

低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム — 加熱コイルおよび関節の改良 —

Winding type high rigid long arm using low melting point alloy — Improvements of Heating Coil and Joints —

○室越廉士*, 高橋隆行*

○ Renshi Murokoshi*, Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード： 低融点合金 (low melting point alloy), 多関節アーム (multi-jointed arm), 誘導加熱装置 (induction heating device),

連絡先： 〒 960-1248 福島県金谷川 1 福島大学 共生システム理工学類 高橋研究室
室越廉士, Tel.: (024)548-5259, Fax.: (024)548-5259, E-mail: muro@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

1. 緒言

2011 年 3 月 11 日, 東日本大震災により東京電力福島第一原子力発電所 (以下, 福島第一原発) の過酷事故が起きた。現在, 福島第一原発では廃炉計画が進められており, その計画の 1 つとして, 遠隔操作による燃料デブリの取り出し作業をモニタリングするため, ペDESTAL内部へのモニタリングプラットフォームの構築を想定した研究が進んでいる¹⁾。この研究で構想されているモニタリングプラットフォームの概要を Fig. 1¹⁾ に示す。

本研究室では, モニタリングプラットフォームの主な開発項目の一つであるモニタリングアームの開発を行っている。燃料デブリ取り出し計画では, このモニタリングアームの先端にカメラや線量計, グリッパなどを取り付けて炉内の調査や, 炉内物質のサンプルの回収を行うことを想定している。

開発するモニタリングアームには以下の 3 つの仕様が要求される。

要求仕様 1: 高放射線環境に耐えられること

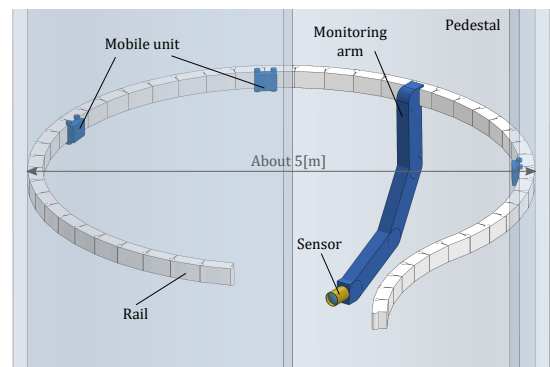


Fig. 1 Overview of the monitoring platform under developing

要求仕様 2: 広い範囲を調査可能であること

要求仕様 3: コンパクト性に優れていること

要求仕様 1 について, ペDESTAL内部は高放射線環境であるため (2019 年現在の福島第一原発 2 号機の原子炉格納容器内部の空間線量は $6.4 \sim 7.6 [\text{Gy/h}]$ ²⁾) アームには高い耐放射性が求められる。要求仕様 2 について, ペDESTAL内部は直径約 5[m], 深さ約 3[m]

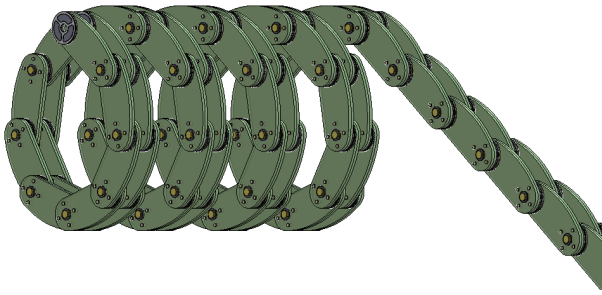


Fig. 2 Image of the monitoring arm

の広さを持つため、広範囲の調査ができるよう高伸縮性が求められる。そして要求仕様3について、ベデスタル内部へのロボットの搬入口が直径約 550[mm]と狭いためコンパクト性が求められる。

これらの要求仕様を満たすアームを実現するために、本研究室では Fig. 2 のような巻取型多関節アームを提案している³⁾。このアームの特徴は、関節部に低融点合金（以下、LMPA）の状態遷移（溶融・凝固）を用いて、関節のロック・フリー状態を切り替える構造を有することである。瀬戸らは、関節の状態遷移を行うための誘導加熱装置の開発や LMPA の状態確認のための温度センシング法などに関する基礎的研究を行った⁴⁾。鈴木らは、アームをコンパクトに巻取り、繰出しが可能な巻取装置を提案し、LMPA の溶融にかかる時間を短縮するための関節構造の改良を行った⁵⁾。横田らは、LMPA の溶融と凝固にかかる時間や強度を考慮し、関節の構成部品の最適な組み合わせの検討を行った⁶⁾。さらに、横田らは鈴木らによって提案された巻取装置の改良⁷⁾や、新たな誘導加熱装置の開発⁶⁾を行い、これを用いた関節状態推定法を提案⁸⁾した。

しかし、これらの先行研究によって開発された関節は LMPA の漏れや構成部品の変形、および新誘導加熱装置に用いられている加熱コイルの著しい自己発熱が課題として残っていた。

