

解 説

超伝導空洞技術：技術研修会（1）

加古 永治*

Technologies for Superconducting RF Cavities, (1)

Eiji KAKO *

Abstract

Essential technologies for achieving high performances in superconducting RF cavities are reviewed. After fundamental understandings of superconducting RF cavities, many interesting technical experiences obtained in the initial R&D phase of 1.3 GHz single-cell cavities for high gradient applications are introduced.

1. はじめに

本論文は、2015年夏に敦賀市で開催された第12回日本加速器学会年会において、8月6、7日の両日に行われた超伝導空洞技術に関する技術研修会での発表資料を基にした解説である。第1日の講義内容については本編にて報告し、第2日の内容については次号にて掲載予定である。本編では、超伝導空洞に関する基本的な説明の後に、高加速電界応用を目的とした1.3 GHz単セル超伝導空洞の開発初期に経験した数々の技術的問題点について、その理解と対応策を解説する。

1980年代後半に超伝導空洞の大型加速器への量産・実用化が世界で初めてKEKの電子陽電子衝突実験用TRISTAN加速器主リングにおいて実現されて以降、今日では超伝導空洞の加速器への応用が幅広く世界中で進められている。現在、FEL用超伝導電子線形加速器として、DESY（独）ではEU-XFEL¹⁾、SLAC（米）ではLCLS-II²⁾の建設が進行中である。また、原子核実験用超伝導重イオン加速器として、MSU（米）ではFRIB³⁾、IBS（韓）ではRAON⁴⁾の建設が開始されている。さらに、超伝導陽子線形加速器では、中性子源用としてESS⁵⁾（欧）、核破碎処理用としてCADS⁶⁾（中）の建設計画が進められており、世界中の数多くの研究所で超伝導加速器の開発研究が活発に

行われている。

一方、KEKではTRISTAN用508 MHz超伝導空洞⁷⁾以降、次世代の加速器計画を目的として、超伝導空洞の技術開発が継続的に行われており、この30年間にKEKで開発された主要な超伝導空洞を、図1にまとめて示す。

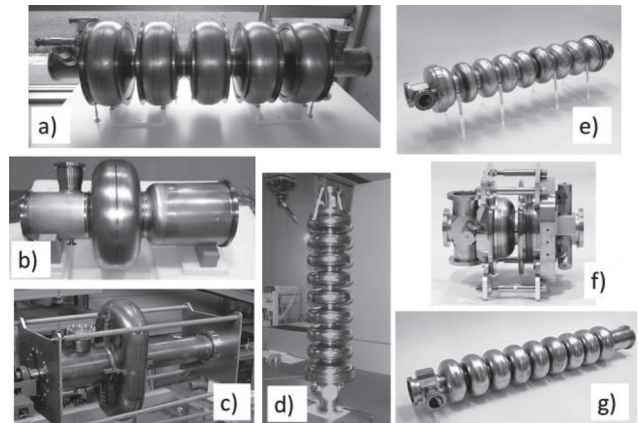


図1 KEKで開発された超伝導空洞。a) TRISTAN 508 MHz 5-cell Cavity⁷⁾, b) KEKB 508 MHz 1-cell Cavity⁸⁾, c) KEKB 508 MHz Crab Cavity⁹⁾, d) J-ADS 972 MHz 9-cell Cavity¹⁰⁾ ($\beta=0.73$), e) STF 1.3 GHz 9-cell Cavity¹¹⁾, f) cERL Injector 1.3 GHz 2-cell Cavity¹²⁾, g) cERL Main-Linac 1.3 GHz 9-cell Cavity¹³⁾.

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: eiji.kako@kek.jp)

2. 超伝導空洞の基礎

2.1 高周波表面抵抗

常伝導空洞（室温）と超伝導空洞（低温）の高周波表面抵抗 (R_S) は、それぞれ次式で表される。
常伝導空洞の場合：

$$R_S = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \sigma}} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、 μ は透磁率、 σ は導電率、 δ は表皮厚さである。

超伝導空洞の場合：

温度依存性をもつBCS抵抗 (R_{BCS}) ともたない残留抵抗 (R_{res}) の和として表される。

$$R_S = R_{BCS}(T) + R_{res} \quad (2)$$

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B \cdot T}\right) \quad (3)$$

ここで、 A は定数、 T は空洞温度、 Δ はギャップエネルギー、 k_B はボルツマン定数である。低温実験で得られた表面抵抗 (R_S) の温度依存性を示す代表例を図2に示す。

周波数 1.3 GHz で同じ形状因子 ($G=270 \Omega$) をもつ同形状の銅空洞（室温）とニオブ空洞（低温）の表面抵抗を比較すると、

$$\begin{aligned} \text{Cu (300 K)} ; \sigma &= 5.8 \times 10^9 \text{ 1}/\Omega \text{ m} \\ R_S &= 9.4 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

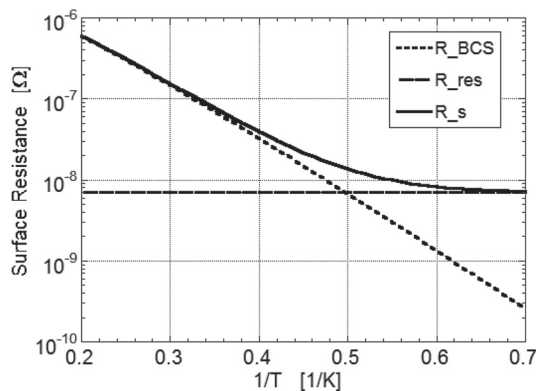


図2 代表的な表面抵抗の温度依存性 (1.3 GHz ニオブ空洞での $R_S=1/T$ 曲線の例)。

$$\begin{aligned} \text{Nb (2 K)} ; R_{BCS} (2 \text{ K}) &= 7 \text{ n}\Omega, R_{res} = 7 \text{ n}\Omega \\ R_S &= 14 \text{ n}\Omega \end{aligned}$$

