

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン
[シンプルチューブ]
(第1版)

2026年4月

一般社団法人 原子力エネルギー協議会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

本ガイドの位置づけ

本ガイドライン（以下「本ガイド」）は、従前より(一社)原子力安全推進協会(以下、JANSI)が策定・管理してきた「PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン[シンプルチューブ]（第1版）」（以下「従来のガイド」）を原文のまま原子力エネルギー協議会（以下、ATENA）の管理体制下で引き継いで使用するものである。本ガイドの内容については、ATENA 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会を経て改訂が決定されるまでの間、変更は行わない。

運用時期

本ガイドの運用開始日は 2026 年 4 月とする。

運用上の注意

1. 本ガイドは従来のガイドを踏襲したものであり、運用上の変更はない。
2. ATENA は必要に応じて、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会を経て改訂しますが、その場合は別途改訂履歴を明示する。

本ガイドラインの情報等の取扱いについては、以下のとおりとする。

（免責）

ATENA、ATENA 従業員、会員、支援組織等本書の作成に関わる関係者（「ATENA 関係者」）は、本書の内容について、明示黙示を問わず、情報の完全性及び第三者の知的財産権の非侵害を含め、一切保証しない。ATENA 関係者は、本書の使用により使用者その他の第三者に生じた一切の損失、損害及び費用についてその責任を負わない。使用者は、自己の責任において本書を使用するものとする。

（権利帰属）

本書の著作権その他の知的財産権（「本件知的財産権」）は、ATENA に帰属する。本件知的財産権は、本書の使用者に移転せず、また、ATENA の承諾がない限り、本書の使用者には本件知的財産権に関する何らの権利も付与されない。

2026 年 4 月
原子力エネルギー協議会

PWR炉内構造物等点検評価ガイドライン

[シンプルチューブ]

(第1版)

2022年3月

一般社団法人 原子力安全推進協会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

はじめに

我が国の原子力発電所では、安全・安定運転を確保するため、炉内構造物等の健全性を確認あるいは保証することが、重要な課題となっています。本ガイドラインは、このような重要性に鑑み、損傷発生の可能性のある構造物について、点検・評価・補修等に関する要領を提案するものです。

2000年に(社)火力原子力発電技術協会に発足した「炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会」は、2007年より日本原子力技術協会に継承され、さらに2012年11月の日本原子力技術協会の改組に伴い、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会は、原子力安全推進協会に発展的に継承され、活動を継続しています。また、検討会での審議を経て制定する「炉内構造物等点検評価ガイドライン」は、関係者の利便性向上を図るため、関連情報と併せ協会ホームページより公開しています。

本ガイドラインの策定にあたっては、常に最新知見を取り入れ、見直しを行っていくことを基本方針としています。この方針に則り、現行版の発行後も最新知見の調査および収集に努めることといたします。検討会では、点検評価ガイドライン(個別及び一般)の改訂審議の都度、国内外の運転実績に関する情報活用と、点検評価手法の在り方について議論を重ねており、その成果をガイドラインのなかに反映しつつあります。今後も継続的な改善提案に取り組み、より効果的な保全活動への合理的な資源配分を目指すことも検討課題といたします。

原子力発電の位置づけは地球温暖化防止のためにも重要であり、その具体化施策として原子力発電所の長期的な安全・安定運転への期待は高まりつつあります。本ガイドラインが原子力産業界で活用され、原子力発電所の安全・安定運転の一助になることを期待しております。

最後に、本ガイドラインの制定にあたり、絶大なご助言を賜りました学識経験者、電力会社、メーカーの方々等、関係各位に深く感謝いたします。

2022年3月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
委員長 望月 正人

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン

改訂履歴

ガイドライン名：シンプルチューブ

改訂年月	版	改訂内容	備考
2022年3月	初版発行	—	

ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、原子力安全推進協会に設置された炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会において、専門知識と関心を持つ委員と参加者による審議を経て制定されたものである。

原子力安全推進協会はガイドライン記載内容に対する説明責任を有するが、ガイドラインを使用することによって生じる問題に対して一切の責任を持たない。またガイドラインに従って行われた点検、評価、補修等の行為を承認・保証するものではない。

従って本ガイドラインの使用者は、本ガイドラインに関連した活動の結果発生する問題や第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任が使用者にあることを認識して、このガイドラインを使用する責任を持つ。

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(2022年3月現在, 順不同, 敬称略)

委員長	望月 正人	大阪大学
委員	笠原 直人	東京大学
委員	竹田 陽一	東北大学
委員	西本 和俊	大阪大学名誉教授
委員	水谷 義弘	東京工業大学
委員	森下 和功	京都大学
委員	浅山 泰	日本原子力研究開発機構
委員	古川 敬	発電設備技術検査協会
幹事	菊川 浩	東京電力ホールディングス (株)
幹事	棚橋 晶	関西電力 (株)
幹事	寺門 剛	日本原子力発電 (株)
委員	清水 秀高	北海道電力 (株)
委員	豊嶋 慶徳	東北電力 (株)
委員	神長 貴幸	東京電力ホールディングス (株)
委員	稲垣 哲彦	中部電力 (株)
委員	網谷 宏和	北陸電力 (株)
委員	越智 文洋	関西電力 (株)
委員	荒芝 智幸	中国電力 (株)
委員	滝川 雅博	四国電力 (株)
委員	木元 健悟	九州電力 (株)
委員	町田 栄治	日本原子力発電 (株)
委員	高村 賢也	電源開発 (株)
委員	内山 好司	日立GEニュークリア・エナジー (株)
委員	三橋 忠浩	東芝エネルギーシステムズ (株)
委員	和地 永嗣	三菱重工業 (株)
委員	新井 拓	電力中央研究所
委員	関 弘明	原子力安全推進協会
事務局	堂崎 浩二	原子力安全推進協会
事務局	佐藤 寿志	原子力安全推進協会

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン [シンプルチューブ]

目 次

第1章 目的及び適用	1
1.1 目的	1
1.2 適用	1
1.2.1 適用範囲	1
1.2.2 適用時期	1
1.3 用語の定義	1
第2章 基本的考え方	2
第3章 点検及び評価	3
3.1 点検対象	3
3.2 点検方法	3
3.3 点検時期	3
3.4 評価	4
第4章 予防保全及び補修	5
解説1-1 ガイドライン制定の目的	6
解説1-2 シンプルチューブの選定理由	6
解説2-1 シンプルチューブの機能及び重要度分類	7
解説2-2 シンプルチューブに想定される経年劣化事象及び運転経験	7
解説2-3 シンプルチューブの減肉による影響	7
解説3-1 点検方法	9
解説3-2 点検周期	9
解説3-3 点検周期の見直し	9
解説3-4 減肉率が70%を超える場合の詳細評価	9
解説4-1 シンプルチューブの予防保全及び補修	10
付録A シンプルチューブの概要	A-1
付録B シンプルチューブの摩耗による減肉事象	B-1
付録C シンプルチューブのECT	C-1
付録D 流動振動試験及びプラントのグループ化	D-1
付録E 点検周期	E-1
付録F 限界減肉率	F-1
参考資料 1 炉内構造物等点検評価ガイドライン[シンプルチューブ]概要	参 1-1
参考資料 2 引用文献	参 2-1

第1章 目的及び適用

1.1 目的

本ガイドラインは、加圧水型原子力発電所（PWR）に使用される炉内計装用シングルチューブ（以後、シングルチューブと称す）について、想定される経年劣化事象に対する合理的な点検、評価の方法を示すことにより、原子力発電所の安全及び安定運転を維持することを目的とする（解説 1-1）。

1.2 適用

1.2.1 適用範囲

本ガイドラインは、PWR のシングルチューブに適用する（解説 1-2）。

1.2.2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、商業運転開始後の PWR の供用期間中とする。

1.3 用語の定義

ECT：渦電流探傷試験（Eddy Current Testing）

第2章 基本的考え方

- (1) 本ガイドラインにおいて、最も重要で基本的な事項は、「原子炉の安全性確保」とする。
- (2) シンプルチューブは、炉内の中性子束分布を計測するための中性子検出器を原子炉容器の外部から炉内まで導く機能を有する（解説 2-1）。本ガイドラインは、この機能を維持することを目的に、シンプルチューブの点検、評価、予防保全等の指針を示す。
- (3) シンプルチューブは炉内の1次冷却材流れにより流動振動し、案内経路と接触、摺動することで外面に摩耗による減肉が生じる（解説 2-2）。減肉の進行によりシンプルチューブの肉厚が徐々に減少し、圧壊や貫通が生じた場合、中性子検出器の案内機能を喪失する可能性がある（解説 2-3）。このため、本ガイドラインでは、シンプルチューブの機能に影響を与える可能性のある経年劣化事象として、シンプルチューブの摩耗による減肉を想定する。
- (4) シンプルチューブの減肉によって中性子検出器の案内機能を喪失する前に適切な対策を行うため、点検により減肉状態を継続的に監視する。点検方法は、シンプルチューブ内面から肉厚を計測することのできる ECT とし、全本数を対象とする（解説 3-1, 3-2）。点検時期は、過去の点検結果を基に予測した減肉深さが、1次冷却材圧力により圧壊する減肉深さから定めた取替基準に対し、十分な余裕を考慮して定める。
- (5) シンプルチューブが流動振動する際のワークレート（シンプルチューブが案内経路と接触しながら振動する際の荷重×滑り距離（単位時間当たり））は、シンプルチューブと案内経路の隙間量に依存するため、当該隙間量に応じてプラントをグループ化したうえで、グループごとに点検時期を示す。
- (6) シンプルチューブの減肉が進行した場合、減肉の進行程度に応じて、案内経路との当たり位置を変える位置ずらし（解説 4-1）、又は取替えを実施する。本対策は予防保全としても実施できる。

第3章 点検及び評価

3.1 点検対象

点検対象は、シングルチューブとし、減肉深さを測定する。点検範囲は、シングルチューブ全長のうち、燃料集合体の最下段グリッドから原子炉容器炉内計装筒下端までとする（位置ずらしを実施した場合は、位置ずらし前に当該範囲に含まれていた範囲を含む）。点検対象本数は、シングルチューブ全数とする。

3.2 点検方法

点検方法は、シングルチューブ内にプローブを通過させる内挿型の ECT とする（解説 3-1）。

3.3 点検時期

点検は、以下のプラント運転時間を目途に実施する。なお、運転開始後初めての点検を実施するプラントは、運転開始後から以下の時間を目途に点検を実施する（試運転の時間を含む）（解説 3-2, 3-3, 表 D-1）。

プラントグループ 1（半径隙間 3.1mm のプラント）：3 万時間ごと

プラントグループ 2（半径隙間 2.0mm のプラント）：4 万時間ごと

プラントグループ 3（半径隙間 0.9mm 及び 0.5mm のプラント）：6.2 万時間ごと

ここで、半径隙間とは、シングルチューブ外径と炉内計装案内管内径の差の 1/2 を意味する。

3.4 評価

ECT の結果，シンプルチューブの減肉率（初期の肉厚に対する減肉深さの割合）が 50%未満の場合は，次回点検時期まで継続使用することができる。シンプルチューブの減肉率が 50%以上の場合には位置ずらし，70%以上の場合には原則として取替えを実施する（第 4 章）。

なお，確認された減肉率が 70%以上で取替えを実施できない場合において，次回の点検までシンプルチューブの機能が維持できることを評価等により確認できれば，継続使用することができる（解説 3-4）。

