

# プロアクティブ材料経年劣化評価と状態監視技術開発

## Proactive Materials Degradation Management and Development of Condition Monitoring Technology

東北大学 庄子 哲雄 Tetsuo SHOJI Member  
竹田 陽一 Yoichi TAKEDA Member  
国谷 治郎 Jiro KUNIYA

The predictive and preventive maintenance technologies are of increasingly importance for the long term operation (LTO) of Light Water Reactor (LWR) plants. In order for the realization of LTO, it is essential to prevent the degradation phenomena from emergence using proper maintenance programs on foreseeing the phenomena and evaluating their rates of development. In this paper, the proactive activities and the aging degradation phenomenon which were discussed in the Proactive Aging Management Group Meeting of Tohoku-Hokkaido Research Cluster of NISA Project are introduced. The necessity of the development of condition monitoring technologies is stated as well.

**Keywords:** Proactive materials degradation management, Condition Monitoring Technology, LWR, BWR, PWR, Plant Aging, Long Term Operation, Stress Corrosion Cracking, Flow Assisted Corrosion

### 1. 緒言

軽水炉発電プラントの高経年化(aging)と長期安定運用(Long Term Operation : LTO)が世界的な課題となっている。一般に多くの機器構造物は供用開始とともに経年劣化が始まるが、初期の想定寿命(設計のために想定される供用期間)範囲を超えた供用を行う場合には運転実績やその間の実働の負荷を評価し、設計上の想定経年劣化や実働において顕在化した劣化の受容性を評価し、その後の妥当な供用期間を想定する事になる。この間には、当然の事として定期検査毎の供用中検査(In-service Inspection)、10年ごとのPSR,そして30年目の高経年化技術評価等が義務付けられており、適切に補修や取り換えが行われ機器・構造物の健全性や機能が維持される。保全技術はこの維持に対して中心的な役割を果たすものであり、その重要性は言うまでもない。加えて最近では、単なる維持ではなく将来的な性能向上に向けた広義の保全技術が期待されるようになってきている。出力向上や定期検査間隔の延長、LTOに向けた保全技術開発等例をあげればきりが無い。大前提として継続的に安全性・健全性の維持・向上を目指しているものである事は言うまでもない。

我が国では発電プラントの運転30年目に原子力安全・保安院による高経年化技術評価が行われてきており40年の供用期間に向けての技術評価が行われている。ここ数年後以内に複数のプラントにおいて供用期間40年を迎えた運転が始まる事が想定されている。軽水炉発電プラントの高経年化は世界的趨勢であり、長期安定運用に向けて大前提である安全・安心を科学的合理性を持って維持・向上させる

対策技術の高度化並びに革新技術開発を継続的に推進し、技術情報基盤の継続的強化が肝要である。加えていかなる優れた技術も最終的には人によって使われる事を考えれば、今後長期的に原子力発電プラントを支える人材育成も極めて重要である。

軽水炉の長期安定運用における新たな視点は、損傷が顕在化する前に適切にその損傷を予知・予測・検出し適切な対策を取るにより効果的な予防保全を行うことであろう。新検査制度の趣旨を踏まえれば保全プログラムを基盤とする検査や状態監視等の実態把握を強化し、従前に増してリアクティブ(事後)からプロアクティブ(先見的)への積極的移行であろう。すなわちプラントの高経年化進行に伴い時間とともに変化する事象を考慮し、新たに工学的に予見し難い部位で発現する可能性のある経年劣化事象及び事象の複合作用として発現する可能性のある経年劣化事象(以下「潜在的な事象」という)に対する知見の充実であろう。これまでの米国原子力規制委員会(NRC)での類似研究による知見を踏まえつつ、設計、運転、検査及び補修に関するプラントデータ、他産業における知見、経年劣化事象に関する理論的検討等を総合的に関連付けて考察し、より学術的なメカニズム解明より演繹される潜在的な事象の発現可能性に係る評価の考え方を整備することは高経年化対策を先進的に進める上で重要である。

このため、原子力安全・保安院「高経年化対策強化基盤整備事業」の一環として、プラントで今後対応が必要となる可能性のある潜在的な事象の抽出に係る考え方を整理し、決定された先進的かつ科学的合理性を有する評価方法の在り方に基づいて、学术界、

