# 原子力発電プラント配管予防保全技術

## Preventive Maintenance Technology for Nuclear Power Plant Piping

世界でも有数の高稼動率で安定した運転を続けているわが国の原子力発電プラントに対し、よりいっそうの長期的な信頼性が求められており、供用中の経年変化の管理、予防が主要な1項目となっている。

プラント配管に経年変化をもたらす要因の一つとして,腐食による管内壁の 薄肉化があり,これらに対し実施している供用配管の肉厚測定について,現場 での実測,データ整理,肉厚の変化率や供用可能残期間などの評価を一貫して 行える自動システムを開発,実用化して良好な成果をあげている。

このデータベースから得られる配管劣化条件, 感度, 統計的傾向を, 適切に 供用配管の管理に反映することにより, 配管の予防保全は着実に歩みを進めて いる。 後藤伸穂\* Nobuho Gotô
石渡雅幸\* Masayuki Ishiwata
治部 襄\* Noboru Jibu
佐々木朝明\* Tomoaki Sasaki
新田 正\*\* Tadashi Nitta

## 1 緒 言

高い信頼性のもとで、長期的な安定運転を継続していくために計画的予防保全が不可欠な原子力発電プラントにあって、供用劣化管理・診断のニーズの高い装置類があり、これらを構成する一つとして配管がある。

配管の主要な劣化要因の一つに、管内流体によって管壁に腐食(エロージョン、コロージョン)が生じ、薄肉化する現象(以下、減肉と略す。)があり、これらの傾向把握、状況管理のために、実機プラント供用配管の主な位置に対し定期的な肉厚測定を実施している。この測定データを既取得データと合わせ的確に分析・評価することにより、当該配管および類似条件の配管の供用健全性、余寿命を評価・診断することは、プラント予防保全の一つとして有用かつ重要であり、この現場での実測から工場(検査、設計部門)での評価までを一貫して行えるシステムを開発、実用化して成果を得ている。

また,すでに取得した数百万にのぼる膨大なデータを適切に処理して,減肉傾向(発生条件,感度,減肉率など)の統計的な把握や精度の高い余寿命評価を行い,重みを付けたプラント配管管理を実施していくことで,より信頼性の高い予防保全が可能となる。

以下,配管予防保全技術の一環として実用化した配管余寿 命診断システムについて,その概要を述べる。

## 2 配管の予防保全

プラント供用配管の経年変化要因のうち, 減肉に対する予

防保全として,(1)設計上減肉が発生しにくい条件を設定し,管理すること,(2)供用下にある配管の肉厚を継続的に管理し,必要に応じて計画的な改善を実施すること,の二つが行われている。

### (1) 設計上の管理

エロージョンやコロージョンによる配管減肉は, 材質的に 特に炭系鋼管で留意が必要な現象であり、種々の因子が複雑 に影響を及ぼしあって発生、進行に至る場合がある1)。減肉発 生の主な影響因子を図1に示す。これらの因子には、それぞ れ理論上,あるいは実験データから減肉進行に対する影響の 度合いの低い領域,種類があることがわかっており<sup>2)</sup>,設計条 件としてこれらの限界値,最適値を設定して,プラントの設 計段階で適切に考慮することで減肉の発生を最小限となるよ うにしている。具体的には、材料強度的な物理的因子につい ては, 減肉発生ポテンシャルを持っている部位に対しての耐 食性の高い材料(ステンレス鋼,低合金鋼など)の採用,系統 の最適流速の設定、著しい流れの乱れ(高流速偏流など)が生 じうるような複雑な形状の配管系構成の排除などの配慮がな されており、化学的因子については、酸素流入などによる徹 底した水質管理が実施されていて、すでに供用下にあるプラ ントに対しても適切に反映されている。