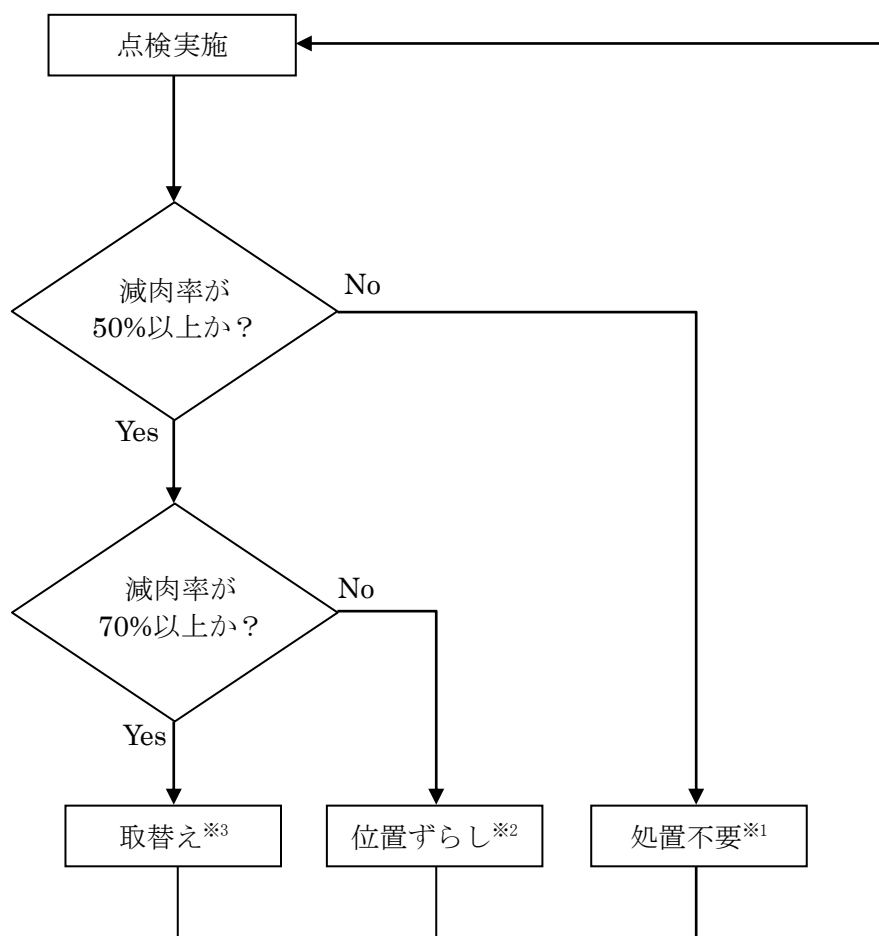
第4章 予防保全及び補修

ECTの結果に応じて以下の対応を行う（解説4-1）。

減肉率 50%以上：位置ずらし

減肉率 70%以上：取替え

シングルチューブの点検，評価及び予防保全のフローを図4-1に示す。



※1：減肉率が50%未満の場合においても，予防保全として位置ずらし又は取替えを行ってもよい

※2：減肉率が70%未満の場合においても，予防保全として取替えを行ってもよい

※3：減肉率が70%以上で取替えを実施できない場合において，次回の点検までシングルチューブの機能が維持できることを評価等により確認できれば，継続使用することができる(3.4節)

図4-1 点検，評価及び予防保全のフロー

解説 1-1 ガイドライン制定の目的

シンプルチューブは、原子炉容器の外部から燃料集合体の内部まで中性子検出器を導く案内管である（付録 A）。シンプルチューブは、その周囲の 1 次冷却材流れによって流動振動し、案内経路と繰り返し接触・摺動することで外面に摩耗による減肉を生じることが知られている（付録 B）。本ガイドラインは、当該事象がシンプルチューブの機能や原子力発電所の安全及び安定運転に及ぼす影響を適切に考慮したうえで、減肉の進行に応じた点検、評価の方法を示し、もって原子力発電所の安全及び安定運転を維持することを目的とする。

解説 1-2 シンプルチューブの選定理由

シンプルチューブは、中性子検出器を原子炉容器外部から炉心まで案内する機能を有しているため、流動振動摩耗による減肉によって当該機能の喪失に至る前に減肉の進行状況を適切な周期で把握し、取替えなどの予防保全を実施する必要がある。

このため、本ガイドラインは、シンプルチューブの摩耗による減肉事象を対象に、点検方法、点検時期、予防保全措置等を定めている。

解説 2-1 シンプルチューブの機能及び重要度分類

シンプルチューブは、中性子検出器を原子炉容器外部から炉心まで案内する機能を有する。シンプルチューブの外側は 1 次冷却材に接し、内側は気中環境であるが、小口径のため、原子炉冷却材圧力バウンダリには分類されない（解説 2-3）。

シンプルチューブは、原子炉計装のうち計装配管に該当し、安全機能の重要度分類 PS-3 に該当する（異常状態の起因事象となるものであって、PS-1 及び PS-2 以外の構築物、系統及び機器）^[2]。なお、日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」^[3]において、計装品であるシンプルチューブ（同規格では「炉心計装用シンプル」）は同規格の適用対象から除外されている（同規格 GNR-1110、解説表 GNR-1230-1）。

解説 2-2 シンプルチューブに想定される経年劣化事象及び運転経験

シンプルチューブと案内経路（炉内計装筒及び炉内計装案内管）の間のアニュラス部には 1 次冷却材が流れており、この流れによってシンプルチューブの流動振動が引き起こされ、案内経路と接触・摺動することでシンプルチューブ外面に摩耗による減肉が生じることが知られている。このため、本ガイドラインでは、シンプルチューブの経年変化事象として摩耗による減肉を想定する。

シンプルチューブの摩耗による減肉事象は、1981 年米国 Salem1 号機において初めて確認され、その後、フランス、ベルギー、スウェーデン等で同様の事象が確認されている。国内においても、Salem1 号機等の事例を受けてシンプルチューブの ECT が実施され、結果に応じて位置ずらしや取替え等が実施されてきている^[4-7]。

なお、シンプルチューブ全長のうち、運転中に燃料集合体内部に挿入された範囲は高中性子束条件となるが、シンプルチューブには運転中有意な引張応力が生じないため、照射誘起型応力腐食割れ（IASCC : Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking）については、本ガイドラインでは経年劣化事象としては想定しない。

解説 2-3 シンプルチューブの減肉による影響

シンプルチューブは外面で 1 次冷却材に接し、内面は気中環境となっている。このため、減肉が顕著に進行して貫通穴が生じた場合には、シンプルチューブ内に 1 次冷却材が流れ込み、通路選択装置に設けられた漏えい検出器で検知される。その後、シールテーブルに設けられた隔離弁を閉止することで系外への漏えいは防がれる（これにより、当該シンプルチューブは中性子検出器の案内機能を喪失することとなる）。

なお、シングルチューブは小口径（内径約 5mm）のため、隔離弁が仮に閉止しない場合を想定しても漏えい量は小さく、充てんポンプにより 1 次冷却材流量の維持が可能である（このため、シングルチューブは原子炉冷却材圧力バウンダリから除外されている^[1]）。

また、炉内の中性子束分布計測にあたり、必要最少計測数は、全シングルチューブの 75%、かつ 1/4 炉心あたり 2 本と評価されており^[8]、シングルチューブが隔離されて当該アドレスの計測が不可となっても、プラントの運転上直ちに問題とはならない。

解説 3-1 点検方法

点検方法は、供用中のシンプルチューブの点検範囲全域において、減肉有無の検出及び減肉深さの推定ができる非破壊試験方法として、内挿型の ECT とする（付録 C）。

解説 3-2 点検周期

シンプルチューブの流動振動試験により、シンプルチューブと炉内計装案内管の隙間の大小によってワークレートが異なることが分かっており、国内プラントを当該隙間でグループ分けしたうえで、グループごとに点検周期を定める（付録 D）。

点検周期は、過去のシンプルチューブ減肉の点検結果を基に作成した減肉予想曲線に基づき、減肉率が 50%から 70%に至るまでの時間として設定する（付録 E）。これは、点検の結果、減肉率が 50%未満で継続使用可能と判断された次の点検において取替基準の 70%を超える減肉が確認され、急遽取替えが必要となる事態を避けるためである。なお、これらの基準は、シンプルチューブが 1 次系圧力で圧壊する減肉率 94%に余裕をもって設定したものである（付録 F）。

運転開始後初めての点検を実施するプラントについては、運転開始後から、3.3 項に示す該当するプラントグループの運転時間経過後を目途に点検を実施する。なお、当該時間には、試運転時間（シンプルチューブが燃料集合体に挿入された状態以後の試運転時間）を含むものとする。

解説 3-3 点検周期の見直し

シンプルチューブ減肉の点検を継続して実施し、得られた減肉深さに係るデータを本ガイドラインの点検周期設定に用いた減肉予想曲線と比較して当該点検周期の妥当性を確認するとともに、結果に応じてより適切な減肉予想曲線、点検周期を検討することが望ましい。

解説 3-4 減肉率が 70%を超える場合の詳細評価

シンプルチューブの製造には時間を要することから、点検により 70%を超える減肉が確認された場合において、直ちに取替えできない場合も想定される。この場合において、次回点検までシンプルチューブの機能に問題がないことを評価等により確認できれば、継続使用することができるものとする。

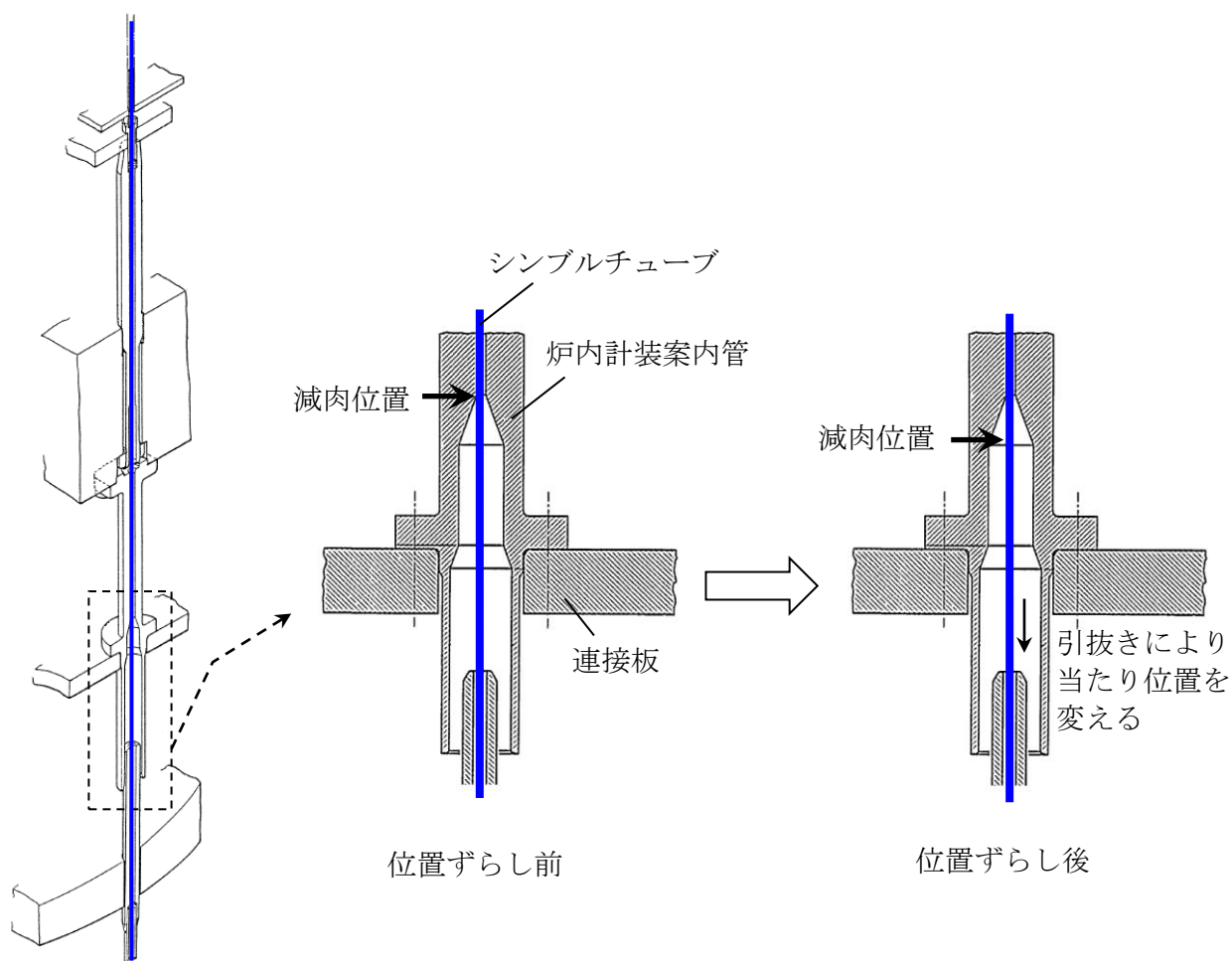
上記評価の例としては、当該シンプルチューブのそれまでの点検実績や、点検により得られた減肉深さ及び長さ等を考慮した個々の減肉評価（減肉進行予測や許容可能な減肉率の設定等）を行うことなどが考えられる。

