

疲労健全性評価グランドデザインの構築（その2） －国内実機疲労損傷事例分析－

Reconstruction of Grand Design for Fatigue Evaluation (Step-2) -Fatigue failure analysis of Japanese NPPs-

大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member
大阪大学	藤川 亮祐	Ryousuke FUJIKAWA	Non Member
大阪大学	松下 幹弥	Mikiya MATSUSHITA	Non Member
原子力安全システム研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMATA	Non Member

Abstract: After Fukushima-Daiichi NPP accident, improvement of nuclear safety is highly requested in order to prevent re-occurrence of severe accident. New scheme of fatigue evaluation to confirm system safety in NPPs is enhanced to be established based on Defense-in-Depth concept. In step 1, grand design of fatigue evaluation is reviewed on the viewpoint of fatigue management in long-term safe operation of NPPs, which is required after Fukushima-Daiichi NPP accident. This study focuses on the direction to re-construct grand design of fatigue evaluation to ensure system safety based on fatigue failure analysis of Japanese NPPs.

Keywords: Fatigue Evaluation, Grand Design, Fatigue failure analysis, NUCIA (Nuclear Information Archives), Defense-In-Depth concept

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故を受けて、我が国の原子力発電所においては苛酷事故を二度と起こさないという決意の元に更なる安全性の向上が強く求められている。そのため、原子力発電所の設備信頼性の確保を目的として安全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^[1]。疲労健全性評価においても、従来まで行われてきた疲労損傷の発生防止に留まることなく、疲労き裂成長予測手法を導入することにより、深層防護の概念に基づき事故の発生防止、拡大防止、そして影響緩和の各層のそれぞれにおいてプラントの設計、保全、安全評価を組み合わせた新たな枠組み、即ち疲労健全性評価のグランドデザインの再構築を進めている。

本研究では、疲労健全性評価グランドデザイン構築の活動の一貫として原子力施設情報公開ライブラリー(以下NUCIA と言う)に登録されている国内実機疲労損傷事例を分析し、その調査結果から、従来、低サイクル疲労損傷を対象として検討してきた疲労評価グランドデザインを原子力発電所で発生が想定される全ての疲労損傷要因に対して拡張した新たな枠組みについて提案する。

連絡先: 中村隆夫
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻、
E-mail: nakamura@see.eng.osaka-u.ac.jp

2. 疲労健全性評価グランドデザイン構築活動

疲労健全性評価グランドデザインの再構築は、設計疲労曲線に基づく従来の疲労評価に対し、疲労き裂の発生、成長から貫通までをモデル化することにより、疲労損傷の発生防止のみならず、現実的なき裂進展解析に基づいた検査モニタリングの導入やシステム安全評価におけるリスク解析を可能とすることを目指し、深層防護の考え方に基づいて新たな選択肢を提供するものである。

先行研究では活動全体の枠組みを明らかとする^[2]と共に、き裂成長予測に基づく疲労評価法として新たに「仮想き裂成長曲線」の活用について提案^[3]した。また、試験片表面観察に基づく微小疲労き裂成長予測モデルの検討を行い、仮想き裂成長曲線作成のための実験データの整理^[4]を行った。加えて、NUCIAに登録されている情報を元に過去に国内の原子力発電所で発生した疲労損傷事例を抽出し、疲労の種類別の損傷発生件数、発生箇所、発生要因、安全機能重要度などについて統計的に分析し、原子力発電所のシステム安全評価における疲労損傷の取扱いや保全計画への反映について検討^[5]を行った。

本研究では、国内外規格改定及び研究動向を整理するとともに、損傷事例の分析を更に進めて疲労健全性評価グランドデザインへの反映事項を抽出し、新たな枠組みについて取りまとめ、グランドデザインを再構築することを目的としている。

3. 疲労評価に関する国内外規格改訂および研究動向

疲労健全性評価のためのグランドデザインの再構築に当たり、原子力発電所に関する国内外の規格改訂動向と関連する研究動向について調査を行った。構造規格として発行されているのは低サイクル疲労に関する米国機械学会(ASME)規格と仏国の RCCM 規格、そして我が国の日本機械学会(JSME)規格であり、それ以外には高サイクル熱疲労に関する規格が JSME から、そしてガイドラインが米国 EPRI 及び仏国でまとめられているが、ここでは低サイクル疲労を対象に調査を行った。

