

Katsuhide Yoshida

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

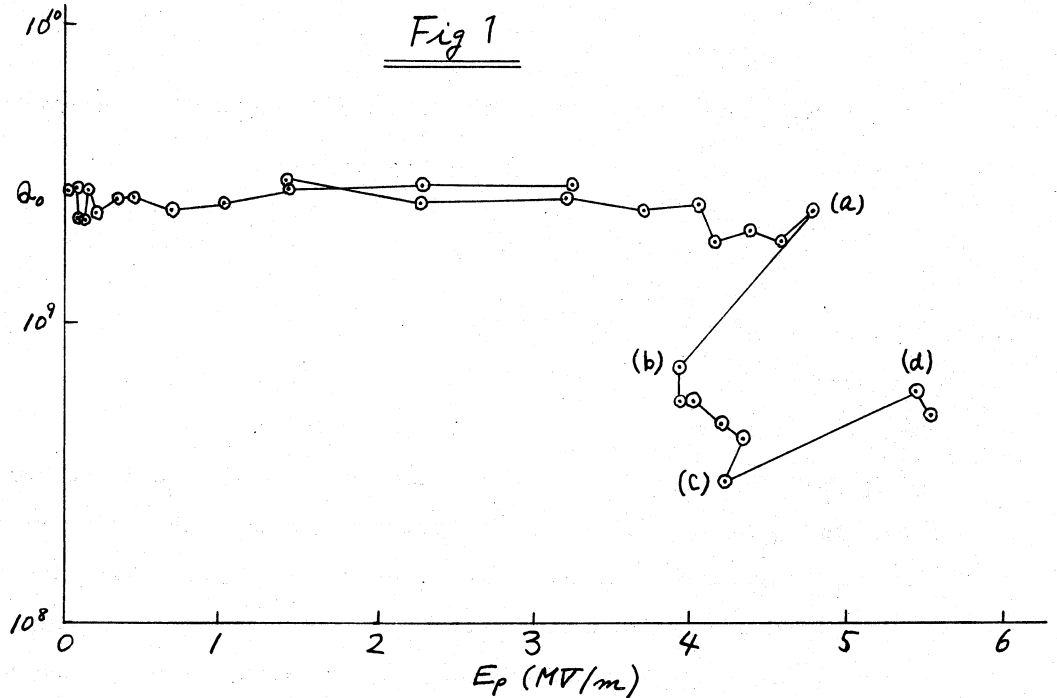
Abstract

Superconducting RF cavity of the frequency band around 700 MHz can be applied to post accelerator of ordinary proton linac or to RF acceleration system of electron storage ring. The major obstacle limiting the performance of such superconducting cavity has been known to be the electron loading due to the multipactoring in the cavity. One of the most simple way to examine the electron loading phenomena would be to observe the bremsstrahlung X-rays from the cavity. By using a X-ray telescope, one can know the spacial distribution of the X-ray sources, and the energy spectrum of the X-ray. The measured results will provide with the information on the electron motion in the cavity and hence on the partial deteriorations of the superconductive cavity surface. An example carried out at Kernforschungszentrum at Karlsruhe is given. One-point or two-point multipactoring is clearly distinguishable in the work.

§ 1. はじめに

超伝導 RF キャビティはライナック、電子ストレージリングの RF 加速系への応用をめぐって世界各地で研究が進められている。しかし当初の予想より実用化が遅れているのは、超伝導性の磁氣的破壊の外、キャビティ内面からのスールドエミッションによる電子がマルチパクター現象を起こしてキャビティのマクロ波動的性質を損なううえ、超伝導表面に放射線損傷をもたらすからである。実際、超伝導キャビティを用いて、内部の電場強さを増しつつ Q の変化を測定していくと、ある電場強さのところで Q が突然劣化することが観測される。この時、キャビティを収めたクライオスタット周辺は強い X 線強度を示す。これはキャビティにマルチパクターが起るためである。¹⁾ Fig 1 に実例を示す如く、この特定の電場強さを越すと

