

## 加速器冷却水設備における防錆剤変更による 電蝕の抑制

－腐食とコストの削減－

Suppression of Electrolytic Corrosion at Accelerator Cooling-water Facility  
by Changing of Rust Inhibitors  
－ Reduction of Rust and Cost －

出井 竜美 菅沼 和明 藤来 洸裕 鈴木 勝夫  
鈴木 博 仲田 守浩 細川 英洸 小野瀬 勇一郎  
渡辺 泰広 篠崎 信一 山崎 良雄

Tatsumi DEI, Kazuaki SUGANUMA, Kosuke FUJIRAI, Katsuo SUZUKI  
Hiroshi SUZUKI, Morihiro NAKATA, Hideaki HOSOKAWA, Yuichiro ONOSE  
Yasuhiro WATANABE, Shinichi SHINOZAKI and Yoshio YAMAZAKI

J-PARCセンター

J-PARC Center

March 2026

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)  
は、下記までお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.  
Availability and use of the results of this report, please contact  
Library, Institutional Repository and INIS Section,  
Research and Development Promotion Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: [ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

加速器冷却水設備における防錆剤変更による電蝕の抑制  
— 腐食とコストの削減 —

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

出井 竜美、菅沼 和明、藤来 洸裕、鈴木 勝夫、鈴木 博\*1、仲田 守浩\*1、  
細川 英洸\*1、小野瀬 勇一郎\*2、渡辺 泰広、篠崎 信一、山崎 良雄

(2026年2月5日受理)

加速器冷却水設備配管系統は異なる金属で構成されることも多いため電蝕が不可避である。本試験では、まず無酸素銅と炭素鋼の間で電蝕が起こること、またこれまで使用されてきた防錆剤ではその電蝕の抑制ができないことを確認した。次に新たに導入した防錆剤による電蝕の抑制を確認した。また新しい防錆剤に変更することにより、補給水の節水および防錆剤コスト削減が実現できた。

**Suppression of Electrolytic Corrosion at Accelerator Cooling-water Facility  
by Changing of Rust Inhibitors  
- Reduction of Rust and Cost -**

Tatsumi DEI, Kazuaki SUGANUMA, Kosuke FUJIRAI, Katsuo SUZUKI,  
Hiroshi SUZUKI\*<sup>1</sup>, Morihiko NAKATA\*<sup>1</sup>, Hideaki HOSOKAWA\*<sup>1</sup>, Yuichiro ONOSE\*<sup>2</sup>,  
Yasuhiro WATANABE, Shinichi SHINOZAKI and Yoshio YAMAZAKI

J-PARC Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 5, 2026)

Accelerator cooling-water facility cannot prevent electrolytic corrosion because the systems consist of several different kinds of metals. We have confirmed that the electrolytic corrosion certainly occurs between oxygen-free copper and carbon steel, and cannot be suppressed by the rust inhibitor used so far. We have chosen a new rust inhibitor and confirmed that the new rust inhibitor can prevent the corrosion progression of carbon steel as well as oxygen-free copper. Moreover, using the new rust inhibitor brings about saving water and the cost reduction of the inhibitors.

Keywords: Copper Corrosion, Accelerator Cooling-water Facility, Rust Inhibitor

---

\*1 NAT Corporation

\*2 Nuclear Engineering Co., Ltd.

目 次

1. はじめに -----	1
2. 試験結果と考察 -----	1
2.1 純水へのシリカ溶解試験 -----	1
2.2 無酸素銅と炭素鋼間の電蝕効果の確認 -----	2
2.3 異なる防錆剤による腐食の違い -----	5
3. 実際の冷却水設備に使用した場合の効果 -----	6
4. まとめ -----	7
謝辞 -----	7
参考文献 -----	7

Contents

1. Introduction -----	1
2. Experimental Results and Discussion -----	1
2.1 Preparation of Silica Dissolved Pure-Water -----	1
2.2 Conformation of Electrolytic Corrosion between Oxygen-Free Copper and Carbon Steel -----	2
2.3 Difference between Rust Inhibitors in Corrosion of Oxygen-Free Copper and Carbon Steel -----	5
3. Application of New Rust Inhibitor for Real Coolant Facility -----	6
4. Concluding Remarks -----	7
Acknowledgements -----	7
References -----	7

This is a blank page.

## 1. はじめに

冷却水による無酸素銅や炭素鋼配管の腐食が配管寿命、ひいては加速器の安定な運転に多大な影響を及ぼしている。大強度陽子加速器施設の加速器冷却設備では、使用されている金属配管を防食するため、アゾール系を主とした防錆剤が使用されている[1, 2]。現在リニアック増強冷却塔 3 次冷却水で用いられている防錆剤は配管寿命には多大な貢献をしているが、使用水量の削減、コスト面と防食効果のさらなる改善を目的とし、新たな防錆剤導入も視野に入れた改善策を実行した。本報告は、改善策を実行するにあたり事前に行った各種試験および、改善策実行後の補給水削減（節水）およびコスト削減の効果について報告するものである。

一般的に配管系統は異なる金属で構成されることも多いため、異種金属接触腐食（以後、電蝕）の影響が不可避である。電蝕は種類の異なる金属が電気的に接続または接触して一緒に電解質溶液（例：水、海水等）に浸漬した場合、両金属の標準電極電位が異なるため、イオン化傾向が強い金属（今回の場合、炭素鋼）から小さい金属（今回の場合、無酸素銅）に電子が移動し、イオン化傾向の大きい方の金属原子がイオンとして電解質溶液に溶けだして腐蝕する現象であり[3, 4]、他の金属と同時に浸漬していない単体の場合よりも腐食される。この電蝕を防錆剤により抑制が可能かどうかを検討する。

今回の試験では、最初に、実際に使用している冷却水の分析結果をもとに模擬冷却水を作製する。実際の冷却水と同じシリカ濃度の水を作製するため、純水に対するシリカ溶解試験を行った。次にそのシリカ溶解水から模擬冷却水を作製し、試験装置を組み立て、無酸素銅と炭素鋼という典型的な冷却水配管材料を用いて、電蝕の影響を確認した。さらに以前用いていた防錆剤と新たな防錆剤の防食効果を検証するため、無酸素銅および炭素鋼の腐食試験を実施した。その後、実際の加速器冷却設備であるリニアック増強冷却塔 3 次冷却水に新たな防錆剤を導入したので、その節水効果と薬剤費用削減効果を新旧の防錆剤で比較した。

## 2. 試験結果と考察

### 2.1 純水へのシリカ溶解試験

冷却設備を模した腐食試験を実施するにあたって、濃縮された冷却水を模した試験水の作製が必要である。リニアック棟増強冷却塔で使用される開放循環冷却水には、シリカが年間平均して約 55 ppm 溶存している。模擬冷却水の作製には純水にシリカを溶解させることが不可欠であり、純水に対するシリカの溶解性を確認する必要がある。このため純水に対するシリカの溶解度を確認する試験を行った。試験方法として、当作業場で可能な方法であるマグネティックスターラーによる攪拌法（以後、攪拌法）と、マイクロ波試料分解法（以後、分解法）を選択した。シリカは『関東化学株式会社、二酸化ケイ素（沈降性、非晶質）、試薬特級』を使用した。溶媒には超純水を使用した。また水溶液中のシリカ濃度の判定には『株式会社共立理化学研究所製、シリカ用パックテスト』を用いた。

