

# 「ふげん」原子炉本体解体に向けた AWJ 技術の適用性検討評価

## －厚板水中切断性能の把握と音による切断監視試験－

### Assessment of the Applicability of AWJ Technique for Dismantling the Reactor of Fugen - Performance of Underwater-Cutting Thick Plate and Testing of Sound-Based Monitoring for Underwater-Cutting Process -

丸山 信一郎 SHIN-ICHIRO MARUYAMA

西尾 新一 SHIN-ICHI NISHIO

原子炉廃止措置研究開発センター「ふげん」の原子炉本体は、圧力管とカランドリア管からなる二重管構造を特徴としている。原子炉本体解体は、逐次水中で行われる予定であり、二重管の同時解体技術として、アブレイシブウォータージェット(AWJ)水中切断工法を有力候補の一つとしている。

AWJ 技術の適用性検討評価にあたり、開発した小型 AWJ 切断装置で厚板水中切断の性能確認を行った。また切断時に水の濁りが発生するため、二次的な切断監視技術として、音による切断監視を行った。結果より、ステンレス鋼板水中切断では、150mm の板厚をワンパスで切断可能であることを実証し、かつ、切断深さと切断可能速度との関係予測を可能にした。また、音による切断監視では、切断状況を音レベルの変化を捉えることで切断良否状況予測の可能性を確認した。

**キーワード**：ふげん，原子炉解体，アブレイシブウォータージェット(AWJ)，水中切断，音

The reactor of Fugen is characterized by its double-walled pressure tube construction that is composed of pressure tubes and calandria tubes. The reactor dismantlement has been planning on dismantling it under water and the abrasive water jet (AWJ) underwater-cutting method is chosen as an option among simultaneous double tubes cutting technologies.

For assessing the applicability of the AWJ cutting technology, a thick plate was cut under water by the small AWJ cutting machine. In addition, since cutting causes muddiness in water, cutting was monitored by the sound-based monitoring system which was adopted as a secondary cutting monitoring method. As a result, it was demonstrated that one-pass cutting was possible under water for a stainless-steel plate with 150mm thickness and that the relationship between cutting depth and capable cutting speed could be predictable. As for the sound-based cutting monitoring, the predictability whether or not cutting would be successful was verified by checking the change of sounds level.

**Key Words**: Fugen, Reactor Dismantlement, Abrasive Water Jet(AWJ), Underwater-Cutting, Sound

## 1. はじめに

原子炉廃止措置研究開発センター「ふげん」(写真-1)は、安定した稼働率で約 25 年間稼働し、2003 年 3 月に運転を終了した。現在は、廃止措置中で原子炉解体工法の検討が進められている<sup>1),2)</sup>。

「ふげん」は、熱出力 557MWt、電気出力 165MWe の重水減速沸騰軽水冷却圧力管型原子炉で、圧力管とカランドリア管をそれぞれ 224 本ずつ内蔵する複雑で狭隘な管群構造<sup>3)</sup>を特徴としている(図-1)



写真-1 原子炉廃止措置研究開発センター「ふげん」

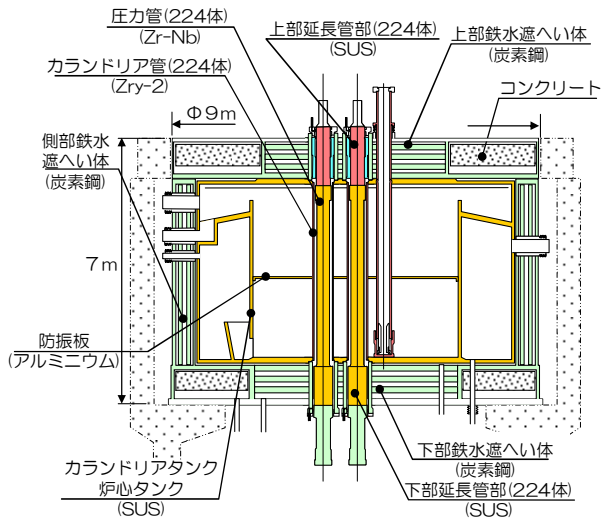


図-1 原子炉本体構造

特に、このような原子炉構造物の解体では、放射性物質の拡散を防ぐこと（汚染拡大防止）が重要なため、候補とされる切断工法の適用性を試験し、その諸特性について充分検討しておくことが必要である。

