

SuperKEKB 計画のための C バンド加速管開発について

紙谷 琢哉^{1, A)}、杉村 高志^{A)}、大越 隆夫^{A)}、山口 誠哉^{A)}、大沢 哲^{A)}、柿原 和久^{A)}、池田 光男^{A)}、
榎本 収志^{A)}、高富 俊和^{B)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 電子陽電子入射器研究系

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 工作センター

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

最近KEKBファクトリーのルミノシティーは目標値の $1 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{sec}$ を突破したが、さらに1桁から2桁高いルミノシティーを目指した加速器の改造(SuperKEKB)についての実現可能性の検討が行われている。この改造の際、入射ライナックについては陽電子ビームの加速エネルギーを3.5GeVから8.0GeVに高くすることが必要となる。このため、現在使用されているSバンドの加速ユニットの代わりにCバンドのRF源と加速構造を用いて加速電界を現在の2倍に増やすためのR&Dを行っている。本発表では、Cバンド加速管の1号機的设计、製作の現状について報告する。

1. はじめに

KEKBファクトリー^[1]の入射ライナック^[2]は、8.0 GeV の電子、3.5 GeV の陽電子を衝突リングに一日あたり 15 ~ 20 回入射している。また、PF放射光リング及び、AR放射光リングにも 2.5 ~ 3.0 GeV の電子ビームをそれぞれ 1 回と 3 回入射している。ライナックの加速ユニットは、50 MW Sバンドクライストロン(通常運転値 41 MW、RFパルス幅 4.0 μs)、SLED型 rf パルス圧縮空洞(平均電界増倍率 1.85)、4 本の加速構造(各 2m-長、平均加速電界 21 MV/m)から構成されており、ユニット当たりの平均加速エネルギーは 160 MeV である。8.0 GeV の加速エネルギーを達成するために、ライナックには 56 台の加速ユニットが設置されている。陽電子ビームは、ライナックのおよそ中間点にある変換標的に約 4 GeV の電子ビームを照射して生成し、それより下流の 30 ユニットにより 3.5 GeV まで加速している。

2003年5月時点において、KEKBファクトリーのルミノシティーは目標値である $1 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{sec}$ を突破し、これはすでに世界最高値であるが、B中間子の物理についてより深く、より高い精度で調べるために、さらに1桁から2桁高いルミノシティーを目指した加速器の改造(SuperKEKB)^[3]についての実現可能性の検討が行われている。この改造の主眼の一つは、電子ビームと陽電子ビームのエネルギー値を入れ替えて、陽電子が 8.0 GeV になることである。これは現在、陽電子蓄積リングにおいて問題と

なっている光電子不安定性の影響を緩和させるための措置である。この改造に伴い、入射ライナックから 8.0 GeV の陽電子ビームを供給する必要が生じるが、現在の陽電子加速用の 30 ユニットによる最大加速エネルギーは 4.8 GeV であり不十分である。陽電子を 8.0 GeV にするための方策として、現在の S バンド (rf 周波数 2856 MHz) 加速ユニットの代わりに、C バンド (5712 MHz) の rf 源及び加速構造を用いることにより、加速電界を現在の約 2 倍に上げることが検討されている^[4]。

