

材料劣化潜在事象のプロアクティブ評価

Proactive Evaluation of Potential and Latent Materials Degradation Phenomena

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

A Proactive Materials Degradation Management (PMDM) project has been carried out at the Frontier Research Initiative (FRI), New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University for 5 years, as a part of a Nuclear Industries Safety Agency (NISA, now the Secretariat of the Nuclear Regulation Authority) project that was originally formed in 2007 to define an Aging Management Program that addresses unexpected structural material failures in Light Water Reactors (LWRs). Such a program required, therefore, the development of a life prediction capability for specific combinations of degradation modes, structural materials, and reactor components. In this paper, PIRT results for the aging degradation phenomena in LWR structural materials are introduced.

Keywords: Potential and latent materials degradation phenomena, PIRT, Proactive materials degradation management, , LWR, BWR, PWR, Plant Aging, Long Term Operation, Stress Corrosion Cracking, System Safety

1. 緒言

プラントの高経年化に伴い工学的に予見し難い部位で新たに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「潜在事象」という）について科学的合理性をもってプロアクティブ（先見的）に予見しておくことは極めて重要である。

より基礎的、学術的なアプローチに基づいて劣化メカニズムを深く掘り下げることにより潜在事象の予測が可能になると考える。具体的には、①過去の事象の根本原因究明に基づく帰納的アプローチ、並びに②科学的劣化メカニズム解明に基づく演繹的アプローチをそれぞれの側面から③体系的 elicitation(潜在事象・メカニズムの思考的顕在化へ)を通じて深耕することにより抽出できるものとする。

筆者らは原子力規制庁「高経年化技術評価高度化事業」の一環として平成19年度より毎年プロアクティブ材料経年劣化専門家会議を開催して潜在事象の抽出と評価を進めてきた。その結果、今までに多様な潜在事象が提起されてきた。[1]-[3]

本稿では今までに提起された潜在事象に対して Phenomenon Identification and Ranking Table (PIRT)手法[4]を適用してスコア付けを行い、経年劣化事象としての潜在性及び重要度を評価した結果を報告する。

2. PIRT 再スコア付けの必要性

図1は、米国 Nuclear Regulatory Commission (NRC) が想定する PIRT スコア付けにおける感受性レベルと知識レベルの関係と平成24年度プロアクティブ専門家会議で得られた両者の関係を示す。平成24年度の結果、図1に示されるように感受性レベルと知識レベルには米国NRCが想定した「知識の集約に基づく問題（事象）の解決」という概念から言うところの右下がりになるものに対して右上がりの関係が示された。これは、物理化学的な現象によってプラントにとって不都合な事象が発生するという時系列のなかで現象と事象を明確に定義しなかったことによるものと考えられる。現象の理解によってその発生を抑制することで事象の生起を抑制できる一方、現象が起きても事象の生起を抑制（管理）できる場合もある。この明示が無いまま単に現象として起き得るかという視点でスコア付けを行ったことが結果に表れたものと考えられた。そこでH25年度はプラントにおける事象の生起可能性の程度を感受性レベルとして再スコア付けを行った。

3. 今までに提起された材料劣化事象と PIRT 手法に基づくスコア付け結果

プロアクティブ専門家会議において議論・提起されてきた潜在事象の中には件数は少ないが新たな劣化事象そのもの、すでに例えば日本原子力学会 PLM 標準に記載されている劣化事象においてまだその影響が検討されていない

い要因を含む劣化事象、また研究課題そのものが混在している。

表1は、今までに提起された経年劣化事象の中から潜在事象となり得ると考えられる経年劣化事象をまとめたものである。基本劣化メカニズムとして、1.熱時効、2.疲労、3.照射劣化、4.クリープ、5.腐食及び水素損傷、6.照射誘起応力腐食割れ、7.応力腐食割れ、及び8.破壊に分類した。表1に記載された経年劣化事象についてPIRT手法によるスコア付けを行い、これらの経年劣化事象の潜在性を評価した。

PIRT手法のプロセスでは重要性を決定するためのスコア付け基準に基づいて事象のスコア付けを行う。スコア及びそれを決定する根拠に関する情報によって米国NRCは安全関連研究の優先順位決定を行ったり、意志決定の支援に用いたりする。PIRT手法におけるスコア付けの基準は以下に基づいた。

・感受性レベル (SUSCEPTIBILITY Factor)

0= 事象が生じるとは考えられない

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

・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

・自信レベル (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 (NOTE: “3” is assumed if Susceptibility Factor is 0.

