

制御棒駆動機構の予防保全支援システムの開発

Development of a Preventive Maintenance Support System for Control Rod Drive Mechanisms

原子力発電プラントでの点検計画業務の省力化と信頼性向上のため、CRD(制御棒駆動機構)の点検計画を支援する予防保全システムの開発が求められている。これにこたえるため、定期検査で分解点検すべきCRDを自動選定する予防保全支援システムを開発した。このシステムの特徴は、部材の経年変化の傾向とCRD機能変化の兆候を組み合わせて余寿命を予測する点にある。実プラントデータを用いて、システムを検証した結果、このシステムが熟練保守要員と同水準の選定能力を持つことを検証できた。

吉川和明*
杉山 栄*
今野隆博*
大塚久雄**

Kazuaki Yoshikawa
Sakae Sugiyama
Takahiro Konno
Hisao Ôtsuka

1 緒 言

発電プラントの事故を防止するために、プラント機器を対象とした予防保全システムに関する研究開発が国内外で積極的に進められている。近年では、知識工学を応用した機器故障診断、保全計画、プラント設計などのエキスパートシステムの開発¹⁾が活発である。

発電プラントには、多数の機器が含まれ、それらの保守所要時間を最少化することが必要である。このためには、定期検査の対象とすべき機器の選定が重要な業務の一つである。

このようなニーズにこたえるため、原子力発電所の定期検査で分解点検すべきCRD(制御棒駆動機構)を自動選定する予防保全支援システム^{2),3)}を開発した。

本稿では、その概要と適用結果について述べる。

2 背 景

CR(制御棒)は、出力調整や緊急時停止のために核分裂反応度を調節する重要な役割を果たしている。各CRは燃料集合体内に水圧駆動によって遠隔操作で挿入、引き抜きするために、CRDによって操作される。

CRD予防保全の現状とこのシステムの特徴を表1に示す。電気出力1,100 MW級の原子炉内には185本のCRとCRDが設置されており、信頼性向上と安全運転のために、原子力プラントの定期検査中にCRDの分解点検が周期的に実施されている。この作業は約10日を要し、定期検査中の作業工程のクリティカルパスとなっている。このため、プラントの信頼性と経済性の観点から、分解点検すべきCRDの最適な選定が重要になる。

表1 CRD予防保全の現状とシステムの特徴 従来、熟練保守要員が手作業によって点検CRD(制御棒駆動機構)を選定していたものを、このシステムを使用することによって自動的に選ぶことができる。

No.	選定方法 項 目	現 状	本システム
		熟練保守要員による 手作業	ワークステーション による自動選定
(1)	デ ー タ 管 理	文書管理	ディスクによるデータベース管理
(2)	機能試験傾向解析	手作業	自 動
(3)	部 材 寿 命 解 析	経験的予測	自 動
(4)	余 寿 命 予 測	(2)による予測	(2), (3)による予測
(5)	選 定 所 要 時 間	約2週間	30分

分解点検すべきCRDの選定方法は、現状では、定期検査中に行う機能試験の結果と点検履歴に基づいて、手作業で選定されている。まず、機能上変化の前兆が現れているCRDが優先的に選定され、残りのCRDは炉心の一定エリアから計画本数だけ選定される。実際には、数本のCRDが前者の方法で選定されている。このような機能変化の兆候は、構成部材の経年変化が潜在的に進行している可能性があることを示している。

そのためこのシステムでは、従来の保全方法に経年変化の影響を付加的に考慮し、CRD選定の信頼性向上を図ることにした。

* 日立製作所 日立工場 ** 日立製作所 エネルギー研究所

3 システム概要

3.1 システムの機能

分解点検すべきCRDの選定を支援するために、予防保全支援システムを開発した。このシステムのハードウェアは汎(はん)用のワークステーション2050を用いる。特にシステムの特徴はソフトウェアにあり、そのシステムの機能概要を図1に示す。

