

SPring-8-II 蓄積リングの高周波システムの設計と準備状況

DESIGN AND PREPARATION STATUS OF THE RF SYSTEM FOR THE SPring-8-II STORAGE RING

稲垣隆宏^{#, A,B)}, 斗米貴人^{B)}, 岩井瑛人^{B,A)}, 山口博史^{B)}, 馬込保^{B,A)}, 細田直康^{B,A)}, 前坂比呂和^{A,B)}, 大島隆^{B,A)},
Takahiro Inagaki^{#, A,B)}, Takato Tomai^{B)}, Eito Iwai^{B,A)}, Hiroshi Yamaguchi^{B)}, Tamotsu Magome^{B,A)}, Naoyasu Hosoda^{B,A)},
Hirokazu Maesaka^{A, B)}, Takashi Ohshima^{B, A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 center

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

In the upgrade plan SPring-8-II, the current accelerating cavity, RF source, and Micro-TCA.4 based low-power RF control system will be used. Since the electron energy will be reduced from 8 GeV to 6 GeV, the required acceleration electric field will also be reduced from 16 MV to 8 MV. Therefore, at four RF stations, the number of bell-shaped acceleration cavities will be reduced from 32 to 16, and they will be reinstalled to fit into a 4.2 m straight section. Photo-absorbers will be installed at both ends of the cavities to absorb the synchrotron radiation from the upstream bending magnet. The total input power to the four cavities is 480 kW, which can be driven by the existing 1.2 MW klystron at SPring-8-II. The resonant frequency of the acceleration cavities will be changed from 508.58 MHz to 508.76 MHz, but this difference is within the tuning range of the cavity tuners and within the klystron bandwidth. As the electron energy decreases and the stored current increases, the coupled bunch instability caused by the HOM in the cavity is more likely to occur, so the frequency and Q-value of the HOM in each cavity are being evaluated and studied to avoid the instability.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 では、約 30 年使用した電子蓄積リングを入れ替え、世界第一線の光源性能を維持するためのアップグレード・プロジェクト「SPring-8-II」を進めている[1, 2]。SPring-8-II では、放射光ユーザーに提供する X 線の輝度を 100 倍に増やすことを目標とし、ビームエネルギーの 8 GeV から 6 GeV への低下と 5-bend achromat lattice や Damping wiggler の導入による極低エミッタンス化、および蓄積ビーム電流を 100 mA から 200 mA に倍増させることにより X 線の高輝度化を実現する。また、ビームエネルギーを下げ、偏向磁石を永久磁石化することで電力使用量を大幅に減らし、SDGs やグリーン(省エネルギー)化の要請に応えることも目的としている。SPring-8-II プロジェクトは、2024 年度に正式に予算化され、2029 年の完成を目指して各機器の準備が進められている。本報告では、そのうち蓄積電子ビームを加速する高周波(Radio Frequency: RF)システムの設計と準備状況についてまとめる。

2. 高周波システムの概要

現在の SPring-8 蓄積リングでは、4 回対称の位置に配置された 4 か所(2 セル、14 セル、26 セル、38 セル)の直線部に、高周波加速部(RF ステーション)が設けられている[3, 4]。各 RF ステーションには、それぞれ 8 台の常伝導の高周波空洞が設置され、それぞれ 500 kV の加速電圧を発生させて、電子ビームを加速している[5, 6]。高周波源としては、509 MHz、1.2 MW の連続波クライストロン(キャノン電子管デバイス社 E3732 [7])が用いられ、低電力高周波制御システムによって空洞の振幅と位相

が制御されている。

Table 1: Design Parameters for Current SPring-8 (left) and New SPring-8-II (right)

Items	SPring-8	SPring-8-II
Stored beam energy	8 GeV	6 GeV
Stored beam current	100 mA	200 mA
Radiation loss (max.) incl. IDs, wigglers	13 MeV/turn	6 MeV/turn
Circumference	1435.95 m	1435.43 m
Straight section length	6.6 m	4.2 m
RF frequency	508.580 MHz	508.762 MHz
Total RF voltage	16 MV	8 MV
Number of RF stations	4	4
Number of cavities	8 /station	4 /station
Cavity voltage	500 kV	500 kV
Cavity wall loss	42 kW	42 kW
Beam loading (max.)	40 kW /cavity	75 kW /cavity
Cavity coupling	2	2.8
Klystron output (max.)	700 kW	480 kW

