

An S-band 3m-long Accelerating Structure for ATF

H. Matsumoto, S. Takeda and S. Yamaguchi

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

ABSTRACT

The 3m-long accelerating structure were designed for the 1.54 GeV injector linac of the KEK Accelerator Test Facility (ATF). To meet the energy goal 1.54 GeV with a given site constraint the accelerating gradient has to reach 33 MV/m. The amount of dark current of the clean structure is an order of magnitude lower than those of two structures fabricated by a conventional method. The Hot Isostatic Pressing (HIP) and a simulation of a coupler cavity are carried out to achieve this gradient with good operational margin. The phase error of the each cavity obtain the less than ± 1 degree.

ATF 用 S-band 3 長加速管

1. はじめに

これからの電子線型加速器は、短い距離で高いビームエネルギー利得が得られる高電場勾配型の加速管が主流になると思われる。これは、SLACにおいて65 MW級のクライストロンがSLCの営業運転に使用され、更に国内においても100MW級のクライストロン[1]が東芝(株)により1989年に開発されたことによる。

Japan Linear Collider (JLC) [2] は電子-陽電子衝突型線型加速器を用い、衝突点でのエネルギーは300~500 GeV、ルミノシティは $\sim 5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を目指すものである。加速器の全長は約25 kmを予定している。この長さでJLCを実現するには、加速管の高電場勾配化は不可欠である。

JLCでは前述のような大型加速器を学ぶために、主要なコンポーネントを実験可能な試験加速器装置(Accelerator Test Facility, ATF) [3] を製作中である。ATFは1.54 GeVのダンピングリングとその入射器用S-bandリニアック、バンチコンプレッサー、最終収束系、 $\sim 0.5\text{GeV}$ 主リニアック、陽電子発生装置等で構成される。

入射用1.54GeVリニアックの全長は約70mであり、これは建物のサイズで制限されている。リニアックのビームは1バンチ当たり 2×10^{10} 電子を20バンチ、25Hzでダンピングリングへ入射しなければならない。この時の夫々のバンチの間隔は運転周

波数の1/8の2.8nsである。このような大電流ビームを安定に加速することと、許容される加速器の長さで1.54GeVを達成する為、加速管の電場勾配は約33MV/mが必要となった。これに使用する高周波源は出力85MW、パルス幅4.5 μs をSLED空洞[4, 5]でパルス圧縮し、ピーク出力400MW、パルス幅1 μs が得られる。これを2本の3m長加速管に供給する。図1に主加速装置の構成を示す。

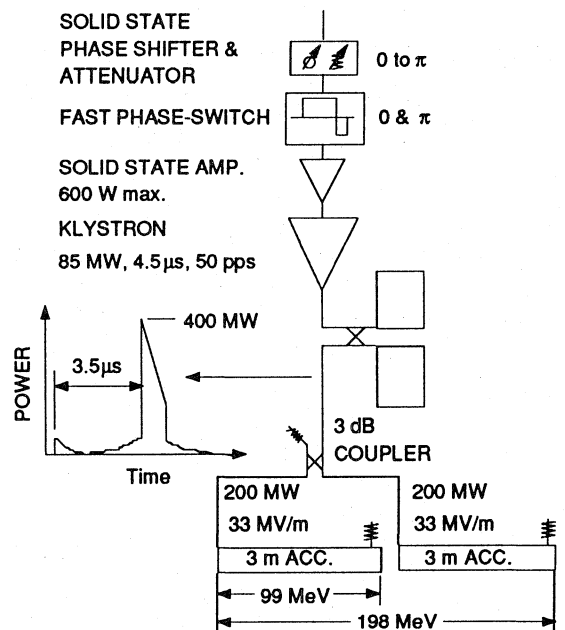


図1 1.54 GeVリニアックのレギュラーユニット。

ここで使用するクライストロンは東芝(株)とKEK-JLCグループの協力で1989年に開発したものである。出力のパルス幅が1 μ sの場合、100MW出力で運転可能である。ATFでは加速管の平均電場勾配は、33MV/mが必要である。これはSLAC-SLCの平均17MV/mの約2倍近くである。このような高電界での加速管の振舞いを調査するため、JLCグループでは、高電場勾配型加速管の研究を1987年から行って来た[6]。この研究から、高電界型加速管を安定に運転するには、以下示した事柄が重要であることが分かった。