## (2) 供用中の管理

供用配管での減肉の発生は、材料や環境的な要因ばかりでなく局部的な系統条件とも関連しているため、上述の全体的

<sup>\*</sup> 日立製作所 日立工場 \*\* 日立エンジニアリングサービス株式会社 足崎工場

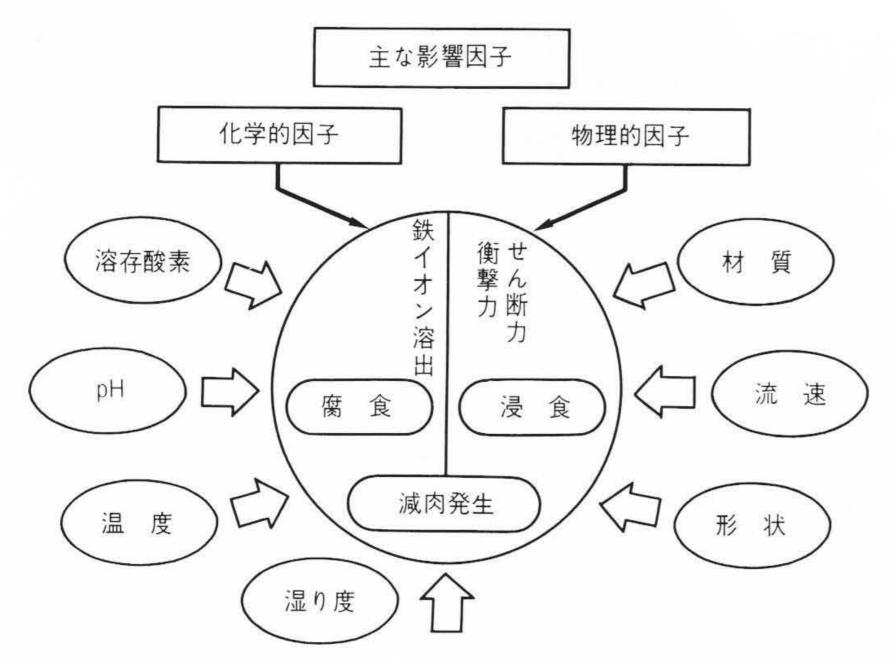


図 I 減肉発生メカニズム 配管の減肉は、化学的因子として溶存酸素濃度、pH、温度があり、物理的因子として材質、流速、形状などがある。それらの因子が相乗して減肉現象が発生する。

な設計上の配慮に加え、供用状態に即した個々の細かな管理 が必要である。この考えに基づき、実際のプラントでは、供 用配管のうち図1に示す影響因子との関連から相対的に減肉 発生の可能性のある代表的な系統、位置に対し継続して定期 的な点検を実施しており、この調査結果をもとに配管健全性 の確認、最適改善時期設定のための余寿命評価を行い、信頼 度の高い保全を進めている。

この点検(減肉調査)には、管肉面の目視点検と管外面からの肉厚測定とがあり、一般に管外面からの超音波による肉厚測定が多く行われている。供用前配管の工場での初期肉厚測定状況を図2に示す。同図は管外表面に50 mmピッチでマークされた定点の肉厚を測定している状況を示すもので、供用後も定期的に同位置の測定を行うことによって肉厚の監視、経年変化(減肉)の評価および管理を行うことにしている。

この減肉調査としての肉厚測定は、プラントの定期点検ごとに計画的に展開・実施されており、測定データは現在数百万点にのぼり、一大データベースを形成している。これまでの調査により、

- (a) 高流速,高湿り度の気液二相流体下では,比較的耐食性の良い材料でも減肉が発生する場合がある。
- (b) 流体の湿り度が低いと減肉は生じないが、凝縮排水を 巻き込むと減肉する可能性がある。
- (c) 水系流体と気液二相流体とでは,二相流体のほうがや や高い温度領域で,減肉感度がピークを形成する傾向にあ る。
- (d) 配管系を構成する部品(直管, 曲管, 分岐管, 弁など) ごとに, 相対的に減肉が生じやすい位置を特定できる。 などの特徴があることが分かっており, これらのデータをさらに種々の観点からまとめ直し, 統計的に分析・評価することで, プラント配管の実際の減肉傾向をあらためて確認する



図2 配管肉厚測定 供用期間中の配管肉厚測定データと比較するために,工場で初期値の肉厚測定を実施している。写真のマーキングポイントの肉厚を測定し,供用期間中も同一ポイントを測定することとしている。

ことができる。おのおのの影響因子の減肉感度を統計的に把握し、各因子、条件に重みを付けて次の点検計画(測定対象系統,位置の選定、測定頻度、代表着目定点の設定など)に反映していくことで、効率の良い一貫性のある減肉管理と、信頼性の高い余寿命診断が可能となる。

現在,数年ごとに実施しているこれらの定点点検・監視の 基本的考え方は次のようなものである。

### (a) 点検部位

点検部位として, 主に,

- (i) 減肉環境として流れ条件の厳しい部位:偏流部,二 相流高流速・高湿度部など。
- (ii) これまでの点検で改善実施前も含め、相対的に減肉が多く観察された部位

を代表的に選定している。

### (b) 点検クラス

点検の目的により、点検のクラス(レベル)区分を行う。

- (i) 点検クラス1:高耐食材料への最適取り替え計画策定(余寿命評価)のための継続監視・点検であり、系統機器・配管の減肉状況を適切に把握できる主要な部位について点検を行う。
- (ii) 点検クラス2:対減肉余裕の確認(予防保全的主旨) のための点検(監視)であり、高耐食材料を用いている系統、原則として減肉発生条件にないと考えられる系統に対し、機器・配管の代表部についてサンプルチェックを行う。

## (c) 点検頻度

前記(b)のクラス 1 点検については、基本的には数年(n)ごとの点検を実施するものとし、評価余寿命長さ、前回測定時の減肉傾向との差異などにより、状況に即した適切な点検頻度を設定する。例えば、評価余寿命がnに対し十分に長いものはその点検ピッチを 2n, 3n, ……とし、短い評価結果となり取り替え計画との関連から精度を上げる場合にはピッチを $\frac{n}{2}$ とするような応用である。

