

既設発電設備の寿命診断

Life Evaluation of Thermal Power Plant in Service Exposure

既設発電設備に対して、設計寿命(10万時間)を超える長寿命化、しかも高頻度起動・停止及び高負荷変化に耐える運用が課題となっている。

長寿命化のキーポイントは、正確かつ迅速な余寿命診断に基づく計画的な保守管理の推進にある。非破壊式診断法は、この目的に最も合致したものと言える。

発電設備のうちボイラについては、金属組織の形状変化を非破壊的に検出して余寿命診断する技術を開発し、実機の主要耐圧部に適用している。また、タービンについては、電気抵抗測定や硬度測定に加えて、金属組織の観察による余寿命診断技術を開発し、タービン設備の主要機器に対して余寿命診断を実施してきている。

森 修二* Shûji Mori
田村広治** Kôji Tamura
丹 敏美*** Toshimi Tan

1 緒 言

原子力発電比率の増大、電力需給関係及び発電設備の新設に対する経済メリットなどの観点から、既設発電設備は設計寿命を超えて、しかも高頻度起動・停止、負荷変化の厳しい条件で運用されるすう勢にあり、既設発電設備の長寿命化が大きな課題となっている。

長寿命化のキーポイントは、正確かつ迅速な余寿命診断とそれに基づく構造改善や部分取替などの計画的な保守管理の推進にある。

余寿命診断法は、(1)解析法、(2)破壊試験法、(3)非破壊診断法に大別される。解析法は、温度、圧力データに基づく応力解析によって、疲労、クリープ寿命消費を計算する方法で、オンラインの実機寿命監視装置^{1),2)}が実用化されている。破壊試験法は従来から行われている方法で、クリープ試験、疲労試験によって余寿命を評価するものである。非破壊診断法は、最近特に注目されているもので、金属組織や物理的性質(硬さ、電気抵抗、超音波波形、X線回折幅など)の変化量を計測して、余寿命を診断する方法³⁾で、診断が迅速で定期的なモニタリングが可能であるという長所を持っている。

日立製作所とバブcock日立株式会社はこの非破壊診断法の研究開発を強力に推進し、タービンに対しては電気抵抗・かたさ法⁴⁾及び表面微小き裂法⁵⁾を既に実用化している。ボイラに対しては、結晶粒形状の変化に着目したクリープ寿命診断法を独自に開発⁶⁾し、実機の適用によって実用性を確認している。本稿は、金属組織法を中心に上記非破壊診断法の実用化状況と既設発電設備の長寿命化例について紹介する。

2 ボイラ設備の寿命診断と長寿命化

2.1 診断対象部品と損傷劣化要因

表1に厚肉耐圧部、一般耐圧部及び非圧部での診断対象部品と損傷劣化要因の関係を示す。また、図1に具体的診断箇所を示す。

2.2 余寿命診断法の現状

余寿命診断法は、図2に示すように間接評価法と直接評価法に大別できる³⁾。

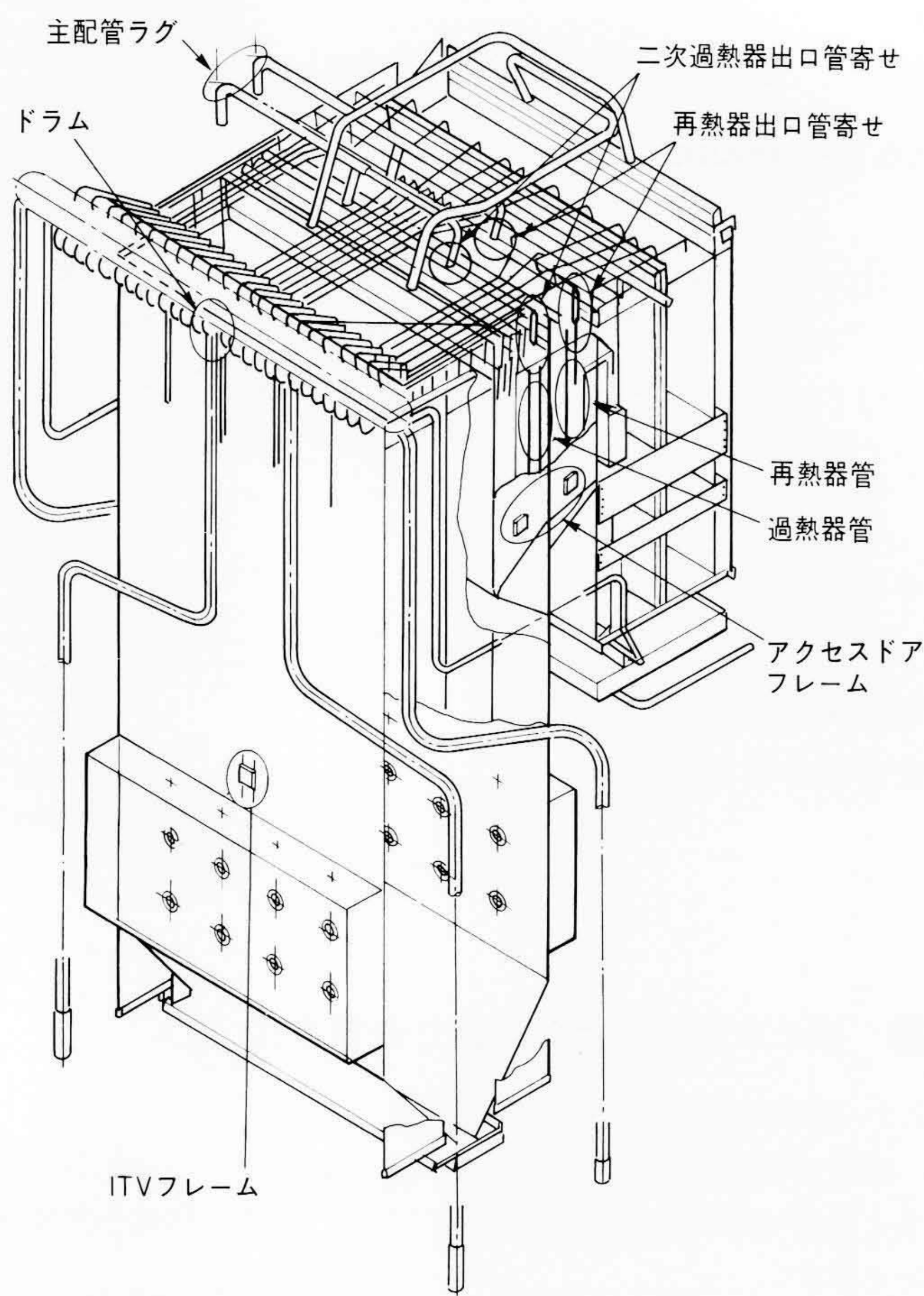
間接評価法(解析)は計算によって求めた部材の温度と応力を、材料の強度データと比較して寿命を評価するもので、既に多くの診断実績を持つ。しかし、運転履歴の正確な把握が困難な部位や、強度データが完備されていない材料に対しては精度の良い診断は難しい。

