

「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 —超小型 AWJ カuttingヘッドの開発と模擬材の切断試験—

Assessment of the Applicability of AWJ Technique for Dismantling the Reactor of FUGEN - Development of Ultra-Small AWJ Cutting Head and Cutting Tests for Simulated Materials -

丸山 信一郎 SHINICHIRO MARUYAMA
大鐘 大介 DAISUKE OGANE

新型転換炉ふげん発電所の原子炉本体解体工法を検討するにあたり、圧力管とカランドリア管からなる2重管および炉内厚板構造物の解体技術として、アブレイシブウォータージェット（AWJ）技術の適用性を切断試験により確認した。水中環境下で切断試験を行った結果、開発した超小型 AWJ カuttingヘッドで2重管模擬材が管の内側から同時に切断できると汎用のヘッドで厚板部材が切断できることを確認した。

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、超小型、切断

As a part of the study of dismantling the advanced thermal reactor at the FUGEN Nuclear Power Station, we confirmed the applicability of the abrasive water jet (AWJ) technique that could be used for the dismantlement techniques of double tubes (pressure tube and calandria tube) and thick plate structures in the reactor was confirmed through cutting tests. As the result of cutting tests in the water, it was found that the developed ultra-small AWJ cutting head could cut the simulated double tubes and the general-use head could cut the thick plate material.

Key Words: FUGEN, Reactor Dismantlement, Abrasive Water Jet, Ultra-Small, Cutting

1. はじめに

新型転換炉ふげん発電所（以下「ふげん」と略す）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。

「ふげん」は、安定した稼働率で24年間稼働し、2003年3月に運転を終了した。そして現在は、機器・設備の解体を安全かつ合理的に行うために、解体工法の検討が進められている。

従来から検討されてきた原子炉本体の解体工法は、プラズマアーク等を用いた水中での逐次解体であり、技術的には解体可能であるが、「ふげん」の原子炉構造は特有であるため、切断箇所数が約7,000箇所を超え、解体工期も10年以上となることが分かった¹⁾。このことから、解体工期の短縮および合理化を図るため、新しい発想や技術等を取り入れた原子炉本体解体工法を検討していくこととした。

本報では、「ふげん」原子炉本体解体における固有の課題について、スポット的に実施した模擬材の切断試験結果について述べる。

2. 「ふげん」原子炉本体構造と解体における課題

「ふげん」原子炉本体は、燃料集合体を取めるために圧力管とカランドリア管からなる2重管を224本内蔵した構造となっている。図-1に原子炉本体の構造を示す。

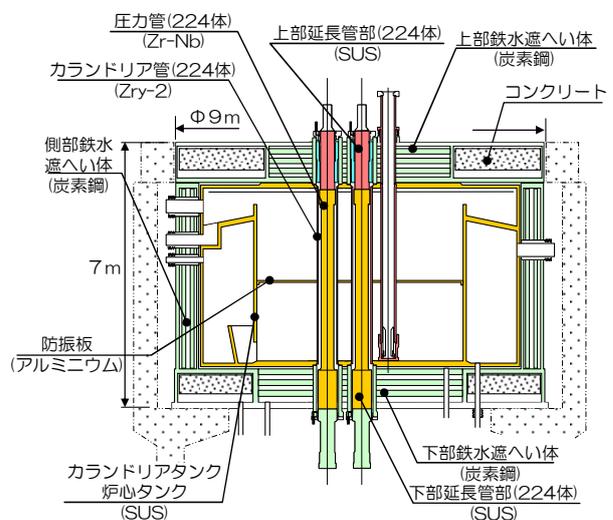


図-1 原子炉本体の構造

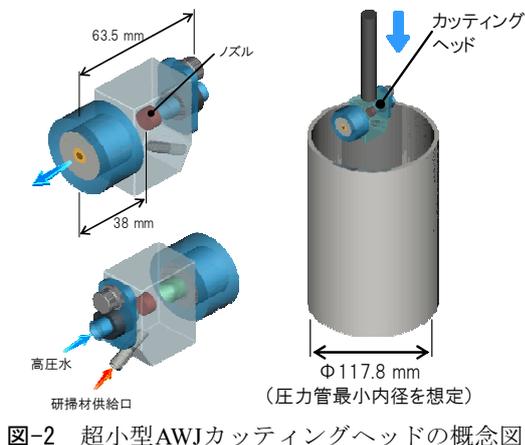
圧力管とカランドリア管を解体するにあたり、これらを別々に1本ずつ切断し、撤去していたのでは、工期が非常に長くなり、解体コストも増大する。また、2重管周辺は狭隘であるため、2重管の合理的な解体工法として、現在、管内部から同時に切断し撤去する工法について検討している。

