

「水素先端科学基礎研究事業」
事後評価報告書

平成25年1月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

平成25年1月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 古川 一夫 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、別添のとおり
評価結果について報告します。

目次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 個別テーマに関する評価結果	1-23
2. 1 高圧水素物性の基礎	
2. 2 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本 原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による 材料強度特性研究	
2. 3 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、 温度などの影響による材料強度特性研究	
2. 4 高圧水素のトライボロジーの解明	
3. 評点結果	1-52
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料2 評価に係る被評価者意見	参考資料 2-1
参考資料3 分科会議事録	参考資料 3-1
参考資料4 評価結果を受けた今後の取り組み方針について	参考資料 4-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「水素先端科学基礎研究事業」の事後評価報告書であり、第32回研究評価委員会において設置された「水素先端科学基礎研究事業」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第34回研究評価委員会（平成25年1月15日）に諮り、確定されたものである。

平成25年1月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「水素先端科学基礎研究事業」

事後評価分科会委員名簿

(平成24年10月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	もりなが まさひこ 森 永 正彦	名古屋大学 大学院工学研究科 名誉教授
分科会長 代理	つる とおる 水流 徹	東京工業大学 大学院理工学研究科 名誉教授 特任教授
委員	あいはら しゅうじ 栗飯原 周二	東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 教授
	おがた しげのぶ 尾方 成信	大阪大学 基礎工学研究科 機能創成専攻 教授
	おの しんいち 小野 信市	株式会社日本製鋼所 執行役員 研究開発本部 本部長
	こぼり よしひろ 小堀 良浩	JX日鉱日石エネルギー株式会社 中央技術研究所水素・FC研究所 エグゼクティブリサーチャー
	しらね よしかず 白根 義和	一般社団法人 日本産業・医療ガス協会 医療ガス部門 常務執行役員
	のさか まさたか 野坂 正隆	株式会社 IHI 航空宇宙事業本部 宇宙開発事業推進部 技術顧問

敬称略、五十音順

審議経過

● 第1回 分科会（平成24年10月5日）

公開セッション

1. 開会、分科会の設置、資料の確認
2. 分科会の公開について
3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について
4. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

5. プロジェクト詳細説明
6. 全体を通しての質疑

公開セッション

7. まとめ・講評
8. 今後の予定、その他、
9. 閉会

● 第34回研究評価委員会（平成25年1月15日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

本事業は、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な、水素物性、水素環境下での材料特性に係わる幅広い研究を行っており、我が国のみならず世界にとっても重要な事業である。産業技術総合研究所と九州大学が中心となり、世界レベルの水素関連研究拠点を構築し、基礎研究だけでなく、企業との応用研究も進めている。中間評価以降、基盤研究と開発がうまくかみ合って進んでおり、目標は概ね達成されている。また、各研究課題で、データベースの整備・拡充を取り上げ、従来の知識と新しい成果を整理し、今後の研究開発、実用化に必要な情報にアクセスできるようにした点は高く評価できる。チーム間連携の成果も目に見える形で現れており、拠点を設置しての集中的な事業展開の結果として、十分なシナジー効果が見られた。

一方、環境の変化により研究成果には水素の安全性確保と低コスト化の課題を同時に解決する方向性が求められている。特に、材料の水素脆化のメカニズムはより多面的に解明されるべき残された課題である。また、高圧水素燃料を利用した水素ロケット開発で経験した技術課題も参考にして、技術的難易度のリスク評価や安全管理のマトリックス評価を真摯に行い、今後の技術展開に反映させることを望む。現在参画しているメンバーは、国内水素研究を推進している研究者、技術者の中で、主要なメンバーではあるものの、日本全体から見ればその一部であり、今後、広くメンバーを糾合し、より一層の駆動力でもって事業を推進するならば、名実ともに世界をリードしていくことが可能になると考える。

2) 今後に対する提言

2015年に向けた実用化研究・開発の加速が必要であることは自明であり、今後も安全・安心な水素エネルギー社会実現に向けた研究開発の継続が望まれる。世界的に見ても類い希な優れた研究施設と設備がほぼ整えられた現在、これが我が国の水素材料研究の一つの研究・教育拠点として、今後も有効に機能するよう、国やNEDOは施策を講じるべきである。また、拠点内の情報交換はもちろんのこと、国内外の関係者との議論をより活発に行うことにより、情報発信の発展と拠点内の研究開発レベルの向上が必要である。

水素の実用に向け、性能（安全性、耐久性、効率、など）を低下させることなくコスト削減を果たすための一つはオーバースペックを排除することであり、これを実現するためにも、より使いやすいデータベース利用環境を整備するこ

と、およびデータ蓄積を継続することが必要である。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

水素社会に向けた水素輸送および貯蔵技術開発は、国内外問わず緊要かつ公共性の高い事業である。これを進めるには、水素の基礎物性や水素機器に使用する材料を、安全・安心の観点から基礎的に調べる必要がある。更に、単なる材料特性の評価にとどまらず、水素利用技術に関連する情報をいくつかのデータベースの形でまとめ、利用しようとする事は、民間単独では取り組みがたい公共性の高い課題であり、NEDO の関与はきわめて妥当である。

また、世界的にも計測実績のない高圧水素物性を正確に測定することや、高圧水素環境下における各種材料特性を調べることは、水素関連分野の我が国の研究基盤を強め、国際競争力を高める。併せて、国際貢献にも繋がり事業目的としても妥当である。

2) 研究開発マネジメントについて

研究開発目標は具体的な根拠に基づいた定量値が設定されており、高圧水素物性データの採取と整理、水素脆化メカニズムの解明、あるいは水素トライボロジー特性の基礎データの蓄積などは、いずれも水素の安全利用のために妥当である。特に資金を重点配分し、九州大学に集中的に施設、設備を整備したことは、効率的な運用と研究の進展に貢献した。研究開発のチーム構成もやや分野の偏りが見られるものの、個々の基礎研究力・開発力・技術力も高く、プロジェクトリーダーの下、九州大学および産業技術総合研究所が中心となって、全体のプロジェクトをコントロールする研究体制が整っていた。高圧水素インフラ整備に必要な要素を4本の柱として整理・運営し、企業参加もあつて材料開発などがタイムリーになされており、マネジメントは良好であった。また、水素ステーション設置費用の低コスト化などの社会情勢の変化、要望に機敏に対応している。

一方、基礎研究にも力点を置くということから考えると、より多様な分野や組織から人材が参画してもよかった。また、本プロジェクトで整備した設備や試験機を将来にわたり維持管理して、広く、産業界にも利用できる環境を整備することが肝要である。そのためには、本プロジェクト終了後の設備維持管理や専門的技術者の確保等を継続的に行う必要がある。

3) 研究開発成果について

水素の物性、材料、トライボロジーに関して集中して研究を行い、水素関連

の世界的な研究拠点を作り上げたことが第一の成果である。本事業における最大の目標は高圧水素ガス環境下で接ガス機器を安全に使用するための指針を示すことにあるが、個々の研究テーマも、また全体としてもおおむね目標を達成しているか、達成予定である。成果は論文、特許、データベース、研究会やフォーラムの形でそれぞれ適切に公開されており、多くの世界初の貴重なデータが提供されている。国際標準化のイニシアチブを取るための取り組みも高く評価できる。

しかしながら、水素脆化現象の機構解明という点では、水素脆化のモデルを提案するレベルに留まっており、そのモデルを検証するための詳細観察や解析が不十分である。また、安全性を確保して運用するためのより実用的な利用方法の提案についても、種々の材料のデータベースの提示だけでは十分とは言えない。

4) 実用化の見通しについて

データベースの提供や水素関連の各種根本メカニズムの提示が具体的な出口イメージとして設定されており、そこに至るまでのマイルストーンや、達成への見通しも立っている。特に、産業界からの参画を重視している点は高く評価でき、一定の成果を挙げており、今後も産業界への波及が期待できる。また、企業で採取することができないデータを提供するなど貴重な技術データの集積は、高圧ガスに係る安全システムに役立つことが期待でき、例えば、国内の高圧ガス取扱に係る規則等の内容の正確性・充実化に向けての働きに大きく貢献している。特に安全性の高い設計技術の構築には、要素研究の成果が大きく貢献することが期待できる。さらに、水素分野の人材育成にも貢献している。

しかしながら、技術的な波及効果を期待するためには、基本原理の解明や普遍的なデータベースの構築が必要であるが、水素脆化については両者ともに満足できるレベルではない。また、高圧機器などで使用したい低合金鋼などの安全利用に関する具体的な成果も十分とは言えない。

研究評価委員会におけるコメント

第34回研究評価委員会（平成25年1月15日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所属、役職
委員長	西村 吉雄	技術ジャーナリスト
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	元一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 企画運営推進会議 副議長
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院 総合研究所 客員教授（専任）
	稲葉 陽二	学校法人日本大学 法学部 教授
	尾形 仁士	三菱電機株式会社 社友
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 附属医療福祉工学開発評価研究センター センター長／教授
	佐藤 了平	国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル 生産科学専攻（システムデザイン領域担当） 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授
	吉川 典彦	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科 マイクロ・ナノシステム工学専攻 教授

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1) 総合評価

本事業は、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な、水素物性、水素環境下での材料特性に係わる幅広い研究を行っており、我が国のみならず世界にとっても重要な事業である。産業技術総合研究所と九州大学が中心となり、世界レベルの水素関連研究拠点を構築し、基礎研究だけでなく、企業との応用研究も進めている。中間評価以降、基盤研究と開発がうまくかみ合っており、目標は概ね達成されている。また、各研究課題で、データベースの整備・拡充を取り上げ、従来知識と新しい成果を整理し、今後の研究開発、実用化に必要な情報にアクセスできるようにした点は高く評価できる。チーム間連携の成果も目に見える形で現れており、拠点を設置しての集中的な事業展開の結果として、十分なシナジー効果が見られた。

一方、環境の変化により研究成果には水素の安全性確保と低コスト化の課題を同時に解決する方向性が求められている。特に、材料の水素脆化のメカニズムはより多面的に解明されるべき残された課題である。また、高压水素燃料を利用した水素ロケット開発で経験した技術課題も参考にして、技術的難易度のリスク評価や安全管理のマトリックス評価を真摯に行い、今後の技術展開に反映させることを望む。現在参画しているメンバーは、国内水素研究を推進している研究者、技術者の中で、主要なメンバーではあるものの、日本全体から見ればその一部であり、今後、広くメンバーを糾合し、より一層の駆動力でもって事業を推進するならば、名実ともに世界をリードしていくことが可能になると考える。

〈肯定的意見〉

- 本事業は、エネルギーイノベーションプログラムの達成を目的とし、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な、水素物性、水素環境下での材料特性に係わる幅広い研究を行っており、我が国のみならず世界にとっても重要な事業である。民間では実施が困難なこのような公共性の高い基礎研究を実施することは NEDO 事業として意義がある。
- 本事業では、産業技術総合研究所と九州大学が中心となり、世界レベルの水素関連の研究拠点を構築している。基礎研究のみならず、企業との応用研究を進めている。また、産業界にとり有用なデータベースを提供している。さらに、水素分野の人材教育に対する取り組みも評価できる。
- 水素社会を実現するためのロードマップに従って、本事業の目標を設定し、

多くの個別テーマにおいてその目標を達成したと評価できる。高圧水素物性や金属材料の水素脆化では「先端科学基礎研究事業」としての基礎的・学術的面での進展も見られその成果は高く評価できる反面、基礎的な成果よりも実用・開発に傾きすぎた課題も見られた。また、各研究課題で、データベースの整備・拡充を取り上げ、従来の知識と新しい成果を整理し、今後の研究開発、実用化に必要な情報にアクセスできるようにした点は高く評価できる。

- 世界において長期間にわたって日本の水素関連技術の優位性を確保するためには、基礎研究レベルのより深い知見をベースとした技術開発が不可欠であり、また同時に、学术界、産業界にわたる広範な人材育成が不可欠である。水素関連研究では基礎研究レベルでも解明すべき点が多く、今回の事業が基礎研究に軸足を置いて、そこから事業展開していることは高く評価できる。同時に、人材育成についても、大学における専攻の設置など、各種の育成に向けての努力が見られ、高く評価できる。また、チーム間の連携の成果も目に見える形で現れており、拠点を設置しての集中的な事業展開の結果として、十分なシナジー効果が見られる。
- 本事業の目標は概ね達成されているといえる。
- 中間評価以降、基盤研究と開発がうまくかみ合っていて進んでおり、水素インフラ等の実現に役立つ基礎的知見が得られた。
- 地球温暖化防止のための CO₂ 削減や原油などの資源枯渇など、地球規模のエネルギー・環境問題に対して、低炭素・脱炭素社会に向けたエネルギー変革が人類にとって大きな課題となっている。資源に乏しいわが国では、将来にわたる持続的発展を維持するためには、革新的なエネルギー技術分野の開拓を行い、その成果を広く展開することが肝要である。特に、東北大震災での原発事故により、再生可能な新エネルギー分野の開発に向けて、今日一層の努力が必要な状況に至っている。そのためには、本プロジェクトで実施された水素先端科学基礎研究事業は、当初の目標の燃料電池自動車の導入やそのための高圧水素ステーションのインフラ整備に必要な研究開発事業に留まらず、将来の再生可能な水素エネルギー利用技術に向けての先導的研究事業と位置付けできる情勢下にある。世界的にも、原発廃止にともなう新エネルギー政策の検討や実施が国家プロジェクト的に行われており、再生可能な水素エネルギー利用技術の研究開発を重点課題として鋭意推進されている。このような観点からみて、再生可能なエネルギー分野の新地となる水素利用技術のインフラ整備に必要な特異な技術課題、①高圧水素物性の基礎研究、②金属材料の水素脆化や強度評価に係る基礎研究、③高分子材料のシール性に係る基礎的研究、④高圧水素中での

トライボロジーに係る基礎的研究を、平成 18 年度から平成 24 年度にわたる 7 年間の事業計画のもとに、集中的・体系的に実施され、高圧水素環境で使用する機器の安全設計に資する貴重な技術データが蓄積されており、これらの成果は国際的にみても高い評価を得ていると判断できる。

- 近年、エネルギー基本政策は世界的に最重要視されているが、次の二つの課題がある。一つはエネルギーの安定的な供給であり、二つ目は地球温暖化防止と低炭素社会の実現である。この二つの課題を同時に解決できる方策として原子力発電が世界的に推進されてきた。しかし、昨年 3 月の東日本大震災による深刻な原発事故により、原子力発電は見直しや停滞、および計画中止が相次いでいる。それに代わって注目をされているのが、再生可能エネルギーやシェールガスなどであり、同時に次世代エネルギーとして位置付けられていた水素エネルギーの利用技術の研究や開発も実用化へ向けて世界各国で進められている。このような環境あって、本事業は水素をより安全に利用するためにタイムリーで有意義なプロジェクトである。実施期間が 7 年間と長いが、大震災以降はその重要性がさらに高まったことで、その実用化が加速されており、このような時流も計画に取り入れつつ推進されたことは評価できる。
- 中間評価も担当したがその時は各テーマがバラバラにそれぞれの担当者の得意分野周辺を掘っていてコンソーシアムを組んでいるメリットが感じられなかった。しかし今回は「得意」なものではなく水素インフラ構築に「必要」な、逆に言えばこれまで「不得意」だった材料にも対象を広げそのことで構築しているデータベースの価値を大きく高めることができた。このような成果には水素雰囲気下での各種測定を可能にした多くの創意工夫が必要であったが、これに果敢に挑戦したことで世界に誇ることができ、他では簡単に真似のできない水素分野の研究拠点を実現できたと考えられる。
- 本事業は、水素社会構築に向けた研究事業として相応しいものである。また、水素を国民に広く理解してもらうための信頼感・安全面の後ろ盾ともなっている。研究テーマ選定、体制、成果、普及に至るまで、国民の期待にそって進んでいるものと思われる。今後の継続を期待したい。

〈問題点・改善すべき点〉

- 本プロジェクトは燃料電池自動車の導入や水素インフラ整備に必要な水素に係る基礎的研究を実施する事業であるが、水素充填能力を高めるため 35MPa 水素ステーションから 70MPa 水素ステーションに研究範囲を拡大しており、高圧水素技術の研究が重点的に行われた。水素ガスの高圧イ

ンフラ整備には、高圧ガスに係る安全管理システムの構築が重要であり、技術難易度の高い70MPa級の高圧充填システムが安全管理上妥当か否か、再度検討する必要があると考える。高圧水素燃料を利用した水素ロケット開発で経験した技術課題も参考にして、技術的難易度のリスク評価や安全管理のマトリックス評価を真摯に行い、今後の技術展開に反映させることが肝要である。

- 国内他機関との情報交換をより活発にすべきである（水素脆化の分野）。

〈その他の意見〉

- ・ 本事業は当初は「基礎研究」の意義が大きかったと思うが、近年の世界的な脱原子力や低炭素化の流れにより水素燃料電池の実用化が一部では加速されてきたことから、より実践的な成果が求められるようになってきている。すなわち、このような環境の変化により研究成果には水素の安全性確保と低コスト化の課題を同時的に解決する方向性が求められている。しかしながら、これらの課題はいずれもハードルの高い問題を多く包含し、本事業の期間内に解決するためには十分な期間とは言えないと考える。特に材料の水素脆化のメカニズムはより多面的に解明されるべき課題で、相当な時間を要するテーマであり、即座に実用的な成果を求めることは難しい。
- ・ 大きな問題点は見当たらない。今後、この研究拠点を中心にオールジャパンの体制での水素研究の発展が期待される。現在参画しているメンバーは、国内水素研究を推進している研究者、技術者の中で、主要なメンバーではあるものの、日本全体から見ればその一部であり、今後組織的な枠組みを超えて、広くメンバーを糾合し、より一層の駆動力でもって事業を推進するならば、名実ともに世界をリードしていくことが可能になると考える。
- ・ 本データベースはコストの低減に極めて重要な情報を提供する。すなわち本データベースに基づいて部品・装置の設計を行えばデータが詳細で正確なところから正確な設計が可能となる。その結果、たとえば必要以上に高価な材料を使用する愚を回避できた、などの成果が期待される。逆に言えばいくらデータベースを整備してもそれを有効に活用する手段も同時に提供しなければ宝の持ち腐れになってしまう。もちろん、利用技術を自分自身で開発する必要は必ずしも無いが、利用技術開発者と連携し優れた開発例を世の中に示すことでデータベースの価値をさらに向上させる取り組みは重要と考える。
- ・ 構築したデータベースは当代無比のものであるが、このデータベースの価値はそれを使いやすくするインターフェースの開発によりさらに高めることができると考える。具体的にはデータベースは部品・装置の設計にお

いて最も利用されるはずであるが、設計の中で必要以上に安全率を見込むと高コストの原因となる。このとき、どこが安全率を取りすぎているかを明示できればコスト低減を実現でき水素インフラの拡大に貢献できるはずであるので、これを明示する手段、具体的にはデータベースに基づいて部品の強度などを計算するためのシミュレーションを用意し広く活用できる環境を整えるべきと考える。

- エネルギー技術が環境の改善あるいはエネルギー効率の向上を目指すものである限り、普及してこそ意味を持つ。例えばある技術が優れた性能を示したがコストが高く1%のシェアしか無いとしたらその技術はせいぜい1%の貢献しか環境問題・エネルギー問題には寄与できない。従って普及のための絶対条件、すなわちコストの低減は常に頭の中に置き、目指していかなければならない。
- 再生可能な新エネルギー分野として、今後、水素エネルギー利用技術の大きな発展が世界的に求められている。再生可能な水素燃料を使用した大規模な水素発電所計画が世界的にも注目されている。本プロジェクトで得られた成果を、燃料電池自動車の導入や水素ステーションのインフラ整備だけでなく、水素発電所等の将来の新エネルギー分野までを視野に入れて、今後発展させる努力を期待する。
- 企業の参画もあり、タイムリーに新材料評価や材料開発が進んだ。開発を進めるためには原理原則に基づいた検討が必要である。一方、原理原則の解明を待っていては開発が進まない。開発の段階で得られる知見が原理原則の理解に役立つこともある。両輪の研究開発が重要である。
- データベースを構築することは重要であるが、原理原則の思想に基づいたまとめをしないと単なるデータの羅列に終わってしまう恐れがある。この意味からも原理原則の整理と現象の機構解明は必要である。
- 規制緩和や水素インフラ等を実現するためのデータ取得は必要であるが、これに傾倒しすぎると原理原則の解明がおろそかになる恐れがあるので、注意すべきである。

2) 今後に対する提言

2015年に向けた実用化研究・開発の加速が必要であることは自明であり、今後も安全・安心な水素エネルギー社会実現に向けた研究開発の継続が望まれる。世界的に見ても類い希な優れた研究施設と設備がほぼ整えられた現在、これが我が国の水素材料研究の一つの研究・教育拠点として、今後も有効に機能するよう、国やNEDOは施策を講じるべきである。また、拠点内の情報交換はもちろんのこと、国内外の関係者との議論をより活発に行うことにより、情報発信の発展と拠点内の研究開発レベルの向上が必要である。

水素の実用に向け、性能（安全性、耐久性、効率、など）を低下させること無くコスト削減を果たすための一つはオーバースペックを排除することであり、これを実現するためにも、より使いやすいデータベース利用環境を整備すること、およびデータ蓄積を継続することが必要である。

〈今後に対する提言〉

- ・ 今後も安全・安心な水素エネルギー社会実現に向けた研究開発は重要であり、本事業が継続することが望まれる。世界的に見ても類い希な優れた研究施設と設備がほぼ整えられた現在、これが我が国の水素材料研究の一つの研究・教育拠点として、今後も有効に機能するよう、国やNEDOは施策を講じていただきたい。
- ・ 水素インフラ技術のキーポイントは水素の貯蔵・輸送にある事は世界の共通認識となっている。そしてそのレベル感は「技術の基礎は確立したがまだコストが高い」と表現できよう。従って今後の水素インフラ構築に携わる者の使命は性能（安全性、耐久性、効率、など）を低下させること無くコスト削減を果たすことにあると考える。水素型FC自動車は2015年度には商品化される可能性が高く、水素ステーションなど水素供給インフラはFC車の普及に先行して整備が計られる。コスト低減に対するこだわりは、水素インフラ整備の初期段階すなわちまだまだ水素ステーションの数が少ない時点ではそれほど強くないが、供給インフラ整備が本格化する時点ではコスト低減に対するこだわりは格段に強いはずである。この時点に向けて我々がなさなければならない事の一つはオーバースペックを排除することであると考え。このための基礎データとして、今回のデータベースは極めて重要な役割が期待されるが、これを実現するためにも、データベースを利用できる環境を整備すること、およびデータ蓄積を継続することと合わせて必要であると考え。
- ・ 水素に関する研究拠点を維持することは必要と思われる。拠点内の情報交換はもちろんのこと、国内外の関係者との議論をより活発に行うことによ

り、情報発信の発展と拠点内の研究開発レベルの向上が必要である。

- 2015 年に向けて実用化への研究・開発の加速が必要であることは自明であるが、今回の事業でも今後の発展に不可欠な基礎的な研究が十分であるとは言えない。NEDO の事業としての適切性に議論はあろうが、さらなる発展・基礎固めのためには、今後も基礎・基盤研究の充実が重要である。文科省の少額研究事業に頼らない基礎研究の拡充策を打ち出すことが必要である。
- 今後は組織や分野の枠組みを超えて、広くメンバーを糾合し、より一層の駆動力でもって事業を推進することが望ましい。また、今後も基礎研究に取り組み、この方面でも世界をリードしていただきたい。その意味でも、事業中心者に加えて、他分野の学者も比較的容易に参画できるような体制があればよい。
- 水素の基礎的な物性や水素脆化メカニズムの研究は、水素利用技術の安全性をより高めるために、時間をかけても引き続き実施されるべきである。一方、実用化の動きには、その時点での問題に対して、水素関連機器の使用条件の設定などの実用的な対策により安全性を確保するような対応とすることが望ましいと考える。
- 引続き研究の継続をお願いするなかで、これからの新たな技術、コストダウンに向けた対応にも本事業の中で取組んで頂きたい。PL のもと、複数の専門チームが、ひとつの目標に向かって連携して取組む方法は、効率的、効果的だと思われる。
- 高圧水素ステーションのインフラ整備に係る高圧ガスの安全管理は、安全な高圧ガス水素利用技術が確立しても、安全管理には慎重な対応が肝要である。水素脆性問題以外に、水素がリークして大きな事故に至った例は多くある。高圧ガスの安全管理や取扱に必要な技術マップを検討して、研究の実用化に向けての技術展開に反映させることが肝要である。
- 国際標準化については、産業界主導の提案が出されることが重要であることから、関連する事業者によるコンソーシアムを早急に整備する必要がある。

〈その他の意見〉

- 現在の国内の水素関連の法規制は過度に厳しい点もあり、水素の実用に向けた低コスト化の推進に対して障壁となっていることも否めないことから、本事業の成果により、より具体的な見直しが励起されるように関係機関への強力な働きかけが必要と考える。
- 海外での水素エネルギー利用技術の研究開発では、宇宙開発分野で蓄積さ

れた水素ロケット技術を発展させ、広く展開している状況が見られる。宇宙関連の高圧水素技術の蓄積に富む JAXA 等の関係機関と連携・協力して、再生可能な水素エネルギー利用技術の産業化に向けて鋭意事業化図ることが肝要である。本プロジェクトに参画した多くの企業も宇宙開発関連に携わった経歴があるようで、その技術的背景を考慮する必要がある。中間評価でも指摘されたように、国内の関係機関や産業界との連携・協力が十分行われたとは言い難い。学際的な高度の研究目標に特化せず、宇宙開発と同様の観点で今後、国家プロジェクト的に事業展開を図ることが肝要である。

- また、本事業は、NEDO の他の水素関連事業(「地域水素供給インフラ・社会実証」「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業」)との連携に努めていることも評価する。バランスのとれた効果的な水素研究を進めるためには、連携は必須であるので、NEDO は、現状よりももっと具体的な連携態勢を講じてもらいたい。
- 本事業で得られた技術開発や物性データベースは、法規制の見直しや国際標準化の施策に利用されている。我が国の水素エネルギー関係の施策と戦略のためにも、今後も、この取り組みを発展させてほしい。

1. 2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

水素社会に向けた水素輸送および貯蔵技術開発は、国内外問わず緊要かつ公共性の高い事業である。これを進めるには、水素の基礎物性や水素機器に使用する材料を、安全・安心の観点から基礎的に調べる必要がある。更に、単なる材料特性の評価にとどまらず、水素利用技術に関連する情報をいくつかのデータベースの形でまとめ、利用しようとする事は、民間単独では取り組みがたい公共性の高い課題であり、NEDO の関与はきわめて妥当である。

また、世界的にも計測実績のない高圧水素物性を正確に測定することや、高圧水素環境下における各種材料特性を調べることは、水素関連分野の我が国の研究基盤を強め、国際競争力を高める。併せて、国際貢献にも繋がり事業目的としても妥当である。

〈肯定的意見〉

- 事業目的も妥当である。世界的にも計測実績のない高圧水素物性を正確に測定することや、高圧水素環境下における各種材料特性を調べることは、水素関連分野の我が国の研究基盤を強め、国際競争力を高める。併せて、国際貢献にも繋がるので重要である。
- 水素利用を進めるには、水素の基礎物性や水素機器に使用する材料を、安全・安心の観点から基礎的に調べる必要がある。これは民間単独では取り組みがたい公共性の高い課題なので、NEDO の関与はきわめて妥当である。
- 本事業は、水素利用における基盤的な知見を収集し、必要な技術開発を推進する上で、必要かつ妥当な事業である。単なる材料特性の評価にとどまらず、水素利用技術に関連する情報をいくつかのデータベースの形でまとめ、利用しようとする事業は公共性の高いものであるといえる。2015 年に向けて、産業界と大学・研究機関との情報・技術の交流を目指しており、今後一層の交流拡大が期待される。
- 水素社会に向けた水素輸送および貯蔵技術開発は国内国外問わず緊要かつ公共性の高い事業である。特にエネルギー問題が国内で大きな関心事となっており、その重要性が増している。真に安心できる水素技術を早期に確立するためには、基本原理に基づいた多岐にわたる技術開発を集中的に実施し、それを短期間で纏め、実用に資する枠組みが必要であるが、これを民間だけで自発的に実施するのは困難であり、国のサポートが不可欠である。
- 燃料電池自動車等の水素利用技術にした再生可能な新エネルギーシステ

ムとして、世界的にも技術革新が進む水素エネルギー利用技術に係る研究開発は、公共性が高い事業であり、産業界との横断的事業連結を効率的に行うことは、NEDO プロジェクトとして適切である。特に、東日本大震災以降の我が国のエネルギー政策は大きな転換期を迎えており、水素燃料電池自動車の導入や水素関連インフラ整備に必要な技術研究は、産業界を先導し先進技術開発に向けての活力を与える大きな役割としても、本事業の推進は極めて重要である。今後、新たな事業展開を図る上で、幅広い水素エネルギー利用技術の育成や専門的技術者の育成がからみて、再生可能な水素エネルギー利用技術を支える基盤技術として継続・発展させることが肝要である。

- 水素社会構築という大きなエネルギー関連の社会変革であり、その中で技術を確立させることは重要である。これは、一企業、一業界団体ができることではない。産学官一体となった取組みが重要であり、NEDO として相応しい事業である。他の水素関連事業との連携を保つ一貫した体制で取組むことで、大きな成果が出ていると思われる。
- 多くの大学・企業と協力関係を結び材料サンプルの提供と各種測定を行いデータベースを拡充していくという作業は利害関係を排除した組織でないと不可能であり、今回 NEDO 主導の下、このプロジェクトが推進されたことは適切と考える。
- 超高压水素環境、長時間試験など、企業で取得することが困難なデータを採取することは本事業の重要な役割である。水素インフラ関係の規則整備に必要なデータや知見が提供されている。
- エネルギー政策の二つの課題である安定供給と低炭素化を同時に解決するためにタイムリーで有意義な研究開発事業である。

〈問題点・改善すべき点〉

- 研究費は莫大であり、もっと系統的な実験データ（水素脆化特性だけでなく、現象解明につながる詳細解析など）が必要である。
- 水素利用技術に係る先端的研究開発を効率的に展開するには、事業計画策定の前に、水素関連技術の技術マトリックス評価やリスク管理が重要である。技術マトリックス評価やリスク管理を行わないと、興味的な研究スタイルになり、高度な学際的目標に重点を置いた研究計画になりやすい。実用化を視野に入れない研究は、インフラ整備に必要な新規技術開発が不十分になる場合がある。研究内容が高度な内容でなくても、設計技術に必要な重要な課題は多岐にわたる。高度な学際的研究目標とともに、基盤技術としての着実な新技術開発を念頭に、専門的技術者育成の観点からみて、

重点化を必要とする課題の抽出を技術マトリックス評価から得ることが肝要である。

- 中間評価においても指摘されているが、広範な課題間の関連付けが弱い部分が見られ、今後の成果の公表については個々の課題と全体の目標との関係付けにさらに工夫・配慮した方が良い。
- 水素エネルギーの実用化への課題と、その解決のために、本事業がどのように資しているかを、より具体的に、また一般市民レベルで容易に理解できる工夫やアピールが必要と考える。

〈その他の意見〉

- ・ 水素社会に対する全体のロードマップ、本事業あるいは各研究課題、さらにはその下の個別テーマと各階層における目標・ロードマップが明確になっていることは必要で、重要なことである。しかしながら、下の階層になるにしたがって全体、本事業の目的との関係が不明確になっているように思われる。今後の展開においては、それぞれの個別テーマを全体の中で位置づけた上でのテーマ設定が必要であろう。
- ・ 水素利用技術に係る先端的技術の発展には、世界的にも多くの例があるように、宇宙開発技術で育成された水素燃料ロケット技術を利用することが効率的である。現在、JAXA が開発したロケット技術は民間に移行され、民間活力の向上に大きく貢献している。プロジェクトの事業計画や研究開発の進捗過程を見ても、JAXA 等の宇宙関連機関との研究協力が見えないのは残念である。

2) 研究開発マネジメントについて

研究開発目標は具体的な根拠に基づいた定量値が設定されており、高圧水素物性データの採取と整理、水素脆化メカニズムの解明、あるいは水素トライボロジー特性の基礎データの蓄積などは、いずれも水素の安全利用のために妥当である。特に資金を重点配分し、九州大学に集中的に施設、設備を整備したことは、効率的な運用と研究の進展に貢献した。研究開発のチーム構成もやや分野の偏りが見られるものの、個々の基礎研究力・開発力・技術力も高く、プロジェクトリーダーの下、九州大学および産業技術総合研究所が中心となって、全体のプロジェクトをコントロールする研究体制が整っていた。高圧水素インフラ整備に必要な要素を4本の柱として整理・運営し、企業参加もあって材料開発などがタイムリーになされており、マネジメントは良好であった。また、水素ステーション設置費用の低コスト化などの社会情勢の変化、要望に機敏に対応している。

一方、基礎研究にも力点を置くということから考えると、より多様な分野や組織から人材が参画してもよかった。また、本プロジェクトで整備した設備や試験機を将来にわたり維持管理して、広く、産業界にも利用できる環境を整備することが肝要である。そのためには、本プロジェクト終了後の設備維持管理や専門的技術者の確保等を継続的に行う必要がある。

〈肯定的意見〉

- 研究開発目標については達成評価に資することが可能な定量値が具体的な根拠に基づいて設定されており妥当である。また、FCV およびそれに伴うインフラ整備の社会的要請に対して機敏に対応する姿勢が感じられる。研究開発のチーム構成もやや分野の偏りが見られるものの、実用化・技術化に向けた要請に応えるためには、機械・材料関連の研究者・技術者が中心となるのは必然であり、また、個々の基礎研究力・開発力・技術力も高く、おおむね妥当である。プロジェクトリーダーの下、九州大学および産業技術総合研究所が中心となって、全体のプロジェクトをコントロールする研究体制が整っている。
- 高圧水素物性データの採取と整理、水素脆化メカニズムの解明、あるいは水素トライボロジー特性の基礎データの蓄積などは、いずれも水素の安全利用のために妥当な研究開発目標である。燃料電池車と水素インフラの安全確保のための先端科学基礎研究として、妥当な研究開発計画が設定されている。また、水素ステーション設置費用の低コスト化などの社会の情勢の変化にも真摯に対応しており、研究開発のマネジメントは適切である。
- 開発の目標、実施体制などは妥当である。特に資金を重点配分し、場所的

にも九州大学に集中的に施設、設備を整備したことは、効率的な運用と研究の進展に貢献したであろうと思われ評価できる。協力機関（大学）が九州地区に偏っていることはやむを得ないと思われるが、例えば水素脆化に関する全国に広がる研究者（大学、企業）との接点、連携が十分であったかについては、今後の検討が必要な事項であろう。

- 企業参加もあって材料開発などがタイムリーになされており、マネジメントは良好である。水素インフラ等他事業への情報発信も適切である。
- 高圧水素インフラ整備に必要な要素を4本の柱として整理・運営したことは秀逸なマネジメントではなかったかと推測する。片手で数えられる位の組織数であるのでメンバー個人個人が自分の立ち位置を容易に確認できること、セクションが少ないので組織の見通しが良かったこと、などが要因としてあったのではないかと考える。そして、それ以上に村上 PL のひととなりが多くの人をひきつけ、村上 PL をサポートしたのではないか。
- 7年間の長期に渡る事業の中、PLのもとで、社会情勢の変化、要望に機敏に対応している。複数のチームの存在と、相互の協力、連携があればこそその成果だと思う。今後もし是非、継続して頂きたい。
- 本プロジェクトが7年間で達成する研究目標は、将来の水素エネルギー利用技術、特に燃料電池自動車の導入、水素ステーション等のインフラ整備に必要な水素関連の先端技術を、九州大学を拠点とする先端的試験設備を整備するとともに、水素物性、水素材料、水素脆性、高分子材料、トライボロジーの基礎的分野に特化して、集中的に行われた。個々の研究課題については、広く産業界と連携協力して行われた。このような水素利用技術に必要な基礎的研究を集中・統合的に実施した例は世界的に見てもなく、今日、我が国が必要とする再生可能エネルギー開発の先駆けとして大きな使命を果たしている。水素利用技術に関しては、高圧水素ガスに係る安全管理システムの構築が必然的な課題であり、試行錯誤を繰り返しながら、世界的な研究レベルまで事業計画を推進できたのは、研究管理目標や目標達成に向けての要素研究の実施が着実に行われた結果と判断できる。また、研究成果の新規性やそのレベルの高さは、個々の専門的成果の評価で述べられている通りである。このような新エネルギー分野を開拓する先導的プロジェクトは、重要な研究課題を着実に実施して、国際的にも高いレベルの新規研究成果を得ることが重要であり、プロジェクト管理はその目標を達成したと判断できる。
- 7年間の事業期間中に世界的なエネルギー環境の変化があり、水素の実用化へ向けた活動として、計画の追加や見直しが行われたことは評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 本プロジェクトは、2006年度から開始され、7年間の長期にわたり実施された。その間、九州大学を拠点とする世界的レベルの最新の研究設備を整備してきた。本プロジェクトで整備した設備や試験機の整備状況は、個々の研究成果で述べられているが、将来にわたり維持管理して、広く、産業界にも利用できる環境を整備することが肝要である。そのためには、本プロジェクト終了後の設備維持管理や専門的技術者の確保等を継続的に行う必要がある。具体的には、試験設備や試験機の設計等に係る図面管理、運用時に問題となった不具合等の技術データ管理、試験装置利用に係る技術的ノウハウ等、先端的研究を支える設備管理体制を構築されることを望む。このことは、将来の技術者育成にも必要であり、また、研究担当者が散在した場合、技術の伝承と継続に役立つと考える。そのためには、水素材料先端科学研究センターを独立した公的な研究機関に位置付け（例えば独法化）、専属職員による運営を背景にした研究体制を今後検討する情勢にあると思われる。
- 関連した事業や機関との連携が行われている。
- 基盤研究と密接に結びついた材料開発が必要であるが、それに足る水素脆化や摩擦に関する機構の解明が追いついていない感がある。他の国内研究者とも意見交換して水素脆化機構の解明を進めてほしい。

〈その他の意見〉

- ・ 基礎研究にも力点を置くということから考えると、もう少し多様な分野や組織から人材が参画してもよいはずである。
- ・ 将来、再生可能なエネルギー分野を先導できる基礎的研究分野を拡張し、他のプロジェクトとの連携協力が今後の課題となる。また、今日、東日本大震災以降、再生エネルギー分野の企業化に向けて、産業界は大きく注目している。また、世界的にもドイツを中心に水素エネルギー利用技術の研究開発を国家的戦略として取り上げ、現在、鋭意研究開発が行われている。世界的な動向に遅れず、次期プロジェクトとしては、再生可能な水素エネルギー技術として本プロジェクトの成果を継続的に発展させることを期待する。
- ・ 研究開発実施の事業体制は概ね良いが、水素関連の研究はいろいろな分野の学協会で行われている。例えば、水素脆性については、日本鉄鋼協会において、多くの人が研究に取り組んでいる。いろいろな分野の水素研究者と意見交換をする場を持つことが必要かもしれない。
- ・ 本事業に関しての費用対効果（予算・配分の妥当性）については、開示さ

れたデータからは判断できない。成果に対してかなり大規模な費用である印象は強い。

3) 研究開発成果について

水素の物性、材料、トライボロジーに関して集中して研究を行い、水素関連の世界的な研究拠点を作り上げたことが第一の成果である。本事業における最大の目標は高圧水素ガス環境下で接ガス機器を安全に使用するための指針を示すことにあるが、個々の研究テーマも、また全体としてもおおむね目標を達成しているか、達成予定である。成果は論文、特許、データベース、研究会やフォーラムの形でそれぞれ適切に公開されており、多くの世界初の貴重なデータが提供されている。国際標準化のイニシアチブを取るための取り組みも高く評価できる。

しかしながら、水素脆化現象の機構解明という点では、水素脆化のモデルを提案するレベルに留まっており、そのモデルを検証するための詳細観察や解析が不十分である。また、安全性を確保して運用するためのより実用的な利用方法の提案についても、種々の材料のデータベースの提示だけでは十分とは言えない。

〈肯定的意見〉

- 個々の研究テーマも、また全体としてもおおむね目標を達成しているか、達成予定である。成果は論文、特許、データベース、研究会やフォーラムの形でそれぞれ適切に公開されており、多くの世界初の貴重なデータが提供されている。国際標準化のイニシアチブを取るための取り組みも高く評価できる。
- 本事業における最大の目標は高圧水素ガス環境下で接ガス機器を安全に使用するための指針を示すことにあるが、そのための基礎的な研究成果が得られたことは評価でき、全体的に当初の目標値を概ねクリアできていると思われる。
- 水素の物性、材料、トライボロジーに関して集中して研究を行い、水素関連の世界的な研究拠点を作り上げたことが第一の成果である。
- 本プロジェクトが7年間で達成する研究開発目標は、要素研究に必要な高圧水素試験設備の整備や高圧ガスに係る安全管理を行いながら、着実に行われた。研究分野は、水素物性、水素材料、水素脆性、高分子材料、トライボロジーの基礎的分野を集中的に実施、世界的レベルの成果を得ている。この成果は、論文発表や国際標準化を目標に、海外の多くの関連機関との連携・協力を推進しており、今後、我が国が担うべき再生エネルギー政策の先導的役割として、水素エネルギー技術開発の推進に期待される基盤を構築したことの成果は大きい。特に、東北大震災以降の原発エネルギー政策の見直しは、世界的にも現在大きな問題となっている。わが国に限らず、

国際的にも再生エネルギー技術の開発の鋭意推進を国家プロジェクトと実施すべき情勢にある。このように本プロジェクト発足時の状況から大きく世界的に水素エネルギーを取り巻く環境は大変革されており、このような状況を鑑みれば、水素エネルギー技術の研究開発の国際化に向けて、水素利用技術研究の世界的な拠点として、その研究活動も含め大きく貢献できたことは高く評価できる。

- 具体的な研究成果として、例えば、①高温高压水素物性データの採取と整理、②超高压水素中の金属材料の水素環境疲労試験と水素脆化メカニズムの検討、③高分子材料の水素物性と劣化・破壊メカニズムの検討、④高压水素トライボロジーのデータ採取と解析、および⑤上記4項目の実験結果のデータベース化とその産業界への提供などが挙げられる。この外、企業との連携研究もあり、基礎から応用にわたって、幅広い研究が行われている。
- 成果の全体的な目標はクリアし、80～90%の達成度と考えられる。ただ、個別に設定された開発等の目標は達成されているといえるが、次のステップにつながるより基礎的な学術・技術については、高く評価できる成果はあまり多くない。知的財産権に関しては、特許による技術の開示数を評価の基準とするべきかについては議論の余地があるが、特許出願に関するポリシーが不透明（多くの特許出願があるテーマとほとんどないテーマがある）で判断しかねる。
- 高压ガスを安全に取り扱う技術の確立に必要な各種材料の水素雰囲気下での挙動に関するデータが整理され使いやすい形で提供されている。従って本事業の目的は達成されていると評価する。
- データが使いやすい形で提供されるので種々の応用問題にも対応しやすい。従って新しい問題にも適用しやすく結果として特許の取得も取得しやすくなり、日本の技術力ひいては国力の増進に寄与できる。
- 複数の専門チームに役割を分担しながら、より深く研究し、目標を達成、成果を普及させている。我が国の研究拠点としての実績、知名度も誇れる状況だと思われる。
- 国内特許9件に比べて、外国特許は34件と多く、知的財産権等の取り扱いも戦略的に行われている。
- 概ね、目標を達成している。

〈問題点・改善すべき点〉

- 水素脆化現象の機構解明という点では不十分である。水素脆化のモデルを提案するレベルに留まっており、そのモデルを検証するための詳細観察や

解析が不十分である。

- 実用的なほとんどの材料で発現している水素ガスによる悪影響のもとであっても、安全性を確保して運用するためのより実用的な利用方法の提案については、種々の材料のデータベースの提示だけでは十分とは言えないと考える。
- 基礎研究の成果が比較的国内向けの雑誌に論文として掲載されている傾向がある。世界に基礎研究のレベルの高さをアピールし、インパクトを与えるためにも、多く注目が集まる海外の国際論文誌に投稿するなど、論文の発表先については検討の余地がある。
- データベースの使いこなし技術を周知させ日本の誰もがこの情報の恩恵に浴せる状況を作って欲しい。一方で外国のただ乗りを防止するシステムも確立すべきである。
- 予算のわりに系統的なデータが充分でないように見える（水素脆化）。

〈その他の意見〉

- ・ 各研究テーマで、データベースを整備し、従来の知識と新しい成果を整理し利用できるようにしたことは高く評価できる。また、データベースへのアクセスを制限付きとしたことも理解できる。しかしながら、データベースの存在すら知らない研究者が多いのが現状と思われる。例えば、それぞれのデータベースについて、関連する学会誌等に寄書・記事等でデータベースの存在を広く知らせ、データベースの管理者が閲覧を希望する研究者にアクセス権とその範囲を制限して開放するなどの公開方法が考えられてもいいのではないだろうか。
- ・ 水素エネルギー問題の重要性は、原発廃止問題を起点に、将来のエネルギー政策を課題として、再生利用エネルギーシステムの構築に大きな期待が世界的にも寄せられている。水素燃料電池自動車に限らず、幅広い水素を用いたエネルギー技術開発が我が国の新エネルギー政策で取り上げるべき情勢にある。そのためには、高度な研究成果の報告や産業界との連携・協力に限らず、一般に向けての情報発信を今後、積極的に行う必要がある。先端的な電気自動車の開発は、広く一般にも理解できるが、水素を利用する水素燃料電池自動車は安全管理の面からみて、その危険性を払拭できるか否か、水素燃料電池自動車の将来像を現時点で再評価することも重要である。
- ・ 全体として、高いレベルの研究が行われているものの、個々の研究については、未だ十分には解明されていない問題が多い（例：金属の水素脆化メカニズムやトライボロジー解析ほか）。先端基礎研究ゆえ多くの難しさが

あるのは当然のことではあるが、一步一步、水素研究を前進させてほしい。

- 水素材料先端科学研究センター設備の世界的レベルでの研究活動の維持には、海外研究者の招聘や専門技術者の育成など、予算措置等を含む多くの課題を含む。また、九州大学がその中核組織になるが、学際的組織に偏らず、広く産業界や国の研究機関との連携・協力を得ることが肝要である。
- 本事業で設置された世界的にもレベルの高い多くの試験設備は、水素安全利用技術の確立のために極めて有用なものであり、今後も、より実践的な視点から、その更なる利用がはかられるべきである。
- 費用対効果については、判断できるデータがない。

4) 実用化の見通しについて

データベースの提供や水素関連の各種根本メカニズムの提示が具体的な出口イメージとして設定されており、そこに至るまでのマイルストーンや、達成への見通しも立っている。特に、産業界からの参画を重視している点は高く評価でき、一定の成果を挙げており、今後も産業界への波及が期待できる。また、企業で採取することができないデータを提供するなど貴重な技術データの集積は、高圧ガスに係る安全システムに役立つことが期待でき、例えば、国内の高圧ガス取扱に係る規則等の内容の正確性・充実化に向けての働きに大きく貢献している。特に安全性の高い設計技術の構築には、要素研究の成果が大きく貢献することが期待できる。さらに、水素分野の人材育成にも貢献している。

しかしながら、技術的な波及効果を期待するためには、基本原理の解明や普遍的なデータベースの構築が必要であるが、水素脆化については両者ともに満足できるレベルではない。また、高圧機器などで使用したい低合金鋼などの安全利用に関する具体的な成果も十分とは言えない。

〈肯定的意見〉

- データベースの提供や水素関連の各種根本メカニズムの提示が具体的な出口イメージとして設定されており、そこに至るまでのマイルストーンや、達成への見通しも立っている。特に現場(産業界)からの意見を吸い上げ、現場にアドバイスを送る体制を整えるために、産業界からの参画を重視している点は高く評価でき、一定の成果を挙げている。また、人材育成を通してプロジェクトの効果を長期にわたって維持継続しようとしている点も高く評価できる。
- 本プロジェクトの研究分野は、水素物性、水素材料、水素脆性、高分子材料、トライボロジーの基礎的分野を集中的に実施、世界的レベルの成果を得ていると評価できる。成果の実用化の可能性は、本プロジェクトが対象とする燃料電池自動車や水素ステーション等のインフラ整備に必要な要素研究に特化していることから、各段階でのマイルストーンは明確であり、その成果は産業界への波及が今後期待できる。また、水素研究センターを中核として、高圧水素関連の設備を使用しての貴重な技術データの集積は、高圧ガスに係る安全システムに役立つことが期待でき、また、国内の高圧ガス取扱に係る規則等の内容の正確性・充実化に向けての働きに大きく貢献している。特に産業界の既存の水素関連設備を支える設計技術は、不十分な技術データをベースにしており、安全性の高い設計技術の構築には、要素研究の成果が大きく貢献することが期待できる。

- 本事業で開発した技術やデータは、法規制の見直しや国際標準化施策にも用いられており評価できる。さらに、水素分野の人材育成に貢献している。
- 企業で採取することができないデータを提供するなどして、水素インフラの基準化等に協力しており、実用化を促進していると言える。
- 実用化に関しては、具体的な開発、提案がなされており、当面の目標は達成されたと評価される。目標に対する個々のテーマの問題点も認識されており、今後の進展が期待できる。本事業とは直接関係ないが、人材育成の大学院の設置、運営に協力している点は評価できる。
- 複数の専門チームに役割を分担しながら、より深く検討し、目標を達成、成果を普及させている。材料、接合研究などは、今後の新たな施工技術に、また各種計測技術は、新たな産業育成にも波及する効果大きい。
- 水素ガスの特性把握やトライボロジー、高分子材料についての研究成果は、実際の水素ステーションなどの設計や設置に有意義なデータである。
- 論文・特許のみならず、著書「水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方」(村上PL他3名)を出版し、最新の成果・データを水素機器の設計、製造の現場へ提供している。
- 本プロジェクトの成果が実用化される期待は極めて大きい。例えば、部品・装置の設計にデータベースが適切に利用され、低コスト・高性能の製品を生み出すことは確実である。

〈問題点・改善すべき点〉

- 技術的な波及効果を期待するためには、基本原理の解明や普遍的なデータベースの構築が必要であるが、水素脆化については両者ともに満足できるレベルではない。
- 材料の水素脆化特性の評価については、対象とされた材料はオーステナイト系が主体であり、高圧機器などで使用したい低合金鋼などの安全利用に関する具体的な成果が十分とは言えないと考える。
- 世界に先駆け優れたデータベースを作り出したが世界の追い上げは急である。今回多くの特許をとったとしても追撃を阻止することはできない。日本の優位性を維持するためには国内／海外を問わず常に新しいことに挑戦し、積極的に新しい情報を掘り起こす情熱を多くの研究者が共有することが必要である。
- 再生利用エネルギー技術の開発が世界的な課題となっている状況を鑑みれば、本プロジェクトは我が国の水素利用技術の先導的な役割を担うものであり、その成果を広く広報することが重要である。また、海外から広く先端技術者の招聘を図り、今後、研究活動を一層高めるとともに、その活

動を支える水素材料先端科学研究センターの体制を明確にする必要がある。

- 特に大きな問題は見当たらない。事業開始から7年を経過したことで、今後については、具体的にどのような人材が育成されたのかについても具体的に示していく必要がある。

〈その他の意見〉

- ・ 本事業に関連する研究者、技術者の育成のための機関の設置は重要で、大学院の設置は画期的といえる。ただ、企業の技術者（社会人）の教育・研修には大学院という形態・運営が最適かについては議論の余地があろう。
- ・ 水素社会構築のための技術は、今後も革新が続くと思われる。また普及期には、さらなるコストダウンが望まれるところである。我が国の研究拠点として、研究の継続を望みたい。
- ・ プレクレーター用材料などの追加テーマについても、材料学的な見地からのより深い考察が必要と考える。

2. 個別テーマに関する評価結果

2. 1 高压水素物性の基礎研究

1) 成果に関する評価

十分に考慮され作成された計画の下、系統的なデータ収集が行われ、世界初の高温高压水素の高精度データベースを構築したことは、大きな成果である。また、データ獲得時に測定手法の問題点を明確にし、適切な改良が加えられていることも特筆すべきである。高精度水素状態方程式の確立や水素物性データベースの構築および公開は、閲覧を許可した企業等に対し、DVD 及びWEB等の電子媒体によって実施されており、成果の普及の面でも高く評価できる。水素ステーションにおけるシビアアクシデントなどの災害想定を実施するために有用なデータであり、その意義は大きい。

ただし、データベースの充実と利用法の拡大については、公開の方法を含めてさらに検討する必要がある。また、実用を考えると一般的には、不純物が入る場合を考えるのが自然であり、不純物に対する各データの敏感性に対する知見が加われば、さらに安心して使用できるものになる。

(肯定的意見)

- おおむね目標が達成されている。広い温度や圧力範囲にわたる世界的に見ても貴重な水素物性データが獲得できている。データ獲得時に測定手法に関して問題点を明確にし、適切な改良が加えられていることも特筆すべきである。高精度水素状態方程式の確立や水素物性データベースの構築および公開は、閲覧を許可した企業等に対し、DVD 及びWEB等の電子媒体によって実施されており、成果の普及の面でも高く評価できる。
- 水素ステーションにおけるシビアアクシデントなどの災害想定を実施するために有用なデータであり、その意義は大きい。
- 高压水素の物性データベースの構築は、水素利用技術研究を支える基盤的な研究課題であり、特に、高压水素ステーション設備を設計する際の必要となる高压・高温水素の熱的物性データは、古くは1970年代の宇宙開発でのNASA水素ロケットの開発で構築されたデータベースが存在するが、これは低压・低温での熱的物性値を外挿して得られたものであり、今日の熱物性測定技術の高度化と対応したデータベースではない。このプロジェクトでは、高压水素を取り扱う最新の熱物性測定装置を整備して、試行錯誤を繰り返しながら、世界初の高温高压水素の高精度データベースを構築したことは、大きな成果である。熱物性を調べる研究は、華やかな研究成果のイメージがないが、この基礎的な精度の高いデータベースがない場合、高压ガス機器の安全設計の精度の高い限界が不明になり、安全管理

システムの基盤が不安定になることから、本データベースの公的機関や産業界での活用に期待できる。また、水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定では、特にシール材に使われるゴムの水素溶解度の定量測定を可能にした測定技術は、関連分野と協力して、高分子材料の水素透過性や水素溶解性の貴重なデータベース構築に期待できる。また、このような水素透過性や水素溶解度などは、水素安全管理に必要とされるため、これらの貴重な技術情報の公開は、産業界も大きな期待を寄せている。

- 500°Cの高温域までの高圧水素物性に関するデータベースを構築し、限定公開したことは成果の実用化の一端として高く評価できる。データベースの充実と利用法の拡大については、公開の方法を含めてさらに検討する必要がある。
- 十分に考慮され作成された計画の下、系統的なデータ収集が行われ、その結果使いやすいデータベースが出来上がった。水素技術分野のスタンダードとなることが期待される。
- 例えば、高圧水素熱伝導率の測定にも見られるように、新しく測定装置を開発し、高圧下において広い温度範囲で熱伝導率を測定し、偏差2%で再現できる相関式を作成している。他の種々の高圧水素物性についても、新装置の開発を行い、貴重なデータを採取している。
- これまでにない高温高圧状態における水素の基礎データを取得したことは評価できる。今後、このデータが世界的に参照されることが期待できる。
- 広範囲の温度、圧力条件下で、物性データを取得、また近似式を確立したことは素晴らしいことである。また、データベース化は多くの関係者に活用される手段として有効、かつ機器開発企業の利便性の向上に期待できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 純粋水素ガスの主要熱的物性データ以外に、純粋水素ガスに含まれる不純物ガスの問題が、高圧ガス機器の寿命やトライボロジーに影響することが、本プロジェクトでも明らかにされている。不純物ガスの混入は高圧タンク等の安全管理に影響を与える腐食問題を生じる。このような見地から、今後、不純物ガスの水素ガスの熱物性値に与える影響を調査検討することが今後必要である。
- 金属材料への水素の溶解度は測定・検討されていないようだが、既存のデータで（高温・高圧まで）十分であるとの判断なのか？ 検証は？
- FCに使用されるレベルの工業用純度の水素ガスの物性についても言及されたい。

〈その他の意見〉

- ・ 純度の高い水素ガスに対するデータベースが構築されているが、実用を考えると一般的には、不純物が入る場合を考えるのが自然である。不純物に対する各データの敏感性に対する知見が加われば、さらに安心して使用できるものになる。

2) 実用化の見通しに関する評価

本要素研究で得られた高精度な水素物性データベースを産業界に提供することが出口イメージとして明確に設定され、系統的に構築されたデータベースであり、利用者にとって使いやすく、柔軟に対応できる仕組みができていることは高く評価できる。これらの基礎データは、高圧水素容器からの水素漏洩量の推定等に活かされ、高圧水素容器の規格のための技術情報として活用されている。また、水素ステーション関連機器、FCV 関連機器の開発に有効なだけに留まらず、分析・測定機器、新材料などの開発にも波及効果が期待できる。

また、物性研究であることから、特許や実用化とはなじまないが、高分子材料、トライボロジーとの連携が見られた点があることも評価できる。

〈肯定的意見〉

- 高精度な水素物性データベースを産業界に提供することが出口イメージとして明確に設定されている。それを用いてのシミュレーション解析例も提示されており、利用者にとって使いやすいデータベースになっている。また、利用者が新たなシミュレーションを企画した場合にも、柔軟に対応できる仕組みができていることも高く評価できる。得られている基礎物性値は多くの関連事業でも使用されるものであり、その波及効果は大きい。
- 水素物性データベースも作成しており、WEB による公開も予定している。これらの基礎データは、高圧水素容器からの水素漏洩量の推定等に活かされ、高圧水素容器の規格のための技術情報として活用されている。また、水素ステーションの性能評価にも本データベースが活用されるなど、成果の関連分野への波及効果は大きい。
- 物性研究であることから、特許や実用化とはなじまないが、高分子材料、トライボロジーとの連携が見られた点があることは評価できる。
- 水素ステーション関連機器、FCV 関連機器の開発に有効なだけに留まらず、分析・測定機器、新材料などの開発にも波及効果が期待できる。
- 系統的に構築されたデータベースであるので卑近な例であるが単位やパラメータを定義する数学的表現も統一されていて非常に使いやすいものになっている。今回水素脆化などの動的現象に各種材料がどう影響されるかについて、信頼度の高いデータを得た事は今後の水素インフラに関する材料選定、あるいは機器開発にとって極めて好ましい影響があると期待できる。
- 本要素研究で得られた高圧・高温水素の熱物性データベースは、関係機関や産業界で利用活用が可能ないように配慮されており、当初計画の通り着実な成果を得ている。高圧水素機器で安全管理上問題となる微量水分の露点

測定では、独自技術の開発により、精度の高い露点推定や許容水分濃度の評価技術は高く評価できる。これらの成果は、関係機関や産業界への貴重な技術情報を提供するものであり、大きな成果であり、不純物ガスの影響評価に係る研究に発展できることが期待できる。

- 水素基礎データが実用化に直結することはないが、世界標準データとして実用化の基盤を支えることが期待できる。
- 取得されたデータがシミュレーションなどに応用されることが実用化イメージとして明確になっている。

〈問題点・改善すべき点〉

- 水素技術マトリックス評価により、熱物性測定技術やデータベースの活用など、幅広い応用分野の調査を行い、高圧水素設備の安全設計に必要な水素透過性や水素溶解度などのデータベースを重点化して調査する必要がある。

3) 今後に対する提言

物性データの収集は、基礎的・基盤的研究として極めて重要であり、今後、予算削減により中止された比熱の測定や、不純物に対する物性値の敏感性などの知見の追加が必要である。

将来的には、高圧・高温水素ガスの熱物性値のデータベースを、水素発電所など、再生可能な水素エネルギー技術の開発に必要な熱物性データベースや、水素に関連する化学プラントの安全管理情報を得て、水素を含む有機ガスへの熱物性データベースへの拡張も産業界に対して有益な貢献になる。

〈今後に対する提言〉

- ・ 高圧・高温水素ガスの熱物性値のデータベース化は、将来、水素発電所などの大規模発電システムで多量の水素燃焼をともなう技術開発が期待される。海外でもこの種の水素発電システムの開発に向けて、鋭意研究が進められている。このような状況下にあるため、再生可能な水素エネルギー技術の開発に必要な熱物性を調査する必要があると思われる。また、水素に関連する化学プラントの安全管理情報を得て、水素を含む有機ガスへの熱物性データベースの拡張も産業界に対して有益な貢献になる。また、液体水素を利用した再生可能なエネルギー技術の開発が次期プロジェクトとして必要な情勢にある。水素ロケット関連で公開された液体水素や低温水素の熱物性を参考に、液体水素や低温水素の熱物性取得の検討を早急に進める情勢下にあると思われる。また、液体酸素や液体窒素など液化気体や低温ガスの精度の高い熱物性のデータも将来必要になると思われる。
- ・ 物性データの収集は、基礎的・基盤的研究として極めて重要であり、網羅的にデータベースとした点は評価されるが、本事業との関連性、特に他の課題との関連性やデータベースの利用技術についても今後検討するべきである。
- ・ 不純物に対するデータベースの物性値の敏感性の知見の追加について検討していただきたい。
- ・ 予算削減により、比熱の測定が中止されたが、高温の水素の熱力学関数を推定するには、比熱のデータが必須であるので、この測定を計画してほしい。
- ・ 別プロジェクトで進行中の水素ステーションシミュレーションでの活用とその成果について紹介すれば、より実用面での成果として効果的ではないか。
- ・ 今後、どこまでデータの範囲を拡大するのか、費用対効果の検討が必要である。

- データベースを使いこなす技を高めること、そしてその技を誰もが使えるように設計システムを工夫することが求められる。

〈その他の意見〉

- 亀裂からの水素漏洩メカニズムは、亀裂の程度により大きく異なる。漏れの音速が問題となる漏洩状態は、タンク圧の急激な低下をもたらすため、その検知は容易である。しかし、微小なクラックからの漏れの検知は、設備周辺の風速等の環境条件により、一般に用いられる水素検知器でも検知不能なことがある。高圧水素インフラ整備の安全管理システムには、このような微量漏洩検の検知能力向上技術の研究が必要と思われる。また、不純物ガスの混入は高圧タンク等の安全管理に影響を与える腐食問題を生じる。構造材料の腐食問題は、化学反応を含む複雑なメカニズムを有する。不純物ガスの水素ガスとの化学反応や金属腐食に与える影響を調査検討すること必要である。

2. 2 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究

1) 成果に関する評価

高圧水素環境下での水素脆性化メカニズムや水素疲労メカニズムの解明に向け、高圧水素機器の各種構造材料の評価を中心に研究が実施され、多くの技術情報を得ることができ、水素用高圧構造材料の安全管理設計に大きな貢献ができたと評価できる。また、従来の水素脆性化メカニズムに新たな知見を提供し、各種の水素脆性・水素疲労の材料評価データを得るとともに、高圧水素環境下での安全限界を見極める破壊メカニズムの検討を進め、設計理念の高度化に大きく貢献した。水素用構造材料データベースの整理は、材料選定、機器設計において重要であり、実用性の上でも高く評価できる。企業との連携研究も積極的に行われ、基礎的知見を応用へとつなげていく意思が感じられる。特許、論文なども相当数あり、活発な研究が行われたことを高く評価する。

一方、鉄鋼協会などで公表されている水素脆化メカニズムの研究とは異なった見解が見受けられる。これらの研究機関との意見交換や、国内外で得られつつある水素と転位の相互作用や水素と原子空孔との相互作用など、水素脆化機構解明に係る多くの知見も参照し、統一した見解となるような活動を期待する。

〈肯定的意見〉

- 本研究では、高圧水素環境下での水素脆性化メカニズムや水素疲労メカニズムについて、高圧水素機器の各種構造材料の評価を中心に研究が実施された。特に高圧容器の疲労における水素脆性化メカニズムの解明においては、過飽和に水素をチャージすることで疲労亀裂進展が大幅に減速する新たな知見を得るなど、水素脆性化メカニズムの解明に向けて、多くの技術情報を得ることができた。その成果は、水素用高圧構造材料の安全管理設計に大きく貢献できると評価できる。また、水素脆性化メカニズムの究明に関して、水素チャージ効果が水素で局在化したマイクロ延性破壊を誘発するメカニズムを提案、従来の水素脆性化メカニズムに新たな知見を提供した。各種の水素脆性・水素疲労の材料評価データを得るとともに、高圧水素環境下での安全限界を見極める破壊メカニズムの検討を進め、設計理念の高度化に大きく貢献した。
- 水素脆化機構を提案・検証するとともに、疲労における繰返し速度（変形速度）の低下に伴うき裂進展速度の加速に上限があることとその説明を提案し、疲労設計の指針を与えるなど優れた成果を上げている。基礎的な研究に加えて応用的な研究においても評価法や新しい材料の提案などの成

果が見られる。また、水素用の構造材料のデータベースの整理は、材料選定、機器設計において重要であり、実用性の上で高く評価される。

- 特許、論文なども相当数あり、活発な研究が行われたことを高く評価する。
- 水素脆化の基本原理や多数の興味深い新現象の観察測定結果は世界的にも貴重なものであり、水素社会での技術全般にかかわる普遍的な知見が得られている。水素脆化の基本メカニズムや、疲労による水素脆化メカニズムについて材料選定や材料使用時に必要となるデータや知見が的確に提示されている。また、企業との共同研究を実施し、基礎的知見を応用へとつなげていく意思が感じられる。
- 「高圧水素プレクーラー用高強度材料の強度評価」、「高圧水素ガス用ひずみゲージの開発」に関する企業との連携研究も積極的に行われている。
- 70MPaの水素供給インフラに用いることのできる機器は100MPaを超える圧力に耐える試験に合格しなければならないが、このための試験機が不足している事もあり認証の取得がスムーズに進まなかった。しかし、今回このための機器を揃えることで日本も本格的に70MPa対応の水素供給インフラの時代を迎えることができるようになった。
- SUS316Lの疲労き裂進展速度が低荷重負荷速度で大幅に加速することを見つけたことは評価できる。また、SUS304において、70mass ppm以上の過飽和水素によって、疲労き裂進展速度が大幅に減速する実験結果も興味深い。
- 高圧下における材料データの取得、試験方法や予測手法の確立等、成果は十分評価できる。実地に即したデータ取得要請などにも対応した幅広い結果が得られており、大いに活用が期待できる。我が国の誇れる技術成果だと思う。
- 低歪速度の長時間疲労特性評価など、貴重なデータが取得できた。
- 多くの材料の水素脆化特性を調査し、その結果を各機関へ提供していることは評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 鉄鋼協会などで公表されている水素脆化メカニズムの研究とは多少異なった見解が見受けられることから、これらの研究機関との意見交換の場を設け、できるだけ統一した見解となるような活動を期待したい。それによってKHK*などの規制見直しへの影響力も大きくなると思う。

*高圧ガス保安協会(The High Pressure Gas Safety Institute of Japan、略称：KHK)は、高圧ガス保安協会規則に基づき1963年(昭和38年)に設立された経済産業省所管の法人。特殊法人であったが、1986年(昭

和 61 年) 10 月 1 日に特別民間法人となった。

- 水素脆化の基本原理が解明されたとは言い難い。モデルを提案するレベルに留まっており、モデルを正当化するための詳細な調査や定量的解析が不十分である。水素と転位の相互作用や水素と原子空孔との相互作用など、水素脆化機構解明に関係する多くの知見が国内外で得られつつある。これらも参照して、決定的な証拠に基づく水素脆化機構の提案をしてほしい。実験データがスポット的であり、より系統的な実験の組み立てが必要である。
- 高圧水素環境での水素脆性化メカニズムの検討において、水素環境下での破壊モードには、加工表面の状況を大きく影響することが知られている。産業界においては、耐水素脆性に富む材料を使用すれば、水素脆性を防ぐことができるとの安易な考え方がある。しかし、加工表面の表面粗さや加工クラックの発生状態、また、微小水分等の不純物による表面の腐食にとともなう応力腐食割れなど、高圧水素下での破壊モードの要因は多岐にわたる。材料強度の評価においても、加工表面の影響評価が不足していると思われる。このような材料研究では、技術マトリックスを評価して、水素脆性化データベースの活用時に考えるべき加工条件の明確化をしていく努力を期待する。
- 蓄圧器の LBB*評価では、水素の影響を衝撃試験により評価しており、適切ではない。水素環境下での破壊靱性値に基づいた評価が必要であり、LBB が成立するとの結論は早計である。熱処理による細粒化により靱性が向上することは常識であり、新知見とは言えない。
- *破断前漏洩 (LBB) 基礎的な研究の課題が広範であるためか、いくつかのテーマで他のテーマとの関連性が不明なものがあり、水素の状態解析やマイクロプリント法の結果が十分に生かされた解析となっていないと思われる。
- 基礎研究の興味深い成果が比較的国内向けの雑誌に論文として掲載されている傾向がある。世界に基礎研究のレベルの高さをアピールし、インパクトを与えるためにも、多く注目が集まる海外の国際論文誌に投稿するなど、論文の発表先については検討の余地がある。
- 同様に、ステンレス鋼溶接継手の疲労寿命評価が高周波数の実験によりされており、溶接が適用可能とする結論は早計である。

〈その他の意見〉

- ・ 水素脆化に関しては国内外で研究が進んでおり、たとえば、鉄鋼協会講演大会のような場で活発な意見交換がなされている。このような場にも積極

的に参加して情報交換をすることにより、なお一層の研究レベルの向上を目指してほしい。

- 高圧水素環境下で使用する材料評価は、高圧機器が対象とする水素圧力に強く依存する。水素機器の安全設計に関しては、溶接部の水素強度評価が重要な課題である。溶接部の水素脆性化メカニズムの検討などが今後の課題となるであろう。
- 水素脆化研究については、やや場当たり的にデータ採取をしている感がある。水素環境下破壊靱性、疲労、水素拡散・吸蔵など、水素脆化を総合的に理解するための体系的なデータ採取と考察が必要である。

2) 実用化の見通しに関する評価

水素構造材料データベースや関連資料を提供しており、成果の実用化に取り組んでいる。この外、水素機器に使われる金属材料の強度評価、部品・接合部材の強度評価あるいは事例解析なども行っており、成果の産業界への波及効果は大きい。また、特認申請のデータとなるなど、新たな基準、規制見直しにも波及しており実用面での成果も上がっている。

一方、このような先導的プロジェクトで得られた成果は我が国の貴重な知的財産であり、国としての先端技術のデータベースの公開の指針を明確にすることが肝要である。

〈肯定的意見〉

- 水素構造材料データベースや関連資料を提供しており、成果の実用化に取り組んでいる。この外、水素機器に使われる金属材料の強度評価、部品・接合部材の強度評価あるいは事例解析なども行っており、成果の産業界への波及効果は大きい。
- 特認申請のデータとなるなど、新たな基準、規制見直しにも波及しており実用面での成果も上がっている。
- 要素研究で得られた水素環境下での水素脆性化メカニズムや材料強度データに基づく強度設計の知見は、内外の学会発表や解説書の出版を通して研究成果の公開を鋭意行っている。また、水素構造材料データベースとして、関係機関や産業界に情報提供するシステムを構築したことは、大きな成果である。また、世界的な学会活動を通して、新規性の高い情報公開に努めることは、水素エネルギー技術の国際的な発展に我が国が大きく貢献できる成果を得ている。
- 水素による強度変化や疲労挙動の予測手法の確立、また各種データベースの確立などはっきりとした出口イメージが設定され、企業との共同研究が実施されており、実用化にむけての着実な取り組みがなされている。
- 新しい評価法、材料の提案などは実用性へ向けての進展であると評価される。また、データベースの整備は、設備、機器の設計等において実用的に重要である。
- 水素ステーション用の利用鋼種拡大に資する強度データの取得も評価できる。
- 成果は、実際の設計指針ともなり、高圧水素下のより設備の安全性向上につながることを期待できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 世界的な研究機関との相互情報公開と評価がグローバル化に向けて必要と思われるが、このような先導的プロジェクトで得られた成果は我が国の貴重な知的財産であり、公開に向けてはその運用管理を法的に明確化する必要がある。特に材料強度や新材料の創生に係る情報は、研究担当者も当然その波及効果を考えることが必要であるが、国としての先端技術のデータベースの公開の指針を明確にすることが肝要である。
- 企業との応用開発研究が実施されているが、その中で、基礎研究で培った知見がいかにか活かされているのかについて明確な説明があるとよい。また逆に、応用開発研究からのフィードバックによって基礎研究に新たな研究対象が示唆されることもあるであろう。このあたりの、応用開発研究と基礎研究との間のつながりをさらに強く明確なものにしていただきたい。
- たとえば、水素インフラ機器に適用可能な材料選定に関して、ステンレス鋼における温度や Ni 当量の影響に関するデータが国内外で蓄積されつつあるが、これに貢献できるデータが本事業で提供できているか。実用化に資するための系統的なデータを採取してほしい。

3) 今後に対する提言

水素脆化の基本原理の解明が確実になされたのか（他の可能性が完全に否定されたか）どうかについて、示された結果だけから判断するのは難しい。実証を伴った優れた研究であるといえるが、学界ではいくつかの説が提案され議論が継続している状況であることから、水素脆化を評価する材料（たとばステンレス鋼の Ni 当量）、温度、歪速度など、水素脆化機構の解明に役立つ系統的なデータを採取し、事業を通じて解明されたメカニズムと、これまでに提案されているメカニズムとの違いや、これまでの理論では説明できない実験事実などを具体的に系統立てて説明し、基礎研究分野での成果を明確にしていくことが必要である。

また、高圧継手からの水素の漏えいを防ぐには、溶接施工が望まれるため、溶接・熱処理等に対する継続した研究や、水素用材料強度評価における加工条件や加工表面の影響評価に係る研究も今後必要であろう。

〈今後に対する提言〉

- ・ 各種の実験結果が想定した水素脆化の基本メカニズムに反しないものであることは理解できるが、水素脆化の基本原理の解明が確実になされたのか（他の可能性が完全に否定されたか）どうかについて、示された結果だけから判断するのは難しい（発表された論文の中では論じられているものと推測する）。事業を通じて解明されたメカニズムと、これまでに提案されているメカニズムとの違いや、これまでの理論では説明できない実験事実などを具体的に系統立てて説明し、基礎研究分野での成果を明確にしていくことが必要である。
- ・ 水素脆化機構およびき裂進展・変形に対する水素の効果に関する提案は、実証を伴った優れた研究であるといえる。ただ、学界ではいくつかの説が提案され議論が継続している状況であることから、学界においてさらに積極的にこの提案についての議論を広げることが必要であろう。
- ・ 水素脆化を評価する材料（たとばステンレス鋼の Ni 当量）、温度、歪速度など、水素脆化機構の解明に役立つ、且つ、基準制定に役立たせるための系統的なデータを採取するような実験計画をたててほしい。
- ・ 高圧継手からの水素の漏えいを防ぐには、溶接施工が望まれる。溶接・熱処理等に対する継続した研究にも期待したい。
- ・ 水素用材料強度の評価においても、水素環境下で材料強度に大きく影響する加工条件や加工表面の影響評価に係る研究が今後必要と思われる。このような材料研究では、技術マトリックスを評価して、水素脆性化データベースの活用時に考えるべき加工条件の明確化をしていく必要がある。また、

水素脆性を軽減させる水素透過バリアー表面処理などの開発など、多くの技術課題があり、今後検討する必要がある。そのためには、水素研究センターにその分野の専門家を招聘して、研究の高度化を図ることが肝要である。

- ・ 特認申請、規制見直しなどへのデータ提供の結果において、何か課題などあったらそれらを取りまとめ、今後の研究に活かして頂きたい。

〈その他の意見〉

- ・ 水素脆性は昔からの大問題であり、水素利用機器にとり最も解決しなければならない問題である。それだけに、既存の水素脆化モデルにとらわれることなく、水素脆化の基本原理を解明してもらいたい。そして、低コストの耐水素脆化材料の設計指針を見出してほしい。
- ・ 水素環境下での金属表面の腐食問題は、応力腐食割れによる破壊をもたらす。この現象は、水素脆性破壊とは異なる現象であるが、似たような破壊現象を生じるため、腐食問題を念頭にした水素環境下での構造強度評価が必要と思われる。

2. 3 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究

1) 成果に関する評価

一部進行中のデータベース構築を除き実施目標がほぼ達成されている。高圧水素ガスシール用ゴム・水素機器用各種樹脂材料は水素機器を支えるキーマテリアルであるが、水素侵入や高圧水素との反応については系統的な研究が少なく、ブリスタや内部クラックの発生を観察してその発生機構の提案や、劣化しにくい樹脂の提案など、実用的な成果が出されており、評価できる。また、これらのデータは随時論文や研究会での発表を通じて公開されている。これらのデータのデータベース化も進んでおり、成果の普及という点でも評価できる。産業界との連携協力を得て、企業との共同研究を主体とする研究方針は、短期的にも効率的に貴重な成果を得たことは特筆すべきことである。

一方、現象論的な説明や解釈が多く、例えば、ゴム材料への水素溶解状態に2種類の存在状態があることが突きとめたが、それがどのように分子設計に応用できるのか具体性に欠いている。

〈肯定的意見〉

- 高圧水素環境下で使用されるゴム等の高分子材料の材料強度や化学構造に係る研究は、高圧水素ステーション機器で使用する O リング等を用いたシール部の設計に必須な課題である。高圧継手部からの水素ガスの漏洩は、高圧ガスの大きな事故につながる危険性がある。ゴム材料の水素ブリスタ発生メカニズムの検討や水素溶解状態の評価、また水素暴露によるゴム材料の強度・構造劣化の評価など、安全管理システムに貢献できる新たな知見や技術情報を得た。この成果は、O リングを使用した高圧シールシステムで評価されており、直接、高圧ガス関連の関係機関や産業界に安全管理上、貴重な情報を提供した。また、産業界との連携協力を得て、企業との共同研究を主体とする研究方針は、短期的にも効率的に貴重な成果を得たことは特筆すべきことである。学際的な研究分野とは異なり、産業界に直接役立つ研究の見本であり、今後、安全管理システムの一層の高度化に資するシールシステムに向けての展開が期待できる。
- 一部進行中のデータベース構築を除き実施目標がほぼ達成されている。高分子材料に対する水素の影響はこれまで十分なデータがなく、本研究開発で得られるデータは貴重である。ガスシール用ゴムに関する知見は直接応用に資するものであり、有用である。これらのデータは随時論文や研究会での発表を通じて公開されている。これらのデータのデータベース化が進んでおり、成果の普及という点でも評価できる。民間企業と共同研究を実

施している点も成果の普及への尽力が伺える。また、フォーラムやシンポジウムを開催して積極的に成果の発信に努めており当該分野の研究開発の促進に寄与している。

- 有機材料（ゴム、樹脂等）への水素侵入、高圧水素との反応については系統的な研究が少なく、ブリスタや内部クラックの発生を観察してその発生機構を提案し、劣化しにくい樹脂を提案し実施するなどの実用的な成果が出されており、評価できる
- 高圧水素ガスシール用ゴム・水素機器用各種樹脂材料は水素機器を支えるキーマテリアルであり、有用な知見が本研究から得られている。例えば、ゴムの水素暴露時のブリスタ破壊*を調べ、高圧水素ガスシール用ゴム材料の設計指針を導出している。
*ブリスタ破壊：高圧水素に曝露され、ゴムの内部に水素が侵入した後、急速に大気圧まで減圧することにより生じるゴムの破壊現象
- 産業界との連携研究である「緊急離脱カップリング用 O リング」では、NMR スペクトルの暴露圧力依存性を調べ、ゴム中に溶解した水素には 2 種類あることを見出している。
- また、共同研究「水素雰囲気におけるゴム材料研究」では、O リングの溝設計の基礎データを採取し、高圧水素シールの実用化に向けた指針を得ている。
- もう一つの共同研究「水素に対して耐性に優れた適用材料の研究開発」でも、多層樹脂ホース作製の問題点を調べ、高圧水素ホースの設計に関する知見を得ている。
- 水素の安全利用にシール技術は不可欠なものであり、その耐久性や劣化メカニズムを明確にしたことは評価できる。また、具体的な設計方法についての提言も有用な成果である。
- 高圧水素中に置かれた高分子化合物の挙動を系統的に調べた例は従来ほとんど無く、今回得られたデータは貴重なものとして高く評価したい。
- O リングなどのシール材の基礎的な研究成果が出たのは、これまで初めてのことと思われ、これらデータの活用、試験方法の確立など今後大いに期待できる成果が出たものと評価したい。
- 水素抵抗力のある高分子材料の開発に資する系統的なデータが得られた。参加企業における材料開発との連携も良好である。

〈問題点・改善すべき点〉

- ゴム材料への水素溶解状態について NMR スペクトル解析に基づき 2 種類の存在状態があることが突き止められているが、それがどのように分子

設計に応用できるのかについてやや具体性を欠いている。

- Oリングなどの高分子材料を使用した継ぎ手部のシール部は、極めて重要な部位であり、トライボロジー問題を含む検討が必要になる。Oリング単体使用とともにバックアップリングとの併用も考慮する必要がある。静的なシールでも、圧力サイクルでOリングは、シール溝の中ですべり摩擦を繰り返す。また、相手材料の表面粗さや材質により摩擦状態は異なる。Oリング表面に発生するマイクロクラックが水素環境下でどのような破壊モードになるか、未知の研究分野が多岐にわたる。バルブ等の可動部での使用状況では、その耐久性や破壊メカニズムは多岐にわたる。技術マトリックス評価により、シール漏洩の要因や対策を検討して、研究への展開が必要になると思われる。
- 高圧水素中の高分子がどのように変性・劣化するのか、劣化を抑制するにはどのような対策が可能なのか、など基本的疑問が残されているので、まず劣化の機構を解明して欲しい（高分子の種類、置かれる条件によって違うかもしれない）。

〈その他の意見〉

- ・ 短期間での効率的な研究成果の獲得は、学際的な背景とは異なる産業界の企業的技術を背景とした共同研究活動により得られたと思われる。他の研究分野においても、学際的な高度な研究の推進と産業界を中核とする実用化を念頭した研究の推進にわけて、技術マトリックス評価して効率的に推進することを期待する。
- ・ 現象論的な説明や解釈が多く、基礎的・基盤的な研究としては不十分な印象である。

2) 実用化の見通しに関する評価

ゴム材料の水素ブリスト発生メカニズムの検討や水素溶解状態の評価、また水素暴露によるゴム材料の強度・構造劣化の評価は、直接、高圧水素ガスを取り扱う安全管理システムに大きく貢献できる、新たな知見や技術情報を得ることができた。49種ものゴム材料のデータベースを作成し、取得した強度データを産業界における水素機器開発へ提供もしている。また、開発した材料の実機への適用や、水素耐久性材料の設計指針の策定など、研究成果は関連分野に波及し、実用化に向けて着実な進展が見られる。

継ぎ手部のシール要素は、多岐にわたるシールシステムを有しており、マトリックス評価して、共通する重要な研究課題を抽出して評価することが重要である。この分野は奥が深いと考えられるので、実験のみならず理論的な検討も充実させて欲しい。また、高分子材料の高温・低温環境では、シールリングの表面に塗布するグリスの影響等も含め、安全管理上、必要となる技術課題に対応する研究体制の構築も今後必要となるであろう。

〈肯定的意見〉

- 取得したゴム・樹脂の強度データを産業界における水素機器開発へ提供している。また、開発した材料を実機へ適用し、水素耐久性材料の設計指針を策定するなど、研究成果は関連分野に波及している。
- 高圧継手部からの水素ガスの漏洩は、高圧ガスの大きな事故につながる危険性がある。ゴム材料の水素ブリスト発生メカニズムの検討や水素溶解状態の評価、また水素暴露によるゴム材料の強度・構造劣化の評価は、直接、高圧水素ガスを取り扱う安全管理システムに大きく貢献できる、新たな知見や技術情報を得ることができた。この成果を背景に、幅広い高分子シール材料の水素環境下での強度評価や漏洩メカニズムの検討に向けて、研究を発展できる可能性を秘めている。
- 水素ガスのゴム材料に対する影響を纏めたデータベースが構築されており、実用化に向けて必要なデータの提供が準備されている。また、Oリングや水素ガスホースに関して、企業との共同研究を積極的に実施しており、実用化に向けて着実な進展が見られる。
- 49種ものゴム材料のデータベースを作成、また産業界と連携したデータの検討、標準化など、さらなる展開に繋がっており、今後の実用化に向けた成果が期待できる。
- 水素雰囲気下にある高分子の挙動に関する研究の第一歩を踏み出したものであるが、この分野は奥が深いと考えられるので、実験のみならず理論的な検討も充実させて欲しい。

- 企業との共同研究において、実用的な課題についての進展が認められる。
- 企業との連携により新材料の開発がタイムリーに進んでいる。

〈その他の意見〉

- 継ぎ手部のシール要素は、多岐にわたるシールシステムを有しており、種々のシール材料が使用される。多岐にわたるシールシステムをマトリックス評価して、共通する重要な研究課題を抽出して評価することが重要である。これにより、広範囲な高分子材料の高圧水素環境で使用できる評価基準を得ることができる。また、高分子材料の高温・低温環境では、そのシール性は大きく異なる。また、シールリングの表面に塗布するグリスの水素環境下での評価も重要になる。炎天下での高圧容器は、時として部位の表面温度は想像以上の高温になり、シール機能の劣化によるリーク事故は多く経験されている。このような安全管理上、必要となる技術課題に対応する研究体制の構築も今後必要となるであろう。

3) 今後に対する提言

高圧水素環境下で使用できるシール部の設計技術は、その特異性のため、未知な研究分野である。材料評価やシールシステム評価、トライボロジー評価を含めた広い範囲の研究推進が今後の課題である。高分子材料の水素耐性の機構の分子レベルでの解明を期待したい。また、Oリングの水素暴露による破壊は、ブリスタによる破壊のみならず、膨潤に起因するはみ出し破壊、座屈破壊もあり、水素シール材の設計は容易ではないが、この難しさを克服して、有用なデータベースを作成し、設計指針をまとめ上げることにより、水素機器用高圧水素シール材の標準仕様の作成を期待する。その際、水素ステーションでは、プレクール設備の導入により、 -40°C 以下の低温域での使用が予定されているため、この温度域での研究の成果も急がれる。

〈今後に対する提言〉

- ・ 高圧ガス機器の継ぎ手部や可動部に使用される高分子材料は、高機能なゴム材料や樹脂材料が産業界で開発され、特殊な環境状態で使用されている。高圧水素環境下で使用できるシール部の設計技術は、その特異性のため、トライボロジー問題と同じように未知な研究分野である。そのため、材料評価やシールシステム評価、またトライボロジー評価を含めた広い範囲の研究推進が今後の課題となる。また、高分子材料に限らず、カーボンやセラミックなどの無機質材料など多くのシール材が使用されている。これらのシール材の水素透過性などの統計的評価が産業界から求められている。
- ・ 水素ステーションでは、プレクール設備の導入により、 -40°C 以下の低温域での使用が予定されている。この温度域での研究の成果が急がれる。
- ・ 高分子材料の水素耐性の機構は予想のレベルであり、分子レベルでの解明を期待したい。
- ・ 高分子の物性については、分子シミュレーションが近年その信頼性向上と適用範囲を広げてきている。積極的にこれらの計算機シミュレーションを導入し、具体的な材料選定の際の材料探索範囲を狭めることにより、実用に向けて材料開発の期間とコストの削減が可能になると考える。
- ・ 開発研究として最適材開発の意義は認めるが、水素溶解量の水素圧依存性や添加剤の効果など、より明確な学術的基盤に基づいた指針の提案が必要と思われる。
- ・ 水素ガス仕様での O リング使用条件、期限などの基準作りに反映して頂きたい。

〈その他の意見〉

- Oリングの水素暴露による破壊は、ブリストタによる破壊のみならず、膨潤に起因するはみ出し破壊、座屈破壊もある。このように、ゴムの破壊は溝設計にも関与するので、水素シール材の設計は容易ではない。しかし、この難しさを克服して、有用なデータベースを作成し、設計指針をまとめ上げることにより、水素機器用高圧水素シール材の標準仕様を作ってほしい。
- 高圧水素ステーションのインフラ設備で使用されるシール要素は、シール条件(圧力、温度、環境など)によってシール要素の構造は多岐にわたる。高圧ガス設備の安全性は、継ぎ手部のシール漏洩問題の検討不足が、多くの原因になる。安全に係る種々のシール部のマトリックス評価を行い、高圧水素環境下で安定したシールシステムの指針を明らかにすることが肝要である。

2. 4 高圧水素のトライボロジーの解明

1) 成果に関する評価

高圧水素中での摩擦・摩耗を系統的に調べ、この現象が表面酸化物膜、水素中の水分、酸素および温度などに影響されることを明らかにし、いくつかの金属および樹脂材料の特性から使用の適否を明らかにした。水素が関与するトライボロジーを体系的に整理したデータは世界的にも貴重であり、関連機器の使用上の安全性の確保に資するものは大きい。最終的にデータベース（トライボアトラス）の構築を目指しており、標準化・成果の普及という点でも評価できる。また、民間企業との連携を積極的に進めており、シンポジウム、国際会議や技術展で情報発信をしていることも成果の普及という点で評価できる。

一方、仮説の提案から検証、メカニズムの解明が目標の重要な点として挙げられているが、具体的な進捗状況を把握することができない。データベースが提示されているが、メカニズムの解明が十分でないため、系統だったデータの提示がなされておらず、データベースを利用する立場からすれば、使いにくい。また、固体潤滑軸受の水素中でのトライボロジー特性の評価などが不足しており、今後の研究課題である。

〈肯定的意見〉

- 高圧水素中での摩擦・摩耗を系統的に調べ、この現象が表面酸化物膜、水素中の水分、酸素および温度などに影響されることを明らかにし、いくつかの金属および樹脂材料の特性から使用の適否を明らかにした。
- 高圧水素トライボロジーの研究開発は世界的に見ても新しい課題であり、新たな技術領域を切り開く可能性を秘めている。また、最終的にデータベース（トライボアトラス）の構築を目指しており、標準化・成果の普及という点で評価できる。
- 民間企業との連携を積極的に進めており、シンポジウム、国際会議や技術展で情報発信をしていることも成果の普及という点で評価できる。
- 水素が関与するトライボロジーを体系的に整理したデータは世界的にも貴重であり、関連機器の使用上の安全性の確保に資するものは大きい。
- 高圧水素環境下で使用する機器のトライボロジー要素について、強い還元環境下でのトライボロジー特性を評価して、トライボ要素の設計に資するデータベースを整備したことは大きな成果である。特に摩擦摩耗状態に大きな影響を与える水素ガス中の微量水分や酸素の影響を系統的に評価したことである。この微量不純物の影響は今まで不明な現象であり、この研究成果は、水素ガスを使用する機器のトライボロジー問題の解決に貴重な情報を提供できると評価する。また、これらの現象を評価するための独自

な試験設備の整備は、今後の水素トライボロジー研究の推進に大きく貢献できる。シール材や固体潤滑剤として使用される各種樹脂や可動 O リングの摩擦摩耗の基礎的な特性が評価された。また、水素透過を防止する水素バリアコーティングや DLC 膜等の各種コーティング材料も評価された。トライボロジー現象の評価は、表面現象を伴うため摩擦材料の組合せで多岐にわたるが、取得した基礎的データを基にそのメカニズムの検討は、学際的な成果を得ている。また、トライボロジーデータシートの作成を通して、耐水素設計の指針がまとめられ、今後の産業界への発信が期待できる。

- 広範な材料について、トライボロジー特性の基礎データを蓄積している。例えば、①金属材料では、表面酸化膜が水素ガス中の微量水分や酸素によって形成され、滑り摩擦摩耗特性を左右すること、②高圧水素中の摩擦摩耗は、圧力よりも温度の影響が顕著に現れることを見出している。また、③軸受・バルブしゅう動材料の水素トライボロジー特性を統一条件のもとで調べ、材料のスクリーニングに有用なデータベースを作成している。この外、④樹脂材料の水素トライボロジーを調べ、転移膜の形成がトライボロジー特性を左右すること、⑤樹脂の摩耗は水素中の水分量が多いほど少ないこと、および⑥DLC 膜は低温水素中で良好な摩擦特性を示すことなどを明らかにしている。これらは、水素トライボロジーの材料および機器設計に有用な知見である。
- 水素中の摩擦は、水素ガス中・材料中の微量元素に大きく依存するため、支配因子の解明が困難であったが、系統的な注意深い実験により、摩擦現象のかなりのことが明確になってきたと思う。企業との連携も良好である。さらなる発展を期待したい。
- この分野も特に超高圧領域の検討について世界のパイオニアとしての役割を果たした。潤滑の問題はインフラ機器の安全を確保する上で真正面からとりくむ必要がある領域であるので更なる発展に期待したい。
- 実用面から多くの現象を捉え、設計指針としたことは評価できる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 仮説の提案から検証、メカニズムの解明が目標の重要な点として挙げられているが、提出された情報のみからはこの点の具体的な進捗状況を把握することができない。データベースが提示されているが、メカニズムの解明が十分でないため、提示する側の意思が希薄であり、系統だったデータの提示がなされておらず、データベースを利用する立場からすれば、非常に使いにくい感を受ける。
- トライボロジー問題は、可動機器の設計に必要な多岐にわたる研究分野を

有している。本研究では、金属材料を主体とする微量不純物の影響の評価が主な成果である。トライボ機器の可動部には、潤滑性を確保するためセラミックなどの硬質皮膜処理、高機能樹脂の利用、固体潤滑剤や耐水素グリリスが経験的に利用されているが、強力な還元作用のため潤滑トラブルを多く経験している。潤滑問題の解決につながる研究が今後の研究課題となると思われる。また、水素環境で使用する実際の軸受やシールの評価が産業界から求められるが、固体潤滑軸受の水素中でのトライボロジー特性の評価などが不足しており、今後の研究課題である。

- 摩擦・摩耗は材料の組み合わせ、試験の方法などの条件により損傷自体が大きく変化する複雑な現象であることから、多くの因子の影響についての系統的・学術的な解明が容易でないことは理解出来るが、基礎的基盤的研究である以上は、計画・問題設定の段階でより学術的なアプローチが考えられるべきではなかっただろうか。

〈その他の意見〉

- ・ 本研究で対象とされた研究試料は、一般的な材料であり、基準材料としては適切であるが、現在、多くの高機能・固体潤滑材料が産業界では研究開発されている。高機能・固体潤滑材料の水素環境下でのトライボロジー特性を評価し、優れたトライボロジー特性を示す固体潤滑材料の設計指針を明らかにすることが肝要である。
- ・ データベースの構築には、できる限り、原理原則に基づいた整理を目指してほしい。

2) 実用化の見通しに関する評価

摩擦・摩耗に表面の酸化物膜、水素中の不純物としての水分と酸素の影響が多きいことを明らかにし、耐水素トライボロジー設計指針の提案と水素トライボロジー特性データの整備を通して産業界へ有用な情報を提供している。これらの成果は、摺動部を持つ機器開発に、大いに貢献可能であろう。

しかしながら、実用化段階となり本格的に水素インフラが稼動する時に混乱しないためには、今の時期に問題点を徹底的に抽出し対策を考えておくことが大切である。今後この学問領域が発展することが安全で効率的な水素インフラを構築する上で必要と考える。

〈肯定的意見〉

- 超高压水素中の金属表面の様子など今回の検討で明らかになった事は多いが、実用化段階となり本格的に水素インフラが稼動すると多くの問題が一挙に噴出することが予想される。この時に混乱しないためには今の時期に問題点を徹底的に抽出し対策を考えておくことが大切である。今後のさらにこの学問領域が発展することが安全で効率的な水素インフラを構築する上で必要と考える。
- 摩擦・摩耗に表面の酸化物膜、水素中の不純物としての水分と酸素の影響が多きいことを明らかにした。しかしながら、材料の種類、不純物の濃度などによってその影響は複雑で系統的に整理できたとは言えない。
- 耐水素トライボ設計指針の提案、水素トライボ特性データの整備を通し、産業界へ有用な情報を提供している。
- これらの成果は、摺動部を持つ機器開発に、大いに貢献可能と思われる。欧米にやや遅れをとっている国産水素圧縮機の開発への活用も期待したい。
- 本研究で明らかになった、高压水素環境下での摩擦摩耗特性に大きく影響する水素ガス中の微量水分や酸素の影響評価は、半導体設備等の水素ガスを利用する機器のトライボロジー問題の解決に資する、貴重な技術情報を提供する。データベースのシート化は、複雑なトライボロジー問題を整理し、その対策を考える上で重要になる。
- データベースの構築・提供、メカニズムの解明が出口イメージとしてとして設定されている。水素環境下でのトライボロジーに関するデータはこれまで系統だったものではなく、開発中のトライボアトラスが系統だったものになれば、関連分野への波及効果は大きい。
- 本研究を基にして企業との連携により水素機器の開発に資することができた。

〈問題点・改善すべき点〉

- 高度な研究成果を得ることを目標とする学際的な研究分野と、幅広い材料のトライボロジーに係るデータベース化を念頭にした評価分野に分けて、企業関係者との連携協力で推進することが効率的である。この問題は、技術マトリックスにより課題を広く産業界から情報収集して対応する必要がある。技術マトリックス評価により、得られた成果の波及先を明確にでき、相互の研究協力の構築にも役立つ。
- 構築されるデータベースがどのような形で産業界でのトライボロジー要素の設計に結びついていくかの具体的なイメージがつかめない。具体例の提示があるとよい。

3) 今後に対する提言

これまでに有用な実験データが得られているが、系統的な部分が見えにくく、全体として散漫な印象を受ける。今後、理論的な検討を進め、水素トライボロジーの体系化を期待する。また、水分量が少ない場合に水素吸着膜が潤滑作用を持つとしているが、表面科学者も含めたより広い研究者による議論がなされることも期待する。今回は、水分についてその影響を解析しているが、水素ガス中のその他の不純物、パーティクルの影響も把握する必要がある。

水素などの特殊環境で使用する固体潤滑剤の技術評価に係る研究は、海外においても、将来の水素エネルギー技術の発展に向けて、先進的な研究が行われている。本研究においても JAXA 等の研究機関との研究協力で、水素トライボロジー技術研究の効率的推進が図れることを期待する。

〈今後に対する提言〉

- ・ 高圧水素ガス中で使用する機器の潤滑問題が今後重要になる。水素などの特殊環境で使用する固体潤滑剤の技術評価に係る研究は、海外においても、将来の水素エネルギー技術の発展に向けて、宇宙開発で育成されたトライボロジー技術を背景に、先進的な研究が行われている。産業界も宇宙機器のトライボロジー機器の開発に参画した企業が、本研究に参画しており、JAXA 等の研究機関との研究協力で、水素トライボロジー技術研究の効率的推進が図れることを期待する。
- ・ 不純物の影響にも取り組んで頂きたい。今回は、水分についてその影響を解析しているが、水素ガス中のその他の不純物、パーティクルの影響も掴みたいところである。
- ・ 水分量が少ない場合に水素吸着膜が潤滑作用を持つとしているが、表面科学の分野で十分に検討された結論だろうか？ 今後、より広い研究者を含めた議論がなされることを期待する。
- ・ トライボロジー研究は難しいが、これまでに有用な実験データが得られている。今後、理論的な検討を進め、水素トライボロジーの体系化に努めてほしい。
- ・ 多くの実験を実施して様々な角度からデータが取得されているが、系統的な部分が見えにくく、全体として散漫な印象を受ける。世界でも珍しい研究対象であり、ぜひ系統立ててインパクトのある研究開発にしていいただきたい。
- ・ 摩擦・摩耗減少における表面酸化物、新生面の出現は材料中への水素の侵入挙動や水素との反応に影響を与えられると思われるが、今後他の課題と連携によってこれらの解明が進むよう期待する。

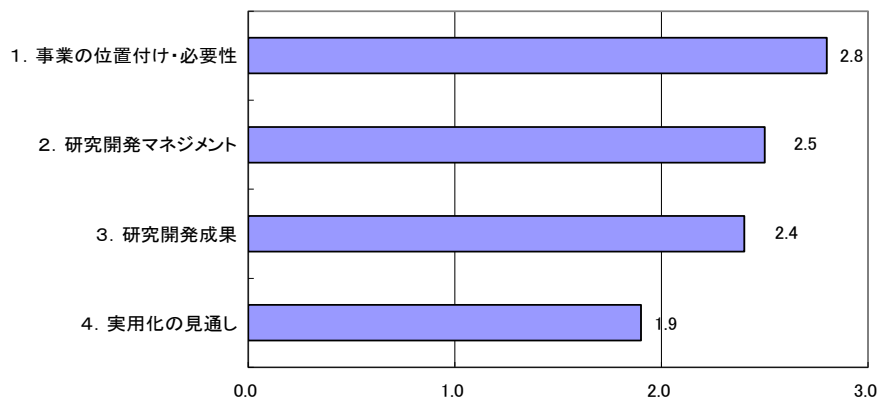
- 基礎的研究という視点からは、やや現象面を追い過ぎ、現象の解明が少ないように思われる。困難な研究とは思われるが、現象の解明にも取り組んで頂きたい。

〈その他の意見〉

- 将来の高圧水素インフラ設備では、将来、液体水素環境を含む極低温環境や高温水素ガスでの高温環境での極限環境下でのトライボロジー問題の解決が必須になる。このような環境下では、常温環境下とは異なった特異なトライボロジー問題を発生するが、このような極限環境下での系統的な研究は、我が国ではほとんど実施されていない。将来の水素エネルギー利用技術に必須なトライボロジー技術を評価して、将来の研究の発展に継続させることが肝要である。

3. 評点結果

3. 1 プロジェクト全体



平均値

評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	A	A	A	B	B
1. 事業の位置付け・必要性について	2.8	A	A	A	A	A	A	B	B
2. 研究開発マネジメントについて	2.5	A	A	A	A	B	B	B	B
3. 研究開発成果について	2.4	A	A	A	B	B	B	A	C
4. 実用化の見通しについて	1.9	B	B	B	B	B	B	B	C

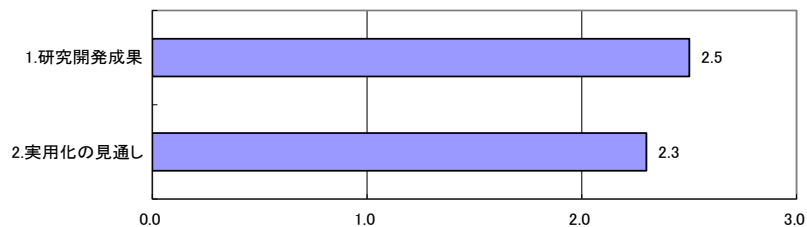
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

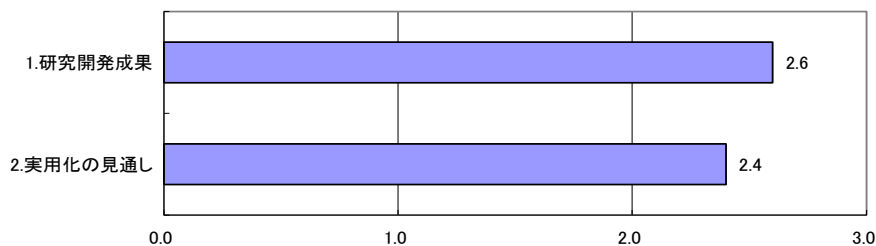
3. 2 個別テーマ

3. 2. 1 高压水素物性の基礎



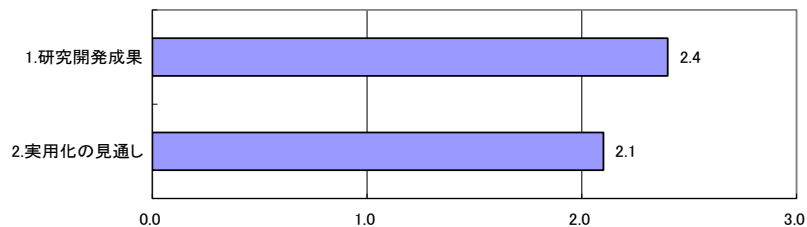
平均値

3. 2. 2 高压化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究



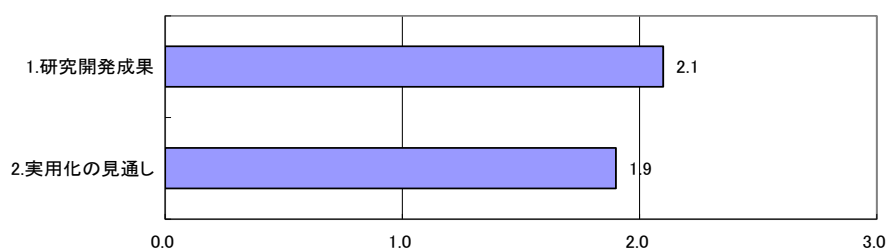
平均値

3. 2. 3 高压化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究



平均値

3. 2. 4 高压水素のトライボロジーの解明



平均値

個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
3. 2. 1 高压水素物性の基礎									
1. 研究開発成果について	2.5	A	A	A	A	B	B	B	B
2. 実用化の見通しについて	2.3	B	A	A	A	B	B	B	C
3. 2. 2 高压化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究									
1. 研究開発成果について	2.6	A	A	A	A	A	B	A	C
2. 実用化の見通しについて	2.4	A	B	A	A	B	B	A	C
3. 2. 3 高压化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究									
1. 研究開発成果について	2.4	A	A	A	B	C	B	A	B
2. 実用化の見通しについて	2.1	B	A	B	B	C	B	A	B
3. 2. 4 高压水素のトライボロジーの解明									
1. 研究開発成果について	2.1	B	A	A	B	C	B	B	B
2. 実用化の見通しについて	1.9	B	A	B	C	C	B	B	B

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について

- ・非常によい
- ・よい
- ・概ね適切
- ・適切とはいえない

2. 実用化の見通しについて

- A ・明確
- B ・妥当
- C ・概ね妥当であるが、課題あり
- D ・見通しが不明

第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「水素先端科学基礎研究事業」

事業原簿(公開)

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	------------------------------------

— 目 次 —

概 要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I -1
1.1 NEDOが関与することの意義	I -1
1.2 実施の効果(費用対効果)	I -2
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I -3
2.1 事業の背景	I -3
2.2 事業の目的	I -4
2.3 事業の位置づけ	I -4

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標	II 1.-1
2. 事業の計画内容	II 2.1-1
2.1 研究開発の内容	II 2.1-1
2.2 研究開発の実施体制	II 2.2-1
2.3 研究の運営管理	II 2.2-1
3. 情勢変化への対応	II 2.2-3
4. 中間評価結果への対応	II 2.2-4
5. 評価に関する事項	II 2.2-9

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果	III 1.-1
1.1 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」	III 1.-2
1.2 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び 長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究」	III 1.-5
1.3 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度など の影響による材料強度及び化学構造評価」	III 1.-9
1.4 研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」	III 1.-11
1.5 特許、成果の普及等	III 1.-13
2. 研究開発項目毎の成果	III 2.1-1
2.1 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」	III 2.1.-1
2.2.1 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び 長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究」	III 2.2.1-1

2.2.2研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究」 共同研究／高圧水素プレクーラー用等高強度材料の特性評価, 岩谷産業株式会社	Ⅲ2.2.2-1
2.2.3研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究」 共同研究／高圧水素ガス用ひずみゲージの開発とひずみゲージ箔材の電気抵抗に及ぼす水素の影響の解明, 株式会社共和電業.....	Ⅲ2.2.3-1
2.3.1研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」.....	Ⅲ2.3.1-1
2.3.2研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」 共同研究／水素雰囲気下におけるゴム材料研究、NOK 株式会社.....	Ⅲ2.3.2-1
2.4 研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」.....	Ⅲ2.4-1
 IV. 実用化の見通しについて.....	IV-1
 (付録) 特許.....	付-1
文献.....	付-4
口頭発表・講演.....	付-25
受賞実績.....	付-77
シンポジウム等の開催.....	付-79
展示会等への出展.....	付-79

(添付資料)

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

「水素先端科学基礎研究事業」基本計画

平成23年度実施方針

平成24年度実施方針

事前評価書

NEDO POST3

概要

		作成日	平成 24 年 10 月					
制度・施策 (プログラム)名	エネルギーイノベーションプログラム							
事業(プロジェクト)名	水素先端科学基礎研究事業	プロジェクト 番号	P 0 6 0 2 6					
担当推進部/担当者	新エネルギー部/森大五郎・主藤祐功・畠山正博 (H24～) 新エネルギー部/中山博之・森大五郎 (H22～) 燃料電池・水素技術開発部/檜山清志・川村 亘・高橋 靖・中山博之 (~H22)							
0. 事業の概要	本事業では、水素物性等に係る基礎的な研究を実施し、高度な科学的知見の集積を行い、水素社会到来に向けた基盤整備を行うことを目的に、高圧化した状態における水素物性の解明や、材料の水素脆化にかかる基本原理の解明及び対策検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を実施する。また、2015年燃料電池自動車普及開始に向けて、産業界と連携をとりながら必要なデータ、考え方を提示し、NEDOの他の水素関連事業との連携関係も整理して、産業界全体の効率的な技術開発に貢献することを目指す。							
I. 事業の位置付け・必要性について	水素及び燃料電池を広くかつ円滑に一般社会に普及させるために、現在、産学官挙げて技術開発に取り組んでいるところであるが、燃料である水素を高圧化した状態で輸送・貯蔵するなど水素を高いエネルギー密度で取り扱う場合の水素物性については、未だ世界的にも知見集積が乏しく、特にこれらの環境下における容器や機器で使用する材料の水素脆化現象のメカニズム解明は、長期間、水素を安全に利用するためには早急に解決・確立しなければならない重要な基礎的かつ高度な科学的課題の一つである。そこで当該事業により、燃料電池自動車導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要となる水素物性や水素環境下における材料特性に関わる基礎研究を進展させることで、燃料電池や水素エネルギーの実用化技術の進展を支え、安全性の確保、標準化等に大きく貢献すると共に、我が国の国際競争力の維持・確保に繋げる。							
II. 研究開発マネジメントについて								
事業の目標	燃料電池自動車、定置用燃料電池システム及び水素インフラ等水素社会構築に必要な水素物性、水素環境下材料特性に係るデータ取得、材料劣化等の基礎的研究及びメカニズム解明を行うために、具体的には、下記項目を当該事業にて実施し、その成果を用いて、関連産業界の技術開発や標準化活動を支援する。 ①高圧水素物性の基礎研究 ②高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究 ③高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価 ④高圧水素トライボロジーの解明 ⑤材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究(平成22年度まで実施)							
事業の計画内容	主な実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy
	①高圧水素物性の基礎研究	物性測定技術、装置の開発	熱伝導、露点測定技術、装置の開発			データ取得	データベース公開	
	②高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究	高圧水素中試験装置整備		水素環境下での疲労試験				
	②③高圧水素環境下での長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究(金属材料、高分子材料)	高圧水素中試験装置整備	実部品(金属、樹脂)の疲労試験、劣化解析	水素侵入特性、シール材の長期信頼性評価	管理基準、信頼性評価手法の提示			
			高圧水素曝露材の摩擦試験					

	④ 高圧水素トライボロジーの解明	高圧水素中 試験装置整備		高圧水素中摩擦試験			信頼性評価 データ公開	
	⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究	水素挙動シミュレーション整備 実験担当者との連携、事前評価など支援		固体内拡散挙動解析 材料内水素と材料強度、疲労特性の相関解析				
	成果とりまとめ		実測データとの比較検証	報告★中間評価1	報告★中間評価2		最終報告★	
開発予算 (単位：百万円)	会計・勘定	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy
	一般会計	0	0	0	0	0	0	0
	特別会計 高度化	1,620	1,791	1,631	1,739	1,019	708	765
	総予算額	1,620	1,791	1,631	1,739	1,019	708	765
開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課 燃料電池推進室						
	プロジェクトリーダー	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)						
	委託先／再委託先／共同研究先	【委託先】 独立行政法人 産業技術総合研究所 国立大学法人 九州大学 独立行政法人物質・材料研究機構 (H22～H24) 国立大学法人京都大学 (H22) 国立大学法人佐賀大学 (H22～H24) 国立大学法人長崎大学 (H22～H24) 学校法人上智学院 (H22～H24) 学校法人福岡大学 (H22) 【再委託先】 独立行政法人物質・材料研究機構 (H18～H21) 国立大学法人京都大学 (H18～H21) 国立大学法人佐賀大学 (H20～H21) 国立大学法人長崎大学 (H18～H21) 学校法人上智学院 (H18～H21) 学校法人福岡大学 (H19～H21) NOK株式会社 (H19～H21) 【共同研究先】 NOK株式会社 (H22～H24) 日本合成化学工業株式会社 (H22～H24) 岩谷産業株式会社 (H22～H23) 株式会社共和電業 (H22～H24)						

<p>情勢変化への対応</p>	<p>(A)本事業開始後、平成 20 年 7 月、燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ) が「2015 年、一般ユーザーへの普及開始を目指す」とする『FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ』を発表し、平成 21 年 3 月には、産業競争力懇話会も同様の発表を行い、2015 年に FCV・水素インフラを普及開始する合意が急速に形成されてきた。</p> <p>(B)鋼種拡大に係る規制の再点検に対する対応。</p> <p>(C)水素ステーション 100 箇所の先行整備に向けた対応。</p> <p>このような情勢変化に対応するため、</p> <p>(1) 燃料電池自動車の普及に向けた日本自動車工業会や燃料電池実用化推進協議会等々からの追加検討要望を受け、燃料電池自動車や水素スタンドの例示基準向け安全検証の根拠となる材料特性データ提供や同評価方法に関する指針等を纏める旨加速</p> <p>(2) 第 2 期水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC)にて計画されている 70MPa 級水素供給インフラの検討にも反映させるために、安全確認検証(例、実証終了プロジェクトから得た水素曝露機器の解体調査等)、70MPa 級蓄圧器等材料物性補足データ取得等を追加し、研究を加速中。</p> <p>(3) 燃料電池・水素技術の基準・標準化、規制見直しに向けた国際協調・体制整備に関する最近の政策提言等への対応として、材料評価データの提供・データベース構築に加えて、今後、規制見直し・国際標準化・認証制度の構築に貢献できる体制強化を推進中。</p> <p>(4) 産業界におけるニーズを的確に把握し、研究成果を効率よく展開することを狙い、平成 22 年度上期に民間企業等実施者の公募を実施。新たに 3 社の民間企業を共同研究先として追加した。(岩谷産業、共和電業、日本合成化学工業)</p> <p>(5) 平成 22 年 6 月に閣議決定された「規制・制度改革に係る対処方針 (グリーンイノベーション分野)」を受け、平成 22 年末に水素ステーションの鋼種拡大に係る規制の再点検及びその結果を踏まえた対応について今後の具体的な工程表が作成され、「例示基準に記載された使用可能鋼材の拡大」が項目の一つに位置付けられた。それを受け「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業」と連係して、鋼種拡大に資するデータ・安全性のデータ取りを加速して実施。結果、工程表の進捗に貢献。平成 24 年度末に技術基準 (案) 完成見込み。</p> <p>(6) 平成 23 年 1 月、2015 年の FCV 普及開始に先駆け、100 箇所程度の商用水素ステーション設置・実証を行う共同声明が発表された。それを受け鋼種拡大にかかる規制合理化のためのデータの取得を加速して実施すると共に、基準化対象外の材料についても高圧ガス保安法の特認を取得するために材料データを取得。その結果 2015 年の商用水素ステーションの目標コスト達成に資する低コスト水素ステーション実証が可能となる見込み。</p>
<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>【研究開発の対象】</p> <p>水素高圧状態下における水素の物性や水素機器材料中の水素挙動等基礎的メカニズム解明等に関し、具体的な試験、分析、解析、評価等を重ね、理論的考察を進めるとともに、科学的裏付けとなる検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・指針等内容を精査・強化する。</p> <p>研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」</p> <p>本研究では、100MPa、500℃までの高圧高温での水素物性のデータベースを構築し、広く WEB に公開するために、以下に示す項目を実施した。</p> <p>(1) PVT データの測定装置の開発および状態方程式の作成</p> <p>(2) 粘性係数の測定</p> <p>(3) 熱伝導率の測定</p> <p>(4) 水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定</p> <p>(5) 水素物性データベースの研究開発</p> <p>(6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定</p> <p>(7) 比熱の測定</p> <p>【成果】</p> <p>・世界的にも類の無い高温・高圧力条件下で、水素の PVT 性質、粘度および熱伝導率を測定するための装置を開発し(高圧対応型バーネット法装置、細管法粘度測定装置および非正常短細線法熱伝導率測定装置)、773K、100MPa までの</p>