- (1) 従来の加速管製作技術を更に向上させること。
- (2) 加速管内部に塵等が混入しないこと。
- (3) 加速管に使用する無酸素銅の品質を向上させること。

本論文では、JLC計画の一環として行われた高電界発生試験、無酸素銅の内部に残存する小さい気泡の除去方法(HIP)、及びこれらの成果を採用した3m長加速管の低電力特性について報告する。

2. 高電界発生試験

2.1 加速管

高電界の発生試験は、他の研究機関においても加速電場勾配が50MV/mを超える所で行われている[7, 8]。しかしながら、高電界での暗電流の発生や放電限界が何によるかは明確にされていないのが現状である。そこで、JLCでは高電界の領域で、加速管の内部で発生する暗電流と放電限界の因果関係に的を絞って調査することにした[9]。これには、同一の構造で性質の異なる3種類の加速管を製作し、比較試験を行った。

これらの加速管の性質は、夫々次に示すものである。

- (1) 従来の水素ロー付製造方法で製作したもの。
- (2) 水素ロー付方法で製作するが、加速管内部をできる限り清浄な状態を実現したもの。
- (3) 電鍍法で製作したもの。

加速管は実機と同一構造の進行波型、 $2\pi/3$ モード、定電場勾配型を選択した。これは、出来るだけ実機と同じ条件にするためである。但し、高周波源の関係でマイクロ波電力200 MW、パルス幅1 μ sで電場勾配が100 MV/mまでの試験を可能とする為、加速管長は0.6mとなった。この加速管の軸上に発生す

る電場勾配(E_a)と入射マイクロ波電力(P_{in})の関係は次式で与えられる。

$$E_a \text{ [MV/m]} = 7.16 \times \sqrt{P_{in} \text{ [MW]}} \quad (1)$$

$P_{in}=195$ MW入射時に100MV/mが得られる。この加速管のディスクの表面の最大電界と軸上の電界の比はSUPER FISHの計算結果から、平均して2倍である。全ての加速管は実機と同様の高品質、高電気伝導の無酸素銅を使用した。ディスクの表面粗度は、加速管種類(1)と(2)は0.8 μ m、(3)はディスクの平坦部で0.02 μ m、ビームホルルのR部で0.3 μ mである。

2.2 RFプロセッシング

加速管への入射電力のパルス幅は0.8 μ sに固定にし、パルスの繰り返し周波数とクライストロン出力を可変パラメータとした。加速管を傷めないように注意深くプロセッシングを行うと、徐々に加速電場勾配が上昇する。電場勾配はある値の所からプロセッシングによる改善が頭打ちになる。この値を、その加速管の最大電場勾配とすることにした。

図2は、この過程における加速管の電場勾配と発生した暗電流値の関係をFowler-Nordheim (F-N)プロットしたものである。横軸はディスクの最大表面電界 E_s の逆数であり、縦軸は暗電流を $E_s^{2.5}$ で割った値である。測定値を対数プロットするとある傾き(β)を持った直線になる性質がある。ここでの β は夫々の加速管の放電のしにくさを表す値である。