圧力管とカランドリア管の部材の特徴としては、切断データの少ないジルコニウム (Zr) 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があげられる²⁾。これらを考慮すると、熱の影響の少ない機械式切断工法が望ましい。また、管内部から同時に切断することを考えると、スタンドオフ距離(Cuttingヘッド吐出口から標的物体までの距離)が長く取れる切断工法³⁾でなければならない。以上のことから、多くの切断工法のなかよりアブレイシブウォータージェット(以下、AWJという)工法を候補にあげ、2重管内部に挿入可能な超小型のAWJ Cuttingヘッドを開発し、切断試験を行い、原子炉本体解体への適用性の検討評価を行った。

一方、この2重管以外の「ふげん」炉内構造物として、カランドリアタンク上管板と下管板に板厚150mmの極厚のSUS材が用いられている点があげられる。極厚部材の切断については、プラズマアーク等で切断すると、熱の影響により、非常に広いカーフ幅(切断幅)になることや、多くのヒューム(金属蒸気の凝集物)が発生することが懸念される。したがって、SUS材等の極厚部材をAWJにより切断できるか否かの確認と、切断時のカーフ幅等の切断データの取得を行った。

3. 超小型 AWJ Cuttingヘッドの開発

圧力管とカランドリア管からなる2重管を圧力管内部より同時切断することを想定し、圧力管内部に挿入可能な寸法の超小型AWJ Cuttingヘッドを開発した。図-2に超小型AWJ Cuttingヘッドの概念図を示す。



製作したCuttingヘッドは、外形において従来寸法の3分の1以下程度とすることができ、管内に挿入可能なものとなった。写真-1に製作した超小型AWJ Cuttingヘッドを示す。



写真-1 超小型AWJ Cuttingヘッド

4. 試験設備および試験方法

(1) 試験設備

試験設備は、超高压ポンプ、AWJ Cuttingヘッド、研掃材フィーダ、およびAWJ切断試験装置で構成される。超高压水は、プランジャーポンプにより水圧200 MPaでCuttingヘッドまで送った。一方、研掃材については、インド産ガーネット(モース硬度7~8)を用いて、フィーダにより定量制御しながら、超高压水の負圧吸引によりCuttingヘッドまで供給した。図-3にAWJ切断試験設備の構成図を示す。

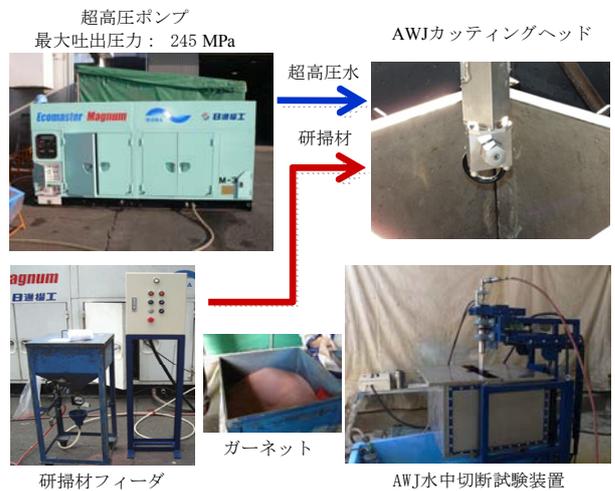


図-3 AWJ切断試験設備の構成図

(2) 試験方法

試験の手順を以下に示す。

- ① 試験体をAWJ切断試験装置の水槽内に固定し、試験体の切断位置にCuttingヘッドを合わせる(写真-2)。
- ② 切断は、水中環境下で実施し、切断中は切断音や切断水槽内の水流の変化で切断状況を予測し、切