PVT データを取得した。

- ・従来のデータのレビュー結果をもとに高圧でかつ高温まで適用領域を拡張した推算式を作成し、データベースに組み込んだ。
- ・非定常短細線法による水素ガスの熱伝導率の測定法を確立した。本測定法を気体に適用したのは世界で初めてである。
- ・雰囲気水素ガスを H2 から D2 に切り替えることで、ゴム構造由来水素と溶解水素ガスの信号を分離し、溶解した水素ガスの溶解度をより正確に定量化できた。
- ・平成 21 年度までに開発してきた水素熱物性データベースシステムがサポートする物性値や適用範囲について、特に本プロジェクトの特徴である高圧の領域を正確にサポートできるような拡張を検討し、拡張版 PVT 関係・相平衡計算システムを開発した。
- ・このプロジェクトが開始されて 5 年が経過し、データベースサーバーやクライアントの本体となる計算機のハードとソフトの利用状況が変化した。その変化を整理して、それらに対応した改良を行う。当面、CD-ROM を利用したシステムから USB メモリを利用したシステムへの完全移行するための USB メモリ型 DB システムの構築とエクセル以外のソフトウェアのサポートを実施した。
- ・恒温槽内の攪拌性能を向上させ、温度の不均一性を低減させた。
- ・水素ステーションの条件に対応した微量高沸点ガスの露点推算法について詳細に検討し、異なる形式の状態方程式に基づいた計算を可能とする露点推算ソフトウェアを作成した。露点推算に基づき、水素ステーションにおいて凝縮・凝固する可能性があるのは、専ら残存水分であることを示した。

研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原則の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」

本研究では、高圧水素雰囲気下での水素脆化の基本原則を解明、また疲労き裂発生と伝ばに及ぼす高圧ガス水素の影響を明らかにし、そのメカニズムを解明することを実施した。また、高圧水素下長期使用可能な機械要素設計法構築とデータベース整備、最適水素材料の探索を実施した。

- (1) 疲労き裂先端における塑性変形（すべり変形）と水素の相互作用の解明
- (2) 高圧水素ガスにおける疲労き裂発生・進展メカニズムの解明
- (3) 水素機器に使用される金属材料の強度評価
- (4) 水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価
- (5) 材料中の侵入水素の存在状態解析
- (6) 材料中の結晶粒内・粒界におけるすべり変形に及ぼす水素の影響調査
- (7) 材料中の疲労き裂先端の水素状態の調査
- (8) 水素ステーションに使用された金属材料の健全性及び強度評価
- (9) 水素デバイス等の安全設計シミュレーション

<共同研究：岩谷産業>

- ・高圧水素プレクーラー用等高強度材料の特性評価

<共同研究：共和電業>

- ・高圧水素ガス用ひずみゲージの開発とひずみゲージ箔材の電気抵抗に及ぼす水素の影響の解明

【成果】

水素エネルギーシステムの安全性、信頼性を確保する基礎研究であるが、水素の可視化の実現、結晶のすべり挙動の特異性（すべりの局在化と離散化）の発見など水素脆化の基本機構に関わる成果を得た。

- ・疲労破壊、引張破壊における水素脆化は、格子脆化による脆性破壊でなく、水素で局在化したすべりによるマイクロ延性破壊であるという基本原理を確立し、FCV、インフラ関係者に水素エネルギー機器の設計思想を提示した。
- ・オーステナイト系ステンレス鋼では、製造時に侵入した水素による疲労き裂進展速度は加速するが、特殊熱処理で製造時に侵入した水素を除去すると、疲労き裂進展速度は減速することを発見した。
- ・120 MPa 水素ガス中疲労試験機などを使用し、高圧水素ガス中での低速引張（SSRT）特性、疲労特性、疲労き裂進展特性を評価する方法を確立した。
- ・外部の関係機関と連携し、実証が終了した 35 MPa 水素ステーションの蓄圧器やパイプ、試験で破裂前漏洩した 35 MPa 車載水素容器、高圧水素実験施設で水素

漏洩した高圧配管用T型ジョイントや高圧センサーなどの調査・解析(事例解析)を行っている。事例解析の結果をもとに、水素機器の安全性確保、高性能化の提言を行った。

- ・オーステナイト系ステンレス鋼および溶接構造用鋼の溶接部の高サイクル疲労強度は、0.6MPa水素ガスにより低下しないことが明らかになった。き裂性の溶接欠陥(不完全溶け込みおよび、融合不良)を含む場合、溶接部の高サイクル疲労強度は欠陥がない場合に比べて顕著に低下するが、0.6MPa水素ガスによってさらに低下が助長されることはなく、溶接の水素機器への適用可能性を示した。
- ・水素チャージにより内部破壊が生じやすくなることを示し、材料の清浄度が内部破壊の頻度に影響することを示した。
- ・本研究の材料データ、解析結果を活用し、「高圧水素プレクーラー」として、高圧ガス保安法・特定則の事前評価・大臣特認を取得する等、実用化に向けた設計適合性を確認。(岩谷産業)
- ・ひずみゲージ用金属材料のEBSD組織解析、水素侵入特性の測定、電気抵抗率の測定を行い、箔材(としてFe-Cr-Al、ゲージリードとして銅(Cu)、接合部としてはんだ(Sn-Ag-Cu)が高圧水素ガス用ひずみゲージの構成金属材料として有効であることを明らかにした。(共和電業)

研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

本研究では、高圧水素下長期使用可能な機械要素設計法構築とデータベース整備、最適水素材料の探索を実施した。

- (1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価
- (2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価
- (3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する最新研究状況調査
- (4) 水素雰囲気下におけるゴム材料研究(NOKとの共同研究)
- (5) 水素耐性に優れた適用材料の研究開発(日本合成化学との共同研究)

【成果】

- ・ブリスタによる内部クラックの進展状況を観察し、ブリスタ発生メカニズムを推定した。
- ・水素曝露時に溶解した水素の溶解状態を分析し、耐ブリスタ性に優れた分子設計指針の検討を実施した。
- ・日本ゴム協会水素機器用エラストマー研究分科会との連携により研究開発動向調査および研究ニーズの把握を進めた。
- ・Oリングの使用条件を模擬した温度、加減圧条件によるシールからの漏洩量により、Oリングの破壊モードを把握し、対策の指針を確立した。(NOK)
- ・開発した材料の実機への適用評価を実施し、水素耐久性材料の設計指針を策定した。(日本合成化学)

研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」

本研究では、高圧水素環境下で使われる軸受、バルブなど摺動部材のトライボロジー基礎特性のデータ整備、耐水素トライボロジー設計指針の提案を実施した。

- (1) 軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性の調査研究
- (2) シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究
- (3) 耐水素表面のトライボロジー特性(耐水素表面改質)の調査研究
- (4) トライボシステム中の気体分子の挙動解析
- (5) 耐水素トライボロジー信頼性評価

【成果】

燃料電池自動車及び水素インフラ機器など高圧水素環境下で使用される軸受、バルブ、シールなど摺動材料の、水素ガス雰囲気中でのトライボロジー特性に関して検討を行った。

- ・試験ガスの純度を測定・制御する方法を確立して、材料の摩擦摩耗特性が水素ガス中の微量の水分や酸素に影響されることを定量的に示し、また摩擦にともなうトライボケミカル反応が材料によって異なることを明らかにした。
- ・高圧水素中に曝露された鋼材表面の力学的特性、化学的特性、侵入水素量などの測定を行い、高圧水素曝露により表面酸化膜の減少、表面硬度の上昇、炭素の析

	<p>出などが起こり、温度依存性があることを明らかにした。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧水素（40MPa, 100℃）への曝露により、ステンレス鋼表面の酸化膜が還元され、PTFEの転移膜形成が促進されることを明らかにした。 ・ 研究実施項目①と連携して超高圧水素中摩擦試験機による実験技術を確認し、40MPaの水素ガス中における各種PTFE複合材の摩擦摩耗特性を明らかにした。 ・ 硬質薄膜の水素透過性の計測方法を開発し、水素透過を抑制する水素バリア性コーティング膜を探索して、DLC、TiN、TiC、TiAlNなどの硬質薄膜、ジルコニウムやニオブなどの高融点金属薄膜が水素バリア性が高いことを明らかにした。 ・ 潤滑薄膜中の気体分子の挙動の分子動力学シミュレーションを行い、潤滑剤中の溶存分子（水素）の移動はせん断によって誘起され、壁面への吸着量が増加することを明らかにした。 ・ データベースのシステムを改善するとともに、要点をまとめたデータシートを作成した。 <table border="1" data-bbox="464 712 1410 817"> <tr> <td>特許</td> <td>出願中 [国内] 9件 [外国] 34件</td> </tr> <tr> <td>投稿論文</td> <td>[査読有り] 215件 [査読無し] 1件</td> </tr> <tr> <td>その他</td> <td>発表件数 624件 受賞実績 31件 ※いずれも平成24年3月現在</td> </tr> </table>	特許	出願中 [国内] 9件 [外国] 34件	投稿論文	[査読有り] 215件 [査読無し] 1件	その他	発表件数 624件 受賞実績 31件 ※いずれも平成24年3月現在
特許	出願中 [国内] 9件 [外国] 34件						
投稿論文	[査読有り] 215件 [査読無し] 1件						
その他	発表件数 624件 受賞実績 31件 ※いずれも平成24年3月現在						
<p>IV. 実用化の見通しについて</p>	<p>1. 事業全体における実用化の見通しについて</p> <p>本事業では、水素エネルギー社会に不可欠である「水素を長期間安全に利用するための学術的な基盤」を確立することを目的としている。また水素を取り扱う容器や機器における材料の水素脆化やトライボロジーなど、水素が関わる現象や挙動の基礎的メカニズムを解明するとともに、基礎的な水素物性のデータベースを構築することで関係産業界の誰もが、その成果を活用できるようにすることで水素利用技術の信頼性向上、安全性確立に資することを意図している。</p> <p>具体的には、2008年7月に発表された燃料電池実用化推進協議会が描く「燃料電池自動車を2015年に一般ユーザーに普及開始」、「商用水素ステーションの設置開始」のシナリオに向けて、産業界と連携を取りながら必要なデータ、考え方を提示していく。2010年に予定される「商用水素ステーションの仕様決定」、「高圧容器および付属品の新基準発行」に関しては、産業界における設計、評価に資するために、各材料の疲労寿命を考えた使い方や設計方針を提言していく。2011年後半以降、水素製造・輸送・貯蔵等技術開発事業に参画する企業及び規制機関等への水素構造材料及び水素物性に関するデータを250件以上提供し、高圧水素の使用に関わる規制見直し、水素関連機器の技術開発、および、2015年に向けて設置される水素ステーション用機器の特認申請に広く活用されている。今後さらに、2015年以降の、安全性と低コスト化を実現した水素機器への規制見直しと産業界の技術開発への基盤として本事業で取得されたデータに期待される部分は大きい。また、随時最新の水素物性データベースを広く世に公開していくこと。金属材料だけでなく、バルブなど摺動材やOリングのようなシール材に関する水素環境下での劣化特性を明らかにし、データベース化を進めていくことを通して、水素インフラに使用する機器の設計手法構築や、構成部材の疲労寿命予測、メンテナンス指針を確立し、安全な水素社会を構築するための基盤となる知見を産業界に提供する。</p> <p>2. 波及効果</p> <p>基礎研究により技術的基盤を形成する過程において、研究の初期から海外の基準作成に影響のある研究者と一緒に考察・評価することにより、日本が国際標準の場に出遅れることなく、むしろ初めから同じ考え方に基づいた国際標準提案や国内基準整備等が行えるような研究体制とすることにより、結果として日本にとって技術的に有利になる産業界展開が可能となる。</p> <p>また、研究成果の普及や定着のために若手技術者を対象としたセミナーを定期的に開催するなど、人材育成や本技術分野の基礎・基盤技術の底上げを図り、近い将来、文字通り産業界で活躍する戦力となる技術者育成にも活用反映させている。</p>						

<p>V. まとめ</p>	<p>本事業は、概ね当初計画通りに推進中であるが、2015年FCV普及開始に向けた産業界から水素関連機器の低コスト化、水素中で使用される材料に関するデータ取得・提供等のニーズが高まってきたため、追加公募等により体制を見直し、状況変化に対応している。</p> <p>(1) 高压水素環境(100MPa)での材料や部品の評価方法を確立し、高温高压条件の状態方程式等について高精度の推算式を作成した結果、新しいコンセプトに基づいた物性推算機能付きデータベースシステムを完成。産業界へのデータ提供が可能となりつつある。</p> <p>(2) 水素脆化に関する基本原理を確立し、FCV、インフラ関係者に水素エネルギー機器の設計思想を提示した。また高压水素環境中における各種材料特性やトライボロジーなどに関するメカニズム解析を通じて、従来の加速試験では見落としていた知見を加えることが出来た。今後は、各種材料の長期サイクル使用等実使用条件を十分に考慮した材料特性把握(裏付けデータ取得を含む)・メカニズム解析を展開し、関係産業界が実際に活用しやすい使用方法や機器設計指針等を提供していくこととする。</p> <p>(3) 2010NEDOロードマップにおける2020年普及時の水素ステーションコスト<1.5億円、自動車用水素容器コスト<数十万円の実現に向けて、基盤研究、材料データの提供等の貢献が期待される。</p>	
<p>VI. 評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>平成17年度実施 担当部 燃料電池・水素技術開発部</p>
	<p>中間評価</p>	<p>平成20年度7月 中間評価結果反映</p>
	<p>中間評価</p>	<p>平成22年度9月 中間評価結果反映</p>
<p>VII. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成18年2月作成</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>平成20年3月改訂 平成20年6月改訂 平成22年3月改訂 平成23年7月改訂</p>

用語集 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」- 1

	用語	定義
E	Enskog理論	気体の粘度および熱伝導率は気体分子運動論によって推定することができる。しかし、従来の気体分子運動論では分子を単純に剛体球と仮定しているため値の定性的な傾向、例えば温度依存性などは比較的正しく予測できるものの、定量的な値については高精度の予測はできない。Enskog らは剛体球の仮定を改善するとともに統計的な手法を駆使してより厳密な予測法を確立した。この理論によれば粘度および熱伝導率の圧力依存性を比較的正確に求めることができるとされている。本プロジェクトでは高圧域の粘度および熱伝導率を実測するので、この理論の適用範囲と精度を確かめることが可能となる。
I	ITS-90 国際温度目盛	1990 年国際温度目盛。ITS = International Temperature Scale。国際度量衡委員会によって、それ以前の 1968 年国際実用温度目盛 (IPTS-68, International Practical Temperature Scale) に変わる新しい温度目盛が承認され、1990 年より国際標準として使用されている温度目盛。
N	NIST	米国国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)、以前は国立標準局(National Bureau of Standards, NBS)と呼ばれ、米国の標準・規格を統括する機関。米国商務省傘下にある。
P	PVT、PVT 関係、PVT データ	圧力(P)・体積(V)・温度(T)、あるいはこれらの関係・データのこと。理想気体の状態方程式で、PVT の関係は、 $PV=nRT$ と表される。実在気体では、①分子はある大きさを持っていること、②分子が接近すると分子相互間に引力が作用することなどにより、理想気体の状態方程式からずれてくる。特に低圧・高温ほどずれが大きくなる。水素については、300K 以上の温度領域では、1960 年以前のデータをもとに状態方程式が作成されている。とくに 450K 以上の温度では、実測値が不足している。
V	VLEデータ	気液平衡データ(Vapor-Liquid Equilibrium)のことで、蒸気圧曲線を意味する。
X	XML、XML データベース	XML とは、Extensible Markup Language の略で、コンピュータでデータを管理する際に使用する、文書やデータの内容や構造を記述するためのマークアップ言語のひとつ。XML データベースとは、XML を使用してデータを管理するタイプのデータベースのこと。
え	(水素の)エンタルピー	熱力学における示量性状態量のひとつであり、エンタルピー(H)は、内部エネルギー(U)、圧力(P)、体積(V)を用いて $H=U+PV$ で定義される。

	用語	定義
お	オルソ水素	水素分子は2個の水素原子によって構成されるが、それぞれの原子核の核スピンの向きにより2種類の状態が存在する。核スピンの向きが平行のものをオルソ水素、(ortho-hydrogen, o-H ₂)、核スピンの向きが反平行のものをパラ水素(para-hydrogen, p-H ₂)という。常温以上では、オルソ水素とパラ水素の存在比は3:1であるが、低温になるほどパラ水素の割合が増加し、絶対零度付近ではほぼ100%パラ水素となる。オルソ水素からのパラ水素への転換速度は極めて遅く、故意に転換させる場合には一般的に触媒も用いて転換速度を上げている。化学的性質に違いがないが、物理的性質(比熱や熱伝導率など)が異なる。
か	管摩擦係数	管内流れにおいて、管壁面に生じる摩擦抵抗(ずり応力)を、管内平均速度を代表速度とした動圧によって無次元化することにより得られる係数。
さ	三重点、三重点温度	純物質において、固体・液体・気体が共存する状態であり、温度と圧力の値は定点をとる。三重点温度はその時の温度の値である。
	細線加熱法	非定常短細線加熱法はこの測定法を基本にして開発されている。アスペクト比が大きく細線の熱容量が無視できる程度に小さいと仮定して得られる細線の非定常温度応答の解析解に基づいた流体の熱伝導率測定法。「非定常細線加熱法」と記す方が正確である。
し	シンカー	おもり。磁気浮上式密度測定における基準となるおもりである。気体あるいは液体の密度を測定する際に、シンカーに作用する浮力を測定し、密度を求める。シンカーは高純度の物質で作製され、固体密度校正装置(液中秤量装置)により校正されて質量、体積および密度の値が付される。
	四重極質量分析器	複数の分子が混ざっている気体の組成比を求める分析器。試料ガスをこの分析器に導入すると、分子はイオン化され、分子質量(m)/イオン価数(z)に応じて変動電場によりフィルターリングされ、増倍管により各分子をカウントし、混合ガスの組成比を求めることができる。本水素溶解度測定においては、1MPa以上の条件下において使用する。高圧気液平衡セルからサンプリングし、減圧した水/水素の混合流体を気化器に導入し、参照ガスとなるHeも既知量導入し、H ₂ /He比を四重極質量分析器で測定することにより、水素溶解度を求めることができる。

	用語	定義
じ	磁気浮上密度計	アルキメデスの原理によって密度を測定する浮力法の一種。永久磁石ならびに電磁石を用い、浮子を試料内で浮上させる。このときに浮子に働く浮力を測定することで試料の密度を求める。比較的高密度域において高精度での測定が可能である。
	ジュールトムソン係数	実在気体を等エンタルピー断熱膨張をさせると、膨張後の気体の温度が変化する。その際の圧力変化に対する温度降下の割合をジュールトムソン係数という。逆転温度以下では膨張後に温度が減少し、ジュールトムソン係数の値は正となり、逆転温度以上では膨張後に温度が上昇し、負の値となる。冷凍効果を得るには逆転温度以下で膨張を行う必要がある。
だ	断熱指数	断熱変化における圧力を P 、体積を V とし、その変化を $PV^k = \text{一定}$ と表したときの k の値。理想気体では定圧比熱を定積比熱で割った比熱比に等しい。
て	定圧比熱	圧力一定の下で、単位質量あたりの物質を単位温度上げるのに必要な熱量。
	定積比熱、定容比熱	容積一定の下で、単位質量あたりの物質を単位温度上げるのに必要な熱量。
と	等圧膨張率	圧力一定の下で、物体に熱を加える時、単位温度上昇のために生じる容積の膨張と初めの容積との割合。
	等温圧縮率	温度一定の下で、物体に圧力を加える時、単位圧力上昇のために生じる容積の収縮と初めの容積との割合。
ど	動粘性係数	動粘性係数は、粘性係数を密度で除して定義され、流体力に関する無次元量の定義に用いられる。
に	ニュートン流体	流体に対する応力-ひずみ速度の関係に、線形法則(ニュートン-ストークスの法則)が成り立つ流体。ニュートン-ストークスの法則のうち、ずり応力-ひずみ速度の関係式が、ニュートンの粘性の法則であり、ずり応力とひずみ速度の比例係数が粘性係数である。
ね	(水素の)粘性係数	粘性率、粘度とも呼ぶ。粘りの度合いを示す物性値で、流体の流れによる流体摩擦や流体の輸送などにおける圧力損失の見積りに用いられる水素の粘性係数については、希薄気体の分子運動論に基づく理論式を補正する形で多くの推算式が提案されている。水素の粘性係数の実測は、1970年代にアメリカのNBS(現NIST)とNASAが宇宙開発を目的として実施してきたが、本事業で必要とされる高温、高圧域での信頼性の高い実測値はほとんど無い。

	用語	定義
ね	(水素の)熱伝導率	伝導による熱の伝わり易さを表す物性値で、熱伝導に関する熱交換量や物体内の温度分布のシミュレーションや熱交換器などの熱設計に用いられる。水素の場合、パラ水素とノーマル水素では熱伝導率の値が異なることが知られている。水素の熱伝導率の実測は、1970年代にアメリカのNBS(現NIST)とNASAが宇宙開発を目的として実施してきたが、本事業で必要とされる高温、高圧域での信頼性の高い実測値はほとんど無い。
の	ノーマル水素	オルト水素とパラ水素の存在比が 3:1 である水素。常温以上のオルソパラ平衡組成に達した水素はノーマル水素である。
は	ハーゲン-ポアズイユ(Hagen-Poiseuille)流れ	十分に発達した円管内層流流れ。円管内の粘性境界層が管中心にまで発達しているため、速度分布が放物線状となる。ハーゲン-ポアズイユ流れでは、流量は圧力勾配に比例し、管径の4乗に比例し、また流体の粘性係数に反比例する(ポアズイユの法則)。本研究事業では、このポアズイユの法則を利用して、水素の粘性係数を測定する。
ば	バーネット法、バーネット式	大小2つの容器を設置し、試料を大きいほうの容器から小さい容器へ繰り返し等温膨張させることで、気体の密度を求める方法。特に低密度域での測定に有効である。
ば	パラ水素	水素分子は2個の水素原子によって構成されるが、それぞれの原子核の核スピンの向きにより2種類の状態が存在する。核スピンの向きが平行のものをオルソ水素、(ortho-hydrogen, o-H ₂)、核スピンの向きが反平行のものをパラ水素(para-hydrogen, p-H ₂)という。常温以上では、オルト水素とパラ水素の存在比は 3:1 であるが、低温になるほどパラ水素の割合が増加し、絶対零度付近ではほぼ 100% パラ水素となる。オルソ水素からのパラ水素への転換速度は極めて遅く、故意に転換させる場合には一般的に触媒を用いて転換速度を上げている。化学的性質に違いがないが、物理的性質(比熱や熱伝導率など)が異なる。
	パラ濃度	ある量の水素分子における、パラ水素の存在比。常温以上のオルソパラ平衡組成に達した水素のパラ水素濃度は 25%であるが、低温になるほどパラ濃度が増加し、絶対零度付近でのパラ濃度はほぼ 100% となる。ただしオルソ水素からのパラ水素への転換速度は極めて遅いため、常温の水素を絶対零度付近まで冷却しても、パラ濃度が 100%となるためには長い時間を要する。

	用語	定義
ひ	非定常短細線加熱法	静止流体中に設置された細線をステップ状に電気加熱したとき、細線の非定常的な温度上昇が周囲流体の熱伝導率および熱拡散率の関数になることを利用した流体の熱伝導率測定法。従来の細線加熱法は細線径に比して非常に長い(アスペクト比(長さ/直径)が数千以上)細線を用いるため、試料容器が必然的に大きくなるが、本測定法ではアスペクト比が数百と短い細線を用いるところに特徴がある。熱伝導率と熱拡散率を同時に測定することが可能であるが、細線周りの熱伝導に関して高精度の数値解を求める必要がある。
ぶ	ブジネ近似 (Bussinesq 近似)	自然対流の基礎方程式において、密度の変化を運動方程式の浮力(体積力)の項のみ考慮し、他の項に現れる密度は一定として扱う近似のことをいう。
ぺ	ペルチェ素子	全固体型のエネルギー変換素子である。電力を素子に与えることで、片面から吸熱、他方の面から放熱させることができる。本露点測定のうち、いわゆるレーザー露点計において使用される。容器内の一側面をペルチェ素子により冷却し、同時に温度も監視し、レーザー反射光の変化から結露を検知することで、高圧水素ガス中の微量な水蒸気を測ることができる。
よ	溶存水素計	水の中に溶けた水素ガスの溶解度を、電気化学的に測定する装置。水素ガスの溶解度が高いほど、起電力が高くなり、起電力による電流も高くなる。この電流値を変換して、水の中の水素溶解度を求めることができる。本水素溶解度測定では、1MPa 以下での条件に限って使用する。本文にも示したように、電気化学プローブ周りのサンプル流速を適切に与えることが、正確な測定に欠かせないことが分かっている。

	用語	定義
れ	レイノルズ数	流れが持つ慣性力と粘性力との比を代表する値。物体回りの流れ(外部流)では、レイノルズ数が1より十分大きい場合は慣性力支配の流れ、1より十分小さい場合は粘性力支配の流れとなり、流動形態を特徴づける重要なパラメータである。一方で、本研究事業で対象とする定常円管内流れ(粘性係数測定における細管内流れ)のような内部流では、流路の幾何学的な束縛により慣性力はゼロとなるため、上で述べたような「慣性力と粘性力との比」のような概念は定義できない。そのため、管内流れに対するレイノルズ数を管レイノルズ数と呼び区別することがある。管レイノルズ数が約2000以下では、管内流れは層流である。また、定常流れにおいて、幾何学的に相似な流れの場合は、レイノルズ数が指定されれば実際の規模の大小に関係なく全く相似な流れ模様となる。これを力学的相似の法則と呼び、円管内の流れにおいても適応される。

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-1

	用語	定義
1	1次イオン	2次イオン質量分析装置 SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) において、イオン源で発生し、加速させて試料に衝突させるイオンのことを1次イオンという。水素の2次イオン検出の場合、1次イオン源として液体金属のセシウムがスパッタ率および2次イオンとしての水素の負イオン生成効率が高いため採用されている。
2	2次イオン	1次イオンが試料に衝突し、試料面から原子が叩き出される原子、分子のうち、電荷を帯びたものを2次イオンと呼ぶ。水素の場合、正イオンより負イオンとして検出する場合が感度が高い。
	2次イオン質量分析法、SIMS	2次イオン質量分析装置 SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) の日本語訳および略称。材料の表面にイオンを高速で衝突させ、衝突によって材料から叩き出されるイオンを質量分析することにより、材料の表面に存在する元素を分析する装置。材料中に存在する水素の位置および濃度を測定することが可能。
	2重収束方式	電場と磁場を組み合わせ、イオンの速度収束と方向収束を行わせる質量分析方式。
△	$\Delta \epsilon_t$	ひずみ制御低サイクル疲労試験において用いる。「全ひずみ幅」を示す記号。
A	AlCuグリッド試料	2次イオン質量分析装置 SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) の2次イオン像を調整するとき用いるアルミ基板上に格子状に銅を蒸着した試料。格子間隔が $25 \mu\text{m}$ と既知のため、2次イオン像の倍率を算出する場合にも用いる。
B	BCC 金属	BCC とは体心立方格子 (Body-Centered-Cubic) のことで、立方体の頂点の他、立方体の中心にも格子点がある。BCC 金属とは結晶構造が BCC である金属のこと。代表例として鉄、クロム、モリブデン、タンゲステン、ヴァナジウムなどがある。結晶構造は水素の拡散、吸蔵量などに大きく影響を及ぼし、BCC 金属は一般に水素拡散が速く、水素吸蔵量は少ないのが特徴である。[1]
	bcc (BCC) 構造	体心立方格子 (Body-Centered Cubic lattice) の略称。結晶構造の一種。立方体形の単位格子の各頂点と中心に原子が位置する。常温での水素の拡散係数は $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であり、FCC 構造に比べ非常に大きい。[1],[2]
C	CPFEM	Crystal Plasticity Finite Element Method の略。「マルチスケール解析」のひとつ。

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-2

	用語	定義
D	DS	脆化感受性(Degradation Susceptibility)の略で、この値が高いほど脆化しやすいことを示す。一般に、材料中に水素を多く含むほど DS 値は低下する。
E	EBSP 法	走査電子顕微鏡を用いて極めてマイクロなレベルで結晶方位を測定する手法。後方散乱電子線回折パターン法の略称で、EBSD法ともよばれる。[3]
	EM(エレクトロンマルチプライヤー)	2次イオン質量分析装置 SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)における、1 次ビームを走査するときに各点の信号を画像化する装置。空間分解能は 1 次イオンビーム径に依存する。水素検出の場合、大電流ビームを用いる必要があり、イオンビーム径が大きくなるため、走査像の解像度が悪くなる。また、信号の大きさが 100 万カウント/秒以下という制限があるため、強度の大きな信号の場合には、スリットを利用して信号を減衰させて使用する必要がある。
	ESA	Electrostatic Sector の略。扇型の電場発生器。セクタ(扇)型 SIMS 装置において扇型磁場コイルと組み合わせて質量分析に用いる。
F	FC(ファラデーカップ)	SIMS における、イオン電流値を計測するための器具。1 次イオンビーム値の計測や、画像データを取る前の 2 次イオンの電流値を計測するために用いている。
	fcc(FCC)構造	面心立方格子(Face-Centered Cubic lattice)の略称。結晶構造の一種。単位格子の各頂点および各面の中心に原子が位置する。常温での水素の拡散係数は $10^{-12} \sim 10^{-16} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であり、BCC 構造に比べ非常に小さい。[1],[2]
	Ferrite grain	フェライト結晶。鉄の結晶の一種であるフェライトからなる結晶粒。
	FE-SEM	電界放射型走査電子顕微鏡。(Field Emission Scanning Electron Microscope)の略。通常の SEMと比較して、高分解能の観察が可能。
	fibre loading モデル	フェライト-パーライト鋼において、パーライト中のセメンタイトのひずみはフェライトのひずみと等しいと仮定するモデル。この仮定のもとでセメンタイト中の応力をもとめる。[4]
	F- δ 曲線	ナノインデンテーションにおける圧子の押し込み力(F)と押し込み深さ(δ)の関係を示す線図であり、材料の微小領域における弾性・塑性挙動を評価するのに用いる。

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-3

	用語	定義
G	Gurson の降伏関数	材料の降伏特性を連続体力学に基づいて表現する際に用いるモデル関数の一つ。ボイドのような「隙間」を多く含む個体の応力-ひずみ特性を記述したもので、延性材料の変形・破壊特性を力学的に評価する際に用いられる。
H	H ⁻	水素負イオン。SIMS において、Cs を 1 次イオンとする場合、2 次イオンとして負イオンの H ⁻ が生成される。
	HAZ	溶接継手における熱影響部 (Heat Affected Zone)。溶接熱により、母材が熔融温度近くまで加熱され、熱の影響を著しく受けた部分。
	HESFCG	水素による疲労き裂進展加速のメカニズムを示した水素助長疲労き裂継続前進機構 (Hydrogen Enhanced Successive Fatigue Crack Growth, HESFCG) のこと。疲労試験の繰返し速度が遅く、き裂先端に水素が十分に集まる時間がある場合、き裂先端の狭い領域において、低応力ですべりが局所的に起こる。そのため、水素チャージ材のき裂先端では負荷の増加につれて短いすべりが次々と起こるため、未チャージ材と比べてき裂はほとんど開口せずに前方へと進展していく。その結果、低炭素鋼および低合金鋼の水素チャージ材のき裂進展速度は未チャージ材の 10~30 倍に加速すると考えられる。 [5]
	HMT	水素による臭化銀 BrAg の還元反応を利用した水素の可視化手法の 1 つである。材料表面に塗布された BrAg が材料中から放出される水素により還元される。還元された Ag を電子顕微鏡で観察することで水素の存在位置を決定することができる。[6]
	HV	「ビッカース硬さ」を示す記号。
I	Hydrogen charged specimen	水素をチャージした試験片。材料の強度特性に及ぼす水素の影響を試験する際に用いられる。
	IMS - 7fセクタ (扇) 型 SIMS	セクタ (扇) 型の静電場発生器のマグネットを組み合わせる質量分析を行う SIMS 装置。鉄鋼中の水素を検出する場合、水素の信号が小さいため、大電流ビームを用いるダイナミック SIMS と呼ばれる手法で検出する必要がある。本装置ではダイナミック SIMS 手法が可能となっている。1 次イオン源は水素検出に特化したセシウムイオンのみが装着されている。また、液体窒素を用いた試料冷却ステージをオプションとして付加しており、温度上昇による水素離脱を防止する機能を有している。

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-4

	用語	定義
I	Inconel 625	米国 Inco 社で開発され耐食性、耐熱性に優れた Ni 基合金のこと。主要成分は、61%Ni、22%Cr、9%Mo である。本成果では、水素拡散係数が小さい FCC 金属である Inconel625 を対象材料の一つとした。
	ISF(インスツルメンツ ステイタス ファイル)	Cameca 製 SIMS 装置で装置内の各種パラメータの状態を保存するファイル。イオン源のように時間とともに劣化するもの以外のパラメータを再現するために便利である。
K	K-S 関係	鋼のマルテンサイトとオーステナイトとの間の結晶学的方位関係。Kurdjumov と Sachs により見出されたもの。[7]
L	LBB 解析	圧力容器、配管等の破断前漏洩(Leak-Before-Break)の成否を判断するための解析。LLB では、容器・配管に何らかの要因によってき裂が発生しても容器・配管の瞬時の不安定破壊以前にき裂の安定進展による肉厚貫通を先行させ、内部流体の漏洩検知により、装置、プラント等の安全性を確保する[8]。本プロジェクトでは、蓄圧器の鏡部に存在するしわの健全性評価に用いた。
M	MCP(マイクロチャンネルプレート)	マイクロチャンネルプレートは Micro-Chanel Plate の各頭文字をとって、MCP と呼ばれる。MCP は 2 次電子増倍管を 2 次元的に配列した板状の検出器。SIMS における二次イオンの検出に使われる。
	Md30 点	M _s 点(マルテンサイト変態開始温度)以上の温度で塑性加工すると、オーステナイトがマルテンサイトに変態するが、この変態の起こる温度にはある限界の最高温度があり、これを M _d 点という。特に、Md30 点はオーステナイト単相の試料に引張試験で 0.3 の真ひずみを与えたとき、組織の 50%がマルテンサイトに変態する加工温度として定義されるオーステナイト安定度の指標である。本プロジェクトでは、Md30 点の算出に Angel の式 $(Md30(^{\circ}C))=413-462([C]+[N])-92[Si]-8.1[Mn]-13.7[Cr]-9.5[Ni]-18.5[Mo]$ を用いる。[9],[10]
	MeX	Alicona imaging の画像処理ソフト。傾斜角度を変えて撮影した 2 枚の SEM 画像から三次元形状を再構築し、解析することができる。本プロジェクトでは、引張破壊試験片の破面表面に形成されるディンプルの三次元形状を得るために用いた。
N	Negligibly embrittled	NASA による水素脆化の調査の際、高圧水素環境中で引張試験を行い、水素の影響の度合いを分類し、明らかな変化が見られなかったものに分類された材料。[11]

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-5

	用語	定義
N	NH ₄ SCN	チオシアン酸ナトリウム水溶液。この溶液中に試験片を浸漬すると、試験片中に水素が侵入する。本プロジェクトでは、40℃に保持した質量パーセント濃度 20%の NH ₄ SCN 水溶液に試験片を浸漬し、水素チャージを行った。
	Ni 基合金	Ni 元素を基本とし、Ni 量が 50%以上を含んだ合金のこと。本プロジェクトでは、水素拡散係数が小さい FCC 金属である Ni 基合金を研究対象材料の一つとした。
O	O ⁻	酸素負イオン。SIMS において、Cs を 1 次イオンとする場合、2 次イオンとして負イオンの O ⁻ が生成される。水蒸気がき裂先端に閉じ込められている場合、H と同じ O ⁻ の 2 次イオン分布が得られる。
P	Paris 則	繰返し荷重をかけたときの疲労き裂進展速度とき裂先端の応力状態を示す応力拡大係数幅との関係を表す式。1963 年に Paris と Erdogan により見出された。[12]
	PBMF	Primary Beam Mass Filter の略 SIMS において、Cs イオン源から発生するイオンのうち、質量数 133 の Cs イオンのみを試料側へ導入し、他の質量数のイオンを取り除く磁場フィルター。
	PIIA	重水素とヘリウムイオンの誘起核反応を利用した水素の可視化手法の 1 つである。可視化される元素は重水素である。[13]
	Pop-in 現象	ナノインデンテーションにおける圧子の押し込み力 (F) - 押し込み深さ (δ) 曲線において、転位の集団的活動の開始に対応して不連続点が現れる現象。本プロジェクトでは、転位の易動度の指標としてその押し込み力を用いる。
R	RAE (リアクティブアノードエンコーダー)	SIMS における、マイクロチャンネルプレートと直結した 256×256 のアレイ状に検出素子を配列した 2 次イオン検出器。本研究で用いたものは最小空間分解能約 2 μm である。水素の信号は 104 カウント/秒台以下と小さいので、2 次元水素分布の良好な画像を得るために用いられている。
S	SCM435	機械構造用合金鋼。(35MPa) 蓄圧器の材料。焼入れ性が高く、高強度、高靱性。SCM435 鋼の日本工業規格 (JIS) の化学成分は、C:0.33~0.38、Si:0.15~0.35、Mn:0.60~0.85、P:0.030 以下、S:0.030 以下、Cr:0.90~1.20、Mo:0.15~0.30 (mass %)。

	用語	定義
S	S/N比	信号(Sound)と雑音(Noise)の比。数値が大きいほど信号の検出が良好になる。SIMSにおいて、水素2次イオン信号を大きくするために、1次ビーム電流密度を上げる必要があるが、ビーム径が大きくなること、ラスターサイズの深いクレータが形成されることによるクレータエッジ効果が問題となる。そこで、1次ビーム電流値とラスターサイズの最適化が必要となる。
	SEM	走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope)の略称。通常の光学顕微鏡と比較して高解像度の拡大画像を得ることができる。水素の有無による破壊形態の差異の観察等に用いている。
	SEM 像	走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope)により撮影された像。
	SGP	配管用炭素鋼管。現在、都市ガスに使用されており、水素ガスパイプの候補材料としても考えられている。SGPは0.1MPa(ゲージ圧)未満の低圧ガス用であり、1MPa(ゲージ圧)以上の高圧ガス用のSTPG370とともに、水素ガス環境下における安全性評価が進められている。本プロジェクトでは、SGP鋼管に製造される前の鋼板を用いて、水素侵入特性に及ぼす予ひずみの影響、並びに引張特性に及ぼす水素と予ひずみの影響を明らかにした。
	Sieverts 則	ある温度における金属中への水素の溶解度は水素ガス圧の平方根に比例する関係のこと。
	SIMS	二次イオン質量分析法の略称。数百 eV~20keV のエネルギーを有する細束イオンビームを試料表面に照射し、スパッタ現象に伴い二次的に放出される試料の構成元素による二次イオンを質量分析計にかけて、元素または化合物の同定および濃度の測定を行う分析法。水素の分布を三次元的にマッピングすることができる。[14]
	Slip bands	すべり帯。結晶のすべりが集中して生じる帯状の領域。
S-N 曲線	金属疲労を生じさせる応力の大きさ(Stress)と疲労寿命(Number of cycles to failure)の関係を表す曲線。金属疲労の強度を表す最も基本的なデータ。縦軸に応力、横軸に疲労寿命をとった図はS-N線図ともいわれる。	

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-7

	用語	定義
S	SSRT	遅れ破壊試験法の一つ。低ひずみ速度法を意味する Slow Strain Rate Technique の頭文字を取ったもの。遅れ破壊試験は、応力負荷方法により、定荷重法、定ひずみ法、SSRT の三つがある。前二者は、実機環境中の遅れ破壊感受性を評価するには長時間を要する。一方、SSRT は、低ひずみ速度により徐々に応力を負荷し、試験片を強制破断させるため、試験環境によらず遅れ破壊感受性を高感度に短時間で評価することができる。[15],[16]
	SSRT 試験	SSRT を用いた遅れ破壊試験。
	STPG370 鋼管	圧力配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3454)。水素パイプラインとして、STPG370 鋼管の中に 1MPa 以下の水素ガスを流すことが想定されている。
	SUS304	主合金成分がクロム 18%、ニッケル 8%のオーステナイト系ステンレス鋼。[17]
	SUS316	主合金成分がクロム 18%、ニッケル 12%、モリブデン 2.5%のオーステナイト系ステンレス鋼。[17]
	SUS316L	主合金成分が炭素 0.03%以下、クロム 18%、ニッケル 12%、モリブデン 2.5%のオーステナイト系ステンレス鋼。[17]
T	TDS	昇温脱離分析 (Thermal Desorption Spectrometry) 高真空中に置かれた試料を一定の速度で加熱し、試料から脱離したガスを質量分析装置で分析する。脱離した原子や分子の種類、それらの量を高感度に分析できる。試料を加熱すると、表面に吸着したり材料に吸蔵された原子や分子は、存在状態や存在場所によって決まった温度になると試料から脱離する。そこで、原子や分子が脱離する温度からその存在状態や場所を知ることができる。
	TOFD	回折波の飛行時間解析法 (Time Of Flight Diffraction)。非破壊検査の超音波探傷試験方法の一つ。TOFD は送信探触子と受信探触子を向かい合わせに配置し、送信探触子から問う音波 (縦波) を伝搬させ、材料内部に存在する欠陥の上端と下端で発生した回折波を受信探触子で受信する方法。各波の到着時間差により、音速との関係から欠陥の位置および寸法評価を行う[18]。本プロジェクトでは、蓄圧器の鏡部の非破壊検査に用い、蓄圧器内面に存在する欠陥の評価を行った。

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-8

	用語	定義
	Torr	圧力の単位。1Torr=133Pa。国際単位 SI では Pa が使用されることになっているが、真空工学では実用単位として、いまだによく使用されている。本事業で用いられている SIMS 装置の場合、装置内の圧力表記は Torr で統一されている。
V	V ノッチ	シャルピー衝撃試験の試験片につける切り欠。破壊の起点となる。
X	X 線回折法	X 線が結晶格子によって回折される現象を X 線回折という。この現象を利用して物質の結晶構造を調べることが可能である。このように X 線の回折の結果を解析して結晶内部で原子がどのように配列しているかを決定する手法を X 線結晶構造解析あるいは X 線回折法という。 [19]
あ	アーク法	原料であるグラファイトなどの炭素を陽極とし、陰極との間に電圧をかけることにより陽極を蒸発させ、陰極表面上に目的物を析出させる炭素材料などの合成手法である。
	アクチュエータ	作動装置 (Actuator) 疲労試験機においては、試験片に荷重を与えるピストン部分を指す。
	圧縮機	圧縮機 (Compressor)。水素ガスを圧縮する装置。水素ステーション (水素ステーション参照) の主要な構成装置。
	アパーチャ	SIMS において、一次イオンビームが通る小さな孔のことをいう。本事業で用いられている SIMS 装置の場合、PBMF アパーチャーは 3000 $\mu\text{m}\phi$ のもの、レンズ4アパーチャーは 400 $\mu\text{m}\phi$ のものを用いている。
	アラインメント	Alignment のカタカナ標記。本プロジェクトでは、疲労試験機への試験片の取付け精度を指す。これが不十分だと、試験片に荷重を付加した際に余計な曲げ応力などが発生し、正しい疲労試験データが得られない。
	アレイ状	配置として格子の交点と同じ配列で並んでいる状態。
い	陰極チャージ法	水素が吸蔵されている金属材料を模擬して疲労試験を行うために、電気化学的に水素を試験片表面に発生させて水素吸蔵を行う方法。カソードチャージともいう。電解質水溶液中で試験片を陰分極すると試験片表面に水素原子が生成し、その一部が材料に侵入する。
え	液体金属脆化	曲げや引張などの応力を受けた個体金属が、熔融した液体金属に接触すると、き裂伝ぱが著しく進行する場合があります、これを液体金属脆化と呼ぶ。一例として、常温で曲げ加工を施した鋼材に、そのままの状態でも融融亜鉛めっきを施すと、本現象が生じることがある。

	用語	定義
	エッジ効果	SIMSによる水素原子の測定を行う際に、測定対象表面に角部が存在すると、あたかもそこに水素が存在するような信号が観察される現象。水素と本効果による信号の分離がSIMSによる水素観察の際には必要となる。
	エッチピット	試料表面を適当な腐食液で腐食すると、エッチピットと呼ばれる小さな孔ができる。このエッチピットの形状から、結晶の方位を知ることができる。[20]
え	エッチング	組織の観察を容易にするために、腐食等により金属の組織、結晶粒界を現出させること。
	エネルギースリット	SIMSにおいて、エネルギー幅のある2次イオンのピーク値からのエネルギー幅を選択するために用いる切れ目状の器具のこと。
	エメリー紙	紙ヤスリ。研磨加工に用いられる研磨材を紙などに付着させたもの。研磨の段階に応じて、目の粗いものから細かいものまで、数種類を使用する。ギリシャのナキサス島のエメリー岬で採取された石を研磨材として用いたことがその名称の由来。現在では、人工研磨材も用いられる。
	エメリー研磨	試験片表面の仕上げに用いる紙やすりのような研磨剤、およびそれを用いた研磨。#100～#4000など様々な粒度のエメリー紙があり、使用するエメリー紙の粒度を徐々に小さくしていくことで、必要な表面状態に仕上げる。一般的に試験片表面を鏡面仕上げしたい場合には、エメリー研磨後さらにバフ研磨を行う。
	円周切欠き	丸棒試験片の円周全体に、ある一定の深さの切欠きを導入した試験片。水素は応力集中部に集まる傾向があるため、平滑材よりも切欠き材の強度特性のほうが水素の影響を受けやすい。
	延性ストライエーション	疲労き裂が進展する際に破面上に形成される縞状の模様。負荷時に疲労き裂先端が塑性鈍化し、除荷時に再鋭化することによって、繰返し荷重一サイクル毎に一本の縞が形成される。縞の間隔はその場所におけるき裂の伝ば速度を表す。
	延性ストライエーション状模様	疲労破面上で観察される延性ストライエーションに似た縞模様であるが、延性ストライエーションほど明瞭でなく規則性が乏しいもの。鉄鋼材料では形成されやすい。
	延性低下	塑性変形がしにくくなることで、一般に強度が高いほど延性は低下する。水素脆化の特徴の一つとして、延性低下があげられる。

	用語	定義
	延性破面	材料が延性的に破壊した破面のこと。一般に、ディンプルが観察される。水素環境中もしくは水素チャージ材では大気中とは異なる破面様相を示し、水素の影響を検討するときの一助となる。
お	応力拡大係数	き裂先端近傍における特異応力場の強さを表す係数。一般に、き裂形状(長さ)及び負荷応力により求められる。き裂の形状等が異なっても、応力拡大係数が同一であれば、き裂先端近傍の応力状態は合同とみなすことができる。き裂発生やき裂進展を評価するための因子として用いられており、水素の影響を検討する場合においても重要なとなる。
お	応力拡大係数幅 ΔK	繰返し荷重下における応力拡大係数の最大値と最小値の差のこと。
	応力比 $R=-1$	応力比 $R=(\text{最小応力})/(\text{最大応力})$ 。応力比が -1 ということは、引張(+)と圧縮(-)の応力を交互に同じ大きさだけかける試験。典型的な引張圧縮疲労試験で両振り試験ともいう。
	オーステナイト	ステンレス鋼 SUS304 や SUS316L の標準的な金属組織。 γ 鉄に他の元素を固溶したもの。水素を吸蔵する量は比較的多いが、水素拡散速度は比較的遅い。
	オーステナイト系	オーステナイトは、純鉄において $911^{\circ}\text{C}\sim 1392^{\circ}\text{C}$ の温度領域にある相のことである。この領域において、鉄は面心立方格子構造をとる。Ni、Mn、Pd が固溶するとオーステナイトの温度領域が広がる。オーステナイト組織を有するステンレス鋼をオーステナイト系ステンレス鋼という。 [19],[21]
	オートグラフ	島津製作所製引張試験機。本プロジェクトでは、容量 5t のものを使用した。
	オートクレーブ	内部を高圧力にすることができる容器や装置。水素ガス中疲労試験装置の水素ガス容器のこと。
	押し込み力	ナノインデンテーションにおいて圧子を押し込む力で、そのときの圧子の押し込み深さと対比させて評価される。
か	開口変位	き裂に引張応力が作用すると、き裂先端がわずかに開き、き裂先端に新しいき裂面が形成される。このときのき裂の進展方向に対して垂直方向のき裂の開口量を開口変位と呼ぶ。水素チャージ材では、き裂先端への水素の集中により、き裂はほとんど開口せずに前方へと進展する。つまり、水素チャージ材の開口変位は未チャージ材よりも小さくなる。

	用語	定義
	介在物検査	介在物検査(Inclusion Rating)。材料中に存在する介在物の形状、寸法求め、材料の清浄度評価すること。本プロジェクトでは、極値統計法に基づいた介在物評価法を用いた。製造年代の異なる蓄圧器の材料に対して介在物検査を行い、現在使用されている蓄圧器材の清浄度が向上していることを示した。
	化学機械研磨(CMP)	弱酸性の化学腐食液に浸しながら、同時に機械的に力を作用させながら、研磨することから、化学機械研磨(Chemical Mechanical Polishing: CMP)と呼ばれている。最適な条件で CMP を行うと、無ひずみで原子レベルの平滑面が得られる。
か	鏡部(かがみぶ)	円筒形容器の端面(鏡)近傍の呼び名。蓄圧器の鏡部は胴部の端をスピニング加工または熱間鍛造で製作するため球面状になっている。
	下限界値	限界値の下限側の値のこと。水素の影響によりき裂進展の下限値が低下することにより、より低応力においても破壊を生じることがあるので、重要な値となる。
	拡散係数	拡散とは、粒子、熱などが自発的に散らばり広がる物理現象である。拡散係数とは拡散の早さを規定する物理量であり、拡散する粒子や熱の流れ(流束密度)は粒子の濃度や温度の勾配に比例し、その比例係数を拡散係数と呼ぶ。[L ² T ⁻¹]の次元を持つ。水素分子が金属あるいは樹脂、ゴム材料などの固体中に溶解あるいは脱離する過程において、固体中の水素の拡散現象が問題となる。固体中の水素の拡散係数は高圧水素中に曝露された際に発生する破壊現象などに影響を与える。
	拡散律速過程	ある現象が複数の過程を経て進む場合に、その中で一番速度の遅い(時間のかかる)過程を律速過程と呼ぶ。特に、拡散現象が全体の現象の速度を決定する場合、拡散律速過程と呼ぶ。
	下限界応力拡大係数幅 ΔK _{th}	き裂を有する部材から、疲労き裂が進展しない応力拡大係数幅の下限界値。本プロジェクトでは、水素ステーションで使用した蓄圧器で観察された疲労き裂が進展するかを評価するために使用した。
	加工誘起マルテンサイト組織	オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 などでは、もともとの金属組織であるオーステナイト組織は準安定状態にあるために、材料がひずみを受けたことによってオーステナイトがマルテンサイトに変化する場合があり、このひずみにより生成したマルテンサイトを指す。
	加工誘起マルテンサイト変態	加工を加えることによりオーステナイトからマルテンサイトに変態すること。

	用語	定義
	カソードチャージ材	水素が吸蔵された金属材料を模擬して疲労試験を行うために、金属に水素を吸蔵させる方法の一種。高圧水素ガスを用いて試験片に水素吸蔵させることもできるが、より簡便に電気化学的に水素を試験片表面に発生させて水素吸蔵を行うことも多い。その方法をカソードチャージといい、その方法で水素吸蔵された疲労試験片をカソードチャージ材という。陰極チャージに同じ。
か	カップアンドコーン破壊	延性材料の引張試験で起こる破壊形態。本プロジェクトの炭素鋼 SGP および低合金鋼 SCM435 の引張試験では、未チャージ材と水素チャージ材はともにカップアンドコーン破壊した。本プロジェクトでは、水素チャージ材において延性破壊の特徴であるカップアンドコーン破壊が起きたことが、水素脆化を格子脆化説ではなく局所変形助長説で説明することができる証拠の一つとしている。
	カム式	運動の方向を変換する装置の一種。例えば、回転運動を直線運動に変換する。モータに偏心カム(回転中心と運動中心をずらせたカム)を取り付けることにより、モータの回転運動をピストンの直線運動に変換することができ、その波形は正弦波に近い波形となる。
	荷重負荷	荷重(力)を試験片に作用させること。
	完全脆性破壊モデル	材料中の原子間結合が分離する(破壊する)際に、塑性変形のようなエネルギー散逸過程を含まない理想的な脆性破壊が起こるとするモデルであり、破壊力学による材料強度クライテリアの礎を築いた人物の名前を冠して「Griffith モデル」とも称する。
	完全粘性体	気体や液体などの流体は一定の外力に対応して一定の変形速度で流動する。この際、変形速度と外力が比例する場合、ニュートン粘性と呼び、この性質を示す流体を完全粘性体(ニュートン粘性体)と呼ぶ。
が	ガスチャンバー	水素ガス中で実験を行う際に、水素ガスを封入する容器。
	ガルデン	シャルピー衝撃試験などで試験片中の温度調整のために使われるフッ素系熱媒体。試験片を浸漬しても水素はチャージされない。[24]
	ガルバナスタット	電気化学測定や電解反応などを行う際に用いられる、精密に電流を制御できる装置。陰極法により試験片に水素吸蔵を行う際には、定電流源として使用される。
き	気体定数	熱力学の定数であり、 $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ である。

	用語	定義
	急冷焼準材	焼準を施した材料のこと。焼準は、焼ならしともいい、鋼をオーステナイト状態まで加熱した後、大気中で冷却する操作である。粗大組織や過熱組織を微細化して均一な組織にし、機械的性質を改善するために行う。
	供試材	試験に使用した材料。
	極値統計法	極値統計法(Extreme Value Theory)。極値分布はある基本分布関数に従うデータから一定数のデータの集合を抽出したとき、各集合の最大値や最小値が従う分布である。この分布の解析を極値統計という[25]。本プロジェクトでは、極値統計法を介在物評価法に援用した。
き	局所水素	局所に集まった水素のこと。材料の強度に大きな影響を与えられている。
	局所変形助長説	水素脆化を説明するメカニズムの一つ。材料中に水素が進入し、水素によって局所変形が生じやすくなり、巨視的には材料が大きな変形をとこなわずに破壊するというモデル。
	切欠き効果	試験片につけられたき裂発生箇所となる急激な形状変化部を切欠きという。それによって生じる応力分布や強度への影響を切欠き効果と呼ぶ。金属疲労においては、切欠き等の応力集中部のある材料の疲労強度が平滑な材料の疲労強度に比べて著しく低下すること。低下の程度を表すために切欠き係数 $\beta = (\text{平滑試験片の疲労限度} / \text{切欠き試験片の疲労限度})$ が用いられる。[12]
	切欠き材	機械的に加工した切欠きを有する試験片。切欠きの底では応力が集中することから、平滑材(切欠きのない試験片)とは異なる強度特性を有する。一般の機械部品も応力集部を持っていることから、それを模擬することができる。水素は応力集中部に集まる傾向があるため、平滑材より切欠き材のほうが水素の影響を受けやすい。
	き裂	材料の割れ(分離)によって生じる不連続箇所。
	き裂開口変位	繰返し荷重が負荷されているときに、き裂先端におけるある一点において、き裂が閉じた状態と開いた状態の変位の差分。
	き裂進展寿命	試験片中でき裂が発生・進展して破断にいたるまでの繰返し数を疲労寿命といい、欠陥からき裂が発生するまでの繰返し数をき裂発生寿命、き裂が発生してから破断するまでの繰返し数をき裂進展寿命という。
	き裂長さ 2a	人工微小穴を含めたき裂の長さ。一般的に、き裂の長さは a で表されるが、人工微小穴を導入した試験の場合、穴の両端からき裂が発生するため 2a として表わしている。

	用語	定義
	極近傍	近傍のうち、極めて近い近傍のこと。
	共析鋼	鉄鋼材料を高温から冷却する場合に、オーステナイト組織からセメンタイトとフェライトに分解する反応のことを共析変態という。通常、0.77 mass%の炭素量をもつ鉄鋼材料で共析変態は起こるので、これを共析鋼という。[12],[21]
ぎ	ギガサイクル	10 ⁹ 回を越える繰返し数のこと。
	擬へき開破面	破面の様相の一種で、へき開破面の類似の様相ではあるが、へき開破壊ではないもの。水素環境中もしくは水素チャージ材で多く見られる。
ぎ	擬へき開破壊	FCC 以外の金属では、結晶中で最も表面エネルギーが低い面は割れやすい(へき開しやすい)ことから、このような特定の面は「へき開面」と呼ばれる。一方、金属材料は、条件によってはへき開面以外の面で脆性的に破壊することもあり、このような面をへき開面と区別して擬へき開面と称する。
	擬へき開模様	破面上に観察される、ぜい性的な模様のひとつ。ファセット状でリバーパターンを伴うなどへき開破面と類似した模様であるが、特定のへき開面にそった破壊かどうかは不明である。
く	クラスターイオン	原子および分子がファンデルワールス力によって複数個の集合体で、しかも電荷を帯びているものをいう。SIMS による水素検出では質量数が最小の1となる 2 次イオンを検出しているため、クラスターイオンが妨害イオンとなることを考慮しなくてよい。
	クラック	き裂のこと。
	クラックスターター	疲労き裂の発生起点として意図的に設けた人工欠陥。
	クランク式	リンク機構の一種。回転運動を直線運動に変換する。例えば、モータの力(回転運動)をピストンの力(直線運動)に変換する。
	クリープ	物体に一定な応力が作用した場合、時間の経過とともに歪みが増大する現象。通常、高温機器で問題になる。
	繰返し予ひずみ	複数回の繰返し変形により与えた予ひずみ。本事業においては、水素ガス中で繰返し予ひずみを与えている。
	繰返し速度 Hz	1 秒間に繰返す応力サイクルの回数。10Hz なら 1 秒に 10 回、0.5Hz なら 2 秒に 1 回応力が繰返される。

	用語	定義
	クレータエッジ効果	SIMS 分析で、信号強度を大きくするためには、電流密度を上げる必要がある。電流密度を上げた分析を行うと、深いクレータが形成される。クレータの側面は斜面となっており、その斜面からの信号が偽の信号となる。水素のように微量の信号を検出するためには、高電流密度による分析が不可欠なため、クレータエッジ効果の影響を低減させる必要がある。
	クロスヘッド	引張試験機では、試験片の両側を掴んで、引張るが、その引張る付け根器具を駆動する部分がクロスヘッドに相当する。
	クロスヘッドスピード	引張試験の際に、試験片を固定するジグ(クロスヘッド)を移動させる速度。試験片はクロスヘッドに完全固定されているため、クロスヘッドスピードで引張られることになる。材料が受けるひずみ(変形)の速度には、一般には材料のひずみ速度を用いることが多いが、本事業では切欠き材を用いた試験のため、クロスヘッドスピードで表している。
く	空孔(原子空孔)	完全結晶(理想的な結晶)では、結晶格子の格子点に原子が配置している。一方、実材料では格子点に原子が無い部分、すなわち原子空孔が、熱力学的に決まるある一定の割合で含まれることが知られている。原子空孔は、不純物原子の拡散や材料の変形特性を左右する重要な微視構造(点欠陥)の一つである。
	矩形状	2レベルの間を規則的かつ瞬間的に変化する波形の形状を示す。
ぐ	グッドマン線図	金属疲労を受ける部品が、応力の繰返しとともに平均応力も受ける場合に、部品の破壊/非破壊を判断する線図(耐久限度線図)の一種。
け	形状因子	一般的に、様々な物理現象において、計測される物性値が物質の種類等から予想される理論値と合致せず、計測される物体の形状に影響を受ける場合、影響の度合いを表す因子を無次元量である形状因子として取り扱う場合がある。本プロジェクトにおいては、動的粘弾性測定による架橋密度算出に際し、対象となる分子の架橋点となる部分の構造(形状)の影響を形状因子として考慮した理論式を用いたが、同種の架橋構造を持つ試料間の比較となるため、形状の影響は一定であると考え、形状因子を1とした。
	結晶方位[100]	結晶格子が立方格子の場合、立方体の垂直な方向(100)面という。

	用語	定義
	結晶粒界	液体が冷却され、固体になるとき、始めに多数の微小な結晶が形成され、それぞれが別々に成長して多結晶体になる。多結晶体を構成する結晶は隣接する結晶と方向が異なっている。結晶と別の結晶との間に残された不連続な境界面が結晶粒界である。水素脆化は各種トラップサイトと密接に関係しており、結晶粒界もその一つであり、高強度鋼では、水素が侵入すると、結晶粒界に沿った割れを示すことがある。[19],[26]
こ	較正曲線	センサなどを用いて測定したい量を、予めセンサの出力である電圧などの電気信号と関係づけておく曲線。
	光学顕微鏡	試料の可視光による拡大像を観察する装置。
	高強度鋼	通常の鋼よりも強度が高い鋼。「引張強さ690N/mm ² 以上の高強度の鋼材」と定義されている。高い強度を有するものの、水素が影響する「遅れ破壊」に対しては弱い。
	高空間分解能	2次元画像において1画素間の間隔を空間分解能という。間隔が小さいほど高い空間分解能を持つ。SIMS による水素分布の面内分布可視化では高電流密度かつ高空間分解能が必要となる。
	格子	空間的に規則正しい分布をした点の集まりを空間格子という。その各点を格子点とよぶ。[27]
こ	格子欠陥	実際の金属では原子の並び方に種々の乱れが生じている。この原子の並び方の乱れを総称して格子欠陥といい、原子空孔、転位、結晶粒界などがある。格子欠陥は水素をトラップすると考えられており、金属材料に塑性変形等で格子欠陥を多量に導入すると、水素を固溶しやすくなる。[28]
	格子脆化説	Troiano、Orianiらが支持する水素脆化のメカニズム。金属中に侵入した水素が金属原子間の結合力自体を低下させ、脆性破壊が起きやすくなると考える説である。
	公称応力	引張試験や圧縮試験で、試験片にかかる荷重を試験片の断面積で割った値を表し、荷重負荷で生じる変形による断面積の変化は無視される。
	公称応力-ひずみ曲線	応力-ひずみ曲線の応力を公称応力ひずみを、公称ひずみを用いて表示した曲線。
	混合転位	刃状成分とらせん成分の両方を含んだ転位のこと。実材料中の転位は、通常、混合転位として存在する。
さ	3次元解析	立体的な解析を行うこと。

	用語	定義
	最安全き裂進展特性	水素の影響による疲労き裂進展速度の加速の上限値。水素によるき裂進展の加速は、繰返し速度が遅いほど著しいが、き裂進展の加速には上限値が存在する。このき裂進展特性を基にすると、実際の蓄圧器の疲労き裂進展寿命の最安全側評価が可能になる。本プロジェクトでは、水素チャージ材のき裂進展速度の加速の上限は、未チャージ材のき裂進展速度の約 30 倍である。このき裂進展特性は、実際の蓄圧器の安全設計に応用することができる。
	サブグレイン	方位差が小さい亜粒界(サブバウンダリー)を境界とする結晶単位。方位差が大きい粒界(バウンダリー)を有する結晶粒(グレイン)に比べると、生成・消失が容易である。
	サージング(自励振動)	ばねに対してある一定の速度で荷重の負荷・除荷を繰り返すと、ばねの変形がその荷重に追従できず、荷重とは関係なく変形する現象。サージングが発生すると、負荷したい荷重と異なる荷重が生じたことになり、正常な試験ができなくなる。
	サムホイール	SIMS の操作に用いる器具のひとつ。SIMS 装置のパラメータを、画像を見ながら手でホイールを回すことにより、連続可変で調整する器具。
	三軸塑性拘束	切欠き材の切欠き周辺は三方向(丸棒では軸方向、半径方向及び円周方向)が拘束されることにより、三軸応力状態となり、塑性変形が拘束される。
ぎ	残留応力	外部からの負荷が全くない状態で、材料中に存在する応力を残留応力と称する。加工・熱処理等によって生じる。
	残留応力測定	残留応力測定法は物理的方法と機械的方法がある。物理的な方法には X 線法、電気的および磁気的な性質を用いる方法。機械的方法には層除去法、たわみ法、局部ひずみ法などがある。本プロジェクトにおいては、蓄圧器の胴部の残量応力測定はたわみ法を用いた。
し	シアーリップ	引張試験において、試験片表面のせん断破壊域のこと。水素環境中もしくは水素チャージ材では大気中とは異なる破面様相を示し、水素の影響を検討するときの一助となる。
	自然酸化層	材料を大気にさらすと、大気中の酸素によって材料表面の薄い層が酸化する。この層を自然酸化層と称する。
	質量較正(マスキャリブレーション調整)	磁場を計測するホール素子に温度依存性があるため、磁場に対応した質量数を変化させることにより、各元素の信号ピークを較正する調整のことをいう。SIMS の分析の前には必ず行って最大ピーク信号を持つ質量数にする必要がある。

	用語	定義
	斜角超音波探傷	超音波探傷試験方法の一つ。斜角超音波探傷法では超音波を探傷面に対して斜めに送受信する。探傷方法には直射法と1回反射法がある[30]。欠陥からのエコーの大きさは入射角に依存する。欠陥の位置は超音波の入射角と経路から求める[19]。
	シャルピー衝撃試験	材料の靱性を測定するための試験。切り欠けのついた試験片を用いる。両端を支持し、試験片中央の切り欠けと反対側を振り子形のハンマーで打撃して試験片を曲げ破断させる。[12]
	シャルピー遷移温度	シャルピー衝撃試験における試験片の破壊形態が、脆性破壊となる温度領域と延性破壊となる温度領域の間の温度。
	修正 S-N 線図	推定疲労限度に対する破断起点の負荷応力振幅の比と破断繰返し数の関係を示したもの。推定疲労限度は介在物を荷重軸に垂直な面に投影したときの面積やビッカース硬さを用いて求めた値である。[25]
	ショットピーニング	小さな硬球を材料の表面に高速で衝突させることによって材料の表面に圧縮残留応力を発生させ、材料の強度を向上させる方法。
	シリコンウェハー	シリコンは半導体デバイス素材の代表例であるが、単結晶化したシリコンをデバイス加工用に薄板円盤状に輪切りにしたものである。
	シリコンシーラント	一般的にコーキング剤として用いられる防水シール材のうちシリコン系の樹脂を用いたもの。陰極法による水素チャージを行う際に、保護したい部分を被覆するためなどに用いる。
し	真空焼鈍	材料は加工等によって、材料中に残留応力と称される応力が生じる。この残留応力を消去するために、行う熱処理を焼鈍と言う。焼鈍中に材料の表面に発生する酸化を避けるために、真空中で行う焼鈍を真空焼鈍と称する。
	侵入水素	金属中に侵入した水素。
	真破断応力	引張試験などで、試験片にかかる荷重を試験片の初期の断面積で割った値を公称応力と呼ぶ。これに対し、荷重による断面積の変化を考慮し、荷重をその時点の断面積で割った値を真応力と呼ぶ。引張試験に際し、破断時の応力を破断応力と呼び、破断時の真応力、すなわち破断時の荷重を破断時の断面積で割った値を真破断応力と呼ぶ。

	用語	定義
	摺動式	疲労試験は試験片に引張や圧縮、あるいは曲げ、ねじりの繰返し負荷を加える試験である。水素ガス容器内で疲労試験を行う際、疲労荷重を負荷する軸を容器の外部から内部にガスが漏れないように貫通する必要がある。このときピストンと水素ガス漏洩防止用シール材とは互いに接触しながらすべることとなり、このような形式を摺動式という。完全に漏洩を防ぐことは難しい。シール材が摩耗するので決まった間隔でシール材の交換が必要である。
	伸線パーライト鋼	鉄鋼材料の金属組織であるフェライトとセメンタイトの層状組織に伸線加工を施した鋼のこと。伸線パーライト鋼中の水素存在状態は典型的な2つの状態に分離でき、詳細に調べられている。
	昇温脱離分析	試験片の温度を上げることにより、ある物質を試験片から脱離させる分析手法。水素量を分析する際は、この手法が用いられる。
	昇温脱離分析装置(TDS)	水素等材料内に含有している成分量を測定する装置。真空中で試験片を加熱することにより、その試験片から放出されるガス成分を連続的に測定することにより、含有していた成分量が測定できる。水素を分析対象としたとき、材料内に含有している水素量だけでなく、水素が放出してきた温度域によって、その水素の特性(拡散性等)も把握できる。
	四重極質量分析装置	真空容器内の気体の種類とそれぞれの気体の圧力を分析するための装置。ガス分子をイオン化し、四本の電極ロッド間の電場によって特定のイオンを分離し、特定の気体の圧力を測定する。本プロジェクトでは、この装置を用いた昇温脱離分析により試験片内の水素量を測定している。[30]
じ	樹脂皮膜処理	表面処理の一種で、めっきのかわりに樹脂を用いて材料表面に樹脂被膜を生成すること。
じ	準安定オーステナイト鋼	室温付近でオーステナイト構造を有する鋼であっても、塑性加工を行うことで、マルテンサイト変態する鋼。SUS304 や SUS316 などが含まれる。
	除荷弾性コンプライアンス法	き裂開閉口挙動を測定する手法の一つ。理想的なき裂は引張荷重を加えると口を開き、圧縮荷重を加えると口を閉じる。しかし疲労き裂には、き裂がその先端に形成された塑性域内を進展するために、き裂を閉じさせようとする力が作用しているので、ある程度の引張荷重を負荷しないと裂先端は開口しない。き裂は開口しているときに進展するため、き裂が開いたり閉じたりする挙動の測定は疲労き裂進展を支配するメカニズム解明のため重要である。

	用語	定義
	人工微小穴	試験片表面にドリルを用いて開けた穴。き裂を発生させやすくしたり、発生する場所を特定したい場合に用いられる。
	靱性	材料の脆性破壊に対する抵抗の高さのこと。破壊力学パラメータの限界値 K_{IC} などで表わされる。この限界値は破壊靱性試験法により求められ、設計、あるいは破損解析などに使用される。また、靱性を比較するために、衝撃値や脆性延性遷移温度(シャルピー遷移温度)が用いられる。[12]
す	水素イオンカウント数	SIMS で検出される二次イオンは1秒あたりのカウント数で表される。一般的に水素の場合、二次イオンは炭素、窒素、酸素と比べて小さい。
	水素ステーション	水素ステーション(Hydrogen Station)。圧縮水素を燃料として使用する車両に固定した容器に圧縮水素を充填するための高圧水素貯蔵水素供給設備。水素源の水素カードル、水素を圧縮する圧縮機、水素を貯蔵する蓄圧器、圧縮水素を燃料電池自動車に充填するディスプレイペンサー等で構成されている。定置式と移動式がある。
	水素カードル	水素カードル(Off-site hydrogen cylinders)。水素ステーション(水素ステーション参照)の主要な構成装置。水素ステーションの水素源。水素ガスの中型の輸送容器としてボンベ(単瓶:シリンダー)を集結したもの。46.7L×10本=467L、充填圧力 14.7MPa が一般的。
	水素拡散	金属中での水素に濃度差があるときに、この差をなくすような水素原子の移動。拡散の速さを規定する量として拡散係数 D を用いる。D は温度Tによって著しく変化する。
	水素ガス透過率測定装置	水素透過率を測定する装置であり、試料を透過したガスをガスクロマトグラフィーにて定量する。測定法としては差圧法、等圧方がある。
	水素固溶度	固溶体として水素が溶け込む平衡水素濃度をフガシティの平方根で除した値。水素固溶度は温度Tによって著しく変化する。
す	水素脆化	材料中に侵入した水素によって、引張強度、伸び、絞り、あるいは疲労強度などが低下する現象。水素脆化のメカニズムは、格子脆化説や局所変形助長説などさまざまな説があるが、未だ一致した結論は得られていない。[32]
	水素チャージ材	試験片に水素を導入(チャージ)したもの。水素は材料内を水素拡散速度で移動するため、材料内部に水素が満たされるまでにある時間が必要となる。水素チャージすることにより、材料内部の水素の影響を検討することができる。

	用語	定義
	水素吸蔵	水素が金属の中へ入り込む現象。高圧水素ガス環境で使用される材料には水素が侵入する。材料強度評価を行う際、材料の水素環境中での長期使用等を考慮して、加速試験的に材料に高濃度の水素を侵入させることを指すこともある。
	水素吸蔵合金	水素の貯蔵・利用を目的に、可逆的に高密度の水素を蓄えることと放出することができるように成分を調整した金属。
	水素チャージ	水素脆化を評価するために、試験片中に水素を侵入させること。その方法は、浸漬チャージ、電解チャージ、水素ガス曝露などがある。
	水素チャンバー	試験片を水素曝露するために使用する容器。本プロジェクトで水素ガス中で曝露した試験片は全て水素チャンバー中で曝露されている。
	水素助長局所塑性変形(HELP)理論	水素が局所的な塑性変形を助長するという理論(局所変形助長説)。H.K.Birnbaum、P. Sofronis らが提案した。本プロジェクトで示す実験結果は HELP 理論で説明できることから、水素が材料の特性に及ぼす影響は格子脆化説ではなく、水素によって局所的な塑性変形が助長されて起こるものと考えられることができる。[31]
	水素助長疲労き裂継続前進機構	水素による疲労き裂進展加速のメカニズムを示した水素助長疲労き裂継続前進機構(Hydrogen Enhanced Successive Fatigue Crack Growth, HESFCG)のこと。疲労試験の繰返し速度が遅く、き裂先端に水素が十分に集まる時間がある場合、き裂先端の狭い領域において、低応力ですべりが局所的に起こる。そのため、水素チャージ材のき裂先端では負荷の増加につれて短いすべりが次々と起こるため、未チャージ材と比べてき裂はほとんど開口せずに前方へと進展していく。その結果、低炭素鋼および低合金鋼の水素チャージ材のき裂進展速度は未チャージ材の 10~30 倍に加速すると考えられる。[5]
	水素侵入メカニズム	水素の材料中における分布状態などのメカニズム。
す	水素ドーブ	イオン注入装置によって水素原子を試料に高エネルギーで打ち込むこと。シリコン単結晶に水素ドーブした場合、ある深さに濃度ピークを持つため、水素ドーブしたシリコン単結晶は SIMS における深さ方向分析の標準試料として用いられる。
	水素トラップサイト	介在物や格子欠陥など、水素を捕獲するトラップとして働く結晶中の場所。[32]
	水素昇温脱離	高圧ガスに曝露するなどの方法により試験片に吸蔵した水素を、試験片を加熱するなどの方法により脱離させること。

	用語	定義
	水素暴露試験機	材料を水素に曝し(暴露し)、材料中に水素をチャージすることを目的とする試験機。
	水素未曝露材	試験片に水素をチャージしなかったもの。水素ガス中で試験を行う場合でも、試験片内部に水素が存在するか(水素チャージ材)、存在しないか(水素未曝露材)によって強度特性は異なると考えられる。
	水素マイクロプリント法	金属材料中から放出される拡散性水素を可視化する手法の一つ。試料表面に塗布した乳剤膜に含まれる臭化銀粒子(直径約 0.1 μ m)が、放出水素により還元されて銀粒子になることを利用する。試料表面に生じた銀粒子の位置と量が、それぞれ水素の放出位置と放出量に対応する。1980 年代にアルゼンチンで開発された。
	水素溶解エンタルピー	金属中の水素の溶解のしやすさをエネルギーで表したもので、負で大きい値をとる金属ほど水素を吸収しやすい。
	垂直超音波探傷	超音波探傷試験方法の一つ。超音波(縦波)を検査表面に対して垂直に送受信させる方法。健全部では底面のエコーだけが受信されるが、欠陥が存在すると底面の他に欠陥からのエコーが観察される[18]。これらのエコーの到達時間から、欠陥の位置評価を行う。
	推定疲労限度 σ_w	推定疲労限度 s_w は、初期欠陥の主応力方向への投影面積の平方根(\sqrt{area})と、材料のビッカース硬さ(Hv)とを用いて次の村上の式[25]からもとめることができる。 [表面の微小欠陥、き裂、介在物に対する疲労限度評価式] $s_w=1.43(Hv+120)/(\sqrt{area})^{1/6}$ [表面に接するような微小欠陥、き裂、介在物に対する疲労限度評価式] $s_w=1.41(Hv+120)/(\sqrt{area})^{1/6}$ [内部の微小欠陥、き裂、介在物に対する疲労限度評価式] $s_w=1.56(Hv+120)/(\sqrt{area})^{1/6}$ ここで、 s_w : , Hv : kgf/mm ² , \sqrt{area} : μ m
す	ステンレス鋼	ステンレス鋼 は、耐食性を向上させるためにクロムを含ませた合金鋼である。鉄に約 10.5%以上のクロムを含ませた合金を指し、しばしばニッケルも含ませる。[17],[19],[33]
	ストライエーション	疲労破面に形成される縞状の破面形態。

	用語	定義
	ストレッチ・ゾーン	疲労試験後に過大荷重を1回だけ負荷した際にみられる破面領域。疲労破面に対して無特徴な帯状の破面領域となる。疲労破面は繰返し荷重の負荷により、引張荷重負荷によるき裂開口および荷重除荷によるき裂閉口の影響を受けている。一方、ストレッチゾーン形成は過大荷重を1度だけ負荷して行うため、ストレッチ・ゾーンでは引張荷重負荷によるき裂開口の影響のみをみることができる。水素チャージ材および未チャージ材のストレッチ・ゾーンの幅はほぼ等しいが、水素チャージ材のストレッチ・ゾーン破面がき裂進展方向になす角度は未チャージ材よりも小さい。これは、水素チャージ材のき裂は未チャージ材に比べてほとんど開口しないことを示している。また、同じき裂長さおよび荷重で比較すると、未チャージ材のき裂進展速度はストレッチ・ゾーンの約1/10になるが、水素チャージ材ではほぼ等しくなる。[34]
	ストレッチ・ゾーン形成試験	ストレッチ・ゾーンを形成する試験のこと。疲労試験後に過大荷重を1回だけ負荷し、その後、荷重除荷によってき裂先端の変形をおこさないように高応力比で疲労試験を行う。
	スパッタリング	高電圧により元素をイオン化し、対象物に衝突させること。目的は種々で、膜を形成する場合もあれば、SIMSのように表面の元素を除去する場合もある。
	スパッタ率	1個の原子を固体試料にぶつけたときに試料からスパッタリング現象によって放出される原子の個数をいう。スパッタ率は1次イオンの入射角依存性を持っており、き裂部では平面と異なるスパッタ率となるため、水素濃度が一定でも異なる信号分布となる。
	すべり変形	原子面のすべりによって変形が進むこと。
	すべり面分離	すべりにより新生面ができること。大気中や不活性環境中では、疲労き裂もその先端において、すべり面分離による新生面が累積することによって伝ばする。つまり延性過程である。
	スループット	一定期間内に処理できる量
せ	静水圧	三つの垂直応力の平均で定義される応力。一般的には負の値が用いられるが、本プロジェクトでは正の値のものも静水圧と言っている。静水圧応力の働く場所に水素が集まる。[12]
せ	積層欠陥エネルギー	ある一つの原子面がもう一つの原子面の上に順序が狂って積み重なることによる界面欠陥を積層欠陥というが、その単位面積あたりのエネルギー。

	用語	定義
	静的荷重	荷重を負荷したままの時の荷重もしくはゆっくり荷重を負荷したときの荷重。水素が材料内をある速度で移動するため、荷重負荷速度が遅い場合、水素がき裂先端に集まりやすく、その影響が顕著に表れる。
	セメントイト	鉄と炭素の化合物。化学式は Fe_3C で示される。鉄鋼材料においてパーライト組織や焼戻しマルテンサイト組織に現われる化合物である。 [12]
	積層欠陥 (Stacking Fault)	結晶の積層構成が乱れている部分のこと。例えば、面心立方結晶の(111)面の積層構成は…ABCABC…であるが、これが何らかの原因で…ABCACABC…のようになるとき、中央部…CACA…が他とは異なる配列となっており、この部分を積層欠陥と呼ぶ。
	積層欠陥エネルギー (Stacking Fault Energy、SFE)	積層欠陥を含む結晶は、理想配列とは異なるため、エネルギー的に高い状態にある。理想結晶と積層欠陥を含む結晶のエネルギー差を単位面積あたりの量として表したものを積層欠陥エネルギーと呼ぶ。この値が高いほど交差すべりが起こりやすい。水素が存在すると SFE が低下し、交差すべりが起こりにくくなった結果、すべりが平面的になるという主張がある。
	せん断破壊域	破壊試験の際に、せん断破壊を生じた領域のこと。引張試験の場合、せん断変形により試験片表面近くに生じる。水素環境中もしくは水素チャージ材では、大気中とは異なる破面様相を示し、水素の影響を検討する時の一助となる。
	潜在水素	製造段階(特に溶接時)に侵入した水素。実験的に水素チャージしたことによって侵入する水素と区別するために、潜在水素と名付けた。
ぜ	脆性延性遷移温度 BDTT	“シャルピー遷移温度”を参照。
	脆性ストライエーション	破面に現れる様相のひとつ。延性ストライエーションと類似の縞模様であるが、リバーパターンを伴うような脆性的破面にリバーパターンに直交するように現れる。硬い材料や腐食性環境での破面で多く見られる。破面は平坦であり塑性変形を伴っていない。水素ガス中疲労の擬へき開破面上でも観察される。
	ぜい性的な破面	鉄鋼材料が低温下、腐食環境下等で、脆性破壊した際には、へき開・粒界・擬へき開破面などが観察される。本事業では、擬へき開破面をさして用いている。
ぜ	絶対圧	絶対真空を基準に表した圧力。ゲージ圧に大気圧を加えたもの。
	全ひずみ幅	疲労負荷一サイクルにおける最大ひずみと最小ひずみの差

	用語	定義
そ	走査型電子顕微鏡	SEM(Scanning Electron Microscope) 電子銃から電子ビームを対象物に照射し、対象物から放射される二次電子を検出することで対象物を観察する。光学顕微鏡と比較して焦点深度が深く、広範囲に焦点の合った立体的な像を得る事ができる。実体顕微鏡に比べて高倍率での観察が可能。 本プロジェクトでは、SCM435 鋼の水素チャージ材の疲労破面に特徴的なファセットを観察した。応力拡大係数幅 ΔK とファセット率 f との関係を探ることで、ファセット形成とき裂進展速度の加速との関係を探った。
	走査型レーザー顕微鏡	光学顕微鏡の一種である。光源として波長の短いレーザーを用いる。小さく絞ったレーザー光スポットで試料を走査し、反射光を検出することによって、高解像度の光学像を得る。共焦点光学系とすることにより立体的な像が構築しやすくなる。
	塑性域	材料中の塑性変形を生じている領域。原子の配列が乱れていることにより、水素が移動しやすい領域であると考えられている。
	塑性ひずみ幅	疲労一サイクル中の塑性ひずみの変化幅。これに弾性ひずみの変化幅を加えたものが全ひずみ幅である。
	塑性変形	材料にある大きさ以上の荷重を負荷すると、荷重を取り去っても材料には変形が残る。この変形のことを塑性変形という。金属材料を原子レベルで観察すると、塑性変形では金属原子の配置が少しずつずれていく現象が見られる。金属原子が少しずつずれる際に水素が一緒に移動したり、水素が入り込む欠陥(転位)ができたりするといわれている。
	塑性変形抵抗	塑性変形を生じることに対する抵抗。
	粗大すべり帯	すべりの一形態。太く、広い間隔で並んだすべり帯で、もっとも普通に見られる。
た	大気中焼鈍	材料は加工等によって、材料中に残留応力と称される応力が生じる。この残留応力を消去するために行う熱処理を焼鈍と言い、大気中で行う焼鈍を大気中焼鈍と称する。
	多段荷重	変動荷重の一種。荷重が階段状に変化するものをいう。
	タッピングモード	原子間力顕微鏡の測定モードの一つである。カンチレバーを振動させながら、試料表面を走査して、表面形状を測定する。接触させる(コンタクト)モードよりも弱い力で試料表面をなぞることから、特に試料やプローブ先端を損傷させたくない場合に利用される。[22]

	用語	定義
た	たわみ法	残留応力測定法の一つ。試料の一部に切り込み(スリット)を導入し、この切り込み部のたわみ量を測定する。たわみ量から残留応力を求める[35]。蓄圧器の胴部の残量応力はたわみ法で求めた。
	タンゲル	転位のもつれ(タンゲル)を指す。
	単結晶シリコン	原子が整然と整列しており、すべての結晶軸が同じ方向を向いているシリコンの結晶。
	炭素鋼	Feと少量のCを基本の成分とした合金。いわゆる鋼。FeとC以外の元素が多く含まれると合金鋼と呼ばれる。材料中の炭素含有量は0.02～約2%。少量のけい素、マンガン、りん、硫黄などを含むのが普通である。便宜上、炭素含有量により低炭素鋼、中炭素鋼、高炭素鋼に分類される。水素ガスパイプラインの候補材料として、低炭素鋼が注目されている。その理由は低炭素鋼配管SGPはすでに天然ガスパイプラインとして使用されており、ステンレス鋼よりも安価であるためである。低炭素鋼は主にフェライト(BCC構造の組織)およびパーライト(フェライトとセメンタイト Fe_3C の層状組織)の組織からなる。 [36],[37]
だ	第二相界面	母相中に存在する別の相を第二相といい、第二相と母相の境界部を第二相界面と称する。第二相界面も結晶粒界と同様に、材料の巨視的な性質を大きく左右する重要な微視的構造の一つである。
	第二相粒子	金属材料は二種類以上の異なる相を含む複相材料であることが多く、第二相粒子とは母相の成分組成とは異なる組成の粒子のことである。本プロジェクトで用いた炭素鋼においては、第二相粒子であるが、デンプル形式の起点となっている。
	弾性変形	弾性とは、力を加えると変形するが、除荷すれば元の寸法に戻る性質。弾性を示す範囲の変形を弾性変形という[19]。
	弾塑性破壊靱性試験	塑性域の大きさが小規模降伏条件を満たさないほど大きくなった場合(応力拡大係数Kで支配される弾性特異応力場よりも塑性域が大きくなった場合)、き裂先端の応力場は弾塑性状態を考慮する必要がある。このような大規模降伏状態で不安定破壊(荷重の増加なしにき裂が進展する現象)が始まるような破壊じん性を求める試験のこと。疲労試験でき裂を進展させた後、過大引張荷重を負荷して行う。 [34],[37]
	弾塑性破壊力学クライテリオン	き裂先端における応力場(特異応力場)を代表するパラメーターとしてJ積分を用いて、材料の破壊条件(クライテリオン)を記述したものをこのように称する。

	用語	定義
だ	断面2次モーメント	断面2次モーメント(Moment of Inertia)。曲げに対する抵抗の大きさを表す[38]。
ち	蓄圧器	蓄圧器(High Pressured Storage)。水素ステーション(水素ステーション参照)の主要な構成装置。圧縮機で圧縮した水素ガスを貯蔵する容器。現在、充填圧力は35MPaが一般的。70MPa級の蓄圧器が開発されている。
	超音波探傷	超音波探傷検査(Ultrasonic Inspection)。非破壊検査の一つ。超音波探傷試験はパルス発信機、探触子、受信機、表示部で構成[18]。試験体の表面の探触子から材料内部に超音波を伝搬させ材料中に存在する欠陥から反射された超音波(エコー)を受信し、受信までに要した時間をもとに欠陥の位置の特定を行う。
	超長作動ズームマイクロスコープ	顕微鏡の一種で、焦点距離が非常に長い顕微鏡。一般に、顕微鏡の焦点距離は数mmから十数mm程度と短い。チャンバ内での試験では、カメラから試験片表面までの距離が長くなるため、特殊な顕微鏡が必要となる。
	直線近似	物理現象を、想定されるパラメータとの相関を解明する手法の一つであり、パラメータxに対して $y=ax+b$ の一次関数として近似しすることを言う。
て	低合金鋼	金属に用途にあった性質を得るために別の元素を添加することを合金という。合金元素の総量が5mass%以下の鋼を低合金鋼という。
	定置燃料電池	燃料電池の形態のひとつで、定置型の燃料電池を指す。他には定置しない自動車用燃料電池がある。
	停留き裂	疲労限度に近い応力で疲労試験を行って未破断であった試験片に、微小なき裂が観察される場合がある。この微小なき裂を停留き裂という。このような場合、疲労限度(破壊が生じるか否かの限界の応力振幅)は、疲労き裂の発生ではなくて、一旦発生したき裂が進展するか停留するかによって決定されている。
	転位	金属の変形は特定の面に沿い、かつ特定の方向に沿って金属原子がずれる、いわゆるすべり変形による場合がほとんどである。転位とは、すべった領域とまだすべっていない領域の間に存在する線状の欠陥のことを指す。
	テヌポール	転位を観察するために、試験片を薄片状にするための研磨装置。
で	ディスペンサー	水素ディスペンサー(Hydrogen Dispenser)。水素ステーション(水素ステーション参照)の主要な構成装置。圧縮水素を燃料電池自動車に充填する装置。

	用語	定義
で	ディメンジョン 3000 形大型ステージ付走査プローブ顕微鏡	デジタルインストルメント社製の原子間力顕微鏡(AFM)の製品名である。大型ステージが付いているために、引張試験片などの大きな寸法の試験片表面の観察に適している。[22]
	デンプル	延性破面の形態の一種。試験した材料内に存在する介在物等を起点として、介在物と母材金属とがはく離することにより生じる。水素環境中もしくは水素チャージ材では大気中とは異なる破面様相を示し、水素の影響を検討する時の一助となる。
	デフレクタ値	イオンビームの軌道を補正するための偏向板の電圧値。
	データバンド	データの存在する範囲。疲労寿命などのばらつきを有するデータを1本の曲線で表すと、ばらつきが考慮できない場合があるので、ある幅をもってデータを表すことがある。
	電解チャージ法	一定温度の電解溶液中に一定電流を流し、対象材料である陰極に水素を浸入させる方法。[32]
	電解研磨	電解研磨は、電気化学的に行う研磨である。物理的な力を受けないため残留応力は発生せず、加工に伴う変質層を生じることもない。[12]
	電気油圧サーボ式	試験機の種類で、動力源に油圧を使用することにより、高速(～100Hz)で変動する大きな力を発生させることができる。また、その力の制御(油圧切替バルブの制御)を電氣的に行う。
	伝ば機構	疲労き裂が進展する(伸びる)メカニズム。水素によって疲労き裂の進展する速度が上昇するメカニズムを明らかにすることにより、材料の疲労強度に及ぼす水素の影響を明らかにすることは本プロジェクトの目的の一つである。
で	飛び量	ナノインデンテーションにおける押し込み力(F)－押し込み深さ(δ)曲線において、pop-in 押し込み力での押し込み深さの不連続部の長さ。
と	トラップ	一時的な吸着あるいは捕獲を表す用語であるが、本プロジェクトでは材料に侵入した水素が転位などの欠陥に一時的に捕獲される現象を表す。
	トラップサイト	材料中において水素が吸着される場所。材料の強度は吸着された水素によってより大きな水素の影響を受ける。
	トリチウムオートラジオグラフィ	トリチウムから発生する放射線を利用した水素の可視化手法の1つである。可視化される元素はトリチウムである。[39]

	用語	定義
	トレーサー	物質の挙動を知るために添加する元素のこと。水素脆化の研究においては、金属中の格子欠陥量を調べるため、水素を使って調べることが可能である。
な	ナイトール	硝酸とエタノールの混合溶液。金属の表面を腐食(エッチング)して金属の組織の観察や検査を容易にする際に用いられる腐食液。炭素鋼によく使われる。
	内部固溶水素	材料内に含まれる水素。強度に影響を及ぼす水素として、材料内部に存在する水素と環境中に存在する水素であり、その影響は異なると考えられている。
	内部転位組織	転位を観察するためには、試験片を薄片状にして、高エネルギーの電子を透過させ、転位の影を映し出す透過型電子顕微鏡(TEM)が使用される。観察される転位は、試験片の内部情報であることから、内部転位組織という言い方がされる。
	ナノ・メゾスケール	ナノスケールは、1ナノメートル(10億分の1メートル)から0.1(サブ)マイクロメートル(1000万分の1メートル)である。一方、メゾスケールは1マイクロメートル(100万分の1メートル)から0.1(サブ)ミリメートル(1万分の1メートル)のスケールを指す。したがって、ナノ・メゾスケールとは、10億分の1メートルから1万分の1メートルの領域である。
に	2次イオン質量分析法	数百 eV~20keV のエネルギーを有する細束イオンビームを試料表面に照射し、スパッタ現象に伴い二次的に放出される試料の構成元素による二次イオンを質量分析装置にかけて、元素または化合物の同定および濃度の測定を行う分析法。水素の分布を三次元的にマッピングすることもできる。[19],[30]
	二次元弾性有限要素法応力解析	有限要素法とは、連続関数を区分的に連続な有限個の関数で近似する方法であり、材料強度の分野では複雑形状の物体の応力やき裂のK値を求める際などにコンピュータを用いて行う数値計算法の一種である。部品や試験片の応力などを求める際、応力状態を考慮すると、必ずしも立体形状を用いる必要はなく、より簡単に実施できる平面形状(二次元)で解析を行う場合が多い。また材料の塑性変形を考慮すると解析が複雑になるので、弾性状態で解析を行う場合も多い。
	二次粒子	一次粒子が凝集して形成された粒子であり、見かけの粒子径は大きくなる。

	用語	定義
ぬ	ヌープ圧子	ダイヤモンド製の菱形の四角錐の圧子で、試料に圧痕をつけるために用いられる。菱形の鋭角の頂点には応力が集中し、き裂が進展する。本事業では水素ドープ単結晶シリコンにヌープ圧子により模擬き裂を形成することで、き裂部における SIMS 分析の手法を開発した。
の	ノギス	長さを精密に測定するための道具。本プロジェクトでは、試験片の肉厚、き裂長さなどを測定するために使用した。
は	破壊駆動力	き裂の成長を引き起こす原因となる力学量の総称。応力拡大係数、J 積分、エネルギー解放率などがある。弾性体について考える場合、構造物の形状および負荷条件によって一意に決まる。
	破壊力学クライテリオン	き裂先端における応力場(特異応力場)を代表するパラメーターである応力拡大係数を用いて、材料の破壊条件(クライテリオン)を記述したものをこのように称する。Griffith によって導入された。
	刃状成分	結晶内部のある平面のすべりの起きた領域と、まだ起きない領域との境界として現れる線状の不整を転位というが、転位ループにおいてそのバーガースベクトルが転位線ベクトルと垂直になっている成分。[9]
	刃状転位	転位線とバーガースベクトルが垂直な転位のこと。固定されたすべり面上のみ運動することができる。
	発光分光分析法	発光分光分析方法(Emission Spectro-Photometric Analysis)。放電等により試料の表面を気化させ、そのとき放たれた光を分光器で輝線スペクトルに分光し、その波長から組成を、その強度から含有量を分析する[40]。発光分光分析は、多数の元素の分析を一度に行うことができる。
	ハッチング	網掛け。グラフや図面などで強調したり区別したい領域などに引く斜線群。
	破面遷移温度 FATT	“シャルピー遷移温度”と同義。
ば	バーガースベクトル	転位の移動によって生じるすべりをベクトルで表わしたものをバーガースベクトルという。バーガースベクトルの大きさは、結晶構造で決まり、一般に最密方向の原子間距離と等しく、方向は最密方向と決まっている(“最密方向”参照)。Frank によって定義された。[27]
	バイス	万力のこと。本プロジェクトでは発信器および受信器を固定するために用いた。
	バリエーション数	マルテンサイト変態により一つの母相結晶内に生じる結晶学的に等価で方位の異なる結晶の数。[7]
	バルク	試験片など物体の全体、マクロな挙動やマクロな特性を意味する。

	用語	定義
	バルブ	流体の流れの方向、圧力、流量を制限する機器の総称。[12]
	パーライト	顕微鏡的に薄い層状のセメンタイトとフェライトが交互に並んだ組織。鋼組織の一つ。
ば	パルス状	短時間の間に急峻に変化する(通常単発の)信号の総称をパルスといい、本プロジェクトでは、電気信号としてファンクションジェネレータにより生成した一定の幅を持った矩形波の形状を示す。
	パルス幅	ファンクションジェネレータにより発生された矩形波の幅を表す。
ひ	非拡散性水素	拡散性水素と比較して、極めて拡散速度が遅いとされている水素。一般的には、室温大気中で拡散しない状態にある水素を指す。
	ひずみゲージ	材料が荷重を受けた際に生じるひずみを測定するセンサーの一種。弾性変形の範囲では、応力がひずみに比例する関係を利用して、応力や荷重の測定にも応用される。電気抵抗が被測定体の長さや断面積によって変化することを利用する。被測定物に電極のついた金属箔を接着しひずみを加えると、材料の変形にともなって金属箔も変形して長さや断面積が変化するので、金属箔の抵抗が変化するので、抵抗の測定からひずみが分かる。
	ひずみレベル依存性	材料の強度特性は、負荷するひずみの大きさによって変化する場合がある。これをひずみレベル依存性と称する。本事業では、き裂進展速度(一回の負荷でき裂が伸びる量)のひずみレベル依存性を検討している。
	引張圧縮荷重形式	疲労試験の際に、試験片に荷重を負荷する形式の一つ。試験片を軸方向に引張ったり、圧縮したりする負荷形式。他には、曲げ、回転曲げ、ねじりなどの負荷形式がある。
	非破壊検査	非破壊検査(Non-Destructive Inspection)。機械や構造物の健全性の評価、信頼性を保証するため、製品を破壊したり、傷つけることなく、内部や表面の状態を調べ、機械や構造物の健全性を評価すること[41]。放射線、超音波による検査のほか磁粉探傷法、浸透探傷法、電位差法などがある。
	被覆アーク溶接継ぎ手	被覆アーク溶接によって接合した部分。溶接金属、HAZ、母材で構成される。被覆アーク溶接はもっとも一般的で、手動で行われる溶接である。
	引張強度特性	引張試験によって得られる強度特性。公称応力-ひずみ曲線で最大の強度。引張強度特性にも水素が影響及ぼすため、その影響を検討する必要がある。
	表面き裂進展	試験片表面からき2次元裂が発生し、進展すること。

	用語	定義
ひ	疲労き裂	材料に対して荷重負荷を繰返すと、その負荷が一回の負荷で破壊する程度以下の負荷であっても、繰返しによって材料は破壊する。破壊を生じるまでに、材料中に微小なき裂が発生・進展し最終的に破壊する。この現象を金属疲労と称し、金属疲労の原因となるき裂を疲労き裂と称する。
	疲労き裂先端	繰返し荷重下で発生した疲労き裂部の先端のこと。 本プロジェクトでは、水素によって疲労き裂先端のすべり帯の挙動が異なることを見出した。
	疲労寿命の予測	部材の破壊までの寿命(疲労寿命)を疲労試験を実施せずに予測すること。本プロジェクトでは、水素ステーションで使用した蓄圧器の残存寿命を予測するために適用した。
び	ビーム電流値	イオンビーム電流値の略。
	ビッカース硬さ	材料の重要な基本的性質の一つである硬さを測定する際に、ビッカース硬さ試験法によって測定された値。正四角錐のダイヤモンドを一定の荷重で材料に押し付けてできたへこみ(圧痕)の寸法から硬さを計算する。
	ビッカース硬度	材料の硬さの指標の一種で、ビッカース硬度計を用いて測定した時の値。
	ビッカース圧痕	材料の硬さの一つに「ビッカース硬さ」がある。材料表面に四角錐の先端を所定の荷重で押しつけ、除荷した後に残ったくぼみの大きさで硬さを定義する。このくぼみをビッカース圧痕と称する。
ふ	ファセット	Facet。小さい面。通常細かい模様のある疲労破面などで、模様のない滑らかな結晶粒程度の大きさ(数ミクロン～数十ミクロン)の面を指す。
	ファンクションジェネレータ	正弦波や矩形波など様々な波形を発生させる装置。
	フィッシュアイ	金属中の非金属介在物(一例としてアルミナなど)を起点として疲労破壊が発生する場合には、疲労破面上に非金属介在物を中心として同心円状の模様が見られ、魚の目に例えられることから、フィッシュアイと呼ばれる。

	用語	定義
ふ	フェーズドアレイ	フェーズドアレイ(Ultrasonic Phased Array)法。非破壊検査の超音波探傷試験方法の一つ。フェーズドアレイ法では微小な超音波振動子を多数配列したアレイ探触子から、タイミングを変えて発振した超音波を合した主ビームを、特定の方向に発振および所定の深さに収束できる。複数の方向からの探傷結果を画像処理することで、複雑な形状部や擬似エコーが存在する場合でも欠陥の寸法評価が行える[18]。本プロジェクトでは、蓄圧器の鏡部の非破壊検査に用い、蓄圧器内面に存在する欠陥の評価を行った。
	フェライト系	鉄鋼材料の分類の一つである。鉄原子の結晶配置が体心立方(Body-Centered Cubic: BCC)構造を有するもの。
	フェライトパーライト組織	炭素鋼を加熱した後、ゆっくりと冷却したときにできる金属組織。硬度は比較的低い。フェライトは α 鉄の他元素の固溶体、パーライトはフェライトとセメンタイトの層状組織。鋼は焼入れ、焼戻し、焼鈍、焼ならしなどの熱処理によって金属組織を変化させることでいろいろな性質が得られる。低合金鋼においては水素の影響を受けにくい金属組織。
	複合材料	異なる材料を組み合わせることで単一の材料では発現できない特性を付与した材料の総称。母材(マトリックス)に強化材として微粒子や繊維を複合させるのが一般的である。
	フラクトグラフィ	試験片の破断した面に残された幾何学模様の特徴や寸法を肉眼や顕微鏡で観察し、破壊メカニズムを研究する方法のこと。本プロジェクトでは、例えば走査型電子顕微鏡などを用いて破断面の形を観察し、水素の影響による破面形態の違いを見出している。[12]
	雰囲気(転位による)	結晶中の刃状転位近傍の原子は、正常な格子間隔より狭められたり広がったりして、それぞれ圧縮応力場あるいは引張応力場を形成している。この転位線直下の格子間隔の伸びた部分に溶質原子が入ると、この部分の応力が緩和され、転位のエネルギーは低下し、転位は動きにくくなる。このような作用を転位の固着と呼び、この状態を雰囲気を形成しているという。

	用語	定義
ふ	フレッティング疲労	機械はいくつかの部品が組立てられて構成されている。組立に際して、はめ合いやボルト締結などが用いられた場合、組み立てられて互いに接触する部品は荷重の変動があると相対的に数ミクロン程度の微小なすべりを生じる。この微小な繰返し相対すべりをフレッティングという。フレッティングでは互いにこすられる部品の表面に強い摩擦力が作用するので微細な疲労き裂が発生する。フレッティングによる微小き裂は欠陥として作用するので、機械の組立部の疲労強度は材料単体の疲労強度に比べて著しく低い。
	フロントゲージ法	除荷弾性コンプライアンス法などを行う際に、ひずみゲージを試験片のき裂のある側に貼り付ける方法。試験片のき裂とは反対の面にゲージを貼り付ける方法はバックフェースゲージ法という。
ぶ	ブリッジ形式	フレッティング疲労試験において、試験片は疲労試験片と接触片から構成される。その接触片の形状の1種。フレッティング疲労強度を評価する際に接触面に作用する摩擦力は重要な因子である。センサを貼り付けて摩擦力の測定を行うために、接触面の一部を橋(Bridge)の様にくり抜いた形状の接触片。
ぶ	プライマリー電流値	SIMS において、観察の際に調整するパラメータの一つ。プライマリー電流値を上げることにより高い密度のイオンビームを得ることができ、強くスパッタリングができるようになる。
	プラナーすべり	転位が障害物にあたると、最初のすべり面とは異なる面に交差すべりを起こすか、最初のすべり系とは別のすべり系が活動することになるが、例えば、積層欠陥エネルギーが低いような材料では交差すべりが起こりにくく、すべり系が限定されたすべりの形態をとりやすい。このような材料で起こるすべりの形態をプラナーすべりという。水素が入ると、すべりの形態はプラナーになる傾向があるといわれている。
	プリセット	Cameca 社製 SIMS 装置において、各装置パラメータを調整項目毎に分類してあるウィンドウのことをいう。このウィンドウのパラメータを順序良く調整することにより、効率良く各種調整を行うことができる。
	プリ・ポストプロセッサ	有限要素法を行う際に、計算の前後に行う処理(前にはモデル作成、境界条件付与など、後には結果の表示や整理など)を実行するソフトウェア。
	プリアンプ	観測波形の増幅器。本プロジェクトでは、受信子により計測した波形シグナルを観測装置に入力する前に増幅するために用いた。
	プルロッド	水素ガス中疲労試験機のピストンを延長するように取り付けられた軸。この先端に試験片を取り付ける。

	用語	定義
ぶ	プレーナ(すべり線)	すべりが立体交差を起こさず、平面状に起こっている様子を表す形容詞。水素が存在する場合、積層欠陥エネルギーの低下や刃状成分の安定化によってすべりがプレーナになると報告されている。
	プレスパッタ	本分析に入る前に試料表面の汚れや不純物を除去する目的でスパッタリングすること。SIMS を用いて水素の面内分布を可視化する際、最表面は汚れや不純物が多いため、プレスパッタを行うことが必須となっている。
	プローブ波形	プローブとは計測に際して直接試料に適用して計測信号を発生する素子であり、素子が発生した信号をプローブ波形と呼ぶ。本プロジェクトでは、超音波受信子が受信した試料を透過した後の超音波を電気信号に変換した波形を指す。
	プロジェクションレンズ	SIMS において、2 次イオン像の拡大率や縮小率を調整するためのレンズ。
	プロファイル	グラフおよび図で示した分析結果のこと。
へ	へき開破面	試験片が脆性破壊した際に形成される破断面の様様。
	ヘキサジエン	炭素数6の炭化水素化合物であり、分子式 C_6H_{10} である。炭素炭素二重結合が2カ所含まれるジエンモノマーの一種である。
	変位制御	材料試験機において変位を設定し、その変位になるように試験片を制御すること。カム式試験機の場合、負荷機構の構造により変位が一定に決まっているため、変位制御しかできない。
	変形挙動評価	試験片が初期の形状から変化する挙動の評価。
	変形双晶	原子の様な平行移動によって起こる変化で、変形が低温で行われるときや高速変形の場合には、このような変形を伴う。稠密六方晶金属などすべり系の少ないものでは、主要な変形機構となる。[9]
べ	ベイナイト	ベイナイト(bainite)。オーステナイトを比較的早く冷却したときにえら得られる組織[42]。パーライト生成温度とマルテンサイト生成温度との中間温度範囲で生ずる。ベイナイト組織はパーライト変体温度近くでは羽毛状、マルテンサイト変体温度近くでは針状の組織となる[43]。
	ベローズ	Bellows。気体や液体の配管などにおいて、主に管の軸方向の変位を吸収するために蛇腹状になっており、伸縮可能な部分。水素ガス中疲労試験においては、摺動式シール機構を用いるとシールの寿命や負荷繰返し速度に制限が生じるので、摺動シールを持たない機構として考案された水素ガス封止機構の主要部品。

	用語	定義
ほ	ホール素子	磁気センサーの一種。SIMS において質量数によって信号を分離するために、高感度のホール素子が用いられているが、温度依存性があるため、マグネットの冷却水を一定温度 18℃にして、誤差が少なくなるようにしている。
	放射線透過試験	放射線透過試験(Radiographic Testing)。非破壊検査の一つ。放射性同位元素や X 線を用いて試験体内部の欠陥を検出する検査方法。放射線源とフィルムの間に試験体を配置し、試験体内部の透過写真を撮影する。写真の観察により欠陥の評価を行う[44]。他にマイクロフォーカス X 線、X 線 CT、イメージングプレート(Imaging Plate)などがある[45]。
	飽和磁化	飽和磁化(Saturation Magnetization)。強磁性体の磁化の飽和値。磁性体は磁界の中に置かれるとそれ自身が磁石になる。これを磁化という。磁化は磁界を強くしてもある一定値で飽和する。この値を飽和磁化という[19]。
ぼ	ボイド	金属材料に大きな変形を与えると、非金属介在物などの第二相粒子と母相との間の塑性変形能の差により、界面はく離や第二相粒子の割れが生じ、微小な空洞が形成される。この空洞をボイドと呼ぶ。本プロジェクトでは、水素チャージ材のボイドの成長過程を観察し、水素による延性低下は局所変形助長説で説明できることを主張した。[46]
	妨害イオン	測定対象のイオン種に共存して発生するイオンで測定対象イオンの測定値に誤差を与えるイオン。
ぼ	ポアソン比	弾性変形の範囲において、引張りを加えた時に荷重方向の伸び(ひずみ%)と荷重に直角方向の寸法の縮み(ひずみ%)の比をいう。無次元量である。
ま	マイクロメータヘッド	マイクロメータ(長さを測定する測定具の一種)を他の装置に取り付けられるようにしたもの。本事業においては、ばねの試験においてばねの圧縮距離を測定するために用いた。
	マイナー則	応力振幅が変動する場合の疲労寿命を評価する方法の一種。疲労限度以下の応力は被害に寄与しないと仮定して、疲労限度以上の応力振幅のみに対して評価を行う方法
	マクロフォトセンサ	発光ダイオード(LED)と受光ダイオードからなるセンサで、LED からの光が物体により反射した光を受光ダイオードで受けることにより、測定範囲内における物体の存在を検出する。カム式引張り試験機においてカムの変位の違いを利用すれば、繰返し数の積算ができる。

	用語	定義
	曲げモーメント	部材を曲げようとする偶力。
ま	マスフィルター (質量分離器)	SIMS における、質量数の異なるイオンを分離するための器具。磁場および電場を利用して質量数の異なるイオンの軌道を変化させて分離する。
	マルチスケーリング解析	FEM 解析のような連続体の仮定を用いずに、材料の微視的な繰返し構造を利用して、繰返し単位の解析を行い、巨視的な材料の挙動に反映させる解析。
	マルテンサイト系	マルテンサイトは、炭素鋼を安定なオーステナイト状態から急冷する事によって得られる非常に硬い層組織である。マルテンサイト組織を有するステンレス鋼をマルテンサイト系ステンレス鋼という。
	マルテンサイト組織	高い強度を得るために行われる鋼の焼入れによって得られる金属組織。鋼や低合金鋼は多くの場合焼入れ焼戻しの熱処理を施して使用されるので、それらの材料で造られた機械部品にはよく見られる金属組織である。水素の影響を受けて疲労強度低下を示す材料の金属組織の一つ。水素の拡散速度が他の金属組織に比べて速い。
	マルテンサイト変態	鉄鋼材料の鉄原子の結晶配置は、高温の温度領域では面心立方 (Face-Centered Cubic; FCC) 構造を有している。それを急冷すると、瞬間的に体心立方 (BCC) 構造に変化するプロセス。オーステナイト系ステンレス鋼などでは、常温で応力を加えることによりマルテンサイトを生じることもある。これを応力誘起マルテンサイト変態とよぶ。ひずみを与えて変態する場合には、ひずみ誘起マルテンサイト変態という。
む	無次元応力拡大係数 F	応力拡大係数 $K = F \sigma \sqrt{\pi a}$ の F はき裂形状や荷重条件によって変化する。この F を無次元化応力拡大係数と呼ぶ。
め	メゾスケール	「メゾレベル」と同義。
	メゾレベル	原子レベル ($1 \times 10^{-10} \text{m}$) とミクロンレベル ($1 \times 10^{-6} \text{m}$) の間。水素脆化のメカニズムを説明するためには、このレベルに着目する必要があるとされている。
や	焼きなまし	鉄や鋼の軟化、結晶組織調整または加工などによる残留応力を除去するための熱処理。熱処理炉で所定の温度まで昇温・保持し、そのまま炉内で徐冷する。
	ヤング率	弾性変形の範囲において、印可された応力に対するひずみの相関を表す係数である。単位は応力と同じ Pa 等の応力と同じ単位を用いる。

	用語	定義
ゆ	油圧サーボ式	疲労試験機の動力に油圧を用い、その制御をサーボ制御で行う方式。サーボ制御はフィードバック制御の一種で、時間と共に変化する目標値に追従して行う制御方式。疲労試験では荷重を厳密にコントロールすることが絶対条件であるので、疲労試験機にとって制御方式は重要な要素である。
	有限要素解析	解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得るための方法の一つ。領域全体を小領域(有限要素)に分割し、各小領域の支配方程式を全領域のマトリックス表記にまとめ解くことにより、様々な物理量の分布(応力、温度、濃度など)を計算することができる。
	有限要素法	構造物などの応力状態を有限の要素の分割し、数値計算によって応力状態を近似的に求める方法である。FEM(Finite Element Method)と呼ばれることもある。
よ	予き裂	試験に先立ち、あらかじめ試験片に導入したき裂。機械加工の切欠き等は先端(底)の曲率半径がある程度の大きさを有するため、先端からのき裂の進展と、実際のき裂からの進展挙動が異なり、試験結果が異なる。その影響を避けるために、予き裂を導入する。
	予ひずみ	疲労試験前に予め与えるひずみ。通常塑性変形を与えることを目的とするため、降伏点以上の応力を負荷し、ひずみを与える。
ら	ライナー	高圧水素タンクなどで、水素ガスが外部へ漏れるのを防ぐための内貼り部品である。
	ラスターサイズ	集束した一次イオンビームを走査することにより、試料上の正方形領域がスパッタリングされる。この正方形領域のサイズのことをラスターサイズと呼ぶ。水素のように微弱な信号を大きくするためには1次イオン電流密度を大きくする必要があり、ラスターサイズは小さくすることが求められる。ところが、クレータエッジ効果により、端部分に偽信号が現れるため、最適化する必要がある。
	らせん転位	転位線とバーガースベクトルが平行な転位のこと。他のすべり面上に移って(交差すべりをして)運動することができる。
り	リチウムマイクロプローブ法	リチウムと水素の核反応時に発生するガンマ線を利用した水素の可視化手法の1つである。[47]

	用語	定義
	リバーパターン	リバーパターン(River Pattern)。脆性破面に見られる模様の1種[42]。脆性破面の典型であるへき開破面に見られる川の流れ状模様。リバーパタンからへき開破壊の微視的き裂進展方向がわかる[41]。
り	粒界	通常、金属材料は、多数の結晶粒が集まり構成されている。結晶粒と結晶粒の界面を粒界という
	粒界状破面	材料が破壊した面を電子顕微鏡レベルで観察する際に観察される結晶の粒界が見えているような平らな破面。
	粒界進展機構	疲労き裂が結晶の粒界を進展経路とするメカニズム。
	粒界損傷	結晶の粒界にできた損傷。ここでは、疲労過程で生じた、走査電子顕微鏡で観察可能な程度の微視的欠陥の意で用いた。
	粒界ファセット	結晶粒は多面体状である。き裂が隣り合う結晶粒の界面を進展するとき、破面上にはその一部が露出する。粒界ファセットとは露出した結晶粒界の平坦な面である。
	理論水素侵入量	材料を水素に曝した際に、理論的に試験片に侵入できる水素量。
	理論暴露時間	材料を水素に曝した際に、材料に水素が飽和するまでの時間を Fick の第二法則により求めたもの。材料内の水素量を検討するときの基本となる。
	臨界角	屈折率が大きいところから小さいところに光が入り、全反射が起きる最も小さな入射角を表す。本プロジェクトでは、ATR 計測の際にプリズムと試料の屈折率差から臨界角以上の角度で赤外光を入射させ、全反射が起こっている条件で測定した。
	臨界分解せん断応力	すべりが始まるときの活発なすべり系上に射影された応力。[9]
れ	冷間圧延	材料を常温のまま塑性加工によって棒・板などに引き延ばすこと。[12]
れ	レーザー回折法	粉体にレーザー光を照射し、そこから発せられる回折・散乱光の強度分布から粉体の粒度分布を求める方法であり、粒度分布の計測法として一般的に用いられている。
	レーザーショットピーニング	「ショットピーニング」における硬球衝突の代わりに、レーザー照射によって材料の表面に圧縮残留応力を発生させ、材料の強度を向上させる方法。

	用語	定義
	レプリカ法	試験片表面を直接的に観察できない場合、間接的に観察する方法の一種。プラスチックなどの有機材料を観察面に添付し、表面の凹凸を忠実に転写する。この転写皮膜をレプリカと呼び、レプリカによって試験片表面を間接的に観察する。レプリカは検査結果の保存にも利用される。[23]
	レンズ値	静電レンズの電圧値。
わ	ワイヤーループ法	水素マイクロプリント法において、写真乳剤(臭化銀)の膜を試料に塗布する方法の一つ。金属ワイヤーのループ(輪)で乳剤をすくって作った膜を試料表面に載せることより、薄く均一な乳剤膜を作成できる。

参考文献

- [1] 西川兼康、高田勝、機械工学用語辞典、理工学社、2003)
- [2] 深井有、田中一英、内田祐久、水素と金属-次世代への化学、内田老鶴圃、2002
- [3] 鈴木清一、EBSD 読本、TSL ソリューションズ
- [4] 鉄鋼協会フォーラム「構造材料の強度と破壊」2006/11/15、「へき開破壊のマイクロメカニズムについて」東京大学環境・海洋工学専攻 栗飯原周二、
http://sunshine.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/aihara/data_file/20061115_forum.pdf
- [5] 投稿中論文「炭素量 0.08 mass%の配管用炭素鋼鋼管の疲労き裂進展とストレッチゾーンに及ぼす水素の影響(松岡・堤・村上)」より
- [6] Ovejero-Garcia J. Hydrogen microprint technique in the study of hydrogen in steels. J Mater Sci 1985; 20: 2623-2629.
- [7] G. V. Kurdjumov, L. M. Utevskij, R. Y. Entin, 鉄鋼の相変態、西山善次監修、江南和幸訳、(1983)、アグネ技術センター
- [8] <http://www.jsme.or.jp/0306190s.htm>
- [9] 改訂増補版金属用語集、長崎誠三編、(1995)、日本機械学会
- [10] 日本金属学会、T. Angel, J. Iron Steel Inst., 177 (1954), 165
- [11] Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, NASA NSS 1740, 16, (2005)
- [12] 機械工学事典、社団法人日本機械学会、(1997)
- [13] Ilic R, Altstetter C. Prompt ion-induced autoradiography and its application for the determination of deuterium. Nucl Inst Meth 1981; 185: 505-512.

