

# THE QUALITY FACTOR ADJUSTMENT OF THE SUPERCONDUCTING CAVITY USING WAVEGUIDE COMPONENTS IN STF

Mitsuhiro Yoshida<sup>1,A)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>, Sergey Kazakov<sup>A)</sup>, Tateru Takenaka<sup>A)</sup>, Hideki Matsushita<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

## Abstract

We tested the adjustment method of the loaded quality factor of the super conducting cavity using waveguide components. RF power from a 5 MW Klystron is fed to four superconducting cavities in STF. The different filling time due to the difference of the loaded quality factor of each cavity causes the increment to reach the stable total accelerating voltage in such a distributed RF configuration. Thus the loaded quality factor is adjusted using the phase shifter and the reflector. This method leads some merits that the precise adjustment of the coupling coefficient in the superconducting cavity is not required and its voltage control range is wider than the power ratio control of the power distribution system. Using this method, the loaded quality factor of each cavity was adjusted and the flat cavity voltage using the low level RF feedback system was obtained.

## STFにおける導波管コンポーネントによる超伝導空洞のQ調整

### 1. はじめに

超伝導試験施設(STF)において1台の5MWクライストロンから複数の超伝導加速空洞へのLバンド導波管の敷設を行ったが、個々の空洞の電圧を調整する方法として、いくつかの導波管の分配構成が検討されている。その中の一つの方式として超伝導加速空洞の外部Q値( $Q_L$ )を移相器と反射器を用いて調整を行う試験を行ったので、その調整方法と結果について報告する。この方法の利点は、超伝導空洞の結合度は冷却した状態で外部から調整する事は難しく、外部Q値を導波管コンポーネントで調整する事で空洞側の結合度を精密に調整する必要がなくなる事、また導波管の分岐比を変える方法に比べて調整幅が広い事である。

### 2. 外部Q調整の概要

図1に示す比例電力分配システム (TESLA-TypePDS) は、移相器と反射器を挿入して $Q_L$ の可変構造を導入したものである。空洞と反射器間の位相長を半整数倍の波長に合わせ、反射器の反射係数を変えると、 $Q_L$ を変更できる。図1のシステムでは個々の空洞からの反射をそれぞれアイソレーターで吸収しているが、反射ハイブリッドの方向性の性能などを向上する事によりサーキュレーターを削除するなど簡略化は可能であり、 $Q_L$ 調整に必須では無い。図2は実際の導波管系の立体図である。これらのクライオスタットと導波管系は地下に配置され、地上のクライストロンから導波管で伝送されてくる。地下は試験時に入域不可能なため遠隔制御が必要である。

