

KEK 電子陽電子入射器の大口径 S バンド加速管

LARGE APERTURE S-BAND STRUCTURES IN KEK INJECTOR LINAC

松本修二[#], 荒木田是夫, 池田光男, 柿原和久, 紙谷琢哉, 田中窓香, 肥後寿泰, 横山和枝, Zang Lei
Shuji Matsumoto[#], Yoshio Arakida, Mitsuo Ikeda, Kazuhisa Kakihara, Takuya Kamitani, Madoka Tanaka,
Toshiyasu Higo, Kazue Yokoyama, Zang Lei
Accelerator Lab., KEK

Abstract

Upgrade of KEKB Injector Linac is ongoing for super KEKB project. The positron beam intensity is required to be 4nC per bunch. Use of the flux concentrator and the large aperture S-band structures (LAS) in the positron capture system can give us four times larger population of positrons than that of our previous system. Ten LAS are set in the downstream of the positron target. The new system starts its first operation with positron generation in this spring (2014). In the present paper the system design is briefly reviewed and the operation of LAS is reported.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器は、さらなる高ルミノシティが目標の superKEKB 計画のために、供給する電子、陽電子のいずれも、そのビーム強度の増強と低エミッタンス化のために改造を行っている。陽電子に関して言えば、低エミッタンス化のため、ダンピングリングが新規に導入される。さらに、陽電子標的で発生した陽電子を効率よく捕獲し、ビーム強度を保ったままダンピングリングまで送り込めるように陽電子システムを改良する。標的で生成された陽電子ビームは横方向に広く分布をしているので、まず、標的直下の Flux Concentrator (FC) で発生させるピークソレノイド磁場 5~10T で陽電子をかき集め、次に (入射器で通常使われているものよりも) 口径が大きな S バンド加速管 (LAS 管: Large Aperture S-Band 管. 全長約 2m.) を使用して、陽電子ビームを捕獲・初期加速する (10 台の LAS を使用. このうち、先頭からの 6 台は、5kG の一様なソレノイド磁場中に置かれている) [1]. FC および LAS よりなる陽電子システム全体は、今春 (2014 年) 試運転運転を開始した。本稿では、LAS についてまずその概要を解説したのち、LAS のプロセッシング運転の結果をまとめる。

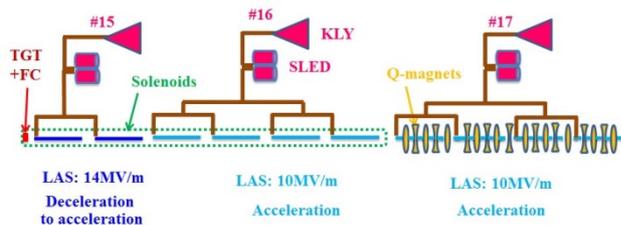


Figure 1: Capture system schematic.

2. 陽電子 RF 捕獲システム

2.1 概要

システムの概要は図 1 を参照。システムは入射器 #15 ユニット先頭部に置かれた陽電子ターゲットの直下に FC が設置され、引き続いて一連の、LAS から構成される 3 つの加速ユニットが続く。加速器トンネル内 #15 ユニット付近からビームライン下流方向を見た写真を図 2 に掲げる。

一番先頭の #15 ユニットおよび次の #16 ユニットは、それぞれ 2 台および 4 台の LAS より構成され、6 台の加速管はすべて 5kG のソレノイド磁石の中に設置されている。続く #17 ユニットは 4 台の LAS から構成され、Q 磁石による収束系をもつ (各加速管は 4 台の Q 磁石に抱かれた状態で設置)。#15 は他のユニットよりも加速勾配が大きくできるように、クライストロンからのパワーを 2 台の LAS に等分配している。これ以外のユニットではパワーは各 LAS に 4 等分して供給される。

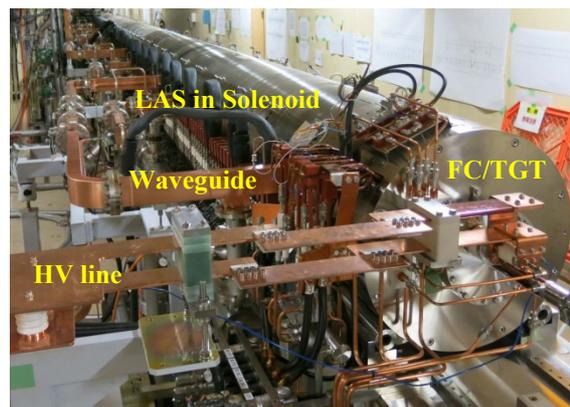


Figure 2: Positron production system.

