

PRESENT STATUS OF C-BAND ACCELERATOR MODULE DEVELOPMENT FOR SUPERKEKB

Takuya Kamitani*, Takashi Sugimura, Kazue Yokoyama, Toshikazu Takatomi, Kazuhisa Kakihara,
Satoshi Ohsawa, Mitsuo Ikeda, Noboru Kudoh, Toshiyasu Higo
High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have been developing a C-band accelerator module as a prototype for future upgrade of KEKB injector linac. It consists of a 40 MW klystron, an RF pulse compressor and four 1m-long accelerating sections. It was installed in the linac and has been operated. Energy gain of beams given by a module is design to be 160 MeV and it corresponds to an accelerating field gradient of 42 MV/m. By a recent installation of two new accelerating sections, design configuration of the accelerator module has been completed. In a recent measurement using 8-GeV electron beam of the linac, we obtain an energy gain of 172 MeV, corresponding a 45 MV/m field gradient, which exceeds the design value.

SuperKEKBのためのCバンド加速ユニット開発の現状

1. はじめに

KEKB 入射ライナック^[1]は 8.0 GeV の電子ビームと 3.5 GeV の陽電子ビームを各蓄積リングに供給している。ライナックは 56 台の加速ユニットでできており、各ユニットは 40MW Sバンドクライストロン、SLED 型 RF パルス圧縮器と 4 本の 2m 長加速管を主要コンポーネントとして構成されている。1 台の加速ユニットのエネルギーゲインは 160 MeV であり、その平均加速電界は 21 MV/m である。入射用電子ビームはライナック全長にわたって 8.0 GeV まで加速されるのに対して、陽電子生成用 1 次電子ビームは約 4 GeV まで加速されて陽電子生成標的に照射され、生成された陽電子ビームはライナックの後半部分により 3.5 GeV まで加速されてから入射される。

将来の KEKB のルミノシティ増強改造 (Super-KEKB 計画) のための R&D が 2001 年より始まった。その改造における重要な変更点の 1 つは衝突させる電子と陽電子のビームエネルギーを入れ替えて、陽電子のエネルギーを高くして電子雲によるビーム不安定性に強くすることである。入射ライナックにとっては、陽電子の加速エネルギーを 3.5 GeV から 8.0 GeV に上げる改造が必要になる。これを実現するために我々が取ろうとしている方策は、現在の S バンド加速ユニットを C バンド (5712 MHz) の加速ユニットに置き換える事により加速電界を現在の倍の 42 MV/m にしようとするものである。なお C バンドユニットの長さは S バンドのもの半分の長さになるように設計し、1 つの S バンドユニットを 2 つの C バンドユニットに置き換えることになる。

1 つの C バンドユニットは 40MW クライストロン、SLED 型 RF パルス圧縮器 (但し TE038 モード) と 2 本の 2m 加速管から構成されるのが最初の設計案であったが、実際の構成としては 2m 加速管の代わりに 2 本の 1m 加速管を導波管経由で直列につないだものを採用した。これは製造及び RF 測定の便宜のためである。RF 特性としては 2 本全体として準定電界型となるように

してある。現在までに 6 本の加速管を試作した (表 1)。5 号機までの詳細についてはこれまでの報告^[2]を参照されたい。この報告では 6 号機加速管の詳細と KEKB 入射ライナックに組み込まれた C バンド加速ユニットの現状について述べる。

2. C バンド加速管 6 号機

6 号機加速管の RF 特性設計は 5 号機と基本的に同じであるが、5 号機は KEK において 6 号機は三菱重工 (MHI) 名古屋航空宇宙システムにおいて製作され、製造方法には違いがある。ここではその違いと改善された点について説明していく。

