「加速器」Vol. 6, No. 1, 2009 (54–57)

特集2　KEKB Bファクトリーのコミッショニング

RFシステムの立ち上げ

赤井　和憲*

Commissioning of RF System

Kazunori AKAI*

1.　RFシステムの開発と建設

設計ビーム電流がLER　2.6 A，HER　1.1 Aと，TRISTANより2桁高いKEKBは，RFシステムにいくつかの大きな課題を与えた．第一は，加速モードに起因する強烈な縦方向結合バンチビーム不安定の問題である．リング型加速器を周回するビームは高周波加速に対してリアクティブ成分のビーム負荷をもつため，一般に加速空洞の共振周波数をずらしてビーム負荷にマッチングさせるが，リング周長が長く蓄積ビーム電流が高いKEKBでは，この離調が相対的に大きくなり，ビーム不安定をもたらす．その対策としてKEKでは1990年代初め頃からARES型常伝導空洞[1]，およびシングルセル超伝導空洞[2]の開発を行った．ARES空洞は加速空洞を，結合空洞を介してQ値の高い貯蔵空洞と連結させる，KEK独自のシステムである．一方の超伝導空洞は加速電圧が高く，両者とも空洞内の貯蔵エネルギーが高いので離調量が減る．この点，従来型の常伝導空洞を用いてフィードバックを頼りに不安定性を抑え込むPEP–IIの方式とは本質的に異なる．第二は，空洞の高次モードに起因する結合バンチビーム不安定性である．その対策として，ARES空洞，超伝導空洞のいずれも，高次モードを強く減衰させる構造を採用してインピーダンスを低減した．第三は，8～17 MVの比較的低い加速電圧で，4 MW程度のビームパワーを供給するので，それぞれのRFステーションが1 MW近くの高いRFパワーをハンドリングする必要がある事である．

ARES空洞と超伝導空洞が大電流ビームで安定に運転できるかどうかを検証するために，量産工程に入る前の1996年に試験空洞をTRISTAN–ARリングにインストールして，3回に分けて合計11週間の試験を行った．最初の2回の試験では，超伝導空洞はトリップ（空洞内やカプラー付近での放電，超伝導の破壊などの現象）が頻繁に発生して，安定な運転に支障があった．しかし，空洞周辺に真空ポンプを増強し，真空度を改善させて臨んだ最後の試験では，非常に安定であった．最終的にビーム電流573 mAの蓄積に成功し，ARES空洞，超伝導空洞ともに満足できる性能が確認された．

ARビーム試験の成功を受けて空洞の選択について検討し，ビーム負荷がより大きいLERはARES空洞のシステムを，RF電圧がより高いHERは超伝導空洞とARES空洞を併用するハイブリッドシステムを採用した．HERをハイブリッドとした理由は，(1)両空洞間に約10°の位相差をつけることにより，約半分のビーム負荷をARES空洞が分担し，電圧の大部分を超伝導空洞が担って，両者のメリットを生かせる．(2)TRISTANで運用した日光直線部の大型冷凍機等を有効利用できる．さらに，(3)万一，超伝導空洞がトリップで運転不能に陥った場合でも，ARES空洞だけで小電流のビームを回してコミッショニングする可能性を残す，等であった．

加速空洞にRFパワーを供給する508.9 MHz，1.2 MW連続波のクライストロンおよびその高圧電源，ハイパワー機器と冷却系，ローレベルRF制御システムについては，TRISTANから継承した機器をベースにして，KEKBの厳しい要求に応えるために安定性，信頼性を高めるとともに，制御精度向上のための改良を加え，さらに大電流ビーム負荷へのいくつかの新しい対策を導入した[3]．

最先端加速器を建設する場合の常であろうが，いろいろな問題に遭遇してそれを解決しながら，またスケジュールに追われながら，グループのメンバー，メー

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

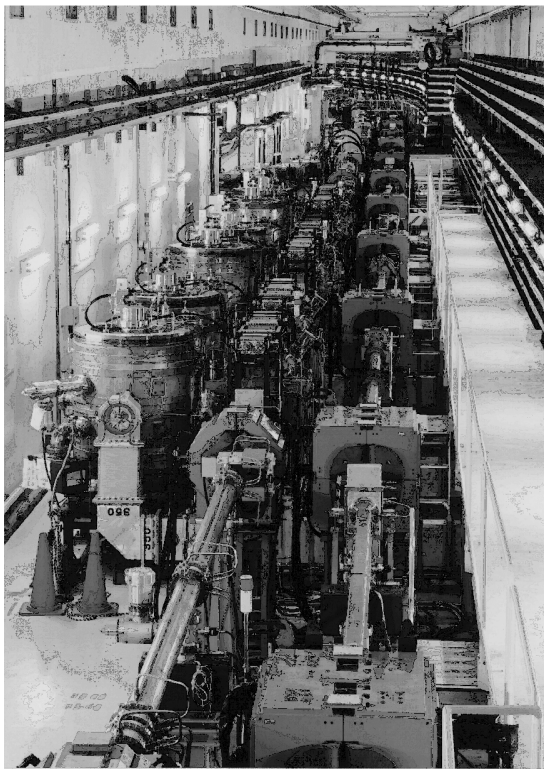

図 1　富士直線部の ARES 空洞.

