PIRT 手法を用いた研究課題抽出手法の検討

青木 孝行^{1,*}, 高木 敏行¹, 古村 一郎²,
古川 敬², 遊佐 訓孝³, 浦山 良一¹

Study of a Methodology of Identifying Important Research Problems by the PIRT Process

Takayuki AOKI^{1,*}, Toshiyuki TAKAGI¹, Ichiro KOMURA²,
Takashi FURUKAWA², Noritaka YUSA³ and Ryoichi URAYAMA¹

¹*Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*

²*Japan Power Engineering and Inspection Corporation, KDX Shibadaimon Bldg. 3FL.,
2-10-12 Shiba-daimon, Minato-ku, Tokyo 105-0012, Japan*

³*Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University,
6-6-01-2 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan*

(Received March 6, 2013; accepted in revised form May 7, 2013; published online June 27, 2013)

In this paper, we propose a new methodology of identifying important research problems to be solved to improve the performance of some specific scientific technologies by the phenomena identification and ranking table (PIRT) process, which has been used as a methodology for demonstrating the validity of the best estimate simulation codes in USNRC licensing of nuclear power plants. It keeps the fundamental concepts of the original PIRT process but makes it possible to identify important factors affecting the performance of the technologies from the viewpoint of the figure of merit and problems associated with them, which need to be solved to improve the performance. Also in this paper, we demonstrate the effectiveness of the developed method by showing a specific example of the application to physical events or phenomena in objects having fatigue or SCC crack(s) under ultrasonic testing and eddy current testing.

KEYWORDS: *PIRT, inspection, ultrasonic testing, eddy current testing, fatigue, SCC, crack detection, crack sizing, accuracy, influential factor*

I. 緒 言

世の中に存在する人工構造物はいかなるものでも多かれ少なかれ、時間の経過とともに経年劣化が生じ、その機能が徐々に低下する。その中で経年劣化が高じると、許容できない機能喪失が生じる可能性のある場合は、その人工構造物が機能喪失すると考えられる時点よりも十分前に検査あるいはモニタリングを実施し、その時点での状態を把握するとともに、検査結果を用いて経年劣化の進展を評価、予測し、機能喪失が発生しないように経年劣化を管理する必要がある。したがって、ここで用いる検査あるいはモニタリング技術は当該人工構造物が機能喪失した場合にもたらされる結果が人命や社会、環境に悪影響を与えるような場合には、非常に重要な役割をもつことになり、高い検査

精度が要求されることになる。

このような要請に応えるため、検査・モニタリング技術は常に検査精度向上に向けて研究あるいは技術開発されている。しかしながら、検査精度向上のための課題や研究テーマの抽出は、個々の研究者や技術開発者に任されているのが現状であるといっても過言ではない。その結果として具体的な研究開発の内容と現場ニーズとの間に乖離がある場合が散見される。これは大学等の現場から遠い研究機関で研究課題を設定する場合に生じることが多い。近年の産学連携積極化の流れに伴い、ニーズとシーズをマッチングさせる試みも数多くなされるようになってきたが、両者の視点には依然として少なからぬ差異がある。利用可能な資源が限定されている今日の研究開発環境の中において、客観性の高い方法で適切な研究課題を設定できるようにすることは極めて重要である。

以上のような背景を踏まえ、本報においては、PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)に基づく新しい研究課題抽出手法を提案する。PIRT 自体は、後述す

¹ 東北大学 流体科学研究所

² (一財)発電設備技術検査協会

³ 東北大学 工学研究科量子エネルギー工学専攻

* Corresponding author, E-mail: aoki@wert.ifs.tohoku.ac.jp

るように、原子力発電所の許認可手続きにおける最適評価コードの妥当性を証明する方法として開発されたものであり、大規模かつ複雑なシステムにおける各種の事象に影響を与えるパラメータの抽出、それらが事象に与える影響度合いや知識レベルの定量化、およびそれらに基づく最適評価コードの妥当性確認に実績を有するものである。本報において提案する新しい手法は、PIRT 自体の基本的考え方を維持しつつ、問題意識を立脚点として着目すべき視点(あるいは着目変数)を明確にし、その視点から検討対象の中で生じている一連の物理現象をシナリオ化することにより、その視点に影響を与える因子を網羅的に抽出し、それら影響因子に関連する重要研究課題の抽出を可能にすることをその特徴とする。以下に本手法の概要を説明するとともに、当該手法を用いて非破壊検査の検査精度に影響を与える因子を体系的に抽出し、検査精度向上のために必要な重要研究課題を抽出するという具体例を通じて、その有効性を示す。

II. PIRT 手法の適用

PIRT の検討手順は、原子力発電所の許認可手続きにおいて最適評価コードを使用するに当たり、その妥当性を証明する方法として体系的かつ文書化された方法として開発されたものである¹⁾。また、我が国では、発電用軽水型原子炉施設の運転時の異常な過渡変化および事故の統計的安全評価を実施する場合の具体的手順ならびにこの評価に適用する最適評価コードの要件および管理方法を規定した実

