

High Gradient Experiment and Beam Acceleration by the ATF-Phase-I Linac

Seishi Takeda, Mitsuo Akemoto, Hitoshi Hayano, Hiroshi Matsumoto, Takashi Naito
and JLC Study Group

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

Abstract

High gradient experiment has been carried out with a traveling structure of ATF Phase-I Linac. The dark current is multiplied along the structure, and the multiplication factor at 70 MeV/m is estimated to be 1.63 per cell for the present structure. The field enhancement factor β near the input coupler and inside the output coupler is evaluated to be 39 and 66 respectively. The electron beam has been accelerated at the gradient of 85 MeV/m.

はじめに

リニアコライダー(電子・陽電子衝突型線形加速器)は対向した2台の主リニアックから構成されており、電子と陽電子のバンチを直線上で加速し、それぞれ正面衝突させるために放射光損失がなく、原理的にはエネルギーの限度はない。重心系 1 TeV のリニアコライダーを全長 14 km 以内で建設するには、加速管内で従来より 1 桁高い 100 MeV/m 以上の加速電界を発生させねばならない。このような高電界では、RF Breakdown と Dark Current が無視できず、高電界達成にはこれらの基礎的研究を推進する必要がある。

高加速勾配での RF Breakdown に関する実験は、SLAC、Varian が単独または共同¹⁾でおこなった S-band、C-band、X-band の各周波数領域での報告がある。これらの実験は、小出力の RF 源(1 MW ~ 数 10 MW)で高い加速電界を作り出すために、Half-Cavity や、1 Cell + 1 Coupler の π モード定在波型加速管、並びに 6 Cell + 1 Coupler の $2\pi/3$ モード定在波型加速管を用いている。これらの一連の実験から、Kilpatrick Breakdown Limit を上廻る Peak Surface Field が得られること、また Breakdown Limit が周波数の平方根にほぼ比例することなどが明らかになった。

しかし、RF Breakdown や Dark Current が、加速管の全長すなわち Cell 数に大きく依存するものと予想され、そのためにも、実機に使用される長さの Traveling Wave 型加速管で起きるこれらの問題を解明する必要がある。しかし、そのためには、S-band では 100 ~ 200 MW の RF 源が必要となる。JLC Study Group は、以前 PF 入射器のリゾナントリングを利用して 104 MW のピーク出力を作り、電鑄方式で製作した 3 Cell + 2 Coupler の Traveling-wave 型加速管で、103 MeV/m の高加速勾配を達成している。今回は、JLC の R&D 用に試作した ATF Phase-I リニアックの RF 源(最大 200 MW、1 μ s)を用いて、17 Cell + 2 Coupler の S-band 加速管の高電界実験をおこなった。

1. High Gradient 実験装置(図1参照)

a) RF 源

日光に建設された、クライストロン変調器は合計4台で、そのうち1台は、現在 30 MW X-band クライストロン XB-50K の試験に用いられており、もう1台はリゾナントリングや、大出力 RF コンポーネントの開発に利用されている。残りの2台はATF SLAC で SLC用に開発した 5045 S-バンド・クライストロンと、東芝製 E3712 S-バンド・クライスト

ロンにそれぞれ接続されており、2台のクライストロンの RF 出力は 3dB カップラーで合成され、パルス幅 1 μ s で、最大 200 MW のピーク出力が発生できる。これを真空導波管で、17 Cell + 2 Coupler のロウ付け製 S-band 加速管に入力する。

b) インターロック系

クライストロン RF 窓付近、加速管入力並びに出力 Coupler 付近の導波管内の真空、並びに加速管前後のビームダクト内の真空は、CCG 真空計によってモニターされており、制御用 VAX コンピューターに CAMAC 経由で接続されている。インターロック系として、上記の真空計、クライストロン窓への反射ピーク RF レベル、冷却水系、クライストロンダイオード保護の各インターロックが、変調器自身のインターロックに加えられており、異常時は電源同期の 50 pps で運転されているクライストロン変調器を停止することができる。真空系インターロックレベルは、通常 3 ~ 4 $\times 10^{-7}$ Torr に設定している。

c) Auto Processing System

加速管に RF を入力して RF Processing をする際、Computer-Auto-Processing System が用いられた。VAX コンピューターは、設定された真空アナログレベル(通常は 6 $\times 10^{-8}$ ~ 1 $\times 10^{-7}$ Torr)以上に圧力が上昇しないよう、クライストロンの RF 入力レベルを調整して RF 出力パワーを制御する。このような制御方式で、加速管への RF パワーは、Processing が進むにつれ、設定した最大出力まで自動的に上昇していく。真空がインターロックレベルを超えるような RF Breakdown が発生したときは、クライストロン変調器が停止し、真空の圧力レベルが設定値以下(通常は 6 $\times 10^{-8}$ Torr)に回復すると、加速管への RF 入力が低いレベルから再び開始される。この System には任意の RF レベルを保持する Hold-Mode Routine を有し、上記の真空の圧力レベル以下であるなら、Terminal の Key Board から設定した RF レベルを長時間にわたって保持できる。