攪拌法によるシリカ溶解試験の概略は次の通りである。

- (1) 50 mL バイアル容器にシリカ 1 g を採取した後、超純水 50 mL を加えて、マグネティックスターラーで 48 時間攪拌した。
- (2) 攪拌後、上澄み液をメンブランフィルター（孔径 0.22  $\mu\text{m}$ ）でろ過し、ろ液のシリカ濃度をパックテストで測定した。

上記試料の他、攪拌時間を 72 時間にした試料も作製した。

分解法によるシリカ溶解試験の容器として、『サビレックス社製 PFA バイアル付きマイクロ波試料加熱分解容器』を加熱容器として用いた。分解法の概略は次の通りである。

- (1) このマイクロ波試料分解容器に付属の PFA バイアルにシリカ 0.1 g を採取し、超純水 10 mL を加えた後、ジャケットを装着して装置に取り付けた。
- (2) 出力 500 W、分解時間 3 分間でシリカを分解した。

- (3) 上記の3分間の分解を間欠的に3回行った後、1時間以上放冷した。
- (4) (3)の分解および放冷の作業を3回行った。
- (5) 放冷後、試料全量をメンブランフィルター（孔径 0.22  $\mu\text{m}$ ）でろ過し、ろ液のシリカ濃度を、パックテストを使用して測定した。

上記試料の他、シリカ採取量を0.2 gとして、同様に分解を行った試料も作製した。

攪拌法と分解法によるシリカの溶解試験結果を表1に示す。室温でのシリカの溶解度は25  $^{\circ}\text{C}$ で0.012 g/100 mL[5]とされており、攪拌法では、その約1/80の結果が得られた。攪拌時間の延長によっても溶解度に差が見られなかったことから、マグネティックスターラーによる攪拌法では模擬冷却水の作製に必要な55 ppmまでシリカを溶解させることは困難と考えられる。一方、マイクロ波試料分解法ではシリカの溶解度に対して、その約1/40および約1/2.4となる結果が得られた。採取量0.1 gの場合と0.2 gの場合とで、溶解量に約17倍の差が生じた。採取量を増量することで溶解量が増加していることから、採取量をより増量することで、溶解量が増加する可能性がある。

分解法によるシリカの溶解量は、攪拌法よりも約2倍から33倍大きい値となった。シリカの溶解度は、液温に依存する[6]とされており、今回の試験においても、溶解温度の高い分解法が、攪拌法よりも溶解度が高い結果になったと考えられる。また、一般的に固体の溶解は、固体表面で生じる平衡現象であるため、表面積が増大すると溶解速度が増大する。このことにより、同じ分解法でも、比表面積が大きい試料が、より溶解度が高くなる結果になったと考えられる。試験の結果から、シリカの溶解にはマイクロ波試料分解法を用いることにした。

実験用試験水として、リニアック棟増強冷却塔の冷却水を水質分析し、その結果に基づいて決定した成分濃度をもつ模擬冷却水を作製した。先に記したマイクロ波加熱分解法を用いてシリカ含有水溶液を作製し、硫酸カルシウム二水和物（林純薬工業株式会社、一級）、塩化ナトリウム（林純薬工業株式会社、特級）、炭酸水素ナトリウム（富士フィルム和光純薬株式会社、食品添加物）を加えて所定の濃度に調製した（リニアック棟増強冷却塔に補給される工業用水を濃縮度1とする）。

表2に本実験で用いた模擬冷却水の成分検査結果を示す。試験水の種類は防錆剤を添加しない模擬試験水（以後、無添加水、濃縮度3.1）、その模擬試験水に、以前使用されていた防錆剤①を添加した模擬試験水（以後、添加水①、濃縮度3.1）、および新たに導入した防錆剤②を添加した模擬試験水（以後、添加水②、濃縮度5.5）である。濃縮度や防錆剤の種類・添加量を、防錆剤メーカーや冷却塔設備メーカーと協議して決定した。

防錆剤①と②の違いは以下の通りである。

- ・防錆剤①：主に銅に特化した防錆効果がある。
- ・防錆剤②：①の成分の他、防スライム材（有機窒素化合物）を新たな添加成分とする。有機窒素化合物は銅以外の金属の防錆効果もあり、炭素鋼などの防錆も期待できる。

## 2.2 無酸素銅と炭素鋼間の電蝕効果の確認

試験片として、JIS C1020 無酸素銅およびJIS G 4051 炭素鋼を選定した。無酸素銅、炭素鋼共に、寸法30 mm×15 mm×2 mmの平板を使用した。試験片表面を、研磨紙 #800～#1200を用いて、流水中で機械研磨した後、エタノールで超音波洗浄を行い、脱脂した。脱脂後、エアダスターで仮乾燥させて、デシケーター内で24時間以上放置したものを試験に用いた。試験片は、試験前に重量測定、表面の写真撮影、寸法計測を行った。また無酸素銅と炭素鋼をそれぞれ単独のセルに入れて浸食実験する場合の試験片は、腐食の進行を容易にするため研磨は実施しなかった。

電蝕の効果を確認するため下記の4種類の試験セルを用意した。

- (a) 無添加水、無酸素銅1片、炭素鋼1片
- (b) 添加水①、無酸素銅1片、炭素鋼1片
- (c) 添加水①、無酸素銅1片

## (d) 添加水①、炭素鋼 1 片

これら 4 種類の試験セル中の無酸素銅片と炭素鋼片は、浸漬後に腐食状態について外観観察および重量測定を行い、腐食度や浸食度などを算出した。併せて、浸漬試験前後の試験水について、パックテストを使用して、腐食に影響を与える各種イオン濃度を測定した。

図 1 に無酸素銅片と炭素鋼片を同一セルに入れた場合の浸漬試験装置の概要を示す。浸漬試験装置は、5 L の試験水供給ボトル・腐食試験セル・送液ポンプ・配管により構成し、同一の試験水を循環させた。また、ポンプでタンク内に空気を吹き込み、飽和酸素状態にした。水質測定系として、フロースルー式の溶存酸素電極を設置し、試験水の溶存酸素濃度(DO)および液温を測定した。

図 2 に試験セルに試験片を単独セルに入れた場合の浸漬試験装置の概要を示す。基本的には図 1 の実験と同じ配置であるが、無酸素銅、炭素鋼は単独でセルに入っているため電蝕は発生しない。