[#] inagaki@spring8.or.jp

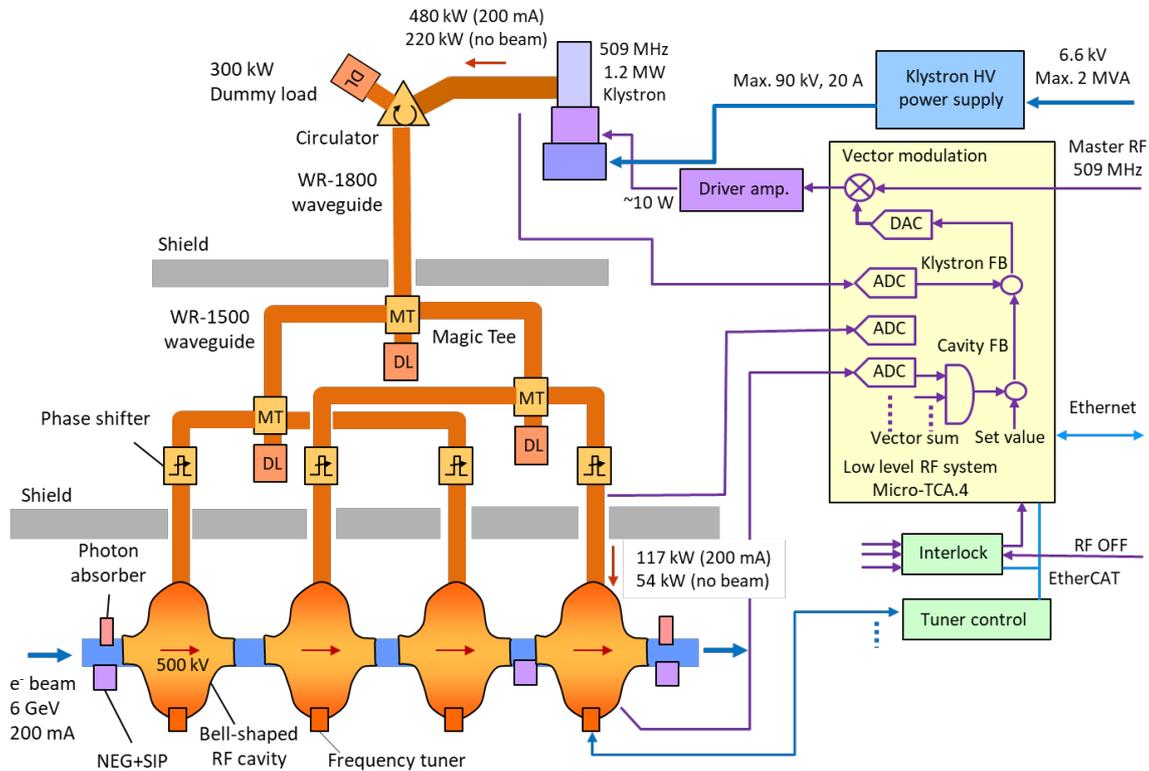


Figure 1: Schematic diagram of the RF system for SPring-8-II storage ring.

SPring-8-II では、ビームエネルギーを 6 GeV に下げ、放射減衰によるエネルギー損失が大幅に減るため、必要な高周波電圧も 8 MV と半分になる。新しい低エミッタンス・オブティクスにおいても、RF 振幅・位相に対する要求は現状より厳しくはならなかったため、既存の高周波空洞とクライストロン、低電力高周波制御系をそのまま利用し、建設コストを抑えることにした。

