

SPRING-8 蓄積リングクライストロン用 90kV 直流高圧電源の更新

RENEWAL OF A 90 KV DC POWER SUPPLY FOR THE KLYSTRON OF THE SPRING-8 STORAGE RING

惠郷博文^{#, A, B)}, 石井美保^{B)}, 大橋裕二^{B)}, 小林和生^{B)}, 近藤力^{A, B)}, 佐々木茂樹^{A, B)}, 高嶋武雄^{B)}, 熊谷教孝^{B)}, 福井達^{A)}, 勝部貴光^{C)}, 齋藤寛典^{D)}, 溝田樹容子^{D)}, 今野修二^{E)}, 山崎長治^{E)}

Hiroyasu Ego^{#, A, B)}, Miho Ishii^{B)}, Yuji Ohashi^{B)}, Kazuo Kobayashi^{B)}, Chikara Kondo^{A, B)}, Shigeki Sasaki^{A, B)}, Takeo Takashima^{B)}, Noritaka Kumagai^{B)}, Toru Fukui^{A)}, Takamitsu Katsube^{C)}, Hironori Saito^{D)}, Kiyoko Mizota^{D)}, Shuji Konno^{E)}, Choji Yamazaki^{E)}

^{A)} Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

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

^{C)} SPRING-8 Service Co., Ltd. (SES)

^{D)} TOSHIBA Co.

^{E)} Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Co. (TMEIC)

Abstract

90 kV DC power supplies for the 508.58 MHz 1.2 MW klystrons, TOSHIBA E3732, in the SPRING-8 storage ring are being replaced with new ones because the old power supplies recently suffer from troubles or failures by aging in 20-year operation. A cathode voltage of 90 kV is generated from three-phase 6.6 kV AC line with a conventional 12-phase full-wave rectifier having step-up transformers with both Δ -Y and Δ - Δ connections. RF powers ranging from 700 kW to 900 kW are needed for a beam of 100 mA to be accelerated in the storage ring. Though the new power supplies have no regulator for cathode voltage and a change in receiving voltage modulates the cathode voltage, the klystron output power is regulated modulating an anode voltage to the klystron and controlling an RF input power with feedback loop. Besides, no protecting circuit such as a high-current crowbar switch is implemented because no short-circuit by arc in the klystron has happened in the operation. The simple and streamlined constitution of the power supply decreases trouble and yields low cost in maintenance.

1. はじめに

SPRING-8 蓄積リングには、A、B、C、D で識別される4つの RF ステーションがある。各ステーションには 508.58 MHz で共振する定在波型高周波加速空洞が 8 台設置され、計 32 台で 16MV のビーム加速を行っている[1]。これら空洞の大電力高周波源として東芝製クライストロン E3732 を 5 台使用している。Table 1 に E3732 の定格を示す。括弧値は製造工場における 1.2MW 出力試験時の値である。

蓄積電流 100mA での定常運転ではステーションあたり、約 700kW の RF 出力を要し、トラブル等で1ステーションが使用できない場合、約 900kW の RF 出力で運転される。このクライストロンの駆動電源として電圧 90kV、電流 20A の直流高圧電源が必要となる。そのため、サイリスタ式直流高圧電源が開発され[2]、1994 年 D ステーション、1997 年 B、C ステーション、2000 年 A ステーションの3期に分けて製作、設置された。建設年度当時の運転計画によって各電源の仕様が一部異なり、D ステーション電源のアノード電圧はカソード電圧の抵抗分割方式、B、C ステーションでは変調アノード電源を別途設けており、A ステーションは 12 相整流方式でクライストロン 2 台を駆動するタイプとした。

しかしながら、約 20 年間の大電力運転によって構成部品の寿命超過、老朽化等による動作不良が発生する

ようになったため、2014 年度より高圧電源の更新を開始した。放射光共用運転の妨げにならないように工期を3年に分けて高圧電源を更新中である。2014 年度に 4 ステーション分の高圧電源の製作を行い、2015 年度に老朽化が進んでいた C、D ステーションの高圧電源の入れ替え工事を行った。A、B ステーションは 2016 年度に更新する。

