

福島第一原発炉内構造物解体に向けた AWJ 切断工法の 適用可能性検討

— 溶融燃料デブリ模擬材の切断可能性および切断状況判定 —

Applicability of AWJ Technique for Dismantling Reactor of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

- Cutting Test of Imitation of Fuel Debris and Optimization of the Cutting Condition -

丸山 信一郎 SHIN-ICHIRO MARUYAMA
綿谷 聡 SATOSHI WATATANI

福島第一原子力発電所（以下、1F と称す）の炉内構造物は、スリーマイル島原子力発電所 2 号機の知見から溶融燃料と混在した複雑狭隘な状態となっていると想定される。このような想定から、炉内構造物を安全かつ合理的に切断解体する方法として、アブレイシブウォータージェット（以下、AWJ と称す）切断工法を候補に適用可能性の検討を行った。検討にあたり、AWJ 切断工法が保有している課題（溶融燃料デブリ模擬材切断、切断可否判定）について試験を実施した。結果、AWJ 切断工法が 1F の炉内構造物の解体方法の候補と成り得ることを確認した。

キーワード：福島第一原子力発電所、炉内構造物解体、溶融燃料デブリ、アブレイシブウォータージェット

Based on findings during recovery works that followed the accident at Three Mile Island Station 2, it is assumed that the reactor internals at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F) have complex geometries intermixed with melted fuel and confined in limited spaces.

Accordingly, abrasive water jet (AWJ) cutting method is considered to be a promising technique that can be safely and reasonably used for cutting and removing reactor internals. The authors conducted tests to examine the possibility of application and to solve the problems of this technique. In the tests imitation of fuel debris and optimization of the cutting condition is used. The test result made the measures for some of the associated issues clear, and demonstrated that AWJ cutting method is assumed as one of the promising techniques for removing reactor internals.

Key Words: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Dismantling reactor internals, Fuel Debris, Abrasive Water Jet

1. はじめに

福島第一原子力発電所（以下、1F と称す）4 号機の使用済み燃料プールからの燃料取出しが 2013 年 11 月より開始されたことで、「東京電力（株）福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」は次なるフェーズ（第 2 期）に移行した。第 2 期のゴールは、2020 年以降に、1F の 1 号機から 3 号機の原子炉格納容器と原子炉圧力容器の内部に存在する燃料デブリの取出しを開始することであり、必要な現場作業や関連研究開発の迅速な遂行が求められている。米スリー

マイル島 2 号機（以下、TMI-2 と称す）事故対応での経験に基づき、現在、原子炉格納容器を冠水させて水による遮蔽効果を利用する、いわゆる、冠水工法の実施が検討されている（図 -1）¹⁾。

また、原子炉建屋内の炉内構造物は、TMI-2 の事故対応の知見から、原型を留めておらず、溶融燃料と混在した複雑狭隘な状態となっていると想定される²⁾。このような状況から、炉内構造物を安全かつ合理的に切断撤去するには、構造物の状況に応じて柔軟に切断工法を選定する必要がある。上記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（以下、AWJ と称す）切断工

法があげられている。

本報では、AWJ切断工法を用いて炉内構造物を解体する際に想定される課題について試験を実施し、得られた成果について述べる。

なお、本成果は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と実施した1Fの原子炉解体検討のための委託試験（溶融燃料デブリ模擬材を用いた切断試験）と共同研究試験（ヘッド切断反力計測試験，切断音計測試験）によるものである。

2. AWJ切断工法の特徴および課題

原子炉廃止措置研究開発センター「ふげん」では、原子炉解体に向けて、熱的および機械的切断工法の切断試験が実施されており、機械的切断工法の1つであるAWJ切断工法についても研究開発が進められている。当該工法については、内径φ95mmの圧力管に挿入可能な小型カッティングヘッドを用いた水中での二重管の切断実証やの板厚150mm以上のステンレス鋼の切断実証等が成果として確認されている³⁾。