3.1 国内外疲労関連規格改訂動向

米国では、米国規制委員会(NRC)が、日本の EFT データを入手し、以前に発行した環境疲労評価手法に関する NUREG レポートおよび Regulatory Guide の見直しを検討中⁶⁾である。また、ASME 規格委員会においても、2010年に発行した環境疲労に関する Code case N761,N792⁷⁾の改訂の検討を引き続き行っている。また、仏国においては EDF により、RCCM 規格への環境疲労評価の取り入れに向けた検討が行われている。

国内では、JSME 発電設備規格委員会原子力専門委員会において、軽水炉用規格における環境疲労評価の扱いについて再検討するとともに、これ以外の規定内容についても最新の知見に照らして見直す重要性が認識され、これらの課題について検討するためのタスクグループ「疲労評価タスクグループ」が組織され活動を行っており、そのうち設計疲労曲線の改訂については日本溶接協会 DFC2 小委員会にて検討が行われている。

3.2 国内外疲労規格関連研究動向

ASME PVP 国際会議では環境疲労メカニズムや実機の環境疲労評価手法に関する論文が投稿されている。昨年の PVP2013 では環境疲労メカニズムを含め疲労評価に関する論文が多数発表されている。

EPRI は 2012 年に環境疲労評価手法における今後の検討課題に関する取り組みをロードマップ⁸⁾に取りまとめた。課題に優先度を付けることで、成果を最大限、短期に得られる様、またメカニズムの理解に基づき、長期的には不必要な保守性を回避するための疲労評価手順や管理計画につながることを意図しており、それを受けた研究が米国の国立および民間の研究所等で進められている。

4. 国内実機疲労損傷事例の分析

4.1 先行研究の概要

先行研究⁴⁾では、疲労評価グランドデザインの検討において取り扱う疲労損傷要因を低サイクル疲労から疲労損傷全般に拡張するため、NUCAI に登録されている国内の原子力発電所で発生した事故故障データベースから、各疲労損傷の種類毎に発生機器や発生原因、損傷の発生時期、発生率や使用期間と安全機能重要度や発生原因の関係を統計的に分析し、疲労損傷の種類ごとに今後の検討方針を取りまとめた。

4.2 グランドデザイン構築のための調査分析

本研究では、まず、先行研究で得られた分析結果を精査し、発生機器の種類と安全機能重要度で再整理した。この結果を Table 1 に示す。このうち、低サイクル疲労と高サイクル熱疲労については先行研究の分析結果を見直す必要はないが、それ以外の疲労損傷については、発生機器の種類と安全機能重要度（すなわちプラントへの波及影響の大きさ）の観点から整理することにより、グランドデザインに反映すべき事項を効率的に抽出できることを確認した。以下にその調査分析結果について述べる。

4.3 発生原因別及び発生機器別の損傷発生割合

NUCIA で抽出された疲労損傷の件数は約 220 件である。（調査対象期間は 1966 年から 2012 年 3 月末まで）このうち、流体振動疲労と機械振動疲労は Fig.1 に示す通り、合計の約 80%を占める。発生機器別に分類すると、Fig.2 に示す様に、配管、容器、ポンプ、弁の順となる。Table.1 の分析から、この 4 機器以外にプラントの安全性に影響を与える重要機器（クラス 1,2）は非常用 DG 及び計器用空気圧縮機などがある。

