

# 「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 －

Assessment of the Applicability of AWJ Technique for Dismantling the Reactor of Fugen  
- Cutting Tests for Recycled Abrasive and Development for Cutting Monitoring Technique -

丸山 信一郎 SHIN-ICHIRO MARUYAMA

手塚 慎一 SHIN-ICHI TEZUKA

大鐘 大介 DAISUKE OGANE

原子炉廃止措置研究開発センター(通称：ふげん)の原子炉は、圧力管型を特徴としている。原子炉本体解体の検討にあたり、圧力管とカランドリア管からなる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)を候補にあげ、その適用性を試験した。試験では、AWJの課題となる二次廃棄物量の低減と水中における切断監視技術の確立を目的に、切断への研掃材再利用の可能性と音および振動による切断監視技術の可能性を確認した。

キーワード：ふげん、原子炉本体解体、圧力管、二重管、アブレイシブウォータージェット

The reactor at Fugen Decommissioning Engineering Center is characterized by its tube-cluster construction. As a part of the study of the reactor dismantlement, we are considering the abrasive water jet (AWJ) technique that could be used for the dismantlement techniques of double tubes (pressure tube and calandria tube) as one of possible methods. Though the tests aiming at establishing to reduce the volume of secondary wastes and to develop the cutting monitoring technique in the water, the possibility of abrasive recycle for cutting and the cutting monitoring technique were confirmed.

**Key Words:** Fugen, Reactor Dismantlement, Pressure Tube, Double Tubes, Abrasive Water Jet

### 1. はじめに

原子炉廃止措置研究開発センター(通称：ふげん)の原子炉は、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ある<sup>1)</sup>。

「ふげん」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、廃止措置中であり原子炉の解体を安全かつ合理的に行うため、解体工法の検討が進められている。「ふげん」の全景を写真-1に示す。

「ふげん」の原子炉は、圧力管型を特徴とし、圧力管とカランドリア管をそれぞれ 224 本ずつ内蔵する管群構造である。またそれらは二重管構造であり、非常に複雑で狭隘な構造となっている。圧力管とカランドリア管の部材の特徴は、切断データの少ないジルコニウム合金であることと、長年の運転により高放射化している点である。これらを考慮すると、切断工法は、熱の影響の少ない機械式切断工法が望ましい<sup>2)</sup>。また、狭隘構造である



写真-1 原子炉廃止措置研究開発センター  
(通称：ふげん)

二重管の解体を合理的に行うためには、管の内側から二重管を同時に切断することが望ましい。そのためには、切断装置の超小型化が可能で、かつスタンドオフが長く取れる切断工法が必要となる<sup>3)</sup>。以上の条件を満たす切

断工法として、アブレイシブウォータージェット工法（以下、AWJという）を選定し試験を実施した。

本報告では、AWJ切断工法の「ふげん」原子炉本体解体の適用にあたり想定される課題について、実験的に実施した試験の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より委託され実施した試験結果をとりまとめたものである。

## 2. 「ふげん」原子炉本体解体におけるAWJ切断の課題

図-1に原子炉本体の構造を示す。この圧力管とカランドリア管を同時解体するために、世界最小クラスの超小型AWJ切断装置を開発し、試験を行っている。圧力管集合体の管内切断想定位置を図-2に、管切断イメージ想定状況を図-3に示す<sup>4)</sup>。現在までに、超小型AWJ切断装置により二重管を実用レベルで同時切断できることを確認している。しかし、今後、当該技術分野において克服しなければならない主な課題としては、①発生二次廃棄物量の低減方策の確立、②切断良否状況の確認技術の確立の2点があげられる。

発生二次廃棄物量の低減する理由は、その処理コストや処理量を減らしたいことにある。低減方策としては、切断条件の最適化による研掃材使用量の抑制や研掃材ガーネットの再利用による使用量の抑制等があげられる。

次に、切断良否状況の確認技術を確立する理由は、原子炉本体は、長年の運転により放射化されているため、水中において解体する計画となっている。解体切断時には、切断粉等で水に濁りが発生する可能性がある。したがって、水中カメラ等の目視以外で切断移動のタイミングや切断良否を判断する技術の確立が必要となる。