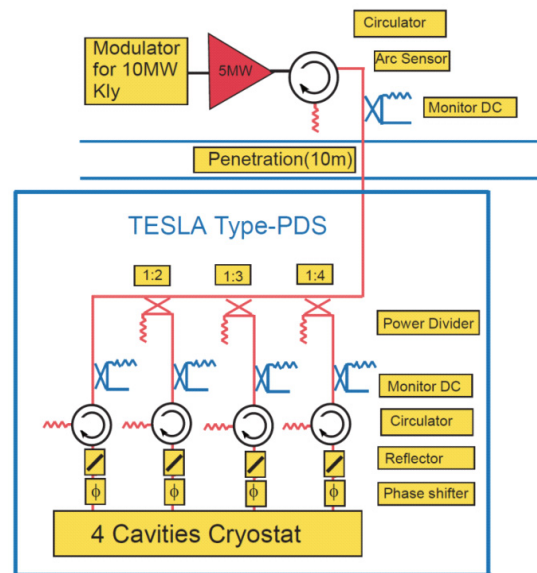


図1：比例電力分配システム

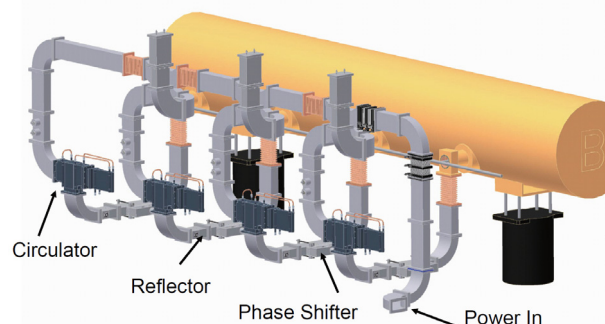


図2：比例電力分配システムの導波管系

<sup>1</sup> E-mail: Mitsuhiro.yoshida@kek.jp

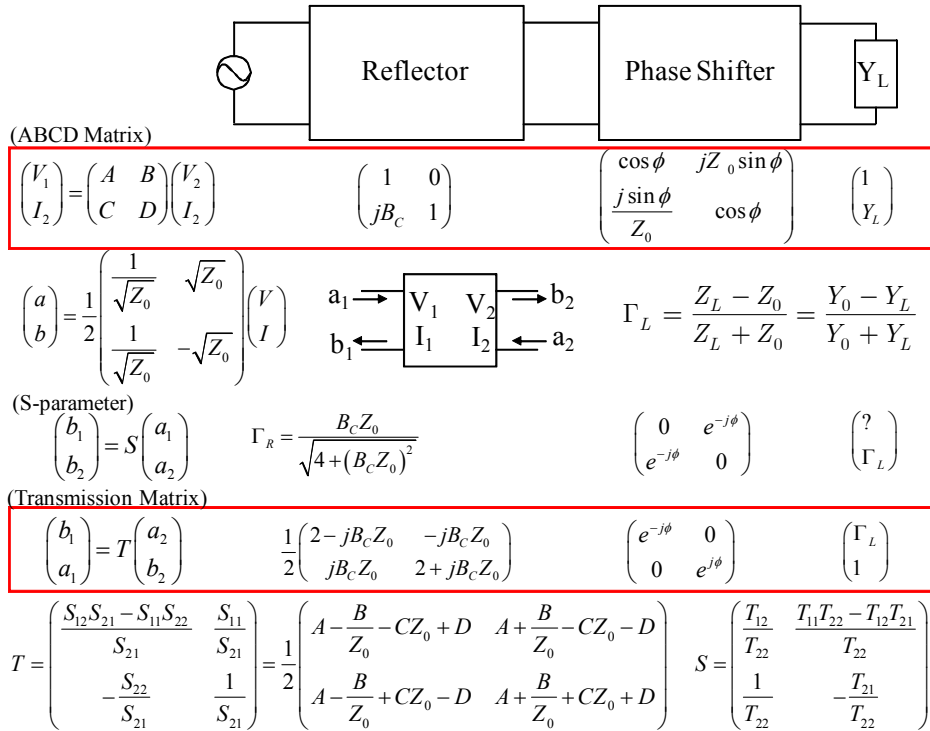


図3：外部Q調整の等価回路

### 3. 外部Q調整の仕組み

図3は移相器と反射器を使用した外部Q調整の仕組みをモデル化した物である。反射器はサセプタンスとしてABCD行列を定義して、それを元に計算を行った。このような連結したコンポーネントを計算するには赤線で囲ったABCD行列もしくは転送(Transmission)行列が行列の単純な乗算で表せるため便利である。どちらでも結果は同じになるが、数値計算は結果としてSパラメーターが欲しいため転送行列で、式の計算は空洞がアドミッタンスで表した方が簡潔であるためABCD行列で、それぞれ計算しクロスチェックを行った。

#### 3.1 ABCD行列による式計算

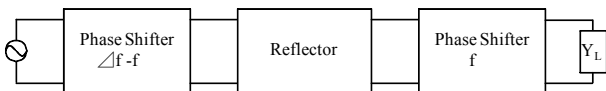


図4：ABCD行列による計算

ABCD行列による式計算では、図3の回路にアドミッタンスを簡潔にするため、さらに導波管の経路長に相当する $\angle\phi-\phi$ 分の移相器を追加した図4を用いて、計算すると以下ようになる。なおここで $b_c = B_C / Y_0$ ,  $y_L = Y_L / Y_0$ とした。

$$\begin{pmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\phi - \phi) & jZ_0 \sin(\Delta\phi - \phi) \\ \frac{j \sin(\Delta\phi - \phi)}{Z_0} & \cos(\Delta\phi - \phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ jB_C & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & jZ_0 \sin \phi \\ \frac{j \sin \phi}{Z_0} & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ Y_L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_{in} \\ I_{in}/Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Delta\phi + b_c \cos \Delta\phi \sin \phi \cos \phi - b_c \sin \Delta\phi \cos^2 \phi + jY_L (b_c \cos \Delta\phi \sin^2 \phi + \sin \Delta\phi - b_c \sin \Delta\phi \sin \phi \cos \phi) \\ j(\sin \Delta\phi + b_c \sin \Delta\phi \sin \phi \cos \phi + b_c \cos \Delta\phi \cos^2 \phi) + Y_L (\cos \Delta\phi - b_c \sin \Delta\phi \sin^2 \phi - b_c \cos \Delta\phi \sin \phi \cos \phi) \end{pmatrix}$$

