

円筒形炉内構造物に対する評価における 未点検範囲の扱いに関するガイドラインの改訂について

Technical Basis for Revision of Guidelines for Inspection and Evaluation of Reactor Internals on Flaw
Characterization for Uninspected Region of Cylindrical Components

日本原子力発電株式会社	堂崎 浩二	Koji DOZAKI	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	伊東 敬	Takashi ITO	Member
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	馬淵 靖宏	Yasuhiro MABUCHI	Member

“Guidelines for Inspection and Evaluation of Reactor Internals”, published by Thermal and Nuclear Power Engineering Society (TENPES) and taken over by Japan Nuclear Technology Institute (JANTI), adopted a very conservative assumption on flaw characterization for uninspected region of cylindrical components. Fully penetrated flaw should be assumed for uninspected region, when SCC is found and flaw evaluation is performed on cylindrical core internals such as core shroud. The authors suggested a modified method on flaw characterization for uninspected region based on a simple application of probabilistic approach last year. This paper describes a technical basis of modification of JANTI Guidelines, incorporating the suggested method. Confirmation for the modified method utilizing field data of an operating plant is also shown. Significance of feedback from field data on inspection and evaluation method in JANTI Guidelines is discussed.

Keywords: JANTI Guidelines, Flaw Characterization, Uninspected region, Cylindrical Reactor Internals

1. 緒言

(社)火力原子力発電技術協会(以下、「火原協」という)が発行した炉内構造物等点検評価ガイドライン(以下、単に「ガイドライン」という)においては、炉心シュラウド等の円筒形炉内構造物に対する応力腐食割れを想定した点検規定と、点検の結果欠陥が検出された場合の欠陥評価の方法が規定されている^[1]。

ガイドラインではその使用者が点検範囲を定め、点検範囲と点検結果を結びつけた欠陥評価を行うことで、点検に対する動機付けを行っている。欠陥評価においては、点検していない範囲(以下、「未点検範囲」という)を貫通欠陥と仮定した欠陥想定を行わなければならない。これは最も保守的な想定ではあるものの、未点検範囲が多くなると過度に保守的になると考えられる。

このため、著者らは簡単な確率論の適用に基づき、未点検範囲に対するより現実的な欠陥想定法を提案した^[2]。その後、火原協ガイドラインを引き継いだ有限責任中間法人 日本原子力技術協会(以下、「原技協」という)の炉内構造物等点検評価ガイドライン検

討会において、この欠陥想定法を取り入れたガイドライン改訂版が発行された^{[3][4]}。検討会において欠陥想定法の理論的側面の確認とともに、実機炉心シュラウドのひびデータに基づく欠陥想定法の妥当性確認も合わせて行われた。本報では、未点検範囲に対する欠陥想定法に関するガイドライン改訂の技術的根拠について、既報の理論的側面及び実機データによる確認の概要をまとめるとともに、実機データを確認した結果をガイドラインの点検及び評価規定にフィードバックしていくことの意義についても合わせて述べることとする。

2. 未点検範囲に対する評価法の概要

2.1 欠陥想定法の考え方

これまでのガイドラインでは、点検の結果欠陥が検出された場合の欠陥評価において、点検を実施しない範囲(未点検部位)を残存断面積に含めず欠陥と同等に扱い評価を実施することを規定している。これは欠陥評価において最も保守的な取扱いとなるため、より適切な保守性を有した未点検範囲の想定欠陥方法を検討するため、以下に示す想定を新たに

設定し比較する。

- ・ケース 1：点検実施範囲での欠陥割合と同じ割合で、未点検範囲に欠陥を想定する。
- ・ケース 2：点検実施範囲での欠陥割合に信頼度 99%での統計的推定（信頼区間）の上限値を加えた割合を、全体の欠陥の割合と想定する。

全体の範囲 L に対する点検割合を X 、点検した範囲 L_i のなかで発見された欠陥長さ L_c の割合（点検欠陥比率）を Y とした場合に想定される点検範囲全体に対する欠陥割合（想定欠陥割合）を $P(X, Y)$ とする。それぞれの想定に基づく欠陥想定を以下のように算出する。