5L ボトルに試験水 3 L を用意して、試験装置配管内を流量約 100 mL/min で循環させた。試験開始直前に 500 mL を排出して、pH、電気伝導率および各種イオン濃度を測定した。試験水排出後、配管経路を変更し、腐食試験セルに試験水を注水して、ボトルと試料セルの間で循環させた。試験水の循環中、溶存酸素と液温を測定した。溶存酸素計のサンプリング間隔は 30s に設定した。

試験水の循環開始から、360 時間後に送液用ポンプと空気吹き込み用ポンプを停止した。ポンプ停止後、試験水を分取し、pH、電気伝導率および各種イオン濃度を測定した。腐食試験セルから回収した試験片については、水洗後、エタノールに浸して、洗浄した。洗浄後、エアダスターで仮乾燥させて、デシケーター内に 24 時間放置し、重量測定および写真撮影を行った。

次に腐食生成物除去方法について記す。試験片表面には腐食生成物が付着する。試験片の腐食速度を厳密に計算するためにそれらを注意深く取り除く必要がある。試験片は、浸漬試験終了後、デシケーターで 360 時間以上放置していたものを使用した。腐食生成物除去は、以下の手順で行った。

- (1) 超純水 40 mL を注いだ 50 mL チューブに、腐食試験後の試験片を入れ、超音波洗浄 2 分間を 2 回、間欠的に行った。
- (2) ナイロンブラシを用いて水道水流水中で試験片表面の腐食生成物を除いた後、試験片を超純水中で洗浄した。
- (3) 洗浄後、試験片の超音波洗浄をエタノール中で 1 分間行った。
- (4) 洗浄後、エタノールを新しいものに入れ替えて再び超音波洗浄を 1 分間行った。
- (5) 洗浄後の試験片を取り出しエアダスターで仮乾燥後、真空デシケーターで 24 時間放置した。
- (6) 重量測定および写真撮影を行い、腐食評価を行った。

浸漬期間中の試験水の溶存酸素濃度および液温の平均値を表 3 に示す。無添加水、添加水①試験水共に飽和溶存酸素状態になっている。無添加水および添加水①の、pH、電気伝導率、各種イオン濃度の測定結果について、試験前と 360 時間後の測定結果をそれぞれ表 4 および 5 に示す。試験前後で、総硬度やアルカリ度のみならず、腐食に大きな影響を与える水温や pH、塩化物イオン濃度などは大きく変化していない。また無酸素銅と炭素鋼を同一セルに入れた場合と、それぞれ単独で入れた場合でも大きな違いは見られなかった。

試験前後の無酸素銅の試験片の外観を図 3 に示す。無酸素銅の腐食状況は、すべての試験共に、試験開始前と比較して、光沢が減少しており、全面に薄い赤褐色を呈していることから、表面に亜酸化銅[7]の皮膜が形成される均一腐食と考えられる。腐食生成物除去前までは、すべての試験の試験片外観に差異は見られないが、生成物除去後は、無添加水を用いた試験片の方が、より赤みを帯びており、防錆剤による皮膜形成の結果、腐食が抑止されることが推測される。

試験前後の炭素鋼の試験片の外観を図 4 に示す。炭素鋼の腐食状況は、無添加水の場合と、添加水①の場合とで様相が異なる。無添加水の場合、全面に腐食が進んで研磨面が消失

しており、試験片中央部に錆瘤と推定される腐食生成物が生成している。既知の鉄の腐食プロセスおよび明るいオレンジ色を呈していることから、腐食生成物は、水酸化鉄が結晶化した $\gamma$ -オキシ水酸化鉄[8]が主成分と推測される。

添加水①を用いた場合でも、錆瘤の生成が見られるが、無添加水の場合と比較して、小さなものとなっている。試験片表面は、研磨痕のある研磨面が確認できる。小さな黒色の斑点状の腐食生成物が点在しているが、この局所腐食を、腐食の初期段階と考え、試験片の大部分を占める腐食生成物は、複数の局所腐食が進展して、結合したものと考えられる。腐食生成物の色は、黄褐色から黒色まで複数種あり、鉄の代表的な腐食生成物である $\beta$ -オキシ水酸化鉄、 $\gamma$ -オキシ水酸化鉄、四酸化三鉄が混在した状態と推測される。

一方、単体でセルに入れた添加水①の炭素鋼においては、茶褐色の点状の局部腐食が見られた。局部腐食の発生状況、腐食生成物の色など、先記の添加水①で無酸素銅を同一セルに入れた場合の試験結果と類似しており、同様の腐食機構によると考えられる。ただし先記の結果と比較して、腐食面積がかなり少なく、電蝕の影響のない炭素鋼の腐食挙動を示していると考えられる。

防錆剤①は銅を対象としており、炭素鋼への防食にはさほど効果はないとされている[9]。試験片表面の腐食状態から、電蝕の起こらない状態で防錆剤①を用いても、炭素鋼の表面全体ではなくとも部分的な腐食を起こす可能性が推測される。

試験片の腐食速度、腐食度、浸食度を算出する計算式[10]をそれぞれ式(1)、(2)、(3)として、以下に示す。

$$Y = \frac{M_1 - M_2}{S \times T_h} \quad (1)$$

$Y$  : 腐食速度 ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ )  
 $M_1$  : 試験片の試験前の質量 (mg)  
 $M_2$  : 試験片の試験後の質量 (mg)  
 $S$  : 試験片の表面積 ( $\text{m}^2$ )  
 $T_h$  : 試験時間 (hr)

$$W = \frac{M_1 - M_2}{S \times T_d} \quad (2)$$

$W$  : 腐食度 (mdd)  
 $M_1$  : 試験片の試験前の質量 (mg)  
 $M_2$  : 試験片の試験後の質量 (mg)  
 $S$  : 試験片の表面積 ( $\text{m}^2$ )  
 $T_d$  : 試験日数 (day)

$$P = W \times \frac{365 \times 10^{-4}}{d} \quad (3)$$

$P$  : 浸食度 ( $\text{mm}/\text{y}$ )  
 $W$  : 腐食度 (mdd)  
 $d$  : 試験片の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

浸食度の算出に使用した密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) の値は、無酸素銅を 8.94[11, 12]、炭素鋼を 7.85[13] とした。以上の計算式により、本試験の試験片の腐食速度、腐食度、浸食度の計算結果を表 6 に示す。

表 6 から、添加水①を使用した無酸素銅においては、重量が減少しておらず、防錆剤を添加することにより腐食が抑制されている。先に記したように、防錆剤①は、銅を対象とした防食効果をもつ防錆剤であり、銅に対する防食効果を確認できた。一方、図 4 の上段中央と中段中央の外観から予想される結果と異なり、無酸素銅と同一セルに入れて試験した炭素鋼は添加水①を用いた試験片の方が無添加水の場合よりもむしろ腐食度や浸食度は高くなっており、防錆剤の効果は確認できなかった。このことは同一試験セル内で銅に特化した防錆剤を使用したことにより腐食因子が炭素鋼に多く働いた可能性がある。

