

G=GwG2G8 æ7\ 9x Ø <7Á Ê5 #Ý "GIGy S4 Fp q4: ìGEGmGsGzGŠGEGuG>ì

237,0,=\$7,21 2) 08/7, &(// 6758&785()25 &5<2*(1,&
 3+272&\$7+2'(5) *816

£#ã7ù• \$ #ã,o \$ #ãp‡B \$ CJ¿ % +mRÓ% 5 V¥Ê % ©] % ©]\$. %
 <DVX\XNL <D F D D W R\$ <R R K K G Q D\$UL7 D D D D D D 6 D D D L
 .\RNR 1R%JD.PLQ +D\DNDZVXVKL %D¿BNVNDZID6%PLWRPR
 \$ *UDGXDWH 6FKRRO RI 6FLHQFH DQG 7HFKQRORJ\ 1LKR
 % /DERUDWRU\ IRU HOHFWUR QSSMDL \$ \$ V R D R K Q L Y H U V L W \

Abstract

7KH FUI\RJHQLF & EDQG SKRWRFDWKR GRIH GHOHEWUKRQG HXGG R Š H O B Ø R L
 1LKRQ 8QLYHUVLW\ 7KH 5) JXQ FRQ V L H W R V Q B Q W I U H T H O H Q F D R L W \ Z L W Y K 7
 FHOO VWUXFWXUH KDG EHHQ FK R I R S Q H O W W K W K H D U X P E S I K D R H F R I O W K H K
 WKH SURSHUW\ RI WKRIPEWIP H J U W L U D F W I G W K L S H Q W K Q F H R I W K H S U R S H
 OHQJWK RI WKH HQG FHOO ZKHU O D F W H K E G H V L Q D W Ø V D Q D K B G K D V I S W H R S
 EHDP LQ HDFK FDVH G DUR R P H M Q H H E W D P L Q W P S G O B \$ W L R Q V

>Ý>Ú>ì FyFèG Fú>ì

¥•±ÚÁÊz<#Ý%Ê'2<0¿ /(%5\$÷FyF,
 &ìØGF÷í7FçFi9x(ç ØFp5jFúG G * † » - _9x Ø
 <5JG"#ÝFÛFi &G^G•GW 0 + }8FpG=GwG2G8 æ7\
 9x Ø <7Á Ê5 Fp6ä\$ÍG"/œFóFöFÖG F'5] S4 FøFçFöFy
 Fäg G F÷ GIGyFp@BGPgŠGW'5]FúFôFÛFöFpG è0iFÜ/œ
 G G FöFÝFiFÜ F_@IGy XFp q4: ìFÜ/œG G FöFÖFúFÛFö
 FiF'FiFäF÷•%Ê'2F÷FyF, Ú%Ê'2<0¿FúFúFáGIGy è
 ¥Fp'5]6ä\$ÍG g*fFúF_GIGy XG" šFØFi œFp'5]0£
 'ìIG GaŠŠn •3yFp0Ú oG"/œFóFiF'G FêF,'5]4ŠFp0£
 'ìFyF_7Á&" GEGmGsGzGŠGEGuG•GŠGEGuG•GŠGEGuG•
 ([F H O 9 % ä \$ I F ç F i G C G d G y Š Š G O G • G " Q # Ý F ç F ö / œ F ó F i F ' 1
 FäFp0£'iFúG FóFö q4:Fú M 2G" ô FçFi'5]FúF, è SFú
 GEGmGsGzGŠGEGuG•G"/œFóF7 8 B F ä Š Š W F Ü ä ~ F ç L J X U H 7 K H S D U D P H W H U V ' L Q W K H
 FúFÖG9GeGwŠ@ œFçF& 67 678', 0"Q#ÝFçFö P R G H F H O O & E D Q G F D Y L W \
 q) GOGsŠŠYG•G>G"/œFóFiF'FäFpG9GeGwŠŠG" œFçFiGp
 GUGyF÷0£'iFäG Fi3H V7Á (xG"G FøFúF_7Á ÊGaŠŠn p p > p > U > ì G E G m G s G z G Š G E G u G • m 8 p > ì