このシステムでは、定期検査時に得た機能試験データや運転中プラント履歴データなどをワークステーション2050に入力してデータベースを構築し、このデータベースを使って点検すべきCRDを自動選定する。

このシステムの特徴は、CRD部材の経年変化の傾向とCRDの機能変化の兆候をとらえて余寿命を予測する点にある。前者では、運転中の温度履歴と加速寿命試験データに基づいて余寿命 L_1 を算出する。後者では、図1の機能試験項目のおのに対して、過去の機能試験データに基づいて回帰分析を行い、管理値に到達するまでの時間から余寿命 L_2 を予測する。両解析で得られた余寿命を比較して、短寿命の値をCRDの余寿命とする。

点検CRDの選定にあたっては、この余寿命と保守専門家の

選定基準や経験などの知識データベースを用いて推論し、点検対象CRDを選定する。この結果に基づいて点検周期の予測、点検工程の計画などの保全計画を提案する。

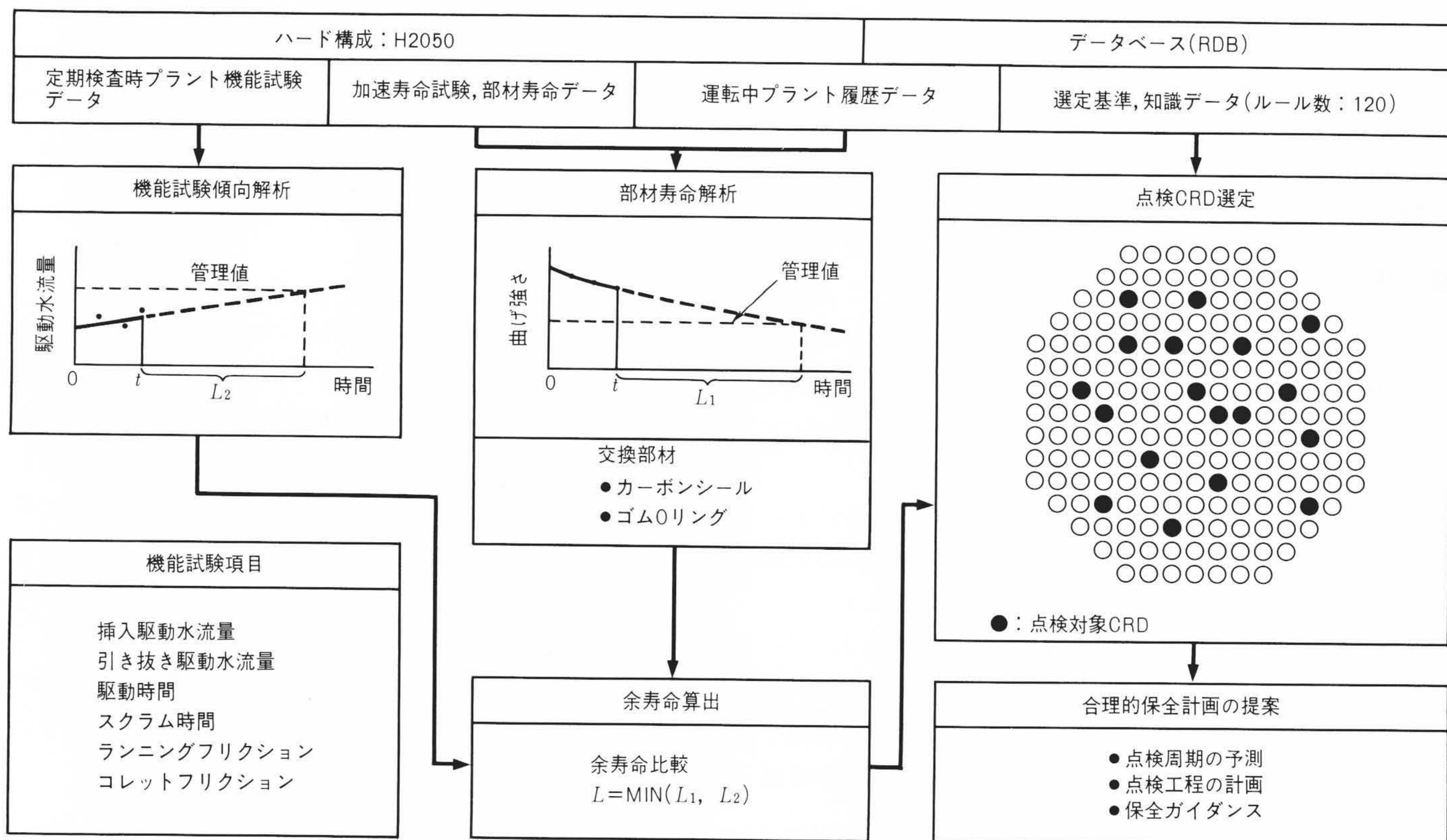
このシステムを開発するにあたって、まず、CRDのフォールトツリー解析を実施した。その結果、CRDの構成部材の中から、駆動力を保持するカーボンシールを重要部材として抽出した。