添加水①を用いた炭素鋼単体の場合の腐食度や浸食度は、添加水①に無酸素銅と炭素鋼を同一セルに入れて実験をした場合に比べて約 80%、無添加水で同一セルに入れた場合と比べても約 70%減少した。先に記したように、同一のセルに炭素鋼と無酸素銅のような異種金属を混在させると、イオン化傾向の差異によって電蝕が生じることが知られており、今回の実験でも防錆剤のあるなしにかかわらず顕著に電蝕効果が表れている。

このような電蝕現象を考慮すれば、本来、冷却水の配管は高純度な同一の金属で構成されることが望ましいが、実際の配管においては異種金属で構成されることが不可避である。また高純度な同一金属で構成されたとしても、金属表面付近に不純物元素が存在する場合は局所的に電蝕が起こるため、結果的に電蝕が発生する。超高純度の、いわゆる錆びない鉄なども開発されているが 1 kg あたり 100 万米ドル以上するため[14]、コストの面から実用性はない。

### 2.3 異なる防錆剤による腐食の違い

無酸素銅・炭素鋼を同一セルに入れて (図 1)、2.2 と同じ腐食試験と腐食生成物除去による評価を行った。本実験では浸漬時間は 360 時間だけでなく、720 時間、1080 時間の試験を行い、計 3 Batch 分のデータを収集した。

浸漬期間中の試験水の溶存酸素濃度は先の試験と同様に、無添加水、添加水①、②いずれも飽和溶存酸素状態で行う。

無添加水の pH、電気伝導率、各種イオン濃度の測定結果について、試験前後の測定結果を表 7 に示す。各 Batch の試験前後で、Ca 濃度が上がるため総硬度が上がりアルカリ度も上がっているが、腐食に大きな影響を与える水温や pH などは大きく変化していない。同じく腐食に大きな影響を与える塩化物イオン濃度は、1 Batch と 2 Batch の間で 5 mg/L から 15 mg/L と大きく変化しているが、表 2 にあるように本実験で用意した無添加水の塩化物イオン濃度は 15 mg/L であり、2、3Batch の塩化物濃度と同じである。1 Batch 目の測定値だけ低くなった原因は不明であるが、試験に用いた無添加水の塩化物濃度と今回の浸漬時間では腐食度合いにはほぼ影響を与えないものと推測される。

添加水①を添加した試験水の pH、電気伝導率、各種イオン濃度の測定結果について、試験前後の測定結果を表 8 に示す。無添加試験水と同様、各 Batch の試験前後で Ca 濃度が上がるため総硬度が上がりアルカリ度も上がっているが、腐食に大きな影響を与える水温や pH などは大きく変化していない。添加水①の場合も無添加水と同様に塩化物イオン濃度は 5 mg/L から 15 mg/L と大きく変化している。表 2 にあるように用意した添加水①の塩化物イオン濃度は 15 mg/L である。

添加水②を添加した試験水の pH、電気伝導率、各種イオン濃度の測定結果について、試験前後の測定結果を表 9 に示す。防錆剤メーカー推奨の電気伝導率にするために濃縮度を高くしたため、各イオンの濃度は先の無添加水や添加水①に比べて高くなっているが、各 Batch の試験前後で腐食に大きな影響を与える水温や pH、塩化物イオン濃度などは大きく変化していない。

試験前後の無酸素銅の試験片の外観を図 5 に示す。先の 2.2 での実験と同様に、無酸素

銅の腐食状況は、試験時間とともに光沢が減少しており、全面に薄い赤褐色を呈していることから、表面に酸化銅の皮膜が形成される均一腐食と考えられる。また生成物除去後は、防錆剤が添加されていない試験片の方が、より赤みを帯びており、防錆剤による皮膜形成での腐食抑止の影響が推測される。

試験前後の炭素鋼の試験片の外観を図 6 に示す。炭素鋼の腐食状況は無添加水、添加水①いずれも最初の 1 Batch (360 時間) では、腐食が激しいが、それ以上の試験時間になると腐食の進行が抑制されているように見える。炭素鋼の表面が腐食生成物で覆われることにより腐食の進行が遅れる可能性がある。想定していた通り、添加水②では炭素鋼の腐食がかなり抑えられているように見える。先に記したように防錆剤②は炭素鋼の腐食にも効果があることが期待されていたが、試験後の外観観察で明確に確認できた。

本試験の試験片の腐食速度、腐食度、浸食度の結果について表 10 に示す。試験後のいずれの重量も腐食生成物除去後のものである。腐食速度などの計算は、2.2 で示した式 (1)、(2)、(3) を用いた。これらのデータのうち試験時間による腐食度変化を無酸素銅の場合と炭素鋼の場合について、それぞれ図 7 と 8 に示す。

図 7 に試験時間に対する無酸素銅の浸食度の推移を示す。無添加水への浸漬では浸食度は試験時間とともに一度ピークを迎え、そのあと低くなる。これは銅片表面での腐食生成物により、腐食そのものが抑制されている可能性がある。また無酸素銅は腐食しにくい材料であり、もともと浸食度は小さいが、添加水①および②を用いた場合には無添加水に比べ、浸食度はほぼゼロであり、銅の腐食改善に有効である可能性がある。

図 8 に試験時間に対する炭素鋼の浸食度の推移を示す。無酸素銅の時と同様、無添加水と添加水①への浸漬では浸食度は試験時間とともに一度ピークを迎え、そのあと低くなる。これは無酸素銅と同様に、炭素鋼表面での腐食生成物により、腐食そのものが抑制されている可能性がある。

また 2.2 の試験と同様に、添加水①に浸漬すると、無添加水に浸漬するより試験時間全般にわたり浸食度が大きくなる。

一方、添加水②の場合は腐食が大幅に改善されており、浸食度の観点からも防錆剤②は無酸素銅だけでなく、炭素鋼に対しても有効であることが確認できた。これは図 6 の試験後外観の結果とも一致している。

本試験では、同一の試験セルに炭素鋼と無酸素銅の異種金属を混在させるため、イオン化傾向の差異によって生じる電蝕の影響が想定され、無添加水や添加水①を用いた場合は炭素鋼試料が電蝕により顕著に腐食されていた。しかし、添加水②を用いることで、炭素鋼の電蝕をかなり抑えることができることを確認できた。また添加水②では濃縮度が高くても電蝕を抑えることが確認できた。

### 3. 実際の冷却水設備に使用した場合の効果

実際の冷却設備であるリニアック増強冷却塔の 3 次冷却水に新しい防錆剤をすでに導入しているが、どの程度補給水量を削減できているか、およびどの程度コストが抑えられているかを調査した。

増強冷却塔 3 次冷却水の含有成分の濃縮度や防錆剤の種類・添加量は、防錆剤メーカーや冷却塔設備メーカーと協議して決定した。これらを決定するために用いた条件を以下に記す。

