



# AWJによる模擬燃料集合体加熱試験体の切断作業

Cutting Operation of Simulated Fuel Assembly Heating Examination by AWJ

阿部 雄太 中桐 俊男 綿谷 聡 丸山 信一郎

Yuta ABE, Toshio NAKAGIRI, Satoshi WATATANI and Shinichiro MARUYAMA

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター 事故進展挙動評価ディビジョン

Severe Accident Propagation Behavior Evaluation Division Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development

October 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒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. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, 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, 2017

# AWJによる模擬燃料集合体加熱試験体の切断作業

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉国際共同研究センター 事故進展挙動評価ディビジョン 阿部 雄太<sup>+</sup>、中桐 俊男、綿谷 聡\*、丸山 信一郎\*

(2017年8月21日 受理)

本報は、廃炉国際共同研究センター(Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science: CLADS)燃料溶融挙動解析グループにて、平成 27 年度の「プラズマトーチによる模擬 燃料集合体加熱試験(Phase II)」で用いた模擬試験体について、Abrasive Water Jet (AWJ)切断によ る切断作業に関する報告である。

本報で用いる模擬燃料集合体は、外周るつぼ及び模擬燃料がジルコニア(ZrO<sub>2</sub>)、制御ブレー ドが炭化ホウ素(B<sub>4</sub>C)及びステンレス鋼、並びに被覆管及びチャンネルボックスがジルカロイで 構成されている。溶融物の移行挙動、模擬燃料集合体の崩落挙動及び支持構造部の損傷挙動に ついては X 線 CT を用いた非破壊検査を実施し、溶融物内部に存在する物質の大きさ、形状及 びポロシティ等を確認してきた。しかし、再臨界やデブリの取り出しに影響する溶融化した集 合体内部の状態や成分分布の確認は、模擬試験体が大型かつ高硬度で容易に細断できないため 困難であった。

本報では、国内外の原子炉廃止措置において水中及びセラミックス(アルミナ等)による厚板 切断の実績を有する AWJ 切断工法を用いて、2 つの点(I. 特に硬度が高いホウ化物の溶融部分 等の1回(ワンパス)で切断できない場合は、アップカットとダウンカットを繰り返す往復運動 の動作を実施、II. I.の手法でも切断が困難な場合には、Abrasive Injection Jet (AIJ)方式(従来工法) よりも切断能力が高い Abrasive Suspension Jet (ASJ)方式を用いることで効果的に切断)を工夫 した。その結果、材料分析のために必要な装置が許容できる試料に加工(切断及び研磨)するこ とが可能な大きさまで切断した作業について報告する。

なお切断作業では、AWJの先端で切断能力を失うと送り方向と反対に噴流が逃げる際に生じ る湾曲した切断面が試験体中央部(制御ブレード近傍)で確認された。今後は、切断面の荒さを 抑えるための適切なトラバース(送り)速度の選定や切断時間の短縮のためのジェットの出口側 から再切断を行うことで改善が期待できる。

\* 三井住友建設(株)

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

<sup>+</sup> 高速炉研究開発部門 高速炉技術開発部

#### Cutting Operation of Simulated Fuel Assembly Heating Examination by AWJ

Yuta ABE<sup>+</sup>, Toshio NAKAGIRI, Satoshi WATATANI<sup>\*</sup> and Shinichiro MARUYAMA<sup>\*</sup>

Severe Accident Propagation Behavior Evaluation Division Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 21, 2017)

This is a report on Abrasive Water Jet (AWJ) cutting work carried out on specimen, which was used for Simulated Fuel Assembly Heating Examination by Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS) Molten Core Behavior Analysis Group in February 2016. The simulated fuel assembly is composed of Zirconia (ZrO<sub>2</sub>) for the outer crucible/simulated fuel,  $B_4C$ /stainless steel for the control blade and Zircaloy (Zr) for the cladding tube/channel box. In order to measure the state and component distribution inside the melted aggregate which affects re-criticality and removal of debris, it is necessary to cut at once substances having a wide range of fracture toughness and hardness. Moreover, it is a large specimen with an approximate size of 300mm $\phi \times$ 1,000mmH. AWJ was selected from these impacts and past experience of decommissioning technology.

The following two points (I. If it was not possible to cut at one time like a molten portion of boride, it was repeatedly cut. II. Abrasive Suspension Jet (ASJ) system with higher cutting ability than Abrasive Injection Jet (AIJ, conventional method) system method was used for places where cutting is difficult even in repeatedly cut.) were devised. This specimen could be cut with AWJ to a size that allows sample processing (cutting and polishing) acceptable by the analyzer.

As a result of this work, the cutting method in Simulated Fuel Assembly Heating Examination was established. Incidentally, in the cutting operation, when the cutting ability was lost at the tip of the AWJ, a curved cut surface, which occurs when the jet flowed away from the feeding direction, could be confirmed at the center of the test body. From the next work, to improve the cutting efficiency, we propose adding a mechanism such as turning the cutting member itself for re-cutting from the exit side of the jet and appropriate traverse speed to protect cut surface.

Keywords: Abrasive Water Jet (AWJ) Cutting, Abrasive Suspension Jet (ASJ), Non-Transfer (NTR)

Type Plasma, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F), Core-Material Relocation (CMR)

<sup>+</sup>Fast Reactor Technology Development Department, Sector of Fast Reactor Research and Development

<sup>\*</sup> Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

# 目 次

1. 緒言	1
2. 切断方法の調査とAWJの原理	2
2.1 切断手法の調査	2
2.2 AWJの特性	3
3. AWJ による切断作業概要	5
3.1 作業場所	5
3.2 切断機器	5
3.3 AWJ 水中切断装置及び模擬試験体の配置	6
4. 作業手順と切断結果	7
4.1 切断項目	7
4.2 作業手順	7
4.3 切断結果	7
4.4 切断結果の考察	8
5. 水中切断音計測1	0
5.1 システム概要1	0
5.2 計測概要1	0
5.3 計測結果(データ)1	0
6. 結論1	2
謝辞1	.3
参考文献1	.4
付録 1 写真集 3	5

# Contents

1. Introduction	1
2. Survey of Cutting Method & Characteristics of AWJ	2
2.1 Survey of Cutting Method	2
2.2 Characteristics of AWJ	. 3
3. Outline of Cutting Operation using AWJ	5
3.1 Work Place	• 5
3.2 Cutting Equipment	-5
3.3 Structure of Equipment Cutting AWJ underwater	
& Arrangement of After Heating Simulated Fuel Assembly Heated Specimen	. 6
4. Operation Procedure and Cutting Result	7
4.1 Cutting Item	7
4.2 Operation Procedure	7
4.3 Cutting Results	-7
4.4 Consideration of Cutting Results	-8
5. Measurement of Underwater Cut Sound 1	10
5.1 Outline of Measurement System 1	10
5.2 Measurement Overview 1	10
5.3 Measurement Result (Data) 1	10
6. Conclusion 1	12
Acknowledgements 1	13
References 1	14
Appendix 1 Photo Collection 3	35

