

低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アーム ～関節構成部品の選定と巻取装置の改良～

Winding type high rigid long arm using low melting point alloy ～Selection of joint component parts and improvement of winding up device～

○横田 開*, 高橋 隆行*

○ Kai Yokota* and Takayuki Takahashi*

*福島大学

*Fukushima University

キーワード : 低融点合金 (low melting point alloy),
巻取型高剛性長尺アーム (winding type high rigid long arm), 断熱材 (heat insulation),
巻き取り装置 (winding up device)

連絡先 : 〒 960-1296 福島県福島市金谷川 1 福島大学 共生システム理工学類 高橋研究室
横田 開, Tel.: (024)548-5259, Fax: (024)548-5259, E-mail: yokota@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)の重大事故が起きた。現在, 福島第一原発の廃炉に向けて燃料デブリの取り出しが計画されている。福島第一原発2号機の原子炉格納容器のペDESTAL内部の放射線量は650[Sv/h]と推定されている¹⁾。国内で定められている線量限度(目の水晶体における)は100[mSv/5year]かつ50[mSv/year]であるため, ペDESTAL内に人間が立ち入ることはできない。そのため, 燃料デブリの取り出しではロボットの活用が期待されている。

燃料デブリ取り出しの計画の一つとして, 遠隔操作による取り出し作業状況をモニタリングするプラットフォームの構築が進められている²⁾。

モニタリングプラットフォームの概要をFig. 1³⁾に示す。主な開発項目として, モニタリングアーム⁴⁾, 移動レール⁵⁾, 映像提示インターフェース⁶⁾, 操縦インターフェース⁷⁾などがある。本研究室では, モニタリングアームの開発を行っている。計画では, このモニタリングアームの

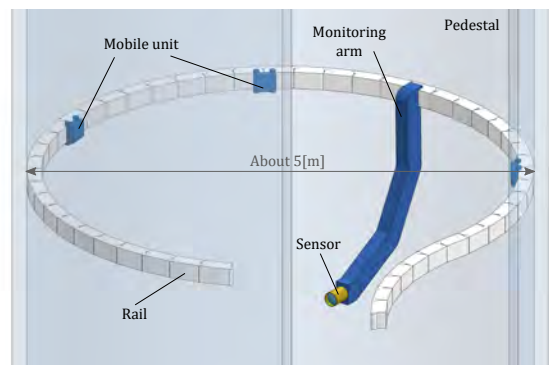


Fig. 1: Overview of the monitoring platform under developing

先端にカメラや線量計などを取り付けて、格納容器内の各部の観察を行うことを想定している。

モニタリングアームには3つの要求仕様がある。1つ目は、先述したような高放射線環境であるペDESTAL内でも耐えられることである。2つ目は、カメラや線量計を至近距離まで対象物に接近させることができるよう、直径約5[m]、高さ約3[m]の広さのペDESTAL内の全空間を作業スペースにできることである⁸⁾。3つ目は、ペDESTAL内部へのロボットの搬入口が直径約550[mm]と小さいため⁹⁾、コンパクト性に優れていることである。

これらの要求仕様を満たすために、本研究室ではFig. 2のような低融点合金を用いた巻取型のアームが提案され、アームのロック/フリー状態を遷移させるための誘導加熱装置の開発、低融点合金の状態確認のための温度センシング法などの基礎的な研究が行われた¹⁰⁾。アームのロック/フリー状態については次項で述べる。また、アームをコンパクトに巻き取り・繰り出しが可能な巻き取り装置が提案され¹¹⁾、低融点合金の溶融にかかる時間を短縮するために関節の改良が行われた¹²⁾。

本論文では、低融点合金の溶融と凝固の両方にかかる時間を考慮して、現在の関節に使用する構成部品を評価・選定する。また、選定した部品を使用した長さ4[m]のアームを5~10分で繰り出し可能な巻き取り装置を提案する。

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の概要をFig. 2に示す。モニタリングアームは、多数の関節を組み合わせたチェーン型の構造である。関節の構造として、各関節に低融点合金を用いている。先行研究では、低融点はんだ (ECO SOLDER LEO: 千住金属工業株式会社, 融点: 139~141[°C]¹³⁾) を用いた。この低融点合金を加熱して溶かすことで関節が自由に回転するフ