これに対して、直接評価法は実機部材を直接診断するため、

表1 ボイラ診断対象部品と損傷劣化要因 ボイラ設備の厚肉耐圧部、一般耐圧部及び非圧部での診断対象部品と損傷劣化要因を示す。

区 分	部 品	損傷劣化要因
厚肉耐圧部	管寄せ(レグ含む。)	クリープ、疲労、時効
	主配管 ドラム	クリープ、疲労、時効 疲労
一般耐圧部	過熱器、再熱器管 水壁管	クリープ、腐食 疲労
非 圧 部	ケーシング サポート部材 (トルクブラケット、ラグ) ハンガー	疲労・腐食 クリープ 腐食

* バブcock日立株式会社呉工場 ** バブcock日立株式会社呉研究所 *** 日立製作所日立工場



注：略語説明 ITV(工業用テレビジョン)

図1 ボイラ設備の寿命診断代表箇所 ボイラ設備の厚肉耐圧部、一般耐圧部及び非圧部での代表的な具体的診断箇所を示す。

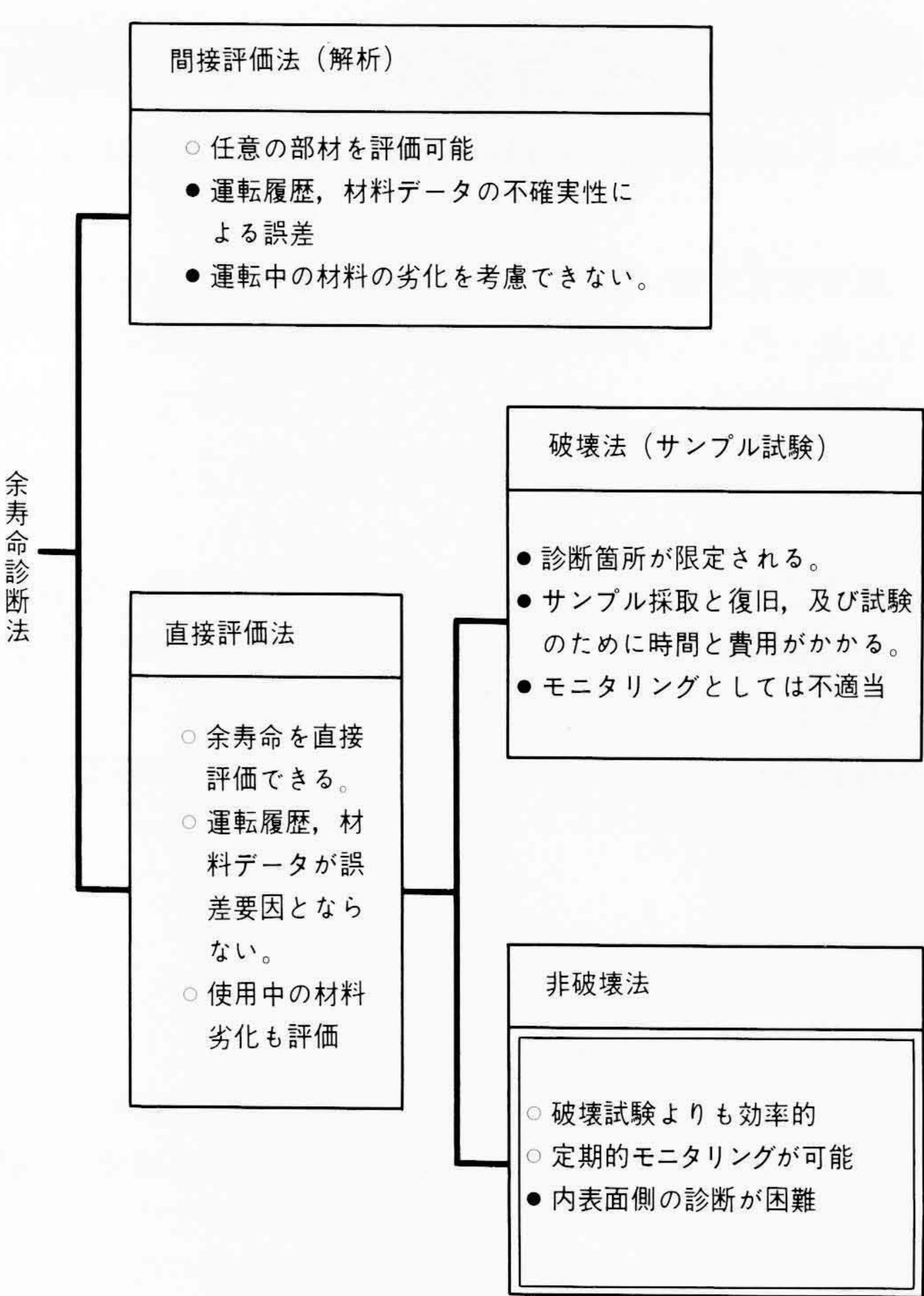
運転履歴や材料の強度データを必要としないのが特徴である。破壊法は実機部材からサンプルを採取して、クリープ、疲労などの強度試験を行うもので、チューブ材については多くの実績がある。しかし、厚肉耐圧部材での実用は困難であり、また、サンプルの採取、復旧及び試験のために多くの費用と時間を必要とする。

このため、表2に示すように、実機部材の金属組織又は硬さなどの物性値の変化で余寿命を診断する非破壊法の研究を進め、一部実機に適用している。本法はサンプル採取が不要で、破壊法に比べて非常に効率的であることから、余寿命診断法の主流になるものと考えられる。

2.3 金属組織法によるクリープ余寿命診断

2¹/₄Cr-1Mo鋼は、ボイラ耐圧部に多く使用されている耐熱鋼である。しかし、タービン用Cr-Mo-V鋼とは異なり、溶接性を考慮してC量を低くし、フェライトが生成するように熱処理されている。このため、クリープ損傷による硬さや電磁気特性の変化は小さく、またクリープキャビティも発生しにくく、余寿命診断が困難とされていた。