クラス2点検については、基本点検ピッチを2nとして、これも結果によって適切にピッチを再設定するものとする。また、クラス2点検の結果によって継続的に監視が必要と判断される場合には、これをクラス1点検対象とするものとする。

## (d) 評価・判定の基準

点検の結果およびこれまでのデータとの比較から、減肉部位がどの程度の残存肉厚を持っているか、あとどのぐらいの時間で供用可能な限界の肉厚となるか、を適切に評価・判定する基準として、管の当該減肉部位が持つべき構造強度の面から要求される必要最小肉厚を基準のベースとする。肉厚の変化率からこの必要最小肉厚に至る時間(余寿命)を求め、またそれらに対する余裕を評価している。

また, 点検, 評価の結果から余寿命が十分に長い個所,

他の代表定点の点検・評価結果に包含されるような個所については、その後の監視範囲の見直しに適切に反映していくものとする。

これらの考え方のもとで供用中の配管減肉管理が行われている。

## 3 配管余寿命診断システム

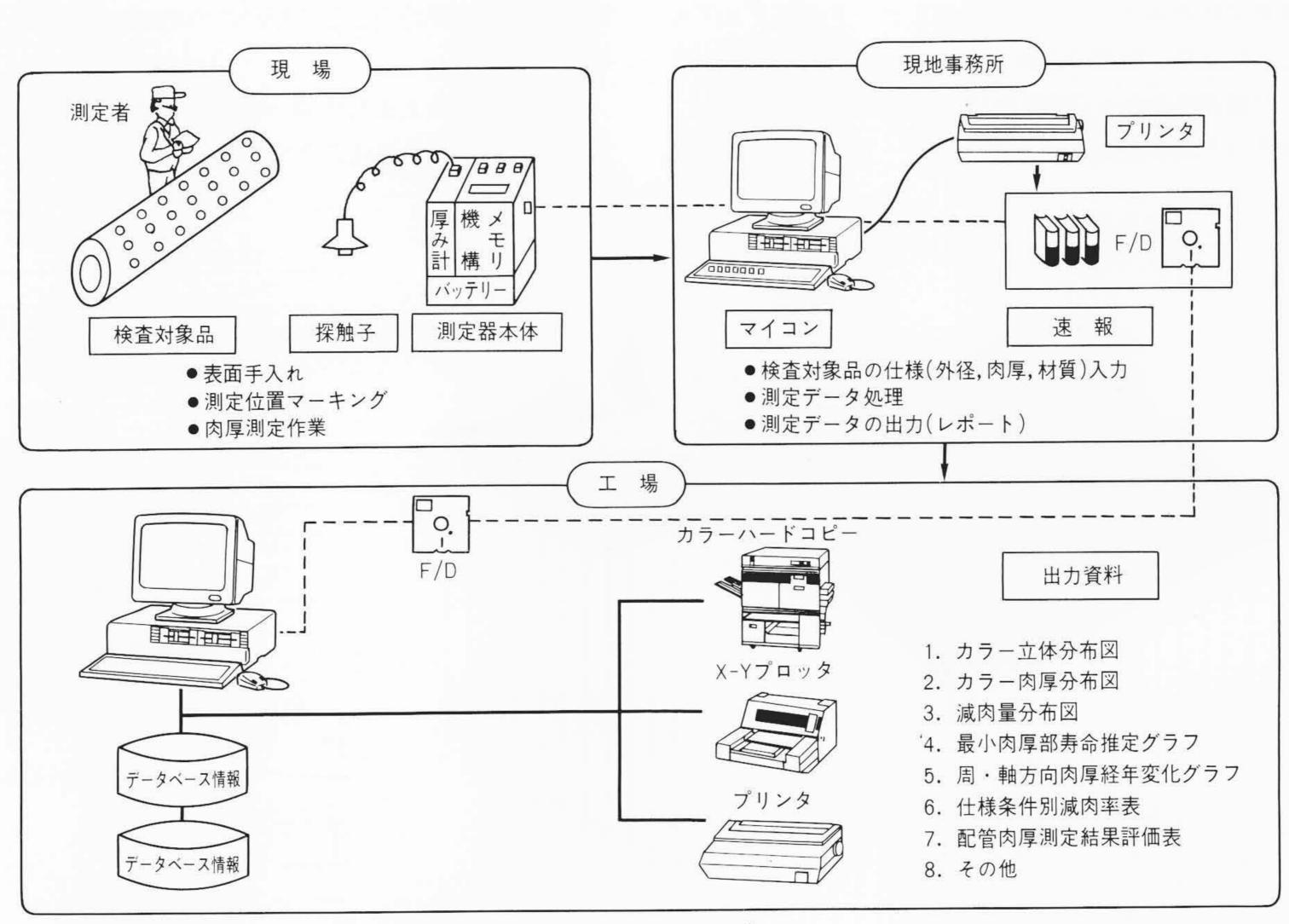
配管の減肉管理および余寿命診断は、現場での肉厚測定と そのデータの既取得データとを合わせてのデータ処理から成る。