3.2 カーボンシールの寿命解析

CRDを構成する機器の性能は摩耗や摩擦、および温度変化によって影響を受ける。これらに敏感で、経年変化の影響を受けやすい部品として、シールやOリングのような非金属部品がある。これらの部品は分解点検時に交換される。

これらの中でカーボンシールは、特に熱的要因により最も損傷を受けやすいことが知られている。カーボンシールのバインダー剤が溶解すると容積が減量し、曲げ強さが変化して駆動水流量漏れの原因になる。これによりCRの駆動力が低下する。

実際のカーボンシールを用いて、温度加速条件下で寿命試験を行った。60個の試験片を定温・定圧のオートクレーブ内に約3,000時間さらし、一定時間ごとに10個の試験片を取り出して、曲げ強さ、衝撃強さ、硬さおよび質量を測定した。そ



注：略語説明など RDB (Relational Data Base)

図1 CRD予防保全システムの機能概要
る点にある。

このシステムの特徴は、CRD部材の経年変化の傾向と、CRD機能変化の兆候をとらえて余寿命を予測す

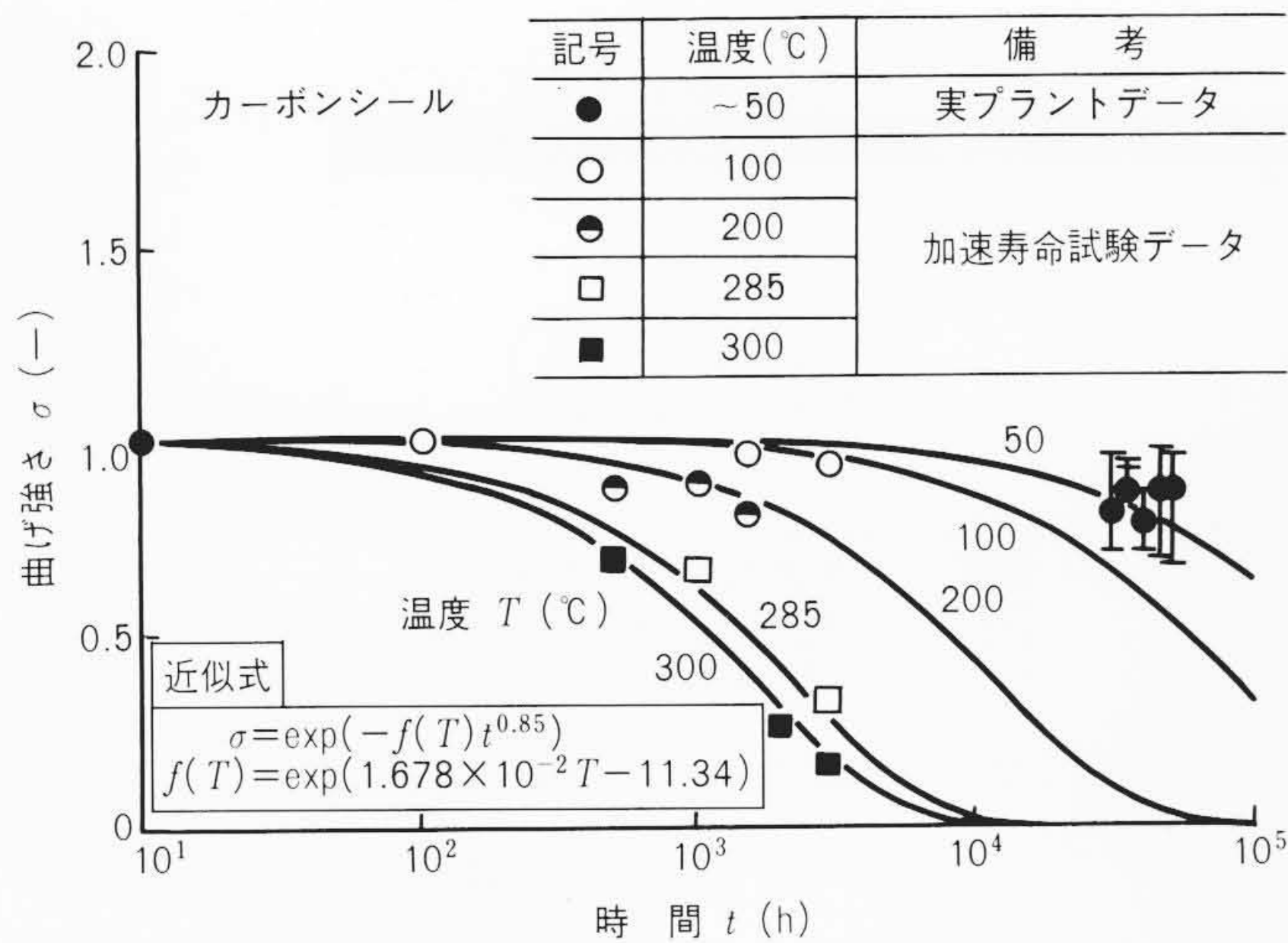


図2 カーボンシール寿命試験結果 運転温度の増加に伴い、曲げ強さの低下速度が大きくなる傾向がある。

の結果、寿命に対する感度のいちばん大きいものが曲げ強さであることがわかった。これを寿命特性指標として選べば、カーボンシールの寿命を高精度で予測できる。