施基準²⁾の付属書として、この PIRT の作成手順と関連事項が収録されている。

まず、原子炉安全解析に用いられる解析コードの予測精度あるいは妥当性の検証や試験検証の必要な事項の抽出等のために従来から用いられている PIRT の代表的な検討手順を整理して **Fig. 1** に示す^{3,4)}。

この検討手順の各ステップにおける実施内容は整理して示すと、下記ようになる。

(1) ステップ 1(Define problem or issue)

PIRT の実施に当たっての最初のステップは検討の問題あるいは論点を明確にすることである。例えば、新型炉を開発する際に原子炉系機器の安全性能の妥当性を確認するための試験プログラムを開発する必要がある場合、その妥当性確認のための試験プログラム開発が PIRT 検討の問題あるいは論点となる。

(2) ステップ 2(Define PIRT objectives)

次は PIRT 検討の目的を明確にするステップである。目的は PIRT をどう使用するかに強く依存する。PIRT の第一の役割は重要な系統、機器、プロセスおよび現象を抽出するため、プラント挙動を明確にすることであり、原子炉安全解析に関連する試験、解析コードの開発および解析コードの不確かさに対して問題解決のガイドを与えてくれることである。したがって、このステップでは、これらに関連する問題を解決するために実施すべき事項を明確にすることがその目的となる。例えば、新型炉の設計認証を得るために必要な知識レベルを獲得するための調査研究内

Fig. 1 Illustration of typical application on the PIRT process

容を明確にすることである。

(3) ステップ3(Define potential plant designs or events)

対象となる原子炉施設を構成する空間領域を設定するのがこのステップである。検討対象の空間領域は関心のあるプラント挙動において重要な役割を果たすシステムあるいはサブシステムを明確にするため、後続のステップで検討する事象シナリオの選定と関連付けねばならない。また、検討対象の空間領域で生じる事象およびその過程は対象システムに大きく依存することから、一般的なシステムを対象とする場合は具体的、定量的議論が困難になるという問題が生じ得る。このため、PIRT検討においては対象をある程度限定する必要がある。例えば、新型炉の開発において未知の現象が生じる可能性のある空間的範囲をシステムあるいはサブシステムとする場合、あるいは機器に絞った範囲とする場合がある。

(4) ステップ4(Define potential scenarios)

対象とするシステムで生じている事象のシナリオ(進展過程)あるいはその事象の中で生じている現象を記述する。この事象/現象の重要性は想定するシナリオに依存するので注意が必要である。ここでいう事象/現象とは、例えば、新型炉の開発において安全上最も大きな脅威をもたらすであろう外部電源喪失や冷却材漏えいなどによって対象システムに発生する事象/現象であり、ここではそのシナリオを明確にする。

(5) ステップ5(Define parameter(s) of interest (Figure(s) of merit))

このステップでは、上記のステップ1~4において明確にされた目的、システム、シナリオ等をエキスパートパネルの共通認識とした後、関心のあるパラメータ(着目変数 Figure of merit)を明確にする。この着目変数は関心のあるプラント挙動における事象/現象の重要性を判断するために使用される主要な評価基準である。例えば、燃料被覆管ピーク温度(PCT)や水素発生への制限に関する規制上の安全要求事項などがそれである。

(6) ステップ6(Identify, obtain & review all available experimental & analytical data)

既存の試験データ、解析データなどの関連情報を収集、整理し、レビューする。

(7) ステップ7(Define high level basic system process)

システムの高位のプロセス/事象(例えば、Depressurization, Inventory reduction, Short-term dynamic core cooling など)を明確にすることから始めることが推奨されている。

(8) ステップ8(Partition scenario into convenient time phases)

(9) ステップ9(Partition plant design into components (subsystems))

ステップ8, 9において主要なプロセス/事象が大きく変化しないように、そのシナリオをいくつかの時間フェーズに分割し、また、システムをいくつかの機器あるいはサブシステムに分けて、いくつかの重要な現象を空間的に区分けできるようにする。これによって、時間と空間のゾーンのマトリックスを作り出し、その中ですべての発生する可能性の高い現象とプロセスが確認される。

(10) ステップ10(Identify plausible phenomena by phase & component)

ステップ8, 9を踏まえ、時間フェーズと機器ごとに妥当と思われる現象を明確にする。

(11) ステップ11(Develop ranking of component & phenomena relative importance)

(12) ステップ12(Apply AHP to determine phenomena relative importance)

(13) ステップ13(Review AHP results; modify if required)

ステップ11~13において、着目変数の観点から対象とするシステム内で生じている各現象の重要度付けを行う。現象の相対的重要度を決定するため、階層化意思決定法(AHP: Analytic Hierarchy Process)を適用してもよい。また、AHPを適用した結果をレビューし、必要に応じて修正する。

(14) ステップ14(Perform selected PIRT confirmation sensitivity studies)

Figure 1の矢印で示されているように、各ステップ間の検討プロセスは相互に行ったり来たりしながらエキスパートパネルで繰り返し検討する。

(15) ステップ15(Finalize and document PIRT for subject scenarios & plant designs)