本報では、候補とされる小型 AWJ 切断工法の想定される課題（厚板切断性能、切断監視方法）について試験を実施し、その試験より得られた成果について述べる。

なお、本成果は、（独）日本原子力研究開発機構「ふげん」における原子炉解体工法の検討のため実施した試験によるものである。

## 2. AWJ 水中切断の課題と対応

小型 AWJ 切断工法の適用検討にあたり、これまで世界最小クラスの小型 AWJ 切断装置を開発し、二重管を同時切断できることを確認した<sup>3)</sup>（図-2）。しかし、AWJ 水中切断に関して、以下の課題があり、課題への対応のため試験を実施した。

- ① 汎用ノズル（写真-2）と比較してヘッドを小型化したことによる能力の低下が懸念されたため、炉内構造物のステンレス鋼板（SUS304 t=150mm）に対して切断可能性の検証を行い、ステンレス鋼板の厚さに対する切断可否予測を行った。
- ② 水中切断時に、切断粉などの影響と思われる水の濁りの発生が確認された（写真-3）。そのため、水中カメラなど以外の二次的な水中切断監視技術の検討が必要となり、その切断監視技術として、切断音による監視方法を候補にあげ、切断時の音の変化を計測した<sup>4)</sup>。

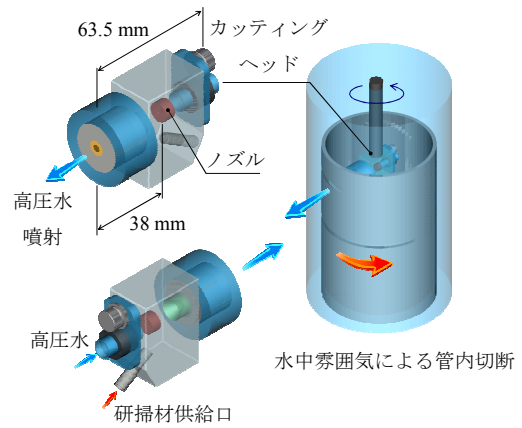


図-2 小型 AWJ 切断装置（イメージ）

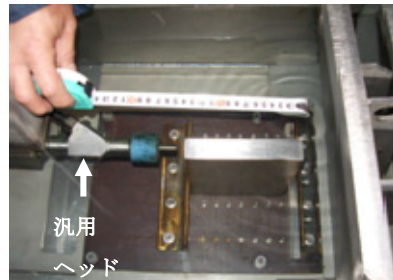
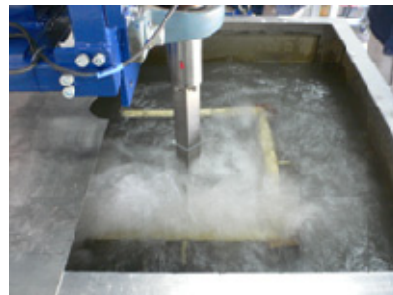
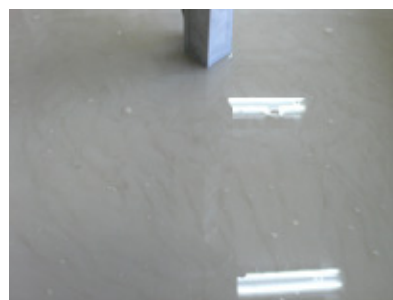


写真-2 汎用 AWJ ヘッド



(a) 切断中



(b) 切断後

写真-3 AWJ 水中切断における水の状態

## 3. 小型 AWJ による水中厚板切断試験

### (1) 試験方法

被切断部材に、ステンレス鋼板（SUS304 t=150mm および t=80mm）を用いて、小型 AWJ 切断装置と被切断部材とのスタンドオフ距離および研掃材供給量を一定に保

ち切断速度を可変させ、水中における被切断部材の切断深さの確認を行った。ステンレス鋼板設置状況を写真-4に示す。また、切断条件を表-1に示す。

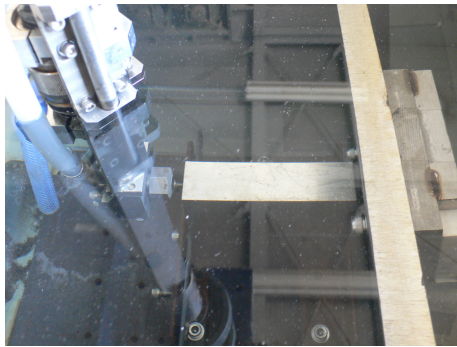


写真-4 ステンレス鋼板設置状況

表-1 切断条件 (ステンレス鋼板切断)

