

J-PARC クライストロン電源の高圧整流器の改修

IMPROVEMENT OF HIGH VOLTAGE RECTIFIER OF J-PARC KLYSTRON POWER SUPPLY

千代悦司^{#,A)}, 佐川 隆^{B)}, 鳥山 稔^{C)}
Etsuji Chishiro^{#,A)}, Ryu Sagawa^{B)}, Minoru Toriyama^{C)}

A) Japan Atomic Energy Agency/J-PARC

B) Universal Engineering

C) Hitachi

Abstract

Klystron power supplies in the J-PARC have been generated high voltage DC power by chopping 12-phase AC voltage power by thyristors, and boosting the voltage up to 110kV in step-up transformer and rectifying the voltage in high voltage rectifiers. Some of the high voltage transformers (HVTR), which consist of the step-up transformer and the high voltage rectifier and the reactor, were often broken in the running time of over 30,000 hours. This failure caused the long-term shut down of the J-PARC facility. The high voltage rectifier composed diodes and capacitors by a series connection of 66 stages. Investigating the failed rectifier, the capacitors were applied the overvoltage because the flashover occurred on the ceramic surface. We investigated the mechanisms applying the overvoltage and took measure for the overvoltage to the rectifier. The HVTR with the improved rectifier has been operating for long term. The measures have been evaluated for the validity.

1. はじめに

J-PARC、リニアックの高周波源のクライストロン直流高圧電源は、電源 1 式あたり 4 台のクライストロンを駆動でき、リニアック棟に 12 式設置されている。クライストロン電源は、移相変圧器により 6.6kV を 6 相の 600V 交流電圧に降圧し、電圧調整盤のサイリスタにより電圧をチョップし、位相制御により直流電圧を制御している。チョップされた電圧波形は、直接、昇圧変圧器に入力され、110kV まで昇圧されたのち、三相全波整流される。整流後の直流電圧は、リアクトル(10H)とコンデンサー(25.5 μ F)により平滑され、クライストロンのカソード電圧として給電される。昇圧変圧器、整流器およびリアクトルは、1 つの筐体内に収められ、変圧整流器(HVTR)と呼ばれている。本報告では、変圧整流器の故障とその原因について

の考察結果について報告する。

2. 変圧整流器の高圧整流器の故障

2.1 故障箇所

2012 年 3 月に変圧整流器 1 号機(稼働時間 28,000 時間)、2013 年 12 月に 2 号機(30,000 時間)および 2014 年 6 月に 5 号機(36,000 時間)の高圧整流器が破損し、短絡状態となった[1]。図 1 は破損した整流器の 1 つのモジュールを示す。1 つのモジュールは、並列接続されたダイオードと分圧用のコンデンサーが 11 段に直列に接続されており、全体をエポキシ樹脂でモールドされている。このモジュールを 6 段直列に接続され、1 つの整流器を構成し、全体ではダイオードとコンデンサーは 66 段直列に接続されている。

破損したモジュールを分解、調査したところ、ダイオード

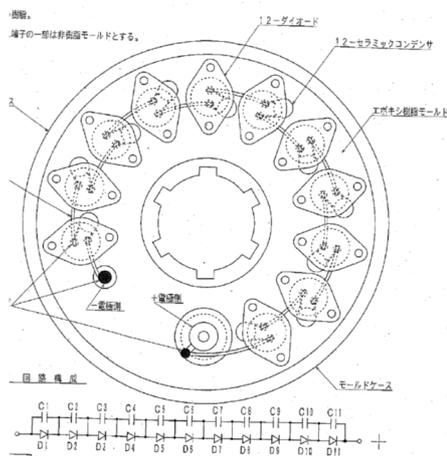


Figure 1: Illustration of the high voltage rectifier module.

etsuji.chishiro@j-parc.jp

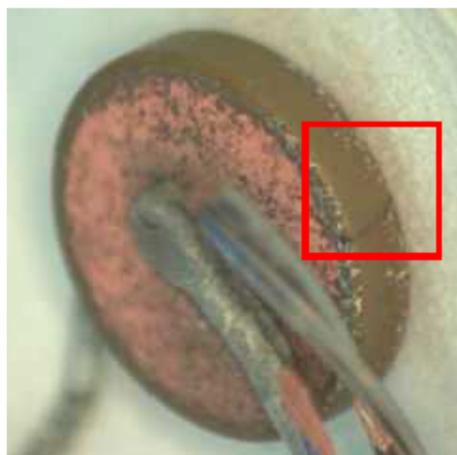


Figure 2: Photograph of the broken capacitor.

