

原子力発電所における伸縮継手不具合事象の分析

Analysis of Failure Events for Expansion Joints in Nuclear Power Plants

佐藤 正啓 (Masahiro Sato)*

要約 軽水型原子力発電所では伸縮継手が多数用いられているが、これまでその不具合事象は、容器や配管と異なり注目されることが少なかった。しかし原子力発電所の運転年数が長期化するに伴い、経年的要因あるいは短期間では現れてこない設計・製造不良等の要因による伸縮継手の不具合事象についても、容器や配管と同様に注意が必要である。

本研究では、これまでに報告された国内と米国の原子力発電所の不具合事象の報告から、伸縮継手の不具合事象に関するものを調査し、プラント出力等への影響、損傷部位および損傷原因等を分析した。その結果、伸縮継手の不具合事象は継続的に発生しており、プラント出力へ影響を及ぼす事象あるいは人身事故に繋がる事象が発生していることが判明した。そこで、これらの事故の再発防止対策が重要であることを示した。更に個別事象として、次の項目への対応が重要であることが判明した：(1)サービス水系の伸縮継手の腐食、(2)復水器のゴム製伸縮継手の劣化、(3)抽気管伸縮継手の振動・疲労、および(4)格納容器貫通部ベローズの粒内応力腐食割れ。

キーワード 原子力発電所，伸縮継手，ベローズ，振動，疲労，腐食

Abstract Although a large number of expansion joints are used in nuclear power plants with light water reactors, their failure events have not been paid as much attention as those of vessels and pipes. However, as the operation period of nuclear power plants becomes longer, it is necessary to pay attention to their failure events as well as those of vessels and pipes, because aging problems and latent troubles originated in design or fabrication of expansion joints may appear during their long period operation.

In this work, we investigated failure event reports of expansion joints in nuclear power plants both in Japan and in U. S. A. and analyzed (1) the influence to output power level, (2) the position and (3) the cause of each failure. It is revealed that the failure events of expansion joints have continuously occurred, some of which have exerted influence upon power level and have caused fatal or injury accidents of personnel, and hence the importance of corrective actions to prevent the recurrence of such events is pointed out. The importance of countermeasures to the following individual events is also pointed out: (1) corrosion of expansion joints in service water systems, (2) degradation of rubber expansion joints in main condensers, (3) vibration and fatigue of expansion joints in extraction steam lines and (4) transgranular stress corrosion cracking of penetration bellows of containments.

Keywords nuclear power plant, expansion joint, bellows, vibration, fatigue, corrosion

1. はじめに

国内外の軽水型原子力発電所(軽水炉)の事故・故障状況から教訓を学び、同種の事故・故障を防止することは、原子力発電の信頼性向上を図るために有益である。われわれは、これまで「重要事象に関わる信頼性向上の研究」として「非常用炉心冷却系

(ECCS)作動事象の分析」⁽¹⁾⁽²⁾、「原子力発電所における水撃事象の分析」⁽³⁾、「軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析」⁽⁴⁾⁽⁵⁾等を実施してきた。

本稿では、容器や配管と異なり、従来注目されることの少なかった伸縮継手に着目し、米国および国内を対象に、経年的要因や設計・製造不良等による

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

表1 PWRにおける伸縮継手の使用場所、材質、内部流体および口径例

	使用場所(系統)	伸縮継手伸縮部の材質	内部流体	伸縮継手口径
1次系	格納容器貫通部	金属	空気	60cm程度
	格納容器スプレイ系	金属	ほう酸水	15cm程度
	廃棄物処理装置等の補助蒸気系	金属	蒸気	8cm程度
2次系	抽気系	金属	蒸気	50cm程度
	補助蒸気系	金属	蒸気	25cm程度
	復水系	ゴム	復水	70cm程度
	復水器	ゴム	蒸気	750 × 850cm程度
	循環水系	ゴム	海水, 河川水等	390cm程度
	サーブिस水系	金属、ゴム	海水, 河川水等	90cm程度
	給水ポンプ駆動タービン排気系	金属	蒸気	180cm程度
非常用ディーゼル発電機排気系	金属	排気	15cm程度	

不具合事例の調査を実施し、プラント出力等への影響、損傷部位および損傷原因等を分析した。なお、原子炉格納容器配管貫通部ベローズに関しては、原子炉格納容器圧力バウンダリを構成する安全上重要な構成品であり、最近米国において詳細な報告⁽⁶⁾が発表され、参考にした。