解説 4-1 シンプルチューブの予防保全及び補修

シンプルチューブの減肉率が 50%以上の場合には、シンプルチューブの位置ずらしを行う。位置ずらしとは、シンプルチューブを一定量引抜き、案内経路との当たり面を変えることで、同一箇所での減肉進行を防ぐ処置である（解説図 4-1）。

引抜き量は中性子検出器による中性子束の測定範囲、引抜き後の減肉位置と周囲の構造物の位置関係などから設定する。位置ずらしは原則 1 回のみとするが、減肉長さ（減肉範囲の軸方向長さ）が十分に短く、2 回目の引抜き後において既存の減肉箇所が周囲の構造物と接触しない引抜き量を設定できる場合には、最大 2 回まで実施できるものとする（必要な範囲の中性子束計測ができなくなるなどから、3 回以上の位置ずらしは不可とする）。

シンプルチューブの減肉率が 70%以上の場合には、シンプルチューブの取替えを行う（限界減肉率への余裕が比較的小さいため、位置ずらしではなく、抜本的な処置として取替えを行う）。



解説図 4-1 位置ずらしのイメージ

付録 A シンプルチューブの概要

1. 炉内核計装の概要

PWR プラントには、炉内核計装が設置されており、検出器とそれらを駆動する駆動装置、炉心内の測定箇所を選ぶための通路選択装置から構成される。炉心に可動式の小型中性子検出器を挿入することで、定期的に炉心の中性子束分布を計測する。中性子検出器は駆動ケーブルと駆動装置により、通路選択装置を通して計測対象アドレスに挿入される。この測定値は、原子炉容器周囲に設置された炉外核計装の校正のほか、炉心管理、燃料管理のためのデータとして使用される。

2. シンプルチューブの概要

シンプルチューブは、中性子検出器を炉内に案内するための管であり、運転中は燃料集合体上端まで挿入されている（図 A-1）。内径約 5mm，肉厚 1～2mm，全長 35～40m 程度の長尺の管であり，1 プラントあたり，36～58 本設置されている。先端には，挿入性を考慮して丸みを帯びたプラグが溶接されている。外面で 1 次冷却材に接し，運転中外圧を受けることから，耐食性や強度等の観点から冷間加工 316 ステンレス鋼が使用されている。

シンプルチューブの端部は，建屋内のシールテーブル上部で継手（スウェジロック）によりシールされている。シールテーブルより，ステンレス鋼製のコンジットチューブで原子炉容器下部まで案内され，原子炉容器下部鏡の貫通部である炉内計装筒を通して炉内に案内される。さらに，炉内構造物の下端に設置された炉内計装案内管，下部炉心支持柱等を通して燃料集合体内部まで案内される。

シンプルチューブが万一破断して 1 次冷却材が漏えいした場合に備えて通路選択装置に漏えい検出器が設置されており，当該検出器で漏えいが検知された場合，シンプルチューブ上部に設置された隔離弁によりそれ以上の漏えいが防がれる。

付録 B シンプルチューブの摩耗による減肉事象

(1) 炉内におけるシンプルチューブの案内構造

シンプルチューブは原子炉容器の底部までコンジットチューブで案内され、原子炉容器下部鏡に設置された炉内計装筒を通して原子炉容器内部に至る。その後、炉内構造物の底部に設置された炉内計装案内管、下部炉心支持柱、下部炉心板を通して燃料集合体内部まで案内される。なお、プラントや炉内の設置アドレスによって、炉内計装案内管の構造や下部炉心支持柱の有無等が異なる。

(2) シンプルチューブの流動振動

炉内構造物が原子炉容器から取り出せるようにすること、炉内構造物と原子炉容器の熱膨張差を逃がせる構造にすること等の理由により、原子炉容器側に設置された炉内計装筒と、炉内構造物側に設置された炉内計装案内管は互いに固定されておらず、隙間が設けられている。この隙間から 1 次冷却材が流入し、シンプルチューブ周りのアニュラス部を流れ、下部炉心板と燃料集合体下部ノズルの間より流出する。この流れによってシンプルチューブの流動振動が引き起こされる（図 B-1）。

(3) シンプルチューブの摩耗による減肉事象

シンプルチューブの流動振動により、案内経路と長時間にわたり接触、摺動することでシンプルチューブ外面に摩耗による減肉が生じる。シンプルチューブの減肉は、案内経路のうち構造不連続部において大きくなる傾向があり、過去の点検で確認された減肉形状の例を図 B-2 に示す。

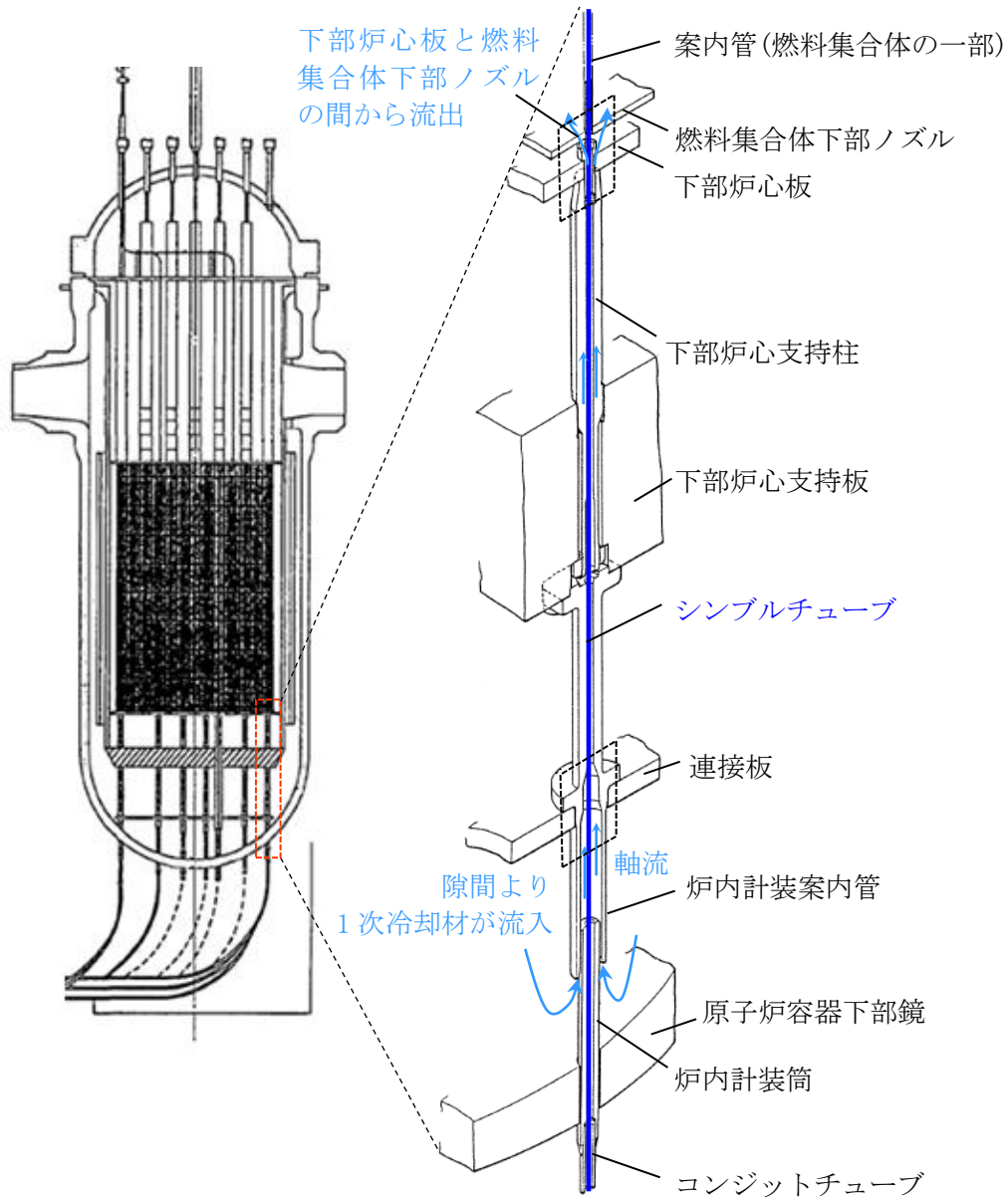
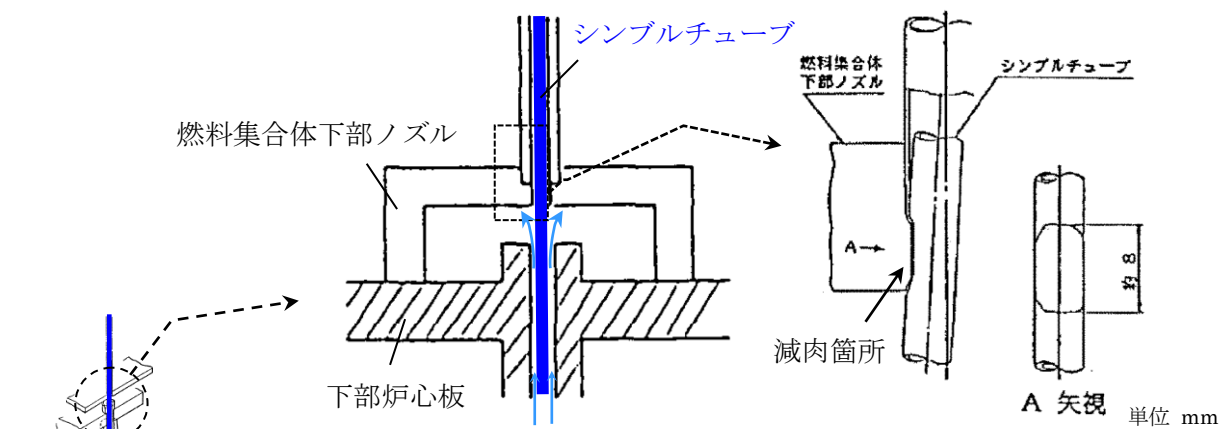
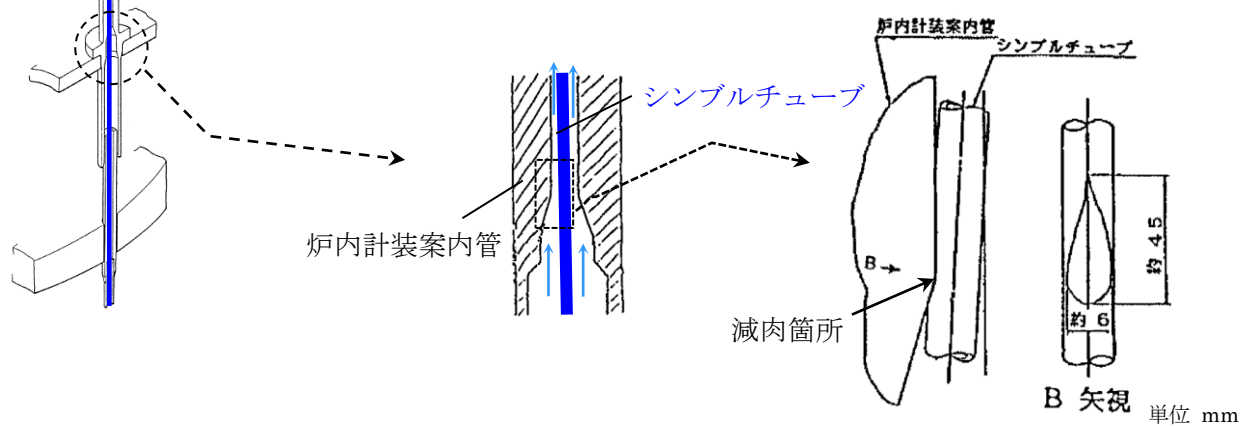


