

国内外原子力発電所における熱水力関連トラブル事例の傾向分析

Trend Analysis of Troubles Caused by Thermal-Hydraulic Phenomena at Nuclear Power Plants

小松 輝雄 (Teruo Komatsu)*¹

要約 原子力安全システム研究所 (INSS) は、原子力発電の安全性・信頼性の向上を目指し研究を進めている。本報告では熱水力関連トラブル事例に焦点を当て、その傾向分析を行い、未然防止のために教訓となる事項を抽出した。熱水力関連トラブル事例の原因としては、設計に起因するものが多く、海外では設備改造に伴うトラブルも散見されることより、設計検証にあたっては最新知見に基づく検証を行うとともに、設計変更においては当初設計との整合性に留意すべきである。また、熱水力関連トラブルは、海外で起こったものは国内でも起こり、逆もまた真である。国内においても出力増強や高経年化に伴う設備改造工事の実施が予定されているが、その先行事例の多い海外情報について引き続き注視していくことにより、原子力発電所の安全性・信頼性の向上に役立てていくことが重要である。

キーワード 熱水力, トラブル, 傾向分析, 原子力発電所

Abstract The Institute of Nuclear Safety System (INSS) is promoting researches to improve the safety and reliability of nuclear power plants. In the present study, our attention was focused on troubles attributed to thermal-hydraulic phenomena in particular, trend analysis were carried out to learn lessons from these troubles and to prevent their recurrence. Through our survey, we found the following two points. First, many thermal-hydraulics related troubles can be attributed to design faults, since we found some events in foreign countries took place after inadequate facility renovation. To ensure appropriate design verification, it is important to take account of state-of-the-art science and technology and at the same time to pay attention to the compatibility with the initial design concept. Second point, thermal-hydraulic related troubles are common and recurrent to nuclear power plants worldwide. Japanese utilities are planning to introduce some of overseas experiences to their plants, such as power uprate and renovations of aged facilities. It is important to learn lessons from experiences paying close attention continuously to overseas trouble events, including thermal-hydraulics related events, and to use them to improve safety and reliability of nuclear power plants.

Keywords thermal-hydraulic, troubles, trend analysis, nuclear power plants

1. はじめに

原子力安全システム研究所 (以下「INSS」という) は、1991年2月、関西電力株式会社美浜発電所2号機の蒸気発生器伝熱管が流力弾性振動により破損した事故を契機に設立され、原子力発電の安全性・信頼性の向上を目指し研究を進めている。その活動のひとつとして、国内外のトラブル情報の収集分析を実施している。熱水力関連トラブルについては、個別事象の分析は行ってきたものの^{(1)~(5)}包括

的な分析については実施されていなかった。そのため、今回その発生傾向について傾向分析を行い、トラブル未然防止のために教訓となる事項を抽出した。

2. 国内の原子力発電所における熱水力関連トラブル事例

2.1 分析対象

「法律に基づく報告」及び「ニューシア保全品質情

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

報」⁽⁶⁾を分析対象とした。分析対象期間としては、2003年度よりニューシア保全品質情報のデータ入力の充実が図られていることを考慮し、2003年度から2008年度までの6年間とした。

2.2 事案件数

法律に基づく報告に占める熱水力関連トラブル数を図1に、ニューシア保全品質情報に占める熱水力関連トラブル数を図2に示す。

法律に基づく報告に占める熱水力関連トラブル数は、PWRでは18件でPWRのトラブルのうち37%、BWRでは7件でBWRのトラブルのうち12%、PWRとBWRを合わせた全てのトラブルのうちの23%を占めた。PWRの報告が多い理由の一つとしては、18件のうち6件が蒸気発生器伝熱管の検査においてインテリジェントECTにより旧振れ止め金具と伝熱管との接触部で磨耗減肉が検出された

事象が占めることによる。

ニューシア保全品質情報に占める熱水力関連トラブル数は、PWRでは33件でPWRのトラブルのうち14%、BWRでは35件でBWRのトラブルのうち6%、PWRとBWRを合わせた全てのトラブルのうち8%を占めた。PWRの報告が占める割合の多い理由は、2004年8月の美浜3号機事故以降、国からの要求に基づき流れ加速型腐食（FAC）に関する報告数が増加したことによる。

法律に基づく報告とニューシア保全品質情報をあわせた全体でみると、熱水力関連トラブルの報告が占める割合は、図3に示すように、PWRで18%、BWRで6%、全体では約1割となる。

2.3 要因別トラブル事案件数

抽出した熱水力関連トラブル事例について、その要因と熱水力現象により、表1のとおり分類した。

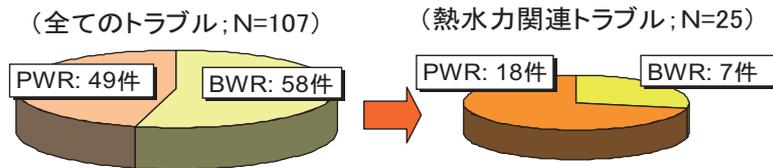


図1 法律に基づく報告件数

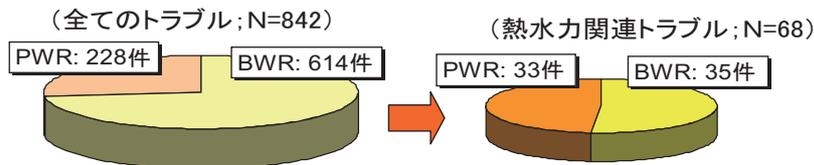


図2 ニューシア保全品質情報件数

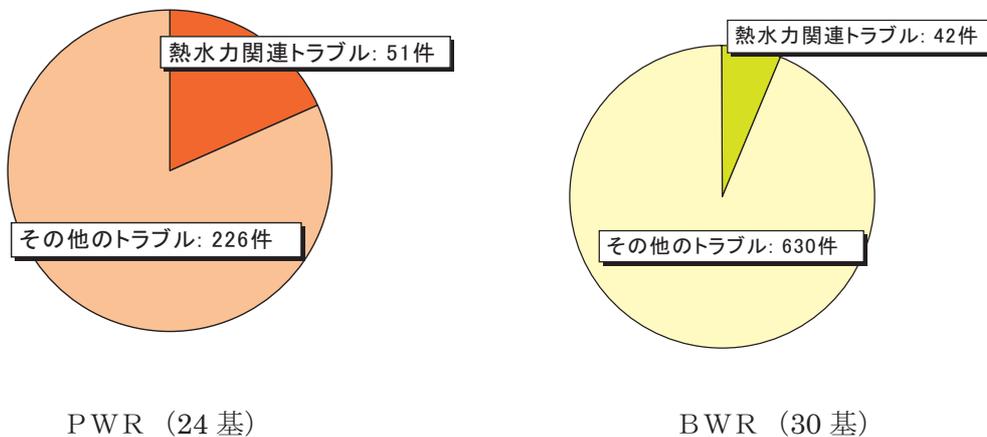


図3 熱水力関連トラブルの報告が占める割合

表1 熱水力関連トラブルの要因と熱水力現象

要因	熱水力現象
疲労	温度ゆらぎ
	流動振動（水・蒸気）
	流動振動（空気）
エロージョン	キャビテーションエロージョン
	液滴衝撃エロージョン
腐食	流れ加速型腐食（FAC）
磨耗	フレットイング