2. 伸縮継手の概要

軽水炉では、使用場所に応じて金属製あるいはゴム製の伸縮継手が圧力の低い個所に設置されている。加圧水型軽水炉(PWR)の主な使用場所、材質、内部流体および口径例を表1に示す。

沸騰水型軽水炉(BWR)においても、PWRとほぼ同様の箇所で使用されている。

図1に金属製伸縮継手を使用している抽気管伸縮継手の一例を示す。抽気管伸縮継手は、タービンから抽気を取り出す配管の熱膨張による伸びを吸収するために復水器内に設置されている。内部にはタービン抽気の流れ、外部はタービン排気にさらされる。抽気管伸縮継手には内部流体および外部流体がベローズ部で乱れることにより発生する振動を防止するため、ベローズの内側に内筒が設置され、ベローズの外側にカバーが設置されている。抽気管伸縮継手の口径は50程度であり、部品の材質には炭素鋼およびス

テンレスが用いられる。

金属製伸縮継手の設計基準として、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準⁽⁷⁾、JIS B2352 ベローズ型伸縮継手⁽⁸⁾がある。また米国では、原子力用としてASME Section⁽⁹⁾、ASME B31.3⁽¹⁰⁾およびASME B31.3が引用しているEJMA Standards⁽¹¹⁾がある。これらの基準では疲労評価の方法等が記載されている。

金属製伸縮継手の製作方法について、抽気管伸縮継手を例に簡単に紹介する。板材を円筒状に溶接し、液圧成型してベローズ部を製作し、端管を溶接する。製造の過程で放射線検査、液体浸透探傷検査、あるいは耐圧・漏えい検査が行われる。

次に図2に標準的なゴム製伸縮継手の一例を示

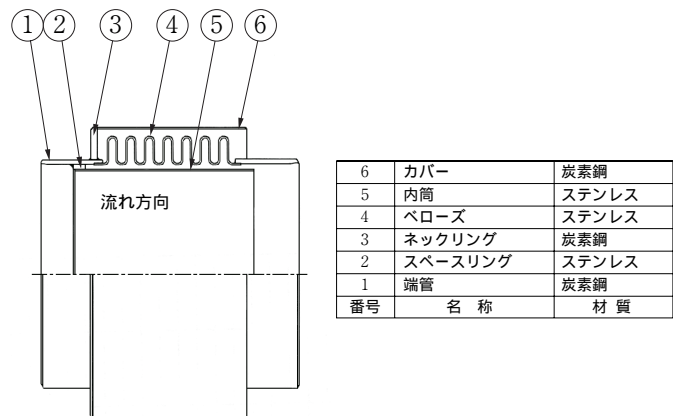


図1 金属製伸縮継手の例

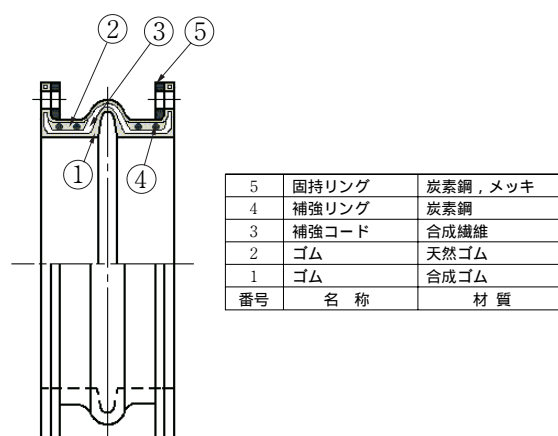


図2 ゴム製伸縮継手の例

す。ゴム製伸縮継手については、製造者の基準で製作されている。

3. 調査対象情報および調査項目

3.1 調査対象情報

今回、米国において法律に基づき米国原子力規制委員会（nuclear regulatory commission：NRC）への報告が義務付けられている原子力発電所設置者事象報告（licensee event report：LER），NRCが実施する検査報告（inspection report），NRCの地方局が発行する原子力発電所での不具合事象等に関する情報（preliminary notification）およびNRCと設置者間のレターを、そして国内において法律や大臣通達に基づき経済産業省に報告が義務づけられており公開されている軽水炉の事故・故障報告⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を対象とした。

3.2 調査項目

1984年から2000年までの上記情報に関し以下の項目を調査した。

- (1) 発生プラントおよび発生年月日
- (2) 損傷対象の伸縮継手および設置系統
- (3) 伸縮継手損傷による出力影響
- (4) 伸縮継手損傷部位および損傷原因
- (5) 伸縮継手の対策