図 B-1 シンプルチューブ周りの1次系冷却材流れ



(a) 燃料集合体下部ノズル付近



(b) 炉内計装案内管テーパ付近

図 B-2 シンプルチューブの減肉形状の例^[6]

付録 C シンプルチューブの ECT

1. 試験目的

シンプルチューブの ECT は、構造物との接触、摺動により生じるシンプルチューブ外面の摩耗による減肉の有無を検出し、その位置、減肉深さ及び長さを推定することを目的とする。

2. 参考図書

日本電気協会電気技術指針 JEAG4208

「軽水型原子力発電所用蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦流探傷試験指針」

シンプルチューブの ECT に用いる探傷装置、解析装置及び校正試験片に対する一般要求事項については、シンプルチューブの試験に適用されているものと同じ内挿コイル法を用いた蒸気発生器伝熱管の ECT の要領についてまとめられている指針“JEAG4208”を参考とすることとした。

3. 探傷装置

3.1 探傷器

探傷器（デジタル探傷器）は、以下の機能を有しなければならない。

- (1) 探傷器は、同時に 2 種類以上の試験周波数で作動可能なものであること。
- (2) 探傷器は、位相及び振幅の情報が出力できること。
- (3) 探傷器は、きず並びに管の形状変化、材質変化及び付着物の信号を検出・記録する機能を有すること。
- (4) 探傷器は、以下の精度を有しなければならない。

(a) 周波数精度

探傷器の周波数精度は、 $\pm 5\%$ 以内でなければならない。

(b) 位相弁別精度

探傷器の位相弁別精度は、 $90 \pm 3^\circ$ 以内でなければならない。

(c) 周波数応答精度

探傷器の周波数応答精度は、以下に定める周波数（ F_{\max} ）において $\pm 2\%$ 以内でなければならない。ここで、 $F_{\max} = 0.4[\text{Hz} \cdot \text{秒}/\text{mm}] \times \text{探傷子最大走査速度}[\text{mm}/\text{秒}]$

(d) 増幅直線性精度

探傷器の増幅直線性精度は、 $\pm 2\%$ 以内でなければならない。

(e) 増幅精度

複数の独立した増幅回路を同時に作動させる探傷器にあつては、各増幅器間の増幅精度は、 $\pm 5\%$ 以内でなければならない。

(f) サンプリングレート及び分解能

用いられる走査速度において、探傷器のサンプリングレートが走査距離 25mm あたり 30 点以上に設定できること。また、探傷器の分解能は、1 点あたり 12 ビット以上でなければならない。

(g) デジタル表示精度

リサージュ波形表示画面は、試験周波数又は演算により得られた信号を選択表示できるとともに、その表示画素数は一方向あたり 128 画素以上でなければならない。

また、チャート波形表示画面は、複数のチャンネルを有し、各信号の垂直又は水平成分を選択表示できるとともに、選択された成分の表示画素数得は 64 画素以上でなければならない。

(h) 記録精度

記録装置は、試験により得られた信号及び試験条件を記録・再生できるとともに、その分解能は 1 点あたり 12 ビット以上でなければならない。

3.2 探傷子（プローブ）

プローブは、試験部位に適合したものとし、シングルチューブの内径に合わせた内挿プローブを使用する。

3.3 校正用試験片

校正用試験片は、以下の条件を満たすものを使用する。

- ・材料は試験対象と電磁気的特性が同等な材料であること。
- ・素材の寸法は試験対象の寸法と同等（公称値）であること。
- ・感度調整用のドリル穴及び位相調整用の打痕が付与されていること。

3.4 解析装置

- (1) 解析装置は、必要とされる試験周波数の信号を表示することが可能であること。
- (2) 解析装置は、記録された信号と試験したシングルチューブ番号及び炉心位置を対応づけられなければならない。
- (3) 解析装置は、以下の機能を有しなければならない。
 - (a) 信号の位相角は、 1° 単位まで測定できること。
 - (b) 信号の振幅は、0.1V 単位まで測定できること。
- (4) 解析装置のデジタル表示精度及び記録精度については 3.1(4)(g)及び(h)項の規定を適用する。

3.5 精度の確認

探傷装置及び解析装置の各精度は、使用される期間（供用期間中検査期間）の開始時より 12 か月以内に確認されていること。ただし、装置のうち、デジタル回路の精度にあたる 3.1(4)(f), (g), (h)及び 3.4(4)項については、調整を必要とするものではなく、機器の仕様を確認すればよい。

4. 試験要領

4.1 試験周波数

試験周波数は、使用するプローブに応じて対象とする減肉の検出/評価に有効なものを用いることとし、減肉の検出及び深さ評価用として 100kHz 及び 400kHz を使用し、減肉の長さ評価用としては 25kHz を使用する。なお、その他の周波数が減肉の検出/評価に有効な場合はその限りではない。

4.2 検出方式

減肉の検出及び深さ評価を目的とする 100kHz 及び 400kHz は自己比較方式とし、減肉長さの評価を目的とする 25kHz は標準比較方式とする。なお、その他の周波数を使用した場合は、それぞれの目的に合った検出方式とすること。

4.3 位相及び感度の調整

- (1) プローブをシングルチューブ走査時と同一の条件にて校正試験片内を走査し、このとき得られる校正試験片の打痕信号又はドリル穴信号を用いて位相及び感度を調整すること。
- (2) 校正用試験片内を走査したとき得られるドリル穴からの信号振幅が、ベースノイズと比較して充分大きく分別可能な電圧とし、打痕からの信号を用いてプローブの揺動信号ときず信号が分別可能な位相とすること。
- (3) 位相及び感度は、ドリル穴からの信号振幅が(2)で設定した電圧の $\pm 0.2V$ 以内、打痕からの信号の位相が(2)で設定した位相の $\pm 5^\circ$ 以内でなければならず、位相及び感度を定期的に確認する際も同様に評価すること。
- (4) 位相及び感度は、試験開始前及び探傷装置（探傷器、プローブ、ケーブル等）の組み合わせが変わるごとに調整すること。
- (5) 前述の位相及び感度の確認の結果、異常があればその前回の確認以後に実施した試験は無効とする。この場合は、新たな調整を実施し、無効となった試験範囲を再試験すること。

4.4 走査方向

プローブはシールテーブル側から燃料集合体内部まで挿入し、引き抜き方向で走査する。

4.5 走査速度

プローブの走査速度は、走査距離 25 mmあたり 30 点以上のサンプリングレートを確保できる速度で、かつ校正用試験片のドリル穴、打痕の信号が得られるものであること。

4.6 信号の収録

試験探傷範囲をプローブが走査している間の信号は、記録媒体に収録すること。なお、記録媒体には少なくとも以下の情報を含むこと。

- ・ プラント名
- ・ 探傷年月日
- ・ シンプルチューブ番号

4.7 再試験

雑音信号などの影響により ECT 波形の評価が困難である場合、又は位相及び感度の調整時に異常が認められて評価が困難である場合は、その原因を特定し、対策を講じた上で、その試験範囲に対して再試験をすること。ただし、位相及び感度の再調整により評価ができる場合は再試験をする必要はない。

5. 試験員及び評価員

試験は一般に試験員及び評価員によって実施される。

- (1) 試験員は試験を行うための十分な能力を有する者でなければならない。試験員は下記の規格・基準のいずれか、又はそれらの内容を満足する資格認定要領に従って認定された者のうち、レベル I（レベル 1）以上の者、又はこれらと同等以上の技術レベルを有する者でなければならない。
 - (a) 日本産業規格（JIS Z 2305）「非破壊試験—技術者の資格及び認証」
 - (b) 米国非破壊検査協会（ANST） Recommended Practice No. SNT-TC-1A (2006) Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing
 - (c) 米国規格協会／米国非破壊検査協会（ANSI/ANST） CP-189 1995 年版「Standard for Qualification and Certification on Nondestructive Testing Personnel」
- (2) 評価員は試験結果の評価を行うための十分な能力を有する者でなければならない。評

係員は前項に上げる規格・基準のいずれか、又はそれらの内容を満足する資格認定要領に従って認定された者のうち、レベルⅡ（レベル2）以上の者、又はこれらと同等以上の技術レベルを有する者でなければならない。

6. 解析及び評価

6.1 有意な信号指示の抽出

ECT で検出される信号には、炉内計装筒や炉内計装案内管などの外部構造物あるいはシングルチューブの形状等に起因する信号（疑似信号）があるので、これを考慮の上で減肉からの有意な信号指示を抽出すること。

ここで、有意な信号指示とは、雑音信号レベルを超える信号であって、炉内計装筒や炉内計装案内管などの外部構造物あるいはシングルチューブの形状等に起因する信号（疑似信号）でないものをいう。有意な信号の抽出に際しては、当該信号の極性、位相角及び振幅並びに試験周波数間の整合性を確認し、信号の経年変化の有無を含めて総合的に評価すること。

6.2 有意な信号指示の位置の特定

外部構造物の寸法関係等から有意な信号指示の位置を特定する。

6.3 有意な信号指示の評価

有意な信号指示の評価は、自己比較方式で得られた信号を用いること。また、深さ評価を行う場合は、想定される形状で深さを変えたきずを設けた試験片にて位相角ときず深さの関係を表す評価曲線を予め作成しておき、有意な信号指示から得られる位相角を用いて深さの推定を行うこと。一方、長さ評価を行う場合は、標準比較方式で得られる信号の分布範囲を用いて長さの推定を行うこと。

6.4 試験結果の記録

ECT を行った後、次の事項を記録し、信号指示の結果と試験部がいつでも照合できるようにしておかなければならない。

- (1) プラント名
- (2) 試験範囲（シングルチューブ番号及び炉心位置（番地））
- (3) 試験年月日と試験員及び係員
- (4) 探傷器及びプローブ番号
- (5) 信号指示の記録

有意な信号指示と判定された場合は、信号の位置、深さ推定結果及び必要に応じて長さ推定結果を含む。

付録 D 流動振動試験及びプラントのグループ化

1. シンプルチューブの流動試験の概要

シンプルチューブ減肉のメカニズム解明のために、シンプルチューブを模擬した流動試験が過去に実施されている⁹⁾。

(1) 試験装置

試験装置を図 D-1 に示す。供試体は、燃料集合体 1 体分の流路（炉内計装筒，炉内計装案内管，燃料集合体）の実寸大モデルであり，これを流動試験ループに組み込んだ試験装置を用いる。シンプルチューブの振動は，炉内計装案内管内部の軸流及び燃料下部ノズル部の主流によって励起されるため，それぞれの流路を模擬する。シンプルチューブは，外径約 8mm の実機品 1 本を用い，シンプルチューブと炉内計装案内管の隙間はプラントごとに異なるため，この影響を確認できるように炉内計装案内管を取り替えられる構造である（内径約 15mm，約 10mm の 2 種類）。

試験装置中に設置された計測装置は次の通りである。

- ・変位計（炉内計装案内管下部位置，燃料下部ノズル位置）
- ・荷重計（燃料下部ノズル位置）
- ・加速度計（シンプルチューブ内挿入用，炉内計装案内管計測用，試験容器計測用等）

なお，シンプルチューブ内挿入用の加速度計は，試験中にシンプルチューブ内に挿入・引抜きすることができるものであり，軸方向に振動振幅を連続的に計測することで，振動振幅のノード点をシンプルチューブの支持点と判断することにより，シンプルチューブの支持スパン（炉内計装案内管とシンプルチューブの接点）を推定することができる。

