

PRESENT STATUS OF THE C-BAND ACCELERATOR R & D OF THE KEKB INJECTOR LINAC FOR SUPERKEKB PROJECT

T. Kamitani¹, M. Akemoto, M. Ikeda, T. Oogoe, S. Ohsawa, Y. Ogawa, K. Kakihara, H. Katagiri, M. Satoh, T. Shidara,
A. Shirakawa, T. Sugimura, T. Suwada, T. Takenaka, K. Nakao, H. Nakajima, S. Fukuda, K. Furukawa, H. Honma,
T. Matsumoto, S. Michizono, Y. Yano, K. Yokoyama, M. Yoshida, A. Enomoto
Electron/Positron Linac, Accelerator Laboratory, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

Abstract

In the upgrade of the KEKB injector linac for the future project SuperKEKB, it is required to increase its positron acceleration energy from 3.5 to 8.0 GeV. To achieve it by doubling the acceleration field gradient with C-band accelerator module, R & D work of the C-band components is in progress. Since the report last year, long term operation of the C-band module placed in the KEKB injector linac and beam acceleration study have been performed. Developments of RF pulse compressor and second prototype accelerator section have been done. High power test of an RF window using a resonant ring has also been done. Status of these activities is reported here.

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

1. はじめに

KEKBファクトリーは現在 $1.3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ という世界最高ルミノシティを達成しているが、さらなる高精度実験の為に一桁以上のルミノシティ向上を目指したSuperKEKB計画^[1]の検討を進めている。この際、ライナックは陽電子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。このために陽電子を加速しているライナック後半部分において現在のSバンド加速ユニットをCバンド化して加速電界を現在の2倍の42 MV/mに上げることを検討しており、Cバンド加速ユニットを構成するコンポーネントのR&Dを2002年より行っている。

昨年すでに報告されているが^[2] 2003年夏前までの状況をまとめる。まずCバンド加速ユニットの基本構成の設計検討が行われ、リニアコライダー計画のために開発された50 MW級クライストロン^[3]を使用することを想定してインバーターDC電源を用いて小型化したモジュレータの設計、試作が行われた。この大電力クライストロンへの入力RF源としては、現在と同様にサブブースタークライストロン方式をまず想定して、気象レーダー用に開発された100kW級クライストロンの発振周波数を変更する改造を施した。また基準RF励振系は、Sバンド基本周波数を2連倍する回路系を準備した。加速管は将来的には2m長構造を想定するが、試作1号機としてはSバンド加速管の1/2スケールの形状に基づいた1m長構造のものを製作した。また、160MWの大電力に耐えられるようなミックスモード型高周波窓の開発が行われ、レゾナントリングを用いた大電力試験が行われた。また電力分配用の3dB方向性結合器や高

周波を吸収するダミーロードの開発も行われた。これらのコンポーネントについてテストスタンドにおいて大電力試験及びエージングが行われた。今報告では2003年夏以降の進展について述べる。

2. KEKBライナック4-4ユニット部におけるビーム加速試験及び長期運転の状況

テストスタンドでのエージングを終了したところで、KEKB入射ライナックの4-4ユニット部にCバンド加速ユニットを設置し、長期運転によるコンポーネントの耐久試験及びビーム加速試験を行うこととなった。クライストロンと1m長加速管についてはテストスタンドより移設し、モジュレータ及び励振系については第2号機を構築した。RFパルス圧縮器が完成するまでの間は、ほぼ同等の加速電界を得るために1台のクライストロンの全出力をこの1本の加速管に投入している。



図1：KEKBライナック4-4ユニットの地上部に設置されたCバンドRF源（左図）とトンネル内に設置された1m長加速管（右図）

そこで実際のビーム（AR入射用3.0GeV電子ビー

¹ E-mail: takuya.kamitani@kek.jp

ム)を加速する試験を行った。今回製作したCバンド加速管1号機では既存のSバンド加速管に比べてビームを通す開口径が半分程度しかないが、ビーム収束系の設定を変更してこの部分でビームを絞ることによりロス無くビームを通すことができた。そしてCバンドユニットの加速位相を変化させながら、ライナック終端のエネルギーアナライザを用いてビームエネルギーを測定し、エネルギーゲインを求めて加速電界強度を推定した(図2)。クライストロンからの出力電力が43 MWの状態では測定された電界強度は41 MV/mであった^[4]。