# 表リスト

Table 2.1	特性比較表1	5
Table 4.1	切断作業工程(実績)1	6
Table 5.1	水中マイクの仕様1	7
Table 5.2	切断条件1	7

# 図リスト

Fig.2.1	模擬燃料集合体	18
Fig.3.1	AWJ 切断試験室	18
Fig.3.2	AIJ 方式切断機器構成	19
Fig.3.3	ASJ 方式切断機器構成	19
Fig.3.4	研掃材(ガーネット)	20
Fig.3.5	AWJ 水中切断装置	20
Fig.4.1	切断手順	21
Fig.4.2	作業手順 (AIJ 方式)	22
Fig.4.3	作業手順 (ASJ方式)	23
Fig.4.4	(事前) AIJ 方式による水平(横)切断状況の確認	24
Fig.4.5	AIJ 方式による約 190mm の水平(横)切断	24
Fig.4.6	AIJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断	25
Fig.4.7	未切断箇所	25
Fig.4.8	ASJ方式でブレードに対し直角に約270mmの垂直(縦)切断	26
Fig.4.9	約190mmのASJ方式による水平(横)切断	26
Fig.4.10	約 190mm の AIJ 方式による水平(横)切断	27
Fig.5.1	システム概要図	28
Fig.5.2	水中マイク設置位置(切断装置水槽内)	28
Fig.5.3	切断音計測データと試験体切断状態(Case-①水平横切断・最上段)	29
Fig.5.4	切断音計測データと試験体切断状態(Case-②垂直縦切断)	31
Fig.5.5	切断音計測データと試験体切断状態(Case-③水平横切断・最下段)	34

This is a blank page.

1. 緒言

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、2011年に発生した東京電力(株) 福島第 一原子力発電所(以下「1F」という)事故時の事故進展や炉心状況の推定に役立てるた め、事故時の燃料集合体の溶融移行挙動を調査するための研究開発を進めている。

1F の沸騰水型原子炉(以下「BWR」という)では、炭化ホウ素(B<sub>4</sub>C)とステンレス鋼 (SUS)からなる制御ブレードが4体の燃料集合体に配置されており、シビアアクシデン ト(以下「SA」という)時に事故進展が進み約1,200℃以下で、この制御ブレードがB<sub>4</sub>C とSUSの共晶反応等により溶融移行を開始する。このため、制御ブレードの溶融移行 後のスペースに燃料が崩落し、燃料集合体の支持構造部に到達する可能性がある。

本研究では、BWR 特有の事象体系を模擬し、1F と同じ材料からなる制御ブレード と模擬燃料としてジルコニア(ZrO<sub>2</sub>)を使用した模擬燃料集合体のプラズマ加熱試験に より、溶融物の移行挙動、模擬燃料集合体の崩落挙動及び支持構造部の損傷挙動を調 査している。これらの調査では X線 CT による非破壊検査を実施しており、本手法で は溶融物内部に存在する物質の大きさ、形状及びポロシティ等を確認することはでき るが、詳細な溶融物の構成成分やそれらの分布が評価できない。分析評価を行うには、 電子線マイクロアナライザ(以下「WDX」という)やレーザーアブレーション誘導結合 プラズマ質量分析(以下「LA-ICP-MS」という)等を用いた調査が必要になる。しかし、 WDX や LA-ICP-MS を用いた分析のためには、装置が許容できる試料の大きさ及び表 面状態まで細断加工する必要がある。ホウ素を含む溶融物は、非常に硬いこと(ZrB<sub>2</sub> 系の硬さ約 13GPa~20GPa<sup>1)</sup>)が知られており、大型なプラズマトーチによる模擬燃料 加熱試験体(以下「模擬試験体」という)の切断加工技術が課題となる。

本報では、再臨界やデブリの取り出しに影響する溶融化した集合体内部の状態や成 分分布を調査するため、大型かつ高硬度の模擬試験体の切断技術に関して、国内外の 原子炉廃止措置において水中及びセラミックス(アルミナ等)による厚板切断の実績を 有する Abrasive Water Jet (以下「AWJ」という)切断<sup>2)</sup>を用いて、材料分析に用いる装 置が許容できる試料の大きさ及び表面状態まで細断加工した作業について報告する。 2. 切断方法の調査と AWJ の原理

2.1 切断手法の調査

2.1.1 切断対象物

切断対象物には 2015 年に実施された模擬試験体を用いた。その製作図を Fig. 2.1 に 示す。模擬試験体は、模擬燃料に ZrO<sub>2</sub>を用いている以外は 1F の軸方向の位置や材料 等を忠実に再現している。模擬試験体の概寸は約 300mmφ×1,000mmH と大型で、模擬 燃料集合体部(約 150mmφ×500mmH)と下部支持構造(約 300mmφ×500mmH)で構成され ている。模擬試験体は加熱溶融によって非常に硬度の高いホウ化物(B<sub>4</sub>C、ZrB<sub>2</sub>等)が生 成されている可能性が高く、また、模擬試験体は空輸及び陸送で形状が滑落しないよ う、エポキシ樹脂が充填されている。この模擬試験体において炉心物質の移行挙動を 確認するためには、模擬燃料集合体部を切断することが必要である。

### 2.1.2 切断能力

模擬試験体は、2.1.1項で示したように、硬度が非常に高いホウ化物や酸化物等のセ ラミック、ジルカロイやステンレスなど金属ならびにエポキシ樹脂のような粘り強い 物質まで、多種多様な材質で構成されている。このため、安全かつ効率的に切断する ため、国内外の原子炉廃止措置分野の報告書や海外技術ハンドブックで切断方法及び 切断能力の調査、産業界での導入実績等を基に文献調査を実施した。その結果、有力 な切断方法として、AWJ、レーザー、プラズマ及びバンドソーの4切断方法に絞り込 んだ。これら4切断方法の切断能力及び適用性を比較評価した結果をTable 2.1 に示す。

1) 切断可能板厚

SUS304 を用いた切断可能な最大板厚を Table 2.1 の表中に示した。切断能力と して、少なくとも模擬燃料集合体部(約 150mmφ×500mmH)の切断できることが必 要であり、500mmH 部はトラバース(送り)速度を調整しても、約 150mmφ 部の切断 できる能力が要求される。

