

ニオブ超伝導空洞と材料・表面科学

—50 MV/m 高電界超伝導空洞開発, この 20 年の闘い—

齋藤 健治*

Niobium Superconducting Cavities and Materials/Surface Sciences —Development of 50 MV/m High Gradient Superconducting Cavity, Battles in those two decades—

Kenji SAITO*

Abstract

Recently accelerating gradient with superconducting RF cavity has been very much upgraded up to 50 MV/m. It took more than twenty years. In this paper, the battles on various materials/surface scientific issues in the those two decades are historically reviewed on the long term cavity R&D.

1. はじめに

超伝導空洞における高電界性の向上は, 1990 年に TESLA の開発が始まって以来, 著しく進歩した. 最近, KEK と Cornell 大学の共同研究で 52 MV/m の加速電界を達成し, ILC への実用化に大きな弾みがついている. 筆者が 1983 年, KEK 小島融三先生の下で超伝導空洞の開発を始めた頃は 5 MV/m 前後であり, この 20 年で一桁向上したことになる.

超伝導空洞の現状製作技術では, 3 mm 程度のニオブ板からプレスでハーフセルを成形し, 正寸加工 (トリム) し, 電子ビーム溶接して一体化する. その後, 空洞内面を表面処理して仕上げる. 空洞性能を確保するためには, 信頼あるニオブ材を使うこと, 空洞製作過程で発生する表面欠陥を除去して, 最終的に滑らかで清浄な表面を製作することに尽きる. これほど単純な事に, 開拓期から数えれば 40 年, 私自身も 22 年費やしている. ここでは, 50 MV/m 達成までの多くの苦難の歴史を超伝導空洞の材料・表面処理技術/科学の側面から解説する. 内容は私の経験に基づいており, 独断と偏見に満ちていることを容赦願いたい.

2. ニオブ材料の進歩

'80-'90 年代にストレージリングでの超伝導空洞の

大規模応用が実現した. その建設期に高純度ニオブ材の工業生産技術が大きく進歩した. 当時, ニオブ空洞内表面の材料欠陥での発熱が空洞性能を制限する大きな要因 (熱的不安定性) であった. この現象を抑えるには, ニオブ材の極低温の熱伝導度の向上が重要である¹⁾. ニオブ材の純度を向上すれば, 熱伝導度は改善されるので, 高純度ニオブ材の開発が重要課題となった.

極低温での熱伝導度は, 残留抵抗比 (Residual resistance ratio: RRR) に比例する. RRR は測定が容易である. 空洞開発現場では, 測定法の煩雑な熱伝導度に代えて, RRR を使う. RRR は (1) 式で定義される.

$$RRR \equiv \frac{R(300\text{ K})}{R(4.2\text{ K})} \approx \frac{R(300\text{ K})}{R(9.5\text{ K})} \quad (1)$$

通常, 常温の抵抗値を 4.2 K での抵抗値で割った値で定義するが, ニオブは 4.2 K では超伝導状態で DC 抵抗がゼロなので, 我々は超伝導臨界温度直上 9.5 K の抵抗値の比で定義している.

高純度ニオブ材の工業化は, 日本では KEK と東京電解株との共同研究で行われ, リアクターグレード (RRR~20-30) のニオブ純度をトリスタン建設末期 (1989年) には RRR=200 まで向上した²⁾. 図 1 は東

* 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 加速器研究施設
(E-mail: kenji.saito@kek.jp)

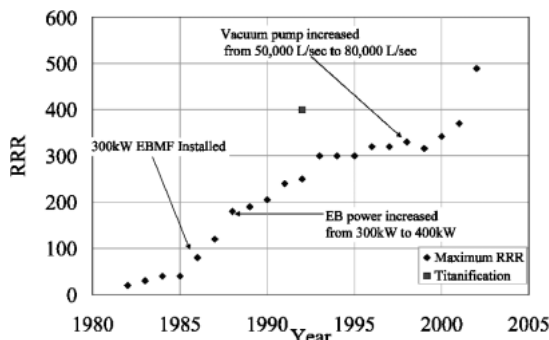


図1 日本でのニオブインゴットの高純度化の歩み（東京電解提供）

京電解のニオブインゴットの RRR の向上の歴史を示す。

ニオブインゴットは、不純ニオブ粉末を固め、電子ビームで真空溶解して製造する。真空溶解でニオブより低融点の金属不純物は蒸発する。最後に残る金属不純物は、タンタル、タングステンなどの高融点金属である。その他、格子間不純物として、水素、炭素、窒素、酸素が残る。ニオブの純度は現状で 99.9% 以上である。不純物と RRR の関係は、化学定量分析によって与えられる。(2)式は、東京電解の梅沢裕明氏が、東京電解の 100 本以上のインゴットの RRR 測定値とそのガス分析値との相関から求めた式である。

$$\frac{1}{RRR} = \sum_i \frac{C_i}{W_i} = \frac{C(H)}{16300} + \frac{C(C)}{8900} + \frac{C(N)}{2300} + \frac{C(O)}{5800} + \dots + \frac{C(Ta)}{605000} \quad (2)$$

(2)式で C_i は、ppm 単位での各不純物元素の含有重量比である。タンタルなどの高融点不純物は、初期のニオブ粉末で決まる。粉末ニオブを輸入に頼る東京電解では、電子ビーム溶解してもっぱら格子間不純物濃度を減らしている。真空溶解法による高純度化に於いて、重要なパラメータは、ニオブが溶けている表面積（不純元素の蒸発のし易さ）、溶解の温度、溶解炉内真空度、溶解回数である。生産設備をいじらないで容易にできることは、ニオブインゴットを繰り返し溶解する（3~4回）ことであり、我々はこのインゴットの多重溶解法でトリスタンでは RRR~200 に向上した。東京電解ではその後、溶解炉の真空度を向上させ、現在では、RRR~500 のインゴットの製造が可能である。

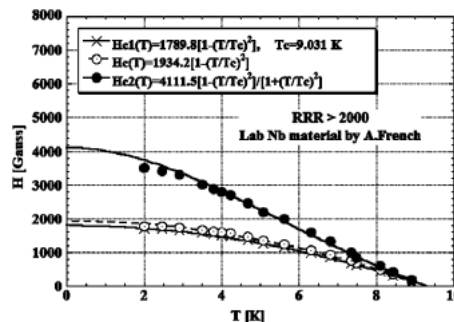


図2 実験室レベル（RRR > 2000）の超高純度ニオブ材の超伝導特性

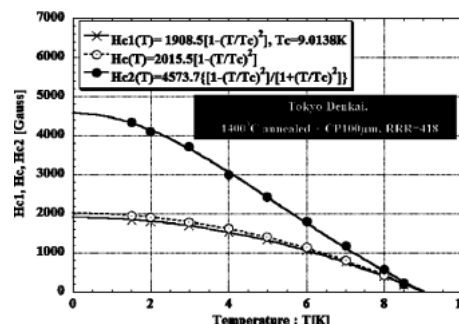


図3 東京電解 RRR = 418 の工業生産レベルのニオブ材の超伝導特性

最近、欧米の研究所では、ニオブ材メーカーに単結晶ニオブインゴットの製造をプッシュしている³⁾。これは後に詳しく述べるように、空洞の表面処理に化学研磨を採用した場合、ニオブ材の粒界が空洞性能を制限し、多結晶ニオブでは 30 MV/m 以上の高電界が期待できないからである。

超伝導空洞の性能上、工業生産レベルのニオブ材と実験室レベルの超高純度ニオブ材の超伝導特性（ H_c , H_{c1} , H_{c2} ）の相違を調べることは興味ある。図2は、RRR > 2000 の実験室レベルの超高純度ニオブの超伝導特性である⁴⁾。図3は現在、工業生産（東京電解、RRR = 418）されているニオブ材の超伝導特性の測定結果である⁵⁾。超伝導空洞の性能にとって重要な H_c （超伝導熱力学的臨界磁場）は両者でほとんど変わらず、RRR を現状以上に改善しても空洞性能の大きな向上は期待できない。

3. 空洞表面処理技術の進歩

信頼できるニオブ材が手に入るようになると、いよいよ空洞の表面特性が空洞性能に直結するようになる。高純度ニオブ材の使用により材料欠陥確率が下がる。しかし、空洞製作工程、例えばハーフセルのプレ

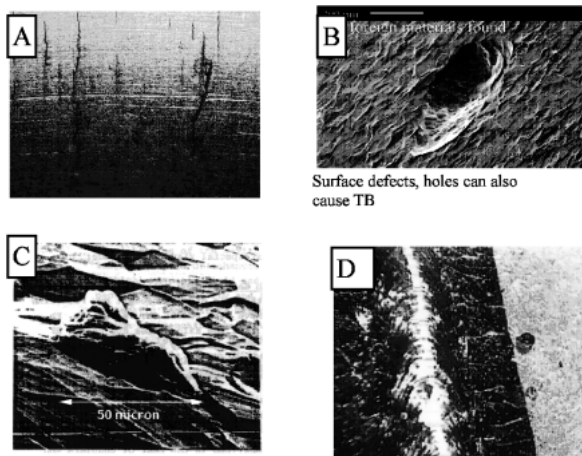


図4 表面欠陥の例; (A)クラック, (B)穴, (C)異材の巻込み, (D)電子ビーム溶接シーム付近のスパッターボール

ス成形, トリム加工, 電子ビーム溶接等の工程で, 図4に例を示すように, クラック, 打痕, スクラッチ, 異材の巻込み, 溶接スパッターボール等溶接欠陥等々, 表面欠陥の発生は避けがたい. 最初にこれらの欠陥を確実に除去する必要がある. また, 特に空洞赤道部の電子溶接シーム部ではRF表面磁場(RF表面電流)が大きく, フィールド局部集中が起き易いので, ステップのない滑らかな面に仕上げることがある. 化学研磨(CP)や電解研磨(EP)は, 表面を滑らかに仕上げ方法として有効であるが, それらの大きな表面欠陥除去にはパワー不足である. 機械研磨は, これらの欠陥を高信頼度で除去することができる. その後, CPあるいはEPで滑らかな表面を形成し, さらにゴミを含まない超純水を使った高圧洗浄(High Pressure Rising: HPR)を使って清浄表面を製作する. 表面処理の考え方として, 要するに機械研磨で大きな表面欠陥の除去, 電子ビーム溶接シームを滑らかにした後, CPやEPで滑らかな表面を形成し, HPRで清浄表面を製作するということである.

