

## 原子力プラントの廃止措置に伴い発生する鉛廃棄物の切断に供する 低融点合金の供給方法の確立

五嶋智久<sup>\*1, \*2</sup> 砂川武義<sup>\*1</sup> Glenn HARVEL<sup>\*3</sup>

原子力プラント（原子力・放射線施設）では遮蔽材としての鉛が広く利用されており、廃止措置に伴い放射性物質によって汚染した鉛および鉛含有物が廃棄物として出てくる。廃止措置で発生した廃棄物は、事業者が処分場を確保しなければならない。そこで、事業者はクリアランス制度により低レベル放射性廃棄物をクリアランスレベル以下に処理して廃棄物を減らしている。本研究は、汚染した鉛の廃棄物量を最少にすることを目的として、汚染部分のみを精密に切断する手法を確立することを目標とした。方法は、鉛と Bi と Sn を反応させることにより、鉛を低融点合金化して切断する。この鉛の低融点合金化においては、Bi-Sn 合金を作製し鉛に供給する方法を検討した。検討の結果、鉛切断部に Bi-Sn 合金を液状にして滴下する方法とペースト状にして注入する方法を実験で確認した。実験の結果、鉛切断部に Bi-Sn 合金をペースト状にして注入する方法の方が、目標とした部位を精密に切断するには優れていた。

**Keywords:** 廃止措置, 遮蔽材, 鉛, 低融点合金, 廃棄物

Lead is widely used as a shielding material in nuclear power plants (nuclear and radiation facilities), and lead and lead-containing materials contaminated with radioactive materials are generated as waste during decommissioning. The operator must secure a disposal site for waste generated during decommissioning. Therefore, operators reduce waste by treating low-level radioactive waste below the clearance level through a clearance system. This study aimed to establish a method to precisely cut only the contaminated parts with the aim of minimizing the amount of contaminated lead waste. The method involves reacting lead with Bi and Sn to turn the lead into a low-melting-point alloy and then cutting it. For this low-melting-point alloying of lead, a method was examined in which a Bi-Sn alloy was produced and supplied to the lead. As a result of the study, experiments were conducted to confirm the effectiveness of a method in which the Bi-Sn alloy was dripped in liquid form on the lead cutting part and a method in which it was poured in paste form. As a result of the experiment, the method in which the Bi-Sn alloy was poured in paste form on the lead cutting part was superior in precisely cutting the targeted part.

**Keywords:** decommissioning, shielding material, lead, low melting point alloy, waste

### 1 緒言

現在、わが国の商業用発電用原子炉施設 57 基の内、2021 年 4 月 28 日時点で 18 基が廃止措置中である[1]。また、日本原子力研究開発機構 高速増殖原型炉もんじゅ、新型転換炉原型炉ふげんなどの核燃料施設等や、役目を終えた放射線施設でも廃止措置が進められている。一方、東京電力ホールディングス株式会社 福島第一原子力発電所は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（炉規制）上、廃止措置中ではないが、廃止措置に向けた取組みがなされている[2]。

発電用原子炉施設の廃止措置に伴い廃棄物が発生する。廃棄物の処理処分について、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターは、運転中廃棄物を対象として受け入れている[3]。一方、廃止措置で発生した廃棄物は、発生者責任となっているため、事業者が処分場を確保しなければならず[4]、現在、認可申請中の日本原子力発電株式会社 東海発電所の L3 廃棄物埋設施設[5]以外は、行先が決まっていない。そこで、事業者はクリアランス制度[6]により低レベル放射性廃棄物をクリアランスレベル以下に処理して、廃棄物を減らす努力をしている。

原子力プラント（原子力・放射線施設）では遮蔽材としての鉛が広く利用されており[7]、廃止措置に伴い放射性物質によって汚染した鉛および鉛含有物が廃棄物として出てくるが、放射性廃棄物に含まれる重金属等の有害物質については、炉規制の規制対象ではないことや、廃棄物の処理及び清掃に関する法律では、対象となる廃棄物から放射性物質およびこれによって汚染された物は除外されていることなどから、現時点で鉛の処理処分を考える場合、どのような法令に基づき規制を行うか明確になっていないという制度上の問題点がある[8]。

一方、土壌汚染対策法では鉛など有害物質の溶出量に規制が設けられており、有害物質と放射性物質を同時に含む低レベル放射性廃棄物に対して、将来の安心安全を見据えて、廃棄体の中に有害物質を閉じ込める処理技術の開発が進められている[7]。

また、日本アイソトープ協会では、炉規制に基づく使用、事業等によって発生した物を含むものは除くとされているが、放射性物質によって汚染した鉛および鉛含有物の集荷を行っている。その集荷要領には、RI によって汚染した鉛及び鉛含有物については可能な限り、汚染部分のみを分離するように記載されている[9]。この集荷要領に倣って、例えば、低レベル放射性廃棄物の汚染部分を分離してクリアランスレベル以下に処理する方法として、ブラスト装置による除染方法が一般的に採用されているが[10]、汚染した鉛に対してブラスト除染することは、有害物質を飛散させることによる鉛中毒等の問題があるため適切な方法ではない[11]。

