

## ILC 陽電子捕獲ライナック用 L バンド APS 加速管の設計

### DESIGN OF AN L-BAND ALTERNATING PERIODIC STRUCTURE (APS) CAVITY FOR THE ILC POSITRON CAPTURE LINAC

福田将史<sup>#,A)</sup>, 榎本嘉範<sup>A)</sup>, 早野仁司<sup>A)</sup>, 森川祐<sup>A)</sup>, 栗木雅夫<sup>B)</sup>

Masafumi Fukuda<sup>#,A)</sup>, Yoshinori Enomoto<sup>A)</sup>, Hitosi Hayano<sup>A)</sup>, Yu Morikawa<sup>A)</sup>, Masao Kuriki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization: KEK

<sup>B)</sup> Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

#### Abstract

In the electron-driven positron source of the International Linear Collider (ILC), positrons are produced by the electromagnetic shower generated when a 3 GeV electron beam is injected to a target. They are accelerated by a capture linac in a solenoidal magnetic field. Beam loading compensation is an important issue because of the acceleration of the high-current multi-bunch positron beam. In addition, in the first accelerator tube, the heat load from the electromagnetic shower is expected to be as high as 10 kW or more, and the temperature of the accelerator tube iris is expected to rise. Therefore, we will use an L-band Alternating Periodic Structure (APS) type accelerating tube, which has bi-periodic structures operated in  $\pi/2$ -mode. It has large group velocity and has relative stability against the beam loading and detuning effects compared with  $\pi$ -mode. In addition, it is necessary to consider space limitations for cooling channels and fitting into the solenoid coils. We are currently designing an APS cavity using SUPERFISH and CST Studio and will report on the design status of this accelerator tube.

#### 1. 陽電子捕獲ライナック用加速管の課題

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、陽電子生成に 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起きる電磁シャワーを利用する。

それら陽電子は、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されながら加速管へ入射され、DC ソレノイド磁場中の陽電子捕獲ライナックで加速される。

ターゲットに近い最初の加速管では、ターゲットからの電磁シャワーによる熱負荷が 10 kW 以上と非常に大きく、加速管のアイリス部の温度上昇が予想され、この冷却が課題となる。また、大電流のマルチバンチ陽電子ビームを加速するため、ビームローディング補償も課題となる。

この捕獲ライナック用の加速管として L バンドの Alternating Periodic Structure (APS) [2] の加速管を検討している。APS 空洞は、 $\pi/2$  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。また、 $\pi/2$  モードなので群速度が大きく、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周波数誤差などの外乱に強くなる。

加速管の設計に際しては、RF 空洞の構造の他に冷却水用の流路、ソレノイドコイル内へ収めるためのスペースの制限、予想される強い放射化かつ狭い場所での交換時の切り離し方法などの検討も必要となる。

そこで、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) 棟内にテストベンチ (Fig. 1) を設け、密に装置を配置するためスペースの取り合いが難しい、ターゲットから 1 本目の加速管までを実際に製作し、試験を行うことを計画している [3]。この計画は 5 年で、加速管に関しては、1 年目に設計、2 年目に製作、3 年目で冷却や Low level での RF 試験を行う。また、3 年目か

らは、1 本目で判明した課題を踏まえて改良版の加速管をもう一度製作することを計画している。

現在は、SUPERFISH [4] や CST studio [5] を使用し、冷却水路のスペースを考慮した RF 空洞形状の設計を行っている。本稿では、これについての現状を報告する。

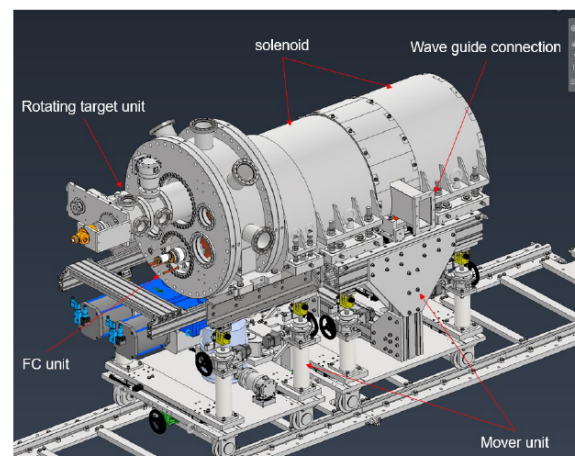


Figure 1: 3D model of the prototype positron source in the testbench.

