

高速炉の実用化に向けた保守・補修技術開発

Development of the In-service Inspection and Repair Technologies toward the Commercialization of Fast Breeder Reactor

(独)日本原子力研究開発機構 山下 卓哉 Takuya YAMASHITA Member

Since the FBR plants in commercial stage is designed 60 years reactor life which is twice of the prototype FBR "Monju", maintenance technologies considering aging and damage for a long term using at high temperature are needed. Development of the in-service inspection and the repair technologies needed for maintenance of the commercial used FBR is discussed after reviewing the features of the FBR plants, and experience of ISI and repair of the experimental FBR "Joyo" and the "Monju".

Keywords: Fast Breeder Reactor, Joyo, Monju, In-service Inspection, Maintenance

1. 緒言

実用化段階の高速増殖炉は、「もんじゅ」の2倍の60年の寿命で設計されるため、高温での長期使用による経年劣化や損傷に配慮した保守・補修技術開発が必要になる。高速炉プラントの特徴や「常陽」、「もんじゅ」の保守・補修経験を概観するとともに、実用化段階の高速増殖炉の特徴を整理し、実用炉に必要な保守・補修技術開発についてまとめる。

2. 高速炉プラントの特徴

ナトリウム冷却型FBRプラントの特徴は、高速中性子を利用し、冷却材に化学的に活性で不透明な液体金属ナトリウムを使用していることである。ナトリウムは沸点が高い(常圧で約880°C)ため低圧で運転されることと、構造材料に延性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼を用いていることから、疲労やクリープによるき裂が貫通してもすぐに破断に至ることはなく、破断前漏えい(LBB)が成立する。また、配管の高所引き廻しとガードベッセルの設置等により、破断時においても炉心燃料の崩壊熱除去に必要な冷却材が確保出

来るため、ナトリウムの漏えいを検知してからでも安全に原子炉を停止することが出来る。このような特徴から、「常陽」と「もんじゅ」の検査は、ナトリウムやカバーガスの連続漏えい監視を主体に行っている。

3. 実験炉「常陽」の保守・補修経験

高速実験炉「常陽」(図1)は、我が国最初のウラン-プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)、ナトリウム冷却、ループ型の高速増殖炉として1977年4月に初臨界を達成した後、1981年12月まではMK-I炉心(増殖炉心)で熱出力50MW及び75MWで運転を行い、高速増殖炉に関する技術的知識、経験の蓄積が図られた。その後、熱出力10MWのMK-II炉心(照射用炉心)に移行した。

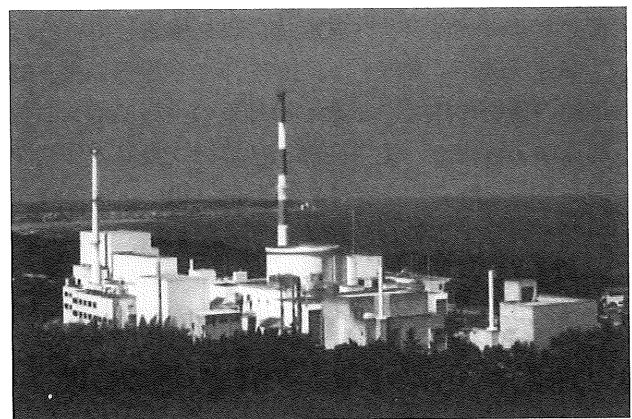


図1 高速実験炉「常陽」

連絡先: 山下卓哉、〒919-1279 福井県敦賀市白木1丁目
独立行政法人 日本原子力研究開発機構 FBRプラント
工学研究センター、電話: 0770-39-1031(内線6811)、
e-mail: yamashita.takuya@jaea.go.jp

2003年7月には、高速中性子束をMK-II炉心の約1.3倍、原子炉熱出力を140MWに増加させたMK-III炉心の初臨界を達成した後、2004年からMK-III炉心での本格運転を開始し、燃料、材料の照射施設として利用されている。この間、炉心管理、運転技術、保守技術などで多くの経験を蓄積した。しかしながら、2007年5月14日にMK-III炉心第6サイクル運転を終了した後、照射試験を終了した計測線付実験装置の切り離しに失敗し、燃料交換機能の一部阻害と炉心上部機構下面の損傷が明らかになった。現在、再起動に向けた復旧方法の検討を進めている。

