

国内原子力発電所トラブル情報分析に基づく 疲労損傷事象に対する安全性向上に関する検討について

Study of fatigue failures to improve safety based on the analyses
of failure database in Japanese nuclear power plant

| | | | |
|---------|-------|-------------------|------------|
| 大阪大学 | 松下 幹弥 | Mikiya Matsushita | Non Member |
| 大阪大学 | 中村 隆夫 | Takao Nakamura | Member |
| 電力中央研究所 | 新井 拓 | Taku Arai | Non Member |

After Fukushima-Daiichi accident, nuclear power plants are highly requested to enhance safety against severe accident. It is important to prevent fatigue failure for operating nuclear power plants, especially pressure boundary of components to ensure safety. This paper studies the failure database of nuclear power plant in Japan (NUCIA) and extracts the events caused by fatigue failure. Fatigue failure can be classified according to fatigue mechanism such as mechanical vibration, fluid vibration, high-cycle thermal fatigue, low-cycle fatigue, and fretting fatigue. The study focuses on the classification of significance in safety function of the system, the trend and the countermeasures taken for each kind of fatigue failure. The detailed analysis of fatigue failure in safety-related components proposes important modification of maintenance program and screening criteria of components to be evaluated to ensure safety in system level.

Keywords: *fatigue failure, failure database, NUCIA, mechanical vibration, fluid vibration, high-cycle fatigue, low-cycle fatigue, fretting fatigue, safety evaluation in system level, maintenance program*

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故を受け、我が国の原子力発電所では過酷事故に対する安全性と設備信頼性の向上が強く求められている。そのため安全性評価と保全活動を統合したシステム安全評価の検討が進められている。システム安全評価とは高経年化プラントの安全指標としての基本機能であるバウンダリ機能、冷却機能、制御機能らの主要システムがどのように劣化し、機能を喪失するかを機器単体や個別機能の確保のみならず経年劣化事象がプラントの安全機能に与える影響を考慮して系統全体で評価し、保全活動による安全性の確保と向上を目指すものである^[1]。

現在、システム安全評価における疲労損傷への対応についても検討が進められている。疲労損傷は原子力プラントの高経年化対策において圧力バウンダリ機器の構造健全性に大きく関与する重要事項の一つである。これまで原子力発電所において発生した疲労損傷については、飯田の論文^[2]、並びに奥田の論文^[3]などにまとめられている。前者は国内の疲労損傷全般、後者は日米両国の熱疲労について疲労損傷の発生が多発する箇所やメカニズム、再発防止対策などについて述べられている。

本研究ではシステム安全評価における疲労損傷事象への対応を検討するため、国内トラブル事例調査データベ

ースを用いて過去に発生した疲労損傷事例の分析を行い、疲労損傷の取扱いや防止対策ならびに保全計画への反映について検討する。

2. 疲労損傷に関する故障データの調査方法

データベースより疲労損傷事例を抽出し、疲労損傷の種類ごとに整理し、個々の事例の内容について分析を行う。その上で、疲労損傷の種類毎にシステム安全評価や保全計画への反映について検討を行う。

2.1 調査の対象

原子力公開ライブラリー：NUCIA に収録されている国内の原子力発電所故障データを調査対象とした。

調査対象期間は1966年から2012年3月31日までとし、黒鉛ガス冷却炉については調査対象外とした。疲労事象を抽出するため、「疲労」または「フレッティング」で検索し、該当する368件および48件(重複を除いた合計399件)を対象に選定した。対象事象が疲労による損傷であるか否かはトラブル等情報の内容から判断した。

また燃料集合体で発生した事象については、本研究の調査の対象から外した。

以上より、疲労損傷事例として合計225件を抽出した。

2.2 疲労損傷の分類

本研究では、発生原因により疲労損傷を以下の5種類に分類した。なお、複数の種類の疲労が原因と思われる事象は、損傷の起因となった疲労原因のみに分類して取り扱うこととした。