#### 2. SUPERFISH による APS 加速空洞設計

##### 2.1 設計方針

最初に、加速管を構成する空洞の内、円筒対称の構造を持つ加速セル、結合セル、エンドセルの 3 種類の空洞設計を SUPERFISH で行うことにした。カップラーセルは円筒対称ではないので、別途 CST studio で設計する。

APS 空洞の加速管は、ILC TDR [1] にある 11 セル定在波管とだいたい同じ長さになるように 11 個の加速セル

<sup>#</sup> mfukuda@post.kek.jp

と、10 個の結合セルの合計 21 セルの APS 空洞とした。SUPERFISH で計算する場合は、中央のカップラーセルを加速セルに置き換えている。

加速管のディスク部分に通す冷却水路は、水路を太くして流量を大きくするため、ディスクを可能な限り厚くする。アイリス部での電磁シャワーによる発熱を取り除くためには、ここの冷却水効率を高める必要があるためである。

まずは想定されるビームローディング補正の計算[6]が行われてきた際に仮定していた空洞構造をもつ 21 セルの APS 加速管を構成し、これをベースにディスク厚をなるべく厚くすることを検討することとした。ベースとなる RF 空洞のディスク厚は 10 mm である。

この際に、ビームローディング補正に関わる群速度は、初期のデザインの値を維持し、その際に起こるシャントインピーダンスの減少はある程度妥協することとした。

## 2.2 合流条件

APS 空洞は陪周期構造を持っているので、 $\pi/2$  モードで群速度を持つには合流条件を満たす、つまり加速セルと結合セルの共振周波数を同じにする必要がある。この周波数が違っていると、分散曲線が 2 つに分離し、使用する  $\pi/2$  モードでは群速度がゼロになってしまう。

実際に、8 セルの APS 空洞を構成し、加速セルと結合セルの共振周波数を  $\pm 5$  kHz 以内で 1.3 GHz に合わせたときの分散曲線が Fig. 2 左となる。連続した曲線で群速度が  $\pi/2$  モードで最大となっているのが分かる。

一方、結合セルの直径を  $\Delta c = 2.5$  mm 変更し、共振周波数を -38 MHz 分ずらしたときの分散曲線が Fig. 2 右となる。加速セルと結合セルの共振周波数がずれると、分散曲線が 2 つに分かれ不連続となってしまう、加速に使用する  $\pi/2$  モードのところでは傾きがゼロ、つまり群速度がゼロになっているのが分かる。

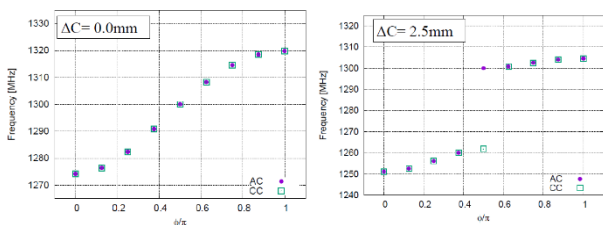


Figure 2: Dispersion curve in the 8cell APS cavity.

## 2.3 共振周波数の調整方法

加速管に供給される RF 周波数は 1.3 GHz となっている。加速に使用するのは  $\pi/2$  モードなので、加速セル、結合セル、エンドセルのそれぞれ単体での共振周波数を 1.3 GHz になるように調整した。

共振周波数を合わせるため、加速セルと結合セルは、それぞれのセルの直径である、2b、2c を変更し、アイリス径である 2a は固定とした (Fig. 3)。

加速管両端にあるエンドセルは、基本的には加速セルと同じだが、片側が真空パイプになっている。この共振周波数は、パイプとの接合部の R 加工の半径を変更して調整し、2b は加速セルと同じとした。

