

SuperKEKB クライストロン電源

Shin-ichi YOSHIMOTO

2024 年 8 月 8 日

目次

第1章	クライストロン電源の概要	3
1.1	RFシステムの概要	3
1.2	クライストロン電源の概要	3
1.2.1	直流高電圧カソード電源	4
1.2.2	クローバースイッチ	5
1.2.2.1	短絡試験	5
1.2.3	ヒーター・アノード電源	5
1.2.4	集束コイル電源	5
1.2.5	アースラインとノイズ	5
1.2.6	電源の制御とインターロック	5
第2章	クライストロン電源のオペレーション	8
2.1	クライストロンビーム電流制御	8
第3章	クライストロン電源の問題点	10
3.1	老朽化による不具合	10
3.1.1	平滑コンデンサ	10
3.1.2	真空遮断器 (VCB)	10
3.2	クローバー誤動作問題	10

第1章 クライストロン電源の概要

1.1 RF システムの概要

SuperKEKB 加速器は 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 3 箇所と陽電子用のダンピングリングに電子や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ます。(残りの直線部には Belle II 測定器があります) 図 1.1 に SuperKEKB 加速器の高周波システムのレイアウトを示します。大穂 (D4, D5)、富士 (D7, D8)、日光 (D10, D11)、ダンピングリングの四つの電源室に、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 台の電源設備があり、クライストロンは 31 本あります。電源装置は、できるだけ安価で安定した電源供給を目指したもので、殆どの電源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ます。

電源とクライストロンは地上の電源室にありますが、そこから地下 11 m にある周長 3 km の加速器トンネル内に加速空洞が設置されています。大穂と富士では常伝導空洞である ARES 空洞が、日光では超伝導空洞が使われており、クライストロンから伸びた長い導波管でこれらの加速空洞へと繋がり、クライストロンから出た高周波電力が供給され、電子や陽電子を加速します。

1.2 クライストロン電源の概要

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° ずらしており、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

