

## J-PARC RCS 新水平シフトバンプ電源の温度問題の報告

### REPORT OF THE TEMPERATURE PROBLEM OF NEW HORIZONTAL SHIFT BUMP POWER SUPPLY AT THE J-PARC RCS

堀野 光喜<sup>A)</sup>, 高柳 智弘<sup>#, A)</sup>, 植野 智晶<sup>A)</sup>, 林 直樹<sup>A)</sup>, 金正 倫計<sup>A)</sup>, 入江吉郎<sup>B)</sup>

Koki Horino<sup>A)</sup>, Tomohiro Takayanagi<sup>#, A)</sup>, Tomoaki Ueno<sup>A)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>, Yoshiro Irie<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup>J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, <sup>B)</sup> KEK

#### Abstract

In 3-GeV RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) of J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), the new shift bump (SB) power supply has been developed and manufactured according to 400MeV injection beam energy upgrade of the LINAC (Linear accelerator). Manufacture and a factory test operation were finished in November, 2013, and test operation in J-PARC RCS was started in January, 2014. However, the trouble of the DC charger of the FT-unit (Flat top unit), which did not occur in the factory, was frequent. Therefore, in user operation from February of the year, the power supply was operated only with the R/F-unit (Rise Fall unit) without using the FT unit. As a result, the flat-top part of the bump waveform had a slight droop. The electrolytic capacitor of the R/F-unit can be not regenerated with the energy of this flat top part and the operation time of the DC charger became usually longer. The DC charger was overloaded and the temperature of the circuit parts was higher. In this paper, the present of the new SB power supply, the cause and measures method of the high temperature problem of the DC charger is reported.

#### 1. はじめに

J-PARC<sup>[1]</sup> の 3-GeV RCS<sup>[2]</sup> では、LINAC<sup>[3]</sup> の 400MeV 加速ビームエネルギーへのアップグレードに合わせて、電源容量を倍増した新水平シフトバンプ電源を開発し製作した<sup>[4][5]</sup>。2013 年 11 月に製作及び工場試験が終了し、2014 年 1 月から、J-PARC RCS (現地) での試験運転を開始した。しかし、工場試験では発生しなかったバンプ波形のフラットトップ部分を形成する FT ユニット回路用充電器の故障が頻発した。そのため、同年 2 月からのユーザー利用運転では、FT ユニットを使用せず、バンプ波形の立ち上がり部分と立ち下がり部分を形成する立上立下ユニットのみで出力をしている。ただし、FT ユニットを使用しないため、バンプ波形のフラットトップ部分は右肩下がりになっている。そして、この部分の電気量を回生エネルギーとして見込んでいた立上立下ユニットの電解コンデンサーは、電流出力後に低下した電気量をすべて充電器で補充することになったため、充電器の稼働時間が通常時よりも長くなった。その結果、過負荷状態となった充電器内部のトランスやブリッジ回路の IGBT などの回路部品が高温となり、サーモスタットの接点温度を超える問題が発生してしまった。本論文では、新電源の立上立下ユニット用充電器の高温問題が発生した原因とその対策方法について報告する。

#### 2. 新水平シフトバンプ電源

##### 2.1 回路構成

新電源の基本回路は、バンプ波形の立ち上がり部分と立ち下がり部分を形成する立上立下ユニットの

回路と、フラットトップ部分を形成する FT ユニットの回路で構成されている。電源盤 (バンク) は、立上立下ユニット 12 台と FT ユニット 2 台で構成されており、1 バンク当たり 2kA/13.2kV を出力する。新電源は、16 台のバンクを並列に接続し、定格 32kA の 1 台の電源として運転する。