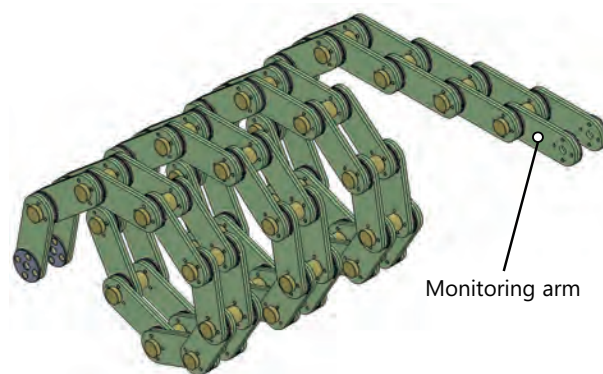


Fig. 2: Image of the monitoring arm

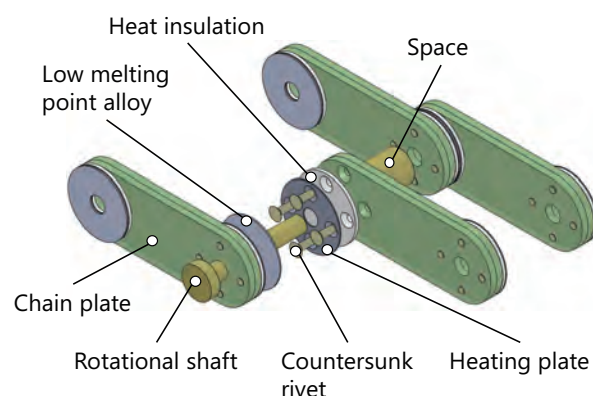


Fig. 3: Structure of the single joint

リー状態となり、冷却して固めることで関節が固定されるロック状態となる。関節に低融点合金を用いることで、ロック状態の関節のバックラッシュをゼロにできるという特徴がある。低融点合金のロック/フリー状態を切り替えるための加熱装置として、本研究では加熱速度が速く、非接触で加熱が可能な誘導加熱方式を用いている。また、コイルコアの温度変化によりコイルの共振周波数が変化することを利用した温度センシング法が提案された¹⁰⁾。

2.1 提案された関節構造

モニタリングアームアームの関節構造をFig. 3に示す。関節は、チェーンプレート、発熱材、皿リベット、低融点合金、回転軸、スペーサーからなる。さらに、発熱材からチェーンプレートへ放出される熱を抑制するために、発熱材とチェーンプレートの間に断熱材が追加された。断熱材は、

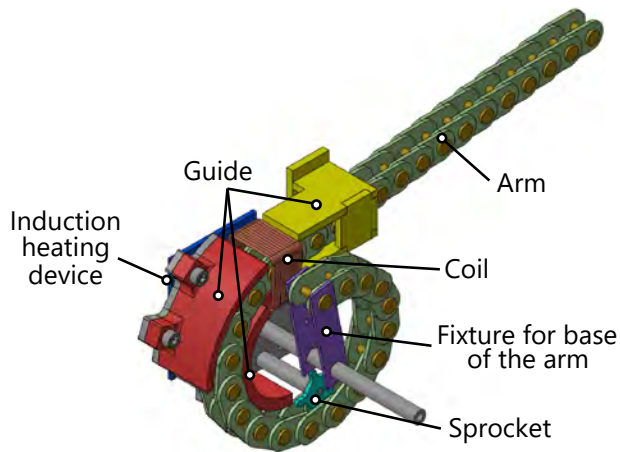


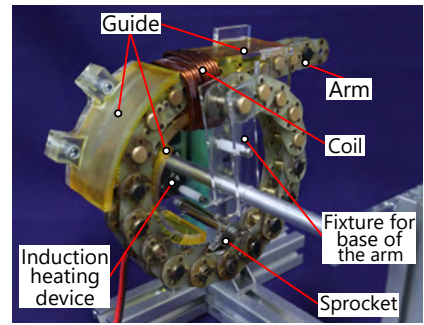
Fig. 4: Schematic image of the winding up device proposed in the previous paper¹¹⁾

熱伝導率が小さいこと、入手や加工が容易であること、また発熱材とチェーンプレートの間に入れる材料として必要な強度を有していることから、コピー用紙を重ねたもの(厚さ約1[mm])が採用された。また、皿リベットにより断熱材と発熱材をチェーンプレートへ機械的に固定しているが、皿リベットを通して発熱材の熱が放出していると考えられたため、皿リベットの材料を鉄から熱伝導率の低いPEEK樹脂へと変更した。断熱材の追加、皿リベット材料の変更により、低融点合金の溶融にかかる時間が約34[s]から約9[s]に短縮された。

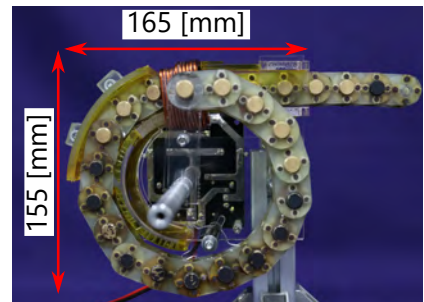
2.2 提案された巻き取り装置

先行研究で提案された巻き取り装置をFig. 4¹¹⁾に、試作された巻き取り装置をFig. 5¹¹⁾に示す。コイルの中にある関節が加熱され、低融点合金が溶けて関節がフリー状態になる。そして、スプロケットを回転させることで、関節の角度がガイドに沿って変わり、自然冷却によって関節がロック状態になることで巻き取り・繰り出しを行うことができる。

