

SuperB計画の為のKEK電子陽電子ライナックCバンド化計画

福田茂樹¹、明本光生、池田光男、大越隆夫、大澤哲、小川雄二郎、柿原和久、片桐広明、紙谷琢哉、佐藤政則、設楽哲夫、白川明広、杉村高志、諏訪田剛、竹中たてる、中尾克巳、中島啓光、古川和朗、本間博幸、松本利広、道園真一郎、矢野喜治、榎本収志

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1 つくば市大穂1-1

概要

KEKではSuper-KEKB 計画の一環としてKEK電子陽電子ライナックのCバンド化計画を考えている。ライナックの陽電子ターゲットから後半をCバンド化して陽電子を8GeVに増強しようとするものである。その計画の内容とそれに関した1年間の開発試験状況を報告する。

1. Cバンド化計画の概要^[1]

KEKでは現在KEKBの運転が順調に行われており、Peak Luminosityも $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上を記録し世界の先端を切っている。しかし数年後にLHCが稼動すると競争力が失われる為に、KEKでは部分的でも競争できるようにLuminosityを一桁上げたSuper-KEKB計画を検討中である。この計画で、リング内での蓄積電流の不安定を避ける為に現行の電子8 GeV、陽電子3.5 GeVを変更し、陽電子8 GeV、電子3.5 GeVにしようという案が浮上している。同時に電子の入射電荷量を5nC、陽電子のそれを1.2nCに増加することが要求されている。これを実現するため、2-3の提案がなされていたが^[1]現在は、現行のライナックの陽電子変換ターゲット以降をCバンド化して陽電子を8 GeVまで加速しようとする案が有力である。Cバンド化計画では、陽電子変換ターゲット以降の3セクター分をCバンドに置き換え、6セクター48台の50MW-klystronとSLEDで陽電子を8GeVまで加速するのが骨

Present Configuration of Modulator and Klystron

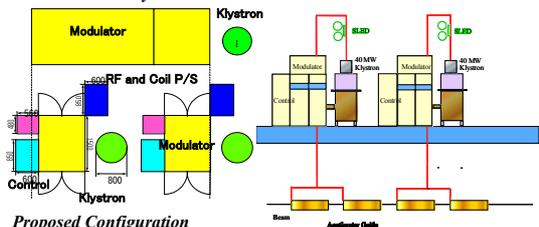


図2 新旧の電源の比較、及び加速管との関係

子である。ここではKEKB改造時と同様に現有資産はすべて有効に利用することを前提にしている。Klystron Gallery をそのまま利用するために現存のmodulatorは、PFN放電部だけをほぼそのまま流用し、inverter電源で充電することで筐体サイズを現存の半分にし、同じ空間に2倍の数の電源を装置する。現在のS band-klystronのパルス幅は若干の巻き直しをし、タンクはそのまま使用することができる。加速管は基本的にSバンドのスケールダウンしたものを考え、現在使用している加速管架台も継続使用する。以上のような観点から図1に示すようなRFのブロック図を想定し、図2のようなKlystron Gallery のレイアウトを検討している。励振系も現在と同じように、100kW級Sub-booster klystronを開発し、これで8台の50MW-klystronを駆動する。

