

## 原子炉内部調査ロボット用巻取可能サンプリングアームユニット —低融点合金を用いたチェーンロック機構の提案—

Windable sampling arm unit for atomic reactor interior surveying robot  
-Proposal of a chain lock mechanism using low melting point alloy-

瀬戸 徳文\*, カニエテ ルイス\*, 高橋 隆行\*

Noriaki Seto\*, Luis Canete\*, Takayuki Takahashi\*

\*福島大学

\*Fukushima University

キーワード： 原子炉内部調査用ロボット (atomic reactor interior surveying robot), チェーン (chain),  
フレキシブルアーム (flexible arm), 巻取機構 (windable mechanism),  
低融点合金 (low melting point alloy)

連絡先： 〒 960-1248 福島市金谷川 1 番地 福島大学 理工学群 共生システム理工学類 高橋隆行研究室  
瀬戸 徳文, Tel./Fax: (024)548-5259, E-mail: seto@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

### 1. 緒言

現在, 東日本大震災によって大事故が起きた東京電力福島第一原発の廃炉計画が進められている。その一つとして格納容器内部の燃料デブリを取り出す計画がある。現時点で内部状況は少しずつ明らかにされてきているが, 燃料デブリの成分, 硬さ, 放射線量などは未だ解明されていない。そのため, 溶け落ちた燃料デブリのサンプリングが必要である。しかし, 格納容器内部は放射線量が高く, 人間が入れない領域であるため, ロボットの活躍が期待されている。

そこで, 本研究室では燃料デブリのサンプリングが可能な原子炉内部調査ロボット用巻取可能サンプリングアームユニットを開発している<sup>1)</sup>。このサンプリングアームユニットを搭載したロボットが Fig. 1 に示すように, (1) 格納容器に通されたガイドパイプを通して (2) 溶け落

ちた燃料デブリの上に静止し, (3) そこからアームを伸ばし (4) 燃料デブリをサンプリングする。サンプリングには, 本研究室で開発している三爪ハンド<sup>2)</sup>によるピッキングや, ドリル切削などを考えている。

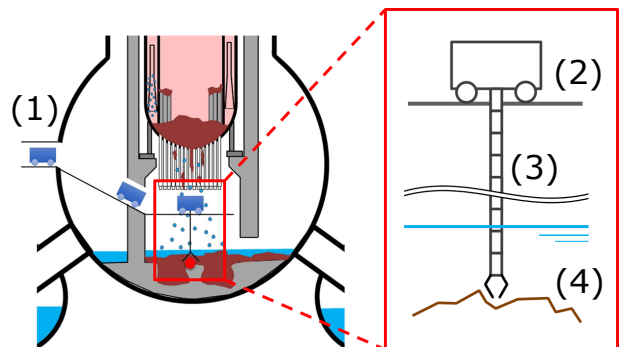


Fig. 1. Sampling operation

このサンプリング動作を行うには、

- (1) ロボットが直径100[mm]<sup>3)</sup>のガイドパイプ内を通行できること
- (2) アームがグレーチング格子90 × 25[mm]<sup>3)</sup>を通すことができること
- (3) グレーチングから燃料デブリまでの高さ最長3[m]<sup>3)</sup>までアームを伸ばすことができること
- (4) 10 ~ 1000[mg]<sup>3)</sup>の燃料デブリを採取できること

の4つが求められる。

## 2. サンプリングアームシステム

渡邊ら<sup>1)</sup>は前章で挙げた課題を解決するため、Fig.2に示すコンパクトで巻き取り可能なサンプリングアームシステムを考案した。このシステムは、大きく分けてフレキシブルアームと二層ドラムで構成されている。アームを巻き取って回収するため、サンプリングユニットをコンパクトにすることができ、十分なアームの長さを確保できる。

### 2.1 フレキシブルアーム

フレキシブルアームをFig.3に示す。フレキシブルアームには、ドラムに巻き取り可能な柔軟性を持つフレキシブルモードと、剛性を持つリジッドモードの二つのモードがある。このモードの切り替えをチェーン内部を通っているワイヤの張力で行う。また、モータの回転をワイヤで伝達させ、先端工具を駆動する。