これらのことから、発電用原子炉施設の廃止措置に伴い発生する放射性物質によって汚染した鉛の処理処分は、汚染部分のみを精密に切断してクリアランス処理することで低レベル放射性廃棄物を最小化することが将来的に求めら

Establishment of a method for supplying low melting point alloys for cutting lead waste generated during the decommissioning of nuclear power plants by Tomohisa GOTO (gotou-t@taihei-dengyo.co.jp), Takeyoshi SUNAGAWA, Glenn HARVEL

\*1 福井工業大学 工学部 原子力技術応用工学科

Department of Applied Nuclear Technology, Fukui University of Technology  
〒910-8505 福井県福井市学園 3 丁目 6-1

\*2 太平電業株式会社 技術本部

Technology Headquarters, TAIHEI DENGYO KAISHA, LTD.  
〒101-8416 東京都千代田区神田神保町 2-4

\*3 オンタリオ工科大学 工学・応用科学部

Faculty of Engineering and Applied Science, Ontario Tech University  
2000 Simcoe St N, Oshawa, ON L1G 0C5, Canada

(Received 2 November 2024; accepted 7 January 2025)

れると考える。

ここで、鉛の物理的性質は、特長として①密度が高い、②軟らかく靱性が大きい、③融点が低く潤滑特性がよい、④熱膨張率が高い、⑤放射線の透過率が低い、⑥耐腐食性が高い、ことが挙げられている[12]。なお、JIS Z 4817 放射線遮へい用鉛ブロックでは、鉛ブロックの種類は標準および硬質の2種類が規格化されており、硬質鉛の化学成分に $4\pm 0.5\%$ のSb（アンチモン）がある。このSbは放射化する核種として報告されている[13]。また、鉛の機械的性質について、機械構造用炭素鋼（S45C）と比較すると、鉛の引張強さは12 MPa、ブリネル硬さは3.2~4.5[14]であるのに対して、機械構造用炭素鋼（S45C）の引張強さは686 MPa、ブリネル硬さは201~269[15]など大きく異なる。発電用原子炉施設の廃止措置で鋼材の切断に使用する市販工具のレシプロソーで鉛を切断すると、先述の軟らかく靱性が大きいといった鉛の特長により、レシプロソーブレードの刃と刃の間に鉛が入り込み、目詰まりを起こして鉛表面をブレードが滑るだけの状態となり切断が困難であるため、実際の作業現場では鑿（たがね）を使って小割り切断を行っている。

## 2 先行研究

我々の研究では、発電用原子炉施設の廃止措置において廃棄物として発生する鉛の切断について、機械的切断手法と熱的切断手法を組み合わせた新たな切断手法を考案し、レシプロソーと低融点合金を用いて厚さ50 mmの鉛ブロック（JIS Z 4817）の切断を試み、切断した[16]。

ここで、低融点合金の使用は、鉛とBi, Snとを反応させることにより、鉛をBi 52.5 wt%, Pb 32.0 wt%, Sn 15.5 wt%の割合で共晶点が95℃の低融点合金化すれば、鉛を容易に切断できると考えた。この鉛の低融点合金化において、Bi-Sn合金（Bi 58 wt%, Sn 42 wt%, 共晶点139℃）を溶解した状態で供給する必要がある。Fig.1にBi-Pb-Sn合金の状態図[17]を示す。Fig.2にBi-Sn合金の状態図[18]を示す。

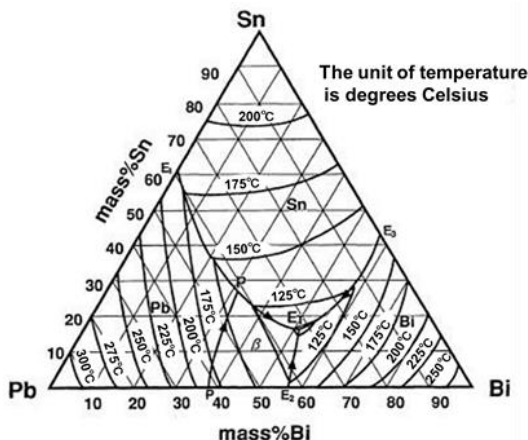


Fig.1 Liquidus projection of Bi-Pb-Sn alloy

我々が行った近赤外線ヒーター加熱による鉛ブロック切断実験[16]では、Bi-Sn合金の供給方法は、鉛ブロックの上部に配置したアルミ缶の中にBi-Sn合金を入れて、ホット

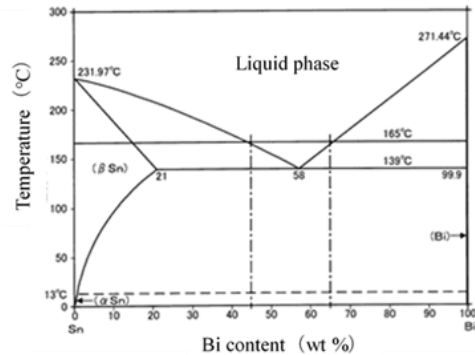


Fig.2 Phase diagram of Bi-Sn alloy

エアガン（RYOBI製, HAG-1551）によりBi-Sn合金を加熱・溶解し、鉛ブロック（200 mm×100 mm×厚さ50 mm）（オーケーレックス製, B200）の切断部にBi-Sn合金を滴下する手法（以下、滴下式と示す。）で行った。Fig.3に滴下式による鉛ブロックの切断システムを示す。Fig.4に滴下式による鉛ブロック切断後の状況を示す。鉛ブロック切断部の幅は、Fig.4に示すように広い所で9.8 mm、狭い所で1.9 mmだった。

