

J-PARC リニアック棟における溶融痕の確認について

1. 背景

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）及び大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構は、共同で大強度陽子加速器施設（J-PARC）を運営している（図1）。リニアックはJAEAが所掌する施設で、イオン源で生成した陽子ビームを400 MeVまで加速し、3GeVシンクロトロン加速器に入射している。

2. 状況

（事象の概要）

令和6年6月21日（金）に、J-PARC リニアック棟冷却水コールド機械室3（非管理区域）（図2）のチラー冷凍機（12台中の1台^{※1}）（図3）で電流値の異常を確認したことから、職員等が目視点検を行ったところ、当該冷凍機の動作に異常はなく、煙・異臭・異音は確認されなかったが、製造メーカーと相談し、当該冷凍機を停止させた。

同年7月5日（金）に製造メーカー作業員による当該冷凍機の調査を行っていたところ、10時46分頃に電源端子部に溶融痕を発見した（図4、5）。このため担当職員は11時19分に公設消防に一般電話により通報し、11時50分に公設消防により火災であると判断された。

残りの11台について7月8日（月）に目視点検を行い、溶融痕は発見されなかった。

（時系列）

7月5日（金）

09時30分頃	製造メーカー作業員が当該チラー冷凍機の調査を開始
10時46分頃	電源端子部に溶融痕を発見
11時19分	担当職員が公設消防に一般電話により通報
11時41分	公設消防現場到着
11時50分	公設消防により火災であると判断された

※1：12台のチラー冷凍機は、4台ずつの3ユニットで構成されている（図3に示すとおり、左側からAユニット、BユニットおよびCユニットと称する）。今回、溶融痕が発見されたのは、Bユニットの1台である。AおよびCユニットは平成22年度（2010年度）、Bユニットは平成30年度（2018年度）にそれぞれ冷却水コールド機械室3に設置されたものである。

3. リニアック冷却水設備の概要

リニアック冷却水設備は、リニアックを構成する機器に冷却水を供給するための装置である。リニアック冷却水設備の配管系統図を図6に示す。リニアック冷却水設備は、冷却塔、チラー冷凍機および熱交換器と、これらに冷却水を循環させるためのポンプから構成されている。このうちチラー冷凍機は、二次系冷却水を供給するための装置であり、加速器機器を直接冷却する一次系とは別系統である。当該チラー冷凍機はメーカーの標準品であり、その性能は、電源電圧400V（3相交流）（図7）、冷却能力360kW、消費電力約90kWである。

4. 事象発生の原因

4-1 原因調査

4-1-1 公設消防との合同調査

令和6年7月16日(火)に公設消防の立会いのもと、溶融痕が発見された電源端子部の調査を行った。調査の結果を以下に示す。

- 3相(R相、S相、T相)ラインの導通試験の結果、R相ラインおよびS相ラインは導通が有り、T相ラインだけ導通が無かった。
- T相一次側のボルトの頭部が破断していた(図8)。
- T相一次側の圧着端子の接触面(両面)に黒色の物質が付着していた(図9)。
- 圧着端子とワッシャー間および圧着端子と端子台プレート間にそれぞれ空隙があった。

4-1-2 電源端子部の詳細調査

電源端子部のT相一次側の詳細調査の結果、以下のことが判明した。

- 圧着端子接触面やワッシャーに付着していた黒色の物質の成分分析を行ったところ、主成分は絶縁性の酸化銅であると認められた(図10)。またこの酸化銅は、10層程度が積層していた(図11)。
- 圧着端子、端子台プレートおよびワッシャーに放電痕があった(図11)。
- 圧着端子の銅部分が、全体的に約0.5mm薄くなっていた(図12)。
- 端子台プレートが3mm程度変形していた(図13)。
- ボルト破断面に溶融した銅が付着していた(図14)。
- 端子台に使用していた圧着端子のサイズや形状の規格は、適正と認められた。

なお、電源端子部の主要部品の材質は、以下のとおりである。

- *圧着端子： 無酸素銅(電気すずメッキ)
- *ボルト： 鉄(亜鉛メッキクロメート処理)
- *ワッシャー： 鉄(亜鉛メッキクロメート処理)
- *端子台プレート： 黄銅(ニッケルメッキ)
- *端子台： ポリカーボネート

4-1-3 当該冷凍機の電流値および圧力値(令和6年6月21日前後)の変化

当該冷凍機のS相電流値データは、30秒おきに冷凍機監視系に保存されている。図15(上)に、令和6年6月20日(木)0時から6月22日(土)0時までの電流の時間変化を示す。電流の値は、図中のA、B、Cの3回のタイミングで大きく変動している。6月20日の10時13分に始まっている変動(図中A)は、当該冷凍機を一旦停止し再起動したことによる。この際は、再起動により電流値が一旦140A程度まで上昇したものの、その後下がった。しかし、12時33分に電流値が突然180Aまで急上昇(図中B)し、その後は180A前後で運転が続いた。翌日6月21日の朝9時頃、職員等による日常点検で電流値の異常を確認したことから、製造メーカーと相談し、同日17時21分に当該冷凍機を停止させ電流値が0Aとなった(図中C)。

図15(下)に、同じ期間における当該冷凍機の圧縮機(気体状態の冷媒を液体に凝縮さ

せる装置)の出口圧力の時間変化を示す。出口圧力に関しては、図中Aの当該冷凍機再起動や図中Cの停止のタイミングで、それらの操作に応じて変化している。しかし、電流が急上昇したBのタイミングでは、出口圧力は定常運転範囲の変動で特に異常は見られなかった。

以上の調査により、以下の事象が発生したと推定される。

- ① 6月20日12時33分(図中B)のタイミングで、T相に電流が流れない状態となった。
- ② 当該冷凍機はインバータ制御であることから、T相が機能しない状態でも残りのR相およびS相からインバータを駆動するのに必要な電流を供給した。
- ③ そのため、T相の喪失後も出口圧力には目立った変動は発生せず、冷凍機は機能を維持した。

4-1-4 電源端子部の点検状況調査

平成30年度(2018年度)にBユニットのチラー冷凍機(今回溶融痕が発見された1台を含む4台)を更新した。この際、更新前の冷凍機とは給電ケーブルと内部配線の取り付け位置と接続方法が異なっていたため、製造メーカーの判断で、現地にてチラー冷凍機筐体内に端子ボックスを設けてケーブルを接続した(図7)。当該チラー冷凍機の納入図面には当該端子ボックスは記載されておらず、かつ製造メーカーからの報告も無かったため、担当職員は当該端子ボックスの存在を把握できなかった。

各チラー冷凍機は毎年夏に製造メーカーによる標準点検が実施されており、点検シートに基づいてネジ等締結部の状態確認、動力電源ケーブルの絶縁抵抗測定および点検後の動作確認試験等が行われている。しかし、点検シートは当該端子ボックスの記載が無い標準仕様の図面を基に作成されており、かつ製造メーカー内において施工担当者から点検担当者への情報の引継ぎも無かった。そのため、当該端子ボックスは点検項目から抜け落ちてしまい、電源端子部の状態確認は、当該チラー冷凍機の更新工事から今回の発災まで一度も行われていなかった。

