

# 「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 —ステンレス鋼板の水中切断と研掃材再利用における性能把握—

## Assessment of the Applicability of AWJ Technique for Dismantling the Reactor of “Fugen” - Performance of Underwater-Cutting Stainless Plates and Recycled Abrasive -

丸山 信一郎 SHIN-ICHIRO MARUYAMA

西尾 新一 SHIN-ICHI NISHIO

「ふげん」原子炉本体解体に向けたアブレイシブウォータージェット(AWJ)技術の適用性検討の中で、検討課題となっている「切断性能の更なる向上化方策」や「二次廃棄物量の低減化方策」について、 $t=150\text{mm}$ 以上のステンレス鋼板と研掃材再利用における性能把握試験を行った。

結果、ステンレス鋼板の水中切断では、 $200\text{mm}$ の板厚をワンパス切断し、今後  $200\text{mm}$ 以上の板厚の切断に対応できる可能性を確認した。また、研掃材の再利用では、切断性能に寄与する再利用材の粒度の把握により切断性能低下防止方策を確認できた。

キーワード：ふげん、原子炉本体解体、アブレイシブウォータージェット(AWJ)、水中切断

It has been demonstrated that AWJ technique cut the mock-up double tubes of core internal and stainless plate in  $150\text{mm}$  thickness with the small cutting head. But, further improvement of cutting performance and reducing secondary waste are expected. So tests of cutting stainless plate of over  $150\text{mm}$  in thickness and using recycled abrasive were conducted. The followings were clarified; 1) The possibility of underwater-cutting over  $200\text{mm}$  in thickness, 2) The relationship between degradation of cutting performance and recycled abrasive particle size.

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

### 1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構「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、廃止措置中で原子炉解体工法の検討が進められている<sup>1)</sup>。

「ふげん」の原子炉は、特徴として圧力管とカランドリア管の二重管をそれぞれ224本ずつ内蔵しており、複雑で狭隘な管群構造となっている(図-1)<sup>2)</sup>。特に、このような構造の原子炉の解体では、装置を小型化して二重管を同時解体できるような合理的な切断工法が望ましい。また、一般的に原子炉の解体にあたっては、放射性物質による汚染拡大の防止や被ばく低減対策のため、水中による遠隔解体が有効とされる。このため、数ある切

