

KEKB クラブ空洞

KEK 加速器研究施設

細山 謙二

kenji.hosoyama@kek.jp

2007年8月30日

はじめに KEKB とクラブ空洞

高エネルギー加速器研究機構の世界最強の衝突性能を誇る電子-陽電子衝突型加速器 KEKB は電子 (8 GeV) およびの陽電子 (3.5 GeV) の大電流ビームをお互いに反対方向に回るように入射・蓄積して、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れ、衝突性能を上げることが出来る”、“寄生衝突の影響を小さくして測定器へのノイズを減らせる”などの長所があるが、その反面、電子と陽電子のパンチ (塊) が完全に重なり合わないことによるビーム不安定性で衝突性能が低下することが予想される。

電子と陽電子のパンチを図 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、二つのパンチが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けることが、生出勝宣、横谷馨氏らによって提案された。クラブ交差の採用により衝突性能の向上が期待される。大見和史氏のクラブ衝突のシミュレーション結果では図 2 で示すようにルミノシティが倍増する。

クラブ空洞の研究開発の歴史は 15 年以上前までさかのぼる。赤井和憲氏は 1991-1992 年に KEK-Cornell 大学の共同研究の一環として 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その可能性を示すとともに KEKB 用のクラブ空洞の基本設計を行った。

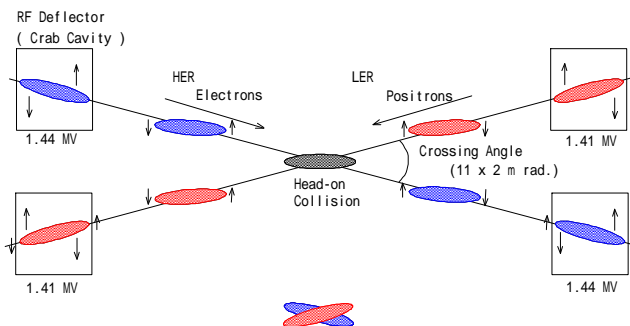


図 1 クラブ交差

KEKB 加速器グループではクラブ空洞の建設が計画され、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いて、計画の突然の中止により時間的な余裕のあったわれわれのグループがクラブ空洞の開発を引き受けるようになった。

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 1/3 縮尺モデルの設計・製作を開始した。製作した 1/3 縮尺モデル空洞は幸運なことに性能がよく、1996 年には KEKB 用の 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空洞が大きいことに驚かされ、その後、その“大きさ”に悩まされることになる。空洞の製作と平行して、空洞の製作・組み立て、および低温性能試験に必要な大型設備をアッセンブリーホールと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した。

初期のクラブ交差案では、衝突前の電子と陽電子の各パンチを横方向にキックするために 2 台、衝突後のパ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必要がある。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パンチを横方向にキックさせて衝突点で

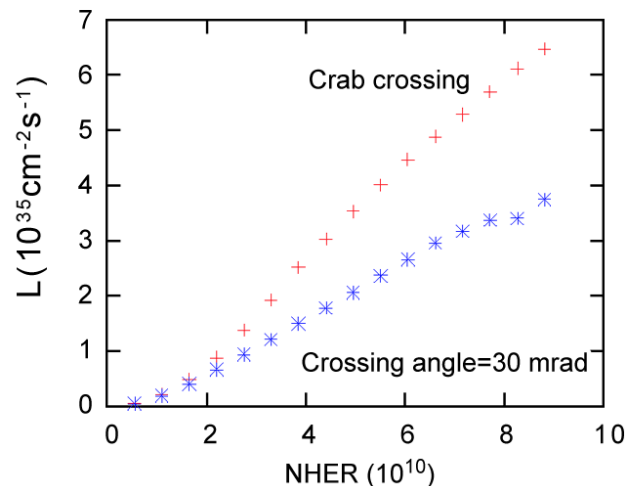


図 2 クラブ交差による衝突性能の増強

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パンチはリング全周にわたってパ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利点がある。この方式は短期間で実現可能な計画として採用され、クラブ空洞実用機2台の設計・製作が始められた。

クラブ空洞の概要と特徴 軸非対称の空洞

クラブ空洞の概念を図3に示す。高エネルギーの電子や陽電子のビームのパンチをクラブ交差させるために時間的に変化する横方向の強力なキック力が必要で、それに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。