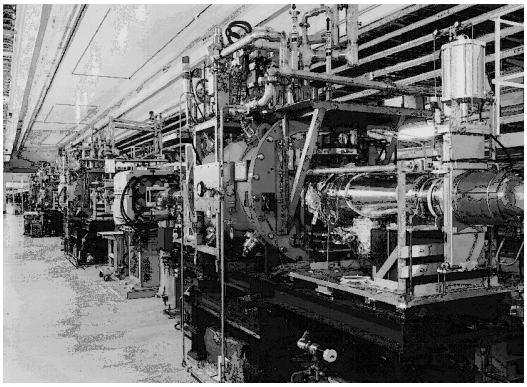

図 2　日光直線部の超伝導空洞.

カーや業者が協力して RF システムの建設・立ち上げ作業を行い，無事コミッショニングに間に合わせることができた．富士直線部トンネルにインストールされた ARES 空洞を**図 1** に，日光直線部の超伝導空洞を**図 2** に示す．

2.　コミッショニングおよび長期間の運転

1998 年 12 月にコミッショニングを開始し，ハードウェアおよびビームの調整を重ねながら，ビーム電流を徐々に増加させた．ビームに供給する RF パワーはビーム電流にほぼ比例するので，ビーム電流に見合った台数の RF ステーションが必要である．まず約半数の RF ステーションで運転を開始し，その後ほぼ毎年ステーションを増設して，2003 年には全ステーションが揃い，設計最大電流まで蓄積できる RF システムが完成した．ただし，LER は電子雲によるビーム不安定の問題のため，通常は設計値より低い 1.8 A 程度で運転している．加速器スタディにおいては，最大 2.0 A まで蓄積して，問題ないことを確認した．

一方，HER は設計値 1.1 A を超えて電流を増やせばルミノシティが増加する見通しが得られたので，電流増強のための改造を行った．まず超伝導空洞のカプラーの突き出し量を調整して負荷 Q 値を下げ，より大電流にマッチングさせるとともに，ドアノブ部の冷却を強化することで，空洞あたりのビームパワーを設計値の 250 kW から 400 kW 程度まで上げた．また，HOM ダンパー冷却システムを改造して冷却能力を高めた．さらに，RF ステーションを増設して，クライストロン 1 台で ARES 空洞 2 台をドライブするシステムから，2 ステーションだけではあるが，クライストロンと空洞 1 対 1 のシステムに変更した．これらの改造により，HER ビーム電流は設計値 1.1 A を上回る 1.4 A に到達し，ルミノシティ増加に大きく寄与した．

表 1 に RF 関連のパラメータの設計値とこれまでの実績値を示す．蓄積ビーム電流および空洞あたりのビームパワーは，超伝導空洞としては世界最高である．HOM ダンパで吸収される HOM パワーは設計値の 3 倍程度と高い．その理由は，設計ではバンチを全 RF バケットまたは 2 バケット毎につめると想定されていたが，実際には 3 ないし 4 バケット毎と，少ないバンチ数で運転しており，バンチ電荷が大きくなっているからである．このため，HOM ダンパとしては想定以上のパワー領域に入っているが，2004 年 D11–A 空洞のダンパの溶接箇所にリークが発生して交換したトラブル以外は，問題は生じていない．ARES 空洞は，初期には後述するいくつかのトラブルがあったが，それらを克服して安定な運転を続けてきた．特に，ビーム電流が設計値より低い LER では性能にまだ余裕がある．クライストロンおよび電源，ハイパワー系，ローレベル制御系なども，機器の老朽化による故障等は時折発生するが，総じて高い信頼性で安定に運転してきた．

クラブ空洞用 RF システムの建設を 2004 年度に開始し，日光直線部の超伝導空洞システムに隣接して HER 用，LER 用各 1 基の RF ステーションを設置した．2007 年 1 月にはクラブ空洞がトンネルにインス