「常陽」の原子炉設備の構造材料に使用しているステンレス鋼やフェライト系合金鋼は、ナトリウム中ではほとんど腐食しない。また、ナトリウム中には主循環ポンプを含め、可動部が摺動し、磨耗する部分がない。このため、「常陽」のナトリウム機器は電気や機械部分を除き原則としてメンテナンスフリーである。一方、カバーガス中に設置されている回転プラグや燃料交換機などの燃料取扱い系の機器の可動部にナトリウム蒸気が付着したため、運転手法の改善やナトリウム付着低減のための改造工事を行った。原子炉および冷却設備のナトリウム機器については、電動機や電気部品の点検、および機器の外観目視検査を行っているが、これまで「常陽」ではナトリウム機器に関する重大な故障は発生していない。供用期間中の健全性については、連続漏えい監視を主体に、ナトリウムに接する機器の構造材料はナトリウム冷却系に装荷したサーベイランス材により、また、中性子照射効果については原子炉容器内に装荷したサーベイランス試験片により確認している。

高速実験炉「常陽」は、1977年の初臨界以来、33年間の運転の中で、1次主冷却系の主循環ポンプ分解点検・再組立、主中間熱交換器の交換等の作業を通して、これらナトリウム機器取り扱いに係る作業管理・プラント管理の経験・知見を蓄積してきている¹⁻²⁾。

4. 原型炉「もんじゅ」の保守・補修経験

高速増殖原型炉「もんじゅ」(図2)は、1994年4月5日に初臨界を達成したが、電気出力40%での出力上昇試験及び過渡試験を実施していた1995年

12月8日に2次主冷却系ナトリウム漏えい事故が発生し原子炉を停止した。その後、徹底した原因究明を行うとともに、安全性及び信頼性のより一層の向上を図ることを目的とした「安全総点検」を実施し、改善すべき事項を明らかにするとともに、ナトリウム漏えい対策等に係る改善策を策定した。2005年9月にナトリウム漏えい対策等に係る工事に着手し、2007年5月23日に終了した。その後、工事確認試験、プラント確認試験、単体及び系統の機能確認試験を経て、2010年4月28日に地元了解が得られたため、5月6日に運転を再開し同8日に臨界を達成した。今後、炉心確認試験、発電を行う40%出力プラント確認試験、その後の出力上昇試験と3段階の性能試験を経て、約3年後に100%出力を達成する計画である。

「もんじゅ」の供用期間中検査(ISI)は、連続漏えい監視が主体であるが、安全上特に重要な機器に対しては最新の開発成果を取り入れて計画的に検査装置開発を行うこととされており、(1)原子炉容器廻り検査装置、(2)蒸気発生器伝熱管検査装置、(3)1次主冷却系配管検査装置については、1960年代から開発・整備を進め、1991年に行われた総合機能試験に適用し、要求性能を満たすことを確認した(図3)。その後も、検査性能と検査効率の向上を図るべくISI装置の高度化を進めた³⁾。原子炉容器廻り検査装置については、従来のファイバースコープに代えて、CCDカメラを搭載し肉眼試験時の視認性の向上と視野の拡大を図った。また、研究開発の位置付けで搭載を検討している電磁超音波探傷器(EMAT)の改良を行い、従来の2倍の検出感度向上と1/4の重量軽減を達成した。蒸気発生器伝熱管検査装置については、渦電流を励起するコイルを2個配置した