これらの成果より、AWJ切断工法は、小型ヘッドを用いることができる点で狭隘な空間での切断を他の工法よりも有利に進められる可能性がある。また、150mm以上の厚みのある炉内構造物を切断できる点で、溶融燃料と混在した硬質部材の切断に対して適用の可能性がある。

しかしながら、AWJ切断工法を1F解体へ技術適用するにあたり、切断性能、装置の設置位置による操作性、および切断診断の点で課題がある。まず、切断性能については、材料が混在した部材に対する切断可否は未確認で、切断の実証の必要がある。次に、装置の設置位置による操作性については、压力容器の上部から燃料デブリにアクセスする場合を想定すると、切断装置のシャフトが長くなる可能性があり、切断時ヘッドに作用する力を把握しておく必要がある。また、切断診断については、切断後水の濁りが発生するため目視に代わる間接的な切断判定法が必要とされる。

以上のことから、AWJ切断工法の有効性を確認するため、模擬デブリを用いた切断試験（性能）、切断時ヘッドに作用する力計測試験（装置）、および切断音計測試験（切断診断）を実施することとした。

3. 溶融燃料デブリ模擬材を用いた切断試験

(1) 目的

本試験では、1Fの炉内を想定し、燃料被覆管材料であるジルコニウム合金(Zry2)と主な炉内構造物材料であるステンレス鋼(SUS304)の溶融再凝固を模擬した試験体を用いた切断試験により、一般鋼材とは異なる物性を持つ材料の切断データを取得することを目的とした。

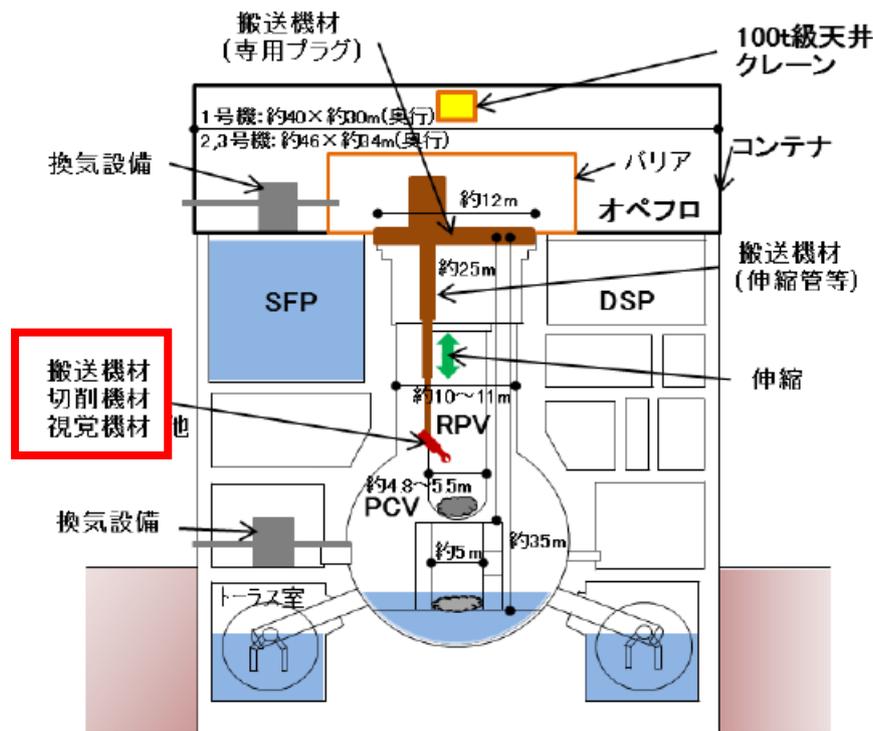


図-1 1F 原子炉建屋内の構造

(2) 試験方法

本試験では、熔融燃料デブリ模擬材として、ジルコニウム合金 (Zry2) とステンレス鋼 (SUS304) の熔融再凝固試験体 (Zry2 : SUS304=5 % : 95%) を用いて、表-1に示す切断条件により切断を実施した。模擬材の形状と寸法について図-2に示す。試験体のジェット方向の寸法は、圧力容器の厚さ150~200mmを模擬した。

