

© 1987 ISIJ

高温構造材料の余寿命予測技術開発



新谷 紀雄*

Research and Development of Residual Life Prediction Technique for High Temperature Structural Materials

Norio SHINYA

1. 材料の余寿命予測が求められる背景

最近、ニューヨークのブルックリン橋で撮影中の日本人カメラマンが切れたケーブルに直撃されて死亡する事件が報じられた。事故原因は、完成後百年近くを経た橋が腐食などで傷みがひどいにもかかわらず、そのまま供用されていたためであった。このような構造物の老朽化に対する対策の遅れが招く問題、穴だらけの高速道路、危険が一杯の橋や鉄道等の米国の荒廃した現状を 80 年に発刊された「荒廃するアメリカ (America in Ruins)」¹⁾ はあまねく示している。経済審議会報告「2000 年の日本」(昭和 60 年 12 月)²⁾ においても、道路等の公共構造物等の充実に伴い、その更新が極めて重要な問題になると指摘している。米国におけるようなパッチワークを避けるため、転ばぬ先の杖として、先手を打った寿命管理技術や寿命延伸化技術の開発は早急に着手すべき、時代が要請する重要研究課題である。

産業プラントに対象を絞ると、事態は一層深刻である。1970 年代の石油ショックを契機として、経済活動は低速安定成長期に入り、設備の新設ニーズは減り、現用設備をできるだけ長く使うことが求められるようになった。その結果、特に、火力発電プラント、石油化学プラント等の高温機器においては、老朽化の問題は切迫しており、企業活動を左右し、人命にも関係するクリティカルな問題となり、緊急な対応が求められている。火力発電プラントを例にとると、運転年数が 10 年を超えるものは全体の 70% を超え、15 年を超えるものは 50% にも達している³⁾。

高温機器においては、使用材料のクリープ、疲れ、酸化・腐食等の損傷は免れなく、しかも熱効率の向上のため、高温強度や耐食性の材料性能の限界近くで使用されている。材料損傷は運転年数に比例して確実に累積され

ており、余寿命予測の必要性和信頼性に対する要求も比例して強くなっている。

2. 高温材料の余寿命予測技術開発の現状

高温材料の余寿命予測が問題となつている代表的なプラントとして、火力発電プラントと石油化学プラントとをあげることができるが、問題点が比較的絞られている火力発電プラントを例として紹介する。火力発電プラントにおいて、高温材料の余寿命が特に問題となる機器はボイラーとタービンである。科学技術広報財団主催の訪米調査団の報告書⁴⁾ によると、1986 年 1 月、1985 年 6 月と連続して蒸気管の破裂による人身事故を起こしていることもあり、ボイラ部材の損傷・劣化把握による寿命管理と寿命延伸化には電力各社とも力を入れているが、技術的にはまだ幼稚で、着手した段階といえる。それに対し、タービンに関しては、1974 年 6 月、TVA Gallatin 発電所で起こしたタービンロータの破壊事故以来、各研究機関の協力の下に総合的な研究が実施され、蒸気タービンの破壊リスクを評価しうる解析システム⁵⁾ が開発されている。また、英国においては CEGB が中心となり、オランダではオランダ電力供給会社と KEMA が共同し、イタリアでは ENEL が中心となり、それぞれ老朽化した火力発電プラントの寿命評価技術開発に取り組んでいる。一方、我が国においても、米国における事故例あるいは、米国における事故解析に参加して得た知見⁶⁾⁷⁾ 等を踏まえ、電力会社や重電機メーカーにより取り組まれている。

このように、老朽化高温プラント対策は、高温材料の性能限界近くで使用する超臨界圧火力発電プラント等を比較的早期に導入した先進国共通の課題であるが、米国におけるタービンロータの解析システム開発などの例を除くと、老朽化プラントを抱えている機関それぞれの個

昭和 61 年 10 月 6 日受付 (Received Oct. 6, 1986) (依頼解説)

* 金属材料技術研究所材料強さ研究部第一研究室室長 工博 (First Laboratory, Material Strength Division, National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

Key words: high temperature; structural material; remaining life; prediction; reliability; damage analysis; accumulation; mechanical property; creep; degradation.