巻き取り時と繰り出し時における加熱したい関節の位置は、Fig. 6に示すように異なる。しかし、試作されたアーム関節の間隔は20[mm]と短く、巻き取り時の関節角度も小さいため、一



(a) Overall view of the winding device



(b) Size from the side view

Fig. 5: Prototype of the winding device proposed in the previous paper¹¹⁾

つのコイル(長さ40[mm])で二つの関節を温める構造になっている。

2.3 先行研究の問題点

先行研究では、低融点合金の溶融にかかる時間を短くするために、発熱材からチェーンプレートへ放出される熱を抑制する改良が行われた。この改良により、発熱材の温度上昇の速度が速くなったことが確認されたが、温度下降の速度については未検討である。関節をロック状態からフリー状態へする時間が短くなっても、関節角度を変えた後に再びロック状態になる時間が長ければ、巻き取り・繰り出しの全体動作は速くならない。そこで本論文では、低融点合金の溶融と凝固の両方にかかる時間を考慮して、現在の構造の関節に使用する構成部品を評価し最適な組み合わせについて検討する。また、選定した部品を使用した長さ4[m]のアームを5~10分で繰り出すという目標を達成するために、巻き取り装置を改良する。

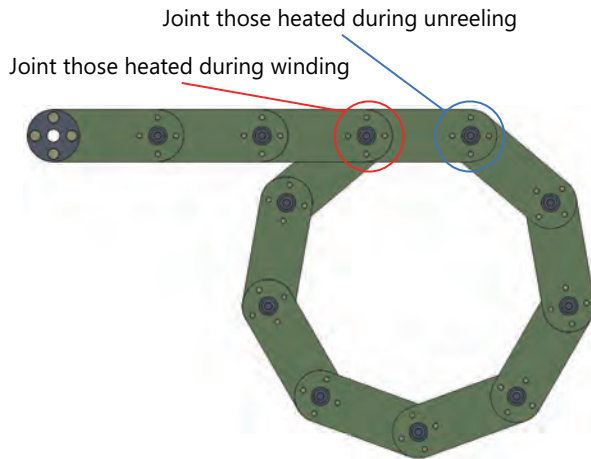


Fig. 6: Joints those heated during winding and unreeling

3. 関節構成部品の選定

アームの巻き取り・繰り出しの全体動作では、関節の加熱と冷却を並列で行う。そのため、動作を効率よく行うためには、低融点合金の溶融と凝固にかかる時間が短く、かつバランスがよいことが望ましい。これを実現する構成部品の組み合わせについて検討する。

検討対象の構成部品は、2種類の低融点合金、断熱材の有無、2種類の皿リベットである。低融点合金は、先行研究で使用していた低融点はんだ（ECO SOLDER LEO：千住金属工業株式会社，融点：139～141[°C]¹³⁾（以下，合金H）と、さらに融点の低い低融点はんだ（鉛フリー低温はんだ 80°C，株式会社青木メタル，融点：80[°C]¹⁴⁾（以下，合金L）を使用する。断熱材は先行研究で使用されたものと同じもの（コピー用紙を重ねたもの）を使用する。皿リベットは、鉄製のものとPEEK樹脂製のものを使用する。