・管理レベル(MANAGEABILITY Factor)

0= 管理方法が確立していない

1= 管理方法はあるが、有効性に改善の余地がある

2= 劣化事象が顕在化する可能性はあるが、機能喪失に至

らないための管理方法が確立している

3= 劣化事象が顕在化しないための管理方法が確立している

図2は、各経年劣化事象に対する感受性レベル及び知識レベルの平均スコアをプロットしたものである。感受性レベルと知識レベルには平成24年度と同様に正の相関が示された。図3は、感受性レベルと管理レベルの平均スコアを示す。この結果も平成24年度と同様に感受性レベルが高い経年劣化事象に対して管理レベルは確立している方向にあり、感受性レベルが低くなるほど管理レベルは確立していない方向が示された。

平成25年度は再スコア付けの必要性の項で述べたように現象の発生と事象の発生（実機での生起）を明確にした上で再スコア付けを行ったので、知識レベルの増加及び管理レベルが確立の方向にあれば実機における事象の生起に対する感受性レベルは低くなると考えられた。しかしながら、結果は平成24年度と同様に両者に正の相関が認められた。このことは実機における事象の発生感受性が高いと認識されている事象ほど知識は集積し、予防保全・進展緩和・機能喪失回避などが図られているものと専門家が考えていることを示す。すなわち、実機での事象発生感受性が高いので自ずと管理レベルスコアも大きくなったものと思料される。

次に管理レベルのスコア付けに対する専門家の見解の相違を見るため管理レベルの平均点が低かった「1.4 照射劣化の重畳による時効脆化の促進」と比較的高かった「7.10 照射、表面研削及び表面残留応力による応力腐食割れの促進」の2劣化事象を例に調査した。図4は上記劣化事象に対する管理レベル点数の頻度グラフを示す。

管理レベルの平均点が低かった「1.4 照射劣化の重畳による時効脆化の促進」において管理レベル0-1を付けた専門家の見解は以下のものであった。

①十分な知見がなく劣化加速の検出や評価が難しい。

②炉内機器が対象となるため検査が難しい部位がある。

一方管理レベル2を付けた専門家の見解は以下であった。

①機器の健全性の観点からはき裂の発生及び想定荷重下で破壊が生じないことが要求される。

②照射の重畳による脆化加速について不明な点は残されているが得られている知見と現行の検査（き裂有無）・取替等の管理技術を考えてとただちに問題になるとは考えにくい。

また、管理レベルの平均点が比較的高かった「7.10 照射、表面研削及び表面残留応力による応力腐食割れの促

進」において管理レベル0-1を付けた専門家の見解は以下であった。

- ①長期運転後の予測・評価に十分な知見がない。
- ②ISI等で欠陥がないことを確認していく必要がある。
(検査の継続)

一方、管理レベル2-3を付けた専門家の見解は以下のようであった。

- ①表面研削部への照射の影響等、不明な点は残されているが、現行の検査、保全、補修技術により機器・システムとしての健全性は担保される。
- ②新たな知見が得られた場合は、維持規格等への反映が必要だが、現時点ではそのような知見はない。

以上をまとめると、管理レベルを低くスコアリングする専門家と高くスコアリングする専門家で重視するポイントが異なる傾向があることが示唆される。前者は劣化事象の予測・検出・評価を精度よく行えることが管理上重要との認識が優先しているのに対して後者は劣化事象が発現した場合でも、機器・システムとしての健全性が担保されるように管理することが重要との認識が優先しているようである。引き続き、機器・システムへの影響の観点からの議論の継続が必要であろう。

図5は、感受性レベル及び知識レベルが最も高くスコア付けされた「7.3冷間加工(機械加工含む)による応力腐食割れの促進」並びに両方のレベルが最も低くスコア付けされた「6.1窒素の核変換による炭素生成による照射誘起鋭敏化」を代表例として各専門家のスコア付け結果を示したものである。図中には25名の専門家のスコア付け結果をプロットしてあるが、自信レベルに応じて色分けしてプロットした。黒丸は高い自信があるレベル、グレーの丸はそこそこの自信はあるレベル、白丸は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、を表している。1つの劣化事象に対して専門家のスコアはかなり分かれているが、感受性レベル及び知識レベルともに平均スコアが高い劣化事象に対しては専門家の自信度は高く、一方感受性レベル及び知識レベルとも平均スコアが低い劣化事象に対しては専門家の自信度は低いという傾向にある。この傾向は他の劣化事象にも認められた。