NO	被切断部材	雰囲気	スタンドオフ距離 (mm)	研掃材	研掃材供給量 (kg/min)	切断速度 (mm/min)
1	SUS304 t=150mm	水中	10	ガーネット	1.0	3.6
2						4.8
3						6
4	SUS304 t=80mm					41
5						100
6						138

### (2) 試験結果

ステンレス鋼板 (SUS304 t=150mm および t=80mm) を用いた場合の切断速度と切断深さの関係を表-2に示す。

被切断部材にステンレス鋼板 (SUS304 t=150mm) を用いた場合、切断速度 3.6 mm/min および 4.8mm/min で、切断深さ 150mm 以上であった。しかし、切断速度 6.0 mm/min では縁切れができていない箇所があり、切断深さ 145mm であった。写真-5 にステンレス鋼板 (SUS304 t=150mm) の切断状態を示す。

### (3) 考察

図-3にステンレス鋼板の板厚に対する切断可能速度予測曲線 (スタンドオフ距離 10mm) を示す。図-3中の点線が、ステンレス鋼板の板厚に対する切断可能速度予測曲線であり、小型 AWJ によるステンレス鋼板の各切断速度に対する切断可能な板厚との関係を示している。

今後、このグラフより、さまざまな板厚 (ステンレス鋼板) の切断可能速度を予測することが可能と考える。

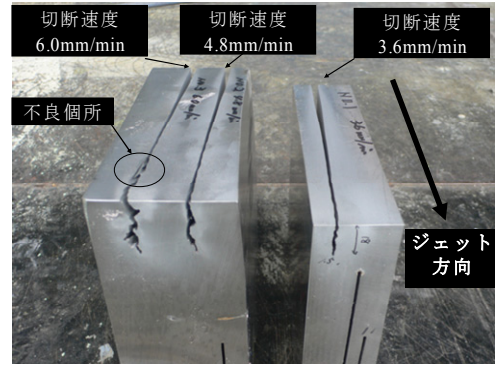


写真-5 ステンレス鋼板 (SUS304 t=150mm) の切断状態

表-2 切断速度と切断深さの関係 (ステンレス鋼板切断)

NO	切断速度 (mm/min)	切断深さ (mm)
1	3.6	150以上
2	4.8	150
3	6	145
4	41	58
5	100	25
6	138	21

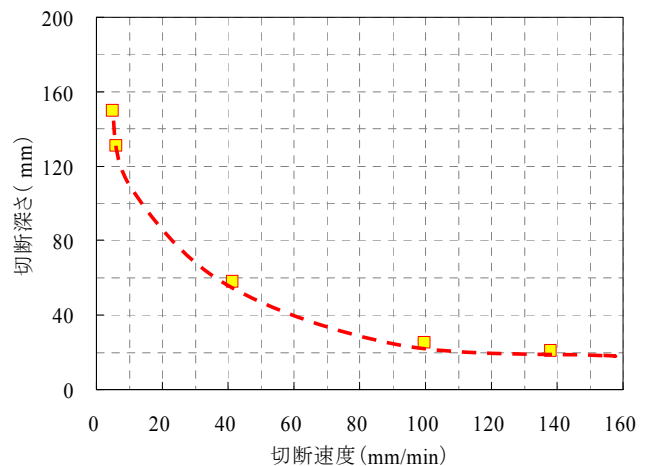


図-3 ステンレス鋼板の板厚に対する切断可能速度予測曲線 (スタンドオフ距離 10mm)

## 4. 音による切断監視試験

### (1) 計測機器の仕様および設置方法

AWJによる切断可否を判定するため、水中切断音を解析するシステムを開発した。このシステムに使用する主な機器は、モニタ (パソコン)、USB 信号記録モジュール



表-3 音計測機器の仕様

No	項目	型式	主な仕様
①	USB信号収録モジュール	NIUSB-9233	4ch AI, 24bit, 50kHz
②	水中マイク	B&K 8103	~20kHz
③	アンプ	B&K 269x	-
④	データ収録パソコン	WindowsXPwith SP2	LabVIEW8.21