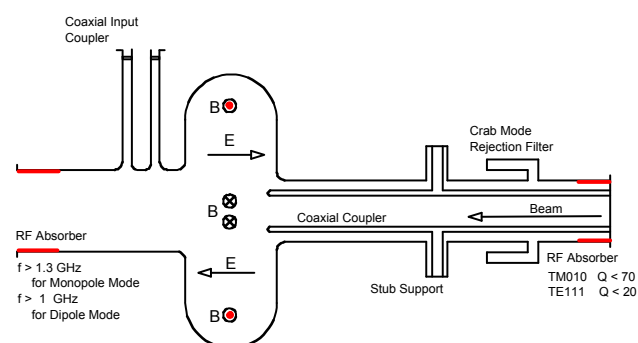


図3 クラブ空洞の概念

軸対称の空洞に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し、ビームを垂直方向にキックしてビームの不安定性を引き起こすことになる。そこで、空洞を上下方向に押しつぶした形状にして、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。

大電流ビームで運転される KEKB クラブ空洞は、空洞内へのビームパンチの通過により、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が、それらを空洞の外に取り出して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で、高い周波数の高調波モード HOM は大口径ビームパイプから空洞外に取り出し、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はクラブモードが外部に漏れ出るのを防止する。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入力結合器から供給される。

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4に示す。クラブ空洞には同軸結合器を取り付けた状態でクラブ空洞の高周波性能を評価するために簡易型の同軸結合器が取り付けられている。薄肉構造のクラブ空洞は外圧により大きく変形したり挫屈したりする可能性がある。これらについては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。軸非対称なクラブ空洞では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7mmの肉厚が必要となるが、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出来るだけ薄くすることが望ましく応力集中部をリブで補強することにより空洞肉厚を4mmとした。

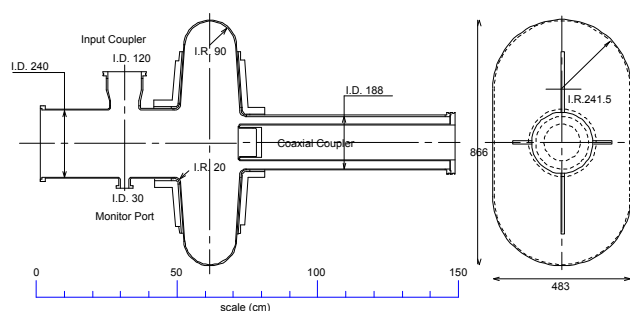


図4 KEKB クラブ空洞の形状・寸法

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などの空洞の高周波特性の確保に必須であり、強力なキック電圧を実現には空洞内面、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は空洞と同程度の性能が要求され空洞とまったく同じ工程で製作されるが、空洞との大きな違いは外面が鏡面に仕上げられ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ことである。

クラブ空洞の縦型クライオスタットでの低温性能試験

クラブ空洞は縦型クライオスタットの中で液体ヘリウムで冷却して高周波特性試験を行なった。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の液体ヘリウムデューワー(12,000ℓ)に隣接して設置され、大量の液体ヘリウムの消費が可能である。

KEKB クラブ空洞は同軸結合器を空洞に挿入して運転されるが、この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評価するために“簡易型同軸部”と呼ばれるニオブ製の同軸結合器を製作して、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で低い電力レベルで顕著なマルチパケング現象が観測されたが約 1 時間の高周波エイジングでこれを克服することが出来た。数回の冷却・高周波特性試験により、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、高周波エイジングした空洞を 2-3 日ヘリウム温度に保持した場合には、この現象が起こらず実機の運転には問題ないことが確認された。

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 5 に低温性能試験で得られた試作 1 号機の空洞単体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最大表面電場 E_{sp} 21 MV/m をこえた。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、到達最大表面電場 E_{sp} は 40 MV/m となり、飛躍的に性能が向上することが確認された。

