

SuperKEKB 計画のためのCバンド加速管開発の現状

紙谷 琢哉^{A)}、杉村 高志^{A)}、大越 隆夫^{A)}、山口 誠哉^{A)}、大沢 哲^{A)}、柿原 和久^{A)}、
池田 光男^{A)}、穂積 康文^{A)}、榎本 収志^{A)}、高富 俊和^{B)}、Nicolas Delerue^{C)}、
鈴木 喜一^{D)}、藤江 壮^{D)}、柿崎 真二^{D)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 電子陽電子入射器研究系 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 工作センター 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{C)}高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 日本学術振興会研究員

^{D)}三菱重工業 名古屋航空宇宙システム製作所 〒455-8515 愛知県名古屋市長区大江町 10 番地

概要

現在 KEKB ファクトリーのルミノシティアップグレードの技術的検討が進められているが、改造の際には入射ライナックの陽電子ビームの加速エネルギーを 3.5 GeV から 8 GeV に上げる必要がある。このため、現在使用している S-バンドの加速ユニットの変わりに 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 とするための技術開発を行っている。昨年より C-バンド加速管の第 1 号機の設計、開発を進め、今年 7 月よりテストスタンドでの RF エージングを進め、ほぼ所定の加速電界まで到達することができた。Cバンド加速ユニット全体の開発の現状については、別論文[1]にて報告されているが、本論文では特に、加速管の製作及び RF エージングの状況について報告する。

1 はじめに

KEKB ライナックは衝突リングに 8.0 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を入射している。陽電子生成部はライナックのおよそ中間点に置かれ、約 4 GeV に加速した電子を生成標的に照射して陽電子を生成し、その下流の加速ユニットにより 3.5 GeV まで加速している。現在検討中のルミノシティ増強計画 (SuperKEKB)[2]では、陽電子蓄積リング内での光電子によるビーム不安定性が問題になり、その対策として、電子と陽電子のビームエネルギーを入れ替えて陽電子を 8.0 GeV に電子を 3.5 GeV にすることが考えられている。しかし入射ライナックにおいて、陽電子の加速に寄与する後半部分は現在のままでは 4 GeV 強の加速能力しかない。そこで、もっともシンプルなライナック改造案として、加速電界を現在の 2 倍にする可能性を検討した。一つの案は、RF 源からのパワーを 4 倍にすることであるが、RF 源の設置スペースの制約とコストの観点から、これは難しい。これに代わる案は、より高い周波数の加速構造を用いることである。一般論として、周波数を 2 倍にすると、RF 空洞のサイズが半になり、同じ RF パワーにより誘起される電界強度は 2 倍になる。そこで、リニアコライダーに向けて検討されているように[3]、現在使用されている S バンド (2856 MHz) の 2 倍の C バンド (5712 MHz) を用いた加速ユニットについての設計検討、各種コンポーネントの試作、試験を行い、SuperKEKB 計画で必要とされる平均加速電界 42 MV/m を達成することが可能であるかどうかについて検証することを進めることになった。

2 Cバンド加速管の基本設計と製作

SuperKEKB 用 C バンド加速管の試作第 1 号機の製作については別論文[4]でもすでに述べられているが、基本方針としては、これまで KEKB 入射ライナックで用いられている S バンド 2m 長加速管 (A-type) を基本的にはスケールダウンした構造の 1m 長加速管 (図 1) とすることにした。その理由は、これまで多数製作された S バンド加速管製作上のノウハウやデータをスケールして利用できることと、アイリス径が S バンドの半分になるため、ここを貫通させる製作治具や測定治具の制約が生じ、製造上 1m 程度の長さが適当であったことである。

表 1: C バンド加速管試作 1 号機の仕様

空洞形状	ディスク装荷型
電磁波の速度	進行波型
電界分布	準定電界型
加速モード	$2\pi/3$ -モード
空洞セル数	54 標準空洞+2 カプラー
運転周波数	5712.000 (MHz)
セル長	17.495 (mm)
ディスク厚み (t)	2.500 (mm)
アイリス直径 (2a)	12.475 ~ 10.450 (mm)
空洞直径 (2b)	41.494 ~ 41.010 (mm)
シャントインピーダンス (r_0)	74.6 ~ 85.1 (M Ω /m)
Q 値	9703 ~ 9676
群速度 (v_g/c)	0.019 ~ 0.010
充填時間	234 (ns)
減衰定数	0.434
運転温度	30 (°C)
ディスクスペーサの一体成型	電鋳法 (銅メッキ)