次に、この曲げ強さの温度依存性について検討した。カーボンシール寿命試験結果を図2に示す。同図は実プラントの温度条件よりも加速した条件(温度100～300℃)下の寿命試験で得たカーボンシール曲げ強さの経時変化を示したものである。ここでの曲げ強さ σ は、曲げ強さの初期値で無次元化した値である。曲げ強さは、運転温度の増加に伴い低下速度が大きくなる傾向があり、(1)式のように近似できる。

$$\sigma = \exp(-f(T)t^{0.85}) \dots\dots\dots(1)$$

$$f(T) = \exp(1.68 \times 10^{-2} T - 11.34)$$

ここで

σ ：無次元化された曲げ強さ(—)
 t ：時間(h)
 T ：温度(°C)

この近似式から、カーボンシール曲げ強さを実プラントの温度域(~50℃)まで外挿して算出すると、 5.3×10^4 時間(約6年間)後の実測値とよい一致を示した。

このように運転温度の履歴を与えることによって、任意時間経過後のカーボンシールの曲げ強さを予測できる。余寿命は、カーボンシールのシール性能が低下する限界曲げ強さまでの運転時間として求め、(2)式のように表される。

$$L_1 = (\log(1/\sigma_c)/f(T_s))^{1/0.85} - t_{\text{now}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで

σ_c ：無次元化された限界曲げ強さ(—)
 t_{now} ：現在時間(h)
 T_s ：将来の温度(°C)