3.1 機械研磨

トリスタンではハーフセルを一枚毎, バフ研磨し, 電子ビーム溶接した後, 特殊グラインダーでその溶接シームを機械研磨した. これは, 時間がかかり, コスト高である. トリスタン後, この問題を解決するために我々は, 遠心バレル研磨と呼ばれるユニークな機械研磨法を開発した.

タンブリング・バレル研磨

完成した空洞内に研磨石と水を適量入れて, 空洞を高速回転(100 rpm)すれば, 石と空洞表面の摩擦で機械研磨される. この方法は, 電子ビームシーム部を

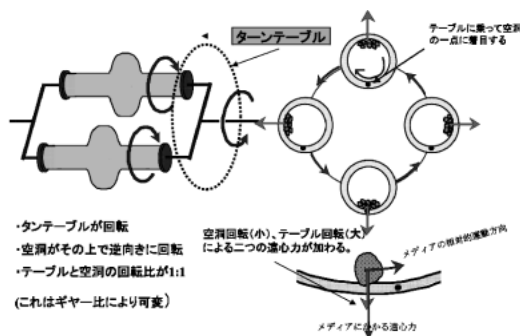


図5 遠心バレル研磨の原理

同時に研磨するのでバフ研磨法より優れる. この研磨法を欧米ではタンブリング, 日本ではバレル研磨と呼んでいる. タンブリングは, DESYがHERA時代にCPの前処理として開発したが, その後捨てた技術である⁶⁾. 一方, KEKはトリスタン後, 独自にこの方法を開発し, EPの前処理として確立した⁷⁾. 今から考えれば, ここにCP/EPで処理した空洞の性能の差が潜んでいる. タンブリングの後CPを行うと, ニオブの粒界がエッチングされ, 粒界ステップが発生し, 空洞に高周波電力を投入した時RF磁場の集中が起こり, 高電界性が制限される. 後に見るように, EPでは粒界エッチングが起きにくいので, この問題は発生しない.

遠心バレル研磨

タンブリング/バレル研磨は簡単な機械研磨法であるが, 研磨速度が遅い. 例えば, 平均30 μm研磨するのに一週間を要する. この問題を解決するために我々は, 野村鍍金棟と共同で遠心バレル研磨を開発した⁸⁾. その原理を図5に示す. 大きな回転テーブルの上でバレル研磨を行う方法である. 空洞半径は10 cm程度と小さいので, バレル研磨だけでは大きな遠心力を発生できない. 一方, 大きな回転テーブルで空洞を回転させれば, テーブルの回転で発生する遠心力が加わり, 研磨速度が大きく向上する. 例えば, バレル研磨で要した一週間がわずか4時間に短縮される. 遠心バレル研磨法は, 空洞のような複雑な中空体の内面研磨の革命的技術と言えよう.

3.2 化学研磨 (CP)

CPは通常, フッ化水素酸(46%), 硝酸(60%), リン酸(85%)の薬品を1:1:1の体積比で混ぜた研磨液を使用する. 硝酸がニオブ酸化膜を作り, それをフッ酸が溶解するプロセスで, CPが進行する. ニオブ酸化膜はフッ酸でしか溶解できない. フッ化水素酸は非常に危険な薬品であるが, ニオブのCPには不

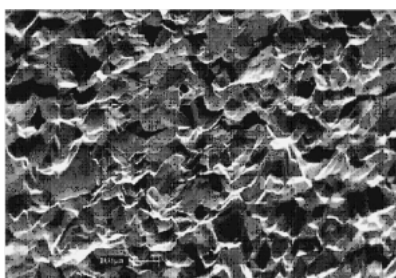


図6 化学研磨したニオブ表面の例

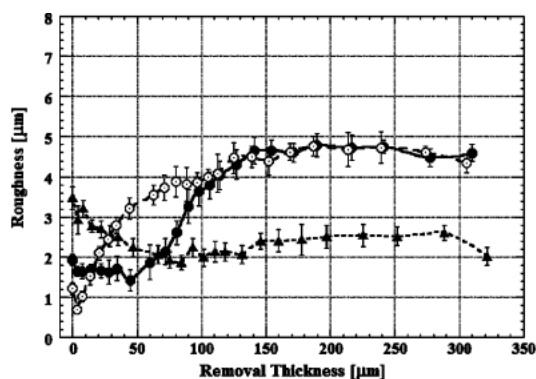


図7 化学研磨での研磨量と表面粗さの関係

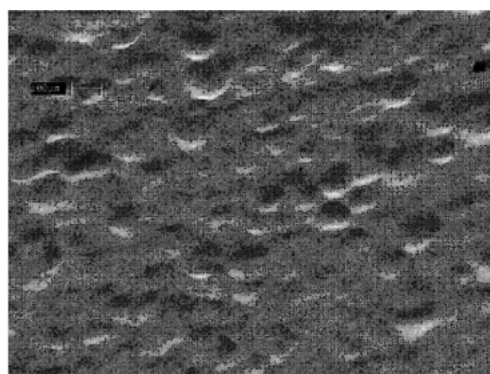


図8 電解研磨したニオブ表面の例

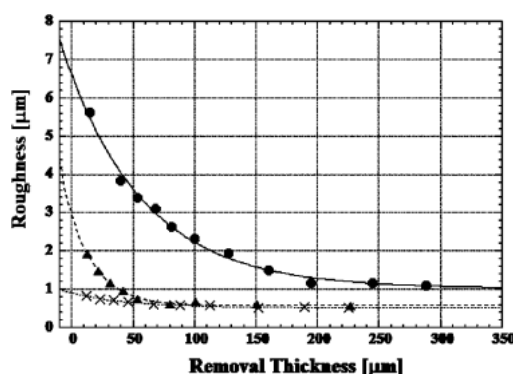


図9 電解研磨での研磨量と表面粗さの関係

可欠である。リン酸は反応に寄与しないが、その量を調整することで研磨速度をコントロールできる。CPでは、研磨液を空洞内に注入するだけで内面を研磨できる。この方法は簡単である。また、研磨速度は常温で $10 \mu\text{m}/\text{min}$ と速い。欧米では、これらの理由で、CPを主流として来た。図6にニオブのCP面の典型例を示す。研磨面は粒界での凹凸が顕著である。研磨液が表面に残ると化学反応が止められず (run-away reaction), 研磨が終わり水洗工程に移る際、早く液抜きしないと不正常的な条件での研磨が続く問題が起きる。

図7にニオブのCP特性を示す。この試験ではニオブサンプルをバレル研磨により三種類の表面粗さに調整した後、研磨しながらその表面粗さを測定した。CPでは、多量研磨した研磨面は、初期粗さが滑らかな場合でも、粒界エッチングにより返って表面が荒れることが分かる。研磨面は、ニオブ材の粒界に依存するので、初期研磨粗さを揃えても最終研磨粗さをコントロールできない。その意味で、品質管理が容易でない。

3.3 電解研磨 (EP)

EPは研磨液として、硫酸 (93%) とフッ化水素酸 (46%) を体積比 10 : 1 で混合した危険な薬品を使用する。ニオブを陽極にして、電気化学反応でニオブ表

面に酸化膜を形成し、それをフッ酸が溶解するプロセスで研磨が進行する。研磨メカニズムは基本的にCPと同じである。CPでは酸化作用に硝酸を、EPでは電気化学反応を使う点が異なる。電圧のオン・オフで反応をコントロールできる。Run-away reactionの問題はない。水素病について後でふれるが、その防止のために表面酸化膜の形成が重要である。EPでは、スイッチ・オフすると酸化作用が発生しないのでこの時水素が侵入することに注意しなければならない。EPはCPに比べて複雑である。研磨速度は $0.4 \mu\text{m}/\text{min}$ 程度で、CPに比べて遅い。ニオブのEP面の典型例を図8に示す。CPほど粒界エッチングが発生しないのでRF磁場の集中が起こりにくく、高電界性に有利である。

図9にEPの研磨特性を示す。CPの場合と同様にバレル研磨で初期粗さを調整した後、EPを追加しながら表面研磨粗さを測定した。研磨粗さは、研磨量と共に指数関数的に滑らかになる。到達研磨粗さは初期表面粗さと研磨量で決まり、粒界にほとんど依存しない。機械研磨で初期表面粗さを揃えれば、EPの研磨量のみで表面粗さをコントロールできるので、品質管

