

Coupling (β) measurement of the cavity BPM ports

Y.Honda, Y.Inoue

2005/8/31

概要

Intensity and decaying time of cavity BPM's beam signal depend on the coupling strength (β) of the ports. We measured β by reflection or transmission measurement using a network analyzer. It was found that $\beta = 0.07 \sim 0.10$ (KEK BPM) and $\beta = 0.20 \sim 0.40$ (BINP BPM).

1 目的

空洞 BPM の信号の大きさ、減衰時定数は信号取り出しポートのカップリング (β) で決まる。もともと KEK 空洞は、スロットの幅が広いことからカップリングが大きいつもりでいたのだが、スロットの位置がわりと外側にあるため、実はカップリングが非常に小さいのではないかとと思われるようになってきたという経緯がある。ポート測定によって β を求めてみる。BINP(SLAC 使用) についても同様の方法で測定し、比較する。

2 KEK 空洞の測定

2.1 対称な 2 ポート 空洞の場合のまとめ

KEK 空洞のように対称にポートがある場合、反射、透過測定からカップリング (β) を求める簡単な関係を導出する。ネットワークアナライザで測定するとき、図 1 のように一つのポートから信号が入力され、反射 (S_{11})、透過 (S_{21}) を測定する。

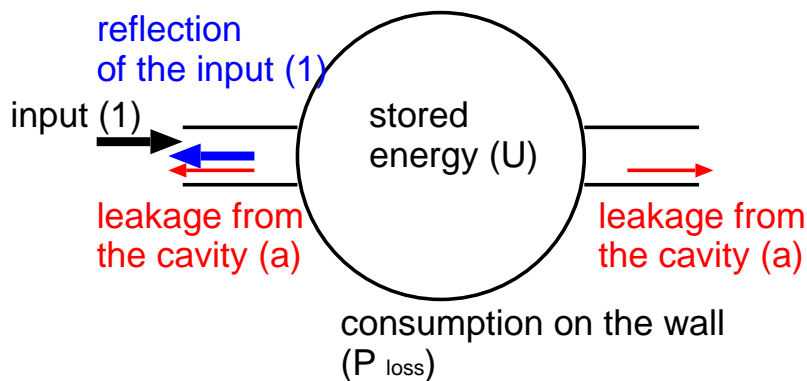


図 1: 2 ポート 空洞の測定の原理。

振幅 1 の RF を入力するとする。いったん空洞に入ったエネルギーは二つのポートから漏れ出て来る。各ポートから漏れ出す RF の振幅を a とすると、反射は、空洞の入口で反射した RF と空洞から出て来た RF の重ね合わせなので、 $S_{11} = 1 - a$ 、透過は、そのまま $S_{21} = a$ である。エネルギー保

存から、空洞内壁で熱になって消費されたパワーは、

$$P_{loss} = 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2 = 2a(1 - a) \quad (1)$$

空洞から外に出て行くパワーは全体で、

$$P_{out} = 2a^2 \quad (2)$$

β の定義より、

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} = \frac{P_{out}}{P_{loss}} = \frac{a}{1 - a} = \frac{S_{21}}{1 - S_{21}} = \frac{1 - S_{11}}{S_{11}} \quad (3)$$

である。共鳴周波数での S_{21} または S_{11} の値を測定すれば β を算出できる。

2.2 KEK 空洞の測定 (反射)

ネットワークアナライザで反射測定を行い、図 2 に示すような共鳴付近の周波数依存が見られる。これから、共鳴周波数、 S_{11} の最小値、半値全幅を読み取る。実際の測定例を図 3 に示す。ベースラインが完全に 1.0 ではないのは、校正の不完全性か、導波管部の影響と思われるので、これを 1.0 にするように補正して読み取った。この測定はビームラインにインストールされている状態で行った。結果を表 1 にまとめる。

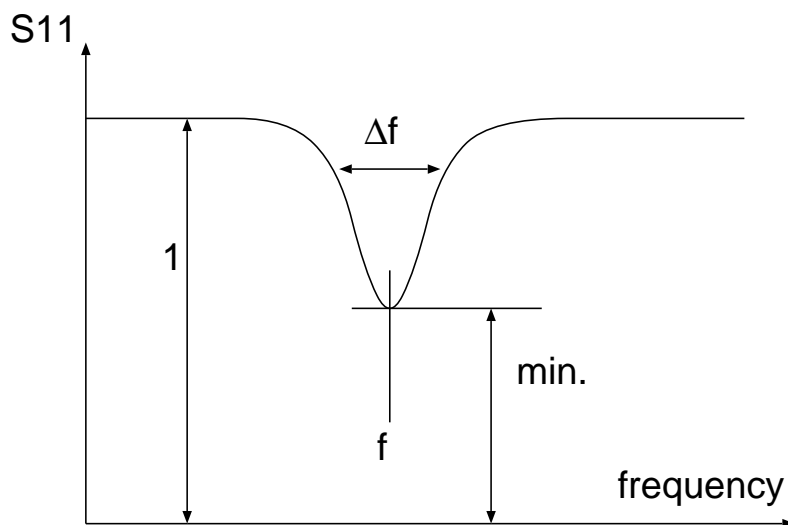


図 2: 空洞の測定の模式図。

2.3 KEK 空洞の測定 (透過)

式 3 によると、対面ポートへの透過 (S_{21}) 測定の結果からも β を求めることができる。結果を表 2 にまとめる。反射から求めた β の値よりやや低めに出ているのは、導波管部の影響の為と思われる。