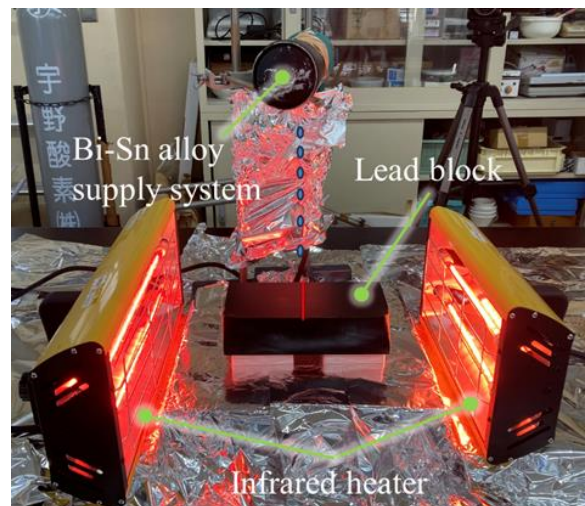


Fig.3 Dropping type cutting system for lead blocks

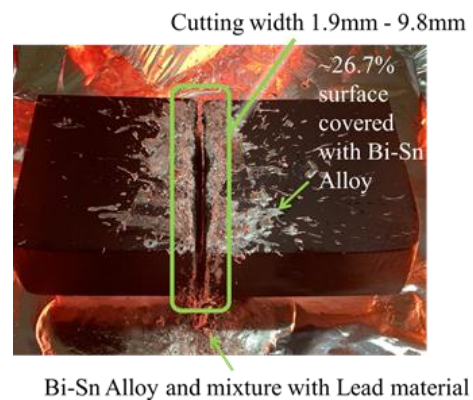


Fig.4 Situation after cutting lead block using the dropping type

ここで、切断面には供給したBi-Sn合金や生成したBi-Pb-Sn合金の付着が観察された。これらの合金に鉛の表面

汚染が巻き込まれた場合の対策として、鋼材の熱的切断時に金属の表面に浮き出るスラグの処理を参考に、グラインダーを用いて切断面に付着した合金を削り落として除染する方法が考えられる。

本研究は、鉛を低融点合金化するために必要な Bi-Sn 合金を、鉛の切断部に的確に供給し、鉛を精密に切断する手法を考案・確立することを目標とした。

ここで、Bi-Sn 合金の滴下式による供給手法の問題点は、次の 3 点である。

- ・ Fig.4 より、鉛ブロック切断部に的確に滴下したいがコントロールが定まらず、切断部の両側にも Bi-Sn 合金が滴下しており（画像処理の結果、鉛ブロックの表面積の 26.7% に Bi-Sn 合金が広がっていた）、鉛ブロック切断部に Bi-Sn 合金が滴下するまで Bi-Sn 合金を供給しなければならず、多量の Bi-Sn 合金が必要になる点。
- ・ Bi-Sn 合金を鉛フリーはんだとして文献調査した結果、濡れ性が悪く、接触角が大きいため、孔からの滴下に適した材料ではない点[19]。
- ・ 滴下のコントロールが定まらないため、切断幅が広く精密に切断ができない点。

そこで、鉛を精密に切断するための Bi-Sn 合金の供給方法について検討を行った。

### 3 Bi-Sn 合金の供給方法の検討

鉛の切断部に Bi-Sn 合金を的確に供給する方法は、これまでの「滴下式」に対して、滴下式で孔から落ちてくる Bi-Sn 合金を水の入ったボウルで受けて冷却して得られる粒径約  $\phi 3 \text{ mm}$  ～  $\phi 5 \text{ mm}$  の粒状の Bi-Sn 合金を供給する「粒状式」と、粒径をさらに細かくした「粉末式」、および鉛フリーはんだの濡れ性を改善してペースト状にした市販品の溶ダペースト[20] を供給する「ペースト式」を挙げて検討した。Table 1 に Bi-Sn 合金の供給方法の違いによる性能

について比較検討した結果を示す。

Table 1 の左側、深さ方向への供給性能比較では、粒径は切断幅の実績である 1.9 mm より小さい必要があった。このため、「粒状式」では、深さ方向へ供給できない。次の加熱による液化比較では、「粒状式」、「粉末式」および「ペースト式」は、Bi-Sn 合金の共晶点が 139 °C のため、150 °C 以上に加熱された鉛の上に置くだけで溶融することが期待された。溶融する場合、次の別途加熱の要否比較において、「滴下式」で Bi-Sn 合金の溶融に必要なホットエアガンが不要となり設備点数が減るという利点がある。しかし、「粉末式」は 150 °C 以上に加熱された鉛の上に置いても溶融しなかった。ここで、はんだ粉末が真球に近いほど無酸化雰囲気下で製造された証拠なので、はんだ表面の酸化被膜厚さが薄いといえる。当然、直径が小さくなるほど酸化物割合が多くなるが、通常の酸化被膜厚さ数 nm では直径約 50  $\mu\text{m}$  になると、割合が急増する。すなわち、フラックスなしでは溶融することができないことが知られている[21]。