(2) 試験結果

流動試験中に計測した，シンプルチューブの卓越振動数とシンプルチューブの支持スパン，振動振幅の関係を図 D-2 に示す。支持スパンが短いほど卓越振動数は増加し，卓越振動数の増加に伴ってシンプルチューブの振動振幅が減少することが分かる。

振動振幅とシンプルチューブのワークレートの関係を図 D-3 に示す。振動振幅の増加に伴ってワークレートが増大することが分かる。

これらより，シンプルチューブの支持スパンを短くすることで振動振幅及びワークレートが低減され，流動振動によるシンプルチューブの摩耗による減肉を低減できると考えられる。

炉内計装案内管を内径約 15mm（半径隙間約 4mm）から約 10mm（半径隙間約 1mm）

のものに取り替えた場合の取替前後のシングルチューブの振動振幅を比較したものを図D-4に示す。半径隙間の減少によってシングルチューブの振動振幅が減少しており、これは、炉内計装案内管の内径が小さくなることでシングルチューブの支持スパンが短くなったためであり、半径隙間の減少によりシングルチューブ減肉が低減されることが考えられる。

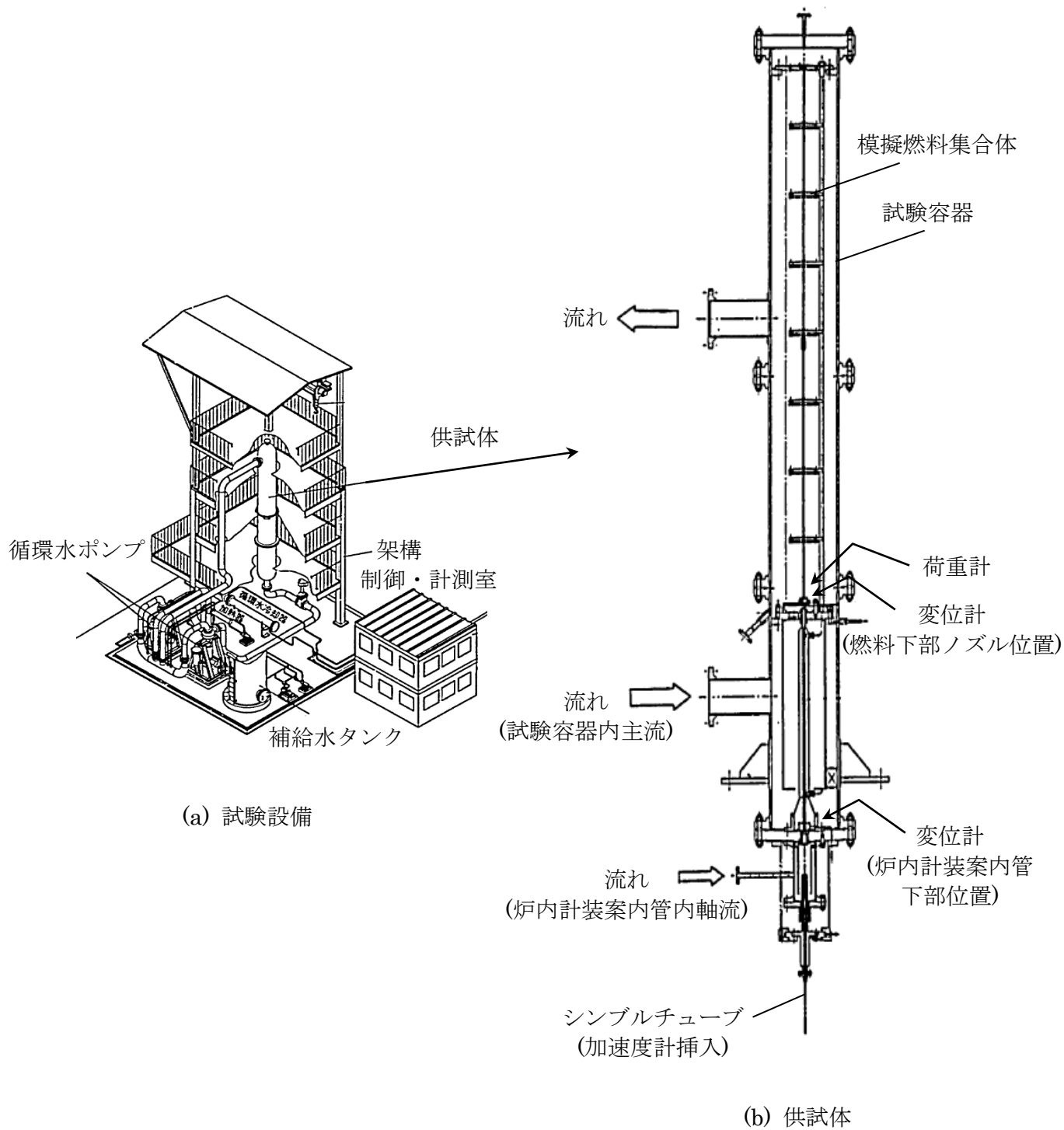
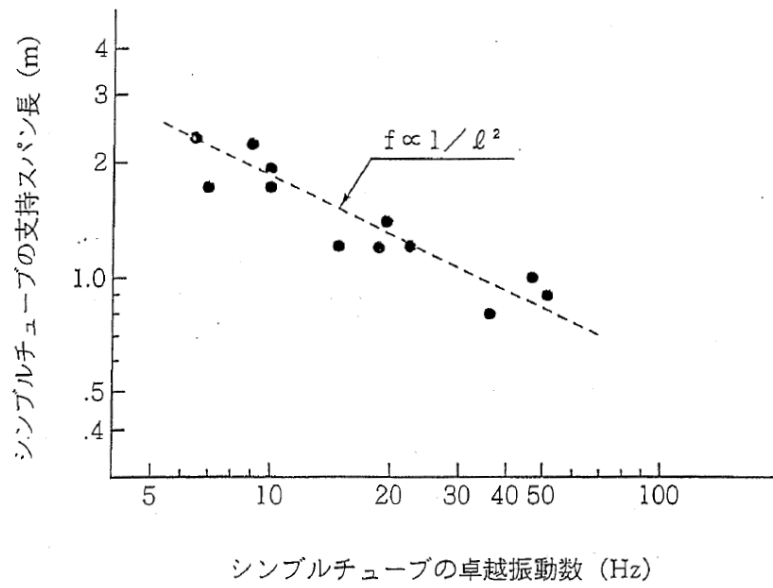
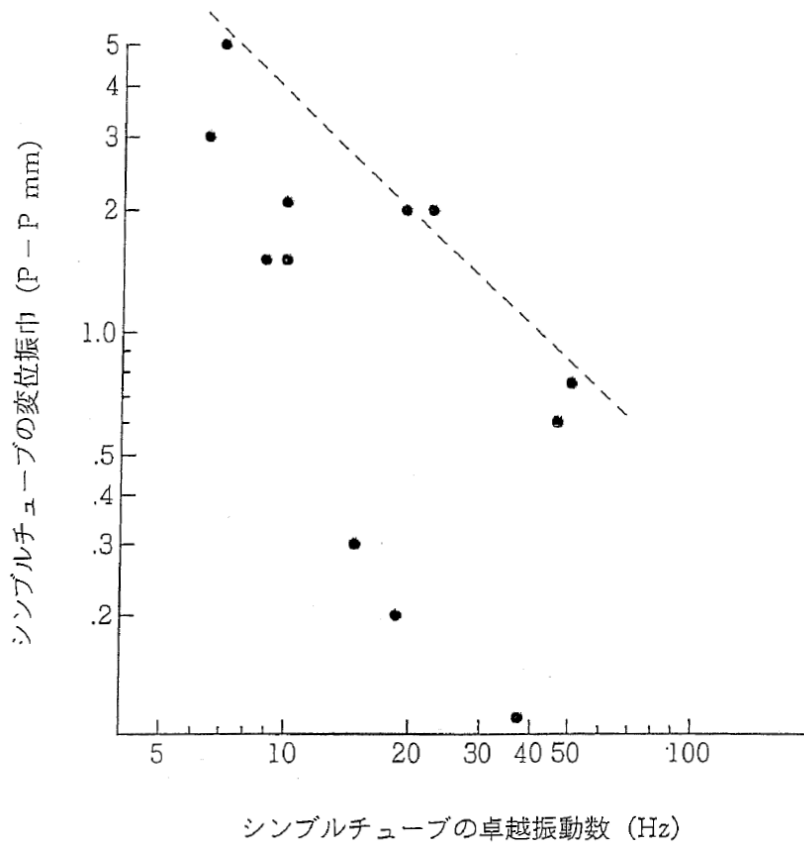


