

氏名	野中 勇
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 61 年 9 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最終学歴	昭和 52 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属加工学専攻 博士課程前期 2 年の課程修了
学位論文題目	高速増殖炉用構造材料のクリープ疲労強度評価法に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 島田 平八 東北大学教授 高橋 裕男 東北大学教授 桑名 武 東北大学教授 高橋 秀明

論 文 内 容 要 旨

石油代替エネルギーとして、原子力発電が期待されているが、天然ウランを効率よく、超長期にわたって利用できる高速増殖炉は最も注目されている。特に、エネルギー資源の乏しいわが国においては、高速増殖炉の開発は重要であり、これまで、自主技術確立のための研究開発が続けられてきた。

高速増殖炉の構造設計については、他の機器に比べて安全性が重視されるために、信頼性が高いことが要求される。そのためには、材料の使用条件下での破壊のメカニズムを正確に把握し、それに基づいた強度評価法を確立することが重要である。しかし、高速増殖炉は従来にない新しい環境および条件で運転されるために、構造材料の破壊のメカニズムさらにはその強度評価法については未だに確立されていないものがある。このうち、最も重要な課題は、材料にクリープ荷重と繰り返し荷重が交互に負荷された場合、クリープ損傷と疲労損傷の相互作用をいかに評価すべきかという、クリープ疲労強度評価法の確立である。クリープ疲労強度評価法については、かなり研究されているが、汎用的な方法がなく、従来の方法を高速増殖炉に適用するには問題がある。

そこで、本研究は高速増殖炉使用条件下の、構造材料のクリープ疲労破壊のメカニズムを明らかにし、それに基づいたクリープ疲労強度評価法を確立することを目的とする。なお、溶接継手は変形抵抗の異なる母材と溶接金属で構成されている不均質材であるために、クリープ疲労負荷に対して、母材単一材とは異なる挙動を示すと考えられるため、母材と溶接継手を別々に取扱った。

第1章 緒 論

本研究の背景と目的について述べた。背景としては、まず、高速増殖炉の構造と構造材料について触れ、次に、高速増殖炉の荷重特性について触れた。最後に、クリープ疲労強度評価法の現状と問題点について述べた。

第2章 母材のクリープ疲労強度評価法

2.1 316ステンレス鋼の高温低サイクル疲労強度におよぼすひずみ速度およびひずみ波形の影響

高速増殖炉に負荷されるひずみ速度は、地震荷重のように比較的速いもの ($10^{-3}/s$) から、機器の起動・停止時の熱応力のようにゆっくりとしたもの ($10^{-8}/s$) まで、広範囲に及ぶ。そこで、高温低サイクル疲労強度におよぼすひずみ速度の影響を明らかにし、その強度評価法について検討することを目的として実験を行い、以下の結果を得た。

(1) $550^{\circ}C$ におけるクリープ疲労寿命を図1に示す。対称三角波はひずみ速度の低下にともない寿命低下する。CP波は引張過程のひずみ速度の低下にともない寿命低下するが、PC波は圧縮過程のひずみ速度が低下しても寿命低下しない。各種波形のうち、CP波の寿命が最も低く、PP波の $1/10$ である。

(2) 破壊の形態は、主に、引張過程のひずみ速度で決定され、引張過程のひずみ速度が大きい時は粒内破壊であるが、小さい時は粒界破壊である。さらにCP波は粒界破壊を、PC波は粒内破壊を示す傾向がある。また、クリープ疲労寿命の低下と粒界破壊は対応している。