断終了後に目視によりその切断状態を確認する
(写真-3)。

- ③ 切断後、発生した二次廃棄物(研掃材残渣, 切断金属屑, 廃水)は専用容器に回収し, 二次廃棄物分析を実施した。

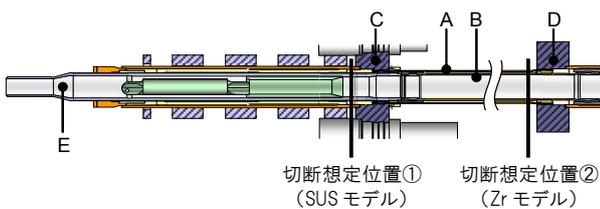


写真-2 試験体セット状況 写真-3 水中切断状況

5. 2重管模擬材切断試験

(1) 2重管模擬材

本試験では、「ふげん」原子炉内部に組み込まれている圧力管集合体に対し, 上部鉄水遮へい体下管板とカランドリアタンク上管板との隙間部分(SUS製: 切断想定位置①)と, カランドリアタンク下管板の上付近(Zr製: 切断想定位置②)を管の内部から水中環境下で2重管を同時切断することを想定した。そして, 各々の想定箇所と同じ材質・径寸法の2重管模擬材を製作し, AWJによる水中切断試験を実施した。図-4に圧力管集合体の管内切断想定位置を示す。また, 写真-4に各切断想定位置と同材質・同径寸法の2重管模擬材を示す。さらに, 表-1に2重管模擬材の仕様を示す。



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-4 圧力管集合体の管内切断想定位置



圧力管上部延長管 SUSモデル 写真-4 2重管模擬材 圧力管・カランドリア管 Zrモデル

表-1 2重管模擬材の仕様

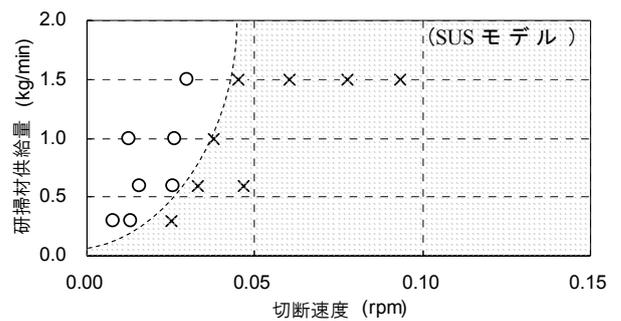
供試体仕様	圧力管上部延長管 SUSモデル		圧力管・カランドリア管 Zrモデル	
	内管	外管	内管	外管
材質	SUS304	SUS304	Zr-Nb	Zry-2
内径 (mm)	95.0	170.0	117.8	156.4
外径 (mm)	127.0	190.0	126.4	160.2
厚さ (mm)	16.0	10.0	4.3	1.9
高さ (mm)	300.0	300.0	207.0	207.0
外面周長 (mm)	398.8	596.6	396.9	503.0
2重管の間隔 (mm)	21.5		15.0	

(2) 試験結果

SUSモデル, Zrモデルとも, 研掃材供給量, 切断速度の条件を変化させ, 切断状態を評価した。ここでは, 内管, 外管ともに完全に切断できる場合を「切断良好」とし, 外管のみ切断できない場合や外管の切断状態が不連続となる場合を「切断不良」とした。

a) 切断速度と研掃材供給量の関係

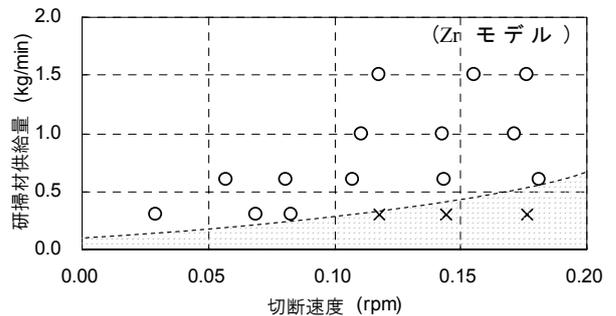
SUSモデルおよびZrモデルにおける切断速度と研掃材供給量の関係を図-5に示す。