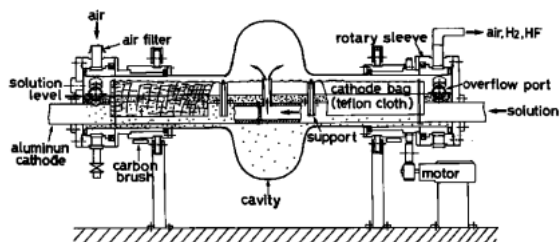


図10 横型回転連続研磨の原理

理が容易である。

横型回転連続電解研磨法

EP は CP に比べて滑らかな研磨面を得る。したがって、この技術は超伝導空洞の開拓当初から注目されていた。ドイツ・カールスルーエ原子力研究所とジーマンス社の共同研究で1970年代に多くの開発研究が行われている⁹⁾。しかし、CPで当時の要求空洞性能を満たすことが分かったので世界の主流は、処理の簡単なCPに移った。その後、EP技術は唯一KEKで適用・改善された。

1980年代の始め、KEKはトリスタンの超伝導空洞に向け、高性能で量産に適したEP技術の開発に迫られていた。当時、オープン容器に研磨液を満たし、空洞を縦姿勢でドブ漬けしてEPしていた。この方法では電解反応で発生する水素ガスが下部から上部へ行くにつれて増え、特に多連空洞では上部セルの内表面に水素ガスの流れ跡が付いたり、後でのべる水素病により空洞性能が制限された。また、フッ化水素が容器の開口部から蒸発し、作業環境に問題があった。これらの問題を解決するために、我々は野村鍍金株と共同で横型回転連続研磨法を開発した¹⁰⁾。その原理を図10に示す。研磨液を空洞内に設置した陰極（純アルミパイプ）から供給し、空洞半分まで満たし、オーバーフローさせる。このオーバーフローした研磨液が、両端の開口部からリザーバタンク戻り、冷却され再び空洞に供給される。危険な研磨液は閉じ込められ、作業環境は大幅に改善される。電解反応で発生する水素ガスの沫が、拡散して空洞内面に当たらないように陰極の回りはテフロン布でできたカソードバッグで囲われている。空洞の回転と液シールの相反する機能を持たせるために、空洞両端に回転スリーブを取り付けてある。横型回転連続研磨技術の鍵は、このスリーブにある。EP中、空洞は連続的にゆっくり回転し、連続通電される。発生する水素ガスはスリーブ上部の開口部から容易に排気され、水素病は起きにくい。この方法では多連空洞のどのセルも一様に研磨される。ILCでは、この技術が表面処理のベースラインとして

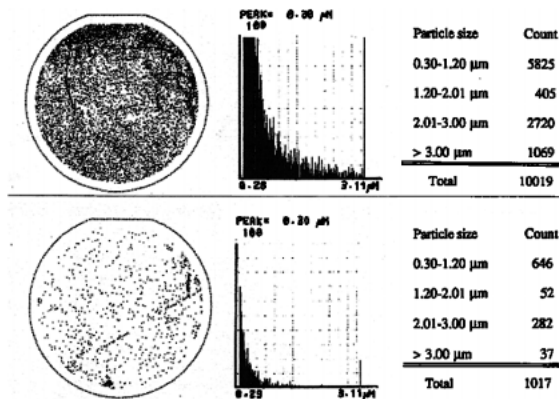


図11 超純水高圧洗浄によるゴミの除去効果

採用された。

3.4 高圧洗浄 (HPR)

表面欠陥のない滑らかな研磨面を製作できれば、後は空洞内表面を清浄に仕上げることが重要となる。空洞内表面に残留するゴミが電界放出電子の種になることがよく分かっている。図11は、半割モデル空洞内にシリコンウエファーを設置して、ゴミのない超純水を使って高圧洗浄してゴミの除去効果を調べた結果である。ゴミの計測には半導体技術で使われているレーザースキャナー装置を使用した。図11上は、ニオブの電解研磨液にウエファーを漬けた後、トリスタンと同じ方法で洗浄した場合であり、下図はその洗浄にHPRを加えた場合である。ゴミは0.3 μm以上の大きさのみカウントされている。HPRすれば、トリスタンの場合の1/10に減少することが分かる。HPRは、CERNでD. Bloess博士によって発明され¹¹⁾、1995年にKEKとJLABで表面処理工程に組み込み、実用化した^{12,13)}。後で見るように、この技術の導入により、フィールドエミッションの問題が解決され、それまでの30 MV/mの加速電界の壁が破られ、40 MV/mに到達することができた。

4. 空洞性能と材料・表面物理

文献14)には2004年8月ICFAが、国際リニアコライダーに超伝導技術を選択するまでの日本の超伝導空洞開発が紹介されている。参考にされたい。ここでは、空洞性能と表面物理現象に絞った話をする。空洞性能確保に不可欠な技術は1995年ころまでに出揃った。材料と表面処理に信頼性が確立して来ると、これまで熱的不安定性問題やフィールドエミッションの裏に隠れていた表面物理現象が現われた。

4.1 空洞性能測定と表面情報

後の理解を深めるために超伝導空洞の性能測定で得られる情報について説明しておく。詳細は例えば、文献 15) を参照。我々は、超伝導空洞に RF 電力を投入し、空洞の表面抵抗と加速電界を測定する。

空洞に RF 電力を投入した時、入射パワー (P_{in})、反射パワー (P_r)、ピックアップモニターから漏れ出るパワー (P_t) を計り、空洞表面の電力損失 (P_{loss}) が測定できる。定常状態では、エネルギー保存則から P_{loss} は次のように計算される。

$$P_{loss} = P_{in} - P_r - P_t \quad (3)$$

一方、 P_{loss} は、表面抵抗 (R_s) と表面磁場 (H_s) の二乗の面積分から計算できる。

$$P_{loss} = \frac{1}{2} R_s \int_s H_s^2 dS \quad (4)$$

空洞内表面の発熱のみに関係する Q 値 (Q_0 : unloaded Q) は次のように定義される。

$$Q_0 = \frac{\omega U}{P_{loss}} \quad (5)$$

ここで ω は RF の角周波数、 U は空洞内の高周波電力の蓄積エネルギーである。一方、空洞 RF 設計コードによる計算から、 R_s と Q_0 は空洞形状にのみ依存する定数 Γ (形状因子と呼ばれる) を介して次のように関係付けられる。

$$R_s = \frac{\Gamma}{Q_0} \quad (6)$$

Γ の中身は、

$$\Gamma = \frac{\omega \mu \int_v H^2 dV}{\int_s H_s^2 dS} \quad (7)$$

である。RF 磁場の体積積分値と表面磁場積分値の比である。現在の球形状の空洞形状では、 Γ の値は 270 Ω 程度である。以上のことから、 Q_0 が測定出来れば R_s が求められることが分かる。

入射パワーをオフした時、空洞内に蓄積されている RF 電力の減衰時間 ($\tau_{1/2}$) の測定から RF 入力結合器、ピックアップカップラーの影響、空洞表面の熱損失を含めた空洞全体の Q 値 (Q_L : Loaded Q) が測定できる。

$$Q_L = \omega \tau_{1/2} / \ln(2) \quad (8)$$

この Q_L は Q_0 と次式で関係付けられ、 Q_L 、 β^* の測定値から Q_0 が求まる。

$$Q_0 = (1 + \beta^*) Q_L = (1 + \beta_{in} + \beta_t) Q_L \quad (9)$$

$$\beta^* = \frac{1 \pm \sqrt{\frac{P_r}{P_{in}}}}{1 \mp \sqrt{\frac{P_r}{P_{in}}}} \quad (10)$$

$$\beta_{in} = (1 + \beta_t) \beta^* \quad (11)$$

$$\beta_t = \frac{P_t}{P_{loss}} \quad (12)$$

ここで β_{in} 、 β_t はそれぞれ RF 入力結合器、RF ピックアップアンテナの結合度であり、 P_{in} 、 P_r 、 P_t の測定から計算できる。式(10)の符号は、結合度が 1 より大きい場合 (over coupling)、上を使い、1 より小さい場合 (under coupling)、下を使う。

一方、超伝導空洞の表面抵抗は BCS 理論で次のように表される。

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right) \quad (13)$$

A は材料に依存する定数、 T は空洞測定温度、 Δ は超伝導ギャップエネルギーの半分、 k_B はボルツマン定数である。空洞表面抵抗の実際の測定では、図 12 に示すように残留抵抗 (R_{res}) と呼ばれる温度に依存しないものが付け加わる。

$$R_s = R_{BCS} + R_{res} \quad (14)$$

R_{res} は空洞表面の汚染状態、地磁気の影響などを含む。ニオブ超伝導空洞の表面抵抗の値は、1300 MHz、

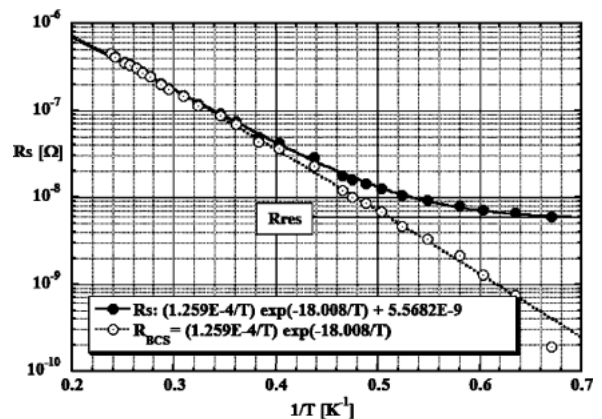


図12 ニオブ超伝導空洞の表面抵抗の温度依存性の例

2 K で 10 nΩ 程度である。超伝導空洞の場合, RF 磁場の侵入は, ロンドンの侵入深さ (λ) であり RF 周波数に拠らない。その値はニオブで約 500 Å である。空洞性能測定では空洞内表面全体のその深さの平均表面抵抗が観測される。