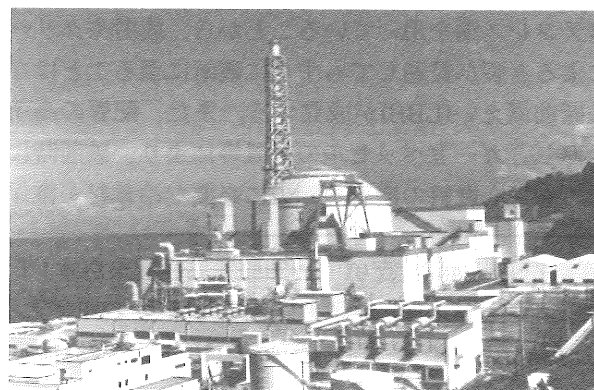


図2 高速増殖原型炉「もんじゅ」

双方向励磁型リモートフィールド ECT の採用とプローブ構造の見直し等により、欠陥検出性能の向上と振動ノイズの低減を図った。1次主冷却系配管検査装置については、超音波探傷プローブの最適化により、従来の1.5倍の検出感度向上を図った。なお、蒸気発生器伝熱管検査装置については、「プラント確認試験」の一環として2007年11月から2008年3月に掛けて蒸気発生器伝熱管の全数検査を実施し、問題となるような減肉や欠陥が無いことを確認している⁴⁾。

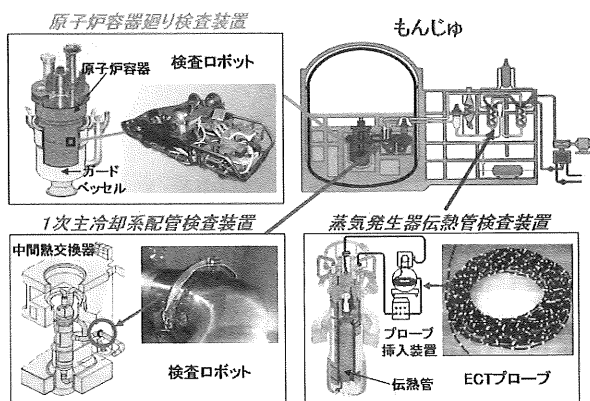


図3 「もんじゅ」のISI装置

一方、ナトリウム漏えい対策に係る2次冷却系の改造工事では、高速実験炉「常陽」や海外先行プラントの改造工事の経験や知見を参考に、ナトリウムバウンダリを開放する際のプラバックの使用、プラバック内の酸素濃度管理、系統系カバーガスの微正圧制御、切粉混入防止のためのロールカッタによる押し切り工法等を採用した。これらの導入により、2次冷却系の改造工事は、トラブルもなくほぼ計画通りに完了することができた。

5. 実用化に向けた保守・補修技術開発

5.1 実用炉の開発目標と特徴

FBR サイクル実用化研究開発(FaCTプロジェクト)で選定した高速炉は、「常陽」や「もんじゅ」と同様にMOXを燃料とするナトリウム冷却型ループ型炉である。FaCTプロジェクトでは、経済性の向上、信頼性の向上及び安全性の向上のために、図4に示すような革新技術の採用を検討している⁵⁾。実用炉も基本的には連続漏えい監視が主体になるが、革新技術の一つとして「⑩保守、補修性を考慮したプラント設計」を挙げており、これを達成することにより信頼性・安全性の向上と供用期間全体を通しての運転・保守に掛かるコストの低減を目指している。

実用炉の保守・補修技術を検討する上で考慮すべき特徴を列举すると、1)「もんじゅ」よりも高温化(「もんじゅ」の運転温度529℃に対し、実証炉は550℃)を図るとともに設計寿命を2倍の60年に設定していること、2)24ヶ月の連続運転と90%以上の稼働率を目標としていること、3)構造材料として原子炉容器に316FR鋼を採用しそれ以外の1次主冷却系機器・配管及び2次主冷却系機器・配管の構造材料として改良9Cr鋼等の新材料を採用していること、4)安全上の配慮から容器や配管を2重化するとともに蒸気発生器伝熱管に直管型の2重伝熱管の採用していること、5)システムの簡素化を狙ったポンプ組込型IHXや逆L字型の1次主冷却系配管の採用等により、機器設置がコンパクトになる一方で検査・補修部位へのアクセス性が悪化したこと、また、6)原子炉容器が大型化し「もんじゅ」には無い原子炉容器の縦継手や炉心支持スカートの高接構造の採用などが挙げられる。