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-41

- [14] 二次イオン質量分析法、日本表面科学会編、(1999)、丸善
- [15] 漆原ら、SSRTによる高強度鋼の遅れ破壊評価、R&D 神戸製鋼技報、vol. 52、No.3 (2002)、pp. 57- 61.
- [16] 春名ら、応力腐食割れ感受性評価のための低ひずみ速度試験法 (SSRT) の進展、まてりあ、Vol. 52、No. 4 (1997)、pp. 311- 316.
- [17] 大山正、森田茂、吉武進也、ステンレスのおはなし、日本規格協会、2003
- [18] http://engy-sqr.com/kaisetu/current%20topics/ut_exam.htm
- [19] フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia) 』、<http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- [20] 機械工学用語辞典編集委員会、機械工学用語辞典、(1996)、p. 40、理工学社.
- [21] 平川賢爾、大谷泰夫、遠藤正浩、坂本東男、機械材料学、朝倉書店、2001
- [22] [日本ビーコ株式会社ホームページ:http://www8.veeco.co.jp/products/index.html](http://www8.veeco.co.jp/products/index.html)
- [23] 金属材料総合研究所、金属材料技術用語辞典、日刊工業新聞社、(2000)、p. 82、P487
- [24] トータル・メジャーメント・システム株式会社ホームページ
<http://www.tmsystem.co.jp/solvay/galden001.html>)
- [25] 村上敬宜、金属疲労 微小欠陥と介在物の影響、養賢堂、(1993)
- [26] 金属材料技術用語辞典-第2版 日刊工業新聞 2000
- [27] 幸田成康著、改訂 金属物理学序論、(1990)、コロナ社
- [28] 矢島ら、第2版 若い技術者のための機械・金属材料、(2002)、p. 54、丸善株式会社
- [29] <http://www.hihakikensa.co.jp/ultrasonic/index.html>
- [30] D. Briggs ら、表面分析:SIMS-二次イオン質量分析法の基礎と応用一、(2003)、アグネ承風社.
- [31] Beachem, C. D., A New Model for Hydrogen-Assisted Cracking (Hydrogen “Embrittlement”), Metallurgical Transactions, Vol.3 (1972), pp.437-451.)
- [32] 深井ら、水素と金属、(2002)、内田老鶴圃
- [33] ステンレス鋼便覧 日刊工業新聞社 2004、
- [34] 破壊力学(小林英男・共立出版株式会社
- [35] 中川元 他『材料試験方法』(養賢堂、1973)
- [36] JIS G0203「鉄鋼用語(製品及び品質)」
- [37] 改訂 機械材料学、社団法人 日本材料学会
- [38] 村上敬宜 著 『材料力学』(森北出版、2005)
- [39] Louthan MR Jr, Donovan JA, Caskey GR Jr. Tritium absorption in type 304L stainless steel. Nucl Tech 1975; 26: 192-200.)
- [40] http://www.jfe-holdings.co.jp/rerease/ksc/99_03/hakkou.html
- [41] 機械材料学 日本材料学会
- [42] 金属用語集 日本金属学会
- [43] http://www.jpo.go.jp/shiryou/s_sonota/map/kagaku09/4/4-8-1.htm

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-41

用語集 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」-42

[44] <http://www.kisco-ndt.co.jp/service/service-rt.html>

[45] <http://www.nstr.co.jp/rt.htm>

[46] 改訂 材料強度学、(2006)、p. 55、社団法人 日本材料学会

[47] Adler PN, Schulte RL. Stress-induced hydrogen migration in b-phase titanium. Scr Metall 1978; 12: 669-672.)

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-1

	用語	定義
A	AFM	原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)の略称。試料表面をカンチレバー先端のチップで走査し、その間に発生する原子間力を制御して像映する。
	ATR アタッチメント	ATRとは赤外吸収スペクトル測定法の一つである全反射測定法(Attenuated Total Reflection)の略称であり、透過法と異なり試料表面近くの情報を得ることが出来る。ATR法により測定する際に必要となる付加装置をATRアタッチメントと呼ぶ。試料を屈折率の大きい媒質結晶(KRS5やGeなど)に密着させ、入射角を臨界角より大きくとり、試料とATR結晶間で全反射が起きるように設定する。全反射が生じる時、界面で光は試料側に少しだけめぐりこんで反射される。試料に吸収のある領域では、吸収の強さに応じて反射光のエネルギーが減少する。この反射光を測定することによりスペクトルが得られる。反射回数は1回~20回程度まで種々のものがあるが、本プロジェクトでは媒質結晶Geを用い、単反射により測定した。
B	BET法	試料に吸着占有面積の判った分子を液体窒素温度で吸着させ、その量から試料の比表面積を求める方法である。吸着質としては窒素、クリプトン、ベンゼン、トルエンなどの有機化合物を用いる。単分子層吸着理論であるLangmuir理論をBrunauer、Emmett、Tellerらにより多分子層吸着に拡張し、比表面積の計測方法として考案されたことからBET法と呼ぶ。
F	FKM	ゴム材料の種類を表す記号の一種で、フッ素ゴムを表す。主にフッ化ビニリデンとヘキサフルオロプロペンとの共重合体を指し、耐油性、耐薬品性及び耐熱性に優れている。バイトンゴムなどが市販されている
H	HAF(ASTMN330)	カーボンブラックのグレードの一種である。本プロジェクトではゴム材料の充てん材として使用した。
	Henryの法則	一般的に、溶液において溶質の蒸気圧は溶液中の溶質モル分率に比例する。溶質が気体である場合には、溶液中の気体のモル分率と気相での圧力が比例することを表し、モル分率が十分に小さい範囲ではモル分率は濃度に比例するから、気体の溶解度は圧力に比例すると言換えることも出来る。これをHenryの法則という。
J	JIS K 6253	加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー引張特性の求め方に関するJIS規格である。加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの引張強さ、切断時伸び、降伏点伸び、及び引張応力を求める方法について規定されている。
M	MHz領域	百万Hz前後の周波数帯域を表す。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-2

	用語	定義
N	Nipsil VN3	合成シリカの一種であり、東ソー・シリカ株式会社の商品名である。本プロジェクトではゴム材料の充てん材として使用した。
T	tan δ	→動的粘弾性参照。 試料に周期的な変形を与え、その際の応答として発生する応力を計測し、粘性および弾性を評価する手法である。弾性に相当する貯蔵弾性率(E')と粘性に相当する損失弾性率(E''), またエネルギー吸収の指標としてE''とE'の比である損失正接(tan δ)の温度依存性、周波数依存性を測定し、これらにより試料の分子構造に起因するガラス転移などについて情報が得られる。”
	TDA	昇温脱離ガス分析(Thermal Desorption Gas Analysis)。高真空下に置かれた試料を一定速度で加熱させながら、脱離していく化学種による圧力や脱離化学種の量変化を、ガスクロマトグラフィにより定量する脱離ガス分析手法であり、本プロジェクトにおいては水素量の定量に用いた。
X	XDF	Explosive Decompression Failure の略称である。ゴム材料を高圧ガスに曝露した場合、ゴム内部に溶解していたガスが、急激な減圧(Explosive Decompression)を行うことにより内部でガスが気化し、気泡を生成する。これにより破壊(Failure)に至る現象を言う。
あ	アクリロニトリル-ブタジエンゴム(NBR)	ニトリルゴムとも言う。アクリロニトリル(CH ₂ =CH-CN)とブタジエン(CH ₂ =CH-CH=CH ₂)の乳化重合により得られる共重合体をベースとした一般的な合成ゴム材料であり、耐油性が要求される用途などに用いられる。アクリロニトリルの配合量により極高ニトリル～低ニトリルの種々のグレードがある。一般的にアクリロニトリルの含有量が高い極高ニトリルは耐油性が優れ、含有量が低い低ニトリルは低温への耐性が高くなる。
	アルキメデス法	固体の体積を計測する手法で、大気中と水などの媒質中での重量を比較し、媒質中で計測した際に作用する浮力による重量差から体積を計測する手法である。
い	硫黄ラジカル(Snは不要)	ラジカルは、不対電子をもつ原子や分子、あるいはイオンのことを指す。この場合、不対電子を持つ硫黄を硫黄ラジカルと呼ぶ。
	一次粒子	粉体の基本となる最小単位の粒子を表す。
	印加	対象物に対して外部から所要の条件を与えることを表し、例えば電気回路では電源などから対象物に対して電圧や信号を与える事を示す。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-3

	用語	定義
	インピーダンス	インピーダンスは、交流回路における電圧と電流の比である。単位はオーム(表記は[Ω])である。インピーダンスは一般に複素数となり、実部をレジスタンス(resistance)または抵抗成分、虚部をリアクタンス(reactance)と呼ぶ。
え	エチリデン	他の原子と二重結合する炭素に結合する水素のうち一つがメチル基(CH ₃ -)と置換した骨格 CH ₃ -CH=をエチリデンと称する。
	エチレン-プロピレンゴン(EPDM)	エチレン(CH ₂ =CH ₂)とプロピレン(CH ₂ =CH-CH ₃)および架橋点となるモノマーの三元共重合体をベースとした一般的な合成ゴム材料であり、チーグラ-ナツタ触媒を用いた溶液重合で製造される。低温への耐性や耐久性に優れた、様々な用途に使用されている。耐油性は他のゴム材料に比べ劣っている。
お	オムニシール	水素ガス中疲労試験機において、水素ガス容器に貫通する軸の部分から水素ガス漏洩を生じないように封止をするシール部品。スプリング荷重式の摺動シール。
か	カーボンブラック	工業的に製造された直径 3-500nm 程度の炭素の微粒子の総称であり、粒子径(粒の大きさ)、ストラクチャー(粒子のつながり)、表面性状(官能基)により様々な特性を持つものが生産されている。本プロジェクトではゴム材料の充てん材として使用した。
	架橋密度	ゴムを含む高分子材料の分子は構成単位となる単量体が多数結合した長鎖状の構造である。長鎖状の高分子の間に新たに結合を導入した構造を持つ高分子を特に架橋型高分子と言い、高分子間に導入した結合を架橋点という。架橋型高分子の単体量(重量、体積など)中に存在する架橋点の数を架橋密度と言い、[molg ⁻¹]等の単位を用いる。
	加硫	生ゴムに加硫剤を混合し、ゴム分子間に架橋構造を導入する操作を加硫と呼ぶ。加硫によりゴムの弾性や強度が増す。一般的には加硫剤として硫黄を用いるが、酸化物による架橋反応を行った場合など硫黄を用いないものも加硫と呼んでいる。ゴム材料の加硫の状態は水素の拡散や耐ブリスタ性などへの影響が想定される。
	カンチレバー	原子間力顕微鏡用の片持ち(カンチ)レバーで、その先端には微小なプローブが付いている。片持ちになっているのは、プローブが付いている反対側で装置に装着するためである。[22]
が	外そう法	試験によって得られた数値データから、試験片データの範囲外の数値データを求める方法を外そう法という。本プロジェクトでは、ゴム材料の水素曝露直後の水素量を求めるために使用した。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-4

	用語	定義
	ガスクロマトグラフィ	充填剤に対する吸着力の差を利用して、気体の定性または定量分析を行う装置。多成分かつ微量成分の分析が可能であり、制度も良い。 [23]
	ガスクロマトグラフ法	試料を加熱し、出てきたガスをキャリアガスで移動させ、カラム内で分離し、分離されたガスを検出器で検出し、ガスの量を測定する方法。本プロジェクトでは水素量を測定したり、金属中の水素トラップ状態を調べたりするために使用している。
き	キャパシタンス	コンデンサーなどの絶縁された導体に電圧を印加した際、単位電圧あたりの蓄えられた電荷量として与えられる。単位はファラド [F] である。ある物体に 1 ボルトの電圧を与えたとき、1 クーロンの電荷を蓄えたならば、その物体の静電容量は 1 ファラドである。静電容量、電気容量とも言う。
	キャリアガス	ガスクロマトグラフィ方式の昇温脱離分析装置を用いて水素量測定を行うときに、装置内に流すガスのこと。Ar ガスを用いている。
	極性基	極性を持った官能基(あるいは原子団)を表す。主に有機化合物に対して用いられる表現である。例えば、NBR 中に含まれるアクリロニトリルのニトリル基は代表的な極性基である。
	極高ニトリル	アクリロニトリル含有量 43%以上のアクリロニトリル-ブタジエンゴムであり、耐油性が優れた材料である。
く	クロロブチルゴム	イソブチレンとイソプレンの共重合体をベースとした合成ゴムをブチルゴムと呼び、その一部を塩素化したものをクロロブチルゴム(塩素化ブチルゴム)と呼ぶ。気体の透過率が低く、ガスシール性に優れたゴム材料である。
げ	原子間顕微鏡	試料表面と微小針(プローブ)先端に作用する微小な力(原子間力)が常に一定となるように試料表面をなぞること(走査)によって、試料表面の形状を、原子レベルの分解能で測定できる顕微鏡装置である。水平方向に加え、高さ(垂直)方向の情報を得ることができる。走査プローブ顕微鏡の一種である。
こ	孔径	フィルター等に用いられる多孔質体などに存在する微細孔の直径を表す。平均値で表す場合が多い。
	コロイダルシリカ	不定形の二酸化ケイ素(SiO ₂)あるいは二酸化ケイ素水和物であり、粒子径が 10~300nm 程度のものを水に分散させたコロイド溶液を指す。ケイ酸塩に希塩酸を作用させ製造する。Si ウエハなどの仕上げポリッシング用研磨剤として多用されている。本プロジェクトではゴムの充てん剤として用いたシリカの原料の一例として示されている。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-5

	用語	定義
	コンデンサー	一般的に電極間に誘電体を挟んだ構造となっており、その静電容量により電荷(電気エネルギー)を蓄えたり、放出したりするデバイスである。静電容量の単位はF(ファラド)が使われる。
	高温気相反応	高温かつ気体状態での反応により、原料のガスから目的物を合成する手法であり、合成シリカの製造方法の一種である。
こ	剛性率	印可されたせん断応力に対し、発生するひずみとの相関を表す係数である。単位は応力と同じ Pa 等応力と同じ単位を用いる。
	ゴム領域貯蔵弾性率	粘弾性挙動の温度分散を計測した場合、ガラス転移現象を示すゴムなどの材料において、ガラス転移温度より高温側をゴム状態と称し、ゴム状態における弾性率をゴム領域貯蔵弾性率と呼ぶ。
さ	差圧法	試料の片側に一定圧力の測定ガスを加え、反対側を減圧して試料両面に圧力差をつけ、試験片中を溶解・拡散して透過したガスによって変化する減圧側の圧力増加率から気体透過率を算出する気体透過率の測定方法の一つである。
し	シール	一般的に液体や気体などの流体を貯蔵する容器において、その漏出を防ぐために用いられる部材の総称である。代表的なものに Oリングや V パッキン、ライニングなどがあり、本プロジェクトでは特に高圧水素容器の Oリングについて研究を進めている。
	周波数特性分析装置	周波数特性分析装置 FRA (Frequency Response Analyzer) は、連続的に変化する周波数の正弦波信号を試料に与え、その周波数応答を計測する装置のことを指し、本プロジェクトでは試料を透過する超音波信号の減衰について周波数を掃引して測定し、超音波信号の減衰の周波数応答を計測した。
じ	ジエチルジチオカルバミン酸亜鉛	報告書中に構造式を示したジチオカルバミン酸系化合物の一種で、ゴムの加硫促進剤として使用される。
	ジエンモノマー	炭素二重結合を2カ所有する化合物をポリマーを構成する単位として用いた場合の一般的な呼称である。本プロジェクトではアクリロニトリルーブタジエンごむのブタジエンがジエンモノマーの範疇に入る。
	ジシクロペンタジエン	環状炭化水素化合物の一種であり、 $C_{10}H_{12}$ である。シクロペンタジエンが二分子結合した構造である。
	ジチオカルバミン酸系	$RR'NC(=S)S-M$ (R, R':アルキル基, M:金属)の構造を持つ化合物の総称。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-6

	用語	定義
す	水素透過率測定	対象とするガス(この場合水素)が試料を通して透過する量を測定する方法を表す。得られる透過率は、気体の溶解度と拡散速度の積で与えられる。試料にガスが溶けこみ(溶解)材料中を移動(拡散)することを透過と言い、試料への溶けこみやすさを示す溶解度係数と移動のしやすさを指し示す拡散係数の積を言う。
	スチレン-ブタジエンゴム	スチレンと 1,3-ブタジエンとの共重合体をベースとした合成ゴムである。耐熱性、機械強度等に優れた材料であるが、耐寒性や引き裂き強度においては他の汎用ゴムより劣っている。自動車用タイヤなど汎用的に使用されるゴム材料である。
	ステアリン酸	飽和脂肪酸(高級脂肪酸)の一種であり、分子式 $C_{17}H_{35}COOH$ 、IUPAC 名は Octadecanoic acid である。融点 $69.9^{\circ}C$ 、沸点 $376^{\circ}C$ (分解)、比重 0.9 で、CAS 登録番号は 57-11-4 である。本プロジェクトではゴム材料の添加剤として配合されており、加硫促進剤を活性化させる加硫促進助剤として用いられている。
そ	損失正接	→動的粘弾性参照 試料に周期的な変形を与え、その際の応答として発生する応力を計測し、粘性および弾性を評価する手法である。弾性に相当する貯蔵弾性率(E')と粘性に相当する損失弾性率(E'')、またエネルギー吸収の指標として E'' と E' の比である損失正接($\tan \delta$)の温度依存性、周波数依存性を測定し、これらにより試料の分子構造に起因するガラス転移などについて情報が得られる。
た	耐ブリスタ性	高圧ガス中にさらされたゴムや樹脂などの材料が、溶解したガスにより発泡し、破壊される現象をブリスタと呼ぶ。ブリスタ破壊への耐性を耐ブリスタ性と称し、本プロジェクト研究では高圧水素ガスにさらされた場合にブリスタを発生しない耐ブリスタ性に優れた材料の開発を目指している。
ち	チアゾール系	複素環式化合物の一種で、1 位に硫黄、3 位に窒素原子を持つ 5 員環化合物である。全体として芳香族性を持つ。 C_3H_3NS の分子式で表される。これらの誘導体を含め、チアゾール系化合物と称する。
	チウラム系	テトラメチルチウラムジスルフィドに代表される硫黄と窒素からなる化合物の総称。
て	低ニトリル	アクリロニトリル含有量 24%以下のアクリロニトリル-ブタジエンゴムであり、低温への耐性が優れた材料である。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-7

	用語	定義
	テストフィクスチャ	試料に対して適切な形状で設計、固定された計測素子のセットを示す。本プロジェクトでは板状試料の比誘電率測定に際して、計測素子である電極を平行に設定したテストフィクスチャを用いて測定した。
	テトラメチルチウラムジスルフィド	報告書中に構造式を示したチウラム系化合物の一種で、ゴムの加硫促進剤として使用される。
で	デューティ	ファンクションジェネレータにより発信された2レベルの間を規則的かつ瞬間的に変化する矩形波の低電位側および高電位側の時間の比率
	デュロメータ硬さ	被測定物の表面に圧子(針など)を押し込み変形させ、その変形量(押し込み深さ)を測定し、硬さを評価する方法である。押し込みの際、荷重を与える方法としてスプリングを用いた場合、「デュロメータ硬さ」と呼ぶ。
	電場印加	対象物に対して外部から所要の条件を与えることを表し、この場合、電気回路において、電源などから対象物に対して電圧を与える事を指す。
と	透過係数	均質な膜により隔てられた二つの領域に圧力差(気体分子数の差)がある場合、二つの領域の圧力差が解消されるように均質な膜を透過し、気体分子が移動する。これを気体の透過現象と呼ぶ。透過現象は膜表面に気体分子が吸着、溶解し、膜中を拡散した後に膜から脱着することにより起こる。均質な膜の気体の透過量は二つの領域の気体の圧力差や気体が透過する領域の断面積、時間、厚さに依存する。これらの影響を単位量当たり換算したものを気体の透過係数と呼び、透過係数=気体の透過量(体積)×膜の厚さ/(圧力差×透過断面積×時間)で定義される。透過係数の IUPAC 推奨の単位は $[\text{kmol}\cdot\text{m}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa})]$ である。慣用的に $[\text{cm}^3(\text{STP})\cdot\text{cm}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{cmHg})]$ を使用したものが最も多い。 $[\text{cm}^3(\text{STP})]$ は1気圧、0°Cでのガス体積を表す。 本プロジェクトでは水素透過率測定装置を用い、差圧法(別途説明)によりゴム材料の水素透過係数を計測した。
ど	動的粘弾性	試料に周期的な変形を与え、その際の応答として発生する応力を計測し、粘性および弾性を評価する手法である。弾性に相当する貯蔵弾性率(E')と粘性に相当する損失弾性率(E'')、またエネルギー吸収の指標として E'' と E' の比である損失正接($\tan \delta$)の温度依存性、周波数依存性を測定し、これらにより試料の分子構造に起因するガラス転移などについて情報が得られる。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-8

	用語	定義
な	ナノインデンテーション法	試料表面にダイヤモンド圧子をナノメートルオーダーの深さで押し込み、そのときの押し込み力と押し込み深さの関係を測定することで、微小領域の弾性・塑性挙動を評価する手法。
の	ノルボルネン	ビシクロ[2.2.1]ヘプタ-2-エンの慣用名。環状炭化水素化合物の一種であり、分子式 C_7H_{10} である。
ひ	比誘電率	誘電率は物質内で電荷と電荷によって与えられる力との関係、電束密度と電場の比例係数にある。単位は F/m である。物質は固有の誘電率をもち、この値は外部から電場を与えたとき物質中の原子または分子の応答(分極)により決まる。誘電率の値を真空の誘電率 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$) との比として表したものが比誘電率であり、無次元量となる。
び	ビニレン	不飽和炭化水素化合物の単位となる骨格の呼称であり、化学式は $-\text{HC}=\text{CH}-$ で表される。
ふ	フィラー	充てん材と同義であり、樹脂やゴム材料などに、強度や各種性質を改良するため添加されるカーボンブラックやシリカなどのことを示す。
	フーリエ変換赤外分光光度計	赤外分光法とは、測定対象の物質に赤外線を照射し、透過(あるいは反射)光を分光することでスペクトルを得て、対象物の特性を知る方法のことをいう。物質に赤外線を照射すると、それを構成している分子が光のエネルギーを吸収し、量子化された振動あるいは回転の状態が変化する。試料を透過(あるいは反射)させた赤外線は、照射した赤外線よりも、分子の運動の状態遷移に使われたエネルギー分だけ小さくなり、この差により分子に吸収されたエネルギー、すなわち試料中の分子の振動・回転の励起に必要なエネルギーを求めることが可能であり、試料の分子構造や状態を知るために使用される。赤外スペクトルを得る装置を赤外分光光度計と呼ぶ。分光に際して干渉計を用い、得られた干渉波形をフーリエ変換(FT)することによりスペクトルに変換する方法を用いたものをフーリエ変換赤外分光光度計と呼び、積算回数を増やすことで SN 比を増やすことが可能である。現在赤外スペクトルの計測にはフーリエ変換赤外分光光度計が一般的に用いられる。
ぶ	ブリスタ発生挙動の解析	高圧ガス中にさらされたゴムや樹脂などの材料が、溶解したガスにより発泡し、破壊される現象をブリスタと呼ぶ。本プロジェクトでは試験片に対し、ガス溶解から発泡、破壊に至る一連の挙動の解明を進めており、ブリスタ発生挙動の解析と呼んでいる。

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-9

	用語	定義
	分子鎖	高分子は、その構成単位である単量体(モノマー)が多数結合して構成されており、単量体が結合して作られている最も長い単量体の連鎖部分を主鎖と呼ぶ。
べ	ベンズチアゾリルジスルフィド	報告書中に構造式を示したチアゾール系化合物の一種で、ゴムの加硫促進剤として使用される。
ぼ	ポリイミド樹脂	比較的強度や電気絶縁性、耐熱性などが高い樹脂の1種。疲労試験では試験片を試験機に取り付ける部分で金属同士が直接接触しないように保護被膜として使用される。
	ポリメチルメタクリレート	メチルメタクリレート(分子式 $\text{CH}_2=\text{C}-\text{CH}_3-\text{COOCH}_3$ 、メタクリル酸メチル)をモノマー単位とする重合体であり、代表的なアクリル樹脂の一つである。透明性に優れ、工学部品や家電品(照明など)に幅広く使われている。
ま	マスターカーブ	動的粘弾性測定は試料に機械的な振動を与えて測定するため、測定可能な周波数範囲が 0.1~100Hz 程度に制限されている。一方、動的粘弾性測定においては、測定周波数と温度の間に「時間-温度換算則」が成り立つ。換算式については種々提案されているが、代表的なものに William、Landel、Ferry により確立された WLF 式がある。この関係を用いて、種々の温度における狭い範囲の動的粘弾性の周波数特性を測定し、粘弾性特性の温度の依存性を周波数の依存性に換算した上で重ね合わせることにより、広い周波数範囲についての一定温度における粘弾性の周波数特性を算出することができる。このようにして作成された動的粘弾性の周波数依存性をマスターカーブと呼んでいる。
め	メチル	飽和炭化水素化合物の基本単位となる骨格の呼称であり、化学式は $-\text{CH}_3$ で表される。
	メチレン	飽和炭化水素化合物の基本単位となる骨格の呼称であり、化学式は $-\text{CH}_2-$ で表される。
	メンブランフィルター	フッ素樹脂やセルロースアセテートで作られた孔径の揃った多孔性の合成高分子膜の総称であり、強度が強い。使用目的に合わせて様々な孔径のものが市販されている。

	用語	定義
ゆ	誘電緩和現象	物質の外部から電界を与えると、内部の原子(あるいは分子)はプラスの電荷に偏った部分と、マイナスの電荷に偏った部分に分かれる。これを電子分極と呼ぶ。電界がかかっている場合分子はランダムな方向を向いているため全体としては電気的雙極子を持たないが、電界を与えると分子が配向するために雙極子が生じる。電界により発生した電子分極が電界を除去した際にもとのランダムな方向を向いた状態に戻る現象を誘電緩和現象と呼ぶ。本プロジェクトではゴム材料の誘電緩和現象を計測することにより分子構造やその運動性に関する知見を売ることを試みた。
ら	ラマン散乱スペクトル測定	ラマン散乱は、物質に光を入射したとき、散乱された光の中に入射された光の波長と異なる波長の光が含まれる現象を言う。試料にレーザー光を照射した際に観測されるラマン散乱光の振動数と入射光の振動数の差(ラマンシフト)は物質の構造に特有の値をとることから、ラマン効果は赤外分光法と同様に分子の構造や状態を知るための分析法である。ラマン散乱と赤外線吸収の選択則は異なるため、赤外分光法とは相補的關係にある。
れ	レーザー変位計	試料にレーザー光を照射し、その反射光を計測することにより反射面の変位を計測する装置。
ろ	ロール混練機	回転速度、回転方向が異なる2本のロールが一定の間隙で平行に設置され、その間隙に混合する試料を投入し、ロール間で発生するずり応力により混練される。生ゴム材料に加硫剤を混合する際に用いられる。

参考文献

- [1] 西川兼康、高田勝、機械工学用語辞典、理工学社、2003)
- [2] 深井有、田中一英、内田祐久、水素と金属-次世代への化学、内田老鶴圃、2002
- [3] 鈴木清一、EBSD 読本、TSL ソリューションズ
- [4] 鉄鋼協会フォーラム「構造材料の強度と破壊」2006/11/15、「へき開破壊のマイクロメカニズムについて」東京大学環境・海洋工学専攻 栗飯原周二、
http://sunshine.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/aihara/data_file/20061115_forum.pdf
- [5] 投稿中論文「炭素量 0.08 mass%の配管用炭素鋼鋼管の疲労き裂進展とストレッチゾーンに及ぼす水素の影響(松岡・堤・村上)」より
- [6] Ovejero-Garcia J. Hydrogen microprint technique in the study of hydrogen in steels. J Mater Sci 1985; 20: 2623-2629.

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-11

- [7] G. V. Kurdjumov, L. M. Utevskij, R. Y. Entin, 鉄鋼の相変態、西山善次監修、江南和幸訳、(1983)、アグネ技術センター
- [8] <http://www.jsme.or.jp/0306190s.htm>
- [9] 改訂増補版金属用語集、長崎誠三編、(1995)、日本機械学会
- [10] 日本金属学会、T. Angel, J. Iron Steel Inst., 177 (1954), 165
- [11] Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, NASA NSS 1740, 16, (2005)
- [12] 機械工学事典、社団法人日本機械学会、(1997)
- [13] Ilic R, Altstetter C. Prompt ion-induced autoradiography and its application for the determination of deuterium. Nucl Inst Meth 1981; 185: 505-512.
- [14] 二次イオン質量分析法、日本表面科学会編、(1999)、丸善
- [15] 漆原ら、SSRTによる高強度鋼の遅れ破壊評価、R&D 神戸製鋼技報、vol. 52、No.3 (2002)、pp. 57- 61.
- [16] 春名ら、応力腐食割れ感受性評価のための低ひずみ速度試験法 (SSRT) の進展、まてりあ、Vol. 52、No. 4 (1997)、pp. 311- 316.
- [17] 大山正、森田茂、吉武進也、ステンレスのおはなし、日本規格協会、2003
- [18] http://engy-sqr.com/kaisetu/current%20topics/ut_exam.htm
- [19] フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia) 』、<http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- [20] 機械工学用語辞典編集委員会、機械工学用語辞典、(1996)、p. 40、理工学社。
- [21] 平川賢爾、大谷泰夫、遠藤正浩、坂本東男、機械材料学、朝倉書店、2001
- [22] [日本ビーコ株式会社ホームページ:http://www8.veeco.co.jp/products/index.html](http://www8.veeco.co.jp/products/index.html)
- [23] 金属材料総合研究所、金属材料技術用語辞典、日刊工業新聞社、(2000)、p. 82、P487
- [24] トータル・メジャーメント・システム株式会社ホームページ
<http://www.tmsystem.co.jp/solvay/galden001.html>
- [25] 村上敬宜、金属疲労 微小欠陥と介在物の影響、養賢堂、(1993)
- [26] 金属材料技術用語辞典-第2版 日刊工業新聞 2000
- [27] 幸田成康著、改訂 金属物理学序論、(1990)、コロナ社
- [28] 矢島ら、第2版 若い技術者のための機械・金属材料、(2002)、p. 54、丸善株式会社
- [29] <http://www.hihakikensa.co.jp/ultrasonic/index.html>
- [30] D. Briggs ら、表面分析:SIMS-二次イオン質量分析法の基礎と応用-、(2003)、アグネ承風社。
- [31] Beachem, C. D., A New Model for Hydrogen-Assisted Cracking (Hydrogen “Embrittlement”), Metallurgical Transactions, Vol.3 (1972), pp.437-451.)
- [32] 深井ら、水素と金属、(2002)、内田老鶴圃
- [33] ステンレス鋼便覧 日刊工業新聞社 2004、
- [34] 破壊力学(小林英男・共立出版株式会社
- [35] 中川元 他『材料試験方法』(養賢堂、1973)

用語集研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-11

用語集 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」-12

[36] JIS G0203「鉄鋼用語(製品及び品質)」

[37] 改訂 機械材料学、社団法人 日本材料学会

[38] 村上敬宜 著 『材料力学』(森北出版、2005)

[39] Louthan MR Jr, Donovan JA, Caskey GR Jr. Tritium absorption in type 304L stainless steel. Nucl Tech 1975; 26: 192-200.)

[40] http://www.jfe-holdings.co.jp/rerease/ksc/99_03/hakkou.html

[41] 機械材料学 日本材料学会

[42] 金属用語集 日本金属学会

[43] <http://www.jpo.go.jp/shiryousonota/map/kagaku09/4/4-8-1.htm>

[44] <http://www.kisco-ndt.co.jp/service/service-rt.html>

[45] <http://www.nstr.co.jp/rt.htm>

[46] 改訂 材料強度学、(2006)、p. 55、社団法人 日本材料学会

[47] Adler PN, Schulte RL. Stress-induced hydrogen migration in b-phase titanium. Scr Metall 1978; 12: 669-672.)

	用語	定義
D	DLC	ダイヤモンドライクカーボン。ダイヤモンドに似て高硬度の、アモルファス構造の炭素。一般にコーティング膜として形成され、成膜方法によって組成や構造が異なる。
E	EDX	エネルギー分散X線分析(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX, EDAX)。走査型電子顕微鏡に取り付け、観察試料表面から発生する特性X線を定量測定する方法。[1]
F	[Fcf2]/[Cr]	本報告書では、PTFE との摺動試験後、金属表面から得られた光電子スペクトルに見られる、CF ₂ を示す 689eV 付近ピークと、Crを示す 577eV 付近のピークの面積強度比であり、この値を金属表面に形成された PTFE 転移膜量を評価する指標とした。
	Fickの法則	拡散に対する基本法則。単位面積・単位時間あたりの拡散量が濃度勾配に比例するという第1法則と、濃度の時間変化に関する第2法則より成る。第1法則における比例係数は拡散係数と呼ばれる。
H	HDPE	高密度ポリエチレン。各種包装材からパイプ等まで、幅広い用途に用いられる熱可塑性樹脂。優れた摩擦・摩耗特性を有し、シーリング剤としても使用される。
L	Lennard-Jonesポテンシャル	2個の原子間に働く力のポテンシャル関数。
O	OPLS-AA 力場	OPLS-AA(Optimized Potentials for Liquid Simulations - All Atom) force field。液体分子内、及び分子間で作用する原子間力のポテンシャル関数の一種。
P	PTFE	四フッ化エチレン。各種シーリング部に用いられる代表的な樹脂材料。デュポン社の商標であるテフロンの名で有名な高分子材料。耐熱性、耐薬品性に優れ、自己潤滑性による低摩擦特性を示すことから、各種表面コーティングや摺動部材としても広く用いられている。
	PEEK	ポリエーテルエーテルケトン。転がり軸受の保持器の他、各種シーリングやパッキン等に用いられる熱可塑性樹脂。機械的特性に優れ、高い耐熱性と耐薬品性を有する。
R	RAE分析	リアクティブアノードエンコーダー分析。二次イオン質量分析計 SIMS(Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometer)による測定における二次イオン像面分析。
S	sp ² 結合、sp ³ 結合	原子の共有結合の様式。固体炭素の場合、前者は炭素原子が他の3つの炭素原子と結合しているグラファイトの、後者は炭素原子が他の4つの炭素原子と結合しているダイヤモンドの結合状態である。
S	SUS316L-VAR	SUS316L の耐腐食性を向上させるために、炭素を中心とした不純物の量を低減した鋼種。真空容器中でアーク溶解することで作られる。

	用語	定義
X	XPS	X線光電子分光分析(X-ray Photoelectron Spectroscopy)。X線を物質の表面に照射し、光電効果によって放出される原子の内殻、外殻電子のエネルギーを測定することにより、表面近傍の元素の種類、量、及び化学結合状態を特定する分析装置。
あ	アークイオンプレーティング法 (ArcIP)	陰極表面に形成される陰極点から放出される高エネルギーのイオンを利用して薄膜を形成する方法。固体陰極からの蒸発物質によってプラズマを形成するため、放電の発生および維持のためのガスを導入する必要がない。
い	移着	接触している2固体を摩擦するとき、凝着部の破断によって、一方の表面の小部分が他方の表面へ移る現象。 [1]
	移着膜	移着(別項参照)によって形成された表面膜。
	イオンエッチング	イオンを固体表面に衝突させて表面材料を除去する方法。
お	AES・SAM・オージェマイクロプローブ	オージェ電子分光(Auger Electron Spectroscopy, Scanning Auger Microprobe)。物質の表面に電子線を入射し、オージェ過程を経て放出された電子を計測して、表面より数原子層の深さに存在する原子の電子構造の情報を得る。
	オーステナイト系ステンレス鋼	鋼に18%程度のCrと8~12%のNiを添加したもので、延性およびじん性に富み、また耐食性、加工性に優れるため、化学工業をはじめ建築用、家庭用など広く使われている。
か	拡散係数	拡散に関するFickの法則に現れる比例係数で、拡散の速さを規定する。
き	吸着活性度	本報告書では、固体表面の気体原子の化学吸着させやすさ、の意で用いている。
	吸着	気相または液相中の物質が、接する他の相(液相または固相)との界面において、相内部と異なる濃度を保って平衡に達する現象。 [1]
ぎ	凝着	本報告書では、摩耗の原因の一つとしての意味を持つ。特に金属に代表される結合の方向性が弱い原子の集まりにおいて、表面がきれいな状態でしゅう動すると、材料同士が真実接触部でくっついてしまう現象。
こ	転がり疲れ	転がり接触を繰り返すうちに、表面の一部にき裂が入ったり、はく離が生ずる損傷形態の総称。代表的なものに、転がり軸受のフレーキング、歯車のピッチングやスポーリングなどがある。 [1]
	光電子スペクトル	XPSによって測定される、放出電子のエネルギーの分布
さ	酸化摩耗粉	一般に金属が著しく酸化された微細な摩耗粉。

	用語	定義
さ	算術平均粗さ Ra	表面の粗さ(凹凸)の大きさを表すパラメータの一つ。機械加工した部材表面の粗さの大小は、一般に Ra の値の大小で表される。
	最大高さ Rz	表面の粗さ(凹凸)の大きさを表すパラメータの一つ。表面上に存在する粗さの突起の高さを示す
し	真実接触部	二つの物の平面同士を接触させた場合に、見掛けの接触面の中に点在する本当に触っている部分。物の表面には微細な凹凸が必ずあり、その部分が優先的に接触するために生じる。真実接触部の見掛け接触面に対する割合は、容易に 1/1,000 以下になる。
じ	磁気流体シール	磁性流体が磁氣的に固定される性質を利用し、空気などのガスの通過を不可能にしたシール。
	自己潤滑性	潤滑剤を必要とせず、その材質自体が摩擦と摩耗の抑制機能を有すること。
	軸受鋼	転がり軸受の鋼球、ころ、軌道輪に用いられる鋼で、硬さ、降伏応力、じん性、耐摩耗性、疲れ強さに優れる。
す	ステライト	コバルトを主成分とし、クロム、タングステンなどを含む合金。組成範囲は広く、クロム 25~32%、タングステン 5~20%、炭素 0.5~3% がふつうである。硬質で耐摩耗性があり、高温酸化に耐える。
	水素脆性誘起フレーキング	本報告書では、水素が浸入することによる鋼の水素脆化によって誘起されるフレーキングの意。
	水素化物(アランとスタンナン)	水素とほかの元素との二元化合物(アランはアルミニウムの水素化物、スタンナンはすずの水素化物)
	水素チャージ	固体内部に、人為的に水素を注入すること。
せ	接触電気抵抗	接触している2面間の電気抵抗。フレッチング試験においては摩擦面の酸化や酸化摩耗粉の介在で大きな値を示すことがある。
	接触面間分離電圧	接触面間の接触電気抵抗、または接触面間の非接触時間割合を電圧に置き換えて評価したもの。無潤滑下で測定値が高ければ、絶縁性の表面膜の形成または摩耗粉の介在が推定される。
	遷移金属	本報告書では、d軌道電子に空位が存在する周期律表上の第 3 族から第 10 族(旧表記の IVa 族から VIII 族)を指すものとする。
だ	ダングリングボンド	結晶表面において結合する相手をもたない不對結合手(非結合軌道)。
て	転移膜	樹脂材料が摩擦相手面の上に移着し、形成された薄膜のことを指す。PTFE 等の樹脂材料の場合、一般に転移膜が相手面上に形成することで同種材間において摺動が行われる状態となり、その結果摩擦摩耗が抑制される。

	用語	定義
て	転走トラック	本報告書では、転がり疲れ試験においてディスク表面上をボール表面が転がり接触する軌道の意。
と	トライボケミカル生成物	摺動面における物理化学反応による生成物。摺動により加えられる物理的なエネルギーと、摺動面材質の化学反応の相互作用により生じる。
	トライボロジー	摩擦、摩耗、潤滑など、接触摺動部で生じる諸現象に係る科学と技術の学際的分野
ど	ドロップレット	アークイオンプレーティング法において陰極点から陰極材料のドロップレット(サブミクロンから数十ミクロン程度の大きさ)が放出され、膜に付着すると膜質が低下する。
ね	熱運動	物質構成粒子の微視的な内部運動。熱運動のエネルギーの平均レベルを定義するものが温度である。
は	白色組織	白相。鋼を過酷な条件で摩擦や繰返し転がり接触させたときに生じる白色の相。
	ハステロイ	Ni 基耐熱合金。組成は Ni 54.5-66.5%、Mo 15-30%の他に Co、Fe、Cr、W 等を含む。高温において機械的強度が高く、しかも耐酸化性に富んでいる。成分により、酸化性、還元性の両環境に耐えるものもある。
ひ	比摩耗量	固体表面から摩耗した体積(単位 mm ³)を、垂直荷重(単位 N) 滑り距離(単位 m ないし mm)で除した値。異なる条件での摩耗量を比較する際によく用いられる。
ぴ	ピン・オン・ディスク試験	回転する円板試験片の表面にピン試験片を押し付けて滑り摩擦試験を行う試験法。
ふ	フレッチング摩耗	接触する2つの固体表面において接線方向の微小な相対変位が繰り返されたときに生じる表面の損傷。機械部品の接合部等、外見上は滑りがないと思われる部分でも、振動によって微小な変位が繰り返されこの損傷が生じることがある。鋼の場合は赤褐色の酸化摩耗粉を生じる。
	不動態膜	金属表面に形成された金属酸化物からなる皮膜。ステンレス鋼の場合、酸化クロムを主成分とする不動態膜が表面に形成され、これが内部を腐食や酸化から守り、ステンレスに耐食性を与えている。
	フッ素ラジカル	PTFE 分子中のフッ素と炭素の間の結合が破断することにより生じる、不対電子を持ったフッ素原子。PTFE と金属表面との間の摺動により生じたフッ素ラジカルの多くは、金属表面と反応しフッ化金属を形成する。

	用語	定義
ふ	フォース・ディスタンス・カーブ測定	原子間力顕微鏡を用いた、固体の表面特性評価法の一つ。探針と固体表面の間に働く力を、探針と表面の距離に対しプロットすることで、固体表面の凝着特性を評価する。
	フレーキング	転がり軸受の軌道輪や転動体の表面が、転がり疲れによってうろこ状にはがれる現象。
ぶ	プラズマCVD法 (PCVD)	真空容器中で、所定のガス(DLCの場合、炭化水素ガス)を高周波放電によりプラズマ化し、電極上に置かれた基板上に炭素や水素を蒸着させて薄膜を形成する方法。
	プローブ顕微鏡	先端を極めて鋭利に尖らせた探針(プローブ)を用い、対象物の表面をなぞることでその形状や特性を計測する顕微鏡。探針と表面間に生じる微少な力を検知することで表面形状を観察する物を、特に原子間力顕微鏡と呼ぶ。
へ	ヘルツ圧力	ヘルツの接触圧力。2物体が接触したとき、変形が弾性的であり、摩擦力は作用せず、接触部が物体の表面曲率半径に比べて十分小さく、物体が半無限体とみなせるとする仮定のもとで、ヘルツによって理論的に求められた接触圧力。
	平均自乗変位 m_{sdr}	本報告書では、変位の自乗平均値の意。
べ	ベーキング	固体を加熱してその表面の付着物を離脱させ清浄にする方法。
ぼ	ボール・オン・ディスク試験	回転する円板試験片の表面にボール試験片を押し付けて滑り摩擦試験、ないしは転がり摩擦試験を行う試験法。
ま	摩擦界面	本報告書では、トライボロジー現象に関与する固体表面近傍の、固-固、液-固、気-固、気-液などの境界面の総称として用いている。
	SUS440C	マルテンサイト系ステンレス鋼。焼入れにより硬化するので、高強度、耐食・耐熱性が必要な機械部品、例えばタービンプレード、シャフト、ノズルなどに使用される。炭素量が少ない方が耐食性が高いが、炭素含有量の多い方が耐摩耗性が優れる。
	膜厚比	潤滑された2面の自乗平均粗さの合成値(自乗平均平方根値) σ と、2面を平滑と仮定したときの理論的最小油膜厚さ h_{min} との比 $\Lambda = h_{min} / \sigma$ 。一般に、 $\Lambda < 1$ では固体同士の直接接触が絶えず起こり、 $\Lambda > 3$ ではほぼ完全な流体膜が生じて固体同士の接触は起こらない。
	摩擦係数	本報告書では、動摩擦係数を意味し、摩擦力を垂直荷重で除した値。

	用語	定義
ま	摩耗	しゅう動(滑り)や転がりによって、物の表面がだんだんと減っていく現象。その原因は、凝着、切削(削り取り)、疲労、腐食などに大別される。
め	メニスカスカ	本報告書では、固体の接触界面で水蒸気が液滴となって凝縮し、これによって固体間に生じる付着力の意。
も	モネル	Ni60～70%、Cu26～34%に少量の Fe、C、Si、Mn、Al、Ti などを加えた、高強度で耐食性、耐熱性に優れた Ni-Cu 合金。Ni を多く含むため高価である。
り	律速	化学反応などの動的過程がいくつかの段階によって構成されているとき、そのうちのある過程が全過程の進行を実際上支配すること。
わ	ワイブルプロット	本報告書では、確率変数を横軸にとって累積分布関数を図示するとき、関数がワイブル分布である場合に直線となるように縦軸を定義した図を用いて図示する意。

参考文献

- [1] 日本トライボロジー学会編、トライボロジー辞典、養賢堂、1995

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となることを目指し「エネルギーイノベーションプログラム」（添付資料）が制定された。本事業は、その「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として実施する。

燃料電池及び水素技術は、上記の目的達成に向けたキーテクノロジーとして、その実用化への期待が高い。また燃料電池の導入・普及による水素エネルギー社会の実現により我が国のエネルギー供給の安定化・効率化、CO₂の排出半減、都市、地域の環境問題の解決に大きく貢献するという意義がある。第3期科学技術基本計画（2006年3月）においては「先進燃料電池システムと安全な革新的水素貯蔵・輸送技術」が戦略重点科学技術として選定され、新・国家エネルギー戦略（2006年5月）では燃料電池自動車に関する技術開発の推進が記され、経済成長戦略大綱（2006年7月）において運輸エネルギーの次世代技術開発が重点分野として位置付けられている。2007年3月のエネルギー基本計画、次世代自動車・燃料イニシアティブ（2007年5月）においても燃料電池及び燃料電池普及のために必要となる水素技術開発の重要性が述べられ、さらには、Cool Earth 50－エネルギー革新技術計画において定置用燃料電池、燃料電池自動車及び水素製造・輸送・貯蔵が位置付けられている。また、環境エネルギー技術革新計画（2008年5月）においては燃料電池を低炭素社会実現に必要な技術として位置付け、低炭素社会づくり行動計画（2008年7月）では、2020年～2030年に定置用燃料電池の本格普及を目指している。2010年6月のエネルギー基本計画では、低コスト化を進めて、燃料電池普及による天然ガスシフトを推進し、新成長戦略（2010年6月）では、日本がイニシアティブを取り、国際標準化を推進することとしている。更に日本再生戦略（2012年7月）においては、燃料電池自動車などの次世代自動車について世界市場を獲得するために、他国を圧倒する性能・品質を実現し、世界的な潜在市場の掘り起こしを図ることとしている。燃料電池システムの大規模な導入・普及に向けて、現在、産学官挙げて技術開発に積極的に取り組んでいるところであるが、燃料である水素を液化又は高圧化した状態で輸送・貯蔵する等水素を高いエネルギー密度で取り扱う場合の水素物性については、いまだ世界的にも知見の集積が乏しく、特に、これらの環境下における容器や機器で使用される材料の水素脆化（水素の吸収によって金属材料が脆くなる現象）のメカニズム解明は、水素を長期間、安全に利用するために早急に確立しなければならない重要な基礎的かつ高度な科学的課題である。また、同基礎的かつ高度な科学的課題に対し、産業界各社が自ら活動・対応するだけでは、効率的なブレイクスルーは見込めず、研究進展にも時間を要すると考えられる。

そこで、産学を問わず有力な研究者を結集して、国費を元に、積極的に研究開発環境を整

備し、必要な研究開発を強力に推進することにより、本分野においても効率的かつ短期間に集中して仕上げるのが可能となり、その結果、産業界支援を有効に行うと共に、産学共有・共通の知的財産を形成とすることが可能になると考えられる。また世界に先駆けて、水素関連技術の掌握に繋がる基礎的研究や評価技術の確立等を行うことは、国際市場においても我が国産業界が先導的役割を果たすこととなり、さらに我が国経済力を向上させることに繋がる点で非常に有効であると考えられる。

そこで、平成 18 年度から平成 24 年度までの 7 年間にわたり、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）として「水素先端科学基礎研究事業」を実施することとし、水素物性把握や水素環境下での材料特性把握等基礎研究を進展させ、水素エネルギー社会構築に向け、燃料電池を広く一般社会へ円滑に普及させるための基盤整備を行う研究開発を行うこととした。本事業は基盤研究を通じて上記エネルギー施策制度の目標達成に適合するものである。

本事業は水素社会における安全性確保のため、水素エネルギー技術の構築のための公益性の高い基礎データの収集に重点を置いている。水素の安全利用に資するデータ取得には多大な労力と投資が必要であり、規制合理化の取り組みを民間負担で実施するには限界が有り、公的機関の関与による研究が不可欠である。さらに、世界的にも計測実績のない高圧水素物性測定や、高圧水素環境下における各種材料特性を調べることは、国際競争力を高め、かつ当該分野の国際貢献に繋がる。また、NEDOの他の水素関連事業（「地域水素供給インフラ・社会実証」「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業」）と連携を図ることで、産業界全体として効率的な技術開発につなげることが可能となる。このような観点から、NEDOの関与は必要であり、内外の動向をより明確にして、機動的な計画運営により情勢変化に対応していくことが必要と考えられる。

1.2 実施の効果（費用対効果）

当該事業を実施することにより、2025 年の FCV の市場規模は 6 兆円（FCV 価格を 300 万円、保有台数を 200 万台として算出）と算出しており、燃料電池自動車の市場形成に貢献することが期待されている。これは、本事業により水素ステーションに低コスト材料が使用できるようになり、水素ステーションの低コスト化に寄与し、民間団体である燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）が平成 22 年 3 月に発表した「FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ」（I-7 頁参照）：2025 年時点で FCV 累計 200 万台程度、水素ステーション 1000 箇所程度の目標達成に貢献できると考えられるからである。このシナリオにおいて、2015 年が FCV の一般ユーザー普及開始を目指す年、2025 年が FCV ・ステーションの自立拡大開始の年として、位置づけられており、2025 年には、FCV 累計 200 万台程度、水素ステーション 1000 箇所程度のシナリオが示されている。同シナリオでは、2015 年の普及開始に向けて 2006～2014 年までの間の技術課題の解決と規制見直しの推進が提示されており、本事業は当該シナリオを実現するための基盤研究としてのみならず、水素中で使用する材料における水素脆化等の課題解決および規制見直しのための基礎データ提供を通じて産業界に貢献することが期待されている。また、2015 年の普及開始に先駆け、平成 23 年 1 月、自動車メーカー及び水

素供給事業者 13 社が FCV の国内市場導入に向けて共同で取り組むことに合意し、共同声明を公表。声明においては、2015 年に自動車会社が FCV 量産車を販売すること、エネルギー事業者が 4 大都市圏を中心として FCV 量産車の販売台数の見通しに応じて必要な規模（100 箇所程度）の水素ステーションを先行的に整備することを目指すことが示された。

一方、燃料電池・水素は「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」（平成 20 年 3 月）において、世界全体の温室効果ガスの排出量を現状に比して 2050 年までに半減するという長期目標を達成するためのエネルギー分野における 21 の革新的技術開発の中に選定されており、温室効果ガスの削減への貢献についても期待されている。

このような研究開発投資がもたらす効果として、燃料電池の導入・普及は、省エネルギー効果、環境負荷低減効果、エネルギーの供給多様化、石油代替効果、分散型電源としての利用、産業競争力強化と新規産業・雇用の創出が期待される。

本事業の開発予算を別紙 表 I 1. - 1 に示す。平成 24 年度までの予算総額は、約 93 億円であり、この内、特に平成 18、19 年度の当初 2 年間では、高圧水素の物性把握や高圧水素環境下における材料特性把握のための実験施設や機械装置整備等に充当し、研究推進環境を充実させた。ご参考として委託先別ごとの予算推移を表 I 1. -2 に示す。産業技術総合研究所を九州大学に誘致し、九州大学を拠点とした研究開発を行うため、投資は九州大学（約 40%）、産業技術総合研究所（約 50%）に集約した。同様に水素脆化等に係る基本原理の解明と水素社会実現に向けた技術基盤の確立を目的として、九州大学に国内外より研究者を結集し、世界的研究拠点として先端的な基礎研究を推進した。また平成 22 年度より、これまでの基礎研究成果を実用化に結びつける研究開発テーマを公募し、開発をスタートさせた。（共同研究。岩谷産業：高圧水素プレクーラー用等高度材料の特性評価。共和電業：高圧水素ガス用ひずみゲージの開発とひずみゲージ箔材の電気抵抗に及ぼす影響の解明。日本合成化学工業：水素に対して耐性に優れた適用材料の研究開発。）

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

燃料電池を含む新エネルギー技術は、科学技術基本計画(2001 年 3 月閣議決定)、エネルギー基本計画（2003 年 10 月閣議決定）等における重点分野としても位置付けられ、特に燃料電池については、燃料電池実用化戦略研究会（経済産業省資源エネルギー庁長官の私的研究会、1999 年 12 月設置）において「固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略」が策定され、産学官が一体となって燃料電池実用化のための技術開発等に積極的に取り組むべきことが提言された。また、2002 年 5 月には、内閣官房に内閣府及び関係省庁の局長級で構成される「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」が設置され、燃料電池の安全性の確保を前提とした燃料電池に係る 6 法律 28 項目の関連規制の包括的な再点検が関係省庁の緊密な連携のもとで実施される等、燃料電池の新技术開発と共に、規制・技術基準の整備及び標準化の推進の重要性が認識され、官民挙げてその整備が進められている。

このように、官民挙げて燃料電池の導入・普及に積極的に取り組んでいるところであるが、燃料である水素を液化又は高圧化した状態で輸送・貯蔵する等水素を高いエネルギー密度で

取り扱う場合の水素物性については、いまだ世界的にも知見の集積が乏しく、特に、これらの状態における容器や機器で使用する材料の水素脆化（水素の吸収によって金属材料が脆くなる現象）のメカニズム解明は、水素を長期間、安全に利用するために早急に確立しなければならない重要な基礎的科学的知見である。

2.2 事業の目的

燃料電池及び水素技術開発の進展により、更に高い圧力の圧縮水素、液体水素等、より多くの水素を貯蔵・輸送するための水素貯蔵容器・材料の普及が見込まれている。また、これに伴って、さらに高圧化した場合の安全性等を確保しながら、低コストで、長期使用できる材料が求められてきた。NEDOが公表しているNEDOロードマップ2010年度版(I-8)では2020年頃の普及期において、70MPa水素ステーションのコスト目標を1.5億円(300Nm³/h)、水素供給コストは約60円/Nm³、また車載水素貯蔵容器コスト目標を数10万円/台(水素5kg)程度とそれぞれ設定している。また低コスト化を実現するためには、規制見直しによる使用可能鋼材の拡大といった材料に関わる課題が挙げられている。この課題を解決するためには液化・高圧化した状態における水素物性の解明及び液化・高圧水素環境下における材料の水素脆化の基本原理の解明及び対策検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を基本とする基礎研究が不可欠と考えられている。

さらに、近年、当該分野における我が国の国際競争力確保のためには、水素社会構築に向けた標準化に必要なデータを取得し、世界に先駆けた高度な国際標準提案を行う必要性も高まってきた。このため、高圧水素や液体水素などを利用する燃料電池自動車やインフラなどでの関連機器で使用する材料の試験データ取得や基礎的なメカニズム解明が強く望まれている。

そこで本事業では、水素脆化に係る基本原理の解明及び対策を実施し、高度な科学的知見の集積及び水素利用技術の確立に資するデータの取得を行い、水素社会到来に向けた基盤整備を行うことを目的に、必要となる具体的な研究開発を行うこととした。それにより、水素の安全利用が可能となり、水素ステーション等での基盤整備が推進される。

2.3 事業の位置付け

NEDOでは、「水素安全利用等基盤技術開発事業」(平成15年度～19年度)において、水素の安全性に係るデータの取得に基づく安全技術の確立、水素の製造・輸送・貯蔵・充填等に係わる技術開発を行い、関連する各機器について基本仕様を固め、性能において世界をリードできるレベルにまで到達させた。安全技術の確立は、「水素社会構築共通基盤整備事業」(平成17年度～21年度)に引き継がれ、燃料電池の大規模な導入・普及や技術レベルの進展に対応した既存規制の見直し等に資するための安全確認データの取得、国際標準の提案並びに製品性能の試験・評価手法の確立を、産業界との密接な連携のもとで実施している。

これらの動向や並行実施事業の進捗状況を踏まえ、来るべき水素エネルギー普及のための水素供給インフラ市場立上げ(平成27年/2015年頃を想定)に向け、水素製造・輸送・貯蔵・充填に関する低コストかつ耐久性に優れた機器及びシステムの技術開発、要素技術開発、次世代

技術開発及びシナリオ策定、フィージビリティスタディ等を行い、水素エネルギーの導入・普及に必要な一連の機器及びシステムに関する技術を確立することを目的として、「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」（平成20年度～24年度）を推進中である。

当該「水素先端科学基礎研究事業」（平成18年度～24年度）では、水素物性等に係る基礎的かつ高度な科学的知見の集積を行い、水素社会到来に向けた基盤整備に資することを目的に、液化・高圧化した状態における水素物性の解明並びに液化・高圧化による材料の水素脆化に関する基本原理の解明及び対策検討など、根本的な現象解析を実施中である。水素中で使用する材料の水素脆化等の課題解決を計りながら、実証研究や基準・標準化に関する事業と連携を図りながら推進することにより、燃料電池の実用化・普及展開及び国際競争力の確保に資するものである。

加えて、「水素貯蔵材料先端基盤研究事業」（平成19年度～23年度）では、高性能かつ先端的水素貯蔵材料開発に必要な水素貯蔵に関する基本原理の解明及び材料の応用技術に必要な基盤研究を実施し、「水素先端科学基礎研究事業」と「水素貯蔵材料先端基盤研究事業」によって基礎固めを行うことにより、水素供給インフラを支える材料、機器及びシステム開発に関するブレイクスルーに繋がっている。

一方「水素先端科学基礎研究事業」で得た基礎研究・材料評価データは「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」と連携し、鋼種拡大のための材料評価データを整備し、規制緩和を推進するとともに、低コスト材料を評価し、特認取得、規制合理化に貢献した。また、「地域水素供給インフラ技術社会実証」（平成23年度～27年度）と連携し、長期間使用した水素ステーション材料の評価を行い、残存寿命などのデータ取得が実施できた。この「地域水素供給インフラ技術社会実証」を実施しながら商用ステーションの総合実証を行い、投資判断、課題の抽出・対策、工期短縮（スムーズな立ち上げ）に成果を活用し、2015年に向けた水素ステーションの先行整備（100箇所程度）を進めていく。

また、世界に目を向けた場合のFCV・ステーション技術開発動向について日本の位置づけ、技術的な開発動向等については以下のような状況である。

○FCV 車載用水素貯蔵技術

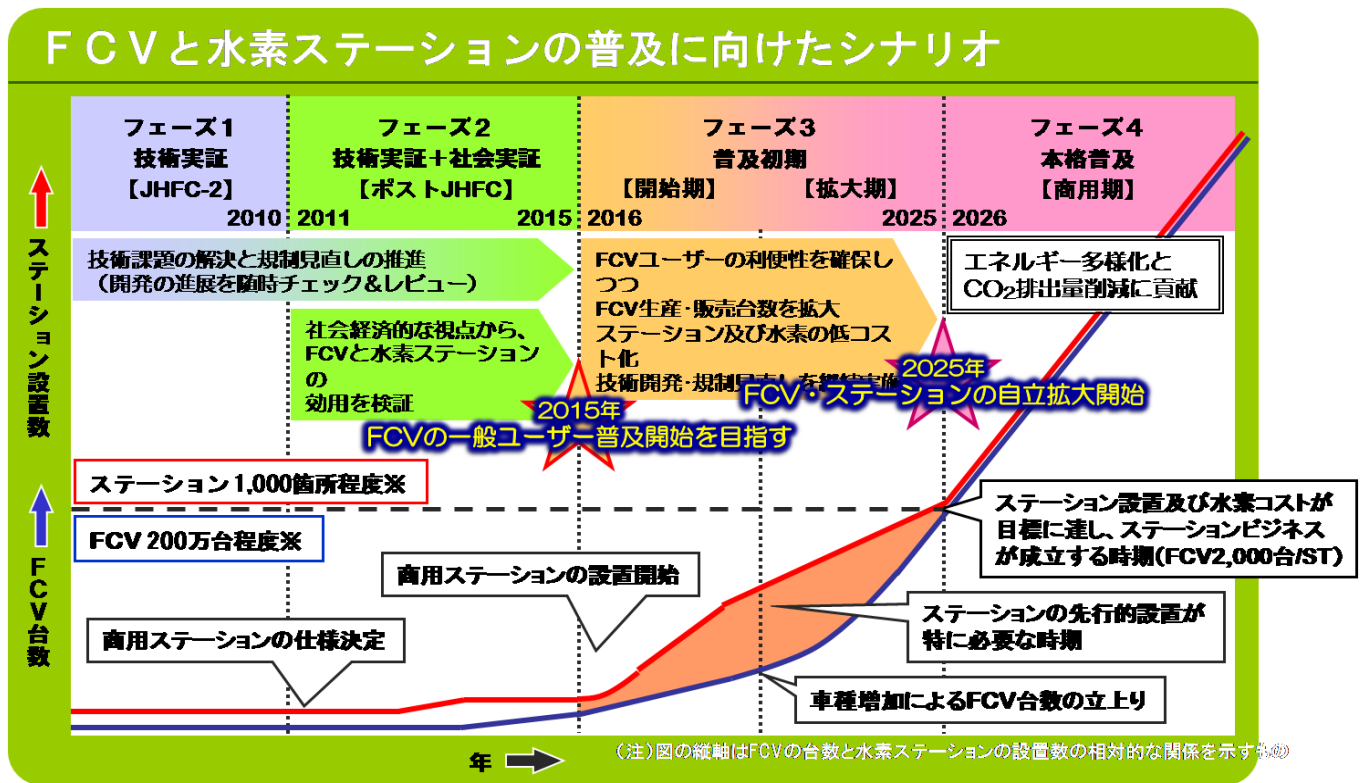
- ・ 高圧水素ガス貯蔵が主流。1回の充填による走行距離を延ばすため、水素充填量を5kg/回とする。そのためには、70MPaの高圧化が必要となる。

○水素供給インフラ技術

- ・ FCVの水素貯蔵の方向性に合わせ、水素ステーションも高圧ガス充填が主流。70MPaの水素を供給する高圧ガス充填設備が必要となる。
- ・ 充填技術では、ガソリン車並みの利便性を求めることから、3分間で5kgの水素を充填する技術（例えば-40℃のプレクール技術等）が要求される。
- ・ FCVへの水素供給に関する法整備がこれまで行われてこなかったが、大容量圧縮機による直接充填、通信充填（FCVの車載水素容器の状態をステーションに逐次伝えて充填）に関する規制を整備中。
- ・ 北米（特に米国）、欧州（特にドイツ）も日本と同様の技術開発動向で、日本としては、国際基準調和を積極的に推進している。

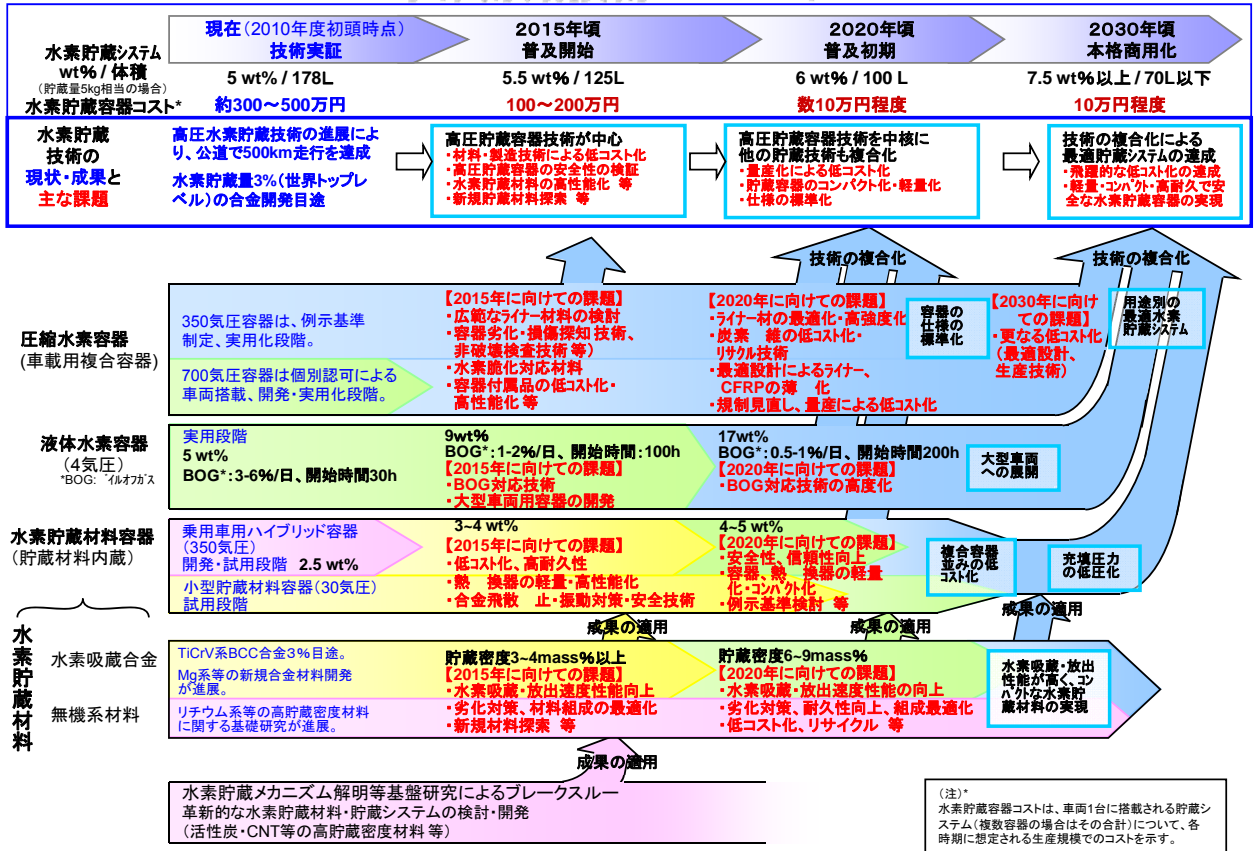
次頁以降に「燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）」によるシナリオ、「NEDOロードマップ2010年度版 水素製造・輸送・貯蔵技術ロードマップ、水素貯蔵技術ロードマップ」を添付した。

「燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）」によるシナリオ



※前提条件:FCVユーザーのメリット(価格・利便性等)が確保されて、順調に普及が進んだ場合

水素貯蔵技術ロードマップ



別紙

表 I 1. - 1 水素先端科学基礎研究事業 開発予算 (年度別推移)

(単位: 億円)

金額 億円	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度	合計
⑤シミュレーション	0.2	0.3	0.4	0.7	0.2	0.0	0.0	2
④トライボロジー	2.2	2.0	3.7	1.8	0.8	0.9	0.9	12
③高分子材料	0.0	0.1	0.1	2.8	2.3	1.3	1.3	8
②金属材料	6.7	5.5	8.4	9.0	5.2	3.6	4.6	43
①水素物性	1.8	2.1	3.7	3.1	1.7	1.3	0.9	15
共通設備	5.3	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13
合計	16.2	17.9	16.3	17.4	10.2	7.1	7.6	92.7

表 I 1. - 2 水素先端科学基礎研究事業 開発予算 (委託先別年度推移)

	委託先名	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度	事業期間全体
委託	国立大学法人九州大学	708,109,091	1,089,693,498	484,737,163	468,501,074	518,144,928	322,761,405	421,181,500	4,013,128,657
	(独)産業技術総合研究所	911,818,066	670,682,798	1,075,718,308	1,178,073,224	436,009,828	317,702,155	301,503,950	4,891,508,327
	(独)物質・材料研究機構	0	3,989,580	4,999,050	7,998,900	5,999,700	7,999,950	7,999,950	38,987,130
	国立大学法人京都大学	0	8,307,600	9,394,350	21,829,500	8,861,000	0	0	48,392,450
	国立大学法人佐賀大学	0	0	21,638,400	19,948,950	8,397,000	5,000,000	5,000,000	59,984,350
	国立大学法人長崎大学	0	7,887,600	20,595,750	19,047,000	7,875,000	5,000,000	5,000,000	65,405,350
	学校法人上智学院	0	3,675,120	4,760,700	3,999,450	3,000,000	2,500,000	2,500,000	20,435,270
	学校法人福岡大学	0	997,500	997,500	998,550	109,000	0	0	3,102,550
	小計	1,619,927,156	1,785,233,695	1,622,841,220	1,720,396,648	988,396,455	660,963,510	743,185,400	9,140,944,084
	2/3 共同 研究	NOK(株)	0	5,324,550	10,053,750	15,884,400	7,353,150	9,881,200	8,470,700
日本合成化学工業(株)		0	0	0	0	4,427,500	13,937,000	10,087,000	28,451,500
(株)共和電業		0	0	0	0	8,754,900	7,361,200	2,964,500	19,080,600
岩谷産業(株)		0	0	0	0	7,945,000	15,724,100	0	23,669,100
小計		0	5,324,550	10,053,750	15,884,400	28,480,550	46,903,500	21,522,200	128,168,950
合計	1,619,927,156	1,790,558,245	1,632,894,970	1,736,281,048	1,016,877,005	707,867,010	764,707,600	9,269,113,034	

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本事業では、水素物性等に係る基礎的な研究を実施し、高度な科学的知見の集積を行い、水素社会到来に向けた基盤整備を行うことを目的に、次に示すような目標を設定し、必要となる具体的な研究開発を行うこととした。

- (1) 燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及、水素社会構築のためのインフラ整備に向け、「NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010」に記載された2015年普及開始段階での技術レベル*1を実現するために必要な水素物性・材料特性に係るデータ取得、材料劣化等の基礎的な研究及びメカニズム解明を行う。
- (2) 基礎的研究を踏まえ、水素環境下で長期使用できる材料又は劣化評価方法や運用方法などの提案を行う。
- (3) 自動車業界および水素インフラ業界が取り組んでいる水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題について「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」と連携し、2015年までに水素関連機器の鋼種拡大等が可能となるデータ取得・提供に貢献する。

(*1) 水素ステーションコスト：4億円（70MPa）～3億円（35MPa）
水素供給コスト：90円/Nm³

上記目標を達成するために行う具体的な研究開発項目は、下記の通り。

- ① 高圧水素物性の基礎研究
- ② 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究
- ③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究
- ④ 高圧水素トライボロジーの解明
- ⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究（平成22年度まで実施）

また年次に沿った事業全体としての中間目標及び最終目標は以下の通り。加えて、各研究開発項目毎に設定した中間目標及び最終目標は下記項目の通り。

(1) 中間目標(平成19年度末)

水素高圧状態下における水素の物性や水素機器材料中の水素挙動等基礎的メカニズム解明等に必要となる研究体制（人材招聘を含む）、研究設備や評価機器など研究環境を整備し、基礎的考察・評価を進めるための手法を検討・導出するとともに、当該分野における今後の研究開発の方向性等が有効である目処付けを行う。

(2) 中間目標(平成21年度末)

水素高圧状態下における水素の物性や水素機器材料中の水素挙動等基礎的メカニズム解明等に関し、具体的な試験、分析、解析、評価等を重ね、理論的考察を進めるとともに、科学的裏付けとなる検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・指針等内容を精査・強化する。

(3) 最終目標(平成 24 年度末)

燃料電池自動車や水素ステーションなど、高圧状態の水素を利用する際に重要となる、水素高圧状態下における水素の物性、水素を取り扱う容器や機器における材料の水素脆化やトライボロジーなど、水素が関わる現象や挙動の基礎的メカニズムなどを解明するとともに、基礎的な水素物性のデータベース構築など学術的な基盤を確立し、関係産業界が水素を利用する際の技術の信頼性向上や安全性の確立に資する。

1.1 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」

(1) 中間目標(平成 19 年度末)

PVT データ、粘性係数、物質に対する水素の溶解度等水素物性に関する測定環境を整備し、精度良く計測できる手法(例えば、温度、圧力および密度測定装置用シンカーの校正等)を検討・導出する。

(2) 中間目標(平成 21 年度末)

PVT データ、粘性係数、物質に対する水素の溶解度等水素物性(平成 20 年度から熱伝導率を追加)について、具体的な試験、解析、評価を重ね、その有効性について、理論的考察を進めるとともに、測定精度や信頼性向上に向けた検討に基づき、校正技術を確立する。

(3) 最終目標(平成 24 年度末)

PVT データ、粘性係数、熱伝導率、比熱、物質に対する水素の溶解度等水素物性について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素物性データベースを纏め、関係産業界に提供するとともに、更なる測定精度や信頼性向上のための校正技術を纏める。

1.2 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究」

(1) 中間目標(平成 19 年度末)

高圧又は液化水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムを解明するための試験・分析・解析環境を整備し、基礎的考察や評価を進めるための手法(例えば、材料中の水素濃度測定法やき裂先端近傍の組織・強度測定法等)を検討・導出する。

また、液化・高圧化状態の水素に曝される材料、部品等の加工(成形・表面修飾)等の影響について、考察・評価を進めるための具体的な試験や分析等に必要となる環境を整備

し、例えば、ステンレス鋼、低合金鋼並びに部品・部材等加工品における水素侵入特性や、加工品に生じる加工ひずみや欠陥の差異が材料疲労強度に及ぼす影響について明らかにする。

(2) 中間目標(平成 21 年度末)

高圧または液化水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムを解明するために、具体的な材料に対する各種試験、分析、解析、評価等を重ねるとともに、水素脆化の基本原理に関する考察を深める。また、発生した現象を科学的に裏付ける検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・利用のための管理指針等の内容を精査・強化する。

また、液化・高圧化状態の水素に曝される材料、部品等の加工（溶接等）プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、例えば、溶接材の疲労強度に及ぼす水素の影響について明らかにするとともに、炭素鋼のような低コスト材料における水素の影響評価手法について検討・導出する。

(3) 最終目標(平成 24 年度末)

高圧水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムについて、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータをもとに、水素環境下における組織・強度変化予測手法や疲労き裂進展挙動予測手法をまとめ、関係産業界に提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

また、高圧化状態に曝される材料、部品等の加工（成形・溶接・表面修飾）プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記の科学的知見も含めて、水素材料データベース、最適水素材料探索指針をまとめ、関係産業界に提供するとともに、材料劣化判断・健全性評価法や水素用機械要素設計法等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資することに加え、規制見直し、使用材料拡大、国際標準化に貢献する。

さらに、水素関連機器に用いる材料内の水素拡散挙動・漏洩挙動を計算するシミュレーション手法を用いて、上記の実験・解析データに理論的根拠を与え、産業界に対して水素材料や水素機械の信頼性向上や安全性の確立のための科学的知見を可能なかぎり一般化して提供することを試みる。

1.3 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

(1) 中間目標(平成 19 年度末)

液化・高圧化状態の水素に曝される材料、部品等の加工（成形・表面修飾）等の影響について、上記 1.2(1) における科学的知見も鑑み、考察・評価を進めるための具体的な試験や分析等に必要となる環境を整備し、例えば、ステンレス鋼、低合金鋼並びに部品・部

材等加工品における水素侵入特性や、加工品に生じる加工ひずみや欠陥の差異が材料疲労強度に及ぼす影響について明らかにする。

(2) 中間目標(平成 21 年度末)

液化・高圧化状態の水素に曝される材料、部品等の加工（溶接等）プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記 1.2(2) における科学的知見も鑑み、例えば、溶接材の疲労強度に及ぼす水素の影響について明らかにするとともに、炭素鋼のような低コスト材料における水素の影響評価手法について検討・導出する。

(3) 最終目標(平成 24 年度末)

高圧化状態の水素に曝される高分子材料等の材料強度及び化学構造について、高分子材料の組成、長期使用及び加工、温度などの影響を評価し、基礎研究の結果に基づく知見も含めて、最適な耐水素高分子材料創製指針を纏め、関係する産業界に提供する。また、水素シールとして実使用される O リング等の性能評価法等、高分子材料の劣化や破壊に関する評価法や基礎的データを提供し、関係する産業界が水素を利用する際の高分子材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

1.4 研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」

(1) 中間目標(平成 19 年度末)

高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、滑り摩擦試験、フレッティング摩擦試験、摺動試験等トライボロジー基礎物性データを測定できる環境を整備し、精度良く計測できる手法を検討・導出する。

(2) 中間目標(平成 21 年度末)

高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な材料を用い、滑り摩擦試験、フレッティング摩擦試験、摺動試験等の試験、分析、解析、評価等を重ね、理論的考察を進めるとともに、発生した現象を科学的に裏付ける検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・材料利用のための設計指針等の内容を精査・強化する。

(3) 最終目標(平成 24 年度末)

高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを纏め、関係産業界に提供するとともに、高圧水素トライボシステムや使用する材料に関する設計指針や管理指針等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の摺動材料やシール材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

2 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の6つの研究開発項目について、研究を実施する。

研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」

研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」

研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」

研究開発項目⑤「材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究」（水素シミュレーション研究チーム）（平成22年度まで実施）

2.1.1 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」実施内容

平成18年度～平成24年度においては、高圧水素物性に関する以下の研究実施項目を行う。

- (1) PVTデータの測定装置の開発および状態方程式の作成(主に産業技術総合研究所側で実施)
- (2) 粘性係数の測定(主に産業技術総合研究所側で実施)
- (3) 熱伝導率の測定(主に九州大学側で実施)
- (4) 水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定(主に九州大学側で実施)
- (5) 水素物性データベースの研究開発(主に長崎大学で実施)
- (6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定(主に佐賀大学で実施)
- (7) 比熱の測定(主に産業技術総合研究所側で実施)

- (1) PVTデータの測定装置の開発および状態方程式の作成(主に産業技術総合研究所側で実施)

現在、高温、高圧域では信頼性の高い実測値が存在しないため、100MPa、500℃までの水素のPVT性質を測定し、これらを基に状態方程式を作成する。比熱やエンタルピー、エントロピーなどの他の物性値は、主にPVT性質を基にして作成した状態方程式から、熱力学関係式を用いて計算されるため、PVT性質は他の状態量を誘導するための基準値となり、非常に重要な性質である。信頼性の高い物性値を用いることは、機器の設計、シミュレーションの精度向上および、水素の商取引においても必要不可欠である。

PVT性質の測定は、バーネット式、定容積式、磁気式の異なる方法で測定を行う。領域が重なるところでは、クロスチェックが可能となり、実測値の信頼性向上が図れる。また、磁気式密度計の精度向上のため、密度の基準となるシンカーの校正技術を開発する。得られた実測値を基に状態方程式の作成を行い、測定領域の拡張とともに、状態方程式の適用範囲も拡張する。

<平成18～19年度>

- ① 100MPa、500℃まで水素の密度が測定可能なバーネット式PVT測定装置を開発する。このPVT測定装置に250℃恒温油槽を組み込み、温度調節を行う。バーネット法は体積の異なる2つの容器を連結させ、等温膨張によりPVT関係を求める方法である。一連の圧力測定の精度が重要なため、圧力レンジに応じて複数台の圧力センサーを設置し、重錘式圧力基準器との比較校正により圧力測定の絶対値を保証する。恒温槽を温度範囲により2つに分け、～250℃までは液体恒温槽式、250～500℃までを固体恒温槽とする。温度測定にも高い精度が要求されるので、交流測温ブリッジにより白金抵抗測温体の抵抗を測定し、ITS-90に準拠した温度測定を行うために、高精度の温度校正装置を導入する。

<平成 19 年度>

- ① 1100MPa、250°Cまで圧力、温度を変えて安全に測定ができるように、高圧水素 PVT 測定装置遠隔操作システムを導入する。
- ② 液体恒温槽で温度制御された条件下で 1MPa、250°C以下の PVT データの測定を行う。バーネット式は低圧で精度が非常によく、高圧でも相当精度のデータが得られる測定方法である。また、必要に応じて定容積法によるデータとの比較を行う。
- ③ 窒素ガスまたはヘリウムガスによる動作試験を行う。
- ④ 0.1～1 MPa、250°C以下の水素ガスによる PVT データの測定を行い、文献値と比較を行う。
- ⑤ 磁気式密度計(1)による測定データには、精度と正確さが保証されなければならない。特に、水素の密度を測定する際には、吸着の影響を排除するため、表面積の等しい2つのシンカー（シリコンとゲルマニウム）を導入し、これらのシンカーの密度を 10ppm の精度で校正する技術を開発する。さらに密度測定の不確かさを低減させるため、磁気浮上密度計測用荷重交換機構や磁気カップリングなどの要素技術を改良する（磁気浮上密度計測用非磁性高圧セル開発を含む）。また、バーネット式密度測定装置と音速測定(1)、比熱の測定(7)などで使用する熱物性測定装置の開発における装置設計において誤差要因の検討を行う。
- ⑥ 圧力計や温度計の精密校正方法を検討し、PVT 性質計測における不確かさ要因を評価する。
- ⑦ シンカーとして用いるシリコン単結晶の密度校正技術は既に確立しているため、ゲルマニウム単結晶の密度の精密校正技術を新たに開発する。
- ⑧ そのためにシンカーとして用いる質量 60g 程度の小型のゲルマニウム結晶の密度を 10ppm の精度で校正することが可能な固体密度校正システム（液中秤量システム）を開発する。
- ⑨ また、高圧水素の PVT 測定に使用する磁気式密度計の精度維持のため、アセトン洗浄に使用する磁気浮上密度計用低温トラップ及び磁気浮上密度計用スクロール型真空ポンプを導入する。同時に、同密度計の精度及び信頼性向上のため、同密度計の測定値の信頼性検証の際に使用する密度標準液充填に使用する磁気浮上密度計用チューブポンプを導入する。また、PVT 測定装置における高分解能圧力センサーは、高頻度で6ヶ月～1年程度使用すると、安定した専用台に固定された圧力基準器によってその精度を確認し、校正作業を行う必要があるため、圧力基準器据付台を導入し、上記の確認及び校正作業を行う。
- ⑩ なお、本研究実施項目に関連して、平成 19 年 5 月にギリシャで予定されている「第 11 回プロダクト&プロセスデザインに関する物性及び相平衡国際会議」において、水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集、また、平成 20 年度に設計を開始する磁気式密度計の技術情報を収集するため、ドイツの Rubotherm 社で現地調査を行う。

<平成 20 年度>

- ① 平成 19 年度に装置の健全性および測定原理確認のために実施した 1MPa までの水素、ヘリウム、窒素に関する物性測定の成果を踏まえて、100MPa、200°Cまでの水素の PVT データの測定を行う。
- ② 常圧から 100MPa、100°Cから 400°Cまでの水素の PVT データの信頼性を確保するため、定容積法 PVT 測定装置の開発を行なう。当初予定は、500°Cまで測定可能な装置を開発する予定であったが、KHK の審査において、427°Cまでしか認められないことが判明したため、平成 20 年度目標を 400°Cまでに修正する。平成 20 年度は、100MPa までの高圧化の準備段階として、まず 1MPa 以下、400°Cまでの装置を開発し、高圧化の際の問題点を抽出する。その際、加熱炉の温度均一性の確認を行うために赤外面像システムを導入する。
- ③ 平成 19 年度までの研究開発により、磁気式密度計の心臓部であるシリコンとゲルマニウムのシンカーの密度を 10ppm の精度で構成する技術の確立に目途がたった。また、100MPa の超高

圧下での磁気浮上密度計測用荷重交換機構や磁気カップリングなどの要素技術を初めとして、周辺技術の開発にも目途がたったため、予定を1年早めて、100MPa、250°CまでのPVTデータを測定可能な磁気式密度計の導入を開始する。これにより、PVT測定におけるトレーサビリティ確保し、かつ高精度化測定が可能となる。磁気式密度計の早期導入と並行して、測定値の精度を評価するため、新たにシリコンおよびゲルマニウムシンカーを製作する。さらに、ゲルマニウムシンカーの高温における密度変化を評価するため、ゲルマニウム単結晶の熱膨張率測定を行う。

- ④ 平成19年度に製作した液中秤量システムを用いて、上記のシリコンシンカーおよびゲルマニウムシンカーの密度校正を行う。密度校正時の温度を正確に制御するため、温度制御用精密測温ブリッジおよび温度計校正用三重点保持装置を導入するとともに、密度の参照基準として用いる中空のシリコンシリンダーを製作する。
- ⑤ 磁気式密度計の二つのシンカーの荷重交換方法を検討するため、新しく磁気浮上密度計用圧力コントローラを導入した磁気式密度計用荷重交換システムを製作する。
- ⑥ なお、本研究実施項目に関連して、平成20年8月にフランスで予定されている第18回欧州熱物性会議において水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集を行う。

<平成21年度>

- ① 液体恒温槽を用いて、平成20年度に引き続き100MPa、200°C以下におけるPVTデータの測定を行う。窒素またはヘリウムによるPVTデータの測定を行い、装置定数の検定および装置の信頼性の確認を行うとともに、水素のPVTデータの測定を行う。そして、過去の実測値や状態方程式との比較を行い、データ評価を行う。また、平成20年度に開始した磁気式密度計の導入を完了する。さらに、真空時におけるシンカー質量の測定精度向上を図るため、磁気式密度計用ターボ分子ポンプを導入する。
- ② 100MPa、500°CまでのPVT測定が可能な高圧定容積法PVT測定装置の設計に着手する。
- ③ 校正用磁気浮上密度計の温度範囲拡張を行う。具体的には、真空断熱チャンバーおよび放射シールドを併用した固体恒温槽による温度制御システムを開発する。これにより250°CまでのPVT測定を可能にし、水素測定用磁気式密度計を校正するための基準流体のキャリブレーションを可能にする。
- ④ 本研究実施項目に関連して、平成21年6月にアメリカで開催される第17回米国熱物性シンポジウムに参加し、さらにNISTおよびUC Berkeleyを訪問して、水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集を行う。また平成21年9月にイギリスで開催される熱力学2009に参加し、水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集を行う。

<平成22年度>

- ① 目標とする最高圧力、温度範囲である100MPa、500°Cまでの測定を可能にするため、高圧定容積法PVT性質測定装置を開発する。また、平成21年度に導入した磁気式密度計により100MPa、250°C以下および、低圧仕様の定容積法PVT性質測定装置により1MPa、500°C以下におけるPVT性質を測定する。過去の実測値や状態方程式との比較を行い、データ評価を行う。バーネット法で測定したデータと重なる領域においてはクロスチェックが可能になり、データの信頼性が向上する。また、新しい実測値の取得により、ビリアル状態方程式の適用領域の拡張も可能になる。
- ② 産総研つくば既存の磁気浮上密度計を用いてアルゴン・ヘリウム等の基準流体に関してPVT性質を測定して値付けし、これらのサンプルを用いて平成21年度に導入した磁気密度計の校正を行う。
- ③ 本研究実施項目に関連して、平成22年10月に中国で開催される第9回アジア熱物性シンポ

ジウム(ATPC)に参加し、水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集を行う。

<平成 23 年度>

- ① 平成 22 年度に開発導入した高压定容積法 PVT 性質測定装置により、100MPa、500°Cまでの水素の PVT 性質を測定する。
- ② 磁気式密度計によるデータおよび定容積法による PVT 性質データを用い、状態方程式の適用領域を 100MPa、500°Cまでの拡張を行う。
- ③ 平成 23 年度 8 月にギリシャで開催される第 19 回欧州熱物性会議において水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集を行う。

<平成 24 年度>

- ① 99MPa、773K(500°C)までの水素の PVT 性質のデータを取りまとめる。
- ② 実測値に基づく状態方程式を完成し、主な熱力学性質(エンタルピー, エントロピー, 定圧比熱)を導出する。
- ③ 状態方程式の適用例として、容器の亀裂発生時における圧力変化を模擬した実験と本事業で開発された状態方程式による解析の比較を行い、状態方程式の実用性を検証する。
- ④ 平成 24 年 6 月にアメリカで開催される第 18 回米国熱物性シンポジウムに参加し、水素物性測定及び状態式構築に関する情報収集を行う。

(2) 粘性係数の測定(主に産業技術総合研究所側で実施)

水素の高压充填システムや流量測定システムの開発や設計には精度の高い粘性係数が必要とされる。100MPa、150°Cまでの範囲を超えた領域の粘性係数は、補外による推算値が用いられているため、実測データに基づく推算式が必要とされている。100MPa、500°Cまでの範囲で測定可能な細管式粘性係数測定装置を開発し、実測するとともに、温度、圧力に対する推算式を作成し、水素の基礎物性情報の一つとして提供することを目的とする。粘性係数を求めるには密度の情報が必要であるため、まず動粘性係数を測定し、PVT の実測データから得られる密度を用いて、粘性係数を求める。測定原理が全く異なる振動細線法による測定値との相互確認をすることでデータの信頼性を確保する。

<平成 18~19 年度>

- ① 高压水素粘性係数測定装置の設計・製作を行う。250°C以下の測定用に液体恒温槽を採用する。測定用細管は、内径 0.5mm 以下、長さ 500mm 程度とし、測定容器は 100MPa の耐圧仕様とする。

<平成 18~19 年度>

- ① 細管法による水素の粘性係数について、±5%の精度を確保するために差圧と流量の高精度計測方法を検討する。
- ② なお、本研究実施項目に関連して平成 19 年 6 月にメキシコで開催される「マイクロチャンネルに関する国際会議(ICNMM2007)」において、細管内の水素流動に関する速度および温度分布の測定法に関する情報収集、7月にカナダで開催される「日米熱工学合同会議」において、水素物性の測定法に関する情報収集を行う。

<平成 19 年度>

- ① 100MPa、250°Cまで圧力、温度を変えて安全に測定ができるように、高压水素粘性係数測定装置遠隔操作システムを導入する。
- ② 粘性係数測定用細管内径測定用システムを構築し、実測することにより細管内径の寸法およ

びその均一性を確認する。

- ③ 液体恒温槽で温度制御された条件下で、1 MPa、250°C以下の動粘性係数の測定を行う。
 - ・窒素ガスまたはヘリウムガスによる動作試験を行う。
 - ・0.1～1 MPa、250°C以下の水素ガスによる動粘性係数の測定を行い、既存の密度情報を用いて粘性係数に換算した後、文献値と比較を行う。

<平成 20 年度>

- ① 平成 19 年度に装置の健全性および測定原理確認のために実施した 1MPa までの水素、ヘリウム、窒素についての成果を踏まえて、100MPa、200°C以下の動粘性係数の測定を行う。
- ② 100MPa、200°Cまでの条件下で得られた水素ガスの動粘性係数を、密度情報を用いて粘性係数に換算し文献値との比較を行う。
- ③ 平成 21 年度以降に予定されている 500°Cまでの高温条件下の測定法に関する調査を行う。
- ④ 流量測定や圧力測定の校正技術の開発を継続して行う。その際、高圧水素の非定常流動状態の流量を測定するために、マスフローメータを導入する。
- ⑤ 本研究実施項目に関連して、8月にフランスで開催される第 18 回欧州熱物性会議において、粘性係数の測定法に関する情報収集を行う。

<平成 21 年度>

- ① 高圧水素粘性係数測定装置により 99MPa、200°Cまでの動粘性係数を測定し、従来密度が実測されていない領域では本プロジェクトで実測された密度の値を用いて粘性係数の算出を試みる。
- ② 細管法における差圧測定に関し超高圧までの高精度測定を検討しているが、流路内径の微小化および長さ確保の実現を試みる。さらに高圧水素粘性係数測定装置入口部に圧力調整弁を設置する改造を行い、測定中の圧力を安定化し変動を抑制する。
- ③ 超高圧条件では差圧測定の測定精度が低下する可能性を補うため、差圧測定を必要としない振動細線法粘性係数測定予備システムを構築する。
- ④ 本研究実施項目に関連して、平成 21 年 7 月にカナダで開催される第 20 回国際輸送現象シンポジウムにおいて、粘性係数の測定法に関する情報収集を行う。

<平成 22 年度>

- ① 平成 21 年度までに測定したデータと既存の実測データを基に推算式を作成した。
- ② 99MPa、500K(227°C)までの測定を行う。そして、実測データをもとにした推算式を充実する。
- ③ 平成 21 年度に構築した振動細線法粘性係数測定予備システムにより、1MPa 未満の試測定を行なう。
- ④ 本研究実施項目に関連して、平成 22 年 10 月に中国で開催される第 9 回アジア熱物性シンポジウム(ATPC)に参加し、粘性係数の測定法に関する情報収集を行う。

<平成 23 年度>

- ① 高圧水素粘性係数測定装置の改造を行い、99MPa、773K(500°C)までの測定を可能にする。
- ② 高温(500°C)条件下で気密を維持して石英細管を固定する取付法は平成 22 年度までに確立しており、これにより動粘性係数を測定し、従来密度が実測されていない領域では本プロジェクトで実測された密度の値を用いて粘性係数の算出を試みる。
- ③ 平成 23 年度 8 月にギリシャで開催される第 19 回欧州熱物性会議において粘性係数の測定法に関する情報収集を行う。

<平成 24 年度>

- ① 99MPa、773K(500°C)までのデータを取りまとめる。
- ② 実測データをもとにした整理式を充実する。
- ③ 平成 24 年 6 月にアメリカで開催される第 18 回米国熱物性シンポジウムに参加し、粘性係数の測定法に関する情報収集を行う。

(3) 熱伝導率の測定(主に九州大学側で実施)

熱伝導率は最も基本的な物性値であることに加え、水素エネルギーシステムにおける①貯蔵タンクへの急速充填の際における水素の温度上昇の推測、②水素ステーションにおけるプレクール能力の決定、③高温での運転が必要な固体酸化物形燃料電池の熱設計などに欠かせない情報となっている。本研究では高圧高温水素の熱伝導率測定に適した、非定常短細線加熱法を用いて高圧、高温域で信頼性の高い熱伝導率を測定するとともに、圧力、温度に対する整理式を作成する。その目的達成のため、熱伝導率測定装置を導入し、段階的に測定領域を拡張し、最終目標として 100MPa、500°C までの熱伝導率を測定する。

またこれまでの物性値情報の調査の結果、水素の異性体であるパラ水素とオルソ水素の濃度によって熱物性値が異なることが明らかになった。低温の水素を利用する際は、様々なパラ水素濃度の水素を利用する可能性が高いことから、パラ水素の濃度と熱伝導率の関係についての測定も開始する。

<平成 19 年度>

- ① 伝導率測定装置開発の設計データを得るために、水素熱伝導率予備実験システムを構築して予備実験を開始するとともに、数値シミュレーションを行う。なお、本研究実施項目に関連して、平成 19 年度中に清華大学（中国）の熱物性測定研究に関する現地調査を行う。

<平成 20 年度>

- ① パラ水素およびオルソ水素の濃度と熱物性値の関係を把握するため、パラ水素ガス発生装置を導入し、パラ水素濃度モニターおよびオルソ-パラ変換速度を測定するためのラマン分光計を導入する。
- ② 平成 19 年度の非定常短細線法における細線プローブ周りの温度と流れ場のシミュレーションおよび簡易実験による予備研究の成果を踏まえて、恒温制御システムを備えた 1MPa 以下、80K~400K の範囲の条件で測定が可能な細線法熱伝導率測定装置を設計製作し、導入することにより、パラ水素の濃度を変化させて熱伝導率を測定する。低温領域の温度調節に必要なため、液体窒素容器を導入する。
- ③ 熱伝導率測定用プローブの製作を高精度で迅速に行うために、極細線用抵抗溶接機を導入する。
- ④ 同時に 100MPa、500°C までの条件下の測定が可能な装置の開発・設計に着手する。
- ⑤ 本研究実施項目に関連して、平成 20 年 8 月にフランスで開催される第 18 回欧州熱物性会議、および 6 月にオーストラリアで開催される第 17 回世界水素エネルギー会議において、水素の熱拡散率および熱伝導率測定に関する技術情報の収集を行う。

<平成 21 年度>

- ① 1MPa、80K~350K までの熱伝導率測定を行う。
- ② パラ水素ガス発生装置により、任意濃度のオルソ-パラ水素について測定し、オルソ-パラ濃度と熱伝導率の相関を明らかにする。オルソ-パラ濃度にはパラ水素濃度モニターを用いる。
- ③ また、同時にラマン分光計によりオルソパラ変換速度の測定を試みる。

- ④ ラマン分光計の分光用測定セルを現状の大気圧から 1MPa まで耐圧を高め、グレーティング・フィルタを高密度に変更することにより分解能を高めるために改造する。
- ⑤ 100MPa、500°Cまでの熱伝導率測定を行うため、高圧水素熱伝導率測定装置の設計および製作を行う。測定容器内の圧力を精密に測定するため高圧水素熱伝導率測定装置用精密圧力センサを導入する。
- ⑥ 本研究実施項目に関連して、平成 21 年 6 月にアメリカで開催される第 17 回米国熱物性シンポジウムに参加し、さらに NIST および UC Berkeley を訪問して、水素の熱拡散率および熱伝導率測定に関する技術情報の収集を行う。

<平成 22 年度>

- ① 平成 21 年度に実施された任意のパラ水素濃度の水素についての測定で（1MPa、80K～350K までの範囲）、低温領域にてパラ水素とノーマル水素との差が観測され、150K 付近で最大 30% 程度の差があることを見出した。またラマン分光計によりオルソパラ変換速度の測定した結果、その変換速度は水素ガスが充填される容器の材質に大きく依存することを明らかにした。本年度は以下の課題を行う。
- ② 100MPa、500°Cまでの範囲でノーマル水素の熱伝導率を測定する。
- ③ ラマン分光計によりオルソパラ変換速度の測定を行い、変換速度と容器の材質の相関を検討する。
- ④ 本研究実施項目に関連して、平成 22 年 10 月に中国で開催される第 9 回アジア熱物性シンポジウムにおいて、水素の熱拡散率および熱伝導率測定に関する技術情報の収集を行う。

<平成 23 年度>

- ① 細線法熱伝導率測定装置を改造し、1MPa、室温から 773K(500°C)までの熱伝導率測定を可能にする。
- ② ラマン分光計によりオルソパラ変換速度と水素貯蔵タンク用材質との相関に関する測定を行う。
- ③ 平成 23 年度 8 月にギリシャで開催される第 19 回欧州熱物性会議において水素の熱拡散率および熱伝導率測定に関する技術情報の収集を行う。

<平成 24 年度>

- ① 99MPa、773K(500°C)までのデータを取りまとめる。
- ② 実測データをもとにした整理式を充実する。
- ③ オルソパラ変換速度と水素貯蔵タンク用材質の関係について温度との相関を測定する。
- ④ 平成 24 年 6 月にアメリカで開催される第 18 回米国熱物性シンポジウムに参加し、水素の熱伝導率測定および熱拡散率に関する技術情報の収集を行う。

(4) 水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定(主に九州大学側で実施)

水素ガスの物質への溶解度は、水素エネルギー要素技術の開発において重要である。水素の製造、貯蔵、利用システム技術において、その安全性、機能性、耐久性を評価する上で水素ガスの溶解度が必要であるが、十分に整備されていない。水素ガスは様々な材料・物質と相対するが、重工、自動車、機械、プラントエンジニアリング企業等からのニーズを踏まえて、高分子材料（ゴム、高分子電解質膜）、液体（純水、電解質溶液）にたいする溶解度を計測する。高分子材料に対しては、室温～70°C、大気圧～0.6MPa の範囲で計測する。液体に対しては、室温～70°C、大気圧～30MPa の範囲で計測する。

従来、高分子材料、たとえば高分子電解質膜への水素ガス溶解度に対しては、高分子電解質膜の両側に水素ガスの圧力差を与え、透過量を計測し、透過率 (P) のみを導出してきた。

透過率は一般に、 $P \propto c \times D$ 、すなわち溶解度 (c) と拡散係数 (D) の積と表すことができる。このことから透過率のみ計測しても、溶解度が大きいと、あるいは拡散係数が大きいと、あるいは透過が進むのか不明であった。溶解度、拡散係数を個々に計測し、どちらか支配的に透過率を決めるのかを見極めた上で材料開発指針を得る必要がある。

また従来のゴムに対する水素溶解度計測においては、ゴム試料の高圧水素雰囲気暴露、水素チャージ、その後の減圧操作、放出水素のカウンティングによる溶解度の定量化が進められてきた。しかしこの計測から付随して導出された拡散係数は、輸送プロセスを仮定した上での拡散係数であった。また、複雑な構造を有するゴム内のどのサイトに水素ガスが支配的に溶解するか不明であった。

そこで本研究では、NMR 原理を導入し、水素溶解度 (c) と拡散係数 (D) のその場同時計測を行い、水素の高分子材料に対する溶解過程を直接的かつ詳細に明らかにする。容器内に高分子試料、NMR センサーを設置し、水素ガス暴露し、NMR 信号を得る。この時の信号強度は溶解度に対応し、磁気的な摂動 (勾配磁場) を与えた際の信号強度は拡散係数に対応することから、その場で同時に高分子材料内の水素ガスの溶解度、拡散係数を計測することができる。また NMR 信号のスペクトル解析から、水素ガスが溶解するサイトを微視的に解明できる可能性もある。このような NMR 計測の特徴を活かして計測・整備された溶解度、拡散係数データは、今後の高分子電解質膜、ゴム材料の適切な開発指針を与える上で重要である。

なお、高分子電解質膜に対する水素の溶解度を含む透過性については、これを利用する燃料電池や水電解装置の性能に直接影響することから、メーカー内での計測も進んでいるようであるが、これまでに系統的にデータが開示されていない。本研究により高分子電解質膜に対する溶解度、拡散係数のデータを整備することで、国内の水素・燃料電池産業の裾野を広げることが期待できる。

液体に対する水素溶解度に対しては、高圧気液平衡セルによる水素溶解、その場溶液サンプリング、質量分析器による溶解度定量のシーケンスを導入にする。従来の高圧気液平衡セルによる水素溶解、圧力開放と気相体積変化を介した溶解度計測シーケンスに比べて本研究の方法では、水素溶解度に影響を与える液相に混入する不純物を監視でき、気相側の蒸気圧を補正することなく、より正確に液体に対する水素ガス溶解度を計測することができる。得られた一連のデータは、例えば水電解装置の実質的な効率を試算する上で、起動、停止の安全な操作を確立する上で役立つことができる。

<平成 18~19 年度>

- ① 溶解度装置は、圧力調整弁やバルブ、温度調節、及び遠隔操作に伴う制御機器などから構成され、要素点数が多い。特に、(1)溶解度が圧力に対して大きく変化するため、各圧力領域に対して適切な計測・分析装置の住み分けが必要となり、(2)密閉セルによる圧力・温度の調整→気液平衡の調整→その場サンプリング→前処理→質量分析装置による溶解度分析、など分析操作数も多い。安全で精度よく、効率的に溶解度を測定するには、装置の段階的な開発が必要となる。そこで 20MPa、40℃までの溶解度測定装置及び溶解度測定用水位監視システムを試作し、問題点を抽出する。特に、水と水素ガスを充填する高圧容器にはガラス窓を設け、セル内における水の流れ、水位とサンプリングポートの位置関係、攪拌作用の程度などを検証する。
- ② また、バルブ類の遠隔操作がノイズ等により誤動作することなく、信頼性よく作動するかどうかを評価する。同時に、正確なデータが準備されている低圧下の溶解度を試測定し、測定精度を評価するとともに、作業の効率性を検証する。このように試作機を使って問題点を抽出し、改良を重ね、平成 20 年度以降の「本」測定の基礎とする。

<平成 19 年度>

- ① 段階的に昇圧を試みる。この時、圧力を上げるとガス漏れが発生しやすいため、窒素ガス、ヘリウムガスなどを充填して漏れ試験を実施し、繰り返しに起因する不具合も含めて測定の安全性を確保する。安全性が確保された上で、1MPa程度の低圧域での水素溶解度の測定を開始する。また研究の結果、標準ガスの流動性制御によるガス濃度安定化及びサンプル水量の増加により、測定精度の向上が可能であることが新たに明らかになった。この結果を踏まえ、ガス流動性制御用のマスフローコントローラー及び大型の水蒸気除去システムの付加を行うことで、より精密な水素ガスの水溶解度測定に資する。さらに、来年度から同装置を用いて「水素が溶解した水に曝された高分子膜内の水素溶解度測定」の開始を計画している。そこで、これに先だって高圧液相ポンプを付加する改造を行い、予備実験を開始することで装置の最適化と研究手法の適正化が図られ、来年度の円滑な研究推進に資する。
- ② なお、本研究実施項目に関連して、平成19年6月にアメリカで開催されるFC会議において、水素関連技術に関する情報を収集する。また、高圧下の気液相の取り扱いに関連して、平成19年7月ドイツで開催の多相流体の国際会議(ICMF)及びチェコのThe Institute of Chemical Process Fundamentalsにおいて、11月にアメリカで開催される物理学会流体力学部門年会上において情報収集を行う。

<平成 20 年度>

- ① 核磁気共鳴(NMR)原理を応用して計測するため、水素ガスの高分子材料への溶解度を測定できる装置(溶解度測定用NMR装置)を開発する。高分子材料の周囲は、水素ガス100%、あるいは水蒸気など他のガス、液体が混在した雰囲気とする。NMR信号の授受に適するよう容器の設計に配慮しながら、水素ガスの高分子材料への溶解度を測定できる装置を構築する。なお、平成20年度は、圧力範囲を1MPa以下、温度は室温程度の条件下で、高分子材料への水素溶解度を試測定する。また、温度調節によりNMRの感度を向上させるために、永久磁石磁気回路用水循環恒温ジャケットを導入する。
- ② 前年度に開発し、安全性、効率性などを検証した溶解度測定装置を使って、水素ガスの、水などの液体への溶解度測定を本格的に開始する。純水のみならず、pHを調整した水、あるいは極性が比較的小さな液体なども検討の上対象とする。気液平衡セルによりサンプルを作製し、前処理、質量分析器により溶解度を得る。得られた実測値は、気液平衡理論による溶解度と比較・検証する。なお、より高精度に溶解度が得られるよう、前処理部分などを改造する。
- ③ 10月にアメリカで開催される2008年燃料電池セミナーにて、水素関連技術に関する情報を収集する。また、11月にアメリカで開催される第61回米国物理学会流体力学部門年会講演会にて、気液相の取り扱いに関する情報を収集する。

<平成 21 年度>

- ① 前年度までに装置の開発を終えた「NMRによる高分子材料内の水素溶解度測定の測定」では、ゴム材料と、高分子電解質に対する水素の溶解度測定を本格的に開始する。新規なRFコイルを有する本装置は、試料周囲を水素ガス、及び水蒸気も混合させた雰囲気中に制御できる。すなわちその場の雰囲気下で高分子材料内の水素溶解度を測定可能である。平成21年度は、圧力を0.1~0.6MPa、温度を室温~70℃の条件下で測定する。対象とする試料は、EPDMゴム、フッ素系の電解質膜とする。なお、溶解度測定用NMR装置の計測システムのソフトウェア改造を行い、信号処理を高速化する。また同じく溶解度測定用NMR装置の計測システムのハードウェア改造を行い、試料容器を非磁性化して計測の感度を上げる。
- ② さらに、NMR励起パルスを極短化し、減衰が早い高分子材料内の水素分子のNMR信号を、よ

り SN 比を向上させて測れるようにする。一連の改造を経て、ゴム材料についてはゴムの種類、フィラーの有無・種類を変えながら、水素溶解度データを拡充する。

- ③ 「水などの液体に対する溶解度測定」では、pH を調整した水に対する溶解度を測定する。アルカリ水電解を踏まえ、KOHaq に対する水素溶解度を測定する。平成 21 年度では、0.1mol/kg 程度の KOHaq に対する水素溶解度を、室温、大気圧～29MPa の範囲で測定する。このため、高圧溶解度測定装置の気液平衡セルを耐薬品化する改造を行う。
- ④ 10 月にオーストリアのウィーンで開催される電気化学の年次大会にて、水素関連技術に関する情報を収集する。

<平成 22 年度>

- ① 平成 21 年度までの種々の改造を経て、NMR による手法が、高分子材料内の水素ガス透過性（溶解度、拡散係数）のその場計測に有効であることを検証できた。事前に校正線を作成することで、信号強度、信号強度の変化から溶解度、拡散係数の絶対値も導出でき、他の計測法と比較照合して妥当な値であることが分かった。そこで今年度は、種類や、添加剤の異なるゴムの水素ガスに対する透過性を計測しデータを拡充する。この時、ゴム構造由来水素と溶解水素ガスの信号をより精度高く分離する必要がある。そこで、雰囲気水素ガスを H₂ から D₂ に切り替えることで、ゴム構造由来水素と溶解水素ガスの信号を分離し、溶解した水素ガスの溶解度をより正確に定量化する。
- ② NMR による手法で、高分子電解質膜内の水素ガスの透過性も計測する。ゴム試料に比べて高分子電解質膜試料は体積が小さく、試料周囲の水素ガス、溶解した水素ガスの分離が難しいと考えられる。そこでセンサーの役割を担う RF コイルを試料に直接埋め込み、計測領域を膜内に制約し、溶解した水素ガスのみをセンシングできるようにする。

<平成 23 年度>

- ① 確立した NMR 手法により、含水状態の高分子電解質膜 (PEM) に対する水素ガスの溶解度、拡散係数を計測する。水由来のプロトンと水素ガス由来のプロトンを区別するために、含浸させる水を重水とする。
- ② NMR 手法によるゴムに対する水素ガスの溶解プロセスの計測においては、実際の仕様環境を模擬するために、荷重かけた条件下での計測を実施する。このために外部から荷重を ON/OFF できるような NMR 用容器を改造する。
- ③ 平成 23 年にアメリカで開催される 2011 米国電気化学会議にて、水素関連技術に関する情報を収集する。

<平成 24 年度>

- ① NMR 手法によって得られた水素ガスの高分子電解質膜に対する、ゴム材料に対する溶解度、拡散係数をまとめる。特に高分子電解質膜においては含水量、ゴム材料においてはフィラー種、量をパラメータに溶解度、拡散係数を整理する。
 - ② 平成 24 年にアメリカで開催される 2012 米国電気化学会議にて、水素関連技術に関する情報を収集する。
- (5) 水素物性データベースの研究開発(主に長崎大学で実施)

水素製造から貯蔵、輸送、エネルギー変換機器などの水素利用機器については、多くの企業や研究機関で実用化のための研究・開発が進められており、機器の開発・設計に必要な水素の物性値を簡便に検索できるシステムの実現は産業界から大きな期待が寄せられている。そこで、広範な圧力、温度範囲にわたる水素の物性値を Web ブラウザや MS Windows で動作す

るアプリケーション・ソフトウェアから自由に検索できるシステムを構築することを目的とする。

目的を実現するための課題とそれぞれの課題解決のためのプロセスを列挙する。

- ・ 収録データの温度と圧力範囲の拡張のために、熱物性チームで新たに測定したデータのみでなく、未収録データや新しく発表されたデータを逐次収録する。
- ・ 熱物性予測式の適用範囲の拡大および精度の向上を図るため、水素の音速を室温～170℃、0～1 MPa の範囲で測定する。さらに 0.1 MPa から定圧極限までの水素の音速を測定し、熱物性予測式の精度を向上させる。
- ・ より使い易いユーザインターフェイスと利用環境を用意し、ある範囲の物性値を指定した刻み幅で出力できるように LiveCD の改良を行う。

<平成 18～19 年度>

- ① 現存する水素の主要物性値情報を網羅的に収集し、信頼できるデータを抽出する。これらのデータは、本事業で測定されたデータとの比較に用いる。
- ② 抽出された物性値情報をデータベース化する方法の検討を行う。
- ③ データベースに関して、Linux 等のオープンソースシステムをベースにして、基本設計と試作を行う。
- ④ 物性値データベース検索システムとデータ入力システムの構築を行う。
- ⑤ 実験式や状態方程式などの成果も、データベースシステムと負荷の大きい計算クライアントをスムーズに統合するシステムについて検討する。
- ⑥ MS-EXCEL 上で物性計算を行うためのシステムを開発する。

<平成 19 年度>

- ① 収集した水素に関する物性情報は、信頼性および健全性のチェックを行い、随時、データベースに入力して充実を図る。
- ② 必要に応じて物性推算式を作成する。相平衡に関する物性値については、種々の入力パターンに対応できるようなシステムを開発する。
- ③ 文献調査と物性関連の研究機関の調査を定期的に行い、データベースの完全性を維持する。実験グループが測定したデータについても、データベースへの入力を行う。
- ④ なお、本研究実施項目に関連して、平成 18 年度では、7 月に第 16 回米国熱物性シンポジウムにおいて、水素物性、熱物性値測定等に関する情報収集、8 月にオーストラリアで開催される国際伝熱会議において、水素の熱物性、物性 DB 等に関する情報収集、同じく 8 月に韓国で開催される「機械工学における姉妹大学ジョイントシンポジウム」において水素物性に関する情報収集を行う。平成 19 年度では、7 月にカナダで開催予定の「日米熱工学合同会議」において、水素物性の推算手法応用に関する調査、8 月に韓国で開催予定の「第 18 回輸送性国際シンポジウム」11 月にイタリアで予定されている第 20 回世界エネルギー会議において、水素物性に関する情報収集を行う。