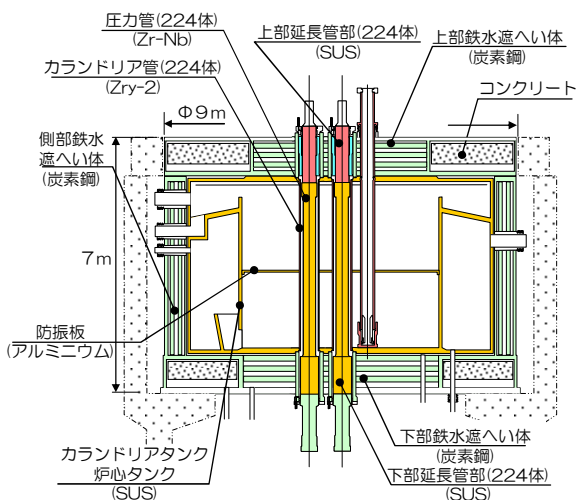
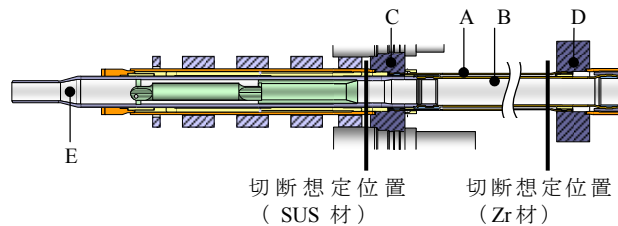


図-1 原子炉本体の構造



A: 外管（カランドリア管） B: 内管（圧力管） C: カランドリアタンク上管板（SUS） D: カランドリアタンク下管板（SUS）, E: 圧力管上部延長管

図-2 圧力管集合体の管内切断想定位置

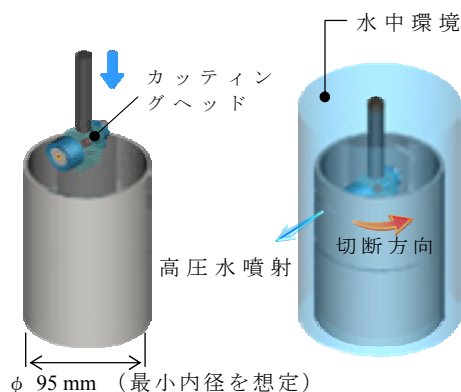


図-3 管切断イメージ

## 3. 超小型AWJ装置の切断性能試験

### (1) 目的

開発した超小型AWJ切断装置の切断性能を把握するために切断試験を行った。試験では、各研掃材供給量における切断限界速度を把握し、切断性能のさらなる向上化方策を検討することとした。

### (2) 機器構成

AWJ切断試験機器の構成を図-4に、機器仕様を表-1に示す。試験機器は、超高压ポンプ、研掃材フィーダ、およびAWJ水中切断試験装置（超小型AWJカッティングヘッド付）で構成されている。超高压ポンプより高压水を、研掃材フィーダにより研掃材を超小型AWJカッティングヘッドに供給し、それらを二重管模擬材に混合噴射した。

開発した超小型AWJカッティングヘッドは、圧力管とカランドリア管からなる二重管を圧力管内部より同時切断することを想定し、最小内径 95mm の管内に挿入可能な寸法とした。



図-4 AWJ試験機器の構成

表-1 AWJ試験機器仕様

超高压ポンプ	外形：L3,800×W1,800×H1,600 性能：最大吐出圧力 245MPa 吐出流量 18.2L/min
AWJ 水中切断装置	外形：L1,742×W1,000×H550 水槽：0.2m <sup>3</sup> 回転機能：0～0.5 rpm (0.1kW 防水モーター) 昇降機能：0～30 mm/min (0.2kW 防水モーター)
研掃材供給装置	吐出：ローター回転制御 供給量：0～3.6kg/min
超小型 AWJ カuttingヘッド	対応寸法：φ 80mm 挿入可 最大吐出圧力 300MPa

(3) 二重管模擬材

試験では、圧力管集合体の切断想定箇所（図-2）と同じ材質・径寸法の二重管模擬材を製作した。材質は、Zr材およびSUS材の2種類である。表-2に二重管模擬材（Zr材およびSUS材）の仕様を示す。

表-2 二重管模擬材の仕様

供試体仕様	Zr材		SUS材	
	内管	外管	内管	外管
材質	Zr-Nb	Zry-2	SUS304	SUS304
内径 (mm)	117.8	156.4	95.0	170.0
外径 (mm)	126.4	160.2	127.0	190.0
厚さ (mm)	4.3	1.9	16.0	10.0
高さ (mm)	250.0	207.0	200.0	200.0

(4) 方法

切断試験は、水中環境下で行った。超小型AWJカuttingヘッドを用いて、二重管模擬材（Zr, SUS材）を管内側より切断した。試験状況を写真-2に示す。切断では研掃材供給量と切断速度を可変パラメーターとし、各

