

## PRESENT STATUS OF C-BAND ACCELERATING SECTION DEVELOPMENT FOR SUPERKEKB

T. Kamitani, T. Sugimura, K. Yokoyama, T. Takatomi, K. Kakihara,  
S. Ohsawa, M. Ikeda, T. Higo, N. Kudoh  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

This paper reports on recent R&D status of C-band accelerating section for future upgrade of the KEKB. Four 1-m long accelerating sections have been developed and installed in the KEKB injector linac as two pairs of two sections connected in series. They are driven by a 50-MW klystron through an rf pulse compressor. This C-band accelerator module has been operated for ten months since the summer of 2005. A beam acceleration study shows the module generates an average field gradient of 36.5 MV/m at 42 MW of klystron output power. Also given is a description of recently developed fifth accelerating section which replaces one of the sections in the module.

### SuperKEKBのためのCバンド加速管開発の現状

#### 1. はじめに

KEK-Bファクトリーのアップグレードとして検討されているSuperKEKB計画においては、ライナックからの陽電子ビームの入射エネルギーを現在の3.5 GeVから8.0 GeVに上げることが必要となる。これを実現するために加速電界を現在のSバンド加速ユニットで達成されている21 MV/mの2倍の42 MV/mに上げることのできるCバンドの加速ユニットで置き換えることを想定してR&Dを進めてきた。特に加速管については、これまでに5本の1m長加速管の試作を行い、製造方法やカップラー形状の改良を進めてきた。このうち4本の加速管はすでにテストスタンドでのRFエージングを経て、KEK-B入射ライナックのビームラインに組み込まれて1つのCバンドの加速ユニットを構成し、長期運転試験及びビーム加速試験を行っているところである。この論文ではこのCバンド加速ユニットの現状及び最近完成した5本目の加速管で得られた知見について報告する。

#### 2. Cバンド加速管の開発

##### 2.1 SuperKEKB用Cバンド加速ユニット

SuperKEKBにおいては現在KEKB入射ライナックにある58基のSバンド加速ユニットのうち24基をCバンドのもので置き換えることを検討している。Cバンドユニットはその長さがSバンドの時の半分になるように設計してあるので、改造の際には各々1基のSバンドユニットを2基のCバンドユニットで置き換えられる。1つのCバンドユニットは50 MW級クライストロン1本とそのモジュレータ、TE038モードを使用したRFパルス圧縮器と4本の1m長加速管を主要なコンポーネントとして構成されている。図1に示すように、加速管は2本づつがU字型導波管を介してタンデム接続されている。パルス圧縮器からのRFパワーは半分に分配されて2つのタンデムのそれぞれ上流側に供給される。タンデム接続された2本

の加速管はその2本分の全長にわたってほぼ一定電界になるよう上流型管と下流型管のセットとして設計されている。

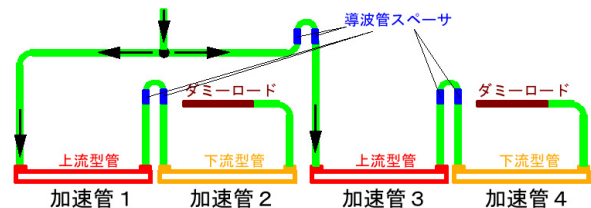


図1: Cバンドユニット加速管レイアウト

	上流型	下流型
ディスク口径:2a [mm]	14.5→12.5	12.5→10.5
空洞直径:2b [mm]	42.1→41.5	41.5→41.0
シャントインピーダンス [MΩ/m]	65→75	75→85
充填時間 [ns]	135	243
パワーロス [%]	45	61

表1: 加速管特性パラメータ (上流型、下流型)

表1には上流型管と下流型管のそれぞれの特性パラメータの比較を示す。下流にいくほどディスク開口径は一律に小さくなるが、これに伴いシャントインピーダンスが高くなりパワーの減衰分を補って各加速空洞でほぼ同程度の加速電界強度となる設計となっている。但しこれはRFパルス内でのパワーが一定の場合であり、実際にはパルス圧縮空洞を用いるためRFパワーには強い時間依存性があり、ビームが通過した瞬間に各空洞での電界が等しくなるわけではない。これについては後の2.3節で詳しく述べる。

