

修士論文

- 超伝導加速空洞の製作及びその評価 -

東京大学大学院
理学系研究科物理学専攻
修士課程 2年
山下研究室

羽野 仁志

序章

電子・陽電子衝突型の超大型線形加速器実験である ILC(International Linear Colider) 計画が推進されている。重心エネルギーで 500GeV(1 期)、1TeV(2 期) という高エネルギーレプトン反応を目標としている。そこで、これまでに無い高い加速勾配の加速器が必要となり、そのための加速空洞に超伝導加速空洞が採用された。しかし、大量生産に向けての製作技術はまだ確立されておらず、現在 R&D が進んでいる。そこで本研究においては単セル空洞の製作及び加速電界などの測定を通して理解を深める事を目的とする。また KEK(高エネルギー加速器研究機構) にある測定システムの評価も加えてその目的とする。

測定結果としては、現状の測定方法において最大加速電界 $E_{acc} = 41\text{MV/m}$ という結果になり、その測定方法及び結果などの理解や改善を目的としてパルス法における測定も行った。すると、最大加速電界 $E_{acc} = 46.3 \pm 0.3\text{MV/m}$ と上昇した。これは測定原理の理解の上からも必要な結果である。

また、誤差の評価のための測定も行い、それらについても述べる。

目次

第1章	ILC 実験	6
1.1	理論	6
1.1.1	ヒッグス粒子	6
1.1.2	超対称性粒子 SUSY	7
1.1.3	t クォーク	7
1.2	加速器	7
第2章	超伝導空洞	8
2.1	超伝導現象	8
2.2	円筒形空洞 -ピルボックス-	9
2.3	パラメータ	10
2.3.1	Q 値 -Unloaded Q-	10
2.3.2	Q_L -Loaded Q-	11
2.3.3	Γ -形状因子-	11
2.3.4	R_{sh} -シャントインピーダンス-	12
2.3.5	その他のパラメータ	12
第3章	製作工程	13
3.1	設計図	13
3.2	成型	15
3.3	深絞り -プレス-	15
3.4	トリム加工 -Trimming-	15
3.5	電子ビーム溶接 -EBW-	16
3.6	ビームパイプ	16
3.7	遠心バレル研磨 -CBP-	19
3.8	化学研磨 -CP-	22
3.9	焼鈍 -Annealing-	22
3.10	電界研磨 -EP-	24
3.11	脱脂洗浄 -Degreasing-	25
3.12	高圧洗浄 -HPR-	26
3.13	ベーキング -Baking-	27
第4章	測定 -Vertical Test-	28
4.1	測定原理	28
4.1.1	One-Port Cavity	28
4.1.2	Two-Port Cavity	31

4.2	測定系	34
4.2.1	Cable Correction	35
4.2.2	Feed Back System	36
4.3	誤差	37
4.3.1	Power Meter and Sensor 及びその評価	37
4.3.2	ケーブルの評価 -周波数依存など-	42
4.3.3	各パワーメーターの違い	49
4.3.4	総合誤差の評価	51
第5章	結果	52
5.1	測定結果 -IS#17-	52
5.2	測定結果 -ISE#6-	64
第6章	考察	66
6.1	測定結果より	66
6.2	測定方法について	72
6.3	今後やるべきこと	73

目 次

1.1	リニアコライダー略図	7
2.1	第二種超伝導体と外部磁場の様子	8
2.2	ピルボックス	9
3.1	設計図	14
3.2	電磁場分布のシミュレーション	14
3.3	ニオブ材	15
3.4	プレス機とそのプレスの様子	15
3.5	トリミング	16
3.6	溶接しろ	16
3.7	電子ビーム溶接	17
3.8	点付け 本付けの様子	17
3.9	ビームパイプの溶接	17
3.10	グランディングの様子	18
3.11	芯出しの機器	18
3.12	フランジ取り付け用のチタンの溶接	18
3.13	遠心バレル研磨	19
3.14	研磨石	19
3.15	空洞赤道部内面の研磨推移の様子	20
3.16	超音波厚み測定計	21
3.17	超音波厚み測定の結果	21
3.18	化学研磨 -CP-	22
3.19	化学研磨の様子	23
3.20	Annealing の真空炉	23
3.21	電界研磨の原理	24
3.22	単セル空洞用の電界研磨装置	24
3.23	電界研磨データ	25
3.24	超音波洗浄装置	25
3.25	HPR の原理図	26
3.26	HPR 装置	26
3.27	ベーキングの様子	27
4.1	One-port	28
4.2	Pe の減衰	29
4.3	オシロスコープで見た Decay Time の様子	30

4.4	Two-port	31
4.5	等価回路	32
4.6	測定システム	34
4.7	Cable Correction	35
4.8	Feed Back System	36
4.9	setup 1	37
4.10	setup 2	38
4.11	setup 3	39
4.12	setup 4	40
4.13	setup 5	41
4.14	ケーブルでの RF 減衰	42
4.15	周波数依存性	43
4.16	周波数依存性 再現性	45
4.17	温度変化による周波数依存性 P_0	46
4.18	温度変化による周波数依存性 P_{in}	47
4.19	温度変化による Correction Factor の変化 P_0/P_{in}	48
4.20	回路図	49
4.21	電圧依存性	50
5.1	pickup アンテナ (20mm,22mm,24mm,28mm) とフランジ	52
5.2	1st Measurement (IS#17)	53
5.3	2nd Measurement (IS#17)	54
5.4	3rd Measurement (IS#17)	55
5.5	4th Measurement (IS#17)	56
5.6	5th Measurement (IS#17)	57
5.7	6th Measurement (IS#17)	58
5.8	ビームパイプについての汚れ	59
5.9	7th Measurement (IS#17)	60
5.10	8th Measurement (IS#17)	61
5.11	9th Measurement (IS#17)	62
5.12	10th Measurement (IS#17)	63
5.13	1st Measurement (ISE#6)	64
5.14	2nd Measurement (ISE#6)	65
6.1	Q_0 のアンテナ長依存性	66
6.2	Q_t のアンテナ長依存性	67
6.3	9th Measurement の Q_t の変化	68
6.4	10th Measurement の E_{acc} の変化	69
6.5	10th と 2nd Measurement の Q_0 の比較	70
6.6	各測定における Q_0 の変化	71
6.7	各 β における波形の変化	72

第1章 ILC 実験

これまでの電子-陽電子衝突型実験における最大重心系エネルギーは、CERN の LEP(Large Electron Positron Collider) で達成された 210GeV である。またハドロンコライダーに関しては、フェルミ国立研究所の TEVATRON で重心系エネルギー 1.96TeV にまで達し、現在それを越える重心系エネルギーである 14TeV を目標とする新しい陽子-陽子衝突型加速器 LHC(Large Hadron Collider) が CERN で動き始めるところである。

LHC では高いエネルギー領域での実験を可能とするが、陽子-陽子衝突であるためにその反応は複雑で、素過程の厳密な測定は難しい。一方、電子-陽電子衝突型加速器実験では、その反応は素過程そのものであり厳密な測定が可能となる。しかしながら、円形衝突型加速器ではシンクロトロン放射によるエネルギーの損失により、実質的には LEP での重心系のエネルギーが限界であると考えられており、この問題の回避のために直線型加速器による実験が提唱された。

International Linear Collider(ILC) 実験はその名のとおりに直線型加速器であり、重心系エネルギーとして 1TeV 以上を目標とする電子-陽電子衝突型実験である。ILC ではそのエネルギーフロンティアでの実験により、ヒッグス粒子の探索、超対称性粒子の探索、十分に研究の行なわれていないトップクォークの精密測定などの成果が期待されている。

ILC は日本の KEK で進められていた GLC(Global Linear Collider) 計画、ドイツの DESY で進められていた TESLA(TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) 計画、アメリカを中心に進められていた NLC(Next Linear Collider) 計画を統合したものである。

1.1 理論

1.1.1 ヒッグス粒子

ヒッグス場は標準理論でその存在を予言されており、そのポテンシャルに起因する自発的対称性の破れによって粒子の質量を生成するものと考えられている。例えば繰り込み可能なヒッグスポテンシャル

$$V(\phi^2) = \mu^2 \phi^2 + |\lambda|(\phi^2)^2$$

を考えてみる。 $\mu^2 < 0$ の場合ポテンシャルの最小値が $|\phi^2| = 0$ ではなく、

$$|\phi^2| = -\frac{\mu^2}{2|\lambda|} \equiv \frac{v^2}{2}$$

にあるために、自発的対称性の破れが起こり粒子は質量を獲得する。この場合ゲージボソンやフェルミオンの質量は

$$m_W = \frac{v_g}{2}, \quad m_Z = \frac{v}{2} \sqrt{g^2 + g'^2}, \quad m_f = \frac{g_f v}{\sqrt{2}}, \quad m_H = \sqrt{\lambda} v$$

となる。 g 、 g' はそれぞれ $SU(2)$ 、 $U(1)$ に対する結合定数、 g_f はフェルミオン f に対する湯川結合定数であり、ヒッグスとの相互作用の強さがその粒子の質量を決定する形となる。ILC では、そのヒッグス粒子の発見及び精密測定が目的の一つとなっている。

1.1.2 超対称性粒子 SUSY

標準理論を超える理論の超対称性理論 (SUSY) では、すべての粒子に対してスピンの $1/2$ だけ異なるパートナー (超対称粒子) が存在することが要請される。このうち最も軽い中性の超対称粒子 (LSP) は暗黒物質の有力候補であり、非常に興味深いものとなっている。

超対称性理論を実証するためには少なくとも 1 つの超対称粒子の発見が必要不可欠となるが、ILC ではこの超対称性粒子が少なくとも 1 つは見つかると考えられている。しかし、実質的に超対称粒子の発見に関しては LHC に期待されており、ILC では精密な測定を行なうことが目的とされている。具体的には超対称粒子の質量、混合の精密測定、スピンやハイパーチャージといった量子数の測定、超対称性の破れ具合といったものが ILC の測定対象である。

1.1.3 t クォーク

トップクォークは標準理論のフェルミオンの中で 1 つだけ質量がずば抜けて大きく非常に特殊なものとなっており、CDF と D0 [4] によれば

$$m_t = 174.3 \pm 3.2(stat) \pm 4.0(sys) GeV/c^2$$

である。これは標準理論におけるラグランジアンの中のトップクォークの質量項が $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 対称性を最も大きく破っているということとなり、フレーバー構造の起源を研究する上で、トップクォークの精密測定は重要なものとなる。具体的にはトップクォークの質量や崩壊幅の精密測定が ILC での目的となる。

1.2 加速器

ILC では $500 GeV$ までの加速を必要とする。そこで、加速空洞の加速電界 E_{acc} を上げる事ができれば、加速器全体の長さも抑えることができる。そこで、より高電界の加速空洞の開発が必要となる。ILC では超伝導加速空洞が採用されており、その研究開発が進んでいる。

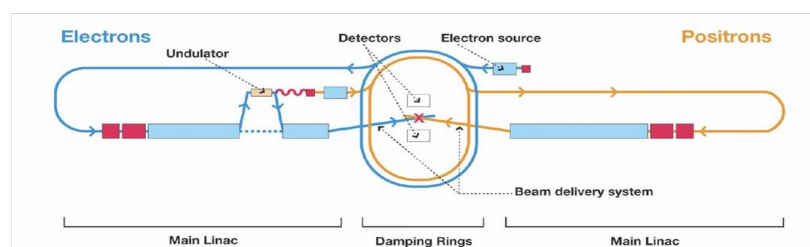


図 1.1: リニアコライダー略図

第2章 超伝導空洞

2004年8月に北京において、ILC 実験では超伝導加速空洞が採用されることが決まった。しかし、ILCで予定されている(まだ確定している訳ではない) 30MV/m という加速勾配を 9cell 空洞で安定して作り出す技術はまだ確立されておらず、大量生産に向けての工業技術の向上も同時に進めていかなければならない。

2.1 超伝導現象

超伝導現象はクーパー対と呼ばれる2個の電子のペアがエネルギー凝縮して起こす相転移である。超伝導の特徴として

- 完全電気伝導性
- 完全反磁性

の二点が代表的なものである。完全導体との大きな違いは二番目の完全反磁性(マイスナー効果)であり、超伝導状態となると同時に外部磁場を排除する現象である。またその磁場の応答の違いから第一種超伝導体と第二種超伝導体に分けられる。これは超伝導状態を破る臨界磁場(H_c) 付近の振る舞いの違いである。第一種超伝導体は臨界磁場を上回ると超伝導が破れるのに対して、第二種超伝導体とは図 2.1 のように外部磁場が強くなるに連れて常伝導部分と超伝導部分が共存する状態になる。

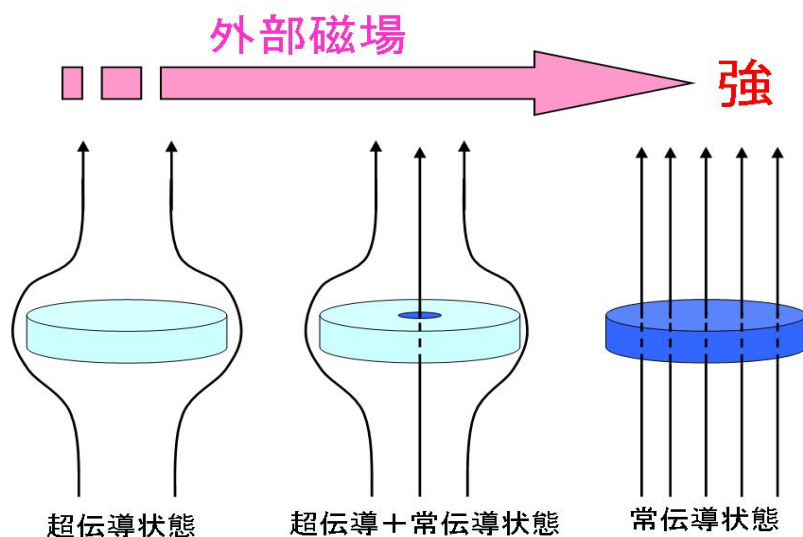


図 2.1: 第二種超伝導体と外部磁場の様子

超伝導体は直流電流に対しては電気抵抗が0になるが、RF（交流電流）に対しては電気抵抗を示す。これは超伝導状態において、電子・フォノン相互作用からくる引力によって作られたクーパー対が、エネルギーギャップ (2Δ) 分のエネルギーを受け取って2個の準粒子となるためであり、二流体モデルによって説明される。

超伝導空洞の材料として用いるニオブは第二種超伝導体であり、その臨界温度 T_c は常圧下で 9.2K である。

2.2 円筒形空洞 -ピルボックス-

図 2.2 のような仮想的な円筒形空洞（ピルボックス）を考える。この中に閉じ込められた電場分布は無数の共振モードの重ね合わせで表現できる。通常の粒子加速では、最も周波数が低く、中心軸上の加速方向に強い電場を有する TM_{010} モードを使う。これは、最低周波数であるため他のモードとの分離も容易である。

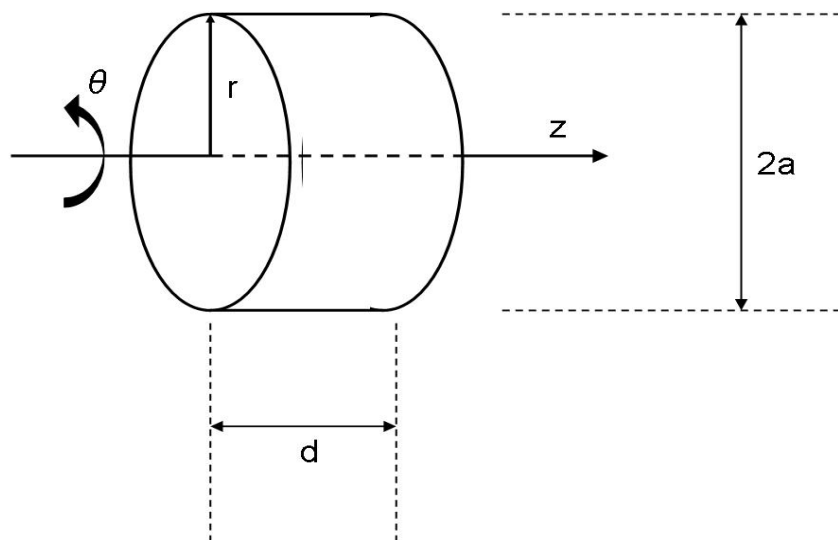


図 2.2: ピルボックス

まず、空洞内部でそれぞれ誘電率 ϵ 、透磁率 μ 、導電率 σ が一定であるとすると、マクスウェル方程式は

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

となり、真空であり電荷 0 なので

$$\Delta \mathbf{E} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

という波動方程式が得られる。

z 軸をビームの進行方向にとり、空洞が完全導体である場合、TM モードにおいて以下のような境界条件を課す

$$E_\phi(r = a) = 0, \quad E_z(r = a) = 0 \quad (2.4)$$

$$E_\phi(z = 0, d) = 0, \quad E_r(z = 0, d) = 0 \quad (2.5)$$

$$H_z = 0 \quad (2.6)$$

TM₀₁₀ モードにおいて、 r 、 θ 、 z 方向の各成分は

$$E_r = E_\theta = 0 \quad (2.7)$$

$$H_r = H_z = 0 \quad (2.8)$$

$$E_z = E_0 J_0\left(\frac{\rho_{01}}{a} r\right) \quad (2.9)$$

$$H_\theta = -\left(\frac{i\omega\epsilon a}{\rho_{01}}\right) E_0 J_0\left(\frac{\rho_{01}}{a} r\right) \quad (2.10)$$

となる。ここで J_m はベッセル関数であり、 ρ_{mn} は $J_m(\rho_{mn}) = 0$ の解である。

TM₀₁₀ モード、即ち $m = 0$ 、 $n = 1$ 、 $p = 0$ の場合 $\rho_{01} = 2.405$ である。加速電場 E_z は z に依らず一定で z 軸上で最大となり、磁場は H_θ のみ、即ち z 軸を対称に同心円状となる。また、共振周波数 f は

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \frac{\rho_{01}}{a} \quad (2.11)$$

となり、空洞の径 a にのみ依る。

また、 z 軸上をビームが光速で通過した場合に受ける最大加速電圧 V_c は

$$V_c = \left| \int_0^d E_0 e^{i\frac{\omega}{c}z} dz \right| \quad (2.12)$$

となり、これを実効加速長 d_{eff} で割ると実効加速電場 E_{acc}

$$E_{acc} \equiv \frac{V_c}{d_{eff}} \quad (2.13)$$

となる。

2.3 パラメータ

2.3.1 Q 値 -Unloaded Q-

定常状態で空洞内に蓄積したエネルギー U と、RF の一周期あたりに空洞表面で損失するエネルギー P_{loss} の比で定義される Q 値は

$$Q_0 \equiv \frac{\omega U}{P_{loss}} \quad (2.14)$$

となる。

2.3.2 Q_L -Loaded Q-

実際の運転の際に、空洞には RF の入力（出力）器が付く。空洞に入力結合器が取り付けられれば、空洞壁でのジュール損失（ P_{loss} ）だけで無く、結合器から漏れ出る電力（ P_e ）もある。そこで全体の電力損失 P_{tot} は

$$P_{tot} = P_{loss} + P_e \quad (2.15)$$

となる。ここで新たに全体の損失 P_{tot} に対して Q_L

$$Q_L \equiv \frac{\omega U}{P_{tot}} \quad (2.16)$$

を与える。

そこで、空洞内の蓄積エネルギーの時間変化 $U(t)$ は全体の電力損失 P_{tot} に対して

$$\begin{aligned} \frac{dU(t)}{dt} &= -P_{tot} \\ &= -(P_{loss} + P_e) \\ &= -\frac{\omega}{Q_L} U(t) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\therefore U(t) \propto \exp\left(-\frac{\omega}{Q_L} t\right) \quad (2.18)$$

すなわち蓄積エネルギー $U(t)$ の減衰時定数 τ は

$$\tau = \frac{Q_L}{\omega} \quad (2.19)$$

2.3.3 Γ -形状因子-

空洞表面での磁場の強さを H_s 、表面抵抗を R_s とすると Q_0 は

$$Q_0 = \omega \frac{\frac{1}{2} \mu \int_V H^2 dv}{\frac{1}{2} \int_S R_s H_s^2 ds} \quad (2.20)$$

となり、表面抵抗 R_s が一様な場合

$$Q_0 = \frac{1}{R_s} \frac{\omega \mu \int_V H^2 dv}{\int_S H_s^2 ds} \quad (2.21)$$

ここで、空洞の大きさに依存しない形状によって決まるパラメータ Γ （形状因子）

$$\Gamma \equiv \frac{\omega \mu \int_V H^2 dv}{\int_S H_s^2 ds} \quad (2.22)$$

を定義する。これは、空洞形状が相似であれば常に同じ値をとる。
すると Q_0 は

$$Q_0 = \frac{\Gamma}{R_s} \quad (2.23)$$

となる。

2.3.4 R_{sh} -シャントインピーダンス-

ビームが空洞を通過するときの最大実効加速電圧 V_c と空洞表面での電力損失 P_{loss} で定義されるシャントインピーダンス R_{sh}

$$R_{sh} \equiv \frac{V_c^2}{P_{loss}} \quad (2.24)$$

は加速性能を示すパラメータで、できるだけ大きい値であることが望ましい。

2.3.5 その他のパラメータ

その他にもシャントインピーダンスと Q 値の比で定義される

$$\frac{R_{sh}}{Q_0} = \frac{V_c^2}{\omega U} \quad (2.25)$$

は、設計値から導かれ空洞の材質には依らない量である。

また、空洞表面での最大電場 E_{sp} や、最大磁場 H_{sp} と実効加速電場 E_{acc} との比

$$\frac{E_{sp}}{E_{acc}} \quad (2.26)$$

$$\frac{H_{sp}}{E_{acc}} [Oe/(MV/m)] \quad (2.27)$$

なども空洞の性能を表すパラメータである。

第3章 製作工程

ここでは、単セル空洞の製作工程について述べる。

1. 空洞の成形
2. ビームパイプの成形
3. 電子ビーム溶接
4. 遠心バレル研磨
5. 化学研磨
6. 焼鈍
7. 電界研磨
8. 脱脂洗浄
9. 高圧洗浄
10. ベーキング