Q はなだらかな変化にもとづく。このマルチパワーカー現象をよく調べ例えばキャビティ形状に工夫をこらしてマルチパワーカーを起こしにくくすることが困難を解決する一つの方法である。この目的



にあってマルチパワーカー現象の特性を調べるのだが、その方法としては ① キャビティ外壁に多数の温度センサーを貼り、超伝導性が劣化するポイントをさがす ② 電子による制動 X 線をキャビティ外で観測し、内部の電子の振舞いを推定する、等が考えられる。ここでは後者にもとづき、西ドイツ、カールスルーエ原子核研究所で行った実験結果について述べる。種々のキャビティについて試みたが、その内、700 MHz TM₀₁₀ 型キャビティに例をとる。

§2. X線測定

X線はキャビティを取めたフライスラットの外側で測るのが最も簡単である。X線検出器には鉛スリット付きの NaI シンチレーターを用い、X線の発生量とその強度、エネルギー分布を測定した。検出器は望遠鏡として働くのだが、常にキャビティの電場に関し垂直方向をにらむようにした。以上の測定に際して、キャビティ内の電子の運動と、観測される X 線との関係がわかっている必要がある。

制動輻射 電子のエネルギーを γ_0 、X線を検出する方向を θ 、望遠鏡の立体角を $d\Omega$ 、X線のエネルギーと強度をそれぞれ ν 、 I とすると

$$dI(\nu, \theta) \propto (\gamma_0 - \nu)^{d(\theta)} d\nu d\Omega$$

となり、 $\theta = 90^\circ$ とすると $d(90^\circ) = 0.5$ である。²⁾

X線の吸収 X線が発生してから検出器にとどくまでには、気体ヘリウム、ニオブ、液体

登素、ステンレススチールなどの物質層を通過するので、そこでの吸収を調べるため、各種の
 アイソトープをキャビティに入れて吸収係数のエネルギー依存性を調べてみた。一方、吸収層の
 内、最も厚いのはステンレススチールであり、その主成分は鉄であるので、すべての吸収材質を
 鉄におきかえた場合の計算値を出し、実際の吸収係数と比較してみると、両者は実験
 誤差内で一致することが確かめられた。そこで、鉄で近似した計算値を用いることにするが
 吸収係数のエネルギー依存性を簡単な代数式で表わすことが後に必要になる。この実
 験に用いた装置の場合、

$$A = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = 2.4 \left(\frac{\nu}{\text{MeV}} \right)^{2.75}$$

と近似できることがわかった。

電子の運動 キャビティ内の特定の場所で放出された電子が、高周波電磁場中でどのよ
 うに運動するかは、電子計算器による計算例があるが、ここでは現象の大筋をつかむた
 め、磁場の影響を無視して、平行電極間の電子の運動として考える。電子のフェールドエミッ
 ションは電場強さに極めて強く依存するうえ、電場の強いところでは磁場は弱いため、この近似
 は将来、よりこみ入った解析をするための充分な基礎となり得る。

§3. Modified Fowler-Nordheim Plot

dC-フェールドの場合にフェールドエミッション I_F は Fowler-Nordheim 則により、極めて高い
 精度で与えられることがわかっている。

$$\frac{I_F}{mA} = 1.54 \times 10^5 \times \frac{F}{cm^2} \times \beta^2 \times \left(\frac{E}{MV/m} \right)^2 \times \left(\frac{eV}{\phi} \right) \times \exp \left(- \frac{6.83 \times 10^3 \times (\phi/eV)^{3/2}}{\beta E / (MV/m)} \right)$$

ここで

- F : Emitting area
- β : Microscopic field enhancement factor
- E : Macroscopic field strength
- ϕ : Work function of the surface ($\phi = 4 eV$ for niobium)