##### 2.2 Cバンド加速管開発の経緯 (2005年夏まで)

2002年にスタートして以来Cバンド加速管の試作、検討を進めた結果、昨2005年夏までの時点で4号機までが完成していた。それら個別の詳細については文献[1]を参照していただきたいが、タンデム接続の

セットのうちの下流型の開発をまず先行させたのでこれらの加速管4本中3本が下流型である。その理由は1号機を製作した際に開発期間を短くするために、その加速空洞部の寸法をこの下流型に相当するような既存のSバンド加速管の一つのタイプのものの正確に1/2スケールとすることにしたためであり、これによりいち早く1号機のハイパワー試験までこぎ着けて40MV/mレベルの加速電界が達成するメドを早期につけることができた。ちなみに1号機はカプラー部の形状についてもSバンド加速管の1/2スケールに準じている。その後試作した2, 4号機では製造技術の確立やカプラー部の改良が主眼であったため、加速空洞部については1号機と同じ下流型を踏襲した。4号機とほぼ並行して進めた3号機でようやく上流型用のディスク口径の大きな加速管を作ることになったが、ビームラインに組み込むための完成時期の制約により本来の定電界型ではなく定インピーダンス型として加速空洞部は最上流部用の寸法で全空洞セル共通とし、カプラーも入口側と出口側を同一形状として開発時間を短縮した。そのため、特性パラメータは表1にあるような本来の定電界型上流管とは異なり、充填時間が106 ns、パワーロスが35%となっている。

### 2.3 KEKBライナックのCバンド加速ユニット

このようにこれまで進めてきた開発の経緯により、昨2005年夏の時点で完成していた4本の加速管は本来のSuperKEKB用ユニットの上流型+下流型のセット2組ではなく1本が準上流型で3本が下流型という変則的な組み合わせであったがともかく4本そろった。1号機加速管及びRF源のクライストロン、モジュレータ、RFパルス圧縮器はすでにKEKB入射ライナックのビームラインの空きユニット部に組み込まれ先行して試験がされていたが、残る3本の加速管も組み込み1つのCバンド加速ユニットとしての体裁が整った。

このCバンド加速ユニットの様に複数の加速管を用いる場合、各加速管でのRFの位相がそれぞれでのビームの来るタイミングに同期するように、各加速管までの位相長をあらかじめ調整しておくことは重要である。図1にある3箇所U字型部分にスペーサ導波管を組み込んでその長さをしかるべき値にすることでこの位相関係を合わせた。しかし残念ながら最初の理論的計算による位相長では加速管1本目に対する2本目及び3本目に対する4本目の位相がいずれも90度程度のずれを生じて、ユニット全体としては所定より低いエネルギーゲインしか得られない結果になってしまった。結局、ビームローディング及びビーム誘起波を実測することにより入力RFに対する各加速管での加速位相の相対関係を求めて、スペーサ導波管の長さを決め直して再度組み込みを行うことで15度程度の誤差の範囲内で位相関係が揃うように修正した。誤りの原因は、加速管によってカプラー形状が異なるため、入口導波管の所定位置でのRF位相に対する加速空洞内でのビームに対する位相の関係を推定するのにある種の仮定に基づいて計