点検ごとに多量のデータがとられ、すでに取得・処理されている膨大なデータと合わせ、再び処理・評価される一連の業務に、測定ーデータ処理ー評価(余寿命診断)を現場一現地一工場(検査、設計)間で一貫してシステマティックに行うことのできる「配管余寿命診断システム」を実用化し、効果を上げている。

## 3.1 システム概要

この「配管余寿命診断システム」は、現場作業(肉厚測定)から工場での評価・診断作業までを一貫して自動処理し、その結果を傾向把握、検討、判断の容易な図・グラフにカラー出力(ビジュアル化)させることを主な特徴とするものであり、システムの概略構成は図3に示すとおりである。

現場での肉厚測定は,メモリ機構を持つ測定器本体と接続



注:略語説明 マイコン(マイクロコンピュータ), F/D(フロッピーディスク)

図3 配管予防保全システム構成図 現場の測定データを、工場での評価プログラムまで一貫して使用するシステム構成である。測定データは、全プラント共通のデータベースとして確保している。

している超音波厚み計によって実施される。現場で測定した データは測定器に記憶され、現場事務所で測定器本体からマ イクロコンピュータへ転送される。この段階でマイクロコン ピュータによって測定データの第一次処理がなされ、測定結 果のレポートが出力できる。

一次処理がなされたこれら測定データは,フロッピーディスクによって工場でのワークステーションのデータベースに転送され,測定個所ごとの各種仕様・条件,同一個所の既取得データと合わせてデータベースとして格納される。測定結果の評価,余寿命診断にあたり,それらのデータの第二次の処理がなされ,以下の各測定,評価結果がCRT上,ハードコピー,X-Yプロッタ,プリンタなどに適宜出力される( $\mathbf{図4}$ )。

- (a) カラー立体分布図
- (b) カラー肉厚分布図
- (c) 減肉量分布図
- (d) 周・軸方向肉厚経年変化グラフ
- (e) 寿命推定グラフ
- (f) 仕樣別減肉率表
- (g) 配管肉厚測定結果評価表
- (h) その他

## (1) カラー立体分布図,カラー肉厚分布図

肉厚測定データを基に,配管の内面状況をビジュアル化し 表示した図である。

従来数値だけの表示であった肉厚測定データをビジュアル 化することにより、配管の内面状況を一目で把握できるよう にし、また出力にあたっては厚肉部と薄肉部をカラー表示し、 より見やすいくふうを施してある。カラー立体分布図の例を

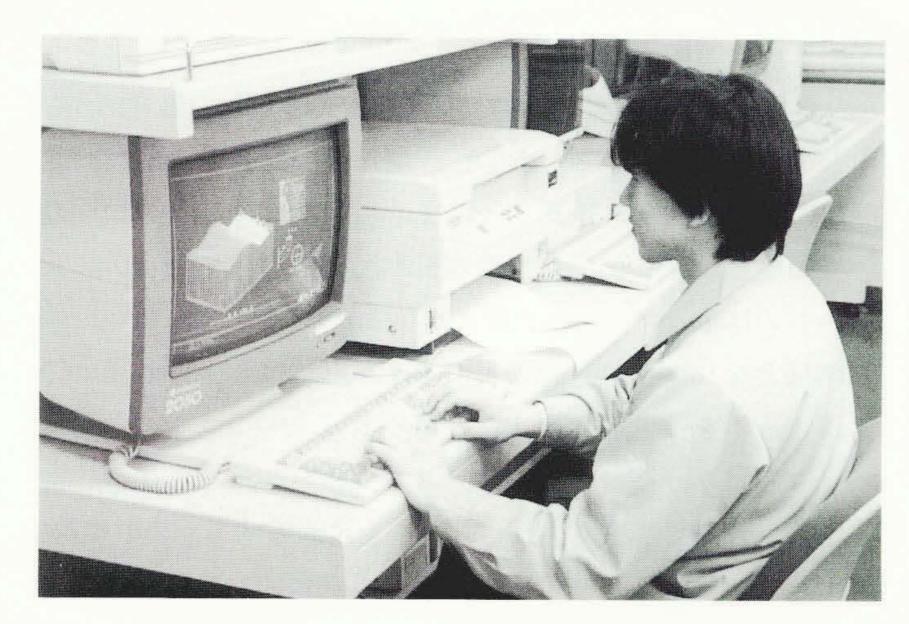


図4 配管予防保全システム操作状況 このシステムの操作状況 の一例である。この写真は配管の肉厚分布図を画面表示しているもので、減肉状況をビジュアルな形で表現している。必要に応じた出力が可能である。

