

High Gradient Test of S-band Cavity

H. Akiyama

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 1-1, Omika-cho, 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, #319-12, Japan

H. Matsumoto, M. Yoshioka

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

K. Nishitani

ATC Co. Ltd., Namiki 36-7, Hachioji, Tokyo, #193, Japan

Abstract

It is required to reduce dark current of a cavity for realizing high gradient accelerating structures and a low emittance polarized RF gun for JLC (Japan Linear Collider). The systematic study to investigate a mechanism of dark current is needed. We made high gradient tests of three type of cavity, (1) OFC cavity, (2) OFC cavity using Titanium of which secondary electron emission coefficient is less than 1, (3) OFC cavity which was rinsed with ultra pure water in the class 1 clean room. It was found from the test of the type (2) cavity that the multiplication of the dark current is suppressed using Titanium. And it was confirmed from the test of type (3) that a main cause of dark current is dust sticking on cavity surface.

S-band 高周波加速空洞の高電界試験

1. 緒言

近年、素粒子物理学実験用の電子加速器においてリニア・コライダ―が有力になり、日本では KEK を中心として JLC (Japan Linear Collider) とよ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精力的に進行している[1]。JLC は現在の計画では全長 25 km、ビーム衝突エネルギー 300~500 GeV を第一期 JLC-I とし、将来 1.5 TeV までエネルギーを増強して行くことを予定している。このような大型加速器を現実的な長さで実現するためには、短い距離で高いビームエネルギー利得が得られる安定かつ高電界の加速管が必要である。また、JLC ではスピン偏極電子ビームを低エミッタンスで加速する RF 電子銃を開発している。スピン偏極電子ビームは GaAs 等のフォトカソードから発生させるが、フォトカソードは電子銃内の真空環境に極めて敏感であり、安定に電子銃を運転するためには、暗電流の増加を極力さげなければならない[2][3]。暗電流の低減方法は 2 つの方法が提案されている[4][5]。本研究の目的は高電界下の加速空洞内で発生する暗電流の低減方法を実験的に検証することである。

暗電流を低減するための第 1 の方法としては、暗電流の増倍を抑制することである。すなわち、電界がもっとも強くなりかつ発生した電界放出電

子が衝突しやすい部分に 2 次電子放出係数が 1 よりも小さい物質を用いることにより、暗電流の増倍を抑制する[4]。このような物質として 2 次電子放出係数が 0.9 であるチタン Ti が有力である。また、Ti の融点は 1675°C で銅の 1084.5°C よりも高く電子やイオン等の衝撃による損傷にも強いと考えられる。一方 Ti の抵抗率は銅の 30 倍と大きいため空洞全体に使用することができない。したがってもっとも電界が高くなるビームホール付近のみ Ti を使用する必要がある。

第 2 の方法として空洞表面の清浄化が考えられる。すなわち、加工油など空洞表面に付着した汚染物質付近で電界が強まり電界放出により電子を発生させるとともに、汚染物質がイオン化し加速されて対向する空洞表面に衝突することにより、更に電子を発生させ暗電流増加の原因となる[5]。したがって空洞内を十分清浄にすることは暗電流低減のためには極めて重要である。

上の 2 つの効果を検証するために、一部に Ti を用いる空洞、クリーンルームにおいて超純水により洗浄した無酸素銅 (OFC) 空洞、通常の製作プロセスを経た OFC 空洞の 3 種類の S-band 単セル定在波空洞を製作し、高電界試験をおこなった。

2. 高電界試験空胴

3種類の空胴は単純なビルボックス型とし、比較のためすべて同一構造とした。空胴1は通常の加工及び洗浄方法で製作したOFC空胴である。一部にTiを用いる空胴2については、OFCとTiをHIP (Hot Isostatic Pressing) により接合した材料を使用した[4]。HIP条件は温度800℃、圧力1200 kg/cm²である。空胴3は空胴1と同じOFC空胴であるが、製作後にclass1のクリーンルームにおいて超純水により洗浄し、パッキングし実験室に持ち込んだ。表面の加工には精密旋盤で同質のバイトを使用し、すべての空胴を同一条件で加工した。加工した空胴内面の表面粗度を接触型3次元測定器により測定した結果、OFCの表面は0.1μm以下、Tiの表面は0.8μm以下で加工されており、表皮厚さに比べて十分滑らかであった。表1に製作した3種類の空胴の材質、加工方法及び高周波特性を示す。

