

[13P-24]

Performance Degradation in the TRISTAN Horizontal Cavity Assembly and Its Cause

K.Abe, K.Saito, H.Kitamura*, E.Kako, M.Ono, S.Noguchi, T.Higuchi T.Shishido

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory
1-1,Oho Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

*Mitsubishi Electric Corporation

7-10-4, Nishigotanda, Shinagawa-ku, Tokyo,141-8537,Japan

Abstract

We are investigating the performance degradation of superconducting rf cavities in TRISTAN horizontal assembly. This is a considered matter with the SC application in the JAERI and KEK joint project where the SC cavities will be operated at 2K. We made simulated tests in order to find out the cause. From many experiments we consider candidate to be multipacting enhanced by the adsorption gas.

TRISTAN 横組み立てにおける性能劣化とその原因

1.はじめに

超伝導加速空洞は、TRISTAN で実証された通り高い加速電界と高い Q 値が得られるので、今後ますます注目される加速技術である。実際にドイツの DESY で 2K 運転での超伝導加速空洞を利用したリニアコライダー“TESLA”が計画されており加速電界が 2.5MV/m、Q 値が 1×10^{10} 程度の高性能の超伝導加速空洞の開発が進んでいる。日本では KEK と日本原子力研究所のジョイントプロジェクトで使用される陽子リニアックで超伝導加速空洞の使用が決定されており、これも 2K 運転で高性能の超伝導加速空洞が要求されている。

KEK では TRISTAN の後もこうした将来的应用のために高性能の超伝導加速空洞開発を行ってきた。そして、現在最大加速電界 4.0MV/m、Q 値が 1×10^{10} 以上の高性能の空洞製作技術にメドが見ついた。しかしながら、超伝導加速空洞を実際の加速器の中で実現する際、横型クライオモジュールに組み込む作業があり、この組み立て工程において空洞性能劣化の問題が懸念されている。

2.背景

トリスタンで使用された空洞の縦性能試験（個々の空洞の性能試験）の結果と横型クライオモジュールに組み込んだ後の測定（横性能試験）結果を図 1 に示す。図 1 より縦測定では加速電界が 1.0MV/m、Q 値が平均で 2.7×10^9 であることが分かる。しかし、横性能試験に於いてはどちらの数字ともダウンし、加速電界では統計的に 7MV/m、Q 値では 1.7×10^9 となっている。もしこの性能の劣化が今後の計画においても現れるなら、今後行われる超伝導加速空洞の 2K 運転において大きな問題となる。Q 値の 1×10^9 のダウンは残留抵抗に対して約 60nΩ 増加する事になり 2K 運転の意味がそなわれる。しかしながら、朗報は実際の加速器の運転では性能の劣化は見えないことである。本研究は、この性能劣化がアクシデンタルな結果起こったものなのか、それともこの背景に物理的な原因があるのかを検証する事を目的に行った。