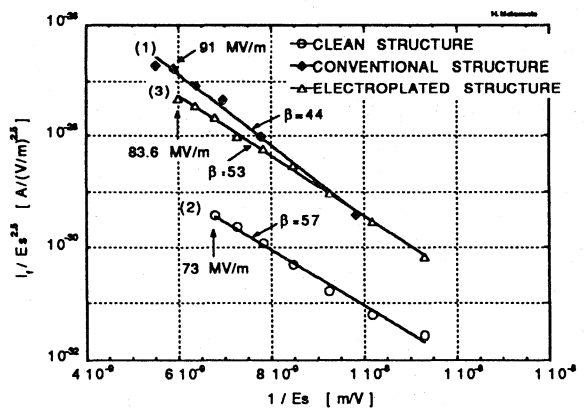


図2 3種類の加速管のFowler-Nordheimプロット

図2で特徴的なことは、清浄な加速管(2)は他の2種類(1), (3)に比較して、暗電流値が一桁以上低いことで

ある。これは、暗電流の発生が加速管内の清浄度に強く関係していることを示している。一方、最大の加速電場勾配は暗電流値によらず、 β の小さい方が高くなる事が分かる。即ち、 β は放電のしにくさを表す要素であるから、夫々の加速管の構造や表面の仕上げ品質によることを示している。表1に夫々の加速管の得られた最終結果を示す。

表1 3種類の加速管の最終結果

| | CONVENTIONAL (brazed) | CLEAN (brazed) | ELECTROPLATED |
|---------------------|-----------------------|----------------|---------------|
| Field gradient MV/m | 91 | 73 | 83.6 |
| β | 44 | 57 | 53 |
| Processing hours | 800 | 200 | 200 |

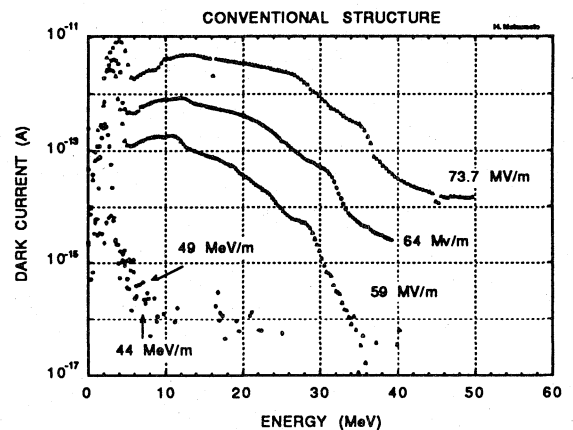
全ての加速管は試験後に内部を可能な限りファイバースコープによる目視観察をおこなった。これにより、内部が清浄な加速管(2)は、出口のカプラー空胴の内側に、直径5mm程度の大きな盛り上がりがあることが判明した。この盛り上がりは、空胴の周波数調整によるものであることが分かった。この部分は、強い電界が発生する位置にあるので、当然の事ながら強い放電が発生する。その結果、盛り上がり部分の表面は溶解し非常に荒れた面になっていた。これが暗電流が少ないにもかかわらず、最大電場勾配が低くなった原因である。

2.3 暗電流の測定

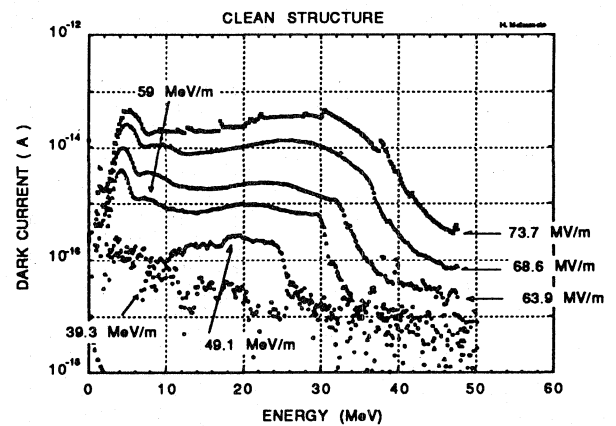
加速管で発生した暗電流のエネルギースペクトラムは、加速管下流に設置した90°偏向電磁石の磁場をホール素子で計測し、エネルギーに換算した。暗電流はエネルギー幅0.2%相当のスリットを通過してファラデーカップに到達した電荷を、ピコアンペア計で計測した。図3に夫々の加速管のエネルギースペクトラムを示す。図3の(a)は水素ロー付で製作した通常の加速管、(b)は水素ロー付で製作した清浄な加速管、(c)は電鍍法で製作した加速管に対応する。

