

クライオ光陰極高周波電子銃用多セル構造の最適化シミュレーション

OPTIMIZATION OF MULTI CELL STRUCTURE FOR CRYOGENIC PHOTOCATHODE RF-GUNS

山田靖征^{#,A)}, 吉田昂斗^{A)}, 田中俊成^{A)}, 境武志^{B)}, 住友洋介^{B)}, 野上杏子^{B)}, 早川建^{B)}, 早川恭史^{B)}

Yasuyuki Yamada^{#,A)}, Takato Yoshida^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Takeshi Sakai^{B)},

Kyoko Nogami^{B)}, Ken Hayakawa^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)}, Yoske Sumitomo^{B)}

^{A)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

Abstract

The cryogenic C-band photocathode RF electron gun operating at around 20K is under development at LEBRA in Nihon University. The RF gun consists of a 2.6 cell cavity with a resonant frequency of 5712 MHz. Though the π -mode 2.6-cell structure had been chosen in the early phase of the development, the number of cells has not been optimized for the property of the beam extracted from the RF gun. In this study, the dependence of the properties of the cavity on the length of the end cell where a cathode is attached has been simulated by using SUPERFISH. The property of the electron beam in each case has been estimated from the beam simulations using ASTRA.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、20 K程度まで冷却した高純度の銅による低損失常伝導高周波空洞を用いたCバンド(5712 MHz)動作のクライオ光陰極高周波電子銃の開発を行っている。空洞構造としてはこれまで2.6セルの π モード空洞についてのみ検討が行われてきたが[1,2]、セル数の最適化が行われていなかった。そこで本研究では、他研究施設における2.6セル以外の空洞開発も参考に、セル数を変えた場合の空洞計算及びビーム加速の評価を行った。まず、空洞部の計算は、電磁場シミュレーションコード SUPERFISH[3]とExcel VBA で開発したサブルーチンを使用して行った。この計算によって最適な寸法を決定した空洞に、以前にシミュレーションを行って作成されたTE₁₁モードが混在しないカプラー[1,4]を結合し、CST STUDIO[5]を使用して最終チューニングを行った。このカプラーを結合したモデルで計算された軸上電場分布をもとに、電子ビームの軌道計算を行った。この軌道計算においては、空間電荷効果を取り入れた時間依存三次元粒子軌道シミュレーションコード ASTRA[6]を用いた。

2. 多セル構造高周波空洞

今回のシミュレーションに用いた、Cバンド高周波加速空洞の例として、2.6セル加速空洞の外形図を Figure 1 に示す。これまで検討が行われていた2.6セルの π モード空洞の寸法をもとに、アイリスの丸みや空洞の曲面の半径は固定して、アイリスの丸みを1.8 mm、空洞の曲面の半径を8 mm、1セルあたりの空洞の長さを26.2423 mm、セルの空洞半径 fc_h は1セルのチューニング計算で求めた値を使用した。加速空洞全体の π モード共振周波数を5712 MHzにするチューニングは、ハーフセル部の空洞半径 hc_h を調節して行った。ディスクのアイリスには平坦部を作っていないため、ディスクの厚さは3.6 mm

[#] csya17006@g.nihon-u.ac.jp

となる。また、2.55セル等ハーフセルをさらに短くした際にも、ハーフセルの空洞半径 hc_h のみで共振周波数の調整を行った。

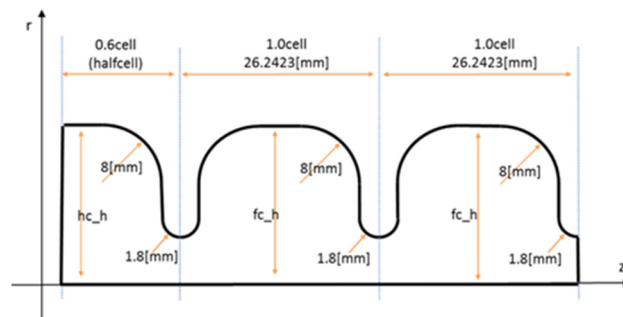


Figure 1: The parameters in the simulations of the π -mode 2.6-cell C-band cavity.

3. シミュレーション手順

3.1 SUPERFISH による空洞部の計算

0.4 から 0.6、1.4 から 1.6、2.4 から 2.6 セルを 0.05 間隔で、それぞれ加速空洞のチューニングを SUPERFISH で行った。このチューニングの過程には、「(1) SUPERFISH の入力ファイル(.af ファイル)の生成」、「(2) 計算の実行」、「(3) 結果ファイル(.SFO ファイル)から計算結果の取得し、次の入力ファイルの生成」という3つの段階が必要である。これらの計算には Excel VBA で開発したサブルーチンを使用し、自動化を行った。まず、入力ファイルの生成は、Excel のシート上にテンプレートを用意しておき、計算に応じて書き換える方法で行った。テンプレートを使用することによって視覚的に形状やデータの確認が容易となった。次に、計算の実行には、外部プログラムを開く VBA のコマンド(.Run メソッド)で行った。一般に VBA には、Microsoft Office 製品以外のアプリケーションは操作しにくいデメリットがあるが、今回のシミュレーションの過程ではこの SUPERFISH の実行ファイルを開く操作以外で Excel 以外

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で行った。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。

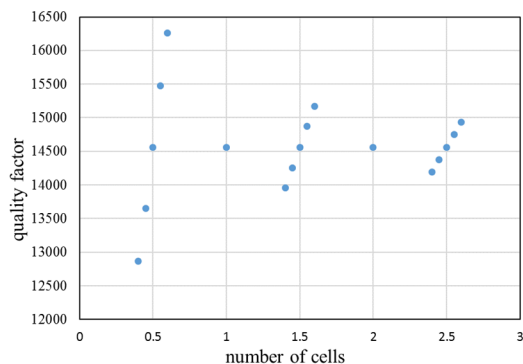


Figure 2: Number of cells vs. quality factor.