4. 調査結果

4.1 概要

4.1.1 炉型別の不具合事象発生状況

調査の結果、1984年から2000年までの間に伸縮継手の不具合事象に係る49件の事象を収集した。炉型別ではPWRは28件、BWRは21件である。このうち国内で発生した事象はBWRでの1件だけである。図3に米国における一年当たりの平均発生率を示す。図に示すとおり、PWRでは0.024、BWRでは0.036、全体で0.028であった。格納容器貫通部ベローズを除き、伸縮継手の不具合事象の報告は、原子炉トリップ等の安全系の作動によってLER等の報告が行われることが多いため、実際に発生している事象の一部と考えられるものの、いずれの炉型についてもほぼ同様に発生している。

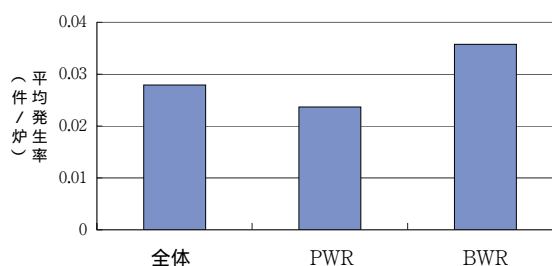


図3 米国における1年当たり平均発生率

なお、国内で発生したBWRでの1件の事象は、補助ボイラ系の弁を操作中に伸縮継手から蒸気が漏れたものであり、死傷者が発生している。⁽¹⁶⁾米国では人身事故に至った伸縮継手の不具合事象は報告されていない。

4.1.2 出力への影響の推移

伸縮継手不具合事象にかかる出力への影響の推移を図4に示す。まず全体の発生率は、年毎にばらつきが見られるが、継続的に発生している。原因は、劣化、設計・製造不良、人的ミスあるいは運転不良等であり、劣化が特に多い。詳細は「4.2 系統毎の損傷原因と重要な事例」に示す。

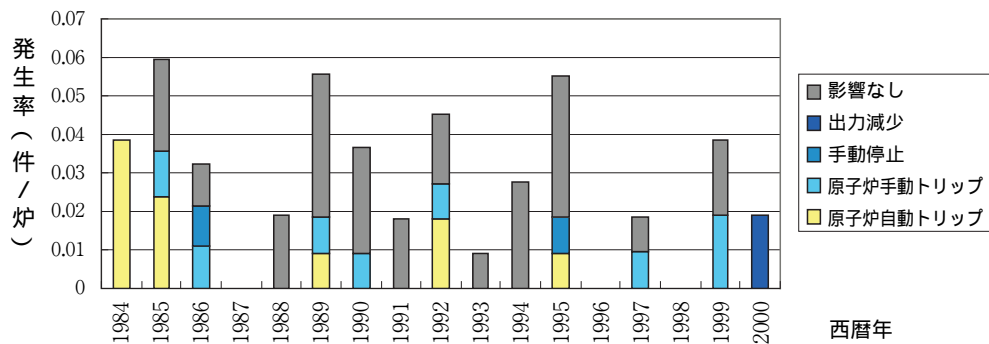


図4 出力への影響

また、原子炉トリップ等により出力への影響があった不具合事象についても、最近に至るまで断続的に発生している。なお、1984年と1985年に原子炉トリップに至った事象が際だっているが、これには後述する2発電所それぞれで再発事象があったためである。

4.1.3 発電所毎の再発状況

複数ユニットをまとめた発電所単位での不具合事象件数を見ると、6件、5件および4件の不具合事象があった発電所がそれぞれ1箇所、3件の発電所が2箇所、2件の発電所が7箇所、それ以外の発電所では1件であった。3件以上不具合事象のあった発電所について、その発生年と概要ならびにユニット営業運転開始年を含めて表2にまとめる。

発電所単位で見ると、複数回不具合事象が報告されている発電所では、類似事象が発生していることが明らかである。即ち、

A 発電所では、タービン蒸気シール系逃がし弁出口ラインの伸縮継手の破損、格納容器貫通部ベローズの漏えい率が発電所管理基準を超過した不具合がそれぞれ2回ずつ発生している。

B 発電所では、サービス水系の不具合が4件発生しており、その内2件は伸縮継手の腐食が原因となっている。

C 発電所では、サービス水系の伸縮継手溶接部での漏えいが2件発生し、更に伸縮継手タイロッドのボルト締め付け不良およびナットの間隙が不適切である不具合が発生している。