しかし、このチェーンの構造上、アーム巻取り時に実効長が長くなってしまい、長くなった分だけワイヤを繰り出さなければ、スムーズに巻き取ることができない。本稿において、実効長とはアーム巻取り時のスペースを含めたアームの長さである。

### 2.2 二層ドラム

前節の問題を解決するため、渡邊らはFig.4に示すような二層に分けたドラムを提案した。このドラムは、一方を能動的、もう一方を受動的に動かすことによって、長くなってしまった実効長を吸収することを考えた。

しかし、実際に試作を行い、巻き取りを行うと2周目に入る前にチェーンとワイヤがスムーズにずれず、巻き取ることができなかった。原因として、ワイヤとチェーンの摩擦が大きいことが挙げられていた。

### 2.3 先行研究の課題

先行研究では、ワイヤとチェーンの摩擦が課題として残った。この課題の根本的な原因は、実効長が変化してしまうことである。また、本アームは張力がかかることによって簡単に剛性の高いアームにすることができるが、チェーンを試作し、リジッドモードにしたアームにあらゆる方向から力を加えてみると、アームが変形してしまった。

そこで本研究では、巻き取るというコンセプトは変えずにアームの構造を変えることによって先行研究で生じた問題点を解決し、サンプリングアームシステムの完成を目指す。

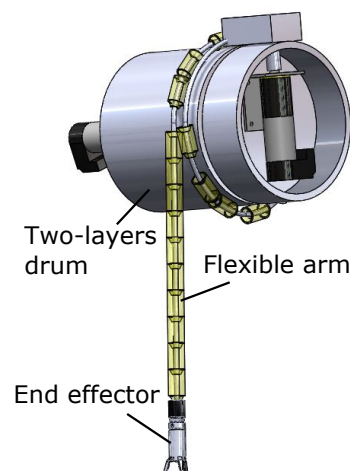


Fig. 2. Sampling arm system

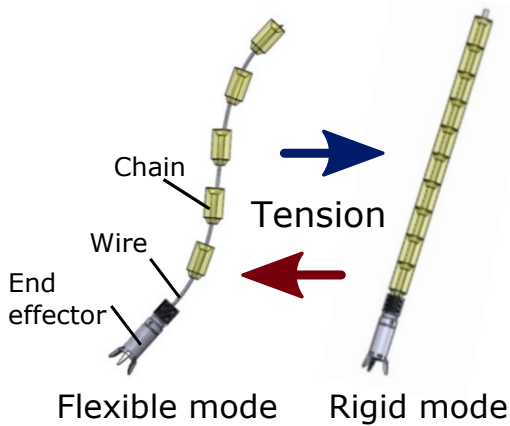


Fig. 3. The flexible arm

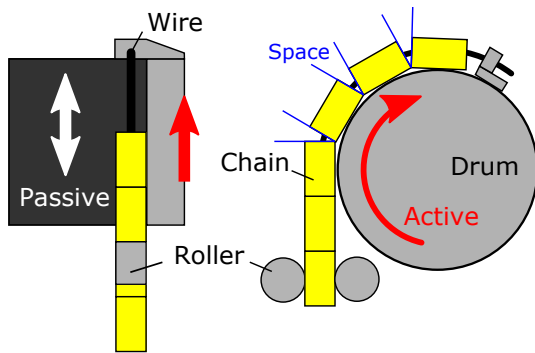


Fig. 4. Two-layers drum

### 3.1.1 ジップチェーンアクチュエータ

ジップチェーンアクチュエータ<sup>4)</sup>を Fig.5 に示す. このジップチェーンアクチュエータは, 巻き取られている二本のチェーンがジッパーのようにかみ合うことによって一本の強固な柱状に変化する直線作動器である. このチェーンをフレキシブルアームとして使用を考えたが, 二本のチェーンを使用することから必要なアーム長の二倍のチェーンが必要となり, 巻き取るとユニット自体が長くなってしまふ. よって, 小型化が難しいといった欠点が存在する.