3.1 関節の状態遷移時における発熱材温度

3.1.1 実験目的

本節では、構成部品を変更したことにより、関節のロック/フリー状態が遷移するときの発熱材温度に変化があるか確認する。

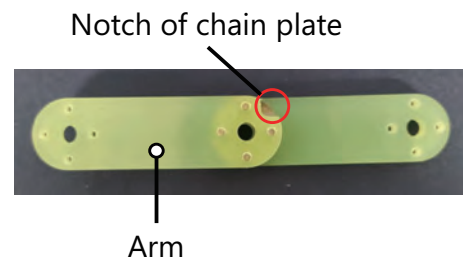


Fig. 7: The notch of chain plate to measure the heating plate temperature

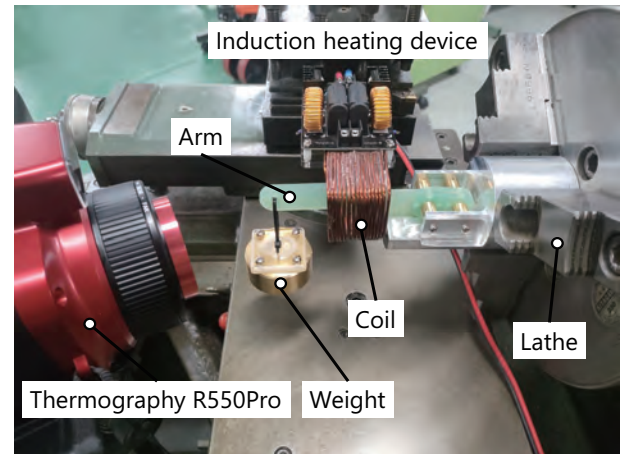
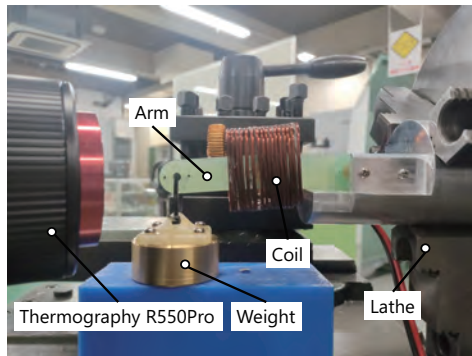


Fig. 8: Experimental setup for measuring melting point

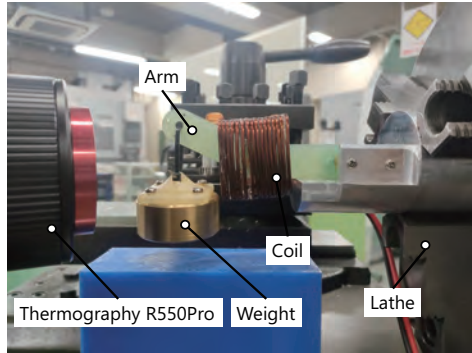
3.1.2 実験方法

低融点合金の状態を確認するため、本研究室では発熱材の温度をサーモグラフィ（R550 Pro，日本アビオニクス株式会社製）により測定している。低融点合金の温度を直接測定することが望ましいが、低融点合金は発熱材で挟まれているため、直接測定することは難しい。そのため、ほぼ同じ温度と考えられる発熱材の温度を測定する。

実験で使用する関節を Fig.7 に示す。発熱材はチェーンプレートで隠れているため、チェーンプレートに切り欠きを設けて発熱材の一部が露出するようにする。その切り欠きから露出している発熱材部分の温度をサーモグラフィで測定する。以降の実験においても、チェーンプレートに切り欠きを設けた関節を使用し、切り欠きから露出している発熱材部分の温度をサーモグラフィで測定する。



(a) free state joint



(b) lock state joint

Fig. 9: Determination of the transition from free to lock state

関節がロック状態からフリー状態になる温度を調べる実験装置を Fig. 8 に示す. 先端におもり (360.0[g]) を吊り下げた関節を旋盤に固定し, 市販の誘導加熱装置 (1000[W], 電源電圧: 12-30[V]) に電源電圧 30[V] を印加して関節を加熱する. おもりにより関節が動いたときの発熱材の温度を, 関節がロック状態からフリー状態になる温度とする.

関節がフリー状態からロック状態になる温度を調べる実験は以下のように行った. 先端におもり (360.0[g]) を吊り下げた関節を旋盤に固定し, 誘導加熱装置に電源電圧 30[V] を印加して関節を加熱する. 関節がフリー状態になったら, おもりを持ち上げるように関節を曲げ, 手で支える. 支えた状態で冷却を開始し, 発熱材が目的の温度になったら関節を支えている手を放す. 手を放すときの温度を 1[°C] ずつ下げていき, 同様の操作を行う. 手を放したときに関節がフリー状態であると, Fig. 9(a) のようにおもりによって関節が動く. 手を放したときに関

Table 1: Experimental results of state transition temperature of joint

LMPA	Heat insulation	Countersunk rivet	from lock to free [°C]	from free to lock [°C]
LMPA-L	no	Iron	65.22	64.20
		PEEK	64.31	65.50
	yes	Iron	64.73	65.90
		PEEK	64.06	64.30
LMPA-H	no	Iron	122.2	119.7
		PEEK	121.2	119.6
	yes	Iron	121.8	119.1
		PEEK	121.1	118.5

節がロック状態であると, Fig. 9(b) のようにおもりは持ち上がったままである. 手を放したときに関節がロック状態であったときの一番高い温度を, 関節がフリー状態からロック状態になる温度とする.

3.1.3 実験結果

関節がロック状態からフリー状態になる温度と, フリー状態からロック状態になる温度を Table 1 に示す. 表の値は, 実験回数 10 回の平均値である. 低融点合金以外の構成部品を変更したことによる差があるか, 有意水準 5% で 2 標本 t 検定を行った結果, すべての条件で有意差はみられなかった. よって, 断熱材と皿リベットを変更しても, 関節のロック/フリー状態が遷移するときの発熱材の温度に差はないといえる. また, 関節のロック/フリー状態が遷移するときの発熱材の温度は, どちらの低融点合金においてもカタログ値の融点 (合金 L: 80[°C]¹⁴), 合金 H: 139~141[°C]¹³) よりも低いことがわかった.