5 号機ではカプラー部の表面粗度を小さくするために電界研磨 (EP) を行った。EP を行うとカプラー空洞の表面がどれぐらいの深さ割れるかについて不確定さがあるので共振周波数についても誤差が生じる。これを補正するために、後の工程でカプラーのビームホール部分の角の曲率半径寸法の修正加工を行う事とした。これを可能にするためにこのビームホール部分は分離できるような構造として、最終工程においてカプラー本体部と溶接結合するやり方をとった (図 1)。ビームホール部分とカプラー本体の RF コンタクトは狭い面積の領域で取っているため、接触部の当たり方によってはコンタクトが不安定になり、カプラーの特性が安定しない場合があるということが問題であった。これに対して 6 号機ではビームホール部とカプラー本体は最初から一体として製造されている (図 2) ので、RF コンタクトは本質的に安定である。カプラー空洞は超精密旋盤で仕上げ、アイリス部はフライス盤で仕上げた。最適なカップリング特性が得られるところまで、RF 測定と空洞直径或いはアイリス部開口寸法を修正加工することを繰り返した。その後の工程では共振周波数の変化は問題ない程度の量であり、その調整は不要であった。その代わりフライス盤で仕上げた部分の表面は、5 号機のように EP 仕上げの表面よりは粗度が悪いが放電特性に対してはそれほど影響はないであろうと仮定した。

加速空洞部分がディスクと円筒状のスペーサを積み

*E-mail: < takuya.kamitani@kek.jp >

表 1: 6本の試作加速管の比較

| | 1号機 | 2号機 | 3号機 | 4号機 | 5号機 | 6号機 |
|------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 上流管(U)／下流管(D) | D | D | U*(C.I.) | D | U | U |
| ディスク開口直径 (mm) | 12.5→10.5 | 12.5→10.5 | 14.5 | 12.5→10.5 | 14.5→12.5 | 14.5→12.5 |
| シャントインピーダンス (MΩ) | 75→85 | 75→85 | 65 | 75→85 | 65→75 | 65→75 |
| 充填時間 (ns) | 243 | 243 | 103 | 243 | 135 | 135 |
| 電鍍方式 | 高速 | 低速 | 低速 | 高速 | 低速 | 高速 |
| 製造担当 | MHI | KEK | KEK | MHI | KEK | MHI |

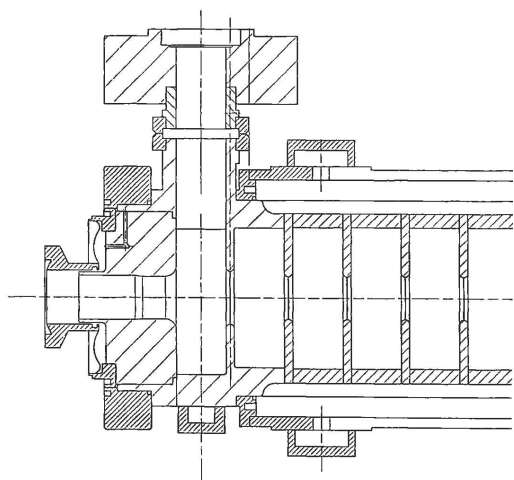


図 1: 加速管 5号機のカプラー構造

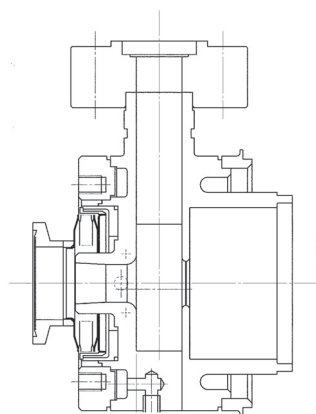


図 2: 加速管 6号機のカプラー構造

重ねた形で空洞構造を構成されているのは5号機も6号機も同じであり、またその外側に銅電鍍層を形成させて一体化させることについても同じであるが、その電鍍のやり方については違いがある。まず5号機については電鍍応力による共振周波数の変化が問題ない程度 (<100 kHz) に抑えるために、低速度で電鍍層を成長させる方法を使った。またカプラー部分と加速空洞部分を同時に電鍍することで結合した。このため、電鍍を行っている間、加速空洞とカプラー端部は電鍍液に触れるようにする一方でカプラー部は密閉防水のカバーをかけて電鍍を受けないようにした。これは、加速空洞とカプラー端部のようななめらかな円筒形の部分には電鍍層を形成させることができるが、カプラー部のようにならばこの