12台中の残りの8台(AユニットおよびCユニット)には、当該電源端子部のような中継端子ボックスは設置されておらず、ネジ等締結部の状態確認は標準点検の範囲内で製造メーカーによって実施されていた。

4-2 事象発生メカニズム

以下に示すメカニズムにて、溶融痕が発生したと推定される(図16)。

- ① T相一次側の圧着端子の接触抵抗が他の圧着端子より大きくなり、ジュール熱により温度が上昇し酸化銅の生成が進行した^{※2}。なお、接触抵抗が大きくなった原因については、ボルトの締め付け不足による緩み、または締め過ぎによる変形/破損、圧着端子の不良などが考えられるが、確定できなかった。
- ② 酸化銅は絶縁物のためさらに接触抵抗が大きくなり、より高い温度上昇が発生した。
- ③ 当該冷凍機は運転状況により起動と停止を繰り返すため(年5回程度)、酸化銅は断続的に生成されることで積層状態になった。酸化銅は10層程度であったことから、数年間かけて成長し、ワッシャーと圧着端子にギャップが増大していった。
- ④ ギャップ幅など一定の条件が満たされアーク放電が始まり短時間の赤熱現象^{※3}が発生した。これにより電源端子部が溶融するとともに、ボルトの破断や端子台プレートの変形が

発生したと考えられる。ボルトの破断面に溶融した銅（融点 1085℃）が流れ込んでいることから、ボルト付近の温度は 1000℃以上に上昇したと考えられる（1000℃以上になると鉄や銅の強度が極端に低下し、容易に変形/破断する）。

- ⑤ ボルトが破断されたため、圧着端子と端子台プレートが分離し、T 相に電流が流れなくなった。

※2：酸化銅は、100℃付近を境としてそれ以下の温度では成長速度が遅く、それ以上の温度では急速であることが分かっている。

※3：銅導体接続部の接触不良に加え、通電、放電、過熱などの条件が伴うと異常な発熱が発生し、発煙や発火に進展する場合がある。

5. 当該チラー冷凍機の対策

今回の溶融痕の発生は、上記の推定に基づくと、「定期的な電源端子部の外観検査およびボルトの増し締めなどにより端子部の健全性を確認すること」、「外観検査においては酸化銅の生成にも着目すること」で未然に防止できる。

チラー冷凍機に対しては以下の対策を行った。

- 点検要領書を改訂し、電源端子部など点検すべき機器が定期点検対象から抜けていないことを確認した。
- B ユニットの残り 3 台のチラー冷凍機について、電源端子部の点検を行い異常が無いことを確認した。
- 電源端子部を窓付きタイプに変更するとともに、設置位置を冷凍機筐体内部ではなく外部に変更し、冷凍機の日常点検時に電源端子部を容易に目視確認できるようにした。
- 溶融痕が発見されたチラー冷凍機の使用は当面中止する。製造メーカー工場にて総点検および試運転を行い健全であることの確認後に、使用を再開する予定である。

6. 今後の対策

J-PARC においては、以下の対策を実施する。

- 動力機器の電源ケーブル接続点について、図面と実際の状態に相違が無く、点検が確実に実施されていることの確認。
- 同ケーブル接続点について、定期点検範囲の明確化。

また、今後、動力機器の更新または新設をする場合は、図面と実際の状態に相違が無いよう職員が確認する。

メーカー標準品の購入・据付であっても仕様に変更が生じた場合、発注者は受注者に対し作業前に連絡や相談を行うことを徹底させるとともに、仕様変更の適合性を発注者・受注者の双方で確認する。