3.3 点検CRD選定方法

CRDの選定方法は、まず運転中に異常事象が発生したCRD

と、定期検査での機能試験データに異常があるCRDを選定する。次に、過去の機能試験データの傾向解析から、管理値を超える可能性のあるCRDを最優先で選定する。

さらに、残りのCRDの中から余寿命の短いCRDを優先的に選択する。その際、部材寿命解析から求めた信頼度からCRD全体系の信頼度を算出し、これが別途設定した判定基準値以上になるまで分解点検すべきCRDの本数を増やしていく。

このシステムでは、プラント名、定期検査回数、前サイクルでの観測事象などを対話的に入力すると、CRD余寿命、分解点検すべきCRD、そのCRD番号と炉心での座標などが自動的に出力される。

4 結果と検討

実プラントで収集された温度履歴を使って、カーボンシールの経年変化挙動を評価した。運転温度履歴の入力条件を図3に示す。ケース1は炉心中央部の、ケース2は炉心周辺

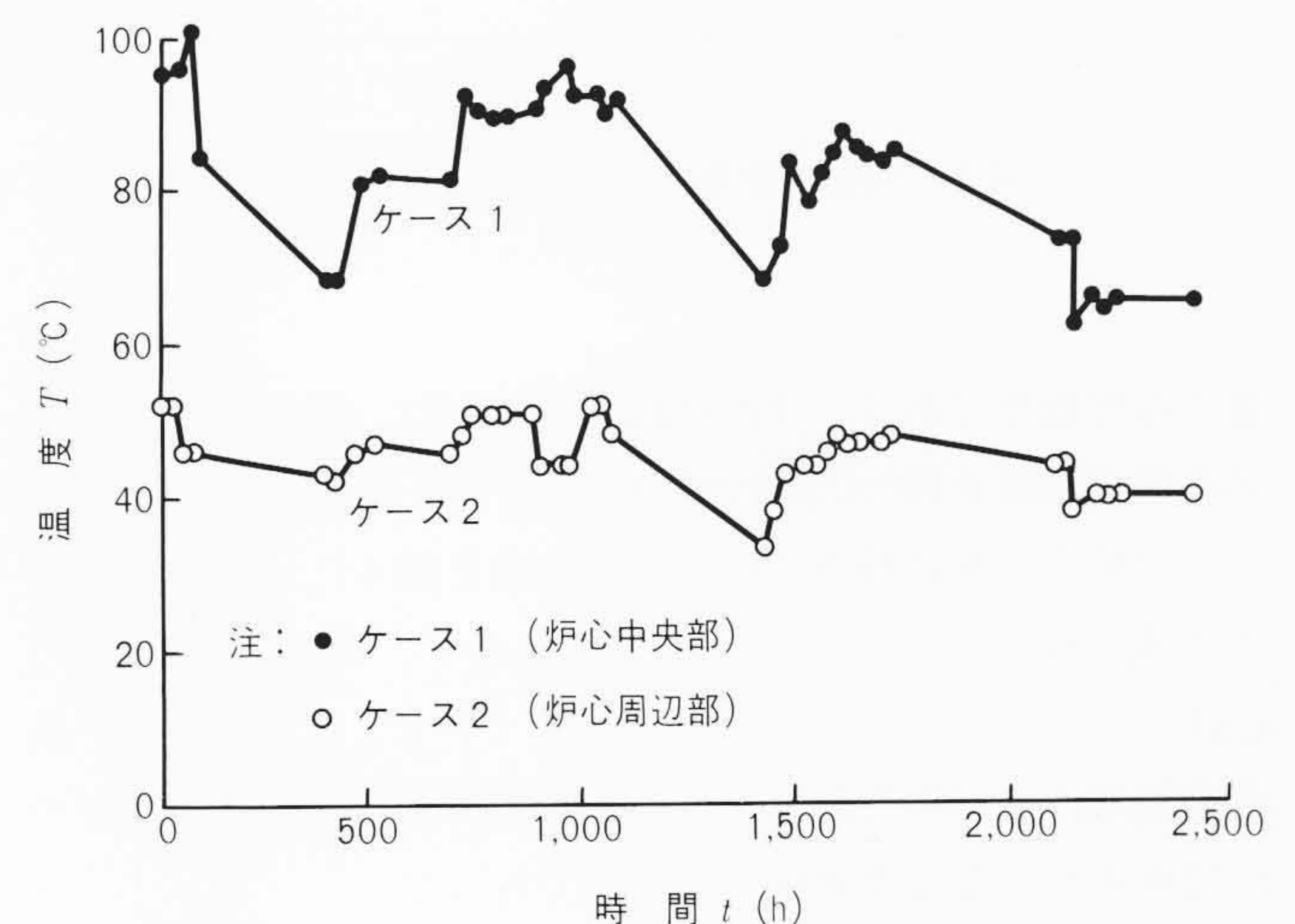