表 1 科学技術振興調整費研究「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」(第 I 期研究)

研 究 項 目	研 究 内 容
(1) 構造用金属材料の損傷・破壊機構の解明, 損傷則の開発及び寿命・余寿命予測法の開発 ① 高温環境下における損傷・破壊機構の解明, 損傷則の開発及び寿命・余寿命予測法の開発 ② 腐食環境下における損傷・破壊機構の解明, 損傷則の開発及び寿命・余寿命予測法の開発 (2) 材質劣化, 損傷, 欠陥の計測技術の開発 ① 材料の微視的損傷の計測技術の開発 ② 材料のき裂の計測技術の開発 ③ 寿命・余寿命予測のための計測評価手法の確立に関する調査 (3) 寿命・余寿命予測のためのシステムに関する技術開発 ① 陸上公共構造物用材料の損傷要因解析評価システムの開発 ② 事故事例に基づく海上構造用材料の信頼性評価手法の確立 ③ 産業プラント用材料の寿命・余寿命予測のためのソフトウェアの開発	クリープ, 高温脆化, クリープ疲労等 応力腐食割れ, 腐食疲労等 超音波技術, 磁気ひずみ技術, AE 技術等 渦電流技術, 超音波技術等 材質劣化・損傷の計測評価技術の調査 損傷要因解析システム, 健全度評価システム 損傷事例, 事故事例の分析 要素技術の調査研究

表 2 第 I 期研究成果の概要⁸⁾ (高温材料に関する研究)

項目	課題及び研究実施機関	成 果 の 概 要
(1) 構造用金属材料の損傷・破壊機構の解明, 損傷則の開発及び寿命・余寿命予測法 (1)-①-i)	クリープ損傷・破壊寿命の定量的評価法の開発 (金属材料技術研究所)	10^{-5} オーダーの密度変化を測定可能な高精度密度測定装置の開発などにより, クリープ破壊の直接的な原因となる空洞等のクリープ損傷を定量的に測定し, 損傷則を導出した。また, クリープ破壊機構を明らかにし, 破壊寿命と関係づけたクリープ損傷評価法を導出した。
(1)-①-ii)	クリープ疲労損傷の定量的評価法の開発 (ア) 金属学的検討 (金属材料技術研究所) (イ) 力学的検討 (立命館大学)	クリープ疲労相互作用下の寿命を支配する損傷形態を明らかにした。それら損傷の時系列的変化を調べ, 損傷形態と破壊条件との関係を定量化した。それらを基に, 微視的クリープ損傷形態及びクリープ破断特性を考慮したクリープ疲労寿命評価法を開発した。また, 温度サイクル損傷試験装置を開発し, 温度変動下の損傷に関する試験技術確立した。 主応力比 $\lambda = \sigma_2 / \sigma_1$ (主ひずみ比 $\phi = \epsilon_2 / \epsilon_1$) について $-1 \leq \lambda \leq 1$ ($-1 \leq \phi \leq 1$) の範囲のクリープ疲労重畳下的高温低サイクル疲労試験装置を試作し, き裂開口変位 (COD) 基準による新しい相当応力 σ^* (相当ひずみ ϵ^*) がこれら二軸応力条件下へも拡張できることを明らかにした。また, 単軸応力下での余寿命線図を多軸応力下へ拡張適用する手法を検討した。 高精度のひずみ制御ができ, 経済的でメンテナンスフリーな構造の長時間クリープ疲労試験装置を試作し, その性能及び長時間安定性を検討した。その結果, 本装置で得られたデータは信頼性のあることを確認した。
(1)-①-iii)	クリープ疲労き裂伝播特性の解明 実験的検討 (電力中央研究所) 理論的検討 (京都大学)	Cr-Mo-V 鍛鋼のクリープ疲労き裂伝播特性が繰返し数依存型と時間依存型に大別され, 非線形破壊力学パラメータと良好な関係があることを明らかにした。また, き裂伝播則から, 熱疲労を含む高温低サイクル疲労の破断寿命則を導出・提案し, その有効性を実証した。 金属材料のクリープ疲労条件下における巨視的き裂伝播について, J 積分を中心とした非線形破壊力学的法則を見出すとともに, 平滑試験片による表面き裂の観測から微視き裂の伝播挙動を明らかにし, 破壊力学的法則の適用範囲を確認した。
(1)-①-iv)	組織変化及び脆化機構の解明 (東京工業大学)	タービンロータ用 Cr-Mo-V 鋼では, クリープにより粒界に顕著な回復組織が形成され, この回復領域の幅をパラメータとして用いることによりクリープ抵抗の低下の程度を予測できることを明らかにした。304 ステンレス鋼についてもクリープ中の析出物変化とクリープ抵抗低下等の材料劣化・脆化との関係を明らかにした。
(1)-①-v)	長時間使用材の損傷及び高温強度特性評価手法の確立 (ア) 損傷評価 (住友金属工業) (イ) 強度特性評価 (三菱重工業)	火力発電プラントの実機ボイラにおいて長時間使用された代表的 4 鋼種 (STBA 24, 26; SUS 304, 321) について各種経年変化と使用環境との関連を調査し, 鋼種ごとに組織と機械的性質の関連性を明らかにするとともに, 損傷劣化の定量化を行った。また, 各鋼種ごとの損傷形態と組織変化をクリープ曲線と対応づけ, 寿命評価試案を作成した。 火力発電プラントの実機ボイラにおいて長時間使用された代表的 4 鋼種 (STBA 24, 26; SUS 304, 321) についてクリープ/クリープ破断試験及びクリープ損傷試験を実施し, 高温耐圧部材の材料強度特性の実態を明らかにするとともに, 構造材料の強度特性評価法及び寿命・余寿命予測技術確立のための基礎データを得た。
(2) 材質劣化, 損傷, 欠陥の計測技術の開発 (2)-①-i)	AE 波形解析による劣化, 損傷の評価手法の開発 (東京大学)	AE 原波形解析手法を低合金鋼の焼もどし脆化材に適用し, 微視割れの割れモード及び割れの大きさを評価し, 劣化損傷材に対する AE 原波形解析システムの有効性を明らかにした。
(2)-①-ii)	超音波技術の開発 (石川島播磨重工業)	空洞等のクリープ損傷は超音波信号のノイズ解析により検出できること, さらに定量化も可能であることを明らかにした。また, 超音波の音速や減衰率の変化とクリープ損傷との関係も求めた。
(2)-③	寿命・余寿命予測のための計測評価手法の確立に関する調査 (日本鉄鋼協会)	クリープ損傷に関しては現状では有効な手法は見当たらないが, X線回折法, 硬さ測定法などの可能性が示された。焼もどし脆化に関しては, 超音波の音速減衰の精密計測及び電磁気的手法の有効性が示された。疲労損傷に関しては超音波, 電磁超音波, また磁気特性計測, AE 手法が有効となる。腐食計測には磁束法, 超音波の精密計測 (音波減衰も含めて) 及び AE 法の適用が将来有望と結論された。最後に寿命・余寿命評価には破壊力学試験と比較して, 非破壊計測技術の遅れが問題になるという結論がなされている。
(3) 寿命・余寿命予測のためのシステムに関する技術開発 (3)-③	産業プラント用材料の寿命・余寿命予測のためのソフトウェアの開発 (日本機械学会)	発電及び石油化学プラント, さらに疲労やクリープ等に関する寿命予測技術の現状と問題点を解明し, マイコン用対話式欠陥評価・寿命予測プログラムを作成した。また, 石油タンクの腐食を取り上げて, 保守管理・寿命評価に関する意志決定を支援するため, 対話型エキスパートシステムを開発した。