(3) ひずみ速度の低下にとまなう疲労寿命の低下はクリープ効果によるも

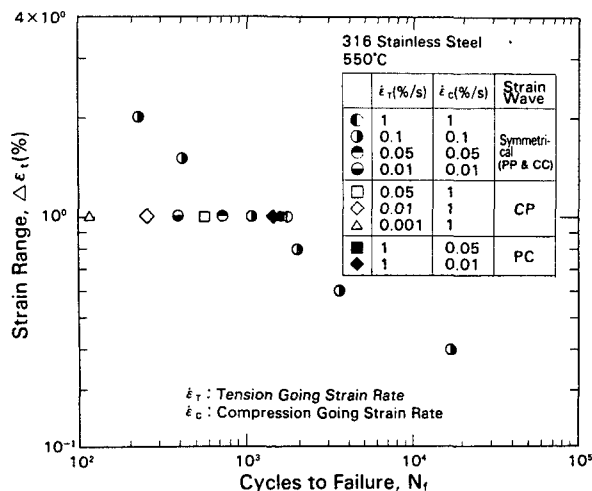


図1 316ステンレス鋼の高温低サイクル疲労強度におよぼすひずみ速度、ひずみ波形の影響

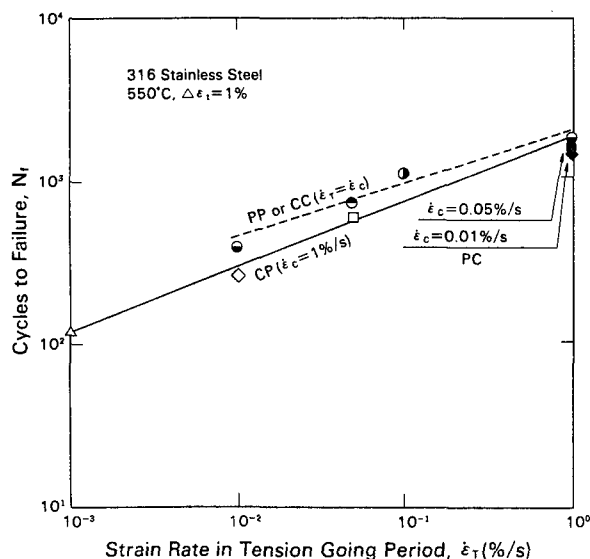


図2 316ステンレス鋼のクリープ疲労強度評価法

のではなく、動的ひずみ時効によるものである。このことは、ひずみ速度の低下にともなう非弾性ひずみ範囲の減少および応力振幅の増加、さらには、動的ひずみ時効の消失したと思われる時効材では疲労寿命の低下がみられないことから裏付けられる。

(4) 316ステンレス鋼の550℃の低サイクル疲労強度におけるひずみ速度効果は動的ひずみ時効に支配され、疲労寿命低下率と粒界破壊率は対応しており、さらに、粒界破壊率は引張過程のひずみ速度に支配されていることから、図2に示すように、クリープ疲労寿命を引張過程のひずみ速度で評価することを提案し、良い結果を得た。

2.2 2¼Cr-1Mo鋼の高温低サイクル疲労強度におよぼす圧縮ひずみ保持の影響

高速増殖炉用構造材料の代表としては、ステンレス鋼の他に、2¼Cr-1Mo鋼がある。2¼Cr-1Mo鋼はステンレス鋼と比較して、クリープ疲労負荷によるクリープ損傷は概して小さいが、高温、長時間使用による酸化の影響を受けやすい。蒸気発生器の伝熱管などは、大気あるいは蒸気雰囲気で使用されるため、酸化の影響を確認しておく必要がある。そこで、各種ひずみ保持疲労試験を行い、クリープ効果および酸化の影響を明らかにし、その強度評価法について検討した。以下にその結果を示す。

(1) 470℃におけるクリープ疲労寿命を図3に示す。純粋疲労寿命と比較して、引張ひずみ保持波、圧縮ひずみ保持波、および引張圧縮ひずみ保持波はそれほど寿命低下を示さないが、ひずみ範囲0.5%以下の低ひずみ領域での圧縮ひずみ保持波は例外的に顕著な寿命低下を示す。

(2) この寿命低下は、同一条件での引張ひずみ保持波が寿命低下を示さないこと、計算されたクリープ損傷値が非常に小さいこと、さらに、無応力ひずみ保持波も寿命低下を示すことからクリープ効果によるものではない。