SPring-8-II で想定する高周波システムの構成図を Fig. 1 に示す。また、設計パラメータを Table 1 にまとめる。SPring-8-II では、5-bend achromat optics を採用し偏向磁石の数が増えるため、高周波空洞を設置する直線部の長さが 6.6 m から 4.2 m に減る。そこで各 RF ステーションの空洞の数を 8 台から 4 台に減らすことにした。空洞としては同じ加速電圧 500 kV を発生させればよく、放電や冷却等の問題も無い。蓄積ビーム電流が 200 mA に増えるため、ビーム負荷の増加に合わせてカプラの結合度を 2 から 2.8 に増やし、高周波電力を有効に利用する。想定するクライストロンの高周波出力は、空洞の壁面ロス ($42 \text{ kW} \times 4$ 空洞) およびビーム負荷 ($72 \text{ kW} \times 4$ 空洞) を合わせて 480 kW 程度で、現在の出力 700 kW よりも少なく、問題無い。

SPring-8-II では、偏向磁石が増えてビーム軌道がより内側になるため、リングの周長がわずかに減る。そこで高周波空洞の共振周波数も 508.58 MHz から 508.762 MHz に変更する。この変更は、空洞に付属した周波数チューナーを約 6 mm 突き出すことで調整可能である。また、182 kHz の周波数の変更は、クライストロン ($\pm 500 \text{ kHz}$ 以上) やサーキュレータ ($\pm 5 \text{ MHz}$ 以上) [8] の帯域幅よりも小さいので、こちらも問題無い。

SPring-8-II については、2014 年にまとめた Conceptual Design Report にて高周波系の継続利用の方針を決めたあと、経年劣化の見られる機器については、先行して更新を行ってきた。2016~2017 年にはクライストロン高電圧電源の更新[9, 10]を行い、2017~2020 年には低電力高周波制御系を Micro-TCA.4 ベースのデジタル制御システムに更新[11, 12, 13]している。また、自由電子レーザー施設 SACLA で生成された低エミッタンス電子ビームを蓄積リングに入射するため、新しいタイミング同期システムを導入し運用している[14]。

次章では、高周波システムを構成する主要な機器について、詳細な設計と到達性能について記す。

3. 構成機器の設計と性能

3.1 高周波空洞

SPring-8 蓄積リングでは、大電流蓄積時のビームの安

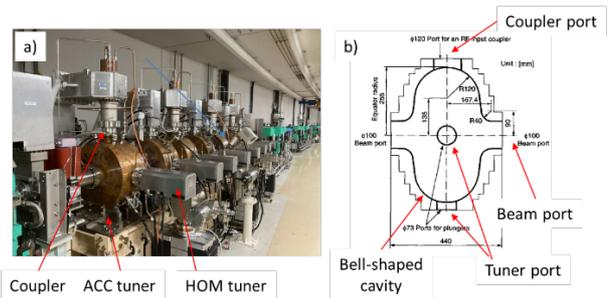


Figure 2: a) Photograph of the accelerator cavities. b) Inner structure of the cavity.

Table 2: Specification of the Accelerator Cavity for SPring-8-II

Acceleration mode	TM010
Resonant frequency	508.762 MHz
Unloaded Quality factor	44,000
Coupling to waveguide	2.8
Shunt impedance	6.7 M Ω
Nominal cavity voltage	500 kV
Variety of cavity size	16
Number of tuners	Variable 2, Fixed 1
Beam port flange	ICF203 with contactor
Cooling water temperature	30 degree-C
Vacuum pressure	< 1 e-7 Pa

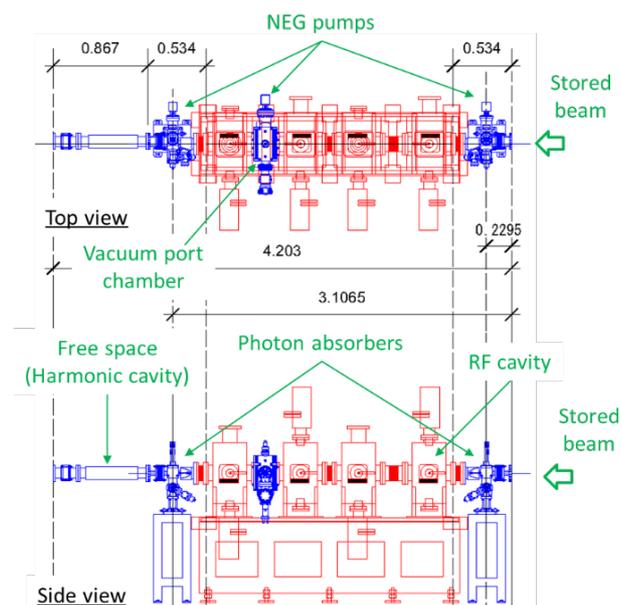


Figure 3: Layout of the RF section for SPring-8-II. The red line indicates equipment currently used at SPring-8 that will be reused, and the blue line indicates equipment that will be newly manufactured. The dimensions written in the figure are in “m”.