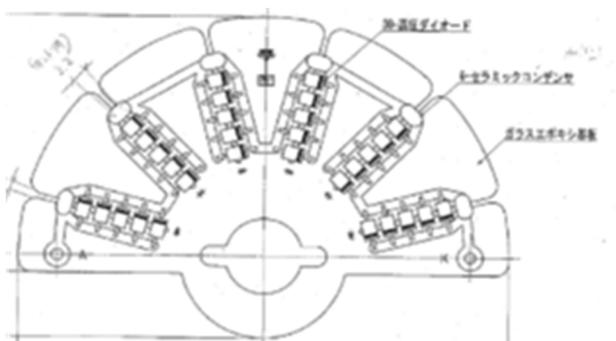


Figure 3 Illustration of the measured rectifier module.

ドには異常が認められず、コンデンサーの沿面に放電痕が確認された(図 2)。サンプル調査したコンデンサーの電気特性は、静電容量が 1350~1750pF であり規格値(2200pF+80%/-20%)を下回り、絶縁抵抗は導通を示した。これらの結果からコンデンサーに耐圧(定格動作電圧 3.15kV、絶縁破壊電圧 10~11kVdc)を超える電圧が印加され、コンデンサー沿面で放電が発生し、モールド樹脂内に導通の経路が形成されたと考えられる[2]。

2.2 初期の対策

コンデンサーの沿面放電により高圧整流器が短絡することが分かったが、高電圧がコンデンサーに印加される原因が不明であった。そこで、当面の対策として、ダイオードとコンデンサーの直列の段数を増やし、また絶縁油で直接冷却する構造とした。図 3 は、対策を施した整流器の1つのモジュール(基板)を示す。1 つ基板当たりダイオードとコンデンサーが 6 段に直列に接続され、この基盤が 14 段直列に接続され 1 つの整流器とした。よって整流器 1 個当たりの直列の段数は、84 段となる。これによりコンデンサーの定格電圧の合計が、3.15kV × 66 段 = 207.9 kV から 3.15kV × 84 段 = 264.6 kV に 1.27 倍となった。この整流器を組み込んだ変圧整流器は、現在、クライストロン電源 1~3、5、7~12 号機で合計 10 台稼働しており、高圧電源 1 号機の HVTR は 25,000 時間稼働している。

3. 考察

3.1 過電圧発生原因

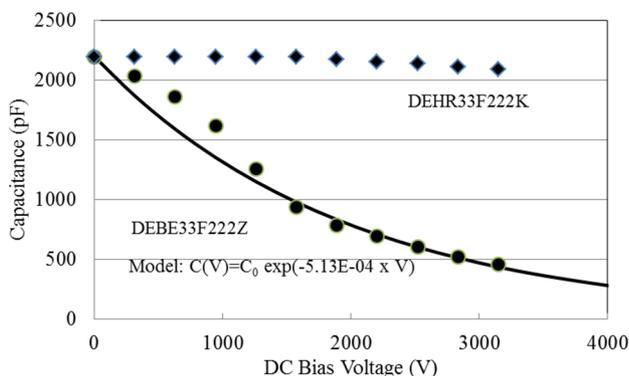


Figure 4: DC bias characteristics.

ここでは、コンデンサーに破壊電圧が印加された原因を考察する。図4は、整流器に使用された高誘電率系コンデンサー(品番: DEBE33F222Z)のバイアス特性を示す[3]。黒丸の点はコンデンサー製造元からのデータを示し、実線は、以下の計算に用いた近似曲線を示す。このコンデンサーはチタン酸バリウムを誘電体としており、電圧が印加されると誘電体中の自発分極が電界の方向に束縛されるため、容量が低減する特性を持つ[3]。この特性を持つコンデンサーを直列に接続したときの分圧比を計算した。直列の段数は破損した整流器と同じで 66 段とし、全体の印加電圧は実機でのダイオードの逆方向電圧に相当する 110kV とした。図 5 の黒塗りの棒グラフは、計算に用いたコンデンサーの初期の静電容量分布を示す。カタログでは、定格容量 2.2nF の +80%、-20%以内が規格値となっているが、信頼性試験データ[3]によると容量は、高めに製造されており、平均値は、2.35nF である。このような容量分布を持つ、66 直列のコンデンサーの分圧電圧(Vd)の計算結果を図 6 に示す。容量が等しい場合、分圧電圧は、ピーク電圧割る個数で 1.67kV であるが、容量にバラつきがある場合、容量の少ないコンデンサーは図 4 のバイアス特性のため、電圧が高くなる程、容量が少なくなり、より多くの電圧を分担している。