本論文では、これらの課題を解決する手法の検討ならびに、その結果に基づく改良を行う。

2. モニタリングアームの構造

先行研究で提案されたモニタリングアームを Fig. 2 に示す。多数の関節を直列に連結したチェーン型構造を採用しており、アーム全体を柔軟に屈曲させることが可能である。本アームの特徴として、関節のロック

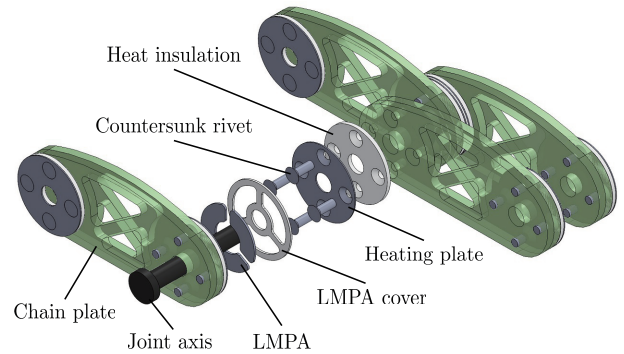


Fig. 3 Structure of the single joint

機構に LMPA の状態遷移を利用している。先行研究では LMPA として、低融点はんだ（ECO SOLDER LEO: 千住金属工業株式会社, 融点: 139~141[°C]⁹⁾）を用いた。これを加熱して溶融させることで関節が可動する「フリー状態」となり、加熱を停止し LMPA が冷却・凝固すると、関節が固定される「ロック状態」に遷移する。この機構は、LMPA が関節部品間の隙間を充填して一体化するため、ロック状態の関節のバックラッシュが発生しないという特徴がある。また、LMPA の加熱には、非接触かつ高速な加熱が可能な誘導加熱方式が用いられている。さらに、この誘導加熱方式の応用として、加熱中の関節部の発熱材（磁性体）の温度上昇に伴って IH 回路の共振周波数が変化する特性を利用し、LMPA の溶融・凝固状態を外部から推定する手法が開発された⁸⁾。

2.1 低融点合金を用いた関節構造

モニタリングアームの関節構造を Fig. 3 に示す。関節中央に LMPA があり、発熱材（ブリキ板、厚さ 0.28[mm]）によって LMPA を挟んでいる。この発熱材を誘導加熱装置によって加熱することで、LMPA を溶融させ、関節をフリー状態に変化させる。フリー状態からロック状態への変化は自然冷却によって行う。ここで溶融した LMPA が関節から漏れ出すことを防ぐために、PTFE 製の LMPA カバーを採用している。また、チェーンプレートと発熱材の間には紙を重ねた断熱材（厚さ 1[mm]）を使用している。これにより、発熱材の熱がチェーンプレートに逃げることを防ぎ、LMPA の溶融、凝固までの時間が短縮されることが確認されている⁸⁾。発熱材と断熱材は、皿リベット（鉄）によってチェーンプレート（ガラ

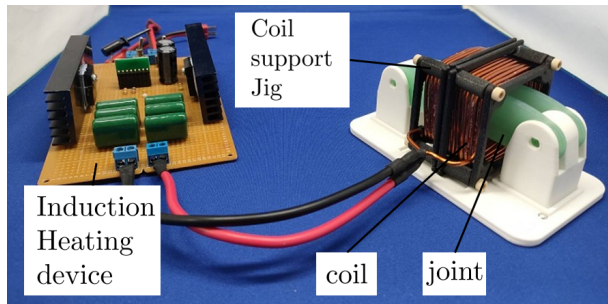


Fig. 4 Heating device

スエポキシ, 厚さ 4[mm]) へ機械的に固定している。また, 関節軸は PAHT-CF 製である。

2.2 誘導加熱装置

開発された誘導加熱装置⁶⁾を Fig. 4 に示す。これは, 加熱用の駆動回路 (以下, 加熱用回路), 単線 (径 2[mm]) で巻かれた加熱コイル (以下, 単線コイル), およびそれを保持する PAHT-CF 製の治具で構成される。加熱回路には, IC ドライバ (IR2302) を用いた他励式のハーフブリッジ回路を採用しており, 外部からの矩形波信号によって加熱のオン・オフや出力を制御できる。これにより, コンピュータによる加熱操作の自動化と精密な制御が可能となった。

2.3 関節状態推定法

誘導加熱装置を応用した新たな関節状態推定法が提案された⁸⁾。これは, Fig. 5 のように加熱コイルの外側に計測コイルを別途配置し, 入力周波数をスイープした際に計測コイルに生じる電圧のピーク位置周波数を検出する手法である。このピーク位置周波数は関節部の発熱材 (磁性体) の温度に応じて変化するため, LMPA の溶融・凝固状態を間接的に推定できる。この手法を用いて関節の自動加熱制御にも成功した⁸⁾。