##### 2.2 立上立下ユニットと FT ユニット

立上立下ユニットと FT ユニットには、大容量電解コンデンサーの充放電回路が設けられている。コンデンサーの充放電をブリッジ回路で制御し、3 回のスイッチ操作で台形形状となるバンプ波形を形成する。立上立下ユニットは、1 個 24mF のコンデンサーを 4 並列 2 直列で接続した合成容量 48mF とする充放電回路に 1 台の充電器を設け、同じ回路が直列に接続されている。FT ユニットは、立上立下ユニットと同型の電解コンデンサーを同じく 8 個使用するが、直並列接続の組合せを銅バーで調整し、合成容量を 48、96、144、192mF から選択した充放電回路を 1 台の充電器で接続している。現地では、フラットトップの平坦度を±1.0%以下にするため、電磁石の負荷 (67.5μH, 2.0mΩ) に合わせて 192mF に設定した。

また、MLF (Materials and Life Science Experimental Facility) 用と MR (50-GeV synchrotron Main Ring) 用として、各施設で異なるペイントエリアの入射に対応するため、ピーク電流値を変更した波形出力を 25Hz で切り替える運転が求められる。そのため、1 バンク当たり、立上立下ユニットは、正負両極の下から 4 段分を共通に、5 段目と 6 段目をそれぞれ MR 用と MLF 用として別々に運転する。FT ユニットは、MLF 用と MR 用に別々の充放電回路を設けており、外部からのトリガーでブリッジ回路を切り替え、MLF 又は MR の出力回路を選択して運転する。16 バンクは同じ動作をする。

#tomohiro.takayanagi@j-parc.jp

### 3. 新電源に生じた問題

#### 3.1 FT ユニット用充電器の故障による不良波形

現地で、FT ユニットを使用して試験運転を行ったところ、出力を開始してから 10~60 分の間に、FT ユニットに搭載した充電器の内部ダイオードが必ず故障する事象が発生した。そのため、連続した安定出力が求められるユーザー利用運転においては FT ユニットを使用せず、立上立下ユニットのみでバンプ波形を形成することとした。FT ユニットを使用しない場合のバンプ波形は、フラットトップ部分が右肩下がりになる。FT ユニットを使用した場合と使用していない場合のバンプ波形を Figure 1 と 2 に示す。共に、立ち上がり時間を 400 $\mu$ s、フラットトップ時間を 650 $\mu$ s、ピーク電流値を 22.4kA に設定している。立上立下ユニット用充電器の設定値は 370V、FT ユニット用充電器の設定値は 140V である。Figure 1 の FT ユニットを使用した正常時の場合は、バンプ波形のフラットトップ部分は平坦になっている。測定時は、 $\pm 0.5\%$ 以下の平坦度であるが、FT ユニットの問題が解決した後は、充電電圧を細かく調整し、工場試験で実績のある $\pm 0.2\%$ 以下を目指す。Figure 2 の FT ユニットを使用しない場合は、フラットトップ部分が、目的としない右肩下がりの形成不良のバンプ波形になっている。フラットトップ部分の始めと終わりの電流値差は 2.7kA ある。

FT ユニット用充電器のダイオードの故障原因は、今現在、明らかになっていない。ダイオードの故障具合から、高電圧印加による故障と考えているが、高電圧の発生根拠が不明確、且つ、それを決定的とする証拠データが取得できていないため、1 バンク構成の試験機と、FT ユニット単体、充電器単体による実証試験にて解明を進めている。また、高電圧の印加が原因だった場合に備え、ピーク電圧を抑制するダイオード用スナバー回路の設計も進めている。

#### 3.2 立上立下ユニット用充電器の温度異常

立上立下ユニット回路の電解コンデンサーは、通常時、FT ユニット回路が出力した電流を回生して運転している。そのため、FT ユニットを使用しない場合、立上立下ユニットの電解コンデンサーの補充電はその充電器がすべて担うことになる。これにより、充電器に掛かる負担が、FT ユニットが正常動作している場合よりも大きくなる。立上立下ユニット用充電器は、「温度異常高」を示す非常停止信号を発報し、電源を停止する。

