

# 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—

## Study of System Safety Evaluation on LTO of National Project - Functional Degradation and System Safety Assessment of Nuclear Plants in Operation-

法政大学	宮野 廣	Hiroshi MIYANO	Member
大阪大学	山口 彰	Akira YAMAGUCHI	Non-Member
東京大学	出町 和之	Kazuyuki DEMACHI	Member
三菱総研	松本 昌昭	Masaaki MATSUMOTO	Non-Member

Since the Fukushima Dai-ichi accident, the importance of “system safety” has been recognized anew. Particularly, system safety assessment of plants in operation from the various degradation perspectives, specifically, transition of time is very important. Accordingly, functional degradation will be the assessment target of degradation, and the changes in the safety standards and the concept of safety will be dealt with; where, the reliability assessment will be made on the consolidation of important functions under a system, and not on individual components.

The boundary function of the system will be one of the focus in this study. For the purpose of reliability assessment on the system by evaluating and quantifying the damage risk of piping – method for confirming the soundness of the system through the assessment on the damage risk of the system when an external force caused by an earthquake is applied was examined on the basis of the damage prediction results for each of the parts in piping system. The prediction results will be verified by tests, whereby, the improvement in reliability will be confirmed, and a combined assessment will be made in relation to the degradation factors of other systems. “System safety” assessment method of plants in operation will be developed in a manner where a comprehensive assessment on the safety of the entire plant can be made.

*Key Words* : System Safety Assessment, Long term Operation, Functional Degradation, Nuclear Plant, National Project

### 1. はじめに

本研究は、運転プラントの「システム安全」をどのように考えるべきか、について基本的な考え方を提示し、具体的な評価手法を構築、提案するものである。原子力発電プラントの「システム安全」とその経年プラントにおける安全評価指標の構築を行う。全体の評価体系を Fig. 1 に示す（末尾参照）。

運転プラントとして、ここでは稼働プラントと称する。その時間経過に焦点を当てると経年プラントと言う。原子力プラントの安全指標としての機能は基本的に、a. バウンダリー機能、b. 冷却機能、c. 制御機能に集約される。これらの基本機能が、稼働プラントにおける主要なシステムがどのように劣化し、その機能を喪失するかを評価する。すなわち、劣化事象における主に材料の劣化特性と機能維持との関係で、その劣化を評価する指標を検討し適切な安全指標としてまとめる。例えば放射性物質の閉じ込め機能としてバウンダリーの維持に関連し、破断や破壊の防止と同時に漏洩の防止にも着目し、機能喪失の基準の定義と劣化の考え方、およびその定量化について検討する。

連絡先：宮野 廣、東京都千代田区富士見 2-17-1  
法政大学大学院、hiroshi.miyano.77@hosei.ac.jp

この経年プラントの安全評価の結果は、従来の設計時の安全評価と対比させ、保守、保全に役立つ指標（プラントカルテ）として有効であることを検証する。

### 2. 機能損傷事象

#### （1）機能劣化の位置づけと予測と検査の融合の効果

これまで事例として「配管減肉」事象を取り上げて、上述の仕組みを検討するとともに、信頼性確保に有効な手段として、劣化予測と監視データによる管理値（劣化事象）の比較により、機能評価に与える影響を評価し、予測と監視の融合の有効性を確認するものである。

「配管減肉」の事象については、火力発電システムでは日常的に破断事象が生じてはいるが、予測対応が難しいことから、運転中はこのような配管系には近づかず、破断事象が生じてから配管の取替を行う仕組みを採用してきた。一方、原子力発電システムの場合は、破断事象を放置することは許されない。古くは1986年の米国 Surry2号機での配管破断事故を経験して以来、世界の原子力発電所では、検査を充実して十分な対応を行ってきた。にもかかわらず、日本では2004年8月9日に美浜発電所3号機において、

2 次系配管破損事故が発生した。このように圧力バウンダリーの機能は重要であり、見過ごせば極めて重大な事故となることが改めて認識される。事象の原理的な予測技術が未熟であるもので、それを補う検査とのバランスを考慮した対応 (Fig.2 参照) が必要であることを示している。

長期間運転してきたプラントにおいては、配管減肉のような劣化事象でも、比較的緩やかに進行すると評価されているが、経年化とともに劣化が懸念される配管系統・範囲は拡大すると予想され、適切な管理を怠れば、重大な事故に至ることがわかる。特に、わが国では、地震が多く、大きな外力が加わることで破断事故に至る可能性が高い。配管減肉の進行による地震時の配管系の安全評価の適切な方法の確立が求められている。そこで、配管減肉による配管の健全性評価手法における、これまでの検査を中心とした管理技術の高度化とともに、減肉配管の耐震安全評価を含めた総合的な配管健全性評価手法を完成させなければならない。