2.4 巻取装置

開発された巻取装置⁷⁾を Fig. 6(a) に示す。この装置は巻き取られたアームの外側に接する 6 つのローラによってアームを支え, Fig. 6(b) に示すモータの先端に取り付けたスプロケットによりアームの巻取りと繰出しを行う。関節を加熱するためのコイルは, アームの巻取り時と繰出し時で関節の加熱する位置が異なるため, 2 つ取り付けられている。Fig. 6(a)

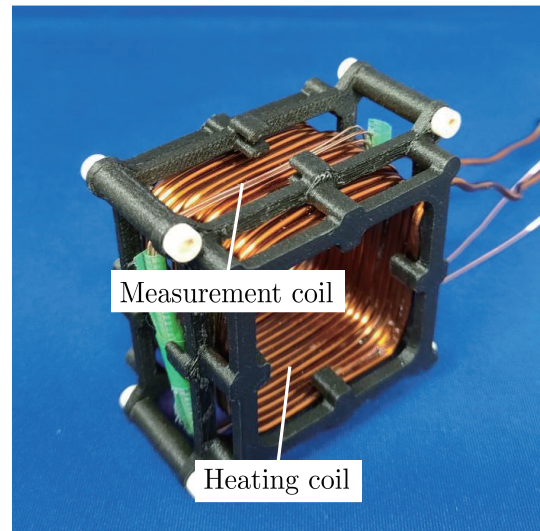
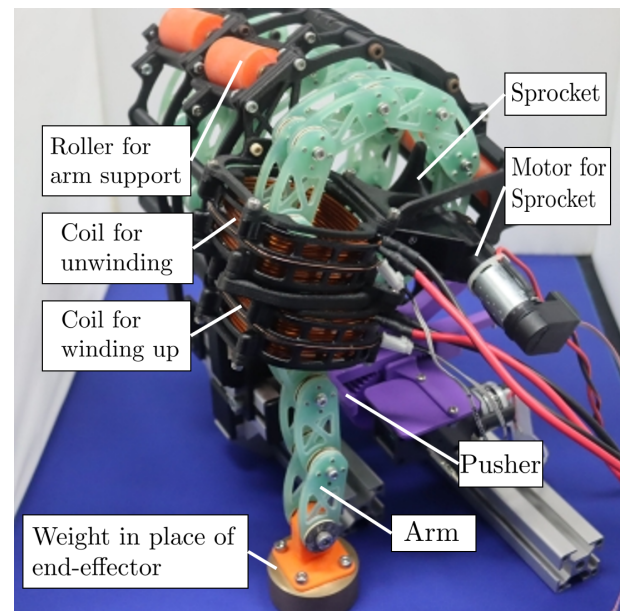
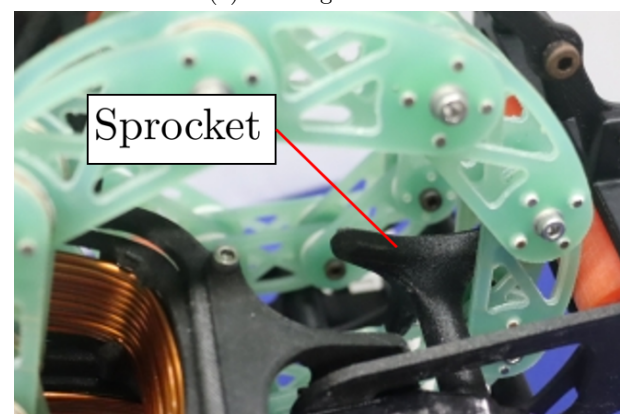


Fig. 5 Heating coil



(a) winding device



(b) sprocket

Fig. 6 Image of the winding device

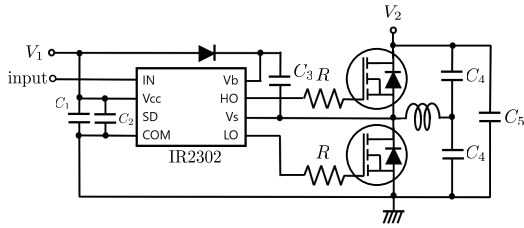


Fig. 7 Circuit of the induction heating device

において上側のコイルが繰出し用コイル，下側のコイルが巻取り用コイルである．この装置は以下のような手順で巻取りおよび繰出しを行う．

工程 1：誘導加熱装置でコイルの位置の関節を 1.5[s] 間加熱する．

工程 2：スプロケットを回転させ，関節 1 個分のアームを巻き取る（繰り出す）．

工程 3：2[s] 間待機し，関節を自然冷却させる．

この工程で装置を動作させると 1 関節当たり，約 5[s] で巻取り及び，繰出しが可能であることが確認された⁸⁾．

3. 加熱コイルの改良

3.1 誘導加熱装置の概要

本章で改良対象とする加熱コイルは，第 2.2 節で述べた通り，誘導加熱装置の構成要素の一つである．加熱用回路の回路図とその各パラメータを Fig. 7 および，Table 1 に示す．この回路は，2つの MOSFET を交互にオン・オフさせ，加熱コイルに高周波の電流を流す他励式ハーフブリッジ回路である．スイッチング IC（IR2302）に入力する矩形波の周波数によって，加熱のオン・オフや出力を制御可能である．