4. 潜在劣化事象の評価

ここではPIRTによる再スコア付けされた32の潜在劣化事象について感受性レベルと知識レベルがともに低い領域にプロットされた潜在劣化事象及び管理レベルに対して感受性レベルは比較的高い領域にプロットされた潜在

劣化事象に注目する。

前者は現時点で感受性レベルが低いと評価されているがこれは知識レベルが低いことに起因しているものと考えられ、知識レベルが高くなれば感受性レベルの評価も変わっていくものと考えられる。このように現時点で感受性レベル及び知識レベルとも低く評価されている潜在劣化事象については基礎研究により知識レベルを高めていくことがプロアクティブの観点から重要に思われる。図6(1)は、感受性レベル及び知識レベルが低い領域例を示す。この領域にプロットされている潜在劣化事象は以下の6事象であった。

- ・3.2 水素による照射脆化の促進
- ・3.3 γ - α 核変換による脆化
- ・5.3 照射による水素脆化の促進
- ・5.4 超多量(スーパーアバンドント)空孔と水素の作用による物質拡散加速と組織変化の促進による経年劣化
- ・6.2 窒素の核変換による生成水素による腐食並びに応力腐食割れの加速
- ・7.6 水素加速酸化現象に起因する腐食並びに応力腐食割れの加速

6事象の内5事象が水素が関連する潜在劣化事象であることから、水素の影響を明確にしていくことがプロアクティブの観点から重要と考えられる。

次に後者の管理レベルに対して感受性レベルが比較的高い領域にプロットされた潜在劣化事象は将来的に実機における発現可能性が高い潜在事象となるのではないかと評価される。この場合、図6(2)に示されるように以下の5つの劣化事象が抽出された。

- ・1.4 照射劣化の重畳による時効脆化の促進
- ・3.1(2) 破壊靱性の低下-オーステナイト系SS
- ・7.2(2) 異材継ぎ手部の応力腐食割れ-BWR-
- ・7.9 リップルストレスによる応力腐食割れの促進
- ・7.10 照射、表面研削及び表面残留応力による応力腐食割れ発生の促進

これらの潜在劣化事象に対する管理手法の開発が今後の課題と考えられる。

5. まとめ

プロアクティブ専門家会議において今までに提示された潜在事象に対してPIRT手法を適用してスコア付けを行い、潜在劣化事象としての重要度を評価した。潜在事象の評価は継続的に検討していくことが重要である。

謝辞

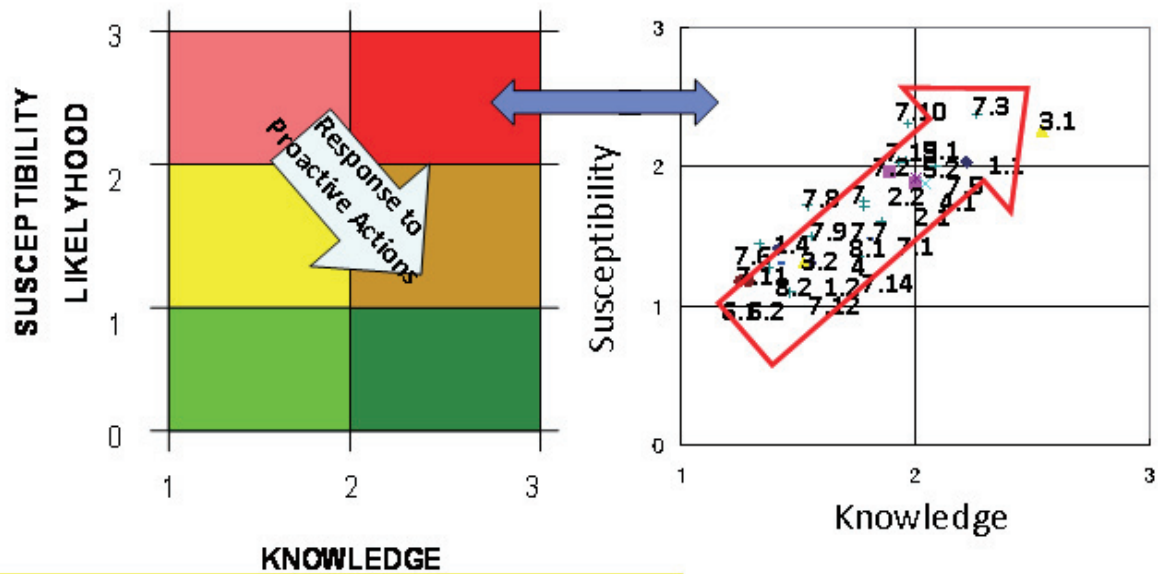
本研究は、原子力規制庁平成25年度高経年化技術評価高度化事業の成果の一部をまとめたものである。プロアクティブ材料経年劣化研究課題の抽出は、附図に示す研究体制で進めた。議論頂いた国内検討会委員及びプロアクティブ専門家会議委員（附表）に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- [1] 庄子哲雄、竹田陽一、国谷治郎：“プロアクティブ材料経年劣化評価と状態監視技術開発”、日本保全学会、第7回学術講演会要旨集、pp.475-479(2010.7)
- [2] 庄子哲雄、竹田陽一、国谷治郎、ピーター フォード、ピーター スコット：“軽水炉原子炉におけるプロアクティブ材料経年劣化研究課題、保全学、Vol. 10, No. 4, pp. 51-66 (2012.1)