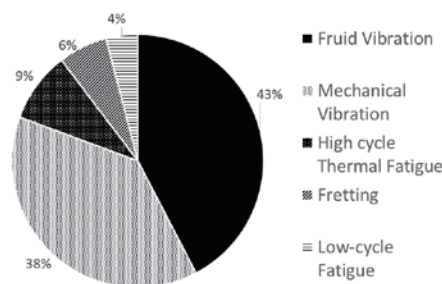


Fig.1 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Fatigue mechanism

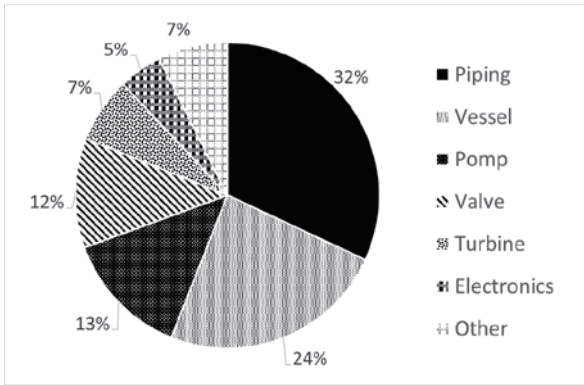


Fig.2 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Damaged component

4.4 流体振動疲労

疲労損傷のうち、最も数が多いのは流体振動疲労である。発生機器の種類は Fig.3 に示す通り、多岐にわたる。しかし、Fig.4 に示すようにその大半は安全重要度の低いクラス 3 以下の機器であり、安全重要度の高い（クラス 1,2）機器での発生は、Table.1 に示す様にポンプ、配管及び弁などに限定される。

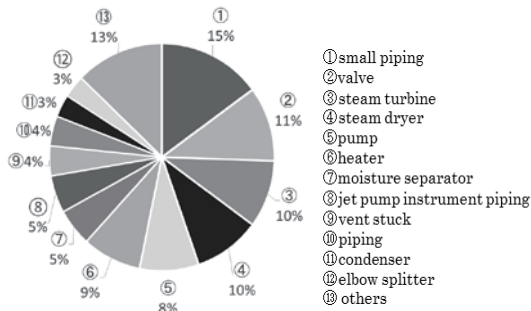


Fig.3 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Damaged component in Fluid Vibration

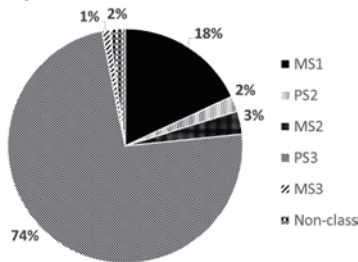


Fig.4 Ratio of Fluid Vibration Fatigue Failure Occurrence classified by Significance of Safety

4.5 機械振動疲労

疲労損傷要因のうち、次に数が多いのは機械振動疲労である。発生機器の種類は配管、ポンプ、弁が大半であり、容器には発生していない。また、安全機能重要度の高い機器（クラス 1, 2）の発生もこれら 3 種類の機器に主に限定される。

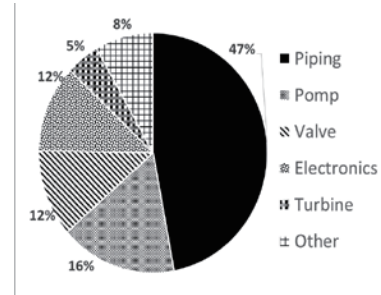


Fig.5 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Damaged component in Mechanical Vibration

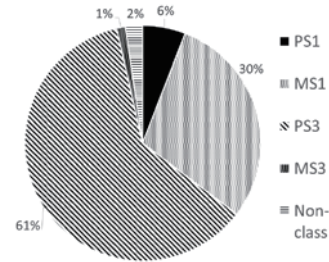


Fig.6 Ratio of Mechanical Vibration Fatigue Failure Occurrence classified by Significance of Safety Functions

4.6 フレッシング

疲労損傷要因でフレッシングに分類されるもののうち、大半は摩耗と腐食であり、疲労に分類されるのは、ポンプ車軸の 2 件と蒸気発生器伝熱管（容器）の 1 件のみである。いずれも安全機能重要度の高いクラス 1 機器に該当する。

4.7 配管の疲労損傷

配管の疲労損傷は、Fig.7 に示すように機械振動、流体振動、高サイクル熱疲労の順となり、低サイクル疲労は殆ど発生していない。また、Fig.8 に示すように安全機能重要度の高い機器の割合は他の機器と比較すると大きい。また、Table.1 に示す様に、高サイクル熱疲労においては大半を占めている。

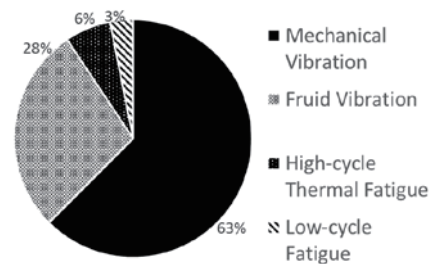


Fig.7 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Fatigue Mechanism in Piping