- (1) 濃縮度を高くしても防錆効果があること
- (2) 防錆剤メーカー推奨の電気伝導率に収まること
- (3) 冷却補給水の削減量（濃縮度の上限）はスケールなどの発生により水質管理が困難にならない範囲とする

防錆剤②を使用するにあたり、濃縮度は実験で防錆効果を確認できた 5.5 とし、防錆剤の量は条件(2)を満たす範囲でメーカーと協議して決定した。防錆剤の変更に関しては、

この条件で増強冷却塔 3 次冷却水に防錆剤②を使用し、水質管理上の問題ないことを確認した。

この結果、補給水量の削減と防錆剤の変更が可能になった。防錆剤の変更に関しては、防錆剤②および同系統の防錆剤②-2 に変更することで、総使用量を削減できることからコストの削減につながった。

表 11 にリニアック増強塔 3 次冷却水の防錆剤見直し効果を示す。補給水量は濃縮度を 3.1 から 5.5 にすることで約 17%削減、防錆剤使用金額は 35%の削減を達成した。

さらに、新たな防錆剤の使用により冷却水配管の電蝕が抑制されることから、配管の長寿命化が期待できる。

これらの結果をもとに、リニアック増強塔 3 次冷却水のほか、2024 年 11 月からリニアック既設下流冷却塔に、2025 年 11 月からはリニアック既設上流冷却塔に新しい防錆剤を導入し、リニアック加速器冷却設備全体としてのさらなる補給水量削減および防錆剤コスト削減が期待できる。

#### 4. まとめ

加速器冷却設備配管系統は異なる金属で構成されることも多いため、無酸素銅と炭素鋼の間での電蝕が不可避である。本試験をまとめると以下ようになる。

- (1) 濃縮された冷却水を模した試験水作製の必要性から、純水へのシリカ溶解試験を行った。マイクロ波を用いた溶解法でシリカ濃度の高い試験水を作製することが可能であることを示した。
- (2) 現在利用している冷却水中で無酸素銅と炭素鋼の間で電蝕が起こること、また以前使用していた防錆剤ではその電蝕の抑制ができないことを確認した。
- (3) 新たに導入した防錆剤による電蝕の抑制を確認した。
- (4) 新たな防錆剤に変更することにより、冷却水補給水量の削減、および防錆剤コストを削減した。また冷却水配管の長寿命化および、他の加速器冷却設備に新たな防錆剤を使用することでさらなる冷却水補給水量の削減と防錆剤コストの削減が期待できる。

#### 謝辞

本報告書をまとめるにあたって終始ご支援を頂いた金正倫計 J-PARC 副センター長、小栗英知加速器ディビジョン長、山本風海加速器副ディビジョン長、森下卓俊加速器第一セクションリーダーに深く感謝いたします。また、ご協力を戴いた関山善雄様、本田智幸様、岡本慎二様に深く感謝いたします。さらにご協力を戴いた施設工務セクションの皆様にも深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 能登谷武紀, 銅および銅合金の腐食抑制剤, 防食技術, Vol. 27, No. 12, 1978, pp. 661-670.
- [2] 淵上真一郎, 山口典生, 銅腐食防止剤, 特許第 6128375 号, 2017.
- [3] 腐食防食協会編, 腐食・防食ハンドブック, 丸善, 2000, pp. 69-74.

- [4] 藤井哲雄, 基礎からわかる金属腐食, 日刊工業新聞社, 2011, 60p.
- [5] 日本化学会編, 化学便覧 基礎編 改訂6版, 丸善, 2020, 699p.
- [6] 白淑琴, 占部真示, 岡上吉広, 横山拓史, 水溶液中における非晶質シリカの溶解に及ぼす亜硫酸ナトリウムの影響, 分析化学, Vol. 54, No. 9, 2005, pp. 767-773.
- [7] 藤井哲雄, 基礎からわかる金属腐食, 日刊工業新聞社, 2011, 116p.
- [8] 藤井哲雄, 最新オールカラー図解 錆・腐食・防食のすべてがわかる事典, ナツメ社, 2017, 170p.
- [9] 和氣敏治, 堀池誠, 冷却水系の腐食抑制剤, 材料と環境, Vol. 50, No. 1, 2001, pp. 3-7.
- [10] 日本産業規格, 工業用水腐食性試験方法 JIS K 0100, 1990.
- [11] 特殊金属エクセル, C1020 無酸素銅 | 純銅,  
<https://www.tokkin.co.jp/search/non-ferrous/copper-alloys/c1020/> (accessed 2025-07-09).
- [12] 日本金属学会 編, 金属便覧 改訂6版, 丸善, 2000, 560p.
- [13] 日本産業規格, 機械構造用炭素鋼鋼材 JIS G 4051, 2023.
- [14] 科学技術振興機構 サイエンスポータル, 東北大の超高純度鉄、生体になじむ性質を確認 医療用に期待,  
[https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20200525\\_01/index.html](https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20200525_01/index.html) (accessed 2025-07-09).

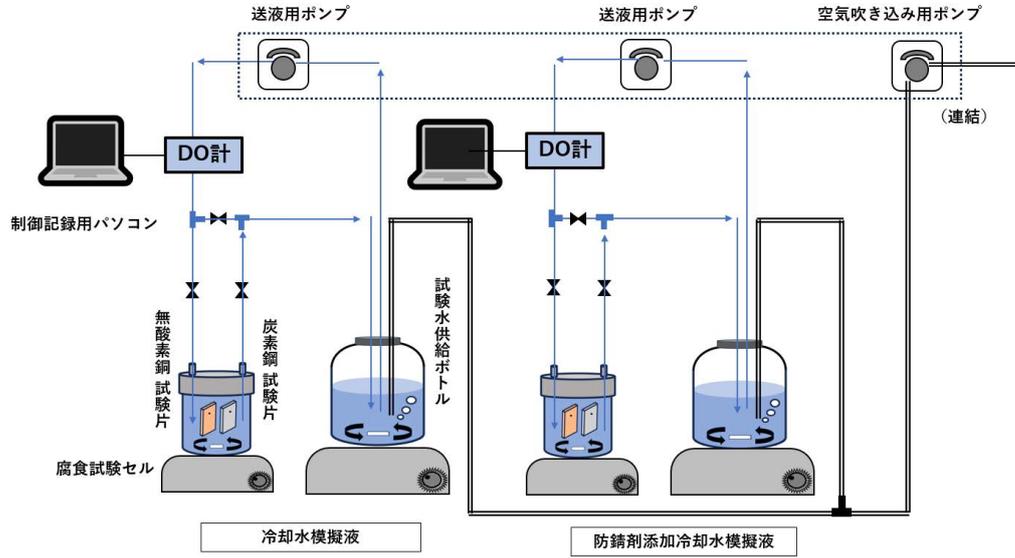


図1 防錆剤の防食性能の確認試験 模式図 (無酸素銅と炭素鋼を同一セルに入れた場合)