検討シナリオとプラント設計のためのPIRTを最終化し、文書化する。

上記の手順からわかるように、PIRTは標準化された手順に従って複数のエキスパートが意見交換しながら各ステップの検討を進め、しかもその検討プロセスに沿って実施した検討の内容が文書化された形で残るので、その検討過程や評価・判断に用いたデータ、根拠などを、後日、再チェックしたり、検証したりすることが可能であるという客観性の高い検討手法を採用している。したがって、この検討手法はすでに実績のある原子炉施設の事故事象等への適用に限定されるものではなく、実際に発生する事象であれば他の事象にも適用できると考えられる。

III. PIRT 手法を用いた研究課題抽出法

本章においては、前述のPIRT手法を用いて既存技術の高度化を図るために必要な研究課題の抽出手法を検討、提案するとともに、その検討手順を具体例とともに示す。具体例として取り上げるテーマは原子力プラントに適用される非破壊検査技術の精度向上のために必要な重要研究課

題の抽出である。すなわち、非破壊検査時に被検体内で発生している事象に着目し、その事象の中で生じる現象や検査精度に影響を与える因子を体系的に抽出整理するとともに、各影響因子について検査精度向上のために必要な課題を抽出し、その重要度等をランク付けすることである。

以下、本研究において提案する手法を、前章において述べた一般的な PIRT 検討手順の各ステップと対応させて、その実施結果を説明する。なお、本検討は産業界および大学・研究機関からそれぞれ10名以上の専門家を招聘し、エキスパートパネルを開催することにより、PIRT 手順に沿って各ステップごとに検討、審議を進めた。

本検討における具体的検討手順を以下に説明する (Fig. 2)。

(1) ステップ 1 (Define Issue)

このステップは検討する問題/論点を定義するステップであるが、本検討では疲労割れまたは応力腐食割れを検出するための非破壊検査の性能 (検出可否およびサイジング精度) に影響を与える影響因子のうち、重要度が高い因子は何か、その中で十分な知見が得られていないものはどれか、それが検査性能に与える影響の大きさはどの程度か、が問題あるいは論点であると定義した。なお、非破壊検査に影響を与える因子として、検査員、検査要領書あるいは

検査の自動/手動の違いなどが考えられるが、本検討の目的は非破壊検査性能に関する課題を抽出することであるので、ここでは純粋に被検体内の物理現象に注目して検討を進めることとし、検査員の技量および検査装置性能は検討対象外とした。

(2) ステップ 2 (Define Objective)

このステップは PIRT を作成する目的を明確にするステップであるが、本検討では疲労割れまたは応力腐食割れを検出するための非破壊検査の性能に影響を与える重要な影響因子を明確にし、それらの影響因子について検査精度向上のために必要な重要課題を抽出してその重要度等をランク付けすることを目的と定めた。

(3) ステップ 3 (Define potential conditions of material to be tested)

このステップは前述の II 章において述べた一般的な PIRT では、検討対象とする原子炉施設のシステムを明確にするとしているが、本検討ではシステム内で生じる事象/現象ではなく、非破壊検査技術で疲労割れを探傷する探傷原理、すなわち非破壊検査技術が活用している物理現象と疲労割れとの相互作用等の事象/現象が発生している被検体の空間的範囲と考え、想定すべき被検体の空間的範囲を明確にした。

Fig. 2 Steps of the PIRT process in this study

具体的には、検討対象である疲労割れまたは応力腐食割れの発生する原子力発電所の耐圧機器の被検査部位である下記を想定することとした。ただし、寸法自体は検討対象を具体的にイメージするために設定したものであり、今後想定する範囲を拡大することは可能である。また、探傷面側に疲労割れまたは応力腐食割れが想定される場合には基本的に寸法に起因する制限はない。

(a) 材 料

オーステナイト系ステンレス鋼, ステンレス鋳鋼, ニッケル基合金, 低合金鋼

(b) 寸 法

管状機器：

小口径 外径 38.04 mm, 肉厚 11.4 mm

(PWR : BMI ハウジング)

外径 50.4 mm, 肉厚 6 mm

(BWR : ICM ハウジング)

大口径 外径 882 mm, 肉厚 74.6 mm

(PWR : 主ループ配管および溶接部)

外径 609.6 mm, 肉厚 33.0 mm

(BWR : 原子炉再循環系配管および溶接部)

その他 : BWR 原子炉圧力容器の胴板および内面クラッド (低合金鋼およびクラッド, 厚さ約 160~170 mm), ノズルコーナ部 (PWR は原子炉容器内面側からの探傷)

機器に発生する疲労割れまたは応力腐食割れと探触子との相対位置関係は、原子炉冷却材が接液する金属表面で発生する疲労割れまたは応力腐食割れを想定しており、基本的に次に示す 2 ケースを考える。(Fig. 3)

- a) 探傷面は外面 (外面の不連続形状の有無) + 内面側に疲労割れまたは応力腐食割れ (内面の形状不連続の有無)
- b) 探傷面は内面 (内面の不連続形状の有無) + 内面側に疲労割れまたは応力腐食割れ

(4) ステップ 4(Define potential scenarios)