[#] shuji.matsumoto@kek.jp

2.2 RF パラメーター

LAS を搭載した 3 ユニットの RF パラメーターを表 1 に掲げた. この表では、加速勾配はすべてビームロード (約 1%) を無視している. さて、先頭の #15 ユニットでビーム運転時に必要な加速勾配 (定格値) は 14MV/m で、他の二つのユニットのそれ (10MV/m) より大きい. 陽電子の初期加速をできるだけ素早く行なうためである. それらの加速勾配は、いずれにしても、SLED を動作させ、パルス圧縮を行なうことで確保できる設計である. SLED を使えば、それらの定格勾配には、クライストロン約 15MW 出力で到達するので、運転には余裕がある (クライストロンの最大出力は 40MW). 仮に SLED を使わなかった場合でも、クライストロンの最大出力時の勾配は、いずれも定格値の 70% が確保される.

後で触れるように、今春のビーム運転時には、SLED は動作させなかった. この理由は、SLED 動作時、加速管からのアウトガスにより加速管部分の圧力が上昇するためであった. ビーム運転開始までの LAS プロセッシングでは、SLED 動作時のアウトガスを十分枯らすところまで到達しなかったためである.

Table 1: Capture RF System with LAS

Unit #	15 / 16	17
Focusing magnet	Solenoid	Q-mag
Focusing field [kG or T/m]	5	4 ~ 12
Number of LAS	2 / 4	4
KLY power non-SLED [MW]	40	40
Non-SLED Gradient [MV/m]	9.8 / 6.9	6.9
SLED Gradient [MV/m]	14 / 10	10
KLY power needed for SLEDed gradient [MW]	14.5 / 14.8	14.8
SLEDed Gradient at KLY maximum power [MV/m]	23.2 / 16.4	16.4

2.3 真空システム

LAS を含むユニットの排気系は、入射器の他のユニットと基本的に同じ構成である. 140mm 内径の SUS 製マニフォールドをビームラインと平行に 500mm 離して設置し、加速管の入力・出力の両導波管とこのマニフォールドを連結して加速管の排気を行なう. マニフォールドは、イオンポンプおよび NEG により排気される. 加速管部のいわゆるベース圧力は、 $1e-6$ Pa ないしそれ以下に保たれる.

空きスペースの都合で、FC~LAS 間にはゲートバルブは設置されていないので、ガスが行き来する. 両者間の真空コンダクタンスは小さい (6.5L/s) が、

FC もその動作時にガス源となるので、今春の運転時には、互いの影響を避けるため、ビーム運転時以外は、原則、FC と LAS 同時のプロセッシングは行なわなかった. 真空に関する数値を表 2 にまとめた.

Table 2: System Evacuation Parameters

Item	Geometry	Value
FC evacuation	IP	75 L/s x 2
FC-LAS conduct.	$\phi 40\text{mm} \times \text{L}150\text{mm}$	6.5 L/s
LAS volume	$\phi 85\text{mm} \times 2\text{m}$	0.012 m ³
LAS inner surface	$\phi 85\text{mm} \times 59$ cells	1.0 m ²
LAS coupler-manifold	Two iris + J-coupler + Waveguide-holes	20 L/s
Manifold evacuation	Ion pump + NEG pump	500 L/s + 1000 L/s

3. LAS について [2]

LAS 管は通常の S バンド加速管よりも大きな口径をもつことを特徴とする. これは、発生直後の空間的に広がった陽電子ビームを効率よく捕獲するためである. 大きな口径ほど収量が增大する一方、シャントインピーダンスの低下と群速度の増加により、加速勾配は下がってゆく. 発生直後の陽電子はなるだけ素早く加速したいので、必要な加速勾配に見合う最適な口径を選ぶ必要がある. 検討の結果、最小口径を 30mm とした[3].

