

RF SYSTEM FOR SUPERKEKB

Kazunori Akai, Tetsuo Abe, Kiyokazu Ebihara, Masaaki Ono, Tatsuya Kageyama, Atsushi Kabe, Hiroshi Sakai, Susumu Takano, Yasunao Takeuchi, Kota Nakanishi, Michiru Nishiwaki, Takaaki Furuya, Katsumi Marutsuka, Shinji Mitsunobu, Yoshiyuki Morita, Masato Yoshida, Kazuo Yoshino, Shin-ichi Yoshimoto
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The operation of present KEKB ended in June 30, 2010, and the upgrade project started. Final goal of the upgrade, SuperKEKB, targets 40 times higher luminosity, based on the nano-beam scheme with twice beam currents in the LER and HER. To increase the beam current and beam power, the KEKB RF system needs to be modified and improved. The ARES cavities will be rearranged and more klystrons be added so that more beam power can be provided by the cavities. Various RF components such as HOM dampers, input couplers as well as low-level RF control system are to be improved to cope with the increased beam current.

SuperKEKB の高周波システム

1. はじめに

電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器 KEKB は、1998 年 12 月のコミッション開始以来これまで運転を続け、大量の B 中間子対を生成してきた。ピーク luminosities は設計値の 2 倍を超えて $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に、積分 luminosities は 1040 fb^{-1} に、それぞれ達した^{[1], [2]}。これらはいずれも世界最高記録である。現行 KEKB はプロジェクトの目的を達成し、2010 年 6 月 30 日に 11 年半におよぶ運転を終了して、衝突性能をさらに高めるための高度化の改造に着手した^[3]。

高度化の最終目標である SuperKEKB はナノビーム方式を採用し、衝突点ビームサイズを $50 \sim 60 \text{ nm}$ まで絞り (KEKB は $1 \mu\text{m}$)、かつビーム電流を KEKB の 2 倍に増強することで、KEKB の到達した luminosities の 40 倍、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指す。リングの大規模な改造と入射器の増強を行うほか、入射陽電子ビームのエミッタンスを下げるためのダンピングリングを新設する^[4]。

RF システムは SuperKEKB に向けて、ARES 空洞、超伝導空洞 (SC)、クライストロンおよび電源など、KEKB の既存の機器を可能な限り再利用しつつ、ビーム電流の増強をはじめとする、新しいビームパラメータからの諸要求を満たすために必要な改造を行う。本論文では、まず KEKB の RF システムについて簡単にまとめ、次に SuperKEKB のためのシステム改造および機器の改良について述べる。

2. KEKB-RF システム

2.1 システム構成

KEKB の高周波システムは 32 台の ARES 型常伝導加速空洞 (陽電子リング(LER)に 20 台、電子リング(HER)に 12 台) および HER 用 8 台の超伝導加速

空洞、そしてこれらの空洞に RF を供給するハイパワー RF システム (HPRF) とローレベル RF 制御システム (LLRF) から構成されている^[5]。

ARES 空洞は、加速空洞に電磁場エネルギー貯蔵空洞を結合空洞経由で共鳴的に結合させた $\pi/2$ モード三空洞系である^[6]。図 1 に現行 ARES 空洞^[7]の構造、及び等価な連成振子系を示す。加速・貯蔵の二空洞間の電磁場振幅・位相の相対関係は所謂 $\pi/2$ モード安定化機構のお陰で加速空洞に対する大電流ビーム負荷由来の一次の摂動を受けない。大型円筒 (内径 $1.1 \text{ m} \times$ 軸長 1.2 m) の貯蔵空洞は低損失高 Q 値なる TE_{013} モードにて電磁場エネルギーを貯え、所謂、原動機の回転を安定化させる「はずみ車」の如く機能する。

加速空洞の上下各側面に 2 本ずつ、計 4 本の高次モード減衰用の扁平矩形導波管 (図 1 の HOM WG)、そして軸方向前後の両端板各々には上下に溝を配した溝付ビームパイプ (Grooved Beam Pipe) が備えられている。各矩形導波管終端部には 2 本の砲弾形炭化ケイ素電波吸収体が、溝付ビームパイプにおいては各溝に 8 枚の炭化ケイ素タイルがそれぞれ配置され、高次モードパワーを吸収する^[8]。