表-1 切断条件

ヘッド種類	小型
切断雰囲気	水中
ポンプ圧力 (MPa)	230
研掃材供給量 (kg/min)	1.0
切断方向	上から下
切断速度 (mm/min)	5
スタンドオフ距離 (mm)	10
試験体	形状：矢型 寸法：150 mm -200 mm

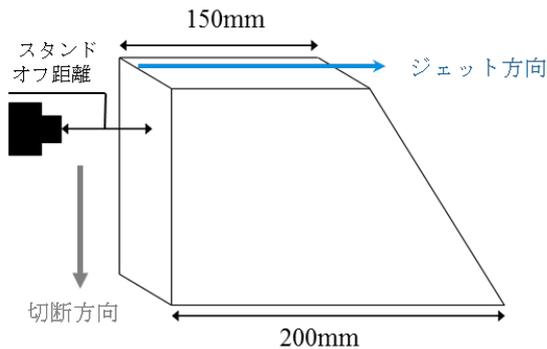


図-2 模擬材の形状と寸法

(3) 結果

AWJにて圧力容器の厚さ相当の150~200mmの熔融燃料デブリ模擬材を切断することができた。切断状況を写真-1に示す。

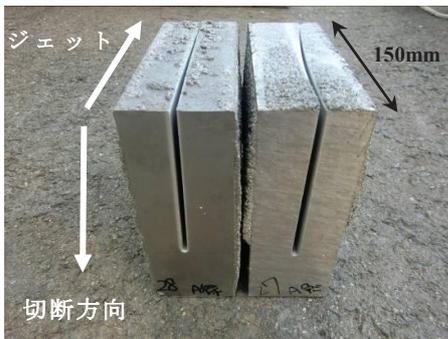


写真-1 模擬デブリ切断状況

4. 切断時ヘッドに作用する力計測試験

(1) 目的

F1 の炉内の構造より炉内構造物の解体では、圧力容器の上部から燃料デブリにアクセスすることが想定され切断装置のシャフトが長くなる可能性があり、切断時のAWJ噴射によりヘッドに作用する力が切断に影響を与えることが懸念される。そのため、この試験でヘッドに作用する力を把握することを目的とした。

(2) 方法

本試験では、表-2に示す仕様の歪ゲージをヘッドシャフトに取り付け、切断時のジェットによる歪データを取得し、ヘッドに作用する力を算出した。試験体切断条件を表-3に示す。

算出手順は、以下とした。

- ①歪ゲージをヘッドシャフトの表裏に2枚ずつ設置し4アクティブゲージ法より歪データを取得した。

(図-3)

- ②歪データの校正は、ヘッドシャフトに荷重をかけ、ロードセルを用いて、歪と荷重の関係(図-4)を求めた。校正を最小二乗法により行い、 $\mu = 0.9N$ とした。(写真-2, 図-4)

- ③歪ゲージより得たデータとロードセルにより求めた荷重の関係よりヘッドに作用する力を算出した。

表-2 歪ゲージの仕様

形式	WFLA-6-11-5LT
長さ (mm)	6
ゲージ率 (%)	2.10±1
抵抗値 (Ω)	120±0.5
温度補正值 (/ °C)	11×10 ⁻⁶
感度 (%)	-0.1

表-3 試験体切断条件

ヘッド種類	小型
切断雰囲気	水中, 気中
ポンプ圧力 (MPa)	230
研掃材供給量 (kg/min)	1.0
切断速度 (mm/min)	10 ~ 15

(3) 結果

表-3の切断条件における本装置での切断時のAWJ噴射によりヘッドに作用する力は、歪と荷重の関係より算出し、約 180N であることを確認した。力の大きさとして切断に影響を及ぼさない程度の数値であった。