この論文では、SuperKEKB 計画で用いるべき C バンド加速構造の設計検討の概要と第 1 号試作機の製作の現状について報告する。

2. C バンド加速ユニットの設計

まず目標とする加速電界強度を達成するために、次節で述べる加速管の基本設計と平行して rf 源についての検討が行われ、以下のような C バンド加速ユニットの基本設計ができ上がった^[5]。まずクライストロンについては、JLC計画のC-bandライナックのために開発された 50 MW クライストロン^[6]が、現在商業化もされているので、これを利用することにした。そして長期運転での安定性を考慮したマージンを取り、運転時のパワー値を 40MW と想定した。現在は、各加速ユニットにクライストロン 1 台であるが、C バンドユニットではこのクライストロンを 2 台使用する。そして各クライストロン毎に独立のモジュレーターを設置する。現在のクライストロンギャラリーの 1 ユニット分のスペースに 2 台のモジュレーターを収めるために、インバーター電源を用いてコンパクト化する設計がなされた。rf パルス圧縮空洞としては、C バンドでは現在の SLED 型の TE_{015} -モードでは Q 値が低くて十分なパワー増倍率が確保できないため、CERN-LIL ライナックで使用されている TE_{038} -モードを用いた空洞を C バンド化したものを検討している。これにより、現在と同様の平均電界増倍率 ($=1.85$) が達成されると考えられる。これを前提とすると必要な rf パルス幅は 2.0 μs となり、モジュレーターもこれを仕様値として設計されている。パルス圧縮空洞は各クライストロン毎に設置され、そこからの rf パワーは 2 分割されて、2 本の 2m-長加速構造に供給される。

¹ E-mail: takuya.kamitani@kek.jp

3. Cバンド加速管の基本設計

今回検討している C バンド加速管の基本構造は、これまでの S バンドのもの^[7]（ディスク装荷型、進行波型、定電界型、2 π /3-モード、運転温度 30℃）を踏襲し、空胴全体の成型方法もこれまで通り電鋳法によるものとしている。

以下に加速空胴形状の基本パラメータとそれを決定するにあたっての検討事項を示す。まず 2 π /3-モードで使用するために、セルの長さは 1 自由空間波長の 3 分の 1 ($Z_{cell}=17.4949\text{mm}$) となる。ディスクの厚み (t) は S バンドの場合の半分の 2.5 mm とした。当初はこのようにディスクが薄い場合、加工する際の変形して最終形状の精度が確保できないことが心配されたが、ディスクを試作してみて問題ないことが確認された。また、ディスクアイリス部の先端部 R 形状についても、加工寸法、表面粗さともに問題なかった。次にアイリス直径 ($2a$) は、定電界型にするためにパワー減衰を考慮してサイズを下流になるほど小さくする必要がある。加速管の各空胴での加速電界強度は次のような関係式で与えられる^[7]。

$$E_0 = \sqrt{r_0 \frac{dP}{dz}} = \sqrt{r_0 \frac{2ff \square P}{v_g Q}} \quad (\text{式1})$$

ここで E_0 は加速電界強度 (MV/m) で、 f は rf 周波数 (5712 MHz)、 r_0 はシャントインピーダンス ($\text{M}\square/\text{m}$) で、 v_g はマイクロ波の群速度、 Q は Q 値、 P は rf パワーであり、 r_0 と v_g と Q は $2a$ に依存する。図 1 は SuperFISH を用いて求めたものである。これを考慮して、 $2a$ の減少率を決める。

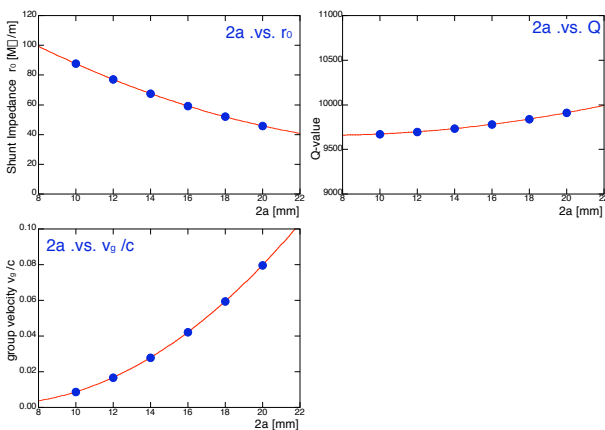


図 1：加速管パラメータの $2a$ 依存性

SuperKEKB 用 C バンド加速管は 108 加速セルで全長約 2 m とする。 $2a$ は 14.000~10.544 mm と変化し、減少率は 32 $\square\text{m}/\text{cell}$ である。この時、充填時間は 380 ns、減衰定数は 0.703 となる。しかし、今回製作している第 1 号機は、現在の S バンド 2m-長加速管の A-タイプ形状のスケールダウンした C バンド 1m-加速管 (54 加速