一方、「ペースト式」の溶ダペーストは、加熱すると溶融した。はんだ付けでは溶ダペーストが用いられる。溶ダペーストは、はんだ合金の金属粉末と、フラックスとの混合物である。フラックスは、ロジン（松ヤニ由来）・塩化亜鉛・ハロゲン化水素などを含んでおり、金属の酸化防止・酸化物除去のために用いられる。ロジン系フラックスは、はんだ表面の主たる酸化物である SnO を除去することができず、活性剤として添加された塩化亜鉛やハロゲン化水素により、酸化被膜を除去することが可能であると報告されている[21]。ただし、塩化亜鉛は、加熱すると分解し、白色の有毒なヒューム（塩化水素、酸化亜鉛）が発生するため、集塵機と防毒マスクが必要である。

Table 1 の右側、供給量の調整と供給時の精度比較では、シリンジで供給できる「粉末式」および「ペースト式」が良い。最後の切断対象物と供給手段の位置関係比較では、

Table 1 Comparison of performance for different supply methods of Bi-Sn alloy

Supply method	As supplied	Supply means	Depth supply performance	Liquefaction by heating	The necessity for single heating	Supply adjustment	Supply accuracy	Positional relationship between the cutting object and the supply means	Evaluation
Dropping type	Liquid	Dripping	△	○	Need	×	×	Fixed up and down to drip by gravity	×
Granular type	Solid	Spoon	×	○	Not required	△	△	Gravity-fed, so the top and bottom are fixed	×
Powder type	Solid	Syringe	○	×	—	○	○	Gravity-fed, so the top and bottom are fixed	×
Paste type	Paste	Syringe	○	○	Not required	○	○	Viscosity allows for side feeding	○

Legend ○ : possible, good    × : impossible, bad    △ : It's not impossible, Not bad    — : Not applicable



ペーストに粘度を持たせることにより、側方への供給が可能である。

上記の比較検討の結果、Bi-Sn 合金の供給方法は、Bi-Sn 合金をペースト状に加工し、シリンジを使用して鉛切断部に供給することとした。

なお、次章の鉛ブロック切断実験では、市販品の溶ダペーストと、白色の有毒なヒューム（塩化水素、酸化亜鉛）の発生を改善することを目的に本研究で我々が開発・作製した鉛切断に特化した Bi-Sn 合金ペーストを使用して行った。

## 4 実験方法

### 4.1 ソルダペーストによる鉛ブロック切断実験

実験に使用した市販品の溶ダペースト（維桿匠製, Bi 58 wt% Sn 42 wt%）の写真を Fig.5 に示す。また、溶ダペーストによる鉛ブロックの切断システムを Fig.6 に示す。また、白色の有毒なヒューム回収用としてポータブルダストキャッチャー（コトヒラ工業製, KDC-DC1）を使用した。

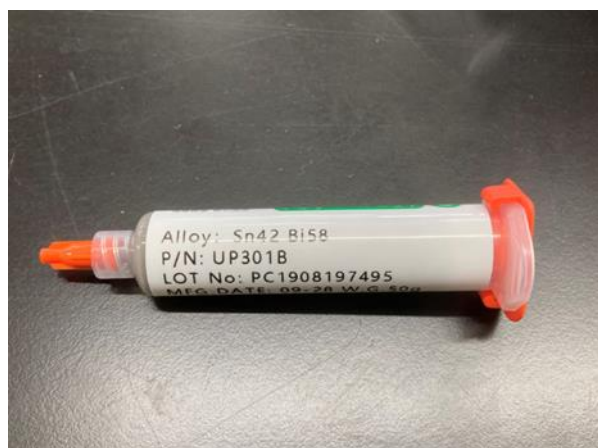


Fig.5 Solder paste used in the experiment

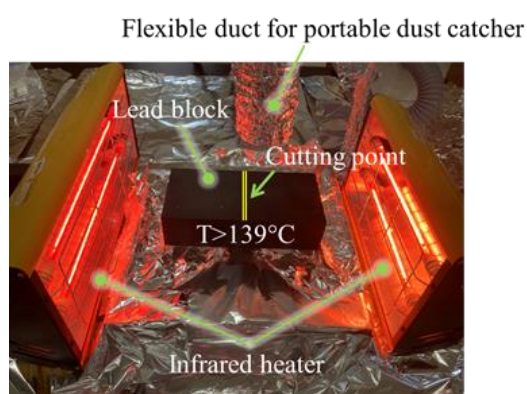


Fig.6 Paste-type cutting system for lead blocks

鉛ブロックの切断面は幅 100 mm、厚さ 50 mm を対象とした。2 台の近赤外線ヒーター（DATOUBOSS 製, SC002, 2000W）を 400 mm の間隔で向かい合わせに配置し、その中央に鉛ブロックの入熱面（100 mm × 50 mm）が近赤外線ヒーターに面するように設置して加熱した。切断工具は、小型レシプロソー（RYOBI 製, RJK-120KT）とレシプロソーブレード（RYOBI 製, 鉄工用, No.52（全長 165mm, 山数

