JAEA-Technology
2022-018
DOI:10.11484/jaea-technology-2022-018

# 水銀ターゲット容器内壁のキャビテーション損傷観察に関する技術資料 (1) 遠隔操作対応試験片切出し装置の開発

Technical Note for the Cavitation Damage Inspection for Interior Surface of the Mercury Target Vessel (1) Development of Specimen Cutting Machine for Remote Handling

直江 崇　木下 秀孝　涌井 隆　粉川 広行
羽賀 勝洋

Takashi NAOE, Hidetaka KINOSHITA, Takashi WAKUI, Hiroyuki KOGAWA and Katsuhiro HAGA

原子力科学研究部門
J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン

Materials and Life Science Division
J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research

August 2022
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　JAEA イノベーションハブ　研究成果利活用課
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

JAEA-Technology 2022-018

# 水銀ターゲット容器内壁のキャビテーション損傷観察に関する技術資料 (1) 遠隔操作対応試験片切出し装置の開発

日本原子力研究開発機構　原子力科学研究部門　J-PARC センター　物質・生命科学ディビジョン

直江　崇、木下　秀孝、涌井　隆、粉川　広行、羽賀　勝洋

（2022 年 5 月 26 日受理）

大強度陽子加速器研究施設（Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC）の物質・生命科学実験施設に設置されている核破砕パルス中性子源水銀ターゲットでは，高エネルギー陽子線入射時に水銀中に発生する圧力波が引き起こすキャビテーションによって，ステンレス鋼製のターゲット容器内壁に激しい壊食損傷が生じる．陽子線強度の増加と共に攻撃性が高くなるキャビテーションが引き起こす壊食損傷によって，熱応力を低減するために厚さ 3 mm で設計されたターゲット容器先端部では，長時間の運転により壊食痕からの水銀漏洩や，壊食痕を起点とした疲労破壊などが生じる懸念がある．

これまでに，高出力での長期的な安定運転を実現するために，キャビテーションによる壊食損傷を低減するための取り組みとして，容器内壁への表面改質の適用や，水銀中への微小気泡注入によりキャビテーションの発生源である圧力波の抑制，先端部の 2 重壁構造化を進めてきた．

損傷低減化技術の効果を確認するために容器内壁に形成された損傷を観察する必要があるが，中性子源の運転中に内部を観察することは不可能であるため，運転を終えたターゲット容器の先端部から試験片を切出し，内壁の観察を実施している．ターゲット容器の破損による水銀の漏洩を防ぎつつ，運転出力によって変化する適切な容器の交換時期を検討するためには，運転出力と損傷の関係を明らかにすることが必要である．これまでに，高放射線環境で遠隔操作可能な試験片切出し装置を開発し，実機水銀ターゲット容器からの切出しを通じて，遠隔操作性や，より確実に試験片を切出すための切削条件の検討や切出し手法の改良を重ねてきた．

本報では，実機ターゲットでの作業経験，及びモックアップ試験の結果に基づいて改良した遠隔操作による水銀ターゲット容器先端部からの試験片切出し手法に加えて，これまでに実機から試験片を切出した結果の概要についてまとめる．

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

JAEA-Technology 2022-018

# Technical Note for the Cavitation Damage Inspection for Interior Surface of the Mercury Target Vessel
# (1) Development of Specimen Cutting Machine for Remote Handling

Takashi NAOE, Hidetaka KINOSHITA, Takashi WAKUI, Hiroyuki KOGAWA and Katsuhiro HAGA

Materials and Life Science Division, J-PARC Center, Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 26, 2022)

In the liquid mercury target system for the pulsed spallation neutron source of Materials and Life science experimental Facility (MLF) at the Japan in the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), cavitation that is generated by the high-energy proton beam-induced pressure waves, resulting severe erosion damage on the interior surface of the mercury target vessel. The erosion damage is increased with increasing the proton beam power, and has the possibility to cause the leakage of mercury by the penetrated damage and/or the fatigue failure originated from erosion pits during operation.

To achieve the long term stable operation under high-power proton beam, the mitigation technologies for cavitation erosion consisting of surface modification on the vessel interior surface, helium gas microbubble injection, double-walled beam window structure has been applied.

The damage on interior surface of the vessel is never observed during the beam operation. Therefore, after the target operation term ends, we have cut out specimen from the target nose of the target vessel to inspect damaged surface in detail for verification of the cavitation damage mitigation technologies and lifetime estimation. We have developed the techniques of specimen cutting out by remote handling under high-radiation environment. Cutting method was gradually updated based on experience in actual cutting for the used target vessel.

In this report, techniques of specimen cutting out for the beam entrance portion of the target vessel in high-radiation environment and overview of the results of specimen cutting from actual target vessels are described.

Keywords: Spallation Neutron Source, Mercury Target, Post Irradiation Examination, Cavitation Damage, Remote Handling

目次

1. はじめに . . . . . 1
2. 試験片切出し装置 . . . . . 3
2.1 装置概要 . . . . . 3
2.1.1 ホールソー . . . . . 4
2.1.2 ドリルマシン . . . . . 5
2.2 装置の改良 . . . . . 5
2.2.1 電源 . . . . . 5
2.2.2 電源コネクタ . . . . . 6
2.2.3 制御 . . . . . 6
2.3 試験片切出しの手順 . . . . . 8
3. モックアップ試験 . . . . . 10
3.1 試験装置 . . . . . 10
3.2 試験条件 . . . . . 10
3.3 表面温度測定 . . . . . 14
3.4 切削油使用の検討 . . . . . 14
3.4.1 スプレー式切削油の検討 . . . . . 15
3.4.2 エマルジョン型切削油の検討 . . . . . 15
3.4.3 切削油の引火性試験 . . . . . 16
3.5 センタードリルの検討 . . . . . 17
3.6 切削油の真空乾燥の検討 . . . . . 19
3.6.1 切削油の流入油量測定 . . . . . 19
3.6.2 閉止栓の気密確認試験 . . . . . 20
3.6.3 真空乾燥試験 . . . . . 21
3.7 ホールソーへのコーティングの検討 . . . . . 21
3.8 グリース使用の検討 . . . . . 24
3.9 切削油の洗浄に関する検討 . . . . . 26
3.10 試験片がターゲット容器内に落下した場合の対策 . . . . . 26
3.11 切断中のホールソー刃の破損による咬み込みへの対策 . . . . . 27
3.12 最適な切出し条件について . . . . . 28
4. 実機水銀ターゲット容器からの試験片切出しの記録 . . . . . 30
4.1 水銀ターゲットの運転履歴 . . . . . 30
4.2 ターゲット容器 1 号機 . . . . . 32

4.3 ターゲット容器 3 号機 . . . . . 33
4.4 ターゲット容器 5 号機 . . . . . 34
4.5 ターゲット容器 2 号機 . . . . . 35
4.6 ターゲット容器 8 号機 . . . . . 35
4.7 ターゲット容器 9 号機 . . . . . 36
4.8 ターゲット容器 11 号機. . . . . 37
4.9 ターゲット容器 10 号機. . . . . 38
5. まとめ . . . . . 40
謝辞 . . . . . 41
参考文献 . . . . . 42

Contents

1. Introduction ..... 1
2. Specimen cutting out machine ..... 3
2.1 Overview of cutting machine ..... 3
2.1.1 Annular cutter ..... 4
2.1.2 Drill machine ..... 5
2.2 Modifications of cutting machine ..... 5
2.2.1 Power source ..... 5
2.2.2 Power plugs ..... 6
2.2.3 Control system ..... 6
2.3 Procedure of the specimen cutting ..... 8
3. Mockup tests ..... 10
3.1 Cutting machine for mockup test ..... 10
3.2 Conditions for mockup tests ..... 10
3.3 Surface temperature measurement ..... 14
3.4 Examination of lubricant ..... 14
3.4.1 Examination of spray-type lubricant ..... 15
3.4.2 Examination of emulsion type lubricant ..... 15
3.4.3 Flammability test for luburicans ..... 16
3.5 Examination of center drill ..... 17
3.6 Investigation of vacuum drying for lubricant ..... 19
3.6.1 Inflow measurement for lubricant ..... 19
3.6.2 Airtightness tests for rubber plug ..... 20
3.6.3 vacuum drying tests ..... 21
3.7 Coating for annular cutters ..... 21
3.8 Examination of grease ..... 24
3.9 Cleaning of cutout specimen ..... 26
3.10 Measure for specimen dropped off in mercury vessel ..... 26
3.11 Measure for stuck and failure of annular cutter ..... 27
3.12 Optimized cutting condition ..... 28

4. Records of the beam window cutting for used mercury target vessels ..... 30
4.1 Operational histories of the mercury target vessels ..... 30
4.2 Target vessel No. 1 ..... 32
4.3 Target vessel No. 3 ..... 33
4.4 Target vessel No. 5 ..... 34
4.5 Target vessel No. 2 ..... 35
4.6 Target vessel No. 8 ..... 35
4.7 Target vessel No. 9 ..... 36
4.8 Target vessel No. 11 ..... 37
4.9 Target vessel No. 10 ..... 38
5. Summary ..... 40
Acknowledgement ..... 41
References ..... 42

# 1. はじめに

大強度陽子加速器研究施設（Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC）の物質・生命科学実験施設（Materials and life science experimental Facility, MLF）に設置されているパルス核破砕中性子源では，液体金属である水銀を核破砕ターゲットに用い, 25 Hz の繰返しで 3 GeV, 1 MW の高エネルギー大強度陽子ビームを入射する設計としている．大強度の陽子線が水銀に入射すると，核破砕反応による中性子生成と共に，水銀の熱衝撃によって水銀中に圧力波が発生する．圧力波が水銀中を伝ぱする過程で，負圧によるキャビテーションが発生し，壁面近傍でのキャビテーションの崩壊によって水銀が充填されているステンレス鋼製の容器（水銀ターゲット容器）の内壁に壊食損傷が形成される [1]. 水銀ターゲット容器のビーム窓と呼ばれるビームが入射する先端部分は，陽子ビームの入射による内部発熱を抑えるために，厚さ 3 mm の薄肉構造を採用しており，壊食損傷による減肉や，損傷痕を起点とした疲労き裂進展により，容器が破損することが懸念されている [2].

J-PARC と同じ水銀を核破砕ターゲットを先行して運用している米国オークリッジ国立研究所の核破砕中性子源（Spallation Neutron Source, SNS）では，先端部が 2 重壁構造となっており，水銀の漏洩には直接至らなかったものの，厚さ 3 mm の内壁を貫通するほどの激しい壊食損傷が確認されている [3].

キャビテーションによって形成される壊食損傷は，運転時間の増加と共に進行し，また損傷の程度は，入射する陽子ビームの強度に依存して変化する．J-PARC の水銀ターゲット容器は，熱応力を低減する観点から先端部の厚さを 3 mm としているため，運転中にキャビテーションによる損傷痕を起点とした疲労破壊や，壊食痕が貫通することによる水銀の漏洩が生じることが懸念される．J-PARC の設計出力である 1 MW において，1 年間（約 5000 時間）ターゲット容器が破損することなく運転を継続するためには，疲労破壊等が生じない壊食深さまで損傷を低減することが求められている．

水銀ターゲット容器は，2008 年 5 月の施設運用開始から損傷を低減するための改良を加えてきた．1 号機では，キャビテーションによる損傷が激しくなるビーム窓部分を硬化させる表面改質処理によって損傷の抑制を試みた [4]．3 号機からは，表面改質に加えてキャビテーションの発生源である圧力波を抑制するために，水銀中へヘリウムガスのマイクロバブルを注入する技術を採用した [5]．更に，5 号機からは，マイクロバブル注入に加えて，ビーム窓部分に狭い水銀流路を隔てて内壁を設置し，高速の水銀流れと狭隘壁によりキャビテーション気泡の成長を阻害し，攻撃性を抑える技術を採用した [6].

Fig. 1 に水銀ターゲット容器の全体図及び先端部の断面図を示す．水銀ターゲット容器は SUS316L 製であり，水銀を充填する水銀容器，冷却水層を有する保護容器の多重容器である．水銀容器と保護容器の間はヘリウムガス層となっており，水銀容器からの水銀の漏洩を電気式の漏洩センサ及びヘリウムガスの放射能モニタリングにより検出する [7]．また，5 号機以降は陽子ビームが入射するビーム窓と呼ばれる先端部近傍は 2 重壁構造となっている．

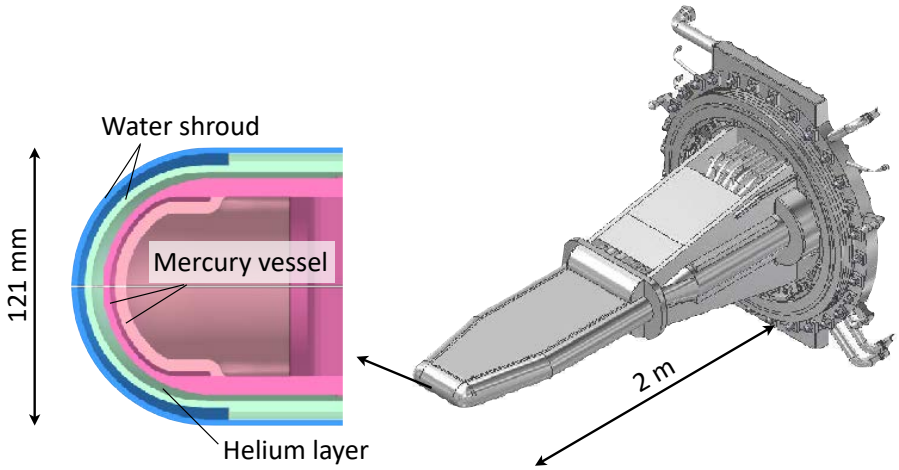



Fig. 1 Schematic view of the target vessel and cross-sectional view of the beam window portion.

水銀ターゲット容器の内壁に生じた損傷の程度を知るには，使用済みの容器から試験片を切出して観察することが現実的である．水銀ターゲット容器を交換する前に内壁の損傷状態を把握することができれば，適切で効率の良い交換時期を設定することが可能となり，放射性廃棄物の削減につながる．また，陽子及び中性子照射環境で使用されるため，容器構造材は照射損傷を受ける．水銀ターゲット容器は，設計当初の原子炉等での中性子照射データを基に，延性が確保される積算照射量 5 dpa までを暫定的に設計寿命としている [8]．これを基に，設計時においてはビーム出力が 1 MW の場合，2500 時間（年間 2 回）毎の容器交換を計画していた．なお，放射化や水銀中の圧力波を低減するために見直された現状の容器交換頻度は，ビーム出力 1 MW の場合，5000 時間以上である．キャビテーション損傷の評価のための試験片の切出しは，将来的に照射による力学特性変化を調べるための試験片の採取も兼ねている．

これまでに，容器内壁に形成された損傷を観察するために，高放射線環境で遠隔操作により試験片を切り出す装置を開発した．当初は，遠隔操作性を重視して，機器はバッテリ駆動方式とし，汚染拡大防止の観点からドライカットとしていた．しかしながら，長時間の安定した切出しを可能とするためにバッテリ駆動では不十分であること，ドライカットでは確実に試験片を切り出すことが困難であることから実機での経験を踏まえ改良することとした．具体的には，電源は，バッテリ駆動から遠隔コネクタを用いた有線による電源供給とすることで，切出し装置の長時間の安定した駆動が可能となった．また，ドライカットについては，水で希釈した切削油を用いることで確実な切出しが可能となった．さらに，開口部からのトリチウム放出低減の観点から，グリースによるセミドライカットを導入した．加えて，柔軟な切出しパラメータの変更を可能とする制御システムに更新した．以上の改良により，4 重容器構造である水銀ターゲット容器の先端部分を確実に切り出せるシステムを構築した．本報では，切出し試験装置の概要と運用経験に基づいた改良と，これまでに実施した水銀ターゲット容器からの試験片切出しの記録について報告する．

## 2. 試験片切出し装置

### 2.1 装置概要

使用後の水銀ターゲット容器は，陽子及び中性子によって高度に放射化しているため，試験片の切出しは，遠隔操作で実施する必要がある．試験片を切り出す際に，開口部から冷却水や水銀が漏洩して周囲に汚染が拡がることを抑止するため，切出し方法は Fig. 2 に示すように水銀ターゲット容器をターゲット台車に取り付けた状態で水平方向に加工する方式とした [9]．試験片の切出しに用いる切出し装置を Fig. 3 に示す．

装置は，切出し時にターゲット交換台車に設置して使用する本体側と，マスタースレーブマニピュレータ（MSM）により試験片の洗浄などを実施する作業台側との分割構造となっており，組み合わせた際の大きさは W2100×D720×H1480 mm であり，重量は約 2t である．本体側には，ドリルマシン，横行駆動装置，及び制御装置を備え，無線 LAN によりホットセル外部から運転制御が可能である．作業台側は，本体側を MSM でアクセス可能な位置に仮置きする架台を備え，試験片に付着した水銀を除去するための超音波洗浄機を備えており MSM による電源 ON-OFF 操作が可能である．

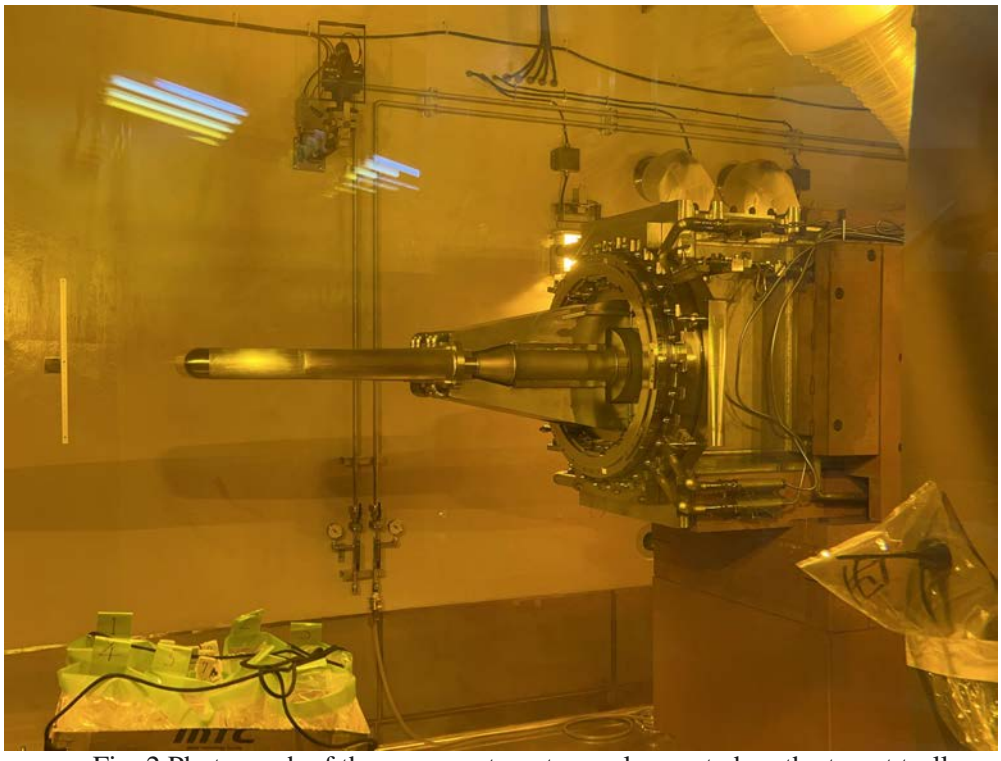


Fig. 2 Photograph of the mercury target vessel mounted on the target trolley.