が得られる。超伝導空洞は、銅空洞と比較して高周波表面抵抗が約6桁小さく、このことは空洞の高周波損失が約6桁小さくなり、すなわち約6桁高いQ値を有していることを意味する(式(5), 参照)。

2.2 加速電界とQ値

高周波空洞の加速電界 (E_{acc}) は、z軸上 (ビーム軸上) の電界が時間変化することを考慮し、空洞内を通過する粒子が実際に感じる実効的なz方向の電界 (E_z) をz軸に沿って積分し、その有効空洞長 (l) で平均することによって、次式で与えられる。

$$E_{acc} = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} E_z(z, r=0) \cos(k \cdot z) dz \quad (4)$$

空洞内部の蓄積エネルギー (W_s) と空洞内表面での高周波損失 (P_d) の比はQ値と呼ばれ、次式にて定義される。

$$Q = \frac{\omega W_s}{P_d} = \frac{G}{R_S} \quad (5)$$

ここで、 G は形状因子と呼ばれ、周波数に依存しない空洞形状のみで決まるパラメーターである。

超伝導空洞では性能評価を行うために、図3に示すような無負荷Q値 (Q_0) の加速電界依存性の測定が低温実験で行われる。高加速電界領域では、空洞内表面の温度上昇によって Q_0 値は徐々に低下し、さらに電界放出電子などを原因とする

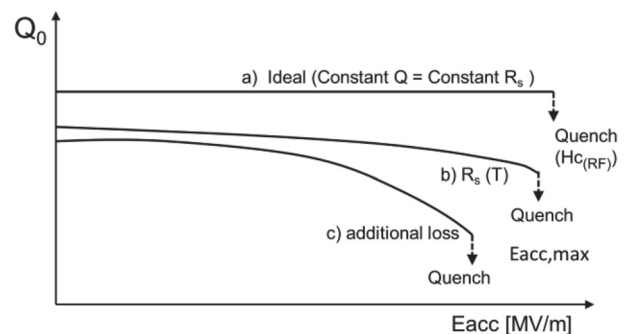


図3 典型的な Q_0 値の加速電界依存性。a) R_S が一定である理想の場合、b) R_S に温度依存性がある場合、c) 何らかの付加損失が発生した場合。

高周波損失の増加から、 Q_0 値の悪化が観測される。最終的に局所発熱による超伝導破壊 (Quench) が発生して、空洞性能は制限される。

2.3 材料の機械強度

ニオブ製超伝導空洞の外側は、液体ヘリウムを貯蔵するためのチタン製ヘリウムタンクに覆われており、圧力容器とみなされるため耐圧・気密試験の実施、高圧ガス保安法に遵守した超伝導空洞の製作が必須となる。そのため、使用する材料の機械強度特性に注意を払うことが重要である。ヘリウムタンクを含む超伝導空洞の構成材料について、破断・変形・衝撃に対する機械強度試験を実施して、応力解析や疲労解析などの強度計算から求められる許容値と比較し、十分な機械強度を有することを各種材料について示す必要がある。

KEK で使用している純ニオブ材料の機械強度の温度依存性の結果を、一例として図 4 に示す。空洞構成素材である純ニオブ材、ニオブチタン合金材、純チタン材に加えて、同素材での溶接部および異種材料間での溶接部についても、同様に機械強度試験が要求される。

2.4 超伝導空洞に関する基本技術

超伝導空洞を製作するための一連の工程には、以下に述べる本質的に重要ないくつかの超伝導空洞に特有な基本技術がある。

1. 高純度ニオブ材料：純度（不純物成分と含有量）、熱伝導率特性、機械強度特性、成形性（伸展性）、粒径サイズなどが好ましいニオブ材料の主な指標となる。
2. 成形技術：アルミ合金製成形型を用いる深絞り加工（プレス成形）が一般的であるが、スピニングや液圧成形などの方法でも製作される。
3. 接合技術：空洞本体となるニオブは高真空中での EBW（電子ビーム溶接）、ニオブとチタンの異材接合部も EBW、チタン製ヘリウムタンクはアルゴンガス雰囲気中での TIG（タングステン・アーク放電溶接）、チタンとニオブチタン合金の異材接合部も TIG、ニオブとニオブチタン合金製フランジの異材接合部はアルゴンガス雰囲気中での LBW（レーザービーム溶接）にて、現在は空洞各部が接合されている。
4. 表面処理技術：製造後の空洞内表面を平滑化・

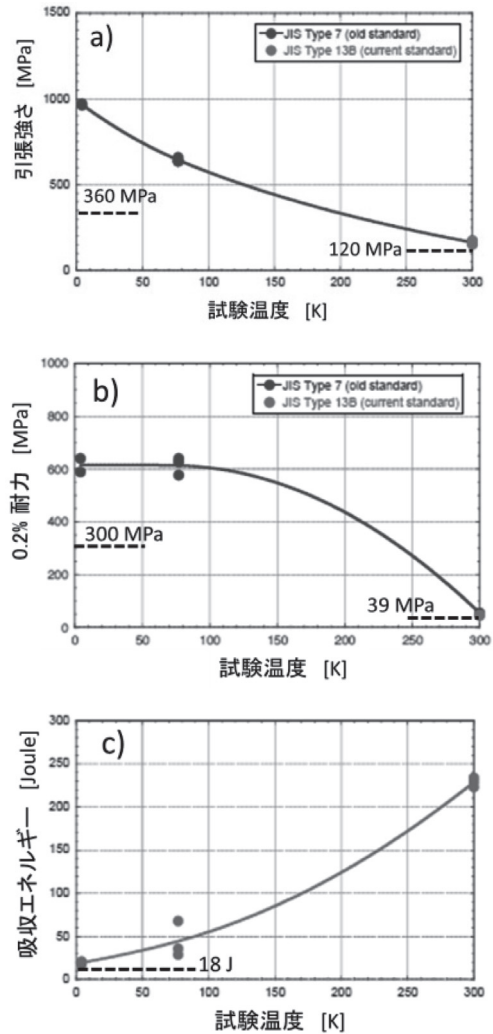


図 4 純ニオブ材料の機械強度の温度依存性^{14, 15)}。a) 引張り強さ, b) 0.2%耐力, c) シャルピー衝撃試験での吸収エネルギー（破線と数値は、室温と低温でのそれぞれの許容強度値を示す）。