Table 1: Specifications of Klystron E3732

Operating frequency (f)	508.58	MHz
Output RF power (CW) (P_o)	1.2	MW
Efficiency (η)	> 60 (65.1)	%
Instantaneous bandwidth (-1dB)	> 0.7	MHz
Gain (G)	> 45 (59.8)	dB
Cathode voltage (V_k)	> -96 (-92.4)	kV
Beam current (I_b)	21 (20.1)	A
Anode voltage (V_a)	< 68 (63.0)	kV
Anode current (I_a)	< 5 (0.1)	mA
Heater voltage (V_h)	< 15 (11.0)	V
Heater current (I_h)	25 (23.5)	A
Focusing coil current (I_{coil})	10 (8.0)	A

[#] ego@spring8.or.jp

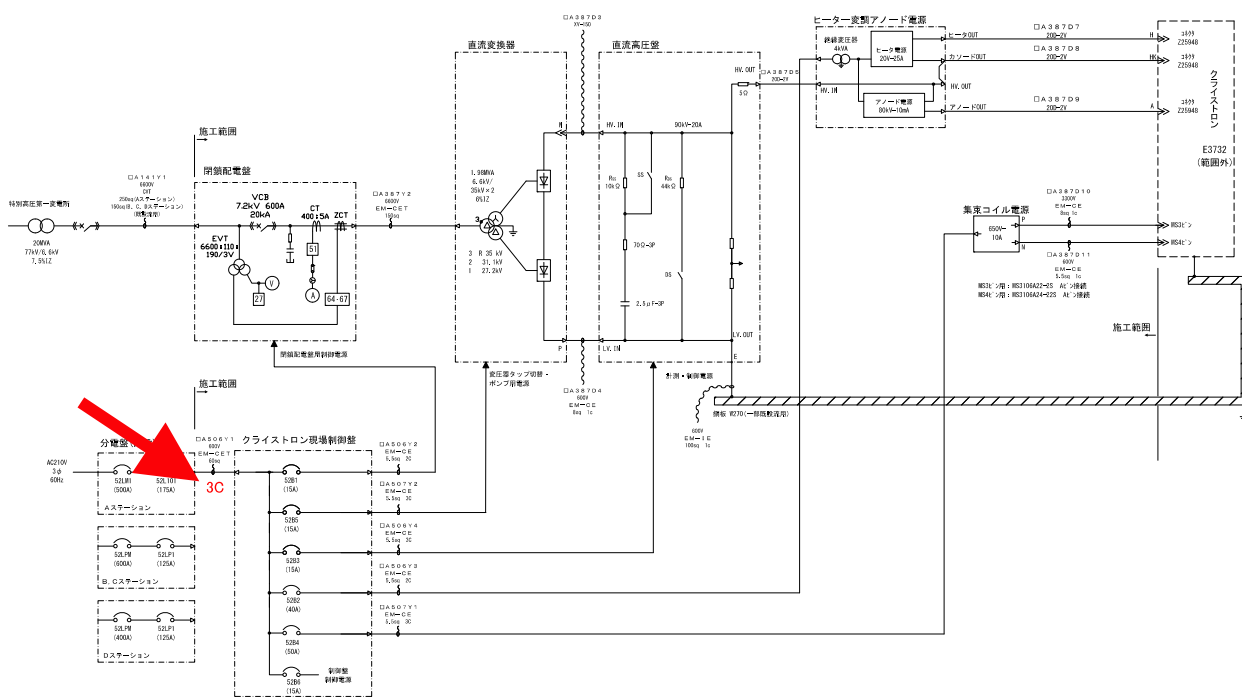


Figure 1: Block diagram of the new 90 kV DC power supply.

