

J-PARC SDTL で発生したマルチパクタ抑制のための空洞内洗浄について

CAVITY CLEANING FOR SUPPRESSION OF MULTIPACTOR OCCURED AT J-PARC SDTL

伊藤崇^{#,A)}, 森下卓俊^{A)}, 平野耕一郎^{A)}, 北村遼^{A)}, 小林史憲^{A)}, 新井宇宙^{A)}, 南茂今朝雄^{B)},
根本康雄^{C)}, 小坂知史^{C)}

Takashi Ito^{#,A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Ryo Kitamura^{A)}, Fuminori Kobayashi^{A)}, Sora Arai^{A)}
Kesao Nanmo^{B)}, Yasuo Nemoto^{C)}, Tomofumi Kosaka^{C)}

A) J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, B) KEK, C) NAT Corporation

Abstract

The SDTL, which is the main accelerator of the J-PARC linac, has been experiencing a problem in which power cannot be supplied to the SDTL cavity due to an increase in reflected power near the operating power for some of the SDTLs. After investigating the cavity interior and conducting simulations, it was determined that the cause of the problem was multipactors generated on the cavity inner walls. To solve this problem, we have implemented several countermeasures for SDTL cavities, the most effective of which was a cleaning of the inner surface of the cavity. We have cleaned the cavities with acetone, dilute sulfuric acid, and dilute hydrochloric acid, and have been able to eliminate most of the defects in six cavities, including two cavities that were in particularly bad condition. This paper reports on the details of the cleaning of the inner surface of the SDTL cavities that have been carried out so far.

1. はじめに

機能分離型ドリフトチューブリニアック (Separated type Drift Tube Linac : SDTL) は、大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) リニアック施設の主要加速器の一つである。SDTL は 32 台で構成され (S01A, S01B~S16A, S16B)、負水素イオンを 50 MeV から 190 MeV まで加速するために用いられている。

2011 年 3 月の東日本大震災以降、複数台の SDTL において定格電力での運転ができなくなる不具合が発生した[1]。その症状は、定格電力付近では電力を供給しても反射電力が増えるだけで空洞内に電力が供給できない、というものである。このため、この不具合の領域を避け定格電力以上の電力を空洞に投入して運転を継続してきたが、幸いなことに、定格電力以上の電力領域では SDTL の運転は安定していたため、ユーザーに対するビームの供給には支障がでなかった。この不具合解消のため、空洞の調査及び電磁場解析のシミュレーションを行った結果、不具合の原因は空洞内表面で発生しているマルチパクタであることが判明した[2]。本稿では、不具合解消のために行った対策の中から、空洞内壁面の洗浄について報告する。

2. 不具合症状

定格運転電力付近で電力を投入できない、という不具合の症状が顕著になったのは 2011 年 3 月の東日本大震災の復旧作業後である。S05A~S06B の 4 台の空洞で症状が顕著になり、とりわけ S05A 及び S05B の定格運転電力はこの領域に含まれるため定格運転が不可能となり、定格運転電力より高い電力で運転をしなければならぬ状態であった。Figure 1 は空洞表面でマルチパ

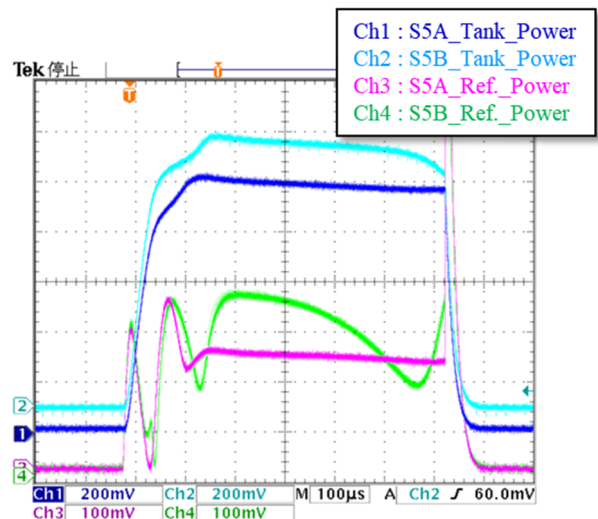


Figure 1: Macro-pulse waveform of SDTL05A and 05B in multipactor region.