そこで、材料のクリープ変形が結晶粒の変形に起因することに着目し、結晶粒の変形を定量化してクリープ損傷を診断する結晶粒変形法を開発した⁶⁾。図3に、クリープ損傷率0(クリープ試験前)と0.8(破断時間の80%でクリープ試験中断)の



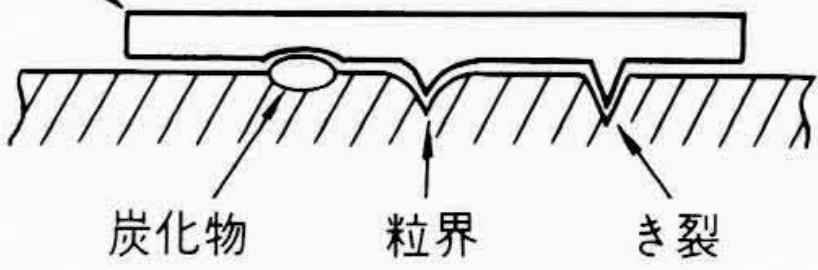
注：○は利点を、●は欠点を示す。

図2 余寿命診断法とその特徴 効率と精度の観点から、非破壊法は有力な余寿命診断法である。

表2 ボイラ材料の非破壊診断法 診断対象によって、適切な診断法を選択することが重要なポイントである。

診 断 法		ク リ ー プ	疲 労	時 効	
				強度低下	ぜい(脆)化
金属組織 (レプリカ)	キャビティ	○	—	—	—
	結晶粒変形	○	—	—	—
	微小き裂	—	○	—	—
	炭化物	—	—	○	—
	σ 相 (ステンレス鋼)	○	—	—	—
電 気 抵 抗		△	△	—	—
硬 さ		△	△	○	—
X 線 回 折		—	△	—	—
電 気 化 学		—	—	—	△
渦 電 流		△	△	—	△
バルクハウゼンノイズ		—	△	—	△
超 音 波		△	△	—	△

注：レプリカ (アセチルセルロースフィルム上に金属組織を転写) ○(実用可能) △(研究中)



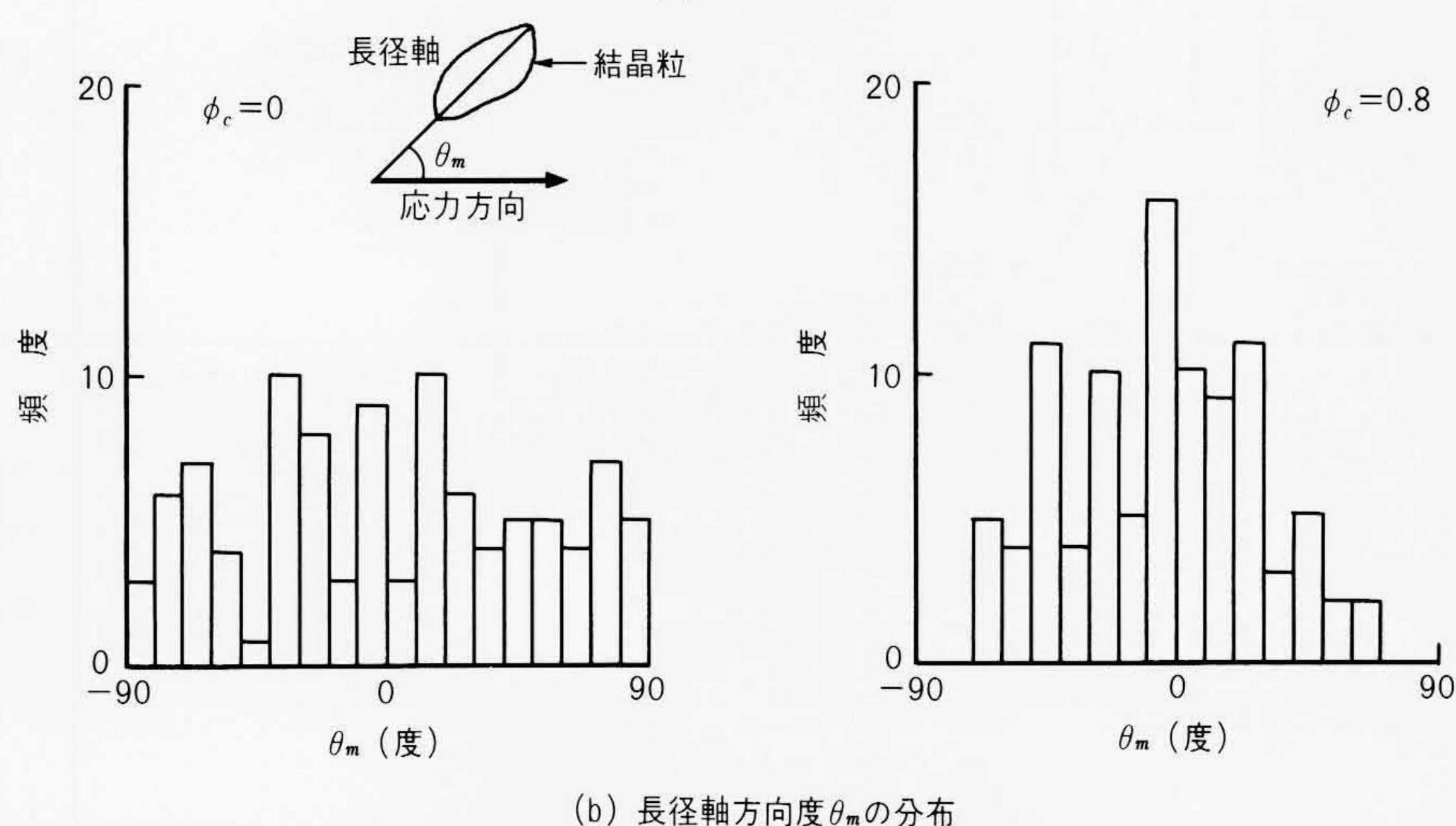
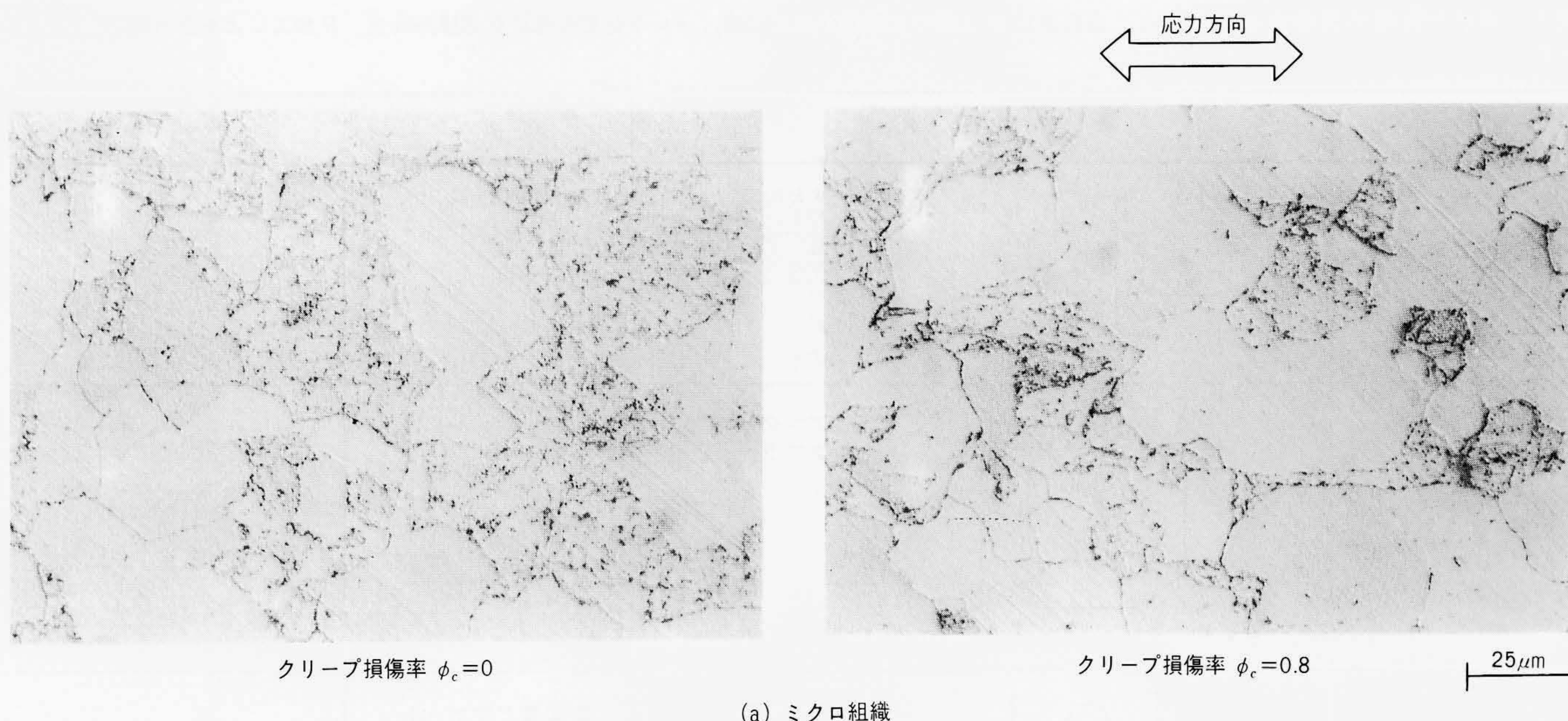