○: 切断良好, ×: 切断不良

切断環境: 水中, 吐出圧力: 200 MPa

スタンドオフ距離: 7.5 mm



○: 切断良好, ×: 切断不良

切断環境: 水中, 吐出圧力: 200 MPa

スタンドオフ距離: 18.9 mm

図-5 切断速度と研掃材供給量の関係

SUSモデルでは, 研掃材供給量 0.6 ~ 1.5kg/min の範

囲で切断限界ゾーンの存在が確認された。一方、Zrモデルでは、研掃材供給量 0.3kg/min の場合、切断速度 0.1 rpm を超えると切断不良となり切断限界が確認された。

研掃材供給量 0.6 ~ 1.5kg/min の範囲については本試験条件内では明らかにならなかったが、恐らくさらに速い速度での切断が可能であると考えられる。

b) 切断部バリ状況

切断部のバリ（切断過程で生じる余計な部分）は、実機解体において切断解体物の撤去作業に影響を及ぼす要素であるが、本試験では写真-5に示すように、2重管模擬材の切断部の表面、裏面ともにバリは確認されなかった。よって、切断解体物の撤去作業には影響ないと考えられる。



SUSモデル Zrモデル
写真-5 2重管模擬材の切断部

c) 切断カーフ幅

切断時に発生する切断金属屑量は、実機解体においては放射性二次廃棄物の一つとなるため、その発生予測量の把握は非常に重要となる。この切断金属屑量は切断カーフ幅により発生量が決まる。

本試験では、SUSモデルにおける切断カーフ幅は、内管（SUS材管厚 16mm）の場合 2.5 ~ 4.0mm、外管（SUS材管厚 10mm）の場合 1.5 ~ 2.5mmであった。また、Zrモデルにおける切断カーフ幅は、内管（Zr管厚 4.3mm）の場合 2.5 ~ 4.0mm、外管（Zr管厚 1.9mm）の場合 4.0 ~ 5.0mmであった。

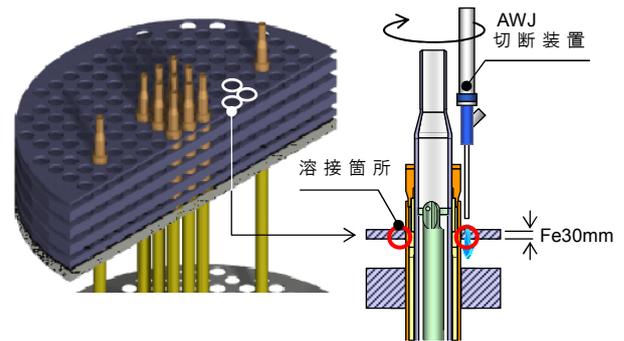
切断カーフ幅は、使用研掃材（種別、供給量）、被切断対象物の材質・厚さ、切断条件（吐出圧力、スタンドオフ距離、切断速度など）に関係するが、本試験の範囲では、切断カーフ幅には研掃材供給量の差異は確認されず、切断速度の増加とともにカーフ幅が狭くなり、ある速度以上になると切断不良になることが分かった。

6. 厚板部材切断試験

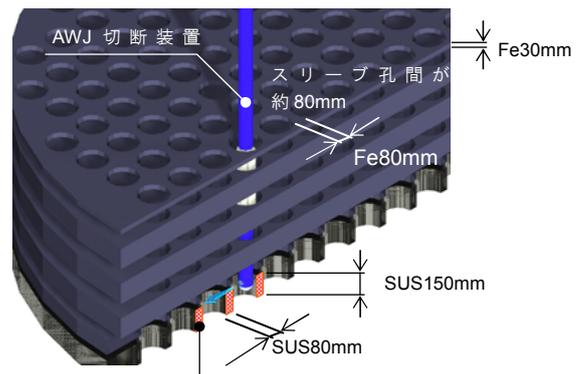
(1) 厚板部材

「ふげん」原子炉本体において、圧力管集合体の上部延長管やスリーブを撤去した場合、多くのスリーブ孔

（圧力管集合体が組み込まれていた孔）を有する板厚 32mm ~ 140mmの炭素鋼板（鉄水遮へい体板）と、板厚150mmのSUS板（カランドリアタンク上管板）の積層構造部材が残ることになる。したがって、このスリーブ孔間（約 80mm）や各積層板の板厚方向（32mm ~ 150mmの炭素鋼板およびSUS板）について、AWJにより切断可能か否かを確認した。本試験において想定した炉内構造物の切断想定部位を図-6に示す。また、本試験で使用した厚板部材の仕様を表-2に示す。



