

J-PARC SDTL 空洞内マルチパクタ対策

COUNTERMEASURE OF THE MULTIPACTOR AT SDTL CAVITY IN J-PARC LINAC

伊藤崇^{#,A)}, 平野浩一郎^{A)}, 杉村高志^{B)}, 南茂今朝雄^{B)}
 Takashi Ito^{#,A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Takashi Sugimura^{B)}, Kesao Nanmo^{B)}
^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency
^{B)} KEK

Abstract

The Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) facilities were extensively damaged by the Great East Japan Earthquake on March 2011. We restarted the beam operation in December 2011 after the recovery works. However, a multipactor problem of SDTL5B cavity was occurred after the beam restoration. To solve this problem, we performed the analysis of the impurities on the inner surface of the cavity, adopted the countermeasure that is the improvement of the vacuum condition of the cavity and performed the conditioning of the cavity carefully in the summer maintenance period of 2012. By adopting the countermeasure and conditioning, the multipactor problem improved just after the beam restoration and the operation power had been decreased. We present the result of the countermeasures and the present operation status of the SDTL5 in this report.

1. はじめに

J-PARC リニアック部の加速空洞である SDTL は、東日本大震災後の復旧作業の後、2011 年 12 月からビーム加速を再開した。復旧後の運転において、SDTL05B 空洞はおよそ 300kW~400kW の領域で空洞内に電力が投入できず反射のみが増加するという症状を呈した^[1-2]。これまでにを行った原因調査及びシミュレーション結果から、この症状の原因は空洞内で発生しているマルチパクタである可能性が高いことが判明した。空洞内表面は震災後に高湿度の大気に長時間晒されたことからマルチパクタの症状が顕著に表れた可能性があり、この症状を改善させるため、2012 年の夏季メンテナンス期間に SDTL05B 空洞内表面の不純物の成分分析を行うとともに、温水ベアキング、真空ポンプの増強とオイルフリー化などの対策、及び運転前の空洞コンディショニングを慎重に行った。この結果、マルチパクタの症状が改善し空洞に電力が入らない不具合領域が縮小した。本学会では、SDTL05B 空洞の調査結果、及び不具合対策の結果について報告する。

2. 震災後の SDTL05B 空洞

J-PARC で利用している機能分離型ドリフトチューブリニアック (Separated type Drift Tube Linac : SDTL) は一般的なアルバレ型の加速空洞である。ビーム収束用の電磁石を SDTL 空洞間に設置し、ビーム加速とビーム収束の機能を分離するので、機能分離型と呼ぶ (J-PARC の DTL では、収束用電磁石はドリフトチューブに内蔵している)。SDTL 空洞は全 32 台、不調となった SDTL05B 空洞は SDTL 区間の 10 番目の空洞である。SDTL05B の主要パラメータは表 1 の通りである。

Table 1: Main Parameter of SDTL05B

Diameter	560mm
Length	1818mm
Operation frequency	324MHz
Energy	80MeV - 85MeV
Electric field strength	3.44MV/m
Operation Power	370kW
Cell No.	5

不具合の症状は震災前から観測されていたが運転に支障が出るほど深刻なものではなかった。震災後に顕著になった SDTL5B の不具合症状は以下の通りである。

- 空洞内投入電力 250kW 程度から徐々に空洞内に電力が入りにくくなり反射が増える (VSWR が増加する)。
- 300~400kW の領域では、クライストロンからの出力電力を増加させても空洞内の投入電力が 300kW のまま増えず、反射だけが増える。
- 400kW 以上になると、~250kW までと同様に問題なく空洞内に電力が入るようになり反射も減る (VSWR が元に戻る)。

この不具合の原因調査のため、空洞内部を観察したところ、空洞内壁面に帯状の変色が観測された。この帯状の変色は全てのギャップの側面に位置する場所で見られ、空洞円周方向全体に渡って発生していた。この観測結果から、空洞内壁面においてマルチパクタが発生していることを疑い、CST Micro Wave

itou.takashi@jaea.go.jp

Studio を用いてシミュレーションを行った結果、250kW~400kW 程度の電力を投入した時に空洞内壁面の変色位置でマルチパクタが発生していることが示された。