5. 水洗干净技術：空洞内のゴミや汚染物質を超純水による高圧水洗（8 MPa 程度）で確実に除去することは、電界放出電子の抑制に効果がある。
6. ダストフリー組立技術：クラス 10 のクリーンルーム環境下で、空洞内部にゴミや微小異物を持ち込まない空洞組立方法と部品洗浄法の確立は、特に重要な要素技術である。

3. TRISTAN から TESLA へ（前編）

3.1 1.3 GHz 超伝導空洞開発の開始

TRISTAN 用 508 MHz 超伝導空洞 32 台をクライオモジュール 16 台に組み立て、トンネル内に設置し、安定なビーム運転に成功¹⁶⁾した 1990 年に、高加速電界応用を目指した 1.3 GHz 超伝導加速空洞の研究開発が KEK で開始された。その時期を同じくして、Lバンド超伝導空洞を基本とする TeV エネルギーでの衝突実験用超伝導線形加速器 (TESLA, TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) が提案された。その第 1 回国際 TESLA 研究会が 7 か国からの参加で、コーネル大学 (米) の主催にて開催され、その様子を図 5 に示す。KEK では Lバンド超伝導空洞の開発を始めたばかりであり、1.3 GHz 単セル空洞の形状設計などに関する報告が行われた。

3.2 1.3 GHz 単セル空洞での開発研究

超伝導空洞の開発は、一般にその加速器計画に最適化された空洞設計を行い、性能評価用原型空洞の製作、表面処理装置の整備、低温での空洞性能測定システムの構築を同時に着手することで、開発研究が始められる。1.3 GHz 超伝導空洞の開発では、図 6 に示す 3 台の単セル空洞が CEBAF (米) との共同研究により製作され¹⁷⁾、図 7 に示す単セル空洞用表面処理装置が野村鍍金 (株) 鹿沼工場内に設備された。また、TRISTAN 超伝導空洞用クライオスタットを利用して、その内部に装着するタイプの Lバンド用低温性能測定システム (図 8) が建設された。これらの測定準備は 1 年程度で完了し、1991 年春には最初の 3 空洞の

たて測定 (たて型クライオスタットによる低温性能評価) が行われた。その後 5 年間に製作された 1.3 GHz 単セル空洞 13 台についてのたて測定の結果を、図 9 にまとめて示す。特に開発初期から、様々な問題点に遭遇し、当初の目標であった 30 MV/m を達成することができたのは開発 4 年目の初めであった。この間の興味深い実験結果と対処・改善について、次章以降に述べる。

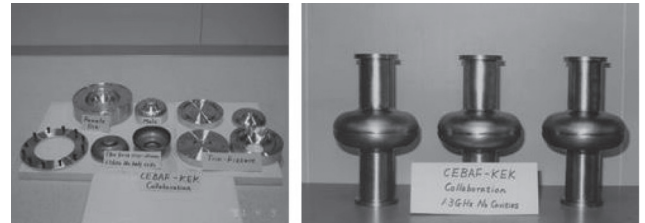


図 6 CEBAF-KEK 共同研究によるアルミ製空洞成形治具 (左) を用いて製作された 3 台のニオブ製 1.3 GHz 単セル空洞¹⁷⁾ (右)。

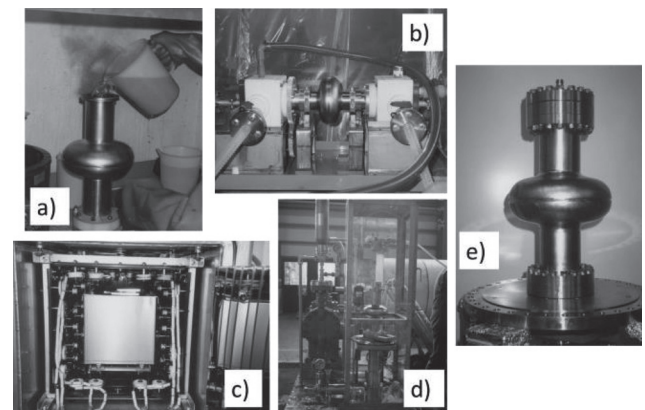


図 7 1.3 GHz 単セル空洞用表面処理装置¹⁷⁾。a) 化学研磨, b) 電解研磨, c) 脱ガス用真空炉, d) 高水圧超純水洗浄, e) たて測定用空洞組立。



図 5 The First International TESLA Workshop のプロシーディング (左), コーネル大学近郊のカユガ湖での船上バンケットにて共同研究者との写真 (右); 左から, Hasan Padamsee 氏, 齋藤健治氏, 著者, 野口修一氏 (1990 年 7 月)。