最後に、これら 3 種類のセルを組み合わせると 21 セルの APS 加速管を構成し、SUPERFISH による計算を進めていった。

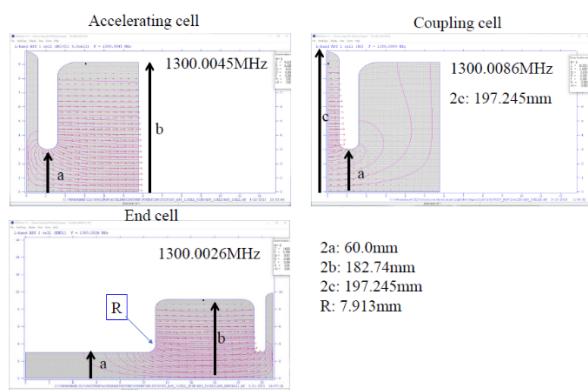


Figure 3: Structures of an accelerating cell, a coupling cell and an end cell.

## 2.4 ディスク厚 10 mm の 21cell APS 加速管

ディスク厚 10 mm において、21 セル APS 加速管を構成し計算する際の空洞形状を Fig. 4 に示す。この形状を SUPERFISH に入力して計算した。

全部で 21 個あるモードの周波数を計算して出した分散曲線、および、ビーム軸上の電界  $E_z$  の分布が Fig. 5 となる。各タイプのセルの共振周波数を 1.3 GHz に合わせたので、使用する  $11\pi/21$  モードでも 1.3 GHz になっている。また、 $E_z$  の分布のフラットネスも良い。

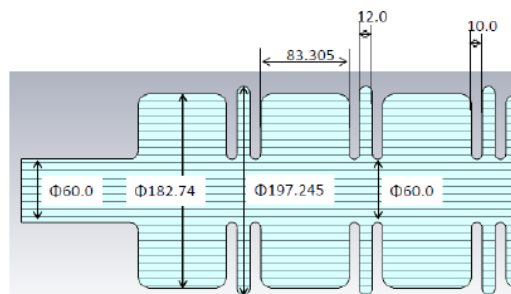


Figure 4: Cavity structure of the 21cell APS cavity with the disk thickness of 10 mm.

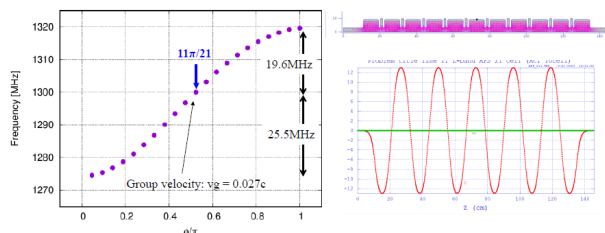


Figure 5: Dispersion curve and  $E_z$  distribution of the 21cell APS cavity with the disk thickness of 10 mm.

この分散曲線の傾きから群速度を表しており、傾きが最大となる  $11\pi/21$  モードで光速の 2.69% となっている。このモードが加速に使用するモードである。

また、シャントインピーダンスは 54.6 MΩ/m となった。その他 SUPERFISH で計算した、この 21 セル APS 加速管の  $11\pi/21$  モードにおけるパラメータは Table 1 の通りである。

Table 1: Parameters of 21cell APS Cavity With the Disk Thickness of 10 mm

Shunt impedance[MΩ/m]	54.6
Transit-time factor	0.635
Q0	24977
r/Q[Ω]	1120
Group velocity	0.0269c (c: light speed)
Cavity length [mm]	1268

### 2.5 ディスク厚変更によるパラメータの変化

水路スペースを増やすためディスク厚を増やした場合、群速度やシャントインピーダンスなどのパラメータがどう変化するかを調べた。

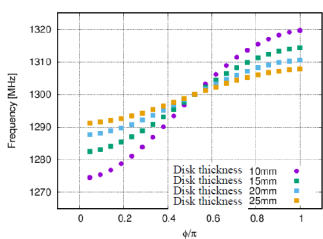


Figure 6: Dispersion curves of the 21cell APS cavity when the thickness is changed.

