

クラブ空洞の開発と性能試験 —RF の観点から—

山本 康史*1

R&D and Performance Test for Crab Cavity —From a viewpoint of RF—

Yasuchika YAMAMOTO*1

はじめに

昨年 KEKB においてクラブ空洞¹⁻³⁾のビームコミッションが始めて以来、国内外の研究所から注目を浴びるようになり、様々な場所で報告したり紹介されたりする機会が増えた⁴⁻⁷⁾。本学会誌においては、クラブ空洞の製作⁸⁾とクラブ交差に関するビームスタディ⁹⁾についてすでに報告されているので、今号ではクラブ空洞の開発と性能試験について RF の観点から報告したい。

初めに経緯を簡単に振り返ると、クラブ空洞の組み立ては 2006 年に行われたが⁷⁻⁸⁾、最初の組み立てでは同軸部が空洞へ真っ直ぐに入らない状態で完成したため、横測定（総合試験）終了後に再組み立てを行い、ようやく完成に漕ぎ着けた。KEKB トンネルへの設置は 2007 年から行われ、電子リング（High Energy Ring, 以下 HER と略す）と陽電子リング（Low Energy Ring, 以下 LER と略す）に各一台ずつ設置された。図 1, 2 は断面図である。

1. クラブ空洞の RF 的な基本構造

1.1 RF の設計値

KEKB のクラブ空洞はビームを加速するためのものではなく、ビームに横方向の振動（キック）を与えるための超伝導高周波空洞である。使用している RF モードは TM110（厳密に言うと、クラブ空洞は非軸対称のため TM110-like などと呼ばれるべきであるが、煩雑のためこの報告書では TM110 と書く）と呼ばれるダイポールモードで、これが発生させる磁場によりビームにキックを与えるという仕組みである。有

限交差角を持って衝突しているビームに横方向の蹴りを与えるには、以下のような式を満足する電圧（キック電圧という）をクラブ空洞に立てる必要がある。

$$V_{kick} = \frac{cE \tan \theta}{2\pi f_{RF} \sqrt{\beta^* \beta_{crab}}} \quad (1)$$

ここに、E はビームエネルギー、 θ は交差角の半分の値、 f_{RF} は RF の周波数、 β^* は衝突点でのベータ関数、 β_{crab} はクラブ空洞のあるところでのベータ関数である。この式に KEKB の設計値を代入すると、必要なキック電圧として 1.4 MV という値が得られる¹⁰⁾。この時、空洞表面での最大電界は約 20 MV/m であり、通常の加速空洞での加速勾配約 10 MV/m に匹敵する。表 1 にクラブ空洞の RF 特性をまとめておく¹¹⁾。

1.2 空洞に存在する寄生モードとその対処¹²⁾

ビームが励起する空洞の寄生モードの中で危険なモードがいくつか存在し、それらの Q 値は典型的にオーダーで 100 程度に抑えておく必要がある。空洞両端のビームパイプの径をある程度大きくすることでほとんどのモードの Q 値は抑えることができるが、それでもなお空洞に捕獲されるモード（trapped mode という）がある。それらは TM010 (Lower Order Mode), TE111 の 2 成分, TM110 の垂直成分（クラブモードと対を成すモードのこと）で、これらを空洞から引き出すために空洞を横長のセル形状とし（図 3）、またビームパイプの片側を同軸構造としており、さらにノッチフィルタが取り付けられている（図 4）。

ノッチフィルタは同軸ビームパイプが偏心した時にこの中をクラブモードが TEM モードで伝播していく

*1 KEK : 高エネルギー加速器研究機構 KEK: High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: yasuchika.yamamoto@kek.jp)