18 山）を使用した。切断方法は、切断部に Bi-Sn 合金を供給して、そこへ小型レシプロソーを当て、レシプロソーブレードによる前後方向の往復運動により、供給した Bi-Sn 合金を同じく前後方向に広げ、鉛と Bi-Sn 合金との共晶合金化させていく要領で行った。以降、供給した Bi-Sn 合金は、レシプロソーブレードを通過して切断部の底部に到達するため、小型レシプロソーは、切断部に当たった状態を維持して Bi-Sn 合金の供給を待つだけで良い。なお、鉛ブロックに対するレシプロソーブレードの角度は 0 度である。

### 4.2 Bi-Sn 合金ペーストによる鉛ブロック切断実験

本研究では、市販の溶ダペーストに見られた白色の有毒なヒューム（塩化水素、酸化亜鉛）が発生しない鉛切断に特化した Bi-Sn 合金ペーストを開発・作製して、鉛ブロックの切断実験を試みた。すなわち、鉛切断に特化した Bi-Sn 合金ペーストは、ロジンフリー、ハロゲンフリーである。

鉛切断に特化した Bi-Sn 合金ペーストの作製には、はんだ粉（三井金属鉱業製, ST-7（粒径約 7  $\mu$ m）, Bi 58wt% Sn 42wt%）を使用した。一般に鉄の酸洗いには硫酸と塩酸が用いられているが[22]、はんだ粉の酸化被膜除去には、19 wt%リン酸水溶液（カナダ薬品工業製）を選定した。150  $^{\circ}$ C の雰囲気下で、この 2 種類だけではシリンジ（テルモ製）からの供給管である注射針の管内で水分が蒸発し目詰まりを起こす。そこで、鉱物をペーストにする技術は、油絵具の技術を参考にした。油絵具は、顔料と乾性油などから作られており[23]、乾性油には他にも半乾性油と不乾性油がある。乾性油は空気中で完全に固まる油、半乾性油は空気中で反応して流動性は低下するものの完全には固まらない油、不乾性油は空気中では固まらない油である[24]。これらのことから、水分の蒸発を防ぐことと、流動性をコントロールすることを目的として半乾性油（竹本油脂製）を選定した。半乾性油だけでは油分が濃く切断後も残るため、油分の粘性や濃度の調整および乾燥の促進を目的として揮発性油[25]を選定した。揮発性油の内、テレピン油（アメージングクラフト製）[26]は沸点が 154~170  $^{\circ}$ C であり、本切断手法の使用温度域に近いため選定した。これら油分とリン酸水溶液の水分を均一に混ぜるため乳化について検討した。乳化には水の中に油を細かく粒子にして分散させる O/W 型エマルジョン、あるいはこの逆に油の中に水の粒子を分散させる W/O 型エマルジョンがあり[27]、この粒子を安定な状態でエマルジョンにしておくために乳化剤を選定した。乳化剤は一種の界面活性剤で、HLB 値によって界面活性剤の使用上の 1 つの目安が与えられており、O/W 型エマルジョンのポリオキシエチレンソルビタンモノオレエート（ナカライテスク製, Tween80, HLB 値 15）とモノラウリン酸ソルビタン（東京化成工業製, Span20, HLB 値 8.6）を選定した[28]。実験に使用した Bi-Sn 合金ペーストの写真を Fig.7 に示す。

切断システムは、4.1 の溶ダペーストによる鉛ブロック切断実験の Fig.6 と同様に準備した。また、鉛ブロックの加熱、使用した切断工具および切断方法も 4.1 と同じ条件で実験を行った。

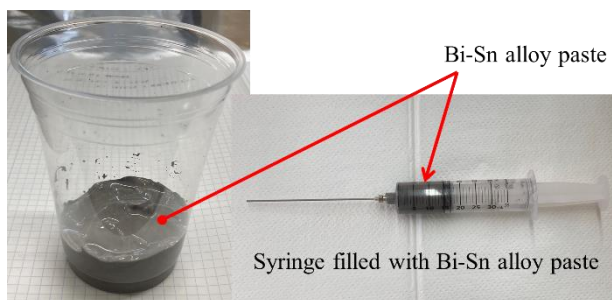


Fig.7 Bi-Sn alloy paste used in the experiment

## 5 実験結果

### 5.1 ソルダペーストによる鉛ブロック切断実験

鉛ブロック切断部の表面温度が 150℃以上に昇温したことを赤外線放射温度計（FLUKE 社製, GM700）で確認してから、切断部にソルダペーストをシリンジで供給した。その後、生成した Bi-Pb-Sn 合金を小型レシプロソーで掻き出し除去して、次の鉛と Bi, Sn との反応を促進させた。これら一連の作業（ソルダペーストの供給と小型レシプロソーによる掻き出し除去）を繰り返し行い、厚さ 50 mm の鉛ブロックを切断した。

ここで、Table 2 に滴下式[16]と今回のペースト式の鉛ブロック切断時間と切断に要した合金使用量を示す。また、Fig.8 に Table 2 をグラフ化したものを示す。

Table 2 Comparison and evaluation of cutting time and alloy usage of lead block by dropping type and paste type

Supply method	Lead block cutting time (minutes)	Amount of Bi-Sn alloy used (g)	Evaluation
Dropping type	36	569	×
Paste type	16	48	○
Effect	56% decrease	92% reduction	