また、PWR、BWR 別に分類したトラブル事例件数を図4に示す。

PWR では腐食、BWR では疲労（流動振動）とエロージョンによるトラブル事例が多く見られる。

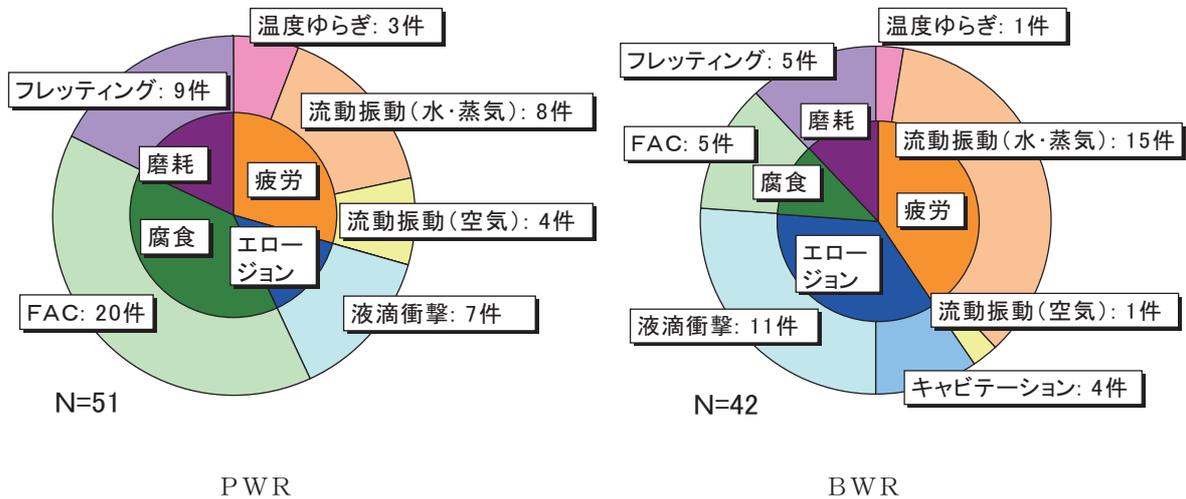


図4 要因別トラブル事例件数（国内）

2.4 年度別トラブル事例件数

PWR、BWR 別に、年度毎のトラブル事例発生件数を図5に示す。

PWR、BWR 共に継続的に発生しているものの近年は減少傾向にある。流れ加速型腐食（FAC）についても、2004年8月の美浜3号機事故以降PWRプラントで国からの要求に基づき検査を実施したことより報告数が一時増加したが、2008年度については報告事例はない。