図3 クリープ損傷による2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼結晶粒の変化 クリープ損傷によって結晶粒は応力方向へ変形し、その形状データを統計的に処理することで定量化できる。

ミクロ組織、及び結晶粒長径軸の方向角 θ_m の分布を示す。ミクロ組織から、クリープ損傷材の結晶粒は応力方向に変形していること、その変形状況は結晶粒長径軸の方位角 θ_m の分布によって明確に定量化できることが分かる。すなわち、クリープ損傷率0の結晶粒には方向性はないが、クリープによって変形すると θ_m は応力方向を中心に正規分布を示す。図4に θ_m の標準偏差とクリープ損傷率の関係を示す。クリープ損傷率が大きくなると標準偏差は低下しており、本方法によって2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のクリープ損傷率を診断できることが明らかである。

なお、ステンレス鋼や溶接部に対しては、クリープキャビティ法によってクリープ損傷率を診断できる。

2.4 ボイラの長寿命化実施例

表3は、解析及び非破壊的方法(主に金属組織法)による診断結果に基づいて実施したボイラの代表的な長寿命化例である。隅肉部アール加工、熱伸び差拘束の解除、フレキシブル化などによる応力低減をねらいとした構造を採用している。

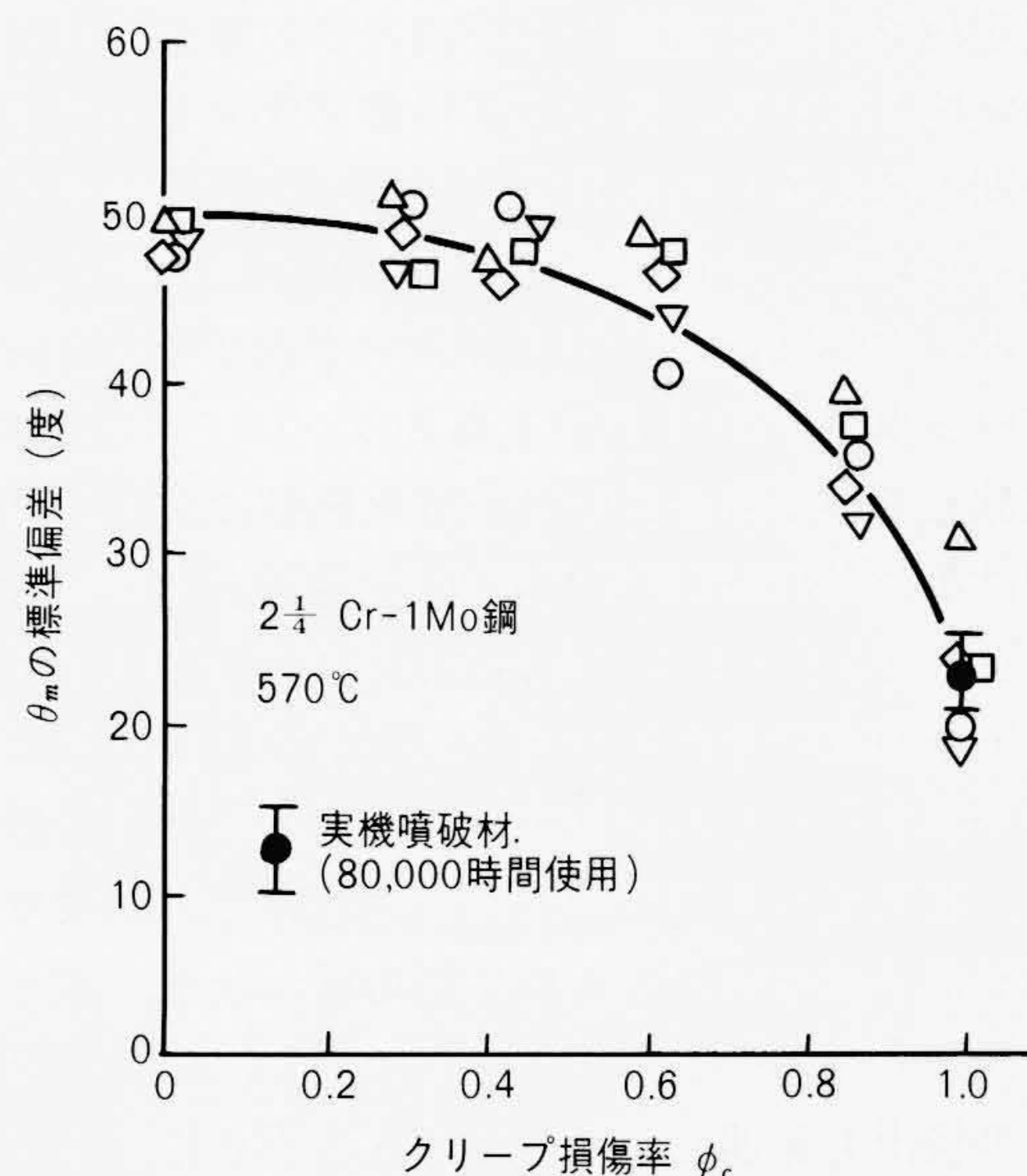
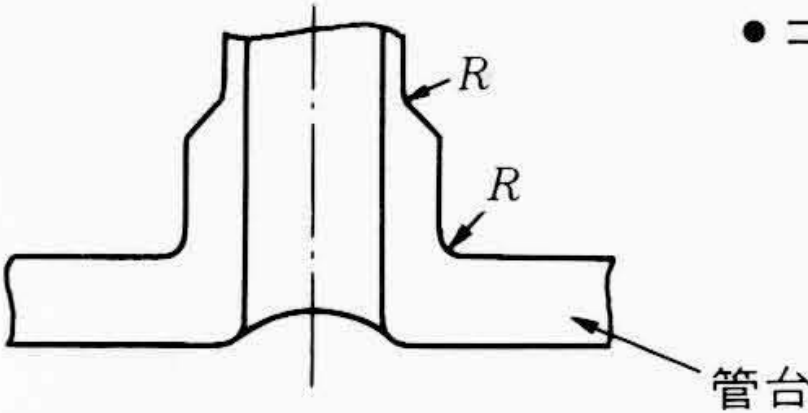
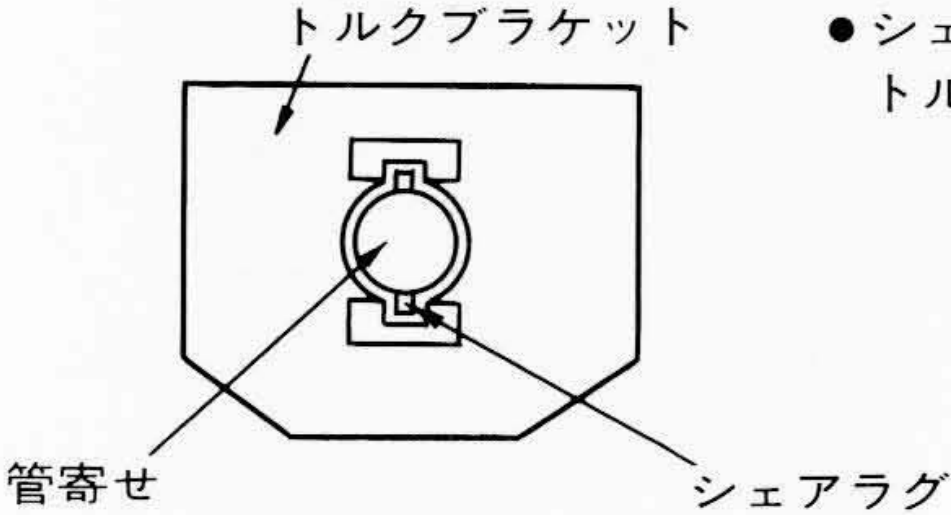
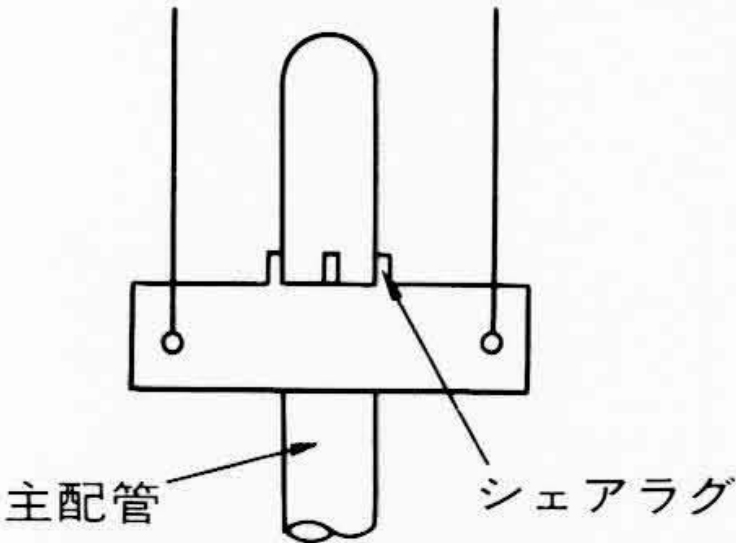
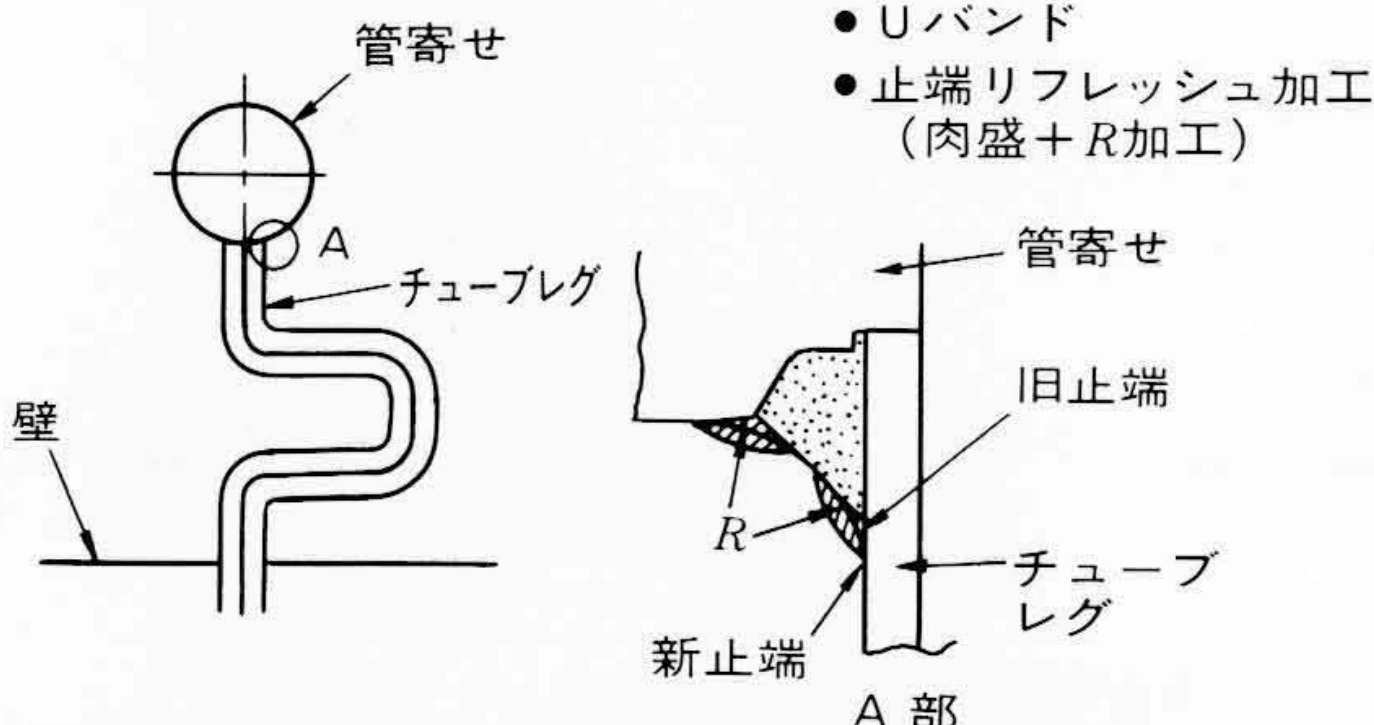