クタが発生する電力領域 (以後、不具合領域と記載) にある時の S05A 及び S05B 空洞に装着したピックアップモニタの測定波形、及び反射電力のマクロパルス波形である。マクロパルスの途中で波形がいびつに変形し、空洞内に正常に電力が投入できていない。

Figure 2 は S05B の空洞内電力 (空洞に設置したピックアップモニタで測定した電力) に対する VSWR であり、3 つのデータはそれぞれ測定時期が異なっている。空洞投入電力が約 250 kW までは VSWR は一定であり、250 kW を超えると徐々に増加する。その後約 300 kW から約 450 kW の間では空洞に対して正常に電力が投入できないためプロットできるデータが取得できない。およそ 450 kW 以上の電力になると再び問題なく電力が投入可能になり VSWR は一定になる。不具合領域の下限值

[#] itou.takashi@jaea.go.jp

は測定時期が異なっても同一であるが、上限値時間が経つと電力が高い方向に拡大している。

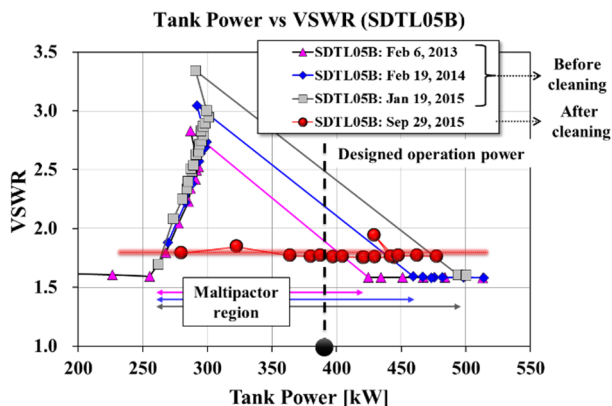


Figure 2: VSWR as a function of tank power before and after cleaning (S05B).

S05B (S05A も同様) は定格運転電力が不具合領域内であり、S06 は不具合領域の上限より数十 kW 程度しか離れていなかったため、不具合を解消、抑制するための効果的な対策が求められていた。

3. 空洞内洗浄

S05A 及び S05B に対しては、空洞内洗浄を実施する前にも、真空ポンプの交換や増強、装着機器の交換などいくつかの対策を実施してきた[3]。これらの対策は効果があり不具合領域は縮小したが、その効果は一時的なもので、不具合領域は徐々に再拡大していた。このため、不具合症状を根本的に解決するための別の対策を施す必要があった。

3.1 アセトン洗浄

S01A から S06B では、震災以前は粗排気用にロータリーポンプを使用していた。このためオイルが蒸発して空洞内壁に付着しマルチパクタの症状が悪化した可能性を疑っていた。そこで空洞内の油分除去を目的としてアセトン洗浄を実施した。油分を除去することでマルチパクタを抑制し不具合領域を消失させること、最低でも定格運転電力にかからない程度にまで不具合領域を縮小し再拡大しない状態にすることを期待した対策である。

ビームライン上では洗浄作業を行うための広い空間が確保できないことから、SDTL 空洞本体を加速器トンネル内のメンテナンスエリアに移動した後、洗浄作業を実施した。洗浄部位は空洞本体の内壁表面だけでなく、端板表面(空洞内壁になる側)やチューナー等の空洞装着機器の表面など、基本的に真空引きされる箇所全てを洗浄の対象とした。ただし、ドリフトチューブとステム部は洗浄作業中に誤って大きな力を加えて動かしてしまうリスクを考慮して、洗浄対象部位から外した。

