

「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

－音・振動を用いた切断監視技術の開発と適用性試験－

Assessment of the Applicability of AWJ Technique for Dismantling the Reactor of Fugen - Development and Applicability Testing of Sound/Vibration-Based Submerged Cutting Process Monitoring Technology -

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内にある新型転換炉「ふげん」の原子炉本体は、圧力管とカランドリア管からなる二重管構造を特徴としている。原子炉本体解体は、逐次水中で行われる予定であり、二重管の同時解体技術として、水中におけるアブレイシブウォータージェット（AWJ）工法を一つの候補としている。

今までの AWJ 切断試験では、切断時に切断粉等で水に濁りが発生するため、水中での切断監視を水中カメラ等で行うことが困難であった。そこで、二次的な切断監視技術として音・振動を用いた切断監視システムを開発し、その適用性を試験した。その結果、当該技術は、二次的な切断監視技術として、切断工程の把握や切断可否判定に有効であることを確認した。

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（AWJ）、音、振動

The reactor of Fugen is characterized by its double-walled pressure tube construction that is composed of pressure tubes and calandria tubes. The reactor dismantlement has been planning on dismantling it under the water and the submerged abrasive water jet (AWJ) cutting method is chosen as a candidate from among simultaneous double tubes cutting technological options.

Because past AWJ cutting tests have verified that cuttings cause muddiness of water due to fine debris generated during cutting. As visual monitoring of cutting process with an underwater camera was proved to have difficulties, a sound/vibration-based cutting process monitoring system was developed as a secondary cutting process monitoring technology and was tested for its applicability. The test has confirmed that this technology is effective as a secondary cutting process monitoring technology, in assessing the cutting process and judging whether materials can be cut or not.

Key Words: Fugen, Reactor Dismantlement, Abrasive Water Jet(AWJ), Sound, Vibration

1. はじめに

新型転換炉「ふげん」（写真-1）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¹⁾。

「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解体工法の検討が進められている²⁾。

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。



写真-1 新型転換炉「ふげん」の全景

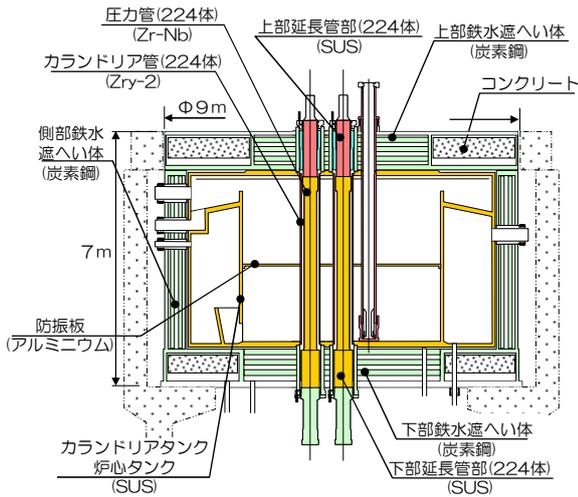


図-1 原子炉本体の構造

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。図-1³⁾に原子炉本体の構造を示す。

ここで、原子炉施設内の構造物の解体においては、放射性物質の拡散を防ぐ（汚染拡大防止）ことが重要である⁴⁾。

一般に、熱的な切断工法により構造材を切断すると、材料が熱によって蒸発したり溶けたりしてヒュームやドロス等が発生する。炉内構造物切断の場合は、それらが放射性物質を含むことが考えられる。したがって、できるだけヒュームやドロス等の発生が少ない切断方法を選択する必要がある。また、解体時には、配管等が入り組んだ複雑で狭隘な構造物も解体するため、それに適用可能な切断方法を選定する必要がある。

そこで、以上の条件を満たす切断工法として、水中におけるアブレイシブウォータージェット工法（以下、「AWJ」という）を一つの候補とし、適用性確認試験を実施した。

本報告では、AWJ切断工法の「ふげん」原子炉本体解体への適用にあたり想定される課題について、音・振動を用いた切断監視技術を開発し、適用性試験を実施した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、実施した試験によるものである。

2. AWJ 水中切断の課題

炉内の圧力管とカランドリア管を同時解体するため、これまでに、世界最小クラスの超小型AWJ切断装置を開発し、超小型AWJ切断装置により二重管を同時切断できることを試験により確認した。超小型AWJ切断装置による管切断イメージを図-2⁵⁾に示す。

切断試験では、切断粉等の影響と思われる水の濁りが発生することが確認されている（写真-2、写真-3）。そのため、切断状況監視を考慮した場合、水中カメラ等による目視以外の二次的な水中切断監視技術の検討が、今後の課題の一つである⁶⁾。