他の構造は変えず、ディスク厚のみを 25 mm まで増やした場合の各厚さでの分散曲線が Fig. 6、このときの群速度とシャントインピーダンスの変化をプロットしたものが Fig. 7 (丸点) である。

この計算の際、ディスク厚を増やした分、加速セルのビーム軸方向の長さ、加速セル長を短くし、結合セル長は 12 mm で固定した。これによって、加速セルと結合セルでの合計の長さは同じになるようにし、光速の陽電子を加速する際に、位相がずれないようにした。この合計の長さは 1.3 GHz の半波長分の長さ(115.3 mm)にする必要がある。以降の計算でも同様の処置をとっている。

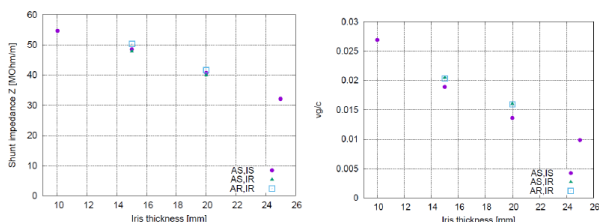


Figure 7: Shunt impedance and group velocity of the 21cell APS cavity when the thickness is changed.

これらのグラフを見ると、ディスク厚が増すと、Mode separation が減少し、傾きも小さくなるため、群速度が下がってしまうことが分かる。これは、ディスク厚を厚くした際に、アイリス部の R 加工の半径を変更していないため、先端にフラットな部分が出てしまい、セル間のカップリングが減少したためと考えられる。また、厚くなるとシャントインピーダンスも減少している。

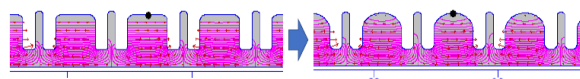


Figure 8: Cavity structure.

そこで、Fig. 8 のようにディスクの厚さの半分の R で加工することでアイリス部先端を半円にし、さらに加速セルの円筒部分の R もセル長の半分の半径にして丸い形にした。各セルの共振周波数を合わせ直し、計算した結果が Fig. 7 の三角点と、白抜きの四角点になる。三角はアイリス先端を丸くした時で、こうすると群速度が上昇する。また、白抜きの点の加速セル形状を丸くした時で、こうするとシャントインピーダンスが上昇する。

次に、この状態からさらに結合セル長を変えるとどうなるか調べた結果が Fig. 9 となる。ディスク厚 15 mm(四角点)と 20 mm(丸点)について計算した。ここからは、計算コストを減らすため、加速セルと結合セルの 2 セル構成で計算している。モードは 0, π の 2 つしかなくなるが、この周波数差、つまり Mode separation が広がれば、群速度も上昇するという関係になっている。また、21 セルでも 2 セルでもこの Mode separation はほぼ同じである。よって群速度が改善したかは、Mode separation で判断できる。

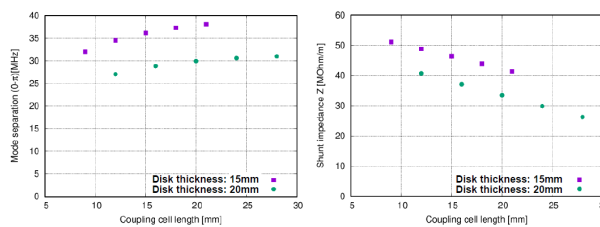


Figure 9: Mode separation(0-π) and Shunt impedance as a function of the coupling cell length.

ディスク厚を変えず結合セルの長さを増やしていくと、Mode separation は上昇する、つまり群速度が上昇する。ただし、ディスク厚と結合セルの長さが同じくらいになったあたりから、その伸びは小さくなる。また、シャントインピーダンスは逆に下がっていく。よって、ディスク厚と結合セルの長さが同じか少し長いところを選択するほうが良く、それ以上長くするメリットは無いようであった。

最後に、さらに群速度を回復させるため、セル間のカップリングが変わるアイリス径(2a)の変更をした場合を計算した。これまでの計算から、ディスク厚 25 mm は群速度やシャントインピーダンスの落ち込みが大きいので、ディスク厚は 15 mm と 20 mm の場合のみ計算するとし、結合セル長は初期の 12 mm と、それぞれのディスク厚より少し長い値 18 mm と 24 mm を選択した。

その結果が Fig. 10 で、アイリス径を大きくすると Mode separation、つまり群速度が大きく上昇し、ディスク厚 10 mm の時の光速の 2.7% まで回復できることが分かる。ただし、アイリス径を広げるとセル間カップリングが変わり、シャントインピーダンスは下がってしまう。