定性を重視し、常伝導のベル型単空洞を使用している。空洞の写真と内部形状を Fig. 2 に示し、特性を Table 2 にまとめる[5, 6]。多連空洞にせず単空洞を並べているのは、空洞の高次モード (Higher-Order-Mode: HOM) の数を減らし、結合バンチ不安定性 (Coupled bunch Instability: CBI) を回避するためである。空洞部からビームポートに向かって滑らかに接続するベル型の形状は、ノーズのある空洞形状に比べて基本モードのインピーダンスは若干低下するが、HOM のシャントインピーダンスが低く CBI を起こしにくい。またこの空洞は、主要な縦方向 HOM である TM020 モードに対してシャントインピー

ダンスがゼロ近くになるように設計されている。空洞の中央の四面には、導波管と接続する同軸カプラと、2 台の可変チューナー、1 台の固定チューナーが接続されている。同軸カプラは、先端がループ形状になっており、取付角度によって結合度を調整することができる。可変チューナーは、直径 70 mm のプランジヤーを空洞内に突き出して共振周波数を調整するもので、カプラと対向するものを ACC チューナー、90 度の角度に付いているものを HOM チューナーと呼んでいる。また、HOM チューナーに対向して、固定チューナーを取り付けている。ACC チューナーと HOM チューナーの突き出し量を変えると、加速モードである TM010 の周波数を保ったまま HOM の周波数を離調して CBI を回避することができる。通常は、HOM チューナーは位置を固定し、ACC チューナーの位置は共振周波数を保つように制御されている。

SPring-8 では、カプラが空洞の上部に付いたもの (V タイプと呼ぶ) と、90 度回転させてカプラが空洞の側面に付いたもの (H タイプと呼ぶ) を交互に並べている。これは、隣り合う導波管が接近することを避けるとともに、横方向 HOM が重ならないことを意図している。また、空洞の曲率半径を、少しずつ 16 種類に変えて HOM の周波数を分散させ、CBI が起こりにくいようにしている[5]。

空洞の HOM による CBI の起こりやすさは一般的に、蓄積ビームのエネルギーに反比例し、蓄積ビーム電流に比例する。従って、蓄積ビームのエネルギーを下げビーム電流を増やす SPring-8-II では CBI が起こりやすく、心配している。そこで空洞 HOM の低電力による測定やビーム誘起信号による測定を行い、各空洞の HOM と Q 値を確認した。詳細な結果は[15]にまとめているので参照のこと。実測された Q 値は、シミュレーションでの理想的な無負荷 Q 値に比べおおよそ低く、モードによってはシミュレーションの Q 値の半分から 1/5 程度であるものもあった。これらは、カプラや導波管との結合による流出や、チューナー接続部での損失によるものと考えている。当初に心配していたよりも CBI は起こりにくいことがわかった。縦方向 (ビーム進行方向) の HOM については、Q 値の低い空洞を選択することで CBI を回避できそうである。横方向 (ビームに垂直な方向) の HOM については、5 種類ほどの HOM 周波数で CBI を起こす可能性があるが、HOM チューナーを動かして離調することで回避できることがわかった。更に、縦方向、横方向ともに Beam Based Feedback (BBF) システムを導入するので、これにより CBI を回避することも可能である[16]。

3.2 真空排気系とフォトンアブソーバ

Figure 3 に、SPring-8-II での RF セクションの配置図を示す。赤色で示した空洞や架台は、現在の SPring-8 のものを再使用する。青色で示した機器は、新たに調達するものである。上流の偏向磁石で発生した放射光が空洞やビームダクト管壁に当たらないよう、空洞の両端にはフォトンアブソーバ[1]を設けて放射光を除去している。蓄積ビーム電流が 200 mA のとき、フォトンアブソーバの負荷熱量は約 400 W と見積もられる。これは他のアンジュレータ部のアブソーバなどと同程度の量であり、問題無い。フォトンアブソーバの近傍、および空洞 3 と空洞 4 の間には、真空ポンプを設け、放出されたガスを排気して空洞内を超高真空に保つ。真空ポンプは、カートリッジ