研掃材供給量における切断速度の限界点を把握した。切断手順は以下のとおりである。

- ① 切断試験装置内に、二重管模擬材を固定し、管内の切断位置にヘッドをセットし、水槽内に水を満たす。
- ② 高圧ポンプを起動し、超小型AWJカuttingヘッドより高圧水を噴射し、200Mpaの圧力まで昇圧する。
- ③ 研掃材供給装置を起動し、設定した研掃材量を超小型AWJカuttingヘッドまで供給する。研掃材を超小型AWJカuttingヘッド内で高圧水に混合し、切断対象へ噴射する。
- ④ 外管、内管の双方をピアッシング（穴開け）した後、ヘッドの回転移動を開始し、設定した切断速度で切断を開始する。
- ⑤ 切断終了後、水を抜く。切断の良否状況を目視確認する。

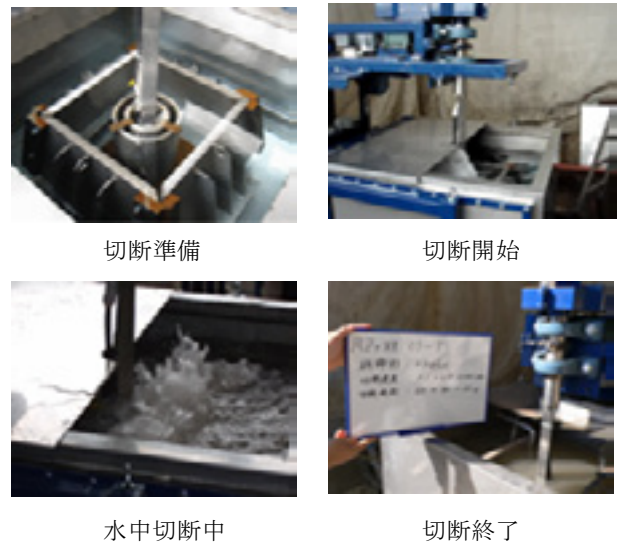


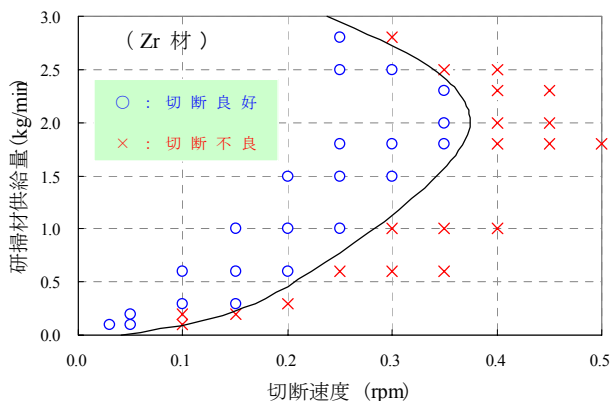
写真-2 試験状況

(5) 結果

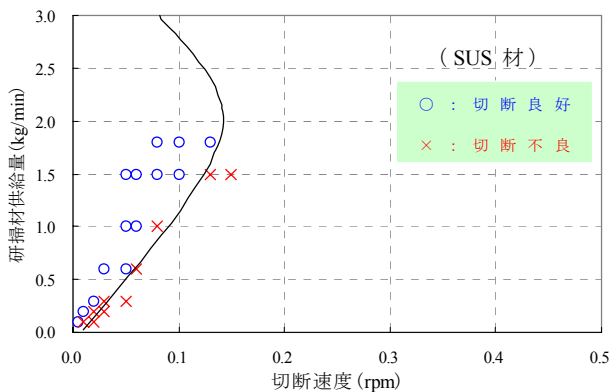
二重管模擬材（Zr材およびSUS材）切断時の切断速度と研掃材供給量との関係における切断良否を図-5に示す。研掃材供給量 1.8kg/min までは、Zr材およびSUS材ともに、研掃材供給量を増加させるとともに切断速度を伸ばすことができた。また、研掃材供給量 1.8kg/min では、Zr材の切断において切断可能な速度限界は 0.3～0.4rpm に存在することが分かった。また、SUS材では、切断速度限界は 0.1～0.2rpm であることが分かった。実機の解体工程期間を考慮すると、超小型AWJ切断装置の性能は、双方の切断材料において実用レベルである。