Mode separation が 10 mm 厚の時とほぼ同じになるのは、ディスク厚 15 mm、結合セル長 18 mm、アイリス径 65 mm とディスク厚 20 mm、結合セル長 12 mm、アイリス径 70 mm の場合である。この時に シャントインピーダンスは、10 mm 厚の時の 7 割程度に落ち込む。

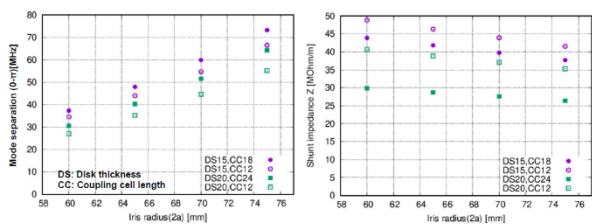


Figure 10: Mode separation(0- $\pi$ ) and Shunt impedance as a function of the iris radius.

この 2 つのうちどちらを選択するかであるが、ディスク厚 20 mm、結合セル長 12 mm、アイリス径 70 mm でデザインを進めることとした。これはシャントインピーダンスの落ち込みはどちらも同程度であること、水路のスペースをできるだけ確保したいこと、アイリス径が大きいほうが電磁シャワーの衝突は起こりにくいことを考慮して決めた。

ディスク厚 20 mm の空洞形状で構成した 21 セルの APS 加速管の分散曲線や各パラメータが Fig. 11 や Table. 2 となる。

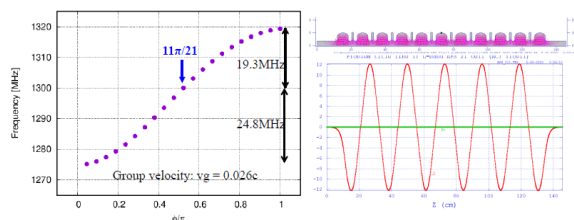


Figure 11: Dispersion curve and  $E_z$  distribution of the 21cell APS cavity with the disk thickness of 20 mm.

Table 2: Parameters of 21cell APS Cavity With the Disk Thickness of 20 mm

Shunt impedance[MΩ/m]	38.5
Transit-time factor	0.652
Q0	22920
$r/Q[\Omega]$	907
Group velocity	0.0263c (c: light speed)
Cavity length [mm]	1268

分散曲線の傾きから計算した群速度は、ディスク厚 20 mm の時で光速の 2.63 %となり、ディスク厚 10 mm の時とほぼ同じとなった。

また、シャントインピーダンスは、ディスク厚 10 mm の時の約 7 割程度に下がった。これは 2 セルで計算したときと同じ結果となっている。シャントインピーダンスは下がってしまったが、この量は許容するとした。

最終的なディスク厚 20 mm の空洞形状の寸法を Fig. 12 に示す。

### 3. CST studio によるカップラー空洞設計

加速管へ RF を入力するためのカップラーセルは、円筒対称ではなく SUPERFISH では計算できないため、3 次元の計算ができる CST Studio を用いてデザインを行った。SUPERFISH でデザインした空洞形状(Fig. 12)を

CST Studio に入力して分散曲線が再現するか確認したが、差はわずかで同じ結果が得られている。

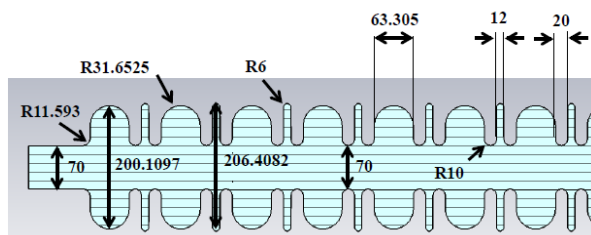


Figure 12: Cavity structure of the 21cell APS cavity with the disk thickness of 20 mm.

