

## 水冷式アルミヒートシンクのガルバニック腐食試験(2)

### GALVANIC CORROSION TEST OF WATER COOLED ALUMINUM HEATSINK (2)

三浦一喜<sup>#, A)</sup>, 石井恒次<sup>A)</sup>, 栗本佳典<sup>A)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 佐川隆<sup>B)</sup>, 森田裕一<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK

<sup>B)</sup> Universal Engineering

#### Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), we plan to shorten the driving cycle from 2.5 sec to 1.3 sec for higher beam power. To achieve this, replacement of the power supplies of main magnets is mandatory. A water-cooled heatsink for cooling the IGBT is included as a component of the new power supply. For the purpose of the cost reduction, the aluminum heatsink is used instead of the conventional copper heatsink. A concern in the adoption of the aluminum heatsink is the possibility of the galvanic corrosion since the cooling water is shared with the existing equipments that use copper tubes for the flow channels. Therefore, we observed a galvanic corrosion evaluation test using aluminum heatsink samples. In the previous report, we confirmed black dots on the water flow path. These black dots are suspected of being pitting corrosion. This report shows the results of additional analysis aimed at determining the presence or absence of pitting corrosion and the reasons for adopting aluminum heatsink for the new power supply.

#### 1. はじめに

J-PARC では将来計画であるビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.5 秒から 1.3 秒へと速める高繰り返し化を実現することが求められており、その計画の一部として主電磁石用新電源の開発が進められている[1]。この新電源の構成要素として、IGBT を冷却するための水冷式ヒートシンクが含まれる。この水冷式ヒートシンクは現行電源では銅製ヒートシンクが採用されてきたが、新電源においては製造時のコストカットを目的としてアルミ製ヒートシンクを採用している。アルミ製ヒートシンクの採用における懸念として、銅管を用いた既存機器を由来とする銅成分を含んだ冷却水が、アルミ製ヒートシンクに対してガルバニック腐食を引き起こす可能性が存在する。このガルバニック腐食とは、電解質溶液(水など)中で電位の異なる 2 つの金属間において、電位の低い金属(本件におけるアルミ)の腐食が助長される腐食現象のことであり、この腐食によって電源内部に冷却水が漏水し電源故障の原因となることも考えられるため、事前にガルバニック腐食のリスク評価が必要と判断した。そこで我々は実使用環境および高負荷環境の冷却水において、アルミ製ヒートシンクサンプルを用いてガルバニック腐食評価試験を実施した。PASJ2019 での報告[2]では、試験済みヒートシンクサンプルを切削して流路を露出させ、冷却水流路表面状態を分析した結果、高負荷環境で 1 年間試験したサンプルに粒子状の黒点部が散見され、孔食の疑いはあるものの断定には至らないという結果であった。本報告では該当サンプルに追加試験を実施することで孔食有無の断定および、新電源におけるアルミヒートシンク採用の根拠を示す。

#### 2. 先行試験結果

先行試験において孔食の可能性ありと判定された、高負荷環境で 1 年間試験したサンプルの試験条件ごとの表面観察結果を Table 1 に、流路表面状態を観察したデジタルマイクロスコープの画像を Fig. 1、Fig. 2 に示す。表面観察の結果、孔食無しと判定されたサンプルの画像が Fig. 1、孔食の可能性ありと判定されたサンプルの画像が Fig. 2 である。Fig. 2 に散見される黒点部(最大直径 200[ $\mu\text{m}$ ]程度)が孔食の可能性が疑われる部分であるが、表面観察のみではそれ以上の情報は得られなかった。そこで本報告では黒点部に対して 4 項目(SEM-EDX 分析、デジタルマイクロスコープによる 3D 計測、酸洗後表面解析、FE-SEM 断面解析)の追加試験を実施することで、アルミヒートシンクの腐食有無断定および、長期稼働における腐食リスク評価を行った結果を示す。

Table 1: Summary of Previous Test Results (High-Load Environment)

Voltage	Leakage current	Heater	Pitting corrosion
+3 kV	10 $\mu\text{A}$	○	Risk (Black dots)
-3 kV	10 $\mu\text{A}$	○	Risk (Black dots)
None	None	×	None
+3 kV	50~100 $\mu\text{A}$	○	Risk (Black dots)
-3 kV	50~100 $\mu\text{A}$	○	Risk (Black dots)

<sup>#</sup> kazuki.miura@kek.jp



(a) actual size (b) 2x zoom (c) 5x zoom

Figure 1: A half year exposure to actual environment.



