

SuperKEKB クライストロン電源のクローバー回路 CROWBAR CIRCUIT FOR SuperKEKB KLYSTRON POWER SUPPLY (KPS)

小野礼人[#], 吉本伸一
Ayato Ono[#], Shin-ichi Yoshimoto
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The SuperKEKB accelerator is equipped with 16 klystron power supplies (KPS) in the main ring and one in the damping ring, each incorporating a crowbar circuit to protect the klystron. While these systems have been enhanced through continuous improvements since the TRISTAN era and are capable of high-speed operation, they are prone to malfunctions caused by electrical noise and other disturbances. This paper reports on the countermeasures that have been implemented to mitigate these issues and presents an evaluation of the current performance of the crowbar circuits.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器で使用されているクライストロン電源 (KPS) には、1 台で 2 本のクライストロンを駆動する A 型電源と、1 台で 1 本のクライストロンを駆動する B 型電源の 2 種類がある。加速器全体では、A 型が 14 台、B 型が 3 台設置されており、合計 31 本のクライストロンに電力を供給している。これらの電源の多くは、TRISTAN 加速器時代から改良・更新を重ねながら、約 40 年にわたり使用され続けてきた。すべての KPS には、クライストロンを保護するための短絡保護装置 (クローバー回路) [1] が搭載されているが、これらの回路は高速動作が可能である反面、ノイズなどの外乱に対して脆弱であり、運用初期から誤動作が課題となっていた。本稿では、これまでに実施してきた誤動作対策、とくにコロナ放電やノイズに対する具体的な取り組みと、クローバー回路の現状の性能について報告する。

2. クライストロン電源 (KPS) の構成

KPS は、カソード電源 (90 kV/A 型: 40 A、B 型: 20 A)、変調アノード電源 (80 kV/10 mA)、ヒータ電源

(30 V/28 A)、および集束コイル電源 (650 V/10 A) で構成されている。Figure 1 に、A 型電源の概略回路を示す。本章では、この KPS の構成について詳述する。

2.1 カソード電源とクローバー回路

カソード電源は、特別高压変電所から供給される三相交流 6.6 kV を VCB 内蔵の受電盤で受け、IVR によって ±10% の範囲で電圧調整を行った後、変圧整流器へ送られる。変圧整流器内では、12 相全波整流によって最大 DC -90 kV の高電圧が発生する。この電圧は、クローバー回路部内の大容量コンデンサ (A 型で 15 μF、B 型で 7.5 μF) によって平滑化され、クライストロンのカソードへ供給される。このコンデンサに蓄えられるエネルギーは非常に大きく、万が一クライストロン内部で放電が発生した場合、その全エネルギーがクライストロンに流れ込み、破壊に至る危険がある。これを防ぐため、クローバー回路部にはクライストロン保護用のバイパス回路 (クローバー回路) が内蔵されており、スイッチ素子として National ELECTRONICS 製の水銀整流器 (イグナイトロン) NL7703EHV を 5 本直列に接続して使用している。クライストロン内部で放電が発生すると、負荷側の短絡電流が CT1 によって検出され、トリガーパルス発生器からの信号によりイグナイトロン 5 本が同時に点弧し、短絡電

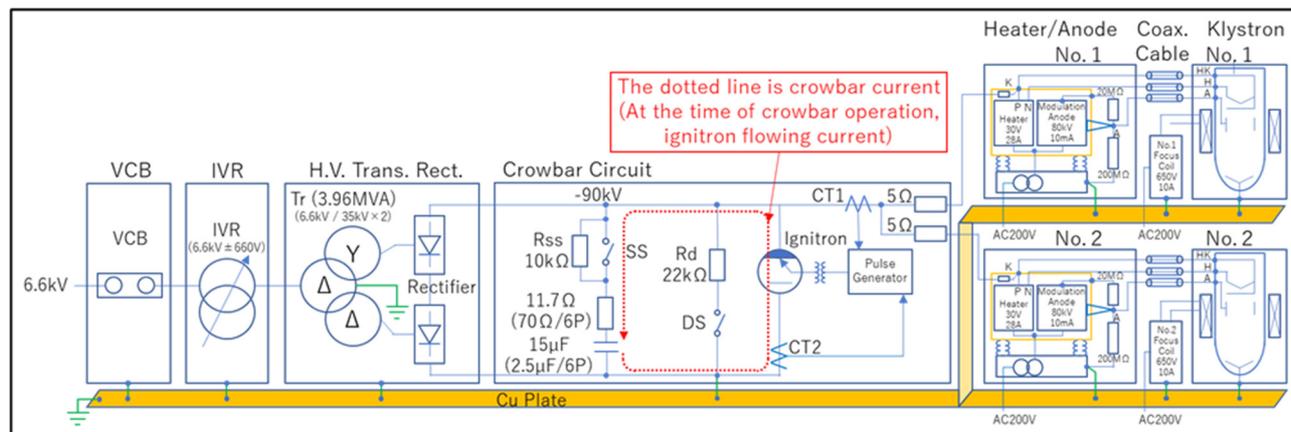


Figure 1: Klystron power supply (KPS) type A.