この誘導加熱装置は，単線で巻かれた加熱コイルの著しい自己発熱が課題となっている．これについて次節では，自己発熱の程度を確認する確認実験を行う．

3.2 単線コイルの自己発熱確認実験

3.2.1 実験方法

単線コイルの自己発熱の程度を確認する実験を行う．実験装置を，Fig. 8 に示す．この実験装置は加熱駆動用の回路，単線コイル，およびそれを保持す

Table 1 Parameters of induction heating circuit (Fig. 7)

symbol	value
V_1	20[V]
V_2	30[V]
R	10[Ω]
C_1	100[μF]
C_2	0.1[μF]
C_3	10[μF]
C_4	0.99[μF]
C_5	500[μF]

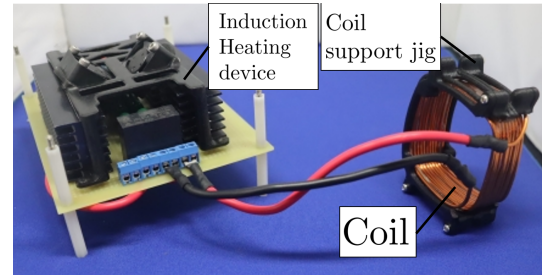


Fig. 8 Heating device

る PAHT-CF 製の治具で構成される．また，加熱回路の各パラメータは Table 1 と同じである．使用する単線コイルを Fig. 9 に示す．単線コイルは径 2[mm] の 1 種ポリアミドイミド銅線を使用して，8 巻で作成し，3 面を接着剤（コニシ社製，ボンドクイック 30）で固定した．ただし，正確な単線コイルの温度測定のため，計測面（1 面）には塗布していない．実験方法は，入力矩形波（デューティー比：50 %）の周波数を共振周波数である 16.4[kHz] に設定し，加熱を約 40[s] 間行う．このとき，単線コイルの中には発熱材を挿入した状態で行った．単線コイルの温度測定には，サーモグラフィ（R550 Pro，日本アビオニクス株式会社製）を用いる．なお，計測には Fig. 9 に示す単線コイルの接着剤を塗布していない面の 3 点 A，B，C を計測する．

3.2.2 実験結果

実験結果を Fig. 10 に示す．30[s] の加熱で点 A 及び点 C では約 110[°C]，点 B では約 80[°C] まで上昇することが確認できた．この結果から，単線コイルの端付近（点 A，点 C）の温度上昇が大きく，単線コイルの中央付近（点 B）では温度上昇が比較的小さいことがわかる．

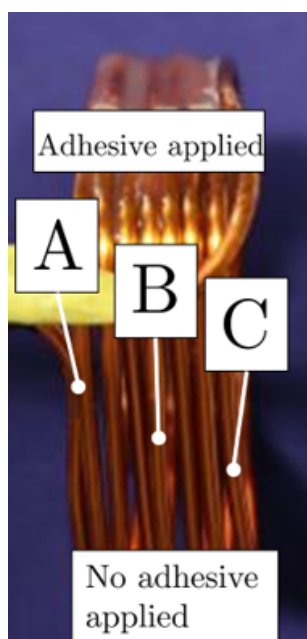


Fig. 9 Single-wire coil

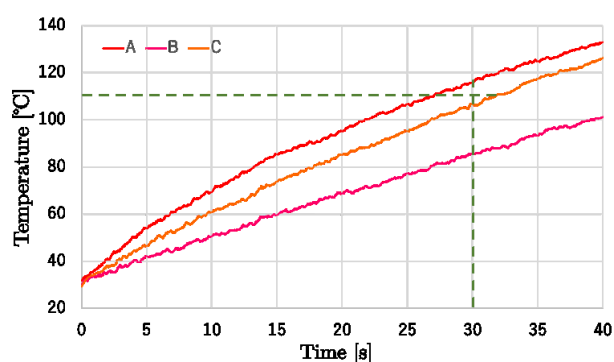


Fig. 10 Temperature of single-wire coil during heating

3.2.3 考察

前項の実験結果から、単線コイルは 30[s] の加熱でコイル側面が 110[°C] まで温度上昇することが確認された。これは長時間の連続加熱を行うと、加熱コイルの治具に使用している PAHT-CF の耐熱温度 194[°C]¹⁰⁾ を超える可能性がある。この発熱の要因として、2つの効果が考えられる。第1に誘導加熱に用いる高周波電流が導体を通れる際、電流が導体表面に集中する表皮効果である。これによって導線の実質的な抵抗値が増大し、ジュール熱によって発熱したと推測する。第2に近接効果である。実験結果から、測定点 A、C と B の間で温度上昇に差があった。これは、コイルの巻線同士が近接することで互



Fig. 11 Litz-wire coil

いの磁束が干渉し、電流密度を偏らせる近接効果の影響であると考えられる。これにより、計測点 A、C 付近では電流密度が偏ることで、導線の実質的な抵抗値が増大し発熱に差が発生したと推測する。