2.5 プラントへの影響

PWR、BWR 別に、プラントに及ぼした影響により分類したトラブル事例件数を図6に示す。

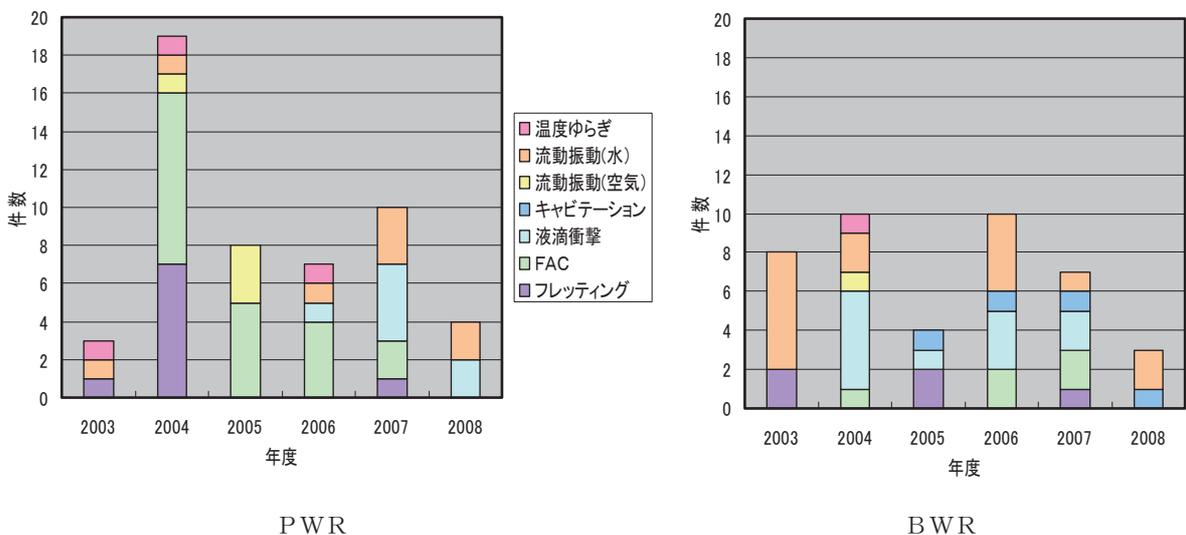


図5 年度別トラブル事例件数（国内）

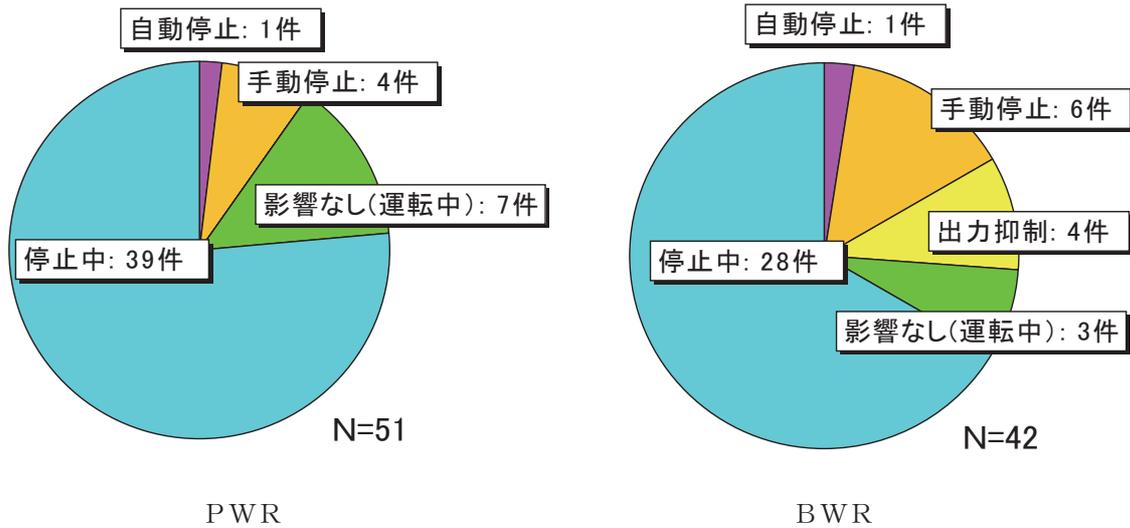


図6 プラントへの影響 (国内)

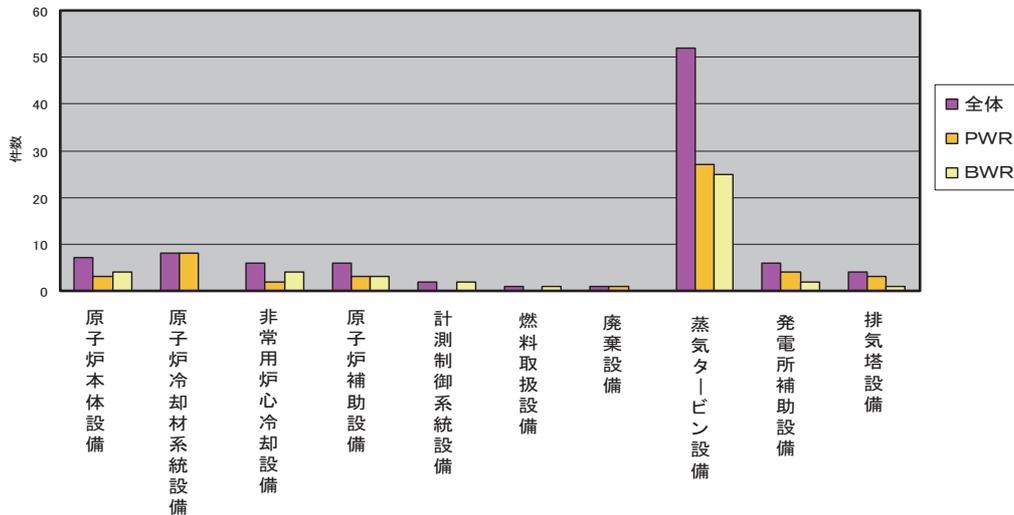


図7 設備別トラブル事例件数 (国内)

PWRで約1/4, BWRで約1/3のトラブルがプラント運転中の事例として報告されているが、そのうちの約半数がプラント停止に至っている。

2.6 設備別トラブル事例件数

設備別のトラブル事例件数を図7に示す。

PWR, BWRともに蒸気タービン設備が大半を占めている。

また、蒸気タービン設備について系統別に分類すると、図8に示すとおり、PWR, BWRともに給水系及び復水系のトラブルが多い。また、PWRでは、抽気・ヒータドレン・ベント系、BWRでは、復水

