

BREAKDOWN OF THE BACK-DIODE OF THE PULSE MODULATOR FOR FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY

K.Ishiwata^{*)}, H.Inokawa, Y.Nakamura, K.Sato^{A)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, T.Tanaka^{A)},
Y.Hayakawa^{A)}, H.Kobayashi^{A)}, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai,
K.Shinohara^{B)}, N.Matsunaga^{B)}, S.Anami^{C)}, S.Fukuda^{C)} and H.Homma^{C)}

Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

^{A)}Atomic Energy Research Institute, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

^{B)}Nihon Koshuha Co. Ltd.,
1119 Nakayama-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-0011 Japan

^{C)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

Abstract

The breakdown of the diodes and the resistors in the back-diode circuit, which is a protection against damages of the klystron and other elements, was found at the pulse modulator #2 after a series of operations since 1997. The breakdown of the resistor can be explained by assuming a preceding breakdown of the diodes possibly suffered an excessive surge voltage. However, there has been no problem found in the back-diode circuit at the pulse modulator #1. As one of efforts made at LEBRA of Nihon University to reduce the fluctuation of the energy and the current of the beam in the linac, an optimum reservoir voltage of the thyatron in each modulator has been investigated in order to reduce the fluctuation of the modulator output voltage between successive pulses.

日大 FEL 用リニアック パルスモジュレータのバックダイオード破損

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設では、自由電子レーザー (FEL)、パラメトリック X 線 (PXR) など複数の光源をさまざまな研究に利用するため、加速器の高性能化を図っている。パルスモジュレータ出力安定度の向上もその 1 つである。パルスモジュレータは、FEL 用に半値幅 30 μ s の長パルスを出力するため、クライストロン放電時の反射電力やサイラトロンが OFF した後生じる大きな逆電圧パルスを抑え回路全体を保護するためのバックダイオード回路が取り付けられている[1]。最近になってこの回路のダイオードと抵抗が破損していたことが分かったので、それについて報告する。また、バックダイオード回路の修理後、前回のリニアック研究会で報告した[2]パルスモジュレータの出力変動を減少させるため、サイラトロンのリザーバー調整を行い、効果が見られたので、その結果も報告する。

2. パルスモジュレータのバックダイオード破損

2000 年 4 月のモジュレータ運転時に、クライストロン 1 号機のモジュレータ筐体付近で異常音が顕著とな

り、図 1 に示すパルスモジュレータの出力部にあるバックダイオード回路で放電が発生していた。調べた結果、この回路でダイオード・アレイと抵抗の破損が確認された。ただし、同時に調べた 2 号機のモジュレータでは異常は全く見られなかった。

バックダイオード回路は、20 個の直列接続のダイオード・アレイと 3 組並列接続の抵抗ブロックが直列接

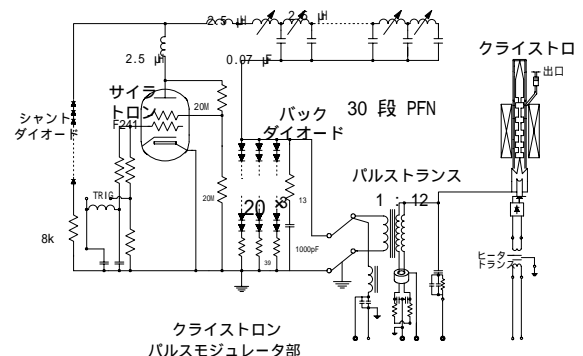


図 1. パルスモジュレータ概略図。30 段 PFN、サイラトロン、バックダイオード、シャントダイオードなどから構成されている。

^{*)} K.Ishiwata,047-469-5489,ishiwata@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

続されて1組となっており、それを3組並列接続して構成することで、逆電圧とジュール損失容量が確保されるように設計されていた。

ダイオードは、カタログ上では1個当り3kVのサージ電圧まで耐える。抵抗はセラミック抵抗器で1個当たりの抵抗値112.5、定格電力270Wのものを使用していた。

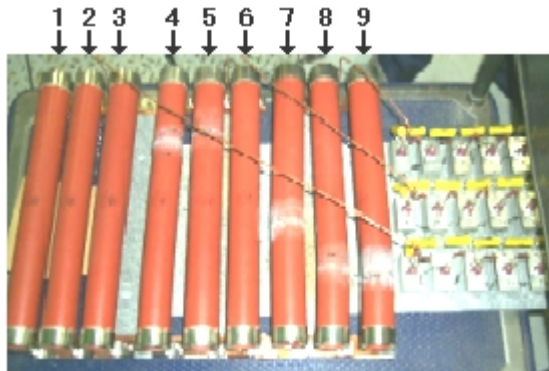


図2.セラミック抵抗器の一部が破損した様子の写真。ダイオード20個直列のアレイに対して、セラミック抵抗器3個並列のブロックが直列に接続してある。抵抗器はダイオード・アレイとの組み合わせで1-2-3、4-5-6、7-8-9のそれぞれ組みになって並列に接続されている。写真で、抵抗体が白く変色している部分は割れている。

