

AWJによる燃料集合体溶融模擬材の切断実証および評価

Evaluation and Demonstration of Cutting the Fuel Assembly Heating Examination by AWJ

環境・リニューアル技術部 丸山 信一郎 MARUYAMA SHIN-ICHIRO
生産機械技術部 綿谷 聡 WATATANI SATOSHI

福島第一原子力発電所(以下、1F と称す)の廃止措置において、安全で確実な燃料デブリの取出しを行うために、燃料デブリの形態や特性を推定することが不可欠となる。推定は、事故時の燃料集合体の溶融移行挙動調査により行われ、調査のために燃料集合体溶融模擬材の切断が必要となる。切断は、ジルコニウム合金とステンレスの溶融混合材料やセラミックの切断実績のあるアブレイシブウォータージェット(以下、AWJ と称す)工法を適用することとした。

結果、燃料集合体溶融模擬材を切断でき、切断可能な条件のデータを取得できた。今後、これらのデータは燃料デブリの取出しの検討に役立つ可能性がある。

キーワード：福島第一原子力発電所、燃料集合体、溶融模擬材、切断、AWJ

It is essential to estimate characteristics and forms of fuel debris for safe and reliable removing at the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (1F). For the estimation, melting behavior of fuel assembly in the accident is being researched. To proceed the research, the fuel debris were need to cut, and the abrasive water jet (AWJ) which had enough results for cutting ceramic material or mixed material of zirconium alloy and stainless.

The test results demonstrated that AWJ could cut the fuel assembly and accumulated the cutting data which will be subservient when removing the fuel debris in future.

Key Words: Fukushima-Daiichi NPP, Fuel Assembly, Heating Examination, Cutting, AWJ

1. はじめに

福島第一原子力発電所(以下、1F と称す)の原子炉建屋内の炉内構造物は、米スリーマイル島2号機(以下、TMI-2 と称す)事故対応の知見から原型を留めておらず、燃料デブリと炉内構造物が混在した複雑狭隘な状態になっていると想定される¹⁾。しかしながら、1Fの炉心内部で生成されている燃料デブリの形態や特性はTMI-2事故と発生状況や事故発生からの冷温停止に至る過程が異なるためTMI-2の知見と異なる可能性がある。そのため、1Fの廃止措置において、安全で確実な燃料デブリの取出しを行うには、燃料デブリの形態や特性を推定することが不可欠となる²⁾。

このような状況を鑑みて、(国)日本原子力原子力研究開発機構(以下、JAEA と称す)では、事故時の燃料集合体の溶融移行挙動の調査が行われている。

調査では、実機と同じ材料からなる制御棒と模擬物質からなる燃料集合体を使用したプラズマ加熱試験により1F実機の燃料デブリにできるだけ近い特性や状態を

模擬した燃料集合体溶融模擬材が使用されている。

特性の推定のためには、模擬材を切断して分析試料を作成する必要性があり、模擬材の表面を荒らさずに切断可能な工法が求められる。

切断可能な工法としては、JAEA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)³⁾でジルコニウム合金とステンレスを溶融させた材料やセラミックを切断した実績を持つアブレイシブウォータージェット(以下、AWJ と称す)工法を適用した。

本報では、融燃料デブリ模擬材の切断実績を持つAWJ工法を用いて燃料集合体溶融模擬材を切断した成果について述べる。

なお、本成果は、JAEA福島研究開発部門国際廃炉共同研究開発センターより委託されたAWJによる模擬燃料加熱試験体の切断によるもので、試験体は、平成27年度に同センターにより実施された「プラズマトーチによる模擬燃料集合体加熱試験」で生成されたものである。

2. 燃料集合体溶融模擬材の特徴と切断の課題

燃料集合体溶融模擬材(図-1)は、外周のるつぼおよび模擬燃料にジルコニア(ZrO₂)、制御ブレードに B4C およびステンレス、そして被覆管およびチャンネルボックスにジルコニウム(Zr)合金を利用している。また、大型(外径φ300mm×H1,000mm)、かつ、溶融物を保持するためエポキシ樹脂が充填されている。このような状況の中、本試験体の材料分析を実施するためには硬度および靱性の異なる材料を一度に切断し、かつ、綺麗な切断面を保つ必要がある。