3. 高電界試験用実験装置

図1に試験空胴の高電界試験装置の概念図を示す。ほこり等の侵入を防ぐために、実験システムをclass 1000程度の簡易クリーン・ルームにして試験空胴を組み込んだ。実験システムを超高真空かつ清浄に保つため、空胴の近辺、及び装置下流側にイオンポンプとNEG (Non-Evaporation Getter) ポンプをそれぞれ1台ずつ配置し、実験装置全体を150~200℃で約168時間ベーキングした。ベーキング用の粗排気はイオンポンプとターボ分子ポンプを用いポンプ側からの汚染が極力ないように配慮した。このような真空装置の構成により実験装置内部の真空度は1×10⁻¹⁰ Torrに達した。測定装置は、空胴から発生する暗電流の電流値と時間構造を測定するためにファラディカップを、高電界時に発生する放出ガス種を特定するために四重極質量分析器を用いた。空胴のエイジングにおいては、空胴内面に回復不可能な損傷を与えること

表1 製作した空胴の種類と特性

	空胴1	空胴2	空胴3
空胴の種類	OFC	OFC・Ti HIP	OFC
空胴洗浄方法	アセトン洗浄	アセトン洗浄	超純水洗浄
空胴組立環境	class 10000	class 10000	class 1
共振周波数(MHz)	2854.5	2851.4	2852.3
無負荷のQ値	13200	8650	2852.3
結合定数	1.58	1.41	1.19
最大表面電界(MV/m) (4MW入力時)	146	123	149

を避けるため、通常の加速管のエイジングの際の真空度の限界値1×10⁻⁷ Torrより厳しく1×10⁻⁹ Torrに設定した。

4. 高電界試験結果

空胴内の表面の状態は電界放出の理論式 Fowler-Nordheim の式より求められる Field Enhancement Factor β により評価した。Fowler-Nordheimの式は

$$\frac{I}{E^{2.5}} = C \times \exp\left(\frac{-6.35 \times \phi^{1.5}}{\beta \times E}\right)$$

で与えられる。ここで I は暗電流(A)、 E は空胴内

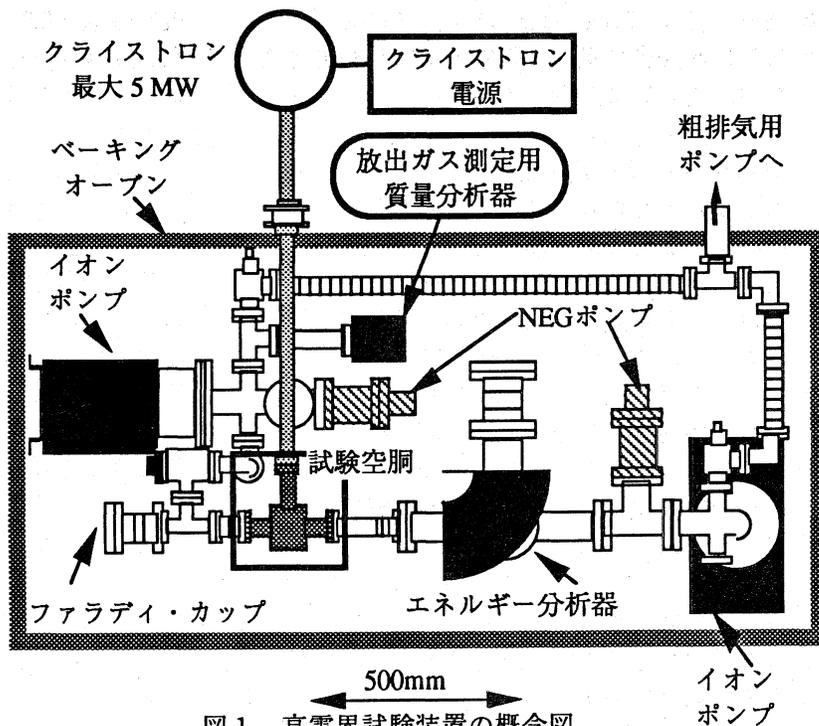


図1 高電界試験装置の概念図

の最大電界強度(MV/m)、Cは定数、 ϕ は仕事関数(Cu:4.4 eV、Ti:3.8 eV)である。 β は空洞表面をマクロに見た場合の電場の増強度で、 β が小さいほど理想的な表面状態を示す。暗電流値Iはファラデイカップで測定したパルス波形のピークの値をとった。Fowler-Nordheimの式の左辺を縦軸に、右辺の括弧内を横軸にプロットしたものをF-N (Fowler-Nordheim)プロットと呼び、このプロットの直線の傾きが β をあらわす。図2に3種類の空洞のF-Nプロットを示す。3種類の空洞とも β は50~60で、電界から推定される表面粗さはほぼ同じであった。