- [3] Tetsuo SHOJI, Yoichi TAKEDA, Jiro KUNIYA, Peter FORD, Peter SCOTT：“Proactive Material Degradation Research Subjects for Light Water Reactors、E-Journal of Advanced Maintenance、Japan Society of Maintenance、to be published.
- [4] NUREG/CR-6923, Expert Panel Report on Proactive Materials Degradation Assessment, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC. (2007).
- [5] P. L. Andresen, Emerging Issues and Fundamental Processes in Environmental Cracking in Hot Water, Corrosion J, Vol.64, No.5, 2008, 439 - 464
- [6] Xiaoyuan Lou, Peter L. Andresen and Tiangan Liang,, INVESTIGATION OF RAPID FRACTURE PHENOMENON IN HIGH TEMPERATURE WATER, C2012-0001186, NACE CORROSION 2012 (2012)

(平成26年6月26日)



注：この図における生起度は、発電プラントにおける事故・トラブルの生起度を想定しており、知識レベルが高まれば事故・トラブルは回避できるので生起度が低下することを想定している。

H24年度の結果

図1 米国NRCが想定するPIRTスコアリングにおける感受性レベルと知識レベルの相関と平成24年度プロアクティブ専門家会議におけるPIRTスコアリングにおける両者の相関

表1 今までに提起された経年劣化事象の中から潜在事象となり得ると考えられる経年劣化事象の一覧

基本劣化メカニズム	経年劣化事象	材料		
1. 熟時効	1.2 長周期オーダリングによる時効脆化	~30%Crを含有するニッケル基合金 (Alloy 690及び溶接金属)		
	1.3(1) 運転温度における長時間時効脆化	Type 403, 410		
	1.3(2) 運転温度における長時間時効脆化	Type 17-4, 15-5PH		
	1.4 照射劣化の重畳による時効脆化の促進	オーステナイト系ステンレス鋼、 オーステナイト系溶接金属		
	1.5 低合金鋼の焼き戻し脆性	低合金鋼		
2. 疲労	2.1 溶存酸素下における疲労強度の低下	炭素鋼		
	2.2 溶存水素下における疲労強度の低下	オーステナイト系ステンレス鋼		
3. 照射劣化	3.1(1) 破壊靱性の低下	低合金鋼		
	3.1(2) 破壊靱性の低下	オーステナイト系ステンレス鋼		
	3.2 水素による照射脆化の促進	低合金鋼、オーステナイト系ステンレス 鋼、マルテンサイト系ステンレス鋼、 ニッケル基合金		
	3.3 γ - α 相変態による脆化	オーステナイト系ステンレス鋼		
4. クリーブ	4.1 照射下クリープ	オーステナイト系ステンレス鋼、 ニッケル基合金		
5. 腐食及び水素損傷	5.3 照射による水素脆化の促進	低合金鋼		
	5.4 超多量(スーパーアバンドント)空孔と水素の作用による物質拡散加速と組織変化の促進による経年劣化	オーステナイト系ステンレス鋼、 ニッケル基合金		
6. 照射誘起応力腐食割れ	6.1 窒素の核変換による生成炭素による照射誘起鋭敏化	オーステナイト系ステンレス鋼		
	6.2 窒素の核変換による生成水素による腐食並びに応力腐食割れの加速			
	6.3 核変換ヘリウムによる応力腐食割れの加速			
	6.4 照射下応力緩和			
7. 応力腐食割れ	7.1 動的ひずみ時効による応力腐食割れの促進	低合金鋼、炭素鋼		
	7.2(1) 異材継ぎ手部の応力腐食割れ-PWR-	オーステナイト系ステンレス鋼、 ニッケル基合金と低合金鋼継ぎ手		
(6. 照射誘起応力腐食割れ以外)	7.2(2) 異材継ぎ手部の応力腐食割れ-BWR-	オーステナイト系ステンレス鋼、 ニッケル基合金と低合金鋼継ぎ手		
	7.3 冷間加工(機械加工含む)による応力腐食割れの促進	オーステナイト系ステンレス鋼、 ニッケル基合金とそれらの溶接金属		
	7.4 温度及び腐食電位の過渡的变化による応力腐食割れの促進			
	7.5 ひずみ履歴による応力腐食割れの促進			
	7.6 水素加速酸化現象に起因する腐食並びに応力腐食割れの加速			
	7.7 ビーニングによる圧縮残留応力の長期信頼性			
	7.8 応力腐食割れ発生における酸化局在化劣化事象			
	7.9 リップルストレスによる応力腐食割れの促進			
	7.10 照射、表面研削及び表面残留応力による応力腐食割れ発生促進			
	7.11 熟時効による応力腐食割れ進展の促進			
	8. 破壊		8.1 低温き裂進展	ニッケル基合金と溶接金属
			8.2 環境中急速破壊	低合金鋼、オーステナイト系ステンレス 鋼、ニッケル基合金と溶接金属