2. 加速管周辺の測定装置

Dark Current を計測するために、加速管の上流と下流にそれぞれ、パルス波形測定用ビーム電流モニター、電荷量測定用ファラデーカップが設けられている。加速管の下流には、Dark Current のプロファイル測定用として、Cr-doped SiO₂ を用いたビームプロファイルモニターが設けられており、リアルタイム画像処理装置に接続されている。Dark Current のエネルギー分布は、分析用電磁石によりコンピューター制御で自動的計測される。さらに、10個の小型プラスチック・シンチレーターが加速管外壁に沿って貼り付けられており、加速管内で発生した RF Breakdown による X-ray Burst の波形がリアルタイムで測定できる。すでに報告²⁾したように、RF パルスの Front が加速管出力 Coupler を通過する時点で、Burst 状の Dark Current が電流モニターで計測され、また同時に X-ray Burst が Output Coupler 付近で測定された。またエネルギー分布の測定で、この Burst 状の Dark Current が 1 Cell 分の加速エネルギーに相当する低エネルギーにピークを有することから、出力 Coupler における Multi Factor に起因する、使用加速管固有の現象であると考えた。

3. High Gradient 実験

a) Dark Current の加速管長依存性

今回行った High Gradient 実験の目的は、Dark Current の加速管長依存性を明らかにすることである。もし、加速管が、電子増倍管のように Dark Current の増倍をする働きをするなら、Dark Current は加速管長に比例せず、指数関数的に増加するであろう。これを明らかにするには、長さが異なり、同一特性を有する数多くの加速管を準備しなければならない。ここでは、模擬実験として、加速管に磁場を横方向にかけの方法を採用した。磁場をかけると、磁場上流部で発生した Field Emitted Electrons は軌道を曲られるため、加速管出口での Dark Current が減少することが予想される。加速管の磁場下流部を加速管実行長として、70 MeV/m の加速電界時の Dark Current をプロットしたのが第 2 図である。出

力Couplerで発生した Dark Current を除くため、Dark Current は測定したエネルギー分布から低エネルギー成分を除去し、積分して得られた値を使用した。図1から明らかなように、Dark Current は加速管実効長に指数関数的に増加している。そして、この実験に用いた加速管の場合、70 MeV/mにおける1 Cell 当たりの増倍率は、全長にわたってほぼ一定で、1.63倍であった。

b) Energy 分布から求めた Field Enhancement factor β

従来は、加速管出口で測定されるDark Current と加速管内の Surface Field から、Fowler-Nordheim プロット図を作成し、その勾配から Field Enhancement Factor β を求めてきた。長い加速管の場合、加速管出口で測定される Dark Current は、増倍効果の影響を受けて、Fowler-Nordheim プロットから得られる β は、主に加速管入口付近の Field Emitted Electron に関する β 値を反映しているものと考えられる。第3図は、加速電界 33 MeV/m~92 MeV/mにおける Dark Current のエネルギー分布である。低エネルギー成分も含めた全電子数と、低エネルギー成分を除いた電子数についての Fowler-Nordheim プロットを図4に示す。 β 値は、全電子数でプロットした場合は66となり、これはファラデーカップで測定した値と一致する。低エネルギー成分を除去、すなわち出力 Coupler 内で発生した Dark Current を除いた電子についての β 値は39と求められた。以上のことから、出力 Coupler では、RF Breakdown が生じるため、 β が改善されないが、加速管上流付近は β 値が39程度まで RF Processing が進んでいるものと考えられる。

c) 最大到達加速電界

実験に使用した加速管については、設定した真空系のインターロックの条件を保持しながらおこなった RF Processing で、現在 93 MeV/m の加速勾配に到達している。