一方, 空洞のビーム軸上の加速電界は, 空洞 RF パラメータ, シャントインピーダンスと R/Q を使って計算できる。シャントインピーダンス (R) は, 空洞内に蓄積された RF 電力の内, ビーム中心上にどのくらい強くエネルギーを集中できるかを示し, 空洞形状の良し悪しを決める重要なパラメータであり, 空洞 RF 設計コードで計算できる。

$$R \equiv \frac{V^2}{P_{\text{loss}}} \propto \frac{V^2}{U} \quad (15)$$

ここで V は加速電圧である。R はその定義に P_{loss} を含み, 空洞材質に依存する。R を Q₀ で割った値 (R/Q と呼ばれる) は, R と同様な意味をもち, 材質に依存せず, 空洞形状にのみ依存する。これは空洞設計で非常に重要なパラメータである。これも空洞 RF 設計コードで計算できる。

$$\left(\frac{R}{Q}\right) \equiv \frac{R}{Q_0} = \frac{V^2/P_{\text{loss}}}{\omega U/P_{\text{loss}}} = \frac{V^2}{\omega U} \quad (16)$$

後で, TESLA 空洞形状に替わる新しい空洞形状に触れるが, その形状ではこの値が TESLA に比べて ~15% 程度大きい。

加速電界 (E_{acc}) は, 空洞の有効加速長を L_{eff} とすれば, 加速電圧 V から計算できる。

$$E_{\text{acc}} = \frac{V}{L_{\text{eff}}} \quad (17)$$

(18), (19) を使えば, E_{acc} は次のように計算出来る。

$$E_{\text{acc}} = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \sqrt{\left(\frac{R}{Q}\right) Q_0 P_{\text{loss}}} = Z \sqrt{Q_0 P_{\text{loss}}} \quad (18)$$

$$= Z \sqrt{Q_t P_t}$$

$$Z \equiv \frac{\sqrt{(R/Q)}}{L_{\text{eff}}} \quad (19)$$

(21) の下の式で, Q_t はピックアップモニターの結合度で, 次のように定義され, 実験で測定される。

$$Q_t \equiv \frac{\omega U}{P_t} = \frac{Q_0 P_{\text{loss}}}{P_t} = \frac{Q_0}{\beta_t} \quad (20)$$

先に述べたように Q₀ は, τ_{1/2} の測定が必要であった。入力結合器はその結合度を調整するために可変で

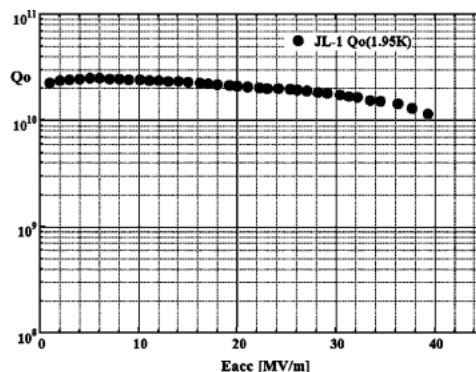


図13 高電界測定での Q₀-E_{acc} カーブの例

あるが, ピックアップモニターは, 固定アンテナを使うために変化しない。そしてその結合度は, 加速電界に依存しない。逆に, Q_t を一度測定しておけば, どの加速電界でも Q₀ が計算できることになる。

$$Q_0 = Q_t \beta_t \quad (21)$$

高電界試験では, 先に Q_t を測定しておき, (18) の下の式を使って, 加速電界を求め, (21) を使って Q₀ を求める。こうして測定された Q₀-E_{acc} カーブの例を図13に示す。

空洞表面上の最大表面電界 (E_p) あるいは表面最大磁場 (H_p) と加速電界 (E_{acc}) の比は, 空洞の形状によってきまり, 空洞 RF 設計コードで計算できる。例えば, TESLA 形状では,

$$\frac{E_p}{E_{\text{acc}}} = 2.0$$

$$\frac{H_p}{E_{\text{acc}}} = 42.6 \text{ Oe}/[\text{MV/m}]$$

である。図13は KEK の 1.3 GHz 単セル空洞の結果であり, この場合 H_p/E_{acc} は 43.8 Oe/[MV/m] である。最大加速電界は 40 MV/m であり, H_p ~ 1750 Oe の RF 磁場で制限されていることが分かる。

4.2 水素病

表面物理現象で最初に触れなければならないのは, CP における水素病である。これは高純度ニオブ材の開発によるものであり, 1990 年に発見された¹⁶⁾。EP では処理中, 水素ガスが発生するので, リアクターグレードのニオブ材でも, ニオブが水素を吸蔵し, Q 値が著しく劣化することは古くから良く知られていた。これを水素病と呼ぶ。ニオブ中の水素は 600°C 以上の温度で真空熱処理すれば容易に脱ガスできる。トリスタンではその処理を施したので, 問題は発生しな

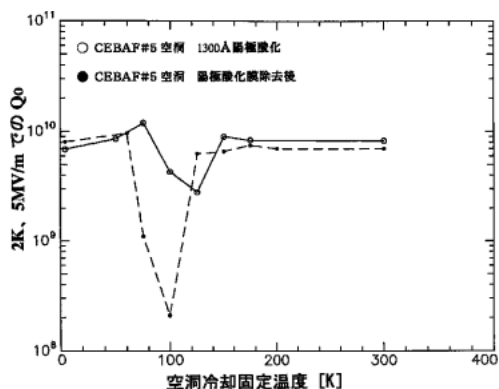


図14 水素病によるQ値の劣化と危険温度領域

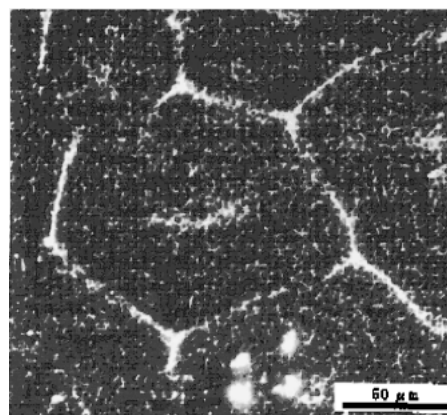


図15 粒界での水素トラッピングの観察

った。'80年代当時はCPでは水素吸蔵が少なく、水素病が起きないと考えられていた。しかし、高純度ニオブ材を使って製作した空洞を化学研磨した場合、冷却が遅いと水素病が起きることが発見された。図14に長時間曝すと水素病が起きる温度領域と水素病によるQ値の劣化を示す¹⁷⁾。DESY-HERAで量産期にこの水素病に遭遇し、問題となった。HERA空洞ではその外部にステンレス製のヘリウムベッセルが溶接され、600°C以上での熱処理が困難であったからである。

この現象は次のようなメカニズムで発生する¹⁸⁾。ニオブに吸蔵された水素は常温では固溶状態にある。低温に冷やされる時、固溶臨界温度(～100 K)で吸蔵水素は固溶状態から結合状態に相転移する。このとき低純度ニオブ材では格子間不純物が多く、とくに吸蔵水素は酸素と結合してニオブとは結合しない。しかし、高純度ニオブ材では酸素が少なく、水素がニオブと直接結合する。こうして形成されたニオブ水素化物は、低級超伝導体であり、高周波との相互作用で大きな表面抵抗を発生し、Q値が劣化する。100 K辺りの冷却を速くすれば (fast cool-down), そのような相転移を食い止められ、水素病が起きない。表面を陽極酸化 (Anodizing) して高純度ニオブ材の表面に酸素を供給すれば、水素はその酸素と結合するので水素病は緩和される。図14の実線はその結果を示している。CPでの液温を10°C以下に下げれば、水素吸蔵は抑制される。CP液のリン酸量は従来の物(フッ酸：硝酸：リン酸=1：1：1)から1：1：2の物に変えた研磨液を使用するようになった。また、水素は600°C以上の温度で真空熱処理すれば簡単に脱ガスできる。一度脱ガスすればその後は、水素病が起きにくい。CPでの水素病はこうした対策により解決された。現実の加速器はfast cool-downではシステムに熱応力を誘発

し、真空リークを起こしかねない。空洞に真空熱処理を施し、水素病を避けるべきである。

4.3 水素病の完全対策

2003年我々は、EPでの水素吸蔵のメカニズムを研究し、水素吸蔵を完全に防ぐ方法を発明した。これは、野村鍍金悌の樋口玉緒氏によってなされた⁸⁾。図15に示すように、金属中への水素の吸蔵は、金属表面の粒界を通して起こることが知られている¹⁹⁾。この写真は、粒界にトラップされた水素を撮影したものである。

しかし、我々の経験では、ニオブ空洞を一度真空熱処理すれば、その後水素病は起きにくい。また、バレル研磨/遠心バレル研磨のようにニオブ表面に傷をつけた場合、著しい水素病が発生する。水素病の背後にニオブ表面の傷と水素との相互作用の問題が潜んでいると考えられる。我々の研究の結果、現象論的に次のことが判明した。

- 1) バレル研磨で水素吸蔵が起きる。バレル研磨で水素を含む溶媒(例えば水)を使うと、バレル研磨中にその溶媒が表面傷とのラジカル反応で分解される。そして、その傷口を通して水素がニオブバルク内に侵入・拡散して行く。この時、酸化プロセスが共存すれば、この水素の吸蔵は緩和される。
- 2) こうしてバルク内に侵入・拡散した水素は、その後CPやEPしても除去出来ない。
- 3) バレル研磨で水素を含まない溶媒(例えば3M社のフロリナート)を使えば、バレル研磨中の水素吸蔵は完全に防ぐことができる。
- 4) この後CPをすれば、水素吸蔵は起きないが、EPでは起きる。
- 5) 4)のEPの水素吸蔵は、EP研磨液に極少量の