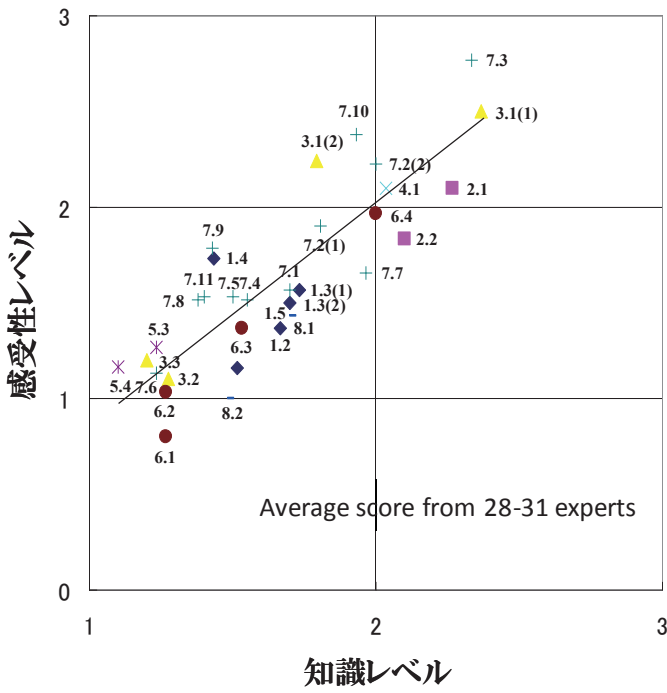


図 2 各経年劣化事象に対する感受性レベル及び知識レベルの平均点数のプロット

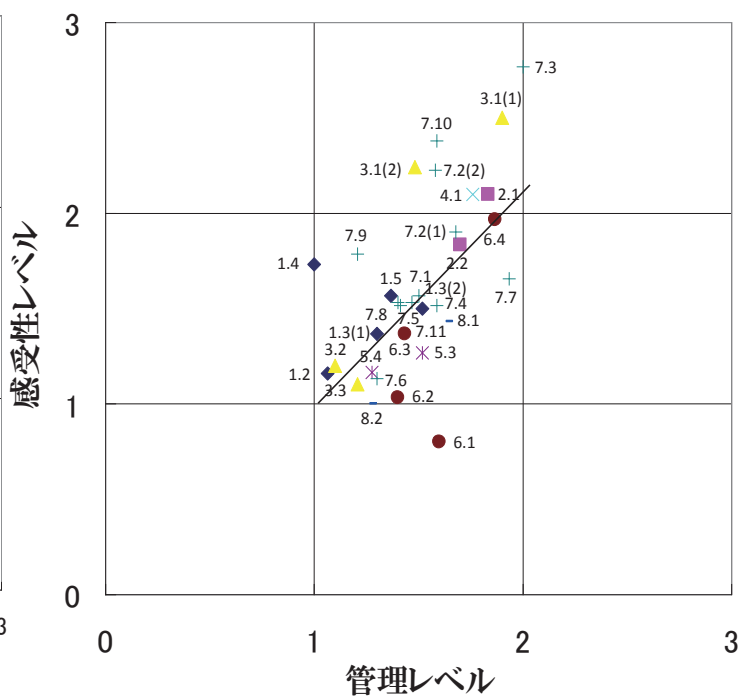