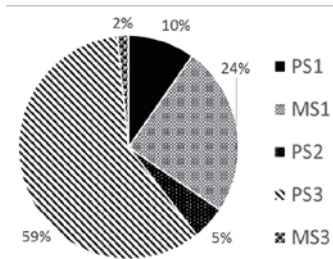


Fig.8 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Significance of Safety in piping

配管の疲労損傷の大半を占める流体振動と機械振動疲労の発生の年代毎の推移を Fig.9 と Fig.10 に示す。損傷発生数はプラントの運転初期に多く、運転年数を経ても横ばいであり、経年的に大きな変化は見られない。また、年代別では、10~980年代と2000年代に二つの山がある様に見られるが、後者では運転プラント数が増加していることも考慮した上で更なる検討が必要である。

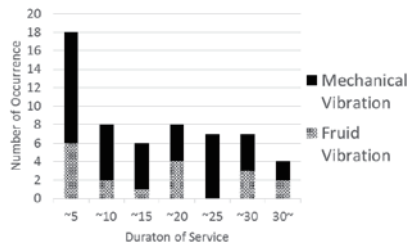


Fig.9 Duration of Operation up to Fluid and Mechanical Vibration Fatigue Failure Occurrence in piping

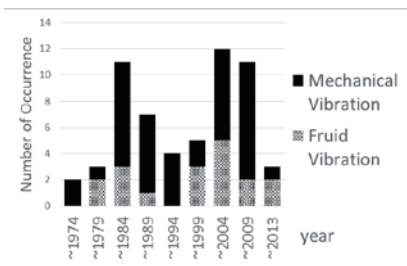


Fig.10 Number of occurrence in every 5 years by Fluid and Mechanical Vibration Fatigue Failure in piping

4.8 ポンプにおける疲労損傷

ポンプの疲労損傷は、Fig.11 に示すように機械振動、流体振動が大半を占める。また、Fig.12 に示すように安全機能重要度の高い機器の割合は他の機器と比較すると大きい。

ポンプの疲労損傷の大半を占める流体振動と機械振動疲労の発生の推移を Fig.13 と 14 に示す。損傷発生数は2000年代に入って増加する傾向が見られている。プラントの運転期間からは25年頃にピークが見られており、更なる検討が必要である。

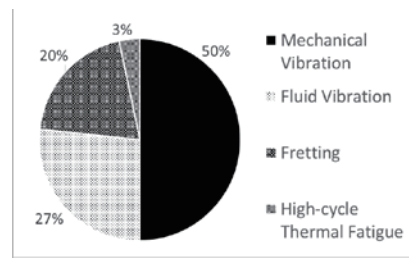


Fig.11 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Fatigue Mechanism in Pumps

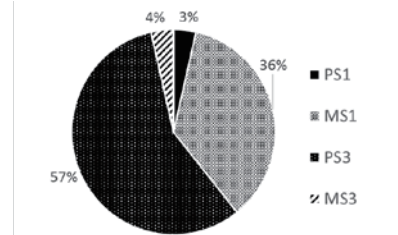


Fig.12 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Significance of Safety in pumps

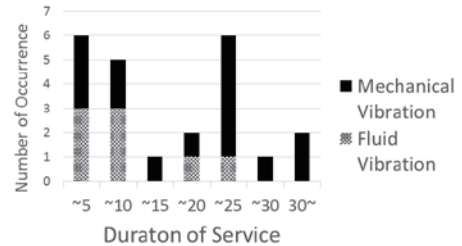


Fig.13 Duration of Operation up to Fluid and Mechanical Vibration Fatigue Failure Occurrence in pumps

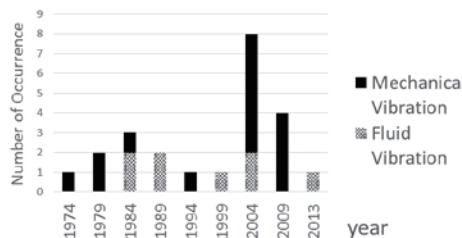


Fig.14 Number of occurrence in every 5 years by Fluid and Mechanical Vibration Fatigue Failure in pumps

