

J-PARC SDTL 空洞で発生したマルチパクタに対する抑制方法の検討 STUDY ON SUPPRESSION METHOD FOR MULTIPACTOR OCCURRED IN THE J-PARC SDTL CAVITY

伊藤崇^{#, A)}

Takashi ITO ^{#, A)}

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

Abstract

As a countermeasure against multipactor occurring on the inner surface of the SDTL cavities, we have been considering cavities with slit-shaped inner surfaces. We conducted electron suppression using a slit shape with a small depth of 10 mm, which is feasible for actual fabrication. The results showed that even with a small slit depth, electron generation by the multipactor could be suppressed by about 85 %. Simulations using a cavity with a 20 mm larger diameter indicated that electron generation by multipactor could be suppressed by about 50 %. However, actual operation is impossible due to the large difference between the cavity's resonant frequency and the operating frequency. The SDTL allows resonance frequency adjustment within a range of about ± 100 kHz, equivalent to a cavity diameter difference of ± 0.3 mm. The result of multipactor simulations showed no significant difference in the number of electrons generated by multipactor between the reference cavity and cavities with diameters differing by ± 0.3 mm.

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 J-PARC リニアックの主要加速器の一つであり、陽子を 50 MeV から 190 MeV まで加速する。Table 1 に SDTL の主要パラメータを、Fig. 1(a) に加速器トンネル内に整列された SDTL 外観図を示す。SDTL は 32 台で構成されるが、一部空洞において、空洞内表面で発生する高周波に共鳴して二次電子放出量が増加する放電現象 (マルチパクタ) により、定格電力での運転が不安定になる不具合が発生していた[1-3]。Figure 1(b) は SDTL 空洞の内部写真である。円周上の黒い変色がマルチパクタ発生部位である。



(a) Overview of the SDTL. (b) Inside view of SDTL.

Figure 1 SDTL Cavity.

(1/20 になる)ことを示したが、深い溝は加工が困難であるため、次の段階として加工が容易な浅い溝形状での検討を進めた。本稿ではそのシミュレーションの結果及びマルチパクタ抑制可能性の検討結果について報告する。

Table 1: Main Parameter of SDTL

Number of tanks	32 (S01A~S16B)
Input Energy	50MeV
Output Energy	190MeV
Tank inner Diameter	520mm
Tank length	1.5m ~ 2.5m
Number of cells	5
Drift tube outer diameter	92mm
Drift tube inner diameter	36mm
Operating Frequency	324MHz

このマルチパクタ対策のため、これまで内部の形状・寸法などを変更した様々なモデルで電子軌道のトラッキングシミュレーションを実施し、マルチパクタで発生する電子増加量の比較検討を行った[4, 5]。シミュレーションの結果は、空洞内壁面に溝形状を付加したモデルでは溝を深くすることでマルチパクタの強度が 95 %減少する

2. シミュレーション

2.1 モデル空洞

シミュレーションは CST Studio Suite を用いて行った[6, 7]。シミュレーションに用いた基準モデル空洞を Fig. 2 に示す。モデル空洞は、内部構造を単純化するため DT のみとし、マルチパクタが顕著に発生していた S05A 空洞の 1 セルを模擬して作成した。隣り合うドリフトチューブの中心から中心までを 1 セルとし、セル長は 360 mm (5 セ

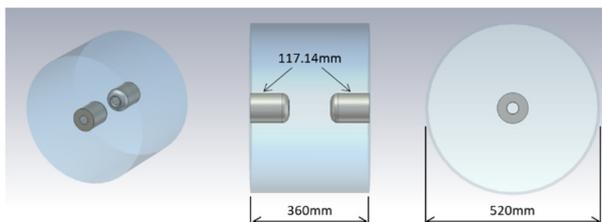


Figure 2: Reference model cavity.

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

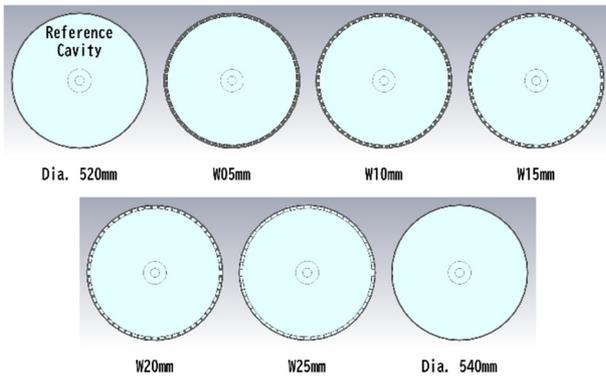


Figure 3: Cross-sections of slit cavity.