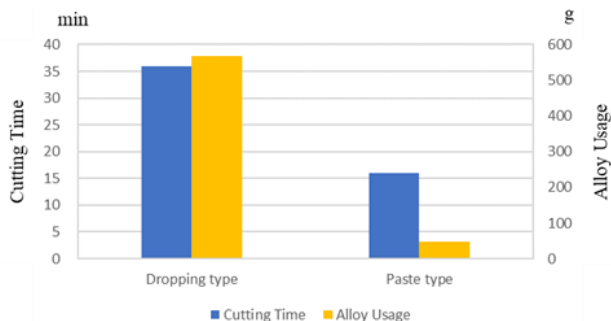


Fig.8 Comparison of cutting time and alloy usage between drop and paste cutting methods

切断時間は滴下式の 36 分からペースト式の 16 分に約 56 %短縮し、合金使用量は滴下式の 569 g からペースト式の 48 g に約 92 %減少した。このことから、Bi-Sn 合金をペ

ースト状にした方が合金使用量を少量化でき、また Bi-Sn 合金をシリンジで切断部に直接供給できるので、切断部での待ち時間が減少し、滴下式より短い時間で切断することができた。鉛ブロック切断部の幅は、広い所で 3.5 mm, 狭い所で 2.5 mm であり、目標とした部位を精密に切断するには Fig.4 の滴下式よりペースト式の方が優れていた。

実験に使用した市販のソルダペーストは、電装用の工業製品でロジン系フラックスを含んでおり、活性剤として添加された塩化亜鉛は、加熱すると分解し、白色の有毒なヒューム（塩化水素、酸化亜鉛）が発生するため[29]、鉛切断用には適していないことがわかった。また、発電用原子炉施設で使用する場合は、ハロゲンフリーが求められる場合があることや、含有成分を提示して使用許可を得る必要があるが、実験に使用した市販のソルダペーストは Bi-Sn 合金以外の含有成分が不明確であり採用できない。

### 5.2 Bi-Sn 合金ペーストによる鉛ブロック切断実験

鉛ブロック切断部の表面温度が 150℃以上に昇温したことを赤外線放射温度計で確認してから、切断部に我々が作製した Bi-Sn 合金ペーストをシリンジで供給した。その後、5.1 と同じ要領で厚さ 50 mm の鉛ブロックを切断した。

Fig.9 に鉛ブロック切断部に Bi-Sn 合金ペーストをシリンジで供給している状況を示す。Fig.10 に Bi-Sn 合金ペーストを使用した鉛ブロック切断後の状況を示す。

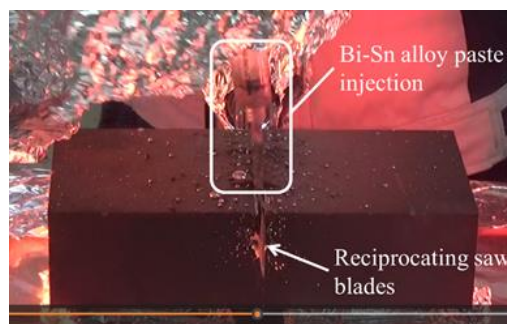


Fig.9 Injecting Bi-Sn alloy paste into the cut part of the lead block

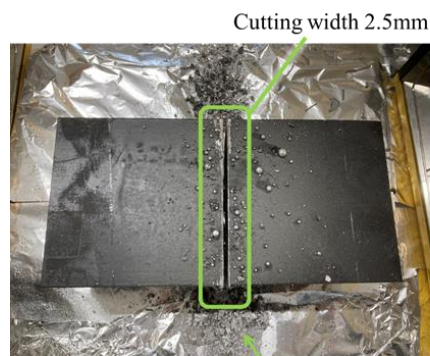


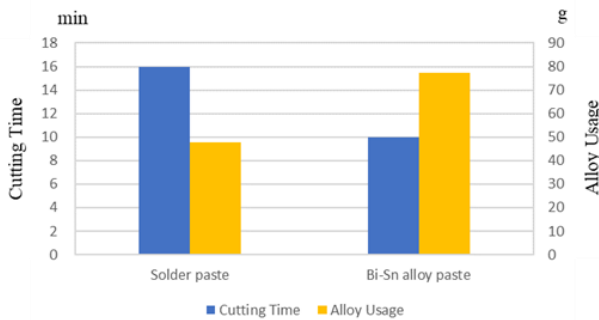
Fig.10 Situation after cutting lead block using Bi-Sn alloy paste

ここで、Table 3 に市販のソルダペーストと作製した Bi-Sn 合金ペーストによる鉛ブロック切断時間と切断に要した合金使用量を示す。また、Fig.11 に Table 3 をグラフ化し

たものを示す。

**Table 3 Comparison and evaluation of cutting time and alloy usage of lead blocks using solder paste and Bi-Sn alloy paste**

Paste Type	Lead block cutting time (minutes)	Amount of Bi-Sn alloy used (g)	Harmful white smoke	Evaluation
Solder paste	16	48	Existence	×
Bi-Sn alloy paste	10	77	None	○
Effect	38% decrease	60% increase		