SDTL05B の震災前の運転電力は 370kW であり、まさにこの不具合領域と重なるため、震災後に再開したビーム加速に支障をきたした。このため、震災直後の運転では約 440kW、その後次第に不具合領域が広がったため、2012 年の夏季メンテナンス前には通常運転の 1.4 倍の電力となる 510kW で運転を行った。

この場合、SDTL05B からのビーム出射エネルギーが増加することになるが、SDTL06B 空洞の運転電力を下げることによって SDTL06B からの出射エネルギーが通常の運転と同一になるように調整している。空洞への投入電力を増やしたものの空洞の運転は安定している。夏季メンテナンス以降これまでの運転において、SDTL05B トリップ回数が増えるようなこともなく、またビーム運転を停止するような不具合も発生していない。

3. 症状改善のための対策

2012 年の夏季メンテナンスにおいて、症状を改善させるべく以下の調査や対策を行った。

- 空洞内不純物の成分分析
- 粗引き用ポンプのオイルフリー化
- 真空配管交換
- 空洞の温水ベーキング
- カプラーループの向きの変更

以下に詳細を述べる。

3.1 空洞内不純物の成分分析

加速空洞の大気 (N2) 解放時に、RF カプラーポートから腕を入れ、空洞内壁からサンプル試料を採取した。試料の採取はメンブランフィルターによる擦り取り及び電導性両面テープによる粘着で行った。採取した試料に対し、ラマンスペクトル分析及び SEM-EDX 分析 (走査型電子顕微鏡 : Scanning Electron Microscope、エネルギー分散型 X 線分光法 : Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) を行った。

- ラマンスペクトル分析

Figure 1 に採取した試料の拡大写真を示す。メンブランフィルターの拭き取り試料を用いたラマンスペクトル分析では、ラマンスペクトルを与えない微粒子 (Figure 1 の緑色の○)、有機物又は不定形炭素と考えられる微粒子 (水色)、炭酸塩微粒子 (赤) 及び硫化モリブデン微粒子 (黄色) が観測された。

観測されたスペクトルの例を Figure 2 及び 3 に示す。有機物又は不定形炭素と考えられる微粒子 (水色) もまた多く見つかっている。これらの微粒子のラマンスペクトルには、約 1350cm⁻¹ 付近、および 1545~1590cm⁻¹ にブロードなピークが観測され、不定形炭素のピークであると同定した。ただし、励起レーザーにより元々あった有機物が分解してしまっ

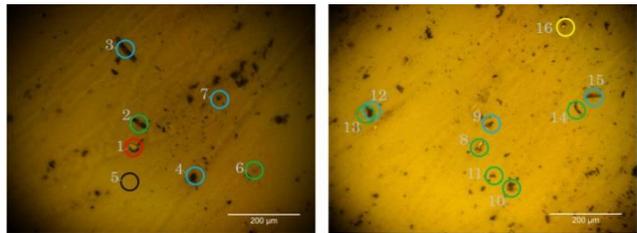


Figure 1: Photograph of the sample particle on the filter.

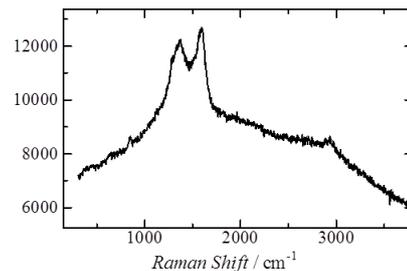


Figure 2: Raman spectrum (cyan circle).

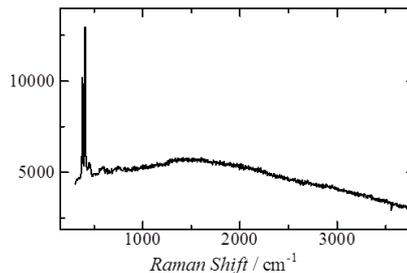


Figure 3: Raman spectrum (yellow circle).