なお、今回の事象発生の原因を踏まえて原子力科学研究所内で水平展開を実施し、同様の事象の再発防止に努める。

7. 環境への影響等

本事象に伴う人的災害の発生及び周辺環境への影響はなく、モニタリングポストの指示値にも変動はなかった（図 17）。

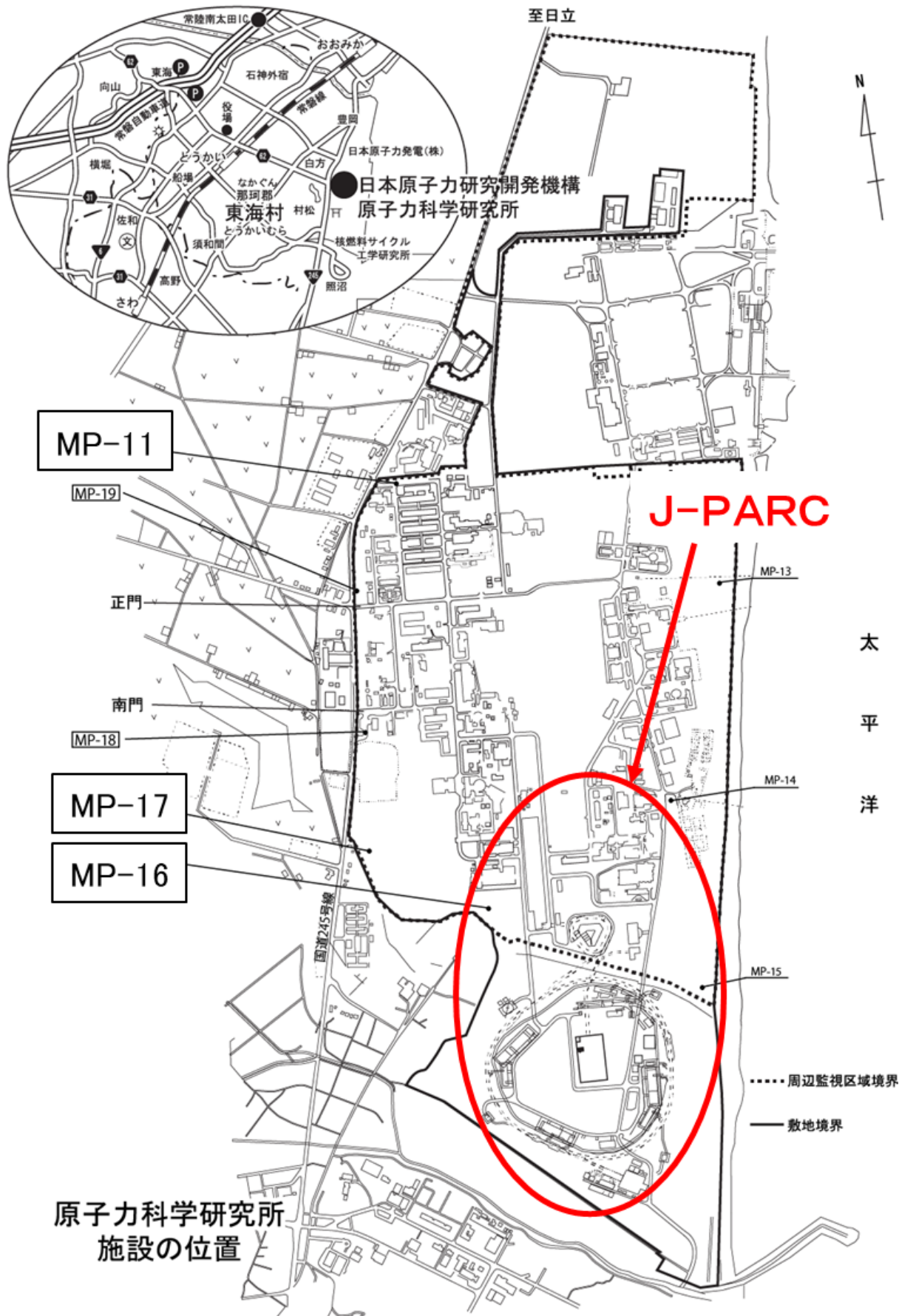


図1 日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所の施設配置図