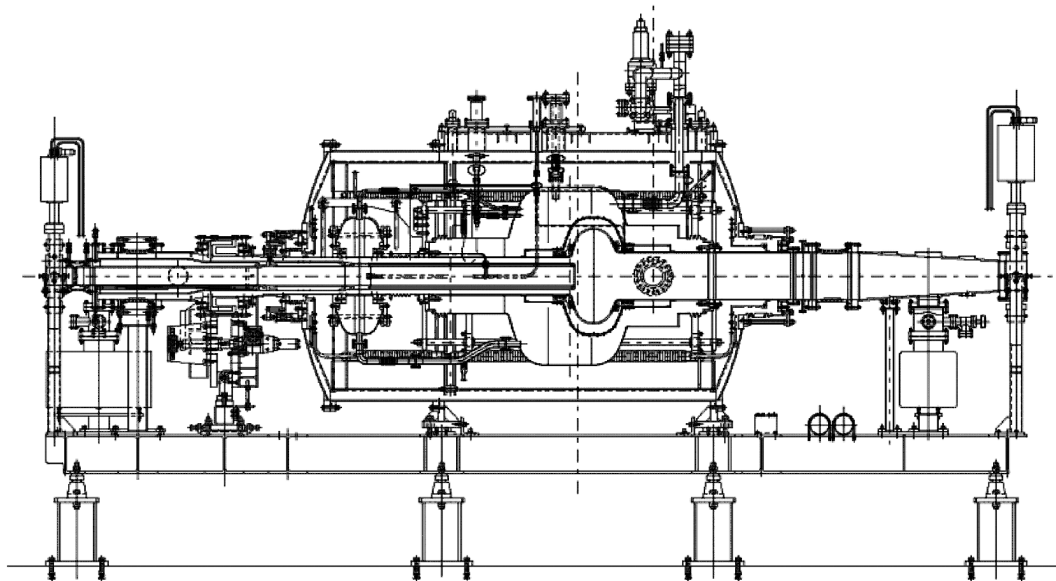


図1 クラブ空洞の側断面図

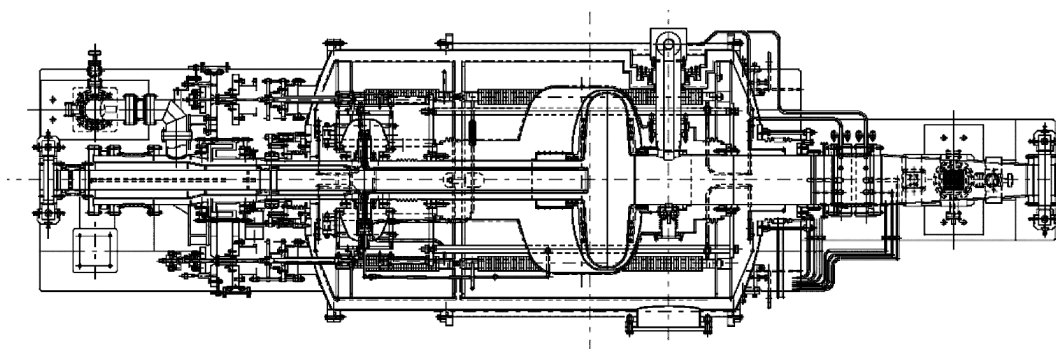


図2 クラブ空洞の平断面図

表1 クラブ空洞のRF 特性 (figures of merit)

f_0	508.887 MHz
R/Q	46.2 Ω
Geometrical Factor	220
E_{sp}/V_{kick}	13.5 MV/m/MV
H_{sp}/V_{kick}	424 Oe/MV
Kick Voltage	1.4 MV

上から空洞周波数, ダイポールモードの R/Q, 形状因子, 単位キック電圧に対する表面ピーク電場の比, 単位キック電圧に対する表面ピーク磁場の比, キック電圧である。

ため, これを再び空洞側へ跳ね返す役割を持っている。また, 同軸ビームパイプの根元には同軸部内を伝播してきた寄生モードを吸収させるための高周波減衰

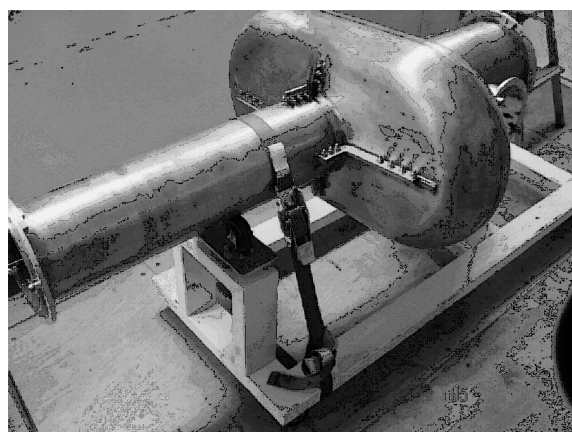


図3 クラブ空洞
手前がSBPで奥がLBP側である。SBPの長さはクラブモードが十分減衰するように1m程度に設計されている。

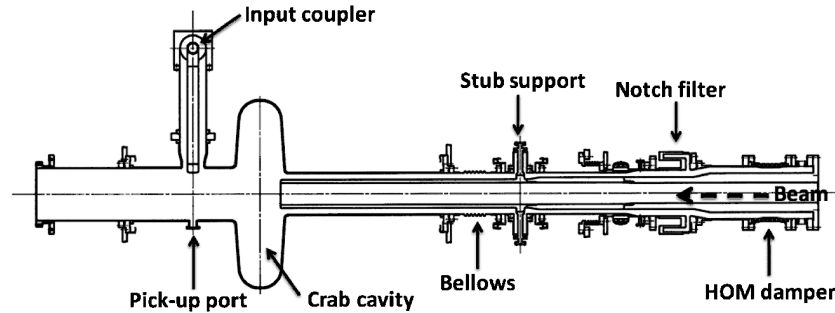


図4 クラブ空洞の同軸部詳細図

同軸部の支持は終端と中間地点にあるスタブサポートの2点支持で行っている。内導体先端はクラブ空洞内に突き出ている。ビームは同軸側から入ってきてLBP側へ抜ける。

器があり、実績のある吸収パワーはせいぜい10 kW程度のためこれを保護する目的もある。

全てのモノポールモードはTEMモードとして同軸部内を伝播し、全てのダイポールモードはダイポールモードとして同軸部内を伝播していく。TEMモードには遮断周波数は存在しないが、ダイポールモードの方には存在するので、その遮断周波数(f_{cutoff})は以下のような大小関係を満足する必要がある。

$$f_{TM110} < f_{cutoff} < f_{TE111} \quad (2)$$

しかし、この条件だけではTM110のクラブモードと対を成す垂直成分が空洞に捕獲されてしまい、大電流ビーム時にビーム不安定を引き起こす要因になってしまう。したがって、このモードを空洞から引き出すためにKEKBのクラブ空洞は横長のセルをしており、中心部での断面はレーストラック形状(Squashed Cell)になっている(図3)。この形状のおかげでクラブモードの周波数(508.887 MHz)を変えることなく、これと対を成す垂直成分だけを同軸部におけるダイポールモードの遮断周波数以上(700 MHz)に押し上げることができる。

同軸部の外径は $\phi 188$ (内径は $\phi 130$, ビームパイプ径は $\phi 100$)で小口径ビームパイプ(Small Beam Pipe, 以下SBPと略す)と呼ばれ、反対側のビームパイプ径は $\phi 240$ で大口径ビームパイプ(Large Beam Pipe, 以下LBPと略す)と呼ばれる。ビームが励起する高調波の大半はLBP側から取り出される。