（圧力管上部延長管と鉄水遮へい体板との溶接部）



（圧力管集合体等が引き抜かれた後）

図-6 炉内構造物の厚板切断想定箇所

表-2 厚板部材の仕様

厚板部材モデル名	Fe30モデル	SUS80モデル	SUS150モデル
対象想定部材	上部鉄水遮へい体上管板	カランドリアタンク上管板(断面切断)	カランドリアタンク上管板(平面切断)
材質	炭素鋼	SUS304	SUS304
板厚	30mm	80mm	150mm

(2) 試験方法

表-2に示す3種類のモデルについて、水中環境下で切断する。Fe30モデルについては、原子炉上部の狭い空間内で離れた位置からの切断作業を想定していることから、スタンドオフ距離を変化させて切断性能を確認し、

圧力管上部延長管撤去後のカランドリアタンク上管板を想定した SUS80 と SUS150 モデルについては、スタンドオフ距離を 10mm に固定して切断性能を確認する。なお、切断には、汎用の AWJ カutting ヘッドを用いる。写真-6 に、厚板部材モデルのセット状況を示す。



Fe30モデル

SUS150 モデル

写真-6 厚板部材モデルのセット状況

(3) 試験結果

炭素鋼 30mm 厚であれば、スタンドオフ距離 150mm であっても切断可能であることを確認した。一方、SUS 材に関しては、最大 150mm 厚を一回の直進切断で切断できることを確認した。また、AWJ により切断した厚板部材モデルの切断カーブ幅は、水中において AWJ の噴射が衝突する面側が 4 ~ 5mm、背面側が 1.5 ~ 2mm と、他の切断技術と比較し幅が狭いことを確認した。なお、このカーブ幅は、スタンドオフ距離が長くなるにつれて、幅も広くなる傾向がある。写真-7 に、Fe30 モデルの切断部を示し、写真-8 に、SUS150 と SUS80 モデルの切断部を示す。切断面は、どのモデルにおいてもバリのない綺麗な状態であった。

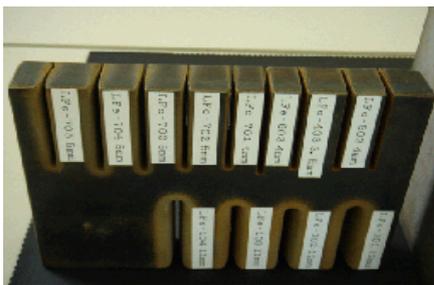


写真-7 Fe30 モデルの切断部

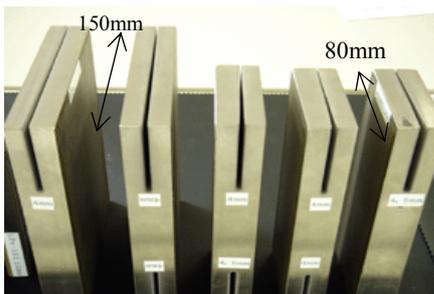


写真-8 SUS150, 80 モデルの切断部

7. 二次廃棄物分析

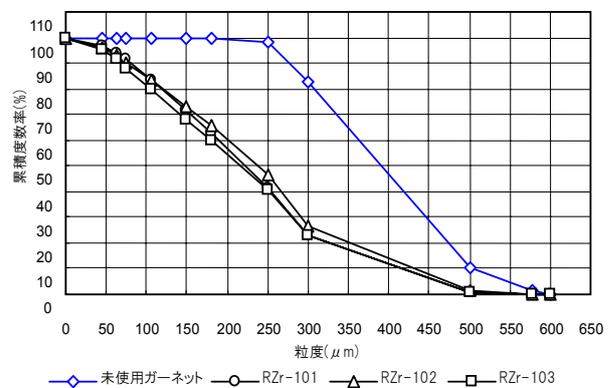
AWJ による切断試験で発生した二次廃棄物（研掃材残渣、切断金属屑、廃水）を回収し、二次廃棄物の性状把握試験を実施した。試験項目は、研掃材残渣の粒度分布測定（篩法）および外観観察（SEM 観察）である。