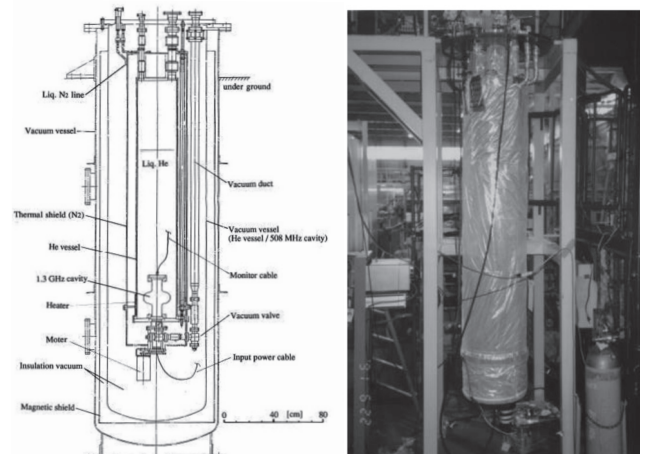


図 8 1.3 GHz 単セル空洞用たて型クライオスタット。

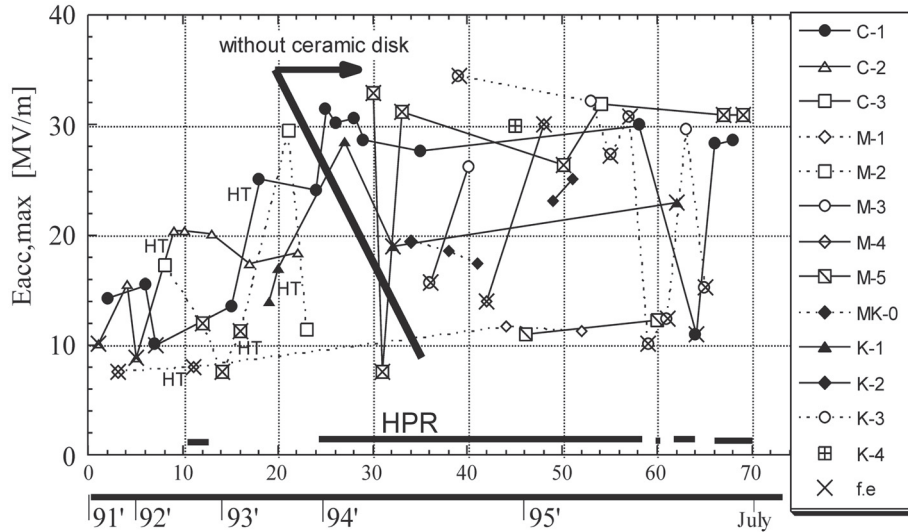


図9 1.3 GHz 単セル空洞 13 台について 70 回のたて測定の結果 (1991 年～1995 年 7 月). 図の縦軸 ($E_{acc, max}$) は達成された最大加速電界, 横軸は測定回数, 右端は空洞名を記す. また, 図中の HPR は高圧水洗の適用, HT は高温熱処理の実施, f.e は電界放出電子による著しい Q_0 値の低下を示す.

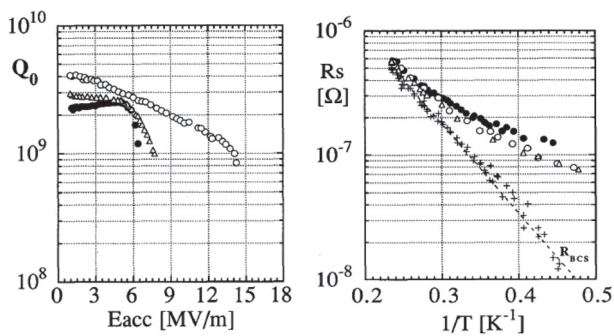


図10 最初に測定された 3 空洞の結果. (左) Q_0 - E_{acc} 曲線 (2.1 K), (右) R_s - $1/T$ 曲線.

3.3 残留磁界による低い Q 値

最初にたて測定が行われた 3 空洞の性能評価の結果を, 図 10 に示す. 前節で説明したように, 形状因子 (G) が 270Ω である 1.3 GHz ニオブ空洞の想定される Q_0 値は, 高周波表面抵抗 (R_{BCS} (2 K) = $7 \text{ n}\Omega$, R_{res} = $7 \text{ n}\Omega$, R_s = $14 \text{ n}\Omega$) を考慮すれば, Q_0 (2 K) = 2×10^{10} 程度が期待される. しかしながら, 得られた Q_0 値の結果は 3 空洞とも著しく低く, $2 \sim 4 \times 10^9$ であった. この 3 空洞について表面抵抗 (R_s) の温度依存性から計算される残留抵抗 (R_{res}) は $70 \sim 110 \text{ n}\Omega$ となり, 予想以上に大きな値であった. 空洞周辺に存在する残留磁界が, 残留抵抗の主な原因と考えられる. これは, ニオブ空洞が超伝導状態に転移する時に磁束の芯が常伝導の磁束量子として捕捉されるために高周波損失となる. この残留磁界 (H) が及ぼ

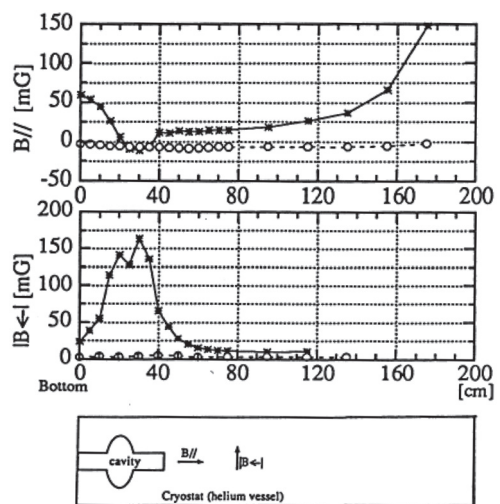


図11 たて型クライオスタット内部の残留磁界測定の結果. (上) 空洞ビーム軸と平行方向の磁界成分, (中) 空洞ビーム軸と垂直方向の磁界成分, (下) 空洞位置の模式図 (図中の*は初期状態, ○は磁気シールドの改善後).

す残留抵抗 ($R_{res}(H)$) へ影響は, 実験的に $0.35 \text{ n}\Omega/\text{mGauss}$ と言われており, 通常 10 mGauss 程度まで磁気遮蔽することが望ましい. 図 8 に示すように, Lバンド用測定システムは外側に TRISTAN 空洞用クライオスタットを用いていることから, 磁気遮蔽は十分であると思われたが, 実はそうではなかった. このたて型クライオスタット内部の残留磁界測定の結果を 図 11 に示す. 空洞設置位置周辺に集中した約 150 mGauss の大きな残留磁界の存在が明らかとなった.