この式から出発して RF-フェールドの場合のフェールドエミッションを計算し、更にそれによる X線
 強度を計算すると次のようになる。^{1,2)}

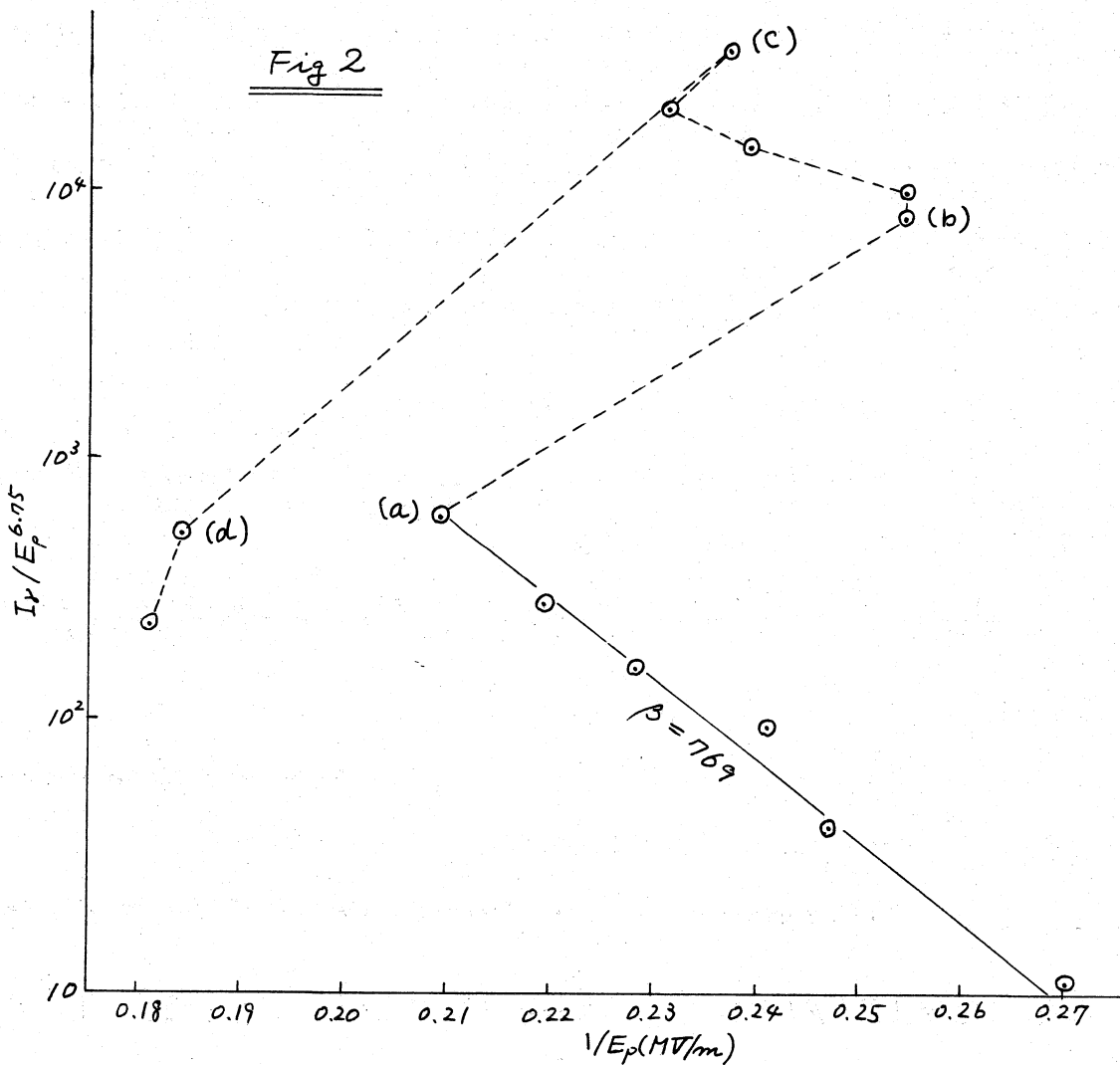
$$I_x = C \cdot F \cdot \beta^{2.5} \cdot (l E_0)^{6.75} \cdot \exp \left(- \frac{6.83 \times 10^3 \times (\phi/eV)^{3/2}}{\beta E_0 (MV/m)} \right)$$