このステップは前述の II 章において述べた一般的な PIRT では、対象とするシステムで生じている現象 (Phenomena) を記述するとしているが、本検討では被検体の中で生じている事象のシナリオ (進展過程) あるいはその事象の中で生じている現象を記述することと解釈し、非

破壊検査信号の発信から受信までに検査機器および被検体内でどのような物理現象が発生しているか時間軸に沿った分解を行った。例えば、被検体である機器に超音波がどのように入射され、どのように伝搬するか、疲労割れまたは応力腐食割れでどのように反射あるいは透過するか、き裂の性状が超音波の伝搬過程にどのような影響を与えるか、などである。

超音波探傷検査と渦電流探傷検査に関する検討結果を、それぞれ Tables 1, 2 に示す。

(5) ステップ 5(Define parameters of interest)

このステップは関心のあるパラメータ (着目変数 Figure of merit) を明確にするステップであり、前述の II 章において述べた一般的な PIRT では、関心のあるプラント挙動における事象/現象の重要性を判断するために使用される主要な評価基準を明確にするとしているが、本検討では検査精度に影響を与える因子を抽出し、精度向上のために必要な重要課題を抽出することを目的としているため、下記であると考えた。

- ・ 検出性 (疲労割れまたは応力腐食割れの検出可否および位置検出精度)
- ・ サイジング性 (疲労割れまたは応力腐食割れのサイジング可否および深さ/長さのサイジング精度)

(6) ステップ 6(Identify, obtain & review all available experimental & analytical data)

このステップは、既存の試験データ、解析データなどの関連情報を収集、整理し、レビューするステップであるが、本検討では事前調査、専門家から超音波探傷検査および渦電流探傷検査に関する情報収集により、各種データを収集、整理した。超音波探傷検査に関する結果の一例を Table 3 に示す。

(7) ステップ 7(Define high level basic system process)

このステップは前述の II 章において述べた一般的な PIRT では、システムの高位のプロセス/事象を明確にするとしているが、本検討の対象はプラントシステム内で生じる複雑な事象/現象ではなく、比較的単純な被検体内の探傷に関わる事象/現象であるので、このステップの検討は不要と考えた。

Fig. 3 Relative position between scanning surface and probe

Table 1 Potential scenario and influential factors in ultrasonic testing phenomena

事象/現象のシナリオ/シーン	影 響 因 子 ^{a)}
A. 探傷器 (探傷波形の印加)	①印加電圧 ②励振波形 (インピーダンスの影響等) ③特殊励振方式
B. 超音波の発生	①探触子の中心周波数 ②探触子の周波数帯域 (波形特性) ③探触子寸法 ④探触子タイプ/フォーカス ⑤超音波のモード (縦波・横波 (SH 波, SV 波)) ⑥超音波の屈折角 (き裂への入射角)
C. 超音波の被検体への入射	①接触媒質 ②被検体表面の凹凸および表面粗さ
D. 被検体健全部における入射波の伝搬	①被検体材質の超音波特性 (音速・減衰・拡散特性 (結晶粒度・析出物等依存性)) ②超音波の直進性 (被検体内の不均質性・異方性)
E. 疲労き裂面およびき裂先端近傍における入射波の反射・回折・透過特性	①き裂位置 ②き裂寸法 ③き裂の 2 次元形状 ④き裂性状 (き裂面およびき裂先端部近傍の凹凸・ファセット寸法・分岐) ⑤き裂内物質の状態 (腐食生成物の有無, 疎密) ⑥き裂の閉口状態 (密着性) とその分布 ⑦き裂の方向 (角度) ⑧入射波の反射率, 透過率
F. 被検体底面での入射波の反射, 透過	①底面の形状不連続・溶接部境界 ②底面の表面粗さ, 腐食等
G. 被検体内での反射波の伝搬	(D に同じ)
H. 反射波の探触子内への伝搬	(C に同じ)
I. 探傷器 (探傷信号の受信)	①受信回路のフィルター機能・特性

^{a)} 本検討では, 探傷に関わる物理現象に着目しているため, 個人の技量や手順に関する項目は挙げていない。

(8) ステップ8(Partition scenario into convenient time phases)

(9) ステップ9(Partition plant design into components (subsystems))

前述の II 章において述べた一般的な PIRT のステップ 8, 9 は, プラントシステム内で生じる事象/現象を空間的, 時間的に分割, 区分するとしているが, 本検討の対象は比較的単純な被検体内の探傷に関わる事象/現象であるので, このステップの検討は不要と考えた。

(10) ステップ10(Identify plausible phenomena by phase & component)

このステップは, ステップ 8, 9 を踏まえ, 時間フェーズと機器ごとに妥当と思われる現象を明確にするステップである。本検討ではステップ 6 までの調査, 検討を踏まえて, 想定される事象/現象を同定することとした。すなわち, 超音波探傷検査および渦電流探傷検査について, ステップ 4 で検討したシナリオに基づき, どのような事象/現象が発生, 進行するか可能性が高いか検討した。具体的には, 発生, 進展すると考えられる事象/現象を想定し, それに影響を与える主要な因子 (影響因子) を明確にするとともに, その影響因子がステップ 5 で検討した着目変数にどのような影響を与えるか, について検討した。超音波