型の NEG とイオンポンプの複合型ポンプ (NEXTorr Z500 ND [17]) を用いる予定である。空洞間を接続するベローズには RF フィンガーを付け、接続フランジ (ICF203) にも内側に RF コンタクトを設けて、蓄積ビーム誘起場へのインピーダンスを下げています。また、空洞部の両端は、テーパ管 (テーパ部の長さ 100 mm) で通常のビームダクトと接続している。これらの RF フィンガーやテーパ管については、電磁界シミュレーション (CST studio suite [18]) にてビーム通過時の応答を計算し、誘起場によるキックや発熱などの問題が無いことを確認している。空洞の下流側には、600 mm ほどのフリースペースがある。ここには将来、バンチ長伸長のための高調波空洞を設置することを検討している。

3.3 クライストロンと高電圧電源

大電力高周波源であるクライストロンは、1997 年の SPring-8 運転開始時からキャノン電子管デバイス社 E3732 [7] を使用している。このクライストロンとソケットの写真を Fig. 4 に、仕様を Table 3 にまとめる。このクライストロンは、最大出力 1.2 MW の連続波クライストロンで、アノード電圧でビーム電流を制御する三極管構造をしている。出力電力に応じてアノード電圧を制御することで、低出力の場合にも高い電力効率で運転を行うことができる。SPring-8 での運転時の入力電力と出力電力の相関の例を Fig. 5 に示す。SPring-8-II で想定する 480 kW 付近でも線形な応答が得られており問題無い。

クライストロンの高電圧電源は、2 章でも述べたように 2016~2017 年に新しいものに交換しており、SPring-8-II でもそのまま使用する。クライストロン電源の回路系統図を Fig. 6 に示す [9, 10]。電源の故障頻度を下げ保守を容易にするため、不要な回路、機能を極力省いたシンプルな設計となっている。三相交流 6.6 kV を Vacuum Circuit Braker (VCB) を介して受電し、12 相変圧整流器で昇圧、整流し、最大 -90 kV のカソード高電圧を生成し平滑キャパシタに充電する。変圧整流器には昇圧比が切り替えられるようにタップスイッチが付いており、-90 kV、-80 kV、-70kV の 3 種類のカソード電圧を選択できる。カソード電位に接続された高電圧デッキには、サイリスタ制御式のカソードヒータ電源 (最大 20 V, 25 A) とコッククロフト・ウォルトン式の変調アノード電源 (最大 80 kV, 10 mA) が置かれている。このクライストロン電源では、クライストロンの短絡時に平滑キャパシタの電荷を放出するクローバ回路を省略している。SPring-8 では、クライストロンの短絡はほとんど起こっておらず、故障や誤作動の心配のあるクローバ回路は必要が無いと判断した。その代わり、短絡で平滑キャパシタからの出力電流が増加した場合は、1 サイクル以内にアノード電源と VCB を遮断する高速インターロックが組み込まれている [10]。

3.4 低電力高周波制御系

低電力高周波制御系は、Micro-TCA.4 規格のデジタル制御システムを開発し、2017~2020 年に導入した [11, 12]。Figure 7 に系統図を示す。デジタイザは、1 枚あたり 16-bit の DAC を 2 チャンネル、ADC を 10 チャンネル持ち、オンボードでフィードバック制御ができる。クライストロン出力の振幅、位相を一定に保つクライストロンフィードバックと、空洞ピックアップのベクトル和を一定に保つ空

洞フィードバックの 2 つのフィードバック制御を行っている。前者は主にクライストロン電源の 12 相整流のリップルや電圧変動を補償し、後者はビーム負荷の変化や空洞の温度変化による空洞電圧の変化を補償している。デジタイザでは、基準高周波を 5/7 分周した 363.27MHz のクロックで ADC を動かし、アンダーサンプリング方式によって高周波の振幅と位相を測定している。そのため、クロックの再起動時に位相の不定性が生じる。そこで簡便に位相を確認し調整できる手法を開発した [13]。クライストロンのアノード電圧の制御は、クライストロンごとに変換テーブルを用意し、出力電力に応じた設定電圧を DAC より出力してクライストロン電源に渡すことで行っている。また、高周波空洞の共振周波数の調整は、空洞への入力高周波の位相と空洞ピックアップの位相が等しくなるよう、ACC チューナーの位置を調整することで行っている。これらのシステムは、SPring-8-II においても、そのまま使用可能である。