産業界、事業者及び規制側の各分野における世界の専門家の経験及び知識に基づいた調査を実施し、その有機的な融合・活用を図ることとした。また、潜在的な事象及び連成劣化事象に関する広範囲な事象について現象の抽出と重要度ランクを検討し、専門家会議での意見交換、重要度調査結果を基に一層の知見の拡充を図ることとした。本稿ではこれまでに議論されてきた中長期的あるいは短期的に対応が必要な想定劣化事象の重要度分類、それに関連して必要と想定される研究開発領域とその具体的研究課題について紹介する。

## 2. 基本概念

プロアクティブ材料経年劣化評価に対する基本的概念を図1示す。横軸は知識領域、縦軸は知識の理解度の深さレベルを示す。実機において生じたある事象に対する原因究明が工学的レベル(Engineering)であるならば、そこからフィードバックされる知識の幅あるいは実機において起きるかも知れない現象の予測幅は図における黄色あるいは青色で示される範囲に留まる。一方、原因究明が普遍的、基礎的レベル(Basic Science)まで為されるならば、そこからフィードバックされる知識の幅あるいは実機において起きるかも知れない現象の予測幅は図における赤色で示される範囲にまで拡大されることが期待される。

以上のように、より基礎的、学術的なアプローチにより劣化メカニズムを深く掘り下げることにより潜在的経年劣化事象(未知事象、シナジー劣化やカスケード劣化)の予測が可能となるものと考えられる。

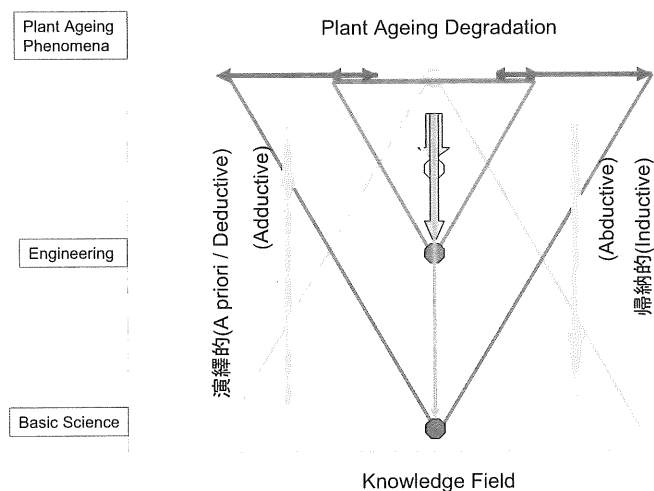


図1 プロアクティブ材料経年劣化評価に対する基本概念

## 3. 共通課題の優先度付け

### 3.1 優先度付けの必要性

高経年化対策強化としてのプロアクティブ材料経年劣化の評価は極めて重要であるが、特に多様な因子が同時にあるいは時間軸を持って関与するいわゆる連成劣化事象や連鎖劣化事象の抽出が重要である。このような観点より、米国原子力安全規制委員会における材料経年劣化評価専門家会議での研究成果(NUREG/CR-6923) [1]や本事業の専門家会議(2007年、2008年及び2009年)[2]-[4]において各専門家から提起された課題や、会議において議論の過程で浮かび上がってきた課題に基づいて研究代表者と Dr. P. Ford と Dr. P. Scott の両コンサルタントにより整理された共通課題の優先度付けに関する質問に対して、website 上において専門家の意見を集約した。各専門家がインプットした点数はまとめられ、共通課題に優先度をつけた。

これらの共通課題は、システム固有あるいはプラント固有の問題とは異なり、共通的あるいは幅広い分野、例えば溶接冶金、照射損傷、腐食、加工また多くの材料/環境系における複合的劣化に関連する課題を抽出している。従って、これらの共通課題に重要度付けすることにより、リソースを将来において“予期せぬ”材料劣化事象を最小にすることが出来る現象に集中させることが可能となる。