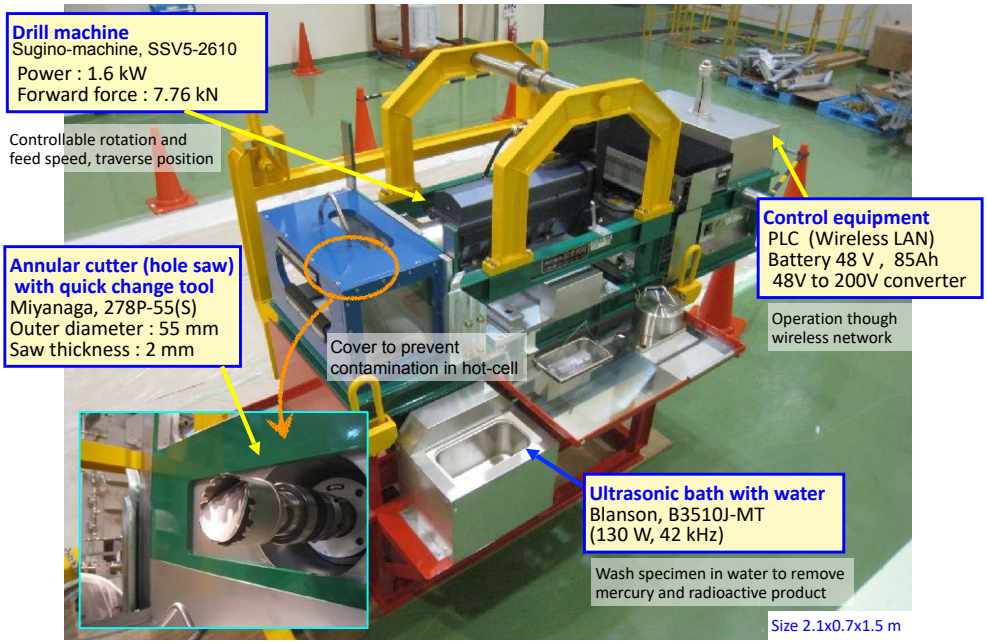



Fig. 3 Photograph of the cutting machine.

### 2.1.1 ホールソー

ビーム窓部分からの試験片切出しには，パイプなどの曲面の穴開けに適した懐の深いホールソー（Miyanaga, 278P-55(s)）を用いた．先端にはタングステンカーバイド製のチップ 12 枚がろう付けされている．先端部は湾曲していることと，外観では分からない多重壁構造容器の製作時に生じた内壁の位置ズレ，切出し時の高さ方向の位置ズレなどが生じても確実に水銀容器を切り抜けるように，ホールソーの外径は 55 mm を選定した．刃の厚さが約 2.5 mm であり，外径約 50 mm の試験片を切り抜くことができる．なお，水銀容器内側の高さが 4 号機までは 77.6 mm，水銀容器先端が 2 重壁構造となった 5 号機以降は 63.6 mm である．

実機の切出しに用いたホールソーの写真を Fig. 4 に示す．刃の先端部分が側筒よりも厚くなっており，細かい切粉や切削油等は，側面の隙間から排出される．写真左側は，センタードリルがついた状態のもので，右側は表面に後述するコーティングを施した物である．センタードリルは，取り外しが可能な構造となっている．切粉を逃がす目的で，ホールソー側面にらせん状に溝が入っているクリンキーカッターの使用も検討されたが，側面に溝を設けるために刃を厚くする必要があり，切削抵抗が大きくなることから採用しなかった．

Fig. 4 Photograph of the annular cutters. Left cutter is equipped with a center drill, while right one is without center-drill and with coating.

### 2.1.2　ドリルマシン

ビーム窓先端部の切出しには，ドリルマシン（Sugino Machine, SSV5-2610）を用いた．サーボ送り式のドリルマシンで，回転出力 1.6 kW，前進推力 7760 N である．先端部に遠隔操作対応の工具クイックチェンジツールを備え，MSM によるホールソーの交換が可能である．高さ方向の位置決めは，ターゲット交換台車の位置決め機構を利用し，0.1 mm 単位の調整が可能である．横方向の位置決めは，横行駆動装置により微調整が可能である．横行のストロークは 400 mm 程度であり，ビーム窓中心以外からも試験片の切出しが可能である．

## 2.2　装置の改良

### 2.2.1　電源

切出し装置の製作時は，設置から切出しまでを全て遠隔操作で実施することから，本体側はバッテリー駆動とした．バッテリーの直流からコンバーターを介して 3 相交流 200 V と単相 100 V を生成し，それぞれドリルマシンと制御系を駆動する電源としていた．設計当初は，中央部のみ 1 箇所を切り出すことを想定していたが，ターゲット容器の構造が 3 重壁容器から 4 重壁容器に変更になり切出しに要する時間が長くなったことに加えて，中央部以外の場所も切出しをする可能性が生じた．このような場合，バッテリー駆動では，電圧低下により制御が不安定になったり，作業途中に充電が必要

となる．そこで，装置を長時間安定して駆動できるように，ターゲット交換台車や作業台へ設置後に電源ケーブルを接続して給電する方式に改造した．これによりバッテリーでは連続駆動時間が 1 時間程度であったが，制限無く使用できるようになった．

### 2.2.2　電源コネクタ

ケーブルによる給電は，作業台に設置した場合とターゲット台車上に接続した場合とで，それぞれ東側と西側の別の電源コネクタを用いる．ホットセルでの遠隔操作の経験を積み，作業者の技術が向上してきたことから，ケーブル接続には Fig. 5 に示すように通常の 3 相 200V 用プラグを採用し，遠隔操作試験も実施し問題ないことを確認していた．しかしながら，コネクタ位置は Fig. 5 右に示すように，ホットセルの窓から直視することは可能であるが，距離が離れているため操作性が悪く，実作業では，コネクタ接続に時間を要することが分かった．また，コネクタを床面に落下させた場合に，ピンの変形が生じることが分かった．そこで，Fig. 5 左下に示すように接続部を遠隔対応のコネクタ（LEMO 製，N シリーズ）に変更することで作業効率化を図った．ソケット部が MSM でアクセスしにくい位置にあるため作業者の技量を必要とすることには変わりが無いが，遠隔対応であるため操作性が向上した．

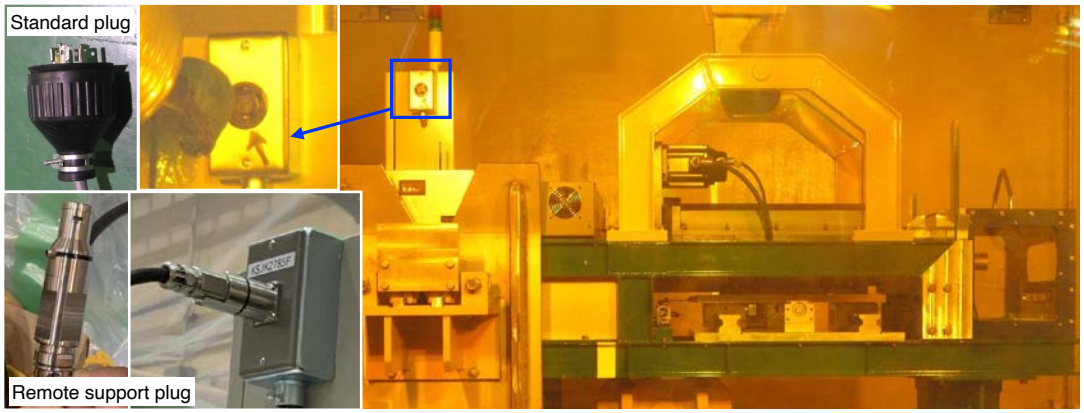



Fig. 5 Photographs of original (top side) and current (bottom side) power plugs for cutting machine.

### 2.2.3　制御

設計当初は，切出しの条件を頻繁に変更することは想定していなかったため，ドリルマシンのパラメータを変更するためには，ドリルマシン本体付近にある制御部にケーブルを接続してパラメータを変更する必要があった．また，ドリルマシンのインバータにエラー表示が出た場合は，本体側のエラー表示を確認し，主電源を落としての再起動操作が必要であり，全てを円滑に遠隔操作で行うことができない状態であった．

Fig. 6 Photographs of the control system for the cutting machine. Top right image is the screen of the touch panel, and bottom right image is the trend of the motor current.

そこで，制御装置やプログラムの更新を行い，無線 LAN で接続した操作部のタッチパネルから切出しの詳細なパラメータの設定，エラーコードの取得やエラー解除のための操作を実施できるようにした．また，実際の切出し時や条件を最適化するモックアップ試験の際に，モーターの電流値と切出し条件との関係を調べるために，モータ電流値のトレンド表示と測定データのテキスト出力をできるようにした．制御盤のタッチパネルを及びモーター電流のトレンド表示を Fig. 6 に示す．

切出し中にドリルマシンの負荷が大きくなると装置は過負荷停止する．当初は，過負荷停止時は装置を再起動し，ホールソーを原点まで復帰させて切出しを再開する制御としていたため，原点復帰時に咬み込んだホールソーの刃が折れる場合があった．ホールソーの刃が破損すると，刃の交換に 1 時間程度要することに加えて，容器側に咬み込んだ刃が新しい刃と干渉するため，同じ場所の切出しが困難になる．

そこで，過負荷停止を少なくするために，モーター電流値を監視し，瞬間的な過負荷を検知した場合にホールソーを瞬時に後退させることによって負荷を下げて過負荷停止を回避する制御を組み込んだ．また，過負荷停止時に手動でホールソーの後退や低速回転などの操作ができるように改良した．これにより刃の咬み込み時に，刃が折れないようにホールソーを引き抜いて切出しを再開できるようになった．

## 2.3　試験片切出しの手順

遠隔操作による水銀ターゲット容器からの試験片切出し手順の模式図を Figs. 7，8 に示す．MSM による操作性向上のため，ホットセル内に設置されている水銀配管を交換する際に使用する高さ約 1.2 m の架台を設置して床面をかさ上げした．この架台上に，大型機器取扱室から切出し装置本体を作業台側に設置した状態で搬入して設置する．人手による作業台周囲の養生や，使用機材の設置の後，ターゲット台車を後退して，Fig. 7(a) に示すようにターゲット容器交換に使用するターゲット交換台車をターゲット容器前方に設置する．次に，クレーンにて切出し装置本体をターゲット交換台車上に設置する (Fig. 7(b))．ターゲット容器先端部がホットセルの窓から目視できる位置に来るようにターゲット台車の位置を調整後，切出し装置を載せたターゲット交換台車をターゲット容器先端部に近づけて位置決めし，ホットセル外の制御盤操作で切出し装置を起動する (Fig. 7(c))．ターゲット容器先端部をホールソーで切り込んでいき，連続的にモニタリングしているホールソー先端位置とモーター電流値から容器を確実に切り抜いたことを確認し，装置を停止する (Fig. 7(d))．

切出した後は，準備の逆順で切出し装置本体を作業台を備えた架台に設置し (Fig. 8(a))，切粉飛散防止カバーを架台横へ移動してホールソーへアクセスできる状態として (Fig. 8(b))，MSM で切出した試験片が含まれるホールソーを取り出し，それぞれを超音波洗浄機で水洗浄する (Fig. 8(c))．洗浄後の試験片は，Fig. 8(d) に示す直径約 200 mm の簡易な遮へい容器に収納する．

試験片及び切粉は線量が高く人手で取り扱えないため，遠隔操作にてターゲット台車上に仮置きした後，作業者がホットセル入域し，超音波洗浄水の回収及び機器の除染作業を実施し，準備の逆順で切出し装置を搬出する．

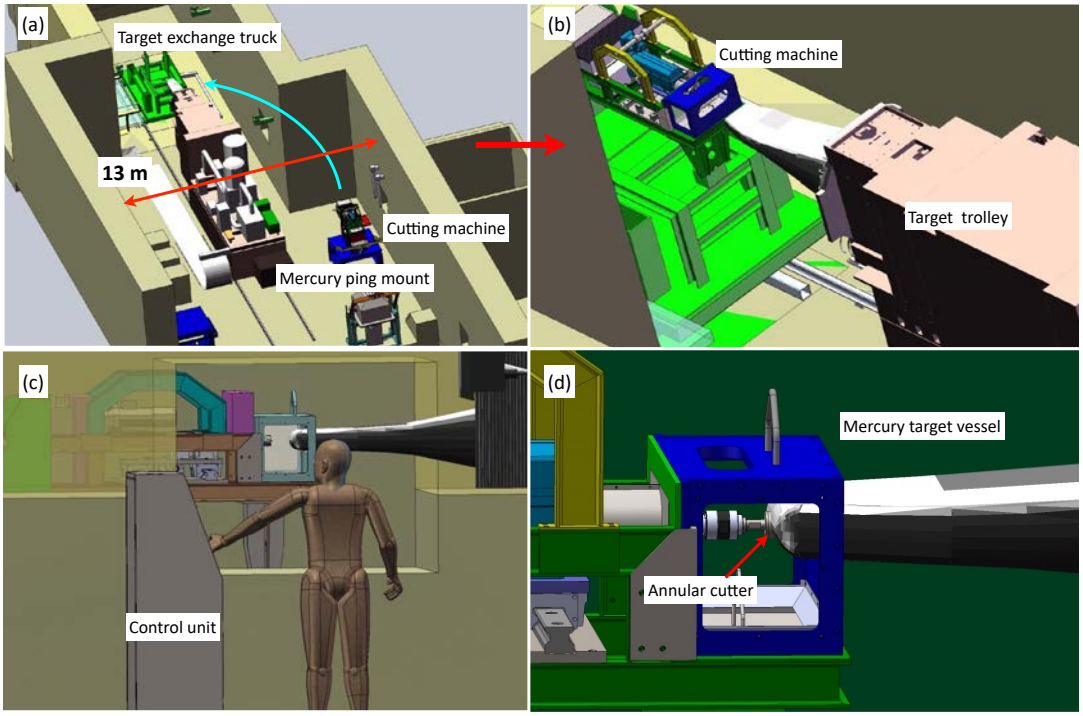



Fig. 7 Procedure of the beam window cutting for the mercury target vessel: (a) Birds-eye-view of hot cell in MLF, (b) Cutting machine placed on the target exchange truck, (c) Cutting machined control from outside of the hot cell, (d) Beam window cutting.