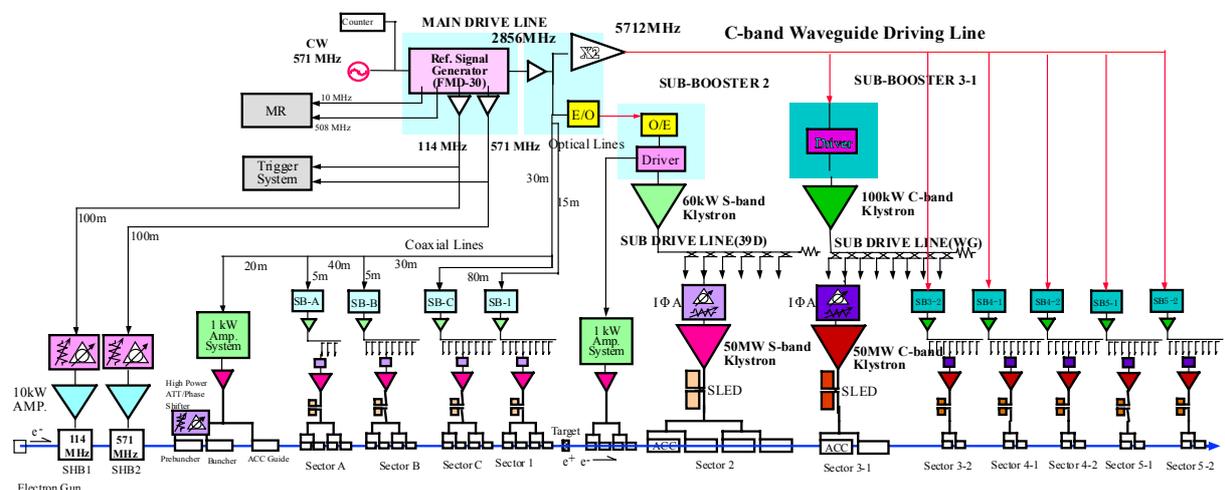


図1 現在検討中のRF系のブロック図

¹ E-mail: shigeki.fukuda@kek.jp

以上の計画で陽電子を8 GeVに加速する為には加速電界約40MV/mが必要である。一方Super-KEKBではマルチバンチ入射は現在行っている2バンチ入射以上は考えていないので、現在と同じSLED方式が使用できる。市販のCバンド50MW-klystronから40MW出力のRFを、SLED(パルス幅 $2\mu\text{s}$ の時、電力増倍係数3.4)を経由して、Sバンド加速管の1/2スケールダウンした構造をもつ2m長のCバンド加速管2本へ供給する。Filling Time 380ns, Attn Constant 0.703とすると加速管入り口で約59MW、加速電界約40MV/mを得る。SLEDはCERN-LIPSで使用されたTE₀₃₈モードを用いたものを検討している。この場合サイズの現在使用しているSバンドSLEDとほぼ同等になり架台、保持方法等の設計が楽になる。

2. Cバンド試験装置の開発状況

第1章の基本プランをベースに2002年度から1年間で試験装置とCバンド加速管を開発し試験すること、更に2003年の夏のシャットダウン時に現在空席になっている#4-4へこの加速管を設置し、2003年秋からのKEKB運転開始から、試行的にビーム加速試験に供する計画を立てた。Cバンドに関する設備は0であったので基本的なコンポーネントを揃える事から始めた。又予算的な措置は運転経費等をやり繰りして行った。開発しなければならない要素もいくつかあり、ライナックの加速管グループとRFグループが全体としてこの計画に取組んだ。具体的には、加速管の設計試作^[2]、Dry LoadとしてのSiC dummy loadの開発^[3]、WG用真空フランジの開発^[4]、RF系の低電力から大電力までのシステムの構築^[5]、100kW Sub-booster klystronの開発^[5]、1個で50MW電力に耐えられる大電力高周波窓の開発^[6]と試験^[7]、小型電源の開発^[8]等が進められた。

2.1 小型モジュレータ^[8]

図2にあるように既存の電源のスペースに2台の電源を置く為と対コスト性を前提に、現在使用しているPFN及びサイクロトロンは継続使用し、充電用電源としてinverter電源を用いたものを試作した。PFN容量は現用と同じ15.5nF、コイルは $1.55\mu\text{H}$ とし、前記の通りパルス平坦部は $2\mu\text{s}$ 必要なので、PFN14段2並列回路を採用した。パルストランスの昇圧比を1:15とするとPFNの特性インピーダンスは 5Ω となる。Spiceによる計算では上記のパラメータで半値幅 $4.8\mu\text{s}$ 、平坦部 $2\mu\text{s}$ を得た(図3)。このmodulatorは2002年末に納入され2003年初めから試運転を始め

