

平成24年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成24年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成24年 4月27日現在

研究代表者氏名	村上 敬宜	所属研究機関・部局・職	九州大学・大学院工学研究院・教授
研究課題名	ギガサイクル疲労破壊機構に及ぼす水素の影響の解明と疲労強度信頼性向上方法の確立		
課題番号	14001002		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 村上 敬宜（九州大学・大学院工学研究院・教授） 研究分担者 近藤 良之（九州大学・大学院工学研究院・教授） 野口 博司（九州大学・大学院工学研究院・教授） 松岡 三郎（九州大学・大学院工学研究院・助教授） 高井 健一（上智大学・理工学部・助教授） 松永 久生（福岡大学・工学部・助教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成14年度	114,000 千円
平成15年度	128,800 千円
平成16年度	69,500 千円
平成17年度	29,920 千円
平成18年度	26,000 千円
総計	368,220 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

本特別推進研究は金属材料の疲労において一般的に認められる疲労限度が高強度鋼では消滅し、ギガサイクル (10^9 回) を超える繰返し数に耐えた後でも破壊が起こる現象の基本的メカニズムを解明することが目的であった。この問題は多くの産業機器の安全を脅かす重大性を有しているため、産業界から解明を期待されていた。

本研究グループは、この問題に関する現象に鋼中に含まれる非金属介在物にトラップされた水素が関与していることを突き止め、そのメカニズム解明と高強度鋼を用いた機械部品の疲労強度設計法に関する指針を示した。

本特別推進研究の開始後、折しも我が国のエネルギーセキュリティ問題と CO_2 排出により地球温暖化問題が注目されるようになり、研究の方向はギガサイクル疲労問題に留まらず、水素材料強度の問題、すなわち水素脆化のメカニズム解明に向かった。この研究は、安全と経済性が両立する水素社会の構築のためには根底をなす新しい技術分野へと展開がなされた。本特別推進研究の成果が認められ、事業の最終年度である平成 18 年度には NEDO 技術開発機構「水素先端科学基礎研究事業」(平成 18-24 年) が採択された。水素利用社会の実現を技術的に支援するため、水素と材料に関わる種々の現象を科学的に解明して各種データを産業界に提供するとともに、安全で簡便に水素を利用するための技術指針を確立することを目的とし、九州大学と(独)産業技術総合研究所が共同で研究を推進し、世界最先端の水素材料研究施設である水素材料先端科学研究センター (HYDROGENIUS) が設立された。

この NEDO 事業は、7 年間、予算総額 約 90 億円、金属材料の水素脆化研究を中心として、トライボロジー、水素熱物性、水素と高分子材料との関係など関連分野を巻き込んだ“一大プロジェクト”へと発展した。このプロジェクトの中心である水素材料強度特性研究チームは、24 年 1 月にこの 5 年間 (平成 18-23 年) の成果をまとめた『水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方』(養賢堂) を出版した。この成果は、本特別推進研究が端緒となり、基礎をなしたためである。

さらに、平成 22 年度には文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) に水素関連研究グループを柱とする「カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I^2CNER)」(平成 22-31 年) が採択された。この I^2CNER は、水素エネルギー社会や CO_2 の効率的な回収、地中・海洋貯留 (CCS) または有用製品への転換に向けて、障壁を取り除き、技術的ブレークスルーを可能にするために必要な科学を創出することを目的とするものである。平成 23 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震による大震災と福島第一原子力発電所の事故後の我が国のエネルギー問題を解決する一つの有力な方法として、再生可能エネルギーを利用した水素社会の構築が注目されており、本特別推進研究は基礎からの社会貢献へと大きく展開をみせている。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