測定に至るまでには大きく分けて成形と表面処理の二つがある。

3.1 設計図

今回は9セル空洞の中部にあたる Regular cell (Ichiro Single cell 以後 IS#17) と 両端にあたる End cell (Ichiro Single End cell 以後 ISE#6) の二種類の製作を行った。二種類の違いは、ビームパイプの径、及び長さである。それぞれの表面積は

- IS#17 : 1398 cm²
- ISE#6 : 1428 cm²

となる。

ニオブ (Nb) の密度を 8.57 g/cm³ とし、研磨の際に研磨量から研磨厚みを計算する。

3.2 成型

セル部として厚さ 2.8 mm、直径 270 mm、中心部に直径 30 mm の穴を開けたドーナツ状円盤を作る。

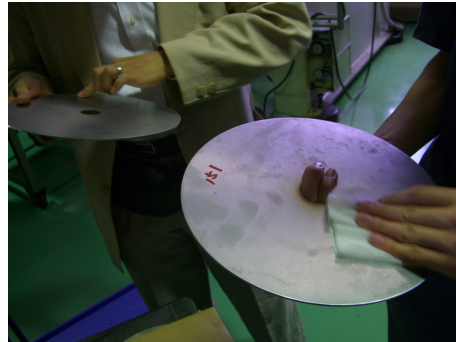


図 3.3: ニオブ材

3.3 深絞り -プレス-

図 3.4 の右の写真のように、メス型にセットされて上部からオス型でプレスすることで、カップ状に加工される。型はアルミ合金でできており、約 80t でプレスする。



図 3.4: プレス機とそのプレスの様子

3.4 トリム加工 -Trimming-

カップを設計寸法に加工する。ジグにセットされ両端の不要部分を旋盤によって削る。その際に図 3.6 のような溶接しろを残しておく。これは溶接の際の膨らみを考慮したもので、バレル研磨回数を軽減させることができる。

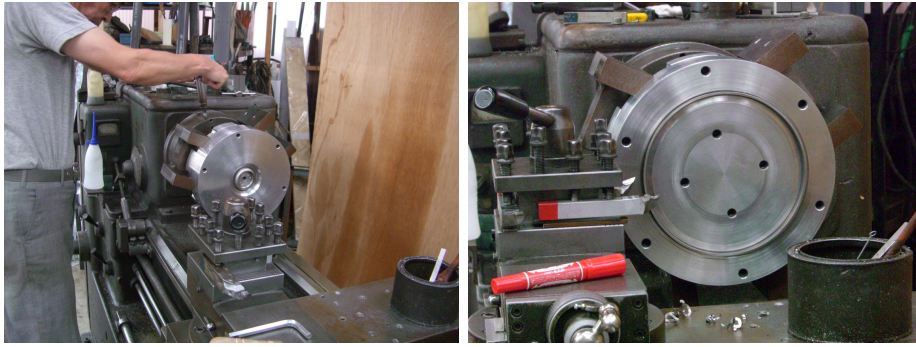


図 3.5: トリミング

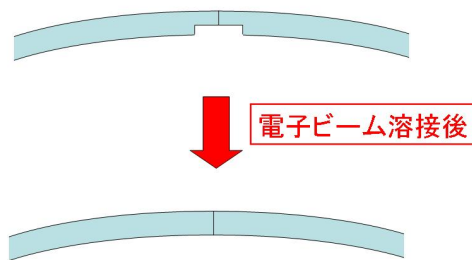


図 3.6: 溶接しろ

3.5 電子ビーム溶接 -EBW-

超伝導空洞の壁面に酸素などの不純物が混入すると、超伝導性能を低下させてしまう。そこで不純物が混入しないように、ニオブ材を器内に設置した後に、真空排気した状態で電子ビームによって溶接する。図 3.8 のように点付け、本付けと二段階に分けて溶接する。また各溶接の際に、溶接部を後に述べる化学研磨によってクリーニングする。

3.6 ビームパイプ

1. 直径 60mm の円筒形に湾曲させる。
2. 端部同士を溶接する。
3. グランディング (内面の溶接部を滑らかにする)
4. 芯出し (真円に加工する)
5. フランジ取り付け用のチタンの溶接

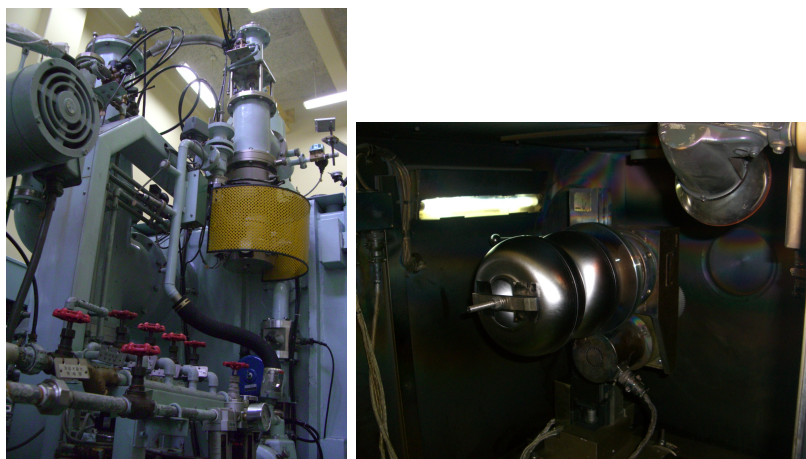


図 3.7: 電子ビーム溶接 @KEK



図 3.8: 点付け 本付けの様子



図 3.9: ビームパイプの溶接



図 3.10: グランディングの様子



図 3.11: 芯出しの機器



図 3.12: フランジ取り付け用のチタンの溶接

3.7 遠心バレル研磨 -CBP-

研磨石と水を入れて、遠心バレル研磨装置によって公転と自転を繰り返しながら削る。

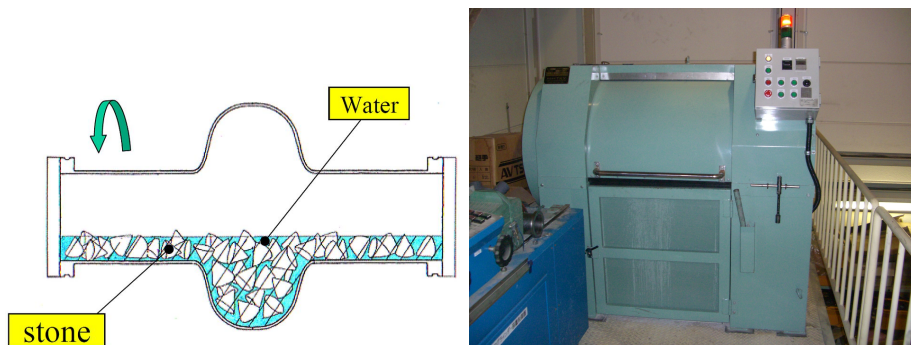


図 3.13: 遠心バレル研磨

以下のように計6回の研磨を行った。

- 荒削り ×3 (rough stone)
- 仕上げ 各1回 (green, brown, white stone)

荒削りとは主に電子ビーム溶接によってできた膨らみを削り取るためであり、仕上げ研磨は内面を滑らかにすることを目的としている。



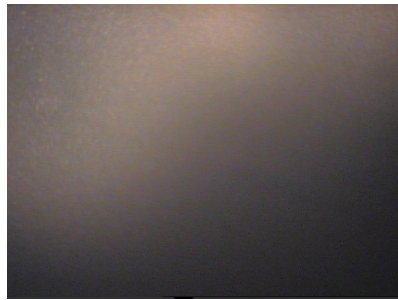
図 3.14: rough stone(左上)、green stone(右上)、brown stone(左下)、white stone(右下)



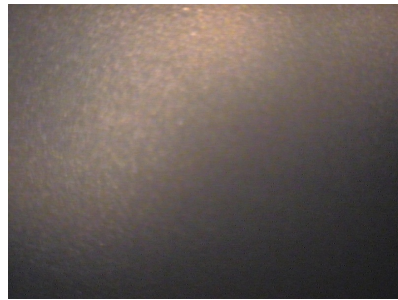
(a) 溶接直後



(b) 1st rough stone 後



(c) 2nd rough stone 後



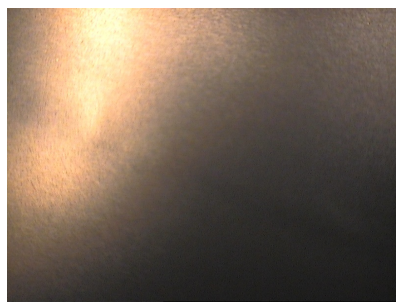
(d) 3rd rough stone 後



(e) green stone 後



(f) brown stone 後



(g) white stone 後

図 3.15: 空洞赤道部内面の研磨推移の様子

研磨の際の空洞の重さの推移を以下に示す。研磨厚みを求める事ができる。

研磨のパラメーターと研磨量の推移			
研磨石	研磨回転速度と時間	IS#17	ISE#6
研磨前	—	4412.0 [g]	4300.2 [g]
rough stone (1st)	100 [rpm] 4hours	4404.3 [g]	4293.5 [g]
rough stone (2nd)	120 [rpm] 6hours	4377.7 [g]	4268.8 [g]
rough stone (3rd)	120 [rpm] 5hours	4352.7 [g]	4244.8 [g]
green stone	120 [rpm] 6hours	4340.4 [g]	4236.1 [g]
brown stone	120 [rpm] 4hours	4335.6 [g]	4231.6 [g]
white stone	120 [rpm] 4hours	4332.1 [g]	4228.7 [g]

また、荒削り後から図 3.16 のような超音波厚み測定計で厚みを計った。図 3.17 の左のように、1～36 のビームパイプ及びセル部の各点における厚み推移を右に示す。



図 3.16: 超音波厚み測定計

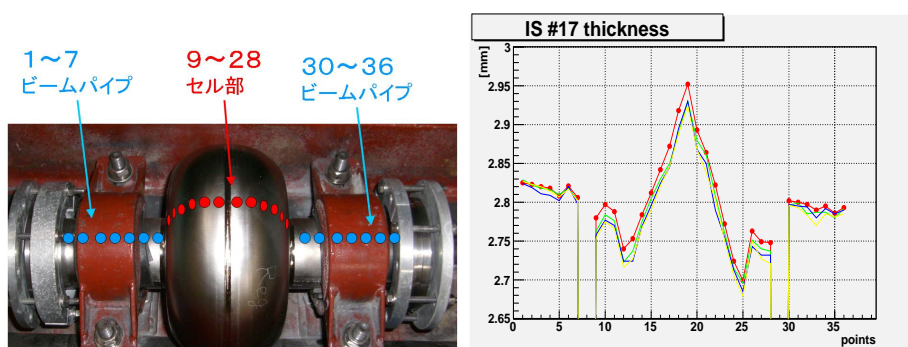


図 3.17: 超音波厚み測定の結果

3.8 化学研磨 -CP-

化学研磨は研磨液を注ぎ込むだけの簡単な処理であるが、研磨面はまだ荒いものとなる。化学研磨液を用いて $10\mu\text{m}$ 削る。研磨液は体積比で

フッ酸 (HF,46%) : 硝酸 (HNO_3 ,60%) : リン酸 (H_2PO_4 ,85%) = 1 : 1 : 1

の混合液である。室温 (約 20) でニオブ材は 約 $10\mu\text{m}/\text{min}$ で研磨される。



図 3.18: 化学研磨 -CP-

以下の図 3.19 に実際の CP の前後の違いの写真がある。初めにあった虹のようなグラデーションの酸化膜が消えているのが分かる。また、表面の油脂も落ちるので水を弾かなくなっている。

3.9 焼鈍 -Annealing-

10^{-6}Torr 程度の真空炉の中で約 750°C で3時間ほど焼鈍する。これは、 700°C 程度で起こるニオブ内の水素の脱ガスを目的とする。機械研磨や化学研磨において、材料の欠損などから水素が吸蔵されるが、これを行わないと超伝導状態で Q 値が著しく下がってしまう水素病 (Q-disease) の原因となってしまう。ちなみに 750°C 程度の焼鈍ではニオブ材の軟化はそれほど問題にはならない。

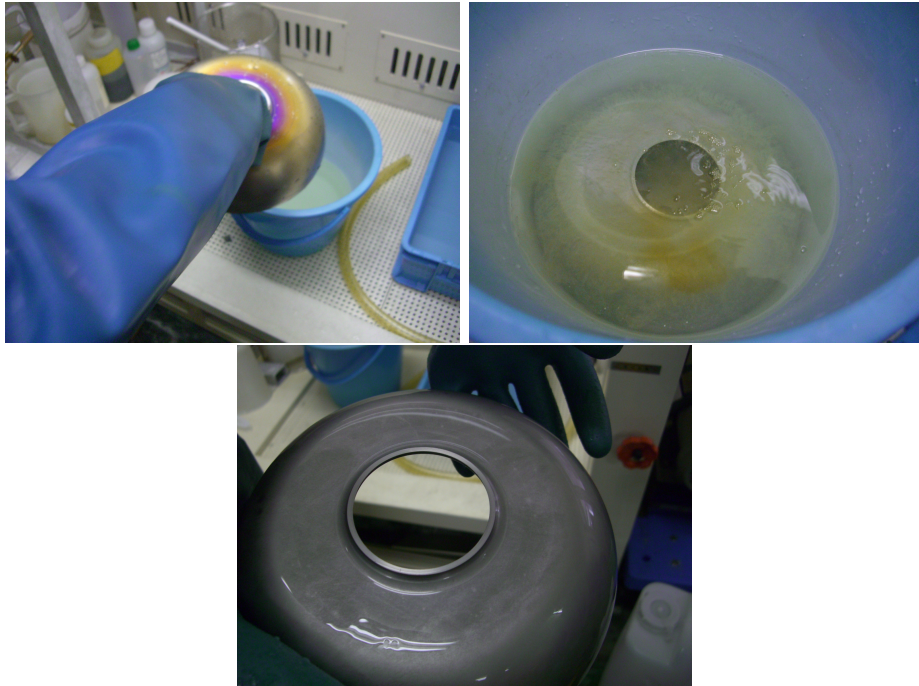


図 3.19: 化学研磨の様子

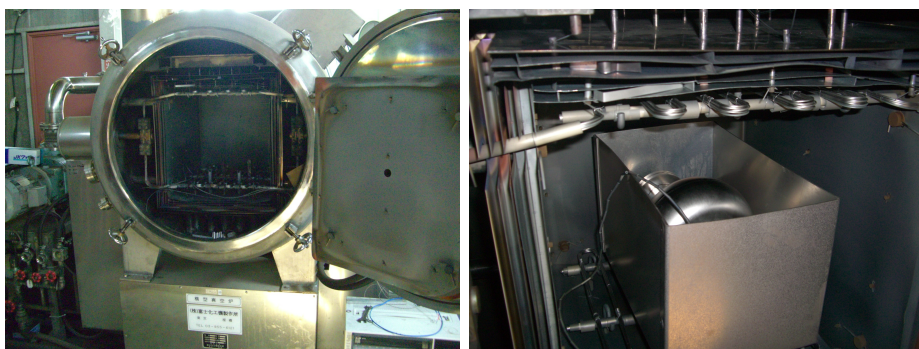


図 3.20: Annealing の真空炉

3.10 電界研磨 -EP-

ニオブを陽極、純アルミの棒が陰極としてEP液を電解液として印加する。すると、陽極のニオブが電解液に溶け出して、陰極からは水素が発生する。EP液は体積比で

硫酸 ($\text{H}_2\text{SO}_4, >93\%$) : フッ酸 ($\text{HF}, 46\%$) = 10 : 1

を使用する。

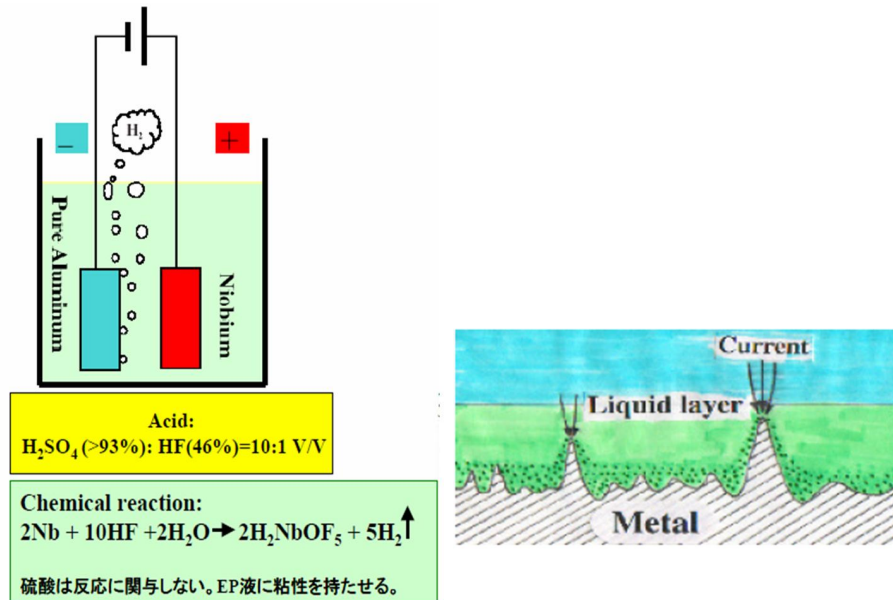


図 3.21: 電界研磨の原理

電界研磨は2段階の反応であると考えられている。まず、第1段階では、電気反応によりニオブの表面に酸化膜が作られる。次に第2段階として、電解液中のフッ酸 (HF) がその酸化膜を溶かすことで研磨が進む。

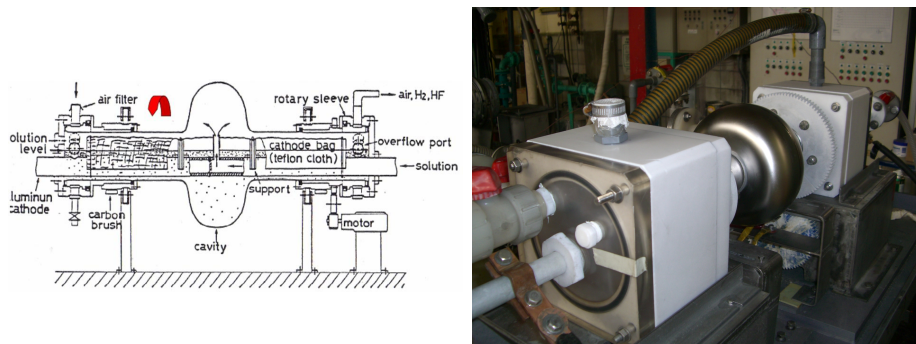


図 3.22: 単セル空洞用の電界研磨装置

装置には、ビームパイプ部の研磨速度を和らげるためにテフロン加工が施されている。また陰極から発生する水素がニオブに触れると水素病の原因となるので、この水素をうまく外に出させる必要がある。そこで、テフロン加工されたカソードバッグがついている。

反応式より、この一連の電界研磨は五価によるものであり、積算電流量を測る事で、平均研磨量を求めている。実際の IS#17 を $30\mu\text{m}$ 研磨した際の電圧及び電流などの様子を図 3.23 に示す。

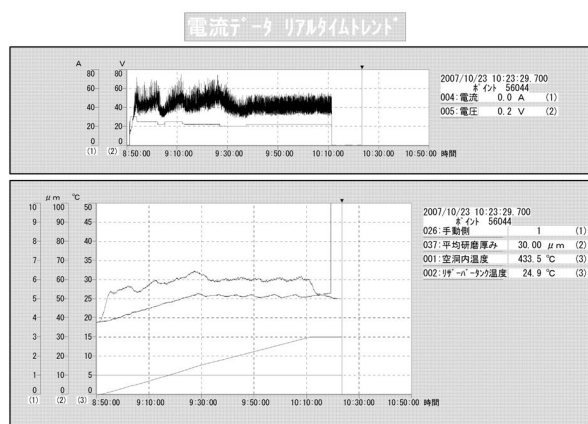


図 3.23: 電界研磨データ

今回の処理は、IS#17、ISE#6 共に

- $30\mu\text{m} + 3\mu\text{m}$

の電界研磨を行った。 $30\mu\text{m}$ の電界研磨で高電界を達成したという例はまだ過去に無く、実証されれば作業工程の軽減へと繋がる。

3.11 脱脂洗浄 -Degreasing-

Micro-90 というアルカリ性の脱脂剤を 2% に薄めて、50 で空洞内面を超音波洗浄する。これは、電界研磨で付着した硫黄や油脂を洗浄することを目的としている。



図 3.24: 超音波洗浄装置

3.12 高圧洗浄 -HPR-

空洞表面に残留するゴミ等が原因で起こるフィールドエミッション対策として HPR(High Pressure Water Rinsing) を行う。これは高圧の超純水で内面を洗浄するものであり、測定用のセットアップを変更した際にも行う。

