

HIGH GRADIENT PERFORMANCE OF X-BAND ACCELERATOR STRUCTURE

Toshiyasu Higo^{1 A)}, Ken Watanabe^{B)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Noboru Kudo^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Taikan Suehara^{C)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Shuichi Tokumoto^{A)}

^{A)}KEK, Tsukuba, Japan

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies, Hayama, Japan

^{C)}The University of Tokyo, Tokyo, Japan

Abstract

KEK has developed X-band accelerator structures for linear collider for more than 10 years. Recently the first prototype accelerator structure, 60cm long and with detuning in higher modes, was tested beyond 70MV/m level. The breakdown rate at 65MV/m with 400ns square pulse width was observed to be one per 5 hours operated at 50Hz operation. It met the requirement of the linear collider based on X-band design assuming the rate improvement taking the actual pulse shape into account. The dark current finally became below the measurement sensitivity, 10nA. The breakdown rate has decreased through the 1000-hour operation.

Xバンド加速管の高電界特性

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、リニアコライダの主線形加速器に用いるためのXバンドRFシステムの開発を行ってきた。残念ながら昨年8月のITRP (International Technology Recommendation Panel) の決定^[1]により、次期リニアコライダー (International Linear Collider) としては採用されないことになった。これを受けてKEKはこれまで進めてきたXバンドの開発は停止し、超伝導空洞による加速器開発に集中することになった^[2]。しかし、Xバンド技術そのものは貴重な財産であり、将来の加速器推進に対して貢献すべきであると考え。そこで、重要な研究項目に対してはこれまで進めてきた試験を続け、当初の目標に達するまでの評価することにした。これを進める間に、これまで進めてきた研究開発の集大成を行うと共に、今後のXバンド技術開発の継続・発展させる道を模索している^[3]。

2. 試験設備 XTF

Xバンドのリニアコライダーに必要な高電力RFシステムの試験に遂行するために、XTF (X-band Test facility) をKEK内に立ち上げた^[4]。ここではクライストロン試験スタンドと並行して、2台のクライストロンの出力を合成することにより、100MW級のピーク出力を得て、加速管の高電界試験を行う。この試験では、加速管やパワー輸送に用いる導波管系での放電が問題になるので、これらを研究するために、RF波形をはじめ、音響、X線等のパルスに対して、放電パルスを含めた複数パルスの解析を行うための制御系、測定系を備えている^[5,6]。

現状のシステムパラメータを表1に掲げる。特に

最近では、RF電力増強のため、リニアコライダー用開発の最終版であるPPMクライストロン2台を備え、またRF源から加速管までの十数m間のパワー伝送には、SLACの協力を得て低損失TE01モード円形導波管を取り入れている。

表1 XTF 加速管実用運転状況

モジュレータ PFN型・サイラトロン	有効電圧パルス ~1マイクロ秒, ~95%
電圧	500kV以下
PPMクライストロン	50MW程度×2台
RFブースター	TWT管×1台
電力合成	3dBハイブリッド
基本電力伝送	WR90矩形導波管
長距離伝送ライン	φ74.4円形導波管
RFロード	SS430ドライロード

3. 試験加速管

3.1 リニアコライダー用加速管群

リニアコライダーの加速管には、(1)低エミッタンスを保持すること、(2)高電界で安定に加速すること、及び(3)量産ができることが要求されている。1項に関する可能性は既に実証されており、3項の基礎的な技術も本質的なところは得られたと考えている。残るは近年特に問題視している第2項であるが、本論文ではこれの実証に向けてKEKで進めてきている高電界試験の現状を述べる。

SLAC・KEK間で協力した高電界運転試験を通して

¹ E-mail: toshiyasu.higo@kek.jp

設計改良が行われ、最終パラメータはほぼ図1にあるようなところに到達した^[7]。KEKでは同図にある3種類の加速管を製作し、試験を行うよう進めている。本論文ではその1台目、KX01、についての試験について議論する。後の2台についても数ヶ月以内に試験する予定である。