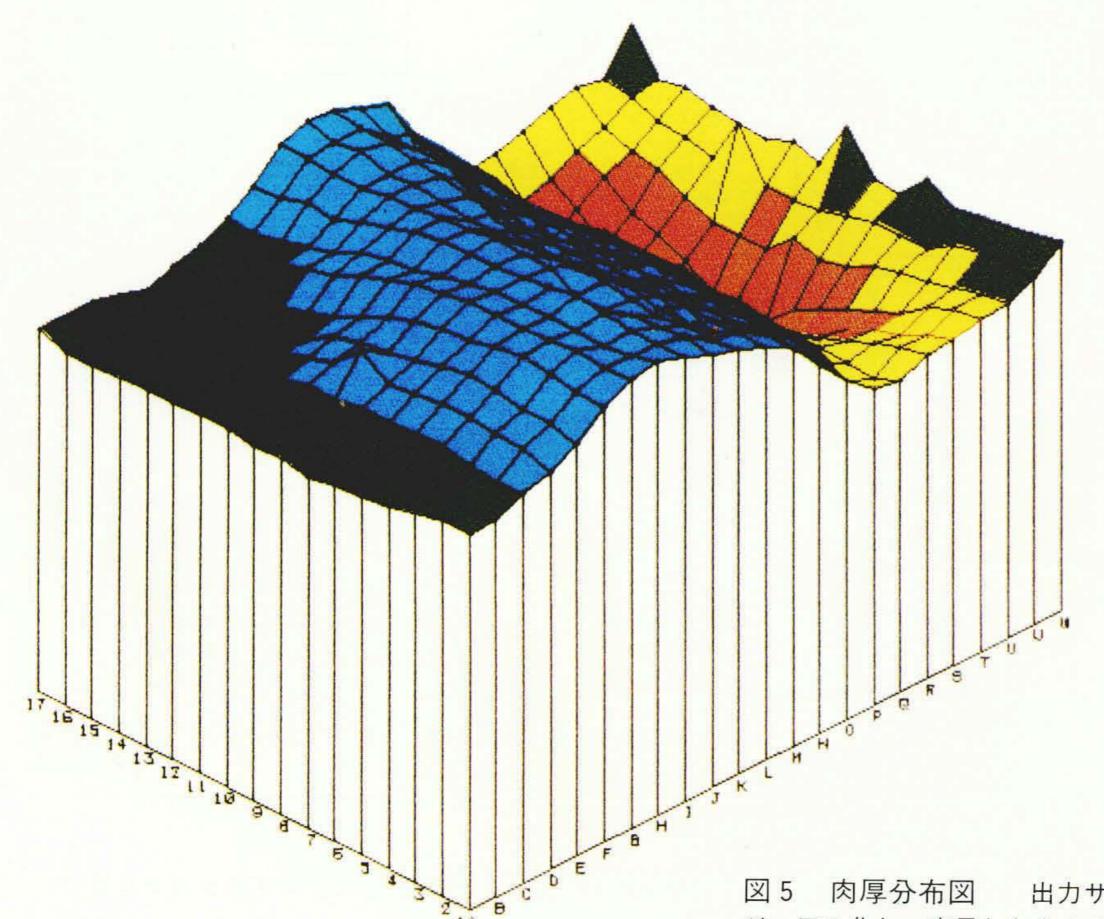
### 図5に示す。

(2) 減肉量分布図, 周・軸方向肉厚経年変化グラフ

複数回の肉厚測定を実施した測定個所での経年肉厚変化を 色別で表示した図が分布図である(図6)。

減肉の傾向は、測定ポイントごとに微妙に異なる(**図1**に示す物理的因子に影響されるため)ことから、それらの傾向を把握するために、配管内表面の展開図上に減肉量の分布を色別化表示し、物理的因子との相関性の把握が可能となるようにしている。

また,同一軸上または同一周上の肉厚経年変化の状態を表示したものが経年変化グラフである(図7)。



測定個所 NO	:TEST
系統名	: ABC
材質, 口径	: STPT42, 14B
部位	:90°L曲管,水平
運転年数	:10.9年
運転温度	: 142.3℃
流体,流速	:水, 5.2 m/s
管の公称厚さ	: 27.8 mm
管の最小厚さ	: 24.32 mm
計算上必要厚さ	: 22.51 mm
測定最小肉厚	: 22.7 mm

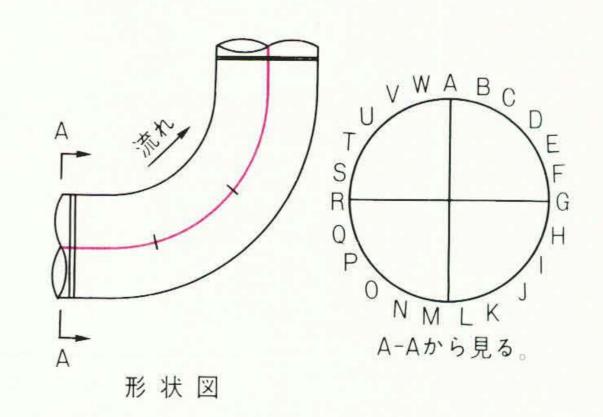


図 5 肉厚分布図 出力サンプル例で、肉厚測定データを基に肉厚分布をビジュアル化し、表示したものである。

## (3) 寿命推定グラフ

既肉厚測定データおよび新肉厚測定データをベースに,寿 命を推定したグラフである。

このグラフにより、各測定個所ごとの減肉率の把握、余寿 命の把握が可能である。寿命推定グラフの例を図8に示す。

本図の例では、測定最小値に最大減肉率(同一測定個所での 最大減肉率)をあてはめて、計算上必要厚さに至るまでの時間 (余寿命)を算出しており、保守側の評価を行っている。