表1 抵抗値とバックダイオードの破損状況

番号	セラミック抵抗器の抵抗値[Ω]	バックダイオード
1	115	正常
2	114	
3	116	
4	∞	故障(導通)
5	∞	
6	170	
7	∞	故障(導通)
8	∞	
9	∞	

図2に破損した抵抗の様子を、表1にこのとき測定して得られた各抵抗の抵抗値とダイオードの状態を示す。図2の各抵抗に示した番号が表1の番号に対応している。表1に示すように、3組のバックダイオード回路のうち、1組は抵抗器、ダイオード・アレイ共に特に問題はなく、残り2組は全てのダイオードが完全に導通状態で、抵抗器も1個を除いて途中で割れて電極間抵抗が無限大となっていた。また、完全に破損してはいなかったものの6番の抵抗器は抵抗値が約170と定格より高くなっており、やはり損傷を受けていたと考えらる。

そこで、最初に抵抗器が破損したとは考えが難しいので、定格を超えるサージ等の原因でダイオードが破損して導通状態になったと仮定し、その後の現象を考え

てみる。この場合、バックダイオード回路は単に抵抗負荷回路となってしまふ。ビーム加速時の運転条件としてモジュレータ出力パルス電圧20kV、パルス半値幅30μs、繰り返し2Hzとすると、このときの抵抗器1個あたりのジュール損失は約210Wで定格を下回ってはいるが、エージング等では出力電圧18kVで繰り返し10Hz~12.5Hzの運転を行っていたので、このときには明らかに定格を大きく上回っていたはずである。さらに、セラミック抵抗器を複数使用する場合は熱などの影響をうけるため、なるべく間隔をあげなければならないが、実際には9本の抵抗器がパルス64mmの間隔で並んでいるため、定格電力の60%以下で使用しなければならないことがカタログから明らかになった。従って、通常のビーム加速時の条件であっても、ダイオードが破損して導通状態になってしまうと抵抗器が急速に劣化し、いずれ破損してしまうことは十分予想される。

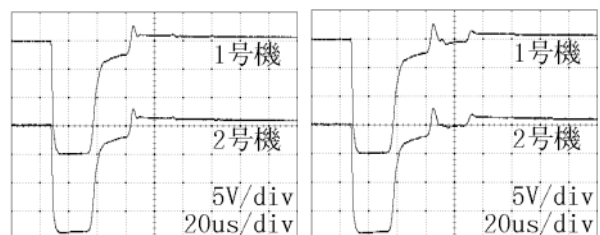
しかし、ダイオードが最初に破損したとしても、その原因・時期を特定できるような顕著な現象や運転状況の記録はされていない。

3. パルスモジュレータ出力の変動

パルスモジュレータ出力電圧の変動は、パルスモジュレータ1号機、2号機で共に起きている。図3-()に安定な時の波形、()に変動が生じた時の波形を示す。この変動の頻度については昨年の研究会において、パルス出力電圧に依存していること、またそれがサイラトロンON/OFFの問題として説明できることを報告している[2]。そこでサイラトロン動作条件を調整して、変動の起きる頻度が最小となるような条件を探した。

方法としては、パルスモジュレータを繰り返し2Hzで運転し、15kV~20kVの入力DC電圧の間で、サイラトロンリザーバーを5分毎に変え、この5分間にオシロスコープに図3-()の波形が現れる回数を目視で計測した。その結果を図4-()と()に示す。1号機においてはリザーバー電圧が3.9Vの時、DC電圧19kV~20kVに対して変動頻度が最小となり、2号機ではリザーバー電圧が4.0Vの時最小となった。この測定範囲ではどちらもリザーバー電圧を下げると頻度が減少する傾向にあった。

実際にビーム加速で使う電圧は、1号機、2号機とも



() 安定時 () 変動時

図3.パルス出力電圧の変動(DC電圧15kVの時)

に19kV~20kVであるので、繰り返しを2Hzの時19kV~20kVで変動頻度が最小となるリザーバー電圧付近で、繰り返しを2Hzから10Hzに上げ、同様の測定を行った。図4-()にその結果を示す。

1号機では高電圧側で若干頻度の増加が見られるが、2Hzの時と比較して顕著の違いはない。しかし、2号機では、DC電圧18kVで頻度の増加が顕著に見られる。そこで2号機について、さらにリザーバー電圧を下げて見た結果、頻度はさらに下がったがリザーバー電圧3.95Vで、DC電圧19kVに頻度のピークが現われた(図4-())。2号機のサイラトロンは以前には1号機に使用していたものであり、当時は1号機において同様の現象が見られたので、以上のような1号機と2号機の振舞の違いは、使用しているサイラトロンの微妙な特性の違いによるものと考えられる。