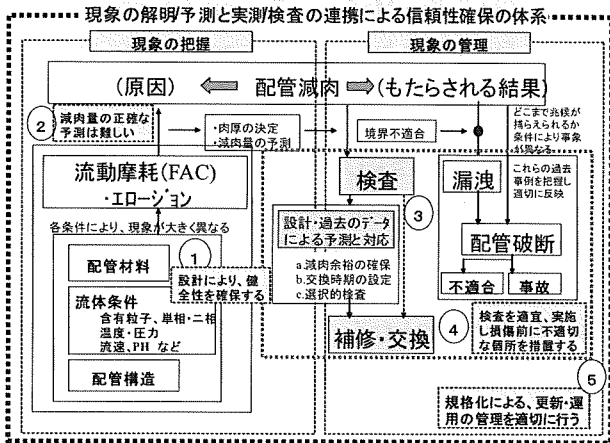


Fig.2 Deterioration and Failure Management on Uncertain Phenomena as Pipe Wall Thinning

(2) 構造健全性の視点からの運転プラントの機能劣化事象

配管減肉は、現象が複雑であり予測精度がよくない事情から、検査と合わせた管理が求められてきた (Fig.2 参照)。

一方、Fig.3 に示すように、様々な構造健全性に係る劣化事象がある。いずれも損傷の観点からは必ずしも予測精度はよくない。劣化予測による健全性評価には、検査の活用と共に、損傷リスクの評価の考え方を導入することが適切と考える。

検査による管理に依存すれば、検査量が多くなり、検査漏れのリスクも生じる。また変化が緩やかであり運転の初期から長期の管理を求められる配管減肉のような現象には、以下の視点の対応が求められる。①長期運転状況における機能劣化事象の正確な把握、②長期運転における適切な点検、取替・補修計画の策定、③事象のメカニズムの解明と把握。

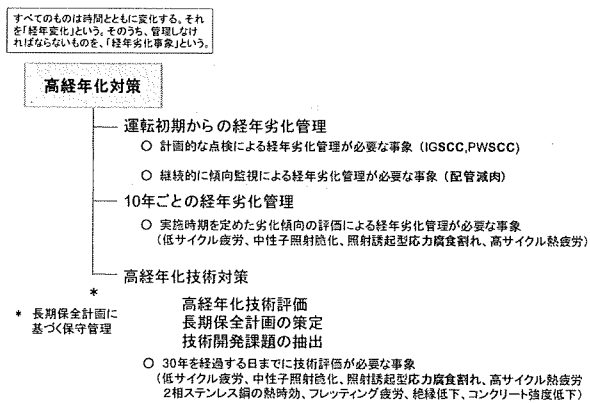


Fig.3 Degradation and Damage by Aging Phenomena

健全性評価の重要な視点である、ハザードの扱いでは、これまで内的事象を中心に安全評価が行われてきたが、特に日本のような地震が多発する地域では、ハザードとして地震は重要な外的事象である。中越沖地震や今回の東北地方太平洋沖地震の被災に伴い、経年劣化が進んだ減肉配管などの重要な劣化事象に対する健全性評価が課題となっている。

発電プラントには多くの配管があり、重要度の高いものから一般の配管まで、適切な手順で評価を行うための基準化が求められている。

配管減肉だけではなく、SCC や熱疲労など様々な劣化事象を予測して、実効的な耐震安全性評価を行わなければならない。様々な配管の劣化事象を機能劣化の指標で統合した、配管系全体の健全性を評価する適切な評価手法の確立が求められている。これまでの検査を中心とした健全性評価の仕組みと連携して、メカニズムに基づく予測法と連携したより適切な健全性評価法の確立が求められている。

3. 機能劣化・損傷事象の課題解決の手法

(1) 機能劣化事象のメカニズムの解明

上述のように、大きく環境が変化し、取り組むべき課題、目標が明確になった。配管減肉の劣化事象を例に、課題解決の取組み方法を示す。図に示すよう

に、取り組まなければならない技術課題は、3点ある。一つは「現象の把握」であり、一つは「現象の管理」、残りの一つは「地震への対応」である。

「現象の把握」においては、メカニズムの解明とその結果としての予測法を提案し、集大成としてシミュレーションコードの開発を行うものである。その内容は、メカニズムの要素に分類し、「材料」、「環境」、「系統・構造」の分野において、それぞれの因子の効果を解明することであり、その結果として減肉現象のメカニズムを明確にすることにつながる。これにより、より精度のよい高度な予測を可能としたシミュレーションモデルが開発される。これによりすべての配管の減肉においてその予測精度を大きく向上することが期待されるものである。