(a) actual size (b) 2x zoom (c) 5x zoom

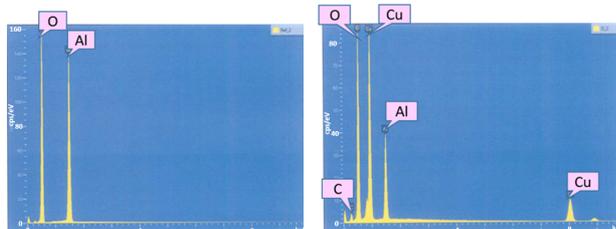
Figure 2: One year exposure to high-load environment.

### 3. 追加試験

孔食の疑いありの判定になった高負荷環境のサンプルのうち、黒点部の多かったサンプル(流量:5 [L/min]、流速:1.06 [m/s]、印加電圧:+3 [kV]、漏洩電流:50~100 [ $\mu$ A]、リボンヒーターによる熱負荷:有)を本腐食評価試験における代表サンプルとして以降の追加試験を実施した。

#### 3.1 SEM-EDX 分析

黒点部の主成分特定のために実施した SEM-EDX 分析の結果を Fig. 3 に示す。



(a) Normal point

(b) Black point

Figure 3: Spectra of SEM-EDX qualitative analysis.

通常部が Al を主成分としているのに対して、黒点部では Cu 成分が顕著に検出された。黒色であることから黒点部はガルバニック腐食の原因として懸念された冷却水中の銅成分が酸化した酸化銅(CuO)であるものと推定される。

#### 3.2 デジタルマイクロ스코プによる 3D 計測

黒点部が流路内表面に対してどのような形状をしているかを確認するため、黒点部 2 カ所に対してデジタルマイクロSCOプによる 3D 計測を行った。3D 計測結果のうち 1 カ所の測定画像を Fig. 4 に示す。

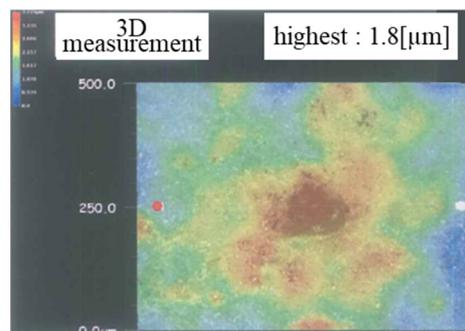


Figure 4: 3D measurement.

結果として、2 点いずれも流路内表面に対して高さが約 2 [ $\mu$ m]の凸形状であることが分かった。このことから黒点部そのものが孔食でないことは確認できたが、黒点部直下のアルミ表面状態が確認できないため、まだ孔食の懸念は残されている状態である。

#### 3.3 酸洗後表面解析

黒点部直下のアルミ表面状態を観察するため、付着した酸化銅を 5% $HNO_2$  (硝酸)で酸洗して 8 割程度除去し、デジタルマイクロSCOプで表面観察した結果を Fig. 5 に示すが、表面上孔食は観察されなかった。なお、酸洗により黒点部を全て除去した場合、対象点が変わりにくくなること、周囲健全部まで表面荒れが激しくなることから酸洗除去は 8 割程度に留めている。

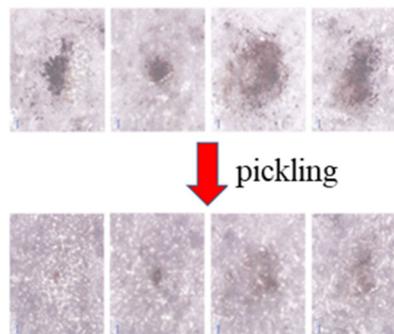


Figure 5: Surface observation after pickling.

#### 3.4 FE-SEM 断面解析

黒点部について断面からも腐食評価を行うため、先行試験で切削したヒートシンクを黒点部で更に流路垂直方向に切断した。この際、収束イオンビーム加工装置(FIB)にて観察を行う際のスパッタによるダメージ防止としてのカーボン(C)コート(厚さ約 50 nm)および、FIB 加工時(Ga イオン)の保護としてタングステン(W)デポジットを施してある。

黒点部断面を FE-SEM 観察した電子画像および FE-SEM-EDX 元素マッピングの結果をまとめた図を Fig. 6 に示す。黒点部(酸化銅)の直下にはアルミの酸化被膜(3~8  $\mu$ m)が存在することでアルミ本体表面の保護となっており、酸化銅とアルミ本体が直接接触していないことが確認できる。この断面観察結果から内部的にもアル