図 D-1 流動試験供試体



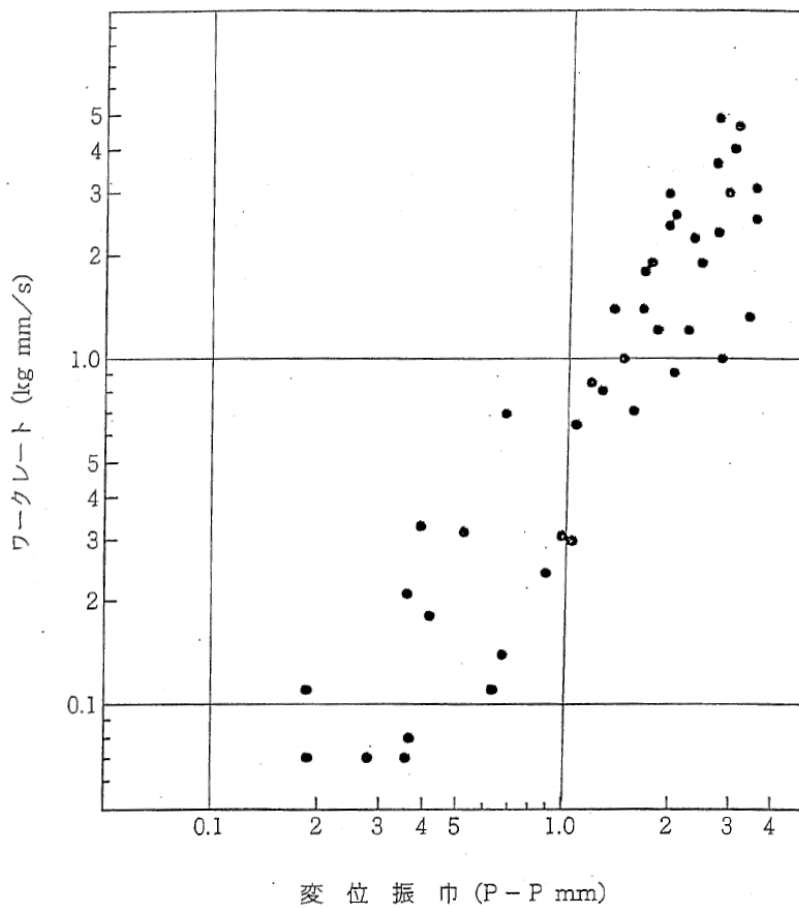
(a) 卓越振動数と支持スパンの関係



(b) 卓越振動数と振動振幅の関係

※半径隙間約 4mm

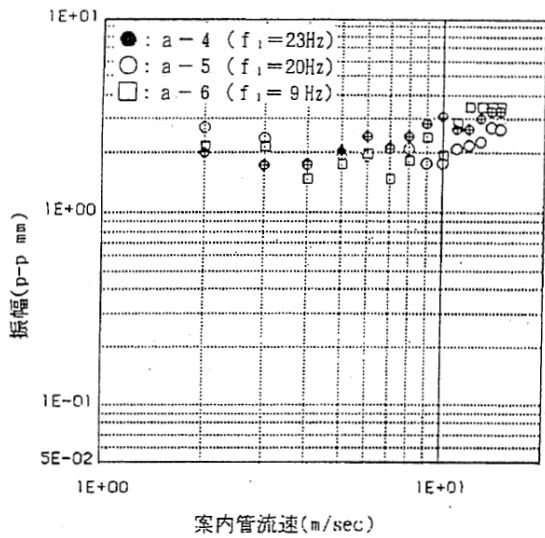
図 D-2 シンプルチューブの卓越振動数と振動振幅，支持スパンの関係



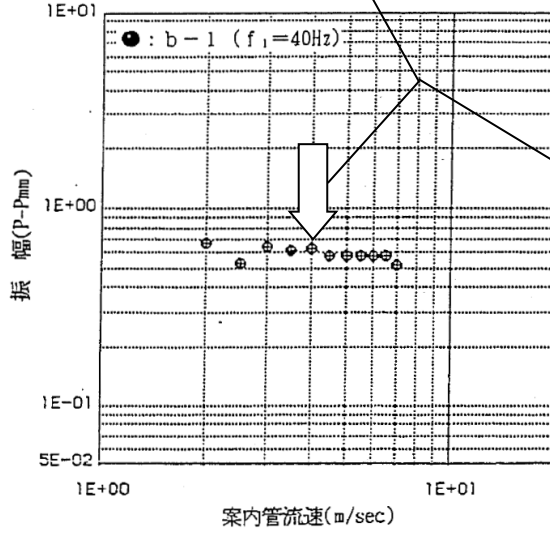
※半径隙間約 4mm, 燃料集合体下部ノズル位置

図 D-3 シンプルチューブの振動振幅とワークレートの関係

半径隙間を減少させることでシンプルチューブの支持スパンが短くなり、振動振幅が減少する

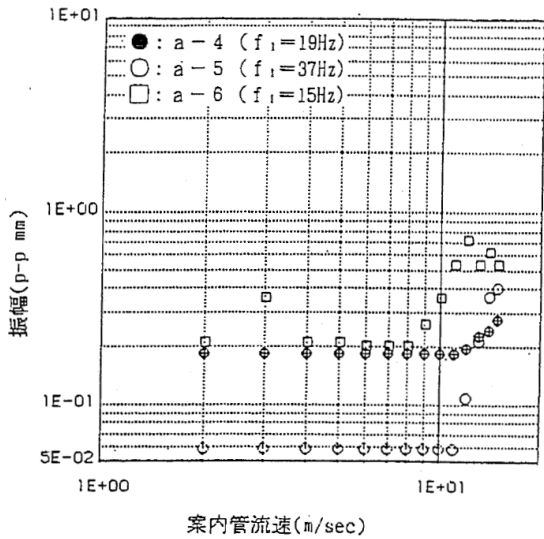


半径隙間約 4mm

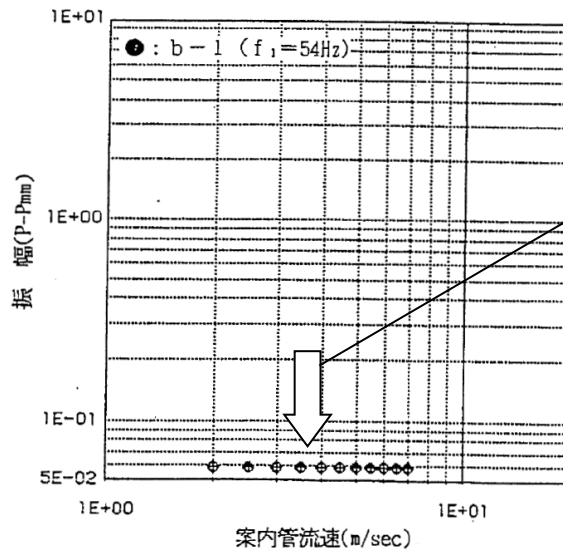


半径隙間約 1mm

(a) 燃料集合体下部ノズル位置



半径隙間約 4mm



半径隙間約 1mm

(b) 炉内計装案内管下部位置

※a-5 と b-1 は同じシンプルチューブを使用し、半径隙間のみを変えたもの。半径隙間約 4mm の条件では、シンプルチューブの初期曲がりによる案内経路との接触位置のばらつきが大きいことから、別のシンプルチューブ(a-4, a-6)を用いて試験を実施した。凡例中の f_1 は各位置における卓越振動数を示す。

図 D-4 半径隙間と振動振幅の関係

2. プラントのグループ化

流動試験の結果より，シンプルチューブと炉内計装案内管の隙間が小さいほど，ワークレートが減少することから，国内プラントのグループ分けはシンプルチューブと炉内計装案内管の半径隙間に基づいて行う。

シンプルチューブと炉内計装案内管の半径隙間に基づいて国内プラントのグループ分けしたものを表 D-1 に示す。なお，付録 E に示す点検周期も合わせて記載した。

なお，泊 3 号機には，シンプルチューブの減肉に対する改良設計として外径を増大（肉厚を増大）させたシンプルチューブが使用されており，半径隙間は **0.5mm** である。このため，グループ 3 の半径隙間 **0.9mm** のプラントに対して泊 3 号機の減肉の進行は緩やかであると考えられるが，本ガイドライン制定時点において当該プラントの点検データがないため，半径隙間 **0.9mm** のプラントと同じ点検周期とする。今後の点検結果に応じて，点検周期を見直すことも可能と考えられる。

表 D-1 国内プラントのグループ分け

グループ	プラント	炉内計装 案内管内径 (mm)	シンプル チューブ外径 (mm)	半径隙間 (mm)	点検周期
1	高浜 1 号機 高浜 2 号機	13.8	7.6	3.1	3 万時間
2	川内 1 号機 川内 2 号機 高浜 3 号機 高浜 4 号機 敦賀 2 号機	11.9	7.9	2.0	4 万時間
3	泊 1 号機 泊 2 号機 伊方 3 号機 大飯 3 号機 大飯 4 号機 玄海 3 号機 玄海 4 号機 美浜 3 号機※	9.7	7.9	0.9	6.2 万時間
	泊 3 号機				

※炉内構造物取替後

付録 E 点検周期

1. 減肉予想曲線

点検周期の設定は、減肉予想曲線に基づいて行う。減肉予想曲線の作成方法は次の通り。

(1) 減肉率と減肉体積の関係図作成

シンプルチューブの減肉が進行した場合の減肉率と減肉体積の関係をシンプルチューブの幾何学形状から求める(例：図 E-1)。図 E-1 において、減肉体積の増加に伴い減肉率の傾きが緩やかになる傾向があるが、これは、シンプルチューブの形状から、減肉初期に比べて減肉後期では、同じ摩耗体積に至るまでの減肉深さの増分が小さいためである。

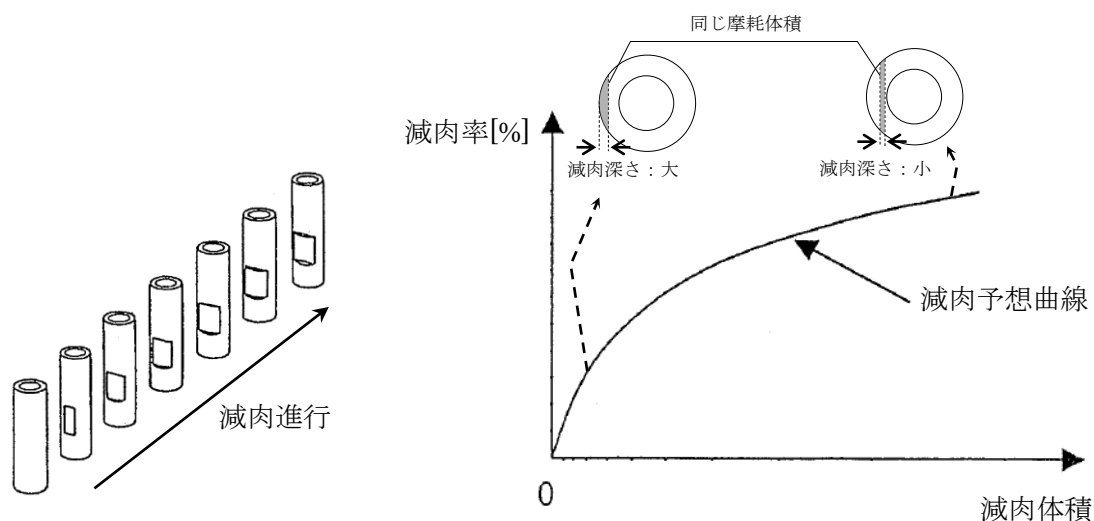


図 E-1 減肉体積と減肉率の関係

(2) 点検実績を包絡する摩耗進行予想曲線の作成

Archard の式によると、摩耗による減肉体積は次の通り計算される。

$$\begin{aligned} V &= k \times F \times S \\ &= k \times F \times \underbrace{v \times t}_{\text{ワークレート}} \end{aligned}$$

V : 減肉体積[m³]

k : 比摩耗係数[m²/N]

F : 接触荷重[N]

S : 摺動距離[m]

v : 摺動速度[m/s]

t : 接触時間[s]

本式から、ワークレートが一定であれば、減肉体積は時間に比例することが分かる。図 E-1 の横軸を時間に換算し、シングルチューブの点検結果を通る線を引き、当該シングルチューブの減肉予想曲線を作成する。なお、減肉の点検結果は、同じプラントグループの中でも、プラント、点検対象のシングルチューブ、点検時期によって複数の値が得られるが、点検周期を保守的に設定するために同一プラントグループの点検結果を包絡する減肉予想曲線を当該プラントの減肉予想曲線とする。

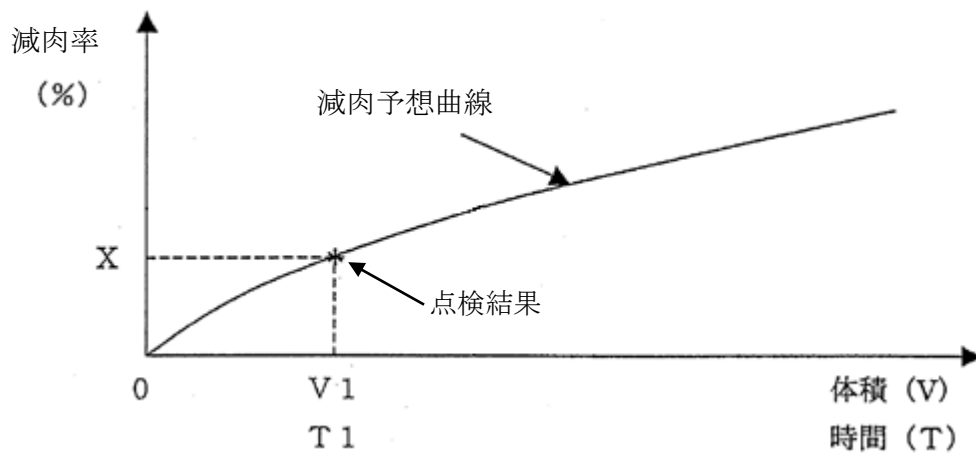


図 E-2 減肉体積と減肉率の関係

2. プラントグループごとの点検周期

点検周期は、付録 D で定めたプラントグループごとに設定する。プラントグループ 1, 2, 3 の過去のシンプルチューブの点検結果^[10]とそれを包絡するように定めた減肉予想曲線をそれぞれ図 E-3, E-4, E-5 に示す。

点検周期は、減肉予想曲線が、処置基準（位置ずらしの基準）の 50%から取替基準の 70% に至るまでの時間とする。これは、処置基準に至っていないシンプルチューブが次の点検時に急に取替基準の 70%を超えるような事態を避けるためである。