[#] onoayato@post.kek.jp

流をバイパスすることでクライストロンを保護する。クローバー回路動作時に流れるクローバー電流(イグナイトロンに流れる電流)の経路は、Fig. 1 の赤色点線で示している。

2.2 ヒータ電源と変調アノード電源

ヒータ電源と変調アノード電源は同一筐体に收容されており、いずれもカソード電圧(DC -90 kV)と同じ電位に接続されている。このため、両電源への AC 200 V の電力供給は、高電圧に耐える絶縁トランスを介して行われる。さらに、制御盤からの指令や設定信号、電源側のステータスやモニタ信号などの通信は、高電圧絶縁を確保する目的で、すべて光ファイバーによって伝送されている。

2.3 集束コイル電源

クライストロンに付属している集束コイルへ電源を供給する集束コイル電源(650 V/10 A)を有している。

2.4 アースについて

アースに関しては、300 mm 幅のラミネート絶縁銅板が各機器近傍に敷設され、建屋に一点接地されている。各機器との接続には 38~100 sq の IV 線を用いている。定常時には、クライストロン 1 本あたり最大 20 A、A 型であれば合計 40 A 程度のビーム電流がリターンとして流れる。また、放電が発生した場合には、2000~4000 A の短絡電流が流れる可能性があり、その際には銅板の電位が 1000 V を超えることが想定されるため、ラミネートによる絶縁が必須となっている。

3. クローバー回路の誤動作対策

クローバー回路の誤動作対策としては、コロナ放電などのノイズ源を抑制する対策と、ノイズによる検知回路の誤動作を軽減するための対策を実施した。本章では、これらの具体的な対策内容について述べる。

3.1 コロナ対策および集塵対策

(1) クローバー回路部の側板の撤去

当初は装置全体を密閉することで集塵対策を試みたが、十分な効果が得られなかった。そのため、内部機器の絶縁距離を確保する目的で側板を撤去した。撤去前の側板は内外両面が塗装されており、内部の高電圧部と対向する内側面が帯電することが確認された。後に新設された D7-E ステーションでは、アルミ製側板の外側のみを塗装する改良が施され、密閉による集塵対策の効果が得られた。

(2) カソード抵抗(5 Ω)の盤外移設

DC -90 kV が印加される抵抗器について、絶縁距離を確保するためにコロナリングを追加し、盤外(天井部)へ移設した。

(3) DS(接地器)の位置変更

DC -90 kV が印加される電極を含む DS についても、絶縁距離確保の観点から、盤外へわずかにみ出す程度に位置を変更した。

(4) イグナイトロンユニットの塩ビカバーによる密閉化 常時 DC -90 kV が印加されるイグナイトロンユ

ニットに塩ビ板材のカバーを装着することで、高電圧部への塵埃付着を抑制し、コロナ放電を低減。結果として誤動作の防止に効果があった。

(5) コロナリングの追加設置

クローバー回路部の高電圧電極や、対向するアース電位の電極にコロナリングを追加することで、電界集中を緩和し、コロナ放電の低減を図った。

(6) ひだ付き絶縁パイプの材質変更

ヒータおよび変調アノード電源の制御信号伝送に使用される、低圧部から高圧部へ接続されるひだ付き絶縁パイプの材質を変更した。

(7) イグナイトロンユニット用金属カバーの設置

D7-E ステーションでは、露出していたイグナイトロンユニット全体を滑らかな表面を持つ金属製カバーで覆うことで、突起部をなくし、コロナ放電を抑制する構造とした。

(8) 球ギャップの状態確認

イグナイトロンユニットには、イグナイトロンと並列に球ギャップが設けられており、イグナイトロンが動作しない場合には球ギャップが放電することで過電圧を防止している。しかしながら、この球ギャップが規定電圧よりも低電圧で放電してしまう事例があり、クローバー回路の誤動作を引き起こした。したがって、球ギャップの表面状態の定期的な確認が必要である。