た可能性も否定できない。(Figure 2)

硫化モリブデンも見つかった。382, 407cm⁻¹ に硫化モリブデン (MoS₂) に特徴的な鋭いダブルレットピークが観測された。おそらく (本来あってはならないことであるが、) 潤滑剤に使用したモリブデンペースト由来のものであろう。(Figure 3)

ラマンスペクトルを与えない微粒子 (緑) は多く見つかっており、下地のメンブランフィルターのスペクトルが弱く観測、又はその蛍光によるバックグラウンドしか観測されない。これは金属微粒子ではないかと考えられる。

また、数は少ないが炭酸塩微粒子 (赤) も見つかっている。712, 1085cm⁻¹ に炭酸塩 (CO₃²⁻) に帰属できるシャープなピークが観測された。これは、例えばアルカリ+CO₂ で生成される。

- SEM-EDX

メンブランフィルターで拭き取った試料の SEM-EDX 分析でも多くの成分が観測された。ラマンスペクトル分光法で観測された成分の他、金属の銅、鉄・ステンレス微粒子、また黒雲母やシリカアルミナ系、シリカ系の微粒子も観測された。

測定の一例として、金属ステンレス微粒子の測定結果を Figure 4 に示す。写真中の黄色の丸が測定部

分、そこで測定されたスペクトル図とその成分表である。スペクトルには鉄、クロム、ニッケルのピークが測定されており、この粒子がステンレスであることが判る。(観測された多数の微粒子に対し、同様の測定を行っている)。

銅微粒子の大きさは $5\mu\text{m}$ 以下で小さいものが多い。金属銅は空洞内壁の銅メッキが擦り取られたものである可能性が高い。また、ドリフトチューブやコンタクターも銅製であり、空洞組立時に擦れたものが空洞内に残っていた可能性も考えられる。

鉄・ステンレスの微粒子の大きさは銅よりも大きく $10\sim 30\mu\text{m}$ 程度である。空洞本体が鉄製、端板がステンレス製であることから、組立時にメッキされていない部分がこすれて取れた可能性がある。また組立に使用しているボルト・ナット類由来の可能性も否定できない。

黒雲母、シリカ・アルミナ系、シリカ系の微粒子はいわゆる「砂」の微粒子であると考えられる。メンテナンス時に、RF カプラーやチューナー取り付けポートから空洞内に入ったと考えられるが、由来は不明である。

伝導性のテープでの拭き取り試料に関しても同様に SEM-EDX を行った。測定からは、亜鉛微粒子、ケイ素・チタン・硫黄を含む微粒子、鉄の酸化微粒子、ケイ素を含む繊維状の物質などが見ついている。また、非常に薄い薄片状の試料が採取されており、測定結果によるとこの薄片は酸化アルミニウムと考えられる。亜鉛の由来は不明であり、酸化アルミニウムは RF カプラーのセラミック窓の材質であるが、空洞内に存在する理由は不明である (RF カプラーも損傷などはしていない)。

ラマンスペクトル分析及び SEM-EDX の結果から、空洞内には有機物、金属、砂 (土)、潤滑剤など、本来空洞内には存在しない物質が多数存在しており、その由来のほとんどは不明である。換言すれば、SDTL05B 空洞の内部は、通常の加速器であれば考えられないほど異物が混入している、と言える状態であった。

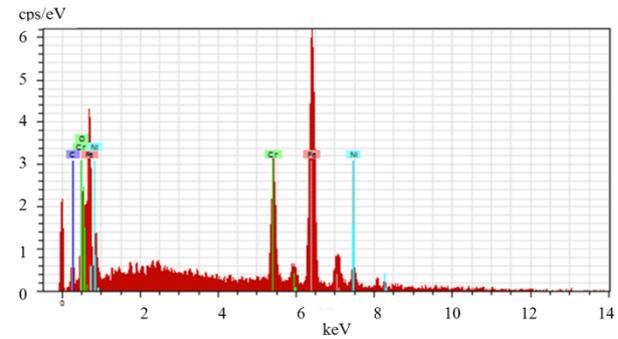
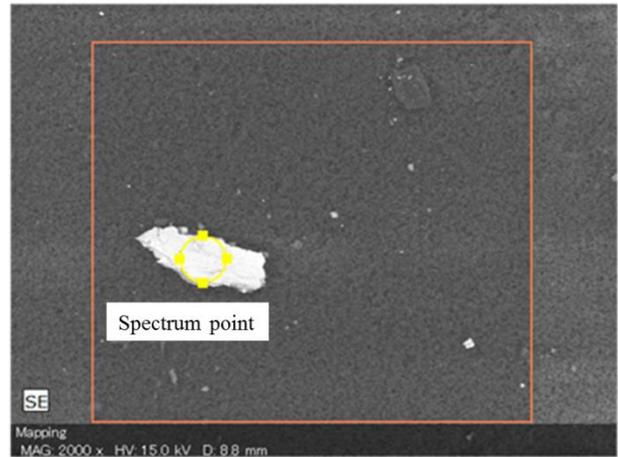
3.2 粗引き用ポンプのオイルフリー化