3 BINP 空洞の測定

3.1 1 ポート 空洞の場合のまとめ

BINP 空洞のように 1 ポートの場合、反射測定からカップリング (β) を求める簡単な関係を導出する。ネットワークアナライザで測定するとき、図 1 のように一つのポートから信号が入力され、反射

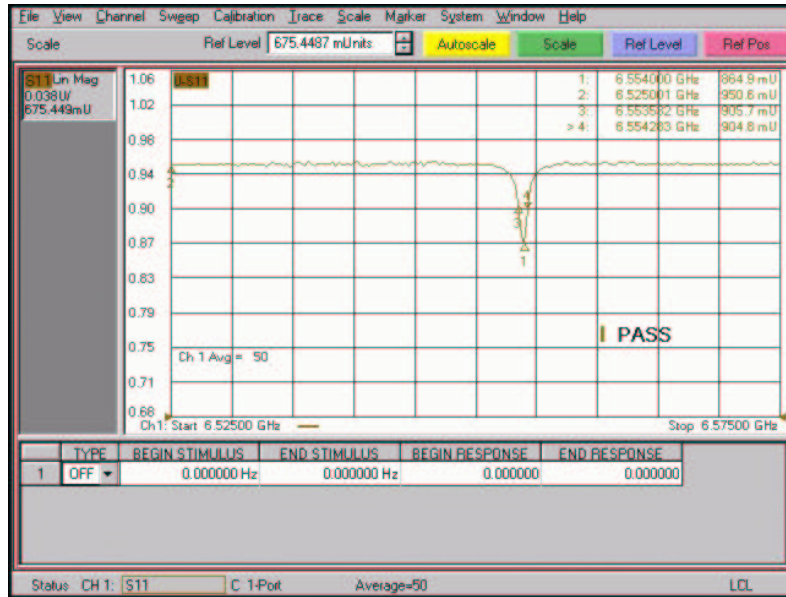


図 3: KEK 空洞の測定の例 (cavity3 top port)

(S11) を測定する。

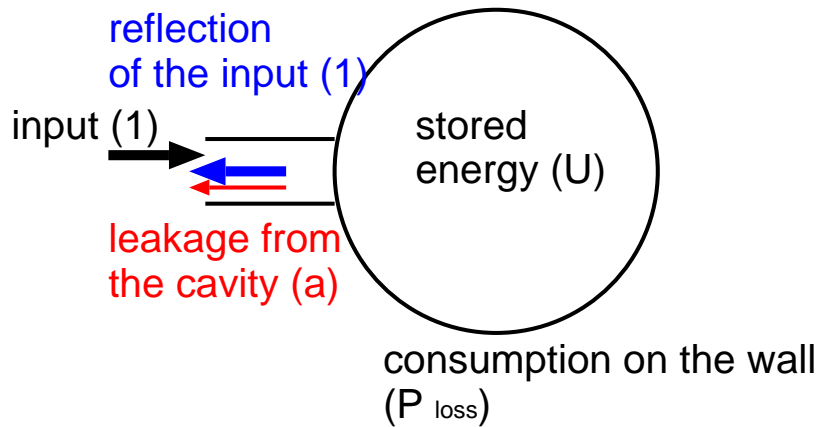


図 4: 1 ポート空洞の測定の原理。

振幅 1 の RF を入力するとする。いったん空洞に入ったエネルギーは二つのポートから漏れ出て来る。各ポートから漏れ出す RF の振幅を a とすると、反射は、空洞の入口で反射した RF と空洞から出て来た RF の重ね合わせなので、 $S_{11} = 1 - a$ である。エネルギー保存から、空洞内壁で熱になって消費されたパワーは、

$$P_{loss} = 1 - S_{11}^2 = a(2 - a) \quad (4)$$

空洞から外に出て行くパワーは全体で、

$$P_{out} = a^2 \quad (5)$$

β の定義より、

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} = \frac{P_{out}}{P_{loss}} = \frac{a}{2 - a} = \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (6)$$

である。共鳴周波数での S_{11} の値を測定すれば β を算出できる。

表 1: KEK 空洞の測定結果

cavity	port	f (GHz)	minimum	Δf (MHz)	$Q_L = f/\Delta f$	β from min.
1	top	6.55325	0.933	0.797	8222	0.072
1	left	6.55325	0.913	0.766	8555	0.095
1	bottom	6.55325	0.914	0.863	7594	0.094
1	right	6.55325	0.904	0.791	8284	0.106
2	top	6.55275	0.914	0.785	8347	0.094
2	left	6.55250	0.904	0.923	7099	0.106
2	bottom	6.55275	0.903	0.859	7628	0.107
2	right	6.55250	0.892	0.822	7971	0.121
3	top	6.55400	0.910	0.751	8727	0.099
3	left	6.55400	0.915	0.900	7282	0.093
3	bottom	6.55400	0.904	0.863	7594	0.106
3	right	6.55400	0.901	0.798	8213	0.109