熱的切断手法における切断可能な鋼材の板厚を比較すると、レーザー切断で約 30mm、プラズマ切断で約 210mm である。機械的切断手法では、バンドソー切断 で約 700mm と熱的切断手法に比較して大きい。運動エネルギーを利用した AWJ 切断では、約 600mm(600MPa)の実績がある。

2) 硬質材料(アルミナ: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の切断能力

実績は少ないが、硬質材料としてアルミナを切断した実績を Table 2.1 に示した。 「1)切断可能板厚」に記載する SUS304 同様の切断能力が要求される。

熱的切断手法における切断可能なアルミナの板厚を比較すると、レーザー切断 法は熱衝撃割れを利用しペレット 1 つ分程度<sup>5)</sup>、プラズマ切断ではプラズマジェ ットを使い約 40mm(34mm は切断され、6mm は割れていた)程度<sup>6)</sup>である。

機械的切断手法では、切断歯がささらない硬度の高いセラミック(ホウ化物(B<sub>4</sub>C、

ZrB<sub>2</sub>)及び酸化物(ZrO<sub>2</sub>))の切断が難しい。運動エネルギーを利用した AWJ 切断では、約 180mm (230MPa)<sup>2)</sup>の実績がある。

3) 気中/水中切断性

4 つの切断方法とも気中と水中の両方に適用することが可能である。ただし、気中 切断の場合は、ジルカロイの粉末(粒径:3µm 以下)が空気中に浮遊すると自然発火す る可能性があり<sup>4)</sup>水中切断が好ましい。なお、プラズマ切断は水中時に切断能力が落 ちることからここでは「△」と表現している。

4) 非金属切断性

模擬試験体は、ステンレスやジルコニアのような金属だけではなく、導電性の無い (エポキシ樹脂、ホウ化物(B<sub>4</sub>C、ZrB<sub>2</sub>等)及び酸化物(ZrO<sub>2</sub>))であるため非金属の切断性 能が重要になる。熱的切断であるレーザー切断は非金属にも対応可能である<sup>5)</sup>が、熱 衝撃による割れが生じることもあり適していない。プラズマ切断は本来の切断手法(プ ラズマアーク)では切断できないが、プラズマジェットを用いる方法で切断は可能であ る(ただし、切断能力は劣る。)。機械的切断であるバンドソーは、エポキシ樹脂のよ うに切断時に歯の間に食い込む物質には適さない。運動エネルギーを利用した AWJ 切断では、切断物質を選ばす切断可能である。

5) 大型な模擬試験体への適用

レーザー、プラズマ及びバンドソーによる切断法は、大型な模擬試験体への適用性 が容易であったが、AWJによる切断法は高圧水を受けても大型な模擬試験体がぶれな い固定冶具や切断機構の可動範囲等で適用性に課題があった。しかし、1Fの炉内構造 物及び燃料デブリの取り出しに向けて2012年度から3ヵ年で実施した技術開発で用い られた AWJ 水中切断装置を用いること<sup>2)</sup>で、AWJ 切断の適用課題が解決されている。

2.1.3 切断対象物(模擬試験体)への切断技術の選定

切断方法について、本試験体の 4 つの特徴(①非金属、②大型 (概寸:直径約 300mmφ×1,000mmH、切断範囲:約150mmφ×500mmH)、③硬度約13GPa~20GPaと高 いホウ化物、④形状を保持するエポキシ樹脂)を考慮した結果、AWJ 切断を選定した。

2.2 AWJの特性

2.2.1 切断深さ

Hashish は AWJ による切断機構が①鋭い角度で衝突する粒子により生じる切削摩耗 と②大きな角度で衝突する粒子による変形摩耗の2項から成り立つ(1)式にまとめてい る<sup>7),8)</sup>。このモデルによれば、材料の切断深さhは次式で表される。第1項は切断摩 耗による項で、第2項は変形摩耗による項である。

$$h = C\sqrt{\frac{m_a V^2}{8 \sigma u}} + \frac{2 m_a (1-c) V^2}{\pi u \epsilon d j} \quad . \quad . \quad (1)$$

V:粒子速度

- *m*<sub>a</sub>:研磨剤流速(供給量)
- *u* : トラバース(送り)速度
- σ:被切断材のフローストレス(硬い材料はこの値が大きい)
- ε : 材料の比エネルギー (材料の靱性、応力--ひずみ線図で囲まれる面積に相当)
   dj : アブレイシブ噴流の直径
- C : 定数

また、水圧 P、ノズル径  $d_w$ と水の流量  $Q_w$ 及び水の流速  $V_w$ との関係は(2)式で表される<sup>8)</sup>。

$$V_w = Q_w / \frac{\pi}{4} d_w^2 = \mu \sqrt{2 P / \rho_w} \qquad (2)$$

μ:流量係数(0.64~0.75)

*ρ<sub>w</sub>*:水の密度

AWJ の場合、ノズル部品の寸法を一定とすれば、切断材の流速は水の流速 V<sub>w</sub>に 比例し、切断深さhはVに比例することから、水圧 P にほぼ比例することになる。な お、切断深さに及ぼす水圧の影響に関する実験でも、切断深さは水圧にほぼ比例し、 ある圧力以下で切断が不可能となる臨界圧力 P<sub>c</sub>が存在することが確認されている<sup>9)</sup>。

2.2.2 切断能力

AWJでは密度差の大きい研磨剤を高速の水噴流によって加速し、速度を持った研磨 材粒子が物体と衝突し、摩耗によって切断が行われる。現在、実用的に用いられる研 磨剤の混合方法は、大別して①研磨剤を混合室内で高速水噴流に添加する Abrasive Injection Jet (以下「AIJ」という)方式と、②研磨材を水に懸濁したスラリーを加圧・ 噴射する Abrasive Suspension Jet (以下 「ASJ」という)方式の2種類である。同一消費 動力及び研磨材流量条件下における ASJ 方式の切断深さは AIJ 方式の数倍になる<sup>10)</sup>。

一方で、水中 ASJ 方式の加工特性に関しては、ノズルと加工物間の距離(スタンドオ フ距離)が増大すると ASJ 方式の加工方法は急激に減少する<sup>11)</sup>。また、200MPa を超え る高圧での ASJ 方式の切断実績は AIJ 方式よりも少ない。これらの特徴を鑑み、本切 断作業では過去に多数の実績がある AIJ 方式の切断を実施し、AIJ 方式による往復運 動でも切断が困難な場合はより切断能力の高い ASJ 方式を用いた切断を実施すること とした。