**Fig.11 Comparison of cutting time and alloy usage for solder paste and Bi-Sn alloy paste**

切断時間は市販ソルダペーストの16分から作製したBi-Sn合金ペーストの10分に約38%短縮し、合金使用量は市販ソルダペーストの48gから作製したBi-Sn合金ペーストの77gに約60%増加した。このことから、作製したBi-Sn合金ペーストの使用量が多い分、鉛とBi-Sn合金との共晶合金化が効率的に進行して短時間で溶断できたことを示唆している。また、作製したBi-Sn合金ペーストは塩化亜鉛を含んでいないため、白色の有毒なヒューム（塩化水素、酸化亜鉛）が発生しない。鉛ブロック切断部の幅はFig.10より2.5mmであり、目標とした部位を精密に切断できた。

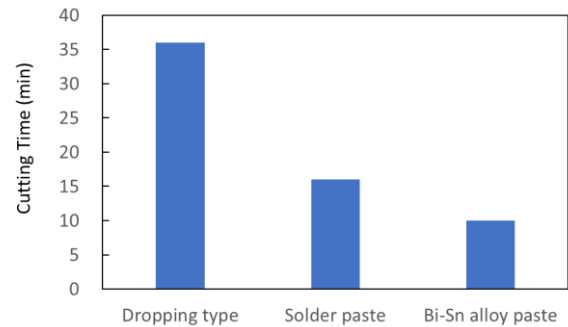
## 6 考察

Table 4は、鉛ブロック(200mm×100mm×厚さ50mm)を小型レスプロソーとBi-Sn合金を使用し、Bi-Sn合金の供給方法を滴下式とペースト式それぞれで切断実験を行った結果のまとめ表を示す。また、Fig.12は、横軸にBi-Sn合金の供給方法、縦軸に切断時間を示した図であり、Fig.13は、縦軸に合金使用量を示した図である。

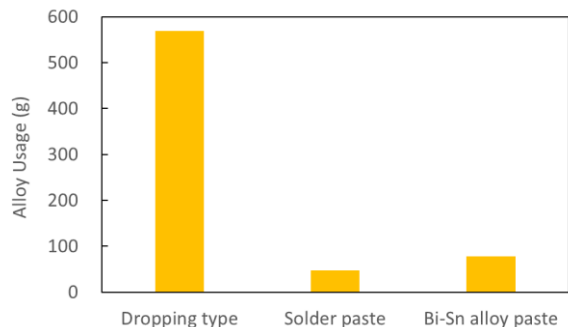
実験の結果、切断時間は滴下式の36分から、ペースト式のうち作製したBi-Sn合金ペーストの10分に約72%短縮し、合金使用量は滴下式の569gからペースト式のうち作製したBi-Sn合金ペーストの77gに約86%減少した。このことから、Bi-Sn合金をペースト状にした方が合金使用量を少量化でき、またBi-Sn合金をシリンジで切断部に直接供給できるので、切断部での待ち時間が減少し、滴下式より短い時間で切断することができた。一方、切断部の幅に

**Table 4 Summary table of experimental results for dropping type and paste type**

Supply method	Paste type	Lead block cutting time (minutes)	Amount of Bi-Sn alloy used (g)	Cutting width (mm)	White toxic fumes	Evaluation
Dropping type	—	36	569	1.9~9.8 (Ave.=5.9)	None	×
Paste type	Solder paste	16	48	2.5~3.5 (Ave.=3.0)	Existence	×
	Bi-Sn alloy paste	10	77	2.5	None	○
Effect		72% decrease	86% decrease	58% decrease	—	—
[Red box] (Targets for comparison)						



**Fig.12 Comparison of cutting time between dropping type and paste type**



**Fig.13 Comparison of alloy usage between dropping type and paste type**

については、滴下式の広い所で9.8mm、狭い所で1.9mmの平均5.9mmに対して、ペースト式は2.5mmであり、約58%減少した。目標とした部位を精密に切断するには滴下式よりペースト式の方が優れていることがわかった。

「5.1 ソルダペーストによる鉛ブロック切断実験」と「5.2 Bi-Sn合金ペーストによる鉛ブロック切断実験」では、後者の方が合金使用量は約60%多い反面、切断時間は約38%短かった。本切断手法により生成されるBi-Pb-Sn合金は二次廃棄物となるため、本研究テーマの趣旨から、切断時間の長短よりも二次廃棄物を最小限に抑える必要がある。この観点からすると、合金使用量が少なかった市販ソルダペーストによる工法が優れていることになる。しかしながら、我々が開発・作製した鉛切断に特化したBi-Sn合金ペーストによる工法は、合金使用量は滴下式と比較して約86%少なく、白色の有毒なヒューム（塩化水素、酸化亜鉛）が発生しないため、ポータブルダストキャッチャーなどの設備が不要となり、作業環境の安全面や設備面で優れている。



## 7 まとめ

発電用原子炉施設の廃止措置に伴い発生する放射性物質によって汚染した鉛の廃棄物量を最少にすることを目的として、本研究では鉛を低融点合金化するために必要な Bi-Sn 合金を、鉛の切断部に的確に供給し、精密に切断する新規の手法を確立した。

