

話 題

KEK B-factory クラブ空洞の製作

細山 謙二*

Construction of Crab Cavities for KEK B-factory

Kenji HOSOYAMA*

1. はじめに：KEK B-factory とクラブ空洞

KEK B-factory (KEKB) は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の世界最強の衝突性能を誇る電子-陽電子衝突型加速器である。電子 (8 GeV) および陽電子 (3.5 GeV) の大電流ビーム (それぞれ 1.4 A, 1.7 A) を、お互いに反対方向に周回するように入射・蓄積して衝突させ、大量の B 中間子を作り出し、その崩壊過程を詳細に調べて素粒子の謎を解明する。

KEKB では、電子と陽電子のビームを水平方向に有限の角度 (約 1.3 度) で交差・衝突させる。この有限交差の採用により“衝突点付近の配置する磁石の構成が簡素化され、衝突点でビームを容易に細く絞ることが可能となり、衝突性能を上げることができる”、“寄生衝突の影響を小さくして測定器のノイズを低減できる”などの長所がある。その反面、電子と陽電子のバンチ(塊)が完全に重なり合わないことによるビーム不安定性によって、衝突性能が低下することが予想される。

生出, 横谷氏¹⁾らは、電子と陽電子のバンチを図 1 に示すように衝突点の手前でクラブ空洞がつくる時間的に変化する強力な電磁場で横方向にキックさせ、二つのバンチを衝突点で重なるクラブ交差 (Crab Crossing) させることにより、このビーム不安定性を取り除くことができることを示した。さらに、大見氏によるクラブ衝突のシミュレーション結果では、クラブ交差の採用により衝突性能が向上し、ルミノシティが倍増すると考えられている。

クラブ空洞の開発の歴史は 15 年以上前まで遡る。赤井氏²⁾は KEK-Cornell 大学の共同研究の一環として、1991-1992 年に Cornell 大学において電子-陽電子衝突型加速器 CESR-B 用のクラブ空洞に関する研究を精力的に行い、1.5 GHz のクラブ空洞のモデルを製作してその可能性を示すと同時に、KEKB 用のクラブ空洞の基本設計を行った。その後、KEKB 加速器グループでクラブ空洞の研究開発グループを立ち上げるようになった。当時、SSC (Superconducting Super Collider) 計画の超伝導マグネットの開発を担当して

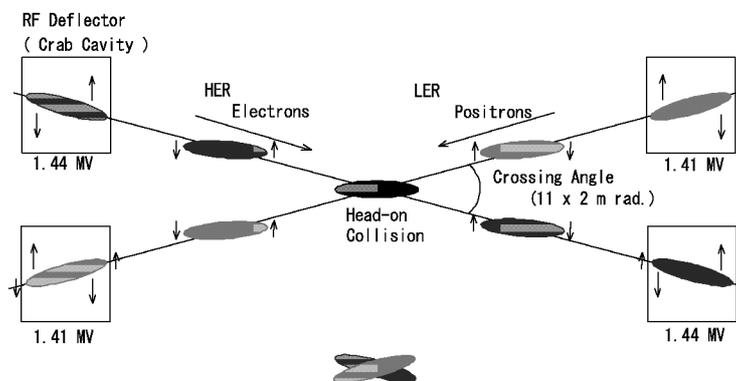


図 1 クラブ交差の模式図。下は有限交差の場合。

* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
(E-mail: hosoyama@kek.jp)

いて、計画の突然の中止により時間的な余裕のあった我々のグループが、このクラブ空洞開発を引き受けることになった。

KEK 内の超伝導空洞開発グループからの支援を受けて、1994年にクラブ空洞の1/3縮尺モデルの設計・製作を開始した。製作した1/3縮尺モデル空洞は性能が良く、1996年には500 MHzの実機モデル空洞の設計・製作に着手した。実機モデル空洞の製作を開始して驚いたことは空洞が大きいことで、その後この“大きさ”に悩まされ続けることになる。空洞の製作と平行して、空洞の製作・組み立ておよび低温試験に必要な大型設備を、アッセンブリーホール及び日光の冷凍機棟に整備した。最終的には2台の実機モデル空洞が製作され、低温での高周波特性試験によりKEKBのクラブ交差に必要な性能を達成することを確認することができた。

ところで、クラブ交差の最初の案では、衝突前の電子と陽電子の各バンチを横方向にキックするために2台、衝突後のバンチをもとの方向に戻すために2台、計4台のクラブ空洞を筑波実験室の衝突点付近に設置することになっていた。これに対して、電子と陽電子リングに各1台、計2台のクラブ空洞を日光地区に設置して各バンチを横方向にキックさせ、衝突点でクラブ交差させる新方式が提案された。この方式では、電子と陽電子のバンチはリング全周にわたってバンチの前後が左右に振られながら進行し、衝突点でクラブ交差する。この新方式ではクラブ空洞の台数を半分の2台に減らせると同時に、既存の超伝導加速空洞冷却用の大型ヘリウム冷凍機を有効に活用できるという利点があり、短期間で実現可能な計画として採用された。その結果、クラブ空洞実用機2台の設