ここで C は定数, l はキャビティの エドプレート間距離 であり, X 線は電子の運動方向と直角に観測するものとした。これ等の式における β は フールド エミッションをひき起こす金属表面の状態を反映するので 超伝導キャビティの場合の表面処理の良否, または表面の放射線損傷等についての重要な情報を与える。さて, 最後の式について考えると, この式はエクスポネンシャルの項によって支配されるので, 横軸に $1/E_0$ をとり, 縦軸に $\log(I_r/E_0^{6.75})$ をプロットすると, ほとんど直線になり, その勾配は二オブの場合,

$$-\frac{1}{\beta} \times 6.83 \times 10^3 \times 8$$

となる。従って勾配の大ききから β の値を決定することができる。通常 β はおよそ 200 となることが知られているので, X 線強度の測定から表面の良否を判定できる。

Fig 2 は Fig 1 の測定と同時に行った X 線測定の結果を $F-N$ プロットで表わしたものである。 $\beta=769$ は極めて悪い表面状態に対応し, 従って はなはだしい ZL 4 パクターを起していることがこのプロットからわかる。



§4. マルチパワタリング

キャビティの軸方向を X 軸とし、この方向にかかる電場を

$$E_x = E_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (\phi: \text{位相})$$

とすると、電子の運動は

$$m\ddot{x} = eE_0 \sin(\omega t + \phi)$$

$$m\dot{x} = \frac{eE_0}{m\omega} (\cos\phi - \cos(\omega t + \phi))$$

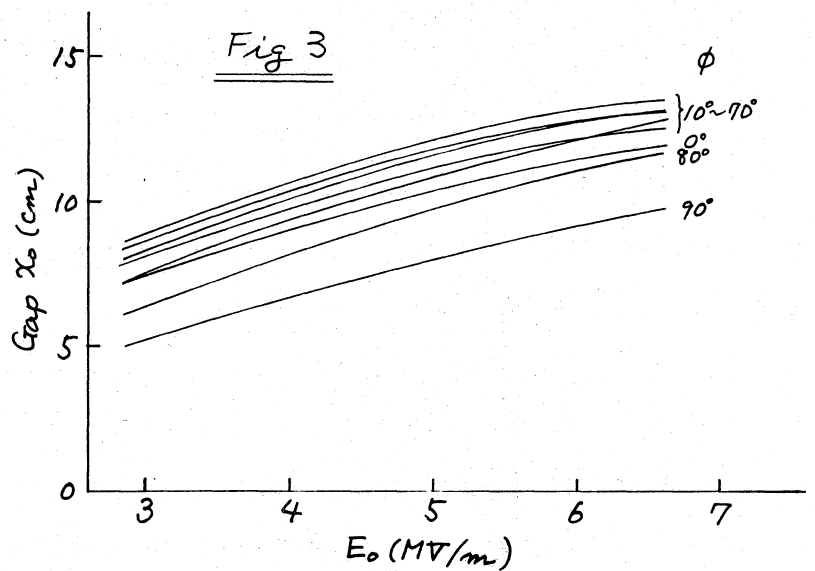
と表せる。電子の運動は相対論的に考えねばならないので、これ以上の積分は数値的に
行なうことにする。実験に用いた共振周波数 $f_0 = 703.6 \text{ MHz}$ のキャビティにつき、第一
次のマルチパワターが起る場合の E_0 , ϕ , x_0 の関係を計算した結果を Fig 3 に示す。

高次のマルチパワターは電場強さ
が弱く、電子のトランシット・タイム
も長くなつて不安定となるので、

ここでは考えなくてもよい。

このキャビティはエンドプレート間
の距離 $x_0 = 11.2 \text{ cm}$ であるの
で、図から、 E_0 がおよそ 4.3 MV/m
の時マルチパワターが起りはじめ。
 E_0 がある程度以上に大きくなる

と停止することがわかる。また、 x_0 がもし可変であれば、電場の強さに応じて一定以
上に長くとれば第一次のマルチパワターを避けることができることをも示している。F-N 則に
よれば ϕ が小さい程、*field emission* は大きく、しかしその時、電子が対向電極を
たたくエネルギーは小さくなることに注意を要する。