別的な取り組みで、しかも対症療法的アプローチを脱していないのが現状であろう。余寿命評価は、当面の緊急を要する課題であるが、将来ますます重要となる技術であることを考えると、余寿命評価の出発点ともいえる材料損傷の実体の解明やその評価法の確立といった基礎的・基盤的研究も長期的な観点から並行して行う必要があろう。

3. 科学技術振興調整費研究における高温材料の信頼性評価技術に関する研究

先端的科学技術分野等における重要な研究課題に関し、産・学・官の各機関に散在している研究能力を結集し、総合的な研究を行うための制度として、科学技術庁に科学技術振興調整費が創設されている。

プラントや公共構造物の大型化、高性能化に伴う使用材料の寿命評価の重要性や上記のプラント等の老朽化に伴う余寿命評価法開発の緊急性の増大とこれら技術開発には総合的な研究が必要であることから、科学技術振興調整費研究として「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」が設定され、昭和 57 年度におけるフィージビリティスタディを経て、昭和 58 年度より研究実施に入っている。

同研究は表 1 に示すように、第 I 期研究（昭和 58～60 年度）として、基盤的研究を行った。研究は大きく 3 種の分野から構成されている。すなわち、(1) 構造用金属材料の損傷・破壊機構の解明、(2) 材質劣化、損傷、欠陥の計測技術の開発、(3) 寿命・余寿命予測のためのシステムに関する技術開発である。第 II 期研究では、第 I 期研究での研究成果を発展させ、(4) 信頼性評価技術開発と実証試験に着手したところである。この「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」の中で、高温材料に関する研究の第 I 期における概要を表 2⁸⁾ に示す。第 I 期研究においては、特定の機器を対象としたものでなく、高温材料の寿命評価のための基礎・基盤研究に重点を置いたアプローチを行ったが、第 II 期研究では火力発電プラントをケーススタディとして取り上げることを念頭に入れ、対象材料としてボイラ管の 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼、9Cr-1Mo 鋼、304 ステンレス鋼、316 ステンレス鋼及び 321 ステンレス鋼を、またタービン材料の Cr-Mo-V 鋼及び 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼を取り上げた。本研究の成果は本誌「鉄と鋼」にも既に数多く掲載されている^{9)~18)}。大谷ら⁹⁾は展望記事として「クリープ疲労き裂伝ば特性にもとづく高温構造材料の寿命・余寿命推定の基本的概念」をまた岸ら¹⁰⁾は本研究の一環として行った「各種損傷因子の計測技術に関する調査」の結果を本誌に報告している。論文として、松尾ら^{11)~13)}、岸ら¹⁴⁾、山口ら¹⁵⁾、著者ら^{16)~18)}の報告もある。