- ① これまでのガイドラインによる想定欠陥割合：
未点検範囲を全て欠陥と想定するため、想定欠陥割合は点検範囲で発見された欠陥長さに未点検範囲を加えた長さを、全体の範囲で除した値となり、式(1)に示す通りとなる。

$$P(X, Y) = (L_c + (L - L_i)) / L = (Y - 1) \cdot X + 1 \quad (1)$$

- ② ケース 1 による想定欠陥割合：

点検欠陥割合は、点検範囲で発見された欠陥の割合と等しく、式(2)に示す通りとなる。

$$P(X, Y) = Y \quad (2)$$

- ③ ケース 2 による想定欠陥割合：

点検数を母集団 M 、点検範囲（標本数）を N 、 N のうちの欠陥部分を m とした場合の、ある点検欠陥比率の信頼区間 Δp を式(3)に示す。

$$\Delta p = Z \left(\frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{\frac{M - N}{M - 1} \cdot \frac{m}{N} \cdot \frac{1 - m / M}{N}} \quad (3)$$

想定欠陥割合は、点検欠陥比率 Y に信頼度 99% となる信頼区間の上限値を加えたものであり、 $Z(0.01/2) = 2.58$ 、 $X = N/M$ 、 $Y = m/N$ を用いて式(4)に示す通りとなる。

$$\begin{aligned} P(X, Y) &= Y + \Delta P \\ &= Y + Z \left(\frac{0.01}{2} \right) \sqrt{\frac{M - N}{M - 1} \cdot \frac{m}{N} \cdot \frac{1 - m / M}{N}} \\ &= Y + 2.58 \sqrt{\frac{(1 - X)(1 - Y)Y}{(M - 1)X}} \quad (4) \end{aligned}$$

M は点検時において点検最小範囲をどのように考えるかによって決められる。炉心シュラウドの目視点検実績では、数 mm～数十 mm のひびが多く確認されていることから、炉心シュラウドのガイドラインで目視点検によって検知可能な SCC によるひび割れを長さ 10mm としていることは保守側の適切な設定と考えられる。従って点検最小範囲を 10mm とし、シュラウド周溶接線の全周がおよそ 10～15m であることから、シュラウド全周の母数 M を $(10,000 \sim 15,000/10) \approx 1,000$ とする。

図 1 に点検欠陥比率 (Y) が 0.5 の場合の点検割合 (X) と想定欠陥割合 ($P(X, Y)$) の関係を、これまでのガイドラインによる想定（以下ガイドラインの想定）及び各ケースでの想定別に示す。ガイドラインの想定は、点検範囲が 0.5 以下の場合、工学的に最も妥当であるケース 2 と比べて大きく保守側の想定欠陥割合を示すことが分かる。ケース 1 は概ねケース 2 と同等で合理的と考えられるが、点検割合 (X) が非常に小さい場合は非保守側となる懸念がある。

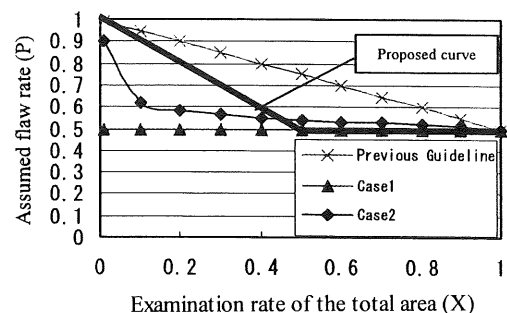


Fig.1 Assumed flaw rate at each case (When ratio of the flaw to the examination round (Y) = 0.5)

2.2 新たな欠陥想定法の提案

以上の比較結果より、想定欠陥割合のばらつきが大きくなる点検範囲が小さい領域では想定欠陥比率を保守的なものとし、想定欠陥割合のばらつきが小さくなっていく点検割合が大きい領域では想定欠陥比率をより現実に即したものとするため、想定欠陥割合を以下に示す直線として提案する。

- ・点検割合が 0.5 を超えている場合は、想定欠陥割合はケース 1（点検範囲での欠陥割合に等しい）とする。

・点検割合が 0.5 未満の場合は、点検割合が 0 のときの想定欠陥割合を 1、点検割合が 0.5 の時の想定欠陥割合を点検割合での点検欠陥比率として、この間を線形補間する。
提案した直線を図 1 上に重ねて示す。

2.3 実機データによる確認

これまでの検討により示した想定欠陥割合の妥当性を確認するため、実機データとの比較を行った。実機データは、炉内構造物（シュラウド）点検実績のうち、欠陥割合が確定できるように点検割合が 100%で、ひびが全周にわたり分散していた実機データを用いた。点検の順序による点検欠陥比率の推移のばらつきを考慮した比較を行うため、シュラウド円周上の 0°、90°、180°、270° の各方位から点検

