

超伝導空洞の性能評価

1. はじめに

本講義の前に行われた加古永治教授の講義「超伝導空洞の基礎 1、2」及び、「超伝導空洞の周辺技術」において、空洞の設計、高周波、超伝導の基礎理論や周辺技術の基礎を学んだ上で、では実際の空洞性能評価にあたり、具体的にはどのような対応がなされるのか？を本講義では解説します。対象となるのは、ILC用に研究開発されたニオブ製1300 MHz 9セル超伝導空洞ですが、cERL (Compact Energy Recovery Linac) の入射器用に開発された2セル超伝導空洞や、主加速空洞9セル超伝導空洞にも同様に当てはめる事が出来ます。

2. 空洞の処理工程；

受け入れ検査から内面検査まで

新しく製造された空洞が KEK に納められた後に行われる処理工程は以下の通りです。

1. 受け入れ検査
2. 内視鏡による内面検査
3. Pre-EP、EP-I (Pre-Electropolishing、Electropolishing-I)
4. 一次洗浄、温水超音波洗浄、超純水高圧洗浄 (High Pressure Rinsing ; H.P.R.)
5. アニール(Anneal)
6. 内視鏡による内面検査

空洞の電解研磨処理や化学研磨処理、水洗工程の詳細については、沢辺元明氏の講義を参考にして下さい。

2.1. 受け入れ検査

空洞のセル間隔、全長、赤道溶接部の厚み、共振周波数、電場平坦度、パルスモードの周波数と電場強度の測定を行い、空洞の初期状態を把握します。

電場平坦度(Field Flatness)=(電場強度の最小値)/
(電場強度の最大値)*100 (2-1)

2.2. 内視鏡による内面検査

京都大学にて開発された内視鏡、「京都カメラシステム」を使い、空洞内面のアイリス部、赤道溶接部の検査を行い、空洞内面の初期状態を把握します(Fig.1)。KEK で ILC 用超伝導空洞の研究開発が始まった 2005 年頃は、溶接欠陥除去のため遠心バレル研磨を行っていました(Fig.2)。これは研磨材と水を内部に入れた空洞を、公転運動させると共に公転と逆向きに自転運動させる事で、主に赤道溶接部を効率よく研磨する処理方法です。その後、溶接技術の向上により省略されました。

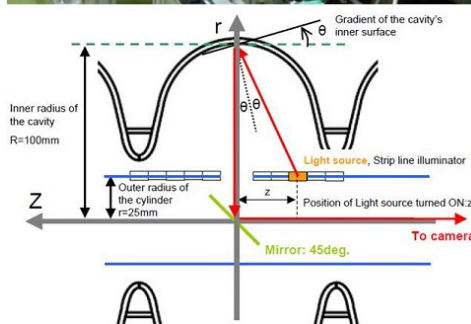


Fig. 1 京都カメラシステム

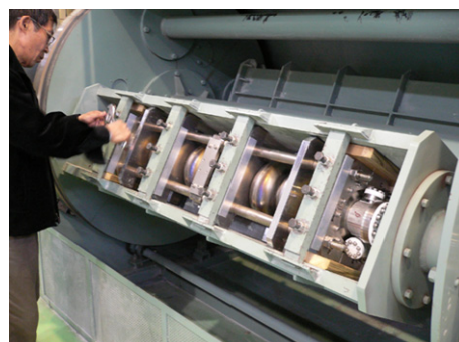
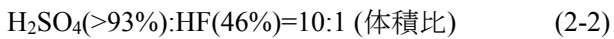


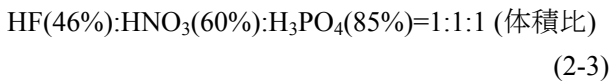
Fig. 2 遠心バレル研磨装置

2.3. 電解研磨 (Pre-EP、EP-I)

Pre-EP(Pre-Electropolishing) はタンク内の電解研磨液の汚染を防ぐため、液を循環させずに行う 5 μm 程度の少量研磨です。空洞内面の不純物除去が目的です。これが終わると EP-I (Electropolishing-I) と呼ばれる 100 μm 程度の初期多量研磨を行います(Fig.3)。EP-I では液の循環を行います。電解研磨液は



からなりますが、以前は液組成



からなる CP (Chemical Polishing ; 化学研磨)が行われていました。これは液を空洞内に注ぎ、テフロン棒で攪拌するだけの簡単な表面処理法です(Fig.4)。しかしながら EP と比較して高加速電場を出すのが難しいために、今では部品洗浄や空洞フランジ面の処理に使われています。



Fig. 3 電解研磨装置

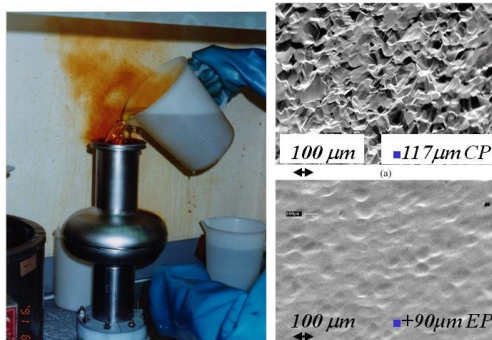


Fig.4 化学研磨処理と表面粗さ

2.4. 一次洗浄、温水超音波洗浄、超純水高圧洗浄

EP が終わると空洞内に超純水を溜めては流す工程を繰り返す、主に EP 液の排出を目的とする一次洗浄を行います(Fig.5)。続いて、Degreaser FM20 と超純水を空洞内に溜め、50 $^{\circ}\text{C}$ の恒温槽に沈めて超音波洗浄を約 15 分を行います(Fig.6)。最後に 8 MPa の超純水高圧洗浄を 1 時間程度行います(Fig.7)。EP-I 後の洗浄工程は、EP 液の完全な洗浄が主目的です。(この後、アニールや内面検査で空洞内部が大気開放されるためです。)

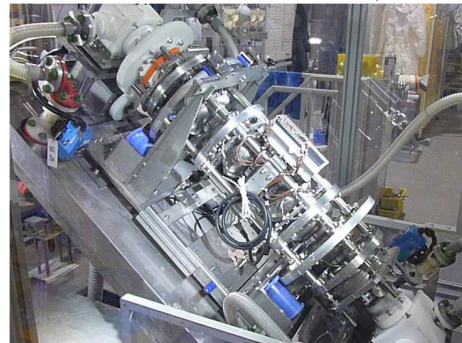


Fig.5 一次洗浄 ; 液抜き

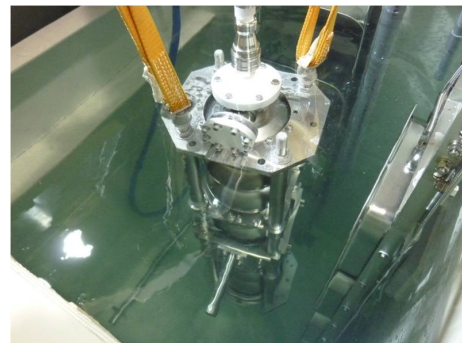


Fig.6 温水超音波洗浄



Fig.7 超純水高圧洗浄

2.5. アニール (Anneal)