### 3.2 優先度付けにおける数値スコアシステム

優先度付けには単純な数値スコアシステムを採用した。一つの劣化モードに適用した数値スコアシステムは、他の劣化モードに対して必ずしも同じ“重み”を持つ必要はない。例えば、“溶接冶金”は SCC とガルバニック腐食に強く影響するが、運転条件に依存して前者の劣化モードの影響の方が後者よりもより厳しい。材料劣化モードに関しては、共通課題なので PWR と BWR を区別しない。また、システム固有の問題の解決は原子力プラント製造者あるいは製造許可事業者の責務であるとした。

従って、本研究ではシステム固有の課題の優先度スコアは低くなる。一方、結晶粒界組成の適切な定義(これは規制線図や固有の対策法に大きく影響する)といったより PWR 及び BWR 両方に影響する広い課題は高い優先度スコアを得ることになる。

このような材料経年劣化課題に対して十分な貢献をするという視点での時間枠はおおよそ 3-5 年である。本条件は、世界的な原子力産業は他の主な材料劣化が関係する事象よりも、この時間枠での問題解決にかかわる抽出課題に優先度を置いている事を意味し、短期的課題は長期的課題より大きい優先度をもつはずという推測に基づいている。

従って、タイトなき裂先端の quantum- mechanics-based analysis の開発のような課題は長期的、基礎的研究の観点からは十分な意味があるが、そのような解析が実機に適用されるには 10 年かそれ以上かかるだろうから、必然的により短期的でより実際の研究トピックよりは低い優先度が付けられる。

本研究におけるスコアシステムは以下の通り。

3 = 即解決すべき課題であり、速やかに着手する事により5年以内に潜在的課題の解決に多大な貢献が出来る。

2 = 2-5年以内に着手すべき課題

1 = この課題の解決は3-5年の時間制約の中で為されることが好ましい。

0 = 重要でない課題

その後の議論において、長期的視野に立った課題についても特定課題の抽出の中で取り上げられてきている。

### 3.3 優先度付け結果

表1は、専門家会議で提起された共通課題に対して各専門家からウェブ上にてスコア及び意見が出された結果をスコアの高い順にまとめたものである。

この結果、概して現在大きな課題として着目されている事象あるいはその展開において想定される事象について高い得点が与えられている。

具体的に、2.5以上のスコアが与えられた事象は、

- ① 材料表面の応力/ひずみの評価で、応力腐食割れに及ぼす残留応力並びに材料の微視組織影響
- ② 破壊抵抗に及ぼす環境影響（低温き裂進展含む）
- ③ SCC き裂進展メカニズムとモデリング
- ④ ステンレス鋼炉心支持構造物に及ぼす照射効果について、照射誘起応力腐食割れ発生に及ぼす照射量、動的負荷、粒界偏析（Si, Mo等）、中性子スペクトラム、高照射線量の影響評価
- ⑤ 複雑な形状の構造物について熱影響部を含めて残留応力/ひずみのモデリングとその検証並びに照射クリープによるその時間変化
- ⑥ 溶接希釈部及び熱影響部、残留応力及びその計測、ひずみの局在化と変形経路そして異材継ぎ手部の溶接金属の特性評価

であり、これらに関する知見の集約が潜在事象や連成事象の評価に不可欠である。これらは、どちらかといえば対象としているシステムの実情が十分に把握されていないことを示しているものであり、改めてこれらの基本諸量の計測と評価が重要であることが明らかである。

## 4. 特定課題の優先付け

### 4.1 平成20年度に提起された特定課題

以下の問題が提起されそれぞれの問題に対して専門家によりウェブ上で意見が出された。

(1) 既知事象であるが、想定していなかった条件（箇所、環境）で生じた事象

- ① PWR 蒸気発生器管台の割れ
- ② スペンドフェューエルプールの裏面の腐食
- ③ ペネトレーションパイプのコンクリート構造体との貫通部の劣化
- ④ バックアップ技術としてのコンディションモニ

タリング

- ⑤ プラントの酸化皮膜の観点からのEACに及ぼす温度とECP遷移
- (2) そもそも劣化モードとして想定していなかった事象
- ⑥ 局所的に強い酸化性が生じる条件
- ⑦ 水素の酸化剤としての役割とそれが引き起こす劣化モード
- ⑧ 高調波リップルストレスが割れに及ぼす影響