FøFúG F'G FiF, GIGy'½G]GŠGcGIGyG"FäG Fú%.FßFçFi7•
 FúG F_G]GŠGcGIGyFp'5] K F B p G F ÷ í ú Ø < X F p
 1* ZG"/œFóFiF'1

364(0£'iG"/œFóFiF'FäFp364(0£'iFúFúFÛFöFyF,'56ë7Á 683(5)FøGG'5]4ŠFp0£'i
 , ' ÝG" vG °G Fi îë k Ñ U -(• Ê364(GEGmGs
 GzGŠGEGuG•GŠGEGuG•#ÛFÛFüF'1 FÚG F, FÚG F, FÚG GIGyG" 6ë7x
 F÷F, FiG FiG •3y'5]FpGOGsŠŠYG•G>G' (5), F÷
 /œFóFiF'FäFpGOGsŠŠYG•G>Fp4#&iFçFçFç(FA), 6 +
 Fp ° ŠGcG/G2GyH Fp#Ö BFÄFIFÄ /œFÄF,
 FÄ) ÝGcG/G2GyH) ŠGcG/G2GyH FÚG 0£'i) ÝFp v "FçF,
 Fp ° ŠGcG/G2GyFp#Ö BFÄF, FøFôFôH FôFp •7uFÜ 20[F÷FÖG
 Fäg G Fp0£'iFúFü [(F H O 9 % ä \$ I F ç F i G C G d G y Š Š G O G • G "
 Q # Ý F ç F ö / œ F ó F i F ' 1 F ÷ F ç F ö + + • i G " / œ F ó F i F ' G F ê F, ° Š G c G / G 2 G y F p # Ö B F ý F,
 ([F H O 9 % ä \$ I F ç F i G C G d G y Š Š G O G • G " Q # Ý F ç F ö / œ F ó F i F ' 1 F ÷ F ç F ö + + • i G " / œ F ó F i F ' G F ê F, ° Š G c G / G 2 G y F p # Ö B F ý F,
 FèFö iFy nFØG % 0 2 F ÷ / œ F ó F i F ' G T G • G e G z G Š G V G " Q # Ý F é G F
 FúG FóFö0i0£x Fú" g" GUGŠGMFp& 1 FÜ ÆFøFúFóFif'1
 FúF 0£'iFp /œFúFyF, ¥4ŠGEG(G>GwGnG•GŠGAGI
 G•GwXG•GKGQGWH F÷/œFóFçFçFç(FA) F L F U R V R I W
 11L6Hè ¥FpG0GeGxG?GŠGEGuG•Fy'ì8FçFúFßFÛFöGUGoGx
 GVFÜFÖG FÜF, Ò GFpGEGmGsGzGŠGEGuG•Fp4#&
 683(5), Fp /œGcG/G2GyG"6äFß ì8è ¥F÷F Hø

>p>Ú>ì "GIGy S4 9x Ø <'5]>ì

Ò GFpGEGmGsGzGŠGEGuG•GŠGEGuG•GŠGEGuG•
 '5]Fp [FøFçFöF, GIGy •3y'5]Fp ¥g WG") L J X U H
 FúG&FéF'Fäg G F÷ è0iFÜ/œG G FöFÛFiGyFp@BGPgŠ
 GW'5]Fp M 2G"G FøFúF_G0G2GxGGFp xG G '5]Fp q4: ìFÜ/œG G FöFÖFúFÛFö
 „Fy [FçFöF_G0G2GxGGFp xG G" P P '5]Fp d8
 Fp „G" P P, GIGyFÛFüG Fp'5]Fp6xFäG"
 P F F, GIGyFp'5] „ I F B K GIGyFpGOGsŠŠYG•G>G"
 F÷ ÓG Fi íG" Q#ÝFçFiF' •3y'5]² /Fp G P G Š G W ' 1 ú Ø
 < XG" 0 + FúFéG GOGsŠŠYG•G>FyF, G]GŠGcGIGyG'
 Fp'5] „ K F B K * (F ç F ö / œ F ó F i F ' G U G 1 G = G G F p G O G 2 G x G F ü
 Fy ' 4 Š G " 8 F ó F ö F ö F ú F ö F i G F, G U G 1 G G G = F p L F p F
 F V \ D # J Q L K R Q X D F M S