その後の調査により、**図 12** に示すようなヒーターがヘリウム槽の外側に断熱シートに覆われて取り付けられており、そのジャケットの材質が鉄製であることが判明した。超伝導空洞周辺部には、残留磁界をできる限り低減するために、磁気遮蔽と非磁性材料（通常、SUS316L材）を用いることが鉄則であり、空洞の低温測定以前に環境磁界測定を実施することも必須である。その後、この鉄製ヒータージャケットは撤去され、ヘリウム槽内部にも低温用磁気シールドが装着され、残留磁界 15 mGauss 以下で 1×10^{10} 以上の Q_0 値が得られることが確認された。

3.4 放電による Q 値の悪化現象

1992～1993年に行われた約 15 回の空洞測定において、最大加速電界を制限している現象は全て同じであり、その後に起こる Q_0 値の悪化も共通した現象であった。その代表例を**図 13**に示す。この図で、25 MV/m で瞬間的に測定システムの同調回路が共振周波数から外れ、空洞の真空度の

一時的悪化と X 線が観測される。その後空洞の Q_0 値は徐々に悪化して、最終的には電界放出電子に起因する性能制限により 8～10 MV/m で 10^9 以下の Q_0 値にまで低下する。また、空洞性能を回復するためには 10 μ m 程度の研磨が必要であることが分かった。この Q_0 値の悪化現象を詳細に調査するために、**図 14** に示す表面温度計測システムが開発された。この装置を用いた Q_0 悪化現象発生時の表面温度の測定結果の代表例を、**図 15** と **図 16** に示す。いずれの場合も、 Q_0 値の悪化に伴って、電界放出電子が空洞表面に衝突して発生する発熱が観測され、その電子軌道によって描かれる尾根状の発熱場所が、徐々に増加している。このことは、電子の放出源の数が、徐々に増えていることを示している。

高加速電界到達時に、真空度の悪化と X 線の放出を伴って空洞内の蓄積エネルギーが瞬時に消失し、その後著しい Q_0 値の悪化が始まることから空洞内での真空放電がその原因として推定された。超伝導空洞での放電現象を理解するために、空洞と同様な表面処理を行ったニオブ電極を試料として作製し、超高真空中でのギャップ放電によりその絶縁破壊電界の特性を調べる実験が、**図 17** に示す直流高電圧放電装置を用いて埼玉大学との協力¹⁸⁾で行われた。その放電実験の結果を**図 18**に示す。1 回目の直流絶縁破壊電界が 78 MV/m、48 MV/m であるのに対し、2 回目以降は著しく低下し、300 回の放電後でもコンディショニング効果による回復は見られなかった。したがって、ニオブ表面で放電が一度発生すると、絶縁破壊電界の著しい低下が引き起こされ、回復する可能性が期待できないことが示された。

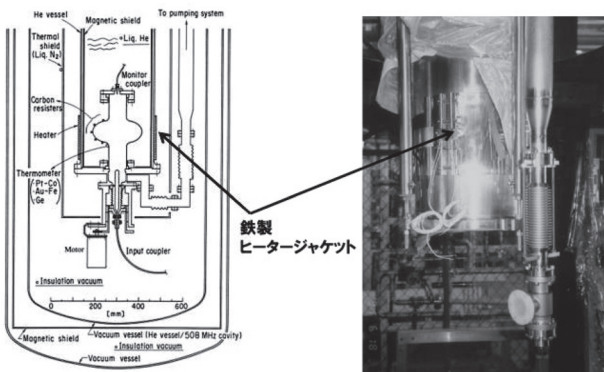


図 12 残留磁界の原因となったヘリウム槽加温用“鉄製”ヒータージャケット。

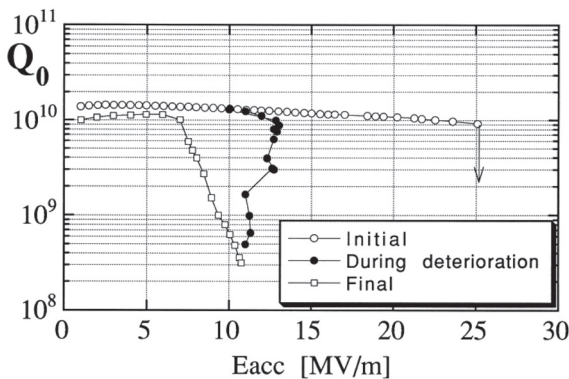


図 13 Q_0 値の悪化現象（○は初期測定時、●は悪化途中、□は最終状態を示す）。

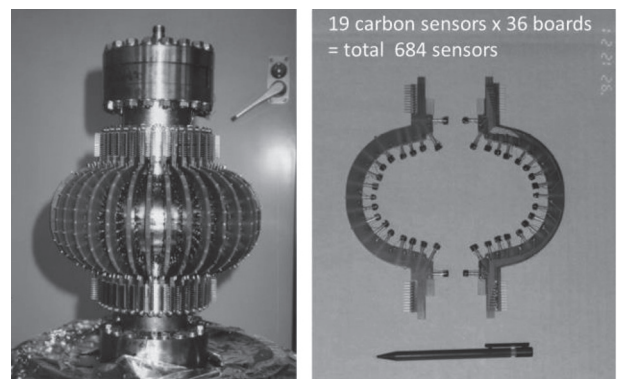


図 14 総数 684 個のカーボン抵抗から構成される単セル超伝導空洞用の表面温度測定装置。

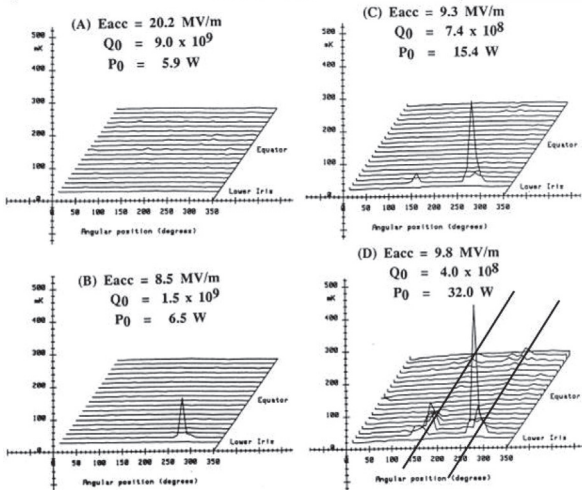
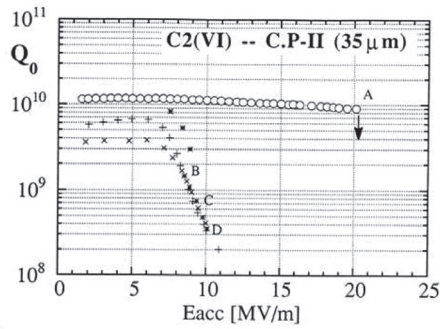


図 15 Q_0 値の悪化現象発生時の Q_0 - E_{acc} 曲線 (上) と表面温度測定の結果 (下) - 例 1.