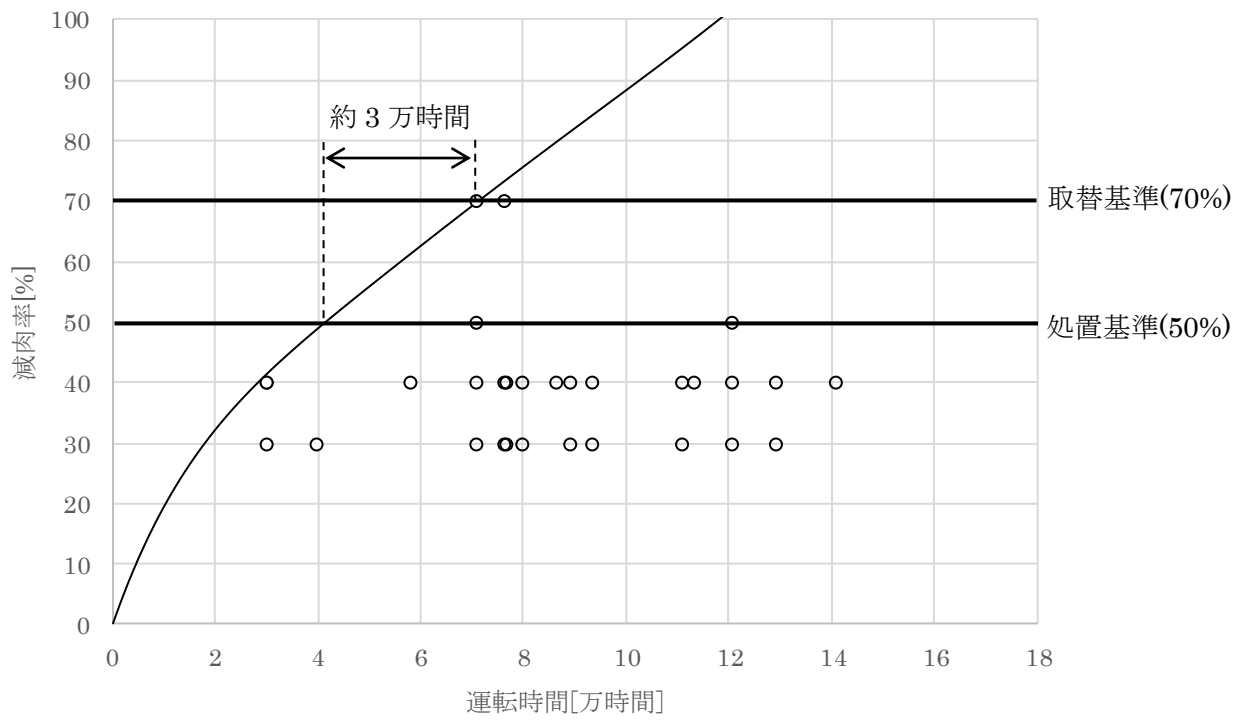


図 E-3 プラントグループ 1 の減肉予想曲線と点検周期

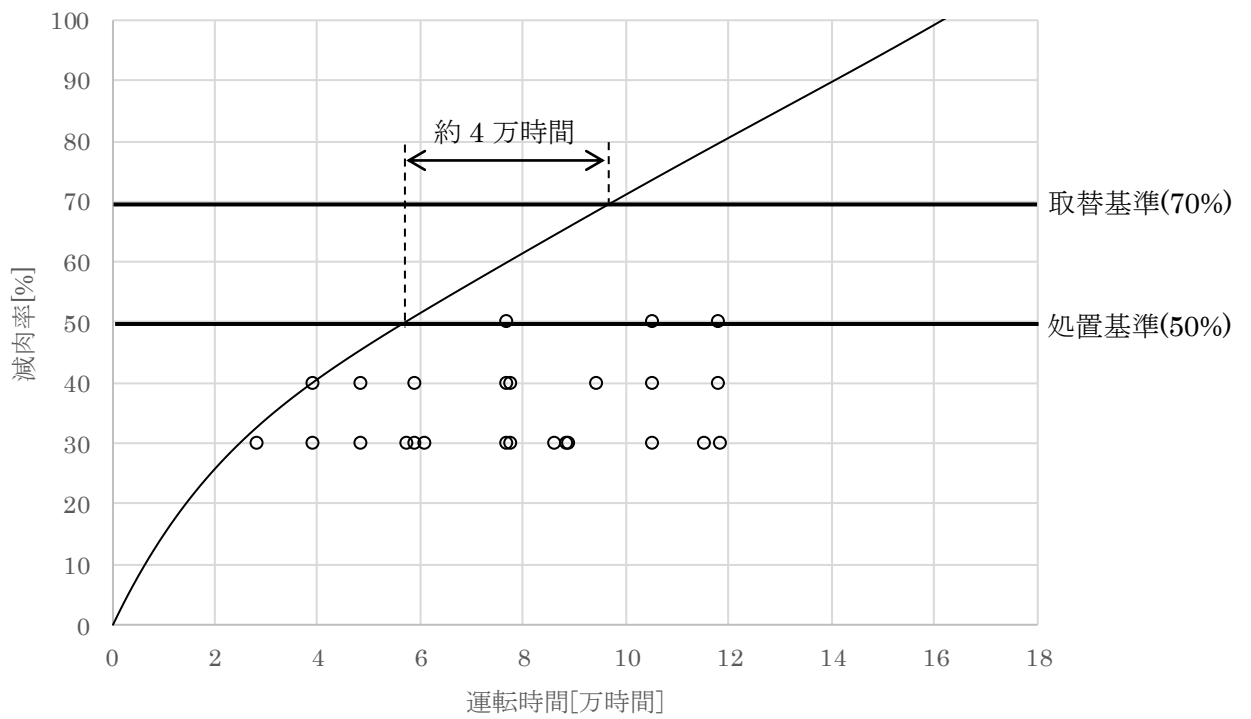


図 E-4 プラントグループ 2 の減肉予想曲線と点検周期

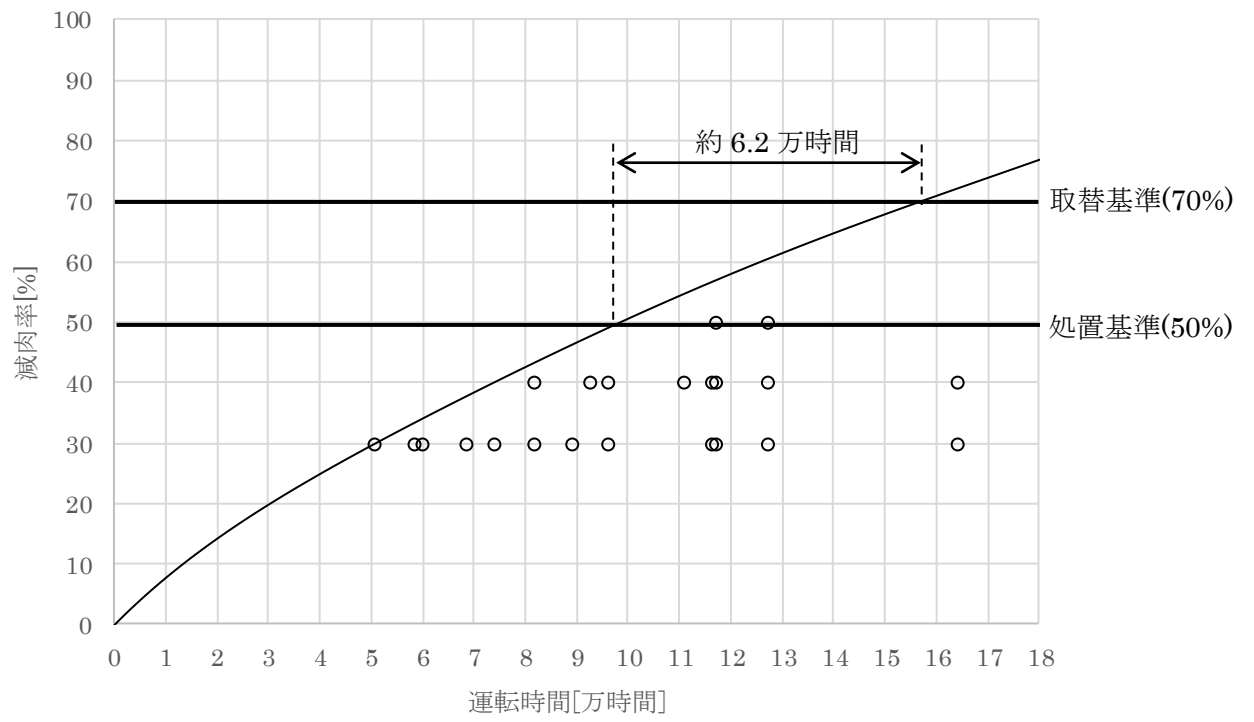


図 E-5 プラントグループ 3 の減肉予想曲線と点検周期

付録 F 限界減肉率

取替基準となる減肉率 70%は、シンプルチューブが外圧で圧壊する減肉率に十分な余裕をもって設定されたものである。

シンプルチューブの限界減肉率は、実機で想定される減肉形状を模擬したシンプルチューブの外圧による圧壊試験^[10]により求められた。試験装置を図 F-1 に示す。減肉を模擬したシンプルチューブの両端に端栓をしたものを耐圧容器中に入れ、圧力を計測しながら外圧を徐々に増加させる。圧力が急減した時点を圧壊と判断し、シンプルチューブの減肉率と圧壊圧力の関係を求めた。試験条件及び試験結果をそれぞれ表 F-1、図 F-2 に示す。図 F-2 より、設計圧力 175kg/cm²に相当する限界減肉率は 94%となる。

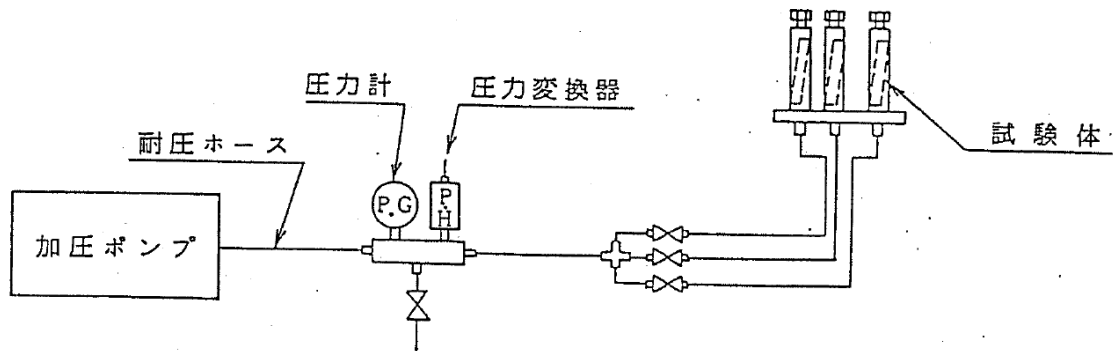
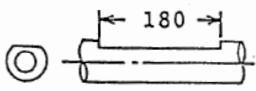
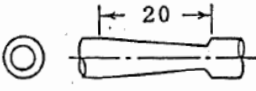
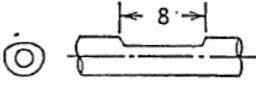
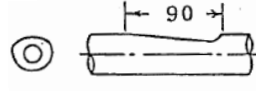