以上の特定課題に対するスコアリングの基準は以下に基づいた。

[A]感受性レベル (SUSCEPTIBILITY Factor)

- 0 = 問題になるとは考えられないレベル
- 1 = 異常運転条件下におけるデータあるいは潜在的発現から概念的に問題と考えるレベル
- 2 = 強く問題である、あるいは知られている問題と考えられるレベル
- 3 = 問題に対する証拠がある、あるいは多くのプラントで事例があるレベル

[B]知識レベル (KNOWLEDGE Factor)

- 1 = 理解不足、少ないあるいは低い信頼度のデータがあるレベル
- 2 = データあるいは同じ系における推定から定量的あるいは半定量的に傾向を知ることが出来る合理的根拠があるレベル
- 3 = 全ての傾向に対して広範囲で一致したデータがあるレベル

[C]信頼レベル (CONFIDENCE Level) - 感受性の判断における個人的自信の程度

- 1 = 自信がないかその現象に対して少ししか知らないレベル
- 2 = そこそこの自信はあるレベル
- 3 = 高い自信があるレベル

図2及び3は、それぞれの問題に対する専門家の評価結果を示す。この結果、具体的な対象が明確な場合には具体性ととも評価が高くなる傾向があり、逆に、本プログラムの中核であるサイエンスあるいは極めて基礎的な理解から演繹的に提起された課題は、知識レベルが小さいこともあり重要度も比較的に小さなスコアと成った。この点は、本プログラムが目指す所の重要性を示しているものであり、真に未経験事象/潜在事象の評価の難しさを示している。この点を克服するためには、さらに学術分野の専門家を招聘し、基礎的知見から演繹的に推論される劣化事象の評価を継続推進することが肝要である。特に水素の影響については多方面に大きなインパクトを与える可能性があるため、改めて専門家会議で問題の再提起と背景の説明を加えながら議論する。またリップル応力の効果についてもSCCと環境疲労の重畳として総合的な取り組みが必要であり規格基準との関連も含めて検討を進める。

表 1 共通課題に関する優先度付け結果例

Item	Score		N° of outliers	Magnitude	IDs of outliers
	Mean	dev			
Assessment of surface stress/strain; role on residual stress and microstructure and effect on SCC initiation	2.82	0.4	None		
Effects of environment on fracture resistance, including LTCP	2.8	0.42	None		
Crack growth mechanisms and modeling	2.55	0.52	None		
Effects of irradiation on stainless steel core support structures: IASCC initiation criteria as a function of dose, stress, time and dynamic loading. Grain boundary Si and Mo effects. Neutron spectrum effects, high neutron doses,	2.55	0.69	One	1	Expert C
Residual stress/strain modeling in complex geometries including weld HAZs and its validation. Changes due to irradiation creep, etc.	2.55	0.69	One	1	Expert A
Characterization of weld dilution and heat affected zones, residual stresses and their measurement, strain localization and deformation path, dissimilar metal welds	2.5	0.53	None		
Strain Localization and strain history (deformation path), cold work combined with compositional banding	2.45	0.52	None		
Load/unload, ripple loading and, resonance effects, dK/da effects,	2.45	0.52	None		
Effects of cold work and deformation path, CW and compositional banding. (Note that the definition of the extent of cold work etc is covered in Section A. This current issue relates to the effect that that cold work has on the cracking susceptibility)	2.36	0.67	One	1	Expert A
Superposition of one degradation mode upon another e.g. SCC and thermal embrittlement in CASS, radiation damage and thermal aging embrittlement of CASS	2.36	0.67	One	1	Expert K
Initiation of SCC in structural alloys, modeling, stochastic features, heat to heat variability, effects of long exposure periods (definition of initial condition and precursors), plant upgrades	2.36	0.81	Two	1	Expert C, Expert G
ECP changes due to e.g. O <sub>2</sub> transients during start up, shut down, make-up water injection in systems normally at low potential, e.g. PWR primary circuits and BWRs on HWC/Noble Chem	2.36	0.81	Two	1	Expert D, Expert I
Weld material composition and morphology	2.36	0.81	Two	1	Expert D, Expert F
Flow assisted corrosion, reliability of current predictive fundamentally based models	2.3	0.82	Two	1	Expert C, Expert G
Fluence related materials changes.	2.27	0.47	None		
Grain boundary composition as function of fabrication variables and time	2.27	0.65	One	1	Expert F
Crevice chemistries as function of geometry, bulk chemistry, radiolysis and heat flux	2.18	0.75	Two	1	Expert G, Expert K
Hot cracking, liquation cracking, ductility dip cracking, re-heat cracking, etc	2.18	0.75	Three	1	Expert A, Expert D, Expert F
Crack tip chemistry, nanometer dimension crack tip enclaves, diffusion kinetics	2.18	0.6	One	1	Expert F
Thermal fatigue crack initiation and propagation in austenitic stainless steels. Surface condition, environmental effects, transient waveform effects. Vibration fatigue, small amplitude very high cycle fatigue effects on fatigue limits	2.1	0.88	Three	1	Expert D, Expert I, Expert K