4.9 弁における疲労損傷

弁の疲労損傷はFig.15に示すように流体振動、機械振動、高サイクル熱疲労が大半を占める。また、安全重要度の高い機器の割合も他の機器と比較すると比較的大きい。

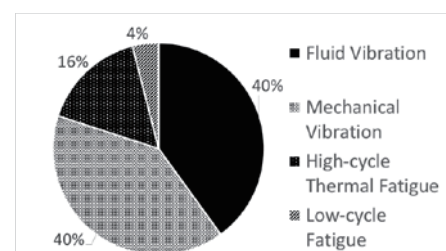


Fig.15 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Fatigue Mechanism in Valves

4.10 容器における疲労損傷

容器の疲労損傷は、Fig.16 に示すように流体振動、高サイクル熱疲労、フレティングが大半を占める。このうち、Fig.17 に示す安全機能重要度の高い機器の損傷の種類はいずれも高サイクル熱疲労である。

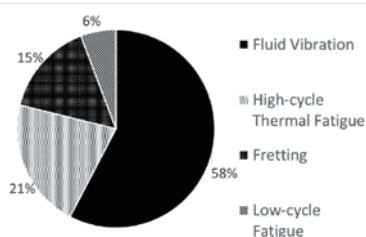


Fig.16 Ratio of Failure Occurrence classified by Fatigue

Mechanism in Vessels

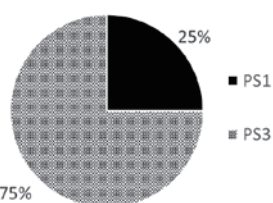


Fig.17 Ratio of Fatigue Failure Occurrence classified by Significance of Safety in Vessels

4.10 疲労損傷事例分析のまとめ

疲労損傷の種類及び損傷発生機器の種類により整理した分析結果を Table.1 に示す。

網掛けをした範囲は、安全機能重要度の高い機器の損傷事例が多く、過去の再発防止策を元に重点的に対応策の検討を行った。

また、個々の損傷事例がプラントに与える波及影響について調査したが、安全機能重要度と高い相関があり、網掛け部の安全機能影響度の高い機器の損傷をグランドデザイン検討の対象とすることとした。

低サイクル疲労については、低融点金属割れで損傷した1件を除き、重要度クラス1,2 機器での疲労損傷は発生していない。これは設計・建設規格に定められた疲労設計の規定が有効に機能しているものと考えられる。しかし、深層防護の観点からは、低サイクル疲労評価の対象となる機器は重要度が極めて高く、これまで取られてきた設計段階での発生防止対策に加えて、深層防護の観点から事故への拡大防止、事故発生時の影響緩和のため、維持規格体系の整備、保全計画の充実やシステム安全評価手法の開発に取り組む必要があると考える。

5. 疲労健全性評価グランドデザイン再構築の方向性

疲労評価に関する国内外の規格改訂動向及び関連研究の動向を踏まえて、国内実機疲労損傷事例分析結果を元に疲労健全性評価グランドデザインの再構築の方向性を検討し、Table.2 にまとめた。ここでは疲労損傷の種類ごとに、深層防護の考え方にに基づき、第1層の事故の発生防止に対する「規格体系の整備」、第2層の事故への拡大防止に対する「保全計画の充実」、第3,4層の事故の影響緩和に対する「システム安全評価」のそれぞれの対応策について、今後取り組むべき事項を整理し新たな疲労健全性評価のグランドデザインとして取りまとめた。

6. まとめ

原子力発電所の疲労健全性確保のため、深層防護の考え方に基づいて新たなグランドデザインの枠組みを提案した。このスキームに基づき、規格体系の整備、保全計画の充実及びシステム安全評価手法の確立に向けた活動を、今後関係機関と協力して取り組んでいくことが強く求められている。

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研究である、「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、関村直人、出町和之、新井滋喜、松本昌昭、“高経年化技術評価の高度化—運転プラントのシステム安全評価の体系化—”，日本保全学会第10回学術講演会、大阪、2013、pp329-335
- [2] 中村隆夫、釜谷昌幸、“疲労評価グランドデザインの新たな構築に向けて”，日本保全学会第10回学術講演会、大阪、2013、pp65-67
- [3] 釜谷昌幸、中村隆夫、“き裂成長予測に基づく疲労評価法の検討”，日本保全学会第10回学術講演会、大阪、2013、pp239-244
- [4] 阿部茂樹、西朋秀、中村隆夫、釜谷昌幸、“試験片表面観察に基づく微小き裂成長予測モデルの検討”，日本保全学会第10回学術講演会、大阪、2013、pp298-303
- [5] 松下幹也、中村隆夫、新井拓、“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”，日本保全学会第10回学術講演会、大阪、2013、pp292-297