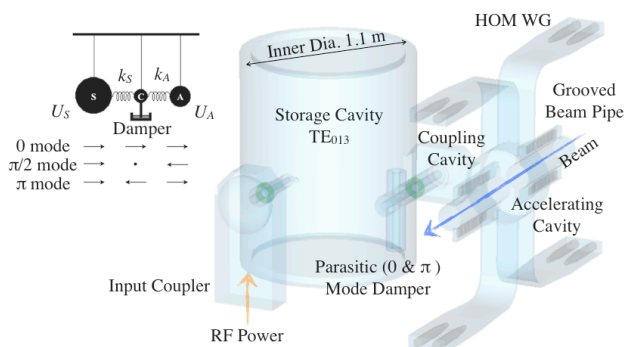


図 1 : ARES 空洞構造系と等価な連成振子系

KEKB 超伝導空洞は大電流用に開発したシングルセルのニオブ製空洞である^[9] (図2)。片側のビームパイプ径は 300φ の大口径であり (他方は 220φ)、最低次のダイポールモード周波数よりも低いカットオフを持ち、このモードを含めてすべての寄生モードが両側のビームパイプから取り出される。ビームパイプには、フェライト粉末を銅のパイプに高温高压で焼結 (HIP 製法) させた HOM 吸収体が装着され、高次モードパワーを吸収する。

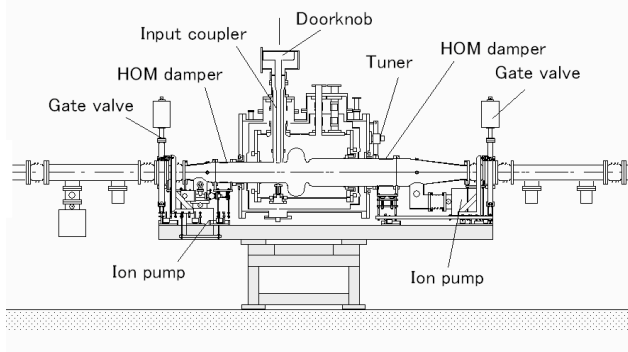


図2：KEKB 超伝導加速空洞

ARES 空洞は貯蔵空洞と結合することで、また超伝導空洞は高い運転電圧によって、いずれも空洞内に高い電磁場エネルギーが貯蔵される。これにより、ビーム負荷のリアクティブ成分を補償するための離調周波数が、PEP-II 等で使用された通常の常伝導空洞に比較して一桁程度に減少し、加速モードに起因する -1 モード縦方向結合バンチ不安定が十分に抑制される。

HPRF と LLRF は TRISTAN 加速器の機器を受け継いだものをベースにして、クライストロンのアノードネガティブスパイク現象の原因究明と対策^[10]、クライストロン電源のノイズによるクローバー回路誤動作への対策、ビーム負荷に対する制御性の向上や保護機構の改良^[11]など、各種の改良を行った。

2.2 運転状況

1998 年の加速器コミッショニング開始以来 2～3 年程度の運転初期には、ビーム電流を次第に高めていく過程で、主として放射光やウェーク電磁場に起因するいくつかの問題が発生した。放電や発熱等の発生箇所の改良、インターロックやビームアポート等の保護機構の改良などを行った結果、2002 年頃からは重大なトラブルは少なくなった^[12]。その後もビーム電流をさらに高め、LER 1.6～1.8A、HER 1.1～1.4A で物理ランのための運転を長期間安定に続けた。2006 年頃以降の統計によると、RF システムが原因のビームアポートの発生頻度は 1 日あたり平均 1 回程度と、システム全体として良好な安定性を示している^[13]。

表1に RF 関連主要パラメータの KEKB での運転実績を示す。LER は電子雲によるビームサイズ増大のため通常 1.8A 以下で運転してきたが、加速器スタディでは最大 2A まで蓄積試験を行ない、ARES

空洞を含めた RF システムに問題ないことを確認した。HER は RF ステーションを増強して、設計値 1.1A を超えて最大 1.4A まで蓄積した。KEKB 超伝導空洞は、超伝導空洞としては世界最高の蓄積ビーム電流およびビームパワーである。この高い性能と安定な運転実績が評価され、KEKB 型超伝導空洞は中国 BEPC-II に導入されたほか、台湾放射光リングの改造計画においても導入されることが決定した。