最初のアセトン洗浄は 2015 年夏季メンテナンス時に当時最も不具合状態が悪化していた S05B 空洞に対して実施した。洗浄作業方法は単純で、拭き取り用のワイピングクロスや綿棒にアセトンを染み込ませ、空洞内壁(真空面)を拭き取り、最後に全体をアルコールで拭き取

る、というものである。空洞本体及び端板の一度目のふき取りでは、ふき取り後の布の表面にはオイルと思われる黒い汚れが付着した (Fig. 3)。アセトンによる拭き取りを黒い汚れの付着がなくなるまで繰り返し、最終的にエタノールで拭き上げた。

洗浄作業後に布に付着した汚れの成分分析を実施し、黒い汚れの成分とロータリーポンプ用オイルの成分の赤外吸収スペクトルは良く一致していることが判明した。このことから空洞内壁面にはロータリーポンプ用オイルが付着していたと考えている。

アセトン洗浄作業後の電力投入では、洗浄前の不具合電力領域で真空度の悪化がみられたものの、反射電力が増えることはなくなり正常に電力が投入できるようになり、不具合領域は消失した。これはアセトン洗浄後もマルチパクタは発生しているが、洗浄によりマルチパクタが抑制された状態となり、空洞内に電力が投入できなくなる現象が解消した、と推測している。その後、S05B の状態は変化がなく、定格運転付近の電力領域で電力が投入できない(運転できない)という不具合は解消した。

この結果から、アセトン洗浄は空洞内壁面のマルチパクタ抑制に効果的であると判断し、2016 年以降数年間に



Figure 3: Wiping cloth after wiping inner surface of the end plate of S05B.

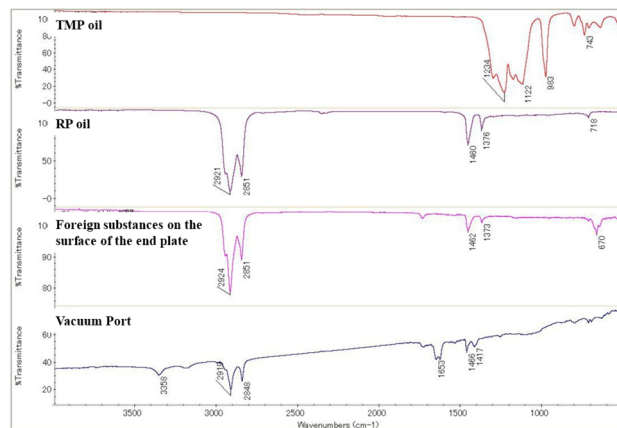


Figure 4: Infrared absorption spectra of the vacuum pump oils and the foreign substances on the wiping cloths.

分けて、S04A、S04B、S05A (3 回実施)、S06A 及び S06B に対してアセトン洗浄を実施した。これらの空洞のうち、S04A、S04B は定格電力での運転は可能であったが、わずかにマルチパクタの発生する電力領域内であったため、状態の悪化を防ぐ予防保全のために洗浄を実施した。洗浄後の測定では不具合領域は洗浄前とほぼ同じ状態が残っていたが、定格運転が可能であった。

S05A 空洞では、一度目の洗浄後、不具合領域が残っていたものの大幅に縮小していた。しかしながらその後不具合領域は徐々に拡大し、洗浄前の状態に戻った。このため、最初の洗浄で不具合領域が残ったのは拭き残しがあるからではないかと推測して二回目の洗浄を実施した。その結果、不具合領域はほぼ消失した状態まで回復したが、残念ながら不具合領域は短期間で再拡大し、洗浄前と同等の状態となった。三回目の洗浄は再度洗浄を行えば再拡大がしなくなることを期待して実施したものであるが、その結果は 2 回目と同様、不具合領域はほぼ消失していたが短期間で拡大し、洗浄前の状態に戻る結果となった。