探傷検査に関する検討結果の一例を Table 4 の「事象/現象のシナリオ/シーン」「影響因子」および「影響説明」の欄に示す。

なお, 本ステップで抽出された事象/現象および影響因子の妥当性を検証する意味で, ENIQ (European Network for Inspection and Qualification) が発行している報告書⁵⁾に記載されている超音波探傷検査と渦電流探傷検査の影響/エッセンシャル・パラメータと比較した。その結果, 本研究において検討対象外とした検査員の技量および検査装置性能に関連する因子を除き, 本研究で抽出された因子は ENIQ にリストされているパラメータにほぼ一致することを確認した。

(11) ステップ11(Develop ranking of component & phenomena importance)

(12) ステップ12(Apply AHP to determine phenomena relative importance)

(13) ステップ13(Review AHP results; modify if required)

前述の II 章において述べた一般的な PIRT のステップ 11~13 は, 着目変数の観点から対象とするシステム内で生じている現象の重要度付けを行い, 必要に応じて階層化意思決定法 (AHP: Analytic Hierarchy Process) を適用

Table 2 Potential scenario and influential factors in eddy current testing phenomena

現象シナリオ/シーン	影 響 因 子 ^{a)}
A. 励磁電流の発生と励磁コイルへの供給	①励磁電圧強度・励磁電流強度 ②周波数(単一周波数励磁の場合) ③励磁周波数の数(複数周波数励磁の場合) ④特殊励磁(矩形波, パルス波など)
B. 励磁コイルによる変動磁場の発生	①励磁コイル形状(矩形, 円形など) ②励磁コイルの大きさ ③励磁コイル巻数 ④励磁コイル配置(対向/垂直) ⑤励磁コイルリフトオフ ⑥励磁コイル構成(アレイ化など)
C. 健全部における渦電流の誘起	①電磁氣的均一性(母材) ②溶接の有無 ③表面粗さ ④表面形状(うねり・凹凸) ⑤酸化被膜 ⑥スケール ⑦表面曲率半径
D. き裂による渦電流の乱れ	①き裂寸法 ②き裂の2次元形状 ③き裂3次元性状(き裂面の3次元形状, ファセット寸法・分岐) ④き裂周辺の応力状態(分布, 大きさ) ⑤き裂内物質の状態(腐食生成物の有無, 疎密) ⑥き裂の閉口状態(密着性)とその分布 ⑦き裂の方向(角度) ⑧き裂の発生・進展に伴う母材の電磁特性の変化
E. 乱れた渦電流が生じる磁場の変動	—
F. 変動磁場の検出	①磁場の検出方式(サーチコイル, 磁気センサー) ②検出コイル形状(矩形, 円形など) ③検出コイルの大きさ ④検出コイル巻き線数 ⑤磁場検出成分 ⑥検出コイルリフトオフ ⑦検出方式(単一方式/自己比較方式/標準比較方式) ⑧検出コイル構成(アレイ化など) ⑨検出対象磁場

^{a)} 本検討では, 探傷に関わる物理現象に着目しているため, 個人の技量や手順に関する項目は挙げていない。

し, その結果を反映するとしているが, 本検討では被検体内で生じている事象/現象から非破壊検査性能に影響を与える因子に関連して抽出された課題に対してエキスパートパネルに参加した各専門家がその重要度をランク付けすることとし, AHPの適用は不要と考えた。

前述のステップ10の検討結果を踏まえ, 各課題に対してその影響の大きさの観点から「重要度」をランク付けした。超音波探傷検査に関する評価結果の一例を Table 4 に示す。なお, 重要度ランキングの判断に当たっては, Table 5 に示す基準を用いた。

(14) ステップ11'(Develop ranking of knowledge level)

このステップは前述のⅡ章において述べた一般的な PIRT に明確な記載はないが, 本検討の目的が非破壊検査の性能に影響を与える重要な影響因子を明確にし, それら

の影響因子について検査精度向上のために必要な重要課題を抽出することであることから, 重要課題に関する現状の「知識レベル」がどの程度であるかを評価することは重要と考え, 知識の多寡の観点から「知識レベル」をランク付けした。本ステップは, 新型炉の設計認証を得るために必要な知識レベルを獲得するための調査研究内容を明確にするという先行例においても実行されている⁴⁾。超音波探傷検査に関する評価結果の一例を Table 4 の「重要度」および「知識レベル」の欄に示す。なお, 知識レベルランキングの判断に当たっては, Table 6 に示す基準を用いた。

(15) ステップ11''(Develop ranking of self-confidence)

このステップは, ステップ11'と同様, 前述のⅡ章において述べた一般的な PIRT に明確な記載はないが, エキスパートパネルに参加した各専門家が自身でランク付けし

Table 3 Various data on accuracy of ultrasonic testing (Example)