空洞製造に使われた個々の材料の残留応力除去と、ニオブ材に取り込まれた主に水素除去を目的とし、真空炉にて 750 °C、3 時間の熱処理を行います。空洞はチタン製箱に納められ、チタンのゲッター作用を利用して、効率よく水素を除去します(Fig.8)。

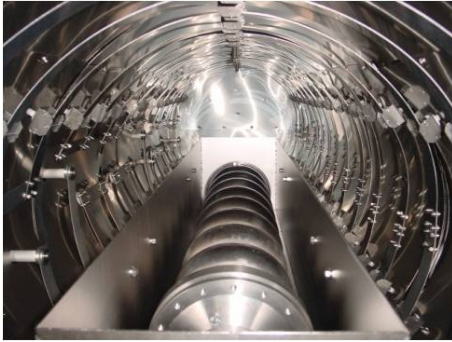


Fig. 8 アニール用真空炉

2.6. 内視鏡による内面検査

2.3 から 2.5 までの内面処理工程を経て、再度京都カメラにて内面検査を行います。表面処理を行った結果、受け入れ検査時に見つかった欠陥がどう変化したか、あるいは無かった欠陥が新たに生じたかの確認が目的です。

3. 空洞の処理工程；

プリチューニングから縦測定

受け入れ工程が済むと、空洞単体性能試験(縦測定)を行うための以下の工程が始まります。

1. 局所研磨 (Local Grinding)
2. プリチューニング (Pretuning)
3. 仕上げ電解研磨 EP-II (Electropolishing-II)
4. 1 次洗浄、温水超音波洗浄、超純水高圧洗浄(H.P.R.)
5. Class10 クリーンルームでの空洞組立
6. リークチェック、ベーキング (140 °C、44 時間)
7. 空洞単体性能試験 (縦測定)

縦測定において、要求仕様を満たす性能を達成出来ない場合、測定で得られたデータを基に、内面検査、局所研磨を施し、縦測定を繰り返します。

3.1.局所研磨 (Local Grinding)

ヘッドにダイヤモンドシートを張り付け、欠陥部分に押し当て研磨する装置です(Fig.9)。無負荷でのヘッドの回転数は 12 Volt、3000 rpm、研磨量は 10 Volt、400 番シートで 5 μm/10 分、1000 番シートで 3μm/10 分です。

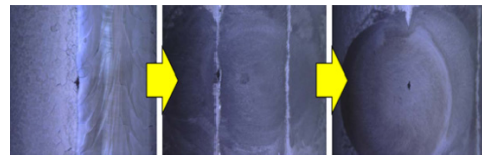
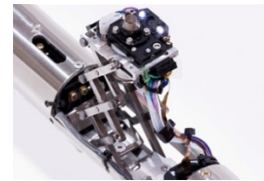


Fig.9 局所研磨装置

温度マッピング装置で、空洞性能を制限する発熱箇所を特定し、京都カメラでその場所を確認、欠陥があればこの装置で除去します。性能向上のための非常に有効な装置です。

3.2. プリチューニング (Pretuning)

空洞の共振周波数を加速器の運転周波数に一致させ、かつ全てのセルで効率よくビーム加速させるために、各セルでの電場強度を一様に揃える工程です。セルをパッドで挟み込み、アイリス部を変形させる事で周波数を変えます(Fig.10)。ILC 用 9 セル空洞の場合、運転周波数は 1300 MHz であり、チューナー及びピエゾ素子での周波数制御範囲と、2 K への冷却、空洞内やクライオモジュール内の圧力変化による周波数変化を考慮して、常温大気圧下で 1297.3~1297.5 MHz に共振周波数を合わせると共に 98 %以上の Field Flatness を目指します(Fig.11)。

縦測定の結果、再測定を行う事が決まると、共振周波数と Field Flatness の測定を行います。Field Flatness が劣化したり(約 95%未満)、共振周波数が低くなった場合には再度チューニングします。



Fig.10 Pretuning 装置

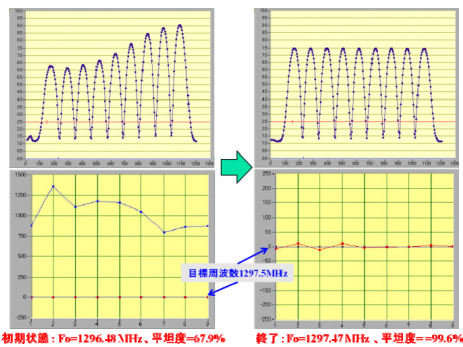


Fig.11 Pretuning

(1296.48MHz, 67.9%→1297.47MHz, 99.6%)

3.3.EP-II、一次洗浄、温水超音波洗浄、超純水高圧洗浄

これらの工程は、2章で説明した工程と基本的には同じです。FM20 を用いた温水超音波洗浄は、以前は 1 時間行っていました但最近では 15 分に短縮されました。

仕上げ電解研磨と呼ばれる EP-II での研磨量は 5~20 μm ですが、20 μm の場合、Field Flatness の劣化が比較的大きいため、内面検査の結果が不良でない限り、5 μm の少量研磨にしています。

2 章の工程と異なるのは超純水高圧洗浄です。空洞内面の清浄化が主目的であり、空洞性能を決める重要な工程ですので、十分な時間をかけて行います。空洞の各ポート(ビームパイプポート 2、入力カプラーポート 1、高次モードカプラーポート 2、モニターポート 1) 開状態で約 2.5 時間、その後、H.P.R. ノズルが上下する下側ビームパイプポートを除き、フランジを用いて各ポート閉状態で 2.5 時間、合計約 5 時間行います。これも以前

は約 9 時間(ポート開 4.5 時間+ポート閉 4.5 時間)行っていました。温水超音波洗浄共々、性能には影響がない事をきちんと確認し、時間短縮しています。

3.4. 縦測定に備えた空洞組み立て

5 時間におよぶ洗浄が終わると、唯一開いていたポートもフランジで閉じ、密閉します。その状態でクラス 10 クリーンルームへ空洞を移動し、縦測定に必要なフランジ、排気系バルブ、入力アンテナ、出力アンテナ等の取り付けを行います。(クラス 10 : 0.5 μm の粒子 <10 個/ ft^3 、ISO 規格のクラス 4 ; 0.1 μm の粒子 $<10^4$ 個/ m^3 に相当します。) これらの部品や組み立てに使用されるボルト類は、事前に超音波洗浄、超純水洗浄を行い、クラス 10 で保管しておきます。部品を取り付ける箇所のフランジを外す前にイオンガン(Fig.12)で十分に清浄化を行い、また取り付ける部品も同様にイオンガンで清浄化し、すばやく取り付けを行います。