(3) 試験後の試験片表面の酸化膜を

走査型電子顕微鏡で観察した結果、純粋疲労および引張ひずみ保持波については不規則な割れしかみられないが、圧縮ひずみ保持波については荷重軸に垂直な鋭い規則的な割れがみられた。さらに、試験片の縦断面を光学顕微鏡で観察した結果、この規則的な酸化膜の割れの直下では、金属が選択的に腐食されて切欠状になっていることがわかった。これらの結果から、圧縮ひずみ保持波の顕著な寿命低下の機構を図4に提案した。ひずみ保持中に形成された酸化膜が引張過程で割れ、金属のき裂発生を早め、寿命を低下させる。引張ひずみ保持波においては、ひずみ保持中に形成された酸化膜には圧縮過程で負のひずみしか与えられず、酸化膜が割れないため、寿命低下は起こらない。

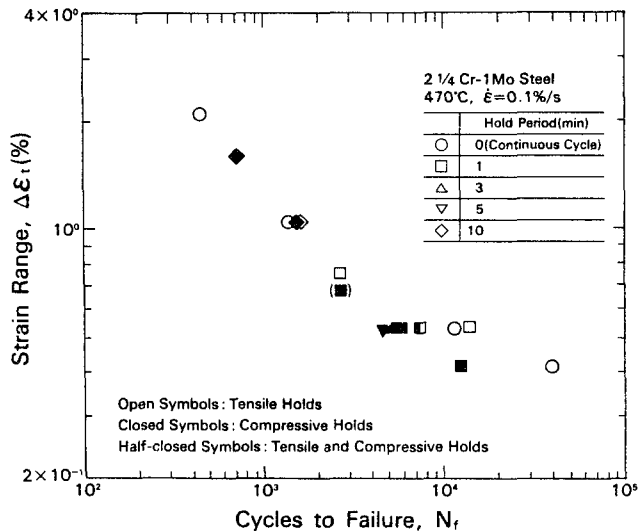


図3 2¼Cr-1Mo鋼の高温低サイクル疲労強度におよぼすひずみ保持の影響

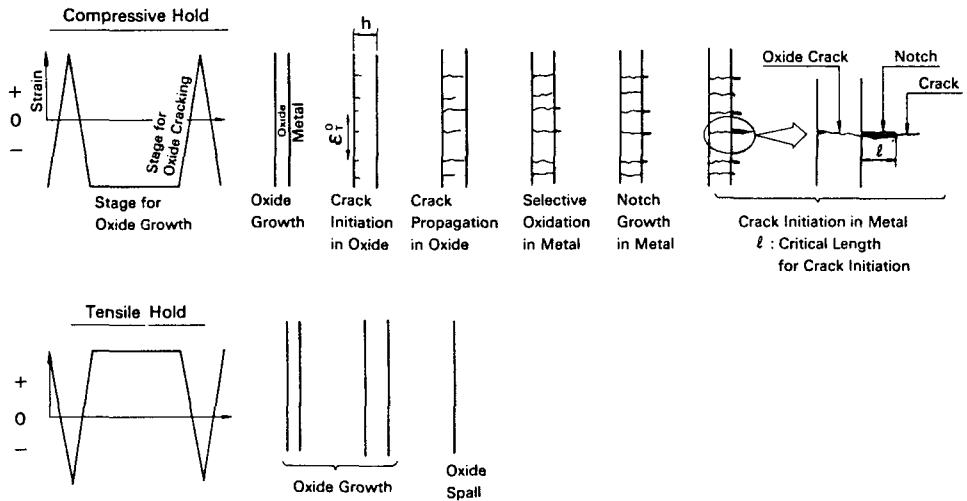


図4 圧縮ひずみ保持波の寿命低下機構

(4) この寿命低下機構に基づいて、圧縮ひずみ保持波の寿命評価式を提案した。ちなみに、この評価式で実機の寿命を予測したところ、純粋疲労の $1/6$ であった。従来、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の疲労強度については、クリープ効果のみに注目していた傾向があったが、酸化と疲労の相互作用の重要性を指摘した。

2.3 304ステンレス鋼の高温低サイクル疲労き裂伝ば速度評価法に関する一考察

2.1および2.2はき裂発生寿命についてであるが、き裂伝ばにおいてもクリープ疲労き裂伝ば評価法を確立する必要がある。特に、構造健全性評価あるいは余寿命評価などにおいて重要である。従来、き裂伝ば速度評価においては、破壊力学が適用されているが、高速増殖炉で問題となるような高温、非線型領域への適用にはまだ問題点が残されている。ここでは、現在、最も広範囲に利用されているJ積分の有効性の確認と実験的にJ積分を求める方法の問題点について考察した。その結果を以下に示す。