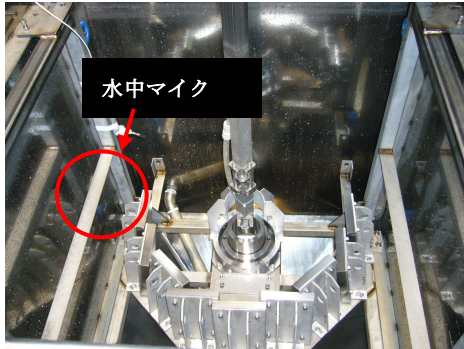


写真-6 水中マイク設置状況

ル、水中マイクなどである。音計測機器の主な仕様<sup>5)</sup>を表-3に示す。水中マイクは、切断装置から直線距離にして400mm程度離れた位置とした。水中マイクの設置状況を写真-6に示す。

(2) 切断条件

小型AWJ切断装置を用いて、ステンレス鋼の円管および厚板を切断した時の音の周波数特性の変化を計測した。切断条件を表-4に示す。

表-4 切断条件(音計測)

被切断部材	ポンプ水圧 (MPa)	研掃材供給量 (kg/min)	スタンドオフ距離 (mm)	切断速度 (mm/min)	切断時間 (sec)
内管 (SUS304: 板厚16mm)	200	1.0	2.5	18	250
外管 (SUS304: 板厚10mm)			40	32	250
二重管 (SUS304: 管厚16mm 10mm)			2.5	18	250
平板 (SUS304: 板厚80mm)			50	30	80

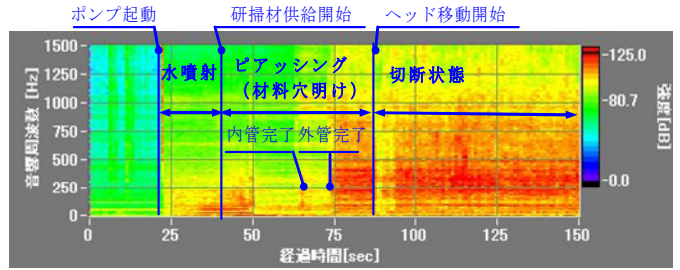
(3) 計測結果

音の周波数特性の変化について、ステンレス鋼円管 (SUS304) の水中切断状況とステンレス鋼板 (SUS304 t=80mm) の水中切断状況を図-4に示す。

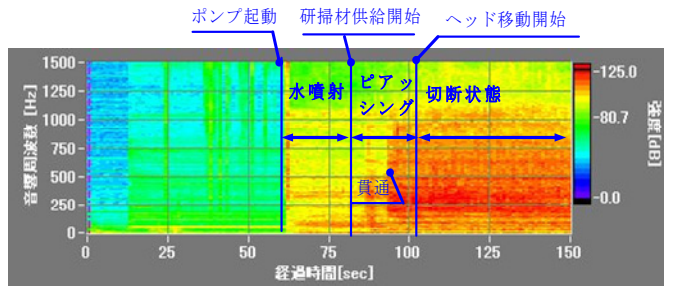
ステンレス鋼円管およびステンレス鋼板とも、切断良好時の音の周波数特性変化である。

ステンレス鋼円管切断中は、二重管、外管単体、内管域で大きいレベルを示した (図-5(a)~(c))。

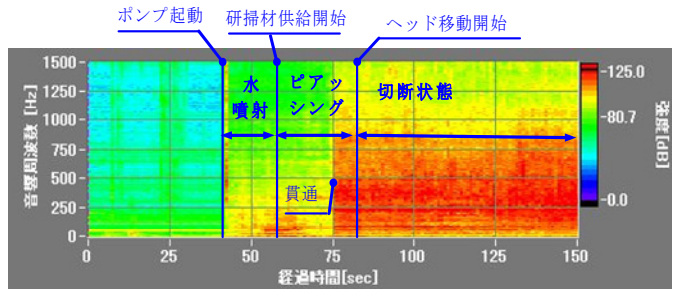
一方、ステンレス鋼板切断中は、250~500Hzの周波数帯域で大きいレベルを示したが、切断時間の経過と