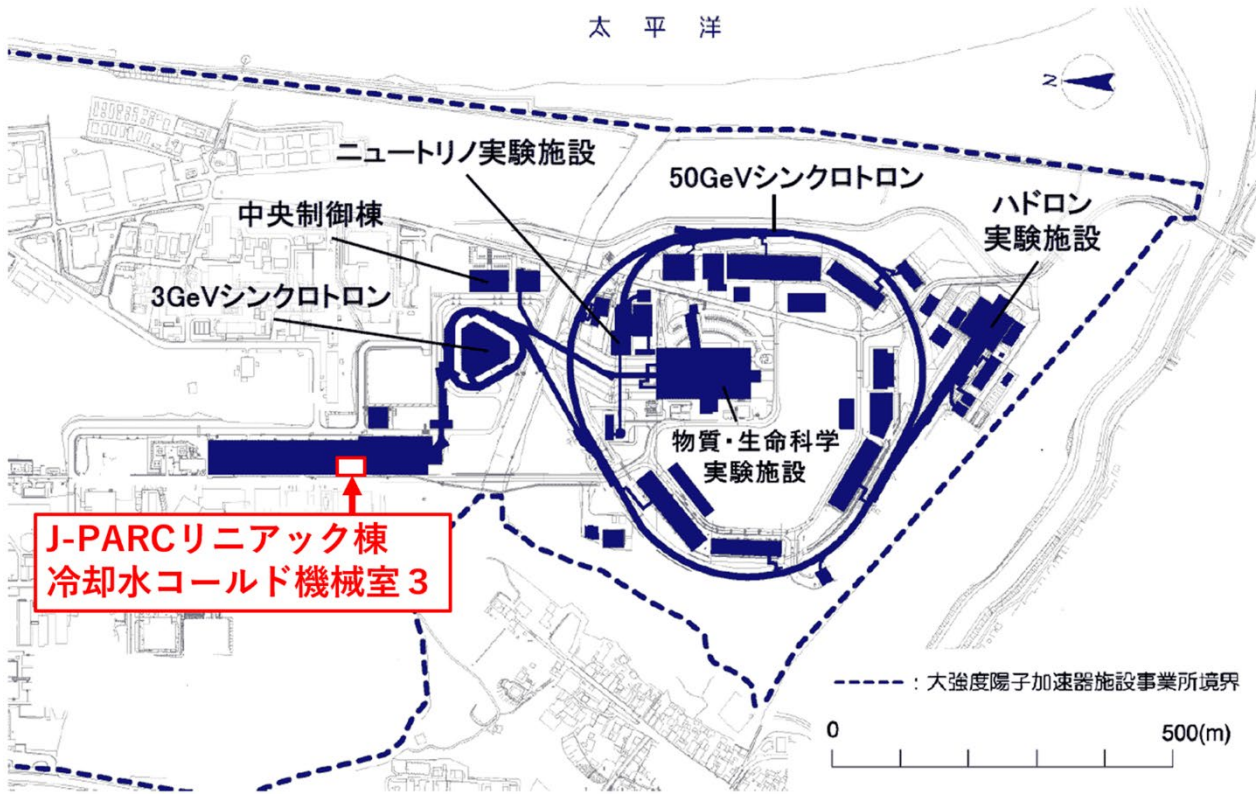


図2 J-PARC リニアック棟の冷却水コールド機械室3の位置

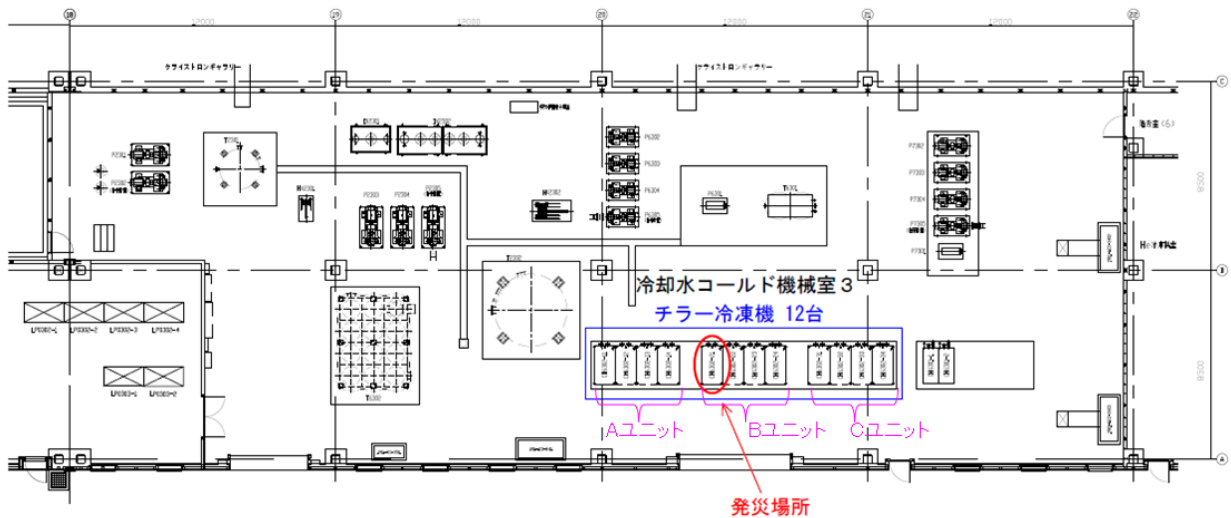


図3 冷却水コールド機械室3内のチラー冷凍機の設置位置

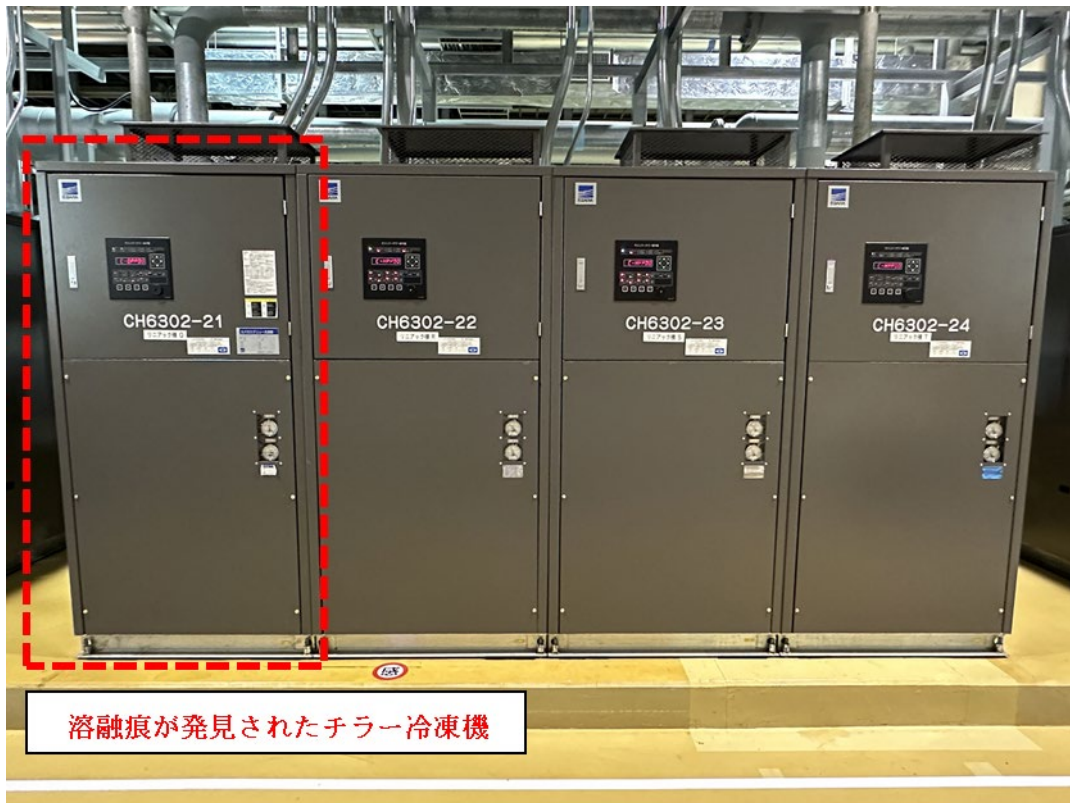


図4 チラー冷凍機の設置状況

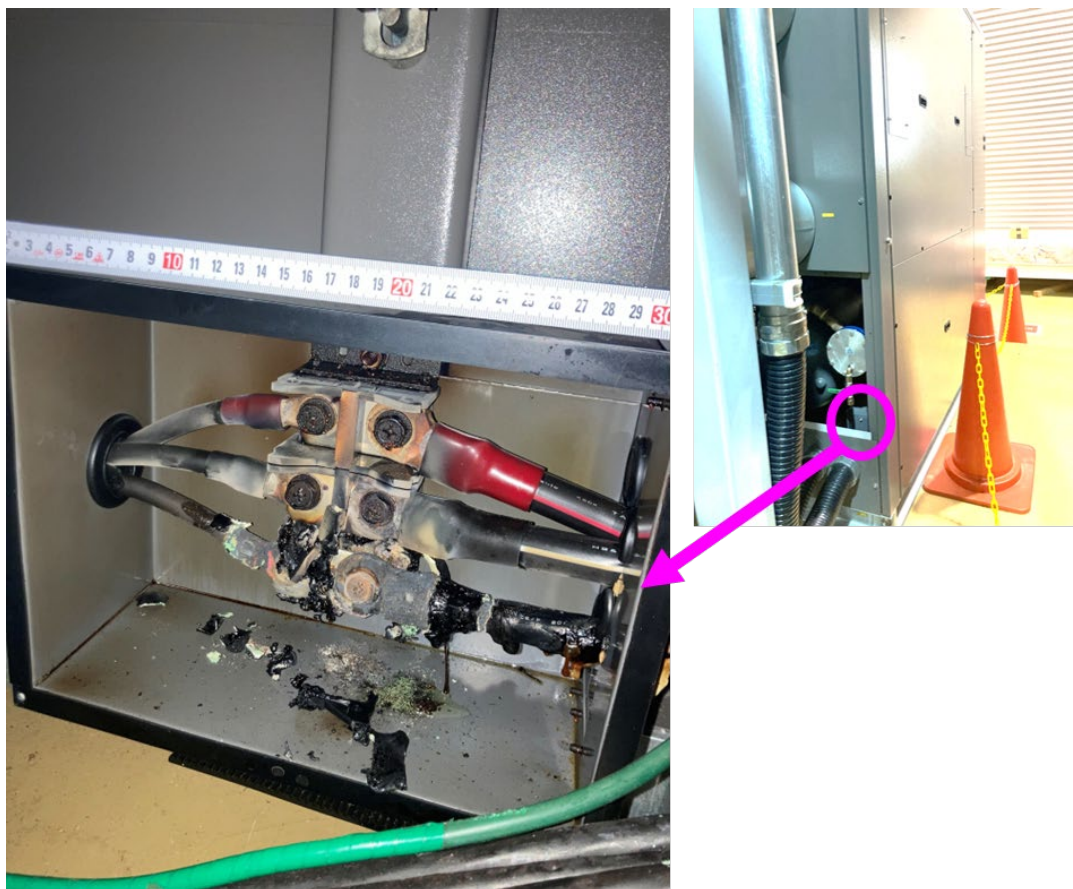


図5 チラー冷凍機電源端子部の位置（右）および状態（左）