$b_c \cos \Delta\phi \sin^2 \phi + \sin \Delta\phi - b_c \sin \Delta\phi \sin \phi \cos \phi = 0$ となるように $\Delta\phi$ を選ぶと

$$\begin{pmatrix} V_{in} \\ I_{in}/Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Delta\phi + b_c \cos \Delta\phi \sin \phi \cos \phi - b_c \sin \Delta\phi \cos^2 \phi \\ j(2 \sin \Delta\phi + b_c \cos \Delta\phi) + Y_L (\cos \Delta\phi - b_c \sin \Delta\phi \sin^2 \phi - b_c \cos \Delta\phi \sin \phi \cos \phi) \end{pmatrix}$$

$\phi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$ の際は  $\tan \Delta\phi = -b_c$  となるため、

$$\frac{Y_{in}}{Y_0} = -jb_c + y_L (1 + b_c^2)$$

$$= \frac{1 + b_c^2}{\beta} + j \left( \frac{1 + b_c^2}{\beta} Q_0 \frac{2(\omega - \omega_0)}{\omega_0} - b_c \right)$$

$$= \frac{1}{\beta_c} + jQ_c \frac{2(\omega - \omega_c)}{\omega_c}$$

$$\beta_c = \frac{\beta}{1 + b_c^2} = \frac{1 - \Gamma_R^2}{1 + 3\Gamma_R^2} \beta$$

$$\frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} = \frac{b_c}{1 + b_c^2} \frac{1}{2Q_{ext}} = \frac{-\Gamma_R \sqrt{1 - \Gamma_R^2}}{1 + 3\Gamma_R^2} \frac{1}{Q_{ext}}$$

従って、導波管側から見た空洞の結合定数と周波数シフトは以上のように、結合定数は小さくなるので、 $Q_L$ が上昇する事が分る。

### 3.2 転送行列による数値計算

上記の式計算の確認のため、転送行列を用いてSパラメータの数値計算を行った。図5は $\Gamma=0$ の時の元の空洞と、 $\Gamma=0.5$ の時のS11の例と、結合定数の $\Gamma$ に対する変化を示したものである。

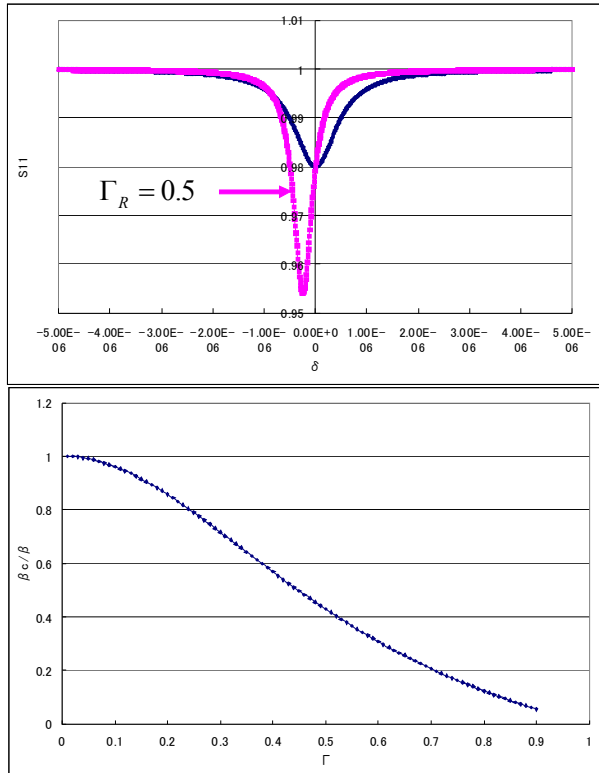


図5：反射率に対するSパラメータと結合定数

### 4. 移相器と反射器

このような $Q_L$ 制御のために製作した反射器と移相器を、図6に示した。特性等については参考文献<sup>[1]</sup>に記載されている。これらの反射器と移相器は、尖頭値2MWまでの電力透過試験を行い、放電は無かった<sup>[2]</sup>。