## 参考文献

- [1] 原子力規制委員会: 廃止措置中の実用発電用原子炉.  
[https://www.nra.go.jp/activity/regulation/reactor/haishi/sochichu\\_jitsuyou.html](https://www.nra.go.jp/activity/regulation/reactor/haishi/sochichu_jitsuyou.html) (accessed 2024-12-23).
- [2] 経済産業省: 廃止措置に向けた取組.  
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning.html> (accessed 2024-12-19).
- [3] 柳原敏: 廃止措置ビジネスの展望－クリアランス物の有効利用と放射性廃棄物の行先－.  
[https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/dengen/shinkeikaku/r2kaigi\\_d/fil/shiryo1.pdf](https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/dengen/shinkeikaku/r2kaigi_d/fil/shiryo1.pdf) (accessed 2024-12-17).
- [4] 愛媛県 県民環境部防災局 原子力安全対策課: 廃炉に伴い発生する低レベル放射性廃棄物の処分について.  
[https://www.ensc.jp/committee/esm/2017/nuclear\\_power/file/20170718\\_genshiryou2-2.pdf](https://www.ensc.jp/committee/esm/2017/nuclear_power/file/20170718_genshiryou2-2.pdf) (accessed 2024-12-17).
- [5] 日本原子力発電株式会社: 東海発電所の廃止措置 低レベル放射性廃棄物.  
[https://www.japc.co.jp/tokai/haishi/waste\\_tokai\\_1.html](https://www.japc.co.jp/tokai/haishi/waste_tokai_1.html) (accessed 2024-12-18).
- [6] 電気事業連合会: クリアランス制度.  
<https://www.fepc.or.jp/nuclear/haishisochi/clearance/index.html> (accessed 2024-12-18).
- [7] 佐藤淳也: 有害物質を含む放射性廃棄物の安定固化に向けて－アルカリ活性材料で固化処理された鉛の保持機構の解明－. 原子力機構の研究開発成果 2022-23, 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 (2022).
- [8] 原子力規制庁: 重金属等の有害物質を含む放射性廃棄物の埋設処分に関する対応について.  
<https://www2.nra.go.jp/data/000345121.pdf> (accessed 2024-12-18).
- [9] 公益社団法人 日本アイソトープ協会: RI によって汚染した鉛及び鉛含有物の集荷について.  
<https://www.jrias.or.jp/waste/cat1/202-07.html> (accessed 2024-12-18).
- [10] 浜田宣幸 他: クリアランスのためのウェットブラスト除染性能確認試験. デコミッショニング技報 45, pp.2-9 (2012).
- [11] 片脇清士, 中野正則: 鋼道路橋の塗替え時における含鉛塗料の除去について. 土木技術資料 55-2, pp.56-59 (2013).
- [12] 大澤直: 鉛. SHM 会誌 Vol.11 No.3, pp.2-8 (1995).
- [13] 榊本和義: 放射線発生装置の解体等に伴って発生する RI 汚染物の種類と物量について. 資料第 8-3-2 号, 高エネルギー加速器研究機構 (2013).
- [14] 日本金属学会編: 金属便覧, 改訂 6 版, 丸善, 東京, p.564 (2000).
- [15] 日本金属学会編: 金属データブック, 改訂 3 版, 丸善, 東京, p.127 (1993).
- [16] 五嶋智久 他: 原子力プラントの廃止措置に伴う鉛ブロックの切断手法の研究開発. 日本原子力学会和文論文誌 Vol.24 No.1, pp.1-12 (2025).
- [17] 戎谷隆, 川久保隆: Bi 系低温はんだのクリープおよび引張特性. 日本金属学会誌 第 57 巻 第 4 号, pp.455-462 (1993).
- [18] T.B.Massalski, H.Okamoto: *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition*, ASM International, Materials Park, Ohio, p.796, ISBN 978-0871704030 (1990).
- [19] 日本溶接協会: 接合・溶接技術 Q&A.  
[https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg\\_no=0080020150](https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0080020150) (accessed 2024-12-19).
- [20] 日本溶接協会: 接合・溶接技術 Q&A.  
[https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg\\_no=0080020010](https://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg_no=0080020010) (accessed 2024-12-19).
- [21] 竹本正: はんだ付技術の要点. 溶接学会誌 第 60 巻 第 4 号, pp.291-295 (1991).
- [22] 間宮富士雄: 鉄鋼の酸化膜およびスケールの除去について. 実務表面技術 第 78 巻 第 3 号, pp.113-119 (1978).
- [23] 長倉稔: 油脂・天然樹脂. 色材協会誌 第 65 巻 第 1 号, pp.40-47 (1992).
- [24] 足利千枝: 食用油脂に就いて. 家事科教材拾遺 第 18 巻 第 10 号, pp.46-52 (1942).
- [25] 長谷川理一: 油彩画と油絵具. 色材協会誌 第 75 巻 第 7 号, pp.346-353 (2002).
- [26] 厚生労働省: 職場のあんぜんサイト.  
<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/8006-64-2.html> (accessed 2024-12-19).
- [27] 潤滑通信社: 水と油はどうすれば混ざり合うか.  
<https://www.juntsu.co.jp/qa/qa1606.php> (accessed 2024-12-19).
- [28] 岡田正秀: 界面活性剤の HLB－その物理化学的意味と新算出－. 油化学 Vol. 7, No.7, pp.434-438 (1958).
- [29] 三原一幸, 長倉稔: 塩化亜鉛の化学. 第 9 巻 第 11 号, pp.22-28 (1962).