図3は3種類の空洞の最大表面電界強度と暗電流値の関係を示す。空洞1のOFC空洞と、空洞2のTi空洞、空洞3の超純水洗浄したOFC空洞をそれぞれ比較すると暗電流は1桁小さい。空洞2で暗電流が小さいのは、当初の目論見通り2次電子放出係数が1より小さいため暗電流の増殖が抑制されたためと考えられる。

四重極質量分析器を用いたガス分析によれば、超純水洗浄した無酸素銅空洞は、超純水洗浄しない無酸素銅空洞、Ti空洞と比較し放出ガス種に質量数12のC、28のCO、44のCO₂が極めて少なかった。これらの炭素系のガスが発生する理由は、加工油が残留しう付けによる高温、高電界による放電等で分解発生すること、真空ろう付け炉内の炭化物などの汚染物質が空洞表面に付着すること、などが考えられる。したがって、超純水洗浄した空洞の場合、汚染物質が十分少ないために暗電流発生因子が取り除かれ、暗電流を低く抑えられたと考えられる。

5. 結 言

3種類の単セル空洞を製作し高電界試験を行い、次のような結論を得た。

(1) 加速空洞高電界部に2次電子放出係数が1より小さいTiを使用することにより暗電流の増殖を抑制できる。

(2) 無酸素銅空洞をclass 1の極めて清浄な環境で超純水を用いて洗浄し、空洞内の汚染物質を十分取り除くことで暗電流を低減できる。

(3) 高電界印加時に空洞内の放出ガスの分析の結果によれば、暗電流の支配的因子は空洞内に残留した加工油などの有機物と推定される。

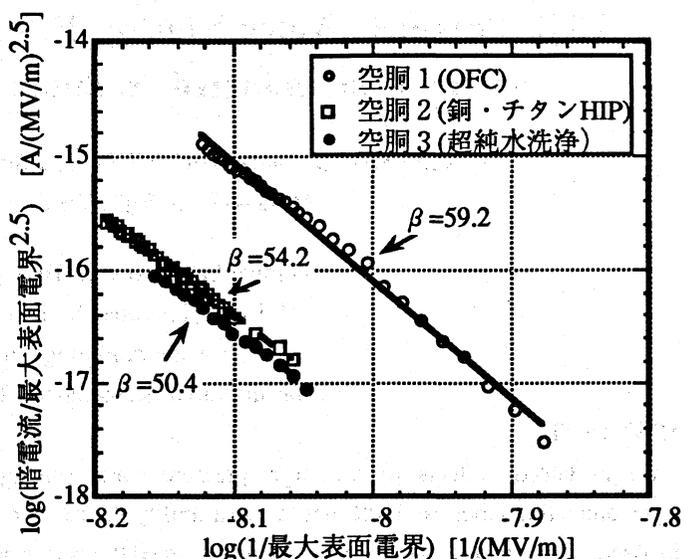


図2 3種類の空洞のF-Nプロット

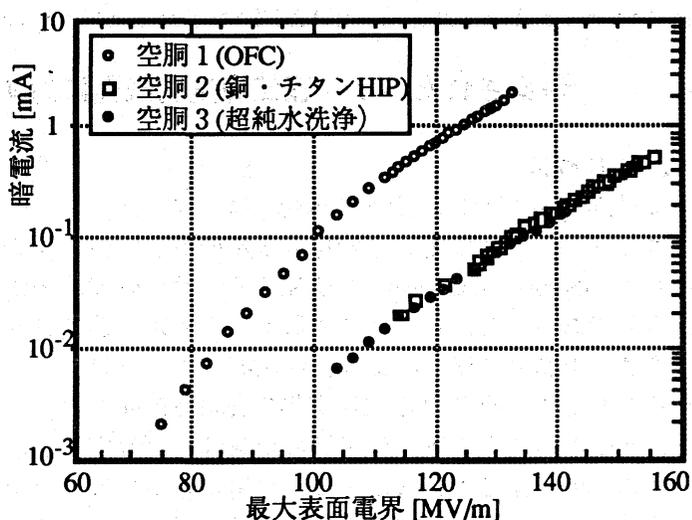


図3 3種類の空洞の最大表面電界と暗電流の関係

(4) 暗電流を抑制し、加速空洞を高電界化するためには、製作時に清浄な環境が必要である。

6. 参考文献

- [1] JLC group : KEK report 92-16, December (1992)
- [2] 吉岡 正和、他：第19回ライナック技術研究会プロシーディング、p.25 (1994)
- [3] M. Yoshioka, et al. : Proceedings of the 1994 International Linac Conference, p.302, August, 1994
- [4] 松本 浩、他：第18回ライナック技術研究会プロシーディング、p.270 (1993)
- [5] 松本 浩、他：第19回ライナック技術研究会プロシーディング、p.245 (1994)