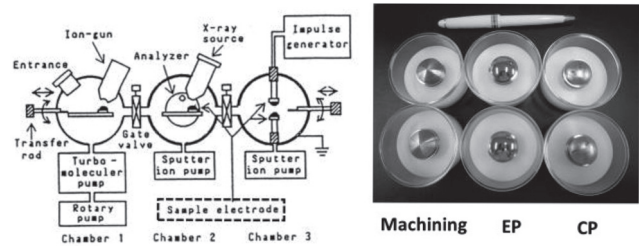


図 17 ニオブ試料での直流高電圧放電実験。(左) 真空放電用高電圧発生装置の模式図¹⁸⁾ (埼玉大学工学部電気工学科小林研究室), (右) 真空放電実験用ニオブ製試料 3 種 (左から, 機械加工, EP, CP の表面処理)。

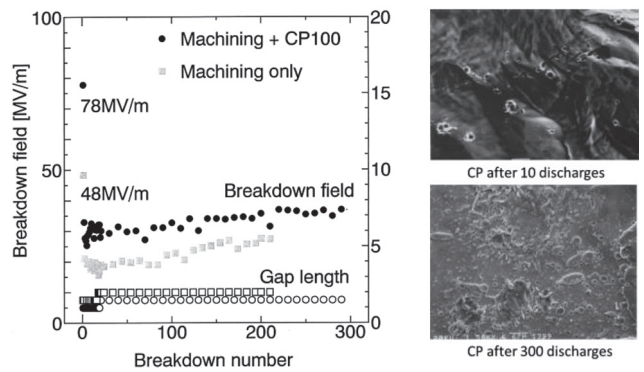


図 18 ニオブ製試料での直流放電実験の結果。(左) 絶縁破壊電界と放電回数との関係, (右) 放電後のニオブ表面の電子顕微鏡写真。

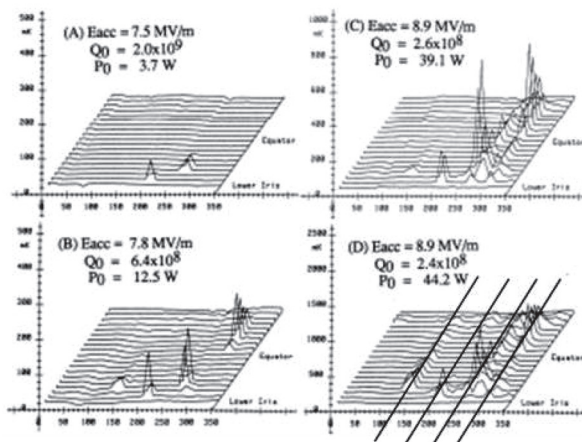
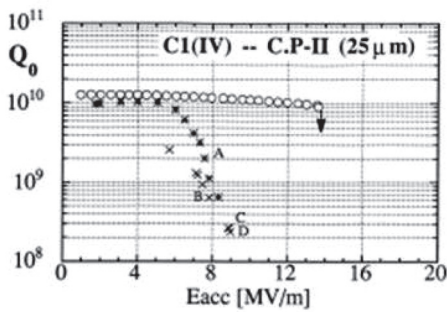


図 16 Q_0 値の悪化現象発生時の Q_0 - E_{acc} 曲線 (上) と表面温度測定の結果 (下) - 例 2.

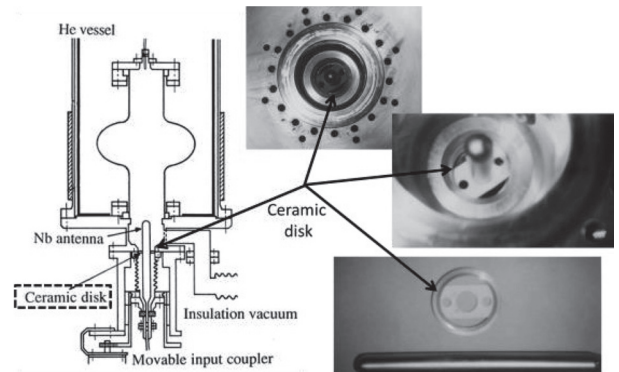


図 19 Q_0 値の悪化現象の原因となった空洞内部に位置するアンテナとセラミック板での放電。

実際に空洞内で起こっている放電現象の原因は、測定システムを分解している時に判明した。高周波電力を空洞に供給するためのニオブ製アンテナと支持用セラミック板との隙間で、放電の痕跡が見つかった。放電により発生した微粒子が空洞内に飛び散って、電界放出電子の放出源となったと考えられる。その原因となったアンテナとセラミック板の写真を図 19 に示す。このアンテナ

構造は改善され、その前後での測定結果のまとめを図20に示す。セラミック板を再度取付けた悪化現象の再現実験も実施され、この原因の特定は明確となった。

3.5 溶接欠陥によるQスイッチ

空洞の Q_0 値が突然変化して低下する現象をQスイッチと呼び、単セル空洞での観測例を図21に示す。表面温度測定(図14)により、セルとビームパイプとのEBW接合部での発熱が観測され、その発熱部内面には多数のスプッターボール(溶接時に熔融したニオブが飛散し、付着後に冷えて固まった微小球状の溶接欠陥の一種)の存在が、内面検査装置¹⁹⁾によって確認された。これらの溶接欠陥では、空洞表面との熱接触が良くないため、超伝導状態を保持する冷却能力が十分ではな