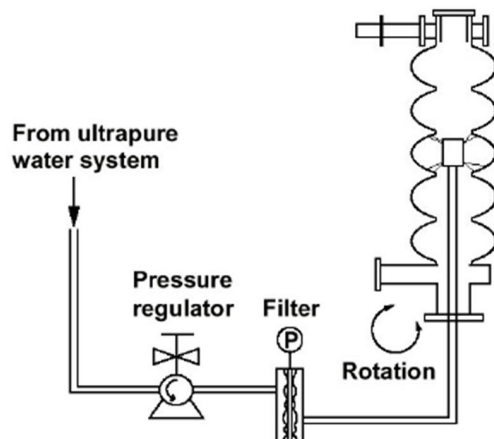


図 3.25: HPR の原理図

EP 直後の HPR のレシピとして

- 上下速度 … 220 mm/min
- 回転速度 … 15 rpm
- 水圧 … 7 MPa
- 洗浄時間 … 1 hour



図 3.26: HPR 装置

3.13 ベーキング -Baking-

120 で48時間ベーキングする。これは空洞表面(数 $n\Omega$ の厚さ)の酸素濃度を下げ、すなわちニオブ純度を上げることで超伝導状態で表面抵抗を抑えることに繋がる。

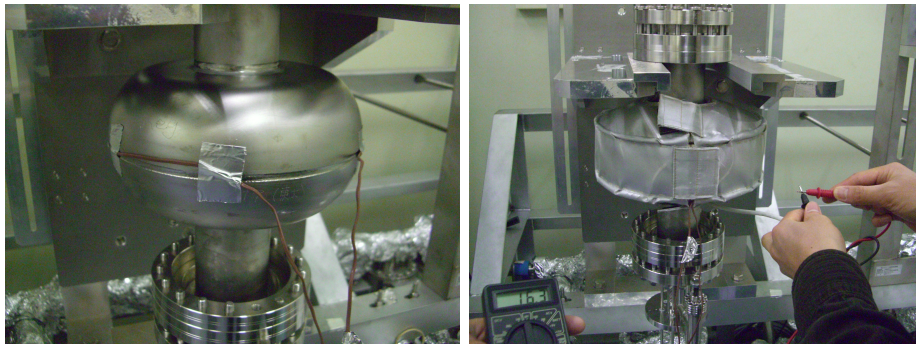


図 3.27: ベーキングの様子

第4章 測定 -Vertical Test-

ビームを用いて空洞の加速勾配を直接測定するのは困難である。そこで他の方法で調べなければならない。本章では、その測定方法について述べる。

4.1 測定原理

今回はシングルセルの空洞の評価であるので、KEK（高エネルギー加速器研究機構 以後 KEK）の縦測定法によって測定を行った。これは空洞の上下に Input 用と pickup 用のアンテナを取り付けて、液体ヘリウムで 2K まで冷却し、RF Power の染み出し量で内部状態を測定するものである。

4.1.1 One-Port Cavity

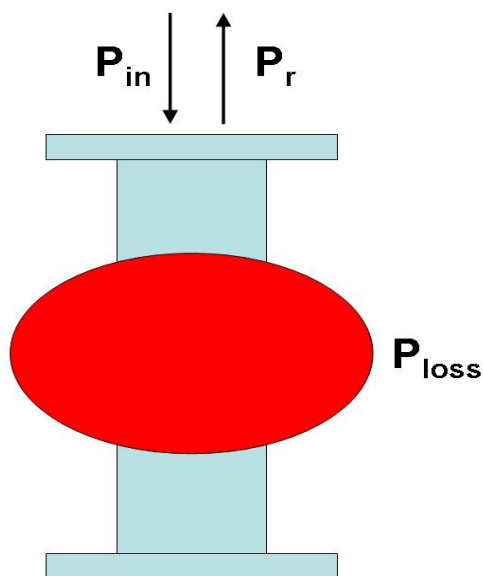


図 4.1: One-port

まず測定原理の理解として、図 4.1 のようにポート（アンテナ）が一つの場合を考える。 P_{in} として空洞特有の周波数をもった RF（高周波）が空洞内へ入る。その際に、アンテナと空洞内のカップリングに応じて、一部は反射する。空洞内に入った RF はたちまち TM_{010} モードを形成する。空洞内に出来た電場及び磁場に応じ、空洞内部の表面抵抗によって P_{loss} の発熱を行う。そして、内部に溜まったエネルギーの一部が P_e として染み出していき、定常状態となる。

そこで Input Power を断ち切ると図 4.2 のように空洞内に溜まっていたエネルギーがアンテナから染み出していく。この時に、温度に応じてある一定の時定数をもって減衰していく。その Decay Time を測ることで、空洞性能の測定を行う。これを Decay Time 法という。

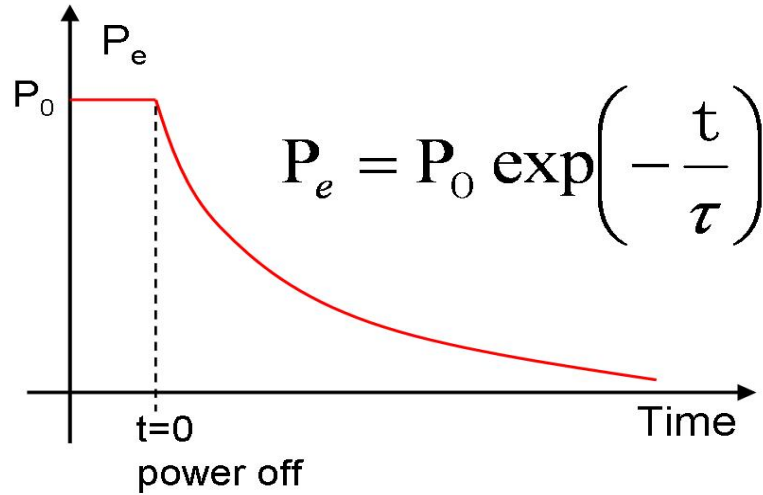


図 4.2: P_e の減衰

ここで式 (2.16) の Q_L (Loaded Q) を考える。

$$\begin{aligned}
 Q_L &= \frac{\omega U}{P_{loss} + P_e} = \frac{\omega U}{P_{loss} \left(1 + \frac{P_e}{P_{loss}}\right)} \\
 &= \frac{Q_0}{1 + \beta_{in}}
 \end{aligned}$$

β_{in} は等価回路の計算から

$$\beta_{in} \equiv \frac{P_e}{P_{loss}} = \frac{1 \pm \sqrt{P_r/P_{in}}}{1 \mp \sqrt{P_r/P_{in}}} \quad (4.1)$$

となり、 Q_0 は

$$\therefore Q_0 = (1 + \beta_{in})Q_L \quad (4.2)$$

と表せる。

ここで式 (2.19) より時定数 $\tau = Q_L/\omega$ なので、空洞から出てくるパワー $P(t)$ は

$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{\omega}{Q_L}t\right) \quad (4.3)$$

となり、Decay time $t_{1/2}$ を用いて Q_L は

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{\omega t_{1/2}}{\ln(2)} \\ &= 2\pi f \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \end{aligned} \tag{4.4}$$

となる。すなわち Decay Time $t_{1/2}$ を測定することで Q_L を求める。

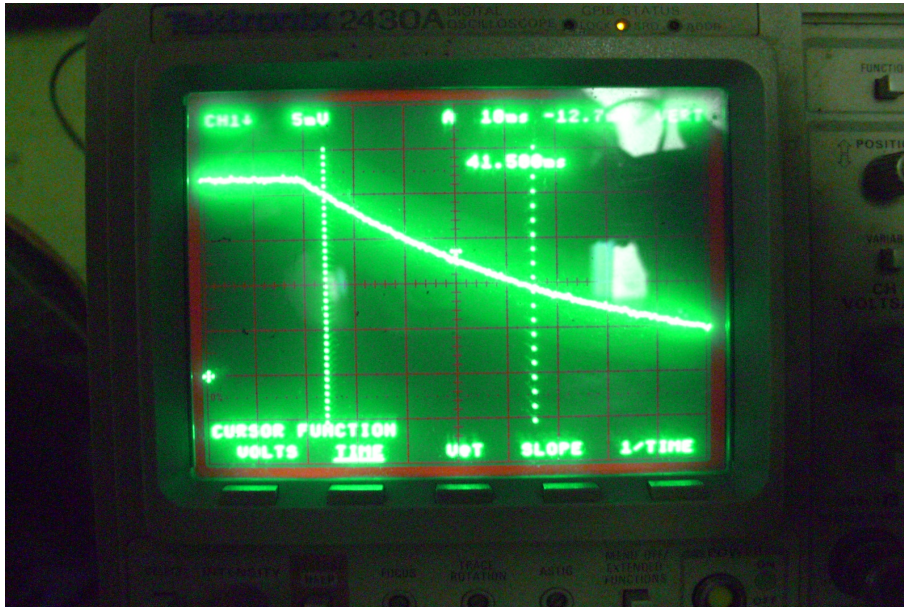


図 4.3: オシロスコープで見た Decay Time の様子

4.1.2 Two-Port Cavity

次に図4.4のようにポート(アンテナ)が二つの場合を考える。これは P_t (Transmitted Power)のみを測定する事で空洞内部の電磁場状態が測定できると考えられている。

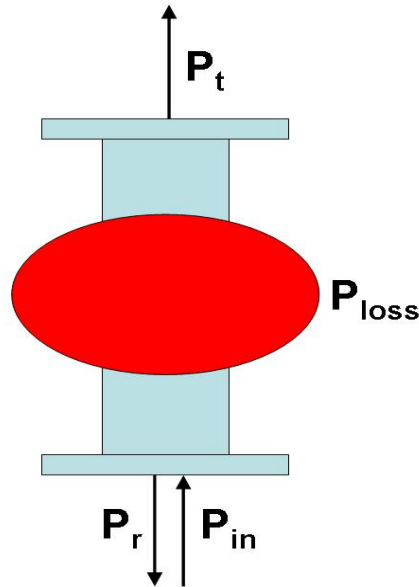


図 4.4: Two-port

One-Port と同様に Q_0 と Q_L の関係を考える。新たに Input 側から見た見掛け上の P_{loss}^*

$$P_{loss}^* = P_{loss} + P_t \quad (4.5)$$

を与える。この P_{loss}^* に対する Q 値 (Q_0^*) は

$$\begin{aligned} Q_0^* &= \frac{\omega U}{P_{loss}^*} \\ &= \frac{\omega U}{P_{loss} + P_t} \\ &= \frac{\omega U}{P_{loss} \left(1 + \frac{P_t}{P_{loss}}\right)} \\ &= \frac{Q_0}{1 + \beta_t} \quad \left(\because \beta_t \equiv \frac{P_t}{P_{loss}}\right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

となる。ここで One-Port と同様に図 4.5 のような等価回路を考える。交流電源を ϕ 、ケーブル及び各 Port での抵抗を R_1 、 R_2 、赤枠内を空洞とする。この計算より新たに Input 側のカップリングを表す β_{in}^*

$$\beta_{in}^* = \frac{1 \pm \sqrt{P_r/P_{in}}}{1 \mp \sqrt{P_r/P_{in}}} \quad (4.7)$$

を定義すると、Two-Port での Q_0 と Q_L の関係は

$$\begin{aligned}
 Q_0^* &= \frac{Q_0}{1 + \beta_t} = (1 + \beta_{in}^*) Q_L \\
 Q_0 &= (1 + \beta_t) \cdot (1 + \beta_{in}^*) Q_L \\
 &= (1 + \beta_t + \beta_{in}) Q_L \quad (\because \beta_{in} \equiv (1 + \beta_t) \cdot \beta_{in}^*)
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

となる。

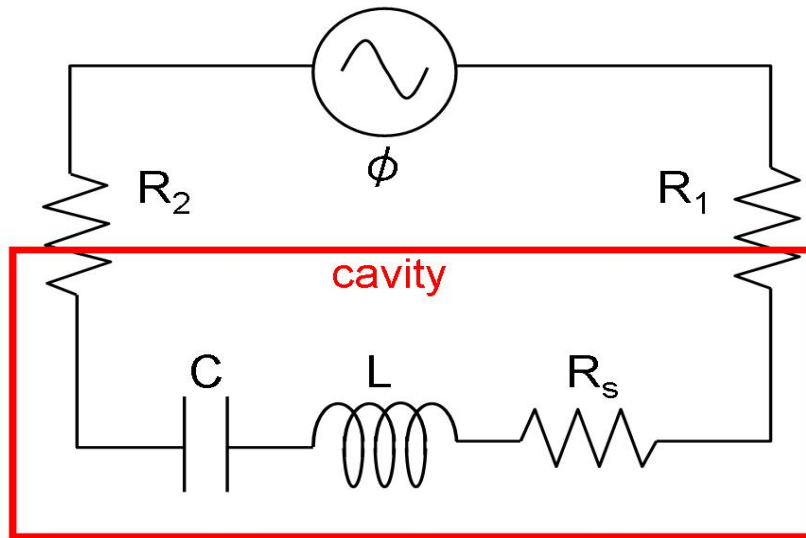


図 4.5: 等価回路

また、新たに Transmit 側の結合の強さを表す Q_t

$$Q_t \equiv \frac{\omega U}{P_t} = \frac{Q_0}{\beta_t}
 \tag{4.9}$$

を定義すると

$$\omega U = Q_0 P_{loss} = Q_t P_t
 \tag{4.10}$$

という関係式を得る。

また、シャントインピーダンス R_{sh} の式 (2.25) より、加速電界 E_{acc} は

$$\begin{aligned}
 R_{sh} &= \frac{V_c^2}{P_{loss}} \\
 &= \frac{(E_{acc} \cdot d_{eff})^2}{P_{loss}} \\
 E_{acc} &= \frac{1}{d_{eff}} \sqrt{R_{sh} \cdot P_{loss}} \\
 &= \frac{1}{d_{eff}} \sqrt{(R_{sh}/Q_0) \cdot (Q_0 \cdot P_{loss})} \\
 &= Z \sqrt{Q_0 \cdot P_{loss}} \quad \left(\because Z \equiv \frac{1}{d_{eff}} \sqrt{(R_{sh}/Q_0)} \right) \\
 &= Z \sqrt{Q_t \cdot P_t}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

となる。 Z は形状から求められる値であり計算の際には定数としてシミュレーションの値を用いる。

4.2 測定系

KEK の AR 東実験棟にある縦測定システムを使用した。磁気シールドで被われた深さ約 4メートルの穴の中に、スタンドに固定した空洞を入れて、液体ヘリウムを減圧することで 2 K まで冷却する。

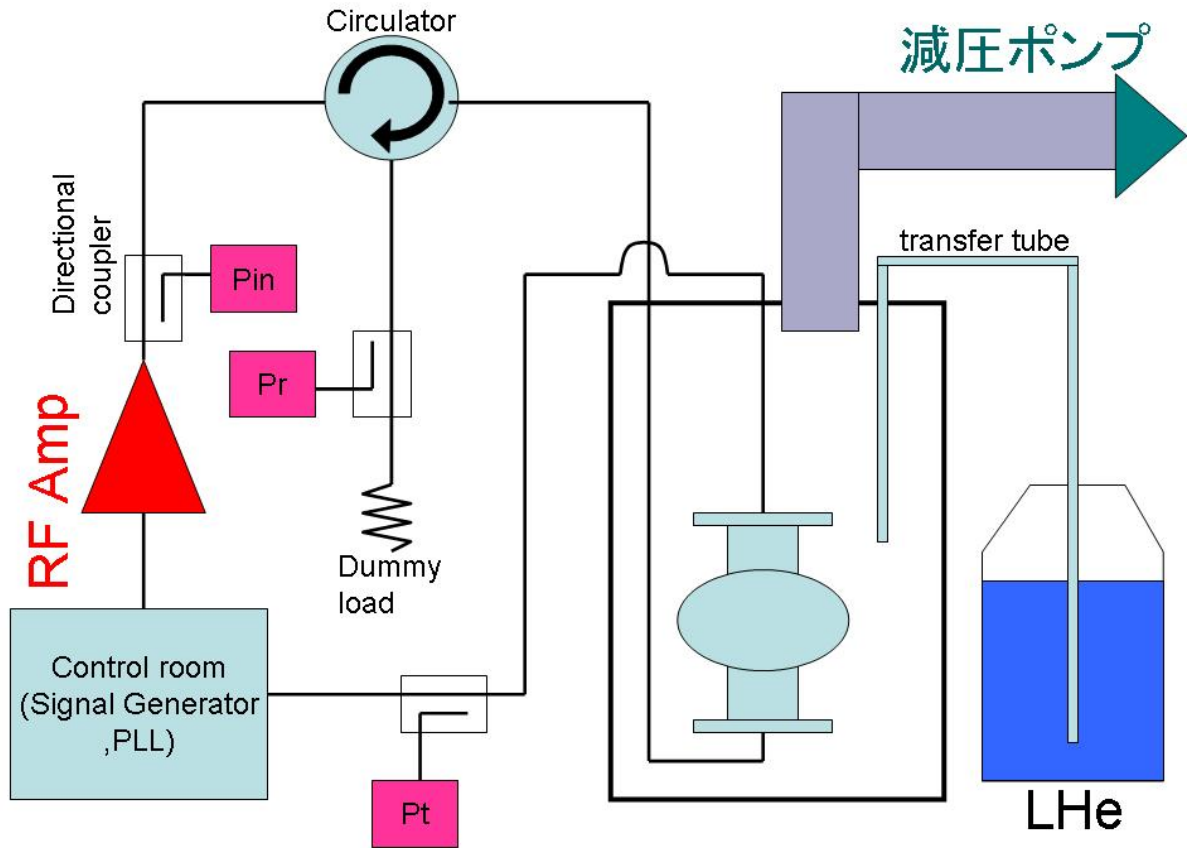


図 4.6: 測定システム

4.2.1 Cable Correction

測定の際、空洞前後でのパワーの値 (P_{IN} , P_R , P_T) を知る必要がある。そこで、ケーブルでの減衰などを考慮に入れた Correction Factor (C_{in} , C_r , C_t) を事前に求めておく必要がある。各測定量を p_{meas} とした時、各 Correction Factor は $P = C \cdot p_{meas}$ で定義する。以下にそれらを求める手順を示す。

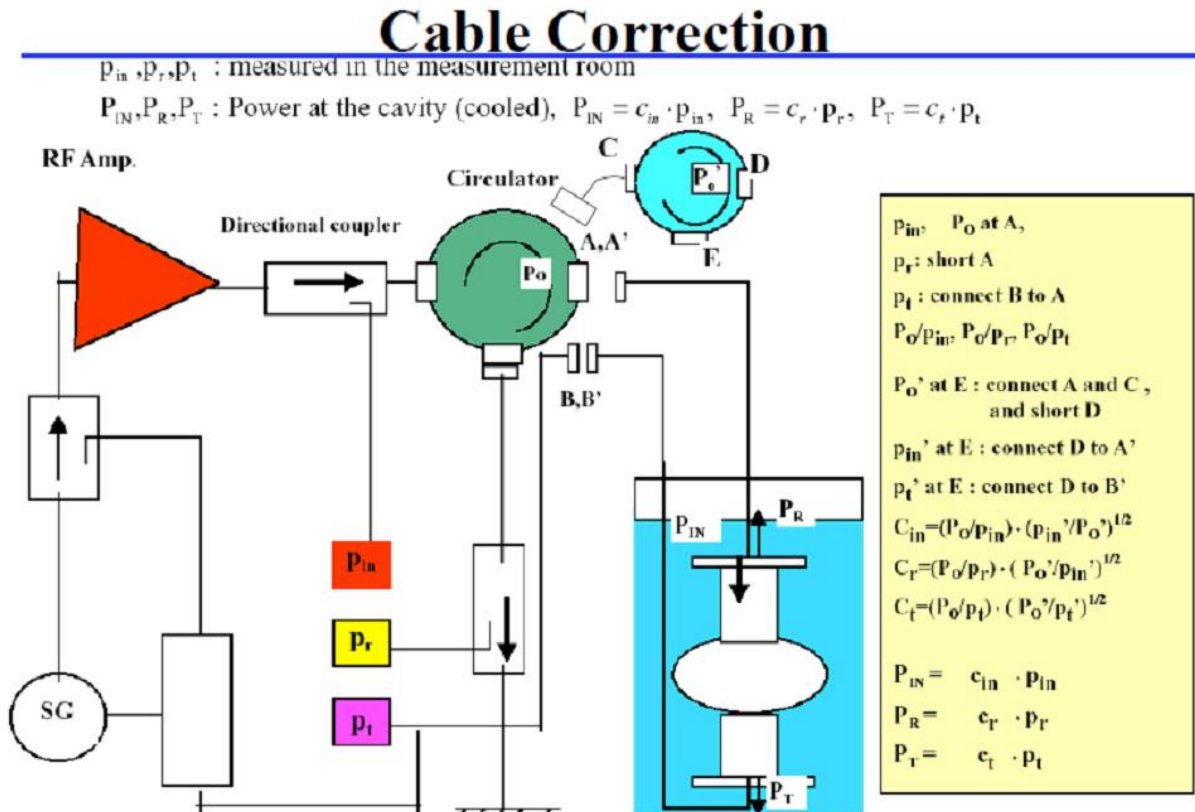


図 4.7: Cable Correction

図 4.7 のように 2K での空洞の共振周波数を用いて

1. P_{in} 、A 点における P_0 を測定する
2. A 点をショートさせて P_r を測定する
3. A 点と B 点を繋いで P_t を測定する
4. もう一つの Circulator の C 点と A 点を繋ぎ、D 点をショートさせて E 点で P_0' を測定する
5. D 点と A' 点を繋いで E 点で P_{in}' を測定する
6. D 点と B' 点を繋いで E 点で P_t' を測定する