D 発電所では、復水器のゴム製伸縮継手において

3件不具合が発生しており、事象発生毎に伸縮継手材質を変更して対策を実施している様子が伺えるが、必ずしも成功しなかったようである。

E 発電所では、設計不良による内筒の過度の振動により、1ヶ月以内に抽気管伸縮継手の破損が再発している。これらは運転開始直後に発生している。

以上のことから、これらの発電所では、結果的に再発防止対策が不十分であったことを示している。

4.2 系統毎の損傷原因と重要な事例

PWRとBWRそれぞれの系統毎の伸縮継手損傷原因の分類を表3と表4に示す。PWRにおいては、サービス水系が11件と群を抜いて多く、次に多い復水器の3件と大きな差がある。復水系と抽気系はそれぞれ2件ずつである。原因を見ると劣化によるものが14件であり、半数を占めている。系統と原因の組み合わせでは、サービス水系の劣化が6件と特に多くなっている。

BWRにおいては、復水器および格納容器貫通部がそれぞれ5件で最も多い。ついで復水系、抽気系、タービン蒸気シール系がそれぞれ2件となっている。原因を見ると劣化が最も多くPWRの場合と同様半数近くを占めている。系統と原因の組み合わせでは復水器の劣化が最も多く4件である。

PWRとBWRを比較すると、サービス水系はPWRで多いがBWRではわずか1件である。また復水器については、PWRでもBWRでも同程度に発生している。復水系および抽気系についても件数は同じである。格納容器貫通部については、PWRで1件であり、BWRでは5件である。

表2 不具合事象件数が3件以上の発電所

発電所名および ユニット運転 開始年(西暦)	件数	発生前(西暦) およびユニット	不具合事象の概要
A 発電所(BWR) A1:1970年 A2:1971年	6	1984年, A2	・タービン蒸気シール系逃がし弁出口ラインの伸縮継手が破損。
		1985年, A1	・タービン蒸気シール系逃がし弁出口ラインの伸縮継手が破損。
		1991年, A1	・ドライウエルの格納容器貫通部ベローズを検査した結果、ベローズ外層に粒内応力腐食割れ(TGSCC)による貫通クラック。
		1992年, A1	・ドライウエルベント・パージの格納容器貫通部ベローズに解析条件と異なる伸縮継手使用。解析ではタイロッド付きシングルベローズ、実際はタイロッドなしのタンデムベローズ。
		1994年, A2	・格納容器貫通部ベローズの漏えい率が発電所管理基準を超過。単層ベローズに更新。
		1995年, A1	・格納容器貫通部ベローズの漏えい率が発電所管理基準を超過。ベローズ外層は健全。
B 発電所(PWR) B1:1976年 B2:1987年	5	1989年, B2	・補機冷却水系伸縮継手の内筒溶接部で流体条件による繰り返し疲労損傷。
		1993年, B2	・サービス水系金属製伸縮継手から僅かな漏えい。原因はステンレスベローズと炭素鋼製フランジとの異種金属溶接部での腐食・ピッチングと想定。
		1994年, B2	・サービス水系伸縮継手の取替(理由は記載なし)。
		1995年, B1	・サービス水系伸縮継手ゴムが流体加速によるエロージョンのため損傷して金属ベルトが腐食し、電動弁開閉試験時の圧力パルスが要因となって伸縮継手が破損。
		1999年, B2	・サービス水ポンプ真空破壊逆止弁が保守不良で開放しなかったことによりウォーターハンマーが発生し伸縮継手破損。
C 発電所(PWR) 1986年	4	1990年	・サービス水系伸縮継手モネル合金製ベローズと内筒との周方向溶接部でピッチングによる漏えい。
		1992年	・非常用ディーゼル発電機サービス水系伸縮継手のモネル合金製ベローズ長手方向溶接部にピンホール漏れ。
		1995年	・サービス水系伸縮継手のタイロッドボルト締め付け不良による伸縮膨張の阻害。
		1997年	・再循環スプレー系伸縮継手中間タイロッドナットの隙間が不適切である設計欠陥。
D 発電所(BWR) 1985年	3	1989年	・復水器伸縮継手ゴムを通して進入した湿分により麻の強化繊維が劣化。
		1995年	・復水器エチレンプロピレン製伸縮継手にタービン油付着、浸透により劣化。
		1999年	・復水器エラストマー製伸縮継手で接合処理手順書に従わなかったことによる接合不良。
E 発電所(BWR) 1984年	3	1984年	・設計不良による内筒の過度の振動により抽気管伸縮継手破損。
		1984年	・内筒の設計流量が小さく、内筒に凹凸があった設計不良による内筒の過度の振動により、抽気管伸縮継手破損が対策不十分のため前回と別の個所で一ヶ月以内に再発。
		1985年	・循環水ポンプ出口バタフライ弁ギア取付ボルト疲労損傷により弁体が回転して閉止し、急激な圧力上昇を引き起こしたため伸縮継手損傷。

