

SDTL 空洞内壁で発生するマルチパクタ放電を抑制する内壁形状の検討

STUDY ON INNER WALL GEOMETRY TO SUPPRESS MULTIPACTOR DISCHARGE OCCURRING ON THE INNER WALL OF SDTL CAVITY

伊藤崇^{#, A)}, 平野耕一郎^{A)}
Takashi Ito^{#, A)}, Koichiro Hirano^{A)}
A) J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

SDTL are one of the main accelerators in J-PARC. Due to multipactor discharges occurring on the inner surface of the cavity, some SDTL cavities could not be operated at their design rf power. However, this problem was solved by removing dust and oil from the inner wall surface of the cavity. The simulations performed to investigate the cause of multipactors showed that multipactors on the inner walls of the cavities were unavoidable with the SDTL cavity body and drift tube geometry. In addition, a result of visual inspection shows that even at locations where simulations showed multipactor to occur, multipactors did not occur in the vicinity of ports and slit geometries or other areas where the cavity inner wall was deformed. In this paper, we will report the possibility of suppressing the multipactor at the designed operation power region by changing the geometry of the cavity inner wall surface.

1. はじめに

J-PARC の主要加速器の一つである SDTL では、一部の SDTL 空洞において、空洞内壁表面で発生するマルチパクタ放電のため設計定格電力で運転ができない問題が発生していた[1-3]。この時マルチパクタの発生原因究明のために行ったシミュレーションでは、SDTL の空洞本体やドリフトチューブの寸法及び形状では空洞内壁面でのマルチパクタ発生は避けられないことが明らかとなった。同時期に実施した空洞内部の目視調査では、シミュレーションでマルチパクタが発生することが示された位置には円周状に黒い変色があること、及び変色がある部位であってもチューナーなどの空洞内側への凸部、あるいはポートやスリット形状などの空洞外側への凹部ではマルチパクタが発生せず変色していないことが判明した。これら凹凸部では電磁場がゆがめられるためマルチパクタが抑制されたと考えられる。そこで、空洞内壁表面の形状を変化させることで空洞内壁面上のマルチパクタを抑制できるのか、その可能性を検討したので報告する。

2. 空洞内部観察

Figure 1 は S05B 空洞の内部写真である。(a)は空洞全体を正面から見たもので、空洞円周状に黒い変色が確認できる。この変色は空洞 z 軸方向(加速軸方向)の各ギャップの位置に 2 箇所、一周に渡り発生している(空洞全体では 5 ギャップあるので 10 箇所発生)。この変色部分がマルチパクタ発生場所である。

変色の仕方はギャップごとに違いがみられる。第 5 ギャップ(一番手前)の変色と、写真ではわかりにくい第 1 ギャップの変色は、円周上を一周に渡って発生している。他方、第 2~4 ギャップの変色は、各種ポート付近では発生していない(変色していない)。さらに各ポートにおける変色にも違いがある。チューナーポートとカップラーポート

付近はポート周辺部まで含めて変色が発生していない(b)。真空ポートはポート直前まで変色がありポートのスリット部には変色がない(c)。ビューポート部分では、変色はポート部を避けるように発生しており、チューナーポート周辺と比較すると変色部分は途切れておらず、変色していない領域は小さい(d)。

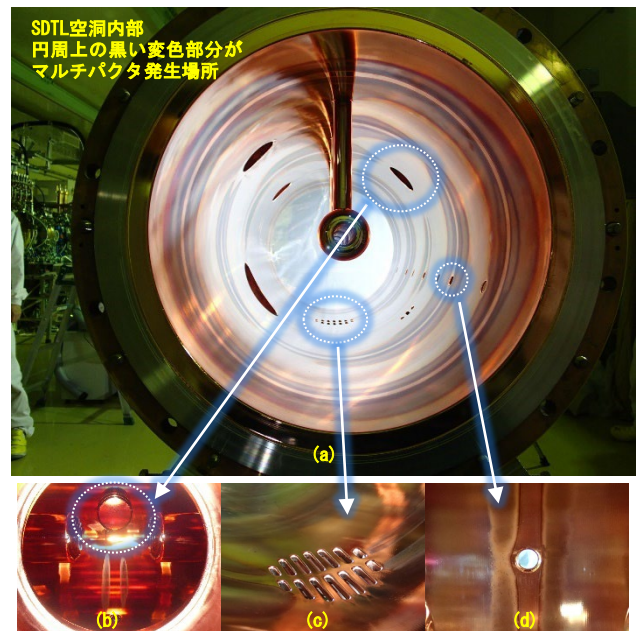


Figure 1: Inside photo of the SDTL05B cavity.