図4 クリープ損傷率と θ_m の標準偏差の関係 結晶粒の変形状況を表す θ_m の標準偏差によって、クリープ損傷率を診断できる。

表3 ボイラ設備の長寿命化実施例 余寿命診断に基づく熱伸び拘束解除、フレキシビリ化及び溶接部肉盛、R加工による応力緩和構造例を示す。

部 品	長 寿 命 化 構 造	着 眼 点	余 寿 命 診 断
管 寄 せ 管 台	 ● コーナR加工	応力集中低減	● 金属組織検査(レプリカ) ● 硬度測定 ● 解 析
トルクブラケット	 ● シェアラグ形トルクブラケット	管寄せとトルクブラケットの熱伸び拘束解除	● 解 析
主 配 管 サ ポ ート	 ● シェアラグ形サポート	主配管とサポートラグ熱伸び拘束解除	● 解 析
壁貫通部 チューブレグ	 ● Uバンド ● 止端リフレッシュ加工(肉盛+R加工)	フレキシビリティUP 既存損傷消去	● 金属組織検査(レプリカ) ● 硬度測定 ● 解 析

3 タービン設備の寿命診断と長寿命化

3.1 タービン主要機器の寿命診断状況

火力発電用タービン設備の主要機器での寿命診断は、昭和59年から実施している。寿命診断対象プラントは、運転時間が10万時間を超えるものを目安としているが、経年的な傾向を把握するために、それ以下のプラントや製作時のものも実施している。主要機器は、(1) 高圧ロータ及び中圧ロータ、(2) 高圧及び中圧車室、(3) 主要弁である。

現在実施している寿命診断の内容を図5に示す。寿命診断は非破壊計測(電気抵抗測定や硬度測定)による診断と、解析による診断を行うとともに、過去の定期検査記録も合わせて、総合的に実施時点の寿命を判定し、将来の運用計画に基づいて余寿命予測を行うものが基本である。実機の寿命診断に当たっては、電気抵抗測定や硬度測定に加えて、ミクロ組織検査、走査形電子顕微鏡による炭化物の析出状況、ボイドの発生状況の観察も合わせて行っている。更に、レプリカ法による疲労損傷検出も見通しがついている。図6に、高中圧ロータの測定例を示す。これらの寿命診断によって、主要機器の計画的寿命管理が可能となった。

3.2 レプリカ法による疲労損傷検出

疲労損傷(クリープ疲労も含む。)を受けた場合には、寿命の初期に微小き裂が発生し、これらの成長が部材の寿命を支配することが実験によって確認された。微小き裂の観察は、レプリカ法によって検出できる。図7に、表面微視き裂長さと疲労寿命の関係を示す。同図はCr-Mo-V 鋼のデータであり、き裂長さと疲労寿命は、直線的な相関性を示している。実機で測定する場合には、極値統計手法を用いることによって、対象面積中のサンプリングから最大き裂長さを求め、同図から疲労寿命を求める。一方、レプリカ法によって、ボイドの数又は炭化物の数とクリープ損傷との関係について鋭意研究を進めている。レプリカ法によれば、損傷状態が可視できることから、今後、寿命診断法として注目されてくると思われる。

3.3 タービン設備の長寿命化

タービン主要機器の取替更新や改善、改造などは、タービン設備の長寿命化、ひいてはプラント全体の長寿命化と評価できる。更に、表4に示すように、予防保全技術の推進によって、タービン設備の長寿命化に積極的に取り組んでいる。

