

RF HEATING TEST OF VACUUM RELAYS EMPLOYED TO SHORT ACCELERATION GAPS IN J-PARC MAIN RING

Shimada Taihei[#], Alexander Schnase, Masanobu Yamamoto, Fumihiko Tamura, Chihiro Ohmori, Masahiro Nomura, Makoto Toda, Keigo Hara, Katushi Hasegawa and Masahito Yoshii
 KEK and JAEA J-PARC Center
 Shirakata Shirane 2-4, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Abstract

Vacuum relays are employed to short acceleration gaps in J-PARC main ring. The intended purpose of these relays is to de-bunch a beam in slow extraction operation, but they are sometimes used in order to pass the cavity for 2nd harmonics in fast extraction operation. In this case an electric current of several amperes average and of about 1.7 MHz runs through the relay. A few relays were recently damaged. It seems to be caused by heating in beam operation. We tried to heat a vacuum relay using RF current to simulate the process of damaging relays. We conclude that the cause of abnormal temperature rise of the relay is "contact loss" in RF region operation.

J-PARC MR の加速ギャップショート用真空リレーの高周波加熱試験

1. はじめに

J-PARC Main Ring は、ハドロン物理の実験の為に周期約 6 秒、出力約 2 kW の遅い取り出し運転とニュートリノ実験の為に周期約 3 秒、出力 145 kW の速い取り出し運転を行っている。遅い取り出しでは、ビームをデバンチする為に、フラットトップにおいて、高周波加速電圧を OFF し、さらに加速ギャップをリレーでショートする。このリレーには、加速中最大 15 kV、約 1.7 MHz の高周波電圧がかかり、リレー ON 時には、ビーム電流と同じ電流が流れるため、高周波高電圧用の真空リレー(Kilovac H-17/S33)を使用している。図 1 に Main Ring 高周波加速空洞(2 次高調波用空洞)の縦断面模式図を示す。

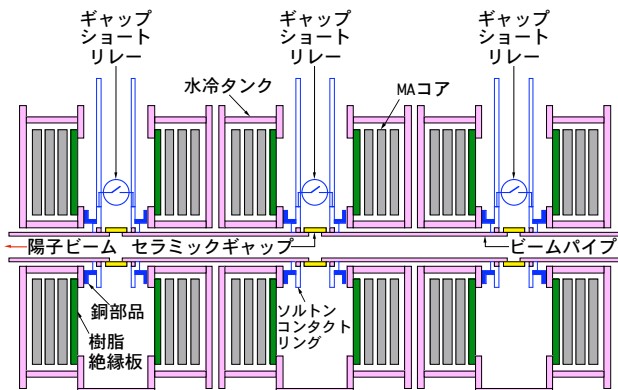


図 1 : Main Ring 高周波加速空洞の縦断面模式図

このリレーは、速い取り出し運転においても、例えば 2 次高調波空洞を使用しない時に加速器トンネルに入射しないで加速ギャップをショートする場合にも使用してきた。ギャップをショートした場合、リレーには、ビーム電流と同波形の壁電流が流れる。

最近、図 2 に示す様リレーの損傷が見られるようになった。球のガラスが部分的に溶け、銅導体が黒く変色している。損傷したリレーの近傍には放電痕

も見られた。発熱によってガスが放出され放電を誘起したようにも見える。リレーのカタログによれば、2.5 MHz で 16 A、16 MHz で 10 A、32 MHz で 8 A で連続運転可能である[1]。なお、真空リレーの内部の真空とビームパイプの真空とはつながっていない。



図 2 : 損傷した真空リレーと銅導体(W9mm, t0.2mm)

そこで、リレー損傷の原因を探る為に、リレーにビーム電流を模擬した高周波電流を流し、発熱の状況を赤外線カメラで観察することとした。

2. ビーム電流の波形と高調波成分

実験結果の解釈を容易にする為に、また、使用する半導体増幅器の帯域の制約(30 MHz 以下)から、実際のビーム電流の波形で加熱するのではなく、単一の周波数毎に通電し温度上昇を測定した。その為に、ビーム電流の時間波形を高調波成分に分解した。

図 3 にビーム出力 145 kW の速い取り出し運転における出射直前の 1 周分のビーム電流波形を示す。ギャップをショートした場合、この波形の電流がリレーを流れることになる。

図 3 の波形をフーリエ解析し、振幅を実効値に変換し、さらに、加速繰り返し周期 3 秒のうちビームのディューティが 2 秒であることを考慮して、各高調

[#] shimada.taihei@jaea.go.jp

波成分毎の実効電流値を求めた。その結果を図 4 に示す。図 4 の横軸は、加速周波数 1.7 MHz の高調波の次数であるが、17 次=28.9 MHz で打ちきった。なぜなら、使用する半導体増幅器の特性が 30 MHz までなので、それ以上の周波数での実験ができないからである。実際のスペクトルは、30 MHz を超えてより高次まで伸びているので、実験結果の解釈において、実際の発熱の一部分までしか観測できていないことに留意する必要がある。