器にトラブルが多く発生している。

2.7 機器別トラブル事例件数

機器別のトラブル事例件数を図9に示す。PWR, BWRともに配管が過半数を占めている。

3. 海外の原子力発電所における熱水力関連トラブル事例

3.1 分析対象

10年程度を目途として、1998年度から2008年度

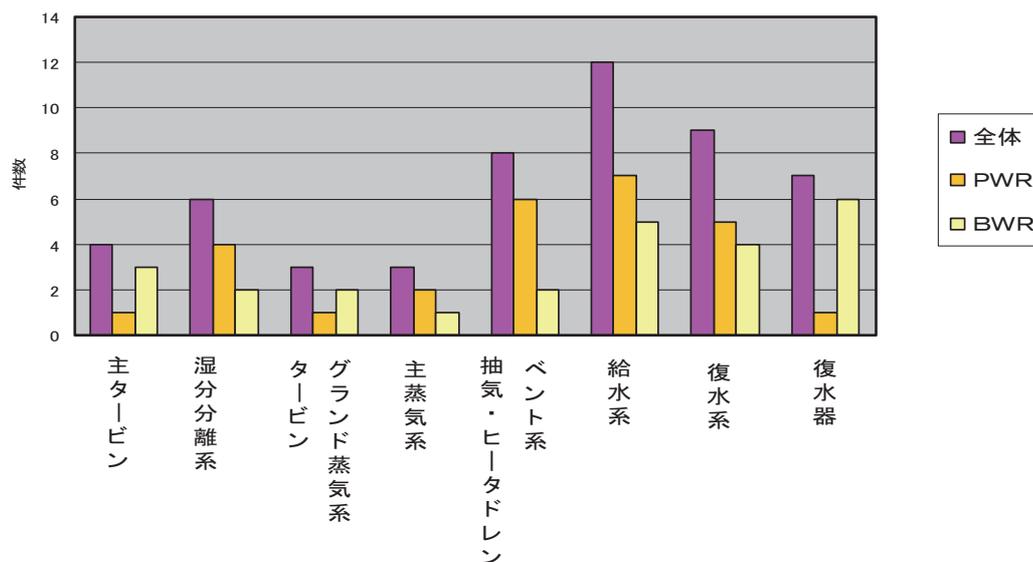


図8 設備別トラブル事例件数（蒸気タービン設備の内訳）

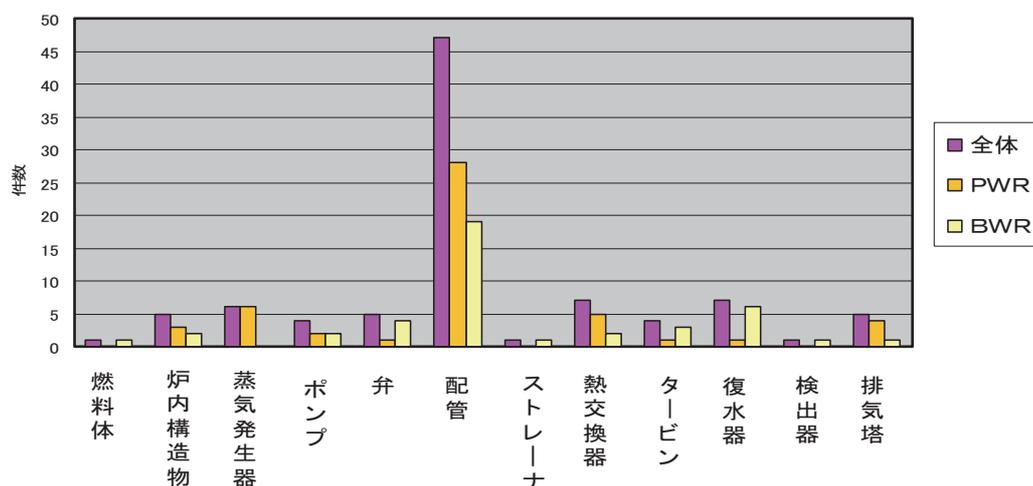


図9 機器別トラブル事例件数（国内）

までの11年間の米国LER（Licensee Event Report）情報より抽出した。なお、LERは法律に基づく報告であり、プラント停止や技術仕様書（Technical Specification）からの逸脱等が発生した場合に原子炉設置者が作成するものであり、国内においては法律に基づく報告とニューシア保全品質情報のうちの一部に相当するものである。

3.2 事例件数

米国LER情報から、39件（PWR18件、BWR21件）の事例を抽出した。米国のプラント数（PWR69基・BWR35基、2010年2月時点）を考慮すると、LER報告ではBWRの方が熱水力関連トラブルの発

生割合は高い。これは、国内においてもBWRの方が手動停止件数が多いように、BWRの場合は原子炉を運転した状態で復水器につながる配管の補修が困難なこと及び米国では設備改造を伴う大規模な出力増強は主にBWRプラントで実施されていることにも起因すると考えられる。

3.3 要因別トラブル事例件数

PWR、BWR別に分類したトラブル事例件数を図10に示す。

PWR、BWRともに流動振動によるトラブル事例が半数以上を占めている。

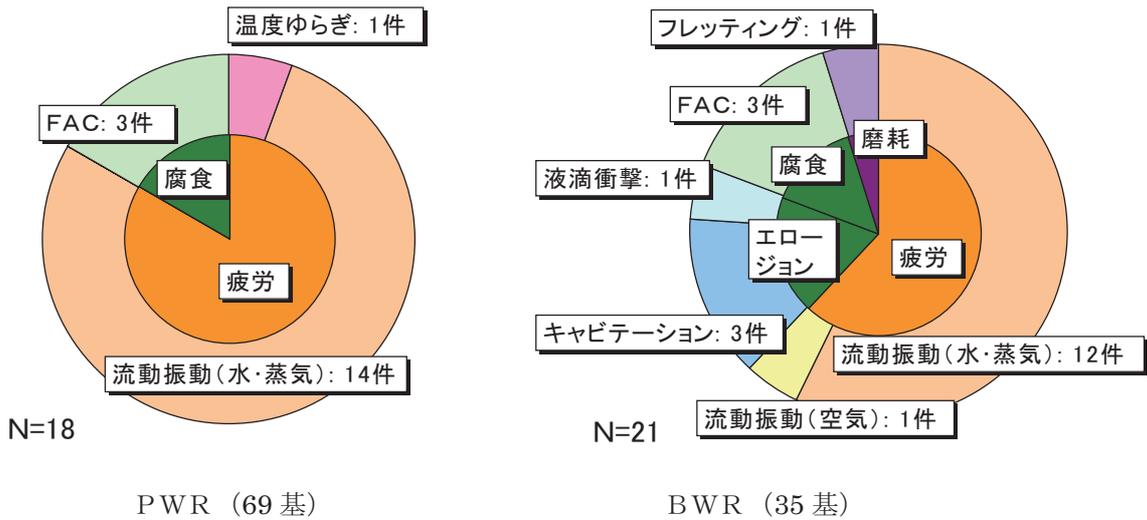


図10 要因別トラブル事例件数 (海外)

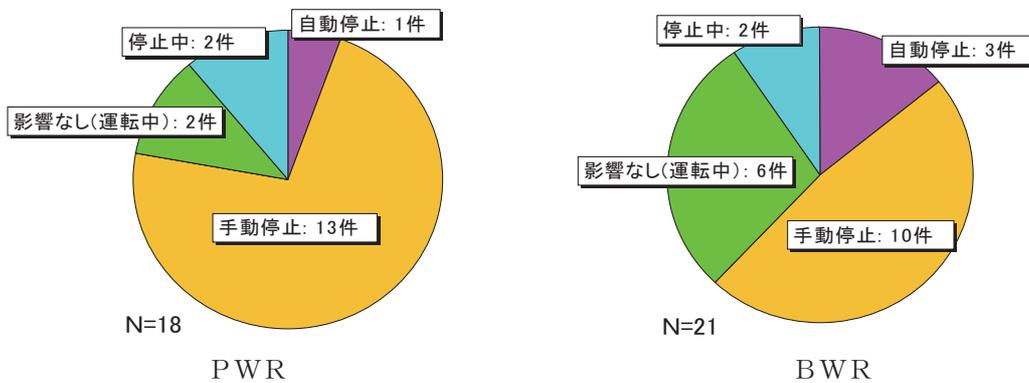


図11 プラントへの影響 (海外)

3.4 プラントへの影響

PWR, BWR 別に、プラントに及ぼした影響で分類したトラブル事例件数を図11に示す。

PWR, BWR ともに運転中のトラブルが大半を占め、その多くがプラント停止に至っている。

3.5 設備別トラブル事例件数

設備別のトラブル事例件数を図12に示す。

LER 報告では、蒸気タービン設備より原子炉冷却材系統設備や非常用炉心冷却設備等一次系(原子炉系)のトラブルが多く、25件中の11件は流動振動による1次系の小口径配管ソケット溶接部からの漏えいであった。