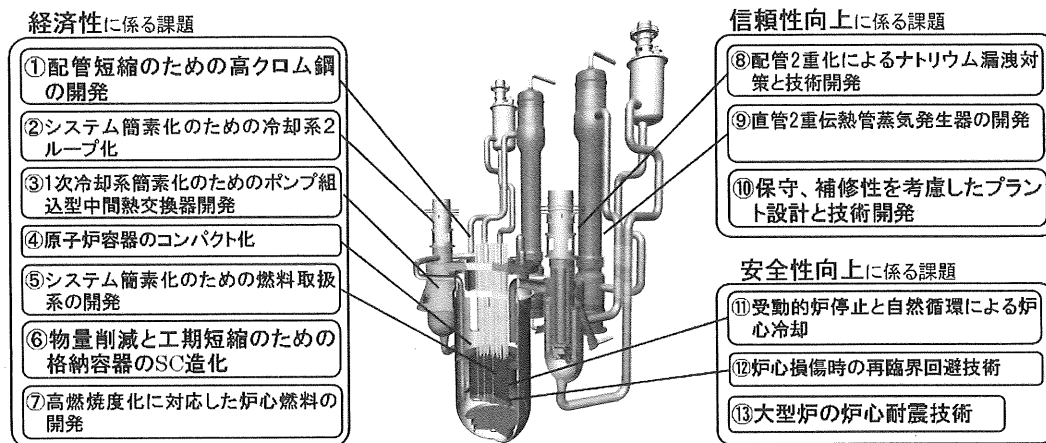


図4 実用化に向けた革新技術の検討

5.2 新材料の採用と高温、長寿命化に向けた保守・補修技術開発

実用炉は、316FR 鋼や改良 9Cr 鋼といった新たな構造材料の採用に伴い、「もんじゅ」よりも高温化を図るとともに設計寿命を2倍の60年に設定している。高温で長時間に亘って機器を使い続けるためには、クリープ疲労損傷や溶接部の割れを主体とした高温で問題となる劣化・損傷を適切に検出する技術、検出した劣化・損傷のその後の進展を予測する技術、劣化・損傷の補修の必要性や時期を評価する技術等に加えて劣化・損傷の予防・回復技術や補修・修理の技術が重要になる。

機器の劣化や損傷を検出する技術として、軽水炉や「もんじゅ」の蒸気発生伝熱管の検査にも適用される過電流探傷 (ECT; Eddy Current Testing) や「もんじゅ」の原子炉容器の溶接部の検査用に研究開発を行っている電磁超音波探傷子 (EMAT; Electro-Magnetic Acoustic Transducer) 等に加えて、中間媒質が不要なため非接触で高温の被検体の超音波探傷を行うことができるレーザー超音波⁶⁾も有望である。また、目に見える前の劣化状態の検知を可能にする磁気的検査手法⁷⁾の開発が望まれる。

劣化・損傷を予防・回復する技術としては、誘導加熱やレーザー加熱等による損傷部分の焼戻しやレーザーピーニング⁸⁾等による材料強化がある。また、ナトリウム中で実施できる可能性のある材料強化技術として、キャビテーションショットレスピーニング⁹⁾の応用が考えられる。また、き裂などの損傷部の補修については、細いガラスファイバーで大きなエネルギーを伝送でき遠隔での補修が可能な技術としてレーザーによるクラディング補修¹⁰⁾が考えられる。

5.3 長期連続運転の達成と稼働率向上に必要な保守・補修技術開発

24ヶ月の長期連続運転と90%以上という高い稼働率を達成するためには、運転しながら機器の劣化・損傷の検査やモニタリングが出来る状態監視技術を積極的に採り入れることが必要である。運転中の状態監視を取り入れることにより、定検での検査項目を減らすことが出来るだけでなく、軽水炉の応力腐食割れ(SCC)のように当初想定出来なかった損傷や高クロム鋼の「タイプIV損傷」のように加速試験では確認できないような損傷に対するリスクの低減が可能となる。状態監視は、