2. クラブ空洞の各構成要素の開発

2.1 同軸ビームパイプ

ビームによって励起される空洞の寄生モードを引き出すためにビームパイプの一方を同軸構造としているが、それに付随する問題も生じるため適切な対処が必

要であった。同軸構造に起因する寄生モードは $\lambda/4$ (λ は管内波長)の奇数倍のところであり(一方が開放端で他方が固定端の場合の共鳴条件に相当する)、スタブサポートあるいはノッチフィルタを短絡面とするモードである。特に危険なのが、ダイポールTEの $\lambda/4$ モードでこれはR/Qも高いためビームに悪影響を及ぼす可能性があった。そこで、同軸内導体の数カ所にテーパ構造を持たせ、このモードがスムーズに同軸内を伝播し、その先の高周波減衰器で吸収されるように工夫した¹³⁾。一方、ノッチフィルタのダイポールTEモードの禁止帯は600 MHz近辺にあり、これによりダイポールTEの $\lambda/4$ モードが反射されてしまい、そのQ値が大きくなってしまおうという問題があった。したがって、ノッチフィルタの水平部分に仕切り板(partition)を入れて禁止帯を600 MHzから遠ざける工夫を施した。さらにこの仕切り板の位置をビーム軸に対して回転させると、 $\lambda/4$ モードの水平成分のQ値を下げる効果があることがシミュレーションによって示されたため、HERクラブ空洞の2回目の組み立て時に60°回転させて取り付けられた。LERの方も同様に組み立てられた。

クラブ空洞の周波数調整は同軸ビームパイプを空洞に対して出し入れすることで行っているが(後述)、柔軟性を持たせるために同軸外導体にベローズが設けられている。ベローズの付いている所は、低温部にあたるためここで捕獲されるモードが同軸内導体を発熱させてしまうのではないかと、という恐れがあった。シミュレーションによりスレーターの同調曲線¹⁴⁾を求め、それより4~5 GHzに3つの捕獲モードが存在することが示された。シミュレーションの結果では発熱量は無視できるほど小さく、この懸念は払拭された。実際に、コミッショニングの間でも発熱は観測されなかった。

同軸ビームパイプは非常に複雑な構造をしており、その製作もさることながら空洞への組み込みも難航を極めた。同軸内導体の先端部分は宙に浮いており、そこからビームパイプの中へ1m程度入り込んだところにあるスタブサポートと呼ばれる支持棒で水平方向に支えられている。しかし、これだけだとシーソーのようになってしまい安定しないので、さらに1mほど離れた根元のところで内外導体は短絡されている。スタブサポートからはニオブで出来ており、超伝導状態まで冷却される。スタブサポートまでが真空断熱層の中に収められており、断熱層からすぐ外側へ出たところにノッチフィルタがある。ノッチフィルタの後方、内外導体が短絡される直前のところに高周波減衰器が取り付けられている。同じ物が逆側のビームパイプにも取り付けられている。同軸部周辺の詳細図を図4に示す。

同軸ビームパイプの空洞への最初の組み込みは思うようにいかず、先端が偏心した状態で組みあがってしまった。同軸ビームパイプが偏心していると、クラブモードがTEMモードで同軸内を伝播してくるため、横測定時に同軸部でマルチパクタ放電が多数発生する事態になってしまった。ガス出しのための一時的な昇温などを経て、最終的に定格電圧(1.4 MV)以上までコンディショニングされたが、相当の時間がかかったため、2回目の組み立て時には治具等を改良し、同軸ビームパイプの組み込みをさらに慎重かつ精密に行った。その結果、同軸ビームパイプの先端はほぼ中心に収まるようになった(図5)。

2.2 高周波減衰器

高周波減衰器は基本的にKEKBの超伝導加速空洞グループで開発されたフェライトタイプの吸収体¹⁵⁾を採用しているが、クラブ空洞の場合ビームパイプ径が異なる($\phi 240$)ため治具などは新たに製作した(図6)。必要な吸収パワーはシミュレーションによってHERに1.3 A蓄積された場合で、10 kW程度と見積もられた。

テストベンチにおけるハイパワー試験(図7)では吸収パワーで約10 kWまでの到達を確認した。吸収パワーは冷却水の温度上昇分から計算される。この時の冷却水の流量は5 l/minで、冷却水出口の温度は55°Cであった。この時のフェライト表面の温度は125°C前後であった(図8)。

また、モデル空洞を製作(図9)し、ネットワークアナライザにより全ての高周波減衰器に対して様々なモードの吸収特性を調査し、それらの吸収特性が同等であることを確認した。



図5 クラブ空洞内部の様子
奥の中心に見えるのが同軸ビームパイプの先端部で、右から突き出ているのが入力結合器の先端部である。

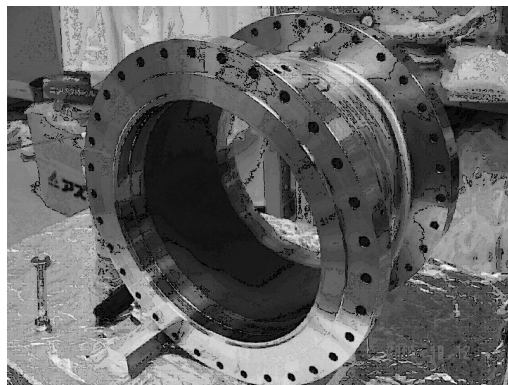


図6 高周波減衰器
フェライトパウダーを無酸素銅に対してHIP(Hot Isostatic Press)という加工法で焼き固めて製作される。外周には冷却水用配管が巻きつけられている。

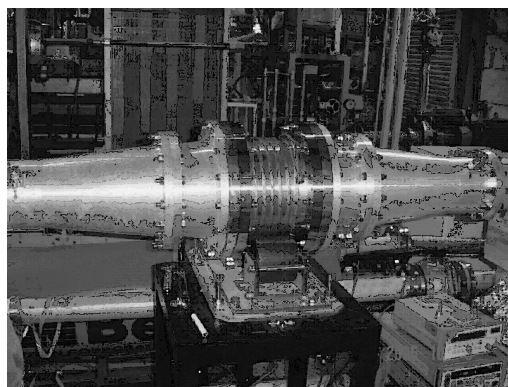


図7 ハイパワーテストベンチ
試験用クライストロンから導波管を経て、同軸変換器によって同軸導波管に変換された後、高周波減衰器に到る。その終端はダミーロードになっている。