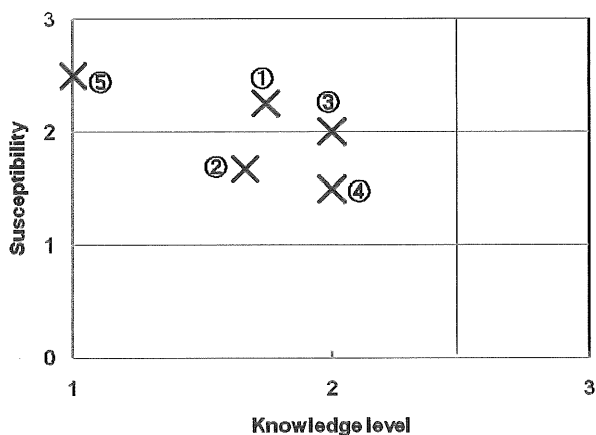


図 2 既知事象であるが、想定していなかった条件(箇所、環境)で生じた事象の評価結果

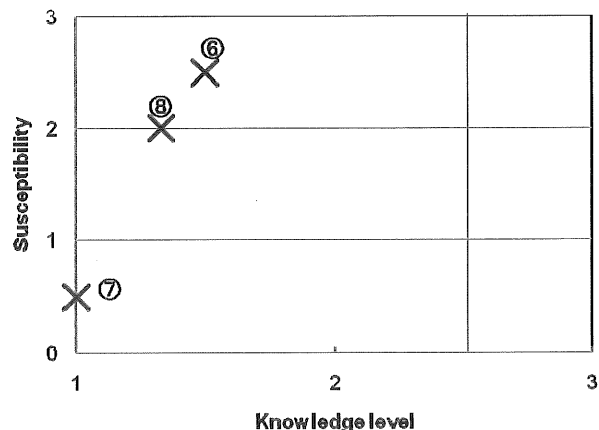


図 3 そもそも劣化モードとして想定していなかった事象の評価結果

## 4.2 平成 21 年度に提起された特定課題

以下の問題が提起された。

- (1) ピーニング表面の長期信頼性
  - ・ピーニング端部における引張応力の作用
  - ・熱、照射、応力繰り返し負荷に対する安定性
  - ・複雑形状：厚板部や温度・熱伝導の相違
- (2) 水素による酸化の加速
  - ・分子動力学による検討によれば、鋼中における負にチャージした水素原子と酸化皮膜中の正にチャージした水素原子が存在する。母時合金と皮膜界面での電荷のやりとりが酸化に与える影響
  - ・酸化物中での水素の状態(原子/プロトン)
- (3) 高経年化軽水炉構造材料における未経験劣化事象に対する予測・検知手法
  - ・Quantitative micro-nano model の提案、孔食からの割れ発生におけるひずみ分布の影響
- (4) SCC 潜在的機構に及ぼすひずみ経路の影響
  - ・粒界におけるキャビティ形成
  - ・粒界近傍のひずみ集中・局在化
- (5) 材料劣化研究課題
  - ・ポリマー：①照射の影響(低照射量&事故時)/鎖構造変化、脆化、フィラーの役割、②評価試験方法/試験温度の保守性は妥当か。製造者による添加物の相違とその影響度評価。
  - ・コンクリート構造体：劣化機構の相互作用の複雑さ(中和、割れ、はく離)とそれら経時変化をいかに取り込むか
  - ・低合金鋼の低温熱時効：400℃以上での報告あり。軽水炉運転温度での長期時効による発現可能性。
  - ・環境遷移の繰り返し：固/液/蒸気の共存環境(ex. PWR SG)では極端な状況が想定される
  - ・照射試験：高速炉照射材データから経年軽水炉材料への予測可能性
- (6) 溶存水素下におけるオーステナイト系合金の環境疲労感受性とメカニズム解明
- (7) 高温水の物理化学特性
  - ・H<sub>2</sub>O のクラスターとしての存在
- (8) 長時間時効による低合金鋼の破壊抵抗の低下
- (9) ニッケル基合金における規則化の可能性
  - ・長時間時効後の組織相変化・析出挙動
- (10) 低温き裂進展に関する基本的理解