これらのことから、我々はチューナーやポートなど、空洞壁面に空洞壁とは別の構造体があると、その付近の電磁場がゆがめられるため、マルチパクタの発生が抑制され、変色しない部分が出来たのではないかと推測した。

3. シミュレーション

3.1 計算条件と手順

2章で述べた推測を確認するため、マルチパクタ解析で多く利用されている CST Studio Suite (PIC) を用いてシミュレーションを実施した[4, 5]。シミュレーションを行う際の主な条件を以下に記載する。

- モデルは S05A 空洞の 1 セルを模擬して作成
 - ✓ 空洞直径: 520 mm
 - ✓ セル長: 360 mm
 - ✓ ドリフトチューブ直径: 92 mm
 - ✓ ドリフトチューブ長さ: 117.41 mm (ドリフトチューブ以外の内部構造体が無い場合、この長さで共振周波数が 324 MHz になる)
- 電磁場: TM010 モード
- 共振周波数: 324 MHz
- 電場強度は S05A 空洞の 230 kW 相当 (マルチパクタが発生する電力領域)
- 内部構造体: チューナー、ビューポート、真空ポート
- 内部構造体は円周方向 90 度毎に 4 カ所設置
- 初期電子数: 72000
- 初期電子の発生場所は、空洞表面全域に対して空洞表面から空洞中心方向に高さ 20 mm の範囲
- シミュレーション時間: 40 ns

シミュレーションでは、空洞壁面の内部構造体としてチューナー、ビューポート、真空ポートの 3 種類を想定した。それぞれの内部構造体に対して、内部構造体が無いモデル (空洞本体とドリフトチューブだけのモデル) と内部構造体有るモデルの両方でマルチパクタのシミュレーションを行い、40 ns 後の二次電子の発生量を比較した。

シミュレーションは以下の手順で実施した。

1. 内部構造体が無い状態の電磁場分布を計算。
2. 1 の電磁場分布を読み込んで、内部構造体が無い状態のマルチパクタを計算。
3. 内部構造体有る状態の電磁場分布を計算。この時の共振周波数は、1 の共振周波数 (324 MHz) とは異なるため、透磁率 μ を調整して共振周波数を 324 MHz に合わせる。(電磁場分布の読み込みでは周波数を変更できないため)
4. 3 の電磁場分布を読み込んで、内部構造体有る状態のマルチパクタを計算。

上記の計算後、2 と 4 の二次電子の発生数を比較する。これを 3 種類の内部構造体に対して行った。

3.2 計算結果

3.2.1 チューナー

Figure 2 はチューナーを内部構造体とした時のモデルとシミュレーション終了後の電子の状態を表したものである。チューナーは直径 ϕ 90 mm、挿入量 40 mm で、ギャップ中央の円周方向 90 度ごとに 4 カ所配置した。(a) はチューナーが挿入されていない時のモデルに xy 平面のメッシュを付加した図である。(b) は同様にチューナーが 40 mm 挿入された時の図である。チューナー挿入部の