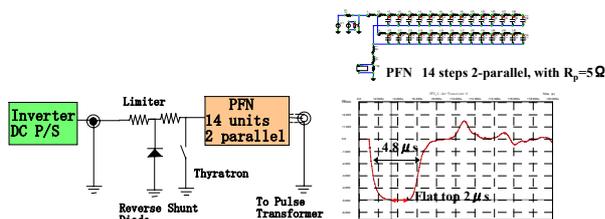


図3 Modulatorのブロック図及びSimulation結果。

た。当初、inverter電源でさまざまなトラブルが発生し、IGBTの破損等続いたが現在は一応順調に動いている。ただし、IGBT素子そのものとIGBTの制御回路のノイズ対策に課題が残っていると思われる。

2.2 50MWクライストロン及び励振系^[5]

信号発生器から発生した2856MHzを逡倍し、パルス変調後、NEC製8W-Trアンプを介して励振用klystronへ入力した。最終段を励振するものとして図1の全体図を考慮しSB klystronを開発した。これは気象レーダ用のものを改造(空洞の再同調、パービアンズ変更)したものである。開発条件として現在使用のSB modulatorで100kW出力(印加電圧28kV時)を目標とした。今年度はSLEDを用いた試験を予定していないがCバンドでの位相反転SWとして性能の良いものを探す必要がある。SB klystronからの電力は減衰を避ける為にWRJ-5の導波管素子を介して50MW-klystronへ入力した。

大電力klystronは電磁石集束の東芝製50MW-klystron(E3746)を用いた。パルストランス及びタンクはKEKB建設当初Sバンド60MW-klystron用についた昇圧比1:15のトランスとID ϕ 700のタンクを用いた。電圧モニターはStangen社社の容量分割器CVD-350(耐圧350kV)を使用している。将来的には集束コイルフランジ径を変え現在使用中のタンクに変更する予定である。

2.3 大電力高周波窓の開発^[6]

50MW-klystronでは2個の大電力高周波窓が使用されているが、1個で50MW透過の実績は十分でない。運転維持的なことも考慮し、1個で50MW透過する高周波窓を開発した。Kazakovにより提案されたミックスモード(TE₁₁+TM₁₁)型高周波窓にすることでセラミック表面と端での電界を下げるができる。HFSSを用いて設計を行い、コールド試験でGhostモードがあったことから再設計後大電力モデルを製

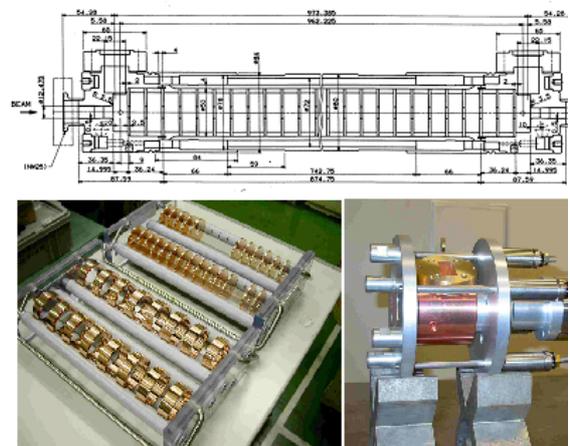


図4 加速管断面図(上)、製造途中のDiskと円筒(下左)及びCoupler部(下右)

作した。これは後述のレゾナントリング(RR)試験により評価を行った。

2.4 加速管の開発^[2]

第一章で述べた2m加速管を想定しつつ、今年度は現Sバンドの1/2スケールの1m管を開発している。これは2m加速管の後半部に相当する構造を有し、2aは12.44~10.41mm、Filling Time 234ns、Attn Constant 0.434である。SLEDを用いずklystron出力40MWがすべてこの加速管に入るとすると、基本プランと同等の39 MV/mの加速電界を得る。設計はHFSS及びMAFIA-3Dを用いて行った。ディスクと円筒の加工はMHI及びKEKで進めている。MHIの精密旋盤の故障があり、仕上げ削りはKEKで行う。この加速管も電鑄法で製作される。図4に断面図及び製作途上のディスク、円筒及びカプラー部を示す。この加速管の製造スケジュールは2003年7月納入後、試験ベンチに据え付け高電界試験を7-8月と行う予定である。