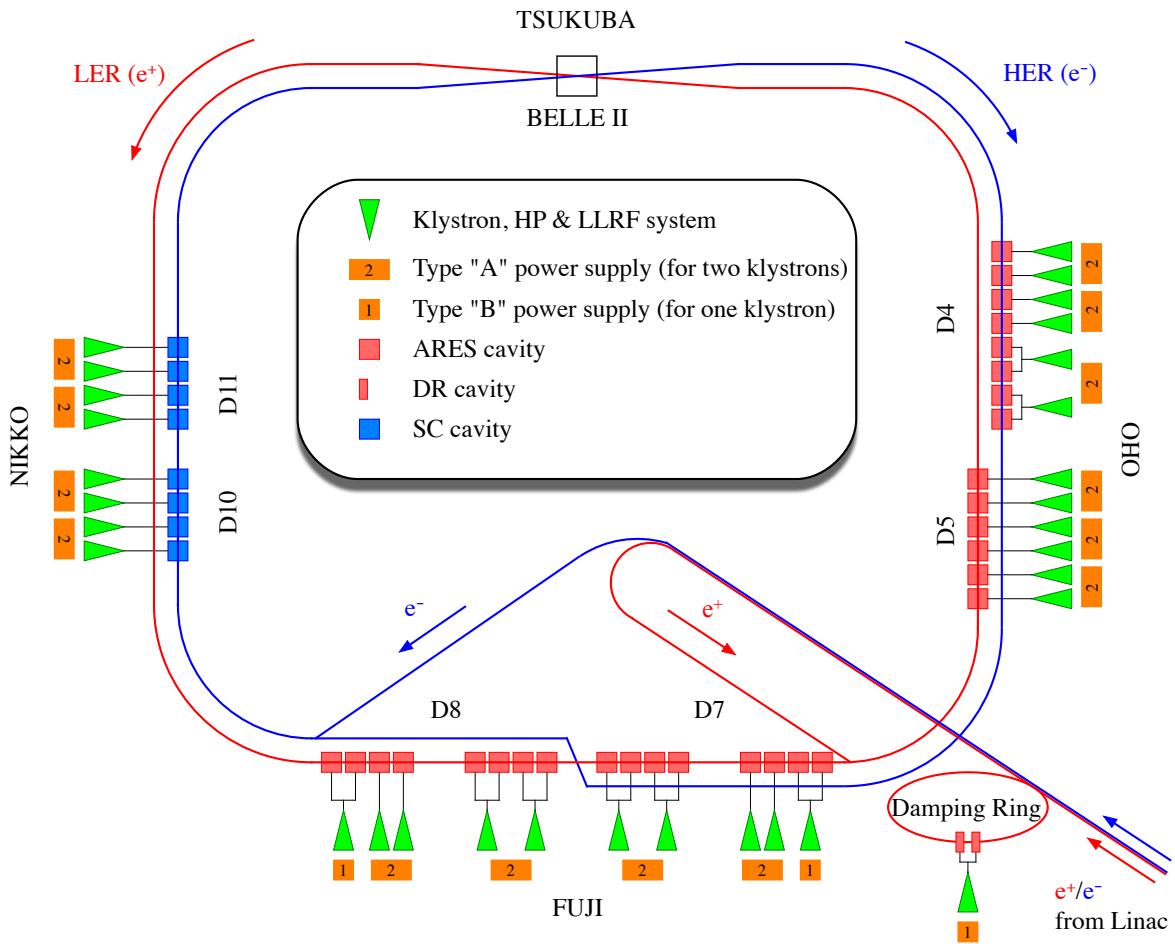


図 1.1 Layout of SuperKEKB, showing the locations of RF buildings and RF stations.

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） $20\text{ M}\Omega$ 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。

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。

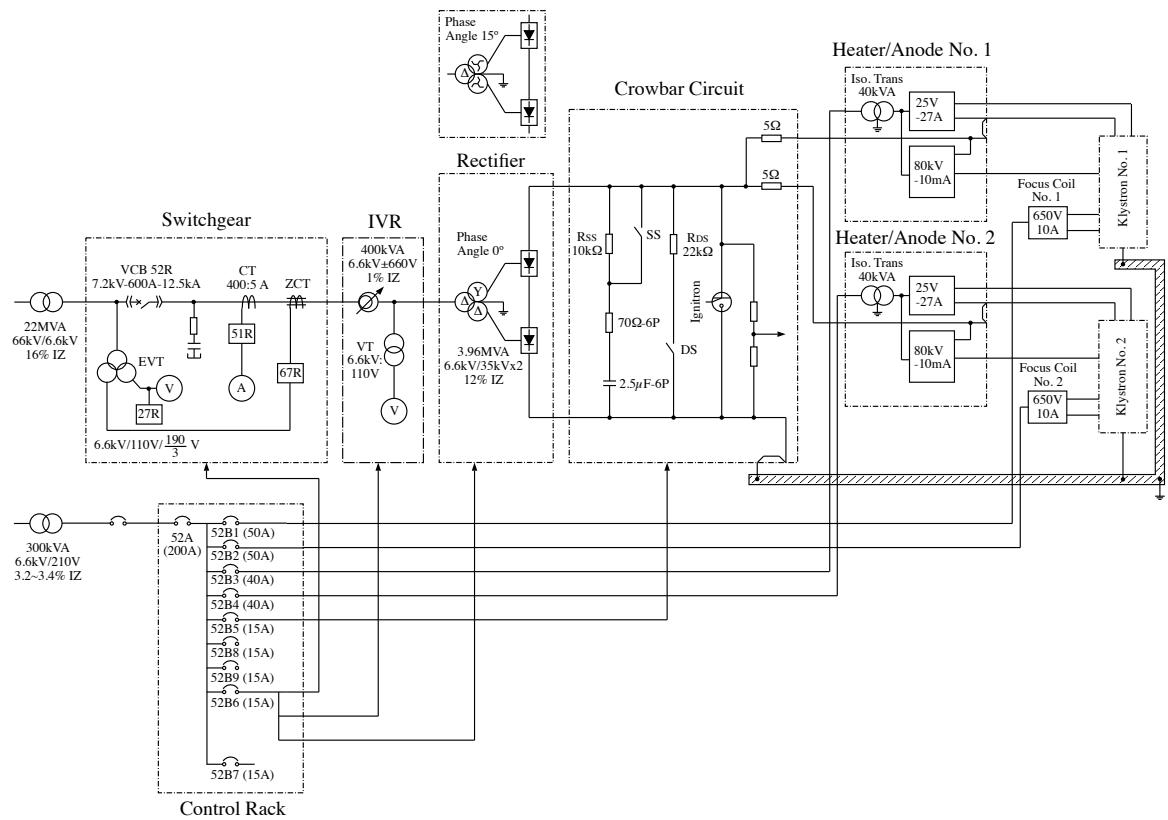


図 1.2 Block diagram of a type-A KPS.