部品取り付けが完了するとヘリウムガスを用いてリークチェックを行います。空洞性能試験は超流動ヘリウムに沈めた状態で行いますのでリークチェックは非常に重要です。問題なければ 140 $^{\circ}\text{C}$ 、44 時間のベーキングを行います(Fig.13)。

真空シール材である錫メッキされたヘリコフレックスは、フランジを外した際、フランジ面への錫の付着が少なく取り扱いが容易です。以前はインジウムリボンを使用していましたが、剥がす際に空洞内面の汚染が起こり易く、その後、インジウムメッキされたヘリコフレックスに変更されました。さらにベーキング温度が高い方が空洞性能が良いという実験結果が出た事から、100 $^{\circ}\text{C}$ で行っていたベーキングを 120 $^{\circ}\text{C}$ に上げました。しかし、メッキされたインジウムが溶け出す可能性があり、またよりベーキング温度を上げるため、錫メッキに変更、現在 140 $^{\circ}\text{C}$ で行っています。

Table 1 インジウムと錫の物理特性

インジウム	超伝導転移温度=3.4K、融点=157 $^{\circ}\text{C}$
錫	超伝導転移温度=3.7K、融点=232 $^{\circ}\text{C}$

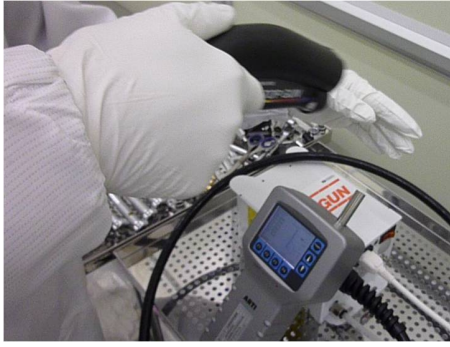


Fig.12 イオンガン



Fig.13 ベーキング

3.5. 測定用クライオスタットへの移動

ベーキングが終了し、空洞真空が $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa に到達するとメタルバルブを閉じ、封じ切りにしてクリーンルームから測定スタンドへ移動します。

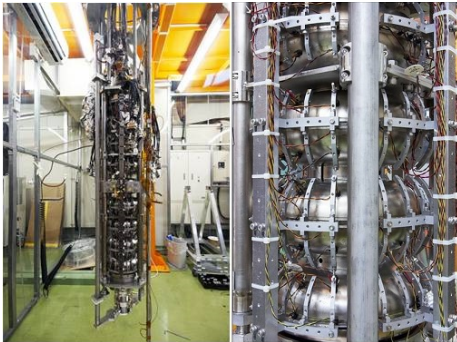


Fig.14 スタンドに設置された9セル空洞(左)と温度マッピング装置(右)

スタンドに設置し排気系を接続すると、空洞のメタルバルブを閉じたまま排気系配管のベーキングを行います。ベーキング終了後、配管の真空度が空洞内真空度と同等まで良くなると、空洞のメタルバルブを開きます。

スタンドに設置した後、縦測定に必要な温度マッピング装置やX線マッピング装置の取り付けも行います(Fig.14)。

測定に必要な装置の設置が済み、また空洞内真空度が 10^{-7} Pa 程度に到達すると、バルブを閉じ、排気系を切り離し、縦測定用クライオスタットへ空洞を移動、挿入します(Fig.15)。



Fig.15 クライオスタットへの空洞の挿入

挿入が完了すると、排気系の接続、各種ケーブルの接続が行われ、測定開始を待ちます。

4. 空洞単体性能試験 (縦測定)

空洞性能測定は、Fig.15 の様に、縦型クライオスタットにて行われるため「縦測定(Vertical Test)」と呼ばれます。

4.1. 液体ヘリウムの注入

液体ヘリウムが通るラインは、事前にヘリウムガスで置換しておく事が重要です。(デュワーから液体ヘリウムを取りだすトランスファーチューブも、ヘリウムガスを充填してから差し込みます。)

準備が整うと、クライオスタット内への液体ヘリウムの注入を開始します。



Fig.16 液体ヘリウムデュワー

9セル空洞の場合、測定は2日に渡り行われます。初日は室温から液体ヘリウムを注入して4.2 Kでの、翌日は4.2 Kの状態に液体ヘリウムを注入しながらクライオスタット内を減圧し、超流動ヘリウム状態 (2.17 K以下。通常は1.8 K~2 K)での測定を行います。各々、1000L デュワー1本を使用します(Fig.16)。

デュワー内部にポンプでヘリウムガスを送り込み、内圧を上げる事で液体ヘリウムをクライオスタット内へ送り込みます。

4.2. 縦測定の高周波制御系

Fig.17 は縦測定の全体図を、Fig.18 は高周波制御系を表します。我々の扱う9セル空洞で実際に測定する高周波電力は、空洞への入力電力(Pin)、空洞からの反射電力(Pref)、空洞透過電力(Pt)、高次モードカプラー透過電力(PHOM1、PHOM2)、プローブ電力(Pprobe)ですが、その他に出力ポートがある場合はそれも加えます。

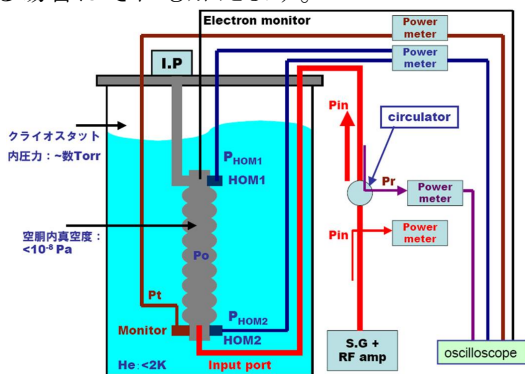


Fig.17 縦測定全体図

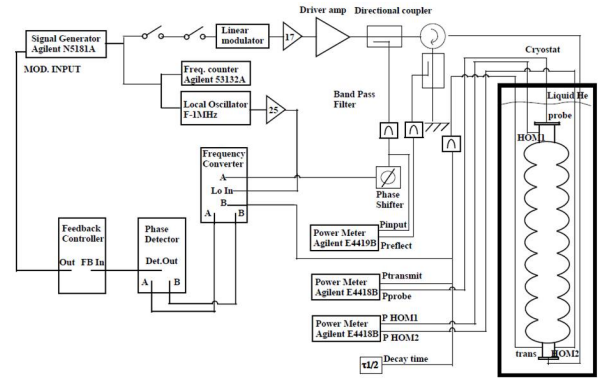


Fig.18 高周波制御系

最大出力 400W のドライバーアンプ(Driver Amplifier)後方にある方向性結合器(Directional Coupler)から取り出した出力と、空洞を透過してきた出力の間に PLL(Phase Lock Loop)が組み込まれています。両信号を周波数変換器(Frequency Converter: 1300 MHzを1 MHzに変換)に通した後、位相検出器(Phase Detector)で位相差を検出します。位相差 1°あたり 50 mV の出力電圧で、これを Feedback Controller 経由で信号発生器の周波数変調(Frequency Modulation)ポートに入力し、空洞の共振周波数を追尾します。同時に反射電力が最低になる様、入力カプラー(Input Coupler)と移相器(Phase Shifter)で調整します。