3.6 機器別トラブル事例件数

機器別のトラブル事例件数で見ると、図13に示すとおり、PWR, BWR ともに配管が過半数を占めている。

4. 国内外トラブル事例の比較と教訓事項

今回の調査で抽出した熱水力関連トラブル事例(海外:39事例, 国内:93事例)について、熱水力現象別に国内外のトラブル事例を比較し教訓をまとめた。

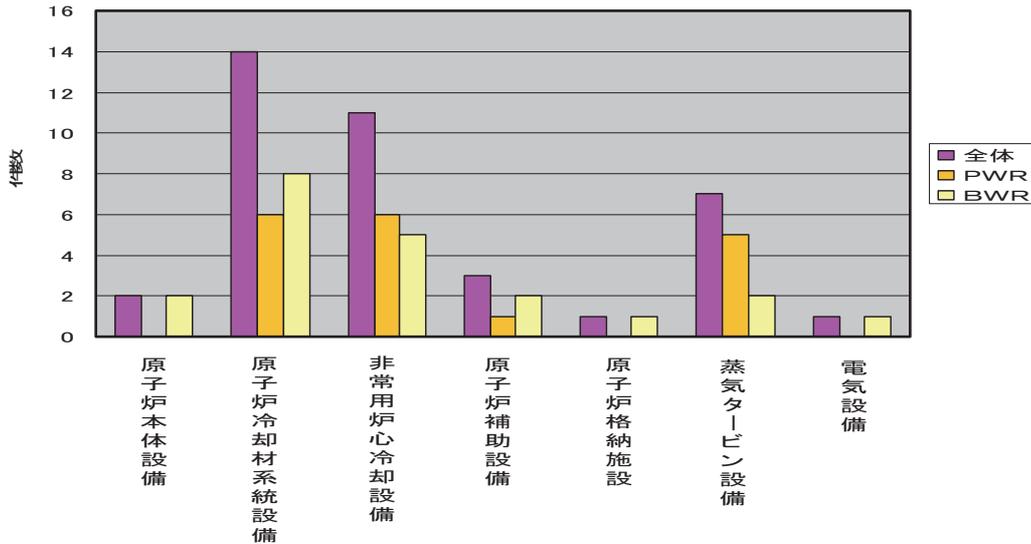


図 12 設備別トラブル事例件数 (海外)

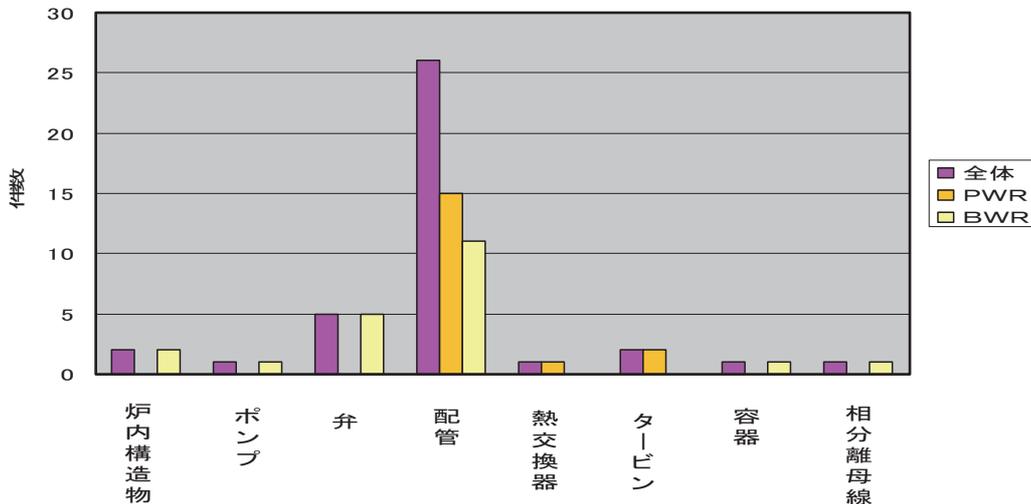


図 13 機器別トラブル事例件数 (海外)

4.1 温度ゆらぎ

(1) 海外事例

温度ゆらぎによる熱疲労については今回の調査で 1 事例 (PWR:1, BWR:0) が抽出されたが、余剰抽出系統取り出し配管のひび割れについては国内 PWR において対策済である。

(2) 国内事例

国内においては 4 事例 (PWR:3, BWR:1) が抽出された。PWR プラントではこれまでのトラブル事例の対策として、温度ゆらぎの発生を抑制した熱交換器への取替えや配管合流部形状の変更、配管ルートの変更を実施しており、2007 年度、2008 年度の報告事例はない。

(3) 教訓

引き続き、海外トラブル事例を注視していく。

4.2 流動振動 (水・蒸気)

国内外の流動振動事象についての、設備別・機器別トラブル発生状況を図 14 に示す。

(1) 海外事例

流動振動による疲労は熱水力現象のうち最も事例数が多く、全体で 26 事例 (PWR:14, BWR:12) が抽出された。海外 PWR プラントのトラブルでは、振動による 1 次系の小口径配管ソケット溶接部からの漏えいによるものが 11 事例と大半を占めている。また、主タービンの損傷事例が 2 件報告されている