図 3 各経年劣化事象に対する感受性レベルと管理レベルの平均点数のプロット

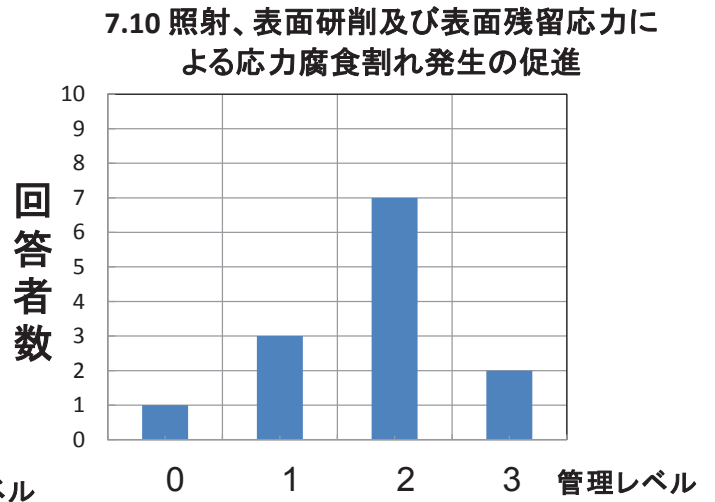
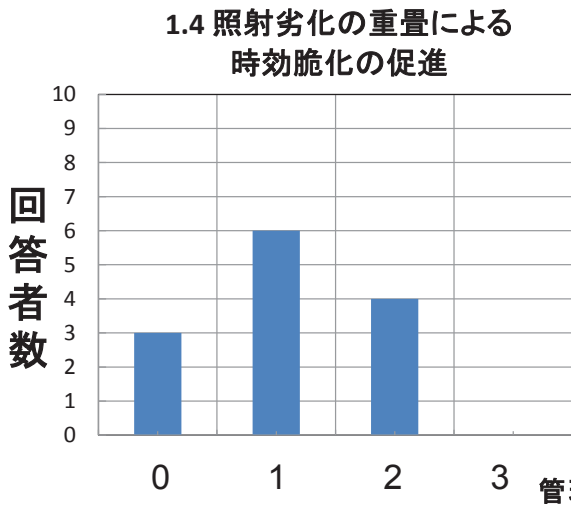