セル) とする。これは製作治具、測定治具の制約より長さを控えめにしたため、またこれまで多数製作された S バンド加速管製造上のノウハウやデータをスケールダウンで利用することができることも考慮された。この 1m-加速管では、 $2a$ は 12.475 ~10.450 mm と変化し、減少率は 37.5 $\square\text{m}/\text{cell}$ であり、充填時間は 234 ns、減衰定数は 0.434 となる。各空胴の内径 ($2b$) は、正しい周波数に共振するように $2a$ に合わせて変えなければならない。基本的には S バンドの時に決めた $2a$ - $2b$ 関係を半分にスケールしたものが成り立つはずであるが、今回製作する 1m-加速管の最上流と中間点と最下流の $2a$ 値に相当する 3 組の 6 セル試験空胴を製作して共振周波数を測定した。その結果は、S バンドをスケールしたものと測定誤差の範囲で一致した (図 2)。

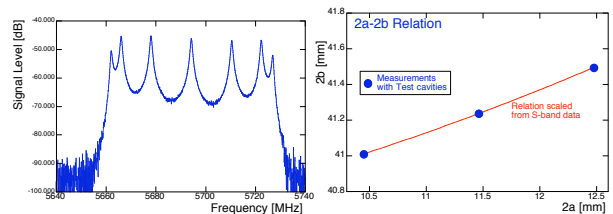


図 2：6 セル試験空胴測定例と $2a$ - $2b$ 曲線

このデータに基づいて 54 空胴分のディスク、スペーサが加工され、最終的にはノードルシフト法で各空胴の位相進み量を実測して、それが 120 度になるように $2b$ 寸法値は修正加工した。両端部を除く 50 空胴については、外周部を電鋳 (銅メッキ) することにより一体化成型した。なお、S バンド加速管での経験により、電鋳時の応力のため共振周波数が高くなることがわかっており、330 kHz 程度上がることが推定され、 $2b$ 寸法はそれを見越して加工されていたが、実際にはその倍の 660 kHz 上がってしまった。この原因については現在調査中である。また電鋳された部分の両端にある空胴では、他の空胴に比べて電鋳応力の影響が顕著に小さく、ノードルシフトでの位相進み量が他とずれるため、結果として反射特性の VSWR 値に悪影響が出た。これは、スペーサの厚みがそこだけ異なる事によるものと考えられ、2 号機については対策を施す予定である。

4. カプラー空胴

カプラー空胴についても、現在の S バンドのものを踏襲して、セル長はレギュラーセルと同じく 3 分の 1 波長の円筒空胴が薄い長方形のカップリング用アイリス穴を通して矩形導波管とつながる構造になっている^[7]。しかし S バンドでは、WRJ-3 タイプの導波管を用いるが、C バンド加速管で用いる WRJ-5 タイプの導波管は寸法が 2 分の 1 スケールになっていないためカプラー部の寸法は単純なスケールアップでは決められない。そこで、カプラー空胴 $2b$ 寸法およびカップリング用アイリス穴幅 w について、新たに設計値の最適化を行うことにした。

また、S バンドではカプラー空胴内の電磁場が軸対称性を持つように、カップリング穴の反対側の空胴側面に三日月型の窪みを作ったが、これが放電の原因の一つとなっていることがわかった^[8]ため、今回の第1号機では電磁場の軸対称性についてはあきらめて、このような窪みは省いた。

設計パラメータ値については、まずシミュレーションによりほぼ近似的な最適値を求めた。入口カプラー+レギュラー部6セル+出口カプラーのモデルについて MAFIA T3 code により時間領域のシミュレーションを行い、反射特性を求めてこれに基づいて最適化を行った。

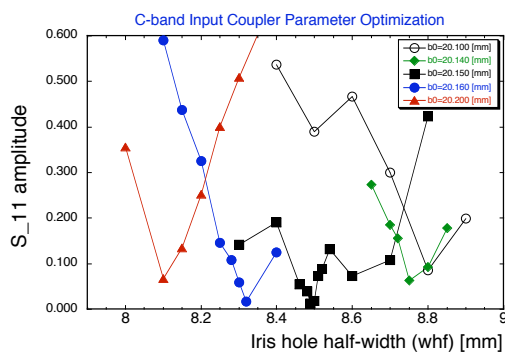


図3：MAFIA によるカプラー寸法最適化

さらにシミュレーションによる最適値を念頭において、ローパワーモデルを製作し、Kyhl 法に基づいた RF 測定と修正加工の繰り返しにより最終的な寸法値を決めた。また、実機用カプラーはこの寸法を基に若干の修正加工を加えて完成させた。