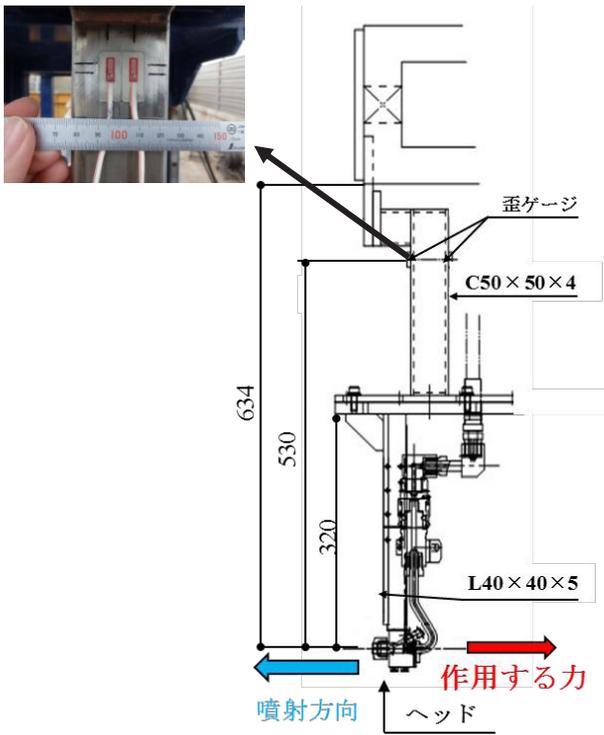


図-3 ヘッドシャフトへの歪ゲージ設置状況



写真-2 ロードセルを用いた荷重確認

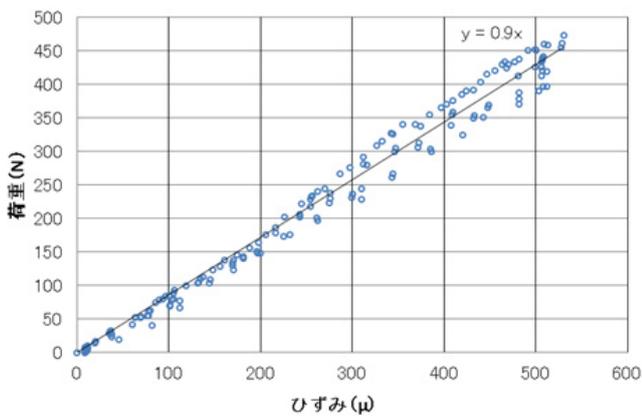


図-4 歪と荷重の関係

5. 切断音計測試験

(1) 目的

1Fの燃料デブリや炉内構造物の取出し作業は、高線量下のため、カメラ等の機器を用いた目視による切断状況の監視が困難な場合が想定される。そのため、目視による切断状況の監視の代替え方法として、切断音の音圧レベル変化による切断状況の監視の可能性について、水中および気中に設置したマイクを用いた切断音計測試験より確認することとした。

(2) 方法

図-5に示すように、切断装置の外に水中および気中にマイクを設置し、切断時の音圧レベルを計測した。計測では、部材の貫通時と非貫通時の状況を確認しやすくするため、板厚が階段状に変化するステンレス鋼板（1段目：板厚170mm、2段目板厚180mm）を切断速度10mm/minで、7.5分間実施し、切断部材の貫通時と非貫通時の周波数帯域毎の音圧レベルの経時変化データを図-6に示す音圧レベルの計測システム⁴⁾より取得した。