3.3 リッツ線の採用

3.3.1 リッツ線の作成方法

前項で述べた2つの効果による発熱の対策として、加熱コイルの導線にリッツ線 (Litz wire) を採用することを検討する。リッツ線は、絶縁された細い導線を束ねて1本の導線としたものである。これによって導体表面に電流が集中することを抑制することができ、表皮効果を低減する。また、リッツ線のように多数の導線を撚り合わせる構造は、電流密度の偏りを抑制し、近接効果も低減する。

本章では、リッツ線による加熱コイルの温度上昇の抑制効果を検証する。径 0.3[mm] の2種ポリウレタン銅線のエナメル線を 70 本撚り合わせ、径 2.1[mm] 相当のリッツ線を作成する。そのリッツ線で加熱コイル (以下、リッツ線コイルとする) を作成する。Fig. 11 にリッツ線を用いて作成した巻数 8 巻のリッツ線コイルを示す。

次項では、作成したリッツ線コイルを用いて加熱実験を行い、温度上昇を確認する。

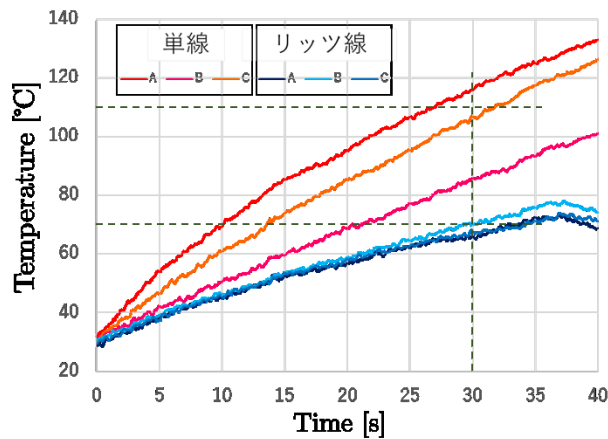


Fig. 12 Temperature of litz-wire coil during heating

3.3.2 実験方法

前項で作成したリッツ線コイルで自己発熱確認実験を行う。実験方法は第3.2.1項と同じく、接着剤の塗布していない計測面の3点A, B, Cをサーモグラフィで測定する。入力矩形波（デューティー比：50%）の周波数は共振周波数である17.4[kHz]に設定し、加熱を約30[s]行う。

3.3.3 実験結果

実験結果をFig. 12に示す。これは、前節で行った単線コイルの発熱確認実験の結果を暖色、本節で行ったリッツ線コイルの発熱確認実験の結果を寒色で表している。グラフを見ると、30[s]の加熱時に、単線コイルは点A, Cが約110[°C]まで上昇しているのに対し、リッツ線コイルは、3点すべてが約70[°C]までの上昇に抑えられている。また、単線コイルは、点A, Bの温度の上昇が著しいが、リッツ線コイルは3点がほぼ同じ温度上昇をしていることがわかる。

3.3.4 考察

前節の実験結果から、30[s]時点で、リッツ線コイルが単線コイルよりも、コイル自身の温度上昇を約40[°C]抑制できることが確認された。リッツ線は単線コイルと比べて、自己発熱に対して有効であると考え。また、近接効果による温度上昇の差についても確認できなかったため、リッツ線は近接効果についても効果があるといえる。



Fig. 13 Deformation of the LMPA Cover

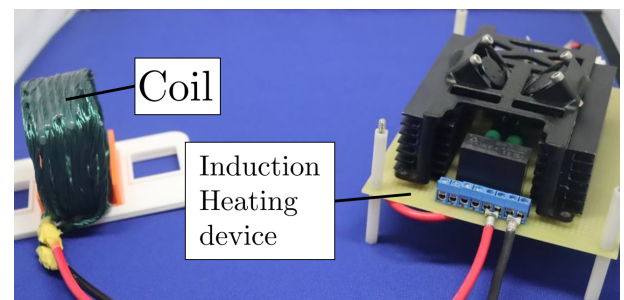


Fig. 14 Heating device

4. 新たな関節構造の提案

4.1 LMPA カバーの変形とLMPA の漏れ

関節の曲げ実験において、LMPA カバーの変形とそれに伴うLMPA の漏れが確認された。それが確認された関節を分解したものをFig. 13に示す。Fig. 13の赤丸部では、LMPA カバーの外周部に顕著な変形が確認された。この変形に伴い、本来LMPA が充填されるべき内部スペース（LMPA カバーの切り出された3つのスペース）からLMPA がほとんど流出している状態が確認された。この変形が起こる要因について、再現実験を行い、考察を行う。

4.2 LMPA カバーの変形再現実験

4.2.1 実験方法

4.1節で述べたLMPA カバーの変形とLMPA の漏れの原因を特定するため再現実験を行う。実験装置として、Fig. 14に示す誘導加熱装置を用いる。またこの実験のために新たに作成した関節をFig. 15