304ステンレス鋼の650℃における低サイクル疲労き裂伝ば速度およびクリープ疲労き裂伝ば速度は、実験的に求めた繰り返しJ積分範囲およびクリープJ積分範囲で整理できた。ただし、各々のJ積分範囲はき裂中央開口変位のゲージ長に依存し、有効なJ積分範囲を測定するためにはき裂の情報のみを取り出すのに適当なゲージ長の選択が必要である。このゲージ長はき裂長さ、試験片の幅によって決まるもので、本実験の例では、試験片幅20mm、き裂長さ1mmに対して、5mmのゲージ長が有効であり、10mmのゲージ長はき裂以外の情報を含むため有効ではなかった。

第3章 溶接継手のクリープ疲労強度評価法

高速増殖炉においては、中間熱交換器や蒸気発生器における伝熱管-管板溶接継手およびステンレス鋼- $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼異材継手など強度評価上、重要な溶接継手が存在する。溶接継手の疲労およびクリープ疲労設計法としては、溶接継手の強度低下を安全裕度という形で設計許容値を厳し

くする方法が一般的であるが、設計許容値を策定するためには、あらゆる条件での強度確認のための実験を行う必要があり非常な労力を要する。また、安全裕度を一律に決定すると、過度に安全側の設計にならざるを得ない。そこで、設計精度を上げるためには、溶接継手を構成する母材および溶接金属（あるいは熱影響部）の各々の変形に注目した精度の高い強度評価法が必要である。

3.1 溶接継手の高温低サイクル疲労強度評価法

304ステンレス鋼溶接継手と2¼Cr-1Mo鋼溶接継手の実験結果から、溶接継手の疲労寿命は母材および溶接金属の変形抵抗と疲労曲線によって決定されることがわかったため、図5に示す3つの評価法を提案した。これらの評価法の特徴と寿命予測結果について以下に述べる。

(I) 評価法(I), 評価法(II)およびFEMは、いずれも母材と溶接金属の基礎データである繰り返し応力-ひずみ曲線と疲労曲線から溶接継手の疲労寿命を予測する点では同様であるが、母材部と溶接金属部のひずみを予測するのに、評価法(I)は応力を用い、評価法(II)は平均ひずみを用い、FEMは有限要素法解析を行う点異なる。

これらの評価法の寿命予測精度は主に、母材と溶接金属の繰り返し変形抵抗の差に依存していることがわかった。304ステンレス鋼溶接継手や溶接後熱処理を行った2¼Cr-1Mo鋼溶接継手のように、母材と溶接金属の変形抵抗の差が小さい場合には½~2倍の精度で寿命予測ができた。一方、溶接後熱処理を行わない溶接継手のように、変形抵抗の差が大きい場合には、評価法(I)が過度