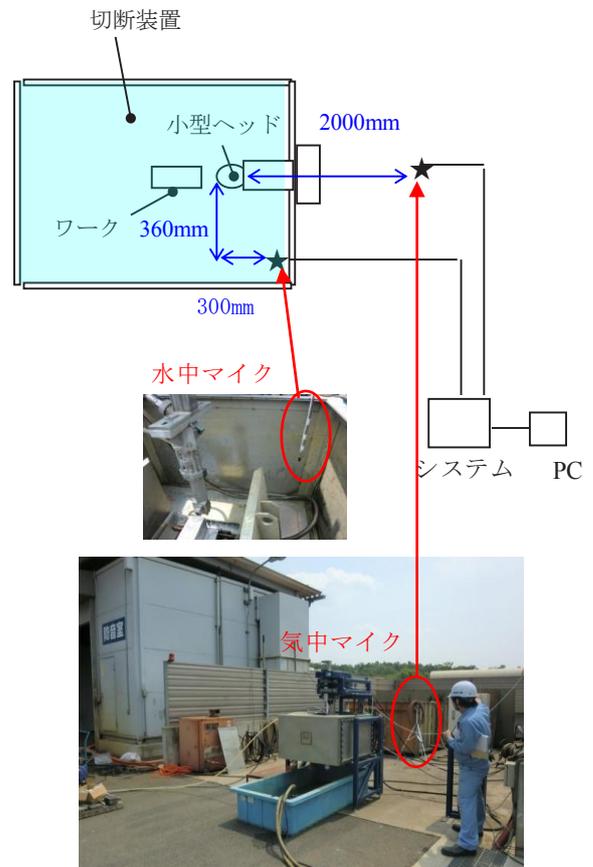


図-5 水中、気中マイク設置概要

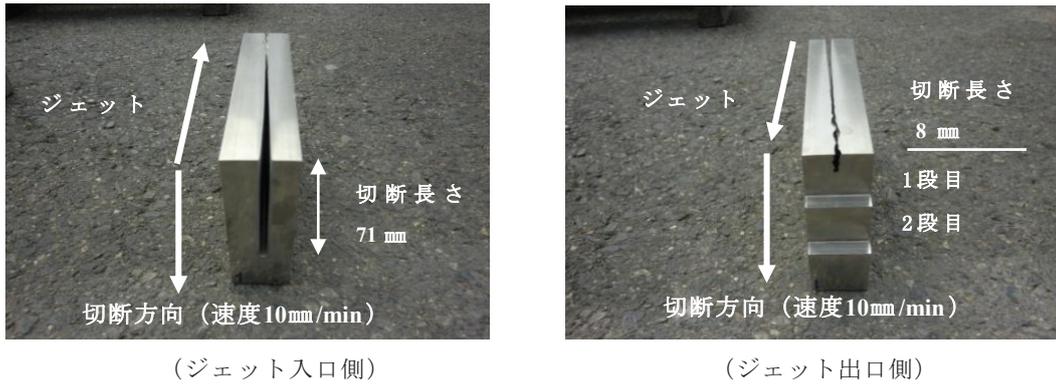


写真-3 切断状況 (ステンレス鋼板)