一方、部材の切断面においては、どの面においてもバリがなく、綺麗な切断面であった。切断カーブ幅におい

では、内管の切断カーブが細くなってくると、外管に切断不良を生じさせる傾向にあることが分かった。切断状況を写真-3に示す。



切断環境：水中，吐出圧力：200 MPa，  
スタンドオフ距離：18.9 mm



切断環境：水中，吐出圧力：200 MPa，  
スタンドオフ距離：7.5 mm

図-5 切断速度と研掃材供給量の関係



Zr材 SUS材  
写真-3 二重管模擬材の切断状況

(6) 切断性能の予測<sup>5)</sup>

切断試験で得られた研掃材供給量と切断速度の関係を予測するために、研掃材と水ジェットを持つエネルギーについて考える。

研掃材供給前の水噴流（圧力P，流量Q，比重 $\gamma$ ）の運動量が、研掃材混合後の研掃材（供給量W）と水噴流の運動量に保存され、かつ水噴流の一部（ $\alpha \cdot Q$ ， $0 < \alpha \leq 1$ ）

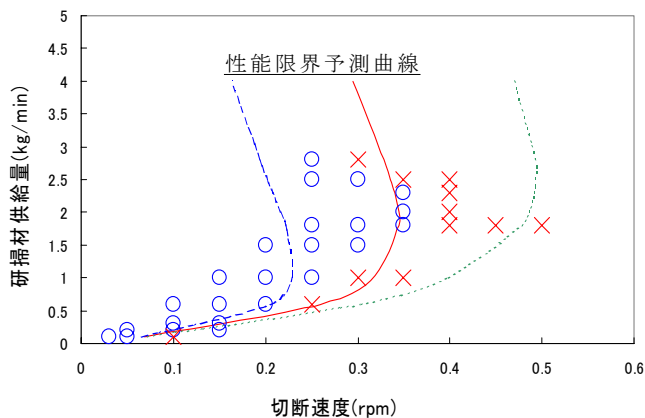
が研掃材の加速に寄与すると仮定すると（ $\alpha$ ：研掃材の加速に寄与する水噴流の流量の割合を示す係数），研掃材の運動エネルギーEは次のように表現できる。

$$E = (W \cdot P) / \{ \gamma(1+W/(\alpha \cdot \gamma \cdot Q))^2 \} \quad (1)$$

また、試験体の切断に必要なエネルギー  $E_c = \epsilon c \cdot v \cdot t$  ( $\epsilon c$ : 単位面積当たりの切断エネルギー， $v$ : 切断速度， $t$ : 板厚（一定）)であることから， $E = E_c$  とすると (1) 式は切断速度  $v$  に比例する。

$$v \propto (W \cdot P) / \{ \gamma(1+W/(\alpha \cdot \gamma \cdot Q))^2 \} \quad (2)$$

試験によって得られた切断可否の境界に最小二乗近似を適用し、得られた式 (2) の関係を図-6に実線で示す。式 (2) は、研掃材供給量の増加とともに切断速度が最大となりその後低下する傾向をおおむね再現している。



○ : 切断良好 × : 切断不良  
- - : 式(2) ( $\alpha$  : 0.07)  
— : 式(2) ( $\alpha$  : 0.11)  
- - : 式(2) ( $\alpha$  : 0.15)

図-6 研掃材供給量における切断限界速度  
(試験体：二重管Zr材)

以上より、超小型AWJ切断装置により二重管模擬材（Zr材，SUS材）の同時切断を行った場合、切断可能となる速度の限界点分かった。また、高圧水と研掃材粒子が持つ運動量の観点より、高圧水に対する研掃材の混合効率が切断性能に大きく影響していることが分かった。