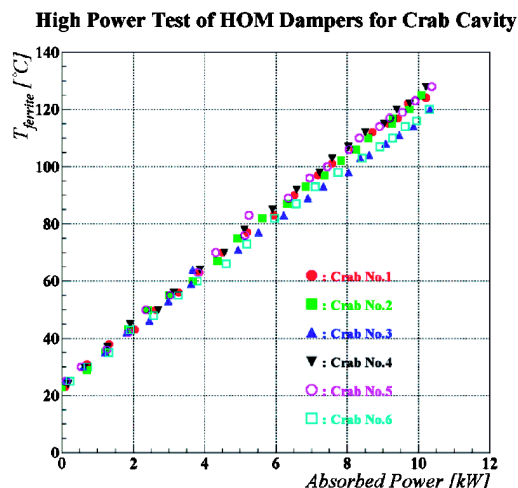


図8 ハイパワーテストの結果
高周波減衰器における吸収パワーとフェライト表面の温度の相関。表面温度は放射温度計によって導波管に開けた細孔を通して測定している。高周波減衰器は予備2台を含む計6台が製作された。

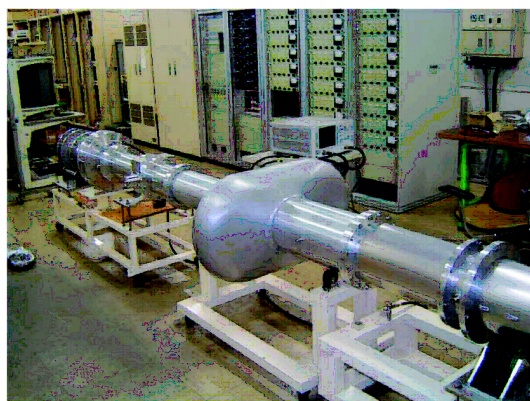


図9 アルミ製のRF特性試験用クラブ空洞
実機と同様の形状で空洞内のRFの振舞いを調査した。

2.3 チューナー機構（ピエゾ素子を含む）

一般に超伝導空洞の周波数調整は空洞を機械的に伸縮させることで行っているが、クラブ空洞の場合は同軸ビームパイプがあるためこれを空洞に対して出し入れすることで周波数を変化させることが可能である。同軸ビームパイプは空洞の中心軸上にあるため、その影響を受けるのは電場よりもむしろ磁場である。したがって、以下の式(3)¹⁶⁾より同軸ビームパイプを空洞側へ挿入すると周波数は上がり、逆に空洞から引き出すと周波数は下がることになる。

$$\Delta f \propto (\epsilon_0 E^2 - \mu_0 H^2) \Delta V \quad (3)$$

ここに Δf は周波数の変化量で、 ϵ_0 、 μ_0 はそれぞれ真

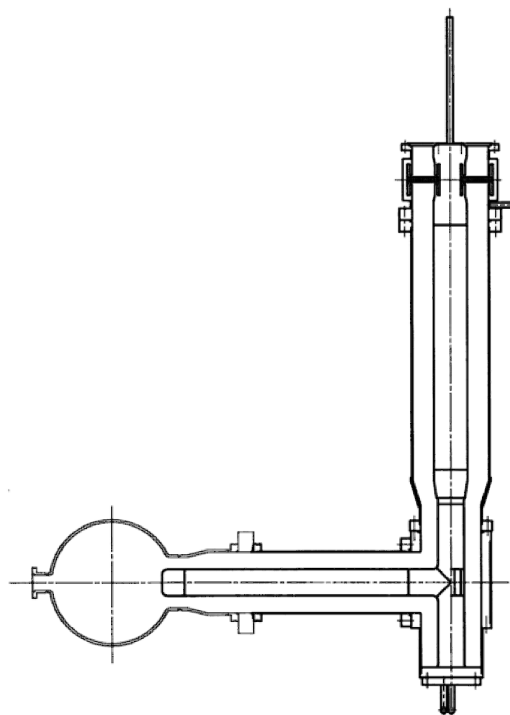


図10 入力結合器の断面図
T-stub 構造の形状はシミュレーションによりいくつかのモデルを吟味し、また製作の手間も考慮して決定された。垂直部分の上下方向から内導体に向かって冷却水用配管が通っている。真空ゲージやアークセンサーはRF窓近くに取り付けられている。

空中の誘電率と透磁率である。

クラブ空洞の周波数チューナーは二つの機構からなっている。一つ目は、ステッピングモーターを使い梃子の原理を利用して同軸ビームパイプを直接空洞へ出し入れすることで周波数調整を行うメカニカルチューナーである。二つ目は、ピエゾ素子を用いて同軸ビームパイプを細かく出し入れすることで、周波数の微調整を行うものである。周波数の調整範囲は、メカニカルチューナーの場合 100 kHz 程度であり、ピエゾチューナーの場合は 4 kHz 程度である。同軸の軸方向変位に対する周波数変化は約 30 kHz/mm である。

一方、サブチューナーと呼ばれる同軸ビームパイプの先端を左右に少しだけ振ることが出来るチューナーも付いている。これは、同軸ビームパイプを出来るだけクラブモードのRF的な中心に合わせ、TEM結合による同軸部への漏れ出しを最小にすることを狙ったものである。

チューナー機構に関する動作試験は横測定時に集中的に行われた。手でゆっくり動かしながら周波数変化を測定していくという準静的過程による方法と、ハ

イパワーテスト時に自動フィードバックをかけてチューナー位相のデータを取り、その振れ幅等を評価する方法とが取られた（後述）。

2.4 入力結合器¹⁷⁾

入力結合器はLBP側に取り付けられており、クラブモード（TM110）と結合させるために水平方向から挿入されている。RF窓や同軸部の内外径などはKEKBの超伝導加速空洞のそれと同じであるが、水平方向からの挿入のために途中がT-stub構造となっている点が唯一異なる（図10）。ビーム運転時の入力パワーは、ビームが空洞のオフセンターを通っている場合でも問題ないようなRF制御の観点から考慮され、約100 kWの運転が可能ないように要請された¹⁸⁾。この要求を満たすように入力結合器のLBPへの突き