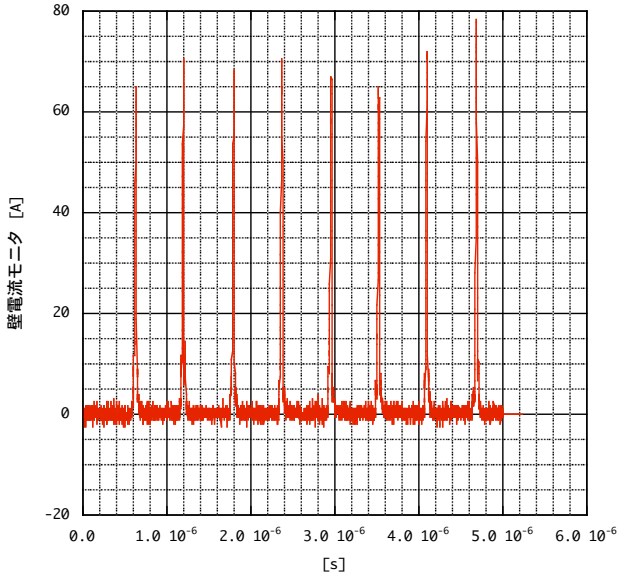


図 3：ビーム出力 145 kW の速い取り出し運転における出射直前の 1 周分のビーム電流波形 (田村氏)