4. 研掃材を再利用した切断性能試験

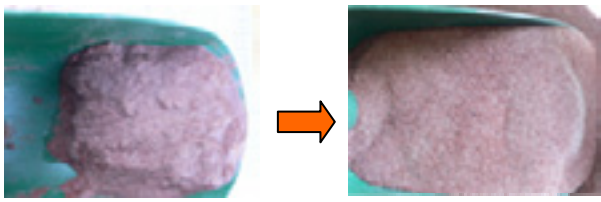
(1) 目的

研掃材（ガーネット）の再利用の可能性を見極めるため、使用済ガーネットの切断性能を検証した。

(2) 方法

切断に用いた使用済ガーネットは、二重管模擬材の切断を1度行った後に回収し乾燥させたもので、このため

切断金属屑を含んでいる。写真-4に使用済ガーネット外観を示す。



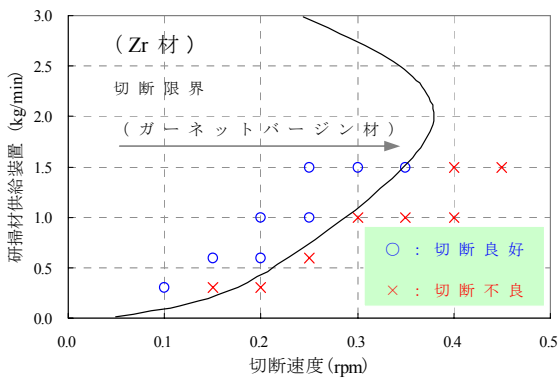
乾燥前 乾燥後

写真-4 使用済ガーネット

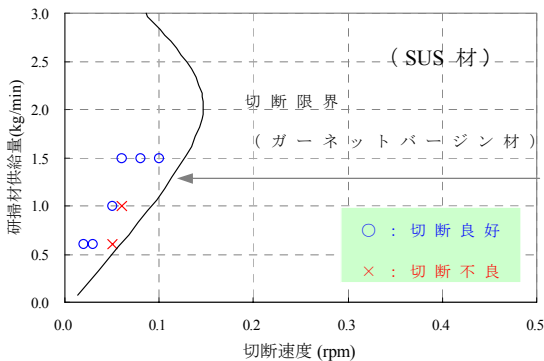
### (3) 切断性能

使用済ガーネットを適用した場合の二重管模擬材 (Zr材, SUS材) 切断時の切断速度と研掃材供給量との関係における切断良否状況を図-7に示す。

Zr材およびSUS材の双方とも、切断速度限界は、バージン材と比較すると、ほぼ同等であった。使用済ガーネットは、バージン材と比較すると、粒子径が小さくなっているため、切断性能は下がると予測していたが、切断可能速度限界点に影響を及ぼす範囲ではなかったと考えられる。



切断環境：水中，吐出圧力：200 MPa，  
スタンドオフ距離：18.9 mm



切断環境：水中，吐出圧力：200 MPa，  
スタンドオフ距離：7.5 mm

図-7 切断速度と研掃材供給量の関係  
(使用済ガーネットを用いた場合)

### (4) ガーネットの粒度分析

切断前後におけるガーネットの粒度分布の変化を図-8に示す。バージン材で、最も多く存在する粒子は、300~600μmの粒子であるが、1度切断すると、150~300μmへ変化していることが分かった。さらに、2度切断後すると、粒子150~600μmの割合は減少しているが、逆に、粒子150μm未満の割合が増加していることが分かった。主に150~600μmの粒子が切断に大いに参与していると考えられる。

一方、ガーネットの粒子状態を、写真-5のSEMにより観察すると、切断後の粒子は全体的に小さくなっている傾向にあるものの、鋭角な状態で存在することが確認できた。

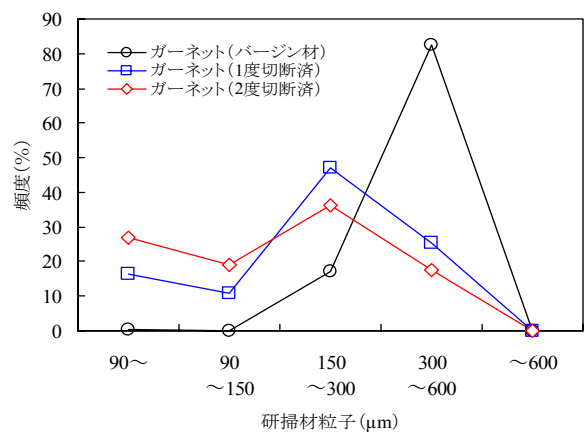
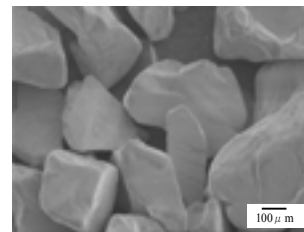
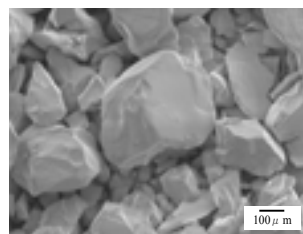