図 F-1 試験装置

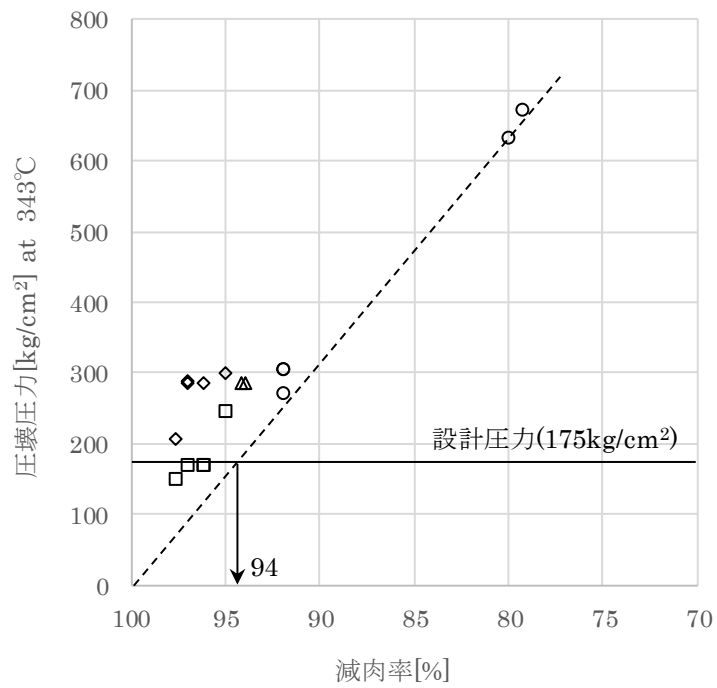
表 F-1 試験条件

タイプ	減肉形状	供試体 番号	減肉率 [%]	圧壊圧力(kg/cm ²)	
				試験値 at R.T.	高温換算値
A ○	 部分減肉(軸方向一様)	1	79.3	880	673
		2	80.0	830	635
		3	92.0	400	306
		4	92.0	400	306
		5	92.0	355	272
B △	 全周減肉(軸方向テーパ)	6	94.0	375	287
		7	94.2	375	287
C □	 実機 B部 減肉形状模擬	8	95.0	325	249
		9	97.7	200	153
		10	97.0	225	172
		11	96.2	225	172
		12	96.2	225	172
D ◇	 実機 F部 減肉形状模擬	13	95.0	400	300
		14	97.7	350	268
		15	97.0	380	291
		16	97.0	375	287
		17	96.2	375	287

※減肉形状タイプの記号(○~◇)は図 F-2 のプロット点に対応する

※高温換算値は、試験値(室温)を降伏応力比で最高使用温度 343℃に補正したもの

※B 部は燃料集合体下部ノズル位置、F 部は炉内計装案内管テーパ部を示す



※プロット点の形状は表 F-1 の減肉形状タイプ(A~D)に対応する

図 F-2 試験結果

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン[シンプルチューブ]の概要

1. 基本的な考え方

本ガイドラインは、加圧水型原子力発電所（PWR）のシンプルチューブに想定される減肉に対し、点検、評価及び予防保全等の指針を示すものである。シンプルチューブの機能、想定劣化事象は次の通り。

- シンプルチューブの機能：中性子検出器の案内
- 想定劣化事象：シンプルチューブの流動振動による摩耗減肉（図 1）

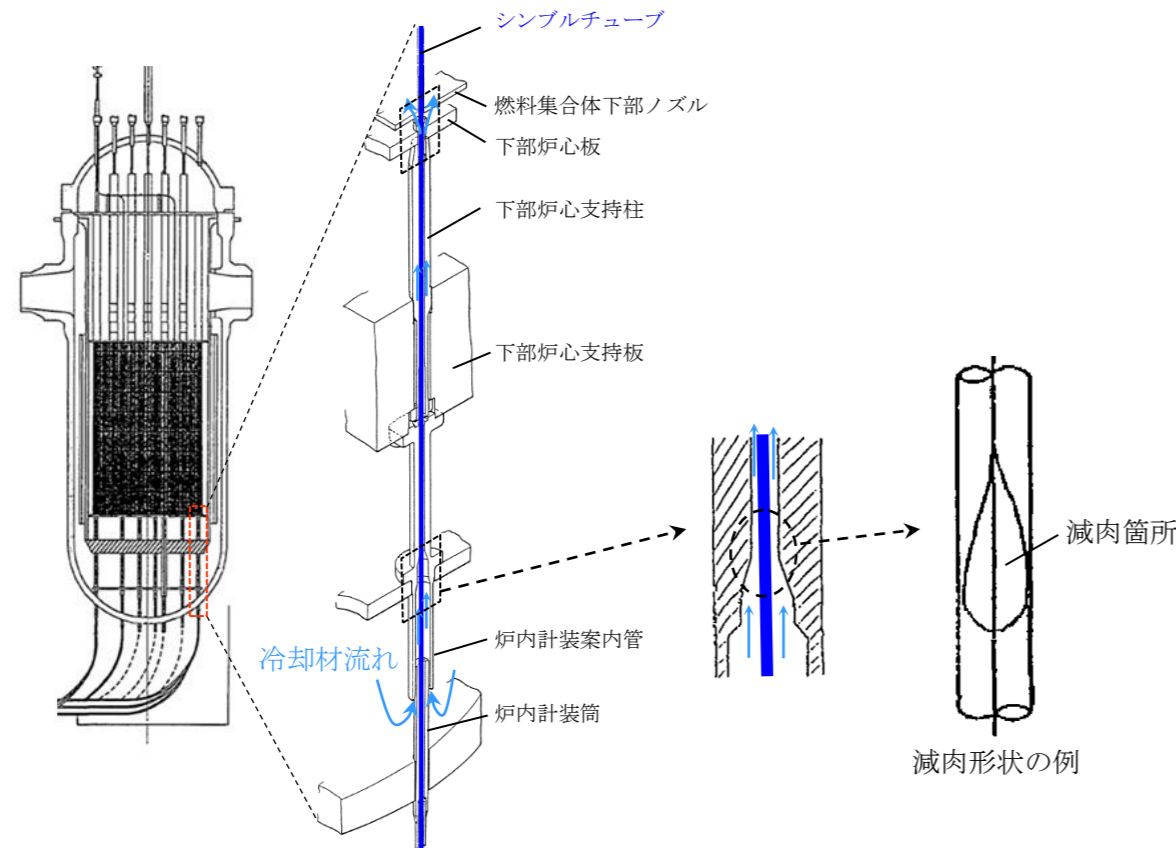


図 1 シンプルチューブの流動振動による摩耗減肉

2. 点検及び評価

2.1 点検対象

点検対象は、シンプルチューブの減肉深さとする。点検範囲は、シンプルチューブ全長とする。点検対象本数は、シンプルチューブ全数とする。

2.2 点検方法

点検方法は、シンプルチューブ内にプローブを通過させる内挿型の ECT（渦電流探傷試験）とする。

2.3 点検時期

点検は、表 1 に示すプラント運転時間を目途に実施する。なお、運転開始後初めての点検を実施するプラントは、運転開始後から表 1 に示す時間の経過時を目途に点検を実施する。

表 1 プラントグループごとの点検周期

Gr.	プラント	半径隙間 ^{※1} (mm)	点検周期 ^{※2}
1	高浜 1/2 号機	3.1	3 万時間
2	川内 1/2 号機 高浜 3/4 号機 敦賀 2 号機	2.0	4 万時間
3	泊 1/2 号機	0.9	6.2 万時間
	伊方 3 号機		
	大飯 3/4 号機		
	玄海 3/4 号機		
	美浜 3 号機	0.5	
	泊 3 号機 ^{※3}		

※1: シンプルチューブと炉内計装案内管の間の半径隙間

※2: 減肉予想曲線において、取替基準から処置基準に至るまでの時間として設定（例：図 2）

※3: 泊 3 号機は半径隙間が小さく、減肉進行は比較的緩やかと考えられるが、本ガイドライン制定時点において点検実績がないため、グループ 3 の点検周期とする。今後の点検結果に応じて、点検周期を見直すことも可能と考えられる。

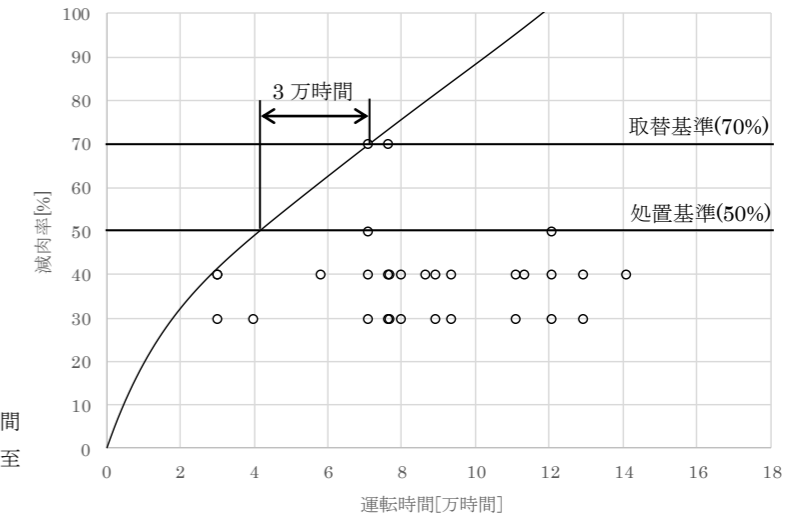


図 2 減肉予想曲線の例(プラントグループ 1)

2.4 評価

ECT の結果、シンプルチューブの減肉率（肉厚に対する減肉深さの割合）が 50%未満の場合は、次回点検時期まで継続使用することができる。シンプルチューブの減肉率が 50%以上の場合には位置ずらし、70%以上の場合には原則として取替えを実施する。なお、確認された減肉率が 70%以上で取替えを実施できない場合において、次回の点検までシンプルチューブの機能が維持できることを評価等により確認できれば、継続使用することができる。

3. 予防保全及び補修

ECT の結果に応じて以下の対応を行う。

- 減肉率 50%以上：位置ずらし
- 減肉率 70%以上：取替え

シンプルチューブの点検、評価及び予防保全のフローを図 3 に示す。

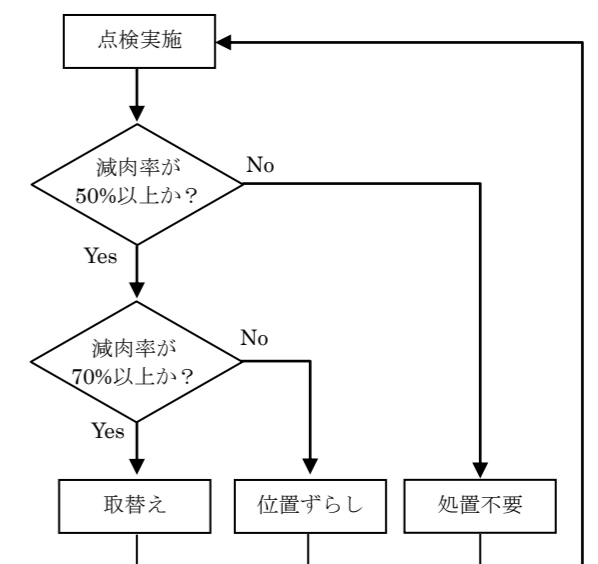


図 3 点検・評価フロー

引用文献

- [1] 日本電気協会, 原子炉冷却材圧力バウンダリ, 原子炉格納容器バウンダリの範囲を定める規程, JEAC 4602-2016
- [2] 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針, 平成 2 年 8 月 30 日
- [3] 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」2016/2019 年追補 (第 I 編 軽水炉規格)
- [4] NUCLA, 炉内計装用シングルチューブの損傷について, 1988-関西-M001
- [5] NUCLA, 炉内計装用シングルチューブの損傷について, 1988-関西-M013
- [6] NUCLA, 炉内計装用シングルチューブの損傷について, 1987-関西-M017
- [7] NUCLA, 炉内計装用シングルチューブの損傷について, 1988-関西-M018
- [8] 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 原子炉施設保安規定に係る技術資料に関する報告書(その 2), 平成 17 年 4 月
- [9] 共同研究報告書, 炉内計装用シングルチューブ信頼性向上に関する研究, 平成 5 年 9 月 (PWR5 電力-三菱重工業の共同研究)
- [10] 受託調査報告書, 炉内計装シングルチューブ ECT データ評価に関する委託調査, 平成 13 年 3 月 (PWR5 電力から三菱重工業への委託研究)

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン
[シングルチューブ]
(第1版)

編集者 一般社団法人 原子力安全推進協会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

発行者 一般社団法人 原子力安全推進協会
〒108-0014 東京都港区芝 5-36-7 三田ベルジュビル 13～15 階
TEL 03-5418-9312 FAX 03-5440-3606

©原子力安全推進協会，2022

本書に掲載されたすべての記事内容は、原子力安全協会の許可なく、
転載・複写することはできません。