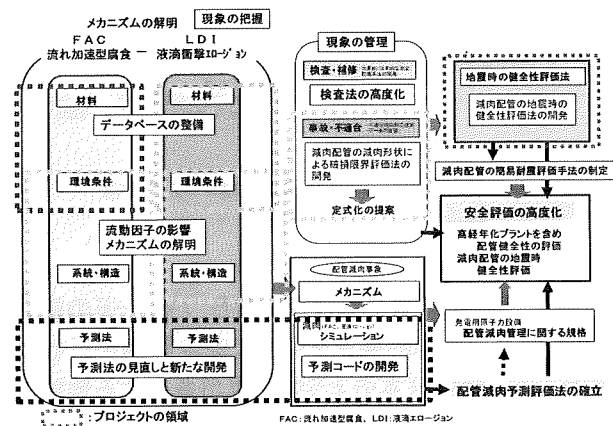


Fig.4 How to Solve Mechanism of Pipe Wall Thinning and Build-up Seismic Evaluation Method

「現象の管理」は、最も重要な課題である稼働プラントのシステム安全の評価につながる課題である。現在の管理方法では主に検査を中心としているが、検査方法の高度化を図り、検査の簡素化を進めるとともに、事象のメカニズムを解明することで、事象の予測法が信頼の高いものとなる。また最初に Fig.2 に示したようにこの検査と融合させることで、プラント全体としてのこの機能劣化の評価を効率的に行うことができるようになり、信頼性を主眼とした機能劣化の管理が可能となる。すなわち機能維持の信頼性を確保する方法を確立することが最適な管理法となる。

「地震への対応」は、従来の耐震評価において、劣化事象を加味した総合的な健全性評価を行うことである。例として配管系を取り上げると、様々な劣化事象があり、発生箇所も一定ではない。また全ての配管を対象として、多様な劣化事象を重ねて配管の耐震健全性評価を簡便に行う方法を開発することで、

システム全体の機能維持の程度、すなわち損傷のリスクを評価することができ、適切な保全の効果の評価が可能となる。

## (2)劣化シミュレーション予測による健全性評価

システム安全の観点より、プラントの主要な配管の減肉や熱疲労、SCC などの劣化事象を複合させ、バウンダリー維持の機能の劣化を定量的に評価することが、本研究の目的であり、減肉評価はその一つである。このように配管系統のバウンダリー機能の劣化が複合的に発生した場合での、地震動の外力が加わった時のバウンダリー機能の喪失のリスク評価を行うモデルを Fig.5 に示す。

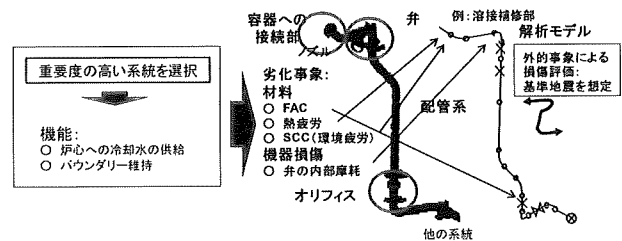


Fig.5 Simulation Model on Seismic Integrity Evaluation by Pipe Thinning, Thermal Fatigue and SCC

配管減肉のシミュレーションコードが開発されたことにより、減肉の信頼性評価を伴った定量的な減肉予測が可能となり、地震動荷重の大きさの確率的な分布とあわせて、配管のバウンダリー機能喪失のリスク評価が可能となる。これにより、リスク評価による破断事故の確率評価を行うことも可能となる。

## 6. まとめ

- ・機能劣化による運転プラントのシステム安全を評価する体系を構築した。
- ・シミュレーションによる減肉予測コード度を開発した。
- ・地震動による外的事象によるシステム安全評価法を、減肉配管に適用し、バウンダリー機能に着目した構造健全性の評価法を確立した。
- ・機能劣化を配管減肉でモデル化し、運転プラントのシステム安全の評価法の検討のモデルを開発した。