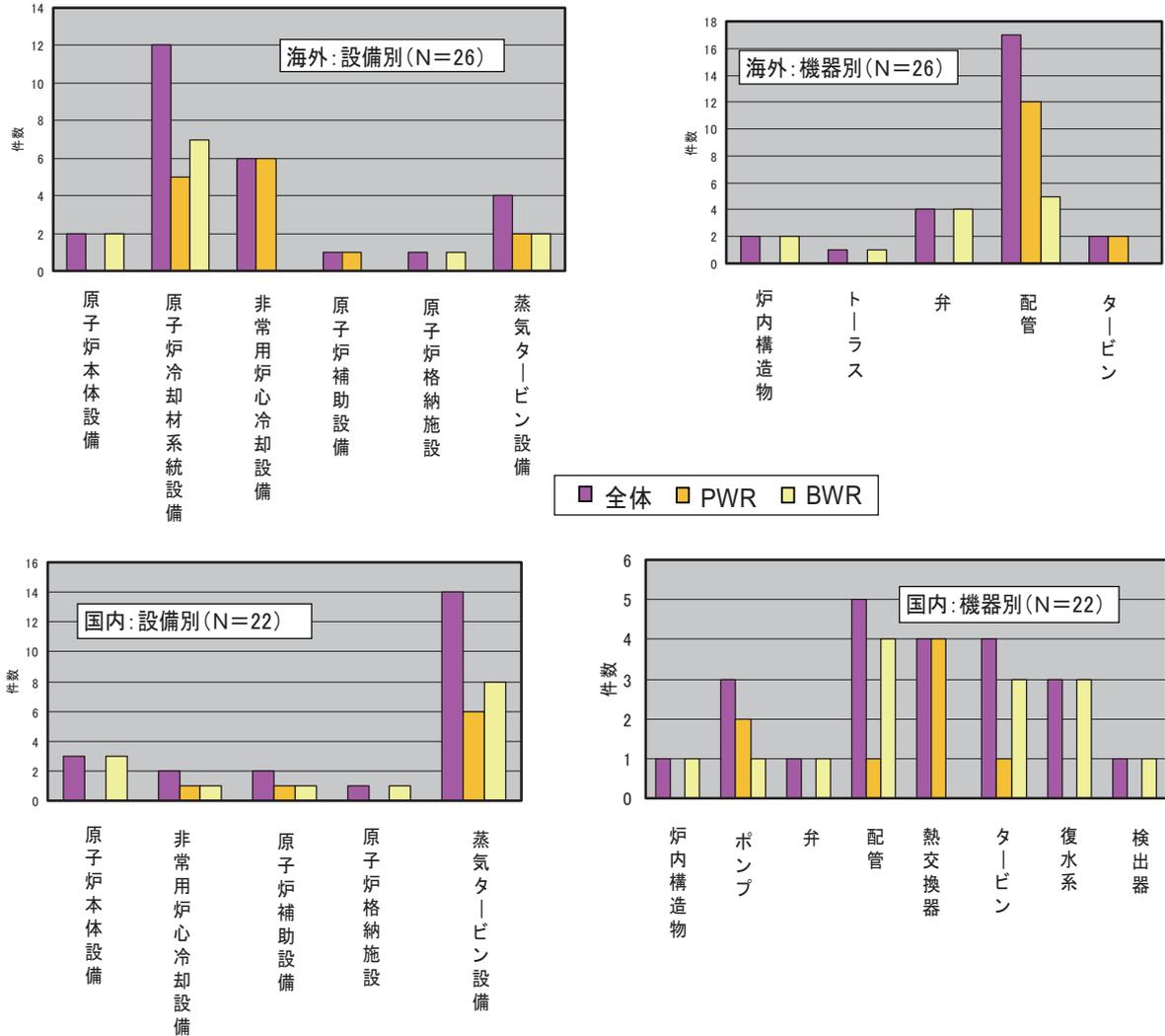


図 14 設備別・機器別トラブル発生状況（流動振動）

が、1件はタービンの設計変更時の検証不足によるトラブル、もう1件はタービンの運転条件（復水器真空度）を変更したことによるトラブルであった。

海外 BWR プラントでは出力増強に伴うトラブル事例として、原子炉圧力容器内蒸気乾燥器の損傷や主蒸気逃がし弁の損傷が報告されている。

(2) 国内事例

国内においても流動振動事例は流れ加速型腐食 (FAC) に続いて2番目に多く、22事例 (PWR: 8, BWR: 14) が抽出されたが、一次系設備でのトラブルはほとんど発生していない。海外で多い1次系の小口径配管ソケット溶接部からの漏えいについては、国内では配管の振動防止措置やソケット溶接継手を応力集中の小さい突き合わせ溶接へ計画的に変更する等の対策がとられており最近の発生は無い。特徴的な事項としては、BWR プラントにおいて、主タービンのトラブルが3事例 (4基) 発生しているが、

いずれも設計検証が不十分であったことが原因とされている。

(3) 教訓

設備改造実施にともなうトラブルが散見されることから、メーカーサイドも含めて設計検証を慎重に実施することが求められる。

4.3 流動振動（空気）

(1) 海外事例

空気の流動振動による疲労については海外で1事例 (PWR: 0, BWR: 1) が抽出されたが、これは相分離母線ダクト内で冷却空気の風圧振動に伴い部品が脱落し発電機トリップに至った事例であった。

(2) 国内事例

国内においては5事例 (PWR: 4, BWR: 1) が抽出されたが、いずれも排気筒のひび割れや排気ダ

クトの損傷であり、2006年1月以降発生していない。

(3) 教訓

流動振動については、水・蒸気系のみならず「空気の流れ」についても十分留意する必要がある。

4.4 キャビテーション・エロージョン

(1) 海外事例

キャビテーション・エロージョンについては海外で3事例（PWR：0，BWR：3）が抽出された。トラブル原因として経年劣化を上げているが、弁の取替えや設計流量の変更，系統試験実施時の設計流量超過等，当初の設計要件を変更したことにより発生している。

(2) 国内事例

国内においては4事例（PWR：0，BWR：4）が抽出されたが，PWRでは至近の6年間は発生していない。

(3) 教訓

海外において機能試験実施時等，圧力・流量が定常状態とは異なる状況でのトラブルの発生が見られることから，新たな試験要領書の作成時等においては十分な検討が必要である。合わせて，設備改造実施時等の設計検証は社内マニュアルに基づき慎重に実施することが求められる。

4.5 液滴衝撃エロージョン

(1) 海外事例

液滴衝撃エロージョンについては海外で1事例（PWR：0，BWR：1）が抽出された。報告内容は，高圧炉心注水系ポンプのタービン駆動蒸気入り口ドレンポットドレン配管エルボ部からの漏えいであった。

(2) 国内事例

国内においては18事例（PWR：7，BWR：11）と数多く抽出されているが，ニューシア保全品質情報の軽微な減肉等も含まれていることによる。復水器の細管漏洩は3件発生しているが，PWRプラントではチタン管においても漏洩が発生しており，負圧機器への接続箇所等とともに点検時には注意を要する。

(3) 教訓

今後も点検結果に基づく新たな知見等を踏まえ、

配管肉厚管理指針の検証及び見直しを継続的に行っていくことが望まれる。

4.6 流れ加速型腐食（FAC）

国内外のFAC事象についての，設備別・機器別トラブル発生状況を図15に示す。

(1) 海外事例

FACについては海外で6事例（PWR：3，BWR：3）が抽出されたが，いずれもFACの発生によりプラント停止もしくはECCS系の運転不能に至った事象である。また，海外トラブル事例の傾向として，当初は測定未実施によるものが多かったが，近年は配管取替計画時に技術図書の更新のみ行われ実際の配管は更新されなかったことによるFACの発生等，保守管理の不良に起因するトラブルも散見される。

(2) 国内事例

国内においては25事例（PWR：20，BWR：5）と数多く抽出されているが，これはPWRプラントにおいて国から報告要求があったことによるものである。美浜3号機の事故以降は検査の結果報告件数が増加したが，2008年度はPWR，BWRともに報告事例はない。海外で起こったトラブル発生箇所については，国内では配管肉厚の管理指針に基づき計画的な肉厚測定や点検が実施されるとともに耐食性に優れたステンレス鋼や低合金鋼の配管への取替えが進められている。