FT ユニットを使用した正常時の場合と、使用していない場合の各条件で、立上立下ユニット用充電器の内部回路の温度を測定した。測定結果を Figure 3 と 4 に示す。最も温度が高くなったのは、トランスの 1 次側にある IGBT ブリッジ回路のヒートシンクで、FT ユニットを使用した場合は 44 $^{\circ}$ C( $\Delta T=26^{\circ}$ C)、使用しない場合は 69 $^{\circ}$ C( $\Delta T=46^{\circ}$ C)にまで上昇した。条件による温度差は 20 $^{\circ}$ Cある。

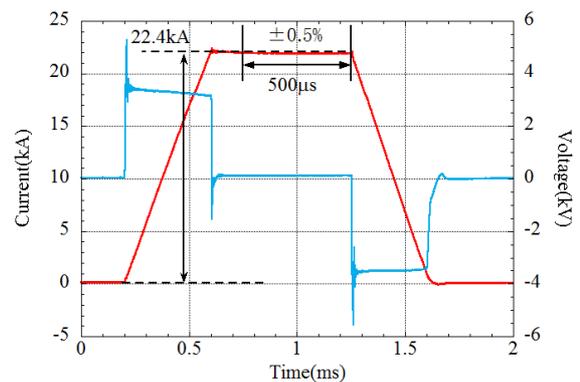


Figure 1: Measurement results of an output current and a voltage in case of the power supply operation using the R/F-unit and the FT-unit.

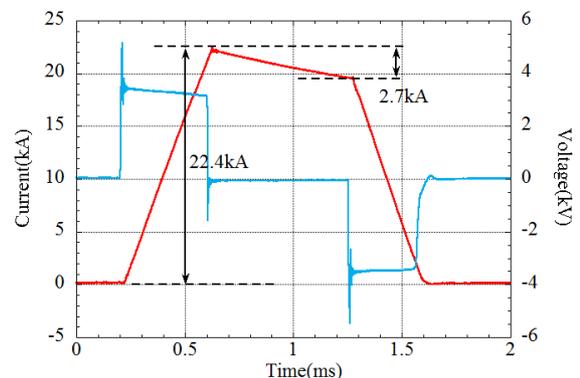


Figure 2: Measurement results of an output current and a voltage in case of the power supply operation only with the R/F-unit without using the FT unit.

FT ユニットを使用しない状態で 6 日間の連続したユーザー利用運転を行ったところ、運転開始後、温度異常による電源停止が 30 分から 120 分の間隔で頻発した (Figure 5 参照)。しかし、温度異常が発生した充電器は、温度測定をしていない充電器であったため、実際に何度まで上昇したのか確かな温度は分からなかった。温度異常で停止した充電器を、外から送風機で冷却したが、その後も温度異常が発生した充電器があった。その場合は、充電器のケースの上蓋を外し、高温の空気を直接放出する対策を行った。9 台に送風機の対策を、7 台に追加で充電器の上蓋を外す対策を行った後は、温度異常が発生する充電器が無くなり、連続した運転が可能になった。同型の充電器は全部で 192 個あるため、サーモスタットの接点を超えるほど温度が高くなる充電器 (16 台)は限られている。また、内部回路に設けたサーモスタットの接点温度は、ヒートシンクが 90 $^{\circ}$ C でトランスが 105 $^{\circ}$ Cである。測定した充電器のヒートシンクが約 70 $^{\circ}$ Cの時に、他の充電器の温度異常で電源が停止したため、高温になった充電器と測定していた充電器には、推定で 20 $^{\circ}$ Cの温度差がある。