更新後の高圧電源は旧来のサイリスタ式ではなく、12相全波整流方式である。この更新電源の開発指針を第2章、電源各部の詳細を第3章、更新設置した C、D ステーションでの運転状況を第4章で報告する。

2. 更新における設計指針

更新高圧電源の主回路・制御電源単線結線図を Figure 1 に示す。6.6 kV 真空遮断機 (VCB) 付閉鎖配電盤、直流変換器 (変圧整流器)、直流高圧盤、変調アノード電源、ヒータ電源から構成される。カソード部は旧電源とは異なり、サイリスタ整流方式ではなく、ダイオードブリッジを用いた 12 相全波整流方式である。基本構成は、蓄積リングの RF テストスタンドに設置されている高圧電源から誘導電圧調整器 (IVR) とクローバスイッチを省いたものである。テストスタンドの高圧電源は高エネルギー加速器研究機構で開発された B タイプ電源 [3] と同型の東芝製電源で、1990 年に理化学研究所和光本所に設置され、1995 年に SPring-8 へ移設したものである。

加速電圧低下によるビーム寿命減少等の制約を受けることになるが、3ステーションでも 100mA のビーム加速運転は可能であることから、A ステーションで行ってきたクライストロン2本駆動は今後必要ないと判断した。そのため、更新後はすべての RF ステーションでクライストロン1台駆動とし、現在の電源3種を 90kV-20A の単一仕様電源に統一した。

2.1 タップ切換 12 相全波整流方式

サイリスタ式高圧電源では、サイリスタ点弧角の制御によってクライストロンのカソード電圧を 45kV から 90kV まで連続的に可変できた。よって、放射光共用開始当初より 2003 年度まで行ったビーム寿命で決まる電流減少運転 (Figure 2) においては、カソード電圧制御による約

20% の RF 出力調整を行って対応した (B、C ステーションは、アノード電圧の変調で対応)。しかし、2004 年度より 100mA のトップアップ運転 (蓄積ビーム電流の変動を抑えるように随時ビーム入射を行い、定電流にする運転) が開始された [4]。トップアップ運転により、現在のビーム電流変動は 0.05% 以内に抑えられ、定強度の放射光供給が可能となっている。これにより、挿入光源個別のギャップ駆動による数%程度の小さな変動はあるが、放射光利用運転中のクライストロン RF 出力は、ほぼ一定である (Figure 3)。そのため、更新高圧電源では、カソード電圧の設定は3段のタップ切換方式 (70、80、90 kV) とした。通常 700kW 出力では 80kV タップで運転する。Figure 4 に工場試験で測定した 80kV での出力特性例を示す。3ステーション 100mA 運転では 900kW を超える高出力が必要となるが、80kV 印加での RF 出力はクライストロンによって 900kW から 970kW 程度の個体差があるので、出力が不足する場合は 90 kV 運転 (1.1MW 出力可) で対応する。また、SPring-8 アップグレード計画 [5, 6] では蓄積リングのビームエネルギーを 8 GeV から 6 GeV に下げるため、必要な RF 電力も下がるので、70kV タップでの運用を予定している。

テストスタンドで用いられている 6.6kV 受電電圧の調整と安定化用の IVR は、周辺の機器に対して誤動作を引き起こすノイズ源となることが多いため、設置しない。実際、テストスタンドでも IVR 調整モータの駆動により、IVR 制御回路のサージ抑制用パソコンからアースラインへ回り込んだノイズにより、ローレベル制御系の誤動作を引き起こした。対策としてパソコンの除去にてローレベル機器へのノイズを低減させた。一方、IVR が無いため、ビーム入射時の電流変化や温度等の環境要因による緩やかな変化によって生じる負荷変動に対しては主にアノード電圧の調整 (ビーム引き出し電流の調整) にて、数