(3) 教訓

液滴衝撃エロージョン同様に新たな知見等を踏まえ，配管肉厚管理指針の検証及び見直しを継続的に行っていくとともに，保守管理を適切に実施することが重要である。

4.7 フレッシング

(1) 海外事例

フレッシングについては海外で1事例（PWR：0，BWR：1）が抽出されたが，これは原子炉停止時冷却系格納容器内逆止弁シート部のフレッシングによる損傷であった。

(2) 国内事例

国内においては14事例（PWR：9，BWR：5）が抽出されている。PWRプラントの9件のうち6件は蒸気発生器伝熱管の検査においてインテリジェントECTにより旧振れ止め金具と伝熱管との接触部

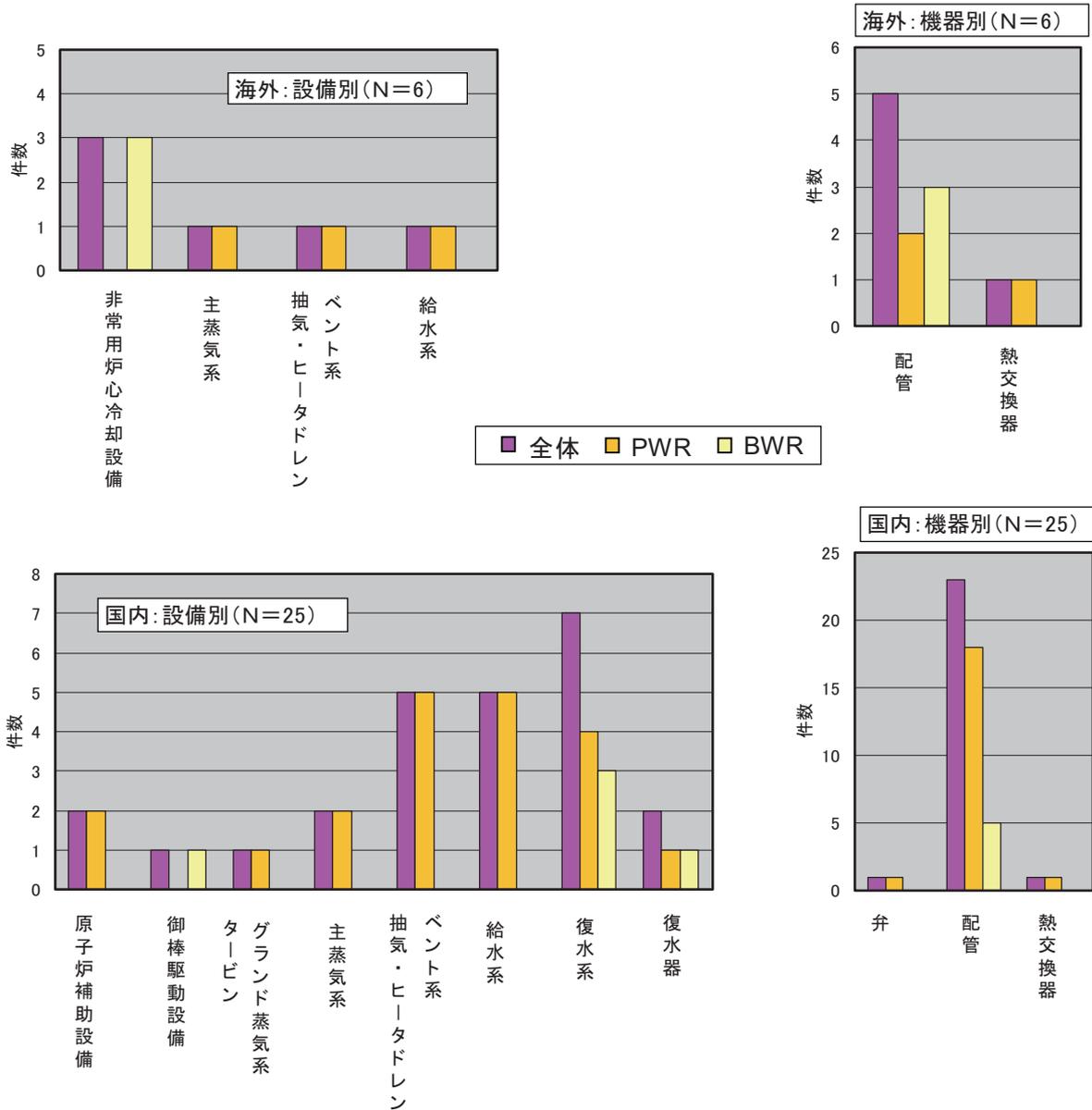


図 15 設備別・機器別トラブル発生状況 (FAC)

で磨耗減肉が検出された事象である。残り 3 件は制御棒クラスタ案内管支持ピンの磨耗等であり、すでに対策が施されている。

(3) 教訓

国内 BWR プラントにおいて異物によるフレットイングが原因で燃料漏洩が発生していることより、引き続き異物管理の徹底が望まれる。

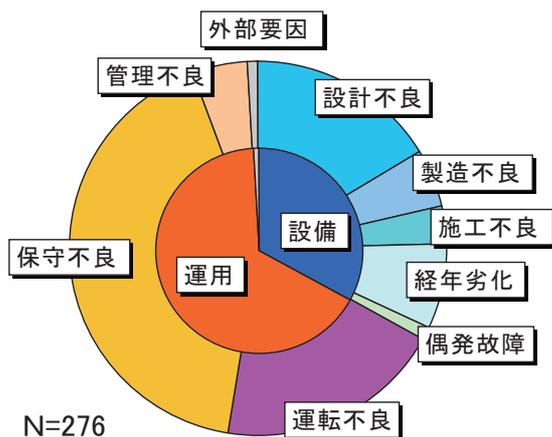
5. トラブル発生原因からの考察

図 16 に 2009 年に収集・分析した LER262 件及び 2008 年度の国内トラブル事例 168 件について報告内容を精査し、INSS にて定義した原因分類法⁽⁷⁾に従

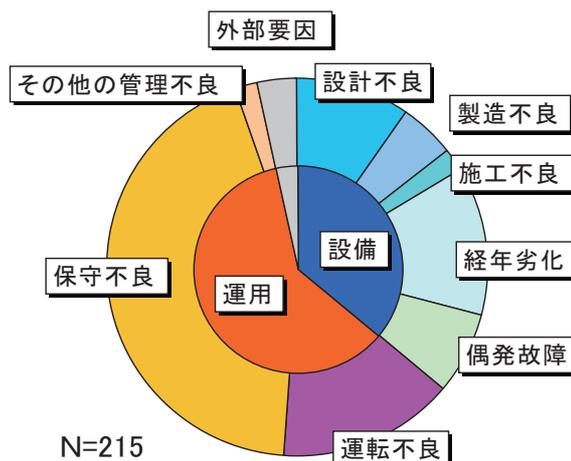
って原因分類したグラフを示す。(一つの事象に複数の原因をあげている場合もあることから、事例数より原因数が多くなっている。)また、図 17 には LER のうちプラントが自動または手動停止した熱水力トラブル事例 27 件及び国内の熱水力トラブル事例のうちプラントが自動または手動停止した 12 件について原因を分類したグラフを示す。

