

HIGH POWER TEST OF L-BAND ACCELERATOR STRUCTURE OF SUPERKEKB INJECTOR LINAC

Shuji Matsumoto[#], Yoshio Arakida, Mitsuo Ikeda, Kazuhisa Kakihara, Takuya Kamitani, Yasuo Higashi, Toshiyasu Higo, Tateru Takenaka, Yoshiharu Yano, Mitsuhiro Yoshida
Accelerator Laboratory, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Although the actual installation of L-band (1298MHz) accelerator units is suspended from Day One of the superKEKB operation, limited numbers of R&D programs are ongoing for the future use. An L-band 40MW klystron was produced in FY2010 and its performance (30MW output) was confirmed in its high power test done. A travelling wave accelerator structure was produced in FY2010 and was long waiting for the test. The waveguide components were prepared and the "L-band accelerator test unit" was built by putting all these devices together and is now set in the sector#1 region of KEKB injector linac. Two weeks pilot run of the unit was done just before the linac summer shutdown.

Lバンド加速管高電力試験

1. はじめに

superKEKB 計画では、当初、入射器（線形加速器）の増強計画の一環として、その陽電子発生部での陽電子捕獲効率を稼ぐため、Lバンド(1298MHz)加速管を陽電子発生ターゲット直下に導入する決定をした。また、陽電子ダンピングリング内でのCSR効果によるバンチの伸びを圧縮するBCSにもLバンド加速管を使う予定であった。このため、当初の導入計画のもと、2010年度より、RF源の40MW Lバンドクライストロン(PV-1040)[1]の開発と並行して、Lバンド進行波型加速管[2]の開発製造がおこなわれた。また、管内が真空の立体回路を使用することに決め、特に長尺部分には、アルミ製導波管を使用するなど、立体回路素子にもいくつかの開発項目があり、プロトタイプ製造も行ってきた。

その後の詳細な検討の結果、superKEKBの初期性能段階では、Lバンドは必ずしも必要ないことが明らかになってきた。長い時間を要する基本的な要素開発（例えばクライストロン製造など）を、限定した規模で継続するのが現時点での開発方針である[3]。先ごろ始まった加速管の高電力試験もこの方針にそって当面継続する。

2010年度に製造されたクライストロンはその翌年度中ごろより、単体での試験を行ない[1]、同年度末からは、今度は、Lバンド加速管試験のための試験ユニットの構築にとりかかった。このユニットは、①地上部のモジュレーター+試験済みクライストロン一本よりなるRF源、②地下トンネルに設置された加速管（2m管一本）、③両者をつなぐ真空立体回路、④LLRFや付属する各種電源および制御システム、等々より構成される。なお、加速管はトンネル内ビームライン上には設置せず（つまりテストユニットではビーム加速までは行わない）、ビームライン脇の専用架台上に設置されている。

Lバンドクライストロンの電子銃部は、KEKB入

射器で使用しているSバンドクライストロンのそれと同型であるので、既存モジュレーターやクライストロンタンク、パルストランスなど、クライストロンへの高圧パルス電力供給部はLバンドに対してもそのまま使える（この部分はSバンドと完全コンパチブル）。KEKB入射器1セクター第4ユニットのモジュレーターに、単体試験を終えたLバンドクライストロンを取り付け、そこからトンネル内ビームライン脇に設置されたLバンド加速管まで立体回路を引いた。（図1はそれらの各機器の配置を示している。）

6月中旬に試験ユニットは完成し、その後、夏のシャットダウン前までの2週間の短期間、最初の試験運転をおこなった。

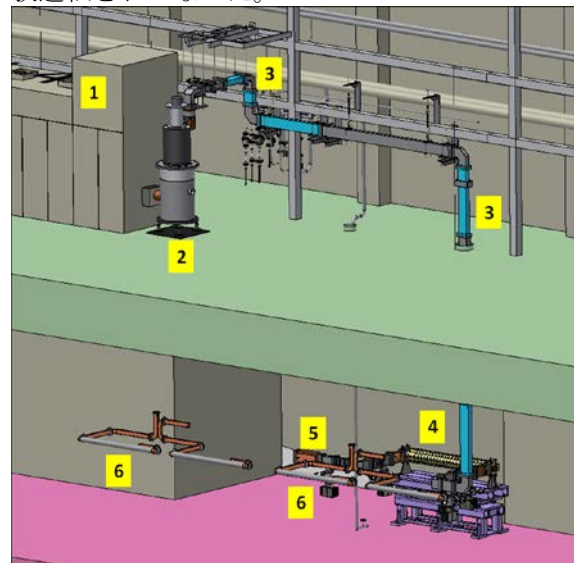


図1: Lバンド加速試験ユニットの構成。図の上半分は地上部、下方は地下（トンネル）。1. モジュレーター（ユニット番号 1-4）2. Lバンドクライストロン 3. 立体回路 4. 2m 進行波型加速管 5. RF ロード 6. 既存Sバンド加速管。

