

高電界超伝導加速空洞の横組立法の研究

齋藤 健治¹

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・第一研究系

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

最近、KEK の高電界超伝導空洞の開発では、ニオブ超伝導材料の下部臨界磁場 ($H_{c1}=1800\text{Gauss}$) から予想される理論的限界値 40MV/m の加速電界を達成できるようになり、高電界超伝導加速空洞の製作法の研究は一段落した。次の研究目標は、この高電界を加速器の中で実現することである。そのためには、空洞をペアリングしてクライオモジュールに組込む作業（横組立）によって、性能劣化を来してはならない。本論文では、トリスタン超伝導空洞に見られた横組立での性能劣化の原因究明をベースとしながら、性能劣化を来さないためにはどうすべきか、そのシナリオを明らかにする。

1. はじめに

昨年の本研究会報告では、TRISTAN 超伝導空洞の横組立で見られた性能劣化 (Q 値の低下と分散化、最大加速電界の低下) のシナリオを示した^[1]。2点 multipacting が主原因である。横組立作業工程では純窒素ガスを使って空洞の真空を破るので、縦測定 (空洞精密性能測定) の RF-processing で活性化したニオブ表面を汚染 (あるいはニオブ窒素化合物の生成) して二次電子放出係数を増加させる。こうして、縦測定では RF-processing で容易に克服された 2点 multipacting が横測定では深刻化して、その 1st order で加速電界が制限された。一方、1点 multipacting は過去の研究から対策が施されている (球形形状の採用) ので横測定でも深刻な制限とはならなかった。

今回の報告では、これまで蓄積した数多くのデータから窒素ガス導入がどんな性能劣化を来すか、その症状を報告する。この種の実験では、後で述べるように窒素ガス導入の時、メッシュの大きさが分子サイズのフィルターを使用しているとは言え、ガスと同時にゴミを入れてしまい単純なフィールドエミッションに至らしめることが付きまとう。それは、作業者の個人誤差となる。この報告では、その可能性を十分考慮しつつ、そうした偶発的要因を選別して性能劣化の背後にある物理メカニズムを追求する立場を採る。

窒素ガス曝気のパフォーマンス劣化の症例を報告した後、窒素曝気とベーキングとの関係 (前回報告よりデータが蓄積された)、有効なベーキング温度、また、純窒素の代わりにアルゴンガスや空気に代えた場合の結果を報告し、最後、窒素曝気による空洞性能劣化のメカニズムを議論する。

2. 真空排気システム

リファレンス性能を測定した (空洞は真空封じ切りで低温測定されている) 後、空洞を図 1 に示す真空排気スタンドに取り付けてガスを入れた。この実験では、空洞内にゴミを導入することなくガスを入れる技術が問われる。この真空排気システムは注意深いメンテナンスが行われている。システムを 1 気圧に戻す時には、必ず、CE (液体窒素貯槽) からの純窒素ガスを分子サイズメッシュフィルターを通して導入し、パージガスの純度、ゴミの汚染に注意している。

空洞にガス入れる時、ゴミを導入することがないと確認されているガス流量 1000cc/min (フローメーターで確認) で導入している。空洞の真空接続では、まずシステムだけを真空排気して $5 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 以下 (空洞内の縦測定後の真空度) になってから空洞バルブ (V6) を開く。その後ターボ分子ポンプのスイッチを切り、羽が惰性で回転している段階でガスの導入を始め、ガスが空洞側に徐々に入るように注意している。

