

ILC 陽電子捕獲ライナック用 L バンド APS 加速管の設計および製作方法の検討

DESIGN AND FABRICATION STUDY OF L-BAND ALTERNATING PERIODIC STRUCTURE (APS) CAVITY FOR THE ILC POSITRON CAPTURE LINAC

福田将史^{#, A)}, 榎本收志^{A)}, 榎本嘉範^{A)}, 佐藤幹^{A)}, 高富俊和^{A)}, 早野仁司^{A)}, 肥後壽泰^{A)},
森川祐^{A)}, 栗木雅夫^{B)}

Masafumi Fukuda^{#, A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Motoki Sato^{A)}, Toshikazu Takatomi^{A)},
Hitoshi Hayano^{A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Masao Kuriki^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization: KEK

^{B)} Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

Abstract

In the electron-driven positron source of the International Linear Collider (ILC), positrons are generated through electromagnetic showers by irradiating a target with a 3 GeV electron beam and then accelerated in a positron capture linac in a solenoid magnetic field. To accelerate high-current multi-bunch positron beams in this accelerating cavity, it is necessary to manage beam loading compensation and a heat load of 20 kW caused by the electromagnetic shower. For this reason, we choose an L-band Alternating Periodic Structure (APS) accelerating cavity operating in $\pi/2$ mode, which has a large group velocity which mitigates the effects of thermal deformation. Since last year, we have been designing a cavity for a 21cell APS accelerating cavity, equipped with efficient cooling channels extended close to the beam hole radius. This accelerating cavity has a resonant frequency of 1.3 GHz, a coupling β of 5.05, and a shunt impedance of 35.0 M Ω /m. Currently, we are investigating the fabrication procedure and measurement methods for parameters such as the resonant frequency required during fabrication. This paper reports the cavity design and fabrication methods for this accelerating cavity.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) [1] の電子駆動型の陽電子源では、3 GeV の電子ビームをタングステンターゲットに照射して生成した電磁シャワーの陽電子を利用する。それらをフラックスコンセントレータのパルスソレノイド磁場で収束しながら加速空洞へ導き、DC ソレノイド磁場中に設置された陽電子捕獲ライナックで加速する。

ILCでは大電流のマルチバンチ陽電子ビームが要求されるため、このライナックの加速空洞には、いくつかの課題がある。まず、ターゲット付近の加速空洞では、アイリス部付近に電磁シャワーが当たり 20kW 程度の大きな発熱が予想され、この冷却が必要となる[2]。また、大電流を加速するためビームローディングの影響を補償する必要がある[3]。さらに、電磁シャワーによる高い放射化が起こり、加速空洞はソレノイドに囲まれてもいるため、人の手では作業できず、交換の際には、遠隔操作による装置との接続が必要となる[2]。

そこで、この捕獲ライナック用の加速空洞として L バンドの Alternating Periodic Structure (APS) [4] の加速空洞を検討している。これは二重周期構造をもつ、 $\pi/2$ モードの定在波管で、電界が無いセルを縮めてシャントインピーダンスを高めたものである。陽電子捕獲率向上のため幾何学的アパーチャーを大きく取れ、また、 $\pi/2$ モードでは群速度が大きくセル間のエネルギーのやり取りがあるため、ビームローディングやセルの変形などの外乱に強く安定性が高い。進行波管でアパーチャーを広げると群速度が上昇し電界が大きくできないので、 $\pi/2$ モード定在

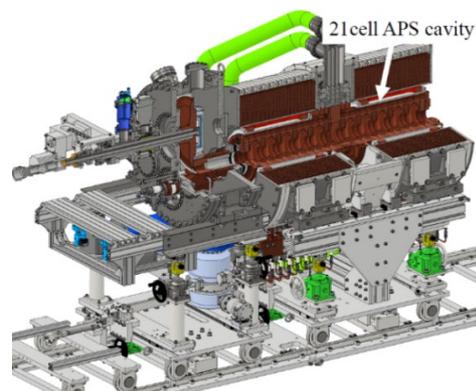


Figure 1: 3D model of the prototype positron source on the test bench at STF.

波管であるこちらを採用した。

この APS 加速空洞の RF 設計を SUPERFISH[5] や CST studio[6] を使用して昨年より行っており[7]、今年度から試作空洞や測定装置の製作を始め、来年度にかけて実際に加速空洞を製作していく予定である。

製作した APS 加速空洞は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の超伝導リニアック試験施設 (STF) 棟内に設けたテストベンチ (Fig. 1)[2] に導入する。このテストベンチは、ターゲットから 1 本目の加速空洞までの装置を実際に設計・製作し、製作、設置、運用などに関する課題を洗い出し、試験するためのものである。

製作した加速空洞に関しては、冷却や遠隔制御による接続の試験、他の装置とのスペースの取り合いの確認などを行う予定である。遠隔操作を考え、加速空洞のピ

[#] mfukuda@post.kek.jp

ームラインとの接続部はピローシールになっている。また、架台はレールの上に乗っており、交換の際にビーム軸方向に移動できるようになっている。

本稿では、この加速空洞の RF 設計および製作方法について検討の現状を報告する。

2. APS 加速空洞の RF 設計

製作する L-band 1.3GHz APS 加速空洞は、加速セル 11 個と、その間にある薄い結合セル 10 個からなる $\pi/2$ モードの 21cell 定在波加速空洞であり、中央の加速セルがカプラーセルとなっている(Fig. 1)。

加速セル、結合セル、エンドセルについては、ディスクの厚さを 20 mm にして、ここにも冷却水路を確保した空洞設計を行い(Fig. 2)、参考文献[7]にて報告している。

ここでは、製作の事情を考慮して再設計を行ったカプラーセル、それを組み込んだ 21cell APS 空洞の特性、チューナーの応答について説明する。

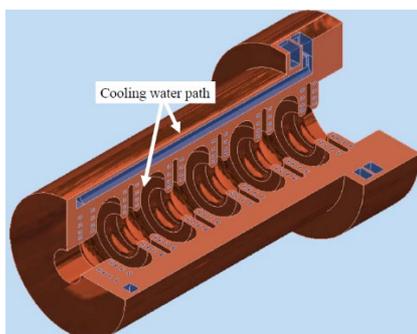


Figure 2: The blue area shows the cooling water path of an APS cavity. There is also a channel inside the disk to cool the heat load from the electromagnetic shower.

2.1 カプラーセル

大電流のビームローディング補償を行うため、21cell 空洞の時のカップリング β は最大 5 のオーバーカップリングを想定している[3]ので、この値に調整した。

最初は、カプラーセル単体でカップリングの調整を行った。21cell 空洞でカップリング β が 5 になるには、単体では 50 程度のカップリングになるように調整する。あとは、21cell 空洞に組み込んで確認し微調整を行うことを繰り返し合わせこんだ。

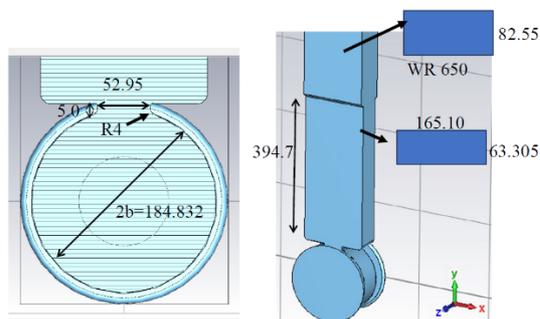


Figure 3: Geometry of a coupler cell.

穴の形状は、大きなカップリングを実現するため、Fig. 3 のように Slot 型[8]とし、ビーム軸方向はセル長と同じ 63.305 mm とし、ビーム軸と垂直方向の長さでカップリ

ングを調整した。導波管と加速空洞をつなぐ穴の長さは、短くすればカップリングは強くなるが、剛性を保つため 5 mm とした。この穴の空洞側の穴の淵は、磁界が集中し表面電流により発熱が予想されるため、R 加工を 4 mm でを行い磁界の集中を緩和している。

導波管は WR650 だが、カプラーセルに接続するため、途中からビーム軸方向の B 寸法(82.55 mm)をセル長と同じ 63.305 mm に合わせ薄くしている。セルから管内波長($\lambda_g=322.2$ mm)の 1.225 倍のところまでが薄い区間となっている。この段差部分は段差の高さの半分の半径で R 加工している。

カップリングや共振周波数は、CST Studio の Frequency domain のソルバーで計算した。セルの両端は結合セルのハーフセルになっており、境界条件を横方向磁界 $H_t=0$ とし、カプラーセルのみに電界が立つ状態で 1.3 GHz になるように共振周波数を調整した。

カップリングは、穴サイズ、穴の長さ、穴の R 加工、導波管の段差の位置で変化する。これらの依存性を見たのが Fig. 4 である。ほとんどはスキャンした範囲で線形に近い形で変化しているが、段差の位置は管内波長 $\lambda_g(=322.21$ mm)の周期で変化している。穴の長さや R 加工は先に述べた理由で決まり、あとはカップリングと共振周波数をそれぞれ穴サイズとセルの直径(2b)で調整した。導波管の段差の位置はカップリングが最大となる位置に合わせた。一番近い $\lambda_g/4$ 付近は、製作上作るのが難しいので、次に高い $1.225\lambda_g$ を選択した。

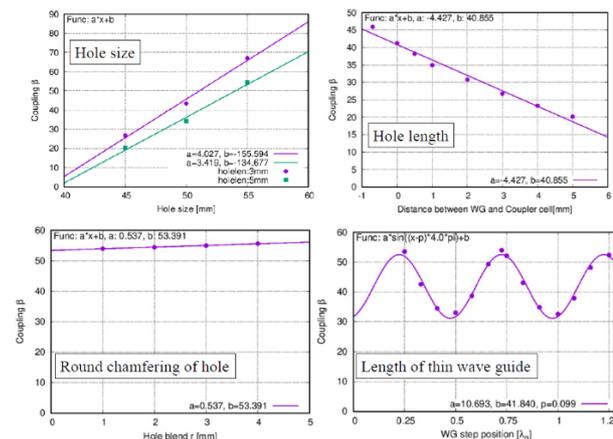


Figure 4: Dependence of coupling on each parameter.

最終的にカップリング $\beta=46.7$ 、共振周波数 1.3 GHz に調整した。これらの値は、Fig. 5 の反射 S11 やそのスミスチャートのデータから算出した。その時の各所の寸法は Fig. 3 の通りとなる。

このカプラーセルを 21cell 空洞に組み込んだときカップリングは、 $\beta=5.05$ となった。詳細は 2.2 節で説明する。

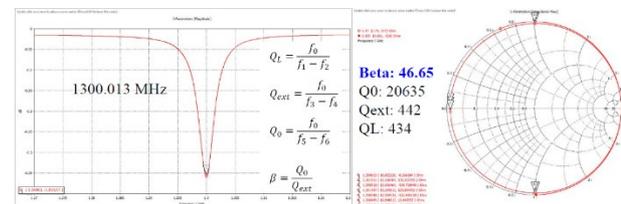


Figure 5: S11 and Smith chart of a coupler cell.

2.2 21cell APS 加速空洞

これまでに設計した加速セル、結合セル、エンドセル、カプラーセルを組み合わせ、21cell の加速空洞を構成し、CST Studio を用いたシミュレーションにより APS 加速空洞のパラメータを算出したものが、Table 1 となる。

Table 1: Parameters of 21cell APS Cavity

| | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Frequency ($\pi/2$) [GHz] | 1.300 |
| Cell-to-cell group velocity | 0.0263c (c: light speed) |
| Shunt impedance [M Ω /m] | 35.0 |
| Eacc [MV/m] | 6.5 |
| Vacc [MV] | 8.2 |
| Input RF power [MW] | 10.0 |
| Coupling β | 5.05 |
| Q0 | 22800 |
| Filling time [μ m] | 1.0 |
| Cavity length [m] | 1.268 |

各モードの共振周波数をプロットした分散曲線は Fig. 6 左上となり、運転に使う $\pi/2$ モードの電界分布になるのは矢印で示したところとなる。共振周波数は 1.3GHz で、この傾きから群速度は光速の 2.63%となる。

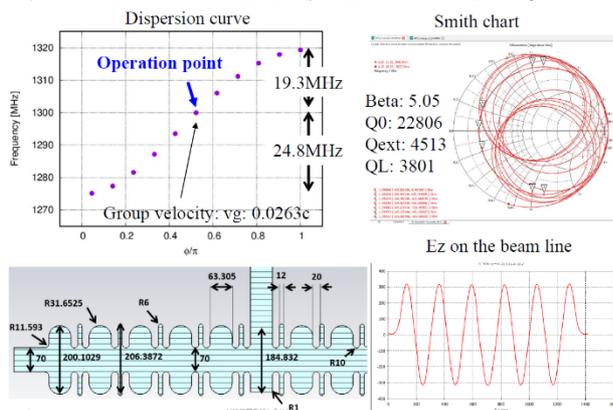


Figure 6: Dispersion curve, Smith chart of S11, electric field strength on a beamline and geometry of cavity for the 21cell APS cavity.

Figure 6 右上にあるスミスチャートから得られた Q 値より算出したカップリング β は 5.05 と目標の値を得られた。

ビーム軸上の進行方向の電界強度の分布 (Fig. 6 右下) は、各セルで同じ強度でありフラットネスは良い。また、この分布から光速の粒子に対するシャントインピーダンスを計算すると、35.0 M Ω /m となる。

エンドセルから伸びたパイプに、加速空洞内の電界強度をモニターするためのピックアップアンテナを設けており、そこに来るパワーの時間変化が Fig. 7 となる。このデータから求めた Filling time は 1 μ s となった。ここを同軸構造にしておくと、入力パワーから -67 dB 下がったパワーがピックアップでき、入力パワー 10 MW の時、3 dBm がピックアップされるのでモニターは十分可能と予想される。

加速空洞表面で電界の一番強い場所は、ビームが通

るアイリスの加速セル側となっており、10 MW の RF を入力したとき最大電界は 20 MV/m である。これは 1.3GHz のキルパトリック限界 [9] である 32.1 MV/m と比較しても、それほど高くないため問題ないと思われる。

最終的な加速空洞の寸法は、Fig. 6 の左下のようになっている。

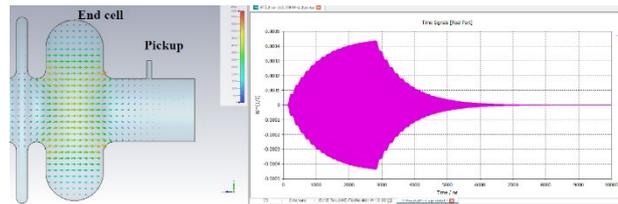


Figure 7: Signal of a pickup monitor.

2.3 チューナーの特性

APS 加速空洞の各々の加速セルには、セルの共振周波数を微調整するためのチューナーが付いている。セルの赤道付近に均等に 6 か所 (各所に 2 個ずつ) のチューナーがあり、その先端の直径は 20 mm、先端部の厚さは約 3 mm である。その薄い壁面を押し引きして、周波数を調整できるようになっている。

Figure 8 は、そのチューナーの位置とセル番号を示したものであり、加速セルを AC、結合セルを CC として端から番号を振っている。シミュレーションでは、簡単にするため、チューナーは赤道に 6 か所設けて直径 20 mm で押し込んだときの周波数変化を調べている。

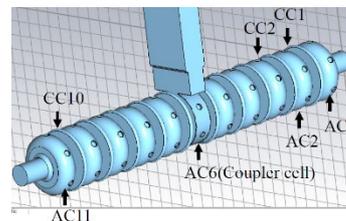


Figure 8: Cell number and tuner position.

加速セル単体の場合に、6つのチューナーを同じ挿入量で全て押し込んだときの周波数変化を調べたところ、0.5 MHz/mm となった。セルの直径を変えた時の周波数変化は 7.5 MHz/mm なので、チューナーを 2 mm 挿入できるとすると、セル径を約 100 μ m の変更した時と同じ調整しとなる。加工精度はこれよりずっと小さいと思われるので、チューナーの調整幅は十分と考えられる。

21cell 加速空洞の場合に、1つのセルのチューナーを6つとも同じ量で挿入し、各モードでの周波数変化を見た結果の例が Fig. 9 である。このグラフは、チューナー挿入時と設計値の分散曲線との差分となっている。

これを見ると、どの加速セルのチューナーを挿入するかで、パターンが異なるのが分かる。これは加速モード以外の位相進みのモードでは摂動を受けるセルでの電界強度が違い、電界強度が強いセルに摂動があつてそのモードの共振周波数が大きくずれて運転周波数に近づく時には、そのモードが大きく励振される、というメカニズムに関係する。逆に言うと、このパターンからどのセルの共振周波数がデザインとずれているかが推測できると思われる。