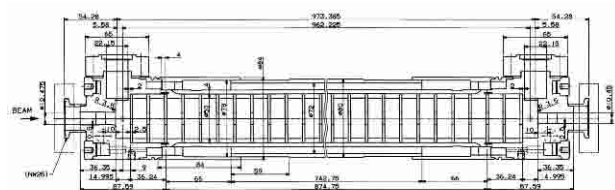


図 1: C バンド 1m 長加速管全体図

標準空洞は、ディスクとスペーサをそれぞれ加工して電铸により一体成型した。カプラーは1ポート型であるが、Sバンド加速管でカプラー部の電磁界分布の軸対象性のずれを補正するために設けた三日月状窪みは放電の誘因となることがわかったため無しとした。今回の1号機では高電界耐性の確認に重点を置き、軸対象性の改善については今後の課題とする。なお、カプラーの形状寸法については、規格品の導波管寸法がSバンドのちょうど半分にはならないため、ローパワーモデルを製作して、RF測定と調整加工を繰り返して詳細寸法を決定した。標準空洞部とカプラー部は電子ビーム溶接で接合し、さらに外周部の冷却水ジャケットはTIG溶接により取り付けた。このような加速管の製造は、三菱重工名古屋航空宇宙システム製作所において行われ、一部の加工についてはKEKの工作センターの協力を仰いだ。

3 テストスタンドでのRFエージング

こうして製作された加速管をRFエージングするために図2のようなテストスタンドが構築された。RF源としては、低電力RFの励振とその増幅用のサブプースタークライストロン、そしてハイパワークライストロンとそのモジュレーターが設置された。クライストロンからのRFパワーはRF窓を経て、導波管を通り、コンクリートシールド内に置かれた加速管に供給される。

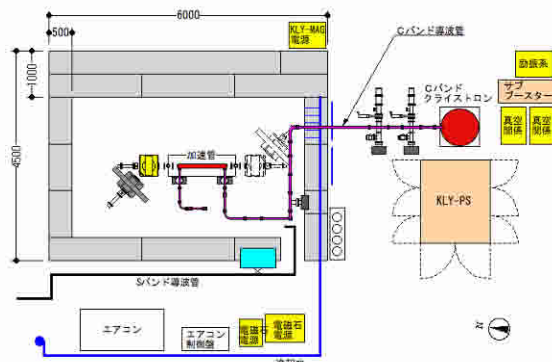


図2: Cバンドテストスタンド

ここでは、まずモジュレーターとクライストロンのそれぞれの単体試験が行われ、さらにレゾナントリングを用いたRF窓の試験も行われた。これに引き続いて、事前に加速管以外の部分からのガス放出を行って、加速管本体のRFエージングを効率良く進めるための準備として、まず導波管系とダミーロードのみのエージングが行われ、さらに導波管のベーキングも行われた(100℃で27時間)。そして、加速管のエージングが始まった。パワーを上げていくと放電が起き、クライストロン保護のために真空値やVSWR値でかけられているインターロックのため、クライストロンがダウンする。図3はエージング中の様子を示し、真空値(針のようにとがった線)とパワーを変えるためのPFN電圧値(黒太線)及び暗電流値(最上部の2本の線)などの時間変化を表している。パワーを上げていくとダウン頻度が増えるので、一旦下げてからまた上げていくという一進一退の様子がわかる。このようにエージングを進めてゆき、最終的にRFパワーで43.7 MW、平均加速電界で41.8 MV/mに到達した。

