

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 2

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

惠郷博文^{#, A, B)}, 田中均^{A)}, 福井達^{A)}, 安積隆夫^{C)}, 石井美保^{C)}, 大島隆^{C)}, 大橋裕二^{C)}, 小林和生^{C)}, 近藤力^{C)}, 佐々木茂樹^{C)}, 高嶋武雄^{C)}, 熊谷教孝^{C)}, 勝部貴光^{D)}, 齊藤寛典^{E)}, 溝田樹容子^{E)}, 今野修二^{F)}, 山崎長治^{F)}
Hiroyasu Ego^{#, A, B)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Toru Fukui^{A)}, Takao Asaka^{C)}, Miho Ishii^{C)}, Takashi Oshima^{C)}, Yuji Ohashi^{C)}, Kazuo Kobayashi^{C)}, Chikara Kondo^{C)}, Shigeki Sasaki^{C)}, Takeo Takashima^{C)}, Noritaka Kumagai^{C)}, Takamitsu Katsube^{D)}, Hironori Saito^{E)}, Kiyoko Mizota^{E)}, Shuji Konno^{F)}, Choji Yamazaki^{F)}

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

^{D)} Spring-8 Service Co., Ltd. (SES)

^{E)} TOSHIBA Co.

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

Abstract

In the Spring-8 storage ring, we had used four thyristor-type 90 kV DC power supplies to drive the klystrons outputting an RF power of more than 1 MW for more than 20 years but recently they suffered from malfunction due to excessive lifetime of their components. We have been updating the high-voltage power supplies since 2014. Two of the new power supplies updated in FY 2015 have worked at a cathode voltage of 80 kV stably in 5000-hour operation. Replacement of the rest power supplies had been completed in March 2017 and the storage ring is released from troubles or failures with the old power supplies. Cathode voltages of 70, 80 and 90 kV of the new power supplies are generated from three-phase 6.6 kV AC line with a conventional 12-phase full-wave rectifier having 3-tap transformers with both Δ -Y and Δ - Δ connections. RF powers ranging from 700 kW to 900 kW needed for accelerating a beam of 100 mA are regulated by modulating an anode voltage to the klystron and controlling an RF input power with feedback loop.

1. はじめに

SPring-8 蓄積リング(8GeV)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 508.58MHz で共振する定在波型高周波加速空洞が 8 台ずつ設置され、計 32 台で 16MV のビーム加速を行っている[1]。これら空洞用の大電力高周波源として定格 RF 出力 1.2MW の東芝製クライストロン E3732 を 5 台使用していた。

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、残り3ステーションの RF 出力を約 900kW に上げて運転する。このクライストロンを駆動するには、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 相整流方式で蓄積電流の増強を見据えてクライストロン 2 台を駆動するタイプであった。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、抜本的対策として 2014 年より高圧電源の更新を開始した。放射光供用運転は継続しなければならないため、工期を3年に分けて高圧電源を更新した。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を入れ替え[3]、1年間の大電力運転の状況を確認した後、2016 年度に A、B ステーションの高圧電源を更新した。この高圧電源更新において、蓄積リングアップグレード[4, 5]ではエネルギーを 6GeV に下げること、また、現行リングにおいては蓄積電流の増強は行わないことを考慮して、A ステーションのクライストロン2本駆動は取り止めることとした。そのため、A ステーションの導波管立体回路を組み替えて、他のステーション同様、クライストロン 1 本で空洞 8 台を駆動するシステムに改造した。これにより、全ステーション 90kV-20A の単一仕様電源に統一された。本報告では、この更新電源の開発をまとめ、新高圧電源の運転状況を報告する。