計・製作が始められた。

2. クラブ空洞の概要と特徴：非軸対称の空洞

クラブ空洞の概念を図2に示す。高エネルギーの電子や陽電子ビームのバンチをクラブ交差させるためには、時間的に変化する横方向の強力なキック力が必要で、これを実現するためには超伝導空洞の応用が必須となる。今回開発したクラブ空洞では、クラブモードと呼ばれる超伝導空洞の共振モードTM110がつくる垂直磁場を利用する。

軸対称の空洞では、クラブモードと同じ共振周波数の水平磁場をもつ縮退したモードが存在する。そのモードはビームを垂直方向にキックし、ビームの不安定性を引き起こすことになる。そこで、我々の空洞は、空洞を上下方向に押しつぶした形状にし、このモードの周波数をビームパイプのカットオフ周波数以上に押し上げて空洞の外に取り出し、減衰させることにした。

大電流のビームを蓄積するKEKBのクラブ空洞では、バンチの通過により、ビームの不安定性を引き起こす種々なモードが空洞内に励起されるため、それらも空洞の外部に取り出し、減衰させる必要がある。クラブモードより低い周波数の加速モードTM010は空洞軸に沿って空洞に挿入された同軸結合器によって、一方、高い周波数の高調波モードHOMは大口径ビームパイプによって空洞外に取り出し、高周波吸収体で吸収・減衰させる。同軸結合器の室温部に取り付けられたノッチフィルターは、クラブモードがTEMモードとして外部に漏れ出るのを防止する。また、クラブ空洞の運転に必要な高周波電力は、大口径のビームパイプに水平に取り付けられたアンテナ型の同軸の

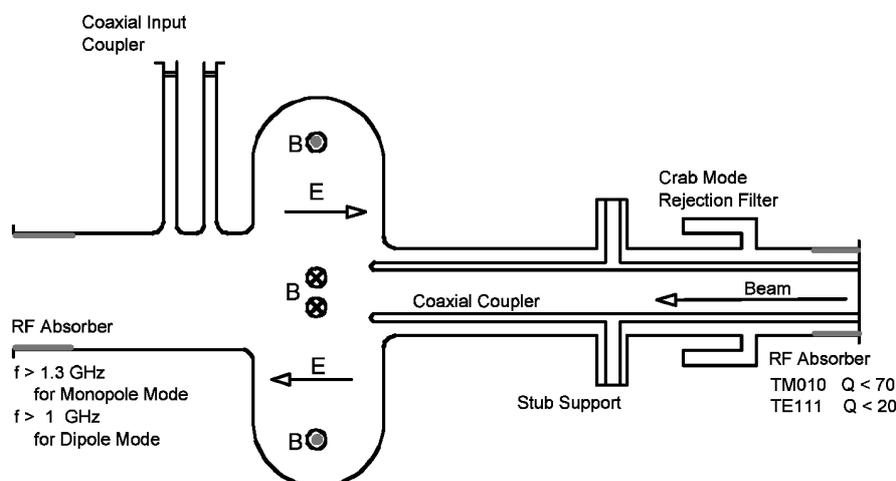


図2 KEKB クラブ空洞の概念。

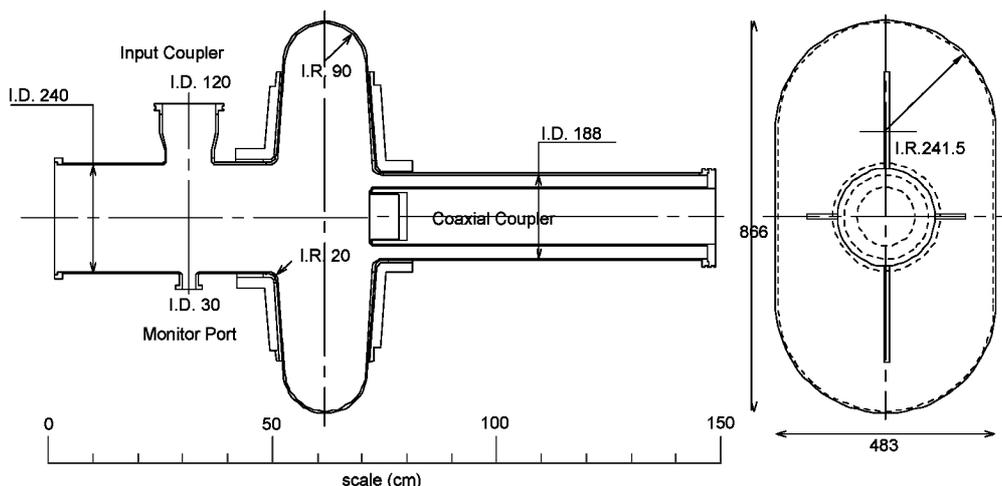


図3 KEKB クラブ空洞の形状・寸法.