第 II 期研究における高温材料研究では、第 I 期での基

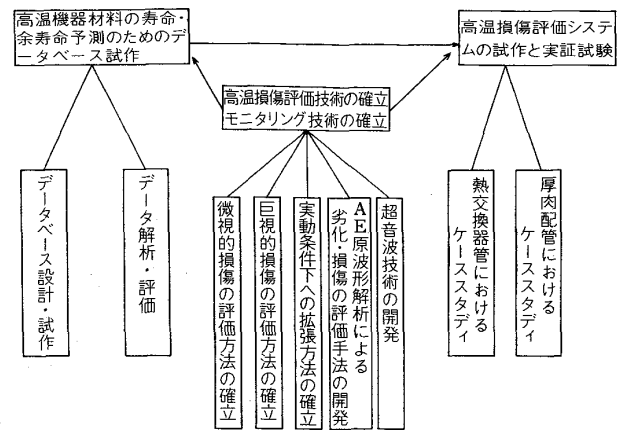


図1 第II期研究の概要（高温材料に関する研究）

盤的研究を発展させ、高温材料の余寿命予測に必要な機能の原形を構築することを目的としており、必要な機能として、図1に示すように、余寿命予測システム、データベース及び評価・モニタリング技術を考えている。

4. クリープ損傷評価と余寿命予測

高温使用中に材料に生じる損傷として、クリープ、熱疲労、高温腐食、浸炭・脱炭、 σ 相析出など実に多様である。このような損傷は材料性能を劣化させたり、微小なクラック生成から巨視的クラックへの成長などにより破壊へ導く。損傷評価に際して、困難な問題は、例えば、高温腐食は用いている燃料のわずかな違い等により大きく異なることがあり、またクリープにおけるように、同一種類の材料でも熱処理や不純物量のちよつとした違いが大きな強度差を生じる原因となるなど、設定条件や用いる材料の通常のコントロールあるいは指定可能な範囲を超えたところでは思いがけなく著しい損傷を生じることがあることであろう。そのため、ばらつき幅を求めて一律に処理する信頼性工学的アプローチに加え、材料ごと、コンポーネントごとに材料損傷を計測し、それを寿命との関連のもとに評価することが必要であろう。また、これら損傷は独立の事象として働くことも多いが、相互に影響し合つて、加速的に損傷が進むことも多く、余寿命と関連づけた損傷評価を一層難しくしている。長期的な研究を要するゆえである。

図2¹⁹⁾は前記「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」において計画している熱交換器管の余寿命予測システムの概念図である。このようなシステムがうまく機能するためには、多様な損傷を精密に測定し、寿命との関連の下に評価し、そして余寿命を推定する必要がある。ここでは、寿命を決めるいろいろな因子のうち、致命的な事故につながるクリープ破壊を対象を絞り、余寿命予測の考え方、方法について紹介する。