1.2.2 クローバースイッチ

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。

1.2.2.1 短絡試験

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



図 1.3 クライストロン電源の全景

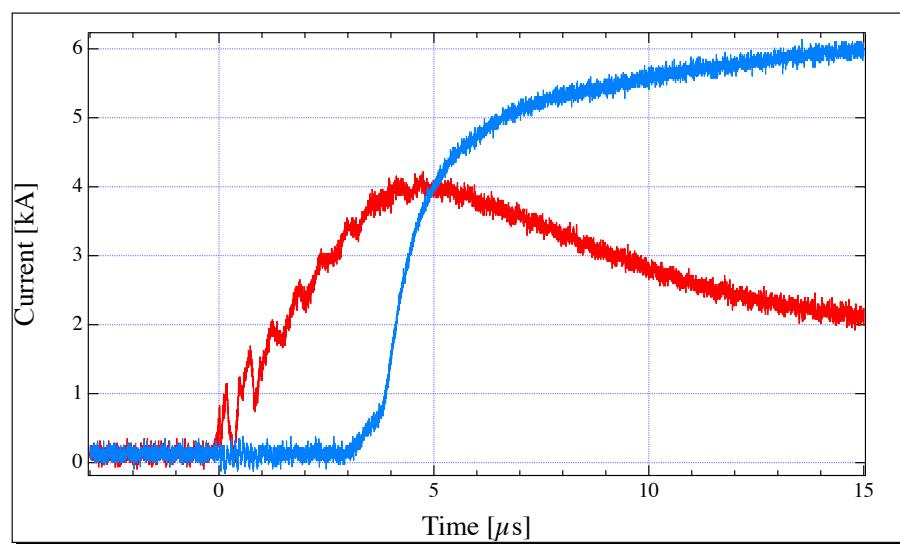


図 1.4 Block diagram of a type-A KPS.

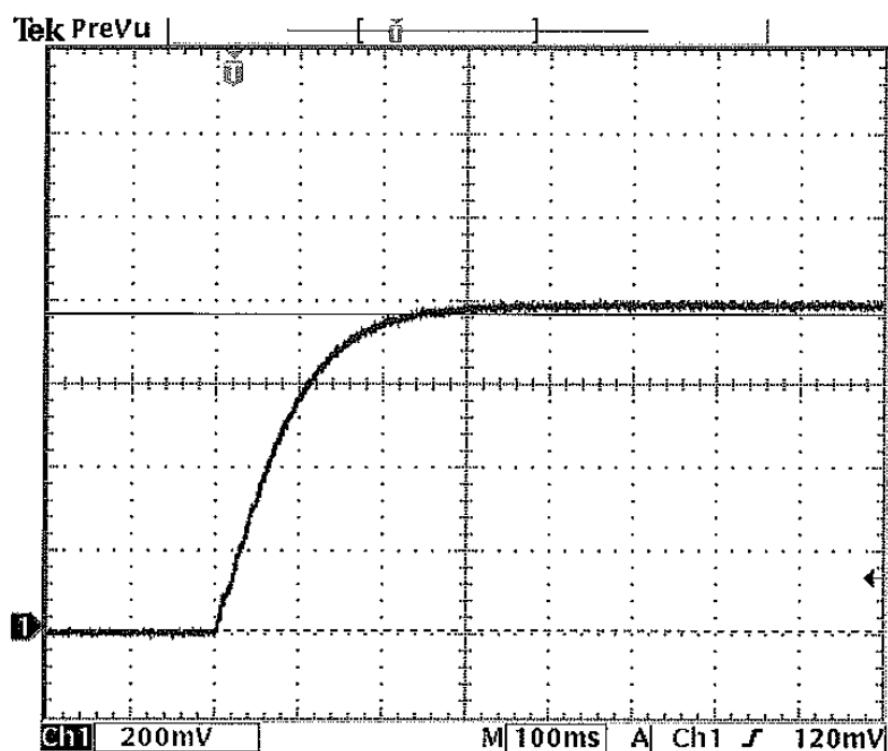


図 1.5 Block diagram of a type-A KPS.