<平成 20 年度>

- ① 流体の熱物性値を利用する場合、測定値がそのまま利用できる場合は殆ど無く、測定値に基づいて作成された複雑な推算式を用いて計算する必要がある。通常、要求される熱物性値は数点あり、繰り返し計算中で利用される事も多いため、複雑な計算を伴うデータベースシステムを安定的に運用するためには、内部の計算量についても考慮が必要である。この最適化に関する研究の第一歩として、水素の熱物性が必要とされる状況を幾つか想定し、その際にデータシステム内の計算が最小となるシステムの構築を試みる。

- ② 計算コストが最小となるシステムの構築を通して、システムで使用した各種の推算式の性能や特徴の評価を行う。また、同時に最適な熱物性値データベースが供えるべき条件やその評価方法について検討を開始する。
- ③ 今年度も、測定データの収集と推算式の整理を継続する。現存する推算式を参考にしつつ、本プロジェクトの特徴でもある高温、高圧域での熱物性の推算式を作成する。このため、今年度はモデルの選定と評価を進める。また、上記の研究を円滑に効率よく遂行するために、相平衡計算・データベースシステムを導入する。
- ④ 状態式からの誘導関数の精度を向上させるため、水素中の音速測定装置の開発を開始する。このため、音速測定システムを導入する。
- ⑤ これに関連して、6月にアメリカで開催予定の第16回国際原子力会議、8月にチェコにて開催される第18回化学およびプロセス工学に関する国際会議、同じく8月にフランスで開催される第18回欧州熱物性会議に参加し水素生成と水素物性の推算手法応用に関する調査を行う。また、大阪で開催予定の冷凍空調学会年次大会に参加し、水素利用時に到底される超臨界圧あるいは二相流状態を利用した機器の現状に関する調査を行い、東京で開催予定の日本熱物性シンポジウムでは、熱物性全般に関する調査を行う。さらに札幌で開催予定のJSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conferenceに参加し、混相流、燃料電池技術当、水素利用機器における水素の役割や熱物性の役割当に関する調査研究や情報収集を行い、水素研究に関わる打ち合わせを九州ルーテル学院大学（熊本）等でも行う。

<平成 21 年度>

- ① 前年度に引き続き、システム内部の計算量を考慮したデータベースシステムの構築に対して、システム構成をハードウェアの基本構成や、使用するソフトウェアの種類や使用方法等を、これまでの成果を総括した上で再度検討し、より効率的な物性データベースサーバーが保持すべき特性等を整理する。本年度は熱物性計算の中では、際立って計算負荷が大きくなるPVT関係と相平衡の計算について重点的に検討し、最終目標である水素物性データサービスシステムの重要要素となる事が想定されるPVT関係・相平衡計算システムを開発する。
- ② MathCAD等、研究や開発の際に広く使用されているソフトウェアから開発中の水素物性データベースへのアクセスを可能とするシステムについて、基本的な要求や効率化に必要な事項等について検討し、システム開発に着手する。
- ③ 水素熱物性データベースシステムを公開するに当たり、その公開方法や範囲、ライセンスについて、現在のわが国の研究者や産業界両方の要求をできるだけ満たせるよう検討を行う。
- ④ 前年度に引き続き、状態式からの誘導関数の精度を向上させるため、水素中の音速測定装置の改良と音速の測定を行なう。具体的には、前年度導入した音速測定システムを用いて、温度170℃以下、圧力1MPa未満の条件で、共鳴法による音速測定を実施する。水素を流しながら測定するために、実験室に簡易型の水素常時監視システムを設置する。また、温度と圧力の測定精度を向上させるために、高精度の音速測定装置用圧力・温度精密測定システムを導入する。音速測定に際して、共鳴法による測定精度向上、高圧対応および高温対応に必要な条件を洗い出し、材質および球直径を最適化した音速測定部（共鳴セル）を製作する。共鳴セルに取り付ける音響測定センサーおよび発振子は、共鳴セルの製作前に導入して、予め測定装置と接続して予備実験を実施しておく。
- ⑤ これに関連して、平成21年6月にアメリカで開催予定の第17回米国熱物性会議に参加し水素物性の推算手法およびその応用、水素の音速測定技術に関する調査を行う。また、学会開催国にあるNISTの熱物性測定施設を見学すると同時に、NISTの研究者と意見交換を行ない、水素物性の測定方法および水素物性データベースに関する情報収集を実施する。

<平成 22 年度>

- ① 平成 21 年度までに開発してきた水素熱物性データベースシステムがサポートする物性値や適用範囲について、特に本プロジェクトの特徴である高圧の領域を正確にサポートできるような拡張を検討し、拡張版 PVT 関係・相平衡計算システムを開発する。
- ② XML を利用した水素物性データベースおよび文献データベースを稼働させ、ユーザーインターフェイスの拡充を図る。
- ③ 特に高圧状態における水素の PVT 関係の推算により適したモデルの構築へ向けての検討を開始する。
- ④ 平成 21 年度に引き続き、状態式からの誘導関数の精度を向上させるため、水素中の音速測定装置の改良と音速の測定を行なう。前年度末に導入した、真鍮製の球形共鳴器と、圧力および温度の高精度計測システムを用いて測定精度の向上を図る。測定範囲は、温度は室温から 170°C まで、圧力は 1 MPa 以下とする。

<平成 23 年度>

- ① 平成 22 年度までに開発してきた水素熱物性データベースシステムについて、引き続き物性チームが測定するデータの組み込み作業を続ける。
- ② このプロジェクトが開始されて 5 年が経過し、データベースサーバーやクライアントの本体となる計算機のハードとソフトの利用状況が変化した。その変化を整理して、それらに対応した改良を行う。当面、CD-ROM を利用したシステムから USB メモリを利用したシステムへの完全移行するための USB メモリ型 DB システムの構築とエクセル以外のソフトウェアのサポートを実施する。
- ③ 測定精度の確認のため、物性がよく知られている高純度アルゴンの音速測定を実施する。
- ④ 測定した音速のデータを利用して、データベースに組み込んだ迫田らの状態方程式の精度を確認する。
- ⑤ これまでに作成している 1 個の共鳴器を利用して音速の測定を続けつつ、もう 1 個の共鳴器を用いて、マイクロホンの作動範囲外の低温・高温環境での測定を可能にするために、マイクロホンを測定器外部に取り付ける装置の予備実験を実施する。
- ⑥ 平成 23 年度 8 月にギリシャで予定されている第 19 回欧州熱物性会議において水素の音速および音速測定に関する技術情報の収集を行う。
- ⑦ 第 4 回世界水素技術会議においてデータベース組み込みを想定した水素の熱物性値の状況や各種の水素利用機器の現状について情報収集を行う。

<平成 24 年度>

- ① 水素利用機器の現状を想定したアプリケーション型の物性計算システム(例えば、水素ステーションにおける熱物性値シミュレータ)を拡充する。
 - ② 100°C 以上の高温環境で音速の測定を行なう。
 - ③ 平成 23 年度に実施した音速のデータによる迫田の状態方程式の評価をさらに進め、式の係数に反映させる作業を行う。
 - ④ 音速の測定装置の攪拌、断熱、温度計の再較正などを行い、適宜チューニングを施して測定精度の向上を図る。
 - ⑤ 第 18 回米国熱物性会議において、これまでの成果を発表するとともに、熱物性値データベースに関連する技術および水素の音速とその測定に関する技術情報の収集を行う。
 - ⑥ 物性チームが測定した各種の物性値に加えて、以上の成果をデータベースに反映させる。
- (6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定(主に佐賀大学で実施)
水素ステーションにおける車載タンクへの高圧水素の急速充填過程では、系内の低温部に

いて水素中に残存する水蒸気等の微量高沸点ガスが凝縮・凝固し、流動系の不安定や高圧水素機器の潤滑部等での不具合が生じることが懸念される。残存水分等の凝縮・凝固が生じない圧力・温度条件でステーションを運用する必要があるが、35MPa 以上の高圧水素中の ppm オーダーの水分の露点(固相として現れる場合は霜点という)を測定可能な測定装置はなく、信頼できる露点データがない。ステーションの最適な設計条件と運用条件を把握するためにも、水素ステーションの条件に対応した信頼できる露点データの拡充が必要とされている。

そこで、本研究では、40MPa 程度までの高圧下で水素中の微量水分の露点測定が可能な露点測定システムを開発し、露点データを拡充するとともに、水素ステーションの条件に対応した露点推算法の開発を目指す。

そのためには、(1)40MPa 水素対応の高耐圧性を備えた露点測定セルの開発、(2)高圧水素中の微量水分の高精度濃度モニター法と濃度調整法の開発、また、(3)残存水分が微量であり凝縮相が固相(霜)として現われるため、高圧水素と氷の高精度な固気平衡推算法の検討が課題となる。露点検知光学系と分離された構造を持つ高耐圧性の露点測定セルを開発して、課題(1)に対応する。インライン型鏡面冷却式センサを用いた水分モニター法を開発し、氷の飽和層を用いた微量水分調整法等を検討して、課題(2)に対応する。本研究の露点実測データに基づいて固気平衡推算法を改良し、水素ステーションの条件に対応した高精度な露点推算を可能とする。

<平成 19 年度>

- ① 水素対応露点計測装置開発の設計用基礎データを取得するための露点計測予備システムを導入して予備実験を行い、技術的問題点を抽出する。
- ② なお、本研究実施項目に関連して、平成 19 年 11 月に中国の清華大学視察及び「中国工程熱物理学会伝熱伝質年会」(中山大學)において、水素ガスの湿度管理技術に関する情報収集、また平成 19 年 8 月に韓国で開催予定の「第 18 回輸送性質国際シンポジウム」において、凝縮現象に関する情報収集を行う。

<平成 20 年度>

- ① 高圧水素雰囲気中に含まれる微量の高沸点ガスの露点(凝縮温度)測定が可能な装置の開発を行い、最終的に 40MPa 程度までの高圧下での測定が可能な装置の開発に着手する。測定には、凝縮開始を一次検出でき、最も高精度とされている鏡面冷却式の露点測定法を採用する予定であるが、より高精度な測定手法の検討も引き続き実施する。低圧で窒素の標準ガス等を用いた動作確認を行うため、露点測定システムの設計と製作を行う。装置の改良と測定方法の検証を進め、段階的により高圧での測定に対応させていく。また、高圧水素中の極微量の水分を制御できる水素供給装置ならびに水分濃度の測定法についても検討する。

<平成 21 年度>

- ① 40MPa までの高圧水素対応への改良を前提とした構造の低圧域用露点測定システムを用いて、1MPa 以下の窒素ガスおよび水素ガス中での水蒸気の露点測定を開始する。鏡面での凝縮を検知する光学系の精度を向上させる。システムの制御ソフトウェアを開発する。
- ② ボンベ圧 10MPa 程度までの圧力下での露点測定を想定し、システムをより高圧と低露点に対応させるために超低温サーキュレータ、温度制御部等を改良した試験容器および検証用露点計を導入する。装置の構造と機能の検証を進め、40MPa 対応システムの仕様を確定し製作の準備をする。
- ③ 低圧域における露点測定データと露点推算値、検証用露点計の測定値および既存データを比較・検討し、測定ならびに推算法について検証を進める。

<平成 22 年度>

- ① 前年度までに、40MPa 対応の露点測定セルの設計および KHK 特認取得を終え、現在、同様の構造の測定セルを組み込んだ低圧域用露点測定システムを用いて、10MPa 程度までの圧力域における測定を開始し、測定精度の向上を図っている。また、インライン型鏡面冷却式センサを用いた高圧水素中の微量水分濃度モニター法を開発し、使用中である。
- ② 平成 22 年度は、前年度に引き続き、低圧域用露点測定システムを用いて 10MPa 程度までの圧力域における水素中の水蒸気の露点測定を進め、露点データを拡充する。測定精度の向上が課題であるが、主に、鏡面温度の制御方法と露点検知光学系の改良によって対応する。
- ③ 10MPa 程度までの圧力域における露点測定データを、露点推算値ならびに検証用露点計による測定値等と比較・検討し、露点測定ならびに推算法について検証を行う。露点推算法の改良を進める。
- ④ 高圧水素中の微量水分の濃度モニター法および濃度調整法について、さらに検討を進める。

<平成 23 年度>

- ① 水素中の微量水分に対応した低中圧域用露点測定システムを用いて、水分濃度 10 ppm 以下、圧力 10 数 MPa までの露点データを拡充する。

<平成24年度>

- ① 露点データの拡充を継続し、一連のデータの信頼性を向上させる。
- ② 実測データに基づき水素中の微量水分に関する露点推算法を改良する。
- ③ より高圧域への露点推算法の拡張の可能性を検討する。

(7) 比熱の測定(主に産業技術総合研究所側で実施)

100MPa、500℃まで測定可能なフローカロリメータを開発し、定圧比熱を測定する。測定した定圧比熱を状態方程式から誘導される値と比較し、状態方程式の高精度化を検討する。

<平成 22 年度>

- ① 1MPa、500℃までの条件下で比熱の測定が可能なフローカロリメータ設計のための予備検討および情報の収集を継続する。

<平成 23 年度>

- ① 100MPa、500℃までの条件下で比熱の測定に関する情報の収集を継続する。

<平成 24 年度>

- ① 100MPa、500℃までの範囲の比熱について状態方程式から誘導した値について既存のデータの範囲で検証する。

実施計画

研究実施項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度
(1)PVTデータの測定装置の開発および状態方程式の作成	<p>バーネット式PVT測定装置の設計・製作</p>	<p>PVTデータの測定(100MPa、200℃まで)</p>	<p>PVTデータ測定の校正技術の開発</p> <p>定容積法PVT測定装置の設計・製作</p> <p>PVTデータの測定(1MPa、500℃まで)</p> <p>磁気式密度計の設計・製作</p> <p>磁気式密度計による測定(100MPa、250℃まで)</p> <p>高圧定容積法PVT測定装置の設計・製作</p>	<p>PVT性質データの測定(100MPa、500℃まで)</p>	<p>状態方程式の作成およびまとめ</p>		
(2)粘性係数の測定		<p>粘性係数測定装置の開発</p>	<p>粘性係数の測定(100Mpa、500K(227℃)まで)</p> <p>粘度測定の校正技術の開発</p> <p>振動細線式粘性係数測定装置の開発</p>	<p>粘性係数測定装置の改造(100Mpa、500℃)</p>	<p>粘性係数測定(100Mpa、500℃)</p>	<p>整理式の作成およびまとめ</p>	
(3)熱伝導率の測定	<p>熱伝導率測定装置設計のための予備実験</p>	<p>細線法熱伝導率測定装置設計・製作</p> <p>パラ水素発生装置パラ-オルソ変換速度測定用ラマン分光計の導入</p>	<p>パラ水素濃度に関する熱伝導率の測定(1MPa、80-350K)</p> <p>オルソパラ変換速度の測定</p>	<p>高圧水素熱伝導率の測定装置の設計・製作(100MPa、500℃)</p> <p>高圧水素熱伝導率の測定(100MPa、500℃)</p>	<p>熱伝導率測定装置の改造(1MPa、500℃)</p>	<p>熱伝導率の測定(1MPa、500℃)</p> <p>推算式の作成、検証、およびまとめ</p>	

<p>(4)水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定</p>	<p>溶解度測定装置の開発</p>	<p>水素溶解度測定用 NMR 装置の設計・製作、平衡セルの改造</p>	<p>水溶液への水素溶解度の測定</p>	<p>高分子材料内の水素溶解度の測定</p>	<p>模擬環境下での測定</p>	<p>データ整理とデータベースへの組み込み</p>	
<p>(5) 水素物性データベースの研究開発</p>	<p>水素物性既存情報の調査と信頼性評価 データベース構築システムの設計と整備</p>	<p>水素物性データベースの整備と公開 既存水素物性データの整理およびデータベースの開発</p>	<p>本プロジェクトで測定した物性値を利用した相平衡計算およびデータベースサービスシステムの開発</p>	<p>水素中の音速測定装置の開発</p>	<p>水素中の音速測定 (1MPa 未満、170°C) 音速測定装置の改良</p>	<p>音速の測定結果を反映した整理式の作成とデータベースへの組み込み</p>	
<p>(6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定</p>	<p>露点測定システム設計のための予備実験</p>	<p>水素対応露点測定システムの開発</p>	<p>露点測定システムによる露点測定</p>	<p>露点推算法の改良およびまとめ</p>			
<p>(7) 比熱の測定</p>			<p>比熱測定法の検討</p>				

2.1.2 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」実施内容

平成 18 年度～平成 24 年度では金属材料を対象とし、以下の研究実施項目を行う。

- (1) ナノ・メゾレベルにおける強度・変形過程の解明(主に九州大学側で実施)
- (2) 高圧ガス水素下及び液体水素下における疲労き裂発生と伝ば機構の解明(主に九州大学側で実施)
- (3) 疲労き裂先端における塑性変形(すべり変形)と水素の相互作用の解明(主に産業技術総合研究所側で実施)
- (4) 高圧ガス水素下における疲労き裂発生・進展メカニズムの解明(主に産業技術総合研究所側で実施)
- (5) 水素機器に使用される金属材料の強度評価(主に産業技術総合研究所側で実施)
- (6) 水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価(主に九州大学側で実施)
- (7) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する研究状況調査(主に産業技術総合研究所、九州大学側で実施)
- (8) 材料中の侵入水素の存在状態解析(主に上智大学で実施)
- (9) 材料中の結晶粒内・粒界におけるすべり変形に及ぼす水素の影響調査(主に物質・材料研究機構で実施)
- (10) 材料中の疲労き裂先端の水素状態の調査(主に福岡大学で実施)
- (11) 水素ステーションに使用された金属材料の健全性及び強度評価(主に物質・材料研究機構で実施)
- (12) 水素デバイス等の安全設計シミュレーション(主に九州大学側で実施)

- (1) ナノ・メゾレベルにおける強度・変形過程の解明(主に九州大学側で実施)

1) SIMSなどを用いて、き裂先端近傍などへの局所水素の濃度測定法を開発する。

水素が存在する場合のナノ・メゾレベルにおける強度・変形過程および水素の存在を直接観察可能にすることにより、水素脆化の基本原理を解明する。

<平成 18 年度>

- ① SIMS を設置し、き裂先端近傍などへの局所水素の濃度測定法を開発する(実施内容①-1))。

<平成19年度>

- ① 18 年度に導入した SIMS (19 年度に SIMS 用安定化電源・UPS を付加) 及び平成 19 年度に導入する水素環境用試験片加工機(試験片に先端曲率半径 0.05mm 以下の鋭い(き裂に近い)切欠きを加工可能なワイヤ放電加工機)を用いて、き裂先端近傍などへの局所水素の濃度測定法開発(200 μ m \times 200 μ m の領域内における水素濃度を、2 μ m \times 2 μ m 以下の領域を単位として 25 段階の濃淡で表示)を継続して実施する(実施内容①-1))。

<平成 20 年度>

- ① 平成 18 年度及び 19 年度に導入した SIMS (平成 19 年度に SIMS 用安定化電源・UPS を付加) 及び水素環境用試験片加工機(試験片に先端曲率半径 0.05mm 以下の鋭い(き裂に近い)切欠きを加工可能なワイヤ放電加工機)を用いて、疲労き裂先端近傍などへの局所水素の濃度を測定することにより、水素の存在が金属材料の強度に及ぼす影響を解明する。具体的には、疲労き裂先端近傍において、疲労き裂進展速度を加速させる水素が存在する位置(粒界/すべり帯/その他)を明らかにする。
- ② 水素環境下におけるナノレベルの強度・変形過程を解明するため、平成 20 年度に導入する TEM 水

素ガスホルダー及び平成 19 年度に導入した水素環境用試験片加工機を用いて、直接観察を行う。具体的には、水素環境下において原子寸法オーダーである転位の挙動の直接観察を行う。

- ③ 水素ガス雰囲気における超微小領域の変形挙動を観察し、水素ガスが材料の変形・強度に及ぼす影響及びメカニズムを明かにするため、集束イオンビーム加工観察装置(FIB)を導入する。

<平成 21 年度>

- ① SIMS を用いて、負荷をかけたき裂先端に水素が集まる様子を時間的に逐次観察する手法を開発する。
- ② SIMS を用いて、負荷による転位の移動にともなう、水素の転位から他のトラップサイト(き裂先端)への移動を観察する。そのため SIMS 用液化窒素容器を導入する。
- ③ 1MPa 水素ガス環境で、炭素鋼における脆性ストラエーションの機構・伝ば速度の周波数依存性をその場観察・フラクトグラフィによって解明することによって、脆性現象における水素の影響を明らかにする。
- ④ 1MPa 水素ガス環境で、炭素鋼の疲労き裂伝ばに影響する、内部水素と外部水素の役割を定量化する。
- ⑤ 九大既存の 0.1MPa 水素疲労試験機に 0.1MPa 以下が計測できる水素ガス圧力計を設置する改造を行い、0.1MPa 以下の水素が疲労亀裂進展に及ぼす影響を調べる。
- ⑥ TEM 水素ガスホルダーを用いた HVTEM(超高压電子顕微鏡)その場観察によって、き裂先端からの転位射出条件に及ぼす水素の影響、き裂から射出した転位の粒界での集積に及ぼす水素の影響を明らかにする。
- ⑦ 水素ガス環境における単結晶金属中の遅れき裂伝ば・疲労き裂伝ばを途中で中断し、そのき裂先端の転位構造を超高压電子顕微鏡で解析し、水素による伝ば速度の加速と転位構造の変化を対応づける。
- ⑧ 超高压電子顕微鏡を用いて、転位の周りの応力場が水素によって変化するかを観察する。

(2) 高压ガス水素下における疲労き裂発生と伝ば機構の解明(主に九州大学側で実施)

- 1) 超高压ガス水素下における材料評価試験技術を開発する。また、疲労き裂発生・伝ばに及ぼす高压ガス水素の影響を明らかにし、そのメカニズムを解明する。

<平成 18 年度>

- ① 1MPa 水素ガス疲労試験機(1台)を稼働させることにより、高压水素ガス中疲労試験におけるき裂開閉口挙動・マルテンサイト変態量・残留応力の測定法を開発する(実施内容②-1))。

<平成19年度>

- ① 18年度に導入した1MPa水素ガス疲労試験機(1台)を用いて、高压水素ガス中疲労試験におけるき裂開閉口挙動・マルテンサイト変態量・残留応力の測定法の開発を継続して実施する(実施内容②-1))。
- ② 高压ガス水素下での材料評価試験技術を開発する(実施内容②-1))。
- ③ 2) 上記1)を用い、き裂開閉口挙動・マルテンサイト変態量・残留応力の測定を通して、疲労き裂発生・伝ばに及ぼす高压ガス水素の影響を明らかにし、機構を解明する。
- ④ き裂開閉口挙動・マルテンサイト変態量・残留応力の測定を通して、疲労き裂発生・伝ばに及ぼす高压ガス水素の影響を明らかにする方法を開発する(実施内容②-2))。
- ⑤ これらの研究を通し、絶対圧0.1 MPa~0.7 MPaにおいて、疲労き裂進展は加速するが、上限値が存在することを見出した。上限値は水素圧力に依存せず、大気中の疲労き裂進展速度の約30倍であつ

た。水素エネルギー機械・インフラの設計において、疲労き裂進展加速の上限値が存在することは有益である。そのため、高圧水素ガス中における上限値の存在を実証することの重要性が増した。また、米国では、ASME規格のSection III「超高压压力容器」を改訂し、燃料電池自動車の水素タンクの試験圧力を約120MPaにすることが進められている。このため、120MPa水素ガス中で稼働する材料試験機を至急開発する必要がある。

<平成20年度>

- ① 平成18年度に導入した1MPa水素ガス疲労試験機でのデータ蓄積等をもとに、超高压(120MPa)水素ガス中疲労試験を実施可能にするため、超高压水素ガス雰囲気下材料試験システムの導入を開始する。
- ② 平成18年度に導入した1MPa水素ガス疲労試験機を用いて、引き続き高圧水素ガス中における疲労き裂開閉口挙動・疲労き裂進展挙動の観察・評価、切欠き(応力集中)の影響評価およびフラクトグラフィ(破面解析)を通して、金属材料の疲労き裂発生・伝ばに及ぼす高圧ガス水素の影響を明らかにし、機構を解明する。
- ③ 水素ガス環境中でのばね(ねじり負荷を受ける材料)の疲労強度予測法の検討を行うため、マグネットカップリング並びにき裂発生およびき裂進展を直接観察するための観察用窓を付けた1MPa水素ガスバネ疲労試験機を導入する。
- ④ 上記に関連して、ばねに加工した人工欠陥からのき裂の発生および進展と荷重低下等の現象との関係の確認およびばねのき裂発生箇所である巻きの内側の観察を行なうため、高速度で試験片を撮影することが可能なバネ式疲労試験機測定装置を導入する。

<平成 21 年度>

- ① SCM435 鋼の破壊じん性値に及ぼす、水素ガス圧、ひずみ速度、温度、水素曝露の影響を統一的に表わすため、円周き裂からの伝ば過程を切断法によって明らかにする。
- ② 水素ガス中において、実体バネにおける疲労き裂伝ば特性と試験片における疲労き裂伝ば特性の関係を調査し、バネ材の疲労き裂伝ば挙動を試験片で再現する方法を見出す。
- ③ 10MPa 水素ガス中で、SCM435 鋼の微小き裂挙動のその場観察を行い、水素中での停留挙動を解明する。
- ④ 100MPa 水素ガス中での、予ひずみ・水素曝露を受けた A286 の疲労特性・き裂伝ば特性を解明する。
- ⑤ 100MPa 水素ガス中においてき裂材での遅れ破壊特性と SSRT 特性の関係を明らかにする。
- ⑥ 超高压水素ガスが疲労特性に及ぼす影響に関する研究の加速とデータの拡充のため、超高压水素ガス雰囲気下材料試験システムの導入を完了する。また、試験雰囲気温度の制御範囲を拡張するため、超高压水素ガス雰囲気下材料試験システムの改造を行う。
- ⑦ 九大既存の 100MPa 水素疲労試験機の安全性を向上させるため、100MPa 水素疲労試験機配管改造を行う。

(3) 疲労き裂先端における塑性変形(すべり変形)と水素の相互作用の解明(主に産業技術総合研究所側で実施)

- 1) 水素が可視化できる SIMS と材料の結晶方位が分析できる EBSD を組み合わせ、き裂先端での水素存在状態を解析できる技術、き裂先端での水素による塑性変形(すべり変形)の局在化を解析できる技術を開発する。開発した技術により水素脆化の基本原理を解明し、水素エネルギー機器の設計・製造に対する基本思想を確立する。

<平成 22 年度>

- ① SIMS による水素可視化の基本技術は確立しており、本年度はオーステナイト系ステンレス鋼の疲労

き裂先端での水素存在状態を解析する。

- ② EBSD による組織解析は、霞ヶ関、鶴見、大黒などの水素ステーションで実証に用いられた蓄圧器の焼き戻しマルテンサイト組織の違いを明らかにできるなど、産業界で利用できるまでに完成している。本年度は、SIMS による水素可視化技術と組み合わせ、オーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂先端での水素によるすべり変形(塑性変形)の局在化を解析し、水素脆化の基本原理の解明に迫る。

<平成 23 年度>

- ① SIMS による水素可視化・水素測定技術、EBSD と SEM による組織・破面解析技術を用い、疲労破壊過程や引張破壊過程におけるすべり変形と水素の相互作用を解明する。

<平成 24 年度>

- ① 本研究で得られた成果をもとに、疲労破壊や引張破壊における水素脆化メカニズムモデルを作成し、水素エネルギー機器の設計・製造に関する基本思想を提案する。
- (4) 高圧ガス水素下における疲労き裂発生・進展メカニズムの解明(主に産業総合技術研究所側で実施)
- 1) 高圧水素ガス中疲労試験技術を開発し、70MPa 燃料電池自動車や70MPa 水素ステーションの安全性確保に不可欠な高圧水素ガス中の疲労特性を評価することを可能にする。
- 2) 高圧水素ガス中での疲労メカニズムを解明し、70MPa 燃料電池自動車や 70MPa 水素ステーションに使用される材料の選択指針を確立する。

<平成 22 年度>

- ① 昨年度までに 1 台の 100MPa 水素ガス中疲労試験機(最高試験周波数:1Hz)と超高压水素ガス雰囲気下材料試験システム(2 台の 120MPa 水素ガス中疲労試験機、最高試験周波数:1Hz)を用い、低試験速度下での高圧水素ガス中疲労試験技術を開発した。本年度は、超高压水素ガス雰囲気下材料試験システムの改造(加熱冷却システム追加)を行い、試験雰囲気温度の制御範囲を拡充する。また 120MPa 水素ガス中高速疲労試験機(最高試験周波数:30Hz 予定)を稼働させ、高速試験速度下での疲労試験技術を開発し、疲労限度や疲労き裂進展下限界特性の評価を可能にする。
- ② 昨年度までに、今まで知られていなかった水素脆化現象(①水素による疲労き裂進展速度の加速に上限が存在すること、②過飽和水素下では疲労き裂進展特性が向上すること、③極低試験周波数では水素による疲労き裂進展加速が消滅すること)が明らかになってきた。本年度は、これらの特異な水素脆化現象をさらに調べ、水素エネルギー機器に使用される材料の選択指針の高度化を図る。さらに、水素疲労に強い抵抗を示す炭素鋼や低合金鋼を探索する。

<平成 23 年度>

- ① 今までにほとんど報告されていない高圧水素ガス中における疲労き裂進展下限界特性を集中的に調べる。

<平成 24 年度>

- ① 水素エネルギー機器の設計・製造における材料選択指針、水素脆化に対して高い抵抗を示す構造材料の創製指針を提案する。
- (5) 水素機器に使用される金属材料の強度評価(主に産業技術総合研究所側で実施)
水素機器に使用される金属材料は高圧水素ガスに曝されるので、金属材料中には水素が侵入する。水素機器の安全性を確保するためには、金属材料中にどのくらいの水素量が侵入し、侵入した水

素でどのくらいの特性低下がおこるかを評価する必要がある。これらの評価を可能にするため、水素特性データベース並びに水素材料強度データベースと水素破面・組織画像データベースを構築し、産業界に提供する。

- 1) 水素侵入メカニズムの解明
 - a. 材料中に侵入する水素量に及ぼす圧力、温度、時間の影響を評価する。
 - b. 昇温脱離法を用いて材料中に侵入した水素の存在状態を解析し、材料中の原子空孔、転位、結晶粒界、介在物、析出物等、水素トラップサイトの分離を行う。
 - c. 水素固溶度や水素拡散速度に関する水素特性データベースを構築する。
- 2) 強度評価とフラクトグラフィ
 - a. 設計に必要な引張特性、シャルピー衝撃特性、疲労特性に及ぼす水素の影響を評価する。
 - b. 破面様相や塑性変形に及ぼす水素の影響を評価する。
 - c. 水素材料強度データベースと水素破面・組織画像データベースを構築する。
- 3) 燃料電池自動車の高圧水素容器や配管、水素ステーションの配管、水素パイプライン等の振動解析とAE解析

<平成18年度>

- ① 100MPa水素ガス大型曝露容器(一部平成19年度に導入)と昇温脱離分析装置TDS(1台)を設置し、高圧水素ガス中に曝露したオーステナイト系ステンレス鋼を用い、侵入水素測定技術を確認する(実施内容⑤-1)-a)。
- ② 1MPa水素ガス疲労試験機(2台)を設置し、水素ガス環境下の疲労と引張試験技術、100MPa水素ガス曝露による水素チャージ材を用いたシャルピー衝撃試験技術を確認する(実施内容⑤-2)-a)。

<平成19年度>

- ① 18年度に導入した100MPa水素ガス大型曝露容器(一部平成19年度に導入)と昇温脱離分析装置TDS(1台)を用いて、高圧水素ガス中に曝露したオーステナイト系ステンレス鋼に加えて、低合金、炭素鋼の侵入水素測定技術を確認する。さらに、平成19年度に3台の低速度疲労試験機(10分に1回のような低速度繰り返し荷重を付加する疲労試験機)を導入し、100MPa水素ガス大型曝露容器(一部平成19年度に導入)に曝したオーステナイト系ステンレス鋼の低試験速度下の疲労特性を調べる。また、前年度に導入した水素ガス疲労試験機の稼働プログラムを改修することで、極低速度(1サイクル11分以上)の疲労試験に対応できるようにし、極低速度での疲労試験データ取得や、負荷速度に対応する疲労き裂進展量と応力拡大係数の分析に資するほか、低速度疲労試験機に試験片を正確に取り付けるため、水素試験片ひずみ測定器(ひずみゲージの出力を増幅する装置)を導入する。さらに、このような極低速度の疲労試験を行う必要が生じたことから、既設疲労試験機を極低速度で稼働できる制御部を導入する。これによって繰り返し速度を高速から極低速まで広範囲の試験が可能となり、き裂進展の加速メカニズムを明らかにすることができる。また、オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化メカニズムと水素疲労メカニズムの分析に関する目途付けを行う。(実施内容⑤-1)-a)。ステンレス鋼の低速疲労特性に及ぼす水素の影響を明らかにするため、九大所有の疲労試験機(島津制作所製)疲労試験機EHF-ED30KN-40L、インストロン2軸疲労試験機、(MTS社製)疲労試験機を修理し、停電によるデータ損失を防ぐため、無停電電源装置を付加する。
- ② これらの一連の研究を通して、従来は水素によって疲労き裂進展が加速しないとされていたSUS316Lにおいても、0.0015Hzのような低荷重負荷速度で疲労き裂進展速度は水素により加速されることが発見された。この結果は社団法人 日本自動車工業会(自工会)を始めとする産業界から高く評価され、さらに低応力下での疲労き裂進展試験、バネ等の実用部品の疲労試験を実施することが要望された。

- ③ 高圧水素ガス曝露条件を変え、オーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼、炭素鋼に侵入する水素量に及ぼす水素ガス圧力、温度、曝露時間の影響を明らかにする(実施内容⑤-1)-b)。
- ④ 18年度に導入した1MPa水素ガス疲労試験機(2台)を用いて、水素ガス環境下の疲労と引張試験技術、100MPa水素ガス曝露による水素チャージ材を用いたシャルピー衝撃試験技術の確立を引き続き図る(実施内容⑤-2)-a)。これにより、疲労、引張、シャルピー衝撃試験で破壊した試験片の水素量を測定し、幾らの水素量のときに、疲労、引張、シャルピー衝撃特性が幾ら低下するかを定量的に評価できるようになる。なお、これらの試験機は一度に使用する水素ガス量が多いため、自主的な安全対策として1MPa水素ガス疲労試験機用安全システムと1MPa疲労試験機用フードカーテンを付加し、安全確保に万全を期する。また、各種ステンレス鋼の低速度疲労試験において、小型ボックス炉を導入し、加熱による水素量調整を行う。
- ⑤ 水素環境破面観察システム(二次電子像分解能1.5nm以下、試料台寸法φ120mm以上、エネルギー分散型X線分析/EBSD機能付)を導入し、破壊した試験片の破面と表面において、水素に特有な破面様相、塑性変形挙動を観察し、水素による強度特性の低下の原因と結び付ける(実施内容⑤-2)-b)。試験片の破面や表面観察を高分解能で行うため、水素材料観察用静止形脱磁気装置(磁化した試料の脱磁気を行う装置)を導入する。フェライト量測定装置の導入により、疲労き裂先端付近でのマルテンサイト変態量を測定できるようになり、き裂進展加速とマルテンサイト変態量との関係の定量的評価に資する。デジタルマイクロスコープ及びデジタルマイクロスコープ用ズームレンズ観察システムの導入により、疲労試験中における疲労き裂周辺の塑性変形挙動をさらに精度良く、フリーアングルの観察が可能となり、き裂進展の様相の観察及びき裂進展メカニズムの解明に資する。Twin-Jet電解研磨装置の導入により、材料中のマルテンサイト組織形態と結晶方位を明らかにすることができ、材料加工時における加工誘起マルテンサイト分布の解析及び評価に資する。

<平成20年度>

- ① 平成18年及び平成19年度に導入した100MPa水素ガス大型曝露容器と昇温脱離分析装置TDSを用いて、高圧水素ガス中に曝露したステンレス鋼と炭素鋼に侵入する水素量に及ぼす圧力、温度、時間の影響を評価する。同時に100MPa水素ガス大型曝露容器に疲労試験片を曝露し、疲労強度に及ぼす水素の影響を評価する。これら二つの研究を組み合わせ、疲労強度と材料中の水素量の関係を明らかにする。また、液体水素ローリー等の溶接継手の水素分析を行うため、溶接継手が挿入できるようにTDAの試料室を改造する。(実施内容⑤-1)-d)。
- ② 100MPa水素ガス大型曝露容器に曝したオーステナイト系ステンレス鋼の低試験速度下の疲労特性の研究をさらに加速させるため、低速度疲労試験機2台(10分に1回のような低速度繰り返し荷重を付加する疲労試験機)を導入する。また、より高度な疲労試験の信頼性を確保するために試験片取付ひずみ記録用レコーダと低負荷速度荷重変動制御装置を導入する。これにより、燃料電池自動車等に多用されているオーステナイト系ステンレス鋼の実使用状態での疲労強度を明らかにする。水素バネ用疲労試験機3台を導入し、蓄圧器等に使用するばねの疲労特性を調べる。(実施内容⑤-1)-e)
- ③ 蓄圧器用低合金鋼SCM435、SNCM439あるいは水素パイプライン用炭素鋼SGP、STPG370等の実用材料を対象にして、引張強度、疲労強度に及ぼす水素圧力、試験速度、試験温度等の影響評価を行うため、1MPa水素ガス疲労試験機2台を導入する。また、試験データ評価に必要な開口変位や伸びを測定するためにCOD測定用クリップゲージおよび伸び計を導入する。さらに、これらの影響評価に加え、水素純度による影響評価を行うため、高純度水素ガス製造装置(水素純度99.999999%以上)を導入する。水素環境下における疲労き裂進展下限界値を求めるため、既存のMTS疲労試験機(10ton)の制御装置をデジタル式にする。また、疲労試験の効率を上げるため、疲労試験制御用コンピューターとアンプ2式を導入する。(実施内容⑤-2)-a)。
- ④ 前年度に引きつづき水素環境破面観察システムの使用、SEMサーボ装置の改良を行い、破壊した試

験片の破面と表面において、水素に特有な破面様相、塑性変形挙動を詳細に観察し、水素による強度特性の低下の原因との関係を解明する。組織・変形挙動を観察する際に必要となる平坦な試験片表面を得るため、水素材料組織観察用研磨装置を導入する。(実施内容⑤-2)-b)。

- ⑤ この研究に関連して(財)エンジニアリング振興協会から霞ヶ関水素ステーションと鶴見ステーションの水素蓄圧タンクの提供を受け、製造時のしわの形状、材料の損傷といった点について、詳細な調査・分析を行い、高圧(～35MPa)水素ガス蓄圧器の実用化等に向けた健全性評価法の確立を目指す。蓄圧器用材料の水素侵入特性を調査するため、九大所有の昇温脱離水素ガス分析装置の修理を行う。また、蓄圧器用材料の強度特性を調べるため、九大所有の(鷲宮製)疲労試験機MFT-30の保守整備を行い、同時に停電によるデータ損失を防ぐため、無停電電源装置を付加する。

<平成 21 年度>

1) 水素侵入メカニズム

- ① 内部摩擦測定装置を導入し、疲労過程に重要な役割を果たす転位と水素の相互作用を調べる。
- ② 小型引張疲労試験機を導入し、平成 19 年度に導入した水素環境破面観察システムに接続して、塑性変形挙動に及ぼす水素の影響を結晶学的に解析する。また本水素環境破面観察システムの性能を維持するために、オーバーホール点検ならびに部品交換を行う。
- ③ 引き続き、平成 18 年度および平成 19 年度に導入した 100MPa 水素ガス大型曝露容器と平成 18 年度に導入した昇温脱離分析装置 TDS を用いて、ステンレス鋼、高強度鋼、炭素鋼に侵入する水素量を測定し、侵入水素データベースを構築する。特に、40MPa 水素ガス大型曝露容器の改造を行い急速冷却曝露容器とし、水素の拡散が速い高強度鋼や炭素鋼について、水素曝露取出しから TDS 測定までの間の水素の散逸を最小限に防ぎ、高強度鋼、炭素鋼の侵入水素データベースの高度化を図る。また、100MPa 水素ガス大型曝露容器を安全に使用するために、定期自主点検を行う。精度のよい水素測定データを取得するため、九大既存の昇温脱離分析装置 TDS のオーバーホール点検ならびに部品交換を行う。

2) ステンレス鋼の強度評価とフラクトグラフィ

- ① オーステナイト系ステンレス鋼は、燃料電池システムを構成する高圧水素タンクのライナーや、配管、バルブ等の材料として使用され、水素により疲労き裂進展速度が加速する現象が明らかになっている。また、実際に機器が使用される場合、繰返し負荷速度は 7～8 分あるいはそれ以上に非常に遅いものである。オーステナイト系ステンレス鋼では繰返し速度が 0.0015Hz(1 サイクル:11 分)と非常に遅い場合に、水素の影響が顕著に表れる。水素環境下で使用される機器の設計に反映するために、平成 18 年度に導入した 1 台の 1MPa 水素ガス疲労試験機と平成 19 年度と平成 20 年度に導入した低速度疲労試験機を用いて水素環境下で低繰返し速度の疲労試験を行い、オーステナイト系ステンレス鋼の強度データベース構築を進める。

3) 炭素鋼、低合金鋼の強度評価とフラクトグラフィ

- ① 平成 18 年度に導入した 1MPa 水素ガス疲労試験機を用いて炭素鋼、低合金鋼の疲労き裂進展特性を評価し、炭素鋼、低合金鋼の強度データベースの構築を進める。特に、低 Δk 領域の疲労き裂進展特性、疲労き裂進展下限界特性に及ぼす外部水素と内部水素の影響を明らかにするため、1 MPa 疲労試験機改造(チャンバー取り付け)を行う。
 - ② 大黒水素ステーション蓄圧器の健全性評価、有明水素ステーションの主要装置部材の健全性評価及び液水コンテナ、液水ローリーの健全性評価を行う。
- ### 4) 燃料電池自動車の高圧水素容器や配管、水素ステーションの配管、水素パイプライン等の振動解析と AE 解析
- ① 燃料電池自動車が高圧水素の充填を繰り返す過程での容器、配管系の振動、燃料電池自動車走行中の容器、配管系の振動および九州大学伊都キャンパス内に設置されている水素ステーションの水素充填中の配管の振動を実験的に解析して、振動の空間的モードを把握すると共に、応力の高

い位置を特定し、配管系の最適配置を検討する。そのため4チャンネル増設デジタル AE 解析システムを導入する。

<平成 22 年度>

1) 水素侵入メカニズム

① 昨年度までに 100MPa 水素ガス大型曝露装置と昇温脱離分析装置 TDS を用いて、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L、SUS316、SUS304 の水素特性データベースのプロトタイプを作成した。本年度は、関係機関と協議し、低合金鋼 SCM435 を中心に水素特性データベースを構築する。また、100MPa 水素ガス大型曝露容器の安全性を確保するために、定期自主検査を行う。また、高精度の水素測定データを得るために 18 年度に導入した昇温脱離分析装置 TDS についてオーバーホール点検ならびに部品の交換を行う。

2) 強度評価とフラクトグラフィ

- ① 昨年度までに高圧水素ガス曝露したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、低合金鋼 SCM435 の水素材料強度データベースのプロトタイプを作成した。本年度は、関係機関と協議し、120MPa までの高圧水素ガス中の低合金鋼やアルミ合金の水素材料強度データベースを構築する。
- ② 本年度に整備する 120MPa 水素ガス中高試験速度疲労試験機を用い、低 Δk 領域の疲労き裂進展特性、疲労き裂進展下限界特性の評価法を開発する。
- ③ 高圧水素ガス中で得られた疲労破面を走査型電子顕微鏡で観察し、水素破面・組織データベースのプロトタイプを作成する
- ④ 関係機関と協議し、外部有識者を招いて有明水素ステーションの主要部品と部材の調査を行う。

3) 燃料電池自動車の高圧水素容器や配管、水素ステーションの配管、水素パイプライン等の振動解析と AE 解析

① 燃料電池自動車走行中の容器、配管系の振動および九州大学伊都キャンパス内に設置されている水素ステーションの水素充填中の配管の振動を実験的に解析して、振動の空間的モードを把握すると共に、応力の高い位置を特定し、配管系の最適配置を提案する。さらに、圧力変動による水素タンクの状態を AE 解析し、タンクのダメージの程度を測定すると共に、タンクの使用限界の状態を把握する。また、マンション等に水素パイプラインを設置する場合の地震による振動の影響を解析する。

<平成 23 年度>

1) 水素侵入メカニズム

① 昨年度までに導入した 100MPa 水素ガス下型曝露装置と昇温脱離分析装置 TDS 並びに昨年度までに開発した侵入水素分析技術を用い、オーステナイト系ステンレス鋼に続き、低合金鋼とアルミ合金の水素特性データベースを構築する。

2) 強度評価とフラクトグラフィ

- ① 関係機関(自動車、インフラ、NEDO)と協力し、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316(12%Ni)、アルミ合金の引張試験、疲労寿命試験、疲労き裂進展試験を 115MPa 水素ガス中で行い、水素材料強度データベースを構築する。
- ② 上記試験で得られた破面を観察・分析し、水素破面・組織データベースを構築する。
- ③ 120MPa 水素ガス中曝露容器(KIH 用)を導入し、破裂前漏洩(LBB)評価に必要な水素助長割れ応力拡大係数下限値 KIH を調べる。
- ④ 昨年度に引き続き、有明水素ステーションの主要部分・部材の調査を行う。また、原子力研究所依

頼のペローズの損傷解析を行う。

- 3) 自動車用複合容器および一般複合容器の圧力サイクル試験過程の AE 解析
 - ① 複合容器を軸方向に輪切りしたモデルに繰り返し応力をかけて、疲労試験を実施する。その過程を AE 計測することで、疲労過程のさらに詳細な情報が得られることを確認する。特に、ライナーの塑性変形、クラック発生・進展に起因する AE 発生と CFRP の層間はく離、粘着はく離に起因する AE 発生の位置を特定すること、および両者の AE 発生原因を区別できる AE 解析手法を開発する。
 - ② 自動車用複合容器および一般複合容器の水圧による圧力サイクル試験で、ライナーに生じるであろう塑性変形、その後のクラックの発生と成長、クラックのライナー貫通、CFRP 層内への水の浸透、最終的な CFRP 外壁からの破断前漏洩(Leak Before Break: LBB)という一連の変化過程を、AE の計測を通して観察する。そして、その観察から AE によってサイクル試験時の状態変化を検知する可能性、LBB の兆候を検出する可能性、および LBB を生じさせたライナーの貫通クラック位置を特定する可能性を考察する。

<平成 24 年度>

- 1) 水素侵入メカニズム
 - ① 水素特性データベースを公開する。
- 2) 強度評価とフラクトグラフィ
 - ① 水素材料強度データベース、破面・組織データベースを公開する。
 - ② 水素ステーションに使用される鉄鋼材料として、「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業／システム技術開発／70MPa級水素ガス充填対応ステーション機器システム技術に関する研究開発」において使用される材料を、実施機関である岩谷産業(株)および(財)石油エネルギー技術センターから提供を受けて引張試験、疲労寿命試験、および、疲労き裂進展試験を 115MPa 水素ガス中で行い、水素材料強度データベースを構築すると共に成果を上記事業に反映する。
- 3) 自動車用複合容器および一般複合容器の圧力サイクル試験過程の AE 解析結果と材料強度学的現象との関連の検討
 - ① 圧力サイクル試験での複合容器の強度学的挙動と AE 発生との関連の検証
 - ② 水素ガス充填を 3 年間程度経験した中古複合容器の圧力サイクル試験における AE 試験の実施と新品複合容器との相違の検討。
- (6) 水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価(主に九州大学側で実施)

水素機器の製造条件や応力負荷条件を取り込んだ強度評価を行い、水素機器の部品・接合部材の設計法・製造法を確立し、産業界に提供する。

 - 1) 疲労強度に及ぼす製造加工プロセスの影響評価
 - a. 水素利用機器の主要材料である低合金鋼ならびにオーステナイト系ステンレス鋼の予ひずみ材について、水素チャージした材料の水素ガス中で高サイクル疲労強度に対する切欠き及び微小欠陥効果の強度設計法構築の基礎となる材料データの取得を行う。

水素環境下での製造加工プロセスが疲労強度に及ぼす影響評価を行うため、オーステナイト系ステンレス鋼について、溶体化処理を標準として、加工ひずみの効果について検討する。
 - b. 溶接部の疲労強度データ取得。溶接は機械部品製造に多用される接合法であるが、止端部の切欠きや、未溶着等の欠陥を含むことも多く、これらのき裂性欠陥は水素ガス中でのき裂進展を加速させ、損傷が発生する可能性が高い。このため、水素環境中での溶接部の疲労試験を行い、疲労

設計法の策定を行う。

- 2) 部品に作用する応力状態の影響把握
 - a. 水素中での切欠き材の疲労強度評価法を策定する。
 - b. 水素ガス中で締結部やバルブのシート面等の接触部で相対すべりが生じる部位で問題となるフレタイング疲労試験を行い、接触部の疲労設計法を策定する。
 - c. 水素環境下で使用される機器は一定応力で使用されるとは限らず、変動応力を受ける。これによって、水素中では微小き裂の進展が加速され、特に疲労限度以下の変動応力を含む変動応力条件下で疲労損傷が加速される可能性が高い。このため、水素環境中での変動応力に対する疲労設計法を策定する。
 - d. 水素環境下で使用される機器が地震等により大きなひずみの繰返しを受けた場合、特に切欠き部で微小なき裂が発生し、その後の疲労強度が激減する可能性が高い。そこで、地震を模擬した大振幅のひずみ負荷後の健全性評価法について検討を行う。
- 3) 長周期変動応力および静応力下の高サイクル疲労強度に及ぼす水素の影響把握
部材が長周期変動応力や静応力を継続的に受ける場合、感受性の高い材料では材料固有の応力拡大係数の限界値を超えると急激なき裂進展の加速が生じるという事象が発生する。低合金鋼の各温度での焼戻し材について材料データの取得を行うとともに、加速機構を解明する。
- 4) 各種材料の水素環境中の高サイクル疲労S-Nデータの取得
部品の疲労強度設計法策定の基礎となる高サイクル疲労領域のS-Nデータを、10MPaの水素ガス中で各種の材料に対して取得する。
- 5) 破壊靱性に及ぼす材料内水素と負荷速度の影響評価
破壊靱性は水素の影響により低下し、さらに低負荷速度では水素の影響がさらに顕著となる。また水素の影響は材料の硬さによっても顕著に異なる。このため、各種材料について連続水素チャージ下の破壊靱性試験を実施し、破壊靱性に対する水素感受性の低い材料を探索する。
- 6) 蓄圧器用材料の静荷重下のき裂進展下限界条件に及ぼす高圧水素の影響評価
蓄圧器のように高い圧力を受ける部材はき裂が生じた場合でも壊滅的な破壊が生じない設計する必要がある。このため、き裂進展下限界条件に及ぼす高圧水素の影響を評価し、設計法への反映を検討する。

<平成18～19年度>

- ① 水素環境中疲労試験装置(1MPa、荷重容量5トン)(1MPa水素ガス疲労試験機(1台)に対応)と水素環境中疲労試験装置(1MPa、荷重容量10トン)(1MPa水素ガス疲労試験機(1台)に対応)を設置し、稼働可能な状態にする(実施内容⑥-2))。
- ② 水素利用機器の主要材料となるオーステナイト系ステンレス鋼の予ひずみ材について、水素チャージした材料の水素ガス中で高サイクル疲労強度に対する切欠き効果の強度設計法構築の基礎となる材料データを取得する(実施内容⑥-1)-a)。
- ③ 疲労強度設計に不可欠な、切欠き部の応力集中効果に及ぼす水素の影響の評価線図を取得する(実施内容⑥-1))。機械部品には必ず切欠きがあり、切欠き問題は疲労強度設計の中心的課題である。大気中では切欠き材は停留き裂が発生して疲労限度となるが、水素中では特にき裂の疲労強度が低下するため、大気中の従来知見とは異なる切欠き強度特性を示す懸念がある。そこでまず、平均応力ゼロの両振り条件で各種の切欠き半径(切欠き半径0.1mmから2mmの間で3種類)について水素未チャージ材の大気中と、水素チャージ材の水素ガス中での疲労試験を行い、切欠き感度係数に及ぼす水素の影響を明らかにする。
- ④ 次に圧力容器や配管などでは内圧による平均応力が重畳するので、水素中での切欠き材に対する平均応力の評価法を明らかにする(実施内容⑥-2))。従来切欠き効果に関するデータは主に両振り条

件下でしか求められておらず、平均応力が重畳する場合にもこれを流用しているのが実状である。水素中では高平均応力に、より敏感になることが懸念される。高平均応力条件(最大降伏点の80%まで)で、各種の切欠き半径について水素未チャージ材の大気中と、水素チャージ材の水素ガス中の疲労試験を行い、平均応力下の切欠き感度係数に及ぼす水素の影響を明らかにする。これらの試験は時間を要するので、次年度以降も継続するが、19年度までには主要知見が得られるように計画する。

<平成20年度>

- ① 前年度に引きつづき水素利用機器の主要材料となるオーステナイト系ステンレス鋼の予ひずみ材について、水素チャージした材料の水素ガス中で高サイクル疲労強度に対する微小欠陥に対する強度設計法構築の基礎となる材料データの取得を行う。微小欠陥作製のため、本年度導入する微小欠陥作製機によって導入した欠陥から疲労予き裂を発生させ、試験片研磨用小型旋盤で切欠きを除去し、微小予き裂測定用顕微鏡により予き裂測定を行う(実施内容⑥-1)-a)。
- ② 疲労強度設計に不可欠な、切欠き部の応力集中効果に及ぼす水素の影響のデータを取得する(実施内容⑥-1))。前年度に引きつづき平均応力ゼロの両振り条件で各種の切欠き半径(切欠き半径0.05mmから1mmの間で4種類)について水素未チャージ材の大気中と、水素チャージ材の水素ガス中での疲労試験を行い、切欠き感度係数に及ぼす水素の影響を明らかにする。
- ③ 溶接部を有する水素未チャージ材と水素チャージ材の試験片の疲労試験に着手し、溶接部の疲労設計法の策定を行う。このため、マイクロ試料埋め込み機を導入し、作製した試料により、溶接部の材料組織観察を行う(実施内容⑥-1)-b)。
- ④ 水素中での切欠き材に対する平均応力の評価法を策定するために動ひずみ計を導入し、前年度に引きつづき、き裂開閉口挙動測定を行う(実施内容⑥-2)-a)。
- ⑤ 接触部のフレッティング疲労強度試験を水素ガス中で実施し、フレッティング疲労強度に及ぼす水素の影響を明らかにするため、高精度非接触段差測定器を導入して、フレッティング摩耗段差の測定を行う(実施内容⑥-2)-b)。
- ⑥ 水素ガス中変動応力疲労試験機を導入して、疲労限度以下の応力を含む変動応力疲労試験に着手する。また、高純度の水素ガス置換を行うために、水素ガス置換用油拡散形真空ポンプを導入する(実施内容と⑥-2)-c)。
- ⑦ 微小疲労き裂進展・き裂開閉口測定解析装置を用いて水素中ガス中のき裂進展挙動に及ぼすき裂開閉口挙動を高精度に計測し、水素がき裂閉口に及ぼす効果を定量的に評価する(研究実施項目⑥-2)-c)。
- ⑧ 連続的に水素チャージを行いながら、高い水素濃度を保った状況の下で疲労試験が実施可能な構造の連続水素チャージ疲労試験装置により長周期変動応力試験を行い、連続水素チャージ疲労試験き裂観察装置により高倍率でき裂先端部の観察を行う(研究実施項目⑥-2)-c)。
- ⑨ 切欠き部に地震相当の大振幅のひずみ負荷を与えた上で高サイクル疲労試験を実施し、地震負荷後の健全性評価法について検討を行う。水素チャージした試験片の安定保存のために曝露材凍結保存容器を導入する(研究実施項目⑥-2)-d)

<平成21年度>

- ① 水素利用機器の主要材料である低合金鋼について、水素チャージした材料の水素ガス中で高サイクル疲労強度に対する微小欠陥に対する強度設計法構築の基礎となるき裂進展特性データの取得を継続して行う。(研究実施項目⑥-1)-a)。
- ② 溶接部を有する水素未チャージ材と水素チャージ材の SUS304 の疲労試験を継続して実施し、溶接部の疲労設計法の策定を行う。(研究実施項目⑥-1)-b)
- ③ 疲労強度設計に不可欠な、切欠き部の応力集中効果に及ぼす水素の影響のデータを取得する(研

究実施項目⑥-2)-a)。機械部品には必ず切欠きがあり、疲労強度設計の中心的課題である。大気中では切欠き材は停留き裂が発生して疲労限度となるが、水素中では特にき裂の疲労強度が低下するため、大気中の従来知見とは異なる切欠き強度特性を示す可能性が高い。SUS304、SUS316Lについて各種の切欠き半径について水素未チャージ材の大気中と、水素チャージ材の水素ガス中での疲労試験を継続して行い、切欠き感度係数に及ぼす水素の影響を明らかにする。

- ④ 接触部のフレッティング疲労強度試験を水素ガス中で実施し、フレッティング疲労強度に及ぼす水素の影響を明らかにする。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ⑤ 水素ガス中で変動応力試験を行う試験装置により、オーステナイト系ステンレス鋼について疲労限度以下の応力を含む変動応力疲労試験を継続して実施する。(研究実施項目⑥-2)-c)
- ⑥ 切欠き部に地震を模擬した大振幅のひずみ負荷を与えた上で、高サイクル疲労試験を継続して実施し、地震負荷後の健全性評価法を策定する。(研究実施項目⑥-2)-d)
- ⑦ 部材が長周期変動応力や静応力を継続的に受ける場合、低合金鋼では材料固有の応力拡大係数の限界値を境にして急激なき裂進展の加速が生じることが明らかになったので、連続水素チャージ疲労試験機を用いてき裂進展試験を行ってデータ取得を行うとともに、連続水素チャージ疲労試験き裂観察装置を用いてき裂進展機構を解明する。(研究実施項目⑥-3))
- ⑧ 部品の疲労強度設計線図の策定に際しては各種の材料について基準となる高サイクル疲労領域のS-Nデータが必要である。ステンレス鋼について 10^7 回までのS-Nデータを取得するために、比較的速い繰返し速度での水素ガス中疲労試験が可能な新しい形式の 10MPa 水素ガス中高サイクル疲労試験機を導入して、まずステンレス鋼の材料強度のデータベースを構築する。(研究実施項目⑥-4))

<平成 22 年度>

- ① 溶接部を有する水素未チャージ材と水素チャージ材のステンレス鋼および炭素鋼の疲労試験を実施し、溶接部の疲労設計法の策定を行う。(研究実施項目⑥-1)-b)
- ② 接触部のフレッティング疲労強度試験を水素ガス中で実施し、フレッティング疲労強度に及ぼす水素の影響を明らかにする。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ③ 水素ガス中で変動応力試験を行う試験装置により、ステンレス鋼、低合金鋼について疲労限度以下の応力を含む変動応力疲労試験を継続して実施する。(研究実施項目⑥-2)-c)
- ④ 切欠き部に地震を模擬した大振幅のひずみ負荷を与えた上で、高サイクル疲労試験を継続して実施し、地震負荷後の健全性評価法を策定する。(研究実施項目⑥-2)-d)
- ⑤ 部材が長周期変動応力や静応力を継続的に受ける場合、低合金鋼では材料固有の応力拡大係数の限界値を境にして急激なき裂進展の加速が生じることが明らかになったので、炭素鋼についてデータ取得を行う。(研究実施項目⑥-3))
- ⑥ 部品の疲労強度設計線図の策定に際しては各種の材料について基準となる高サイクル疲労領域のS-Nデータが必要である。 10^7 回までのS-Nデータを取得するために、比較的速い繰返し速度での水素ガス中疲労試験が可能な 10MPa 水素ガス中高サイクル疲労試験機を用いて材料強度のデータベースを構築する。(研究実施項目⑥-4))
- ⑦ 追加公募により、水素材料強度特性研究チームに2社(岩谷産業株式会社、株式会社共和電業)が本事業に参画することになった。研究推進体制の役割で指導・助言を行うにあたり、材料解析のための試験を行う。また水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業等との連携により車載用高圧水素容器用アルミ合金の 115MPa 水素ガス中疲労き裂進展特性データ取得および水素機器に使用可能な鋼種の拡大のためオーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼、アルミ合金の強度特性データ取得を加速する。(研究実施項目⑥-4))

<平成 23 年度>

- ① 破壊靱性に及ぼす材料内水素の影響を負荷速度との関連を含めて検討し、破壊靱性を考慮すべき部材の設計法について検討を行う。評価対象の材料種類を拡大する。(研究実施項目⑥-5))
- ② 長周期変動応力や静応力を継続的に受ける場合に生じる急激なき裂進展の加速は硬度の高い材料でより顕著であることが明らかになった。実験を継続して行い、今年度は水素機器の溶接構造部の熱影響により硬化が予測される部材についてデータ取得を行う。(研究実施項目⑥-3))
- ③ 溶接部の疲労強度に及ぼす水素の影響を明らかにする実験を、炭素鋼の溶接材を対象とし引き続き実施し、溶接部の疲労設計法の策定を行う。(研究実施項目⑥-1)-b)
- ④ 不純物の混入した水素ガス中でフレット疲労試験を実施し、フレット疲労強度に及ぼす水素の不純物濃度の影響を明らかにする。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ⑤ 接触部のフレット疲労強度に材料中水素濃度が及ぼす影響を解明し、フレット疲労を被る部材の長期使用の健全性について検討を行う。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ⑥ バルブ等の厳しい応力状態で接触する部材について水素ガス中での損傷評価を実施し、バルブ等の寿命、信頼性、耐久性の向上について検討するための基礎的データを取得する。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ⑦ 高サイクル疲労寿命域で使用される部材の設計上、もともと基本的なデータとなる平滑材の S-N 線図を、10MPa までの水素ガス中で取得し、データベース構築を引き続き実施する。(研究実施項目⑥-4))
- ⑧ 高圧水素ガス中(10MPa)の疲労強度について微小欠陥の影響を明らかにし、微小欠陥を有する部材の疲労設計法について高圧水素の影響を考慮する必要性について検討を行う(研究実施項目⑥-2)-a)(研究実施項目⑥-4))
- ⑨ 120MPa の高圧水素中でボルト負荷によるき裂進展試験を実施できる装置を導入し、静的荷重下のき裂進展限界条件に及ぼす高圧水素ガスの影響を明らかにし、高圧水素部材の設計基準について検討を行う。(研究実施項目⑥-5))

<平成 24 年度>

- ① 破壊靱性に及ぼす材料内水素の影響を明らかにする実験を継続して行う。水素の影響による破壊靱性低下を改善する材料成分について検討を行う。(研究実施項目⑥-3))
- ② 長周期変動応力や静応力を継続的に受ける場合に生じる急激なき裂進展の加速について、各種材料についてデータ取得を引き続き行う。(研究実施項目⑥-3))
- ③ 水素ガス純度が接触部のフレット疲労強度に及ぼす影響を解明する実験を継続して行い、フレット疲労強度に及ぼす水素の純度の影響を明らかにする。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ④ 接触部のフレット疲労強度に材料中水素濃度が及ぼす影響を解明する実験を継続して行い、フレット疲労を被る部材の長期使用の健全性評価法について検討を行う。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ⑤ バルブ等の厳しい応力状態で接触する部材について損傷評価の結果を踏まえて、寿命、信頼性、耐久性の向上法について策定する。(研究実施項目⑥-2)-b)
- ⑥ 120MPa 高圧水素ガス中の高サイクル疲労試験を実施し、高サイクル疲労強度に及ぼす高圧水素の影響を解明し、またデータベース構築を行う。(研究実施項目⑥-4))
- ⑦ 高圧水素ガス中(10MPa)の疲労強度について微小欠陥の影響を明らかにする実験を継続して行い、高圧水素中の微小欠陥を有する部材の疲労設計法を策定する(研究実施項目⑥-2)-a)(研究実施項目⑥-4))
- ⑧ 120MPa の高圧水素中でボルト負荷による静的荷重下のき裂進展試験を引き続き実施し、高圧水素部材の設計基準について検討を行う。

- (7) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する研究状況調査(主に産業技術総合研究所、九州大学側で実施)

<平成18～19年度>

- ① 平成19年11月に米国で開催されるSeventh International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture (36th ASTM National Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響について、米国における最新の研究状況を調査する。また、平成20年1月に中国で開催されるThe eighth International Conference on Fundamentals of Fractureに参加し、ナノ・メゾレベルにおける材料強度に関する情報収集を行う。
- ② 平成19年5月にポーランドにて開催される「ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF ENGINEERING MATERIALS」に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。また、平成19年11月に米国にて開催される「Seventh International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture (36th ASTM National Symp. on Fatigue and Fracture Mechanics)」に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響について、米国材料試験協会(ASM)における最新の研究状況を調査する。

<平成20年度>

- ① 平成20年9月にチェコにて開催されるEuropean Conference on Fracture (ECF-17)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。また、平成20年9月にアメリカで開催される2008 International Hydrogen Conferenceに参加し、材料強度に及ぼす水素の影響について、最新の研究状況を調査する。
- ② 平成20年9月にチェコにて開催されるEuropean Conference on Fracture (ECF-17)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。また、平成20年11月にウクライナで開催されるWELDING AND RELATED TECHNOLOGIES INTO THE THIRD MILLENNIUMに参加し、水素機器に使用される溶接継ぎ手の強度評価に関する情報収集を行う。

<平成21年度>

- ① 平成21年7月にカナダにて開催される12th International Conference on Fracture (ICF12)に参加し、破壊力学の視点から見た材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。また、平成21年9月にポルトガルにて開催される7th EUROMECH Solid Mechanics Conference (ESMC2009)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響について、欧州における最新の研究状況を調査する。
- ② 平成21年8月にドイツで開催される15th International Conference on Strength of Materials(ICSMA)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。
- ③ 平成21年9月にイタリアで開催されるInternational Conference on Crack Path 2009に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。

<平成22年度>

- ① 平成22年6月にドイツにて開催されるEuropean Conference of Fracture (ECF18)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響について、欧州における最新の研究状況を調査する。
- ② 平成22年6月にチェコにて開催される10th International Fatigue Congress (Fatigue2010)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。

<平成23年度>

- ① 平成23年6月にアメリカで開催されるJSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing (ICM&P 2011)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。

- ② 平成 23 年 7 月にアメリカ合衆国で開催される 11th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM11)に参加し、連続体力学シミュレーションの観点から見た材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。
- ③ 平成 23 年 9 月に神戸で開催される International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。
- ④ 平成 23 年 12 月に香港にて開催される 14th Asia-Pacific Vibration Conference (APWC2011)に参加し、AE を利用した機械、構造物の健全性診断技術に関する情報収集及び研究成果の発表を行なう。

<平成 24 年度>

- ① 平成 24 年 7 月にブラジルで開催される 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012)に参加し、連続体力学シミュレーションの観点から見た水素デバイス等の最適設計に関する情報収集を行う。
- ② 平成 24 年 8 月にロシアで開催される European Conference on Fracture 19 (ECF19)に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。
- ③ 平成 24 年 9 月にイタリアで開催される Crack Paths 2012 に参加し、材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集及び研究成果の発表を行う。

(8) 材料中の侵入水素の存在状態解析(主に上智大学で実施)

- 1) 昇温脱離法を用いて材料中に侵入した水素の存在状態を解析し、変形過程との関係を明らかにする。

<平成 18～19 年度>

- ① オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化メカニズムを解明するため、オーステナイト系ステンレス鋼中の原子空孔、転位、結晶粒界、介在物、析出物等、水素トラップサイトの分離を行い、侵入水素の存在状態を明確にする(実施内容⑧-1))。

<平成 20 年度>

- ① 材料中の格子欠陥(主に、転位と原子空孔)にトラップされた水素を昇温脱離法により分離し、変形過程における格子欠陥生成と脆化との関係を明らかにする。

<平成 21 年度>

- ② 安定オーステナイトステンレス鋼と準安定オーステナイトステンレス鋼について、昇温脱離分析法を用いて fcc および bcc 格子中の水素、さらには格子欠陥にトラップされた水素の存在状態分離を試みる。

<平成 22 年度>

- ① オーステナイト安定度の異なる 2 種類のステンレス鋼を対象とし、安定オーステナイトステンレス鋼(SUS316L)と準安定オーステナイトステンレス鋼(SUS304)を中心に変形過程における転位と水素の相互作用、さらには水素環境脆化との関係解明を目的とする。具体的には、水素添加したステンレス鋼に真空チャンバー内で引張変形を付与し、弾性・塑性変形過程における水素放出をこのチャンバーに取り付けた質量分析器を用いて検出する。転位運動によって試験片内部から表面まで水素が輸送されると、表面から水素が放出され質量分析器で検出可能である。各種条件(ひずみ速度、温度等)を変化させ、転位によって水素輸送される引張条件と水素環境脆化との関係解明を目指

す。

<平成 23～24 年度>

- ① オーステナイト安定度の異なる2種類のステンレス鋼を対象とし、平成22年度に確立した転位と水素の相互作用を評価する装置を用いて、安定オーステナイトステンレス鋼(SUS316L)と準安定オーステナイトステンレス鋼(SUS304)の弾性/塑性変形過程における転位と水素の相互作用、さらには水素環境脆化との関係解明を目的とする。具体的には、水素添加したステンレス鋼に真空チャンバー内で引張変形を付与し、弾性・塑性変形過程における水素放出をこのチャンバーに取り付けた質量分析器を用いて検出する。転位運動によって試験片内部から表面まで水素が輸送されると、表面から水素が放出され質量分析器で検出可能である。各種条件(弾性・塑性応力、ひずみ速度、温度等)を変化させ、転位によって水素輸送される引張条件と水素環境脆化との関係解明を目指す。
- (9) 材料中の結晶粒内・粒界におけるすべり変形に及ぼす水素の影響調査(主に物質・材料研究機構で実施)
- 1) 原子間力顕微鏡やナノインデンテーション等の先端的解析手法により、種々の水素脆化特性(引張、疲労、き裂伝播など)を有する金属に対して、粒界・粒内析出物やサブグレイン、内部転位組織、変形組織をナノスケールで統計的かつ定量的に評価し、金属組織と水素脆化特性の関係を明らかにする。さらに、耐水素脆化性に優れる金属組織の理想像についても検討を行う。

<平成 18～19 年度>

- ① オーステナイト系ステンレス鋼において、塑性変形の観点から水素脆化メカニズムを解明するため、原子間力顕微鏡等を用いて、結晶粒内・粒界のすべり変形に及ぼす水素の影響を分析する(実施内容⑨-1)。

<平成 20 年度>

- ① 種々の強度を有する結晶粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒鋼の試作を行うと共に、浸漬による水素吸蔵特性を昇温脱離分析によって明らかにする。加えて、引張特性に及ぼす水素の影響を評価し、結晶粒の超微細化によって耐水素脆化性の変化を確認する。さらに、原子間力顕微鏡等により、超微細結晶粒におけるすべり変形を評価し、耐水素脆化性との関係から、金属組織と水素脆化メカニズムとの関係を考察する。

<平成 21 年度>

- ① 平成20年度までに作製した溝ロール圧延による結晶粒径 $1\mu\text{m}$ の0.05-0.4mass%Cの炭素鋼に対して、平滑材の疲労特性に及ぼす水素の影響を明らかにすると共に、CT試験片を用いたき裂進展特性に及ぼす水素の影響を調べる。汎用炭素鋼と比較した耐水素脆化性の向上を定量的に評価する。さらに、き裂進展経路における詳細なAFM観察、ナノ硬さ測定を行い、水素の影響を組織・力学的に解析し、耐水素脆化性に優れる理想組織像を明確にすることに寄与する。

<平成 22 年度>

- ① 超微細粒を有する低合金炭素鋼に対して、種々の微量添加元素の制御によって、革新的に耐水素脆化性に優れる材料創製の指針を得る。特に、疲労特性に及ぼす水素の影響に注目し、平滑材、切欠き材、CT試験片に対して、種々の応力比、速度効果を明らかにする。さらに、き裂進展経路における詳細なAFM観察、ナノ硬さ測定を行い、水素の影響を組織・力学的に解析し、耐水素脆化性に優れる理想組織像を明確にすることに寄与する。

(10) 材料中の疲労き裂先端の水素状態の調査(主に福岡大学で実施)

1) マイクロプリント法を用いた疲労き裂先端等における水素状態の可視化を行う。

<平成19年度>

① オーステナイト系ステンレス鋼における疲労き裂先端の水素状態を、マイクロプリント法により、可視化する(実施内容⑩-1)。

<平成20年度>

① オーステナイト系ステンレス鋼およびクロムモリブデン鋼における疲労き裂先端の水素状態を、マイクロプリント法により可視化を行う。

<平成21年度>

① 水素チャージを施した水素蓄圧器用クロムモリブデン鋼の疲労き裂先端近傍における水素集積状況を水素マイクロプリント法により可視化する。き裂先端近傍の高応力部への水素拡散・集積の挙動を明らかにすることで、疲労強度低下機構解明への手がかりを得る。また、水素配管用ダクタイル鋳鉄の引張強度特性に及ぼす水素の影響を明らかにし、水素による材料の延性低下の機構を明らかにする。

<平成 22 年度>

② ステンレス鋼やフェライト鋼、非鉄金属に水素チャージを施して疲労試験を行い、き裂先端近傍における水素の集積状況を水素マイクロプリント法(HMT)により可視化する。種々の材料について、き裂先端近傍の高応力部への水素拡散・集積の挙動を明らかにすることで、疲労強度低下機構解明への手がかりを得る。また、水素配管用ダクタイル鋳鉄に水素チャージを施して疲労試験を行う。HMTにより材料中の水素の挙動を調べ、疲労過程における水素の役割を明らかにする。

<平成 23 年度>

① 試料表面のコーティング方法を変化させることにより HMT の水素検出感度を向上させる。その方法を用いて、水素チャージを施した低合金鋼について、疲労き裂先端近傍における拡散性水素の挙動を可視化し明らかにする。

<平成 24 年度>

① オーステナイト安定度の異なる複数のステンレス鋼について、疲労き裂先端近傍の水素集積の挙動を HMT により可視化する。そして、マルテンサイト変態相がき裂先端への水素の移動に果たす役割を明らかにする。

(11) 水素ステーションに使用された金属材料の健全性及び強度評価(主に物質・材料研究機構で実施)

1) 解体された水素ステーションから各種の部品を採取し、金属材料の健全性及び強度の評価を行う。具体的には概観調査によりクラックの有無を調査した後、化学成分分析や組織調査により材料の健全性を評価し、必要に応じて各種の材料試験を実施して強度の評価を行う。また、強度評価では平均荷重を変えることができる超音波疲労試験技術を活用し、疲労限度及び疲労き裂進展下限界値に対する水素の影響についても検討する。

<平成 21 年度>

① 既に解体・調査が終了した水素ステーションの部品(SCM435 鋼製蓄圧器)から試験片を採取し、平均荷重を変えることができる超音波疲労試験により疲労限度及び疲労き裂進展下限界値に対する

水素の影響を調査する。

- ② 水素ステーションが解体された後には、各種の部品を採取し、金属材料の健全性調査を行う。

<平成 22 年度>

- ① 前年度以前に採取された部品から試験片を採取し、各種の材料試験を実施することにより、疲労特性に及ぼす水素の影響を調査する。
- ② 水素ステーションの解体が行われた際には、逐次調査を行う。

<平成 23 年度>

- ① 有明水素ステーションの蓄圧器について、金属材料の健全性の調査を継続するとともに、き裂伝ば特性を調査するための試験法を確立する。
- ② 有明水素ステーションの蓄圧器材について、基準的な $R=-1$ の条件下でのギガサイクル疲労特性を評価し、霞が関水素ステーションの蓄圧器材との比較を行う。

<平成 24 年度>

- ① 有明水素ステーション及び霞が関水素ステーションの蓄圧器についてき裂伝ば特性を調査し、両者を比較する。
- ② 有明水素ステーションの蓄圧器材について、より実用的な $R \geq 0$ の条件下でのギガサイクル疲労特性を評価し、霞が関水素ステーションの蓄圧器材との比較を行う。

(12) 水素デバイス等の安全設計シミュレーション(主に九州大学側で実施)

- 1) 材料内の温度、応力、水素、時間を因子とした有限要素法に基づくシミュレーション技術を開発し、疲労き裂進展特性に水素が与える影響を評価することを可能にする。
- 2) 材料強度に水素が与える影響を考慮した汎用計算力学シミュレーションシステムを確立し、水素利用に関連する周辺機器の安全性確保と高性能化を可能にする。

<平成 23 年度>

- ① 昨年度までに、金属表面からの水素の流束量を明らかにし、水素ガスの圧力を考慮した材料内水素拡散シミュレーション技術を開発した。本年度は、3 次元き裂の応力拡大係数評価などの解析技術の開発を行い、き裂を有する圧力容器や配管の圧力変動が疲労強度に与える影響を評価することを可能にする。
- ② 昨年度までに、3 次元有限要素法における炭素繊維強化プラスチック材料の解析技術や多点拘束条件式に基づくアセンブリ構造の解析技術を開発し、様々な水素デバイス等の応力解析を可能にした。本年度は、アセンブリ構造のモデリングや機器構成部品の結合部分に関する物理量評価などの技術を開発し、シミュレーションシステムの高度化を図る。また、開発システムにおける一連のシミュレーション作業工程の簡素化を行い、ソフトウェアとして整備する。

<平成 24 年度>

- ① これまでに得られたシミュレーション結果を整理し、水素利用に関連する周辺機器の設計に向けた、3 次元有限要素法に基づくシミュレーションに必要な材料定数のデータベースを構築し、一般公開する。
- ② これまでに確立した計算機シミュレーションシステムを用いて、水素デバイス等の最適構造設計並びに安全性評価を行い、信頼性の高い設計を実現可能にする。また、高圧水素関連の機械システム向け汎用計算力学シミュレータとして開発システムを整備し、一般公開する。

実施計画

研究実施項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度
(1)ナノ・メゾレベルにおける強度・変形過程の解明		手法開発 素過程の解明	SIMSによる水素の存在位置の明確化 水素TEMホルダーの開発		き裂近傍における水素挙動の明確化 転位に及ぼす水素の影響解明		
(2)高圧ガス水素下における疲労き裂発生と伝ば機構の解明	試験技術開発	き裂発生・伝ばの解明	超高圧ガス水素下における材料評価試験技術開発 疲労き裂発生・伝ば機構の解明		水素の影響を統一的に表すパラメータの提案・検証 実体バネの評価手法開発 微小き裂停留挙動に及ぼす水素の影響解明		
(3)疲労き裂先端における塑性変形(すべり変形)と水素の相互作用の解明					き裂先端における水素挙動の明確化 SIMSとEBSDによるき裂先端でのすべりの局在化の解析		
(4)高圧ガス水素下及び液体水素下における疲労き裂発生・進展メカニズムの解明					120MPa水素ガス中高速疲労試験技術の開発 水素機器に使用される材料の選択指針の確立		
(5)水素機器に使用される金属材料の強度評価		測定法開発 水素量測定 水素侵入メカニズムの解明 強度評価とフラクトグラフィ			水素侵入メカニズムの解明とデータベース 強度評価・フラクトグラフィとデータベース 健全性評価 有明ステーション健全性評価 水素ステーション用材料の評価		
(6)水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価			強度評価		破壊靱性・材料内水素と負荷速度 長周期変動応力 溶接 フレット疲労 データベース 10MPa, 120MPa 静荷重下のき裂進展下限界 120MPa		

2.1.3 研究実施項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

平成19年度～平成24年度は非金属材料(ゴム・樹脂)を対象とし以下の研究実施項目を行う。

- (1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価(主に九州大学で実施)
- (2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価(主に産業技術総合研究所で実施)
- (3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する最新研究状況調査(主に九州大学側で実施)
- (4) 水素雰囲気下におけるゴム材料研究(主にNOK(株)で実施)

- (1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価
摩擦・摩耗・劣化特性評価(ゴム材のブリスタ現象の再現と影響要因の明確化)
 - a. 圧力差、減圧速度、ゴム材とブリスタ発生状況の関係を把握する。
 - b. ブリスタによる内部クラックの進展状況を観察し、ブリスタ発生メカニズムを推定する。
 - c. 長時間水素雰囲気下に暴露されたゴム材料の物性変化(劣化)の評価を行う。
 - 1) 水素侵入・放出メカニズムの解明
 - 2) ブリスタ発生メカニズムの解明
 - 3) 強度・劣化特性評価

<平成19年度>

- ① ゴムや樹脂を100MPa大型水素ガス曝露容器にて曝露し、高圧水素ガスで引き起こされる損傷を明らかにする。特に、ゴム材料に関する研究については、ゴム材料高圧水素耐久試験機(任意の減圧速度で100MPaの水素ガスを繰返し充填できる耐久試験機)を導入し、ブリスタ発生メカニズムを解明する。加えて、高速・高精度レーザー変位計システムを導入し、曝露チャンバー内の試験片の寸法を正確に計測し、水素吸蔵によるゴム材料の膨潤挙動を明らかにする。同時に水素曝露後におけるゴム材料の粘弾性挙動を測定し、その物性変化を把握するためのOリング用ゴム材料動的粘弾性評価装置を導入する。(実施内容①-1))
- ② ゴムと補強剤を系統的に組み合わせ、100MPa水素ガス圧力容器を用いた繰返し曝露試験、100MPa水素ガス曝露材を用いた引張試験・水素分析、ゴム材料高圧水素耐久試験機を用いたOリング耐久試験を実施し、高強度のゴムと水素をトラップしない補強剤の組み合わせが高圧水素ガス中で起こるブリスタの防止に有益であることを見出した。この知見に基づき、ゴムの物性と強度測定並びにブリスタ発生・成長の観察を実施し、高圧水素ガスに耐えることができるOリングの実用化を目指す。(実施内容①-2))

<平成20年度>

- ① 平成19年度に導入したOリング用ゴム材料水素透過率測定装置、ゴム・樹脂材料中水素分析装置を用いて、ゴム・樹脂材料の水素量に及ぼす充てん剤や曝露圧力の影響を明らかにする。(実施内容①-1))
- ② 高圧水素耐久試験機に高圧下でOリング用ゴム材料の水素透過率を測定するための高圧水素耐久試験機用水素透過率測定ユニットを追加して、高圧下でOリング用ゴム材料に侵入する水素量を明らかにする(実施内容①-1))。
- ③ 平成19年度に設置した高圧水素耐久試験機を用い、高圧水素に繰返し曝露することによりOリングのブリスタ破壊が発生することが明らかになった。そこで、高圧水素耐久試験機の評価条件、すなわ

ち圧力、保持時間、温度等の運転条件、線径、圧縮率等のリング形状因子等の要因について、ブリスタ破壊に対する感度評価を実施し、リングの繰り返し高圧水素曝露によるブリスタ再現条件を検討する。このため、高圧水素耐久試験機試験体ホルダー追加、コンプレッサー増強による高圧水素リング評価加速を実施する(実施内容①-2)。

- ④ ブリスタ現象はゴム材料の引き裂き特性の影響が大きいため、き裂を導入した状態でのゴム材料の強度特性を評価が必要となる。き裂長さを測定するためのマイクロスコープおよび試験片のひずみを測定するためのデータロガーからなるゴム用き裂観察・ひずみ測定装置を導入し、ゴム材料の引き裂き特性を定量的に評価する(実施内容①-2)。
- ⑤ ブリスタ発生メカニズムを検討するため、ゴム材料の高速な圧力変化の影響の把握が必要である。このため、ゴム高速変形挙動観測装置を導入し、高速な電気刺激に対する誘電率の挙動を計測する(実施内容①-2)。
- ⑥ 水素環境中でのゴム材料の強度特性を評価するために、引張試験用水素曝露容器を導入する(実施内容①-3)。
- ⑦ ゴム材料熱特性評価装置およびゴム材料熱膨張率評価装置を導入し、平成19年度に導入したリング用ゴム材料動的粘弾性評価装置とともに使用し、高圧水素ガス中で曝露したゴム材料の構造変化に伴う吸発熱挙動、熱膨張率、粘弾性挙動を測定し、水素曝露によるゴム材料物性への影響の評価を行う(実施内容①-3)。
- ⑧ 平成19年度に導入したゴム材料高圧水素耐久試験機を用いて、ゴム材料の耐久性・シール性に及ぼす材料や充てん剤の影響を明らかにする(実施内容①-3)。
- ⑨ ゴム材料高圧水素耐久試験機を用いて高圧水素環境中で水素曝露したゴム材料の疲労試験を実施し、疲労特性に及ぼす材料強度、充てん剤および水素曝露の影響について評価する(実施内容①-3)。

<平成 21 年度>

- ① 昨年度までの研究の結果、高圧水素ガスシール用 O リングゴム材料の高圧ガス雰囲気におけるブリスタ現象を再現し、ブリスタによる破壊現象の解明が進んだ。この結果に基づきゴム材料中に溶解した水素ガスによる気泡発生からブリスタに至る破壊現象の力学的モデルを提案した。本年度は、平成 20 年度までに確立したブリスタ破壊再現実験手法および提案した破壊現象の力学的モデルに基づき材質、粒子径、比表面積等が異なる充てん剤を用いたゴム材料のデータ取得を進める。これにより、ブリスタ破壊現象に対する充てん剤の影響を明らかにする。(実施内容①-3))
- ② 高圧ガスシール用ゴム材料を対象として平成 20 年度までに確立したブリスタ破壊再現実験手法および提案した破壊現象の力学的モデルを用いて、ポリテトラフルオロエチレン等の樹脂材料のデータ取得を進める。これにより、実験手法および力学的モデルの樹脂材料に対する適用可能性を検討する。(実施内容①-1))
- ③ ゴム構造のナノオーダーの構造不均質性を評価するためゴム用原子間力顕微鏡を導入し、構造不均質性とブリスタ起点との関連について検討する。(実施内容①-2))
- ④ 平成 20 年度に導入したゴム材料気泡発生挙動観測装置を用い、0.6MPa 水素雰囲気下におけるゴム材料の分光特性測定を実施し、ブリスタの起点となる気泡発生現象を確認する。また、10MPa の高圧水素ガス雰囲気中に曝露されたゴム材料の減圧後のブリスタ発生・進展挙動および膨潤現象を観察するために、ガラス付高圧セルチャンバを導入し、高圧水素雰囲気および高圧水素雰囲気からの減圧する際の試験片形状やブリスタ発生状況を直接観察する。(実施内容①-2))
- ⑤ 平成 19 年度に設置した高圧水素耐久試験器を用い、リングを高圧水素に繰り返し曝露することによりブリスタ破壊が発生することが明らかになった。そこで、平成 20 年度に水素センサーの増設、コンプレッサー高性能化など機能を増強した高圧水素耐久試験機を用い、高圧水素耐久試験機の評

価条件、すなわち圧力、保持時間、温度等の運転条件、線径、圧縮率等のリング形状因子等の要因について、ブリスタ破壊に対する感度評価を実施し、リングの繰り返し高圧水素曝露によるブリスタ再現条件を検討する。(実施内容①-2)

- ⑥ ゴム材料の正確な構成式を見積もり、ゴム材料破壊現象の力学的モデルの精度を向上させるために、2軸引張試験機を導入する。(実施内容①-2)
- ⑦ 平成20年度に導入したゴム用き裂観察・ひずみ測定装置、引張試験用水素曝露容器、平成19年度に導入したリング用ゴム材料動的粘弾性評価装置、高速・高精度レーザー変位システム、リング用ゴム材料高精度密度測定装置、およびゴム変形挙動追跡装置を用いて種々のゴム材料物性を計測する。これにより水素曝露によるゴム材料物性への影響の評価を行う。これらと平行してゴム材料の疲労進展特性に及ぼす充てん材の影響について評価する。このため、ゴム用疲労試験機を導入する。(実施内容①-3))
- ⑧ 物性評価用試料調整のため、ドラフトチャンバーを導入する。(実施内容①-3))
- ⑨ 高圧水素中で曝露したゴム材料の添加剤を溶媒にて抽出し、濃縮、計量による分析、定量を実施するためエバポレーターシステム、ジーニアス天秤を導入する。(実施内容①-2))
- ⑩ 高圧水素中で曝露したゴム試験片の体積変化データ取得のためデジタルマイクロスコープを導入する。(実施内容①-1))
- ⑪ 高圧水素曝露後のゴム材料から発生する音響波形計測による破壊状況解析のため広帯域アンプを導入する。(実施内容①-1))

<平成22年度>

- ① 前年度までの研究により、ゴム材料に水素ガスによる気泡発生からブリスタに至る破壊現象の力学的モデルが確立される。本年度は提案された力学的モデルの精度向上を目的にゴム材料のマクロな変形パラメータ取得および変形に伴うミクロな構造変化に関する情報取得を進める。(実施内容①-2))
- ② ブリスタ発生メカニズムを検討するため、ゴム材料のき裂の程度、発生頻度などの発生状況を把握する必要がある。このためゴムき裂信号高速計測システムを導入し、き裂発生に伴う信号を記録し、き裂発生状況を把握する(実施内容①-2))。
- ③ 平成21年度までにポリテトラフルオロエチレン等の樹脂材料を対象に確立した力学的モデルなどを含む耐水素性評価方法を用いて、ポリエチレンなど、他の樹脂系についてのデータ取得を進める。(実施内容①-3))
- ④ 平成20年度に導入したゴム用き裂観察・ひずみ測定装置、引張試験用水素曝露容器、平成19年度に導入したリング用ゴム材料動的粘弾性評価装置、高速・高精度レーザー変位システム、リング用ゴム材料高精度密度測定装置、およびゴム変形挙動追跡装置を用いて種々のゴム材料物性を計測する。これにより水素曝露によるゴム材料物性への影響の評価を行う。(実施内容①-3))
- ⑤ 樹脂材料の破壊靱性値に及ぼす高圧水素曝露の影響を明らかにするため、樹脂材料破壊靱性評価システムならびに高精度試験片研磨装置を導入して、各樹脂材料の破壊靱性試験を行う。(実施内容①-3))

<平成23年度>

- ① ブリスタ発生メカニズムを検討するため、平成22年度に導入したゴムき裂信号高速計測システムを用いて、き裂発生に伴う信号を記録し、ゴム材料のき裂の程度、発生頻度などの発生状況を把握する。これらの結果に基づき、ゴム材料とき裂発生状況の相関を検討する。(実施内容①-2))
- ② 引き続き平成20年度に導入したゴム用き裂観察・ひずみ測定装置、引張試験用水素曝露容器、平成19年度に導入したリング用ゴム材料動的粘弾性評価装置、高速・高精度レーザー変位システム、リング用ゴム材料高精度密度測定装置、およびゴム変形挙動追跡装置を用いて種々のゴム材

料物性を計測する。これにより各種ゴム材料について水素曝露によるゴム材料物性への影響の評価を行い、ゴム材料種との相関を検討する。(実施内容①-3))

- ③ 前年度までにポリテトラフルオロエチレン等の樹脂材料を対象に確立した力学的モデルなどを含む耐水素性評価方法を用いて、ポリエチレンなど、他の樹脂系についてのデータ取得を進める。(実施内容①-3))
- ④ 樹脂材料の破壊靱性値に及ぼす高圧水素曝露の影響を明らかにするため、平成 22 年度に導入した樹脂材料破壊靱性評価システムならびに高精度試験片研磨装置を用い、各樹脂材料の破壊靱性試験を行う。(実施内容①-3))
- ⑤ 水素雰囲気下におけるゴム材料の疲労進展特性を評価するため、平成 21 年度に導入したゴム用疲労試験機に水素チャンバーを取り付ける。(実施内容①-3))
- ⑥ 水素充填用レセプタクルに代表されるシール構造評価のため、円筒固定タイプのシール(Oリング+バックアップリング)および装着部の設計指針提示を目的として、円筒固定シール評価セルを導入し、各種条件による評価データを収集する。
- ⑦ 産業界のニーズが高い水素ガスシール用ゴム・樹脂材料や水素搬送配管用ゴム・樹脂材料など、水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して強度・劣化特性評価を実施し、本事業のデータの充実を図る。(実施内容①-3))

<平成 24 年度>

- ① 引き続き、平成 22 年度に導入したゴムき裂信号高速計測システムを用いて、き裂発生に伴う信号を記録し、ゴム材料のき裂の程度、発生頻度などの発生状況を把握する。これらの結果に基づき、ゴム材料とき裂発生状況の相関をまとめ、き裂に対する耐性に優れたゴム材料配合指針を提示する。(実施内容①-2))
- ② 引き続き平成 20 年度に導入したゴム用き裂観察・ひずみ測定装置、引張試験用水素曝露容器、平成 19 年度に導入したOリング用ゴム材料動的粘弾性評価装置、高速・高精度レーザー変位システム、Oリング用ゴム材料高精度密度測定装置、およびゴム変形挙動追跡装置を用いて種々のゴム材料物性を計測する。これにより各種ゴム材料について水素曝露によるゴム材料物性への影響の評価を行い、ゴム材料種との相関をまとめ、水素曝露に対する耐性に優れたゴム材料配合指針を提示する。(実施内容①-3))
- ③ 前年度までにポリテトラフルオロエチレン等の樹脂材料を対象に確立した力学的モデルなどを含む耐水素性評価方法を用いて、ポリエチレンなどの樹脂系について耐水素性データをまとめる。(実施内容①-3))
- ④ 樹脂材料の破壊靱性値に及ぼす高圧水素曝露の影響を明らかにするため、引き続き平成 22 年度に導入した樹脂材料破壊靱性評価システムならびに高精度試験片研磨装置を用い、各樹脂材料の破壊靱性試験を行い、水素曝露時の破壊靱性データをまとめる。(実施内容①-3))
- ⑤ 平成 21 年度に導入したゴム用疲労試験機および平成 23 年度に導入した疲労試験機用水素チャンバーを用いて水素雰囲気下におけるゴム材料の疲労進展特性評価を行い、各種ゴム材料について、水素雰囲気下の疲労進展特性をまとめる。(実施内容①-3))
- ⑥ 水素充填用レセプタクルに代表されるシール構造評価のため、円筒固定タイプのシール(Oリング+バックアップリング)および装着部の設計指針提示を目的として、平成 23 年度に導入した円筒固定シール評価セルを用いて引き続き各種条件による評価データを収集し、まとめる。
- ⑦ 産業界のニーズが高い水素ガスシール用ゴム・樹脂材料や水素搬送配管用ゴム・樹脂材料など、水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して強度・劣化特性評価を実施し、本事業のデータとしてまとめる。(実施内容①-3))

- (2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価(主に産業技術総合研究所で実

施)

ゴム材料の化学構造評価(ゴム材の水素曝露による劣化等、化学構造変化の明確化)

- a. 水素曝露前の状態で分析を実施し初期のゴム材料の化学構造を把握する。
- b. 長時間水素雰囲気下に曝露された、ゴム材料の分析を実施する。
- c. 水素曝露によるゴム材料の化学構造変化(劣化)の評価を行う。
 - 1) 水素吸着・反応メカニズムの解明
 - 2) 水素曝露による化学構造変化の解明
 - 3) 強度・劣化特性との相関を評価

<平成19年度>

- ① オリング用ゴム材料水素透過率測定装置、ゴム・樹脂中水素分析装置、オリング用ゴム材料高精度密度測定装置、オリング用ゴム材料試験片作製装置の導入により、各種ゴム材料(今年度はニトリルゴム、EPDM、フッ素ゴム等を予定)の水素透過率、材料中水素量、密度の変化を正確に測定して、水素に曝露されたゴム材料の物性・構造変化との相関関係を明らかにする。また、比誘電率測定用インピーダンスアナライザー、比誘電率測定用テキストフィクスチャー及びゴム電気特性測定用AE計測装置を導入することにより、電気特性(特に比誘電率)を測定して、高圧水素中における各種ゴム材料の破壊要因となる、材料中の気泡の発生状況を計測することが可能となり、各種ゴム材料の設計指針明確化に資する。加えて、ゴム材料気泡分布分析装置の導入により、AE特性計測装置と組み合わせて超音波吸収挙動の周波数特性を測定することで、高圧水素中における各種ゴム材料の破壊要因となる、材料中の気泡の発生状況をより詳細に計測でき(今年度はニトリルゴム、EPDM、フッ素ゴム等を予定)、各種ゴム材料の設計指針の明確化に資する。(実施内容②-1))

<平成20年度>

- ① ゴム材料の構造や物性は圧力に影響を受け、圧力依存性が大きいいため、高圧セル本体、高圧プレス、試料設定用に用いる顕微鏡、セル内の圧力を測定する圧力測定装置、物性計測用に必要となる電極形成装置からなるゴム材料高圧物性測定セルを導入し、平成19年度に導入した高速・高精度レーザー変位システム、ゴム材料気泡分布分析装置、オリング用ゴム材料高精度密度測定装置、ゴム変形挙動追跡装置、比誘電率測定用インピーダンスアナライザー、比誘電率測定用テキストフィクスチャーおよびゴム電気特性用AE計測装置を用いてゴム材料の圧力下での誘電率や弾性率などの物性を計測する。(実施内容②-1))。
- ② 水素雰囲気下におけるゴム材料の分光特性測定を実施し、プリスタの起点となる気泡発生現象を確認するためゴム材料気泡発生挙動観測装置を導入する(実施内容②-2))。
- ③ ゴム材料の水素曝露に伴う化学的劣化評価のため、ゴム試験片粉碎装置およびゴム中水素分布状態測定装置用解析装置を導入する。これにより水素曝露後のゴム材料からNMR用試料を調整し、九州大学の既存共通設備であるNMRで計測して得られたスペクトルを解析する(実施内容②-2))。
- ④ 水素曝露に伴うゴム材料の構造変化、充てん剤の分布状況の変化を把握するためゴム用小角X線散乱測定装置の導入を開始する。(実施内容②-3))。

<平成21年度>

- ① ゴム用小角 X 線散乱測定装置の導入を完了する。ゴム材料中に溶解した水素ガスによる気泡発生現象の解明のため、本装置を用いてゴム構造のナノオーダーの構造不均質性を評価する
- ② ゴム材料の構造不均質性の温度依存性を観測することを目的に、小角 X 線散乱測定装置用冷却加熱延伸ステージを導入し、加熱および冷却状態でゴム材料の X 線小角散乱を計測する。(実施内容②-2))

- ③ 平成 20 年度に導入したゴム材料熱特性評価装置、ゴム材料熱膨張率評価装置、ゴム材料高圧物性測定セル、ゴム高速変形挙動観測装置、平成 19 年度に導入したゴム材料気泡分布分析装置、比誘電率測定用インピーダンスアナライザー、比誘電率測定用テキストフィクスチャーおよびゴム電気特性用 AE 計測装置を用いて種々のゴム材料の化学分析を実施する。また、き裂発生計測装置を導入し、ゴム中に生成した気泡からき裂が発生する状況を調査する。これにより水素曝露によるゴム材料構造への影響の評価を行う。(実施内容②-2)
- ④ これまでの検討から充てん材への水素吸着がゴム材料の水素量を増大させることが明らかになった。そこで、充てん材用水素吸着量評価装置を導入して充てん材への水素吸着量を評価し、耐ブリスタ性に優れたゴム材料を実現する充てん材を探索する。また、ゴム・樹脂中水素量分析装置を導入し、これらの充てん材を用いたゴム材料の水素量評価を行う。((実施内容②-1))
- ⑤ 平成20年度に導入したゴム試験片粉碎装置およびゴム中水素分布状態測定装置用解析装置を用い、水素曝露後のゴム材料からNMR用試料を調整し、九州大学の既存共通設備であるNMRにより計測して得られたスペクトルを解析する。これにより、水素曝露後のゴム材料中の水素の状態を明らかにする。(実施内容②-2))

<平成 22 年度>

- ① 平成 21 年度に導入した充てん材用水素吸着量評価装置を用いて充てん材への水素吸着量を評価し、耐ブリスタ性に優れたゴム材料を実現する充てん材を探索する。(実施内容②-1))
- ② 平成 21 年度に導入したゴム用疲労試験機、充てん材用水素吸着量評価装置、平成 20 年度に導入したゴム材料熱特性評価装置、ゴム材料熱膨張率評価装置、ゴム材料高圧物性測定セル、ゴム高速変形挙動観測装置、平成 19 年度に導入したゴム材料気泡分布分析装置、比誘電率測定用インピーダンスアナライザー、比誘電率測定用テキストフィクスチャーおよびゴム電気特性用 AE 計測装置を用いて種々のゴム材料物性を計測する。これにより水素曝露によるゴム材料化学構造への影響の評価を行う。(実施内容②-2))
- ③ ゴム材料の水素による加熱加圧環境下で劣化した試料調製のため、ゴム劣化試験用温度制御水素チャンバーを導入する。得られた試料の化学構造を調べ、水素による加圧加熱環境下でのゴム材料の劣化状況を調査する。(実施内容②-2))
- ④ ゴム材料の分子設計に反映させるために、固体 NMR を導入し、種々のゴム材料分析を進め、物性との相関を検討する。(実施内容②-3))
- ⑤ 水素雰囲気での加熱加圧環境下におけるゴム、樹脂材料からの脱離成分を評価する目的で、ガス劣化脱離成分解析装置の改造(マイクロジェット方式クライオトラップ、選択的試料導入装置の設置)を行う。回収物を評価することで劣化状況、ならびに水素ガスへの汚染状況を調べる。(実施内容②-2))

<平成 23 年度>

- ① 前年度に引き続き平成 21 年度に導入した充てん材用水素吸着量評価装置を用いて充てん材への水素吸着量を評価し、耐ブリスタ性に優れたゴム材料を実現する充てん材の評価を実施する。これらの結果に基づき、充てん材選定基準を検討する。(実施内容②-1))
- ② 平成 22 年度に導入したゴム劣化試験用温度制御水素チャンバー、ガス劣化脱離成分解析装置、マイクロジェット方式クライオトラップ、選択的試料導入装置を用いて、ゴム材料の水素による加熱加圧環境下で劣化した試料を調製し、その化学構造を調べ、水素による加圧加熱環境下でのゴム材料の劣化状況を調査する。さらに水素雰囲気での加熱加圧環境下におけるゴム、樹脂材料からの脱離成分を評価する目的で、回収物の分析による劣化状況評価、水素ガスの汚染状況を調べる。(実施内容②-2))
- ③ 光音響検出器を導入し、水素による加熱加圧環境下で劣化した炭素系ゴム材料の化学構造変化を

計測する。(実施内容②-2))

- ④ 平成 22 年度に導入した固体 NMR、平成 21 年度に導入したゴム用疲労試験機、充てん材用水素吸着量評価装置、平成 20 年度に導入したゴム材料熱特性評価装置、ゴム材料熱膨張率評価装置、ゴム材料高圧物性測定セル、ゴム高速変形挙動観測装置、平成 19 年度に導入したゴム材料気泡分布分析装置、比誘電率測定用インピーダンスアナライザー、比誘電率測定用テキストフィクスチャーおよびゴム電気特性用 AE 計測装置を用いて種々のゴム材料の構造および物性を計測する。これにより水素曝露によるゴム材料化学構造への影響および物性との相関の評価を行う。(実施内容②-3))
- ⑤ 産業界のニーズが高い水素ガスシール用ゴム・樹脂材料や水素搬送配管用ゴム・樹脂材料など、水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して強度・劣化特性評価を実施し、本事業のデータの充実を図る。(実施内容②-3))

<平成 24 年度>

- ① 前年度に引き続き平成 21 年度に導入した充てん材用水素吸着量評価装置を用いて充てん材への水素吸着量を評価し、耐ブリスタ性に優れたゴム材料を実現する充てん材の評価を実施しデータベースとしてまとめる。これらの結果に基づき、充てん材選定基準を提示する。(実施内容②-1)
 - ② 前年度に引き続き平成 22 年度に導入したゴム劣化試験用温度制御水素チャンバー、ガス劣化脱離成分解析装置、マイクロジェット方式クライオトラップ、選択的試料導入装置を用いて、ゴム材料の水素による加熱加圧環境下で劣化した試料を調製し、その化学構造を調べ、水素による加圧加熱環境下でのゴム材料の劣化状況を調査する。さらに水素雰囲気での加熱加圧環境下におけるゴム、樹脂材料からの脱離成分を評価する目的で、回収物の分析による劣化状況評価、水素ガスの汚染状況を調べる。(実施内容②-2))
 - ③ 平成 23 年度に導入した光音響検出器、平成 22 年度に導入した固体 NMR、平成 21 年度に導入したゴム用疲労試験機、充てん材用水素吸着量評価装置、平成 20 年度に導入したゴム材料熱特性評価装置、ゴム材料熱膨張率評価装置、ゴム材料高圧物性測定セル、ゴム高速変形挙動観測装置、平成 19 年度に導入したゴム材料気泡分布分析装置、比誘電率測定用インピーダンスアナライザー、比誘電率測定用テキストフィクスチャーおよびゴム電気特性用 AE 計測装置を用いて種々のゴム材料の構造および物性を計測する。これにより水素曝露によるゴム材料化学構造への影響および物性との相関の評価を行う。(実施内容②-3))
 - ④ 産業界のニーズが高い水素ガスシール用ゴム・樹脂材料や水素搬送配管用ゴム・樹脂材料など、水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して化学構造分析・評価を実施し、本事業のデータとしてまとめる。具体的には、低温(-40℃レベル)におけるゴム材料化学構造への影響および物性との相関の評価を行い、「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業／要素技術／水素ステーション機器要素技術」において緊急離脱カプラの開発を実施しているトキコテクノ(株)およびボールバルブの開発を実施している(株)キッツとの連携により低温水素ガスシール性を確保するためにそれぞれの機器に必要なゴム材料の最適化に資する。また、同事業において開発されている水素搬送配管について日本合成化学(株)および横浜ゴム(株)との連携によりゴム・樹脂材料最適化に資する。以上のために平成 24 年度に試料切断機を導入して評価の効率的な推進を行う。(実施内容②-3))
- (3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する研究状況調査(主に九州大学側で実施)

<平成 19 年度>

- ① 平成 19 年 11 月に米国にて開催される「Seventh International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture (36th ASTM National Symp. on Fatigue and Fracture Mechanics)」に参加し、材料強

度に及ぼす水素の影響について、米国材料試験協会 (ASTM) における最新の研究状況を調査する。

<平成20年度>

- ① 平成 20 年 9 月にイギリスのダーラム大学及びスイスで開催される FRACTURE OF POLYMERS、COMPOSITES AND ADHENSIVES に参加し、ゴム・樹脂材料の強度評価法と材料強度及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。また、平成 20 年 10 月に開催される International Rubber Conference & Exhibition2008 に参加し、ゴムに関する技術、研究動向の情報収集を行う。

<平成 21 年度>

- ① ゴム、樹脂材料及びこれらの破壊、疲労現象について最新の研究動向を調査する。ゴムについては関連する幅広い分野の研究発表が行われる International Rubber Conference (平成 21 年 6 月開催、ニュルンベルク、ドイツ) に参加し、材料の開発、物性測定、分析手法などの開発状況を把握し、O リング用ゴム材料の開発に反映させる。同時にゲッティンゲン大学 (ゲッティンゲン、ドイツ) を訪問し、水素脆化現象の権威である Prof. Kirchheim と水素によるファイバー材料の水素吸着現象について討論する。また、ゴム関係の研究については平成 21 年 12 月に開催される Pacific Polymer Conference (ケアンズ、オーストラリア) においても議論されるため、樹脂材料も含む幅広いポリマー材料としての研究動向を調査する。O リング等、自動車部品としてのゴム材料の開発動向について、平成 21 年 4 月に行われる SAE2009 (デトロイト、ミシガン、米国) において情報収集を図る。また、米国のゴム、樹脂材料の研究拠点の一つであるアクロン大学 (アクロン、オハイオ、米国) を訪問し、ゴム材料の破壊現象の権威である Prof. Gent と水素によるゴム材料の破壊現象について討論する。

<平成 22 年度>

- ① ゴム、樹脂材料及びこれらの破壊、疲労現象について最新の研究動向を調査する。樹脂、ゴムについては関連する幅広い分野の研究発表が行われる平成 22 年 7 月に行われる 43rd IUPAC World Polymer Congress (グラスゴー、英国) に参加し、材料の開発、物性測定、分析手法などの開発状況を把握し、O リング用ゴム材料の開発に反映させる。また University of Durham (ダーラム、英国) の Prof. Graham Sandford を訪問し、現在進めているフッ素樹脂に関連する劣化反応について調査する。ゴム、樹脂材料の破壊現象については平成 22 年 8 月に開催される European Conference of Fracture ECF 18 (ドレスデン、ドイツ) において情報収集を行う。

<平成 23 年度>

- ① JSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing (平成 23 年 6 月開催、シアトル、米国) に参加し、ゴム材料の力学的特性、計測法、動的挙動などに関する情報収集を行う。また、平成 23 年 9 月に INSTITUT P' (UPR CNRS 3346) Département de Physique et Mécanique des Matériaux (ボルドー、フランス) University of Durham (ダーラム、英国) への訪問及び Fracture of Polymers, Composites and Adhesives (ル・ディアブルレ、スイス) に参加し、ゴム・樹脂材料の強度評価法と材料強度に及ぼす水素の影響に関する情報収集を行う。

<平成 24 年度>

- ① ゴム、樹脂材料の破壊現象については平成 24 年 8 月に開催される European Conference of Fracture ECF 19 (カザン、ロシア) において情報収集を行う。ゴムについては関連する幅広い分野の研究発表が行われる International Rubber Conference 2012 (平成 24 年 9 月開催、ソウル、韓国) に参加し、材料の開発、物性測定、分析手法などの開発状況を調査する。

(4) 水素雰囲気下におけるゴム材料研究(主にNOK(株)で実施)

1) ブリスタ発生メカニズム解明と解決に向けたゴム材料の研究及び評価

ゴム材料高圧水素耐久試験機を用い、ブリスタ発生に起因する機構側要因(圧力差、昇圧・減圧速度等)の影響度を把握する。更に、その検討結果から現実的なブリスタ評価試験条件について検討を行う。

ゴム材料の配合設計についてはNOK(株)技術本部(藤沢)、Oリング設計試作についてはNOK(株)Oリング事業部(熊本)で連携を取りながら実施し、作成したゴム材料の試験評価を九州大学伊都キャンパス内(福岡)に設置した装置を用いて実施する。

<平成19年度>

- ① Oリングにおけるブリスタ発生メカニズムの解明とその解決策に関する研究を進める(実施内容④-1)。

<平成20年度>

- ① ゴム材料の種類(ポリマー)、充填剤の種類、配合量等のゴム材料構成因子をふったゴム材料を作製し、ブリスタ再現試験で発生に起因する因子を明らかにする。加えて、ブリスタによるゴム内部クラック発生～進展状況を観察し、破損に至るメカニズムを明らかにする。
- ② シール形状に関しては、高圧容器である試験用セルを数水準製作して、シール曝露面積を変えた再現試験を実施する。この結果からシール装着部の設計指針を提示する。
- ③ 限界減圧速度の確認及び、耐久性評価を実施し、各種ゴム材料の高圧水素ガス環境下における使用範囲を明らかにする。

<平成21年度>

- ① 前年までの検討の結果、ゴム材料高圧水素ガス耐久試験機を用いて、精度の高いOリングの高圧雰囲気下での輸送(拡散・溶解)特性の評価およびゴムOリングの耐久性の評価が進んだ。本年度は、評価装置運転パラメータ、材料種、シール形状に関する評価に取り組み、Oリング破壊の影響因子を抽出することで、破壊に対する影響因子の抽出を図る。

<平成22年度>

- ① 前年までにゴムOリングの破壊に対する影響因子の抽出を実施し、感度の高い因子を絞り込むことができた。本年度は、抽出した破壊因子の影響最小化に向けた検討を進める。
- ② シール溝設計についての検討を推進し、高圧水素ガスによる膨潤を考慮したシール溝設計のための基礎データを収集する。
- ③ EPDMをベースポリマーとし、異なる充填剤を添加したモデルゴムコンパウンドを作成し、Oリングに成型することで実際の使用状態での高圧水素ガスの溶解・拡散挙動の充填剤による影響を測定する。
- ④ 減圧速度によるブリスタ破壊状態などシール耐久性能に関する基礎評価のため、ゴムOリングのブリスタ発生・成長挙動を可視化する。

<平成23年度>

前年度までにOリングおよびOリング溝の設計について、高圧ガス環境下におけるOリング平面固定溝設計の基礎データ収集が進捗し、設計指針を提示できる見込みとなった。ブリスタ破壊状態の可視化検討の結果から、ゴム内に溶解したガスが圧力の開放に伴い急激に拡散する様子が観察され、ブリスタ破損メカニズムの一部が検証された。

本年度からOリングの疲労耐久試験や実用配合によるゴム材評価など、実用化を念頭に置いた検

討を開始する。

- ① 平面固定溝設計の評価を継続し、設計指針を検討する。
- ② 水素充填用レセプタクルに代表される円筒固定タイプのシール(Oリング+バックアップリング)および装着部の設計指針提示を目的として、円筒固定シール評価法を検討し、各種条件による評価データを収集する。
- ③ 定期メンテナンス期間設定を目標として、Oリング寿命推定を進める。具体的には、繰り返し加減圧によるOリングの疲労耐久評価を実施しデータを収集する。
- ④ 高圧ガス下でOリングに生じる破壊現象を検証するため、各種条件下での可視化評価を行う。
- ⑤ 推奨する材料特性提示を目的として、EPDMゴムに異なる充填剤種や変量した実用配合にて、テストピースやOリングを作製し、高圧水素ガスにおける溶解・拡散挙動特性を評価する。

<平成24年度>

前年度までに得られた平面固定溝設計の基礎データに基づき、設計指針としてまとめる。水素充填用レセプタクルに代表される円筒固定シールについては、前年度に確立した評価法を用いて基礎データを収集し、シールおよび装着部の設計指針としてまとめる。

また、実用化を目指した疲労耐久試験や実用配合材の特性評価を進め推奨する材料特性を提示する。

- ① 平面固定溝設計の評価結果をまとめ、設計指針を提示する。
- ② 前年度に確立した円筒固定シール(Oリング+バックアップリング)評価手法により各種条件による評価データを収集する。これらの結果に基づき、シールおよび装着部の設計指針を提示する。
- ③ 定期メンテナンス期間設定を目標として実施した繰り返し加減圧によるOリングの疲労耐久評価結果をまとめ、Oリング寿命推定を行う。
- ④ EPDMゴムに異なる充填剤種や変量した実用配合にて、テストピースおよびOリングを作製し、高圧水素ガスにおける溶解・拡散挙動特性を評価することで、推奨する材料特性を提示する。

実施計画

研究実施項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度
(1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価		水素量測定 測定法開発	ブリスト発生メカニズムの解明 強度・劣化特性評価	水素のゴム材料特性への影響評価 樹脂材料の水素量評価	水素のゴム材料特性への影響解明 樹脂材料の強度・劣化特性評価	水素のゴム材料特性への影響評価 水素中における樹脂材料の劣化特性評価	水素のゴム材料特性への影響まとめ 樹脂材料の強度・劣化特性まとめ
(2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価		測定法開発	水素侵入・放出メカニズムの解明	水素によるゴム材料の化学構造変化評価 ブリスト現象に対する充てん材の影響評価	水素のゴム材料構造への影響解明 充てん材の探索 水素による樹脂材料の化学構造変化評価	水素における化学劣化評価 各種ゴム材料、充てん材の評価	水素における化学劣化評価まとめ 各種ゴム材料、充てん材の評価まとめ
(4) 水素雰囲気下におけるゴム材料研究		リング評価法開発	環境条件とブリストの影響度把握 ゴム材料とブリストの影響度把握	リング破壊の影響因子抽出 リング破壊因子への対応策検討		リング円筒タイプ装着溝検討	リング材料装着溝の実用化提案

