

Multipactor at SDTL Cavity in J-PARC Linac

ITO Takashi ^{#,A)}, HIRANO Koichiro ^{A)}, NANMO Kesao ^{B)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

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

^{B)} KEK

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

Abstract

After the recovery works from an earthquake, we started a high power conditioning of a DTL and an SDTL on November 2011 and restarted a beam acceleration on December 2011. The operation of the DTL and the SDTL was stable as with the operation before the earthquake without SDTL05B cavity. It was impossible to input an rf power into the SDTL05B in the about 300kW to 400kW range. Therefore the operating power was increased to 510kW that is about 1.4 times those of before the earthquake. We have investigated the cause of this malfunction of SDTL05B, and a computer simulation showed that it is likely to be caused by a multipactor on the surface of the cavity wall. In this paper we present the result of the simulation, the various measurements and the countermeasure.

J-PARC SDTL 空洞内マルチパクタに関する検討

1. はじめに

J-PARC リニアック部の加速空洞である DTL (Drift Tube Linac) 及び SDTL (Separated type DTL) は、2011 年 3 月の東日本大震災により大きな被害を受けた^[1]。復旧作業は 4 月から 10 月まで行われ、11 月からのハイパワーコンディショニングの後 12 月からビーム加速を再開している。復旧後の DTL 及び SDTL 空洞は、ほぼ震災前と同様の安定な運転を維持している。ただし、SDTL05B 空洞は、震災前の運転電力 (370kW) で運転することができず、約 1.4 倍の電力 (510kW) を投入して運転している状況である。現在この不具合の原因究明を進めており、シミュレーションの結果は空洞内で発生しているマルチパクタが原因である可能性を示した。本稿では、空洞内マルチパクタに関するシミュレーション結果、これまでにを行った各種測定及び対策、並びにそれらに関する考察を報告する。

2. SDTL05B 空洞

J-PARC で使用している SDTL 空洞 (SDTL05B 空洞、以下 S5B) の主な特徴は以下の通りである。また、表 1 に S5B 空洞の主要パラメータを示す。

- 空洞材質は鉄、内壁表面に銅電鍍が施されている。ドリフトチューブ (DT) やチューナーなどの装着部品の材質は、無酸素銅あるいは SUS に銅電鍍／銅メッキである。
- SDTL 区間の 10 番目の空洞であり、空洞径は 520mm、空洞長 1818mm、セル数は 5 である。
- 運転電力は約 370kW である (震災前)。
- 高周波電力は RF カプラー1 台から供給される。
- チューナーは全 3 台、そのうちの 1 台が周波数チューニング用の可動式チューナー (オートチューナー: AT) である。

表 1 : SDTL05B 主要パラメータ

空洞直径	520mm
空洞長	181mm
加速電場	3.44MV/m
加速エネルギー	80MeV ~ 85MeV
セル数	5
運転電力	370kW

3. 不具合症状

S5B の不具合症状を一言で言えば“ビーム加速時の運転電力で運転できない”ということである。具体的には以下のような症状を呈す。

1. 250kW 程度から徐々に空洞内に電力が入らなくなる。300~400kW の領域では空洞内へ電力が入らず空洞からの電力反射が増える。例えば空洞に 310kW 投入しようとするとき空洞電力 300kW、反射 10kW、350kW 投入しようとするとき 300kW、50kW のようになる。400kW 以上になるとこのような症状は起こらなくなる。
2. 上記領域では、空洞からの反射波形が乱れている。また AT の位置により波形の形が変化する。
3. 上記領域でも運転自体は安定しており、空洞がダウン (トリップ) しやすいうようなことはない。
4. 上記領域では空洞内の真空度が悪化する。

問題となるのは 1 の症状であり、電力を投入できない領域が震災前の運転電力である 370kW を含んでいるためビーム加速ができない、という問題が生

じた。SDTL 区間では、一台のクライストロンが 2 台の SDTL 空洞に電力を供給するのだが、震災前には S5A、B 空洞共に約 370kW で運転していたものが震災後は A : 440kW、B : 300kW となり、トータルでは 740kW で同じであるが、空洞個別では通常とは大きく異なる運転電力になるため、設計通りにビームが加速されない状況となった。このことはビームロスを増大させ機器放射化の原因となり、メンテナンスにも支障をきたすこととなる。