ルで 1800 mm になる)、空洞両端面からハーフ DT が空洞内に位置する形状である。ハーフ DT の長さは 117.41 mm で、この時共振周波数は 324 MHz である。

溝付き空洞は、基準モデル空洞の内壁から外側に向かって溝を設ける。深さは 10 mm、幅は 5 mm から 25 mm まで 5 mm 毎に 5 種類とし、空洞円周上に 6 度毎に 60 箇所作成する。また、全周を深さ 10 mm 削った直径 540 mm の空洞も作成した(隣接する溝までを全て削ることと同等、溝幅 28.28 mm 以上)。Figure 3 に溝付き空洞の断面図を示す。

溝付き空洞の計算は以下の 2 種類の構造で実施する。

- 構造 1: 基準空洞の内壁に溝を付加する構造(直径 520 mm + 溝、共振周波数は各空洞で異なる。溝付き空洞の共振周波数は 324 MHz より低い)
→ 現在の空洞に加工を施すことを想定
- 構造 2: 溝を付加した後に共振周波数が 324 MHz になるように空洞径を変更した構造(直径は各空洞で異なる、共振周波数は 324 MHz)
→ 新規に空洞を製作することを想定

2.2 シミュレーション結果

これら基準モデル空洞、溝付きモデル空洞に対し、空洞内壁面で発生するマルチパクタの計算を行い、溝幅ごとに発生する電子数を求めて比較を行う。この時、構造 1 の各空洞は共振周波数が 324 MHz とは異なるので、各溝幅ごとに固有値計算で求めた電磁場分布を、PIC の計算時には 324 MHz として読み込むことで計算する。

シミュレーションでの初期電子数は 18,000 個(最初の一周期(約 3.1 ns)で電子 500 個を 36 回発生させる)、発生場所は空洞表面から中心方向に 20 mm の空間、シミュレーション時間は 25 ns である。25 ns 後の基準空洞の電子数と各溝付き空洞の電子数を求め、マルチパクタ抑制の効果を比較検討した。

計算終了時(25 ns 後)の溝幅ごとのモデル空洞の電子分布の例として、構造 2 の空洞断面図を Fig. 4 に示す。全てのモデル空洞において、電子は空洞内表面付近に分布している。溝付き空洞では溝の中に電子が入り込んでおり、溝幅が太くなるにつれ空洞内表面付近の電子が少なくなっている様子が分かる。また、直径 540 mm の空洞は基準空洞と比較して空洞内表面上の電子の分布が少ない(色の付いている部分が細い)ことが分かる。

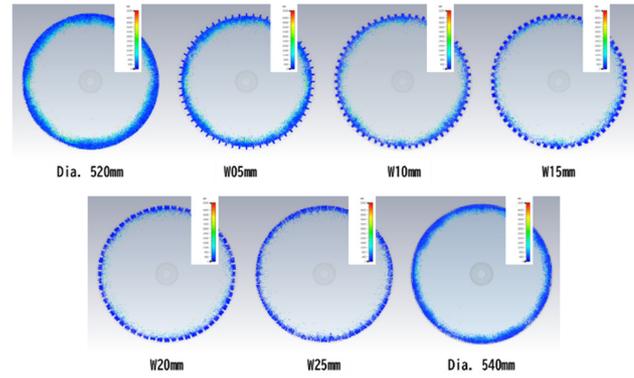
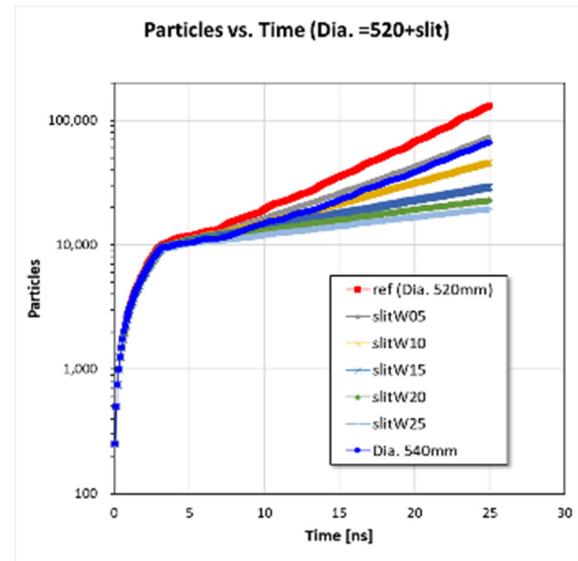
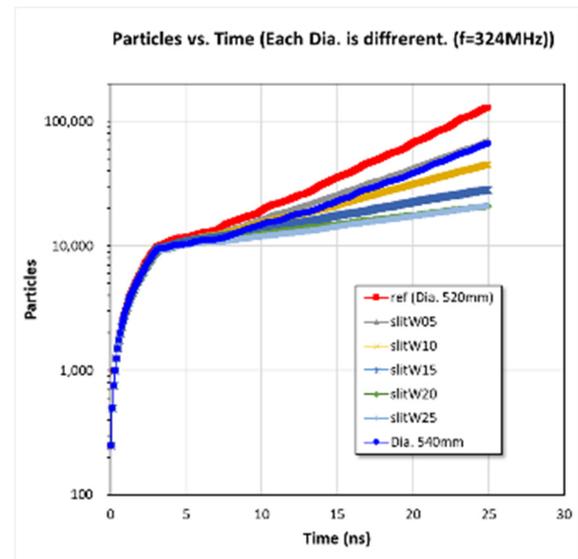