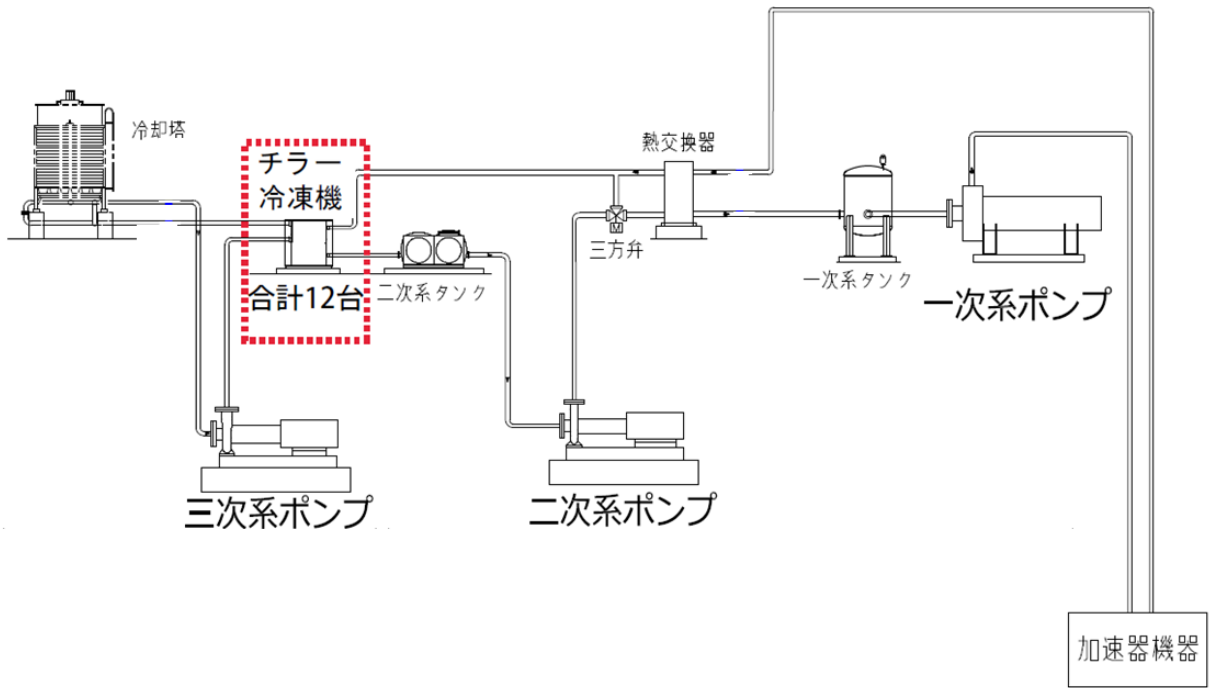


図6 リニアック冷却水設備の配管系統図

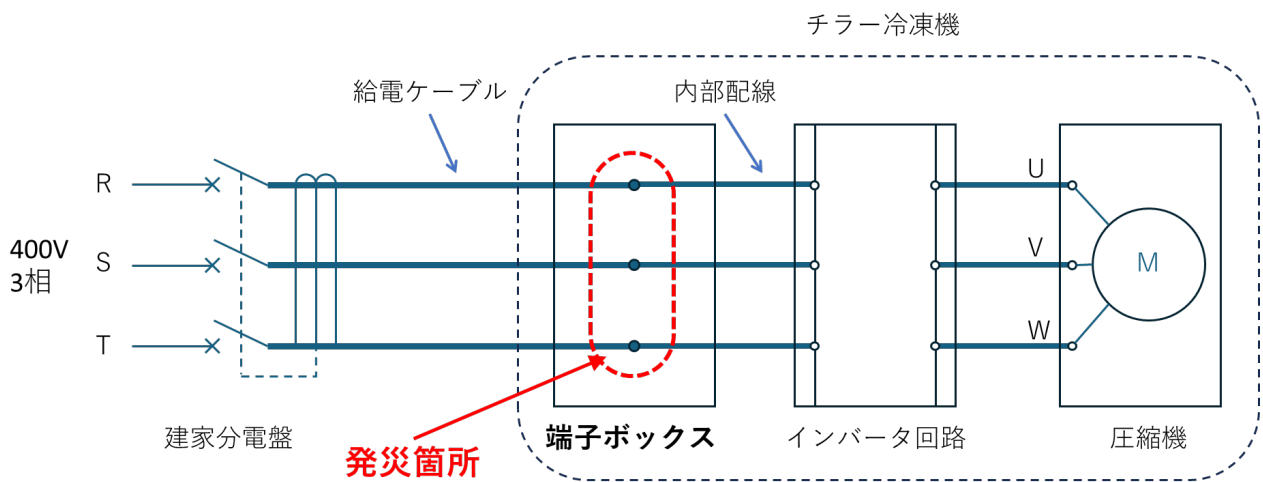


図7 チラー冷凍機の結線図



図8 チラー冷凍機本体から取り出した電源端子部の状態

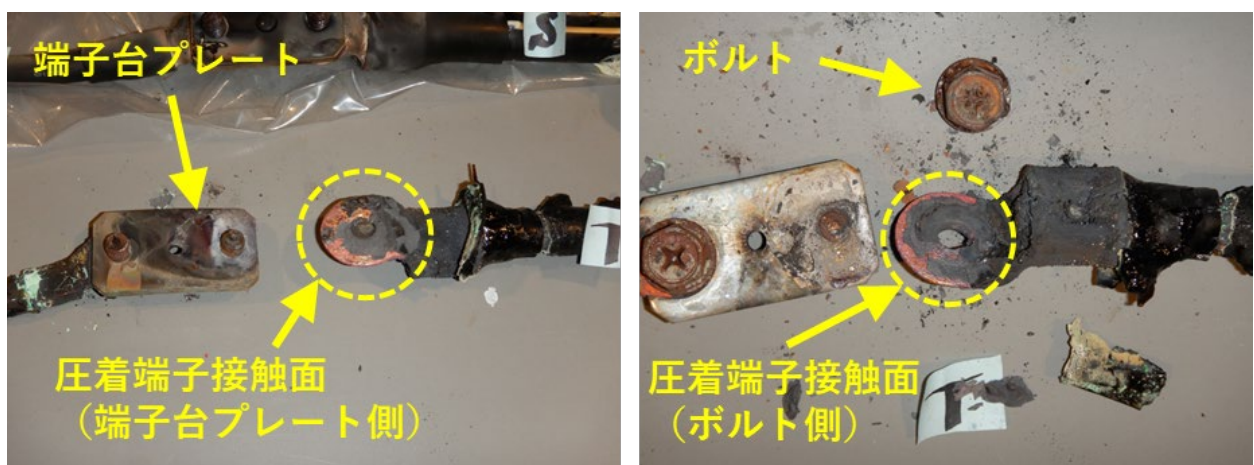


図9 T相一次側圧着端子の接触面の状態
(左：端子台プレート側、右：ボルト側)