しかしながら、AWJ工法では、複数の溶融混合させた大型部材での切断実証ができていないため、燃料集合体溶融模擬材の切断の場合、まずは切断の実証が必要となる。また、切断中の切断可否状況についての確認が目視で困難なため、目視に代わる間接的な切断判定法の検討も必要となる。

3. 燃料集合体溶融模擬材を用いた切断試験

(1) 目的

本試験では、燃料集合体溶融模擬材の AWJ 工法で切断が可能であるか確認を行い、切断データを取得することを目的とした。

(2) 試験方法

本試験では、写真-1 に示す燃料集合体溶融模擬材を用いて、表-1 に示す切断条件により垂直縦切断および水平横切断を従来工法のアブレイシブ・インジェクションジェット(以下 AIJ)方式とアブレイシブ・サスペンション・ジェット(以下 ASJ)方式(写真-2)の双方で実施した。AIJ 方式と ASJ 方式の機器仕様を表-2, 3 に示す。

AIJ 方式と ASJ 方式は、双方とも AWJ 工法であるが、研掃材のミキシング方法が異なり、AIJ 方式は、研掃材をカッティングヘッド部で高速水噴流に添加して形成されるジェットを切断対象に噴射する方式である。

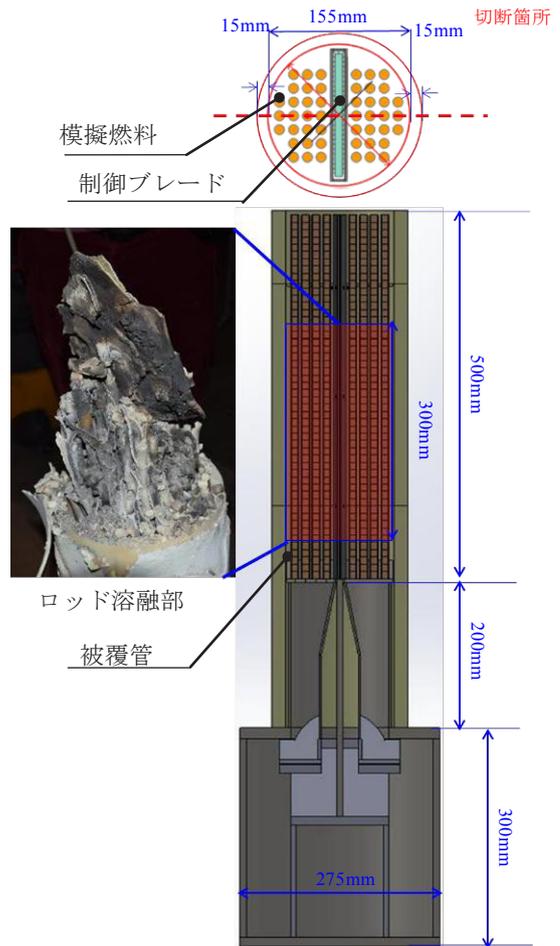


図-1 燃料集合体溶融模擬材の寸法



写真-1 燃料集合体溶融模擬材

表-1 切断条件

No.	切断方向	方式	雰囲気	カッティングヘッド	切断速度	圧力	研掃材種類	研掃材量 kg/min	スタンドオフ 距離 mm	切断 距離 mm
					mm/min	MPa				
1	水平横	AIJ	水中	汎用 WOMA 製	5	230	ガーネット (TYPE3)	1.5	10	190
2	垂直縦	AIJ	水中	汎用 WOMA 製	5~10	230	ガーネット (TYPE3)	1.5	10	135
3	垂直縦	ASJ	水中	ANT 製	5~8	230	ガーネット (80MESH)	1.5~2.0	10	135



写真-2 サスペンションユニット(ANT製)

表-2 機器仕様(AIJ方式)

使用圧力	230MPa
カッティングヘッド	汎用(WOMA製)
高圧ポンプ	最大吐出圧245 MPa(WOMA製)
研掃材供給装置	供給量1.5 kg/min
研掃材	ガーネット粒径250~600 μm

表-3 機器仕様(ASJ方式)