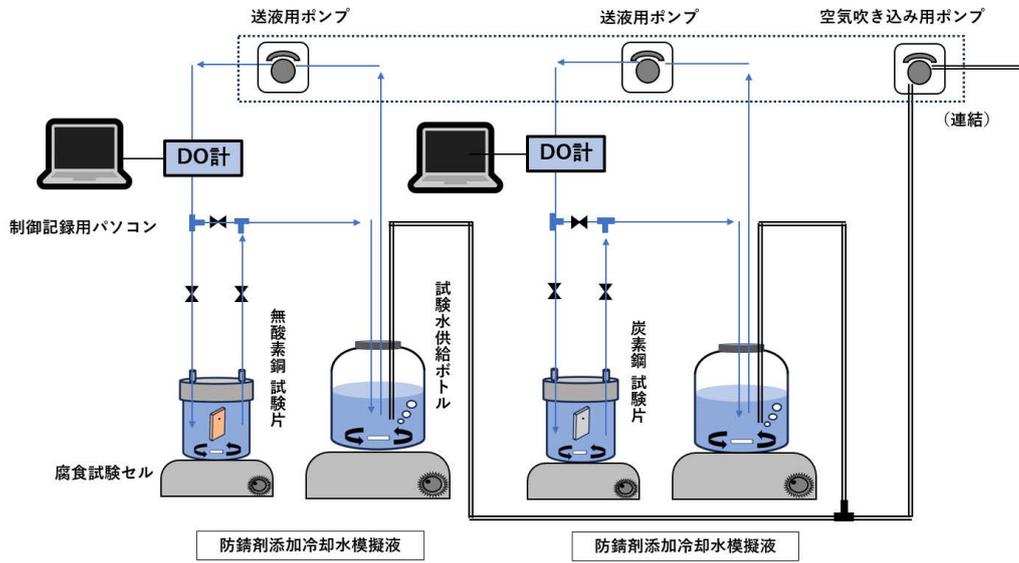


図2 防錆剤の防食性能の確認試験 模式図（無酸素銅と炭素鋼を単独セルに入れた場合）

TP		無酸素銅 (C1020)	
試験条件	Batch (hr)	0Batch (0hr)	1Batch(360hr)
			腐食生成物【除去前】 腐食生成物【除去後】
(a) 無酸素銅1片、炭素鋼1片 同一セル  濃縮度：3.1倍 無添加水			
			
(b) 無酸素銅1片、炭素鋼1片 同一セル  濃縮度：3.1倍 添加水①			
			
(c) 無酸素銅1片 単独セル  濃縮度：3.1倍 添加水①			
			

図3 無酸素銅の試験片外観

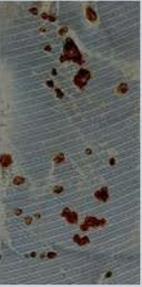
TP		炭素鋼 (JIS G 4051)	
試験条件	Batch (hr)	0Batch (0hr)	1Batch(360hr)
			腐食生成物【除去前】 腐食生成物【除去後】
	(a) 無酸素銅1片、炭素鋼1片 同一セル  濃縮度：3.1倍 無添加水		 
	(b) 無酸素銅1片、炭素鋼1片 同一セル  濃縮度：3.1倍 添加水①		 
	(d) 炭素鋼1片 単独セル  濃縮度：3.1倍 添加水①		 

図4 炭素鋼の試験片外観

TP	無酸素銅 (C1020)								
	Batch (hr)	0Batch (0hr)		1Batch (360hr)		2Batch (720hr)		3Batch (1080hr)	
	試験条件	試験前	腐食生成物【除去前】	腐食生成物【除去後】	腐食生成物【除去前】	腐食生成物【除去後】	腐食生成物【除去前】	腐食生成物【除去後】	
試験片No. C1 無酸素銅、炭素鋼 同一セル 濃縮度：3.1倍 無添加水									
試験片No. C2 無酸素銅、炭素鋼 同一セル 濃縮度：3.1倍 添加水①									
試験片No. C3 無酸素銅、炭素鋼 同一セル 濃縮度：5.5倍 添加水②									

図5 各試験時間における無酸素銅試験片の外観

TP	炭素鋼 (JIS G 4051)						
	0Batch (0hr)	1Batch (360hr)		2Batch (720hr)		3Batch (1080hr)	
	試験前	腐食生成物 【除去前】	腐食生成物 【除去後】	腐食生成物 【除去前】	腐食生成物 【除去後】	腐食生成物 【除去前】	腐食生成物 【除去後】
試験片No. F1 無酸素銅、炭素鋼 同一セル 濃縮度：3.1倍 無添加水							
試験片No. F2 無酸素銅、炭素鋼 同一セル 濃縮度：3.1倍 添加水①							
試験片No. F3 無酸素銅、炭素鋼 同一セル 濃縮度：5.5倍 添加水②							