第2章 クライストロン電源のオペレーション

2.1 クライストロンビーム電流制御

クライストロンへの RF 入力電力を変化させることで、空洞電圧 V_c を制御する。もし、DC 入力電力を一定に保つとすると、RF 電力が低い時は、コレクタ損失が非常に大きくなる。そこで、消費電力の低減とコレクタの過熱防止のため、クライストロンのビーム電流を必要な RF パワーで制御する方式を採用した。図 2.1 に本方式のブロック図を示す。クライストロン入力の RF 振幅はリニア検波され、関数変換器に入力される。関数変換器は、必要な RF 電力を出力するのに十分なビーム電流を与えるために、変調アノード電圧に適した関数を生成します。本システムには 2 つのリミッター機能がある。1 つはアノード電圧をカソード電圧よりも幾分低く保つためのもので、もう 1 つは、コレクタの消費電力をあらかじめ設定した値に制限するものである。

このシステムは基本的に開ループであるが、 V_c フィードバックループの摂動源として作用する。したがって、システムの応答速度は V_c ループの応答速度よりはるかに遅くななければならない。この要件は、変調アノード電源として本質的に低速のコッククロフト・ウォルトン回路を使用しているため、自動的に満たされる。このシステムの応答速度は約 0.3 秒である。このシステムが V_c フィードバックループに与えるもう一つの効果は、ループゲインを RF パワーレベルに依存されることである。RF パワーレベルによってクライストロンビーム電流が決まり、それによってクライストロンゲインが決まり、結果的に V_c フィードバックループのループゲインが決まる。ループゲインは 5 kW から 800 kW の RF パワー範囲で約 15 dB 变化する。

クライストロンのビーム電流は、アノード電圧の $3/2$ 乗でコントロールされる、 $I_b \propto V_a^{3/2}$ 。カソード電圧 (V_k) は $\pm 1\%$ で一定であり、コレクターでの損失 (P_{cl}) をあまり大きくない範囲に納めようとするならば、RF 出力 (P_{rf}) と相関をもって、ビーム電流 ($P_{dc} = V_k \times I_b$) をコントロールする必要がある。

$$P_{dc} = P_{rf} + P_{cl}$$

但、このことより空腔の加速電圧 (V_c) を一定にする feedback loop の gain は、RF 出力によって変動するようになる（最小一最大で約 15 dB の gain が変化）。ビーム電流のコントロールのブロック図を図 2.1 に示す。ここで、アノード電圧のコントロール信号としては、Drive Power を検波した信号を用いている。この方法は MR の電子一陽電子ビームによるビームローディングの分で RF 出力が増加する分も、自動的に V_a に反映される。反射波等のインターロックによって RF 出力が瞬間に off になった時は コレクターロスを軽減するために速やかにアノード電圧を下げ、ビーム電流を減少させねばならない。このことが、最初に述べた、アノード電圧の立下りを早めた理由で