図 4 2つの劣化事象に対する管理レベル点数の頻度グラフ

6.1 窒素の核変換による生成炭素による照射誘起鋭敏化

7.3 冷間加工(機械加工含む)による応力腐食割れの促進

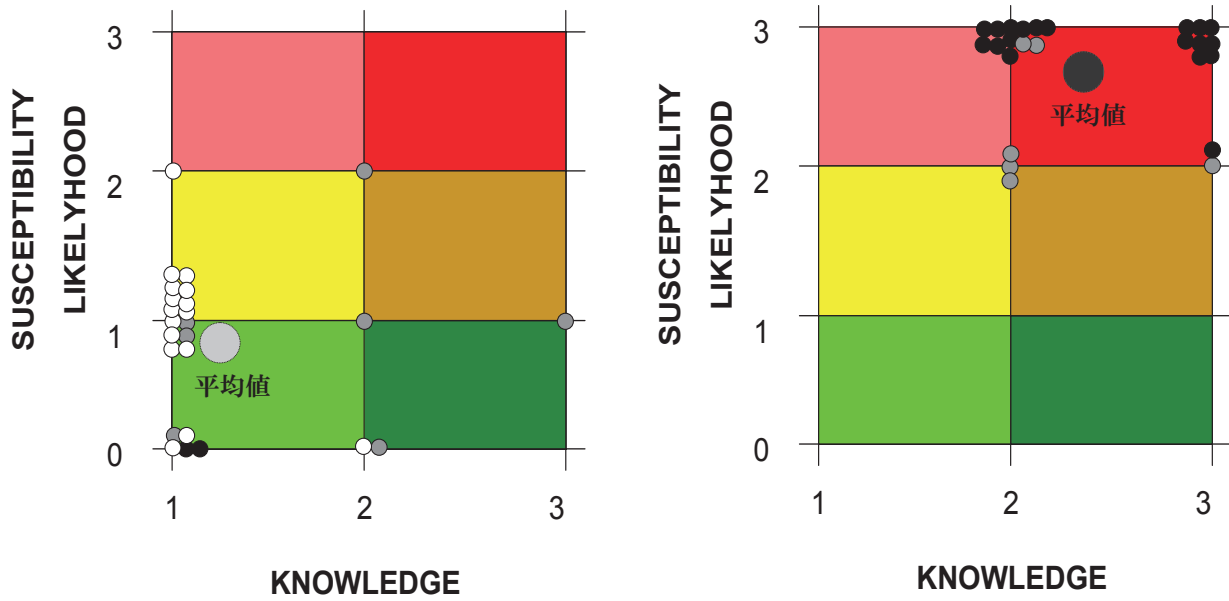
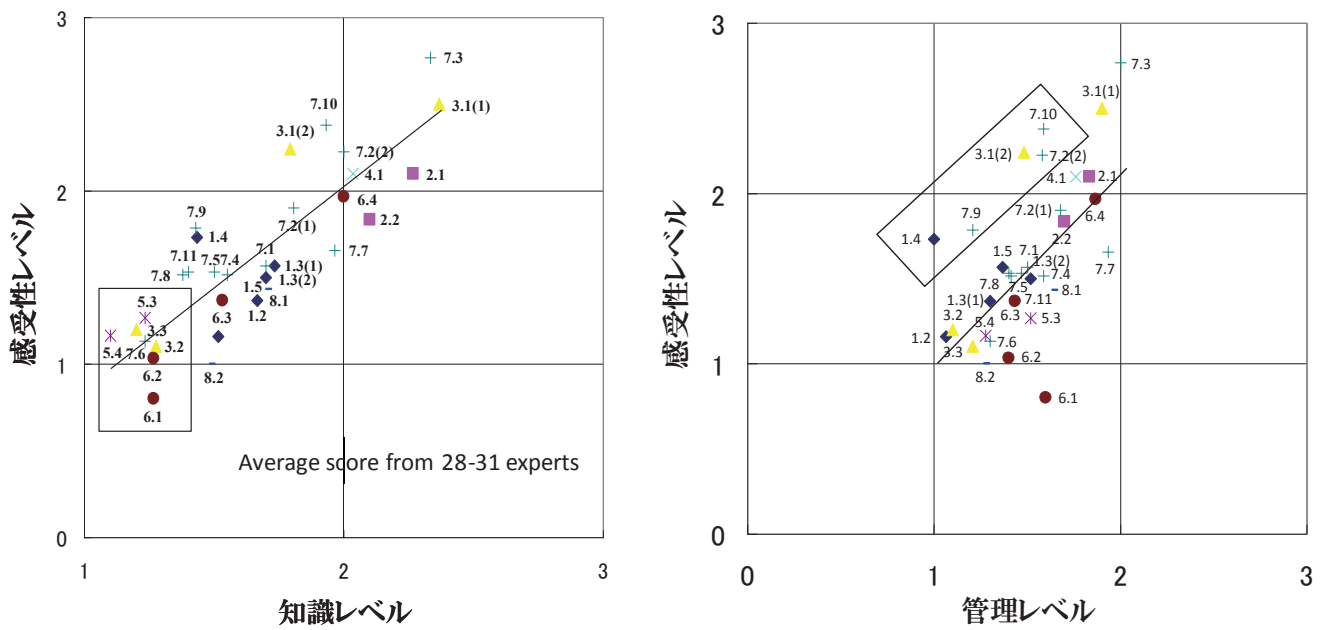