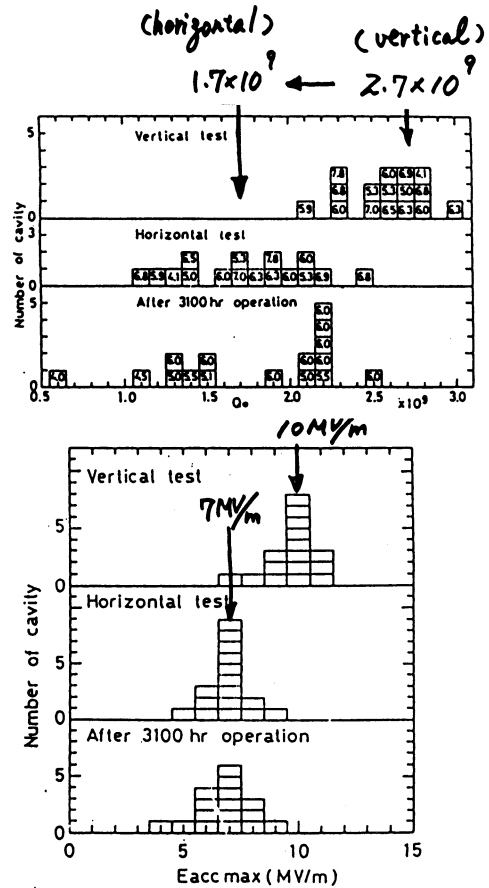


図 1： TRISTAN 超伝導加速空洞の縦測定から横測定のパフォーマンスの変化

3.トリスタン横組み立てと性能劣化の原因

TRISTAN の横組み立ては、縦測定が終了した後、1) 空洞を常温に戻し窒素を用いて空洞の真空を破る。次にクラス 100 のクリーンルーム環境において 2) 縦測定用治具の除去 (写真 1)、3) 二つの空洞のペアリング、4)

インプットカプラー、HOM カプラーの取り付けを行い、5) 横型クライオモジュールに組み込む。そして6) 横型クライオモジュールにおいて約70℃のベーキングを行い、7) 横性能試験を行う。この一連の流れにおいて、窒素の空洞への影響、空気空洞への影響、ごみの問題、ベーキングの効果の問題を調べた。

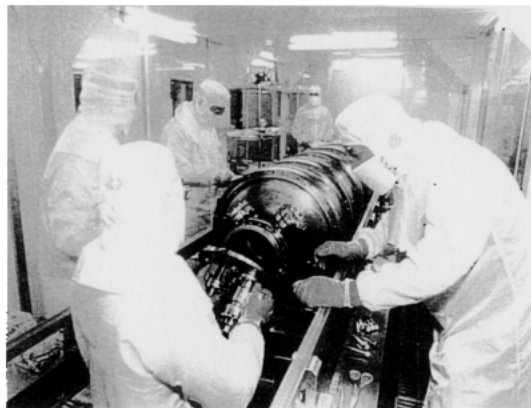


写真1：横組み立ての様子

これらの問題に対しての空洞性能測定に現れる現象をあげる。ごみの混入による性能の減少は、フィールドエミッションとして現れる。これは、アクシデンタルであり、空洞の加速電界、Q 値に対しても規則性がない。そしてこれは注意深く作業を行えば回避できる問題である[1]。また、窒素、空気空洞への影響では、空洞表面へのガス吸着が懸念されるが、しっかりとベーキングを行えば(ベーキング温度約130℃)両方とも回避できる事が分かっている[2][3]。しかし、ベーキングが不十分な場合、ガス吸着によりマルチパッキングが助長され、性能劣化が起きる事が分かってきた。そして、これが TRISTAN 横性能試験においての空洞の性能を制限した原因と考えられる。したがって、空洞に窒素を封じきりベーキングを行わなかった場合とベーキングを行った場合について実験を行った。

4.マルチパッキング

マルチパッキングは、空洞表面から飛び出した電子が空洞内のマイクロ波と同期して運動をくり返す現象である。マイクロ波の磁場に曲げられて電子の放出点に戻ってくる一点マルチパッキングと空洞の赤道部を対象に運動する二点マルチパッキングがある。そして、それぞれ高次のモードがある(図2)。マルチパッキングは、表面の2次電子放出係数が1より大きいと、電子が空洞表面をたたいた際そこからさらに多数の電子が放出され、マルチパッキングが増殖する。この現象が起これると電子が空洞内の蓄積エネルギーを吸収するため、Q 値が急激に低下する。また、電子が空洞表面と衝突するためX線が発生し、またその場所が発熱する。

この運動は、マイクロ波の周期とマルチパッキングの運動の周期から以下のようにあらわされる。

2点マルチパッキングの運動周期はマイクロ波の周期の半整数倍でなくてはならないので

$$E_n^{IMP} = \frac{E_{n-1}^{IMP}}{2n-1} \quad (式1)$$

これより、n 次のマルチパッキングが起こる加速電界は1次を基準にしてとびとびの値になる。同様に1点マルチパッキングはマイクロ波の整数倍となるので以下のように表される。