平成 23 年度論文発表実績：特別推進研究の研究期間終了後、約 40 本論文発表。

- ・ Y. Murakami "Improvement of Fatigue Strength of Metals by Introducing Super-saturated Hydrogen" Pipeline Technology, Vol.717, Nov. p.p.14 -20(2011)
- ・ Y. Murakami and S. Matsuoka "Hydrogen Embrittlement: Observation and Mechanism in Wide Range of Strength and Microstructure" International Conference on Steel & Hydrogen Proceedings, p.p7-20(2011)
- ・ Y. Murakami "Material defects as the basis of fatigue design", International Journal of Fatigue, Volume 41, p.p 2-10(2012)
- ・ A. Roiko and Y. Murakami " A design approach for components in ultralong fatigue life with step loading" International Journal of Fatigue, Volume 41, Aug. p.p140-149 (2012)
- ・ Y. Murakami and R.O Ritchie "Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies" Woodhead Publishing Limited, pp.379-417 (2012)
- ・ K. Onoue, Y. Murakami and P. Sofronis "Japan's Energy Supply: Mid-to-Long-Term Scenario -A proposal for a new energy supply system in the aftermath of the March 11 earthquake -" in press, International Journal of Hydrogen Energy (2012)

平成 23 年度講演実績：年間平均して、国際学会での講演を 5～6 回、国内外の研究機関よりの依頼招待講演を 5-10 回程度行っている。

- ・ Keynote lecture at International Symposium on Fatigue Design & Material Defect (Trondheim, Norway: May 23-25, 2011), "Material Defects as the Basis of Fatigue Design".
- ・ Invited lecture at Royal Institute of Technology, KTH (Sweden, Stockholm: May 27, 2011), "Effects of Inclusion on Fatigue Strength and Ultrahigh-Cycle Fatigue".
- ・ Invited lecture at Politecnico di Milano (Milano, Italy: Jun.01, 2011), "Mechanism of Hydrogen Embrittlement".
- ・ Plenary lecture at 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM 11) (Como, Italy: Jun. 05-09, 2011), "A Perspective on Hydrogen Embrittlement in Fatigue".
- ・ 基調講演：日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス(福岡県北九州市：2011 年 7 月 16-18 日)
「水素は如何に材料の疲労強度に影響するか？」
- ・ 市民講座：日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス(福岡県北九州市：2011 年 7 月 16-18 日)
「水素に関する最新の話題」
- ・ Keynote lecture at International Conference on Steel & Hydrogen (Ghent, Belgium: Sept. 28-29, 2011), "Hydrogen Embrittlement: Observation and Mechanism in Wide Range of Strength and Microstructure".
- ・ Invited lecture at Nordic Green Japan (Tokyo, Japan: Nov.7-8, 2011), "Hydrogen Research at HYDROGENIUS and I²CNER: Basic and Applied Research and International Collaborations".
- ・ Invited lecture at Arcelor Mittal (Chicago, USA: Mar.9, 2012), "Evaluation of Steel Quality from the Viewpoint of Fatigue and Fracture".
- ・ Keynote lecture at TMS2012 (Florida, USA: Mar. 12-15, 2012), "Mechanism of Hydrogen Embrittlement in Fatigue".

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）**(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）****（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「水素先端科学基礎研究事業」**

PL：村上 敬宜（独立行政法人 産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター センター長）

研究課題：

水素エネルギー社会の実現への指針となる、機器設計や劣化評価方法を提供することが目的である。主な研究内容は以下のとおりである。

- ・ 高圧水素・液化水素による材料の脆化、疲労強度特性の低下のメカニズム解明と安全な設計指針の提供に関する研究
- ・ 水素環境下でのトライボロジー（摩擦、摩耗、潤滑現象）の諸問題の解明と設計手法に関する研究
- ・ 高圧化・液化した状態における水素物性、の基本原理の解明及び対策検討
- ・ 水素に関わる諸現象のコンピュータによるシミュレーション技術の開発

事業期間：平成 18 年度～平成 24 年度

総予算：49.9 億円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

1. 非金属介在物にトラップされて水素による金属疲労限度の消滅のメカニズムと介在物周辺に形成される ODA (Optically Dark Area) の法則の発見
2. 高強度鋼によって製造される機械部品の超長寿設計法の確立と産業界への提案
3. オーステナイト系ステンレス鋼に含まれる非拡散性水素の癒着における水素脆化と超低速負荷速度の影響の発見
4. 疲労き裂先端における水素によるすべり変形の局在化とき裂進展加速メカニズムの解明
5. オーステナイト系ステンレス鋼への過飽和水素のチャージによる水素脆化抵抗性の向上 (Hydrogen Effect against Hydrogen Embrittlement) の発見
6. 高強度鋼の水素中疲労き裂進展速度の加速における双晶変形の出現の発見
7. 極値統計による非金属介在物評価法への水素脆化メカニズムの逆利用の提案