これらの症状は震災前から発生していたが、運転電力とは異なった領域で発生していたため問題とはなっていなかった。震災後に運転電力を含む形でこの不具合領域が広がり、問題が生じることとなった。これまでの測定では、不具合領域が高電力側に僅かずつ拡大傾向にあり現在の懸念事項となっている。

図 1 は震災前後の S5B 空洞の空洞電力と真空度を表したグラフである。横軸は電力を投入する際の設定値である。設定値を増やしても投入電力が増えない領域があること、またその領域において真空度が悪化することが判る。

これらの症状は S1A～S6B でも発生している。ただし、S1A～S3B までは空洞の症状が測定できない程度の投入電力であること、S4A、B は運転時電力が不具合症状の発生する電力より低いこと、S6A、B は運転時電力不具合症状の発生する電力よりも高いために問題とはなっておらず、これらの空洞では震災前後で症状の発生する領域が変化していない。また、S7 以降の空洞ではこの症状は観測されていない。

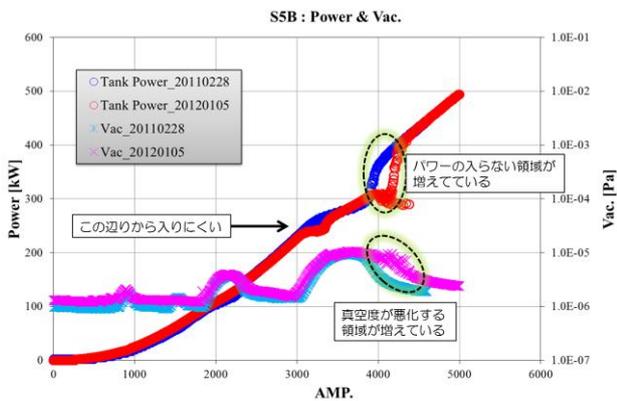


図 1 : S5 空洞の Pickup 波形と反射波形

4. 原因調査

4.1 オートチューナー

図 2 はオシロスコープで測定した S5A 及び S5B 空洞の不具合領域における空洞 Pickup 波形及び空洞反射波形の一例である（デジタルフィードバック OFF 状態（FB-OFF））。

この領域における反射波形が乱れていることが良

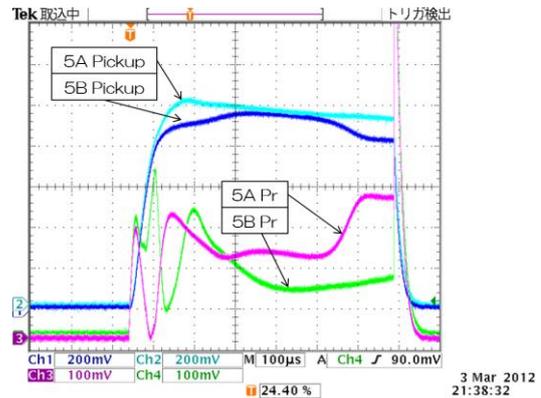


図 2 : S5 空洞の Pickup 波形と反射波形

くわかる。反射波形の乱れに応じて空洞 Pickup 波形にも乱れが生じている。反射波形の形状は一定ではなく、クライストロンからの投入電力及び AT 位置によって異なる。このため、AT 及びその周辺部での放電あるいはマルチパクタが原因であることを疑い AT を取り外し AT 本体、及び空洞内部の観察を行った。

図 3 に取り外した AT の写真を示す。AT 本体にはコンタクター及び空洞壁面の位置に変色が見られたが、明らかに放電痕であると言えるような傷跡は見られなかった。このため AT が原因である可能性は低いと判断し、そのまま再装着した。