入力結合器から供給される。

3. クラブ空洞の設計と製作

KEKB クラブ空洞の形状と寸法を図3に示す。クラブ空洞は薄肉構造であるため外圧により大きく変形したり挫屈したりしやすい。そこで詳細な構造解析を行って空洞の機械的な強度を評価・検討した。例えば、非軸対称なクラブ空洞では、空洞部とビームパイプとの接続部で応力集中が起こり、外圧に耐えるために7 mmの肉厚が必要となる。しかし一方、溶接特性や運転時の空洞の冷却性能を考慮すると肉厚をできるだけ薄くすることが望ましい。そのため、応力集中部をリブで補強することにより空洞肉厚を4 mmと薄くできるようにした。

クラブ空洞の形状・寸法の精度は、空洞内のモードの共振周波数や電磁場分布等空洞の高周波特性の確保に非常に重要であり、また、強力なキック電圧を実現するには空洞内面、特に溶接部分を滑らかに研磨する必要がある。

同軸結合器の内導体にも空洞と同様な性能が要求され、空洞と同じ工程で製作される。ただし、外面が鏡面に仕上げられているため、組立作業時に表面に傷やゴミなどが付着しないように取り扱いに細心の注意が必要になる。

4. クラブ空洞の縦型クライオスタットでの低温性能試験

クラブ空洞は、まず大型の縦型クライオスタットに収納されて液体ヘリウムで冷却され、高周波特性試験が行われる。この低温性能試験では大量の液体ヘリウムを必要とするため、性能評価のテストスタンドは

KEKBの超伝導加速空洞用の大型のヘリウム冷凍装置に隣接して設置された。

KEKB クラブ空洞は同軸結合器が空洞に挿入された状態で運転されるので、同軸部でのマルチパッキングによる空洞性能の劣化が懸念された。この影響を実験的に調べるために、“簡易型同軸部”と呼ばれるニオブ製の同軸結合器(図3参照)を製作し、クラブ空洞に取り付けて低温での性能評価試験を行った。冷却後の最初の高周波試験において、低い電力レベルで顕著なマルチパッキング現象が観測されたが、約1時間の高周波エージングでこれを克服することができた。数回の冷却・高周波特性試験を行い、この現象が空洞冷却後の最初の高周波試験で現れること、そして高周波エージングした空洞を2~3日ヘリウム温度に保持して再度高周波試験を行った場合にはこの現象が起こらないことがわかり、実機の運転には支障ないことが確認された。因みに、入力結合器の結合度が大きい実機の場合では、最初の高周波運転でこのマルチパッキング現象が起きると、大電力の高周波が一気に空洞に入り瞬時に高周波エージングされる。

空洞の性能は、その高周波損失の逆数に比例する Q_0 値で評価される。図4に、低温性能試験で得られた試作1号機の、空洞単体の場合と同軸結合器をクラブ空洞に挿入した場合についての Q_0 値を最大表面電場 E_{sp} の関数として表す。同軸結合器をクラブ空洞に挿入した場合の到達最大表面電場 E_{sp} は28 MV/mで、定格運転での必要な値(21 MV/m)を超える。さらに、液体ヘリウムを減圧してクラブ空洞の運転温度2.8 Kに下げると、 E_{sp} は40 MV/mと、飛躍的に性能が向上することが確認された。

試作1号機の低温性能試験で、クラブ交差に必要

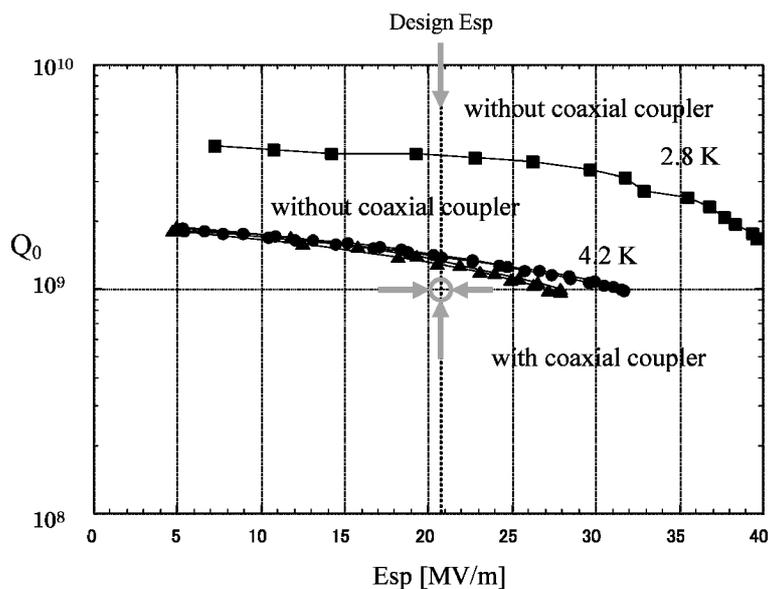


図4 縦型クライオスタットでの低温性能試験の結果 (Q_0 vs. E_{sp}).