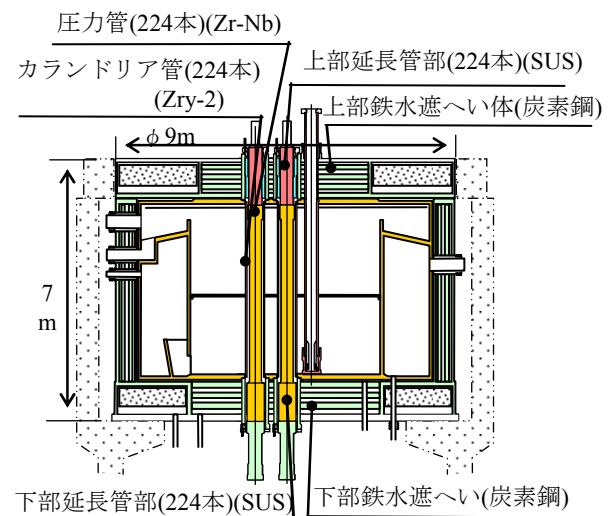


図-1 「ふげん」原子炉本体構造

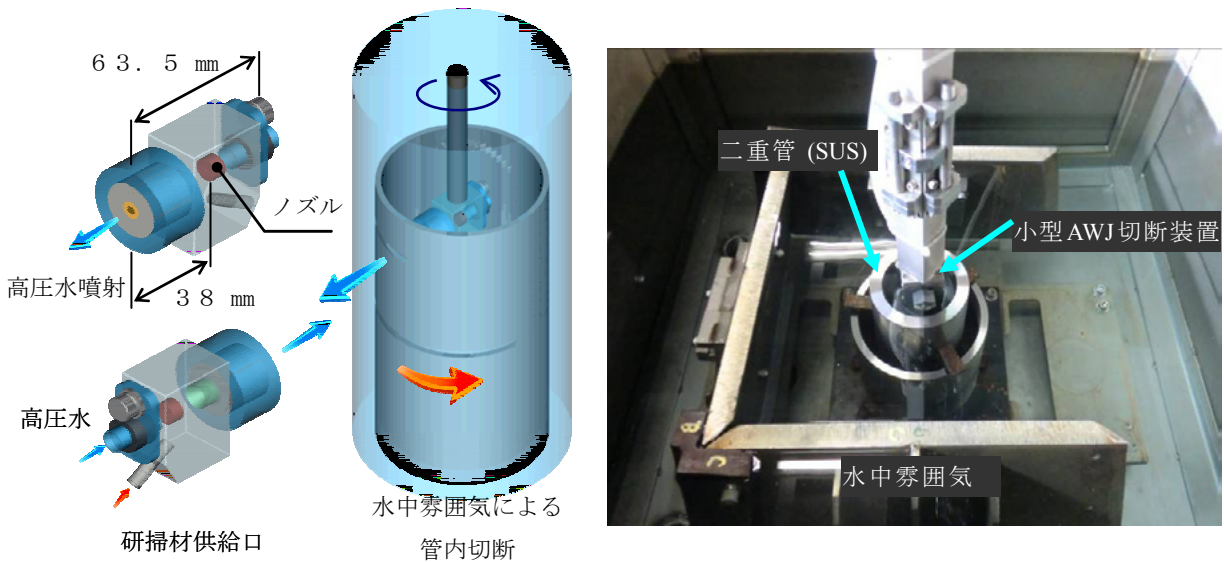


図-2 小型 AWJ 切断装置のイメージと二重管切断試験における装置設置状況

断工法の中から候補技術の1つとして、小型化が容易でかつ、遠隔操作に有利なアブレイシブウォータージェット (AWJ) による水中切断工法を選択し、その適用性検討を行った。ここで、AWJ装置は、切断対象物に対してある程度の距離をおいて非接触で切断できるため、遠隔操作による位置決めが有利である。

検討においては、二重管の管内から挿入可能な小型 AWJ 切断装置を開発し、切断試験により切断性能を確認している。しかし、「切断性能の向上化」や「二次廃棄物量の低減化」などの新たな課題について検討が必要となっている。

本報では、これらの課題について実施した試験の成果について述べる。

## 2. AWJ 切断技術の検討課題

AWJ切断工法の適用性検討に当たり、これまで世界最小クラスの小型AWJ切断装置を開発し、炉内構造物の二種類の二重管模擬材 (ジルコニウム合金製およびステンレス製) について、同時切断できることを切断試験にて確認している (図-2)<sup>3)</sup>。しかし、ふげん原子炉構造部材には、二重管以外にステンレス鋼板 (MAX t=150mm) があり、ステンレス鋼板への小型AWJの適用性が課題となっており、切断可能なステンレス鋼板の厚さと切断速度の関係や装置の耐久性を明確に把握する必要があった。

また、AWJ切断工法では、研掃材が二次廃棄物として発生するため、二次廃棄物の低減方策の1つとして、研掃材の再利用について切断性能への影響を確認する必要

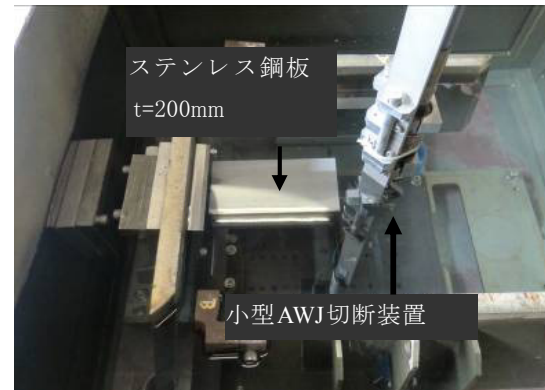


写真-1 ステンレス鋼板の設置状況

があった。そのため、これらの課題に対して、以下の切断試験を行った。

- ①小型AWJのステンレス鋼板切断に対する適用性検討に当たり、ステンレス鋼板の厚さについて切断性能限界の把握試験を行った。
- ②ステンレス鋼板切断では、管切断より切断量が多くなり切断時間が長くなるため、小型AWJ装置の先端パイプの摩耗 (拡径) による切断性能低下の懸念があった。そのため、先端パイプに硬質な素材 (焼結ダイヤモンド) を適用し、先端パイプの耐久性試験を行った。
- ③研掃材 (ガーネット) の再利用に当たり、切断性能への影響を確認するために、使用する研掃材再利用材の粒度やバージン材と再利用材の混合割合について切断試験を実施した。