- ① 機械振動疲労 (Mechanical Vibration)
- ② 流体振動疲労 (Fluid Vibration)
- ③ 高サイクル熱疲労 (High Cycle Thermal Fatigue)
- ④ フレッシング (Fretting)
- ⑤ 低サイクル疲労 (Low Cycle Fatigue)

2.3 調査・分析の進め方

調査にあたりトラブル等情報からプラント名、炉型、事象発生の日時、事象発生時のプラント状態、事象の発生箇所をデータとして抽出し、損傷詳細、発生原因、再発防止対策を抜粋した。また以下の項目についてトラブル等情報から判断し分類を行った。

2.3.1 疲労損傷の発生箇所

疲労損傷発生箇所を①容器(Vessel)、②配管(Piping)、③ポンプ(Pump)、④弁(Valve)、⑤タービン設備(Turbine)、⑥その他(Others)に分類した。

2.3.2 疲労損傷の発生要因

疲労損傷に至った要因を NUCIA 情報より調査して分類を行った。本研究では NUCIA の分類とは別に、疲労損傷への寄与を考慮し発生要因として以下の通り分類した。複数要因が考えられるものは、計上の際にそれぞれの該当項で重複して扱った。

- ①製作・施工(Fabrication)：溶接時の溶け込み不足など、製作・施工時の欠陥を起因として疲労損傷が発生。
- ②保守不備(Maintenance)：保全活動中に発生した不備や欠陥、保全計画の実施に関する原因により発生したもの。対策・再発防止策で作業要領書の改訂が行われたもの。
- ③設計不良(Design)：設計面で各種応力の対策不足により発生。対策により大幅な構造の変更があったもの。
- ④設備不備(Facility)：再発防止策でサポートなど設備の追加や不要設備の撤去が行われたものなど。初期段階で疲労の発生に対する備えが十分でなかったもの。
- ⑤運転・操作(Operation)：特定の運転状態の継続の結果疲労損傷が発生したもの。また対策によって運転・運用マニュアルに追加・変更があったもの。
- ⑥偶発的事象(Incident)：異物の混入や、何らかの外力が加えられたことが起因となって発生したもの。
- ⑦該当なし(Others)：上記分類には該当しなかったもの

2.3.3 疲労損傷機器の安全機能重要度

疲労損傷の発生した系統または機器が有する安全機能について、旧原子力安全委員会の安全機能の重要度分類に関する審査指針^[1]に基づき分類した。

2.3.4 疲労損傷の発生時期、損傷機器の使用期間

疲労損傷の発生時期毎のプラント一基あたりのトラブ

ル発生件数(トラブル発生件数/発生当時の稼働プラント数)、疲労損傷発生機器の使用5年ごとのトラブル発生件数を調査した。使用年数はトラブル等情報より部品の交換時期が判るものは最も新しい使用開始日付から、記載の無いものはプラント運転開始からの年数で算出した。

3. 調査・分析結果

3.1 発生原因別の疲労損傷発生割合

疲労損傷発生原因について分類した結果を Fig.1 に示す。

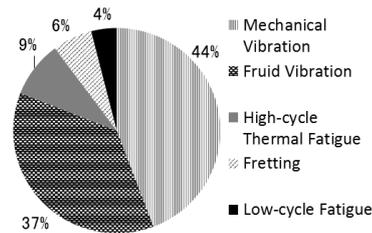


Fig. 1 Ratio of Occurrence caused by Fatigue Failure classified by fatigue mechanism

以下に疲労損傷の種類毎の調査結果について述べる。

3.2 機械振動疲労

代表事例として、特定出力状態でのポンプの振動周波数成分が当該配管の固有振動数に近づいたことによる共振、および定期検査時の当該配管の取り替え工事により発生したガイドサポートとの干渉により高サイクル疲労に至った事例が挙げられる。

(1993年8月18日、高浜1号機、PWR、一次冷却材ポンプ付属配管)