## (4) 仕樣別減肉率表

一連の肉厚測定データから,減肉の影響因子ごとに減肉率

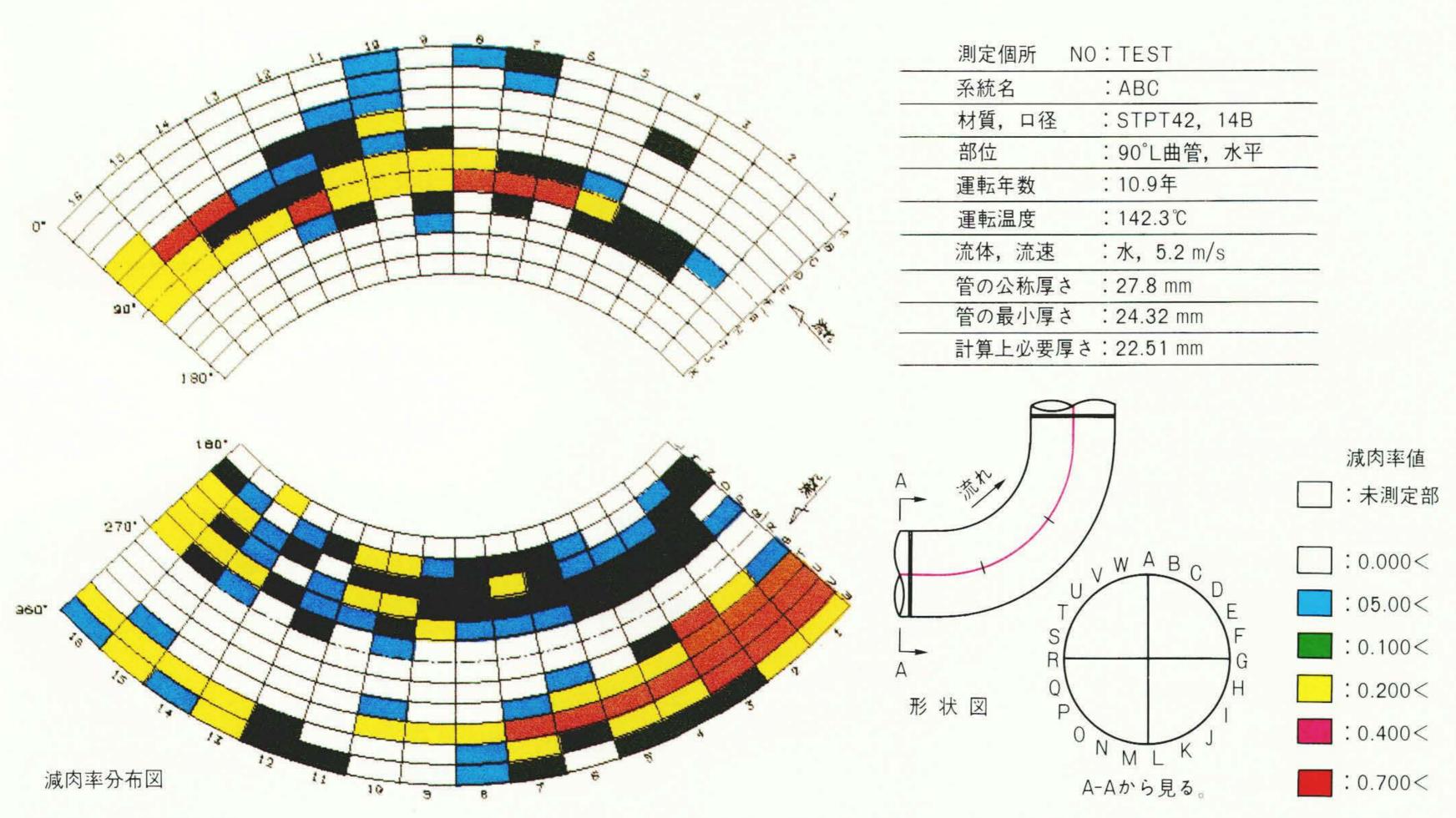


図6 減肉量分布図 