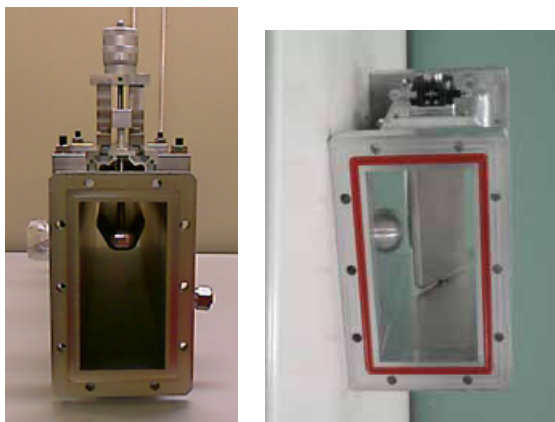


図6：反射器と移相器

### 5. STFにおける外部Q調整の試験

以上のシステムをSTFにおいて試験するため、移相器と反射器を、空洞4台にそれぞれ用意し、ステッピングモーター駆動で遠隔操作できるようにした。これらを用いてRFの低電力試験で $Q_L$ の調整具合についてチェックしたところ、図7の通り最初 $1.4 \times 10^6$ 付近で10%程度ばらついていた $Q_L$ を、図8のように $3.0 \times 10^6$ を中心に1%程度にそろえることができたことを確認した。

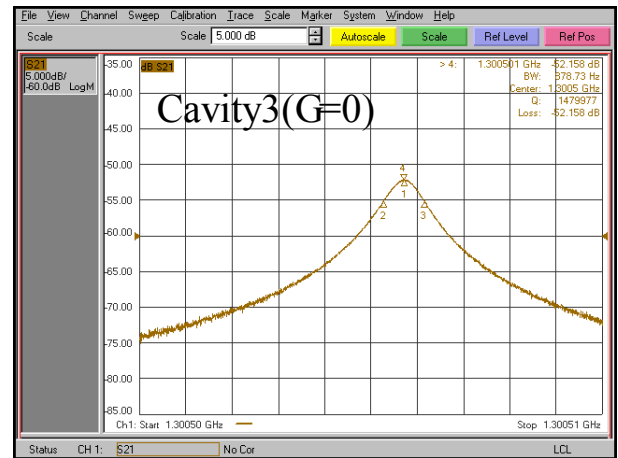


図7： $Q_L$ 調整前の $S_{21}$

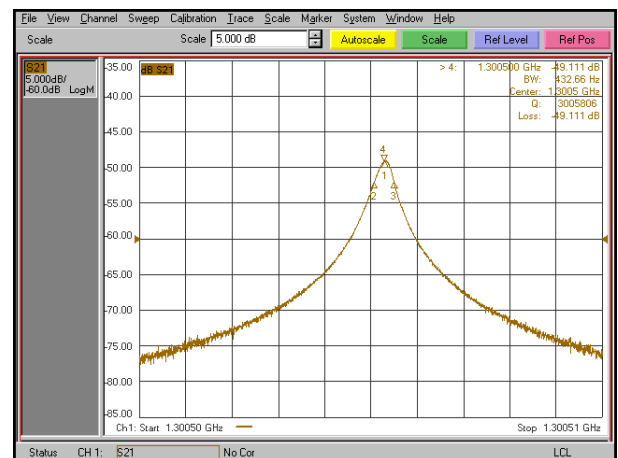


図8： $Q_L$ 調整後の $S_{21}$

これを用いて、各空洞の $Q_L$ が異なる場合の空洞電圧と、 $Q_L$ が同じ場合の空洞電圧のそれぞれの低電力フィードバックのデータを取ることができ、 $Q_L$ を揃える事で平坦になる事が確認できた。

### 参考文献

- [1] Kazakov Sergey, et al., "L-band waveguide elements for SRF application", in these proceedings.
- [2] 竹中たてる 他, "STFにおける導波管システム", in these proceedings.