Figure 4: Electron distribution of after calculation.



(a) Diameter 520 mm.



(b) Resonant Freq. 324 MHz.

Figure 5: Particles versus time.

Figure 5 に 0 ns~25 ns までの電子数の推移を示す。(a)は構造 1、(b)は構造 2 の電子数の推移を示している。0 ns~3.1 ns までは初期電子の発生時間である。全ての溝幅に置いて、構造 1 と構造 2 の電子数の推移に大きな違いはない。Figure 6 に計算終了時 ($t=25$ ns) の基準空洞に対する溝付き空洞の電子数比を示す。溝幅が異なっても計算中の電子数は構造 1 と構造 2 ではほぼ同数であり、電子発生の抑制効果は同等であり、構造 1 と構造 2 の計算結果には違いはみられなかった。電子発生の抑制効果が最も大きいのは溝幅が 25 mm の溝付き空洞で、基準空洞と比較して 85 % 減の結果となった。

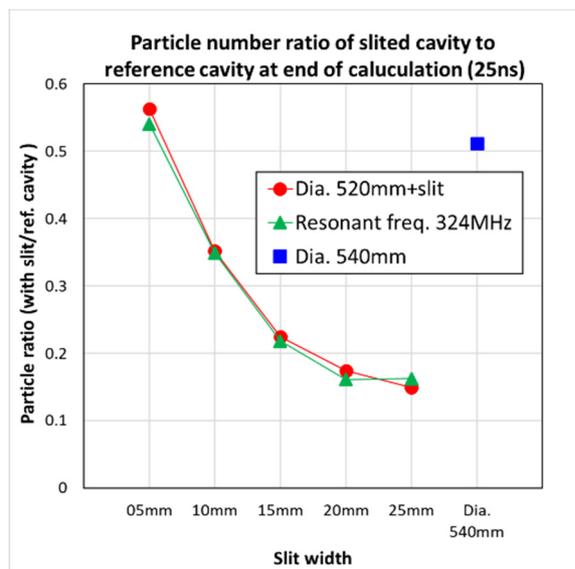


Figure 6: Particle number ratio of slited cavity to reference cavity at end of the calculation (25 ns).

ただし、溝幅 20 mm との抑制効果の違いは小さいため、実際の溝幅は溝にしなくて残す部分(直径 520 mm の表面)の幅寸法を考慮して溝幅を決定することになる。

2.3 構造 1 と構造 2 の選択

シミュレーションの結果は、構造 1 と構造 2 における電子抑制効果は同等であることを示した。この点だけを考慮すれば両方の構造を選択可能だが、実際の運転を考慮すると構造 2 だけが選択対象となる。理由は以下の通り。

構造 1 は、溝が無い状態である基準空洞の共振周波数が 324 MHz であり、溝を付けると共振周波数が 324 MHz より低くなる。従って、共振周波数を 324 MHz に保つためには運転中にチューナーによる共振周波数の調整が必要であり、共振周波数がチューナーの調整範囲外となる場合はデチューン運転(共振周波数とは異なる周波数で運転)が必要になる。