3.2 検知回路のノイズ耐性強化

(1) 短絡電流検知 CT(CT1)の光信号化

クライストロンの短絡を検知する短絡電流検知 CT(CT1)と、検知信号をもとにイグナイトロンユニットへトリガー信号を送出するパルス発生器は、当初 BNC ケーブルを用いた電気信号により接続されていた。しかし、クライストロン短絡時には大電流が流れるため、誘導ノイズ等によりクローバー回路が誤動作する事例が発生していた。この対策として、CT1 の出力信号を光信号へ変換することでノイズの影響を低減し、誤動作の大幅な減少が確認された。あわせて、イグナイトロン電流を検知する CT(CT2)についても同様に光信号化を実施している。

(2) IVR 動作時のノイズの除去

クローバー回路は、クライストロン内部での放電に限らず、集束コイル電源がインターロックにより遮断された場合にも、クライストロン保護の観点から速やかに電源を停止させる必要があるため、これを契機として動作する仕様となっている。

しかしながら、特定の電源においては、IVR を駆動するモーターの動作時にスパイク状のノイズが発生し、それが集束コイル電流のモニタ信号に重畳することで、インターロックが誤動作し、クローバー回路が頻繁に動作する現象が確認された。この対策として、電流モニタ信号ラインにローパスフィルタを挿入し、ノイズ成分を除去した結果、誤動作の発生頻度は大幅に低減された。

3.3 まとめ

コロナ放電対策として、電極間の距離を確保し、また電極表面を滑らかにすることで電界集中の緩和を図って

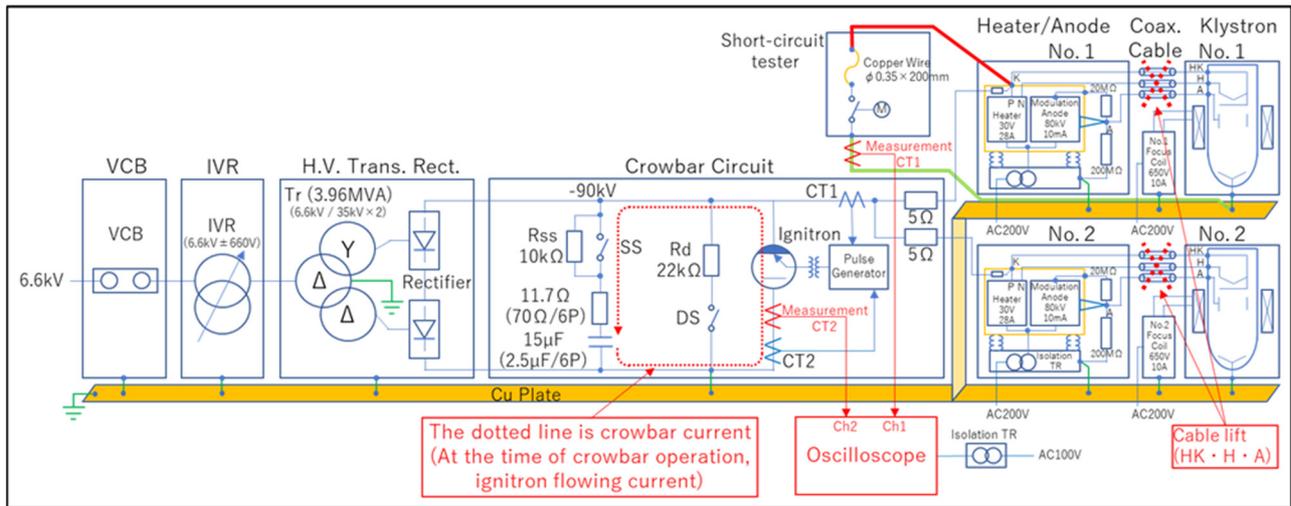


Figure 2: Short-circuit test circuit.

いる。さらに、高電圧部への塵埃付着を抑制するため、カバーの設置などを通じた集塵対策も実施しており、これらの施策によってコロナ放電の抑制が確認されている。

また、クライストロン短絡時などに大電流が流れることによって発生するノイズ対策としては、短絡検出系の光信号化を行い、電気的ノイズの影響を低減することで誤動作防止に寄与している。

一方、SuperKEKB 加速器のクライストロン電源が設置されている電源室は、塵埃の多い環境であり、根本的な対策として再び電源盤の密閉化を検討する必要があると考えられる。たとえば、ファンを用いて電源盤内に外気を取り込み、加圧状態に保つことで外部からの塵埃侵入を防ぐことが可能である。ただし、その際には吸気口にフィルターを設けて塵埃を確実に遮断し、定期的な清掃・交換体制を整えることが重要である。