蓄積ビームによるコヒーレントなシンクロトロン振動は、現在はマスターオシレータの周波数に変調を掛けることで補正を掛けているが、この方法では、施設全体の基準高周波に変調を与えることになり、位相雑音の増加や高精度測定への影響が懸念される。これに代わる方法として、ビーム位置モニタ (BPM) の測定システムと高周波制御システムを接続し、ビームの位置情報から高周波の位相を制御する方法を開発している [19]。SPring-8-II に先駆けて、今年度の実運転への導入を予定している。

Table 3: Specification of the Klystron

Frequency	508.58±0.5 MHz
Max. output power	1.2 MW (c.w.)
Typical power efficiency	60~65%
Typical power gain	50 dB
Beam voltage	70~90 kV
Anode voltage	25~60 kV
Max. beam current	20 A
Max. collector loss	800 kW
Length	4.3 m

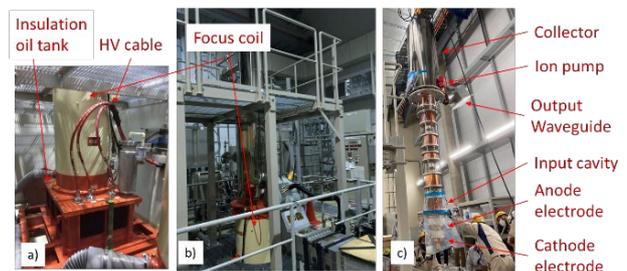


Figure 4: Photograph of a) insulation oil tank, b) focus coil and turret, and c) klystron tube.

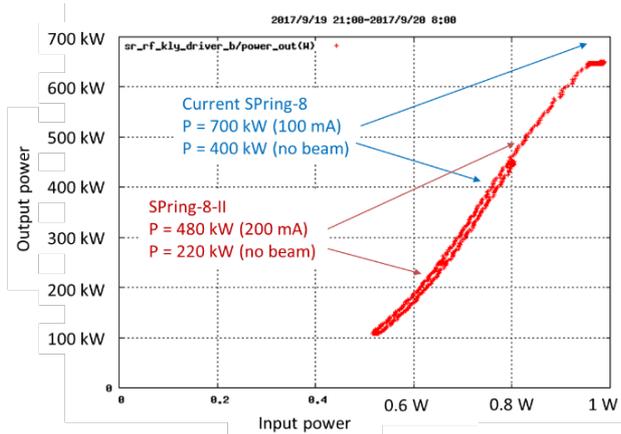


Figure 5: Typical input-output characteristics of the klystron.

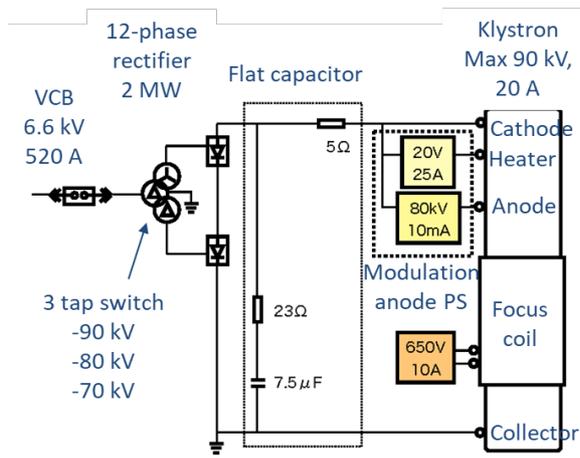


Figure 6: Schematic diagram of the klystron high voltage power supply.