これにより、減肉配管の地震時の健全性に与える影響を評価する簡便な評価法を開発し、検査と予測の融合を図るとともに劣化事象の機能維持の評価として統合するモデルを構築した。

次フェーズでは、予測結果を検査により検証することで、信頼性が向上されることを確認すること、他の劣化の要因との複合評価を行うことでシステムの機能損傷リスクの評価が可能となる。更に稼働プラントにおける「システム安全」の評価手法として、プラント全体の安全を総合的に評価する方法を確立したい。具体的には、様々な材料劣化などの機能を低下させる状態変化をシステムの全てに渡り評価し、その機能低下によるシステムの求める機能の喪失（損傷）により生じるリスクの総和として評価することにより、その安全の程度を把握することができる仕組みを確立する。

### 謝辞

本研究は、原子力安全・保安院のプロジェクト「高経年化対策強化基盤事業（2006-2010）」および「高経年化技術評価高度化事業（2011-）」にて進めてきた成果である。関係各位の協力に謝意を表す。

### 参考文献

(1) JNES Report on “Strategic Load-Map 2008 of Technology Development for Ageing Management” 「高経年化対応技術戦略マップ2008」  
 (2) 日本機械学会発電用設備規格「配管減肉管理に関する規格 2005年版（2005年3月）」ほか JSME-S-CA1-2005 “Standards for Pipe Wall Thinning Management for Power Generating Plants 2005” by JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers)

(3) AESJ-SC-P005:2008 “Code on Implementation and Review of Nuclear Power Plant Ageing Management Programs 2008” by AESJ (Atomic Energy Society of Japan)  
 (4) JEAC4601:2008/JEAG4601:2008 “Code and Guideline on Seismic Design for Nuclear Plant 2008” by JEA (Japan Electric Association)  
 (5) Masanori NAITOH et al, “Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Coupling Systems of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics (I), Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, No.11, pp1116-1128, 2008, AESJ  
 (6) Shunsuke UCHIDA et al, “- (II)”, J of Nuclear Science and Technology, Vol45, No.12, pp.1275-1286, 2008, AESJ  
 (7) Shunsuke UCHIDA et al, “- (III)”, J of Nuclear Science and Technology, Vol45, No.12, pp.1275-1286, 2008, AESJ  
 (8) H. Miyano, N. Sekimura, A. Takizawa, K. Maeda, “Review of Piping Wall Thinning and Seismic Evaluation in Japan”, Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-78037, Prague, Czech Republic, 2009.7.26-30.  
 (9) H. Miyano, N. Sekimura, A. Takizawa, K. Maeda, “Review of Piping Wall Thinning and Seismic Evaluation in Japan2”, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2011-58023, Baltimore, Maryland, USA, 2011.7.17-21.

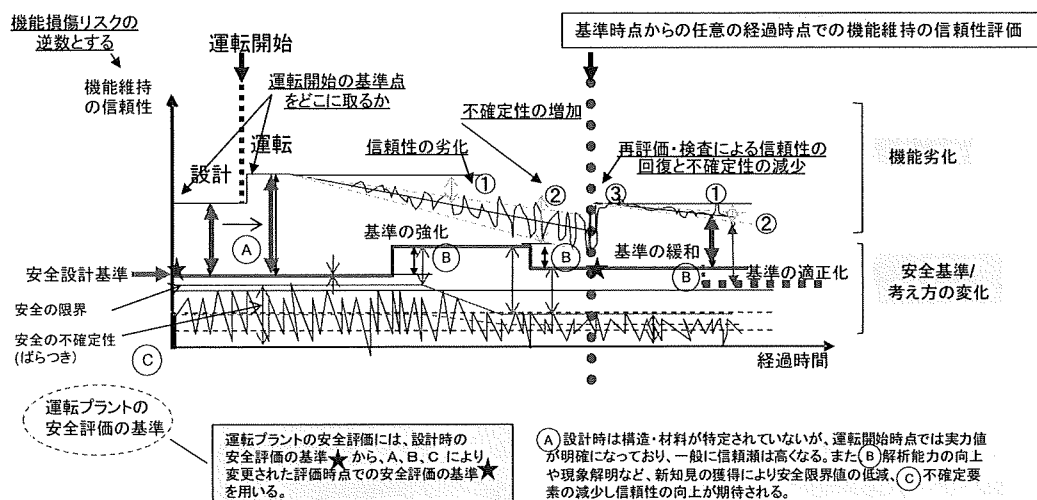


Fig 1 Basic Concept of System Safety Assessment of Nuclear Plants in Operation