我々は、マルチパクタの原因の一つが空洞内壁の汚染であると考えており、その汚染状態を少しでも改善するため、粗引き用ポンプとして使用していたロータリーポンプをオイルフリーポンプ (ルーツポンプ) に変更した。

実際に粗引き用ポンプを使用するのはメンテナンス後の数日間、あるいはユーザーの利用運転中にイオンポンプが停止してしまった時だけであり、稼働時間は非常に少ない。それでもロータリーポンプのオイルが空洞内に入っていた可能性はあり、オイルフリー化によりこの可能性をなくした。

3.3 真空配管交換

ロータリーポンプのオイルが空洞内に入っていた場合、粗引きポンプから空洞までの真空配管もオイルによって汚れていると考えられる。よって、粗引きポンプのオイルフリー化と併せて、真空配管とバ



Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	26	K-series	67.01	50.36	1.6
Chromium	24	K-series	17.33	13.99	0.4
Carbon	6	K-series	6.97	24.34	1.6
Nickel	28	K-series	6.04	4.32	0.2
Oxygen	8	K-series	2.66	6.99	0.7
Total:			100.00	100.00	

Figure 4: Raman spectrum (red circle).

ルブを全て新品と交換した。

3.3 イオンポンプ及び配管交換

空洞をマルチパクタ領域で長時間運転してきたことにより、排気能力が下がってきている可能性を考慮し、イオンポンプを新品と交換した。またこの時空洞とイオンポンプ間の配管の長さを 10cm 短いものと交換した。これらの対策により、わずかではあるが真空度の改善が期待できる。

3.4 空洞の温水ベーキング

粗引きポンプの交換及び真空系配管の交換の後、空洞内壁の状態を改善するため、加速空洞本体の温水ベーキングを行った。通水は空洞本体、端板及びドリフトチューブに対して行い、水温は最大 50°C である。ベーキングは 96 時間連続で行い、最大温度である 50°C は約 39 時間キープした。

Figure 5 は水温 50°C からの温水ベーキング時の

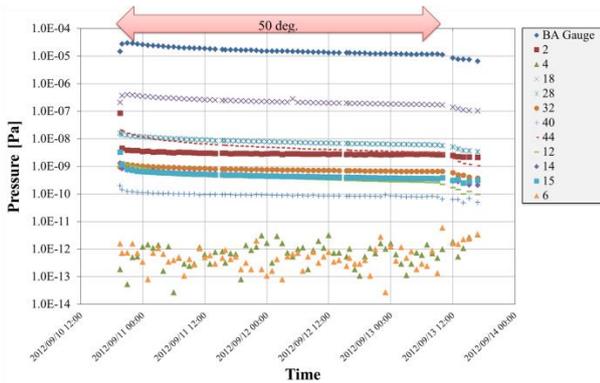


Figure 5: Total and partial pressure in the SDTL05B.