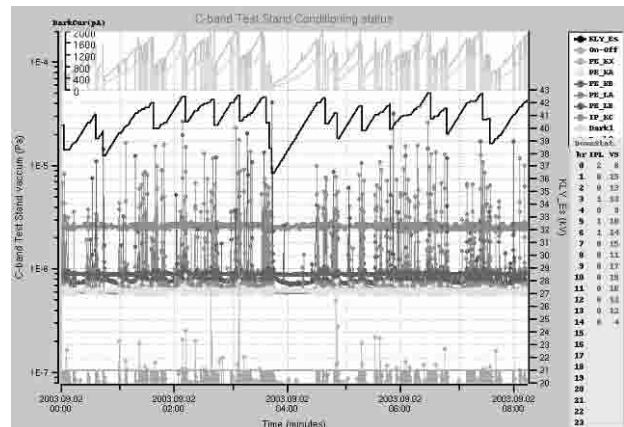


図3: エージング中の真空値等の変化

図4に、その履歴を示すが、ほぼ一様に順調にエージングが進んだことがわかる。これに要した時間は298時間(但しRF ONの時間のみ積算)でRFパルス数にして5千4百万ショットであった。

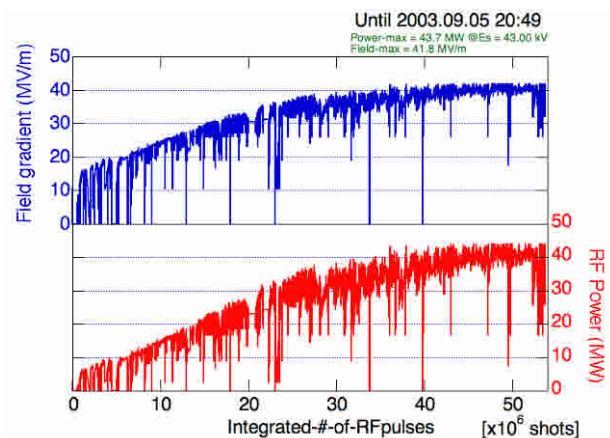


図4: エージングの履歴

なお、放電特性を良く表すものとして、暗電流の値とその時間変化及びその運動量スペクトルの測定を行った。暗電流の表面電界強度に対する依存性のデータより、Fowler-Nordheim 公式における電界増倍係数を求め、その時間依存性をみたものが図5である。この係数の変化がエージングの進み具合を表していると考えられる。

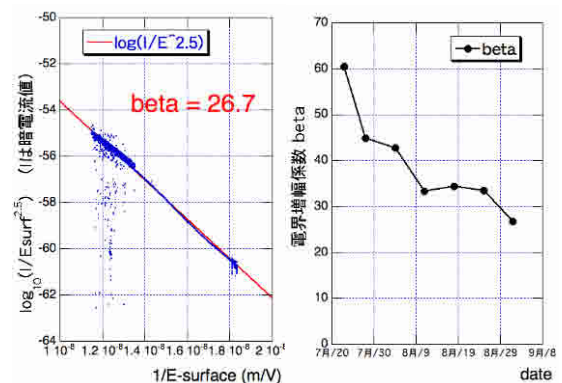


図5: 電界増倍係数の算出と時間変化

加速管内での放電の位置、時間情報を与えるものとして、RF 波形をクライストロン側から見ての入射波と反射波、加速管出口からの透過波について観測し、放電毎にその情報を記録した。(図6)

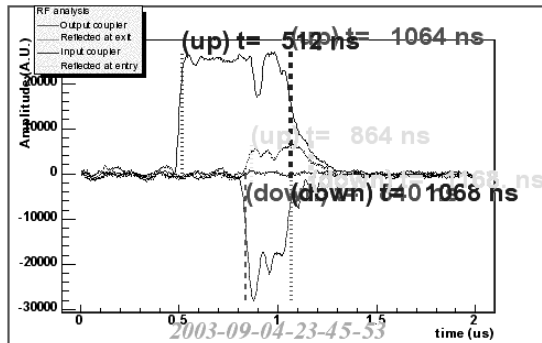


図6：RF 波形（正極性の入射波と反射波、負極性の透過波）

この波形のデータから、まず透過波の長さ（立上りと立下りの時間間隔）より RF パルス全長（500 ns）のうちどの時点で放電が起きたかがわかる（図7上）。データより RF パルスの立上がりと立下りのところがやや多いが、それ以外の途中でもまんべんなく放電が起きているようである。次に透過波の終わりと反射波の始めの時間差をみることで（加速管内での有限の RF パルス進行時間のため）加速管全長のどの場所で放電が起きたかの情報を与える（図7下）。データによれば、入口カプラー付近でほとんどの放電が起きているようである。