kHz オーダーまでの短時間変化にはクライストロン励振 RF 信号のフィードバックにて RF 出力を安定化することとした。

2.2 短絡保護回路の省略

クライストロンから安定に大電力高周波を出力させるにはカソード電圧のリップルを低く抑える必要があるため、平滑コンデンサを用いる。クライストロン内でのアーク放電時に、このコンデンサ等に蓄積されたエネルギーがクライストロンへ流入されないようにクライストロンの入力部にクローバスイッチ等の短絡保護装置が一般的に設置される。クライストロン保護基準として 24J を超えるエネルギーがクライストロンへ流入しないように短時間での保護動作が求められる。しかし、IVR 等からの電氣的ノイズによってクローバスイッチが誤動作するとクライストロンの運転が停止し、加速電圧の不足から放射光の供給が停止してしまう。このことからクローバスイッチを省略しながらもクライストロン保護を行えるようにサイリスタを用いた starpoint 制御の 90kV 高圧電源を開発した[2]。しかしながら、20 年間の蓄積リング RF 運転においてクライストロン短絡現象は一度も発生しなかった。そこで、短絡時のクライストロン保護回路の設置は省略することとした。

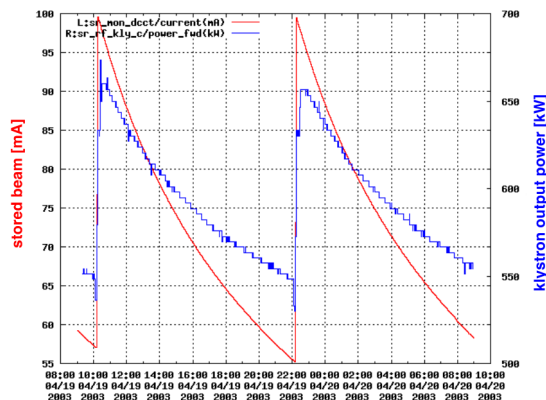


Figure 2: Stored beam current (Red line) and RF output power of the klystron (Blue line) in C-station in the current-decay operation in April 2003.

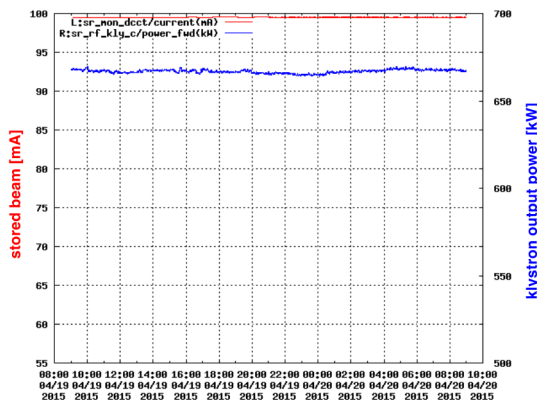


Figure 3: Stored beam current (Red line) and RF output power of the klystron (Blue line) in C-station in the top-up operation in April 2015.

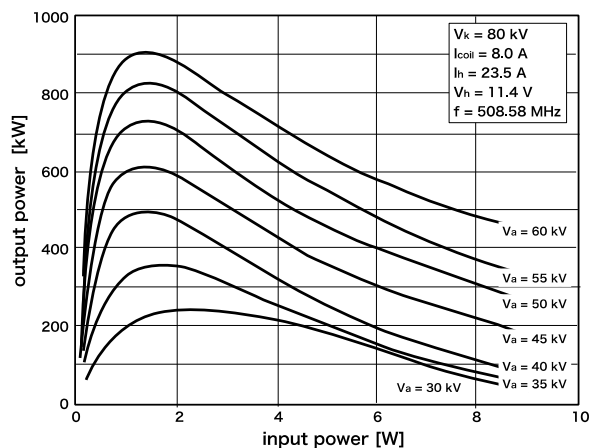


Figure 4: Dependences of the klystron output power on input power and V_a at V_k of 80 kV.