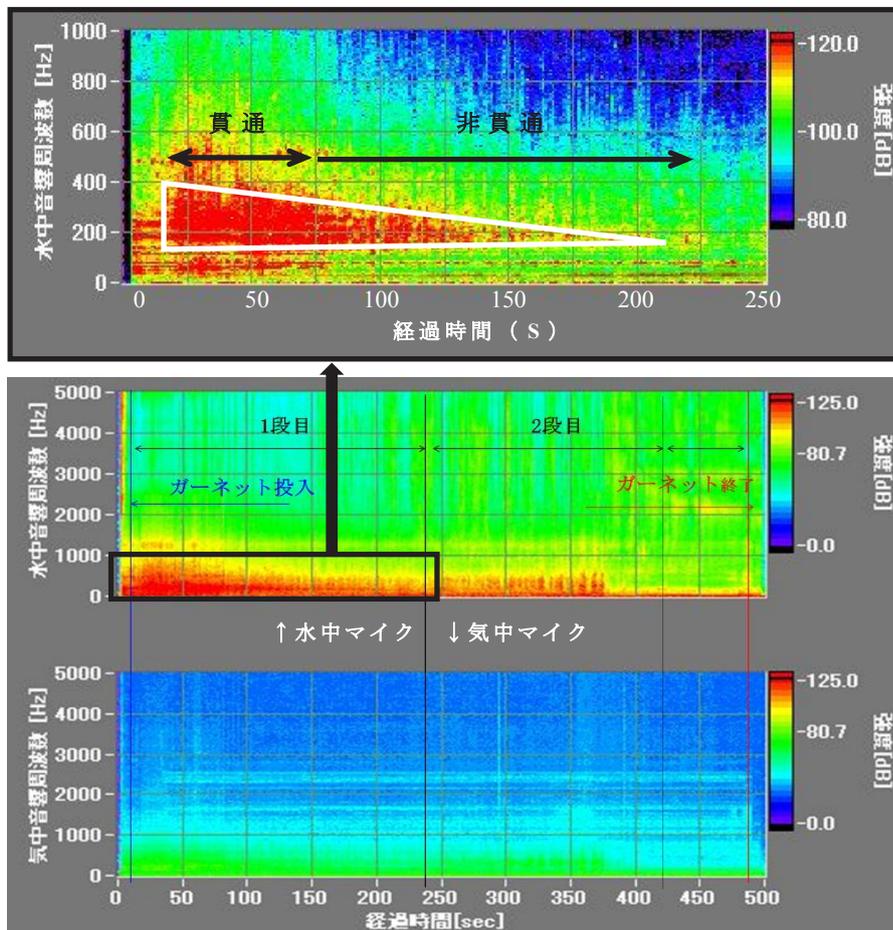


図-7 周波数帯域毎の音圧レベルの経時変化 (ステンレス鋼板)

(3) 結果

部材の切断状況を写真-3に、切断時の水中音の周波数帯域における音圧レベルの経時変化を図-7に示す。

切断長は、ジェット入口側71mm、出口側8mmで切断開始1分間程度は、貫通状態であったが、徐々に切断遅れが発生し非貫通状態へ移行した。水中音は、貫通状態から非貫通状態へ移行していく時に200～400Hzの帯域にて音のレベルが徐々に弱まる傾向を示した。しかし、気中音から、顕著な音のレベルの変化を確認することはできなかった。

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 溶融燃料デブリ模擬材を用いた切断試験

AWJ切断工法にて压力容器の厚さ相当150～200mmの溶融燃料デブリ模擬材を切断することができた。

AWJ切断工法は、溶融燃料と混在した硬質部材の切断に対して適用の可能性があると考えられる。

② 切断時ヘッドに作用する力計測試験

切断時のAWJ噴射によるヘッドに作用する力は約180Nであった。この値は、切断に影響を及ぼさない程度の小規模な値であることを確認した。

③ 切断音計測試験

切断時の状況を、気中では顕著な音の変化を捉えることはできなかったが、水中では音圧のレベル変化として捉えることができた。今後詳細なデータの取得は必要となるが、水中マイクを用いて切断状況判断は可能性であると考えている。

以上のことから、AWJ切断工法は、1Fの炉内構造物の解体の候補技術の一つと成り得る可能性がある。しかしながら、1Fの炉内構造物の解体においては、まだ不確定要素も多く、構造物の状況に応じた柔軟な切断工法を選定する必要があるため、今後、AWJ切断工法だけでなく、他の複数の切断工法と組み合わせることによる複合的な切断工法のシステム化検討が必要となると考えている。

謝辞：本研究で対象とした1F炉内構造物撤去技術の検討評価に関して、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 原子炉廃止措置研究開発センター 技術開発部 佐野一哉技術主幹、技術開発課 中村保之主査にご指導、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) 廃炉・汚染水対策事業事務局：平成25年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（燃料デブリ取出し代替工法の概念検討と要素技術の実現可能性検討）」に係る補助事業者公募要領，2014.2
- 2) 中村保之，手塚将志，岩井紘基，佐野一哉：福島第一原子力発電所 炉内構造物解体を想定した熱的及び機械的切断技術による適用性試験（2）アプレイブウォータージェット切断技術による切断試験（基礎データの取得），日本原子力学会2013年秋の年会予稿集，N13，2013.9
- 3) Yasuyuki Nakamura, Kazuya Sano, Yoshitugu Morisita, Shinichiro Maruyama, Shinichi Tezuka, Daisuke Ogane, Yuji Takashima : The Study on AWJ for Predicting Cutting Performance and Monitoring the Cutting Situation in the Water, Journal of Engineer for Gas Turbines and Power, Vol.133, 2011.6
- 4) 丸山信一郎，西尾新一：「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, 2010.11