3) 85 MeV/m におけるビーム加速試験

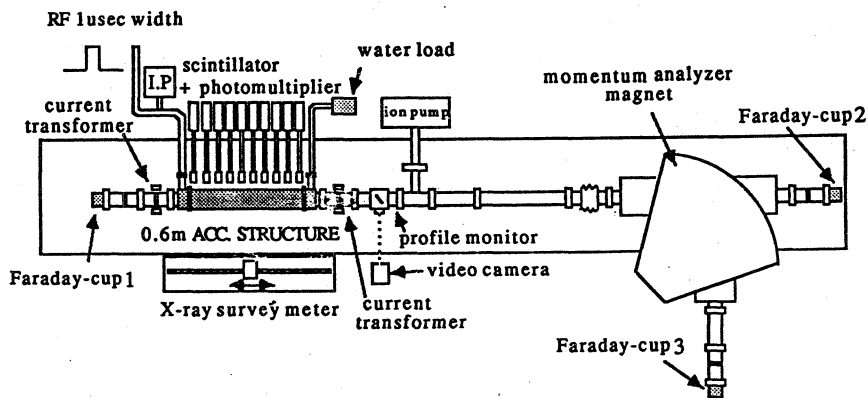
最大 85 MeV/m におけるビームの加速試験をおこなった。詳細は講演にゆずる。

おわりに

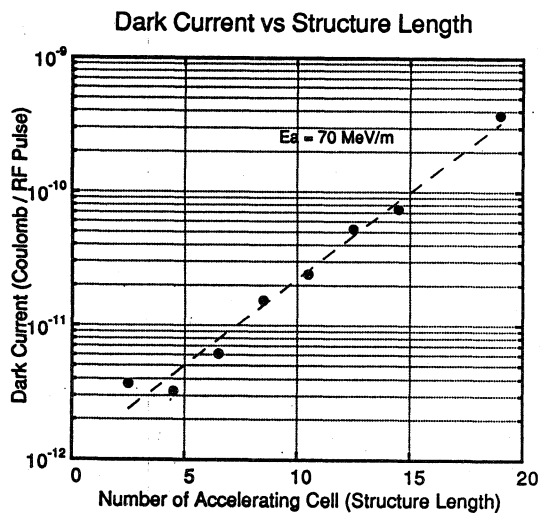
Cell 数が多く実機に近い長さの Traveling Wave型加速管を用いた High Gradient の実験は緒についたばかりである。High Gradient における現象は複雑で、多くのパラメータに依存すると予測される。多くのことを知るには、系統的な実験を数多くこなすことが必要で、そのためにも数多くの異なった特性の加速管についての実験を進めていかなければならない。そのために、同一 Geometryではあるが、 β 値を高める有機物の付着を低減した加速管や、その他の加速管をすでに準備している。

参考文献

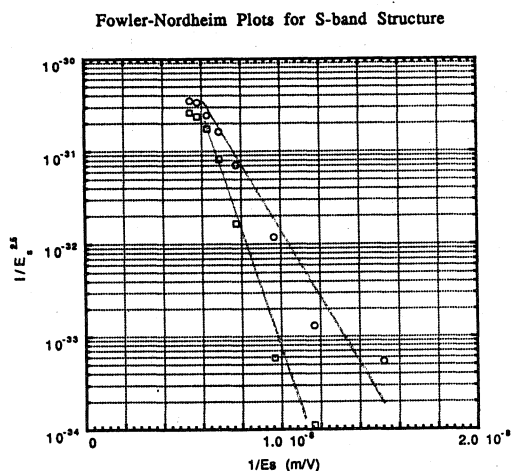
- 1) G.A.Loew and J.W.Wang, Proc. XIIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.
- 2) H.Matsumoto et. al., Particle Accelerators, Vol.26 (1990) 231/1189.



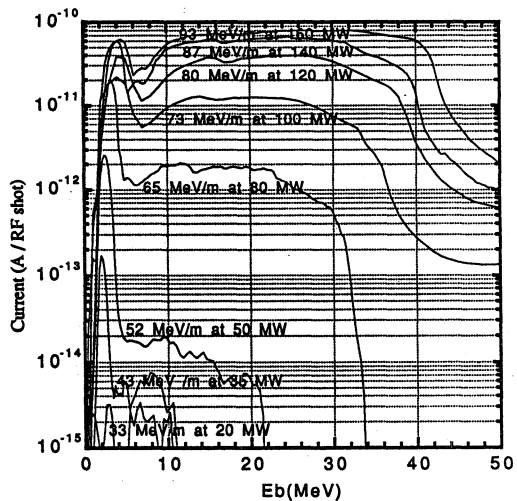
第1図 High Gradient 実験装置



第1図. 70 MeV/m の加速電界時の Dark Current の加速管長依存性。



第3図. 低エネルギー成分も含めた全電子数と、低エネルギー成分を除いた電子数についての Fowler-Nordheim プロット。



第2図. 加速電界 33 MeV/m ~ 92 MeV/m における Dark Current のエネルギー分布。