F÷F, FiG FiG •3y'5]FpGOGsŠŠYG•G>G' (5), F÷
 /œFóFiF'FäFpGOGsŠŠYG•G>Fp4#&iFçFçFç(FA), 6 +
 Fp ° ŠGcG/G2GyH Fp#Ö BFÄFIFÄ /œFÄF,
 FÄ) ÝGcG/G2GyH) ŠGcG/G2GyH FÚG 0£'i) ÝFp v "FçF,
 Fp ° ŠGcG/G2GyFp#Ö BFÄF, FøFôFôH FôFp •7uFÜ 20[F÷FÖG
 Fäg G Fp0£'iFúFü [(F H O 9 % ä \$ I F ç F i G C G d G y Š Š G O G • G "
 Q # Ý F ç F ö / œ F ó F i F ' 1 F ÷ F ç F ö + + • i G " / œ F ó F i F ' G F ê F, ° Š G c G / G 2 G y F p # Ö B F ý F,
 ([F H O 9 % ä \$ I F ç F i G C G d G y Š Š G O G • G " Q # Ý F ç F ö / œ F ó F i F ' 1 F ÷ F ç F ö + + • i G " / œ F ó F i F ' G F ê F, ° Š G c G / G 2 G y F p # Ö B F ý F,
 FèFö iFy nFØG % 0 2 F ÷ / œ F ó F i F ' G T G • G e G z G Š G V G " Q # Ý F é G F
 FúG FóFö0i0£x Fú" g" GUGŠGMFp& 1 FÜ ÆFøFúFóFif'1
 FúF 0£'iFp /œFúFyF, ¥4ŠGEG(G>GwGnG•GŠGAGI
 G•GwXG•GKGQGWH F÷/œFóFçFçFç(FA) F L F U R V R I W
 11L6Hè ¥FpG0GeGxG?GŠGEGuG•Fy'ì8FçFúFßFÛFöGUGoGx
 GVFÜFÖG FÜF, Ò GFpGEGmGsGzGŠGEGuG•Fp4#&
 683(5), Fp /œGcG/G2GyG"6äFß ì8è ¥F÷F Hø

のアプリケーションに対する操作は行わなかったため、このデメリットは問題にはならなかった。最後に、結果ファイルから計算結果を取得する方法は、テキストファイルである結果ファイルを Excel で読み込み、周波数の値をファイル内で検索して取り出すことを行った。取り出された周波数をもとに計算が実行された形状を評価して、さらに次の形状の計算を行う。また、SUPERFISH では有限要素法で計算が行なわれているため、同じ形状空洞を複数のメッシュサイズで計算し、メッシュサイズがゼロでの値を重み付き近似式で外挿することで形状誤差を小さくした。これらを繰り返して、変数である空洞半径 hc_h と周波数の間で二分法を用いて周波数が 5712 MHz になるときの空洞半径 hc_h を決定した。この Excel VBA を用いた自動化を用いることによって、SUPERFISH によるチューニング計算でこれまで手動で行われていた工程の自動化が可能になった。

シミュレーションに使用した計算機の環境は CPU: intel core i7-6700K、SSD: NVMe Samsung SSD 950、メモリ: 16GB、OS: Windows10 Pro である。この環境を用いると、1 つの加速空洞の寸法を決定するのに手動ではおよそ 1 時間程度かかっていたチューニング計算が、自動化によりおよそ 20 分に短縮できた。

この計算によって得られた、空洞のセル数と Q 値及び、シャントインピーダンスの関係を Figure 2 に示す。2.4~2.6 セルの間では、今回の計算で得られた Q 値とシャントインピーダンスの値に大きな違いはなかった。

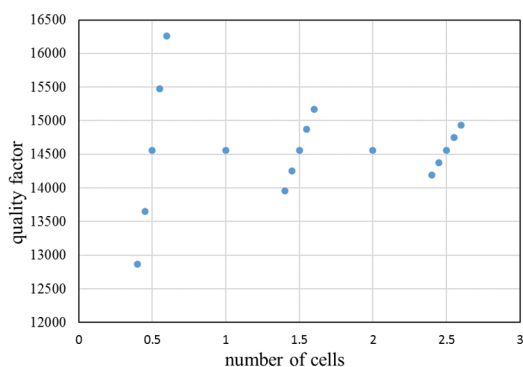


Figure 2: Number of cells vs. quality factor.