3.2 関節の状態遷移に要する時間

3.2.1 実験目的

関節が完全にフリー状態になっていないにもかかわらずアームを動かしてしまうと, 巻き取り・繰り出しの動作が行えないなどの不具合が

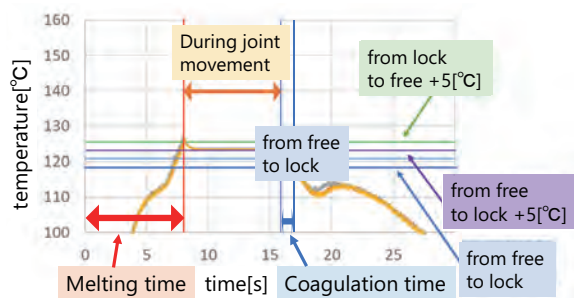


Fig. 10: Definition of melting and coagulation time

起きる可能性がある。そのため、関節がロック状態からフリー状態になったあと、余裕をもって少し高い温度まで加熱する。本論文では、関節がフリー状態になる温度から+5[°C] 余裕をもたせるとする。また、温度が上がりすぎてしまうと冷却にかかる時間が長くなってしまいうため、巻き取り・繰り出し動作中は誘導加熱装置の出力を下げて発熱材を保温する。保温の際は関節がロック状態になる温度+5[°C] を維持する。以上のことから、巻き取り装置における関節の加熱・冷却は以下のような手順で行う。

- 1) 誘導加熱装置により関節をフリー状態になる温度+5[°C] まで加熱する。
- 2) スプロケットを回転させ、アームの繰り出し・巻き取り動作を行う（関節1個分）。
- 3) 巻き取り・繰り出し動作中は、関節がロック状態なる温度+5[°C] を維持しながら保温する。
- 4) 巻き取り・繰り出し動作が終わったら、関節がロック状態になる温度まで冷却する。

以上の手順において、関節の加熱開始 (40[°C]) からフリー状態になる温度+5[°C] までの時間を溶融時間とする。また、関節がロック状態になる温度+5[°C] からロック状態になる温度までの時間を凝固時間とする。溶融時間、凝固時間について Fig. 10 に示す。グラフは関節の加熱・冷

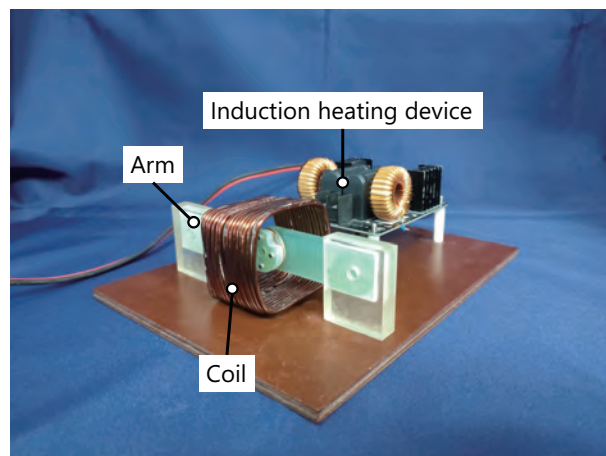


Fig. 11: Experimental setup for measuring melting and coagulation time

Table 2: Experimental results of time required for melting and coagulation

LMPA	Heat insulation	Countersunk rivet	Melting time [°C]	Coagulation time [°C]	total time [°C]
LMPA-L	no	Iron	3.58	5.78	9.36
		PEEK	3.09	5.48	8.57
	yes	Iron	3.26	4.87	8.13
		PEEK	2.04	4.23	6.27
LMPA-H	no	Iron	13.2	2.20	15.4
		PEEK	9.21	1.69	10.9
	yes	Iron	10.4	1.10	11.5
		PEEK	8.03	1.20	9.23

却を行ったときの発熱材の温度を表す。この溶融時間と凝固時間を用いて構成部品の評価・選定を行う。

3.2.2 実験方法

実験装置を Fig. 11 に示す。誘導加熱装置に電源電圧 30[V] を印加し、加熱する。このとき、Table 1 に示した、関節がロック状態からフリー状態になる温度より十分に高い温度まで加熱する。その後、誘導加熱装置の電源を切り、自然冷却をする。

3.2.3 実験結果・考察

実験結果より、各構成部品を使用したときの低融点合金の溶融時間、凝固時間及び合計時間を Table 2 に示す。ここから、2 種類の低融点合

金、断熱材の有無、2種類の皿リベットについて評価する。

まず、低融点合金について評価する。合金Lの方が合計時間が短く、かつ溶融時間と凝固時間のバランスが取れている。ファンを用いるなどして能動的に冷却することで、凝固時間は短縮することができると考えられるため、合金Lの溶融時間と凝固時間のバランスはより優れたものになる。