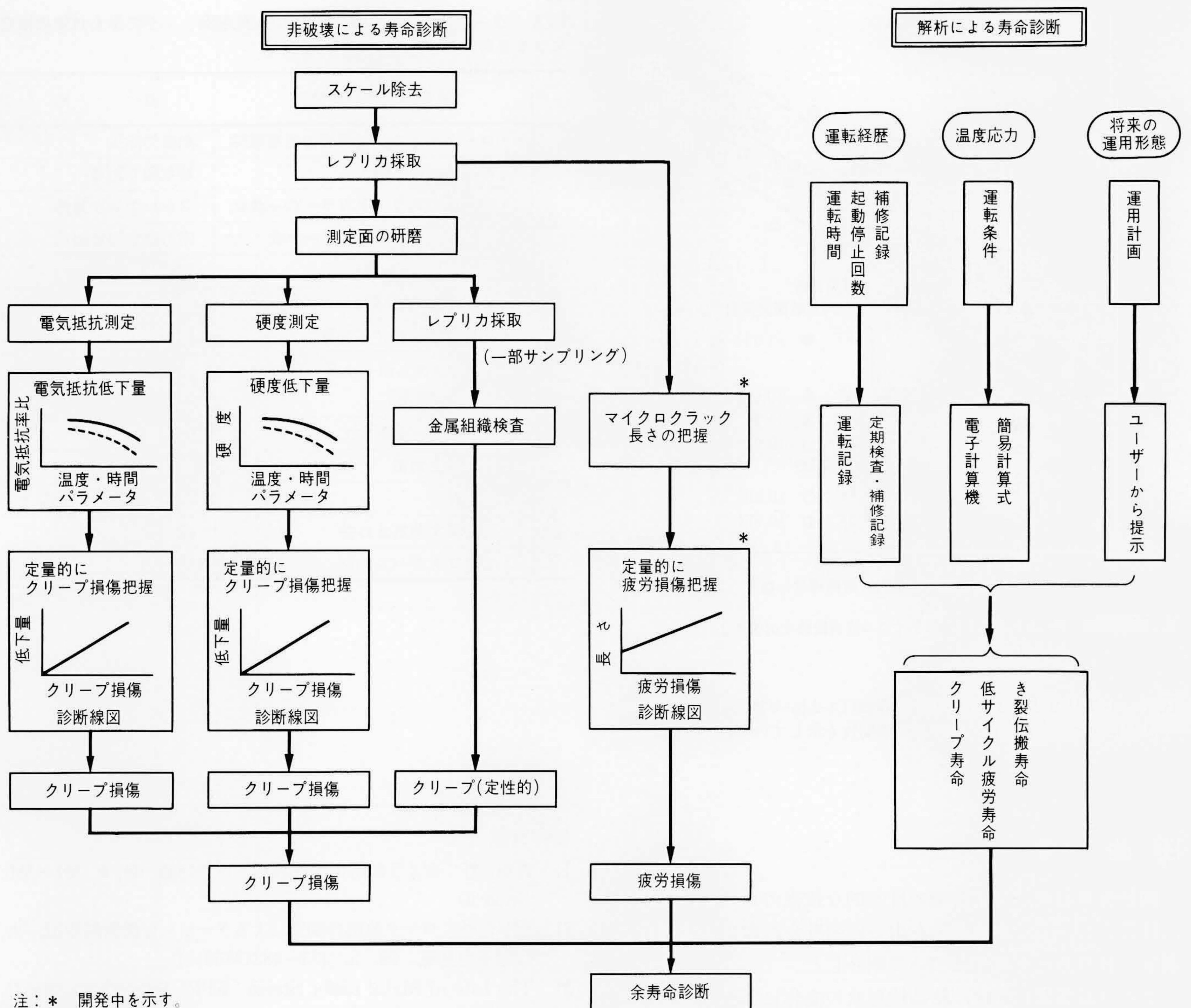
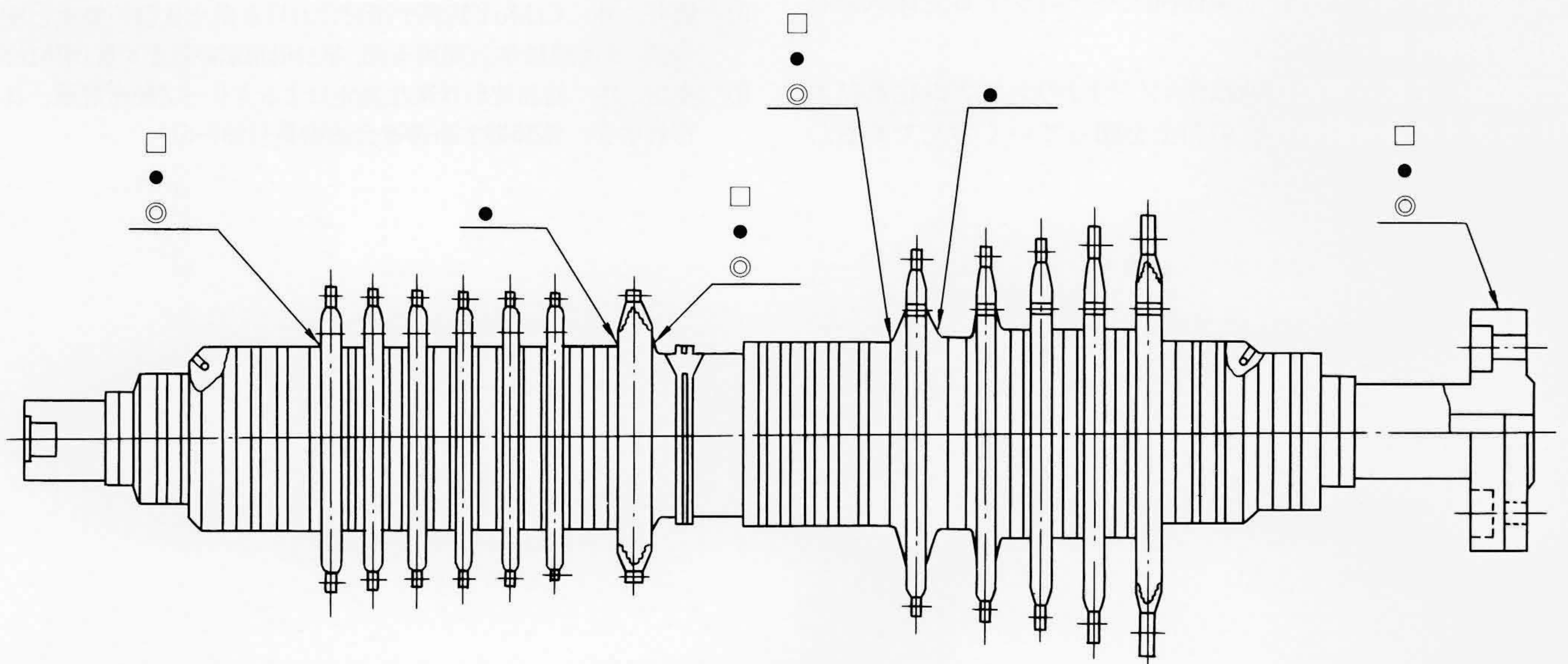
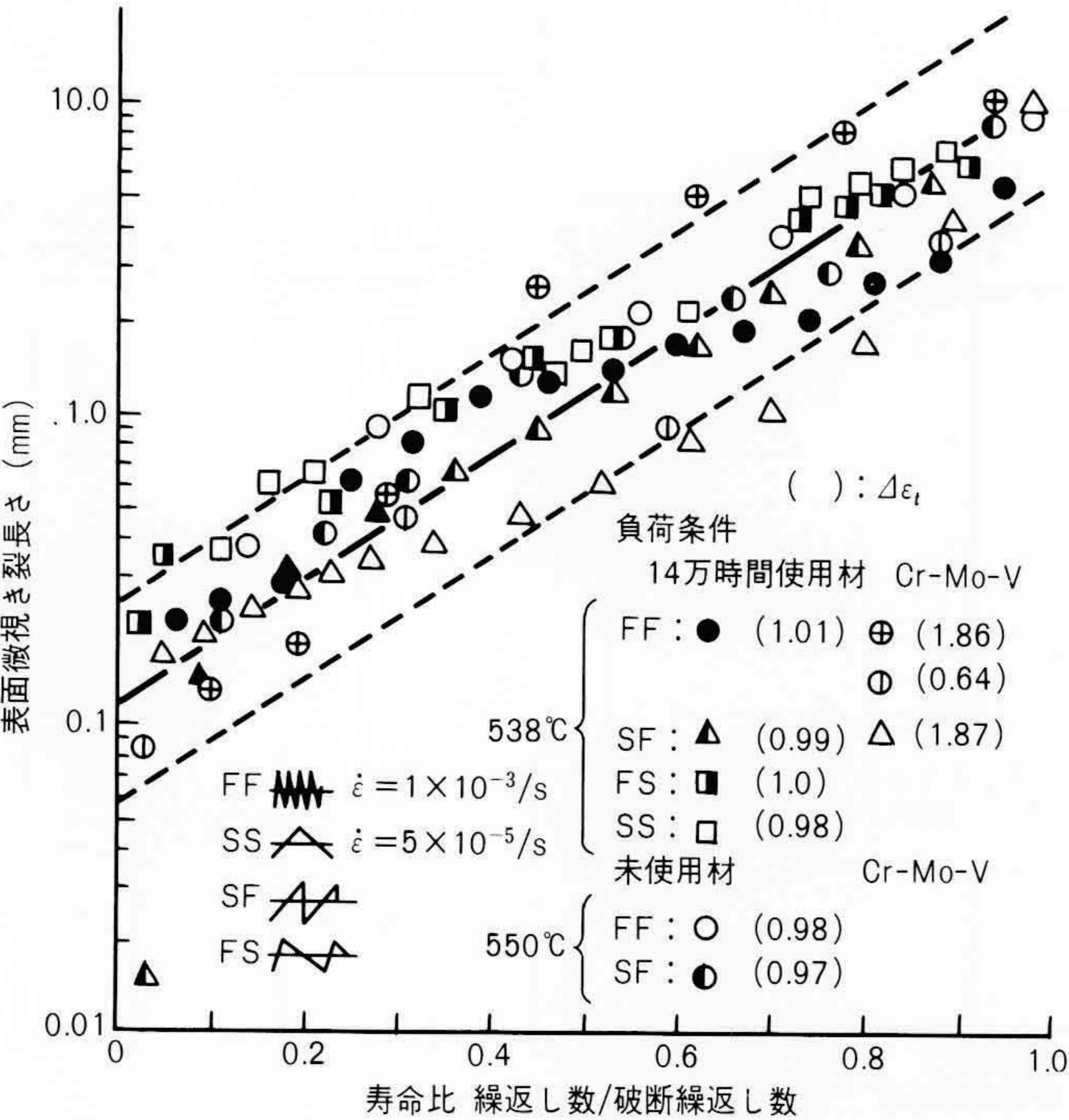