図6 各試験時間における炭素鋼試験片の外観

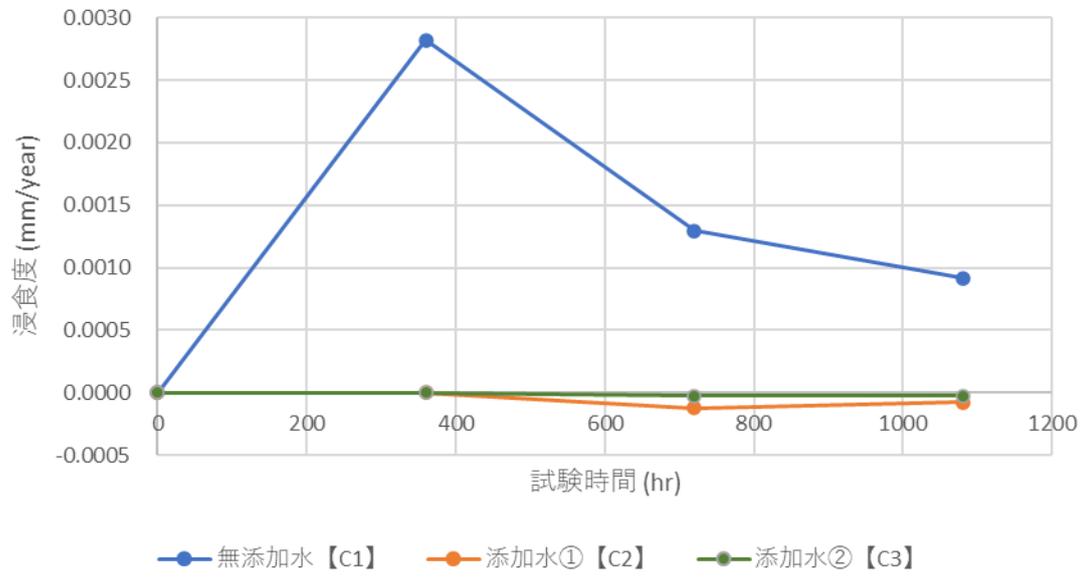


図7 無添加水および添加水①と②の、無酸素銅における浸食度変化

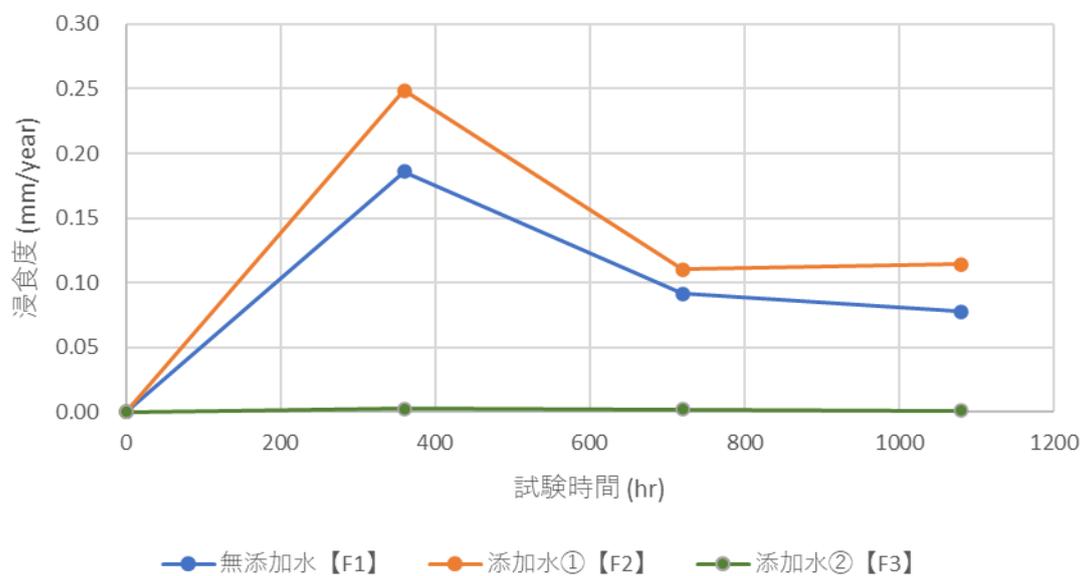


図8 無添加水および添加水①と②の、炭素鋼における浸食度変化

表 1 攪拌法と分解法によるシリカの溶解試験結果

	シリカ濃度 (ppm)	シリカ溶解度 (g/100 mL)
攪拌法	攪拌時間: 48 時間	0.00015
	攪拌時間: 72 時間	0.00015
分解法	シリカ採取量: 0.1 g	0.0003
	シリカ採取量: 0.2 g	0.0050

表 2 本実験に用いた各試験水の分析結果

試験水の種類	無添加水	添加水①	添加水②
濃縮度	3.1	3.1	5.5
カルシウム (mg/L)	40	40	80
カルシウム硬度 (mg/L)	100	100	200
マグネシウム (mg/L)	1.8	1.8	2.8
マグネシウム硬度 (mg/L)	7.4	7.4	12
総硬度 (mg/L)	108	108	212
硫酸イオン (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/L)	89	89	180
塩化物イオン (Cl <sup>-</sup> ) (mg/L)	15	15	25
炭酸水素イオン (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/L)	65	65	120
溶存シリカ (SiO <sub>2</sub> ) (mg/L)	56	56	88
防錆剤その1 添加量 (mg/L)	-	120	-
防錆剤その2 添加量 (mg/L)	-	-	300

表 3 電蝕の確認試験における溶存酸素濃度、液温

	(a) 無添加水 無酸素銅、炭素銅	(b) 添加水① 無酸素銅、炭素銅	(c) 添加水① 無酸素銅のみ	(d) 添加水① 炭素銅のみ
溶存酸素濃度 (DO) 平均値 (mg/L)	7.1	6.9	7.1	7.1
液温 平均値 (°C)	25.6	26.0	25.2	24.8

表 4 電蝕確認試験前の水質測定結果

	(a) 無添加水 炭素鋼、無酸素銅	(b) 添加水① 炭素鋼、無酸素銅	(c) 添加水① 無酸素銅のみ	(d) 添加水① 炭素鋼のみ
pH	7.43 (23.6°C)	7.72 (23.6°C)	8.19 (22.3°C)	8.16 (22.3°C)
電気伝導率 (mS/m)	38 (24.2°C)	38 (24.1°C)	39 (22.5°C)	39 (22.5°C)
塩化物イオン (mg/L)	5	3	5	3
シリカ (mg/L)	50	50	50	50
Mアルカリ度 (mg/L)	80	80	80	80
カルシウム (mg/L)	40	40	40	40
マグネシウム (mg/L)	1	1	1	1
カルシウム硬度 (mg/L)	100	100	100	100
総硬度 (mg/L)	104	104	104	104

表 5 電蝕確認試験後 (360h 後) の水質測定結果

	(a) 無添加水 無酸素銅、炭素鋼	(b) 添加水① 無酸素銅、炭素鋼	(c) 添加水① 無酸素銅のみ	(d) 添加水① 炭素鋼のみ
pH	7.44 (22.3°C)	7.56 (22.4°C)	7.75 (23.0°C)	7.66 (22.4°C)
電気伝導率 (mS/cm)	37 (22.5°C)	38 (22.4°C)	38 (23.0°C)	38 (23.0°C)
塩化物イオン (mg/L)	5	3	3	3
シリカ (mg/L)	50	50	50	50
M アルカリ度 (mg/L)	70	80	70	80
カルシウム (mg/L)	40	40	40	40
マグネシウム (mg/L)	1	1	1	1
カルシウム硬度 (mg/L)	100	100	100	100
総硬度 (mg/L)	104	104	104	104

表 6 腐食速度、腐食度、浸食度の測定結果

	(a) 無添加水 無酸素銅、炭素銅		(b) 添加水① 無酸素銅、炭素銅		(c) 添加水① 無酸素銅のみ	(d) 添加水① 炭素銅のみ
	無酸素銅	炭素銅	無酸素銅	炭素銅		
試験前重量 (g)	7.59988	6.84530	7.94176	7.09670	8.17382	7.38033
試験後重量 (g)	7.59877	6.78128	7.94176	7.00993	8.17382	7.36175
重量変化 (g)	0.00111	0.06402	0.00000	0.08677	0.00000	0.01858
表面積 (m <sup>2</sup> )	0.00107	0.00107	0.00108	0.00108	0.00109	0.00110
腐食速度 (mg/m <sup>2</sup> ・hr)	2.88	166.35	0.00	222.56	0.0	47.1
腐食度 (mdd)	0.69	39.93	0.00	53.41	0.0	11.3
浸食度 (mm/year)	0.003	0.186	0.000	0.249	0.000	0.053