硝酸を添加して, 酸化作用を強化すれば, 完全に防ぐことができる。

6) 空洞をアニールした後では, 水素の脱ガスは勿論のことであるが, 表面のキズが回復し, 水素吸蔵の種がなくなる。

こうして, 我々は, ニオブ超伝導空洞の製作工程で水素脱ガスのための真空熱処理工程を省けることを原理実証した。樋口氏はこの業績により2003年第11回SRF Workshopで最優秀若手研究賞を勝ち得た。

これらの現象を整理すれば, ニオブの水素吸蔵過程は次のようにまとめられる。

- 1) 機械研磨のように, 表面に形成された傷に水素が捕獲される。
- 2) この傷の発生プロセスと酸化プロセスが共存する場合, 酸化膜によりバルク中に水素は侵入できず, 傷口にのみ留まる (Defect Trapping)。
- 3) 一方, 酸化プロセスが共存しない場合, 傷口を通して, 水素がバルク内に侵入・拡散する (Channeling)。
- 4) 表面酸化プロセスが弱い場合, 粒界を通してバルク内に侵入・拡散する場合もある (Channeling)。

これらのメカニズムをモデル化すれば図16のようになる。キズの数が深さ方向に指数関数的に減少する分布 ($N_d(t) = N_d^0 \cdot \exp(-t/\alpha)$) を仮定すると, ニオブ材の初期厚さを L とした時, EPで厚さ t 除去したときの吸蔵水素の重量比は, 三つの水素吸蔵メカニズムに対して, 次のようになる。ここで α は表面キズの深さである。

$$\text{Defect: } N_d(t) = N_d^0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right) \quad (22)$$

Defect Trapping

$$C(H) \propto \frac{N_d}{L-t} \propto \frac{\exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right)}{L-t} \quad (23)$$

Defect Trapping to Channeling

$$C(H) \propto \frac{\int_0^t N_d \cdot dx}{L-t} = \frac{\int_0^t \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \cdot dx}{L-t} = \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right)\right]}{L-t} \quad (24)$$

Channeling

$$C(H) \propto \frac{t}{L-t} \quad (25)$$

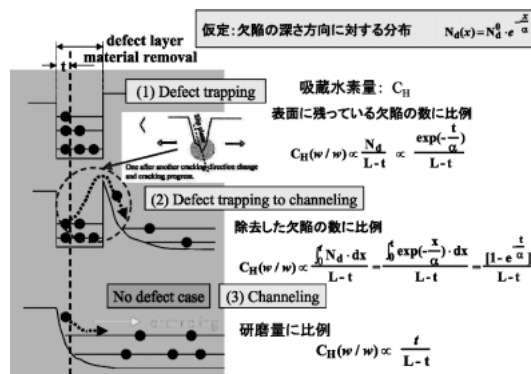


図16 水素吸蔵のメカニズムのモデル化

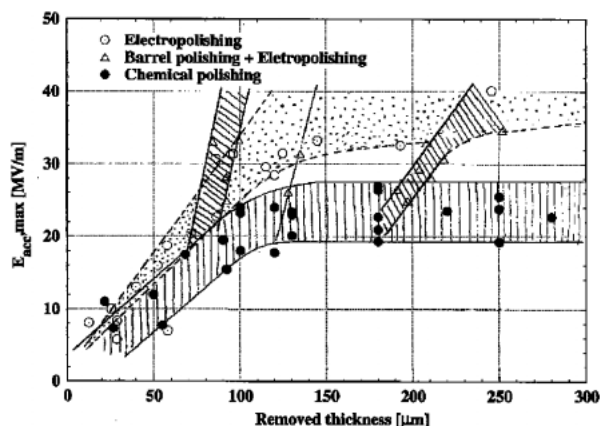


図17 化学研磨の性能限界と電解研磨による性能向上

4.4 電解研磨の高電界優位性

次に顔を覗かせたのが, 高電界性におけるEPのCPに対する優位性である²⁰⁾. このことを示すのが, 図17である。KEKで3個の空洞に研磨量30 μm から280 μm にわたってCPして空洞性能を測定した。この試験では, CPの前段階で機械研磨は行っていない。図17で縦ハッチ領域は, CPでの研磨量に対する期待される最大加速電界である。CPでは100 μm 以上の研磨量で最大加速電界が 22 ± 3 MV/mにサチルことが分かる。一方, そのサチレーションを起こした空洞にEPを施すと, 加速電界は向上する。また, EPで研磨量に対する同様の試験を行うと40 MV/mまでサチレーションを起こさない, あるいは35 MV/m程度のCPより高いレベルでサチルことが分かる。

EPの優位性をもっとはっきり示す結果が図18である²¹⁾. これは, CPした空洞にEPを施しながら性能を測定し, 性能が十分向上した後, 再びCP量と共に電界が劣化することを確認し, さらにEPでその劣化した電界が改善されることを確かめたものである。

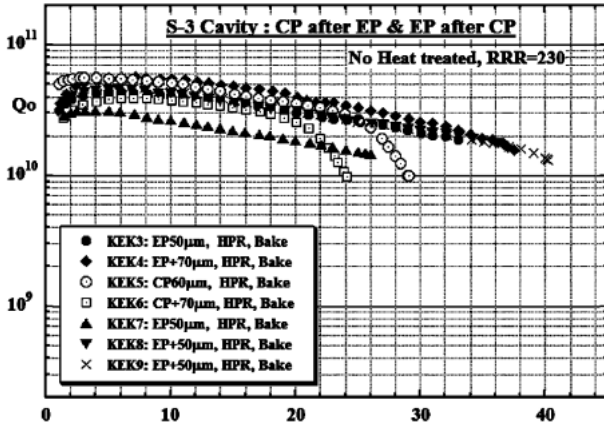


図18 高電界性に対する電解研磨の化学研磨に対する優位性

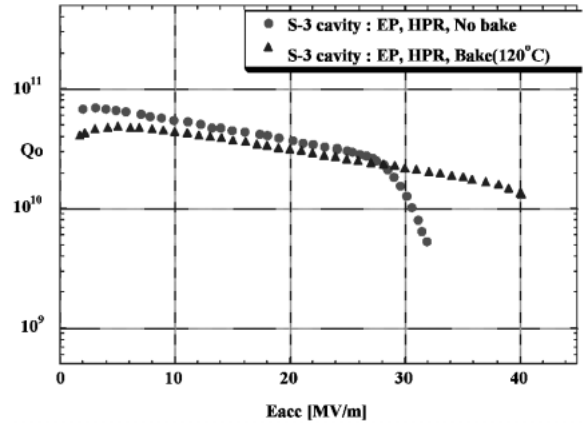


図20 電解研磨した空洞のQ-Eaccカーブに発生するQ-Slopeとベーキングによる消失

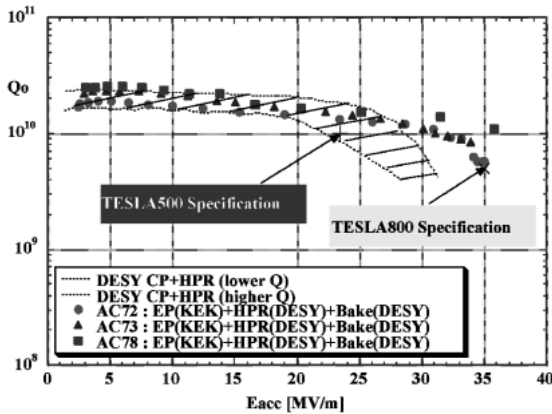


図19 DESY/KEK 共同研究による TTF 9-セル空洞での電解研磨の高電界優位性の実証

CPでは100µm以上研磨した場合、20 MV/m 辺りからQ値の急激な低下が起きることが分かる。

TTF9-セルでの電解研磨の優位性の確認

以上の実験結果から、高電界超伝導空洞に対して、EPはCPよりも優位であることが理解出来る。1997年のSRF Workshopで筆者がこのEPの優位性を発表した時、DESYやCornell大学から強い反対があった。しかし、その後、DESY/KEKの共同研究で、DESYのTTF 9-セル空洞をKEKでEPし、DESY側で評価したところ性能上優位な差が現われた²²⁾。結果を図19に示す。図で斜線を施した範囲が、DESYでCPしたTTF用9-セルニオブ空洞の性能範囲である。CPでは20 MV/m 辺りからQ値が低下し始め、28-30 MV/m に加速電界が制限される。TTF空洞は1400°Cで熱処理されており、最大加速電界はKEKの単セル空洞のCPの結果よりも高い。一方、EPでは大きなQ値の低下なく、35 MV/mの加速電

界が得られた。DESYはKEKの電解研磨システムのコピーをTTFに建設し、1年のTTF空洞で40 MV/mを到達した。こうして2001のTESLA TDRでは、CPに代えてEPを表面処理のベース技術に選択し、35 MV/m 運転によるTESLA-800のシナリオを完成した²³⁾。