大電流のビームローディング補償を行うため、RF カップラーの入力カップリング $\beta$ は最大 5 とオーバーカップリングを想定している。最初、カップラーセル単体で計算してカップリングを 50 に調整し、その後 21 セルの APS 加速管の中央の加速セルの部分にカップラーセルを組み込み、この時のカップリングが 5 になるかを確認するという方針で調整を行った。21 セル APS 加速管の場合、カップラーセル単体での入力カップリングの約 1/10 になる。

カップラーセルの穴の形状は、カップリングを大きくするため、Fig. 13 のような穴を大きくとれる Slot 型にした[7]。導波管(WR-650)を加速空洞に接続する形になっており、セルの空洞形状は円筒形状にしている。導波管をセルへ押し込む深さを変えると、重なる面積が増え、穴サイズが広がる。穴の淵の R 加工は  $R = 1$  mm で行っている。

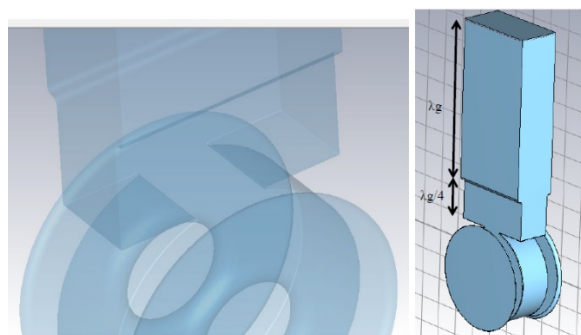


Figure 13: 3D model of coupler cell.

セル長は加速セル長(63.305 mm)と同じだが、これは導波管の B 寸法(82.55 mm)に比べて短いので、空洞から管内波長( $\lambda_g = 322.2$  mm)の 1/4 の場所で導波管寸法をセル長に合わせた(Fig. 13 右)。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。

この形状のカップラーのカップリングは、CST studio の Frequency domain で計算した。境界条件は、セルの両端は  $H_t = 0$ 、導波管の入力は Open とした。壁面の材質は銅になっている。

カップラーセルの共振周波数は、空洞の径(2b)で調整した。共振するところで S11 の反射信号が最小になるので、それが 1.3 GHz 付近になるようにした。

カップリングの算出は、S11 をスミスチャートで表示し、そこから求めた Q 値を使って計算した。S11 の測定の円がチャート円の右端に接するように合わせるため、RF 入力的位置を変えて位相を調整した。

カップリングは、Fig. 14 にある式を使用して算出した。ここで、 $\beta$ は入力カップリング、 $Q_L$ は負荷  $Q$ 、 $Q_{ext}$ は外部  $Q$ であり、 $Q_0$ は無負荷  $Q$ 、 $f_1$ は共振周波数、 $f_2$ 、 $f_3$ はスミスチャートの右端と上部の点を結んだ時の交点の周波数、 $f_4$ 、 $f_5$ は、リアクタンス  $X = \pm i$  の線との交点の周波数、 $f_6$ 、 $f_7$ は、インピーダンスの実部と虚部が等しくなる周波数である。

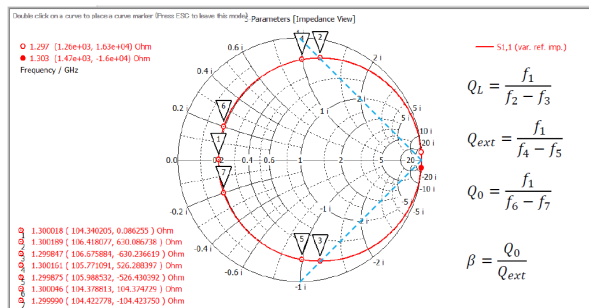


Figure 14: Smith chart.

Figure 15 左は、導波管を加速空洞側へ押し込む距離を変えて穴サイズを変えた時のカップリング $\beta$ の変化、穴サイズが広がると、カップリングが増加し、1 mm の時におよそ目標の 50 になっている。この穴サイズを選択した。空洞の径(2b)は固定なので、穴が大きくなると共振周波数は下がっていく。

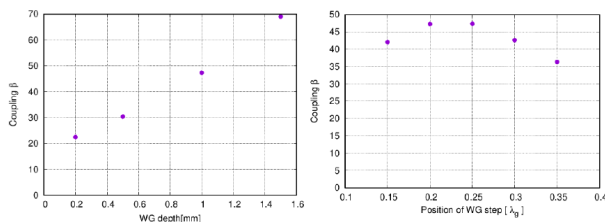


Figure 15: Coupling  $\beta$  as a function of the wave guide depth(left) and the step position(right).