[#] shuji.matsumoto@kek.jp

2. 各デバイス

2.1 クライストロン[1]

出力の設計仕様値は、ピーク 40MW、 $4\mu\text{s}$ パルス幅（繰り返し 50pps）である。クライストロンの単体試験を 2011 年 6 月より 9 月末まで断続的に行い、Lバンド加速管二本を動かすのに必要な運用出力値（30MW、 $1.5\mu\text{s}$ 、50pps）が出せることを確認した。収束コイルの最適化などもおこなったが、RF 変換効率が低い値（ $\sim 30\%$ ）にとどまったこともあり、設計仕様値の 40MW 確認までには至らなかった。この出力試験は改めて行なうこととした。

2.2 進行波加速管[2]

ユニット試験の主役である加速管の仕様を表 1 にまとめた。

表 1 : L バンド加速管仕様諸元

セル数	24 レギュラー+2 カプラー
加速電界	12.2 MV/m @ 15MW
有効長	2001 mm
Vg/c (design)	0.61 ~ 0.39 %
充填時間 (μs)	1.323 (design) / 1.359 (meas)
減衰 τ	0.261
S11 (dB)	-28.8 (input) / -28.9 (output)
S21 (dB)	-2.27 (design) / -2.33 (meas)
E_{acc} ripple	$\pm 2\%$ (by bead)

実機としての加速勾配は 10MV/m（10MW 入力）である。加速モードは $2/3\pi$ 、運転温度は 30 度（冷却水温度）である。電界強度を確保するためアパーチャーが比較的小さめに設計されているために透過帯域は狭くおよそ 1294~1300MHz の 6MHz である。

現場に設置した後の S11 測定結果から、加速管のマッチングが工場出荷時との比較で若干悪化していることが判明したため原因調査を行なった。入力および出力ポートからのネットワークアナライザーによる時間領域での反射測定結果から、加速管内下流位置に弱い反射源の存在が示唆されたが、原因の特定までには至らなかった。

2.3 立体回路素子

使用する導波管規格は WR650（内寸 $165.1 \times 82.55\text{mm}$ ）である。想定する最大搬送パワーはクライストロンの最大定格の 40MW で、このときの管内の最大電界強度は 2.5MV/m となる。回路システムの簡便さと温暖化ガスの使用をなるべく避けるべく、加圧 SF₆ を充填する方法はとらず、立体回路管内を高真空にして耐電圧を確保する。導波管各種素

子の多くは無酸素銅製を採用した。また、軽量化のため、アルミ合金も積極的に採用した。特に長尺の直管は、軽量のアルミ合金製管の独壇場である（図 2 参照。）。われわれの経験では、アルミ合金の導波管壁からのガス放出は、銅と比較して必ずしも多いわけではなく、アルミを多用した試験ユニットでも、焼きだしが進むと運転中であっても 10^{-6}Pa 台の真空が確保できることがわかった。図 3 は試験ユニットで使用しているアルミ合金（A6063）製導波管素子の例である。



図 2: 1-4 ユニットに設置された L バンドクライストロン（画面左）とその直下流の立体回路（画面右方向へ一旦走り、その後画面手前方向に向かって走っている）の構成。方向性結合器や真空引き導波管は銅製。それ以外のベンドや直管はアルミ合金製。



図 3: A6063 製 WR650 導波管の例。E ベンドビューポート付き。引き抜き管（厚み 5mm）を TIG 溶接により接合。EBW による接合試作も行なっている。

3. 試験結果

3.1 概説

ピークパワーは、短パルス（250ns）で約 8MW、長パルス（500ns~750ns）で約 6MW まで入れることができたが、夏期シャットダウンまでのユニット運転期間が 2 週間だったこともあり、加速管定格の 10MW までには至らなかった。パワーを制限したのは、後述のようにクライストロン~加速管間の導波

管部（加速管直前の RF 窓まで）を排気している 2 台のイオンポンプ IP_KX、IP_KA の電流上昇（インターロックは $2e-4\text{Pa}$ ）であった。

3.2 アウトガス、RF 窓発光

導波管内のアウトガスについては、一定の傾向が見られた。ユニットの真空系は、加速管入力ポート出力ポートともに RF 窓で仕切られており、導波管部、加速管部、およびロード部の三領域に分かれている。このうち第一の領域、クライストロンから加速管直前の RF 窓までの導波管部分の真空の悪化が運転中に頻発した。その例を図 4 に与えた。この図にあるような突然の真空悪化の際には、加速管上流部（入力ポート部）の RF 窓の連続的な発光も見られた。