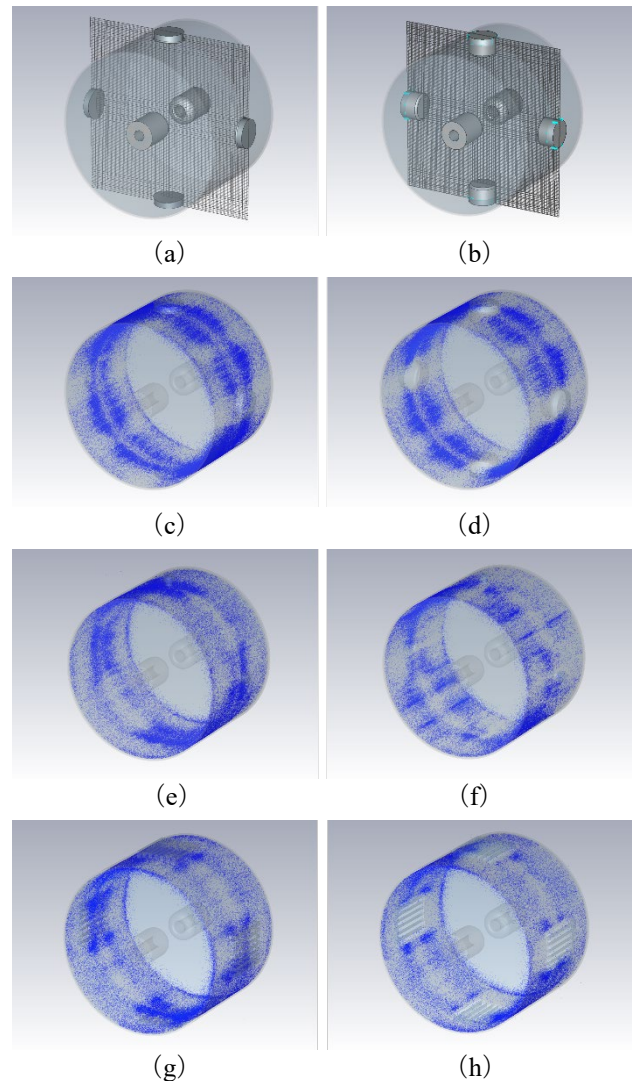


Figure 2: Simulation model (a)(b) and state of the electron after the end of simulation. (c)(d): Tuner, (e)(f): View port, (g)(h): Vacuum port

有無にかかわらずメッシュが同一であることが確認できる。

(c) はチューナーが無い時、(d) はチューナーが 40 mm 挿入された時のシミュレーション終了時の電子状態を示した図である。この図から以下のことが分かる。

- (c)(d)ともに空洞内壁面のギャップ中心付近に 2 箇所、電子が円周状に集中している部分がある。2章の内部観察で述べたマルチパクタによる変色部分と位置的に一致しており、この部分でマルチパクタが集中的に発生していることを示している。
- (d)では、チューナー側面及び先端面ともに電子が無く、内部観察時と同様マルチパクタが発生していないことを示している。
- (d)では電子がチューナー直近まで集中しており、チューナー周辺部でもマルチパクタが発生していることを示している点が内部観察の時との大きく異なっている。内部観察ではチューナー周辺部には変色が

無いため、実機の状態とは異なるシミュレーション結果となった。

3.2.2 ビューポート

φ 20.6 mm のビューポートをセル中央の円周方向 90 度ごとに 4 カ所配置した。Figure 2 (e)はビューポート無し、(f)はビューポート有りの時のシミュレーション終了時の電子状態を示した図である。この図から以下のことが分かる。

- (e)ではギャップ中心付近の 2 箇所電子が集中しており、マルチパクタが発生しており、マルチパクタが発生していることを示している。ただし、チューナーの計算の時ほど明確には表れていない部分がある。
- (f)ではビューポート直近まで電子が集中し、ビューポートの部分は電子がなくなっているため、内部観察同等の結果を示している。

3.2.3 真空ポート

幅 12 mm、長さ 150 mm のスリット 7 本をひとまとめにした Vacuum ポートをセル中央の円周方向 90 度毎に 4 カ所配置した。Figure 2 (g)は真空ポート無し、(h)は真空ポート有りの時のシミュレーション終了時の電子状態を示した図である。この図から以下のことが分かる。

- (g)ではギャップ中心付近の 2 箇所電子が集中しており、マルチパクタが発生していることを示している。ただし、ビューポートを用いた計算の時と同様、電子が明確には表れていない部分がある。
- (f)では真空ポート直近まで電子が集中し、真空ポート内のスリット部分では電子がなくなっている。これは内部観察の時とほぼ一致している。しかし、内部観察ではポートの直近で変色が薄くなっているため、ポート周辺でのマルチパクタの発生量が異なっている。