### 3. AWJ による切断作業概要

ここでは、選定されたAWJ切断を用いた模擬試験体の垂直および水平切断作業の概 要について述べる。

### 3.1 作業場所

作業場所は、Fig.3.1 に示す AWJ 試験室で実施した。

- 3.2 切断機器
- 3.2.1 AIJ 方式

AIJ 方式の切断作業に用いた機器構成を Fig.3.2 に、機器仕様を以下に示す。試験 機器は、超高圧ポンプ、研磨剤供給装置及び AWJ 水中切断装置(汎用カッティング ガンタイプを含む)で構成した。

超高圧ポンプは、最高仕様圧力 245MPa のプランジャー式ポンプであり、研磨剤 供給装置は、研磨剤供給量を微調整するためにロータリー方式のものを採用した。

【仕様】

使用圧力	:	230MPa
切断ヘッド	:	汎用カッティングヘッド
高圧ポンプ	:	吐出圧力 230 MPa
研掃材供給装置	:	ホッパー40 L、供給量 1.0 kg/min
研掃材	:	ガーネット(TYPEⅢ) 粒径 250~600 μm

# 3.2.2 ASJ 方式

ASJ 方式の切断作業に用いた機器構成を Fig.3.3 に、機器仕様を以下に示す。試験 機器は、超高圧ポンプ、サスペンションユニット及び AWJ 水中切断装置(カッティ ングヘッドを含む)で構成した。

超高圧ポンプは、AIJ 方式同様、最高仕様圧力 245MPa のプランジャー式ポンプで あり、サスペンションユニットにて研磨剤と混合させる ASJ を採用した。

【仕様】

230MPa
40L
2000kg
$1400 \text{mm} \times 900 \text{mm} \times 2,200 \text{mm}$
カッティングヘッド(Applied New Technologies(ANT)製)
約 10~30L/min
ガーネット(80MESH)

# 3.2.3 アブレイシブ(研掃材)

本作業で使用した研掃材(ガーネット)を Fig.3.4 に示す。粒径は AIJ 方式で 250~600µm、ASJ 方式で 150~300µm のものを使用した。

3.3 AWJ水中切断装置及び模擬試験体の配置

AWJ 水中切断装置の構造及び水槽内部における模擬試験体の設置状況を Fig. 3.5 に 示す。模擬試験体は、固定冶具を用いて AWJ の圧力により転倒しないよう設置した。 また、切断時の音の変化をとらえるため、模擬試験体中央と同一高さに水中マイクを 設置した。

切断作業は、AIJ 方式及び ASJ 方式の両者とも AWJ 水中切断装置を用いて実施した。 水中切断装置は切断試験装置内に固定した模擬試験体に対し、切断位置にカッティン グヘッドを設置し、水槽内に水を張る。カッティングヘッドは遠隔で 1mm の精度で xyz の 3 軸でコントロールできる。AWJ 水中切断装置の主な仕様は以下のとおりであ る。

【仕様】

X 軸ストローク: 500mm Y 軸ストローク: 660mm Z 軸ストローク: 700mm 脚部フレーム高:1,940mm 装置全高 : 3,585mm 速度範囲 : 5~2,000/min 水槽容量 : 2m<sup>3</sup>

#### 4. 作業手順と切断結果

4.1 切断項目

Table 4.1 に切断作業工程の実績を示し、Fig.4.1 に切断手順を示す。

4.2 作業手順

本切断における AIJ 方式の作業手順を Fig.4.2 に、ASJ 方式の作業手順を Fig. 4.3 に それぞれ示す。

- 4.2.1 AIJ 方式
  - カッティングヘッドを試験装置に取り付け、切断槽に模擬試験体をセットした。
  - ② カッティングヘッドをセットし、スタンド距離等ヘッドの切断位置の確認を行った。
  - ③研掃材のセット、切断槽内の水張りを行った。
  - ④ 高圧水と研掃材をそれぞれカッティングヘッドに供給し、研掃材混合高圧水の 安定的な噴射の後、カッティングヘッドの移動・切断を開始した。
  - ⑤ 切断完了後、ヘッドの移動及び研掃材の供給を停止し、供給ホース内に研掃材が残っていないことを確認した後、高圧水の供給を停止した。AWJ水中切断装置の切断槽下部より水を抜き、切断状況を目視確認した。
- 4.2.2 ASJ 方式
  - カッティングヘッドを試験装置に取り付け、切断槽に模擬試験体をセットした。
  - ② カッティングヘッドをセットし、スタンド距離等ヘッドの切断位置の確認を 行った。その後、切断槽内の水張りを行った。
  - ③ 研掃材充填容器内に研掃材(ガーネット)を充填し、容器下部に設けた混合部に 水を供給してスラリーを形成させ、充填容器と高圧ポンプの圧力を調整し、 ノズルから噴射させる。
  - ④ 圧力が安定後、カッティングヘッドの移動・切断を開始した。
  - ⑤ 切断完了後、充填容器の弁を閉じ、高圧ポンプからの水の供給を停止した。 AWJ水中切断装置の切断槽下部より水を抜き、切断状況を目視確認した。
- 4.3 切断結果

各切断試験の結果について以下に示す。

(事前) AIJ 方式による水平(横)切断状況の確認(Fig.4.4)。

AIJ 方式の切断により、切断速度 5mm/min を選定した。

 AIJ 方式による約 190mmの水平(横)切断(Fig.4.5)。
 事前試験より切断速度 5mm/min で切断した際、切断音の変化を捉えた。音が 変化した箇所において再切断を行い、切断を完了した。 ② AIJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断。

垂直切断を行った結果(Fig.4.6)で多くの領域で切断できなかった。定規等を用いて切断状況を調査した結果、Fig.4.7 のように大部分の未切断箇所が確認された。この結果をもとに、AIJ 方式では切断時間がかかりすぎると判断し、ASJ 方式に変更した。

- ② ASJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断。 切断速度 5mm/min で切断した際、AIJ 方式同様、切断音の変化をとらえた。 音が変化したノズルの座標を記録し切断音の変化点までノズルを戻す、アッ プカットとダウンカットを繰り返す往復運動により、垂直(縦)切断を完了した (Fig.4.8)。
- ③ 約 190mmの ASJ 方式による水平(横)切断。
   ②'と同様に ASJ 方式にて切断を行い、切断音の変化点までノズルを戻す再切断を行った。その結果、材料分析に用いる片側半分の切断を完了した(Fig. 4.9)。
- ④ 約 190mmの AIJ 方式による水平(横)切断。
   切断面の性状とカーフ幅を考慮して、切断箇所をマーキングし、AIJ 方式でマーキングの通りの切断を完了した(Fig.4.10)。

結果、再臨界やデブリの取り出しに影響する溶融化した集合体内部の状態や成分分 布を調査するために必要な材料分析用の切断及び研磨加工が実施できる大きさまで切 断できた。