このようにSバンド加速管に比べて2倍近く高い加速電界は得られたが、長期間の運転でのエージングを経てもまだ放電頻度は高く、1時間当たり5回程度の放電が発生している。RF波形(反射波と透過波)の解析及び、放電による加速構造の振動を捕らえる加速度センサーを加速管上に複数設置してそれぞれからの信号の強度とタイミングデータを解析することにより、ほとんどの放電は入力カプラー周辺で起こっていることがわかってきている。この問題の解決は加速管2号機以降の課題である。

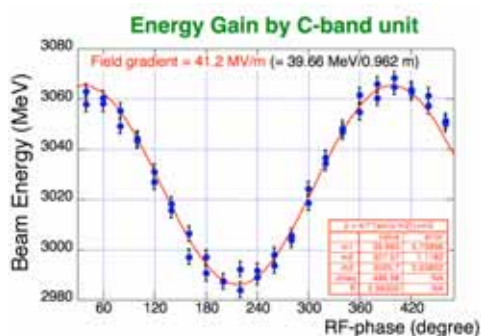


図2 : Cバンドユニットの加速位相に対するビームエネルギーの変化

3. Cバンドコンポーネントの開発、試験の状況

3.1 大電力クライストロンと小型モジュレータ

Cバンド加速ユニット用の大電力クライストロンとしては東芝製50MW級クライストロン(E3746)を使用している。昨年来、約1年間の長期運転において特にトラブル無く順調に稼働している。モジュレータについては、DC電源部分にインバーター充電方式を採用することにより筐体サイズを既存のもの3分の1に(幅4.7m→1.8mに縮小、高さ3.1m、奥行き1.8mは共通)小型化したものが開発された^[5]。特にインバーター電源部分は高さ0.53m、奥行き0.63m、幅0.45mと非常に小型でありながら、最大充電電圧50kV、充電電流(ピーク)1.5A、定格充電電力30kJ/sという性能を持っている。なお長期運転においてインバーター電源のIGBTが両導通する破損不具合が何度か発生した。対策として、IGBTドライブ回路の改良とIGBT素子を耐量の大きい短

絡保証型に変更した。現在、その効果を確認しているところである。

3.2 高周波窓とそのレゾナントリングでの大電力試験

クライストロンから加速管までの導波管系において真空中には分離しつつ高周波は透過させるための高周波窓が必要な大電力に耐えられるかどうかはCバンド加速ユニットにおいても重要な問題である。既存のSバンド用ピルボックス型高周波窓とは異なり、ミックスモード型($TE_{11}+TM_{11}$)設計によりセラミック部における電界強度を下げた高周波窓を開発した。耐電力目標としては、クライストロンからの通常運転出力を40MWとしたときに負荷による全反射があった場合の最大電力に相当する160MWまでについての大電力試験をレゾナントリング(図3)を使用して2003年春に行い問題が無いことが確認されている^[6]。この窓はその後テストスタンド及びライナック4-4ユニットでのエージング及び長期運転に問題なく使用されている。2004年春には同型高周波窓についてさらに大きな電力レベルでの試験を行い350MWまで到達した。この際、窓の真空漏れやセラミック表面溶融の兆候も観測されず、問題なく使用できることが確認された^[7]。



図3 : レゾナントリングの導波管系、クライストロンからの高周波出力を重畳させることで10倍以上の透過電力を得ることができる

3.3 RFパルス圧縮空洞 (SKIP: SuperKEKB Injector Pulse compressor)

Cバンド加速ユニットにおいても現在同様にRFパルス圧縮空洞を用いてピーク電力を高くすることによって、平均加速電界で1.85倍上げることを想定している。現在用いられているSLEDをそのままCバンドにスケールダウンして使用するとQ値が低いので、より高いQ値を実現するためにCERN LEP入射器ライナックでSバンドで使用されているLIPS空洞^[8]と同様の TE_{038} モードを採用する。結果的に周波数は2倍高いが空洞の寸法は既存のSLEDとほぼ同程度である。(表1、図4)。

今回製作されたパルス圧縮器(SKIP)1号機は小電力でのRF測定、調整が完了し、2004年7月からエージングと大電力試験が行われ、8月にKEKBライナック4-4ユニット部に設置する予定である。

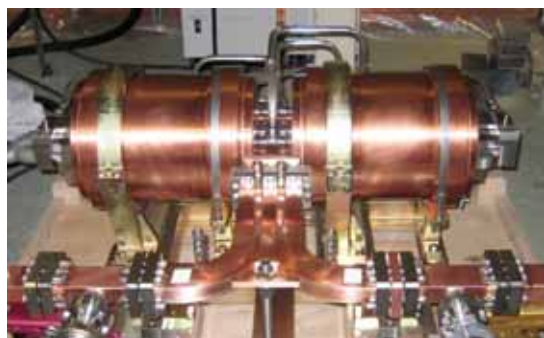


図4：Cバンドパルス圧縮器 (SKIP)