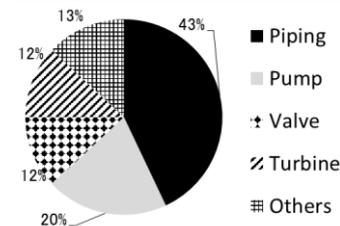


Fig.2 Ratio of Occurrence Classified by Damaged components in Mechanical Vibration

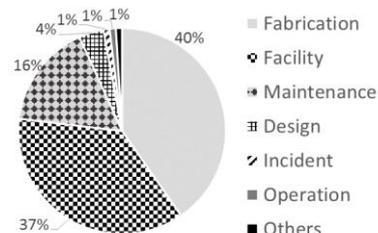


Fig. 3 Ratio of Occurrence Classified by Root Cause in Mechanical Vibration

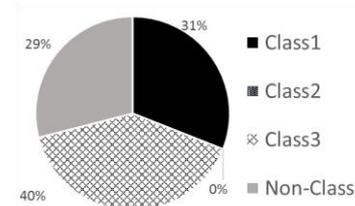


Fig. 4 Ratio of Occurrence Classified by Significance of Safety Functions Damaged by Mechanical Vibration

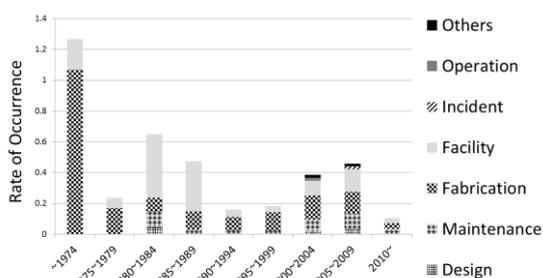


Fig. 5 Number of Occurrence per one Plant in every 5 years by Mechanical Vibration, focused on Root Cause

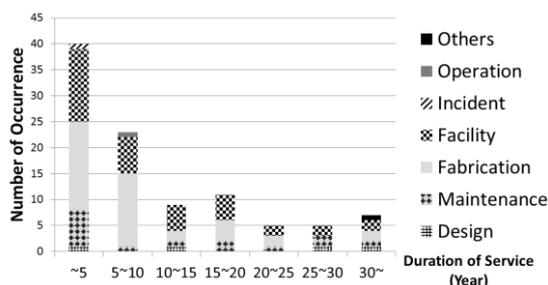


Fig. 6 Duration Year of Operation up to Mechanical Vibration Failure, focused on Root Cause

- Fig.2 より機械振動の約半数が配管で発生している。内訳としては、計装配管やドレン管など口径が小さく振動の影響を受け易い配管部位で多く発生している。
- Fig.3 より製作・施工と設備不備が特に多い。保守不備には、保全活動中に初期欠陥が発生した事例 10 件が含まれており、重複含め 9 割の事例で運転開始以前から欠陥や振動対策への不足が存在していたといえる。
- Fig.4 よりクラス 1 での発生が約 30% を占めている。内訳としては、クラス 1 機器に付随する小口径配管の損傷が 9 件、ポンプ主軸の折損や弁棒折損など直接的に機能の損失に繋がる事例がポンプと弁で合わせて 19 件発生している。
- Fig.5 よりプラント一基当たりの発生件数は、運転初期を除き増減しており明確な減少傾向は読み取れない。
- Fig.6 より使用期間 5 年以内の発生件数は多く、使用期間 10 年以降はほぼ横ばいとなっている。
- 主な対策としてサポート等の取り付けや改良品への交換などによる機器の剛性の強化および共振の回避が行

われている。単純に施工不良や取り付け不備のみが原因の場合、新品の部品への取替えや施工後の探傷検査のみを行うことが多い。また、同様の欠陥が発生しないよう作業要領の改定や類似した機器への水平展開が行われている。

3.3 流体振動疲労

代表事例として、定期検査時のドレン管口径変更によりドレン管台部の固有振動数がポンプ吐出脈動成分に接近し共振、溶接部のスラグ巻込み部等に応力が集中し割れが進展・貫通した事例が挙げられる。