BA ゲージで測定空洞内真空度、及び Q マスフィルタの測定結果である（ベーキング開始から 50°Cまでは測定系の不具合でデータが取得できなかった）。水（mass18）が多いのは、真空配管交換時に空洞を大気（N2 パージ）にしたためである。時間と共に真空度は改善している様子が判る。真空状態が改善しているようにも見えるが、最終的な真空度は温水ベーキング前後でほとんど変わらず有意な差は見られなかった。ベーキングにより空洞内壁の状態を改善させるためには、もっと温度を上げ水分を飛ばす等の方法が必要であるが、端板の真空シールにインジウムメッキが施されていること、及び高温時にドリフトチューブのアライメントがずれる可能性があるためこれ以上の昇温はリスクが高く難しいと判断した。

3.5 カプラーの向き変更

空洞内壁の変色位置が RF カプラー先端部分と重なっており、カプラーの縁の一部が変色していた。即ち、カプラーでマルチパクタが発生していた可能性がある。この可能性を低減させるため、カプラーの位置をマルチパクタによる変色部分と離すよう変更した。

Figure 6 は変更前後のカプラーの位置を示した図である。マルチパクタが空洞円周全体に渡って発生していると考えれば、この向きの変更では結

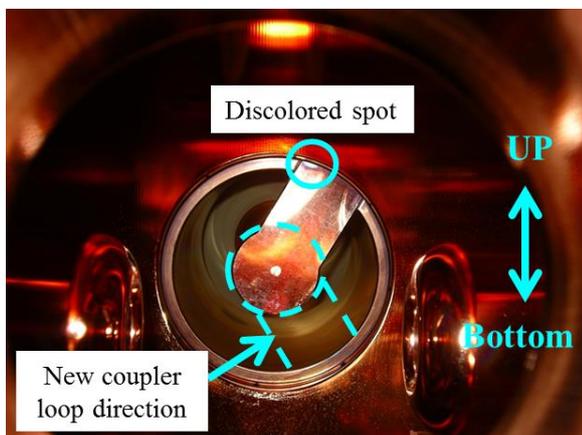


Figure 6: Coupler loop direction.

局のところカプラーでマルチパクタの発生部分が変わるだけである。しかしながら、空洞内の観察から各種ポート付近では変色が薄いことが判っている。ポート付近では電場が乱れマルチパクタが発生しにくいと想定される。SDTL 空洞の下部には真空ポートがあり空洞内壁の変色は空洞上部や側面と比較して薄い。このため、カプラーの向きを下側に変更することでマルチパクタの影響を低減できる可能性がある。よって、カプラーの向きを上側から下側に（カップリングも位相も変わらぬよう、水辺軸に対し対称な位置に）変更した。

3.5 コンディショニング

真空関係及び RF カプラーの対策を行った後、加速空洞のコンディショニングを行った。Figure 7 は SDTL05B のクライストロン出力電力（KLY_Pf）に対する空洞投入電力（TK：左縦軸）と反射電力（Pr：右縦軸）を示している。

TK では下側に凸になっている部分、Pr では上に凸になっている部分がマルチパクタ領域である。KLY_Pf を増やしても TK があまり増加せず Pr が増加している。すなわち、この領域では空洞内に電力が入らないことを示している。

オレンジ色は震災前の状態で、マルチパクタの領域が非常に少ない。通常の運転電力である TK370kW ではマルチパクタの領域を超おり、ビーム運転に支障は出ていなかった。黒色は 2012 年の夏季メンテナンス直前の状態で、運転電力は 510kW まで悪化している。緑色・青色、赤色は 2012 年夏季メンテナンス後のコンディショニング途中の三日間の状態を表している。コンディショニングを続けるにつれ、徐々にマルチパクタ領域が減少している様子が判る（凸の領域が減っている）。パルス幅は 200μsec であるが 650μsec まで伸ばした時もマルチパクタの領域は変化しない。次節で述べるように、真空対策、RF カプラー対策及びコンディショニングにより空洞の状態は最終的に運転電力 TK を 470kW とする状態に改善した。