影響因子 (Phenomena)		E-⑤: き裂内物質の状態 (腐食生成物の有無, 疎密)
対 象		検出性への影響
影響因子に対する現状認識 ・影響のメカニズム ・現状の評価		<ul style="list-style-type: none"> 環境疲労等で発生・伝搬するき裂に関して腐食生成物等の化学的物性・特性[1]はわかっている場合もあるが, 超音波の伝搬に影響する物理的状態・特性は明らかになっていない。 き裂内の腐食生成物の有無や疎密により, 超音波エコーが発生せず透過する現象は, き裂の過小評価や見逃しを引き起こす要因となり得るため, その評価法の確立が重要である。 き裂内への酸化膜生成の検出性への影響やその対策に関する研究事例は一部しかない[2]。
	重要度	評価: H 根拠: 評価手法を確立しなければ, き裂検出において見逃しを引き起こす可能性がある。
	知 識	評価: U 根拠: 検出性に対するき裂内物質の状態の影響に関してはほとんど知見がない。
	確信度	評価: H
参考文献/注釈		[1] T. Terachi, K. Fujii, K. Arioka, "Microstructural characterization of SCC crack tip and oxide film for SUS 316 stainless steel in simulated PWR primary water at 320°C," <i>J. Nucl. Sci. Technol.</i> , 42 [2], 225-232 (2005). [2] S. Horinouchi, M. Ikeuchi, Y. Shintaku, Y. Ohara, K. Yamanaka, "Evaluation of closed stress corrosion cracks in Ni-based alloy weld metal using subharmonic phased array," <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , 51 , Jul., 07GB15-1-5 (2012).

Table 4 Effect of influential factors on accuracy of ultrasonic testing (Example)

事象/現象の シナリオ/ シーン	影響因子	検出性への影響			サイジングへの影響				
		影響説明	重要 度	知識 レベル	確 信 度	影響説明	重要 度	知識 レベル	確 信 度
E. 疲労き裂面 およびき裂 先端近傍に おける入射 波の反射・ 回折・透過 特性	⑤き裂内物 質の状態 (腐食生 成物の有 無,疎密)	環境疲労等で発生・伝搬するき裂に関して腐食生成物等の化学的物性・特性はわかっている場合もあるが、超音波の伝播に影響する物理的状態・特性は明らかになっていない。また超音波の伝播への影響もわずかの事例を除き明らかににはされていない。	H	U	H	き裂先端部近傍における影響は検出性の場合と同様あるいはそれ以上と考えられる。	H	U	H
	⑥き裂の閉 口 状 態 (密着性) とその分 布	き裂の周囲の応力状態(大きさと分布)によってはき裂の閉口状態を生ずる原因となり、検出性に及ぼす影響は大きい。探傷を実施する前に応力解析等により評価しておくことが必要。また、環境疲労等で発生・伝搬するき裂に関して、……。	H	U	H	残留応力等によるき裂の閉口がき裂先端近傍ほど大きい場合も有り、また環境疲労等で発生・伝搬するき裂に関して、腐食生成物等の密着性およびき裂の閉口状態の影響は……。	H	U	H
	⑦き裂の方 向(角度)	超音波の入射方向(探傷方向)と欠陥の方向性、あるいは探傷面や裏面に対する欠陥の発生・伝播方向(角度)は欠陥検出特性に影響するため、検査対象の応力状態等を事前に検討し……。	H	P	M	影響は検出性の場合と同様。	M	P	H

た前述の重要度と知識レベルに対する「確信度」をランク付けすることは重要と考え, 重要度と知識レベルの判定に対する確信度合の観点から「確信度」をランク付けした。超音波探傷検査に関する評価結果の一例を Table 4 の「確信度」の欄に示す。なお, 確信度ランキングの判断に当た

っては, Table 7 に示す基準を用いた。

(16) ステップ14(Perform selected PIRT confirmation sensitivity studies)

本検討でもエキスパートパネルにおいて Fig. 1 の矢印で示されているように, 各ステップ間の検討プロセスを相

Table 5 Criteria for ranking of importance

重要度ランク	サイジングの重要度の評価基準
H (High)	サイジングのための情報量を増加させる,あるいは減少させる観点で影響が大きい。(注目パラメータに支配的な影響を及ぼす現象)
M (Medium)	サイジングのための情報量を増加させる,あるいは減少させる観点で影響が比較的大きい。(注目パラメータに中程度の影響を及ぼす現象)
L (Low)	サイジングのための情報量を増加させる,あるいは減少させる観点で影響が小さい。(注目パラメータへの影響が小さい現象)

Table 6 Criteria for ranking of knowledge

知識レベルランク	知識レベルの評価基準
K (Known)	公開された論文・報告書に結果が報告されている。さらに,理論もしくは実験によりメカニズムがおおむね明らかにされている。
P (Partially known)	①公開された論文・報告書に結果が報告されている。しかし,理論もしくは実験によりメカニズムが明らかにされていない。 ②公開された論文・報告書がほとんどない。しかし,理論もしくは実験によりメカニズムがおおむね明らかにされている。
U (Unknown)	公開された論文・報告書がほとんどない。さらに,理論もしくは実験によりメカニズムが明らかにされていない。