使用圧力	230MPa
カッティングヘッド	専用(ANT製)
高圧ポンプ	最大吐出圧245 MPa(WOMA製)
ミキシングユニット	1400mm×900mm×2200mm
研掃材供給装置	供給量2.0 kg/min
研掃材	ガーネット(80MESH)

また、ASJ方式は、研掃材を水にけん濁したスラリーを加圧・噴射することで形成されるジェットを切断対象に噴射する方式である⁴⁾。一般的に、AIJ方式とASJ方式を比較すると、研掃材とジェットが混合されている時間が長い点でASJ方式の切断能力が高いとされている。

(3) 結果

切断速度について、AIJ方式では5~8 mm/minで燃料集合体溶融模擬材を切断可能で、ASJ方式では、5~10 mm/minで切断可能であった。切断能力としては、切断

速度の比較よりASJ方式のほうが2割程度有利となった。また、溶融分の固い部分で、切断音の変化から切り残し発生を判断をした場合は、カッティングヘッドをその部分で1~2回反らせて部材の縁切りを行うことで切断を完了した。

切断面については、反復切断を行った溶融分の固い部分では多少凹凸が発生したが、分析に支障がない程度で双方の方式とも全体的に綺麗な切断面はあった。水平横切断と垂直縦切断の切面を写真-3、4に示す。

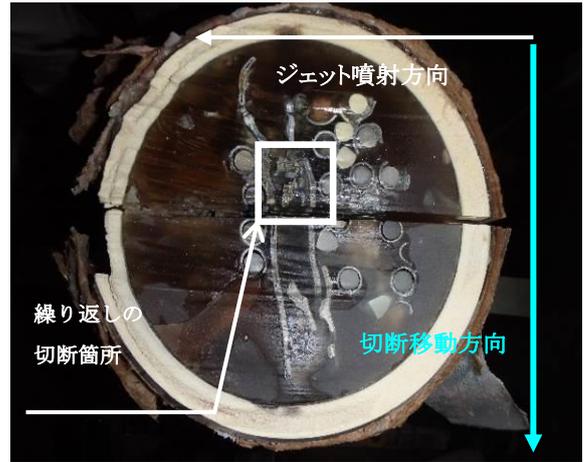


写真-3 燃料集合体溶融模擬材の切断断面 (NO.1 水平横切断結果)

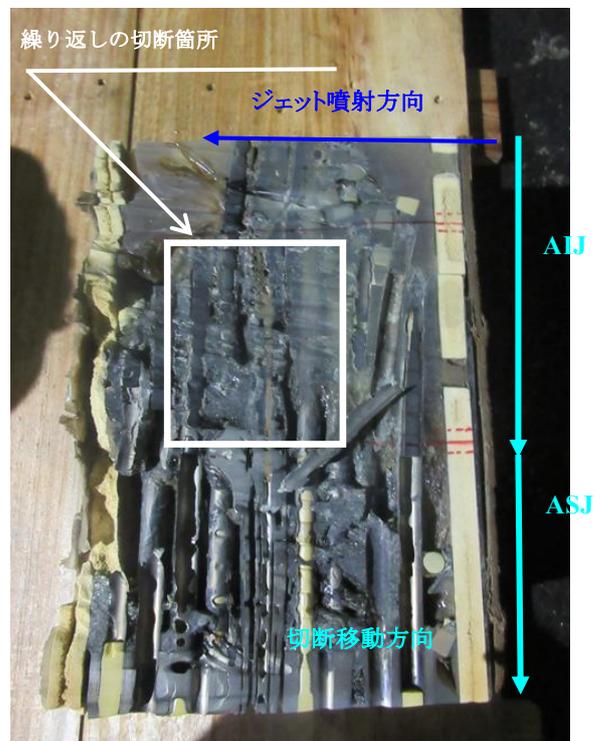


写真-4 燃料集合体溶融模擬材の切断断面 (NO.2およびNO.3 垂直縦切断)