特に、運転経験の少ない実証段階での未知の破損に対するリスク低減に有効と考えられる。

状態監視技術に使える技術として、前述の ECT、EMAT やレーザー超音波等がある他、1本のガラスファイバーで同時に数千箇所の温度、歪、振動等のモニタリングが可能なファイバー・ブラッグ・グレーティング(FBG; Fiber Bragg Grating)¹¹⁾がある(図5)。ただし、これらの技術を高速炉の機器・配管のモニタリング用センサとして実用化するためには、耐熱性と耐放射線性が要求されるため新たな技術開発が必要である。

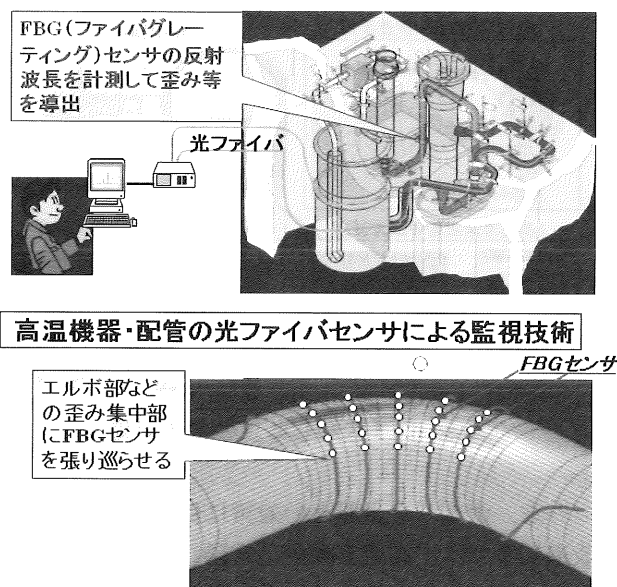


図5 FBG センサを用いた状態監視システム

5.4 容器、配管、SG 伝熱管の2重化、狭隘化に対する保守・補修技術開発

実用炉は、原子炉容器や主冷却系配管が2重化されるため、人が検査部位に直接アクセスすることが出来ない。また、システムの簡素化を狙ったポンプ組込型 IHX や逆L字型の1次主冷却系配管の採用等により機器設置スペースが狭隘化する等、検査・補修部位へのアクセス性が悪くなる。このため、人がアクセスしなくても行える遠隔での検査・補修技術の開発が必要になる。容器や配管に対する遠隔の検査・補修技術は、前述の ECT、EMAT、レーザー超音波等のセンサやレーザー補修装置と「もんじゅ」の検査ロボット(図3)を組み合わせることで可能になる。

実用炉の蒸気発生器伝熱管は、内外の管を密着させた構造の2重伝熱管であることや、「もんじゅ」に比べ

て伝熱管本数が大幅に増えることから、検査精度の向上に加え検査速度の高速化が望まれる。このため、欠陥検出性能の高い超音波探傷プローブとマルチコイル型の ECT プローブ (図6) の開発¹²⁾に加え、探傷速度の飛躍的な高速化が可能なガイドウェーブプローブの開発を進めている。初期段階で検出された小さなき裂程度であれば比較的容易に補修が出来るため、ECT プローブとレーザー加工ヘッドを組合わせた伝熱管の検査補修装置の開発を進めている¹³⁾。

