

PWR炉内構造物点検評価ガイドライン

[制御棒クラスター案内管]

(第3版)

平成25年 6月

一般社団法人 原子力安全推進協会

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。

平成12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、平成19年より日本原子力技術協会に継承され、原技協ホームページより電子ファイル版で各種ガイドラインを公開してきました。

平成24年11月の日本原子力技術協会の改組に伴い、炉内構造物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。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、原技協での制定済みガイドラインと併せ、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おります。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致します。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。

平成25年6月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
委員長 野本敏治

PWR 炉内構造物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
平成 14 年 3 月	初版発行		
平成 16 年 1 月	第 2 版発行	点検時期の規定を修正	
平成 25 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	

※ 改訂の詳細は参考資料参照

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。

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

(平成 25 年 6 月現在, 順不同, 敬称略)

委員長	野本 敏治	東京大学名誉教授
副委員長	関村 直人	東京大学教授
委員	安藤 博	元(財)発電設備技術検査協会
委員	辻川 茂男	東京大学名誉教授
委員	西本 和俊	大阪大学名誉教授 福井工業大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	望月 正人	大阪大学教授
幹事	村井 荘太郎	東京電力(株)
幹事	平野 伸朗	関西電力(株)
幹事	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	勝海 和彦	北海道電力(株)
委員	飯田 純	東北電力(株)
委員	吉田 伸司	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	市川 義浩	中部電力(株)
委員	倉田 勝	北陸電力(株)
委員	野村 友典	関西電力(株)
委員	谷 浦 亘	中国電力(株)
委員	黒川 肇一	四国電力(株)
委員	大久保 康志	九州電力(株)
委員	江口 藤敏	日本原子力発電(株)
委員	寺門 剛	日本原子力発電(株)
委員	枘 明彦	電源開発(株)
委員	伊東 敬	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	元良 裕一	(株)東芝
委員	小山 幸司	三菱重工業(株)
委員	杉江 保彰	原子力安全推進協会
参加者	菊池 正明	(独)原子力安全基盤機構
参加者	小澤 正義	(独)原子力安全基盤機構
事務局	関 弘明	原子力安全推進協会

PWR 炉内構造物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	目的および適用.....	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.....	1
第 2 章	基本的考え方	2
第 3 章	点検および評価.....	2
3.1	点検範囲	2
3.1.1	制御棒クラスタ案内管.....	2
3.1.2	案内板リガメント	2
3.2	点検方法	2
3.3	点検時期	3
3.3.1	点検開始時期	3
3.3.2	点検周期	3
3.4	評価.....	3
3.4.1	判定基準	3
3.4.2	詳細評価	3
3.4.3	点検および予防保全措置のフロー	3
第 4 章	予防保全措置及び補修.....	5

解 説

解説 1-1	ガイドライン制定の目的.....	6
解説 1-2	制御棒クラスタ案内管の選定理由と対象プラント	6
解説 2-1	制御棒クラスタ案内管の機能維持	6
解説 2-2	制御棒クラスタ案内管に想定される経年変化事象	6
解説 2-3	プラントのグループ化.....	6
解説 3-1	点検開始時期	7
解説 3-2	摩耗進行予測	7
解説 3-3	点検周期.....	7
解説 3-4	摩耗進行予測ならびに点検時期の見直し.....	7
解説 3-5	制御棒の摩耗の考慮.....	7
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.....	8

付 録

付録 A	制御棒クラスタ案内管の摩耗現象について
付録 B	制御棒クラスタ案内管のグループ化
付録 B-1	制御棒クラスタ案内管の流動解析
付録 B-2	制御棒クラスタ案内管の流動試験
付録 C	摩耗長さの定義
付録 C-1	摩耗長さの検査手法例
付録 D	摩耗予測の詳細
付録 D-1	摩耗進行時の摩耗分散
付録 D-2	プラントグループ毎の摩耗予測
付録 E	制御棒クラスタ案内管の機能と管理摩耗長さ
付録 E-1	地震時の制御棒抜け出しの評価
付録 E-2	地震時の制御棒破損防止の評価
付録 E-3	制御棒減肉時の管理摩耗長さへの影響
付録 F	評価の余裕に対する検討
付録 G	点検周期
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
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

参 考 資 料

参考資料 1	炉内構造部物における制御棒クラスタ案内管の機能
参考資料 2	用語一覧表
参考資料 3	改訂経緯
参考資料 4	炉内構造物点検評価ガイドライン [制御棒クラスタ案内管] の概要

第1章 目的および適用

1.1 目的

本ガイドラインは加圧水型原子力発電所（PWR）用機器のうち、炉内構造物の構造健全性が維持されていることを確認するための、合理的な点検のあり方を示すことを目的とする（解説 1-1）。

1.2 適用

1.2.1 適用範囲

本ガイドラインは、PWR の炉内構造物の制御棒クラスタ案内管に適用する（解説 1-2）。

1.2.2 適用時期

本ガイドラインの適用期間は、商業運転開始後の機器の供用期間中とする。

1.3 用語

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 RCC 結合部（スパイダー）が通過するよう設けられた溝を形成する平坦部をいう（図-1 参照）。また、その長さをリガメント長さという。

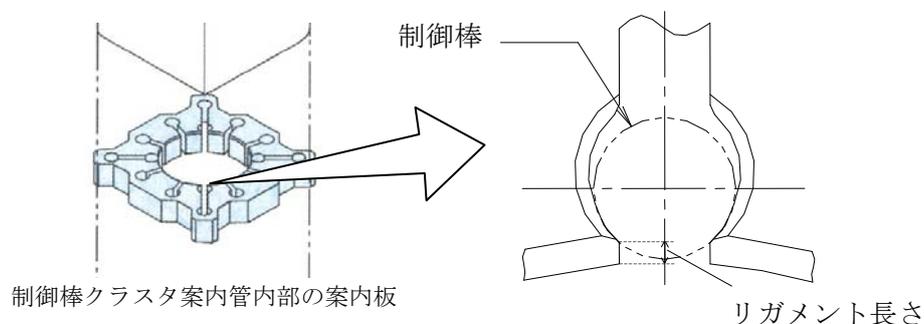


図-1 案内板リガメント

最大摩耗：案内板リガメントが摩耗により減少し、外力なしで制御棒が抜け出る状態になった摩耗状態をいう。

摩耗長さ：案内板リガメントの摩耗状態を示し、摩耗なしの状態を 0%、最大摩耗を摩耗長さ 100%として表す。

管理摩耗長さ：制御棒クラスタ案内管（GT）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に係る「原子炉の安全性確保」として、具体的には制御棒クラスタ案内管の制御棒案内機能維持及び制御棒クラスタの破損防止とする（解説 2-1）。
- (3) 制御棒クラスタ案内管に想定される経年変化事象は案内板リガメントの摩耗とする（解説 2-2）。
- (4) 案内板リガメントの摩耗に対する管理として、制御棒クラスタ案内管の機能に影響を与えない範囲で管理摩耗長さを設ける。
- (5) 案内板リガメントの摩耗の管理方法は、制御棒クラスタ案内管の形状によりプラントをグルーピングし、基本的に通常運転時に制御棒を案内している制御棒クラスタ案内管を管理対象とする（解説 2-3）。

第3章 点検および評価

3.1 点検範囲

3.1.1 制御棒クラスタ案内管

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検査とすることができる。

3.1.2 案内板リガメント

点検の対象となる案内板は、通常運転時に制御棒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、制御棒の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に適用する非破壊試験は、目視検査等、摩耗長さを特定できる方法とする。

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処に実施する（解説 3-1）。

プラントグループ 1	約 12 万時間
プラントグループ 2	約 24 万時間
プラントグループ 3	約 36 万時間
プラントグループ 4	約 40 万時間
プラントグループ 5	約 25 万時間
プラントグループ 6	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 を目処に設定する（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) 前 (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、次回点検まで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 項の判定基準において、次回点検までの摩耗進行が管理摩耗長さを超えると予測される場合は、試験的手法または解析等により、次回点検までの制御棒クラス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 点検および予防保全措置のフロー

制御棒クラス案内管の点検および予防保全措置のフローを図 3.4-1 に示す。

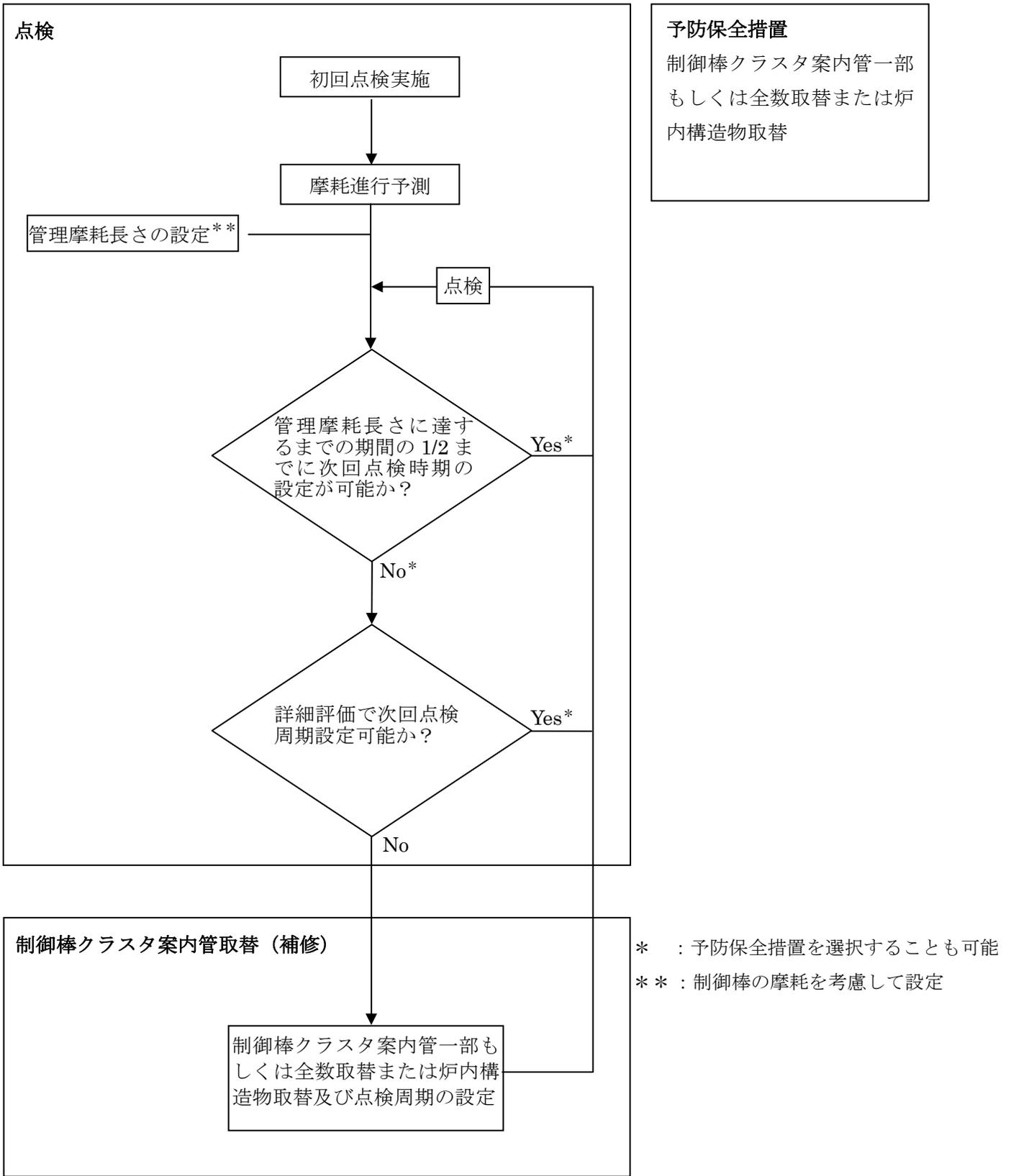


図 3.4-1 点検および予防保全措置のフロー

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保全を図るため、点検を実施する代わりに、予防保全措置として、制御棒クラスター案内管単体取替、もしくは炉内構造物取替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）。

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冷却水流路の維持及び流量適正配分、③制御棒挿入性の確保、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や進行の特性に応じた点検、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、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の選定理由と対象プラント

PWR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が流動振動を起こし制御棒クラスタ案内管と長時間にわたる接触により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は、制御棒を保護し、これ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）、取替など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 1,2,3 号機、高浜 1,2,3,4 号機、大飯 1,2,3,4 号機、伊方 1,2,3 号機、玄海 1,2,3,4 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 (以降 S_s 地震動という) の荷重により制御棒が損傷しないことを考慮する（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の支持状態は設置時と基本的に変わらないため、制御棒落下時間に与える影響は考慮しない。

解説 (2-2) 制御棒クラスタ案内管に想定される経年変化事象

制御棒クラスタ案内管の経年変化事象としては、制御棒の経年変化事象を勘案し、案内板の摩耗を想定する（付録 A 参照）。

解説 (2-3) 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内側案内穴の形状、上部炉内構造物の形式をもと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）。

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の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 の式にのっとり、単位時間あ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。従って、評価に当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 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) 摩耗進行予測ならびに点検時期の見直し

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、ならびに点検時期等を見直すことができる。

また、複数回にわたる点検により摩耗データが蓄積され、または、管理摩耗長さに達するまでの時間が短くなると、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と考えられることから、点検時期等について見直しを図ることができる。

解説 (3-5) 制御棒の摩耗の考慮

制御棒 (RCC) の摩耗については別途管理されており、クロムメッキ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、RCC の摩耗を安全側に考慮して設定する。なお、RCC 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。更に個々の RCC 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

摩耗進行が予測される制御棒クラスタ案内管単体、も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性が取替前のものと同等以下の場合は、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。

付録 A 制御棒クラスタ案内管の摩耗現象について

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おこし、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

制御棒クラスタの摩耗は、定常状態の流動振動による摩耗を生じさせる力（ワークレート）が一定と考え、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、

$$V=\text{摩耗体積} \quad [\text{m}^3]$$

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

$$F=\text{接触荷重} \quad [\text{N}]$$

$$S=\text{摺動距離} \quad [\text{m}]$$

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の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の案内板形状、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 6 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（UCI）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）。

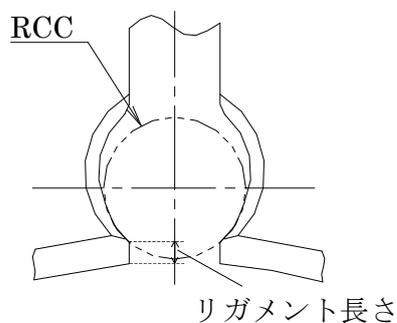


図 B-1 案内板案内穴のリガメント長さ

表 B-1 制御棒クラス案内管 (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
					a	b	c	
タイプ	14×14 ITH 型	14×14 FLAT 型	14×14 CIR	15×15	17×17 3 ループ	17×17 4 ループ	17×17 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	2.9mm			2.9mm
案内板板厚	24mm		40mm	24mm	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	ITH 型	FLAT 型	ITH 型	FLAT 型	ITH 型			ITH 型
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	美浜 3 号機 高浜 1 号機 高浜 2 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 大飯 2 号機 大飯 3 号機 大飯 4 号機 玄海 3 号機 玄海 4 号機	泊 3 号機

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（以下 GT）の案内板の摩耗は、制御棒の流動振動に起因することから、制御棒の振動の原因となる GT（コンティニュアス）の形状との関連が大きいと考えられる。そこで、GT 下部近傍の流況、特に一次冷却材の流速及び乱れエネルギーの分布を GT の形式毎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-2）

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-3 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-4、図 B-5 に示す。その結果、次のように整理できる。

コンティニュアス内部の流速については

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

コンティニュアス内部の流れの乱れについては

- ・ 14ITH 型は炉心から GT 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アス部に流れ込む冷却材のため、コンティニュアス部内に乱れが生成されやすい。
- ・ 14FLAT 型、15FLAT 型は炉心から GT 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、

- ・ GT のコンティニュアス部や上部炉心支持柱のタイプによって、それぞれ制御棒の振動、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。
- ・ 摩耗進展が早い傾向は、流動解析の結果から

14ITH 型 > 14FLAT 型 > それ以外

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 5	
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					

USC:上部炉心支持柱

図 B-2 GT 周辺の構造比較

解析範囲

出力範囲のモデル

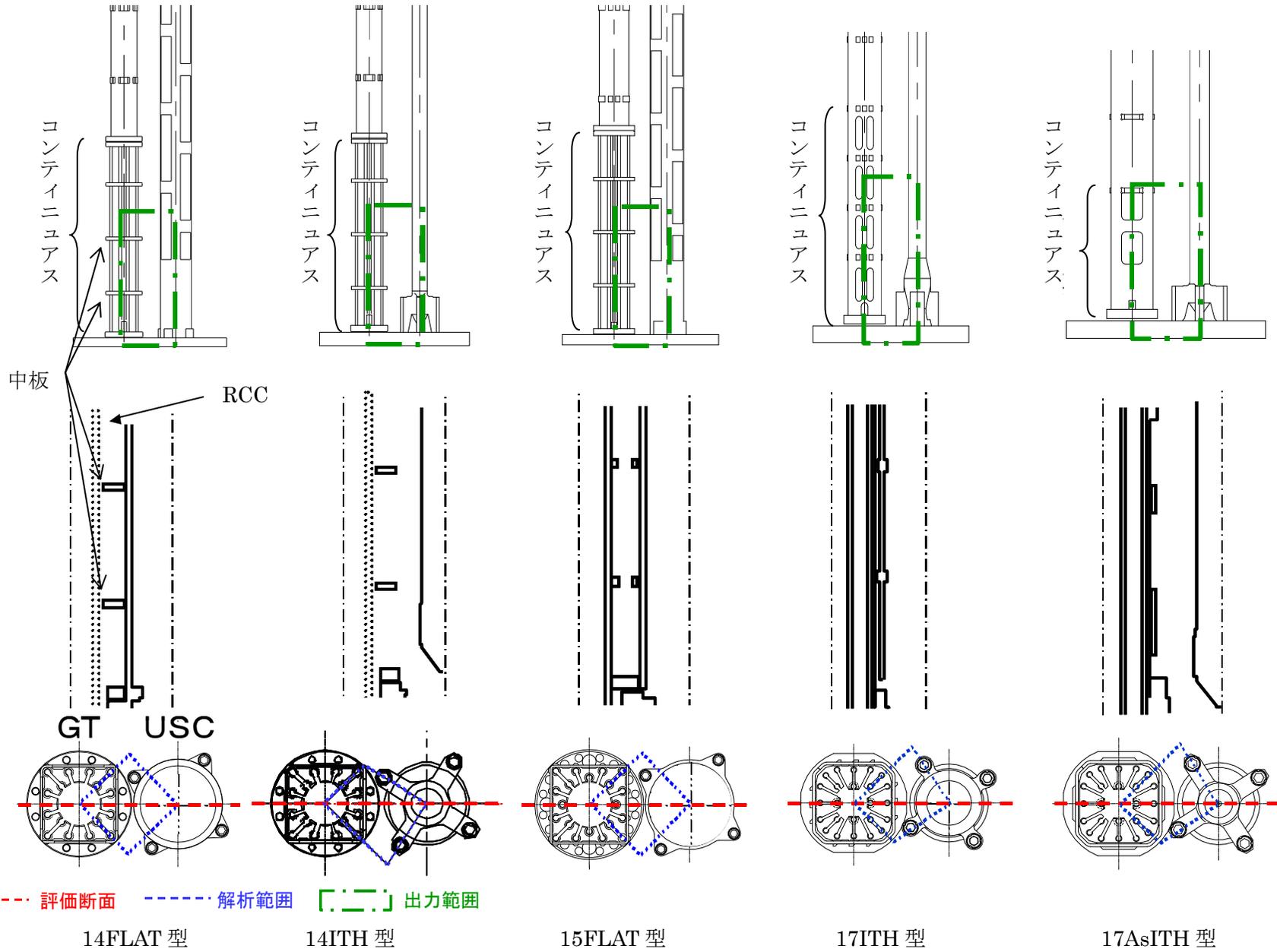
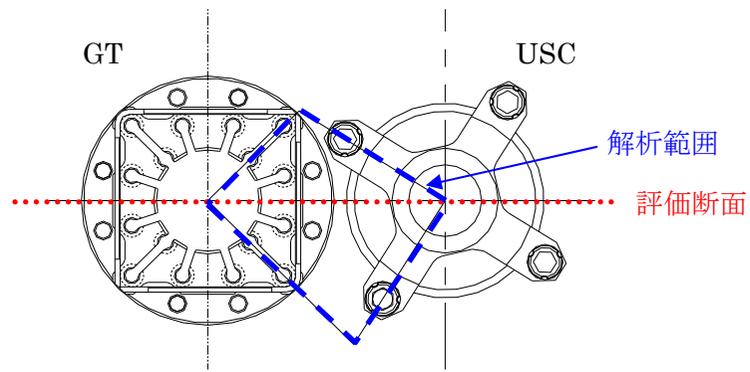
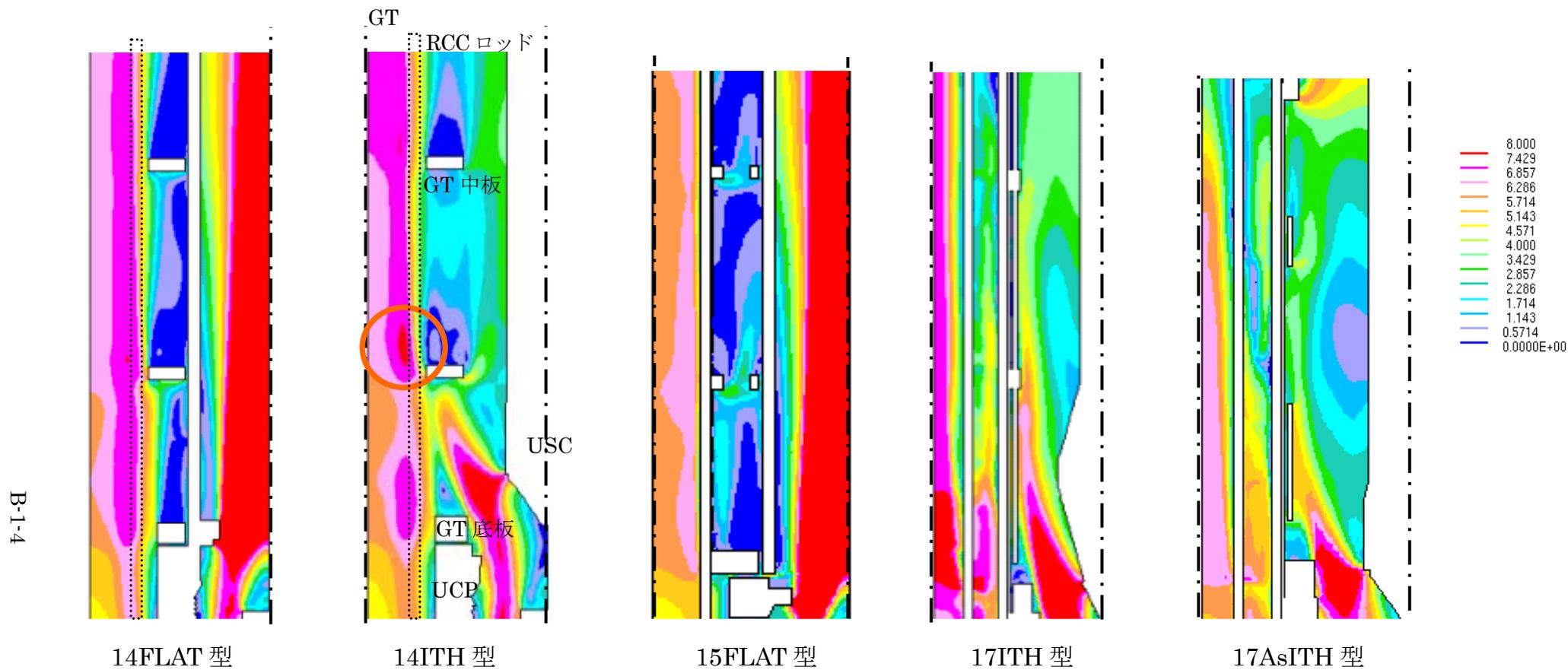