これらの特定課題についても現在 Web 上で専門家からの意見を集約中である。

## 5. 結 言

- (1) 潜在的経年劣化事象を予測し防止する能力を得るためには、より基礎的なアプローチによるメカニズムに立脚したプロアクティブ材料経年劣化管理の確立が必要である。すなわち劣化事象予測の網羅性を高めるために体系的に潜在事象や潜在メカニズムの思考上の顕在化 (*elicitation*) を行うことが肝要である。産業界及び国・官界との強い

共同作業と支援の下、より学術的なアプローチにより劣化メカニズムを深く掘り下げ、組織的 *elicitation* を推進する専門家集団を構成・維持し、このことにより長期的なシナジー劣化やカスケード劣化の予知・予測を可能とする方法論の確立が重要である。

- (2) プラントで今後対応が必要となる可能性のある潜在的経年劣化事象の抽出に係る考え方を整理し、先進的かつ科学的合理的な評価方法の在り方について学术界、産業界、事業者及び規制側の世界の専門家の経験及び知識並びに知恵の結集と、その有機的な融合の促進とその成果の予知・予防保全への反映提案が重要である。  
(長期運用プラントの保全におけるプロアクティブ経年劣化対応の位置づけと役割の明示。図 4 参照)

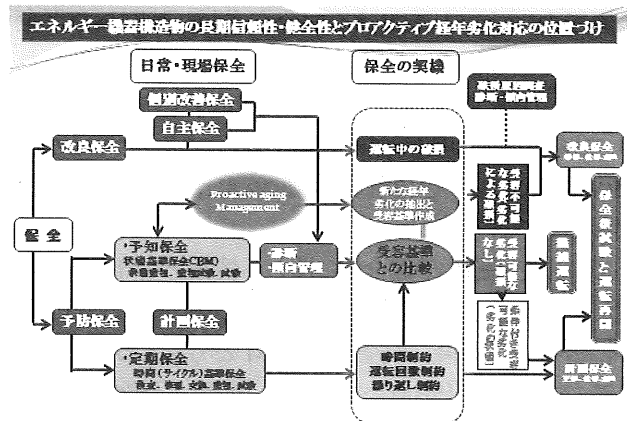


図 4 プロアクティブ経年劣化対応高度化と保全高度化の関係

## 謝辞

本研究は、経済産業省原子力安全・保安院平成 21 年度高経年化対策強化基盤整備事業（経年劣化事象の解明等）の成果の一部をまとめたものである。

## 参考文献

- [1] NUREG/CR 6923-2006, US NRC
- [2] 平成 19 年度経済産業省原子力安全・保安院高経年化対策強化基盤事業成果報告書（東北・北海道クラスター）(株)インテリジェント・コスモス研究機構、平成 20 年 3 月
- [3] 平成 20 年度経済産業省原子力安全・保安院高経年化対策強化基盤事業成果報告書（東北・北海道クラスター）(株)インテリジェント・コスモス研究機構、平成 21 年 3 月
- [4] 基調講演「プロアクティブ経年劣化対応と階層化保全」、庄子 哲雄、第 6 回保全学会学術講演会 2009 年 8 月 3 日-5 日、札幌