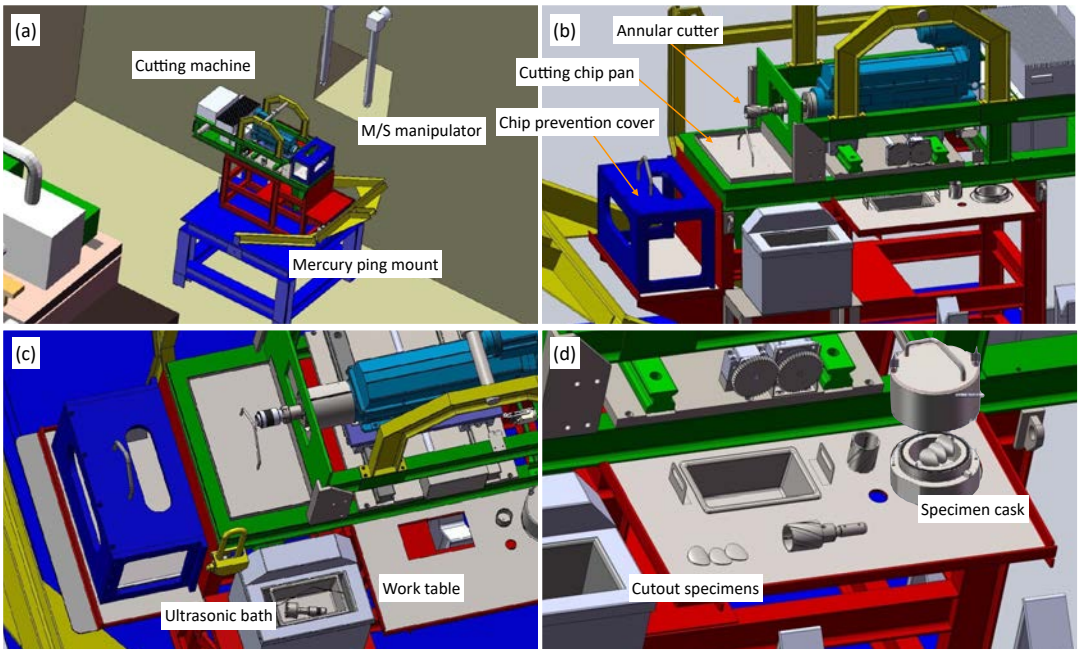



Fig. 8 Procedure of the clean up for the beam window cutting: (a) Cutting machine move back in front of manipulator, (b) Open the chip prevention cover and remove annular cutter, (c) cleaning annular cutter and cutout specimen in the ultrasonic bath, (d) store cutout specimens inside specimen cask.

# 3. モックアップ試験

## 3.1 試験装置

実機水銀ターゲット容器からの試験片切出しに用いる切出し装置は，作業後に入念な除染を実施しているが，機器の隙間に入り込んだ切粉等を完全に除去することがでず線量があるため，ビーム窓の模擬体を用いて繰返し実施する切出し条件の最適化などの作業を実施するのには適していない．

機器の汚染状況にとらわれず，ビーム窓模擬体を用いた切出し条件の最適化試験や，制御システムの更新及び動作確認試験等を安全且つ念入りに実施するために，実機で用いているドリルマシン及び制御装置と同型の機器を用意し，モックアップ試験に用いた．

Fig. 9 にモックアップ試験に用いている装置を示す．電源は 3 相 200 V を分電盤，またはコンセントから取れるようにし，ドリルマシンと制御装置の通信は実機と同様に無線 LAN としている．ビーム窓模擬体は，4 重壁容器の板厚及び曲率を模擬した形状を SUS316L インゴットのワイヤー放電加工により再現し，剛性の高い台座にボルト固定した．

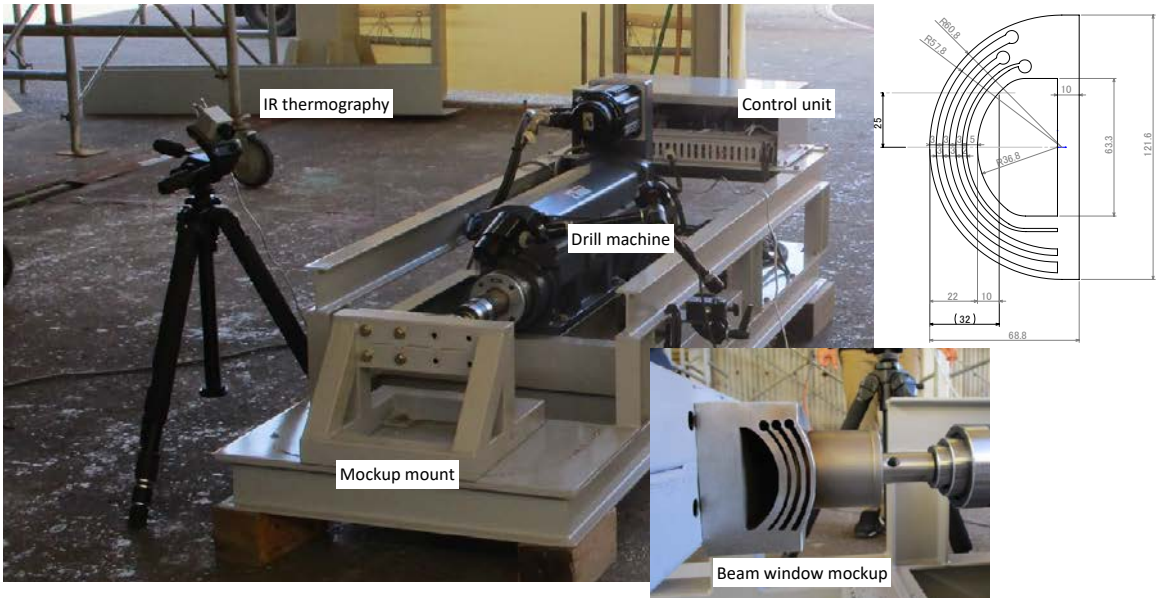



Fig. 9 Photograph of the cutting machine for the cold cutting tests.

## 3.2 試験条件

実機水銀ターゲット容器からの試験片切出しを確実に成功させるために，2017 年から 2022 年にかけて，切出し中の表面温度測定や，モーター負荷などのデータを記録しながら試験条件を変化させて，約 70 回のモックアップ試験を実施した．試験条件の一覧を Table 1 に示す．ドリルマシンの条

件としては，回転数，送り速度・送り量，戻り速度・戻り量，待機時間を系統的に変化させ，ホールソーの条件としては，切削油有無，センタードリル有無，コーティング有無，新品か再使用かでの比較を行った.

Table 1 Condition list for cold cutting tests (1/2)

| Date | Experiment ID | Purpose | Lubricant | Coating | Center drill | Cutting | Cutter | Cutter speed [rpm] | Feed rate [mm/s] | Feed pitch [mm] | Back rate [mm/s] | Back pitch [mm] | Wait [s] | Max temp cutter [degC] | Result |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2017/09/05 | 1 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 400 | 1 | 0.1 | - | - | 3 | 182.9 | × |
| 2017/09/05 | 2 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 1 | 0.1 | - | - | 3 | 160.4 | × |
| 2017/09/05 | 3 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 1 | 0.1 | - | - | 3 | 161.2 | × |
| 2017/09/05 | 4 | Spray Lubricant test | Tapping spray | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 1 | 0.1 | - | - | 3 | 190.5 | ○ |
| 2017/09/08 | 5 | Emulsion lubricant test | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | 224.5 | ○ |
| 2017/09/08 | 6 | Emulsion lubricant test | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | 147.2 | ○ |
| 2017/09/08 | 7 | Emulsion lubricant test | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | 95.4 | × |
| 2017/09/08 | 8 | Emulsion lubricant test | Emulsion | none | ϕ10 | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | 182 | ○ |
| 2017/09/14 | 9 | Emulsion lubricant test | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | 102.1 | ○ |
| 2017/09/15 | 10 | Battery test@MLF | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| 2017/09/15 | 11 | Battery test@MLF | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2018/08/29 | 1 | Reproducibility check | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | × |
| 2018/08/29 | 2 | Reproducibility check | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| 2018/08/29 | 3 | Reproducibility check | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| 2018/09/05 | 4 | Cutting test@MLF | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| 2018/09/05 | 5 | Cutting test@MLF | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| | | | | | | | | | | | | | | - | |
| 2019/09/04 | 1 | Lubricant vacuuming | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| 2019/09/04 | 2 | Lubricant vacuuming | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| 2019/09/04 | 3 | Lubricant vacuuming | Emulsion | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | - | - | 3 | - | ○ |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2020/02/26 | 1 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | - | | ○ |
| 2020/02/26 | 2 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | - | | × |
| 2020/02/27 | 3 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 200 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 0.03 | - | | × |
| 2020/02/27 | 4 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.1 | 0.03 | - | 181.9 | × |
| 2020/02/27 | 5 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 300 | 0.03 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | - | 179.4 | × |
| 2020/02/27 | 6 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | - | 186.8 | △ |
| 2020/02/28 | 7 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.01 | 0.1 | - | - | - | 241.8 | ○ |
| 2020/02/28 | 8 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | - | - | - | 265.7 | × |
| 2020/02/28 | 9 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.01 | 0.1 | - | - | - | 221.8 | × |
| 2020/02/28 | 10 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.01 | 0.1 | - | - | - | 215 | × |
| 2020/02/28 | 11 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.01 | Arbitrarily | - | - | - | 239.8 | × |
| 2020/02/28 | 12 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.01 | Arbitrarily | - | - | - | 175.3 | △ |
| 2020/03/27 | 13 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | -0.01 | 1 | 244.9 | ○ |
| 2020/03/27 | 14 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | -0.01 | 1.5 | 212.6 | × |
| 2020/03/27 | 15 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | -0.01 | 1.5 | 113.4 | × |
| 2020/03/27 | 16 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.1 | -0.01 | 1 | 274.7 | ○ |
| 2020/03/27 | 17 | Coating test | none | OS-CⅡ | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 227.1 | × |
| 2020/03/27 | 18 | Coating test | none | ALNOVA | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 272.9 | × |
| 2020/03/27 | 19 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 238.1 | ○ |
| 2020/05/13 | 20 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 203 | × |
| 2020/05/13 | 21 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 2nd cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 170.9 | × |
| 2020/05/13 | 22 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 275 | × |
| 2020/05/13 | 23 | Coating test | none | ALNOVA | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 123.9 | × |
| 2020/05/13 | 24 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 241.5 | × |
| 2020/05/13 | 25 | Coating test | none | ALNOVA | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 190.6 | × |
| 2020/05/13 | 26 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 275 | ○ |
| 2020/08/04 | 27 | Dry cut test | none | none | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 122.4 | × |
| 2020/08/04 | 28 | Dry cut test | none | none | none | 2nd cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 133.9 | × |
| 2020/08/04 | 29 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 154.4 | ○ |
| 2020/08/05 | 30 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 220.3 | × |
| 2020/08/05 | 31 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 2nd cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 220.3 | × |
| 2020/08/05 | 32 | Coating test | none | ALCRONA PRO | none | 3rd cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 133.8 | × |

Table 1 Condition list for cold cutting tests (2/2)

| Date | Experiment ID | Purpose | Lubricant | Coating | Center drill | Cutting | Cutter | Cutter speed [rpm] | Feed rate [mm/s] | Feed pitch [mm] | Back rate [mm/s] | Back pitch [mm] | Wait [s] | Max temp cutter [degC] | Result |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2020/08/05 | 33 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 2nd cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 119.7 | ○ |
| 2020/08/05 | 34 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 149.4 | ○ |
| 2020/08/06 | 35 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 2nd cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 131.4 | ○ |
| 2020/08/06 | 36 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 209.5 | △ |
| 2020/08/06 | 37 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 182.1 | △ |
| 2020/08/06 | 38 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 137.8 | ○ |
| 2020/08/07 | 39 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 168.4 | △ |
| 2020/08/07 | 40 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 180.1 | ○ |
| 2020/08/25 | 41 | Grease test | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 157.2 | ○ |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2021/08/24 | 1 | Reproducibility check | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 198.1 | ○ |
| 2021/08/24 | 2 | Recovery test from 3rd layer | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø45 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 152.7 | ○ |
| 2021/08/24 | 3 | Recovery test from 3rd layer | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø40 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 128 | ○ |
| 2021/08/24 | 4 | Reproducibility check | Grease | ALCRONA PRO | none | 2nd cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 112.9 | ○ |
| 2021/08/25 | 5 | Prepare cutter for actual cut | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 176.8 | ○ |
| 2021/08/25 | 6 | Prepare cutter for actual cut | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 192 | × |
| 2021/08/25 | 7 | Recovery test from 3rd layer | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø45 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 275 | × |
| 2021/08/25 | 8 | Prepare cutter for actual cut | Grease | ALCRONA PRO | none | 1st cut | ø55 | 250 | 0.03 | 0.1 | 0.01 | -0.01 | 1 | 178.1 | ○ |

### 3.3　表面温度測定

切出し時の温度が高くなると刃の劣化が早まり多重容器の切出しが困難になる．また，試験片が高温に晒されることで将来的に実施する予定の試験片の力学特性評価の結果にも影響があると考えられる．そこで，切出し条件によるビーム窓模擬体及びホールソーの温度上昇の違いを評価するために，赤外線サーモグラフィー（Optris, PI450）を用いて連続的に表面温度の測定を実施した．測定レンジは 0~250°C，サンプリングは 10 秒間に 1 フレームとし，各フレームでは測定値を時間平均する設定とした．Fig. 9 に示したようにホールソーと模擬体が視野に入るようにサーモグラフィーを設置して撮影することで得られる温度分布（Fig. 10）から，模擬体とホールソー側面が入るように設定した測定範囲内における最大温度の時刻歴変化を評価した．

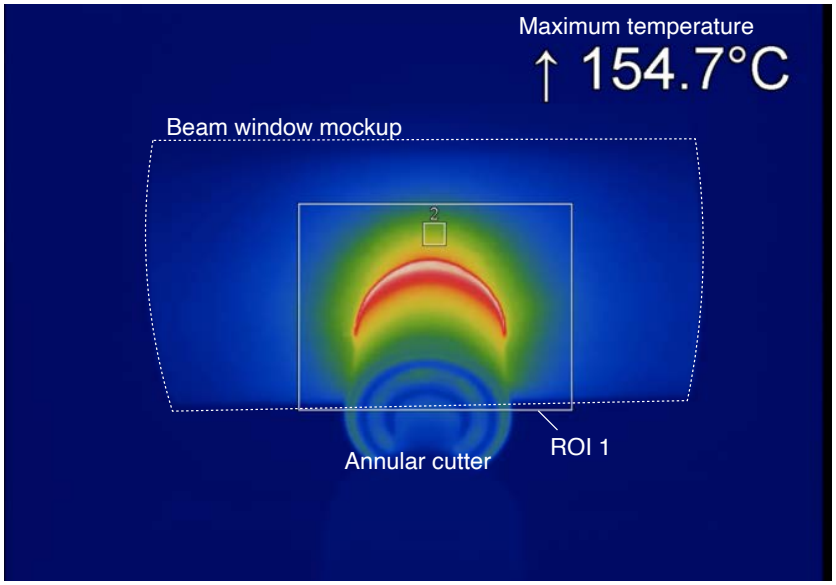



Fig. 10 Temperature distribution obtained by the thermography during the beam window cutting.

### 3.4　切削油使用の検討

実機からの試験片切出しについては後述するが，完全なドライカットでは，摩擦熱による刃先の損傷，超硬チップの割れ，刃の咬み込みによる過負荷停止などにより，4 重壁構造容器を確実に切出すことが困難であった．Fig. 11 に完全なドライカットで切出したホールソーの写真を示す．摩擦による温度上昇の影響を受けて，ホールソー側面に焼き色がついているのを確認できる．そこで，切出し時の摩擦低減と刃先の冷却のために，切削油の使用を検討することにした．

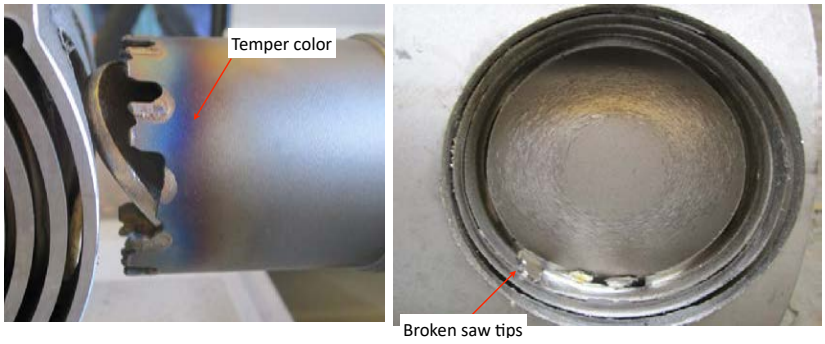



Fig. 11 Photograph of the annular cutter and the beam window mockup after dry cutting.

### 3.4.1　スプレー式切削油の検討

まず，切削油の効果を確認するための基礎試験として，ボール盤での穴開け加工等で使用するスプレー式の切削油（モノタロウ，タッピングスプレーステン加工名人）を用いて切出しを実施した．ホットセルでは遠隔操作による切出しを行うことを想定して，ビーム窓模擬体とホールソー側面との隙間に断続的にスプレーを噴霧しながら切出し試験を実施した．Fig. 12 に切出し試験時の写真及びスプレー噴霧有無によるホールソー表面温度の比較結果を示す．Fig. 11 に示したドライカットと比較し，切削油噴霧時は Fig. 12(b),(c) に示すようにホールソー及び試験片に焼き色は見られず，温度上昇が抑えられていることが確認できた．

また，Fig. 12(d) に示すドライカット時の温度及びモーター電流値の履歴と比較して，切削油使用時（Fig. 12(e)）は，モータの負荷を抑えられており，摩擦を低減できていると考えられる．一方，温度については，ドライカット試験時は刃の損傷及び過負荷により装置が停止し，完全に切り抜くことができなかったため，ホールソー側面温度の最高温度は切削油使用時の方が高くなっているが，切出し開始後の温度上昇は切削油使用時の方が緩やかであり，過負荷により停止することなく 4 重壁容器を切り抜くことができた．

### 3.4.2　エマルジョン型切削油の検討

実機の切出しにおいて，スプレー式の切削油を断続的に供給する場合には，意図しない温度上昇等により切削油が燃えて火災になる可能性が考えられたため，切削加工等で用いられている水希釈のエマルジョン型切削油を用いた試験を行った．切削油原液（トラスコ，メタルカット MC-5E）をステンレス鋼の切削に適した水での 10 倍希釈とした．噴霧方法は，噴霧量や頻度を制御可能な農薬散布用の噴霧器に約 10 m の延長ホースを取付け，ホットセルの外側から手動で噴霧する方式とした (Fig. 13(a)).