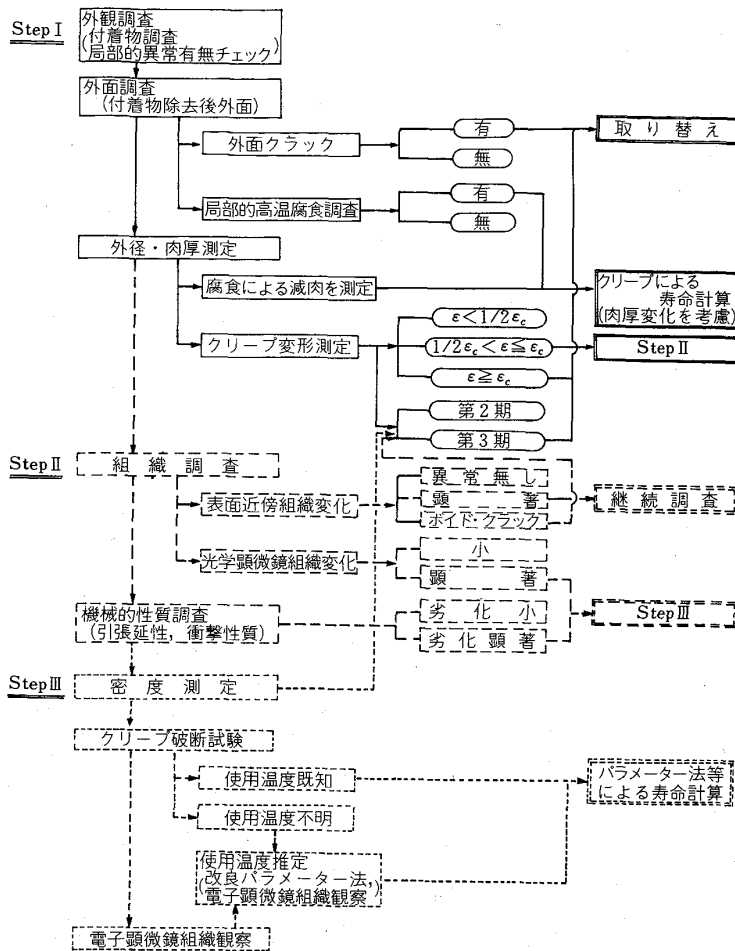


図2 熱交換器管の余寿命推定の概念図¹⁹⁾

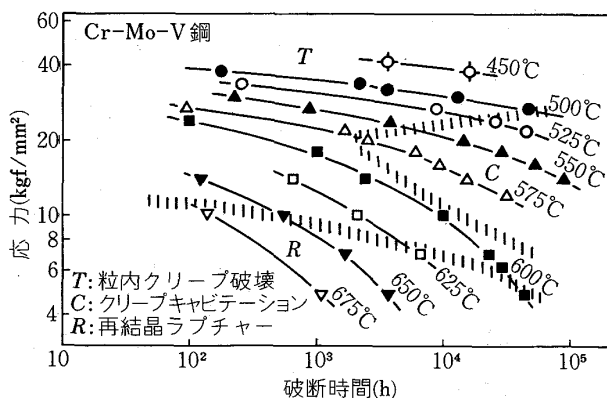


図3 Cr-Mo-V 鋼のクリープ破壊機構領域図

4.1 クリープ破壊機構領域図

クリープ余寿命を予測する上で、また対象とすべき損傷を明らかとするため、まず、想定される破壊機構を明確にすることが必要である。クリープ破壊機構は材料、温度、応力条件により異なるため、どのような条件下ではどのような破壊機構が支配的に働くかを示すのがクリープ破壊機構領域図である。図3はタービンロータ用Cr-Mo-V 鋼 (0.3% C-1% Cr-1% Mo-0.3% V) につい

てのクリープ破壊機構領域図で、約 10 万 h (11 年半) までのクリープ破断データを基に作成している。Cr-Mo-V 鋼においては、クリープキャビティの生成による粒界破壊の促進と微細組織変化に伴うクリープ速度の増加による粒内破壊の促進とが同時に競合的に働いているため、複雑な領域図となっている。Cr-Mo-V 鋼が通常使用される温度域は 500~550°C であるので、実用上問題となる破壊機構はクリープキャビティによる粒界破壊であることが図3より示されている。

4.2 Cr-Mo-V 鋼のクリープ損傷評価

クリープ中に生じる材質劣化につながる損傷として、組織変化、微量不純物の粒界偏析によるぜい化等があるが、長時間の低破断延性の破壊に関する余寿命予測には、まず、直接破壊に導く損傷であるクリープキャビティや微小クラックを測定・評価する必要がある。このようなキャビティやクラックの生成量を精度よくかつ簡便に測定する方法として密度変化による方法を採用し、 10^{-5} オーダーの密度変化測定が可能な高精度密度測定装置を開発²⁰⁾した。このように精度を高めることにより、クリープキャビティ生成量を初期段階から定量的に把握することが可能となった。

