

HIGH GRADIENT STUDY ON UHV COPPER CAVITY AT S-BAND FOR POLARIZED RF GUN

M.YOSHIOKA, H.MATSUMOTO, Y.TAKEUCHI, K.SAITO, H.AKIYAMA*,
E.TANABE**, K.NISHITANI***, H.MIWA****, T.SUZUKI*****

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305 Japan

*Hitachi, Ltd. Energy Research Laboratory

2-1 Omika-cho, 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-12 Japan

**AET Co., Ltd.

1-3-4 Kamiasao, Asao-ku, Kawasaki-shi, 215 Japan

***ATC Co., Ltd.

36-7 Namiki-cho, Hachioji-shi, Tokyo-to, 193 Japan

****Nomura Plating Co., Ltd.

Satuki-cho, Kanuma-shi, Tochigi-ken, 322 Japan

ABSTRACT

An UHV cavity which can generate high accelerating gradient is essentially important for photocathode rf guns for future linear colliders. A single cell copper cavity at S-band rf frequency was rinsed with ultra pure water, which was pressurized at 20 atm., in the clean room condition. The cavity was baked at 200 degrees C for 100 hours and evacuated with sputter ion pumps and NEG pumps. The base vacuum pressure of 1.5×10^{-10} torr was achieved and the cavity was rf-processed up to the maximum surface electric field of 337 MV/m without any serious rf breakdown. The pressure rise was only 5×10^{-11} torr at this field level and the minimum microscopic field enhancement factor β was 37, which was obtained with Fowler-Nordheim plot.

偏極電子用RF-GUNのための超高真空、超高電界加速空洞

1. はじめに

次世代リニアコライダでは、電子ビームはスピン偏極ビーム、それも偏極度が90%前後が当然使用できるものと期待されている。これはスタンフォード線型加速器センター(SLAC)のリニアコライダ(SLC)において偏極度が50%を大幅に超えるスピン偏極ビームが、ルーチ的に使用されていることから考えれば自然なことである^[1]。とはいえ、これは数年前には当事者以外あまり予想し得たことではなかった。偏極電子源のカソードについては、本研究会における他の発表^[2,3]があるので、ここでは触れないが、ガリウム砒素系の結晶をフォトカソードとして用いる。このフォトカソードの開発は、SLACを中心とするグループと、日本の中西(名大)、大森、栗原(KEK)らのグループが、競争と協力により、大きな貢献をしたことは、過去の本研究会におけるいくつかの発表にも見られる。いわゆる「営業運転」用フォトカソード電子銃としてはSLACの圧倒的に進んだ超高真空と高電圧に関する技術開発が、決定的な役割を果たしている。電子銃部品製作、洗浄、組み立てにいたる諸プロセスの徹底的な管理を行い、かつ、イオンポンプとNEGポンプを組み合わせた合理的な真空排気システム、ベーキングプロセスおよび高電圧エージングがもたらすものでベース圧力は 10^{-11} Torrを切っており、直流120kVを印加したときの暗電流は20 nA以下になっている^[4]。また、カソードの交

換や活性化などの取り扱い、ロードロックシステムを用い、電子銃本体のベーキングおよび高電圧エージングは、最初の一のみで済む方式にしていることも、大きく寄与している。このように、フォトカソード電子銃はSLACにより、完全に確立した技術にまで育てられたと言える。カソードそのものについては、量子効率と偏極度双方をさらに改善する努力が、日米でなされている。

SLACの偏極電子銃は「単パンチ」用のものである。ところが、JLCをはじめ次期リニアコライダにおいては、ルミノシティを $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上にするために、100パンチ(パンチ間隔は350psではなく2.8ns程度)程度のマルチパンチオペレーションにしなければならない。KEKの内藤らは、熱電子銃でこれを実現するために、速いグリッドパルサーを開発し、20パンチのビームをカソードから直接発生することに成功している。我々は偏極電子源の場合は、フォトカソードを用いることの特性をいかして、RF電子銃方式を採用することにした。