3. 高電界超伝導空洞の窒素曝気による性能劣化の症例

3.1 窒素曝気後ベーキングを施さない場合

図 2 は、一度リファレンスデータを取った後、窒素ガスを空洞内に入れて、1 昼夜窒素にさらした後、

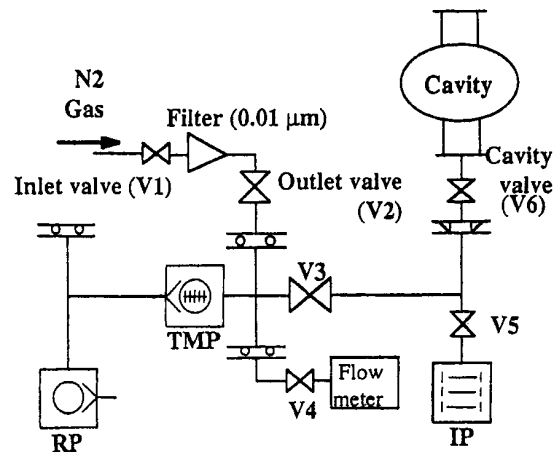


図 1：真空排気システム

¹ E-mail: ksaito@post.kek.jp

再度性能測定をした結果である。この試験では、真空排気でベークを省いた。K-7 と名付けた 1300MHz のニオブ単セル超伝導空洞を使って、再現性を確認するために同じ試験を 3 回繰り返した。最初のシリーズでは、加速電界 18MV/m から field emission 的な Q 値の低下が見られた (●)。18MV/m は、2-point の 1st order multipacting のレベルに対応する。2 回目、3 回目のシリーズでは劣化が甚だしく、加速電界 8 MV/m あたりから著しい Q 値の低下が起こった (■、▲)。この 8 MV/m は 1-point の 1st order の multipacting に対応する。3 回目のシリーズでは、余りにも性能劣化がひどいので、窒素を導入する時にゴミを入れたのではないかと疑い、空洞を分解して純水高圧洗浄 (HPR) を施して再度性能測定を試みた (X)。その結果、性能はほぼリファレンスのものに回復した。

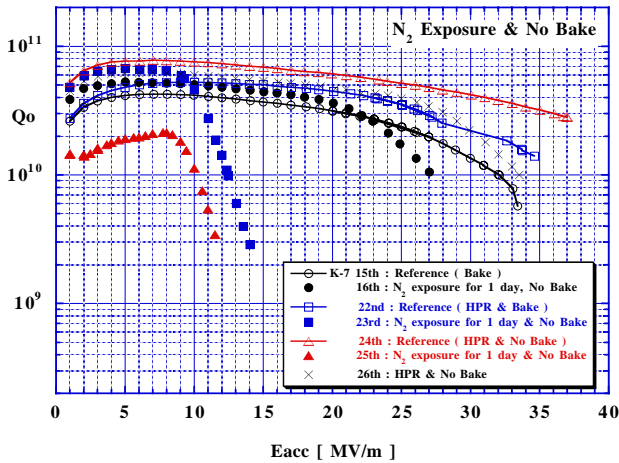


図 2 : 窒素ガスに曝した後、真空排気でベークを省いた場合

2) K-8 空洞の例

別の空洞で同様の性能劣化を調べる事、また、窒素に曝す時間効果を調べるために、K-8 空洞を使って窒素に 3 日間曝し、同様の試験を行った。結果を図 3 に示す。この時も真空排気ではベークを省いている。この試験では、窒素に曝すことで multipacting のレベルが誘発される顕著な例が得られた (K-8 22nd の結果)。最初、8MV/m より Q 値の著しい低下が始まる one-point の 1st order のレベル (●) が現れた。これは RF processing により 18MV/m から Q 値の低下が始まる two-point 1st order のレベル (▲) に移った。さらに、RF processing で向上し、最終的には加速電界 27MV/m で制限された (■)。この性能劣化が、ゴミのような単純なものによるものかどうかを調べるために、一旦常温に戻してベーク (130°C で 3 日間) を施して再測定した。このベークによって著しく性能が回復した (▼)。このような低い温度でのベークで性能が回復することを考えると先の性能劣化は、ゴミのような単純な要因ではないと思われる。

3) ベーキングによる性能回復の再現性結果

ベークによる性能回復に大きな期待が生まれた。ベーク効果の再現性を見るために、引き続き K-8 空

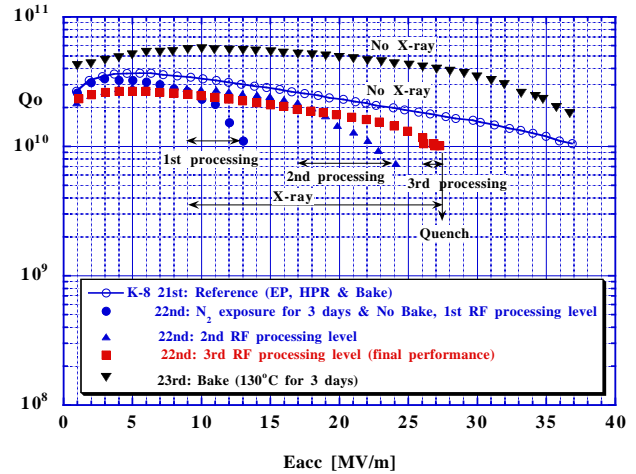


図 3 : 窒素曝気による multipacting の誘発とベークによる性能劣化の回復例

洞を使って試験した。結果を図 4 に示す。窒素に 1 週間曝気して性能劣化を確認した (▲) 後ベーク (130°C 3 日間) を施し、性能変化を調べた (△)。図 4 には、前回の結果を合わせて示している。今回の試験では、ベークで性能回復せず、むしろ Q 値が低下した。窒素曝気による性能劣化要因は複数あり、ベークで回復すると言えない。