Fig. 15 Shape of the joint in the wound state



Fig. 16 Shape of the joint in the unwound state

に示す。本実験では、アームの「繰出し」および「巻取り」動作を模倣する。ここで各動作を以下のように定義する。

巻取動作：アームが伸展した状態（直線形状）から、巻取装置に巻き取られる状態（屈曲形状）へ変化する動作 (Fig. 15)

繰出し動作：アームが巻き取られている状態（屈曲形状）から、伸展した状態（直線形状）へ変化する動作 (Fig. 16)

これらの動作は、LMPA が溶融した「フリー状態」で行われる。そのため、実験手順としては LMPA がフリー状態になるまで関節を加熱する。その後、手で「巻取動作」もしくは「繰出し動作」を行う（これらの動作は交互に行う）。動作が終了したのち、LMPA が凝固するまで待つ。それぞれの動作を行うたびに回数をカウントし、各動作 5 回ずつ、計 10 回動作を行い、全動作が終了したのち、LMPA カバーの変形と LMPA の漏れが発生するか検証を行う。

4.2.2 実験結果

前項で定義した「巻取り」と「繰出し」動作をそれぞれ 5 回ずつ交互に行い、計 10 回行った。その結果、6 回目の巻取り動作において、初めて LMPA の漏れが確認された。Fig. 17 の赤丸部はこの時確認された LMPA カバーの変形と LMPA の漏れが発

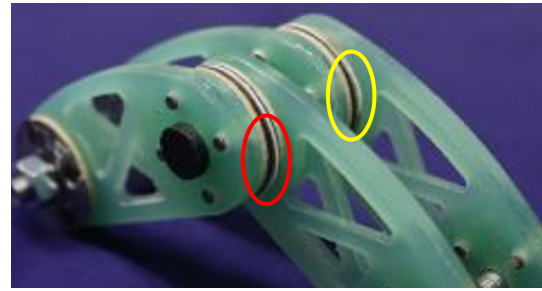


Fig. 17 Image of the LMPA cover when leakage and deformation occur

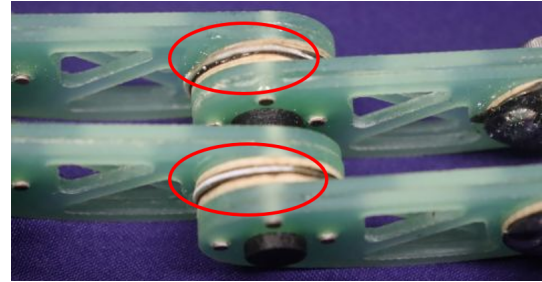


Fig. 18 Image of the LMPA cover when deformation occur

生した地点である。また Fig. 17 の黄丸部は、同じく 6 回目動作において LMPA カバーの変形のみ確認された別の箇所である。さらに操作を続けたところ、9 回目の繰出し動作時に Fig. 18 に示すような LMPA カバーの変形が確認された。

4.2.3 考察

本実験によって、4.1 節で問題としていた LMPA カバーの変形および、LMPA の漏れが再現された。この現象が発生する要因として以下の 2 点が推察される。

第 1 の要因として、関節をフリーにするための誘導加熱による熱が考えられる。発熱材が誘導加熱によって高温になることで、発熱材に挟まれている PTFE 製の LMPA カバーが軟化したと推測する。

第 2 の要因として、「巻取り」および「繰出し」動作に伴う力の発生である。LMPA カバーは発熱板に挟まれている状態であり、実験動作によって関節が回転することにより、LMPA カバーはせん断方向に大きな力を受けたと推測する。

以上のことから、加熱によって軟化した PTFE 製の LMPA カバーに対して、「巻取り」もしくは「繰出し」動作による力が加わることで、LMPA カバー

の変形が発生し、生じた隙間から溶融した LMPA が漏れたと推測している。

4.3 新たな関節構造の提案

4.3.1 新たな関節の作成方法

第 4.2.3 項の考察に基づき、LMPA の漏れを根本的に解決する新たな関節構造（以下、新関節とし、提案前の関節を旧関節とする）を提案する。新関節の概略図を Fig. 19 に示す。本構造の特徴は、旧関節の変形の要因であった PTFE 製の LMPA カバーを廃止し、新たにスペーサリング（以下、リング）を追加した点である。リングは発熱板間に LMPA が充填される 0.5[mm] の隙間を確保するように厚さを設計している。第 4.3.4 項で行う比較評価のため、このリングの材質として以下の二つを用いる。

PPA-CF：優れた耐熱性と剛性を持つ¹⁰⁾

PTFE：旧関節の LMPA カバーで用いられ、
優れた耐熱性と低摩擦特性を持つ

この 2 種類でリングを作製し、片側のチェーンプレートに接着する。この時、PPA-CF 製のリングにはセメダイン社製、ハイスーパータフを用いて接着したが、これは PTFE に使用できないため、PTFE 製リングにはアロンアルファ社製、アロンアルファ一般用を用いて接着を行った。