4.5 Q-Slope

EPは、高電界に必須技術であるが、それだけでは高電界が達成できないことが分かった。1997年のKEKのEP優位性発表の後、ヨーロッパ(DESY, CERN, Saclay)では、EPの研究を始めた。しかし、加速電界25 MV/m以上でQ値に著しい低下が起き、高電界を達成できなかった。EPのみでは高電界が達成できないことが、1998年に発見された²⁴⁾。所謂Q-Slopeの発見である。Q₀-Eaccカーブでは、この現象は一見フィールドエミッションと同じであるが、純粋なQ-SlopeはX線の発生がなく、熱的な現象である。ヨーロッパの研究者は、KEKのレシピを詳しく調べ、空洞の真空排気工程に110°C 2日間のベーキングが入っていることに気付き、それを施すことでKEKと同様の性能を得た(図20)。このベーキングの効果は、我々にとって晴天の霹靂であった。我々は、ベーキングを真空度の向上のために採用していた。ベーキングを日常化していたのでこの現象には気づかなかった。ともあれ、トリスタンレシピの正当性が実証される結果となった。

このベーキング効果の物理的解釈については、今でもSRF Workshopではhot topicsである。その解釈について、ニオブ表面の五酸化ニオブ(RF表面抵抗がほとんどゼロでRFでは透明に見える)の下にある不飽和酸化層(RF表面抵抗が大きい)の酸素が、ベー

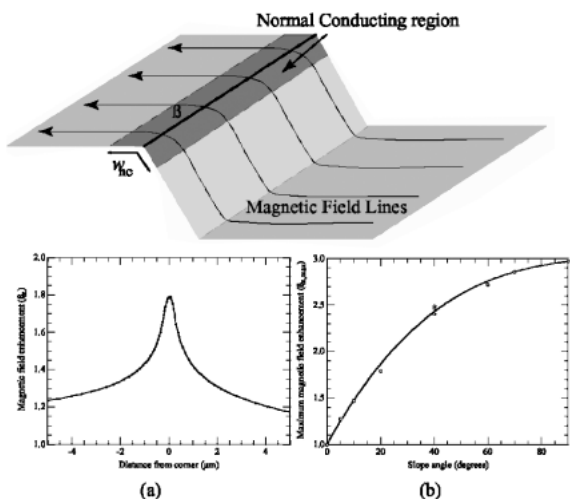


図21 10ミクロン粒界ステップ(上)でのRF磁場のエンハンスメントの計算結果(下)

キングによりニオブバルク中に拡散し、酸素汚染ニオブ層の純度が上がり、RF抵抗が低減し、Q-Slopeが消失すると考えられている^{25,26}。Q-SlopeはCPした空洞でも起きる。その場合ベーキングでQ-Slopeは改善するが、加速電界の向上が見られないケースが多い。一方、単結晶ニオブ空洞ではCPでもEPと同様、ベーキングにより加速電界も向上する。これは、多結晶ニオブ空洞のCPの場合、ベーキングでQ-Slopeが改善してもなお、粒界でのRF磁場の集中で電界が制限されることを示唆している。

コーネル大学では、このシミュレーションを行っている²⁷。図21はその結果である。粒界ステップを10 μmとして、ステップの傾き、ステップからの距離に対するRF磁場集中度を計算している。ファクター2程度の磁場集中は容易におきる事がわかる。後でわかるようにTESLA形状では41 MV/mが理論限界であり、ファクター2の集中が起きれば20 MV/m辺で粒界ステップで超伝導が破れ、局部的に常伝導部が発生する。このモデルによればCPした多結晶空洞で、ベーキングしても加速電界が何故向上しないかを上手く説明できる。

4.6 研磨表面粗さとRF磁場集中

超伝導空洞で上に述べたRF磁場集中が起きないためには、どの程度の表面粗さに仕上げればよいか、解析した²⁸。空洞を遠心バレル研磨で予め7 μm程度の表面粗さに調整し、EPの研磨量と図9でのフィットした式で、空洞内表面の研磨粗さが推定できる。色々なEP磨量で空洞性能を測定した。加速電界と最大表面磁場は比例する。理論加速電界をその最大加速電界で割れば、RF磁場の集中度が予測できる。図22は

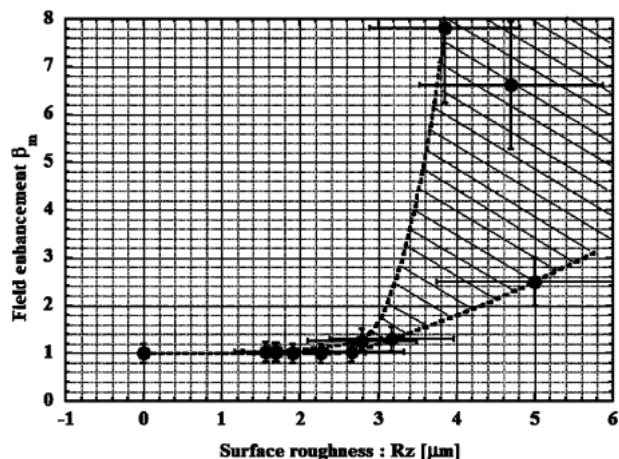


図22 表面粗さとRF磁場集中度

こうして得られたプロットである。1 μm以下の表面粗さ(Rz:10点表面粗さ)であればよいことがわかる。

4.7 加速電界40 MV/mの壁

2000年までKEKは電解研磨を柱とする独自の表面処理レシピ(バレル研磨+750°Cアニール+EP+HPR+120°Cベーキング)で世界最高性能を多くの単セル空洞で達成した。その結果を図23に示す。どの空洞でも40 MV/m前後に制限されているのが分かる。過去10年にわたるTESLA単セル空洞での高電界の歴史を図24に示す。1995年にHPRの実用化により30 MV/mから40 MV/mへのジャンプが起きているが、それ以後40 V/m辺りにサチッている。

4.8 理論限界説

40 MV/mの壁をどう解釈するか、世界は二つの意見に割れた。すなわち、技術的問題と理論限界説である。筆者は、2001年に理論限界説を提唱した²⁹。超伝導状態に外部磁場を加えると、ニオブのような第二種超伝導体は下部臨界磁場(H_{C1})で完全マイスナー効果が破れ、超伝導バルク内に磁場が部分的に侵入し始め、Vortexと超伝導の混在状態(Vortex state)が発生する。さらに磁場を強めると上部臨界磁場(H_{C2})で超伝導状態が破壊され、常伝導状態に至る。超伝導のRF応用においても、あるRF磁場で超伝導破壊が起きると信じられているが、GHz帯の速いRF交流磁場変動に超伝導状態が十分に追従できるとは考え難い。RF臨界磁場は、DCの場合とは異なると考えられる。しかし、現状ではRF臨界磁場の強さを決める信頼できる理論が存在しない。

すでに4.1で述べたように、空洞はRF電界と同時にRF磁場をも測定することになる。筆者は、図

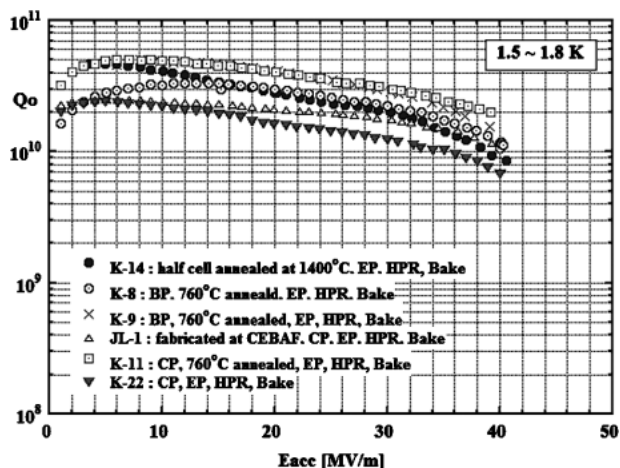


図23 KEK での 1.3 GHz 単セル空洞の性能

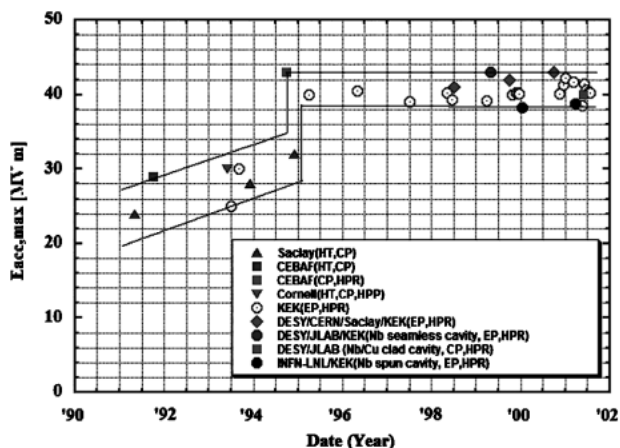


図24 過去 10 年の TESLA 単セル空洞での高電界の歴史

25 に示すように、Cornell 大学での超伝導空洞の RF パルスでの RF 臨界磁場測定の結果³⁰⁾と我々の CW での測定結果の解析を試みた。臨界温度近くでは、発熱現象に遮られて、RF パルス測定以外では、臨界磁場の測定が難しい。一方、2 K 辺りでは、BCS 表面抵抗は十分低く発熱が少なく、CW 測定でも RF 臨界磁場の測定が可能である。RF 臨界磁場については、古くから Super-heating モデルが提唱されていたが³¹⁾、それでは Cornell の結果を説明できない³⁰⁾。また、 H_{C1} の温度依存性でも説明出来ない。そこで簡単な Vortex Nucleation モデルを試みた³²⁾。このモデルでは、flux が進入すると、flux 単位長さ当りの RF 磁場エネルギーと超伝導凝縮エネルギーがバランスする点が RF 臨界磁場を与える。次式右辺は、静磁場エネルギーなので、左辺の RF 磁場は実効値をとらなければならない。