二次的な水中切断監視技術としては、切断時に切断音や被切断物の振動に変化が起きると予測されるため、音・振動による切断監視方法を候補にあげた。

そこで、音・振動を用いた切断監視システムを開発し試験により、そのシステムによる切断工程や切断良否状況の把握の可能性を確認した。

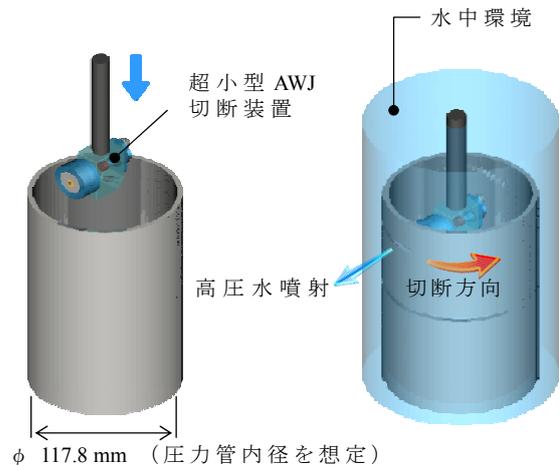


図-2 超小型 AWJ 切断装置による管切断イメージ



写真-2 切断試験中の水の状態



写真-3 切断試験後の水の状態

3. 音および振動による切断監視システムの開発⁷⁾

AWJによる切断可否を判定するため、水中切断音および被切断物の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。システム機器構成を図-3に示す。また、システム機器の主な仕様を表-1に示す。

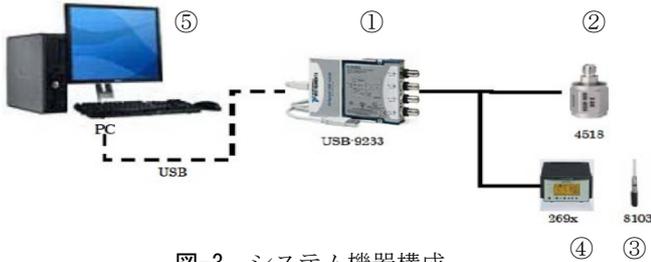


図-3 システム機器構成

表-1 システム機器の主な仕様

| No | 項目 | 型式 | 主な仕様 |
|----|--------------|-------------------|--------------------|
| ① | USB信号記録モジュール | NIUSB-9233 | 4ch AI、24bit、50kHz |
| ② | 振動センサー | B&K 4518 | ~20kHz |
| ③ | 水中マイクロホン | B&K 8103 | ~20kHz |
| ④ | アンプ | B&K 269x | - |
| ⑤ | データ収録パソコン | WindowsXPwith SP2 | LabVIEW8.21 |

このシステムは、センサーで検知した音や振動データをパソコンに取り込み、音および振動レベルの周波数特性の変化をモニタリングすることを特徴としたシステムである。切断監視モニタを写真-4に示す。



写真-4 切断監視システムモニタ

4. AWJ 切断試験機器の構成

AWJは、高圧（200～400MPa）の水を鉬石等の研掃材とともに噴射させ、水および研掃材の持つ運動エネルギーにより材料を切断する技術である。試験で、高圧水を200MPa、研掃材をガーネットとし、それらを被切断物に向かって混合噴射し、被切断物を切断した。

切断試験機器は、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切断装置）で構成される。AWJ切断試験機器構成を図-4に示す。