2. 電源更新指針

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。6.6kV 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

ego@spring8.or.jp

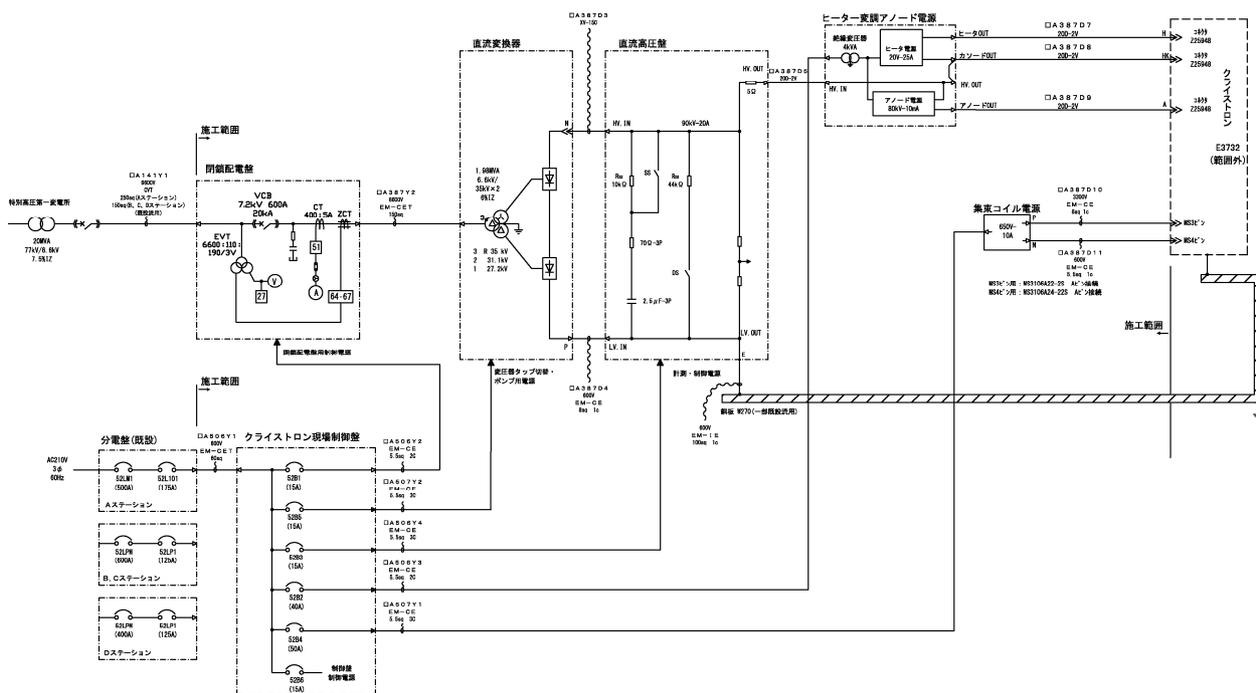


Figure 1: Block diagram of the new 90 kV DC power supply.

ノード電源、ヒータ電源から構成される。カソード部はダイオードブリッジを用いた 12 相全波整流方式である。

現在、SPring-8 では、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）が行われており、蓄積リングのビーム電流変動は 0.05% 以内に抑えられ、定強度の放射光が供給されている[6]。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。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、90kV）としており、1ステーションあたり 700kW の RF 出力に対しては 80kV タップで運転している。1ステーショントラブル時には、3ステーションでの 100mA 運転のため、900kW を超える高出力が必要となる。80kV タップでの RF 出力はクライストロン個体差によって 900kW から 970kW 程度のばらつきがあるので、出力が不足する場合は、90kV 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では蓄積リングのビームエネルギーを 8GeV から 6GeV 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。

6.6kV 受電電圧の調整と安定化に用いられる 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ったので[3]、今回の更新でも設置していない。RF 出力レベルの調整、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 RF 出力変動の補正は、アノード電圧の調整（ビーム引き出し電流の調整）で対応し、電源系のリップルなどによる RF 出力の変化 (<10kHz) は励振 RF 信号のフィードバックにて安定化している。

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。サイリスタ式の前電源に比べて構成機器が簡略・合理化されており、メンテナンスおよび信頼性の向上を図っている。各機器の詳細は、文献[3]に詳しく述べているので本報告では概略を示す。

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 相交流の受電、遮断を行う。

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 タップ無電圧切換器が設けられ、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。