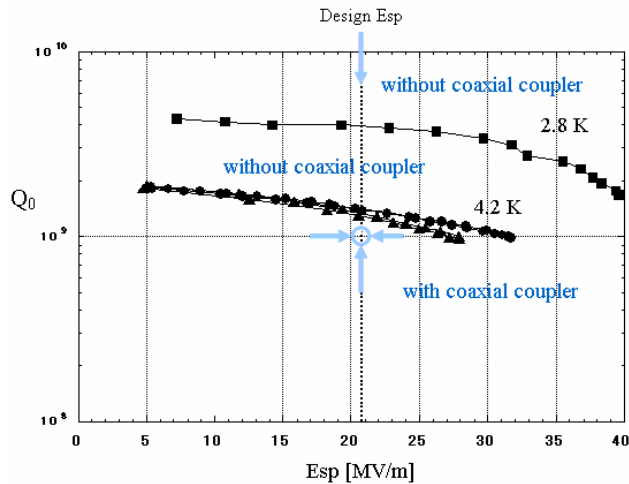


図 5 縦型クライオスタットでの低温性能試験の結果 (Q_0 vs. E_{sp})

試作 1 号機の低温性能試験で、クラブ交差に必要な性能が得られることを確認した後、空洞の製作技術、特に、電子ビーム溶接およ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て本格的なクライオスタットの設計・製作を開始した。

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 6 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収納され浸漬冷却される。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の調節で液面が一定に保たれる。同軸結合器のニオブ製の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、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の冷却に利用される。

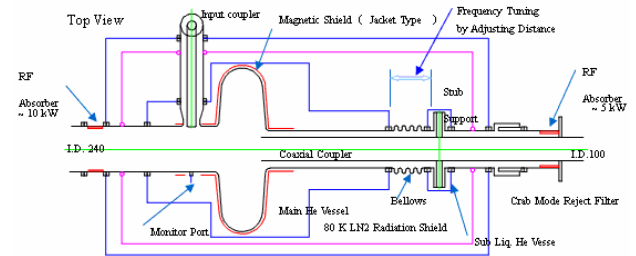


図 6 KEKB クラブ空洞クライオスタットの概要

ジャケット型ヘリウム槽に挿入されたクラブ空洞と同軸結合器と関連機器の構造の断面を図 7 に示す。同軸結合器は 4 本の吊り下げ棒でクラブ空洞の端部のアームに取り付けられ、2 本の駆動棒が左右に取り付けられている。空洞共振周波数を変えるための主チューナーはモーターと微調用のピエゾ素子から構成され、駆動板を通して 2 本の駆動棒を同時に駆動する。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駆動され片方の駆動棒のオフセット量を変える。

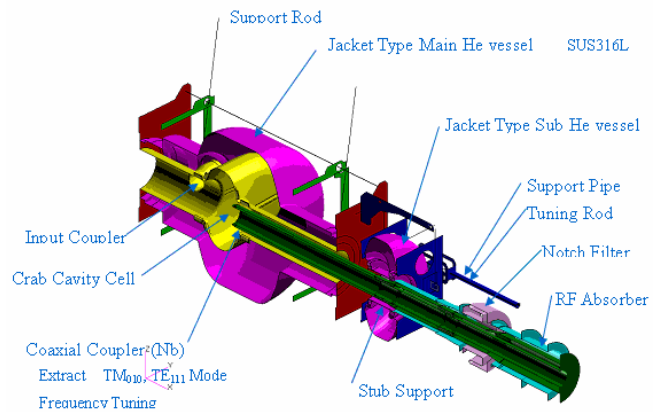


図 7 KEKB クラブ空洞と同軸結合器の構造

クラブ空洞に高周波電力を供給する入力結合器は KEKB 加速空洞に使用され実績のある同軸構造のアンテナ型で、クラブ空洞のビームパイプに水平に取り付けられる。クラブ空洞ではビームバンチのキックは基本的には磁場を利用するため加速空洞の場合に比べてビームの負荷は小さいが、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への結合は比較的強い外部 Q 値 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 10kW で、クラブ空洞の大口径ビームパイプや同軸結合器から空洞の外部に取り出され、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。

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し、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、製造中は法律に基づく検査を実施した。

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、電磁石、真空、RF 制御、HOM、入力結合器、冷却などの技術的な検討を行った。

2 台のクラブ空洞の成型は 2005 年の 2 月に終了し、LER 号機が先行して製作され 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 8 に示す。