これらの測定およびサイラトロンのリザーバー電圧調整により、これまで頻繁に起きていたモジュレータ出力電圧変動の頻度を非常に少なくすることができ、その結果パルス間で生じていた加速ビームのエネルギーと電流の変動を改善することができた。

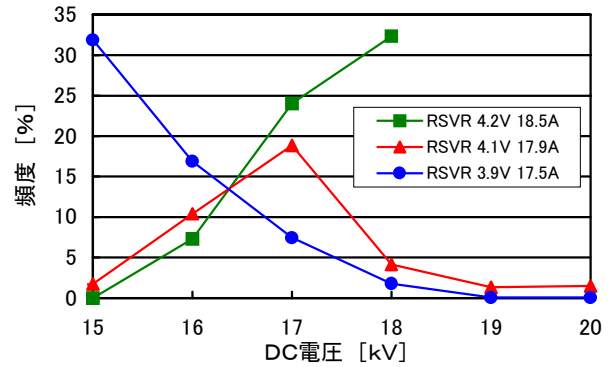
4. まとめ

バックダイオード回路の破損については、原因は明らかではないが、サージによるダイオードの破損がトリガーとなって、正常時には容量的に問題ない抵抗器が容量不足となって劣化を早め、結果として抵抗器が割れるまでに至ったと考えられる。今後ダイオードの破損を避ける対策を講じるとともに、ダイオードが破損しただけでは直後に顕著な動作上の変化が見られないので、破損の影響が他の部分に広がらないようバックダイオード回路の状態をモニターすることも必要と考えられる。

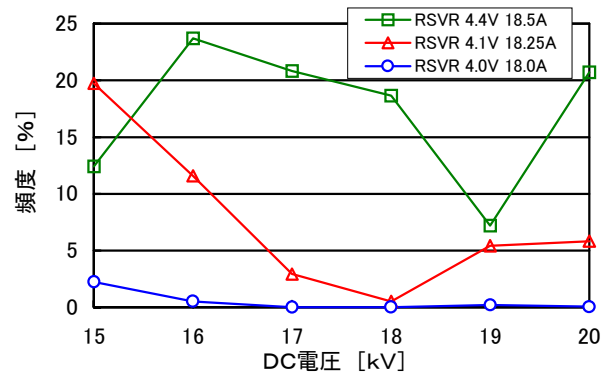
日大リニアックではパルスモジュレータの充電用DC電源には約 2×10^{-4} の安定度をもつ直流電源を用い、出力にはディキューイング回路を使っていない。このため出力パルスがサイラトロンの動作変動の影響を直接受け、出力パルスの電圧変動を生じやすい。今回、我々が行ったサイラトロンのリザーバー電圧調整によって動作の変動頻度を1%以下に減少させることができ、実際にビーム加速を行って安定度の大幅な改善が確認された。

参考文献

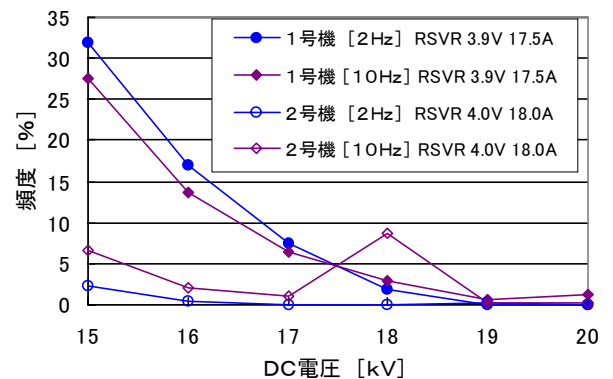
- [1]K.Hayakawa et al., Proc. of 22nd this meeting in Japan, September 9-11 (1997) 41-43.
- [2]T.Sakai et al., Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 7-9 (1999) 329-331.



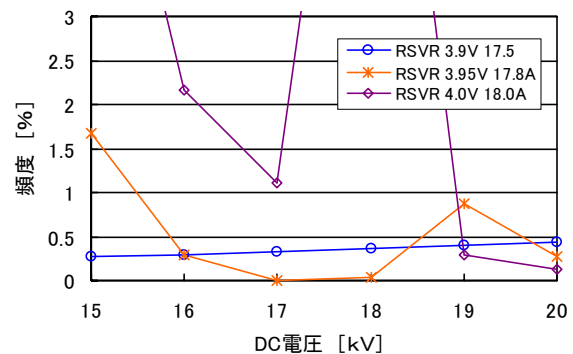
() 1号機の変動頻度 (2Hz)



() 2号機の変動頻度 (2Hz)



() 1, 2号機の変動頻度 (2, 10Hz)



() 2号機の変動頻度 (10Hz)

図4.パルス電圧変動の起こる頻度