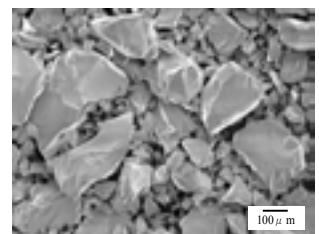
図-8 切断前後のガーネットの粒度分布



バージン材



1度切断済



2度切断済

写真-5 研掃材ガーネット SEM 観察

以上より、研掃材ガーネットは、再利用が可能でありまた、再利用できる回数は、複数回の可能性があることが分かった。

## 5. 水中切断音および切断母材振動の周波数計測試験

### (1) 目的

AWJ切断は、高圧水を使用するため、切断時に高圧水の発する音や高圧水より受ける切断母材振動の変化を捉えることで、切断良否状況を判定できる可能性がある。この可能性を確認するため、水中切断音や切断母材振動の変化を切断試験にて計測することとした。

### (2) 音響および振動解析システム<sup>6)</sup>

AWJ切断状況を判定するため、水中切断音および切断母材振動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、水中マイクロホン、振動センサー等である。計測機器の構成を図-9に示す。また、計測機器の仕様を表-3に示す。

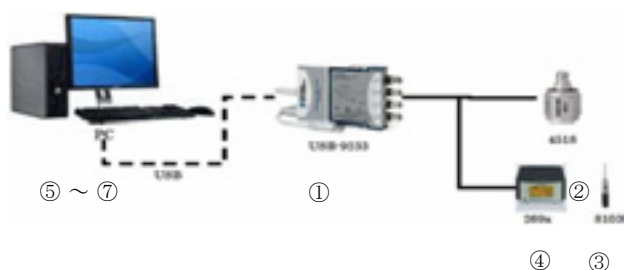


図-9 計測機器の構成

表-3 計測機器の仕様

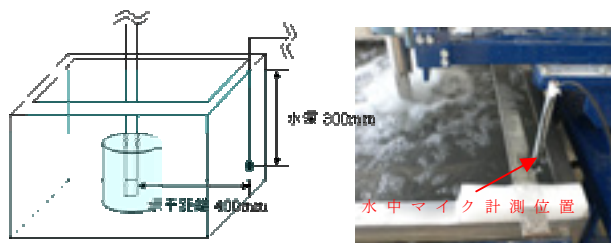
No.	項目	仕様	数量
①	USB 信号収録モジュール	NIUSB-9233 4ch AI,24bit,50kHz	1
②	振動センサ	B&K 4518	1
③	水中マイクロホン	B&K 8103	1
④	マイクロホン用アンプ	B&K 269x	1
⑤	データ収録	PC	1
⑥	OS	WindowsXPwith SP2	1
⑦	開発言語	LabVIEW8.21	1

### (3) 水中切断音の周波数計測試験

#### a) 方法

AWJにより、二重管模擬材（SUS材）を水中切断した場合の水中切断音の周波数を水中マイクロホンにより計測し、切断良否判定を行った。水中マイクロホンは、切断位置の水深300～400mmとほぼ同等の水深とし、切断位置からの水平距離400mmの位置にセットした。水中切断音計測試験状況を図-10に示す。切断開始から

終了までの一連の切断作業中の切断音の周波数計測を行い、主に外管および内管のピアッシング工程と切断移動工程（切断良好な場合と切断不良の場合）について、周波数特性の変化を読み取った。



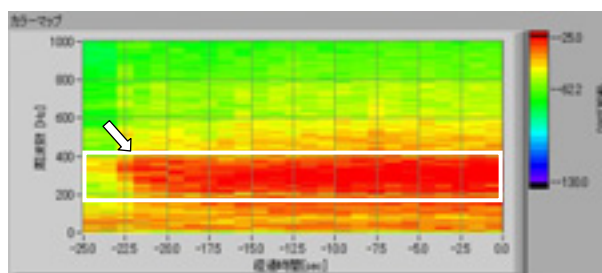
センサー位置

計測状況

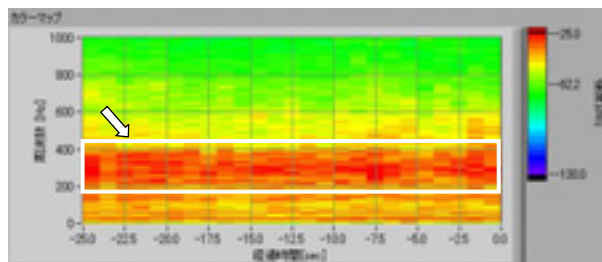
図-10 水中切断音計測試験状況

#### b) 結果

切断中の水中音を計測することにより、各切断状況における周波数特性の変化を確認することができた。水中切断音レベルの周波数特性変化を図-11に示す。切断中の周波数の特徴として、内管、外管とも切断良好な場合は、200～400Hzの周波数帯域において強い強度を示した。一方、外管が切断不良となる場合は、200～400Hzの周波数帯域において強度が弱くなるのが分かった。双方の切断状況において、周波数特性の変化の相違を観察することができた。切断工程における切断音の周波数特性の変化のまとめを表-4に示す。