の順で各パラメーター P_{in} 、 P_0 、 P_r 、 P_t 、 P'_0 、 P'_{in} 、 P'_t を測定する。すると、各 Correction Factor は

$$C_{in} = \frac{P_0}{P_{in}} \sqrt{\frac{P'_{in}}{P'_0}} \quad (4.12)$$

$$C_r = \frac{P_0}{P_r} \sqrt{\frac{P'_0}{P'_{in}}} \quad (4.13)$$

$$C_t = \frac{P_0}{P_t} \sqrt{\frac{P'_0}{P'_t}} \quad (4.14)$$

となる。

4.2.2 Feed Back System

超伝導空洞は Q 値がとても高い事からもわかるように共振周波数の Δf が非常に狭い。そこで、空洞に安定した RF を供給するために Feed Back System が必要になる。以下にその概略図を示す。

Feed Back System

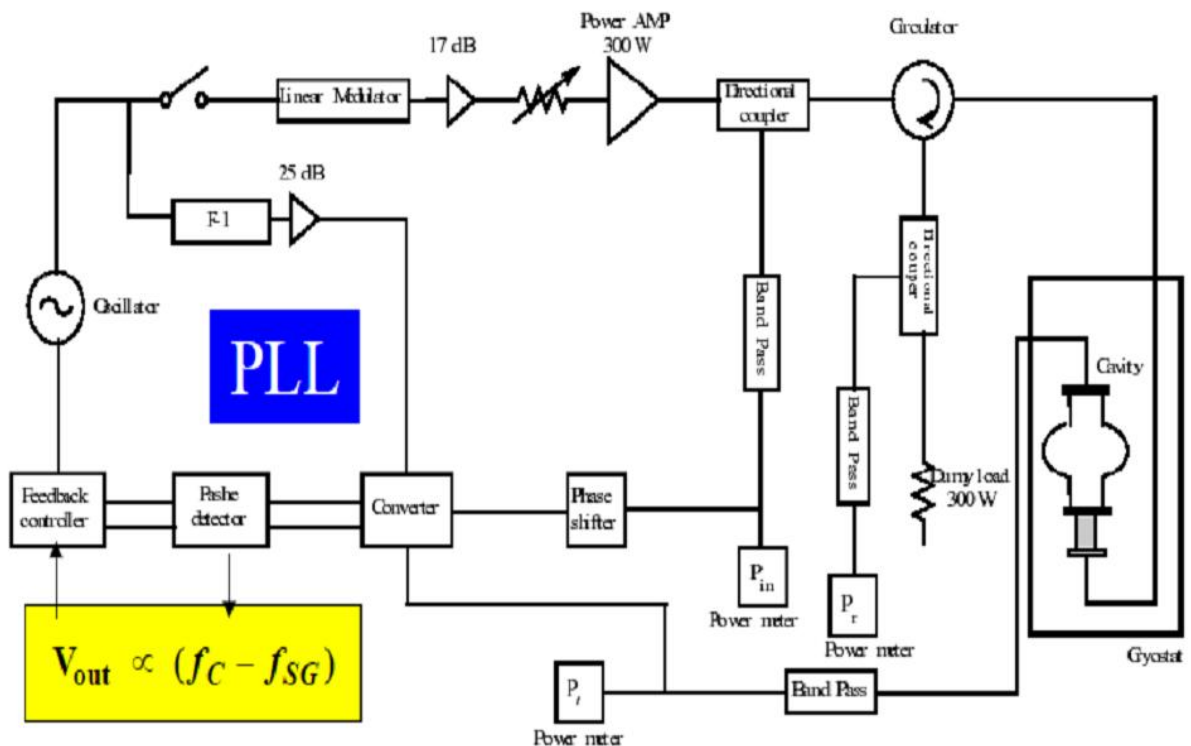


図 4.8: Feed Back System

4.3 誤差

4.3.1 Power Meter and Sensor 及びその評価

RF の Input Power P_{in} 、Reflect Power P_r 、Transmit Power P_t を測定しなければならない。今測定において各 Power を測るために Agilent Technologies 社製の 437B 高性能シングル・チャンネル平均値応答パワー・メータ と 8480 シリーズのパワー・センサを使用した。これは構造上、各パワー・メータとパワー・センサーをセットで Calibration するものである。

この一連の測定では、測定器自体の理解とその誤差について述べる。

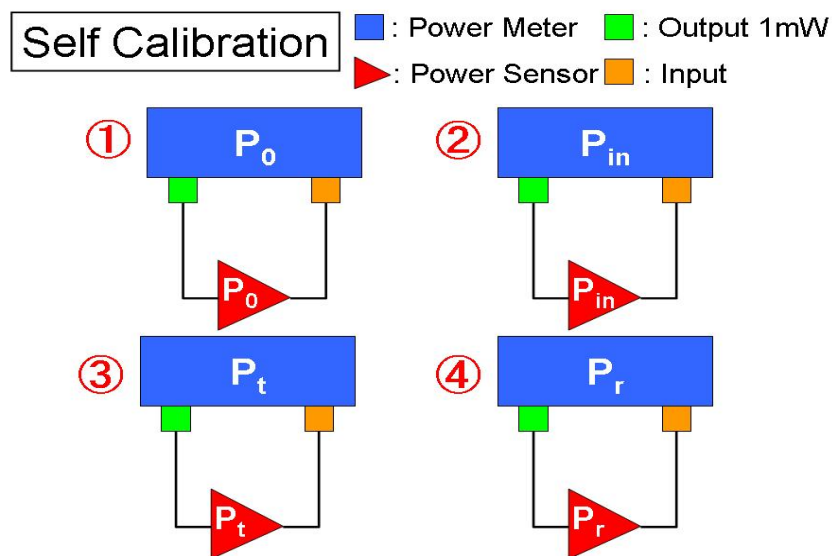


図 4.9: setup 1

まず図 4.9 のような **setup 1** で行う。各パワー・メータには $1[mW] 50[MHz]$ の RF Output が付いており、その値を読み取ることで self calibration を行う。各結果は

$$\begin{aligned} \text{①: } & 1.008[mW] \\ \text{②: } & 1.002[mW] \\ \text{③: } & 1.008[mW] \\ \text{④: } & 0.999[mW] \end{aligned} \tag{4.15}$$

であった。本来はここで各値をつまみで $1.000[mW]$ に調節するのだが、今評価の過程において、途中で目盛りの調整は行っていない。

次に図 4.10 のような **setup 2** で行う。

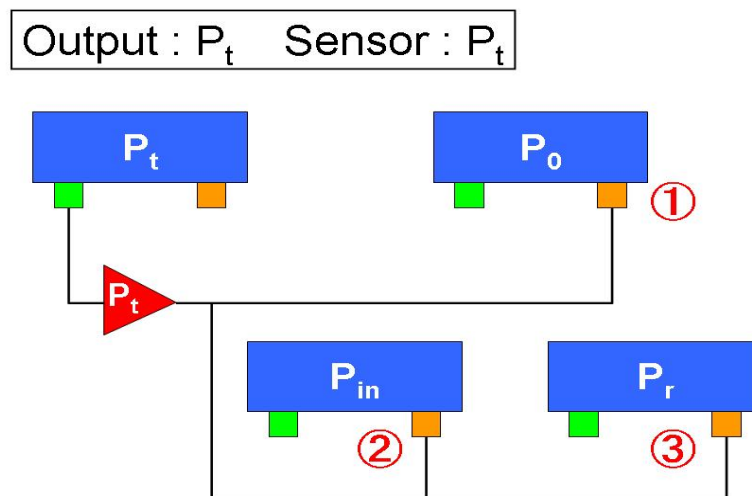


図 4.10: setup 2

これは、パワー・メーターとパワー・センサーの組み合わせを変えた場合の変化を調べたものである。P_t 用のパワー・メーターから 1mW の Output を出力して、P_t 用のパワー・センサーを用いて各メーターで値を読んだものである。各結果は

$$\begin{aligned} \textcircled{1}: & 1.38[mW] \\ \textcircled{2}: & 0.848[mW] \\ \textcircled{3}: & 0.833[mW] \end{aligned} \tag{4.16}$$

であった。メーターとセンサーの組み合わせを換えているので、全く異なった結果となっている。つまり、組み合わせを換えた場合には、毎回調節を必要とする。

次に図 4.11 のような **setup 3** で行う。

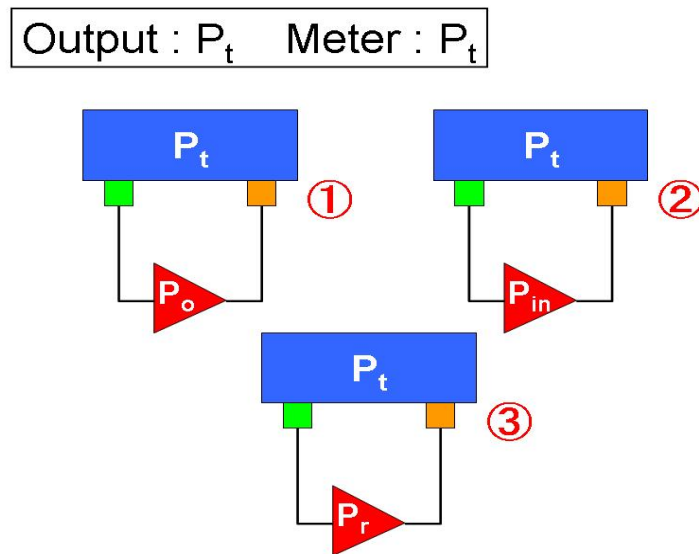


図 4.11: setup 3

これは、パワー・センサーを変えた場合の変化を調べたものである。 P_t 用のパワー・メーターから 1mW の Output を出力して、それぞれ他のパワー・センサーを用いて P_t 用のパワー・メーターで値を読んだものである。各結果は

$$\begin{aligned} \textcircled{1}: & 0.726[\text{mW}] \\ \textcircled{2}: & 1.181[\text{mW}] \\ \textcircled{3}: & 1.21[\text{mW}] \end{aligned} \tag{4.17}$$

であった。これも先程の setup2 と同様に、メーターとセンサーの組み合わせを変えているので 1mW とは大きく異なっている。

次に図 4.12 のような **setup 4** で行う。

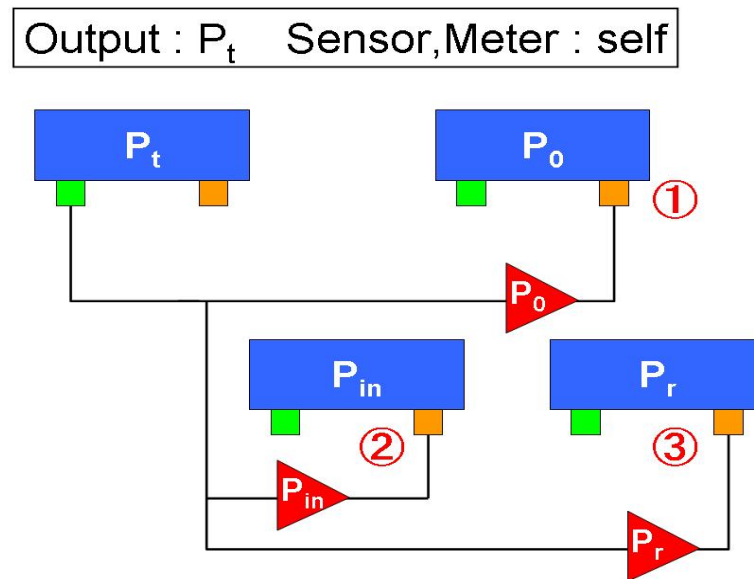


図 4.12: setup 4

これは、Output を固定した場合の変化を調べたものである。 P_t 用のパワー・メーターから 1mW の Output を出力して、それぞれのパワー・センサー、パワー・メーターで値を読んだものである。各結果は

$$\begin{aligned} \text{①: } & 1.008[mW] \\ \text{②: } & 1.001[mW] \\ \text{③: } & 1.003[mW] \end{aligned} \tag{4.18}$$

であった。setup 1 の結果と比較すると、それぞれのパワー・メーターの Output は誤差 1%未満で正しいと言える。

最後に図 4.13 のような **setup 5** で行う。

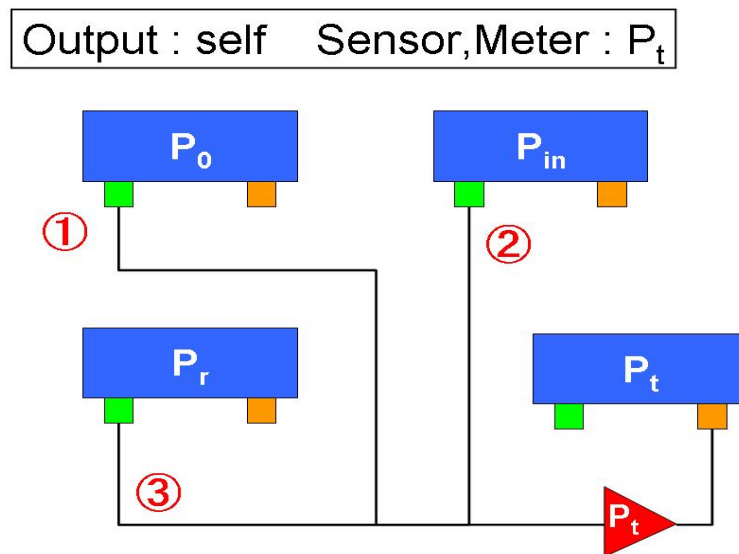


図 4.13: setup 5

これは、Output を変えた場合の変化を調べたものである。それぞれ他のパワー・メーターから 1mW の Output を出力して、P_t 用のパワー・センサー、パワー・メーターで値を読んだものである。各結果は

$$\begin{aligned} \textcircled{1}: & 1.000[mW] \\ \textcircled{2}: & 0.998[mW] \\ \textcircled{3}: & 1.000[mW] \end{aligned} \quad (4.19)$$

であった。setup 1、及び setup 4 の結果と比較すると、それぞれのパワー・メーターの Output の絶対値としての誤差も 1%未満であると言える。

これらの5つの測定より

- 各パワー・メーターの Output は誤差 1%未満 で正しい
- Self Calibration を行った場合の測定値は絶対値として誤差 1%未満 で正しい (1mW, 50MHz において)

と言える。(今後、追加測定を行って定量的に求める)

- より高パワー、もしくは低パワーでの振る舞い
 - 1.3GHz 付近の周波数依存性
- なども調べる必要があると言える。

4.3.2 ケーブルの評価 -周波数依存など-

測定系の一部としてケーブルでのロスも調べる必要がある。測定回路において各コネクタ点における RF Power の変化を測定した。ここで減衰率 α は以下のように定義する。

$$P_0 = P \times \alpha^x$$

P と P_0 はケーブル前後でのそれぞれの RF Power [W] の測定量、 x [m] はケーブル長である。

各ケーブルでのロス推移		
ケーブル長 (計)[m]	RF Power [mW]	減衰率 [1/m]
0	39.0	—
4	26.6	0.91
19	16.9	0.97
23	12.6	0.93

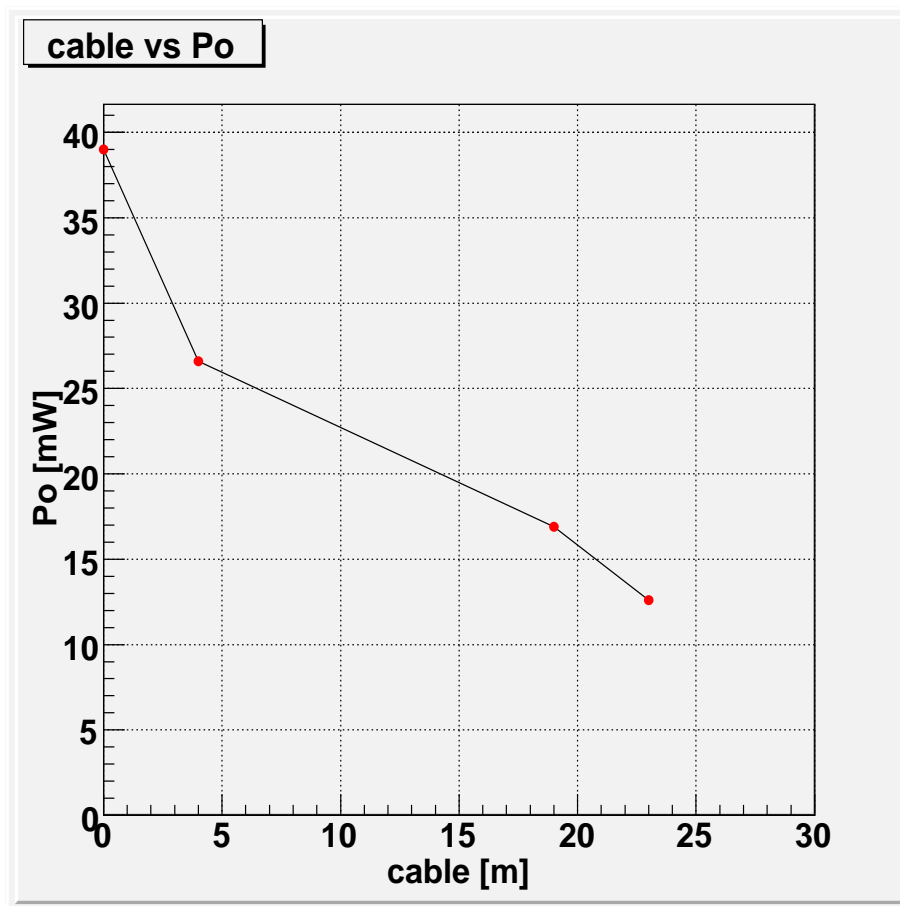


図 4.14: ケーブルでの RF 減衰

各ケーブルでの減衰率は異なる。しかし測定中に変化しなければ Cable Correction Factor の定義より、結果には影響しない。よって再現性もしくは温度依存性などを理解しなければならない。

次に RF パワーの周波数による依存性をみる。ピットにおけるパワーを測定した。各測定結果は以下ようになった。

周波数による RF Power の変化			
RF 周波数 [MHz]	RF Power [mW]	RF 周波数 [MHz]	RF Power [mW]
1300	48.6	1289	39.2
1299	47.4	1288	38.8
1298	46.5	1287	37.9
1297	45.3	1286	37.3
1296	43.8	1285	36.8
1295	42.2	1284	36.5
1294	40.7	1283	36.4
1293	39.6	1282	36.3
1292	38.8	1281	36.0
1291	38.6	1280	35.6
1290	39.0		

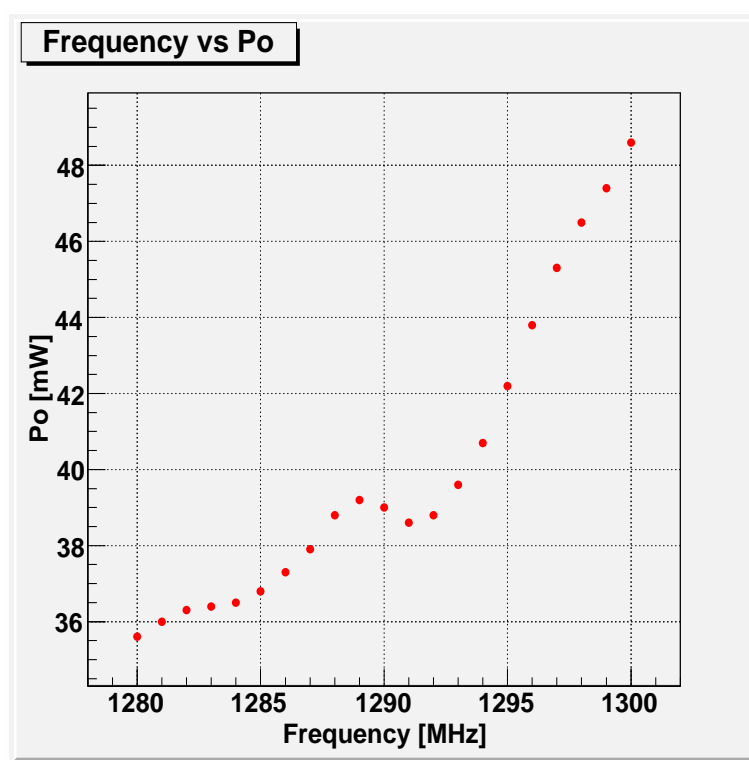


図 4.15: 周波数依存性

1300MHz から 1280MHz の間でも約 20% の違いがある。パワーメーター（及びセンサー）も勿論周波数依存性はあるが、この周波数領域においては 1% 以下である。よって回路中で RF の反射を起こしている可能性があるが、特定までは至っていない。

次に周波数依存性の再現性のチェックを行った。②(黄緑)、③(青)は同じ日に、①(赤)は別の日に測定したもので前項のデータである。

周波数による RF Power の変化			
RF 周波数 [MHz]	① RF Power [mW]	② RF Power [mW]	③ RF Power [mW]
1300	48.6	39.3	38.1
1299	47.4	38.6	37.6
1298	46.5	37.8	37.0
1297	45.3	37.0	36.4
1296	43.8	36.1	35.4
1295	42.2	34.9	34.3
1294	40.7	33.7	33.2
1293	39.6	32.7	32.3
1292	38.8	31.8	31.5
1291	38.6	31.8	31.5
1290	39.0	32.0	31.8
1289	39.2	32.1	31.8
1288	38.8	31.8	31.4
1287	37.9	31.1	30.8
1286	37.3	30.5	30.3
1285	36.8	30.0	30.0
1284	36.5	29.9	29.8
1283	36.4	29.9	29.8
1282	36.3	29.8	29.8
1281	36.0	29.7	29.7
1280	35.6	29.4	29.4