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

本特別推進研究グループが開始した系統的なギガサイクル疲労研究は、世界的な研究ブームを引き起こし、継続的に国際シンポジウムが開催されるようになった。研究代表者の村上はこのテーマに関して多くの関連シンポジウムや国際会議で Plenary Lecture, Keynote Lecture などの招待講演を年間国内外で 10 回程度行っている。

また、特別推進研究グループの成果を発表した“Effects of Hydrogen Charge on Microscopic Fatigue Behaviour of Annealed Carbon Steels”: H. Uyama, M. Nakasahima, K. Morishige, Y. Mine and Y. Murakami, Int. Journal of Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 29, No.12, pp. 1066-1074 (2006.12)は “The Best Paper in Volume 29”を受賞している。

ここ数年は、特に水素社会実現に向けての研究として金属材料の水素脆化だけでなく、高分子材料の水素耐久性やトライボロジー、高圧・高温水素物性、水素貯蔵、燃料電池の分野にまで、関連領域が拡大している。また、東北地方太平洋沖地震後、日本の直面しているエネルギー問題解決の観点から水素社会への関心が高まってきている。

NEDO 事業（平成 18-24 年）や文部科学省の WPI 事業（平成 22-31 年）の採択も本特別推進研究の基礎的な研究成果が発端となっている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Metal Fatigue : Effect of Small Defects and Nonmetallic Inclusions: Y. Murakami, Elsevier (2002)	疲労強度に及ぼす微小欠陥と非金属介在物の影響を定量的に解明、解説した世界で唯一の著書。超長寿命疲労における水素の役割も世界で始めて解明した。	434
2	Mechanism of Fatigue Failure in Ultralong Life Regime: Y. Murakami, NN Yokoyama and J. Nagata, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 25. No. 8-9, pp.735-746, Aug-Sep. (2002)	超長寿命疲労の基本メカニズムと水素の役割について解明。	89
3	What is Fatigue Damage? A View Point from the Observation of Low Cycle Fatigue Process: Y. Murakami and KJ Miller, International Journal of Fatigue, Vol. 27. No. 8, pp.991-1005 (2005)	金属疲労における疲労損傷という長年学会で使用されてきた概念の誤りについて指摘し、実験的証拠により疲労損傷の実体が微小き裂の存在であることを示した。	50
4	The Effect of Hydrogen on Fatigue Properties of Steels used for Fuel Cell System: Y. Murakami and H.Matsunaga, International Journal of Fatigue 28, pp1509-1520 (2006)	燃料電池システムに利用される各種の鋼の疲労性質に及ぼす水素の影響について考察。	45
5	「900MPa 級低合金鋼 SCM435 の引張特性に及ぼす水素の影響」松岡三郎, 本間紳浩, 田中裕之, 福島良博, 村上敬宜, 日本金属学会誌, 第 70 巻, 第 12 号, pp. 1002-1011 (2006)	水素ステーションの蓄圧器に用いられる合金鋼 SCM435 の引張特性に及ぼす水素との微視組織の影響を解明。	18
6	Extreme Value Models for the Assessment of Steels Containing Multiple Types of Inclusion: Stefano Beretta, Clive Anderson and Y. Murakami, Acta Materialia, Vol. 54, Issue 8, pp.2277-2289 (2006)	鋼中に複数の非金属介在物が含まれてる場合の極値統計解析方法を提案。	15
7	「高強度鋼の長寿命疲労破壊に及ぼす水素の影響」村上 敬宜, 長田 淳治, 材料 別冊 第 54 巻 第 4 号 pp. 420-427 (2005)	水素をチャージした材料と未チャージの材料の超寿命疲労特性を比較することにより水素の役割を解明。	10
8			
9			
10			