図3 CRD運転温度履歴 炉心中央部および炉心周辺部の温度履歴であり、それぞれ60～100℃、および30～50℃の範囲の履歴を持っている。

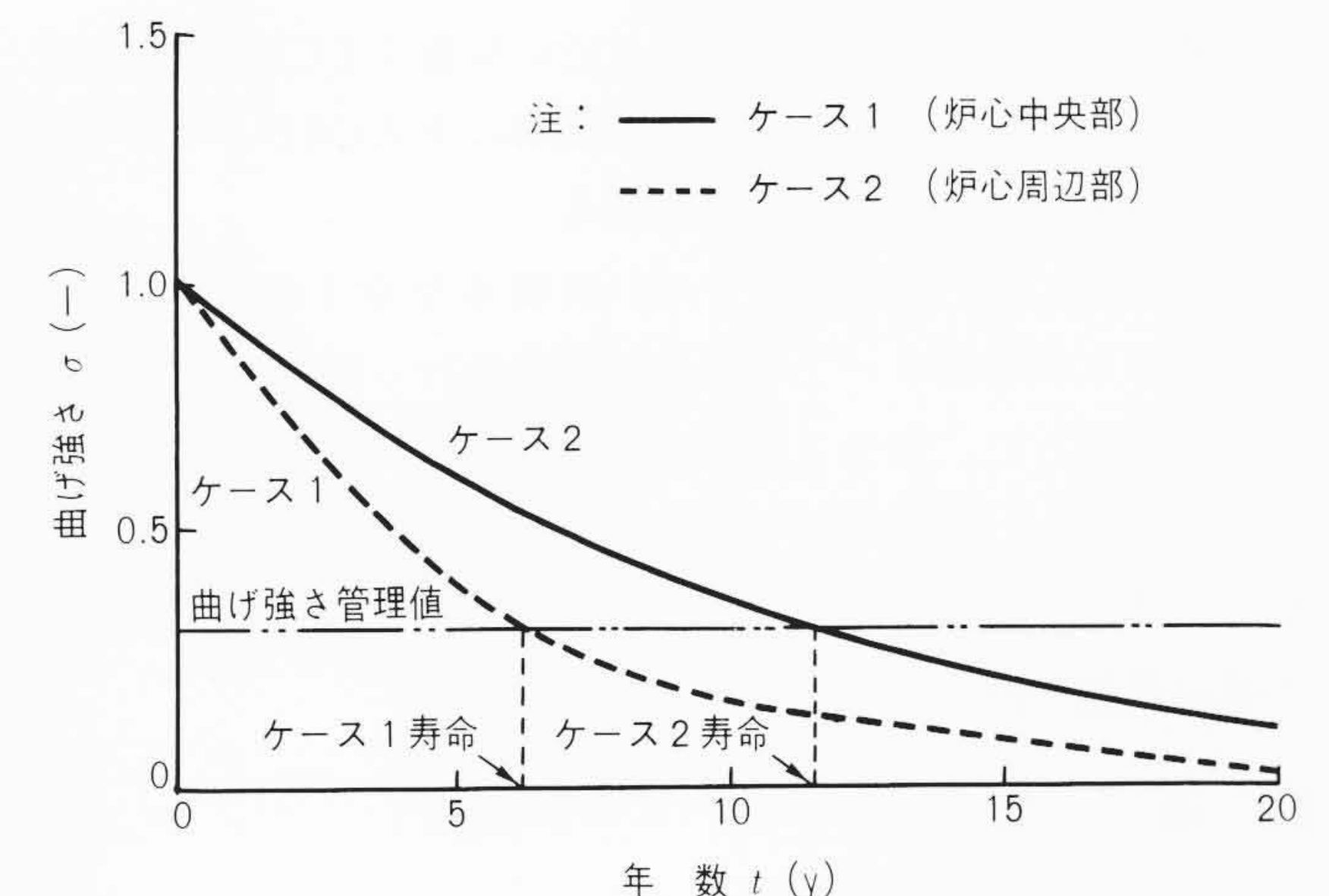


図4 カーボンシールの曲げ強さの経年変化予測結果 炉心中央部と炉心周辺部で、約6年の寿命差があることがわかる。

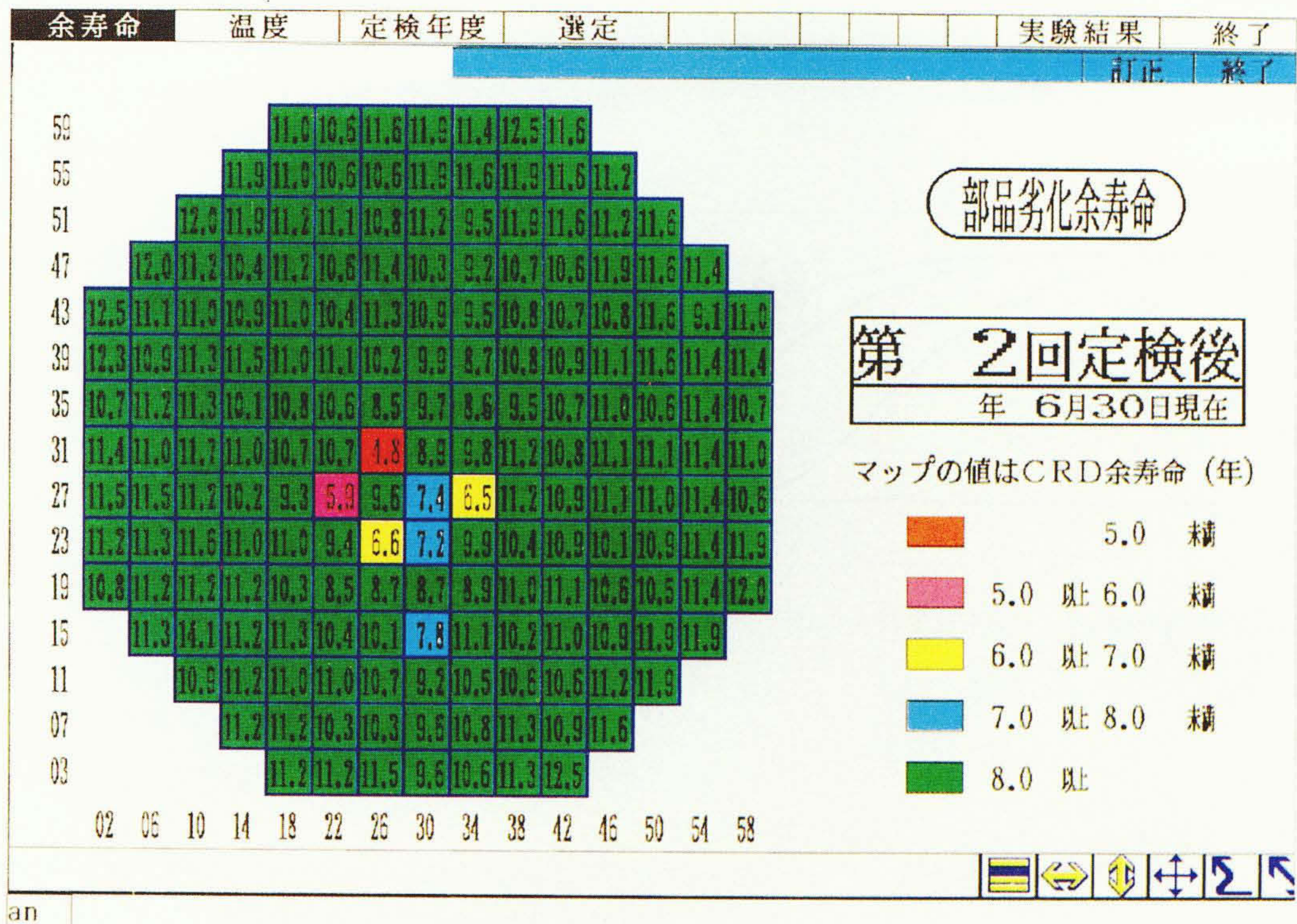


図5 CRD余寿命マップ出力例 余寿命は中央部ほど短寿命で、周辺部にいくに従って増加している。

部の温度履歴であり、それぞれ100～60℃、および50～30℃の範囲の履歴を持つCRDである。

この場合の曲げ強さの経年変化傾向を図4に示す。曲げ強さの変化傾向は、時間が経過するに伴い、高温条件でのCRD(ケース1)の低下速度が増加していることがわかる。低温領域での平均寿命は、シールが限界強さに到達するまでに12年あり、高温領域では6年であった。

この方法を適用して試算したCRD余寿命マップの一例を図5に示す。CRD余寿命分布は中央部ほど短寿命であり、周辺部にいくに伴い徐々に増加していることがわかる。