表1：RF 関連主要パラメータの KEKB 運転実績

| | | LER | HER | |
|---------------------------|-----|---------|-------|------|
| Beam energy | GeV | 3.5 | 8.0 | |
| Beam current | A | 2.0 | 1.4 | |
| RF frequency | MHz | 508.887 | | |
| Operating voltage | MV | 8.0 | 13-15 | |
| Cavity type | | ARES | ARES | SC |
| Number of cavities | | 20 | 12 | 8 |
| Number of klystrons | | 10 | 7 | 8 |
| Operating voltage /cavity | MV | 0.4 | 0.31 | 1.2 |
| Max. voltage /cavity | MW | 0.55 | 0.475 | >2.2 |
| Total beam power | MW | 3.3 | 5.0 | |
| Beam power /cavity | kW | 170 | 170 | 380 |
| HOM power /cavity | kW | ~6 | | ~15 |

3. SuperKEKB の RF システム構成

3.1 ビームパラメータからの要求

RF に関係する主要なビームパラメータについて、KEKB の Physics Run での実績と SuperKEKB の設計値との比較を表2に示す。ビーム電流は LER 3.6A、HER 2.6A で、いずれも KEKB の約2倍である。また、LER のビームパワーが約 9MW と、KEKB の3倍増となる。HER のビームパワーは LER よりは低い、KEKB に比較すると大きい。一方、要求される RF 電圧は KEKB と同程度か、あるいはむしろ低い。これらの結果、以下に述べるように、ビーム負荷に起因する諸問題への対応が必要となる。

表2：SuperKEKB の主要ビームパラメータ

| Parameter | unit | KEKB (Physics Run) | | SuperKEKB (Design) | |
|--------------|-------|--------------------|------|--------------------|------|
| | | LER | HER | LER | HER |
| Beam energy | GeV | 3.5 | 8.0 | 4.0 | 7.0 |
| ϵ_x | nm | 18 | 24 | 3.2 | 5.0 |
| β_y^* | mm | 5.9 | 5.9 | 0.27 | 0.31 |
| Beam current | A | 1.8 | 1.4 | 3.6 | 2.6 |
| Beam power | MW | 3.5 | 5.0 | 9.3 | 6.5 |
| RF voltage | MV | 8.0 | 13.0 | 9.6 | 12.0 |
| Bunch length | mm | 7 | 7 | 6 | 5 |
| Luminosity | /nb/s | 21 | | 800 | |

3.2 ARES 空洞の 1 対 1 化、RF ステーション増設および配置変更

低い RF 電圧で高いビームパワーを供給する場合、各空洞でビーム負荷に整合させるための最適な入力結合度が大きくなる。現在の ARES 空洞の入力結合

度は最大 $\beta=3$ 程度であるが、KEKB の RF システムをそのまま使用する場合には、 $\beta=10$ 程度への変更が必要になる。しかし、電磁場計算や熱計算の結果、これは実現困難であることがわかった。

KEKB で使用しているクライストロンの最大定格は 1.2MW であるが、出力 800kW 程度での運転を想定している。その理由は、(1) 現在のクライストロン電源を改造せずに使用できる、(2) 導波管やサーキュレータ等のハイパワーシステムも基本的に現在のものが使用できる、(3) クライストロンの飽和領域に対して余裕を持ち、大電流ビーム負荷のもとで、安定な制御性を確保するためである。

これらの点を考慮し、SuperKEKB に最適化した RF システムとするために、ARES 空洞の RF ステーションについては、大幅な配置換えを含むシステム変更を行う。KEKB では一部例外を除いて、各クラ

イストロンが空洞 2 台をドライブしているが、空洞 1 台をドライブするシステムに変更することで、各空洞からビームに供給されるパワーが 200kW から 550kW 程度に増加する。このため、クライストロンおよび HPRF、LLRF から構成される地上部 RF ステーションを増設するとともに、一部の ARES 空洞を撤去する。また、現在 HER 用の大穂ステーションの内、半数にあたる ARES 空洞 6 台分を移設して LER 用に転化する。クライストロンと 1 : 1 化する ARES 空洞の入力結合度は $\beta=6$ 程度に高める必要があるが、これについては後述する。