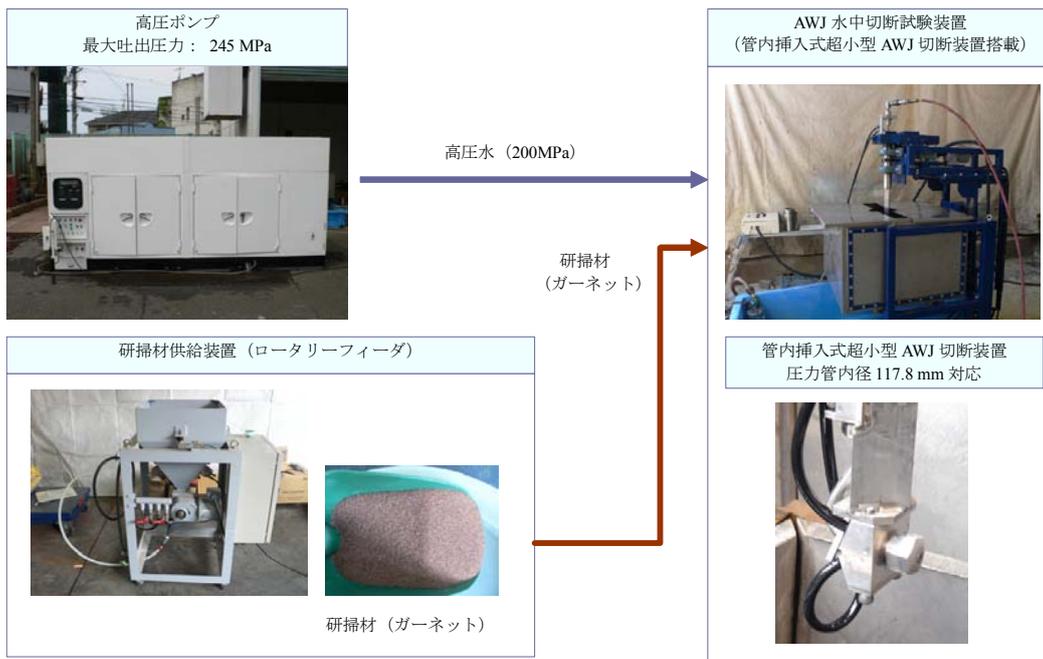


図-4 AWJ切断試験機器構成

5. 水中切断音レベルの周波数特性試験

(1) 試験方法

二重管模擬材 (SUS材) を管内側より、超小型AWJ切断装置により水中切断し、切断開始から終了までの一連の切断作業において、水中切断音レベルの周波数特性の変化を水中マイクロホンにより検知した。

主に、外管および内管のピアッシング (被切断物の穴開け) 工程と切断移動工程 (切断良好と切断不良の場合) の周波数特性の変化の違いを観察した。

水中マイクロホンは、切断位置とほぼ同等の水深 300 ~ 400mm とし、切断位置からの水平離隔距離は、400mm とした。水中マイクロホン設置状況を写真-5に示す。

(2) 試験結果

SUS 二重管切断時の水中切断音レベルの周波数特性の変化を図-5および図-6に、SUS外管の切断状況を写真-6に示す。

水中切断音レベルの周波数特性の特徴として、ピアッシング工程において、内管貫通後の外管ピアッシング移行時に 200 ~ 600Hz の周波数帯域で音レベルに大きな変化が生じた。

また、切断中 (ヘッド回転移動中) において、内管外管とも切断良好な場合は、200 ~ 600Hz の周波数帯域で強いレベルを示した (図-5)。

一方、外管が切断不良の場合は、上記周波数帯域で音

レベルが弱くなった (図-6)。切断良好状態と切断不良状態の双方において、水中切断音レベルの周波数特性の違いを確認することができた。



写真-5 水中マイクロホン設置状況

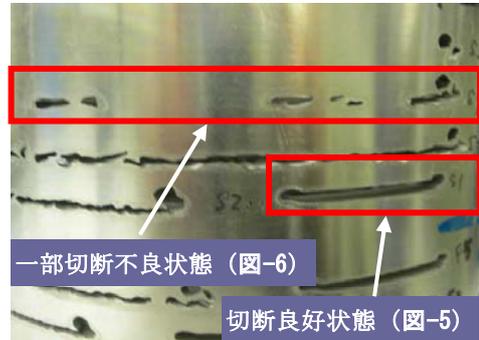


写真-6 SUS外管の切断状況 (音計測)

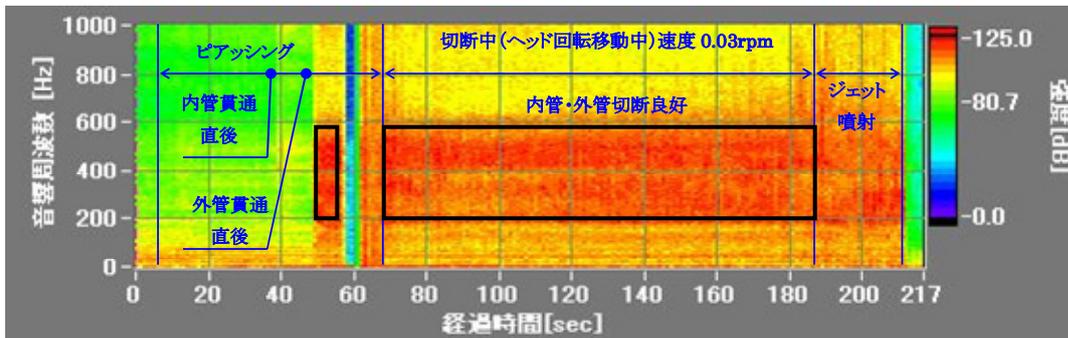


図-5 水中切断音レベルの周波数特性変化 (SUS二重管切断・切断良好状態)