これは、炉心中央部と周辺部のCRDの温度差に起因するものである。そのため、現在のシステムは中央付近に位置するCRDは、機能変化の兆候のあるCRDを除いて周辺部にあるCRDよりも早く分解点検すべきであると提言できる。

電気出力1,100 MW級のBWR(沸騰水型原子炉)のCRDを対象に、点検周期5～7年の予防保全を行う例題にこのシステムを適用した。過去3回の定期検査データを用いて試算した選定結果と、選定実績を比較した結果、選定実績と有意差がなく選定できることがわかり、熟練保守要員と同一レベルの選定機能を持っていることを確認できた。

5 結 言

原子力発電所の定期検査で分解点検すべきCRDを、自動選

定する予防保全システムを開発した。これを要約すると以下のようである。

- (1) このシステムの特徴は、部材の経年変化の傾向とCRD機能変化の兆候を組み合わせ、余寿命を予測する点にある。
- (2) CRDの代表的な特性変化部材として、カーボンシールを取り上げ、その曲げ強さの変化を運転温度履歴から算出して、余寿命を予測する方法を提案した。
- (3) カーボンシールの曲げ強さが管理値に到達するまでのCRDの平均寿命は、CRDの炉心内の位置に依存し6～12年の範囲にある。
- (4) このシステムが、熟練保守要員と同一レベルの選定機能を持っていることを確認した。

今後もさらに充実した機能を実現するため、ニーズに密着したシステムを目指して改良していきたいと考える。

参考文献

- 1) 加藤, 外: 保守支援システムのソフトウェア知識工学活用ー: 昭和63年電気学会シンポジウム予稿(1988)
- 2) 大塚, 外: 制御棒駆動機構予防保全システムの開発, 日本原子力学会「1989秋の大会」予稿集B39, 75(1989)
- 3) H. Ohtsuka, et al.: Development of a Preventive Maintenance Support System for Control Rod Drive Mechanisms., International Symposium on Reliability and Maintainability 1990(ISRM '90), Proceedings, pp. 303～307(1990)