6. 全体性能と今後の予定

こうしてできあがった入口、出口カプラーと電鍍により成型された中央空胴部と両端の各2セルの空胴は組み合わされて(図4)、一体としての rf 特性が測定された。

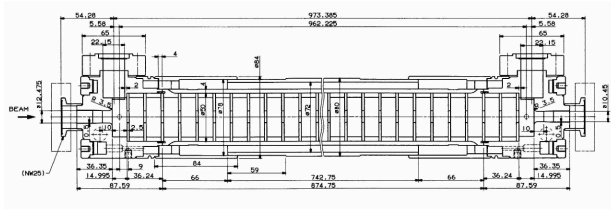


図4：C バンド 1m-長加速管全体図

その結果得られたノーダルシフトの測定データを図5に示す。前述の電鍍部両端部周辺の空胴を除いたほぼきれいな 120 度位相進みが得られていることがわかる。また、この時の入口側からの VSWR 値は、1.09 であった。なお、この後、カプラー部を電子ビーム溶接で結合しさらに、冷却水のジャケットを TIG 溶接する過程で、反射特性を悪化さ

せる変形が生じているようであるが、これについてはまた詳細を検討の上報告する予定である。また、7月よりテストベンチにおいてハイパワー試験を開始し、8月末に KEKB ライナックビームラインに組み込んで、9月よりビーム加速試験を行う予定である。

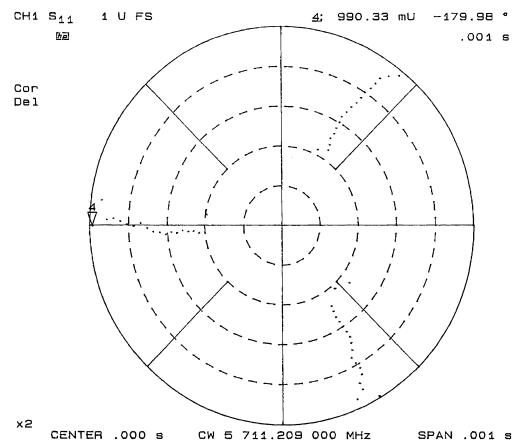


図5：ノーダルシフト測定結果(電鍍後)

参考文献

- [1] "Overview of the KEKB accelerators", By S. Kurokawa, et. al., NIM A, Volume 499, Issue 1, 21 Feb. 2003, Pages 1-7
- [2] "The KEKB injector linac", By I. Abe, et. al., NIM A, Volume 499, Issue 1, 21 Feb. 2003, Pages 167-190
- [3] "Expression of Interest in A High Luminosity Upgrade of the KEKB Collider and the Belle Detector", By I. Abe, et. al., Jan. 2002
<http://www-kekb.kek.jp/SuperKEKB/Document/EoI.pdf>
- [4] 紙谷琢哉ほか"KEKB電子陽電子入射ライナックの改造計画について", 第27回リニアック技術研究会、京都、2002、Pages 42-44
- [5] 福田茂樹ほか"SuperB計画の為のKEK電子陽電子ライナックのCバンド化計画", 第28回リニアック技術研究会、東海、2003
- [6] "Development of C-band 50 MW pulse klystron for e+ e- linear collider", By T. Shintake, et. al., KEK Preprint 97-47, May, 1997
- [7] 五十嵐康仁ほか"KEKB 入射器増強用加速ユニットの高周波特性", KEK Report 98-12, Jan, 1999
- [8] "High-gradient tests on S-band 2m-long accelerating structures for KEKB injector linac", By Y. Igarashi, et. al., Particle Accelerator Conference, Portland, U.S.A., May 12-16, 2003