算により求めたのであるが、その仮定が妥当でなかったことにあった。

なお、現在のレイアウトが1本が準上流型で3本が下流型の組み合わせであることの問題点が2つある。その一つはRFパワーの充填時間が1本目+2本目については349 nsであるのに対して、3本目+4本目は486 nsとアンバランスになることである。SLED型RFパルス圧縮器からのRFパワーはその時間依存性としてまず鋭く立ち上がって最大値になったのちはゆっくり下がっていく波形をしている。このため一般的に最も高いエネルギーゲインをビームに与えるようにするには、このピークパワーが加速管の最下流部に到達したタイミングでビームを通すのが良い。しかし同じ加速ユニット内で充填時間がそろっていない今回のような場合、タイミングを1+2本目について最適化すると4本目の後ろのほうはパワーが充填されていないことになるし、3+4本目に最適化すると1+2本目の方はピークパワーの部分が抜け出た後になってしまう。結果としてこの妥協点を取らざるを得なくなる。この状況を理解するために計算による推定加速電界分布を図2に示す。現状レイアウトで最適タイミングの時の加速電界分布が実線であり、本来の設計レイアウトで最適化した分布を点線である。このように充填時間のアンバランスがあるとエネルギーゲインとしては損をする。

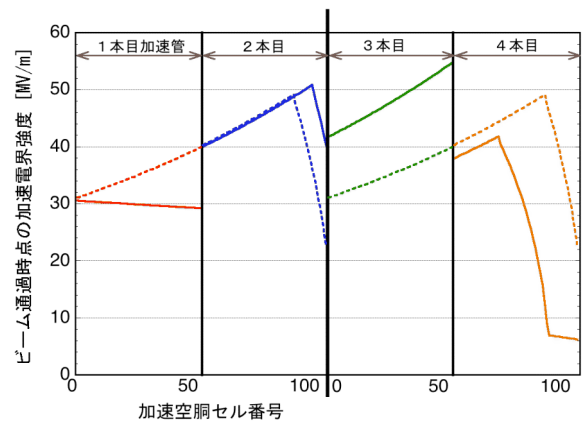


図2：ビーム通過時の各加速管内の加速電界分布

現状レイアウトのもう一つの問題点は3本目が上流型ではなくシャントインピーダンスがより高い下流型であり、これが想定よりも高い電界強度を経験するために放電が起こりやすくなることである。図2より3本目の加速管での電界が特に高いことがわかる。実際に十分長いエイジング期間を経た後には、放電の際にはこの3本目の入口カプラー付近で起きる割合が高かった。一方本来の設計レイアウトでの分布を見ると、より効率よく全体的にRFパワーが充填して加速電界を作っており、また3本目のところで特に電界が高すぎることもない。

実際のビーム加速試験の結果ではクライストロン出力パワー42 MWの時、このユニットのエネルギーゲインは141 MeVであり、平均加速電界 36.5 MV/mに相当する。これは計算による推定値144 MeVにほぼ等しい。今後加速管4本の内2本を上流用定電界型

に置き換えて本来のレイアウトを実現すればゲインは149 MeVに上がると推定される。それでもSuperKEKB用加速ユニットの仕様エネルギーゲインの160 MeVには若干不足しており、パルス圧縮器の出力ゲインを改善するなどの検討が必要であると考えている。なお2005年夏から約10ヶ月にわたってこの加速ユニットの長期運転試験を行ってきたが、放電によるクライストロントリップ頻度は、クライストロン出力パワー36MW（推定平均電界34MV/m）では1日1回程度と他のSバンドユニットと変わらないが、これを越えると頻度が高くなっていき、ビーム加速試験をした42MWのパワーレベル（電界36.5 MV/m）では1日20回以上であった。

## 2.4 Cバンド加速管5号機

先に述べたCバンド加速ユニットとしての長期運転試験と並行して、今後レイアウトを本来の上流型+下流型加速管の組み合わせにしていくために、上流型で定電界型の加速管の製作も進めてきた。これが最近完成した5号機である。これは3号機で試みている角の無いカプラーアイリス形状及びカプラー表面の電界研磨処理を採用している。これらは放電が起きにくくすることに効果があると考えている。

さて下流型加速管については、各空洞セルの共振周波数を運転周波数に合わせるための空洞直径の寸法を決めるに当たって既存のSバンド加速管を1/2スケールした値を設計値として採用することができたが、上流型管についてはこれに相当するSバンド加速管が無いために下流管ほど正確な参考値が無かった。そこで4号機の時に決めた最上流セルのディスク口径2aに対する空洞径2bの値と下流管のいくつかのセルについての2aに対する2b値の依存性のデータを多項式フィットで内装した曲線に基づいて製作することにした。

