

DEVELOPMENT OF C-BAND ACCELERATING SECTION FOR SUPERKEKB

T. Kamitani^{*A)}, T. Sugimura^{A)}, K. Yokoyama^{A)}, K. Kakiyama^{A)}, S. Ohsawa^{A)}, T. Takatomi^{A)},
N. Delerue^{† A)}, Y. Hozumi^{B)}, M. Ikeda^{A)}, T. Oogoe^{A)}, S. Yamaguchi^{A)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Graduate University for Advanced Studies Department of Accelerator Science
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

For future upgrade of the KEKB injector linac, we have been developing C-band accelerator modules to double the field gradient to 42 MV/m by replacing the present S-band modules. Development of accelerating sections tolerable in such high gradient is a key issue in the linac upgrade. Since the fabrication of the first prototype in 2003, improvements in the coupler structure and in the fabrication technique have been made in subsequent three prototypes. This paper reports on the R&D status of these prototype accelerating sections.

SuperKEKB 計画のためのCバンド加速管開発の現状

1. はじめに

KEK B-ファクトリーにおいて現在検討が進められているルミノシティ増強の改造計画 (SuperKEKB) では、陽電子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。このため現在のSバンド加速ユニットをCバンドのものに置き換えて、加速電界を現在の2倍の42 MV/mとするためのR&Dを2002年より行っている。Cバンド加速ユニットを構成するコンポーネントである、50 MW クライストロン (既製品)、小型化されたモジュレーター、サブブースタークライストロン、ミックスモード型高周波窓、ダミーロード、3-dB ハイブリッド、高周波パルス圧縮器及び加速管のR&Dが進められ、テストスタンド及びKEKB入射ライナックにおける長期運転試験を行っている^[1]。加速管の試作1号機は既存のSバンド加速管の製造手法に準拠し、寸法的には2分の1スケールした設計に基づいて製作された。これまでの運転でこの1号機はほぼ仕様値に近い加速電界を達成したが、放電頻度が高く、特に入力カプラー周辺での放電が多く発生した。後に1号機の入力カプラーには微小金属片が混入しており放電を誘発していたことがわかった。しかしこの特殊事情を考慮したとしても、カプラーの構造および製造手法上、改良すべき点があったため、これに続く後継機の開発を進め、これまで計4本の試作を行ってきた。この論文では、これらのCバンド加速管の開発において問題となった点、改良された事柄及び現在の状況について報告する。

2. Cバンド加速ユニットの構成

SuperKEKB用のCバンド加速ユニットの構成は図1のようになる。クライストロンからの大電力マイ

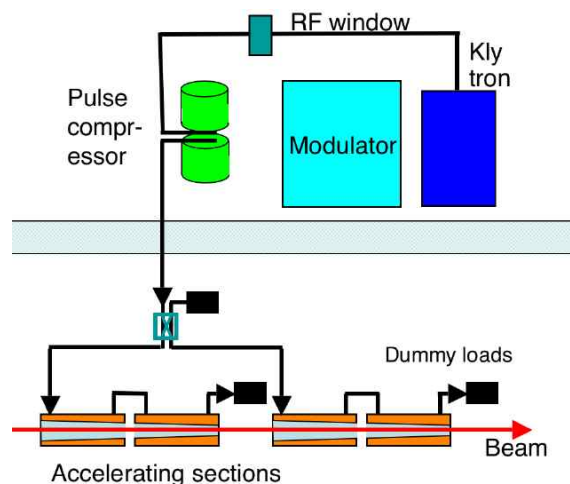


図1: Cバンド加速ユニット

クロ波 (フラットトップ 40 MW、パルス長さ 2.0 μ s) は、高周波パルス圧縮器 (SKIP)^[2] においてピークで約 200 MW、パルス長さ 0.5 μ s に圧縮されてから2分割されて、2つの2m長の加速管に供給される。それぞれの2m長加速管は実際には2本の1m長加速管をそれぞれ上流管、下流管として導波管を介して直列接続したものとなっている。1本の加速管の長さが2mでは製造及びRF測定における取り扱いが困難であるため、このように1m管2本に分割している。