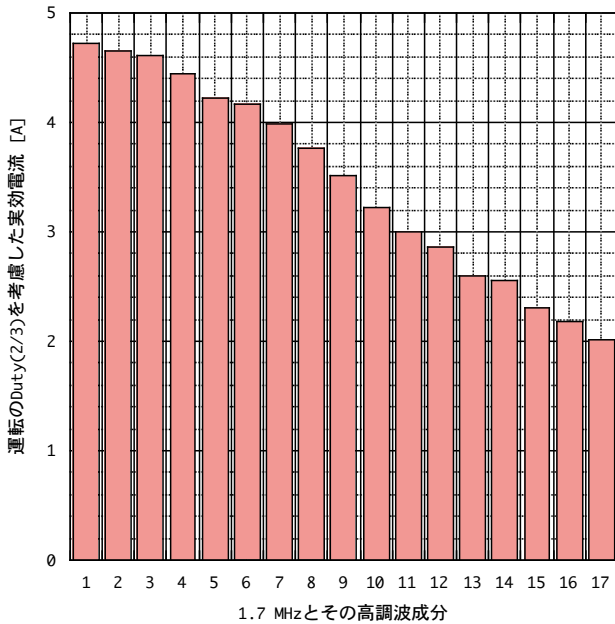


図 4：図 3 の場合の各高調波成分毎の実効電流値

3. 高周波加熱実験の方法

実験のブロック図を図 5 に示す。発熱は赤外線カメラによって観察した。システムは 50Ω系である。

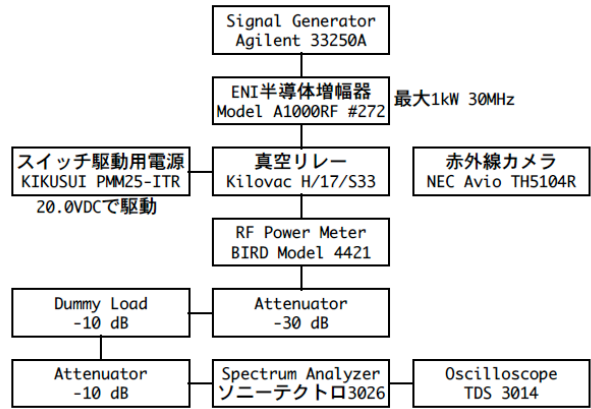


図 5：実験のブロック図



図 6：実験の様子 非温調、自然空冷で実験した

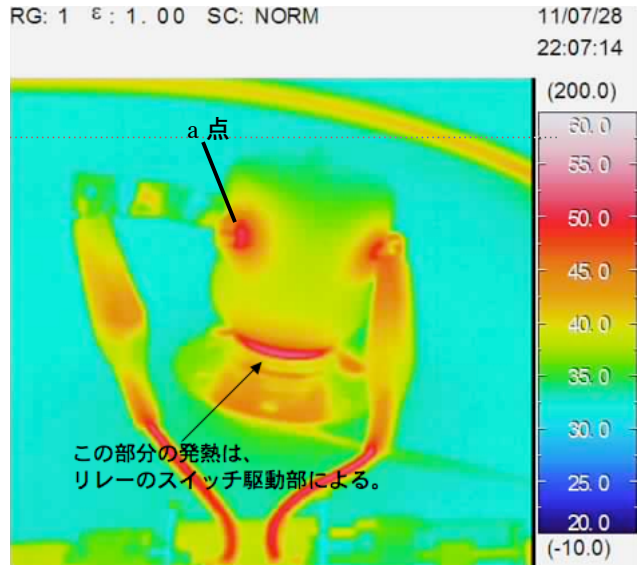


図 7：高周波加熱中の赤外線画像の例 右側の縦バーは温度(20℃~60℃)と色調の関係を示す。

リレーに流れる実効電流は、 $\text{SQRT}(\frac{\text{フォワードパワー}[\text{W}]-\text{反射パワー}[\text{W}]}{50[\Omega]})$ から求めた。実験を通して、反射パワーは概ね1%以下であった。

実験の状況を図6に示す。図中のA点が高周波加熱によって最も高温になった部分として観測された。この部分は、ガラス球を貫通した導体棒と0.2 mm厚の銅導体を接続する端子部分である。

図7に高周波加熱中の赤外線画像の例を示す。図6のA点と図7のa点は同じ位置である。a点の測定温度を使用して解析した。ガラスを貫通する導体棒が強く発熱しているのがわかるが、赤外線カメラの特性上、ガラス球の内部の温度を観察できないので、棒のどこで発熱しているかはわからない。

4. 実験の結果と考察

A点(a点)における加速周波数1.7 MHzの各高調波成分毎の温度上昇の電流依存性の測定結果を図8に示す。温度上昇は、赤外線カメラの測定値から室温を引いて得た。空調は効いていないが室温は概ね30°Cであった。周波数や投入パワーを変えた後、約20~40分間その状態を維持して、システムや測定点の温度が安定してから温度を記録した。1.7 MHzの1次~17次までの奇数次の高調波について測定した。25.5 MHz以上の周波数では、半導体増幅器の特性のため、1 kWの出力(実効値4.47 A)が得られなかった。

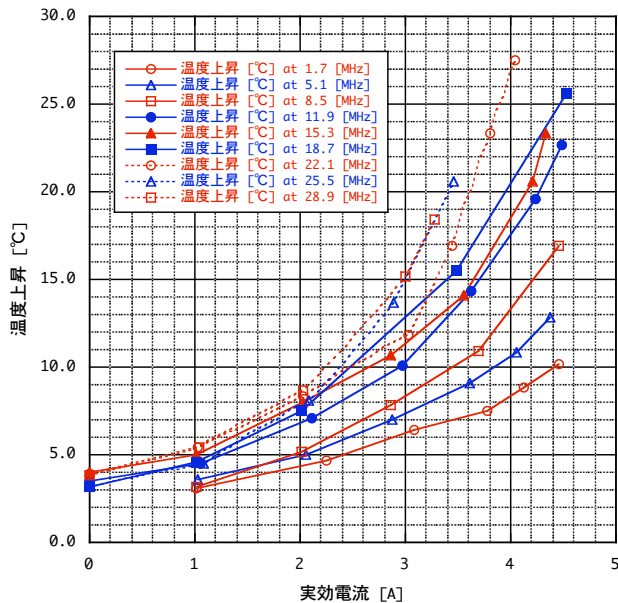


図8：A点(a点)における加速周波数1.7 MHzの各高調波成分毎の温度上昇の電流依存性の測定結果

表1に実ビーム運転における温度上昇の予想を示す。左から1列目は、加速周波数1.7 MHzの高調波の次数である。2列目は、その次数における周波数である。3列目は、図4に示した実際のビームの各高調波毎の実効電流である。4列目は、その次数(周波数)と実効電流に相当する温度上昇を図8から読み取った値である。該当する測定値がない場合は、外挿、内挿あるいは補間して温度上昇を求めた。17次までの各高調波毎の温度上昇とその和を示す。

表1：実ビーム運転における温度上昇の予想

高調波次数	周波数 [MHz]	実効電流[A]	温度上昇 [°C]
1	1.7	4.73	8
2	3.4	4.65	9
3	5.1	4.61	11
4	6.8	4.45	11
5	8.5	4.22	12
6	10.2	4.17	14
7	11.9	3.98	15
8	13.6	3.76	13
9	15.3	3.51	11
10	17	3.22	10
11	18.7	3.00	10
12	20.4	2.86	9
13	22.1	2.60	7
14	23.8	2.56	8
15	25.5	2.30	6
16	27.2	2.17	4
17	28.9	2.01	5