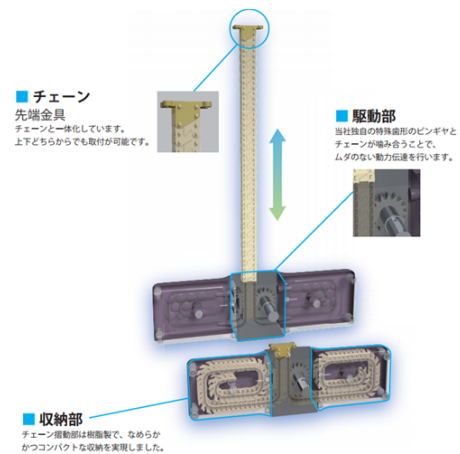


Fig. 5. Zip chain actuator(TSUBAKIMOTO CHAIN CO.)

## 3. チェーン形状の検討

まず市販品で問題点を解決できないかと考え調査, 検討を行った. 次に新しいチェーン形状を考案し, フレキシブルアームに使用するチェーン形状の候補として四つ挙げ, 基本性能を比較した. この中で最も良いと考えるチェーン形状について次章で考察を行う.

### 3.1 市販品の活用

コンセプトとして巻き取ることができるフレキシブルモードと, サンプリングできるリジッドモードが実現できるチェーンを実際に販売されている製品から調査を行った.

### 3.1.2 LinkLift

LinkLift<sup>5)</sup>を Fig.6 に示す. このLinkLiftは, チェーン一つ一つが積み重なることによって強固な柱状に変化し, リフトとして機能する. このチェーンは1本のチェーンのみで剛性の高いチェーンとなるが, チェーン同士が積み重なるという構造上, 巻き取ると直径が増加してしまふ, 大型になってしまうことが考えられる.

### 3.2 チェーン形状の考案

フレキシブルアームに使用できそうな市販品を二つほど検討したが, どちらも小型化が難し

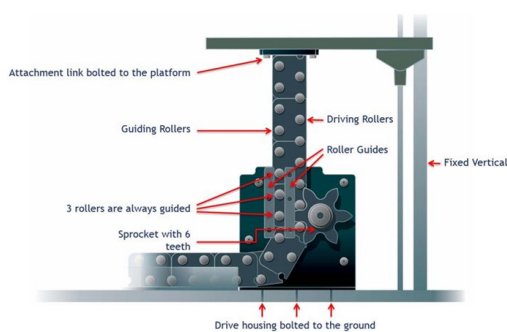


Fig. 6. LinkLift(SERAPID Inc.)

という欠点があった。よって、巻き取ることで小型化ができ、先行研究の問題を検討したチェーンを考案する。

### 3.2.1 ヒンジを用いたチェーン

はじめに、あらゆる方向に剛性の高いチェーン(チェーン形状1)を考える。

そこで、Fig.7に示すようなチェーンをヒンジで繋げる形状を考案した。ヒンジを用いてチェーンを一体にできれば、ヒンジ軸方向以外の剛性を高めることができる。

しかし、このチェーン形状では未だ実効長が変化してしまうため、スムーズに巻き取れない可能性がある。

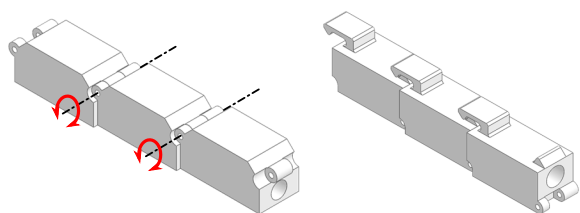


Fig. 7. The chain using a hinge

### 3.2.2 スライドロック機構チェーン

次に、アームの実効長が変化しないチェーン(チェーン形状2)を考える。実効長が変化する理由は、巻き取り時にチェーンとチェーンの間にス

ペースが生じることである。そこでローラチェーンのようなチェーンを使用し、ヒンジの回転中心軸をワイヤと交差するように通すことができれば、スペースが生じず、実効長が変化することなくモードの切り替えを行うことができる。

この方式には自由に動いてしまうチェーンをロックする機構が必要である。そこで、Fig. 8に示すようなスライドロック機構を考案した。赤い部品の溝に青い部品がスライドすることによって、チェーンとチェーンの間に引っかかりが生じ、チェーンがロックできる。