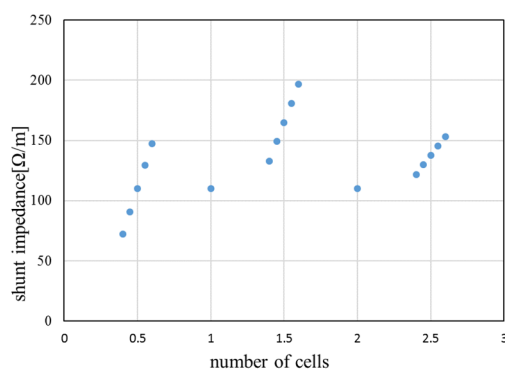


Figure 3: Number of cells vs. shunt impedance.

3.2 RF 入力カプラー付き空洞のシミュレーション

3.1 節の過程で得られた共振周波数が 5712 MHz になるようにチューニングを行った 2.4~2.6 セル空洞と、以

前に作成された反射が少ない RF 入力カプラー部を結合し、CST STUDIO を用いてカプラー付き空洞計算モデルを作成した。このモデルの例として 2.6 セル空洞を結合した計算モデルを Figure 4 に示す。

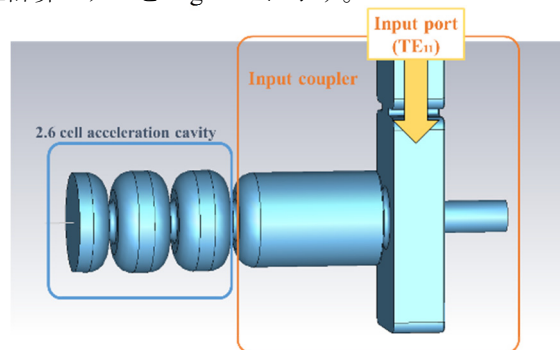


Figure 4: 2.6-cell acceleration cavity and input coupler.

しかし、そのまま結合すると、結合部で加速空洞での電場の波がカプラー部の方に流れるため、全体での共振周波数がずれてしまう。そこでさらに CST STUDIO を使用して、この結合モデルをそれぞれ 5712 MHz になるようにチューニングを行った。チューニングは、3.1 節で示した方法と同様にハーフセル部の空洞半径 hc_h を調整して行った。また、先に SUPERFISH で精度よくチューニングを行ったことによって、CST STUDIO の三次元周波数調整はそれぞれ 4~7 μm 程度の調整で可能であった。このことから、Excel VBA を用いた SUPERFISH の空洞部における自動化チューニングの有効性を確認でき、RF 入力カプラー付き空洞のチューニングの作業工程が大幅に短縮可能となった。

電子ビーム軌道の計算を行うため、この結合されたモデルの軸上電場分布データを求めた。2.4 セル~2.6 セルの各軸上電場分布を Figure 5 に示す。ただし、図において、電場(縦軸)は最大値で規格化し、軸方向の位置はカプラー部出口地点で合わせている。また、今回のチューニングでは、ハーフセルの空洞半径だけで行い、フルセル部の調整は行っていないため、ハーフセル部での電場の振幅は 2.6 セルの場合に比べて小さくなっている。

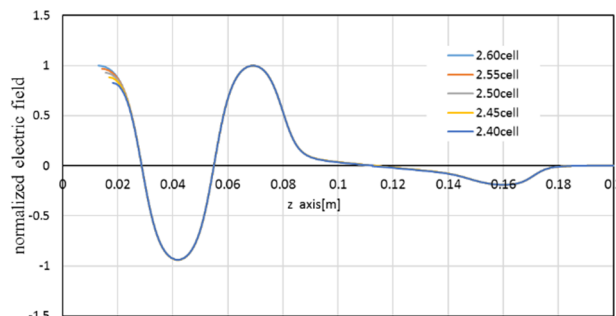


Figure 5: Z-axis vs. normalized electric field.