放射線シールドが開いている様な測定に不適切な状態であったり、時間当たりの放射線の積算上限値(20 μSv/h)を超えた場合には自動的に信号発生器の出力を切るインターロック(Interlock)回路が組み込まれています。

4.3. 測定に必要な計算式

制御室内に置かれた Power Meter に表示される各電力の値を P'i (i=input, reflect, transmit, HOM1, HOM2, probe)、各電力ケーブルのロス係数を Ci とします。ロス係数は事前に液体ヘリウムが十分溜まった状態で測定しておきます。すると各電力の実の値は以下の様になります。

$$P_i = P'_i * C_i \quad (4-1)$$

空洞で消費される実電力 Po は

$$P_o = P_{in} - P_{ref} - P_t - P_{HOM1} - P_{HOM2} - P_{probe} \quad (4-2)$$

となります。

空洞の負荷 Q 値(Loaded Q value) を QL、空洞への入力 Pin を切った時、Transmit ポートからの出力 Pt の減衰時間 $\tau_{1/2}$ (Decay Time ; 電力が半分になる時間)、空洞の共振周波数 fo とすると

$$Q_L = 2\pi f_o \tau_{1/2} / \ln 2 \quad (4-3)$$

減衰時間は次の様にして求められます。まず検波ダイオード(極性に注意)に電力 P を入力し、その出力電圧 V0 をオシロスコープで測定します。その後、P/2 の電力を入力し同様に出力電圧 V1 を測定します。減衰波形が V0 と V1 を横切る時間間隔が減衰時間 $\tau_{1/2}$ に相当します。

各ポートに付けられたアンテナの結合定数 (Coupling Constant)を β_i 、Q 値を Qi、空洞の無負荷 Q 値(Unloaded Q value) を Qo とします。

$$\beta_i = P_i / P_o \quad (i = \text{transmit, HOM1, HOM2, probe}) \quad (4-4)$$

$$\beta_L = \beta_L (1 + \beta_t + \beta_{HOM1} + \beta_{HOM2} + \beta_{probe}) \quad (4-5)$$

$$\beta_L (\text{Over Coupling}) = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}} \quad (4-6)$$

$$\beta_L (\text{Under Coupling}) = \frac{1 - \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}}{1 + \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{in}}}} \quad (4-7)$$

$$Q_i = Q_o / \beta_i \quad (i = \text{input, transmit, HOM1, HOM2, probe}) \quad (4-8)$$

ここで Over Coupling とは入力カップラーを空洞内に入れていくと反射電力が増加する状態、Under Coupling とは入力カップラーを空洞から引き抜いていくと反射電力が増加する状態です。減圧(冷却)途中では空洞の Q 値が良くなっていくため、測定途中に Under から Over へ状態が変わらない様、常に Over Coupling で測定します。

液体ヘリウムを 4 K から 2 K へ冷却中の測定において求めたい値、1) 空洞の無負荷 Q 値 Qo、2) 加速電場 Eacc [MV/m]、3) 表面抵抗値 Rs (Surface Resistance) [Ω]は次の式から得られます。

$$Q_o = Q_L (1 + \beta_{in} + \beta_t + \beta_{HOM1} + \beta_{HOM2} + \beta_{probe}) \quad (4-9)$$

$$E_{acc} = \sqrt{[(R/Q)\omega W] / L_{cavity}} = \sqrt{[(R/Q)P_o Q_o] / L_{cavity}} = Z \sqrt{(P_o Q_o)} \quad (Z = \sqrt{[(R/Q)] / L_{cavity}}) \quad (4-10)$$

ここで $\omega = 2\pi f_o$ 、Lcavity は空洞の有効長、W は空洞に蓄積される電磁場のエネルギー、

$$W = \frac{\mu}{2} \int |\vec{H}|^2 dV = \frac{\epsilon}{2} \int |\vec{E}|^2 dV \quad (4-11)$$

R/Q は加速モードのインピーダンスで、ILC 用 9 セル超伝導空洞では R/Q=1016 [Ω]、Z=30.8 になります。

$$R_s = G / Q_o \quad (4-12)$$

ここで G は形状因子(Geometrical Constant)で ILC 用 9 セル超伝導空洞では 277 [Ω]になります。

4 K および 2 K 以下での High Field 測定では、測定したいモード($\pi \sim 3\pi/9$)で(4-1)~(4-10)の測定を行い Qt を求め、 $P_o * Q_o = P_t * Q_t$ が成り立つので

$$Q_o = Q_t * P_t / P_o \quad (4-13)$$

$$E_{acc} = Z \sqrt{(P_o Q_o)} = Z \sqrt{(P_t Q_t)} \quad (4-14)$$

左側縦軸を Qo、横軸を Eacc [MV/m]、右側縦軸を X 線量として測定値をプロットして空洞性能を評価します。

5. 縦測定の実例

この章では縦測定の実例を示します。

5.1. 4.2 K での測定例

液体ヘリウムの充填が完了した後、最初に行う測定です。ただし 4 K では最大加速電場 ~ 10 MV/m 程で空洞消費電力 $P_o \sim 200$ W になりますので、システムチェックが主な目的の測定です。

もしこの低い加速電場領域でX線が観測される様ですと、2 K での高性能達成は厳しくなります。

例として Fig.19 に MHI#24 号機の 3 回目縦測定結果を示します。この空洞は 4 K の測定から X 線が観測されました(図中の□)。2 K に冷却後の測定でも電界放出電子(Field Emission)による X 線の量が多く、ILC 要求仕様には遠く及ばず、内面検査、再処理、再測定になりました。