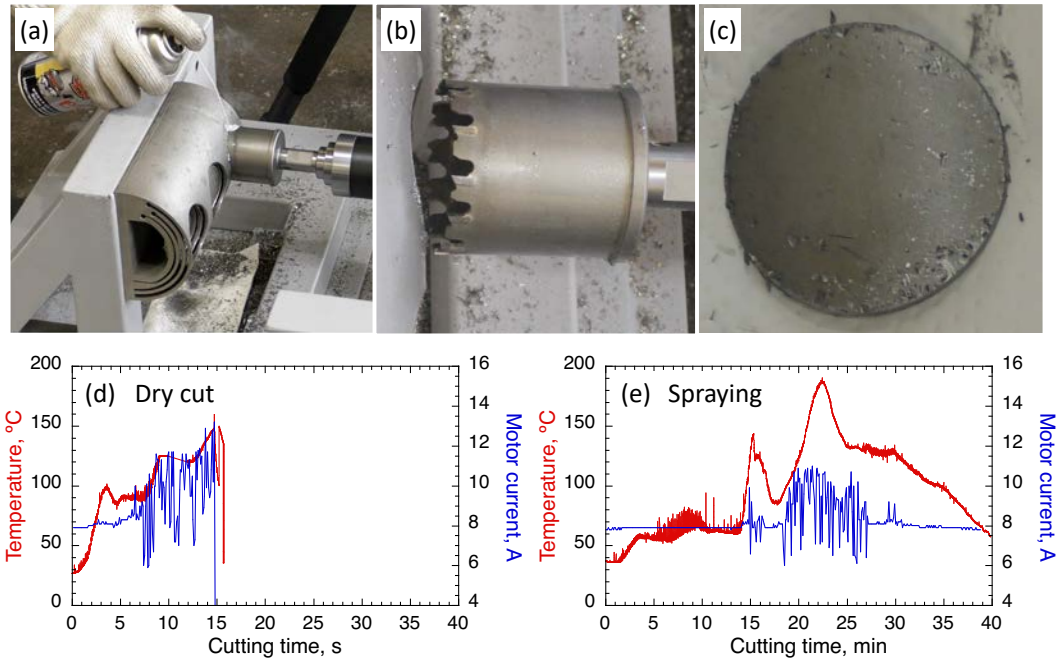



Fig. 12 Results of cutting experiments: photographs of (a) spraying lubricant, (b) cutter surface after cutting, (c) cutout specimen. Time histories of cutter surface temperature and motor current for (d) dry-cut and (e) with spraying cut.

連続的に切削油を噴霧することが理想であるが，実機では，循環式のポンプ等が設置されてないことと，既設の切粉を受け止める受け皿が液体を想定した深さではないため，使用量を意識しながら断続的に噴霧することとした．切削油噴霧から 30 秒程度経過すると，摩擦音が大きくなる傾向が見られ，再度噴霧すると摩擦音が低減することを確認した．噴霧量は 1 分毎にポンプを 1 プッシュで約 1L である．

Fig. 13(b) のようにホールソー上面から噴霧し，切削油の効果を確認する試験を実施した．切削時の摩擦音は，切削油を噴霧することで明らかに小さくなり，温度の高い刃先から冷却に伴う水蒸気が発生することを確認できた．切出し中のホールソー側面温度の時刻歴変化を Fig. 13(c) に示す．刃の先端がサーモグラフィーで確認できる 1 層目を切出している際は温度が約 150°C まで上昇しているが，刃の先端が見えなくなってからは温度の上昇はほとんど見られず，100°C 以下を維持したまま過負荷停止することなく 4 重容器を切り抜くことができた．切出し試験後のホールソーは，Fig. 13(d) に示すように変色や刃の欠け等は見られなかった．

### 3.4.3　切削油の引火性試験

実機での切出しは，遠隔操作にて実施するため，切出し中の異音や過度な温度上昇を把握することが難しい．引火性の強い切削油を使用した場合，火災につながることが懸念される．そこで，各切削

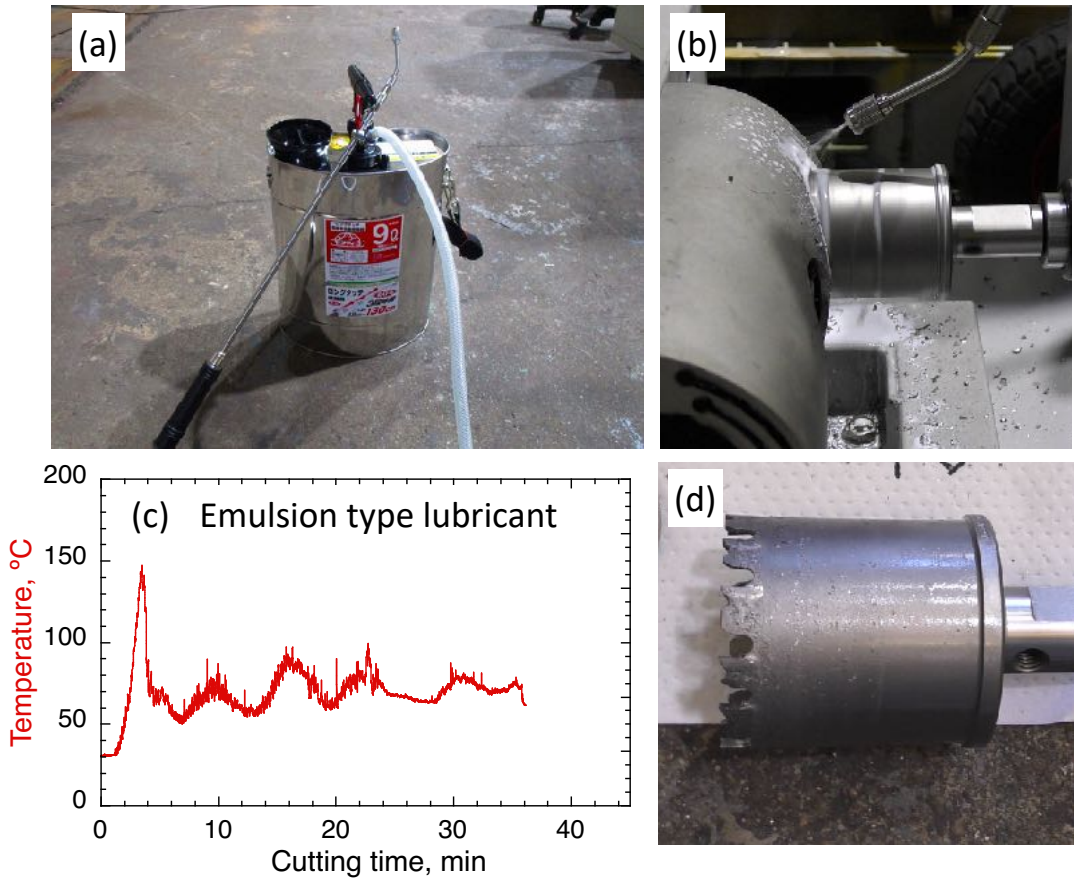



Fig. 13 Photographs and time history of the surface temperature for cutting test with emulsion type lubricant. (a) is the hand pump unit for lubricant, (b) splaying lubricant during cutting, (c) temperature time history during mockup test, (d) annular cutter after cutting.

油の引火性について，実際に火を近づけて調査した．

スプレー式の切削油は，噴霧直後では非常に引火性が高いことがわかった．これは，スプレーを噴霧させるために用いられている LPG の微細気泡が潤滑油中に混入しているためである．切削油単体では油なので長時間火を近づければ燃焼するが，引火性はあまり高くないことを確認できた．

エマルジョン型の切削油は，原液では引火性の第 4 石油類に分類されるため，容易に着火する．一方，水で 10 倍希釈した場合，水分の割合が高くなるために長時間火を近づけても着火することはなく，遠隔操作による切出しにおいて安全に使用できると判断した．

### 3.5　センタードリルの検討

ホールソーはもともとセンタードリル付きの製品を用意しているが，損傷が最も激しくなるビーム窓中央部に傷をつけることを避けるために，これまでセンタードリルを外して切出しを実施していた．

詳細は後述するが，3 号機の切出しにおいて切出した試験片が水銀容器内部に落下する事象が生じた．ホールソー中心にホールソーの刃先より飛び出したセンタードリルがついている場合は，ホールソーで切り抜いた際には，試験片にセンタードリルが確実に食い込んでいるために，落下することはない．

そこで．試験片が内部に落下することを防ぐために，センタードリルがついた状態での切出しの可能性について検討した．Fig. 14 にセンタードリル付きのホールソー及び切出し試験時の写真を示す．センタードリルを使用した場合，試験片の落下を防止する効果は高いが，センタードリルによってホールソー内部に入り込む切出した試験片の自由度がなくなり，切出しの負荷が大きくなること，また，過負荷停止時や刃の破損が生じた際に，ホールソーを完全に引き抜いた後に，再度同じ場所で切出しを再開した場合は，わずかな位置ズレがセンタードリルによる拘束を受けてチャック部分に負荷がかかり，ドリルチャックが外れて空転することがあり，センタードリルを付けることで全体的に切出しが難しくなることがわかった．

実際にセンタードリルの有無で切出し試験を実施した結果，センタードリル無しの方が確実に切出しできること，完全に切り抜いた後にホールソーの回転を続けてもホールソーから切出した試験片が落下することがなかったため，実機ではホールソーにセンタードリルを使用しないこととした．

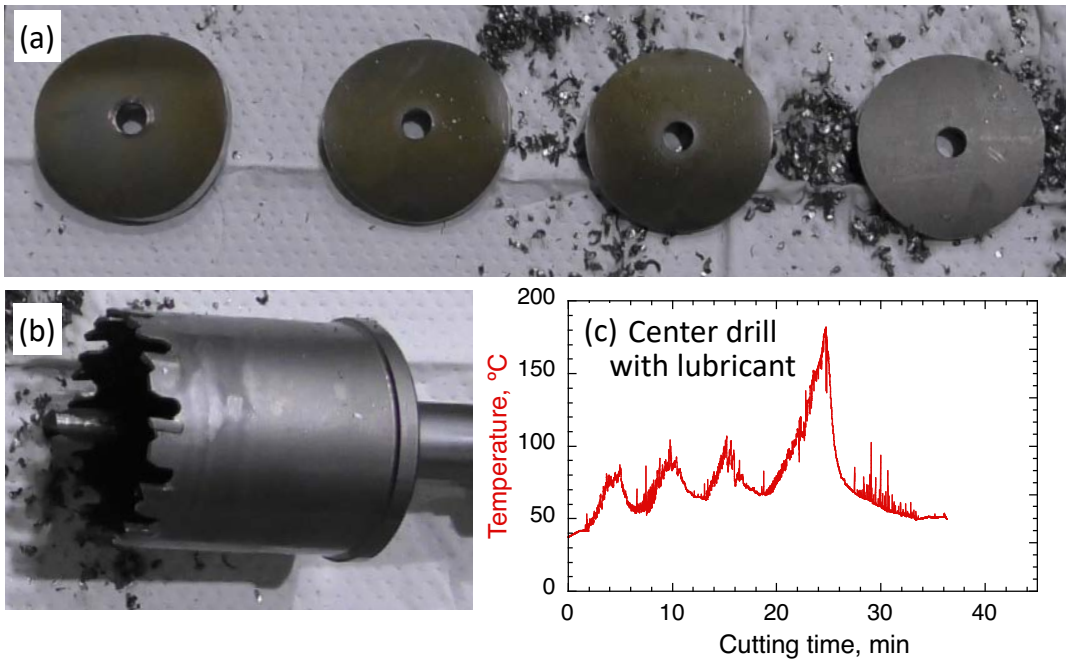



Fig. 14 Photographs of (a) cutout specimens and (b) annular cutter with center drill, and time history of the surface temperature on the cutter surface.

### 3.6　切削油の真空乾燥の検討

水銀ターゲット容器 2 号機及び 8 号機では，水ベースのエマルジョン型の切削油を用いて切出しを実施した．ターゲット容器の切出し時には，ターゲット容器内部のガスを気体廃棄処理設備へ引き込んで開口部の気流を制御する（気流制御）ことによって放射性ガスの放出を抑制している [10]．その結果，水銀容器内部に引き込まれた切削油の水分が，水銀循環系内部に蓄積されているトリチウムと結合する．このため，切出し作業に続いて実施される水銀ターゲット容器交換における水銀配管開放作業時に，通常の交換作業時と比べてトリチウムの放出量が増えることが分かった．そこで，モックアップ試験による切削油の流入量測定，開口部の閉止栓の気密試験及び真空乾燥試験を実施した．

#### 3.6.1　切削油の流入油量測定

Fig. 15 に模擬体による流入量測定時の写真を示す．通常のモックアップ試験に用いているターゲット容器先端部模擬体の両端をアクリル板で閉止して気密を取った状態で，噴霧量を変えて水銀容器の内部に流入する切削油量を調査した．更に，実機での気流制御による切出しを想定して，模擬体内部を実機での気流制御条件に近い 5 L/min で真空排気しながらの試験を実施した．水銀容器先端部は 2 重壁構造となっていることから，外側に近い狭隘流路部，及び内側のバルク側にそれぞれドレンラインを設け，流入量を測定した．ここで，冷却水層である外側 2 層は閉止してあるが，ドレンラインを設けていないため，冷却水層に充満した切削油は水銀層へ流入し，実機よりも水銀層への流入量が多くなる可能性があることに注意が必要である．各試験における噴霧量と流入量の関係を Table 2 に示す．模擬体内部が大気圧の場合は，噴霧量に対して 6% 程度流入し，そのほとんどが水銀容器の外側である狭隘流路側であった．ただし，狭隘流路側とバルク側はつながっているので流入比によってトリチウムの生成への影響は変わらないと考えられる．

一方，気流制御を想定して 5 L/min で真空引きしながら実施した試験では，大気圧下と比べて 2 倍程度流入量が多くなり，総噴霧量の約 14% が流入することがわかった．なお，真空引き条件では，狭隘流路側衣及びバルク側のドレンラインは閉止した状態で試験を実施したため，バルク側に設置された真空ラインに全量が流入した．そのため，フィルター部分で回収した切削油を計量している．

Table 2 Results of inflow lubricant measurement using beam window mockup.

| Pressure | Sprayed lubricant [ml] | Narrow channel inflow [ml] | Bulk side inflow [ml] | Total inflow [ml] | Inflow rate [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Atmospheric | 1000 | 55 | 0 | 55 | 5.5 |
| Atmospheric | 2000 | 125 | 5 | 130 | 6.5 |
| Vacuuming | 2000 | – | – | 275 | 13.8 |

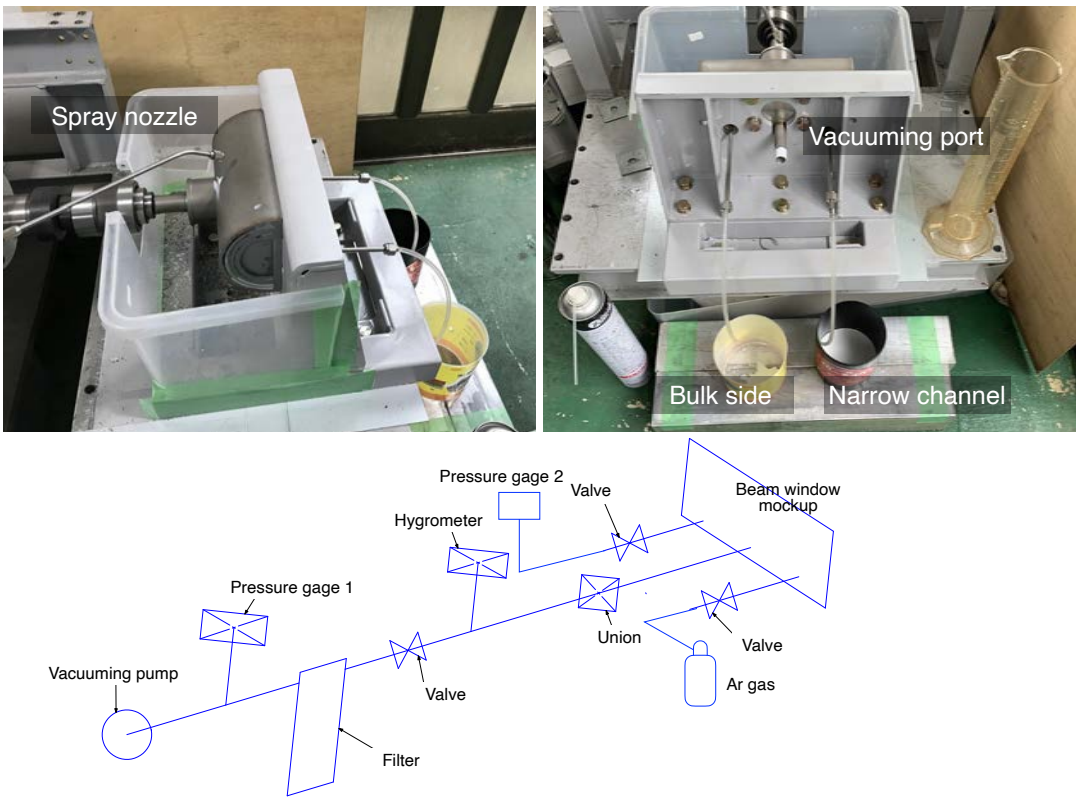



Fig. 15 Photographs of lubricant inflow measurement into mercury vessel. Bottom figure denotes layout of vacuum drying test.