3. 高圧電源構成

更新高圧電源は、VCB 付閉鎖配電盤、直流変換器、直流高圧盤、変調アノード電源、ヒータ電源から構成される。各部の詳細について以下に示す。

3.1 閉鎖配電盤

定格 7.2kV-600A、遮断電流 20kA、遮断速度 3 サイクル内の VCB を収めた閉鎖配電盤で 6.6kV の 3 相交流受電を行う。閉鎖配電盤の交流出力は、直流変換器へ直接給電される。

3.2 直流変換器

直流変換器には Y- Δ 重畳昇圧トランスと 12 相整流ブリッジダイオードが収められている。90kV、80kV、70kV の電圧を発生させるため、昇圧トランスには 3 タップ無電圧切替器が設けられ、昇圧比 6.6:35、6.6:31.1、6.6:27.2 が現場および遠隔で選択できる。変換器内の電力損失として全損 15kW (無負荷損 5kW、負荷損 10kW) となっている。変換器内を冷却するため、変換器内部循環冷却オイルと熱交換器を介して 150L/min の冷却水を供給する。

3.3 直流高圧盤

直流高圧盤には設計値 7.5 μ F (2.5 μ F 3 並列、実測値 7.3 μ F) の平滑コンデンサ、23.3 Ω (70 Ω 3 並列) 平滑抵抗、5 Ω クライストロン直列抵抗等が収められており、直流変換器からの入力 は 0.5%p-p 以下の電圧リップルとなるように平滑される。クライストロンのコレクタが接地となるため、カソードにはマイナス電圧で印加される。直流高圧盤内でクライストロンアーク放電による短絡過電流が検出された場合、60 μ s 以内にトリップ信号を VCB に送信し、60Hz の受電 1 サイクル内に VCB を OFF にする保護回路が組み込まれている。Figure 3 の R_{SS} で示される 10k Ω 抵抗は電源投入時に平滑コンデンサへのラッシュ電流を抑制するもので、VCB ON 応答の 1s 後にスイッチ SS が閉じられる。また、 R_{DS} で示される 44 k Ω 抵抗は電源運転停止時に平滑コンデンサに蓄積されている電荷を放電させるためのものである。

3.4 ヒータ変調アノード電源

ヒータ電源とアノード電源はカソード電位の高压ボックス内に収納され、ヒータ変調アノード電源と呼ばれている。

ヒータ電源は単相 AC 200V 受電のサイリスタ整流方式を用いており、定格 20V-25A、電流リップル 0.5%p-p 以下の定電流電源である。仕様安定度は、電源変動 $\pm 10\%$ 、負荷変動 $\pm 10\%$ に対して $\pm 0.5\%$ である。基準負荷 0.8Ω を用いた単体試験でのリップル実測値は 0.06%p-p 以下、安定度 $\pm 0.04\%$ 以内であった。

変調アノード電源は、定格 80kV-10mA (0V から設定電圧 95% 値までの立上速度 $< 0.4s$)、電圧リップル 0.5%p-p 以下の定電圧電源である。仕様安定度は、電源変動 $\pm 10\%$ 、負荷変動 $\pm 10\%$ に対して、 $\pm 0.5\%$ である。カソードからのビーム引き出し電流を決めるアノード電圧は、最大 80kV の高压であるが、ビームからアノードへ流れ込む電流は通常小さく ($< 1mA$)、また、高速のレスポンスを必要としないので、コックロフト・ウォルトン方式を用いた電源としている。充電器として駆動周波数 20kHz の IGBT インバータ電源を用いている。また、アノード電圧がカソード電圧を超えないように、カソード電圧の 70% 以下 (制御盤にて設定値変更可能) になるように制限、制御される。アノード電源の出力部にはカソード・アース間電圧分割抵抗列 (20M Ω :200M Ω) が接続され、高压運転開始時、充電前にアノード電位が浮くことのないようになっている。基準負荷を用いた 80kV、10mA 試験では、リップルは 0.3%p-p 以下、安定度は $\pm 0.06\%$ 以内であった。また、16.6M Ω ダミー抵抗での応答特性は 0.27s であった。