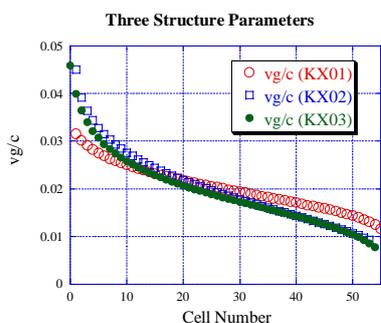


図1：60cm管パラメータ

3.2 試験加速管 KX01

加速管内の電界分布矯正とインプット、アウトプットカプラーでのマッチングをとるため、加速管を構成するセルにチューナーメカニズムを備えている。しかし、マッチング用セルにはチューナーを具備しなかったことにより、カプラーマッチングと加速管内の電界一様性の両立が困難となり、図2に示したようにアウトプットカプラー近傍のセル（マッチングセル（#53）を除いた2セルに電界の増大が発生してしまっ。それでも-20dB程度までマッチングを犠牲にして電界の一様性を回復させた結果ではある^[8]。

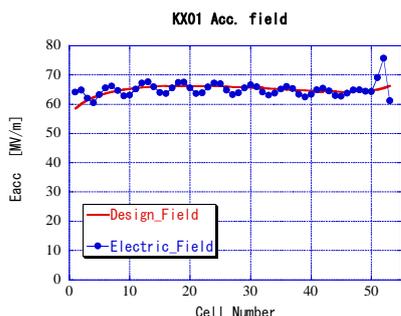


図2：KX01加速管の電界

4. プロセッシング

4.1 プロセッシング履歴

ほぼ1年間のプロセッシング全履歴を図3に示した。殆どの運転は400ns、50Hzで行ない、トータル1450時間に及んだ。この前に立ち上げ期間として数十時間の短パルスのプロセッシングを行った。また、数十時間の長パルス試験も行っている。1300時間あたり

の78MV/mに達する高電界運転は、200ns以下で行ったが、通常のパルス幅400nsでは電力輸送系での放電頻度が増え、そちらのプロセッシングが必要になったため、この時点で高電界を狙う運転は終了し、続いて65MV/mでの長期運転特性を調べてこの加速管の最終評価とした。

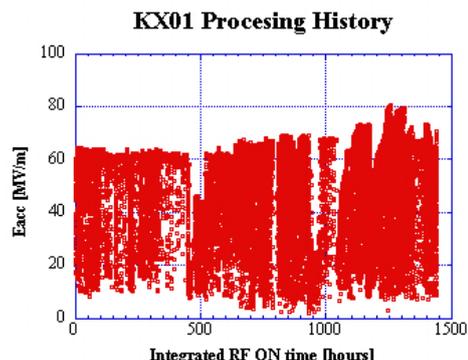


図3：KX01プロセッシング履歴

典型的なパルス波形を図4に示した。モジュレータ電圧波形が短いことから、長パルスモードでは矩形波での試験はできなかった。

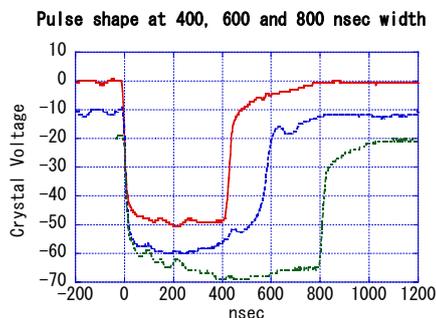


図4：400, 600, 800nsの代表パルス波形

4.2 到達放電頻度

図5に、パルス幅の関数として放電頻度を示した。横に付記した数字は、測定した時までのプロセッシング時間である。これからわかるように、放電頻度は時間と共に減少しており、最終的には400ns、50Hzで5時間に1回（～1BD/1MPulses）まで下がった。リニアコライダーの運転は加速管充填時間中はパワーを次第に上昇させることから、フラットトップは300ns程度であり、この時間が主に放電トリガーに寄与するとすると、放電頻度は10時間に1回程度と推定され、リニアコライダーの仕様を満足していることになる。

Breakdown Rate at 50Hz and normalized to 65MV/m

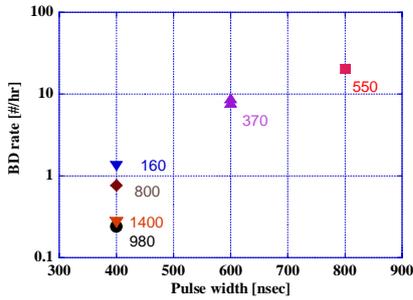


図5：KX01加速管の65MV/mでの放電頻度

4.3 放電の諸特性

放電の位置は、RFパルスの波形解析や音響センサーから得られる。前者での典型的な閾値は、反射波で通常ピーク値の2割増し程度、透過波の積分量の減少で5%である。放電は殆どある単一パルス内で瞬時に生じ、先行パルスには兆候は殆ど現れないようである。極微小な放電による反射波や透過波の微小な揺らぎがあってもこれが加速度的に増大するのはパルス間を通してでなく、同一パルス内で生ずることがわかった^[8]。