図11 入力結合器の単体試験用テストベンチ
右側のT-stub構造を持つのがクラブ用で左側の直管タイプが加速空洞用である。間は導波管で連結されている。テストベンチでは2台同時にコンディショニングが行えるようになっている。

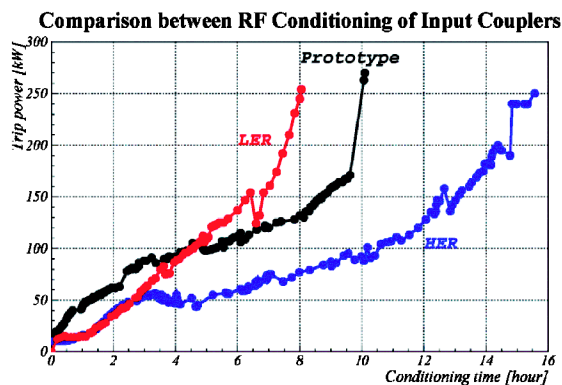
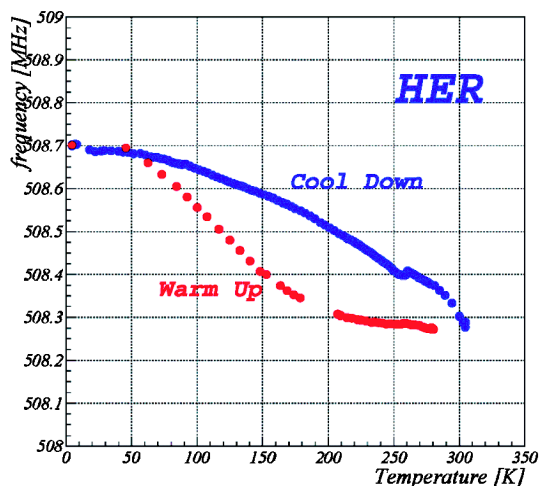


図12 入力結合器の進行波コンディショニングの結果
横軸はハイパワーRFの実効的な投入時間に相当し、縦軸はインターロックにかかってRFがダウンした時の入力パワーを表す。

表2 クラブ空洞の横測定の結果

空洞	実施時期	結果	問題点
HER	2006年6月	1.67MV 達成	同軸の設置に難あり。 空洞周波数の変化が予想と異なる。
HER	2006年11月	1.80MV 達成	なし。
LER	2006年12月	1.93MV 達成	チューナーの動作に難あり。

Frequency Trend in Horizontal Test



Frequency Trend in Horizontal Test

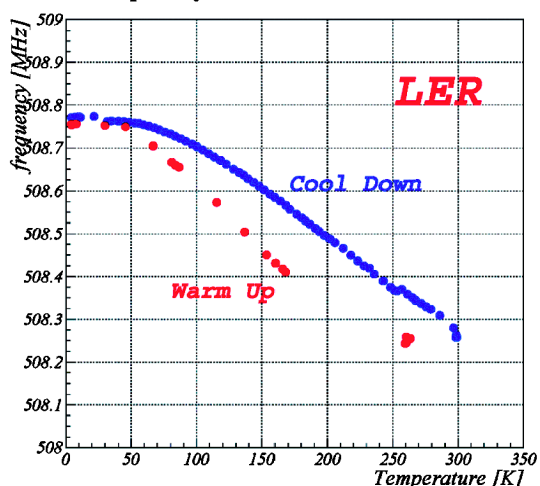


図13 横測定のコoldown中と昇温中の空洞周波数の温度変化
横軸は空洞の温度で縦軸は空洞周波数である。青色が冷却中のデータで、赤色が昇温中のデータである。両空洞の冷却途中250 K辺りに見られる凹みは、冷凍機の運転モードを切り替えるために一時的に冷却を停止していることによる。

出し量も HFSS を用いて計算され、負荷 Q で 1.6×10^5 になるようにビームパイプから 20 mm 突き出る形で設計された。試験機の製作および性能評価を経て、実機は HER と LER 用各一台ずつ製作された。

出来上がった入力結合器は、内外導体を共にオゾン水及び超純水で洗浄した後ベーキングを行い、それからテストベンチで単体での RF コンディショニングを行った。図 11 はその時のセットアップで、右側がクラブ用で左側が加速空洞用の入力結合器である。進行波と定在波それぞれでコンディショニングを行った。進行波では 250 kW 以上に到達した (図 12)。HER 用クラブ空洞のコンディショニング時に T-stub 部で発熱があったため、風冷しながらゆっくりコンディショニングを行っていき、ようやく 250 kW に到達した。その後、分解して内部を調査したが異常は見られなかった。その際、エアを吹き付けて内部を簡単に掃除した。再度コンディショニングを行ったところ、発熱は無くなった。発熱箇所にあったと思われるダストが取り払われたようである。その後、冷却能力をさらに高めるため T-stub の外部に冷却水用配管が取り付けられた。定在波では位相器を使って節と腹の位置を変化させながら 100 kW までコンディショニングを行った。この時、入力結合器の外導体表面に一定の間隔で熱電対を貼っておくとその温度分布から節と腹の位置がわかり、どの場所でコンディショニングに多くの時間がかかっているかがわかる。通常、RF 窓にパワーのピークが重なっている場合に時間がかかることが多い。

ハイパワー試験時のインターロックとしては、真空圧力とアークセンサーの 2 種類である。アークセンサーとはアーク放電発生時の光を検出する PIN ダイオードのことである。