3.3 直流高圧盤

直流高圧盤には設計値 7.5μF (2.5μF 3 並列、実測値 7.3μF) の平滑コンデンサ、23.3Ω (70Ω 3 並列) 平滑抵抗、5Ω 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。この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が、2016 年度を通してのカソード電圧の平均値は 81kV で、受電変動による影響は ±2.5%p-p であった。

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圧ボックス内に収納されている。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 ±10%、負荷変動 ±10% に対して ±

0.5%である。RF 出力運転時のヒータ電流リップル実測値は 23A 設定に対して 0.2%p-p 程度であった。

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±10%、負荷変動±10%に対して、±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 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。クライストロン実負荷でのアノード電圧リップルは 0.5~0.8%p-p である。

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±10%、負荷変動±10%に対して±0.5%である。クライストロン実負荷運転での集束コイル電流のリップルは 8A 設定に対して 0.09%p-p 程度であった。

4. 高圧運転

2016年3月に入れ替えを行ったC、Dステーションの高圧電源は、2016年度に行った約5000時間運転において期待通りの安定動作であった。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は650kW前後のRF出力となっている。この状況から、改造や手直しの必要はないと判断して、A、Bステーションの高圧電源も先行ステーションと同内容で更新した。

クライストロン内での短絡アーク放電時に、平滑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し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が、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発生しなかったため、クローバ回路のようなマイクロ秒で応答する短絡時クライストロン保護回路の設置は省略した。しかしながら、Bステーション電源更新後の調整運転時に短絡現象が発生した。この際、直流高圧盤内でクライストロンアーク放電によると考えられる短絡過電流異常状態が専用検出回路にて応答速度1ms以下で検出され、検出から応答時間7ms以内でアノード電源OFF指令、カ

ソード出力もVCBにて60Hz-1サイクル程度でOFFされた。確認したところ、高圧電源には異常は生じていなかった。高圧運転時の各部計測データから、短絡が生じる前の試験中にFigure2のアノード電流負側にスパイクが発生していた。これはアノード・ボディ間での放電を示唆する。70kVタップ運転では生じておらず、80kV、90kVタップでの運転で観測された。要因としてクライストロン本体のアノード・ボディ間の耐圧が落ちていることが考えられる。また、サイリスタやIVRのようなカソード電圧調整機能がないため、アノード電圧が立ち上がるまでの間、ボディ・アノード間の電位差が、これまで以上に大きくなっていることもスパイクを誘発した可能性として考えられる。クライストロンを予備品と交換した後の運転では、アノード電流スパイクは発生せず、正常に動作するようになった。

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、高圧電源の更新を完了した。電源は12相全波整流方式で、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。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。更新後、特に大きな問題はなく、この高圧電源によりクライストロンは安定に大電力運転されている。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も達成した。

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、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] H. Ego *et al.*, "RENEWAL OF A 90 KV DC POWER SUPPLY FOR THE KLYSTRON OF THE SPRING-8 STORAGE RING", Proceedings of PASJ2016, Chiba, 2016, pp. 914-918.
- [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.

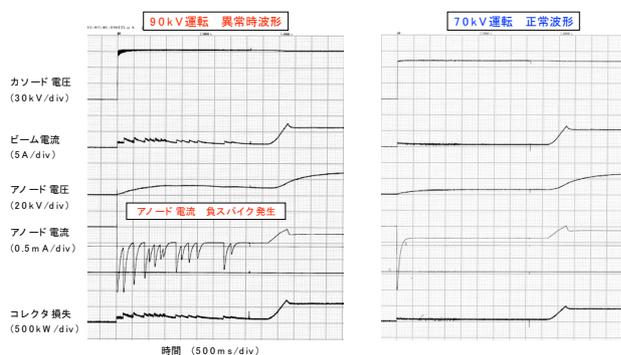


Figure 2: Start-up charts of major voltages and currents of the power supply in the RF B-station at the 90 kV tap (Left) and the 70 kV tap (Right).