4. 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を確認することを目的とした⁵⁾。

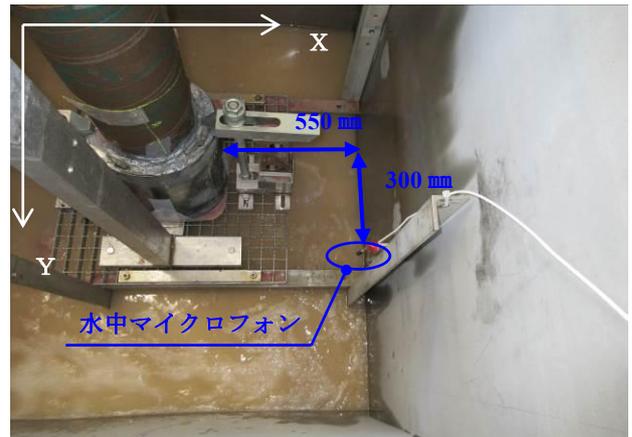
(2) 方法

水中環境下での燃料集合体熔融模擬材の水平横切断の切断状況における切断音について音圧レベルの計測を行い、音圧レベルのデータ取得し切断可否判断を行った。計測は、**図-2**に示すシステムにより水中マイクロフォンで収録したデータをマイクロフォン用アンプおよびUSB収録モジュールに取り込んだ。取り込んだデータから独自開発した「音響振動解析ソフトウェア」を用いて周波数解析を行い、リアルタイムに周波数の分布および強度を表示し、切断中の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取得した。なお、周波数帯域における水中マイクロフォンの設置位置は、**写真-5**に示すように切断位置からX方向に550mm、Y方向に300mmの距離とし、ジェットの後方でジェットが直接当たって計測に影響がでないように配慮した。切断は、**表-4**の切断条件とし、切断速度5mm/minで約2400s(40min)の切断を行った。

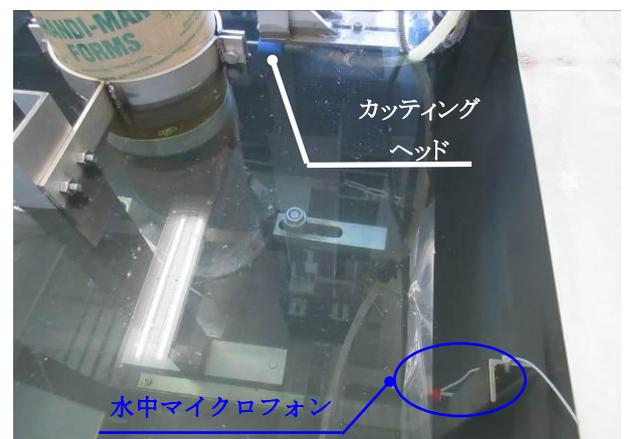
(3) 結果

模擬材の切断状況を**写真-6**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-3**に示す。切断開始から1500sまでは、0~1000Hzの音圧レベルが大きかった。1500~1680s(カッティングヘッド想定移動距離133~140mmの地点)の間では、1000Hz以下の音圧レベルだけでなく、1000Hz以上でも音レベルが強くなっている変化が生じた。

終了後の試験体の切断状態から、カッティングヘッド想定移動距離133~140mmの地点では、切断不良(縁切り不良)が起きており、その他の部分では、縁切りにできていることが分かった。



a) 水中マイクロフォンと試験体の位置の関係



b) 水中マイクロフォンとカッティングヘッドの位置の関係

写真-5 水中マイクロフォン設置概要

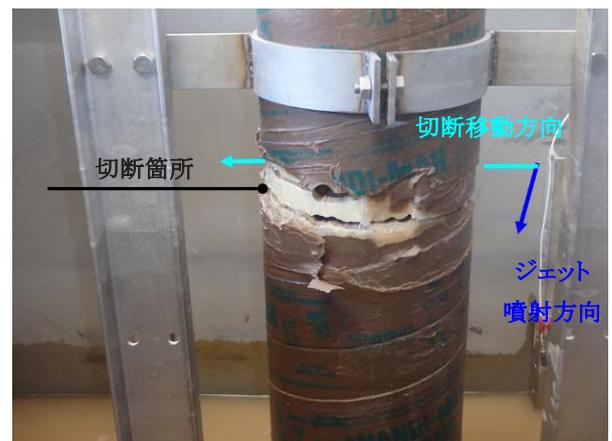


写真-6 試験体水平横切断状態(ジェット出口)



図-2 音圧レベルの計測システム

表-4 切断条件(切断音計測)