注：表中複数ユニットの不具合情報のあるA，B発電所について、それぞれユニットをA1,A2,B1,B2で区別した。

表3 系統毎の伸縮継手損傷原因の分類(PWR)

系統	計	劣化	設計不良	製造不良	人的ミス	運転不良	記載なし
サービス水系	11	6			3	1	1
復水器	3	3					
復水系	2	1					1
抽気系	2						2
非常用ディーゼル発電機排気系	2		1	1			
換気空調系	2	1					1
格納容器貫通部	1	1					
給水系	1	1					
再循環スプレー系	1		1				
燃料取替用水タンクまわり	1						1
補機冷却水系	1	1					
ヒータドレン系	1						1
合計 (件数)	28	14	2	1	3	1	7

表4 系統毎の伸縮継手損傷原因の分類(BWR)

系統	計	劣化	製造不良	人的ミス	運転不良	過圧	記載なし
復水器	5	4	1				
格納容器貫通部	5	1		1			3
復水系	2				1	1	
抽気系	2	2					
タービン蒸気シール系	2	1					1
サービス水系	1			1			
循環水系	1					1	
湿分々離加熱器まわり	1	1					
非常用復水系	1						1
補助ボイラ	1						1
合計 (件数)	21	9	1	2	1	2	6

次に原因の半数を占めている劣化について、更に分類した結果をPWRとBWRそれぞれについて表5と表6に示す。両表には系統毎の出力への影響状況と件数を合わせて記載する。

劣化の原因として、PWRでは腐食が6件と最も多く、ついで振動・疲労が4件となっている。一方BWRでは振動・疲労が4件で最も多くなっている。これらから伸縮継手の劣化原因としては振動・疲労および腐食が主であることがわかる。

PWRでは、サービス水系の腐食が5件と最も多く、出力への影響も発生している。また、復水器については、3件の劣化全てが原子炉トリップに至っている。

BWRでは、復水器の劣化が4件と最も多く、PWRと同様全てが原子炉トリップに至っている。また、抽気系についても、振動・疲労により2件原子炉トリップに至っている。

また、格納容器貫通部ではPWR、BWRそれぞれ1件ずつ腐食により損傷しているが、これらはいずれも粒内応力腐食割れによるものである。

以上より、発生系統、原因、および出力への影響あるいは安全上の重要性を考慮すると、サービス水系の腐食、復水器のゴム製伸縮継手の劣化、抽気管伸縮継手の振動・疲労、そして格納容器貫通部ベローズの粒内応力腐食割れが重要な事例であると考えられる。これらについて次項で分析する。

表5 系統毎の劣化による伸縮継手損傷の分類(PWR)

系統	計	振動・疲労	腐食	エロージョン	その他	出力への影響 件数(割合%)
サービス水系	6		5(1)	1(1)		手動停止2件(33%)
復水器	3	2			1	自動トリップ:2件,手動トリップ:1件(計100%)
復水系	1				1	手動トリップ:1件(100%)
換気空調系	1				1	
格納容器貫通部	1		1			
給水系	1	1				
補機冷却水系	1	1				
合計(件数)	14	4	6	1	3	6件 (43%)

注：表中、()内の数字は出力への影響があった件数(内数)を示す。

表6 系統毎の劣化による伸縮継手損傷の分類(BWR)

系統	計	振動・疲労	腐食	その他	出力への影響件数(割合%)
復水器	4			4	自動トリップ:3件,手動トリップ:1件(計100%)
抽気系	2	2			自動トリップ:2件(100%)
格納容器貫通部	1		1		
タービン蒸気シール系	1	1			自動トリップ:1件(100%)
湿分々離加熱器まわり	1	1			手動トリップ:1件(100%)
合計(件数)	9	4	1	4	8件(89%)