【研究期間終了後に発表した論文】			
No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	Effects of Hydrogen on Fatigue Crack Growth Behavior of Austenitic Stainless Steels: T. Kanazaki, C. Narazaki, Y. Mine, S. Matsuoka and Y. Murakami, International Journal of Hydrogen Energy 33, pp. 2604-2619 (2008)	水素エネルギー機器に使用されるオーステナイト系ステンレス鋼に及ぼす水素の影響を考察。	31
2	Hydrogen Embrittlement Mechanism in Fatigue Austenitic Stainless Steels: Y. Murakami, T. Kanazaki, Y. Mine and S. Matsuoka, Metallurgical and Materials Transactions, Vol., 39A, pp. 1327-1339 (2008)	オーステナイト系ステンレス鋼に製造時より含まれる微量水素が極低速負荷の繰返しで疲労に悪影響を及ぼすことを発見。	24
3	Hydrogen Effect against Hydrogen Embrittlement: Y. Murakami, T. Kanazaki and Y. Mine, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 41, No. 10, pp. 2548-2562, (2010)	水素は水素脆化を引き起こすことで常に悪い影響を及ぼすことで注目されていたが、過飽和に水素をチャージすることにより、逆に疲労強度特性が向上することを世界で初めて発見した。	13
4	Effect of Hydrogen on Martensite Formation in Austenitic Stainless Steels in High-pressure Torsion: Y. mine, Z. Horita and Y. Murakami, Acta materialia 57, pp. 2993-3002 (2009)	材料に超大塑性変形を施すことでオーステナイトからマルテンサイトへ変態が起こるが、水素チャージすることにより変態特性が変化することを示した。	12
5	「高圧水素ガス雰囲気曝露したオーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展挙動と水素侵入特性」 峯 洋二, 榎崎千尋, 金崎俊彦, 松岡三郎, 村上敬宜, 鉄と鋼, Vol. 93, No. 3, pp.247-256 (2007)	種々のオーステナイト系ステンレス鋼を高圧水素ガス中に曝露した後疲労試験を行い水素侵入特性と疲労き裂進展特性を調べた。	11
6			
7			
8			
9			
10			

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

- ・ 特別推進研究期間内においても成果は既に産業界の超長寿命疲労強度設計への応用（その後特許取得）を果たしている。
- ・ その後 NEDO 事業への発展の中でオーステナイト系ステンレス鋼に関する2つの新発見（特推追跡-2-3(4)の3と5）及び（特推追跡-2-3(4)の7）も特許申請中である。
- ・ 特別推進研究期間、NEDO 事業期間において継続的に多くの産業界の水素関連課題解決の指針を提供。
- ・ 愛地球博における水素ステーションのディスペンサーホースのインシデント原因の解明。
- ・ 原子力研究開発機構における水素関連施設のインシデント原因の解明
- ・ 2015年からFCV（燃料電池車）の市場化に向けた産業界（自動車業界、インフラ産業）への水素材料のデータベース提供と設計・製造指針の提供を行っている。
- ・ 「水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方」（養賢堂, 2012）を出版し、これまで主として理論的研究に留まっていた水素脆化の研究を実際の安全なものづくりへ応用するために指針を示した。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

当時研究に携わった若手研究者および学生の多くが現在も大学や企業で研究に従事している。

松永 久生（福岡大学・工学部・助教授）→現：九州大学 工学研究院 准教授

久保田 祐信（九州大学大学院工学府 助手）→現：九州大学 工学研究院 特任教授

山辺 純一郎（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：九州大学 工学研究院 准教授

堤 紀子（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：大分大学 工学部 助教

橋村 真治（九州大学大学院工学府 博士課程後期）
→現：国立久留米工業高等専門学校 機械工学科 准教授

清水 恭（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：(株) タカギ

周 世栄（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：アイシン精機 (株)

植田 徹（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：日本精工(株)

小田原 悟（九州大学大学院工学府 博士課程後期）
→現：鹿児島工業高等専門学校 機械工学科 准教授

大小森 義洋（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：日本鑄鍛鋼(株)

長田 淳治（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：新日本製鐵(株)

戸山 恭平（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：福岡県警 科学捜査研究所 研究員

宇山 英幸（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：日本精工(株)

宮田 肇（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：(株) 日立製作所

岡方 義則（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：住友金属工業(株)

金崎 俊彦（九州大学大学院工学府 博士課程後期）→現：(株) 本田技術研究所