写真1にCr-Mo-V 鋼のクリープ中に生じた粒界キャ

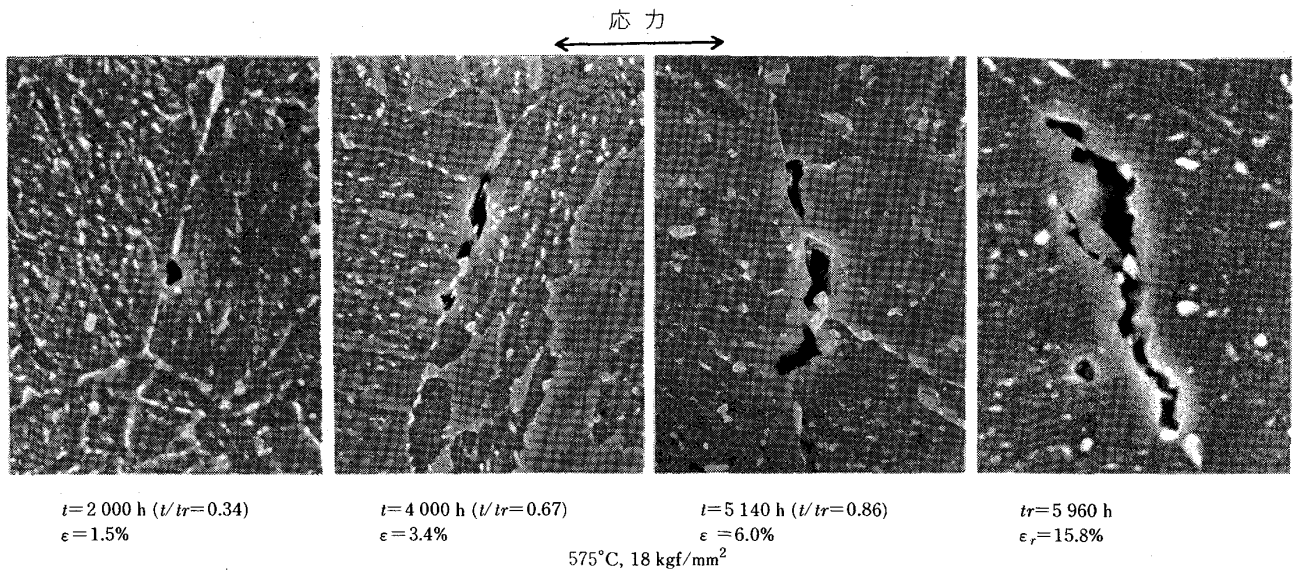


写真1 Cr-Mo-V 鋼のクリープ中に生じた粒界キャビティ

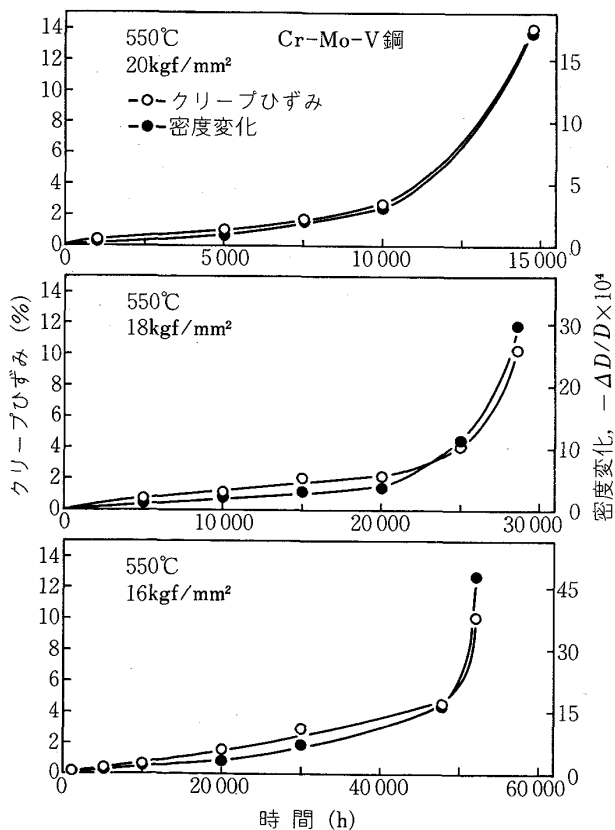


図4 Cr-Mo-V 鋼のクリープ曲線とクリープ中の密度変化

ビティの発生, 成長を示す。粒界キャビティは寿命の1割以下で既に生じており, 試験時間とともにしだいに生成数及び大きさとも増大し, 破断直前ではキャビティが連結して微細な粒界クラックを形成している。このよう