※ 「(3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する最新研究状況調査」は平成19年5月、11月及び平成20年9月、11月、平成21年4月、6月、12月、平成22年7月、8月、平成23年6月、9月、平成24年8月、9月に実施予定。

2.1.4 研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」実施内容

平成18年度～19年度では、以下の研究実施項目を設定し、技術動向調査、及び基礎試験による裏づけを通じて、高圧水素トライボシステム構築における課題を明確化することを目標とする。

平成20年度においては、19年度までに得た研究課題、体制、知見にもとづき、高圧水素トライボロジーに関する研究を本格化する。平成21年度においては、高圧水素中での試験方法を確立してデータ蓄積を行い、支配的因子抽出を進めて、新たに項目⑤を設置してデータベースの公表をめざす。平成22年度には高圧水素中のデータ取得を加速し、水素のかかわる過程のメカニズムを探求して、水素トライボロジーのデータベース(トライボアトラス)を充実させる。平成23年度は、民間企業等と連携してトライボアトラスをさらに充実させるとともに、メカニズム探求を進めて耐水素トライボ設計指針を検討する。平成24年度はさらにデータ取得を継続してトライボアトラスを完成するとともに、関連する過程の基本原則をまとめて耐水素トライボ設計指針を整理して、関係産業界に提供する。これらにより、水素中で作動する各種機械要素の信頼性・安全性向上と価格競争力強化に資する。また、さらなる技術開発へ向けての課題をまとめる。

- (1) 軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性の調査研究(主に産業技術総合研究所側で実施)
 - (2) シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究(主に九州大学側で実施)
 - (3) 耐水素表面のトライボロジー特性(耐水素表面改質)の調査研究(主に産業技術総合研究所側で実施(平成22年度まで))
 - (4) トライボシステム中の気体分子の挙動解析(主に長崎大学に再委託して実施(平成21年度まで))
 - (5) 水素トライボロジー信頼性評価(主に産業技術総合研究所側で実施)
- (1) 軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性の調査研究(主に産業技術総合研究所側で実施)

燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの軸受、バルブ摺動材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、課題の方向を検討する。また、各種軸受・バルブ摺動部、すなわち鉄系、非鉄合金、炭素系材料について、水素中滑り摩擦摩耗特性の基礎データを蓄積し、課題の裏づけを行う。具体的には高圧水素中に曝露した試験片を用いたこれら摩擦摩耗試験を、諸現象への水素の影響を正しく捉えるために、各種分析装置と摩擦試験装置をトランスファーベッセルで連結した実験システムを構築し、実施する(研究実施項目②と連携)。また、水素トライボロジー特性を裏付ける基礎物性として、表面ナノ力学特性の測定、表面の化学分析を行うほか、雰囲気気体分子の挙動の解析を行う。本研究実施項目に供する材料として、研究実施項目③における検討や、民間企業における開発状況を調査し新規材料を対象に加えていく。

平成20年度からは次年度に予定している40MPaでの実験に向けて、高圧水素中摩擦試験機を製作して圧力5MPaまでの摩擦実験技術を確立し、各種摺動材料の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気圧力の影響を調査する。また、高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧気体中での試験、ならびに潤滑剤を用いた試験を続行してデータを蓄積するとともに、材料表面の力学的特性と化学的特性の変化、浸入水素量などの測定を行い、水素雰囲気における摩擦と表面損傷のメカニズムを検討する。特に、試験ガスの純度を正しく把握することに注力し、実用ガスに含まれる不純物の影響を明確にする。また研究実施項目②、③と連携して、トライボロジー特性に関するデータベース設計の検討を行う。

平成21～22年度においては、最大40MPaまでの高圧水素中の摩擦試験を実施するとともに、高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を行う。ガス中の不純物の把握と制御につとめ、広い濃度範囲にわたる水分量の影響を明らかにする。上記試験と表面分析にもとづいて、トライボ諸現象の支配的因子を抽出し、さらに表面損傷と潤滑のメカニズムを探求する。

平成23～24年度においては、高圧水素中の摩擦試験と高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露

試験片の常圧水素中での摩擦試験を実施して基礎特性データを蓄積し、高圧水素の影響、水素純度の影響、水素侵入と転がり疲れ防止機構などの基本原理をまとめる。

<平成18年度>

- ① 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの軸受、バルブ摺動材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、課題の方向を検討する(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成18年11月、米国ボストンで開催の2006 MRS Fall Meetingおよびアルゴンヌ国立研究所、ドイツ・フランクフルト研究所および連邦材料科学計測研究所(BAM)、研究実施項目②、③と共同で実施)。
- ② 水素の影響を正しく捉える実験を行う目的で、トランスファーベッセルを用いた実験システムを、研究実施項目②と連携して導入する(摩擦試験機、環境制御対応型走査分析電子顕微鏡、環境制御対応型X線光電子分光装置、研究実施項目②と共有)。
- ③ 軸受・バルブ摺動材料として、DLCコーティング材、コバルト系合金などの高圧水素中曝露材と非曝露材について、水素雰囲気、湿潤水素雰囲気、ほか参照気体雰囲気での滑り摩擦試験を行う(水素曝露用に45MPa水素ガス大型曝露容器を導入、研究実施項目②と共有)。
- ④ 各種軸受・バルブ摺動部材料について、現有装置を用いた常圧水素環境下での摩擦摩耗試験を行い、水素中での滑り摩擦摩耗特性について基礎データを蓄積する。

<平成19年度>

- ① 技術調査を続行し、下記試験・解析結果とあわせて、軸受・バルブ摺動材料のトライボロジーの課題を明確化する(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成19年5月、米国フィラデルフィアで開催のSTLE Annual Meeting、平成19年9月、フランス・リヨンで開催のLEEDS-LYONトライボロジー国際会議、研究実施項目②、③と共同で実施)。
- ② トランスファーベッセルを用いた実験システム(摩擦試験環境ガス分析システム、表面分析システム用静電半球アナライザを導入)、及び現有装置を用いて、代表的な軸受・バルブ摺動材料の高圧水素中曝露材と非曝露材の滑り摩擦試験を続行して基礎データを蓄積する(なお、高圧水素曝露材の製作・保管用に45MPa水素ガス大型曝露容器(再掲)、水素曝露試験片低温保存庫を導入する)。また摩擦試験片の有機溶媒による連続バッチ洗浄を行うためにドラフトチャンバーを設置する。
- ③ 研究実施項目②と連携し、トランスファーベッセル対応型の摩擦試験機の発展型を追加導入して(回転摺動摩擦試験機を導入、研究実施項目②と共有)、水素侵入に関わる試験方法を検討する。さらに、高度にガス成分を制御可能な高度雰囲気制御摩擦試験機(2台)を新たに導入し、各種材料の微量ガス成分の影響を排除した環境下での摩擦摩耗挙動に関するスクリーニング評価を速やかに進め、効率的な研究進展を図る。また研究の結果、予想以上に摩擦試験時におけるチャンバー内の水分量がトライボロジー現象に与える影響が大きい可能性が新たに明らかになったため、摩擦試験雰囲気微量水分測定装置の導入により、水素環境下摩擦試験時のチャンバー内の水分量を精密に計測(ppmレベル)し、微量の水分が水素と材料のトライボロジーに及ぼす影響の評価に資する。
- ④ 摺動材料の表面層の微視的スケールでの変形・強度特性の変化と表面反応生成物を明らかにする。併せて摩擦試験機用荷重負荷装置を追加導入し、荷重変動が摩擦時の水素侵入と材料表面の変形に及ぼす作用を明らかにする。

<平成20年度>

- ① 研究実施項目②と連携して、代表的な軸受・バルブ摺動材料の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気圧力の影響を調査するために、超高圧水素中摩擦試験機を製作して雰囲気圧力5MPaまでの摩擦実験技術を確立する。
- ② 平成19年度までに導入した実験システムを用いて、各種摺動材料の高圧水素中に曝露した試験片

及び非曝露試験片の常圧気体中での試験、ならびに潤滑剤を用いた試験を続行してデータを蓄積する。このため、45MPa水素ガス大型曝露容器を追加導入する。なお、これまでの実験結果から試験ガスの純度をより詳細に把握するために、摩擦試験環境超微量水分測定装置、摩擦試験環境微量水分測定装置、摩擦試験環境ガス分析システムを導入する。また、平成18年度に導入したトランスファーベッセル対応型摩擦試験機と平成19年度に導入した高度雰囲気制御摩擦試験機において、高度雰囲気制御のための高純度フィルター、及び露点計と酸素濃度計取り付けのための配管変更を実施する。

- ③ 上記高圧水素中摩擦試験、及び常圧気体中摩擦試験の試験片について、材料表面の力学的特性と化学的特性の分析、浸入水素量などの測定を行い、表面特性に及ぼす水素雰囲気の影響を評価し、摩擦と表面損傷のメカニズムについて検討する。これに伴って、摩擦試験片高気密移送容器、浸入水素量の測定のために摩擦面材料水素浸入量測定装置を導入する。また、水素環境トライボロジー試験対応型表面分析システムを産総研水素材料先端科学研究センターに移設する。
- ④ 上記実験と分析のデータにもとづき、研究実施項目②、③と連携して、摺動材料のトライボロジー特性のデータベース設計の検討を行う。
- ⑤ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの軸受、バルブ摺動材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、研究課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成20年5月、アメリカで開催のSTLE Annual Meeting、平成20年9月、イギリスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribology、平成20年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conferenceおよびアルゴンヌ国立研究所など。(研究実施項目②、③と共同で実施)。

<平成 21 年度>

- ① 研究実施項目②と連携し平成 20 年度に導入した超高压水素中摩擦試験機を用いて、圧力 40MPa までの摩擦実験技術を確立し、各種摺動材料の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気圧力の影響を調査する。超高压試験における、安全性向上のために超高压水素中摩擦試験機の改造(防爆パネル設置、シーケンスプログラム)を行う。さらに超高压試験における、試験ガスの微量水分含有量の把握を可能とするために高感度露点計を、試験ガスの微量酸素含有量の把握を可能とするために高感度酸素濃度計を、高感度計測器による試験ガスの純度計測を可能にするために計測用減圧機構を導入する。
- ② 高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧気体中での試験を続行してデータを蓄積する。ガス中の水分量のより正確な把握のために摩擦試験環境超微量水分測定装置を導入する。また、前年度までに不可能であった超高純度水素ガス中での試験、湿潤ガス中での試験を行う。このため、高高度雰囲気制御摩擦試験機を導入する。また、既存の摩擦試験機、及び水素環境回転摩擦試験機における試験ガス純度制御の改善を目的として、それぞれ、摩擦試験機の改造(実験ガスフィルターシステム)と水素環境回転摩擦試験機の改造(実験ガスフィルターシステム)、摩擦試験環境微量水分測定装置の増備(超高压水素中摩擦試験機用、水素環境制御型プローブ顕微鏡用、高高度雰囲気制御摩擦試験機用、および九大既存のバルブ材料摩擦試験機用の計4台)を行う。
- ③ 上記高圧水素中摩擦試験、及び常圧気体中摩擦試験の試験片について、材料表面の力学的特性と化学的特性の変化、浸入水素量などの測定を行って、水素雰囲気における摩擦摩耗特性に及ぼす支配的因子を抽出する。
- ④ 産業界のニーズの高い軸受・バルブ摺動材料について、産業界と協力して試験、分析を行い、本事業の測定データの充実を図る。
- ⑤ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの軸受、バルブ摺動材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、研究課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力

企業、海外については、平成21年6月、イタリアで開催のEcotrib、平成21年9月、フランスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribologyなど、研究実施項目②、③と共同で実施)。

<平成 22 年度>

- ① 研究実施項目②と連携し超高压水素中摩擦試験機を用いて、各種摺動材料の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気圧力の影響を調査しデータを蓄積する。
- ② 高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片について、常圧気体中での摩擦試験を実施し、データを蓄積する。試験においては、滑り速度、荷重、雰囲気ガス、不純物濃度(数十%から ppm 以下)、温度の影響を調査する。
- ③ 材料表面の力学的特性と化学的特性の変化、侵入水素量などの測定を行い、水素雰囲気における摩擦と表面損傷及び潤滑のメカニズムを探求する。
- ④ 産業界のニーズの高い軸受・バルブ摺動材料について、産業界と協力して試験、分析を行い、本事業の測定データの充実を図る。
- ⑤ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの軸受、バルブ摺動材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、研究課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成22年4月、中国で開催のInternational Symposium on Fretting Fatigue 6、平成22年6月、スウェーデンで開催のNordTrib 2010、平成22年9月、イギリスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribology、平成22年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2010)、平成22年12月、オーストラリアで開催のASIATRIBなど、研究実施項目②と共同で実施)。

<平成 23 年度>

- ① 産業界のニーズの高い各種摺動材料について、超高压水素中摩擦試験、高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を続行してデータを蓄積する。製品レベルでの実用化の問題点を産業界と連携して分析し、試験に反映させる。常圧中摩擦試験においては、2 m/s までの高滑り速度の摩擦試験を可能とするために、研究実施項目②と連携して平成 19 年度に導入した高度雰囲気制御摩擦試験機の駆動系を改造するとともに、試験雰囲気に残存する ppb オーダーの酸素量を計測するために高感度酸素濃度計を導入して、各種摺動材料の摩擦摩耗特性に及ぼす滑り速度の影響、及び雰囲気中の残存酸素量の影響を調査する。
- ② 平成 19 年度に導入した水素環境回転摩擦試験機に加熱機構を付加して 100℃までの温度での実験を可能とするとともに、駆動系を改造して滑り速度範囲を拡大して繰返し接触試験を実施し、転がり疲れ試験結果等とあわせて、繰返し接触下の固体内への水素侵入機構と表面損傷との関係を探求する。
- ③ ガス純度を高度に制御した試験、材料表面の力学的特性と化学的特性の測定、侵入水素量の測定などを行い、水素雰囲気における摩擦と表面損傷のメカニズムを探求する。
- ④ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの摺動材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査と、本研究成果の有用性の確認するための調査を行う(調査先は、国内については有力企業、学会講演会、海外については、平成23年5月、アメリカで開催のSTLE Annual Meeting、平成23年8月、中国で開催の6th China International Symposium on Tribology、平成23年9月、フランスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribology、平成23年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2011)など、研究実施項目②と共同で実施)。

<平成 24 年度>

- ① 各種摺動材料について、超高压水素中摩擦試験、高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を続行する。また製品レベルでの実用化の問題点を、企業から実際

に使用される部材等の試料の提供を受けて分析するなど産業界と連携して解析し、試験に反映させる。

- ② 繰返し接触試験、転がり疲れ試験を続行し、固体内への水素侵入と転がり疲れ防止機構を明らかにする。
- ③ ガス純度を高度に制御した試験、材料表面の力学的特性と化学的特性の測定、侵入水素量の測定などを行い、高圧水素、水素純度の影響などの基本原理をまとめる。
- ④ 本研究成果の有用性を確認するための調査を行い、さらなる技術開発へ向けての課題をまとめる。(調査先は、国内については有力企業、学会講演会、海外については、平成 24 年 5 月、アメリカで開催の STLE Annual Meeting、平成 24 年 9 月、イギリスで開催の Leeds-Lyon Symposium on Tribology、平成 24 年 10 月、アメリカで開催の STLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2012)など、研究実施項目②、⑤と共同で実施)。

(2) シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究(主に九州大学側で実施)

(a)動的シール摺動材料の摩擦摩耗特性と(b)静的シールの密封特性を研究対象とする。

(a)では、水素機械システム内のコンプレッサー等に用いられるシール材料について、トライボロジー技術の動向調査を行い、課題の方向を検討する。またシール材料を常圧付近で使用される低圧環境用と40MPa以上の高圧下で使用される高圧環境用に区分し、以下の手法により水素環境が摩擦摩耗挙動に及ぼす影響を評価する。研究実施項目①と連携して、高圧水素中の曝露、トランスファーベッセルを用いた実験システムによる摺動試験を行う。摺動試験と並行して、環境制御型プローブ顕微鏡を用い、材料の表面特性および表層部近傍の機械的物性に及ぼす雰囲気水素の影響について評価する。

(b)では、静的シール材料の密封特性について、技術動向調査を行うとともに、固体接触部での接触状態、固体内の気体透過性、ならびに長期使用にともなう材料変質による影響についての検討を行って、耐水素静的シール材料に関する課題を明確化する。

平成 20 年度からは研究実施項目①と連携し、シール材料(主として PTFE に代表される樹脂材料とゴム材料)の曝露材、非曝露材の摩擦試験ならびに表面分析等を続行するとともに、超高圧水素中における摩擦試験を実施してデータを蓄積し、水素雰囲気におけるシール材料の摩擦・摩耗のメカニズムを検討する。また研究実施項目①、③と連携して、トライボロジー特性のデータベース設計の検討を行う。

平成 21～22 年度においては、最大 40MPa までの高圧水素中の摩擦試験を実施するとともに、高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を行う。ガス中の不純物の把握と制御につとめ、水分量の影響を明らかにする。上記試験と表面分析にもとづいて、水素雰囲気でのシール材料の摩擦摩耗に及ぼす支配的因子を抽出し、さらに表面損傷と潤滑のメカニズムを探求する。

平成 23～24 年度においては、高圧水素中の摩擦試験と高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を実施して基礎特性データを蓄積し、高圧水素と水素純度の影響、材料の組合せの影響、表面損傷とシール機能の関係などの基本原理をまとめる。

<平成18年度>

- ① 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのシール材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、課題の方向を検討する。
- ② 水素の影響を正しく捉える実験を行う目的で、トランスファーベッセルを用いた実験システムを、研究実施項目①と連携して構築する。
- ③ 低圧水素環境用シール材料について、常圧水素環境下における摺動試験を行い摩擦係数および比摩耗量のデータを蓄積し、水素雰囲気の影響を評価する。
- ④ 高圧水素環境用シール材料について、高圧水素曝露した後、摩擦係数および比摩耗量のデータを

計測し、材料内部に吸蔵された水素の影響を評価するためのシステムを研究実施項目①と連携して構築する。

- ⑤ 摺動面の表面特性に対する水素雰囲気の影響について、環境制御型プローブ顕微鏡による評価システムを構築する(環境制御型プローブ顕微鏡を導入、研究実施項目①と共有)。
- ⑥ 静的シール材料の水素密封性に関する課題を明確化する。

<平成19年度>

- ① 技術調査を続行し、下記試験結果とあわせて、シール材料のトライボロジーの課題を明確化する。(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成19年10月、米国サンディエゴで開催のASME/STLE International Joint Tribology Conference、研究実施項目①、③と共同で実施)。
- ② 代表的な低圧水素環境用シール用樹脂材料について、常圧水素環境下における摺動試験を継続し、摩擦係数および比摩耗量のデータを蓄積する。
- ③ 研究実施項目①と連携しトランスファーベッセルを用いた実験システムの発展型を導入し、シール用樹脂材料の摩擦・摩耗に対する水素の影響を捉える実験手法を検討する。
- ④ 高圧水素環境用シール用樹脂材料およびその摩擦相手材について、高圧水素曝露後、水素環境下における摺動試験を行い、材料内部に吸蔵された水素の影響を評価する。
- ⑤ 研究実施項目①と連携し、前述の高度雰囲気制御摩擦試験機(2台)を用いて、摩擦摩耗挙動に関するスクリーニング評価を速やかに進め、効率的な研究進展を図る。
- ⑥ 環境制御型プローブ顕微鏡により、摺動面表層部近傍における表面特性に対する水素雰囲気の影響を評価する手法を検討する。
- ⑦ 静的シール材料について、高圧水素曝露後、水素密封性を評価する。

<平成20年度>

- ① 研究実施項目①と連携して、超高圧水素中摩擦試験機を製作して雰囲気圧力5MPaまでの摩擦実験技術を確立し、代表的なシールしゅう動材料の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気圧力の影響を調査する。
- ② 平成19年度までに導入した実験システムを用いて、各種シール材料の高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧気体中での試験を続行してデータを蓄積する。また、別途導入した摩擦試験機において摩擦摩耗のデータを記録するために摩擦摩耗データ収録装置を導入し、同試験機において試験中の摩擦面の“その場観察”を行うために摩擦摩耗現象観察装置を導入する。また、研究実施項目①と連携して、産総研水素材料先端科学研究センターの水素環境試験設備を整備し、ピン・オン・ディスク摩擦試験機を移設する。さらに、平成17年度以前から保有しているボール・オン・ディスク摩擦試験機、微小振幅往復動摩擦試験機、往復動摩擦試験機の試験雰囲気制御能力を向上させるために、これらの試験機を改造する。また、産総研水素材料先端科学研究センターの水素環境試験設備を整備し、これらの試験機を移設する。
- ③ 上記高圧水素中摩擦試験、及び常圧気体中摩擦試験の試験片について、摺動面表層部近傍における表面分析と浸入水素量の測定を行って、表面特性に及ぼす水素雰囲気の影響を評価し、水素雰囲気における摩擦・摩耗のメカニズムを検討する。ここで、平成18年度に導入した水素環境制御型プローブ顕微鏡において、水素容器の温度制御を可能とするための改造を行う。
- ④ 上記実験と分析のデータにもとづき、研究実施項目①、③と連携して、シール材料のトライボロジー特性のデータベース設計の検討を行う。
- ⑤ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのシール材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、研究課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成20年9月、イギリスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribology、平成20年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conferenceおよびアルゴンヌ国立研究所など、研究実施項目①、③と共同で実施)。

<平成 21 年度>

- ① 研究実施項目①と連携し、平成 20 年度に導入した超高压水素中摩擦試験機を用いて、圧力 40MPa までの摩擦実験技術を確立し、シール材料(主としてPTFEに代表される樹脂材料とゴム材料)の摩擦摩耗特性に及ぼす雰囲気圧力の影響を調査する。
- ② 曝露材、非曝露材の摩擦試験ならびに表面分析等を続行し、超高压水素中における摩擦試験を実施してデータを蓄積し、水素雰囲気におけるシール材料の摩擦摩耗における支配的因子を抽出する。
- ③ 産業界のニーズの高いシール材料について、産業界と協力して試験、分析を行い、本事業の測定データの充実を図る。
- ④ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのシール材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、研究課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成21年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2009)など、研究実施項目①、③と共同で実施)。

<平成 22 年度>

- ① シール材料(主として樹脂材料とゴム材料)について、超高压水素中摩擦試験、高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を続行してデータを蓄積する。試験においては、滑り速度、荷重、雰囲気ガス、不純物濃度のほか、相手面材料の種類と表面粗さの影響を調査する。
- ② 材料表面の力学的特性と化学的特性にもとづいて、水素雰囲気におけるシール材料の摩擦と表面損傷及び潤滑のメカニズムを探求する。
- ③ 産業界のニーズの高いシール材料について、産業界と協力して試験、分析を行い、本事業の測定データの充実を図る。
- ④ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのシール材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、研究課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成22年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2010)、平成22年12月、オーストラリアで開催のASIATRIB2010など、研究実施項目①と共同で実施)。

<平成 23 年度>

- ① 産業界のニーズの高いシール材料(主として樹脂材料とゴム材料)について、超高压水素中摩擦試験、高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を続行してデータを蓄積する。産業界と協力してデータの充実を図るとともに、製品レベルでの実用化の問題点を産業界と連携して分析し、試験に反映させる。特に、シール材料と相手面材料の種類の影響を広く調査する。常圧水素中の摩擦試験については、2 m/s までの高滑り速度の摩擦試験を可能とするために、研究実施項目①と連携して平成 19 年度に導入した高度雰囲気制御型摩擦試験機の駆動系を改造するとともに、試験雰囲気に残留する ppb オーダーの酸素量を計測するために高感度酸素濃度計を導入して、シール材料の摩擦摩耗特性に及ぼす滑り速度の影響、および雰囲気中の残留酸素量の影響を調査する。
- ② 材料表面の表面分析を行い、水素雰囲気におけるシール材料の摩擦摩耗のメカニズムを探求する。
- ③ シール材料の表面損傷とシール機能の関係を調べ、解析モデルを検討する。
- ④ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのシール材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査と、本研究成果の有用性を確認するための調査を行う(調査先は、国内については有力企業、学

会講演会、海外については、平成23年9月、フランスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribology、平成23年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2011)など、研究実施項目①と共同で実施)。

<平成24年度>

- ① シール材料(主として樹脂材料とゴム材料)について、超高压水素中摩擦試験、高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常压水素中での摩擦試験を続行し、また、企業から実際に使用される部材等の試料の提供を受けて分析するなど産業界と連携して解析し、データを蓄積する。
- ② 材料表面の表面分析を続行し、水素雰囲気におけるシール材料の摩擦摩耗特性に及ぼす高压水素、水素純度、材料の組合せの影響などについて基本原理をまとめる。
- ③ シール材料の表面損傷とシール機能との関係に関する基本原理をまとめ、シール材料の摩擦摩耗特性とシール機能との関係を総合的に整理する。
- ④ 本研究成果の有用性を確認するための調査を行い、さらなる技術開発へ向けての課題をまとめる。(調査先は、国内については有力企業、学会講演会、海外については、平成24年9月、イギリスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribology、平成24年10月、アメリカで開催のSTLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2012)など、研究実施項目①、⑤と共同で実施)。

- (3) 耐水素表面のトライボロジー特性(耐水素表面改質)の調査研究(主に産業技術総合研究所側で実施)

本研究実施項目では、材料選択および新材料開発にフレキシビリティの高い表面改質法により、水素環境下での利用に最適なトライボマテリアルの探索を実施する。基本的な耐水素メカニズムは、必要以上の水素浸入を抑止することであり、各種バリア候補材料を表面にコーティングすることによって解決を図る。また、水素をトラップする元素もしくは格子欠陥をバリア中に組み込み、更なる耐性の向上を図る。まず、軸受・バルブ摺動材料ならびにシール材料に必要とされる性能を抽出し、これに合わせた材料系と表面改質技術について、金属系複合材料の場合には溶射法を用い、硬質薄膜の場合にはPVD、CVD法を用いることにより開発を進める。並行して、技術動向調査を行って、耐水素表面改質の課題を明確化する。

摺動環境下(動的状態)において水素透過を抑制するバリア層の形成を目的に、コーティング材料の摩擦・摩耗特性の温度と雰囲気による変化、摩擦試験前後の表面・界面変化を調査し、最適なバリア材料選択のための基礎データを蓄積する。また、コーティング法によるバリア層形成の研究を進め、バリアコーティング膜の密着性や信頼性を評価するためAE法によるin-situ計測の適用を図る。また研究実施項目①、②と連携して、トライボロジー特性のデータベース設計の検討を行う。

<平成18年度>

- ① 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでの表面改質にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行う。
- ② 軸受・バルブ摺動材料ならびにシール材料に必要とされる性能を明確化する。
- ③ 粒界を増やしたステンレススチール、ボロンとアルミナをドーブしたシリコンカーバイド、アルミナ、チタンナイトライドなどについて、摩擦摩耗特性評価を行う。
- ④ バリア性能を、拡散係数 $D(D=D_0 \exp(-Q/RT))$ D_0 : 振動数項 [m^2/s] Q : 活性化エネルギー [kJ/mol] T : 温度 [K] R : 気体常数($=8.3143 \pm 0.0012 [J \cdot mol^{-1} K^{-1}]$)における D_0 で評価する。

<平成19年度>

- ① 技術調査を続行し、下記試験結果とあわせて、表面改質にかかわるトライボロジーの課題を明確化する(調査先は国内については有力企業、海外については平成19年9月、フランス・リヨンで開催予定

のLEEDS-LYONトライボロジー国際会議、研究実施項目①、②と共同で実施)。

- ② -100℃から100℃までの温度環境下において各種材料の摩擦特性評価を行うことにより、水素バリア性とトライボロジー特性との関係を明らかにする。18年度に製作した温度可変摩擦試験機に精度の高い摩擦係数計測機能を付与するための改造を行い、特に低温環境下における摩擦特性を高精度・系統的に測定し、水素雰囲気下における温度と摩擦の関係について考察を進める。また、バリア性能を向上させるための材料開発を継続し、 D_0 のオーダーを 10^{-8} オーダーに拡張することを目指す。(ニッケル、 γ 鉄、プラチナなど面心立方構造を有する金属における D_0 のオーダーは概ね 10^{-7})

<平成20年度>

- ① 前年度に改造した摩擦試験機において温度制御と摩擦力測定の高精度化するための改造を行い、これを用いて、各種コーティング材料について水素雰囲気での摩擦試験を-100℃から100℃までの温度環境下において実施し、摩擦・摩擦特性に及ぼす温度と雰囲気の影響を調べるとともに、摩擦試験前後の表面分析を行い、最適なバリア材料選択のための基礎データを蓄積する。これに伴い、コーティング材料作成のための水素バリアコーティング層形成装置及び、水素雰囲気中温度可変摩擦試験装置用計測システム、耐水素表面分析装置高真空システムを導入する。
- ② 薄膜の水素透過係数の測定技術を確立し、各種コーティング材料の水素バリア性能を評価する。
- ③ コーティング膜の密着性や信頼性を評価する手法としてAE法によるin-situ計測の適用を図るために、水素雰囲気における摩擦試験におけるAE計測の手法を確立する。
- ④ 上記実験と分析のデータにもとづき、研究実施項目①、②と連携して、トライボロジー特性のデータベース設計の検討を行う。
- ⑤ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのコーティング材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成20年12月、シンガポールで開催の2nd International Conference on Advanced Tribology 2008 (iCAT 2008)、研究実施項目①、②と共同で実施)。

<平成21年度>

- ① 耐水素性・潤滑剤との組み合わせを念頭におき、各種コーティング膜の各種コーティング材料について水素雰囲気での摩擦試験を-100℃から100℃までの温度環境下において実施し、摩擦・摩擦特性に及ぼす温度と雰囲気の影響を調べるとともに、摩擦試験前後の表面分析を行う。雰囲気制御と摩擦・摩擦評価の高精度化のために、水素雰囲気摩擦試験機の改造を行う。
- ② コーティング膜の主にコーティング膜の基材との密着性からの剥離の原因となるコーティング膜の基材との密着性にもとづく信頼性評価、及びそれらの評価試験法の開発を行う。信頼性評価試験雰囲気制御のために水素排気装置を導入する。
- ③ 水素雰囲気での使用に適したトライボロジー特性を発現する機能性コーティング技術の開発方針を検討する。すなわち水素雰囲気において剥離することなく良好な摩擦摩擦特性を持続する、コーティング膜の作製条件を最適化するための水素バリアコーティング層成膜制御装置を導入する。
- ④ 燃料電池自動車及び水素インフラ機器などでのコーティング材料にかかわるトライボロジー技術の動向調査を行い、課題の方向について確認・修正を行う(調査先は、国内については有力企業、海外については、平成21年8月、ドイツで開催のTHERMEC' 2009、平成21年9月、フランスで開催のLeeds-Lyon Symposium on Tribologyなど、研究実施項目①、②と共同で実施)。

- (4) トライボシステム中の気体分子の挙動解析(主に長崎大学に再委託して実施)

本研究実施項目では、トライボシステムにおける気体分子の挙動を分子動力学解析を用いて解明する。

トライボシステム中の気体分子の拡散、吸着等の分子動力学解析を行う。平成 20 年度に水素挙動分子動力学計算システムを追加導入し、前年度開発した、潤滑油中の気体分子の MD シミュレーションプログラムコードによる解析を発展させるとともに、摺動表面の凝着力に及ぼす気体分子の影響を捉えるためのプログラムコードを作成する。

<平成 18 年度>

- ① 数値計算用ワークステーションを導入し、摩擦界面とその近傍での雰囲気気体分子の挙動の分子動力学解析を行う。

<平成 19 年度>

- ① 既存の計算システムに加えて、水素挙動分子動力学計算システムを導入し、トライボシステム中の気体分子の拡散、吸着等の分子動力学解析を行う。

<平成20年度>

- ① 前年度開発した、簡単な分子構造の潤滑油中における気体分子の拡散、吸着の MD シミュレーションプログラムコードによる解析を発展させるために、水素挙動分子動力学計算システムを1式追加導入し、実際に使用される潤滑油における気体分子の挙動を検討する。
- ② 摺動表面の凝着力に及ぼす気体分子の影響を捉えるための MD シミュレーションプログラムコードを作成し、固体の元素の違いによる凝着特性に及ぼす雰囲気気体の影響を検討する。
- ③ なお、秋頃行われるトライボロジー会議(名古屋)に出席し水素研究に関する情報収集を行う。

<平成 21 年度>

- ① トライボ表面の凝着、および凝着力に及ぼす気体分子の影響に関する分子動力学(MD)解析を行う。MD プログラムコードを開発するとともに、金属／樹脂などの組合せを想定したシミュレーションを実施し、実験データとの比較を行う。
- ② トライボ表面での水素の吸着と浸入に関する分子動力学シミュレーションプログラムコードを開発する。水素の吸着、浸入の MD シミュレーションプログラムを開発するために水素挙動分子動力学計算システムの改造を行う。
- ③ よりマクロに捉えたトライボ系のシミュレーションの方法を検討する。
- ④ トライボロジーのシミュレーション技術の調査を行い、本課題に資する。

- (5) 耐水素トライボロジー信頼性評価(主に産業技術総合研究所側で実施)

本研究実施項目では、上記項目①～④の結果を集約し、水素中トライボロジーのデータベース(トライボアトラス)として整理し、データベースにもとづく摩擦係数や摩耗量などの予測方法を検討する。

平成 23～24 年度においては、トライボアトラスのデータを蓄積するとともに、民間企業と連携してデータ活用方法を検討してアトラスの充実をはかる。また、耐水素トライボ設計指針を検討して提案する。

<平成 21 年度>

- ① サブテーマ①～④のデータを集約し、トライボアトラス(水素トライボロジーのデータベース)を作成する。このためトライボアトラスデータベースシステムを導入し、前年度検討した形式の改善を図る。
- ② 水素中で作動する軸受・バルブ・シールなどの要素の実部材の評価試験法を検討する。

<平成 22 年度>

- ① トライボアトラスの作成、形式の改善を行う。
- ② トライボアトラスのデータにもとづく、実部材のトライボロジー特性の予測方法を検討する。
- ③ 産業界にトライボアトラス試供版の試用・評価を依頼し、その結果にもとづいてトライボアトラスの改善を図る。

<平成 23 年度>

- ① トライボアトラスのデータを蓄積し、ユーザーインターフェイスの開発を行う。
- ② トライボアトラスの有用性を確認するための調査と成果発表を行う。また、トライボロジーのデータベース産業界にトライボアトラス試供版の試用・評価を依頼し、その結果にもとづいてトライボアトラスの改善を図る。(調査先は、国内の有力企業と学会講演会、研究実施項目①、②と共同で実施)
- ③ 本プロジェクトで得た知見にもとづき、耐水素トライボ設計指針の検討を行う。

<平成 24 年度>

- ① トライボアトラスのデータ蓄積と改善を行って完成させる。
- ② トライボアトラスの有用性を確認するための調査と成果発表を行って、さらなる技術開発へ向けての課題をまとめる。(調査先は、国内については有力企業、学会講演会など、海外については、平成 24 年 10 月、アメリカで開催の STLE/ASME International Joint Tribology Conference(IJTC2012)など、研究実施項目①、②と共同で実施)
- ③ 本プロジェクトの知見を総合し、耐水素トライボ設計指針を整理する。

実施場所

研究実施項目①、②、⑤については、主に産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター、九州大学水素エネルギー国際研究センター、九州大学大学院工学研究院機械工学部門において実施する。研究実施項目③については主に産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門(つくば市)において実施する。また、研究実施項目④は主に長崎大学において実施する。

実施計画

研究実施項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	23年度	24年度
(1)軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性の調査研究		開発動向調査					
		← 非曝露材の摩擦摩耗データ取得					
		← トランスファーベッセルによる実験システムの構築					
		← 高圧水素中曝露材による摩擦摩耗特性データ取得					
		← 表面化学分析・ナノ表面特性の基礎データ取得					
			← 超高圧水素摩擦試験機の製作、実験	← 超高圧水素摩擦試験の実施			
			← 高圧水素中曝露材、非曝露剤の摩擦摩耗特性データ取得				
		← 表面特性と水素量の基礎データ取得	← 支配的因子抽出	← 機構探求	← 支配的因子の作用機構解明		
			← データベース設計の検討				
	(2)シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究		← 開発動向調査				
		← 低圧水素環境用シール材料の摩擦摩耗特性データ取得					
		← トランスファーベッセルによる実験システムの構築					
		← 高圧水素中曝露材による摩擦摩耗特性データ取得					
		← ナノ表面特性、材料物性の基礎データ取得					
		← 静的シール材料試験法検討					
		← 静的シール材料の密封特性データ取得					
			← 超高圧水素摩擦試験機の製作、実験	← 超高圧水素摩擦試験の実施			
			← 高圧水素中曝露材、非曝露剤の摩擦摩耗特性データ取得				
		← 表面特性と水素量の基礎データ取得	← 支配的因子抽出	← 機構探求	← 支配的因子の作用機構解明		
		← データベース設計の検討					
					← 表面損傷とシール機能の関係解明		

2.2 研究開発の実施体制

本研究開発では、研究開発項目毎の達成目標を効率的に実現するために、NEDO が選定したプロジェクトリーダー((独)産業技術総合研究所水素材料先端科学研究センター長 村上敬宜氏)の元に、別途 NEDO が公募によって選定した独立行政法人、大学等の研究機関により連携可能な研究開発実施体制を整備・設定した(平成23年度実施方針別紙:事業実施体制の全体図及び平成24年度実施方針別紙:平成24年度事業実施体制図参照)。本事業は情報共有、共通認識を目的に、プロジェクトリーダーの下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

産業界におけるニーズを的確に把握し、研究成果を効率よく展開することを狙い、平成22年度上期に民間企業等実施者の公募を実施し、共同研究のメーカーとして岩谷産業(株)、(株)共和電業、日本合成化学工業(株)の3社を追加で採択した。

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び研究開発責任者や研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。

具体的には、「水素先端科学基礎研究事業に関する推進助言委員会」(別紙Ⅱ2.3-1 参照)を設置し、学識経験者や関連業界代表者等にて構成した外部有識者の意見を取り入れながら、運営管理に努めた(年1回程度開催)。平成23年度推進助言委員会での主な指摘と対応は以下の通り。

- (1) 指摘：材料評価データは軽々しくオープンにせず、戦略的に活用されるべき。適切な活用方法の検討が必要。
対応：・秘密保持を前提にデータ開示規程を整備し、データの流出防止対応を実施。
・提供先とは覚書を結んで運用(関係者間では研究成果を有効的に使う)。
成果：・外部への不適切な情報の流出を防止した。
・適正にデータを提供することで規制合理化を推進。
- (2) 指摘： -40°C プレクールへの対応を考えると -50°C までのデータ取得を検討すべき。
対応：高圧ガス保安法の要求する強制換気に起因する温度誤差を解決しつつ、 -50°C における材料データ取得見込み(～H24 年末)
成果：プレクール時の材料の安全が確保できる。

また研究開発の効率的な推進を図るために、随時、受託者から事業進捗について報告を受けるとともに、当該研究開発内の効率的な推進に留まらず、関連した他事業や関連産業界との「研究成果に関する情報交換や研究協力等」が可能な体制を図るために、連絡会を設置し、お互いの効率的な確認・摺り合わせを促進させた(適時。年複数回開催)。

研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントとして下記の通り取り組んでいる。

- (1) 技術開発が完了しても、実用化、事業化には現行の法規制等が支障となる場合がある。
そのため2015年のFCV、水素インフラの普及開始期に向けFCV、水素インフ

ラの規制見直し、国際標準化に資する、材料データ取得を実施中。

(2) 実証が終了した機器の材料調査を行い、その技術の確立に向けた課題抽出を実施。

(3) 成果の特許出願等を積極的に出願している。また、外部への成果のアピールのため、論文、プレス発表等を積極的に実施することも指導している。

●研究開発テーマ間の関係について

各研究開発項目で互いに連携し、成果を生み出せる体制で進めている。研究間の成果事例を以下に示す。尚、各研究は以下の通り省略表記する。

水素物性研究：水素物性と表記する

水素金属材料強度特性研究：金属材料強度と表記する

水素高分子材料研究：高分子と表記する

水素トライボロジー研究：トライボロジーと表記する

<研究項目間の連携事例>

金属材料強度⇔水素物性：車載水素容器のき裂発生時における圧力解析（水素漏洩速度予測に貢献）

高分子⇔水素物性：ゴム材料化学構造評価（分子設計指針策定に貢献）

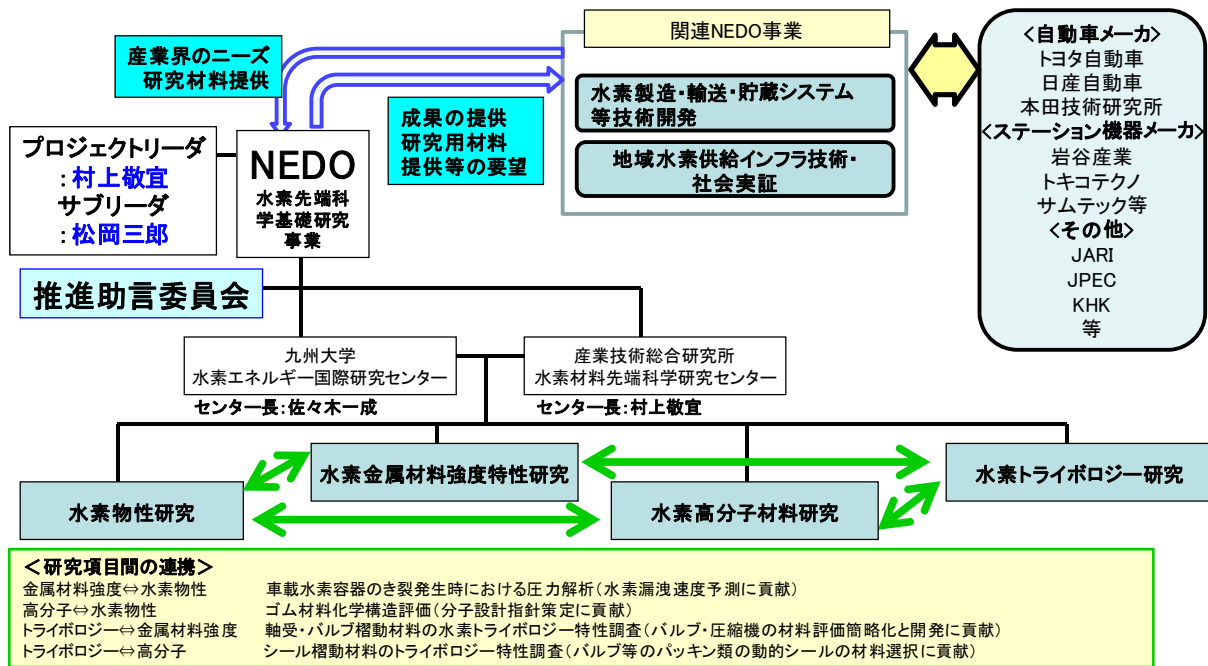
トライボロジー⇔金属材料強度：軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性調査（バルブ・圧縮機材料評価簡略化と開発に貢献）

トライボロジー⇔高分子：シール摺動材料のトライボロジー特性調査（バルブ等のパッキン類の動的シールの材料選択に貢献）

●NEDO内の関連事業の連携体制について

基礎基盤研究である「水素先端科学基盤研究事業」は、来るべき水素エネルギー普及のための水素供給インフラ市場立上げ（平成27年／2015年頃を想定）に向け、「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」（平成20年度～24年度）における低コストかつ耐久性に優れた機器及びシステムの技術開発等における材料評価ニーズを受けて、評価データの提供等を行って課題解決につなげる連携を計っている（鋼種拡大等）。また「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」の成果を技術実証である「地域水素供給インフラ技術・社会実証」にて実証を行い、商用ステーションの総合実証を行い、投資判断、課題抽出・対策、工期短縮（スムーズな立ち上げ）に成果を活用している。

【研究開発の運営管理（研究間連携及びNEDO関連事業の連携）】



3. 情勢変化への対応

本事業開始後、平成 22 年 3 月、燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）が「2015 年、一般ユーザーへの普及開始を目指す」とする『FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ』を発表し、平成 23 年 1 月、自動車メーカー及び水素供給事業者 13 社が FCV の国内市場導入に向けて共同で取り組むことに合意し、共同声明を公表。声明においては、2015 年に自動車会社が FCV 量産車を販売すること、エネルギー事業者が 4 大都市圏を中心として FCV 量産車の販売台数の見通しに応じて必要な規模（100 箇所程度）の水素ステーションを先行的に整備することを目指すことが示された。

このような情勢変化に対して下記の通り対応している。

(1) 鋼種拡大に係る規制の再点検に対する対応

平成 22 年 6 月に閣議決定された「規制・制度改革に係る対処方針（グリーンイノベーション分野）」を受け、平成 22 年末に水素ステーションの鋼種拡大に係る規制の再点検及びその結果を踏まえた対応について今後の具体的な工程表が作成され、「例示基準に記載された使用可能鋼材の拡大」が項目の一つに位置付けられた。

それを受け、「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業」と連係して、鋼種拡大に資するデータ・安全性のデータ取りを加速して実施。その結果工程表の進捗に大いに貢献した。平成 24 年度末に技術基準（案）完成見込み。

(2) 水素ステーション 100 箇所の先行整備に向けた対応

平成 23 年 1 月、2015 年の FCV 普及開始に先駆け、100 箇所程度の商用水素ステーション設置・実証を行う共同声明が発表された。

それを受け、鋼種拡大にかかる規制合理化のためのデータの取得を加速して実施すると共に、基準化対象外の材料についても高圧ガス保安法の特認を取得するために材料データ

を取得。その結果、2015年の商用水素ステーションの目標コスト達成に資する低コスト水素ステーション実証が可能となる見込み。

4. 中間評価結果への対応

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による中間評価を平成20年度、平成22年度に実施し、同評価結果や評価時のコメント等を平成20年度及び22年度以降の本事業の推進・研究開発に反映させた。

4.1 平成22年度中間評価報告時の主な指摘事項及び対応

(1) 指摘：水素の基礎的成果は出ているが、実用化に近づいているか不明

対応：・鋼種拡大の成果を70MPaプレクール対応に反映するため、岩谷産業を実施者に加え、体制を強化した。また、正しく測定できる歪みゲージを開発するために、共和電業を加え、体制の強化を行った。

・2015年の商用水素ステーション整備のために特に緊急性の高い鋼種拡大に資する金属材料の評価を大幅に強化。

成果：成果が水素ステーションの建設許可に活かされ、2015年に向けた実証研究につながった。

(2) 指摘：NEDOの他の水素関連事業と一体感をもって実施することが必要。

対応①：「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」との連携強化

成果①：・規制合理化、国際標準化に資する材料データを特定し、取得。

・水素充填ホース亀裂対策について、日本合成化学を共同研究者に追加し、連携して「耐水素性を有する水素バリア樹脂」のデータを提供。

それにより水素充填ホース実用化（亀裂対策）に向けた課題検証（水素溶解量低減／異物対策）完了見込み。

・トキコテクノでの試験、解析により弾性特性の感度の高い因子を把握。

それにより緊急離脱カップリングのOリングの水素漏洩対策の指針を得た。

対応②：「地域水素供給インフラ技術・社会実証」との連携強化

成果②：・水素ステーションにおいて長期間使用した70MPa関連部品の材料を調査することにより残存寿命が判った。

・低コスト鋼材の水素中の強度データをHySUTに提供することで、HySUTはそのデータを水素ステーションの特認取得に役立てた。

それにより、水素ステーションの使用材料の耐久性が実証された。

4.2 平成22年度中間評価報告時の指摘事項および対応（詳細）

(1) 総合評価

エネルギー資源を殆ど持たない日本にとって、付加価値の高い独自のエネルギー技術および関連技術を開発することは不可欠である。本プロジェクトは、エネルギーイノ

バージョンプログラム達成を目的として、今後の水素社会における機器の安全性確保に資する重要な知見・技術基盤を開発し、我国の水素社会実現に至る基礎的な技術力を高めるもので、国家的・世界的エネルギー戦略にとって、重要な事業である。民間では実施が困難なこのような公共性の高い基礎基盤研究を実施することはNEDO事業として意義がある。プロジェクトリーダーの下、九州大学および産業技術総合研究所が中心となって、全体のプロジェクトをコントロールする研究体制が整っている。水素基盤社会に重要な基礎と実用分野を見据えた研究成果を挙げており、中間目標は概ね達成している。最終目標に対しても現時点で達成するための素地があり、達成までの具体的な筋道が示されている。一方、水素の周辺材料となる部分の基礎研究成果は出ているが、成果が実用的なレベルへと近づいているかどうか明確には視えない。そして、個別に細分化されたテーマの成果が実用化にどのように結びついていくのか、その道筋があいまいである等の問題点がある。また、研究開発テーマ間の連携が必ずしも明確でない。実用化の観点から各テーマの必要性、関連性を整理し、テーマ間の連携関係をより明確にすることが必要である。今後、成果をもっと広く公開し、より広い分野の研究者、専門家から批評を受ける必要もある。

【対処方針】

主に自動車業界および水素インフラ業界と水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題を共有化し、2015年までに水素関連機器の鋼種拡大が可能となるデータ取得・提供の計画を作成する。また、テーマ毎に実用化が期待される成果および提供先、日程をリスト化して、産業界と共有する。更に、コミットするテーマ毎に役割を明確化する。(鋼種拡大の成果を70MPaプレクール対応に反映するため、岩谷産業を実施者に加え、体制を強化した。また、正しく測定できる歪みゲージを開発するために、共和電業を加え、体制の強化を行った。2015年の商用水素ステーション整備のために特に緊急性の高い鋼種拡大に資する金属材料の評価を大幅に強化した。)

国内外の学会等での成果の積極的な公表とその評価の反映については、金属学会等材料学会での研究発表を促進し、材料開発研究者との共同研究を検討する。

(2) 今後に対する提言

今後、産業界全体の効率的な技術開発にどう繋がるかというアウトカムの視点をより具体的に明確にすることが、本事業の成功の鍵となると考える。その時、NEDOの他の水素関連事業との連携と情報交換を密接にして、水素社会実現における問題点、重要なポイントを洗い出し、事業の目標を再検討すべきである。その際、さらなるテーマ間の連携によるシナジー効果が発揮されることを望む。また、水素ガス環境下における機器の信頼性確保に資する具体的、かつ損傷機構などのメカニズムに基づいた根拠のある提言や設計時の基本的な考え方を取り纏め、現在の規制や規格の問題点を明確にして、国際規格制定をリードするように研究・開発を実施することが望まれる。一方、国内外の権威ある学会で研究成果を積極的にアピールすべきである。このこと

は、情報を集める意味においても効果がある。また、NEDO プロジェクトは効果的に機能する産学官連携モデルとして世界から注目されているので、広報においても日本語のみならず、英文による活動報告をもっと行うべきである。

また、実施者は意識して、国際協調と国際競争の二面性という戦略を理解し、プロジェクトを推進していただきたい。NEDO は、知財とノウハウの管理、その後の利用方法について十分に準備をすべきである。

多額の投資が行われた本プロジェクトの施設は、プロジェクト終了後も、国内の水素関係の共同研究センターとして、人材育成も含めて機能させるように国やNEDO は計画し、実施すべきである。

【対処方針】

事業全体での一体感のあるアウトカムの明確化として、NEDO 水素関連事業における PL 会議を実施し、効率的な開発に向けた事業・テーマの整理を実施する。また、既に物性データベースを展開したNEDO 水素事業関係者(主に水素機器メーカー)にデータ活用状況を調査し、具体的ニーズに基づいた基本計画の見直しを実施する。その際、テーマ間の連携関係の明確化も行う。また、規制見直し・国際標準化に関連するテーマを推進する。更に、国内外の学会等での成果の積極的な公表とその評価の反映のため、金属学会等材料学会での研究発表を促進し、材料開発研究者との共同研究を検討する。また、大学の中に研究拠点を設けるという従来に例の無い研究体制の改善も本プロジェクトの重要な一面であり、現在は産総研に大きく依存している研究推進管理や企画広報の機能を九州大学において担えるよう、九大側の管理機能充実を図る必要がある。

(3) 事業の位置付け・必要性

本プロジェクトは、エネルギーイノベーションプログラム達成を目的として、今後の水素社会における機器の安全性確保に資する重要な知見・技術基盤を開発し、我国の水素社会実現に至る基礎的な技術力を高めるもので、国家的・世界的エネルギー戦略にとって、重要な事業である。民間では実施が困難なこのような公共性の高い基礎基盤研究を実施することはNEDO 事業として意義がある。さらには、その成果を安全に使用できる水素高圧貯蔵容器を製造するなど実用化、商品化へ生かせることから、本プロジェクトの意義は大きい。なお、本プロジェクトの位置づけを、エネルギーイノベーションプログラムの5つ柱のすべてに寄与しうる重要なテーマであると認知されるように関係各所への働きかけが必要である。一方、今後、産業界全体の効率的な技術開発にどう繋がるかというアウトカムの視点をより具体的に明確にすることが、事業の成功の鍵となると考える。その時、NEDO の他の水素関連事業との連携関係も整理して、事業全体として一体感を持って実施することが肝要である。また、物性研究は水素を扱う技術上必要であるが、外に出せるデータと、出せないデータがあるということであり、公開できないデータの管理、必要時の利用方法など、国民に明確にすべきである。

国際競争の中で、その成果を国際標準とする努力を望みたい。さらに海外動向を知る上でも、著名な国際集会には積極的に出て行くべきである。

【対処方針】

事業全体として一体感のあるアウトカムの明確化のために、NEDO 水素関連事業における PL 会議を実施し、効率的な開発に向けた事業・テーマの整理を実施する。（「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」との連携強化として、①規制合理化、国際標準化に資する材料データを特定し、取得。②水素充填ホース亀裂対策について、日本合成化学を共同研究者に追加し、連携して「耐水素性を有する水素バリア樹脂」のデータを提供。③トキコテクノでの試験、解析により弾性特性の感度の高い因子を把握。「地域水素供給インフラ技術・社会実証」との連携強化として、①水素ステーションにおいて長期間使用した 70MPa 関連部品の材料を調査することにより残存寿命が判った。②低コスト鋼材の水素中の強度データを H_y S U T に提供することで、H_y S U T はそのデータを水素ステーションの特認取得に役立てた。）また、当面データベースの公開は、NEDO 水素事業関係者に限定する。一方で、データベースを活用した機器開発をサポートし、ニーズに応じて適宜改良を実施する。更に、国内外の学会等での成果の積極的な公表とその評価の反映していく。

(4) 研究開発マネジメント

高压水素条件下の信頼性を確保して新たな機器開発を行う上で、最も重要な水素脆化による損傷が懸念される金属材料や高分子材料の材料強度特性やその機構、ならびにトライボロジー特性、さらに高压水素物性など、水素社会における技術基盤のうちの焦眉の急となる課題に限定して実施しており、研究課題の設定は妥当である。研究開発のチーム構成にやや分野の偏りが見られるものの、個々の基礎研究力・開発力・技術力も高く、おおむね妥当である。プロジェクトリーダーの下、九州大学および産業技術総合研究所が中心となって、全体のプロジェクトをコントロールする研究体制も整っている。一方、大きな目標を実現するために研究テーマが細分化されていき、細分化された中だけで研究が進められて全体感が見えにくくなっている傾向が見受けられる。また、研究開発テーマ間の連携が必ずしも明確でない。実用化の観点から各テーマの必要性、関連性を整理し、テーマ間の連携関係をより明確にすることが必要。さらには、本プロジェクトの中心となる鉄鋼材料の脆性破壊に関しては、脆性破壊を専門とする研究者が集まり、集中した議論ができる国内の学会、例えば日本金属学会、日本鉄鋼協会、国際集会等で成果を発表すべきである。徹底討論などを行い、研究体制を見直し、門戸を広げる手法もありうる選択である。多額な公的資金を投入した成果をもっと広報的にもさらすという義務的な視点からも重要である。

【対処方針】

各テーマが実用化に結びつく道筋の提示・明確化のために、テーマ毎に実用化が期待

される成果および提供先、日程をリスト化して、産業界と共有する。また、テーマ間の連携関係の明確化するために、コミットするテーマ毎に役割を明確化する。更に、国内外の学会等での成果の積極的な公表を行い、その評価を反映する。

(5) 研究開発成果

個々の研究テーマも、また全体としても概ね中間目標を達成している。特に、高圧水素物性や脆化現象と強度に関する基礎研究は着実に成果が出ている。成果は論文、特許、データベース、研究会やフォーラムの形でそれぞれ適切に公開されており、貴重なデータが提供されている。また、最終目標に対しても現時点で達成するための素地があり、達成までの具体的な筋道が示されている。但し、水素物性の成果の重要性はわかるが、本プロジェクトでの役割が具体的、明確に視えない。また、高分子、トライボロジーの研究チームの成果が弱い。今後、インパクトのある成果を期待したい。さらに、細分化されたテーマにおける成果が統合されてどのように水素社会実現に活用されていくのか、外部からも見えるようにすべきである。特に、チーム間で連携して初めて可能となった成果が具体的に何であるのかがほとんど見えてこない。情報発信という面から言えば、脆化現象、トライボロジーなど、異分野の研究者の意見交換、共同研究も参考にすべきであり、その成果発表を広げて行く必要がある。また、データ公開、知財の取り扱い等、成果の戦略的利用の考え方を、NEDO 事業として取り決めることが重要である。

【対処方針】

水素物性の本PJにおける役割の明確化。既に物性データベースを展開したNEDO水素事業関係者(主に水素機器メーカー)にデータ活用状況を調査し、具体的ニーズに基づいた基本計画の見直しを実施する。また、高分子チームについては、これまでの研究成果を具体的課題解決(①高圧水素用Oリング開発、②高圧水素用樹脂ガスバリアー材開発、③70MPaプレクレーターに用いる耐高圧水素、耐低温用Oリング開発)に提供する見込み。トライボロジーチームについては具体的課題が明らかでないため、実証事業の回収品調査等を通じて水素ステーション等におけるトライボロジーの課題探索を実施する。また、各テーマが実用化に結びつく道筋の提示・明確化とテーマ間の連携関係も明確化する。更に、異なる研究分野への成果発表・意見交換の推進を行う。

データベースの公開は、当面従来通りNEDO水素事業関係者に限定する。一方で、データベースを活用した機器開発をサポートし、ニーズに応じて適宜改良を実施する。

(6) 実用化・事業化の見通し

水素基盤社会に必要な水素の貯蔵、輸送用の高圧タンク材料の研究開発の方向性は、燃料電池自動車のみならず、他の水素利用インフラに向けても、出口イメージは妥当であり、高圧水素ガス条件下の貴重な材料強度データベースの提供や水素関連の各種

根本メカニズムの提示が具体的な出口イメージとして設定されている。また、国際標準化のイニシアチブを取るために国際的な取り組みも高く評価でき、その見通しもある程度明確になっている。また、人材育成を通してプロジェクトの波及効果を上げようとしている点も評価できる。但し、水素の周辺材料となる部分の基礎研究成果は出ているが、成果が実用的なレベルへと近づいているかどうか視えない。また、個別に細分化されたテーマの成果が実用化にどのように結びついていくのか、その道筋があいまいである。従って、得られた結果を基にして、「これからどうするのか」という具体的な解決策を設定すべきである。実用化への貢献を強固にするためには、日本国内外の企業の交流を進めながら、産業界ニーズを取り込んだ明確な出口イメージが必要である。明確な出口イメージを基に、各研究テーマとその成果の位置づけを再確認し、また情勢変化に対応して調整しつつ、開発を進めるべきである。

【対処方針】

各成果の実用化に向けた進捗度の明確化のために、主に自動車業界および水素インフラ業界と水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題を共有化し、2015年までに水素関連機器の鋼種拡大が可能となるデータ取得・提供の計画を作成する。また、各テーマが実用化に結びつく道筋の提示・明確化のために、テーマ毎に実用化が期待される成果および提供先、日程をリスト化して、産業界と共有する。

5. 評価に関する事項

本事業に対し、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について評価を行うと共に、各研究開発項目毎に、進捗及び成果達成状況、実用化の見通し等の中間評価を行い、研究開発計画・実用化見通しに反映した。

別紙Ⅱ 2.3-1 推進助言委員

平成 18 年度 水素先端科学基礎研究事業 推進助言委員会 委員名簿

開催日時: 平成 19 年 3 月 8 日(木) 13:30~17:00

開催場所: 川崎日航ホテル11階 橘

氏名		所属・役職
委員長	吉川 暢宏	東京大学 生産科学研究所 教授
委員	栗飯原 周二	東京大学大学院 教授
"	石丸 裕	住友ケミカルエンジニアリング(株)社長
"	尾上 清明	新日本石油(株)
"	河津 成之	(社)日本自動車工業会 燃料電池自動車分科会長
"	工藤 赳夫	兵庫県立大学大学院 工学研究科 客員教授
"	竹花 立美	高圧ガス保安協会 機器検査事業部 審議役
"	八木 晃一	(独)物質・材料研究機構

平成 19 年度 水素先端科学基礎研究事業 推進助言委員会 委員名簿

日時:平成20年3月26日(月) 13:30~17:15

場所:九州大学 伊都キャンパス ウエスト4号館 914会議室

氏名		所属・役職
委員長	吉川 暢宏	東京大学 生産科学研究所 教授
委員	南雲 道彦	早稲田大学 名誉教授
"	栗飯原 周二	東京大学大学院 教授
"	工藤 赳夫	兵庫県立大学大学院 工学研究科 客員教授
"	河津 成之	(社)日本自動車工業会 燃料電池自動車分科会長
"	尾上 清明	(株)ENEOS セルテック 常務取締役
"	竹花 立美	高圧ガス保安協会 機器検査事業部 審議役

平成 20 年度 水素先端科学基礎研究事業 推進助言委員会 委員名簿

日時:平成21年6月15日(月) 13:30~17:15

場所:九州大学 伊都キャンパス ウエスト4号館 914会議室

氏名		所属・役職
委員長	吉川 暢宏	東京大学 生産科学研究所 教授
委員	南雲 道彦	早稲田大学 名誉教授
"	石丸 裕	住友ケミカルエンジニアリング株式会社 社長
"	河津 成之	(社)日本自動車工業会 燃料電池自動車分科会長
"	竹花 立美	高圧ガス保安協会 機器検査事業部 審議役

平成 23 年度 水素先端科学基礎研究事業 推進助言委員会 委員名簿

日 時:平成23年6月15日(月) 13:30~17:00

場 所:NEDO 別館ラウンドクロス 第2、第3会議室

氏 名		所属・役職
委員長	吉川 暢宏	国立大学法人東京大学生産技術研究所 教授
委員	飯田 重樹	石油連盟
〃	池田 哲史	水素供給・利用技術研究組合 技術本部 副本部長
〃	河津 成之	日本自動車工業会 燃料電池自動車分科会 分科会長
〃	里見 知英	燃料電池実用化推進協議会 企画第2部 部長
〃	竹花 立美	高圧ガス保安協会 機器検査事業部 兼 高圧ガス保安研究室 審議役 兼 室長
〃	田畑 健	社団法人 日本ガス協会 技術開発部 部長
〃	南雲 道彦	早稲田大学 名誉教授
〃	日比 政昭	新日本製鐵株式会社 技術開発本部 技術開発企画部 部長

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

水素社会構築のためには、水素製造・供給・利用システムなどの水素利用技術の性能向上だけでなく、水素を安心して使うための信頼性や安全性、経済性の確立が不可欠である。燃料電池自動車や水素ステーションなど水素を利用する際には、高いエネルギー密度で水素を輸送及び貯蔵する必要があり、高圧状態もしくは液化状態の水素を取り扱うこととなる。このような高圧もしくは液化状態の水素物性及びこれらの容器や水素を扱う機器の水素による疲労や脆化など、水素に関わる現象の基礎的メカニズム解明のような共通基盤となる基礎的な知見が、水素を利用する機械システムを長期間安全に利用するためには必要である。本事業は、水素利用技術における技術課題の根本的な解明と解決を目指し、高圧水素を用いる機械エネルギーシステムを、経済性を成り立たせながら信頼性高く設計し、安心してもらうための、水素システムにおける設計指針を確立していくことが目的である。

取り組む研究開発項目は、水素関連機器の構造材料(鋼材、アルミ材)、シール材(高分子)、摩擦摩耗潤滑(トライボロジー)、機器内部の高圧水素の物性と、高圧水素機器の基本的要素を網羅した4項目とし、互いに連携しながら研究を進めている。また、外部機関及び企業とも連携を深めながら、先進的基礎研究に基づいた水素関連機器研究開発・規制見直し・国際標準化等を支援している。

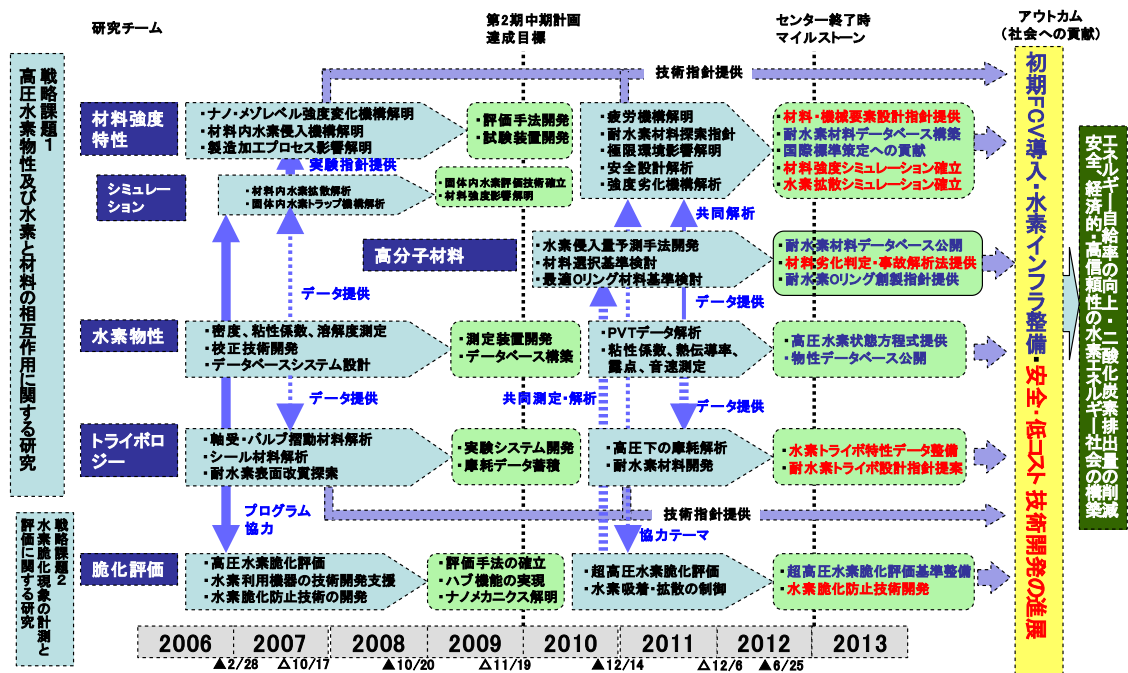


図 1.1 事業全体の研究開発ロードマップ

1.1. 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」

【最終目標(平成24年度末) 出展:基本計画】

「PVTデータ、粘性係数、熱伝導率、比熱、物質に対する水素の溶解度等 水素物性について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素物性データベースを纏め、関係産業界に提供するとともに、更なる測定精度や信頼性向上のための校正技術を纏める。」

研究実施項目	研究開発成果	達成状況
(1) PVT データの測定装置の開発および状態方程式の作成	<ul style="list-style-type: none"> 高圧水素用の定容積法 PVT 性質測定装置を開発し、773 K、100 MPa までの PVT データを取得した。 磁気式密度計のシンカーを製作し、体積を高精度に校正した。そして窒素において 373 K、100 MPa までの PVT データを取得し、装置の健全性を確認した。また、水素において 323 K、100 MPa までの PVT データを取得した。 	<p>○</p> <p>△</p>
(2) 粘性係数の測定	<ul style="list-style-type: none"> 高圧水素粘性係数測定装置を開発し、100 MPa、773K(500°C)までの範囲の測定を安全に行うことを可能にした。 本測定装置により 99MPa、773K(500°C)までの測定を行うことにより、従来実測データが得られていない条件下の粘性係数のデータを整備するとともにデータベースの充実を可能にした。 99MPa まで、室温から 400K(127°C)の範囲で、窒素および水素ガスの測定を行ない、既存の標準値である NIST の REFPROP の値と 2%以内で一致する結果を得た。 従来のデータのレビュー結果をもとに高圧でかつ高温まで適用領域を拡張した推算式を作成し、データベースに組み込んだ。 	<p>○</p> <p>○測定を継続しデータを蓄積する必要あり</p> <p>○</p> <p>○</p>
(3) 熱伝導率の測定	<ul style="list-style-type: none"> 非定常短細線法による水素ガスの熱伝導率の測定法を確立した。本測定法を気体に適用したのは世界で初めてである。 高圧水素熱伝導率測定装置により、高圧(～99MPa)、高温(～500°C)までの水素ガスの熱伝導率の測定を行った。 100MPa、-100°Cから 500°Cまでの範囲の実測データを偏差 2%で再現できる相関式を提案した。 	<p>◎</p> <p>○</p> <p>○</p>
(4) 水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定	<ul style="list-style-type: none"> H22 年度、NMR 手法で種類や、添加剤の異なるゴムの水素ガスに対する透過性を計測しデータを一部拡充した。 H22 年度、雰囲気水素ガスを H2 から D2 に切り替えることで、ゴム構造由来水素と溶解水素ガスの信号を分離し、溶解した水素ガスの溶解度をより正確に定量化できた。 H22、高分子電解質膜内の水素ガスの透過性を試計測できた。 H23 年度、含水状態の高分子電解質膜(PEM)に対する水素ガスの溶解度、拡散係数を計測するために、また水由来のプロトンと水素ガス由来のプロトンを区別するために、重水の加湿器を導入した。 H23 年度、ゴムに対する水素ガスの溶解プロセスの計測において、実際の仕様環境を模擬するために、荷重かけた条件下での計測を実施した。 H24 年度、水素ガスの高分子電解質膜に対する、ゴム材料に対する溶解度、拡散係数をまとめる。特に高分子電解質膜においては含水量をパラメーターに溶解度、拡散係数を整理した。 	<p>○</p> <p>◎</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>△、更なるデータの検証が必要。現在実施中。</p> <p>△、含水量を調整するバブラーも安定し、一部、含水状態のデータを取得済み。随時データを蓄積中。</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・ H24 年度、ゴム材料においてはファイラー種、量をパラメーターに溶解度、拡散係数を整理する。 	<p>△、カーボンファイラーの場合には NMR 手法による計測が難しいことが分かった。</p>
<p>(5) 水素物性データベースの研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ H22 平成 21 年度までに開発してきた水素熱物性データベースシステムがサポートする物性値や適用範囲について、特に本プロジェクトの特徴である高圧の領域を正確にサポートできるような拡張を検討し、拡張版 PVT 関係・相平衡計算システムを開発した。 ・ H22 XML を利用した水素物性データベースおよび文献データベースの開発と評価を行った。その結果、NIST Thermo ML が最善であると判断した。 ・ H22 高圧状態における水素の PVT 関係の推算により適したモデルの構築へ向けての検討を開始し、これまでに得られた PVT の測定結果を用いて判断したところ、従来の手法でも十分な精度で予想できそうであると判断した。 ・ H22 開発を続けている球形共鳴器による音速測定装置を用いて、室温、大気圧の状態の空気、ヘリウムガスおよび水素ガス中の共鳴周波数の測定を行なった。理想気体を想定して共鳴周波数から計算された水素の音速は、Wooly らの式と比較して、(0, 1)モードにおける偏差は 0.11%、複数のモードにおける標準偏差は 0.83%であった。 ・ H22 水晶発振式の高精度圧力センサーを装置に設置し、圧力の測定精度をフルスケールの 0.25%から 0.01%に向上させた。 ・ H22 測定実験の過程で得られた経験と測定結果をもとに共鳴セルを再設計し、材料に真鍮を使い、球の半径を 30 mm とした 2 個目の共鳴セルを制作した。 ・ H23 このプロジェクトが開始されて 5 年が経過し、データベースサーバーやクライアントの本体となる計算機のハードとソフトの利用状況が変化した。その変化を整理して、それらに対応した改良を行う。当面、CD-ROM を利用したシステムから USB メモリを利用したシステムへの完全移行するための USB メモリ型 DB システムの構築とエクセル以外のソフトウェアのサポートを実施した。 ・ H23 水素の音速の測定精度を向上させるために、リファレンスガス Ar を用いて球形共鳴器の内半径平均値を 0.022%の拡張不確かさ(包含係数は 2)で較正する式を作成した。 ・ H23 較正式を利用した結果、水素の音速を、60°C~90°C、50kPa~1MPa の範囲において拡張不確かさ 0.058%の精度(包含係数は 2)で測定できた。 ・ H23 恒温槽内の攪拌性能を向上させ、温度の不均一性を低減させた。 ・ H24 物性チームが測定した各種の物性値に加えて、以上の成果をデータベースに反映させる作業を開始した。 ・ H24 水素利用機器の現状を想定したアプリケーション型の物性計算システム(例えば、水素ステーションにおける熱物性値シミュレータ)を拡充を図っている。 ・ H24 新しい真鍮製の共鳴器の発振器としてスーパーツイータを採用した結果、発振強度が大幅に改善した。 ・ H24 迫田のピリアル状態式と音速の測定データを比較する。 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>◎</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>◎</p> <p>△ (2012年 10 月末)</p> <p>△ (2013 年 2 月末までに最新の測定結果に基づいたシステムを完成予定)</p> <p>△ (2012 年 12 月末までに水素の音速測定を実施予定)</p> <p>△ 新共鳴器による測定後、比較予定</p>

<p>(6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ -100℃, 1 MPa までの低温高圧条件に対応した露点測定予備試験システムを製作し、実験を通して高沸点成分が微量である場合の鏡面冷却式露点測定法の特性を詳細に調べた。 ・ 水素ステーションの条件に対応した微量高沸点ガスの露点推算法について詳細に検討し、異なる形式の状態方程式に基づいた計算を可能とする露点推算ソフトウェアを作成した。露点推算に基づき、水素ステーションにおいて凝縮・凝固する可能性があるのは、専ら残存水分であることを示した。 ・ 高圧水素中の微量水分の露点測定を可能とする、光学系と分離された高圧試験容器を有する鏡面冷却方式の測定システムを設計した。高圧試験容器については、高圧ガス保安協会から 50 MPa で使用するための特認を取得した。 ・ 高圧水素中の微量水分に対応した露点測定システムを製作し、水素標準ガスを用いた系統的測定により、全圧 5～10 MPa, 水分濃度 5～55 ppm の露点実測値を蓄積した。なお、予算面および実験施設上の制約から当初の計画を変更し、15 MPa 対応の測定システムとした。 ・ 露点実測値に基づき、露点推算法の状態方程式中の未定パラメータを決定し、高圧域での露点推算を可能とした。現状で推奨できる露点推算法の詳細を提示するとともに、70 MPa 水素ステーションにおけるブレイク温度と許容水分濃度の解析結果を示した。 ・ 高圧水素中の微量水分の濃度モニター法について検討し、インライン型鏡面冷却式センサを用いた微量水分の濃度モニター法を開発して露点測定システムに組み込んだ。 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○(年度内に、さらに露点実測値を拡充し、状態方程式の未定パラメータの決定精度を高め、露点推算法の精度を向上させる。)</p> <p>○</p>
<p>(7) 比熱の測定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 予算削減により実施不可 	

<達成状況 評価基準>

7 月末において研究成果が

◎ :最終目標を超過達成済み。

○ :最終目標を達成済み。

△ :最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み(達成見込み年月日を括弧で記入する)。

× :最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。

<本研究開発項目のアウトカム>

- ・水素物性データベースが水素ステーションの設計に係る充填シミュレーションに活用された。

1.2 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」

【最終目標(平成24年度末) 出展:基本計画】

「高圧水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムについて、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素環境下における組織・強度変化予測手法や疲労き裂進展挙動予測手法を纏め、関係産業界に提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

また、高圧化状態に曝される材料、部品等の加工(成形・溶接・表面修飾)プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記②における科学的知見も含めて、水素材料データベース、最適水素材料探索指針を纏め、関係産業界に提供するとともに、水素用機械要素設計法や材料劣化判断・健全性評価法等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

さらに、水素関連機器に用いる材料内の水素拡散挙動・漏洩挙動を計算するシミュレーション手法を用いて、上記の実験・解析データに理論的根拠を与え、産業界に対して水素材料や水素機械の信頼性向上や安全性の確立のための科学的知見を可能な限り一般化して提供することを試みる。」

研究実施項目	研究開発成果	達成度
(1) 疲労き裂先端における塑性変形(すべり変形)と水素の相互作用の解明	<ul style="list-style-type: none"> ・ 著書「水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方」(村上敬宜, 松岡三郎, 近藤良之, 西村 伸 共著)を出版した。この著書には材料強度チームと高分子材料チームの基礎研究成果が含まれている。 ・ 水素環境下におけるオーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす荷重負荷速度の重要性を発見した。水素脆化を起こさないとされていた SUS316L においても、0.0015Hz の低荷重負荷速度ではき裂進展速度は水素で加速した。 ・ オーステナイト系ステンレス鋼では、製造時に侵入した水素による疲労き裂進展速度は加速するが、特殊熱処理で製造時に侵入した水素を除去すると、疲労き裂進展速度は減速することを発見した。 ・ オーステナイト系ステンレス鋼では、過飽和水素で疲労き裂進展抵抗が向上することを発見した。 ・ 炭素鋼, 低合金鋼では、水素で疲労き裂進展速度は10倍以上加速した。しかし、水素による疲労き裂進展速度の加速には上限値が存在した。上限値は水素機器の安全な疲労設計の根拠になることを提示した。 ・ 水素により疲労き裂先端ですべりが局在化することに注目し、水素助長疲労き裂継続進展機構を提案した。 ・ 水素環境下における炭素鋼の引張破壊ではボイドが荷重軸に垂直に成長する特異な現象を見出した。この特異な現象も水素助長疲労き裂継続進展機構を応用して説明できることを示した。 ・ 上記の引張強度が1000 MPa以下のオーステナイト系ステンレス鋼, 炭素鋼, 低合金鋼のような低強度鋼における水素脆化は、格子脆化による脆性破壊でなく、水素で局在化したすべりによるマイクロ延性破壊であることを明らかにした。一方、1000 MPa 超級高強度鋼では、水素で 	<p>◎</p> <p>◎</p> <p>◎</p> <p>◎</p> <p>◎</p> <p>◎</p> <p>○</p> <p>○</p>

	変形双晶が助長されることを見出し、助長された変形双晶による粒界き裂形成モデルを提案した。	
(2) 高圧水素ガスにおける疲労き裂発生・進展メカニズムの解明	<ul style="list-style-type: none"> 120 MPa 水素ガス中疲労試験機などを使用し、高圧水素ガス中での低速引張 (SSRT) 特性、疲労特性、疲労き裂進展特性を評価する方法を確立した。 100 MPa 水素ガス曝露容器と昇温脱離分析装置 (TDS または TDA) を組み合わせ、オーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼の水素拡散係数と固溶度を評価する方法を確立した。 SIMS により水素を可視化する技術の開発、水素量を測定する技術の開発、EBSD により焼戻しマルテンサイトのような微細組織を解析する技術の開発に成功した。 	◎ ◎ ○
(3) 水素機器に使用される金属材料の強度評価	<ul style="list-style-type: none"> 外部の関係機関と連携し、水素構造材料データベースを作成している。2011 年 6 月以降で 200 冊以上の水素構造材料データベースを提供した。KHK への 80 冊と JPEC への 5 冊は規制見直しに使用されている。HySUT への 110 冊は水素ステーション設置のための特認取得に使用されている。 外部の関係機関と連携し、実証が終了した 35 MPa 水素ステーションの蓄圧器やパイプ、試験で破裂前漏洩した 35 MPa 車載水素容器、高圧水素実験施設で水素漏洩した高圧配管用 T 型ジョイントや高圧センサーなどの調査・解析(事例解析)を行っている。事例解析の結果をもとに、水素機器の安全性確保、高性能化の提言を行った。 	◎ ◎
(4) 水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価	<ul style="list-style-type: none"> オーステナイト系ステンレス鋼および溶接構造用鋼の溶接部の高サイクル疲労強度は、0.6MPa 水素ガスにより低下しないことが明らかになった。き裂性の溶接欠陥 (不完全溶け込みおよび、融合不良) を含む場合、溶接部の高サイクル疲労強度は欠陥がない場合に比べて顕著に低下するが、0.6MPa 水素ガスによってさらに低下が助長されることはなく、溶接の水素機器への適用可能性を示した。 10MPa 水素ガス中で、周波数 26Hz で疲労試験が可能な試験装置を開発し、炭素鋼、アルミニウム合金、銅、ステンレス鋼の高サイクル疲労特性を取得した。これらの材料について、平滑材の高サイクル疲労強度は 10MPa 水素ガス中でも大気中と比べて大幅な変化は見られず、低下する場合でも 10%以内である結果を得た。 炭素鋼の平滑材における疲労き裂発生寿命は、10MPa 水素中では大気中に比べて 2 倍以上であるために全寿命に見かけ上水素の影響が現れないこと、微小欠陥材では顕著に水素中の方が疲労寿命が短くなることを明らかにし、水素の影響評価の最適な試験法について知見を得た。 オーステナイト系ステンレス鋼の水素中フレッティング疲労強度低下の機構を解明し、また材料中に多量に水素侵入した場合の強度特性を明らかにした。 地震等による大ひずみの負荷がその後の疲労強度に及ぼす影響について、評価線図を作製し、また任意の負荷条件に対する疲労限度低下の予測法を確立した。 水素による微小き裂の進展下限界応力拡大係数 ΔK_{th} の低下が、材料硬さ HV280 未満の材料であれば顕著でなく、水素による微小欠陥材の疲労強度低下を心配する必要のないことを明らかにした。 長周期応力変動 (0.00056Hz) さらにピークで応力保持 	◎ ◎ ○ ◎ ○ ◎ ○

	(1800s)がある場合について、低合金鋼の連続水素チャージ下で、き裂進展速度の急激な加速が起こることを見出した。急激なき裂進展速度の加速を防止する方法として、JISの範囲外の焼戻し温度を用いて材料硬さをHV280未満とすることを提案した。	
(5) 材料中の侵入水素の存在状態解析	<ul style="list-style-type: none"> 安定オーステナイトステンレス鋼 (SUS316L) と準安定オーステナイトステンレス鋼 (SUS304) 中の水素存在状態の分離を達成した。 FCC 結晶構造である SUS316L, SUS304 においても、転位と水素の相互作用が起こることを実験により実証した。 	○ ○
(6) 材料中の結晶粒内・粒界におけるすべり変形に及ぼす水素の影響調査	<ul style="list-style-type: none"> 水素によって誘起される疲労き裂進展の加速を抑制できる低炭素鋼の創製を達成した。0.05 mass%C の低炭素鋼に対して、0.25 mass% のチタン、0.27 mass% のバナジウム、0.45 mass% のニオブをそれぞれ添加した炭素鋼に 833K で減面率 95% の溝ロール圧延を施した低炭素鋼の 1μm 以下の超微細粒組織を解析することによって、微細な炭化物 TiC, VC, NbC の析出と 1μm 以下のフェライト結晶粒の微細化で水素による疲労き裂進展の加速が大きく抑制されることを解明した。 	◎
(7) 材料中の疲労き裂先端の水素状態の調査	<ul style="list-style-type: none"> 水素マイクロプリント法により、金属材料中からの水素放出を可視化する手法を確立した。 水素マイクロプリント法を用いて、オーステナイト系ステンレス鋼中の疲労き裂先端近傍における微視的水素拡散挙動を調査し、水素拡散にはマルテンサイト変態相に加えてすべり線が重要な役割を果たすことを明らかにした。 水素マイクロプリント法を用いて、水素ガス配管への使用が想定されるダクタイル鋳鉄の微視組織中における拡散性水素の分布を明らかにし、水素による延性低下の機構を解明した。 	○ ○ ◎
(8) 水素ステーションに使用された金属材料の健全性及び強度評価	<ul style="list-style-type: none"> 有明水素ステーションの蓄圧器について健全な材料であることを確認した。 水素チャージにより内部破壊が生じやすくなることを示し、材料の清浄度が内部破壊の頻度に影響することを示した。 水素の影響で疲労き裂伝ば速度が加速することを示し、水素チャージによる結果から高圧水素ガス中での特性を予測する方法を提案した。 	○ ◎ ○
(9) 水素デバイス等の安全設計シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> 材料内の水素拡散解析において、従来までの濃度指定境界条件に加え、束指定境界条件を追加し、両条件の違いを明らかにした。これにより内部水素よりは外部水素の影響の方が高い可能性を示唆した。 	○

(共同研究:岩谷産業)

研究実施項目	研究開発成果	達成度
高圧水素ブレーカー用等高強度材料の特性評価	<ul style="list-style-type: none"> これまで本事業で得られた基礎研究成果及び高圧水素試験装置等を活用して、「高圧水素ブレーカー用等高強度材」の実使用環境を想定した高圧水素雰囲気における材料特性を評価。 材料特性データを活用した余寿命解析、水素サイクル試験等による検証 本研究の材料データ、解析結果を活用し、「高圧水素ブレーカー」として、高圧ガス保安法・特定則の事前評価・大臣特 	○ ○ ○

	認を取得する等, 実用化に向けた設計適合性を確認	
--	--------------------------	--

(共同研究: 共和電業)

研究実施項目	研究開発成果	達成状況
高圧水素ガス用ひずみゲージの開発とひずみゲージ箔材の電気抵抗に及ぼす水素の影響の解明	<ul style="list-style-type: none"> ・ ひずみゲージ用金属材料の EBSD 組織解析, 水素侵入特性の測定, 電気抵抗率の測定を行い, 箔材 (として Fe-Cr-Al, ゲージリードとして銅 (Cu), 接合部としてはんだ (Sn-Ag-Cu) が高圧水素ガス用ひずみゲージの構成金属材料として有効であることを明らかにした. ・ ひずみゲージの製作 ・ 高圧水素ガス用箔ひずみゲージ, 箔材及び板材の電気抵抗に及ぼす水素の影響評価 ・ 外力負荷時の高圧水素ガス用ひずみゲージの電気特性に及ぼす水素の影響評価における測定 ・ 事業化の見込み 	<p>◎</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>

< 達成状況 評価基準 >

7 月末において研究成果が

◎ : 最終目標を超過達成済み。

○ : 最終目標を達成済み。

△ : 最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み (達成見込み年月日を括弧で記入する)。

× : 最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。

< 本研究開発項目のアウトカム >

・ 水素ステーションに関わる鋼材において 2 種類から 7 種類の提案につながった

・ 水素ステーション設置 (5 か所) のために水素構造材料データベース 155 冊提供され、特認取得に向けて 30 件の事前審査が行われている

1.3 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

【最終目標(平成24年度末) 出展:基本計画】

「高圧化状態の水素に曝される高分子材料等の材料強度及び化学構造について、高分子材料の組成、長期使用及び加工、温度などの影響を評価し、基礎研究の結果に基づく知見も含めて、最適な耐水素高分子材料創製指針を纏め、関係する産業界に提供する。また、水素シールとして実使用されるOリング等の性能評価法等、高分子材料の劣化や破壊に関する評価法や基礎的データを提供し、関係する産業界が水素を利用する際の高分子材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。」

研究実施項目	研究開発成果	達成度
(1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力差, 減圧速度, ゴム材とプリスタ発生状況の関係を把握した. ・ プリスタによる内部クラックの進展状況を観察し, プリスタ発生メカニズムを推定した. ・ 配合が明確なモデル配合材料による評価結果をまとめてデータベース構築を推進中. ・ 取得したデータの産業界における水素機器開発への適用を進めた. 	<p>○</p> <p>○</p> <p>△(H25年2月)</p> <p>◎</p>
(2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素曝露前の状態で分析を実施し初期のゴム材料の化学構造を把握した. ・ 長時間水素雰囲気下に曝露された, ゴム材料の分析を実施し, 水素曝露による構造変化を把握した. ・ 水素曝露によるゴム材料の化学構造変化(劣化)を評価した. ・ 水素曝露時に溶解した水素の溶解状態を分析し, 耐プリスタ性に優れた分子設計指針の検討を実施した. 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>◎</p>
(3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する最新研究状況調査	<ul style="list-style-type: none"> ・ 国内外の学会, 研究集会において最新の研究動向を調査した. ・ 日本ゴム協会水素機器用エラストマー研究分科会との連携により研究開発動向調査および研究ニーズの把握を進めた. 	<p>○</p> <p>◎</p>
(4) 水素雰囲気下におけるゴム材料研究(NOKとの共同研究)	<ul style="list-style-type: none"> ・ ゴム材料の高圧水素耐久試験機を開発し, プリスタ発生に起因する機構側要因(圧力差, 昇圧・減圧速度等), Oリング材料および溝設計の影響度を把握した. ・ Oリングの使用条件を模擬した温度, 加減圧条件によるシールからの漏洩量により, Oリングの破壊モードを把握し, 対策の指針を確立した. ・ 5,500回加減圧サイクルによる長期シール性を確認し, 加減圧周期がOリング損傷への影響が大きいことを確認した. 	<p>○</p> <p>○</p> <p>◎</p>
(5) 水素耐性に優れた適用材料の研究開発(日本合成化学との共同研究)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水素に対して耐性に優れたガスバリア層のベース樹脂の選定した. ・ 選定したベース樹脂を用いて高圧水素用ホースとして適用可能な柔軟性を持つガスバリア層として適用可能なポリマーアロイ材を設計した. ・ 開発した材料に対する水素燃料の付臭剤の影響を調査した. ・ 開発した材料の実機への適用評価を実施し, 水素耐久性材料の設計指針を策定した. 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>◎</p>

<達成状況 評価基準>

7月末において研究成果が

◎ :最終目標を超過達成済み。

○ :最終目標を達成済み。

△ :最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み(達成見込み年月日を括弧で記入する)。

× :最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。

<本研究開発項目のアウトカム>

・-40℃で使用するためのシール材及びシール構造に関する評価結果が、水素ステーション用高圧水素用バルブの開発・製品化につながった

1.4 研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」

【最終目標(平成24年度末) 出展:基本計画】

「高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを纏め、関係産業界に提供するとともに、高圧水素トライボシステムや使用する材料に関する設計指針や管理指針等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の摺動材料やシール材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。」

研究実施項目	研究開発成果	達成度
(1) 軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性の調査研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ 広範な材料についてトライボロジー特性の基礎データを蓄積し、諸現象の支配的影響因子を明らかにするとともに影響因子の作用機構を検討し、水素雰囲気中で相対的に良好な摩擦摩耗特性を示す材料を見出して産業界の設計開発に貢献した。 ・ 試験ガスの純度を測定・制御する方法を確立して、材料の摩擦摩耗特性が水素ガス中の微量の水分や酸素に影響されることを定量的に示し、また摩擦にともなうトライボケミカル反応が材料によって異なることを明らかにした。 ・ 高圧水素中に曝露された鋼材表面の力学的特性、化学的特性、侵入水素量などの測定を行い、高圧水素曝露により表面酸化膜の減少、表面硬度の上昇、炭素の析出などが起こり、温度依存性があることを明らかにした。 ・ 研究実施項目②と連携して、超高圧水素中摩擦試験機において、試験ガスの不純物の計測を可能にするとともに、圧力 40MPa、温度 373K のもとでの摩擦力測定技術を確立して、種々の材料の高圧水素中の摩擦摩耗特性を明らかにした。 ・ 転がり疲れ寿命に及ぼす雰囲気と条件の影響を調べ、接触面圧が高い場合には水素雰囲気は寿命に影響しないが、面圧が低い場合には影響がみられること、高圧水素曝露等による材料への水素侵入は寿命を低下させること、転がり接触にともなう水素侵入量は雰囲気と温度、潤滑油種によって異なることなどを明らかにした。 ・ 単純繰返し接触試験を行い、表面層への水素侵入量が雰囲気と摩擦形態によって異なることを明らかにした。 	○ ◎ ◎ ○ ○ ○
(2) シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ 四フッ化エチレン (PTFE) を代表とする動的シール用樹脂材料の摩擦摩耗特性を明らかにするとともに、支配因子として、転移膜形成とこれに及ぼす相手面金属表面での化学反応の影響を明らかにした ・ 高圧水素 (40MPa, 100℃) への曝露により、ステンレス鋼表面の酸化膜が還元され、PTFE の転移膜形成が促進されることを明らかにした。 ・ 研究実施項目①と連携して超高圧水素中摩擦試験機による実験技術を確立し、40MPa の水素ガス中における各種 PTFE 複合材の摩擦摩耗特性を明らかにした。 ・ 相手面材料の違いによる樹脂材料の摩擦摩耗特性の違いを明らかにした。 ・ EPDMゴムの摩擦摩耗が、雰囲気ガス種の影響を受けること、EPDMゴムの微小振幅往復動下の摩耗は水素中で他の雰囲気に比べて多いこと、などを明らかにした。 	○ ◎ ◎ ○ ○
(3) 耐水素表面の水素透過性(耐水素表面改質)の調査研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ 硬質薄膜の水素透過性の計測方法を開発し、水素透過を抑制する水素バリア性コーティング膜を探索して、DLC、TiN、TiC、TiAlN などの硬質薄膜、ジルコニウムやニオブなどの高融点金属薄膜が水素バリア性が高いことを明らかにした。 ・ 水素雰囲気中において摩擦面温度(220~370K)を制御可能なトライボロジー特性評価試験機を開発し、上記コーティング膜を評価した結果、軸受 	○ ○

	鋼とTiNは、水素中において高い摩擦係数を示すこと、DLCは水素中で良好な摩擦特性を示すこと、これらは摩擦表面における水素吸着もしくは水素化物の形成によること、などを明らかにした。	
(4) トライボシステム中の気体分子の挙動解析	<ul style="list-style-type: none"> 潤滑薄膜中の気体分子の挙動の分子動力学シミュレーションを行い、潤滑剤中の溶存分子(水素)の移動はせん断によって誘起され、壁面への吸着量が増加することを明らかにした。 水素分子の固体表面での吸着と侵入の MD シミュレーションを行い、固体表面の吸着膜が密にある場合、水素の侵入量が温度に影響されることを明らかにした。 PTFE のトライボ特性に及ぼす水素分子の影響を捉えるための MD シミュレーションを行い、水素の密度による凝着力、せん断力の変化を明らかにした。 	○ ○ ○
(5) 耐水素トライボロジー信頼性評価	<ul style="list-style-type: none"> データベースのシステムを改善するとともに、要点をまとめたデータシートを作成した。 耐水素設計指針をまとめた。 	○ ○

<達成状況 評価基準>

7 月末において研究成果が

- ◎ :最終目標を超過達成済み。
- :最終目標を達成済み。
- △ :最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み(達成見込み年月日を括弧で記入する)。
- × :最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。

<本研究開発項目のアウトカム>

- ・バルブや圧縮機における実機試験が大幅に簡略化可能となった。
- ・企業における適切な材料選択と製品耐久性の大幅な向上につながった。

1.5 特許、成果の普及など

① 特許

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT※出願
H18FY	1 件	0 件	0 件
H19FY	3 件	6 件	0 件
H20FY	3 件	18 件	0 件
H21FY	2 件	6 件	0 件
H22FY	0 件	3 件	1 件
H23FY	0 件	0 件	0 件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

② 研究成果発表

区分 年度	文献	口頭発表・講演
H18FY	2 件	14 件
H19FY	9 件	86 件
H20FY	31 件	136 件
H21FY	77 件	147 件
H22FY	54 件	119 件
H23FY	42 件	122 件

③ 受賞実績

区分 年度	受賞
H18FY	0
H19FY	7
H20FY	6
H21FY	4
H22FY	12
H23FY	2

④ シンポジウム等の開催・展示会等への出展

区分 年度	シンポジウム等の開催	展示会等への出展
H18FY	1 件	0 件
H19FY	3 件	2 件
H20FY	2 件	4 件
H21FY	4 件	4 件
H22FY	6 件	3 件
H23FY	7 件	3 件

※各件数は、いずれも平成 24 年 3 月現在。文献表題、雑誌名などは付録に記載。

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 研究開発項目①「高圧水素物性の基礎研究」

水素の基礎的な熱物性値 (PVT 性質, 粘性係数, 熱伝導率) について 100MPa, 773K(500° C)までの条件下の測定が可能な測定装置を開発, 測定を行ない, 実測データを基に状態方程式および推算式を作成し, 構築した水素熱物性データベース(All in 1 CD と Excel 用ライブラリ)に組み込み, 水素ステーションにおける水素熱流動系の機器設計や各種のシミュレーションに活用しやすい形式で提供する. その普及のため「高圧水素物性データベース,水素物性推算ツール活用セミナー」を開催し, さらに, プロジェクト参加企業や公的機関へ本データベースのプロトタイプを提供を開始した.

(1) PVT データの測定装置の開発および状態方程式の作成

773 K, 1 MPa までの低圧仕様の定容積法 PVT 性質測定装置で得られた結果をもとに, 773 K, 100 MPa まで適用可能な高圧仕様の定容積法装置を開発した. 本装置を用いて 773 K, 100 MPa までの水素および窒素の PVT データを取得した. 既存の状態方程式は, 高温になるほど, 実測値との偏差が大きくなる傾向が明らかになった. また, 523 K までの温度領域において測定不確かさを軽減するため, 磁気式密度計を用いて, 水素および窒素の PVT 性質を測定した.

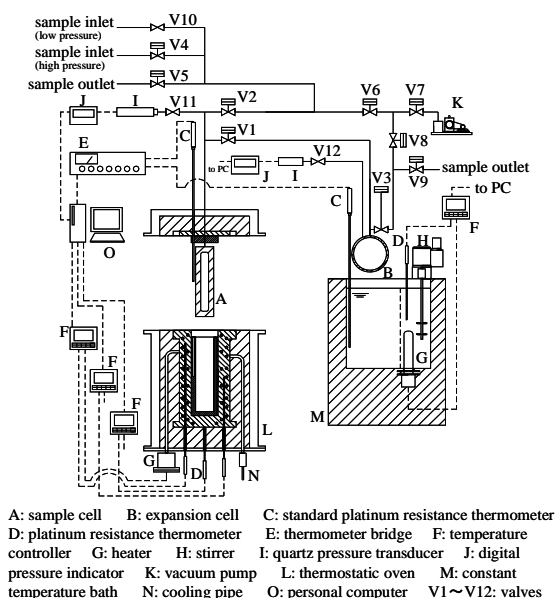
定容積法による PVT データの取得

773 K, 100 MPa まで適用可能な定容積法を用いた PVT 性質測定装置を開発した. 定容積法では, 試料容器に試料を充填, 密閉して, 温度を変化させ, そのときの圧力を測定することで, 等密度線上に沿った温度-圧力の関係を得ることができる. しかし, 水素のような密度が小さい物質に対しては, 試料容器内に充填される試料の質量が小さく, 正確な質量測定が困難であることから, 本研究では気体膨脹法を組み合わせることで, 充填密度を決定した. 気体膨脹法では, 容積の比較的大きな膨脹容器を別途用意し, これに試料容器内に充填されている高圧試料を膨脹させて, 密度が既知である低圧状態に試料を変化させる. 予め参照流体を用いて容積比を検定しておくことで, 膨脹後の状態から, 試料容器内の初期充填密度を算出することができる. 本装置図を図 2.1.(1).1(a),(b)に示す. 試料容器の内容積は 250 cc で, インコネル 625 を用いて製作した. また, 773 K の高温域では, メカニカルなシール部分が緩むことが想定されるため, 本容器のシール部分は溶接構造を採用した. 膨脹容器の内容積は 2500 cc で, SUS316 により製作した. 膨脹容器においてもシール部分は溶接構造とした.

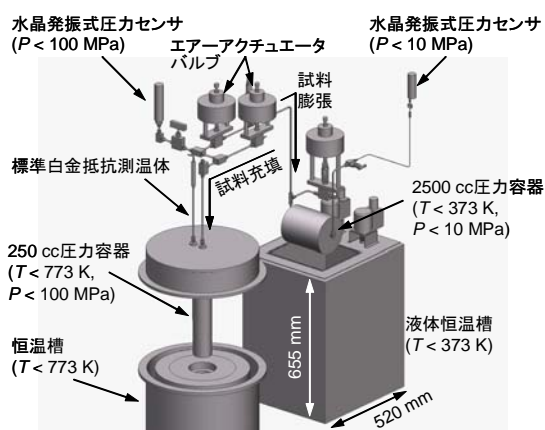
気体膨脹法では, 膨脹前後の質量保存から式(1)が導かれ, これにより初期充填密度 ρ_A を算出する.

$$\rho_A = \rho'_A \frac{V'_A}{V_A} + \rho'_B \frac{V_B}{V_A} + (\rho'_D - \rho_D) \frac{V_D}{V_A} \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 V は体積、下付の A, B はそれぞれ、試料容器と膨張容器を表す。また、上付きの「' 」は膨張後の状態を表す。試料容器に充填された試料は、測定原理上、一定温度でなければならない。しかし実際には、試料圧力を測定する圧力センサは、耐熱性の問題から 773 K の恒温槽内に設置することができず、恒温槽の外に設置しているため、温度が試料容器内と異なるデッドスペースが存在し、この部分の体積を式(1)では V_D として表して補正を行っている。また、式(1)に示すように、デッドスペース部分の絶対量は必要とせず、試料容器との容積比のみ決定すれば良い。この装置定数 $N_D (= V_D / V_A)$ は、窒素を 373 K, 20 MPa で充填し、温度を 773 K まで変化させたときの温度、圧力と密度、そして容器の材料力学に基づく容積変化から、質量保存則を温度変化前後で適用することで、0.0183 と得た。また試料容器と膨張容器の容積比 $N_B (= V_B / V_A)$ は、室温、10 MPa の窒素を試料容器に充填し、473 K で膨張容器に膨張させて、10.134 と得た。膨張容器の温度は温度調節のしやすさなどを考慮して 343 K で一定とした。式(1)の右辺で必要となる密度は、窒素の場合には信頼性の高い既存の状態方程式、水素の場合には、本研究で開発したビリアル状態方程式から計算する。



(a) 装置系統図



(b) 装置外観図

図 2.1.(1).1(a),(b) 高圧水素用定容積法 PVT 性質測定装置

高温域での水素の実験は、他の物質と異なり、573 K 以上の温度領域において、容器の中に水素が拡散しているとみられる現象が現れ始めるため、一定圧力を保持することが非常に困難になる。773 K, 100 MPa のヘリウムでは気密を維持することが可能であったが、773 K, 100 MPa の水素では、20 分間でおおよそ 0.1 % の圧力減少が見られた。このため、本実験では、長時間を要する等密度線上での測定は行わず、気体膨脹法のみを用いた迅速な測定を行った。窒素においても水素と同様に気体膨脹法で 773 K, 100 MPa まで測定し、得られた実測値と信頼性の高い既存の状態方程式(Span et al.(2000))との偏差を図 2.1.(1).2 に示す。本実験

値は、状態方程式と概ね 0.1 %以内で一致しており、測定装置および測定方法の健全性を確認した。そこで、水素を 773 K, 100 MPa まで測定し、既存の状態方程式(Leachman et al. (2009))との偏差を図 2.1.(1).3 に示す。密度の測定不確かさは温度の測定不確かさ(40 mK)、圧力の測定不確かさ(28 kPa)および装置定数の不確かさ($N_D \pm 4.8\%$, $N_B \pm 0.33\%$)から誤差伝播則を用いて 0.45 % (拡張不確かさ $k=2$)と見積もった。473 K では、バーネット法で得られた測定値と良好に一致している。既存の状態方程式は、高温になるほど、実測値との偏差が大きくなる傾向が明らかになった。本測定データを用いて状態方程式を作成することで、773 K, 100 MPa までの温度、圧力領域で信頼性の高い状態方程式の作成が可能になる。

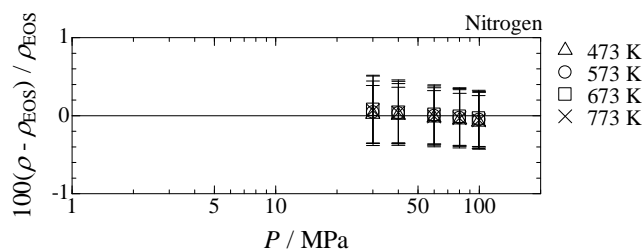


図 2.1.(1).2 773 K, 100 MPa までの窒素の測定と既存の状態方程式との比較

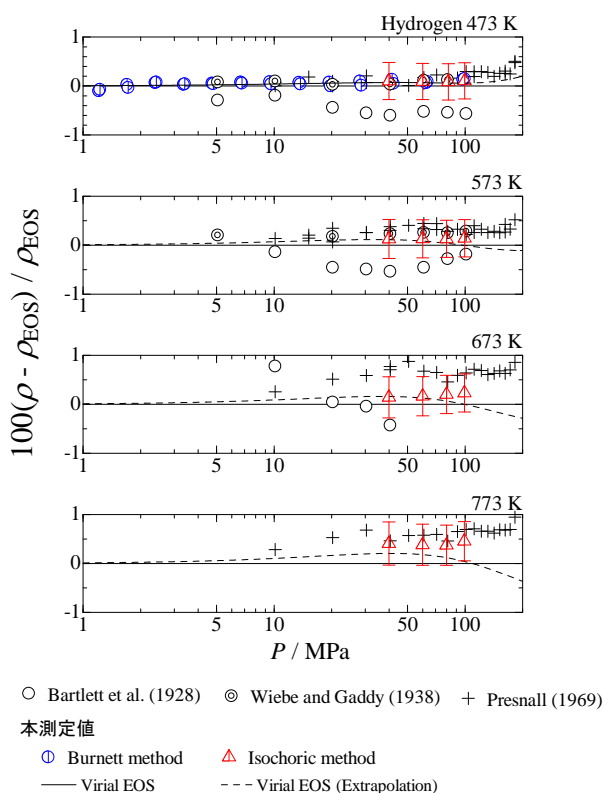


図 2.1.(1).3 773 K, 100 MPa までの水素の測定と既存の状態方程式との比較

磁気式密度計による PVT データの取得

磁気式密度計では、試料流体中に設置したシンカーに作用する浮力からアルキメデスの原理を用いて密度を求める。基本となる密度の算出式は式(2)で表される。

$$\rho = \frac{M_s - M_s^*}{V_s(T, P)} \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 M_s はシンカーの質量、 M_s^* は流体が存在する状態におけるシンカーの質量、 V_s はシンカーの体積を表す。実際の磁気式密度計での測定原理を図 2.1.(1).4(a),(b)に示す。まず、真空中において、図 2.1.(1). 4(a)に示すように、永久磁石と電磁石との磁気カップリングにより、サスペンダー部分のみを浮上させた Tare position (TP)にする。そして、このときの質量 M_{T0} を電子天秤により測定する。次に図 2.1.(1). 4(b)のように、さらに永久磁石をシンカーとともに浮上させ、Measuring position (MP)の状態にして、このときの質量 M_{M0} を測定する。 M_{M0} と M_{T0} の差をとることで、シンカーの質量を求めることができる。次に、測定対象の流体を圧力容器内に充填し、同じく TP と MP で質量を測定し、それぞれ M_{T1} と M_{M1} とすると、最終的に式(3)から、流体の密度を得る。実際には、TP において、40.9 g のタンタル分銅が天秤に載せられ、MP ではタンタル分銅と同じ形状をした 10.9 g のチタン分銅が載せられる。このように、TP と MP で、天秤にかかる負荷が同程度になるような荷重交換機構が備わっており、天秤の荷重に依存する非線形性に関する不確かさを軽減している

$$\rho = \frac{(M_{M0} - M_{T0}) - (M_{M1} - M_{T1})}{V_s} \quad (3)$$

本研究では、シンカーを CuBe2 を用いて製作した。図 2.1.(1).5 に製作したシンカーと圧力容器内にシンカーが設置されている様子を示す。磁気式密度計で高精度な密度測定を行うためには、シンカーの体積をいかに小さい不確かさで測定するかということが重要となる。本研究では、シンカーの体積をシリコン球を用いた密度標準器との比較校正により、 3.30252 ± 0.00036 ccと決定した。また、シンカーの質量は 27.552598 ± 0.000038 gであった。シンカーの体積をこのように非常に精度良く校正した後、窒素の密度を 353 K, 373 K で 100 MPa まで測定した。図 2.1.(1).6 に既存の状態方程式からの偏差を示す。本実測値は信頼性の高い既存の状態方程式と 0.05 %以内で一致した。続いて、水素を 323 K で 100 MPa まで測定を行った。この結果、図 2.1.(1).6 に示すようにバーネット法で得られた測定結果と同様、高圧域で既存の状態方程式と偏差が大きくなる傾向が現れた。磁気式密度計で得られる高精度実測値を用いることで状態方程式の不確かさを 0.1 %以下に小さくすることが可能となる。

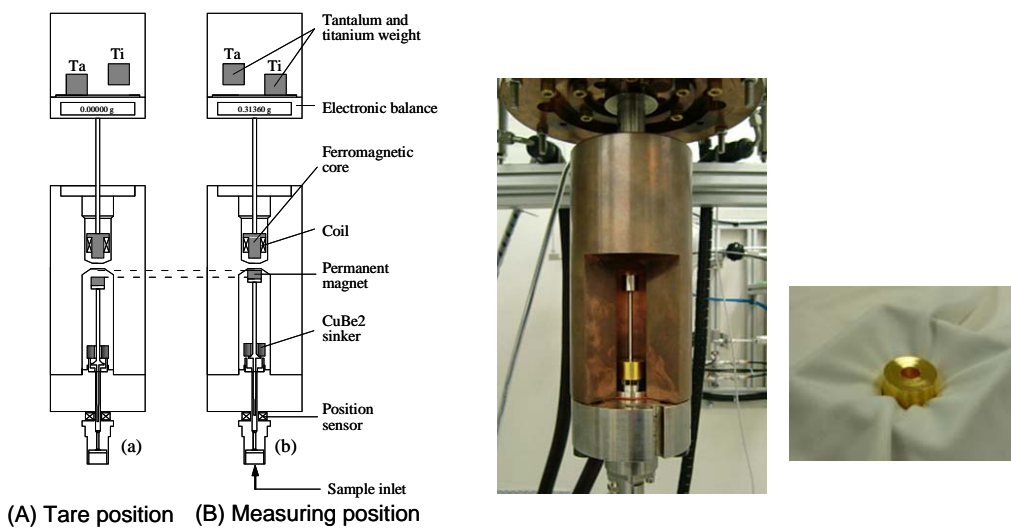
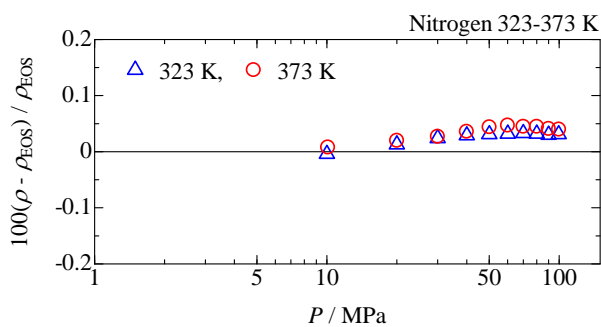
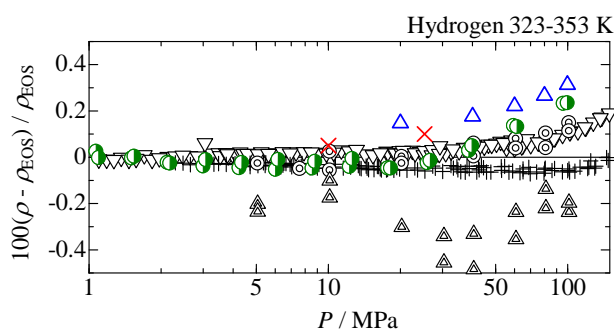


図 2.1.(1).4(a),(b) 磁気式密度計における測定原理

図 2.1.(1).5 圧力容器(カットモデル,左)と新しく製作した CuBe₂ シンカー(右)



(a) 窒素の偏差



- ▲ Bartlett et al. (1928) ⊙ Wiebe and Gaddy (1938)
 ▼ Michels and Goudekot (1941) + Michels et al. (1959)
 本測定値
 ● Burnett method, 353 K
 ▲ Magnetic suspension densimeter, 323 K (ser. 1)
 × Magnetic suspension densimeter, 323 K (ser. 2)

(b) 水素の偏差

図 2.1.(1).6 窒素および水素における本実測値と既存の状態方程式との比較

(2) 粘性係数の測定

水素の高圧充填システムや流量測定システムの開発や設計には精度の高い粘性係数が必要とされる。100MPa, 150 ° C までの範囲を超えた領域の粘性係数は、補外による推算値が用いられているため、実測データに基づく推算式が必要とされている。100 MPa, 500 ° C までの範囲で測定可能な細管式粘性係数測定装置を開発し、実測するとともに、温度、圧力に対する推算式を作成し、水素の基礎物性情報の一つとして提供することを目的とする。

測定原理及び方法

粘性係数の測定は細管法を用いて行う。図 2.1.(2).1 に概念図を示す。

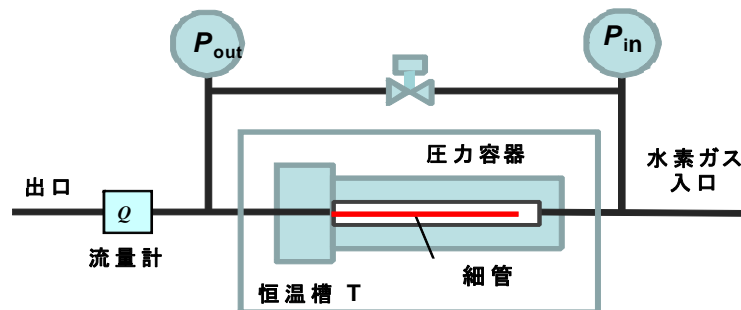


図 2.1.(2).1 細管法粘性係数測定概念図

この方法は細管内の流れを層流とし、ハーゲン-ポアズイユ流れ (Hagen-Poiseuille Flow) で近似できることを利用した測定法である。実際の流れは理想的なものとは異なり、運動量補正や入口近傍の流動発達域の補正が必要である。粘性係数 η は式(1)で示されるハーゲンバッハ-ポアズイユ (Hagenbach-Poiseuille) の式で算出される。

$$\mu = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128(L+n \frac{d}{2})Q} - \frac{m\rho Q}{8\pi(L+n \frac{d}{2})} \quad (1)$$

式中、 ΔP は細管における圧力降下 ($P_{in}-P_{out}$)、 Q は細管を流れる気体の体積流量、 d および L はそれぞれ細管の内径および長さ、 m および n は補正係数である。

測定装置

高圧水素粘性係数測定装置を開発において、温度設定機能は2段階で開発し、第一段階でシリコン恒温槽により250 ° Cまで、第二段階で電気加熱恒温槽により500 ° Cまでの設定可能とした。これにより、100 MPa、500 ° Cまでの高圧高温の測定条件の設定を実現した。装置の弁の開閉の操作やデータサンプリングについては隣室から制御可能な遠隔操作システム化した。

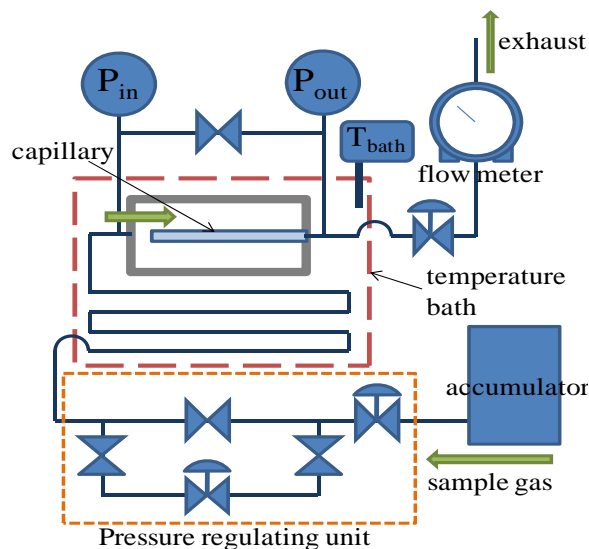
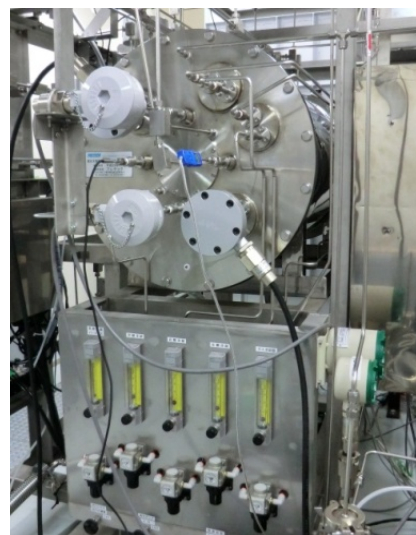


図 2.1.(2).2 高圧水素粘性係数測定装置の配管系統図



(a)第一段階(250°C)



(b)第二段階 (500°C)

図 2.1.(2).3(a),(b) 高圧水素粘性係数測定装置の外観図

図 2.1.(2).2 および図 2.1.(2).3(a),(b)にそれぞれ本装置の配管系統図および外観図を示す。

細管の内径は粘性係数の精度に影響を及ぼすため、内径の測定方法およびその均一性の確認法を確立した。内径測定には水銀を用い、細管内に部分的に注入された水銀を一端

から他端にかけて移動させながら任意の位置で長さを順次測定し、最終的に細管から出た水銀の質量を測定することにより、各位置における平均内径を質量と長さから求めることができる。比較のため注入した水銀の長さから電気抵抗値から内径を求める方法も試みた。

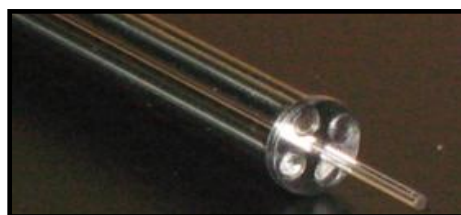
細管は、高温の条件下で熱膨張の影響が小さく、内面粗さが最も小さい要件を満たすものとして石英ガラス管を用いた。

細管の固定には高温高圧下で気密を確保する必要がある。第一段階では O-リングとエポキシ樹脂系接着剤を併用した。第二段階では石英ガラス細管と金属配管の接合を行なうことで 500 ° C までの測定が可能な測定用細管 (QCK 管) を開発した。図 2.1.(2).4 に QCK 管を示す。細管は自重で曲がることのないように支持具で保持される。



細管

細管: 石英ガラス
 内径: 0.088±0.003 mm
 外径: 1.95 mm
 長さ: 442.2 mm



支持具に保持された細管先端の様子

図 2.1.(2).4 QCK 管および細管の保持

細管法による粘性係数の測定では、流れの定常性や安定性が重要である。十分な流量を確保するために蓄圧器容量の変更し、流れの圧力を安定に維持するため調圧機能を付加する改造を行なった。

気体が細管内を通過する際に生じる圧力差は小さいため精密な差圧計の使用が望ましいが、市販の差圧センサには高耐圧仕様はないため差圧を直接測定することは困難である。そのため水晶発振式精密圧力計により細管上流および下流側の圧力を測定し、両者の指示値の差し引きにより差圧を求めた。

本測定法の不確かさは最大 3.1%(k=2)と見積もられた。

推算式の作成

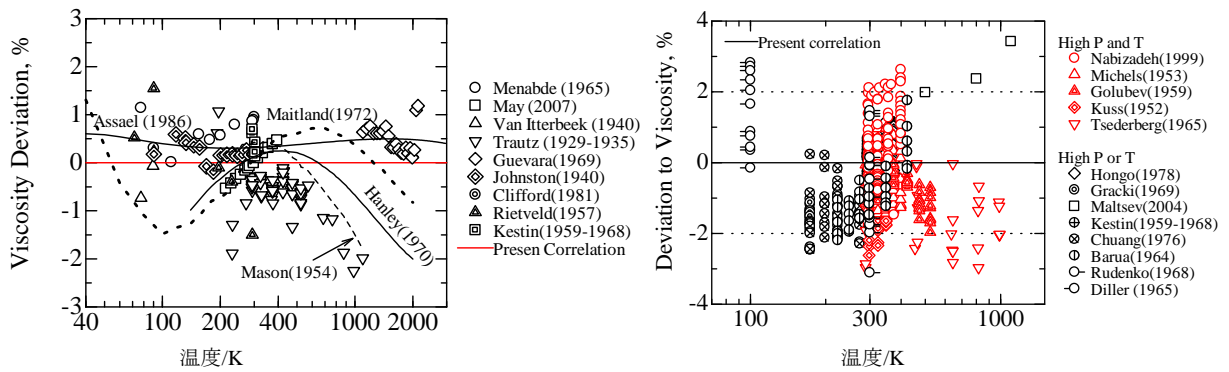
従来のデータのレビュー結果をもとに高圧でかつ高温まで適用領域を拡張した推算式 (1),(2),(3)を作成し、データベースに組み込んだ。

$$\eta(T, \rho) = \eta_o(T) + \Delta\eta(T, \rho) \quad (1) \quad \Omega_\eta(T^*) = \exp(0.354125 - 0.427581(\ln T^*) + 0.149251(\ln T^*)^2 - 0.037174(\ln T^*)^3 + 0.003176(\ln T^*)^4)$$

$$\eta_o(T) = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{\pi mkT}}{\pi \sigma^2 \Omega_\eta(T^*)} \quad (2) \quad \sigma = 0.296 \text{ nm}; T^* = Tk / \varepsilon; \varepsilon / k = 35 \text{ K}$$

$$\Delta\eta(T, \rho) = A(\rho) \exp[B(\rho)/T] \quad (3) \quad A(\rho) = \exp[5.73 + \log_e(\rho) + 65.0\rho^{3/2} - 6.00 \times 10^{-6} \exp(135\rho)]$$

$$B(\rho) = T_o \left\{ 10.0 + 8 \left[\left(\frac{\rho}{0.07} \right)^6 - \left(\frac{\rho}{0.07} \right)^{3/2} \right] - 18 \exp \left[-59 \left(\frac{\rho}{0.07} \right)^3 \right] \right\}$$



(a)低密度域(温度:40K~2130K, 圧力:0.1MP) (b)高密度域(温度:100K~990K, 圧力:0.1~220MPa)

図 2.1.(2).5(a),(b)低密度域および高密度域における既存のデータと本推算式との偏差

本推算式は図 2.1.(2).5(a),(b)に示すように、既存のデータとの偏差が低密度域および高密度域で気体の純度や精度の低いデータを除けば 2%以内であることから、次に示す範囲で、偏差 2%以内で予測できる。

(a)低密度域(温度:40K~2130K, 圧力:0.1MPa)

(b)高密度域(温度:100K~990K, 圧力:0.1~220MPa)

測定結果

99MPa,500K(227° C)までの条件下の窒素、水素について測定を行なった。図 2.1.(2).6(a),(b)それぞれについて示すように 99MPa までの圧力で、室温から 500K (227°C)の範囲で窒素の測定を、および 400K (127°C)の範囲で水素の測定を行ない、既存のデータおよび標準値である NIST の REFPROP の値と 2%以内で一致する結果を得た。

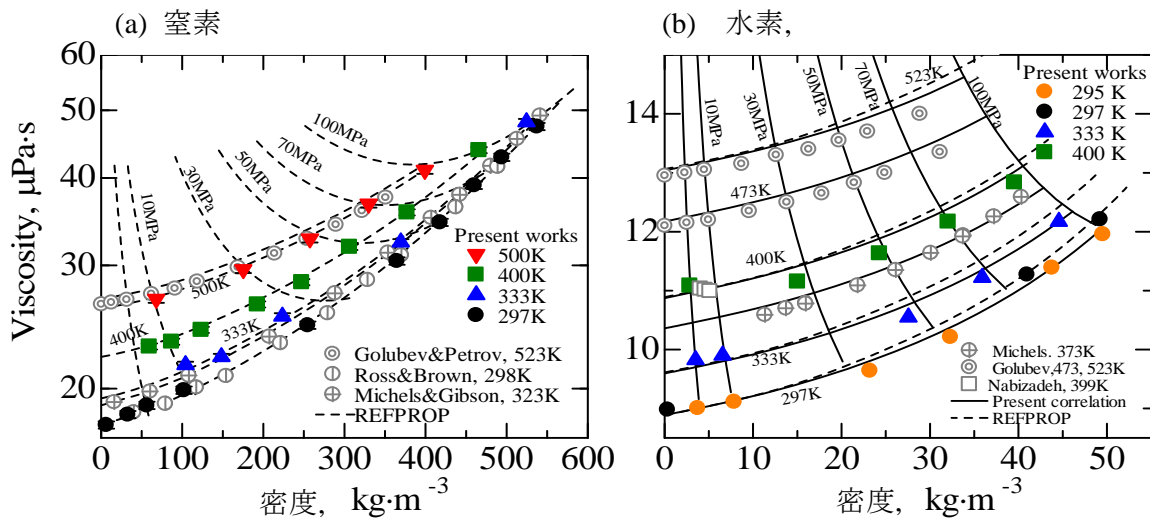


図 2.1.(2).6(a),(b) 粘性係数の測定結果および既存のデータとの比較

99MPa,773K(500° C)までの条件下の窒素, ヘリウム, 水素について測定を行なった. 水素の測定結果を図 2.1.(2).7 および図 2.1.(2).8 に示す.