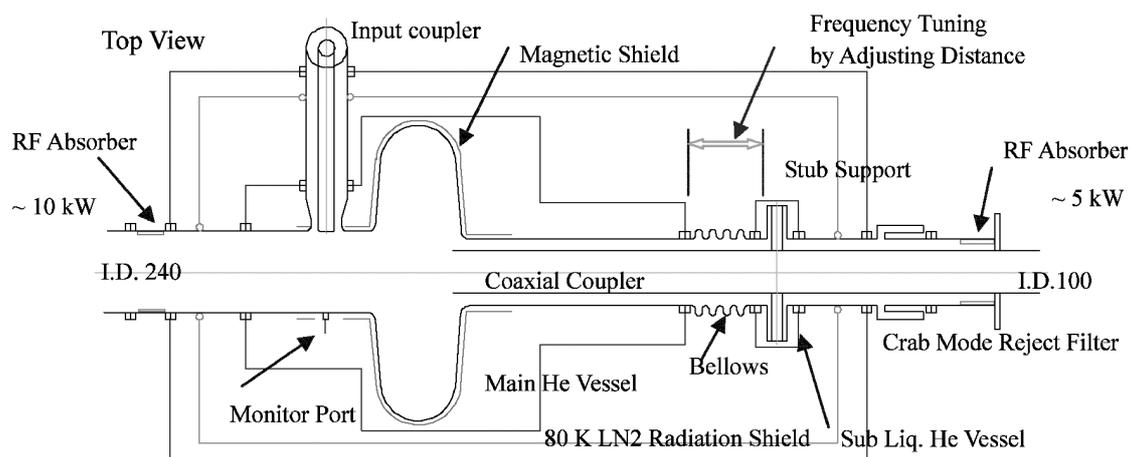


図5 KEKB クラブ空洞クライオスタットの概要.

な性能が得られることを確認した後、製作技術、特に、電子ビーム溶接及び表面処理の再現性を評価するために、試作2号機を製作した。低温試験で試作1号機とほぼ同じ性能が得られることを確認し、クラブ空洞の基本的な製作技術を確立したものと考え、本格的なクライオスタットの設計・製作を引き続き開始した。

5. KEKB クラブ空洞と横型クライオスタット

クラブ空洞用横型クライオスタットの概念図を図5に示す。クラブ空洞本体はジャケット型の主ヘリウム槽に、同軸結合器の支持部は副ヘリウム槽にそれぞれ収納されて浸漬冷却される。熱侵入を低減するため、

クライオスタットは液体窒素で冷却された80 Kの熱シールドで保護されている。二つのヘリウム槽はパイプで連結され、ヘリウム冷凍機から供給される液体ヘリウムの流量を調節することで液面が一定に保たれる。同軸結合器のニオブ製内導体は、副ヘリウム槽のスタブ支持部から取り込んだ液体ヘリウムで冷却される。その蒸発ヘリウムガスはスタブ支持部を通して戻りガスとして回収され、一部は空洞と同軸部を接続するベローズの冷却に利用される。

ジャケット型ヘリウム槽に挿入されたクラブ空洞、同軸結合器、およびその関連機器の構造の断面を図6に示す。同軸結合器は4本の吊り下げ棒でクラブ空洞端部のアームに取り付けられ、2本の駆動棒が左右