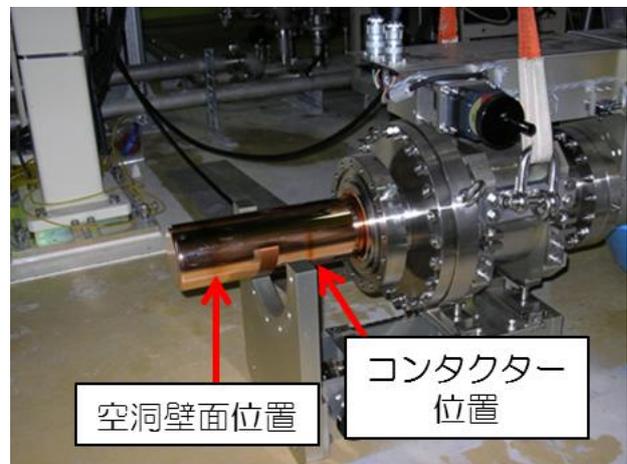


図 3 : 取り外したオートチューナー。色が濃い部分のうち、先端側が運転時の空洞壁面付近、フランジ側がコンタクター付近である。

4.2 RF カプラー

AT 取り外しの際、AT ポートから内部観察を行った。AT ポートの正面には RF カプラーが装着されておりそのループ部を直視できる。図 3 は RF ポートから観察した RF カプラーループ部の写真である。写真に示すようにループの先端の角に高温になっ



図4：ATポートから覗いたRFカプラー。ループ先端の角が変色しているのがわかる。

たような他とは異なる濃い変色がみられた。この部分で放電あるいは高温になるような事象が発生し不具合の症状を発生させていることが疑われたため、予備のRFカプラーと交換を行った。しかしながら、RFカプラー交換後も交換前の症状と大きな変化はなかった。このためこの時点では不具合の原因である可能性は低いと判断した。

4.3 空洞壁面のマルチパクタ

RFカプラー取り外しの際、RFカプラーポートから空洞内部を観察したところ、空洞壁面に筋状の変色があることが判明した。図5に空洞壁面の変色を示す。変色は各ギャップに二本、空洞内壁全周にわたるように発生していた。

端版部の真空シール交換のため端版を取り外した空洞では、その内壁にこのような筋状の変色は見られていない。この筋状の変色はS5B空洞において初めて観察されたものである。“二本”の筋状であることから、当初、空洞内部の電場により電子が空洞壁面に衝突をしている可能性を疑った。図6にSUPERFISHによるS5B空洞の電気力線を示す。空洞内ではDTにより空洞内の電場が曲げられ、空洞壁面間を結ぶ電気力線が表れる。この電気力線の始まりと終わりはギャップ間にあり、これが筋状の位置に近いことが判る。このことから、電気力線に沿って電子が加速され空洞壁面に衝突したことが変色の原因であると考えた。

ただし、この説明では端版部の説明ができない。空洞壁面と端版とを結んでいる電気力線があり、仮説が正しいのであれば端版にも変色が見られるはずであるが、空洞内を観察した限りでは端版内面には変色は見られない。そこで、この電気力線に沿って電子が移動するのか調べるため、電子の動きをCST Micro Wave Studioを用いてシミュレーションした。

シミュレーションではS5B空洞を模擬した空洞長800mmの2セルモデルを作成して行った（共振周波数はおよそ324MHz、ギャップ間に発生する加速電場をS5B空洞と同等にした）。電子のソース

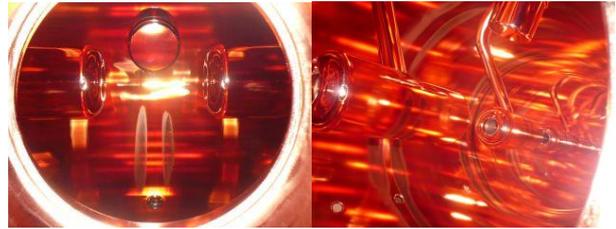


図5：RFカプラーポートから覗いた空洞壁面。空洞壁面に二本の帯状の変色がみられる

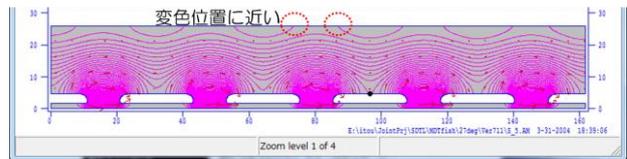


図6：S5B空洞のSUPERFISH計算結果。空洞壁面を結ぶ電気力線がある。

を空洞壁面に設定し（空洞は左右対称のため空洞左半分のみをソースにしている）、5000step後までの電子の動きをトラッキングした。計算は空洞内の電場（電圧）の強さと計算の初期位相を変化させて行った。計算結果は非常に興味深いもので、空洞壁面でマルチパクタが発生していることを示していた。

