

21-P11

HIGH POWER TEST OF AN S-BAND ACCELERATOR UNIT FOR JAPAN LINEAR COLLIDER

H. MATSUMOTO, M. AKEMOTO, H. HAYANO, T. NAITO and S. TAKEDA

National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, Japan

ABSTRACT

An 1.54 GeV S-band linac for the Accelerator Test Facility (ATF) has to inject multi-bunch beam of electrons into the damping ring. To meet the energy goal 1.54 GeV with given site constraint the accelerating gradient has to reach 33 MV/m with beam loading. The 3m-long structure obtained the maximum accelerating gradient of 52 MV/m at an input peak rf-pulse of 200 MW without any problem. At this level, an average field emission current from the structure was 0.34 nA per rf-pulse. The microscopic field enhancement factor β was 70, which was obtained with Fowler-Nordheim plots. The first rf processing time of an accelerator unit is required the 200 hours up to a SLED peak rf-power of 400 MW with rf-pulse width of 1 μ s.

リニアコライダの為のS-band高電界加速ユニットの大電力試験

1. はじめに

トリスタン, SLC, LEP等を超える衝突エネルギーが数百GeV~TeV領域の次世代高エネルギー物理学の将来計画の一つとして国内においてはJapan Linear Collider (JLC)[1]と呼ばれる日本独自の電子・陽電子衝突型線形加速器の計画がある。このような大型加速器を現実的な長さで実現するには、より短い距離で高いビームエネルギー利得が得られる高電界型リニアックが必要である。更に、設計する上で考慮すべき重要なことの一つは、クライストンやそのパルス変調器等のアクティブな構成要素を可能な限り少なくして大規模な加速器システムの信頼性を上げることである。即ち1台の高周波源で出来るだけ高いピーク電力を発生させ多数の加速管をドライブすることである。その為には大出力クライストンの開発は勿論のこと、高電界で使用可能な加速管、高周波パルス圧縮技術[2]等の開発研究は必要かつ不可欠である。これらの高電界型リニアックの研究を効率良く行う為、試験加速器装置(Accelerator Test Facility, ATF)をKEKに設置した。国内においてはKEKを中心にした大学、産業界との共同研究ならびにDESY(ドイツ)、POSTECH(韓国)、SEFT(フィンランド)、SLAC(アメリカ)との国際共同研究が精力的に行われている。

国外におけるS-band, C-band, X-band加速管の高電界実験は既にSLACやVARIAN等、幾つかの研究機関において定在波型加速構造の空洞数が少ない構造で行われていた[3,4]。国内における加速管の高電界実験はKEKにおいてJLCグループが1987年に初めて小規模な実験を行った。その後、JLCではマイクロ波電力200MW入力時に軸上電場勾配が100MV/mが発生可能な出来るだけ実機に近い0.6m長のS-band進行波型加速管構造を用いて、高電界で加速管の内部で発生する電界放出電流と放電限界の因果関係に的を絞って調査を行った。これにより、

- (1)電界放出電流の大きさは加速管内部の清浄度に依存し、
- (2)最大電場勾配は加速管の構造が支配的であることが明らかになった[5]。
- (3)更に、高純度のOFHC-銅であっても銅の粒界間にミクロンサイズの気孔が存在し、電界放出電流の原因になっていることも判明した[5]。

ここではJLCの前段加速として予定されるS-bandリニアックについて、開発研究のプログラムの一環として実用化した100MW級クライストンとピーク電力400MW級のSLED型パルス圧縮装置を使用し

た3m長S-band加速管の高電界発生試験の総合結果を報告する。

2. 高電場勾配型3m長加速管

ここで使用した3m長加速管はこれまでの高電界発生試験で明らかになった全てのネガティブな要素を改善し製作したものである。主には加速管カプラー部の高周波特性の調整作業による構造欠陥やそれによる汚れの発生を避ける為、3次元の電磁界解析計算機コード(MAFIA)を用いて詳細な寸法設計を行い[6]、これによりNCマシンで高精度にカプラー空胴を製作することが可能となった。更に、電界放出電流を低減する為ディスク部のOFHC-銅材料は全てHIP処理(注1)、[7]を施し、加工時にマシンオイルが材料の内部に残らないようにした。表1に加速管の主なパラメーターを示す。

表1 3m長加速管の主なパラメーター

Operation frequency	2856 MHz
Phase shift/cell	2π/3
Electric field distribution	Constant gradient
Structure length	3 m
Number of cell	86
Quality factor	13,000
Shunt impedance	60 MΩ/m
Attenuation parameter	0.57
Group velocity	0.0204-0.0065 vg/c
Filling time	0.83 μs
Peak surface electric field (E _p)/Axial electric field (E _a)	1.9-2.1