提案した構造に基づき作成した関節を Fig. 20 および Fig. 21 に示す。PPA-CF 製のリングを搭載した関節を関節 A、PTFE 製のリングを搭載した関節を関節 B とする。Fig. 20 において、発熱板の周囲に接着された黒い円形の部品が PPA-CF 製のリング、白い円形の部品が PTFE 製のリングである。

次項では、作成した 2 種類の新関節を用いて漏れ確認実験を行う。

4.3.2 実験方法

第 4.3.1 項で作成した 2 種類の新関節を用いて、新関節が LMPA の漏れを発生するのか確認実験を行う。また、リングの材質の違いによる漏れや変形、摩擦特性に影響があるのか確認する。実験方法は第 4.2.1 項と同じように、Fig. 14 の実験装置を用いて「巻取り」と「繰出し」の各動作 10 回ずつ計 20 回動作を行う。全動作が終了したのち、LMPA の漏れや関節構成部品の変形を確認する。

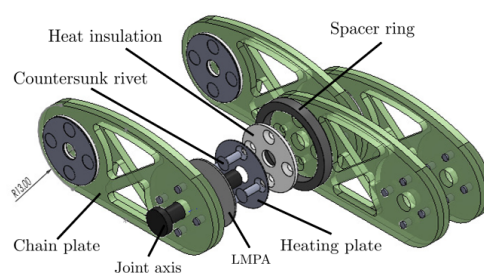
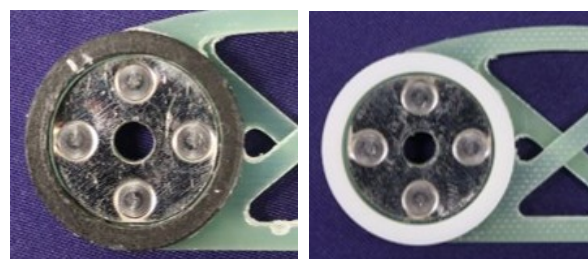


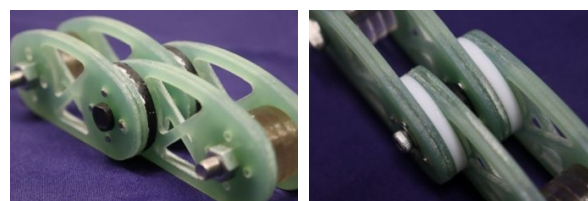
Fig. 19 Schematic image of the new joint



(a) joint A

(b) joint B

Fig. 20 Spacer ring



(a) joint A

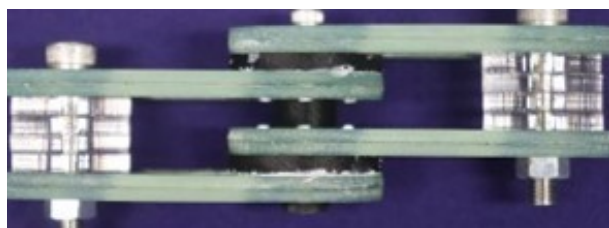
(b) joint B

Fig. 21 Assembled image of the new joint

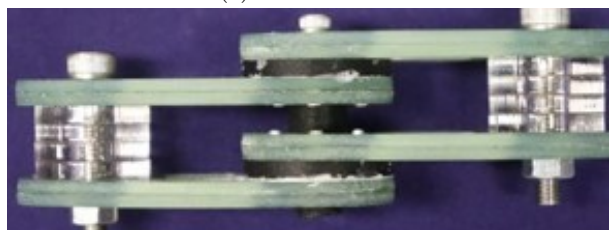
4.3.3 実験結果

第 4.3.1 項で作成した 2 種類の関節に、第 4.2.1 項の実験方法と同様の実験を行った。関節の「巻取動作」および「繰出し動作」を 10 回ずつ交互に繰り返した。初期状態と 20 回の動作完了後の関節 A を Fig. 22 に示す。また、初期状態と 20 回の動作完了後の関節 B を Fig. 23 に示す。それぞれの関節の全 20 回の動作において LMPA の漏れは確認されず、また初期状態と動作終了後の関節を比較しても関節構成部品の変形は認められなかった。次に、実験後に分解した関節 A、B の内部状態を Fig. 24 に示す。内部状態を見ても、LMPA の漏れや構成部品の変形は確認されなかった。

また、関節の動作において、関節 A と関節 B ではより関節 A が動作に要する力が要求された。そして、関節 A、B どちらも加熱停止から LMPA が凝固



(a) initial state



(b) after 20 times wind/unwind motion

Fig. 22 Experimental Results for the Joint A

するまでの冷却時間が旧関節と比べて増加した。

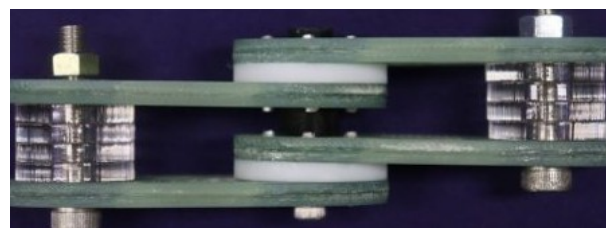
4.3.4 考察

第 4.3.3 項の実験結果から、リングを用いた新関節は LMPA の漏れの防止に有効であることが確認された。これはリングが発熱板などに接触しないことから熱による軟化が発生しないことが大きな要因であると考えられる。従って、新関節は、第 4.2.3 項で考察した「熱」と「力」の二つの要因に対する有効な対策であると考えられる。