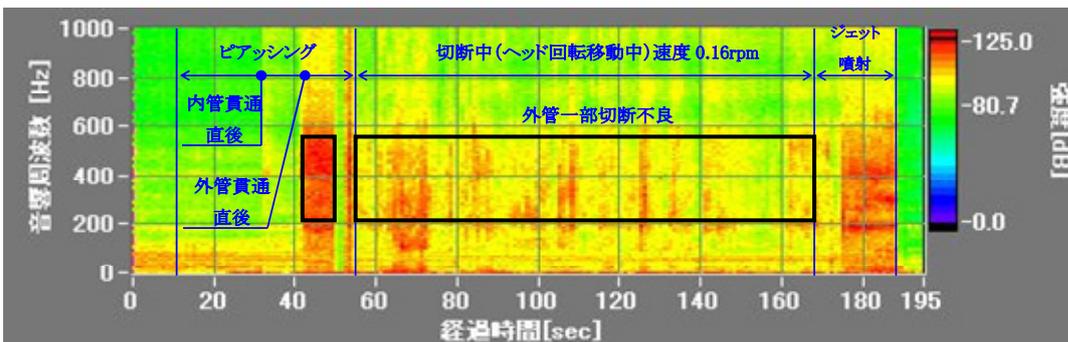


図-6 水中切断音レベルの周波数特性変化 (SUS二重管切断・外管一部切断不良状態)

(3) 考察

内管貫通後に検知した音は、外管ピアッシング中、徐々に大きくなっており、AWJが外管を貫通したと思われる時最も大きくなり、貫通後徐々に弱くなった。また、切断中に検知した音は、AWJが二重管外管の外側に到達した状態（切断良好状態）で最も強くなり、AWJが二重管外側に到達しない状態（外管切断不良状態）で弱くなった。これらのことより、水中マイクロホンに検知された周波数帯域 200 ~ 600Hz の音は、水流摩擦音によるものと考えられる。

6. 被切断物の振動レベルの周波数特性試験

(1) 試験方法

二重管模擬材（SUS材）を水中切断した場合に、被切断物（二重管外管）が受ける振動レベルの周波数特性の変化を振動センサーにより検知した。

振動センサーを二重管模擬材外管の上部外面に取付けた。振動センサー設置状況を写真-7に示す。

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での周波数特性の変化の違いを観察した。

(2) 試験結果

SUS 二重管切断時に外管が受ける振動レベルの周波数特性変化を図-7 に、SUS 外管の切断状況を写真-8 に示す。

二重管外管が受ける振動レベルの周波数特性の特徴として、ピアッシング工程において、内管貫通後の外管ピアッシング移行時に 0 ~ 4,000Hz 周波数帯域で振動レベルが大きく変化した。

また、切断中（ヘッド回転移動中）においては、内管外管とも切断良好な場合に、2,000 ~ 4,000Hz の周波数帯域で強いレベルを示した。外管が切断不良となった場合においても、上記の周波数帯域で強いレベルを示した

が、振動レベルの強さにおいて、切断良好状態より強かった。



写真-7 振動センサー設置状況

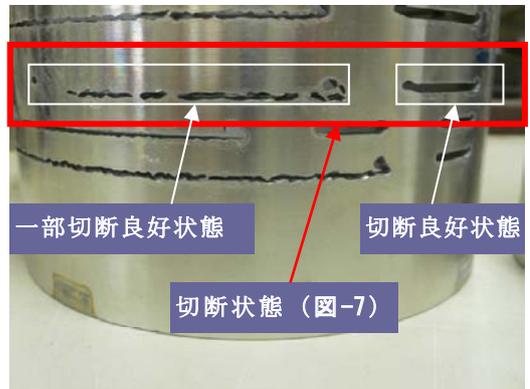


写真-8 SUS外管の切断状況（振動計測）

(3) 考察

ジェット噴射時、外管の振動レベルは強くなっておらず研掃材供給後の内管貫通後（外管ピアッシング）と思われる時より振動レベルは強くなっていることから、被切断物が受ける振動は、AWJが被切断物に当たることにより発生したものと考えられる。