出力サンプル例で、複数回の肉厚測定データを基に減肉量を曲管の展開図上に表示した図である。

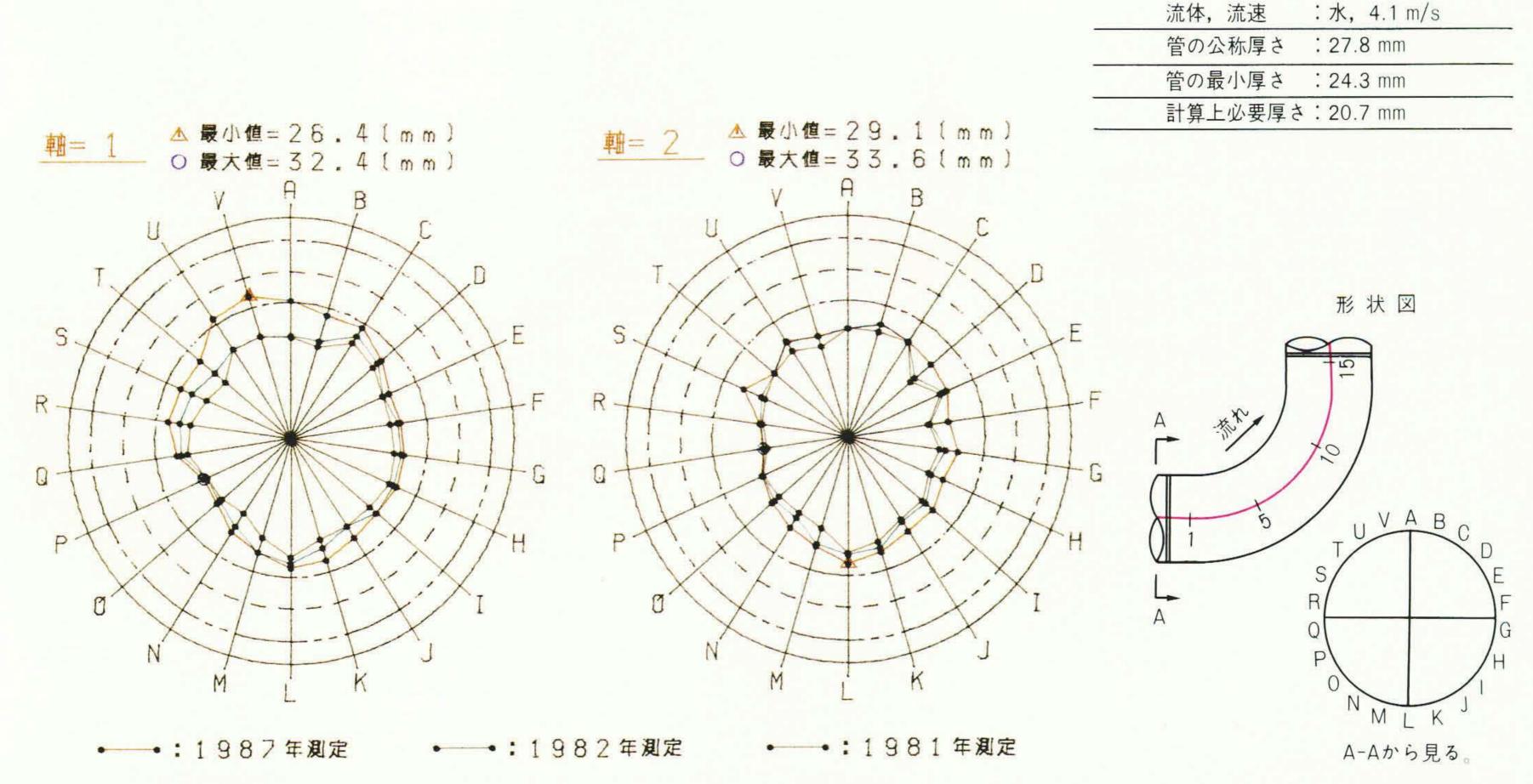
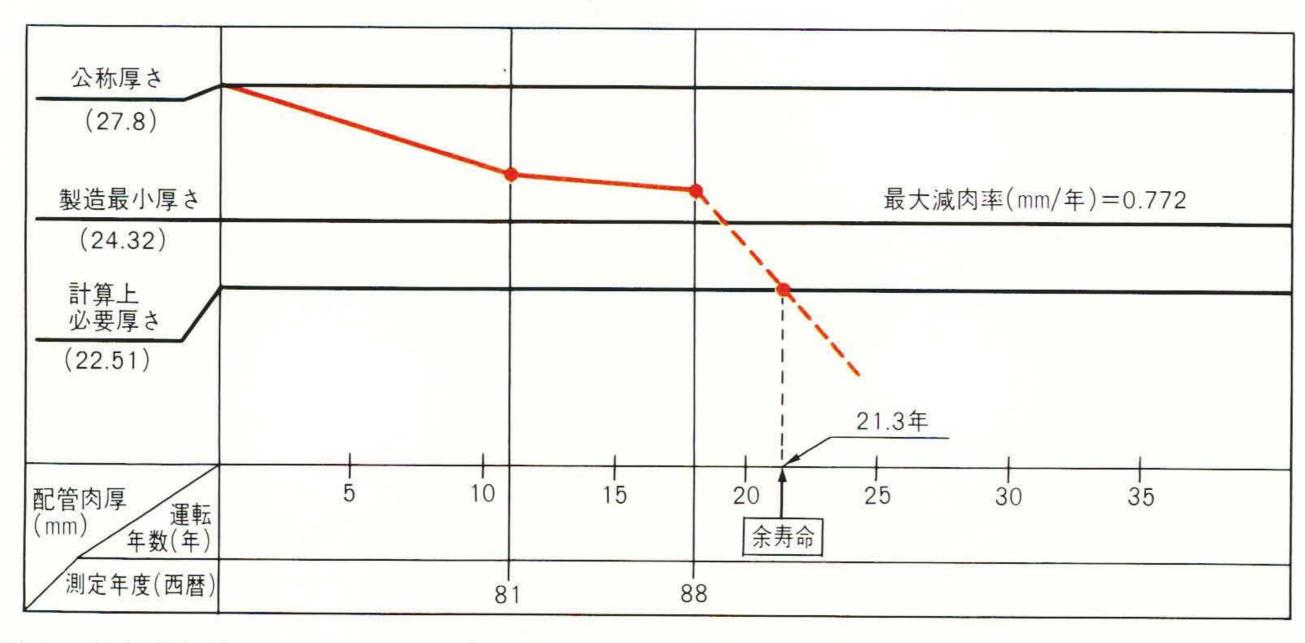