現状の設置スペースでは、コロナ放電を防ぐための距離を保ちながら盤内に機器を収め密閉する必要がある、実現には一定のハードルがあると考えられる。しかし、これにより得られる信頼性向上のメリットは大きく、実行の価値は十分にあると考える。

4. クローバー回路動作試験

クローバー回路の健全性を確認するため、SuperKEKB 加速器では毎年夏季メンテナンス期間中に短絡試験を実施している。今回の試験では、D7-CD ステーションに設置されたクライストロン電源を用いてクローバー回路の動作確認を行った。本章では、その試験方法と測定結果について報告する。短絡試験の概略回路を Fig. 2 に示す。

4.1 試験概要

Figure 3 に、短絡試験を実施する際のセットアップを示す。クライストロンの代替として、 $\phi 0.35 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の銅線（テストワイヤー）を用い、スイッチ操作により短絡させた際の短絡電流およびクローバー電流を測定する。これらの測定には、CT (PEARSON™ Current Monitor Model 3025) を使用し、出力信号をオシロスコープで観測している。なお、テストワイヤーおよび短絡用ギャップ

は、安全性を考慮して短絡試験器内部に設置している (Fig. 4)。クライストロン保護の観点から要求される性能としては、クローバー回路動作時にクライストロンへ注入されるエネルギーが 30 J 以下であることが必要である。そのためには、クローバー回路が $6 \mu\text{s}$ 以内に動作し、かつ、テストワイヤーが溶断しないことが条件となる。

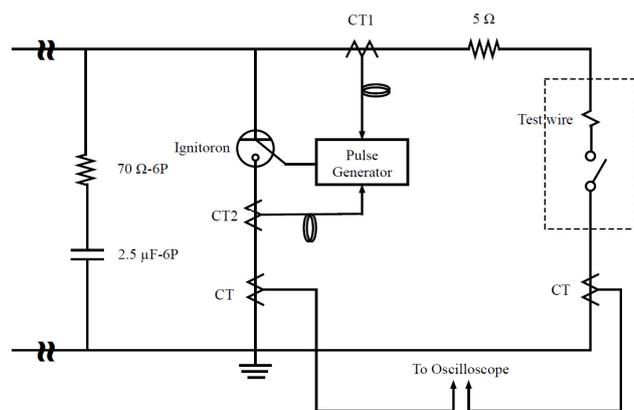


Figure 3: Short circuit test setup.



Figure 4: Short-circuit tester (Left: Overall view, Right: Thin copper wire and short-circuit gap inside the short-circuit tester).

4.2 試験準備

試験準備として、クライストロンに繋がる 3 本のケーブル (HK・H・A) を全てリフトし、クライストロンには電圧印加しない状態で行う。ヒータ・変調アノード電源でカソード電位となる高電圧部の赤色のボディに短絡試験器を接続する。短絡試験器のアース銅板は、クライストロンで短絡が発生したことを模擬するため、クライストロンのアース接続ポイント近傍に接続する。またアース銅板の敷設において、クライストロンのアース接続ポイントまでの間、アース銅板が地絡しないように絶縁物で絶縁しながら敷設を行っている。ヒータ電源の出力端 (HK・H) をケーブルで短絡し、ヒータ電源を LV ON とし 0 A 出力時に、ヒータ電源が暴走しないよう処置をする。アノード電源は定電圧電源のため、出力端は開放のままでは問題はない。短絡電流を測定するために短絡試験器の LV 側の銅板に CT (ピアソン 3025) を、クローバー電流 (イグナイトロン電流) を測定するためにクローバー回路部の CT2 と直列に CT (ピアソン 3025) を設置し、測定用のオシロスコープ側に、50 Ω ターミネーターと 1/10 アッテネータを介してそれぞれ接続する。オシロスコープへの AC 100 V は、絶縁トランスで絶縁する。

4.3 クローバー回路動作確認結果

カソード電圧を定格電圧である DC -90 kV まで充電し、短絡試験器を動作させ、カソード電位を地絡させ、クライストロン短絡状態を模擬する。測定結果を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。

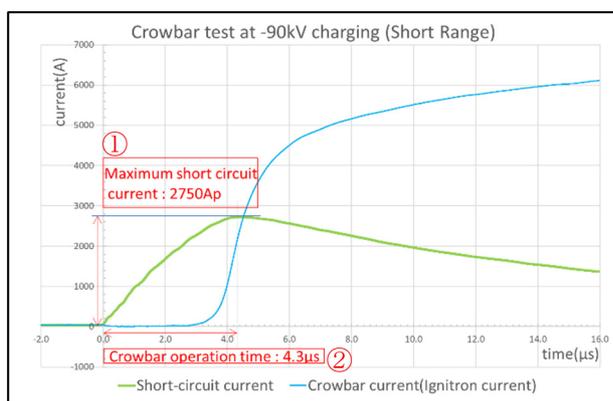


Figure 5: Crowbar test at -90 kV charging (Short Range).