2.5 テストベンチ及び試験結果

Cバンドの試験ベンチは従来のS-band klystron組立ホールではなく、その隣の加速管組立ホールに設けた(図5)^[9]。これはシールドルームへの距離が短い為である。ここでmodulator単体の試験(S-band klystron負荷)後、C-band klystron単体の試験を行った。50ppsでEs=42.5kVまで印加し、出力電力43MWまで確認をした。電力は2本のWG水負荷による熱測定で行った。この試験に必要なベアホール型方向性結合器、VSWRメータは新たに製作した。入出力特性、対電圧特性、位相特性、帯域特性等の測定した後^[5]、klystron負荷でPFN調整を行い、平坦度調整から平坦度1.3%まで調整した。又同時に位相を見ての調整も行い、2.6度(Tentative)以内までの調整を取った(図6参照)^[8]。その後、RRにより高周波窓の試験を行った。初めSB-klystronの出力(1kW)をRRへ入れて共振長の調整等の様子を見た。窓無しでの試験、窓有りでの試験という手順で行ったが、最初の段階でWGのRF的なエージングが終了し、高周波窓の試験は比較的短時間で済んだ。RRの逡倍率は約18倍で今回は最大160MWまでの電力(40MW出力での全反射相当)を透過させ、高周波窓に問題が無いことを確かめた(図7参照)。



図5 試験ベンチ鳥瞰図(左)及びWG系(右)

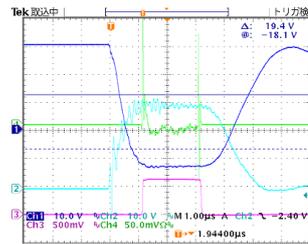


図6 波形写真。上:電圧波形、第2波形:出力RFの位相波形、第3波形:電流波形、下:RF波形。横軸は1 μ s/div

3. 今後の予定

今後は6月末SiC Dummyの試験^[3]、7月に1m加速管の試験を行い、8月末にライナックのビームラインに据え付ける。新規小型電源No.2が同時期に納入され#4-4に設置される。試験ベンチのクライストロンアセンブリも同じ場所に移設される。試験ベンチでは今年度2本目の50MW-klystronを購入して、新しい純KEK製加速管の試験を年度末に予定している。高周波窓は更に限界まで(200~300MW)の電力透過試験に臨む。来年度はSLED設計製作に着手しSLEDの大電力試験に取組む予定である。

参考文献

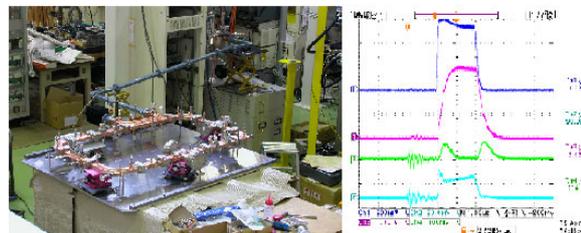


図7 RR試験。SB出力でチューニング(左)。波形(右)。上から2番目波形が周回電力。

- [1] T. Kamitani et. al, "R&D Status of C-band Accelerator unit for SuperKEKB", PAC2003, Portland, Oregon, USA, May 12-16, 2003.
- [2] 紙谷琢哉, 他, "SuperKEKB計画のためのCバンド加速管開発について", 第28回リニアック技術研究会、東海、2003.
- [3] 杉村高志, 他, "Super KEKBに向けたC-band Dummy Loadと3dB Hybrid Couplerの開発", *ibid*.
- [4] 柿原和久, 他, "C-band矩形導波管用フランジの検討", *ibid*.
- [5] 松本利広, 他, "Cバンド50MWクライストロンを用いた大電力高周波窓(I)-低電力励振系の構築-"及び"同(II)-大電力試験-", *ibid*.
- [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", *ibid*.
- [7] 竹中たてる, 他, "Cバンドレゾナントリングを用いた大電力試験", *ibid*.
- [8] 中島啓光, 他, "小型パルス電源の特性と今後の課題", *ibid*.
- [9] 大越隆夫, 他, "KEK電子陽電子LINACのCバンドテストベンチの状況", *ibid*.