一方、切断時では、切断良好および不良状態の双方で

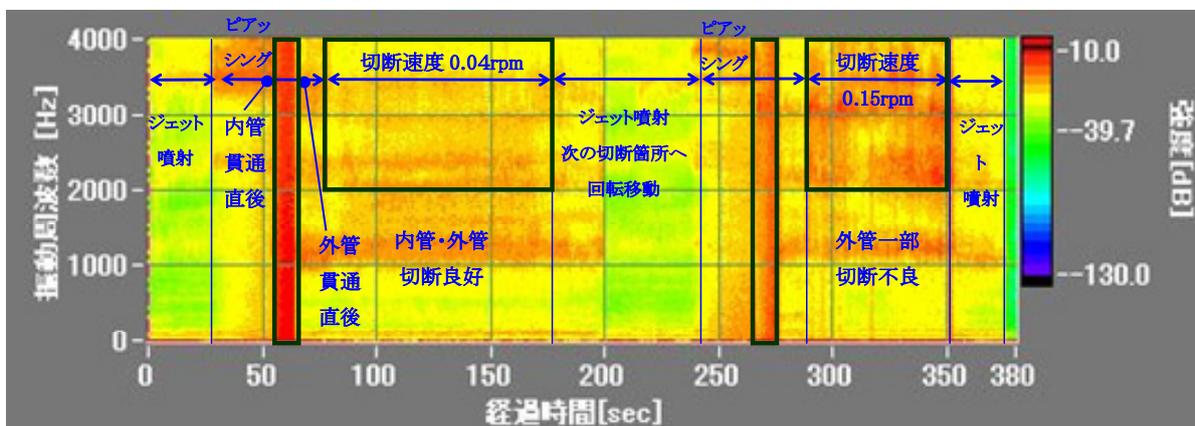


図-7 外管が受ける振動レベルの周波数特性変化（SUS二重管切断）

振動レベルの強さに差が生じていることから、被切断物をAWJが貫通したか否かで振動レベルの強さに差が生じると考えられる。

ここで、被切断物の貫通の有無により、AWJが被切断物に当たる量が増減すると思われるため、被切断物を受ける振動の強さは、AWJが被切断物に当たる量に依存していると予測している。

7. まとめ

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 音・振動による切断監視技術の開発

水中におけるAWJ切断状況を監視するために、二次的な監視方法として、水中切断音および被切断物の振動レベルの周波数特性の変化をモニタリングするシステムを開発した。

② 水中切断音レベルの周波数特性

水中切断音について、切断良好状態と切断不良状態の双方で、200～600Hzの周波数帯域で音レベルの違いを確認できた。

この音レベルの違いは、水流摩擦音の変化によるものと考えられるため、この変化によって生じる水中音レベルの周波数特性の変化を観測することにより、切断工程の移行や二重管の切断良否状態を把握できる可能性がある。

③ 被切断物の振動レベルの周波数特性

被切断物を受ける振動について、切断良好状態と切断不良状態の双方で、2,000～4,000Hzの周波数帯域で振動レベルの違いを確認できた。

この振動レベルの違いは、被切断物にAWJが当たる量の変化によるものと考えられるため、この変化によって生じる被切断物を受ける振動レベルの周波数特性の変化を観察することにより、切断工程の移行や二重管の切断良否状態を把握できる可能性がある。

以上より、AWJ水中切断において、音および振動双方とも、二次的な切断監視方法として有効な手段であることを確認した。

また、音および振動の双方を同時に活用することにより、切断工程の移行判断や二重管の切断可否判断をより確実なものできると考えている。

なお、今後の課題として、音および振動を用いた場合の各々の切断判定基準の設定値の明確化があげられる。

切断判定基準の設定値の明確化のためには、エンコーダー等を用いた周位置における切断可否状況等の詳細把

握やセンサーと切断箇所との距離変化による影響の把握が不可欠である。

謝辞：本研究で対象とした「ふげん」原子炉本体解体技術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次長、佐野一哉課長代理、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) 中村保之, 岩井紘基, 佐野一哉, 森下喜嗣他: 「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
- 2) 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- 研掃材を再利用した切断試験と切断監視技術の開発 -, 三井住友建設技術研究所報告No.6, 2008.11
- 3) 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
- 4) (独)日本原子力研究開発機構: 熱影響が少なく狭隘構造にも適用可能な切断技術- アブレイシブウォータージェットによる炉内構造物の解体 -, 未来を拓く原子力- 原子力機構の研究開発成果 -2007, 9-1, 2007.9
- 5) 丸山信一郎, 手塚慎一, 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- 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
- 6) 岩井紘基, 佐野一哉, 中村保之, 大鐘大介, 丸山信一郎, 高島雄次: 「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
- 7) 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