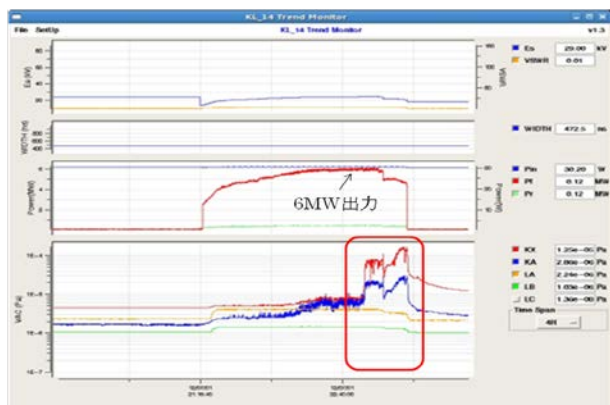


図 4：運転中の真空トレンドの例。2012/7/1 21:15 からの 2.5 時間の運転状況。パルス幅 472.5ns で出力を上げていっている。6MW に達したあたりで IP_KX、IP_KA の真空が突然悪化する（赤線で囲った箇所）。その後真空インターロックによりダウン。他の領域の真空は若干の圧力上昇がみられるのみである。

3.3 クライストロンの出力周波数スペクトラム

突然の真空悪化の原因を探るうち、クライストロン出力に $\sim 1302\text{MHz}$ 自励発振があることがわかった。図 5 はクライストロン出力をスペクトラムアナライザーで観察したときに得られた画像例である。ちなみにこの周波数は加速管の帯域外なので、もしもこの周波数のマイクロ波が何らかの機構によってクライストロンから発生したとすると、そこから加速管までは導波管内を伝送し、加速管に到達後にはそこで完全反射される。導波管で損失しなかった分は、クライストロンまで帰ってくる。（長さ当たり導波管損失の理論値は、銅の場合 $-0.13\%/m$ 、アルミ $-0.16\%/m$ 。なお、クライストロンー加速管距離はおおよそ 20m。）帰ってきた波がクライストロンでその後どのようになるのか不明ではあるが、仮にそれが再度クライストロンから出てくる場合、条件次第では、導波管内にその周波数のマイクロ波が蓄積しうる（定在波が立つ）。仮にこうした事象が起こっているならば、たとえば導波管 RF 窓部セラミックは定在波の影響のため、セラミック表面からのアウ

トガスや発光の発生が起こりうる解釈できるかもしれない。今のところ、なぜクライストロンから 1302MHz の自励発振のような信号が出るのか明らかではないので、導波管部分の真空悪化について確たる原因は判明していない。

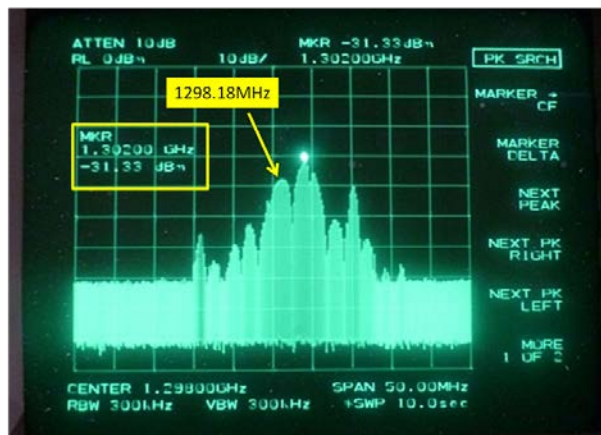


図 5：ドライブ周波数 1298.18182MHz、RF 幅 472.5ns、Pin 10W。クライストロン出力モニターからの RF 信号ケーブルから方向性結合器経由で取りだした信号をスペクトラムアナライザーで観察、画面を写真撮影した。1302MHz にピークがある。ドライブしている周波数成分よりも信号強度は大きい。2012.6.29 21:48。

3.4 クライストロン単体試験

9 月中旬までの夏のシャットダウン期間中は、トンネル内での保守作業のため、加速管試験はできない。この期間中は立体回路を組み換え、クライストロン単体試験を行なっている。加速管試験時に見られた発振の原因を調査する。また、可能であれば、定格の 40MW 出力を確認する予定。9 月以降は再度導波管を組み替えて加速管試験を継続する。

謝辞

試験に関する諸作業は、三菱電機サービス 今井、東福、熊野、馬場、諸富、鈴木各氏に特段お世話になった。熊野氏には本稿の図の元図作成など行っていただいた。トヤマ 飯野氏には立体回路設置・加速管設置に関して大変お世話になった。この場を借りて謝意を表明します。

参考文献

- [1] M.Kubosaki, et al., “L バンド 40MW クライストロンの開発”, TUPS158, in Proceedings of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (Aug1-3,2011,Tsukuba, Japan).
- [2] K.Saito, et al., “陽電子捕獲用 L バンド加速管の製作”, TUPS125, in Proceedings of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (Aug1-3,2011,Tsukuba, Japan).
- [3] T.Higo, et al., WEUH03, These proceedings.