充電器内部には排気ファンを設けているが、ケースの上蓋を外す対策に効果があったことから、充電器の回路部品や配線が窮屈に配置され、且つ、排気

ファンの風量が少ないことで、冷却効率が悪い充電器が存在したと考える。

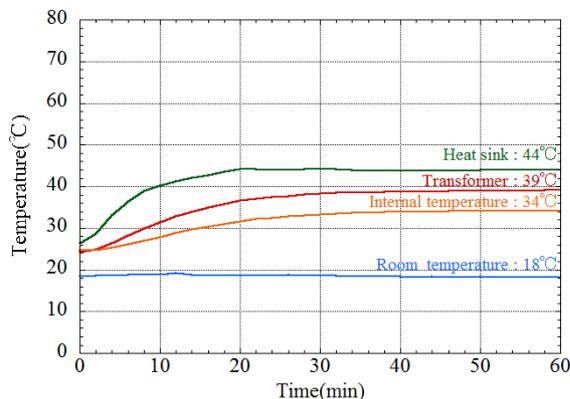


Figure 3: Measured temperature in case of the power supply operation using the R/F-unit and the FT-unit.

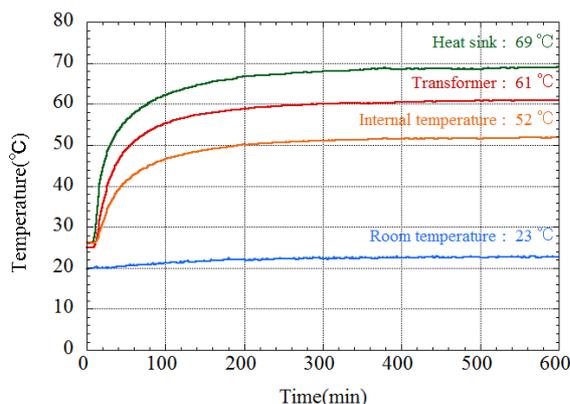


Figure 4: Measured temperature in case of the power supply operation only using the R/F-unit.

#### 4. 立上立下ユニット用充電器の温度対策

##### 4.1 冷却水入水温度の調整

立上立下ユニット用充電器は空冷だが、充電器が搭載される立上立下ユニットの主回路は水冷式である。そこで、冷却水の入水温度を通常時の設定温度の 35°C から、冷却設備の性能限界である 27°C に下げ、入水温度低下の効果を確認した。測定結果を Figure 6 に示す。入水温度が 35°C の場合の Figure 4 と比較して、充電器の内部温度の上昇値は、 $\Delta T=29^\circ\text{C}$  から  $\Delta T=21^\circ\text{C}$  となり各条件の温度差は  $\Delta T=8^\circ\text{C}$ 。冷却水の入水温度を 8°C 下げた効果を確認することができた。また、この状態で連続運転を行ったところ、7 日間の連続運転でも温度異常が発生する充電器が無く、この方法は効果的な対策であることが確認できた。しかし、充電器の根本的な対策では無いため、8°C の低減を図る必要性が生じた場合にのみ使用する限定的な対策とする。

##### 4.2 排気ファンの効果

- AC ファンの商用周波数の違いの確認

現地での通電は、ピーク電流値が 22.4kA(1 バンク

当たり 1.4kA) で運転したが、工場試験では、約 1.4 倍の 32kA 定格相当 (1 バンク当たり 2.0kA) で、4 バンクの連動で試験運転を実施した。充電器の使用電力はより高い状態であったが、温度異常となる充電器は発生しなかった。FT ユニットの使用有無の違いはあるが、現地試験で充電器に温度差があることが確認されたことから、冷却効りに直接影響する排気ファンの性能の低さが温度異常を発生する要因の一つであると考えた。排気ファンは AC100V 仕様であり、電源が製作された工場施設は関西、J-PARC 施設は関東であるため、商用周波数に 60Hz と 50Hz の違いがある。AC ファンの仕様を Table 1 に示す(以下に示す DC ファンの仕様も記載)。

