

## 水素環境下におけるFe, Ni, Cu基合金の疲労き裂進展特性とその微視的機構に関する研究

小川, 祐平

<https://hdl.handle.net/2324/2236231>

---

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 小川 祐平

論 文 名 : 水素環境下における Fe, Ni, Cu 基合金の疲労き裂進展特性と  
その微視的機構に関する研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年、化石燃料枯渇に伴うエネルギーセキュリティの観点や地球温暖化等の環境問題への懸念から、持続可能かつクリーンな次世代エネルギーキャリアとして水素が注目を集めている。水素利用機器の普及拡大に向けた課題の一つとして、高圧水素ガスに曝される金属部材の安全・信頼性の確保および低コスト化が挙げられており、そのために強度・耐水素脆化特性のバランスに優れた構造用金属材料の探索および開発が不可欠である。高圧ガス部材の強度設計基準では、対象材料の疲労き裂進展特性が重要パラメータの一つとして位置づけられているが、従来研究において水素は多くの金属材料中で疲労き裂の進展速度を増大させることが報告されてきた。したがって、広範な金属材料中の疲労き裂進展特性に及ぼす水素の影響を網羅的に把握し、その微視的機構を学術的観点から理解することは、耐水素性に優れる高強度材料の探索および創生に向けた最優先課題の一つである。そこで、本研究では、体心立方構造 (BCC) または面心立方構造 (FCC) を有する種々の材料の疲労き裂進展試験を水素ガス中または水素チャージ下で実施し、各々の疲労き裂進展特性に及ぼす水素の影響を評価した。また、疲労き裂周辺部における変形組織の精緻な観察に基づき、各材料中で疲労き裂進展加速が生じるメカニズムについて検討を行った。本論文は、以下の全6章から構成される。

第1章では、日本国内における水素エネルギー利用への取り組みや水素機器普及に向けた課題について述べ、金属材料の種々の機械的性質に及ぼす水素の影響およびそのミクロなメカニズムに関する従来の知見をまとめた。また、高圧ガス部材の強度設計に対する疲労き裂進展特性の重要性を述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、水素により顕著な疲労き裂進展加速を示すフェライト鋼やマルテンサイト鋼などのBCC鋼のモデル材として純鉄を用い、その疲労き裂進展特性を0.2~90 MPaの水素ガス中で評価した。走査型電子顕微鏡 (SEM) および透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた破面およびき裂断面部の観察から、水素がき裂先端における転位組織発達の助長および抑制という相反する現象を引き起こすことを明らかにし、これら2つの現象が応力拡大係数範囲や水素ガス圧力に依存して変化することを示した。また、従来から提唱されてきたき裂先端部への塑性変形の局所化 (HELP機構) に対し、水素による転位運動の抑制とそれに伴うミクロな脆性破壊 (へき開破壊) が、BCC結晶中における疲労き裂進展加速の主要因であることを明らかにした。

第3章では、塑性変形によりFCC結晶 (オーステナイト相) からBCC結晶 (マルテンサイト相) への相変態を生じる材料の代表として準安定オーステナイト系ステンレス鋼SUS304とSUS316Lを用い、その疲労き裂進展試験を水素ガス中 (外部水素) および水素チャージ下 (内部水素) において実施した。外部水素および内部水素に関わらず、同材料中ではき裂先端部でのマルテンサイト変態

が水素による疲労き裂進展加速の決定因子であり、FCC相安定性が高いほど耐水素性が向上することを示した。一方、外環境からの水素侵入とき裂進展が同時平行で生じる外部水素に対し、予め多量の水素を含有させた内部水素の場合では、高い水素量に反して疲労き裂進展の加速量が低下するという特異な結果を得た。この特異性を生む機構を明確にするため、本研究では電子チャネリングコントラスト（ECCI）法による変形下部組織の分析を応用した。結果として、オーステナイト相へとチャージされた水素が変形中のマルテンサイト変態を抑制し、外部水素の場合には得られないポジティブな効果を発揮してき裂進展加速を低減させる役割を持つことを明らかにした。

第4章では、相変態を生じない安定なFCC結晶を持つ材料としてNi基超合金Alloy718を用い、その疲労き裂進展特性に及ぼす内部水素と外部水素の影響を調査した。また、将来的な耐水素高強度材料の開発に向け、FCC母相の強度の低さを補うための手段として析出強化処理に着目した。安定なFCC相の存在に反し、材料の高強度化に伴い疲労き裂進展の加速率は準安定オーステナイト系ステンレス鋼以上に大きくなることを示した。また、同材料中でのき裂進展加速が、結晶粒界に沿う脆性破壊、または析出物の存在による転位運動のプラナー化とそれに伴うすべり面分離など、マルテンサイト変態を生じる材料とは全く異なる機構によって引き起こされることを明らかにした。

第5章では、Alloy718と同等の強度を有しつつも高い耐水素侵入特性を持つ析出強化型ベリリウム銅合金に着目し、115 MPa水素ガス中での引張試験、疲労寿命試験、疲労き裂進展試験および破壊靱性試験により同材料の耐水素性の総合的評価を行った。水素環境下で著しい材料特性の劣化を生じるAlloy718に対し、本合金はすべての材料試験において一切の特性劣化を示さず、高圧水素ガス部材へと適用できる高いポテンシャルを有することを明らかにした。また本合金での結果を基に、安定なFCC結晶、析出強化による高強度化、および低水素固溶度の母相が、高強度と耐水素性を両立させた材料選択と開発に向けた最適な組み合わせの一つであるという新たな指針を提案した。

第6章では、本論文の総括を述べた。