4.2.1 サービス水系

サービス水系で発生した伸縮継手の腐食5件について表7に示す。サービス水としては、河川水、湖水あるいは海水が使用されている。いずれも十分水質管理された系統水とは異なるため、環境条件として注意を要する。河川水を使用している発電所においても炭素鋼製部分あるいはステンレスと炭素鋼との溶接部分で腐食が発生している。定期的に点検・取替を実施していたかどうかの記載はないが、このような個所については、材質変更等の設計変更、定期的な点検の実施あるいは点検・取替頻度の見直しが必要であることを示している。

一方、海水系で発生した腐食についても、炭素鋼ではないものの、同様の対応が必要である。

4.2.2 復水器

表5と表6に示したように、復水器のゴム製伸縮継手の損傷7件は全て出力へ影響を及ぼしており、プラントの信頼性向上の観点から損傷防止の徹底が

重要である。表8に復水器ゴム製伸縮継手の劣化事象を整理した。また当該ユニットの運転開始からの年数も記載した。

表に示す通り、復水器ゴム製伸縮継手の劣化は、クランプナットの過度の締め付け(I発電所)あるいは油の付着(D発電所)があり、これらは経年劣化以外の原因である。また、経年劣化によると見なせる事象もH発電所とK発電所で発生しており、運転開始からの年数を見ると5.2年および12.2年となっている。なお、J発電所では復水器外枠の変形によるゴムベルトへの応力が加わって劣化しているが、これは経年劣化の要素も含んでいると考えられ、運転開始から15.2年で事象が発生している。運転開始から事象発生までに、ゴム製伸縮継手の修理や取替の実施有無は記載がないが、定期的取替計画を予め定めているとは考えにくいことから、使用年数と解釈すると、早ければ5年から15年程度で劣化による不具合が発生する可能性を示唆している。従って、復水器のゴム製伸縮継手については、ゴムの劣化状況の点検、あるいは定期的な取替計画が必要であることが明らかである。

表7 サービス水系で発生した伸縮継手の腐食

発生年および発電所	原因	対策	サービス水の種類
1988年 F 発電所	炭素鋼製フランジの電気化学腐食	サービス水に接する炭素鋼部をコーティングした伸縮継手に取替	河川水
1986年 G 発電所	サービス水系ポンプ入口配管の伸縮継手に腐食の兆候	配管にフランジを溶接して伸縮継手を取替	湖水
1990年 C 発電所	流れの滞留により有機物が蓄積し、モネル合金製ベローズと内筒との溶接部にピッチング発生	暫定的にゴム継手に取替	海水
1992年 C 発電所	モネル合金製ベローズ長手方向溶接部に隙間腐食または微生物による腐食によりピッチング発生	暫定的にゴム継手に取替・将来インコネル625ベローズに取替	海水
1993年 B 発電所	ステンレスベローズと炭素鋼製フランジとの溶接部に腐食またはピッチング発生	暫定的にエポキシにより保修	河川水

注：B，C 発電所は表2と同様。

表8 復水器ゴム製伸縮継手の劣化

発生年および発電所	原因	対策	運転開始からの年数
1985年 H 発電所	ゴム製伸縮継手の経年劣化	伸縮継手取替	12.2年
1989年 I 発電所	クランプの取付ナットの過度の締め付け、および保護カバー脱落により蒸気にさらされたことによる劣化	伸縮継手取替 ナット締め付けトルク管理	2.2年
1989年 D 発電所	ゴムを通して進入した湿分により、麻の強化繊維が劣化	ポリエステル強化繊維を含んだベローズに取替	4.1年
1992年 J 発電所	復水器外枠の変形によるゴムベルトへの応力に伴う劣化	伸縮継手を改良品に取替	15.2年
1992年 K 発電所	ゴム製伸縮継手の経年疲労	当該伸縮継手を修理	5.2年
1992年 K 発電所	ゴム製伸縮継手の経年疲労（上の事象から5日後別の場所で再発）	全ての復水器ゴム製伸縮継手を取替	5.2年
1995年 D 発電所	エチレンプロピレン製伸縮継手にタービン油が付着して浸透・外表面が劣化して穴があいた。	エチレンプロピレン製伸縮継手をネオプレン製に取替	10.0年