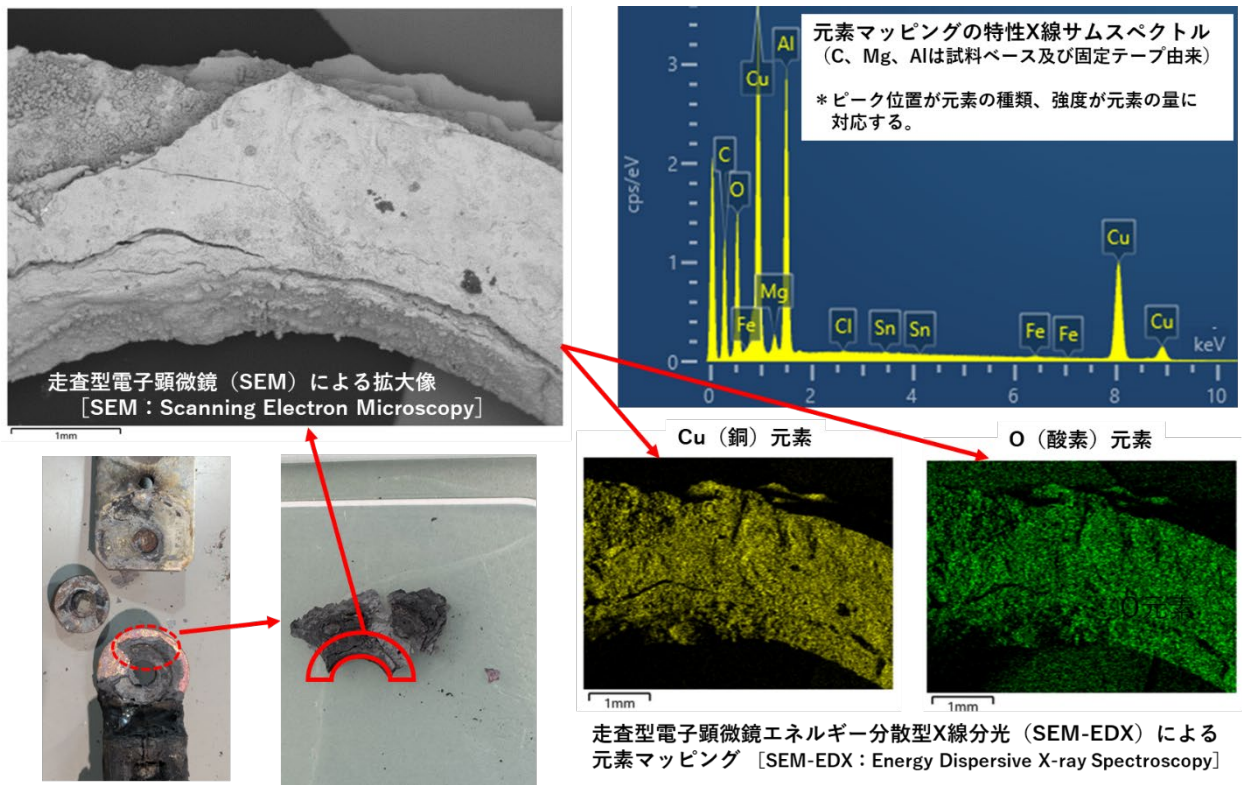


図10 ワッシャーに堆積していた黑色物質の成分分析結果



図11 端子台プレート、圧着端子、ボルトおよびワッシャーの状態

他の正常圧着端子



測定位置	厚さ
A : 周辺部厚さ平均	3.28 mm
B : 締め付け部厚さ平均	3.25mm

T相一次側圧着端子

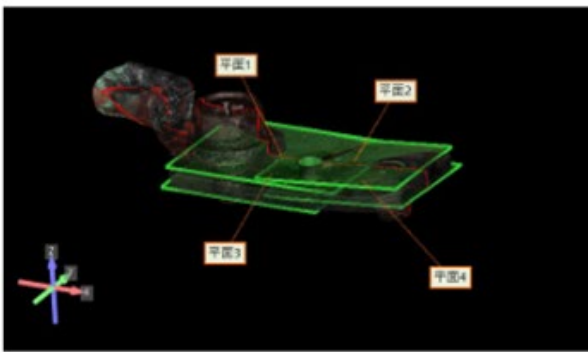


測定位置	厚さ	減肉※
①	2.76 mm	0.52 mm
②	2.68 mm	0.60mm

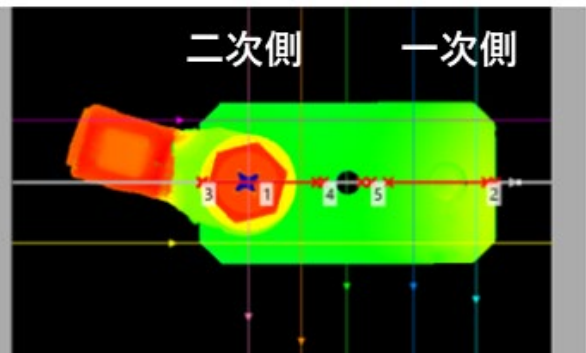
※ 減肉 : 正常圧着端子厚さ平均との差

図 1 2 圧着端子厚さ測定結果 (左 : 他の正常圧着端子、右 : T相一次側圧着端子)