2. フォトカソードRF Gun

リニアコライダのための偏極RF Gunの採用については^[5]を参照して頂きたい。DC GunではなくRF Gunでかつ、フォトカソードを用いようとすると、超高真空および高電界のときの暗電流に対する要求は、さらに厳しいものになる。

我々は、先ず銅製のS-バンド単セル空洞を用いて超高真空でかつ、暗電流を減らすための、基礎的な研究から着手することにした。超伝導空洞や常伝導空洞についての高電界の研究はこれまで多くの優れたものがある^[6,7]した。暗電流については優れたレビューもある^[8]。これらの中で、明らかとなった重要な点を挙げる。

- (1) 空洞の材質(物性, 不純物の混入)について吟味すること。
- (2) 次いで、空洞表面の状態。特にマシニングやその後の処理について、影響をよく知っておくこと。
- (3) 最後に、表面の洗浄, 組み立てを十分に注意して行うこと。

ここで、暗電流とは縁面に沿って流れる電流ではなく、金属表面からの電界放出電流(Ie)を指している。これは、Fowler-Nordheim Plot (F-N Plot)により評価するが、従来の実験では理想的な金属表面の電界強度の50~100倍以上の電界強度でないと説明出来ない結果となっている。これをMicroscopic Field Enhancement Factor (β)と称している。

$$I_e/E_p^{2.5} \sim \text{EXP}(-6.53 \cdot 10^9 \Phi^{1.5} / \beta \cdot E_p)$$

ここに E_p は空洞の最大表面電界強度、 Φ は金属の仕事関数である。KEKの松本らは、上記項目の内(1)と(2)に特に着目して、注意深く製作した3m長のS-バンド進行波加速管に200MWものRF-Powerを供給し、45~50 MV/mの電界強度を安定に達成することに成功した^[9]。また、超伝導空洞は早くから(1)~(3)に注目しており、TRISTANにおける成功は、その成果と言える。また、最近の野口(KEK)らのL-バンド超伝導空洞における高電界試験も、良好な結果を出している^[10]。我々は、これらを参考にし通常材質および通常の方法で空洞を製作し、高圧の超純水で洗浄した後クリーンルーム条件下で組み立て、超高真空状態で高電界試験を行うことにした。即ち(3)に着目したことになる。

3. 試験空洞

本装置ではRF最大出力は5MWと制限されているため300MV/m以上の電界強度まで試験するために図1に示すように、空洞はノーズコーン型とした。 E_p と空洞電力(P_c)の関係はSUPERFISHで計算し、

$$E[\text{MV/m}] = 156.6 \sqrt{P_c[\text{MW}]}$$

で与えられる。また空洞への入力電力(P_{in})と P_c との関係は次式で与えられる。

$$P_c = \frac{4\beta_{in}}{(1+\beta_{in})^2} \left\{ 1 - e^{-\frac{\omega}{2Q_L t}} \right\}^2 \cdot P_{in}$$

ここに β_{in} はRF結合定数、 ω は角周波数、 Q_L は空洞の負荷 Q 、 t はRFのパルス幅である。

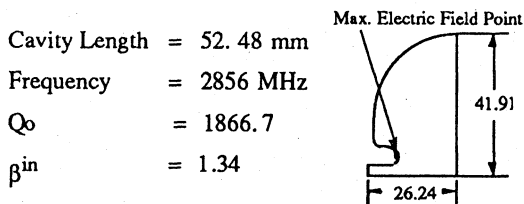


図1 試験空洞

4. 超純水による高圧洗浄

空洞, 空洞に接続する両側の短管, 及び導波管の4点を10~30kg/cm²(85kg/cm²の高圧ポンプを低圧で使用したため吐出圧が不安定となった)に加圧した超純水(比抵抗17M Ω cm以上)で内面洗浄した。写真1に示すように、それぞれのパーツにあわせて製作した1/4インチ径のステンレス製パイプ(EL-Grade)に放射状に細穴を空け、ポリエチレンフランジで固定し、水を流しながら各10分程度まんべんなく、洗浄した。その後、各パーツは銅の酸化を防ぐため半導体用メタノールをさらにフィルター(0.2 μ mメッシュサイズ)でろ過したもので置換する。これまでの作業はクラス100のクリーンブースで行われる。その後、各パーツはKEKに持ち込まれ(所要時間約2時間)、試験装置を囲むクラス100のクリーンブースでメタノールを抜き、装置に組み込まれる。ガスケットはフィルター(0.1 μ m)を通したメタノールで塵を洗い流して使用した。装置はリークチェックの後、排気工程^[11]に移る。