表1　RF関係の主要なパラメータの到達値
（カッコ内は設計値）

	LER ARES	HER	
		ARES	SCC
ビーム電流（A）	2.0 (2.6)	1.4 (1.1)	
運転RF電圧（MV）	8 (5～10)	13～15 (10～18)	
空洞台数	20 (20)	12 (12)	8 (8)
クライストロン本数	10 (10)	7 (6)	8 (8)
運転電圧/空洞あたり（MV） 最大電圧	0.4 0.55 (0.5)	0.31 0.475 (0.5)	1.24 ＞2.2 (1.5)
全ビームパワー（MW）	3.3 (4.5)	5.0 (4.0)	
ビームパワー/空洞（kW）	170 (225)	170 (170)	380 (250)
HOMパワー/空洞（kW）	6		15 (5)

トールされ，2月からクラブ衝突試験を開始した．同年秋から現在にいたるまで，実用運転（物理ラン）をクラブ衝突で行っている．

3.　コミッショニング初期に発生したトラブルと対策

運転開始後数年間は，ビーム電流が増加するにつれてさまざまなトラブルに遭遇した．担当者は原因調査と復旧作業に追われながら，対策と改良を重ねて多くの問題を解決してきた．その結果，2003年頃からは運転を長時間止めるようなトラブルは少なくなった．ここでは初期の数年間に経験したトラブルから，単純な故障などは別にして，我々に少なからぬ教訓を残してくれたものの中から，いくつかを紹介する．

3.1　ARES空洞入力カプラー故障

2000年1月にD7–D#2空洞のカプラー大気側ドアノブ型変換器の焼損，同年11月にD5–C#2空洞のカプラー大気側の放電によるセラミック窓のリークと，故障が2件発生した．セラミック窓の真空側のみに装備していた放電検出用アークセンサーを大気側にも追加したが，翌年10月にもD7–B#1空洞カプラーが放電でリークした．この事故の時は，RFスイッチオフ後も蓄積ビームからの誘起電力によって放電が持続して，被害が拡大した．1ステーションがトリップしても，あわよくば残りのステーションでビームを保持して入射に要する時間を節約したいとの考えが，裏目に出たかたちとなった．これ以降は，アーク検出時には無条件でビームをアボートするようにした．

3.2　カプラー冷却水系の腐蝕

入力カプラーの内軸やセラミック窓等の冷却は，ARES空洞本体の水冷とは別の，チラーを用いた低圧水独立系統で行っている．この冷却系のポンプやバルブ部品に腐蝕による詰まりや漏れが多発した．SUS製部品への交換等を進めていたが，2001年1月にはD4–C#2空洞で内軸の冷却水路からの漏れが原因の真空リークが発生した．調査の結果，セラミックロウ付け治具のモリブデンワイヤーが冷却水中に溶け出し，液が酸性化して銅や亜鉛が溶け出ることが原因と判明した．その後は空洞の冷却水に使用している鉄用の防錆剤をpH緩衝剤として使用することにより，pH管理を徹底して腐蝕を防げるようになった．

3.3　ARES空洞の結合空洞部

結合空洞に取り付けている，寄生モードを外部に取り出すダンパーの同軸部の焼損事故が2001年春に3件相次いだ．原因は，RFパワーを終端する40 kWダミーロードにRF接触不良や水漏れが発生し，ロードが終端として機能せず，反射波が同軸部に戻って過大なパワーが発生したためであった．また，一部の空洞では同軸部のコンタクト面固定方法に欠陥があり，使用しているネジも弱いことがわかった．40 kWダミーロードのRF接触の改良，インターロックの増強，同軸部の改善等の対策を講じ，同種の事故はその後起きなくなった．

また，加速・結合空洞部を貯蔵空洞と接続する連結フランジ部には，当初RFコンタクト面の外側に真空封じ用としてバイトンOリングを使用していた．これは，空洞重故障の際，加速・結合空洞部と貯蔵空洞を容易に分離してトンネルから搬出するための応急の策であった．しかしながら，放電によるOリング焼損での真空悪化（1999年4月，D8–C#1空洞），連結フランジ部からと見られる圧力バーストがたびたび発生した．一方，加速・結合空洞部と貯蔵空洞の各々については，幸い致命的な問題もなく，性能的にも安定し，重故障での空洞搬出の懸念もなくなった．よって，連結フランジ部の真空気密については，周囲のステンレス鋼製の薄肉の鍔を突き合わせてTIG溶接にて真空気密を確保するという，当初の設計仕様通りの真空気密構造に移行すべく，溶接工事を前倒しでシャ