しかしこの内挿には誤差があることも考慮して、各セルの2b寸法は目標値よりも $20\mu\text{m}$ 控えた値で一旦仕上げてノードルシフトの測定を行い、設計2b寸法がどれぐらい正しいか確認することにしたが、図3(左)のようにデータ点の並びが直線からずれており誤差が大きいことがわかった。このデータを解析してまず測定周波数を変えたときに各ノードル測定点の位相角がどれぐらい動くかの係数を求めた。次に3つある系列の各点での位相進み量がそろえるようにするためにはどれだけ共振周波数を修正すればよいかを求めた。この修正の各空洞に対する依存性は一次関数でフィットして補正量を求め、これより各空洞の直径2b寸法の修正加工量を決めた。なお、2b寸法の初期設計値に対する補正量は加速管中央の空洞セルを基準とすると最上流側で $-2\mu\text{m}$ 、最下流側で $+2\mu\text{m}$ 程度となった。なお共振周波数の2b寸法に対する依存性は $145\text{kHz}/\mu\text{m}$ であり、上記の補正量は周波数に換算すると約 $\pm 300\text{kHz}$ に相当する。また空洞内径の加工は超精密旋盤を用いて行い、加工寸

法精度はおよそ $1\mu\text{m}$ である。最終加工後に得られたデータが図3(右)であり、ほぼ直線状に並び各セルの共振周波数がよくそろっていることを示している。

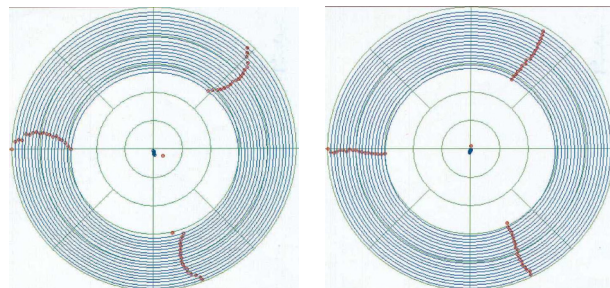


図3：2a-2b関係曲線修前(左図)と後(右図)のノードルシフト測定データ

この加速管は他の試作管同様に銅電铸により空洞の一体化を行った。さらに冷却水ジャケットやビームホール部の溶接を経て完成した。その後、テストスタンドでRFエージングを行ったが、3週間程度でRFパワー46 MW パルス幅500 nsに到達しておりクライストロントリップ頻度も1日10回以下であった。これまでの試作管より放電の起きにくさに関する性能が良いと思われる。今年2006年夏の長期運転停止期間にCバンドユニットの3本目に設置されている下流型管と入れ替える予定である。この3本目は設計よりも高い電界レベルで使用していたため放電頻度が高かったが、入れ替えによって本来の設計レイアウト及び電界分布に近くなるので、放電頻度の改善とユニットのエネルギーゲインの向上が期待される。

## 6. まとめ

SuperKEKB計画のためのCバンド加速管開発を行い、2005年夏までに4本の試作加速管を製作してKEKBライナックにインストールして約10ヶ月の長期運転試験を進めてきた。ビームを用いた測定によれば平均加速電界 $36.5\text{MV/m}$ を得ている。2006年夏にはユニットの内1本を最近完成した5号機の加速管で置き換えることにより、エネルギーゲイン及び放電頻度の改善を目指す予定である。

## 謝辞

Cバンド加速管の内の約半数の製造については三菱重工名古屋航空宇宙システム製作所の皆さんにご尽力を頂きました。また残る半数のKEKでの製造については三菱重工の飯野陽彌氏に多大な御指導を頂きました。深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] T. Kamitani, et al., "SuperKEKB計画のためのCバンド加速管開発の現状", Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, SAGA Light Source, Tosu, Saga, Jul. 20-22, 2005