商用周波数の違いによる冷却効果の確認試験を行った。立上立下ユニット用充電器を単体で駆動して行ったため、DC 運転での評価となる。立上立下ユニット用充電器は 1.6kW の定電力出力で設計されている。充電器の出力設定のうち、設定値が最大/最小になる DC600V/2.7A/DC200V/8A で比較した。それぞれの違いは、パンプ波形の立ち上がり時間が短い/長いに関係する。運転時の温度上昇値( $\Delta T$ )と使用電力値(W)を Table 2 と 3 に示す。温度上昇値は飽和時の値を示している。ただし、DC200V/8A 設定で受電 50Hz の試験をした場合、運転から 12 分後にヒートシンクの温度が 80°C を超えたため、手動で運転を停止した。連続運転が可能だった DC600V/2.7A の設定で、AC ファンを 60Hz と 50Hz にした場合の測定結果を Figure 7 に示す。充電器の温度差は、温度上昇値( $\Delta T$ )で 5~9°C あり、50Hz と 60Hz の風量の性能差が 20%(0.90 m<sup>3</sup>/min /0.75 m<sup>3</sup>/min)なので、商用周波数の違いが冷却能力に表れたと考える(Heat sink:54°C/45°C)。

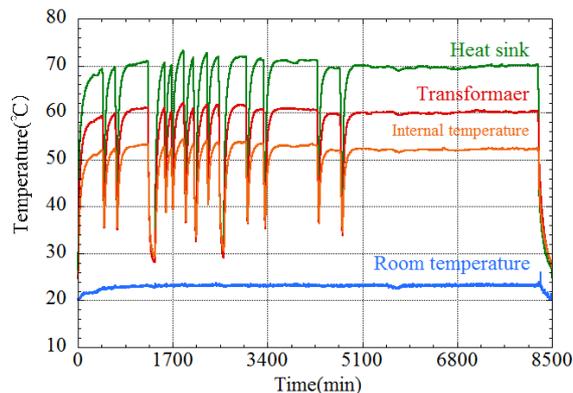


Figure 5: Measured temperature in case of the user operation only using the R/F-unit.

- DC ファンの効果

充電器内部の温度をより下げるため、風量が多い DC ファンを使用した試験を行った。DC ファンの性能は、Table 1 を参照する。また、実機の充電器の 1 台を AC ファン(50Hz)から DC ファンに変更し、現地で連続通電時の温度測定を行った。測定結果を Figure 8 に示す。ヒートシンクの温度上昇値( $\Delta T$ )は 20°C 下がり、DC ファンへの変更は十分効果的であ

ることを確認した。

DC ファンの仕様を決定するために用いた概算式を(1)から(3)式に示す。充電器内部の上昇値は、計算で 8.7℃、実測で 9.0℃となりほぼ一致した。DC ファンの数と仕様の選定に関する概算式の有効性も確認した。

Table 1: Specifications of AC and DC Fan

Frequency	Revolving speed	Maximum air quantity
AC50Hz	2700 r/min	0.75 m <sup>3</sup> /min
AC60Hz	3200 r/min	0.90 m <sup>3</sup> /min
DC	6300 r/min	2.55 m <sup>3</sup> /min

Table 2: Measured Temperature Rise Level

Set value	200V/8A		600V/2.7A	
Frequency	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
Heat sink	65.1℃	62.8℃	62.8℃	33.7℃
Transformer	34.9℃	49.3℃	30.1℃	26.5℃
Internal	12.9℃	23.8℃	18.1℃	14.1℃

Table 3: Measured Power Consumption

Set value	200V/8A		600V/2.7A	
Frequency	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
Effective power	2.07kW	1.97kW	1.91kW	1.90kW
Output power	1.45kW	1.44kW	1.61kW	1.62kW

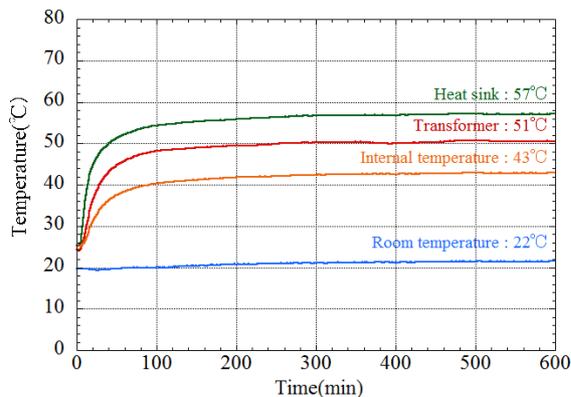


Figure 6: Measured temperature in case of the changing the cooling water temperature from 35 degrees to 27 degrees.