次に、断熱材について評価する。断熱材を使用することで、溶融時間と凝固時間がともに短くなった。溶融時間が短くなった原因として、断熱材を使用することで発熱材からチェーンプレートへ放出される熱を抑制していることであるとされる。凝固時間が短くなった原因として、冷却開始時のチェーンプレートの温度が関係していると考えられる。断熱材を使用しないと、発熱材とチェーンプレートは接触するため、加熱時にチェーンプレートも高温になる。そのため、冷却時にチェーンプレートが熱源のような働きをしてしまう。一方、断熱材を使用することで、加熱時にチェーンプレートの温度上昇を抑えることができ、冷却時の熱源のような働きが弱まる。その結果、低融点合金の凝固時間が短くなると考えられる。このことは、3.3.2項にて検証実験を行う。

最後に、皿リベットについて評価する。皿リベットを鉄製からPEEK樹脂製に変更することで、溶融時間と凝固時間がともに短くなった。溶融時間が短くなった原因として、皿リベットを鉄製からPEEK樹脂製に変更することで、発熱材からチェーンプレートへ放出される熱を抑制していることであるとされる。凝固時間も短くなった原因は断熱材を使用したときと同様である。

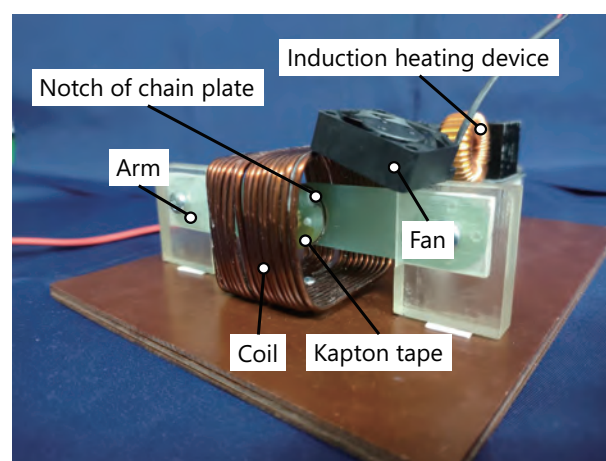


Fig. 12: Cooling experiment of joint with a small fan

3.3 補足実験

3.3.1 ファンを用いたときの凝固時間

関節の冷却時にファンを用いることで凝固時間を短縮できることを確認する。巻き取り装置に実装できるサイズであること、また冷却したい関節のみに風を当てることを考え、小型のDCファン (F3010EB-12UCV, シコー技研, サイズ: $30 \times 30 \times 10$ [mm]) を使用する。実験装置を Fig. 12 に示す。実験は、合金L, PEEK樹脂製皿リベット, 断熱材を使用した関節で行った。実験の結果、凝固時間が 4.23 [s] から 2.55 [s] に短縮された。

3.3.2 チェーンプレートの温度上昇

発熱材とチェーンプレートの間断熱材を入れる、または皿リベットを鉄製からPEEK樹脂製に変更することで、加熱時にチェーンプレートの温度上昇を抑えられていることを確認する。

実験装置を Fig. 13 に示す。チェーンプレートの切り欠き部分に加え、チェーンプレートにカプトンテープを貼った部分の温度も測定する。使用する低融点合金は合金Lのみで、断熱材の有無と皿リベットの材料の違いによる差を確認する。実験結果を Fig. 14 に示す。グラフは、誘導加熱装置による加熱開始から 3 [s] 後のチェーン