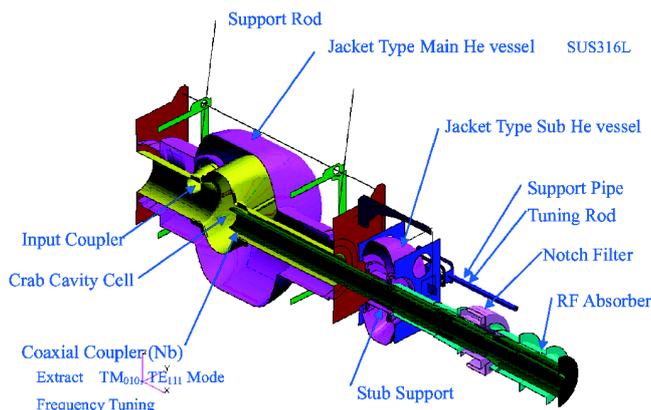


図6 KEKB クラブ空洞と同軸結合器の構造。

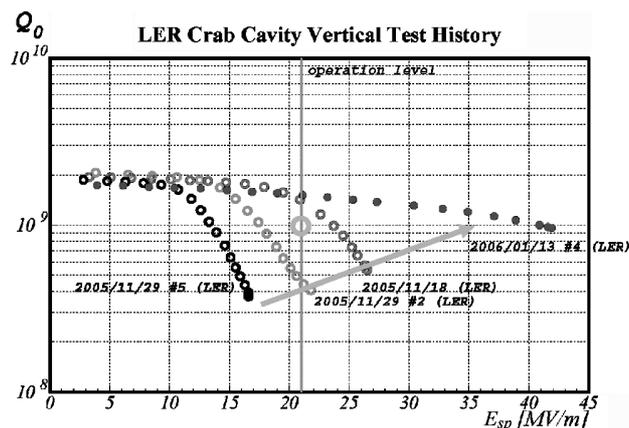


図7 クラブ空洞 LER 号機の性能。

に取り付けられている。空洞の共振周波数を変えるための主チューナーは、モーターとピエゾ素子で構成されており、駆動板を通して2本の駆動棒を同時に駆動する。一方、同軸結合器の水平方向の位置を変える副チューナーは、モーターで片方の駆動棒のオフセット量を変える。

クラブ空洞では、バンチは基本的に磁場でキックされるため、加速空洞の場合に比べてビームの負荷は非常に小さい。しかし、ビーム軌道の変動に対して安定した運転を行うために入力結合器の空洞との結合は強くなければならず、実機では Q_{ex} が 10^5 になるように設定され、100 kW の高周波電力で運転される。

KEKB の大電流運転時にクラブ空洞内に誘起される HOM は約 10 kW と推定される。HOM はクラブ空洞の大口徑ビームパイプや同軸結合器から空洞の外部に取り出し、水冷されたフェライトの高周波吸収体で吸収・減衰させる。

ところで、クラブ空洞のクライオスタットは高圧ガス保安法に定められる特定設備に該当するため、特定設備検査規則に則った設計・製作を行う必要がある。また、クラブ空洞の材料であるニオブ材は、高圧ガス保安法で定める規格材料に該当しないため、経済産業大臣の特認を受ける必要がある。約1年をかけてこれらの手続きを行い、特認および特定設備製造認可を受けた上で製作を開始し、製造中の法律に基づく検査を実施した。

6. クラブ空洞実用機の製作と性能試験

2003年に、戸塚機構長の強力な支援をうけて2006年2月の完成を目標に2台のクラブ空洞をKEKBリングの“日光”地区へ設置することが正式に決定され、2004年に2台のクラブ空洞実用機の設計・製作を開

始した。これに呼応してKEKB加速器グループ内にクラブ空洞の建設に向けてタスクフォースが結成され、クラブ空洞に関係するビーム軌道、ビーム運転、真空、RF制御、HOM、入力結合器、冷却等の技術的な検討を行った。

2台の空洞の成型は2005年の2月に終了し、LER号機（陽電子リング用）が先行して製作された。6月に電子ビームによる組み立てが終了し、バレル研磨、電解研磨、熱処理などを経て、11月18日に縦型クライオスタットで空洞本体の低温試験を実施した。低温性能試験の結果を図7に示す。到達最大表面電場 E_{sp} は26 MV/mを超えることができたが、電子の電界放出によるX線が $E_{sp} = 16$ MV/mで急激に増加し、20 MV/mを越えると Q_0 値が急激に低下した。この原因として空洞内面の異物の付着が疑われ、昇温、分解して空洞内面の高圧水洗浄による異物の除去を実施した。再組み立ての後、11月29日に再度低温試験を行ったが残念なことに性能は回復せず、むしろ劣化した。そこで横型クライオスタットへの組み込みを断念して、電解研磨EP-IIの処理まで戻ることにし、空洞内表面に傷等の欠陥や異物の付着が無いかを徹底的に調べた。その結果、低温試験で発熱が観測された箇所、長さ0.8 mm 直径0.01 mmの黒いヒゲ状の異物が付着しているのを発見した。採取して電子顕微鏡で観察したところ、この異物は綿の繊維であることが判明した。クラブ空洞のビームパイプにフランジを取り付ける際、フランジ表面を拭き取る時に使用した綿紙の繊維のくずが空洞内に混入し、その内面に付着したものと想像された。電解研磨の空洞の再組み立てを行い、1月12日に低温試験を実施した結果、最大表面電場 E_{sp} は42 MV/mに達した。

一方、HER号機（電子リング用）は6月に電子ビー

ムによる組み立てが終了した。12月20日に実施した低温試験では到達最大表面電場 E_{sp} が 29 MV/m と満足する性能が得られたので、横型クライオスタットへ組み込んだ。