3.3 ASTRA を用いたビームシミュレーション

3.2 節で作成した空洞とカプラーを結合したモデルの軸上電場分布を用いて、ASTRA による空間電荷効果を

含んだ電子ビーム軌道計算を行った。計算条件として、マクロ粒子数 10000 個、初期粒子の時間方向分布 $\sigma_z=10$ ps のガウス分布、横方向分布 $\sigma_{x,y}=4$ mm のガウス分布、横方向エミッタンス $1 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の電子バンチの生成を考えた。加速空洞の軸上電場最大値は 115 MV/m に設定し、ソレノイドコイルは当モデルには設置していない。電場位相は、位相スキャンを平均エネルギー及びカプラー出口地点での粒子数に対して行うことで調節した。シミュレーションで得られた粒子の平均エネルギーと電場位相の関係を Figure 6 に、カプラー出口地点まで到達した粒子数と電場位相の関係を Figure 7 に示す。このとき、電場位相の位相スキャンは 150 度から 330 度の範囲を 1 度間隔で行った。今回の条件では、粒子の平均エネルギーは、位相 180 度付近から位相角度の増加に伴って、どのセル数空洞でも同じような単調減少を示した。また、カプラー出口地点まで到達した粒子数は、230 度付近で最大値となっている。このことから電場位相 230 度が、ビームの平均エネルギーも比較を行うには十分に高く、最も粒子が多く到達していることから、この位相でそれぞれ比較を行った。

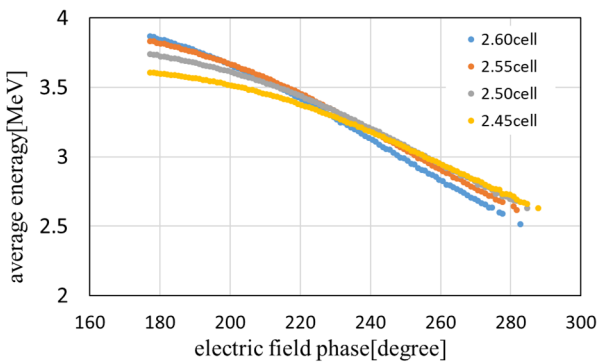


Figure 6: Electric field phase vs. average energy.

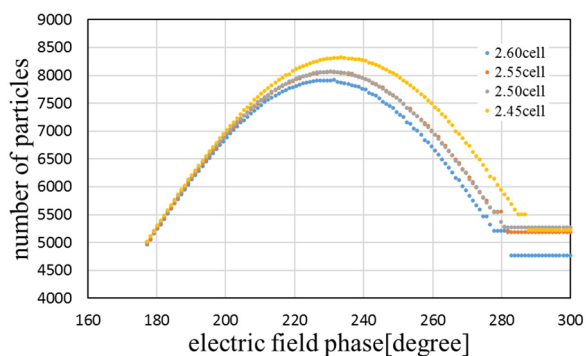


Figure 7: Electric field phase vs. number of particles.

3.4 電子ビーム軌道計算の結果

ASTRA による電子ビーム軌道計算の結果として、各加速空洞のセル数とビームの粒子平均エネルギーの関係を Figure 8 に示す。粒子のエネルギーは加速電場にともなって増大していくため、加速電場の腹で増え、節で一定となっている。また、カプラー部での電場の影響によってわずかに加減速されている。今回の条件における 2.4 セルの加速空洞では、どの電場位相でもカプラー出

口地点での粒子到達数が十分な数にならなかった。これは、今回の加速空洞部のチューニングではハーフセル部の空洞半径 hc/h で調節したため、ハーフセル部での加速電場が弱くなってしまい、加速距離の不足により粒子が十分に加速されず、加速位相に乗れなかったためと考えられる。

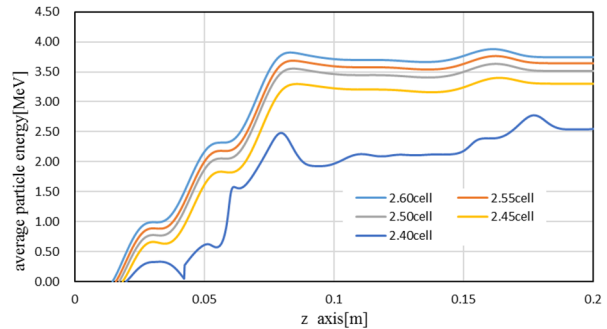


Figure 8: Z-axis vs. average particle energy.