互に行ったり来たりしながら検討を繰り返した。

(17) ステップ15(Finalize & document PIRT)

このステップは, 前ステップまでの検討で作成した資料を踏まえ, ランキング結果を整理するとともに, その結果を表1の3×3マトリックスの中に位置付けることによって, PIRT表を完成させるステップである。また, PIRT表から優先的に実施すべき課題を抽出するステップである。上記ステップ11, 11', 11''におけるランキング結果を集計し, PIRT表にまとめた。超音波探傷検査および渦電流探傷検査に関する結果をそれぞれ **Tables 8, 9** に示す。

また, PIRT表の中で分類された課題に対して, **Fig. 4** に示すように, 優先順位を6段階で付けることとした。優先順位は下記の考え方に基きき決定した。

Table 7 Criteria for ranking of confidence

確信度ランク	確信度の評価基準
H (High)	各専門家が重要度あるいは知識レベルの判定にある程度, 自信をもっており, かつ, その事について専門家間で意見がほぼ一致している。
M (Medium)	専門家の半数程度の意見は一致しているが, 異なる意見も相当数ある。
L (Low)	専門家の意見に大きなバラツキがみられる。

Table 8 Phenomena Identification and Ranking Table (Phenomena of ultrasonic testing)

	優先度		
	優先度 1	優先度 2	優先度 6
重 要 度	■A-③: 特殊励振方式の影響(検出性, サイジング精度)H ■E-③: き裂の2次元形状(サイジング精度)H ■E-④: き裂性状(検出性, サイジング精度)H ■E-⑤: き裂内物質の状態(腐食生成物の有無, 疎密)(検出性, サイジング精度)H ■E-⑥: き裂の閉口状態(密着性)とその分布(検出性, サイジング精度)H ■I-①: 受信回路のフィルター機能・特性(検出性, サイジング精度)H	■C-②: 被検体表面の凹凸および表面粗さ(検出性, サイジング精度)H ■D-①: 被検体材質の超音波特性(音速・減衰・拡散特性(結晶粒度・析出物等依存性))(サイジング精度)H ■D-②: 超音波の直進性(被検体内の不均質性・異方性)の影響(検出性, サイジング精度)H ■E-⑦: き裂の方向(角度)(検出性)M ■F-①: 底面の形状不連続(検出性, サイジング精度)M	■B-④: 探触子タイプ/フォーカス(検出性, サイジング精度)H
	優先度 2	優先度 3	優先度 6
		■B-①: 探触子の中心周波数(検出性, サイジング精度)H ■D-①: 被検体材質の超音波特性(音速・減衰・拡散特性(結晶粒度・析出物等依存性))(検出性)H ■その他	■A-①: 印加電圧(検出性, サイジング精度)H ■B-②: 探触子の周波数特性(波形特性)(サイジング精度)H ■B-⑤: 超音波のモード(縦波・横波(SV波, SH波))(検出性, サイジング精度)H
	優先度 4	優先度 5	優先度 6
		■E-③: き裂形状(検出性)H ■F-②: 底面の表面粗さ, 腐食等(検出性)H	■A-②: 励振波形(インピーダンスの影響等)(検出性, サイジング精度)H ■その他
	U	P	K
知 識 レ ベ ル			

Table 9 Phenomena Identification and Ranking Table (Phenomena of eddy current testing)

		優先順位 1	優先順位 2	優先順位 6
重 要 度	H	■A-③励磁周波数の数(検出性, 深さサイジング精度)H ■B-④励磁コイル配置(深さサイジング精度)H ■C-②溶接の有無(深さサイジング精度)M ■D-⑤き裂内物質の状態(深さサイジング精度)H ■F-⑤磁場検出成分(深さサイジング精度)H	■A-②周波数(深さサイジング精度)H ■B-④励磁コイル配置(長さサイジング精度)H ■B-⑤励磁コイルリフトオフ(長さ/深さサイジング精度)H ■C-③表面粗さ(深さサイジング精度)M ■F-⑤磁場検出成分(長さサイジング精度)H ■F-⑦検出方式(深さサイジング精度)H ■F-⑧検出コイル構成(深さサイジング精度)M	■A-②周波数(検出性) ■B-②励磁コイルの大きさ(検出性, 長さサイジング度) ■B-④励磁コイル配置(検出性) ■B-⑤励磁コイルリフトオフ(検出性) ■F-③検出コイルの大きさ(検出性, 長さサイジング) ■F-⑤磁場検出成分(検出性) ■その他
	M	■B-②励磁コイルの大きさ(深さサイジング精度)M ■D-②き裂の2次元形状形状(深さサイジング精度)M ■D-③き裂3次元性状性状(深さサイジング精度)H ■A-③励磁周波数の数(長さサイジング精度)M	■A-④特殊励磁(検出性, 長さ・深さサイジング精度) ■B-⑥励磁コイル構成(深さサイジング精度) ■C-①電磁氣的均一性(母材)(深さサイジング精度) ■その他	■A-①励磁電圧強度・励磁電流強度(検出性) ■D-①き裂寸法(検出性, 長さサイジング精度) ■D-⑥き裂の閉口状態とその分布(長さサイジング精度)
	L	■C-⑤酸化被膜(検出性, 長さサイジング, 深さサイジング精度) ■C-⑦表面曲率半径(深さサイジング精度) ■D-④き裂周辺の応力状態(深さサイジング精度) ■その他	■A-①励磁電圧強度・励磁電流強度(長さ/深さサイジング精度) ■A-②周波数(長さサイジング精度) ■B-①励磁コイル形状(検出性, 長さ/深さサイジング精度) ■その他	
		優先順位 4	優先順位 5	優先順位 6
		U	P	K
		知 識 レ ベ ル		