切断良好の場合（切断回転速度0.05rpm）



外管切断不良の場合（切断回転速度0.08rpm）

図-11 水中切断音レベルの周波数特性変化  
(研掃材供給量 1.0kg/min)

表-4 水中切断音の周波数特性変化の特徴

切断工程	周波数特性の変化 (相対レベル)
内管 ピアッシング	100Hz 帯域の強度レベル上昇 (-20dB ~ -35dB)
外管 ピアッシング	100Hz 帯域の強度レベル上昇 (-20dB ~ -35dB) 400Hz 帯域の強度レベル上昇 (-20dB ~ -35dB)
切断移動 (切断良好)	200 ~ 400Hz 帯域の強度レベル 上昇 (-20dB ~ -35dB)
切断移動 (切断不良)	200 ~ 400Hz 帯域の強度レベル 上昇 (-35dB ~ -65dB)

c) 考察

切断時の周波数計測において、水中マイクロホンの位置が二重管模擬材を挟んでノズルヘッドの反対側であるため、計測された周波数帯域 200 ~ 400Hz の音は AWJ が管外側まで到達した場合に発生する水流と金属を切削する音を捉えていると推測される。周波数帯域 200 ~ 400 Hz の音は、AWJ が二重管外側に到達する時（切断良好時）に最も強くなり、AWJ が二重管外側に到達する割合が減少し切断不良になると弱くなっている。このことから、特定周波数帯域の強弱の変化を読み取ることで、切断良好と不良状態の区別を把握できると考えられる。

(4) 切断母材振動の周波数計測試験

a) 方法

AWJ 水中切断中に切断母材（外管）が受ける振動の周波数計測を行い、各切断工程における周波数特性の変化を確認した。振動センサーを SUS 材の二重管模擬材外管の外面に垂直に取付け、切断箇所より周方向で 180°、軸方向で 270mm 離れた位置とした。切断振動計測試験状況を図-12 に示す。

切断母材の振動計測は、切断開始から終了までの一連の切断作業について行い、主に管ピアッシング状況と切断移動状況（切断良好な場合と切断不良の場合）の周波数特性の変化を読み取った。

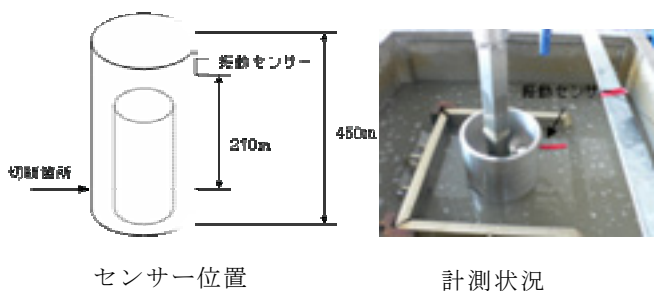
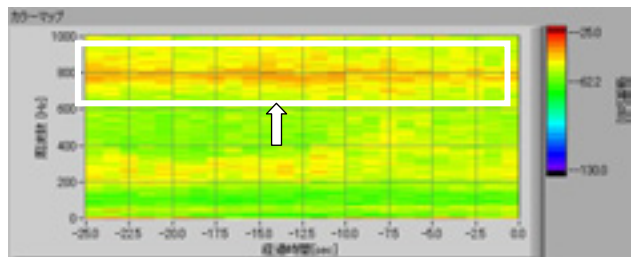


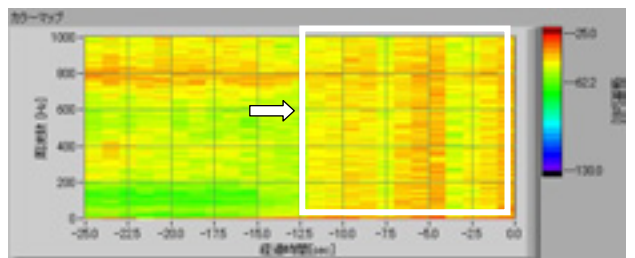
図-12 切断振動計測試験状況

b) 結果

切断中の母材（外管）振動を計測することにより、各切断状況における周波数特性の変化を確認できた。パワースペクトルによる周波数特性の時間変化を図-13 に示す。内管、外管ともに切断良好の場合の切断部材（外管）振動の周波数は、800 Hz 帯域に強い強度を示した。一方、切断不良の場合には、0 ~ 1,000Hz の間の幅広い周波数帯域で強い強度を示した。双方の切断状況において、周波数特性の変化の相違を観察することができた。切断工程における振動の周波数特性の変化のまとめを表-5 に示す。