図5 各専門家のスコア付け結果例



(1) 感受性レベル及び知識レベルともに低い領域にプロットされた潜在劣化事象例

(2) 管理レベルに対して感受性レベルが比較的高い領域にプロットされた潜在劣化事象の評価例

図6 提起された潜在劣化事象の評価例

研究代表者 庄子哲雄

平成25年度プロアクティブ専門家会議

- 専門家50名に委嘱（海外20名、国内30名）
- プロアクティブ潜在事象の抽出手法の検討
- 新たな潜在事象、未経験事象の抽出
- PIRT (Phenomena Identification Ranking Table) によるスコアリング

平成25年度国内検討会

- 専門家14名に委嘱
- 抽出されたプロアクティブ潜在事象について規制基準への反映の観点での優先順位の検討
- 潜在劣化事象の発現可能性評価
- PIRT管理レベル内容の検討

PMDM/LTOに関する国際シンポジウム

- 情報の発信・共有化

氏名	所属
主査 渡邊 豊	東北大学
菅野真紀	(独) 原子力安全基盤機構
鈴木俊一	東京電力
田中秀夫	関西電力
新井 拓	電力中央研究所
朝田誠治	MHI
梶田祐貴	東芝
平野 隆	IHI
藤森治男	日立GE
越石正人	NFD
滝沢真之	三菱総合研究所
青木孝行	東北大学
竹田陽一	東北大学
国谷治郎	東北大学
オブザーバー	
庄子哲雄	東北大学

附図 プロアクティブ潜在事象評価研究の実施体制と国内検討会委員

附表 平成25年度プロアクティブ専門家会議委嘱委員一覧

- Dr. Karen Gott (Consultant)
- Dr. Gabriel Ilevhave (EPRI)
- Dr. Jean-Paul Massoud (EdF SEPTEN)
- Dr. Peter Andresen (GE CRD)
- Prof. Hannu Hamminen (Helsinki U. of Tech.)
- Dr. Armin Roth (AREVA)
- Prof. Il-Soon Hwang (SNU)
- Prof. En-Hou Han (IMR)
- Dr. Stephen Bruemmer (PNNL)
- Dr. Robert Tregoning (NRC)
- Prof. Philippe Marcus (ENSCP)
- Prof. Tim Burstein (U. Cambridge)
- Dr. Damien Feron (CEA)
- Dr. Ren Ai (SNPI)
- Prof. Z. P. Lu (Shanghai U)
- Dr. Tsung-Kuang Yeh (National Tsing Hua U.)
- Dr. Pal Efsing
- Dr. Leonard Bond (CNDE, ISU)
- Prof. M. Grace Burke (U. of Manchester)
- Dr. Jeremy T. Busby (ORNL)
- Mr. Yasushi Morishita (NRA)
- Prof. Naoto Sekimura (U.Tokyo)
- Mr. Masanori Kanno, Masakuni Koyama (JNES)
- Dr. Takayuki Aoki (JSM)
- Dr. Shunichi Suzuki (TEPCO)
- Mr. Hideo Tanaka (KEPCO)
- Mr. Hiroyoshi Murakami (JAPCO)
- Mr. Kunihiro Kobayashi (Tohoku-epco)
- Dr. Seiji Asada, Mr. Takaaki Kobayashi (MHI)
- Dr. Haruo Fujimori (Hitachi-GE)
- Mr. Masato Koshiishi (NFD)
- Dr. Koji Arioka, Dr. Koji Fukuya (INSS)
- Mr. Mikiro Ito (Toshiba)
- Dr. Fumio Inada, Dr. Taku Arai (CREPRI)
- Prof. Yoshimichi Ohki (Waseda U.)
- Prof. Yoshinori Kitsutaka (Tokyo Metropolitan U.)
- Prof. Hirozo Mihashi (Tohoku Institute of Technology)
- Dr. Kunio Onizawa (JAEA)
- Mr. Takashi Hirano (IHI)
- Mr. Masayuki Takizawa (MRI)
- Prof. Tetsuo Shoji (Tohoku U)
- Prof. Tatsuo Kondo (Emeritus, Tohoku U)
- Prof. Yutaka Watanabe (Tohoku U)
- Associate Prof. Makoto Takahashi (Tohoku U)
- Assistant Prof. Yoichi Takeda (Tohoku U)
- Visiting Prof. Jiro Kuniya (Tohoku U)

50 experts