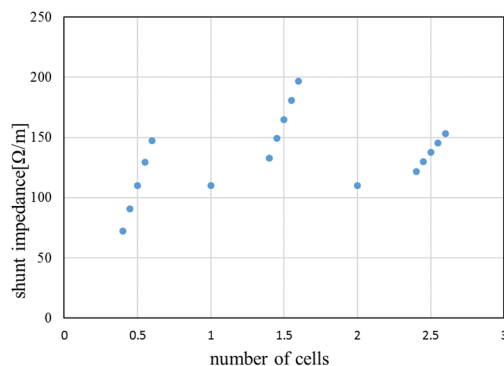


Figure 3: Number of cells vs. shunt impedance.

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。

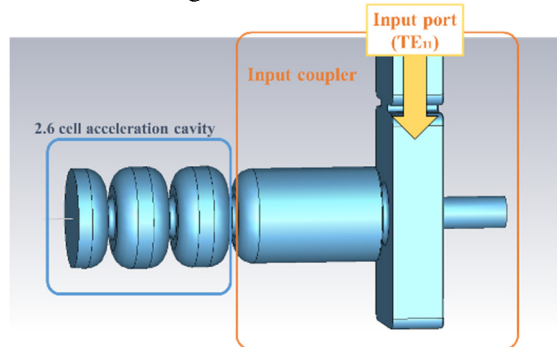


Figure 4: 2.6-cell acceleration cavity and input coupler.

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。

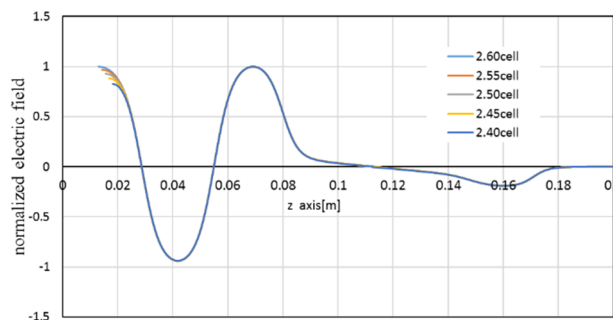


Figure 5: Z-axis vs. normalized electric field.

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 $1 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ の電子パ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。

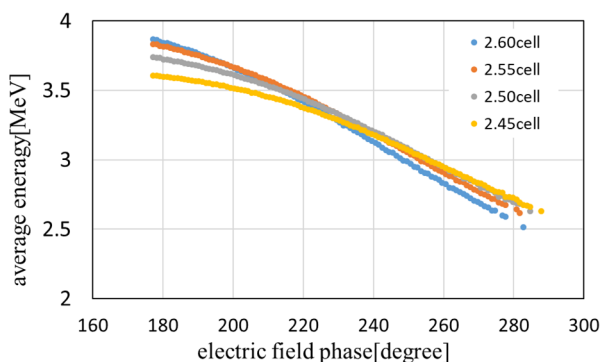


Figure 6: Electric field phase vs. average energy.

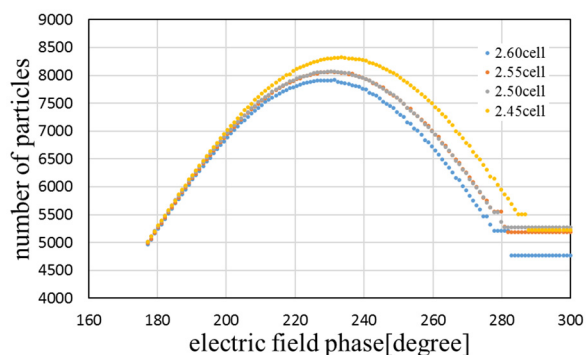


Figure 7: Electric field phase vs. number of particles.

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。

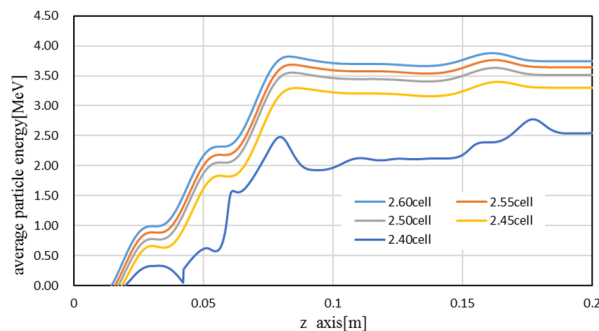


Figure 8: Z-axis vs. average particle energy.

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。

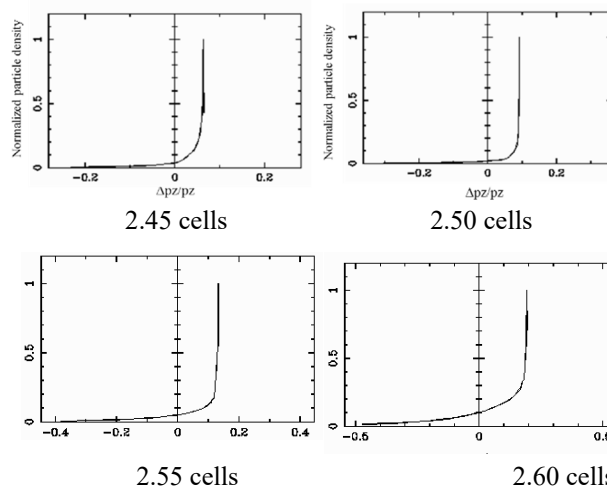


Figure 9: Momentum distribution at 2.45, 2.50, 2.55 and 2.60 cell cavity.

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>