を開始し順次時計回りに点検を進めたと仮定した 4 ケースの点検欠陥比率の推移を実機データより求めた。

図 2 に点検割合 (X) 及び点検欠陥比率 (Y) に対応した想定欠陥割合 (P) の関係を、前述した 4 つの想定毎に等高線図に示す。また実機データから求めた点検欠陥比率の推移も、併せて各々の等高線図に示す。

実機データは、点検割合 0.2~0.3 では点検欠陥比率が 0.07~0.4 と大きくばらつくが、点検割合が 0.4 を超えると点検欠陥比率が 0.19~0.28 に収束していき、最終的な欠陥比率は 0.23 となる。

点検割合 0.3 及び 0.8 の場合に、実機データから求められる各々の想定欠陥割合 (P) の比較を表 1 に示す。保守性の確認であるため、4 つの方位から点検を開始した実機データが示す最も小さい点検欠陥

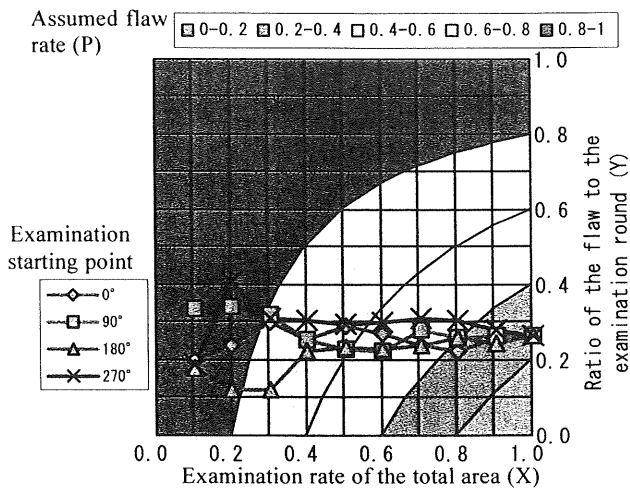


Fig.2 (1) Assumed flaw rate (Previous Guideline)

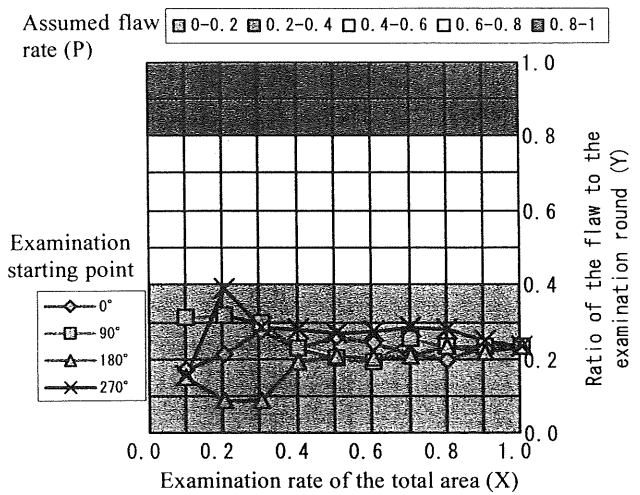


Fig.2 (2) Assumed flaw rate (Case1)

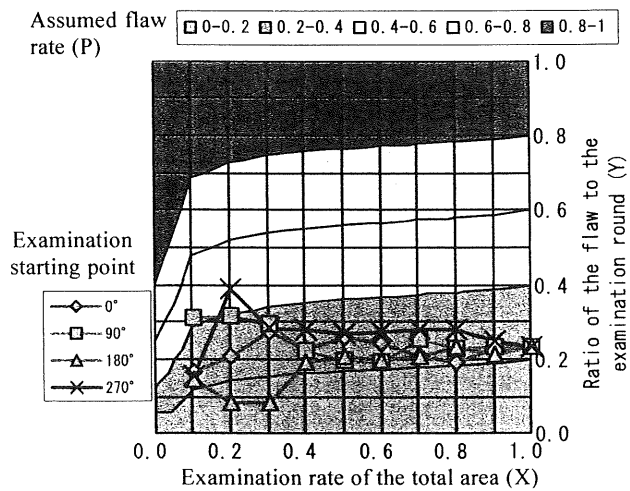


Fig.2 (3) Assumed flaw rate (Case2)