なお、2mの全長にわたって準定電界型となるために、ディスクの開口径は上流管入口で14.5mm、上流管出口及び下流管入口では12.5mm、下流管出口では10.5mmとなっており、これに伴って加速管内のマイクロ波の群速度も光速で規格化した値で3.0 $\rightarrow$ 1.9 $\rightarrow$ 1.0%へ、またシャントインピーダンスも65 $\rightarrow$ 75 $\rightarrow$ 85 M Ω /mへと変化する。上流管より下流管の方が入力パワーが低いのでカプラーでの放電などの仕様達成上の困難がより少ないと考え、まず先に下

^{*} E-mail: takuya.kamitani@kek.jp

[†] Present address: Oxford University, OX1 2JD, Oxford, United Kingdom

流管に相当する 1m 管の試作を先に進めることとした。これまで 4 本製作したもののうち 3 本まではこの下流管の寸法となっている。

3. 4 本の試作加速管

これまでに合わせて 4 本の加速管の試作を行っているが、うち 2 本は三菱重工名古屋航空宇宙システム製作所において、残りの 2 本は KEK において、それぞれ製造手法を若干変えながら、ある程度平行して製作を進めている。区別のため、三菱重工の型番は CKM001、KEK 製は CKK001 などとし 3 文字目の違いで識別している。表 1 にこれら 4 本の特徴についてまとめるが、詳しくは後ろの章で述べる。また 2 号機と 3 号機の設計、製造の詳細については、今研究会での横山氏^[3]、杉村氏^[4]、の報告を参照されたい。なお、現在 1 号機はすでに KEKB ライナックのビームラインに組み込まれて長期運転中であるが、残りの 3 本も今年 (2005 年) 夏季の運転停止期間中に組み込んで、図 1 にあるような C バンド加速ユニットの最終レイアウトに組み上げての運転試験を始める予定である。

4. 加速管 1 号機: CKM001

加速管試作 1 号機は 2003 年に製作され^[1]、テストスタンドでの RF エージングを経て、同年 9 月より KEKB ライナックのビームライン (4-4 ユニット部) に設置され、同時にライナッククライストロンギャラリに設置された大電力クライストロン及びそのモジュレーターを含む RF 源より供給されるマイクロ波 (最大 43MW) を入力として、長期運転試験、ビーム加速試験が開始された。1 年後の 2004 年夏に RF パルス圧縮器^[2]が増設され、より高いピーク電力での試験を行えるようになり、平均加速電界は最高で 42 MV/m を超えた (ビーム加速試験により評価した)。しかし運転開始当初、放電頻度が高く放電によるクライストロントリップが 1 時間当たり 5 回程度起きていた。2004 年夏に CCD 内視鏡によりカプラー部及びそれに近い加速空洞の内部を観察したところ、多数の放電痕が見られたが、そのみならず入力カプラーの内部に切り子と思われる微小金属片 (太さ <100micron、長さ 8mm) を発見して、除去した。これが放電を誘発する原因となっていたと思われる。この後さらに 1 年間の長期運転でエージングが進んだこと及び真空度の下がってきたことも影響していると思われるが、現在では 1 日に数回の放電頻度まで下がっている。

5. 加速管 2 号機: CKK001

2 号機の製作にあたっては、製造方法及びカプラー構造に関して以下のような変更を行った。なお比較のため、図 2、図 3、図 4 に 1 号機、2 号機、3 号機のカプラー周辺の構造を示すので参照されたい。

1 号機ではカプリングアイリスの厚みが薄い (1mm) ため、磁場のエッジで電流密度が上がり放電しやすくなる可能性があったので厚みを増やした (4mm)。ま

た尖った形状になっているとその角では局所的に電流密度が上がるのが指摘された^[5]ので、カプラー仕上げ時にヤスリがけにより角を R100 micron 程度丸めることにした。