表7 無添加水の各試験前後におけるイオン濃度の測定結果

	1Batch (360h)		2Batch (720h)		3Batch (1080h)	
	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後
pH	7.43 (23.6°C)	7.44 (22.3°C)	7.44 (22.9°C)	7.44 (24.9°C)	7.44 (24.8°C)	7.55 (24.6°C)
電気伝導率 (mS/cm)	38 (24.2°C)	37 (22.5°C)	40 (23.0°C)	39 (25.0°C)	40 (24.9°C)	40 (24.6°C)
塩化物イオン (mg/L)	5	5	15	15	15	15
溶存シリカ (mg/L)	50	50	54	56	62	64
カルシウム (mg/L)	40	40	41	54	58	60
カルシウム硬度 (mg/L)	100	100	102	135	145	150
マグネシウム (mg/L)	1	1	2	2	2	2
マグネシウム硬度 (mg/L)	4	4	8	8	8	8
総硬度 (mg/L)	104	104	111	143	153	158
Mアルカリ度 (mg/L)	80	70	100	100	100	100

表 8 添加水①の各試験前後におけるイオン濃度の測定結果

	1Batch (360h)		2Batch (720h)		3Batch (1080h)	
	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後
pH	7.72 (23.6°C)	7.56 (22.4°C)	8.03 (23.0°C)	8.07 (24.7°C)	8.00 (24.6°C)	7.65 (24.5°C)
電気伝導率 (mS/cm)	38 (24.1°C)	38 (22.4°C)	41 (23.0°C)	40 (24.7°C)	41 (24.8°C)	41 (24.6°C)
塩化物イオン (mg/L)	3	3	15	15	15	15
溶存シリカ (mg/L)	50	50	54	60	62	64
カルシウム (mg/L)	40	40	41	55	58	64
カルシウム硬度 (mg/L)	100	100	102	137	145	160
マグネシウム (mg/L)	1	1	2	2	2	2
マグネシウム硬度 (mg/L)	4	4	8	8	8	8
総硬度 (mg/L)	104	104	111	146	153	168
Mアルカリ度 (mg/L)	80	80	100	100	100	100

表 9 添加水②の各試験前後におけるイオン濃度の測定結果

	1Batch (360h)		2Batch (720h)		3Batch (1080h)	
	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後
pH	7.92 (25.8°C)	8.38 (25.8°C)	7.98 (25.8°C)	8.41 (25.1°C)	8.06 (25.0°C)	8.54 (25.1°C)
電気伝導率 (mS/cm)	74 (25.9°C)	74 (25.9°C)	73 (25.9°C)	74 (25.2°C)	73 (25.1°C)	74 (25.1°C)
塩化物イオン (mg/L)	25	25	25	25	25	25
溶存シリカ (mg/L)	90	85	85	85	85	90
カルシウム (mg/L)	84	83	83	90	84	89
カルシウム硬度 (mg/L)	210	207	207	225	210	222
マグネシウム (mg/L)	3	3	3	3	3	3
マグネシウム硬度 (mg/L)	12	12	12	12	12	12
総硬度 (mg/L)	222	220	220	237	222	235
Mアルカリ度 (mg/L)	180	180	180	180	180	180

表 10 防錆剤の防食性能の確認試験における腐食速度、腐食度、浸食度の測定結果

試験条件	試験溶液 (濃縮度)		無添加水 (3.1)		添加水① (3.1)		添加水② (5.5)	
	試験液量 (循環量) mL (mL/min)	防錆剤の添加濃度 (mg/L)	2500 (100)	無添加	2500 (100)	120	2500 (100)	300
	水温 (平均) °C		室温 (25.6)		室温 (26.0)		室温 (28.0)	
	溶存酸素濃度 (DO) (平均) mg/L		飽和 (7.1)		飽和 (6.9)		飽和 (6.8)	
	試験素材-		炭素鋼 (JIS G4051)	無酸素鋼 (C1020)	炭素鋼 (JIS G4051)	無酸素鋼 (C1020)	炭素鋼 (JIS G4051)	無酸素鋼 (C1020)
試験時間	試験片 No. -		F1	C1	F2	C2	F3	C3
0	試験片表面積 m <sup>2</sup>		0.001069	0.001072	0.001083	0.001083	0.001087	0.001077
	試験片重量 g		6.84530	7.59988	7.09670	7.94176	7.22510	7.69637
	試験片重量 g		6.78128	7.59877	7.00993	7.94176	7.22410	7.69637
	累積減量 g		0.06402	0.00111	0.08677	0.00000	0.00100	0.00000
360	腐食減量 g		0.06402	0.00111	0.08677	0.00000	0.00100	0.00000
	腐食速度 mg/ m <sup>2</sup> ・hr		166.35485	2.87624	222.55566	0.00000	2.55545	0.00000
	腐食度 mdd		39.92516	0.69030	53.41336	0.00000	0.61331	0.00000
	浸食度 mm/year		0.18588	0.00282	0.24867	0.00000	0.00286	0.00000
720	試験片重量 g		6.74978	7.59826	6.97143	7.94181	7.22340	7.69638
	累積減量 g		0.09552	0.00162	0.12527	-0.00005	0.00170	-0.00001
	腐食減量 g		0.03150	0.00051	0.03850	-0.00005	0.00070	-0.00001
	腐食速度 mg/ m <sup>2</sup> ・hr		81.85220	1.32152	98.74833	-0.12824	1.78882	-0.02579
1080	腐食度 mdd		19.64453	0.31716	23.69960	-0.03078	0.42932	-0.00619
	浸食度 mm/year		0.09146	0.00129	0.11034	-0.00013	0.00200	-0.00003
	試験片重量 g		6.72294	7.59790	6.93152	7.94184	7.22302	7.69639
	累積減量 g		0.12236	0.00198	0.16518	-0.00008	0.00208	-0.00002
1080	腐食減量 g		0.02684	0.00036	0.03991	-0.00003	0.00038	-0.00001
	腐食速度 mg/ m <sup>2</sup> ・hr		69.74327	0.93284	102.36740	-0.07695	0.97107	-0.02579
	腐食度 mdd		16.73838	0.22388	24.56817	-0.01847	0.23306	-0.00619
	浸食度 mm/year		0.07793	0.00091	0.11438	-0.00008	0.00109	-0.00003

表 11 リニアック増強塔 3 次冷却水の防錆剤見直し効果

		以前	現行
冷却 塔 管 理	濃縮度	3.1	5.5
	ブローダウン量 m <sup>3</sup> /year	14,782	6,943
	補給水量 m <sup>3</sup> /year	46,151	38,312
	節水量 m <sup>3</sup> /year	7,839	
	節水率%	17.0	
薬 剤 管 理	防錆剤①使用量 kg/year	1,642	0
	防錆剤①金額	3,284,000	0
	防錆剤①-2 使用量 kg/year	1,344	0
	防錆剤①-2 金額	4,032,000	0
	防錆剤②使用量 kg/year	0	1,800
	防錆剤②金額	0	4,500,000
	防錆剤②-2 使用量 kg/year	40	132
	防錆剤②-2 金額	104,000	343,200
	薬剤使用金額 円/year	7,420,000	4,848,200
	年間節約金額 円/year	2,576,800	
節約金額率 %	34.7		

This is a blank page.