Figure 9 右のグラフは、結合セルのセル径(2b)を±0.1 mm 変化させたときの各モードでの周波数変化で、加速セルの時と同じようなパターンが出ているのが分かる。これも先ほどと同じ理由でモードによってセルでの電界強度が違うために起きている。

このパターンを加速セルの時と比べると、例えば AC1 と CC5 は同じ形になっており、対になるものが存在している。このことから、結合セルの周波数がずれた時も加速セルのチューナーで補正ができると考えられる。ただし、オフセットが異なっており、加速セルではゼロを中心に上下両方に動くのに対し、結合セルではゼロをベースにそれより上または下に動く。よって、修正後も全体的な周波数オフセットが残るため、最後に加速空洞の温度により共振周波数を合わせこむ必要は出てくる。

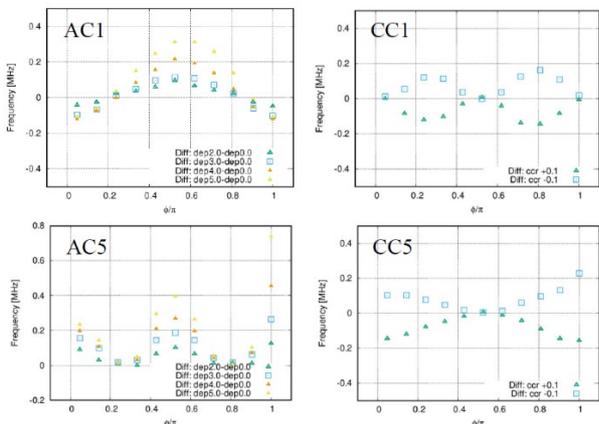


Figure 9: Frequency change in each mode when tuners are inserted in a certain cell.

3. 加速空洞製作

3.1 製作手順

加速空洞のRF設計は完了し、今年度は試作による製作上の問題の洗い出しと製作や共振周波数などの測定に必要な治具の準備を始め、来年度には加速空洞を完成させる予定となっている。

加速空洞は、加速セルと結合セルのハーフセルをつなげたレギュラーセル、エンドセル、4つのパーツから成るカプラーセル、導波管、フランジの各パーツを製作し、これらを組み合わせて構成する(Fig. 10)。空洞材料は、無酸素銅(C1011)を使用する。

これらパーツの製作手順は、まず部材から切り出し、

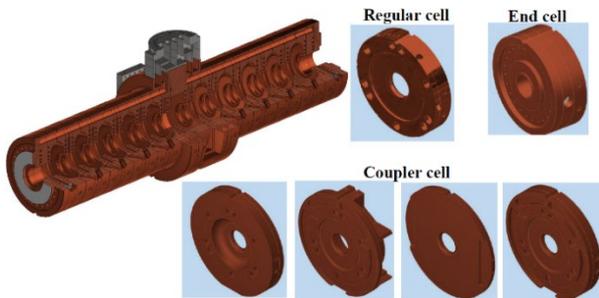


Figure 10: 3D model of APS accelerating cavity and the assembly parts of each cell.

外径水路加工、ホットプレス、中仕上げ加工、応力除去焼鈍、仕上げ加工となる。ディスクにも水路を通すため、先にディスク部に溝を掘って加速セルと結合セルのハーフセルと組み合わせることで水路を構成する。これは加速空洞の仕上げ加工の前に行う必要があるため、製作時の加速空洞部のパーツは加速セルと結合セルのハーフセルを組み合わせたレギュラーセルの形となる。

仕上げ加工後、各セルの共振周波数やカップリングを測定する必要があるが、これには、以降の節で説明する。

測定後、調整加工、確認のための周波数やカップリング測定、ビーズプル法[10]による加速電界分布の測定を経て、ロウ付けすることになる。ロウ材は銀ロウを使用する。最後に加速空洞として組み上がった状態でもう一度一通りの測定を行い、必要があればチューナーなどで調整を行い、完成となる。