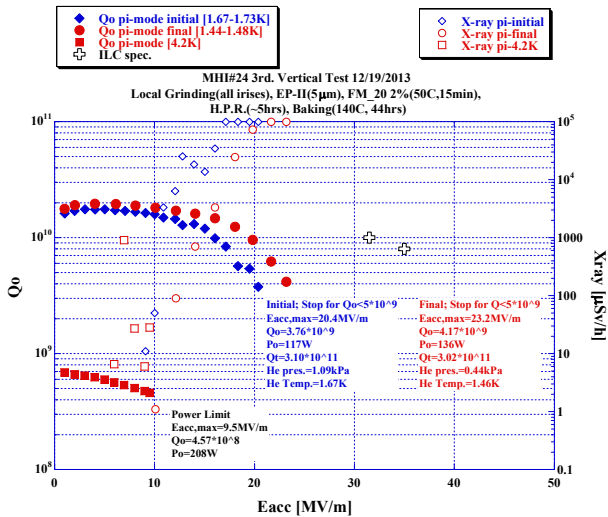


Fig.19 MHI#24 3rd. V.T. Qo vs. Eacc

5.2. 4.2K から 2 K に冷却中の測定例

Fig.20 と同じく MHI#24 号機 3 回目縦測定における 4 K から 2 K へ冷却中の測定結果を示します。

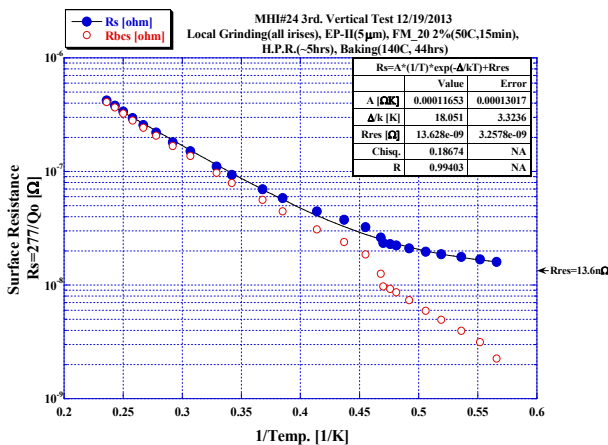


Fig.20 MHI#24 3rd. V.T. Rs vs. 1/Temp.

この測定は空洞の表面抵抗と残留表面抵抗を求めるのが目的です。表面抵抗は Qo が最も大きくなる Eacc~3.5 MV/m で測定を行っています。

超伝導空洞の表面抵抗 $R_s[\Omega]$ は温度依存性を持つ BCS 抵抗と、温度には依存せず空洞表面の状態が決まる残留抵抗 $R_{residual}$ の和で表されます。

$$R_s = R_{BCS}(T) + R_{residual} \quad (5-1)$$

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B \cdot T}\right) \quad (5-2)$$

ここで k_B は Boltzmann 定数で 1.38×10^{-23} J/K、 2Δ は超伝導電子対のエネルギーギャップです。得られた測定データから最適フィッティングを行い、残留表面抵抗を求めます。この測定での残留表面抵抗は 13.6 nΩ です。なお、残留表面抵抗が大きいと Q 値は低くなりますが、得られる最大加速電場が必ずしも低くなる訳ではありません。

Fig.21 は 90 年代に 1 セル空洞で研究開発を行っていた頃に測定した、最大加速電場の温度依存性を示したグラフです。超流動状態になると最大加速電場が跳ね上がる事が分かります。

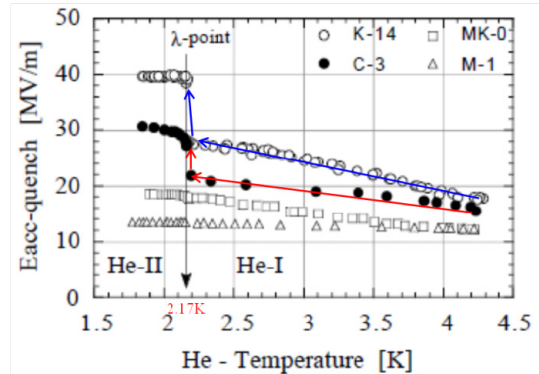


Fig.21 最大加速電場の温度依存性

液体ヘリウムは 2.17 K (約 3 kPa) で相転移して超流動ヘリウムになりますが、超流動状態になると冷却効率が極めて高くなり液体内の熱が素早く伝わるため、Fig.22 で示す様に沸騰は液面のみで起こるようになります。

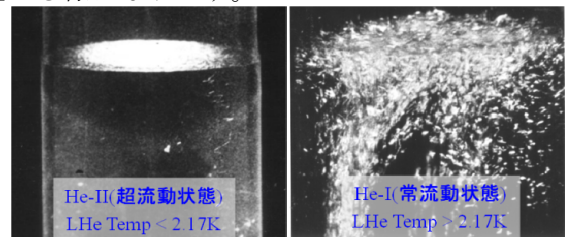


Fig.22 液体ヘリウムの沸騰の様子 (Wikipedia より)

沸騰した液体ヘリウムが空洞性能に影響したと考えられる測定例を次に示します。この測定の

目的は、磁気シールドの有無で残留表面抵抗がどう変わるのかを調べる事でした。測定条件としては、クライオスタット内の磁気シールドを取り除き、空洞周りをほとんど穴の開いていない磁気シールドで覆っています。(Fig.23)。

測定結果を Fig.24 に示します。5 MV/m 位(Po~50 W、Fig.27 の 4 K 測定参照)から Q 値が落ちていくのが分かりますが、これは沸騰によって発生した泡がシールド内から抜けられずに溜まり、空洞の冷却を妨げた結果と考えられます。2 K ではこの様な性能劣化は全く見られません。



Fig.23 磁気シールドで覆われた HITACHI#02

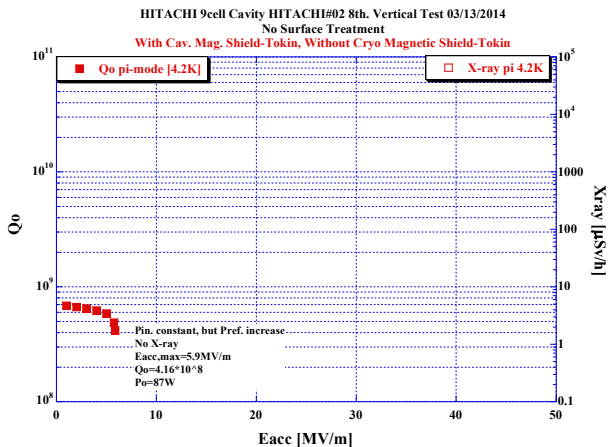


Fig.24 HITACHI#02 8th. V.T.
With Cavity Magnetic shield,
Without Cryostat Magnetic shield

5.3. 2 K での測定例：40 MV/m を達成した空洞

2 K での高性能達成が最重要課題ですが、ここで最大加速電場 40 MV/m 以上を出した空洞の測定例を示します。

5.3.1. 40 MV/m を達成した空洞：MHI#12

MHI#12 号機は KEK STF(Superconducting RF Test Facility; 超伝導高周波試験開発棟)での量子ビーム計画(Quantum Beam Project)用空洞の 1 台で、9 セル空洞では日本国内で初めて 40 MV/m を超えた空洞となりました(Fig.25)。