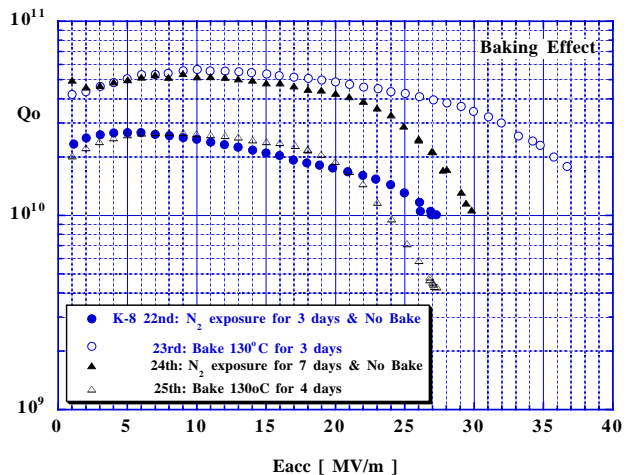


図 4 : ベークで性能回復しない例

4) K-11 空洞の結果

窒素ガス曝気による性能劣化を調べる上で窒素の曝気時間と性能劣化度の関係調べておく必要がある。K-11 空洞を使ってこれまでと同様の試験を行った。結果を図 5 に示す。この試験では、電解研磨で高電界性を得る上で、ベークが非常に重要な役割をしている (昨年報告[2]) ことを再確認する試験を最初に行った (K-11 38th と 39th)。39th の性能 (○) をリファレンスとして、窒素曝気を 1 日行い、ベーキングを行いながら真空排気 (これまでとは異なることに注意) して、低温測定を行い性能変化を調べた (●)。この方法では空洞性能劣化が観測されなかった。次に 1 日間窒素に曝気 (トータルで 2 日の窒素曝気) し、今度はベークを施さずに真空排気して測定した (▲)。このプロセスでも性能劣化が観

測されなかった。引き続きこれと同じ手順を2回繰り返し性能測定した(■、▼)。この最後の性能測定(窒素曝気トータル4日)で著しい性能劣化を観測した。その後、バーク(125°C 2日間)を試みたが、性能回復に寄与しなかった(□)。更に、空洞を分解して HPR を行ったが、性能劣化の回復には至らず(△)、最終的に電解研磨で 30μm 研磨した後、HPR、真空排気でバークを併用した処理により性能回復した(46th)。

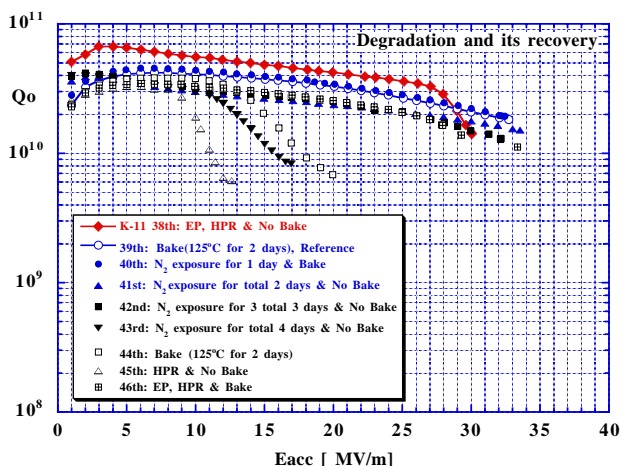


図5：窒素曝気時間と性能劣化度

3.2 窒素曝気後ベーキングを施した場合

既に上の試験でも行ったが、窒素曝気後の真空排気の時にバークを施すことが、その性能劣化にどう影響するか調べる必要がある。これまで使った3個の空洞で試験した。結果を図6に示す。最大4日間窒素に曝したが、顕著な性能劣化が観測されなかった。4日以上では、ここではデータを示さないが、性能劣化が観察される場合が多い。

3.3 有効ベーキング温度

4日間の窒素曝気に限られているとは言え、窒素に曝した後のバーク効果は著しい。そのメカニズムを検討する上で、有効ベーキング温度を把握する必要がある。その試験結果を図7に示す。K-7 空洞を使った結果である。リファレンス性能(○)を測定し、引き続き窒素曝気1日、70°Cのバークを施し性能測定したが性能劣化は観察されなかった(●)。さらに1日間の窒素曝気を追加し、60°Cでバークして性能測定したところ、性能劣化(Q-slope)が観察された(■)。更に低い温度でのバークの影響を見るために、1日間の窒素曝気、50°Cのバークを施し性能測定した。性能劣化は進展しなかった(▲)。次に1日間の窒素曝気を施し、劣化が起こらなかった70°Cで再度ベーキングして性能変化を調べたが変わらなかった(34th)。さらに120°Cバークを試みたが、性能に変化が見られなかった(+)。空洞を分解してHPRすることで性能が回復した(▽)。有効ベーキング温度が70°C以上であることが見当付けら