(1998 年 12 月 1 日、大飯 2 号機、PWR 余熱除去ポンプ出口ドレン元弁管台)

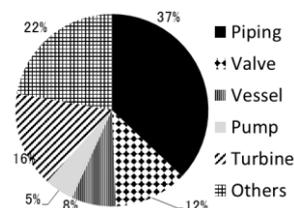


Fig. 7 Ratio of Occurrence Classified by Damaged Components

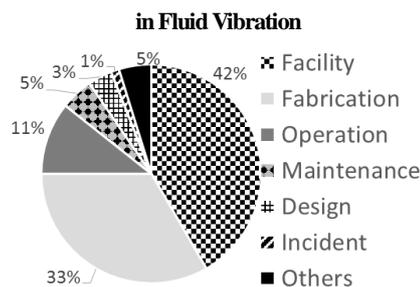


Fig. 8 Ratio of Occurrence Classified by Root Cause of Fluid Vibration

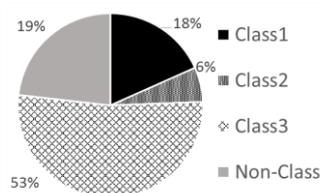


Fig. 9 Ratio of Occurrence Classified by Significance of Safety Functions Damaged by Fluid Vibration

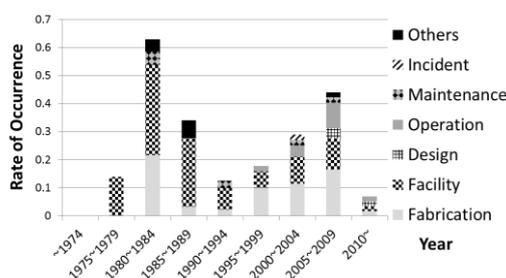


Fig. 10 Number of Occurrence per one Plant in every 5 years by Fluid Vibration, focused on Root Cause

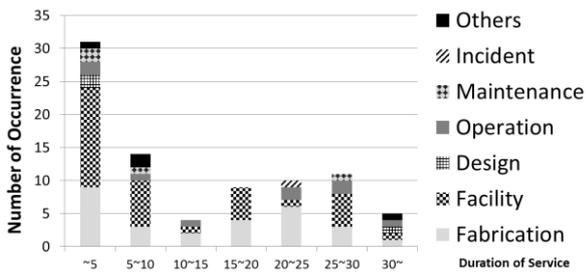


Fig. 11 Duration Year of Operation up to Fluid Vibration Failure, focused on Root Cause

- Fig.7 より、半数近くが配管で発生している。内訳については計装配管などの小口径配管やスプリッタ等配管に付随する部品での発生が多い。また蒸気発生器や湿分分離加熱器、排気塔など分類に漏れる事例が多い。
- Fig.8 より、発生要因は製作・施工と設備不備が8割近くを占めている。キャビテーションなどの発生を防止するために運転マニュアル等が改定されたため、運転・操作が3番目に多い。
- Fig.9 より、クラス1及び2での発生が20%を超えている。支持構造物やスプリッタ、小口径配管などクラス1機器の周辺機器の損傷が6件、弁棒折損や弁溶接部での亀裂発生など直接的に機能の損失に繋がる損傷が複数発生している。
- Fig.10,11 より、使用期間5年未満での発生件数が多いことを除き、発生時期および使用期間に経年的な変化は見られない。
- 主な対策はサポート等の取り付けや改良品への交換による機器の剛性の強化および共振の回避である。またキャビテーションの発生や配管内部流体への気体の流れ込みによって振動が発生した事例では対策として弁開度の規定や運転監視の強化などが行われている。

3.4 高サイクル熱疲労

代表事例として、ノズル内で発生した駆動用水の温度変動による熱疲労によって発生した事例が挙げられる。(1977年2月27日、福島第一1号機、BWR、制御棒駆動用水戻しノズル)