い。この Q_0 値の突然の変化は、一つの溶接欠陥が超伝導状態から常伝導状態に転移することで、高周波損失が増加したことが原因と考えられる。この発熱場所の表面磁界が低い場合、超伝導破壊が広範囲に拡がることなく、発熱と冷却が平衡して安定状態にあると推察される。開発初期の空洞では溶接条件が最適化されておらず、図22に示すようなEBW接合部での数々の溶接欠陥が、内面検査によって観測された。空洞外面からのEBWで空洞内面に突起や凹みなく滑らかな裏ビードを形成するための裕度のある幅広い溶接パラメーターの確立は、本質的に重要な技術である。

3.6 高温熱処理による座屈変形

空洞内表面に存在する溶接欠陥やキズ、付着不純物などでの局所的な発熱による超伝導破壊現象は、空洞性能を制限する主要な原因の一つである。非常に単純なモデルとして、半径(a)で表面抵抗(R_{defect})をもつ常伝導の表面欠陥によって超伝導破壊が発生する表面磁界(H_{quench})は、次式によって表される²⁰⁾。

$$H_{quench} = \sqrt{\frac{4\kappa(T_c - T_{He})}{aR_{defect}}} \quad (6)$$

ここで、 κ はニオブの熱伝導率、 T_c はニオブの臨界温度、 T_{He} は周辺温度である。同じサイズの表面欠陥が存在することを仮定すると、ニオブ材の熱伝導率を上げて冷却効率を良くすることで、空洞性能の向上が期待される。ニオブ材の4.2 Kでの熱伝導率は、RRR(Residual Resistance Ratio, 残留抵抗比)との間に、経験的に次の関係をもつ

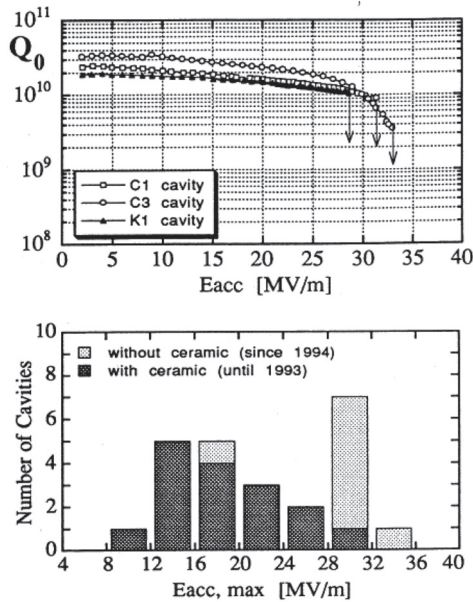


図20 セラミック板除去後に Q_0 値の悪化現象なく高加速電界を達成した3空洞の測定結果(上)、セラミック板除去前後での達成された最大加速電界の比較(下)。

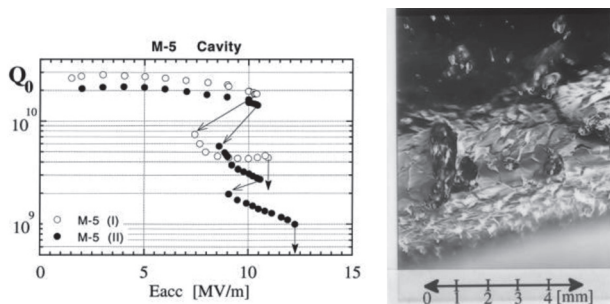


図21 Qスイッチ現象の測定結果(左)とその発熱原因である溶接欠陥(右)。

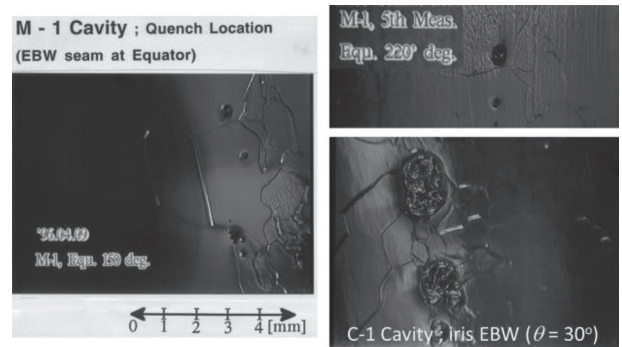


図22 内面観察により判明した開発初期の空洞内での電子ビーム溶接部の多数の溶接欠陥。

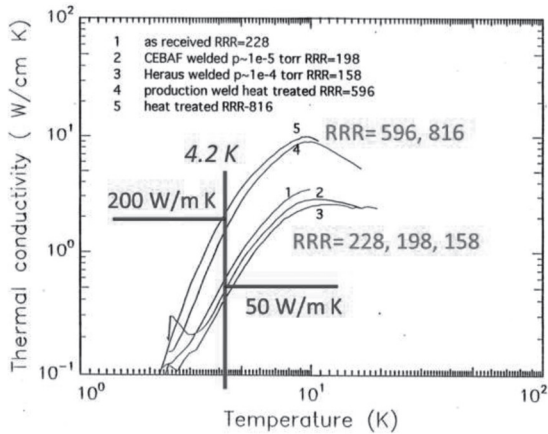


図 23 ニオブ材の熱伝導率の温度依存性²¹⁾.

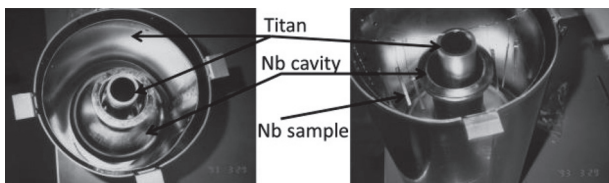


図 24 1400°Cでの高温熱処理用真空炉.