図7 周方向肉厚分布図(経年変化図) 出力サンプル例で,数年間にわたる肉厚測定データの経年的な変化を把握するために,同一断面での肉厚の分布を表示したものである。



測定個所	NO:TEST
部位-1	: 90°L曲管
部位-2	:直管部
部位-3	:水平
材質	:STPT42
口径	: 14B
公称厚さ	: 27.8 mm

----: 最小肉厚変化 ----: 寿命推定

図8 寿命推定グラフ 出力サンプル例で、肉厚測定結果から余寿命を推定したグラフである。この例は、測定最小値に同一測定個所の最大減 肉率をあてはめて、計算上必要な厚さに至る余寿命を算出した例である。

の最大値, 平均値を算出し一覧表として作成するものである。 過去の測定データは, 数百万点に及んでおり, このシステムを用いてのそれらのデータの統計的な処理により, 各影響 因子ごとの減肉率の把握が可能となっている。

## (5) 配管肉厚測定結果評価表

肉厚測定結果に基づき,余寿命算出,次回測定時期の策定 などの評価を実施し,配管仕様,減肉影響因子などを合わせ て出力させた表であり,全体の結果をまとめた表である。

肉厚測定結果に基づき,今後の点検計画,または必要に応じての改善計画を立案することが必要であるが,このシステムの種々の機能を用いることにより,容易に今後の計画立案が可能となる。

### 3.2 効果および今後の展開

配管余寿命診断システムを活用することにより, 従来に比べて以下のような効果が得られている。

- (1) 肉厚測定結果の的確,かつ迅速な処理が可能である。
- (2) 減肉状況および傾向の把握・評価が、視覚面からの理解も合わせ、容易に実施できる。
- (3) 数百万点に及ぶ測定データの各種処理が正確,かつ容易となり,他プラント,他部位などとの比較検討が種々の観点から容易に行えることから,より信頼性の高い配管の予防保全が可能となる。

今後,このシステムをよりいっそう有効に活用し,的確な配管予防保全を行うために,下記に述べる項目を実施していく予定である。

- (1) 複数回測定データをさらに採取し、実機での種々の条件下での減肉率を把握し、減肉の影響因子ごとの影響の的確な把握を行う。
- (2) 上記(1)項の結果を的確に反映した供用配管減肉管理(点検,改善計画)を行うとともに,必要に応じての設計条件へのフィードバックを行う。

## 4 結 言

原子力発電プラントの配管系の予防保全技術として,経年変化要因の一つである減肉に対し,実機配管の肉厚測定結果を基に健全性,余寿命などを評価するその考え方とシステムについて概要を述べた。

このシステムは、現場での肉厚測定から工場での評価までを一貫して処理するシステムであり、膨大な測定データの容易な処理、減肉傾向の的確な把握、余寿命の的確な算出および適切な改善方法の対処が可能であることから、実用面で良好な成果をあげており、配管系のよりいっそうの信頼性確保に寄与する見通しを得ている。

配管の経年変化の代表事象である減肉は、管内面が均一に 薄肉化するような形態ではなく、種々の因子が複雑に影響し合っての局部事象である。したがって、余寿命診断にあたり 多数のデータをどう処理するかが評価・診断手法の精度と適度な保守性を与えるキーとなりうる。今後とも増えていく測定データを、減肉現象を統計的にどう考えるのが最適か、という課題と合わせ、さらにいろいろな観点から処理し、見直し、検討・評価していくことが必要であり、これらの機能拡張を通してより信頼性の高い配管予防保全を展開し、発電プラントの安全運転に寄与する考えである。

## 参考文献

- 1) A. Minematsu: Piping Inspection Program in Japanese BWR Plant and Water Chemistry & Water Quality Control for Core Cooling System Equipment & Piping (BWR), MITI-NRC Engineering Workshop, Tokyo (May, 1988)
- 2) 例えば、M. Izumiya, et al.: Corrosion and/or Erosion in BWR Plants and Their Countermeasures, paper IAEA-SM-264/4, IAEA, Viena (1983)