なお、これらの改造のうち一部は、ビーム運転開始後に行うことを想定している。各直線部のクライストロン本数と空洞台数について、建設期間中の配置変更の概要および SuperKEKB 運転開始時と最終形の計画を表 3 にまとめた。

表 3 : RF ステーション増強と配置変更 (クライストロン本数/空洞台数 : S は超伝導空洞)

| 設置場所 | | KEKB | | 建設期間中の配置変更 | SuperKEKB 運転開始時 | | SuperKEKB 最終形 | |
|--------------|-----|-------|------|--|--------------------|-------|------------------|-------|
| 直線部 | 側室 | LER | HER | | LER | HER | LER | HER |
| 大穂 | D4 | | 3/6 | add 3 klystrons | | 6/6 | | 6/6 |
| | D5 | | 4/6 | add 2 klystrons, convert from HER to LER | 6/6 | | 6/6 | |
| 富士 | D7 | 5/10 | | remove 2 ARES | 5/8 | | 6/8 | |
| | D8 | 5/10 | | remove 2 ARES | 5/8 | | 6/8 | |
| 日光 | D11 | | | | | | (注 2) | |
| Total (ARES) | | 10/20 | 7/12 | add 5 klystrons in total, remove 4 ARES in total | 16/22 | 6/6 | 18/22 | 6/6 |
| 日光 | D10 | | 4/4S | | | 4/4S | | 4/4S |
| | D11 | | 4/4S | | | 4/4S | | 4/4S |
| Total (SC) | | | 8/8S | | | 8/8S | | 8/8S |
| 最大電流 (注 1) | | | | | 3.0 A | 2.6 A | 3.6 A | 2.6 A |

(注 1) クライストロン 1 台あたりビームに供給する最大パワーを ARES 1:1 ステーションは 550kW、1:2 ステーションは 400kW、SCC は 400kW とし、最大電流の目安とした。

(注 2) LER または HER で設計値を超えるビーム電流が必要になった場合、オプションとして D11 に ARES 空洞 2 ステーションの増設が可能である。

3.3 超伝導空洞の逆転位相運転

ナノビーム設計は当初、HER の水平方向エミッタンスを 2nm 程度まで絞ることとし、オプティクスから要求される RF 電圧が KEBK の半分、約 6MV 程度であった。一方、ビームエネルギーは KEBK と同じ 8.0GeV で、HER のビームパワーが約 9MW と高かった。この結果、超伝導空洞の運転電圧が空洞当たり 0.5MV 程度と非常に低く、大きな問題を抱えていた。第一に、離調周波数が周回周波数と同程度に大きくなるので、加速モードに起因する -1 モード不安定が深刻である。この問題の解決が KEBK での ARES 空洞や超伝導空洞の採用の本質であったが、この不安定を抑えられないのでは、その意味がなくなる。第二に、入力カプラーの空洞への突き出し量が大きくして、負荷 Q 値を 1×10^4 程度と、現在の 5 分の 1 程度に下げることが生じる。交換作業にともなう空洞表面の汚染などのリスクがある。

そこで、逆転位相運転の導入を検討した。図 3 のように、一部の空洞の位相を他の空洞に対して、平衡位相角 ϕ_s の 2 倍ずらして (reverse phase) 運転することで、各空洞の運転電圧は高く保持しつつ、ベ

クトル和としての全 RF 電圧を低くすることができる。なお、ビームパワーは正位相、逆位相を問わず全空洞で均等に負担するので、高いビームパワーを供給できる。

2009 年度の運転でビームスタディを行ない、この方式を検証した。まず、RF 電圧やビーム負荷が原理通りであることを、バンチ長、シンクロトロンチューン、ビームパワーの測定によって確認した。次に、大電流を蓄積した状態で 1 台の空洞をトリップさせる実験を行った。この目的は、ビーム負荷のトランジェントな変動が逆転位相空洞の電圧を上昇させ、クエンチを引き起こす可能性があるため、その挙動を観測するためである。測定結果は計算による予測と一致した^[14]。SuperKEKB ではこの電圧変動が 0.3MV 程度であり、許容範囲である。最後に、逆転位相運転の状態での通常物理ランを 6 日間行い、問題なく、安定に運転できることを確認した。逆転位相空洞のビーム供給パワーは、ビーム電流 1.2A のとき 300kW であった。