次にこのコンデンサーの経時変化の影響を考察する。メーカーの特性グラフ[4]から 3 万時間後の容量変化を外挿すると、初期容量から 14%容量が低減する。図 5 のハッチングされた棒グラフは平均静電容量を 14%低減させ、正規分布の分散が信頼性試験データの 5 倍まで拡大すると仮定したときの容量の分布図である。図 7 は、この経時変化した容量分布でのピーク電圧(66 段のコンデンサー全体の印加電圧)に対する最も容量の少ないコンデンサー(1.83nF)の電圧比を示す。印加電圧 106kV あたりから分圧比のバランスが崩れ始め、108kV 以上の電圧では殆どの電圧が最小容量である 1.83nF のコンデンサー 1 個に印加されている。これは、1 つのコンデンサーに電圧が集中すると、その電圧により容量が低減し、直列接続されているため低下した容量のコンデンサーに更に電圧が集中する、逆に容量の大きいコンデンサーは、分担電圧が軽減され、容量が増加し、更に電圧が低下するためである。このようにある電圧(しきい値)を境に 1 つのコンデンサーに全電圧が集中的に印加される事

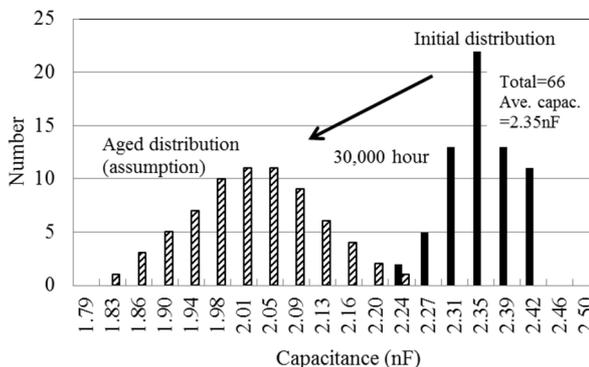


Figure 5: Distribution of the capacitance.

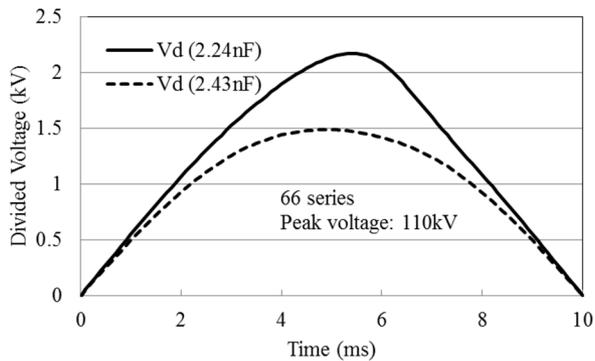


Figure 6: Waveform of divided voltage.

象が発生したために、コンデンサー沿面で絶縁破壊されたと考えられる。

3.2 対策品の評価

対策を施し、直列の段数を 84 段と増やした整流器のコンデンサーの経時変化の影響を評価した。コンデンサーは、破壊したものと同一高誘電率タイプの物を使用しているため図 5 のハッチングした棒グラフと同じ分布とし、84 個のケースで 3.1 項と同様の計算を行った。段数が多いため最小容量のコンデンサーの印加電圧が急激に増加するしきい値は 136kV であり、最大印加電圧 110kV を上回った。これにより、稼働時間が 2.5 万時間のクライストロン電源が HVTR すぐに故障する可能性は少ないと考えるが、4 万時間、5 万時間と長時間使用するとやはり経時変化により、いずれ絶縁破壊が始まると考えられる。

