

SuperKEKB クライストロン電源の周辺

~2023 年度先任・主任技師による若手技術者のためのフォローアップ研修 ~

吉本 伸一

2024 年 8 月 8 日

目次

第 1 章	SuperKEKB のクライストロン電源	3
1.1	SuperKEKB の RF システムの概要	3
1.2	KPS の概要	5
1.2.1	直流高電圧カソード電源	7
1.2.2	クローバースイッチ	7
1.2.3	ヒーター・アノード電源	7
1.2.4	集束コイル電源	7
1.2.5	アースラインとノイズ	7
1.2.6	電源の制御とインターロック	7
第 2 章	短絡試験	8

第1章 SuperKEKB のクライストロン電源

1.1 SuperKEKB の RF システムの概要

SuperKEKB 加速器の MR (Main Ring) は 4 つの直線部を 4 つの弧で結んだレーストラック型で、4 つの直線部のうち Belle II 測定器がある筑波直線部を除いた 3 箇所と陽電子 DR (Damping Ring) に電子、陽電子を加速するための高周波システムが配置されている。(図 1.1) に SuperKEKB 加速器の高周波システムのレイアウトを示す。

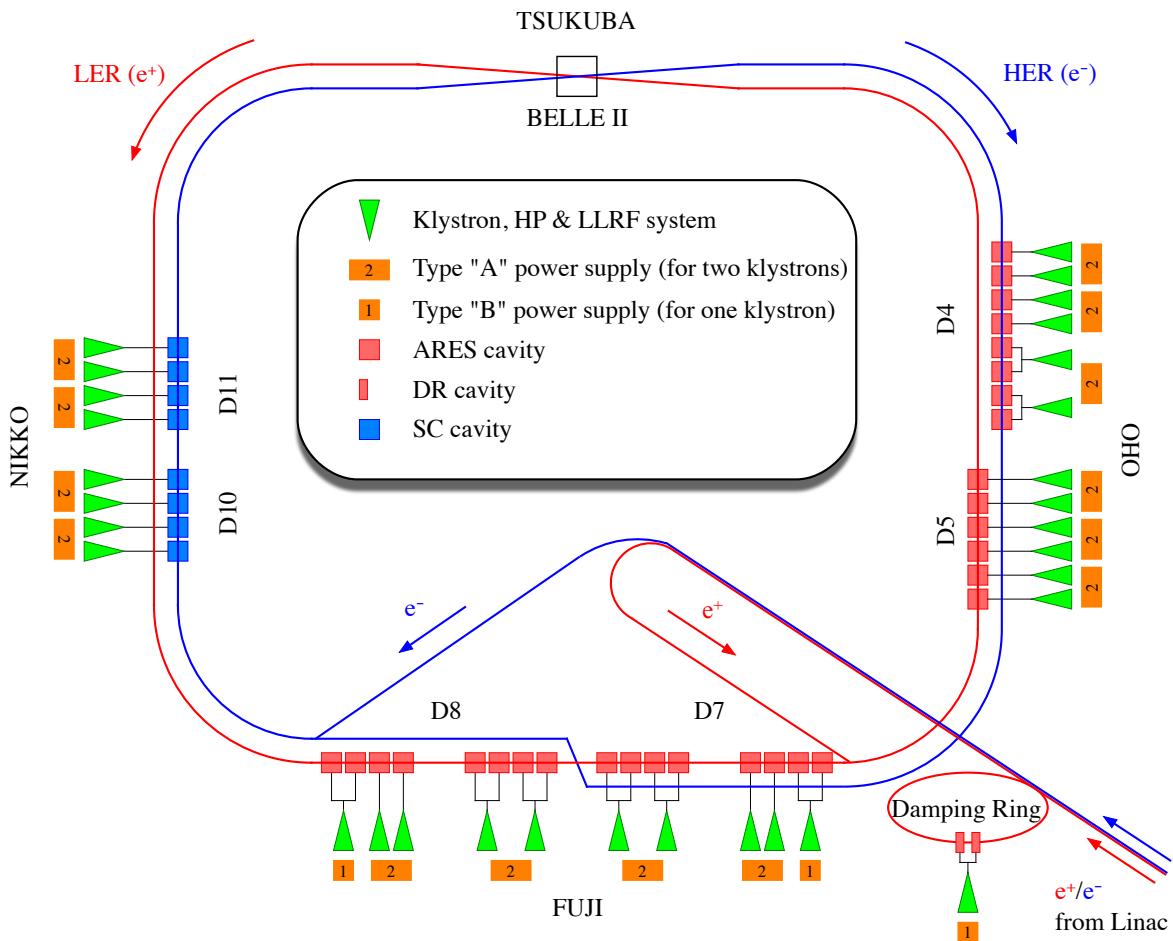


図 1.1 SuperKEKB 加速器の高周波システム.