2.45 から 2.6 セルまでの各空洞で加速されたビームのカプラー出口地点における運動量分布を Figure 9 に示す。電場位相はすべて 230 度で揃え、粒子数 8000 個程度がどのセル数の加速空洞でも到達していた。それぞれ各セル数の加速空洞ごとに運動量分布を比較すると、2.60 セルから 2.45 セルに移るにしたがって、分布の広がりが徐々に狭まり、ピークに集中している。このことから、今回の条件では、現状の 2.6 セル空洞より短いハーフセルのほうが、運動量の揃ったビームが得られた。

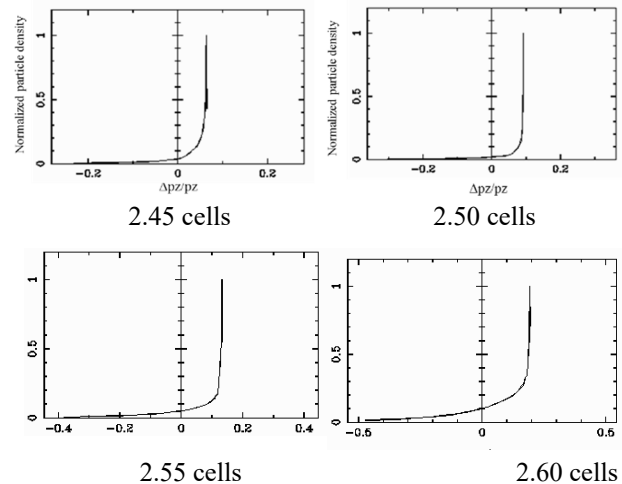


Figure 9: Momentum distribution at 2.45, 2.50, 2.55 and 2.60 cell cavity.

4. まとめ

SUPERFISH による空洞計算で、1 つの加速空洞の寸法を決定するのに、手動ではおよそ 1 時間程度かかっていたチューニング計算が、自動化によりおよそ 20 分に短縮できた。また、空洞部のみのシミュレーションによって Q 値、シャントインピーダンスのセル数との関係の評価を行った。この計算において、2.6~2.6 セルの間でセル数を変更した際には、Q 値、シャントインピーダンスに大きな違いは無かった。

さらに、このチューニングされた空洞部とカップラーを CST STUDIO を用いて、結合モデルを作成した。この結合モデルで ASTRA によるビームシミュレーションを行い、ビームの粒子平均エネルギー及び運動量分布とセル数の依存性を調べた。今回の条件では、現状の 2.6 セル空洞よりも短い空洞のほうが、運動量の揃ったビームが得られた。また、今回の条件において 2.4 セル加速空洞では、どの位相でも十分に加速できなかった。これは加速空洞のチューニングに、ハーフセル部の空洞半径 hc_h で調節を行い、ハーフセル部の加速電場が小さくなったことと加速距離が短くなり過ぎたためと考えられる。これについては今後、各セル部での加速電場の大きさをそろえられるようにサブルーチンを改良する予定である。また、現実的に配置可能なソレノイドを考慮したビームシミュレーション、さらにビームシミュレーションの結果の検証として、CST STUDIO でも同様のモデル計算をする予定である。

参考文献

- [1] K. Takatsuka, “C-バンド高周波加速空洞の電磁場シミュレーション”, Master’s degree thesis, Nihon University, 2016.
- [2] K. Nakao *et al.*, “Simulation of Electromagnetic Field for 20K Cooled Photocathode RF Gun”;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP057.pdf
- [3] Poisson/Superfish, Los Alamos National Laboratory;
<http://www.lanl.gov>
- [4] K. Takatsuka *et al.*, “Simulation of RF-Input Coupler Structure for Cryogenic Photocathode RF-Gun”;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP058.pdf
- [5] CST Studio Suite TM, CST AG, Germany;
<https://www.cst.com/>
- [6] K. Floettmann, ” ASTRA”; <http://www.desy.de/~mpyflo>