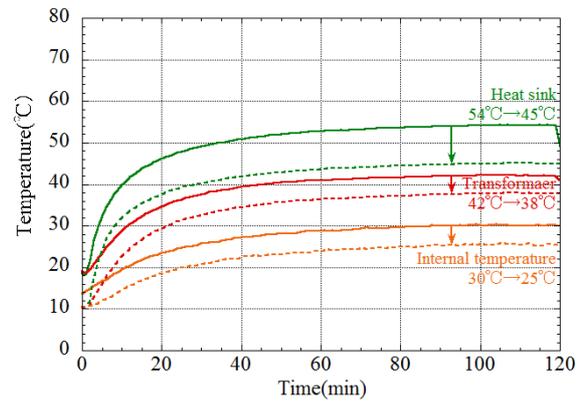


Figure 7: Measured temperature in case of the changing the operation frequency of the AC fan.

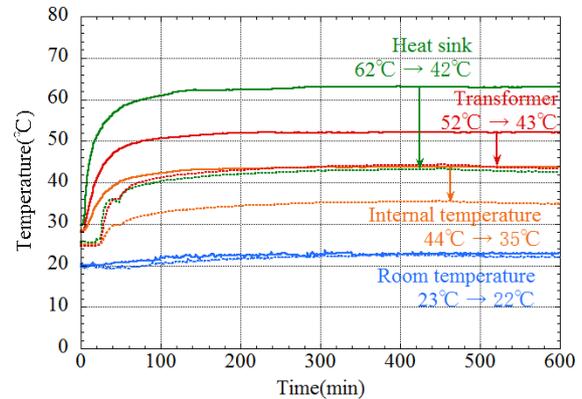


Figure 8: Measured temperature in case of the changing the exhaust fan from AC type to DC type.

- 充電器内損失  
空冷ファンを DC に変更し、立上立下ユニット用充電器の単体試験で電力を測定結果した結果、受電 50Hz、充電器出力 DC200V/8A の場合が最も大きくなり、入力有効電力が 2.02kW、出力電力が 1.45kW であった。これより、充電器の最大損失は 570W となる。
- ファン風量  
DC ファンの最大風量は 2.55 m<sup>3</sup>/min である。これを充電器内部に 3 個配置する。また、充電器内部から外部へ排出する風量効率が 50% と考慮すると、0.0638 m<sup>3</sup>/s (3.83 m<sup>3</sup>/min) である。

$$\Delta Q = 2.55 \text{ m}^3/\text{min} \times 3 \text{ sets} \times 50\% = 3.83 \text{ m}^3/\text{min} \quad (1)$$

- 充電器内空気温度上昇  
内部空気の温度は充電器内部の損失で上昇するとして、約 8.7℃ 上昇することになる。

$$\Delta T = \frac{570W}{1.024 \text{ kg/m}^3 \times 1007 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 0.0638 \text{ m}^3/\text{s}} = 8.7 \text{ K} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{単位時間に入れ替わる空気の量} = Q[m^3/s] \\ \text{充電器の損失} = W[W] \\ \text{空気の比重} \rho = 1.024[kg/m^3] \\ \text{空気の比熱} C = 1007[J/kg \cdot K] \\ \text{空気の上昇温度} = \Delta T \end{array} \right. \quad (3)$$

#### 4.3 バンクの冷却対策

充電器内部の温度を電源盤外に効率よく排気するため、背面の排気ファンを現状の6個から20個に増設することとした。バンク内温度の算出概算式の(4)から(11)式より、1バンクの温度上昇値は11°Cになると予想する。また、室内空調からの冷たい空気を効率よくバンク内に取り込むため、前面パネルをすべてメッシュにする改修も進めている。