Figure 7 は基準空洞(直径 520 mm、溝幅 0 mm)、基準空洞に溝加工した空洞、及び直径 540 mm の空洞の共振周波数を示したグラフである。溝幅を増やすにつれ共振周波数は徐々に低くなり、溝幅 25 mm の時に約 321 MHz、直径 540 mm の空洞(溝幅 28.27 mm 以上(全周が溝、と同等))では 317 MHz まで低下する。実空洞の周波数調整量は、チューナー可動範囲全幅(120 mm)

で約 150 kHz であり、この範囲内にあるのは溝幅 5 mm の空洞だけである(共振周波数: 323.9 MHz) それ以上の溝幅ではチューナーの調整範囲外になるためデチューン運転となるが、数百 kHz 以上のデチューン運転は空洞からの反射電力が大きくなりすぎるため現実的ではない。

Figure 8 は、溝加工した空洞の共振周波数が 324 MHz になるように空洞直径を調整した時の、各溝幅における空洞直径を示したグラフである。溝幅を増やすと空洞直径は小さくなり、溝幅 25 mm の時に空洞直径は 512 mm となり、基準空洞の 520 mm と比較して直径で 8 mm、約 1.5 % 小さくなる。これは、実機製作における旋盤加工時に基準空洞と比較して空洞内壁を半径で

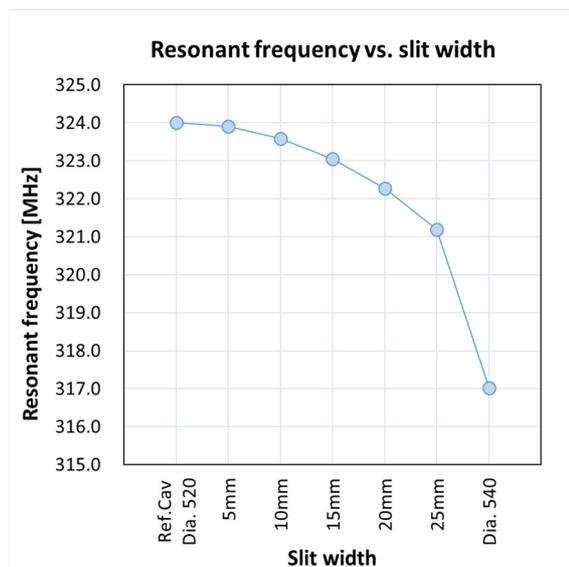


Figure 7: Resonant frequency versus slit width. The reference cavity is equivalent to a slit width of 0 mm. The cavity with a diameter of 540 mm is equivalent to a slit width of 28.28 mm or greater.

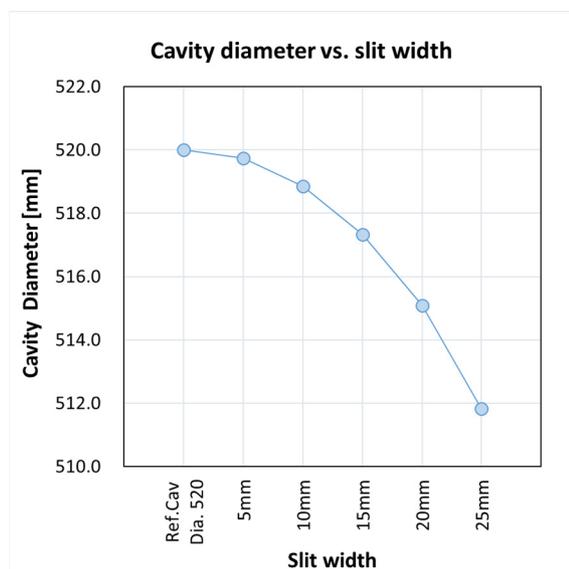


Figure 8: Cavity diameter versus slit width. The reference cavity is equivalent to a slit width of 0 mm.