	KEKB-SLED	C-band SKIP
周波数	2856 MHz	5712 MHz
共振モード	TE ₀₁₅	TE ₀₃₈
空洞長	33.59 cm	30.72 cm
空洞直径	20.51 cm	23.28 cm
Q値 (Q ₀)	90000	130000
カップリングβ	6.4	6.6

表1：SバンドSLEDとCバンドSKIPの比較

3.4 加速管2号機

1号機加速管の長期間のエージングにおいて、入力カプラー付近での放電が多いことが観測されている^[4]。その原因としては、カプラー構造も基本的にはSバンドの1/2スケールで設計したため、カプラーアイリスの厚みが1mm程度と薄く（図5左図）、この部分での電流密度が高くなり温度が上がって放電しやすくなっているのではないかと考えられる。そこで2号機については図5右図のように厚みを増すような設計を行った。なおこの右図の寸法は最終寸法値ではなく調整途中の参考値である。

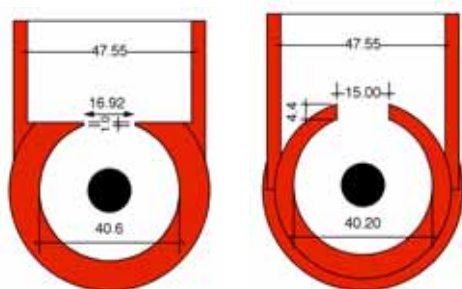


図5：カプラー（入力側）の構造：1号機（左図）、2号機（右図）

カプラー寸法の調整パラメータとしては、カプラー空洞の直径 (2b) とアイリス幅 (w) の2つを最適化する。実際にはカプラーのローパワーモデルを用いて、修正加工及びノードルシフト法でのRF測定を繰り返し、所定の特性を持つように追い込んでいく。現在、その調整作業を進めているところである。なお、最適値に向かう初期加工値の目安としては、MAFIA-T3 及び HFSSTM^[9] を用いてカプラーからの反射が最小になるような寸法を用いて、それ

にある程度のマージンを持たせた寸法を決めた。このカプラーの調整と平行して、レギュラーセル部分の加工が進んでいる。カプラーの寸法追い込みが収束したら、実機用カプラーを加工しそれとレギュラーセルを合わせてノードルシフト法の測定を行い、レギュラーセル部の空洞直径を微調整して、規定の周波数において正しく120度位相進みになるように仕上げる。また、加速管全体の一体化は銅電鑄によって行うが、これまでによりも電鑄応力による周波数変化が小さくなるような方法を検討し、6セル空洞のみの試験電鑄において期待される特性が得られている。

4. 今後の予定

RFパルス圧縮器は今夏シャットダウン期間中にテストスタンドでエージングを行った上で、ライナック4-4ユニット部に設置される。これにより加速管1号機により大きな電力を投入しての試験を進めることができる。また加速管2号機については、カプラー部及びレギュラーセル部の完成の後、銅電鑄により一体化し、テストスタンドでエージングを行い2004年12月以降に4-4ユニット部に増設する予定である。

参考文献

- [1] “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/home.html>
- [2] 福田茂樹、他、“SuperKEKB計画のためのKEK電子陽電子ライナックCバンド化計画” Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July. 30-August-1, 2003, p45-47
- [3] <http://c-band.kek.jp/>
- [4] 紙谷琢哉、他、“SuperKEKB計画のためのCバンド加速管開発の現状”，第14回加速器科学研究発表会、2003年11月11-13日、<http://conference.kek.jp/sast03/>
- [5] 中島啓光、他、“小型パルス電源の特性と今後の課題”，Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30 - August 1, 2003, p48-50.
- [6] 道園真一郎、他、“Cバンド・ミックスモード高周波窓の開発”，Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30 - August 1, 2003.
- [7] T.Takenaka et al., "High Power test of C-band RF window Using Resonant Ring", These proceedings.
- [8] A. Fiebig, et al., "Design Consideration, Construction and Performance of a SLED Type Radiofrequency Pulse Compressor using very high Q Cylindrical Cavities", CERN-PS/87-45, presented at 1987 Particle Accelerator Conf., Wash., D.C., Mar 16-19, 1987
- [9] HFSS version 8.5, ANSOFT, <http://www.ansoft.com/>