### 3.6.2　閉止栓の気密確認試験

実機水銀ターゲット容器の切出し時に水銀層へ流入した切削油から水分を除去するためには，水銀の系統内を真空乾燥することが有効であると考えられる．しかしながら，切出し後は開口部があるため，真空を維持できない．これまで，切出し実施後から，ターゲット容器交換までの間に開口部からトリチウムの放出を抑制するため，シリコンゴム製の栓で開口部を閉止している．この閉止栓が真空乾燥のための水銀系統の真空引きに対応可能かを確認するために気密試験を実施した．

実機の切出しで用いている閉止栓を Fig. 16(a) に示す．開口部に接する部分はシリコンゴムとし，その他の部分はステンレス製である．MSM により開口部に差し込んだ後，端部のネジを締め込むことで，ゴムが圧縮され開口部に接する部分の直径が増加し，気密性の確保と抜け落ち防止になる．

Fig. 15 で試験を実施した模擬体に閉止栓を挿入し，真空引き後の圧力変化からリーク量を測定することで気密性を評価した．閉止栓端部のネジは，MSM で回すことを想定した力加減で締め込んだ．模擬体の内部の圧力変化からリーク量を測定した結果を Fig. 16(b) に示す．リーク率は 2 回の試験で $5.3\times10^{-2}$ [Pa·m$^3$/s] 及び $3.7\times10^{-2}$ [Pa·m$^3$/s] であり，$10^{-2}$ オーダーの気密性があることを確認した．

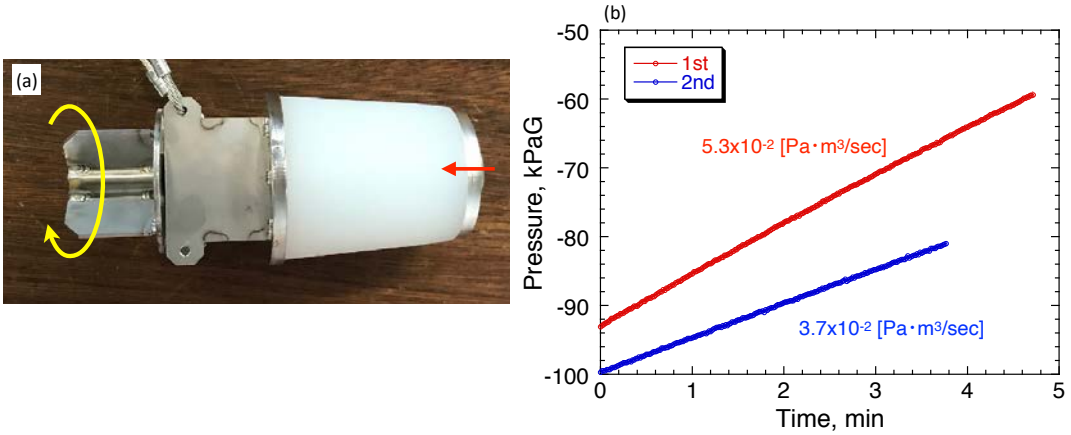



Fig. 16 (a) Photograph of rubber plug for the through-hole of the target vessel, and (b) pressure change as a function of the elapsed time.

### 3.6.3　真空乾燥試験

更に，水銀系統の真空乾燥のための予備試験として，模擬体内に切削油が残留した状態で閉止栓により開口部を閉止し，模擬体に接続した Fig. 15 に示すレイアウトで模擬体内部を真空排気し，圧力と湿度の変化を調べた．真空乾燥試験の代表的な結果として，Fig. 17 に真空排気に伴う，圧力，湿度，温度の経時変化を示す．容積が小さいため，真空排気直後に内部の圧力は低下し，その後，温度及び湿度が低下し始める．真空排気開始約 10 分後に，アルゴンガスで内部を置換した際に圧力が上昇すると，圧力変化に追従して湿度もすぐに上昇した．真空排気開始 30 分以降では，アルゴン置換時の湿度上昇は緩やかになり，長時間の真空排気により水分をある程度除去することができると見込まれる．従って，実機ターゲットでは，試験片の切出しを行った後，水銀循環設備内を長時間真空排気することで，切出しに伴って流入した水分を除去し，ターゲット容器交換時のトリチウムの放出を低減できると考え，ターゲット容器 9 号機からの試験片切り出し時には．真空乾燥を実施することにした．

## 3.7　ホールソーへのコーティングの検討

水銀ターゲット容器 9 号機の切出しでは，水ベースの切削油を使用すると共に，ターゲット容器交換前に水銀系統の真空乾燥を実施し，水分を除去することでターゲット容器交換時のトリチウム放出をこれまでより低減することができた．しかし，この方法では多量のトリチウムを含むガスが気体廃棄物処理設備へ流入するため，気体廃棄物処理設備でのトリチウム除去運転や，放出量を制御しながらのスタックへの排気など，水銀ターゲット容器の交換に付随する作業に時間がかかり，結果としてターゲット容器交換に要する期間が長くなる．

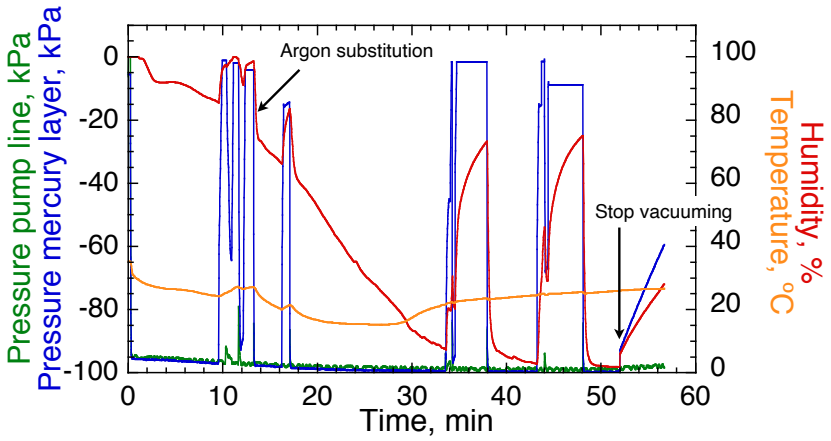



Fig. 17 Time histories of pressure, temperature, and humidity inside the beam window mockup during vacuuming.

そこで，切削油を用いないドライカット方式を再度検討することにした．これまでにモックアップ試験や実機の切出しを実施したときに，ドライカットで水銀ターゲット容器の切出しができなかった原因は，刃とターゲット容器との摩擦による温度上昇が主な原因であると考えた．摩擦によって温度が上昇すると，切削対象であるターゲット容器の熱膨張で刃先の側面の摩擦がより大きくなること，刃先の過度な温度上昇によって，ろう付けされた超硬チップが母材と超硬の熱膨張率の違いにより剥がれることが考えられる．実際，完全なドライカットでは，刃の側面に焼き色が付くような温度上昇が確認されたり，超硬チップが付け根からはがれることによって，切削部に咬み込み，過負荷停止や刃先の破損が生じた．

切削油を用いずに摩擦を軽減するためには，刃の表面に耐摩耗性・耐熱性に優れたコーティングを施すことが有効である．J-PARC と同様に使用済みの水銀ターゲット容器から試験片の切出しを実施している米国の SNS では，刃先に冷却水を噴霧しているが，それに加えてホールソー表面にコーティングを施しているとの情報を得ている．

ドライカットによるコーティング効果の確認，及びコーティング材の選定を行うために，日本国内で施工可能な切削工具用のコーティングを調査し，モックアップ試験に用いるホールソーに施工して切出し試験を実施した．試験に用いたコーティングを Table 3 に示す．アルクローナプロは切削工具のコーティングにおいて世界シェア約 80% のコーティングであり，SNS でも実機の切出しに採用されている．

Fig. 18 に同じ条件でコーティング有無を比較した結果を示す．コーティングなしでは，ホールソー側面に温度上昇による焼き色がついていることを確認できる．一方，コーティングを施すと，サーモグラフィーで観測できる範囲の刃の側面温度は，コーティングなしの場合と比較してわずかに低い程度であるが試験終了後もホールソー側面の変色は見られない．また，コーティングなしの場合は，切出し中にモーターの過負荷により自動停止し，再起動しても刃の咬み込みにより再度過負荷停止し

Table 3 List of coatings for the cold cutting tests.

| Name | Manufacture | Material | Thickness [μm] | Hardness [Hv] | Friction coefficient[-] | Oxidation temp. (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BALINIT ALCRONA PRO | Oerlikon balzers | AlCrN | 3 | 3400 | | 1100 |
| BALINIT ALNOVA | Oerlikon balzers | AlCrN | | 3590 | | 1100 |
| OS-CII | Onward Giken | TiAlN | 3 | ~2500 | 0.4 | 1000 |
| OS-T | Onward Giken | AlCrN | 0.5 | 3500 | 0.55 | 1100 |

た．一方，コーティングを施した場合は，3 層目を切り抜いた際に，切り抜いた試験片が挟まり過負荷停止したが，再起動すると 4 層を切り抜くことに成功した．図はアルクローナプロの結果である．他のコーティングについては 1 回のみ試験を実施したが，全て刃が破損し切り出すことができなかった．また，複数回実施したアルクローナプロの試験では，過負荷停止せずに切出しに成功した結果はほとんどなく，コーティングだけでは確実に切り出すことは困難であると判断した．そこで，コーティングに加えて持続的に摩擦を低減するために，粘度の高いグリースを塗布することが有効であると考えた．

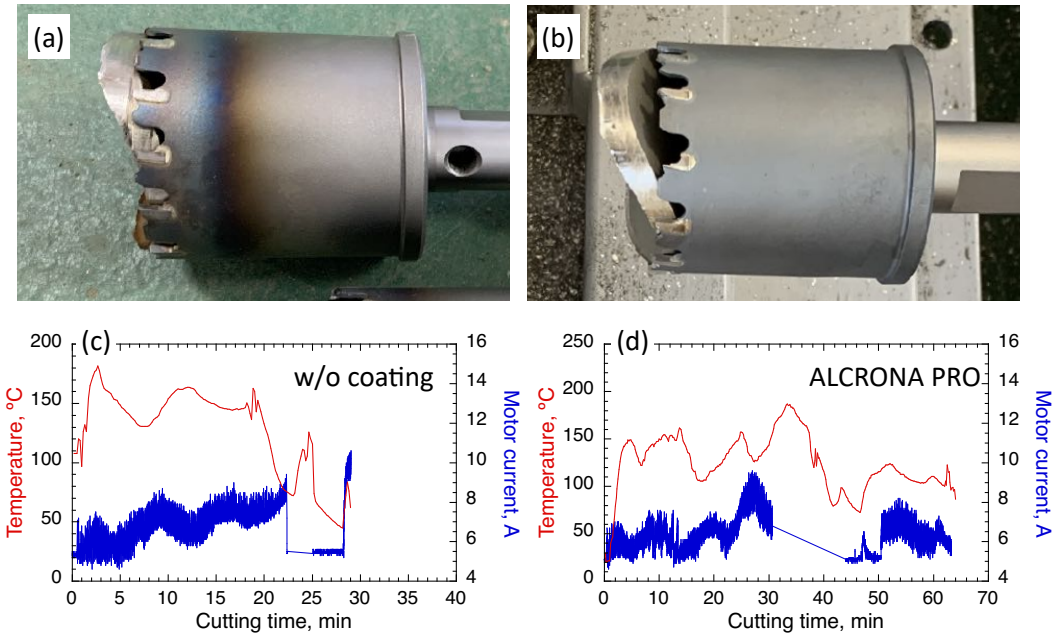



Fig. 18 Photographs of annular cutters after cutting test for (a) without coating and (b) coated by ALCRONA PRO. (c) and (d) are the time histories of cutter surface temperature and motor current during cutting tests.

### 3.8　グリース使用の検討

刃の耐久性向上及び温度上昇の抑制にコーティングが有効であることは分かったが，確実に 4 重壁容器を切り抜くには十分でなかったため，更に摩擦を低減することを目的として，摺動部などの潤滑に用いるモリブデングリースに着目した．ちょう度が高い（粘度が低い）グリースをホールソーに塗布した場合，ホールソーの回転により飛散するが，ちょう度の低いグリースを用いれば，飛散せずに刃の周囲に留まり潤滑に寄与すると期待した．

試験では，ちょう度 No. 3 程度のグリースをホールソーの刃先及び側面に薄く均一に塗布し，模擬体による切出し試験を実施した．塗布方法の比較として，コーティングによる切出し試験で最適化した切削条件のもと，グリースなし，ホールソー内外面に塗布，ホールソー外面のみに塗布の 3 条件で比較を実施した．

試験中のホールソー表面の温度変化及びドリルマシンのモーター電流値を Fig. 19 に示す．ホールソーは全てアルクローナプロでコーティングしたものを用いた．(a) のグリース無しでは，切出し開始直後に表面温度が急激に上昇するのに対して，(b) と (c) に示すようにグリースを塗布した場合は，やや緩やかに上昇する．また，(b) 内側及び外側にグリースを塗布した場合，(c) 外側だけに塗布する場合と比較して，温度上昇及びモーター負荷を抑える効果が高く，外側のみの場合は過負荷停止があった．

また，(b) の試験で使用したホールソーに外観上の損傷が見られなかったことから，(b) と同じ条件でホールソーを再使用した試験の結果を Fig. 19(d) に示す．一度使用したホールソーでは，新品の場合と比較して温度上昇及びモーター負荷が小さく，切出し時の騒音も小さくなった．その傾向は，複数回実施した試験で再現性があることを確認した．この理由は，一度使用したホールソーは，新品と比較して，側面の超硬を接合しているろう材部分の摩耗や刃先のわずかな摩耗により，抵抗が減るためと考えられる．したがって，実機の切出しでは，モックアップ試験で一度使用したアルクローナプロのコーティングを施したホールソーの内外面にグリースを塗布して使用することにした．

ホールソーにグリースを塗布すると，切出した試験片にもグリースが付着する．相対的な比較ではあるが，グリースの塗布量によって，試験片に付着するグリースの量がどの程度変化するかを調べた．Fig. 20 にグリースをホールソー内外側面に多量に塗布した場合と，薄く均一に塗布した場合の切出し後の試験片の写真を示す．どちらの試験も過負荷停止することなく切り出すことができた．グリースを多量に塗布した場合は，試験片外周部だけでなく，損傷観察面までグリース及び切粉が付着することがわかった．一方，適量塗布した場合は，グリース及び切粉の付着は主に試験片外周部に限定的であった．また，適量塗布の場合でも切出し試験後にホールソー側面にグリースが残留することが確認できたため，損傷を観察しやすいように薄く均一に塗布することにした．

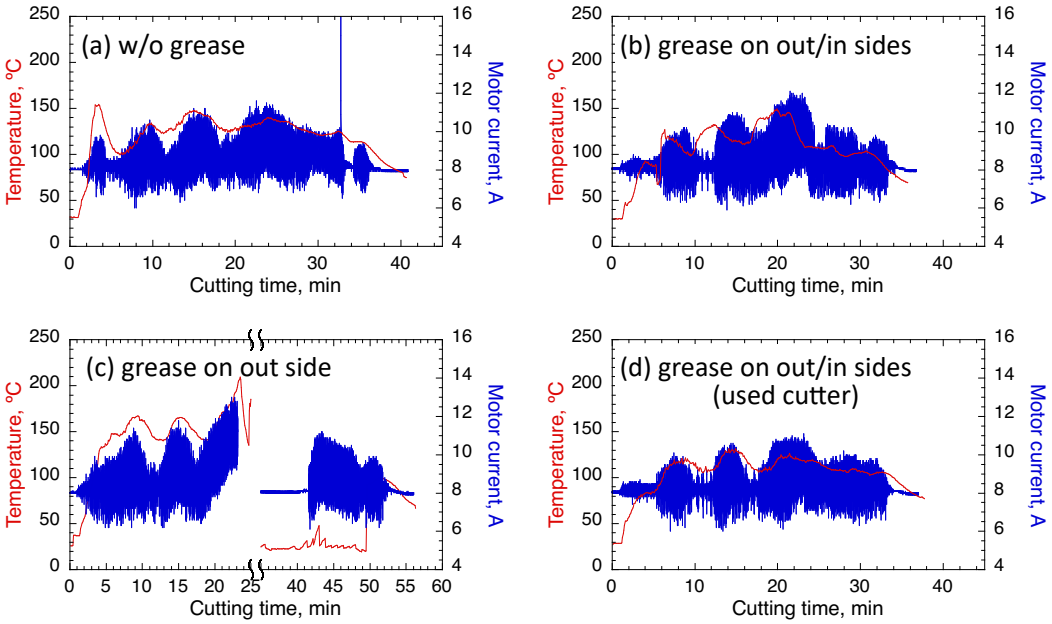



Fig. 19 Time histories of surface temperature and motor current during the cutting tests for (a) without pasting grease, (b) grease pasted on inner and outer side of annular cutter, (c) grease pasted on outer side of annular cutter, (d) grease pasted on inner and outer side of annular cutter using used cutter.