4.4 切断結果の考察

Fig.4.6の上面切断前及びFig.4.10の切断箇所マーキングにAWJにおける切断面を示し たように、AWJの噴流は写真の右側から左側に噴出され、ノズルは上から下方向に送 られている。本項では、2章の(1)式及び(2)式を元に、次回の切断作業の効率向上を目 指し、改善内容を検討する。

4.4.1 断面の荒さ抑制

トラバース(送り)速度の平方根は切断摩耗に反比例し、トラバース(送り)速度は変形 摩耗に比例する。本切断結果では、トラバース(送り)速度が速かったため、大きな変形 摩耗が確認された。したがって、適正なトラバース(送り)速度を選定することで改善が 期待できる。

### 4.4.2 切断時間の短縮

AWJの場合、ノズル部品の寸法を一定とすれば、切断材の流速Vは水の流速Vwに比例 するため水圧Pにほぼ比例する。切断深さhはVに比例することから、水圧を上げること は効果的である。一方で、水圧は共有するポンプの性能に依存する。要求水準を満た している現状で、ポンプの性能を上げる多額の設備投資は費用対効果が悪い。

2章の(1)式第1項の切断摩耗に示したように、対象の厚みが切断深さよりも厚い(若し くは被切断材のフローストレスが大きい)場合には、その先端で切断能力を失うと送り 方向と反対に噴流が逃げる。したがって、(1)式第2項の変形摩耗が示す材料の比エネル ギーに反比例する湾曲した切断面を生ずる。Fig.4.6の上面切断前及びFig.4.10の切断箇 所マーキングでは、中央部にある制御ブレード位置から出口方向に湾曲した切断面が 確認できた。言い換えると、模擬試験体の切断面において制御ブレードの孫沿いする 中央部までは変形摩耗が少なかった。したがってジェットの出口側から再切断のため に切断部材自体を回転させるなどの機構を加えることで改善が期待できる。なお、再 切断用の冶具はポンプの性能向上よりは安価で、作業時間の大幅な短縮が見込める。

#### 5. 水中切断音計測

本試験では人感で音の変化を確認できたが、人の認識には個体差がある。また、今後水中かつ遠隔でAWJ切断した場合、研磨剤などの影響で水が濁り水中カメラなどによる目視切断状況が難しい。したがって、切断時に発生する目視以外の変化(振動や音響)に着目し、代替監視技術として水中マイクを使った切断音計測<sup>12)</sup>を実施した。

5.1 システム概要

AWJによる切断可否を判定するため、Fig.5.1に示すような水中の切断音を収録する計測システムを用いた。このシステムに使用する主な機器は、PC、USB信号記録モジュ ール、水中マイク等である。音計測で用いた水中マイクの仕様をTable 5.1に示す。

5.2 計測概要

切断可否判断の参考とするために、以下の3ケースの切断位置において、水中切断 で発生する音の計測を行い、周波数帯域における音レベルの強弱のデータ取得を行っ た。

Case-①:模擬試験体に対して水平横切断(最上段)

Case-②:模擬試験体に対して垂直縦切断

Case-③:模擬試験体に対して水平横切断(最下段)

ジェットの方式として、AIJ と ASJ の双方の方式で切断を実施し、切断速度は 5~ 8mm/min とした。各切断における切断条件を Table 5.2 に示す。また、水中マイクは、 水槽内で切断の影響を受けないように切断ヘッドの背面下側に設置した。水中マイク の設置位置は、Fig.5.2 に示すように、模擬試験体より約 550mm 離し、高さは模擬試 験体設置面より約 500mm(切断位置③とほぼ同等高さ)高さとした。

5.3 計測結果(データ)

Case-①~③の切断において、水流の変化を感じさせるような切断音の変化が生じていた。その変化からジェットが試験体を貫通しているか否かを判断できる。

Case-①~③の試験体切断状態と計測データを Fig.5.3~Fig.5.5 に示す。また、各切 断状況を以下に示す。

Case-①(Fig.5.3)

切断速度 5mm/min で約 2,400s(40min)切断を行った。切断開始から 1,500~1,680s(25 ~28min)ののち、切断距離想定 133~140mm の間で切断音が変化した。Fig.5.3 の データでは、それまで 0~1,000Hz の間で音レベルが強かったが、切断距離想定 133 ~140mm の間は、1,000~5,000Hz に音レベルが強くなる変化が生じた。終了後の 試験体の切断状態から、切断距離想定 133~140mm の間は、切断不良(縁切り不良) が起きていることが分かった。その他の部分は、縁切りできていた。切断不良箇 所は再切断により縁切りを行った。 Case-2(Fig.5.4)

切断速度 5~10mm/min で約 4,500s(75min)切断し、垂直に切断距離として 280mm の切断を行った。Fig.5.4 のデータでは、切断開始から 2,100~3,750s、3,950~ 4,350s で①と同様に 1,000~5,000Hz に音レベルが強くなったので、切断不良が 生じていると想定し、切断移動をリバース操作し再切断を行った。終了後の試 験体の切断状態(Fig.5.4)から、ジェット出口側で試験体最上端から 80~160mm と 190~220mm の 2 か所の位置で切断不良(縁切り不良)が起きていることが分 かった。Fig.5.4 の 1,000~5,000Hz に音レベルが強くなった切断不良(A)と(B)と 想定できた。縁切り不良と想定する箇所で切断移動リバース操作をしたが、縁 切り不良が解消できていないので、その不良箇所はその部位のみ、アップカッ トとダウンカットを繰り返す往復運動により切断を完了した。

# Case-③(Fig.5.5)

切断速度 5~8mm/min で約 2,760s(46min)切断を行った。1,600~2,760s(26min40s~46min)の切断終了までの切断距離想定 133~200mm の間、切断音が変化した。 Fig.5.5 のデータでは、それまで 0~1,000Hz の間で音レベルが強かったが、切断距離想定 133~190mm の間は、1,000~5,000Hz に音レベルが強くなっている切断音の変化が生じた。①の状況と同様、切断距離想定 133mm から切断終了まで切断不良(縁切り不良)が起きていると想定できた。縁切り不良箇所は再切断を行うことにより切断を完了した。

今回の切断における、計測結果を以下にまとめる。

- 0~1,000 Hz で音レベルが強い時は、ジェットが試験体を切断貫通できていると 想定できる。
- 1,000~5,000Hz で音レベルの強さが分散している時は、試験体をジェットが切 断貫通できていないと想定できる。