図 B-3 解析範囲



USC: 上部炉心支持柱
UCP: 上部炉心板

図 B-4 GT 近傍の冷却材流速分布 (m/s)

B-1-5

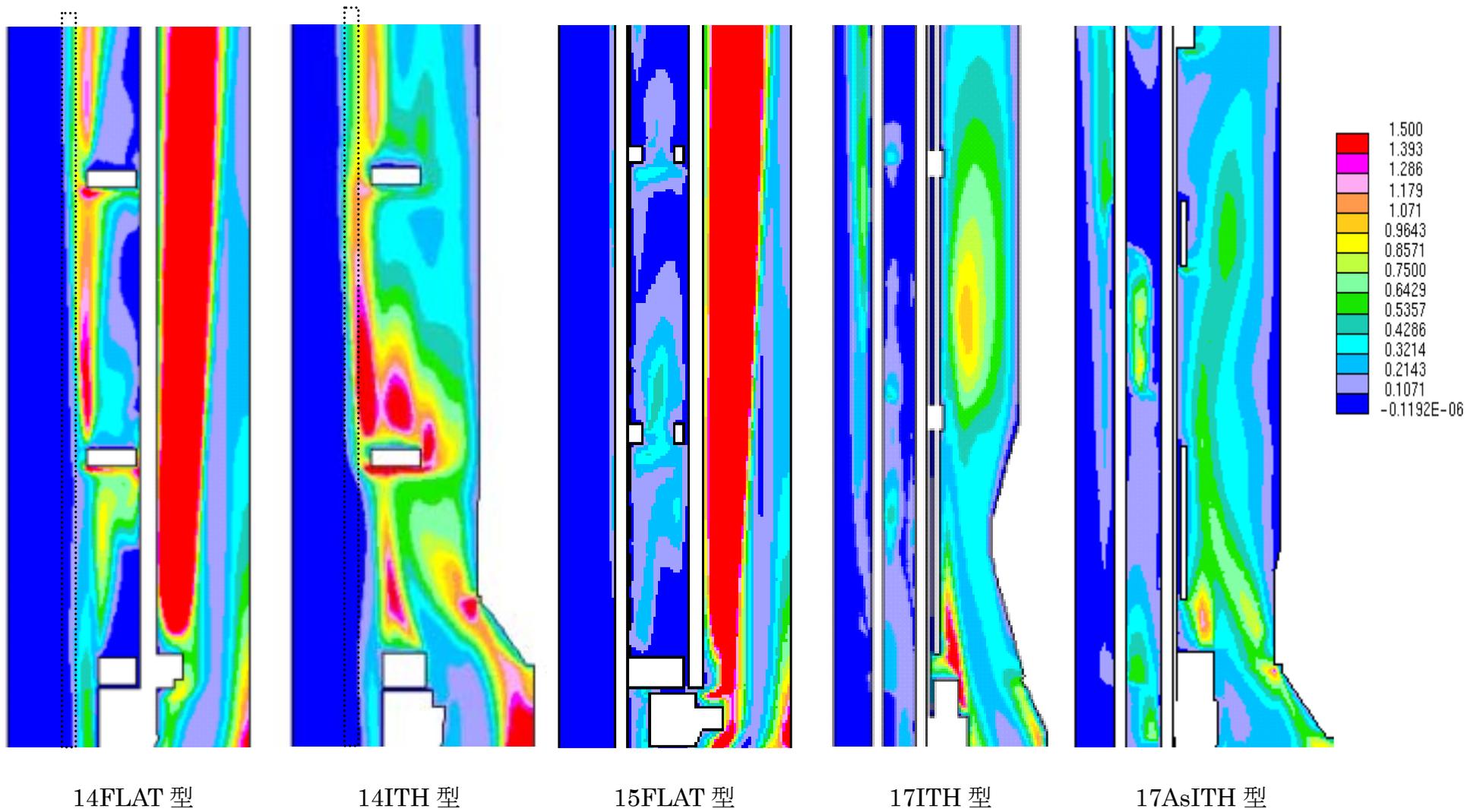


図 B-5 GT 近傍の冷却材乱れエネルギー分布 (m^2/s^2)

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毎の流動解析において、GT 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の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 年代に制御棒の振動について検討した 17×17GT 流動試験の成果を参考に計画を行った。

当時の検討により、コンティニユ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ユ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、コンティニユアス部の流体励振力と流体押付力を計測した。また、14×14GT はオープンコンティニユアスであることから、制御棒クラスタ案内管コンティニユ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、実験結果をもとに振動解析を行い、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-6 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ユ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-7 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、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。

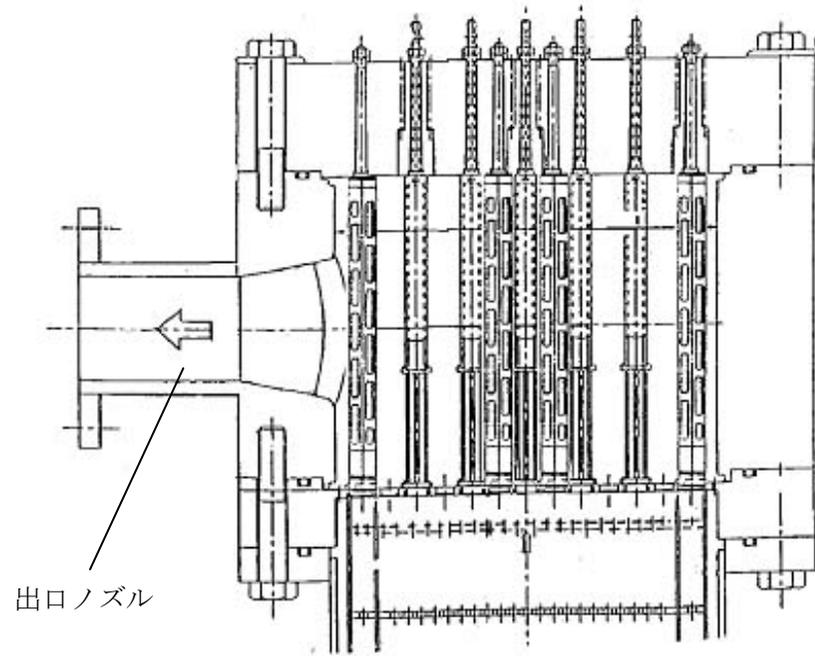
ロッド①の流体励振力の計測結果を図 B-8 に示す。これより、14ITH 型では横流れ流速大の条件において励振力は増加し、14ITH 型の方が 14FLAT 型に比べて励振力は大きいことが分かった。

ロッド①の流体押付力の計測結果を図 B-9 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。

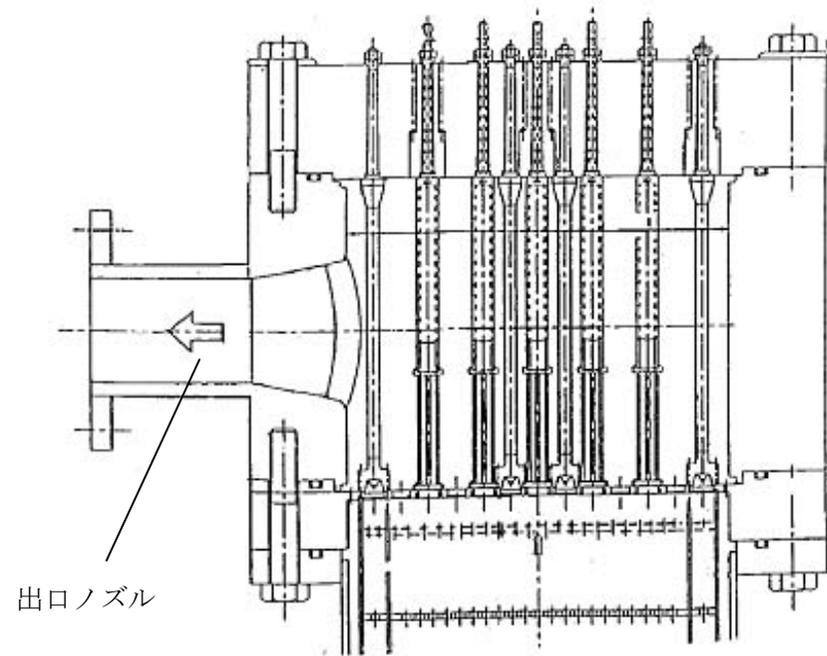
2体流動試験によって得られた流動体押付力、励振力を基にして、制御棒の振動解析を行い、ワークレートを算出した。ワークレート解析の方法を図 B-10 に、解析結果を図 B-11 に示す。これらより、横流れ流速大の条件においてワークレートは増加し、14ITH 型の方が 14FLAT 型に比べてワークレートは大きいことが分かった。これは、14ITH 型ではワークレートに与える隣接上部炉心支持柱からの流れの影響が大きいためと考えられる。

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 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 型は励振力が大きい傾向を有することが要因である。これは、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される。



14FLAT型



14ITH型

図 B-6 上部プレナム流況試験

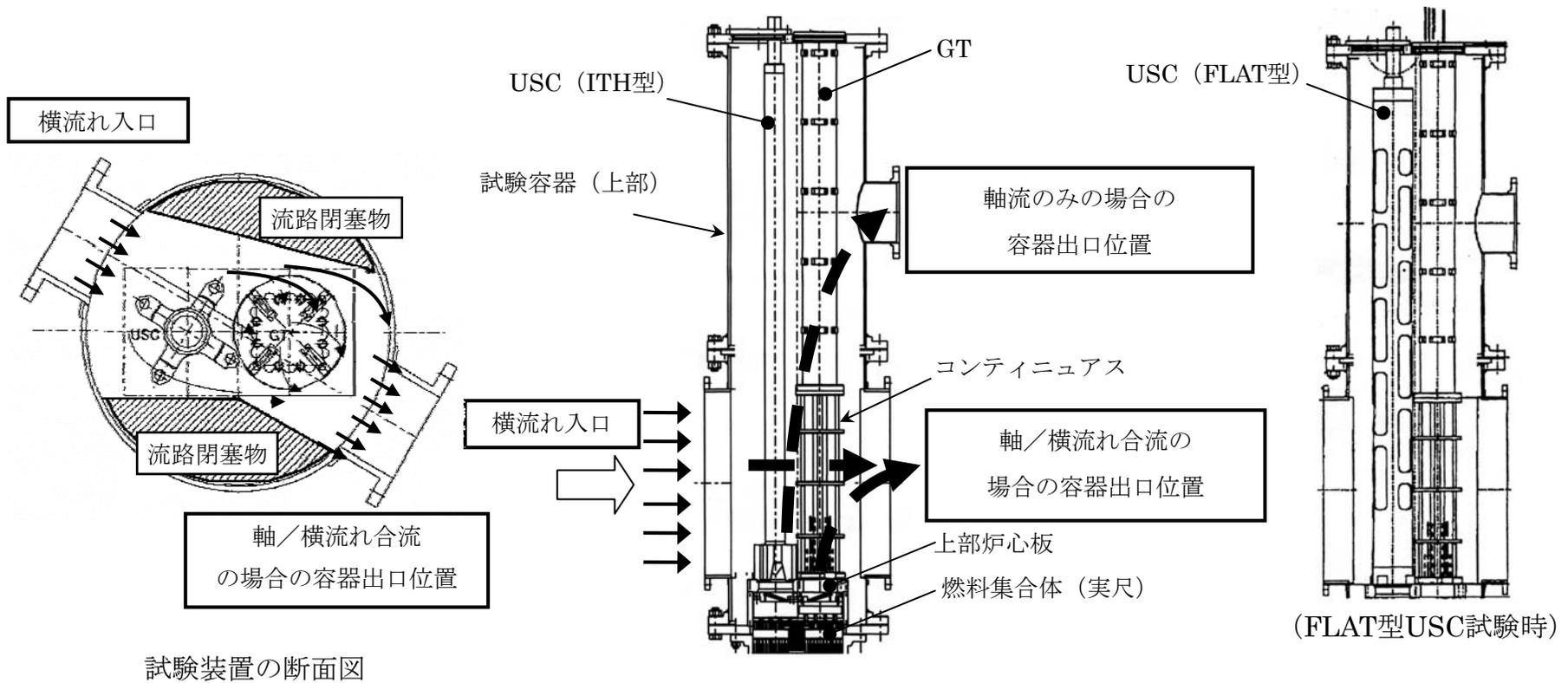


図 B-7 2 体流動試験 試験装置図

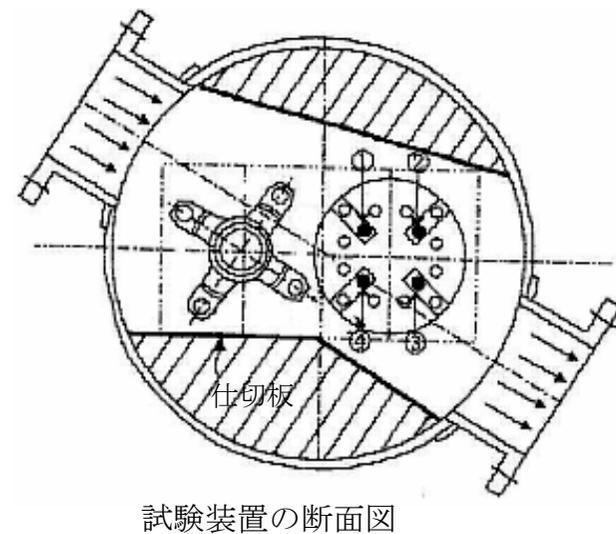
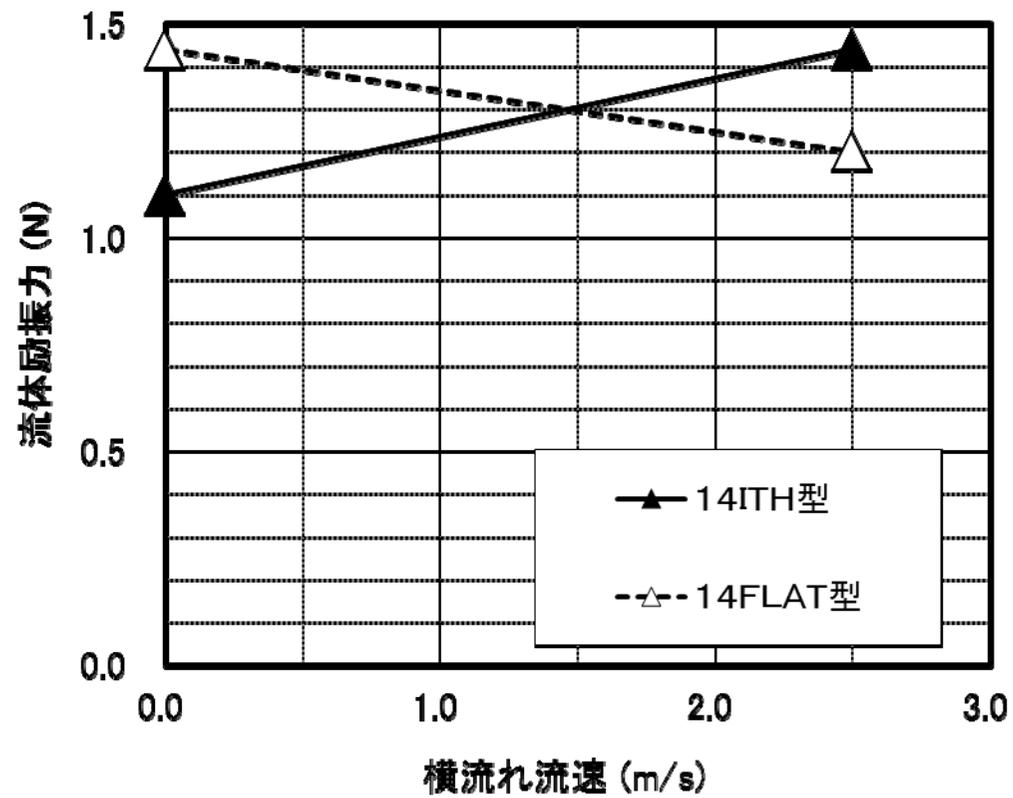
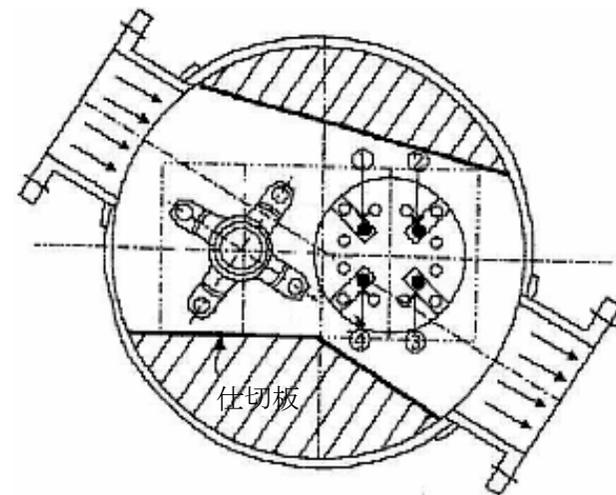
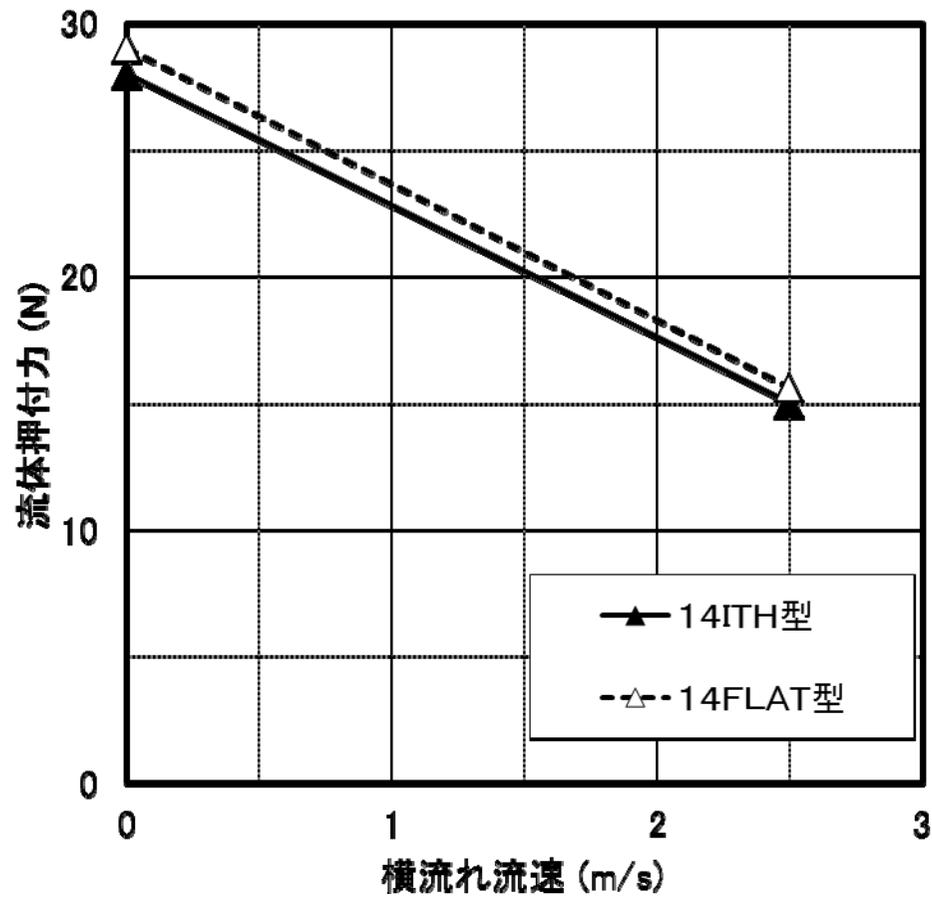


図 B-8 流体励振力計測結果 (ロッド No.①)



試験装置の断面図

図 B-9 流体押付力計測結果 (ロッド No.①)

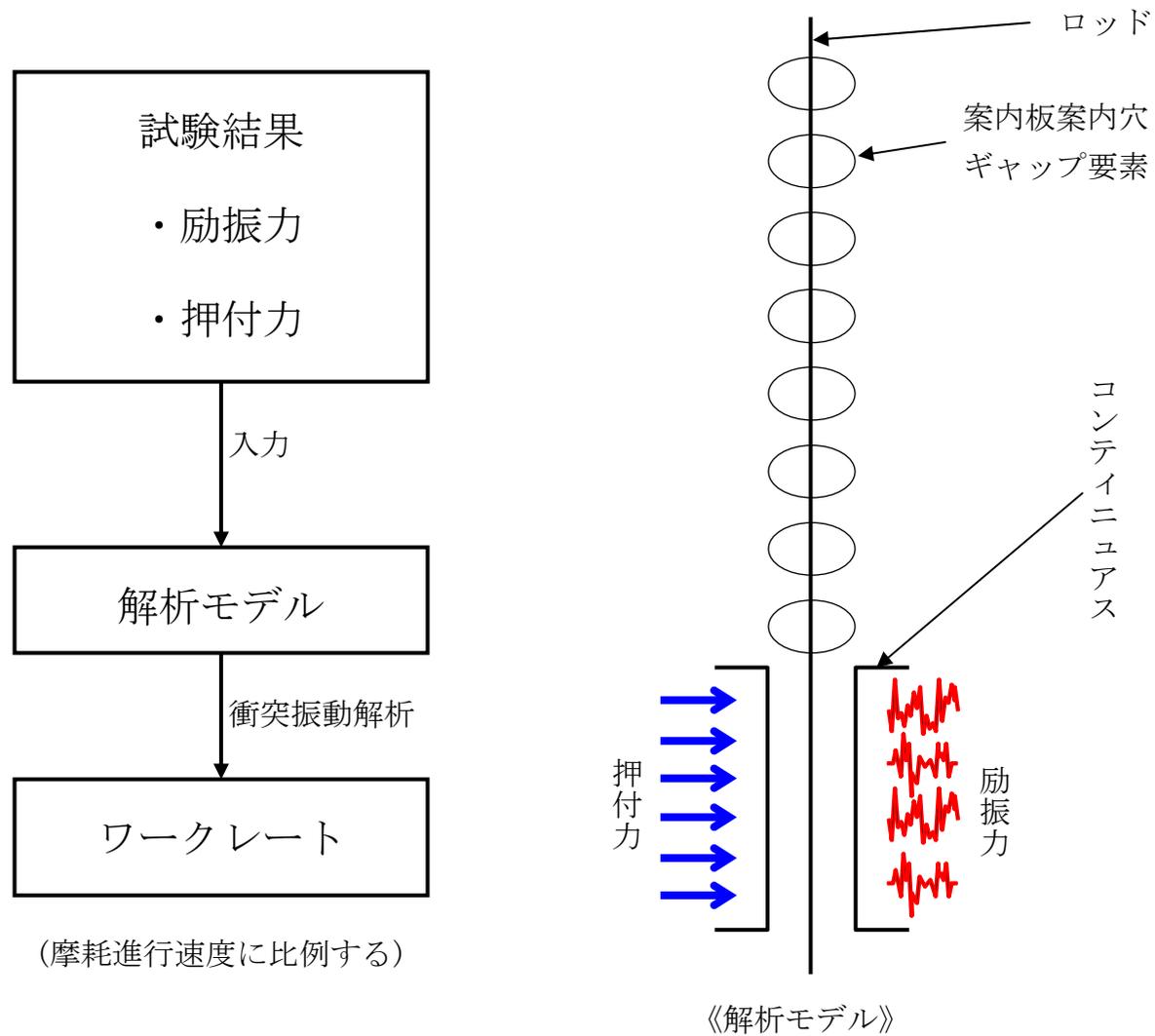
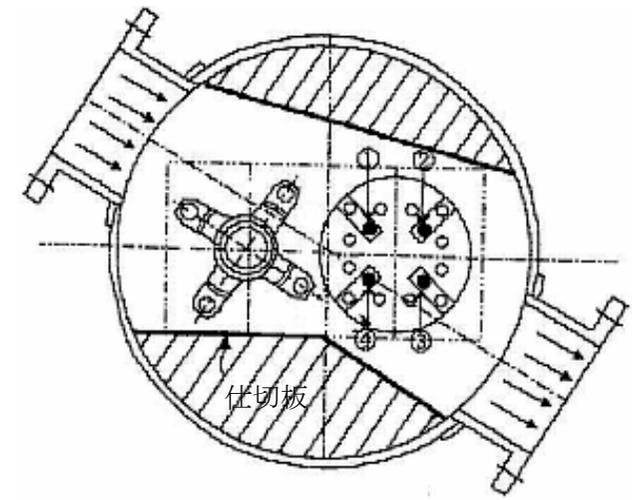
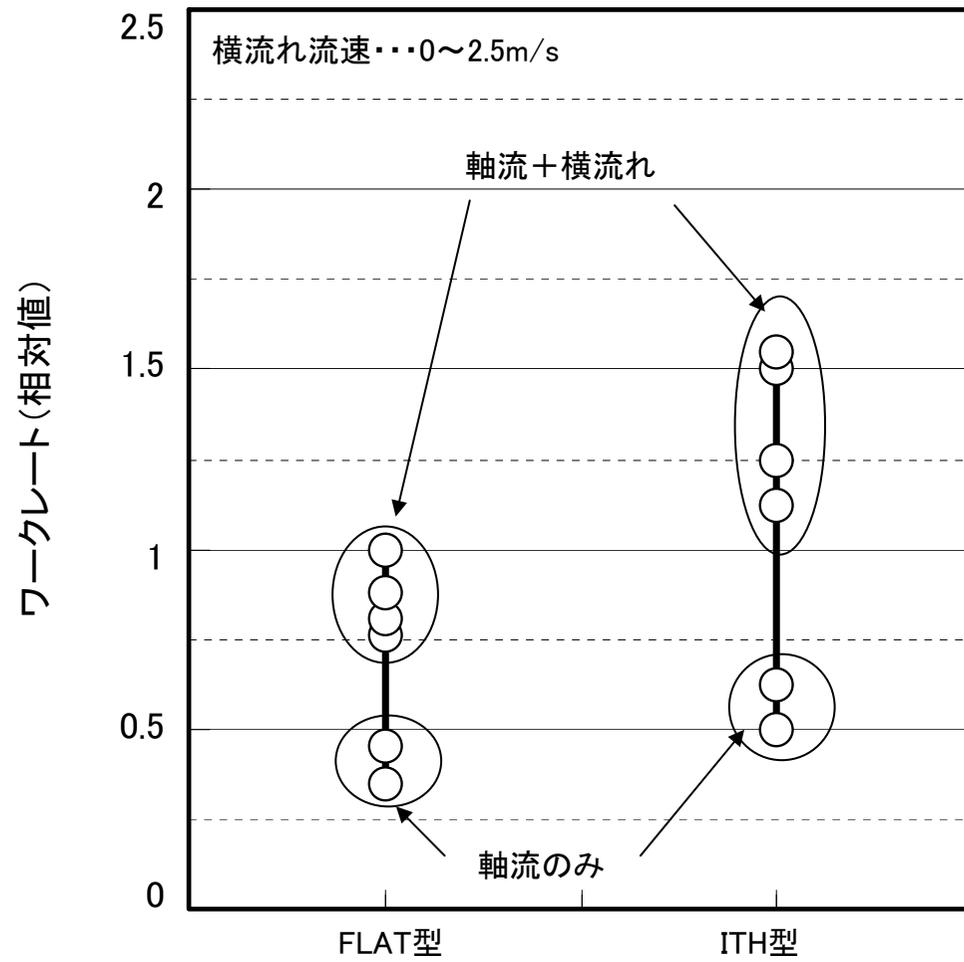


図 B-10 ワークレート解析の方法



試験装置の断面図

図 B-11 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。

摩耗を管理するに当たっては、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。

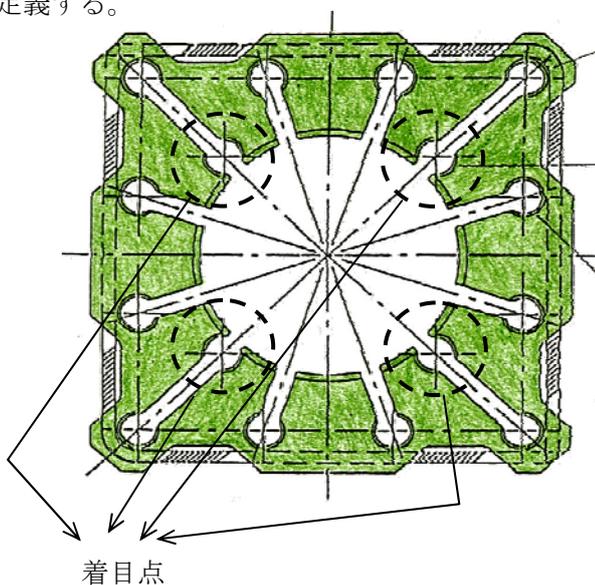


図 C-1 GT案内板の摩耗着目点

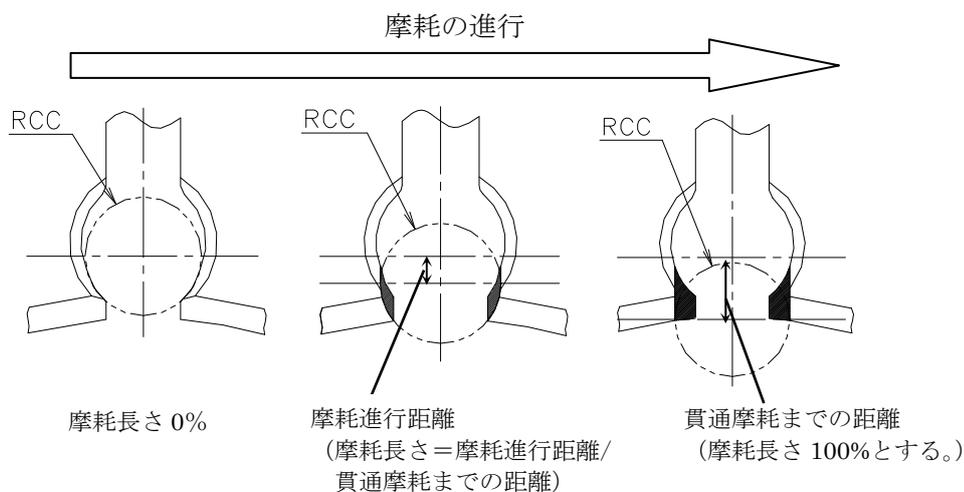


図 C-2 GT案内板の摩耗進行

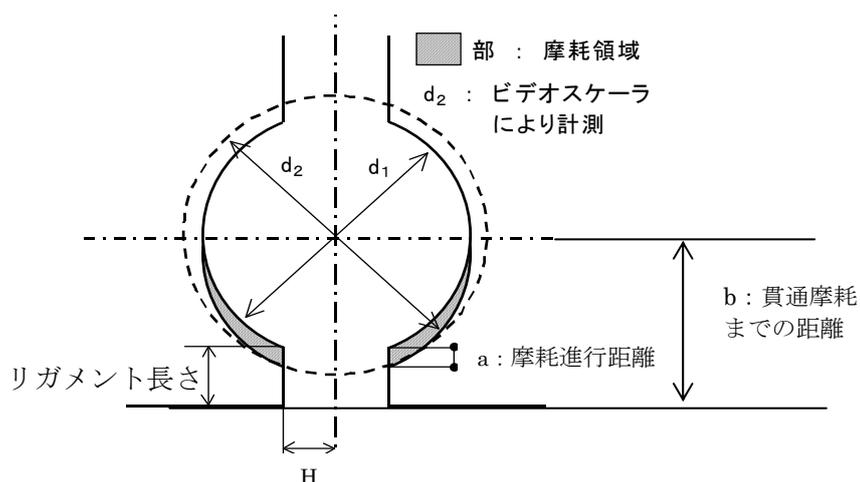
付録 C-1 摩耗長さの検査手法例

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検査等により間接的に計測もしくは算出してもよい。そこで、目視検査のうち、従来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、スケーラー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 : 制御棒が GT 案内穴より抜け出る距離（貫通状態）

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。

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

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]

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の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、摩耗長さで相対時間の関係を導くことができる。

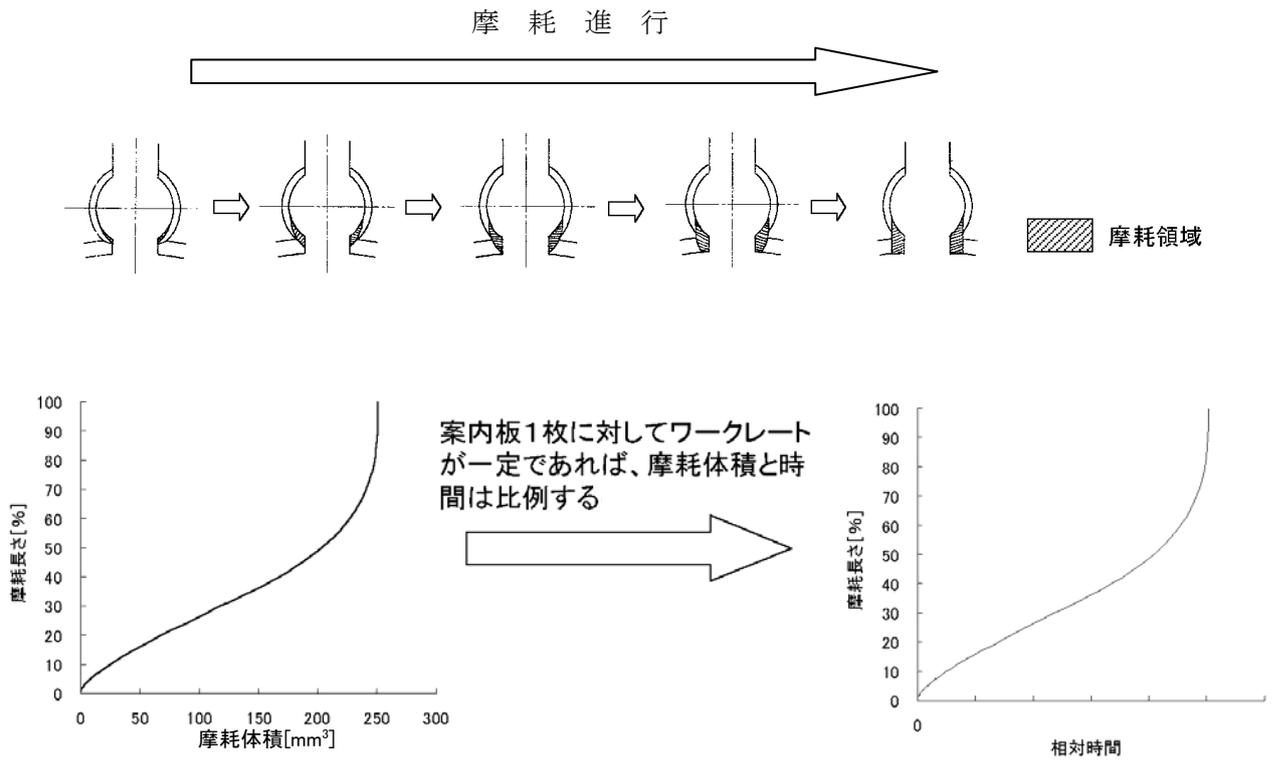


図 D-1 摩 耗 体 積 と 摩 耗 長 さ の 関 係

付録 D-1 摩耗進行時の摩耗分散

制御棒クラスタ案内管の案内板の摩耗は、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 枚あ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 枚の単位時間あたりの摩耗体積（ワークレート）は減少する、即ち摩耗の進行速度は遅くなると考えられる。

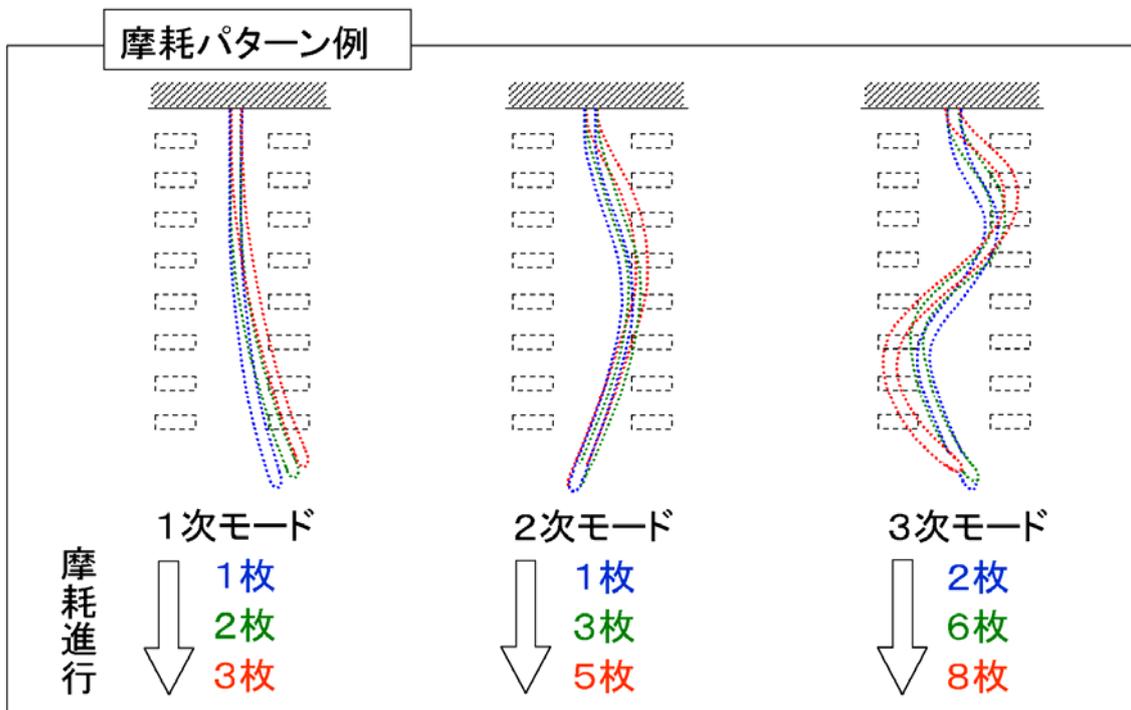
一方、現在の知見では実機で制御棒がどのようなモードで振動し、どのような接触枚数で摩耗が進行していくのか不明であるため、複数案内板への接触による摩耗の分散を考慮しつつも摩耗進行予測が安全側になるよう、すなわち、1 枚の案内板の摩耗進行速度が最も大きくなる振動モードを想定する。

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 案内板の最大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、全ての案内板でのワークレート（単位時間あたりの摩耗体積）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もとに、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

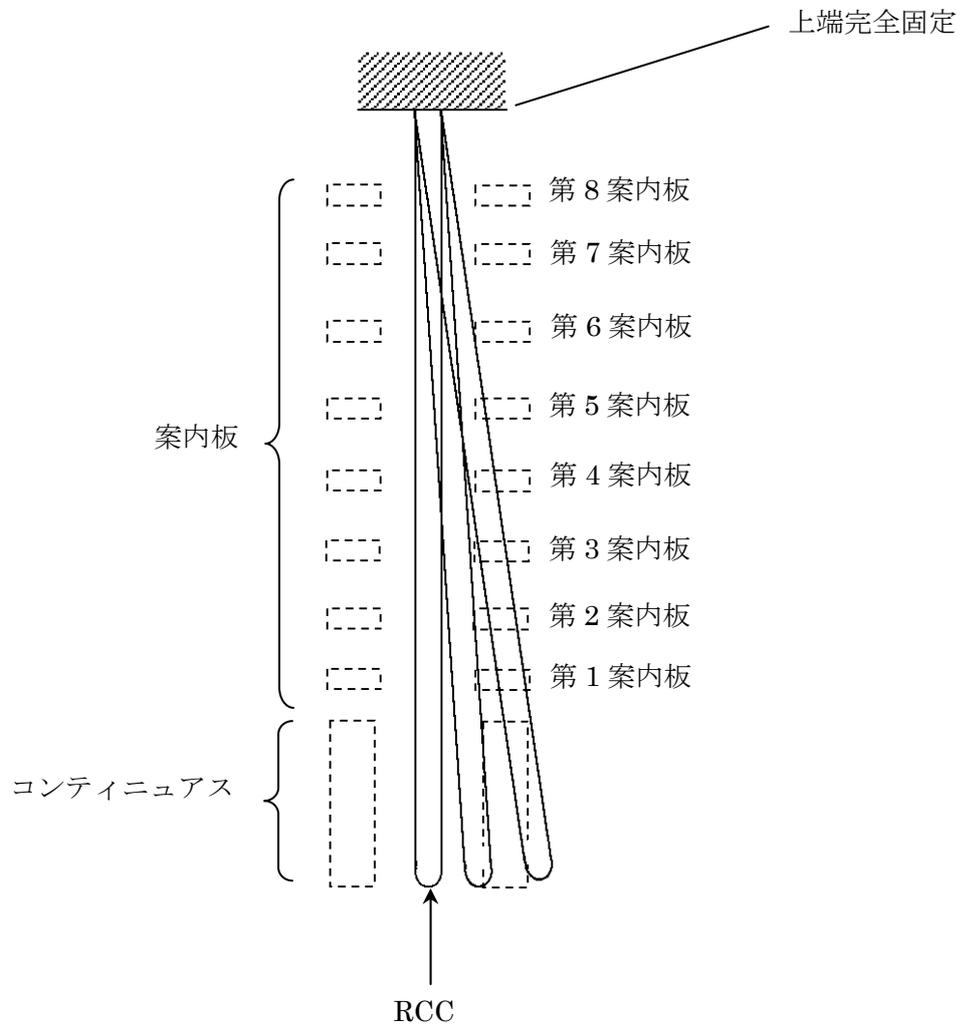


図 D-3 RCC 変形モデル

RCC変形解析結果(%)

#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
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6

最大摩耗長さを100%としたときの変形量を表した。

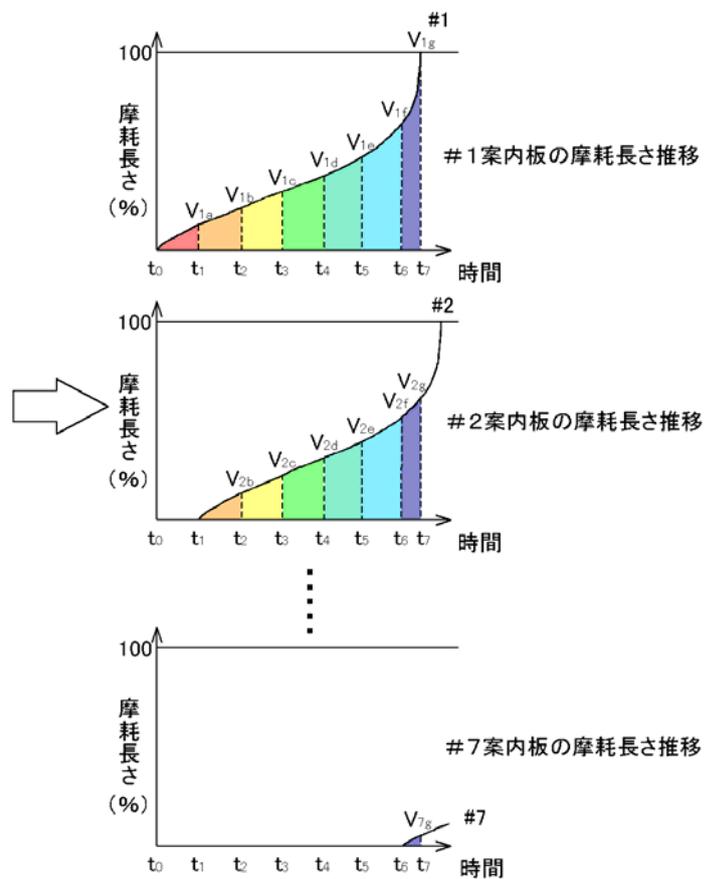


図 D-4 RCC 変形解析結果

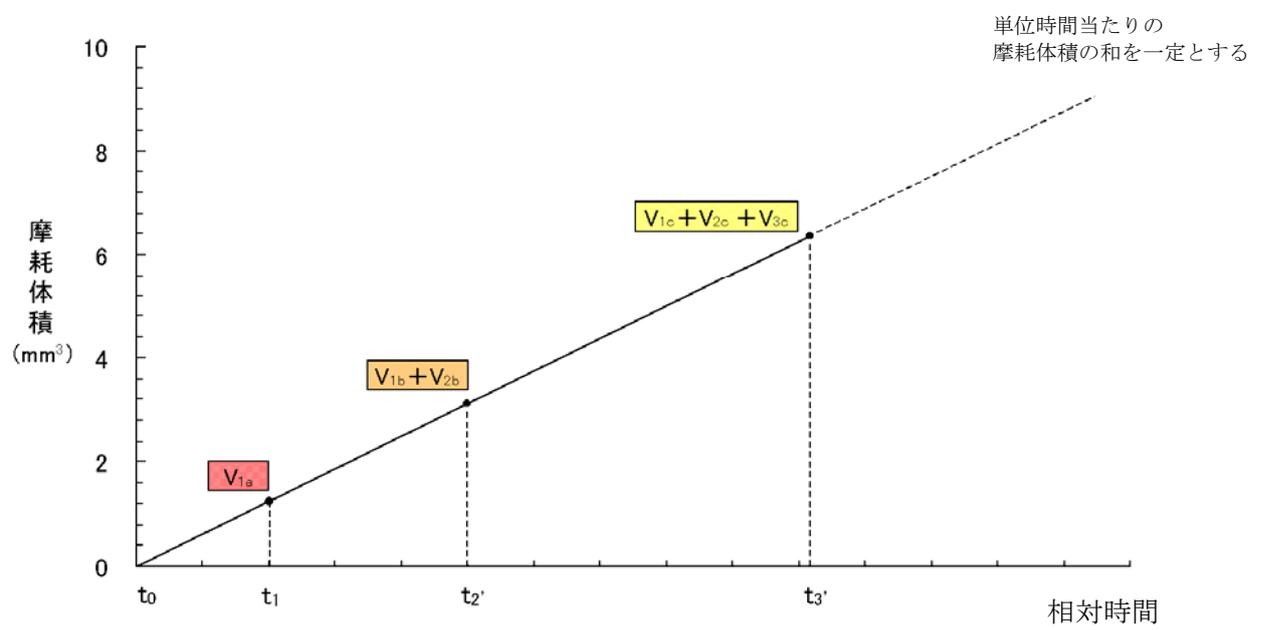


図 D-5 各案内板への接触開始時間（相対値）の算出

付録 D-2 プラントグループ毎の摩耗予測

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の案内板摩耗進行曲線を図 D-6 に示す。実機の点検データ（運転時間、摩耗長さ）に本摩耗進行予測曲線をフィッティングさせることにより、時間軸を絶対値とした予測を行う。

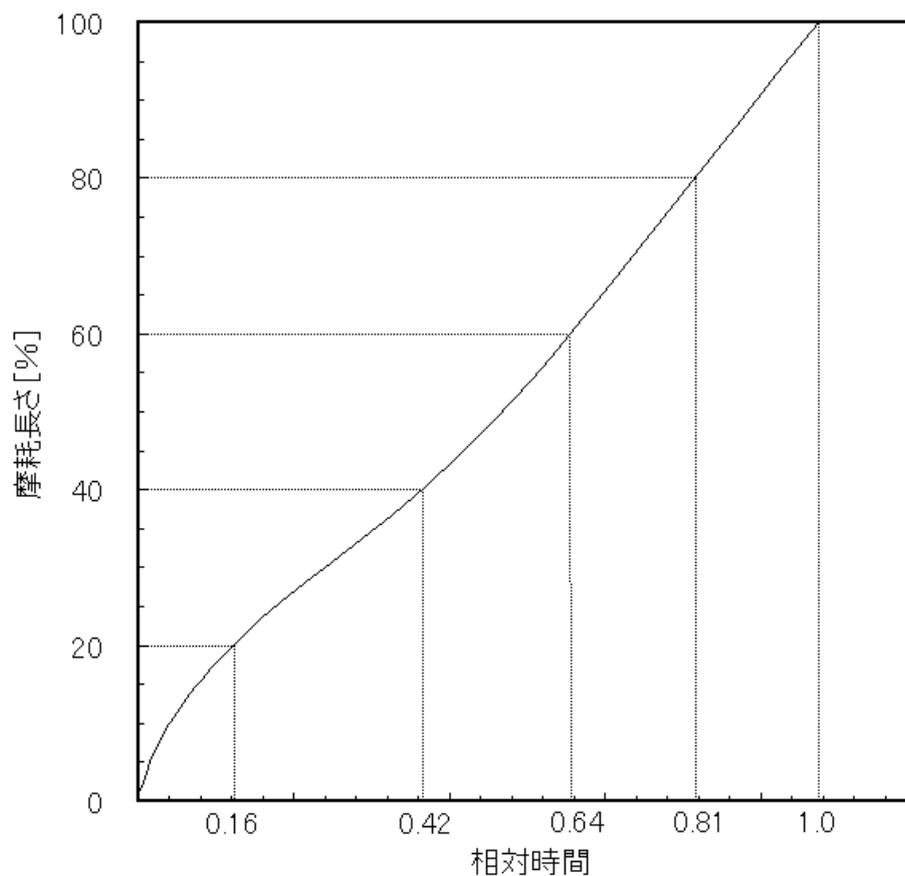


図 D-6 14×14 制御棒クラスタ案内管案内板摩耗進行予測曲線

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の案内板摩耗進行曲線を図 D-7 に示す。実機の点検データ（運転時間、摩耗長さ）に本摩耗進行予測曲線をフィッティングさせることにより、時間軸を絶対値とした予測を行う。

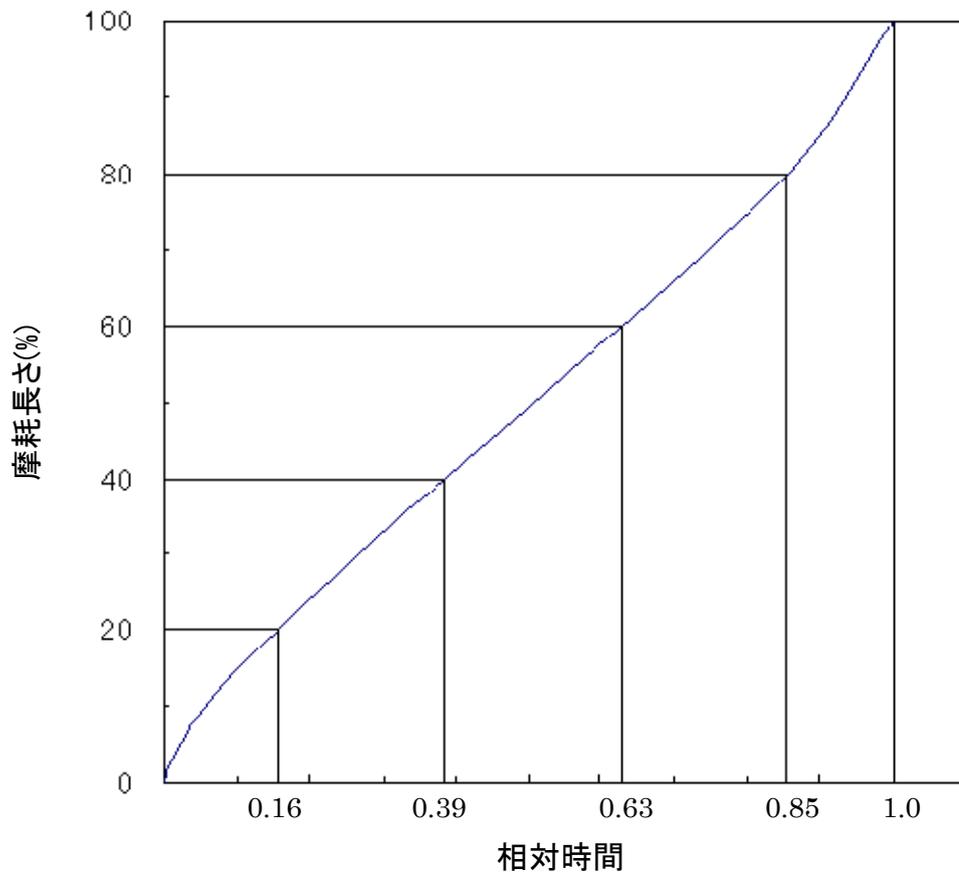


図 D-7 14×14CIR 制御棒クラスタ案内管案内板摩耗進行予測曲線

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の案内板摩耗進行曲線を図 D-8 に示す。実機の点検データ（運転時間、摩耗長さ）に本摩耗進行予測曲線をフィッティングさせることにより、時間軸を絶対値とした予測を行う。

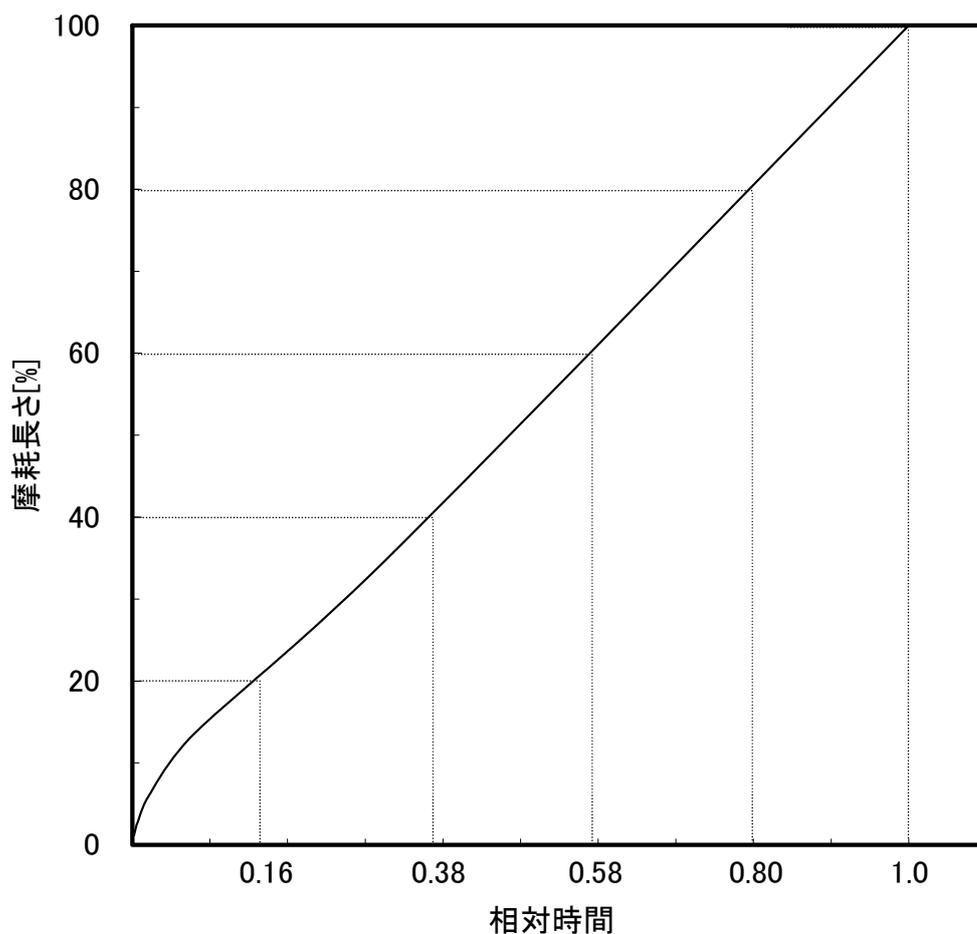


図 D-8 15×15 制御棒クラスタ案内管案内板摩耗進行予測曲線

4. 17×17 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、17×17 制御棒クラスタ案内管の案内板摩耗進行曲線を図 D-9 に示す。実機の点検データ（運転時間、摩耗長さ）に本摩耗進行予測曲線をフィッティングさせることにより、時間軸を絶対値とした予測を行う。

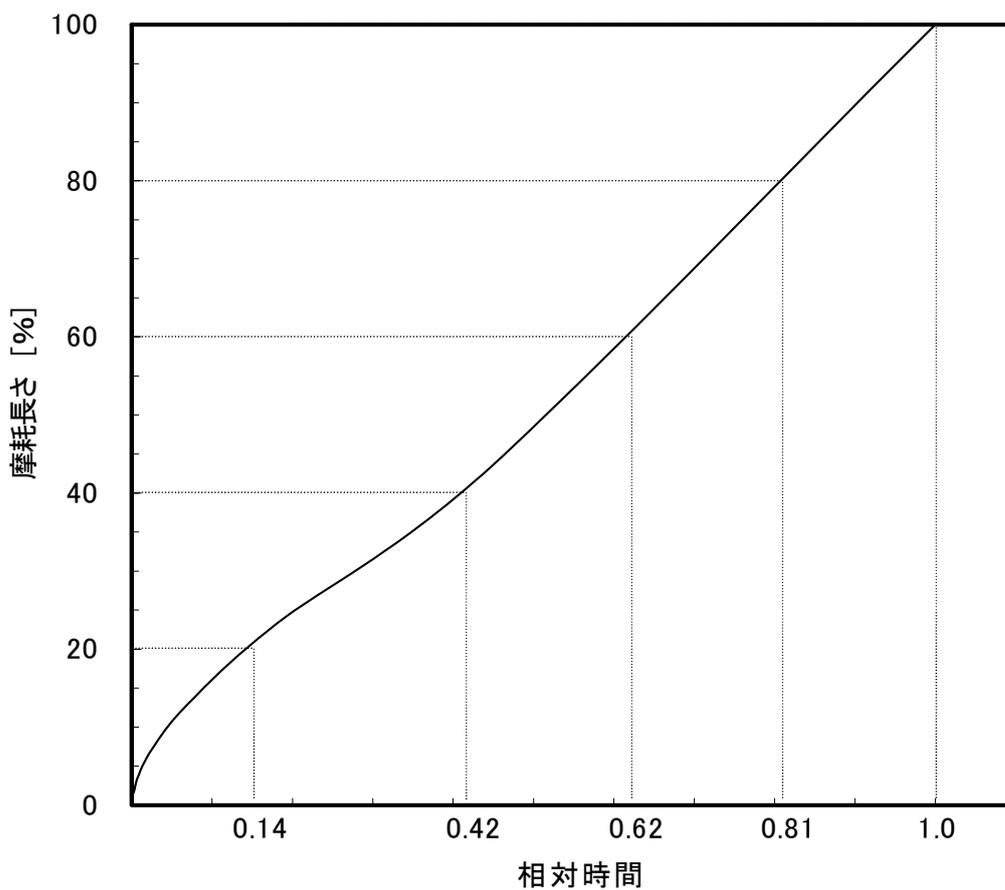


図 D-9 17×17 制御棒クラスタ案内管案内板摩耗進行予測曲線

5. 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 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 改良標準型制御棒クラスタ案内管の案内板摩耗進行曲線を図 D-10 に示す。実機の点検データ（運転時間、摩耗長さ）に本摩耗進行予測曲線をフィッティングさせることにより、時間軸を絶対値とした予測を行う。

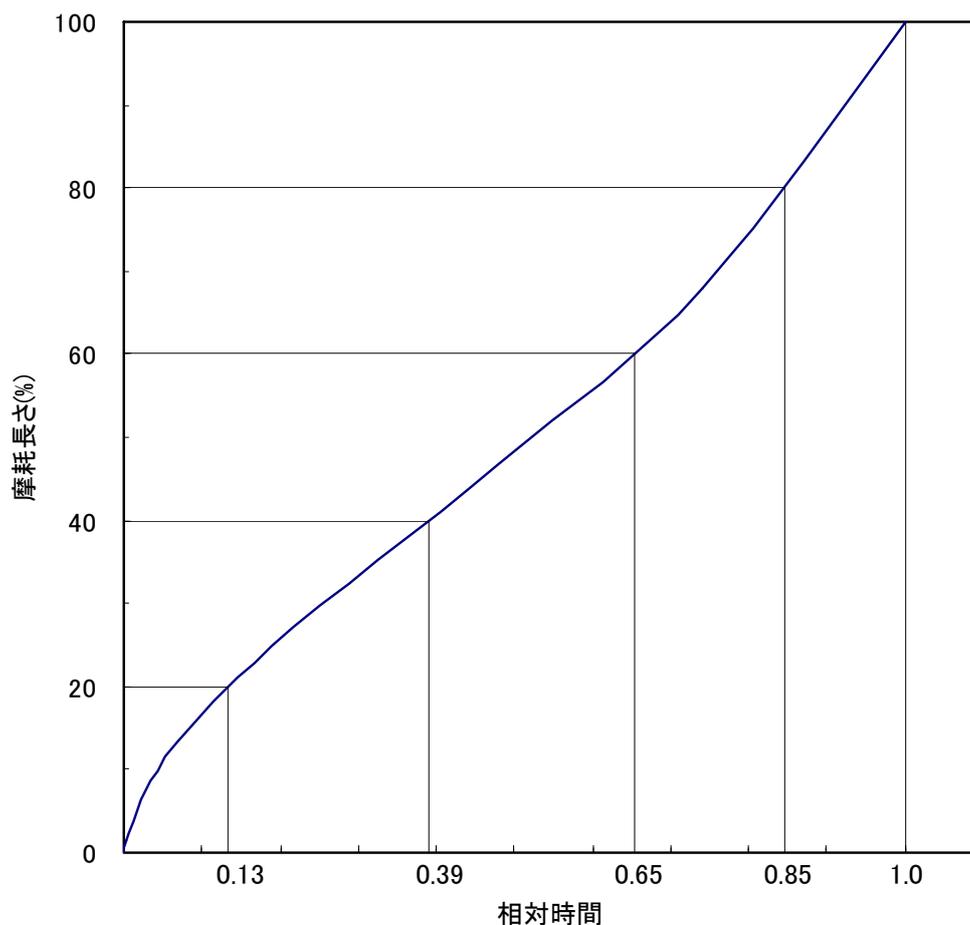


図 D-10 17×17 改良標準型制御棒クラスタ案内管案内板摩耗進行予測曲線

付録 E 制御棒クラスタ案内管の機能と摩耗管理長さ

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 制御棒案内機能

- ・ 制御棒を案内し、規定時間内で制御棒を挿入させること。

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の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。制御棒の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。

地震時でも制御棒の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（GT）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 プラントグループ 2 における制御棒クラスタ案内管（GT）の機能検討結果

GT の機能	案内板摩耗時の影響	評価方法	検討結果
制御棒の案内機能維持	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%
	制御棒挿入時間への影響	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。
制御棒の破損防止	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 枚の案内板が最大摩耗深さ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 46N/mm ² であり、内外圧差による応力 195.9N/mm ² を加えても、Su 値 391N/mm ² （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 プラントグループ毎の摩耗長さ (RCC 被覆管最大摩耗时, 健全時)

プラント グループ	制御棒クラスタ案内管 形式	摩耗長さ	
		RCC 被覆管最大摩耗时	RCC 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	17×17 3 ループ	68%	92%
	17×17 4 ループ	68%	93%
6	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 (RCC) 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、プラント運転年数が最も長いプラントグループ 2 (14×14FLAT 型) について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つりあいを図 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、力のつりあいより

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

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

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

①、②式より、 θ を消去して、抗力 N と開口幅 L の関係は

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

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 の全体耐震モデル中制御棒クラスタ案内管 (GT) 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。
- (ii) プラントグループ 2 の Ss 地震動を原子炉容器サポート位置に入力。
- (iii) GT と RCC の相対加速度が得られるので、Y の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つりあいを考える。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 すると、

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

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

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つりあい点を持ち (例 1)、RCC 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、

つりあい点がなくなり、RCC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。

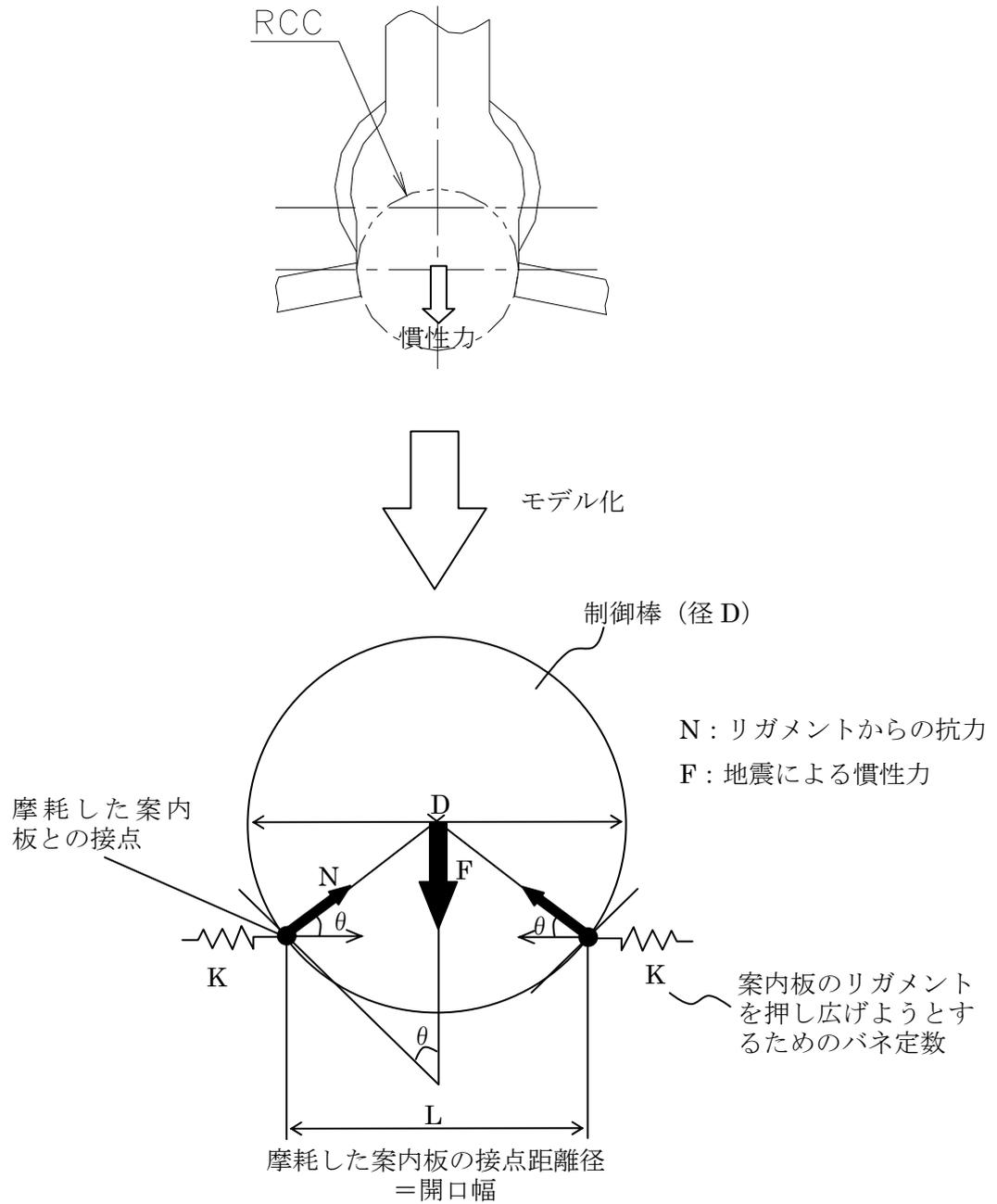


図 E-1 リガメントのたわみを考慮した制御棒抜け出し評価のモデル

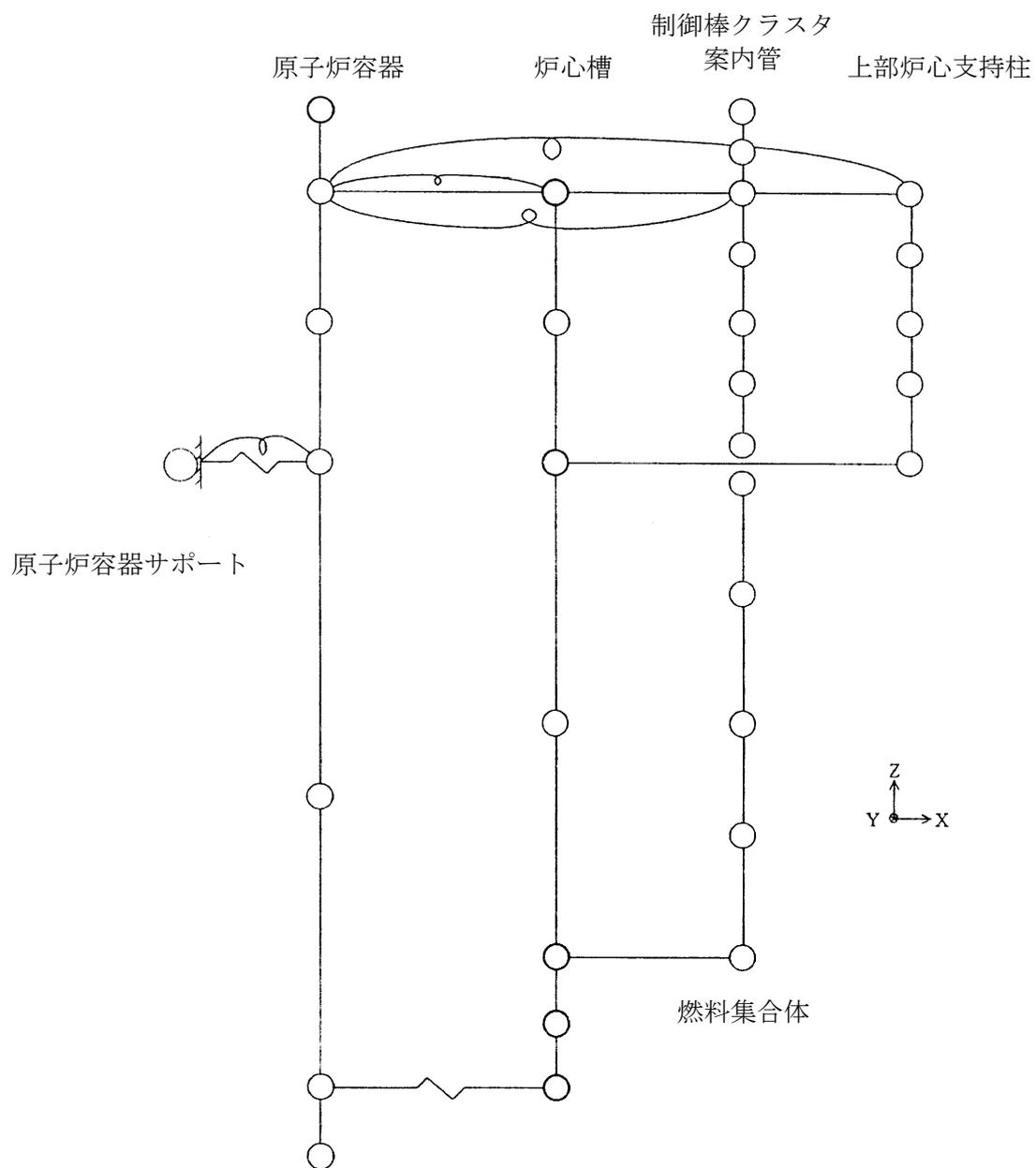


図 E-2 全体耐震モデル

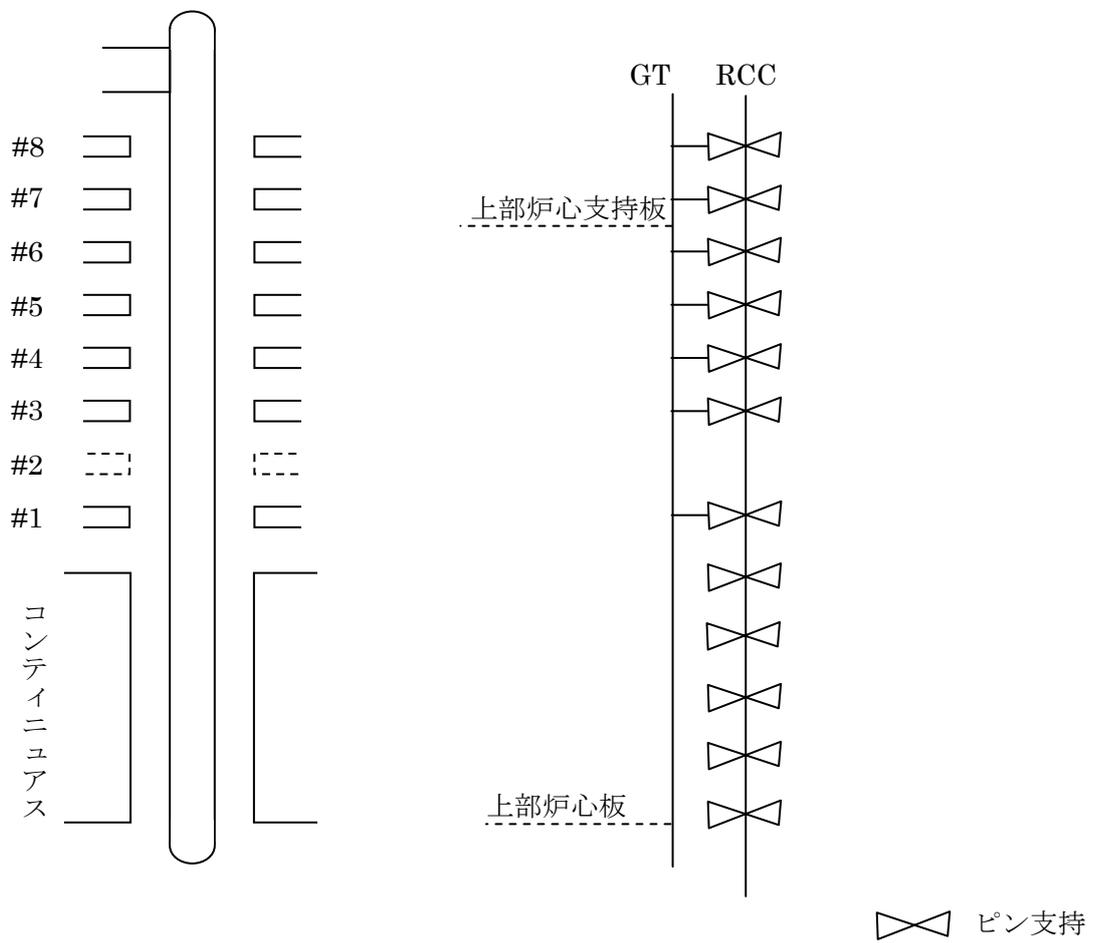


図 E-3 GT/RCC の耐震モデル詳細

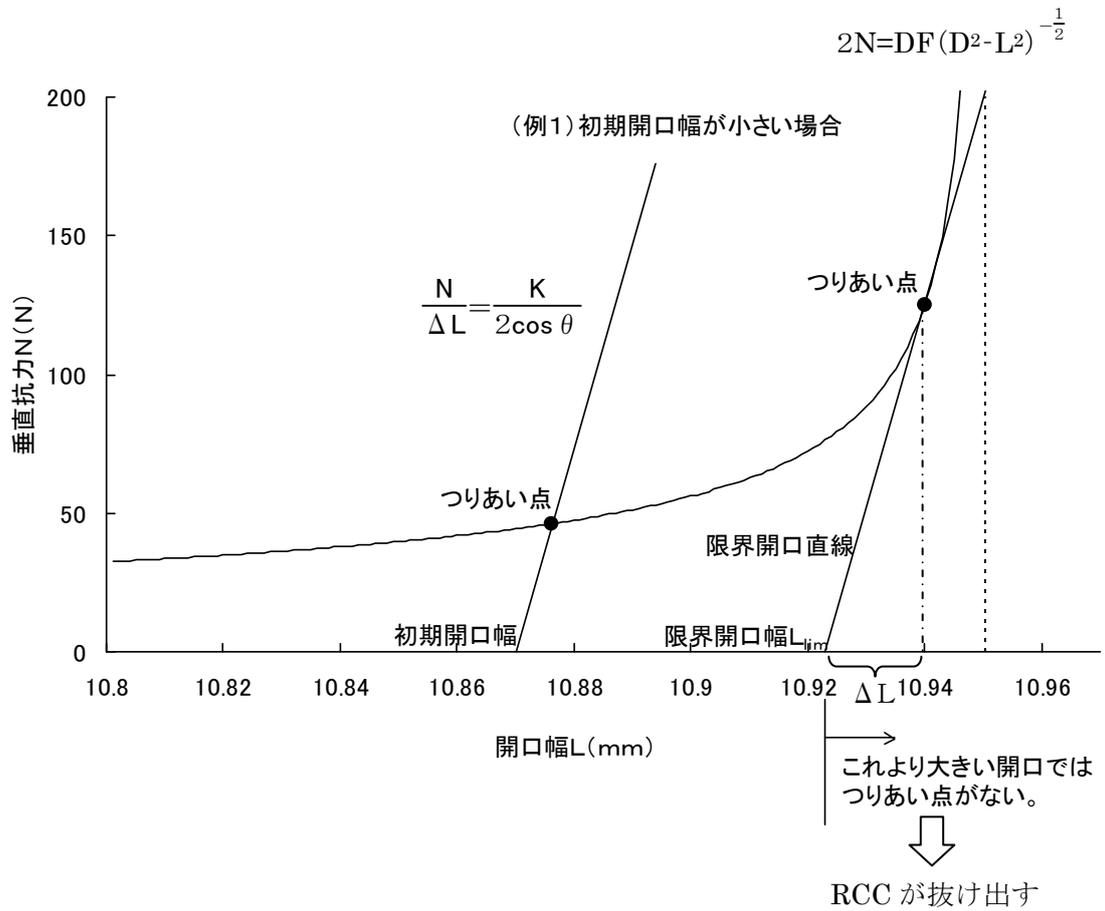


図 E-4 抜け出し限界の算出

付録 E-2 地震時の制御棒破損防止の評価

地震発生時に制御棒（RCC）の被覆管が破損しないことを評価する。

用いた耐震モデルは図 E-5、図 E-6 のとおりであり、以下の手法で応力を求める。

- (i) 図 E-5 の全体耐震モデル中制御棒クラスター案内管（GT）の部分に、図 E-6 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 Ss 地震動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、

$$\sigma=46 \text{ N/mm}^2$$

となり、内外差圧による応力 195.9N/mm^2 を加えても、被覆管の Su 値 391N/mm^2 （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 Su 値を使用する。

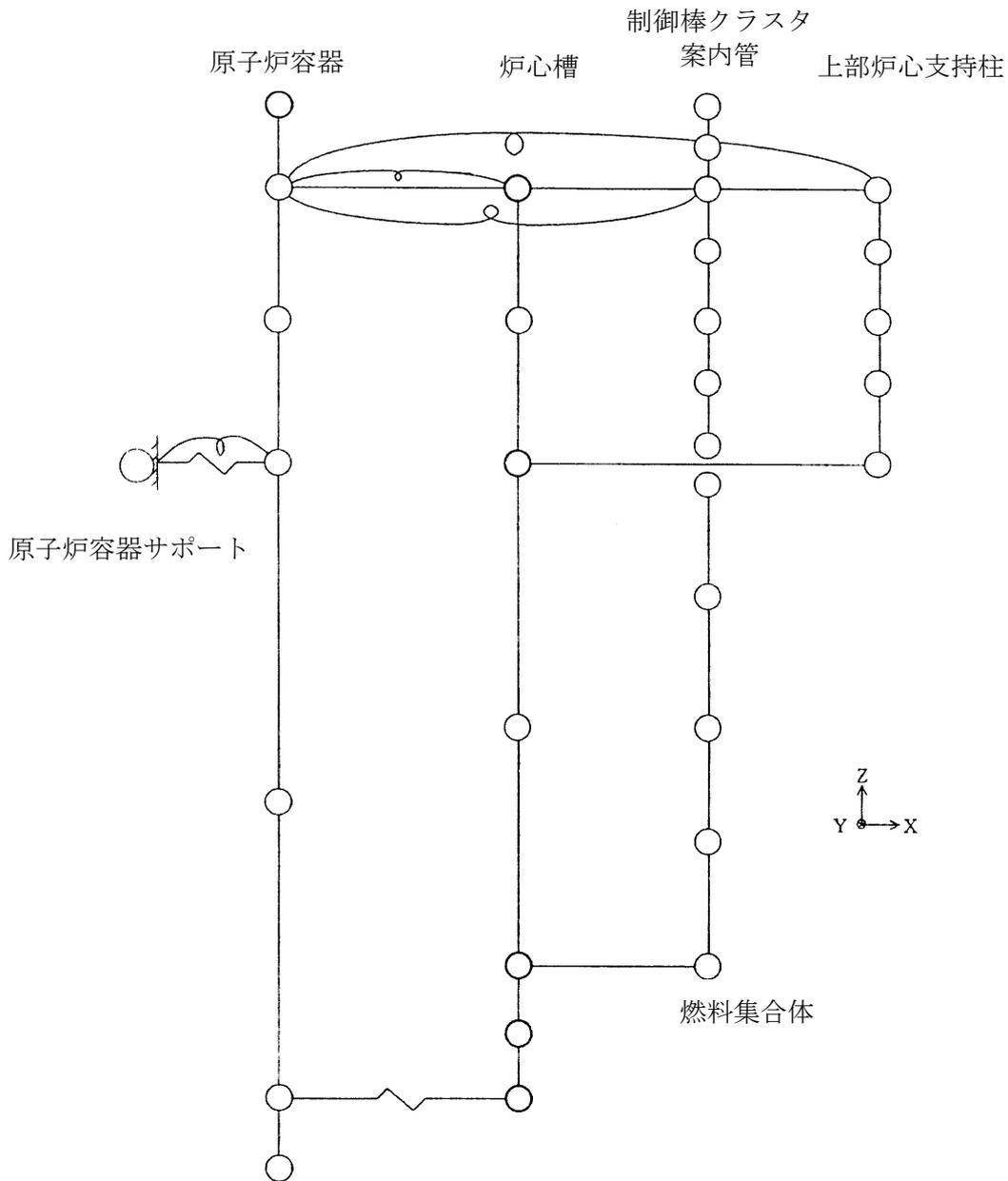


図 E-5 全体耐震モデル

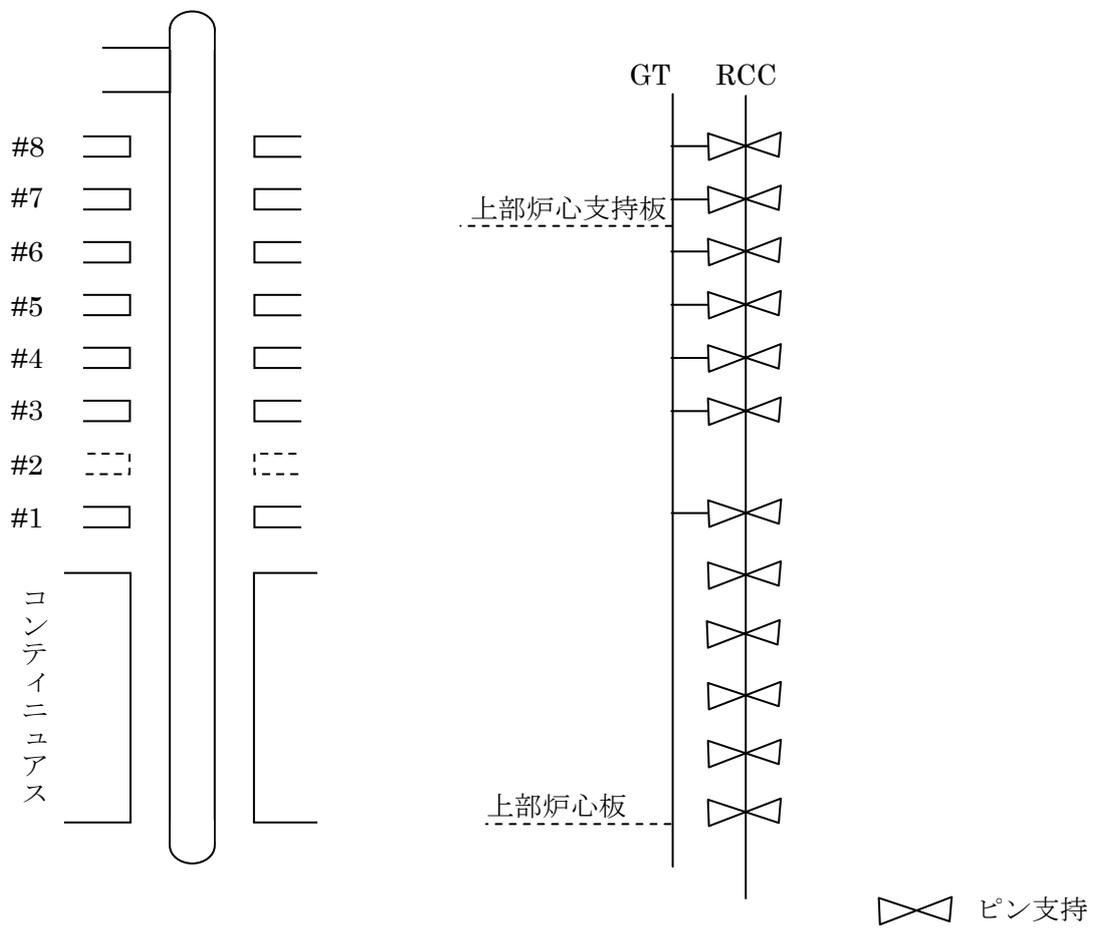


図 E-6 GT/RCC の耐震モデル詳細

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）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基準のうち、最も厳しいのは Ss 地震時の制御棒抜け出し評価である。この時、制御棒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つり合いが成立する摩耗長さは変わってくる。

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り替えることとしており、被覆管が全部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つ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-7 のようになる。

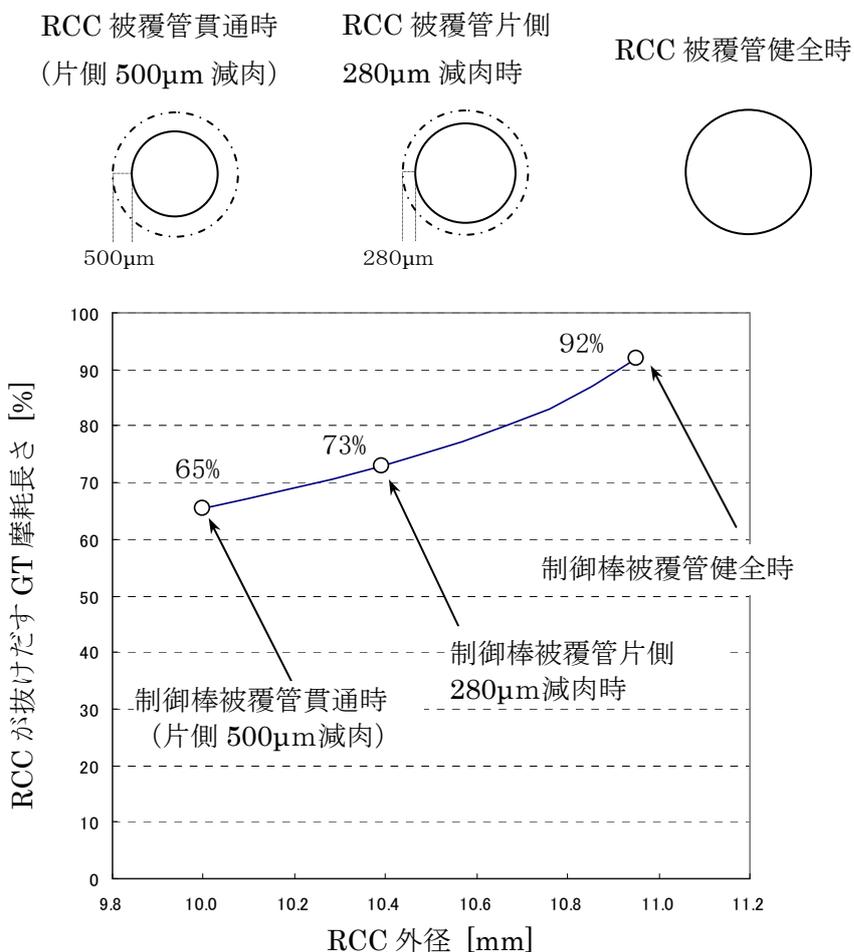


図 E-7 制御棒外径と制御棒が抜け出す摩耗長さの関係
(グループ 2 の場合)

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 (RCC) 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 (65~77%) 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。

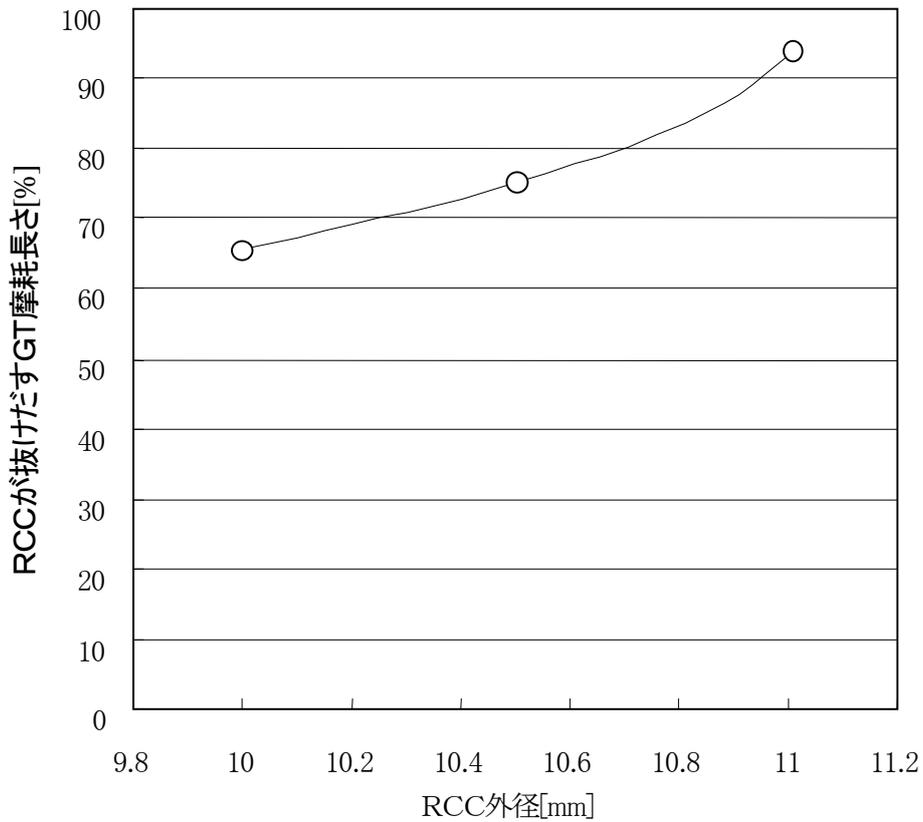
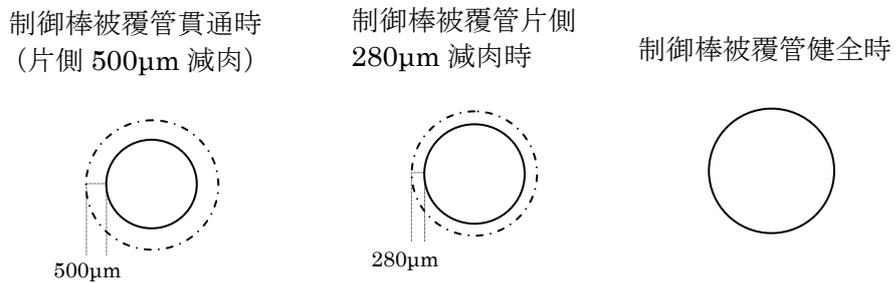


図 F-1 摩耗管理のクライテリアへの制御棒の摩耗量の考慮 (グループ 2 の場合)

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は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、 S_s 地震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。

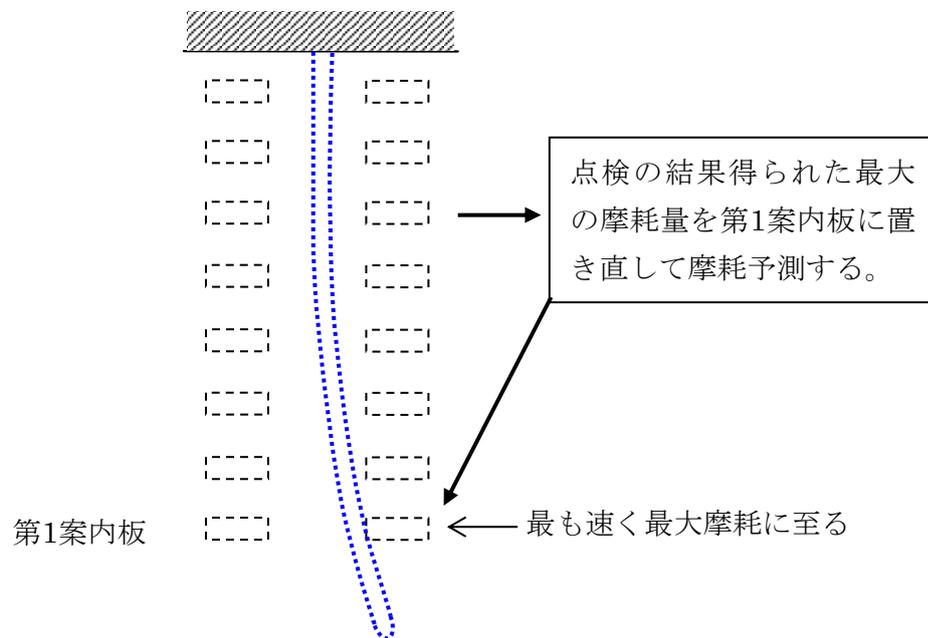


図 F-2 点検時期の設定の基本的な考え方

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 の時期を目処に次回点検時期を設定する（図 G-1）。

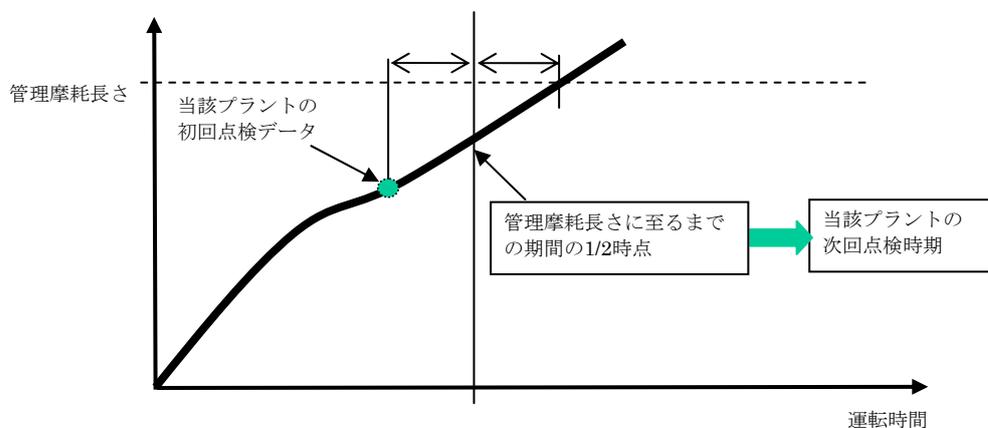


図 G-1 次回点検時期

- 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 の時期を目処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、管理基準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処に設定する（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。

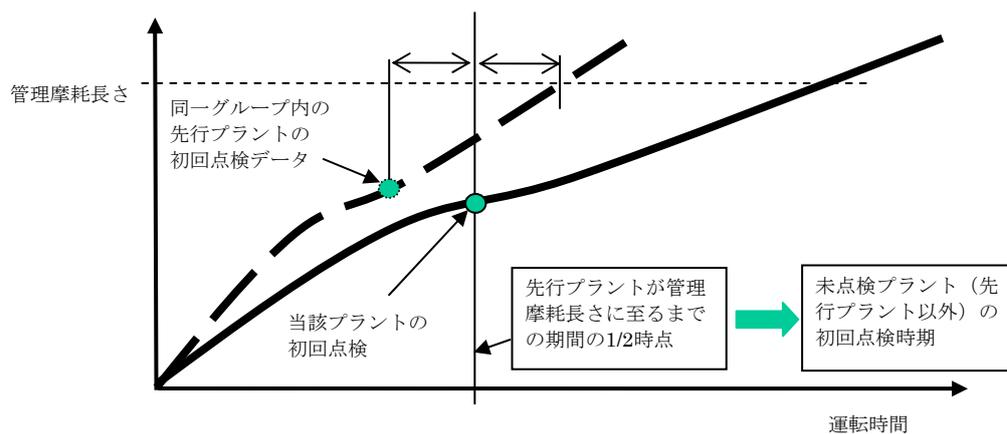


図 G-2 初回点検時期

3. 新規プラントグループの点検時期

新規プラントグループ(グループ 3、6)については、制御棒クラスタ案内管や RCC 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(200mm)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。具体的には以下の通り。

- 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ことができるため、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。

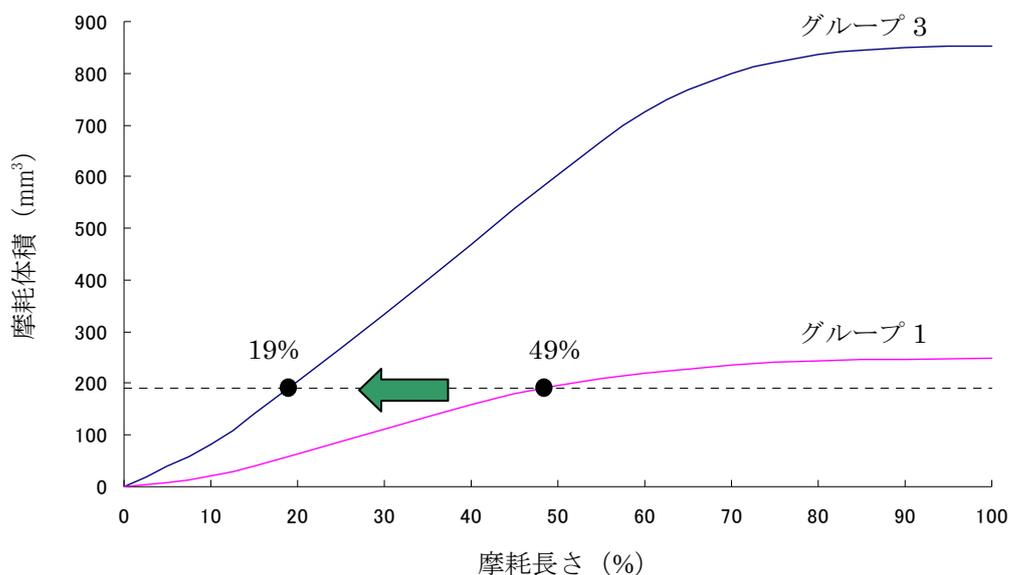


図 G-3 新規プラントグループの摩耗長さ換算
(グループ 3 の例)

4. プラントグループ毎の点検周期

平成 14 年度以降、国内プラントの制御棒クラスタ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-4 に示す。

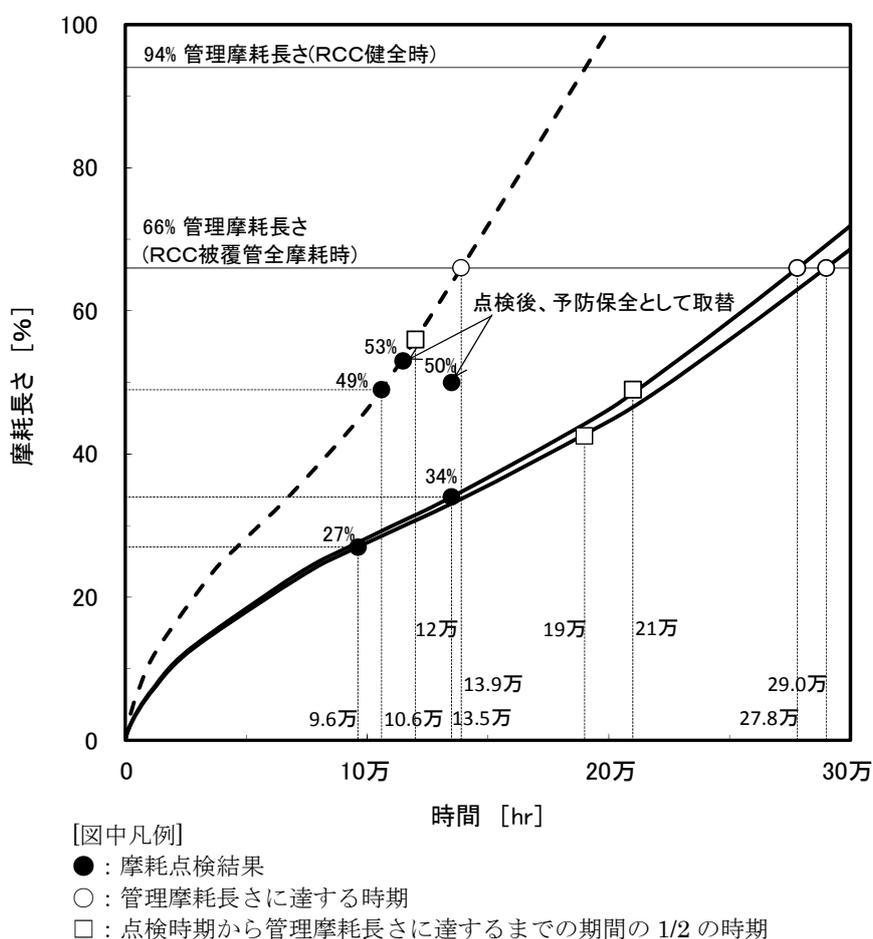
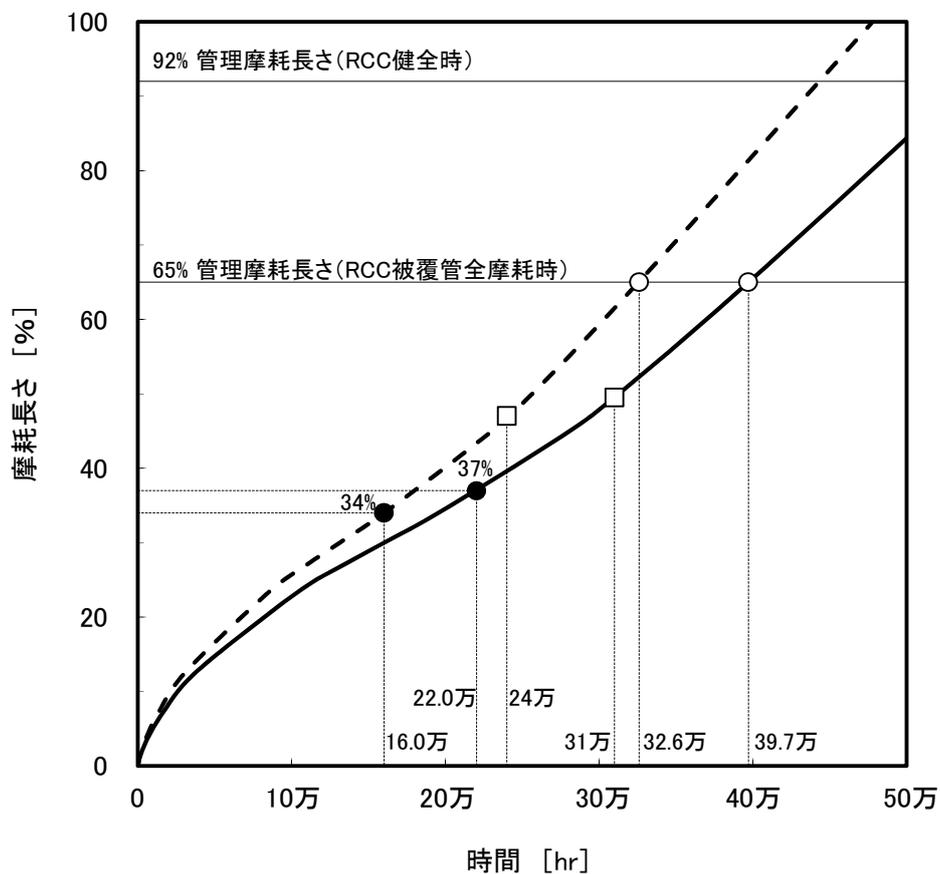


図 G-4 プラントグループ 1 の摩耗進行予測

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 万時間を目処に設定する。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 万時間を目処に設定する。

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-5 に示す。



[図中凡例]

●：摩耗点検結果

○：管理摩耗長さ到達時期

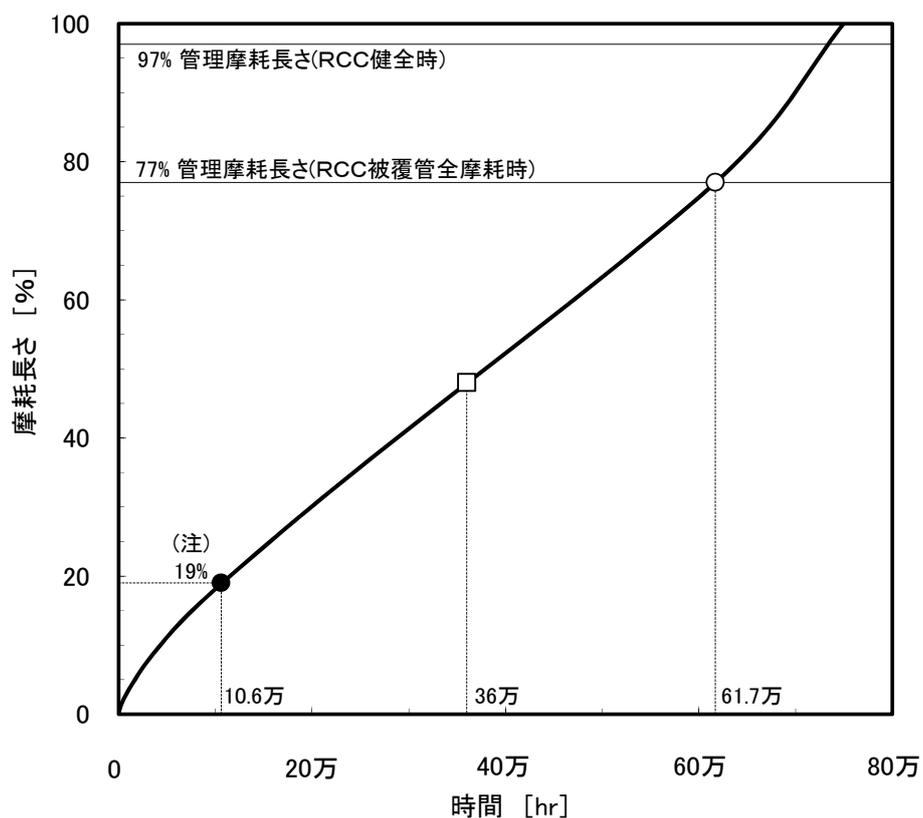
□：点検時期から管理摩耗長さ到達までの期間の 1/2 の時期

図 G-5 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 万時間を目処に設定する。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 万時間を目処に設定する。

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-6 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。



[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-6 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 万時間を目処に設定する。

(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

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-7 に示す。

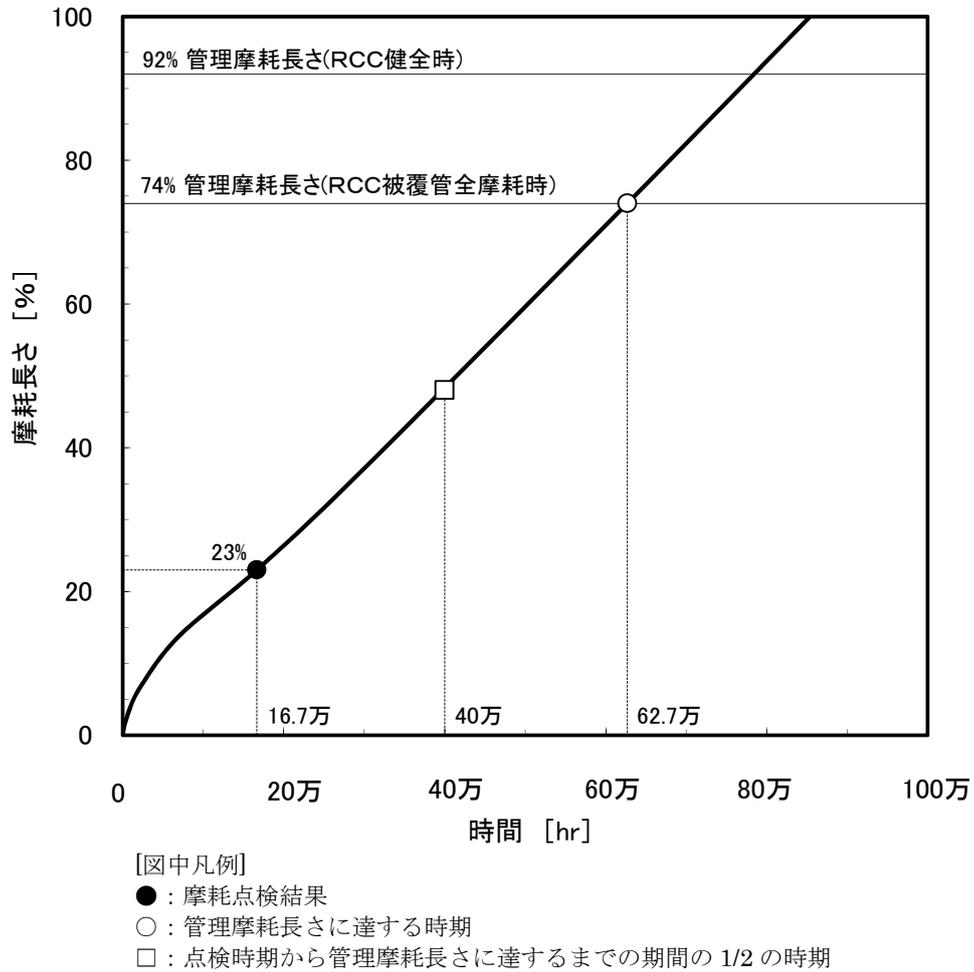
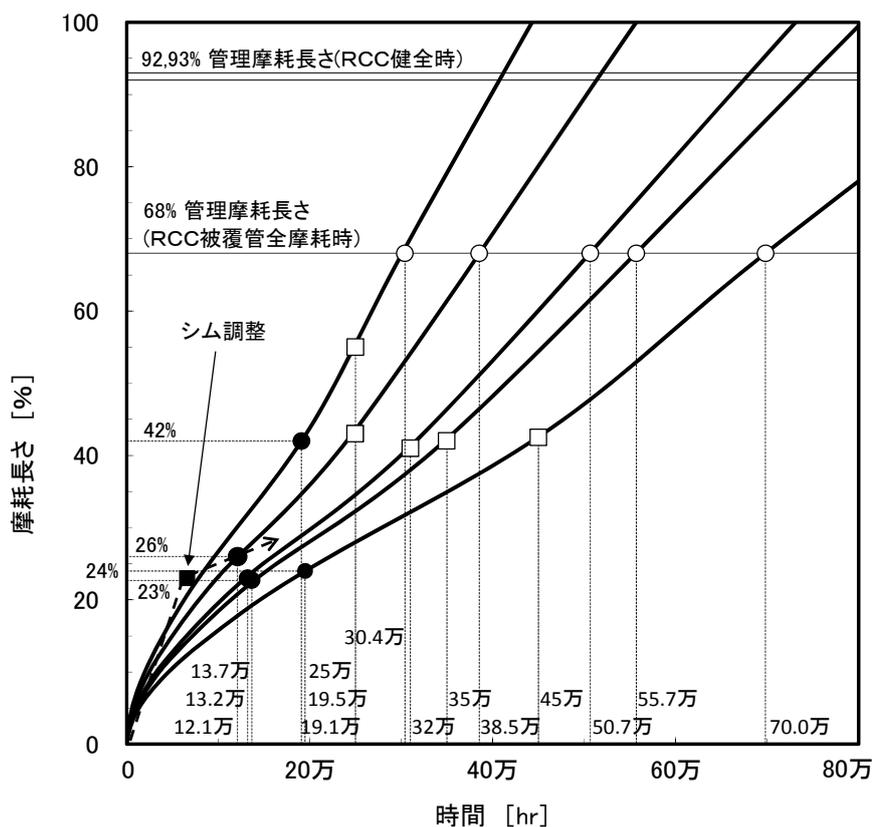


図 G-7 プラントグループ 4 の摩耗進行予測

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 万時間を目処に設定する。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 万時間を目処に設定する。

4.5 プラントグループ 5 (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 5 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。



[図中凡例]

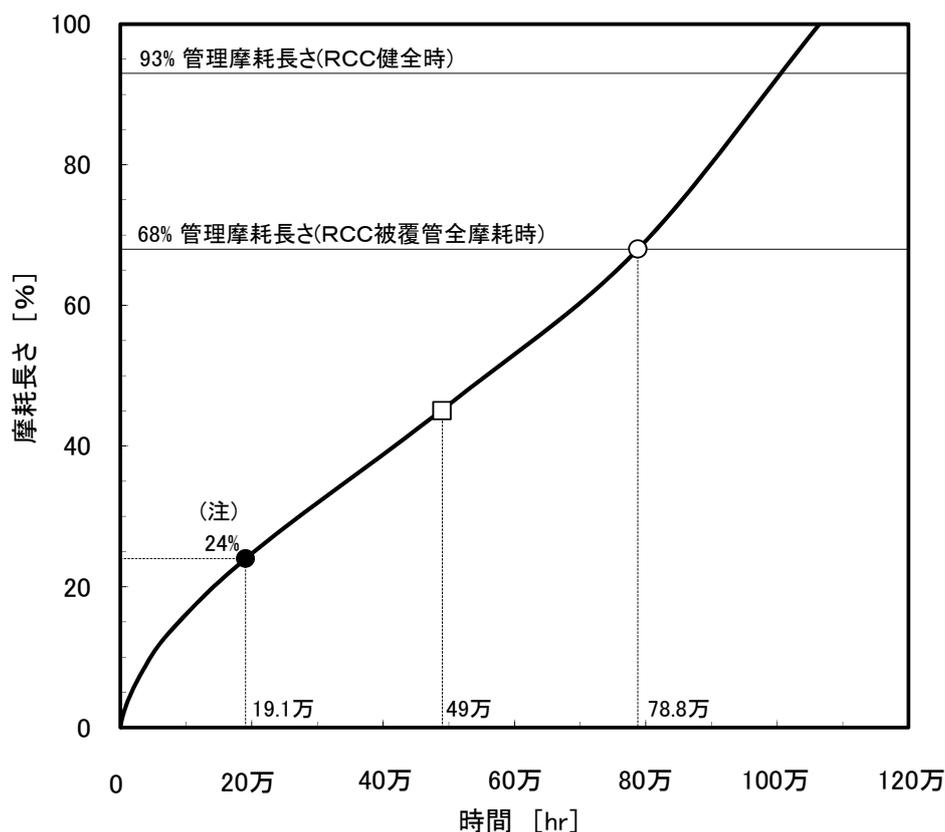
- : 摩耗点検結果
- : 管理摩耗長さ(68%)に達する時期
- : 点検時期から管理摩耗長さ(68%)に達するまでの期間の 1/2 の時期

図 G-8 プラントグループ 5 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、32 万時間、35 万時間、45 万時間を目処に設定する。また、プラントグループ 5 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 万時間を目処に設定する。

4.6 プラントグループ 6 (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 6 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と同じとなるように摩耗長さを換算したものである。



[図中凡例]

- : 摩耗点検結果
- : 管理摩耗長さ(68%)に達する時期
- : 点検時期から管理摩耗長さ(68%)に達するまでの期間の 1/2 の時期

図 G-9 プラントグループ 6 の摩耗進行予測

この結果に基づき、プラントグループ 6 に属するプラントの初回点検時期はプラント運転 49 万時間を目処に設定する。

(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

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)。

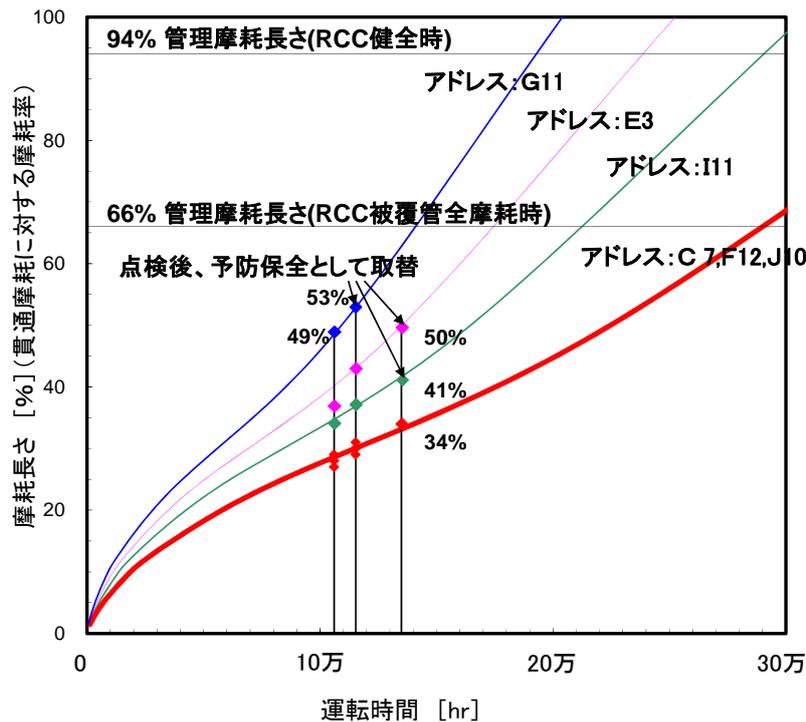


図 H-1 連続した同一プラントの点検結果と摩耗進行予測曲線

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、管理摩耗長さ到達までの時間の 1/2 の時期を目処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上において、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思われる。

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や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 RCC 被覆管最大摩耗时 66%、RCC 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 の通り作成した。

3. 点検時期

制御棒クラスタ案内管や RCC 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の摩耗長さは 28%となることわかる（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 万時間を目処に設定する。

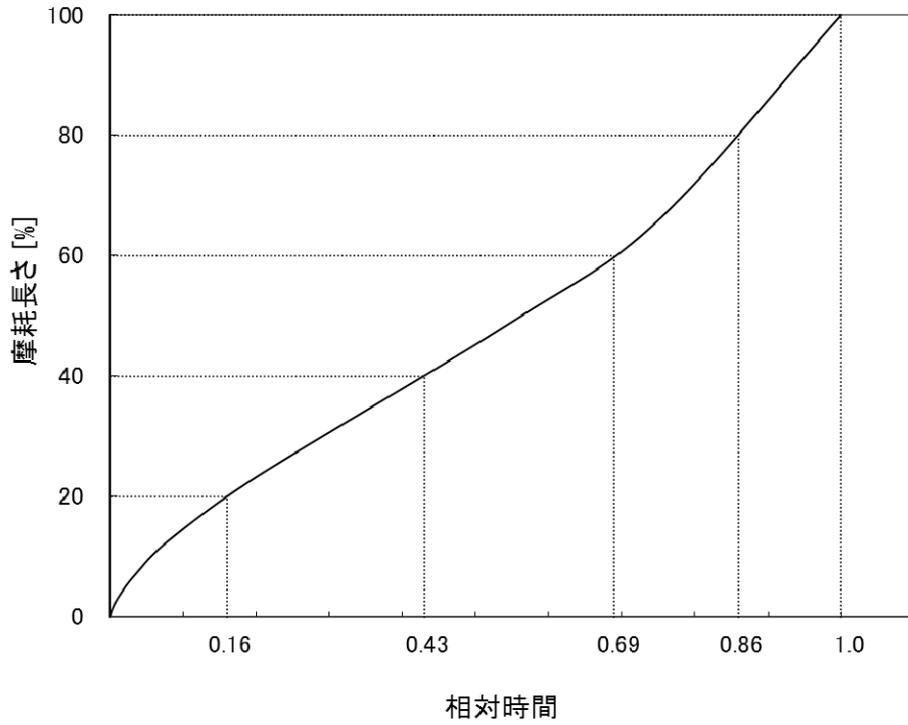


図 I-1 取替後の制御棒クラスタ案内管案内板摩耗進行予測曲線

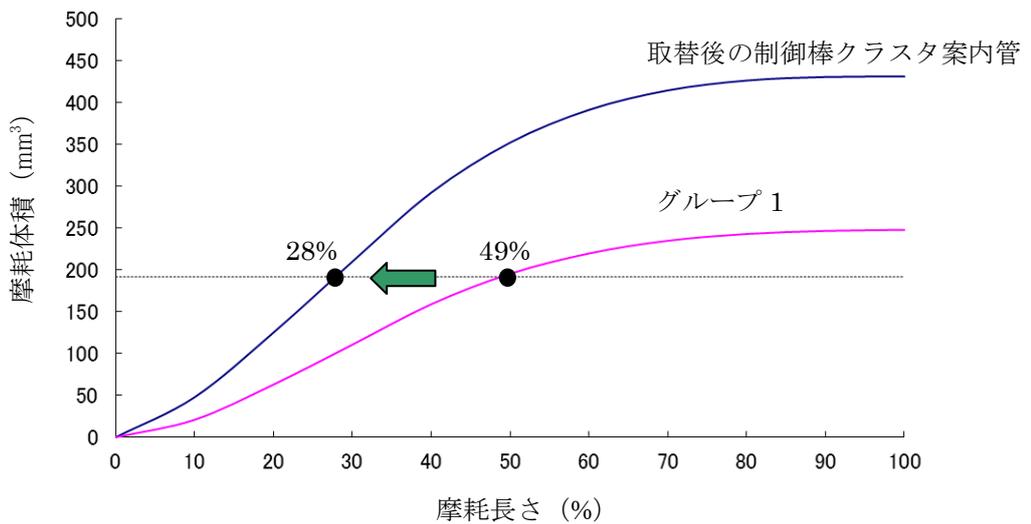
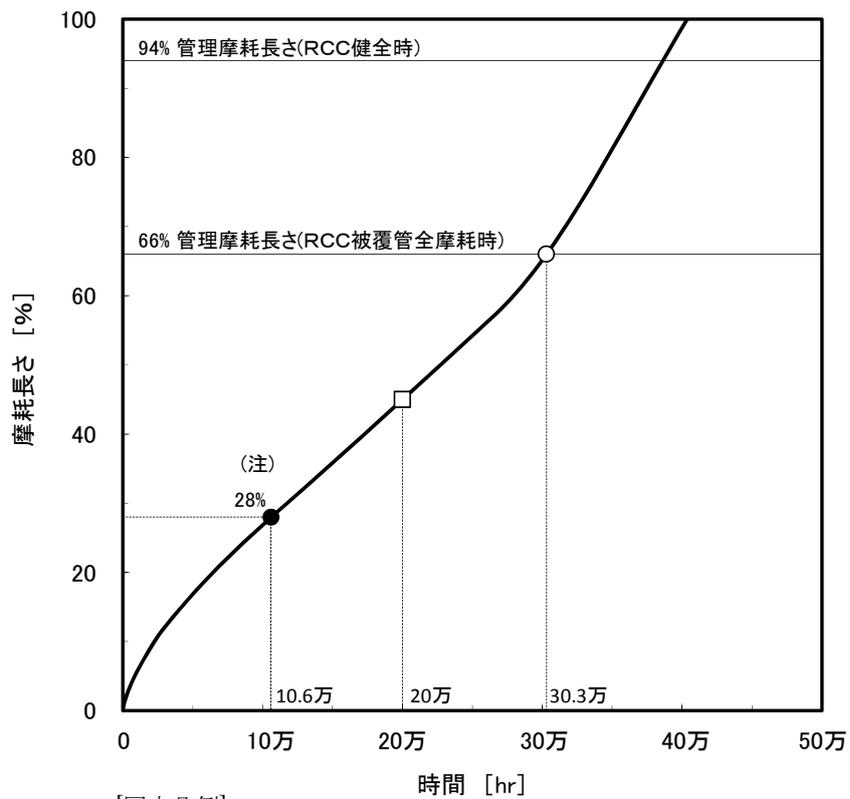


図 I-2 取替後の制御棒クラスタ案内管の摩耗長さ換算



[図中凡例]

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

図 I-3 取替後の制御棒クラスタ案内管の摩耗進行予測

(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

炉内構造物における制御棒クラスタ案内管の機能

1. 炉内構造物とは

炉内構造物（図 1）は原子炉容器内において次の機能をもつ構造物である。

- (1) 炉心すなわち燃料集合体の支持及び位置決め
- (2) 制御棒クラスタの位置決め、案内及び保護
- (3) 1次冷却材の流路形成及び流量の適正配分
- (4) 炉内計装の通路形成、支持及び保護
- (5) 原子炉容器に対する中性子しゃへい

炉内構造物は次の 2 つの構造物に分けられる。

- (1) 下部炉内構造物
- (2) 上部炉内構造物

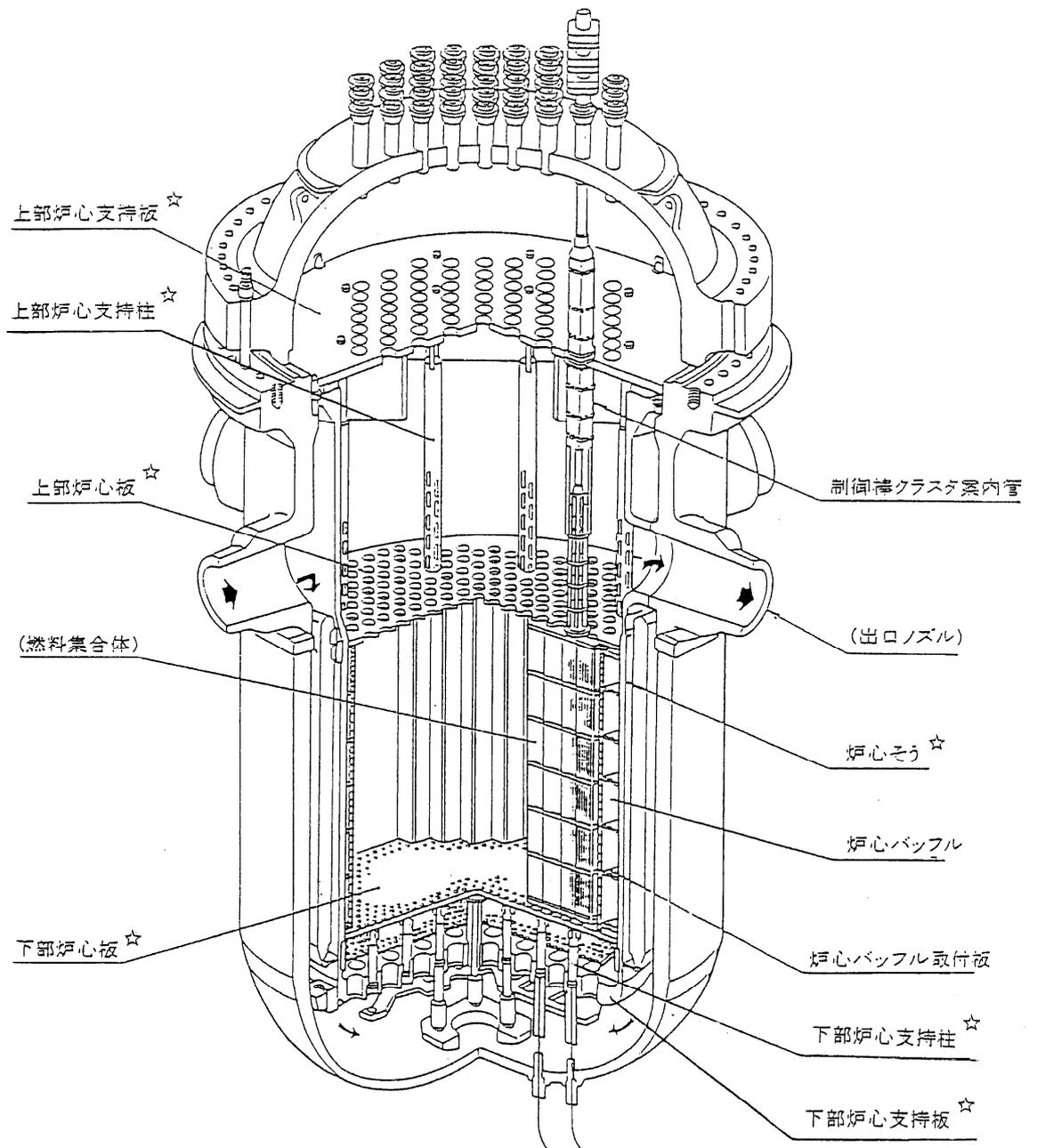
このうち、下部炉内構造物（図 2）は燃料集合体の主要収納構造であり、支持構造となっている。下部炉内構造物は炉心そう、炉心バッフル、炉心バッフル取付板、下部炉心板、下部炉心支持柱、熱しゃへい体、下部炉心支持板等の部材から構成されている。

上部炉内構造物（図 3）は、主に制御棒クラスタの位置決め、及び案内のための構造となっている。上部炉内構造物は、上部炉心板、上部炉心支持柱、上部炉心支持板、制御棒クラスタ案内管等の部材から構成される。