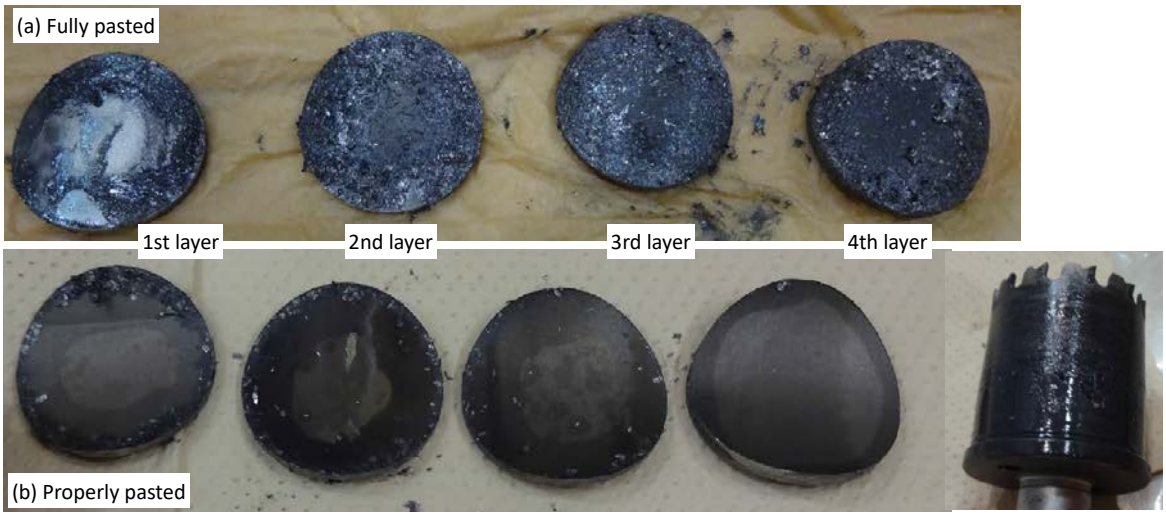



Fig. 20 Photographs of cutout specimens (a) fully amount of grease pasted on the annular cutter and (b) properly amount of grease pasted. Right side cutter shows after cutting test under the condition of (b).

### 3.9　切削油の洗浄に関する検討

実機ターゲット容器で切出した試験片は，水銀や付着した切粉を除去するために水中で超音波洗浄する．切削油またはグリースを塗布して切出しを実施した場合，水による洗浄だけでは油分を完全に除去することができず，カメラによる損傷観察や，詳細な損傷観察のためのレプリカ採取に支障が出る．

油分の除去にはエタノールによる超音波洗浄を実施するのが効果的であるが，可燃性であるため，ホットセル内での大量且つ長時間使用は望ましくない．そこで，脱脂効果の高いスプレー式のパーツクリーナーを使用することとした．モックアップ試験で切出したグリースが付着した試験片に対して，洗浄効果の確認試験を実施した．Fig. 21(a)~(c) にパーツクリーナーによる洗浄前後の写真を示す．ノズル先端を試験片に近づけて噴霧することによって試験片表面に付着したグリースも除去できることを確認した．

また，実機の切出し後の洗浄では，MSM でスプレー缶を直接操作することは困難であるため，Fig. 21(d) に示すような MSM で操作できる噴霧装置を用意した．MSM で上端部を下に押すか，つまみ部分を掴むことによってホース先端からパーツクリーナーを噴霧することが可能である．

### 3.10　試験片がターゲット容器内に落下した場合の対策

3 重壁構造容器であるターゲット容器 3 号機の切出しでは，3 重壁全体を切り出すことができたが，損傷が形成された水銀容器側の試験片が水銀容器内に落下した．完全なドライカットで実施したことに加えて，ホールソーの送り速度が速かったために，最終層を切り抜く瞬間に試験片がホールソー内部に収まらずに，容器内に落下したと考えられる．試験片が容器内に落下した際の対策について準備していなかったこと，及びホットセル内の汚染拡大防止の観点から，落下した試験片の回収は実施せず，詳細な内壁の損傷観察を実施することができなかった．

これまでに最適化した切出し条件で，正常に最終層まで切出しが完了した場合，モックアップ試験では，試験片が容器の内部に落下することは無かったが，万が一落下した場合に，試験片を取り出すことを想定して，Fig. 22(a) に示すツールを製作した．ツール端部を MSM で保持し，開口部から挿入して落下した試験片をかき出すことを想定している（Fig. 22(b)）．モックアップ試験に用いた模擬体を使って試験を実施した際の写真を Fig. 22(c) に示す．切出した試験片の直径は 50 mm で，穴の直径はホールソーの外径と同じ 55 mm であるため，落下した位置にもよるが，試験片を取り出すことは可能である．

Fig. 21 Photographs of grease cleaning test for (a) before cleaning, (b) spraying parts cleaner, (c) after cleaning, and (d) spraying tool for manipulator.

### 3.11　切断中のホールソー刃の破損による咬み込みへの対策

ターゲット容器の 3 層目あるいは 4 層目の切出し中にホールソーの刃が破損し，ビーム窓側に咬み込んだ場合，別のホールソーに交換しても，ホールソーの外径が同じ場合は咬み込んだ刃がホールソーと干渉し，再度刃が破損するため，同じ場所から試験片を切り出すことができないことをモックアップ試験により確認した．

そこで，刃が咬み込んだ場合でも切出しできるように，直径の小さなホールソーを用いた対策を検討した．小径ホールソーの適用性を確認するために，アルクローナプロでコーティングを施した外径 45 mm 及び 40 mm のホールソーを用いた切出し試験を実施した．Fig. 23 に試験の写真を示す．まず，モックアップ試験において 3 層目の切出し中に刃が咬み込んだ模擬体に対し，外径 45 mm 及び 40 mm のホールソーを用いて同じ場所からの切出しを実施した．先に切出したホールソーの外径 55 mm と比較して 10 mm 以上小さいため，遠隔操作の場合でも同じ場所にホールソーの位置決めをすることは可能と思われる．

Fig. 24 に小径のホールソーを用いた切出し試験結果を示す．直径が小さく，また，3 層目からの切

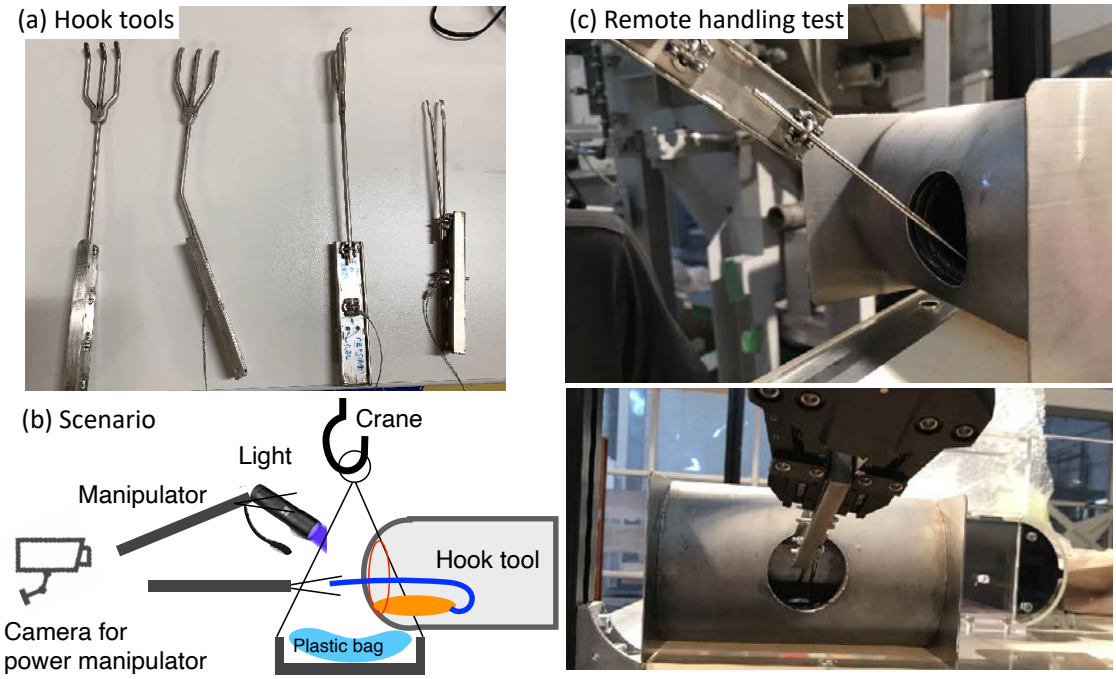



Fig. 22 Photographs of (a) hook tools for extracting dropped specimens, (b) remote handling scenario, and (c) remote handling test with a hook tool.

出しであるため，4 層全て切り出す場合と比較して切出しの時間は短く，モーター負荷も小さい．直径 55 mm のホールソーと比較して，先端及び側面の接触面積が少ないため温度上昇が少ないことも利点である．

Fig. 23 に示した確認試験では，どちらの試験でも問題なく切り出すことができた．一方，別の想定される条件として，3 層目が切出し終わる直前で，3 層目の試験片が模擬体から外れかかっている条件で小径のホールソーによる切出しを実施した．この場合，切削時の抵抗により切出し開始直後に 3 層目が模擬体から外れ，ホールソーと共に回転したため，切出しが進まなくなった．さらに継続すると，3 層目の回転している試験片と 4 層目の間で強い摩擦が生じ急激に温度が上昇したため試験を中止した．実機での切出しは，切粉の飛散カバーでホールソー周囲が覆われているため，切出し中のホールソー周囲の状況を確認できないため，モーター電流や推進トルクを確認しながら慎重に切出しを進める必要があるが，3 層目が外れてホールソーと共に回転した場合は，再度刃を交換することで 4 層目からの切出しが可能であると考えられる．

### 3.12　最適な切出し条件について

上述したモックアップ試験の結果から，以下に示す条件を適用することを結論付けた．

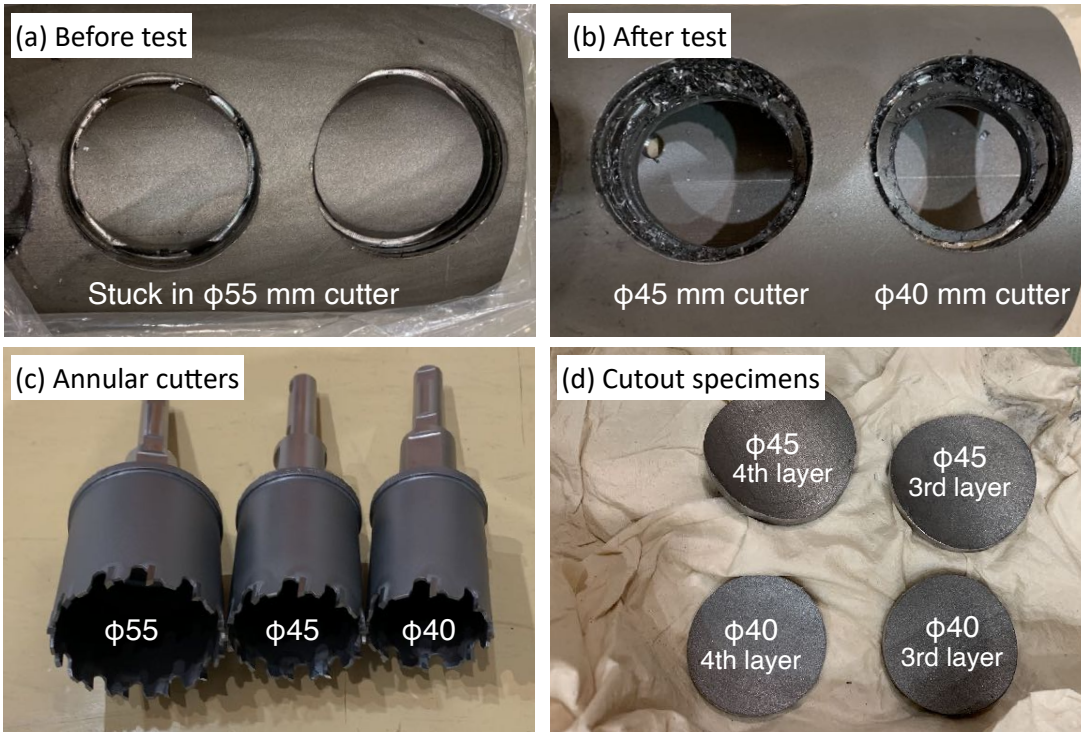



Fig. 23 Photographs of recovery tests for (a) before cutting tests, (b) after cutting tests, (c) annular cutters for different diameters, and (d) cutout specimens.

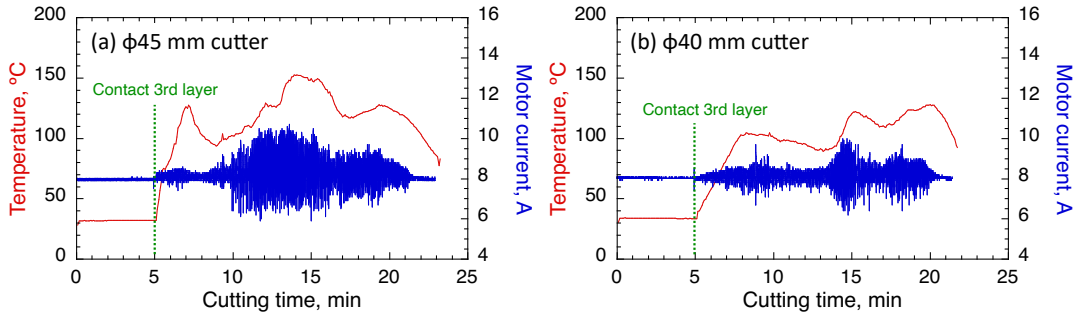



Fig. 24 Time histories of the cutter surface temperature and motor current during the cold cutting tests for (a) $\phi$45 mm and (b) $\phi$40 mm annular cutters.

ドリルマシンの運転条件： ホールソー回転数 250 rpm, 送り速度 0.03 mm/s，送り量 0.1 mm, 戻り速度 0.01 mm/s，戻り量 0.01 mm，待機時間 1 s

ホールソーの使用条件： アルクローナプロコーティング．センタードリルなし, グリース塗布，1 度使用したものを再使用

# 4. 実機水銀ターゲット容器からの試験片切出しの記録

## 4.1 水銀ターゲットの運転履歴

J-PARC の水銀ターゲットは 2008 年 5 月から運転を開始し，これまでに 9 回のターゲット容器交換を経て段階的にビーム出力を上昇している．Fig. 25 にこれまでの運転履歴を示す．1，3，2 号機は，ビームパワーが低かったことから複数年使用した．また，7 号機は運転開始直後に運転開始直後に冷却水のリークがあり運転を中止したため切出しは実施していない．本報告では，損傷の観察結果の詳細には触れず，切り出し作業の結果についてまとめる．次節以降に各ターゲット容器における試験片切出しの結果について示すが，ターゲット容器はそれぞれ内部構造等が異なっているため，ターゲット容器ごとの特徴をまとめたものを Table 4 に示す．

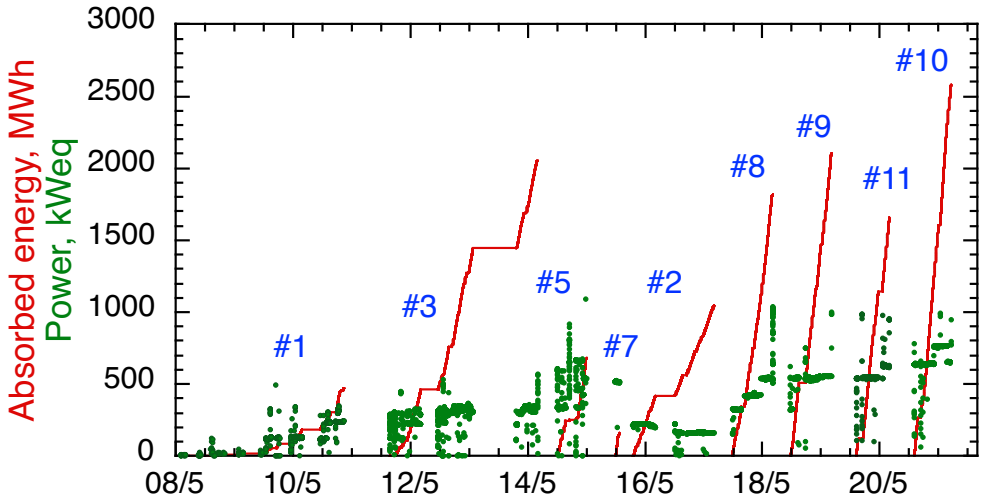
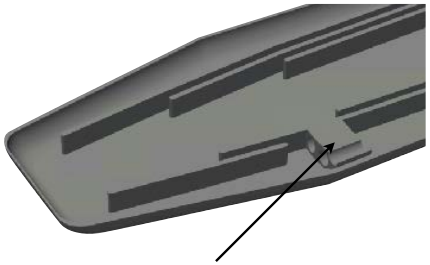
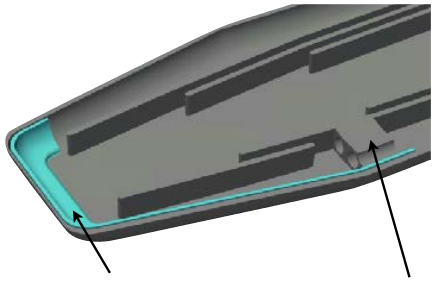



Fig. 25 Operational histories of the J-PARC mercury target vessel.