表1のパラメーターとSUPERFISHから求めた3m長加速管のE_p/E_a ≈ 2を用いて最大表面電界(E_p)は

$$E_p \text{ [MV/m]} = 7.38 \times \sqrt{P_{in} \text{ [MW]}} \quad (1)$$

で与えられる。OFHC-銅の表面垂直電界強度(E_p)とこれによる金属表面からの電界放出電流(I_e)の関係をあらわすFowler-Nordheim Plot (F-N Plot)は

$$\frac{I_e}{E_p^{2.5}} \approx \exp\left(\frac{-6.53 \times 10^9 \times \phi^{1.5}}{\beta \times E_p}\right) \quad (2)$$

で与えられる。φは銅の仕事関数、βは理想的な金属表面からのI_eの増加係数を示すMicroscopic field enhancement factorである。

3. 加速ユニットの大電力試験

図1にATFリニアックのレギュラー加速ユニットの高電界試験装置を示す。加速ユニットは85MW、4.5μsクライストロン[8]、400MW級SLED型マイクロ波圧縮装置[9]、2本の3m長加速管で構成する。加速管の電場勾配(E_p, E_a)は入力マイクロ波電力(P_{in})を計測して(1)式から求めた計算値である。

図1にATFリニアックのレギュラー加速ユニットの構成を示す。加速管の電場勾配(E_p, E_a)は入力マイクロ波電力(P_{in})を計測して(1)式から求めた計算値である。

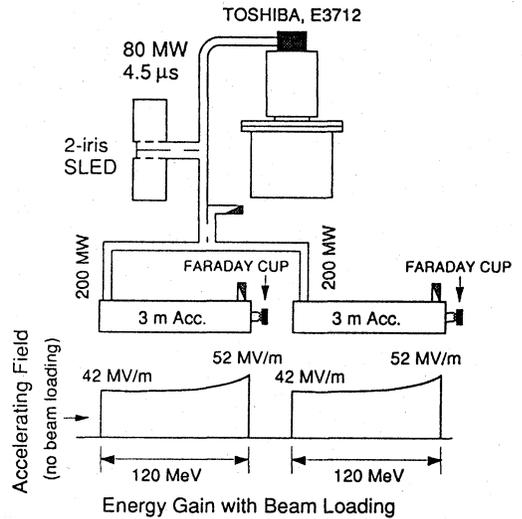


図1 ATFリニアックのレギュラー加速ユニット

試験装置は全く高周波電力の通過を経験したことのない新品で構成されていたのでRFプロセッシングは慎重に行った。計算機プログラムによる約200時間の自動RFプロセッシング後に、ピーク電力200MWが入力可能となり最大加速電場勾配が52MV/mに到達した。その後安定に運転できることを確認した。1度RFプロセッシングが完了すると、大気に戻しても真空が回復後、数時間程で200MW入力が可能となることが分かった[10]。図2にマイクロ波電力のモニター信号波形を示す。

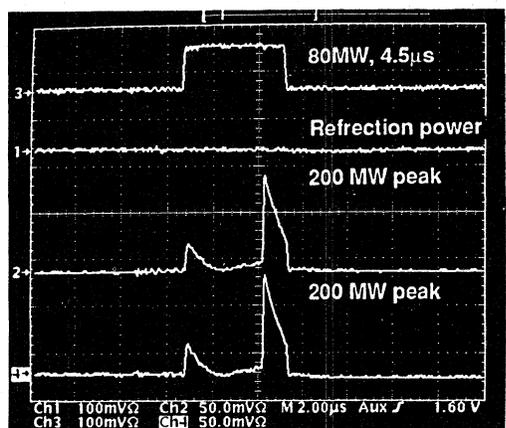


図2 マイクロ波電力のモニター波形

図2に示したモニター波形の1番目はクライストロン出力(80MW, 4.5μs)。2番目はSLEDと2本の加速管からの反射電力で、SLED空胴のピーク電力の所で約100kW程度と非常に小さい。3番ならびに4番

目は夫々加速管の入射電力(ピーク200MW)である。SLEDの出力は時間的に指数関数で減少するので、図1に示した用な42~52MV/mの加速電場分布になる。この場合、リニアックのビームローディングによるエネルギー低減を考慮しても、ビーム加速は3m長加速管当たり120MeVとなり、クライストロン1本当たり240MeVのエネルギー利得が期待できることになった。

4. 試験結果

夫々の加速管の下流にファラデーカップ型電流モニターを設置し、加速管の表面電界をパラメーターに電界放出電流 I_e を計測した。図3にそれらのF-N Plotを示す。