ことが分かっている²⁰⁾.

$$\kappa_{(4.2K)} \approx RRR / 4 \quad (7)$$

種々の RRR をもつニオブ材の熱伝導率の温度依存性の測定結果を図 23 に示す. RRR は材料の純度を評価する指標であり, 室温と低温での常伝導状態における抵抗値の比として, 次式で定義される.

$$RRR = \frac{\rho(300K)}{\rho(9.2K)} \quad (8)$$

ニオブ材の熱伝導率の向上にはニオブ材の高純度化が必要となり, その手法として図 24 に示すような高温熱処理真空炉を用いて, ニオブ空洞の 1400°Cでのチタン熱処理が実施された. これはニオブ空洞内外表面にチタンを蒸着させて, ニオブ中に内蔵されている不純物成分(水素, 酸素, 炭素, 窒素など)をゲッター作用でチタンに吸収させることで, ニオブの高純度化を目的とする. 一方, ニオブの高純度化は, 機械強度を著しく低下させることに注意を要する. 高温熱処理後に座屈変形を起こした 2 台の空洞を図 25 に示す. 空洞内に存在する表面欠陥を, 熱伝導率の向上に

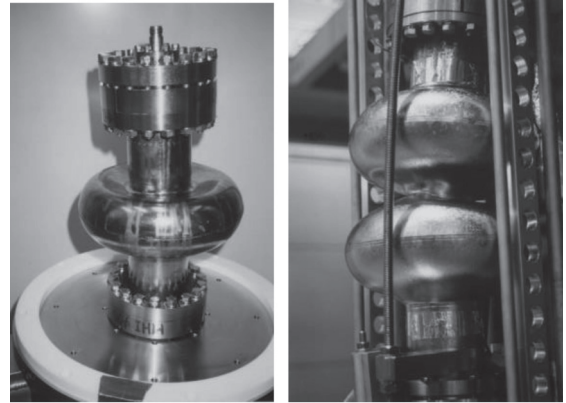


図 25 座屈変形を起こした高温熱処理後の空洞 (空洞内部は真空, 大気圧荷重による外圧により変形).

よって改善を目指す方向性は適切でないことを, この座屈変形の結果は示している.

4. ま と め

新規に装置を開発して新たな実験を開始する時には, 予期せぬ障害が発生することが多い. 分かっ
てしまえば単純なことでも, そこで起こっている現象を一つ一つ理解して, その解決策を見つけ出し, 一步一步着実に次の段階に進んでいくことが, 最終的に目標を達成し, 満足する結果を得るために, 重要なことである. 実際に, 思うように進まない時, 学ぶべきことが多いものである.

謝 辞

本解説を執筆するにあたり, 1990 年から長年にわたり高加速電界応用を目指して 1.3 GHz 超伝導空洞の研究開発を共に継続し, 夢の実現に向かって超伝導空洞技術の発展を牽引しつづけた野口修一 KEK 名誉教授, および, 齋藤健治 KEK 元教授 (現ミシガン州立大学), そして, 宍戸寿郎 KEK 前任技師に, 深く感謝致します.

参考文献

- 1) D. Reschke, "Recent Progress with EU-XFEL", Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOAA02.
- 2) M. Ross, "SRF Linac for LCLS-II: Design Approaches, R&D and First Results", Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOBA01.
- 3) K. Saito, et al., "FRIB Project: Moving to Production Phase", Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOAA01.
- 4) D. Jeon, "Status of the RISP Superconducting Heavy

- Ion Accelerator”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOAA05.
- 5) F. Peauger, et al., “Progress in the Elliptical Cavities and Cryomodule Demonstrators for the ESS Linac”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) TUPB007.
- 6) Y. He, et al., “Progress in Chinese ADS Project”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOAA04.
- 7) S. Noguchi, et al., “Status of TRISTAN Superconducting RF Program”, Proc. of SRF87, Chicago, USA (1987) 605-624.
- 8) T. Furuya, et al., “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-Factory”, Proc. of SRF95, Gif-sur-Yvette, France (1995) 729-733.
- 9) K. Hosoyama, et al., “Fabrication of Full Scale Crab Cavity for KEKB”, Proc. of SRF97, Padova, Italy (1997) 547-552.
- 10) E. Kako, et al., “Pulsed Operation of the 972MHz Prototype Cryomodule for ADS Superconducting Linac”, Physica C 441 (2006) 220-224.
- 11) E. Kako, et al., “Cryomodule Tests of Four TESLA-like Cavities in the Superconducting RF Test Facility at KEK”, PRST-AB Vol.13, 041002, (2010).
- 12) K. Watanabe, et al., “Development of the Superconducting RF 2-cell Cavity for cERL Injector at KEK”, NIM-A, 714 (2013) 67-82.
- 13) K. Umemori, et al., “Status of 9-cell Superconducting Cavity Development for ERL Project in Japan”, Proc. of SRF09, Berlin, Germany (2009) 355-358.
- 14) H. Nakai, et al., “Tensile Tests of Materials at Low Temperatures for ILC Superconducting RF Cavities and Cryomodules”, 低温工学 48 卷 8 号 (2013) 436-444.
- 15) H. Nakai, et al., “Charpy Impact Tests of Materials at Low Temperatures for ILC Superconducting RF Cavities and Cryomodules”, 低温工学 48 卷 8 号 (2013) 445-450.
- 16) Y. Kojima, et al., “Superconducting RF System of TRISTAN”, Proc. of EPAC90, Nice, France (1990) 1082-1084.
- 17) K. Saito, et al., “TESLA Activities at KEK”, Proc. of SRF93, Newport News, VA, USA (1993) 372-381.
- 18) S. Kobayashi, et al., “Vacuum Breakdown Strength of Vacuum-degassed Oxygen-free Copper Electrodes”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.28 No. 4 (1993) 500-506.
- 19) Developed by Dr. Takeo Fujino, KEK.
- 20) H. Padamsee, et al., “RF Superconductivities for Accelerators”, by JOHN WILEY & SONS, INC., USA (1998) 206.
- 21) G.R. Myneni, Private Communication.