ある形状の部分には一様には電鍍層を形成させることができないためである。しかし、このカバーがあるために電気力線の分布がこのカプラー端部周辺では不均一になり、電鍍層の成長が遅いという結果となった。もともと低速度で電鍍を行った事も相まって、全体に十分な厚みの電鍍層を成長させるまでには20日を要した。

これに対して6号機では加速空洞部のみ電鍍をMHIにおけるSバンド加速管の製造の時と同様のやり方で行った。すなわち、大量生産に適した高速電鍍法であり、電鍍に要した時間はわずか4日間であった。しかしこのように短い時間での電鍍層の成長においては、電鍍応力による変形のために共振周波数の変化 (+400 kHz) が起きる。しかしこれまでに行ってきたCバンド加速管の高速電鍍の経験により、電鍍液の組成状態を管理する事と小片のサンプルの試験電鍍から得られる電鍍応力の予想より、周波数変化の大きさは精度良く推定できる事がわかっていた。推定値と実際の周波数変化の差は+10 kHz程度でしかなかった。電鍍が終わった後に、加速空洞部とカプラー部は電子ビーム溶接 (EBW) により接合された。EBWのメリットとしては加熱が局所的に行われるためにカプラー部への熱の影響が問題にならないということがあるが、逆にEBWされた部分の空洞は周波数がずれるという問題がある。図3に示すノードシフトの測定値においても、データ点の直線状の並びが少し不連続になっているのがわかる。しかし最終的な影響は小さくて、図4に示すように加速管からのRF反射 (VSWR) の大きさは十分に小さい。

また、6号機製造の最後の工程では加速空洞部分の外側への冷却水ジャケットのTIG溶接が行われた。これまでにMHIで製造された1号機及び4号機において、TIG溶接により加速空洞の共振周波数が一様に-200 kHz程度ずれるということが起きていた。この原因は溶接で発生する応力により加速管全長が短縮する方向に変形を受けたのであると推定し、6号機においては溶接の接合部の形状を工夫して応力の影響が出にくいようにした結果、周波数変化は-25 kHz程度に収まった。