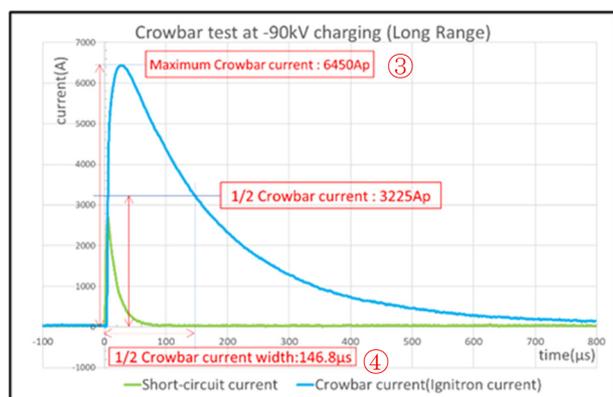


Figure 6: Crowbar test at -90 kV charging (Long Range).

- | | |
|-----------------|------------|
| ① 短絡電流のピーク電流 | : 2,750 Ap |
| ② クローバー動作時間 | : 4.3 μs |
| ③ クローバー電流のピーク電流 | : 6,450 Ap |
| ④ クローバー電流半値幅 | : 146.8 μs |

となった。短絡試験器の銅線 (テストワイヤー: $\phi 0.35 \times 200$ mm) は、溶断することはなかった。クローバー動作時間は 4.3 μs とクローバー回路動作合格判定値 (6.0 μs 以内に動作すること) の値を十分下回っており、クローバー回路動作が正常であることが確認された。

4.4 まとめ

今回短絡試験器を使い、D7-CD のクローバー回路動作確認を行った。1983 年製造のクライストロン電源だが、メーカーによる定期メンテナンスや消耗部品の交換等を行いながら、40 年を超える稼働にもかかわらずクローバー回路動作は、健全を保っていることが確認できた。

今回の確認試験は、KEK の関係者のみで試験準備から確認試験まで一貫して実施した。このノウハウを後世残すことは必須であり、今後の技術継承に活かしていきたい。

最後に、このクローバー回路には、スイッチとしてイグナイトロンが使用されており、イグナイトロンには水銀が封入されている。水銀は世界的に使用禁止の方向に向かっており、近い将来イグナイトロンが手に入らなくなることや水銀を使用した製品自身が完全に使用禁止になる可能性が考えられるため、イグナイトロンを使用しないクローバー回路システム[2-9]、または、クローバー回路が不要な電源システムの開発が急がれる。

謝辞

SuperKEKB 加速器用クライストロン電源 (KPS) について、指導および助言いただいた、小野正明氏、古谷勝彦氏、クローバー動作確認の準備をサポートいただいた (株) 国分電気の方々に深く感謝する。

参考文献

- [1] M. Kawamura *et al.*, “UHF クライストロン電源の大電力試験”, Proceedings of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21-23 July 1993, pp202-205.
- [2] T. Takayanagi *et al.*, “パワー半導体を用いたキッカー用パルス電源とイグナイトロン代替スイッチの開発”, Proceedings of PASJ2019, THOH02.
- [3] A. Ono *et al.*, “J-PARC 加速器用イグナイトロン代替半導体スイッチと新キッカー電源の開発”, Proceedings of PASJ2019, WEPH038.
- [4] H. Mori *et al.*, “イグナイトロン代替半導体スイッチの開発”, Proceedings of PASJ2019, WEPH007.
- [5] H. Kamezaki *et al.*, “イグナイトロン代替半導体スイッチ実用基板の評価”, Proceedings of PASJ2020, WEPH39.
- [6] A. Ono *et al.*, “J-PARC 加速器用イグナイトロン代替半導体スイッチの開発”, Proceedings of PASJ2020, THPP45.
- [7] A. Ono *et al.*, “J-PARC クライストロン短絡保護用半導体クローバースwitchの開発”, Proceedings of PASJ2021, THP015.
- [8] A. Ono *et al.*, “大電力クローバー回路用半導体スイッチ”, Proceedings of PASJ2022, TUP038.
- [9] A. Ono *et al.*, “J-PARC 加速器用大電力クローバー回路用半導体スイッチ”, Proceedings of PASJ2023, FRP17.