## 6. 結 論

溶融化した集合体内部の状態や成分分布を調査するため、電子線マイクロアナライザ(WDX) やレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析(LA-ICP-MS)等を用いた材料分析が必要 になる。しかし、それらの分析のためには、装置が許容できる試料の大きさ及び表面状態まで 細断加工する必要がある。ホウ素を含む溶融物は、非常に硬いこと(ZrB2 系の硬さ約 13GPa~ 20GPa<sup>1)</sup>)が知られており、大型な模擬燃料集合試験体の切断加工技術が課題であった。そこで、 国内外の原子炉廃止措置において水中及びセラミックス(アルミナ等)による厚板切断の実績を 有する AWJ 切断を選定した。AWJ 切断の結果、溶融固化した部分で1回(ワンパス)での切断が 困難な場合にはアップカットとダウンカットを繰り返す往復運動により切断を実施し、それで も切断が困難な場合は国内での実績が少ないが AIJ 方式(従来工法)よりもおよそ数倍効率が良 いとされる ASJ 方式を用い、材料分析のために必要な装置が許容できる試料に加工(切断及び研 磨)することが可能な大きさまで切断できた。

また切断作業では、AWJの先端で切断能力を失うと送り方向と反対に噴流が逃げる際に生じ る湾曲した切断面が試験体中央部(制御ブレード近傍)で確認できた。この結果から、切断面の 荒さを抑えるための適切なトラバース(送り)速度の選定や切断時間の短縮のためのジェットの 出口側から再切断を行うことで改善が期待できる。

さらに目視による切断状況の確認が困難となる濁水中においても、音響をモニタリングする ことにより切断状況の確認が可能であることの見通しを得た。

以上、燃料デブリの中でも最も硬度が高いホウ化物が存在する模擬試験体の切断は、模擬試 験体が大型(約 300mm (約 30 mm (約 300mm (約 30 mm (約 300mm (約 30 mm (約 300mm (約 300mm (約 300mm (約 300mm (約 30 mm (約 300mm (約 30 mm (約 300mm (約 30 mm (約 30 mm (約 300mm (約 300mm (約 300mm (約 300mm (10 mm (10 mm (10

# 謝 辞

本切断手法の検討にあたっては、事故進展挙動評価ディビジョンの佐藤 一憲サブディビジョ ンリーダーに有益なアドバイスを頂いた。また、切断作業を実施するにおいて、多大なご尽力 を頂いた日進機工(株)の高島 雄次様、見波 哲冶様、飯田 桂一様に心から感謝する。また本報 告書の構成にアドバイスを頂いた高速炉技術開発部の吉田 英一様にも心から感謝する。

### 参考文献

- Takano, M., Nishi, T., Shirasu, N., Characterization of solidified melt among materials of UO<sub>2</sub> fuel and B<sub>4</sub>C Control blade, Journal of Nuclear Science and Technology, 51, (2014), pp. 859-875.
- 2) 中村 保之, 岩井 紘基, 手塚 将志, 佐野 一哉, 東京電力福島第一原子力発電所の炉内構造 物解体を想定した AWJ 切断技術による適用性試験, JAEA-Technology 2015-055, (2016), 89p.
- 3) Abe, Y., Sato, I., Nakagiri, T., Ishimi, A., Nagae, Y., Development of Non-Transfer Type Plasma Heating Technology to Address CMR Behavior during Severe Accident with BWR Design Conditions, Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plans (ICAPP 2017) 2017-17646, Fukui and Kyoto, Japan, (2017).
- 4) B. J. Kullen, N. M. Levitz, and M. J. Steindlere, Management of Waste Cladding Hulls, ANL-77-63.
- 5) 村松 壽晴,山田 知典,羽成 敏秀,武部 俊彦,松永 幸大,レーザー光を用いた燃料デブ リ・炉内構造物取り出しに向けた研究 1 研究計画及び平成 24 年度研究成果, JAEA-Research 2013-024, (2013), 49p.
- 6) 手塚 将志,中村 保之,岩井 紘基,佐野 一哉,東京電力福島第一原子力発電所の炉内構造 物解体を想定したプラズマ切断技術による適用性試験, JAEA-Technology 2015-047, (2016), 114p.
- 7) Hashish, M., An Investigation of Milling with Abrasive-Waterjets, Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, 111, (1989), pp.158-166.
- 8) 清重 正典, 研磨剤を含むウォータージェットの切断能力について, ターボ機械, 17(11), (1989) pp.700-707.
- Finnie, I., McFadden D. H., On the Velocity Dependence of the Erosion of Ductile Metals by Solid Particles at Low Angles of Incidence, Wear, 48, (1978), pp.181-190.
- 10) Brandt, C., Louis, H., Meier, G., Tebbing, G., Abrasive suspension jets at working pressure up to 200MPa, Jetting Technology, (1994), pp. 489-509.
- 11) 清水 誠二, 西山 貴教, 志村 孝夫, 表 龍之,アブレシブサスペンションジェットの水中せん 孔特性,日本機械学会論文集 B 編, 68(676), (2002), pp.3346-3351.
- 12) 日本原子力研究開発機構,中村保之他,円管切断方法,特許第5187942号,H25.2.1.

Table 2.1 特性比較表

区分		Abrasive Water Jet (AWJ)	レーザー切断	プラズマ切断	バンドソー切断	
切断	の種類	運動エネルギーを 利用した切断	熱切断	熱切断	機械切断	
長所	・特徴	<ul> <li>切断対象を選ば ないことから複 合材でも切断可</li> <li>熱的影響がない。</li> </ul>	<ul> <li>切断精度が良い</li> <li>熱的影響部の深 さが浅い。</li> </ul>	<ul> <li>大型の切断が可能</li> <li>切断速度が速い</li> </ul>	<ul> <li>         替え刃だけで切 断が継続。     </li> <li>         熱的影響部の深 さが浅い     </li> </ul>	
切断	能力(SUS304)	板厚 600mm※1 (600MPa)	板厚 30mm※2	板厚 210mm※3	板厚 700mm※3	
切断	能力(アルミナ)	約 180mm(230MPa)	熱衝撃でペレッ ト1個分程度	約 40mm	×	
気中	切断性	0	0	0	0	
水中	切断性	0	0	$\bigtriangleup$	0	
非金)	属切断	切断材質を選ばず切 断可能	切断面の焼けや変 色、熱衝撃で割れ が生じる為、適さ ない	本来の切断では非 導電性は切断不 可。切断能力が落 ちるプラズマジェ ットで切断可。	靱性が高いもの 及び歯がささら ないものは切断 ができない。	
切断	コスト	熱切断と比較する と高い	比較的安い	レーザー切断よ り低コスト	熱切断と比較す ると高い	
	① 非金属	0	Δ	$\times / \bigtriangleup$		
切断 切断技術	② 大型試験体	×→○ <sup>※</sup> ※AWJ 切断装置を適用	0	0	0	
技術の適	<ol> <li>3</li> <li>超硬質材料</li> </ol>	Ø	×		×	
用性	④ エポキシ樹脂 (粘り、非導電性)	0	Δ	$\times / \bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	
	総合	O	×		×	