3.5 集束コイル電源

集束コイル電源は定格 650V-10A、電流リップル 0.5%p-p 以下のサイリスタ式定電流電源である。仕様安定度は電源変動 $\pm 10\%$ 、負荷変動 $\pm 10\%$ に対して $\pm 0.5\%$ である。基準負荷を接続した定格電流通電試験でのリップルは 0.12%p-p、安定度 $\pm 0.25\%$ 以内であった。

3.6 現場制御盤

クライストロン現場制御盤は高压電源の統括制御を行うためのものである。電源各部への低電圧電源の供給と遮断、運転シーケンス管理、カソード電圧のタップ切換、アノード電圧、ヒータ電流、集束コイル電流の現場または

遠隔調整、各部の電圧・電流表示を行う。また、専用検出回路にて応答速度 1ms で異常・故障検出を行い、検出から応答時間 7ms 以下でアノード電源 OFF 指令を出してインターロック保護動作を行う。重故障時には VCB でカソード出力も OFF する。操作性や設定頻度を考慮して、低圧と高压の ON/OFF、カソード電圧タップ切換、アノード電圧の現場調整 (ヘリポット操作)、そして異常時のリセット以外はタッチパネルで設定するようにした。遠隔操作、データ収集は SPring-8 制御システムで定式化された FL-net 通信で行う。

コレクタ冷却装置の冷却能力から、クライストロンコレクタ損失電力の上限は 800kW である。RF 出力中にインターロック等で RF 入力を停止するとコレクタ損失が増大する。この損失を抑えるため、RF 入力 OFF 時にクライストロンビーム電流を下げるようにアノード電圧を下降させるが、アノード電源のレスポンス時間を考慮して、RF 入力停止から 0.3s 間、コレクタ損失の検出をマスクする。もし、0.3s 後にもコレクタ損失が制限値を上回る場合はアノード電源出力の OFF、VCB によるカソード電圧 OFF にてクライストロンの保護を行う。コレクタ損失量の演算、保護シーケンスは制御盤内の基板と PLC によって行われている。

4. 高压運転

2016 年 3 月に入れ替えを行った C、D ステーションの高压電源 (Figure 5) は、4 ヶ月の運転を通じて支障となる問題はなく、安定した運転が行われている。カソード電圧の設定は 80kV タップで、ビーム電流 100mA の放射光利用運転において 630kW から 670kW の RF 出力となっており、その時の測定結果を次に示す。

- 電圧制御回路のないカソード電圧は受電変動の影響を受ける。Figure 6 にカソード電圧と受電電圧 (V_{66}) の関係を示す。カソード電圧の平均値は 81kV で、受電変動による影響は $\pm 2.5\%$ p-p であった。
- 6.6kV 受電電力から 81kV 直流出力への変換効率の実測値は C ステーションで 96.6%、D ステーションで 94.7% となり、D ステーションの効率は C ステーションに比べて約 2% 低かった。
- 81kV 直流出力から RF 出力の変換効率は C ステーションで 62.4%、D ステーションで 57.2% であった。

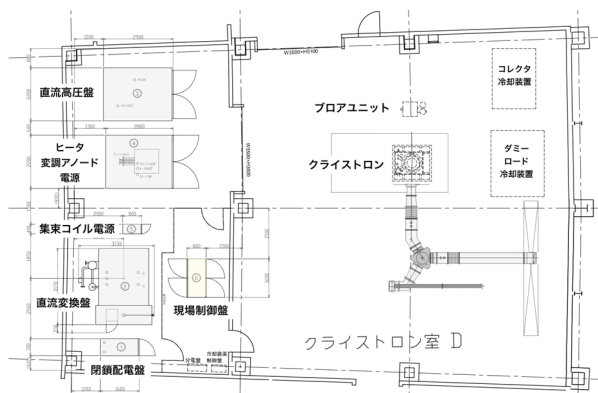


Figure 5: Layout (Left) and photo (Right) of the power supply in the RF D-station.