3D画像



2D画像



プロフィール

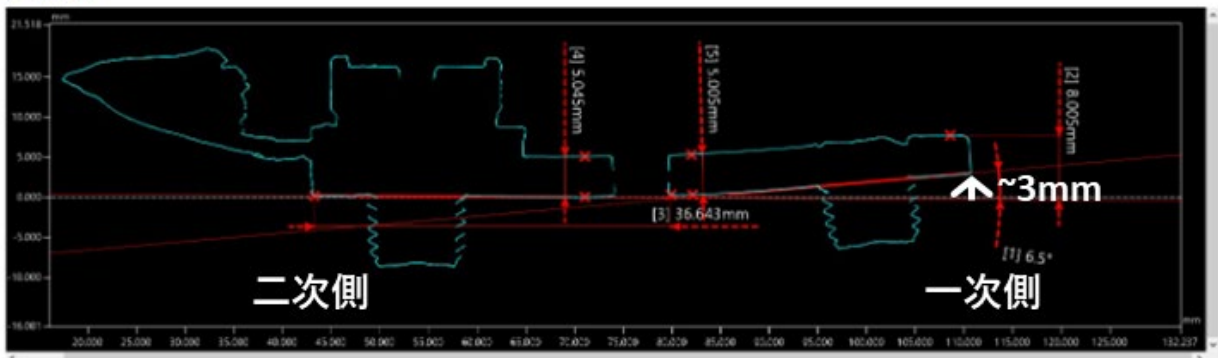


図 1 3 端子台プレートの3次元形状測定結果

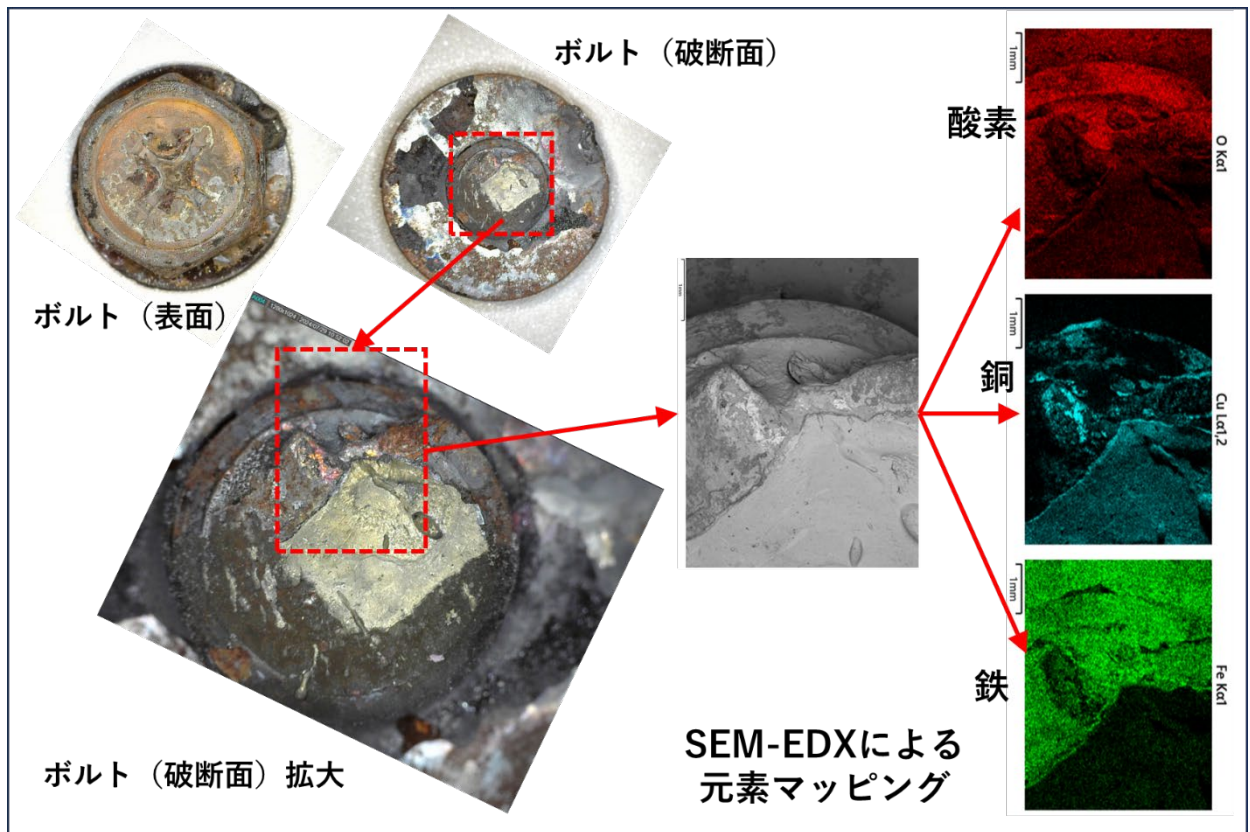


図1 4 ボルト破断面に付着した物質の成分分析結果

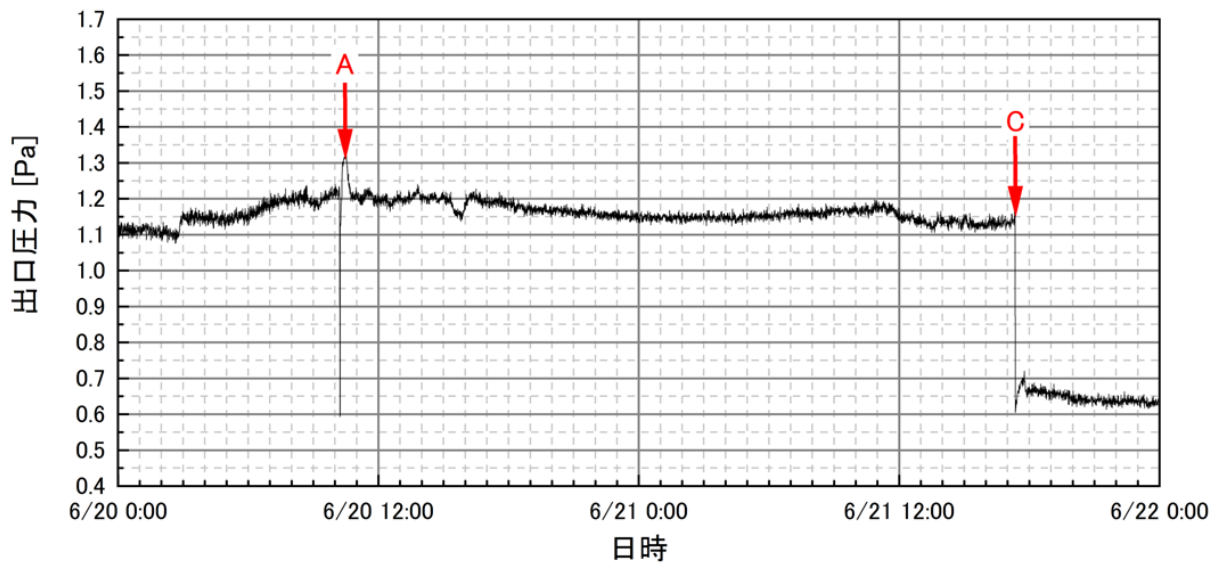
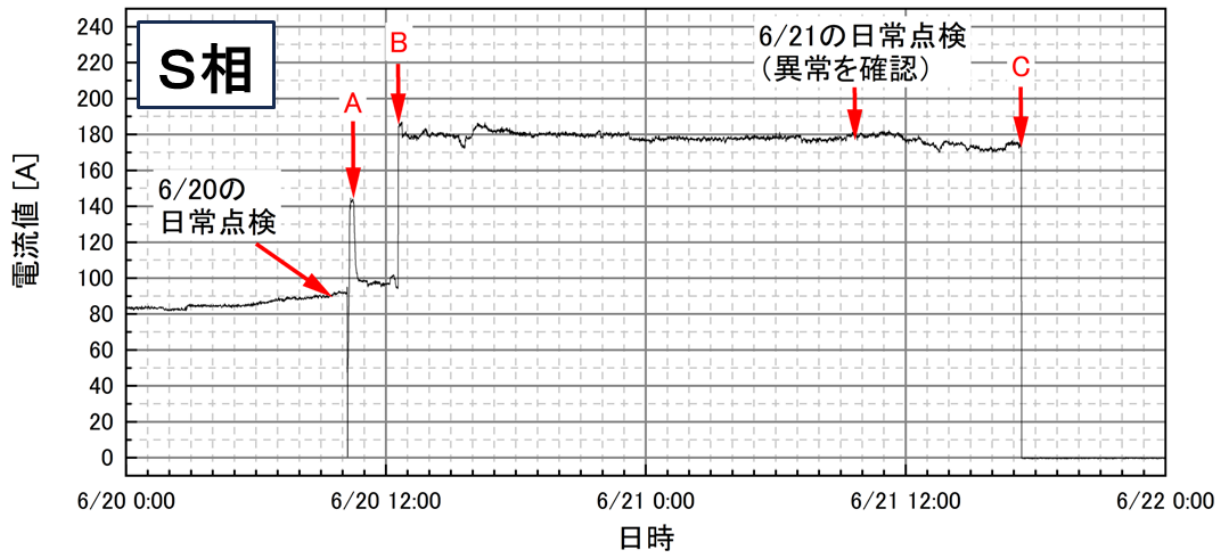