図5 寿命診断フローチャート 非破壊による寿命診断と解析による寿命診断によって、総合的に余寿命を評価する。



注：記号説明 □ (電気抵抗測定), ● (硬度測定), ◎ (金属組織検査)

図6 高中圧ロータの非破壊による寿命診断実施例 電気抵抗測定、硬度測定及び金属組織検査によって、非破壊による寿命を診断する。



注：略語説明 FF, SS, SF, FS (低サイクル疲労試験での波形)
ε̇ (ひずみ速度)
Δε_t (全ひずみ変動)

図7 レプリカ法による疲労損傷評価(Cr-Mo-V 鋼) 表面の微小き裂長さと疲労寿命は、直線的な相関性を示している。

4 結 言

既設発電設備の保守管理の計画的な推進のために、最近特に注目されている非破壊法を中心に余寿命診断法の実用化の現状と長寿命化実施例について紹介した。

ボイラ設備関係では、結晶粒形状の変化に基づくクリープ損傷診断法の開発、タービン設備関係では、表面微小き裂長さの計測による疲労損傷診断法の実用化を行い、いずれも実用への見通しが得られ、日立製作所・バブコック日立株式会社独自の技術を確認できた。

今後は、これら寿命診断技術(ソフト)のシステム化及びよりいっそうの寿命診断精度の向上を図っていく考えである。

表4 タービン設備の長寿命化の一実施例 予防保全技術の推進による長寿命化の一実施例を示す。

	長寿命化の一実施例	目 的
本 体 関 係	・ロータディスク付根部の表層削除	熱疲労除去
	・ロータの偏心加工	経年曲り対策
	・焼ばめのスラストカラーの一体化	フレットング対策
	・焼ばめの低圧ロータの一体化	応力腐食割れ対策
	・埋込式動翼テノン	浸食対策
	・新23in, 26in長翼	耐力向上
	・クロムパックノズル翼	浸食対策
	・180°形ノズルボックス (旧形：90°形)	信頼性向上
	・車室のコーナ部加工	応力集中緩和
	・効率向上対策	高効率化
弁 関 係	・鍛造弁	耐力向上, 信頼性向上
	・多弁形主蒸気止め弁	浸食対策
	・2シフトガバニング	ノズル翼浸食対策

参考文献

1) 宮垣, 外: ボイラ熱応力監視装置, 日立評論, **65**, 6, 391~396 (昭58-6)

2) 天日, 外: ロータ熱応力制御によるタービン自動制御装置, 火力原子力発電, **29**, 5, 473~482 (昭53-3)

3) The Life of Metal under Stress: EPRI Journal pp.24~31 (June 1984)

4) 菅野, 外: 火力発電プラント予防保全の新技术, 日立評論, **67**, 2, 125~130 (昭60-2)

5) 桜井, 外: CrMoV 鋼平滑材における微小き裂の発生と成長挙動, 日本機械学会関西支部, 第246回講演会論文集 (昭61-11)

6) 小山, 外: 結晶粒形状変化測定によるクリープ寿命評価, 日本材料学会, 第36期学術講演会前刷集 (1987-5)