3. 総合試験 (横測定)¹⁹⁾

クライオスタットへの空洞の組み込みが終了すると、通常「横測定」と呼ばれる総合試験に臨むことになる (これに対し、空洞単体の性能試験のことを「縦測定」と呼び、それぞれのクライオスタットの設置される向きによって名前が異なる)。これはビームが無いという以外の他の全ての条件を運転時と同じものとし、設計通りの性能を発揮しているか、各部に異常は無いかなどをチェックしてトンネルインストールの可否の決定を行うというものである。HER クラブ空洞は 2 回、LER クラブ空洞は 1 回の横測定を経てトンネルにインストールされた (表 2)。HER クラブ空洞の 1 回目と 2 回目の横測定の間で、同軸ビームパ

イプの組み込みに関して大幅な改善があった。

横測定における RF に関する主な確認事項は以下の通りである。

- 空洞が運転電圧 (1.4 MV) を維持できること
- チューナーフィードバックが機能していること
- 入力結合器との結合度が設計通りであること
- 高調波の減衰が行われていること

以下、空洞の室温、冷却・昇温中、低温における各状態での試験内容を述べていく。

3.1 室温時

• 入力結合器のコンディショニング
室温状態では空洞との結合度が小さいため、入力結合器の先端までしか RF は到達しない。入力結合器には複数のマルチパクタレベルが存在するためこれらを丹念にコンディショニングする必要がある。入力パワーで 100 kW まで行い、特に異常な発熱などは観測されなかった。

• チューナー試験

チューナーを手動でゆっくり動かしていき (準静的過程)、各駆動部の動きをダイヤルゲージで測定し、空洞の周波数との相関を調べると、チューナーが然るべき動作をしているかどうか分かる。HER の方は 2 回目の横測定時に問題は無かったが、LER の方はチューナー動作が滑らかでないことがわかり、冷却後にさらに丹念に試験をすることにした。

3.2 冷却および昇温時

• 空洞周波数と各部の変異量測定
空洞の冷却中と昇温中は空洞周波数の温度変化及び入力結合器や同軸ビームパイプの動きをダイヤルゲージで測定し、予想通りの変化をしているかチェックしている。結果は、周波数の変化量は予想と異なっていたが、両空洞ともに同様の周波数変化 ($\Delta f = 400 \sim 500$ kHz) をし、各部の動きも同じであった。同軸ビームパイプは 3 mm 程、入力結合器は 1.4 mm 程空洞側に引き込まれ (引き出され) る動きをする。冷却と昇温中の周波数の温度変化を図 13 に載せておく。

3.3 低温時 (4.2 K)

• 空洞のコンディショニング
空洞が超伝導状態になると入力結合器との結合度が一気に増えて、空洞がハイフィールドに達するようになる。このことは、空洞の真空圧力の振舞いや放射線の発生などで確認できる。HER は 2 回の横測定ともにコンディショニングの途中でフィールドがなかなか上がらない状態に陥った。そこで 80 K 辺りまで空洞を温めてガス出しを行った後再冷却してコンディショニングを再開すると、フィールドがさらに上がって定

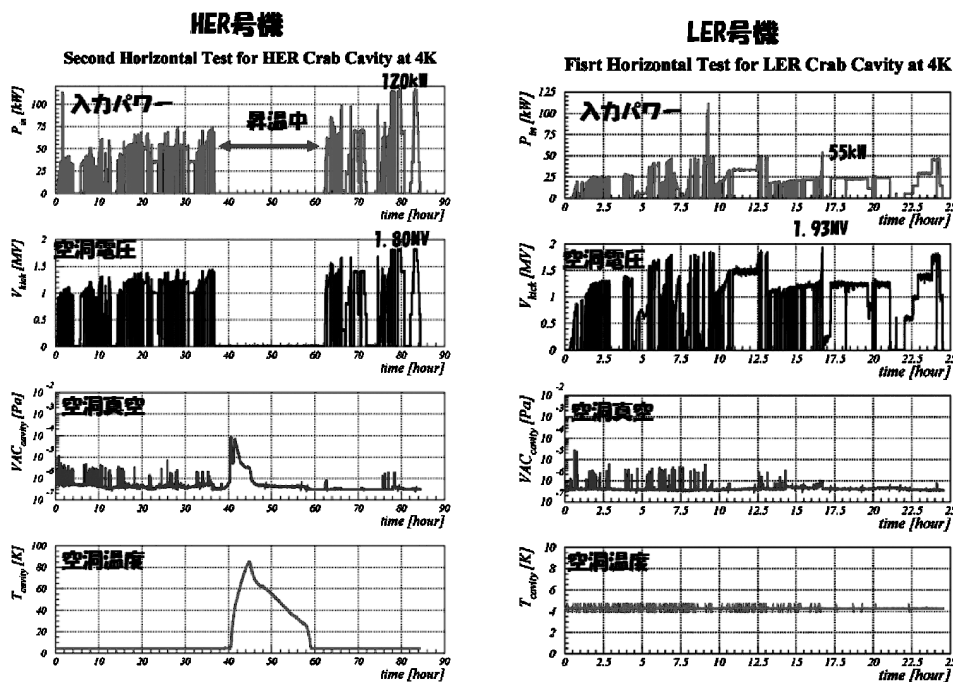


図14 空洞コンディショニングの様子
 横軸は実効的なモニター時間で、上から入力パワー、空洞電圧、空洞真空、空洞温度である。HER クラブ空洞のデータを見ると昇温前後で空洞電圧の大幅な増加があったことがわかる。両空洞で入力パワーに差があるのは負荷 Q が異なるためである。コンディショニングが進むにつれて真空の振舞いが安定していく様子がわかる。

格電圧 (1.4 MV) 以上まで到達するということがあった。LER は縦測定の時から状態が良かったせいか、苦労なく上げられた (図 14)。最終的に HER の方は 1.80 MV まで、LER の方は 1.93 MV まで到達した。昇温によるガス出しで空洞性能を回復させるというこの方法は、ビームコミッショニング中にもしばしば用いられた。