ミ本体に孔食が起きていないことを確認できた。なお、アルミ酸化被膜中に一部割れが観察されたが、割れの起点が酸化銅側でなくアルミ本体側であることから、熱膨張差を原因として被膜が割れたと推測され、割れが酸化銅側に達していないことから腐食には関係していないと考えられる。

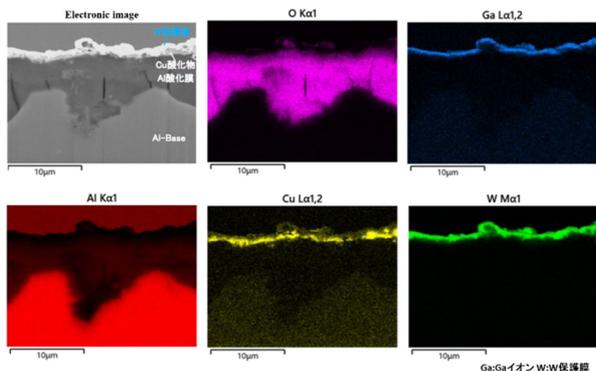


Figure 6: FE-SEM-EDX elemental mapping of cross sections.

#### 4. 新電源への採用根拠

追加試験の結果から、アルミヒートシンクの新電源採用可否について検討を行い、以下の根拠から正式採用が決定された。

- 卑金属(アルミ)が貴金属(銅)と接触時の腐食速度を  $P$ 、卑金属単体での腐食速度を  $P_0$ 、貴金属の面積を  $A$ 、卑金属の面積を  $B$  とした時、ガルバニック腐食における面積比の影響は Eq. (1) で表される。

$$P = P_0(1 + A/B) \quad (1)$$

本試験では使用環境に比べて冷却水中の銅含有量が多い高負荷環境試験でもヒートシンク内部のアルミ表面には粒子状の酸化銅付着のみであった。Equation (1)において、広いアノード面(アルミ)に対して、狭い範囲のカソード(酸化銅)となる本件の状態( $B \gg A$ )では腐食速度  $P$  はアルミ単体での腐食速度  $P_0$  とほぼ等しくなる。アルミは単体では耐食性に優れた金属であることから、この状況下においてガルバニック腐食が発生する可能性は低いと考えられる。

- アルミ本体表面にはアルミ酸化被膜が形成されており、冷却水中の銅成分に対するアルミ本体の保護膜として機能している。仮に酸化被膜の割れが広がり、アルミ本体と酸化銅や冷却水が接した場合でもアルミの特性上、該当の割れ部分が酸化することにより、アルミ酸化被膜が再生されると推測されるため、割れを起点に腐食が進行する可能性は低いと考えられる。
- 実使用環境となる電源棟では冷却水流路に設置されたフィルタによる銅成分などの除去と、冷却水抵抗値の管理 ( $5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  以上) が行われる。これらによってイオン化が起きにくい冷却水環境を維持することでガルバニック腐食のリスクは低減可能である。

#### 5. まとめ

J-PARC では将来計画であるビーム大強度化のために、主リングの運転周期を 2.5 秒から 1.3 秒へと速める高繰り返し化を実現することが求められており、その計画の一部として主電磁石用新電源の開発が進められている。この新電源ではコストカットを目的として水冷式アルミヒートシンクを採用しているが、ガルバニック腐食による漏水が電源故障の原因となることも考えられるため、事前にガルバニック腐食のリスク評価が必要と判断し、我々はテストスタンドを構築、実使用環境および高負荷環境の冷却水において、アルミ製ヒートシンクサンプルを用いてガルバニック腐食評価試験を実施した。

前回報告における流路表面観察の結果、最も腐食の可能性が高かったヒートシンクサンプルを代表として、孔食有無の断定を目的とした追加試験を実施した。結果として、流路内アルミ表面に腐食が無いことおよび、新電源使用環境においてアルミヒートシンクが長期の稼働に対して十分に耐えうる根拠を得られたため、水冷式アルミヒートシンクの新電源正式採用が決定された。アルミヒートシンクを内蔵した新電源は現在インストールが進められており、2022 年度からの J-PARC ビーム利用運転で稼働する予定である。

#### 参考文献

- [1] Y. Morita *et al.*, "Development of J-PARC MR Main Magnets Power Supplies for High Repetition Rate Operation," JPS Conf. Proc., vol. 8, Sep. 2015, ID. 012006.
- [2] K. Miura *et al.*, "Galvanic Corrosion Test of Water Cooled Aluminum Heatsink" Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan.