

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン
[制御棒クラスター案内管]
(第5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[制御棒クラスター案内管]（第5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

[制御棒クラスター案内管]

(第5版)

2024年12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。

2024年12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：制御棒クラスタ案内管

改訂年月	版	改訂内容	備考
2002年3月	初版発行	—	
2004年1月	第2版発行	点検時期の規定を修正	
2013年6月	第3版発行	プラントグループ, 管理摩耗長さ及び点検開始時期の見直し	JANSI-VIP-02 第3版
2019年3月	第4版発行	海外の制御棒クラスタ案内管摩耗加速事例, 海外との点検時期比較の追加, 第2章の記載見直しなど	JANSI-VIP-27 第4版
2024年12月	第5版発行	国内点検実績の反映, 国内プラントの改造工事実績反映, 海外点検情報の反映	JANSI-VIPP-02-05 JANSI-VIP-55 第5版

※改訂の詳細は参考資料4参照

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。

したがって、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

(2024年12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	東京科学大学
委員	森下 和功	京都大学
委員	堂崎 浩二	東北大学
委員	若井 隆純	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	今井 直人	東京電力ホールディングス (株)
幹事	天野 洋一	関西電力 (株)
幹事	日下 純	日本原子力発電 (株)
委員	山崎 朗	北海道電力 (株)
委員	新藤 智也	東北電力 (株)
委員	中野 宏之	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	坂口 昌平	関西電力 (株)
委員	中川 純二	中国電力 (株)
委員	松原 克幸	四国電力 (株)
委員	野崎 剛	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	北条 公伸	三菱重工業 (株)
委員	新井 拓	電力中央研究所
委員	成宮 祥介	原子力安全推進協会
参加者	小林 広幸	EPRI International, Inc.
参加者	町田 秀夫	(株) テプコシステムズ
事務局	大畑 仁史	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

[制御棒クラスタ案内管]

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
3.3.1 点検開始時期	3
3.3.2 点検周期	4
3.4 評価	4
3.4.1 判定基準	4
3.4.2 詳細評価	4
3.4.3 点検、補修及び予防保全措置のフロー	4
第4章 予防保全措置及び補修	6
解説1-1 ガイドライン制定の目的	7
解説1-2 制御棒クラスタ案内管案内板の選定理由と対象プラント	7
解説2-1 制御棒クラスタ案内管の構造	8
解説2-2 制御棒クラスタ案内管の機能	8
解説2-3 制御棒クラスタ案内管に想定される経年劣化事象及び運転経験	8
解説2-4 制御棒クラスタ案内管の機能維持	9
解説2-5 プラントのグループ化	9
解説3-1 点検開始時期	11
解説3-2 摩耗進行予測	11
解説3-3 点検周期	11
解説3-4 摩耗進行予測及び点検時期の見直し	11
解説3-5 制御棒の摩耗の考慮	11
解説4-1 制御棒クラスタ案内管単体取替及び炉内構造物取替	12
解説4-2 制御棒クラスタ案内管に対する予防保全	12
付録A 制御棒クラスタ案内管の摩耗事象について	A-1
付録B 制御棒クラスタ案内管のグループ化	B-1
付録B-1 制御棒クラスタ案内管の流動解析	B-1-1
付録B-2 制御棒クラスタ案内管の流動試験	B-2-1
付録C 摩耗長さの定義	C-1
付録C-1 摩耗長さの検査手法例	C-1-1
付録D 摩耗予測の詳細	D-1
付録D-1 摩耗進行時の摩耗分散	D-1-1

付録D-2 プラントグループごとの摩耗予測	D-2-1
付録E 制御棒クラスタ案内管の機能と管理摩耗長さ	E-1
付録E-1 地震時の制御棒抜け出しの評価	E-1-1
付録E-2 地震時の制御棒クラスタ破損防止の評価.....	E-2-1
付録E-3 制御棒減肉時の管理摩耗長さへの影響	E-3-1
付録F 評価の余裕に対する検討	F-1
付録G 点検周期	G-1
付録H 摩耗進行予測曲線に基づく点検周期の妥当性について	H-1
付録I 取替後の制御棒クラスタ案内管点検時期の設定例	I-1
参考資料 1 海外における制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗加速事例について	参 1-1
参考資料 2 海外との初回点検時期の比較	参 2-1
参考資料 3 用語一覧表	参 3-1
参考資料 4 改訂経緯	参 4-1
参考資料 5 炉内構造物等点検評価ガイドライン [制御棒クラスタ案内管] の概要.....	参 5-1
参考資料 6 引用文献	参 6-1

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）に使用される制御棒クラスタ案内管（GT）案内板について、想定される経年劣化事象に対する合理的な点検及び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、加圧水型原子力発電所の制御棒クラスタ案内管案内板に適用する（解説 1-2）。

1.2.2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、商業運転開始後の加圧水型原子力発電所の供用期間中とする。

1.3 用語の定義

案内板リガメント：制御棒クラスタ（RCC）の各ロッド（制御棒）をガイドするための案内穴の内側に制御棒クラスタ結合部（スパイダー）が通過するように設けられた溝を形成する平坦部をいう（図 1）。また、その長さをリガメント長さという。

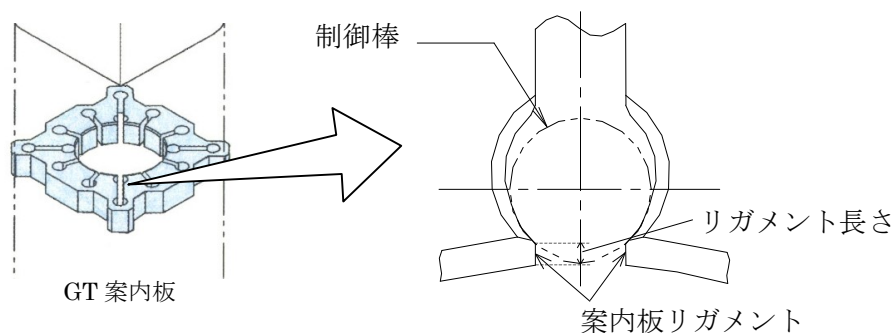


図 1 案内板リガメント

貫通摩耗：案内板の摩耗が進行し、案内板のスリット幅が制御棒外径（健全時）と等しくなるまで拡大した摩耗状態をいう（図 2）。

摩耗長さ：摩耗なしの状態を 0%，貫通摩耗を 100%として百分率で示した案内板リガメントの摩耗量をいう（図 2）。

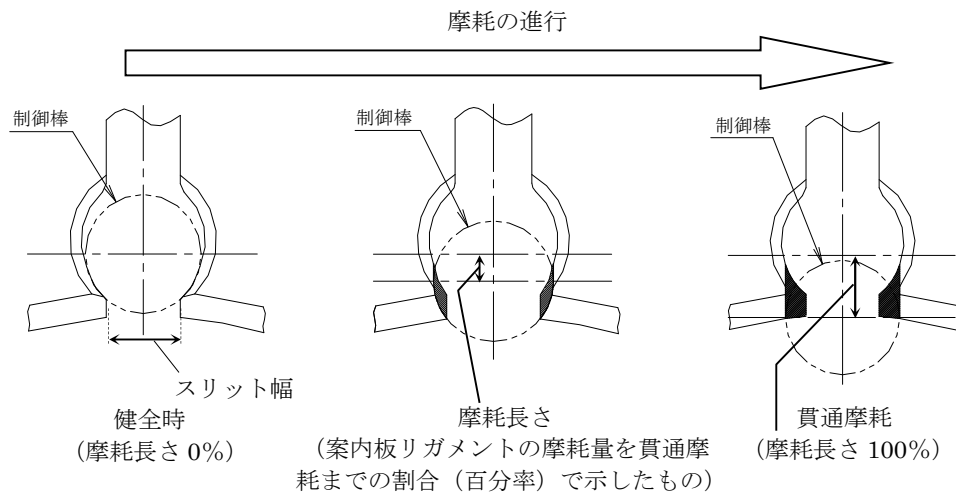


図 2 摩耗長さ

管理摩耗長さ：制御棒クラスタ案内管の機能維持上制限される摩耗長さに対し、（それ以下に設定される）摩耗を管理するための摩耗長さをいう。

第 2 章 基本的考え方

- (1) 本ガイドライン検討にあたって最も重要で基本的な事項として「原子炉の安全性確保」をあげ、これを厳守することを大前提に検討を進めることを基本とする。
- (2) 制御棒クラスタ案内管は、上部炉内構造物（UCI）に設置された筒状の構造物であり、内部に複数枚設置された案内板及びコンティニューアス部（解説 2-1）により制御棒クラスタを燃料領域まで案内する機能を持つ。本ガイドラインは、この機能を維持することを目的に、制御棒クラスタ案内管案内板の点検評価の方法を示す（解説 2-1、2-2）。
- (3) 制御棒クラスタは 1 次冷却材流れにより流動振動し、接触部である制御棒クラスタ案内管案内板に摩耗が生じる。摩耗の進行により案内板の案内穴のリガメントが徐々に減少し、制御棒が案内穴から抜け出せる状態にまで摩耗が進行した場合、制御棒クラスタの案内機能を喪失する可能性がある。このため、本ガイドラインは、制御棒クラスタ案内管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、案内板の摩耗を想定する（解説 2-3）。
- (4) 案内板の摩耗によって制御棒クラスタ案内管が案内機能を喪失する前に適切な対策を

行うため、点検により案内板の摩耗状態を継続的に監視する。点検時期は、過去の点検結果を基に予測した摩耗長さが、制御棒抜け出しの観点から定めた管理摩耗長さに達するまでの時期に余裕を考慮して定める。制御棒が摩耗した状態では抜け出しが生じやすくなるため、案内板の管理摩耗長さは制御棒被覆管の摩耗を考慮して定める(解説 2-4, 第 3 章)。

- (5) 制御棒クラスタ案内管は、燃料集合体の型式 (14×14 燃料, 15×15 燃料, 17×17 燃料), 上部炉内構造物の構造, 製作時期等により, 複数のタイプがあるため, 制御棒クラスタ案内管のタイプ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 (解説 2-5)。
- (6) 次回の点検時期を設定できない程度に摩耗が進行した場合, 制御棒クラスタ案内管の取替等の対策を実施する。本対策は予防保全としても実施できる (第 4 章)。

第 3 章 点検及び評価

3.1 点検対象

個々のプラントにおいて点検の対象となる制御棒クラスタ案内管は、全数点検を基本とする。ただし、摩耗データが蓄積され、各制御棒クラスタ案内管の摩耗進展傾向が予測可能と判断される場合は、摩耗進行程度が大きい案内管を含む部分点検とすることができる。

点検の対象となる案内板は、通常運転時に制御棒クラスタが案内されているすべての案内板とし、各案内板における点検対象案内板リガメントは、制御棒クラスタ案内機能に影響を与える可能性のある内側案内板リガメント 4 箇所とする。ただし、技術的根拠がある場合には、特定の案内板に対する点検を省略することができる。

3.2 点検方法

個々の制御棒クラスタ案内管案内板の点検は、目視等、摩耗長さを特定できる方法とする。(付録 C-1)

3.3 点検時期

3.3.1 点検開始時期

点検開始時期は、以下のプラント運転時間を目途に実施する (解説 3-1)。

プラントグループ 1 (14×14 タイプ ITH 型)	…………約 12 万時間
プラントグループ 2 (14×14 タイプ FLAT 型)	……約 24 万時間
プラントグループ 3 (14×14 タイプ CIR)	…………約 36 万時間

プラントグループ 4 (15×15 タイプ)	……………約 40 万時間
プラントグループ 5 (15×15 タイプ CIR)	……………約 100 万時間
プラントグループ 6 (17×17 タイプ)	……………約 25 万時間
プラントグループ 7 (17×17 タイプ改良標準型)	……約 49 万時間

3.3.2 点検周期

次回点検は、最新の点検結果を反映した摩耗進行予測（解説 3-2）を用い、前回点検から管理摩耗長さに達すると予測されるまでの期間の 1/2 を目途に設定する（解説 3-3）。

ただし、摩耗データの蓄積等により摩耗進行の傾向が十分に把握できると判断された場合は、点検周期を別途設定することができる（解説 3-4）。

また、管理摩耗長さには制御棒の摩耗を考慮するものとする（解説 3-5）。

3.4 評価

3.4.1 判定基準

- (1) 点検の結果、3.3.2 項に示す点検周期を設定できる場合は、次回点検まで継続使用できる。
- (2) (1) 項が満足されない場合は、3.4.2 項に示す詳細評価を行い、継続使用が可能であることを示すか、(1) 項を満足できるように当該制御棒クラスタ案内管を取替えなければならない。なお、取替えた制御棒クラスタ案内管は取替後の仕様に基づく摩耗進行予測を行うことができる。

3.4.2 詳細評価

上記 3.4.1 (2) 項における詳細評価として、試験的手法、解析等により、制御棒クラスタ案内管としての機能が維持できることの評価結果を得られれば継続使用することができる。

3.4.3 点検、補修及び予防保全措置のフロー

制御棒クラスタ案内管の点検、補修及び予防保全措置のフローを図 3 に示す。

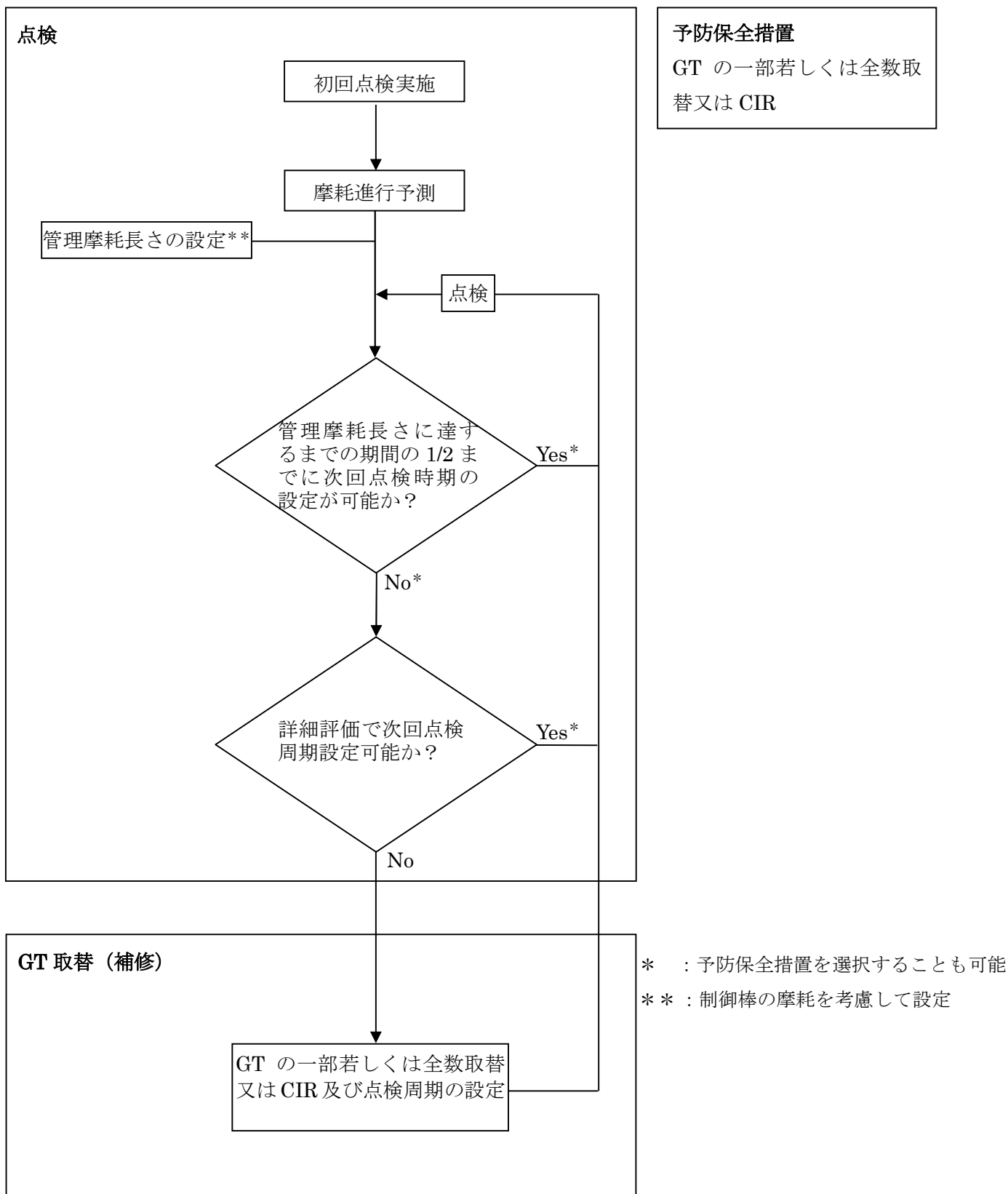


図3 点検，補修及び予防保全措置のフロー

第 4 章 予防保全措置及び補修

制御棒クラスター案内管の機能維持のため、点検を実施する代わりに、案内板の摩耗が管理摩耗長さに達するまでに、予防保全措置として、制御棒クラスター案内管単体取替、若しくは炉内構造物取替（CIR）を実施することができる。

上記の措置は、補修についても適用できる（解説 4-1, 4-2）。

解説 1-1 ガイドライン制定の目的

炉内構造物は、安全上重要な機能として①炉心支持及び位置決め、②冷却材流路の維持及び流量適正配分、③制御棒クラスタ挿入性の確保、④炉内計装の案内を有しており、想定される経年劣化事象がこれら安全機能に及ぼす影響を適切に考慮し、経年劣化事象の発生及び進行の特性に応じた点検及び評価を実施していく取り組みが重要である。

本ガイドラインでは、炉内構造物に想定される経年劣化事象に対し、現状の最新知見に基づいた合理的な点検及び評価の方法を示し、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 制御棒クラスタ案内管案内板の選定理由と対象プラント

加圧水型原子力発電所の制御棒クラスタ案内管については、1次冷却材の流れによって制御棒クラスタが流動振動を起こし、制御棒クラスタ案内管案内板と長時間にわたり接触することにより、両者に摩耗が発生することが知られている（付録 A 参照）。

制御棒クラスタ案内管案内板は、制御棒クラスタを案内する機能を有しているため、摩耗状況を点検により適時把握し（付録 C 参照）、取替等の処置を実施していく取り組みが必要である。したがって、本ガイドラインでは、制御棒クラスタ案内管案内板を適切に点検評価していくための合理的な点検方法、点検頻度、予防保全措置等を定めている。なお、本ガイドラインを適用する国内プラントは、美浜 3 号機、高浜 1,2,3,4 号機、大飯 3,4 号機、伊方 3 号機、玄海 3,4 号機、川内 1,2 号機、敦賀 2 号機、泊 1,2,3 号機である。

解説 2-1 制御棒クラスタ案内管の構造

制御棒クラスタ案内管の構造を図 2-1-1 に示す。制御棒クラスタ案内管は、上部炉内構造物に設置されており、上部制御棒クラスタ案内管、下部制御棒クラスタ案内管から構成される。これらは、両者のフランジ部で上部炉心支持板の上面にボルトで固定される。下部制御棒クラスタ案内管の下端は 2 本の支持ピンで上部炉心板に水平方向に固定され、鉛直方向には上部炉心支持柱（USC）との熱伸び差を逃がすことのできる構造となっている。制御棒クラスタ案内管の内部には、複数の案内板が設置され、制御棒クラスタの挿入を案内する。下部制御棒クラスタ案内管の下部はコンティニユアス部と呼ばれ、燃料領域からの冷却材流れから制御棒クラスタを保護するため、制御棒クラスタを連続的に囲う構造となっている。制御棒クラスタ案内管本体の材質は SUS304、固定ボルトの材質は冷間加工 316 ステンレス鋼、支持ピンの材質は X-750 である。

解説 2-2 制御棒クラスタ案内管の機能

制御棒クラスタ案内管のうち、本ガイドラインで対象とする案内板は、主に以下の機能を有する。

- ①制御棒クラスタを燃料領域まで案内する。
- ②制御棒クラスタを適切な間隔で支持することで水平地震加速度による変形及び破損を防止する。

解説 2-3 制御棒クラスタ案内管に想定される経年劣化事象及び運転経験

制御棒クラスタ案内管案内板には、制御棒クラスタの流動振動による摩耗が生じることが分かっており、国内外で多くの報告事例がある。このため、制御棒クラスタ案内管の経年劣化事象としては、案内板の摩耗を想定する（付録 A 参照）。国内においては、本ガイドライン初版発行から第 5 版発行までに、述べ 16 回の点検実績がある。また、泊 1 号機において、予防保全として 2004 年に 1 体（管理摩耗長さ 66% に対して最大摩耗長さ 53%）、2007 年に 2 体（最大摩耗長さ 50%、41%）取替えた事例がある^[1,2]。海外においては、ガイドライン第 4 版以降、米国で 16 件の点検事例が報告されており、全件で摩耗が報告されている。^[9,10] なお、米国で確認された案内板の摩耗加速事例については参考資料 1 に示す。

解説 2-4 制御棒クラスタ案内管の機能維持

本ガイドラインは、制御棒クラスタ案内管の機能維持のために、案内板が摩耗した場合に、案内機能維持として案内板から制御棒が抜け出さないこと、及び基準地震動 S_s の荷重により制御棒クラスタが損傷しないことを考慮する。制御棒クラスタが流動振動により制御棒クラスタ案内管案内板と接触することで、案内板だけでなく、制御棒側も摩耗するため、制御棒抜け出しを評価する場合には、制御棒側の摩耗も考慮する（付録 E 参照）。なお、案内板から制御棒が抜け出さない条件においては制御棒クラスタの支持状態は健全時と基本的に変わらないため、制御棒クラスタ落下時間に与える影響は考慮しない。

解説 2-5 プラントのグループ化

制御棒クラスタ案内管の評価対象である案内板の形状、上部炉内構造物の形式を基に類似の摩耗速度を示すプラントをグループ化した（付録 B 参照）。

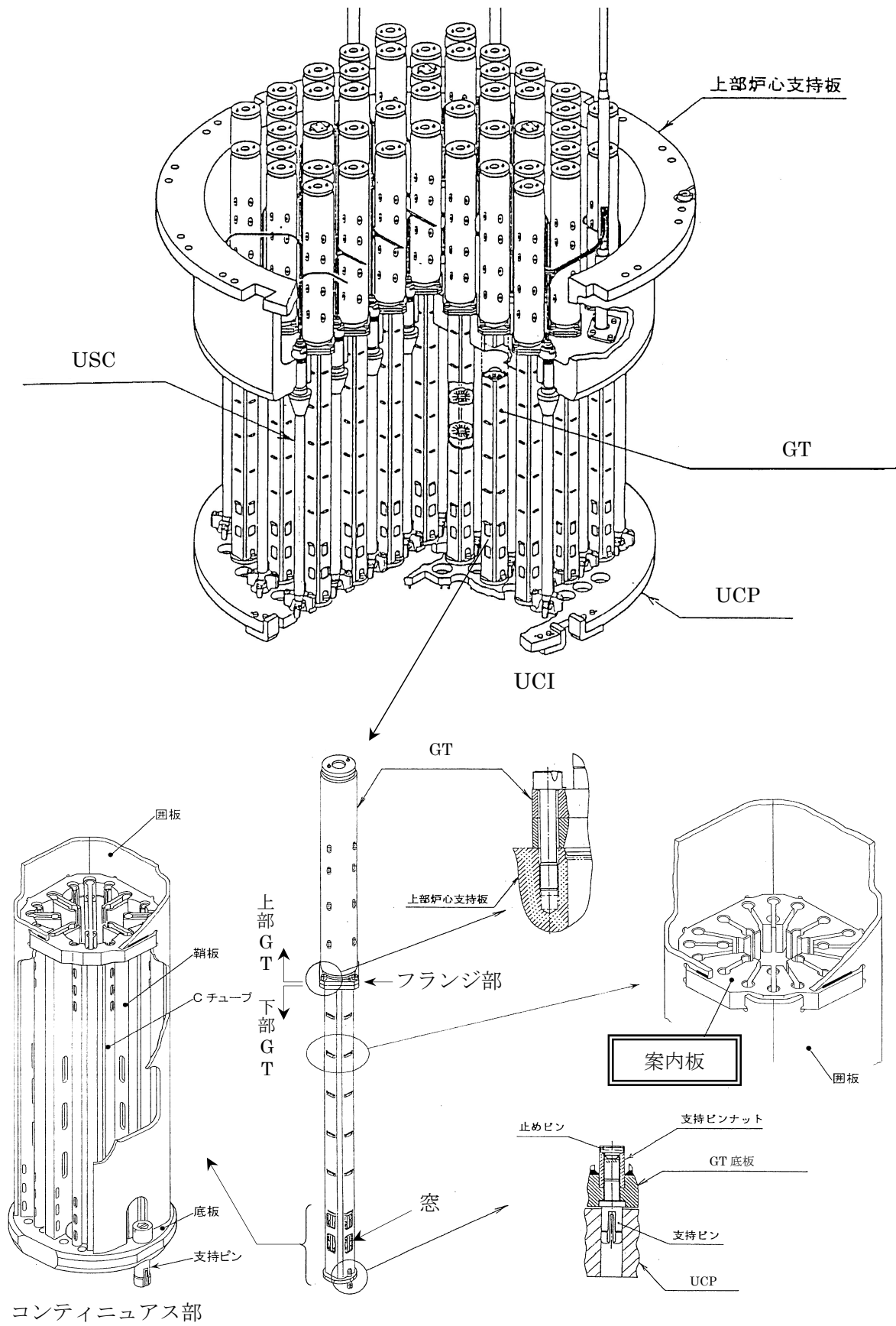


図 2-1-1 GT の構造

解説 3-1 点検開始時期

過去に実施した制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗点検内容が本ガイドラインの規定に則している場合、その点検実績を初回点検として扱うことができる（付録 G 参照）。

解説 3-2 摩耗進行予測

案内板の摩耗進行予測とは、内側案内穴の摩耗長さの進行を予測することをいう。案内板の摩耗は Archard の式に則り、単位時間当たりの摩耗体積一定として進行するものとする。制御棒クラスタ案内管には複数の案内板があるため、構造上の位置関係からは摩耗はその進行とともに複数の案内板に分散されると考えられる。したがって、評価にあたっては摩耗の分散の効果を取り入れる。また、最大摩耗量を有する案内板の摩耗進行が最も速く評価される摩耗形態で予測する（付録 D, F 参照）。

解説 3-3 点検周期

制御棒クラスタ案内管はそのすべてが機能を維持することが必要であるため、最も進行が早い制御棒クラスタ案内管案内板リガメントについて摩耗進行予測を行い、当該プラントの点検周期を決定する（付録 G 参照）。

なお、連続した複数回の点検データから、解説 3-2 に示す摩耗進行予測に基づいて点検周期を決定することは、概ね妥当であることが分かる（付録 H 参照）。

解説 3-4 摩耗進行予測及び点検時期の見直し

プラントグループごとに摩耗データを蓄積した摩耗進行傾向が、本ガイドラインで設定した摩耗進行予測と異なると判断された場合は、点検結果に従い、摩耗進行予測、グループ化、点検時期等の見直しを検討する。

また、複数回にわたる点検により摩耗データが蓄積され、管理摩耗長さに達すると予測した時期に近づくと、点検時期から管理摩耗長さに達するまでの摩耗進行予測に対して、不確定性が少なくなる。次回点検の時期を変更できる根拠がある場合、点検時期を見直すことができる。

解説 3-5 制御棒の摩耗の考慮

制御棒の摩耗については別途管理されており、Cr めっき化など耐摩耗対策も実施されているが、評価対象の案内板の管理摩耗長さに反映するだけの十分な知見が得られていない場合は、案内板の管理摩耗長さは、制御棒の摩耗を安全側に考慮して設定する（付録 F 参照）。なお、制御棒の摩耗点検結果等が得られれば管理摩耗長さにそれらを反映することができる。さらに個々の制御棒摩耗量が計測等により担保できる場合は、制御棒クラスタ案内管ごとに管理摩耗長さを設定することができる。

(付録 E-2 参照)。

解説 4-1 制御棒クラスタ案内管単体取替及び炉内構造物取替

摩耗進行が早いと予測される制御棒クラスタ案内管単体，若しくは制御棒クラスタ案内管を含めた炉内構造物を取替えた場合，取替後の点検周期は取替後の制御棒クラスタ案内管の仕様に基づいて定めることができる（付録 I 参照）。

取替後の制御棒クラスタ案内管の摩耗進行が取替前のものと同等以下の場合，取替までに要した期間はその機能を維持できること，及びその間に他プラントの点検実績等の反映により摩耗予測の精緻化を図ることが可能であると考えられるため，取替までに要した期間が経過するまでに点検周期を定めればよい。

なお，単体取替の場合，取替えた制御棒クラスタ案内管以外の点検周期は，取替えた制御棒クラスタ案内管の次に摩耗が進行している制御棒クラスタ案内管の摩耗進行予測に基づいて定める。

また，点検実績等から得られる知見により取替の他に適切な保全方法があればその方法を実施でき，技術的根拠を示すことができる場合は摩耗進行予測を見直すことができる。

解説 4-2 制御棒クラスタ案内管に対する予防保全

原子力発電所の保全方式として，機器の故障を未然に防止するために実施する予防保全と機器の機能喪失発見後に要求機能遂行状態に修復させるために実施する事後保全がある³⁾。制御棒クラスタ案内管は安全機能を有しており，機能を喪失した場合には直ちに安全性に影響するため，制御棒クラスタ案内管については，事後保全ではなく機能喪失前の段階で保全を行う予防保全が大前提となる。

本ガイドラインでは，制御棒クラスタ案内管が機能喪失に至ることがないように，摩耗が，保守的に定めた管理摩耗長さに達するまでの時期に点検を実施し，案内板の摩耗が管理摩耗長さ以下であることを確認することを定めている。このため，本ガイドラインでは，案内板の摩耗が管理摩耗長さに達するまでに実施する保全（制御棒クラスタ案内管取替，若しくは炉内構造物取替）を予防保全と称する。

付録 A 制御棒クラスタ案内管の摩耗事象について

1. 摩耗事象

制御棒クラスタ案内管は制御棒クラスタを 1 次冷却材の流れから保護し，燃料への挿入経路を確保してこれを案内している。

燃料領域を上昇し，上部炉心板の穴を通過した 1 次冷却材の一部は，制御棒クラスタ案内管下端よりその中へ流入し，制御棒の周辺を上方へ流れる。この流れによって制御棒が流動振動を起こし，制御棒クラスタ案内管案内板との長時間にわたる接触により両者に摩耗が生じる。

2. 摩耗量評価

制御棒の摩耗は，1 次冷却材の流れが定常状態であり，流動振動による摩耗を生じさせる力（ワークレート）は一定と考えられるため，摩耗量を評価する一般式として次のような Archard の式を採用している。そこで，制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗もワークレート一定（ただしワークレートの値は異なる）と考え，Archard の式を使用することとした。

$$V=k \times F \times S$$

ここで，

$$V=\text{摩耗体積} \quad [\text{m}^3]$$

$$k=\text{比摩耗量} \quad [\text{m}^2/\text{N}]$$

$$F=\text{接触荷重} \quad [\text{N}]$$

$$S=\text{摺動距離} \quad [\text{m}]$$

付録 B 制御棒クラスタ案内管のグループ化

制御棒クラスタ案内管案内板摩耗については、図 B-1 に示すリガメント長さの違い等が管理摩耗長さに至るまでの時間に大きく影響し、また、制御棒クラスタ案内管案内板形状、及び制御棒クラスタ案内管を含む上部炉内構造物の形式は摩耗進展傾向に影響するため、これらに着目して各プラントを表 B-1 に示すとおり 7つのグループに分類する。

なお、流動解析によって各グループにおける制御棒クラスタ案内管近傍の流動状況を比較し、表 B-1 のグループ分けの妥当性を確認している（付録 B-1）。また、上部炉内構造物の形式に依存するグループ 1 とグループ 2 の分類については、流動解析と合わせて、流動試験でも妥当性を確認している（付録 B-2）。

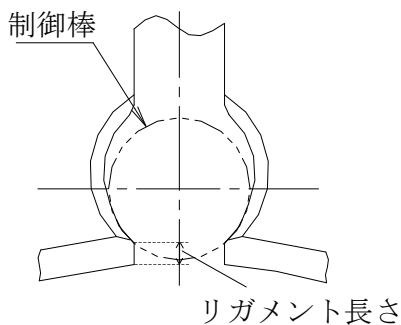


図 B-1 案内板案内穴のリガメント長さ

表 B-1 GT のグループ化

グループ	グループ 1	グループ 2	グループ 3	グループ 4	グループ 5	グループ 6			グループ 7
						a	b	c	
タイプ	14×14 ITH 型	14×14 FLAT 型	14×14 CIR	15×15	15×15 CIR	17×17AS 3 ループ	17×17 4 ループ	17×17AS 4 ループ	17×17 3 ループ 改良標準型
GT 形式	14×14			15×15		17×17			
リガメント長さ	2.4mm		5.5mm	4.8mm	12.4mm	2.9mm			2.9mm
案内板板厚	24mm		40mm	24mm	40mm	24mm			40mm
ループ数	2 ループ			3 ループ			4 ループ		3 ループ
UCI の構造※1	ITH 型	FLAT 型	ITH 型	FLAT 型	ITH 型	ITH 型			ITH 型
RCC 表面処理	Cr めっき								
対象 プラント	泊 1 号機 泊 2 号機	美浜 1 号機※3 美浜 2 号機※3	玄海 1 号機※3 玄海 2 号機※3 伊方 1 号機※3 伊方 2 号機※3	高浜 1 号機 高浜 2 号機	美浜 3 号機	川内 1 号機 川内 2 号機 高浜 3 号機 高浜 4 号機 伊方 3 号機	大飯 1 号機※3	敦賀 2 号機 大飯 2 号機※2,3 大飯 3 号機 大飯 4 号機 玄海 3 号機 玄海 4 号機	泊 3 号機

※1：UCI の構造は図 B-2 参照

※2：大飯 2 号機※3 のみ 17×17A タイプ (17×17AS より GT 全長が長い)

※3：廃止措置中

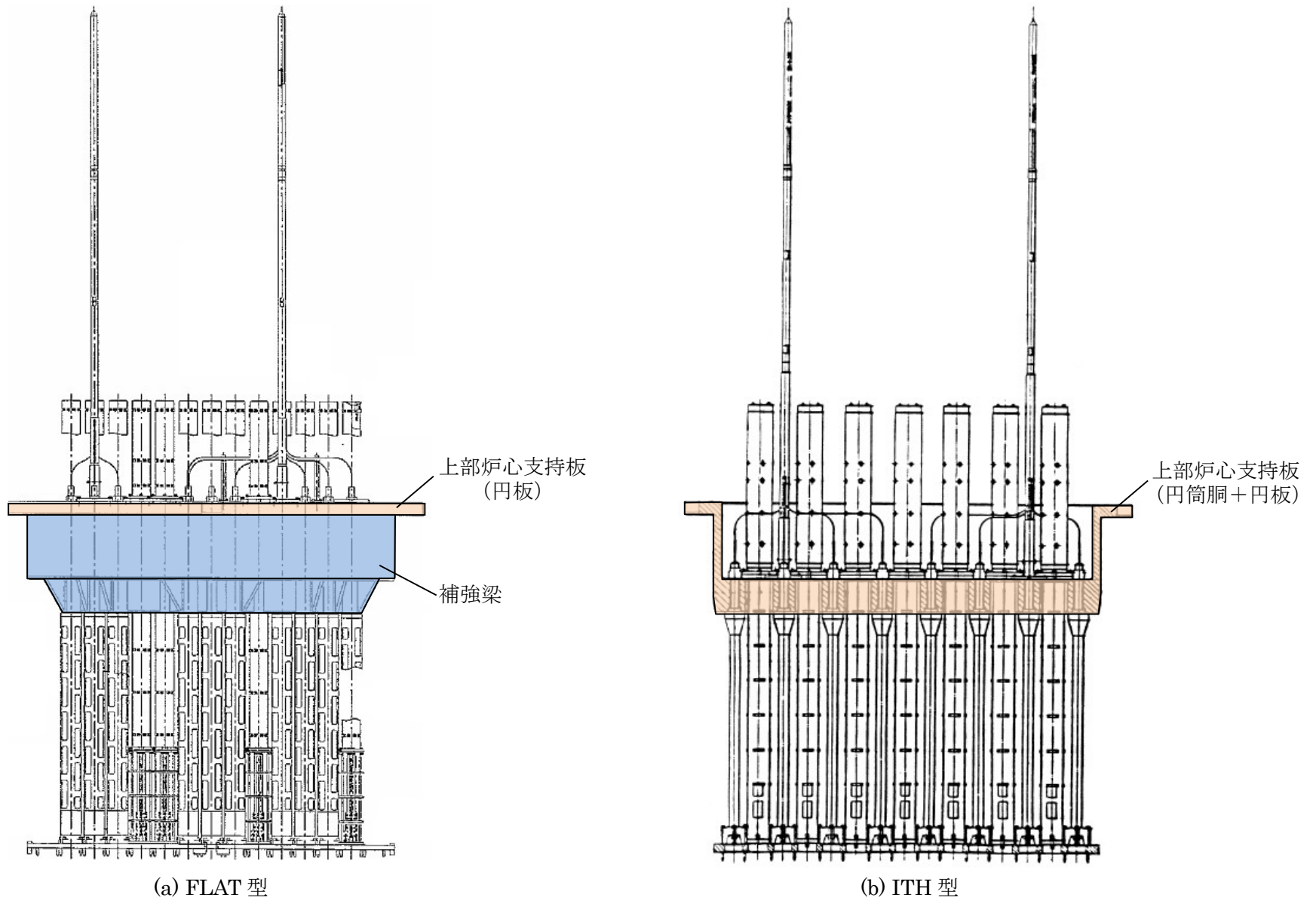


図 B-2 UCI の構造

付録 B-1 制御棒クラスタ案内管の流動解析

制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗は、制御棒クラスタの流動振動に起因することから、制御棒クラスタの振動の原因となる制御棒クラスタ案内管コンティニューアス部の形状との関連が大きいと考えられる。そこで、制御棒クラスタ案内管下部近傍の流況、特に 1 次冷却材の流速及び乱れエネルギーの分布を制御棒クラスタ案内管の形式ごとに比較することを目的として、流況に影響を与える上部炉心支持柱も模擬した流動解析を実施した。(図 B-3)

解析のために、制御棒クラスタ案内管及び上部炉心支持柱を模擬した範囲を図 B-4 に示す。解析結果を流速分布と乱れエネルギー分布で整理したものを図 B-5、図 B-6 に示す。

その結果、次のように整理できる。

コンティニューアス部内側の流速については

- ・ 14×14GT/ITH 型 (14ITH 型) は上部炉心支持柱からの流れが、囲板のないコンティニューアス部に流れ込み、制御棒クラスタ案内管内の流速が局所的に増加する。
- ・ 14×14GT/FLAT 型 (14FLAT 型)、15×15GT/FLAT 型 (15FLAT 型) は上部炉心支持柱からの流れがないため、コンティニューアス部に囲板はないが、制御棒クラスタ案内管内への冷却材流れ込みはない。
- ・ 17×17GT/ITH 型 (17ITH 型) と 17×17AS GT/ ITH 型 (17AS ITH 型) は、上部炉心支持柱からの流れがあるがコンティニューアス部に囲板があることから、上部炉心支持柱からの冷却材流れ込みは遮断される。

コンティニューアス部内側の流れの乱れについては

- ・ 14ITH 型は炉心から制御棒クラスタ案内管内に流入する主流の一部が中板に衝突すること及び上部炉心支持柱からコンティニューアス部に冷却材が流れ込むことにより、コンティニューアス部内側に乱れが生成されやすい。
- ・ 14FLAT 型、15FLAT 型は炉心から制御棒クラスタ案内管内に流入する主流の一部が中板に衝突することから、乱れが生成されやすい。

以上により、

- ・ 制御棒クラスタ案内管のコンティニューアス部及び上部炉心支持柱のタイプによって、それぞれ制御棒クラスタの振動、すなわち摩耗進展傾向に影響する流況、特に流速及び乱れエネルギーの大小関係が異なっており、別グループに分類することが適切と考えられる。
- ・ 摩耗進展の傾向は、流動解析の結果から「14ITH 型」、「14FLAT 型」、「それ以外」の順に早いと考えられる。なお、15FLAT 型は 14FLAT 型と類似の摩耗傾向を持つと考えられるが、リガメント長さが大きいいため、摩耗管理上はそれほど厳しくないと考えられる。

グループ	グループ 1	グループ 2	グループ 4	グループ 6	
GT 形式 構造	14×14 ITH 型	14×14 FLAT 型	15×15 FLAT 型	17×17 ITH 型	17×17AS ITH 型
上部構造物					
GT 断面	<p>中板</p>		<p>中板</p>	<p>中板, 上板</p>	

図 B-3 GT 周辺の構造比較

解析範囲

出力範囲のモデル

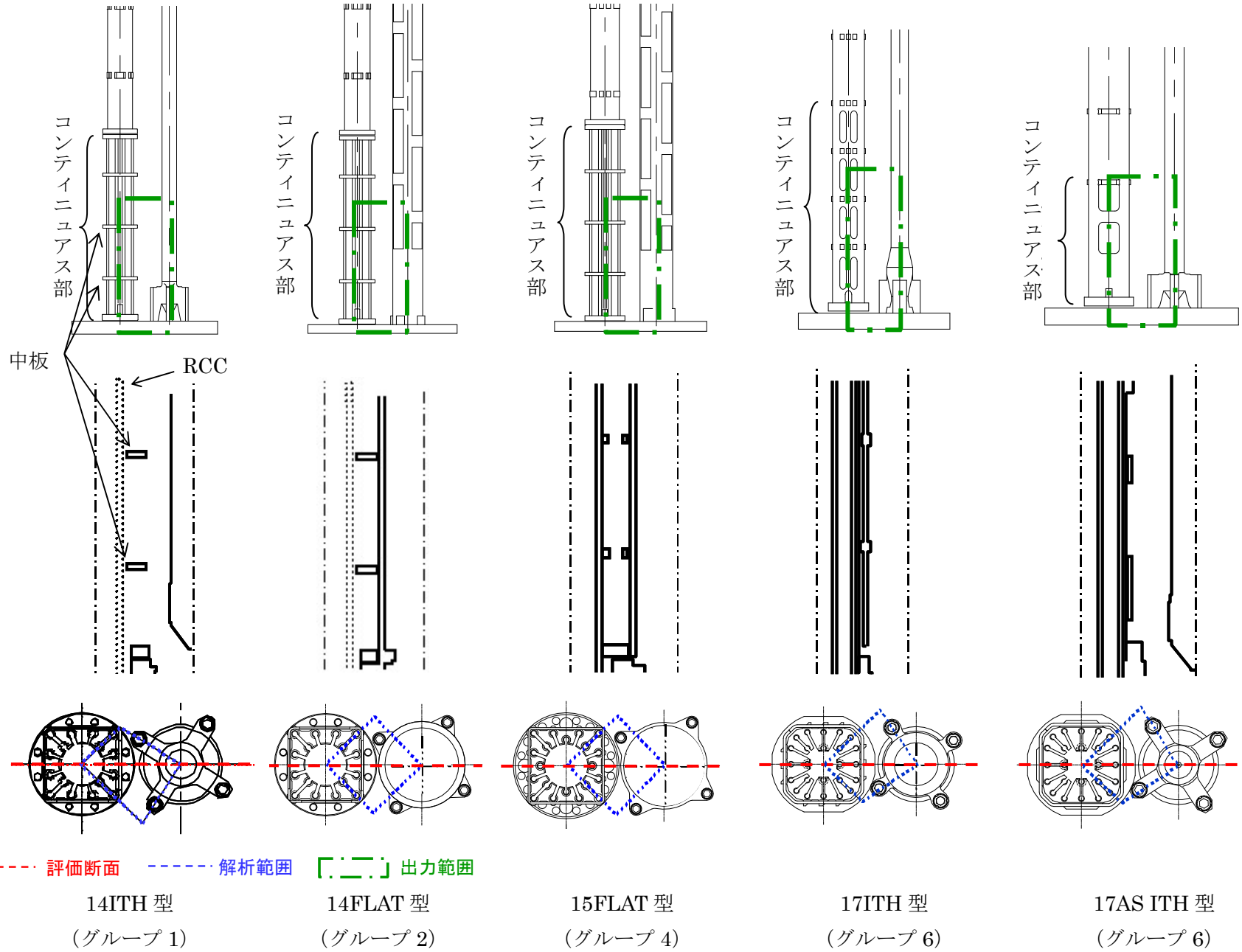


図 B-4 解析範囲

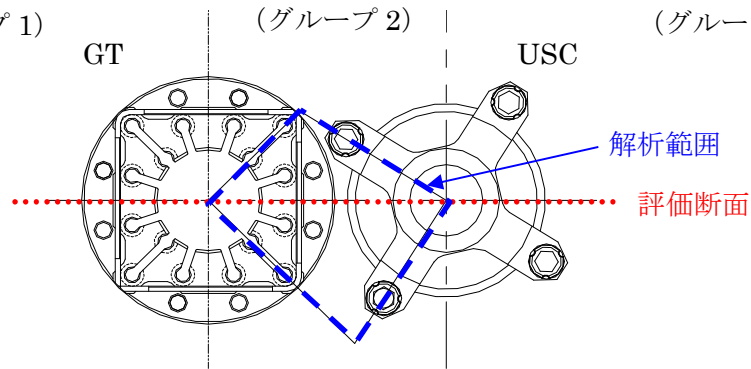
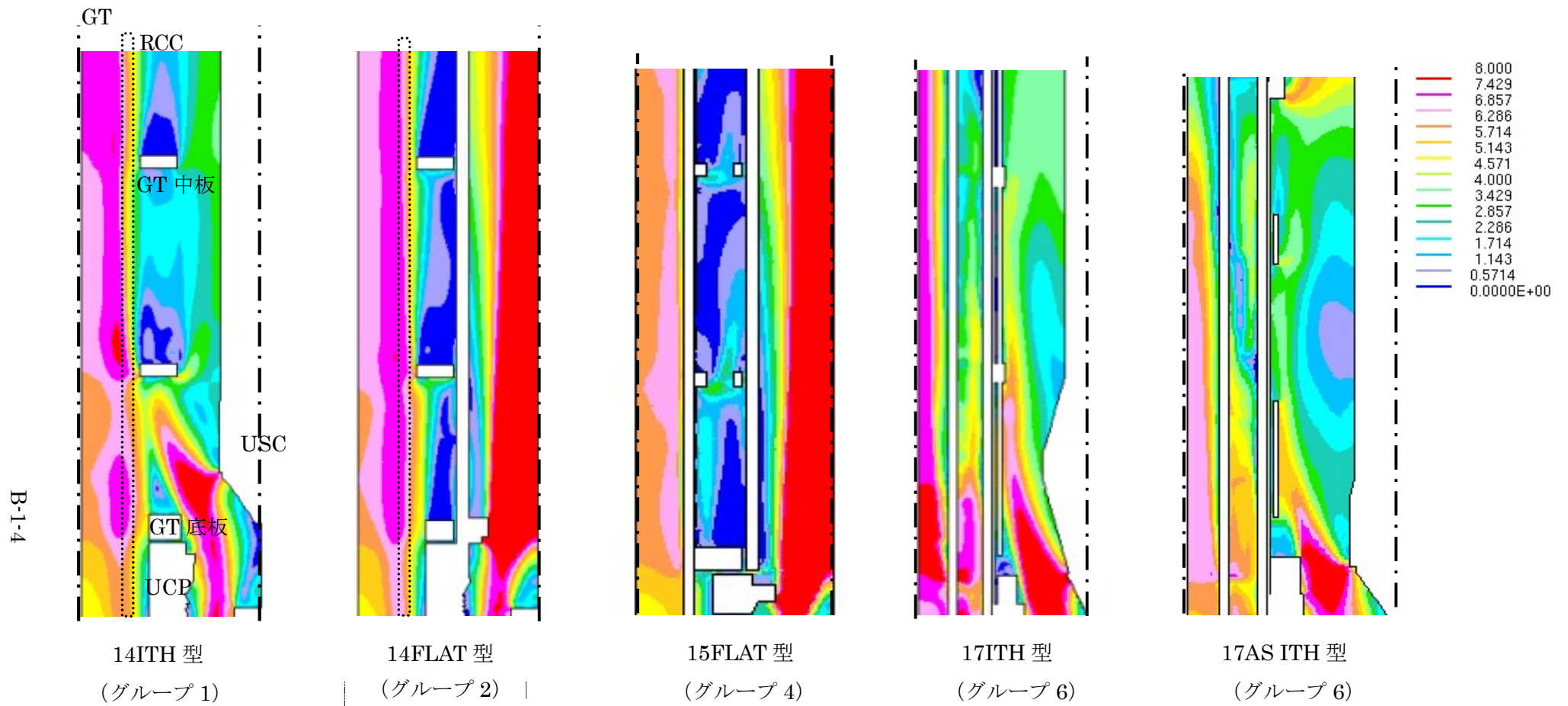


図 B-5 GT 近傍の冷却材流速分布 (m/s)

B-1-5

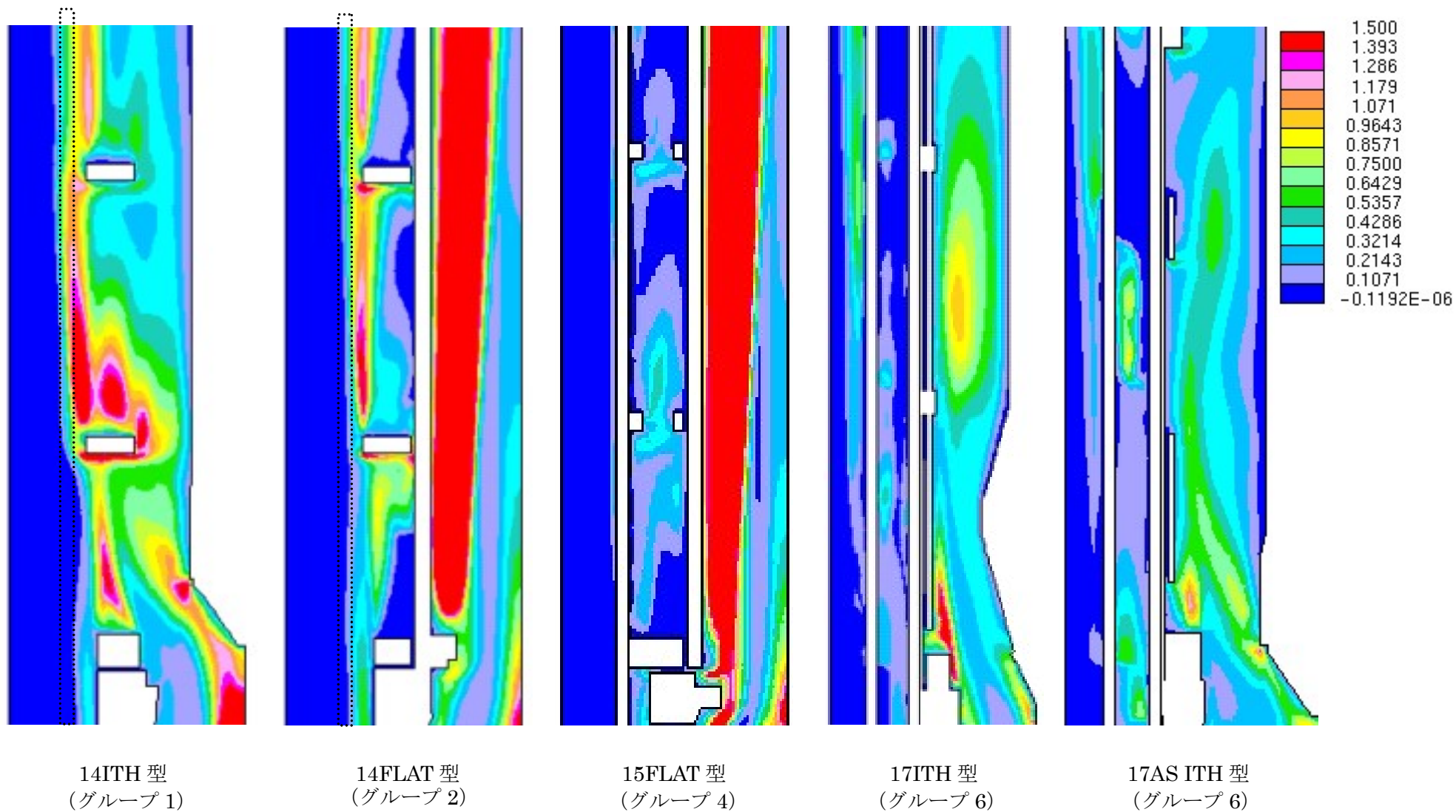


図 B-6 GT 近傍の冷却材乱れエネルギー分布 (m^2/s^2)

付録 B-2 制御棒クラスタ案内管の流動試験

1. 目的

付録 B-1 で示した制御棒クラスタ案内管のグループごとの流動解析において、制御棒クラスタ案内管内の乱れの生成がある程度確認され、摩耗進展が早い傾向を有すると考えられる 14ITH 型と 14FLAT 型の制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗の相違を流動試験で把握した。

2. 試験概要

流動試験は、1990 年代に制御棒クラスタの振動について検討した 17×17GT 流動試験の成果を参考に実施した。

当時の検討により、コンティニューアス部の流体押付力は制御棒の支持条件を安定化させる働きがあり、制御棒に加わる励振力はコンティニューアス部が支配的となることが分かっている。このため、14FLAT 型、14ITH 型の流動試験では、コンティニューアス部の流体励振力と流体押付力を計測した。また、14×14GT は囲板のないコンティニューアス部（オープンコンティニューアス）であることから、制御棒クラスタ案内管コンティニューアス部に流入する上部プレナム内の横流れを上部プレナム流況試験で計測した。そして、この結果を境界条件として、実機サイズの制御棒クラスタ案内管と上部炉心支持柱からなる 2 体流動試験において、制御棒に作用する流体押付力、流体励振力の計測を実施するとともに、実験結果を基に振動解析を行い、ワークレートを算出した。

3. 上部プレナム流況試験

上部プレナム流況試験に使用する試験装置を図 B-7 に示す。この試験では、上部プレナム全周を模擬した 1/8 スケールモデルを用いて、室温で試験を実施した。そして、14FLAT 型、14ITH 型それぞれの内部構造物形状、配列を模擬して、ピトー管で制御棒クラスタ案内管の上流及びコンティニューアス部内側の流速を計測した。

4. 2 体流動試験

2 体流動試験に使用する試験装置を図 B-8 に示す。この試験では炉心から制御棒クラスタ案内管内に流入する主流及び頂部バイパス流を模擬するとともに出口ノズルに向かう横流れ流を模擬した。なお、上部プレナム流況試験及び流動解析結果に基づいて実機の横流れ流速を設定した。

制御棒の流体励振力の計測結果を図 B-9 に示す。これより、14ITH 型では横流れ流速大の条件において励振力は増加し、14ITH 型の方が 14FLAT 型に比べて励振力は大きいことが分かった。

制御棒の流体押付力の計測結果を図 B-10 に示す。これより、横流れ流速大の条件にお

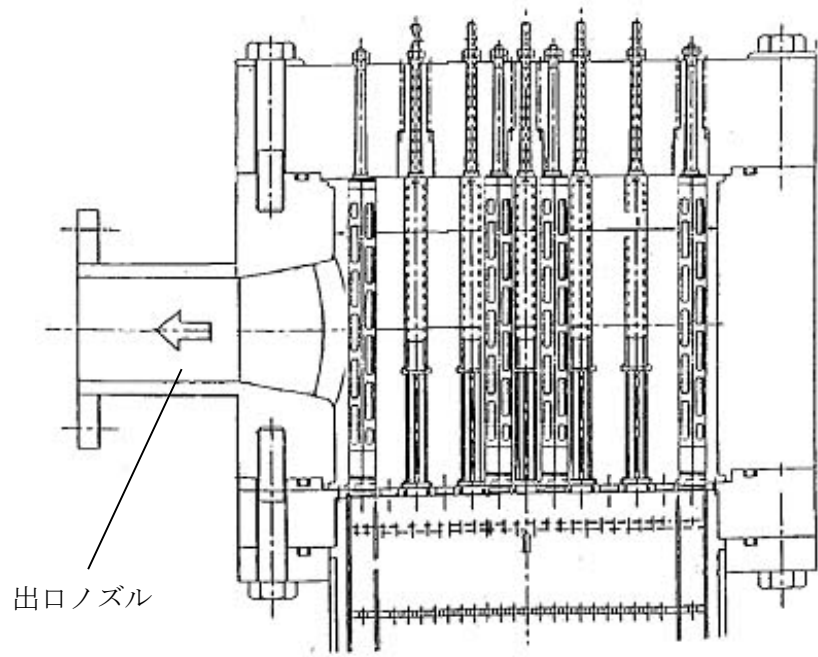
いて押付力は低下し、14FLAT型と14ITH型の相違は小さいことが分かった。

2体流動試験によって得られた流動体押付力、励振力を基にして、制御棒の振動解析を行い、ワークレートを算出した。ワークレート解析の方法を図B-11に、解析結果を図B-12に示す。これらより、横流れ流速大の条件においてワークレートは増加し、14ITH型の方が14FLAT型に比べてワークレートは大きいことが分かった。これは、14ITH型ではワークレートに与える隣接上部炉心支持柱からの流れの影響が大きいためと考えられる。

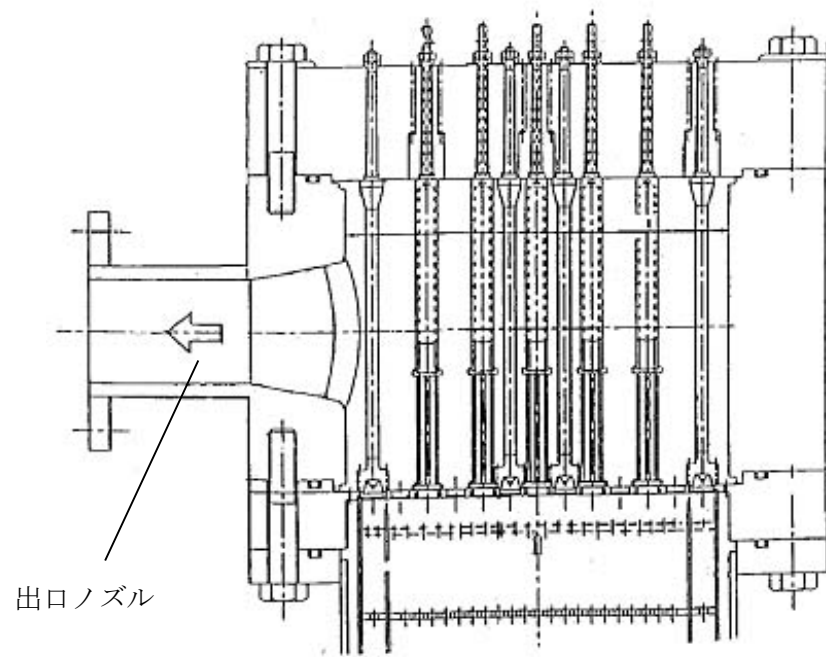
以上、14FLAT型、14ITH型の流動試験をまとめると以下のようになる。

- ① 14ITH型のワークレートの方が14FLAT型のワークレートよりも、大きくなる可能性がある。
- ② 上記①のワークレートの増加は、炉心外周出口ノズル近傍において、横流れ流速が大きい場合、14FLAT型と比較して、14ITH型の方が励振力が大きい傾向を有することが要因である。この励振力の増加は、14ITH型では励振力に与える隣接上部炉心支持柱からの流れの影響が大きいためと考えられる。
- ③ 以上より、14ITH型と14FLAT型は異なるグループ分けを行うことが妥当であると考えられる。

B-2.3



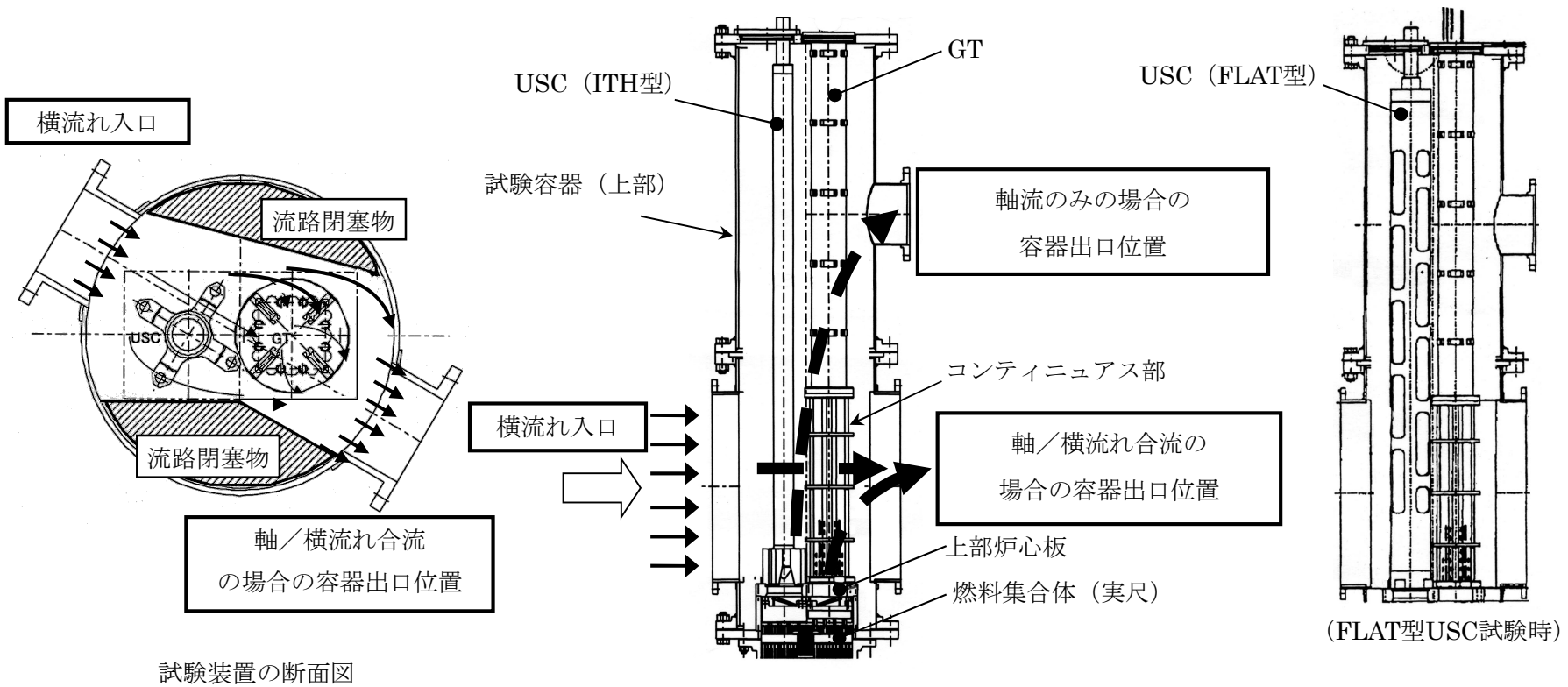
14FLAT型



14ITH型

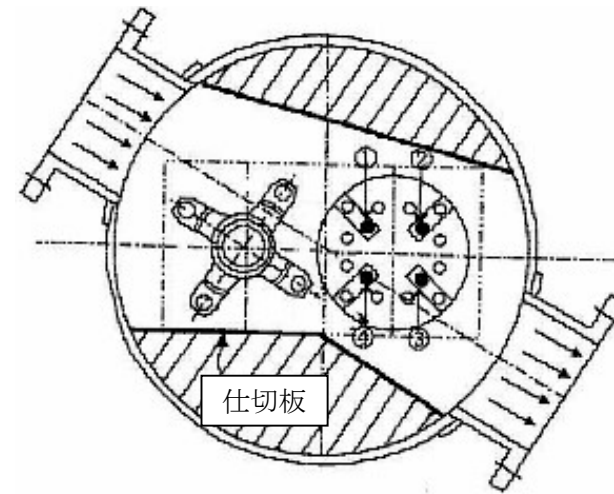
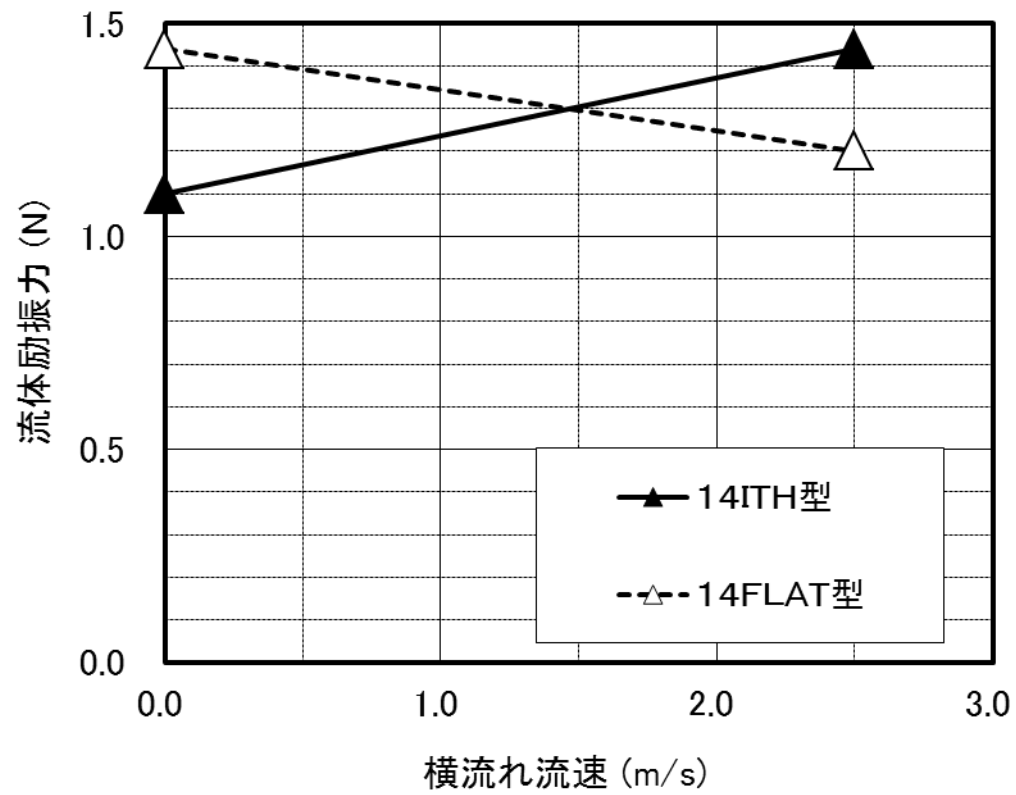
図 B-7 上部プレナム流況試験 試験装置図

B-2-4



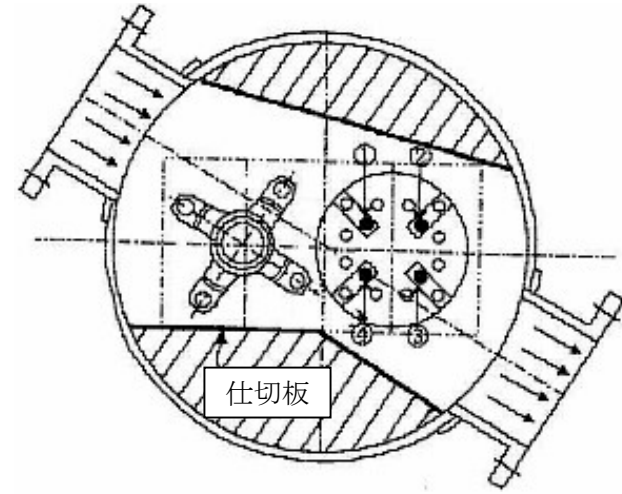
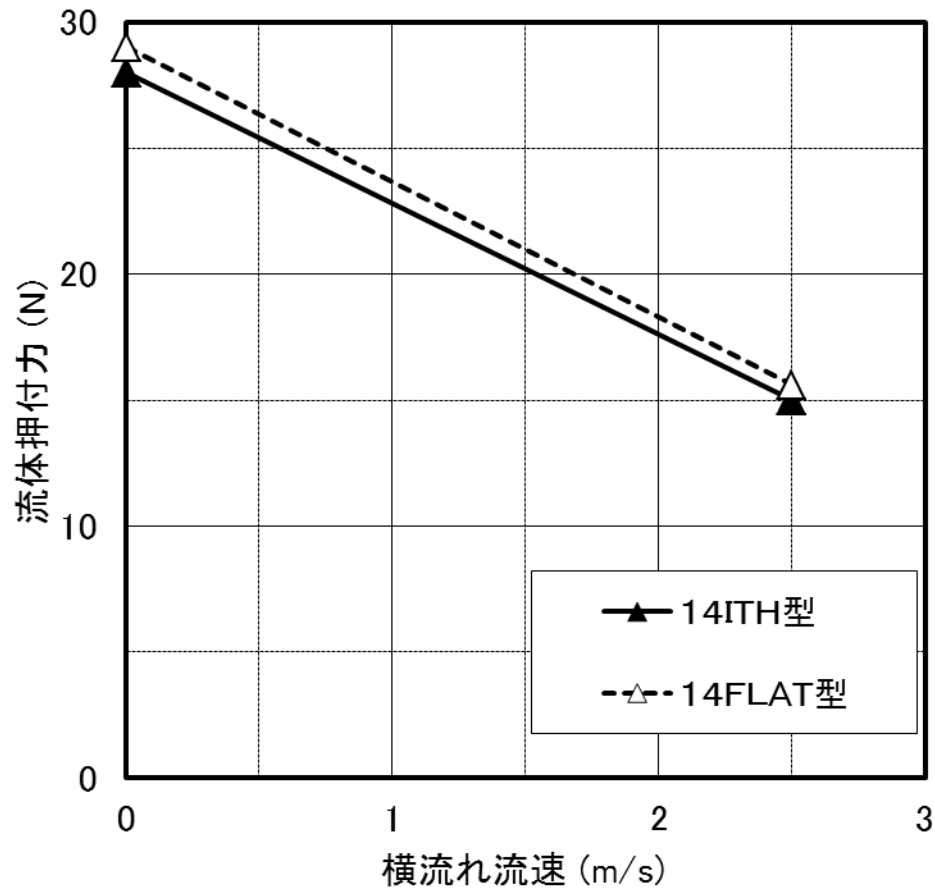
試験装置の断面図

図 B-8 2 体流動試験 試験装置図



試験装置の断面図

図 B-9 流体励振力計測結果



試験装置の断面図

図 B-10 流体押付力計測結果

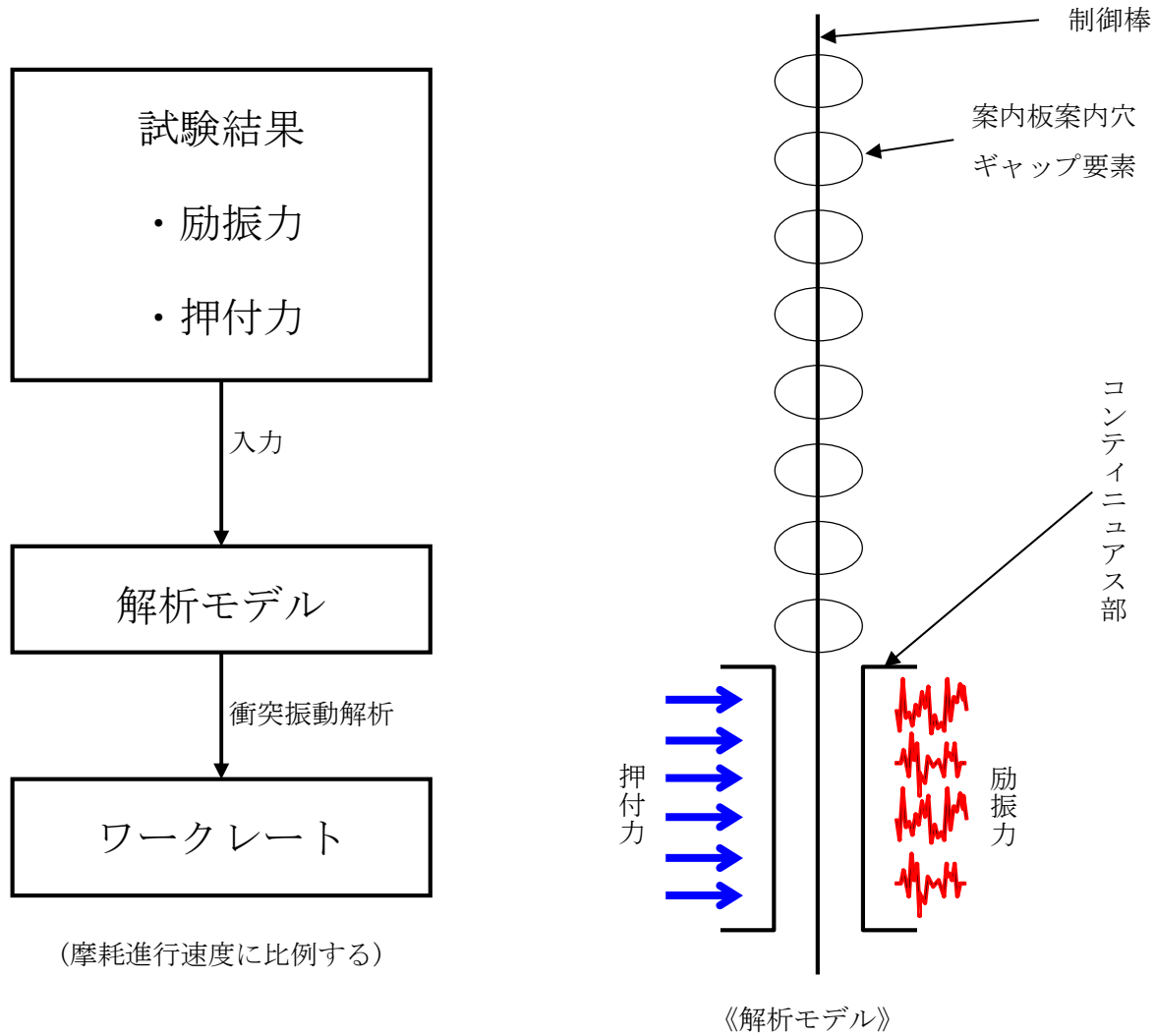
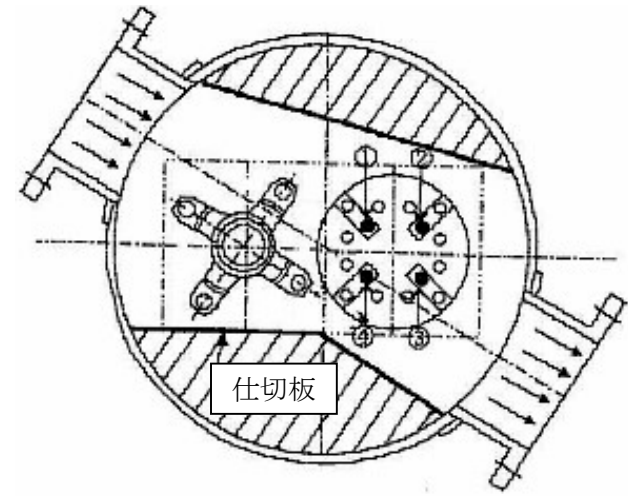
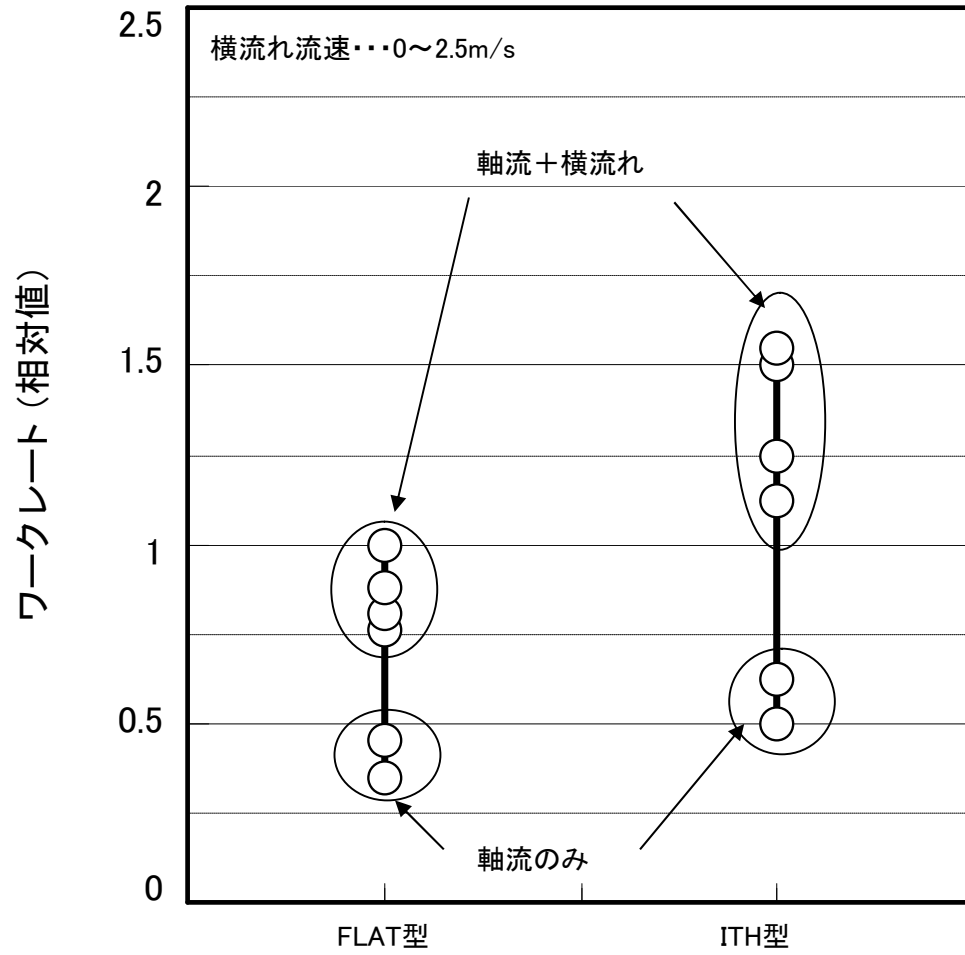


図 B-11 ワークレート解析の方法



試験装置の断面図

図 B-12 ワークレート解析結果

付録 C 摩耗長さの定義

1. 摩耗長さの定義

着目点部分 (図 C-1) である案内板のリガメントにおいて, 図 C-2 のように摩耗が進行すると, 制御棒が抜け出すなど, 維持すべき機能に影響がでる可能性がある。したがって, 着目点の摩耗を管理する必要がある。

摩耗を管理するにあたっては, 摩耗長さを定義し, 着目点の摩耗状態を評価する。摩耗長さは, 図 C-2 に示すように摩耗がない状態において, 制御棒が最も中心穴側に寄った状態の制御棒の中心位置を基準 (摩耗長さ 0%) とし, 制御棒の中心がリガメント端部に達し, 形状的に制御棒が抜け出る状態を摩耗長さ 100% と定義する。

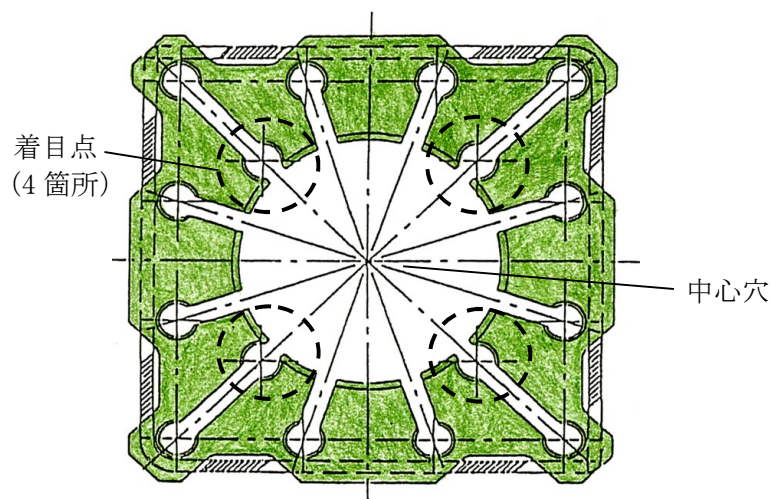


図 C-1 GT 案内板の摩耗着目点

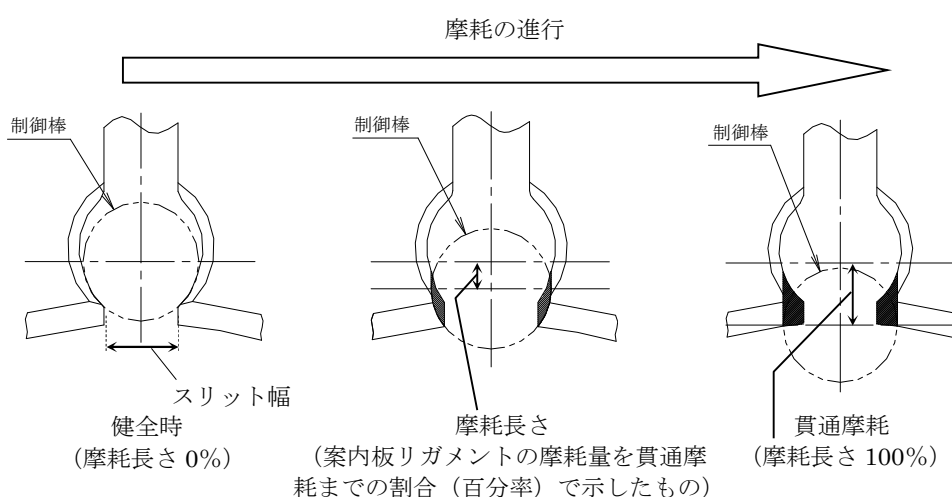


図 C-2 GT 案内板の摩耗進行

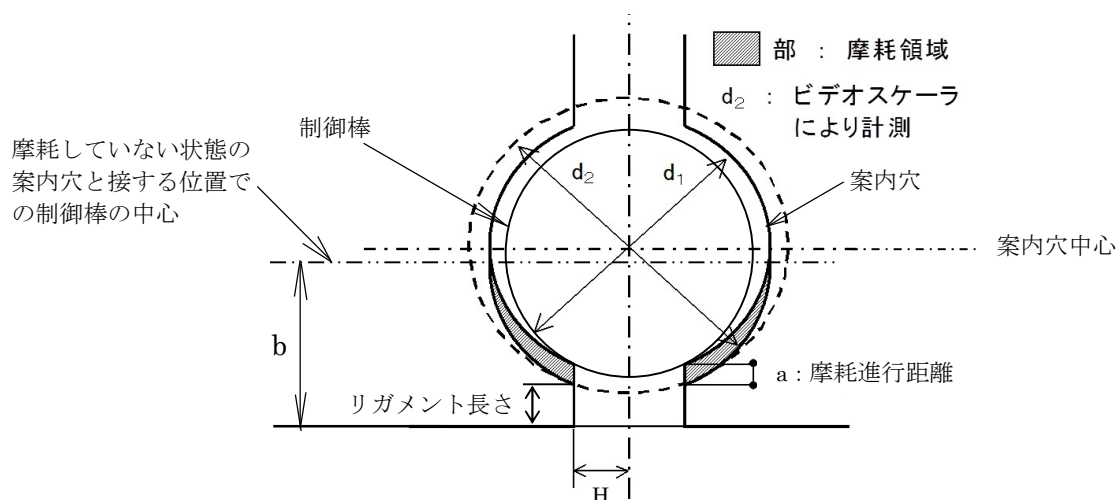
付録 C-1 摩耗長さの検査手法例

1. 摩耗長さの検査

リガメント長さは直接計測する他に目視等により間接的に計測若しくは算出してもよい。そこで、以前から異常の有無を確認するために用いられているビデオ画像による検査手法例について解説する。

2. ビデオ画像による検査手法例

摩耗部の検査手法は、CCD カメラで案内板の摩耗部着目点を撮影し、そのビデオ画像から、スケーラを用いて摩耗状態を目視で読み取り、摩耗長さを下式により算出する（図 C-3）。



$$\text{摩耗長さ}[\%] = a/b \times 100$$

$$a : \text{摩耗進行距離} = \sqrt{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - H^2} - \sqrt{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - H^2}$$

b : 貫通摩耗に至るまでの制御棒の移動距離

d₁ : 摩耗していない状態の案内穴の直径

d₂ : 案内穴中心を中心とし、摩耗領域に外接する円の直径（上図破線）

H : スリット幅 ÷ 2

図 C-3 摩耗長さの算出方法

付録 D 摩耗予測の詳細

案内板の摩耗量を評価する一般式として Archard の式があり、以下のような式で表される。

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

ここで、

V : 摩耗体積[m³]

k : 比摩耗量[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]

である。

上式から、ワークレートが一定であれば、摩耗体積は時間に比例することが分かる。

一方、制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗は摩耗長さで管理するので、摩耗体積と時間の関係を摩耗長さとの関係で表す必要がある。案内板の幾何学的な形状から、摩耗体積と摩耗長さの関係は図 D-1 のように表される。摩耗初期と末期では、摩耗長さに対して摩耗体積が少ないため、その時期の曲線は立ち上がる。

以上の関係は制御棒クラスタ案内管の形状のみで決まるので、ワークレート一定の値そのものは未知であっても、摩耗長さとの関係の関係を導くことができる。

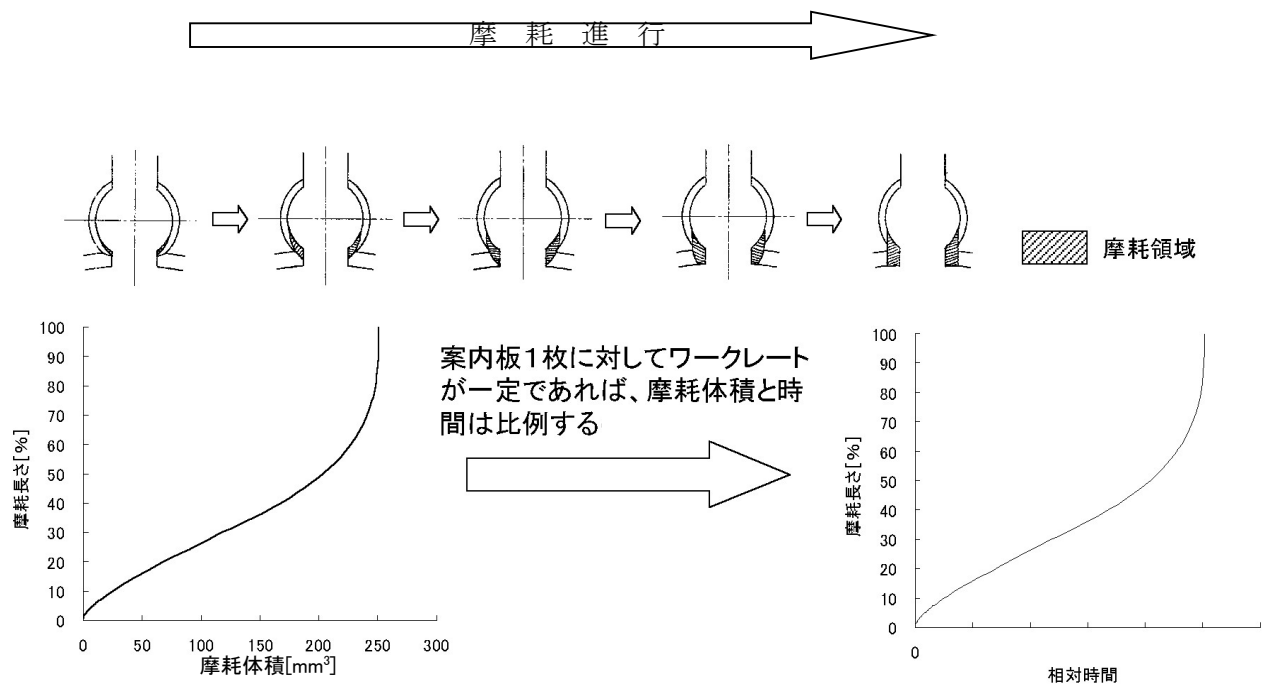


図 D-1 摩耗体積と摩耗長さの関係

付録 D-1 摩耗進行時の摩耗分散

制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗は、実機制御棒摩耗実績からも摩耗が進行するにつれ接触する案内板の枚数が増加していくことが考えられる。

制御棒が多数の案内板に接触すればするほど、案内板 1 枚当たりの接触荷重は減少することになる。したがって、摩耗が進行し、制御棒が接触する案内板の枚数も増えれば、案内板 1 枚の単位時間当たりの摩耗体積（ワークレート）は減少する、すなわち摩耗の進行速度は遅くなると考えられる。

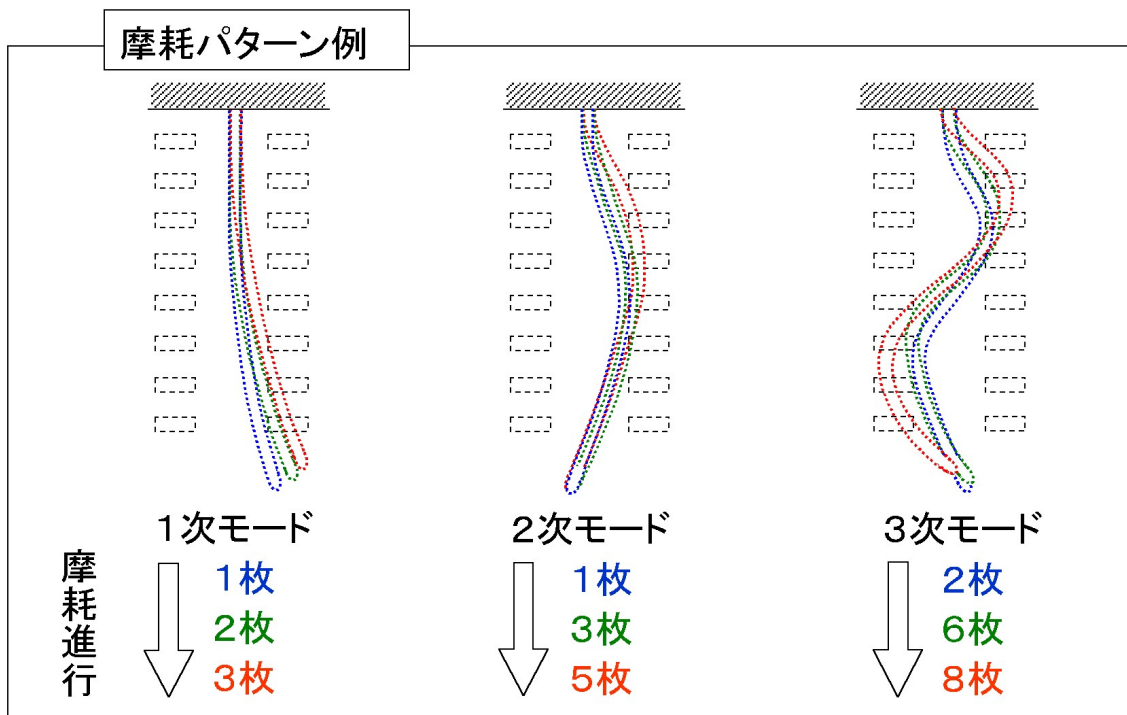
一方、現在の知見では実機で制御棒がどのようなモードで振動し、どのような接触枚数で摩耗が進行していくのか不明であるため、複数案内板への接触による摩耗の分散を考慮しつつも摩耗進行予測が安全側になるよう、すなわち、1 枚の案内板の摩耗進行速度が最も大きくなる振動モードを想定する。

摩耗パターン例を図 D-2 に示す。振動モードが高次になるにつれ、制御棒が案内板に接触する枚数が増えるので、安全側の摩耗進行予測をするためには、なるべく少ない案内板に制御棒が接触する 1 次モードを採用すればよいことが分かる。

以下に 1 次モードを想定して摩耗進行予測曲線を作成する手順を示す。

- (a) 制御棒を上端固定の片持ち梁と仮定して、コンティニューアス上端に相当する位置に荷重を加え、制御棒を第 1 案内板の貫通摩耗長さまで変形させる（図 D-3 参照）。
（コンティニューアスによる変形防止は安全側に考慮しない）
- (b) 制御棒が各案内板に接触し始めるときのそれぞれの摩耗長さを調べる（図 D-4 参照）。
- (c) 各タイムステップ $t_0 \sim t_7$ での摩耗体積の合計を算出し、すべての案内板でのワークレート（単位時間当たりの摩耗体積）が一定となるようにグラフを作成し（図 D-5 参照）、各案内板に接触し始める時間（相対値）を求める。
- (d) (c)で求めた摩耗進行のグラフを基に、最も摩耗が進行する最下段の第 1 案内板の摩耗進行予測曲線を作成する。

以上のように、摩耗進行予測曲線は制御棒と制御棒クラスタ案内管案内板の形状の関連だけで作成することができる。また、このようにして作成した摩耗進行予測曲線を、実機の点検結果を通るようにフィッティングすることで、摩耗長さと相対時間の関係を摩耗長さと絶対時間の関係で記載することができる。



○モードによって、摩耗進行に伴い接触する案内板の数が異なる

図 D-2 摩耗パターン例

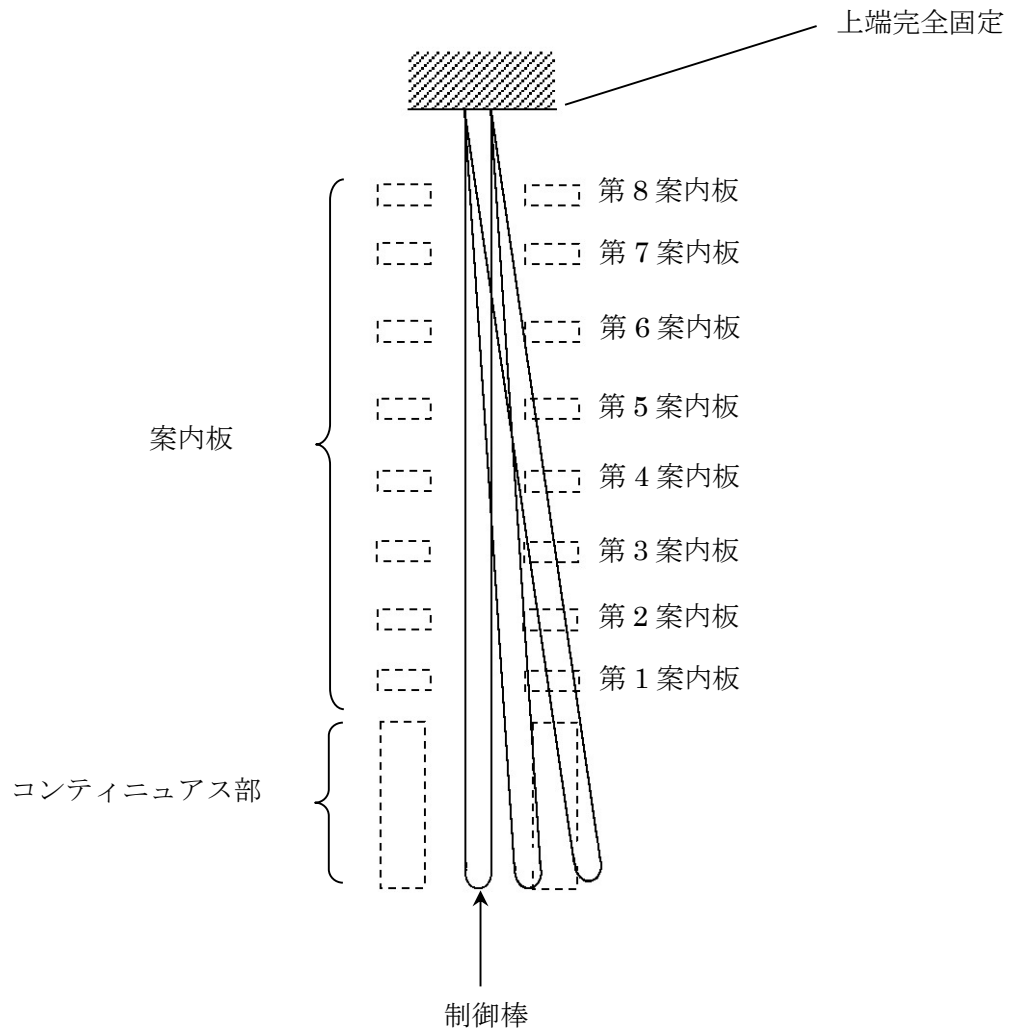


図 D-3 制御棒変形モデル

#7案内板							接触	5.9
#6案内板						接触	5.5	16.6
#5案内板				接触	3.6	12.3	29.5	
#4案内板			接触	2.7	7.8	20.1	44.6	
#3案内板		接触	2.1	5.7	12.6	28.9	61.5	
#2案内板		接触	1.8	4.5	9.0	17.7	38.5	80.1
#1案内板	接触	1.5	3.6	7.0	12.6	23.3	48.9	100
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7

摩耗が進行して第 1 案内板から順に制御棒が各案内板に接触していく際の各案内板の摩耗長さの推移を示す
(制御棒変形解析結果より算出)

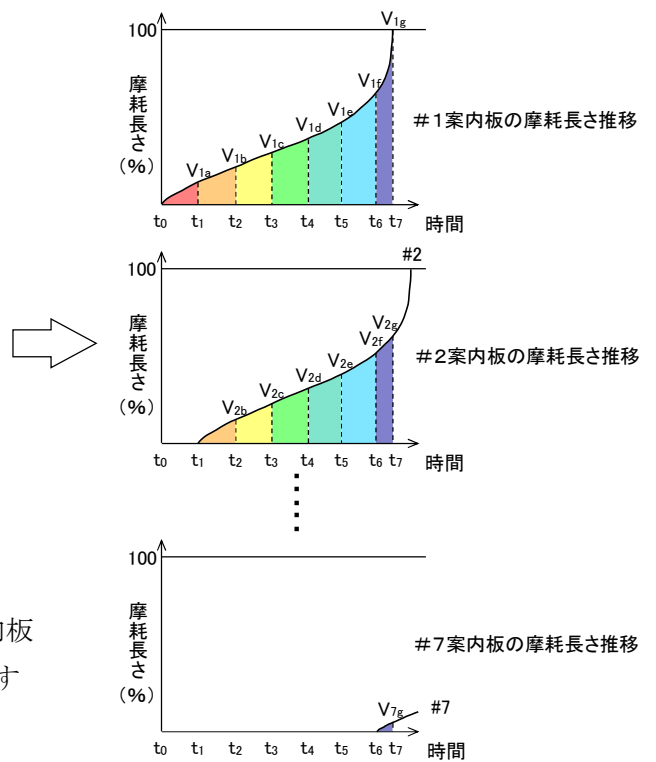


図 D-4 摩耗進行に伴う各案内板の摩耗長さの推移

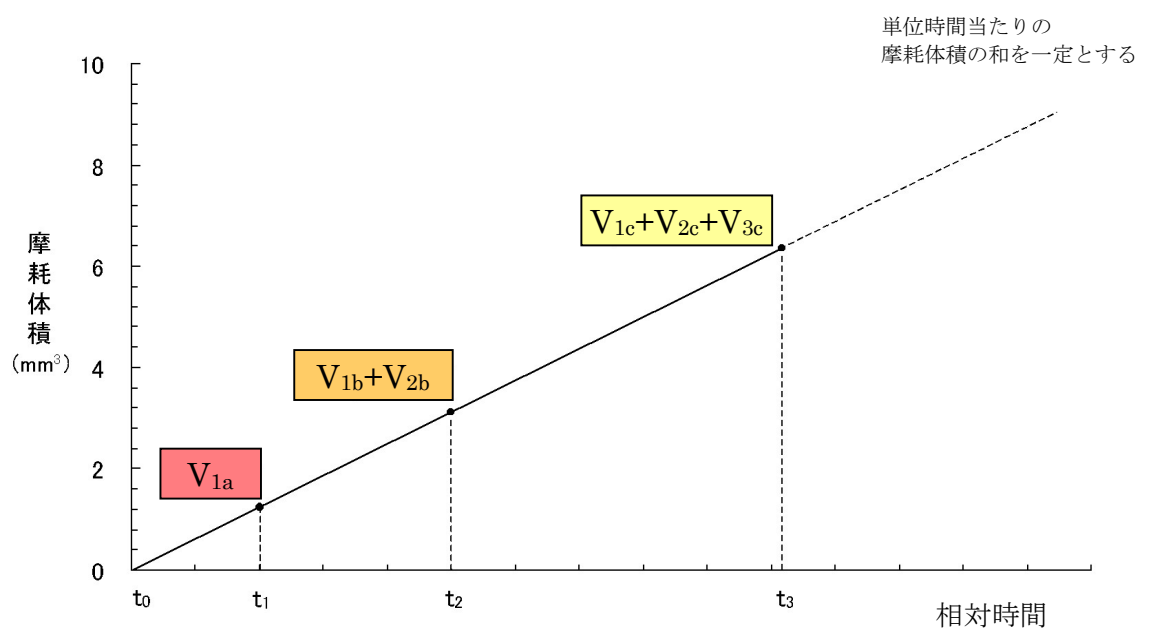


図 D-5 各案内板への接触開始時間（相対値）の算出

付録 D-2 プラントグループごとの摩耗予測

1. 14×14 制御棒クラスタ案内管（プラントグループ 1, 2）の摩耗進行予測曲線

付録 D-1 の摩耗分散を考慮したモデルで作成した，14×14 制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を図 D-6 に示す。実機の点検データ（運転時間，摩耗長さ）を用いて本摩耗進行予測曲線を実運転時間に換算することにより，時間軸を絶対値とした予測を行う。

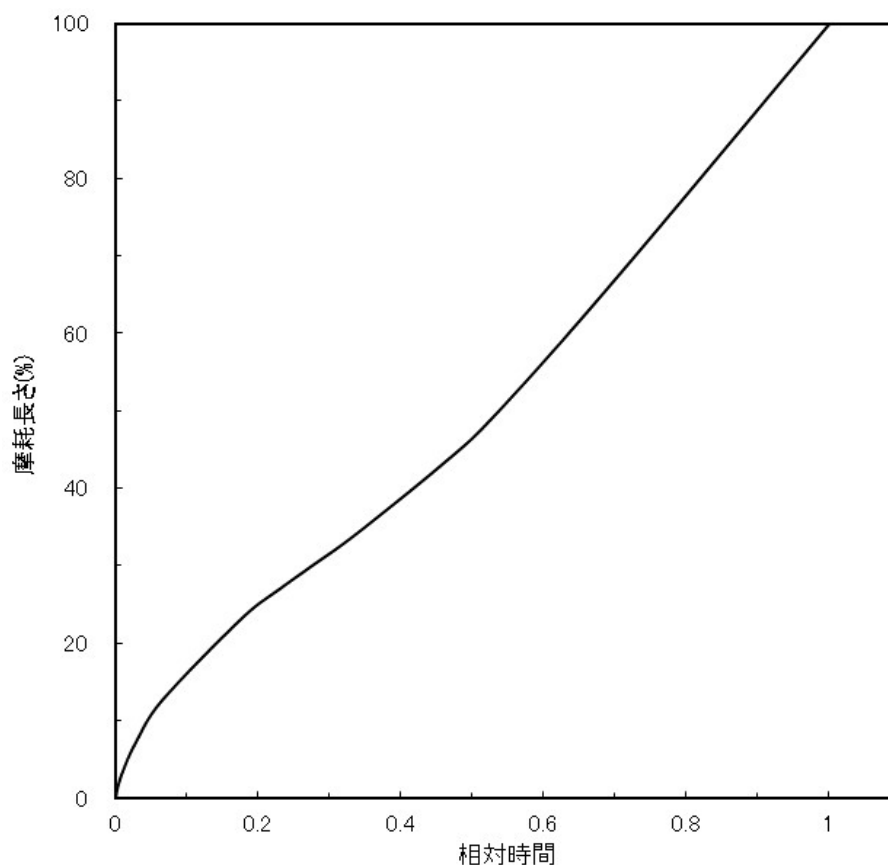


図 D-6 14×14GT 案内板摩耗進行予測曲線

2. 14×14CIR 制御棒クラスタ案内管（プラントグループ 3）の摩耗進行予測曲線

付録 D-1 の摩耗分散を考慮したモデルで作成した，14×14CIR 制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を図 D-7 に示す。実機の点検データ（運転時間，摩耗長さ）を用いて本摩耗進行予測曲線を実運転時間に換算することにより，時間軸を絶対値とした予測を行う。

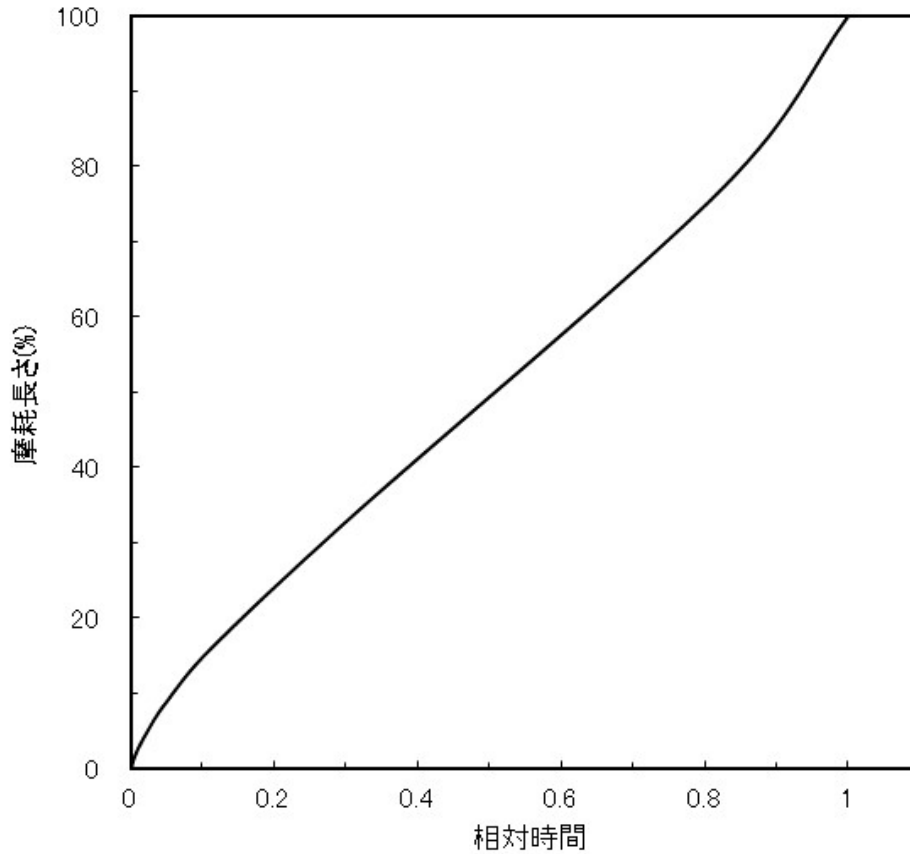


図 D-7 14×14CIRGT 案内板摩耗進行予測曲線

3. 15×15 制御棒クラスタ案内管（プラントグループ 4）の摩耗進行予測曲線

付録 D-1 の摩耗分散を考慮したモデルで作成した，15×15 制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を図 D-8 に示す。実機の点検データ（運転時間，摩耗長さ）を用いて本摩耗進行予測曲線を実運転時間に換算することにより，時間軸を絶対値とした予測を行う。

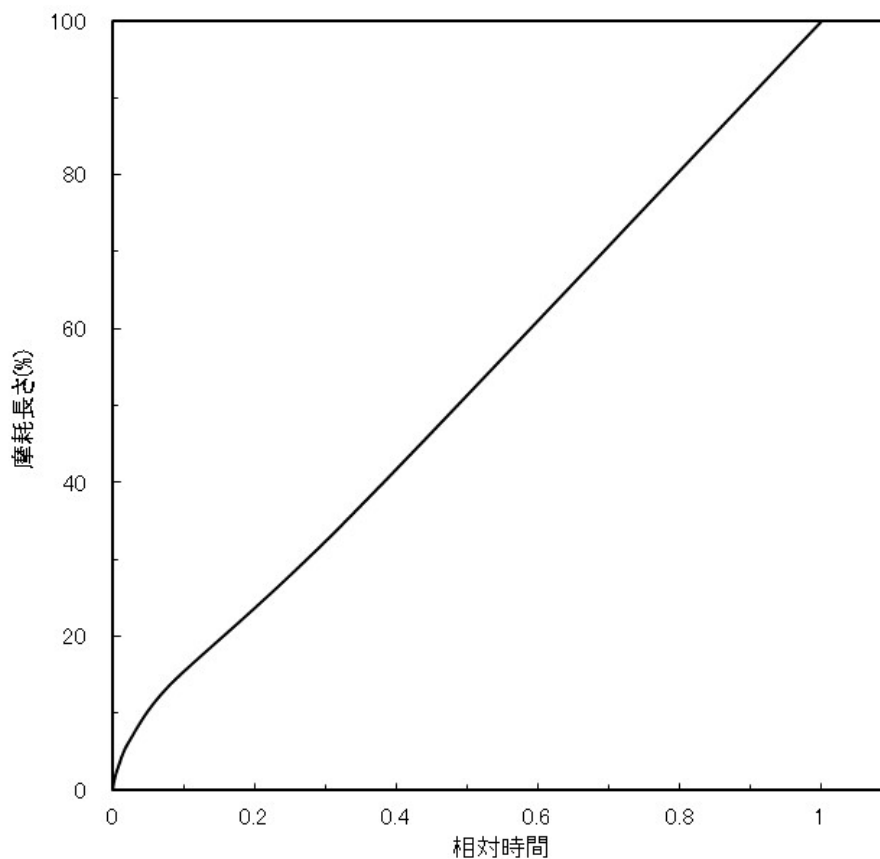


図 D-8 15×15GT 案内板摩耗進行予測曲線

4. 15×15CIR 制御棒クラスタ案内管（プラントグループ 5）の摩耗進行予測曲線

付録 D-1 の摩耗分散を考慮したモデルで作成した，15×15CIR 制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を図 D-9 に示す。実機の点検データ（運転時間，摩耗長さ）を用いて本摩耗進行予測曲線を実運転時間に換算することにより，時間軸を絶対値とした予測を行う。

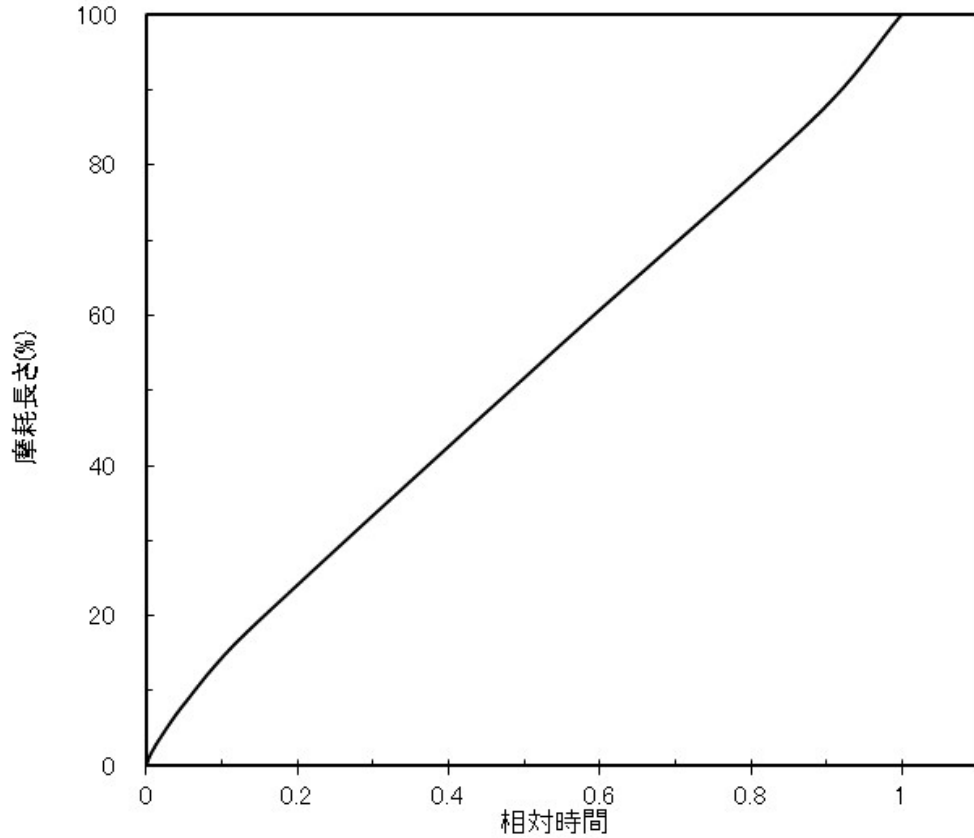


図 D-9 15×15CIRGT 案内板摩耗進行予測曲線

5. 17×17 制御棒クラスタ案内管（プラントグループ 6）の摩耗進行予測曲線

付録 D-1 の摩耗分散を考慮したモデルで作成した，17×17 制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を図 D-10 に示す。実機の点検データ（運転時間，摩耗長さ）を用いて本摩耗進行予測曲線を実運転時間に換算することにより，時間軸を絶対値とした予測を行う。

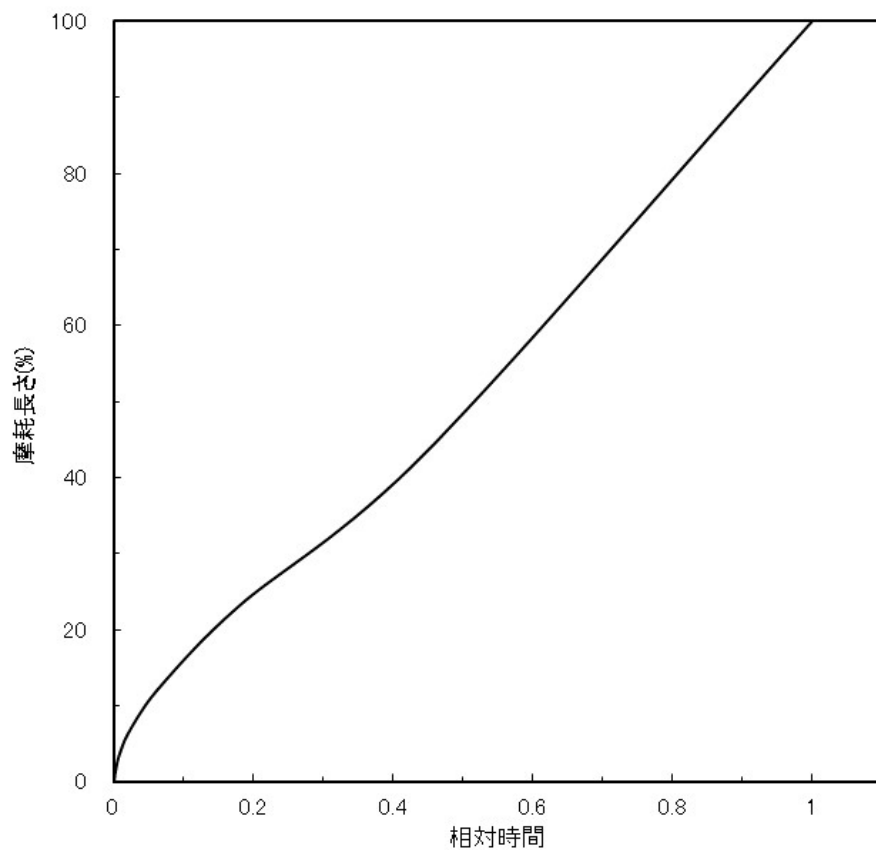


図 D-10 17×17GT 案内板摩耗進行予測曲線

6. 17×17 改良標準型制御棒クラスタ案内管（プラントグループ 7）の摩耗進行予測曲線
付録 D-1 の摩耗分散を考慮したモデルで作成した，17×17 改良標準型制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を図 D-11 に示す。実機の点検データ（運転時間，摩耗長さ）を用いて本摩耗進行予測曲線を実運転時間に換算することにより，時間軸を絶対値とした予測を行う。

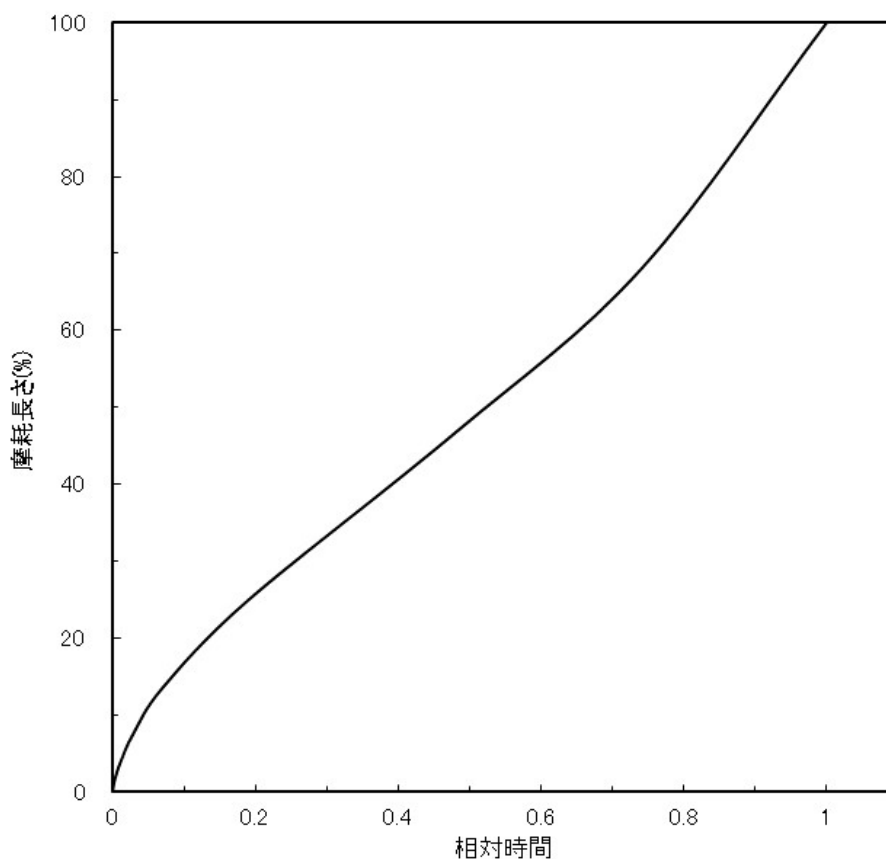


図 D-11 17×17 改良標準型 GT 案内板摩耗進行予測曲線

付録 E 制御棒クラスタ案内管の機能と管理摩耗長さ

1. 制御棒クラスタ案内管の機能と管理摩耗長さの考え方

制御棒クラスタ案内管の「原子炉の安全性確保」に関する機能は次のとおり。

① 制御棒クラスタ案内機能

- ・ 制御棒クラスタを案内し、規定時間内で制御棒クラスタを挿入させること。

制御棒クラスタ案内管が摩耗すると、制御棒の摩耗状態と外力によっては制御棒が抜け出す場合が考えられる。制御棒が制御棒クラスタ案内管案内板から抜け出ても直ちに案内機能が阻害されるとは限らないが、管理上、案内板から全く制御棒が抜け出ることがない状態を「案内機能が維持されている」と考える。制御棒抜け出しには地震による力も考慮する。なお、案内板から全く制御棒が抜け出ることがない状態では、案内の状態は設置当初の状態と相違はないため、「規定時間内での制御棒クラスタの挿入」については維持されているものとして扱う。

② 制御棒クラスタ破損防止

- ・ 制御棒クラスタが破損しないように保護すること。

地震時でも制御棒被覆管が損傷しないこととする。

以上の機能を満足できる制御棒クラスタ案内管案内板摩耗長さの上限を「管理摩耗長さ」とする。

2. 制御棒最大摩耗時の管理摩耗長さ

前項で整理した制御棒クラスタ案内管の機能に対して制御棒クラスタ案内管の摩耗が及ぼす影響について検討した結果を表 E-1 に示す。この検討結果から、制御棒クラスタ案内管の機能維持のためには、地震時の慣性力によって制御棒が抜け出さないように管理基準を設定する必要がある、具体的には制御棒の摩耗進行状況に応じて制御棒クラスタ案内管の管理摩耗長さを設定することが必要であることが分かる。

制御棒被覆管最大摩耗時及び健全時それぞれにおいて制御棒が抜け出さない摩耗長さを表 E-2 に示す。実際の点検における管理摩耗長さは、制御棒被覆管の摩耗を考慮して安全側の設定とするものとする。

表 E-1 GT の機能検討結果 (プラントグループ 2 の例)

GT の機能	案内板摩耗時の影響	評価方法	検討結果
制御棒クラスタ案内機能維持	地震時の制御棒抜け出しの可能性 (付録 E-1)	地震時の慣性力によって制御棒が抜け出さないか算出する。	制御棒片側約 500 μ m 摩耗時に制御棒が抜け出す可能性のある摩耗長さは 65% (付録 E-3)
	制御棒クラスタ挿入時間への影響	制御棒が抜け出した場合、問題となると考えられるため、上記地震時の制御棒抜け出し可能性にて評価する。	制御棒が抜け出す可能性はなく、問題なし。
制御棒クラスタ破損防止	地震時の制御棒被覆管に発生する応力過大の可能性 (付録 E-2)	安全側に 1 枚の案内板が貫通摩耗まで到達した場合を想定し、地震時の慣性力により被覆管に発生する応力を耐震計算モデルから評価する。	地震時の慣性力により発生する応力は 46MPa であり、内外圧差による応力 195.9MPa を加えても、Su 値 391MPa (注) 以下で問題なし。

(注)制御棒被覆管は SUS304 冷間加工材製であるが、安全側に SUS304 の Su 値を使用する。

表 E-2 プラントグループごとの摩耗長さ（制御棒被覆管最大摩耗時，健全時）

プラント グループ	GT 形式	摩耗長さ	
		制御棒被覆管最大摩耗時	制御棒被覆管健全時
1	14×14ITH 型	66%	94%
2	14×14FLAT 型	65%	92%
3	14×14 CIR	77%	97%
4	15×15	74%	92%
5	15×15 CIR	86%	97%
6	17×17 3 ループ	68%	92%
	17×17 4 ループ	68%	93%
7	17×17 3 ループ改良標準型	68%	93%

付録 E-1 地震時の制御棒抜け出しの評価

案内板の摩耗が進むと、リガメントの部分が残り少なくなり、慣性力を受けた制御棒が図 E-1 に示すように案内板に当たることが想定される。

そこで、プラントグループ 2 (14×14FLAT 型) を例に、リガメントのたわみを考慮しても制御棒が抜け出すことがない摩耗長さを求める。

摩耗が進行した案内板に地震による慣性力を受けた制御棒が抜け出す方向に当たった場合の力の釣り合いを図 E-1 に示す。接触点の接線と抜け出す方向の慣性力の軸との角度を θ とすると、力の釣り合いより

$$2N = \frac{F}{\sin\theta} \dots\dots\dots ①$$

N : 接触点の抗力
F : 地震による慣性力

一方、案内板の開口幅 L と、制御棒の径 D の幾何学的な関係より

$$\cos\theta = \frac{L}{D} \dots\dots\dots ②$$

① , ②式より、 θ を消去して、抗力 N と開口幅 L の関係は

$$2N = DF(D^2 - L^2)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots ③$$

となる。

ここで、地震による慣性力 F は次の手法で計算する。

- (i) 図 E-2 の全体耐震モデルにおける制御棒クラスタ案内管の部分に、図 E-3 の GT/RCC モデルを組み込んだモデルを作成する。
- (ii) 基準地震動 S_s を原子炉容器サポート位置に入力する。
- (iii) 得られた制御棒クラスタ案内管と制御棒クラスタの相対加速度に案内板スパン間の制御棒の質量を掛けて荷重を求める。
- (iv) この結果、 $F=11.8N$ となる。

以上により、図 E-4 に示すように、N と L の関係が得られる。

さて、次に開口部での横方向の力の釣り合いを考える。案内板のリガメントはバネ定数 K をもつバネとする。地震による慣性力 F によって案内板のリガメントが横方向に押し広げられる長さを ΔL とすると、

$$2N\cos\theta = K\Delta L \quad (\text{ただし, } \Delta L = \Delta L_{\text{右側}} + \Delta L_{\text{左側}})$$

$$\frac{N}{\Delta L} = \frac{K}{2\cos\theta} \dots\dots\dots ④$$

となる。バネ定数 K は、モックアップ試験で求め、90%摩耗の場合で $K=6500N/mm$ であった。④式の関係を示した図 E-4 によれば、ある程度以下の初期開口幅であれば釣り合い点を持ち(例 1)、制御棒が抜け出すことがないが、初期開口幅が限界値 L_{lim} を超えると、

釣り合い点がなくなり，制御棒が抜け出ることが分かる。

$K=6500\text{N/mm}$ ， $F=11.8\text{N}$ の条件を用いると，限界初期開口 L_{lim} は 92% 摩耗となる。

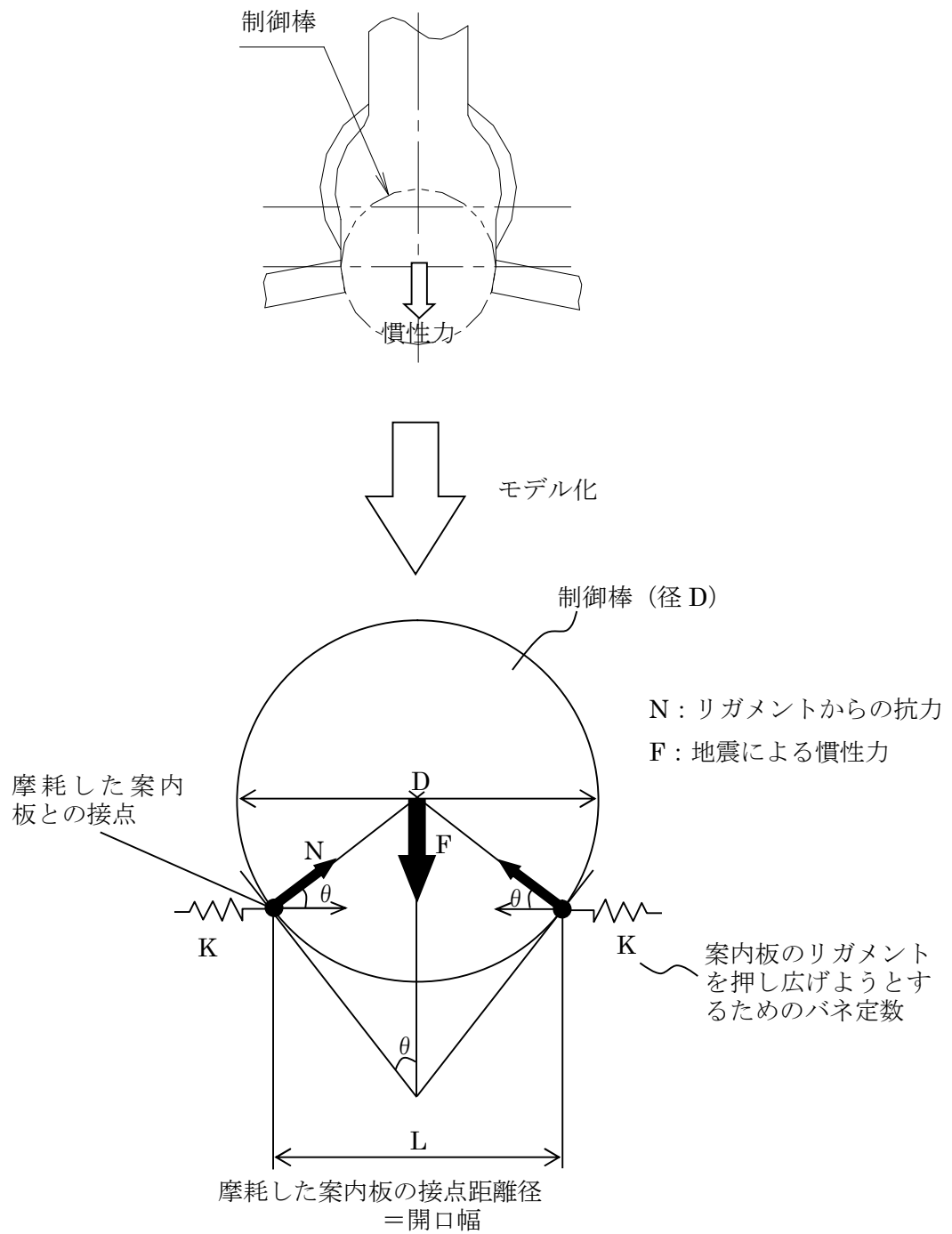


図 E-1 リガメントのたわみを考慮した制御棒抜け出し評価のモデル

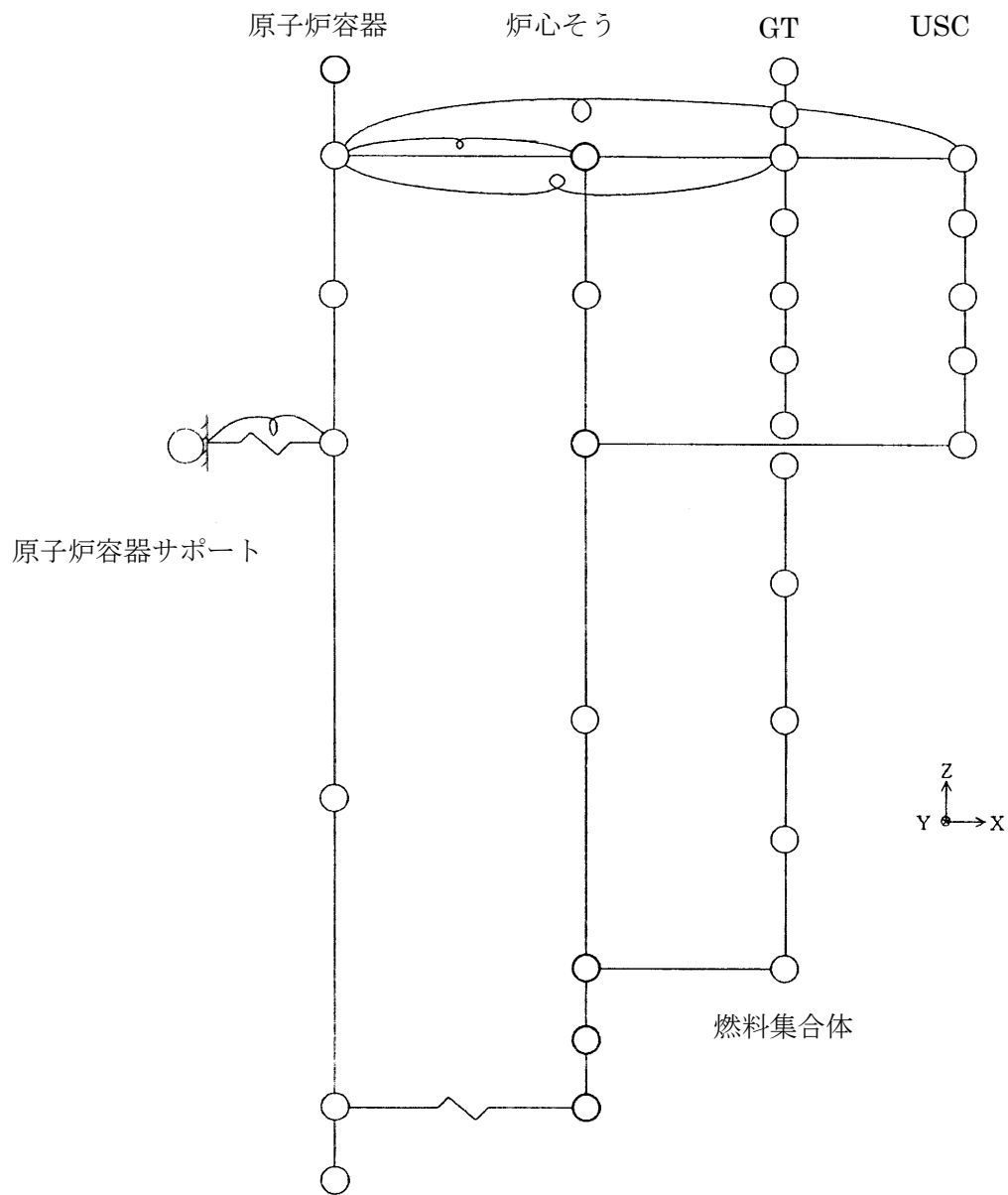


図 E-2 全体耐震モデル

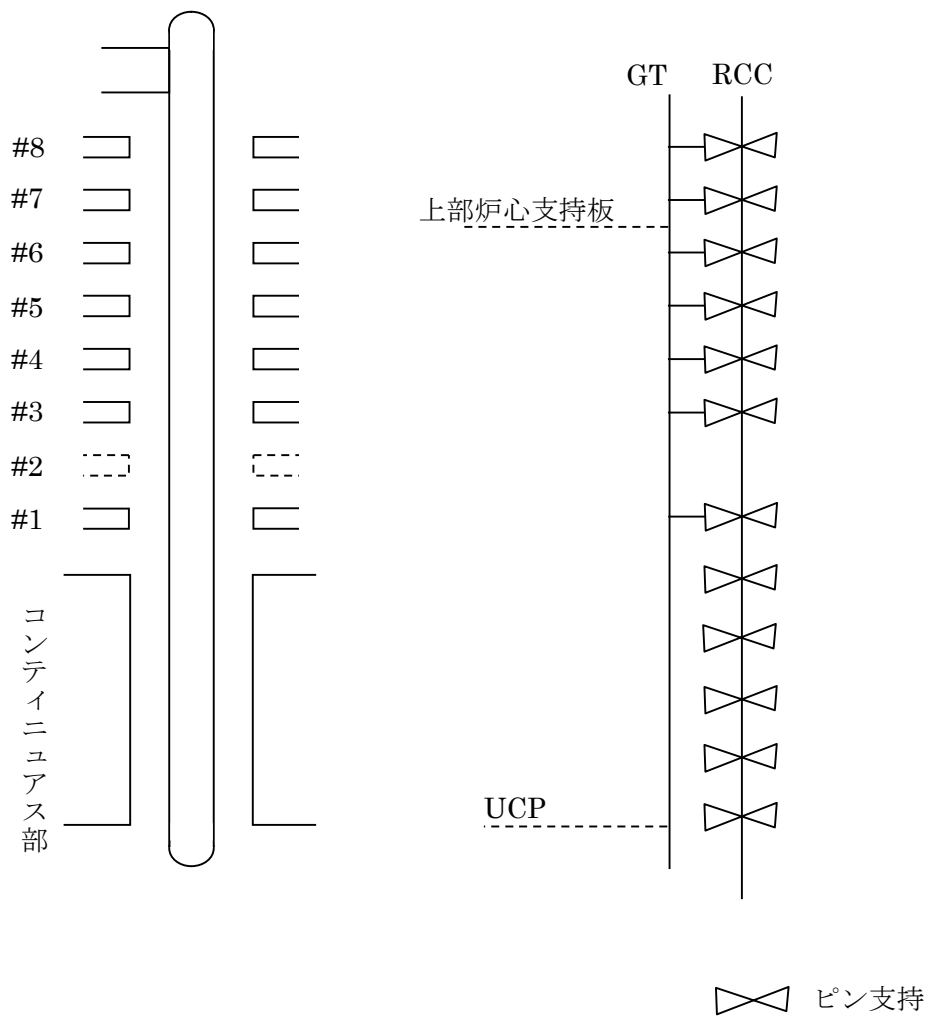


図 E-3 GT/RCC の耐震モデル詳細

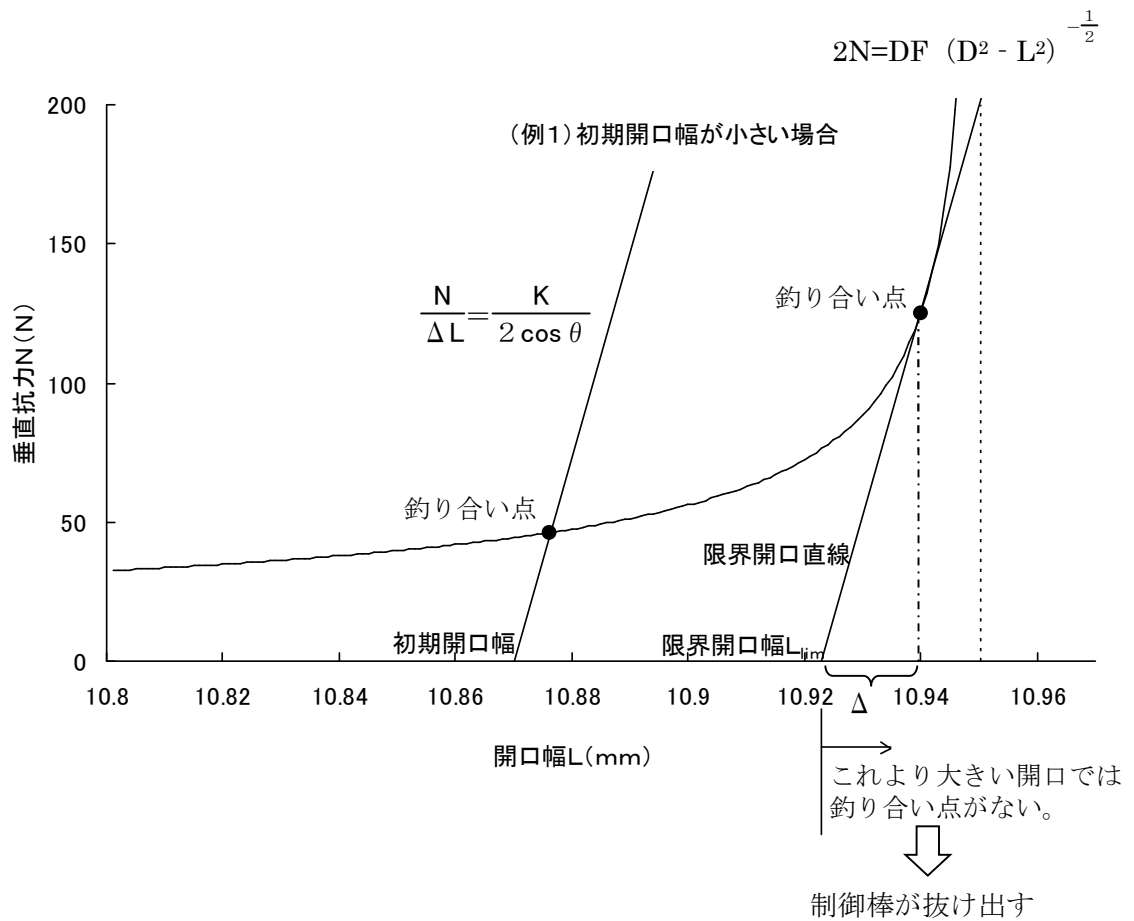


図 E-4 抜け出し限界の算出

付録 E-2 地震時の制御棒クラスタ破損防止の評価

地震発生時に制御棒被覆管が破損しないことを評価する。手法は以下のとおり。

- (i) 図 E-2 の全体耐震モデル中制御棒クラスタ案内管の部分に、図 E-3 の GT/RCC モデルを組み込んだモデルを作成(案内板1枚に貫通摩耗(100%摩耗)を仮定)。
- (ii) プラントグループ 2 の基準地震動 S_s を原子炉容器サポート位置に入力。
- (iii) 制御棒被覆管に発生した最大応力を算出。

以上の結果、得られた被覆管の応力は、

$$\sigma=46\text{MPa}$$

となり、内外差圧による応力 195.9MPa を加えても、被覆管の S_u 値 391MPa (注) 以下である。

(注) 制御棒被覆管は SUS304 冷間加工材製であるが、安全側に SUS304 の S_u 値を使用する。

付録 E-3 制御棒減肉時の管理摩耗長さへの影響

1. 制御棒被覆管の摩耗事象

運転中の 1 次冷却材の流れにより、制御棒クラスタ案内管内で制御棒クラスタが流動振動を起し、制御棒クラスタ案内管案内板とともに制御棒被覆管に摩耗が生じる。

制御棒被覆管の摩耗については、1984 年 3 月に米国 Point Beach 発電所 2 号機で制御棒被覆管の摩耗が認められたことを発端として、国内でも点検を実施した結果、同様の摩耗が確認された^[4,5,6 など]。その後、複数のプラントにおいて制御棒被覆管の点検が実施され、これに基づいた摩耗の進行評価、並びに摩耗が被覆管厚さを超えないように点検（UT 点検による肉厚測定等）、ステップ変更、取替等が行われている。なお、ステップ変更とは、制御棒引抜き位置を原子炉停止余裕及び反応度の補償機能への影響がない範囲で調整し、制御棒被覆管と制御棒クラスタ案内管案内板との干渉位置をずらすことで同一位置での摩耗の進行を防ぐ方法である。また、制御棒被覆管の摩耗対策として、表面を Cr めっきした改良型制御棒が開発された。この制御棒は 1980 年代後半より実機に適用され、本ガイドライン第 4 版発行時点において、国内で運転中の加圧水型原子力発電所では Cr めっきした制御棒が使用されている。改良型制御棒の採用により制御棒被覆管の摩耗速度は低下し、取替後は制御棒クラスタ案内管案内板との接触部における摩耗は問題となっていない。

制御棒抜け出し評価にあたっては、保守的な条件として制御棒被覆管が完全に摩耗した条件についても評価を行う。

2. 制御棒被覆管減肉時の制御棒抜け出し評価

制御棒クラスタ案内管案内板の管理摩耗長さのうち、最も厳しいのは基準地震動 Ss 時の制御棒抜け出し評価である。このとき、制御棒被覆管が摩耗により減肉していれば、制御棒が抜け出すような力の釣り合いが成立する摩耗長さは変わってくるため、抜け出し評価を行うにあたっては、制御棒被覆管の摩耗も考慮する。

現行の制御棒の管理では、制御棒被覆管（厚さ約 500 μm ）が貫通するまでに制御棒を取替えることとしており、被覆管が完全に摩耗することはないが、案内板の管理摩耗長さに反映するだけの十分な知見がない場合などで、最も安全側に管理を行う場合は、最大で片側 500 μm （両側で 1,000 μm ）減肉していると仮定する。

制御棒が抜け出すような力の釣り合いが成立する制御棒被覆管外径と摩耗長さの関係は図 E-5 のようになる。

制御棒被覆管貫通時 (片側 500 μm 減肉) 制御棒被覆管片側 280 μm 減肉時 制御棒被覆管健全時

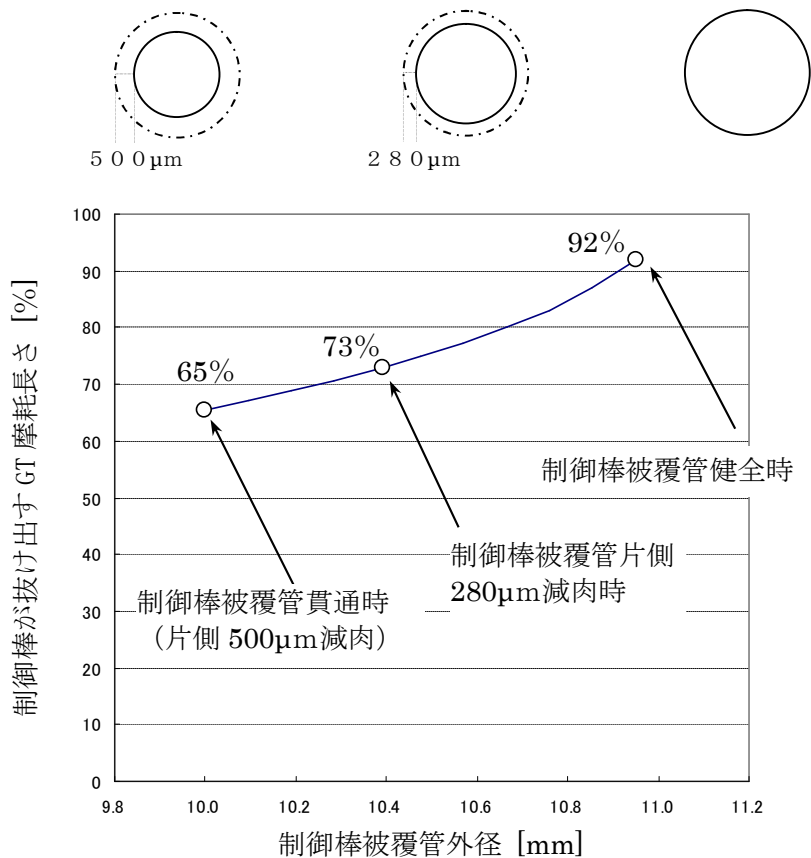


図 E-5 制御棒被覆管外径と制御棒が抜け出す摩耗長さの関係 (グループ 2 の例)

付録 F 評価の余裕に対する検討

1. 管理基準の設定

現状では制御棒の摩耗で被覆管を貫通した状態は報告されていないものの、制御棒クラスト案内管の摩耗の管理基準を最も安全側とし、制御棒の摩耗が最大限進行（被覆管貫通）を考慮した摩耗長さ（65～86%）とした場合、実機の制御棒摩耗点検で得られた被覆管の肉厚は評価の余裕と見なすことができる。

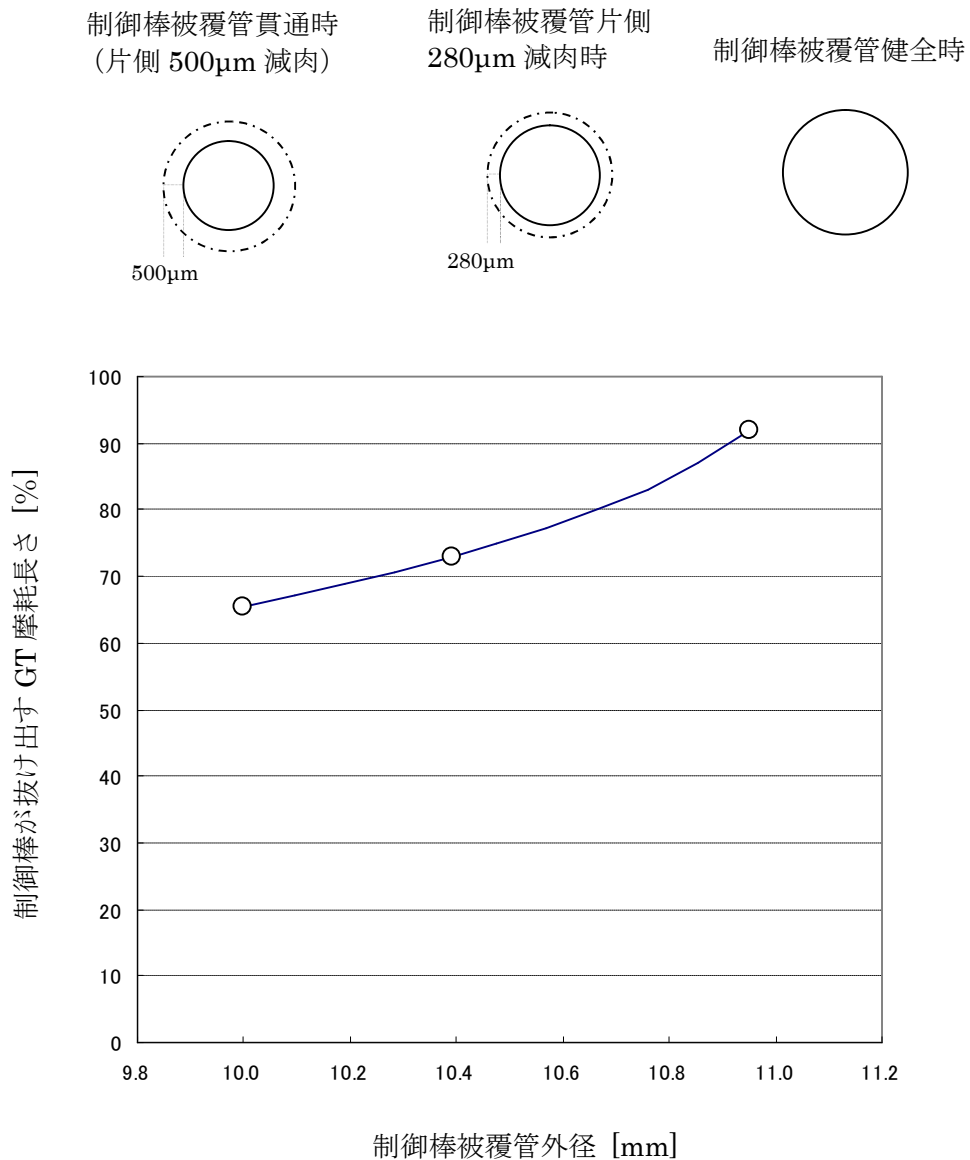


図 F-1 管理摩耗長さへの制御棒被覆管の摩耗量の考慮
(グループ 2 の例)

2. 点検周期の設定と評価の余裕

点検実施時期から管理摩耗長さに達すると予測されるまでに定検計画を考慮して、次回の点検を実施する（図 F-2）。

管理摩耗長さは、制御棒摩耗を最大の摩耗状態と仮定した場合の、基準地震動 S_s 時に抜け出す可能性のある摩耗長さである。また、摩耗進行予測曲線は摩耗が計測された場所に関わらず、最も大きい摩耗量を第 1 案内板の位置に仮想的に置き換え、最も摩耗の進行が速い 1 次モードで評価を実施している。

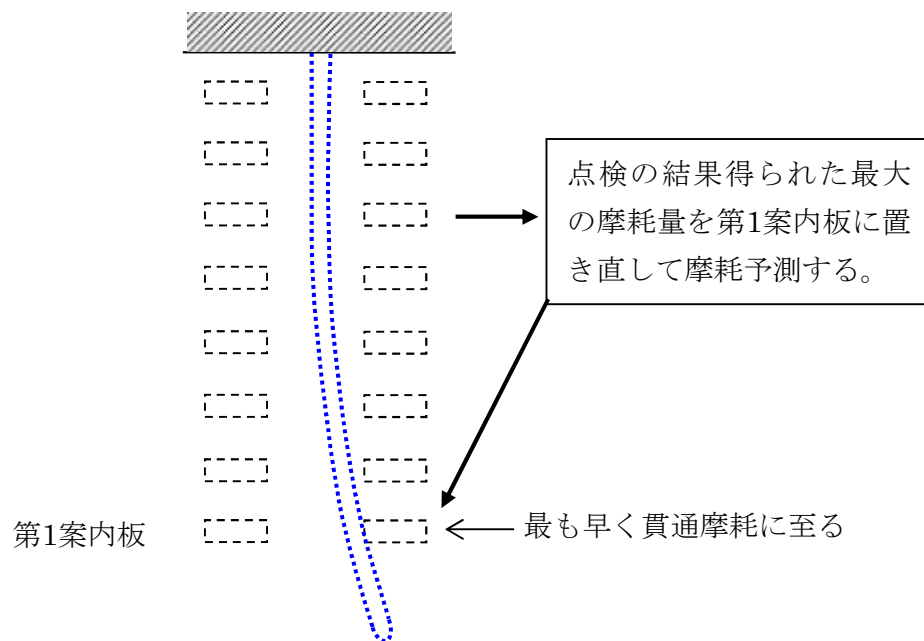


図 F-2 点検時期の設定の基本的な考え方

付録 G 点検周期

1. 初回点検実施済プラントの点検時期

初回点検実施済プラントに対する次回以降の点検時期は、次のとおり設定するものとする。

- ① 初回点検の摩耗データに基づき摩耗進行を予測する。
- ② 管理摩耗長さに達するまでの期間に対し、2倍の安全裕度を考慮して、その1/2の時期を目途に次回点検時期を設定する（図 G-1）。

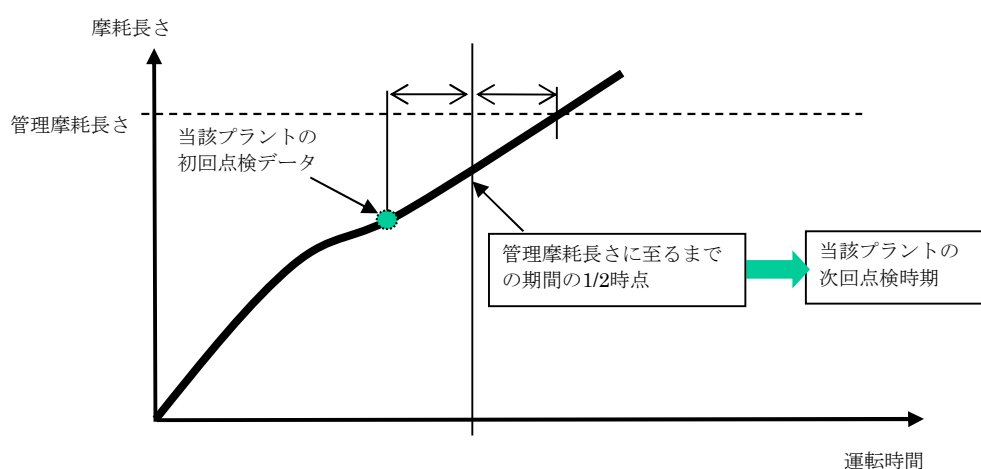


図 G-1 次回点検時期

- ③ 2回目の点検での摩耗データに基づき摩耗進行を予測する。
- ④ ②と同様に、管理摩耗長さに達するまでの期間の1/2の時期を目途に次回点検時期を設定する。

なお、点検による知見の蓄積により、定量的な評価が可能になった場合は、摩耗進行予測カーブの見直しをすることができる。例えば摩耗速度については最も速度の速い1次モード以外の摩耗形態を採用し、ワークレート等についても見直しを図ることができる。さらに、各評価の信頼性に応じ、管理摩耗長さに達するまでに設定する点検時期の安全裕度について見直しを図ることができる。

2. 未点検プラントの点検時期

未点検プラントの初回点検時期は、同一グループ内に先行して点検したプラントの2回目の点検時期を目途に設定する（図 G-2）。また、次回以降の点検については、前項で示した初回点検実施済プラントの考え方と同様とする。

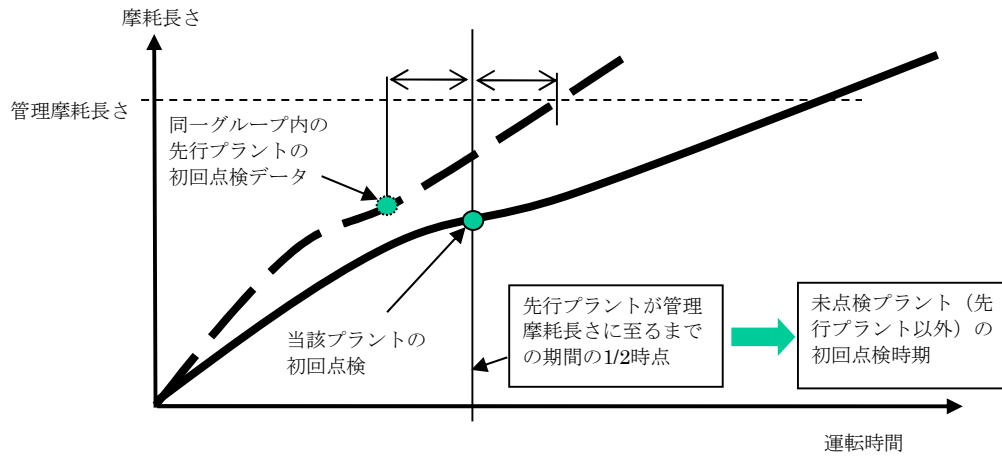


図 G-2 初回点検時期

3. プラントグループ（グループ 3, 5, 7）の点検時期

3.1 プラントグループ（グループ 3, 7）の点検時期

プラントグループ 3, 7（新設プラント及び炉内構造物取替工事実施済プラント）については、制御棒クラスタ案内管及び制御棒クラスタの構造が類似し、制御棒クラスタ案内管近傍の流況が同じと考えられるプラントグループを参照することで（以下、参照プラントと称する）点検時期を設定することとする。新規プラントグループの点検時期は、参照プラントの点検結果の摩耗体積と同じとなるように摩耗長さを換算した点検結果を用いて摩耗進行予測曲線を作成し、管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期を目途に初回点検を設定する。具体的には以下のとおり。

- ① 参照プラントの点検実績として得られる、摩耗長さを摩耗体積に換算する。
- ② 新規プラントグループの単位時間当たりの摩耗体積は参照プラントと同じであると考えられるため、上記で得られた摩耗体積を新規プラントグループの摩耗長さへ換算する。（図 G-3 参照）
- ③ 上記で得られた摩耗長さを、摩耗進行予測曲線作成に用いる点検結果とする。

また、2 回目以降の点検については、前項 1. で示した初回点検実施済プラントの考え方と同様とする。

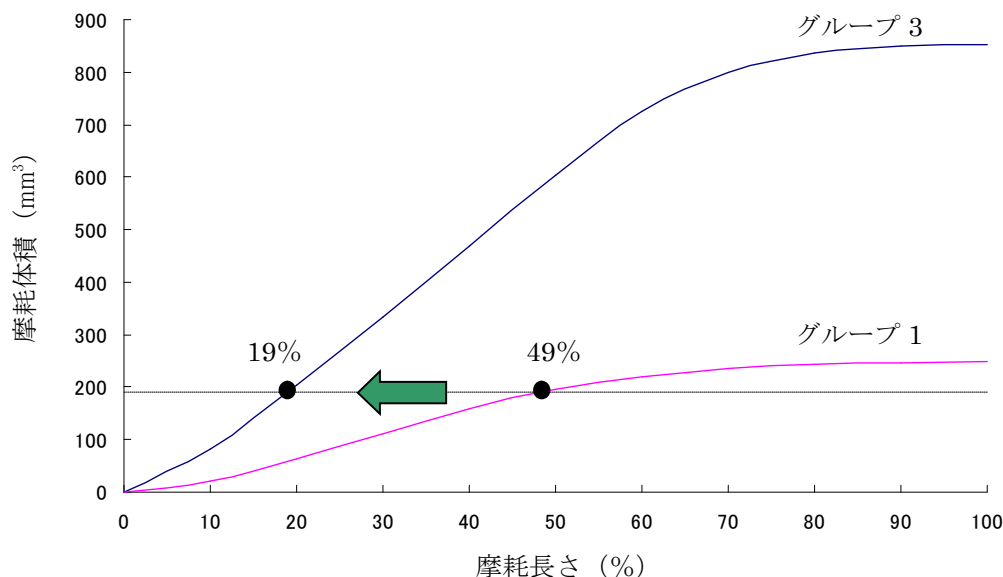


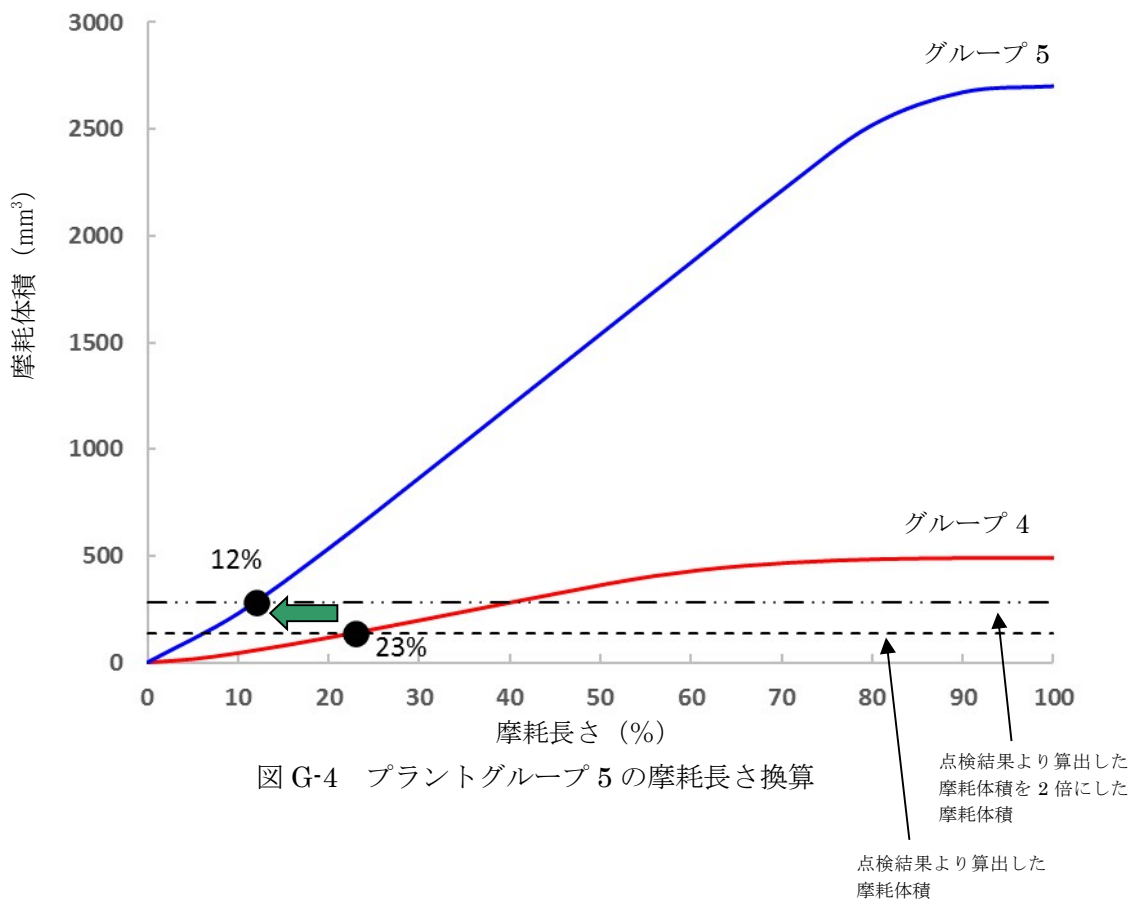
図 G-3 新規プラントグループの摩耗長さ換算
(グループ 3 の例)

3.2 プラントグループ（グループ 5）の点検時期

プラントグループ 5(炉内構造物取替工事実施済プラント)については、同じ 15×15GT であるプラントグループ 4 を参照することで点検時期を設定する。モックアップを用いた流動試験^[11]より、プラントグループ 5 のワークレートは、プラントグループ 4 の 2 倍と考えられる。そのため、プラントグループ 5 の点検時期は、プラントグループ 4 の 2 倍の摩耗体積になるように摩耗長さを換算して摩耗進行予測曲線を作成し、管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期を目途に初回点検を設定する。具体的には以下のとおり。

- ① プラントグループ 4 の点検実績として得られる、摩耗長さを摩耗体積に換算する。
- ② プラントグループ 5 の単位時間当たりの摩耗体積はプラントグループ 4 の 2 倍であると考えられることができるため、上記で得られた摩耗体積を 2 倍した摩耗体積をプラントグループ 5 の摩耗長さへ換算する。（図 G-4 参照）
- ③ 上記で得られた摩耗長さを、摩耗進行予測曲線作成に用いる点検結果とする。

また、2 回目以降の点検については、前項 1. で示した初回点検実施済プラントの考え方と同様とする。



4. プラントグループごとの点検周期

平成14年度以降、国内プラントの制御棒クラス案内管案内板点検を実施し、摩耗データを採取している。これら点検結果に基づき、初回点検実施済プラントの次回の点検時期、未点検プラント及び新規プラントグループの初回点検時期を前項1., 2., 3.に従って設定する。なお、未点検プラントの初回点検時期は同一グループ内で先行して点検したプラントの点検結果に基づき設定、新規プラントグループの初回点検時期は参照プラントの点検結果に基づき設定する。

4.1 プラントグループ1 (14×14 ITH 型) の点検結果と点検時期

プラントグループ1の点検実施済プラントの点検結果を反映した摩耗進行予測を図G-5に示す。点検結果及び点検時期の数值は4.8項参照のこと。

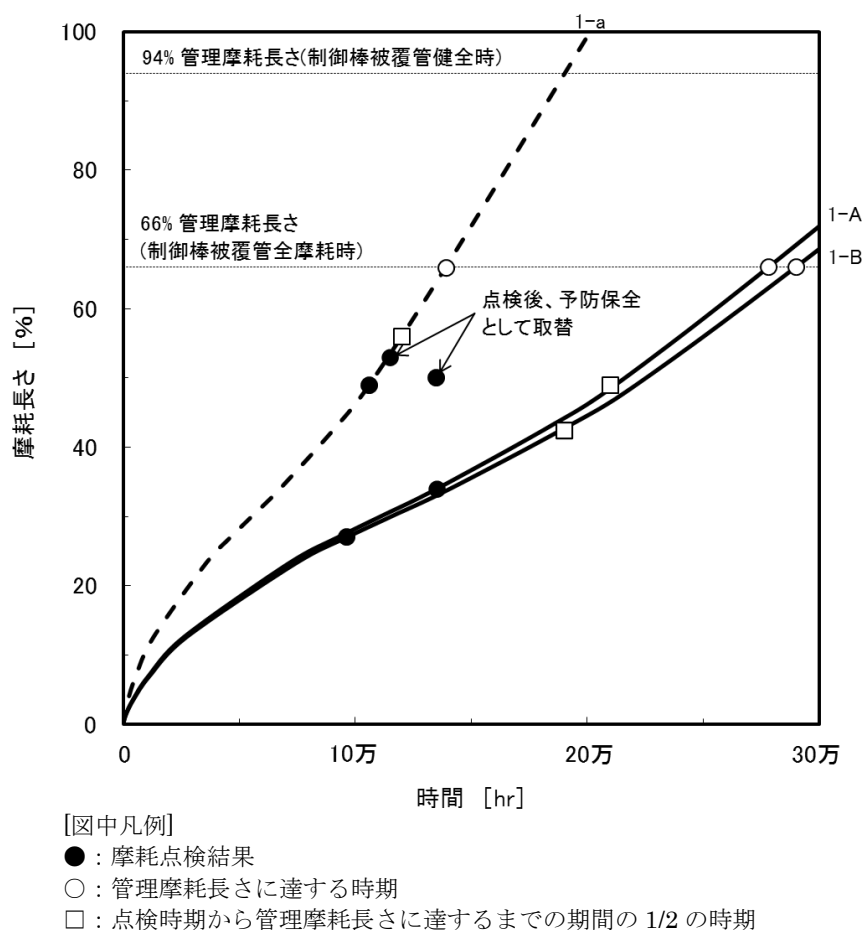
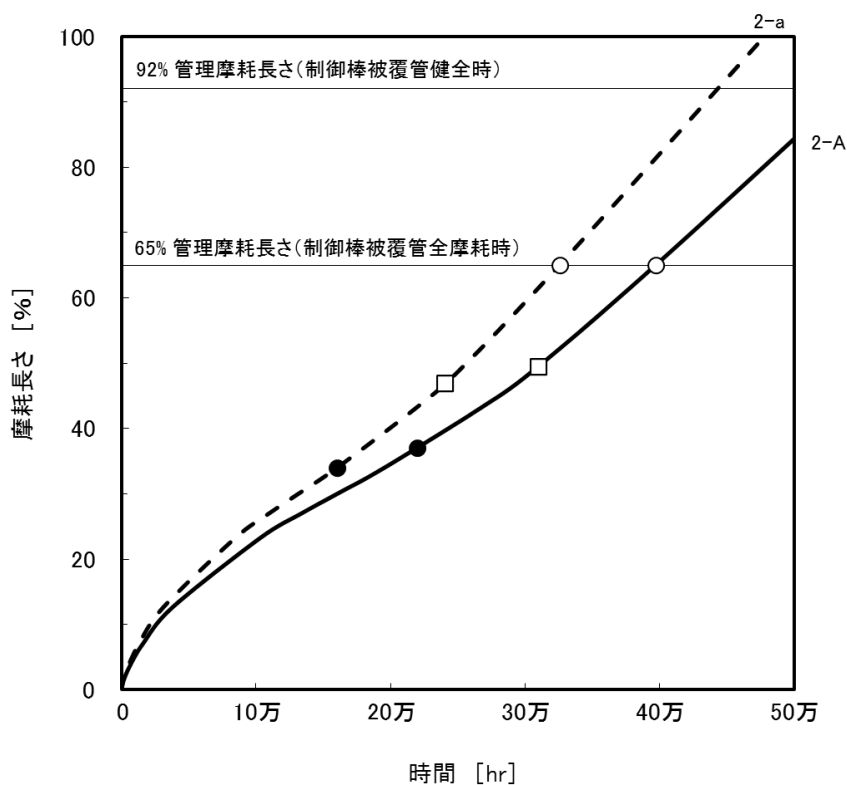


図 G-5 プラントグループ1の摩耗進行予測

この結果に基づき、点検実施済プラントの次回点検時期は、それぞれプラント運転19万時間及び21万時間を目途に設定する。また、プラントグループ1に属する未点検プラントの初回点検時期はプラント運転12万時間を目途に設定する。

4.2 プラントグループ 2 (14×14 FLAT 型) の点検結果と点検時期

プラントグループ 2 の点検実施済プラントの点検結果を反映した摩耗進行予測を図 G-6 に示す。点検結果及び点検時期の数値は 4.8 項参照のこと。



[図中凡例]

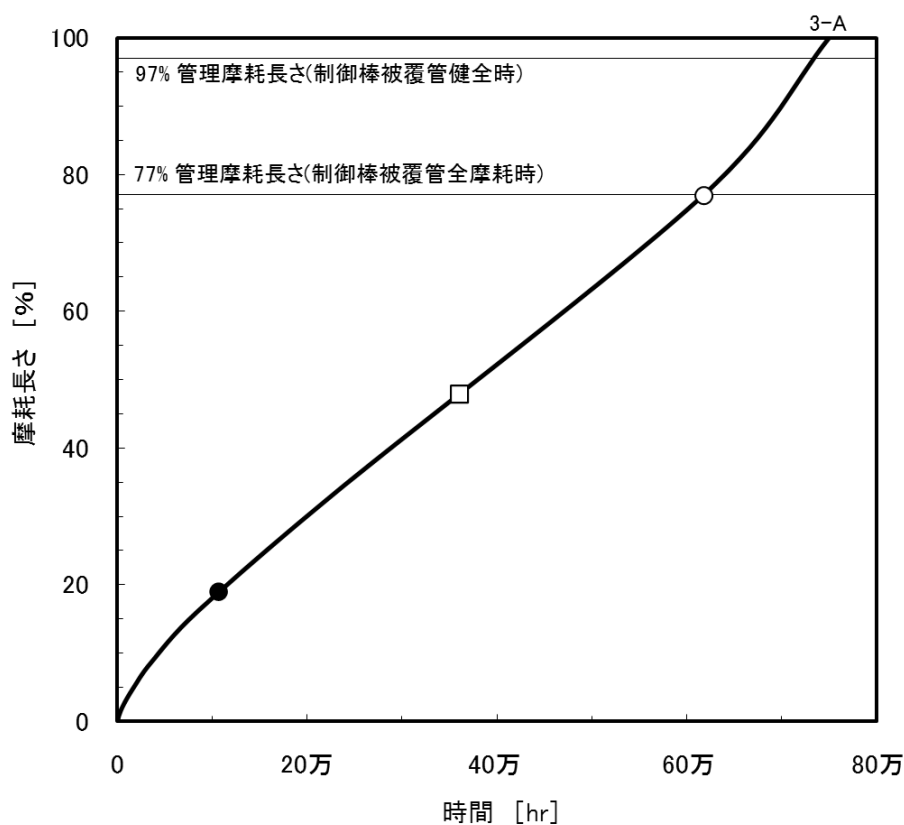
- : 摩耗点検結果
- : 管理摩耗長さ到達する時期
- : 点検時期から管理摩耗長さ到達するまでの期間の 1/2 の時期

図 G-6 プラントグループ 2 の摩耗進行予測

この結果に基づき、点検実施済プラントの次回点検時期は、プラント運転 31 万時間を目途に設定する。また、プラントグループ 2 に属する未点検プラントの初回点検時期はプラント運転 24 万時間を目途に設定する。

4.3 プラントグループ 3 (14×14 CIR) の点検結果と点検時期

プラントグループ 3 の摩耗進行予測を図 G-7 に示す。なお、ここに示す点検結果は、前項 3 で述べたとおり参照プラントの点検結果の摩耗体積と同じとなるように摩耗長さを換算したものである。点検結果及び点検時期の数値は 4.8 項参照のこと。



[図中凡例]

●: 摩耗点検予測 (注)

○: 管理摩耗長さに達する時期

□: 点検時期から管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期

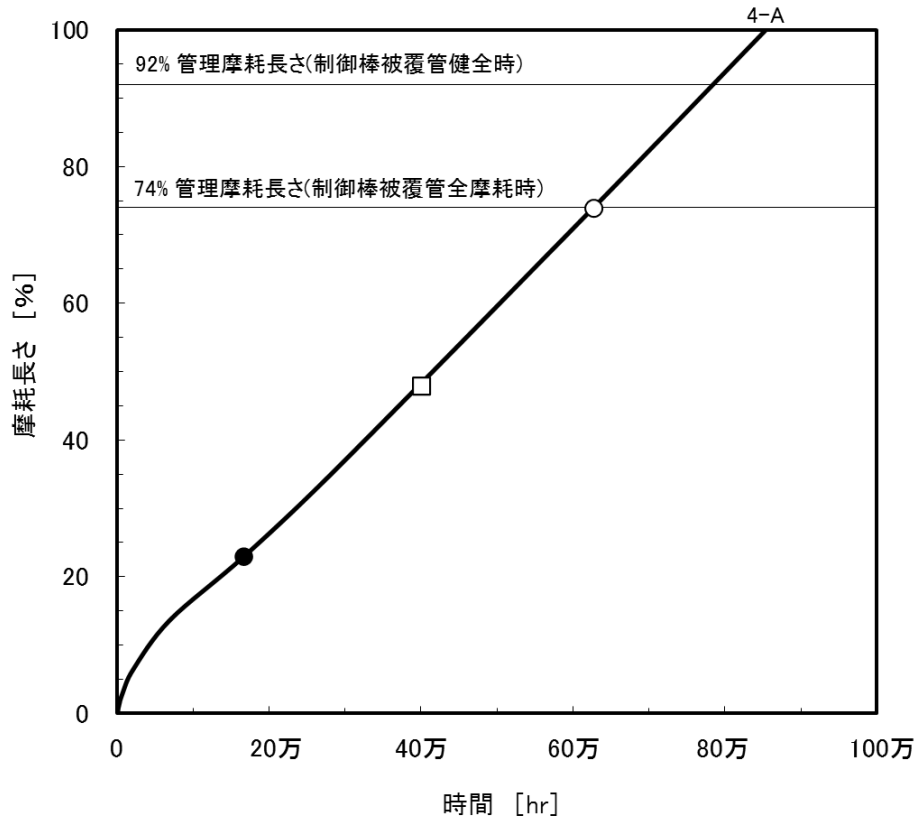
(注) 参照プラントの点検結果を基に摩耗体積が同じとなるように摩耗長さを換算した値

図 G-7 プラントグループ 3 の摩耗進行予測

この結果に基づき、プラントグループ 3 に属するプラントの初回点検時期はプラント運転 36 万時間を目途に設定する。

4.4 プラントグループ 4 (15×15) の点検結果と点検時期

プラントグループ 4 の初回点検実施済プラントの点検結果を反映した摩耗進行予測を図 G-8 に示す。点検結果及び点検時期の数値は 4.8 項参照のこと。



[図中凡例]

● : 摩耗点検結果

○ : 管理摩耗長さに達する時期

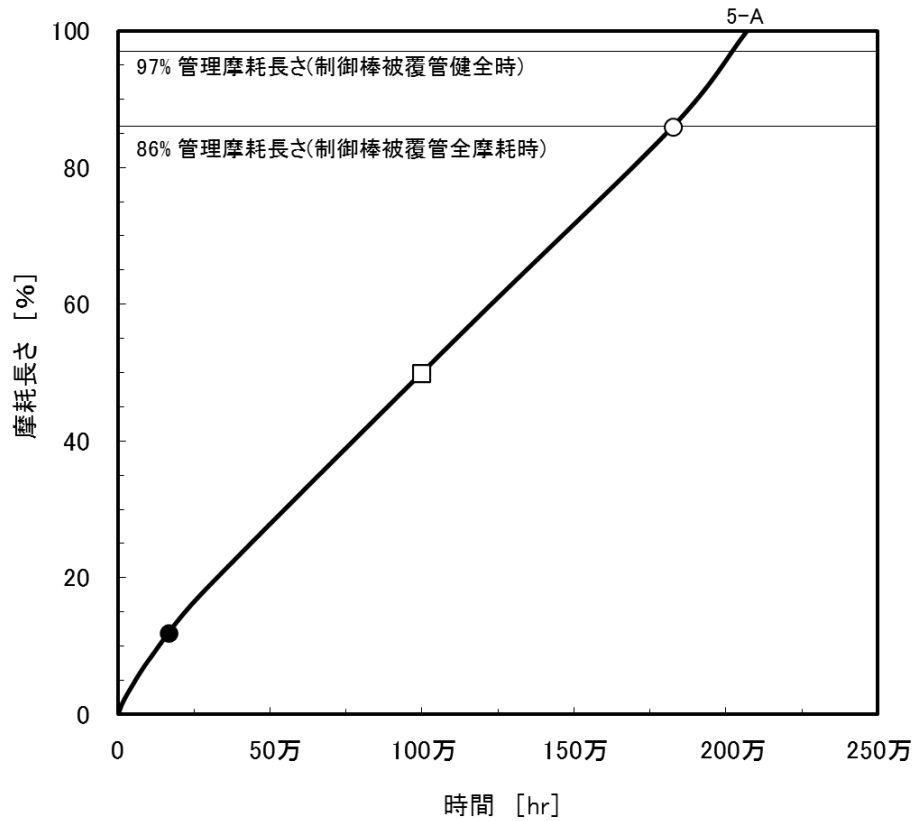
□ : 点検時期から管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期

図 G-8 プラントグループ 4 の摩耗進行予測

この結果に基づき、初回点検実施済プラントの次回点検時期は、プラント運転 40 万時間を目途に設定する。また、プラントグループ 4 に属する未点検プラントの初回点検時期はプラント運転 40 万時間を目途に設定する。

4.5 プラントグループ 5 (15×15 CIR) の点検結果と点検時期

プラントグループ 5 の摩耗進行予測を図 G-9 に示す。なお、ここに示す点検結果は、前項 3 で述べたとおり参照プラントの点検結果の摩耗体積を基に摩耗長さを換算したものである。点検結果及び点検時期の数値は 4.8 項参照のこと。



[図中凡例]

●：摩耗点検予測（注）

○：管理摩耗長さに達する時期

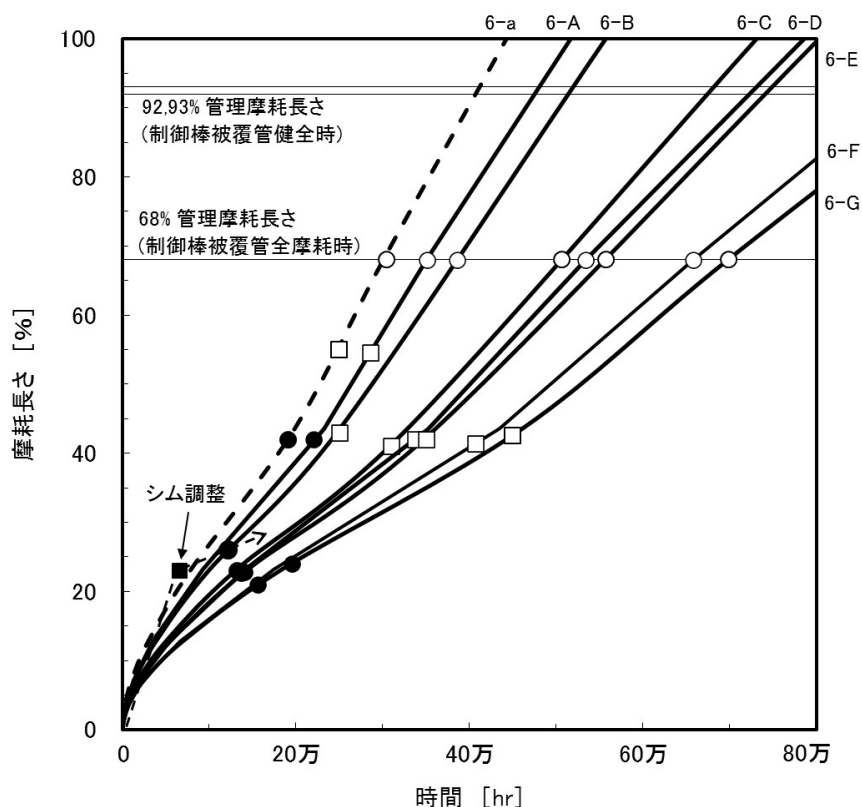
□：点検時期から管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期

（注）参照プラントの点検結果を基に摩耗体積が 2 倍となるように摩耗長さを換算した値

図 G-9 プラントグループ 5 の摩耗進行予測

この結果に基づき、プラントグループ 5 に属するプラントの初回点検時期はプラント運転 100 万時間を目途に設定する。

4.6 プラントグループ 6 (17×17 3 ループ, 4 ループ) の点検結果と点検時期
 プラントグループ 6 の初回点検実施済プラントの点検結果を反映した摩耗進行予測
 を図 G-10 に示す。点検結果及び点検時期の数値は 4.8 項参照のこと。



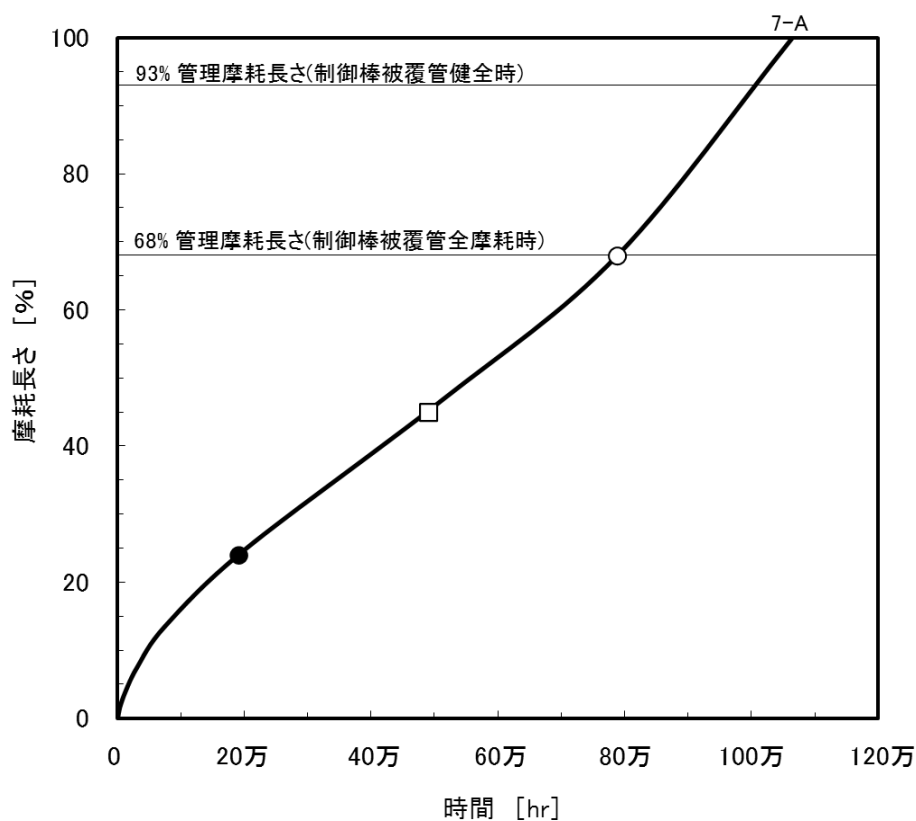
[図中凡例]

- : 摩耗点検結果
- : 管理摩耗長さに達する時期
- : 点検時期から管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期

図 G-10 プラントグループ 6 の摩耗進行予測

この点検結果に基づき、初回点検実施済プラントの次回点検時期は、それぞれプラント運転 25 万時間、29 万時間、32 万時間、34 万時間、35 万時間、41 万時間、45 万時間を目途に設定する。また、プラントグループ 6 に属する未点検プラントの初回点検時期はプラント運転 25 万時間を目途に設定する。

4.7 プラントグループ7 (17×17 3 ループ改良標準型) の点検結果と点検時期プラントグループ7の摩耗進行予測を図 G-11 に示す。なお、ここに示す点検結果は、前項3で述べたとおり参照プラントの点検結果の摩耗体積と同じとなるように摩耗長さを換算したものである。点検結果及び点検時期の数値は 4.8 項参照のこと。



[図中凡例]

●：摩耗点検予測（注）

○：管理摩耗長さに達する時期

□：点検時期から管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期

（注）参照プラントの点検結果を基に摩耗体積が同じとなるように摩耗長さを換算した値

図 G-11 プラントグループ7の摩耗進行予測

この結果に基づき、プラントグループ7に属するプラントの初回点検時期はプラント運転 49 万時間を目途に設定する。

4.8 各プラントグループの点検結果及び点検時期の一覧表

図 G-5～図 G-11 に示す各プラントグループの点検結果及び点検時期の一覧表を表 G-1 に示す。

表 G-1 各プラントグループの点検結果及び点検時期の一覧表

プラントグループ	プラント (注 1)	●：摩耗点検結果		□：点検時期から 管理摩耗長さ に達するまでの期間の 1/2 の時期	○：管理摩耗長 さに達する時期
		時間	摩耗長さ		
プラントグループ 1	1-a	10.6 万 hr	49%	12 万 hr	13.9 万 hr
	1-A	13.5 万 hr	34%	21 万 hr	27.8 万 hr
	1-B	9.6 万 hr	27%	19 万 hr	29.0 万 hr
プラントグループ 2	2-a	16.0 万 hr	34%	24 万 hr	32.6 万 hr
	2-A	22.0 万 hr	37%	31 万 hr	39.7 万 hr
プラントグループ 3	3-A	10.6 万 hr	19%(注 2)	36 万 hr	61.7 万 hr
プラントグループ 4	4-A	16.7 万 hr	23%	40 万 hr	62.7 万 hr
プラントグループ 5	5-A	16.7 万 hr	12%(注 2)	100 万 hr	182.4 万 hr
プラントグループ 6	6-a	19.1 万 hr	42%	25 万 hr	30.4 万 hr
	6-A	22.1 万 hr	42%	29 万 hr	35.1 万 hr
	6-B	12.1 万 hr	26%	25 万 hr	38.5 万 hr
	6-C	13.2 万 hr	23%	32 万 hr	50.7 万 hr
	6-D	14.0 万 hr	23%	34 万 hr	53.4 万 hr
	6-E	13.7 万 hr	23%	35 万 hr	55.7 万 hr
	6-F	15.6 万 hr	21%	41 万 hr	65.8 万 hr
プラントグループ 7	7-A	19.1 万 hr	24%(注 2)	49 万 hr	78.8 万 hr

(注 1) 大文字表記 (A,B 等) は最新の点検結果から設定した摩耗進行予測。小文字表記 (a) は最新の点検結果ではないものの、プラントグループの中で最も摩耗進行が早い摩耗進行予測。

(注 2) 参照プラントの点検結果を基に摩耗長さを予測

付録 H 摩耗進行予測曲線に基づく点検周期の妥当性について

摩耗進行予測曲線に基づく点検周期策定の妥当性を確認する例として、プラントグループ 1 の摩耗進行予測曲線と、連続した同一制御棒クラスタ案内管における摩耗点検結果を示す (図 H-1)。

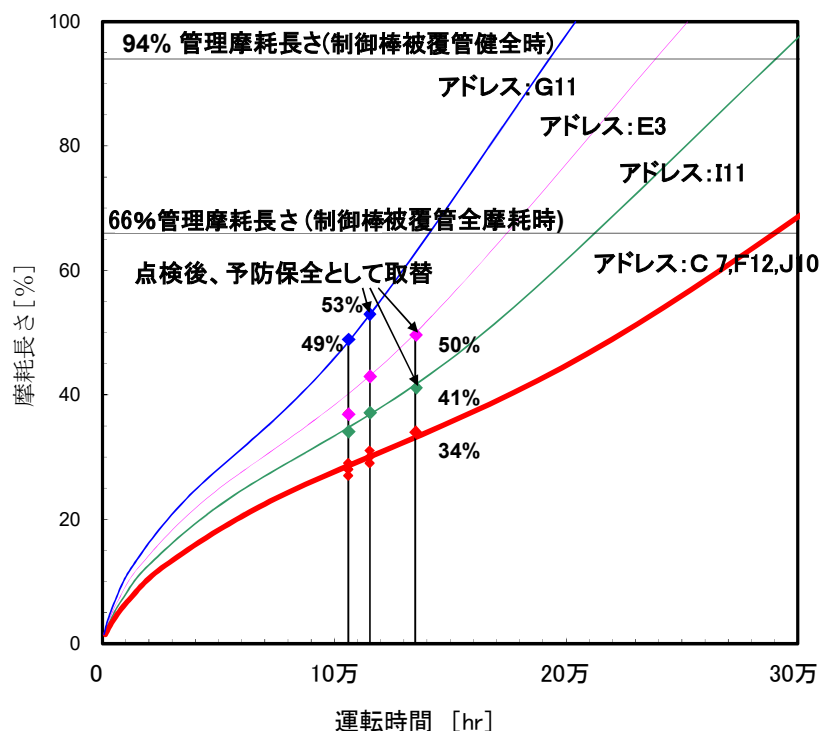


図 H-1 連続した同一プラントの点検結果と摩耗進行予測曲線

本図から連続した同一制御棒クラスタ案内管の点検結果は概ね摩耗進行予測曲線付近にあることが確認できる。

制御棒クラスタ案内管の点検は、付録 G「点検周期」に従って、管理摩耗長さに達するまでの時間の 1/2 の時期を目途に次回点検を実施しており、このように余裕を持って保全するうえで、摩耗進行予測曲線は十分妥当であり、プラントの安全を維持することができると考えられる。

また、これより制御棒クラスタ案内管ごとに摩耗進展傾向が予測可能と考えられるため、制御棒クラスタ案内管ごとの摩耗進行予測及び保全方針策定が可能と判断できる。

付録 I 取替後の制御棒クラスタ案内管点検時期の設定例

取替後の制御棒クラスタ案内管の点検時期について、制御棒クラスタ案内管の取替が実施されているプラントグループ 1 を例に示す。

1. 管理摩耗長さ

プラントグループ 1 の取替後の制御棒クラスタ案内管は、摩耗対策設計を取り入れ、案内板の板厚を 40mm に増加している（その他の仕様はプラントグループ 1 と同じ）。取替後の制御棒クラスタ案内管の管理摩耗長さは制御棒被覆管最大摩耗时 66%、制御棒被覆管健全時 94%である。

2. 摩耗進行予測曲線

プラントグループ 1 の取替後の制御棒クラスタ案内管について、摩耗分散を考慮した摩耗進行予測曲線を図 I-1 のとおり作成した。

3. 点検時期

制御棒クラスタ案内管及び制御棒クラスタの構造が類似し、制御棒クラスタ案内管近傍の流況が同じと考えられる取替前のプラントグループを参照することで点検時期を設定することとする。具体的な取替後の制御棒クラスタ案内管の点検時期は、当該プラントグループの最大の摩耗点検結果の摩耗体積と同じとなるように摩耗長さを換算した点検結果を用いて摩耗進行予測曲線を作成し（下記①参照）、管理摩耗長さに達するまでの期間の 1/2 の時期を目途に初回点検を設定することとする（下記②参照）。また、2 回目以降の点検については、付録 G で示した初回点検実施済プラントの考え方と同様とする。

- ① 当該プラントグループの最大の摩耗点検結果である摩耗長さ 49%を摩耗体積が同一となるように換算した結果、取替後の制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗長さは 28%となること分かる（図 I-2 参照）。
- ② 上記で得られた摩耗長さを基に、取替後の制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗進行予測曲線を新たに作成し、これを基に初回点検時期を決定する（図 I-3 参照）。この結果に基づき、プラントグループ 1 の取替後の制御棒クラスタ案内管の初回点検時期は取替後 20 万時間を目途に設定する。

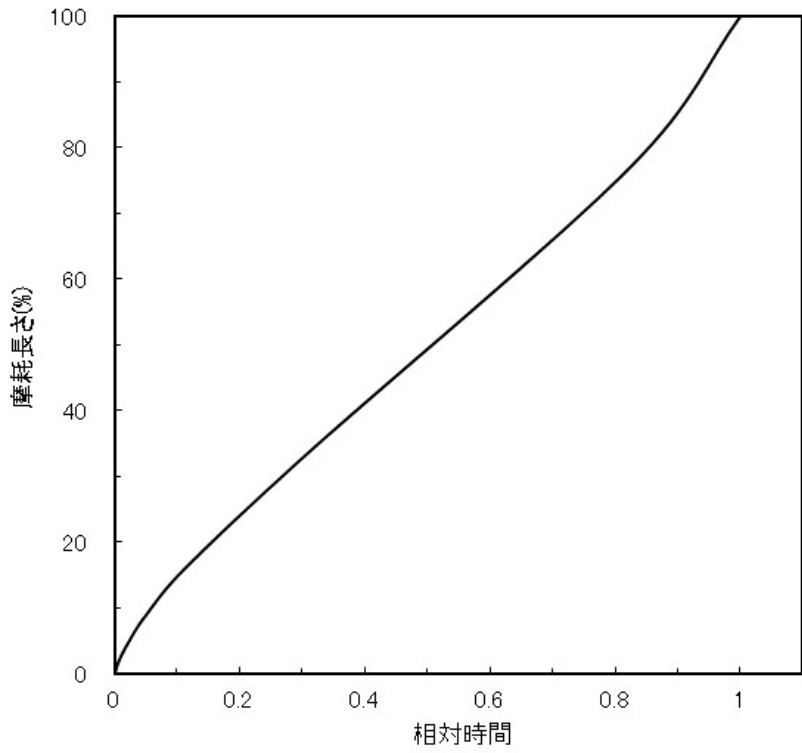


図 I-1 取替後の GT 案内板摩耗進行予測曲線

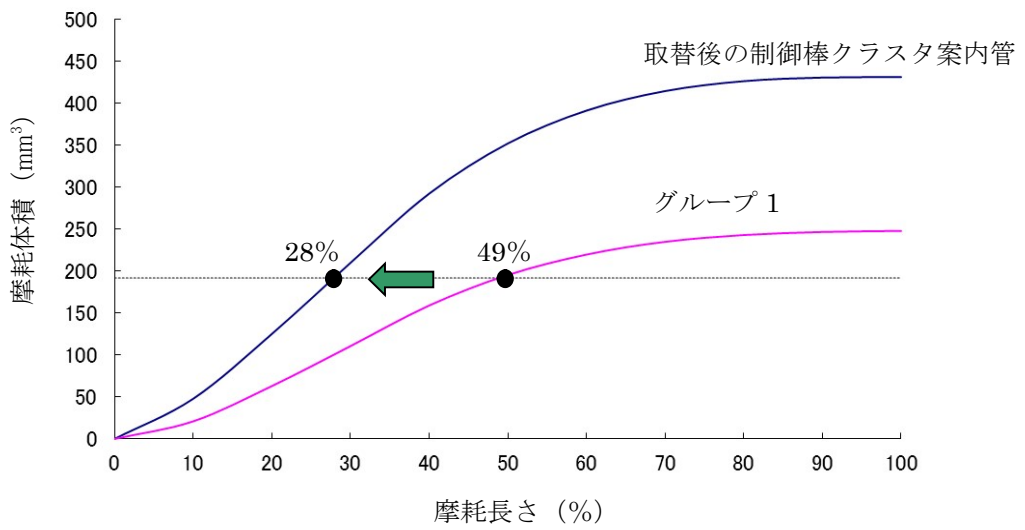
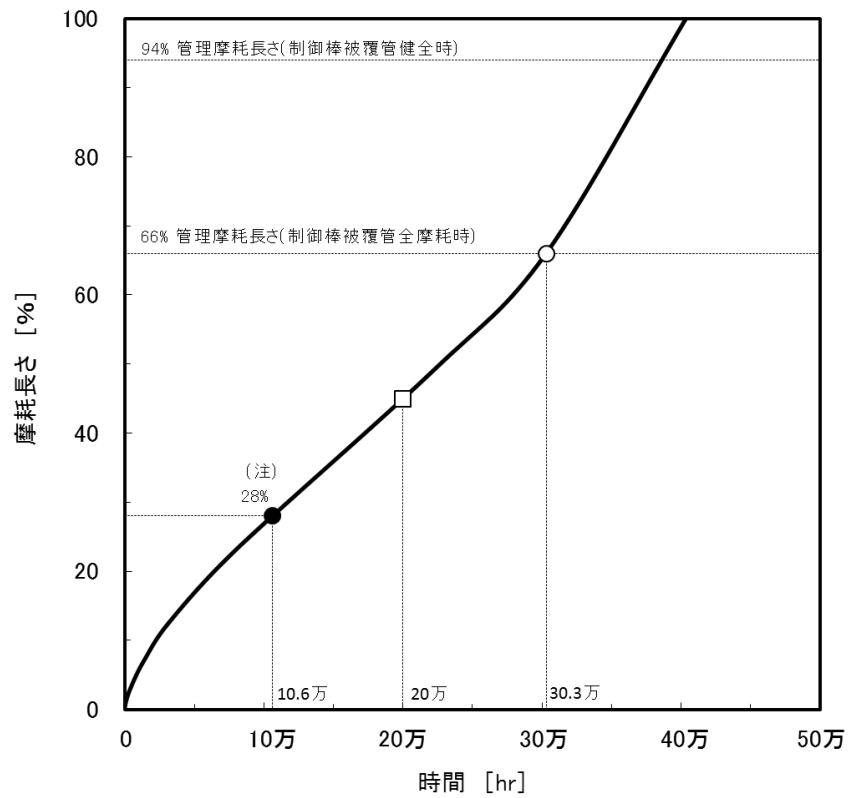


図 I-2 取替後の GT の摩耗長さ換算



[図中凡例]

●：摩耗点検予測（注）

○：管理摩耗長さ(制御棒被覆管全摩耗時)に達する時期

□：点検時期から管理摩耗長さ(制御棒被覆管全摩耗時)に達するまでの期間の1/2の時期

(注) 参照プラントの点検結果を基に摩耗体積が同じとなるように摩耗長さを換算した値

図 I-3 取替後の GT の摩耗進行予測

海外における制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗加速事例について

米国で確認されたイオン窒化制御棒クラスタ採用プラントにおける制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗加速事例の本ガイドラインへの影響について検討した。

2016 年以降、以下の米国加圧水型原子力発電所における制御棒クラスタ案内管案内板の点検の結果、米国内の他プラントよりも加速した摩耗が確認された^[7,8]。

- ・Catawba 1, 2 号機
- ・McGuire 2 号機

これらのプラントに共通するのは、「17×17A, AS タイプ」の制御棒クラスタ案内管であり、かつ「イオン窒化制御棒クラスタ」を採用している点である。なお、イオン窒化制御棒クラスタとは、制御棒クラスタ側の摩耗対策として、制御棒被覆管表面にイオン窒化による硬化処理を施したものである。「17×17A, AS タイプ」の制御棒クラスタ案内管であっても、「Cr めっき」及び「表面処理なし」の制御棒クラスタを採用したプラントではこうした事象は確認されていない。

本事例を受け、2018 年 3 月に米国 PWROG では、制御棒クラスタ案内管の初回点検時期に関する暫定ガイドを発行した^[8]。このガイドでは、制御棒クラスタ案内管の初回点検時期を表 1 のとおりとしており、加速した摩耗が確認された 17×17A, AS タイプの制御棒クラスタ案内管の点検時期を従来よりも前倒している。

表 1 米国における GT の初回点検時期

GT タイプ	初回点検時期	
	従来	暫定ガイド
14×14GT	38～42EFPY	～42EFPY
15×15GT	40～44EFPY	～44EFPY
17×17 3 ループ	30～34EFPY	～34EFPY
17×17 4 ループ	24～28EFPY	～28EFPY
17×17A, AS	34～38EFPY	～29EFPY

国内においても 17×17A, AS タイプの制御棒クラスタ案内管を採用しているプラントがあるが（表 B-1）、いずれも制御棒クラスタの表面処理は Cr めっきであり、米国において摩耗が加速するとされているタイプの制御棒クラスタ案内管と制御棒クラスタの組み合わせはない。このため、米国で確認された加速した摩耗事象は、本ガイドラインで対象とする国内プラントでは発生しないと考えられる。したがって、現時点において本ガイドラインの初回点検時期の見直しは不要と考えられる。

ただし、米国において、今回の摩耗加速の原因は明確に分かっていないとされており、継続的に状況をウォッチし、反映すべき知見が得られた場合には、本ガイドラインの点検時期等の見直しを検討する。

海外との初回点検時期の比較

米国では、2018年に制御棒クラスタ案内管の初回点検時期に関するガイドが発行されている¹⁸⁾。これは、参考資料1に示すイオン窒化制御棒クラスタ採用プラントにおける摩耗加速事例を反映するために発行されたものである。

国外のガイドとのベンチマークとして、当該ガイドに記載された初回点検時期を本ガイドラインと比較したものを表1、図1に示す。これらのおり、本ガイドラインで定める初回点検時期は、米国ガイドと同様、若しくは制御棒クラスタ案内管のタイプによっては本ガイドラインの方が早い結果となった。

表1 米国ガイドと本ガイドラインの初回点検時期の比較

GT タイプ	米国ガイド	本ガイドライン		プラントグループ (本ガイドライン)
14×14GT	～42EFPY	27.4EFPY	24万時間	グループ2
15×15GT	～44EFPY	45.7EFPY	40万時間	グループ4
17×17 3 ループ	～34EFPY	28.5EFPY	25万時間	グループ6
17×17 4 ループ	～28EFPY	28.5EFPY	25万時間	グループ6
17×17AS	～29EFPY	28.5EFPY	25万時間	グループ6

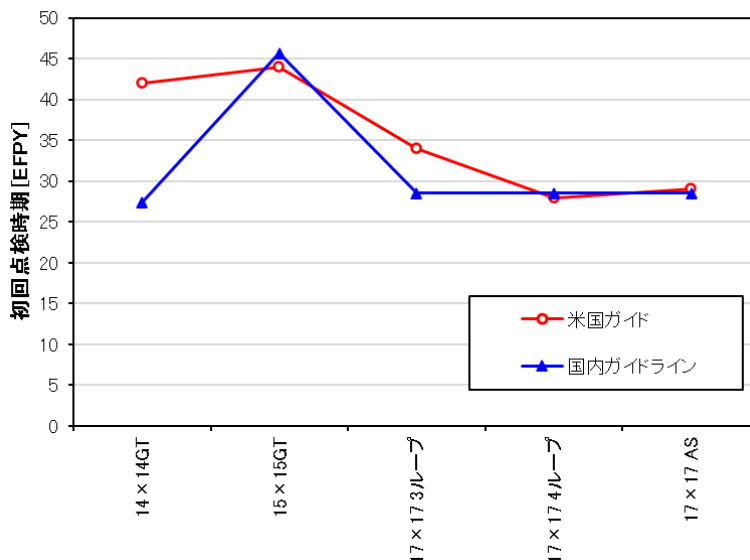


図1 米国ガイドと本ガイドラインの初回点検時期の比較

なお、米国プラントの運転条件(流量等)、制御棒クラスタ案内管の構造詳細、初回点検時期の設定方法等について国内との違いが明確になっておらず、上記のような比較のみでは本ガイドラインの定める初回点検時期の妥当性は議論できないため、上記比較は参考情報としての扱いとする。

用語一覧表

CIR	炉内構造物取替 (Core Internals Replacement)
EFPY	定格負荷相当年数 (Effective Full Power Year)
FLAT	平板型上部炉心支持板
GT	制御棒クラスタ案内管 (Guide Tube)
ITH	円筒胴付き上部炉心支持板 (Inverted Top Hat)
PWR	加圧水型原子力発電所 (Pressurized Water Reactor)
RCC	制御棒クラスタ (Rod Cluster Control)
UCI	上部炉内構造物 (Upper Core Internals)
UCP	上部炉心板 (Upper Core Plate)
USC	上部炉心支持柱 (Upper Support Column)
17×17A	17×17 改良型 (17×17 Advanced)
17×17AS	17×17 改良標準型 (17×17 Advanced Standard)

改訂経緯

第 1 版（2002 年 3 月）制定

制御棒クラスタ案内管の点検評価ガイドラインは 2001 年度に、制御棒の摩耗事象が以前から知られており、制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗事象が否定できないことから検討された。

この時点では制御棒クラスタ案内管案内板の摩耗の定量的なデータがなく、制御棒と制御棒クラスタ案内管案内板の形状及び位置関係から時間と摩耗量を相対的に表した摩耗予測を提案した。

合理的な点検を実施するためのプラントのグループ化については、摩耗の管理値（管理摩耗長さ）に達するまでの時間に影響が大きい案内板のリガメントに着目して行った。

第 2 版（2004 年 1 月）改訂

第 1 版の発行を受け、2002~2003 年度に実機摩耗点検を実施し、この結果を基に、各プラントタイプの点検開始時期を設定した。

それと同時に制御棒クラスタ案内管とその流況に影響を与える上部炉心支持柱の構造等も考慮して流動解析、流動試験を行った。

以上の結果、摩耗進展の傾向は

「14ITH 型」、 「14FLAT 型」、 「それ以外」
の順に早いとの結論を得た。

第 3 版（2013 年 6 月）改訂

第 3 版では、新設プラント及び炉内構造物取替工事実施済プラントを反映したプラントグループの見直し及び管理摩耗長さの設定、耐震設計審査指針改定を反映した管理摩耗長さの見直し、第 2 版発行後の点検結果を受けた点検時期の見直しを行った。

第 4 版（2019 年 3 月）改訂

海外の 17×17A, AS タイプの制御棒クラスタ案内管、イオン窒化制御棒クラスタ採用プラントで案内板摩耗が加速する事象が確認されたことから、本事象の説明及び本ガイドラインへの反映検討を参考資料 1 に追加した。また、海外と本ガイドラインの初回点検時期の比較を参考資料 2 に追加した。

第 2 章を安全機能、構造、想定劣化モード、点検方針等の観点で記載を充実化させ、当該章でガイドラインの概要が分かるようにした。解説 4-2 に本ガイドラインにおける予防保全の定義を記載した。付録 E-3 に制御棒被覆管摩耗事象の概要を記載した。

その他、全体を通して表現の見直し及び記載の充実化を行った。

第 5 版（2024 年 12 月）改訂

第 4 版の発行以降の国内点検結果を反映して、プラントグループ 6 の摩耗進行予測曲線を見直した（図 G-10）。また、各プラントグループの点検結果及び点検時期を一覧表で整理した（表 G-1）。

国内プラントにおける炉内構造物取替工事の実績を反映して、15×15 タイプ CIR をプラントグループ 5 に設定し、摩耗進行予測曲線、管理摩耗長さ及び点検時期の設定の考え方を追加した（表 B-1、図 D-9、表 E-2、図 G-4、図 G-9、参考資料 5）。

海外運転経験の調査結果を反映し、解説 2-3 を見直した。

その他、全体を通して表現の見直しを行った。

1. 基本的な考え方

原子炉の安全性確保を大前提とし、制御棒クラスタ案内管に要求される機能を維持できるように、管理基準、合理的な点検範囲、点検周期を規定する。

- ① 経年劣化事象：制御棒クラスタの流動振動による摩耗
- ② 制御棒クラスタ案内管に要求される安全機能：制御棒クラスタ案内機能、制御棒クラスタ破損防止
- ③ 安全機能に影響を与えない範囲で摩耗を管理
- ④ 形状並びに上部炉内構造物構造によりプラントをグループ化（表 1）

表 1 GT の形式に基づくグループ化

グループ	グループ1	グループ2	グループ3	グループ4	グループ5	グループ6			グループ7
						a	b	c	
タイプ	14×14 ITH型	14×14 FLAT型	14×14 CIR	15×15	15×15 CIR	17×17AS 3ループ	17×17 4ループ	17×17AS 4ループ	17×17 3ループ 改良標準型
GT形式	14×14		15×15		17×17				
リガメント長さ	2.4mm		5.5mm	4.8mm	12.4mm	2.9mm		2.9mm	
案内板厚	24mm		40mm	24mm	40mm	24mm		40mm	
ループ数	2ループ			3ループ		4ループ		3ループ	
UCIの構造 ¹⁾	ITH型	FLAT型	ITH型	FLAT型	ITH型	ITH型		ITH型	
RCC表面処理	Crめっき								
対象プラント	泊1号機 泊2号機	美浜1号機 美浜2号機	玄海1号機 玄海2号機 伊方1号機 伊方2号機	高浜1号機 高浜2号機	美浜3号機	川内1号機 川内2号機 高浜3号機 高浜4号機 伊方3号機	大飯1号機	敦賀2号機 ²⁾ 大飯2号機 大飯4号機 玄海3号機 玄海4号機	泊3号機

2. 点検対象箇所

図 1（プラントグループ 2 の例）のように、摩耗が進行すると、制御棒クラスタ案内管の機能に影響を与える可能性のある案内穴 4 箇所とする。

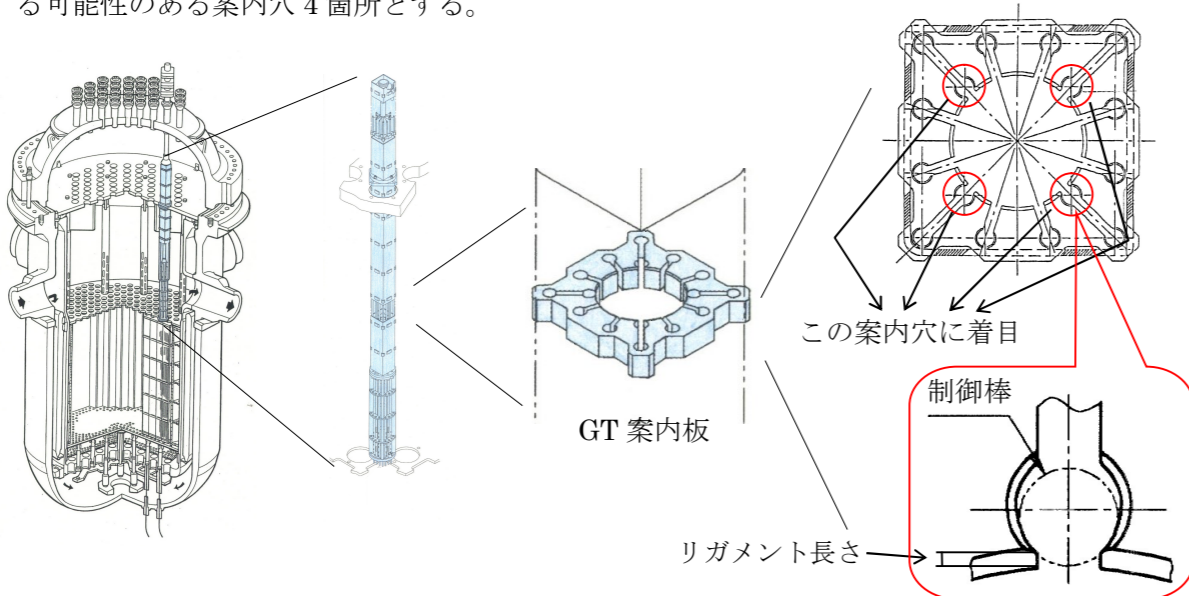


図 1 点検対象箇所（プラントグループ 2 の例）

3. 点検方法

点検方法は、目視等、摩耗長さが判定できる方法とする。また摩耗長さの定義を図 2 に示す。

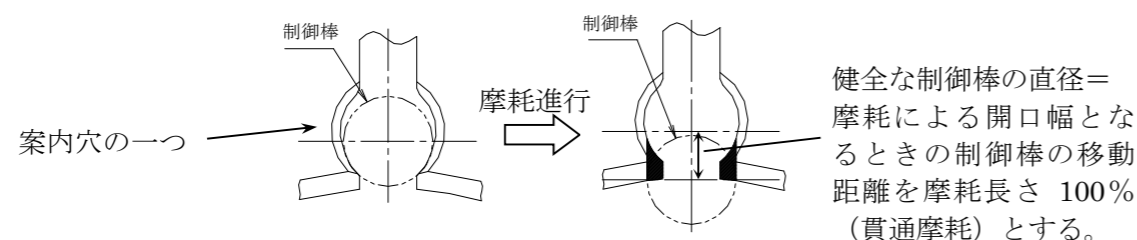


図 2 摩耗長さの定義

4. 管理摩耗長さ及び摩耗進行予測の考え方

制御棒クラスタ案内管案内板の管理摩耗長さ、及びその進行予測を以下のように定める。

[管理摩耗長さ]

制御棒クラスタ案内管の機能維持を、基準地震動 Ss 時に制御棒が、案内穴から抜け出さないこととし、制御棒の摩耗を考慮した、「66～94% 摩耗長さ（グループ 1 の例）」を、管理摩耗長さとする。

[摩耗進行予測]

制御棒 1 本は上下方向に複数の案内板によって案内されているが、これらの単位時間当たりの摩耗体積の和は一定と仮定する。その中で一枚の案内板に摩耗が集中して摩耗進行が速くなるように、保守側の摩耗分散形態を仮定する。摩耗進行予測を図 3 に示す。

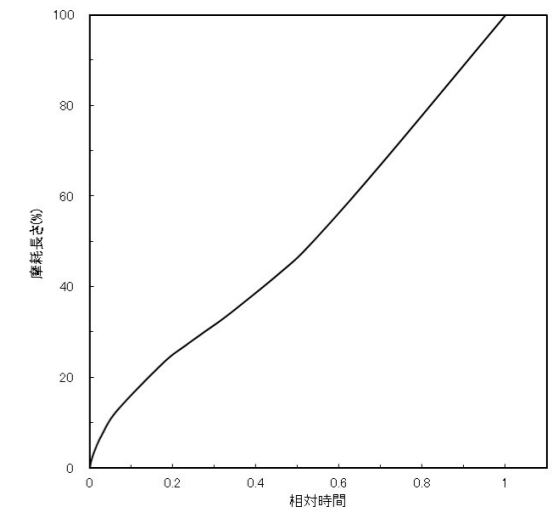


図 3 摩耗進行予測（14×14GT の例）
（時間は相対値）

5. 点検開始時期及び点検周期の考え方

点検フローを図 4 に示す。

- 点検開始時期は、本ガイドライン制定後、表 1 のグループごとに以下のプラント運転時間を目途に実施する。

- プラントグループ 1：12 万時間
- プラントグループ 2：24 万時間
- プラントグループ 3：36 万時間
- プラントグループ 4：40 万時間
- プラントグループ 5：100 万時間
- プラントグループ 6：25 万時間
- プラントグループ 7：49 万時間

- 次回点検は最新の点検結果を通るように図 3 の曲線を実運転時間に換算した摩耗進行予測で、前回点検から管理摩耗長さに達すると予測される期間の 1/2 を目途に行う。ただし管理摩耗長さには、制御棒の摩耗を反映する。なお、摩耗データの蓄積等により摩耗進行の傾向が十分に把握できると判断された場合は点検周期を別途設定することができる。

- 次回点検までの摩耗進行予測が、管理摩耗長さ以下となるよう、点検周期を設定できない場合は、取替等の対策を実施するか、詳細評価にて次回点検まで継続使用が可能であることを示す。また、点検の代わりに、別途、予防保全措置を選択することもできる。

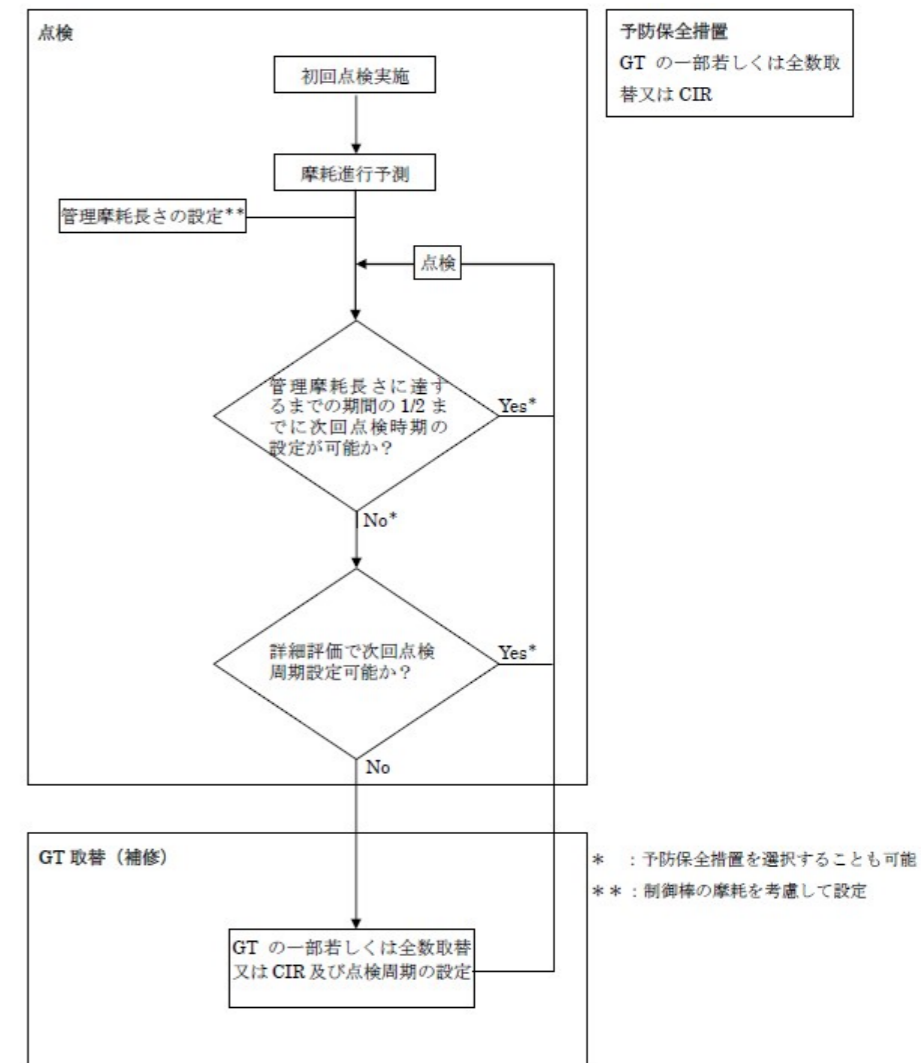


図 4 点検フロー

引用文献

- [1] NUCIA, “制御棒クラスタ案内管の取替”, 2004-北海道-M003 Rev.1
- [2] NUCIA, “泊発電所 1 号機 第 14 回定期検査の制御棒クラスタ案内管 (GT) 取替え”, 2007-北海道-M004
- [3] JEAC4209, “原子力発電所の保守管理規程”
- [4] NUCIA, “制御棒被覆管の経年劣化について”, 1986-関西-M022
- [5] NUCIA, “制御棒クラスタの経年劣化について”, 1987-関西-T009
- [6] NUCIA, “制御棒クラスタ被覆管の経年劣化について”, 1987-九州-M003
- [7] PWROG 2017 Materials Programs Technical Information Exchange Meeting Guide Card Wear Activities Update, May 2017, ML16203A029
- [8] PWROG Transmittal of Interim Guidance for Addressing Accelerated Guide Card Wear Issue Described in NSAL-17-1 (PA-MS-C-1471), March 2018, ML18088A199
- [9] 2020 Biennial Report of Recent MRP-227-A Reactor Internals Inspection Results, August 2020, ML20229A000
- [10] 2022 Biennial Report of Recent MRP-227-A Reactor Internals Inspection Results, September 2022, ML22273A155
- [11] 2011 年度 5 電力委託調査「耐震設計審査指針改定に伴う制御棒クラスタ案内管案内板摩擦クライテリア見直しに関する調査」

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン
[制御棒クラスター案内管]
(第5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, 14 階

TEL 03-5418-9312 FAX 03-5440-3606

©原子力安全推進協会, 2024

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。