4 mm 少なく削るだけであり、加工上の問題はない。

上述したように、実際の運転の現実性と実機空洞の加工の可否を考慮し、空洞直径を変更する「構造2」を選択することで溝付き空洞の製作、運転が可能である。

2.4 デチューン運転

直径 540 mm の空洞など、基準空洞に対して共振周波数が大きくずれる空洞の 324 MHz でのデチューン運転でもマルチパクタによる電子の抑制効果があることがシミュレーションで示された。そこで、実機空洞のチューナーの周波数調整範囲でのデチューン運転を模擬したマルチパクタのシミュレーションを行った。2.3 項で述べたようにチューナーの周波数調整範囲は最大 150 kHz であるので、共振周波数は 324 MHz ± 75 kHz の範囲で調整可能である。シミュレーションは調整範囲を少し多めに取り 324 MHz ± 100 kHz、すなわち 323.9 MHz と 324.1 MHz の空洞のデチューン運転を模擬して行った。

共振周波数 323.9 MHz、324.1 MHz に相当する空洞直径はそれぞれ 520.28 mm、519.72 mm である。PIC 計算に用いる初期条件は 2.2 項に記載した条件と同等である。

Figure 9 に計算終了時 ($t=25$ ns) の基準空洞に対する共振周波数 323.9 MHz の空洞、324.1 MHz の空洞、及び直径 540 mm の空洞 (共振周波数 317 MHz) の電子数比を示す。

直径が 520.28 mm 及び 519.72 mm の空洞の電子数は基準空洞の電子数より 2% から 9% 程度増えていた。計算機のメモリ不足で 0.3 mm の差を表せる小さなメッシュが作れないこともあり電子発生数を正確に表せていないが、基準空洞と同程度の電子を発生させていることを示す計算結果である。チューナーによる調整範囲程度のデチューン運転では電子の発生を抑制することは困難であることを示す結果となった。

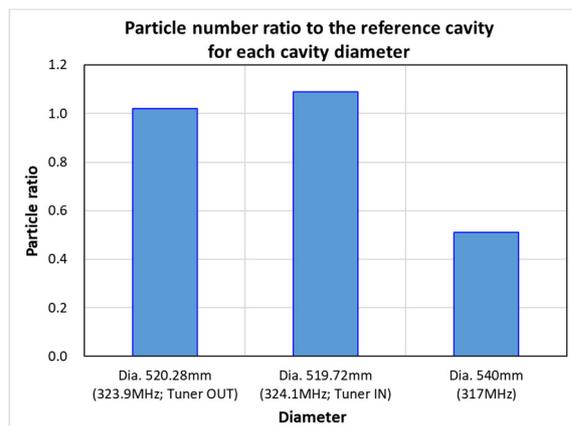


Figure 9: Particle number ratio to the reference cavity for each cavity diameter.

4. まとめと考察

比較的浅め (10 mm) の溝付き空洞溝においてもマルチパクタによる電子の発生を抑制できる可能性がある

とをシミュレーションで示した。基準空洞に対して電子の発生数が 85% 減という結果は、以前検討した溝深さ 24 mm の時の 95% 減と比較しても十分な抑制効果である。また、溝幅が広いほうが電子抑制の効果が高い結果であったが、実際の溝加工の際には元の空洞表面として残す部分の幅を考慮して溝幅を決定する必要がある。この空洞内壁に溝を付加する形状は実際に加工可能な形状であり、新規に空洞を製作する時の有力な空洞内壁形状の候補である。今回のシミュレーションでは、溝数を 60 としたが、溝数を少なくすると費用の面で有利になる利点もあるので、溝数に関して検討を進める予定である。

デチューン運転での電子発生抑制は、空洞に対する新たな加工が必要でないため魅力的であるが、これまでに行ったシミュレーションでは、実空洞のチューナーによる周波数調整幅程度の差では電子発生抑制効果はほとんど効果が無く、電子の発生を抑制できるのは共振周波数と運転周波数の差が大きい場合である結果となった。今後、隣接する電磁場モードも含めるなど、他の条件を考慮して実際の運転が可能範囲のデチューン運転で電子の発生を抑制できる可能性があるのか検討する予定である。

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 の菅野浩一様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. Ito *et al.*, “Multipactor at SDTL Cavity in J-PARC Linac”, Proc. 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”, Proc. 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 977-981.
- [4] T. Ito *et al.*, “Study on inner wall geometry to suppress multipactor discharge occurring on the inner wall of SDTL cavity”, Proc. of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2024, pp. 959-962.
- [5] T. Ito *et al.*, “Study on shape of inner wall surface to suppress the multipactor occurred in the J-PARC SDTL”, Proc. of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Oct. 14-18, 2024, P-221.
- [6] P. Berutti *et al.*, “Multipactor discharge in the PIP-II superconducting spoke resonators”, Fermilab, Technical division, Technical note TD-16-005.
- [7] 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/JSPCP.33.011049