$$E_n^{IMP} = \frac{E_{n-1}^{IMP}}{n} \quad (式2)$$

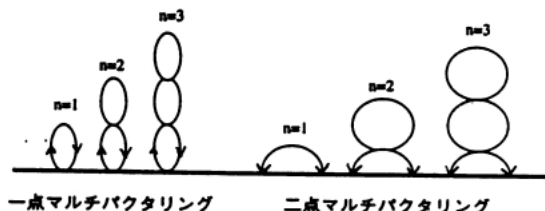


図2：マルチパッキングの軌道

1300MHz について考えると one-point マルチパッキングと two-point マルチパッキングは、表1に示すレベルに現れると予想される。Two-point マルチパッキングは、CERN のW.Weingartenの研究において350MHzと500MHzの単セル空洞において確認されており、これをもとに出した値である。そして、これは我々の数多くの実験において一致することが確認できている。しかし、one-point マルチパッキングはまだ実証が得られていない。

表1：1300MHz 空洞のマルチパッキングレベル

L-band Cavity

		n=1	n=2	n=3
One-point	Eacc (MV/m)	25	12.5	8.3
	Hp / f	0.89	0.45	0.30
Two-point	Eacc (MV/m)	18	6	3.2
	Hp / f	0.59	0.19	0.10

5.実験・結果

実験は1300MHz シングルセルを用いて行った。この空洞は液体ヘリウム温度2Kで残留抵抗が数nΩで測定できる。また、加速電界が30MV/m以上をだせるので空洞性能を高感度で測定できるメリットがある。空洞の処理は通常の表面処理(電界研磨50μm、高圧洗浄1時間)を行い、リファレンスデータをとった後、空洞に窒素を入れて三E間封じきりその後、ベーキングを全く行わなかった状態とベーキング(約130℃)を三日間追加して測定した。リファレンスデータを図3、ベーキングを行わなかったデータを図4、ベーキングを施したデータを図5に示す。

図3と図4をくらべると顕著に空洞の性能劣化が起きている事が分かる。図4において一度目のプロセスレベルは、6MV/mからQ値が落ちはじめ、二度目のプロセスレベルは18MV/mでQ値が落ちている。そして、