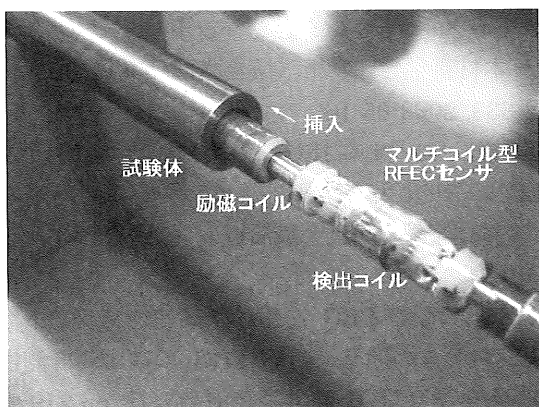


図6 マルチコイル型の ECT プローブ

5.5 ナトリウム中の保守・補修技術開発

原子炉容器の炉心支持スカートの溶接構造を検査するためには、高温 (検査時の温度は約 200℃) の液体金属ナトリウム中で適用出来る検査技術が必要である。

ナトリウム中の検査装置については、超音波を使って機器の変形、破損、脱落やき裂の目視検査や体積検査が可能なセンサの開発¹⁴⁾¹⁵⁾と検査部位にアクセスするための搬送装置 (電磁推進式ビークル) の開発を進めている (図7)。

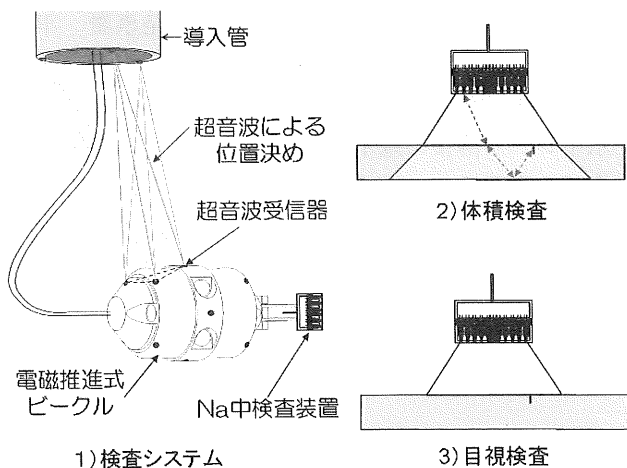


図7 ナトリウム中の検査装置

ナトリウム中の補修技術については、液体金属中での摩擦攪拌接合 (FSW; Friction Stirring Welding) 補修技術¹⁶⁾の研究がある他、軽水炉で実用化された水中でのレーザー補修技術¹⁷⁾のナトリウム中補修への応用が考えられる。

5.6 「常陽」、「もんじゅ」の経験の反映

現在、世界で稼働している高速増殖炉は少ないため、高速増殖炉の実用化のために必要な保守・補修技術を確実に高度化していくためには、「常陽」や「もんじゅ」の経験を有効に活用していくことが重要である。そのような中で、2009年8月に文部科学省より「もんじゅ」を活用した特別推進分野の研究課題が募集された。その中の『課題1: 「もんじゅ」における高速増殖炉の実用化のための中核的研究開発』については、福井大学が総括代表として応募し委託先に採択された。本課題の中の「プラント保全技術に関する研究開発」は、『高温で運転される高速増殖炉の健全性の確認・維持・向上を図る上で特に重要となる機器配管の高応力部や溶接部で予想されるクリープ疲労損傷や溶接割れ等の経年劣化を対象に、「もんじゅ」や実用化段階の高速増殖炉の運転や維持基準の体系化に必要な 1) 劣化診断技術、2) 検査モニタリング技術及び 3) 補修技術を開発し、4) 高速増殖炉の保全評価手法を構築する。』ことを目的としており、これまでに述べた開発課題の幾つかが研究テーマとして盛り込まれた。高速炉の保守・補修技術を体系的、大々的に取り上げた研究プロジェクトは今までに例がなく、今後3年間の研究開発成果に大きな期待が寄せられている。

「常陽」や「もんじゅ」の運転を通して得られる保守・補修経験を反映し高速増殖炉の保全計画の策定と運用に必要な保全技術を確立するために、2009年4月に「もんじゅ」サイトに隣接する白木地区に「FBRプラント工学研究センター」が開設された。また、2012年度の開設を目指して、高速炉特有のナトリウム環境や高温環境下での各種試験が可能な「プラント実環境試験施設(仮称)」の建設を進めており、「FBRプラント工学研究センター」と併せて、高温・長寿命化した高速増殖炉の機器・設備の損傷評価手法及び材料劣化防止技術等の基礎研究、機器・設備の保全に必要な検査・モ