しかし、実際に試作を行ったところ、ロック時に遊びが存在することがわかった。サンプリング時のアームにおける遊びは、先端の位置制御が困難になる。そのため、チェーンには遊びがないことが求められる。

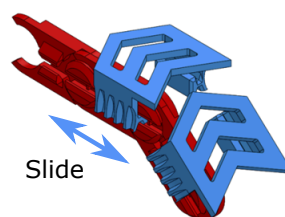


Fig. 8. The chain locking by a slider

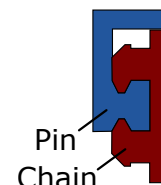


Fig. 9. Sectional view

### 3.2.3 熱可塑性樹脂を用いたチェーン

遊びを生じさせずにモード切り替えを行うことができるチェーン(チェーン形状3)を考える。前節で述べたチェーンはロック機構部に遊びが存在する。そこで、加熱することによって軟化し、冷却することによって硬化する熱可塑性樹脂をチェーンの材料として使用する方法を考案した。本稿では、60[ ]程度で軟化し、硬化時には汎用樹脂程度の強度をもつ手びねりプラスチック(株式会社バケレルセンター TFabWorks)を用いた。この手びねりプラスチックをチューブ型やリング型に成形したアームを Fig.10に示

す。Fig.10のようなアームは、加熱時にフレキシブルモード、冷却時にリジッドモードとなる。

しかし、この手びねりプラスチックを含む熱可塑性樹脂は、熱伝導率が悪いため加熱してもモードの切り替えに時間を要する。

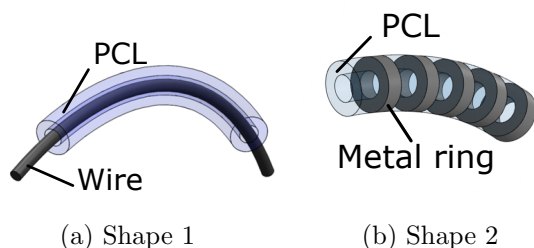


Fig. 10. The chain made of tebineri-plastic

### 3.2.4 低融点合金を用いたチェーン

チェーン形状1～3で検討し、生じた問題を解消できるチェーン形状を考案する。それは、Fig.11に示すような低融点合金を用いたチェーン(チェーン形状4)である。本稿では、低融点合金としてはんだを用いる。ローラチェーンのロックにはんだをリベットのように用いた。これは、2枚の板に貫通孔を開け、その孔にはんだを満し、はんだのせん断強度によってリジッドモードを保持する構造である。また、リジッドモード時にアームが柱状になるように貫通孔を開ける。

低融点合金は加熱・冷却による軟化と硬化が非常に素早い。これらを用いたチェーンのモード切り替えは熱可塑性樹脂よりも速くなり、先端の位置制御の妨げになるほどの遊びは生じる恐れがないと考えられる。

このチェーンは、チェーン形状1～3の問題点を検討し考案した。しかし、このチェーンが実際に使用することができるほどの剛性を有しているかは判断できないため、確認する必要がある。よって、次章ではんだの強度を確認する基礎的な実験について述べる。

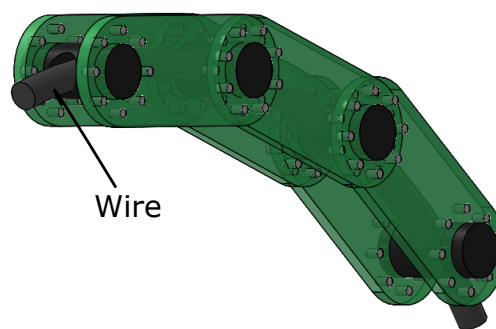


Fig. 11. The chain locked by the solder

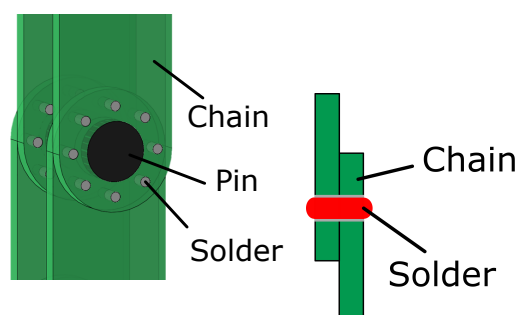


Fig. 12. Enlarged view of Fig. 13. Structure the chain joint of chain

## 4. はんだの破断せん断応力実験

### 4.1 実験目的

低融点合金がサンプリングアームに使用することができるほどの剛性を有しているかを確認する必要がある。そこで基礎実験として、はんだの破断せん断力を計測し、破断せん断応力を求める。