※1 林辰産業(株)HP: http://www.hayashitatu.jp/index.html ※2 能勢鋼材(株)HP: http://nose-sus.co.jp/process/index.html

※3 (株)大谷加工 HP: <u>http://www.ohtani-kakoh.co.jp/index.html</u>

	П	ЫM							
	31	AM							
月	П	PM							
10	25	AM							
	日日	ΡM							
	57	AM							
	和断距離	шш	100	190	270	270	190	200	200
	スタンドオフ	шш	10	10	10	10	10	10	10
	研掃材量	kg∕min	1.5	1.5	1.5	1.5~2.0	1.5~2.0	1.5	1.5
	++=+11	いおおやり	ガーネット (TYPE3)	ガーネット (TYPE3)	ガーネット (TYPE3)	ガーネット (80MESH)	ガーネット (80MESH)	ガーネット (TYPE3)	ガーネット (TYPE3)
	使用圧力	MPa	230	230	230	230	230	230	230
新	切断速度 mm/min		$10 \rightarrow 5$	5	5、10	2, 10 5, 8 5, 8 5, 8		5	5
创	カッティングへッド		(AMOM) 利用	(WOM) 出近	(WOM) 出近	ANT	ANT	(WOM) 出近	汎用 (WOMA)
	<b>壶 田</b> 仁	## () () () () () () () () () ()		水中	水中	水中	水中	水中	
	t t	7 F	٩IJ	٩IJ	AlJ ASJ ASJ		ASJ	٩IJ	٩IJ
	百形市	(기 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년 년	水平(横)	水平(横)	垂直(縱)	垂直(縱)	水平(横)	水平(横)	水平(横)
	2	NO.	(庫聿)	Ð	3	S,	3	4	Ð

Table 4.1 切断作業工程(実績)

Table 5.1 水中マイクの仕様

型番	8103			
感度	-211dB re $1 V/\mu Pa\pm 2dB$			
公称電圧感度		29µV/Pa		
公称電荷感度		0.1pC/Pa		
静電容量(標準ケーブルを含む)		3700pF		
		0.1Hz to 20kHz		
		+1/-1.5dB		
国波粉広 <b></b> (250日7)		0.1Hz to 100kHz		
问(及)加合圣平(250HZ)		+1.5/-6.0dB		
		0.1Hz to 180kHz		
		+3.5/-12.5dB		
水平方向指向性(x y 平面にラジア)	ルレ)	±2dB at 100kHz		
垂直方向指向性(xy平面のまわり)	)	4dB at 100kHz		
リーケージ抵抗(at20×C)		>2500MΩ		
	短時間	-30°C to +120°C		
—————————————————————————————————————	連続	-30°C to +80°C		
19 度に対する咸度亦化	電荷	0 to +0.03dB/°C		
価度に対する感度変化	0 to -0.03dB/°C			
上限静圧	$252$ dB= $4 \times 10^{-6}$ Pa= $40$ atm ocean depth			
	0 to- $3 \times 10^{-7}$ dB/Pa			
肝/工に刈りる燃度変化		(0to-0.03dB/atm)		
許容放射線量		5×10 <sup>-7</sup> Rad		

Table 5.2 切断条件

No.	切断	方式	雰囲気	切断	・ 切断速度 圧力		研掃材 供給量	スタン ドオフ	切断 距離
	刀问			~yr	mm/min	MPa	kg/min	mm	mm
1	水平	AIJ	水中	汎用 (WOMA)	5	230	1.5	10	190
2	垂直	AIJ	水中	汎用 (WOMA)	5、10	230	1.5	10	270
3	水平	ASJ	水中	ANT	$8 \rightarrow 5 \rightarrow 8$	230	1.5~2.0	10	190



Fig.2.1 模擬燃料集合体(左図)製作図、(右図)写真



Fig.3.1 AWJ 切断試験室



Fig.3.3 ASJ 方式切断機器構成





AWJ 水中切断装置の構造



切断水槽内部の試験体設置状況 Fig.3.5 AWJ 水中切断装置



【切断手順】

(事前)AIJ 方式による水平(横)切断状況の確認。

- ① AIJ 方式による約 190mm の水平(横)切断。
- ② AIJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断。

②'ASJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断。

- ③ 約190mmのASJ方式による水平(横)切断。
- ④ 約190mmのAIJ方式による水平(横)切断。
- ⑤ 約190mmのAIJ方式による水平(横)切断。

Fig.4.1 切断手順



① 試験体セット 



④ 試験体切断 



② 切断位置の確認



⑤ 切断後



③ 研掃材の供給

Fig.4.2 作業手順 (AIJ 方式)

# JAEA-Technology 2017-023







④ 試験体切断



② 切断位置の確認



⑤ 切断後



③ 研掃材の充填

Fig.4.3 作業手順 (ASJ 方式)



切断前

切断後

Fig.4.4 (事前) AIJ 方式による水平(横)切断状況の確認



切断前 切断後Fig.4.5 AIJ 方式による約 190mm の水平(横)切断



鳥瞰切断前



側面切断後



上面切断前 上面切断後 Fig.4.6 AIJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断



Fig.4.7 未切断箇所



側面切断前 側面切断後Fig.4.8 ASJ 方式でブレードに対し直角に約 270mm の垂直(縦)切断



上面切断前 上面切断後Fig.4.9 約 190mm の ASJ 方式による水平(横)切断



切断箇所マーキング



Fig.4.10 約 190mm の AIJ 方式による水平(横)切断





Fig.5.2 水中マイク設置位置(切断装置水槽内)

JAEA-Technology 2017-023



(1) 周波数帯域毎の音レベルの経時変化



(2) 計測モニタ



Fig.5.3 切断音計測データと試験体切断状態 (Case-①水平横切断・最上段)



JAEA-Technology 2017-023





<sup>(1)</sup> 各周波数帯域の音レベルの経時変化

※1 切断移動リバース部:切断音により切断不良の可能性を判断し、切断移動をリバース操作して一連の切断の中で再切断を実施した箇所

Fig.5.4 切断音計測データと試験体切断状態 (Case-②垂直縦切断) (1/2)



(2) 計測モニタ



(3) 試験体切断状態ジェット出口側

Fig.5.4 切断音計測データと試験体切断状態 (Case-②垂直縦切断) (2/2)