切断方向	方式	雰囲気	カッティングヘッド	切断速度	圧力	研掃材種類	研掃材量	スタンドオフ距離	切断距離
				mm/min	MPa		kg/min	mm	mm
水平横	AIJ	水中	汎用WOMA製	5	230	ガーネット φ250~600μm	1.5	10	190

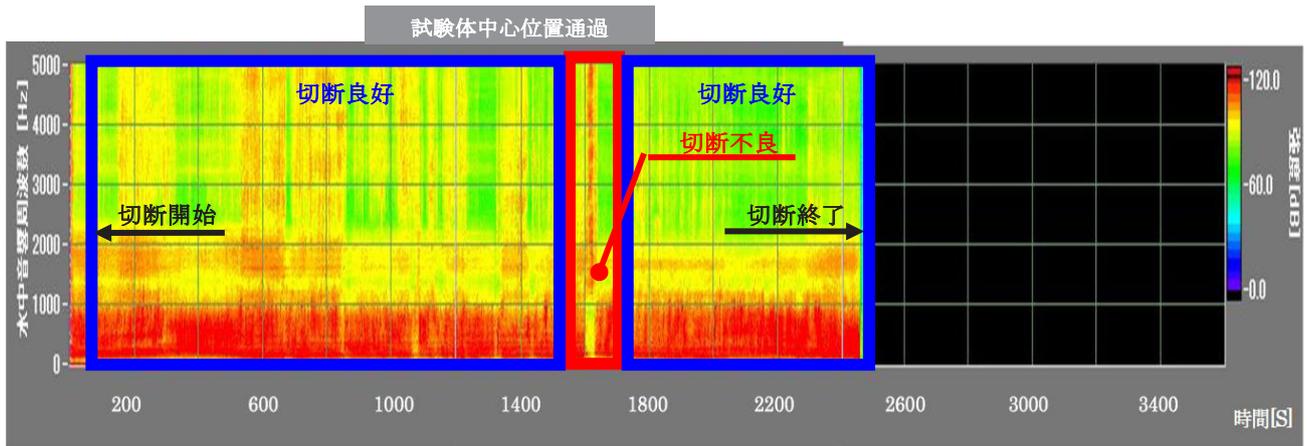


図-3 周波数帯域毎の音圧レベルの経時変化(燃料集合体溶融模擬材)

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燃料集合体溶融模擬材を用いた切断試験

AWJ 切断により本試験体を切断することができた。溶融した固い部分で1回(ワンパス)で切断できない場合は、繰り返し切断を行うことにより切断を完了できた。さらに、AIJ方式より効率の良いASJ方式を用いたことにより切断時間を2割程度短縮できる可能性がある。

②切断音計測試験

水中での燃料集合体溶融模擬材の切断時の状況を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、燃料デブリ等溶融材料への水中マイクロフォンを用いた切断状況判定方法を確立できる可能性が示唆された。

以上、AWJにより燃料集合体溶融模擬材が切断可能であることを確認でき、切断可能な条件のデータを取得できた。今後、これらのデータは、燃料デブリの取出しの検討に役立つ可能性がある。

しかし、1Fの炉内構造物の解体においては、燃料デブリまでのアクセス方法などの課題も多く、状況も複雑化していることが予想されるので、できるだけ多くの切断ケースを想定して切断性能を把握の必要がある。

謝辞：本報で報告した成果に関して、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター 中桐俊夫氏、阿部雄太氏にご指導、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) 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) アブレイシ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
- 2) 鷲谷忠博, 荻野英樹, 高野公秀, 矢野公彦, 鍛冶直也 燃料デブリの特性に関する研究概要, 日本保全学会第12回学術講演会, 2015.7
- 3) 丸山信一郎, 綿谷聡: 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ー，三井住友建設技術研究開発報告 No,14, 2017.2
- 4) 清水誠二，佐久間正仁，人見孔太，秋山健太，彭國義：アブレジブサスペンションジェットによる水中切断，日本機械学会論文集(B編)，77 卷 775 号，2011.3
- 5) 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ー厚板水中切断性能の把握と音による切断監視試験ー，三井住友建設技術開発センター報告 No,8, 2010.11