

[F17p31]

The effect of weak magnetic field on surface resistance of superconducting cavity

M. Ono, E. Kako, K. Saito, T. Shishido and S. Noguchi

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

ABSTRACT

The effect of external magnetic field on surface resistance of niobium superconducting cavity was experimentally explored in the 0 to 140 mOe range. The external H-field generated by the solenoid coil was applied at non-superconducting state (at ~ 10 K; $T_c = 9.25$ K for Nb), and then the cavity was cool down from 4.2K to 1.5K to measure the temperature dependence. The cavity used in this test had been treated at 1400 °C at half-cell state and the RRR = 300. The obtained surface resistances at low accelerating field were well represented by the sum of the BCS term and the residual term as usual. The residual term show the external H-field dependence as 0.43 n Ω increasing per 1 mOe increasing.

超伝導空洞の表面抵抗の弱磁場依存性

1. はじめに

L-バンド (周波数 = 1.3GHz) の超伝導空洞を用いてその開発及び性能向上が KEK において進められており、30 MV/m 以上の加速電界を達成する技術がほぼ確立され 4 個の空洞においては 40 MV/m の加速電界を達成するまでになった[1]。このような高電界を高デューティ (CW 運転まで含めて) で且つ広いアパーチャーが可能な超伝導空洞の適用が様々な用途で真剣に検討されるようになってきた。一方において、超伝導空洞は外部磁場の影響を受け易く良い磁気シールドが要求されることが使用する際の一つの障害になっていると言われている。このような実用上の観点のみならず、外部磁場が空洞の表面抵抗にどのように影響を与えるのか、又その影響は材料 (ここではニオブのバルク) の性質 (RRR や H_{c2} 等) にどのように依存するのかを調べることは興味のあることと思われる。今回は過去に 40 MV/m の高電界を達成した比較的良く調べられた空洞[2]を用いて、弱い外部磁場 (磁束 = 140 mGauss 以下) での影響を測定した。

2. 測定方法及び結果

空洞表面抵抗 (R_s) は通常、BCS 理論より示差される温度依存項 [3] (RBCS) と残りの項 (残留抵抗; R_{res}) の和で表され良く実験値を再現する。つまり、

$$R_s = R_{BCS}(T) + R_{res} = A/T e^{-\Delta/T} + R_{res}$$

ここで A 、 Δ 、 R_{res} のパラメータを R_s の温度依存性から求める。T は 4.2 K から ~ 1.5 K 程度までの範囲で測定した。外部磁場はソレノイドコイルで空洞のビーム軸に平行に加えた。コイルの中に空洞を設置し、ミュウメタルで地磁気をシールドした (数 mGauss 以下) クライオスタットに納められている。ソレノイド磁場の変更は温度が 10 K 以上で超伝導では無い状態で行い、測定は磁場を加えたままで行った。但し、途中で一度超伝導状態でソレノイド磁場をオフし空洞性能に影響を与えないことを確かめた。つまり、磁場の影響は超伝導へ転位する時に捕捉される磁場 (磁束) で決定されるとの予想を確かめた (今回の磁場の範囲で)。ソレノイド電流がゼロでの残留磁場の影響は、電流の絶対値は同じで極性を