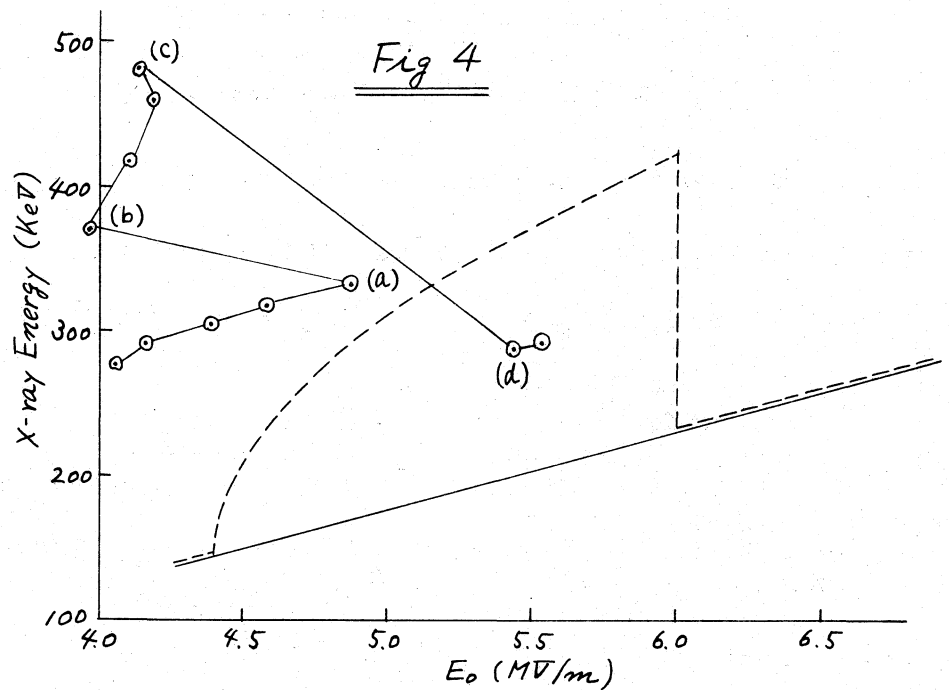


§5 X線のエネルギースペクトル

前節までに述べてきたことにより、マルチパワターを起している場合と、通常のフィールド
エミッションが起っているだけの場合について X 線のエネルギースペクトルを推計することが
できる。スペクトル自体は定量的に比較することがめんどうなので、スペクトルの半値全中

を与えるエネルギーの内、高い方のエネルギーを仮に「X線のエネルギー」と仮定して、計算結果をグラフに示すと Fig 4 のようになる。実線が通常の field emission の場合、虚線がマルチパクターの場合である。この計算も $\lambda_0 = 11.2 \text{ cm}$, $f_0 = 703.6 \text{ MHz}$ の場合について行ったものである。今まで引用してきた実験について、計算の場合と同様の定義による「X線の

エネルギー」を図中に示してある。一見不一致のようにみえるが、実験の場合、エレクトロンローディングによりキャビティ内の電場がさびびっていること、及び「X線のエネルギー」の定義が極めて便宜的なものであつたこと、等が原因だろう。しかしマルチパクターによるジャンプは明瞭である。



§ 6 結語

第一のマルチパクターによるキャビティ性能の劣化が明らかになったので、カールスルエ原子核研究所ではエンドプレート間の距離を長くしたキャビティを試作測定中である。今まで述べてきたような取扱いを更に精密化すれば、単に、距離を長くするのではなく、形状を変えるための情報も得られるだろう。X線の発生量を測る測定では、明らかに、キャビティの対称性に反する結果が得られ、特定の部分の表面劣化が起っていることを示している。

β (Microscopic Field Enhancement Factor) の値は、表面状態が良好の時、200 ~ 300 という値を示し、そのような場合には第一マルチパクターはわずかな徴候を示すのみである。第二以上のマルチパクターは電場の弱いところで測定にかかるとはあつたが、本質的ではなから。 (文献 1. K. Yoshida, Interner Bericht 77-243 ; 2. H. Schopper et. al., Ext. Bericht 3/68-6, Kernforschungszentrum, Karlsruhe)