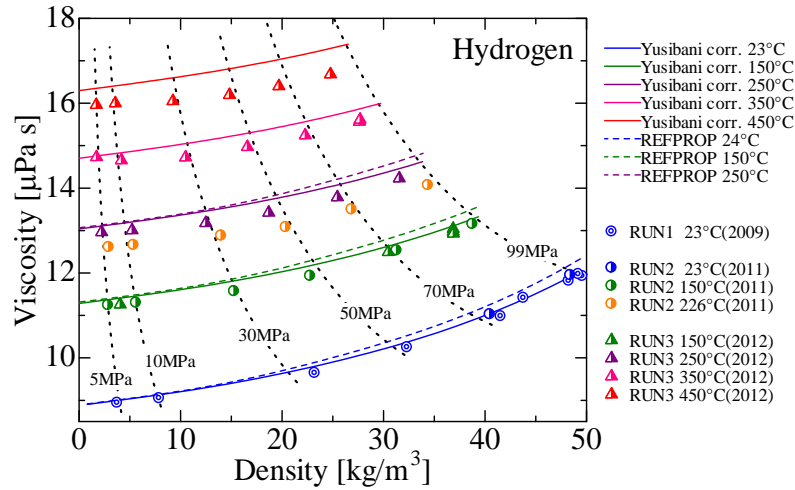


図 2.1.(2).7 水素の測定結果(723K(450° C))

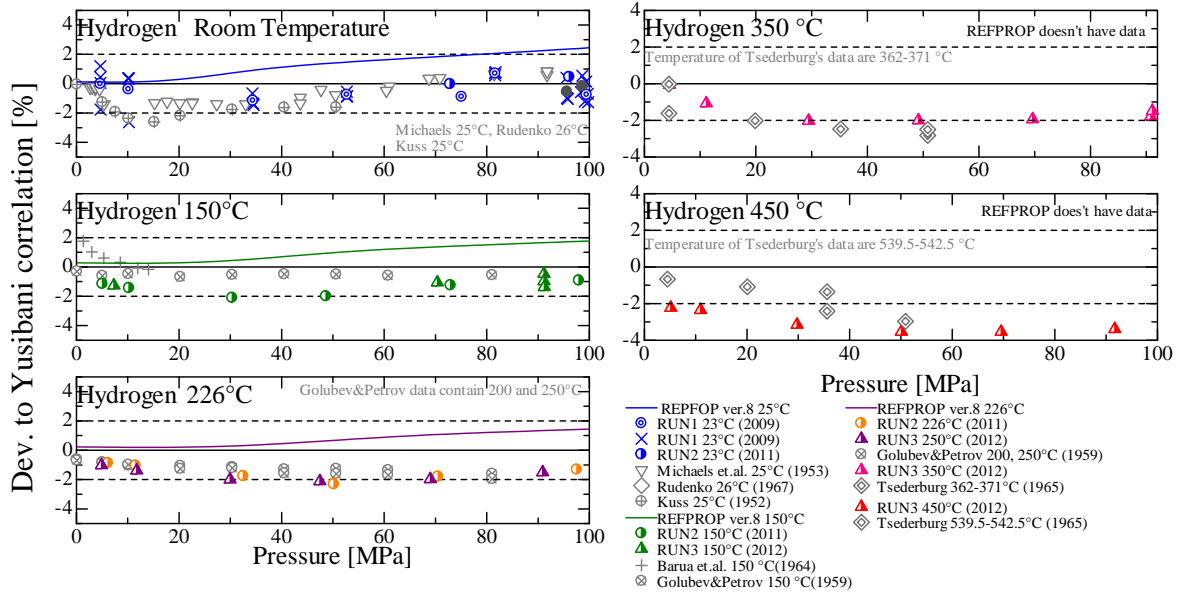


図 2.1.(2).8 本推算式に対する測定データの偏差および既存のデータとの比較

測定データは 623K(350° C)までは偏差 2%内にあるが, さらに高温域では偏差が次第に大きくなる傾向を示す. 既存のデータと同様の傾向がみられる.

(3) 熱伝導率の測定

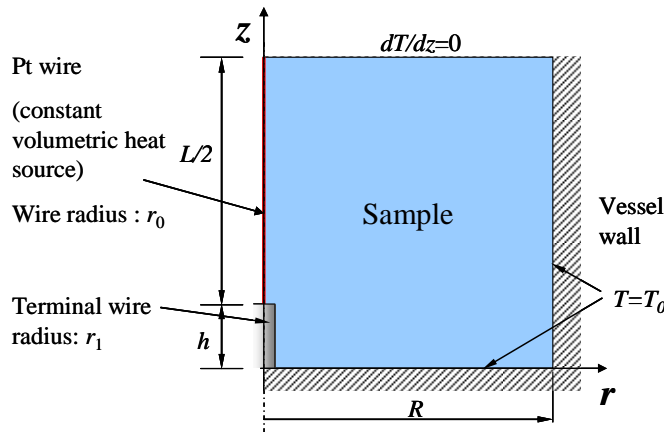
非定常短細線法を用いて高圧(～99MPa), 高温(～500°C)の水素の熱伝導率の計測を実施した。また, 水素物性データ構築のための基礎データとして圧力 100MPa, 温度-100°Cから 500°Cまでの範囲の実測データを偏差 2%で再現できる相関式を提案した。

非定常短細線法による水素ガスの熱伝導率測定

測定原理

非定常短細線法は, 細線端部からの熱損失を考慮した正確な数値解を算出し, 数値計算から得られた細線温度と実際に測定した細線温度を比較することで, 試料の熱伝導率と熱拡散率を同時に求める方法である。

以下に数値解析の物理モデルおよび支配方程式を示す。



$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad \dots(1)$$

$$q = Q / \pi r_0^2 \quad (t > 0, r \leq r_0) \quad \dots(2)$$

$$= 0 \quad (r > r_0, z < h)$$

$$\left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=L/2+h} = 0 \quad \dots(3)$$

$$T|_{z=0} = T_0, \quad T|_{r=R} = T_0, \quad T|_{t=0} = T_0 \quad \dots(4)$$

図 2.1.(3).1 Physical model and boundary conditions

式(1)～(4)を有限体積法でより解くことにより加熱後の細線の体積平均温度の非定常応答 $\Delta T_w(t) = T_w(t) - T_0$ が得られ, これを実験から得られる細線温度の非定常応答と比較することで試料流体の熱伝導率 λ と熱拡散率 κ を求める。

熱伝導率測定装置

装置の概要, 恒温槽部および本研究で用いた短細線プローブの写真図を図 2.1.(3).2 に示す. 装置は, 短細線プローブ, 圧力容器, 直流電源, 標準抵抗器, 高速データロガー, 恒温槽, PC から構成される. 直流電源, 短細線プローブ, 標準抵抗器は直列に回路が組まれている. 標準抵抗器とプローブの電圧を高速データロガーにて4線法により測定する. 恒温槽の温度制御範囲は常温から最高 500°C である. プローブは, 白金細線, 白金端子, 保持板から構成される.

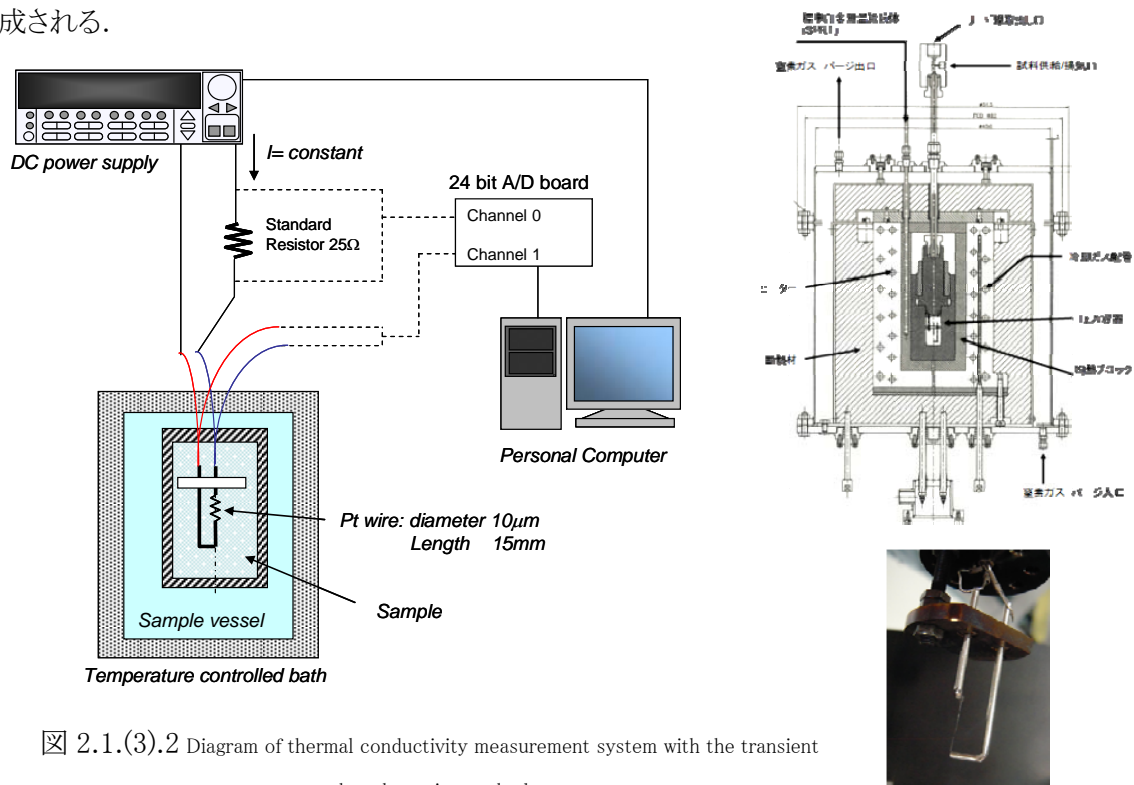
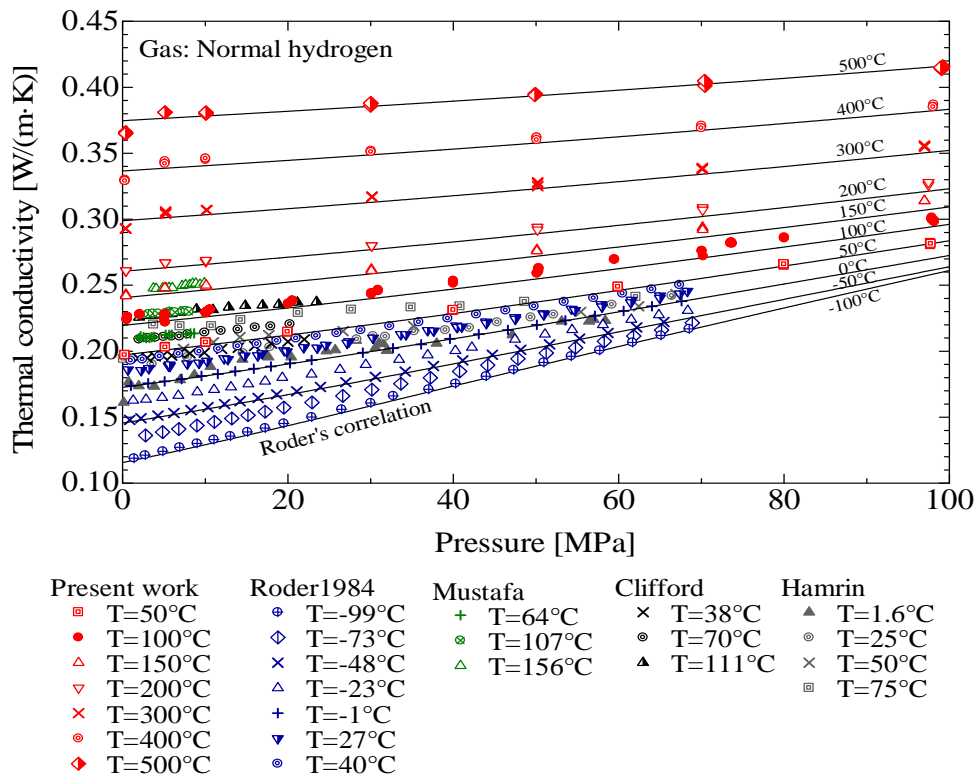


図 2.1.(3).2 Diagram of thermal conductivity measurement system with the transient short hot-wire method

熱伝導率の測定結果

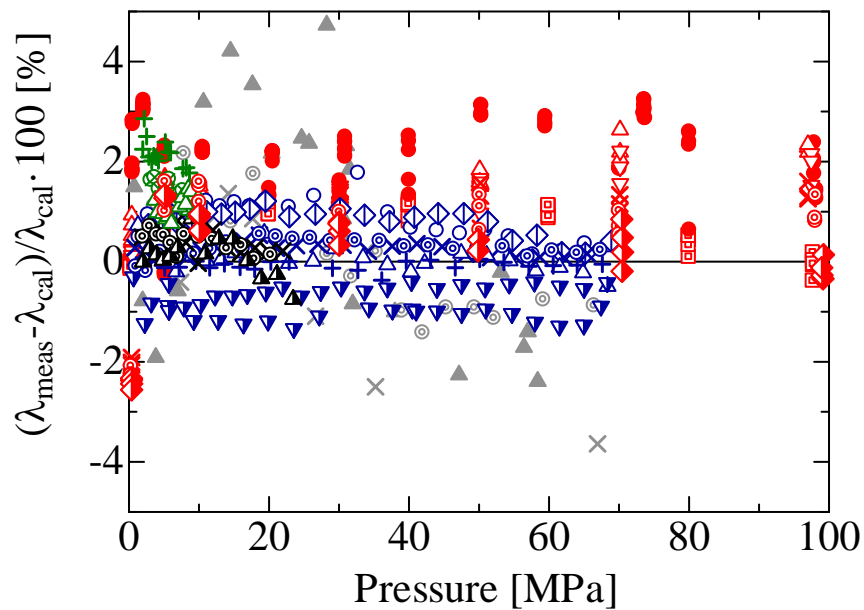
熱伝導率の測定結果および測定値の相関式からの偏差を図 2.1.(3).3 および図 2.1.(3).4 以下に示す. 横軸は圧力, 縦軸に熱伝導率である. 図中の記号は, 赤が本測定値, 青は Roder[1], 緑は Mustafa[2], 黒は Clifford[3], 灰色は Hamrin[4]である. 実線は Roder の相関式[1]である. 高温高压域(温度 500 °C・圧力 100MPa)の水素の熱伝導率のデータは我々の測定値のみであり, 今回の測定データは世界で初めてのものである.



[1] H. M. Roder, Thermal Conductivity of Hydrogen for Temperatures Between 78 and 310K with Pressures to 70MPa, I. J. Thermophy., Vol.5, No.4, 1984 [2] M. Mustafa, M. Ross, R. D. Trengove, W. A. Wakeham and M. Zalaf, Absolute Measurement of the Thermal Conductivity of Helium and Hydrogen, Physica, 141A, pp. 233-248, 1987 [3] A. A. Clifford and P. Gray, "Thermal Conductivities of Argon, Nitrogen and Hydrogen between 300 and 400 K and up to 25 MPa", Journal of the Chemical Society. Faraday Transactions 1, Vol. 77, pp. 2679-2691, 1981. [4] C. E. Hamrin and G. Thodos, "THE THERMAL CONDUCTIVITY OF HYDROGEN FOR PRESSURES UP TO 660 Atm AND TEMPERATURES BETWEEN 1.6 AND 74.6°C", Physica, Vol. 32, pp. 918-932, 1966

図 2.1.(3).3 Thermal conductivity measurement results

温度 50°C の場合、測定値と相関式は偏差 1% で一致している。温度 100~300°C では、測定値と相関式の差が拡大し偏差 3% 程度であった。温度 400, 500°C では、測定値と相関式の偏差 1% 程度であった。測定値の不確かさ ±1.69% であることを考慮しても、測定値は相関式よりも高い。したがって、広温度域でより精度良く再現できる相関式の作成が必要でより高精度の相関式を作成する。



Present work	Roder 1984	Clifford 1981	Hamrin 1966
▣ T=50°C	○ T=-99°C	× T=40°C	▲ T=2°C
● T=100°C	◇ T=-73°C	⊙ T=70°C	⊖ T=25°C
△ T=150°C	× T=-48°C	▲ T=110°C	× T=50°C
▽ T=200°C	△ T=-23°C	Mustafa 1987	▣ T=75°C
× T=300°C	+ T=1°C	+ T=65°C	
⊖ T=400°C	▼ T=27°C	⊗ T=75°C	
◆ T=500°C	⊙ T=40°C	△ T=107°C	

図 2.1.(3).4 Deviation of thermal conductivity from Roder's correlation

水素の熱伝導率の相関式

温度 50~500°C, 圧力 100MPa までの水素の熱伝導率の測定値を得た. Roder の相関式と測定値を比較すると, 測定値は相関式よりも 3%程度高い値を示した. 測定値をよりよく再現できる相関式を本測定値, Roder, Clifford の測定値を用い作成した. 求めた相関式からの偏差を図 2.1.(3).5 に示す. この結果, 高温高压域を偏差 2%以内で再現している. この相関式は, ノーマル水素を対象としたもので, 適用範囲は温度 T=-100~500°C, 圧力 P=0.1~100MPa である.

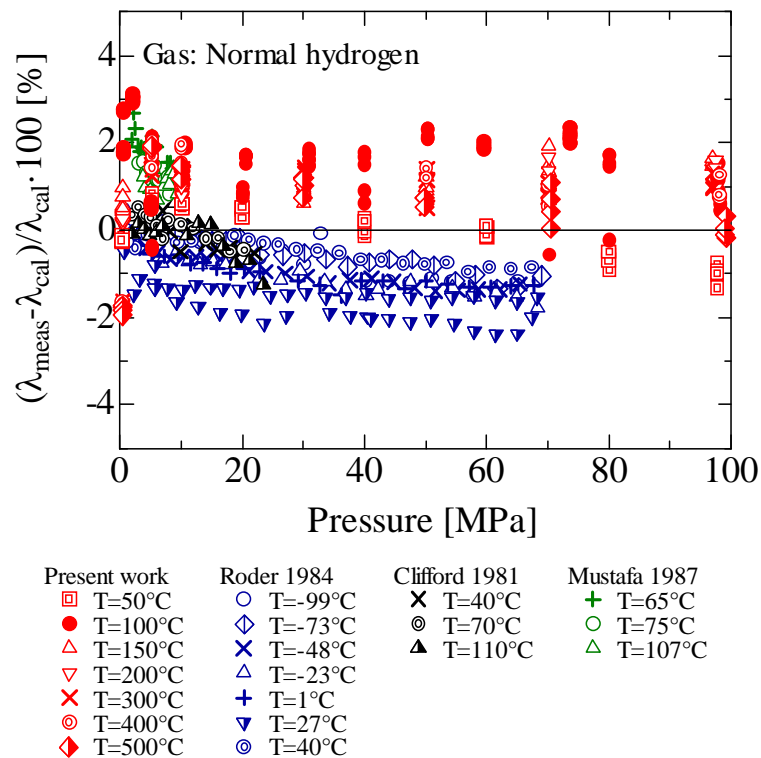


図 2.1.(3).5 Deviation of measured thermal conductivities from new correlation

以上, 以下の成果を得た.

- 非定常短細線法による水素ガスの熱伝導率の測定法を確立した.
本測定法を気体に適用したのは世界で初めてである.
- 高圧水素熱伝導率測定装置により, 高圧 (~99MPa), 高温 (~500°C) までの水素ガスの熱伝導率の測定を行った.
- 100MPa, -100°C から 500°C までの範囲の実測データを偏差 2% で再現できる相関式を提案した.

(4) 水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定

水素ガスの物質への溶解度は, 水素エネルギー要素技術の開発において重要である。水素の製造、貯蔵、利用システム技術において、その安全性、機能性、耐久性を評価する上で水素ガスの溶解度が必要であるが十分に整備されていない。水素ガスは様々な材料・物質と相対するが、重工、自動車、機械、プラントエンジニアリング企業等からのニーズを踏まえて、高分子材料(高分子電解質膜、ゴム)にたいする溶解度を計測したので報告する。室温、大気圧 ~ 0.7MPa の範囲で計測を実施した。

高分子電解質膜に対する水素ガスの溶解度、拡散係数

高分子電解質膜(PEM)は高分子電解質形燃料電池や水電解装置など次世代のエネルギー変換装置において重要な役割を果たす「一」材料である。未だいくつかの課題が残されているが、ここでは PEM への水素ガス透過(クロスオーバー)に着目した。クロスオーバーが起きると、化学的なショートを起こし電流効率が低下する。クロスオーバーは高圧・薄膜であるほど大きくなるが、PEMの薄膜化や水電解の高圧化とあいまってクロスオーバーの問題は顕在化すると考えられる。ガス透過性、特に分子の小さい水素ガスのPEMに対する透過性の把握が必要である。

これまでに PEM に差圧、あるいは分圧差を印加して、クロスオーバー、すなわち透過率が計測されてきた。しかしこの方法では透過率を構成する溶解度や拡散係数の導出に輸送モデルを必要とする。

そこで本研究では溶解した水素を直接計測し、PEM 内の水素ガスの溶解度、拡散係数を計測する手法を開発したので報告する。この手法は核磁気共鳴(NMR)原理を使った手法であり、大気圧から 1.0MPa までの水素ガス雰囲気下での高分子試料に対する水素溶解度、拡散係数を計測できる。以下にその計測手法、結果を示す。

図 2.1.(4).1 に PEM 内溶解水素ガス計測用 NMR システムを示す。中央斜線部が 1T の永久磁石であり、永久磁石の開口部に圧力容器、さらにその中に RF コイル、試料が固定される。試料は磁場強度が最大かつ一様な位置に固定される。試料中の水素原子は 1T の静磁場に対応して約 42.6MHz で回転する。RF コイルからこの周波数に相当する電磁場を試料に照射し、試料中の水素原子が励起、共鳴して発生する NMR 信号を受信することで、PEM 内水素ガスの溶解度、拡散係数を求める。

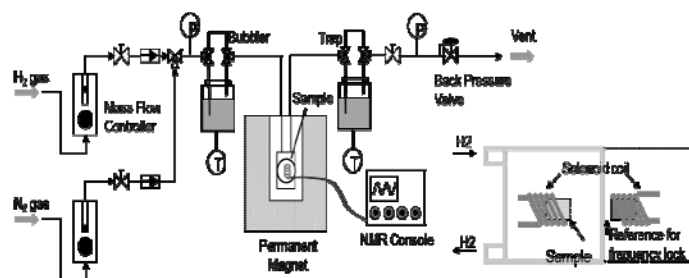


図 2.1.(4).1 NMR 計測システム

RF コイルはソレノイド型で、コイル線径 0.5mm の銅線を内径 8.2mm で 7 回巻いたものである。計測対象とする PEM は最も一般的な Nafion[®]を用い、膜厚の異なる Nafion[®]112, 117 を、幅 5mm の短冊状に切った膜をそれぞれ外径 4.0mm, 外径 6.5mm の試料体積が 50mm³, 150mm³になるように中空の円筒状に巻いて成型する。試料は 80°C の H₂O₂, 蒸留水, HCl の順に 1 時間ずつ煮沸し、1 日以上蒸留水中に保持して標準化処理を行う。その後 60°C, 真空下で 1 週間以上保持し、さらに室温下で乾燥した窒素ガス中に 2 日以上曝すことで乾燥処理して試料中の水分を除く。

計測時には圧力容器に水素ガスを充填して、水素ガスが試料に溶解平衡する約 3hr 後に各種 NMR 信号を計測する。水素ガス圧力を大気圧から 1.0MPa まで変化させ、各圧力にお

る NMR 信号を取得した。温度は室温である。

なお、6000 回の積算をして S/N を上げた。またわずかな室温変化で基準 NMR 周波数が変化するため、図 2.1.(4).1 に示すようにサンプル用 RF コイルの近傍に参照用 RF コイルを設置し、周波数ロックシーケンスを組み込むことで、水の共鳴周波数を常に基準周波数として計測し周波数の補正を行った。

水素ガス溶解度はパルスシーケンス(SE 法)を使って計測した。

$$I_{echo} = A\rho_{1H} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{TR}{T_1}\right) \right\} \exp\left(-\frac{TE}{T_2}\right) \quad (1)$$

90 度パルスからエコー信号発生までの間隔 TE を 12ms. 繰り返し時間 TR を 1000~1500ms とした。式(1)の関係にあるように装置定数 A , 緩和時間 T_1, T_2 を計測することで、水素溶解度 (ρ_{1H}) の値を実際に求めた。

水素ガスの PEM 内の自己拡散係数はパルスシーケンス(PGSE 法)から計測した。この方法では位置情報を磁場強度でエンコードすることで対象の拡散を信号減衰と捉えることができる。

$$\ln \left\{ \frac{I_{echo}(G_i)}{I_{echo}(G_0)} \right\} = -D \times \gamma^2 d^2 \delta G_i^2 \quad (2)$$

この時自己拡散係数と信号強度は式(2)で関係付けられる。実際に自己拡散係数を計測する際には、各勾配磁場 G_i に対する信号 $I_{echo}(G_i)$ を対数プロットした時の勾配として算出する。本研究では勾配磁場印加時間 $d=2.5$ ms, 勾配磁場の印加間隔 $\delta=6.5$ ms, 最大勾配磁場約 40000gauss/m とした。

図 2.1.(4).2 のグラフに雰囲気ガス圧力と信号強度の関係を示す。実線が水素ガス雰囲気、点線が窒素ガス雰囲気である。計測される信号は測定範囲内にある全ての 1H から来るものであり、①PEM に溶解した水素ガス由来、②PEM の構造中に含まれる水素原子由来、③試料周囲に存在する水素ガス由来の 3 種類による信号が考えられる。この内②PEM の構造中に含まれる水素原子は窒素雰囲気中でも計測することで、また圧力にも依らない。また③試料周囲に存在する水素ガスは拡散係数が非常に大きいため信号強度が計測領域外になり除外できる。したがって①PEM に溶解した水素ガス由来の信号を分離するには図 2.1.(4).2 の点線と実線の差分をとればよい。

なお、このように信号分離のために使った窒素ガスを重水素ガスに置き換えても同様の結果であった。対象とした圧力範囲では、溶解した水素ガスが PEM そのものの構造を変化させないことも分かった。従って窒素ガスによるバックグラウンド、すなわち PEM の構造中に含まれる水素の計測は正しく実施できたと考えられる。

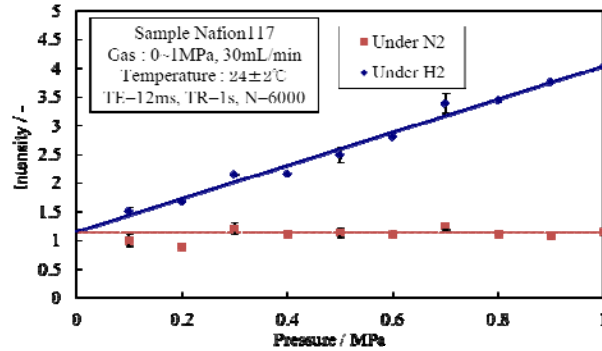


図 2.1.(4).2 水素ガス雰囲気および窒素ガス雰囲気下での NMR 信号強度

溶解した水素ガスの信号強度はガス圧力に比例した。信号強度は溶解度に直接対応するため、ナフィオン膜中の水素溶解度は圧力に比例するヘンリー型と考えられる。得られた溶解水素の信号を実際の溶解度に変換するには式(1)に示した関係を用いる。変換に必要なとなる T_1 , T_2 はそれぞれ IR 法, Hahn Echo 法により計測し, 装置定数 A は重水で薄めた軽水を使って校正した。また本 NMR 法ではオルト水素のみしか計測できないため, 25°C でのオルトとパラの 2 種類の水素分子の存在比(3:1)を考慮した。

以上より算出された溶解度の絶対値を図 2.1.(4).3 に示す。150mm³ の Nafion117 で溶解度係数は 1.4×10^{-5} mol/cm³/MPa となり, 他の方法⁽⁴⁾で計測した値 ($1.4 \sim 3.3 \times 10^{-5}$ mol/cm³/MPa) と同等の結果となった。また膜厚の異なる Nafion[®]112, 117 においても同様の結果を示し, 本計測手法の一定の信頼性を得ることもできた。

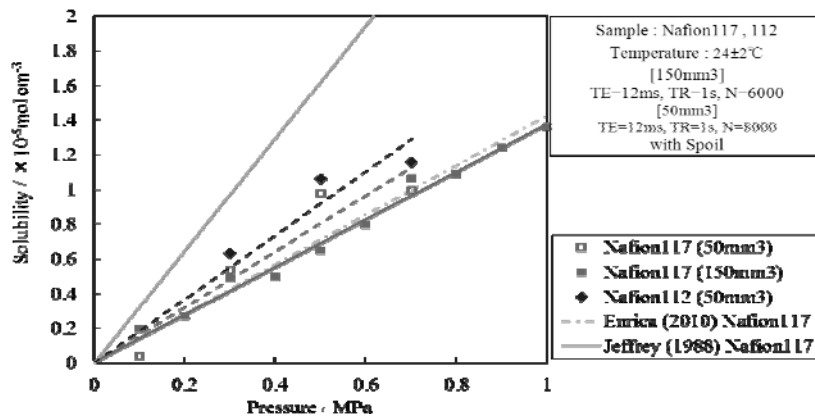


図 2.1.(4).3 乾燥したナフィオン膜に対する水素ガスの溶解度

PGSE 計測により計測した信号減衰を, $\ln[I_{\text{echo}}(G_i) / I_{\text{echo}}(G_0)]$, $\gamma^2 d^2 \delta G_i$ とプロットし, この勾配から算出した自己拡散係数を図 2.1.(4).4 に示す。本計測の圧力範囲では, 圧力によらず自己拡散係数はほぼ一定の値を示し, その値は $1.0 \sim 2.5 \times 10^{-10}$ m²/s となった。他の計測方法による拡散係数は $1 \sim 1.5 \times 10^{-10}$ m²/s であり, 本計測と同程度といえるが若干低い値となっている。これが系統的な誤差であるのか, あるいは計測法による違いによるものであるかどうかについては今後検討の余地がある。

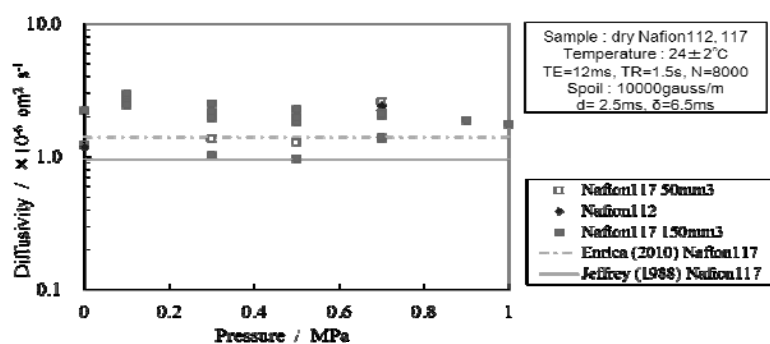


図 2.1.1(4).4 ナフィオン膜内の水素ガスの自己拡散係数

なお、現在、重水により水素ガスを加湿し、含水状態での PEM に対する水素ガスの溶解度を計測中である。H24 年度末には蓄積したデータを整理し、報告する予定である。また炭化水素系の膜への計測にも着手し、ファーストデータを取ることを付記する。

(5) 水素物性データベースの研究開発

データベースとは、任意のデータ集合体から所望の条件を満たすデータを簡便に抽出するためのシステムである。本プロジェクトが対象とする水素の熱物性値が対象である場合には、そのシステムは、一般的なデータベースが有するデータを離散的な数値の集合として取扱うシステムではなく、高度な推算式を用いた物性値の計算まで行う機能を有する必要がある。これまで、このような複雑なシステムに要求される機能や性能について、システムのハードウェアやオペレーティングシステム等、データベースシステムの基礎になる部分について検討を行い、その結果を踏まえて、システムの様式やそのユーザーインターフェース等について整理してきた。また、それを踏まえて、他の研究者らによって既に公表されているデータに基づく式を内包した新しい形式のデータベースを開発し、新しい様式のデータベースのシステムについて評価を行ってきた。

開発中のデータベースのユーザーインターフェースは、WEB 方式のインターフェースを有するデータベースと Microsoft エクセル用アドインライブラリの2種類である。これに加えてシステムの WEB サーバーの確立や維持にかかる諸問題を解決するために、OS, WEB サーバー, 計算サービス, クライアント用デスクトップシステムのすべてを1枚の CD-ROM に収録した新しいシステム様式(All-in-1-Live CD)を提案している。H21 年度までに開発したデータベースにおいては、「PVT データの測定装置の開発および状態方程式の作成」担当チームおよび「粘度の測定の測定装置の開発および状態方程式の作成」担当チームがそれまでに測定したデータに基づいて作成した式に基づく計算サービスに関して、エクセル用アドインライブラリにのみ実装していたが、今期は、All-in-1-Live CD 版のデータベースにも組み込んだ。なお、プロジェクト終了時点では、熱物性チームの最新の成果を踏まえた物性計算サービスの実装を終える見込みである。H21 年度までに作成したAll-in-1-Live CD 版データベースでは、ベースとなる OS には開発時点では最も新しく開発も容易であった KANOTIX 2007 Thorhammer RC7[1]を利用していましたが、より新しくかつより安定して開発が継続されている

Knoppix[2] に変更した。これに伴い、収録するメディアについても、CD-ROM だけでなく、DVD-ROM、USB メモリスティックを利用するシステム開発した。図 2.1.(5).1 にこのシステムのスクリーンショットを示す。なお、この All-in-1-CD/DVD/USB スタイルのデータベースの配布については、それに含まれる水素熱物性データの知的財産権を適切に管理するため、NEDO の管理の基に行う取り決めとなっている。

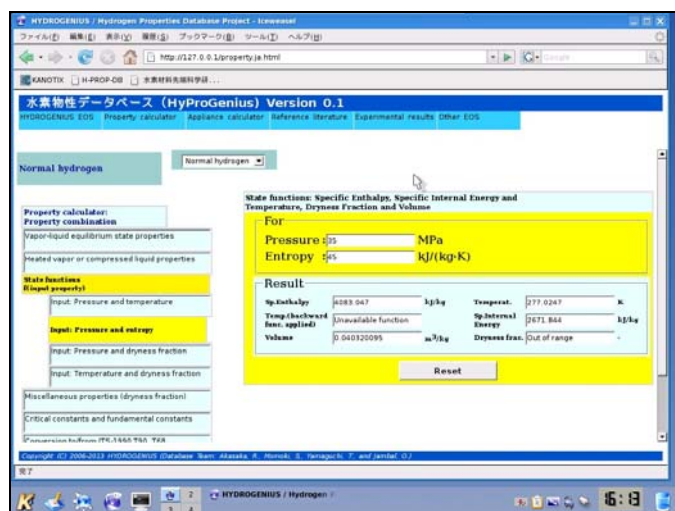


図 2.1.(5).1 All-in-1-CD/DVD/USB 水素物性データベースシステムの実行

インターネットを利用した WEB 版のデータベースシステムには、本プロジェクトの成果を広く世界に知らしめる事が可能である半面、知的財産を保護し利用を制限することが難しいといった問題がある。そこで、本データベースシステムのアイデアや有用性のみを広く一般にアピールする事を目的とした WEB ページを作成し、その URL (<http://h2db.mech.nagasaki-u.ac.jp>) を発表論文中で公開した。この世界中に公開している WEB ページでは、他の研究者らによる研究結果[3,4,5,6]に基づいた計算サービスに限定しており、厳しく保護する必要がある本プロジェクトで測定した水素の熱物性値は含まれない。また、インターフェースシステムについても最新版ではなく、階層メニューを持たない古いバージョンを使用している。

本プロジェクトでは、水素の熱物性に関する文献情報等について、市販のデータベースである Oracle 上に XML 形式のデータを用いたデータベースの構築を続け、水素先端フォーラムにおける水素熱物性ワークショップ等にて、開発の現状等をアピールしてきた。これに関して、NIST(米国国立標準技術研究所)が同様の目的で世界中にフリーに公開しているデータベースである NIST Thermo ML における水素のページが、本プロジェクトの進行と時を合わせるように充実してきた。Oracle 上のシステムの開発と評価を続けてきた結果、機能には問題ないものの利用を継続するために新たな費用が必要となることから、開発中のデータベースシステムでは、文献情報に関する部分は制限なく利用できる NIST Thermo ML を利用する事とした。

もう一つのユーザーインターフェースであるエクセル版については、本プロジェクトの成果の一部を利用可能とするアドインライブラリを既に開発していたが、今期は、応用編として、タンクに微小な溝が生じた際における圧力と温度のシミュレーションをするためのシートを追加した。さらに、表計算ソフトとしてのエクセルだけでなく、世界中にシェアを有するエンジニアリングソフトウェア Mathcad 内で水素の熱物性関数を利用できるよう、水素熱物性関数の Mathcad ライブラリを開発した。この MathCAD 版データベースの利用例を図 2.1.(5).2 に示す。これにより、水素物性データベースのユーザビリティを向上させ、水素物性計算を組み込んだ機器設計などが容易に行なえるようになり、産業界での普及を促進することが期待される。

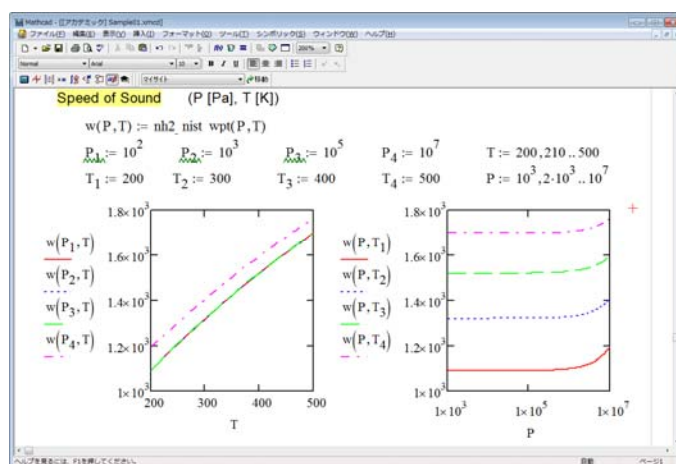


図 2.1.(5).2 MathCAD 版データベースの使用例

熱物性データとしての音速は、体積または密度表記の状態方程式の微分に当たり、また低圧極限のデータからは理想気体状態の比熱が求められるため、状態方程式の精度向上に有用なデータである。ここでは、熱物性データベースに組み込む予定の状態方程式の精度を向上させるために水素中の音速測定を行なったので報告する。

気体中の音速測定方法は主にパルス法、共鳴法があり、使用する容器も円筒や球などがあるが、現在、最も精度の良い測定ができるのは球形共鳴器を用いた共鳴法[8]である。本研究でも、この方法を用いて水素中の音速を測定した。水素の熱物性測定においては、高温、高圧状態における密封が難しい。また、爆発限界が広く、安全の面からは使用量を可能な限り少なくする必要があり、装置の容積は小さい方がよい。一方で、音速の測定は、パルス法にしる、共鳴法にしる、容積の大きい方が測定精度は高くなる。水素の音速は約 1,500 m/s と大きい、今回採用した共鳴法においては、共鳴セルの容積を小さくすることも、音速が大きいことも、どちらも共鳴周波数を大きくする方に働き、高い精度での測定が難しい。本研究では、おおよそ 100kHz までフラットな周波数特性を持つ B&K 社の 1/4 インチ、コンデンサー型マイクロホン 4939 を発振器と受信機の両方に使用することにより、不確かさ 0.058%以下で水素の音速データを取得した。

図 2.1.(5).3 に測定セルである球形共鳴器とそれを内包する圧力容器の図と写真を示す。

球形共鳴器は、半球をくりぬいた純銅製円柱を2つ合わせて球形の空洞を実現し、外形は円柱である。マイクロホンはコンデンサー式であり、ダイヤフラムの前後に圧力差があると測定ができないので、共鳴器内部と圧力容器を細い流路で継げ、圧力容器全体に水素を充填してダイヤフラムの前後の圧力差をなくしている。球形空洞の直径は50 mmである。

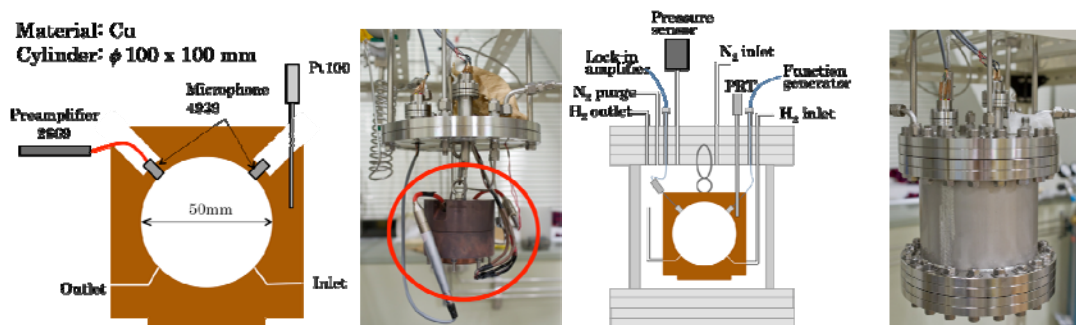


図 2.1.(5).3 Pictures of Spherical Resonator and Pressure Vessel

図 2.1.(5).4 に装置の全体図を示す。半径較正のための Ar 系配管と、測定のための水素系配管、および安全のための窒素配管が用意されている。圧力容器内部の圧力と圧力容器の温度を測定し、それを測定対象の気体の圧力および温度としている。資料の種類を変更した実験の前には、80°C のベーキングを 3 回以上繰り返している。

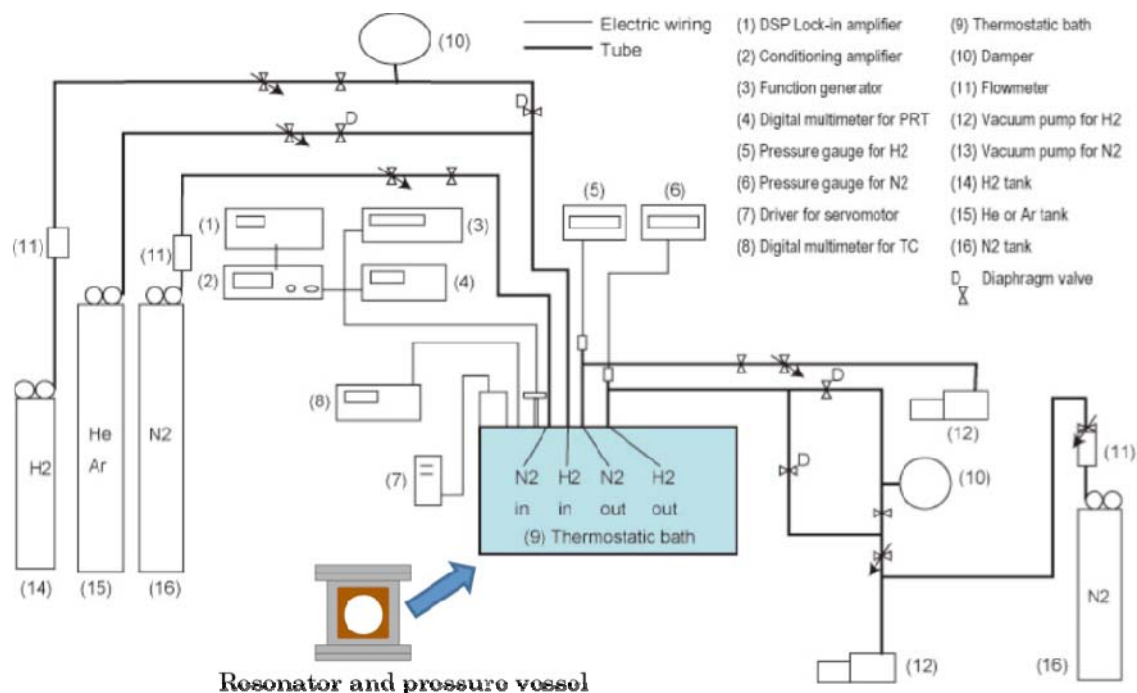


図 2.1.(5).4 Overview of Measurement Apparatus

図 2.1.(5).5 にアルゴンガスによる半径較正の結果を示す。球形共鳴器の内半径は温度によって変化するので、ある圧力、温度で測定された共鳴周波数と、状態方程式[9]から求めた音速から、その圧力、温度における共鳴器の内半径を計算している。圧力による変形は温度による変形に比べると無視できる程度であり、ここでは半径は温度のみの関数とした。

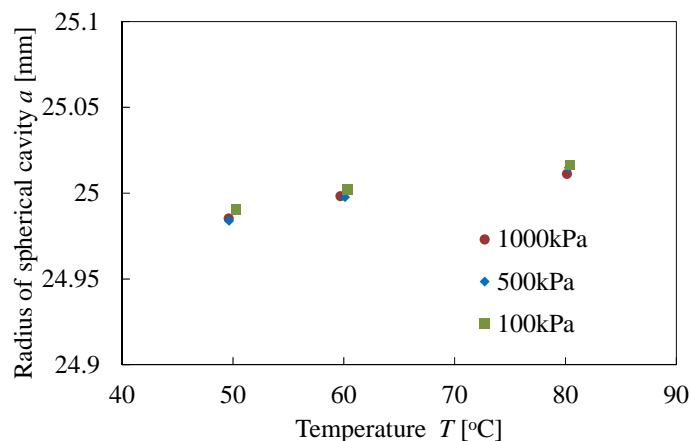


図 2.1.(5).5 Measurement Results of Ar for Radius Calibration

図 2.1.(5).6 に水素の音速の測定結果を示す。温度が高ければ高いほど音速は大きく、圧力も高ければ高いほど音速は大きくなり、温度の影響の方が圧力に比べると大きいことがわかる。Leachman の状態方程式[10]からの偏差は、最大で 0.15%程度である。

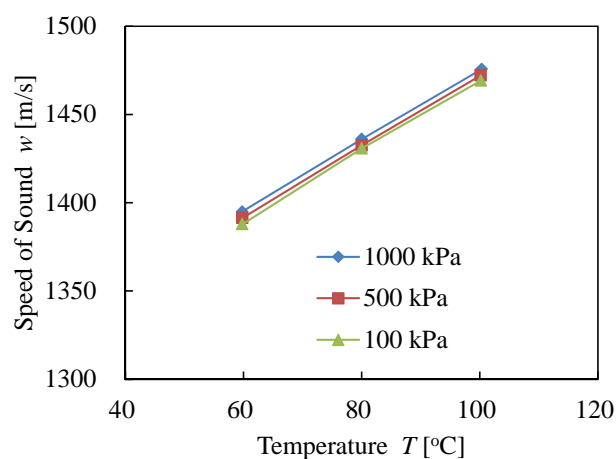


図 2.1.(5).6 Measurement Results of Sound Speed of n-Hydrogen

参考文献

- [1] <http://kanotix.de/changelang-eng.html>
- [2] <http://www.risec.aist.go.jp/project/knoppix/>
- [3] Woolley, H. W., Scott, R. B. and Brickwedde, F. C., J. Res. Nat. Bur. Stand., vol.41, (1948)
- [4] Yonglove, B. A., J. Phys. Chem. Eng. Data, 11, 1, (1982)
- [5] Kunz, O., Klimech, R., Wagner, W. and Jaeschke, M., GERG Technical Monograph 15,

(2007)

[6] Leachman, J. W., Jacobsen, R. T. and Lemmon, E. W., . Phys. Chem. Ref. Data, 38, 3

(2009)

[7] <http://trc.nist.gov/ThermoML.html>

[8] Moldover, M. R., Trusler, J. P. M., Edwards, T. J., Mehl, J. B., Davis, R. S.,
Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator,
Journal of Research of the National Bureau of Standards, 93(2), pp.85-122, (1988)

[9] Tegeler, Ch., Span, R., Wagner, W., A New Equation of State for Argon Covering the
Fluid Region for Temperatures From the Melting Line to 700K at Pressures up to
1000MPa, J. Phys. Chem. Ref. Data, 28(3), pp.779-827, (1999)

[10] J. Leachman, Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and
Orthohydrogen, master's thesis, University of Idaho, (2007).

(6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定

燃料電池車用の水素ステーションにおいて、車載タンクへの高圧水素の急速充填時に、水素中に残存する微量高沸点ガス(水蒸気等)が系内の低温部において凝縮・凝固し、配管の閉塞や流動系の不安定の原因となることが懸念されている。低温部は、複数バンク方式ステーションの低圧バンク出口付近や、プレクール方式ステーションのプレクール機器内等で発生する。水素ステーションの最適な設計・運用条件の把握のために、高圧水素中の微量高沸点ガスの露点測定システムの開発と露点データ蓄積、そして露点推算法の確立が必要とされている。

本研究では、まず、 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 1 MPa までの低温・高圧条件に対応した露点測定予備試験システムを製作し、 N_2+CO_2 標準ガスを用いた露点測定を行い、技術的問題点を抽出した。 40 MPa 程度までの高圧水素に対応した微量高沸点ガスの露点測定システムの手法と構造について検討した結果、高沸点ガスの凝縮・凝固を一次検出でき、最も高精度であるとされる鏡面冷却方式を採用することとした。

次に、水素ステーションの水素供給系内における残留高沸点ガスの凝縮・凝固条件の検討のために、高圧水素中の微量水分の露点推算法について詳細に検討し、露点推算の基本ソフトウェアを製作して露点推算を実施した。推算では、最終的に、気相側には多成分系での推算精度が優れている Peng-Robinson 状態方程式(PR-EOS)を2成分系に適用した式を適用し、凝縮相は単成分固相を仮定した。凝縮相側の水および氷の蒸気圧式には Sonntag 式を、それ以外の高沸点ガスの凝縮相の蒸気圧式には Antoine 式を用いた。PR-EOS という一般化された状態方程式を用いることにより、未だ霜点実測値が限定的である現状でも、その実測値に基づいて推算法の未定パラメータを決定し、高圧域での霜点推算を拡張して行う事で、水

素ステーションの条件に対応した推算値を提供できる可能性が出てくる。水素ガス中の残留水分についての推算結果を図 2.1.(6).1 示す。

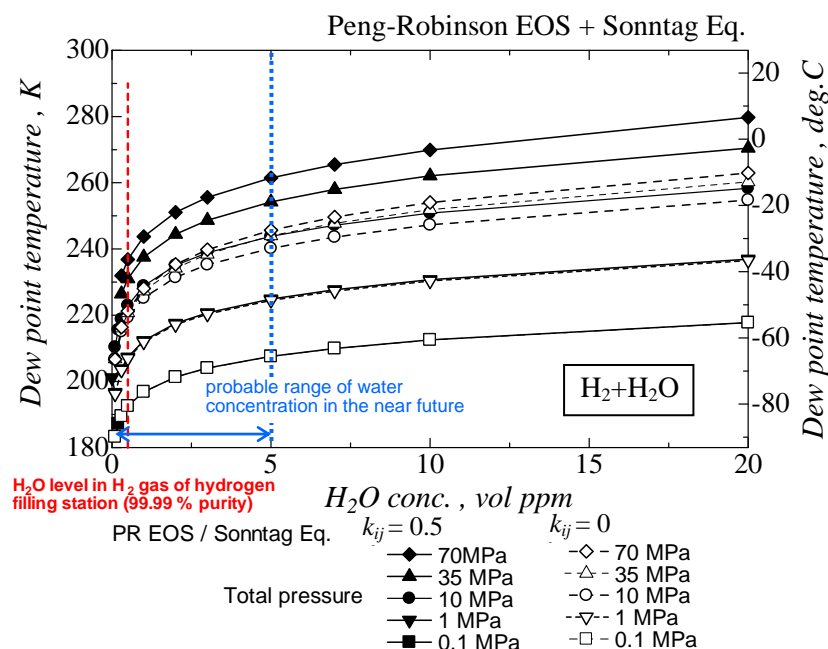


図 2.1.(6).1 高压水素中の微量水分の露点推算結果

これまで、水素ステーションの条件に対応した信頼出来る露点実測値は無く、状態方程式中には分子間相互作用パラメータ k_{ij} 等の未定パラメータが残っている。図 2.1.(6).1 では、 $k_{ij} = 0$ および 0.5 の場合について露点推算結果を示してある。全圧 1 MPa 以下では k_{ij} 値の違いによる推算値の差は小さいが、高压になると k_{ij} の影響が大きくなり、1 MPa 以上ではその差が無視できないことがわかる。また、 $k_{ij} = 0$ とした場合には、高水分濃度の 20 ppm の場合でも、10 ~ 70 MPa における露点推算値の差が約 10°C 以内であることも重要である。

水素ステーションで使用される高压水素の成分分析結果 (JHFC が毎年分析) および各高沸点成分の沸点レベルを考慮すると、水素ステーションの高压水素供給系においては、専ら残留水分の凝縮・凝固に注意すればよいことがわかった。本研究で開発した露点測定システムによって得た露点実測値により、状態方程式中の未定パラメータを決定することにより、露点推算の信頼性を大きく向上することが可能となる。

これまで、状態方程式等の理論的背景を詳細に検討した上で水素ステーションの条件に対応した露点推算を示した例はなく、簡易的な推算に基づいて許容量を超えた水分を含む水素ガスを供給した結果、ステーション内の低温部で氷が析出してバルブ等の不具合が生じた例も報告されている。本研究による露点推算は、水素ステーションの最適な設計条件と運用条件を検討する上で非常に重要となる。

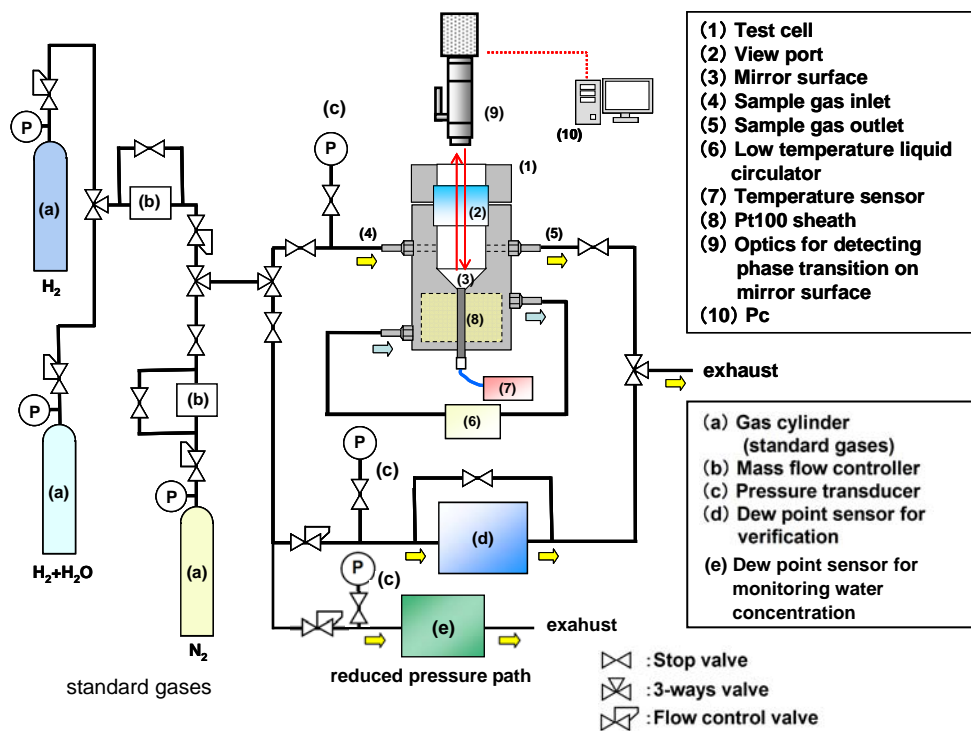


図 2.1.(6).2 露点測定システムの概要.

本研究では、高圧水素中の微量水分に対応した露点測定システム(図 2.1.(6).2)を新たに開発した。本測定システムは、最も高精度な露点測定法とされている鏡面冷却方式を採用しているが、高耐圧性を実現するために、光学系と完全に分離された高圧試験容器を使用し、露点検知の光学系に可視化と画像処理を用いていることが特徴である。システムは、試験ガス供給系、高圧試験容器、検証用露点センサ、凝縮検知光学系などから構成され、配管には系内への水分吸着を抑えるために SUS316L の電解研磨管を用いた。

光学系と分離された SUS316 製の高圧試験容器(図 2.1.(6).2 の(1))は、内容積が約 6.3 mL であり、上部に耐圧ガラスのビューポートを有し、底面から $\phi 3.2$ mm の白金測温抵抗体シースが挿入されている。研磨されたシース先端は、水素中の微量水分が着霜する鏡面として機能する。試験容器下部の熱交換部に低温液サーキュレータにより冷却液を循環させ、容器内にあるシース先端部の温度制御を行う。高圧試験容器は、40 MPa 以上の高圧水素対応に拡張できる基本構造を持つ。本システムは、高圧水素実験施設での実験条件(防爆仕様、遠隔操作等)に対応するため、高出力のレーザーやペルチェ素子、ヒーター等を測定部付近に設置せず、また、外部制御が可能な超低温サーキュレータ、ネットワークケーブルにより映像を転送可能な CCD カメラ等、遠隔操作への拡張を考慮した機器を用いて構成されている。

本測定システムでは、鏡面上における微量高沸点成分の着霜を可視化とリアルタイム画像解析によって検知する。従来の鏡面冷却式露点測定では、鏡面にレーザー光を照射して鏡

面からの反射光または散乱光の強度をモニターしておき、鏡面上で高沸点成分の凝縮や着霜が生じると反射光や散乱光の強度が変化することから凝縮や着霜を検知する。この方法では、鏡面上のレーザー光照射スポット内の平均的な情報を光の強度変化の情報として取り出しており、鏡面上での物理現象と光の強度変化との定量的な関係が不明確である。本研究で採用した可視化と画像解析を組み合わせた手法では、鏡面上を高解像度で広範囲にモニターし、霜の生成・消滅を可視化により検知することで、上記の不確かさを排除し、鏡面上で生じている現象を詳細に把握することができる。図 2.1.(6).3 に可視化と画像処理の概要を示す。

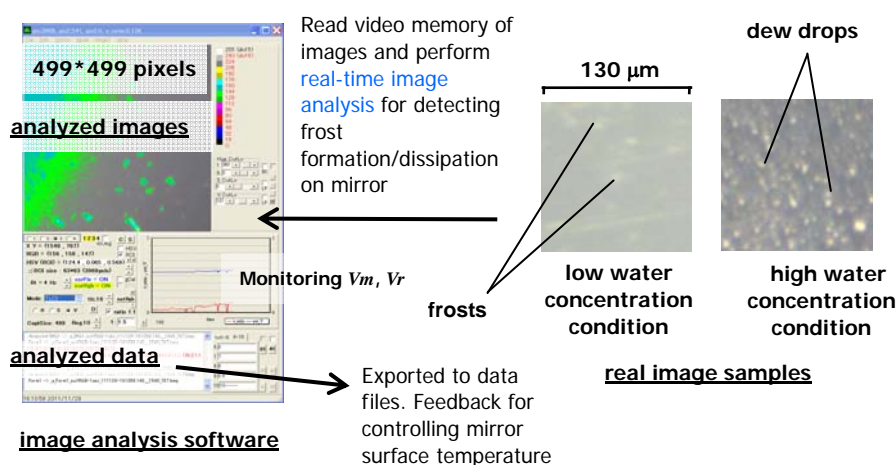


図 2.1.(6).3 鏡面での霜の生成・消滅を検知する可視化と画像解析の概念図

本露点測定システムを使用して、水分濃度を調整した水素標準ガスを用いた系統的測定を実施し、全圧 5~10 MPa、水分濃度 5~55 ppm の範囲の露点実測値を蓄積した。この圧力、濃度域における H_2+H_2O 系の露点実測値はこれまでに無く、水素ステーションの最適な設計と安全な運用のために重要なデータとなる。露点測定の不確かさは $\pm 0.4^\circ C$ と見積もった。

なお、本露点測定システムは、予算面および実験施設上の制約から当初の予定を変更し、15 MPa までの水素に対応した測定システムとしたが、高压試験容器(可視窓付き圧力容器)は、高压ガス保安協会より 50 MPa で使用するための特認を取得済みであり、更なる高压化への対応が可能となっている。

露点推算法においては、高压水素と微量水分の混合気体の気相側に従来の van der Waals 型の 2 成分系 Peng-Robinson 状態方程式 (PR-EOS) に加えて、virial 型の Lee-Kesler-Plöcker 状態方程式 (LKP-EOS) を用いた推算ルーチンも作成し、各状態方程式に含まれる未定パラメータを本研究の露点実測値に基づいて算出した。検証用露点センサ (図 2.1.(6).2 の(d)) による露点実測値と PR-EOS ベースの露点推算値との比較を図 2.1.(6).4 に、高压試験容器による露点実測値と検証用露点センサによる実測値の比較を図 2.1.(6).5 に示す。

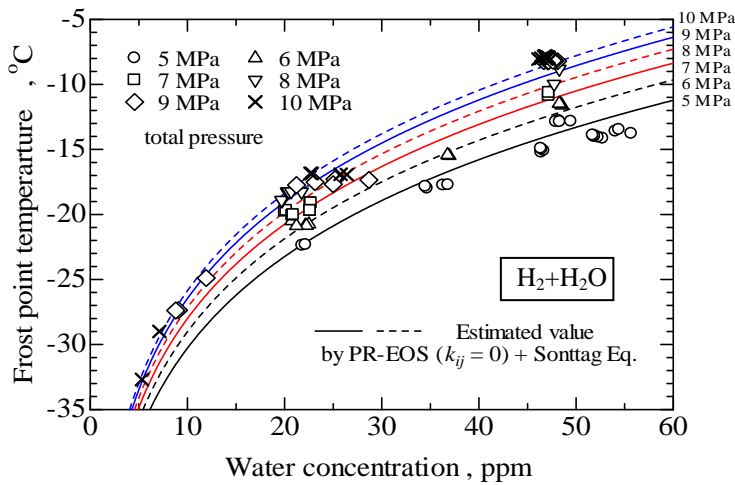


図 2.1.(6).4 検証用露点センサによる露点実測値

高圧試験容器＋可視化，画像解析による露点実測値と検証用露点センサによる露点実測値はよく一致している(図 2.1.(6).5). 全圧 5～10 MPa，水分濃度 5～50 ppm の範囲の実測データとの照合により，露点推算で用いた各状態方程式中の最適パラメータ値を求めると，高圧試験容器の測定値では，PR-EOS について $k_{ij} = -0.002$ ($Err = 0.559$)，LKP-EOS について $\eta = 1.0$ で固定とし $k_{ij} = 2.49$ ($Err = 0.597$)であった．実測値と推算値の一致度の指標 Err は $Err = \sqrt{(T_{measured} - T_{estimated})^2 / N}$ で定義し， N は実測データ数，また Err の単位は K である．検証用露点センサの測定値では，PR-EOS について $k_{ij} = 0.020$ ($Err = 0.843$)，LKP-EOS について $\eta = 1.0$ で固定とし $k_{ij} = 2.47$ ($Err = 0.852$)であった．

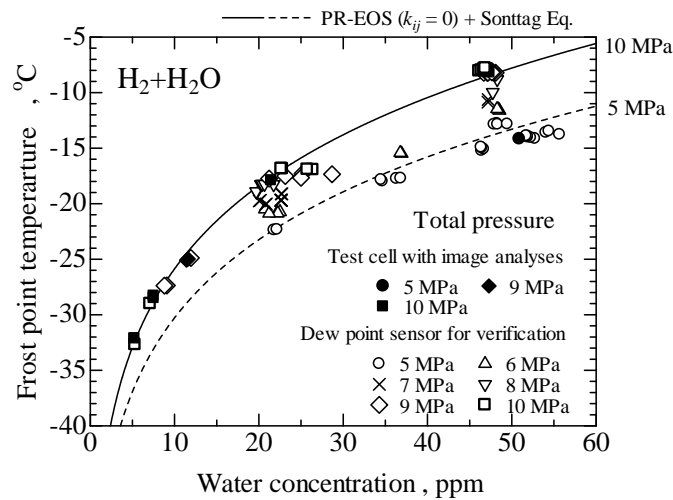


図2.1.(6).5 高圧試験容器による測定値と検証用露点センサによる測定値の比較

なお、検証用露点センサは、10 ppm程度以下の濃度域では信号の応答性が著しく低下し、5時間以上に渡って霜点の指示値が低下し続ける場合があった。このような場合には、指示値が漸近した最終温度を霜点とした。一方で、高圧試験容器による霜点測定では低濃度域でも目立った応答性の低下は見られず、可視化と画像解析による手法の有効性が確認できた。

PR-EOSを用いた相平衡推算では、多くの気体の組み合わせについて、広い圧力、混合比の範囲で気体の組み合わせにより決まる同一の k_{ij} 値を用いて精度よく推算できることがわかっている。加えて、今回の系では、図2.1.(6).1の推算結果にも見られるように $k_{ij}=0$ とした推算では、10~70 MPaの露点推算値の差は20 ppmの高水分濃度の場合でも約10℃と小さい。そこで、全圧5~10 MPa、水分濃度5~50 ppmの範囲の露点実測値に基づいて決定した相互作用パラメータ値を用いて、PR-EOSおよびLKP-EOSによる高圧域に拡張した露点推算を実施し、検討した(図2.1.(6).6)。推算結果によると、35および70 MPaでは、PR-EOSの推算値がLKP-EOSの推算値よりもやや高くなり、その差は35 MPaで約2℃、70 MPaで約4℃であった。水素ステーションの系内での水分の凝縮、凝固を避けるという点では、PR-EOSの方が安定側の霜点推算である。

気相側にPR-EOSを適用した推算では、 k_{ij} 値が0にきわめて近い値となり、霜点実測値との一致度もLKP-EOSよりわずかに良く、高圧域では安全側の推算であるため、現時点で我々は、水素ステーションの条件に対応した H_2+H_2O 系の露点推算について、「気相側にPR-EOS($k_{ij}=0$)、凝縮相を水の単成分固相と仮定し、氷の蒸気圧の計算にSonntag式を用いた推算法」を推奨する。

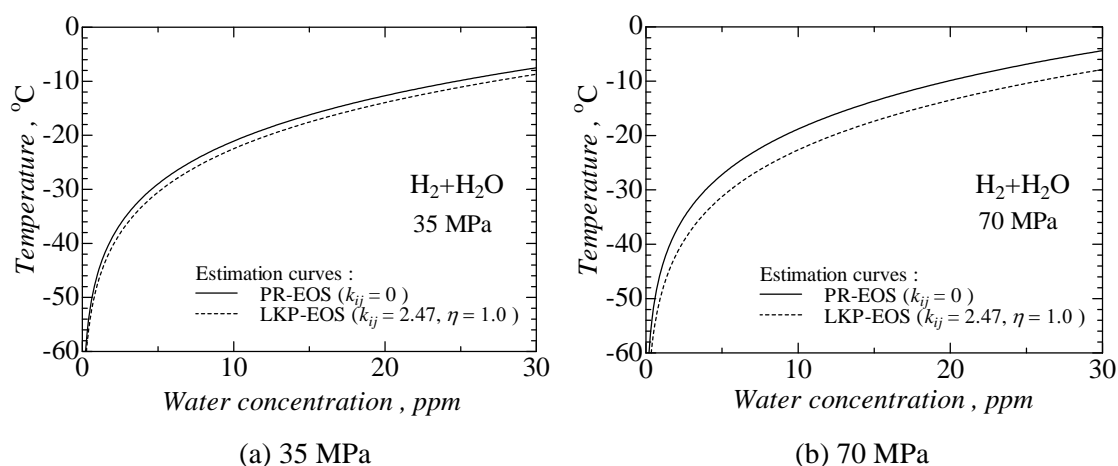


図2.1.(6).6 高圧域に拡張した露点推算結果

70 MPaの水素を3分間で約5 kg充填する際のプレクール温度は-30~-40℃と想定されている。プレクール温度を-30、-40℃の2通りとした場合に、80 MPaまでの高圧水素中で析出せ

ずには含み得る限界の水分濃度を推算した結果を図2.1.(6).7に示す. 将来的に水素ステーションの水素純度を下げた時に想定される水分濃度の上限値 5 ppm の場合, -40°C では 10 MPa 未満, -30°C では 20 MPa 程度で霜が生成するという推算結果となり, 系内で水分が霜として析出する恐れがあり 5 ppm での運用は難しいことがわかった. また, 70 MPa の高圧水素をプレクールする場合, -30°C では約 4 ppm, -40°C では約 1.6 ppm 未満でなければ凝固する恐れがあることがわかる.

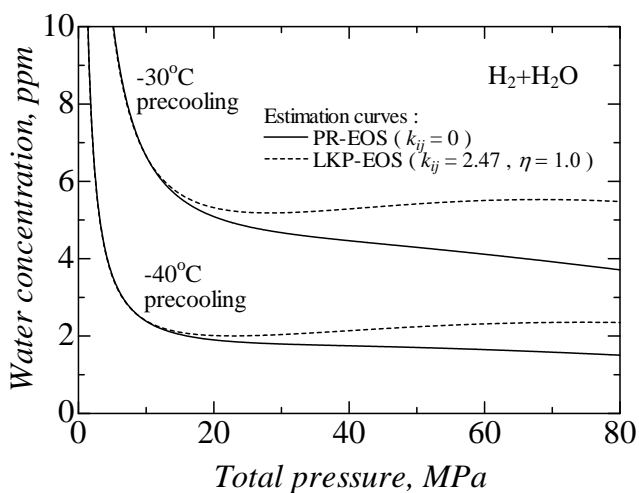


図2.1.(6).7 水素ステーションにおけるプレクール温度と許容水分濃度.

(7) 比熱の測定

- ・予算削減により比熱測定を断念した
- ・PVT 性質測定および音速測定の高精度化を推進することにより高精度の状態方程式を作成し, これにより比熱を推算する.

2.2.1 研究開発項目②「高圧状態における金属材料の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用, 加工, 温度などの影響による材料強度特性研究」

2015年に燃料電池自動車と水素ステーションが商用化される。70 MPa 燃料電池自動車に水素ガスを急速充填するためには、70 MPa 水素ステーションでの水素ガス圧力は110 MPaが必要となる。110 MPa のような高圧水素ガス中における金属材料の水素脆化特性はわずかしか蓄積されていない。^{1), 2)}

NASA の報告書¹⁾には、種々の金属材料を用い、295 K(22°C)、69 MPa の水素ガス中とヘリウムガス中で引張試験した結果が2つの表(Table A5.8とA5.9)にまとめられている。2つの表に示されている数値データから求めた、平滑引張試験片の相対引張強度 $\sigma_{B,H_2} / \sigma_{B,He}$ と相対絞り ϕ_{H_2} / ϕ_{He} が図 2.2(2).1 (a)に示されている。NASA 報告書の2つの表では、ヘリウムガス中の引張強度 $\sigma_{B,He}$ が1000 MPa 以上で $\sigma_{B,H_2} / \sigma_{B,He}$ と ϕ_{H_2} / ϕ_{He} がともに低下する高強度材料は、「極端に水素脆化する」グループに分類されている。逆に、 $\sigma_{B,He}$ が1000 MPa 以下で $\sigma_{B,H_2} / \sigma_{B,He}$ と ϕ_{H_2} / ϕ_{He} がともに低下しないオーステナイト系ステンレス鋼やアルミ合金は「ほとんど水素脆化しない」グループに分類されている。2004年に、35 MPa 燃料電池自車を対象に日本自動車研究所標準 JARI S 001 (2004)と JARI S 002 (2004)が制定された。JARI 標準では、車載水素タンクのライナー材として SUS316L オーステナイト系ステンレス鋼と 6061-T6 アルミ合金の使用が認められている。SUS316L と 6061-T6 は、NASA 報告書では「ほとんど水素脆化しない」グループに属している。

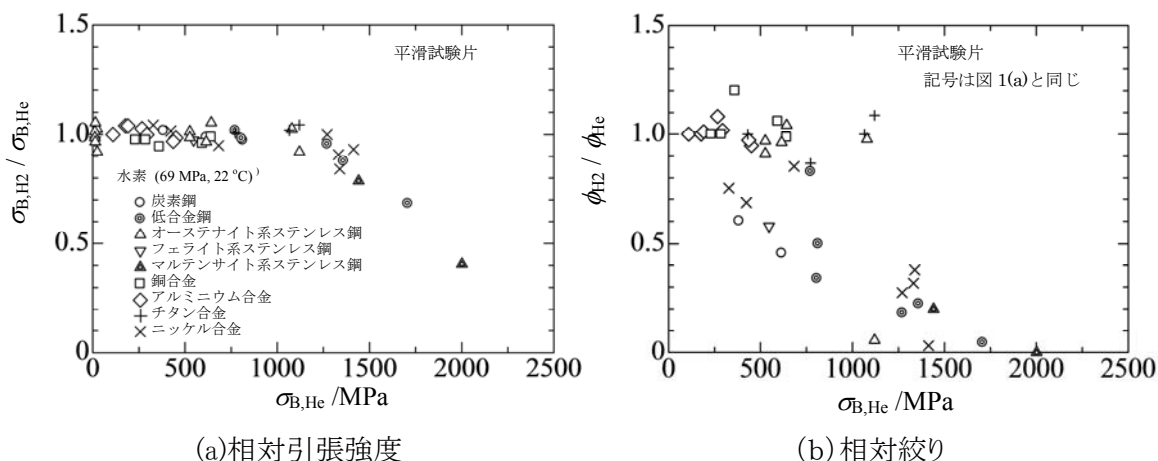


図 2.2(2).1(a),(b)22°C, 69 MPa 水素ガス中における金属材料の相対引張強度と相対絞り (NASA データベース)

一方、水素脆化は50年以上も研究されているので、水素脆化メカニズムに関する多くの説が提唱されているが、その中では格子脆化説³⁾と局所変形助長説^{4), 5)}は、内容的にも相対するものとして多くの研究者の議論的になっている。格子脆化説は、水素の侵入により原子間

結合力が低下し、脆性破壊が起きやすくなると考える説である。局所変形助長説は、水素が塑性変形を容易にし、局所的な変形が生じるため、結果としてマクロ的には小さい変形で延性破壊すると考える説である。しかし、どちらの説が正しいかは、少なくとも本プロジェクトが開始された2006年の時点では決着がついていなかった。

このような状況のもとで開始された本研究開発項目では、1.2節に示した9つの研究実施項目が現時点で行われている。研究実施項目(1), (2), (5), (6), (7), (9)が水素脆化の基本原理の解明に関する基礎研究である。残りの研究実施項目(3), (4), (8)が水素構造データベースの作成などに関する実用研究である。それぞれの研究実施項目で得られた成果を以下に示す。得られた成果、特に基礎研究成果をもとに、著書「水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方」(村上敬宜, 松岡三郎, 近藤良之, 西村 伸 共著, 養賢堂 (2012年))を出版した。この著書には材料強度チームの成果に加え、高分子材料チームの成果が示されている。また、研究実施項目(5)は上智大学、研究実施項目(6)と(8)は物質・材料研究機構(NIMS)、研究実施項目(7)は福岡大学とHYDROGENIUSが連携して推進している。

(1) 疲労き裂先端における塑性変形(すべり変形)と水素の相互作用の解明

本研究実施項目では、ステンレス鋼(SUS304, SUS316L など), 炭素鋼(SGP など), 低合金鋼(SCM435 など)を用い, 疲労破壊や引張破壊における水素脆化メカニズムを解明している。

(1-1) ステンレス鋼の疲労破壊における水素脆化メカニズム

ステンレス鋼の疲労き裂進展に及ぼす水素の影響を調べ, 常識を覆す三つの発見をした。最初の発見は, 0.0015 Hz のような低荷重負荷速度では, SUS316L ($\sigma_B = 584$ MPa) の疲労き裂進展速度も水素で加速する現象である。第二番目の発見は, SUS316L の製造に侵入していた水素は疲労き裂進展速度を加速させるが, 製造に侵入していた水素を特殊熱処理で取り除くと, 疲労き裂進展速度は減速する現象である。

図 2.2.(1).1 に, SUS316L の水素昇温脱離プロファイルを示す。未チャージ試験片でも, SUS316L 製造時に侵入した 2.6 mass ppm の水素が存在する。水素チャージ試験片では, 水素量が 3.6 mass ppm に増加している。未チャージ試験片に特殊熱処理 NDH-HT を施すと, 水素量は 0.4 mass ppm に減少する。図 2.2.(1).2 に, SUS316L において, 直径と深さが 100 μ m の微小穴から発生した疲労き裂のき裂長さとの関係を示す。1.5 Hz の高荷重負荷速度では, 未チャージ試験片と水素チャージ試験片の結果は一致している。1.5 Hz の高荷重負荷速度に比べ, 0.0015 Hz の低荷重負荷速度では, 未チャージ試験片と水素チャージ試験片の結果は加速している。すなわち, 低荷重負荷速度では, SUS316L できえ水素によって疲労き裂進展速度が加速する。一方, 特殊熱処理で水素を取り除くと, 0.0015 Hz の低荷重負荷速度においても, 疲労き裂進展速度は著しく減速している。

第三番目の発見は, 過飽和水素が疲労き裂進展抵抗を向上すること現象である。図 2.2.(1).2 に, SUS304 の試験片を高圧水素ガス中に曝露し, 材料中の水素量を多くし, 試験周波数が 1Hz

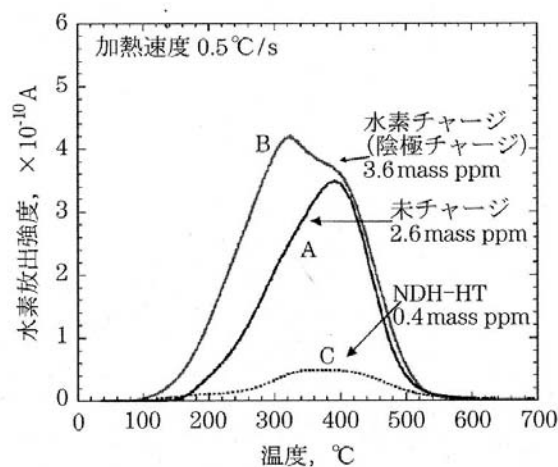


図 2.2.(1).1 オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L ($\sigma_B = 584$ MPa) の水素昇温脱離プロファイル

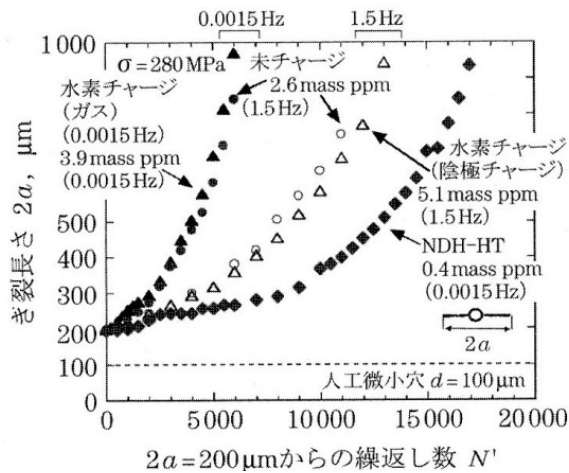


図 2.2.(1).2 オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の
疲労き裂進展挙動

のもとで調べた疲労き裂進展特性を示す。図 2.2.(1).3 の縦軸はき裂長さであり、横軸は人工微小穴から発生したき裂が 200 μm になった以降の繰返し数である。未チャージ試験片(水素量:2.2 mass ppm)のカーブAに比べ、水素チャージ試験片(23.9 mass ppm)のカーブBは左側にある。すなわち、通常に報告されているように、水素は疲労き裂進展速度を加速している。ところが、水素チャージ試験片(70.4 mass ppm)のカーブ C と水素チャージ試験片(89.3 mass ppm)のカーブ D はカーブ A の右側にあり、過飽和水素は疲労き裂進展速度を減速している。同様な過飽和水素による疲労き裂進展速度の減速はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 と SUS316L でも得られている。

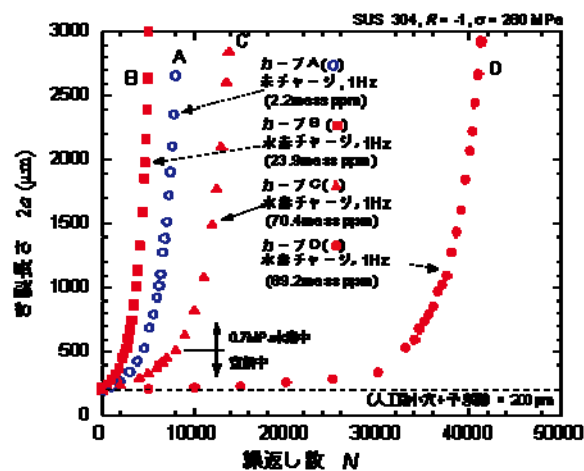


図 2.2.(1).3 オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の疲労き裂進展に及ぼす
過飽和水素量の影響

(1-2) 炭素鋼と低合金鋼の水素脆化メカニズム

上述のように、燃料電池自動車で使用が認められている SUS316L おいても、低荷重負荷速

度では疲労き裂進展速度は加速する。また、SUS316Lは高価である。SUS316Lは加工性が悪いので、SUS316L製部品はさらに高価になる。そこで、燃料電池自動車のような水素エネルギーシステム、水素ステーションや水素パイプラインの水素エネルギーインフラの安全性と経済性を両立させるために、低コストの炭素鋼と低合金鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす水素の影響を調べた。その結果、炭素鋼と低合金鋼の疲労き裂進展速度は水素で加速するが、水素による疲労き裂進展の加速には上限値が存在することを発見した。水素による疲労き裂進展加速の上限値は、水素エネルギーシステム・インフラの安全な疲労設計の根拠となる。

図 2.2.(1).4(a), (b)に、水素パイプライン候補の炭素鋼鋼管 SGP($\sigma_B = 416$ MPa)と 35 MPa 水素ステーション蓄圧器用の低合金鋼 SCM435($\sigma_B = 927$ MPa)の基準化した疲労き裂進展速度($da/dN)/\Delta K^2$ と試験周波数 f の関係を示す。 da/dN はき裂進展速度、 ΔK は応力拡大係数範囲、 E はヤング率である。試験周波数が0.1 Hz以下になると、水素チャージ試験片の疲労き裂進展速度は加速するが、水素による疲労き裂進展速度の加速には上限値が存在している。未チャージ試験片の結果と比較すると、水素による疲労き裂進展加速の上限値は約 10 倍～30 倍である。このような疲労き裂進展メカニズムを解明するため、水素チャージ試験片と未チャージ試験片の疲労き裂周辺に形成されるすべり帯の観察(図 2.2.(1).5)、疲労破面に形成されるストライエーション(図 2.2.(1).6(a),(b))並びに疲労破面に過大応力で形成されるストレッチゾーン SZWの観察を行い、水素助長疲労き裂継続前進機構(Hydrogen Enhanced Successive Fatigue Crack Growth, HESFCG)を提案した(図 2.2.(1).7)。

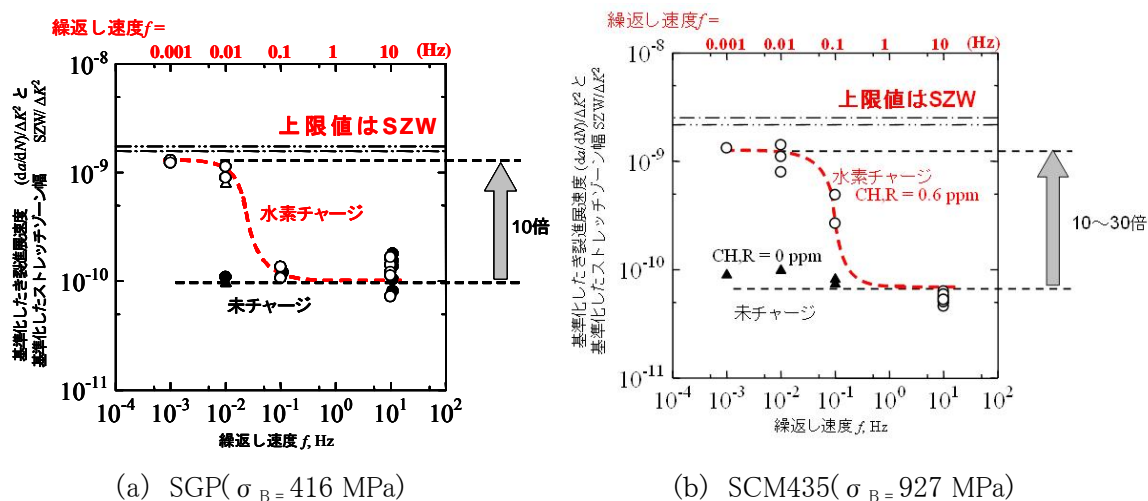


図 2.2.(1).4(a), (b) 炭素鋼 SGP と低合金鋼 SCM435 の基準化した疲労き裂進展速度と試験周波数の関係

未チャージ試験片の室温大気中の疲労き裂進展(図 2.2.(1).7 (a))においては、荷重負荷過程(図 2.2.(1).7,②)ではすべりによりき裂先端が開口し、き裂が進展する。最大引張荷重を負荷した時(図 2.2.(1).7,③)、き裂の新生面($SZW_{f, \max}$ で示される部分)はき裂進展方向に対して傾いた方向に形成され、き裂先端は鈍化する。除荷過程(図 2.2.(1).7,④)では逆すべりに

より、負荷過程で作られたき裂の新生面が閉口し、き裂先端が鋭化する。最小引張荷重負荷時(図 2.2.(1).7,⑤)には、き裂先端は完全に閉じる。その結果、 $SZW_{F, \max}$ をき裂進展方向に投影した長さであるき裂の進展量 s (ストライエーション間隔)は最大荷重負荷時(図 2.2.(1).7,③)の $SZW_{F, \max}$ よりも小さな値となる。このような疲労き裂の開閉挙動に対応し、炭素鋼 SGP に

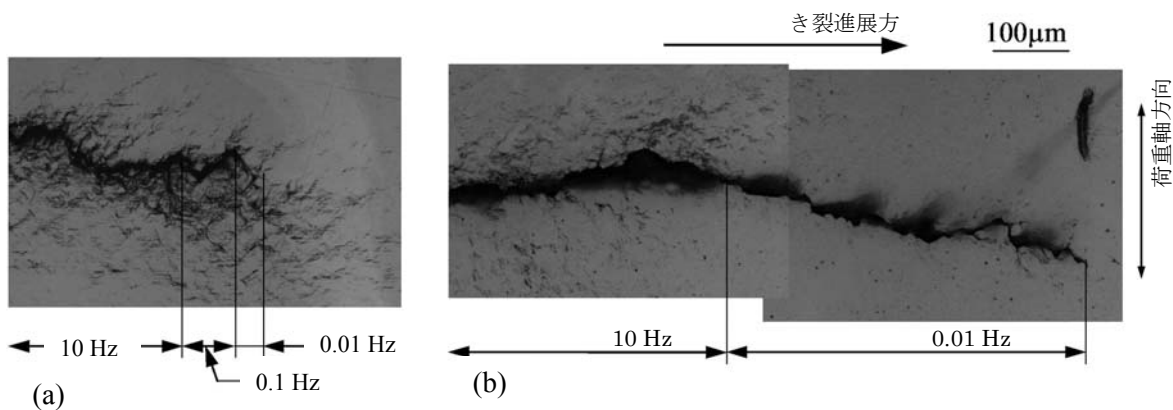
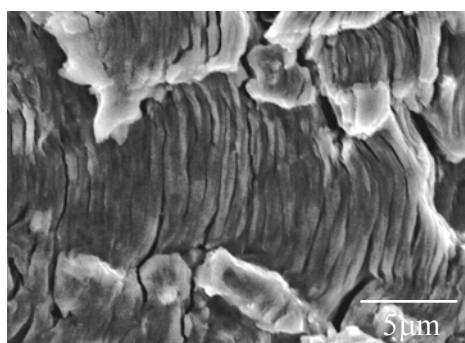
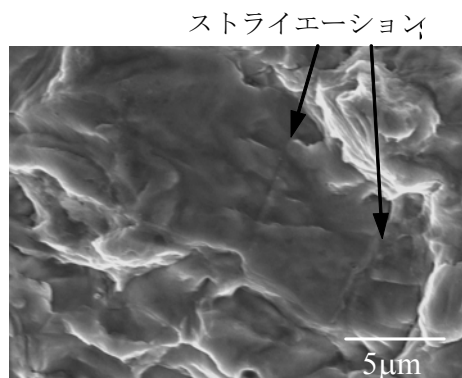


図 2.2.(1).5(a),(b) 炭素鋼鋼管 SGP における疲労き裂周辺のすべり帯

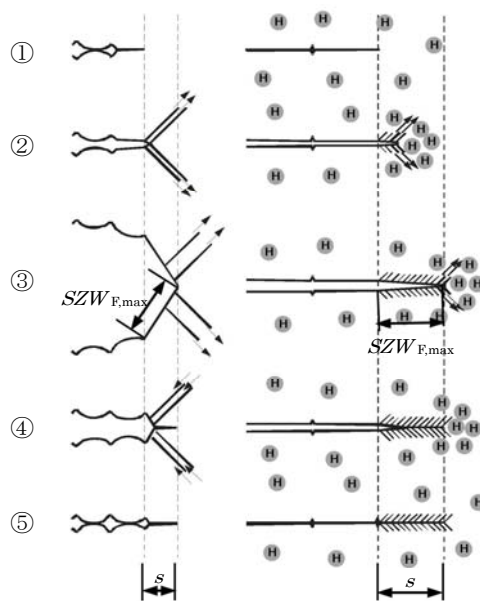


(a) 未チャージ材. $C_{H,R} = 0$ mass ppm, $f = 0.1$ Hz, $\Delta K = 87$ MPa $\cdot\sqrt{m}$, $s = 0.91$ μm



(b) 水素チャージ材. $C_{H,R} = 1.1$ mass ppm, $f = 0.01$ Hz, $\Delta K = 90$ MPa $\cdot\sqrt{m}$, $s = 5.2$ μm

図 2.2.(1).6(a),(b)
炭素鋼鋼管 SGP のストライエーション



(a) 未チャージ材のき裂先端
(b) 水素チャージ材のき裂先端

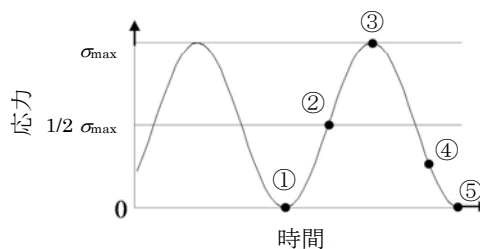


図 2.2.(1).7
水素助長疲労き裂継続前進機構

においては、疲労き裂周辺の広い領域ですべり帯が観察され(図 2.2.(1).5(a)), 破面には典型的な延性ストライエーションが形成されている(図 2.2.(1).6 (a)).

一方、水素チャージ試験片の疲労き裂進展試験(図 2.2.(1).7 (b))では、応力誘起拡散で水素がき裂先端に集まること、集まった水素はき裂先端ですべりを局所化すること(局所変形助長説)を考慮する必要がある。図 2.2.(1).4 の炭素鋼 SGP と低合金鋼 SCM435 においては、繰返し速度 0.1Hz 以上ではすべり変形に影響があらわれるほど、き裂先端に水素が集まる十分な時間がないので、疲労き裂進展挙動は未チャージ試験片とほぼ変わらない。しかし、0.01 Hz 以下では水素がき裂先端に集まる十分な時間があるので、き裂先端では荷重の増加につれて短いすべりが次々と起こり、き裂は前方に進展していく(図 2.2.(1).7 (b)の②)。実際、図 2.2.(1).5(b)の炭素鋼 SGP で $f = 0.01$ Hz の試験周波数では、疲労き裂周辺ですべり帯が観察されず、すべりの局在化が起こっていることがわかる。最大引張荷重負荷時(図 2.2.(1).7 (b)の③)では、水素によりすべり変形が起きる場所がき裂先端のごく近傍のみに集中するため、 $SZW_{F, \max}$ の傾きは疲労き裂進展方向にほぼ一致する。その結果、き裂先端は鈍化せず、ほとんど開口しない。き裂先端がほとんど開口しないので、除荷過程(図 2.2.(1).7④)では逆すべりも小さく、き裂先端は閉じていく(図 2.2.(1).7⑤)。このような疲労き裂の開閉挙動に対応し、図 2.2.(1).6 (b)に示すように、炭素鋼 SGP のストライエーションは平坦になり、その境界は不鮮明となっている。したがって、水素チャージ試験片のストライエーション間隔すなわちき裂進展量 s は $SZW_{F, \max}$ とほぼ同じになり、水素により疲労き裂進展速度が加速する場合でも、加速の上限値は $SZW_{F, \max}$ を超えない(図 2.2.(1).4)。このことは、水素雰囲気中に曝される水素エネルギー機器の疲労設計に対して $SZW_{F, \max}$ が重要なパラメータになり得ることを示している。

以上で述べたように、疲労き裂進展における水素脆化は、格子脆化による脆性破壊(格子脆化説)でなく、水素で局在化したすべりによるマイクロ延性破壊(局所変形助長説)であると考えられる。この考えは、引張破壊における水素脆化メカニズムの解明でも成り立つ。

図 2.2.(1).8 に炭素鋼 SGP を用いた引張試験で得られた相対引張強度と残留水素量の関係と相対絞りと残留水素量の関係を示す。 σ_B と σ_{BH} は未チャージ試験片と水素チャージ試験片の引張強度であり、 ϕ と ϕ_H は未チャージ試験片と水素チャージ試験片の絞りである。 $C_{H,R}$ は引張破壊試験片に残留していた水素量である。残留水素量が多くなると、引張強度は低下しないが、絞りは低下する。図 2.2.(1).9 に SGP の未チャージの処女試験片と水素チャージの 20 %予ひずみ試験片の引張試験後の縦断面をレーザー顕微鏡で観察した写真を示す。通常、ポイドは介在物などを起点として発生し、試験片の引張変形に伴い、荷重軸方向に伸ばされて成長する。図 2.2.(1).9 (a)の未チャージ試験片のポイドは、荷重軸方向に長軸を持つ楕円形となっている。このポイド形成は、通常のポイド成長モデルに従っている。一方、図 2.2.(1).9 (b)の水素チャージ試験片では、ポイドは荷重軸に対して垂直な方向に成長しており、未チャージ試験片に見られるような荷重軸方向に伸ばされたポイドはほとんどない。

図 2.2.(1).10 に、SGP の水素チャージ試験片のポイドが引張荷重軸に対して垂直な方向に

成長するという特異な挙動を説明するモデル図を示す。金属材料中には非金属介在物や析出物等の第二相粒子が存在する。大きな変形が生じると、母相と第二相粒子間の塑性変形能の差により、界面はく離や第二相粒子の割れが生じ、ボイドが形成される。SGP では、ボイドは介在物を起点としている。次の過程として、未チャージ試験片では、絞り変形が進み、局所的に

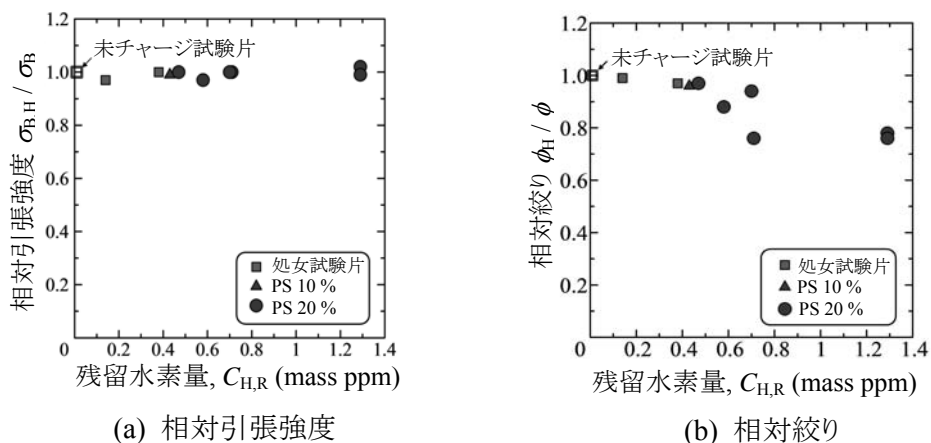


図 2.2.(1).8(a)(b)炭素鋼鋼管 SGP の相対引張強度, 相対絞りと残留水素量の関係

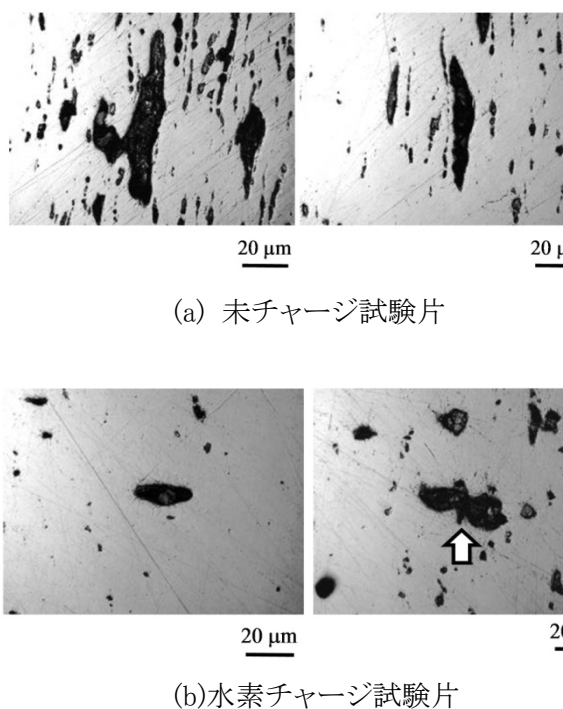


図 2.2.(1).9 炭素鋼 SGP の引張破壊試験片縦断面でのボイド

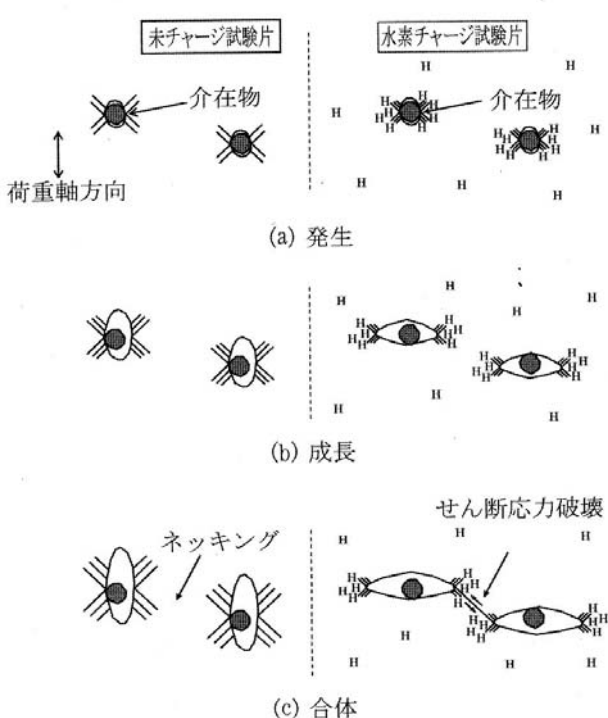


図 2.2.(1).10 ボイドの発生・成長・合体モデル

力三軸度が大きくなると、発生したボイドは、荷重軸に垂直な方向に成長するが、同時に引張

塑性変形によって荷重軸方向にも成長し、細長くなる(図 2.2.(1).10 (b)左側). 一方、水素チャージ試験片では、応力誘起拡散によりボイド縁の三軸応力場に水素が集中する. 集中した水素はボイド縁のすべりを助長する. すなわち、ボイド縁では塑性変形が局所的に起こりやすい状態になる. その結果、ボイドは荷重軸に垂直方向に成長し、荷重軸に垂直方向に成長したボイド縁にはさらに次の水素集中がもたらされると考えられる(図 2.2.(1).10 (b)右側). さらに、水素はすべりを助長するので、水素はせん断破壊を容易にし、ボイド合体を助長する(図 2.2.(1).10 (c)). 図 2.2.(1).9(b)において、矢印で示したボイドはマイクロせん断応力破壊で合体したボイドである可能性が高い. 水素で助長されたせん断破壊によって、合体したボイドは荷重軸に垂直方向に長くなり、ボイド縁での応力集中はさらに増大する. その結果、合体前よりも多くの水素がボイド縁へ集まり、ますますすべり変形がボイド縁に局在化する. このようにして、水素チャージ試験片ではボイドは荷重軸に垂直に成長し、水素によって絞りが低下する. また、SGPより炭素量が多く、パーライト体積率が大きい炭素鋼 S15C, STPG370, S45C の焼ならし材では、パーライト割れの成長が水素で助長され、絞りが低下することを見出している.

上述したように、疲労破壊と引張破壊における水素脆化は、格子脆化による脆性破壊でなく、水素で局在化したすべりによるマイクロ延性破壊である. したがって、水素エネルギー機器の設計・製造においては、水素の影響を考慮した延性破壊を基本とした考え方を採用するのが合理的である. しかし、この考えはステンレス鋼、炭素鋼、低合金鋼などの引張強度が 1000 MPa 以下の低強度鋼に適用すべきであり、1000 MPa 以上の高強度鋼では、別の水素脆化メカニズムが働いている可能性がある. 図 2.2(2).1 に示すように、ヘリウムガス中の引張強度 $\sigma_{B,He}$ が 1000 MPa 以下の低強度材料では、相対絞り ϕ_H / ϕ_{He} が低下しても、相対引張強度 $\sigma_{B,H} / \sigma_{B,He}$ は低下しない. 一方、 $\sigma_{B,He}$ が 1000 MPa 以上の高強度鋼では、 $\sigma_{B,H} / \sigma_{B,He}$ と ϕ_H / ϕ_{He} はどちらも低下している.

(1-3) 1000 MPa 超級高強度鋼の水素脆化メカニズム

高圧水素実験施設で高圧ガス配管用T型ジョイントから水素が漏洩した. T型ジョイントの材質は、17-4PH(JIS SUS630 相当、ビッカース硬さ:450, 引張強度:1300 MPa)であり、設計圧力は 1050 MPa(150000 Psi)である. 150 MPa 水素ガスを用いた圧力試験を3回行ったとき、水素漏洩が起こった. 使用圧力と設計圧力の比は 150 MPa/1050 MPa=1/7 となり、極めて低い. そこで、115 MPa 水素ガス中で SUS630 の破壊靱性 K_{IC} を求めた. 大気中の K_{IC} は 83.2 MPa \cdot m^{1/2}であったが、115 MPa 水素ガス中の K_{IC} は 12.7 MPa \cdot m^{1/2}となり、大気中の K_{IC} の約 1/7 に低下した. これらの結果は、高圧水素実験施設や水素ステーションで 1000 MPa 超級高強度鋼を安全に使用するためには、水素脆化メカニズムの解明が不可欠であることを示している.