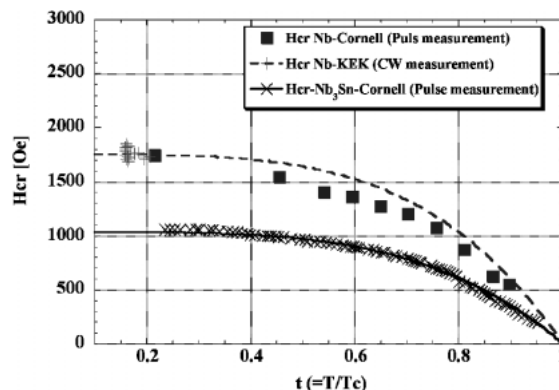


図25 RF 臨界磁場の温度依存性の解析

$$\frac{1}{2} \mu \left(\frac{1}{\sqrt{2}} H_C^{RF} \right)^2 \cdot 4\pi\lambda^2 = \frac{1}{2} \mu H_C^2 \cdot 4\pi\xi^2$$

$$H_C^{RF}(T) = \sqrt{2} \cdot \frac{\xi(T)}{\lambda(T)} \cdot H_C(T) = \sqrt{2} \cdot \frac{H_C(T)}{\kappa(T)} \quad (26)$$

(26) 式の λ , ξ , κ , H_C は、順に磁場の侵入長 (London penetration depth), コヒーレント長, Ginzburg Landau パラメター, 超伝導熱力学的臨界磁場であり、超伝導特性を決める重要なパラメターである。これらのパラメターの温度依存性は、Abrikosov の第二種超伝導体の理論³³⁾で与えられ、結局 RF 臨界磁場は次のような温度依存性となる。

$$H_C^{RF}(t) = \sqrt{2} \cdot \frac{H_C(0)}{\kappa(0)} \cdot [1-t^4] \quad (27)$$

$$t = \frac{T}{T_c} \quad (28)$$

ここで T_c は超伝導臨界温度であり、ニオブでは 9.25 K である。

ニオブに対して、Cornell 大学の超伝導空洞のパルス RF 臨界磁場測定の結果³⁰⁾と、KEK での 1.6 K 前後での超伝導空洞の CW RF 測定による結果を式 (27) でフィットした (点線)。同様に、Cornell 大学の Nb_3Sn の RF 臨界磁場測定結果をフィット (実線) した。ニオブの場合は、 $H_C(0)/\kappa(0)$ は実験値を使った。フィッティング自由パラメータはなく、RF 臨界磁場の絶対値まで合わすことができる。RF 臨界磁場は 1750 Oe 程度であることが分かる。1750 Oe は TESLA 空洞で 41 MV/m の加速電界に対応する。

一方、 Nb_3Sn の場合、実験値が明確でないので $H_C(0)/\kappa(0)$ を自由パラメターとした。温度依存性について満足なフィッティング結果を得られることが分かる。

式 (27) は、新しい超伝導材料の探索の指針を与え

る. 超伝導バルク性を利用した超伝導空洞に対しては, H_c が大きくかつ, κ の小さい超伝導体が高電界に有利であること示している. 古くから Nb_3Sn は期待され長年開発が行われているが, 高電界達成の報告はない. この理論を信じる限り, κ (~ 10) が大き過ぎて高電界性は期待出来ない.

しかし, この理論には批判がある. Abrikosov の理論は摂動論であり, 冷却温度が T_c よりわずかに低い温度領域で成り立つ. ここでは, それを非常に低い温度領域に拡張している. この理論は, 直感的半古典論であり, 将来, 量子力学に拠るミクロスコピックな厳密な式が期待される.

5. 50 MV/m 高電界空洞の原理実証

空洞屋にとって 40 MV/m 程度の理論限界は不愉快である. しかし, 方法を誤れば, それ以上の高電界はいつまでも達成できない. 筆者は, この理論限界を認めた上で, 加速電界向上の方法を提案した³⁴⁾. その方法とは, H_p/E_{acc} の小さい空洞形状を選択する事である.

5.1 新空洞形状

2002年, JLAB/DESY では CEBAF の 12 GeV エネルギー増強計画のために, 2003年 Cornell 大学では TESLA 空洞用に新しい空洞形状を開発した. これらの空洞設計の主眼は高電界性よりは, 冷凍負荷の低減のために Q 値の向上にあった. JLAB/DESY の新空洞形状は Low Loss (LL) 型³⁵⁾, Cornell の空洞は Reentrant (RE) 型³⁶⁾と呼ばれる. これらの空洞形状を図 26 に, その空洞パラメータを表 1 に示し, TESLA 形状と比較する. これらの空洞形状は, $H_p/E_{acc} \sim 37 \text{ Oe}/[\text{MV/m}]$ と TESLA 空洞よりも 15% 程小さい. 筆者の仮説が正しければ, これらの新しい形状では, TESLA 空洞より $\sim 15\%$ 高い電界が可能で, 47 MV/m が期待できる.

5.2 40 MV/m の壁の突破

2004年, 11月に KEK で開催された第一回 ILC Workshop³⁷⁾の後, KEK はこれら二つの新形状で 40 MV/m の壁の突破し 45 MV/m 実証を行うこと, さらに LL 形状で 9-セル空洞を製作し, 45 MV/m ILC 高電界空洞の実証を 2005-2006 年に行う計画を立て, ILC 高電界超伝導空洞の開発を始めた. RE 空洞はこの第一回 ILC Workshop 直後, Cornell 大学が独自の電解研磨技術で 46 MV/m を達成し, 先を越されてしまった³⁸⁾.

一方, KEK は超伝導空洞の開発再立ち上げに伴った色々なトラブルを克服し, 2005年7月末に RE 単

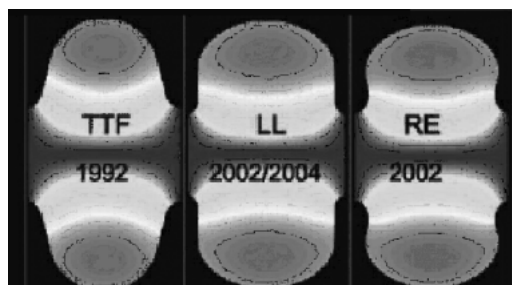


図26 TESLA (TTF), Low Loss (LL), Reentrant (RE) 形状の比較

表 1 三つの形状の空洞パラメーター

	TESLA	Low loss	Reentrant
Iris is Diameter [mm]	70	60	66
E_p/E_{acc}	2.0	2.36	2.21
$H_p/E_{acc} \text{ Oe}/[\text{MV/m}]$	42.6	36.1	37.6
R/Q [Ω]	113.8	133.7	126.8
Γ [Ω]	271	284	277
$E_{acc, max}$ [MV/m]	41.1	48.5	46.5

セル空洞で 47 MV/m を達成した. その後, LL 単セル空洞でも 47.3 MV/m, さらに 9月に RE 単セル空洞で 52.3 MV/m の世界記録を打立てた. それらの結果を図 27 に示す. RE 単セル空洞は, Cornell 大学で製作し, さらに 1400°C の高温真空熱処理を施した後, KEK で表面処理して測定した. この空洞は既に Cornell で 46 MV/m を達成したのとは別空洞 (形状は同じ) である. LL 空洞は JLAB/DESY の 1.5 GHz の設計形状を 1.3 GHz にスケールし, KEK の機械工学センターで製作し, EP して測定した. RE 空洞で 52 MV/m を達成したのは, 高温真空熱処理の影響かも知れない. 図 28 は, 超伝導空洞のこの 15 年の研究で, H_p/E_{acc} の小さい空洞形状の採用による新たなブレイクスルーが起きたことを示している.

5.3 ILC 高電界超伝導空洞の開発

KEK では, LL 形状をベースにした 9-セル超伝導空洞を設計・製作して ILC の高電界超伝導空洞の開発を行っている. 図 29 に完成した空洞写真を示す. 2005年8月の Snowmass での第二回 ILC Workshop³⁷⁾では, ILC500 で TESLA 形状で 35 MV/m を基本性能 (運転加速電界は 31.5 MV/m) にすることが合意されたが, 我々はここ 2~3 年かけ, KEK の新しい空洞で 40 MV/m の基本設計に向上させるべ