3.2 共振周波数測定

APS 加速空洞のような二重周期構造の場合、加速セルと結合セルの周波数が合致していること(合流条件)が必要となる。これが不一致だと、加速に利用する $\pi/2$ モードにおいて、高い群速度が得られなくなる。

そこで、21cell に組み上げる前の製作段階で各々の加速セルと結合セルの周波数を測定し、必要があれば共振周波数を1.3GHzに調整する。

レギュラーセルは、両端を金属板で塞ぎ、そこにRF入力用のアンテナを取り付けて、共振周波数を測定する。加速セルと結合セルの2つがあるため、片方にデチューナーを挿入し、片側のセルだけ見るようにする(Fig. 11)。

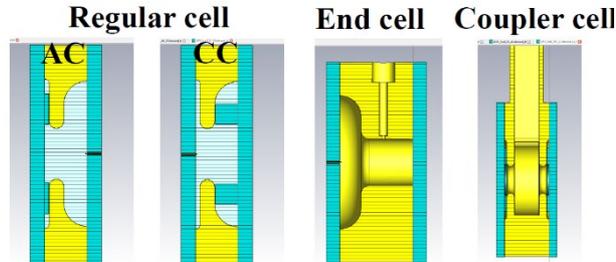


Figure 11: Setup of frequency measurement of each cell.

エンドセルは、パイプとハーフセルだけなので、そのまま両端を金属板で塞げばセルの共振周波数が分かる。

カプラーセルは、RF 入力のための穴があり分割方法が他とは違うため、両端に結合セルのハーフセルが付いた形状で両端を金属板で塞ぎ、結合セルはデチューンした状態にしてカプラーセルのみの共振周波数を測定する。RFは導波管から入力する。

両端の結合セルのうち、カプラーセルと一体となっているほうは、カプラーセルにデチューナーを挿入して共振周波数を測定する。

もう片方の結合セルは直接測定する方法がないので、カプラーセルと両端に結合セルのハーフセルがある状態で両端を金属板で塞ぎ、その $\pi/2$ モードの共振周波数から推定する。 $\pi/2$ モードの共振周波数は、両端の結合セルの共振周波数の平均となるため、片方が既知であれば、もう片方の周波数を推定できる。

デチューナーは、リング形状となっており、挿入位置はそのずれによる周波数変化が緩い場所にして、誤差によ

る影響を減らすようにした。Figure 12 にデチューナーの位置、サイズを示す。

デチューナー挿入時に測定される共振周波数は、デチューナーの影響により、挿入されていないほうの加速空洞本来の共振周波数からは少しずれる。そこで、1.3GHz の加速空洞の場合に、デチューナー挿入時は共振周波数がいくつになるか調べておく必要がある。

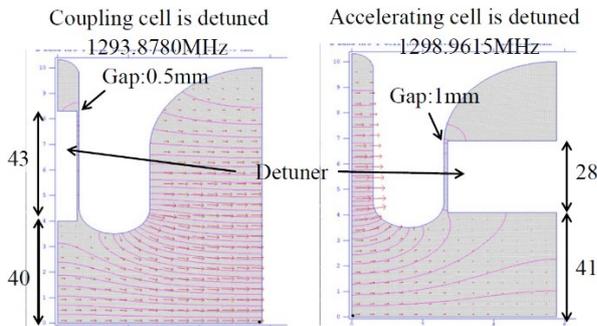


Figure 12: Geometry of detuners.

Table. 2 が、Fig. 11 のようなデチューナー挿入時の共振周波数である。いずれも加速空洞本来の共振周波数は 1.3 GHz である。デチューナー挿入時に、各セルをこの周波数になるように調整すればよい。

単セルの周波数測定の外に 21cell 加速空洞に組み上げ状態でも、導波管やピックアップを用いた S パラメータ計測から、空洞モードの分散曲線や導波管から見た反射特性の測定を行う。また、ビーズプル法により、ビーム軸上の電界強度分布も測定する。これらの装置については、現在検出中である。

Table 2: Frequency When Detuners Is Inserted

| Accelerating cell [MHz] | 1293.634 |
|-------------------------|----------|
| Coupling cell [MHz] | 1298.022 |
| End cell [MHz] | 1299.711 |
| Coupler cell [MHz] | 1293.799 |