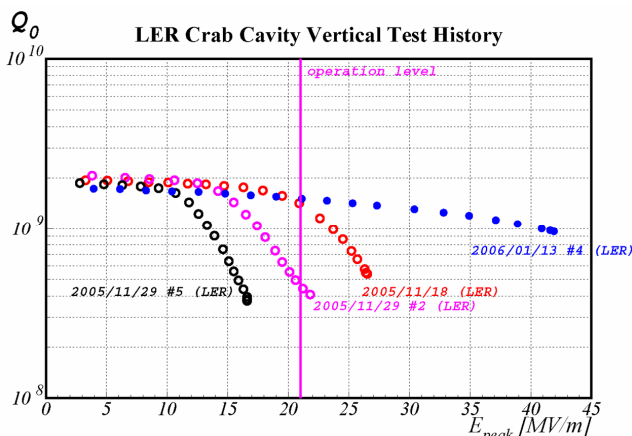


図 8 クラブ空洞 LER 空洞の性能

到達最大表面電場 E_{sp} が 26 MV/m を超えることは出来たが、電子の電界放出による X 線が E_{sp} は 16 MV/m で急激に増加し、 E_{sp} が 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ので、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 EPII の処理まで戻ることにし、空洞内表面に傷などの欠陥や異物の付着がないかを徹底的に調べた。低温試験で発熱が観測された箇所に長さ 0.8mm 直径 0.01mm 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による調査の結果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に、フランジを拭くのに使用した綿紙の繊維のくずが混入して空洞内面に付着したものと想像される。電解研磨された空洞は再組み立てを行い、1 月 12 日に低温試験を実施し、最大表面電場 E_{sp} は 42 MV/m に達した。

HER 号機は 6 月に電子ビームによる組み立てが終了、12 月 20 日に実施した低温試験で到達最大表面電場 E_{sp} は 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みを決定した。

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て、完成度は低く、ビーム運転で改造などが必要になる場合が想定される。その場合に迅速に対応出来るように専用のクリーンルームや高圧洗浄装置設備を KEK 内に整備した。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防止するための組み立て用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、空洞の再組み立てを想定して高圧水洗装置はジャケットに組み込んだクラブ空洞の高圧水洗が可能ないように改造した。

実用機の設計・製作に先立って、斬新なアイデアが盛り込まれたクラブ空洞の横型クライオスタットの製作・組み込みが可能かどうか評価するために、横型クライオスタットの原型試験機を製作し、低温試験を実施した。また、チューニングを行うための同軸結合器の先端位置を調節する複雑な支持連結機構は実寸大の試験装置で正常に動作することを確認した後、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組み込みは、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同軸結合器を接続する。迅速な接続が可能な接続部がテーパ形状のバイオネット方式が採用され、空洞部に挿入された同軸結合器は回転することにより接続が完了する。残念なことに

挿入後の嵌め合いが硬く、最終の回転作業ができなかった。挿入治具の機械的な剛性不足で、厳しい嵌め合い精度が要求される接続部の挿入位置と軸方向を正確に合わせられないことが原因と考えられた。挿入装置の機械的剛性を強化して内導体の位置と方向を精度よく調節することができるように改造して、問題を解決することができたが、このために多くの時間を浪費してスケジュールが大幅に遅れた。

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。筑波山を背景にテストスタンドへトラックで搬送されるクラブ空洞を図 9 に示す。



図 9 クラブ空洞の搬送 テストスタンドへ

テストスタンドに据え付けられたクラブ空洞は各種の測定、制御の配線や冷却のための配管が接続され 5 月 12 日から冷却を開始した。空洞は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 ヶ月にわたり空洞の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り性能の劣化が心配されたが、キック電圧 $V_{kick} = 1.67 \text{ MV}$ 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、クラブ空洞は低温装置として安定に機能することが確認された。同時に、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駆動機構はうまく機能するが、チューナーの可動範囲が狭く、応答性が悪いなどの問題点が明らかになった。

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、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を行った。

- 1) 同軸結合器の可動量を大きくしてチューナーの可動範囲を広げるため、銅製のベローをステンレスに銅鍍金したベローに交換。
- 2) 応答性を改善するため、チューナーの空洞駆動機構の剛性の向上。
- 3) 同軸内導体の接続部の電気的な接続の改善するため、スパイラル形状の薄肉のペリリウム銅製の RF 接続の取り付け。

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を行って、9 月に再組み立てを開始した。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、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可動範囲や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、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 が得られることを確認した。