1 号機ではカプラー空洞 (長さ 15mm) と導波管 (幅 22mm) を直接結合する構造のため段がついて電場のエッジができるため、この部分での放電の可能性が考えられたため、2 号機ではカプラー空洞の長さを導波管幅と同じにして段を無くすことにした。しかしこの結果、カプラー空洞での位相進みが他の加速空洞とは異なることとなり Kyhl 法が適用できなくなったため、ノードルシフト法により追い込みを行ったが、最終寸法に至るまでに多数回のステップを経なければならず苦労することとなった。

加速空洞部を銅電鑄により一体化する際に、電流密度のより低い低速電鑄を用いることにより周波数変化は 100 kHz 以下となった (1 号機では +600 kHz)。しかしカプラー部については、1 号機のように電子ビーム溶接 (EBW) する代わりに電鑄によりカプラー部も含めて一体化したが機械的強度が十分ではなかったため、締付け力と電鑄応力により変形して反射特性が悪化することになった。

また冷却水ジャケットなどを TIG 溶接する際にもカプラーに変形が起きた。特にビームホール部はカプラーに直結しており影響が大きかったため溶接部分を削って一度取り外し、共振周波数の変化量をあらかじめ見込んで補正してから溶接し直した。

2 号機は 2005 年 3 月に完成し RF エージングをテストスタンドで行った。放電頻度は 1 号機に比べて 10 分の 1 以下に改善された。

6. 加速管 3 号機: CKK002

3 号機の製作にあたっては、1 号機、2 号機での経験、反省点をふまえて、以下のような変更を加えた。

アイリス周辺での尖った形状を無くすために、導波管からアイリス、そしてカプラー空洞内径部にわたって一度にフライス加工することとし、アイリス部は曲率半径 2mm 程度の曲面形状とした。また、表面粗度を小さくして耐放電性を高くするためにカプラー内部の電界研磨 (EP) 処理を行った。カプラー空洞の長さは他の加速空洞と同じ 15mm として、Kyhl 法が適用できるようにした。なおかつ 2 号機同様に電場エッジを無くすため、カプラーに接合される導波管幅も同じく 15mm に変更し、その代わりその外側でテーパ導波管を介して通常の 22mm 幅の導波管につなぐようにした。カプラー空洞での電磁場分布が軸対称からずれていることを補正するために、中心軸を加速空洞に対して 1.9mm だけオフセットさせて、カップリングアイリスから離れる方向にずらした。電鑄やビームホール溶接の際、カプラー空洞の変形が起こりにくいように胴体部分の厚みを増やして剛性を高めた。また溶接量が少なく溶接ひずみが小さくて済むように、ビームホール部とカプラー空洞部の接合部の形状を工夫した。

3 号機は現在、電鑄が完了し溶接加工を進めており、6 月下旬より 4 号機と共に RF エージングを行う予定である。

表 1: 4 本の試作機の特徴

名称	disk 2a 寸法	coupler 長	E-edge	H-edge 角	iris 厚み	電铸	coupler 結合	beamhole
(1) CKM001	12.5-10.5	15 mm	あり	<0.1 mm	1 mm	高速	EBW	一体型
(2) CKK001	12.5-10.5	22 mm	無し	0.1mm	4 mm	低速	電铸	溶接
(3) CKK002	14.5 (一定)	15 mm	無し	2 mm	4 mm	低速	電铸	溶接
(4) CKM002	12.5-10.5	15 mm	あり	1 mm(外)	3 mm	高速	EBW	一体型

7. 加速管 4 号機: CKM002

4 号機は構造的には 1 号機とほぼ同じである。若干の違いはアイリス部のみ厚みを増し (1mm→3mm) また、導波管側のアイリス角には R 1mm の丸みを機械加工により付けた点である。この反対側の空洞側の角については機械加工の刃物を届かせるのが困難であったので、特に丸みを付けなかった。