トラブル全体については、国内及び海外ともに保守不良や運転不良など運用面の原因が 7 割程度を占めるのに対して、熱水力トラブル事例の原因は、設計・製造・施工などの設備面での原因が 6 割以上を占める。

また、海外においては新設設備についてもさるこ

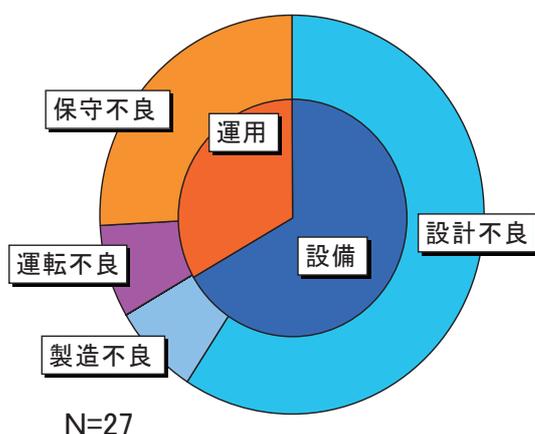


LERのトラブル原因 (2009年)

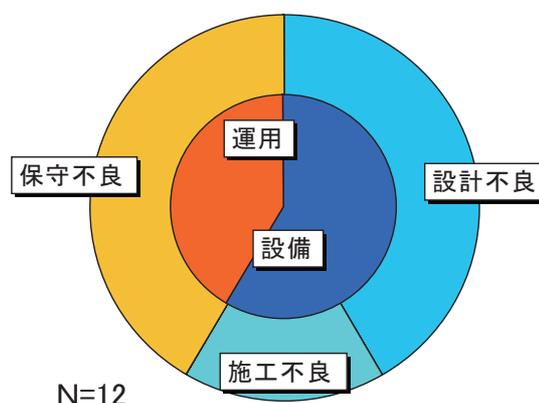


国内のトラブル原因 (2008年度)

図16 LER及び国内のトラブル原因



LERのトラブル原因



国内のトラブル原因

図17 LER及び国内の熱水力事例のうちプラントが自動または手動停止した事例の原因

とながら、設備改造に伴うトラブルも散見される。中には、当時の科学的知見では予見・予防できなかったトラブルもあるのかもしれないが、設備改造時の設計検証にあたっては最新知見による検証とともに当初設計との整合性の検証が求められる。これに答えるためにも、熱水力関連トラブルに関する科学的知見の充実が一層期待される。

一方、海外で発生した熱水力関連トラブルは国内でも発生しており、国内で発生した熱水力関連トラブルは海外でも発生している。このことは、熱水力関連トラブルの多くが設計に起因するものであることを示唆していると考えられる。

6. まとめ

(1)国内については、過去6年間(2003~2008年度)の法律に基づく報告及びニューシア保全品質情報(トラブル情報等)から93件、海外については過去11年間(1998~2008年度)の米国 Licensee Event Report (LER) 情報から39件の熱水力関連トラブル事例を抽出し、傾向分析を行った。

(2)国内の発生傾向は、法律に基づく報告が107件中25件、ニューシア保全品質情報が842件中68件であり、全体の約10%を占めた。これらを要因別に分類すると、PWRでは腐食、BWRでは疲労(流動振動)とエロージョンによるトラブル事例が多く見られた。設備別トラブル事例件数は、PWR、

BWR とともに、タービン設備が大半を、また、機器別では配管が過半数を占めた。年度別トラブル事例件数では、PWR、BWR とともに継続的に発生しているものの近年は減少傾向にある。

(3) 海外の要因別による発生傾向は、PWR、BWR とともに流動振動によるトラブル事例が半数以上を占め、その多くは1次系の小口径配管ソケット溶接部からの漏えいであった。

(4) 主な教訓

海外で BWR の出力増強に伴う原子炉压力容器内蒸気乾燥器の損傷や、主タービンの改造に伴う損傷等設計変更実施時のトラブルが散見されることから、設計検証を慎重に実施することが求められる。また、相分離母線ダクト内で冷却空気の風圧振動に伴い部品が脱落し発電機トリップに至った事例もあることから、水・蒸気の流れのみならず「空気の流れ」についても十分留意する必要がある。

流れ加速型腐食 (FAC) については、海外の傾向として、当初は未測定によるトラブルが多かったが、近年は配管取替計画時に技術図書の更新のみ行われ実際の配管は更新されなかったことによる FAC の発生等保守管理の不良に起因するトラブルも散見されることから、今後とも新たな知見等を踏まえ配管肉厚管理指針の検証及び見直しを継続的に行っていくとともに、保守管理についても適切に実施することが重要である。

(5) 熱水力トラブル事例の原因は、設計、製造、施工などの設備面での原因が6割以上を占めることから、改造工事等の設計検証にあたっては最新知見に基づく検証を行うとともに、当初設計との整合性に留意すべきである。

(6) 国内においても出力増強や高経年化に伴う設備改造工事の実施が予定されていることから、その先行事例の多い海外情報について引き続き注視していくことにより、安全性・信頼性の向上に役立てていくことが重要である。

文献

- (1) 富岡 立行他：原子力発電所における振動関連不具合事象の分析と再発防止対策, INSS JOURNAL, Vol. 5, p. 77 (1998)
- (2) 奥田 恭令：軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析, INSS JOURNAL, Vol. 7, p. 88 (2000)
- (3) 佐藤 正啓：米国原子力発電所の出力増強に伴う不具合事象分析, INSS JOURNAL, Vol. 12, p. 110 (2005)
- (4) 千葉 吾朗：海外原子力発電所における2次系配管減肉不具合の発生状況, INSS JOURNAL, Vol. 12, p. 87 (2005)
- (5) 千葉 吾朗：海外原子力発電所における2次系配管の減肉管理状況と国内との比較, INSS JOURNAL, Vol. 13, p. 290 (2006)
- (6) 日本原子力技術協会, 原子力施設情報公開ライブラリー, <http://www.nucia.jp/> (2010年5月6日現在)
- (7) 宮崎孝正, “経年劣化や人的過誤等を含めた原子力発電所不具合事象の新たな原因分類法とその適用結果,” 日本原子力学会和文論文誌, 6 [4], 434-443 (2007)