注：D 発電所は表2と同様。

4.2.3 抽気系

表6に示す通り、BWRでは、抽気系で振動・疲労により2件プラント自動トリップが発生している。これは表2でも紹介したように、内筒の設計蒸気流量が少なく、内筒に凹凸があったという設計不良により発生している。当該発電所は運転開始直後であったが、事象が短期間に2回発生している。この伸縮継手は、図1に示した構造をしており、また「2.伸縮継手の概要」に記載したように、タービン抽気を低圧給水加熱器へ送るために復水器内を通過している抽気配管に設置され、タービンと復水器の熱的伸びを吸収する。抽気管伸縮継手の内筒は、

蒸気流の乱れを防止し、ベローズを保護するために設置されているが、本来の目的を達成していなかったことになる。

4.2.4 格納容器貫通部

表5と表6に示すように、格納容器貫通部の伸縮継手ベローズの腐食がそれぞれ1件ずつ発生している。これらはプラント出力に影響するものではないが、原子炉格納容器圧力バウンダリを構成する機器であり、事故時に放射性物質を閉じこめる機能を有する重要な機器である。

BWRでは、1991年にドライウェル貫通部ペロー

ズ外層で、粒内応力腐食割れによる貫通クラックが報告されており、対策として貫通部を閉止している。また PWR では、1987 年に粒内応力腐食割れが発見されたが、その後保守上の人的ミスで塩素を含有した保温材が取り替えられていなかったことから、1995 年に粒内応力腐食割れが発生している。

5. 考察

(1) 伸縮継手の不具合事象の報告は、格納容器貫通部ベローズを除き、原子炉トリップ等の安全系の作動によって LER 等の報告が行われることが多いため、伸縮継手の損傷があったとしてもそれだけで必ずしも事象が報告されない。従って、本調査で収集した 49 件の不具合情報は、実際に発生している損傷の一部であると考えられるが、プラントの安全性・信頼性に影響を及ぼす恐れのある不具合を防止するために、これらの不具合情報から教訓を学ぶという観点から有益な情報である。

(2) 米国では 48 件の不具合事象を収集したが、人身事故に至った不具合事象は報告されていない。国内の伸縮継手の不具合事象は 1 件と少ないが、死傷者が発生した事象である。補助蒸気系等高温流体を内包する伸縮継手が破損した場合にはこのような危険性を持っていることを考慮した点検、取替計画が重要であると考えられる。

(3) 伸縮継手の不具合事象が 3 回以上報告された発電所単位(複数のユニットを含む)で見ると、いずれも類似事象が再発しており、結果的に再発防止対策が不十分であったことを示している。経済性と社会的影響を考慮すると、国内でも対策を確実に実施して再発防止に徹することが重要である。

(4) 発生系統、原因、および出力への影響あるいは安全上の重要性を考慮すると、サービス水系の腐食、復水器のゴム製伸縮継手の劣化、抽気管伸縮継手の振動・疲労、そして格納容器貫通部ベローズの粒内応力腐食割れが重要な事例であると考えられる。

(a) サービス水系の伸縮継手については、河川水、湖水あるいは海水の環境下であり、腐食の発生しやすい状況にあるため、このような個所については、伸縮継手材質を考慮した点検・取替周期の設定が重要である。国内では、海水系で使用される伸縮継手には耐腐食性の材料が使用され、またゴム製伸縮継手については、ゴムの劣化状況の点検が行われている。

(b) 復水器のゴム製伸縮継手については、通常の使用状態においてもゴムの経年劣化を考慮する必要があるが、米国での損傷事例から判断すると、ゴムの劣化状況の把握、あるいは定期的な取替計画が必要であることが明らかである。国内では、復水器のゴム製伸縮継手を含め、ゴム製伸縮継手についてゴムの劣化状況の点検が行われている。

(c) 抽気管伸縮継手については、復水器内に設置されており、また伸縮継手ベローズにカバーが設置されているため、点検・検査が容易ではない。抽気管伸縮継手が損傷すると、復水器の真空低下により出力が低下する。更に米国の事象では、結果的に抽気管伸縮継手の破損に伴って、復水器のゴム製伸縮継手も損傷し、プラントトリップに至っている。こうした事象は、点検しにくい個所においても損傷は発生し、連鎖的な破損によって思わぬ結果となることを示唆している。また、抽気管伸縮継手の損傷は PWR でも 1 件報告があり、原因は記載がないが、修理のため出力減少を余儀なくされている。