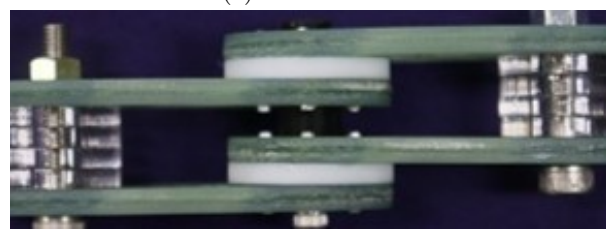
関節 A, B の比較では両者 LMPA の漏れや、関節構成部品の変形等は起こらなかったが、関節 B と比べて関節 A は小さい力で動作が可能であった。これは、PPA-CF に比べて PTFE の方が摩擦が少ないためであると考えられる。一方で、冷却時間の増大という新たな課題も明らかになった。これは新関節の密閉性によるものであると考えられる。旧関節は誘導加熱によって発熱する発熱材が外気にさらされており、空冷による放熱経路が確保されていた。一方で新関節ではスペーサリングによって発熱材などが密閉され、放熱効率が落ちたことが原因であると推測する。

5. 結言

本論文では、LMPA を用いた巻取型高剛性長尺アームの実用化に向け、2つの主要な課題である「加熱コイルの自己発熱」と「関節からの LMPA の漏れ」について改良を行った。



(a) initial state



(b) after 20 times wind/unwind motion

Fig. 23 Experimental results for the joint B



(a) joint A



(b) joint B

Fig. 24 Disassembled new joint after the experiment

まずコイルの自己発熱問題に対して、導線を単線からリッツ線に変更を行った。リッツ線は発熱の要因となる表皮効果と近接効果に対して効果的に抑制することで、30[s] 間の加熱に対しコイルの発熱を約 40[°C] 低減できることを示した。

次に、巻取り、繰出し動作時の LMPA の漏れに対して、提案前の関節に用いられていた、LMPA カバーを廃止し、新たにスペーサリングを用いた関節構造を提案した。この提案する関節は、20 回の巻取り、繰出し動作後も LMPA の漏れを完全に防止できることを確認した。しかし、この関節はリング材質

による摩擦の増大や、密閉構造化によって放熱効率が低くなり、凝固時間の増大という新たな課題が確認された。今後はスパーサリングに改良を行い、摩擦の軽減と冷却時間の短縮を目指す。

また、改良した加熱装置と関節を用いて、巻取装置のスムーズな巻取りおよび繰出し動作を目指す。

参考文献

- 1) 燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成，東京大学，
< https://www.kenkyu.jp/nuclear/field/r1/documents/1_1_r1hum.pdf >（参照：2023.10.12）
- 2) 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器名部調査 実施結果，東京電力ホールディングス株式会社，
< https://www.tepco.co.jp/decommission/common/images/progress/retrieval/unit2_meeting_20190228.pdf >（参照：2025.10.25）
- 3) 瀬戸徳文ほか，“低融点合金を用いた原子炉内部調査用サンプリングアームの開発-ロック部構造の改良と圧縮破壊実験-”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019，2A1-B08，(2019)
- 4) 瀬戸徳文ほか，“原子炉内部調査用モニタリングアームの開発-関節状態判別方法の提案と状態遷移法の検討-”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020，2P1-P01，(2020)
- 5) 鈴木悠太ほか，“原子炉内部調査用モニタリングアームの開発 コンパクトなアーム巻取装置の試作と実アーム関節の非接触温度推定”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021，2A1-O05，(2021)
- 6) 横田開ほか，“低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム-関節の溶融・凝固の最適化と巻取装置の改良-”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023，2A2-B12，(2024)
- 7) 横田開ほか，“低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム-関節構造の改良およびアーム軽量化，巻取システムの具現化-”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025，1A1-N07，(2025)
- 8) 横田開ほか，“低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム-関節状態推定法の提案と関節強度評価-”，第 25 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会，2F1-09，(2024)
- 9) LEO シリーズ，やにいりはんだ，千住金属工業株式会社，< <https://www.senju.com/ja/products/ecosolder/cored/leo.php> >（参照：2025.10.29）
- 10) PPA-CF，Bambulab ストア，Bambu lab，< <https://jp.store.bambulab.com/products/paht-cf> >（参照：2025.10.30）
- 11) PPA-CF，Bambulab ストア，Bambu lab，< <https://jp.store.bambulab.com/products/ppa-cf> >（参照：2025.10.29）