図7は計算最後の時点で残っている電子の位置と動きを示した計算結果の一例である。図7の左図において空洞中心から左側1/4程しか電子が残っていないのは、初期位相の時に電場の向きが空洞内向きか外向きかの違いによるもので、初期位相がおおよそ180度反対の計算では、空洞の左端1/4だけに電子が残る結果となる。図ではギャップ中心から少し右側に電子が1列残っている。初期位相が180度反対の時はギャップ中心から少し左側に1列電子が残る結果となる。つまり360度計算させるとギャップ間に二列の電子が残ることとなる。

電子の動きはSUPERFISHで示された電気力線に沿って空洞壁面間を移動するのではなく、電子の発生場所とほぼ同一の場所に戻り空洞壁面に衝突する（図7右図）。この衝突により二次電子が発生、二次電子が同様の動きで次世代の二次電子を発生させる、つまり空洞壁面でマルチパクタが発生することを示していた。

シミュレーションでは、この洞壁面のマルチパクタは空洞内電圧が一定範囲内の時に発生することも示した。図8はギャップ間電圧と電子の初期位相を変化させた時の計算終了時（5000step後）の残存電子の数を示したグラフである。横軸が空洞内電圧でV=1が空洞電力390kWでの空洞内電圧を表す。またグラフの一本一本が異なる初期位相での計算結果を示す。初期電子数は約4000であり、計算終了時に電子数が大きく増加していればマルチパクタが発生していることを示している。

計算では、 V が 0.55 倍と 0.8 倍の時に残存電子数のピークがみられこの周辺の二領域でマルチパクタが多く発生していることが示された。

このうち $V=0.8\sim 1.1$ の領域は電力に実際に空洞に電力が入らない、入り難い領域 250kW~400kW

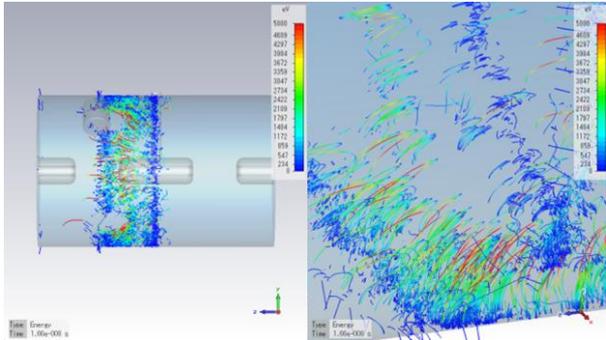


図 7 : MWS 計算結果の一例。ギャップ間で電子が空洞に衝突している(左図)。電子はほぼ同一の場所に戻り空洞に衝突している(右図)。

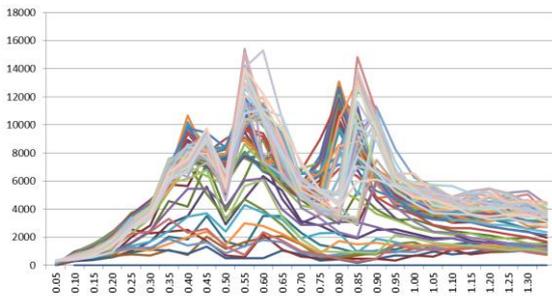
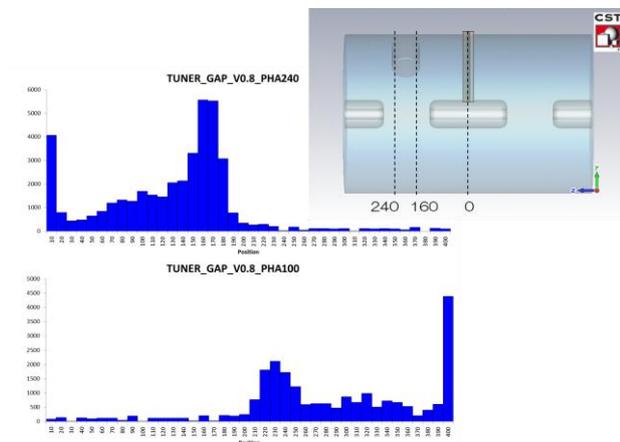


図 8 : 5000step 後の残存電子数。 V と初期位相を変化させた時の計算終了時に残っている電子数である。二つの電圧領域でマルチパクタが発生している。



空洞の変色位置と一致している(ように見える)