2. 制御棒クラスタ案内管とは

制御棒クラスタ案内管は上部炉心支持板上部からボルトで取り付けられ、上部炉心板には支持ピンにより支持されている。（図 4）

制御棒クラスタ案内管は案内板に制御棒を保持し、燃料に所定時間以内に挿入できるように案内する。



注： 1. ()内は炉内構造物ではない

2. ☆印は炉心支持構造物を示す

図1 炉内構造物

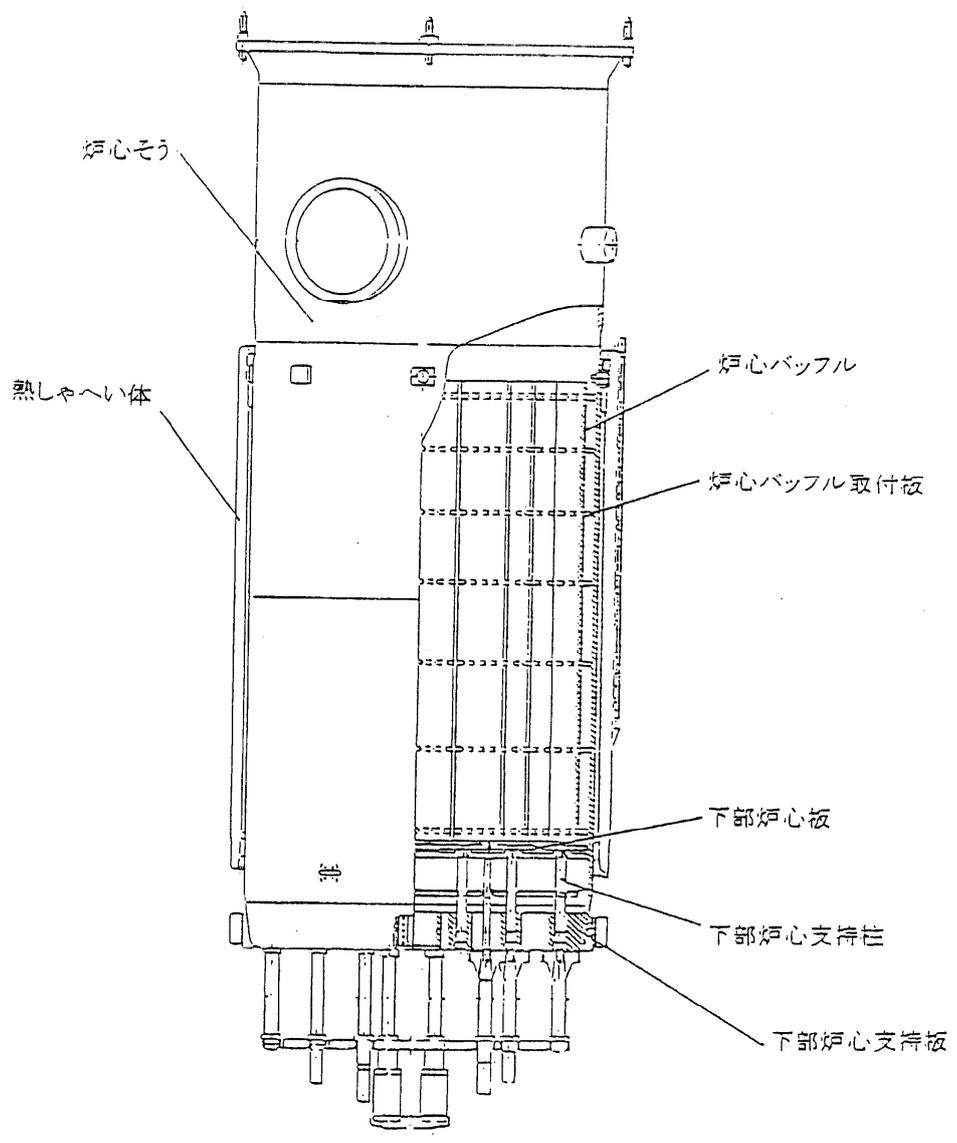


図2 下部炉内構造物

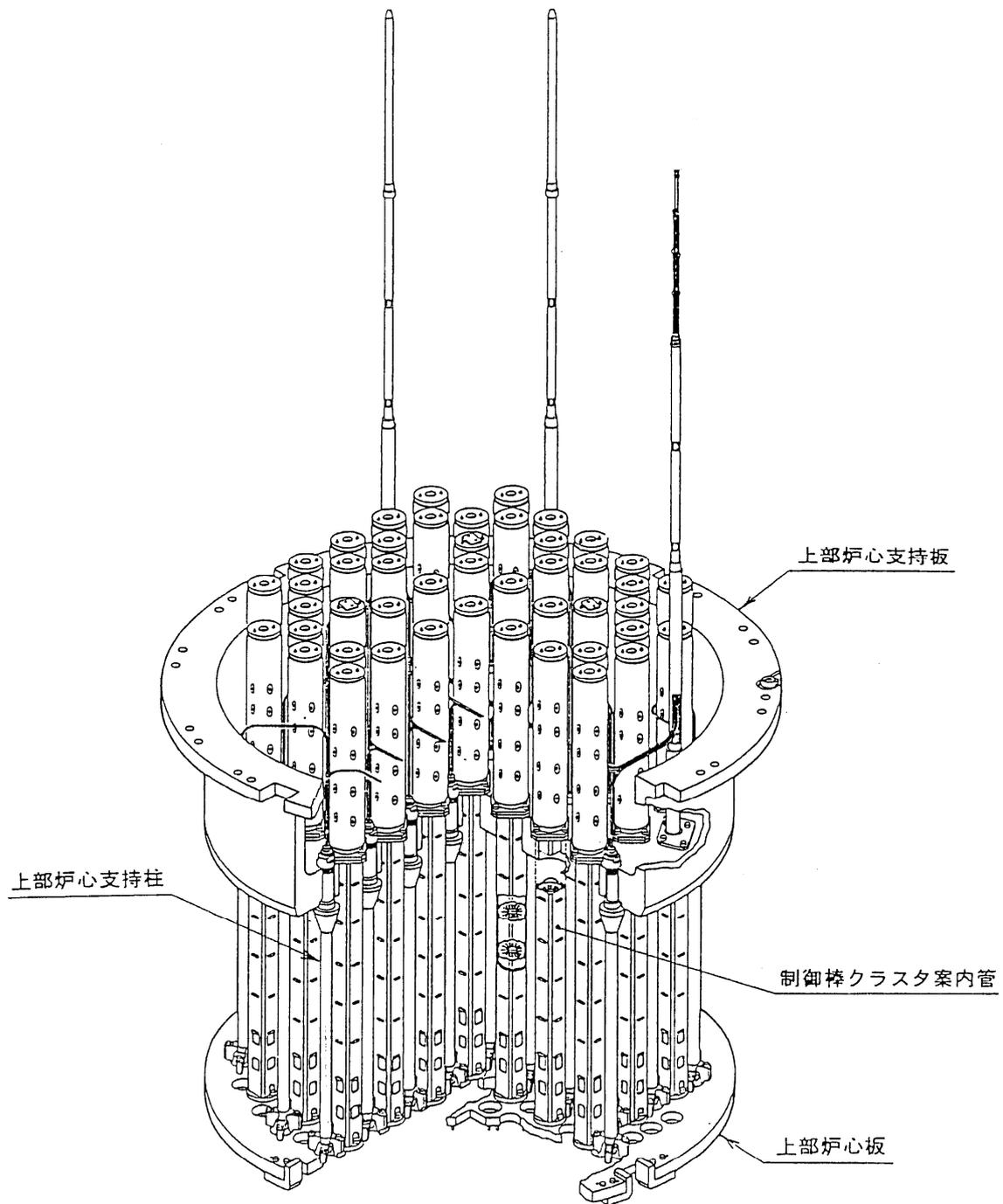


図3 上部炉内構造物

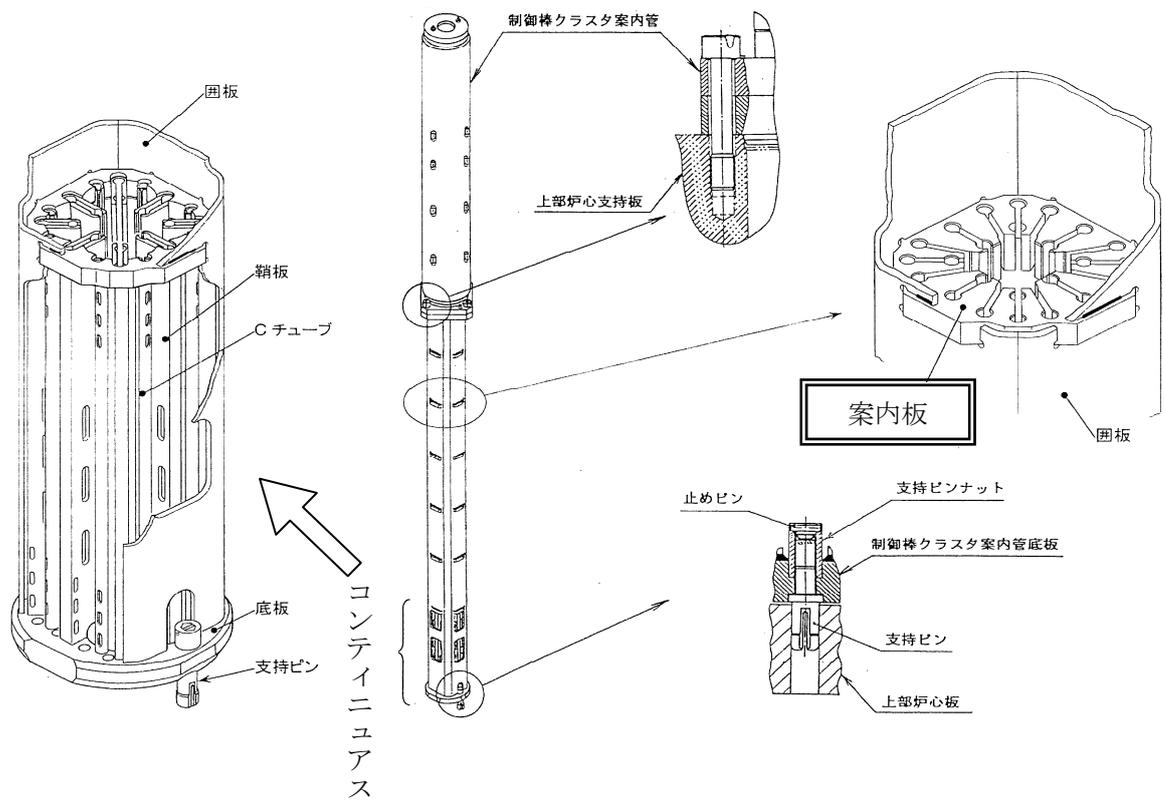


図4 制御棒クラスター案内管の構造

用語一覧表

PWR	加圧水型原子炉発電所 (Pressurized Water Reactor) の略称
RCC	制御棒クラスタ (Rod Cluster Control) の略称
GT	制御棒クラスタ案内管 (Guide Tube) の略称[参考資料-1 の図 4 を参照]
Ss 地震動	敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動
ITH	円筒胴付き上部炉心支持板 (Inverted Top Hat) の略称[参考資料-1 の図 3 を参照]
FLAT	平板型上部炉心支持板の略称[参考資料-1 の図 1 を参照]
CIR	炉内構造物取替 (Core Internals Replacement) の略称
UCI	上部炉心構造物 (Upper Core Internals) の略称[参考資料-1 の図 3 を参照]

改訂経緯

第1版（平成14年3月）の概要

制御棒クラスタ案内管の点検評価ガイドライン（以下GTガイドライン）は平成13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や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（摩耗管理長さ）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（平成16年1月）の概要

第1版の発行を受け、平成14～15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、摩耗管理長さに達する時間は

14ITH型>14FLAT型>それ以外

の順に早いとの結論を得た。

第3版改訂の経緯

GTガイドラインはGT案内板の摩耗事象に対して、適切かつ合理的に保全していくことを目的としており、点検データや最新知見等をGTガイドラインへフィードバックし、GT案内板保全の充実を図っていく。

概要

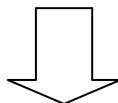
第3版は主に以下の内容について見直している。

- ① プラントグループの見直し
プラント新設や炉内構造物取替に伴いプラントグループを見直す。（表1）
- ② 管理摩耗長さの見直し
新規プラントグループや耐震設計審査指針改訂に伴い、管理摩耗長さを見直す。（表2）
- ③ 点検時期の見直し
プラントグループや管理摩耗長さの見直し、第2版発行後の点検結果を受けて点検時期を見直す。（表3）

表 1 プラントグループの見直し

(a) 第 2 版

グループ	グループ 1	グループ 2	グループ 3	グループ 4		
					a	b
GT 形式	14×14		15×15	17×17		
リガメント長さ	2.4mm		4.8mm	2.9mm		
案内板板厚	24mm		24mm	24mm		
ループ数	2 ループ		3 ループ		4 ループ	
UCI 構造	ITH 型	FLAT 型	FLAT 型	ITH 型		
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	美浜 3 号機 高浜 1 号機 高浜 2 号機	川内 1 号機 川内 2 号機 高浜 3 号機 高浜 4 号機	大飯 1 号機	敦賀 2 号機 大飯 2 号機 大飯 3 号機 大飯 4 号機 玄海 3 号機 玄海 4 号機



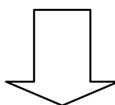
(b) 第 3 版

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
					a	b	c	
タイプ	14×14 ITH 型	14×14 FLAT 型	14×14 CIR	15×15	17×17 3 ループ	17×17 4 ループ	17×17 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	2.9mm			2.9mm
案内板板厚	24mm		40mm	24mm	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	ITH 型	FLAT 型	ITH 型	FLAT 型	ITH 型			ITH 型
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	美浜 3 号機 高浜 1 号機 高浜 2 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 大飯 2 号機 大飯 3 号機 大飯 4 号機 玄海 3 号機 玄海 4 号機	泊 3 号機

表 2 管理摩耗長さの見直し

(a) 第 2 版

プラント グループ	制御棒クラス案内管 形式	摩耗長さ	
		RCC 被覆管最大摩耗時	RCC 被覆管健全時
1	14×14ITH 型	66%	94%
2	14×14FLAT 型	66%	95%
3	15×15	74%	93%
4	17×17 3 ループ	68%	92%
	17×17 4 ループ	68%	93%



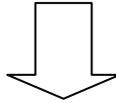
(b) 第 3 版

プラント グループ	制御棒クラス案内管 形式	摩耗長さ	
		RCC 被覆管最大摩耗時	RCC 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	17×17 3 ループ	68%	92%
	17×17 4 ループ	68%	93%
6	17×17 3 ループ改良標準型	68%	93%

表 3 点検時期の見直し

(a) 第 2 版

プラントグループ	制御棒クラス案内管形式	点検開始時期
1	14×14ITH 型	約 12 万時間
2	14×14FLAT 型	約 25 万時間
3	15×15	約 40 万時間
4	17×17	約 32 万時間



(b) 第 3 版

プラントグループ	制御棒クラス案内管形式	点検開始時期
1	14×14ITH 型	約 12 万時間
2	14×14FLAT 型	約 24 万時間
3	14×14 CIR	約 36 万時間
4	15×15	約 40 万時間
5	17×17 3 ループ	約 25 万時間
	17×17 4 ループ	
6	17×17 3 ループ改良標準型	約 49 万時間

炉内構造物点検評価ガイドライン[制御棒クラスタ案内管]の概要

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（以下、GT）に要求される機能を維持できるよう、管理基準、合理的な点検範囲、点検周期を規定する。

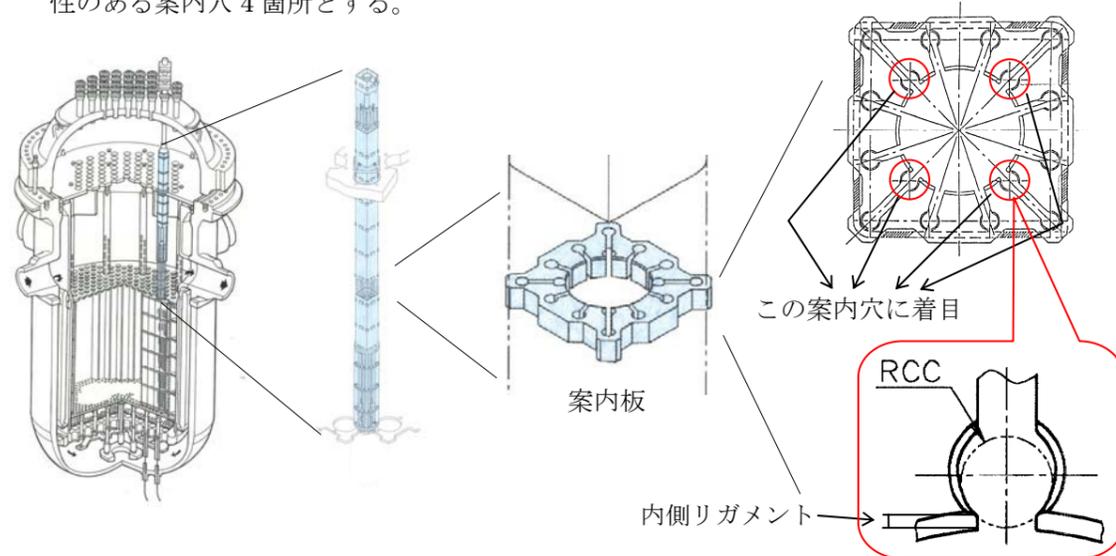
- ① 経年変化事象：制御棒(以下、RCC)の流動振動による摩耗
- ② GTに要求される安全機能：RCC案内機能、RCCの破損防止
- ③ 安全機能に影響を与えない範囲で摩耗を管理
- ④ 形状並びに上部炉内構造物構造によりプラントをグループ化（表1）

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
					a	b	c	
タイプ	14×14 ITH型	14×14 FLAT型	14×14 CIR	15×15	17×17 3ループ	17×17 4ループ	17×17 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	2.9mm			2.9mm
案内板板厚	24mm		40mm	24mm	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	ITH型	FLAT型	ITH型	FLAT型	ITH型			ITH型
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	美浜3号機 高浜1号機 高浜2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 大飯2号機 大飯3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、GT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。



3. 点検方法

点検方法は、目視検査等、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。

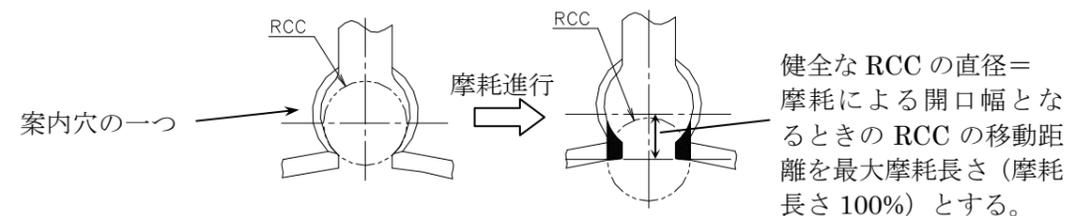


図2 摩耗長さの定義

4. 管理摩耗長さ及び摩耗進行予測の考え方

GT案内板の摩耗を管理するための基準、及びその進行予測を以下のように定める。

[管理摩耗長さ]

GTの機能維持を、Ss地震時にRCCが、案内穴から抜け出さないこととし、RCC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。

*：RCC点検結果を反映する

[摩耗進行予測]

RCC1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、これらの単位時間あ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。

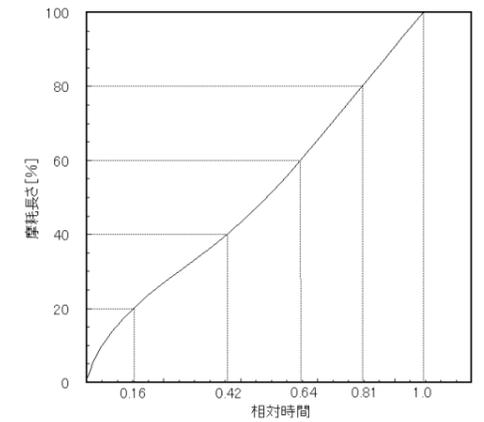


図3 摩耗進行予測（14×14GTの例）
（時間は相対値）

5. 点検開始時期及び点検周期の考え方

- 点検開始時期は、本ガイドライン制定後、表1の各グループ毎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5：25万時間
- プラントグループ6：49万時間

- 次回点検は最新の点検結果を通るように図3の曲線をフィッティング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を目処に行う。但し管理摩耗長さには、RCCの摩耗を反映する。尚、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ある。

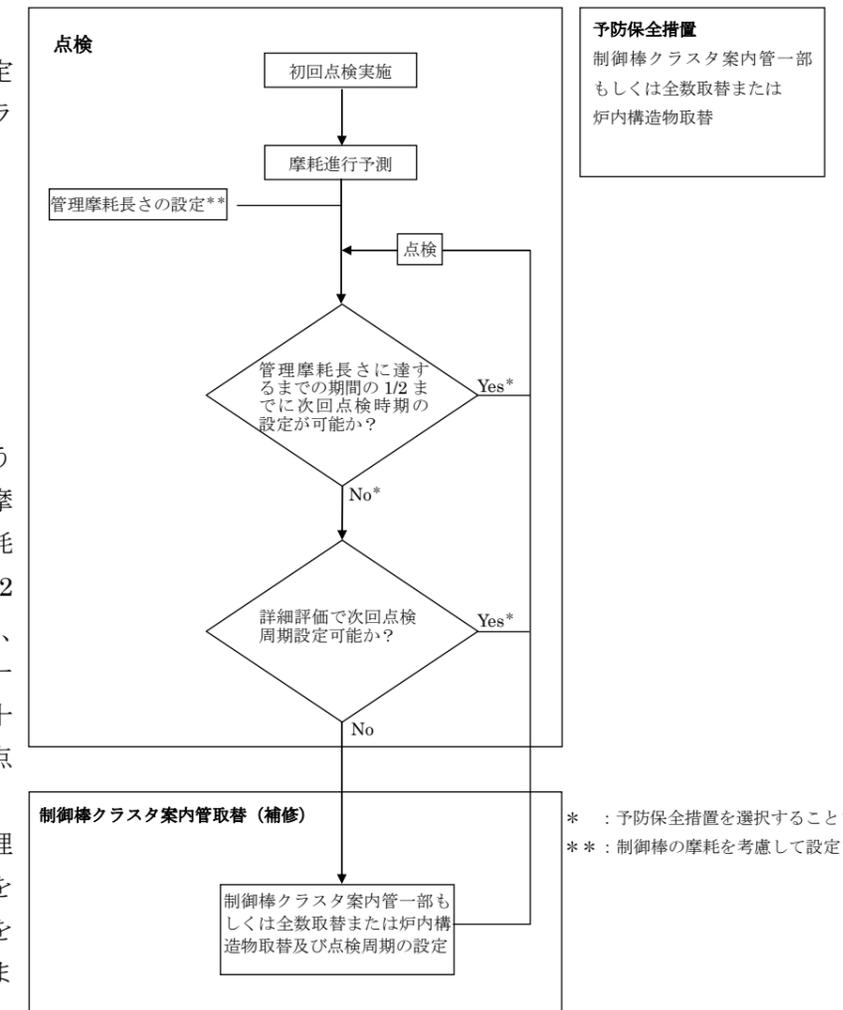


図4 点検フロー

予防保全措置
制御棒クラスタ案内管一部もしくは全数取替または炉内構造物取替

*：予防保全措置を選択することも可能
**：制御棒の摩耗を考慮して設定

PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン
[制御棒クラスター案内管]
(第3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，2013

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。