合計 163

表1から、ビーム出力145 kWの速い取り出し運転の場合、リレーの電流導入部(A点, a点)の温度上昇は163°Cと推測される。室温30°Cを加えると193°Cである。この予想は、高調波成分を30 MHzで打ちきったことにより少なくに評価されている。一方、各高調波成分の温度上昇を単純に足していることから、熱拡散の観点より高めに評価しているともいえる。いずれにしても、200°C近い高温になると予想される。さらに、この実験は、風通しのよい雰囲気で行われたが、実際のリレーは、図1に示すように、風通しの悪い空洞管体内部に置かれているので、さらに温度上昇が大きくなる可能性がある。

リレーの破損が確認された直前の運転は、ビーム出力が約100 kWであったので、その時の温度は、 $163 \times (2/3) + 30 = 142^\circ\text{C}$ 程度と予想される。この温度は、リレーのガラスを溶かしたり、銅が黒く変色する程ではないが、この温度上昇によって、ガスが発生し放電を誘発した可能性もある。なお、銅の黒色への変化は酸化銅(II)が生成されたと推測される。

発熱の原因を確かめる為に、A点の温度上昇の周波数依存性を測定した。その結果を図9に示す。測定は、フォワードパワーを500 Wに固定し、加速周波数1.7 MHzの1次~17次までの奇数次の周波数に対して行った。15次までは周波数と温度上昇の関係が直線的で、それ以上の周波数ではやや寝ている。

発熱の原因が表皮での抵抗であるとすると発熱、

言い換えると温度上昇は、 $\sqrt{\text{周波数}}$ に比例するはずであるが、実際には 15 次以下では周波数に比例している。これは、15 次以下の周波数では、発熱の主な原因が表皮効果ではないことを示している。15 次以上では、表皮効果が効き始めていると思われる。

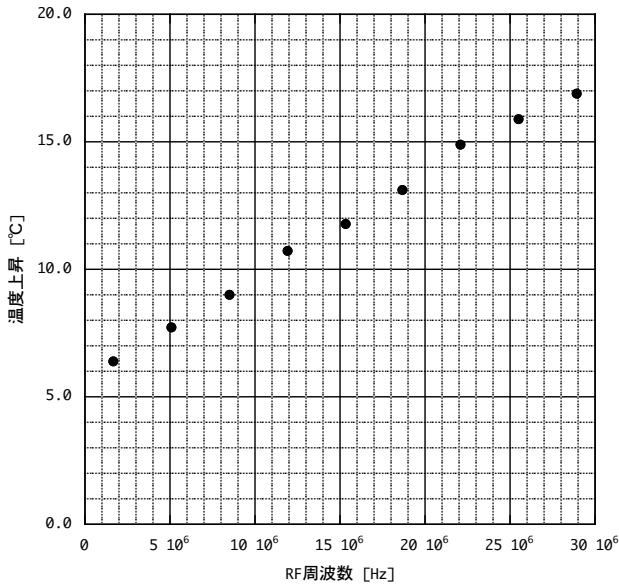


図 9 : 温度上昇の RF 周波数依存性

図 10 にガラス球を貫通した導体棒と端子のカシメ部の拡大写真を示す。カシメ部にスキマがあるように見える。このカシメ部の接触抵抗が発熱の主な要因のひとつであると推測できる。

接触抵抗が問題となりうるもうひとつの場所は、リレーの接点であるが、ガラス越しでは赤外線カメラでの温度測定ができないので特定が困難である。



図 10 : ガラス球を貫通した導体棒と端子のカシメ

5. まとめと今後の課題

実ビームを模擬した高周波通電試験の結果、ビーム出力 145kW では、真空リレーの温度は、193°C以上と予想される。破損した真空リレーが発見された直前の運転では、100kW 出力だったので、その時の

温度は 142°C以上だったと推測される。この温度は、直接的にガラスを溶かしたり、銅を黒く変色させる程ではないが、放電が誘発された可能性がある。

これらの温度上昇の主な原因は、リレーのガラス球を貫通している導体棒と端子の間の接触抵抗と考えられる。

この温度上昇がこの個体に特有なものなのかを確認する為に、他の個体についても測定したい。また、製造メーカーの見解を確認したい。

ガラス球を切り開いて、赤外線カメラでリレー内部の温度上昇を直接観察し、発熱箇所を特定したい。しかし、導体棒はガラスの支えられている構造なので、困難な作業となると思われる。

銅導体が黒色に変化した部分では、酸化銅(II)が生成されていることを化学分析によって確認したい。

今後、高出力の速い取り出し運転において、ギャップショートリレーを使用する場合、注意が必要である。

参考文献

- [1] http://relays.tycoelectronics.com/datasheets/h19_17.pdf