クラブ空洞 LER 号機の組み立てと低温試験

これまでに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いうことで、HER 号機を先行して組み立て、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。HER 号機で好成绩が得られたので、待機していたクラブ空洞 LER 号機はただちに最終組み立てを開始し、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、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）。症状を調査した結果、複雑なチューナーの駆動の機構に何らかのバックラッシュがあり、それが原因ではないかという結論になったが、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 KEKB への設置が難しくなる。2 台のクラブ空洞は独立した 2 台のクライストロンで運転され、

クライストロンの RF フィードバックで空洞を安定位相に運転出来るということで、2 台のクラブ空洞を KEKB へ設置することを決定した。

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超伝導加速空洞が既に設置されていて大型のクラブ空洞を設置場所へ運搬するのが大変で、特に LER 号機の場合は運搬の通路が確保できないので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を行って固定され、真空ダクトが接続され KEKB リングへの取り付けが完了した。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。最終的には空洞の真空、高周波信号、ヘリウム槽の液面や空洞の各部の温度などの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 10 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関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。



図 10 KEKB に設置されたクラブ空洞 HER 号機

クラブ空洞の冷却

クラブ空洞は真空リークの危険を避けるため 2 ~ 3 K/hr とゆっくり冷却され、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 日に開始し、エイ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。途中、同軸部内導体の冷却の不足により同軸部の温度が上昇したが、

バイパスラインによる冷却ガスの流量を増強することで解決することができた。

クラブ衝突の開始

クラブ空洞のビーム運転は 2 月 13 日から開始され、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て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て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。

クラブ衝突実験は、各ビーム 30 mA の小電流での運転から始めて、次第にバンチ数を増加させて両リングのビーム電流を増加させながら加速器の調整運転を行って、4 月 18 日には両リングのビーム電流は LER 430 mA, HER 220 mA に達した。

クラブ空洞の加温

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、同軸結合器などの低温表面に水素ガスなどが吸着・蓄積され、その脱離が原因で、突然の真空悪化が起こり、クラブ空洞のトリップの原因となる。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・蓄積された水素ガスなどを取り除いた。大電流でクラブ衝突試験での安定した運転を実現するために、5 月の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、空洞などに吸着・蓄積されたガスを除去した。

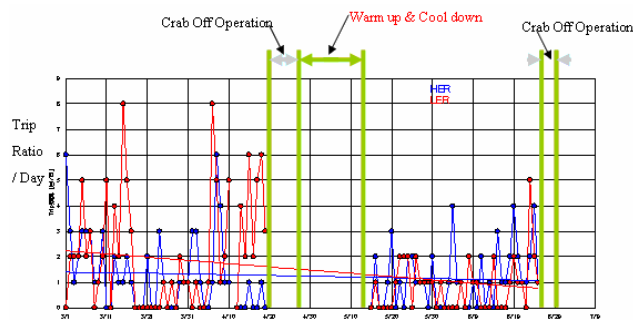


図 11 クラブ空洞のトリップの頻度

クラブ空洞 LER 号機と同軸部の真空が空洞部に比べて一桁悪く、残留ガス成分は窒素が主成分で少量の酸素成分が含まれ大気のリークが疑われたのでクラブ空洞を室温に昇温時にリーク探しを実施したが、リークを発見することが出来ず、結局原因不明のままである。しかし、非常にゆっくりではあるが少しずつ真空がよくなっている。

クラブ空洞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(図 11 参照)、昇温の効果が確認された。

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出来た。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の調整運転を行い、ビーム電流を次第に増加させて6月23日にはビーム電流 LER1.2A、HER 0.67A でのクラブ衝突でルミノシティ $L = 10.5 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sec}$ を達成し、クラブ空洞の大電流運転の可能性を証明することが出来た。

今期の運転スケジュールの最後の数日はクラブ空洞をデイチューンした状態での大電流モードでの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、LER1.7A、HER1.35A で安定に運転することが出来た。この大電流モードでの運転で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は予想値とほぼ一致し、それぞれ約 10kW と 2kW で、安定に運転されている。

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、空洞および同軸部は安定に冷却され、6 月末までの約 5 ヶ月間、運転することが出来た。

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、多くの開発すべき項目があった。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ない。

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出来たのは、KEK およ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、これらの多くの人たちからの温かい支援に感謝する。