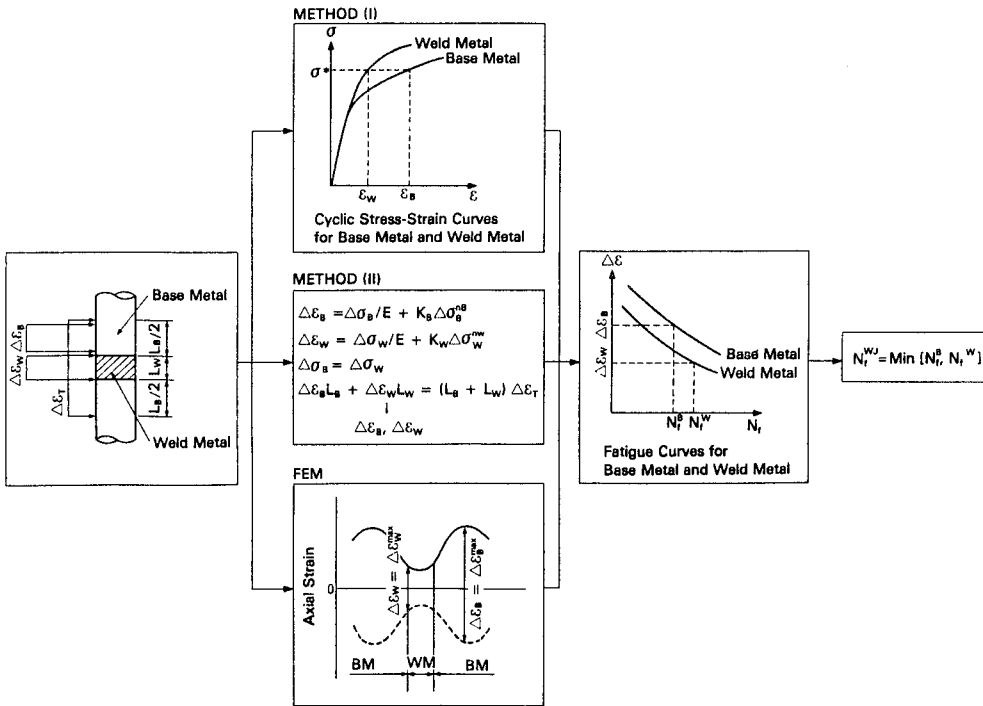


図5 溶接継手の高温低サイクル疲労強度評価法

に安全側に、FEMが過度に非安全側に寿命予測する傾向がある。しかし、高速増殖炉の溶接継手については、2¼Cr-1Mo鋼溶接継手も溶接後熱処理を義務づけられており、母材と溶接金属の変形抵抗の差の大きいものは存在しないため、これらの評価法は有効である。また、評価法(I)、評価法(II)およびFEMの寿命予測精度はほぼ同等であり、簡便さという点で、評価法(I)および評価法(III)はFEMよりも優れている。

3.2 溶接継手のクリープ疲労強度評価法

高温低サイクル疲労強度評価法の拡張として、図6に示すクリープ疲労強度評価法を提案した。この方法は、母材と溶接金属のクリープと疲労の基礎データから線型累積損傷則に基づいて、溶接継手の母材部と溶接金属部のクリープ疲労損傷を求め、溶接継手のクリープ疲労寿命を予測するものである。ここで、クリープの基礎データとしてはクリープ曲線とクリープ破断曲線が、疲労の基礎データとしては、高温低サイクル疲労強度評価法と同様に、繰り返し応力-ひずみ曲線と疲労曲線が必要である。この評価法で2¼Cr-1Mo鋼溶接継手の寿命予測を行った結果、½～2倍の精度で予測できた。