なお、抽気管伸縮継手のベローズ設計においては、「2. 伸縮継手の概要」で述べたような基準に基づいて疲労評価が行われるが、評価の対象は起動停止等による熱的伸びであり、流体による振動ではない。内部流体あるいは外部流体により誘起される振動は発生しないように設計、製作ならびに設置することが前提となる。更に実使用環境で傷や腐食等が発生していないことも当然である。国内では、内筒およびカバーの設置やサポート設置により振動防止が図ら

れるとともに、点検、取替等の予防保全が行われている。

- (d) 格納容器貫通部ベローズの粒内応力腐食割れに関しては、「1.はじめに」で触れたように、2001年5月、NRCからプラント運転認可更新プラントだけでなく、運転中プラントに対しても取り組むべき重要な問題として、経年劣化管理について詳細な報告書が発行された。この中で以下のように結論付けられている。

格納容器貫通部伸縮継手ベローズが主として粒内応力腐食割れにより損傷してきた。

湿潤環境や塩素が保温材からベローズ上に浸出するような環境では2,3年でベローズの損傷が発生することから、環境が主要な要因である。

粒内応力腐食割れを検出するための信頼性の高い手段が欠如していること、そして一たんベローズの層に漏えい率試験に合格しないような割れが生じると、相対的に困難で費用がかかってもベローズの交換が必要となる。

国内では、毎年格納容器漏えい率試験または局所漏えい率試験による管理が実施されている。

6. まとめ

米国および国内における伸縮継手の不具合事象を調査分析した。その結果以下のことが明らかになった。

伸縮継手の不具合事象はPWRおよびBWRにおいて、劣化、設計・製造不良、人的ミスあるいは運転不良等の原因により継続的に発生しており、プラント出力への影響を及ぼす事象および人身事故に繋がる事象も発生していることから、以下の点が特に重要である。

- (1) 補助蒸気系等高温流体を内包する伸縮継手が破損した場合には人身事故の危険性を持っていることを考慮した点検取替計画が重要である。
- (2) 伸縮継手の損傷について、経済性と社会的影響を考慮すると、確実な再発防止対策が重要である。
- (3) 発生系統、原因、および出力への影響あるいは安全上の重要性を考慮すると、次の4項目が重要である。
 - (a) サービス水系の伸縮継手については、伸縮継手材質を考慮した点検・取替周期の設定
 - (b) 復水器のゴム製伸縮継手の劣化状態の把握あるいは定期的な取替計画
 - (c) 抽気管伸縮継手の振動・疲労防止
 - (d) 格納容器貫通部ベローズの粒内応力腐食割れへの注意

国内では、伸縮継手の不具合事象調査の結果、上記(1)に関連する1件だけであるが、今後とも伸縮継手について十分な配慮が必要であると考えられる。

文献

- (1) 麻坂 顯一，加藤 啓之，木田 正則，熊田 雅充，非常用炉心冷却系(ECCS)作動事象の分析，日本原子力学会誌 36, 501(1994)。
- (2) 麻坂 顯一，加藤 啓之，木田 正則，原信一，熊田 雅充，非常用炉心冷却系(ECCS)作動事象の分析，INSS JOURNAL No.2, pp.169-179(1995)。
- (3) 佐藤 正啓，柳 千裕，原子力発電所における水撃事象の分析，INSS JOURNAL No.6, pp.103-112(1999)。
- (4) 奥田 恭令，軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析，INSS JOURNAL No.7, pp.88-99(2000)。
- (5) 奥田 恭令，軽水型原子力発電所の熱疲労による配管等の損傷の分析，原子力 eye 第47巻，第5号，60(2001)。
- (6) NRC NUREG/CR-6726, Aging Management and Performance of Stainless Steel Bellows in Nuclear Power Plants, May 2001。
- (7) 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準，通商産業省告示第501号。
- (8) JIS B 2352-1994，ベローズ型伸縮継手。
- (9) ASME Boiler and Pressure Vessel Code,

- Section , 1998 Edition .
- (10) ASME /ANSI B31.3 Appendix X, Metallic Bellows Expansion Joints , 1996 Edition .
 - (11) Standards Of Expansion Joint Manufacturers Association , Inc . , Seventh Edition 1998 , EJMA .
 - (12) 電気事業法 , 第 106 条 .
 - (13) 電気関係報告規則 , 第 3 条 .
 - (14) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 , 第 67 条 .
 - (15) 実用発電用原子炉の設置・運転等に関する規則 , 第 24 条第 2 項 .
 - (16) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課 , 原子力発電所運転管理年報平成 5 年版 , p.318 (1993) .