S06A、S06B はマルチパクタによる不具合症状は解消し、定格運転電力での運転が可能となった。

3.2 酸洗浄

アセトン洗浄は、マルチパクタの発生を抑制し不具合領域を縮小・消失させ、定格電力での空洞運転可能とする有効な対策であったが、S05A ではその効果は洗浄後の一時的なもので、不具合領域が洗浄前の状態に戻ってしまう結果となった。そこで次の対策として空洞内の酸洗浄を実施した。アセトン洗浄は油分を除去するのみであるが、酸洗浄は空洞内表面の酸化銅を溶かすため、より直接的に空洞内表面状態を改善できることを期待した対策である。

2020 年に S05A に対する酸洗浄を実施した。用いた酸は 3% 希硫酸である。基本的な手順は以下の通りである。

1. アセトン又は洗浄剤による洗浄 (油分除去)
2. 水洗 (複数回)
3. 乾拭き
4. 酸洗浄 (希硫酸、又は希塩酸)
5. 水洗 (複数回)
6. 乾拭き
7. アルコール置換

S05A の洗浄では、過去に三回アセトン洗浄を実施しているため 1~3 の手順は省略した。作業方法はアセトン洗浄と同じで、ワイピングクロスや綿棒に染み込ませた希硫酸、水あるいはアルコールで空洞内壁 (真空面) を拭き取る、というものである。

酸洗浄により、空洞に円筒状に生じていた黒い変色が取れ銅の光沢となり、その他の変色していない部位 (銅色の部分) は、拭き取り直後はより光沢が戻っていた。洗浄後の測定結果はアセトン洗浄とほぼ同様で、不具合領域はほぼ消失したもののその後不具合領域が拡大した。アセトン洗浄と酸洗浄の結果を比較すると、不具合領域の拡大の速さが異なっていた。アセトン洗浄では不具合領域の拡大が早く、洗浄後一月程度で洗浄前の状

態に戻っていたが、酸洗浄では拡大の速さが緩やかであり、一年程度かけて徐々に洗浄前の状態に戻る程度の速さであった (Fig 5)。

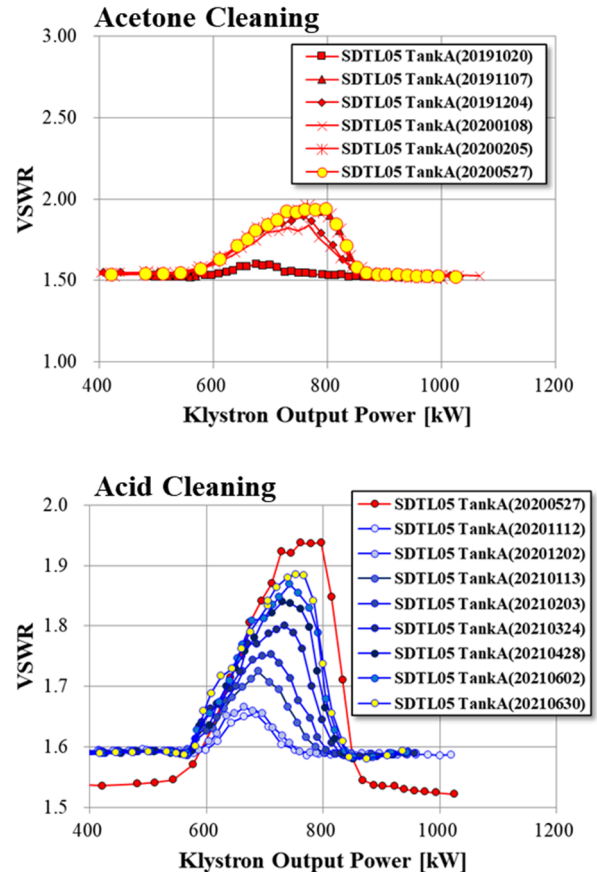


Figure 5: VSWR as a function of klystron output power of S05A with acetone cleaning and acid cleaning.