なお、最近のナノビーム設計の進展により、RF 電圧が 12MV と高くなったこと、およびビームエネルギーが 7GeV に下がりビームパワーが減少したこ

とにより、現在の設計パラメータでは、逆転位相運転は必要なくなった。しかし、この運転方式が実現可能であることを検証したので、オプションとして、必要に応じて随時導入できる。

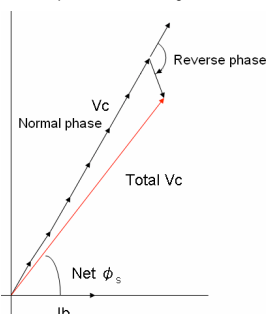


図3：逆転位相運転のベクトル図

4. RF 機器の改造

4.1 ARES 空洞

加速空洞に対する貯蔵空洞のエネルギー比 U_s/U_A は、結合空洞両側の磁気誘導結合孔の大きさを調整することにより変更できる。ナノビーム方式を採用する以前の大電流ビーム方式においては、10 A 近いビームの下で加速モード起因の結合バンチ不安定を抑制すべく、エネルギー比 U_s/U_A を現行 ARES 空洞の 9 から約 15 まで増やす案が検討された^[15]。しかし、ナノビーム方式に替わり、現行のままでも、加速モード ($\pi/2$ モード) に起因する結合バンチ不安定、そして加速モード両側にはほぼ左右対称に位置する二つの寄生モード (0 モードと π モード。両モードとも結合空洞に備えられた減衰器により負荷 Q 値 100 あたりまで減衰済) のインピーダンス不均衡に起因する結合バンチ不安定^[15]についても、前者は RF フィードバック系、後者は Bunch-by-Bunch フィードバック系の併用で、抑制可能となる。

導波管および溝付きビームパイプの、二種類の高次モード減衰器について、吸収電力に係わる実績 (KEKB LER)、予想値 (SuperKEKB LER)、及び許容値 (テストスタンド実験に基づく) を表 4 にまとめた。空洞 1 台あたりの吸収電力は KEBK では 6 kW 弱であったが、SuperKEKB では約 17 kW と、およそ 3 倍に増える。直接冷却方式の砲弾形吸収体を使用している矩形導波管については、導波管あたりの許容値 5.0 kW に対して予想値は 3.3 kW と余裕がある。一方、間接冷却方式のタイルを配した溝付ビームパイプについては、溝当たりの許容値 1.0 kW に対して 0.93 kW と余裕は 1 割弱である。将来の電流増に備えて、現行溝付ビームパイプを直接冷却方式の砲弾形吸収体を溝に装填した翼形チェンバー^[15]に換装する方向で開発が進められている^[16]。

今回の高度化計画で最も厳しい性能増強が求められるのは入力カプラである。現行カプラについては、地上テストスタンドにおいて 800kW 以上の給電性能が既に確認されているが、高度化に向けてさらに二つの改造を施した。第一は、同軸の直管部でのマ

ルチパクタ放電 (カプラ 32 台中 2 台においてマルチパクタ放電により給電電力が制限される事例があった) を完全に抑制すべく、外導体内面に微細な溝を周方向に切る改造である^[17]。第二は、空洞あたりのビームパワー 550 kW に対応すべく、カプラ結合度の現行値 3 強から最大 6 への増強である。昨年度、結合ループの高さを 17 ミリから 60 ミリに延長して最大結合度 8 とした結合度増強型カプラを製造した。当該カプラは、上記テストスタンドでの給電電力 800 kW までの RF コンディショニングの後、D5C ステーション (既に 1 対 1 化済み) の ARES 空洞に結合度 6.4 (冷間時) にて取り付けられた。そして、1 ヶ月余りの入念なるビームコンディショニングを経て、空洞電圧 0.47MV ($P_c = 130$ kW) にてビームへの供給電力 640 kW、カプラ 1 台での給電電力 770 kW の実証運転に成功した。現在、当該カプラをベースに量産にむけての細部の詰めを進めている^[18]。

