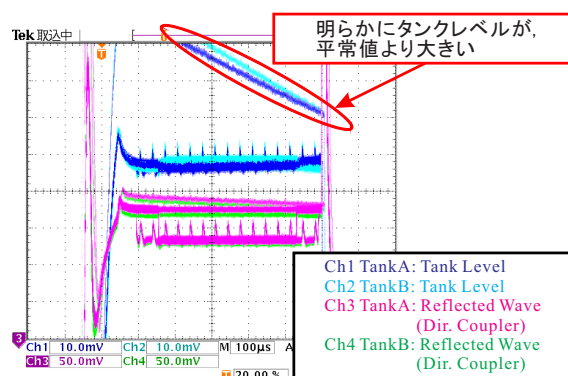


図 6: SDTL01 空洞用の cPCI の出力不安定現象時の空洞タンクレベル。検波器の波形をオシロスコープで観測している。

6 月 18 日の午前中に、今度は SDTL03 で同現象が発生していて、これが起因で後段加速器の RCS で BLM が発報していることが判明した (図 7)。BLM の傾向を分析すると、RCS のアーク部だけでなく、コリメータでもビームロスを発生させている。これから、ビームの運動量が大きく違うことによる縦方向でバケツから漏れるだけでなく水平方向のオプティクスが乱れていることも予想される。RCS の BLM の発報履歴から 6 月 10 日から SDTL03 空洞内の電界強度の不安定現象が生じていたと

<sup>4</sup>後日、HVDPS#01 を開封し確認すると、最初の現象と同様にスタックの物理的な破損があった。

<sup>5</sup>J-PARC リニアックの LLRF システムでは、cPCI の RF 出力は、RF&SW、20 dB アンプ、50 W アンプを通過した後、クライストロンを励振させるために使用される [12, 13]。尚、空洞内の電界強度を一定に保持するために Digital FB システムを活用しており、参考文献中の Analog FB システムは現在では使用していない。

推測される(図8)。6月18日から20日の半日メンテナンスまでの間に RCS BLM で発報した 28 回の内、20 回が SDTL03 の電界の不安定現象と同期していた。上記のように空洞内の電界強度の不安定現象の原因として cPCI モジュールを疑っていたため、20 日の半日メンテナンスのときに SDTL03 の cPCI の DSP/FPGA ボードと IQ ボードを予備品と交換した。これ以降、SDTL03 の不安定現象は観測されていない。

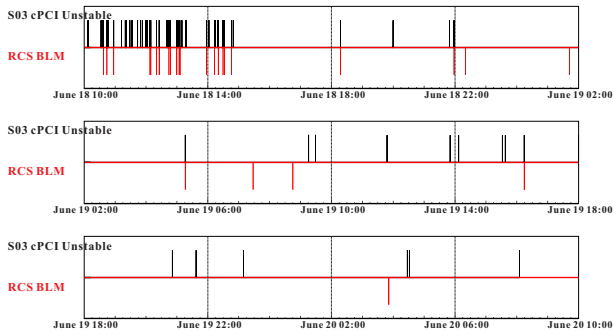


図 7: SDTL03 空洞用の cPCI の出力不安定現象と RCS の BLM 発報との相関。黒線は不安定現象の発生時刻、赤線は RCS の BLM 発報時刻を示す。6 月 18 日から 20 日の間に RCS BLM で発報した 28 回の内、20 回は SDTL03 の不安定現象が起因である。

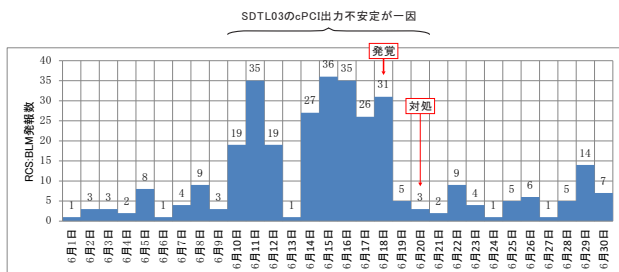


図 8: 平成 24 年 6 月の RCS の BLM 発報数のトレンド図。10 日から BLM 発報数が急激に増加していることが分かる。18 日にこの不安定現象が発覚から 20 日の対処までの間の発報数の減少は、当該 cPCI が設置されているラックを開放したことにより、温度を下げたことに起因すると考えている。

以上より、今回の空洞内の電界強度の不安定現象は、cPCI の FPGA/DSP ボード又は IQ ボードに起因している可能性が高い。cPCI の冷暖に現象の発生頻度が依存していることから、cPCI 本体又はそのボードの熱暴走の可能性も考えられる。しかし一方で、夏季シャットダウンの運転休止中に、今回交換した SDTL03 の 2 枚のボードを同 cPCI に戻して不安定現象を調査しているが、現在までにこの現象を再現させることができていない。尚、平成 24 年 6 月 18 日から夏季シャットダウンの 7 月 2 日まで全ステーションで電界強度の不安定現象の調査を行ったが、不安定現象は確認されなかった。この現象はビームロスに直結することもあり、原因の調査と共に、現象の発生を早期発見する測定システムの構築していく必要がある。

## 参考文献

- [1] K. Hasegawa, "Status of J-PARC Accelerators", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, p.241-245, Tsukuba, Aug.1-3, 2011
- [2] K. Hasegawa, "Status of J-PARC Accelerators", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, WEPS001, Toyonaka, Aug.8-11, 2012
- [3] T. Ito et al., "Recovery Status of J-PARC Linac after Tohoku-Pacific Ocean Earthquake", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, p.1316-1318, Tsukuba, Aug.1-3, 2011
- [4] T. Morishita et al., "Deformation of J-PARC Linac after Tohoku Earthquake in Japan", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, p.814-816, Tsukuba, Aug.1-3, 2011
- [5] M. Kawamura et al., "Present Status of RF Source in J-PARC Linac", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, p.1363-1365, Tsukuba, Aug.1-3, 2011
- [6] T. Ito et al., "Multipactor at SDTL Cavity in J-PARC Linac", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, THPS088, Toyonaka, Aug.8-11, 2012
- [7] T. Kobayashi et al., "Automatic Frequency Matching for Cavity Warming-Up in J-PARC Linac Digital LLRF Control", Proc. of PAC2009, p.2213-2215, Vancouver, Canada, May 4-8, 2009
- [8] T. Kobayashi et al., "Automatic Frequency Matching for Cavity Warming-Up in J-PARC Linac Digital LLRF Control", Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, p.1065-1067, Tokai, Aug.5-7, 2009
- [9] M. Ikegami et al., "Beam Start-up of J-PARC Linac after the Tohoku Earthquake and its beam loss mitigation", Proc. of IPAC2012, p.3293-3295, New Orleans, USA, May 21-25, 2012
- [10] M. Ikegami et al., "Beam Commissioning of J-PARC Linac after Tohoku Earthquake and its beam loss mitigation", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, THPS088, Toyonaka, Aug.8-11, 2012
- [11] M. Kawamura et al., "Present Status of Klystron Power Supply Systems for J-PARC Linac 2012", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, THPS110, Toyonaka, Aug.8-11, 2012
- [12] S. Anami et al., "Control Of the Low Level RF System for the J-PARC LINAC", Proc. of LINAC2004, p.739-741, Lübeck, Germany, Aug.16-20, 2004
- [13] S. Michizono et al., "Digital Feedback System for J-PARC LINAC RF Source", Proc. of LINAC2004, p.742-744, Lübeck, Germany, Aug.16-20, 2004