- 立上立下ユニットの損失( $W_{RF}$ )  
4.2章より、立上立下ユニット用充電器の1台当たりの最大損失は570Wである。また、立上立下ユニット内のブリッジIGBTやスナバダイオードなどは水冷の為、気中への放熱は含まない。立上立下ユニット1台には2台の充電器があり、また、運転時は5段で運転するため(MLF/MRの切り替えに対応するため)、1バンク当たりの立上立下ユニットの損失( $W_{RF}$ )は11.4kWになる。

$$W_{RF} = 570W \times 2set \times 10units = 11.4kW \quad (4)$$

- FTユニットの損失( $W_{FT}$ )  
FTユニット単体試験結果より、出力設定値が最大(300V/45A)の場合に、入力有効電力が15.33kW、出力電力が13.88kWであった。FTユニットは1バンク当たり2台のFTユニットがある為、FTユニットの損失( $W_{FT}$ )は、2.9kWになる。

$$W_{FT} = (15.33kW - 13.88kW) \times 2units = 2.9kW \quad (5)$$

- バンク内部機器の損失( $W_{other}$ )  
立上立下ユニットとFTユニット以外の主な部品の損失は、6.4kWになる。

$$W_{RF-t} = 4kVA \times 3\% \times 12sets = 1.44kW \quad (6)$$

- FTユニット用給電トランス

$$W_{FT-t} = 25kVA \times 3\% \times 2sets = 1.50kW \quad (7)$$

- 制御ユニット

$$W_{CTL} = 200V \times 10A \times \sqrt{3} = 3.46kW \quad (8)$$

- バンク内の全損失  
1バンクの全損失は、上記(4)~(8)式より

$$W_{bank} = 11.4kW + 2.9kW + 6.4kW = 20.7kW \quad (9)$$

- バンク内の空気上昇温度  
1個当たり最大風量11m<sup>3</sup>/minのAC200Vの空冷ファンを盤面裏に設置する。立上立下ユニット及びFTユニットの各裏及び給電トランスの裏に、全部で20個設ける。(1)、(2)式と同様の計算で、バンク内部の温度上昇は11.0°Cになる。

$$\Delta Q = 11m^3/min \times 20sets \times 50\% \times 1/60 = 1.83m^3/s \quad (10)$$

$$\Delta T = \frac{20.7kW}{1.024kg/m^3 \times 1007J/(kg \cdot K) \times 1.83m^3/s} = 11.0K \quad (11)$$

## 5. まとめ

新水平シフトポンプ電源は、FTユニット用充電器が故障したため、FTユニットを使用しないでポンプ波形を出力したところ、立上立下ユニット用充電器が高温となる問題が発生してしまった。この一番の要因は、工場試験と現地試験の結果より、FTユニット出力分からの回生エネルギー無くなり、立上立下ユニット用充電器の負担が大きくなったためと考えている。従って、FTユニット用充電器の故障問題が解決されれば、立上立下ユニット用充電器の温度異常の問題は発生しないと考えている。しかし、排気ファンの性能が低く、立上立下ユニット用充電器に温度差が生じているため、温度対策を実施することとした。立上立下ユニット用充電器に内蔵されている排気ファンをDCタイプに変更し、バンクの筐体には、裏面に排気ファンの追加と、前面パネルをメッシュ化に改修する対策を行う。

## 謝辞

新水平シフトポンプ電源の温度問題に関して、ご教示下さいましたニチコン草津株式会社の内藤氏、志井氏、担当者の皆様に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/index-e.html>
- [2] M.Kinsho, "Progress and Status of the J-PARC 3 GeV RCS", Proceedings of IPAC2014, THPME064 (2014).
- [3] H.Oguri, et al., *this proceedings*, FSP021.
- [4] T.Takayanagi et al., *this proceedings*, SUPO59.
- [5] T.Takayanagi, et al., Simulation model for design of a new power supply, IEEE Transactions on Applied Supercond., vol.22, no.3, June 2012, 5400704.