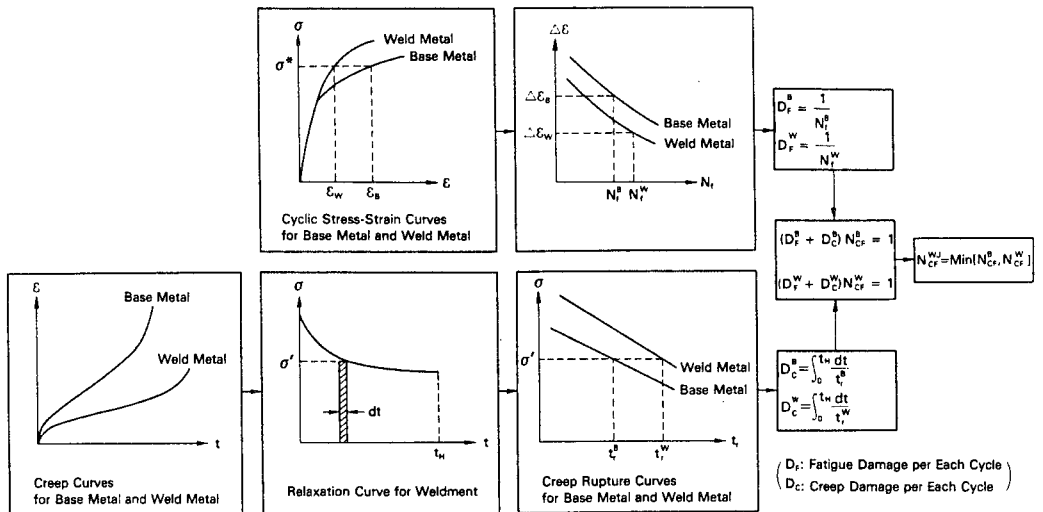


図6 溶接継手のクリープ疲労強度評価法

第4章 現行のクリープ疲労設計法の改善にむけての提案

第2章、第3章の研究成果に基づいて現行の設計法を改善することを試みた。

まず、ステンレス鋼のクリープ疲労設計法については、現行の設計法でクリープ効果として同一に扱われているひずみ速度効果とひずみ保持効果を分けて考え、ひずみ速度効果は疲労損傷として、ひずみ保持効果はクリープ損傷として取り扱うべきこと、さらに、設計疲労強度線図としては、引張過程のひずみ速度と疲労寿命の関係に安全裕度を考慮したものを用いることを提案した。

次に、2¼Cr-1Mo鋼のクリープ疲労設計法については、ステンレス鋼のクリープ疲労設計法の他に、0.5%以下の低ひずみ領域における圧縮ひずみ保持波は特別のケースとして、酸化膜の割れる条件式に基づいて、強度評価すべきであることを提案した。

最後に、溶接継手のクリープ疲労設計法については、現行の設計法では特に規定されていないが、設計精度を上げるために、溶接継手を構成する母材および溶接金属の各々の変形に注目した強度評価法を提案した。

第5章 結 論

本研究で得られたおもな結果を総括した。

審査結果の要旨

高速増殖炉は、他の機器に比べて安全性が重視されるため、その構造設計には高信頼性が要求される。とくに構造材料については、材料の使用条件下での破壊機構を正確に把握し、それに基づいた強度評価法を確立することが必要である。しかし新しい環境および負荷条件で運転されるため未だ確立されていないものが少なくない。このうちの重要な課題として、材料にクリープ荷重と繰返し荷重が重なって負荷された場合、クリープ損傷と疲労損傷の相互作用をいかに評価すべきかという、クリープ疲労強度評価の問題がある。著者は高速増殖炉使用条件下における構造材料の母材単体およびそれらの溶接継手について、クリープ疲労破壊の機構を明らかにし、それに基づいたクリープ疲労強度評価法を確立することを目的とした一連の研究を行った。本論文はその結果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論で、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では母材のクリープ疲労強度評価について述べている。まず316ステンレス鋼の高温低サイクル疲労強度に及ぼすひずみ速度およびひずみ波形の影響を調べ、この材料の強度はおもに引張過程のひずみ速度で規制され、クリープ疲労寿命の低下は粒界破壊に対応していることを明らかにしている。対称三角波はひずみ速度の低下にともない寿命低下をきたし、非対称波形では引張過程のひずみ速度低下は寿命を低下させるが、圧縮過程のひずみ速度の低下は寿命に影響しないことを見いだしている。また、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼については、ひずみ範囲0.5%以下の低ひずみ領域での圧縮ひずみ保持波のみ顕著な寿命低下を示しており、これは酸化膜の選択的な割れによる応力集中が原因であるという興味ある結果を見出している。

第3章は溶接継手のクリープ疲労強度評価について述べたもので、高温低サイクル疲労強度評価については母材および溶接金属の変形抵抗と疲労曲線を用いて疲労寿命を予測する方法を提案しており、母材と溶接金属の変形抵抗の差の少ないときは精度の高い評価のできることを示している。また溶接継手のクリープ疲労強度評価には母材と溶接金属のクリープと疲労の基礎データから線形累積損傷則に基づいて、溶接継手の母材部と溶接金属部のクリープ疲労損傷を求め、溶接継手のクリープ疲労寿命を予測する方法を提案している。

第4章は第2章および第3章の結果をふまえて、母材および溶接継手のクリープ疲労を考慮した現在の構造設計法を改善する新しい方法を提案し、その有用性を実証している。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、高温においてクリープと疲労の重なった場合の構造部材の強度評価法を確立して、新しく設計基準を示したもので、高温用構造部材設計に有益な指針を与えたもので、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、工学博士の学位論文として合格と認める。