図3の(a)および(b)は、低エネルギー側に狭い範囲で暗電流のピークが観測された。これらは加速管の出口側カプラー部に押し込みによる周波数調整がされていた為である。又、図3の(b)には高エネルギー側にもブロードな暗電流のピークが見られる。これは入口側のカプラーに、僅かに同様の調整がされていた為である。図3の(c)は全体から平均的に暗電流が発生している。加速管の構造は(3)が望まし

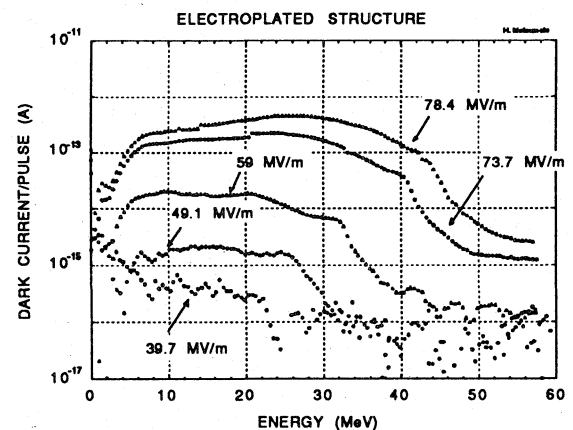
いと判断している。これらのスペクトラムの違いは、主にカプラー空胴の構造によるものである。これらの実験から、暗電流の大きさは加速管内部の清浄度に依存し、最大電場勾配は加速管の構造が支配的であることが分かる。



3-a Conventional structure (brazed)



3-b Clean structure (brazed)



3-c Electroplated structure

図3 加速管から放出された暗電流のエネルギーベクトラム

3. Hot Isostatic Pressing (HIP)

加速管に使用する銅は、高純度の高伝導無酸素銅が使用される。これは、加速管は $10^{-6} \sim 10^{-7} P_a$ の真空中で使用され、かつディスクには数十 MV/m の高周波電圧が発生するためである。それ故、材料の内部から不純物の蒸発が無いことが不可欠である。表 2 に代表的な高純度無酸素銅材に含まれる不純物を示す。

表2 Chemical composition of OFHC copper

| Pb | Zn | Bi | Cd | Hg | O ₂ | P | S | Se | Te |
|----|----|----|----|----|----------------|---|---|----|----|
| 5 | <1 | <1 | <1 | <1 | 3 | 2 | 8 | <1 | <1 |

* ppm

この表から、不純物の含有量は非常に少ないことが分かる。然しながら、高電界の実験中に比較的大きな放電が加速管内で発生すると、真空中のカーボン系の分圧が高くなることがある。これは通常、材料に含まれていない物質である。製造の過程で何等かの原因で残留したものと思われる。機械加工で使用する油の洗浄は厳密におこなわれる。この後に残留したものについては、何等かの理由で内部に閉じこめられた可能性がある。そこで材料の表面を顕微鏡で観察すると図4のように銅の結晶間に数ミクロン程度の気孔があることが判明した。

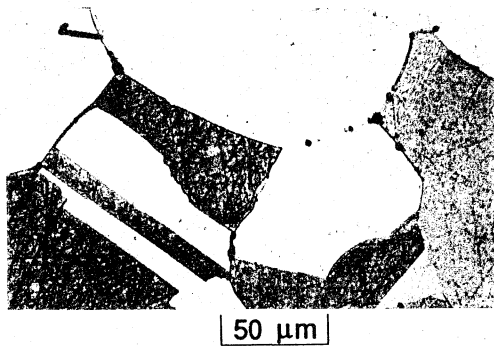


図4 無酸素銅表面の顕微鏡写真

旋盤加工時に、これらの気孔に入ったマシンオイルは洗浄しきれないで残存することが考えられる。この場合、ロー付け工程でオイルはカーボン化して、加速管内壁の浅い表層に閉じこめられる。この後、加速管の製造工程で塵等が入らないようにしても、暗電流の抑制効果は弱いことになる。そこで、材料の機械加工前に気孔を除去する方法として、HIPと呼