導波管の B 寸法変更に伴う段差の位置をスキャンしてカップリングの変化を調べ、最適な位置を探したところ、最大となるのは  $0.23 \lambda_g$  となり(Fig. 15 右)、この時のカップリング $\beta$ は 47.3、 $Q_0$ は 20186、 $Q_{ext}$ は 427 となった。ただ、最初に決めた  $\lambda_g/4$  でも、最大のところとほぼ同じのため、段差の位置は  $\lambda_g/4$  の場所とした。

このカップラーセル単体で共振周波数を 3GHz に調整し 21 セルの APS 加速管に組み込んだが、加速に使用する  $11\pi/21$  モードでの共振周波数がずれており、ビーム軸上の  $E_z$  分布のフラットネスも悪かった。そこで、21 セルの状態でカップラーセルの径(2b)を調整し、加速に使う  $11\pi/21$  モードで 1.3GHz になるように合わせた。そうすると各セルの電界強度のフラットネスも良くなった。

カップリングは、これまでと同様に  $11\pi/21$  モード付近の S11 を表示したスミスチャートから求めた (Fig. 14)。そのカップリングは  $\beta = 5.1$  となり、ほぼ目標値となった。

21 セル APS 空洞に組み込んだまま調整したので、でカップラーセル単体の共振周波数を再確認したところ 1.30061 GHz と約 600 kHz ずれていた。ただし、カップリングは 47.5 とほとんど変わっていなかった。

#### 4. まとめと今後

陽電子捕獲ライナック用 APS 加速管の空洞設計を SUPERFISH と CST Studio を用いて行っている。ターゲットからの電磁シャワーによる発熱が厳しいため、太い冷却水路を通すためのスペースを作るためにディスク厚を厚くしたデザインを行った。各部の R 加工や結合セル幅、アイリス径を調整することで、群速度は初期のデザインのものを持続できた。ただし、シャントインピーダンスは 7 割程度に下がっている。RF を入力するカップラーセルのデザインも行い、穴サイズを調整して目標のカップリングである  $\beta = 5$  を達成できた。最終的な 21 セル APS 空洞の 3D モデルが Fig. 16 となる。

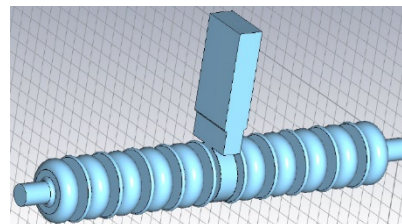


Figure 16: 3D model of 21cell APS cavity.

今後、計算した電界で粒子トラッキングを行い、ビームローディング補償などの計算を行っていく。また、空洞に関しては、電界や磁界、表面電流の集中を確認し、必要なら R 加工の調整による緩和の検討をしていく。

さらに冷却についてもシミュレーションを行い、どのように水路を配置するか決めていく。ILC の Undulator 方式の定在波加速管では、冷却水の流量 530 L/min とかなり大きな流量のデザインで、テスト空洞も製作している[8]。現在、これを参考に水路のデザインを進めている。

これらと並行して図面化や製作時の共振周波数などの測定方法、加工の進め方の検討などを行っていく、来年度は APS 加速管の製作に入っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, <https://linearcollider.org/technical-design-report/>
- [2] S. Giordano, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-12, 213 (1965).
- [3] 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, this meeting.
- [4] 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](https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml)
- [5] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [6] M. Kuriki *et al.*, "Beam Loading Compensation of Standing Wave Linac with Off-crest Acceleration", Proc. 13th International Particle Accelerator Conference, June 12 - 17, 2022, Bangkok, Thailand, pp. 1893-1896.
- [7] D. Alesini, "Power coupling", CERN Yellow Report CERN-2011-007, pp. 125-147.
- [8] Faya Wang *et al.*, "Performance of a 1.3 GHz Normal-Conducting 5-cell Standing-Wave Cavity", Proc. 14th Conference on Linear accelerator (LINAC 08), Victoria, Canada, Sep. 29-Oct 3, 2008, THP072, pp. 957-959.