図 2.2.(1).11 に、大気中の引張強度 σ_B が約 2000 MPa の軸受鋼 SUJ2 の試験片に水素チャージし、疲労き裂進展試験して得られた結果を相対き裂進展速度 $(da/dN)_H / (da/dN)_U$ と試験周波数 f の関係で示す. 図 2.2.(1).4 に示すように、 σ_B が 1000 MPa 以下の

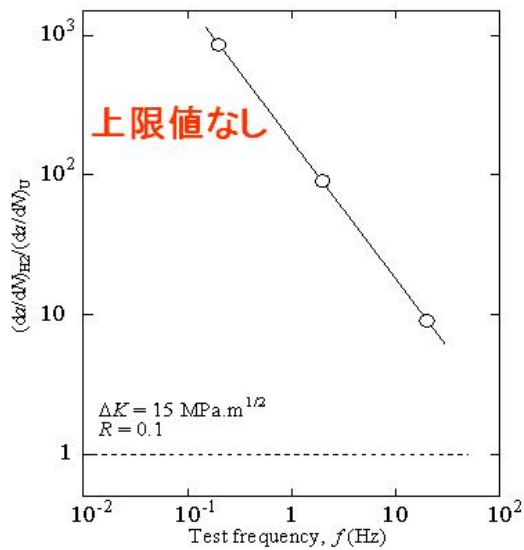


図 2.2.(1).11 軸受鋼 SUJ2 の相対疲労き裂進展速度と試験周波数の関係

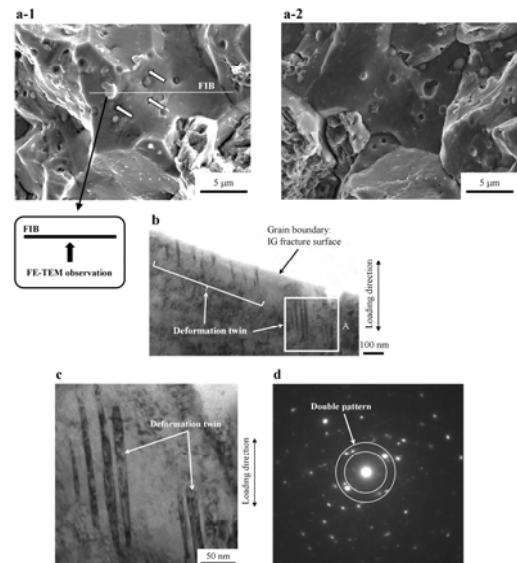


図 2.2.(1).12 水素チャージした軸受鋼 SUJ2 の粒界破面と変形双晶

低強度鋼(SGP と SCM435)では、相対き裂進展速度は約 10 倍で上限値を示している。一方、図 2.2.(1).11 の σ_B が約 2000 MPa の SUJ2 では、相対き裂進展速度は 1000 倍にもなり、上限値に達していない。SUJ2 の疲労破面は、未チャージ材では粒内破面であったが、水素チャージ材では粒界破面であった(図 2.2.(1).12 の(a-1), (a-2))。水素チャージ材の粒界破面直下には変形双晶(図 2.2.(1).12 の b, c, d)が形成されることを発見し、変形双晶による粒界割れモデルを提案した。

以上の結果から、引張強度が 1000 MPa 以上の高強度鋼の疲労における水素脆化は、水素で変形双晶が助長され、助長された変形双晶で粒界割れが引き起こされる現象であると考えられる。粒界割れのため、水素による疲労き裂進展速度の加速は、試験周波数 $f = 0.1\text{Hz}$ で未チャージ材の 1000 倍にもなり、まだ上限値に達していない。すなわち、1000 MPa 超級高強度鋼の疲労設計の根拠は現時点では不明であり、今後の研究が必要である。

(参考文献)

- 1) Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, NASA NSS 1740.16
- 2) AIST:http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol07_07/special/p06.html
- 3) A.R.Troiano: Transactions of the ASM **52**(1960) pp.54-81.
- 4) C.D.Beachem: Metallurgical Transactions **3**(1972) pp.437-451.
- 5) H. K. Birnbaum and P. Sofronis: Mater. Sci. Eng. A176(1994) p.191

(2) 高圧水素ガス中における疲労き裂発生・進展メカニズムの研究

本研究実施項目では、高圧水素ガス中において疲労特性のみならず低速引張特性(SSRT)や破壊靱性などの強度特性の評価法並びに水素拡散特性の評価方法、EBSD を用いた組織解析法、SIMS を用いた水素可視法などを確立することを目的としている。

(2-1) 高圧水素ガス中における疲労き裂進展特性

現在、3台の 120 MPa 水素ガス中疲労試験機、1台の 100 MPa 水素ガス中疲労試験機などを用い、低速引張試験(SSRT)、疲労寿命試験、疲労き裂進展試験を日常的に行っている。これらの試験から得られる強度特性は、高圧水素ガス容器や高圧水素パイプの特認を申請するときに必要となり、通称「3点セット」と呼ばれている。以下では、疲労き裂進展特性を例としてどのようにして高圧水素ガス中で強度特性を評価しているかを示す。

図 2.2.(2).1～図 2.2.(2).5 に 70 MPa 水素ステーション蓄圧器用低合金鋼 SNCM439 鋼の疲労き裂進展特性を示す。図 2.2.(2).1 に CT 試験片(コンパクト型試験片)の形状と寸法を示す。図 2.2.(2).2 に示すように、き裂が蓄圧器の軸方向に平行に進展するか、軸方向と垂直に進展するか、あるいは試験片の採取を蓄圧器の外側にするか、内側にするかにより、4種類の CT 試験片を実物の蓄圧器から作成している。図 2.2.(2).3 から図 2.2.(2).5 の疲労き裂進展特性は、応力比 $R=0.5$ のもとで水素ガス圧力 P_{H_2} と試験周波数 f を変えて調べている。これらの図から、まず大気中のき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は式(1)の Paris 則で表わされることがわかる。(図 2.2.(2).3),

$$d a / d N = C \Delta K^m \quad (1)$$

ここで、 C と m は定数であり、 $C = 2.17 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.62$ である。大気中に比べ、水素ガス中

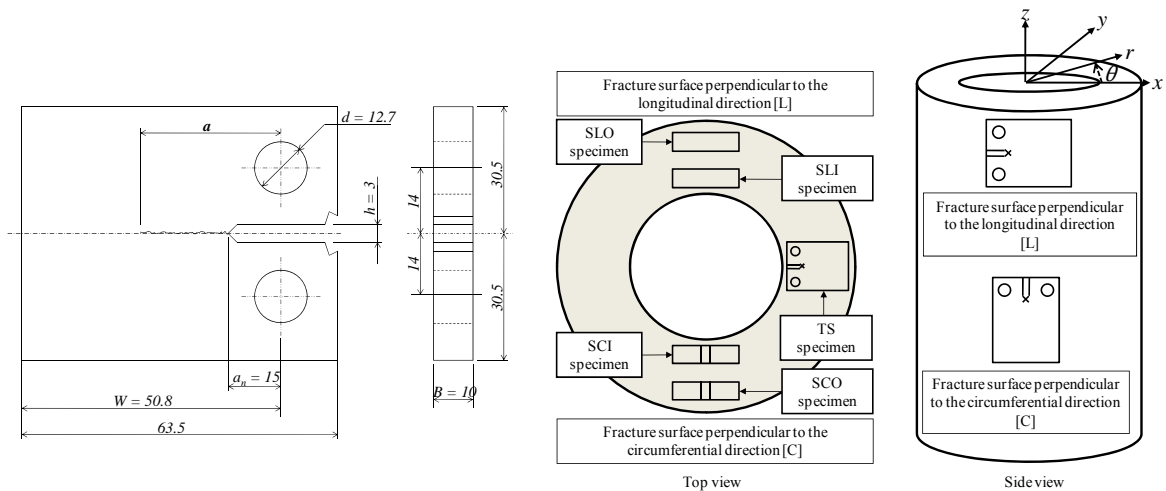
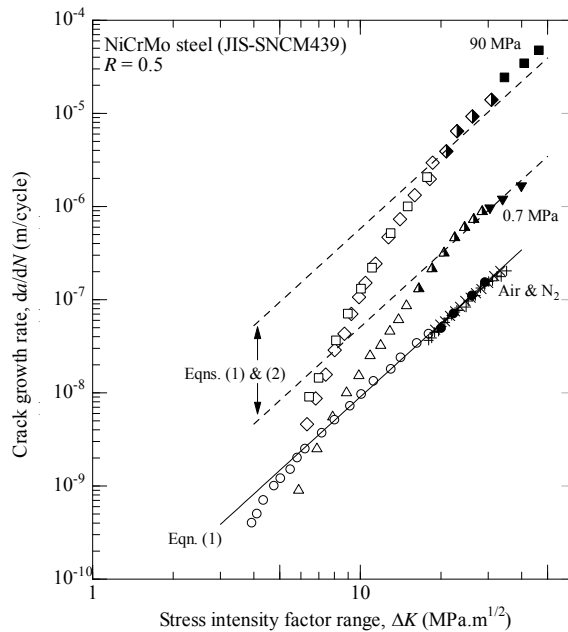


図 2.2.(2).1 CT 試験片の形状と寸

図 2.2.(2).2 70 MPa 蓄圧器(外径 320 mm, 内径 200 mm)からの CT 試験片の採取方法



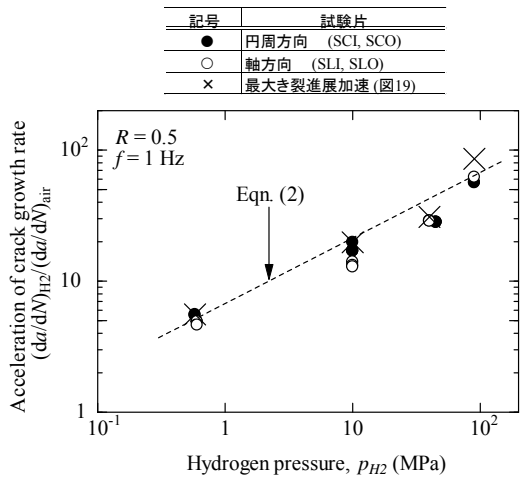
円周方向

記号	環境	周波数 f (Hz)	試験法	試験片採取法
◆	H ₂ , 90 MPa	1	Δ <i>K</i> 増加	SCI
◇	H ₂ , 90 MPa	1	Δ <i>K</i> 増加	SCO
◇	H ₂ , 90 MPa	1	Δ <i>K</i> 減少	SCO
▲	H ₂ , 0.7 MPa	1	Δ <i>K</i> 増加	SCI
△	H ₂ , 0.7 MPa	1	Δ <i>K</i> 減少	SCI
●	大気	20	Δ <i>K</i> 増加	SCI
○	大気	20	Δ <i>K</i> 減少	SCI

軸方向

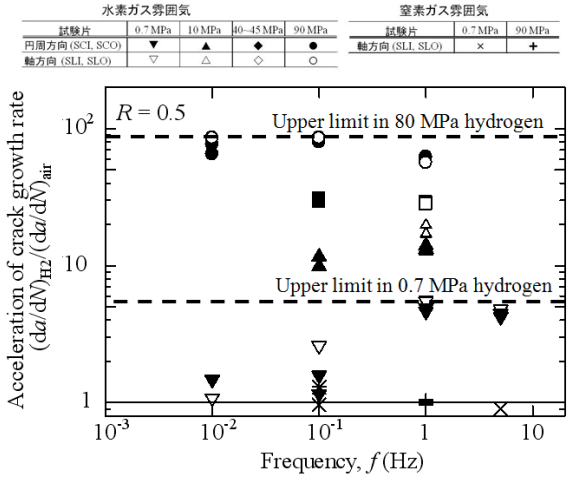
記号	環境	周波数 f (Hz)	試験法	試験片採取法
□	H ₂ , 90 MPa	1	Δ <i>K</i> 減少	SLI
▼	H ₂ , 0.7 MPa	1	Δ <i>K</i> 増加	SLI
+	N ₂ , 90 MPa	1	Δ <i>K</i> 減少	SLI
×	N ₂ , 0.7 MPa	1	Δ <i>K</i> 増加	SLI

図 2.2.(2).3 90 MPa 水素ガス中における 70 MPa 蓄圧器用 SNCM435 鋼の疲労き裂進展特性



記号	試験片
●	円周方向 (SCI, SCO)
○	軸方向 (SLI, SLO)
×	最大き裂進展加速 (図19)

図 2.2.(2).4 相対疲労き裂進展速度と水素ガス圧力



水素ガス雰囲気				窒素ガス雰囲気			
試験片	0.7MPa	10MPa	40-45MPa	90MPa	試験片	0.7MPa	90MPa
円周方向 (SCI, SCO)	▼	▲	◆	◇	軸方向 (SLI, SLO)	×	+
軸方向 (SLI, SLO)	▽	△	◇	○			

図 2.2.(2).5 相対疲労き裂進展速度と試験周波数

ではき裂進展速度は加速する(図 2.2.(2).3と図 2.2.(2).4)。水素ガス圧力が一定のもとでは、試験周波数が低くなるにつれてき裂進展速度は加速するが、水素ガス中でもき裂進展速度の加速に上限値が存在する(図 2.2.(2).5)。上限のき裂進展速度 $(da/dN)_{H_2/upper}$ と水素ガス圧力 P_{H_2} の関係は式(2)で表わされている(図 2.2.(2).4)。

$$\frac{(d a / d N)_{H_2 / \text{upper}}}{(d a / d N)_{\text{air}}} = 6.75 \times P_{H_2}^{0.50} \quad (2)$$

式(1)と式(2)を用いると、任意の水素ガス圧力における上限のき裂進展曲線が得られる。図 2.2.(2).3 中には 0.7 MPa 水素ガス中と 90 MPa 水素ガス中の上限のき裂進展曲線が破線で示されている。高压水素ガス容器、高压水素ガスパイプなどを設計あるいは特認申請する場合、上限のき裂進展曲線は安全側の疲労き裂進展解析を可能にする。

(2-2) 水素拡散係数と水素固溶度

水素ガス中で金属材料中に侵入する水素の挙動すなわち水素濃度分布を求めるためには、水素拡散係数と固溶度が必要である。そこで、10 MPa または 100 MPa の水素ガス暴露容器と昇温脱離分析装置 TDS または TDA を組み合わせ、金属材料の水素拡散係数と固溶度を評価する方法を開発している。

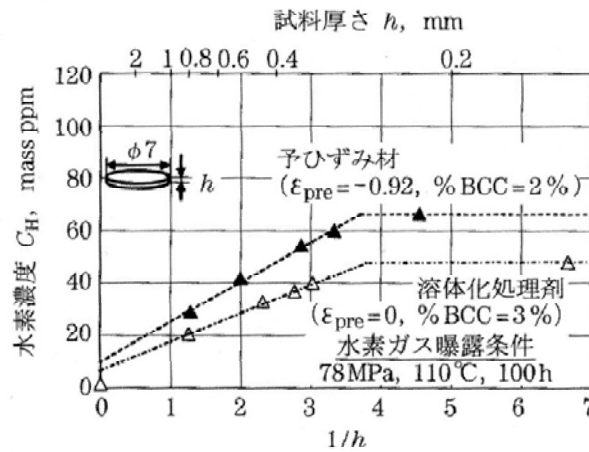


図 2.2.(2).6 SUS316L での水素濃度と試験片厚さの関係

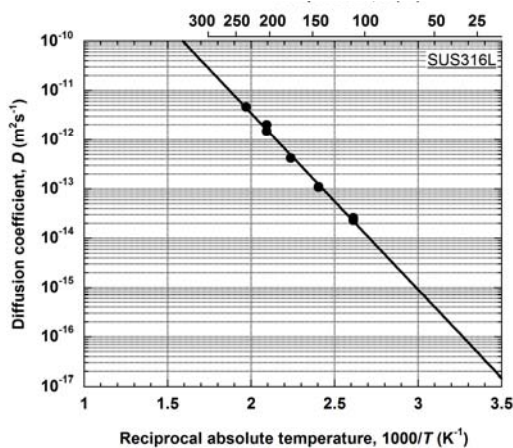


図 2.2.(2).7 水素拡散係数のアレニウスプロット

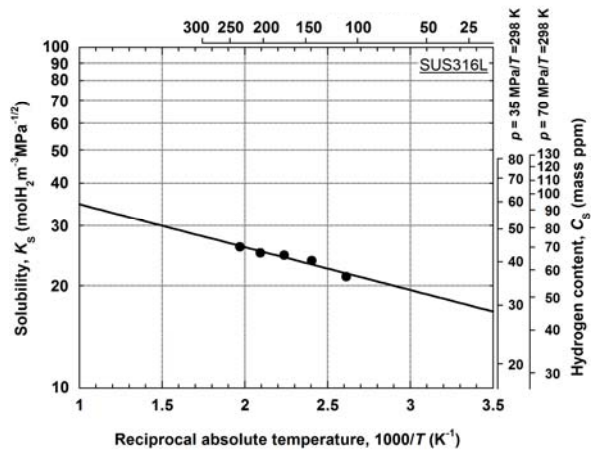


図 2.2.(2).8 水素固溶度のアレニウスプロット

図 2.2.(2).6 には、ステンレス鋼の拡散係数と固溶度を求める方法を SUS316L を例にして示している。直径 7mm で厚さが異なる円盤試料を暴露容器内に同一条件(78 MPa, 110°C, 100 h)で曝露し、試料中に水素を侵入させる。その後、試料を暴露容器から取り出し、試料中の侵入水素濃度を昇温脱離分析装置で測定する。図 2.2.(2).6 には、水素濃度 C_H と試料厚さの逆数 $1/h$ の関係が示されている。 C_H と $1/h$ の関係の傾斜部分から拡散係数が求まり、水平部分から固溶度が求まる。暴露温度を変えて同様な測定を行うと、図 2.2.(2).7 と図 2.2.(2).8 に示す拡散係数と固溶度のアレニウスプロットが得られる。

水素拡散係数と固溶度を用いると、試験片表面やき裂先端での水素濃度分布が計算できる。水素濃度分布は、引張破壊や疲労破壊における水素脆化メカニズムを検討するときに役立つ。材料の水素濃度分布を SIMS で実測することも可能になっている。また、EBSD による組織解析は、水素脆化メカニズムを明らかにする研究のみならず、蓄圧器などの事例解析においても有力な武器となっている(図 25 と図 27 参照)。

(3) 水素機器に使用される金属材料の強度評価

水素脆化の基本原理の解明で得た知識(研究実施項目(1)), 疲労き裂進展特性や水素拡散特性の評価法(研究実施項目(2))をもとに, 本研究実施項目では, 外部の関係機関と連携して水素構造材料データベースの作成している. さらに, 実証が終了した 35 MPa 水素ステーションの蓄圧器やパイプ, 試験で破裂前漏洩(LBB: Leak Before Break)した 35 MPa 車載水素容器, 高圧水素実験施設で水素漏洩した高圧配管用T型ジョイントや高圧センサーなどの調査・解析(事例解析)を行っている.

(3-1) 水素構造材料データベースの作成

水素構造材料データベースの具体例を使用材料拡大の一つとして検討されている SUS316(Ni>12%)について示すと, 115 MPa 水素ガス中での低速引張(SSRT)特性データベース(No.C35), 疲労寿命特性データベース(No.A36), 疲労き裂進展特性データベース(No.A37)の規制見直しや特認申請で必要となる三点セットの強度特性データベースに加え, 水素拡散特性データベース(No.B34)を作成している. 図 2.2.(3).1 は No.C35 データベースの表紙である. このデータベースに記述されている数値データを用いて作成した試験温度 -40°C , ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ のもとで求めた応力-ひずみ曲線を図 2.2.(3).2 に示す. -40°C は 70 MPa 水素ステーションでのプレクーラー温度である. 115 MPa は 70 MPa 水素ステーションの部品・部材の設計圧力 110 MPa を考慮した圧力である. 冷間加工率 $\text{CW} = 0\%$, 20% , 40% の材料の応力-ひずみ曲線が 115 MPa 水素ガス中と 115 MPa 窒素ガス中でほぼ等しいことから, SUS316(Ni>12%)の冷間加工材の使用拡大が検討されている.

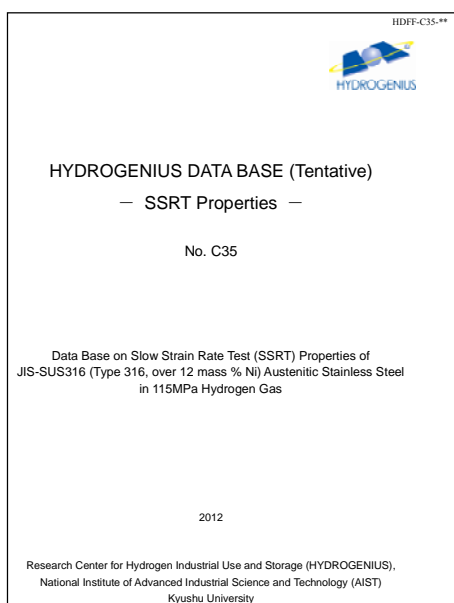


図 2.2.(3).1 水素構造材料データベース No.C 35 の表紙

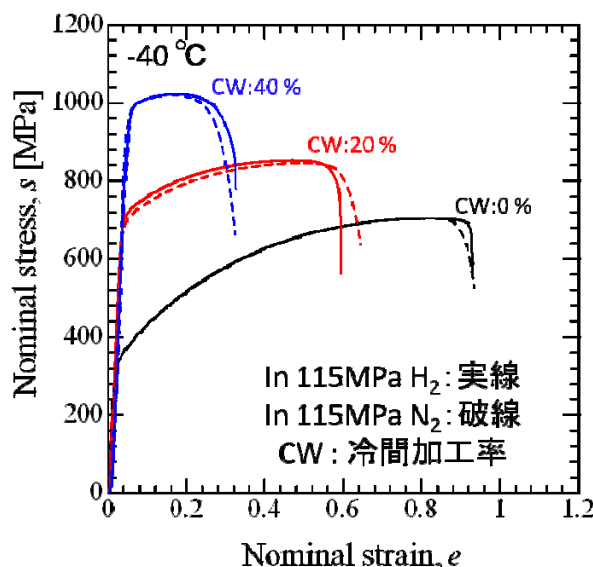


図 2.2.(3).2 -40°C , 115 MP 水素ガス中での SUS316 (Ni>12%) の低速引張特性造材料データベース No.B

2011年6月の提供開始から2012年9月までに、延べ320件以上の水素構造材料データベースが外部の関係機関に提供されている。KHKへの144件とJPECへの10件は規制見直しに使用されている。HySUTへの153件は水素ステーション設置のための特認取得に使用されている。また、水素構造材料データベースは国際標準化にも貢献している。米国SAEとの燃料電池自動車用高圧水素容器の標準化会議で自工会を支援するため、データベースを提供した。

(3-2) 35 MPa 水素ステーションの蓄圧器と圧力計の事例解析

表 2.2.(3).1 に示すように、HYDROGENIUS では、外部の委託を受けて多くの事例解析を行っている。ここでは、35 MPa 水素ステーションの蓄圧器と圧力計の事例解析を示す。

(3-2-1) 4つの蓄圧器の事例解析

表 2.2.(3).2 に、調査した4種類の蓄圧器を示す。その内訳はJHFCプロジェクトにおいて、試験運用が終了した3種類の35 MPa 水素ステーション蓄圧器(a, b, c)と民間企業で使用を中止した1種類の20 MPa 水素輸送用大型長尺蓄圧器(d)である。蓄圧器 a, b, c, d はすべて低合金鋼 SCM435 製である。4種類の蓄圧器は、円筒の両端を絞り加工したのちに、焼入れ・

表 2.2.(3).1 HYDROGENIUS での事例解析

項目	件数
蓄圧器	5
FCV 高圧水素容器	7
液体水素ローリーと容器	3
ステンレスパイプ	3
ステンレスフレキパイプ	3
35MPa 有明ステーション部品 ¹⁾	12
高圧水素実験施設水素漏洩 ²⁾	2

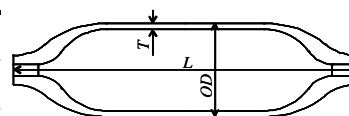
1): 蓄圧器, パイプ, 弁, 流量計, 充填カプラーなど

2): 圧力センタサー, 高圧配管T型ジョイント

表 2.2.(3).2 調査した4つの35 MPa 水素ステーション蓄圧器。

4つの蓄圧器は低合金鋼 SCM435 で製造

蓄圧器	設計圧力	寸法			ビッカース硬さ
	p^{*1}	L^{*1}	OD^{*1}	T^{*1}	HV
a	45	3800	357	25.5	256 (+11, -12), 12 points
b	44	7530	270	30	289 (+14, -27), 14 points
c	20	7080	355	21.5	275 (+18, -30), 19 points
d	20	5980	356	12	272 (+17, -12), 11 points



*1) p : 設計圧力, L : 長さ, OD : 外径, T : 肉厚

低合金鋼 SCM435 製である。4 種類の蓄圧器は、円筒の両端を絞り加工したのちに、焼入れ・焼戻しが施されている。

4 つの蓄圧器から試験片を切り出し、材質を調査するため、化学成分分析、組織観察、ビッカース硬さ試験、介在物検査を行っている。さらに、強度特性を調査するため、引張試験、シャルピー試験、疲労き裂進展試験を行っている。引張試験とシャルピー試験は、試験片を圧力 100MPa、温度 85 °C の高圧水素ガス中で曝露し、試験片に水素をチャージした後、室温大気中で行っている。疲労き裂進展試験は室温、90MPa 水素ガス中で行っている。

図 2.2.(3).3(a),(b),(c),(d) に材質調査で得られた EBSD 像を示す。これらの像は蓄圧器の肉厚中心の円周方向に垂直な面 (θ -direction) の観察結果であり、色分けされている結晶粒はブロックであると考えられる。結晶粒は蓄圧器 a で最も小さい。蓄圧器 c の結晶粒は、蓄圧器 a より大きい。蓄圧器 b と d より小さい。蓄圧器 b と d の結晶粒はほぼ同じ大きさであるが、蓄圧器 a に比べると、明らかに大きい。

図 2.2.(3).4(a),(b),(c),(d) に蓄圧器 a~d のシャルピー吸収エネルギー KV_2 と試験温度の関係を示す。材料、試験片採取方向および残存水素量に拘わらず、水素曝露材と未曝露材では上部柵吸収エネルギーとエネルギー遷移温度に多少の違いが認められるが、全データの傾向から判断してシャルピー衝撃特性に及ぼす水素の影響はほとんどない。水素の影響が認められないのは、シャルピー衝撃試験ではひずみ速度が速いため、き裂先端に拡散性水素が集中するのに十分な時間がないためと考えられる。一方、シャルピー衝撃特性と組織の間には明確な関係が存在している。図 2.2.(3).3(a),(b),(c),(d) に示したように、結晶粒は蓄圧器 a と c のほうが蓄圧器 b と d より小さい。これに対応し、蓄圧器 a の接線方向 (θ 方向) の上部柵吸収エネルギーは、蓄圧器 b または d に比べ、約 2 倍大きい。

図 2.2.(3).4(a),(b),(c),(d) 中に示す水素曝露材のシャルピー衝撃特性を平面ひずみ破壊靱性値 K_{IC} に換算し、それぞれの蓄圧器で破裂前漏洩 (LBB, :Leak Before Break) が成立するかどうかを評価した。その結果、LBB は蓄圧器 a では -50 ° C 以上で成立し、蓄圧器 c では

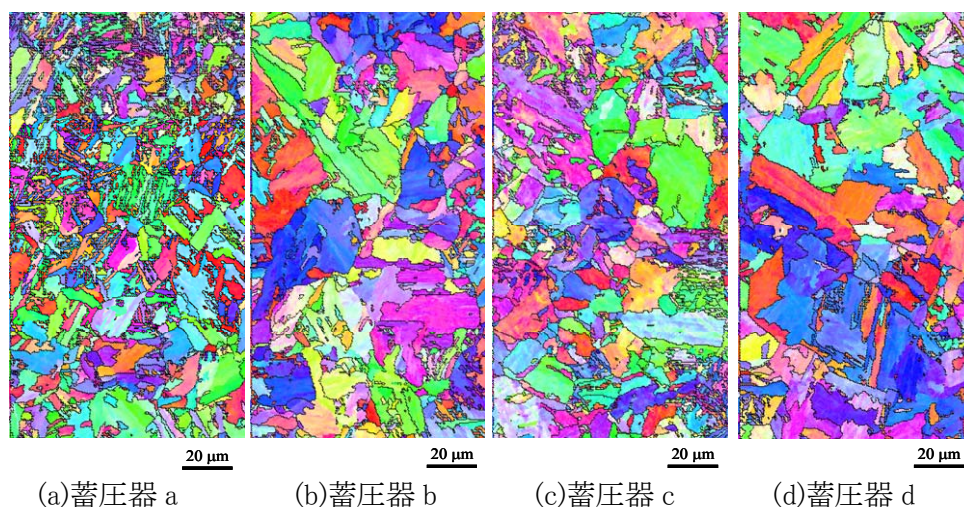


図 2.2.(3).3(a),(b),(c),(d) 35 MPa 水素ステーション蓄圧器の円周方向に垂直な断面で得られた EBSD 像

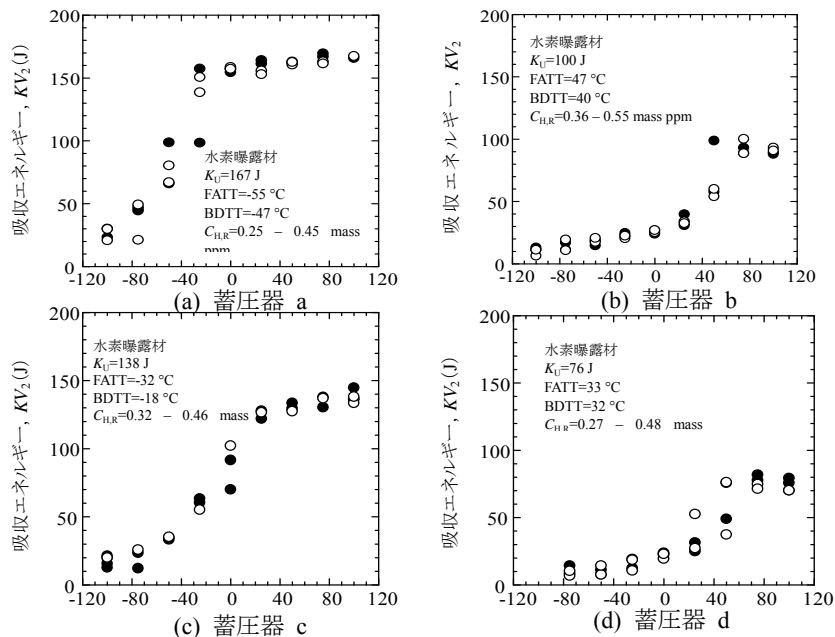


図 2.2.(3).4(a),(b),(c),(d) 35 MPa 水素ステーション蓄圧器でのシャルピー衝撃特性〔●:未曝露材 ($C_{H,R}=0 \text{ mass ppm}$), ○:水素曝露材, K_U 上部棚吸収エネルギー, FATT:破面遷移温度, BDTT:脆性延性遷移温度). 蓄圧器の円周方向とシャルピー衝撃試験片の長手方向を一致.

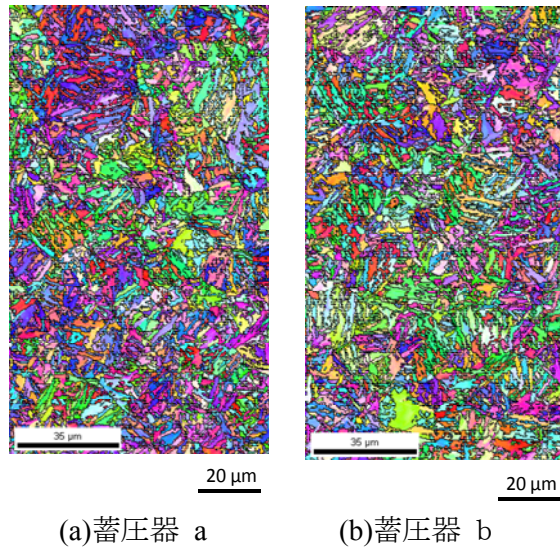


図 2.2.(3).5(a) (b) 蓄圧器 a と蓄圧器 b から採取した幅 14mm, 厚さ 14mm 長さ 100 mm の角柱を焼入れ・焼戻したときの EBSD 像

-75°C以上で成立するけれども, 蓄圧器 b と d では 25 ° C 以上でしか LBB は成立しないことがわかった. 蓄圧器 b と d で LBB が成立しにくい理由は, 蓄圧器の長さ, 外径, 内径が大きく, 肉厚が厚いため, 完全な焼入れ・焼戻しができなかったことによると考えられる. すなわち, 蓄

圧

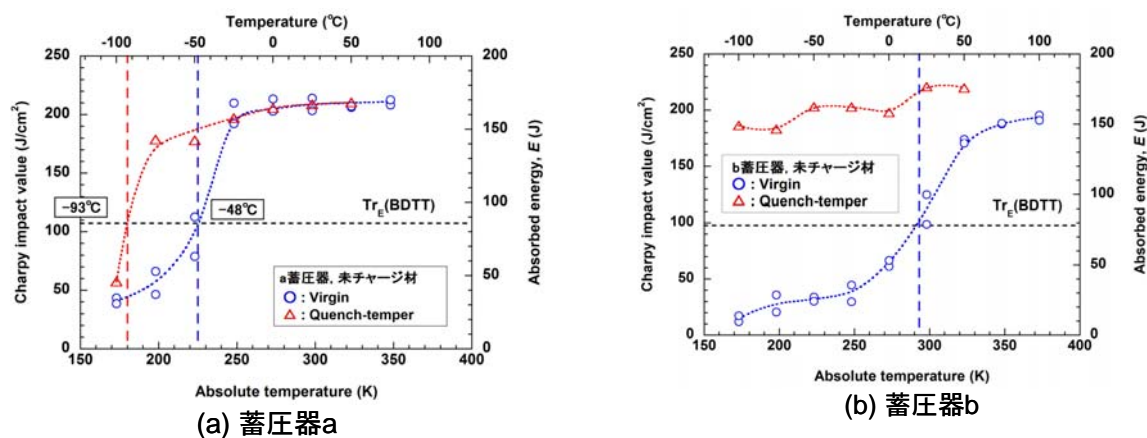


図 2.2.(3).6 蓄圧器 a と蓄圧器 b から採取した幅 14mm, 厚さ 14mm 長さ 100 mm の角柱を焼入れ・焼戻したときの EBSD 像

器 b と d では、焼入れ速度が遅くなり、不完全な焼入れ組織が形成されたと考えられる。従来は、不完全な焼入れ組織を評価することが困難であったが、本調査では EBSD で結晶粒(ブロック)の観察を行い、不完全焼入れ組織を評価することができた。

不完全焼入れ組織についての検討をさらに行うため、蓄圧器 a と b から幅 14mm, 厚さ 14mm 長さ 100 mm の角柱を切り出し、切り出した角柱に焼入れ(860 °C × 30 分 × 油冷), 焼戻し(650 °C × 90 分 × 水冷)の熱処理を施した。熱処理した角柱の EBSD 像を図 2.2.(3).5(a) (b), 未暴露材のシャルピー衝撃特性を図 2.2.(3).6 に示す。蓄圧器 a と b のどちらの場合にも、熱処理前の EBSD 像(図 2.2.(3).3(a),(b))に比べて熱処理後の EBSD 像(図 2.2.(3).5(a) (b))は著しく細かくなっている。この組織変化に対応して熱処理後のシャルピー衝撃特性は改善している(図 2.2.(3).6)。特に、蓄圧器 b の熱処理後のシャルピー衝撃特性の改善は著しい。これらの結果をもとに、寸法が大きい蓄圧器の安全性確保、さらなる高性能化のためには、焼入れ過程の管理と改善は必要であることを水素インフラ関係者に提言した。

上述のように、本調査の結果は、長期間安全に使用できる蓄圧器の製造・設計の指針となるであろう。この点をさらに確実にするためには、次のことが必要である。破壊靱性 K_{IC} を水素チャージ試験片の吸収エネルギーまたは遷移温度を用いて求めている。水素チャージ試験片の吸収エネルギーと遷移温度は、未チャージ試験片のシャルピー衝撃特性、すなわち吸収エネルギーと遷移温度とほとんど同じである(図 2.2.(3).4(a),(b),(c),(d))。この理由は、シャルピー衝撃試験では試験速度が速いため、切欠き底あるいはき裂先端に拡散性水素が十分に集中できないことによると考えられる。破壊靱性に及ぼす水素の影響を調べ、さらに合理的で安全な破裂前漏洩(LBB)評価を行うためには、試験速度が遅い破壊靱性試験(例えば、 J_{IC} 試験)を行うことが必要である。

(3-2-2) 35 MPa 有明水素ステーションの圧力計の事例解析

圧力計は水素利用機器の安全を確保する上で最も重要な機器の一つであり、有明水素ステーションで使用されていた圧力計の調査・解析を行った。調査したブルドン管式圧力計を図2.2.(3).7に示す。最大目盛りは50MPaである。圧力計は、ブルドン管と圧力計を配管等に取り付けるための支持部である株を溶接で接続した構造である。また、ブルドン管は加工硬化材が用いられており、圧力計には水素の影響が心配されるいくつかの因子が含まれているため、健全性調査はきわめて重要である。

図2.2.(3).8にブルドン管の内面と断面を示す。ブルドン管の内面にはひび割れのような微小欠陥が無数にあり、断面では微小欠陥はき裂状の形状を呈する。このような微小欠陥を除去すると、図2.2.(3).9に示す水素チャージを施したパイプの内圧疲労試験結果のように、材料の疲労強度が著しく向上するばかりでなく、水素による疲労寿命の低下を軽減することが可能であり、長期信頼性向上のための今後の開発指針を示した。

材料の化学成分は、ブルドン管はJIS SUS316 鋼の範囲内、株の部分はJIS SCS14 鋼の規格値をほぼ満足した。ブルドン管の硬さは $HV274 \pm 20.7$ であり、加工硬化した材料である。株の硬さはHB119であり、JIS規格を満足している。溶接部分の硬さはHV188～192であり、株とブルドン管の中間の硬さであった。各部の金属組織に水素による変化は認められなかった。ブルドン管、溶接部、株の各所を顕微鏡等で観察したが、き裂などの損傷は発見されなかった。総合的に判断して、本圧力計に劣化は認められなかった。

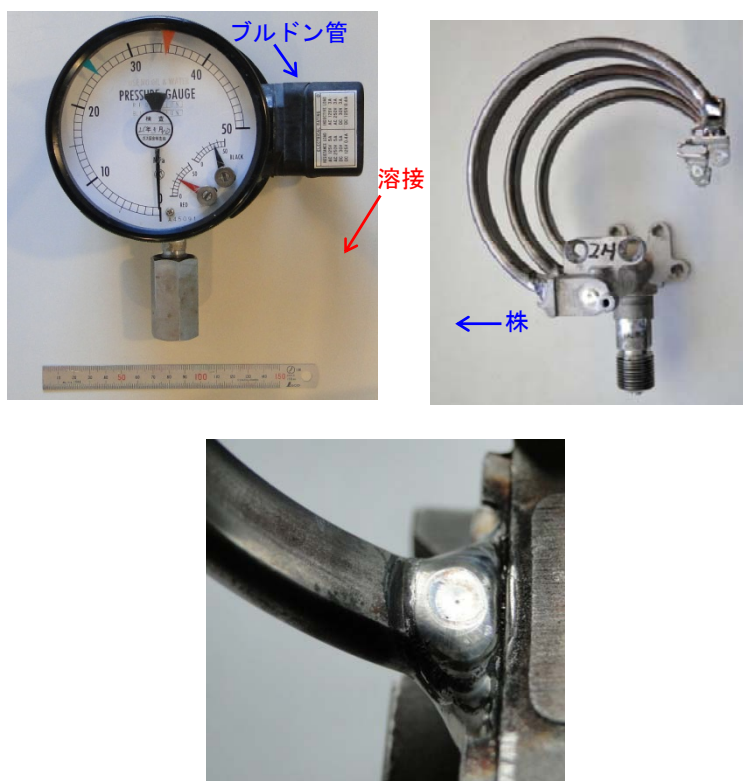


図 2.2.(3).7 有明ステーション圧力計の外観、ブルドン管および溶接部

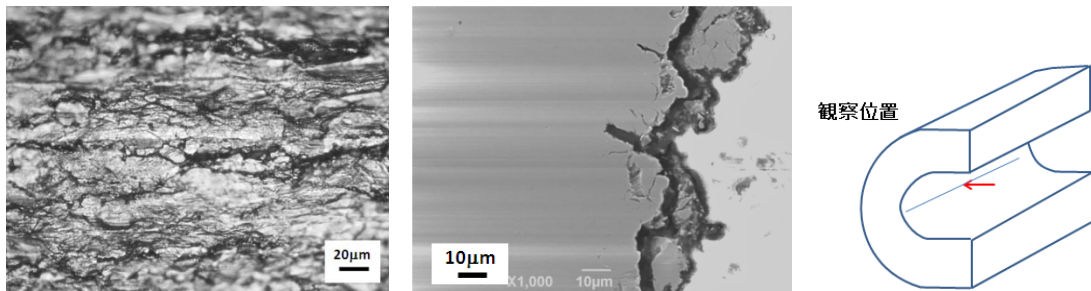
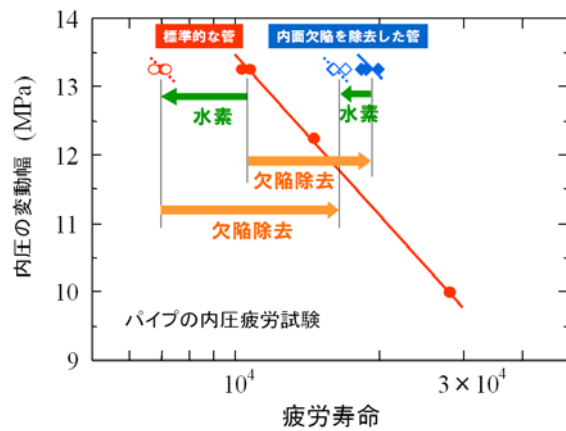


図 2.2.(3).8 ブルドン管の内面と軸直角方向の切断面



	未チャージ材 破損平均回数	水素チャージ材 破損平均回数	疲労寿命 変化率
微小欠陥あり	9374	6998	-25%
微小欠陥除去	19030	16351	-14%
疲労寿命の 変化率	約2倍	約2.3倍	

図 2.2.(3).9 パイプの内圧疲労試験結果(内面微小欠陥と水素の影響)

(4) 水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価

(4-1) 微小欠陥材の高サイクル疲労き裂進展設計法構築のデータ取得

水素利用機器の主要材料である低合金鋼，炭素鋼ならびにオーステナイト系ステンレス鋼について，水素の影響下の微小欠陥材の強度設計法構築の基礎となる疲労き裂進展特性データの取得を行った。

図 2.2.(4).1 に結果の一例を示すように，微小き裂の疲労き裂進展下限界近傍では，水素チャージによるき裂進展速度の加速と，進展下限界値(ΔK_{th})の低下が生じる。各種材料の ΔK_{th} に及ぼす水素の影響を図 2.2.(4).2 に示す。 ΔK_{th} の低下は，ビッカース硬さが約 280 を境にして，より硬い材料では水素の影響が現れる。ビッカース硬さが 280 未満の材料を使用すれば，水素による微小欠陥材の疲労強度低下を心配する必要がない。

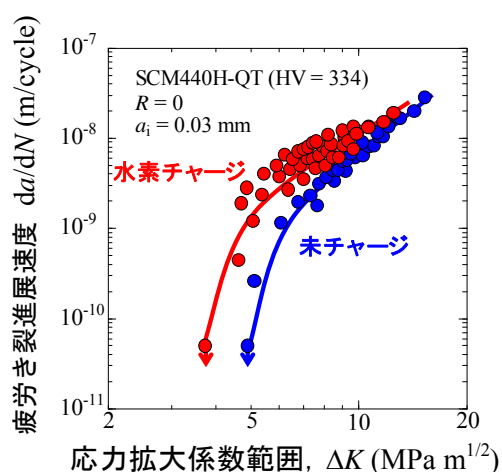


図 2.2.(4).1
微小予き裂材の疲労き裂進展試験

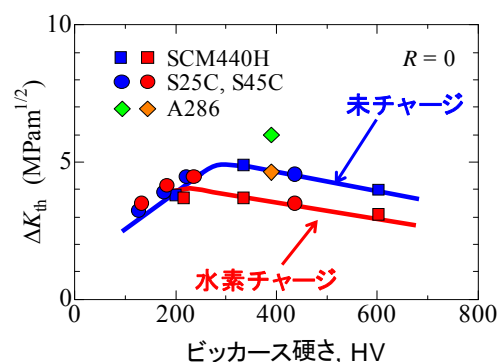


図 2.2.(4).2
各種材料の ΔK_{th} に及ぼす水素の影響

(4-2) 溶接部の疲労強度データ取得

溶接は機械部品製造に多用される接合法であり，水素利用機器への適用では他の形式の継手に比べて大幅なコストダウンが可能である。しかし，止端部の切欠きや，未溶着等の欠陥を含むことも多く，これらのき裂性欠陥は水素ガス中でのき裂進展を加速させ，損傷が発生する可能性がある。このため，水素環境中での溶接部の疲労試験を行い，疲労設計法の策定を行った。

① 溶接部の疲労強度に及ぼす水素および溶接欠陥の影響

溶接による金属組織の変化，余盛りによる応力集中，入熱などの溶接そのものに対する水素の影響を明らかにする。図 2.2.(4).3 に試験片形状の例を示す。供試材は SUS304，SUS316L 鋼の溶体化処理材，SM400A 鋼である。溶接は TIG 溶接を用い，溶接電流 60A，溶接パス数 1 回で施工した。溶接後にステンレス鋼には高圧水素ガス曝露 (75MPa，105°C，100h) で，SM400A 鋼にはカソードチャージで水素チャージを行い，0.6MPa 水素ガス中で疲労

試験を実施した。応力比は $R = -1$ 、周波数は 0.2, 20Hz とした。SM400A の一部には、図 2.2.(4).4 に示すように、意図して溶接欠陥(融合不良)を導入した。

疲労き裂の起点は、水素チャージ材、未チャージ材のいずれでもビード止端、ないし欠陥を導入した試験片では溶接欠陥、ビードを除去した試験片では溶接金属部であった。S-N 線図を図 2.2.(4).5、図 2.2.(4).6 に示す。溶接継手の疲労強度は平滑材に比べて約 50%かそれ以下に低下したが、溶接ビードや溶接欠陥の有無にかかわらず、周波数 20Hz のときには水素による疲労強度低下は認められない。

溶接欠陥を含む試験片については疲労寿命のばらつきが大きいので、欠陥寸法から計算した応力拡大係数により疲労寿命を整理した。周波数の影響と合わせて図 2.2.(4).7 に示す。周波数が遅い場合には欠陥材の寿命は水素の影響により約半分程度になり、これは欠陥から直ちにき裂が伸びるため寿命のほとんどがき裂進展に費やされ、また水素によりき裂進展が加速されることが原因と考えられる。以上より、溶接欠陥を含む場合には水素の影響が顕著になる場合があり、施工管理上のポイントである。溶接欠陥の初期応力拡大係数と疲労寿命は直線関係にあり、溶接欠陥材が水素の影響を受ける場合も疲労寿命評価を破壊力学的に有効に行えることを示した。

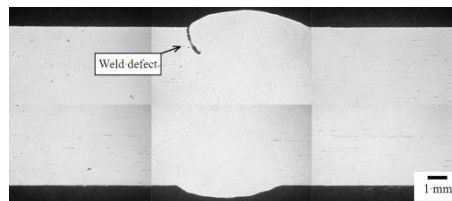
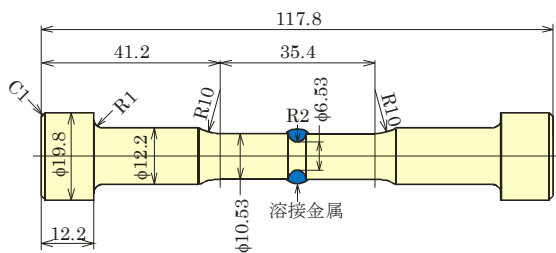


図 2.2.(4).3 溶接疲労試験片の形状・寸法

図 2.2.(4).4 SMA400A 鋼の人工溶接欠陥

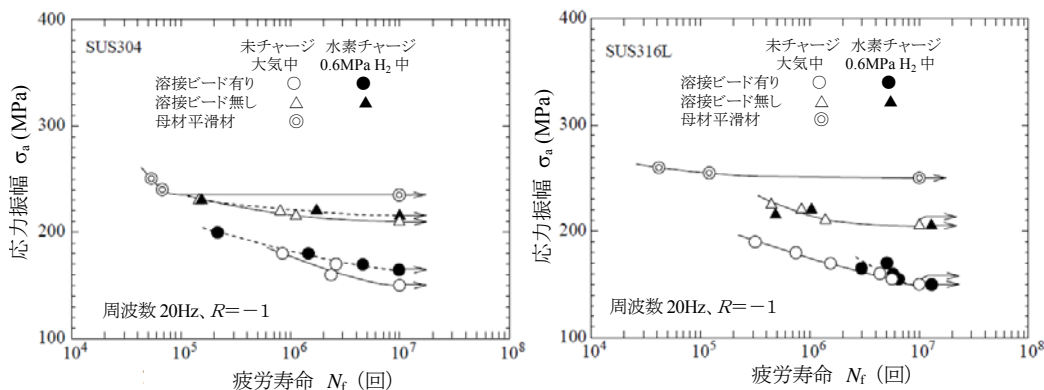


図 2.2.(4).5 SUS304, SUS316L 鋼の溶接継手の疲労強度に及ぼす水素の影響

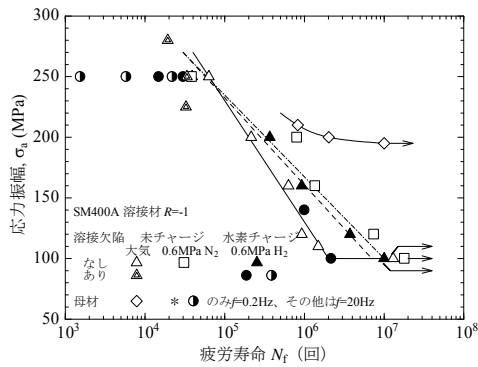


図 2.2.(4).6 SM400A 鋼溶接継手の疲労強度に及ぼす水素の影響

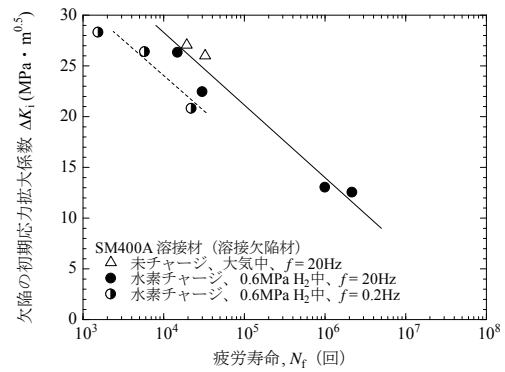


図 2.2.(4).7 初期欠陥寸法を考慮した疲労寿命評価(周波数の影響)

② 高圧水素ガス配管継手を想定した疲労強度に及ぼす水素の影響

低圧水素ガス配管においては溶接継手の使用は一般的であるが、高圧水素ガス配管では疲労強度に対する水素の影響が懸念される。そこで、100MPa 水素ガス用の配管の溶接継手を想定した突き合わせ溶接試験片を作製し、適用性の検討、施工管理の指針作成のためのデータ取得を行った。

図 2.2.(4).8 に試験片形状を示す。供試材は SUS304, SUS316L 鋼の溶体化処理材である。溶接は TIG 溶接を用い、溶接パス数 2 回で施工した。溶接電流は 1 パス目 40A, 2 パス目 50A とした。図 2.2.(4).9(a),(b),(c) に示すように、パイプ内面に裏波が確保されつつ、かつ閉塞がない状態の溶接を行った。また、意図的に溶接欠陥(不完全溶込み)を導入する条件を 2 つ用いた。溶接後に高圧水素ガス曝露 (75MPa, 105°C, 100h) による水素チャージを行い、0.6MPa 水素ガス中で疲労試験を実施した。応力比は $R = -1$ 、周波数は 20Hz とした。

図 2.2.(4).10 に S-N 線図を示す。突合わせ溶接継手の疲労強度は平滑材に比べて 40~50%低下した。しかし、水素による溶接部の疲労強度低下は認められなかった。図 2.2.(4).11 に示すように、疲労き裂の起点は裏波止端であり、施工条件管理のポイントである。意図的に作製した未溶着を有する試験片においては、疲労強度は平滑材に比べて約 80%低下した。しかし、水素によるさらなる疲労強度の低下はみられず、欠陥ができないようにする施工管理は重要であるが、配管付き合わせ溶接を水素環境で使用できる可能性が充分にある。図 2.2.(4).12 に溶接欠陥を含む試験片の疲労き裂起点を示す。

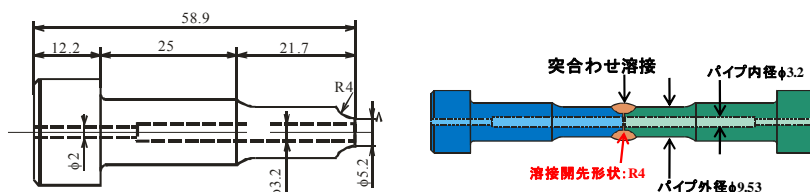
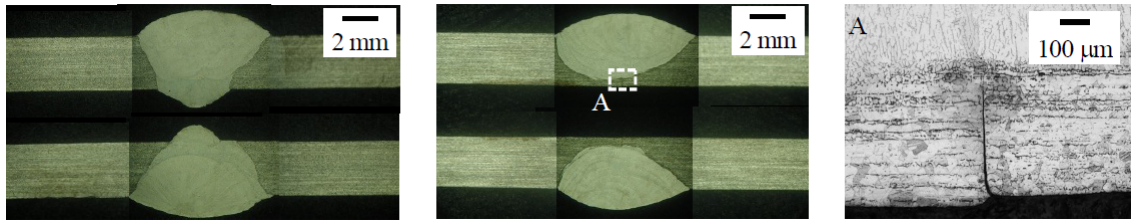


図 2.2.(4).8 高圧水素ガス配管突合わせ溶接試験片



(a) 完全溶け込み (b) 微小欠陥材(不完全溶込み) (c) 微小欠陥の拡大
 図 2.2.(4).9(a),(b),(c) 配管突合わせ溶接の溶込み状態と人工微小欠陥

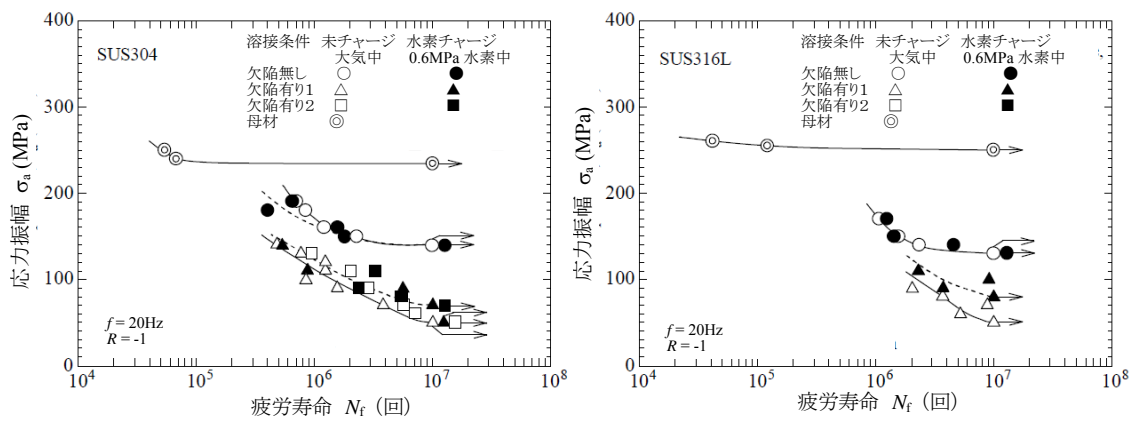


図 2.2.(4).10 高圧水素ガス配管突合わせ溶接継ぎ手の疲労強度と水素の影響



図 2.2.(4).11 欠陥のない溶接試験片の疲労き裂起点

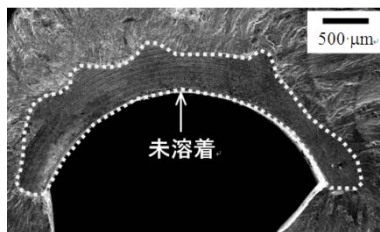


図 2.2.(4).12 意図的に溶接欠陥を導入した試験片の疲労き裂起点

(4-3) 部品接触部の疲労強度(フレットング疲労強度)に及ぼす水素の影響評価

締結部やバルブのシート面等の接触部で相対すべりが生じる部位ではフレットング疲労が問題となり、ここでは水素の影響下における接触部の疲労設計法を策定する。

図 2.2.(4).13 にフレットング疲労試験装置を示す。接触面圧は 100MPa とした。供試材は SUS304 の 40%予ひずみ材である。高圧水素ガス曝露(75MPa, 105°C)によって水素チャージを行い、チャージ時間を 100, 300, 500 時間と変化させた。疲労試験の水素ガス圧力は 0.12MPa とした。

図 2.2.(4).14 にフレットング疲労試験結果を示す。フレットング疲労強度は水素ガスにより低下し、さらに水素チャージ時間の増加とともに顕著に減少する。しかし、その低下には下限

が存在する。

図 2.2.(4).15 に水素ガス中フレッティング疲労試験の接触面の軸方向断面を示す。試験片と接触片の間には凝着を生じており、凝着部からは表面に対して斜めに多数の微小き裂が発生する。すなわち、凝着は接触面間の摩擦係数の増加(図 2.2.(4).16)と、微小き裂の発生をもたらす。これらが水素ガス中におけるフレッティング疲労強度の低下の原因であると考えられる。

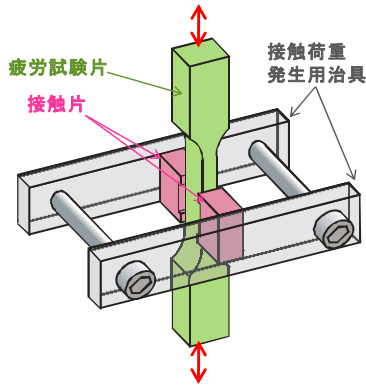


図 2.2.(4).13 フレッティング疲労試験装置

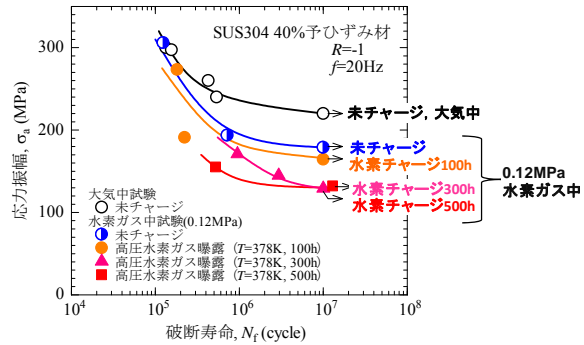


図 2.2.(4).14 フレッティング疲労強度に及ぼす水素の影響

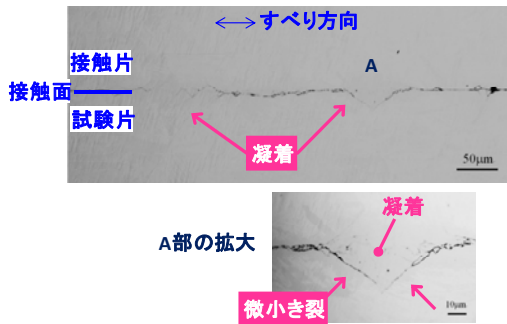


図 2.2.(4).15 水素ガス中で生じた凝着と微小き裂

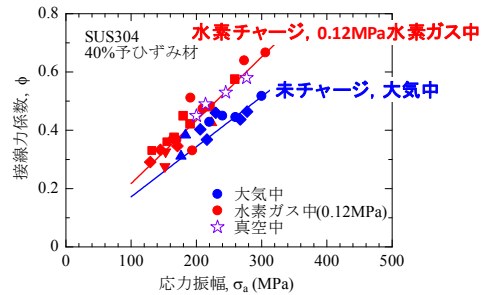


図 2.2.(4).16 水素ガス中の摩擦係数の増加

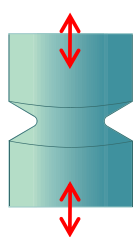
(4-4) 地震負荷後の健全性評価法の策定

水素環境下で使用される機器が地震等により大きなひずみの繰返しを受けた場合、特に切欠き部で微小なき裂が発生し、その後の疲労強度が激減する可能性が高い。そこで、地震を模擬した大振幅のひずみ負荷後の高サイクル疲労強度に対する健全性評価法について検討を行った。

図 2.2.(4).17 に示す切欠き試験片に、図 2.2.(4).18 に示す地震を模擬した大振幅のひずみ負荷を与えた上で、高サイクル疲労試験を引き続き実施した。高サイクル疲労強度は図 2.2.(4).19 に示すように、地震荷重を受けない場合に比べて格段に低下する。強度低下は水素環境中のほうがより顕著に生じる。強度低下の原因は地震荷重を受けることによって切欠き

底に微小なき裂が発生するためであるが、図 2.2.(4).20 に示すように水素ガス中のほうが大きななき裂が生成するために、水素中ではより顕著に低下が生じる。

地震後の残存疲労強度は、地震荷重の大きさ、回数、切欠きの鋭さに依存して変化する。それらの任意の条件に対して、高サイクル疲労強度の低下を予測する方法を開発した。図 2.2.(4).21 に任意の地震荷重の大きさ、繰返し数、切欠きの鋭さに対して切欠き底に発生する微小なき裂の大きさの予測を示す。予測は実験と良く一致した。図 2.2.(4).22 に微小なき裂の進展下限界・ K_{th} と微小なき裂長さの関係を示す。図 2.2.(4).21 で予測したき裂長さに対応する・ K_{th} を読み取り、地震後の疲労強度を予測する。図 2.2.(4).23 に予測の検証のために、予測と実験結果を比較して示す。予測した地震後疲労限度は、実験と±10%以内で一致し、第一段階の設計には十分に使用可能である。



部品切欠き部
切欠き先端半径
 $\rho = 0.2, 0.5, 1.0\text{mm}$

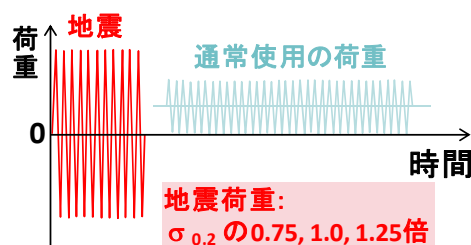


図 2.2.(4).17 切欠き試験片

図 2.2.(4).18 地震後の健全性評価用試験応力波形

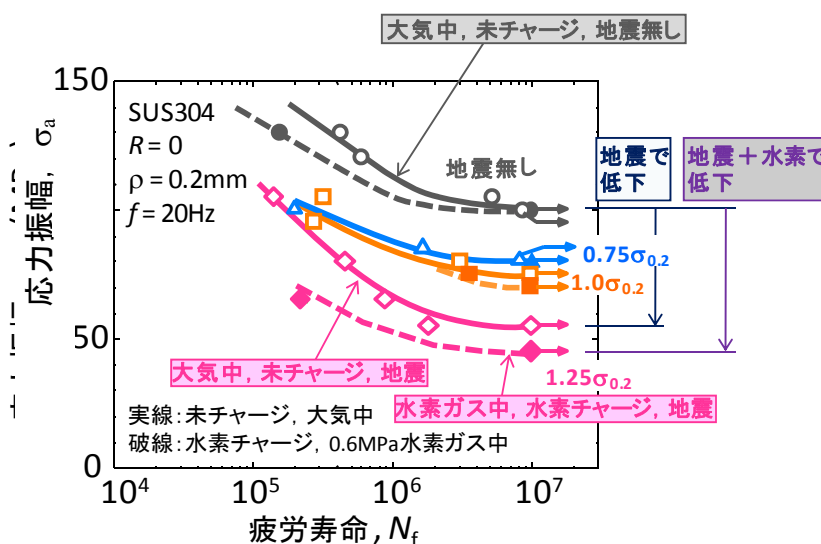


図 2.2.(4).19 地震荷重負荷後の高サイクル疲労強度に及ぼす地震応力と水素の影響

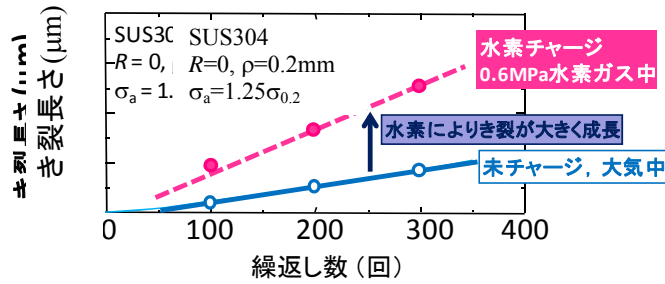


図 2.2.(4).20 地震応力によって生成する微小き裂の寸法に及ぼす水素の影響

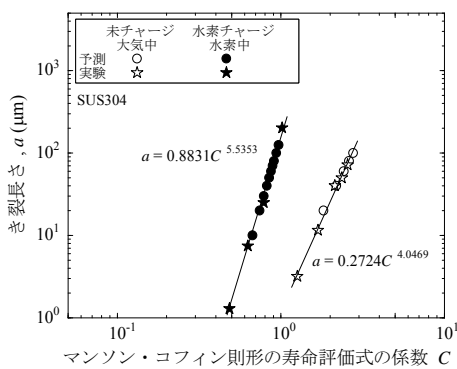


図 2.2.(4).21 任意の地震荷重条件, 切欠きの鋭さに対するき裂長さの予測

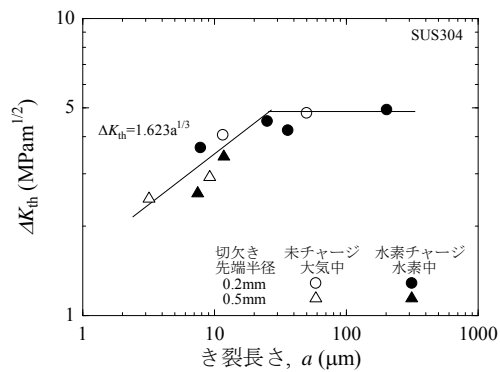


図 2.2.(4).22 微小き裂の ΔK_{th} と き裂長さの関係

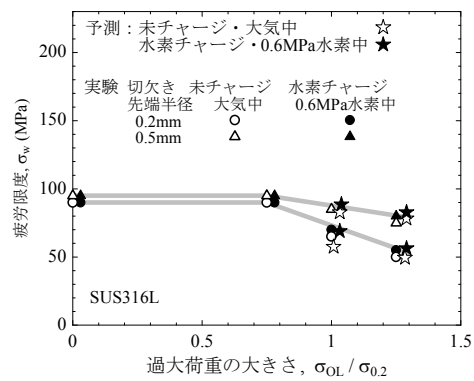
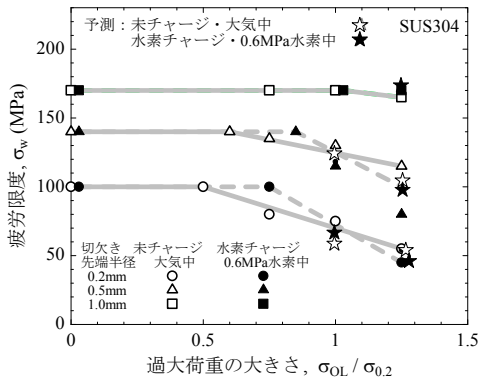


図 2.2.(4).23 任意の地震荷重(大きさ・回数), 切欠きの鋭さに対する地震後の残存疲労強度の予測法の開発と実験との比較

(4-5) 長周期変動応力下の疲労き裂進展に及ぼす水素の影響把握

部材が長周期変動応力を受ける場合, 水素に対する感受性の高い材料では材料固有の応力拡大係数の限界値を超えると急激なき裂進展の加速が生じる事象が発生する. 低合金鋼 SCM440H を対象にして各温度での焼戻し材について材料データの取得を行い,

急激なき裂進展の加速が生じるかどうかの判定基準を策定した。

図 2.2.(4).24 に示すように低周波数でゆっくり変動する応力の場合に、疲労き裂進展速度が水素によって顕著に加速される事象に対して、図 2.2.(4).25 に示すように連続して試験片に水素チャージが行える装置を用いて、各種の硬さの材料についてき裂進展試験を行った。結果を図 2.2.(4).26 に示すように、JISの推奨焼戻し温度範囲内の材料でも水素によるき裂進展の加速が現れた。顕著なき裂進展の加速は応力比と応力拡大係数 K によって現れる条件範囲があり、焼戻し温度をパラメータに水素による急激な加速に対する判定図を作成した。材料製造に関しては、図 2.2.(4).27 に示すように、ビッカース硬さを 280 未満程度にしておけば、顕著なき裂進展の加速を避けることができる。

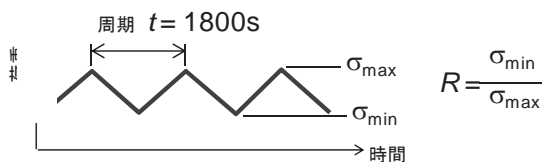


図 2.2.(4).24 長周期変動応力波形

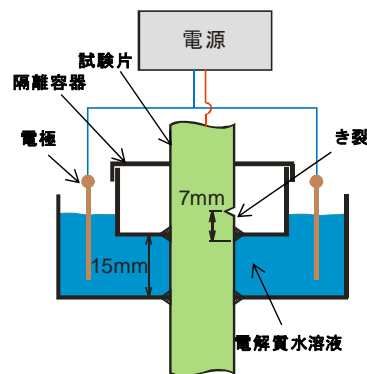


図 2.2.(4).25 連続水素チャージ試験装置

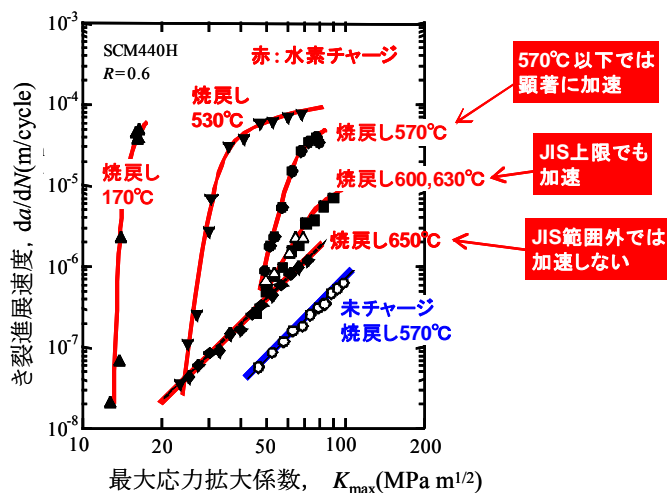


図 2.2.(4).26 各種焼戻し温度の SCM440H 材のき裂進展の加速

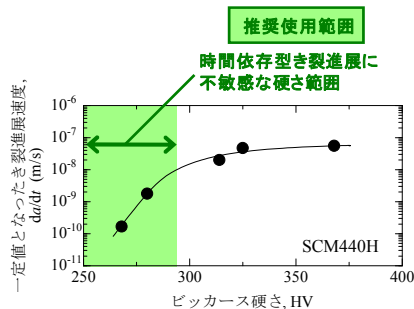


図 2.2.(4).27 き裂進展の加速と材料硬さの関係

(5) 材料中の侵入水素の存在状態解析(上智大学)

第一に、安定オーステナイトステンレス鋼の SUS316L と準安定オーステナイトステンレス鋼の SUS304 へ侵入した水素の存在状態解明を目的とした。その結果、昇温脱離法によって得られる 230 °C のピーク水素は主にオーステナイト相、一方、130 °C のピーク水素は主にマルテンサイト相に存在していた水素あるいはマルテンサイト相を拡散のパスとして放出された水素であることを明らかにした。

第二に、SUS316L および SUS304 の弾性・塑性変形過程において放出される水素を検出可能な装置を開発し、転位と水素の相互作用解明を目的とした。図 2.2.(5).1(a),(b) に水素添加した SUS316L と SUS304 の引張変形過程(ひずみ速度: $4.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) における水素放出スペクトル-時間曲線と公称応力-時間曲線を示す。両鋼とも弾性領域では水素の放出は認められないが、塑性変形が開始すると水素が放出される。これは転位による水素の輸送現象に対応し、転位によって水素が dragging されることがわかった。また、両鋼ともにひずみ速度を低下させるほど多くの水素が放出される。これは、低ひずみ速度ほど、平均転位移動速度が水素の拡散速度に近づき、転位による水素輸送量が増加したためである。すなわち、従来、fcc 結晶構造中の転位と水素の結合エネルギーが bcc 結晶構造に比べ小さいため、fcc 結晶構造中で転位と水素の相互作用が生じるか議論が分かれていたが、本研究によって、fcc 結晶構造においても、転位と水素の相互作用が十分起こることが実験により実証された。

さらに、両鋼の変形過程における水素放出挙動の差異、すなわち、転位による水素の輸送現象の差異について、TEM を用いて微視的な組織変化と対応づけながら検討した。SUS316L の変形過程では水素放出が急増した後、減少する。この水素放出量が減少する理由は、① 転位のセル構造形成に伴い試料表面に到達する転位量の減少、② ひずみ量の増加とともに平均転位移動速度の減少である。一方、SUS304 の変形過程ではひずみ量増加に伴い徐々に水素放出量が増加し続ける。この連続的な増加の理由は、① 転位がセル構造を作らずプラナー転位構造、② 水素拡散係数の大きなマルテンサイト相への相変態による水素拡散のパス形成に起因することを見出した。

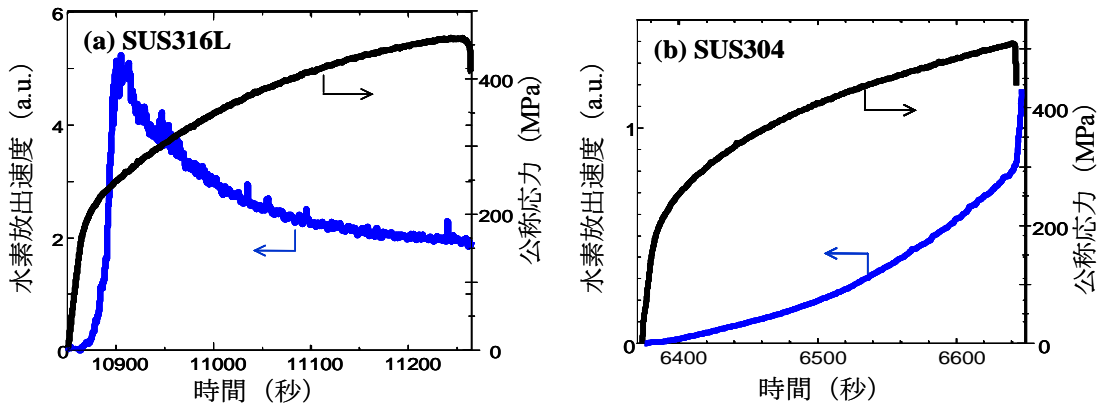


図 2.2.(5).1(a),(b) 水素添加した(a)SUS316L および(b)SUS304 の変形過程における水素放出挙動

(6) 材料中の結晶粒内・粒界におけるすべり変形に及ぼす水素の影響調査 (NIMS)

本研究実施項目では、チタン(Ti)、バナジウム(V)、ニオブ(Nb)の炭化物形成元素の添加とフェライト結晶粒の微細化を組み合わせ、水素による疲労き裂進展の加速を大幅に抑制できる炭素鋼の創製に成功した。炭素(C)量 0.05 mass% C-0.3Si-1.5Mn の低炭素鋼を母材とし 0.25 mass%の Ti, 0.27 mass%の V, 0.45 mass%の Nb の炭化物形成元素をそれぞれ添加した 3 種類の炭素鋼を製造した。なお、それぞれの添加量は、数値上では 0.05 mass% C に対して、TiC, VC, NbC の化学量論になっている。これらの炭素鋼に対してフェライト結晶粒を微細化するため、直径 80 mm の丸棒を 1443 K で 1 h 保持した後、833 K で減面率 95 %の溝ロール圧延を施し、水冷した。図 2.2.(6).1(a)はフェライト結晶粒径が 1 μm 以下であり、図 2.2.(6).1(b)は TiC, VC もしくは NbC が形成することを示す。なお、比較材として、中炭素鋼 S45C を準備した。S45C には 1118 K-0.5 h 保持後水冷の焼入れと、823 K-1 h の焼もどしを施した。

開発鋼の疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を解析すると、水素チャージ試験片におけるき裂進展速度の加速が抑制され、水素チャージ試験片と未チャージ試験片の疲労き裂進展速度はほぼ一致した(図 2.2.(6).2(a))。さらに、水素チャージ材と未チャージ材の疲労き裂進展速度比 $(da/dN)_H / (da/dN)$ と繰返し速度 f の関係を解析すると、比較材の S45C では、 $f = 0.2\text{Hz}$ において $(da/dN)_H / (da/dN) \approx 25$ となった(図 2.2.(6).2(b))。一方、炭化物形成元素を添加した細粒鋼では、 $f = 0.2\text{Hz}$ において $(da/dN)_H / (da/dN)$ は 2 以下となった(図 2.2.(6).2(b))。したがって、炭化物形成元素の添加とフェライト結晶粒の微細化により、水素によって誘起される疲労き裂進展の加速が大きく抑制される炭素鋼の創製が可能であると結論づけた。

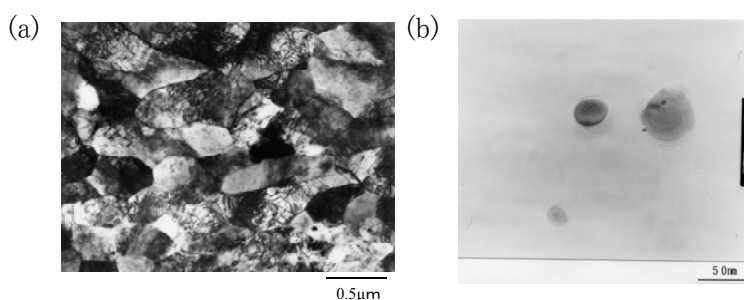


図 2.2.(6).1(a),(b) 微細粒鋼の TEM 像(a)と析出バナジウム炭化物 VC の TEM 像(b)

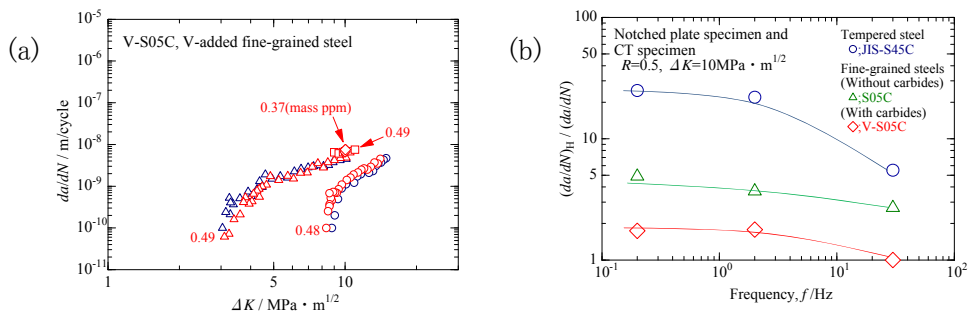


図 2.2.(6).2(a),(b)水素チャージした微細鋼のき裂進展特性(a)と相対き裂進展速度と試験周波数の関係(b)

(7) 材料中の疲労き裂先端の水素状態の調査(福岡大学)

金属材料中への水素侵入による疲労強度低下の機構の解明を困難にする原因の一つとして、疲労過程における水素の挙動に不明な点が多いことが挙げられる。本研究開発では、水素マイクロプリント法(Hydrogen Microprint Technique, 以下 HMT と略す)を用いて材料中の拡散性水素を可視化する方法を確立し、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および SUS316L について疲労き裂先端近傍における拡散性水素の挙動を調査した。図 2.2.(7).1(a),(b),(c),(d)に、結果の一例として、両材中の疲労き裂近傍における HMT 観察結果を、同じ領域の腐食組織写真と共に示す。HMT 観察結果において、白い粒子が水素放出位置を示す銀粒子である。き裂先端近傍における水素放出量はマルテンサイト変態量により異なるものの、水素は主にすべり線を通して移動・放出されていた。この結果から、き裂先端近傍における微視的な水素拡散挙動を理解するためには、マルテンサイト変態相により水素の移動速度が速まる「ハイウェイ効果」に加えて、すべり線に沿った水素移動も重要であることが明らかとなった。

HMT は、簡便かつ安価に材料中の拡散性水素の可視化を可能にするので、種々の金属材料の水素による強度特性低下の機構を解明していく上で有用な手段となる。本研究実施項目で確立した方法を応用して、水素パイプライン配管への使用が想定されているダクタイル鋳鉄についても研究開発を実施した。微視組織中における拡散性水素の分布を明らかにすることにより、延性低下における水素の役割を破壊機構とともに解明した。

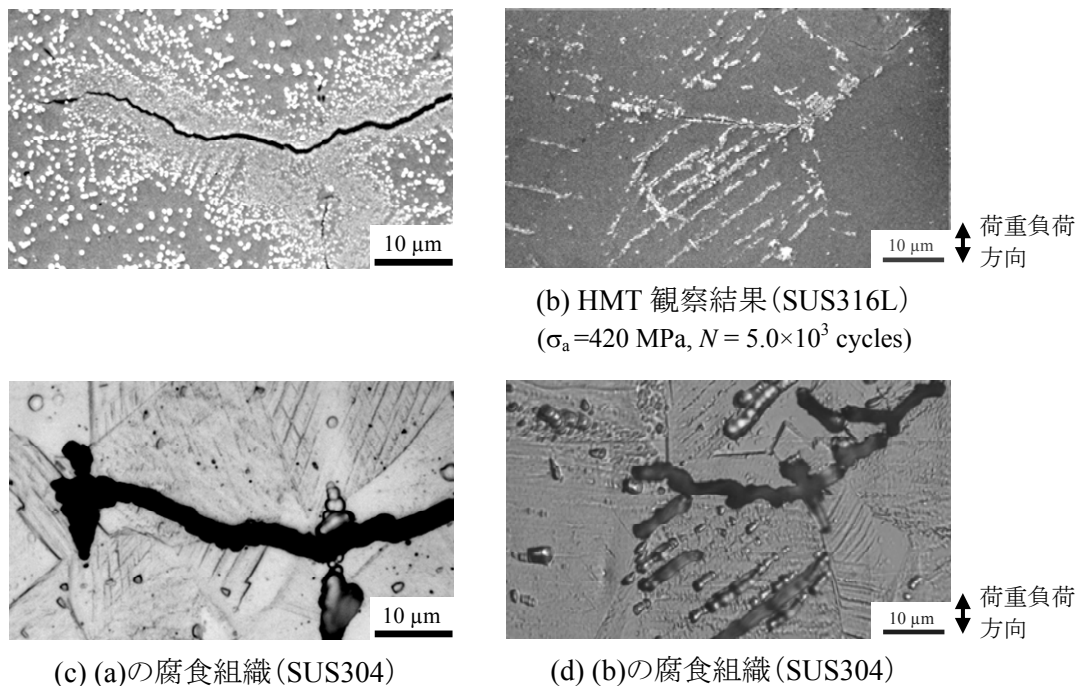
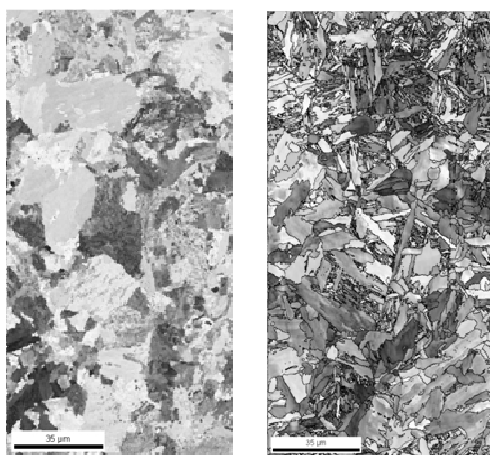


図 2.2.(7).1(a),(b)(c),(d) 水素チャージを施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および SUS316L 中の疲労き裂先端近傍における HMT 観察結果および腐食組織写真

(8) 水素ステーションに使用された金属材料の健全性及び強度評価(NIMS)

本研究実施項目では、平成21年度に解体された有明水素ステーションの蓄圧器についてクラックの有無や組織の調査による材料の健全性評価と各種材料試験による強度評価を行った。調査の際には、既に調査が終了している霞が関水素ステーションの蓄圧器との比較も系統的に実施した。また、材料試験において水素の影響を評価する際には水素チャージ法を用い、昇温離脱分析装置により試験片の水素量を測定した。

調査の結果、クラック等は認められず、健全な材料であることが確認された。ただし、有明材の組織は図2.2.(8).1(a),(b)のように霞が関材よりも粗く、衝撃特性も図2.2.(8).2のように有明材のほうが劣っていた。疲労特性に関しては、霞が関材では図2.2.(8).3のように水素チャージすると内部破壊が生じる傾向があったが、有明材では内部破壊が生じる頻度は少なくなった。これは、有明材の清浄度が高いためである。疲労き裂伝ば特性に関しては両材で大きな違いが見られなかったが、図2.2.(8).4のように水素の影響でき裂伝ば速度が加速する傾向が観察された。この場合、水素チャージによる結果と高圧水素ガス中での結果は異なる挙動を示したが、水素チャージの場合でも周波数を変えて実験することにより高圧水素ガス中での特性を予測できることが分かった。



(a) 有明 (b) 霞が関
図 2.2.(8).1(a),(b) 組織

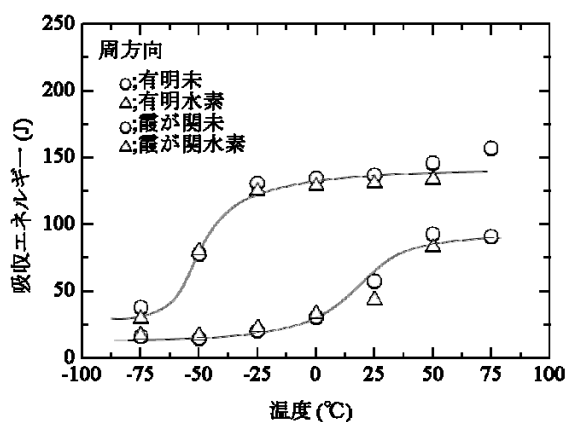


図 2.2.(8).2 衝撃特性

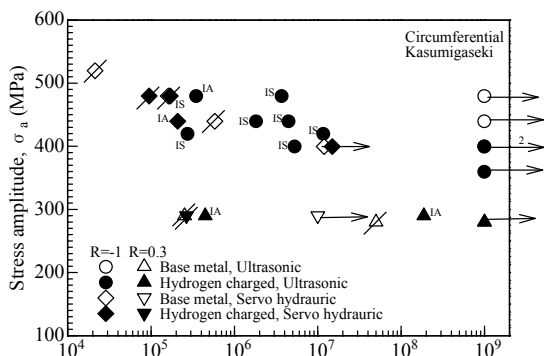


図 2.2.(8).3 霞が関材の疲労特性

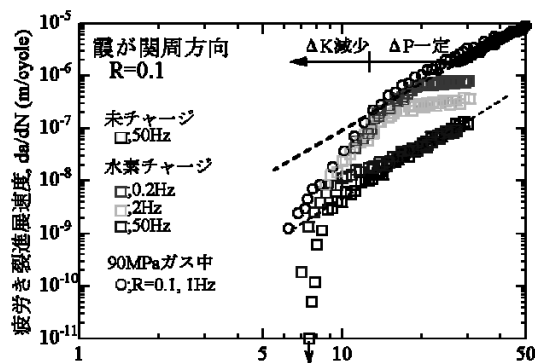


図 2.2.(8).4 疲労き裂伝ば特性

(9) 水素デバイス等の安全設計シミュレーション

本研究実施項目では、水素拡散解析のき裂表面の境界条件を従来までの濃度指定境界条件から流束指定境界条件に変更して解析を行い、き裂からの水素の侵入及び金属内部での拡散現象の様子を見て、流束指定境界条件の影響について調べた。き裂周りでは静水応力が高くなり、水素濃度もそれに応じて高くなるはずであるが、濃度指定境界条件では初期濃度のまま一定の値になる。そのため流束指定境界条件に変更することで、き裂先端の水素濃度が上昇すると考えられる。実際、流束指定境界条件に変更すると、濃度指定境界条件よりもき裂周りの格子間配位水素濃度は増加し、欠陥配位水素濃度も初期濃度が 10^{-6} mass ppm 程度の十分小さい値であれば、増加することがわかった。

本研究実施項目ではき裂を有するモデルを対象とし、解析には水素貯蔵用蓄圧器として使用が想定される SCM435 の円筒タンク(図 2.2.(9).1)を用いた。

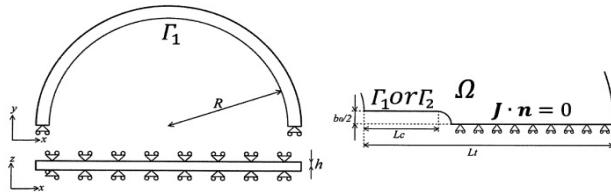


図 2.2.(9).1 Pipe model

図 2.2.(9).1 に記す Pipe model は高山らが使用したモデルと同様のモデルとし、内半径 $R = 163$ mm, 円筒厚さ $L_t = 22$ mm, き裂長さ $L_c = 5$ mm, 鈍化き裂半径 $b_0/2 = 5 \mu\text{m}$ である。材料は SCM435 を想定するが、降伏応力以外は同じ bcc 構造の α 鉄の物性値を用いる。ここでは Pipe model を対象に、まず弾塑性解析を行い、その結果を水素拡散側に渡して拡散解析を行っている。解析条件は高山らより初期水素濃度 $C_{L0} = C_b = 2.08 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} = 4.51 \times 10^{-4}$ mass ppm とし、管内の水素ガス圧力 P を 0 MPa から 10 MPa まで 10 s かけて線形に増加させ、流束の値もそれに対応して 0 から $5.97275 \times 10^{15} \text{ 1/m}^2 \cdot \text{s}$ まで増加させた。図 2.2.(9).2 は $t = 10$ s におけるもので、縦軸は C_L を C_{L0} で正規化したもの、横軸はき裂先端からの距離である。図 2.2.(9).2 の左図より流束境界条件を与えた方が C_L の値が大きくなることがわかる。また、図 2.2.(9).2 の右図のように初期水素濃度が比較的高いので C_T はほぼ同値となった。初期濃度を 10^{-6} mass ppm 程度に下げると C_T も高くなる。

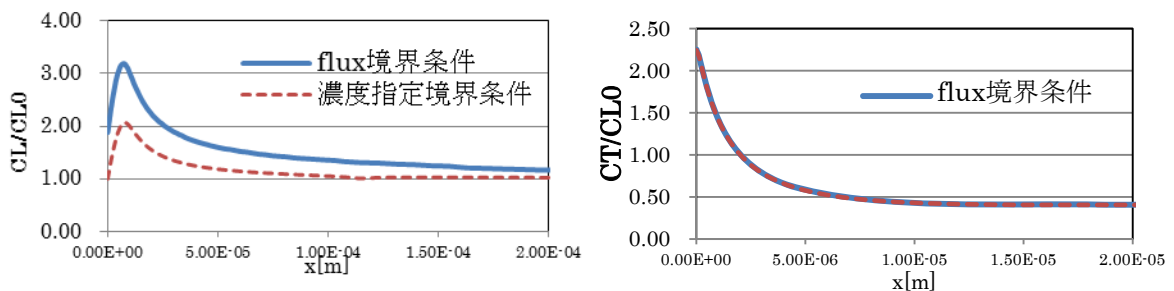


図 2.2.(9).1 格子間配位水素濃度(左図)と欠陥配位水素濃度 (右図)

2.2.2 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」
共同研究／高圧水素プレクーラー用等高強度材料の特性評価、岩谷産業株式会社

燃料電池自動車等の普及のための水素供給インフラの立ち上げに向け、これまで本事業で得られた高圧水素雰囲気における水素物性、材料特性に関わる基礎研究成果を使用して水素供給インフラ機器に実用的に使用できる材料、その運用方法等の提案が望まれている。

そこで、本研究では、高圧水素充填プレクーラー用等に早期に実用化が求められている高強度材料について、2種のオーステナイト系ステンレス鋼、HP160、XM19に着目し、これまで本事業で得られた基礎研究成果及び高圧水素試験装置等を活用して、実使用環境を想定した高圧水素雰囲気における材料特性評価を行い、高圧水素設備の実用化に繋がる強度設計・余寿命評価手法を検証した。

その結果、HP160材とXM19材は従来より使用されているSUS316Lと同等以上の耐水素特性を有することを確認し、HP160では、水素ステーションに使用する「高圧水素プレクーラー」として、高圧ガス保安協会の事前評価・大臣特認を取得する等、実用化に向けた設計適合性を確認した。

本研究は、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水素材料強度特性研究チームと連携して実施した。

① 高圧水素中動的な材料特性データの取得、余寿命解析

プレクーラー等の水素インフラ機器には、高強度かつ耐水素性を有する材料が求められる。本研究では、2種のオーステナイト系ステンレス鋼、HP160、XM19を選定し、大気中及び水素ガス中で、引張試験(SSRT)、シャルピー衝撃試験、疲労き裂進展試験等により耐水素特性を評価した結果、HP160及びXM19とも優れた耐水素性を示すことが確認された。

a) 引張強度特性評価

図 2.2.2-1 に HP160 材の大気中および水素ガス中における応力ひずみ線図を示す。大気中および水素ガス中のいずれの試験環境においても、引張強度は 900MPa を超えていた。また、大気中と比較して、水素ガス中では、引張強度 0.2%耐力、絞りなどの低下はほぼ確認できなかった。

図 2.2.2-2 に HP160 材の大気中および 100MPa 水素ガス中における引張破面を示す。いずれの試験環境においても、カップアンドコーン破壊を示し、試験片の中央部分には、延性破壊の特徴であるディンプルを確認することができた。
大気中及び水素中引張試験の比較において、引張強度の低下や絞りの低下は確認されず、破壊形態・破面も大気中と遜色ない結果であった。

表 2.2.2-1 HP160 材と XM19 材の化学成分と機械的性質

鋼材	化学成分 (mass%)										機械的性質			
	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Cu	N	Ni	0.2% 耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %	
	HP160 (海外材)	Min	-	-	-	19.5	2.00	-	-	-	0.25	9.0	500	800
	Max	0.06	0.60	4.00	22.0	3.00	0.003	0.025	0.2	0.50	11.0	-	-	-
XM19 (国内材)	Min	-	-	4.00	20.5	1.50	-	-	-	0.20	11.5	-	800	-
	Max	0.06	1.00	6.00	23.5	3.00	-	-	-	0.40	13.5	-	-	-
SUS316L JIS G3459	Min	-	-	-	16.00	2.00	-	-	-	-	12.00	175	480	40
	Max	0.03	1.00	2.00	18.00	3.00	0.030	0.040	-	-	16.00	-	-	-

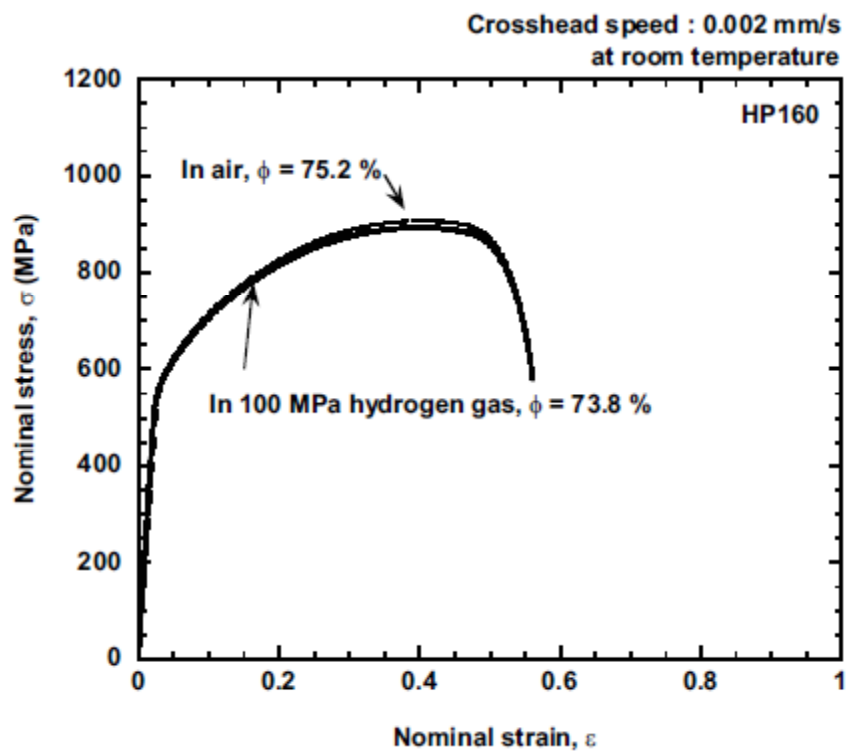


図 2.2.2-1. HP160 材の大気中および 100MPa 水素ガス中における応力ひずみ線図

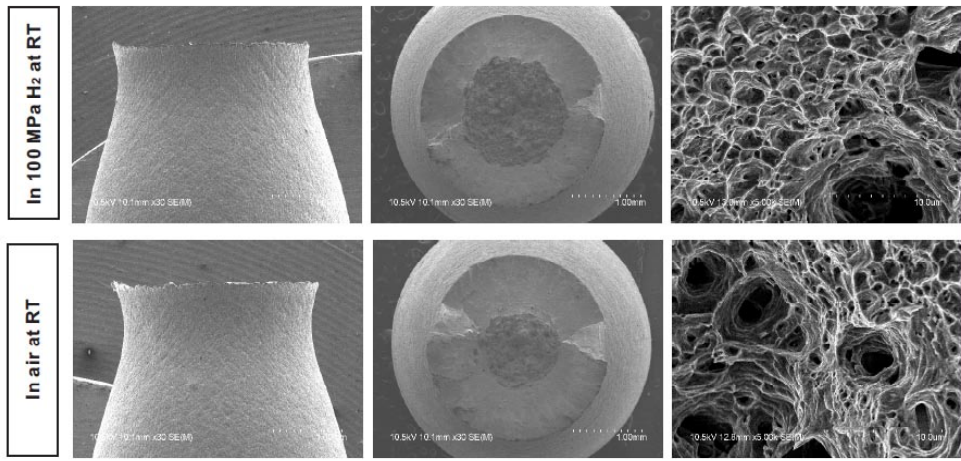


図 2.2.2-2. HP160 材の引張破面

b) シャルピー衝撃特性

低温脆性について、シャルピー衝撃試験により延性脆性遷移を確認したところ、使用温度の-40℃付近及び-100℃付近においてもシャルピー衝撃値の遷移は認められず、いずれの破面にも脆性破面は確認できなかった。

図 2.2.2-3 に HP160 材のシャルピー衝撃値と温度の関係を示す。明確な延性脆性遷移は確認できなかった。図 2.2.2-4 に HP160 材の各温度におけるシャルピー衝撃試験片の破面を示す。-100℃においても、破面には延性破壊の特徴であるデンプルを観察することができた。

図 2.2.2-5 に XM19 材のシャルピー衝撃値と温度の関係を示す。また、シャルピー衝撃試験片の破面を図 2.2.2-6 に示す。HP160 材と同様に、延性脆性遷移は確認できず、破面にはデンプルを観察できた。

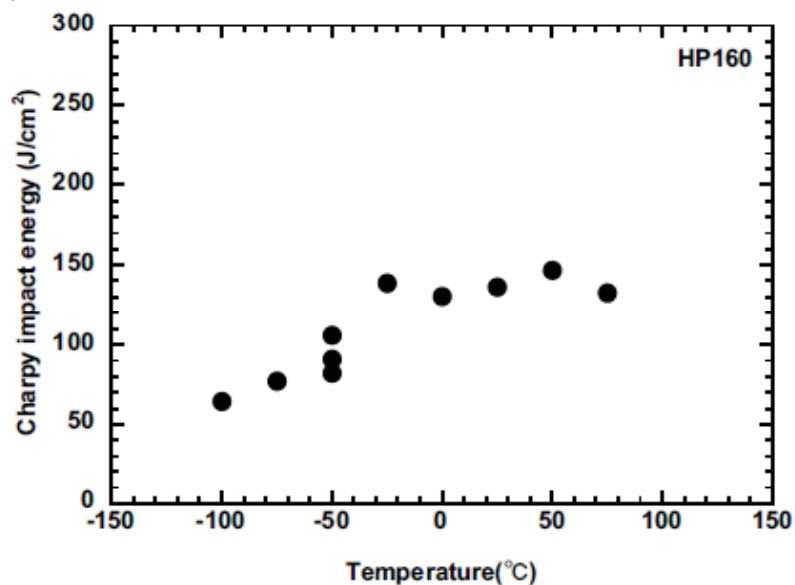


図 2.2.2-3. HP160 材の大気中におけるシャルピー衝撃値特性

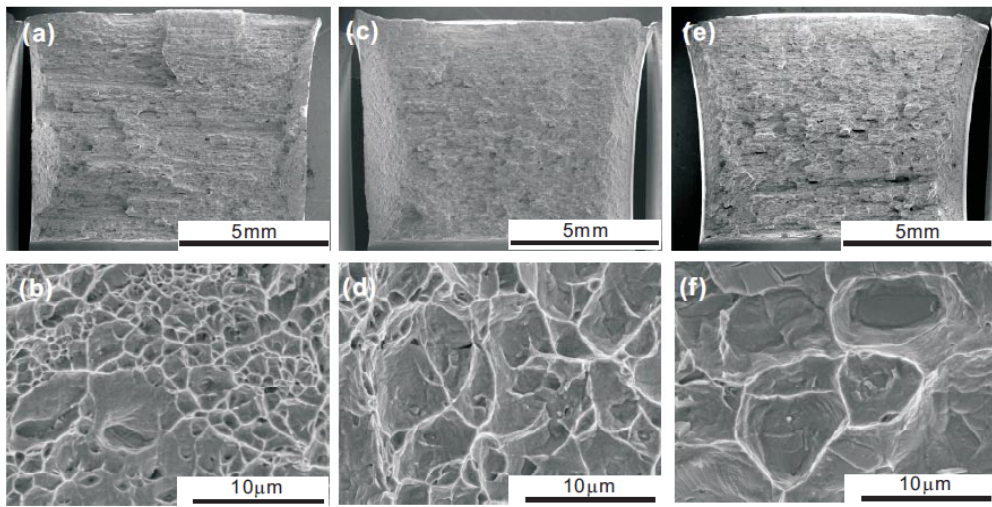


図 2.2.2-4. HP160 材のシャルピー衝撃値試験で得られた破面
 (a,b) 試験温度: -100°C / (c,d) 試験温度: -50°C / (e,f) 試験温度: 25°C

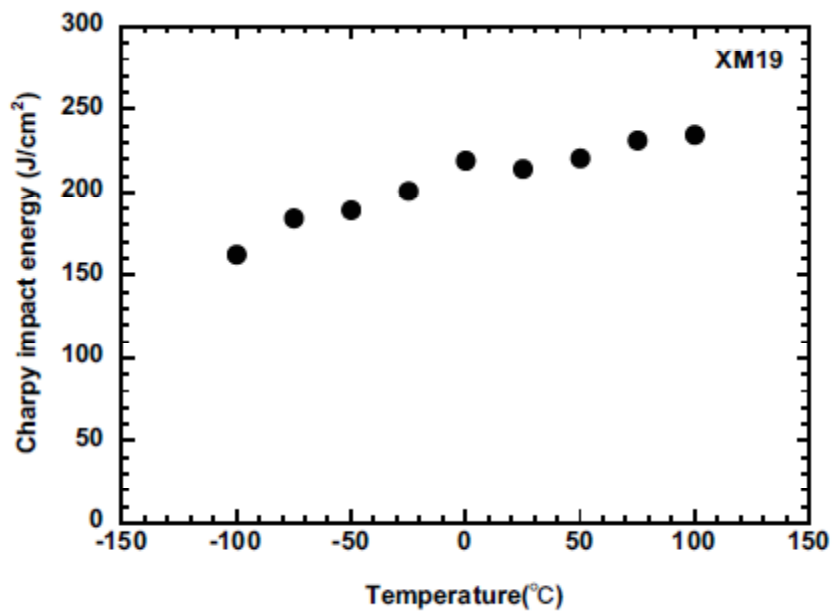


図 2.2.2-5. XM19 材の大気中におけるシャルピー衝撃値特性

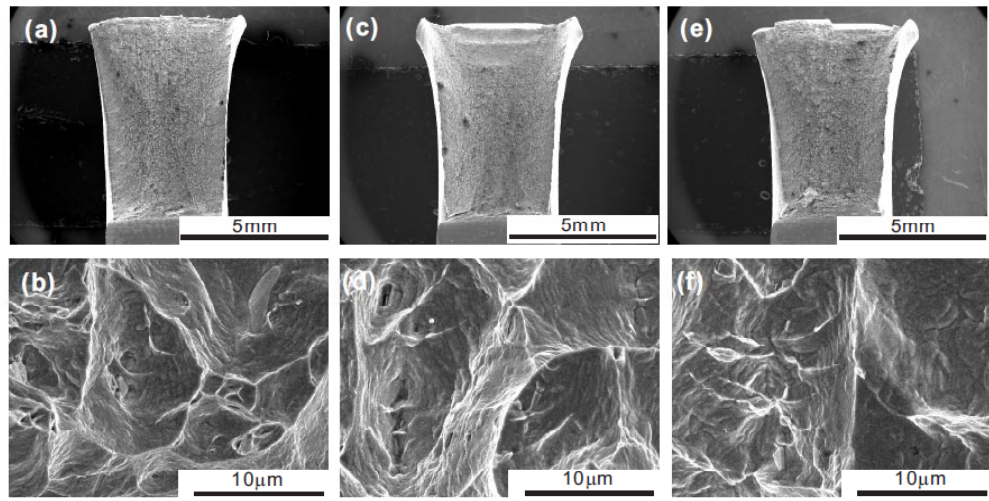


図 2.2.2-6. XM19 材のシャルピー衝撃値試験で得られた破面
 (a,b) 試験温度:-100°C/ (c,d) 試験温度:-50°C/(e,f) 試験温度:25°C

c) 疲労き裂進展特性

図 2.2.2-7 および図 2.2.2-8 に、それぞれ HP160 材および XM19 材の試験周波数と 100MPa または 115MPa 水素ガスにおける疲労き裂進展速度の加速率 $(da/dN)_{H_2}/(da/dN)_{air}$ の関係を示す。HP160 材および XM19 材ともに水素ガス中で若干の加速は見られたものの、どちらの材料においても SUS316L 材の水素ガス中の疲労き裂進展速度の加速率よりも小さかった。

図 2.2.2-9 および図 2.2.2-10 にそれぞれ、HP160 材および XM19 材の疲労き裂進展速度と応力拡大係数幅の関係を示す。SUS304 材または SUS316L 材に比べ、HP160 材、XM19 材のどちらにおいても、大気中および水素ガス中において高い疲労き裂進展抵抗を示し、水素ガス中において、若干の加速が見られた程度であった。

HP160 材及び XM19 材は、大気中と比較して最大で 2 倍程度の加速率を示したけれども、SUS316L 材の水素ガス中の疲労き裂進展速度の加速率よりも、HP160 材及び XM19 材の加速率は小さく、高い疲労き裂進展抵抗を示すことが確認された。また、加速率の周波数依存性は、低周波数側で飽和し、上限値を示した。その結果、水素による疲労き裂進展加速の上限値を用いる低サイクル使用評価が可能となった(表 2.2.2-2 参照)。

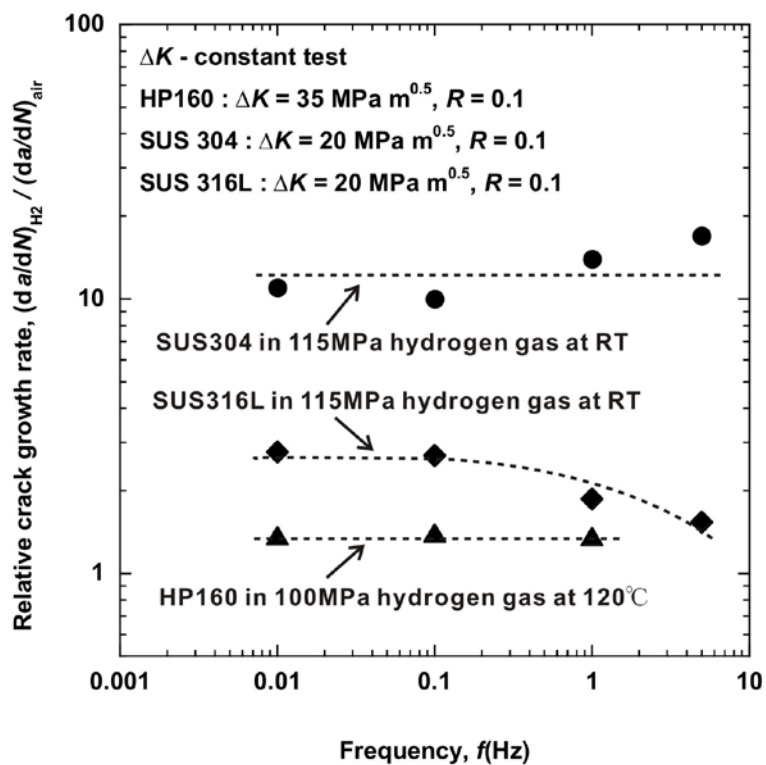


図 2.2.2-7. HP160 の水素ガス中での疲労き裂進展速度の加速率に及ぼす周波数の影響

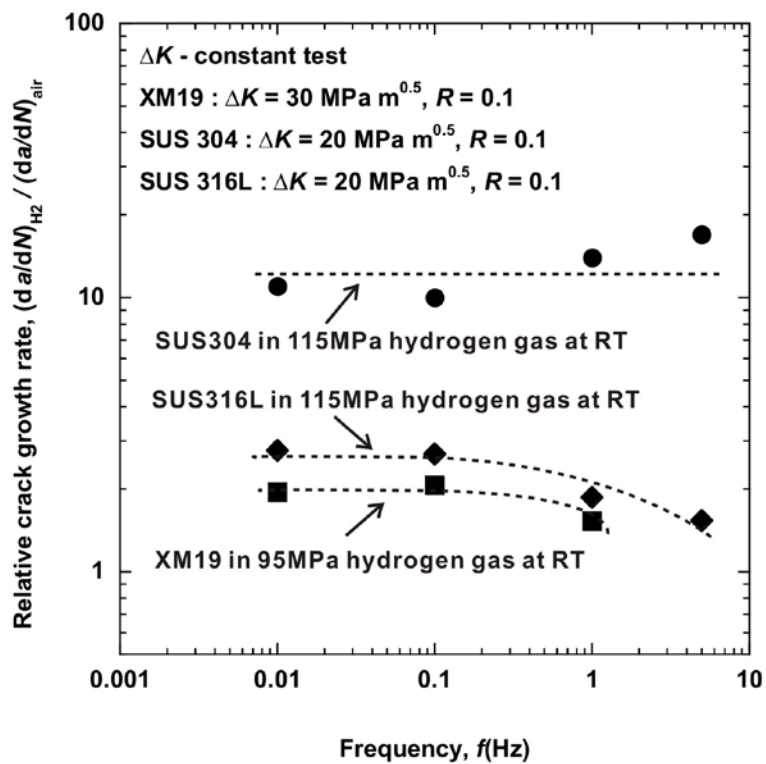


図 2.2.2-8. XM19 の水素ガス中での疲労き裂進展速度の加速率に及ぼす周波数の影響

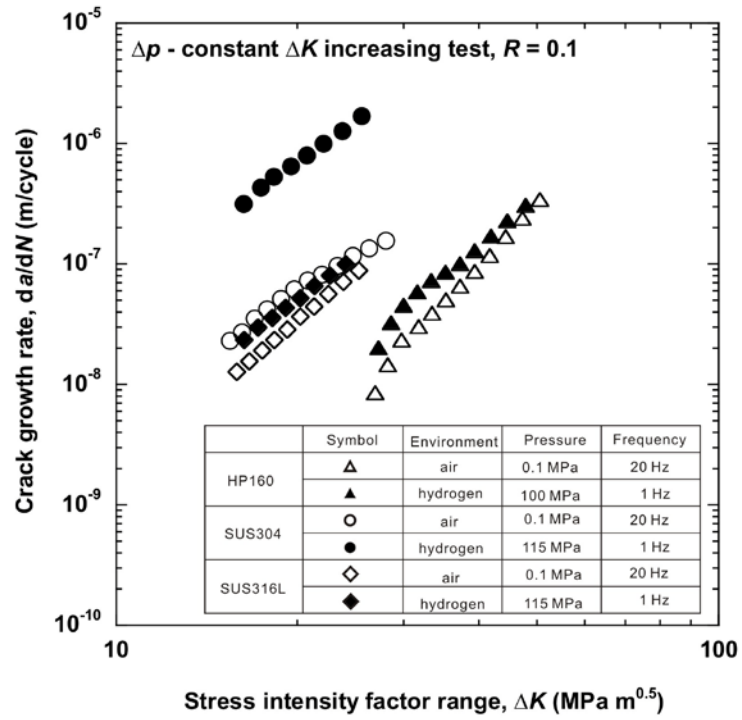


図 2.2.2-9. HP160 の疲労き裂進展速度と応力拡大係数幅の関係

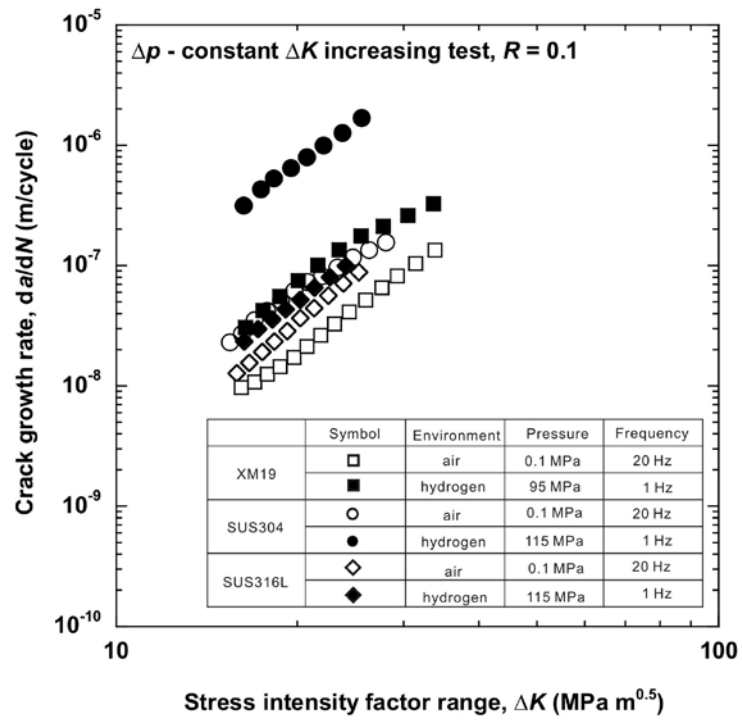


図 2.2.2-10. XM19 の疲労き裂進展速度と応力拡大係数幅の関係

② 水素サイクル疲労試験による余寿命解析、破裂前漏洩(LBB)の検証

HP160 及び XM19 の各オーステナイト鋼は 100MPa のような高圧水素ガス中での引張試験、疲労き裂進展試験において、優れた耐水素脆化感受性を示すことが確認された。

ここでは、HP160 及び XM19 の配管材を用いて、き裂進展試験データから余寿命解析を行い、き裂進展時に破裂前漏洩(LBB)が成立することを、水素ガスサイクル試験により確認した。その結果、表 2.2.2-2 に示すとおり、水素漏洩に至った全ての試験体において、LBB の成立が確認され、また破断回数は事前の予測寿命と概ね一致し、余寿命解析の妥当性が検証された。また、水素ガスサイクル試験に代わる水圧サイクル及び外水圧試験、初期き裂の形成等の将来の評価手法に繋がる代替試験法の検討を行った。

さらに、試験後の試験体について、き裂の進展状況を確認するため、Hydrogenius において電子顕微鏡(SEM)による試験体の破面の観察を行った。破面観察の結果は、図 2.2.2-11 および図 2.2.2-12 に示すとおり、水素圧力サイクルでき裂が進展している状況が確認された。

表 2.2.2-2 水素ガスサイクル試験による余寿命解析検証と LBB 確認

材料	初期き裂深さ	破断回数 (漏洩検知時のサイクル回数)	事前予測した 破断回数	LBB 成立
HP160	1.5 [mm]	— (50,000 回でリークなし)	約 160,000 回	—
	2.0 [mm]	26,365 回	約 37,000 回	○
		30,599 回 30,832 回		
2.2 [mm]	16,245 回 18,312 回 20,600 回	約 20,000 回	○	
XM19	1.4 [mm]	37,074 回	約 24,000 回	○
		40,612 回 42,741 回		
	1.9 [mm]	5,828 回 6,005 回 7,215 回	約 5,000 回	○
2.1 [mm]	1,832 回	約 2,000 回	○	
	1,949 回 1,959 回			

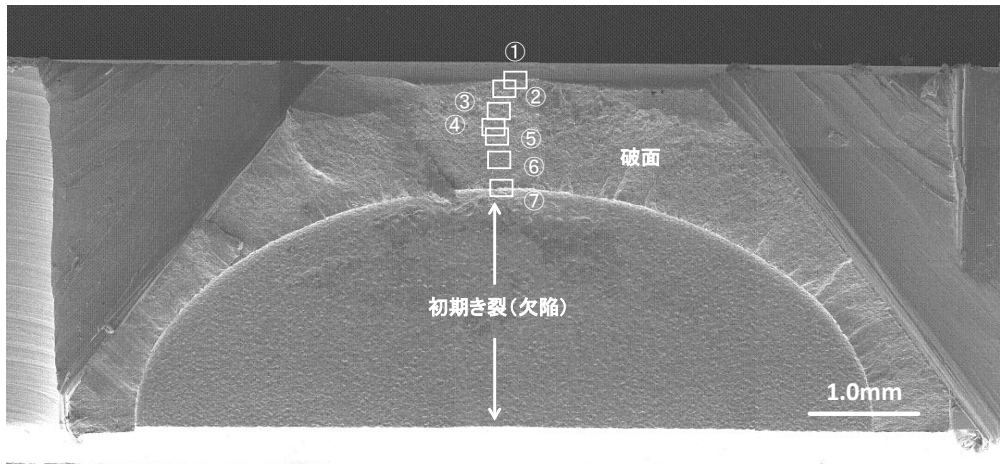
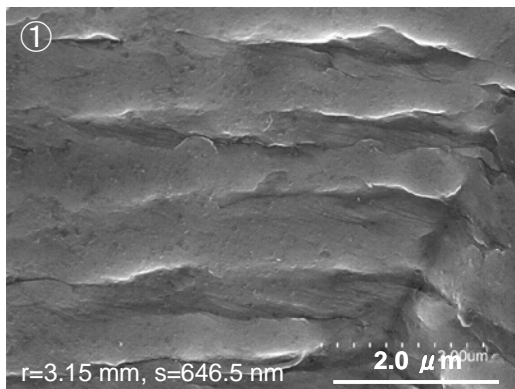
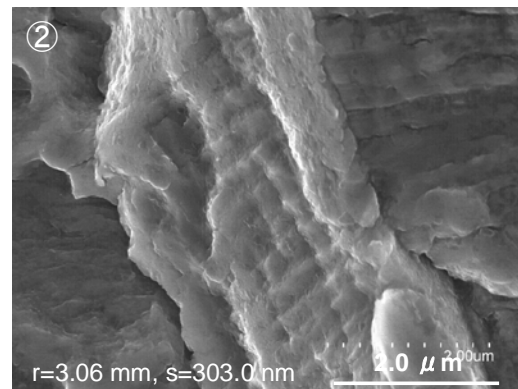


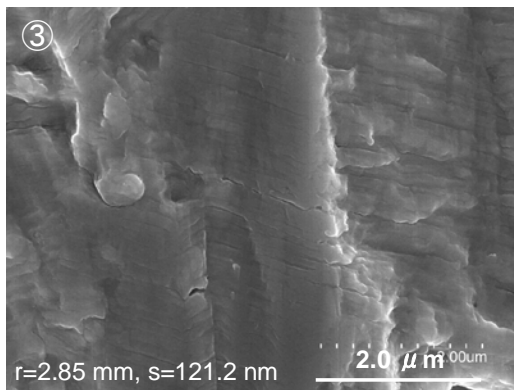
図 2.2.2-11 HP160 の配管材の破面



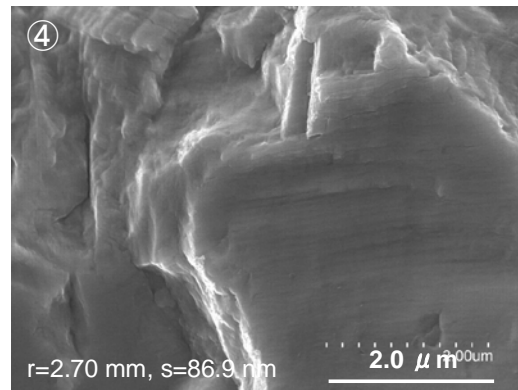
(1) ①の位置



(2) ②の位置



(3) ③の位置



(4) ④の位置

図 2.2.2-12 図 2.2.2-11 の位置における高倍率 SEM 写真

③ 溶接配管の高圧水素ガスサイクル試験

高圧水素プレクーラー等の水素インフラ機器の小型化・性能向上のためには、配管を接合する方法として現行のねじ継手に加えて溶接接合も不可欠である。HP160 及び XM19 は共に溶接可能な材料である。溶接配管状試験体について、大気中引張試験を実施の結果、表 2.2.2-3 に示すとおり、規格値を上回る引張強度を確認した。

さらに、実環境を想定した条件設定にて高圧水素ガスサイクル試験により溶接部の耐久性を確認した。表 2.2.2-4 に示すとおり、今回実施した試験条件では、HP160 及び XM19 とともに 50,000 回までの耐久性を確認した。今後、水素ガス中材料試験等により更なる評価を進めていくことで溶接接合の水素中利用の可能性を見出す。

表 2.2.2-3 溶接配管試験体の大気中引張強度

材料	基準値 (MPa)	溶接施工法	形状	引張強度 (MPa)
HP160	800	手動+自動	溶接配管試験体	892
XM19	800	手動+自動	溶接配管試験体	830~895
		自動溶接	溶接配管試験体	868

表 2.2.2-4 溶接配管試験体の水素ガスサイクル試験

材料	溶接施工法	形状	初期き裂 (mm)	サイクル圧力	結果
HP160	手動+自動	溶接配管試験体	なし	2.0MPa~ 95.0MPa	50,000 回にて 漏れな し
	自動溶接		1.0×3.0		
			なし		
XM19	手動+自動		1.0×3.0		
			なし		

④ 実用化に向けた規格・設計基準への適合性検討

本研究で実施した HP160 及び XM19 等の耐水素性を有し、かつ高強度であるステンレス鋼をプレクーラーの実用化プロセスに適用することについて検討した。

通常、水素ステーション等で高圧水素プレクーラーを使用する場合、プレクーラーは高圧ガス保安法の特定設備（熱交換器）に該当されるため、高圧ガス保安法・特定設備検査規則に従って設計・製作・検査が行われる。特定設備検査規則では、機能性基準（例示基準）において、使用できる材料とその強度、肉厚の算定方法等が定義されており、プレクーラーの設計・製作・検査もこの例示基準に適合する必要がある。しかしながら、例示基準に示された規格材料の耐水素性に強いとされる SUS316L で高圧プレクーラー

を製作すると、SUS316L は低強度であるため、配管は厚肉で小口径となり、水素流量が小さくなるため、冷却性能が発揮できない。そのため、例示基準によらない高強度材料を使用した「高圧水素プレクーラー」を特定設備保安規則に適合するには、図 2.2.2-13 に示すプロセスを経て、特定設備検査規則の機能性基準(例示基準)以外の詳細基準で規則の機能性基準に適合することを判断頂く必要がある(「詳細基準事前評価」)。

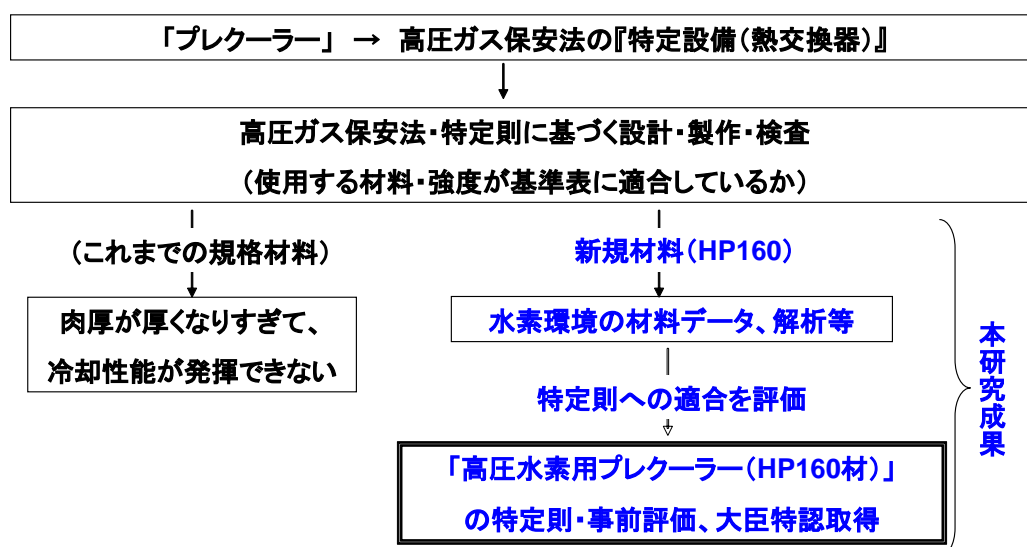


図 2.2.2-13 新規材料を使用した高圧水素プレクーラーの実用化プロセス

そこで、本研究では、HP160を使用した「高圧水素プレクーラー」の実用化に向けて、これまでの事業で得られた理論的考察と、本研究において得られた特性評価データをもとに、高圧ガス保安法・特定設備(熱交換器)として、高圧ガス保安協会の事前評価・大臣特認を取得する等、実用化に向けた設計適合性を確認した。実用化された高圧水素プレクーラーの一例を図 2.2.2-14 に示す。従来のプレクーラーと比較して、配管を薄肉にすることができ、かつ流路面積を大きく取ることができるため、熱交換性能の向上に寄与するとともに、燃料電池ユーザ一の要求性能を満足する大流量かつ低温充填が可能となった。

本研究では、これまで本事業で得られた高圧水素環境下での材料特性に係る基礎研究成果及びわが国が誇る試験・検証環境を活用して、高圧水素充填プレクーラー用等に早期に実用化が求められている 2 種の高強度オーステナイト系ステンレス鋼、HP160、XM19 について、高圧環境下における現象論的データから耐水素特性評価を行い、疲労評価・LBB解析等の余寿命評価手法を検証した。さらに実配管を使用した検証試験等を通じて、実用化に向けた設計適合性を確認した(図 2.2.2-15)。

近年、更なる大流量化やコンパクト化が求められている一方、低温領域に使用できる材料

は一部に限られている。燃料電池自動車の一般ユーザーへの普及開始が近づく中、プレクーラーだけでなく、配管・ノズル等にも、低温かつ高強度な耐水素鋼材の使用が望まれており、本研究成果に対する新たなマーケットニーズが高まっている。溶接評価・低温データ等より一層のデータ拡充により、機器の更なる小型化・低コスト化が図られ、操作性・実用性に優れた水素インフラ構築の促進が期待されている(図 2.2.2-16)。



図 2.2.2-14 実用化された高圧水素プレクーラー (HP160)

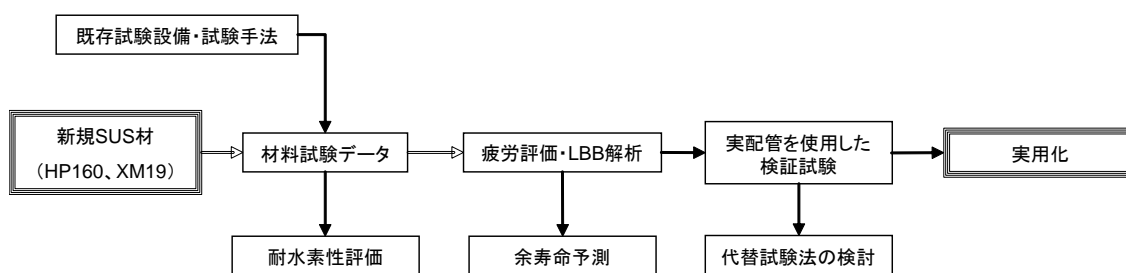


図 2.2.2-15 本研究のスキーム

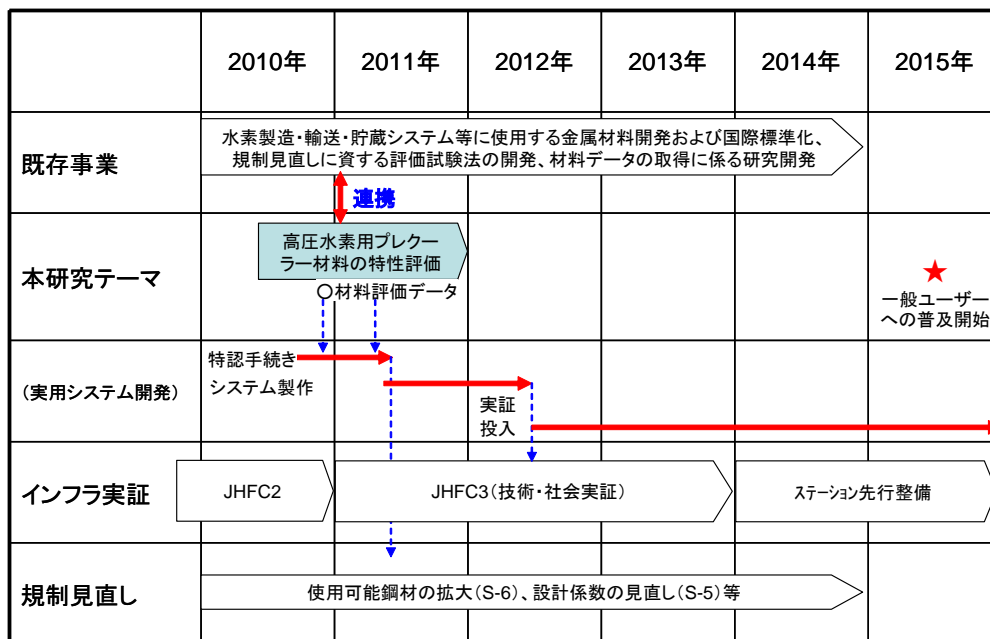


図 2.2.2-16 2015 年普及開始に向けたマイルストーン

2.2.3 研究開発項目②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究」

共同研究／高圧水素ガス用ひずみゲージの開発とひずみゲージ箔材の電気抵抗に及ぼす水素の影響の解明、株式会社共和電業

1. 共同研究の内容及び成果

これまで、高圧水素ガス環境下での使用を目的とした応力測定用ひずみゲージは開発されていない。既製のひずみゲージでは、高圧水素ガス中で無負荷状態での電気抵抗変化が大きくなる難点が生じた（真鍋康夫，100MPa 級高圧水素試験機の開発，R&D 神戸製鋼技報，Vol. 58 (No. 2) 21 頁）。このため、高圧水素ガス中での材料試験，機器の応力測定の安定的な実施に障害をきたしている。

本研究実施項目においては、高圧水素ガス中でのひずみゲージ抵抗変化の解明を行うために、ひずみゲージに使用されている金属材料（図 1-1 参照）の結晶構造解析，水素拡散速度と水素固容度の測定，水素ガス曝露材の電気抵抗変化の測定を行う。次に、ひずみゲージを試作し（図 2-1，図 2-2 参照），試作ひずみゲージ，箔材、板材の高圧水素中での無負荷時の電気抵抗変化および試作ひずみゲージの負荷時の電気抵抗変化を測定する。これらの結果より，高圧水素中のひずみゲージの電気抵抗変化に及ぼす水素の影響を解明し，高圧水素ガス用ひずみゲージの高性能化を図る。

(1-1) ひずみゲージ箔材用金属材料の結晶構造解析と水素拡散速度・固溶度の測定 (担当：水素材料先端科学研究センター HYDROGENIUS)

図 1-1 に示すように，ひずみゲージに使用されている金属材料は，センサーである金属箔（Cu-Ni，Ni-Cr，Fe-Cr-Al など），ゲージリード（銅線），金属箔とゲージリードを

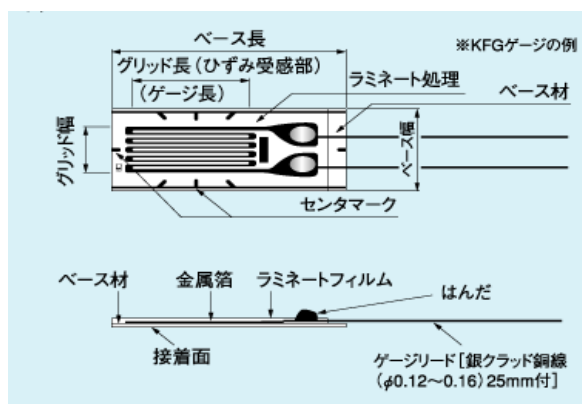


図 1-1 抵抗線ひずみゲージの模式図

接続するはんだ（Sn-Ag-Cu，鉛フリー）である。これらの金属材料の結晶構造解析，

水素拡散速度と水素侵入量の測定, 水素ガス曝露材の電気抵抗変化の測定を実施した. また, Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの高圧水素ガス中での使用状況を調べた.