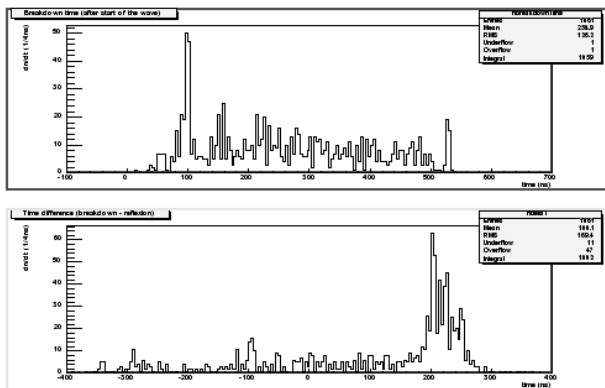


図7：RF 波形より求めた放電発生時刻（上）と放電位置（下）

また別の方策として、振動センサーを複数個用いて、放電音の大きさやいは到達時間の違いにより放電位置を得ることができるかどうかについての試験を行った。今回は加速管上面に、入口カプラー部から出口カプラー部まで等間隔に4箇所取り付け。図8に振動波形と位置-到達時間の相関の例を示す。最上流のセンサーに最初に振動が伝わり、その後下流のセンサーに順番に伝搬しているのがわかる。この放電では、入口側カプラーで放電が起き、その振動が加速管構造を伝わったのだと考えられる。図9に振動波形強度-時間の相関とそれらから推定される放電最近接センサーの位置の分布を示す。これについても、やは

り放電は主に入口カプラー付近で起きていることを示している。

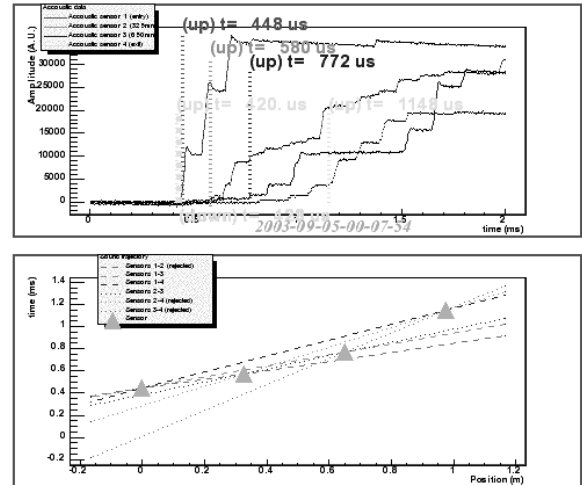


図8：振動センサー波形と位置-到達時間の相関の例

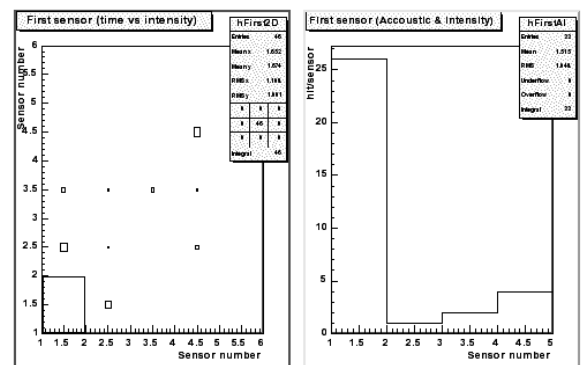


図9：振動波形強度-時間の相関と推定放電位置

4 今後の予定

9月5日をもってテストスタンドでのエージングは終了し、Cバンド加速管はRF源とともにKEKBライナックのビームラインに移設された。10月1日より再度RFパワーを投入し、エージングを行っている。近日中にビーム加速試験を行い、ビームエネルギーより加速電界を実測する予定である。

参考文献

- [1] S. Fukuda, *et al.*, "R & D status of the linac upgrade plan using a C-band system for SuperKEKB", Proceedings of the 14th Symposium of Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Nov. 11-13, 2003.
- [2] "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/Document/EoI.pdf>
- [3] <http://c-band.kek.jp/>
- [4] 紙谷琢哉ほか, "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