図6はRFパルス波形からえられた、400ns、65MV/m以上での50Hzで約50時間にわたる最終長期運転時の放電分布である。この位置は音響センサーの位置から得られるデータとほぼ一致している^[9,10]。放電は割に加速管全体(0~60cm間)で生じているが、下流カプラー近傍での放電が若干多いこともわかった。これは図2に示したフィールドチューニングによる下流の増大に関連しているかもしれない。また、0~60cm以外での放電は、加速管直前の導波管での放電である。これは、同一放電事象に対して相関解析した図7からも伺える。加速管内の放電では、瞬時に大きな電流がビームライン下流へ放出され、入力導波管での放電では入力が対称であるのに反して反射波の非対称性が大きいことに表れる。

KX01 Breakdown distribution

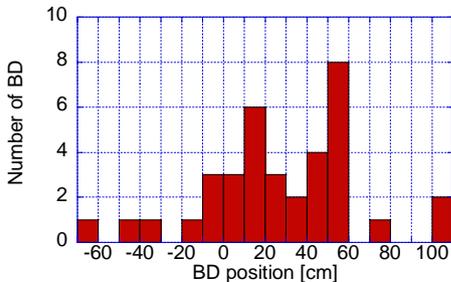


図6：最終長期ラン(>65MV/m)での放電分布

4.5 暗電流

暗電流は上下流1m以内に設置したファラデーカップにおいて直流電流を計測することより求めた。プロセッシングの初期には1μA級観測されたが、後期

から以降は測定限界以下(ピーク電流10nA以下)となり、通常加速するビーム電流に比べると非常に小さいことがわかった。

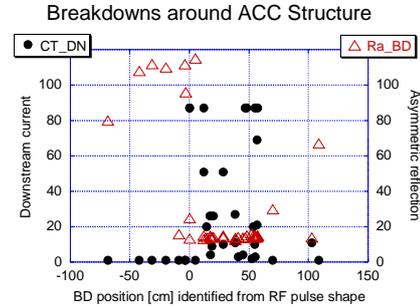


図7：放電位置と下流への電流、及び入力導波管への非対称反射

5. 議論

リニアコライダーに向けての加速管高電界試験を継続してきたが、65MV/mでの放電頻度に関してほぼ仕様を満足することがわかった。また50MV/m以下の運転では、800nsまでの運転経験ができ、放電頻度は十分低く、プロセッシングにかかる時間も数時間オーダーであって実用上問題ない。

本件のようなXバンドの高電界を目指した試験は100MV/m以上の更に高電界加速を必要とする高エネルギー加速器に対する基礎試験になる。安定な高電界運転を阻害する放電メカニズムの解明につながるはずであり、今後3章で述べた後続の2台の加速管に対して行う予定である。

参考文献

- [1] ITRP, <http://lcdev.kek.jp/LCoffice/ITRPexecsum.pdf>
- [2] ILC activities at KEK, <http://lcdev.kek.jp/>
- [3] T. Higo et al., "High Gradient Study at KEK on X-band Accelerator Structure for Linear Collider", PAC 2005, USA.
- [4] 渡邊謙. "High Gradient Test of X-band Accelerator Structure at GLCTA", Proceedings of the First Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2004, Funabashi, Japan.
- [5] 照沼信浩. "GLXTA Control System", 同上.
- [6] 末原大幹. "Analysis of X-band Structure Breakdown at GLCTA", 同上.
- [7] J. Wang and T. Higo, "Accelerator Structure Development for NLC/GLC", ICFA Beam Dynamics News Letter No.32, 2004.
- [8] T. Higo et al., GLCX-NOTE-013, "Fabrication of 60cm-long X-band HDS structure (KX01)", 2005.
- [9] 渡邊謙. "Xバンド高電界加速の開発研究", 東北学院大学、修士論文、平成16年度.
- [10] 末原大幹. "Xバンド加速管における放電現象の研究", 東京大学、修士論文、平成16年度.