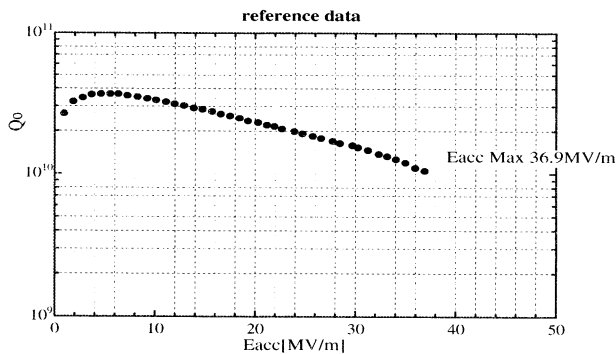


図3：表面処理後のベースライン

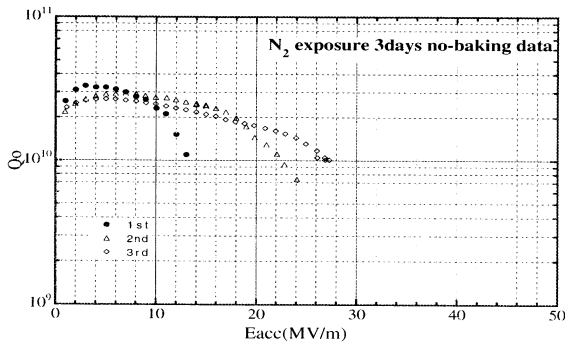


図4：窒素を三日間封じベーキング無しのQ-E カーブ

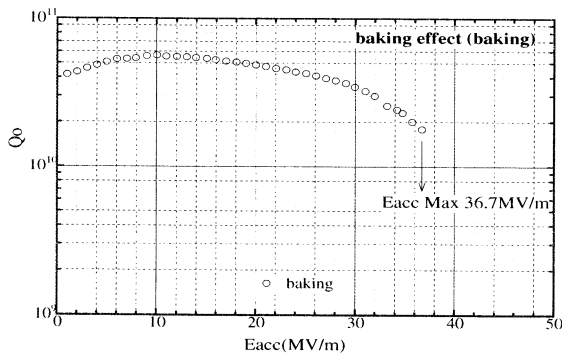


図5：ベーキング後のQ-E カーブ

最終的には 25MV/m で Q 値が落ち最大加速電界が 2.7 MV/m でリミットされている。ここで、Q 値の落ちはじめに注目すると表 1 で示したマルチパクティングのレベルに一致する。ベーキングを施した図 5 においては性能が回復している。また、マルチパクティングレベルは周波数でノーマライズできるので TRISTAN 508MHz、原研 600MHz においても X 線の発生状態で比較した (図 6)。この結果、顕著に各マルチパクティングのレベルにおいて X 線が発生している事が分かる。two-point マルチパクティングの 1 次のレベルを TRISTAN 508MHz 空洞の加速電界に焼き直すと、7MV/m に相当する。これは図 1 で示した加速電界が統計的に 7MV/m に落ちたのはマルチパクティングによる性能劣化であった可能性を示唆するものである。

7.まとめ

今回の実験において、一度空洞を窒素で封じきった場合確実にベーキングを行わなければマルチパクティングが助長され空洞の性能劣化を引き起こすことがわかった。その結果、TRISTAN 時における性能劣化は不十分なベー

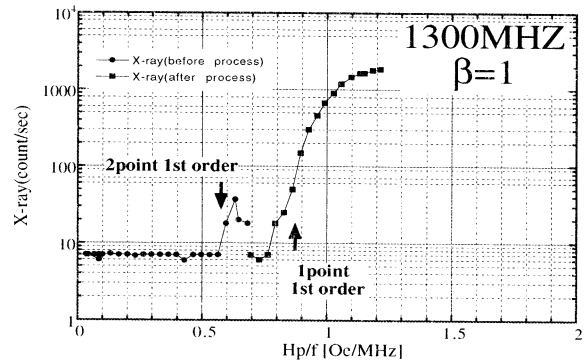
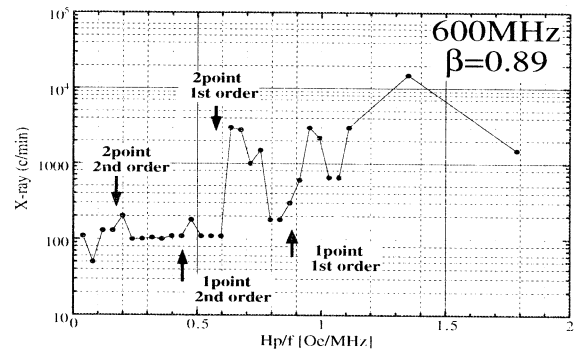
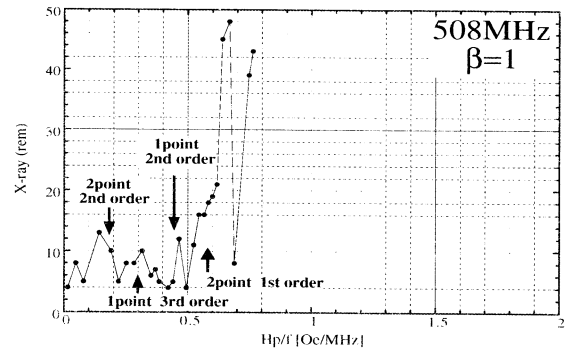


図6：他の超伝導加速空洞における X 線の発生状況

キングがマルチパクティングを誘発し結果的に加速電界が統計的に 7MV/m になったと考えられる。今後、この現象を確実に掴むため、空洞外面の温度マッピングと X 線の同時計測装置の開発、マルチパクティングの軌道計算のシミュレーションを行う予定である。また、これより横型クライオモジュールでのベーキング条件の実験とさらに、マルチパクティングを克服した表面処理の開発を行う。

参考文献

- [1] K.Saito, "Basic Study on the Horizontal Assembly of SC-Pair Cavities into Cryomodule" Proc. of the 1st Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan KEK
- [2] K.Saito et al "Performance Degradation Due to Air Exposure of Niobium Superconducting RF Cavities" Proc. of the 2nd Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan KEK
- [3] H.Kitamura "Effect of N₂ Gas exposure on the L-Band Superconducting Cavity" Proc. of the 2nd Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan KEK