[6] NUREG-6909 Rev.1 Effect of LWR Coolant Environment on the Fatigue life of Reactor Materials, Draft Report for Comment
 [7] 2013 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Code case s:

Nuclear Components Supplement 1, N-761,792-1
 [8] EPRI Technical Report 1026724, Environmentally Assisted Fatigue Gap Analysis and Roadmap for Future Research, Final Report, November 2012

Table 1 Summary of Domestic Fatigue failure analysis

機器		流体振動疲労	機械振動疲労	フレットイング	高サイクル熱疲労	低サイクル疲労	まとめ
容器	53 (9)	× 給水加熱器他	—	△ 蒸気発生器伝熱管	△ 管台、連絡管	× 湿水分離加熱器他	・容器の高サイクル熱疲労及びフレットイング疲労は設計面の対策により再発の可能性は低い
配管	68 (23)	○ 主に小口径管の溶接部に発生	○ 主に小口径管の溶接部に発生	—	○ エルボ、曲げ管、分岐管	△ エルボ(低融点金属割れ)	・流体振動、機械振動損傷は全て漏えいで発見されており、設計対応(固有値評価等)に加え振動や圧力変動、漏洩モニタリングが有効 ・高サイクル熱疲労は規格化されているが更なる管理の高度化が必要
弁	21 (15)	○ 弁棒、ステムピン等	○ 弁棒他	—	△ 弁シート他	× 弁箱他	・流体振動、機械振動は定期検査時の分解点検で発見されたケースが多く、設計対応(固有値評価等)に加え運転中モニタリングが有効 ・フレットイング疲労は、定期検査時の分解点検で発見されており、運転経験で得られた技術知見の設計や検査への活用が有効
ポンプ	29 (12)	○ 車軸他.	○ 車軸他.	○ 車軸	×	—	
その他	47 (10)	△ 非常用DG、タービン他	△ 非常用DG、電気品他	—	—	× バップル管、壁管	—
発生件数		94(21)	85(29)	14(3)	20(17)	9(1)	222(71)

凡例 ○：クラス 1,2 機器での損傷発生が多い △：クラス 1,2 機器での損傷発生あり ×：クラス 1,2 機器での損傷の発生なし
 —：損傷の発生なし
 数字は損傷の発生件数で、() はクラス 1,2 機器の損傷発生件数

Table 2 Interim Proposal of Grand Design based on Domestic Fatigue Failure Analysis

	規格体系の整備	保全計画の充実	システム安全評価
低サイクル疲労	<ul style="list-style-type: none"> 設計疲労線図改訂 環境効果の設計・建設規格への導入 Flaw Tolerance 概念の導入 PLM 規格に保全計画見直し結果の反映 システム安全評価ガイド(仮称)の制定 	<ul style="list-style-type: none"> 仮想き裂成長曲線を活用した検査・モニタリング 疲労モニタリングあるいは運転データに基づく現実的な疲労評価 	<ul style="list-style-type: none"> 仮想き裂成長曲線を活用したき裂進展確率モデルの開発 保全活動(検査・モニタリング)の効果の適切な評価
高サイクル熱疲労	<ul style="list-style-type: none"> 最新の研究成果に基づき、熱疲労設計指針を改訂し技術知見を整備 	<ul style="list-style-type: none"> 設計面での対応(配管レイアウト、流体の温度差制限等の設計管理) 最新の研究成果に基づく検査・モニタリング計画の整備 	<ul style="list-style-type: none"> 最新の研究成果に基づき、き裂の発生・進展評価を活用した貫通確率評価手法を開発
流体振動	<ul style="list-style-type: none"> 産業界で得られた過去の設計改良や再発防止対策などの技術知見を活用するための情報の集約とガイドライン化 	<ul style="list-style-type: none"> 設計面での対応(固有値評価等による疲労限度管理) 振動、圧力変動、漏洩等に関するモニタリング技術の活用と整備 	<ul style="list-style-type: none"> 経年劣化モデルではなく偶発故障モデルをシステム評価に採用すると共に、保全活動の効果を適切に評価に反映
機械振動			
フレットイング疲労			

(平成 26 年 6 月 26 日)