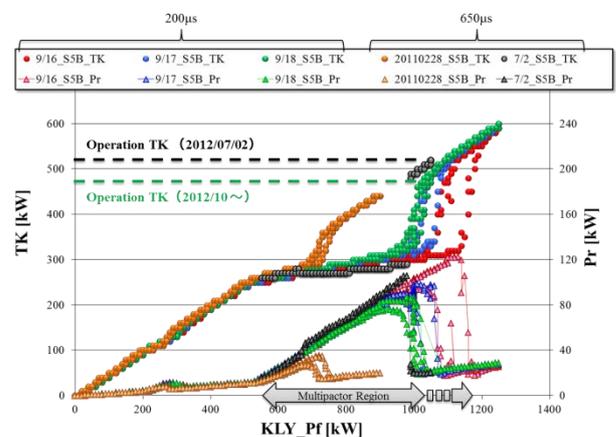


Figure 7: Tank input power and RF reflection power as a function of the klystron output Power at SDTL05B

4. 対策後の状況

前項で述べた対策、及び対策後のコンディショニングの結果、マルチパクタによる不具合領域はほぼ震災直後の状態まで改善し、2012年10月からのビーム運転ではSDTL05Bを440kWで運転可能な状態まで回復した。ビーム利用運転では、状態が悪化した場合でもビームを停止させぬよう若干余裕を持たせ470kWでの運転とした。

2013年5月のビーム停止まで470kWで運転を行ってきたが、懸念していたように空洞の状態は徐々に悪化してきていることが判明した。Figure 9は空洞内でマルチパクタが発生する上限値の時のクライストロンからの出力電力をプロットしたものである（これ以上の電力であればマルチパクタが発生しないため、問題なく空洞に電力が投入できる）。

ハッチング箇所は2012年の夏季メンテナンス時であり、メンテナンス後に不具合領域が改善し低い電力も投入できるようになっていることが判る。その後次第にマルチパクタ領域の上限値が増えており、不具合領域が拡大していることが判る。

SDTL05B以上にこの悪化傾向が顕著に表れている空洞がSDTL06A空洞である。このため2013年の夏季メンテナンスにおいて、SDTL05Bと同様、真空対策を行う予定である。

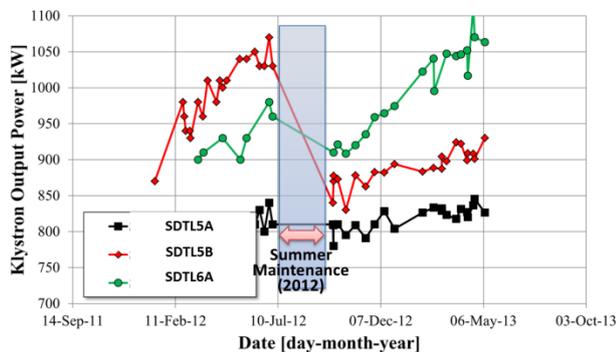


Figure 7: Higher end limit of multipactor region.

5. まとめ

2012年の夏季メンテナンス時に、SDTL05B空洞内の不純物を分析した結果、通常では考えられないような様々な物質が観測され、空洞内がかなり汚れていることが判明した。

2012年の夏季メンテナンスでは、真空状態の改善を目的として、粗引き系真空ポンプの交換や温水ベーキングを実施し、また、マルチパクタの影響を低減するためにカプラーループの向きの変更を行った。この結果、夏季メンテナンス後のマルチパクタによる不具合領域は縮小し、震災直後の運転電力である440kWでの運転が可能状態まで改善した（ビーム運転は470kWで実施）。

しかしながら、空洞の状態はメンテナンス後に徐々に悪化していることが観測された。この状態はSDTL05B空洞以上にSDTL06A空洞で顕著に測定されている。このため、2013年夏季メンテナンスにおいて、SDTL05B空洞と同様、真空対策をSDTL06A空洞に対して行う予定である。

謝辞

KEK放射線科学センター環境計測グループの文珠 四郎秀昭氏と平雅文氏には成分分析に関して多大な御協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

空洞夏季メンテナンスの現場作業全般に御助力して頂いた三菱電機システムサービスの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Ito, et al, J-PARC SDTL 空洞内マルチパクタに関する検討, 第九回加速器学会年会プロシーディングス集, THPS088
- [2] T. Ito et al., "RECOVERY AND STATUS REPORT OF DTL/SDTL FOR THE J-PARC AFTER EARTHQUAKE, Proc. of LINAC12, Tel-Aviv, Israel (2012), TUPB100.