表 4：ARES 空洞の HOM 吸収電力実績値、予想値及び許容値

| | KEKB 実績 | Super- KEKB | 許容 値 |
|----------------------------|-------------------|----------------|---------|
| Beam current (A) | 1.6 | 3.6 | |
| Number of bunches | 1293 | 2503 | |
| Bunch length (mm) | 7 | 6 | |
| Loss factor /cavity (V/pC) | 0.40 | 0.44 | |
| HOM power /cavity (kW) | 5.4 [†] | 17 | |
| HOM power /WG (kW) | 1.05 [†] | 3.3 | 5.0 |
| HOM power /groove (kW) | 0.3 [†] | 0.93 | 1.0 |

[†] calorimetric measurement

4.2 超伝導空洞

SuperKEKB ではビーム電流が 2 倍に増え、かつバンチ長が 6mm から 5mm と短くなるため、空洞内で発生する HOM パワーは KEBK 運転時の 2 倍以上の 32kW になる。さらに、フェライト吸収体自身のロスファクタによる発熱も加わり、小口径ダンパーは 20kW、大口径ダンパーは 26kW もの HOM パワーを吸収する必要がある。そこで、フェライト表面の温度上昇と、それに伴うガス放出が問題となる。フェライトは熱伝導率が小さく、26kW のパワー吸収時に表面温度は 180°C に達する。放出されたガスは空洞表面に凝縮、付着して、放電を起こす頻度が高くなる。安定な運転を行うためにフェライト表面温度を下げるのが重要であり、1) フェライトの厚さをこれまでの 4mm から 3mm に薄くして、熱伝導性を良くする、2) 冷却水路の銅パイプを 2 重の構造にして冷却効率を上げるなどの改良を行っている。2006 年より新型ダンパーの試作を行い、2009 年には 3mm 厚フェライト、2 重冷却構造の SuperKEKB 用 HOM ダンパー 1 セットが完成した^[14]。現在、ハイパワー吸収試験を行い、その性能評価を行っている。図 4 に試作した大口径フェライトダンパーを示す。

入力カプラについては、ビームに供給する RF

パワーが 400kW と、KEKB の通常運転より 1~2 割程度増えるが、最大 400kW でのビーム運転実績もある。マルチパッキング放電、ドアノブ変換器の温度上昇などについても、特に問題なく、このパワーでの運転に十分対応できる^[19]。

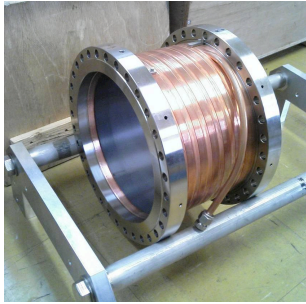


図 4 : 試作が完了した SuperKEKB 用 3mm 厚フェライト大口徑 HOM ダンパー

このほか、SuperKEKB に向けて、横型高圧水洗装置の開発や新規電界研磨設備の導入などを行っている。横型高圧水洗装置は、長期間運転や真空作業時のトラブルによって導入される塵などによる空洞性能劣化を回復させるために、空洞をクライオスタット内に装着されたままで高圧水洗を行う装置である^[20]。新規電界研磨設備は、老朽化した既存設備に代えて KEK 内に建設した。試験空洞を用いた試験研磨が進行中であり、空洞の性能測定試験を行って、電界研磨装置の健全性を確認する予定である。

4.3 HPRF と LLRF

HPRF は基本的に KEBK で使用された機器を再利用する。ARES 空洞の 1 対 1 化やステーション増設のために、レイアウト変更、導波管の組み替え、冷却配管の変更、配線変更などを行う。なお、KEKB では通常クライストロン出力 700kW 程度以下で運転していたが、SuperKEKB では常時 800kW で運転を行うため、導波管やサーキュレータの冷却強化などの対策をとる。