ばれる処理を実施した^[10]。これは圧力容器の中で、高温($\sim 800^\circ\text{C}$)、高圧力不活性ガス ($1,200\text{ kg/cm}^2$) 下で等方的に均一に圧縮する処理である。図5に HIP 処理の概略を示す。図6に処理後の銅の表面の顕微鏡写真を示す。

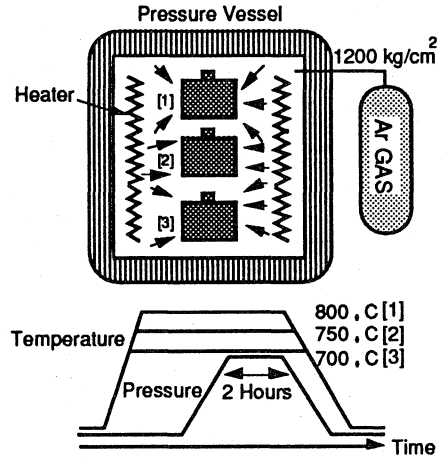


図5 無酸素銅の Hot Isostatic Pressing

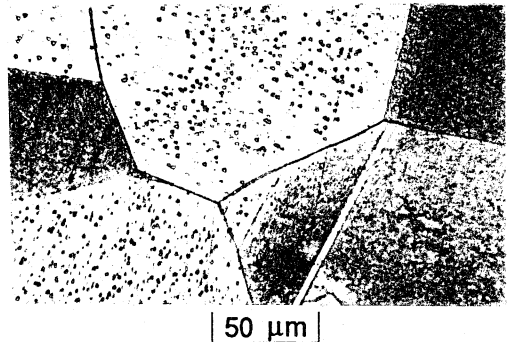


図6 Hot Isostatic Pressing 処理後の無酸素銅の顕微鏡写真

図6から、銅の結晶間に点在する気孔は効果的に除去されたことが分かる。更に、銅の結晶の馴染も改善されることが分かった。

4. 加速管

ATF の入射用 S-band リニアックの電場勾配は 33 MV/m である。これにはビームローディングを考慮して、ピーク 200 MW のマイクロ波電力が必要である。このような電力下で使用する加速管は、以下の事柄が重要である。

- (1) 材料に不純物が無いこと。
- (2) 内部に気孔がないこと。
- (3) 電界が集中しない構造にすること。
- (4) 加速管内に外部から塵等が混入しないこと。

ATFで使用する加速管は、これらの事柄を出来るだけ配慮して、製作したものである。表3に主なスペックを示す。

表3 3m長加速管の主なスペック

| | | |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|
| Phase Shift/Cell | $2\pi/3$ | Constant Gradient |
| Structure Length | 3.0 | m |
| Resonant Frequency f | 2856 | MHz |
| Quality Factor Q | 13,000 | |
| Shunt Impedance r | 60 | M Ω /m |
| Attenuation Parameter τ | 0.57 | |
| Peak Surface Electric Field (E_s) | | |
| / Axial Electric Field (E_a) | 1.9 ~ 2.1 | |
| Average Group Velocity vg/c | 0.012 | |
| Filling Time Tf | 0.83 | μ sec |

加速構造は真空ロー付法で製作された、通常のディスクロード型、定電場勾配型加速管である。ディスクおよびシリンダーの表面粗度は夫々、平坦部で40nm、ビームホールのR部で200nm以下である。又、高電界発生試験の結果から、カプラー部の放電が電場勾配を制限する主要因の一つになることが明らかになっている。それで、ここでは3次元計算機コード(MAFIA)を用いてカプラー部の詳細な解析を試みた[10]。これにより、一切の手作業による加工なしで、高精度に加速管を製作することが可能となった。これは、KEKと三菱重工(株)の共同研究において達成された。図7及び図8に夫々、位相特性、入力マイクロ波特性を示す。従来の3m長加速管においては、累積位相誤差は ± 2.5 度程度であるが、本加速管のそれは ± 0.5 度以下が達成されている。更に、内部の清浄度を確保するため、製作の初期段階から工程管理を厳密におこなっている。