Dステーションの効率が良くないが、RF出力量に応じてアノード電圧を変える電圧変調装置の設定が最適化されていない可能性があるため、今後、確認調整を行う予定である。

- クライストロンに接続した実負荷でのアノード電圧リップルはCステーションで0.8%p-p、Dステーションで0.5%p-pとなり、48kVから50kV程度の運転で電圧が低い分、基準負荷を用いた単体工場試験の値と異なる結果であった。
- ヒータ電流のリップルは23A設定に対してCステーション0.2%p-p、Dステーション0.1%p-p、集束コイル電流のリップルは8A設定に対してCステーション0.08%p-p、Dステーション0.09%p-pであった。

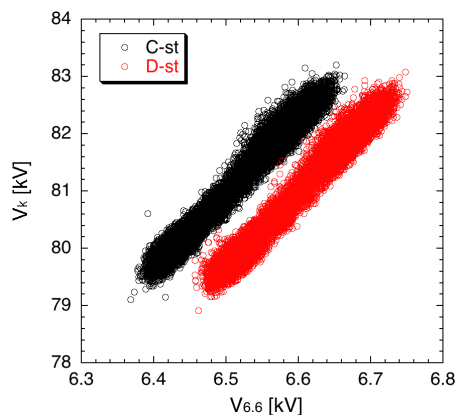


Figure 6: Measured dependences of V_k on $V_{6.6}$.

5. まとめ

約20年間の高周波大電力運転によってクライストロン用90kV直流高圧電源が経年劣化し、部品の寿命超過、老朽化等による動作不良が発生するようになったため、高圧電源を更新中である。新電源では、旧来のサイリスタ式ではなく12相全波整流方式を採用、6.6kVラインVCB付閉鎖配電盤、3タップ電圧切換直流変換器、直流高圧盤、80kV変調アノード電源、ヒータ電源から構成される。受電電圧の調整と安定化に用いられるIVRは、誤動作を引き起こすノイズ源となることが多いため、設置せず、運転に必要な700kWから900kWの電力調整と安定化は変調アノード電源とローレベルRF機器でのフィードバックにより行っている。また、20年間のRF運転でクライストロン短絡現象は一度も発生しなかったため、短絡時保護回路の設置も省いた。蓄積リングの4つのRFステーションの内、昨年度更新した2ステーションでの高圧運転で、特に大きな問題はなく、更新電源は安定に運転されている。また、電源構成の簡略化と合理化により、信頼性の向上、故障やメンテナンスコストの低減を期待している。

謝辞

更新電源の設計および製作に関して(株)東芝の川島秀一氏に心より感謝いたします。また、電源の製作、RFステーションへの据え付け調整作業に当たられたニチコン(株)、及び、東芝プラントシステム(株)の担当スタッフ

各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Kawashima *et al.*, "How to Stably Store Electron Beam in a Synchrotron Radiation Facility from the Point of View of an RF System Design", Proceedings of EPAC08, Genoa, 2008, pp. 1485-1487.
- [2] N. Kumagai *et al.*, "Starpoint Controller for the Klystron Power Supply In the SPring-8 Storage Ring", Proceedings of Int. Power Electronics Conf., Yokohama, 1995, pp. 1497-1500.
- [3] T. Abe *et al.*, "Performance and Operational results of the RF systems for the KEK B-factory", Prog. Theor. Exp. Phys., 2013, **2013** 03A006
- [4] H. Ohkuma, "TOP-UP OPERATION IN LIGHT SOURCES", Proceedings of EPAC08, Genoa, 2008, pp. 36-40.
- [5] H. Tanaka *et al.*, "SPring-8 UPGRADE PROJECT", Proceedings of IPAC2016, Busan, 2016, pp. 2867-2870.
- [6] H. Ego *et al.*, "RF SYSTEM OF THE SPring-8 UPGRADE PROJECT", Proceedings of IPAC2016, Busan, 2016, pp. 414-416.