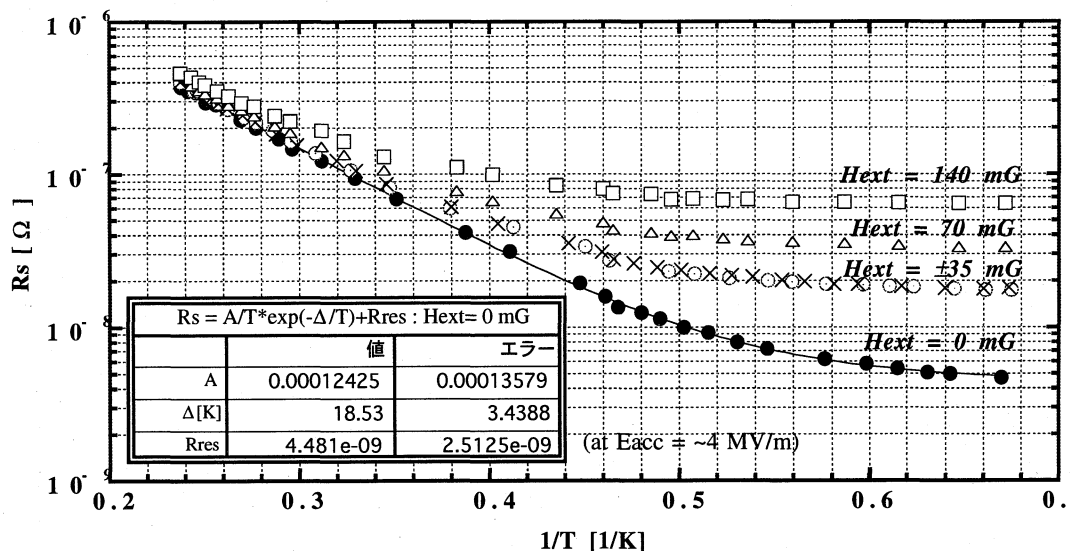


図-1：外部磁場下での表面抵抗。

反転して測定し (Hext = 35 mOe で) 少なくとも、軸方向の残留磁場は小さいことを確かめた。図-1、3に各外部磁場での表面抵抗の温度依存性及びQ-Eカーブの空洞性能の測定値を示す。図-2にBCSパラメータ (A、Δ、Rres) のフィッティング結果を示す。これより外部磁場の影響は Rres に大きく現れており、1mOeの増加で 0.43 nΩ の抵抗値の増加が認められた。最大加速電場は各磁場で 25 MV/m程度となり (図-3) 測定精度以内で不変である。使用した空洞 (K-14) は 40 MV/m の加速電界を過去に達成しているが今回は性能を下回った。これは、一連のこの空洞のテストで (既に 20 回以上行っている; [2]参照) 最良の表面状態を再現できないことを示す。但し、BCS パラメータはほぼ再現しており、低い加速電界での表面抵抗を調べる今回の実験目的に対しては十分な性能を示している。

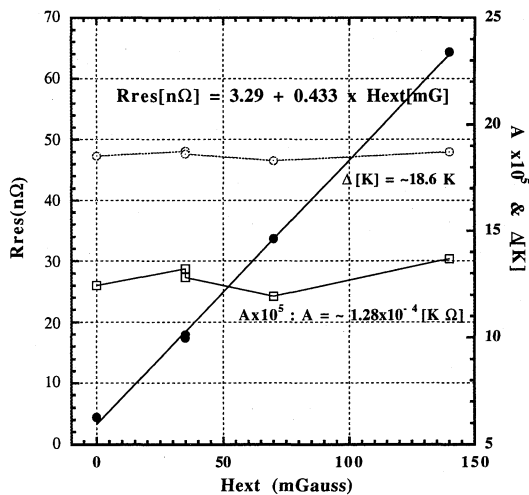


図-2：表面抵抗の BCS パラメータ

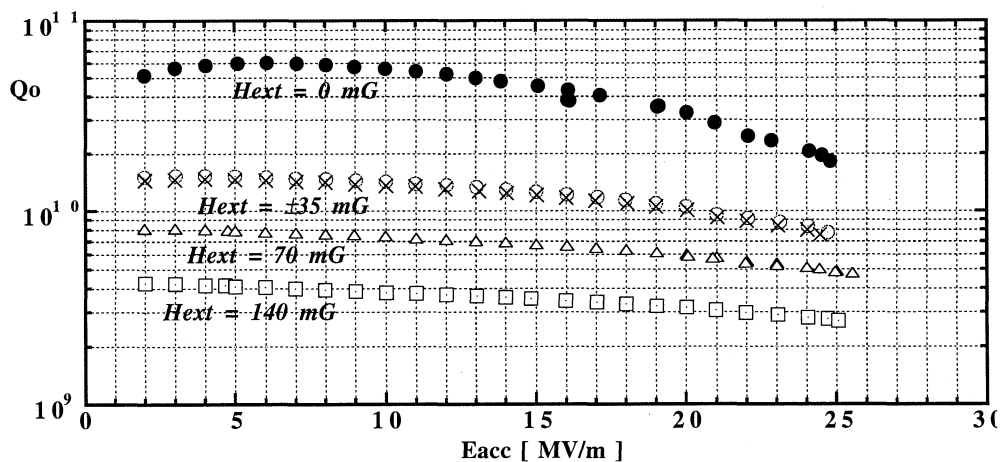


図-3：空洞性能：Q-E カーブ

空洞の表面処理としては、電界研磨 (20 μ)、温水洗浄、高圧水洗 (純水; 90 bar) 及び最終シャワー洗浄 (超純水) である。磁場変更のための加熱は超伝導状態を破るためだけの目的で行い ($\sim 10\text{K}$) 室温まで戻すことはしないで低温を保持したまま各磁場での測定を行った。最初の外部磁場ゼロでの Q-E カーブの測定において加速電界 = 16 MV/m 付近から X 線の発生が見られ、クエンチが繰返される状態になったが加速電界は増加を続け (エージング) 25 MV/m まで達することが出来た。以後の外部磁場を変えての測定においては、低温に保持し続けたこと等により X 線の発生は無くなり最大加速電界まで (~ 25 mV/m) クエンチは起きなかった (エージング効果の保持)。外部磁場が存在する時のクエンチで空洞の性能に変化が現れる可能性があるが (磁束の新たな捕捉又は離脱で)、今回の弱磁場での測定ではその変化は見られなかった (~ 25 MV/m でのクエンチ以後)。