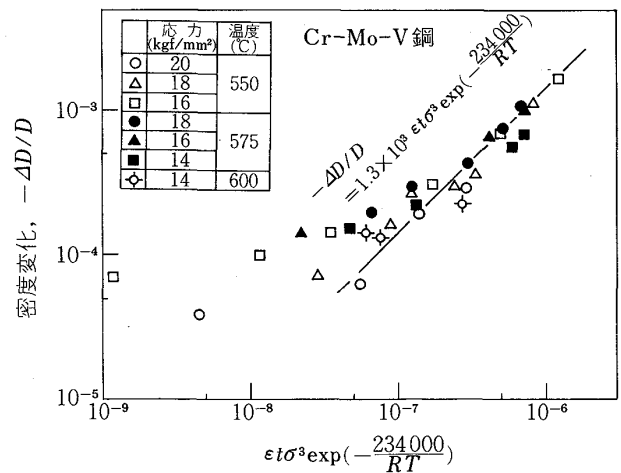


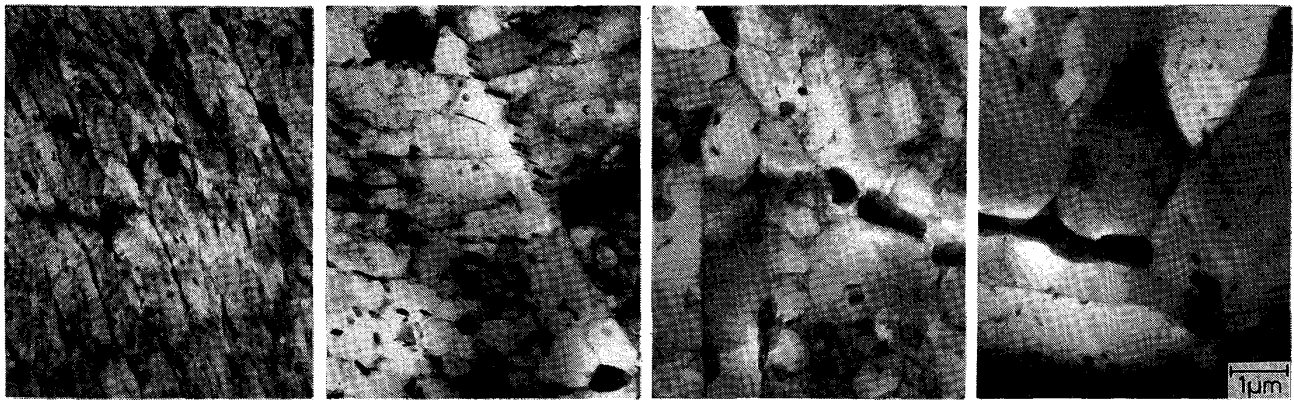
図5 Cr-Mo-V 鋼の密度変化のパラメーターによる表示

なクリープキャビティ量を定量的に把握するため測定した密度変化を図4に示す。密度変化は図5に示すようなひずみ (ϵ), 時間 (t), 応力 (σ) 及び絶対温度 (T) を含むパラメーターで整理できた。

一方, クリープ中に生じる組織変化も著しく, 写真2に示すように, 焼入れ時に導入された高密度の転位組織がしだいに回復している。このような転位組織の回復の程度を回折X線半幅測定により評価し, 回折X線半幅データについてもパラメーター表示を試みた (図6)。