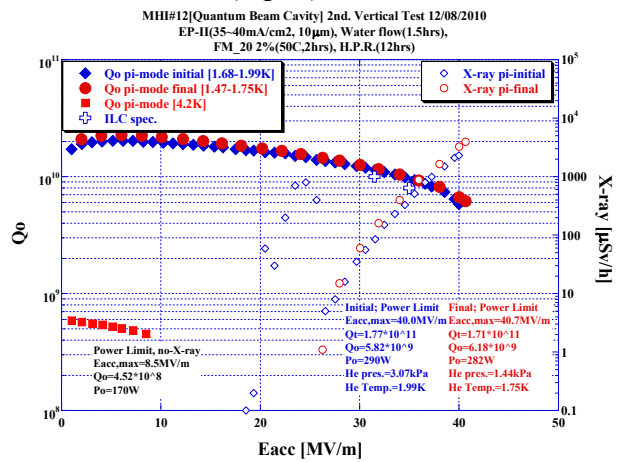


Fig.25 MHI#12 2nd. V.T. Qo vs. Eacc

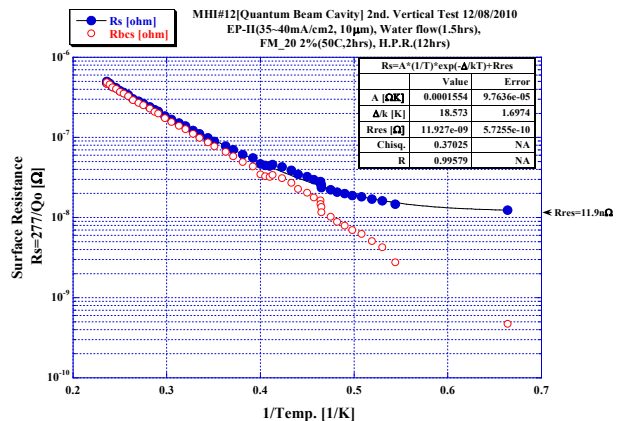


Fig.26 MHI#12 2nd. V.T. Rs vs. 1/Temp.

Fig.26 からこの空洞の残留表面抵抗は 11.9 nΩ と求まりますが、最大加速電場 23 MV/m で制限された MHI#24 号機の残留表面抵抗 13.6 nΩ (Fig.20) とあまり変わらない事が分かります。

5.3.2. 40 MV/m を達成した空洞 : HITACHI#02
ILC 用 9 セル超伝導空洞の研究開発を KEK と行っていた日立製作所が、2012 年度に製造した 9 セル空洞 2 号機です(Fig.27)。

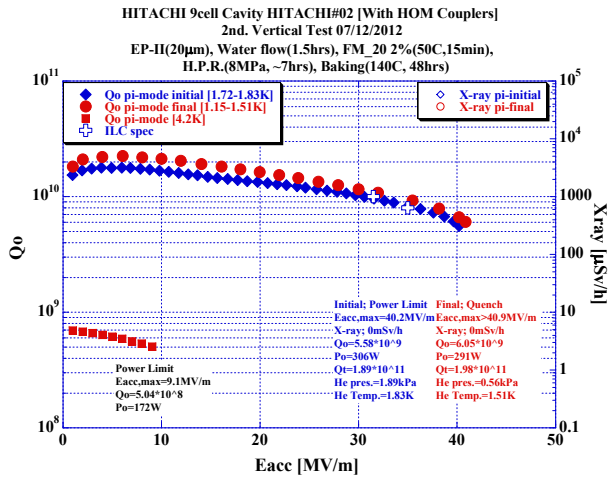


Fig.27 HITACHI#02 2nd. V.T. Qo vs. Eacc

この空洞の測定では 40 MV/m まで全く X 線が出ないという驚くべき結果となりましたが、測定前に全てのアイリスの研磨を行っていました。その後に行われた空洞の測定でもアイリス研磨は X 線低減に非常に有効である事が分かり、今では標準的な処理工程の一つに加えられています。

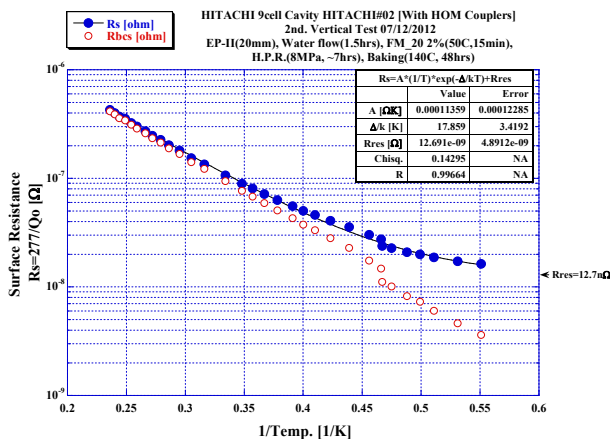


Fig.28 HITACHI#02 2nd. V.T. Rs vs. 1/Temp.

Fig.28 からこの空洞の残留表面抵抗は 12.7 nΩ と求まりますが、MHI#12号機同様、Fig.20 の値とあまり変わらない事が分かります。

5.3.3. 50 MV/m を達成した空洞 : cERL#02

cERL(Compact Energy Recovery Linac)の入射器用に開発された 2 セル空洞ですが、それまでの常識

を打ち破る最大加速電場 50 MV/m を達成しました(Fig.29)。

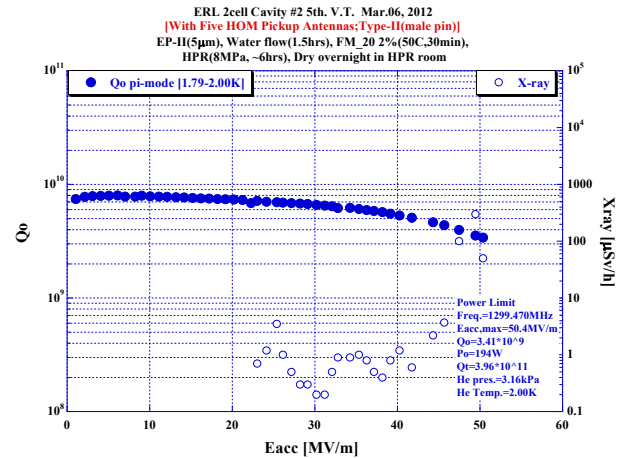


Fig.29 cERL 2cell #02 5th. V.T. Q vs. Eacc

これまで KEK で測定を行った空洞は、RRR = 130~800 (RRR : Residual Resistivity Ratio 残留抵抗比。値が高い程純度、熱伝導率が高い。) のニオブ材で製造されてきましたが、この範囲では RRR によらず、最大加速電場の上限はほぼ 40 MV/m でした。そのため、最大加速電場を決めているのは表面磁場であると考えられ、40 MV/m に対応する磁場として約 1700 Oe が、我々の採用している空洞形状(Hsp/Eacc=41.4 Oe/MV/m)の臨界表面磁場と考えられてきました。しかしながら、この 2 セル空洞の結果から、臨界表面磁場は約 2100 Oe に改められる事となりました。これは Cornell 大学の結果^[1]に次ぐ世界で 2 例目の結果になります。