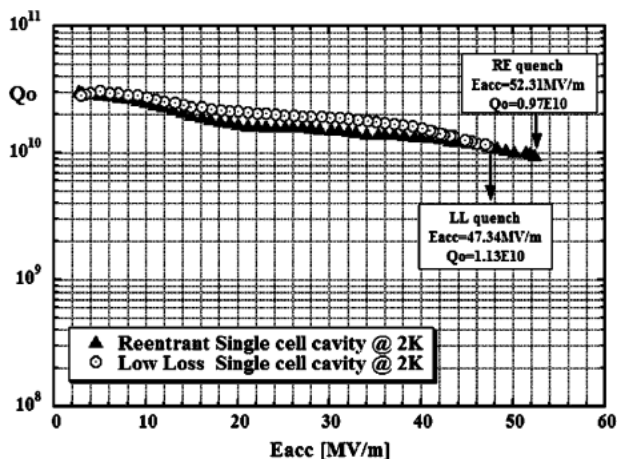


図27 Low Loss, Reentrant 単セル空洞での性能測定結果

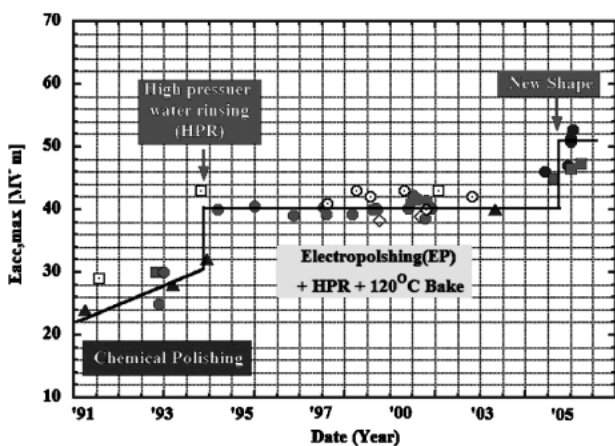


図28 この15年間の高電界超伝導空洞の開発における二度のブレイクスルー

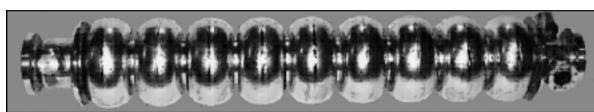


図29 KEK で開発が進んでいる高電界 ILC 空洞

く、その開発に専念している。

5.4 ILC 高電界空洞の課題

以上述べたように、単セル空洞の開発を軸に、50 MV/m 高電界空洞の原理実証を完了した。ILC 高電界空洞の開発では、これまで述べた KEK のレシピ：遠心バレル研磨 + 750°C アニール + EP + HPR + 120°C ベーキング、で信頼性高 (85% 以上の確率) 45 MV/m 以上を達成することである。ILC500 では、16000 台の空洞が必要になる。こうした量産で非常に高い歩留りで 45 MV/m を達成することが大きな

課題であり、この表面処理レシピの確立が急務である。また我々の知らない多くの問題点が潜んでいるはずで、それを一つ一つ解決して行かなければならない。また、例えば、我々が発明した水素病完全対策法のように、原理実証は終わっているが実用化されていない工程がある。それらは大きな製作コスト削減に繋がる可能性があり、その実用化を急ぐ必要がある。さらに、空洞製作の工業化も大きな研究課題である。また、ILC を担う若い研究者の育成も大きな課題である。こうしたチャレンジングに挑む若手研究者が結集することを大いに期待している。

まとめ

以上、やや助長になった感はあるが、超伝導空洞 50 MV/m 達成まで、筆者が不可欠と考えている技術、空洞開発で出会った表面物理現象を紹介した。超伝導空洞の開発は加速器の道具の開発であるが、その中で如何に物理が楽しめるか、筆者の経験を通して見て来た。超伝導空洞の表面抵抗は nΩ 単位であり、表面状態が敏感に反映する。こうした超高感度の手法を通して、超伝導金属という制限はあるが、金属材料、金属表面の物理研究は極めて exciting である。この世界は、これからリニアコライダーのような超大規模応用、ERL (Energy Recovery LINAC)、XFEL のような応用光科学に向け大きく前進することは疑う余地はない。そうした開発と金属材料・表面物理の研究を両立させ、この世界を enjoy しながら新しい世界を開拓するために、若き研究者が結集することを切に期待する。

参考文献

- 1) H. Padamsee, Proc. of 2nd Workshop on RF Superconductivity, CERN, July, 1984. p. 339.
- 2) H. Umezawa, "Impurities analysis of high purity niobium in industrial production", Proc. of the 10th Ultra-High Purity Metallic-Base Materials, Saint-Etienne, France, June, 2003, p. 33.
- 3) P. Kneisel et al., "R&D Paths Towards Achieving Ultimate capabilities", Proc. of the Workshop on Pushing the Limits of RF Superconductivity, ANL, Chicago, USA. Sep. 2004, p. 106.
- 4) R. A. French, Cryogenics 8, 1968, p. 301.
- 5) K.Saito, "Theoretical Critical Field in RF Application", Proc. of 11th Workshop on RF Superconductivity, Trademunde, Germany August 2003.
- 6) D. Proch, private communication.
- 7) T. Higuchi et al., "Finished Niobium Cavity Surface with Barrel Polishing", Proc. of 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, AERINU, Tokyo, September,

- 1996, p. 228.
- 8) 樋口玉緒, 総合大学院大学博士論文, “新しい機械研磨と電解研磨による水素吸蔵を起こさない超伝導空洞の表面処理法の開発”, 2003年3月
 - 9) H. Diepers et al., Phys. Lett. 37A, 1971. p. 139.
 - 10) K. Saito et al., “R & D of Superconducting Cavities at KEK”, Proc. of 4th Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, August, 1989. p. 635.
 - 11) Ph. Bernard et al., Proc. Proc. of 5th Workshop on RF Superconductivity, DESY, Hamburg, Germany, August, 1991, p. 487.
 - 12) P. Kneisel et al., “Experience with High Pressure Ultrapure Water Rinsing of Niobium Cavities”, Proc. of 6th Workshop on RF Superconductivity, CEBAF, Newport News, VA. USA, October, 1993. p. 628.
 - 13) K. Saito et al., “Study of Ultra-clean Surface for Niobium SC Cavities”, Proc. of 6th Workshop on RF Superconductivity, CEBAF, Newport News, VA. USA, October, 1993. p. 1151.
 - 14) 岩田正義, 木原元央, “リニアコライダー—素粒子の謎に挑む最強の加速器—”, 技術経済研究所, 2005年5月
 - 15) K. Saito, “Superconducting RF Cavity for LINACs—Core technology for the superconducting linear collider: TESLA—”, 名古屋大学大学院理学研究科物理集中講義ノート, June, 2 2003.
<http://lcdev.kek.jp/Lectures/index.php>
 - 16) B. Aune et al., “Degradation of Nb Superconducting RF Cavities during cooling time”, Proc. of INAC conference, San Francisco, CA, USA, 1990, p. 243.
 - 17) K. Saito and P. Kneisel, “Q-Degradation in High Purity Niobium Cavities-Dependence on Temperature and RRR-Value”, Proc. of the 3rd EPAC, Berlin, Germany, 1992, p. 1231.
 - 18) Roth et al., Proc. of the 2nd EPAC. Nice, France, 1992, Vol. 2, p. 1097.
 - 19) G. Katano, “Analyzing Method to Locate trapped Hydrogen in Metal crystals and Relationship Between Surface Defect and Hydrogen Absorption”, Proc. of AIP conference about Hydrogen in Materials & Vacuum System, JLAB, Newport News, VA., USA, November, 2002, p. 190.
 - 20) K. Saito et al., “Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients”, Particle Accelerators, Vol. 60, p. 193.
 - 21) E. Kako et al., “Improvement of Cavity Performance in the Saclay/Cornell/DESY’s Cavities”, Proc. of 9th Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, NM, USA, November, 1999, p. 179.
 - 22) L. Lilje et al., “Achievement of 35 MV/m in the superconducting nine-cell cavities for TESLA”, Nucl. Instrum. Meth., A, 524, pp. 1-22, 2004.
 - 23) Edited by R. Brikmann et al., TESLA Technical Design Report, Part II, DESY, March 2001.
 - 24) B. Visentin et al., “Improvements of Superconducting Cavity Performance at High Accelerating Gradients”, Proc. EPAC 1998, p. 1885.
 - 25) K. Saito and P. Kneisel, “Temperature Dependence of the Surface Resistance of Niobium at 1300 MHz—Comparison to BCS Theory—”, Proc. of 9th Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, NM, USA, November, 1999, p. 277.
 - 26) H. Safa, “High Field Behavior of SCRF Cavities”, Proc. of 10th Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, Japan, September, 2001, p. 279.
 - 27) J. Knobloch et al., “High-Field Q Slope in Superconducting Cavities Due to Magnetic Field Enhancement at Grain Boundaries”, Proc. of 9th Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, NM, USA, November, 1999, p. 77.
 - 28) K. Saito, “Surface Smoothness for High Gradient Niobium SC RF Cavities”, Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Lubeck/Travemunde, Germany, September, 2003.
 - 29) K. Saito, “Critical Field Limitation of the Niobium Superconducting RF Cavity”, Proc. of 10th Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, Japan, September, 2001, p. 583.
 - 30) T. Hays and H. Padamsee, “Measuring the RF Critical Field of Pb, Nb, and Nb₃Sn”, Proc. of the 8th Workshop on Superconductivity, Abano Terme, Italy October, 1997, p. 789.
 - 31) T. Yogi, PhD, “Radio Frequency Studies of Surface Resistance and Critical Magnetic Field of Type I and Type II Superconductors”, CALTEC, 1977.
 - 32) K. Saito, “Theoretical Critical Field in RF Application”, Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity, Lubeck/Travemunde, Germany, September, 2003.
 - 33) A. A. Abrikosov, “On the Magnetic Properties of Superconductors of the Second Group”, Soviet Phys. JETP, Vo. 5. No. 6, 1957. p. 1174.
 - 34) K. Saito, “Development of Electropolishing Technology for Superconducting Cavity”, Proc. of the PAC2003.
 - 35) J. Sekutowicz et al., “Low Loss Cavity for the 12 GeV CEBAF Upgrade”, JLAB-TN-02-023, June 2002.
 - 36) V. Shemelin et al., “Optimal cells for TESLA accelerating structure”, Nucl. Instr. Methods, Phys. Res., A 496, p. 1, 2003.
 - 37) <http://lcdev.kek.jp/LCoffice/>
 - 38) H. Padamsee, “Records fall at Cornell”, CERN COURIER, Vol. 45, No. 5, June 2005, p. 32.