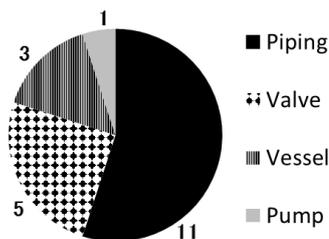


Fig.11 Ratio of Occurrence Classified by Components Damaged by High-cycle Thermal Fatigue

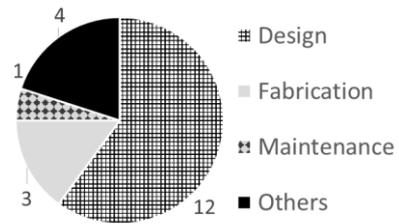


Fig.12 Ratio of Occurrence Classified by Root Cause in High-cycle Thermal Fatigue

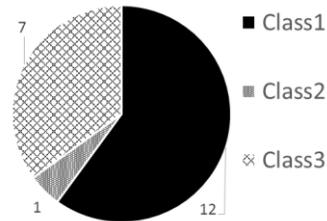


Fig.13 Ratio of Occurrence Classified by Significance of Safety Functions Damaged by High-cycle Thermal Fatigue

高サイクル熱疲労は、メカニズムおよび原因となる物理現象により以下の6つのタイプに分類できる^[2]。

- ① 主配管から枝配管への流入、熱成層
- ② 低温・高温水の合流、温度揺らぎ
- ③ 低温・高温水の合流、熱成層
- ④ 弁のグランドリークによる流体混合、熱成層
- ⑤ 弁のシートリークによる流体混合、熱成層
- ⑥ スイッチング現象、温度揺らぎ

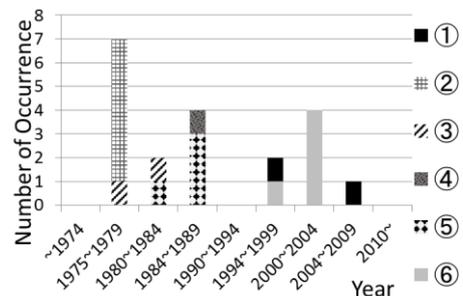


Fig.14 Number of Occurrence in High-cycle Thermal Fatigue, Categorized into 6 types

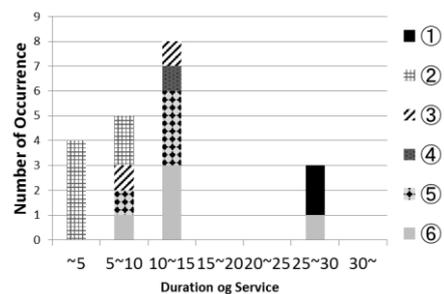


Fig.15 Duration Year of Operation in High-cycle Thermal Fatigue, Categorized into 6 types

- Fig.11 より、発生箇所は配管、弁が大部分を占めている。

内訳としては、弁およびポンプでは溶接部ないしシート部で損傷が発生している。

- Fig.12 より設計段階での対策不足が主な発生原因である。
- Fig.13 より約 70%がクラス 1 機器で発生している。配管やノズル、弁やポンプのシート部、溶接部に発生しており、疲労損傷の進展により安全機能に影響を与える恐れがある。
- Fig.14 より、同種の熱疲労タイプのトラブルは、およそ同一の時期に集中して報告されている。
- Fig.15 より、トラブルが報告されるまでの機器の使用期間は概ね短く、15 年以内に発生している。
- 主な対策として、熱疲労の原因である熱成層や温度揺らぎの発生を防止または緩和することが挙げられる。そのため配管や弁の配置や構造の変更が多く行われており 12 件に上る。また損傷発生部位近傍での温度測定の実施による熱成層や温度揺らぎの発生状況の把握および対策の妥当性の検証が行われている。部品の取替のみが行われた事例も数件存在するが、全て使用期間 10 年以上のものであった。

3.5 フレッシング

ポンプの小流量運転時に発生した荷重により接触面に相対すべりが発生し、フレッシング疲労により破断に至った事例が挙げられる。

(1986 年 10 月 11 日、玄海 1 号機、PWR、余熱除去ポンプ車軸)