陽電子ターゲット直下流に置かれる LAS 管は、大量の放射線にさらされるので、管内での RF 放電は、他の一般的な加速管より起こりやすい. 特にカップラー部結合孔付近は電界が集中のため、放電にはもともと脆弱な箇所である. 放電をなるべく回避するため、LAS 管のカップラーは 2 つの結合孔を対称に配置したいいわゆる Double Feed 型を採用した. さらに、加速管入力側は、放射化する加速管の取り外し作業の簡便化を考慮して、導波管ポートが一箇所の J 型カップラーとし、他方、出力側は導波管ポートが 2 個対称位置に配置されている. 導波管フランジは、ソレノイド内径に合うよう、加速管に埋め込まれている.

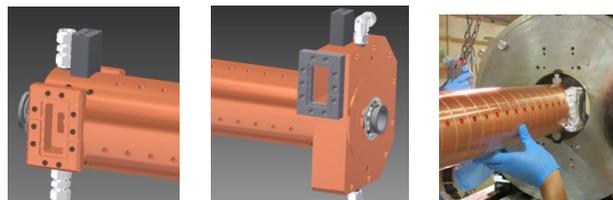


Figure 3: LAS output end (left), input end (center) and insertion of LAS into solenoid (right).

Table 3: Structure Parameters

Item	LAS	Type-C
Frequency MHz	2856	2856
# of regular cells	57	54
Active acc. Length [mm]	2064.40	1959.43
Flange-flange length [mm]	2191.01	2072.45
Beam hole dia. (2a) [mm]	31.9-30.0	24.28-20.3
Group velocity v_g/c [%]	4.2 - 3.5	1.24 (av.)
Shunt impedance [M Ω /m]	46 - 48	57.8 (av.)
Attenuation parameter τ	0.121	0.333
Filling time [ns]	185	507
Maximum E_p / E_{acc}	2.42	2.14
Input coupler iris	J-type Double	Single
Output coupler iris	Double	Single
Cell machining tool	Diamond	Diamond
Coupler fabrication	Brazing	Brazing
Assembly technology	Vacuum brazing	Electro- forming
Cooling passage	Four channels	Outer jacket

4. RF 運転

4.1 フラットパルスでのプロセッシング

先に組み立てが完了した#16 および#17 ユニットの2013年10月頭から同年11月11日までの一カ月余りの期間、フラットなRFパルス（SLED 離調）でのプロセッシングを行なった。試験的にソレノイド磁石に通電してみたところ、磁場印加に伴う加速管内の圧力増加が予想通り確認された。また SLED を同調した場合も同様に圧力が増加した。このため、ソレノイドの励磁、SLED を同調してのプロセッシングは見送り、まずはフラット RF パルスでその幅を伸ばしていくことに専念した。

RF パルス幅を一定にしたまま LAS への入力パワーを徐々に上げてゆくと、加速管内の圧力が上昇してくる。圧力をあらかじめ設定しておいた閾値以下で収まるよう、加速管入力を運転プログラムで自動制御しつつ、だんだんと入力上げてゆく。パワーが目標まで到達したら、RF 幅を少し広げ、再度クライストロンパワーを低いところから徐々に上げてゆく。これを繰り返す、運転期間が終わるころには、おおむね 1 マイクロ秒幅までのプロセッシングが終わった。プロセッシングは比較的順調に推移した。

4.2 ビーム運転を想定したプロセッシング

年末年始の停止期間中に#15 ユニットの組み立てが完了したので、2014年の2月初頭より、先行する#16、#17に#15を加えた3ユニットすべてのプロセッシングを開始した。

プロセッシングの目標値は、当面のビーム運転に必要な（フラット）パルス幅 500ns でのクライストロン出力 40MW での運転に設定した。SLED は離調しておいたが、ソレノイドは原則、励磁した状態である（ソレノイド磁場はビーム運転時に必要だから）。この時点での AC 電力供給量の制限から、約 60% の磁場強度でプロセッシングを行なった（ソレノイド定格電流 600A のところ 370A）。

3月初頭までの約一カ月の運転期間（時間=700時間強）で、#15 はビーム運転に要求された 500nsRF 幅での加速勾配 10MV/m までのプロセッシングが完了した。図 4 に加速勾配、パルス幅および加速管内部の真空圧力の履歴を示す。