(1) 粒度分析

粒度測定用試料は、懸濁液と残渣の混合体を使用した。また、一部の試料はさらに硝酸フッ酸水溶液中に投入し、切断金属屑を溶解、除去した後に、使用済ガーネット粒子のみの粒度測定を実施した。

粒度分析方法は、分析用試料全量を金属バットに移して 105℃ の乾燥炉で水分を完全に蒸発させ、磁性粉体を分離し採取した。粒度の測定は篩法で実施し、篩粗さは +26, +30, +50, +60, +83, +100, +140, +200, +235, +300 Mesh とした。

例として、2 重管模擬材 Zr モデルを切断した場合の使用済ガーネットの粒径と累積度数率の関係を、未使用ガーネットデータと合わせて図-7 に示す。粒度分析結果により、研掃材（ガーネット）は切断作業によって粉碎され、微細化することが明らかとなった。



切断環境：水中，吐出圧力：200 MPa，スタンドオフ距離：18.9 mm，切断速度 (mm/min): RZr-101=48.1, RZr-102=24.0, RZr-103=72.1

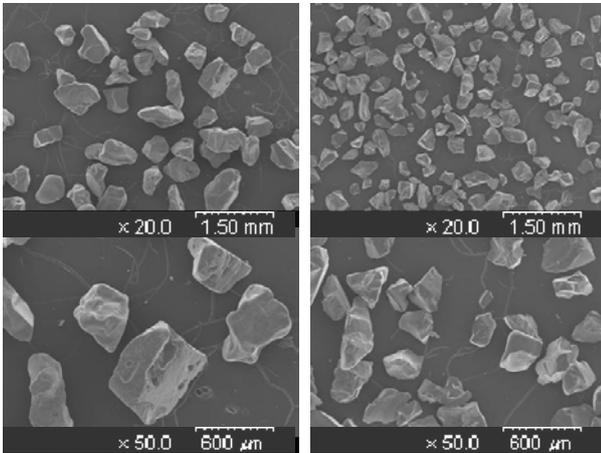
図-7 粒径と累積度数率分布（2重管模擬材Zrモデルを切断した場合）

(2) 外観観察

残渣を乾燥させた後、その外観を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、形態性状変化を調べた。

例として、切断試験前後（2重管模擬材Zrモデルを切断した場合）の研掃材残渣を SEM 観察した結果を図-8 に示す。切断試験後の研掃材残渣の外観を SEM 観察し

た結果、研掃材にはシャープな稜線を持つものが観測され、切断母材との衝突による破碎が確認された。しかし、切断金属屑らしきものは観測されず、それらは極めて微細なものと推定される。



未使用研掃材

使用済研掃材

図-8 ガーネット SEM 観察（2重管模擬材Zrモデルを切断した場合）

8. 結論

2重管模擬材および厚板部材の切断試験と発生二次廃棄物の分析の結果を、以下に示す。

- ① 2重管模擬材の切断試験により、開発した超小型AWJカッティングヘッドは、水中環境下で2重管を管内側より実用レベルの切断時間で確実に同時切断できることを確認した。
- ② 厚板金属部材の切断試験により、AWJ技術で最大150mm厚のSUS板を1パス（1回の切断作業）で水中切断できることを確認した。また、炭素鋼30mm厚であれば、スタンドオフ距離150mmで切断可能であることを確認した。
- ③ AWJ切断面は、どの試験体においても、切断部表面、裏面ともにバリはなく、綺麗であった。
- ④ 本試験における二次廃棄物分析（粒度分析）により、1回の切断作業で研掃材がかなり細かく粉碎されることが確認されたため、切断後の研掃材の再利用は困難であると考えられる。

以上のことから、周辺環境への影響が少ないAWJ切断技術は、「ふげん」炉内構造物の圧力管集合体切断に有効な技術であり、圧力管集合体以外の厚板金属部材においても適用可能な技術であることが分かった。

今後、原子炉本体解体へAWJ技術を適用するために、切断効率の向上、研掃材使用量の低減および二次廃棄物回収・処理方法の検討等の課題に取り組む必要がある。

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ふげん発電所環境技術開発課（森下喜嗣課長，中村保之氏）からご指導，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2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2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