図 4.16 はそれをプロットしたものである。赤、黄緑、青の各点はデータの①、②、③を表している。中下のプロットはそれぞれのデータを 1280MHz と 1300MHz で規格化して比べたもので、最大で 10.5% のばらつきがある。

しかし、これはコネクタの再接続や Amp の安定性などを含んでおらず、以下にそれらを踏まえた測定を行った。また、この値の変化が直接の測定誤差となる訳ではなく、共振周波数の異なる空洞を比較する際に考慮されるべきである。

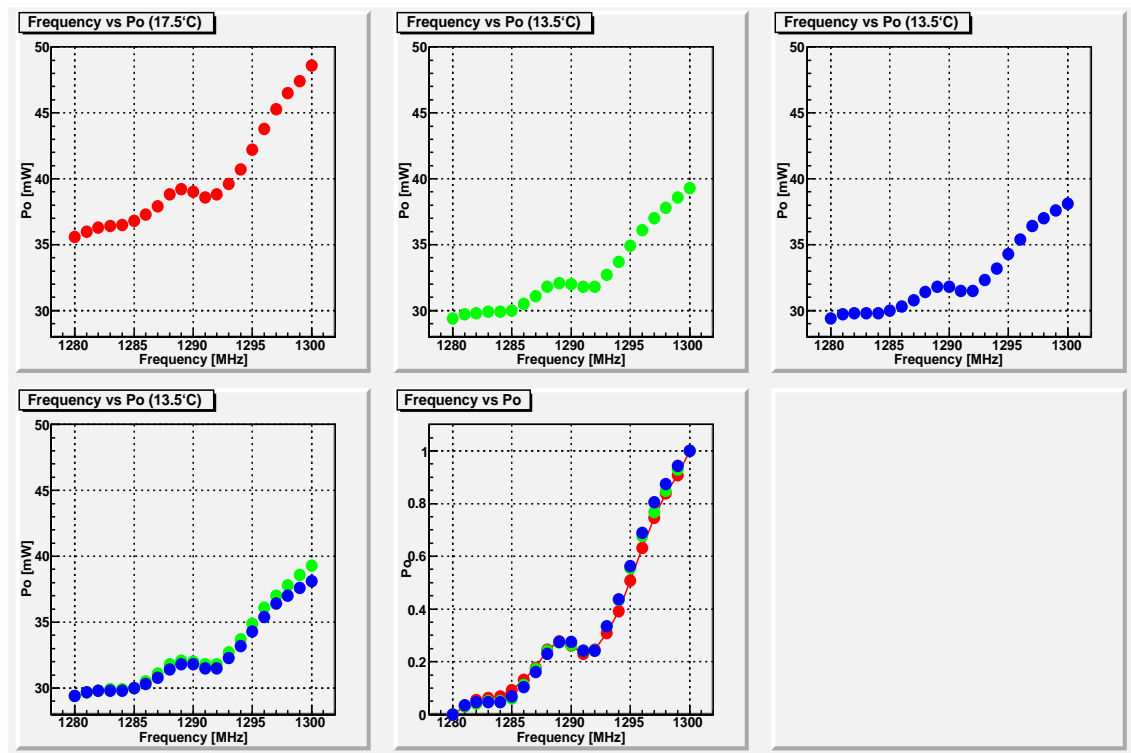


図 4.16: 周波数依存性 再現性

そこで、次に正確に温度変化のみを見るために、ピット (P_0 :空調なし) とコントロールルーム (P_{in} :暖房で一定温度に保たれている) の二箇所での 15 時間の定点測定を行った。これは、

- 1 時間に一回測定する
- Amp は各測定の 10 分前に立ち上げる
- Amp の冷却水は常に 25 に保つ

などの条件で行った。

各図 4.17、図 4.18 はそれぞれ P_0 、 P_{in} であり、各時間 (24 時から翌 13 時) での周波数依存性を赤点、温度変化を緑点、IS#17 空洞の共振周波数に近い 1288MHz での時間変化を青点でそれぞれプロットした。

しかし、有意な温度変化が見られなかった。

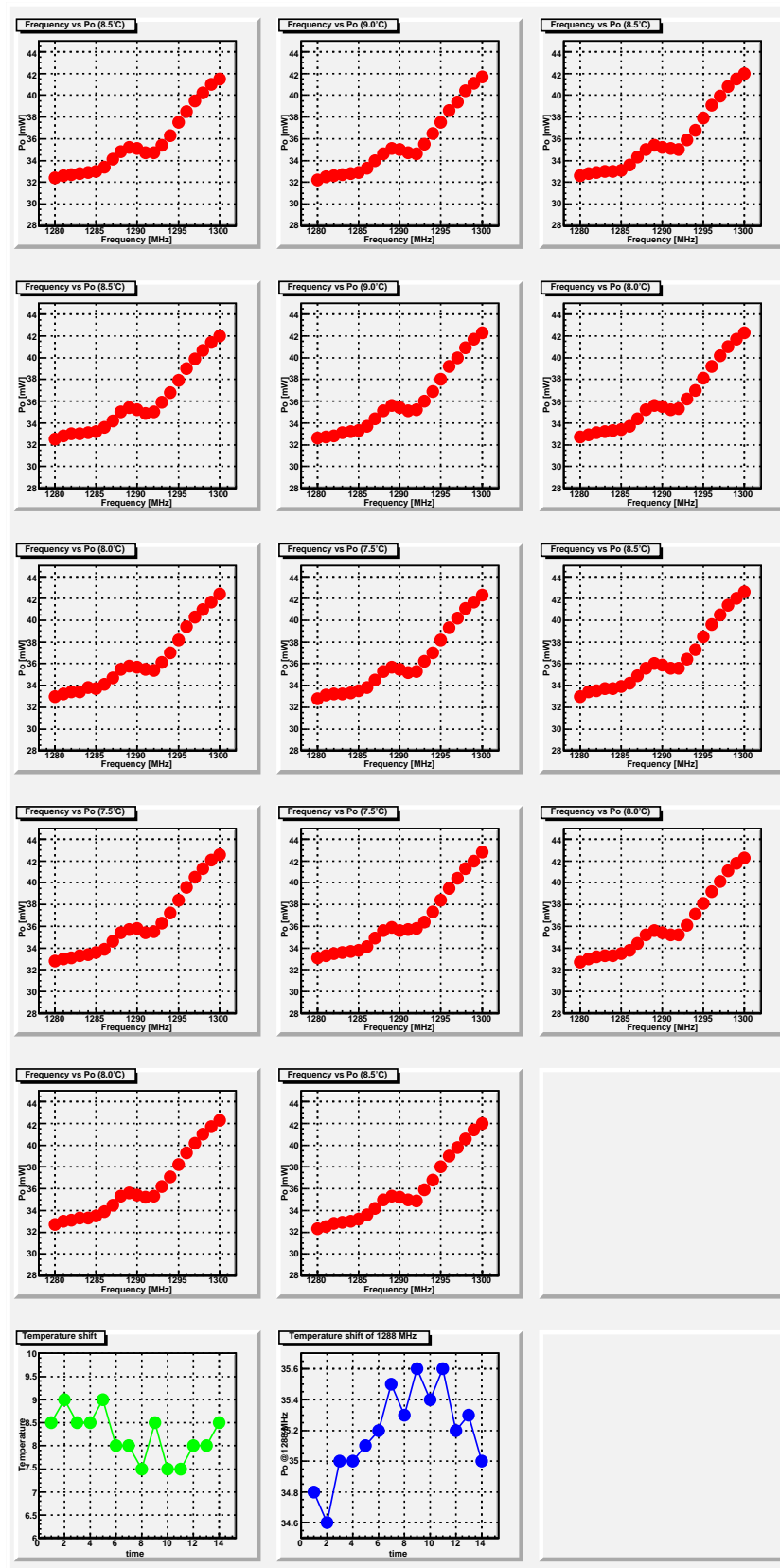


図 4.17: 温度変化による周波数依存性 P_0

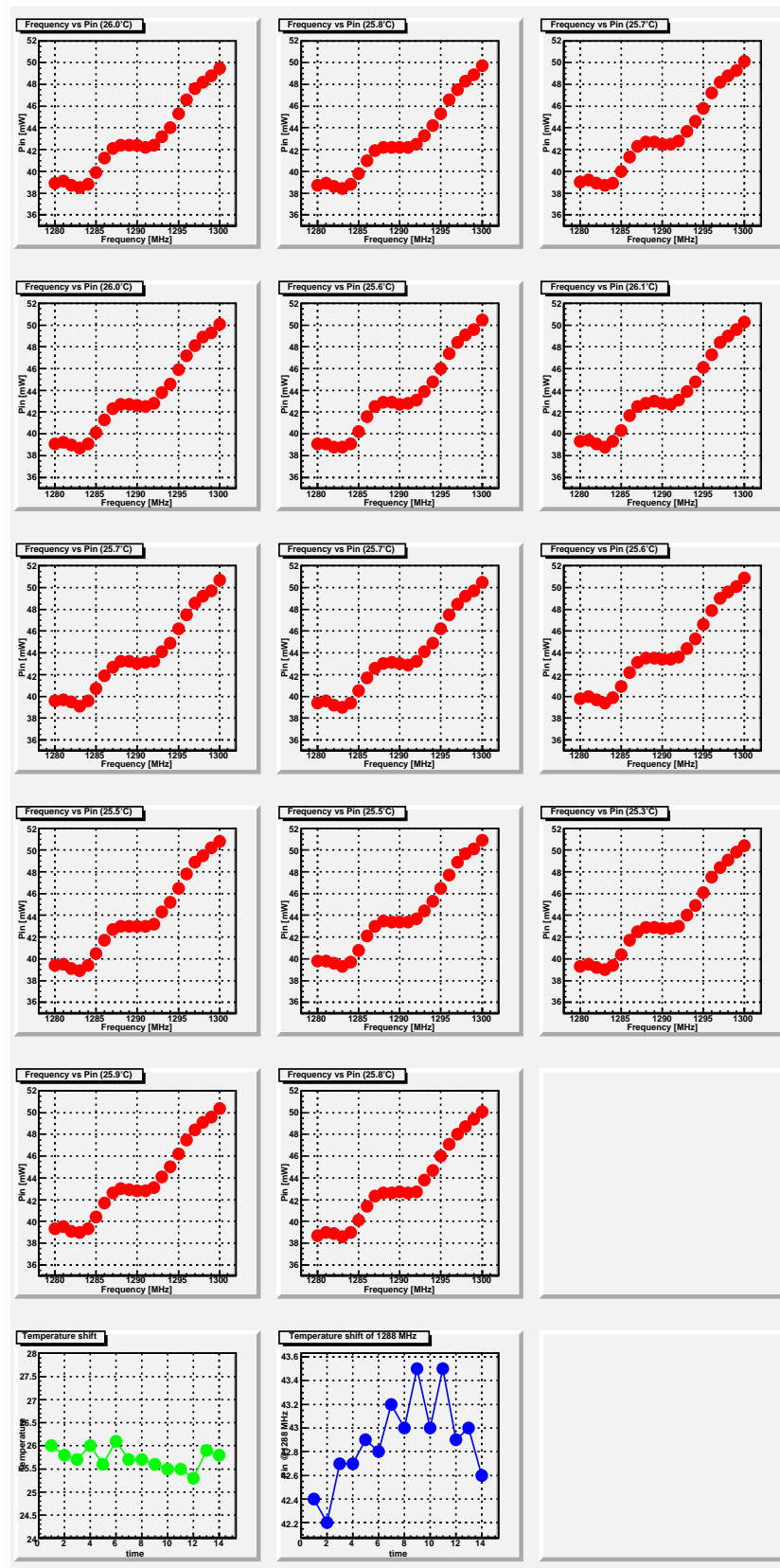


図 4.18: 温度変化による周波数依存性 P_{in}

そこで 1288MHz の場合の Correction Factor の変化を見る。式 (4.12) からわかるように、 P_0/P_{in} の比の変化を見ればよいので、その変化を図 4.19 の赤点で示す。

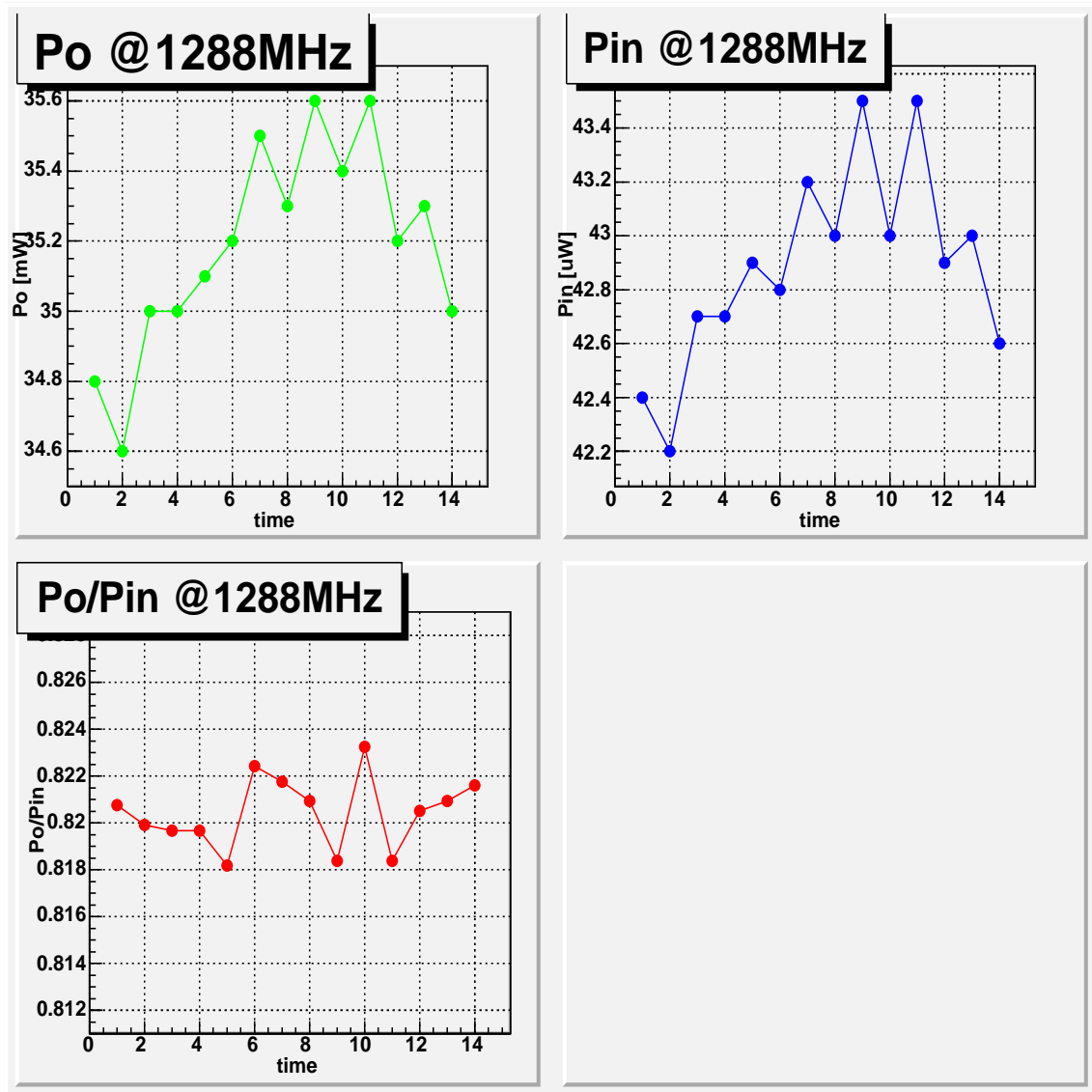


図 4.19: 温度変化による Correction Factor の変化 P_0/P_{in}

この P_0/P_{in} の比のふら付きは 0.31% となり、温度変化が小さい場合の各ケーブルロスを含めたパラメータの誤差の影響は、Correction Factor の誤差としてはその他の誤差に比べて無視できると言える。また、ここで見えている各時間での変化は、Amp より上流の RF Generator などの変化が見えているものであると推測される。

いずれにしても、局所的な温度変化も測定する必要がある。

4.3.3 各パワーメーターの違い

最後に異なるパワーメーター間での RF パワー依存性をみる。
 図 4.20 のようなセットアップで測定を行う。

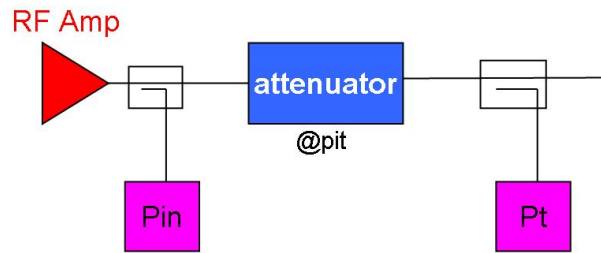


図 4.20: 回路図

増幅ボルテージを変えた RF を二つのパワーメーター (P_{in} 、 P_t) で測定する。その間に 30dB の Attenuator を挟んだ。これは各二つのパワーメーターの測定領域を合わせるためである。

Pin と Pt @ 1300MHz					
Signal Voltage [V]	Pin [μW]	Pt [μW]	Signal Voltage [V]	Pin [μW]	Pt [μW]
0.001	39.6	129	0.200	326	1150
0.010	44.9	148	0.250	447	1590
0.015	48.6	161	0.300	589	2090
0.020	52.7	176	0.350	750	2680
0.025	56.8	190	0.400	932	3330
0.030	61.4	207	0.500	1350	4830
0.040	70.5	240	0.600	1840	6600
0.050	80.7	276	0.700	2400	8580
0.060	91.6	315	0.800	3030	10830
0.070	103.1	356	0.900	3730	13300
0.080	116	403	1.000	4500	16100
0.090	129	449	1.250	6640	23600
0.100	143	498	1.500	9040	32600
0.125	181	634	1.750	11720	42300
0.150	225	792	2.000	14500	52200
0.175	272	960			

各パワーメーターの測定値 P と増幅電圧 V との関係は図 4.21 のように

$$\begin{aligned} P_{in} &\propto (V^2)^{0.85} \\ P_t &\propto (V^2)^{0.86} \\ P_{in} &\propto P_t^{0.99} \end{aligned} \tag{4.20}$$

となる。これは、Correction Factor の形からもわかるように比が変化しない。即ち、Amp から出る RF のエネルギーによって Correction Factor は変化しない事になる。すなわち測定中に温度などの局所的な変化が無ければ、これら二つのパワーメーター、及びケーブルでのロス は線形的であると言える。

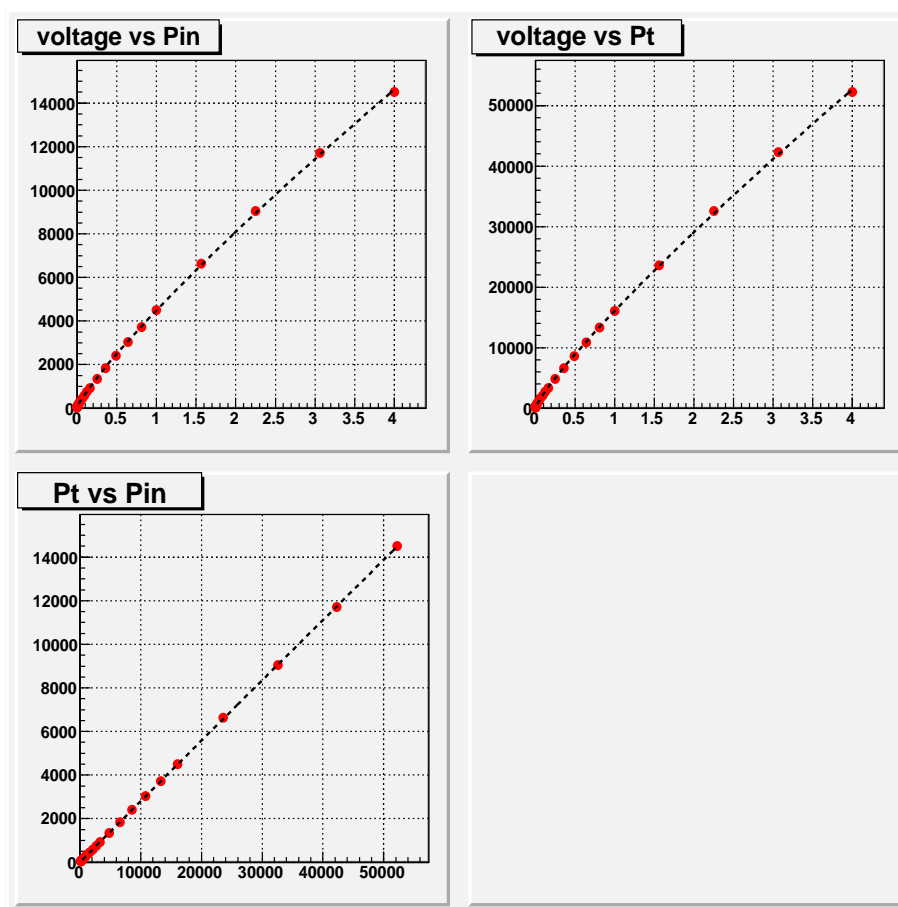


図 4.21: 電圧依存性

4.3.4 総合誤差の評価

各測定結果 (Q_0 、 E_{acc} など) の誤差について考える。まず、今測定において誤差の要因と成り得るのは

1. パワーメーター及びセンサーとケーブルロス

- パワーメーターの測定値 … 1%未満
- コネクタ接続 … 変化は確認できるが測定中は変化なし
- RF の周波数依存性 … 1288MHz で 0.31%
- RF のパワー依存性 … 各メーター間で線形的である
- 温度変化 … 未測定