4.3 クリープ損傷評価による余寿命予測

Cr-Mo-V 鋼のクリープ破壊寿命を支配するクリープ損傷は, 粒界クリープ破壊を促進する粒界キャビティとクリープ速度を加速する組織変化である。これらの2種



受入れ材
熱処理

1010°C×18h→870°C×5h AC
720°C×38h FC
960°C×24h MC
660°C×83.5h FC

$t=10\,000\text{ h}$ ($t/tr=0.45$)
 $\epsilon=0.8\%$

$t=20\,000\text{ h}$ ($t/tr=0.89$)
 $\epsilon=2.3\%$

$tr=22\,380\text{ h}$
 $\epsilon_r=14.9\%$

600°C, 7 kgf/mm²

写真2 Cr-Mo-V 鋼のクリープ中の転位組織変化

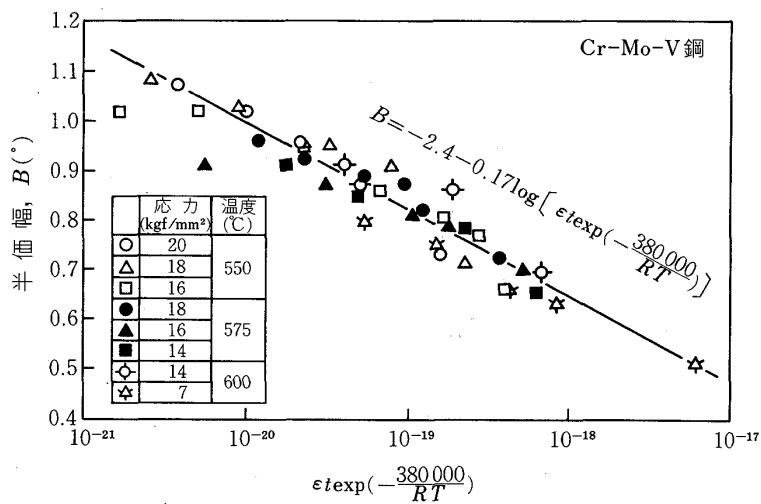


図6 Cr-Mo-V 鋼の半価幅のパラメータによる表示

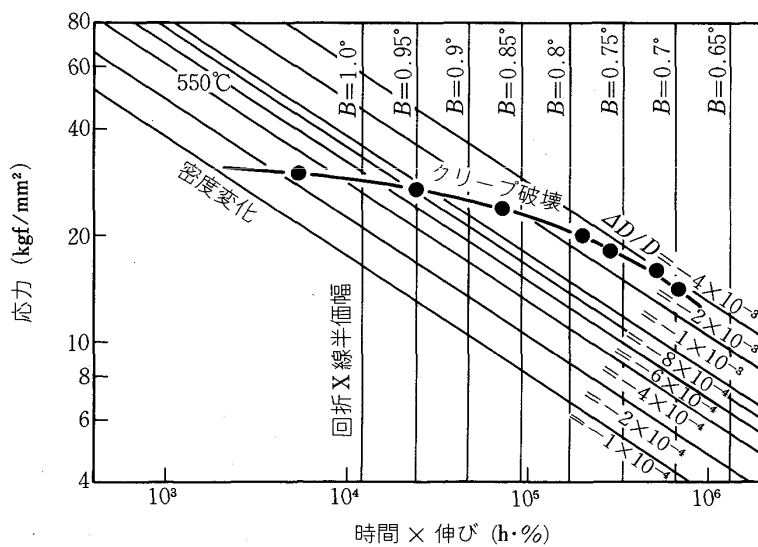


図7 Cr-Mo-V 鋼のクリープ損傷線図

の主要な損傷はそれぞれ異なつた機構により生じ、支配因子も計測方法も異なる。これら2種の損傷を計測・評価することにより、損傷のダブルチェックではなく、より質の高い評価、すなわち余寿命予測が可能となろう。図7はクリープキャビティを評価する密度変化及び組織変化を評価する回折X線半価幅を破断線図と比較して示している。このような損傷線図より、使用材のクリープキャビティ量と組織変化計測から寿命限界に対する位置同定が可能となり、余寿命予測を行える。

5. 今後の課題

高温機器の余寿命予測技術開発は緊急を要する課題であるから、現状の知見、技術を結集して、図1に示すようなデータベースの構築、予測システムの構築等を行うことにより、信頼性の高いものとするのが急務であろう。しかしながら、余寿命予測技術に対するニーズは今後一層大きくなり、より質の高いものが要求されてこよう。それに応えるには、次のような課題に取り組む必要があろう。(1) 材料寿命を律速する損傷の挙動を明確にし、その発生・成長機構を踏まえた速度論的取扱いができるようにする必要がある。クリープキャビティについてみると、その発生機構はほとんど分かっているのが現状といえる。(2) クリープキャビティのような破壊に直接つながるようなミクロな損傷の計測技術の開発が必要である。現在、構造物の安全性管理のよりどころとなつていける破壊力学は、巨視的クランクの計測技術の確立に伴い、十分機能しているといえよう。しかしながら、余寿命予測には、よりミクロな損傷を対象とし、寿命限界に至るまでの過程を定量的に評価する方法と計測する技術が新たに必要となる。(3) 事故経験の先進国である欧米においては、事故解析が徹底的になされ、しかもその結果が広く報告されている。このような知見がその後の事故再発防止に大きな役割を果たしてきた。我が国においても事故解析結果の公開を進める必要があ

う。安全の確保は各国共通の課題であるから、関連する情報・データの共有化を進めるべきであろう。

文 献

- 1) P. CHOATE and S. WALTER: America in Ruins (The Council of State Planning Agencies) (1980) 岡野行秀, 古賀一成訳, 荒廃するアメリカ (1982)
- 2) 2000年の日本(経済企画庁総合計画局, 経済審議会長期展望委員会) (1985)
- 3) 桑原和夫, 新田明人: 損傷の実態と非破壊検査技術シンポジウム論文集(日本非破壊検査協会編) (1984), p. 157
- 4) 経年損傷評価と寿命予測の技術動向(科学技術広報財団編) (1986)
- 5) 大南正瑛: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1549
- 6) 木原重光, 中代雅士, 石本礼二, 梶谷一郎: 火力原子力発電, **35** (1983), p. 227
- 7) 羽田寿夫, 土屋 喬, 大黒 貴, 増山不二光, 瀬戸口克哉: 火力原子力発電, **35** (1983), p. 1225
- 8) 構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究・研究成果報告書(科学技術庁研究開発局編) (1987)
- 9) 大谷隆一, 北村隆行, 木南俊哉: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 711
- 10) 岸 輝雄, 大友 暁, 横井 信: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1077
- 11) 松尾 孝, 木佐貫哲也, 田中良平, 小松周一: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 565
- 12) 木村一弘, 木佐貫哲也, 小松周一, 田中良平: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1803
- 13) 木村一弘, 松尾 孝, 菊池 実, 田中良平: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 474
- 14) 大平貴規, 岸 輝雄: 鉄と鋼 **70** (1980), p. 2188
- 15) 山口弘二, 鈴木直之, 井島 清, 金沢建二: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1526
- 16) 新谷紀雄, 京野純郎, 田中秀雄, 村田正治, 横井 信: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1668
- 17) 新谷紀雄, 京野純郎, 横井 信: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 573
- 18) 新谷紀雄, 田中秀雄, 村田正治, 貝瀬正次, 横井 信: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 114
- 19) 吉川州彦, 伊勢田敦朗: 第24回高温強度シンポジウム前刷集(日本材料学会編) (1986), p. 82
- 20) 貝瀬正次, 江頭 満, 岸本 哲, 新谷紀雄: 学振 123 委研究報告, **26** (1985), p. 11