切断良好の場合（切断回転速度 0.03rpm）



外管切断不良の場合（切断回転速度 0.06rpm）

図-13 切断母材の振動レベルの周波数特性変化  
(研掃材供給量 1.0kg/min)

表-5 切断母材の振動レベルの周波数特性変化の特徴

切断工程	周波数特性の変化 (相対レベル)
内管ピアッシング	特徴なし
外管ピアッシング	0 ~ 1,000Hz 帯域の強度レベル 上昇 (-20dB ~ -35dB)
切断移動 (切断良好)	800Hz 帯域の強度レベル上昇 (-20dB ~ -35dB)
切断移動中 (切断不良)	0 ~ 1,000Hz 帯域の強度レベル 上昇 (-20dB ~ -65dB)

c) 考察

切断時の周波数計測において、振動センサーを二重管模擬材外管に設置しているため、計測された周波数帯域 0 ~ 1,000Hz の振動は AWJ が外管を通過（切削）する時に与える振動を捉えていると推測される。周波数帯域 0 ~ 1,000Hz の振動は、AWJ が二重管外側に到達する時

(切断良好時)に周波数の強度が、最も弱くなる。しかし、AWJが二重管外側に到達する割合が減少する時(切断不良時)は、外管に与える振動の影響が大きくなり、周波数の強度が、強くなっている。このことから、特定周波数帯域の強弱の変化を読み取ることで、切断良好と不良状態の区別を把握できると考えられる。

以上より、水中切断音や切断母材振動の周波数特性の変化から、AWJ切断状況の良否を判定可能であることが分かった。

## 6. 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 超小型AWJ切断装置の切断性能

超小型AWJ切断装置の二重管模擬材における切断限界性能を把握できた。また、高圧水と研掃材粒子の運動量を考察することにより、高圧水に対する研掃材の混合効率の予測を可能にした。

今後、切断時間の短縮や単位時間の研掃材使用量の低減効果を期待するためには、切断性能を向上させる必要があるが、このことを具現化するためには、超小型AWJ切断装置の研掃材と高圧水の混合部の高効率化および耐久性向上が課題となる。

### ② 使用済ガーネットの切断性能

使用済ガーネットを用いて、二重管の切断が可能であることが確認できた。再利用1度目において、切断速度の限界点は、バージン材を使用した時とほぼ同等であったことが分かった。また、切断前後の粒度分布で、粒度に著しい低下は見られないことが分かった。したがって、使用済ガーネットの再利用により、二次廃棄物量を低減する効果を期待できる。

今後は、使用済ガーネットの切断性能を見極めることと再利用方法の具現化が課題である。

### ③ 水中切断音・切断母材振動による切断良否判定

水中切断音および母材振動の周波数特性を計測することにより、切断移動のタイミングや切断良否判定などの切断状況の把握が可能であることが分かった。

このことより、本技術は、水中カメラ等による目視以外の切断監視技術として有効な手段であると言える。

今後、切断速度や研掃材供給量の変化に対応できるように、判定プログラムを確立することが課題となる。そのためには、水中音および振動による複数の周波数データの蓄積が不可欠である。

**謝辞**：本研究で対象とした「ふげん」原子炉本体の解体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技術開発課の森下喜嗣課長、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) 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
- 2) 中村保之, 菊池孝一, 森下喜嗣, 大鐘大介, 臼井龍男 : 「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1), 日本原子力学会2006年春の年会予稿集, D44, 2006.3
- 3) 中村保之, 菊池孝一, 森下喜嗣, 大鐘大介, 丸山信一郎, 臼井龍男 : 「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2), 日本原子力学会2006年秋の大会予稿集, A64, 2006.9
- 4) 丸山信一郎, 大鐘大介 : 「ふげん」原子炉解体に向けたAWJ技術の適用性検討評価 ; 超小型AWJカッティングヘッドの開発と模擬材の切断試験, 三井住友建設技術研究所報告, No.5 2007.9
- 5) 中村保之, 大鐘大介, 丸山信一郎 : 「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3), 日本原子力学会2007年秋の年会予稿集, J07, 2007.9
- 6) 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