各 RF ステーションは、クライストロン、大電力 RF システム (HPRF) (図 1.2)、ローレベル RF システム (LLRF)、RF 空洞で構成される。(図 1.1) に示すように、常伝導 ARES 空洞の場合、1 台のクライストロンで 2 台の空洞を駆動するステーションと、1 台のクライストロンで 1 台の空洞を駆動するステーションがあり、超電導空洞の場合は、すべてのステーションが 1 台のクライストロンで 1 つの空洞を駆動している。大穂 (D4, D5)、富士 (D7, D8)、日光 (D10, D11)、DR の四つの電源室に、電源 1 台で 2 本のクライストロンに電力を供給できる A 型電源 14 台、電源 1 台で 1 本のクライストロンに電力を供給できる B 型電源 3 台、計 17 台のクライストロン電源 (Klystron Power Supply : KPS) と、クライストロン 31 本が設置されている。KPS は、できるだけ安価で、尚且つ、安定した電源供給を目指したもので、ほとんどの KPS が改良や老朽化対策を行いながら、設置から 40 年近く使い続けている。



図 1.2 HPRF システム (DR 電源棟).

1.2 KPS の概要

KPS は、クライストロンのカソード、アノード、ヒーター、および集束コイルに必要な直流電力を供給するシステムです。KPS には、クライストロンを内部高電圧破壊から保護するためのクラウバ回路が備えられています。2 種類の KPS が用意されています。タイプ A の KPS は、2 台のクライストロンに -90 kV、40 A（各 20 A）の直流高電力を供給し、一方、タイプ B の KPS は 1 台のクライストロンに -90 kV、20 A の能力を持ちます。両タイプの KPS は 8.5 m × 6 m の面積を占め、各建物に 2~3 台の KPS が設置されています。タイプ A の KPS のブロック図は図 36 [67] に示されています。KPS の具体的なパラメータは参考文献 [68] に記載されています。

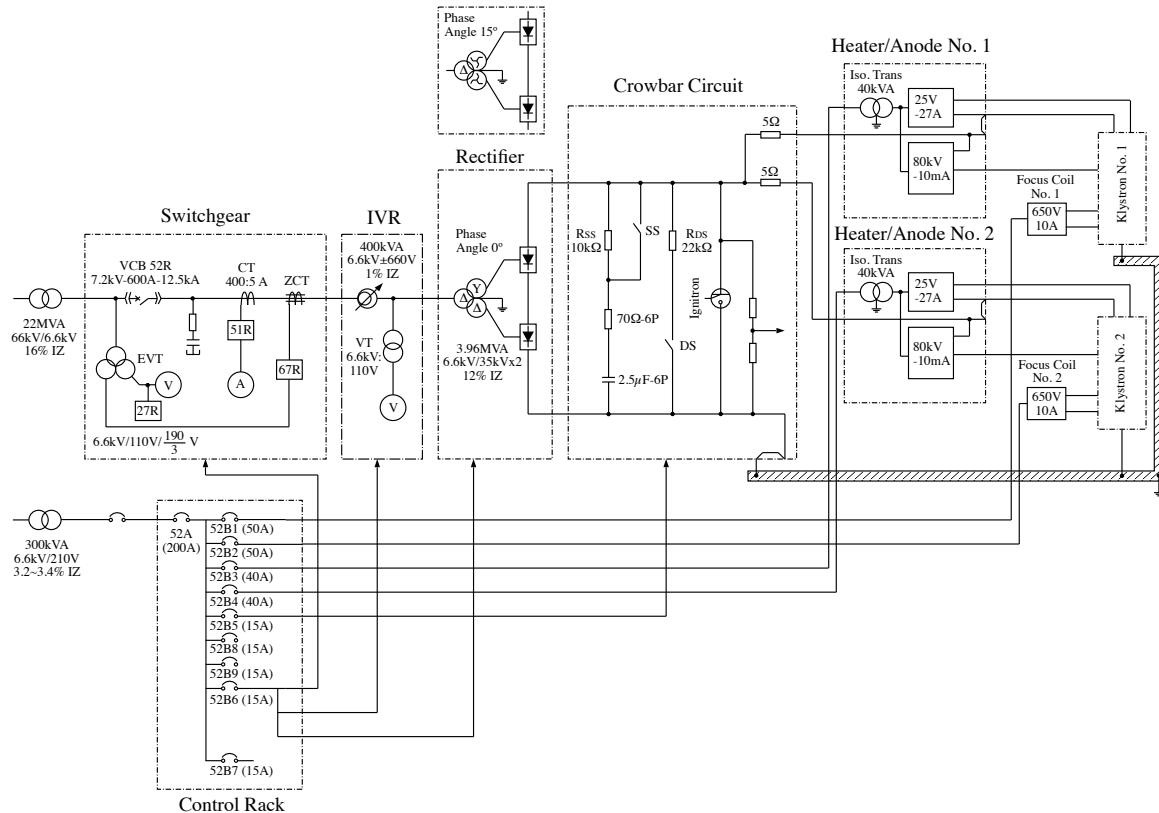


図 1.3 Block diagram of a type-A KPS.