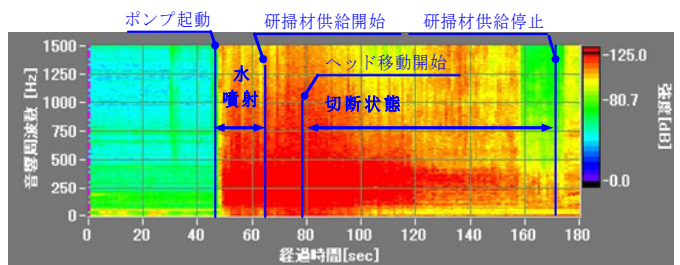
(a) 円管 (SUS304 二重管) ・切断速度 18mm/min



(b) 円管 (SUS304 外管単体) 切断・切断速度 32mm/min



(c) 円管 (SUS304 内管単体) 切断・切断速度 18mm/min



(d) ステンレス鋼板 (SUS304 t=80mm) 切断・切断速度 30mm/min

図-4 音の周波数特性変化状況

もに音が小さくなった (図-4(d))。

ステンレス鋼円管およびステンレス鋼板ともに、ジェット噴射ピアッシング (材料穴明け) などの切断工程の状況変化について、明確に捉えることができた。

(4) 考察

切断中の水中音レベルの周波数特性変化状況について円管切断中 (ヘッド回転中) に水中マイクロホンで検知されたレベルの高い音 (主な周波数帯域 200~500Hz) は、AWJが二重管外管の外側に到達した状態 (切断良好

状態)で発生しているため、水流摩擦音による影響と推測している。

一方、厚板切断中(ヘッド移動中)では、切断開始当初は、周波数帯域 0~1,500Hz と比較的広い範囲で、大きい音が確認されたが、時間の経過とともに、音のレベルが低下し、レベルを強く示す周波数帯域範囲も狭くなった。この現象は、アブレイシブジェットが被切削材を貫通しているか否かによる水流摩擦音の変化が影響していると思われる、被切削材を貫通している状況のほうが水流は一定しており、音の状況が安定していると推測している。

## 5. 結論

本試験の成果と今後検討すべき課題について、以下にまとめる。

### ① 小型 AWJ による水中厚板切断

小型 AWJ 切断装置により、ステンレス鋼 (SUS304 t=150mm) を切断速度 4.8mm/min にて、ワンパス切断可能であることを実証した。

また、各切断速度による切断深さの関係(スタンドオフ距離 10mm)より、小型 AWJ 切断装置を用いた場合のステンレス鋼板の板厚に対する切断可能速度を予測することが可能となった。今後は、スタンドオフ距離を変化させた場合の切断可能速度予測が課題となる。

### ② 切断工程における音の変化特性

水中切断音について、円管および厚板ともに、ジェット噴射、ピアッシング(材料穴明け)などの切断工程の状況変化について、明確に捉えることができた。

また、部材貫通か否かの水流摩擦音の変化を捉えることが、切断良否判断の有効な手段となる可能性を示していることが分かった。今後、水流摩擦音の変化を今以上に明確に捉える手法の検討が必要となる。

**謝辞:** 本研究で対象とした「ふげん」原子炉本体解体技術の検討評価に関して、(独)日本原子力研究開発機構 敦賀本部 原子炉廃止措置研究開発センター 技術開発部 森下喜嗣次長、同部 技術開発課 佐野一哉課長代理、中村保之氏、岩井紘基氏にご指導、ご助言を賜りました。ここに記して深謝の意を表します。

### 参考文献:

- 1) 岩井紘基, 佐野一哉, 中村保之, 大鐘大介, 丸山信一郎, 高島雄次: 「ふげん」原子炉解体技術の適用性検討評価-アブレイシブウォータージェットによる二重管模擬材切断試験(その4)-, 日本原子力学会 2008 年秋の年会予稿集, No.6, 2008.9
- 2) 丸山信一郎, 大鐘大介: 「ふげん」原子炉本体解体に向けた AWJ 技術の適用性検討評価-研掃材を再利用した切断試験と切断監視技術の開発-, 三井住友建設技術開発センター報告 No.7, 2009.11
- 3) Yasuyuki Nakamura, Kouichi Kikuchi, Yoshitugu Morisita, Tatsuo Usui, Daisuke Ogane: Applicability Examination and Evaluation of Reactor Dismantlement Technology in the Fugen-Examination of Double Tubes Cutting by abrasive Water Jet- Proceeding of 14th International Conference of Nuclear Engineering, ICONE14-89380, 2006.7
- 4) 中村保之, 岩井紘基, 佐野一哉, 森下喜嗣ほか: 「ふげん」原子炉本体解体に向けた AWJ 切断技術の適用性試験, デコミッションング技報 (Journal of the RANDEC), No.38, 2008.11
- 5) Yasuyuki Nakamura, Yoshitugu Morisita, Shinichiro Maruyama, Shinichi Tezuka, Daisuke Ogane, Yuji Takashima: Assessment of the Applicability of the Abrasive Water Jet Technique for Dismantling the Reactor of Fugen, Proceeding of 16th International Conference of Nuclear Engineering, ICONE16-48828 2008.5