この6号機は2006年12月に完成した。テストスタンドにおける2週間のRFエージングを経て、KEKBライナックのCバンド加速ユニットに設置された。

3. Cバンド加速ユニットの現状

KEKBライナックにおけるCバンド加速ユニットは、2005年8月に4本の1m加速管 (1号機から4号機) が設置されたことで1つのユニットの全構成要素がそろっ

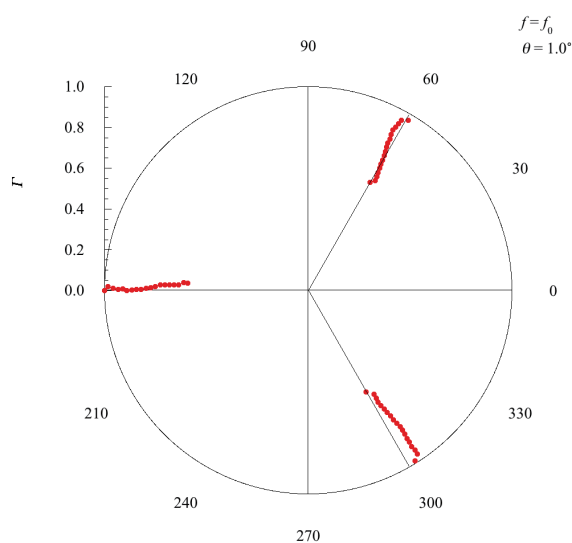


図 3: 6号機のノードシフトデータ

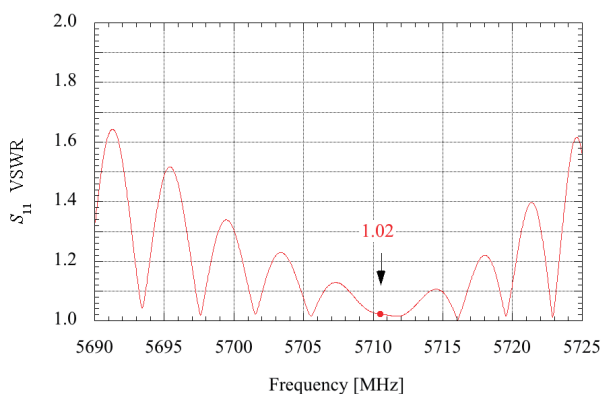


図 4: 6号機の VSWR データ

た状態となり、それ以降長期間にわたって RF エージングを行いつつ運転が続けられてきた。しかし昨年の報告^[2]にもあるように、これまでの加速管開発の経緯によりこの4本の構成はその RF 特性が本来の設計とは異なっており、2つある加速管2本対の間に充填時間とシャントインピーダンスのアンバランスがあり、このため本来のエネルギーゲインが出せない状態であった。しかし、2006年8月に5号機、同12月に6号機が既設の2本との置き換えで設置された事によりようやく本来の設計通りの構成となった。RF 源についても2006年8月より三菱電機製クライストロン (PV-5050K) がこの加速ユニットで使用されており、最大 53 MW の出力パワーを達成している。また RF パルス圧縮空洞についても、低電力時と大電力時の状態の違いを修正するように調整を行う事で 10% 以上ピークパワーが増加した。このような状態 (クライストロン出力 53 MW) において、KEKB ライナックの 8 GeV 電子ビーム (電荷量 1 nC) を用いて、C バンドユニットの加速位相を変えながらビームエネルギーの変化を測定し、サインカーブでフィットしてエネルギーゲインを求めた (図 5)。得られたエネルギーゲインは 172 ± 1 MeV であり、設計

仕様値 160 MeV を越えている。この値の誤差はエネルギーに換算されるビーム位置の測定誤差 (0.1 mm rms) とフィッティング誤差をから来るものである。各データ点の誤差はプロット点の大きさより小さい程度なのでエラーバーが見えない。位相を変えた時の横方向ビームキックにより軌道が変化する事については、毎回ステアリングコイルにより軌道を補正してエネルギー測定に対する系統誤差が生じないようにした。なお、各4本の加速管の有効加速長を共通に 0.962 m として、このエネルギーゲインを平均加速電界に換算すると 45 MV/m となる。この試験時の RF パワーレベルは通常の運転状態より高いため、放電によるクライストロントリップ頻度は1日25回程度であり、他の S バンドユニットに比べると1桁高い。しかし通常運転用のパワーレベルまで下げればトリップ頻度も下がるはずであり、これについては今年 2007 年秋からの運転においてデータを取る予定である。

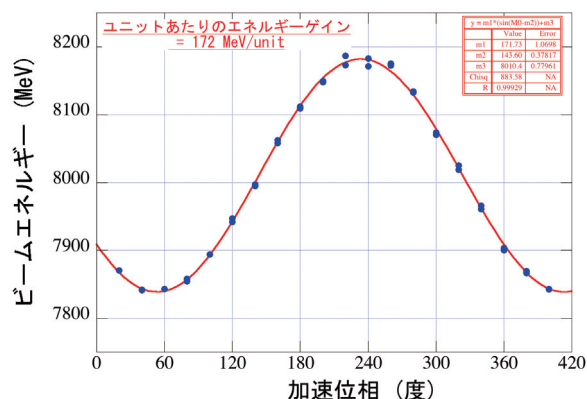


図 5: C バンド加速ユニットのエネルギーゲイン測定

4. まとめ

KEKB ライナックの C バンド加速ユニットにおいて加速管 6 号機を設置する事により、設計通りのユニット構成が実現された。クライストロン出力 53 MW におけるエネルギーゲインは 172 ± 1 MeV、平均加速電界に換算すると 45 MV/m を達成しており、これは設計仕様ゲイン値の 160 MeV を越える性能である。

5. 謝辞

C バンド加速管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、また飯野陽弼氏には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] I. Abe, et al., "The KEKB injector linac", KEK Preprint 2001-157, Nucl. Instrum. Methods A, Volume 499, Issue 1, 21 February 2003, Pages 167-190.
- [2] T. Kamitani, et al., "SuperKEKB のための C バンド加速管開発の現状", Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Miyagi, Aug. 2-4, 2006