我々は、この拡大速度の違いがマルチパクタ発生の抑制効果の違いであると考え、翌年 (2021 年 8 月) に二度目の酸洗浄を実施した。洗浄後、不具合領域は消失し、不具合領域の再拡大も 2022 年 6 月時点まで発生していない。この結果から、S05A 空洞の不具合症状は解消し、定格電力での運転が可能になったと判断している。

また、S05A の酸洗浄が有効であったことから、2022 年 8 月に S04A 及び S04B 空洞に対しても不具合領域の解消を期待して酸洗浄を実施した。S04A、B の洗浄ではアセトンの代わりに洗浄剤を用い、また希硫酸の代わりに希塩酸を用いたが、酸洗浄後の空洞内部の状態など観察結果に違いは見られなかった。本稿執筆時点では、両空洞に対してまだ電力を投入していないためマルチパクタが抑制されたか否かは不明である (が、抑制されていることを期待している)。Table 1 にこれまでに実施した SDTL 空洞洗浄の履歴を示す。

Table 1: Cleaning History of the SDTL Cavity

	S04A	S04B	S05A	S05B	S06A	S06B
				Acetone Disappeared		
2016			Acetone Remained → Expand		Acetone Disappeared	Acetone Disappeared
2017	Acetone Remained	Acetone Remained	Acetone Remained → Expand (fast)			
2018						
2019			Acetone Remained → Expand (fast)			
2020			DSA Remained → Expand (slow)			
2021			DSA Disappeared			
2022	DHA (Before power supply)	DHA (Before power supply)				

DSA : Dilute sulfuric acid
 DHA : Dilute hydrochloric acid

参考文献

- [1] T. Ito *et al.*, “Multipactor at SDTL Cavity in J-PARC Linac”, in Proc. the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2012, paper THPS088, pp.1152. (in Japanese).
- [2] T. Ito *et al.*, “MULTIPACTOR PROBLEM OF J-PARC SDTL”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark (2017).
- [3] T. Ito *et al.*, “COUNTERMEASURE OF THE MULTIPACTOR AT SDTL CAVITY IN J-PARC LINAC”, Proceedings of the 10th Meeting of Particle Accelerator Society of JAPAN (2013).

4. まとめ

J-PARC リニアック施設の主要加速器である SDTL では、震災後、一部の空洞に対して定格運転電力を投入できない不具合が発生していた。その原因は、空洞表面で発生していたマルチパクタであり、我々マルチパクタ解消のため、空洞内部の洗浄を行った。最初に行ったのはアセトンを用いた洗浄で、空洞内表面に付着している油成分を取り除くことを目的として実施した。アセトン洗浄は効果的であり、症状の重かった四空洞のうち S05B、S06A、S06B の三空洞でマルチパクタの発生を抑制し、定格運転電力を投入可能な状態に回復させた。次に、空洞内壁面の状態をさらに改善することを目的として残りの一台に対し酸洗浄を行った。その結果、S05A 空洞もマルチパクタの発生が抑制され、定格運転電力を空洞に投入可能な状態に回復させた。

今後も同様の不具合が発生する可能性はあるが、その対処方法としての洗浄方法が確立されたことは、今後の J-PARC リニアックの運転に安心感を与える非常に有意義なことであった。また、問題の発生から解決までの一連の経過が示すものは、空洞内面を常に清浄に保つことが空洞の安定運転に直結する、というごく基本的なことであり、メンテナンス作業だけでなく、加速器開発を行う際の教訓となるものである。

謝辞

成分分析に関して多大な御協力を頂きました KEK 放射線科学センター環境計測グループの方々には厚く御礼申し上げます。また、空洞洗浄作業全般に対して御助力を頂いた三菱電機システムサービスの方々には深く感謝いたします。