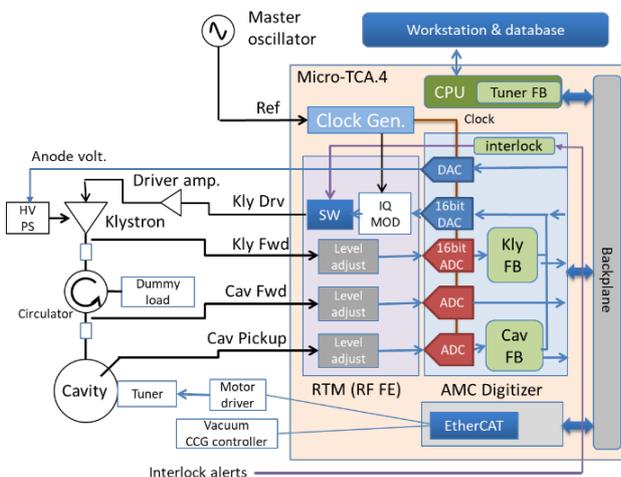


Figure 7: Diagram of the low-level RF control system.

4. まとめ

SPring-8-II では、高周波電圧が約半分の 8 MV になる

ので、空洞の数を半分の 16 台に減らして再使用する。クライストロンや高電圧電源、低電力高周波制御系も、そのまま使用する。これらのシステムについて、大きな問題は生じていない。2027 年に現リングの運転を停止し、組替作業を行う予定で、その準備を行っている。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “Green upgrading of SPring-8 to produce stable, ultrabright hard X-ray beams”, J. Synchrotron Rad. 31, 2024.
- [2] T. Watanabe *et al.*, “Accelerator design and development for the next generation light source, SPring-8-II”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, WEPO702, this meeting.
- [3] M. Hara *et al.*, “RF stations of the SPring-8 storage ring”, Proc. PAC’97, Vancouver, Canada, May 1997, 4P028.
- [4] H. Ego *et al.*, “RF system of the SPring-8 storage ring”, J. Synchrotron Rad. 5, 1998, pp. 379-381.
- [5] H. Ego *et al.*, “Higher-order modes in the bell-shaped single-cell cavity of the SPring-8 storage ring”, Nucl. Instr. Methods A 383, 1996, pp. 325-336.
- [6] H. Ego *et al.*, “Suppression of the coupled-bunch instability in the SPring-8 storage ring”, Nucl. Instr. Methods A 400, 1997, pp. 195-212.
- [7] <https://etd.canon/ja/product/category/microwave/klystron.html>
- [8] <https://www.aft-microwave.com/en/products/microwave-components-and-subsystems/>
- [9] H. Ego *et al.*, “Renewal of a 90 kV DC power supply for the klystron of the SPring-8 storage ring”, PASJ2016, Chiba, Japan, Aug. 2016, TUP032.
- [10] H. Ego *et al.*, “Completion of the renewal of a 90 kV DC power supply for the klystron of the SPring-8 storage ring”, PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, TUP057.
- [11] T. Ohshima *et al.*, “Development of a new LLRF system based on MicroTCA.4 for the SPring-8 storage ring”, IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May 2017, THPAB117.
- [12] T. Ohshima *et al.*, “Upgrade of LLRF system at SPring-8 storage ring using MTCA.4 standard modules”, PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, WEOL10.
- [13] E. Iwai *et al.*, “RF phase initialization and alignment of the RF acceleration system at SPring-8”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, THP055, this meeting.
- [14] T. Ohshima *et al.*, “Timing synchronization system for beam injection from the SACLALINAC to the SPring-8 storage ring”, J. Phys. Conf. Ser. 1360, 2019, 012141.
- [15] T. Tomai *et al.*, “Suppression methods for instability induced by high-order modes of accelerating cavities towards SPring-8-II”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, WE0703, this meeting.
- [16] M. Masaki *et al.*, “SPring-8-II におけるビーム不安定性抑制用バンチ毎フィードバックの設計”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, THO706, this meeting.
- [17] <https://www.saesgetters.com/highvacuum/solution/nextorr-d-z-uhv>
- [18] <https://www.3ds.com/ja/products/simulia/cst-studio-suite>
- [19] T. Ohshima *et al.*, “Suppression of coherent synchrotron oscillation using phase modulation to RF accelerating voltage”, PASJ2022, remote, Aug. 2022, TUP046.