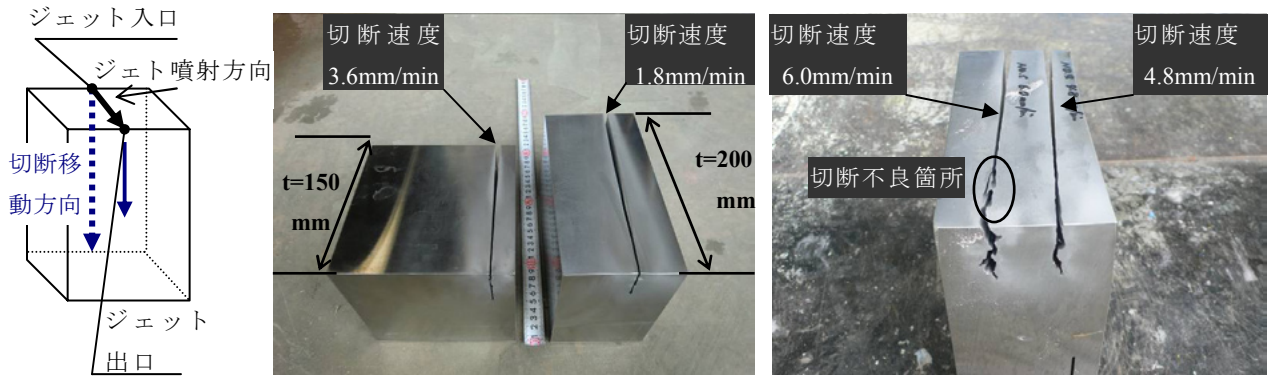


図-3 ステンレス鋼板の切断状況

表-1 切断パラメータおよび計測結果一覧

供試体	圧力 (MPa)	スタンドオフ距離 (mm)	研掃材供給量 (kg/min)	切断速度 (mm/min)	切断幅		切断評価
					ジェット入口 (mm)	ジェット出口 (mm)	
SUS304 t=150	200	10.0	1.0	6.0	3.9	—	不良
				4.8	4.0	1.6	良好
				3.6	4.3	1.6	良好
SUS304 t=200				1.8	4.4	1.6	良好

### 3. 小型 AWJ によるステンレス鋼板の水中切断

#### (1) 試験方法

切断試験用の水槽にて、小型 AWJ 切断装置の噴射口から被切断部材までの距離 (スタンドオフ距離) を 10mm として、ステンレス鋼板 (SUS304 t=150mm および t=200mm) をセットして、被切断部材を水中環境で切断した。ステンレス鋼板の設置状況を写真-1 に示す。

また、切断パラメーターについては、水の圧力 (200MPa)、研掃材ガネット供給量 (1.0kg/min) を一定に小型 AWJ 切断装置の移動速度 (切断速度) を可変パラメータとし、各切断速度における切断可否状況を観察した。切断可否については、アブレイシブジェットの進行方向で被切断部材の削り残しがなく、縁が切れているものを切断良好、被切断部材の削り残しが存在し縁が切れていないものを切断不良とした。

#### (2) 切断結果

ステンレス鋼板 (SUS304) の切断状況として、(図-3)<sup>3)</sup> に示す。SUS304 t=150mm を用いた場合、切断速度 3.6 mm/min および 4.8 mm/min では、被切断部材の削り残し

がなく、切断良好であったが、切断速度 6.0 mm/min ではアブレイシブジェットが部材のジェット出口付近で進行方向に対して左右に振れ、被切断部材の削り残しが存在し、切断不良であった。

一方、SUS304 t=200mm を用いた場合、切断速度 1.8 mm/min で切断良好であった。切断パラメーターおよび計測結果一覧を表-1 に示す。

#### (3) 考察

切断結果より、ジェットが部材のジェット出口付近で進行方向に対して左右に振れ始めると、貫通能力が弱まり、切断不良の可能性が高くなる。ジェット出口で切断幅が左右に振れているものは、切断限界点に近いと考えられる。

今まで、切断試験によりステンレス鋼板の板厚 (切断深さ) に対する切断可能速度の結果が 150mm まで分かっており、今回、新たに t=200mm における切断可能速度 1.8 mm/min の結果を加えて、ステンレス鋼板の板厚に対する切断可能速度の予測曲線 (図-4) を近似で求めると式 (1) で示すことができる。式 (1) から、t=200mm の切断可能な限界速度を算出すると、2.4 mm/min と予測で