図 1 5 当該冷凍機の S 相電流値 (上) および圧縮機出口圧力 (下) 変化

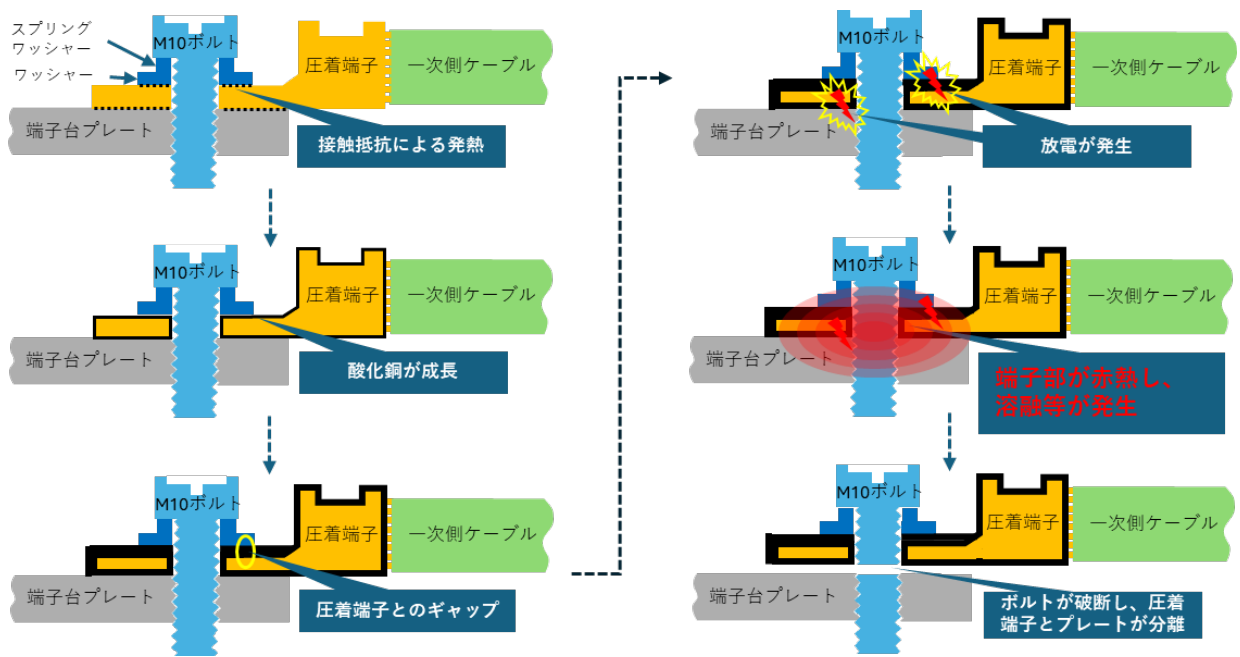


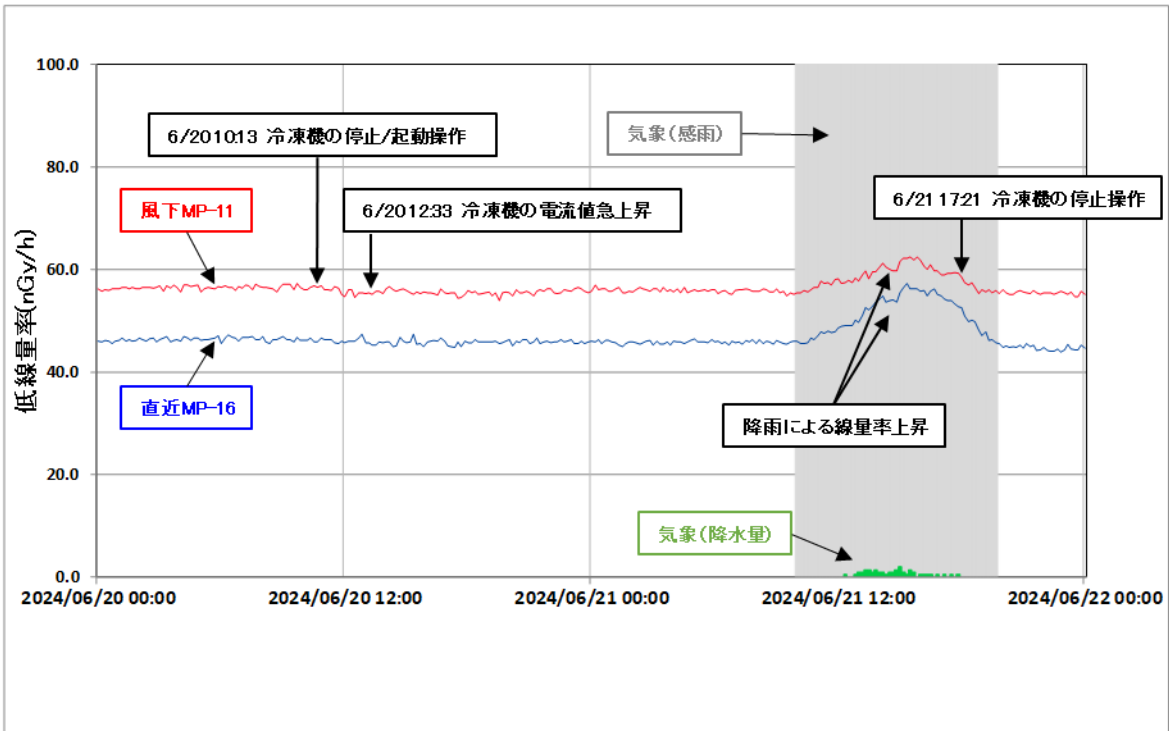
図 1 6 溶融事象発生メカニズム

モニタリングポスト 時系列グラフ (2024/6/20 00:00～ 2024/6/22 00:00)

測定期間:
2024/06/19 24:00～2024/06/21 24:00

データ種別:
10分値

作成日時:
2024/08/22 15:07



モニタリングポスト 時系列グラフ (2024/7/5 10:00～ 2024/7/5 13:00)

測定期間:
2024/07/05 10:00～2024/07/05 13:00 1分値

データ種別:

作成日時:
2024/07/05 13:15

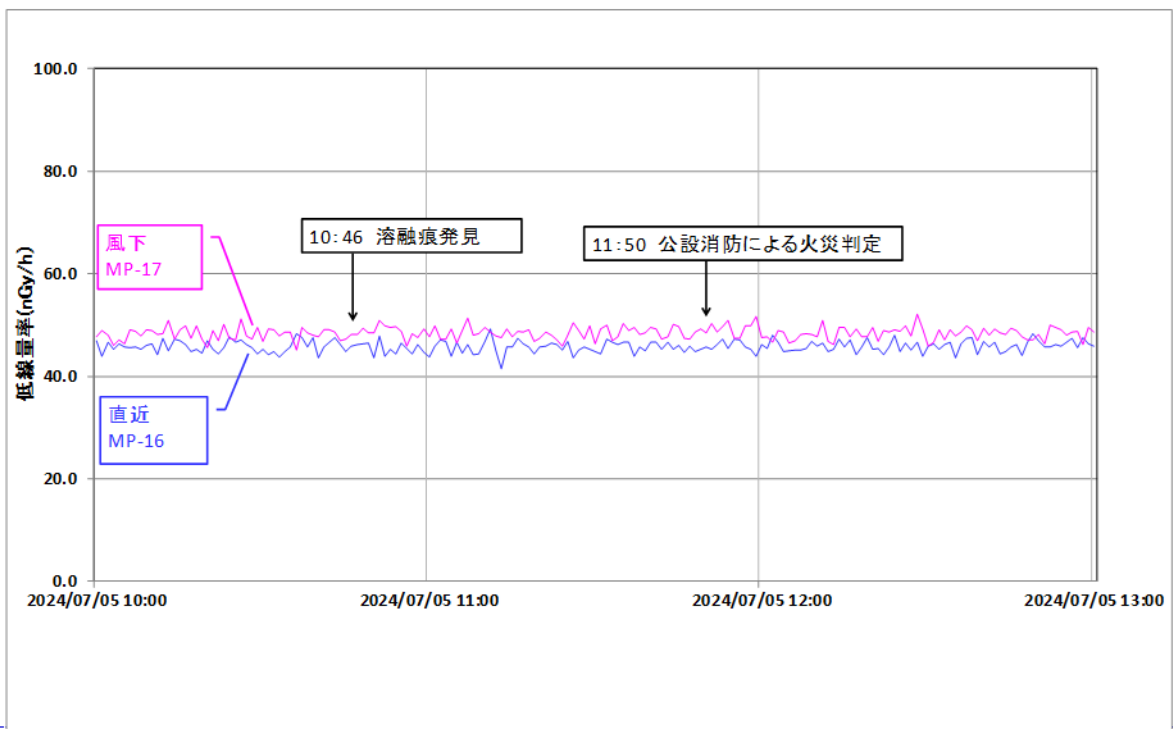


図17 モニタリングポスト (図1のMP-11、MP-16、MP-17) の線量率の時系列グラフ