(2) 計測モニタ

# 付録1:写真集

本作業にかかわる作業時の写真を選定し、以下の項目で示した。

- 1. 模擬試験体
- 2. AIJ方式切断機器
- 3. ASJ方式切断機器
- 4. 研掃材
- 5. 切断手順
- 6. 切断結果 (1/6)-(6/6)

	3		1	模擬試驗体		I						
11) 跳 Tri (夹)就的或件	2	2016/9/12	1	模擬試驗体		1						
	1		1	模擬試驗体		I						
	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	百	備考	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	好	備考

	6			研掃材供給装置		供給量:0~3.6kg/min						
1) 欺 I. I. A. I. J. J. J. J. W. WIT WAR	5	2016/10/24		高圧ポンプ	Ecomaster Magnum	最大吐出圧力:245 MPa	8	2016/10/24	1	カッティングヘッド		Ι
	4			全景		I	2	2016/10/25	I	AWJ水中切断試験装置		水槽容量2m <sup>3</sup> ヘッド3軸方向移動可能型
1 1 1	写真畨号	撮影年月日	試驗番号	名称	貢	備考	写真番号	撮影年月日	試驗番号	名称	西	備考

付錄 1.2 AIJ 方式切断機器

	11	2016/10/25	-	ユニット		圧力容器:40L 吐出数量:約10~30L/min						
1.2 ADJ クスツ町後年	10(5)	2016/10/24	—	- インド 王皇	Comaster Maint	最大吐出圧力: 245 MPa	13	2016/10/25	-	カッティングヘッド		I
	6	2016/10/25	-	全景		I	12 (7)	2016/10/25	-	AWJ水中切断試験装置		水槽容量2m <sup>3</sup> ヘッド3軸方向移動可能型
-	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	「「「」」で	譱栲	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	受	備考

付録 1.3 ASJ 方式切断機器

	16	2016/10/25		ガーネット								
11. 政化 1.4 初月市内	15	2016/10/25	-	$\breve{\mathcal{J}} - \breve{\mathcal{A}}  ightarrow \mathbb{h}$ (80MESH)		ASI方式研掃材						
	14	2016/10/24		$\cancel{\pi} - \cancel{\pi} \lor \vdash (\mathrm{TYPE3})$	TRANSMORTS TRANSM	AII方式研棉材						
	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	文	雟	台聚宣右	撮影年月日	試験番号	名称	文	備考

	19		事前	水注入		1						
<b>钉錸 1.5 切酌于</b> 順	18	2016/10/24	事前	ノズル位置確認	101234567898 D12345678980	1	21	10/24	車前	切断完了		I
	17		事前	模擬試験体取付け		I	20	2016/1	事前	水中切断		I
	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	承	備考	写真番号	撮影年月日	試驗番号	名称	英	備考

5	F-2		模擬試驗体断面		I	27		0	模擬試験体断面拡大		1
1.1 致 1.0 少即而天 (1/0)	2016/10/24	Œ	模擬試験体		Ι	26	2016/10/24	Ū	模擬試驗体断面		I
3	77	事前試驗	模擬試験体		I	25		D	模擬試驗体上部		I
山市水口	サ兵省の 撮影年月日	就驗番号	名称	受	備考	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	这	備考

付録 1.6 切断結果 (1/6)

5	AC	0	模擬試験体断面		I	33		3	切断状況		Ι
1.0 到雪箱未 (2/0)	2016/10/25	Ø	ジェット出口側		AII方式切断後	32	2016/10/25	©	切断状況	Particular and	Ι
ç	70	8	ジェット入口側		AIJ方式切断後	31		3	切断状況		I
山山	少兵軍の 撮影年月日	MA.W-1.J-1 試験番号	名称	写	雟	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	立	筆

休録16 初断結里 つる

76	00	6	模擬試験体		I	39		0	模擬試驗体下側断面		Ι
1.0 9.10 1.0 9.10 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0	cc 30/01/910C	2010010/22	模擬試験体		9.期的完式USA	38	2016/10/25	®	模擬試驗体上側断面		I
72	±0	ĵ,	模擬試驗体		I	37		B	模擬試験体		I
百世年口	中央省の 国家在日口	東影半月日 試験番号	名称	好	備考	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	恒式 位十	雟챈

42	!	0	模擬試驗 体断面		摘出した模擬試験体の断面	45		0	模擬試驗体		1
付録1.6 切断結果 (4/6)	2016/10/25	0	模擬試驗体詳細		右上側の詳細写真	4	2016/10/25	0	模擬試驗体詳細		軍法部に
40	÷.	0	模擬試驗体詳細		左上側の詳細写真	43		0	模擬試驗体詳細		左下側の詳細写真
項真番丹	撮影年月日	試験番号	名称	百次	筆	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	p 武	備考

	48		©	模擬試驗体断面詳細		1	51		4.5	模擬試験体断面		下側切断面
付録 1.6 切断結果 (5/6)	47	2016/10/25	3	模擬試驗体断面		I	50	2016/10/31	(F)	模擬試験体		I
	46		(9)	模擬試験体断面		I	49		(F)	模擬試驗体		Ι
	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	写	雟	写真番号	撮影年月日	試驗番号	名称	写	備考

				<u> </u>				<u> </u>				
	54		(†)	模擬試驗体断面		上側切断面						
<b>竹繁 1.0 切</b> 酌結果 (0/0)	53	2016/10/31	(J. E.	模擬試驗体断面		上側切断面						
	52		(4.5)	模擬試験体断面		下側切断面						
	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	野	備考	写真番号	撮影年月日	試験番号	名称	減	備考

\_

表1.	<u>Ľ</u>								
甘大昌	SI 基本単位								
本平里	名称	記号							
長さ	メートル	m							
質 量	キログラム	kg							
時 間	秒	s							
電 流	アンペア	Α							
熱力学温度	ケルビン	Κ							
物質量	モル	mol							
光度	カンデラ	cd							

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例
AI 立長 SI 組立単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 旭立単位							
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方				
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m				
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$				
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>				
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>				
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$				
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$				
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>				
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A				
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$				
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$				
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$				
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$				
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$				
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$				
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$				
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K				
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd				
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd				
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>				
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$				
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$				
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol				

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はとおらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2 (CI-2002) を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^2 K^1$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$	
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A	
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A	
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A	
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^2 K^1 mol^1$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A	
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d	
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с	
$10^{18}$	エクサ	Е	$10^{-3}$	ミリ	m	
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ	
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n	
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р	
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f	
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а	
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z	
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

# 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

名称	記号	SI 単位で表される数値	
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>·27</sup> kg	
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da	
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m	

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称記		記号	SI 単位で表される数値			
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$