7. 横型クライオスタットの製作とクラブ空洞の組み込み

超伝導クラブ空洞は、これまでに世界中で設計・製作・運転の実績がなく、長い歴史と実績がある超伝導加速空洞に比べると完成度は低い。そのため、ビーム運転で改造等が必要になる場合が十分想定される。そういった場合に迅速に対応出来るように、大型で複雑な構造のクラブ空洞を組み立てるための専用のクリーンルームや高圧洗浄装置設備を KEK 内に整備することにした。高い表面電場で運転される超伝導空洞では、空洞内表面に付着したマイクロサイズの微粒子からの電子の電界放出により性能が著しく制限される。空洞の製作・組み立ての過程で微粒子の空洞内への混入を極力防止するためのクリーンな環境はもちろんのこと、空洞内表面に付着した微粒子を除去する高圧水洗装置が必須である。図8に高圧水洗中のクラブ空洞を示す。

実用機の設計・製作に先立ち、斬新なアイデアが盛り込まれたクライオスタットの製作・組み込みが実際に可能かどうかを評価するために、クライオスタットの原型試験機を試作して低温試験を実施した。また、クラブ空洞の周波数のチューニングや同軸結合器の先

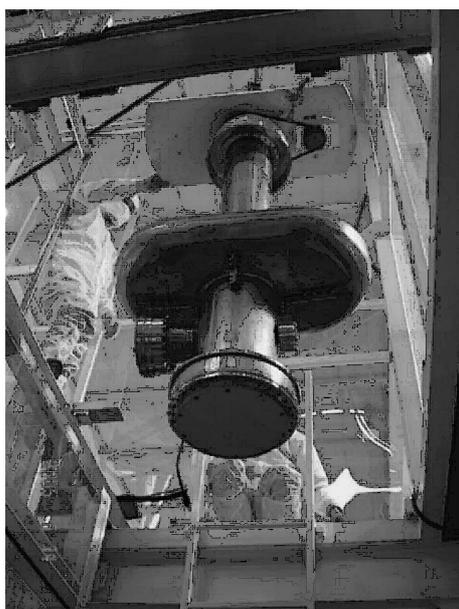


図8 高圧水洗中のクラブ空洞。

端位置を調節する複雑な支持連結機構を模擬する実寸大の試験装置を設計・製作して、正常に動作することを確認した。その後、最終的なクライオスタットの設計を行った。

同軸結合器のクラブ空洞への接続は、横型クライオスタットに取り付けられた空洞に水平方向から行う。接続には、迅速な接続が可能となる、接続部がテーパ形状になったバイオネット方式が採用された。空洞部に挿入された同軸結合器は回転することによって接続されるが、残念なことに挿入後のはめあいが硬く、最終の回転作業ができなかった。厳しいはめあい精度が要求される接続部は、挿入位置と方向を正確に合わせる必要がある。しかし、挿入治具の機械的な剛性不足が原因でこれが実現できていないためと考えられた。そこで、挿入装置の機械的剛性を強化し、内導体の位置と方向を精度良く調節できるように改造して、最終的にはこの問題を解決することができた。しかし、この作業に多くの時間を浪費してスケジュールが大幅に遅れた。

8. クラブ空洞の最初の低温試験

クラブ空洞 HER 号機は 2006 年 4 月に組み立てを終了し、4月26日にテストスタンドに搬送した。テストスタンドに据え付けられたクラブ空洞には、各種の測定・制御の配線や冷却のための配管を接続し、5月12日から冷却を開始した。途中真空リークもなく順調に冷却され、5月29日から約1ヶ月間にわたって低温での高周波特性試験を実施した。同軸部の組み込みに手間取ったため性能の劣化が心配されたが、キック電圧 $V_{kick} = 1.67$ MV を達成することができた。室温からの冷却、液面の制御、同軸結合器の冷却は順調に行われ、クラブ空洞が低温装置として安定に機能することを確認した。同時に、問題点として、空洞の共振周波数が約 300 kHz 予想値より低い、新しく採用したチューナーの駆動機構はうまく機能するがチューナーの周波数調節範囲が狭く応答性が悪い、等が明らかになった。

9. クラブ空洞 HER 号機の改造・再組み立ておよび低温試験

クラブ空洞 HER 号機は、最初の低温試験で明らかになった問題点を解決するために、6月26日に組み立てエリアに戻され、直ちに分解されて次の改造が行われた。

- 1) 同軸結合器の可動量を大きくしてチューナーの調節可能範囲を広げるために、銅製のベローズ

をステンレスに銅鍍金したベローズに交換。

- 2) 応答性を改善するためにチューナーの空洞駆動機構の剛性を改善。
- 3) 同軸内導体の接続部の電氣的な接続を改善するための、スパイラル形状の薄肉のベリリウム銅製の RF コンタクトの取り付け。