2. オシロスコープの読み取り誤差

- 図 4.3 のように目測による … 3%とする

3. 空洞の温度

- 圧力計自体の読み取り誤差 … 5%とする
- 圧力計と液体ヘリウムの実際の温度の違い … 未測定

などが考えられる。

オシロスコープの誤差については、Decay Time $t_{1/2}$ をオシロスコープで測定するのであるが、最終的に測定者の目測の仕方に依るものがあり、そのばらつきを誤差とした。また、圧力計自体の読み取り誤差とは、液体ヘリウムの温度を下げるのに減圧ポンプで蒸気圧を下げる事で冷却しているので、ポンプの圧縮などによって値がふらつく事に対する誤差である。そして、圧力計と液体ヘリウムの実際の温度の違いとは、ニオブの熱伝導率が低いことから、液体ヘリウムの温度と実際の空洞自体の温度の違いで生じる誤差である。これは、直接ニオブに極低温用の温度計を貼り付けて、比較を行う必要があるが未測定である。

現在、これらの分かり得る誤差を今研究の総合誤差として加える。

第5章 結果

5.1 測定結果 -IS#17-

各測定 (Vertical Text) における主な目的は以下の表に示す。

測定番号	測定目的
1st	初回測定
2nd	再現性 + 水素病チェックの準備
3rd	水素病チェック
4th	pickup アンテナを 20mm から 22mm に交換
5th	表面抵抗 R_s の低温での振舞い
6th	pickup アンテナを 22mm から 24mm に交換
7th	6th 後に HPR 1 時間を行った
8th	pickup アンテナを 24mm から 28mm に交換
9th	pickup アンテナは 24mm で Pulse 法により測定
10th	pickup アンテナは 20mm で Pulse 法により測定

また各パラメーター Z :式 (4.11)、 Γ :式 (2.22) は以下のようにする。

$$\begin{aligned} Z &= 100.32 \\ \Gamma &= 285 \end{aligned}$$

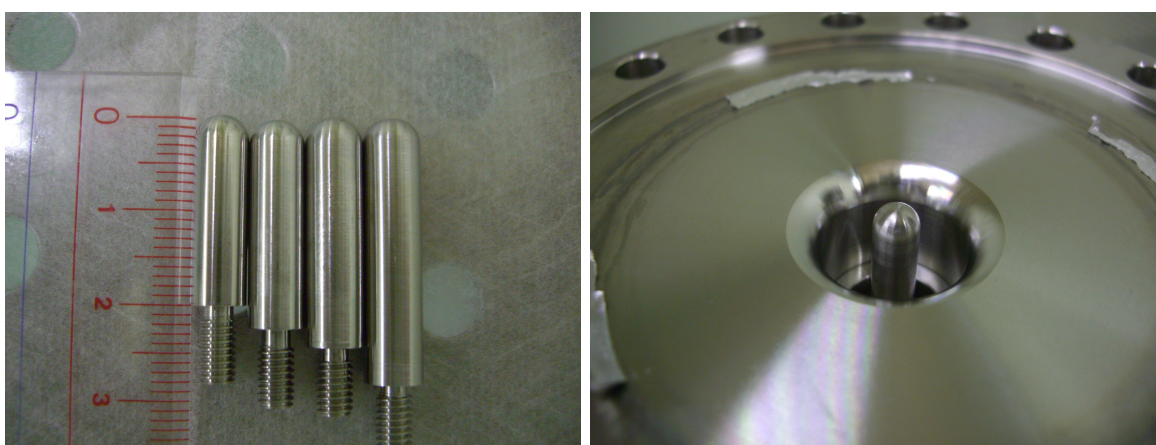


図 5.1: pickup アンテナ (20mm,22mm,24mm,28mm) とフランジ

• 1st Measurement

製作直後の1回目の測定の結果である。Q値と E_{acc} の関係を示す。

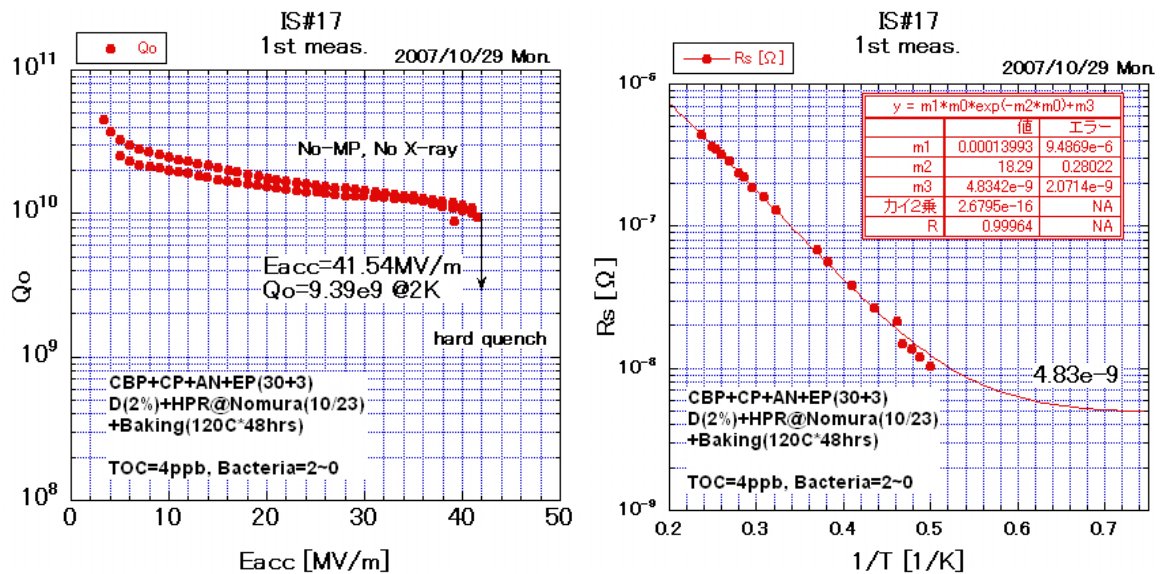


図 5.2: 1st Measurement (IS#17)

1st Measurement	
E_{acc}	: 41.5 [MV/m]
Q_0	: 9.39×10^9
Q_t	: 2.21×10^{12}

初回の測定から最大加速電界 $E_{acc}=41\text{MV/m}$ であった。RF Power を上げていきクエンチを起こして超伝導が破れるために最大加速電界が決まる。しかし、低電界 (Low Field) において Q 値が高くなるという水素病 (Q-disease) に似た傾向が見られた。これはニオブ材料中の水素が冷却過程で結晶格子から追い出されて表面へ移動し、ある程度たまとニオブの水素化合物が生成される。これが超伝導を破壊して表面抵抗が増すためと理解されている。そこで次回の測定で水素病のチェックを行う。

• 2nd Measurement

水素病のチェックのために空洞を一度超伝導状態まで温度を下げる必要がある。そこで、再現性のチェックとして一度測定を行った。

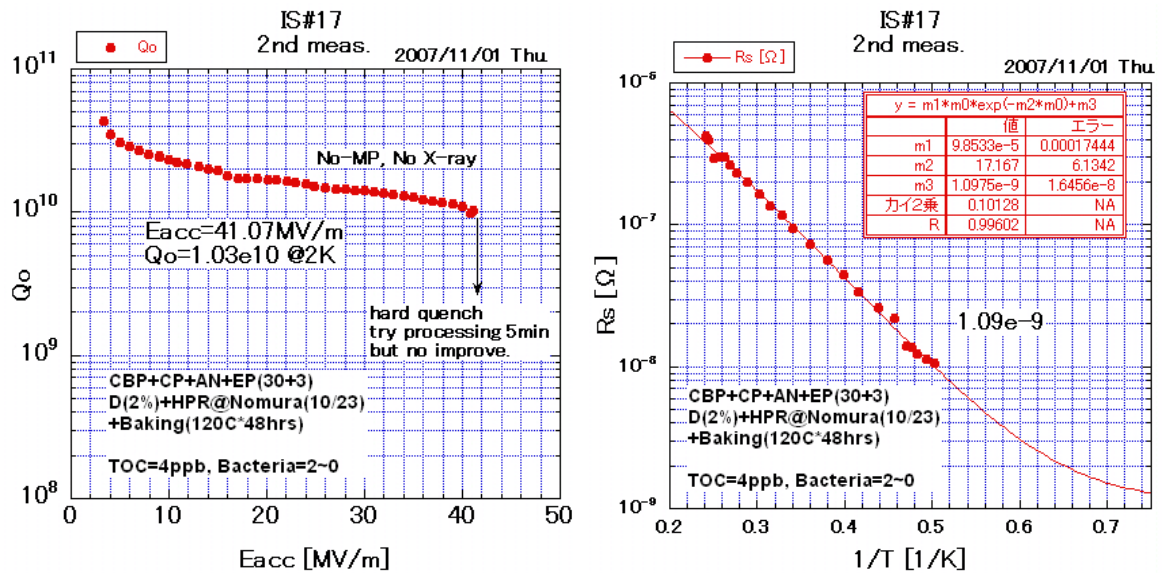


図 5.3: 2nd Measurement (IS#17)

2nd Mesurement	
E_{acc}	: 41.0 [MV/m]
Q_0	: 1.03×10^{10}
Q_t	: 2.11×10^{12}

1st と同様に最大加速電界 $E_{acc} = 41 \text{ MV/m}$ であり、また低電界 (Low Field) において Q 値が高くなるという現象が見られた。

• 3rd Measurement

2nd の測定の後、一度液体ヘリウムをヒーターで蒸発させた後 100K まで上昇させる。そこで 13 時間放置させた後に、3 度目の測定を行った。

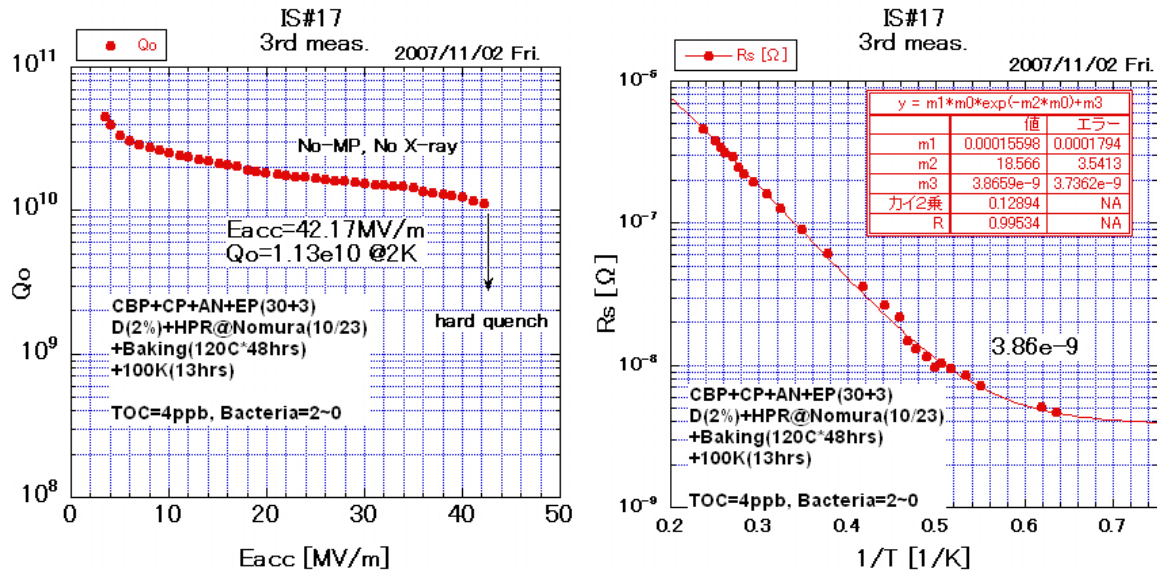


図 5.4: 3rd Measurement (IS#17)

3rd Measurement	
E_{acc}	: 42.1 [MV/m]
Q_0	: 1.13×10^{10}
Q_t	: 2.43×10^{12}

水素病であれば全体として Q 値が低下するはずであるが、その傾向は見られずに 1st、2nd と同様の結果となった。すなわち、この症状は水素病によるものではない。

• 4th Measurement

次にピックアップのカップリング (Q_t) が過去の測定より高いということから、ピックアップ用のアンテナを 20mm から 22mm に交換した。その際に一度真空を破っているなので、再び HPR を行い、真空引きをした。

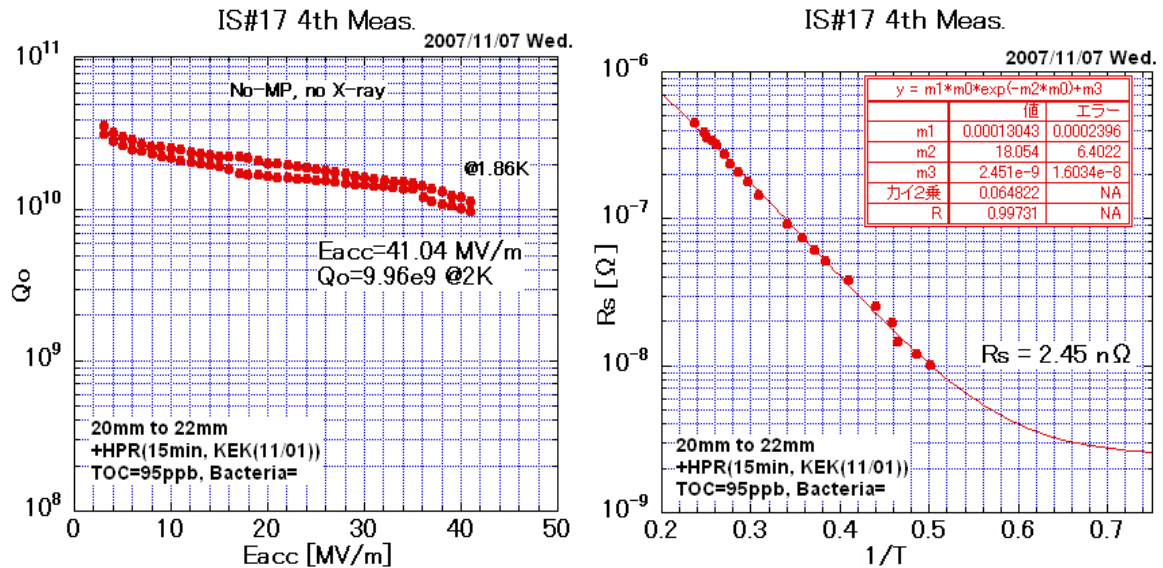


図 5.5: 4th Measurement (IS#17)

4th Measurement	
E_{acc}	: 41.0 [MV/m]
Q_0	: 9.96×10^9
Q_t	: 1.02×10^{12}

Q_t も減少し、低電界 (Low Field) での Q_0 の振る舞いも変化した。加えて 1.86K での振る舞いも測定した。温度が低下したことで表面抵抗も下がる。よって Q 値が全体的に上昇しているのがわかる。

• 5th Measurement

ここで、BCS 理論から導かれる表面抵抗 R_{BCS} についての詳しい測定を行った。これは本来なら反発する電子同士が、格子ひずみからくる電子・格子相互作用によって引力を生じる。その電子対がマイクロ波などによって励起され、超伝導エネルギーギャップを超えて常伝導電子となって電気抵抗を生じるためである。よって表面抵抗 R_s は

$$R_s = R_{BCS}(T) + R_{res} \quad (5.1)$$

$$R_{BCS}(T) = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right) \quad (5.2)$$

となる。 R_{res} は空洞の表面状態からくる残留抵抗、 k_B はボルツマン定数、 Δ は 0K でのエネルギーギャップであり、 A は超伝導体によって決まる係数である。

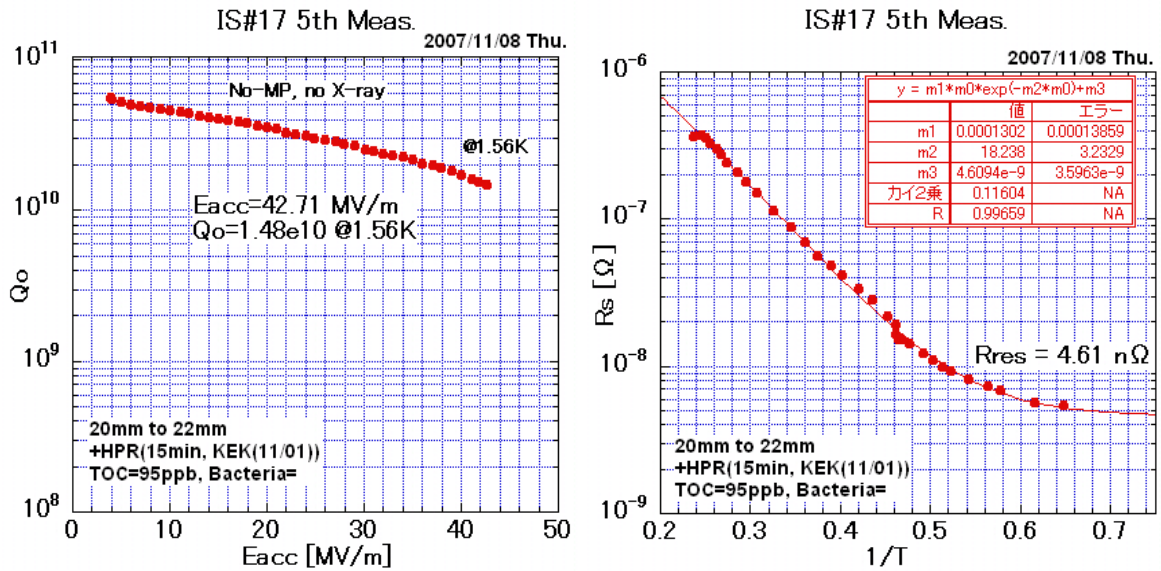


図 5.6: 5th Measurement (IS#17)

5th Measurement		5th Measurement	
E_{acc}	: 42.7 [MV/m]	A	: 1.98×10^{-6}
Q_0	: 1.48×10^{10}	Δ/k_B	: 18.2
Q_t	: 1.14×10^{12}	R_{res}	: 4.6 [n Ω]

• 6th Measurement

次にピックアップ用のアンテナを 22mm から 24mm に交換した。その際に一度真空を破っているため、再び HPR を行い、真空引きをした。

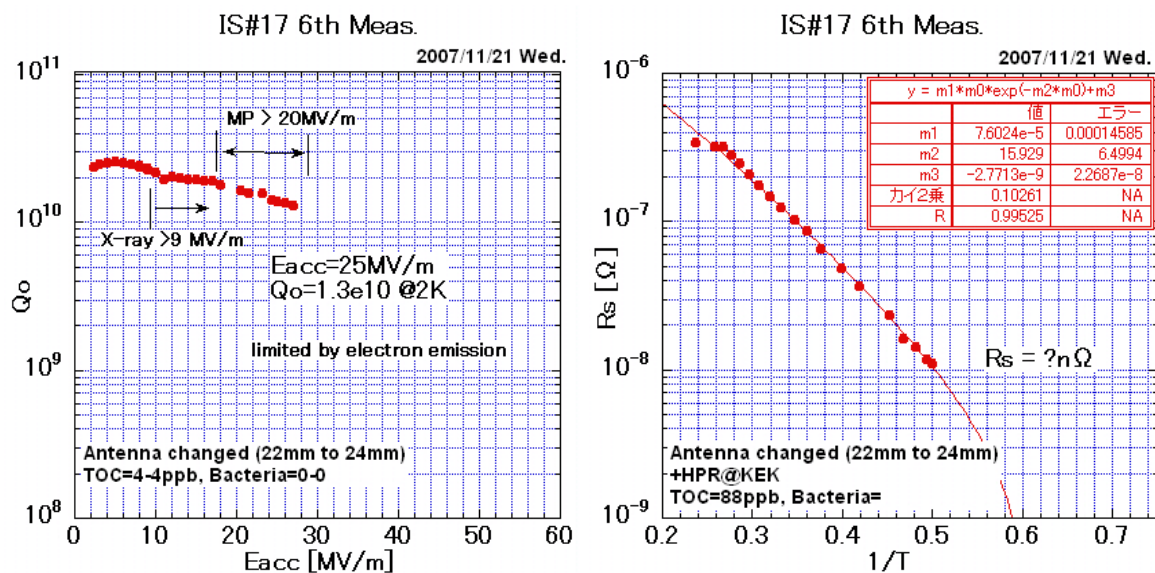


図 5.7: 6th Measurement (IS#17)

6th Measurement	
E_{acc}	: 27.0 [MV/m]
Q_0	: 1.30×10^{10}
Q_t	: 4.61×10^{11}

これまで測定中に X 線は検出されなかったが、今測定において $0.3 \mu\text{Sv/h}$ を超える X 線が検出された。そこで、電界測定の途中で終了した。この原因として、アンテナ交換やフランジの取り付けなどの際に空洞表面にゴミが付着した可能性などが考えられる。そこでクラス 10 のクリーンルーム内で空洞内面を確認した。