(a) $V=0.8$

とほぼ一致している。

図 9 は電子が空洞壁面のどの位置で空洞と衝突しているのかを調べたヒストグラムである。横軸は空洞加速軸 (z 軸) 方向の位置で 0 点は空洞中央 (DT の真横)、縦軸は衝突した電子数である。(a) のヒストグラムはギャップ電圧 $V=0.8$ 、初期位相 240 度及び 100 度のもので、図 7 の計算結果のうち、 $V=0.8$ の時の残存電子数が多い初期位相のものである。電子の衝突位置は 160mm 付近と 240mm 近に集中していることがわかる。これは図 4 の写真にみられる空洞壁面の変色域と一致している。

(b) は同じく $V=0.55$ での初期位相 165 度と 340 度のものである。 $V=0.8$ の結果と比較すると、衝突位置は一点に集中せず全体的にばらばらしている。

これらのことから空洞壁面の変色は 250kW 以上の投入電力の際に発生する空洞壁面のマルチパクタが原因である可能性が高いと考えている。

4.4 真空系

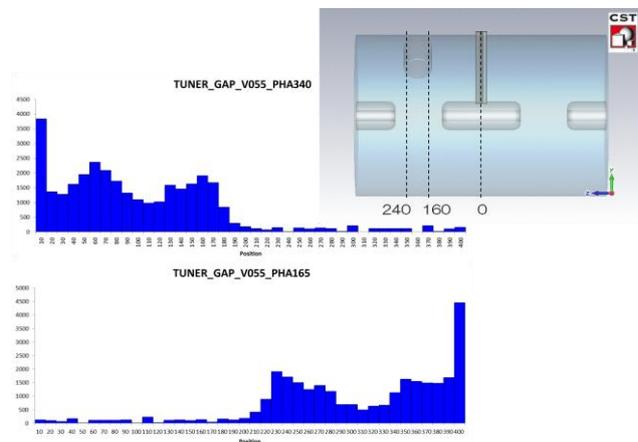
S1~S6 では粗排気系のポンプとしてロータリーポンプを使用している。一方 S7 以降ではルーツポンプを利用しているが、上述の不具合症状が発生していない。このため、この粗排気系の違い、すなわちロータリーポンプのオイルが空洞に悪影響を与えている可能性があり、原因の一つであることを疑っている。

また、震災直後には空洞内壁が湿度 100% の状態に晒された。このため状態が悪化し電力を投入できない領域が拡大してきた原因となった可能性もあり、真空系の改善を計画している。

5. 対応及び対策

5.1 ビーム運転時の対応

上述したように、震災後は震災前の運転電力で空洞を励振させることができない。このため S5 の運



全体的に散らばっている

(b) $V=0.55$

図 9 : 電子が空洞壁面に当たった位置を示すヒストグラム。 $V=0.8$ では 160 mm と 240 mm の位置に集中しているが、 $V=0.55$ では $V=0.8$ と比較して電子の位置がばらばらしている。

転電力を上げ、S4 及び S6 の運転電力を下げる、という運転を行っている。震災前と比較してビームロスが増加しており、コミッショニンググループによるロス低減のための調整が行われている。

5.2 今後の対策

2012 年 7 月からの夏季メンテナンス時にいくつかの対応を行う予定である。

一つは真空の改善である。イオンポンプを増設し真空度の改善を図る。また 4.5 項で述べたロータリーポンプ用オイルの影響をなくすため、ロータリーポンプをスクロールポンプに交換しオイルフリー化する。また、S5B 空洞に温水を流し、空洞壁面についているガスをベーキングにより取り除く。

もう一つは RF カプラーのループ位置を変更することである。4.2 項で述べた RF カプラーの変色は 4.3 項で述べたマルチパクタの変色位置と重なっている。そこで、カプラーループの位置を水平方向の対称位置（カップリングも位相も変わらない位置）に変更し、不具合症状が変化するか観測する。

6. まとめ

S5B 空洞に運転時に必要な電力が投入できないという不具合対応のため、RF の測定、空洞内部観察及びシミュレーションによる原因の究明を行ってきた。空洞内部の観察から RF カプラーのループの変色、空洞壁面の帯状の変色などが明らかになり、シミュレーションの結果と併せ、不具合の原因は空洞壁面でのマルチパクタの発生が原因である可能性が高いことを示した。

現在行われているメンテナンス期間中、対策として真空系の改善及び RF カプラーのループ位置の変更を行い、次期の RF 投入時に対策の効果を確認する予定である。

参考文献

- [1] T. Ito, et al, 地震後の J-PARC リニアック復旧状況, 第八回加速器学会年会プロシーディングス集