クラブ空洞は空洞以外に同軸ビームパイプもコンディショニングを行う必要があった。これは、同軸部をサブチューナーによって左右に偏心させ、同軸部へクラブモードを意図的に伝播させることで行われた。そうすると、同軸ビームパイプ内でマルチパクタ放電が起り、真空圧力が上昇し、また同軸ビームパイプに取り付けられているピックアッププローブから過度の出力が観測されたりした。これらの現象が起こった時は、インターロックが機能して空洞保護のため RF スイッチが切られる。

• チューナー試験 (チューナー位相測定)

チューナー試験は準静的な方法は室温の場合と同じであるが、低温ではさらにハイパワー投入時のチューナーフィードバックの動作からも評価された。具体的には、空洞にある一定のフィールドを立て、チューナーフィードバックをかけた状態で、クライストロン

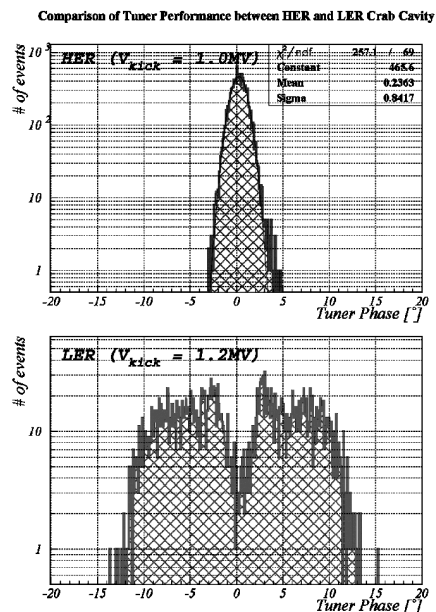


図15 両クラブ空洞のハイパワー試験時のチューナー位相の振る舞い

HER クラブ空洞の方は幅が狭いが、LER の方は大きなヒステリシスを持っているため幅が広い。中心よりも両端で留まっている時間が長いためのそのような分布をしている。

と空洞との位相差（位相）の振る舞いを観測するというものである。この段階でも LER の方はやはり振る舞いが異常で、実際のビーム運転時に機能するかどうか危ぶまれたが（図 15）、ビーム運転時に用いられている RF フィードバックは桁違いに速いものであるため、それを使えば LER の方も大丈夫であろうという見通しを持ってトンネルインストールに臨んだ。

• 空洞の機械振動モードの測定²⁰⁾

ピエゾで空洞を振動させ、位相検出器の出力をシグナルアナライザでモニターすると、空洞が何 Hz で強く励振されているかがわかる。図 16 は横測定で得られた結果で、2~3 Hz 辺りにあるピークはヘリウムジャケット内の圧力変動（サーマルオシレーション）によるものと考えられる。70~80 Hz 辺りにも特徴的なピークが見られるが、これは空洞がビーム軸方向に伸縮するモードに相当する（シミュレーションの結果では複数のモードが存在することがわかっている）。

この固有振動測定の結果を元にしてビーム運転時のフィードバックの帯域などを決めている。

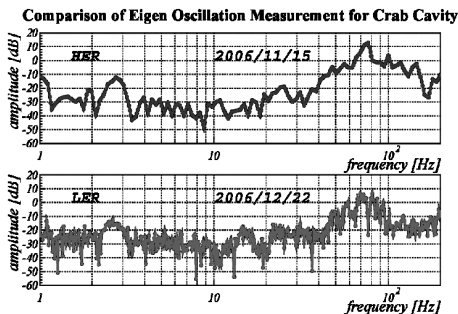


図16 クラブ空洞の機械振動のモード
横軸は機械振動の周波数で、縦軸はその強度を表している。両空洞の機械振動モードの位置はほぼ一致しており、機械特性が同等であることを示している。LER の方はより精度を上げて測定している。

• 負荷 Q 測定

負荷 Q (Loaded Q) は、通常は二通りの方法で求められる。第一は、空洞にハイパワーを投入した状態からパワーを切って、その減衰時間をオシロスコープで観測するという方法である。第二に、ハイパワー投入時に信号発信器の周波数を適当に振って、空洞の透過パワーのピークとその半分値の周波数を記録し、そこから求める方法である（半値幅を求めている）。上記の二通りの方法を式で表すと以下のようになる。

$$Q_L = 2\pi f_{RF}\tau = f_{RF}/\Delta f \tag{4}$$

ここに f_{RF} は RF 周波数、 τ はパワーの減衰時間、 Δf は半値幅である。実際には、空洞の周波数は様々な理由で揺れ動いており、後者の方法では正確に求まらないことが多いが、クロスチェックとしては十分有効で

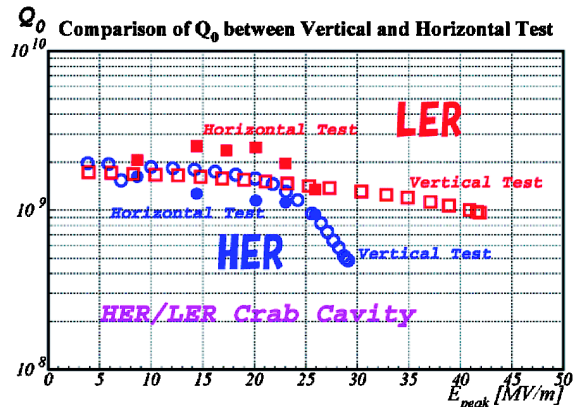


図17 クラブ空洞の Q_0 vs. E_{peak} カーブの比較
クラブ空洞の場合、加速勾配が存在しないので表面ピーク電場で評価される。設計値は $Q_0 = 10^9 @ 21 \text{ MV/m}$ であり、いずれの測定結果もこれをクリアしている。縦測定（白抜き）と横測定（塗りつぶし）との結果を比較すると、 Q_0 に誤差はあるがほぼ同等の性能を維持していることを示している。このことは空洞の組み立て作業に深刻な問題が発生していなかったことを意味している。