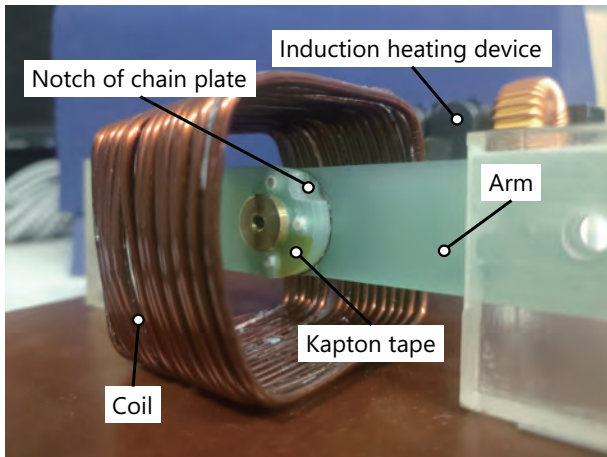


Fig. 13: Experimental setup for measuring temperature of heating and chain plate

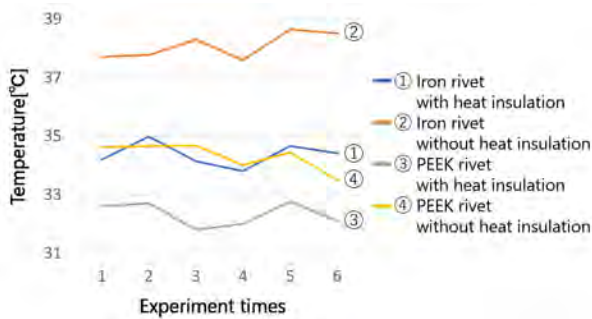


Fig. 14: Heat isolation effect on the temperature of chain plate

プレートの温度を表している。構成部品を変更したことによる差があるか、有意水準5%で2標本 t 検定を行った。その結果、条件①と条件④の組み合わせには有意差はなかったが、それ以外のすべての組み合わせでは有意差があった。検定結果より、断熱材及びPEEK樹脂製皿リベットを使用することで加熱時にチェーンプレートの温度上昇を抑えられていることがわかった。

3.4 構成部品の評価・選定

選定の結果、低融点合金は合金L（鉛フリー低温はんだ 80°C, 株式会社青木メタル, 融点: 80°C¹⁴⁾), 皿リベットはPEEK樹脂製, そして断熱材を使用した関節が, 現在の構造の関節における最適な構成となった。この構成の関節での溶融時間は2.04[s], 凝固時間は4.23[s]であり, 合計時間が最も短く, かつ溶融・凝固時間の

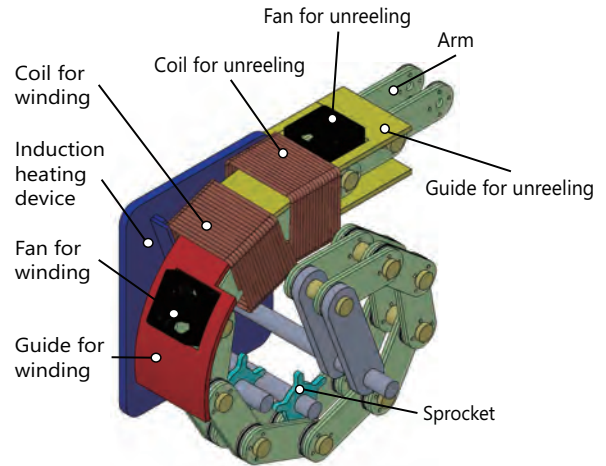


Fig. 15: Image of the improved winding up device proposed in this paper

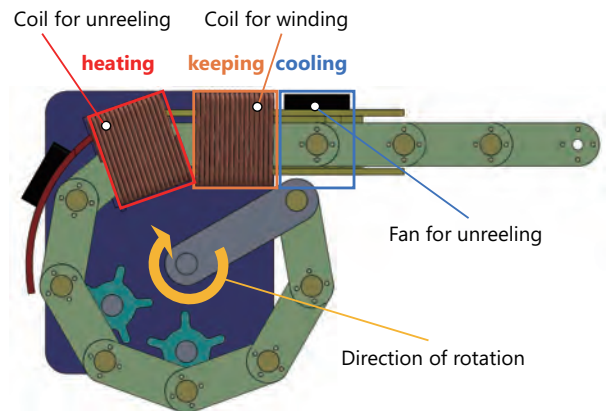


Fig. 16: Functional description of winding up device in unreeling process

バランスも取れていた。また, 冷却時にファンを用いることで, 凝固時間が4.23[s]から2.55[s]に短縮できることもわかった。

4. 巻き取り装置の改良

ここまで検討してきた関節を使って, 目標の動作が実現できる巻き取り装置の改良案を Fig. 15 に示す。なお, アーム巻き取ったときの直径が先行研究と変わらないことに注意した。

4[m]のアームを5~10分で繰り出すという目標を達成するために, 関節の個数はできるだけ減らしたい。しかし, 減らしすぎると, 関節の間隔が長くなり, 巻き取ったときの関節の角度が大きくなってしまふ。関節の角度が大きくな

ると、コイルの断面積を大きくする必要があり、その結果、誘導加熱時の磁束密度が小さくなって加熱の速度が低下してしまう。これを考慮し、関節の間隔を 40[mm] とした。このとき巻き取り時の関節の角度は 40[deg] である。

第 2 節で述べたように、巻き取り時と繰り出し時では加熱したい関節の位置が異なる。そのため、コイルを 2 個に増やし、上記の関節の間隔と角度を実現する。そして、凝固時間を短縮するためのファンを巻き取り用と繰り出し用として 2 個取り付けた。