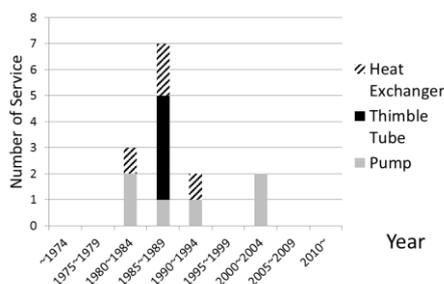


Fig.16 Number of Occurrence every 5 years by Fretting, focused on Damaged Components

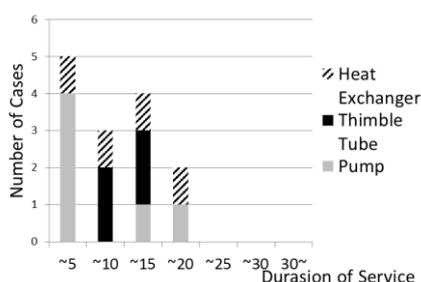


Fig.17 Duration Year of Operation up to Fretting Failure, focused on Damaged Components

- Fig.16,17 より、フレッシング全 14 件の発生箇所はポンプ、案内管、蒸気発生器伝熱管に分類され、1995 年以降はほとんど発生しておらず、使用期間は 20 年以下である。
- ポンプでは、異物フレッシングなど偶発的な事例やモーターで発生した事例を除き、ECCS 余熱除去ポンプ車軸で発生したフレッシング疲労 2 件が該当する。小流量浄化運転を長時間実施したことが起因となって発生しており、対策として運用の変更がおこなわれた。
- 案内管では、炉内計装用シンプルチューブで 80 年代後半に集中して 4 件報告されており、何れも摩耗進展防止対策および ECT 調査の強化が行われた。
- 蒸気発生器伝熱管では、当初有意な指示信号の認められた管に施栓を施す対策が行われていたが、91 年にフレッシング疲労により伝熱管が破断する事例が発生し、蒸気発生器の取り換え、保全活動の改善、品質管理の強化など抜本的な対策が行われた。

3.6 低サイクル疲労

代表事例として、プラント運転に伴う熱伸びにより管支持板が引っ掛かり、起動・停止に伴う繰返し応力が作用し破断した事例が挙げられる。

(2005 年 6 月 30 日、美浜 1 号機、PWR、タービン設備主蒸気系湿分分離加熱機過熱管)

- 全 9 件のうち、クラス 2 が 1 件、クラス 3 が 8 件であり、クラス 1 に該当する機器での発生は現在まで無い。
- 熱伸び考慮不足など構造面に問題があったものが 5 件 製作・施工不良を起点としたものが 4 件であった。
- 熱伸び考慮不足等が原因のものに対しては部品や構造の交換・変更、製作・施工不良に対しては当該部の補修および点検の強化が行われた。

4. システム安全評価及び保全計画への反映

4.1 機械振動・流体振動

振動による疲労損傷に対して、学協会規格などの明確な基準ルールは定められていない。Fig.3、Fig.8 から使用開始前より応力集中部や振動への対策不足といった要因が内在していたと言える。これらの要因に対し、再発防止対策として溶接方法や支持方法の改善や施工後の検査の強化などが実施されてきた。このことは飯田の論文でも指摘されており、長らく個別の機器への対応や水平展開が続けられてきた。対策済みの機器での再発事象は確認されていないものの、Fig.5,6、Fig.10,11 に示す通り発生率や件数に経年的減少傾向は見られない。前述の通り振

動による疲労の要因は初期より内在しており、特に溶接不良など製作・施工時に発生する欠陥は人為的な要素もあり完全に無くすことは難しい。これらのことから、振動疲労はシステム安全評価上ではランダム故障として扱い、一定の損傷発生確率を与えて安全機能へ与える影響の大きさを評価することが考えられる。