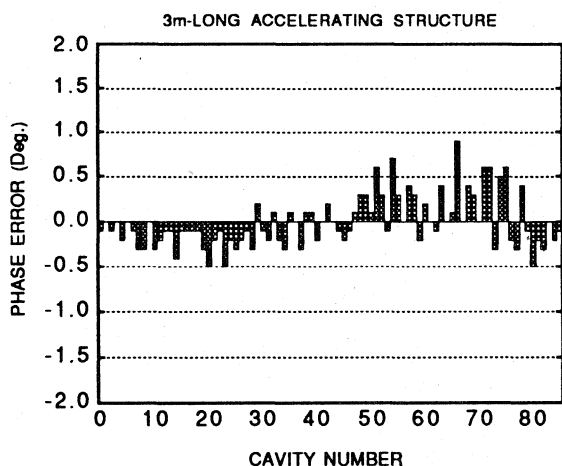


図7 3m長加速管の位相特性

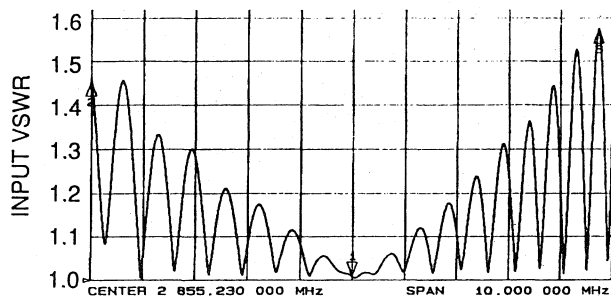


図8 3m長加速管の入力VSWR特性

5. まとめ

本年、8月に加速装置の運転許可を取得次第、本格的な実験を開始する。ここでは、熱電子銃の2.8ns 間隔のマルチバンチビーム運転、大電流ビーム用 SHBおよびバンチャー、ビームポジションモニター、ワイヤービームサイズモニター、ビームエミッタンス測定、ワイヤーセンサー方式の自動架台アライメント等の評価を行うことになっている。更に、SLEDを使用したマイクロ波パルス圧縮による加速管の33 MV/mの電界発生試験が独立におこなわれる。今後は、更にクライストンの大電力化が進むものと思われる。これに伴い、高電界型加速管の開発は重要である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] JLC group, KEK report 92-16, A/H/M, National Laboratory for High Energy Physics, Japan, December 1992.
- [3] S. Takeda, Proc. of the Second Workshop on Japan Linear Collider (JLC), KEK, 1990, p. 6~17.
- [4] P. B. Wilson, SLAC-TN-73-15, 1973.
- [5] H. Matsumoto, H. Baba, A. Miura and S. Yamaguchi, NIM A330 (1993) 1-11
- [6] H. Matsumoto, Y. Fukushima, S. Horiba, G. Horikoshi, Y. Kimura, H. Mizuno, Y. Daito, I. Sato, T. Shidara, K. Takata, S. Takeda, N. Terabayashi, Y. Yamasaki and M. Yoshioka, KEK Preprint 87-17, May 1987
- [7] Eiji Tanabe, IEEE Trans. NS-30, No.4, (1983) 3551
- [8] G. A. Loew and J. W. Wang, SLAC-PUB-4845, January 1989
- [9] H. Matsumoto, M. Akemoto, H. Hayano, T. Naito, S. Takeda and S. Yamaguchi, KEK Preprint 92-84, August 1992
- [10] S. Yamaguchi, Proceedings of III Workshop on JLC, KEK, February 18-29, 1992