れたのでその再現性をみるために、1日間窒素曝気し55°Cバークを行い性能測定した。性能劣化の再現性が認められた(▼)。

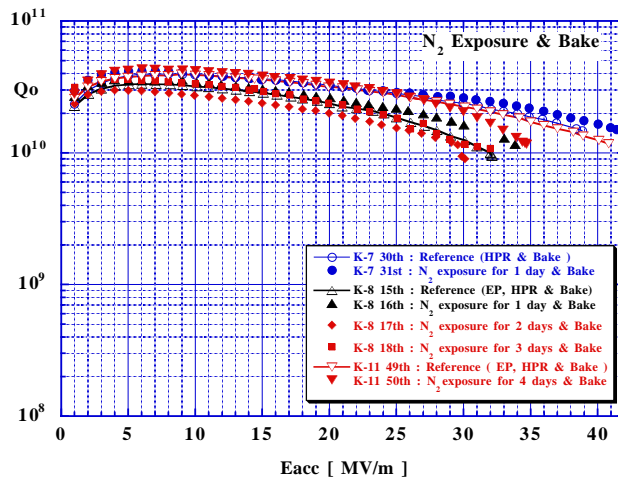


図6：窒素曝気後の真空排気でバークを施した場合の性能

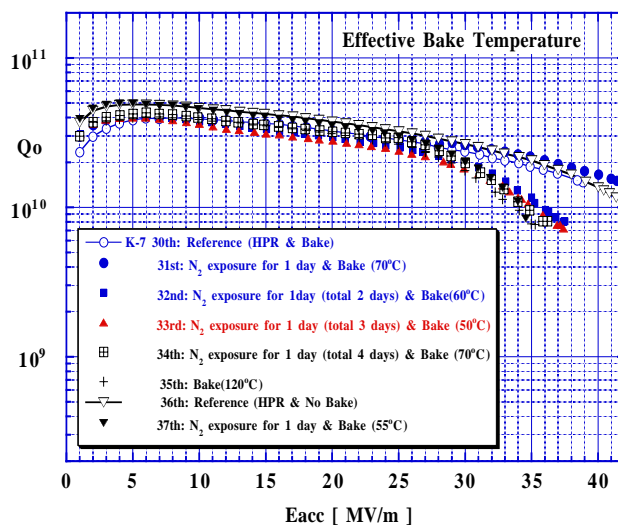


図7：有効バーク温度の調査試験結果

4. アルゴンガス曝気及び、空気曝気

4.1 アルゴン曝気

横組立作業では空洞内がガスに曝されている期間が1週間程度継続する。窒素ガスでは性能劣化は不可避である。そこで、窒素に代えてアルゴンガス(99.9999%)による曝気を試みた。結果を図8に示す。上記の有効バーク温度調査試験(36th、37th)の後空洞を分解してHPRを施し、リファレンス性能を測定した(X)。続いて、アルゴンガスを導入して10日間封じ切り、バークを行うことなく真空排気して測定した(◆)。40MV/mの高電界性に於いて、全く性能劣化が観測されなかった。