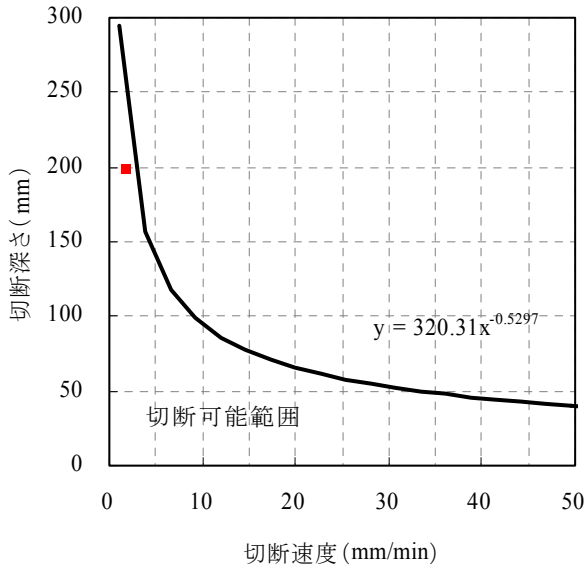


図-4 ステンレス鋼板の切断深さと切断速度の関係

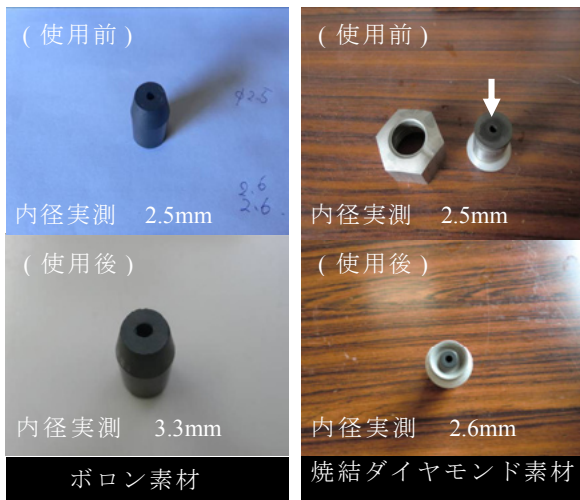


写真-2 小型AWJの先端パイプ (内径φ2.5mm)

きる。

$$y=320.31x^{-0.5297} \quad (1)$$

#### 4. 小型 AWJ 先端パイプの耐久性把握試験

##### (1) 試験方法

小型AWJの先端パイプ(図-5)は、汎用タイプのAWJ切断装置の実績から内径φ2.5mmとし、材質として高強度のボロン(単体元素としてはダイヤモンドに次ぐ硬度9.3を示す)や焼結ダイヤモンドを使用して耐久性を試験した。

ボロンは、加工上、先端パイプ全体に使用した。一方焼結ダイヤモンドは、内径部分のみ使用した。試験では水中において、水の圧力(200MPa)、ガーネット供給量

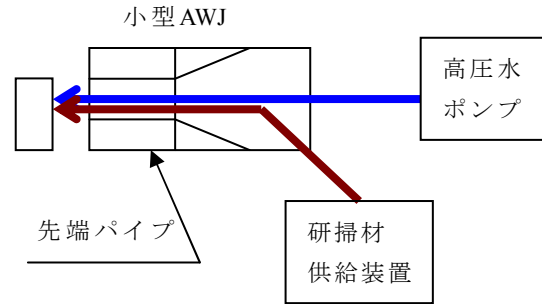


図-5 小型AWJ先端パイプの位置

表-2 小型AWJ先端パイプの耐久性評価

先端パイプ内径		③研掃材 ガーネット 使用量 (kg)	④耐久性 評価 (②/③) (mm/kg)
①素材	②摩耗量 (mm)		
ボロン	0.8	80	0.010
焼結 ダイヤモンド	0.1	60	0.002

$$(\text{摩耗量}) = (\text{使用后内径}) - (\text{使用前内径})$$

(1.0kg/min)を一定にステンレス鋼板を切断し先端パイプの切断前後の内径摩耗状況を実測した。実測した摩耗量を切断に使用した研掃材使用量で除した値をボロンと焼結ダイヤモンドの両者で比較し耐久性を評価した。過去の実績から、内径φ3.5mmまでを切断性能面で使用許容範囲として切断試験を行った。