重 要 度	H	1	2	6
	M	2	3	6
	L	4	5	6
		U	P	K
		知 識 レ ベ ル		

▶重要度：

H: High
M: Medium
L: Low

▶知識レベル：

U: Unknown
P: Partially known
K: Known

▶優先度：

高：1→低：6

Fig. 4 Priority ranking for problem solution

(a) 重要度が高く(H), 知識レベルが低い(U)と評価されるものは最優先とする。(優先度1)

(b) 重要度が高く(H), 知識レベルが中程度(P)と評価

されるものは, 上記(a)の最優先事項に次ぐ優先度とすることとした。(優先度2)

(c) 同様に, 重要度が中程度(M), 知識レベルが低い

(U)と評価されるものも、上記(a)の最優先事項に次ぐ優先度とすることとした。(優先度 2)

(d) 重要度が中程度(M)、知識レベルも中程度(P)以下と評価されるものは、上記(b)(c)の優先度 2 に次ぐ優先度とすることとした。(優先度 3, 優先度 4 および優先度 5)

(e) 重要度に関わらず、知識レベルがすでに高い(K)と評価されるものは、優先的に研究する必要はないと考え、優先度を低くした。(優先度 6)

(f) なお、重要度が中程度(M)あるいは低いもの(L)であっても、知識レベルが低いもの(U)は、最優先で研究に取り組むべきであるとの考え方もあるが、本検討の対象は安全解析コード等の安全に直結するものではなく、検査技術の精度に関わる課題抽出のための検討であるので、上記の優先度でよいと考えた。(MU: 優先度 2, LU: 優先度 4)

(g) 「重要度」と「知識レベル」の判定に対する専門家の確信度は、例えば、優先順位が高いと判定される、重要度 H、知識レベル U の課題に対して確信度が高くない場合(確信度 M または L)、それらを最優先で実施するか否かの判断に影響を与える。本検討では、確信度が高くない M, L の場合は優先順位を 1 ランク落として取り扱うこととした。

IV. 結 論

PIRT はこれまで原子炉施設の運転時の異常な過渡変化等を予測する最適評価コードの妥当性を証明する方法として適用されることが多かったが、本研究では PIRT の考え方に基づく新しい研究課題抽出法を考案し、当該手法の有効性を確認するため、非破壊検査の検査精度向上のために必要な重要研究課題を抽出するという具体的問題に適用した。その結果、非破壊検査に関する課題抽出にも PIRT 手法が適用できることがわかった。また、その適用過程で、超音波探傷検査および渦電流探傷検査の検査精度に影響を与える現象/シナリオと影響因子の体系的な抽出整理、影響因子に関する実験データや解析結果などの情報整

理、影響因子に関する課題の体系的抽出と重要度等のランク付けなどの成果を得ることができた。

今後は、モニタリング技術などの他の技術はもとより、他分野への PIRT 手法の適用も期待される。

本研究を開始するに当たり、PIRT に関する情報等を提供いただいた榑東芝の堀江英樹様、松宮壽人様を始め、関係の皆様に感謝申し上げる。

また、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。関係各位の協力に謝意を表するとともに、特に、本検討のために実施したエキスパートパネルに協力頂いた専門家の方々に感謝申し上げる。

— 参考文献 —

- 1) B. Boyack, *et al.*, *Quantifying Reactor Safety Margins: Application of Code Scaling, Applicability, and Uncertainty Evaluation Methodology to a Large-Break, Loss-of-Coolant Accident*, U.S. Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG/CR-5249, Dec. 1989.
- 2) Atomic Energy Society of Japan, *Code on Implementation and Review of Statistical Safety Evaluation: 2008 (AESJ-SC-001: 2008)*, May 2009, 25-26, [In Japanese].
- 3) G. E. Wilson, B. E. Boyack, “The role of the PIRT process in experiments, code development and code applications associated with reactor safety analysis,” *Nucl. Eng. Des.*, **186**, 23-37 (1998).
- 4) H. Horie, H. Matsumiya *et al.*, “Phenomena Identification and Ranking Tables (PIRTs) for 4S -Loss of offsite power, failure of a cavity can, and sodium leakage from intermediate piping scenarios-,” *The 13th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13) N13P1093*, Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, Sep. 27-Oct. 2, 2009.
- 5) European Commission Joint Research Centre, European Network for Inspection and Qualification, “*ENIQ Recommended Practice 1: Influential/ Essential Parameters Issue 2*, ENIQ Report nr. 24, Jun. 2005, 13-18.