3.3 経時変化対策

これまで使用してきたコンデンサーは、小型で高容量のタイプのものであったが、次の対策として、コンデンサーを特性の良い高温保証低損失コンデンサーに変更した。図 4 中の四角の点はこのコンデンサー (DEHR33F222K) のバイアス特性を示す。顕著な電圧低下が起らず定格電圧 (3.15kV) でも容量が 97% までしか低下しない。容量のバラツキも少なく、カタログ値では定格容量の +/-10% であり、信頼性試験データによれば +/-4% のバラバラツキに収まっている。経時変化の割合も少なく 3 万時間で外挿すると容量の低減は 5.7% であった。このコンデンサーを採用した変圧整流器 (HVTR4) は、2015 年 9 月より稼働中であり、HVTR6 は、今秋より稼働する予定である。

4. おわりに

コンデンサーが沿面放電するほどの過大な電圧が印加される要因は、そのバイアス特性によるものと判明した。図 8 は、故障した HVTR5 の整流器の各素子の破壊状況を示す。図中の 1 つの四角は、並列接続されたダイオードとコンデンサーの 1 つの素子を表し、赤色は短絡した状態、黄色は漏れ電流が大きい状態である。U

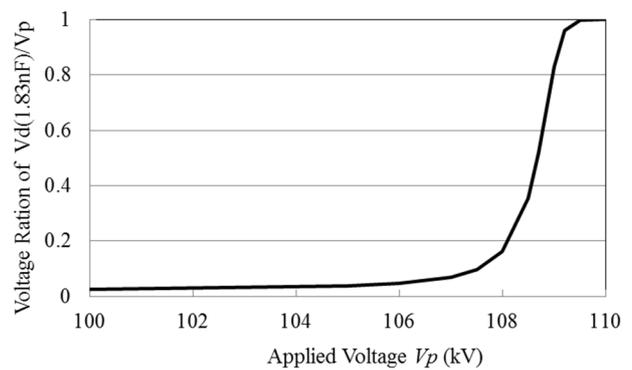


Figure 7: Voltage ration of minimum capacitor voltage for applied total voltage.

相 N 側の 1 つの整流器アッセンブリが全て短絡状態になっているが、その他の相もコンデンサーの破壊箇所は、すべて給電線側(交流電圧入力側)から破損している。単純に経時変化による容量の低下およびバラツキの増大だけであれば故障箇所はランダムに発生すると考えられるが、実際にはそのようになっていない。変圧整流器内の絶縁油の温度分布や浮遊容量の分布など、本事象を解明するために更なる検討が必要である。

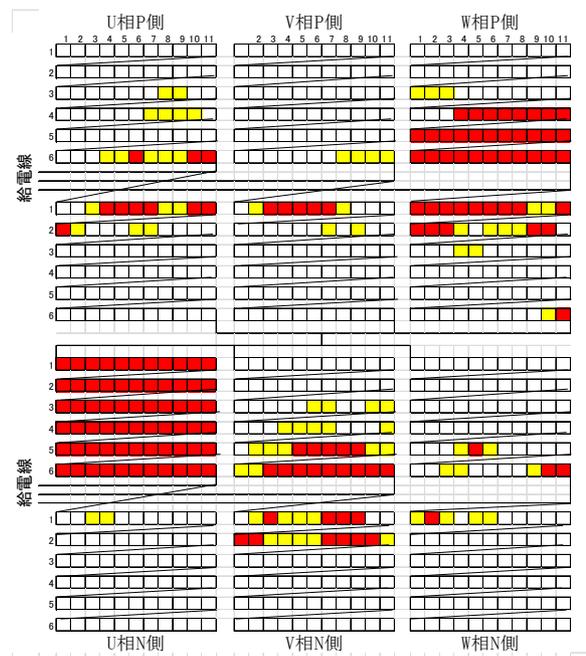


Figure 8: Illustration of broken rectifiers of HVTR5.

参考文献

- [1] 川村他、Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012) pp1001-1003.
- [2] 千代他、Proc. of 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2014) pp1091-1093.
- [3] <http://psearch.jp.murata.com/capacitor/product/DEBE33F472ZA3B.html>
- [4] <http://www.murata.com/ja-jp/support/faqs/products>