5.4. 2 K での測定例 : 性能の出ない空洞

前章の結果とは異なり、性能が出なかった空洞の測定例を示します。

5.4.1. MHI#24 4 回目の縦測定

Fig.19 で示した MHI#24 号機は電解研磨 5 μm を行い、4 回目の測定になりました。測定結果を Fig.30 に示します。4 K では特に何事も起こらず終了しました。

1.7 K まで冷却しての測定で、15 MV/m 付近から X 線が出始め、20 MV/m を超えた辺りから Field Emission による Q の落ちが激しくなり Quench しました。しかしながらこの Quench で Q が回復、高性能を期待しましたが 26 MV/m で再度 Quench しました。この Quench にて表面が汚染された様

で矢印先に劣化しました。Field Emission が酷く、X線量も増大しました。この空洞は4回測定しましたが最後までField Emission を克服出来ませんでした。

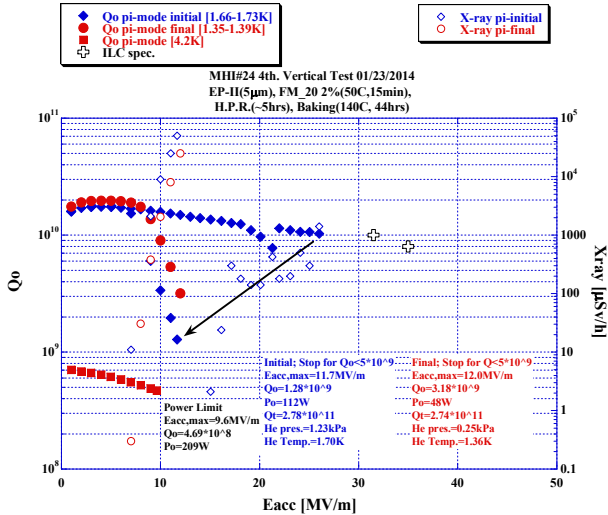


Fig.30 MHI#24 4th. V.T. Qo vs. Eacc

5.4.2. MHI#23 1 回目の縦測定

続いて MHI#23 号機 1 回目の縦測定結果を Fig.31 に示します。この空洞は最大加速電場としては 31 MV/m を達成しましたが、そこでセルフパルス (Selfpulse : 欠陥部で発熱し Quench すると高周波電力が空洞に入らないため冷却されて発熱箇所が再度超伝導になり電力が入るようになる事を繰り返す) を起こし性能制限されました。Fig.32 にセルフパルスを起こしている様子を示します。

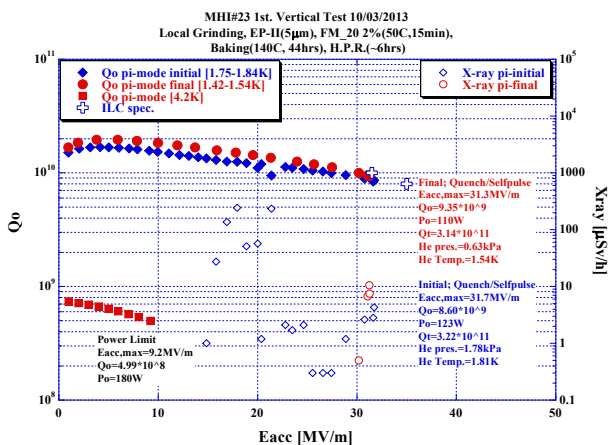


Fig.31 MHI#23 1st. V.T. Qo vs. Eacc

この様な空洞では、発熱が観測される場所に明確な欠陥が存在する事が多いです。

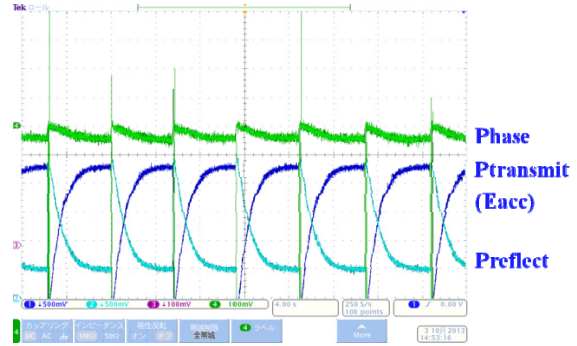


Fig.32 MHI#23 1st. V.T. セルフパルス

なお、セルフパルス中にエージング(Aging)されて空洞性能が上がる事もあります。

5.4.3. MHI#08 1 回目の縦測定結果

温度マッピング装置や局所研磨装置が使われ始めた頃の測定ですが、1 回目の縦測定では最大加速電場 16 MV/m で Quench/Selfpulse が起こり、性能が制限されました。結果を Fig.33 に示します。

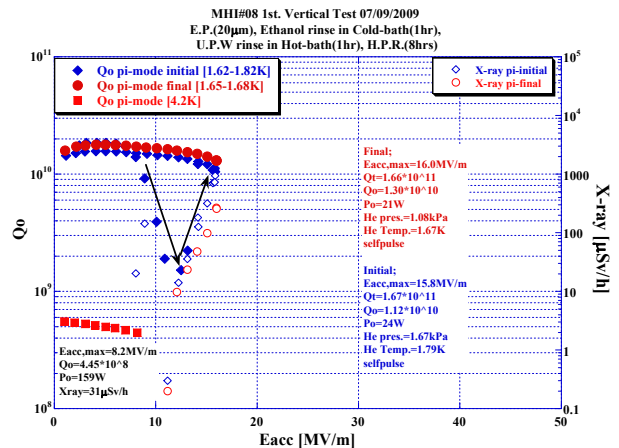


Fig.33 MHI#08 1st. V.T. Qo vs. Eacc

温度マッピング装置は 2 セル赤道部 180° に発熱を観測します(Fig.34)。測定終了後、京都カメラで発熱箇所を調べると Fig.35 の様な欠陥が見つかりました。Fig.36 は局所研磨装置でその欠陥を除去していく様子です。

欠陥除去後、EP-I を 50 µm、EP-II を 20 µm 行い再測定した結果を Fig.37 に示します。最大加速電場が 16 MV/m から 27 MV/m に上がっており、局所研磨が空洞性能を回復させるのに効果的である事が分かります。