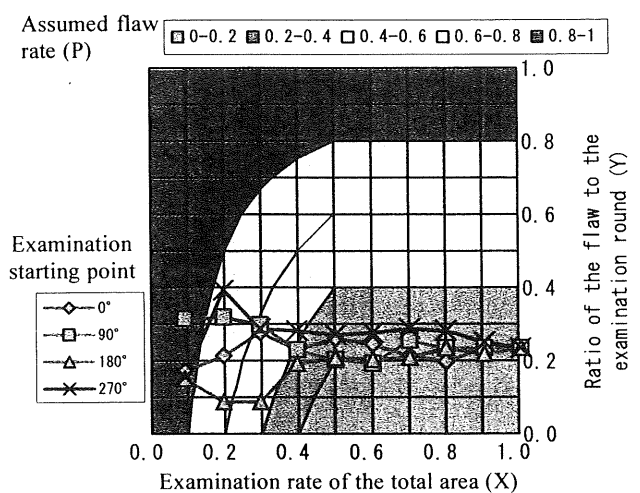


Fig.2 (4) Assumed flaw rate (Proposed Curve)

比率を用いて想定欠陥割合(P)を求めた。

点検割合が0.3の場合はガイドラインの想定では過大に、ケース1, 2では過小に想定欠陥比率を算出するのに対し、提案の方法では実際の欠陥割合である0.23に即した想定欠陥割合が算出できている。また、点検割合が0.8の場合においてもほぼ同等の想定欠陥割合を示すことが分かった。

Table 1 The Assumed Flaw Rate comparison based on the measured flaw rate

Examination rate(X)	Measured flaw rate(min.)(Y)	Assumed (calculated) flaw rate(P)			
		Previous	Case1	Case2	Proposal
0.3	0.07	0.72	0.07	0.10	0.44
0.8	0.19	0.35	0.19	0.21	0.19

3. 実機データのガイドラインへの反映

3.1 ガイドラインの一般的考え方

火原協「炉内構造物等点検評価ガイドラインについて」によれば、各部位に対する個別ガイドラインにおける点検時期決定のロジックには類型化できるいくつかのパターンが存在している。それらのパターンとは、次のようなものである^[5]。

- ① 想定欠陥の進展を解析評価した上で点検時期を決定したパターン
- ② 試験データと運転実績を踏まえて点検時期を決定したパターン
- ③ 限定された試験データに基づき点検時期を決定したパターン

すなわち、SCC 進展データ等の知見が比較的多く得られている場合には①のように解析評価に基づく点検時期決定を行い、経年変化評価手法は確立されているが十分な試験データがない場合には③のように許容基準に対して大きな余裕を取って管理基準を定め、その管理基準に基づき点検時期決定を行っている。②のパターンはそれらの中間的な場合である。知見の充実に伴って、③から②、②から①のパターンへとガイドラインのロジックをシフトしていくことで、より高度な予測に基づく点検・評価が可能になると考えられる。

3.2 実機データのフィードバックの意義

本報で述べた未点検範囲に対する評価法について言えば、当初は3.1で述べたガイドラインのロジックのパターン③に相当しており、欠陥想定手法その

ものは破壊力学の適用が可能であり確立しているが、実機データがなかったため、最も保守的な仮定をすることで点検・評価を可能としたものである。

その後、炉心シュラウド等で SCC を検出し、ガイドラインを適用して欠陥評価を行い、評価結果に基づき継続使用している実機プラントのデータが得られてきていることから、2.で述べたように、未点検範囲に対する評価法を開発し、実機データとの対照による確認を行って、ガイドラインにおける規定を改訂した。

このように実機データをガイドラインにフィードバックさせることは、3.1で述べたとおり、実機データの蓄積とともにガイドラインのロジックをより高度な予測に基づくものへと段階的にシフトさせることにつながる意義を有すると考えられる。

4. 結言

円筒形炉内構造物の未点検範囲に対する欠陥想定法について、これまでのガイドラインにおける保守的想定を見直し、より現実的な欠陥想定法を取り入れた改訂を行うとともに、実機データによる確認結果をガイドラインに反映することの意義について考察した。今後も点検・評価技術や実機データ等、最新知見を反映したガイドラインの見直しを引き続き行っていくことが重要である。

5. 謝辞

本件は炉内構造物等ガイドライン検討会でご審議頂いたものであり、検討会各位のご指導、ご助言に感謝する。

参考文献

- [1] 火原協 炉内構造物等点検評価ガイドライン【炉心シュラウド】初版～第3版 など
- [2] 堂崎,馬淵,伊東「円筒形炉内構造物の欠陥評価における未点検範囲に対する欠陥想定手法の検討」JSME M&M 2007, No.224
- [3] 原技協 炉内構造物等点検評価ガイドライン【炉心シュラウド】第4版
- [4] 原技協 炉内構造物等点検評価ガイドライン【シュラウドサポート】第3版
- [5] 火原協 炉内構造物等点検評価ガイドラインについて 初版及び第2版