3.3 二次電子の発生量

Figure 3 は、内部構造体有り、無しの場合について、マルチパクタにより発生した二次電子数の時間推移を表したグラフである。内部構造体は上から(a)チューナー、(b)ビューポート、(c)真空ポートである。横軸は時間、縦軸が電子数を示している。空洞に投入する高周波の最初の一周に当たる 0~3.1 ns まで、位相で 10 度ごとに 2000 個の電子を連続的に発生させている(合計 72000 粒子)。

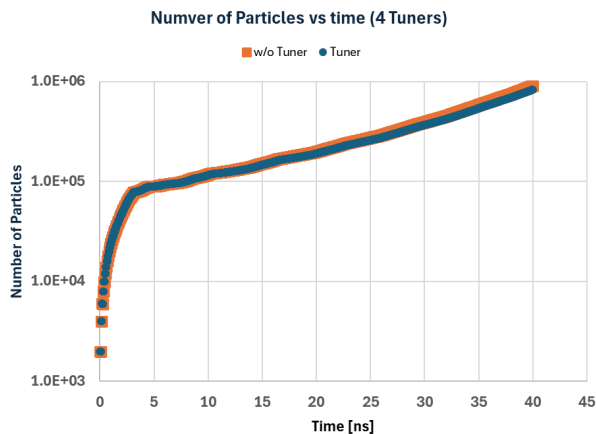
内部構造体の種類に関わらず 3.1 ns 以降の電子は指数的な増加を示しており、マルチパクタによる二次電子が発生していることが分かる。

(a)の結果はチューナーの有無による二次電子発生数の違いが小さいことを示している。つまり、チューナーが有ってもなくてもマルチパクタは抑制されることなく発生することを示している。チューナーが有る空洞の 2 次電子の発生数はチューナーが無い空洞と比較して約 91%であった。

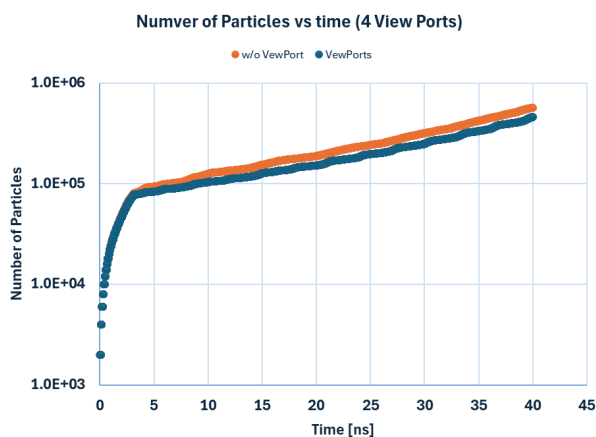
(b)の結果は(a)よりマルチパクタが抑制されていることを示している。小さなポートであってもマルチパクタを抑制できる可能性がある。ビューポートが有る空洞の 2 次

電子の発生数はビューポートが無い空洞と比較して約 80%であった。

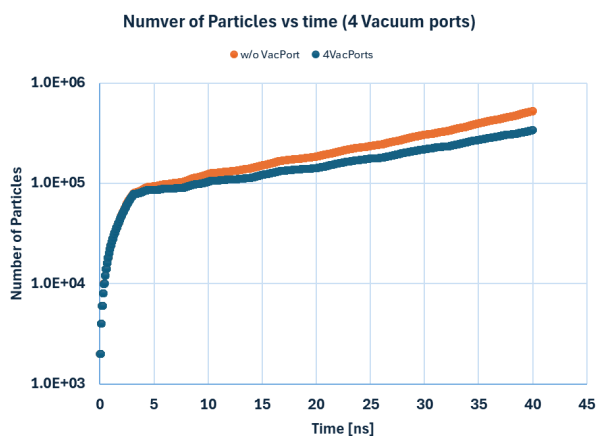
(c)の結果は(a), (b)よりもさらにマルチパクタの抑制を抑えていることを示している。真空ポートが有る空洞の 2 次電子の発生数は真空ポートが無い空洞と比較して約 65%であった。ただし、マルチパクタは抑制されているが