##### (2) 切断結果

写真-2に先端パイプの摩耗状況を示す。ボロン素材で内径を実測すると、切断後内径は、2.5mmから3.3mmまで拡張しており、内径摩耗量として0.8mm摩耗したことになる。一方、焼結ダイヤモンド素材では、焼結ダイヤモンド素材の外周部に使用したステンレス素材の一部に摩耗が見られるが、先端パイプの内径部分に使用している焼結ダイヤモンド素材の摩耗に関しては、0.1mmの摩耗を確認した。

次に、先端パイプの耐久性評価では、ボロン素材でガーネット使用量1kg当たり0.010mmの内径摩耗量であったが、焼結ダイヤモンド素材では、ガーネット使用量1kg当たり0.002mmの内径摩耗量で、ボロン素材と比較し摩耗量が少なかった。先端パイプの耐久性評価を表-2に示す。

表-3 ガーネット再利用における切断速度の限界

供試体	研掃材種類	研掃材重量配合	研掃材供給量 (kg/min)	圧力 (MPa)	切断可能な回転速度限界 (rpm)
SUS304 二重管	バージン (250～600 $\mu$ m)	-	1.0	200	0.19
	バージン&再利用材 (250～600 $\mu$ m)	1:1			0.18
		1:2			0.18
	再利用材 (250～600 $\mu$ m)	-			0.19
	再利用材 (0～600 $\mu$ m)	-			0.16
再利用材 (0～150 $\mu$ m)	-	切断不可			

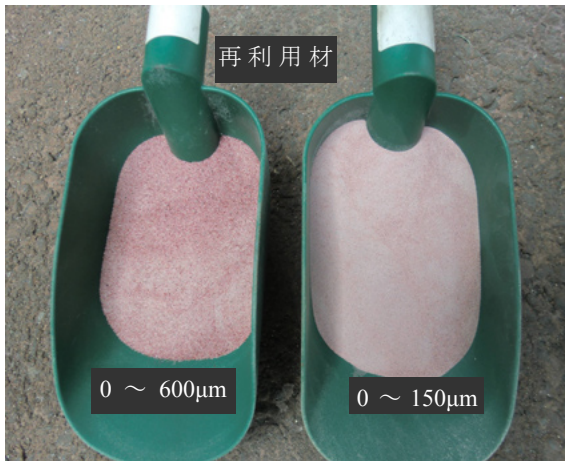


写真-3 ガーネット（再利用材）

### （3）考察

先端パイプの摩耗量の測定結果より、小型AWJの先端パイプの素材としては耐久性の面で、焼結ダイヤモンド素材の使用が有効と考えられる。今回の試験では、内径部のみ焼結ダイヤモンド素材を使用したのが、写真-2のように焼結ダイヤモンド素材の外周部のステンレス素材の部分で被切断部材からAWJの跳ね返りによる摩耗が見られ、この装置噴射口部の摩耗が促進すると焼結ダイヤモンド素材が装置から脱落し小型AWJの耐久性に影響を及ぼすため、今後、焼結ダイヤモンド素材形状の検討が必要であると考えている。

## 5. 研掃材再利用における切断性能把握試験

### （1）試験方法

研掃材は、市販のガーネット粒径250～600 $\mu$ mを使用し切断では、バージン材、バージン材と再利用材の混合材

再利用材の3種類のガーネットを用いた。再利用材は一度切断で使用したガーネットを切断後乾燥させたものである。ガーネットの再利用材を写真-3に示す。桃色の部分はガーネット粒子で灰色の部分が非常に細くなった金属切断屑である。

切断対象物は、ステンレス二重管で、切断パラメーターについては、水の圧力(200MPa)、研掃材ガーネット供給量(1.0kg/min)を一定に、切断速度を可変させ、ステンレス二重管の切断可能な回転速度限界を確認した。各研掃材の種類における切断可能な回転速度限界を比較することでバージン材に対する再利用材の切断性能を評価した。

### （2）切断結果

表-3にガーネット再利用における切断速度の限界を示す。粒径250～600 $\mu$ mにおける再利用材混合の研掃材の切断性能は、バージン材と比較し、95%(0.18/0.19rpm)となり、バージン材と再利用材の混合比率を変更しても切断性能に変化はなかった。

一方、粒径250～600 $\mu$ mと粒径範囲をバージン材と同一に揃えた再利用材は、バージン材使用時と切断性能は同じであった。しかしながら、切断後、ガーネットの粒径範囲を粒径250～600 $\mu$ mを調整せずにそのままの粒径で使用した0～600 $\mu$ mの再利用材は、切断性能が85% (0.16/0.19rpm)と明らかに下がった。