### 4.2 実験方法

実験に用いた器材を Fig.14 に示す。実験結果がランドと基板の接着力に依存しないようにせん断部のランドは予め剥がしておく。まず、ユニバーサル基板を2枚重ね、孔一箇所のみにはんだを満す。次に、基板の片方を固定し、もう一方をはんだが破断するまで Fig.14 の矢印方向に引張る。その破断に要した力の最大値を読み取ることではんだの破断せん断力を計測する。

さらに、破断部を重ね、はんだを十分に加熱(350[ ], 10 秒間)し、もう一度破断実験を行う。これらの動作を 5 回行い、破断せん断力を計測した。

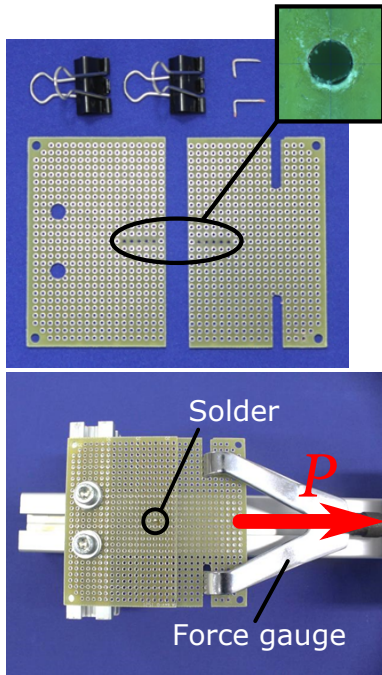


Fig. 14. Shear stress experiment

### 4.3 実験結果

実験結果を Table 1 に示す。実際の使用を想定し、再加熱の場合の最高値、最低値を代表値とした場合、基板孔径  $d = 1[\text{mm}]$  であるので破断せん断応力は、

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (1)$$

より、56.7[MPa] から 76.0[MPa] であることがわかった。

### 4.4 実験考察

参考文献<sup>3)</sup>では、切削工具を使用した場合に押付力 10[kgf] で燃料デブリの切削が可能であると述べられている。これを基に、はんだのせん断応力が押付力に対して十分であるかの考察を行う。

Table 1: Shear stress experimental result

Times	First[N]	Second[N]
1	61.4	57.0
2	51.3	59.7
3	49.3	50.6
4	59.8	45.4
5	59.3	44.5
Average	56.2	51.4

#### 4.4.1 押付力に関する考察

Fig.15 に示すような先端にかかる押付力によるモーメント  $M$  がかったチェーンについて考察を行う。式 (1) を変形し、

$$A = \frac{P}{\tau} \quad (2)$$

より、切削可能な押付力  $P = 98[\text{N}]$ 、前章のはんだの破断せん断応力の最低値  $\tau = 56.7[\text{N}/\text{mm}^2]$  とすると、必要のはんだ接触面積  $A$  は約  $1.7[\text{mm}^2]$  となる。例として、回転中心から力点までの法線距離  $a$ 、回転中心からはんだを満たした点までの距離  $b$  の比を  $5:1$  とし、力のモーメントを考えると、必要な接触面積  $A$  は約  $8.6[\text{mm}^2]$  となる。この値より、はんだで満たされた直径  $2[\text{mm}]$  の孔が 3 個以上で耐えられることが分かる。