写真1 超純水高圧洗浄

5. 高電界発生試験

1) 試験装置

空洞が組み込まれた試験装置を図2に示す。試験装置のRF系や真空装置については本研究会の別の発表^[11]に詳しい説明があるのでそちらに譲る。

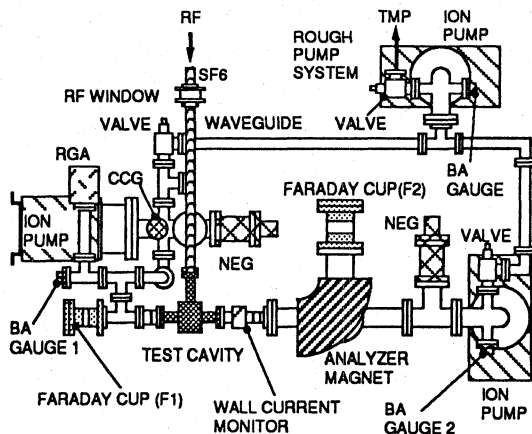


図2 真空装置

2) RFプロセッシング

排気を終えた空胴の真空度が全圧で 1×10^{-10} Torr 程度になったら、 $t=2 \mu \text{ sec}$, 繰り返し10ppsで運転を始めた。約2時間かけてPinを50kWまで上げたところで突発的な真空度の悪化(1×10^{-8} Torr以上まで上昇)が数分に一度の割合で起りはじめた。繰り返しを0.5ppsに下げプロセッシングを続け、RF投入時間にして約10日後50kWで突発的な悪化はあるものの、インターロック(10^{-8} Torr)は働かない状態になった。それから10日かけて400kWまで電力を入力出来るまでになった。再び繰り返しを10ppsに戻し運転を続け約1か月後に試験装置出力のほぼ限界である4.8MWまでプロセッシング出来た。Pinは真空度と暗電流および空胴に貼り付けてあるシンチレータ、サーベメータ出力がプロセッシングにより徐々に低下し安定になったことを確認してから上げた。プロセッシング途中では各波形、真空圧力(全圧,分圧), ビームエネルギーなどを計測した。

4. 試験結果

$E_p=297 \text{ MV/m}$ のときの暗電流の運動量分布を図3に示す。電流は図2のF2で計測した。運動量の最高値は 6 MeV/c に達している。