改造が終了したクラブ空洞 HER 号機は、ヘリウムジャケットに取り付けられた状態で高圧水洗が施され、9月から組み立が開始された。約1ヶ月の組み立て作業の後、10月16日にテストスタンドへ移動して再び冷却し、大電力高周波特性試験を実施した。

前回の低温試験で問題となった共振周波数のずれは、冷却後のチューナーの初期設定時に空洞を軸方向に変形させることにより解決した。また、チューナーの共振周波数の周波数調節範囲が広がり、チューナーによる機械的なフィードバックが正常に機能し、応答性の問題は解決した。再組み立てによる性能の劣化が心配されたが、到達キック電圧 $V_{kick} = 1.8 \text{ MV}$ 、定格運転時の $V_{kick} = 1.4 \text{ MV}$ での Q_0 も 10^9 であることを確認した。

10. クラブ空洞 LER 号機の組み立てと低温試験

クラブ空洞の製作過程で様々な技術的な問題が起こり、LER, HER 号機2台を平行して同時に組み立てるのは無謀であると思われたため、当初は HER 号機を先行して組み立てて低温試験でその性能を確認した後、LER 号機の組み立てを開始することを基本方針としていた。しかし、HER 号機で好成績が得られたので、待機していたクラブ空洞 LER 号機の最終組み立てをただちに開始し、11月には組み立てを終了した。12月5日にはテストスタンドへ移動して冷却、大電力高周波特性試験を実施した。キック電圧 $V_{kick} = 1.93 \text{ MV}$ が得られることを確認できたが、空洞の高周波位相を安定させるチューナーによる機械的なフィードバックがうまく機能せず、位相がゆっくりした周期で $\pm 15^\circ$ 振れる現象に悩まされた（因みに、HER 号機は $\pm 1^\circ$ 以下の範囲に収まる）。症状を精査した結果、複雑なチューナー駆動機構に何らかのバックラッシュがあるためではないかという結論になった。しかし、チューナー機構の主要部はクライオスタットの真空槽の中にあり、詳細な原因究明にはクライオスタットを分解して内部の構造を調査する必要がある。その場合には分解・再組み立てには最短でも3ヶ月は必要で、予定していた冬の KEKB の停止期間を利用したリングへの設置が難しくなる。議論の末、独立した

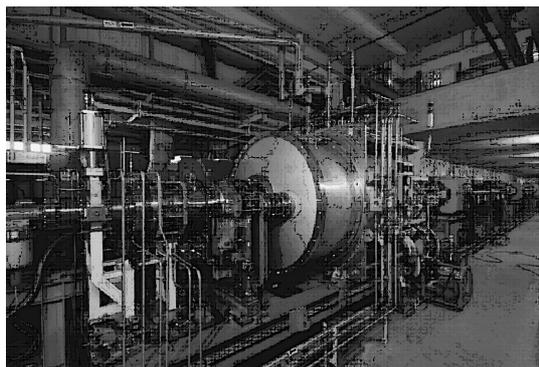


図9 KEKBに設置されたクラブ空洞 HER 号機。

クライストロンで運転されるクラブ空洞では、RF フィードバックで空洞位相を安定化できるということで、2台のクラブ空洞をそのまま KEKB へ設置することにした。

11. クラブ空洞の KEKB への設置

2007年の1月8日と11日に、それぞれクラブ空洞 HER, LER 号機がトンネル内に搬入された。クラブ空洞が設置される日光直線部は、既に超伝導加速空洞が設置されているため、大型のクラブ空洞を設置場所への運搬するのが一苦勞であった。特に LER 号機の場合は運搬の通路が確保できないため、天井クレーンのレールを利用した専用の運搬装置を使用した。所定の位置に運搬されたクラブ空洞は位置出しの後固定され、引き続き真空ダクトが接続されて KEKB リングへの設置を完了した。その後、導波管、トランスファーライン、回収配管、冷却水配管が取り付けられた。最終段階では、空洞の真空度、高周波信号、ヘリウム槽の液面や空洞の各部の温度等、各種の計装の配線作業と調整作業を行った。KEKB に設置されたクラブ空洞 HER 号機を図9に示す。

高圧ガス設備であるクラブ空洞は、1月24日に高圧ガス保安法で定められている県係官による書類審査と、トンネル内の立会による気密試験が実施され、完成検査に無事合格した。

12. クラブ空洞の冷却とクラブ衝突の開始

設置されたクラブ空洞は、真空リークの危険を避けるため $2 \sim 3 \text{ K/hr}$ とゆっくり冷却された。冷却中の不測の事態に対応できるよう、HER 号機は1月29日に、次いで LER 号機は1月31日に冷却を開始したが、途中トラブルもなく順調に冷却され、2月6日には2台の空洞の冷却が完了した。クラブ空洞 HER,

LER 号機の運転は、チューナーの設定・調整後、それぞれ 2 月 6 日、10 日に開始された。エージングによりクラブ衝突運転に必要なキック電圧 V_{kick} を上回る、それぞれ 1.6 MV、1.5 MV が得られることを確認した。