Table 4 List of operation conditions and target vessel structures.

| Target | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 5 | No. 8 | No. 10 | No. 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Absorbed beam energy [MWh] | 471 | 1048 | 2050 | 670 | 1812 | 2580 | 1660 |
| Average beam power [kW] | 127 | 181 | 272 | 400 | 434 | 685 | 568 |
| Constraint between mercury vessel and water shroud | Constraint | | | | | Constraint-free | |
| Beam window structure | Single-walled | | | Double-walled | | | |
| Damage mitigation technology | Surface hardening | | Surface hardening<br>Gas microbubble injection | Surface hardening<br>Gas microbubble injection | | | |
| Cross sectional view of mercury vessel | | |  |  | | | |

### 4.2　ターゲット容器 1 号機

水銀ターゲット容器 1 号機は，冷却水層のある内側・外側保護容器，及び水銀容器から構成される．1 号機が受けた積算のビームエネルギーは 471 MWh, 平均パワー 127 kW である．切出しは完全なドライカットで実施し，3 重壁全ての切出しに成功している．

1 回目の切出しを実施後，切出し装置を戻し，ビーム窓部を観察したところ，3 層目の水銀容器の試験片が本体側に残っており，完全に切り出せていないことが分かったため，再度切出し装置を設置し，同じ場所を切り出せるように位置決めし，切出しを再開し，試験片を切り出すことができた [11]．1 号機切出し時の写真を Fig. 26 に示す．

1 回目の切出しで水銀容器から試験片を切り出せなかった原因としては，ホールソーの水平方向の位置のみをモニタリングしていたため図面上では完全に切り出せる位置までホールソーを送ったが，図面と実機のわずかな寸法差により送り量が足りなかったことによると考えられる．

また，完全なドライカットであったため，ホールソーの接触したビーム窓周囲には，温度上昇による変色が確認された．

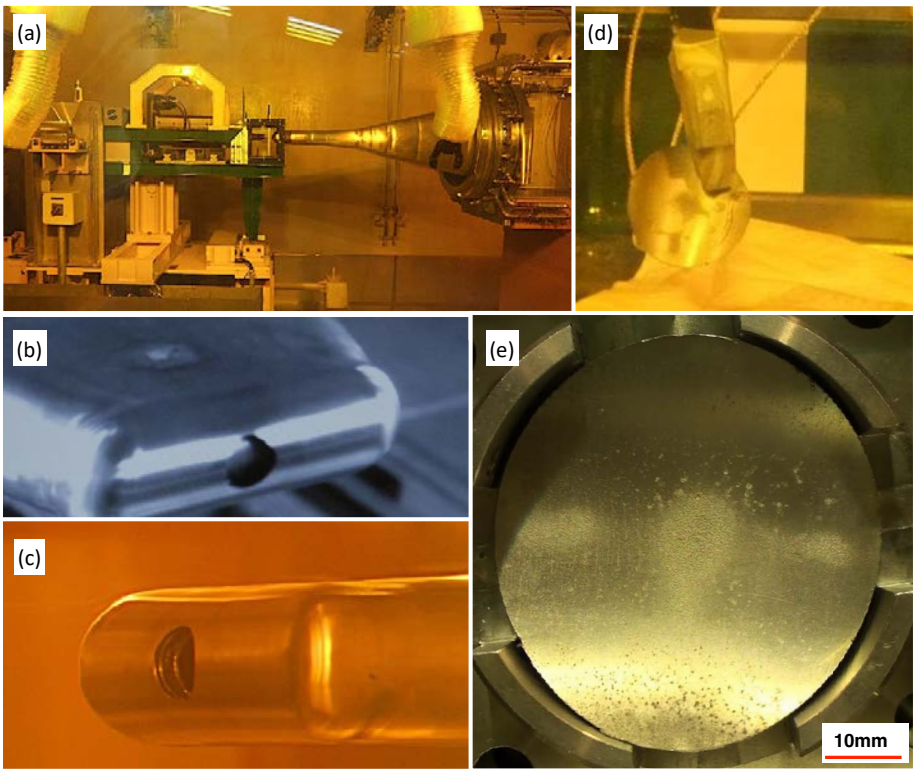



Fig. 26 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 1: (a) setup of the cutting machine, (b) mercury vessel specimen remaining on the beam window after 1st cut, (c) penetrate hole after 2nd cut, (d) cutout specimen after cleaning, and (e) damaged surface on the mercury vessel.

### 4.3　ターゲット容器 3 号機

水銀ターゲット容器 3 号機は，1 号機と同様の 3 重壁構造に加えて，圧力波によるキャビテーション損傷を抑制するために実施している気泡注入用のバブラーが設置されて，世界で初めて水銀中に気泡を注入した状態で運転を実施した．3 号機が受けた積算のビームエネルギーは 2050 MWh, 平均パワー 272 kW である．

3 号機の切出しも 1 号機同様に完全なドライカットで実施した．切出し時の写真を Fig. 27 に示す．3 重壁容器を 1 回の切出しで実施することができたが，損傷が形成される水銀容器側の試験片は，水銀容器の内部に落下し回収できなかった [12]．

そのため，内部の損傷評価はターゲット容器外側からのカメラによる観察しかできず，詳細な損傷深さの測定はできなかった．

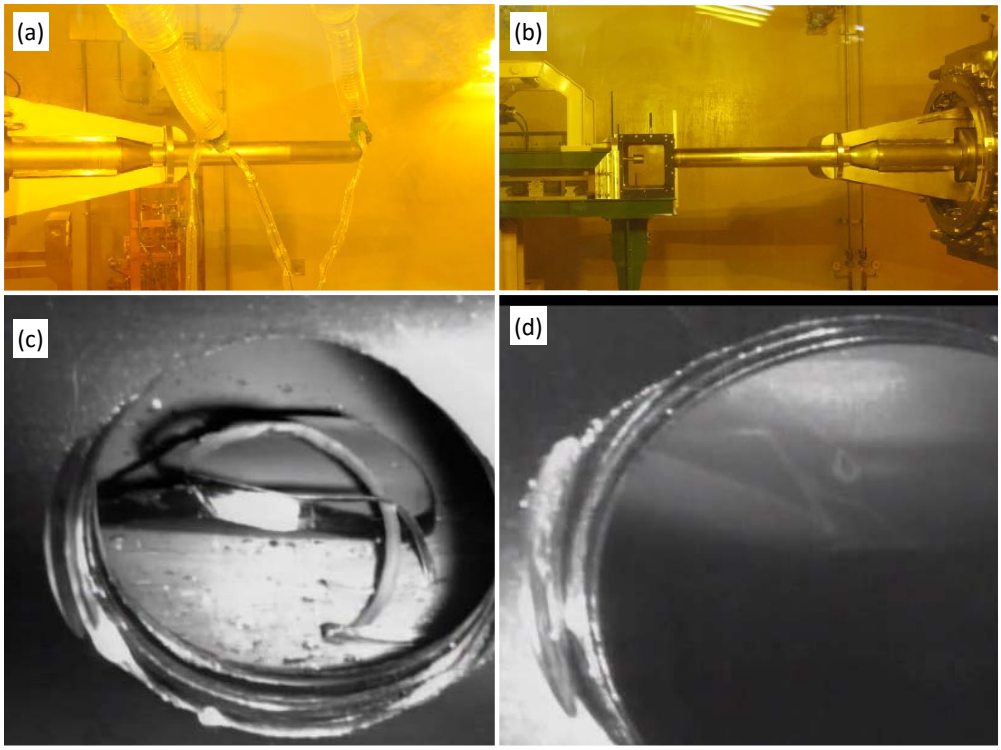



Fig. 27 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 3: (a) dose rate measurement by remote handling, (b) beam window cutting, (c) mercury vessel specimen dropped inside vessel, and (d) top side of interior surface view from cut-hole.

### 4.4　ターゲット容器 5 号機

水銀ターゲット容器 5 号機は，気泡注入用のバブラーに加えて，水銀容器先端部分を狭隘流路を備えた 2 重壁構造としており，初めての 4 重壁構造容器であった．5 号機以降のターゲット容器は全て 4 重壁構造である．5 号機が受けた積算のビームエネルギーは 670 MWh, 平均パワー 400 kW である．

5 号機の切出しについても同様に完全なドライカットで実施した．5 号機の切出し時の写真を Fig. 28 に示す．5 号機は 4 重壁構造のうち，狭隘流路に接する水銀容器までを切り出すことができた [13]．しかしながら，4 重壁目の切出し時に破損した刃がターゲット容器側に咬み込み，刃の交換を実施しても刃が再度破損したため切り出すことを断念した．

したがって，狭隘流路による損傷低減効果を確認することができたが，気泡注入による損傷低減効果は再び確認することができなかった．

これらの経験を踏まえて次に用いるターゲット容器で確実に切出しを行うために，切出し装置の大幅な改良と対策を施した．

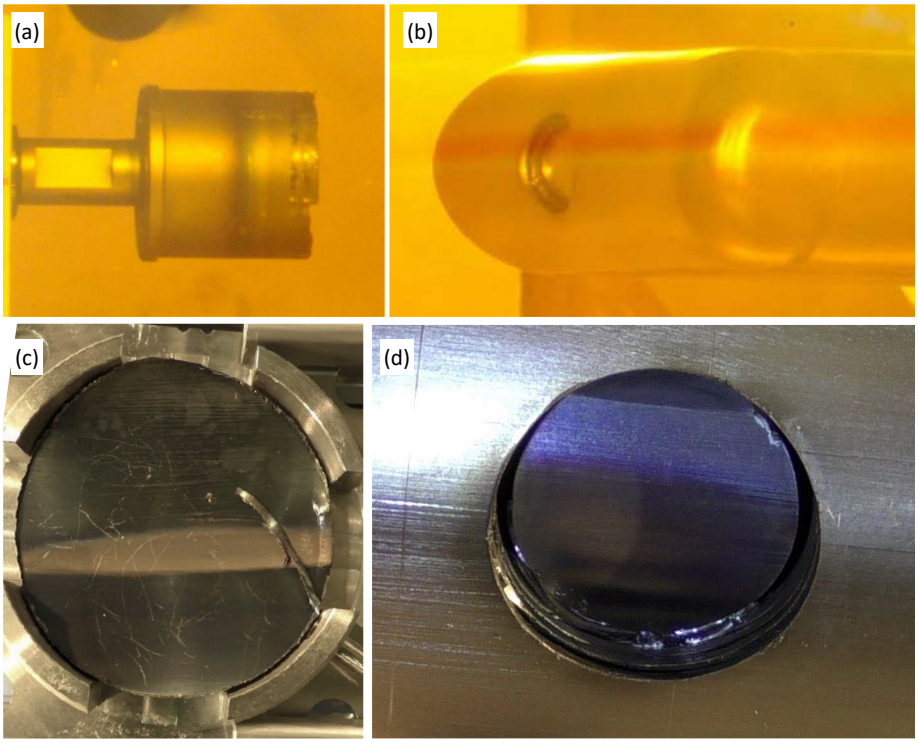



Fig. 28 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 5: (a) failed saws of annular cutter after stuck, (b) innermost wall of the mercury vessel is remaining, (c) cavitation damage on the interior surface of the mercury vessel faced narrow channel, and (d) no-severe damage observed on outside of innermost wall faced narrow channel.

### 4.5　ターゲット容器 2 号機

水銀ターゲット容器 2 号機の構造は 1 号機と同様の 3 重壁構造である．ただし，内壁に損傷低減化の表面改質処理は施されていない．2 号機が受けた積算のビームエネルギーは 1048 MWh, 平均パワー 181 kW である．

3 号機及び 5 号機での切出し失敗の経験を踏まえ，切削油を噴霧しながら切出しを行った．2 号機切出し時の写真を Fig. 29 に示す．モックアップ試験により，回転数や送り量などの切出し条件を最適化したことに加えて，最適切削油を断続的に噴霧することによって 3 重壁構造容器から問題なく試験片を切り出すことに成功した [14]．切出し時に使用した切削油の量は約 2L であった．

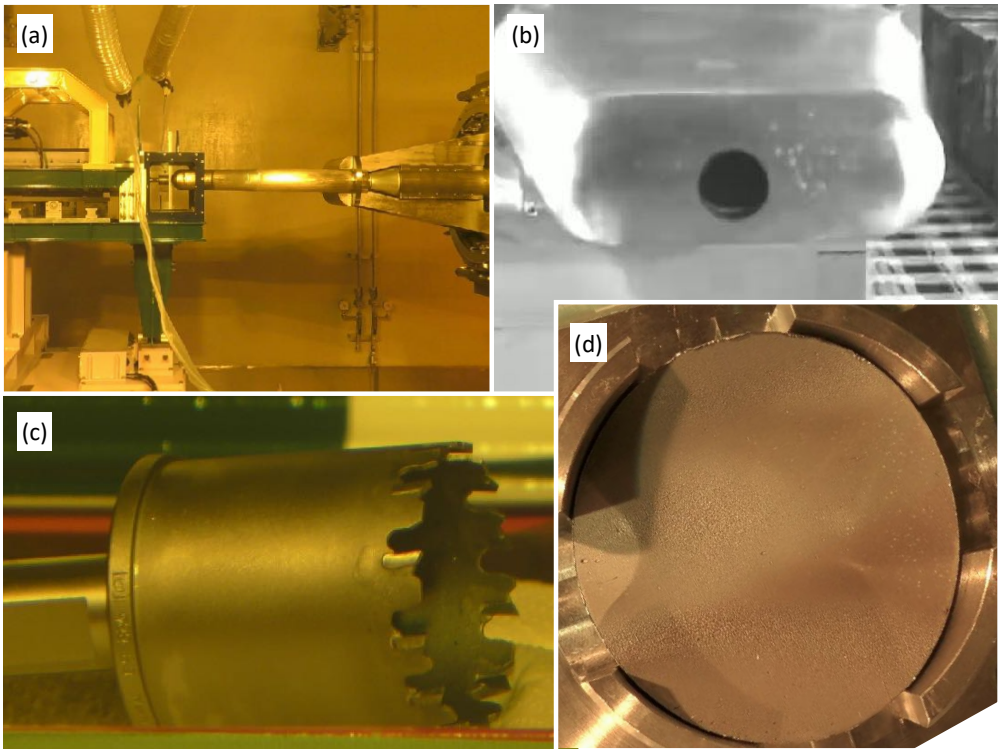



Fig. 29 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 2: (a) Beam window cutting with spraying lubricant by remote handling, (b) cutting chips sticking around the cutout hole, (c) no-visible damage observed in used annular cutter, and (d) cavitation damage on the interior surface of the mercury vessel.

### 4.6　ターゲット容器 8 号機

水銀ターゲット容器 8 号機の内部構造は，5 号機とほぼ同じ構造である．8 号機が受けた積算のビームエネルギーは 1812 MWh, 平均パワー 434 kW である．2 号機切出しと同様に切削油を噴霧し

ながらの切出しを実施した．

8 号機の切出し時の写真を Fig. 30 に示す．8 号機では，圧力波解析の結果，ターゲット容器を正面から見たときに，中心から離れた左端付近に損傷が形成されることが予測されたため，中央部及び中央部を切り出した位置から左に 70 mm 離れた位置の 2 箇所からの切出しを実施した．また，2 箇所からの切出しは時間がかかるため，ドリルマシンを長時間安定して駆動できるように電源をバッテリーから有線接続に変更した．

切削油を断続的に噴霧しながらの切出しであったため，2 箇所からの切出しは問題なく成功した [15]．気泡注入後の損傷を実機で初めて詳細観察し，気泡注入による著しい損傷低減効果を確認した．

しかしながら，2 箇所目の切出しとして実施した容器の正面から見て左側の切出しでは，1 箇所目の切出しにより既に開口していたため，開口部から多量の切削油が水銀容器内に流入した．そのため，水銀容器内では，系統内のトリチウムが切削油の水分により水蒸気となり，切出し後に実施されたターゲット容器交換作業の際に，水銀系の開口部からの放出量は以前に比べて増加した．

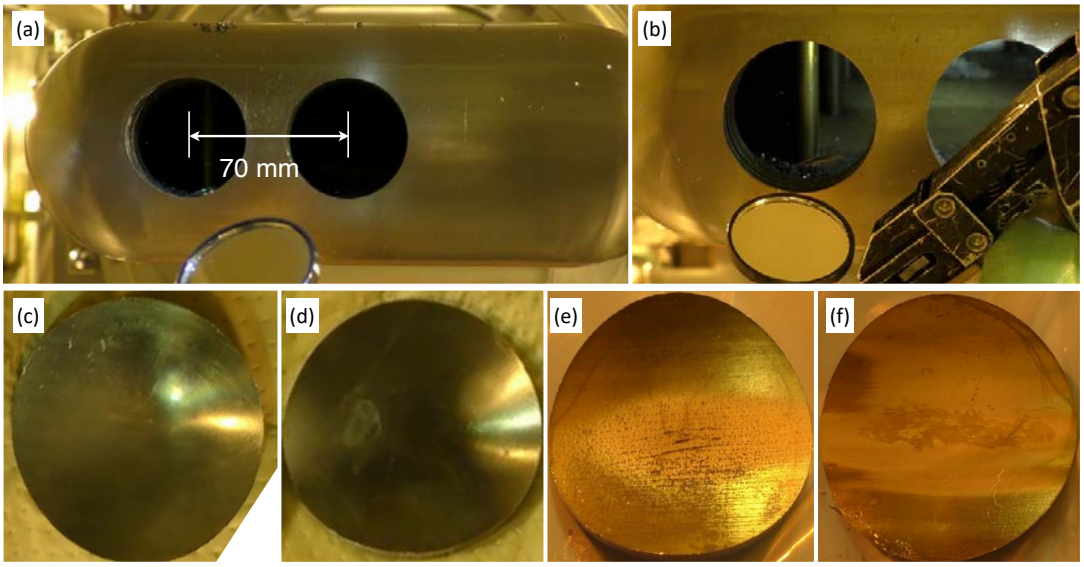



Fig. 30 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 8: (a) Beam window after 2 parts cutting, (b) mercury vessel inside view from cutout hole, specimens cutout from downstream part of (c) inner wall faced bubbly mercury and (d) outer wall faced mercury narrow channel, and center part of (e) inner wall and (f) outer wall.