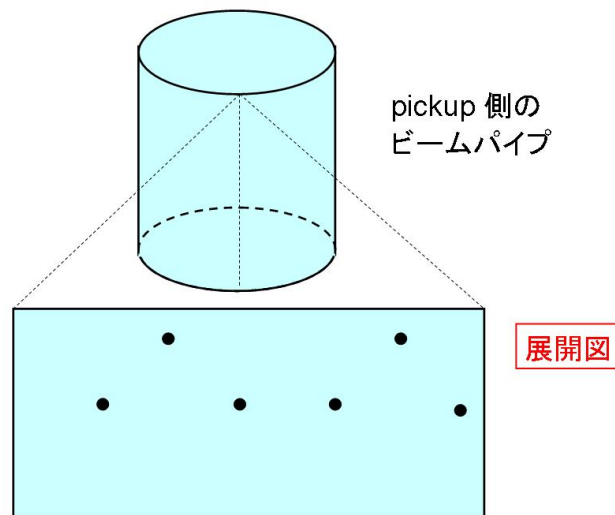
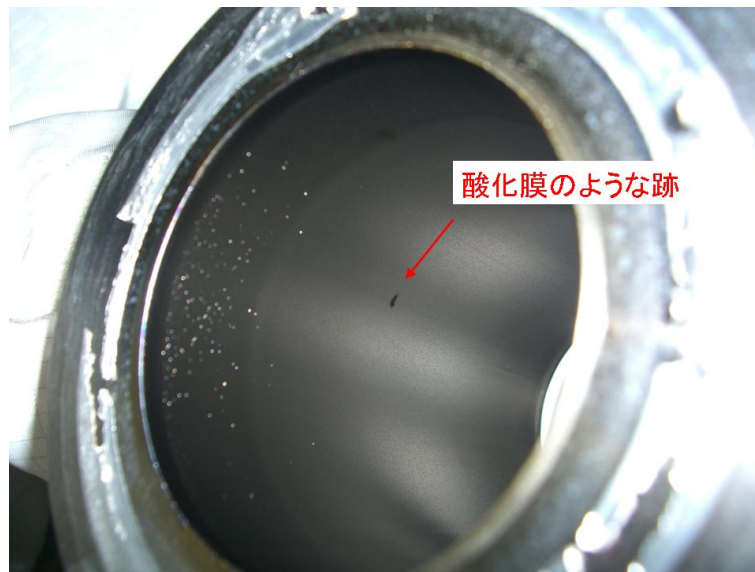


図 5.8: ビームパイプについての汚れ

すると、図 5.8 のようにビームパイプ内面に酸化膜のような跡が見られた。また図 5.8 の下図のように目視で計 6 ヶ所にそのような跡を確認した。高圧水をニオブの一箇所に当て続けると酸化膜ができるというデータがある。直前の HPR で回転が止まってそのような事が起こった可能性はある。しかし、これが直接の原因であるかは定かではない。

• 7th Measurement

汚れが付着している可能性を考えて HPR の高圧水が空洞全面に当たるように行った。その際のパラメーターは以下の通りである。

- 上下速度 … 25 mm/min
- 回転速度 … 5 rpm
- 水圧 … 6 MPa
- 洗浄時間 … 1 hour

HPR 後も前述の跡は取れなかった。

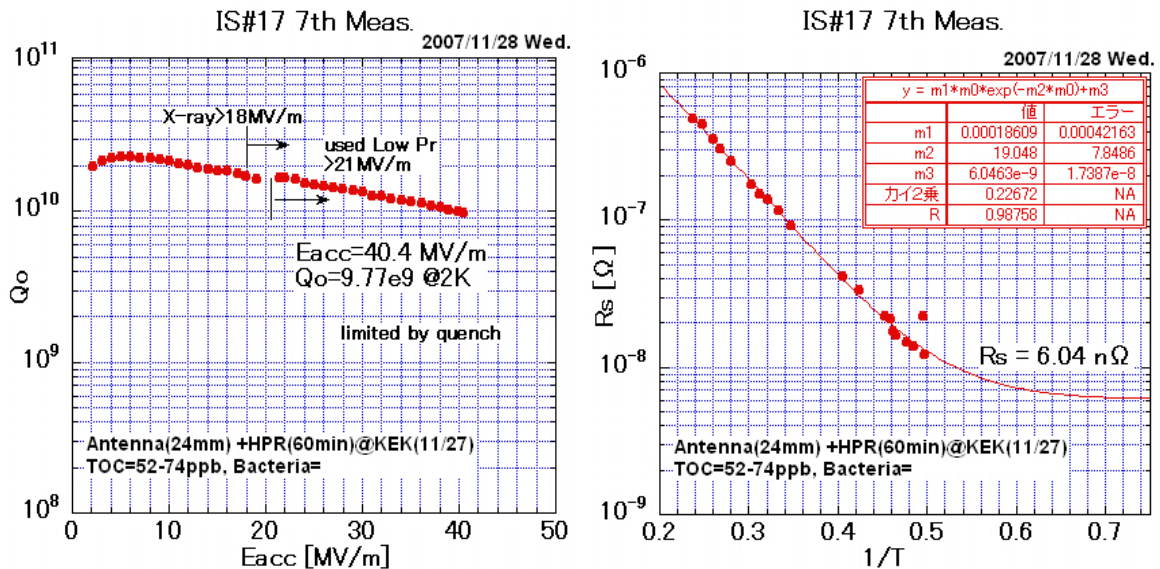


図 5.9: 7th Measurement (IS#17)

7th Measurement	
E_{acc}	: 40.4 [MV/m]
Q_0	: 9.77×10^9
Q_t	: 4.18×10^{11}

前回と同様に X 線は検出されたが測定を続けた。 Q_t もさらに減少し、低電界 (Low Field) での Q_0 が左下がりになった。

• 8th Measurement

次にピックアップ用のアンテナを 24mm から 28mm に交換した。その際に一度真空を破っているため、再び HPR を行い、真空引きをした。これはピックアップ用のアンテナがフランジの断面よりさらに突き出した時の振る舞いを調べるために行った。

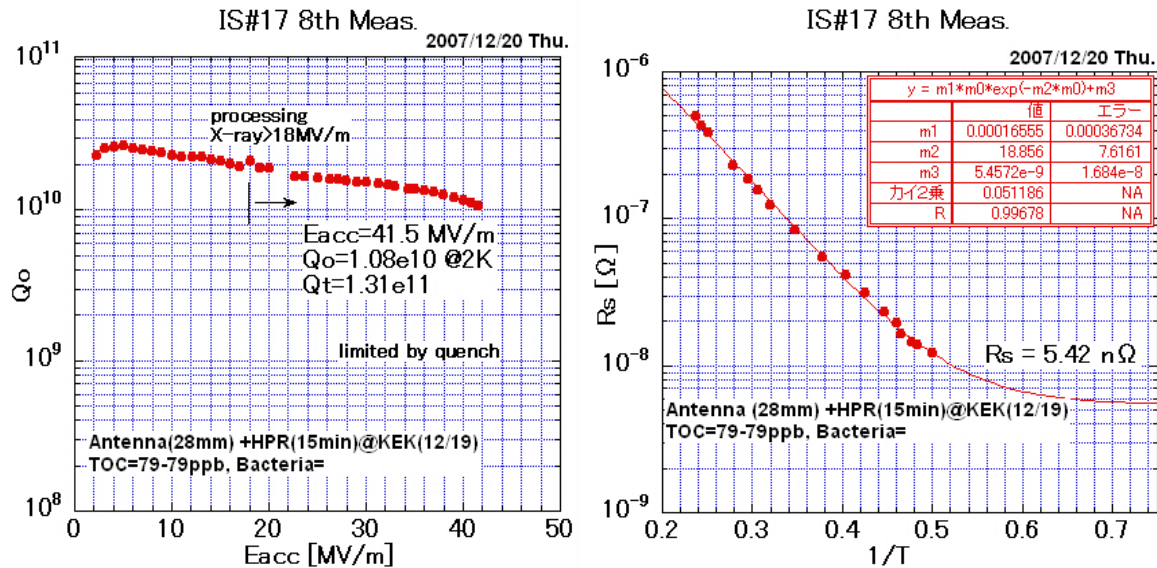


図 5.10: 8th Measurement (IS#17)

8th Measurement	
E_{acc}	: 41.5 [MV/m]
Q_0	: 1.08×10^{10}
Q_t	: 1.31×10^{11}

アンテナ長と Q_t の関係などについての議論は次章で行う。

• 9th Measurement -パルス法-

ここで、加速勾配の測定方法について Q_t が一定という事に疑問を抱き、パルス法による測定を行った。これはつまりは Decay Time 法であるが、加速勾配の測定の際に毎回 Q_L (Decay Time $t_{1/2}$) を測定して計算を行うものである。

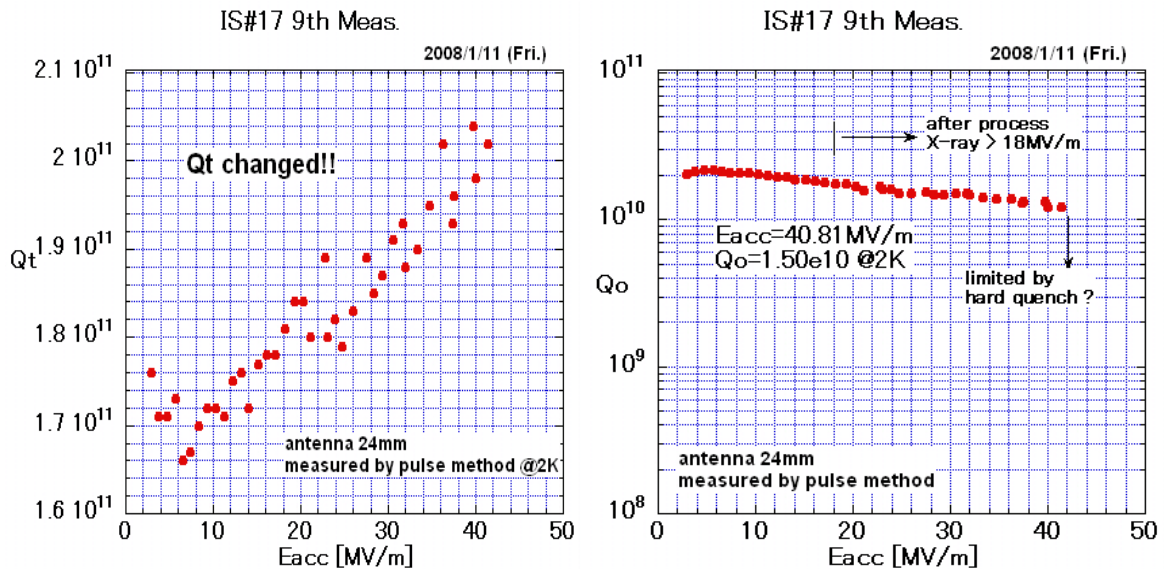


図 5.11: 9th Measurement (IS#17)

9th Measurement	
E_{acc}	: 40.8 [MV/m]
Q_0	: 1.50×10^{10}
Q_t	: $1.66 \sim 2.04 \times 10^{11}$

図 5.11 の左図は加速勾配 E_{acc} に対する Q_t の変化を示したものであるが、23%も変化している。これは最大加速勾配に大きく影響してしまう。これまで、 $E_{acc} = Z\sqrt{Q_t P_t}$ で計算していたことからすると、約 11%の向上が考えられる。しかしこの測定の際に、一度クエンチを起こしたところで測定を中断してしまい、最大加速勾配まで RF のパワーを上げていない。また、7th Measurement (pickup antenna 24mm) の結果と比べると Q_t が異なっているという再現性にも問題を残している。

• 10th Measurement -パルス法-

最後に pickup antenna を 20mm にして、パルス法により最大加速勾配がどう変化するか、また 2nd Measurement (pickup antenna 20mm) の再現性を目的として測定を行った。

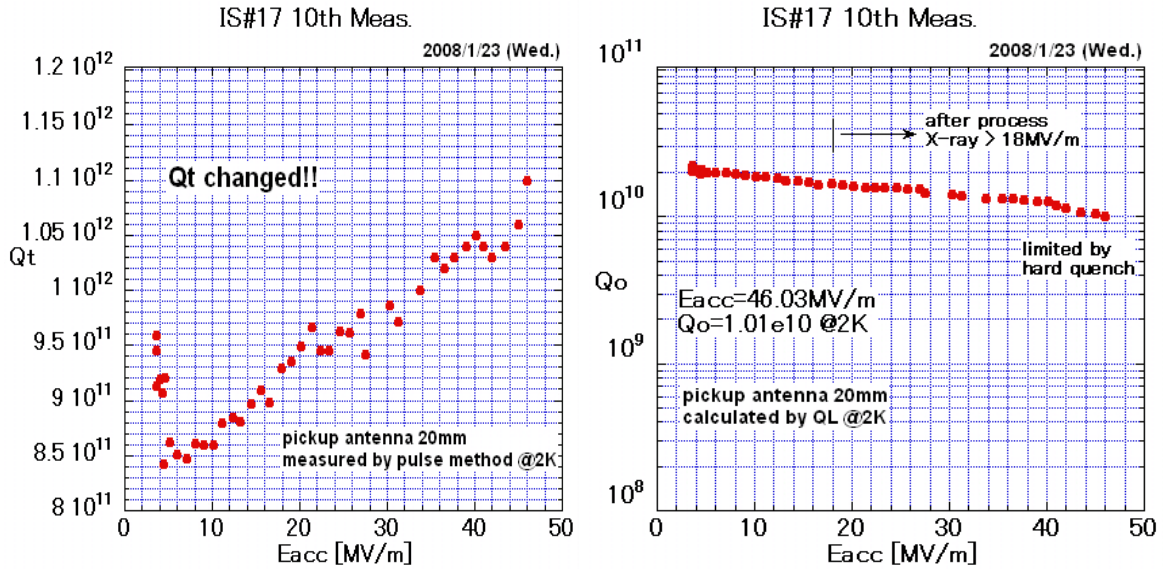


図 5.12: 10th Measurement (IS#17)

10th Measurement	
E_{acc}	: 46.0 [MV/m]
Q_0	: 1.01×10^{10}
Q_t	: $8.42 \times 10^{11} \sim 1.10 \times 10^{12}$

これまで、最大加速勾配は約 41[MV/m] であったのに対して、46[MV/m] と上昇した。しかし、2nd Measurement の結果と比べると Q_t が異なっているという再現性にも依然として問題を残している。これらについての詳しい考察は次章で行う。

5.2 測定結果 -ISE#6-

各測定における違いと結果は

測定番号	測定目的
1st	初回測定
2nd	再現性 + 水素病チェック

また各パラメーターは以下のようにする。

Z	=	95
Γ	=	287

• 1st Measurement

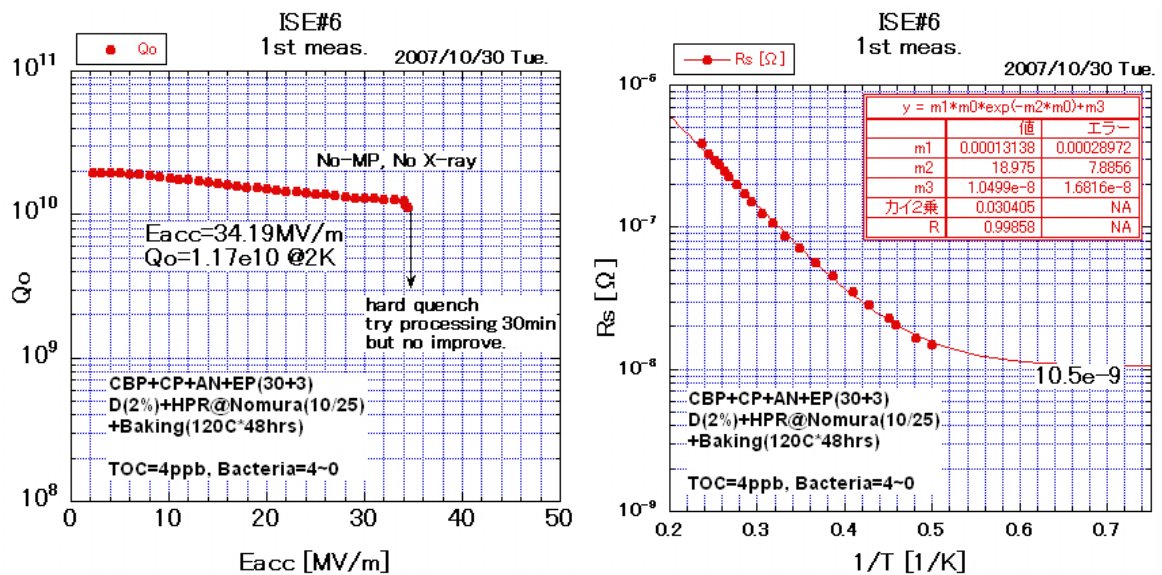


図 5.13: 1st Measurement (ISE#6)

1st Mesurement	
E_{acc}	: 34.2 [MV/m]
Q_0	: 1.17×10^{10}
Q_t	: 2.61×10^{11}

• 2nd Measurement

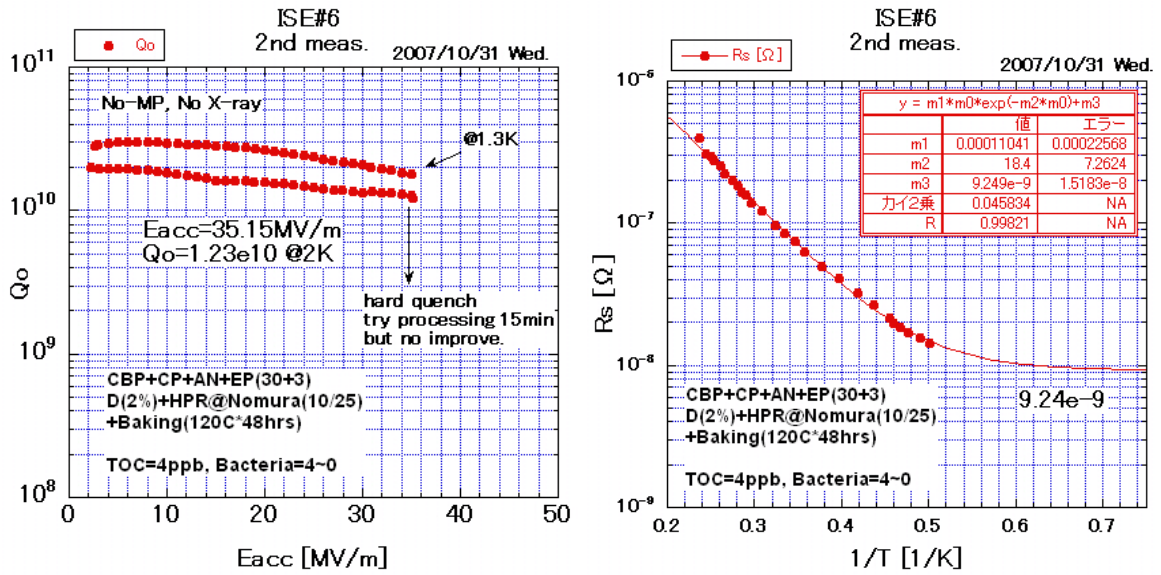


図 5.14: 2nd Measurement (ISE#6)

2nd Mesurement	
E_{acc}	: 35.1 [MV/m]
Q_0	: 1.23×10^{10}
Q_t	: 2.75×10^{11}

第6章 考察

6.1 測定結果より

まず、pickup用のアンテナの長さを変えた時の Q_0 と E_{acc} の関係の変化について考える。

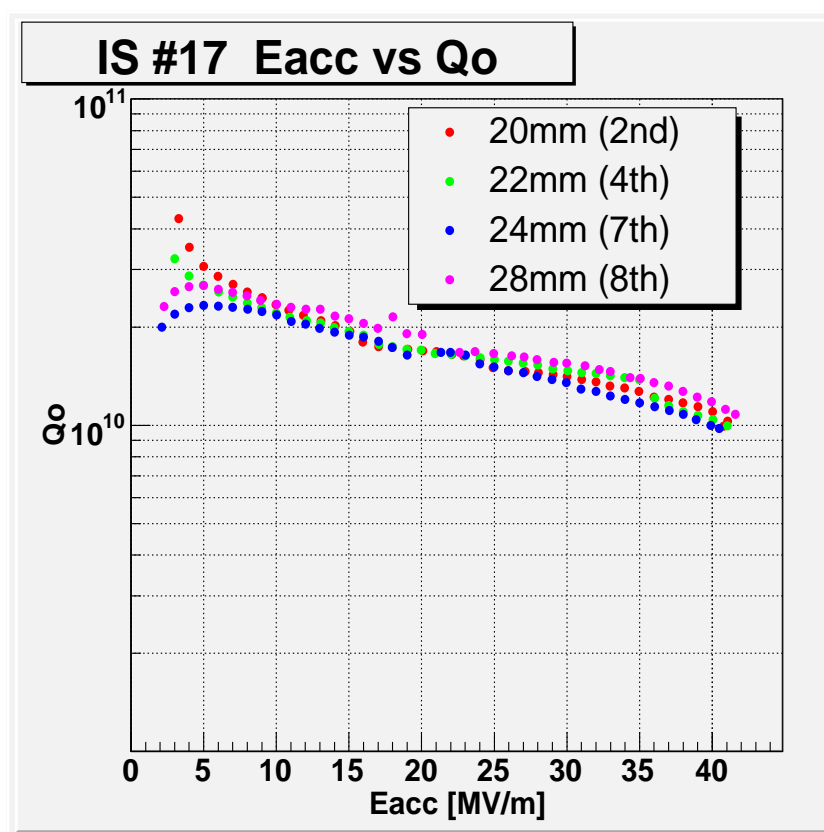


図 6.1: Q_0 のアンテナ長依存性

上図のように低電界 (Low Field) における Q_0 の振る舞いが異なる。 Q_0 の定義式 (2.14) から明らかなように、 Q_0 とは pickup や input のカップラーなどの要因に影響されない、空洞自身の状態を示した物で、pickup用のアンテナ長を変えただけで変化することはないはずである。すなわち、この変化は

- 測定する度にニオブが物理的な変化をした
- 測定方法に問題がある

などの可能性がある。

また、この結果の理解の手掛かりの一つとして Q_t の変化がある。 Q_t はその定義式 (4.9) よりも明らかなように、空洞内部に溜まったエネルギーに対する漏れ出るエネルギーの比である。即ち、空洞に溜まったエネルギーが同じ場合、その変化はアンテナ長の変化を表していることになる。下図にその変化を示す。アンテナ長のエラーは 0.2mm とし、 Q_t のエラーは 4 章での定義から計算したものとする。