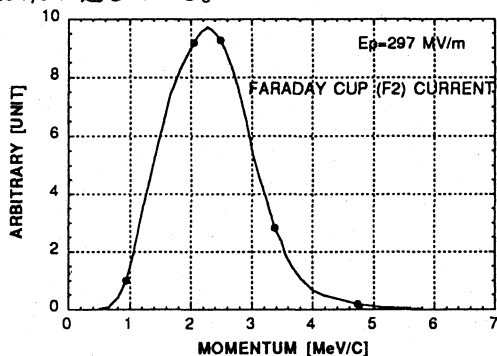


図3 暗電流運動量分布

F-Nプロットを図4に示す。図中の(数)はRFプロセッシングが進む段階の順番を示す。

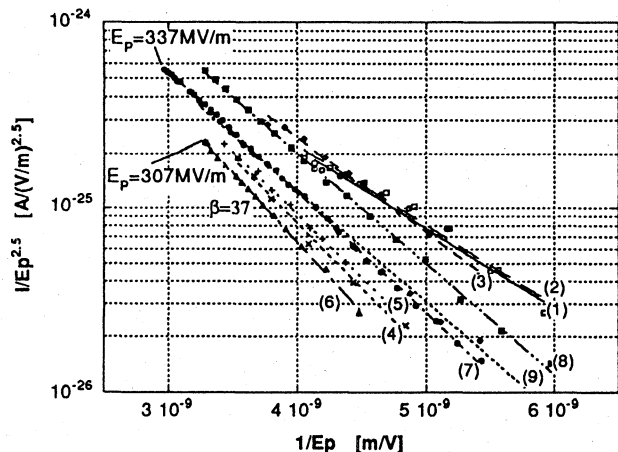


図4 Fowler-Nordheim Plot

図から分かるようにプロセッシングが進むと β が小さくなる。(6)の4.8MWまでプロセッシング出来た時点での β が37で最小値を示した。その後 E_p を高くするため t を2から $4 \mu \text{ sec}$ に広げ(7)になった。この時 β が大きいのはこれまでの経過からみて t を広げた後のプロ

セッシングが完全でないためと思われる。しかしその後頻りに放電が起るようになったため、 t を再度 $2 \mu \text{ sec}$ に戻した(8)。このとき β はさらに悪くなったがそのままプロセッシングを続けることで(9)となり β は改善された。RFオン(E_p が 307 MV/m)とオフでの残留ガス分圧変化を図5に示す。

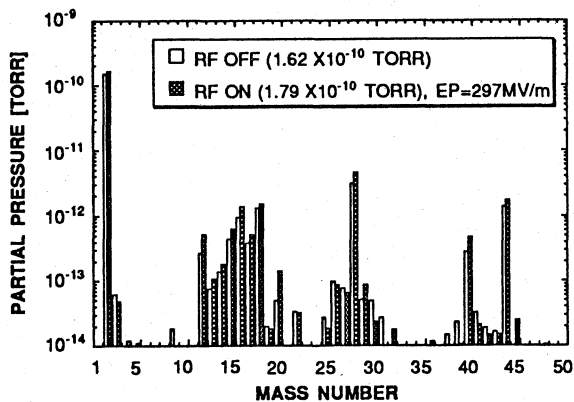


図5 残留ガスの分圧

5. まとめ

RF電子銃にとって、高加速電界と超高真空の条件を同時に満たすことは必須の条件である。今回の実験では空胴を加圧した超純水で洗浄することが超高真空、高電界を実現する上で有効であることが明らかとなった。300 MV/m以上の電界強度でも圧力上昇は 5×10^{-11} torrと僅かであり、また電界放出電流も少ない。今回、図4に示すように、非常にきれいなF-N plotを再現性よく得た。Microscopic field enhancement factor, β ,の最小値37であったがプロセッシングを続ければこれはさらに小さくなると思われる。今後、空胴の洗浄のみでなく、材質や製作方法まで改良し、さらに真空度や電界を上げる実験を予定している。

謝辞

本研究は、JLC開発研究の一環としてなされたものである。同開発グループのみならずの協力に感謝致します。またSLACのJym Clendeninn, David Schultz両氏にはSLACにおける経験を快く教えて頂いた

参考文献

- [1] D. Schultz et al., SLAC-PUB-6060 (1993), contributed to the 10th Int. Symp. on High Energy Spin Physics, Nagoya, Nov. 9-14, 1992
- [2] M. Tawada, 本研究会
- [3] Y. Kurihara, 本研究会
- [4] D. Schultz, J. Clendenin (SLAC), Private communications
- [5] J. Clendenin et al., Nucl. Instr. and Meth. A340 (1994) 133-138
- [6] K. Saito et al., Proc. 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, 1993
- [7] H. Matsumoto et al., Proc. 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK Proc. 93-10, Aug. 1993A
- [8] R. V. Latham et al., Vacuum, Vol.42, No.18 (1991) 1173
- [9] H. Matsumoto et al., 本研究会
- [10] S. Noguchi, K. Saito, 本研究会及び私信
- [11] K. Nishitani, 本研究会