外部磁場 (コイル磁場) がゼロでの残留磁場 (軸方向) の評価は、極性反転 ($H_{ext} = \pm 35$ mOe) での表面抵抗の差 ($\Delta R_s = R_s(-35\text{mOe}) - R_s(35\text{mOe}) = \sim 0.5$ n Ω) 及び R_{res} の磁場依存性 (図-2) の定数項と $H_{ext} = 0$ での R_{res} (図-1 のフィッティング結果) との差 ($\delta R_{res} = 4.48 - 3.29 = \sim 1.2$ n Ω) から 1 - 3 mOe と見積られる (図-2 での R_{res} の傾き 0.433 n Ω /mOe の値を用いて)。横方向 (軸と直角方向) の残留磁場に関しては今回の実験からは何も言えず又クライオ内に持ち込んだ空洞の支持材等からの磁場の評価は難しいが、 R_{res} の定数項が全て磁場に依るとするとそれは ~ 7.6 mOe の一様な磁場に相等する。

測定値の誤差は主に入射/反射パワーの測定精度で決定さる。これはパワーメータの精度と言うよりはパワーの電送系に挿入されているサーキュレータのアイソレーションが周波数で変化する等が大きく影響する。測定に際しては、電送系の較正は使用する周波数附近で行い、又 Q 値が大きく変化する温度依存性を測定する際には ($T = 4.2\text{K}$ から 1.6K で二桁大きくなる) 各温度でカップラーの結合度がマッチしている ($\beta \sim 1$) 附近に調整し、反射波測定誤差が Q 値や加速電界に与える影響を小さくなるよう配慮した。加速電界等の測定精度は $\pm 5\%$ 程度と見積っている。

3. 議論

超伝導への転位時の磁束の捕捉による、残留抵抗の説明が H. Padamsee et.al. [4] により与えられてお

り、この効果に依る表面抵抗 (R_{mag}) は、

$$R_{mag} = H_{ext}/H_c2 \times R_n$$

で与えられ、0.54 n Ω /mOe と見積っている; 但し、 R_n (正常状態での表面抵抗) の 1.3GHz への換算で $\omega^{2/3}$ の依存性を仮定して。又、P. Kneisel 等[5] は 1.5 GHz で 0.25 n Ω /mOe の実験結果を得ている。今回の我々の結果はこれらの値と矛盾はしない様である。もし Padamsee の説明が正しいなら、ニオブ材の性質 (RRR , H_c2 , 等) に依存する。 $RRR = 100$ の空洞も (今回の K-14 では、 $RRR = 300$) 我々は持っているのと同様の実験を行い上記残留抵抗発生のメカニズムの理解の一助にしたいと考えている。更に、強磁場附近での超伝導空洞の適用の観点も含めて、磁界 10 Oe (磁束密度 = 10 Gauss) 程度での影響、特に超伝導に転位した後にこの様な磁界を加えた時の影響を調べることを計画している。

謝辞

二次粒子 (π , μ , 等) の加速を計画中の久野氏 (KEK) のグループが強磁場近くでの超伝導空洞の応用に興味を示されている。今回の実験に際して、同様の興味を持つ澤田氏、福井氏、横井氏及び下村氏 (KEK) らの協力を得ることが出来た、感謝致します。表面処理を誠意を持って行って下さった、野村鍍金鹿沼工場研究室の皆様にも感謝致します。

参考文献

- [1]: K. Saito, "Superiority of electropolishing ..." 8th SRF Workshop, Legnaro, Italy, 1997.
第 1 回超伝導リニアック研究会のプロシーディング、KEK, Japan, May-28~29, 1998.
同じく、本研究会での発表。
- [2]: K-14 及び K-9 の空洞の表面処理、性能等については、M. Ono et.al., "Achievement of 40 MV/m ..." , 8th SRF Workshop, Legnaro, Italy, 1997. 及び K-14 の表面抵抗の解析については、上記第 1 回超伝導リニアック研究会のプロシーディングを参照 ("Surface Resistance of Niobium Cavity"; M. Ono)。
- [3]: Abrikosov et.al., Soviet Physics JETP; p 182, Vol. 35(8), 1959.
- [4]: H. Padamsee et.al., "Frontiers of Accelerator Technology", Proc. of the Joint Us-CERN-Japan Int. School on Particle Acc. Maui, Hawaii, USA. 1994.
- [5]: P. Kneisel (Jefferson Lab. USA) Private Communication.