ニタリング技術や補修・修理技術の開発に加え、保全管理に必要な各種評価手法の開発の拠点を目指している。今後、大学や産業界、国内外の研究機関等と協力して、高速増殖炉の保全技術開発に取り組んでいく計画である。

6. 結言

高速炉プラントの特徴や「常陽」、「もんじゅ」の保守・補修経験を概観するとともに、実用化段階の高速増殖炉の特徴を整理し、実用炉に必要な保守・補修技術開発についてまとめた。

謝辞

本報告の検討に当たっては、約1年間に亘る高速炉のプラント設計、構造材料、保全技術及びナトリウム技術の専門家との議論に拠るところが大きい。特に、5章の「実用化に向けた保守・補修技術開発」の検討に当たっては、日本原子力研究開発機構次世代部門の青砥紀身氏、小竹庄司氏、月森和之氏、早船浩樹氏、西山昇氏、大野裕司氏、FBRプラント工学研究センターの宮原信哉氏との議論に拠るところが大きく各氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 実験炉部, “特集「常陽」20周年IV. 高速炉の運転管理及び保守技術の開発”, 動燃技報 No.104, pp.43-58, 1997
- 2) 磯崎他, “プラント改造設計と冷却系機器の交換”, サイクル機構技報 No.21, pp.49-61, 2003
- 3) 上田他, “もんじゅ用 ISI 装置の開発(1)~(33)”, 原子力学会 2003 年春の年会~2006 年秋の大会
- 4) K.Takahashi et al., “Inspection of the Steam Generator Heat Transfer Tubes for FBR Monju Restart”, ICONE17-75904, 9p., in CD-ROM
- 5) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力発電株式会社, “高速増殖炉サイクル実用化研究開発 2008 年中間とり

まとめ”, JAEA-Evaluation 2009-003

- 6) 平澤英幸, “最新の超音波探傷試験技術”, 溶接学会誌 70(2001), 405-408
- 7) 高屋他, “高温環境下疲労損傷による SUS304 鋼の磁気特性変化”, 原子力学会 2004 年春の年会要旨集 Vol.42, 第 2 分冊, Page435
- 8) 佐野他, “レーザーピーニングによる原子炉構造物の応力腐食割れ対策”, 溶接学会誌 75(2006), 33-36
- 9) 祖山他, “疲労強度向上におけるキャビテーション・ショットレス・ピーニングとショット・ピーニングの比較”, 日本材料学会 学術講演会講演論文集 52, pp332-333, 2003-05-16
- 10) 西本他, “結晶制御補修部の機械的特性に関する検討: LD レーザによる結晶制御クラディング(第 6 報)”, 溶接学会 全国大会講演概要 (81), 82-83, 2007-09-01
- 11) 猿田他, “耐熱 FBG を用いた高速炉プラント健全性監視システムの開発: 耐熱 FBG のひずみ計測性能評価”, 保全学会第 6 回学術講演会要旨 pp.219-222, 2009
- 12) 山口他, “高速増殖実証炉に向けた概念検討と関連技術開発 (9) 構造物欠陥検査技術開発”, 原子力学会 2010 年春の年会予稿集 D34
- 13) 西村他, “伝熱管内壁検査補修技術開発の概要”, 保全学会第 5 回学術講演会要旨集 pp.139-141, 2008
- 14) 山下他, “ナトリウム中目視検査用リアルタイムセンサの開発”, 日本原子力学会 2009 年秋の大会 G50
- 15) 田川他, “ナトリウム中目視検査用高解像度センサの開発”, 日本原子力学会 2009 年秋の大会 G51
- 16) 加藤他, “液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修技術の開発”, 原子力システム研究開発事業 平成 21 年度成果報告会資料集, 159-162
- 17) 河野他, “多機能レーザー溶接ヘッドの開発 (第 1 報) - 水中レーザー溶接の基本特性評価 -”, 保全学会第 5 回学術講演会要旨集 pp.99-102, 2008