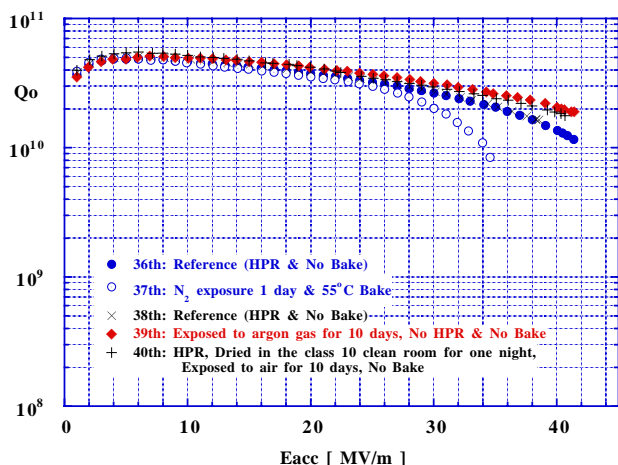


図8：アルゴン曝気、空気曝気の結果

4.2 空気曝気

我々は HPR の強力なクリーニング技術を有している。縦測定後の空洞分解時に発生するゴミ汚染の問題解決には、空洞分解後 HPR しクリーンルームで乾燥してから横組立作業に移る必要がある。しかし、問題はこのクリーンルームの空気乾燥から空洞の真空排気までに横組立作業工程上 1 週間程度の日数が不可避なことである。その間に空洞内表面が酸化されることで性能劣化を来す恐れがある。その工程による性能劣化を調査するために、上記のアルゴンガス曝気試験の後、空洞を分解して HPR し、一晚クラス 10 のクリーンルーム中で空気乾燥し、翌日空洞を組立て（縦測定用のカップラーの取り付け）、空気を 10 間空洞に封じたまま放置（バルブにより空洞内部は閉じられている）した後、ベーキングを施さないで真空排気（横組立ではベーキングが厄介である）して性能測定を行った。図 8 に示されるようにこのプロセスでも 40MV/m の高電界性に全くの性能劣化を来たさないことが分かった。

5. 高電界超伝導空洞の横組立のシナリオ

以上の実験的事実から、加速電界 40MV/m の高電界超伝導空洞の横組立では、縦測定の後真空を破る際、アルゴンガスを使うべきである。空洞分解時にインジウムシールの破片等ゴミを持ち込まないような作業改善（例えば、アルミワイヤーシールの採用^[3]）を行うなら、空洞分解後 HPR する必要はなく、直ちにペアリング作業に移れる。その作業改善が望めないなら HPR し、クリーンルーム乾燥してペリング作業に移ればよい。特に、性能信頼性確保の観点から空洞を分解した後、HPR を施すことを前提にするなら、縦測定の後空気で真空を破ることも可能である（本論文では強調していないが）。この方法は、原研で製作した 600MHz 横クライオモジュール（超伝導空洞のパルス運転実証試験機）の横組立で提案し、採用されている。

6. 議論

窒素曝気による性能劣化のメカニズムを議論する。性能劣化の深刻度の大きい順から現象を分類すると、1) Field emission, 2) One point multipacting, 3) Two point multipacting, 4) Q-slope の 4 つになる。1)、2) の原因は真空を破る時のゴミの導入と考えられる。これは、HPR で性能が回復することがその根拠である。これらは、作業者の個性に大きく依存する。今回の試験では十分経験を積んだ者が行っているがそれでもこの現象が現れている。量産においては個人誤差への対応が問題となる。このとはアルゴンガスを使う場合でも不可避である。横組立の信頼性確保のためには、空洞の HPR を前提にした方が良いかも知れない。

3)、4) は性能劣化の回復がベーキングと関係することからゴミとは考え難い。縦測定中 RF processing されて活性化したニオブ表面に窒素ガスを導入するとまず、ファンデルワールス力による窒素ガスの物理吸着が起こる。そして、時間経過と共に量子力学的揺らぎ効果により局部的に化学吸着に変わるものが生まれる。こうしてニオブにより近付いた窒素ガス分子は表面のニオブ酸化物の触媒作用によって結合ボンドが切れ、活性窒素原子になる。この活性窒素原子の一部は格子間不純物としてニオブ中に侵入する。また、一部はニオブと結合してニオブ窒化物を形成し、二次電子放出係数を増加させるであろう。ニオブ中の窒素の拡散速度は 130°C のバーク温度では $D=1.2 \times 10^{-22} \text{cm}^2/\text{sec}$ である。バーク時間 t [sec]でのニオブ中の拡散距離は $[D \cdot t]^{1/2}$ で評価できる。130°C、3 日のベーキングを仮定すると窒素の拡散距離は殆ど 0 であり、動かないと推定される。ニオブ窒化物が出来た場合でもバークでニオブバルク中へ一様に拡散霧消させることができない。こうして、長時間窒素曝気での性能劣化ではバークによる性能回復が期待薄となる。

本報告で明らかにした最低有効ベーキング温度 70°C は、30 meV に相当する。これは、物理吸着エネルギーの領域である。ここで示したバークでは表面に物理吸着した窒素分子を自由分子に変えることで化学吸着機構に進む分子の数を減らす結果、性能劣化を緩和すると考えられる。

謝辞

ここに示した多くの実験結果は、阿部和広君（東北大学院生）、北村寛樹氏（三菱電機・株）、そして筆者によるものである。両氏に深く感謝致します。

参考文献

- [1] K.Abe et al., Proc. of the 25th LINAC Meeting, pp.349-351.
- [2] K.Saito and P. Kneisel, Proc. of the 25th LINAC Meeting, pp.83-85.
- [3] H.Aho et al., in this meeting