表 3 負荷 Q 測定の結果

Condition	$P_{in}[\text{kW}]$	Method	HER		LER
			Q_L (Jun/2006)	Q_L (Nov/2006)	Q_L (Dec/2006)
Low power		Network Analyzer	1.6~1.7x10 ⁵	1.6~1.7x10 ⁵	1.6~1.7x10 ⁵
High power	20	Decay time	1.66x10 ⁵	1.34x10 ⁵	2.07x10 ⁵
High power	10	Band width	1.59x10 ⁵	1.64x10 ⁵	1.86x10 ⁵
Simulation		HFSS(ver9.2)	1.6x10 ⁵		

ある。半値幅を求めるには、ネットワークアナライザを用いた観測でも可能である。

各実験値と計算値との比較が表3にある。いずれもよく一致しており、問題ないといえる。

• 無負荷 Q 測定

無負荷 Q 測定は、空洞に一定のフィールドを立てて、ヘリウムの液面を一定に調整した状態で測定された²¹⁾。横測定では、縦測定の時ほど正確な測定が出来ないため、誤差は大きい为中心値で比較するとほぼ一致している (図17)。

• 低出力による高調波測定

空洞の高調波測定は、ネットワークアナライザを用いて行われた。室温時と低温時のデータが比較され、高調波減衰器の吸収特性に特に変化がないことが確認された。また、ノッチフィルタの回転の効果を調べるために HER クラブ空洞の1回目と2回目の高調波測定の結果を比較し、予想通り $\lambda/4$ モードの水平成分が減衰していることも確認された。

4. ま と め

2台とも総合試験をパスしたことにより、2007年初頭から2台同時に KEKB トンネルにインストールされることが決定した。クラブ空洞のビームコミッションは世界初のことであり、非常に画期的な出来事である。

クラブ空洞の RF に関する各構成部分は、全般的には設計基準を満たしており、比較的スムーズに開発が進んだと言える。HER クラブ空洞で問題なく動作していたチューナーが、LER クラブ空洞ではなぜ異なった動作をするのかは依然として謎のままである。ただし、ビーム運転時にはさらに応答速度の速い RF フィールドバック回路が用意されているため、最後まで悩まされたこの問題に対する懸念は最終的に払拭された。

複雑な同軸ビームパイプを持つクラブ空洞が組み上がり、総合試験をパスしたということの意義は大きく、今後このような複雑な機能を持つ超伝導空洞が製作される布石となるであろう。

おわりに

クラブ空洞は KEKB の構想段階で検討課題に挙げられ開発を始めていたが、ルミノシティの飛躍的な向上が見込まれるというシミュレーション結果²²⁾が提示されるまではその導入について具体的な検討はされていなかった。したがって、開発当初から実際の導入までには10年以上の歳月が経過している。筆者は最後の2年間のみ参加していただけであったが、それ

でも実に様々なトラブルに見舞われた。2台とも完成しトンネルインストールに到ったのは、個人的にはいくつかの幸運によるものと思っている。しかし、それ以外に KEKB メンバーからの多大な助力があったことを感謝したい。また、長きに亘りクラブ空洞を製作し、完成させた三菱重工業・神戸造船所の多くの設計者や技術者たちにも感謝の意を示したい。

本稿を執筆するにあたり KEKB-RF グループの赤井和憲氏と森田欣之氏から多大な助言をいただいたことを改めて感謝致します。また、本稿を執筆する機会を与えてくださった本学会誌編集委員の末次祐介氏にも感謝致します。

最後に少し宣伝をさせていただくと、今年の本機構の一般公開は8/31であるが、そこでクラブ空洞が設置されている日光地区のトンネル見学が行える²³⁾。これは KEKB の運転開始以降初めてのことであり、読者の皆様も是非この機会を利用してクラブ空洞を見学されたい。

参考文献

- 1) R. B. Palmer, SLAC PUB-4707 (1988).
- 2) K. Oide and K. Yokoya, *Phys. Rev. A*40: 315 (1989).
- 3) K. Akai *et al.*, Proc. of the PAC '93, 1993, p. 769.
- 4) CERN Courier, 47(7), September/2007 p. 8.
- 5) K. Oide *et al.*, Proc. of the PAC07, 27 (2007).
- 6) K. Hosoyama *et al.*, SRF2007, MO405, 2007.
- 7) 細山謙二, 高エネルギーニューズ, 26(2), 2007 p. 78.
- 8) 細山謙二, 加速器, 4(3), 2007 p. 188.
- 9) 船越義裕, 加速器, 4(4), 2007 p. 309.
- 10) KEKB B-Factory Design Report, KEK Report 95-7, August/1995.
- 11) Y. Morita *et al.*, APAC 2007, MOOPMA04, 2007.
- 12) K. Akai *et al.*, Proc. of the 15th Int. Conf. on High Energy Accel., p. 757 (1992).
- 13) Y. Morita *et al.*, Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, vol. 1, p. 630-632, 2005.
- 14) J. C. Slater, Microwave Electronics, *Rev. Mod. Phys.*, 18, pp. 441-512 (1946).
- 15) T. Tajima, KEK Report 2000-10, September, 2000, A.
- 16) H. Padamsee *et al.*, "RF Superconductivity for Accelerators", John Wiley & Sons, Inc., New York (1998).
- 17) K. Nakanishi *et al.*, SRF2007, WEP50, 2007.
- 18) K. Akai *et al.*, SRF2007, WEP57, 2007.
- 19) Y. Yamamoto *et al.*, SRF2007, WEP27, 2007.
- 20) T. Nakazato, private communication.
- 21) H. Nakai *et al.*, SRF2007, TUP04, 2007.
- 22) K. Ohmi *et al.*, Proc. of EPAC06, 616 (2006).
- 23) <http://www.kek.jp/openhouse/>