これより、サンプリングには十分に耐えうるのではないかと考える。

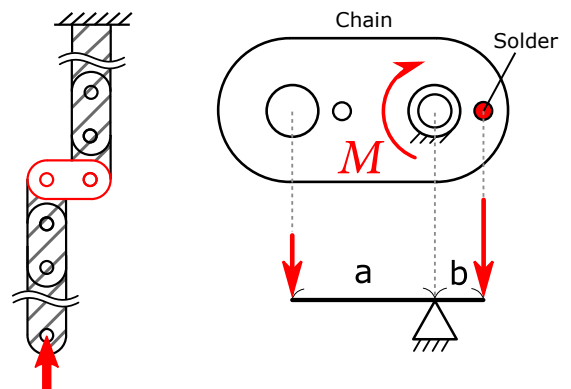


Fig. 15. The force condition 1

#### 4.4.2 先端工具が滑った場合の考察

実際のサンプリングでは、燃料デブリがどのような形状であるか確認できていないため、先端工具が滑り、アームが曲がってしまうことが考えられる。そのため、先端工具の滑った場合の考察をする必要がある。

最悪な状況として先端からフレキシブルアームの根本前までのチェーンを剛体とみなし、フレキシブルアームの一番根本のチェーンを Fig.16 に示すようなモーメント  $M'$  がかったチェーンを考える。

例として、回転中心から力  $P = 10[\text{N}]$  までの距離  $a = 3000[\text{mm}]$ 、回転中心からはんだまでの距離  $b = 5[\text{mm}]$  とすると、比は  $600 : 1$  となり、必要な接触面積は約  $106[\text{mm}^2]$  (直径  $2[\text{mm}]$  の孔が約 34 個分) である。

巻き取って小型化することやグレーチング格子の隙間を通すことを考えるとアームはあまり太くすることができない。よって、先端工具の滑った場合を考慮するとサンプリングに耐えられない可能性があるため先端工具の滑り止めを考える必要がある。

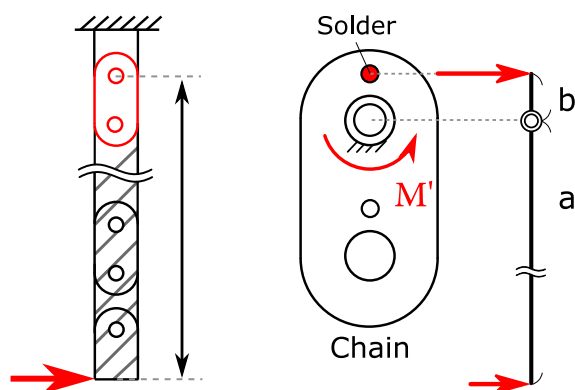


Fig. 16. The force condition 2

## 5. 結言

本論文では、先行研究の問題点を検討し、市販品の中から新しいフレキシブルアームとして使用できる可能性があるものを含め、検討を行っ

た。さらに、新しいチェーン形状として四つ考察し、最も優れた低融点合金を使ったチェーンについて考察を行った。

今後は、はんだ接触面の最適化や先端工具の滑り止めの設計、先端工具の選定などのほか、ドラムの加熱・冷却機構、繰出・巻取機構の設計を行い、サンプリングアームシステムの完成を目指す。

## 参考文献

- 1) 渡邊悠太, カニエテルイス, 高橋隆行: 原子炉内部調査用ロボットの開発ー巻き取り可能なサンプリングマニピュレータ機構の試作ー, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2P1-R08 (2017)
- 2) 伊藤究, 伏見雅英, 秦安延, 秦豪一, 高橋隆行: 立体カム機構を用いた対向 3 指小型ピンチングデバイスの設計と評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1P2-O10 (2015)
- 3) 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, 平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金原子炉压力容器内部調査技術の開発完了報告 平成 26 年 3 月
- 4) 株式会社椿本チエイン  
「ジップチェーンアクチュエータ」,  
<<http://www.tsubakimoto.jp/power-transmission/linear-actuator/zip-chain-actuator/zca/>> (参照 2017.8.23)
- 5) SERAPID Inc.  
「LinkLift Rigid Chain Mechanical Actuator」,  
<<http://www.serapid.com/en/industrial-equipment/industrial-lifts/industrial-lifting-products/linklift>> (参照 2017.8.23)