表 2: KEK 空洞の測定結果 (透過)

cavity	port	f (GHz)	S21	β from S21
1	top-bottom	6.55325	-24.4 dB (0.0631)	0.067
1	left-right	6.55325	-25.7 dB (0.0519)	0.055
2	top-bottom	6.55275	-23.4 dB (0.0676)	0.073
2	left-right	6.55250	-24.7 dB (0.0582)	0.062
3	top-bottom	6.55400	-23.3 dB (0.0684)	0.073
3	left-right	6.55400	-25.1 dB (0.0556)	0.059

3.2 BINP 空洞の測定 (反射)

2と同様にネットワークアナライザで反射測定を行い、共鳴周波数、S11の最小値、半値全幅を読み取る。実際の測定例を図5に示す。この測定もビームラインにインストールされている状態で行った。結果を表3にまとめる。

4 Q値の測定による β の導出

4.1 Q_0 , Q_L と β の関係

共鳴幅から測定した $Q_L (= f/\Delta f)$ からもポートを無視したQ値(Q_0)を仮定すると β を求めることができる。

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} \quad (7)$$

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (8)$$

より、

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_L} - 1 \quad (9)$$

の関係があるので、計算でもとめた Q_0 と測定した Q_L を用いれば β が分かる。

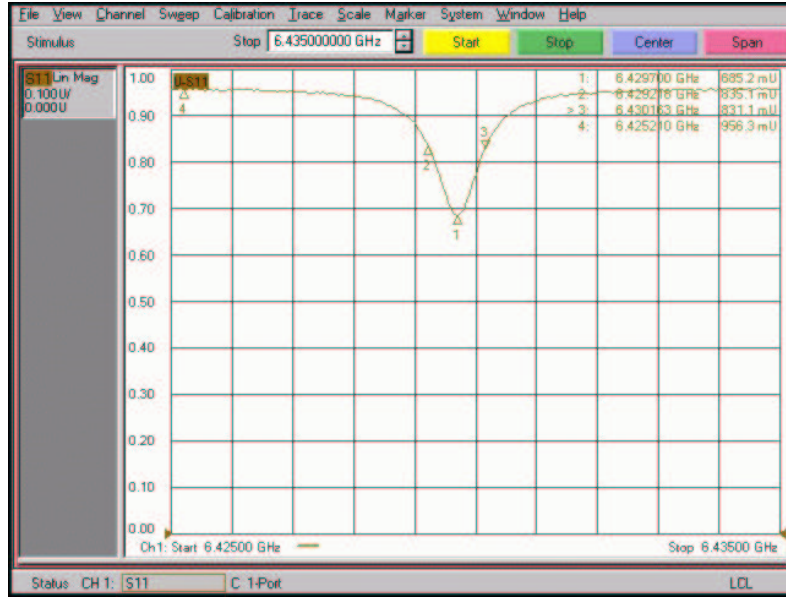


図 5: BINP 空洞の測定の例 (cavity1 y port)

表 3: BINP 空洞の測定結果

cavity	port	f (GHz)	minimum	Δf (MHz)	$Q_L = f/\Delta f$	β from min.
1	top	6.429700	0.717	0.945	6803	0.164
1	left	6.429589	0.634	0.958	6711	0.224
2	top	6.428864	0.666	0.962	6683	0.200
2	left	6.429122	0.615	0.978	6574	0.238
3	top	6.429786	0.496	1.052	6112	0.337
3	left	6.429528	0.370	1.125	5715	0.460

4.2 Q_0 の見積り

MAFIA で固有モード計算を行って Q_0 を求めた。スロットや導波管部のついていない、ただのビームパイプつき円筒型空洞について、 TM_{110} モードについて計算した。このモードの全エネルギー (U)、共鳴周波数 (f)、内壁の電流を求め、銅の伝導率 (5.8×10^7 S/m) から内壁での消費パワー (P_{loss}) を求めた。定義

$$Q_0 = \frac{2\pi f U}{P_{loss}} \quad (10)$$

により Q_0 を求めた。

KEK 空洞 (ビームパイプ直径 16mm, $f=6.6$ GHz) の場合、 $Q_0 = 11177$ 。BINP 空洞 (ビームパイプ直径 20mm, $f=6.4$ GHz) の場合、 $Q_0 = 10617$ 。

4.3 β の算出

KEK 空洞の Q_L の測定値を表 1 の平均として、 $Q_L = 7960$ とする。これから計算すると $\beta = 0.40$ 。BINP 空洞の Q_L の測定値を表 3 の平均として、 $Q_L = 6433$ とする。これから計算すると $\beta = 0.65$ 。逆に、S11 測定からもとめた β と一致するためには KEK 空洞の場合 $Q_0 = 8700$ 、BINP 空洞の場

合 $Q_0 = 8500$ 。

5 結論

KEK 空洞の β は $0.07 \sim 0.10$ 、BINP 空洞の β は $0.2 \sim 0.4$ 。