3.3 共振周波数およびカップリング調整

基本的にはチューナーで共振周波数を調整するが、調整範囲を超えている場合には、加速空洞内のディスク部の壁面に薄い溝を追加して周波数を調整する。レギュラーセルは、加速セルと結合セルのハーフセルを組み合わせた状態となっているため、空洞の半径(2b)の加工は難しいためである。また、片方のハーフセルだけ削ると合わせ目段差ができてしまう。

共振周波数の調整方向は、壁面を削る場所で選べる。Figure 13 のグラフは、溝の深さと周波数変化を計算した結果で、電界の強い場所を削る (Fig. 13 下図) と共振周波数は上がり、磁界の強い(電界の弱い)場所を削る(Fig. 13 上図)と下がる。また、溝を加工したセル(図では右のセル(AC))のみ共振周波数が変わり、隣のセル(CC)には影響がないことも分かる。

実際に掘ることになる溝の深さは大きくても 100 μm 程度で、段差部も実際にはスロープにするため、放電など

の心配はないと考えている。

カップリング調整は、大きくずれている場合には行う。穴サイズを広げればカップリングは上昇し、導波管の B 寸法が変わる段差の位置をずらせば下げられる。ただし、例えこれらが数 100 μm ずれてもカップリングは数%ずれる程度なので、加工精度からすると調整は不要になると予想される。

4. まとめと今後

昨年より ILC 陽電子源の捕獲ライナック用加速空洞として L-band APS 加速空洞の設計を行っており、加速空洞の RF 設計は完了し、図面化および試作による製作時の問題点の確認を始めている。

この電子駆動タイプの陽電子源は ILC だけでなく、将来建設が計画されている他の電子・陽電子コライダーでも検討されており、この開発は将来加速器の性能向上にもつながる。

今後は、製作時に行う共振周波数、カップリング、ビーム軸上の電界強度の測定方法の検討、および、測定治具の設計・製作を今年度行っていく予定である。そして、来年度の加速空洞の完成を目指していく。

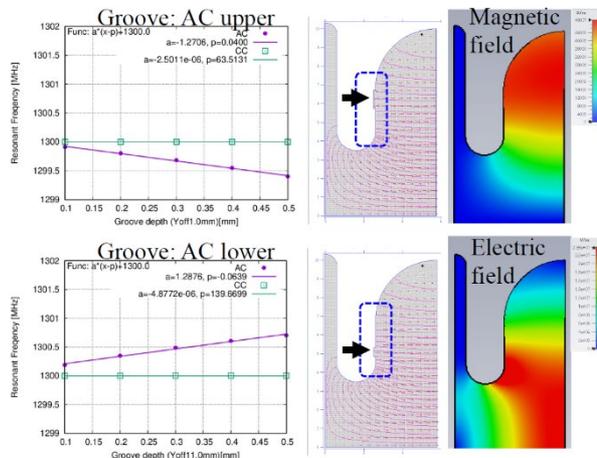


Figure 13: Graphs show the frequency changes with groove depth. The purple and green lines show the frequency of the accelerating cell and the coupling cell, respectively. The right figures illustrate the groove locations and corresponding electromagnetic field strengths.

謝辞

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, <https://linearcollider.org/technical-design-report/>
- [2] Y. Enomoto *et al.*, “Present status and plan on development of positron source for ILC in KEK iCASA”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, THP36, pp766-768.

- [3] M. Kuriki *et al.*, “A study of beam loading effect and its compensation on alternate periodic structure cavity on E-driven ILC positron source”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Takasaki, Japan, Aug. 2023, MOP031, pp315-319.
- [4] S. Giordano, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-12, 213 (1965).
- [5] T. Menzel and H.K. Stokes, User’s Guide for the POISSON/SUPERFISH Group of Codes (Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 1987).
https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
- [6] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [7] M. Fukuda *et al.*, “Design of an L-band alternating periodic structure(APS) cavity for the ILC positron capture linac”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, FRP52, pp985-989.
- [8] D. Alesini, “Power coupling”, CERN Yellow Report CERN-2011-007, pp. 125-147.
- [9] Thomas P. Wangler, “RF Linear Accelerators”, pp163-164.
- [10] H. Klein, CERN Acc. School RF Engineering for Particle Accelerators, CERN 92-03, vol.I, pp112-118.