(a)



(b)



(c)

Figure 3: Number of particle vs time (4 Tuners)

グラフは右上がりのままであるのでマルチパクタは継続していることを示している。

4. 考察とまとめ

3 種類の内部構造体についてマルチパクタに関するシミュレーションを行った。内部構造体があるとマルチパクタが抑制されることはシミュレーションで確認することができた。しかしながらシミュレーションは内部観察によるマルチパクタ発生状態とは異なる結果も同時に示していた。

内部観察では、チューナー周辺のマルチパクタが発生しない無変色領域が大きかったが、シミュレーションではチューナーの直近までマルチパクタが発生しており、無変色領域に相当する領域が存在しなかった。二次電子の発生も9割程度あるため、今回計算した3種類の無い部位構造体の中ではマルチパクタの抑制が一番悪い結果となった。実空洞でマルチパクタが抑えられていることから、何かしらの条件を見落としている可能性が高いと考えている。

ビューポートのシミュレーションではマルチパクタはポート直近まで発生しており、これはポート直近まで変色している観察結果とも一致している。ただし、マルチパクタが抑制されるのはポート部のみであり、変色も消えないことから大きなマルチパクタ抑制効果は、現状では期待できないと考えている。

真空ポートに関しては、シミュレーションでは3種類の内部構造体の中で一番マルチパクタ抑制効果が高い結果が得られた。ポート内のスリット部でマルチパクタが発生していないこともシミュレーションと内部観察で一致しており、スリット構造はマルチパクタの抑制に効果的である可能性が高い。円周方向に一周スリットを付けるなどの効果増大方法も考えられるが、実際の加工や空洞の強度なども含めた検討が必要だろう。

シミュレーション自体の課題として、メッシュ構造の作り方が挙げられる。現状はチューナー、ポート、スリットなどの内部構造体付近を細かくしている一方で、空洞内壁面しかない部分などは大きなメッシュとなっている。これによりマルチパクタの発生量が空洞の位置によりにむらが出ていると考えられる。Figure 2 では、本来(c)(g)(e)に

は構造の違いが無い(空洞本体とドリフトチューブだけ)ので計算結果はほぼ同一になると考えられる。しかしながら、z方向2箇所電子が集中しているのは同じだが、円周方向の電子の分布が異なる上に位置によってかなり濃淡のむらがあることが分かる。これらはメッシュの作成が適切でないことを示していると言える。内部構造体の有無だけでなく、内部構造体の違いによっても二次電子の発生量を比較できるように、適切かつ統一したメッシュで計算を行う予定である。また、チューナーやポートといった実際の機器や部位だけでなく、空洞内壁面自体に変化をつけ、マルチパクタを抑制する形状の検討も併せて進めていく。

謝辞

シミュレーションを実施するにあたり、様々な手法や情報をご教授頂いた株式会社AETの菅野浩一様、及びJ-PARC センターの田村潤研究員に厚く御礼申し上げます。また、空洞内部観察等の現場作業全般にたいしてご助力を頂いた三菱電機システムサービスの方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Ito *et al.*, “Multipactor at SDTL Cavity in J-PARC Linac”, in Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 1152-1156.
- [2] T. Ito *et al.*, “Multipactor problem of J-PARC SDTL”, in Proc. IPAC2017, Copenhagen, Denmark May 14-19, 2017, pp. 4184-4186.
- [3] T. Ito *et al.*, “Countermeasure of the multipactor at SDTL cavity in J-PARC Linac”, in Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 977-981.
- [4] P. Berutti *et al.*, “Multipactor discharge in the PIP-II superconducting spoke resonators”, Fermilab, Technical division, Technical note TD-16-005.
- [5] J. Tamura *et al.*, “RF design of the prototype spoke cavity for the JAEA-ADS Linac”, in JPS Conf. Proc., vol. 33, 011049 (2021). doi:10.7566/JPSCP.33.011049