測定番号	アンテナ長 [mm]	Q_t	Q_t error
2nd	20	2.11×10^{12}	9.7×10^{10}
4th	22	1.01×10^{12}	4.6×10^{10}
7th	24	4.71×10^{11}	2.1×10^{10}
8th	28	1.30×10^{11}	6.4×10^9

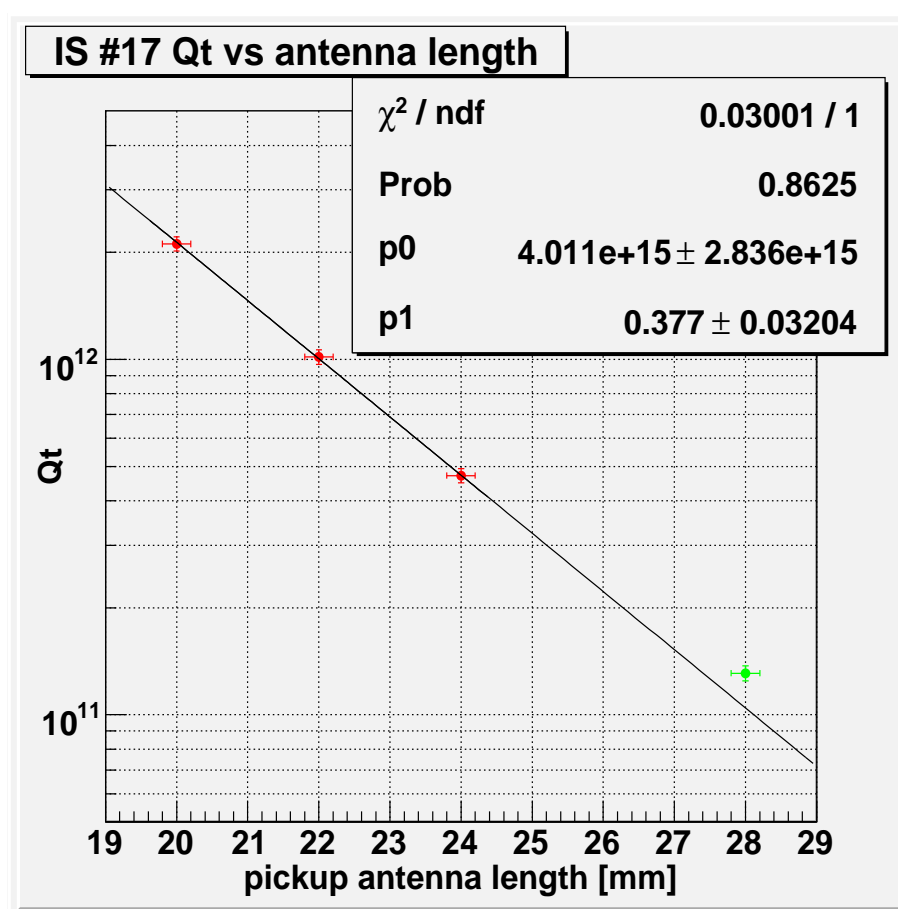


図 6.2: Q_t のアンテナ長依存性

アンテナ長 x に対して漏れ出るエネルギー $P_t(x)$ は導波管の原理より

$$P_t(x) \propto e^{-ax} \tag{6.1}$$

となるはずである。ここで、係数 a はアンテナの径とフランジの穴の径の比から求められる値

であり、フィッティングの結果から

$$a = 0.37 \pm 0.03$$

となる。アンテナの径は6mm、フランジの穴の径は18mmであり、その比は約0.33である。

また28mmでの Q_t が直線から外れているが、これはアンテナがフランジの断面より突き出し過ぎて

- 係数 a が異なった直線に乗り始めた(アンテナとビームパイプの径の比)
- インピーダンスが変わり反射が大きくなり始めた

などが考えられる。どちらの効果がより表れてくるかを調べるためには、より長いアンテナでの振舞いを調べる必要がある。

次に、 Q_0 の変化がアンテナ長の変化によるものであるかを調べるために、9th、10th Measurementを行った。これらは、前述の通りパルス法という測定方法で電界測定を行ったものであり、それぞれのpickup用のアンテナ長は24mm、20mmとした。また、これらの結果については4章での定義から計算したエラーを含めたものとする。

まず Q_t について

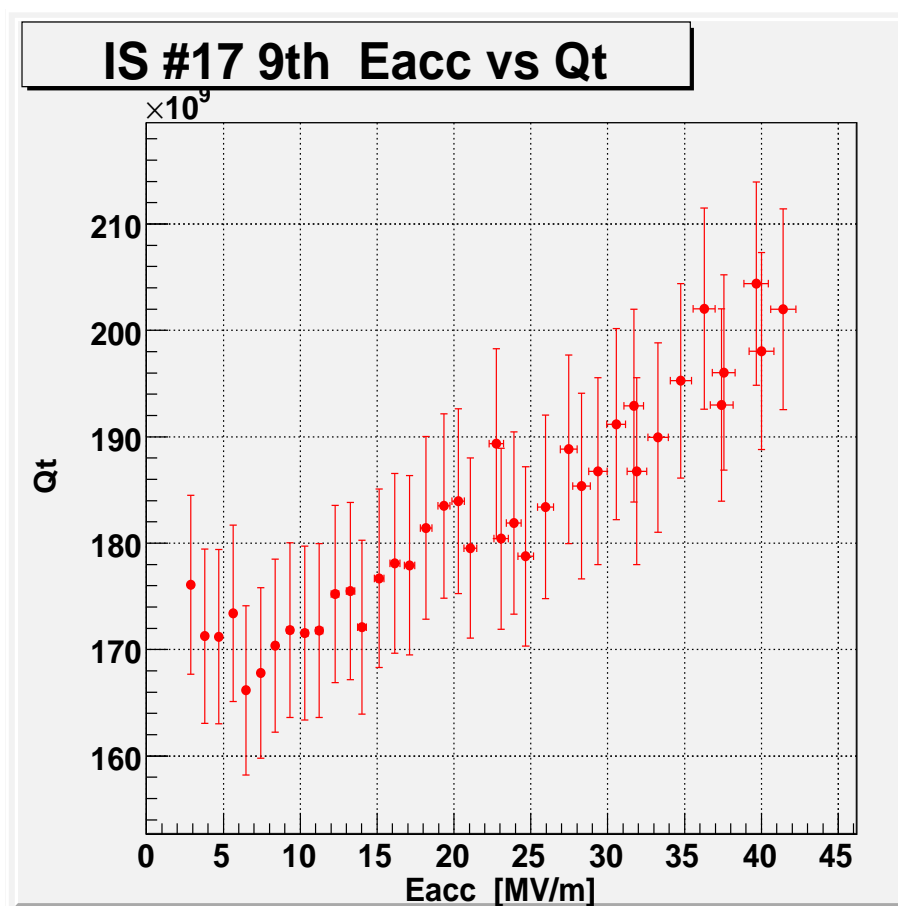


図 6.3: 9th Measurement の Q_t の変化

各点での Q_t のエラーは約 4.6%であるのに対して値が約 23%変化している。即ち、これは測定からくる誤差ではなく無視できない変化であると言える。

これをより表しているのが以下の 10th Measurement の結果である。

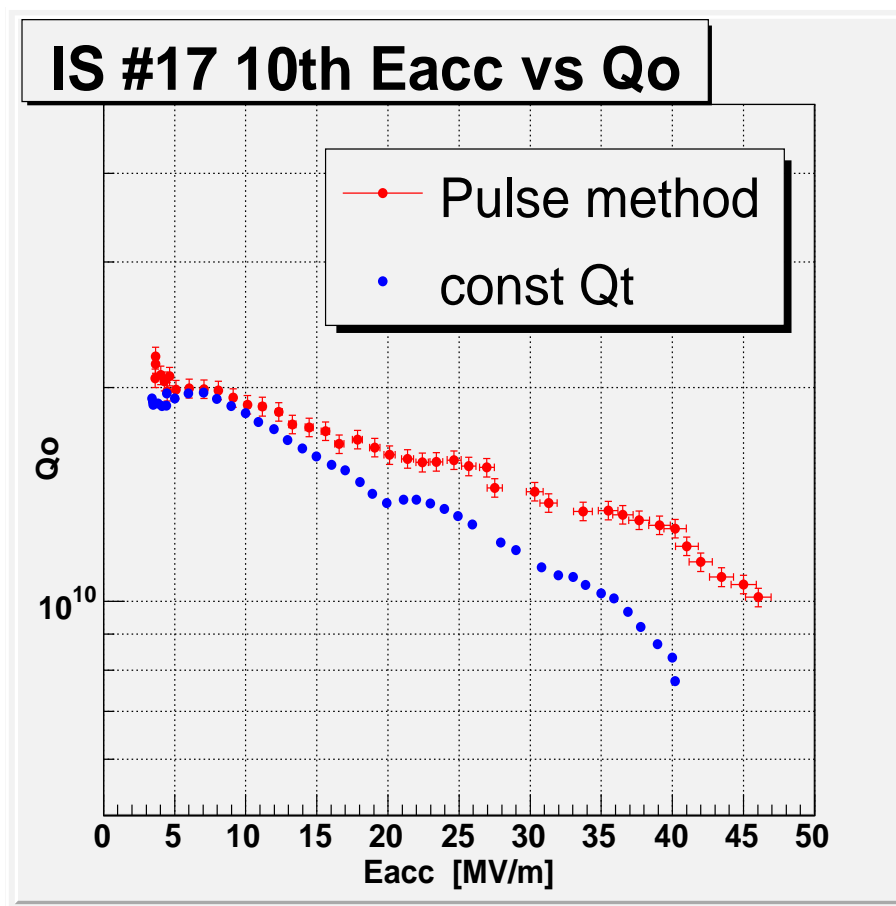


図 6.4: 10th Measurement の E_{acc} の変化

赤点がパルス法で測定した結果で、青点は従来通りに Q_t が一定値であるとして計算したものである。最大加速勾配が変化しているのが分かる。パルス法では毎回 Decay Time $t_{1/2}$ を測定して Q_0 、 P_{loss} をそれぞれ計算して

$$E_{acc} = Z\sqrt{Q_0 \cdot P_{loss}}$$

より求めるのに対して、従来は低電界において求めた Q_t を使って P_t の変化から

$$E_{acc} = Z\sqrt{Q_t \cdot P_t}$$

より求める。よって Q_t の変化量ほど加速電界が低く見えてしまうと考えられる。

しかし、ここで新たな問題が生じた。低電界 (Low Field) での Q_0 の振る舞いが変わったことである。図 6.5 に pickup 用アンテナが 20mm の場合 (2nd、10th) の Q_0 の比較を示す。

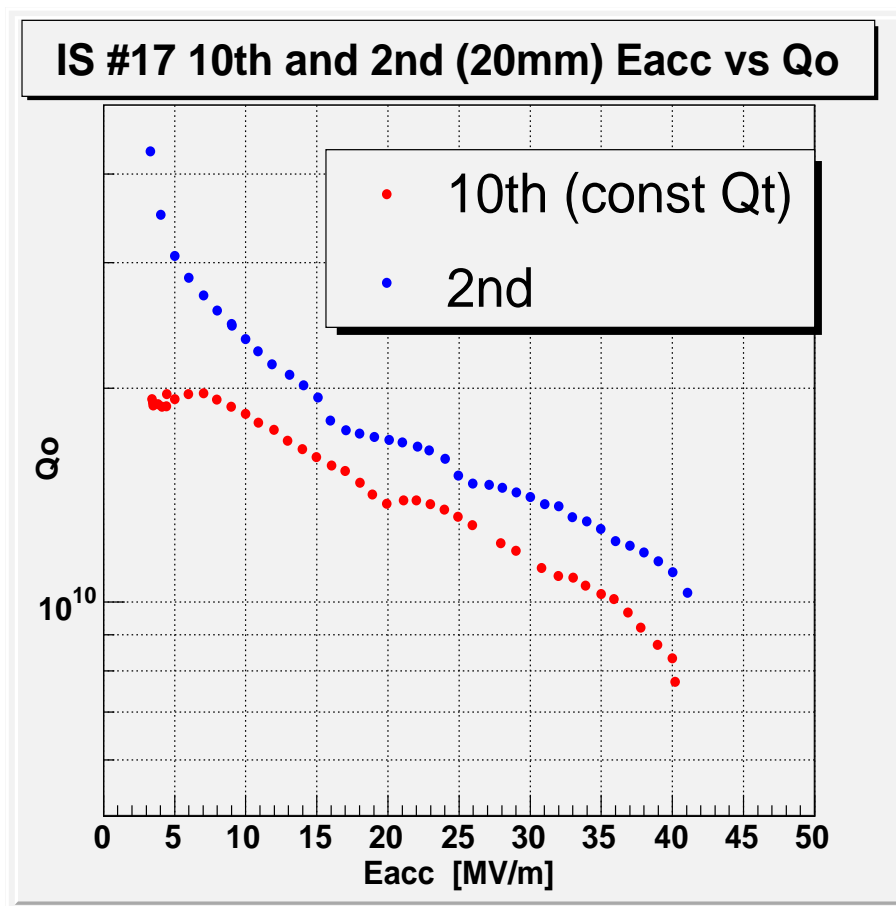


図 6.5: 10th と 2nd Measurement の Q_0 の比較

このように、低電界 (Low Field) において Q_0 が低下していて再現しなかった。これは組み立てを含めた測定技術によるものなのか、物理現象を表しているのかは定かではない。

そこで、各測定における $E_{acc} = 4 \text{ MV/m}$ での Q_0 の変化を図 6.6 に示す。測定を重ねる度に Q_0 が低下していったのがわかる。原因は不明であるが、これは言い換えると表面抵抗 R_s が増加しているという可能性もある。考えられる要因として pickup 用のアンテナを交換する度に HPR を行っていたのだが、それだけでは取りきれない油脂成分などが付着している可能性もある。これは脱脂洗浄を行うことで解決できるはずである。もしくは、測定の度に空洞内面を放出電子などで傷付けていたという可能性もある。いずれにしても、空洞の最大加速電界に大きな変化がある訳ではない。

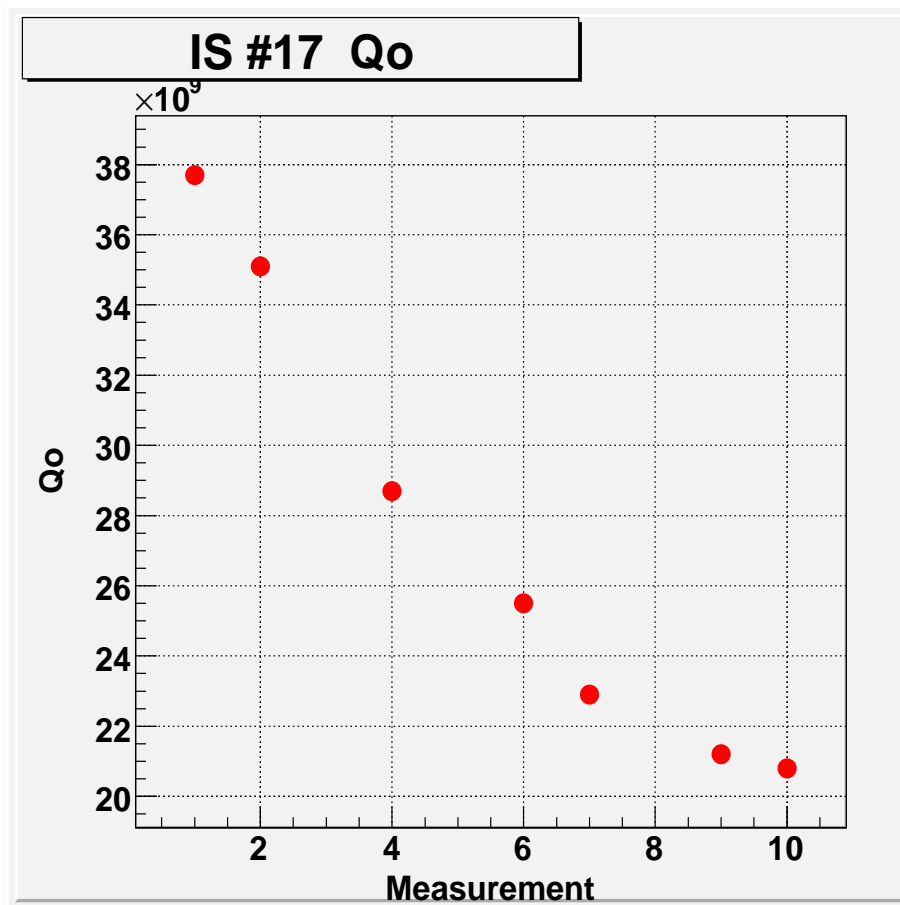


図 6.6: 各測定における Q_0 の変化

しかし、これらはエネルギー消費が表面抵抗と結合器からの漏れ出しのみによる場合であって、フィールドエミッションなどによる消費が大きくなった時には、減衰が単純な指数関数にはならず、時定数（正確な $t_{1/2}$ ）の測定が困難となる。もしかすると、高電界になるに連れてその効果によって Q_t が変化しているように見えるのかもしれないが、その理解のためにはより深い考察が必要であるが、そこまでは至っていない。

6.2 測定方法について

現在の KEK における測定方法、及び、その測定結果の解析方法 (主に Q 値の求め方) などについて述べる。

10th measurement の結果からも現在の Q_t を固定した測定方法ではなくパルス法で測定する事で、より正確な電界測定が可能になると推測される。勿論、 Q_t が変化するという事実をこの IS#17 以外の空洞でも確かめる必要がある。

最後に、現在の解析方法についてである。空洞内面での表面抵抗によるエネルギーロス P_{loss} を

$$P_{loss} = P_{in} - P_r - P_t \quad (6.2)$$

として求めている。ここで図 6.7 に各 β における各波形の様子を示す。

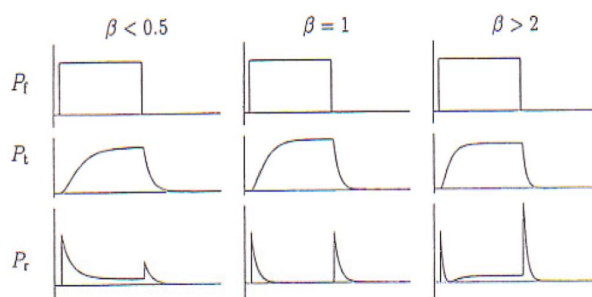


図 6.7: 各 β における波形の変化

P_r について考えてみる。定常状態において P_r が減少しているのが分かる。これは反射波と空洞内から漏れ出る電磁波が打ち消しあっているからであると考えられているが、その際にはエネルギーが保存しない事になる。その原因として、パワーメーターで読み取る値というのは、あくまでも波 (電磁波) の振幅であるが、合成波のエネルギー E は各波の振幅を A_i とした時、

$$E \propto \sum_i |A_i|^2 \quad (6.3)$$

となり、構造上測定できないはずである。

よってこれらの対策として、input 側と pickup 側に同形状のアンテナを用いて測定するなどが考えられる。そうすると、空洞内部からの漏れ出しエネルギーが測定できるので、正確に P_r が測定できるはずである。その際には、input 側のカップリングが over であるか under であるかに注意しなければならない。

いずれにしても、本研究においては至らなかったが、測定に関する理論的な理解を進めていくことが今後の大きな課題であると言える。

6.3 今後やるべきこと

- 測定に関する理論的理解
- ケーブルロスの変化
- ケーブルロスの再現性
- アンテナ長をより長いもので行う
- アンテナの抵抗による変化であるかを調べるために、異なる成分のアンテナで測定する
- フランジの表面抵抗による変化であるかを調べるために、異なる成分のフランジで測定する
- それらのためのシミュレーションを行う
- RF の周波数による違いの原因究明
- 圧力から求める温度と空洞自体の温度を測定する
- EP の理解のためのテスト実験
- 再び EP($10\mu m$) を行って最大加速電界の変化について測定する

謝辞

本研究の機会を与えて頂き、適切な指導、助言を下された指導教員山下了准教授に心より感謝致します。加えて、同研究室の森田裕一氏には空洞製作から測定に至るまでの全工程を共に行い、また議論を重ねて頂き深く感謝致します。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) においては、斎藤健治准教授を始め、佐伯学行助教、古田史生氏には本研究の理解から実技指導に至るまでの御指導をいただきました事を心より感謝致します。本研究における空洞の製作工程において、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の井上均氏、菊池製作所様、石塚製作所様、野村鍍金様にも重ねて感謝致します。

参考文献

- [1] 齋藤健治 ”International Linear Collider (ILC) Project and Superconducting RF Cavity -The core technology of the ILC-” 東大物理大学院集中講義 2007
- [2] Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays ”RF SUPERCONDUCTIVITY FOR ACCELERATORS”
- [3] 古屋貴章 ”超伝導空洞の基礎” OHO’06
- [4] 佐伯学行 ”超伝導空洞の製作技術と計測技術” OHO’06
- [5] 樋口玉緒 ”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”
- [6] Bernard Visentin ”Low, Medium, High Field Q-Slopes Change with Surface Treatments”
- [7] Agilent Technologies ”Operating and Service Manual -Agilent 8480 Series Coaxial Power Sensors”
- [8] M. ティンカム著 小林俊一訳 ”超伝導現象” 産業図書
- [9] Tomoya Nakamura ”Development of Beam-position Monitors with High Position Resolution”
- [10] 河上陽介 ”PFA に最適化した中性ハドロンの同定の研究”