繰り出し動作時における関節の加熱、保温、冷却の工程について Fig. 16 に示す。繰り出し動作時は、繰り出し用コイルで加熱、巻き取り用コイルで保温、繰り出し用ファンで冷却の 3 つの工程を並列に行う。まず、加熱の工程で、低融点合金が溶けて関節がフリー状態になる。次に、保温の工程で、ガイドに沿って関節の角度が変わる。そして、冷却の工程で、低融点合金が固まって関節がロック状態になる。

並列で行う 3 つの工程のうち、最も時間がかかるのは冷却であり、ファンを用いるとすると、2.55[s] かかる。そのため、加熱、保温の工程も、冷却に合わせて 2.55[s] で行うこととする。スプロケットを回転させて、関節を次の工程へ送る動作に要する時間を α [s] とする。ここで、長さ 40[mm](関節 1 個分) のアームを繰り出すのにかかる時間は、2.55[s] に α [s] を加えて 4[s] とする。このとき、4[m] のアームを繰り出すのにかかる時間は 400[s] である。よって、改良した巻き取り装置を用いることで、4[m] のアームを 5~10 分で繰り出すという目標を、理論上達成できる。

5. 結言

本論文では、低融点合金の溶融と凝固の両方にかかる時間を考慮して、現在の構造の関節に使用する部品を選定した。選定の結果、断熱材を使用し、皿リベットの材料を PEEK 樹脂製に

し、低融点合金は合金 L (鉛フリー低温はんだ 80°C, 株式会社青木メタル, 融点: 80[°C]¹⁴) を使用した関節が最適であることが確認できた。また、発熱材からチェンプレートへ放出される熱を抑制する構成にすることで、低融点合金の溶融時間だけでなく凝固時間も短くなることがわかった。そして、選定した部品を使用したアームを実装する巻き取り装置を提案し、4[m] のアームを 5~10 分で繰り出すという目標を理論上達成できるということがわかった。

今後は、巻き取り装置の試作・改良を行い、アームシステムとしての改良を目指す。また、現在のアームはコンパクトに巻き取るために階段状に組み合わせたチェン構造を採用しているため、長く繰り出すとねじれるようにたわんでしまうと考えられる。そのため、コンパクトに巻き取り可能かつねじれないアームの構造を検討する。

なお、本論文における発熱材の温度を測定する実験では、実験の都合上、加熱開始時点の温度を 40[°C] とした。しかし、福島第一原発 2 号機におけるペDESTAL内の温度はおよそ 23[°C] である⁸⁾。これは、ペDESTAL内の高さが異なる 7 つの測定点における温度の平均値である (高さが変化しても温度は一定である)。今後、ペDESTAL内の温度を考慮して再実験する。

参考文献

- 1) 電気新聞デジタル「福島第一 2 号機の格納容器調査/空間線量 650 シーベルトと推定」, < <https://www.denkishimbun.com/170213fukushima1-2> >, (参照: 2022.12.10)
- 2) 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: 2022.12.17)
- 3) 瀬戸徳文, ”原子炉内部調査のための低融点合金を用いた巻取型高剛性長尺アームに関する研究”, 令和元年度修士論文, (2020)
- 4) 瀬戸徳文ほか, ”低融点合金を用いた原子炉内部モニタリングアーム”, 第 20 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, 2D1-14, (2019)

- 5) 福井類ほか, ”友人作業が困難な災害現場における作業ロボットのための移動・作業用軌道構造体の自動構築システム”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2P1-P05, (2020)
- 6) 笹川雅希ほか, ”遠隔操縦システムにおける環境の奥行き感獲得のための四角提示処方に関する研究”, 第 20 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, 2D1-13, (2020)
- 7) 橋本俊治ほか, ”狭隘環境における遠隔操縦ロボットのための軌道提示に基づく操作支援の有効性評価”, 第 21 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, 1A3-08, (2020)
- 8) 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉内部調査 実施結果 (2018 年 2 月 1 日), 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: 2022.12.15)
- 9) 2 号機原子炉格納容器内部詳細調査 アクセスルート構築作業時の影響評価について (2020 年 10 月 2 日), 東京電力ホールディングス株式会社, < <https://www2.nsr.go.jp/data/000331354.pdf> >, (参照: 2022.12.15)
- 10) 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ー関節状態判別方法の提案と状態遷移法の検討ー”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 2P1-P01, (2020)
- 11) 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)
- 12) 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 -令和 3 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-, 日本原子力研究開発機構, (参照: 2022.12.17)
- 13) 千住金属工業株式会社 鉛フリー成形はんだ 製品カタログ, 千住金属工業株式会社, < https://www.senju.com/ja/download/pdf/SMICcat2019_PREFORM_J.pdf >, (参照: 2022.12.14)
- 14) 株式会社青木メタル はんだ 製品カタログ, 青木メタル株式会社, < <http://www.aokimetal.co.jp/solder> > (参照: 2022.12.14)