4 号機は 3 号機より一足先に 2005 年 6 月に完成し、現在 RF エージングを行っている。

8. まとめ

SuperKEKB に向けた C バンド加速管の開発を行っており、これまでに試作機 4 本を製作して、カプラー構造の改良及び設計手法、製造手法の改善を進めてきた。2005 年夏にはこれら 4 本を KEKB ライナックのビームラインに設置して、RF 源も含めて C バンド加速ユニット全体としての運転試験を行っていく予定である。

9. 謝辞

三菱重工業の飯野陽弼氏には加速管製作の全般に渡り御助言、御協力をいただきました。京都大学の岩下芳久氏には 2 号機カプラーアイリスの角の鋭さと電流密度に関してシミュレーションをしていただき、御助言をいただきました。ここに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 KEKB 入射ライナックの C バンド化 R&D の現状", Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Nihon University, Funabashi, Aug. 4-6, 2004
- [2] T. Sugimura, et al., "SKIP - A Pulse Compressor for SuperKEKB", Linear Accelerator Conference 2004, Lubeck, Germany, Aug. 16-20, 2004
- [3] K. Yokoyama, et al., "SuperKEKB 用 C-band 加速管 2 号機の開発", Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Saga, Jul. 20-22, 2005
- [4] T. Sugimura, et al., "角無しカプラーを採用した C バンド加速管", Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Saga, Jul. 20-22, 2005
- [5] T. Iwashita, et al., "Evaluation of Magnetic Field Enhancement Along a Boundary", Linear Accelerator Conference 2004, Lubeck, Germany, Aug. 16-20, 2004

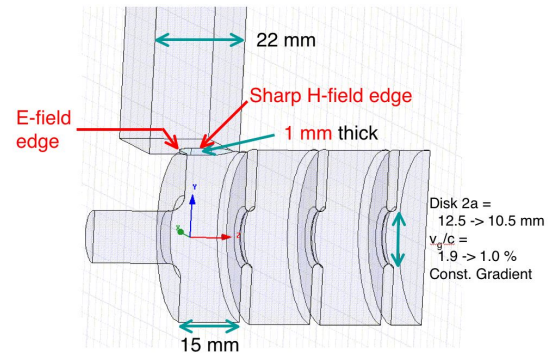


図 2: 1 号機カプラー

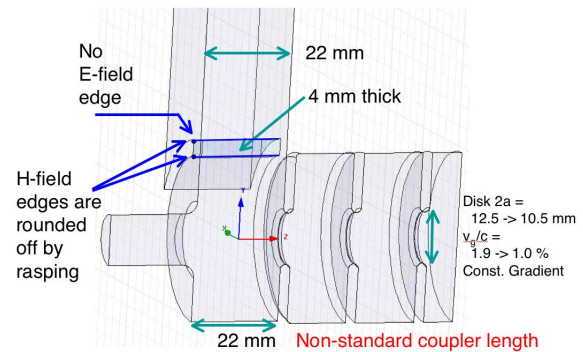


図 3: 2 号機カプラー

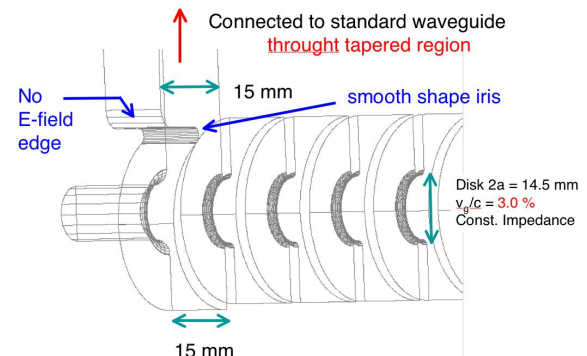


図 4: 3 号機カプラー