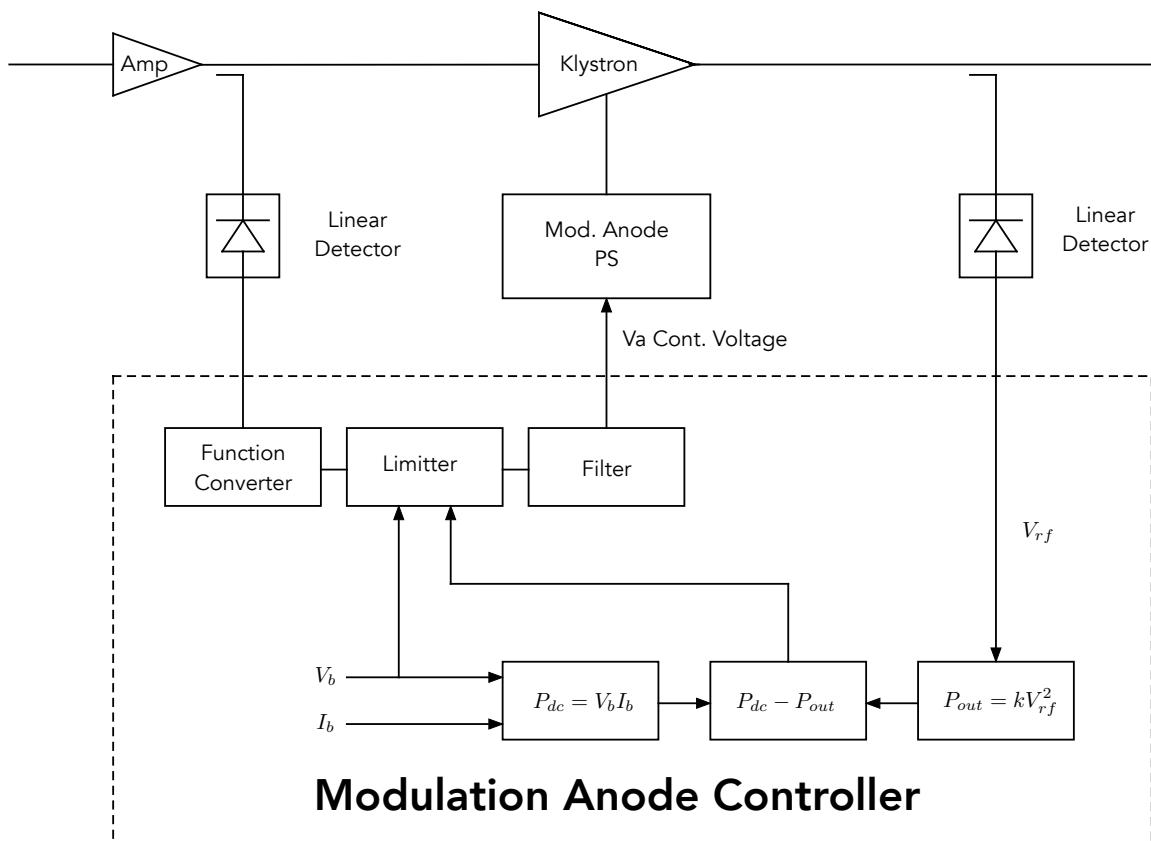


図 2.1 Block diagram of the klystron beam-current control system.

あった。

第3章 クライストロン電源の問題点

3.1 老朽化による不具合

3.1.1 平滑コンデンサ

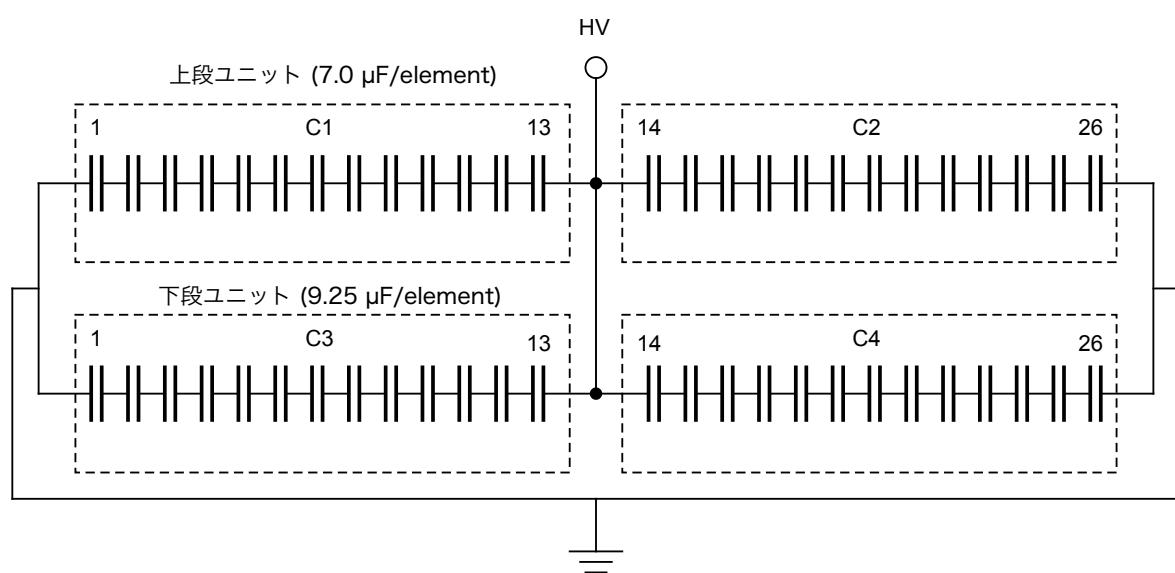


図 3.1 平滑コンデンサのエレメント結線図

3.1.2 真空遮断器 (VCB)

3.2 クローバー誤動作問題

参考文献

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