LLRF は SuperKEKB に向けて、デジタル制御をベースとした新システムへの移行を図り、開発が進行中である。新システムでは、高速な信号処理を FPGA に、それ以外の信号処理を PLC に分担させる。FPGA を中心とした部分は μ TCA プラットフォームを採用し、高速なフィードバック・フィードフォワード処理を行うほか、クエンチ検出などの高速インターロック機能も持つ。FPGA の CPU コアには EPICS を搭載して、EPICS IOC として働かせる。この FPGA 制御ボードを cERL 用と共通仕様で開発中である^[21]。また、PLC はシーケンス制御やインターロックを担うとともに、現行 CAMAC フロントエンドの置き換えとしての機能も持つ。EPICS 機能を持たせた FPGA に加え、PLC に EPICS 搭載 CPU を導入することで、LLRF 各サブシステムに EPICS レベルで可視性を高めた構造を持たせる^[22,23]。

増設ステーションへの新システムの導入とともに、既存ステーションの順次置き換えを計画している。

したがって、両システムの RF ステーションが共存してビーム運転が可能となるよう、また新システムへの更新がスムーズに行えるよう、外部との信号接続等において既存システムとの互換性にも配慮した設計を行った。

4.4 ダンピングリング用 RF

陽電子ダンピングリングは周長 135m で、バンチ当たり最大 8nC の陽電子が 4 バンチ蓄積される。ビーム電流 70.8mA、ビームパワーは高々 10kW 程度であり、RF 源や HPRF、LLRF の各機器は、メインリング用のものが使用可能である。コヒーレントシンクロトロン放射による microwave instability を回避するために、周回エネルギー損失よりかなり高い RF 電圧が必要とされており、パラメータや加速空洞について現在検討が進められている。

5. まとめ

KEKB の RF システムは、大電流ビーム加速器用に開発した ARES 空洞と超伝導空洞を用いて、長期間安定に稼働した。SuperKEKB では両リングとも KEBK の 2 倍のビーム電流、そして LER では 3 倍のビームパワーが要求される。地上部 RF ステーションの増設と ARES 空洞の配置変更および入力カプラーの改造により、ビームパワーを増大させる。また、ARES 空洞と超伝導空洞の HOM 吸収体を改良して HOM パワー増大に対応する。HPRF は運転パワー増加への対策をとり、LLRF は制御精度向上を目指したデジタル新システムを導入する。

参考文献

- [1] <http://www.kek.jp/newskek/2009/mayjun/kek5.html>.
- [2] <http://www.kek.jp/ja/news/topics/2010/KEKBelleCeremony.html>.
- [3] <http://www.kek.jp/ja/news/topics/2010/KEKBupgrade.html>.
- [4] Belle II TDR, Accelerator Part. (<http://belle2.kek.jp/papers/B2TDR.pdf>.)
- [5] K. Akai et al., NIM A 499 (2003) p. 45.
- [6] Y. Yamazaki and T. Kageyama, Particle Accelerators 44 (1994), p. 107.
- [7] T. Kageyama et al., Proc. of PAC'97, 1997, p. 2902.
- [8] Y. Takeuchi et al., Proc. of PAC'97, 1997, p. 2986.
- [9] T. Furuya et al, the 9th Workshop on SRF, 1999.
- [10] M. Yoshida et al., Proc. of the 9th Symposium on Accel. Sci. and Tech., 1993, p. 131.
- [11] K. Akai et al., Proc. of EPAC'02, 2002, p. 2112.
- [12] K. Akai, High Energy News, 21, 5 (2003), p. 207.
- [13] M. Tanaka, private communication.
- [14] Y. Morita et al, Proc. of IPAC'10, 2010, p. 1536.
- [15] T. Kageyama et al., Proc. of the 14th Symposium on Accel. Sci. and Tech., 2003, p. 66.
- [16] T. Abe et al., Proc. of IPAC'10, 2010, p. 3548.
- [17] T. Abe et al., Proc. of EPAC'06, 2006, p. 1310.
- [18] K. Yoshino et al., this conference.
- [19] S. Mitsunobu et al, the 11th SRF workshop, ThP33, 2003.
- [20] S. Takano et al., Proc. of the 14th SRF Workshop, 2009, p. 830.
- [21] M. Ryoshi et al., this conference.
- [22] J. Odagiri et al., Proc. of IPAC'10, 2010, p. 2686.
- [23] H. Deguchi et al., this conference.
- [24] M. Kikuchi, private communication.