クラブ空洞を使用したビーム運転は 2 月 13 日から開始された。クラブ空洞 HER 号機、LER 号機のキック電圧 V_{kick} はそれぞれ 1.4 MV、1 MV で運転された。LER 号機のチューナーは依然として不調であったが、RF フィードバックによりビーム運転に必要な位相の安定性が得られ、クラブ衝突運転には支障がないことが判った。

クラブ空洞でビームをキックした際の軌道の変化から求めたクラブ空洞のキック性能 V_{kick} は、予想値と非常によく一致した。また、ストリークカメラでバンチの傾きを測定し、電子と陽電子のバンチがクラブキックされていることが確認された。

クラブ空洞を使用した衝突実験は、小電流から始められ、その後次第にバンチ数を増やして両リングのビーム電流を増加する方針で、加速器の調整と並行して行われた。

極低温で運転される超伝導空洞では、長期間の運転により空洞、入力結合器、同軸結合器等の低温表面に水素ガス等が吸着・堆積する。そして、その脱離が突然の真空悪化を起し、クラブ空洞のトリップの原因となる。4 月までの衝突実験の途中、加速器のメンテナンス日を利用して 80 K までの昇温を 2 回実施し、空洞、入力結合器、同軸結合器の表面に吸着・堆積した水素ガス等を取り除いた。さらに、大電流におけるクラブ衝突実験の安定した運転を実現するために、ゴールデンウィークの連休を利用してクラブ空洞を室温まで昇温して空洞の真空を改善することにした。クラブ空洞の室温までの昇温は 4 月 27 日に開始し、空洞等に吸着・蓄積されたガスを除去した。この室温までの昇温によりクラブ空洞のトリップの頻度は大幅に減少し、昇温の効果が確認された。

13. クラブ空洞の大電流ビーム試験

5 月 3 日からクラブ空洞の再冷却を開始し、5 月 7 日には冷却を完了した。途中落雷による停電でヘリウム冷凍装置が停止したが、クラブ空洞、冷凍機とも問題なく数時間で運転を再開することができた。5 月 14 日にはビーム運転を再開して、クラブ衝突でビームの寿命が短くなる問題と戦いながら地道な加速器調整を行い、ビーム電流を次第に増加させていった。そ

して 6 月 23 日には、ビーム電流 LER 1.2 A, HER 0.67 A でのクラブ衝突でルミノシティ $L = 10.5 \times 10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$ を達成し、クラブ空洞の大電流運転での実用可能性を証明することができた。

今期の運転の最後の数日は、クラブ空洞をディチューンした状態での大電流衝突試験を実施した。両リングの空洞の真空および同軸部の冷却に注意しながらビーム電流を増加させて、LER 1.7 A, HER 1.35 A で安定に運転することができた。この大電流モードでの運転中にクラブ空洞の大口径ビームパイプと同軸部に取り付けられた HOM 吸収体での吸収電力を見積ると、それぞれ約 10 kW と 2 kW で予想値とほぼ一致し、問題ないことを確認した。

おわりに

クラブ空洞 2 台は 2006 年の 2 月に KEKB への設置を目標に 2004 年に製作が開始されたが、製作の最終工程の大幅な遅れにより、1 年遅れて 2007 年の 1 月にトンネル内に設置された。クラブ空洞は 2 月 13 日よりビーム運転を開始し、途中、心配された重大な真空リーク、空洞の性能の劣化もなく、空洞及び同軸部は安定に冷却され、6 月末までの約 5 ヶ月間運転することができた。

これまでに製作・運転の実績がないクラブ空洞は長い歴史と実績のある加速用超伝導空洞に比べて完成度が低く、多くの開発項目があった。それを一つずつ乗り越えて完成に漕ぎ着けたのはクラブ空洞グループと(株)三菱重工グループのチームワークに支えられた粘り強い努力によることはもちろんのこと、加速器グループからの強力な支援・協力体制が大きく寄与していることは言うまでも無い。

振り返って見ると 1994 年に 1/3 縮尺クラブ空洞の製作を開始してから、クラブ空洞の実用機 2 台を製作し、KEKB に設置、冷却してビーム運転を開始するまでに約 14 年の歳月が過ぎている。途中、冬の時代をじっと耐えて、クラブ空洞の運転を無事開始することができたのは、KEK 及び加速器の首脳陣をはじめ、KEKB 加速器評価委員会のメンバー、物理実験 Belle グループの多くの支援があったからである。これらの多くの人たちからの温かい支援に感謝する。

参考文献

- 1) K. Oide and K. Yokoya, *Phy. Rev. A* 40 p315 (1989)
- 2) K. Akai et al. *Proc. IEEE Part. Accel. Conf.* (1993)