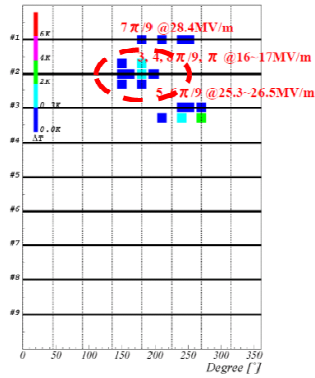


Fig.34 MHI#08 1st. V.T. 発熱箇所

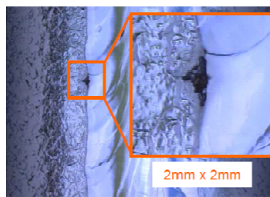


Fig.35 MHI#08 発熱箇所に見つかった欠陥

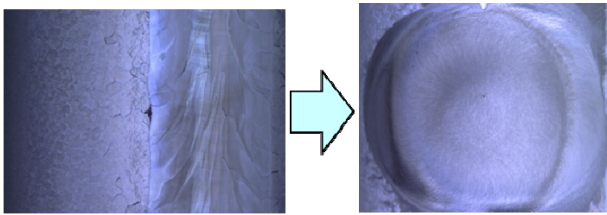


Fig.36 MHI#08 局所研磨装置による欠陥修復
Diamond sheet #400 200 分、#1000 60 分研磨

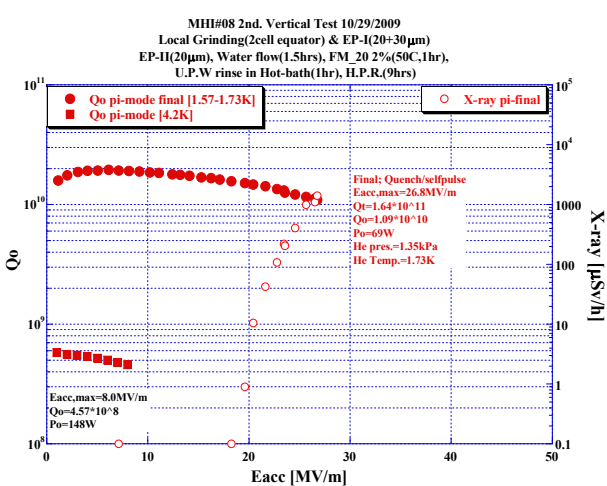


Fig.37 MHI#08 2nd. V.T. Qo vs. Eacc

ILC 建設を考慮して、最近では限られた測定回数(1 空洞あたり 2~3 回)で ILC 要求仕様を満たす事を最重要課題とし、受け入れ時から積極的に局所研磨を行っています。

5.5. Passband Modes での測定

加速モード TM010 パスバンドモード(Passband Modes)の電場強度の様子を Fig.38 に示します。

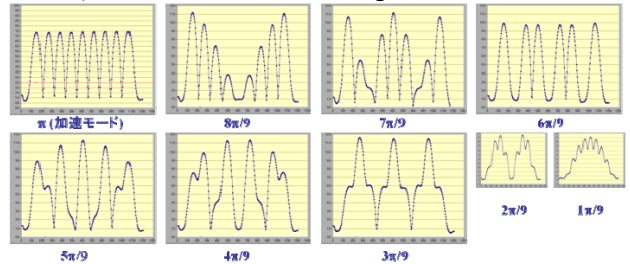


Fig.38 Passband Modes の電場強度分布

通常は加速モードであるπモードで測定しますが、このモードは9つのセル全てに同じ強度を持つ電場が立ちます。そのため、あるセルの最大加速電場が低いと、そのセルで空洞全体の最大加速電場が制限されます。そのセルに電場の立たないモードを選んで測定を行えば、その次に電場の低いセルが分かり、これを繰り返す事で全てのセルの最大電場を求める事が出来ます。

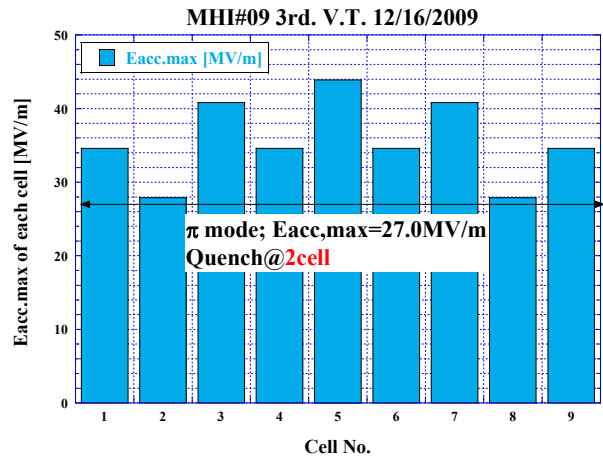


Fig.39 MHI#09 3rd. V.T. Passbands mode による各セルの最大加速電場

MHI#09 号機 3 回目の縦測定において、その様にして求めた各セルの最大加速電場を Fig.39 に示します。この場合、2セルの Quench で空洞全体が 27 MV/m に制限されていますが、他のセルは 34

MV/m 以上であり、2 セルの発熱箇所を修復すれば 34 MV/m 以上の加速電場を得られる可能性が高いと予想出来ます。

こうして、2 K 冷却後にはまず加速モードである π モードで測定し、その結果に応じて適当なパスバンドモードを選び、モード毎の各セルの最大加速電場や発熱箇所、X 線量や分布の測定を行います。パスバンドモードでの測定は空洞のエージングも兼ねており、最後にもう 1 度 π モードで測定、最終結果として1回の縦測定が終了します。

6. 終わりに

超伝導空洞の理論的内容の講義はたくさんありますが、実際の現場ではどのような事が行われているのかを解説しているのはあまりないかと思えます。このテキストで現場の様子や、測定でどのような事が行われているのかを知っていただき、また興味を持っていただければ幸いです。

今回は「加速空洞」に関する内容でしたが、この空洞を「加速器」に仕上げるまでにはまだまだ皆さんの工程があります。興味がありましたら是非リニアコライダー建設に参加していただきたいと思えます。

参考文献

- [1] R.L.Geng, et al., "High gradient studies for ILC with single-cell re-entrant shape and elliptical shape cavities made of fine-grain and large-grain niobium", in Proceedings of PAC07, Albuquerque NM,USA, pp.2337-2339
- [2] 加古永治," 超伝導空洞の基礎"、OHO '14 テキスト
- [3] 沢辺元明," 超伝導空洞の表面処理"、OHO '14 テキスト
- [4] 仲井浩孝," クライオジェニックス"、OHO '14 テキスト
- [5] 増澤美佳," 超伝導空洞の磁気シールド"、OHO '14 テキスト
- [6] 古屋貴章," 超伝導空洞の基礎"、OHO '06 テキスト
- [7] 加古永治," 超伝導空洞の高周波設計"、OHO '06 テキスト

[8] 野口修一," 超伝導加速空洞"、OHO '87 テキスト

[9] 野口修一," 超伝導加速空洞"、OHO '11 テキスト