また、0～150 $\mu$ mの再利用材使用では、パウダー状になった細粒子が供給ホース内に閉塞し、切断ヘッドまで再利用材を供給することができず、被切断部材の切断が不可能であった。

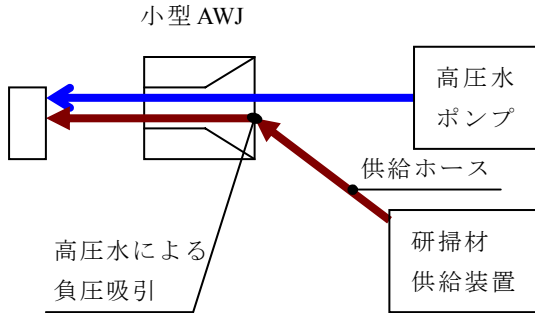


図-6 研掃材供給方式

(3) 考察

ガーネット粒径250~600 $\mu\text{m}$ におけるバージン材と再利用材の切断結果よりバージン材と再利用材では、粒径を250~600 $\mu\text{m}$ に揃えるとほぼ同等の性能を得ると考えられる。しかしながら、バージン材と再利用材の混合材においては、バージン材に対して切断性能5%低下した結果のため、この切断性能の低下は、混合したことによる特有の影響によるものか、それとも、誤差の範囲によるものか、まだ分かっておらず、今後詳細な検討により見極めることが必要と考えている。

一方、再利用材において、粒径250~600 $\mu\text{m}$ と0~600 $\mu\text{m}$ の場合の切断性能において、0~600 $\mu\text{m}$ が15%低下しているが、このことについては、0~150 $\mu\text{m}$ の再利用材使用において、パウダー状になった細粒子(切断屑)が供給ホース内で閉塞し切断不可能となっていることから、このパウダー状になった細粒子(切断屑)が切断性能に悪影響を及ぼしていると考えられる。

そのため、再利用材を使用する場合、250 $\mu\text{m}$ 未満の切断屑は除去し、ガーネットを粒径250 $\mu\text{m}$ 以上に揃えることが、切断性能維持に有効な手段と考えている。

0~150 $\mu\text{m}$ の再利用材が供給ホース内で閉塞した原因としては、図-6のように本装置では供給を高圧水による負圧吸引により行っているが、供給材料がパウダー状になったことにより供給ホース内の内周に付着し易くなりこの付着に対して、負圧吸引による力だけでは送りきらず、パウダー状の材料がホース内に蓄積されて、供給ホース内で閉塞を起こしたと考えている。

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 水中切断可能なステンレス鋼板の厚さ限界

小型AWJ切断装置により、ステンレス鋼板(SUS304  $t=200\text{mm}$ )を切断速度 1.8mm/min にて、ワ

ンパス切断できた。

今後は、ポンプ圧や研掃材供給量などのスペックを上げてAWJの威力を増した場合に、切断可能なステンレス鋼板の板厚の予測と切断の実証が課題となる。

② 小型 AWJ 先端パイプの耐久性

切断結果より、焼結ダイヤモンドはほとんど摩耗していないことが分かった。このことにより、小型AWJの耐久性において、先端パイプの素材としては焼結ダイヤモンドは有効と考えられる。

今後は、内径だけでなく噴射口側での摩耗も抑止できるような焼結ダイヤモンド素材の最適な形状の検討が必要となる。

③ 研掃材ガーネット再利用における切断性能評価

250 $\mu\text{m}$ 未満の細粒子(切断屑)は切断性能に悪い影響を与えているため、再利用材適用時に 250 $\mu\text{m}$ 未満の切断屑を除去すれば切断性能の低下を抑制できる可能性があることが分かった。

今後は、回収を含めた最適な研掃材ガーネットの再利用手順検討が課題となる。

謝辞：本研究で対象とした原子炉本体解体に向けたAWJ技術の適用性検討評価に関して、(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 森下喜嗣部長、同部 技術開発課 佐野一哉課長代理、中村保之主査、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)岩井紘基ほか：「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, N06,2008.9
- 3)中村保之ほか：「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
- 4)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-厚板水中切断性能の把握と音による切断監視試験-, 三井住友建設技術開発センター報告 No,8,2010.10