## 4.7　ターゲット容器 9 号機

水銀ターゲット容器 9 号機は，8 号機とほぼ同様の構造である．9 号機が受けた積算のビームエネルギーは 2105 MWh, 平均パワー 529 kW である．

8 号機の損傷観察の結果，解析で予測された下流側の損傷が中央部と比較して著しく少なかったため，9 号機は中央部からのみ切出した．8 号機切出し時に切削油が容器内に流入したことが，ターゲット容器交換時のトリチウム放出量の増加の要因となったと考えられたため，切出し後に閉止栓により開口部を閉止し，ターゲット容器交換の前に系統内を長時間真空乾燥することで水分を除去する真空乾燥を実施した．真空乾燥の実施及びターゲット容器交換時の系統の開放時間を短縮することによって，ターゲット容器交換時のトリチウム放出を低減することはできた．反面，トリチウムを多く含む多量の水分が水銀系統内のガスを処理する気体廃棄物処理設備へ移行した．

9 号機切出し時の写真を Fig. 31 に示す．9 号機では，気泡注入に使用したガス供給設備の配管に閉塞があり，気泡注入量が少なかったため容器内壁に激しい損傷が形成されていた．

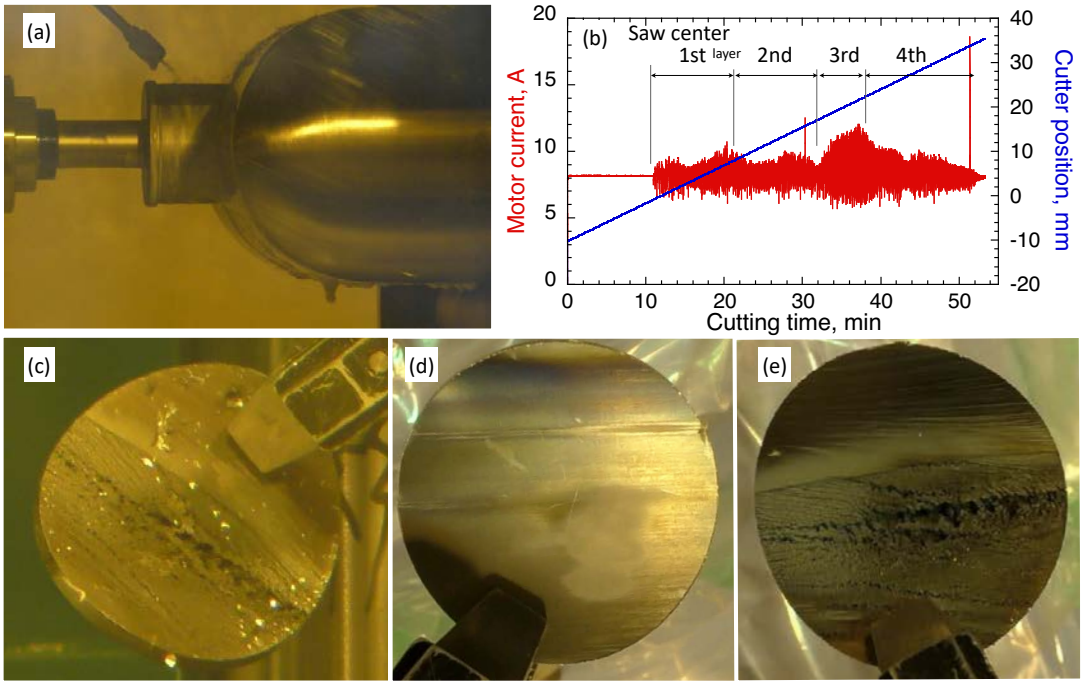



Fig. 31 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 9: (a) cutting with spraying lubricant, (b) time histories of motor current of drill machine and position of cutter during cutting, (c) cutout specimen before cleaning, (d) outer wall specimen faced mercury narrow channel, and (e) inner wall specimen faced mercury with gas microbubbles.

## 4.8　ターゲット容器 11 号機

水銀ターゲット容器 11 号機では，水銀容器が保護容器に拘束されない無拘束型の容器に改良された．また，気泡注入のバブラーの配置も先端部分の気泡含有率が高くなるように見直された．11 号機が受けた積算のビームエネルギーは 1660 MWh, 平均パワー 568 kW である．

9 号機の切出しで真空乾燥によりトリチウム放出を低減できることを確認したが，真空乾燥は気体

廃棄物処理設備で回収したトリチウムの処理や放出に時間を要するため，水ベースの切削油を使用しない方法への改善が求められた．3.8 で述べたモックアップ試験の結果より，ホールソーにコーティングを施すことに加えて，グリースを塗布するセミドライカット方式を見い出し，問題なく切り出すことに成功した．

11 号機切出し時の写真を Fig. 32 に示す．11 号機の運転では，ガス供給設備の配管が閉塞する傾向は見られたものの，平均的な気泡注入量は 9 号機と比較して多かったため，9 号機と比較すると損傷は抑えられていた．

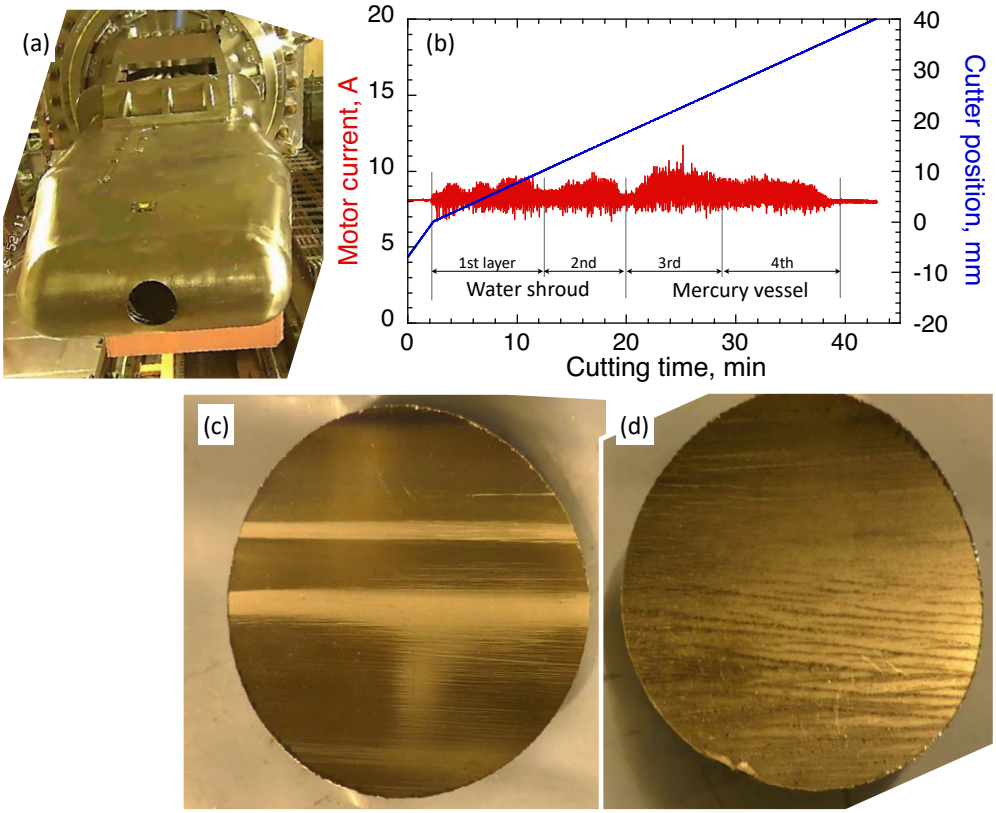



Fig. 32 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 11: (a) front view of the target vessel after beam window cutting, (b) time histories of the motor current of the drill machine and cutter position, (c) cutout specimen of outer wall of the mercury vessel faced mercury narrow channel, and (d) specimen of inner wall faced mercury with gas microbubbles.

## 4.9　ターゲット容器 10 号機

水銀ターゲット容器 10 号機は，無拘束型容器である．10 号機が受けた積算のビームエネルギーは 2581 MWh, 平均パワー 685 kW であり，積算エネルギー，平均パワー共にこれまで使用したターゲット容器の中で最も高い．

11 号機の切出しで，セミドライカットが成功したため，同様の手法で実施することにした．

切出し時の写真を Fig. 33 に示す．10 号機切出し時では，4 重壁容器を切り抜く直前に過負荷停止したが，手動で切出しを再開することにより 4 重壁容器全てから試験片を切り出すことに成功した．10 号機の運転では，ガス供給設備の配管に閉塞がないように運転方法を変更したため，気泡注入量は 11 号機と比較して多く，且つ安定していたため，平均ビーム出力は 11 号機を上回っているが損傷に大きな差が無いことが分かった．

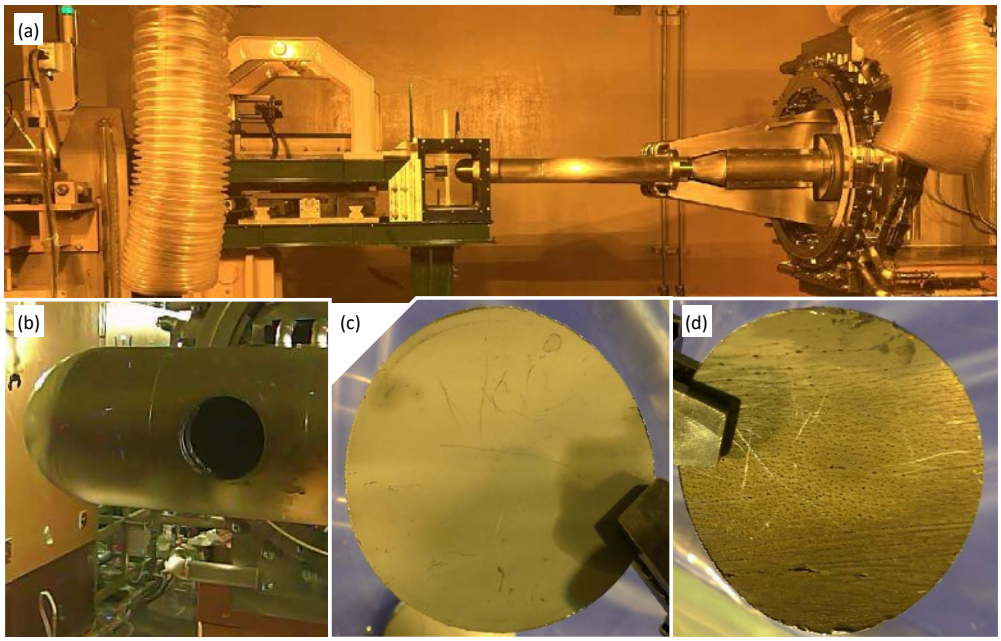



Fig. 33 Photographs of the beam window cutting for the target vessel No. 10: (a) beam window cutting by semi-dry cutting, (b) front view of the target vessel, (c) cutout specimen of outer wall of the mercury vessel faced mercury narrow channel, and (d) specimen of inner wall faced mercury with gas microbubbles.

## 5. まとめ

水銀ターゲット容器の内壁に形成されたキャビテーションによる損傷を定量的に評価し，損傷低減化策の効果確認と今後の運転計画の検討に資するために，高度に放射化した使用済みの水銀ターゲット容器の先端部から試験片の切出しを実施するための技術開発を実施し，遠隔操作で長時間安定した駆動が可能な切出し装置において最適な切出し条件を見い出した．さらに，水を使わずに摩擦による発熱を抑え確実な切出しを可能とするホールソーの使用条件として，刃のコーティングに加えて，グリース塗布によるセミドライカット方式を考案した．

これらの成果により，ターゲット容器は高度に放射化するため，機器の準備及び片付けを除く全ての作業は遠隔操作で実施し，4 重壁構造の容器から試験片を安定して切出せるようになった．

遠隔操作による切出し技術は確立できたと考えているが，段階的にビーム出力が上昇し，作業環境の線量当量率が上昇し，準備・片付け作業における外部被ばく線量が増加していることから，この被ばく低減が今後の課題である．準備・片付けにおいても可能な限り遠隔操作で実施するための改良が必要であると考える．

謝辞

水銀ターゲット容器の切出し装置の開発にあたり，装置製作元である株式会社関東技研の澤幡優氏には機器の設計からモックアップ試験まで多岐にわたりご協力頂いた．また同社の石井芳彦氏には，当初実施できなかったドリルマシンの詳細な条件変更を可能にする制御システムの開発など，電気・制御に関する改造とモックアップ試験にご協力頂いた．ここに記して謝意を表する．

また，実際の切出し作業では，中性子源セクションの派遣職員及び業務委託員，放射線管理セクションで一丸となって作業に取り組んだ．実機の損傷データは，多くの方の協力で得られたものであり，謝意を表する．

## 参考文献


1) M. Futakawa, H. Kogawa, R. Hino, Measurement of dynamics response of liquid metal subjected to uniaxial strain wave, Journal of Physics IV, Vol. 10 (2000) pp. 237–242.
2) T. Wakui, M. Futakawa, H. Kogawa, S. Ishikura, Failure probability estimation of multi-walled vessels for mercury target, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 44 (2007) pp. 530–536.
3) D. A. McClintock, B. W. Riemer, P. D. Ferguson, A. J. Carroll, M. J. Dayton, Initial observations of cavitation-induced erosion of liquid metal spallation target vessels at the Spallation Neutron Source, Journal of Nuclear Materials, Vol. 431 (2012) pp. 147–159.
4) 涌井 隆, 粉川 広行, 羽賀 勝洋, 二川 正敏, 内山尚義, 仲村 宏二, 水銀ターゲット容器の構造強度設計, JAEA-Technology 2009-041, (2010) 71p.
5) H. Kogawa, T. Naoe, H. Kyotoh, K. Haga, H. Kinoshita, M. Futakawa, Development of microbubble generator for suppression of pressure waves in mercury target of spallation source, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 52 (2015) pp. 1461–1469.
6) K. Haga, T. Naoe, T. Wakui, H. Kogawa, H. Kinoshita, M. Futakawa, Pressure wave-induced cavitation erosion in narrow channel of stagnant mercury, JPS Conference Proceedings, 8 (2015) 051008–1–6.
7) M. Harada, M. Sekijima, N. Morikawa, S. Masuda, H. Kinoshita, K. Sakai, T. Kai, Y. Kasugai, G. Muto, A. Suzuki, H. Takada, K. Haga, Unified mercury radioactivity monitoring system at J-PARC and its operation experiences, JPS Conference Proceedings, Vol. 33 (2021) 011099.
8) 物質・生命科学実験施設建設チーム, 大強度陽子加速器プロジェクト物質•生命科学実験施設機器技術設計書, JAERI-Tech 2004-001 (2004) 1171p.
9) H. Kinoshita, K. Haga, M. Seki, T. Suzuki, M. Ito, Y. Kasugai, T. Wakui, H. Kogawa, T. Naoe, K. Hanano, M. Teshigawara, F. Maekawa, S. Sakamoto, M. Futakawa, Development of cut out machine for PIE test pieces from mercury target vessel in J-PARC, Proceedings of ICANS-XX, Centro Atomico Bariloche, Barilocge, Argentina, (2012) pp. 559–576.
10) Y. Kasugai, K. Sato, K. Takahashi, Y. Miyamoto, T. Kai, M. Harada, K. Haga, H. Takada, Behavior of tritium release from a stainless vessel of the mercury target as a spallation neutron source, JPS Conference Proceedings, Vol. 33 (2021) 01144.
11) T. Naoe, M. Teshigawara, T. Wakui, H. Kinoshita, H. Kogawa, K. Haga, M. Futakawa, Damage inspection of the first mercury target vessel of JSNS, Journal of Nuclear Materials, Vol. 450 (2014) pp. 123–129.
12) T. Naoe, H. Kogawa, T. Wakui, K. Haga, M. Teshigawara, H. Kinoshita, H. Takada, M. Futakawa, Cavitation damage prediction for the JSNS mercury target vessel, Journal of Nuclear Materials, Vol.

468 (2016) pp. 313–320.

13) T. Naoe, T. Wakui, H. Kinoshita, H. Kogawa, K. Haga, M. Harada, H. Takada, M. Futakawa, Cavitation damage in double-walled mercury target vessel, Journal of Nuclear Materials, Vol. 506 (2018) pp. 35–42.

14) T. Naoe, H. Kinoshita, H. Kogawa, T. Wakui, E. Wakai, K. Haga, H. Takada, Effect of gas microbubble injection and narrow channel structure on cavitation damage in mercury target vessel, Materials Science Forum, Vol. 1024 (2021) pp. 111–120.

15) T. Naoe, H. Kinoshita, H. Kogawa, T. Wakui, E. Wakai, K. Haga, H. Takada, Mitigation of cavitation damage in J-PARC mercury target vessel, JPS Conference Proceedings, Vol. 28 (2020) 081004.

This is a blank page.