機械・流体振動が発生する箇所は広範囲に渡るため、防止対策の実施はシステム安全評価により安全機能への影響の大きいと判断されるもの、振動による負荷の影響が大きいものから重点的に行う必要がある。対象としては主軸の折損など安全機能に直接影響する事例が多く発生しているポンプや弁などが該当する。重点的に振動管理や探傷検査を行うなどの保全計画の充実により効率的に疲労損傷の発生を抑えられると考えられる。

4.2 高サイクル熱疲労

高サイクル熱疲労は経年劣化管理の対象であり、JSME設計基準が制定されている。しかしながら検査範囲の拡大や探傷技術の向上に伴って新たに損傷が発見された事例が確認されたように、設計基準の適用範囲外での事象発生の可能性が否定できない。高サイクル熱疲労は安全機能上重要な機器で多く発生しており、機能損失の際に安全機能へ与える影響が大きい。流動評価や荷重評価の精緻化に向けた技術基盤整備に関する研究成果をシステム安全評価に反映して損傷発生確率を評価し、リスクの高い部位をスクリーニングして検査の強化につなげるなど保全計画の充実を図っていく必要がある。

4.3 フレッシング

フレッシングの発生が確認された箇所は案内管、伝熱管、ポンプ軸周辺のみであり、個々に再発防止策が講じられている。90年代以降はポンプでのフレッシング腐食、異物フレッシングの事例以外は報告されておらず、再発の可能性は低く、システム安全評価の対象とする必要性は低いと考えられる。また、異物フレッシングやフレッシング腐食が近年発生しているポンプについては、これまでに得られた技術知見を整備し、それを基に保全計画の充実を図っていくことが望まれる。

4.4 低サイクル疲労

低サイクル疲労は米国機械学会(ASME)や日本機械学会において設計基準が設けられており、対象機器は原子炉圧力容器、原子炉格納容器、一次冷却材配管など安全機能重要度クラス1が該当しているがこれまで損傷事例は報告されていない。これらの機器は高経年化技術評価の評価対象となっており、UF(累積疲労損傷係数)を用い

て疲労の評価と管理が行われている。UFが相対的に高い部位はき裂発生に至る可能性が相対的に高いと考えられ、システム安全評価の観点からき裂の成長挙動を把握して重大事故に至る安全裕度を評価していく必要があると考えられる。

また、実機の疲労き裂成長を予測し、管理することにより損傷に至る裕度を評価し、リスクの高い部位の検査を強化するなど保全計画の充実についても検討していく必要がある。

5. まとめ

- ・NUCIA 情報を用いて、これまでに国内で発生した疲労損傷評価の観点からは事例について調査し、疲労損傷メカニズム別の疲労損傷の発生件数、発生箇所、発生要因、安全機能に与える影響などについて分析した。
- ・発生件数の多い機械振動・流体振動については発生率の推移及び発生に至る期間と発生要因の関係を明らかにした。
- ・発生に至るメカニズムが多岐に亘る高サイクル熱疲労やフレッシングについては、発生メカニズムや発生箇所別の発生傾向について明らかとした。
- ・これらの分析結果から、運転プラントのシステム安全評価における疲労損傷の取り扱い及び保全計画への反映内容について提案した。
- ・今後、これらの検討結果を基にシステム安全評価手法や保全計画の改善のための技術知見の整備について更に検討していく予定である。

謝辞

本研究は、原子力規制委員会 原子力規制庁からの受託事業である「高経年化技術評価高度化事業」の一部として実施した成果である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 宮野廣 高経年化技術評価の高度化-稼働プラントの経年劣化とシステム安全評価- 日本保全学会第9回学術講演会
- [2] Kunihiko Iida, A review of fatigue failures in LWR plants in Japan, Nuclear Engineering and Design 138 (1992) 297-312, North Holland
- [3] 奥田恭令 軽水炉の熱疲労による不具合事象の分析 原子力安全システム研究所 INSS JOURNAL vol.7 p.88-99 2000