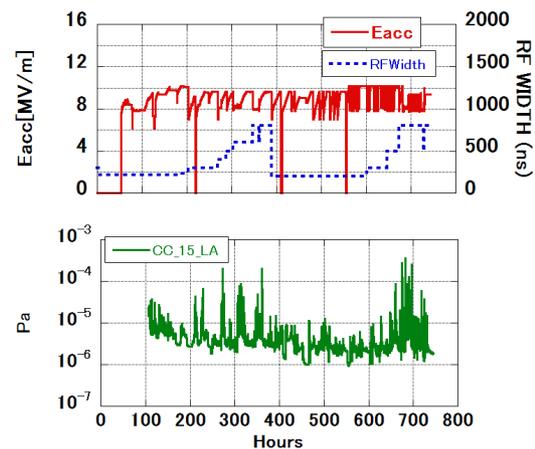


Figure 4: Initial conditioning of unit #15.

5. まとめ

LAS は磁場がかかった状態で運転される。（#15 と 16 ユニットの計 6 台はソレノイド磁場が、#17 の 4 台は Q 磁場が印加された状態で動作させる）。LAS 管のプロセッシング時の特徴としては、突発的な圧力の上昇（とそれによるダウン多発）が見られた。このため、最初から磁場をかけた状態でのプロセッシングは行なわず、いくつかの段階を経て「磁場あり SLED 動作あり」の状態にもっていった。プロセッシングの指針は、加速管部分の真空（圧力）が設定した閾値を超えないようすることで、結果的に下記のような手法に至った。

①フラット短パルスより開始：SLED は離調し、また、RF パルス幅も、当初は短めから開始する（100ns～数 100ns 程度）。②まず磁場なしで運転開始し、徐々にパワーを上げてゆく。RF 幅も徐々に広げてゆく。③ある程度までパワーが入れば、今度は、磁場を徐々にかけながら、ただし再び低いパ

ワーと短いパルス幅から始め、③磁場中でもある程度パワーが入るようになった時点で、SLED を動作させる。一般に、LAS 管のプロセッシングに要する時間は、入射器の他の通常の加速管よりも長い。

J カップラー部に外部より永久磁石を取り付けてみたところ、磁場印加による加速管内圧力への効果（磁場印加で圧力減少）が見られた。カップラー付近でのマルチパクターの発生可能性があるがこれについては、今後も継続して詳しく調査する必要があるであろう。

SLED なしでも、加速勾配は要求値の約 70%まで上げることができる。現時点でそこまでの LAS プロセッシングは終了し、ビーム運転に供した。春のビーム運転では、LAS 加速勾配を上げると陽電子の収量が増えたので、今秋からの運転で、さらに SLED 付きの LAS プロセッシングを進め、十分安定に定格加速勾配での運転ができるようになることが期待されている。ソレノイド磁場は電力供給能力の都合で、春の運転では、設計値の約半分になっていた。今後電力供給は増強されるので、ソレノイド磁場が上がればさらに陽電子の収量増加が期待される。なお、春の運転では、むしろソレノイド磁場を弱くした時、LAS 管内の圧力上昇がみられ、磁場が一定以上強くなれば、圧力への影響が小さくなったことから、今後磁場を増強しても、LAS の RF 運転への影響は小さいものと考えている。

謝辞

三菱重工業三浦禎夫氏には LAS 管の設計・製造でご尽力いただきました。また、KEK 入射器三菱電機サービスの RF および加速管担当の方々には、機器の設置及びプロセッシングに多大な貢献をいただきました。ここに感謝します。

参考文献

- [1] T. Kamitani et al., “Positron Injector Linac Upgrade for SuperKEKB”, MOPLB02, LINAC’12, Tel-Aviv, Israel, 2012.
- [2] S. Matsumoto, T. Higo, K. Kakihara, T. Kamitani, M. Tanaka, “LARGE-APERTURE TRAVELLING-WAVE ACCELERATOR STRUCTURE FOR POSITRON CAPTURE OF SUPERKEKB INJECTOR LINAC” THPRI047, IPAC2014.
- [3] T. Kamitani, “Positron Source Upgrade”, 19th KEKB Accelerator Review Committee, Tsukuba, Japan, March 3-4, 2014.
<http://www-kekb.kek.jp/MAC/2014/>