SuperKEKB のメインリング (MR) のクライストロン電源 (KPS) には、2 台のクライストロンに電源を供給する A 型と、1 台のクライストロンだけの B 型が存在する。さらに、A 型及び B 型の半数は、交流 6.6 kV ラインの位相を 15° ずらしてあり、MR の電源室へ混在させて設置してある。これは、MR ビームへのカソード電圧のリップルを通して影響、及び、逆に 6.6 kV ラインを通して中央変電所側への高次のノイズの発生等を考慮して行われた。つまり、カソード電圧は 12 相の全

波整流でクローバ回路部にあるコンデンサーで平滑され、その半数は 15° 位相がずれており、MR 全体で見た場合大略、24 相で整流されたものとみなせる見なせる。

電源は、各クライストロン 1 本につき、カソード、アノード/ヒータ、集束/補助集束コイルの電源から構成される。A 型電源では、カソード電圧は 2 本のクライ-ストロンで共通であるが、その他は独立に制御される。出力電圧はトランスの切替（無電圧時）によって、公称出力 -50 kV 、 -65 kV 、 -80 kV 及び -90 kV の内から 1 つ選択され、さらに微細な電圧調整は、可変範囲 $\pm 10\%$ の IVR によって行われる。実際の運転においてはクライストロン負荷が変化しても、 $\Delta V_k/V_k < \pm 1\%$ となる様に IVR を自動転している。各クライストロンへはカソード電圧 -90 kV でビーム電流 20 A まで供給可能である。アノード電源はコッククロフトワルトン型の電源で、カソード電位が基準電位なり、80 kV で 10 mA まで出力可能である。実際の運転においては、立下りを早めることが必要となり（後述）20 MΩ の抵抗を外付けにクライストロンと並列にカソードとアノード間に挿入した。



図 1.4 クライストロン電源の全景

1.2.1 直流高電圧カソード電源

電源平滑コンデンサの容量を大きくすればするほど、リップル含有率は小さくなる。しかし、やみくもに大きくすれば良いという訳ではない。その理由は、電源投入時に平滑コンデンサを充電するために非常に大きな電流（突入電流）が流れてしまい、精密な回路を壊してしまう可能性があるからだ。したがって、充電時には R_{SS} を直列に入れて突入電流を制限している。コンデンサが充電後は SS が閉じこの抵抗はバイパスされる。

1.2.2 クローバースイッチ

クライストロンを保護するためにクローバースイッチに要求される性能は、以下のようになる。

1. カソード電圧が 50 kV 以上の場合、負荷が短絡した時、クローバーは 6 μ s 以内に動作し、負荷へのエネルギー流入は 30 J 未満でなければならない。
2. カソード電圧が 30 kV 以下の場合、100 ms 以内に高圧を切ること。

5Ω の抵抗がクライストロンのカソードとクローバースイッチの間に挿入されている。この抵抗は 5 本の直列に接続したイグナイトロンがトリガーするまでカソード電圧を保持するためにある。

1.2.3 ヒーター・アノード電源

1.2.4 集束コイル電源

1.2.5 アースラインとノイズ

1.2.6 電源の制御とインターロック

第2章 短絡試験

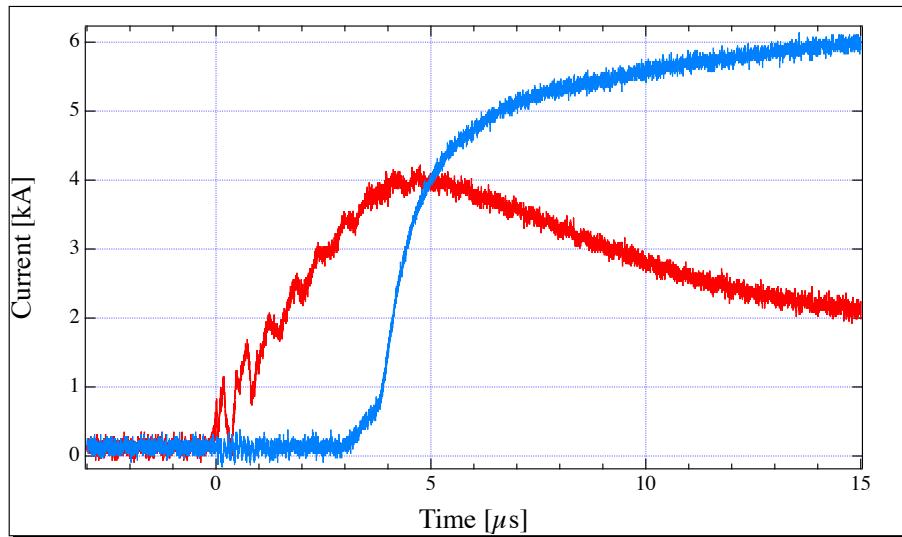


図 2.1 Block diagram of a type-A KPS.

参考文献

- [1] M. Ono et al., TRISTAN RF system with normal conducting cavity, KEK Internal 87-6 (1987)