ットダウン時に順次行った．

3.4 D10 側超伝導空洞インストール直後のトリップ多発

1998 年秋から稼働した D11 側 4 台の超伝導空洞は安定であったが，2000 年夏にインストールした D10 側 4 台は，運転開始後にトリップが多発した．インストール直後のまだ真空度の良くない状態でいきなり 500 mA 程度のビームにさらされたことが，D11 側空洞に比較して過酷な条件だったようだ．しかし，真空度は一ヶ月ほどで改善し，トリップ率も D11 側と同程度まで減った．この立ち上げ時期を除いて長年安定な運転を続け，8 台の空洞の合計のトリップ率は平均して数日に 1 回程度である．バイアスを用いたカップラーの常温エージングやメインテナンス時の空洞のパルスエージングも性能維持に貢献している．

3.5 超伝導空洞のピックアップコネクタ故障

D10 側空洞の運転を開始してほどなく，D10-C，D2 台の空洞のピックアップ信号が正常にモニタできなくなった．クライオスタット内部でケーブルを接続するコネクタの絶縁体は，それまでの架橋ポリエチレン製から PEEK 材に変更していた．その際コネクタの構造も変わり，内導体の収縮に対してストッパー機能をもつ低温仕様でないものになっていたため，低温で収縮して導通不良となった．空洞をディチューンして一時運転から外したが，PEEK 材低温仕様コネクタを開発して，次の冬期シャットダウン時に全数を交換した．

3.6 RF トリップ時のビーム直撃

ビーム電流が 1 A に近づいた 2001 年 1 月末ごろ，突如 HER が入射困難になった．バンプ軌道を作って調べると，可動マスク部に物理的障害があるようにみられた．マスクを点検すると，ヘッド部に深さ 2～3 mm，幅 3～4 mm，長さ数 cm 以上の大きな溝が複数掘られており，はがれた部分が垂れ下がっていた．数日前に RF クライストロン電源がトリップしてビームをロスした時にマスク部の真空圧力が大きく跳ねていたので，この時にビームがマスクを直撃したらしい．その後も同様の事象がしばしば発生し，マスクヘッドの交換を行った．また，RF トリップ時にしばしば Belle 検出器に大量の放射線が飛び込んだ．1 回のトリップで最大 5 kRad 浴びることもあった．シリコンバーテックス検出器（SVD）を劣化させるため，これも大きな問題であった．

RF のインターロック信号からビームアボートシステムにトリガが出てビームが捨てられるが，ビームの位相とエネルギーが激しく変化して不安定になり，ビームがアボートされるよりも早く機器を直撃していた．対策として，(1)従来のアボートトリガに加えて，ビームの位相変化を検出してトリガするシステムを導入した，(2)アボート信号ラインの応答を速くした，(3)マスクヘッドの材質が銅からチタンに変更された（真空グループ）．これらの改良を行った結果，ほとんど問題は生じなくなった[4]．

3.7 縦方向の振動

初めに述べたように，ARES 空洞と超伝導空洞は加速モードに起因する縦方向結合バンチ不安定を抑制するが，それでもビーム電流が 1 A を超えたあたりから−1 モードの結合バンチ不安定が発生し，それ以上電流を上げられなくなった．設計値より低い電圧で運転していることや，個々の空洞の運転条件にばらつきがあることで，不安定のしきい値が下がったと考えられる．この問題に備えて既に開発していた，選択的に−1 モード振動を抑えるフィードバックを新たに導入した結果，この振動を抑えて，電流を大幅に増やすことができた[5]．

このほか，振幅 ± 0.1～0.2°程度のゼロモードのシンクロトロン振動も観測された．ビーム電流によらなかったので，RF システムの何らかのノイズが原因と考えられた．対策として，シンクロトロン振動成分のビーム位相変動を検出してリング全体の RF 位相にフィードバックをかける，ゼロモード振動ダンパーを導入して，振動を 10 dB 程度低減することができた．

4. おわりに

運転初期の数年間にはそれまで我々が経験したことのないトラブルにいくつも遭遇したが，それらを克服して，設計値以上の性能で安定な運転が続けられるようになった．トラブルの原因調査，復旧作業，対策や改良を重ねる過程では，大電流ビーム加速器の RF システムについての貴重な経験が得られた．現在，SuperKEKB に向けてさらに性能を上げるべく開発を進めているところであるが，KEKB 運転での経験は大きな財産となっている．

参考文献

1) Y. Yamazaki and T. Kageyama, *Part. Accel.*, **44**, p. 107 (1994).
2) S. Mitsunobu et al., Proc. 6th Workshop on SCRF, p. 1176 (1993).
3) K. Akai et al., *Nucl. Instr. Methods*, **A 499**, p. 45 (2003).
4) K. Akai et al., Proc. EPAC 2002, p. 2112.
5) S. Yoshimoto, et al., Proc. 14th Symp. Accel. Sci. and Tech. 2003; KEK Preprint 2003-72.