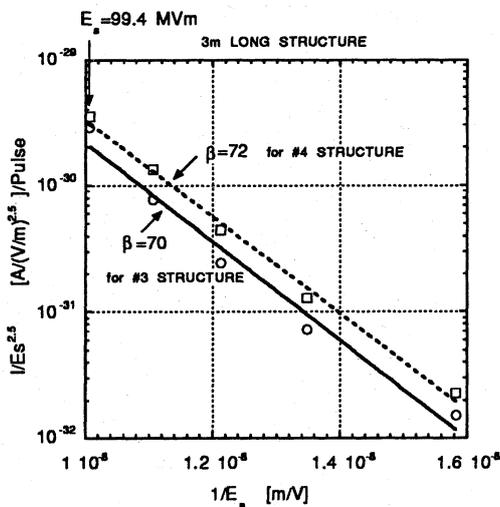


図3 レギュラー加速ユニットのFowler-Nordheim Plot

2本の加速管の β は殆ど同じ70程度が得られた。このことから加速管内部に電界が集中するような構造欠陥がなく性能のばらつきが少ないことがわかる。 I_e は僅かに異なるが内部の清浄度は同程度になっていることがわかる。ここでの I_e は平均値であるが、これを1 μ s幅の矩形パルスのピーク値に換算すると、 $E_p=104$ MV/mにおいても最大0.3mAのピーク電流しか発生しないことが分かる。この時の軸上電場勾配 E_0 は52MV/mに相当する。これにより、33MV/mのビーム加速は全く問題ないといえる。

5. まとめ

加速管の電界放出電流を低減し、高電場勾配で安定な運転を可能とする為、3次元の電磁界解析計算機コード(MAFIA)によるカプラー部の寸法決定、

OFHC銅材料のHIP処理ならびに清浄な環境での組み立て等の高電場勾配型加速管製作のフローを確立し[11]、これにより高電場勾配における安定な運転の実現と電界放出電流を大幅に軽減させることに成功した。ここで使用した400MW級高周波源は、全てJLCの開発研究のプログラムで実用化に成功した100MW級クライストロン、400MW級SLED型パルス圧縮装置、ピーク電力200MW級パルス変調器[12]ならびに400MW級大電力導波管部品で構成され、これらは現在、世界で入手できる最強のものである[13]。

ATFリニアックは、現在加速器として認められている150MeVの入射部のみビーム加速を行っている。ここでは主に加速電圧200kVの熱電子銃を用いた2.8ns間隔のマルチバンチビーム取り出しやビーム診断装置の開発と性能評価ならびにビームエミッタンス測定をおこなっている。主加速器の設置は'95年度の前半に完了することを目標としている。

注1: HIP (Hot Isostatic Pressing), 圧力容器中で高温と高圧力を利用した金属材料の鍛造技術。本加速管のOFHC銅は800 $^{\circ}$ C, 2,000kgf/cm 2 (N $_2$ ガス)で2時間処理をおこなった。

参考文献

- [1] JLC group, KEK report 92-16, A/H/M, National Laboratory for High Energy Physics, Japan, December 1992.
- [2] Z. D. Farkas, H. A. Hogg, G. A. Loew and P. B. Wilson, Proc. 9th Int. Conf. on High Energy Accelerators, SLAC (1974) p. 576
- [3] Eiji Tanabe, IEEE Trans. NS-30, No. 4, (1983) 3551
- [4] G. A. Loew and J. W. Wang, SLAC-PUB-4845, January 1989
- [5] H. Matsumoto, M. Akemoto, H. Hayano, T. Naito, S. Takeda and S. Yamaguchi, KEK Preprint 92-84, August 1992, XVth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Hamburg, Germany
- [6] S. Yamaguchi, Proceedings of III Workshop on JLC, KEK, February 18-29, 1992
- [7] H. Matsumoto, M. Akemoto, H. Hayano, T. Naito and S. Takeda, Proc. of Particle Accelerator Conference, May 1991, IEEE, New York, p. 1008
- [8] H. Yonezawa, S. Miyake, K. Gonpei, K. Ohya and T. Okamoto, Proc. 14th Int. Conf. on High Energy Accelerators, Tuskuba, JAPAN, 1989, p. [1177]219-224.
- [9] H. Matsumoto, H. Baba, A. Miura and S. Yamaguchi, NIM A330 (1993) 1-11
- [10] S. Morita, 本研究会
- [11] H. Matsumoto, S. Takeda and S. Yamaguchi, KEK Proc. 93-10, August 1993, p270-274
- [12] M. Akemoto and S. Takeda, Proc. of the Linear Accelerator Conference, Albuquerque, USA, 1990
- [13] S. Takeda, M. Akemoto, J. Urakawa, K. Oide, T. Naito, H. Hayano and H. Matsumoto, KEK Proc. 93-10, August 1993, p53-58