(1-1-1) EBSD による組織解析

図 1-2 に EBSD 像を示す. ひずみゲージの金属箔に使用されている Cu-Ni (厚さ 250 μm) と Ni-Cr(厚さ 50 μm)の板材の結晶構造は面心立方晶 (FCC), Fe-Cr-Al(厚さ 250 μm)の板材の結晶構造は体心立方晶 (BCC) であった. ゲージリードに使用されている銅 (直径 250 μm) は面心立方晶 (FCC) であった. これらの4つの金属材料は多結晶体であった. 鉛フリーはんだ (Sn-Ag-Cu, 直径 1 mm) については, Sn が初晶として晶出し, Sn と金属間化合物 (Ag_3Sn) が共晶として晶出することが報告されている. Sn の結晶構造は立方晶である.

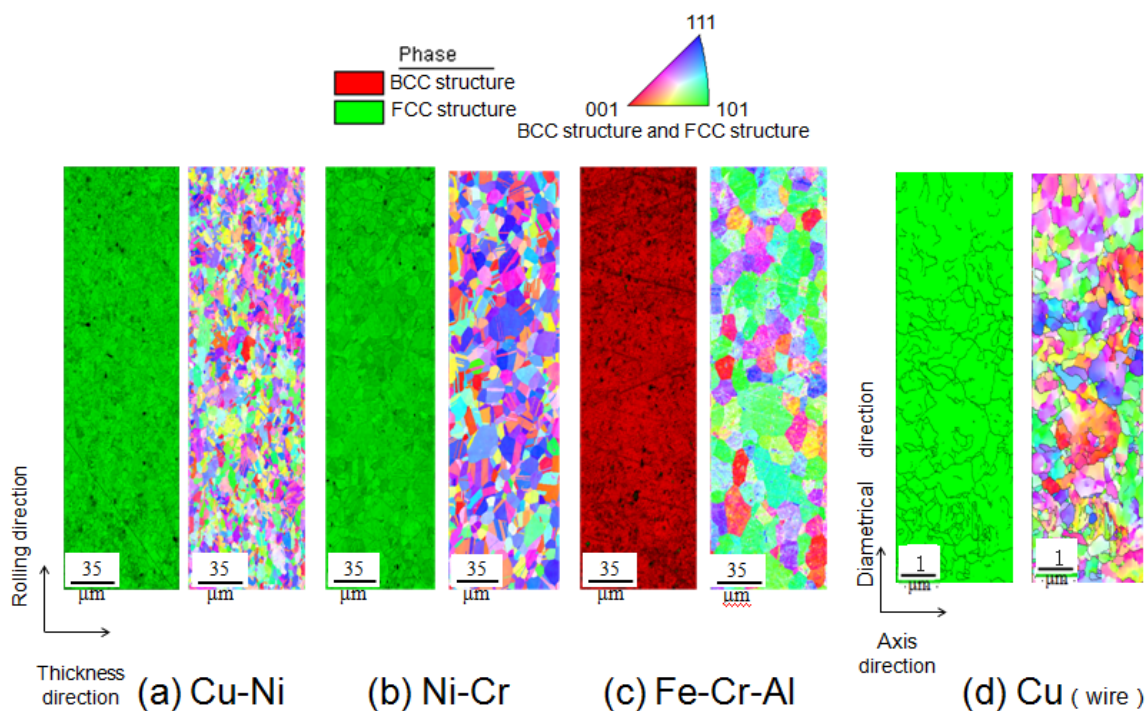


図 1-2 金属箔用 Cu-Ni, Ni-Cr, Fe-Cr-Al, ゲージリード用 Cu の EBSD 像

(1-1-2) 水素拡散係数と水素量

高温水素ガス曝露と TDS による昇温脱離分析を組み合わせて, 試験片の水素拡散速度と飽和水素量を測定した. 試験片寸法と形状は, Cu-Ni, Fe-Cr-Al では底面 $7 \times 7 \text{ mm}^2$ の厚さ 250 μm の板材, Ni-Cr では底面 $7 \times 7 \text{ mm}^2$ の厚さ 50 μm の板材, 銅線では直径 250 μm , 長さ 157 mm の細線である. 高温水素ガス曝露条件は, 水素ガス圧力 $P_{\text{H}_2} = 100 \text{ MPa}$, 水素ガス温度 $T = 270 \text{ }^\circ\text{C}$, 曝露時間 $t_{\text{expose}} = 40 \text{ h}$ である.

図 1-3 に水素拡散係数 D のアレニウスプロットを示す. 水素拡散係数は, 100 MPa,

270 °C, 40 h の条件で水素ガス曝露した試料を所定の温度で TDS 中に放置して得られる水素放出特性を次式に当てはめることによって求めた. 室温大気中で得られた水素放出特性を図 1-5 に○印で示す.

$$\frac{C_{H,R}}{C_0} = \frac{32}{\pi^2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-(2n+1)^2 \pi^2 D t / h^2}}{(2n+1)^2} \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-4\beta_n^2 D t / (1.08b)^2}}{\beta_n^2} \right] \quad (1)$$

ここで, C_0 は初期水素量, $C_{R,H}$ は残留水素量, β_n は 0 次のベッセル関数の第 n 項, h は試料の厚さ, b は試料底面の一辺の長さである. 底面が円形の場合は $1.08b$ に直径を代入する. 図 1-3 に示すように, 水素拡散係数は, Cu で最も低く, Fe-Cr-Al で最も高い. Ni-Cr, Cu-Ni の水素拡散係数は Cu と Fe-Cr-Al の水素拡散係数の中間に存在している.

図 1-4 に 100 MPa, 270 °C, 40 h の曝露材の TDS による昇温脱離プロファイル (昇温速度: 0.33 °C/s) を示す. 上述の試験片厚さ, 曝露条件, 水素拡散係数から予測すると, 試験片中の水素量は飽和していると考えられる. 270 °C での飽和水素量は, 少ない順番で Cu で $C_s = 0.25$ mass ppm, Fe-Cr-Al で $C_s = 1.61$ mass ppm, Cu-Ni で $C_s = 121$ mass ppm, Ni-Cr で $C_s = 148$ mass ppm であった. はんだについては, 直径 1 mm, 長さ 100 mm の細線を 100 MPa, 85 °C, 24 h の条件で水素ガス曝露した. TDS による昇温脱離分析の結果, 85 °C での水素量は約 0.07 mass ppm であった.

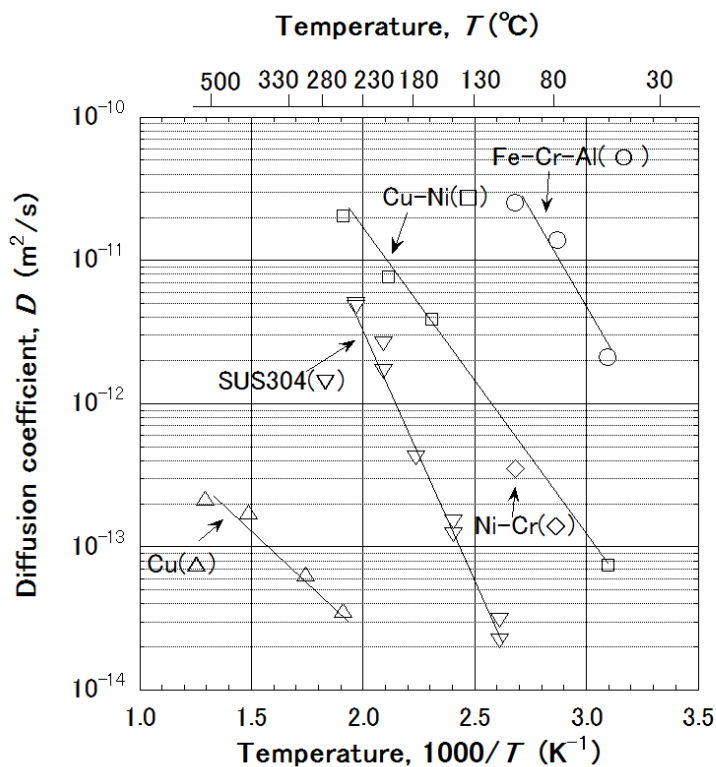


図 1-3 水素拡散係数のアレニウスプロット

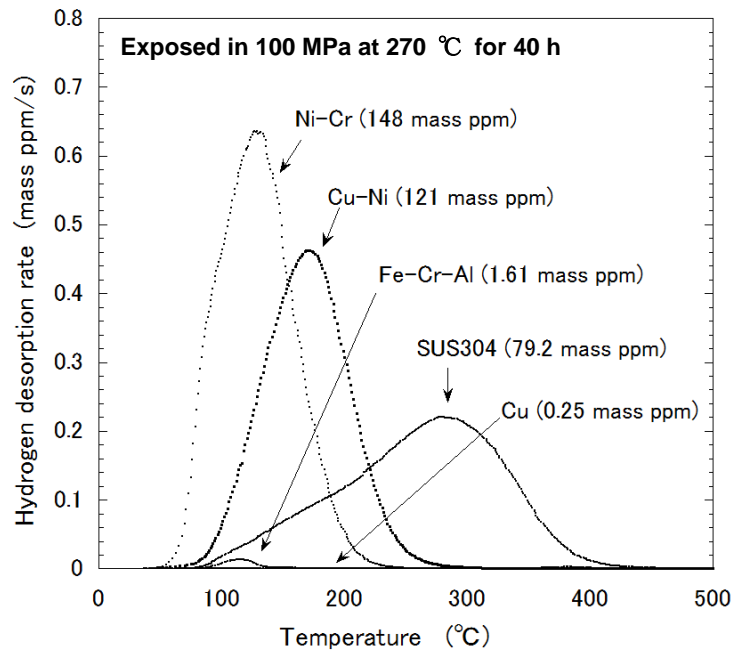


図 1-4 昇温脱離プロファイル

(1-1-3) 高压水素曝露試験片を大気中に放置したときの電気抵抗率と水素量の変化

図 1-5 に、高温水素ガス曝露した試験片を大気中に放置し、電気抵抗率と材料中に残っている残留水素量 $C_{H,R}$ を測定した結果を示す。電気抵抗率測定用試験片は Cu-Ni と Fe-Cr-Al の細長い板 (厚さ 250 μm , 幅 1 mm, 長さ 100 mm), Ni-Cr の細長い板 (厚さ 50 μm , 幅 1 mm, 長さ 100 mm), 銅線 (直径 250 μm , 長さ 100 mm) である。残留水素量測定用試験片は上述の水素拡散係数と飽和水素量を測定したときの試験片と同じである。高压水素ガス曝露条件は 100 MPa, 270 °C, 40 h である。

図 1-5 に示すように、Cu-Ni では、 $C_{H,R}$ が 126 mass ppm から 21 mass ppm に減少するにつれて、測定電気抵抗率は $4.9427 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ から $4.9490 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ に増加した。Ni-Cr では、 $C_{H,R}$ が 148 mass ppm から 97 mass ppm に減少するにつれて、測定した電気抵抗率は $1.1032 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ から $1.1000 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ に減少した。FCC 金属である Ni-Cr と Cu-Ni には多量の水素が侵入するため、電気抵抗率が大きく変化したと考えられる。しかし、 $C_{H,R}$ の減少につれて測定電気抵抗率が Ni-Cr では減少し、Cu-Ni では増加する特異な現象がみられた。一方、BCC 金属である Fe-Cr-Al には水素は多く侵入しない。そのため、 $C_{H,R}$ が 1.71 mass ppm から 0.55 mass ppm に減少するにつれて、測定した電気抵抗率は $1.23923 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ から $1.23920 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ に少し減少するが、電気抵抗率の変化量はゼロと見なせる。銅は Cu-Ni と Ni-Cr と同じ FCC 金属であるが、水素侵入量は小さい。そのため、 $C_{H,R}$ の変化量は 0.28 mass ppm から 0.16 mass ppm へと減少するが、その変

化量は小さい．これに対応して測定した電気抵抗率は $1.6012 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ から $1.6018 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ へと増加するが，電気抵抗率の変化量はゼロと見なせる．

後述の図 3-2 から図 3-6 に Cu-Ni, Ni-Cr, Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを室温，無負荷状態で 90 MPa 水素ガス中に曝露したときのゲージ出力（ゼロ点）の変化が示されている．ゲージ出力の変化は，上述の残留水素量 $C_{H,R}$ と電気抵抗の関係から予測でき，センサー部の金属箔 Cu-Ni, Ni-Cr, Fe-Cr-Al のうち，高圧水素ガス中で使用できる金属箔としては，Fe-Cr-Al が適していることが裏付けられた．また，Cu には水素がほとんど侵入しないため，電気抵抗変化が起こらない．このことは，銅線がゲージリードとして使用できることを示している．はんだについても，100 MPa, 85 °C, 24 h の水素曝露条件で約 0.07 mass ppm の水素量しか侵入しないので，水素侵入による電気抵抗率の変化は生じないと考えられる．

(1-1-4) Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの測定精度と使用時間

HYDROGENIUS プロジェクトでは，高圧水素ガス中で疲労特性や引張特性を調べるため，100 MPa 水素ガスを貯蔵できる圧力容器を持つ疲労試験機 1 台，120MPa 水素ガスを貯蔵できる圧力容器を持つ疲労試験機 3 台が稼働している．高精度の試験をするため，圧力容器内にロードセル，クリップゲージ（あるいは伸び計）を設置している．圧力容器内のロードセル，クリップゲージは高圧水素ガスに曝されるため，圧力容器内のロードセル，クリップゲージには Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージが使用されている．ここでは，高圧水素ガス中疲労き裂進展試験における荷重 P とき裂開口変位 COD の繰返し波形及びき裂長さを調べることによって，Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの測定精度を検討する．また，Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの使用時間を調べる．

120 MPa 水素ガス中疲労試験機と SM490B 鋼の CT 試験片を用い，90 MPa 水素ガス中で応力比 $R = 0.1$ ，試験周波数 $f = 1 \text{ Hz}$ のもとで，荷重範囲 ΔP を一定にして行った疲労き裂進展試験を行った．図 1-6 に，この試験で得られた繰返し荷重の範囲 ΔP_m と平均値 $P_{in,m}$ ，繰返しき裂開口変位の範囲 ΔCOD と平均値 COD_m を繰返し数 N に対して示す．繰返し荷重を制御しているため， ΔP_m と $P_{in,m}$ は一定になっている． N が増え，き裂が長くなると， ΔCOD と COD_m は増加している． ΔCOD と COD_m の間には次式の関係がある．

$$COD_m = \frac{(1+R)}{2(1-R)} \Delta COD \quad (2)$$

そこで，式 (2) に実測の ΔCOD を代入し， COD_m を計算する．計算で求められた COD_m を $COD_{m,cal}$ と表す．実測の COD_m から計算で求めた $COD_{m,cal}$ を引いた値 ($COD_m - COD_{m,cal}$) も図 1-6 に示す．($COD_m - COD_{m,cal}$) は，試験終了付近で少し上昇しているが，0 mm

で一定に保たれている。このことは、90 MPa のような高圧水素ガス中でも、Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージは水素の影響を受けないことを意味している。この点をさらに明らかにするため、き裂長さを調べた。

疲労き裂進展試験中のき裂長さは次式のコンプライアンス法で求めている。

$$\alpha = a/W = 1.0010 - 4.6695u_x + 18.46u_x^2 - 23682u_x^3 + 12149u_x^4 - 21436u_x^5 \quad (3)$$

$$u_x = \left(\left[\frac{EV_g B}{P} \right]^{1/2} + 1 \right)^{-1}$$

ここで、 a はき裂長さ、 B と W は CT 試験片の板厚と板幅である。また、 E はヤング率、 V_g は開口変位(COD)、 P は荷重である。図 1-7 に、式(3)から求まるき裂長さ a/W とパラメーター U_x の関係を黒線で示す。赤線は式(3)で得られた a/W を 5%増やした関係である。図 1-7 には、破面から得られた a/W と U_x の関係も \circ 、 \triangle 、 \square などの記号示す。図 1-8 に示すように、破面上では大気中での予き裂導入終了（水素ガス中疲労き裂進展試験のスタート）時のき裂長さと水素ガス中の疲労き裂進展試験の終了時のき裂長さが判別できる。破面から得られた大気中でのき裂長さと水素ガス中でのき裂長さは、式(3)のコンプライアンス法によるき裂長さと良く一致している。したがって、大気中と水素ガス中の両方において、Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージは荷重とき裂開口変位を精度良く測定していると結論できる。

最後に、現在使用しているロードセルとクリップゲージの使用履歴と使用合計時間を表 1-1 に示す。使用合計時間は、疲労き裂進展試験、疲労試験、引張試験を行なった合計時間となっている。集計は 2010 年 9 月から 2011 年 12 月の間で行っている。Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルの中には高圧水素ガス中で 900 時間以上使用したものがあつた、このロードセルは、現在でも使用している。市販のクリップゲージの中には 10 カ月程度の使用後、COD 信号に激しくノイズが混入したため、使用不可能になったものも存在した。

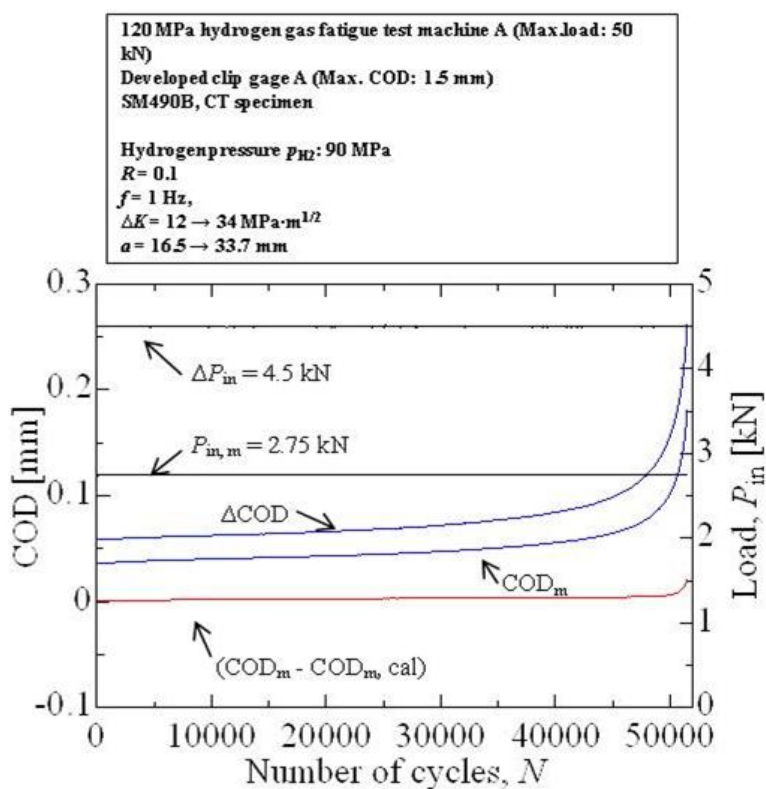


図 1-6 Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージを用いた高圧水素ガス中疲労き裂進展試験での荷重とき裂開口変位の変化

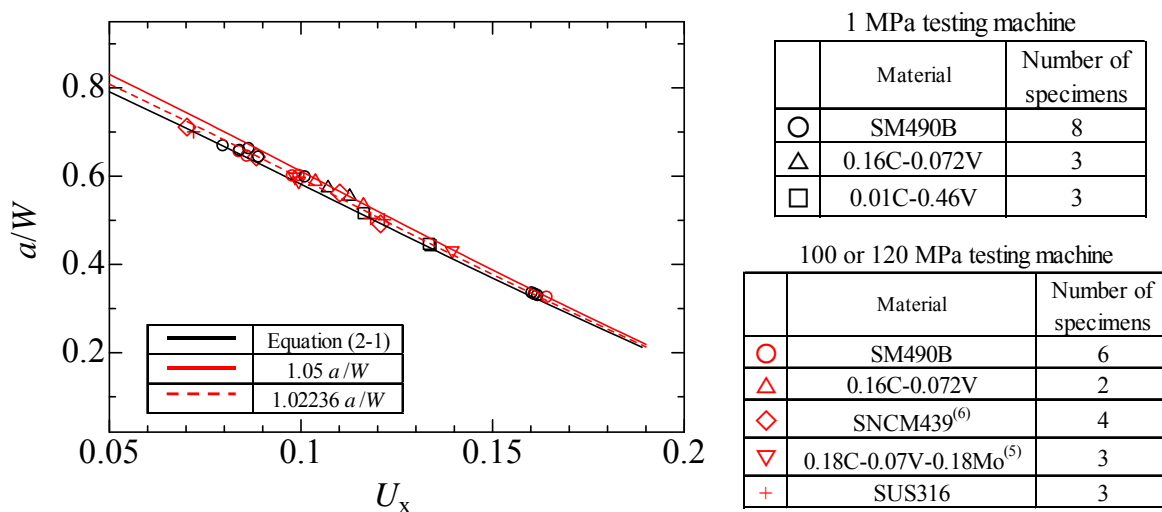


図 1-7 コンプライアンス法によるき裂長さとき破面上で測定したき裂長さの関係

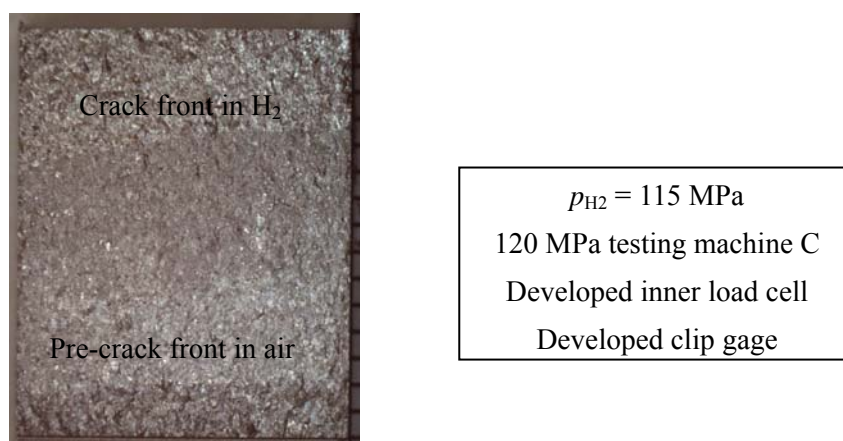


図 1-8 115MPa 水素ガス中疲労き裂進展試験で得られた破面

表 1-1 Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの使用履歴

		2010												2011												Total usage time (h)
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Developed inner load cell for CT specimen and tensile specimen (Max. 50 kN)	A																									910*
	B																									
Developed inner load cell for round bar fatigue specimen (Max. 50 kN)	A																									492
	B																									346
Developed clip gage (Max. 1.5 mm)	A																									531
	B																									606
Commercial clip gage (Max. 1.5 mm)	B																									1602

(1-1-5) まとめ

本研究実施項目では、高圧水素ガス用ひずみゲージの基本原理を得ることを目的に、ひずみゲージの金属材料である箔材料 (Cu-Ni, Ni-Cr, Fe-Cr-Al) , リード線材料 (純銅 : Cu) , 接合材料 (鉛フリーはんだ : Sn-Ag-Cu) のEBSD組織解析, 水素侵入特性の測定, 電気抵抗率の測定を行った。また、Fe-Cr-Al箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの高圧水素ガス中での使用状況を調べた。以下に得られた結果を示す。

- (1) Cu-Ni, Ni-CrはFCC金属であり、水素ガス曝露により多量の水素が侵入した。Fe-Cr-AlはBCC金属であり、水素ガス曝露による侵入水素量は少なかった。純銅, は

んだはほとんど水素が侵入しなかった。水素拡散係数は、Fe-Cr-Alで最も大きく、次にCu-Ni, Ni-Cr, 純銅の順となった。

(2) 高圧水素曝露で水素を侵入させたCu-Niでは、電気抵抗率が水素放出に伴い上昇した。Ni-Crでは、電気抵抗率が水素放出に伴い低下した。Fe-Cr-Al, 銅では、水素がほとんど材料中に侵入しなかったため、高圧水素曝露してもほとんど電気抵抗率の変化は見られなかった。

(3) 以上の結果から、箔材（センサー部）としてFe-Cr-Al, リード線として銅（Cu）, 接合部としてはんだ（Sn-Ag-Cu）が高圧水素ガス用ひずみゲージの構成金属材料として有効であることを明らかにした。

(4) Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージを用いた高圧水素ガス中疲労き裂進展試験において、荷重とき裂開口変位の繰返し波形の調査、き裂長さの調査を行い、Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージは、高圧ガス中でも荷重とき裂開口変位を高精度で測定できることを明らかにした。Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルとクリップゲージの使用実績を調べた結果、Fe-Cr-Al 箔ひずみゲージを使用したロードセルの中には高圧水素ガス中で 900 時間以上使用したものがあつた。

2. 研究開発項目毎の成果

2.3.1 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

(1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価

①目的

摩擦・摩耗・劣化特性評価(ゴム材のブリスタ現象の再現と影響要因の明確化)を目的として、以下の内容について検討を進めた。

- 圧力差、減圧速度、ゴム材とブリスタ発生状況の関係を把握する。
- ブリスタによる内部クラックの進展状況を観察し、ブリスタ発生メカニズムを推定する。
- 長時間水素雰囲気下に曝露されたゴム材料の物性変化(劣化)の評価を行う。

一般的に高圧ガス環境中にゴム材料を曝露すると、減圧後にゴム材料内部から気泡やき裂が発生する現象が報告されている[1-1]。発生した気泡やき裂はブリスタ(blister)と呼ばれている。例えば、水素機器においては高圧水素ガスをシールするためのゴム製Oリングでは、高圧水素ガスの加減圧が繰り返される。高圧水素容器のシールとして用いたゴム製Oリングにおいても、ブリスタに起因する破壊が発生した例がある。図 2.3.(1).1 に 100MPa、30°C、30 分の条件で 25 回使用して破損した高圧水素容器のガスシール用 NBR 製 Oリングの破断面を示す。破断の内部にはブリスタに起因すると考えられるき裂が多数見られ、これによりOリングが破断したものと推定される[1-2]。

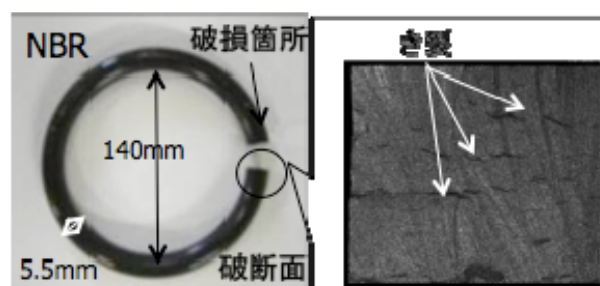


図 2.3.(1).1 高圧水素容器用 Oリングの破断面観察

材料:NBR , 水素曝露条件:100MPa , 30° C , 30 分, 25 回繰り返し使用

このような現象は、ゴム製 O リングの耐久性を確保するためには、ブリスタがどのようなメカニズムで発生・進展しているのかを明らかにし、高圧水素ガス環境中でもブリスタが発生しないゴム材料を開発する必要がある。本研究では、ブリスタ破壊に対する耐性が高いゴム材料の開発指針の提供を目的として、ブリスタ発生メカニズムを解明し、使用条件やゴム配合との相関把握を進めた。

上記研究内容 a～c について、これまで高圧ガスシール用ゴム材料のブリスタ破壊と水素溶解挙動および材料強度との関係を検討した結果、以下の結論を得ており、既に報告した。なお、c 項については 2.3.(4)項に O リングの評価結果とともに記載した。

1. ゴム材料を水素曝露した際の飽和水素量は 0.6 から 10MPa の範囲で曝露時の水素圧力に比例し、ヘンリーの法則に従うことが判明した。図 2.3.(1).2 に、代表的なガスシール用合成ゴムである EPDM と NBR について、フィラーとしてシリカおよびカーボンブラックを添加した試料について、水素曝露圧力と水素溶解量の相関を示す。ゴム中に水素分子の形で溶解すると考えられる。フィラーとしてカーボンブラックを配合したゴム材料は、カーボンブラックの水素吸着により水素溶解量が増大することがわかった。

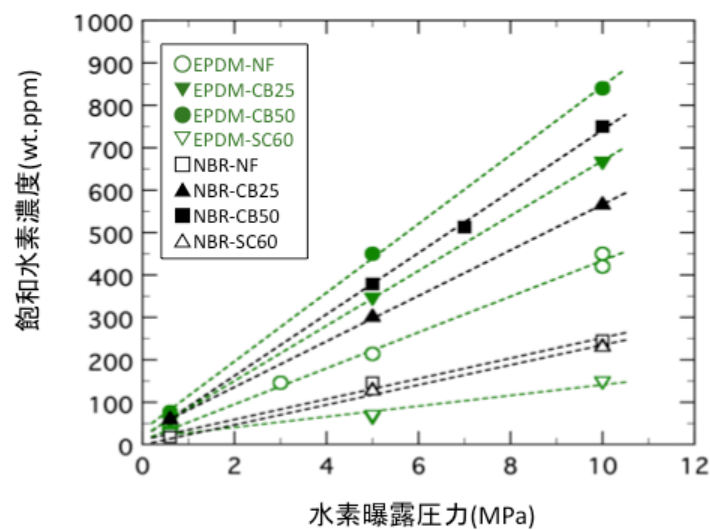


図 2.3.(1).2 曝露圧力と水素溶解量の相関

2. ブリスタ破壊現象は飽和水素量およびブリスタ発生臨界内圧の両者に相関があり、飽和水素量が低く、ブリスタ発生臨界内圧が高いゴム材料はブリスタ発生が軽微になった。図 2.3.(1).3 に各種ゴム試験片についてのブリスタ発生状況と水素溶解量およびブリスタ発生臨界圧力の相関を示す。これらの結果から、高压水素ガスによるブリスタへの耐性に優れたゴム材料の設計指針として、高いブリスタ発生内圧を示し、かつ水素溶解量が小さいゴム材料が望ましいことがわかった。

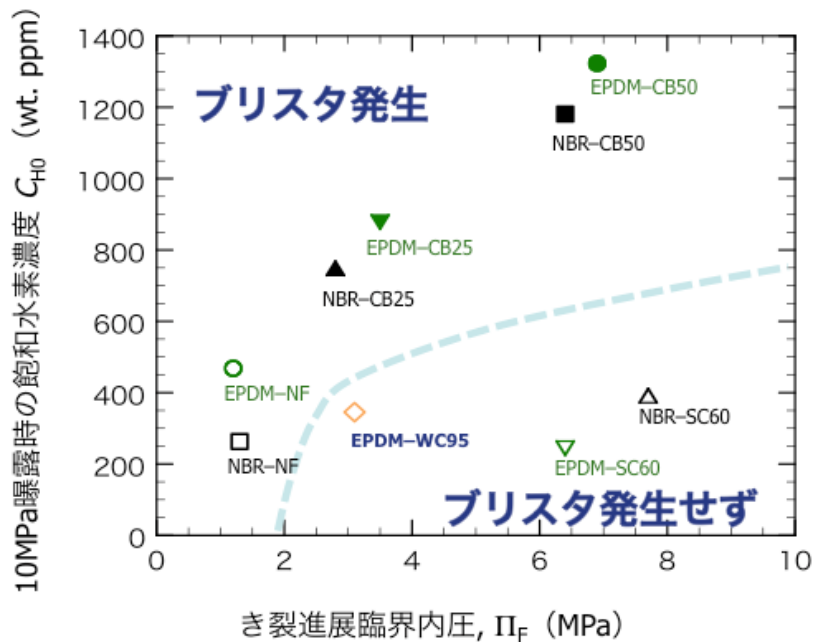


図 2.3.(1).3 ブリスト発生状況と水素溶解量およびブリスト発生臨界圧力の相関

3. ゴム材料を超弾性体とみなし、FEM を援用し気泡を円盤状としたき裂モデルの引裂きエネルギーを計算した。その結果、高い精度で引裂きエネルギーが計算できた。引裂きエネルギー T を静き裂進展試験によって得られた $T_{s,th}$ と比較してすることにより高い精度で臨界内圧を評価することができた。
4. ブリスト現象にカーボンブラック粒径の影響は認められなかった。図 2.3.(1).4 に異なる粒径、比表面積を持つカーボンブラックを配合した各種ゴム試験片のブリスト発生臨界内圧と水素溶解度の関係を示す。補強効果が高い小粒径カーボンブラックを充てんしたゴム材料は、強度特性は高いが水素溶解度が大きいため、補強効果の小さい大粒径カーボンブラックを充填したゴム材料と同様なブリスト発生状況となった。

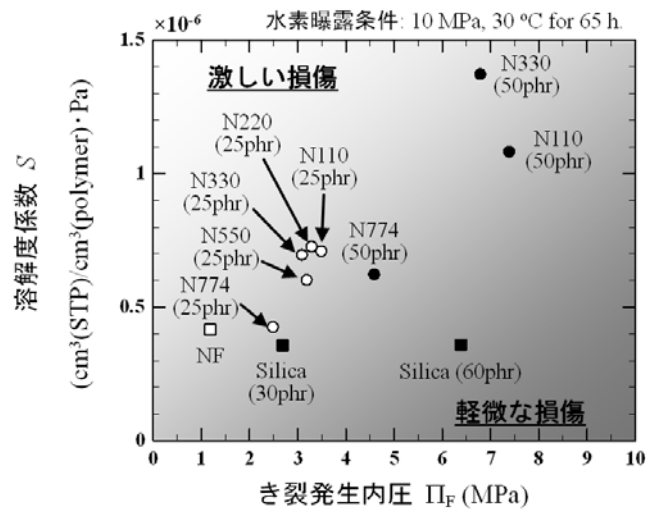


図 2.3.(1).4 ブリスタ発生臨界内圧と水素溶解度の関係

これまでの研究成果を踏まえ、H23 年度～H24 年度においては、水素ガスシール用ゴム材料について、ベースとなるゴム種、加硫方法、フィラー種などがゴムの特性、特に水素シール材としての特性に及ぼす影響を系統的に検討可能なデータベースを構築する目的でモデル配合を設計し、水素溶解量、強度特性などの測定を進めた。(紙面の都合により構築を進めているデータベースは別冊にて示す。)

ゴム材料の構造は、結晶性の金属材料と異なりアモルファス(非晶質)である。複雑に絡み合った長い鎖状の分子(高分子鎖)が硫黄や過酸化物をを用いた化学反応によって結ばれており、架橋構造を形成している。ゴム材料を伸張したとき、ゴム材料の内部では複雑に絡み合った高分子鎖が伸び、伸びた高分子鎖がもとの状態に戻ろうとすることによりゴムの弾性力が発現する。ゴム材料の弾性力を向上させるために、実用的なゴム材料には充てん剤(フィラー)といわれる粒子を配合する。充てん剤には、主にカーボンブラックやシリカが使用されている。ゴム材料は鎖状高分子であるベースポリマーおよび加硫促進剤や充填剤からなる複合材料(コンパウンド)であり、その構成要素であるベースポリマーや加硫促進剤、充てん材種類には数多くの種類があり、それらの組み合わせは膨大な数になる。

ゴム材料についても、標準化が進められ、規格が作製されている。例えばOリングのゴム材料の規格は JIS B2401, JIS K6380(一般機器用), JASO(自動車用)などで規定されている。一例として、表 2.3.(1).1 に JIS B2401 の常態値の規格を示す。これらは物性値による規格であり、配合したコンパウンドの物性値が「相当品」として基準に適合すれば良く、配合や添加剤等の種類や配合量の規定はない。このため、Oリングメーカーはメーカー独自の配合によるコンパウンドを使用して Oリングの製造を行っている。これらのメーカー独自のコンパウンドの配合は一般的には非公開であるが、前述の通りゴムの配合は無数の組み合わせが考えられるため、メーカー独自の配合について網羅的にデータを取得し、データベース化することは不可能である。

表 2.3.(1).1 Oリングの材料別種類と物理的性質(常態):JIS B2401

記号	材質	用途	硬度	引張強度	伸び
1種A	NBR相当	耐鉱物油用	A70±5	>9.8MPa	>250%
1種B	NBR相当	耐鉱物油用	A90±5	>14MPa	>100%
2種	NBR相当	耐ガソリン用	A70±5	>9.8MPa	>200%
3種	SBR相当	耐動植物油用	A70±5	>9.8MPa	>150%
4種C	VMQ相当	耐熱用	A70±5	>3.4MPa	>60%
4種D	FKM相当	耐熱用	A70±5	>9.8MPa	>200%

本事業で目的とする水素によるブリストへの耐性が高い配合設計のためには、データベースとして配合が明確なモデル配合材料による評価結果をまとめてデータベースを構築することにより、配合設計を行うメーカーは、開示されたモデル配合材料から自社コンパウンドとの類似性を検討し、関連するモデル配合材料の水素特性データを参照することにより自社コンパウンドの水素特性改良に資することが期待される。そこで、ガスシール材として一般的に用いられるエチレンプロピレンゴム(EPDM)およびアクリロニトリルブタジエンゴム(NBR)、フッ素ゴム(FKM)をベースポリマーとして選択し、標準的な硫黄加硫法[1-3]および過酸化物加硫方法を用いて試験片を作製し、水素溶解量など、各種水素特性を取得した。

②実験方法

a. 供試材料

NBR はアクリロニトリルとブタジエンの共重合体であり、アクリロニトリル含有量により低ニトリル、中ニトリル、中高ニトリル、高ニトリル、極高ニトリルに分類される。各分類の NBR として、住友化学製 Nipol DN003(極高ニトリル、アクリロニトリル含有量 50wt%)、Nipol 1041 (高ニトリル、アクリロニトリル含有量 40.5wt%)、Nipol 1042 (中高ニトリル、アクリロニトリル含有量 33.5wt%)、Nipol 1043 (中ニトリル、アクリロニトリル含有量 29wt%)、Nipol DN401 (低ニトリル、アクリロニトリル含有量 18wt%)を選択した。EPDM については住友化学製 ESPREN 505、FKM については完全フッ素化ゴムおよび部分フッ素化ゴムであるフッ化ビニリデン(VdF)およびヘキサフルオロプロピレンの2元系ゴム、VdF、HFP にテトラフルオロエチレン(TFE)を加えた3元系フッ素ゴムとしてダイキン工業製パーフロゴム、G-900、G-800、G-700 を選択した。

フィラー(充てん材)について、これまでの検討結果からブリストはゴム中に溶解する水素量少なくなるほど、かつ、ゴム材料の強度特性が向上するほど軽微になることを報告した。シリカは水素量を増大させずにゴム材料を補強可能であり、耐ブリスト性向上に有効であった。一方カーボンブラックは高い補強効果を示すが、水素量を増大させるため、耐ブリスト性向上には必ずしも有効ではなかった。しかしながらカーボンブラックには製造法により粒子径や比表面

積の種々の材料があり、ブリスタ破壊への影響が明らかになっていない。このような観点から、一次粒子径(粒径)の異なるカーボンブラック(ASTM N110, N220, N330, N550, N774)を使用し、表 2.4.(1).3 に示した 8 種類の EPDM を作製した。さらに、表 2.3.(1).2 に使用したカーボンブラックの物理化学的性質[1-4]を示す。

表 2.3.(1).2 カーボンブラックの物理化学的性質[1-9]

項目	N110	N220	N330	N550	N774
一次粒子径 (nm)	19	22	28	43	66
N ₂ 比表面積(m ² /g)	142	119	79	42	27
よう素吸着量(mg/g)	139	121	80	44	26
DBP 吸収量(cm ³ /100g)	115	114	101	115	68
かさ密度 (kg/m ³)	310	330	380	380	520

NBR, EPDM については原料ゴム 100 重量部に対し、硫黄 1.5 重量部および酸化亜鉛 5 重量部、ステアリン酸 1 重量部および加硫促進剤を添加した配合物を金型中で加熱し、2mm 厚の平板、29mm φ × 12.5mm の円柱など、所要の形状の試験片作製した。同じゴム配合品にカーボンブラック(CB, 平均粒径: 0.3 μm, 比表面積: 65 m²/g), シリカ(SC, 平均粒径: 12 μm, 比表面積: 154 m²/g)を添加したものについても同様に作製した。平均粒径は、レーザー回折法によって測定された凝集状態のフィラーの影響を含んだ値である。表 2.4.(1).2 に試験片の配合と物性値をまとめて示す。EPDM-NFT については、加硫剤として過酸化物(Dicmyl peroxide)を使用した。過酸化物による加硫を用いることにより試験片は透明になり、前述の通り内部の気泡発生状況などの観察が可能である。なお、試験片の作製は高石工業(株)に依頼した。

表 2.3.(1).3 モデル配合試験片の配合と物性値

項目		NBR#1	NBR#2	NBR#3	NBR#4	NBR#5	NBR#6	NBR#7	NBR#8
(記号.)		NBR-NF	NBR-CB50	NBR-CB25	NBR-SC60	NBR-SC30	NBR-SAF50	NBR-SRF50	NBR-V-NF
生ゴム	NBR (Nipol DN003:V) AN50%	-	-	-	-	-	-	-	100
	NBR (Nipol 1041:H) AN40.5%	-	-	-	-	-	-	-	-
	NBR (Nipol 1042:Std) AN33.5%	100	100	100	100	100	100	100	-
	NBR (Nipol 1043:M) AN29%	-	-	-	-	-	-	-	-
	NBR (Nipol DN401:L) AN18%	-	-	-	-	-	-	-	-
加硫促進剤	Accelerator MBTS	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Accelerator TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Accelerator ZnBDC	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stearic acid	1	1	1	1	1	1	1	1
	Zinc oxide	5	5	5	5	5	5	5	5
加硫剤	Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Dicmyl peroxide	-	-	-	-	-	-	-	-
フィラー	SAF Black (ASTM N110)	-	-	-	-	-	50	-	-
	ISAF Black (ASTM N220)	-	-	-	-	-	-	-	-
	HAF Black (ASTM N330)	-	50	25	-	-	-	-	-
	FEF Black (ASTM N550)	-	-	-	-	-	-	-	-
	SRF Black (ASTM N774)	-	-	-	-	-	-	50	-
	Silica (Nipsil VN3)	-	-	-	60	30	-	-	-
Density (g/cm ³)		1.032	1.188	1.118	1.247	1.152	1.183	1.196	1.073
Hardness		A54	A78	A68	A83	A68	A80	A74	A65

項目		NBR#9	NBR#10	NBR#11	NBR#12	NBR#13	NBR#14	NBR#15	NBR#16
(記号.)		NBR-V-CB50	NBR-H-NF	NBR-H-CB50	NBR-M-NF	NBR-M-CB50	NBR-L-NF	NBR-L-CB50	NBR-NFT
生ゴム	NBR (Nipol DN003:V) AN50%	100	-	-	-	-	-	-	-
	NBR (Nipol 1041:H) AN40.5%	-	100	100	-	-	-	-	-
	NBR (Nipol 1042:Std) AN33.5%	-	-	-	-	-	-	-	100
	NBR (Nipol 1043:M) AN29%	-	-	-	100	100	-	-	-
	NBR (Nipol DN401:L) AN18%	-	-	-	-	-	100	100	-
加硫促進剤	Accelerator MBTS	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-
	Accelerator TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-
	Accelerator ZnBDC	-	-	-	-	-	-	-	-
	Stearic acid	1	1	1	1	1	1	1	0.5
	Zinc oxide	5	5	5	5	5	5	5	-
加硫剤	Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-
	Dicmyl peroxide	-	-	-	-	-	-	-	0.15
フィラー	SAF Black (ASTM N110)	50	-	50	-	-	-	-	-
	ISAF Black (ASTM N220)	-	-	-	-	-	-	-	-
	HAF Black (ASTM N330)	-	-	-	-	50	-	50	-
	FEF Black (ASTM N550)	-	-	-	-	-	-	-	-
	SRF Black (ASTM N774)	-	-	-	-	-	-	-	-
	Silica (Nipsil VN3)	-	-	-	-	-	-	-	-
Density (g/cm ³)		1.225	1.05	1.201	1.02	1.18	0.997	1.158	0.977
Hardness		A90	A60	A85	A55	A72	A53	A70	A50

項目		EPDM#1	EPDM#2	EPDM#3	EPDM#4	EPDM#5	EPDM#6	EPDM#7	EPDM#8
(記号.)		EPDM-NF	EPDM-CB50	EPDM-CB25	EPDM-SC60	EPDM-SC30	EPDM-NFT	EPDM-SAF25	EPDM-ISAF25
生ゴム	EPDM (ESPRENE505)	100	100	100	100	100	100	100	100
加硫促進剤	Accelerator MBTS	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	1.5	1.5
	Accelerator TMTD	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-	0.7	0.7
	Accelerator ZnBDC	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	-	0.7	0.7
	Stearic acid	1	1	1	1	1	0.5	1	1
	Zinc oxide	5	5	5	5	5	-	5	5
加硫剤	Sulfur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	1.5	1.5
	Dicmyl peroxide	-	-	-	-	-	1.6	-	-
フィラー	SAF Black (ASTM N110)	-	-	-	-	-	-	25	-
	ISAF Black (ASTM N220)	-	-	-	-	-	-	-	25
	HAF Black (ASTM N330)	-	50	25	-	-	-	-	-
	FEF Black (ASTM N550)	-	-	-	-	-	-	-	-
	SRF Black (ASTM N774)	-	-	-	-	-	-	-	-
	Silica (Nipsil VN3)	-	-	-	60	30	-	-	-
Density (g/cm ³)		0.921	1.087	1.013	1.133	1.039	0.873	1.015	1.014
Hardness		A58	A79	A69	A90	A70	A51	A69	A69

項目		EPDM#9	EPDM#10	EPDM#11	EPDM#12	EPDM#13	EPDM#14		
(記号.)		EPDM-FEF25	EPDM-SRF25	EPDM-NFT-CB25	EPDM-NFT-SC30	EPDM-SAF50	EPDM-SRF50		
生ゴム	EPDM (ESPRENE505)	100	100	100	100	100	100		
加硫促進剤	Accelerator MBTS	1.5	1.5	-	-	1.5	1.5		
	Accelerator TMTD	0.7	0.7	-	-	0.7	0.7		
	Accelerator ZnBDC	0.7	0.7	-	-	0.7	0.7		
	Stearic acid	1	1	0.5	0.5	1	1		
	Zinc oxide	5	5	-	-	5	5		
加硫剤	Sulfur	1.5	1.5	-	-	1.5	1.5		
	Dicmyl peroxide	-	-	1.6	1.6	-	-		
フィラー	SAF Black (ASTM N110)	-	-	-	-	50	-		
	ISAF Black (ASTM N220)	-	-	-	-	-	-		
	HAF Black (ASTM N330)	-	-	25	-	-	-		
	FEF Black (ASTM N550)	25	-	-	-	-	-		
	SRF Black (ASTM N774)	-	25	-	-	-	50		
	Silica (Nipsil VN3)	-	-	-	30	-	-		
Density (g/cm ³)		1.017	1.014	0.977	1.008	1.093	1.093		
Hardness		A68	A66	A60	A63	A81	A72		

項目		FKM#1	FKM#2	FKM#3	FKM#4	FKM#5	FKM#6	FKM#7	FKM#8
(記号.)									
生ゴム	パーフロゴム	100	100	-	-	-	-	-	-
	G-900 (3 元系)	-	-	100	100	-	-	-	-
	G-800 (2 元系)	-	-	-	-	100	100	-	-
	G-700 (2 元系.)	-	-	-	-	-	-	100	100
架橋方法		過酸化物	過酸化物	過酸化物	過酸化物	過酸化物	過酸化物	ポリオール.	ポリオール.
フィラー	SAF Black (ASTM N110)	-	-	-	-	-	-	-	-
	ISAF Black (ASTM N220)	-	-	-	-	-	-	-	-
	HAF Black (ASTM N330)	-	A80 に調整	-	A80 に調整	-	A80 に調整	-	A80 に調整
	FEF Black (ASTM N550)	-	-	-	-	-	-	-	-
	SRF Black (ASTM N774)	-	-	-	-	-	-	-	-
	Silica (Nipsil VN3)	-	-	-	-	-	-	-	-
Density (g/cm ³)		1.967	1.941	1.89	1.875	1.798	1.793	1.836	1.831
Hardness		A60	A84	A60	A82	A56	A78	A62	A88

b. 高圧水素曝露実験

高圧水素容器を用い、円柱試験片 (29mm φ × 12.5mm)、円板試験片など、所定の形状に成形した試験片を圧力 0.6MPa～100MPa の水素ガス中で所定時間曝露後、減圧して大気中に取り出し、各種測定に用いた。ゴム材料の水素曝露による体積変化測定、については曝露後の試験片を大気中にて保持し、測長顕微鏡を用いて寸法測定を実施した。同時にブリスタの発生状況など、試験片の変形や破壊状況を観察した。

c. 飽和水素量の測定

水素量の測定は 13mm φ × 2mm の円柱試験片を使用し、水素曝露後、昇温脱離分析装置 (TDA) : ゴム・樹脂中水素分析システム JSH-201 により測定した。得られた残存水素量の経時変化について、式(1)に示した拡散方程式の多項式近似解を飽和水素量と拡散係数 D を未知定数として最小二乗法によりフィッティングすることにより決定した[1-2]。

$$C_{H,R}(t) = \frac{32}{\pi} \times C_{H,0} \times \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left[-(-2n+1)^2 \pi^2 Dt / \ell^2\right]}{(2n+1)^2} \right\} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left[-D\beta_n^2 t / \rho^2\right]}{\beta_n^2} \right\} \quad (1)$$

ここで $C_{H,R}(t)$ (wt.ppm) は水素曝露後の減圧時点からの経過時間 t (sec) における試験片中の水素量、 $C_{H,0}$ (wt.ppm) は水素曝露時の飽和水素量、 D (m²/sec) は拡散係数、 β_n 0 次ベッセル関数の根、 l (m) と ρ (m) はそれぞれ試験片の厚さと半径を示す。

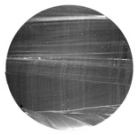
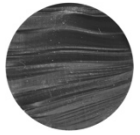
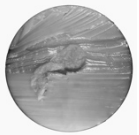
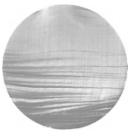
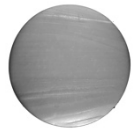
c. ブリスタ発生に対するゴム配合の影響

前項に示した試験片について、硬度、密度などの基本データを取得するとともに高圧水素

曝露実験を実施し、各試験片のブリスタ発生状況を把握した。これらの結果から、水素曝露によるブリスタ発生状況や物性値と試験片のゴム配合の相関を検討することが可能である。一例として、充てん材の添加量、種類、ベースポリマーとして使用した NBR のアクリロニトリル含有量の影響について、圧力 10MPa、温度 30°C にて 65 時間水素曝露後、十分に時間が経過し水素が脱離した後の試験片を中央部で切断し、断面を観察した結果を表 2.3.(1).3 から表 2.3.(1).5 にまとめて示す。試験片のデュロメーター硬度、密度についてもあわせて示す。


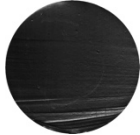
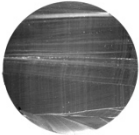
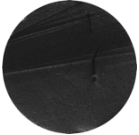
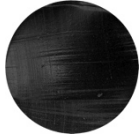
充てん材添加量のブリスタ発生に対する影響について、表 2.3.(1).3 に示した。未充てん材に対して、カーボンブラック、シリカを配合した場合、配合量を増すことによりブリスタ発生状況は軽微になった。特にシリカを配合した場合、ブリスタは観察されなかった。充てん材を配合することにより強度、硬度が増し、ブリスタ破壊に対する耐性が高くなることが示唆される。また、シリカはゴムに配合した際、水素溶解量を増やさないことからシリカ配合ゴムはブリスタ発生が抑制されたと考えられる。

表 2.3.(1).3 充てん材添加量のブリスタ発生に対する影響

充てん材種/添加量(phr) (試験片記号)	HAF 50phr (NBR#2)	HAF 25phr (NBR#3)	未充てん (NBR#1)	Silica 30phr (NBR#5)	Silica 60phr (NBR#4)
圧力 10MPa、温度 30°C にて 65 時間水素曝露後の試験片断面					
デュロメーター硬度	A 78	A 68	A 54	A 68	A 83
密度(g/cm ³)	1.188	1.118	1.032	1.152	1.247

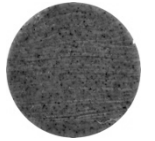

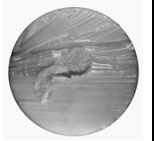
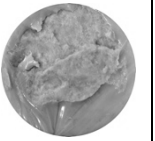

次に表 2.3.(1).4 にカーボンブラック種のブリスタ発生に対する影響をまとめて示した。カーボンブラックとして粒径、比表面積の異なる材料を配合して作製した試験片の水素曝露後の断面観察を実施した結果、ブリスタ発生の観点から充てん材として用いるカーボンブラック種、特にカーボンブラックの平均粒径、比表面積の影響はほとんどないことが判明した。

表 2.3.(1).4 カーボンブラック種のブリスタ発生に対する影響

カーボンブラック種 (試験片記号)	SAF (NBR#6)	ISAF (NBR#17)	HAF (NBR#2)	FEF (NBR#18)	SRF (NBR#7)
粒径(nm)/比表面積(m ² /g)	19/142	22/119	28/79	43/42	66/27
圧力 10MPa、温度 30°C にて 65 時間水素曝露後の試験片断面					
デュロメーター硬度	A 83	A 79	A 78	A 75	A 74
密度(g/cm ³)	1.183	1.187	1.188	1.183	1.193

NBR はアクリロニトリルとブタジエンの共重合体であり、アクリロニトリルの含有量により極高ニトリル、高ニトリル、中高ニトリル、中ニトリル、低ニトリルに分類される。表 2.3.(1).4 にベースポリマーとして用いた NBR アクリロニトリル量のブリスタ発生に対する影響をまとめて示す。これまで標準として用いていた中高ニトリルのブリスタ発生状況に対して、アクリロニトリル量が小さい中ニトリル、低ニトリルを用いた場合、およびアクリロニトリル量が多い高ニトリルを用いた場合は中高ニトリルと比べブリスタ発生が大きくなる傾向にある。アクリロニトリルとブタジエンが等量含まれる極高ニトリルの場合は高度が高く、ブリスタ発生が軽微になった。極性モノマーであるアクリロニトリルの添加量増加に伴い、アクリロニトリルと無極性であるブタジエンの共重合体である NBR の極性は大きくなる。現時点ではこれらの NBR についてのブリスタ発生状況と無極性である EPDM の状況をあわせて検討した結果、ブリスタ発生に対するベースポリマーの種類の影響について、ベースポリマーの極性が大きくなることによりポリマーの硬度や強度が高くなることによりブリスタ発生が抑制されていると考えられる。

表 2.3.(1).4 NBR ベースポリマーアクリロニトリル量のブリスタ発生に対する影響

NBR 種 (試験片記号)	極高ニトリル (NBR#6)	高ニトリル (NBR#17)	中高ニトリル (NBR#1)	中ニトリル (NBR#18)	低ニトリル (NBR#7)
アクリロニトリル量(%)	50	40.5	33.5	29	18
圧力 10MPa, 温度 30°C に て 65 時間水素曝露後の 試験片断面					
デュロメーター硬度	A 65	A 60	A 54	A 55	A 53
密度(g/cm ³)	1.073	1.050	1.032	1.020	0.997

以上、構築を進めているデータベースに基づきブリスタの発生状況を検討した結果の一例を示した。表 2.3.(1).2 に掲載した通り、データベースに掲載する試験片の配合およびその配合を構成する材料を明確に示すことによって、配合と材料強度など特性への水素の影響や水素溶解量、ブリスタ発生状況についての相関を検討することが可能である。通常、ゴムメーカーでは独自のノウハウに基づいた配合を開発し、製品の製造に使用されている。各社とも用途、目的に応じ、数十～数百種もの配合が準備されている場合が多い。これらの配合は非公開であるが、本研究により得られた配合が明確に示されたモデル配合材による試験片の結果を参照することによって、各社独自の配合について、材料強度など特性への水素の影響や水素溶解量、ブリスタ発生状況を推定し、水素機器用の材料開発に活用することが可能である。このような観点から、本研究期間終了後においても企業との連携、関連学協会と連携して産業界からの意見を聴取し、計測データ種、モデル配合材の妥当性の検討を進め、データベースのブラッアップを進める。

e. 結論

本研究では高圧ガスシール用ゴム材料のブリスタ破壊と水素溶解挙動および材料強度との関係を検討し、以下の結論を得た。

1. ガスシール材として一般的に用いられるエチレンプロピレンゴム(EPDM)およびアクリロニトリルブタジエンゴム(NBR)、フッ素ゴム(FKM)をベースポリマーとして用いた水素ガスシール材モデル配合を設計し、ゴム試験片を作製した。これらについて水素溶解量など、各種水素特性を取得し、ゴム材料の配合を明示したデータベースとしてまとめた。

2. 配合を明示したモデル材料の試験片について、硬度、密度などの基本データを取得するとともに高圧水素曝露実験を実施し、各試験片のブリスタ発生状況を把握した。これらの結果から、水素曝露によるブリスタ発生状況や物性値と試験片のゴム配合の相関を検討が可能となった。

3. 配合を明示したモデル材料のデータを参照することにより、特にブリスタ発生や水素の溶解などの水素に対する特性改良の指針を得ることが可能となった。

参考文献

- [1-1] Biscoe, B. J. et al., Rubber chemistry and technology, 67, 384 (1994).
- [1-2] 山辺純一郎, 西村伸, 藤原広匡, 日本機械学会論文集, A編 75巻 756号 1063-1073
- [1-3] ゴム工業便覧(第4版), 日本ゴム協会編, 社団法人日本ゴム協会(1994).
- [1-4] http://www.tokaicarbon.co.jp/products/carbon_b/seast/index.html.

(2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価

①目的

ゴム材料の化学構造評価(ゴム材の水素曝露による劣化等, 化学構造変化の明確化)を目的として, 以下の内容について検討を進めた.

- a.水素曝露前の状態で分析を実施し初期のゴム材料の化学構造を把握する.
- b.長時間水素雰囲気下に曝露された, ゴム材料の分析を実施する.
- c.水素曝露によるゴム材料の化学構造変化(劣化)の評価を行う.

試料として, 充てん材を含まない NBR-NF(NBR#1), EPDM-NF(EPDM#1)を試料として用い, 高圧水素曝露後のゴム材料の構造変化を赤外吸収スペクトル, ラマンスペクトル, 核磁気共鳴スペクトル(固体 $^1\text{H-NMR}$ および固体 $^{13}\text{C-NMR}$)により確認し, 曝露時の水素圧力の影響を把握することを目的とした. また, 固体 $^1\text{H-NMR}$ を用いてゴム材料中に溶解した水素分子の検出を試みた.

上記研究内容 a~c について, これまで水素曝露前後の NBR および EPDM について ATR 法による赤外吸収スペクトル, ラマン散乱スペクトル, 固体 $^1\text{H-NMR}$ および固体 $^{13}\text{C-NMR}$ を測定し, 以下の結論を得ており, 既に報告した.

1. NBR-NF, EPDM-NF 試験片について, ATR 法による赤外吸収スペクトル, ラマン散乱スペクトル, $^1\text{H-NMR}$ および $^{13}\text{C-NMR}$ を測定し, 水素曝露前後のスペクトルを比較した結果, いずれもスペクトルに変化はなく, ゴム素材の化学的な構造変化は生じていないと判断される.

2. 水素曝露直後の水素が溶解した状態の NBR-NF(NBR#1)について, 固体 $^1\text{H-NMR}$ を測定した結果, 分子運動性の異なる 2 種類の水素分子, すなわち気体状の運動性を示す水素分子およびゴム分子鎖と同等の運動性を示すゴム分子鎖との相互作用が強い水素分子が検出された. 図 2.3.(2).1 に水素曝露後の NBR-NF(NBR#1)の固体 $^1\text{H-NMR}$ スペクトルの経時変化を示す. 曝露後のスペクトルでは 2.2ppm と 5.5ppm をピークトップとする NBR 由来のスペクトルの他, 未曝露の NBR では観測されない[A] 4.49 ppm および[B]4.8 ppm に 2 種類のピークが出現した. これらのピークは時間の経過とともに減少し 30 時間後消滅した.

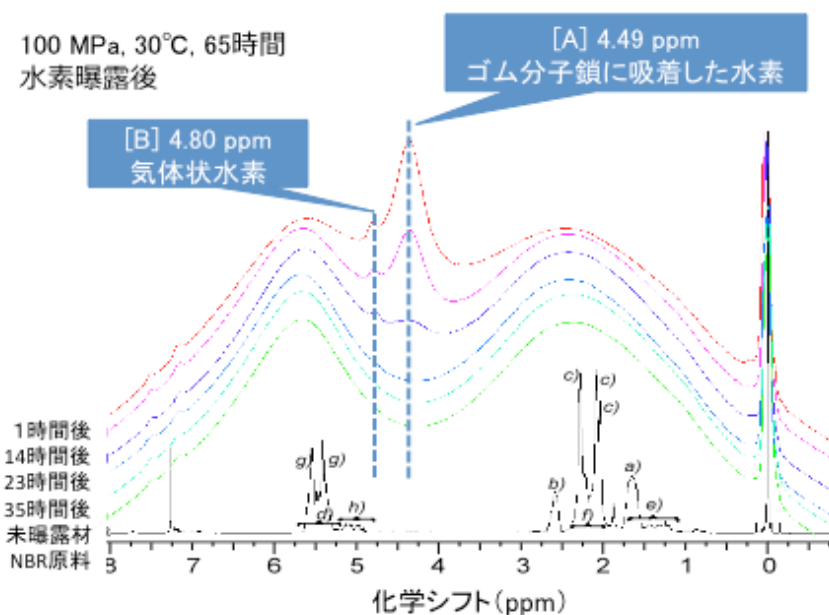


図2.3.(2).1 水素曝露後のNBR-NFの固体¹H-NMRスペクトルの経時変化
曝露条件:100MPa, 30°C, 24時間

3. 水素溶解状態の試験片 NBR-NF(NBR#1)試験片の固体¹H-NMRの経時変化を測定し、ピーク面積比から水素溶解量を算出した結果、昇温脱離ガス分析法(TDA)により測定した水素溶解量と良く一致した。

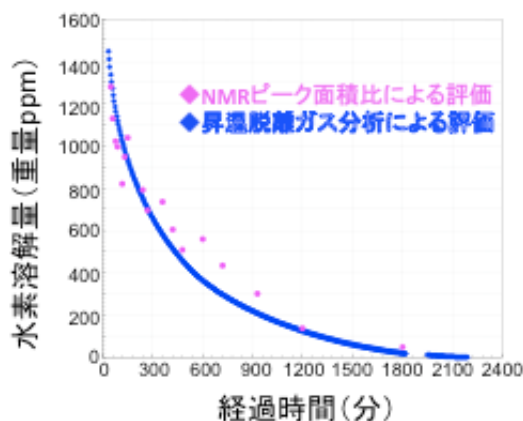


図2.3.(2).2 TDAおよびNMRで評価したNBR-NF中の残存水素濃度の相関
曝露条件:100MPa, 30°C, 24時間

本事業で目的とする高圧水素環境下で長期間信頼性高く使用可能な水素ガスシール材として適用可能な配合設計を行う場合、2.3.(4)項にて後述するOリングの各種破壊モード、すなわちブリスタ破壊、はみ出し破壊、座屈破壊への耐性が高い材料の設計が必要となる。2.3.(1)項に記載したモデル配合は現段階で一般的に使用されている材料の配合であるが、一般的なゴム材料を用いた場合、水素に対する耐性が十分に得られないことも考えられる。そ

ここで、これらの材料の水素の影響を分子レベルで解明し、水素に対する耐性に優れたベースポリマーの分子設計指針確立を目指し、固体 NMR を用いた水素溶解状態における分子構造解析を実施し、水素の溶解状態の検証により水素の溶解量、溶解状態と O リング破壊の原因となるブリスタ発生、体積膨張との相関解明を試みた。

②実験方法

a. 核磁気共鳴(NMR)スペクトル

NMRは超伝導固体NMR装置 AVANCE-III500MHz (Bruker Biospin 社製)を用い、液体用10mmプローブ、固体MAS用7mmおよび4mmプローブを使用した。試料から脱離した水素による内圧上昇を防ぐ目的で、固体MAS測定に使用したジルコニア製試料容器(ローター)および蓋にはピンホールを形成した。また、蓋に設置したシリコンゴム(0ppm)を基準物質として1Hケミカルシフトを観測した。試料容器に基準物質を設置するにより、定量的な評価が可能となった。

b. 測定試料

表 2.3.(1).2 に示した試料のうち、充てん材を添加していない配合である NBR-NF(NBR#1)、高ニトリル(NBR#17)、中ニトリル(NBR#18)、低ニトリル(NBR#7)、EPDM-NF(EPDM#1)および充てん材としてカーボンブラックを 50phr 含む EPDM-CB50(EPDM#2)について、7mm φ × 10mm の円柱状試料を成形し、NMR 測定用試料容器に充填した状態で所定の条件により水素曝露を行った後に測定した。試験片を初期状態として水素曝露していない試料について測定し、スペクトルを比較することにより水素曝露による影響を調べた。

c. 水素溶解量と体積変化の測定

計測した試料の残存水素量はNMR測定試料と同時に同条件にて曝露した試験片をTDA:昇温脱離分析装置 JSH-201 (J サイエンス社製)にて別途測定した。また、試料寸法の変化は同一形状の試料を測定に使用した円柱状試料をNMR測定時の試料容器と同じ径のガラス管に充填し、NMR測定試料と同時に同条件にて曝露した試験片の長さ方向の寸法変化を測定し、体積変化を算出した。

d. 高圧水素ガスシール用ベースポリマーの分子設計指針

これまでの結果に基づきベースポリマーの極性と水素の溶解状態、およびその体積膨張や水素溶解量とはみ出し、座屈破壊およびブリスタ破壊との相関から考えた分子設計指針について検討した。これまでの検討結果においては体積膨張と相関があるゴム分子鎖と同等の運動性を示すゴム分子鎖との相互作用が強い水素分子である[A]の溶解状態や溶解量とベースポリマー、特に極性の影響は見られなかった。従って、アクリロニトリル量の異なる NBR および EPDM の評価結果から判断すると、ベースポリマーの極性は水素の溶解量や溶解状態に影響を与えないため、現時点では材料強度や劣化特性、耐久性など他の要求特性により選定することが可能であると考えている。

e. 結論

本項では水素溶解状態の NBR および EPDM について固体 $^1\text{H-NMR}$ を測定し、以下の結論を得た。

1. 異なる圧力で水素曝露した試験片の減圧後1時間後の $^1\text{H-NMR}$ を測定した結果、ゴムの自由体積に溶解し、気体状の運動性を示す化学シフト 4.8ppm に観察される水素分子[B]はほぼ一定の溶解量を示すのに対し、ゴム分子鎖と同等の運動性を示すゴム分子鎖との相互作用が強い水素分子である 4.3ppm の水素分子[A]は水素曝露圧力が小さくなることにより溶解量が減少し、10MPa にて水素曝露した場合にはピークが検出されなかった。

2. 2種の異なる状態で溶解した水素分子の溶解量と体積膨張と相関を検討した結果、水素の溶解状態がゴム分子鎖に吸着した状態の水素分子[A]がゴムの体積膨張を引き起こすことが判明した。

3. アクリロニトリル量が異なるNBRの高圧水素曝露時の水素の溶解状態を調べた結果、4.7～4.9ppm および 4.3～4.4ppm に溶解した水素[A]および[B]のシグナルが観察された。これらはアクリロニトリル量の影響は見られなかった。

4. 無極性の EPDM をベースポリマーとして用いた場合においても、ゴムの自由体積に溶解し、気体状の運動性を示す水素分子およびゴム分子鎖と同等の運動性を示すゴム分子鎖との相互作用が強い水素分子の2種の溶解状態があることが判明した。

5. ベースポリマーの極性は水素の溶解量や溶解状態に影響を与えないため、現時点では材料強度や劣化特性、耐久性など他の要求特性により選定することが可能であると考えられる。

(3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する最新研究状況調査

国内外の学会、研究集会において水素関連技術、ゴム、樹脂材料に関する最新の研究動向を調査した。また、ゴム材料の素材製造、ゴム材料製造、ゴム部材ユーザーなど様々な立場からの意見を調査する目的で、日本ゴム協会に設立された水素機器用エラストマー研究分科会との連携により研究開発動向調査および研究ニーズの把握を進めた。

2. 研究開発項目毎の成果

2.3.2 研究開発項目③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

共同研究／（4）水素雰囲気下におけるゴム材料研究、NOK 株式会社

①目的

ゴムおよび水素シールに関する基礎データをシステムティックに取得すべくプロジェクト初期より本事業に参画し、その延長上で事業化をまでを目指してきた。高圧水素ガスシール用ゴム材料に求められる材料特性変化に着目し検討を進め、高圧水素ガスが及ぼすゴム O リング材料の体積膨潤への影響が非常に大きいことを明らかにした。さらにその膨潤のため O リング溝と接触し破壊する可能性があり、高圧水素ガスシールでは通常の推奨溝設計範囲と異なることが判明した。このため、実用化のためには O リングだけではなく、O リングの溝規格および O リング溝設計指針の提示が必要であり検討を進めてきた。

これまでにブリスタ破壊メカニズム解明と解決に向けたゴム材料の研究・評価のため、開発したゴム材料の高圧水素耐久試験機を用いたブリスタ発生に起因する機構側要因（圧力差、昇圧・減圧速度等）の影響度を把握した。さらに、O リングの使用条件を模擬した温度、加減圧条件によるシールからの漏洩量により、O リングの破壊モードを把握し、対策の指針を確立した。その結果、以下の結論を得ており、既に報告した。

1. 図 2.3.2.1 に示す高圧水素耐久試験機を開発し、モデル高圧水素容器により O リングのシール挙動を評価した結果、一定圧力で加圧した際には定常的な透過漏れが発生し、繰り返し加減圧を行うことにより透過漏れ量が増加することが判明した。

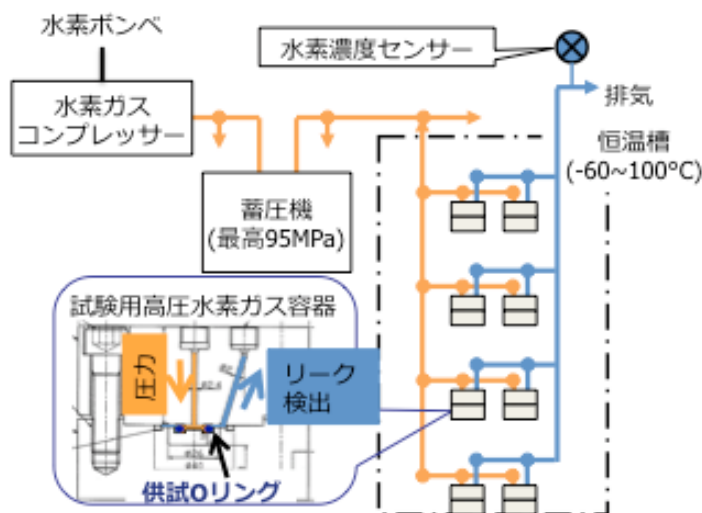


図2.3.2.1 Oリング高圧水素耐久試験機

2. 図 2.3.2.2 に繰り返し加減圧試験後の O リングを観察した結果を示す. 気泡発生および気泡からき裂に至るブリスタ破壊現象が観察され, 加圧時の上限圧力が高いほど損傷が激しいことが判明した. 30℃と 100℃における上限圧力 70MPa での繰り返し加減圧試験を実施した結果,30℃におけるブリスタ現象は軽微であり, 破壊は見られなかった.

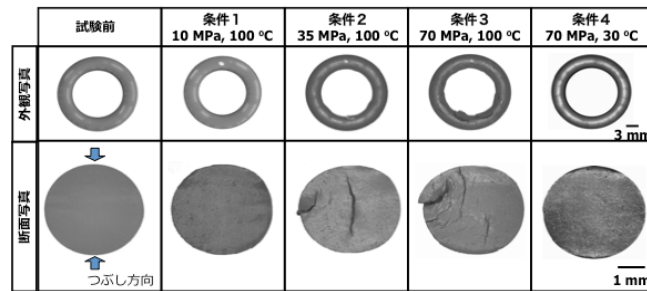


図2.3.2.2 加減圧試験後のOリングの状況

3. ゴム材料, 雰囲気温度, 水素ガス圧力のほか O リング溝充填率, 加減圧力サイクルの環境条件として減圧時間などの制御因子とした L18 直交実験を実施した. 図 2.3.2.3 に要因効果図を示す. O リングの破壊の指標として用いた破断強度の低下に対して, 材料, 温度, 充填率, 減圧時間の影響が大きいことが判明した.

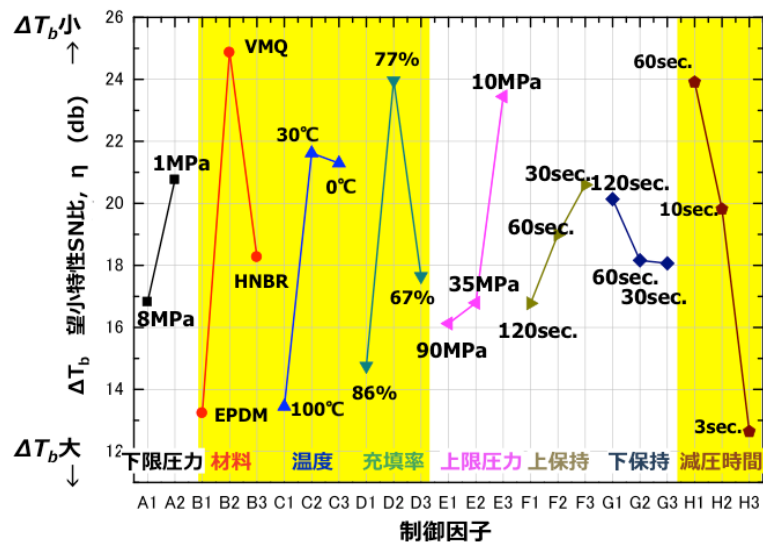
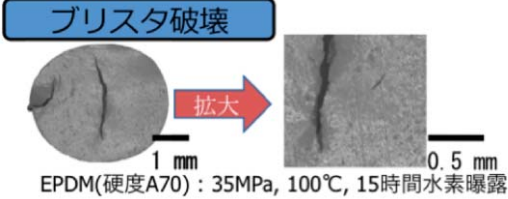
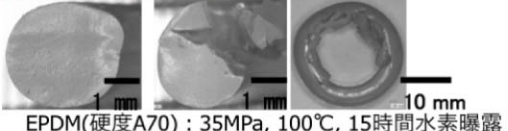
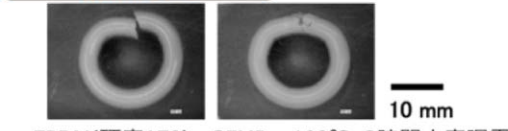


図2.3.2.3 要因効果図

4. O リングの破壊はブリスタ破壊, はみ出しおよび座屈により破壊が発生していることが判明した. O リングの破壊モードを表 2.3.2.1 にまとめた. はみ出し, 座屈による破壊の原因は水素溶解によるゴム材料の膨潤に伴う体積増加であることが示唆された.

表 2.3.2.1 Oリング破壊モード

破壊モード	原因	対策指針
<p style="text-align: center;">ブリスタ破壊</p>  <p style="text-align: center;">EPDM(硬度A70) : 35MPa, 100℃, 15時間水素曝露</p>	<p>高圧水素曝露時にゴム材料中に溶解した水素が減圧に伴い気化することにより気泡発生からき裂進展に至る。</p>	<p>(Oリング用ゴム材料の対策)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素溶解量の低いゴム配合の開発 ・硬度が高く、破壊強度が大きいゴム配合の開発 ・充填材のカーボンブラックは補強効果が高いが水素吸着によりゴムの水素溶解量が増大する。補強効果が高く、水素吸着が小さい充填材を探索
<p style="text-align: center;">はみ出し破壊</p>  <p style="text-align: center;">EPDM(硬度A70) : 35MPa, 100℃, 15時間水素曝露</p>	<p>水素による膨潤のため、ゴム材料の常態値で設計されたOリング溝の断面積を越える体積増加によりはみ出し破壊に至る。</p>	<p>(Oリング用ゴム材料の対策)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素溶解量の低いゴム配合の開発 ・膨潤による体積増加率の低いゴム配合の開発 ・水素溶解量が低いゴム材料の探索
<p style="text-align: center;">座屈破壊</p>  <p style="text-align: center;">EPDM(硬度A70) : 35MPa, 100℃, 3時間水素曝露</p>	<p>水素による膨潤のため、Oリングの円周方向に体積膨張が発生し、座屈発生に至る。</p>	<p>(Oリング溝設計の対策)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用環境（温度、水素圧力など）におけるゴム材料の体積増加を前提とした充填率設計 ・使用環境（温度、水素圧力など）におけるゴム材料のはみ出し破壊、座屈破壊の限界値を把握

以上の結果を踏まえ、ブリスタ発生メカニズムの解明と解決に向けた可視化検討(a), ガス漏洩量の概算に必要なガス透過に関する検討(b), 平面固定シールに依存する非破壊範囲の検討(c)および円筒面固定シール仕様でのOリング破壊評価および長期シール耐久性評価(d)(e)を実施したので、これらについて下記報告する。

②実験方法

a. ブリスタ発生・成長挙動の可視化

図.2.3.2.4 に示す可視化用の窓付きの圧力容器を用いて、ゴム O リング内部に発生するブリスタの発生、成長を可視化した。O リング内部の観察のため透明の O リングをエチレンプロピレンゴム (EPDM) およびシリコーンゴム (VMQ) で作成し、ゴム材料による違いを評価した。またガス種の影響も合わせて評価するため、水素ガス、ヘリウムガス、窒素ガスの 10MPa の高圧ガスをゴム内部に十分溶解させ、室温下で急減圧させた。

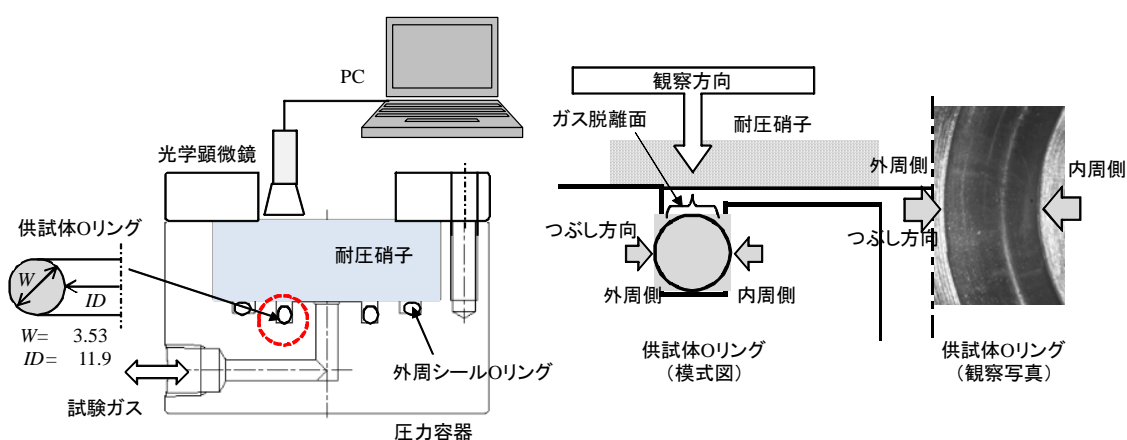


図 2.3.2.4 可視化装置図

b. 高圧水素ガス輸送特性の P-T 線図

焼結金属を溝に用いた特殊 O リング溝を開発し、水素ガス輸送特性を評価した。材料はエチレンプロピレンゴム (EPDM) シリコーンゴム (VMQ) および水素化アクリロニトリルゴム (HNBR) を用いて、ガス透過係数の温度 (T) と水素ガス圧力 (P) の関係を線図化し、高圧下での漏洩量の概算を可能とした。

c. 平面固定シールの非破壊範囲

平面固定シール溝を用いて、O リングの体積変化が引き起こすはみ出しおよび座屈破壊に及ぼす設計因子 (例えばつぶし率, 充てん率, O リング寸法) の設計範囲を検討した。材料は、充てんフィラー種の異なるエチレンプロピレンゴム (EPDM) を評価した。水素ガス 70MPa, 温度 100°C で水素ガスを飽和溶解させた後急減圧し、供試体 O リング破壊状態を評価した。

d. 平面固定シールの長期シール耐久性

平面固定シールを用いた長期圧力サイクルによるシール性評価を実施した。試験装置は、水素エネルギー製品研究試験センター (HyTReC) の高圧水素ガス供給ラインを使用し、

長期サイクル回数を実現できるように開発した。圧力容器断面図を図.2.3.2.5 に示す。

e.円筒面固定シールの長期シール耐久性

同様に円筒面固定シールを用いた長期圧力サイクルによるシール性評価を実施した。圧力容器断面図を図.2.3.2.6 に示す。円筒面固定シール溝設計因子（例えばバックアップリング，つぶし率，充てん率）の設計範囲を検討し，長期シール耐久性の評価を実施した。

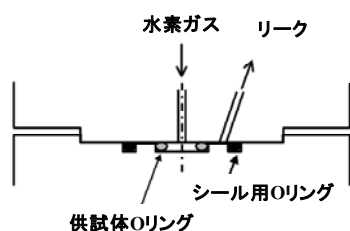
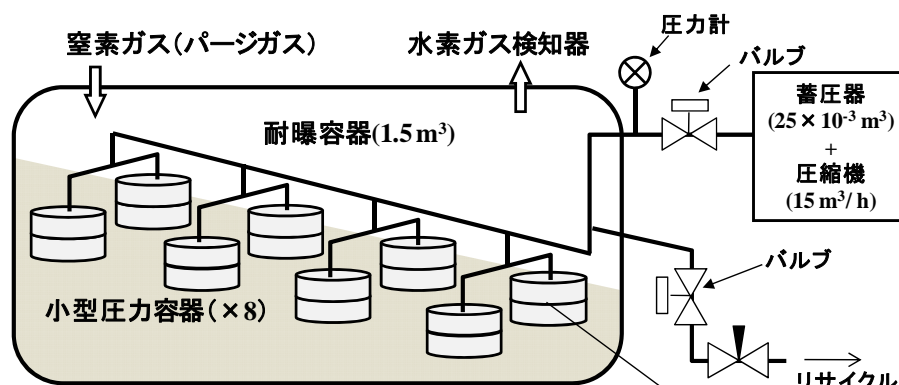


図.2.3.2.5 圧力容器

(平面固定長期シール耐久試験装置)

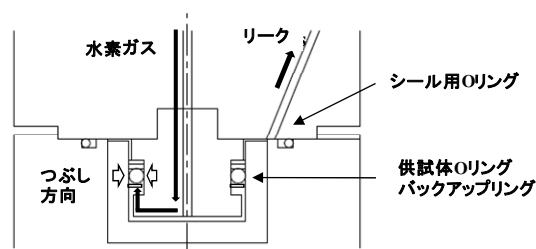


図.2.3.2.6 圧力容器

(円筒面固定長期シール耐久試験装置)

③実験結果と考察

a.ブリスタ発生・成長挙動の可視化

図.2.3.2.7 に示す EPDM ゴムではガス種によりその挙動は異なり，窒素ガスが最もブリスタを発生させやすく，水素ガスはヘリウムガスよりブリスタを発生させることを確認した。図.2.3.2.8 に示すシリコンゴム (VMQ) でも同様にガス種によりその挙動は異なるが，ブリスタが EPDM と比べて発生しにくいことを確認した。

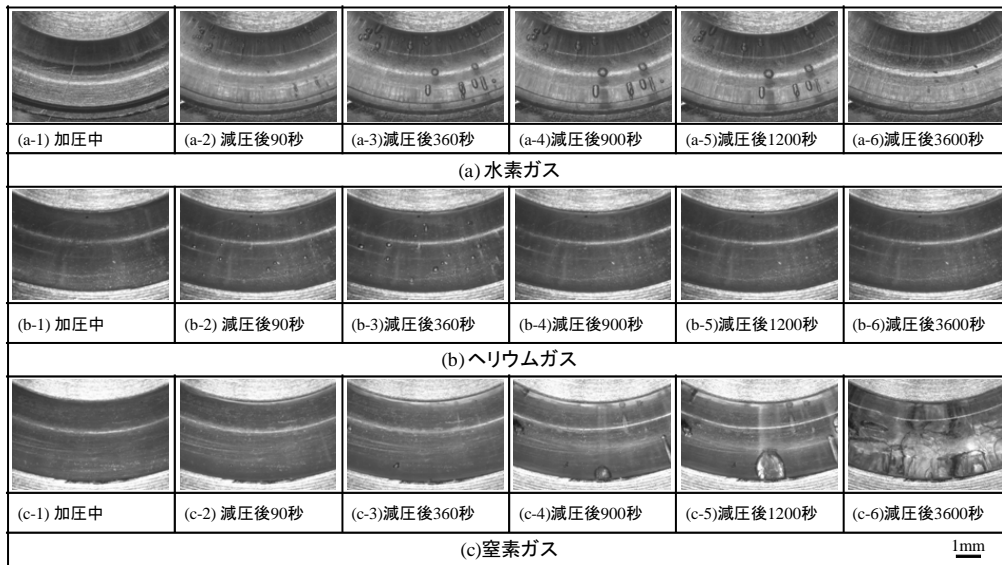


図.2.3.2.7 ガス減圧後のブリスタ発生・成長挙動（エチレンプロピレンゴム）

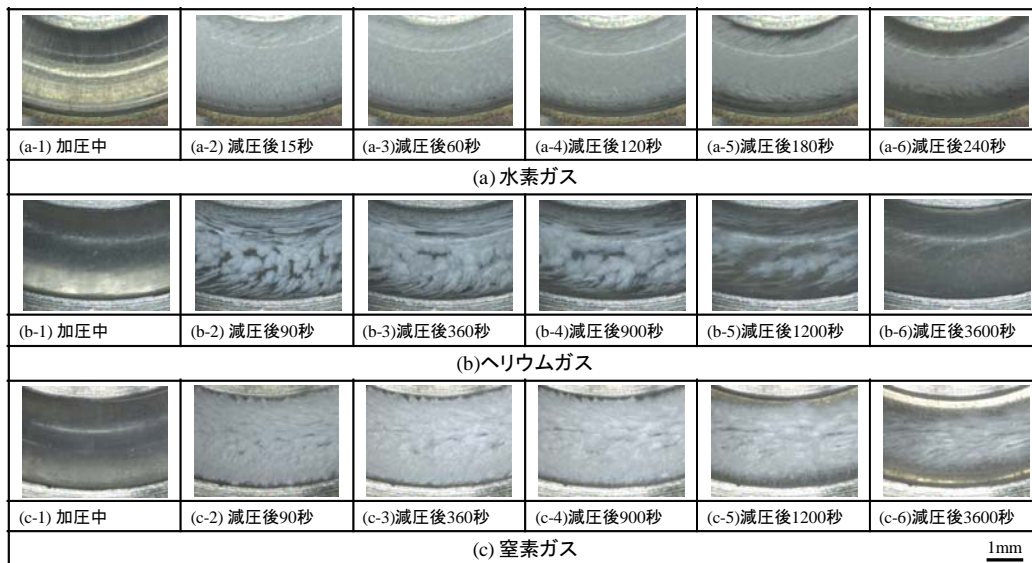
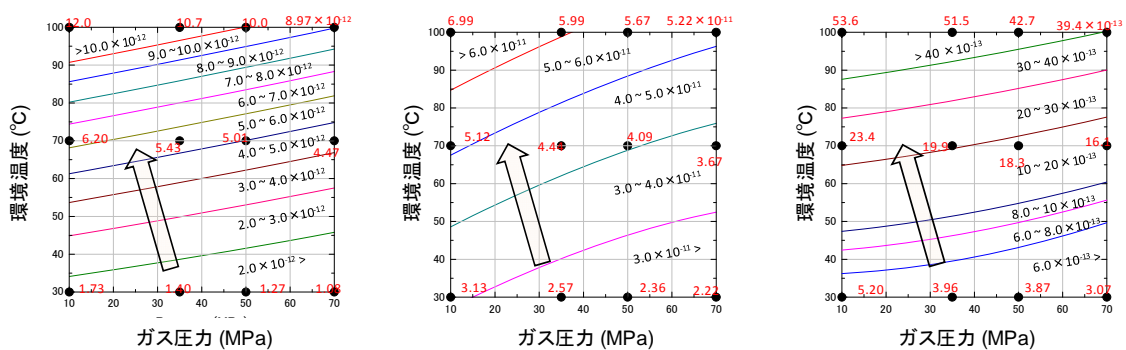


図.2.3.2.8 ガス減圧後のブリスタ発生・成長挙動（シリコーンゴム）

b. 高圧水素ガス輸送特性の P-T 線図

図.2.3.2.9 にガス漏洩量のパラメータとなる各ゴム材料のガス透過係数の P-T 線図を示す。シリコーンゴム（VMQ）のガス透過係数がエチレンプロピレンゴムより 1 オーダー高く、水素化アクリロニトリルゴムは 1 オーダー低い。圧力よりも温度の依存が大きい傾向は同じである。得られた P-T 線図によりガス透過量の概算が可能のため実用的に広く利用できる。

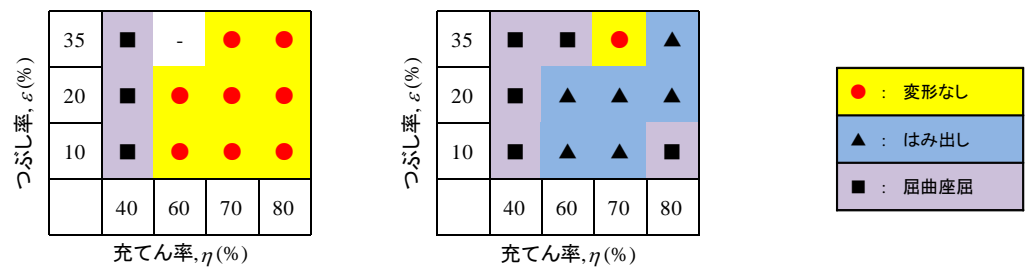


エチレンプロピレンゴム シリコンゴム 水素化アクリロニトリルゴム

図.2.3.2.9 水素ガス透過係数の P-T 線図

c.平面固定シールの非破壊範囲

硬度 75, 充てん材の異なるエチレンプロピレンゴム (EPDM) の破壊状態の充てん率とつぶし率による関係マップを図.2.3.2.10 に示す. カーボンブラック配合は, ホワイトカーボン配合と比べ機械強度が高いため, 非破壊範囲が広範囲だったと考えられる.



カーボンブラック配合 ホワイトカーボン配合

図.2.3.2.10 エチレンプロピレンゴム (硬度 75) の非破壊範囲

d.平面固定シールの長期シール耐久性

5,500 回の圧力サイクル耐久を目標とし, 実用化が期待される様々なゴム材料を評価した. その結果, 30°C 雰囲気下では評価したゴムすべてシール耐久性を保持した. シールに必要な機械特性も維持していることを確認した. 今回実施したモデル条件による実験により, ゴムの耐久性の指針 (材料規格) を提示できる可能性があることを示した.

e.円筒面固定シールの長期シール耐久性

損傷および透過漏れを最も抑制できる円筒面溝設計範囲を明確にし, 1,000 回の圧力サイクルでシール性に影響を与えないことを明らかにした.

f.結論

本項では高圧水素によるブリスタ現象の可視化，ゴム材料のガス漏洩量，溝設計による O リング非破壊範囲検討，長期シール耐久試験を実施し，以下の結論を得た．

- 1.ブリスタはゴム種，ガス種により発生・成長挙動が異なることを可視化により明らかにしたと同時に，シリコーンゴムは，耐ブリスタ性に優れる材料であることを確認した．
- 2.実用的に有用な水素ガス透過係数の P-T 線図を作製したことにより，任意の条件でのガス透過量の容易な概算を可能にした．
- 3.ゴム材料により平面固定シール溝設計の非破壊範囲が異なるため，水素機器に適用するゴム材料に適合した溝設計をする必要がある．
- 4.長期にわたる耐久試験が可能となる装置を開発し，30℃雰囲気下でゴム O リングの長期シール性を初めて確認することができた．
- 5.損傷および透過モレを最も抑制できる円筒面溝設計範囲を明確にし，1,000 回の圧力サイクルでシール性に影響を与えないことを明らかにした．

これら研究開発項目の研究成果は 2015 年に予定される FCV に搭載される各種機器の水素シール材開発および O リング溝設計指針として活用すべく事業化への知見として十分にフィードバックされている．

参考文献

- [4-1] Atsushi Koga, Junichi Nakayama, and Hideyuki Tokumitsu, Masaya Otsuka, Junichiro Yamabe, and Shin Nishimura, Effects of Hydrogen on Materials, Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference (2009), pp. 397-404
- [4-2] Junichiro Yamabe, Shin Nishimura, and Atsushi Koga, SAE International Journal of Materials & Manufacturing, Vol. 2, No.1 (2009), pp. 452-460
- [4-3] 山辺純一郎，古賀敦，西村伸，日本ゴム協会誌 83 巻 6 号 (2010), pp.159-166
- [4-4] Atsushi KOGA, Kenichi UCHIDA, Junichiro YAMABE and Shin NISHIMURA, International Journal of Automotive Engineering, Vol.2, No.4 (2011) 123-129
- [4-5] 古賀敦，山部匡央，佐藤博幸，内田賢一，中山純一，山辺純一郎，西村伸，日本ゴム協会誌 85 巻 5 号 (2012), pp.162-167

2. 研究開発項目毎の成果

2.4 研究開発項目④「高圧水素トライボロジーの解明」

燃料電池自動車及び水素インフラ機器などで使用される軸受、バルブ、シール等のしゅう動材料の水素雰囲気におけるトライボロジー特性を明らかにし、トライボ設計で活用できるデータと耐水素トライボ設計の設計指針を提供することを最終目的として、以下の小項目(1)～(5)を設定して研究を実施した。平成18～20年度には小項目(1)～(4)を実施し、平成21年度に(5)を加えた。多岐にわたるしゅう動材料を対象としてきたが、産業界のニーズをふまえて対象をしばり、データの蓄積とメカニズムの解明を行った。

(1) 軸受・バルブしゅう動材料の水素トライボロジー特性の調査研究

各種軸受・バルブ等のしゅう動材料の適切な設計に資するべく、しゅう動材料の水素雰囲気中でのトライボロジー基礎特性データの蓄積とメカニズム解明を行った。まず常圧気体中の特性の把握から始め、次に高圧水素に曝露した試験片による試験と、40MPa までの高圧水素中での試験を実施した。また、諸現象のメカニズム解明のために、しゅう動表面の各種分析を行って、現象の支配的因子を抽出した。これらを実施するために、小項目(2)と連携して実験装置の開発を行って研究体制を整備した。研究を通じて、無潤滑下のしゅう動において水素ガス中の不純物が重要な支配的因子の一つであることが明らかとなり、特にこの点に着目して装置の開発と試験の実施につとめた。

(1-1) 試験装置の導入(小項目(2)と連携)

本課題では、一方向滑り、往復動滑り、微小振幅往復動滑り、転がり接触などさまざまなしゅう動形態を実現するための多くの試験装置を開発し使用しているが、ここではトランスファーベッセルを用いた実験システム、高度雰囲気制御型摩擦試験機、水素ガス曝露容器、超高圧水素中摩擦試験機の開発について述べる。

(i) トランスファーベッセルを用いた実験システム

摩擦試験を行った試験片を大気にさらすことなく表面分析を行うために、トランスファーベッセルを用いて試験片を移動するシステムを導入した(図 2.4.(1).1)。これにより、大気曝露による酸化の影響を抑え、表面分析結果の信頼性を高めることができた(図 2.4.(1).2)。



図 2.4.(1).1 トランスファーベッセルを用いた実験システム

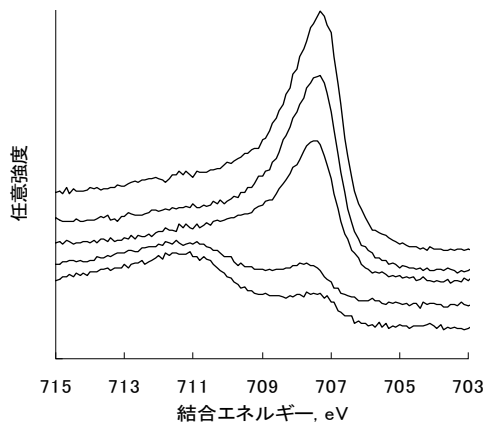


図 2.4.(1).2

トランスファーベッセルによる酸化防止の効果: エッチング後の Fe_{2p3/2} XPS スペクトル

(A) XPS 装置内でエッチング直後 (B) XPS 装置の試料交換室内で15分真空保持 (C) 真空封止したトランスファーベッセルで摩擦試験装置から移送 (D) アルゴン封止したトランスファーベッセルで摩擦試験装置から移送 (E) 1 分間大気曝露

(ii) 高度雰囲気制御摩擦試験機

現状技術において、燃料電池自動車の燃料として供される水素ガスの純度は 99.99% ないしそれ以上とされている。より詳細には、ISO 規格により水分量、酸素量が 5ppm 以下であることが提案されている。市販の 99.999% 純度の水素を調べたところ、保証値が水分量は 5ppm 以下、酸素は 1ppm 以下であったが、実際に測定すると水分、酸素ともにその 1/10 程度となっていた。水素ガス中の水分量や酸素量は製造方法や精製方法によってばらつくことが予想されるために ISO の提案値はやや大きめの濃度が指定されているものと思われる。従って、燃料電池自動車などの普及により莫大な量の水素が供給されるようになった場合、これらの不純物濃度は広範囲にばらつく可能性がある。また、燃料電池自動車に使われる固体高分子タイプの燃料電池では、樹脂内のイオン電導を確保するためある程度加湿した水素を使うことになっており、トライボロジー部品は高水分濃度の水素に曝される可能性もある。

このような水素ガス使用に関わる状況を勘案すると、シールやベアリングなどのトライボロジー要素に用いられる材料の摩擦摩耗特性が水素ガス中の水分濃度、酸素濃度にどう影響されるかを詳細に調べる必要がある。実際に本事業において、既存の試験機を改造した試験

機、及び平成 19 年度末に導入した高度雰囲気制御摩擦試験機により、金属材料の摩擦摩耗調査を行った結果、水素雰囲気中のより微量な不純物（特に水分と酸素）の影響調査が必要であることが分かった。そこで、平成 20～21 年度にかけてガス導入系の改良、ppb レベルの水分と酸素を測定できる計測器の導入、及びサブ ppm レベルまで水分と酸素をコントロールできるガス置換方法の開発を行った（図 2.4.(1).3）。

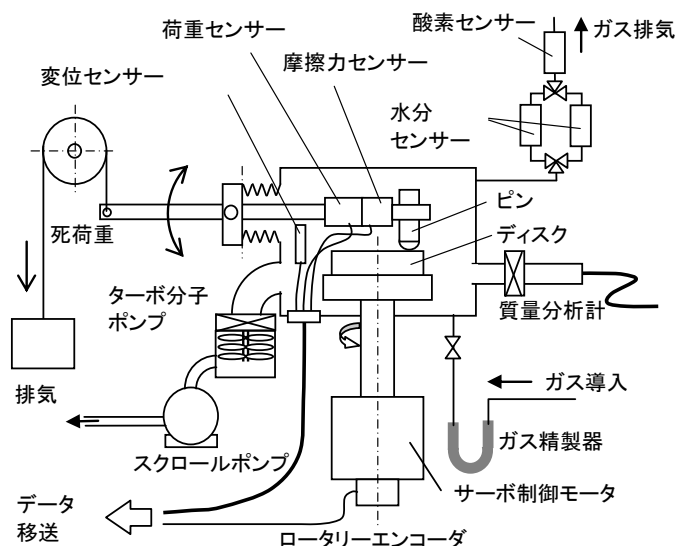


図 2.4.(1).3 高度雰囲気制御摩擦試験機

水分量と酸素量の調節は試験機の真空容器内部に吸着するガスの量をコントロールすることにより行った。具体的には、実験室内温度と湿度に応じてサンプル交換時の試験機内部の大気への暴露時間を規定し、かつ水素ガス導入前の真空度と導入した水素ガス中の不純物水分量の関係を求めることにより行った。本試験機により実施可能となった水分量範囲は下図 a)である。参考のために旧試験機で可能であった調査範囲を b)に、従来行われてきた、相対湿度と捉えられる水分での調査範囲を c)に示す。なお、開発した試験技術でも、水分量と酸素量を独立してコントロールすることはできず、水分量 2ppm 以上の範囲では酸素量が水の約 10%となっていた。水分量と酸素量を独立にコントロールする実験技術は次期以降の課題として残された（図 2.4.(1).4）。

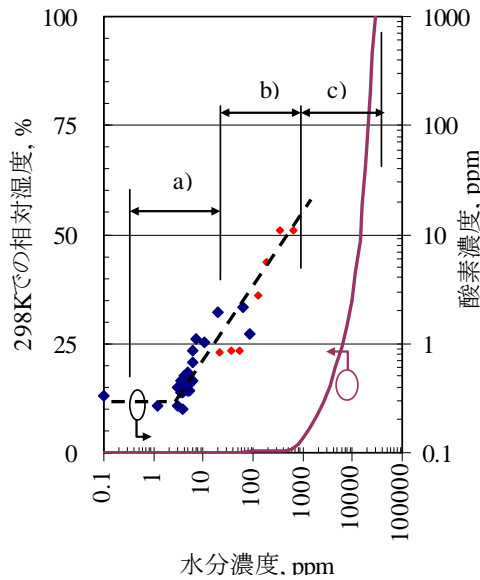


図 2.4.(1).4 調査した水素ガス中の水分量の範囲とその時の酸素量

(iii) 水素ガス曝露容器

高圧水素の影響を調査するためには、高圧水素中で試験を行う必要があるが、装置自体の開発から始める必要があった。そこで、高圧水素中における摩擦試験を模擬する試験として、高圧水素中に曝露した試験片による常圧水素中の試験を行った。高圧水素中に曝露するための設備として水素ガス曝露容器を導入した。本容器の最大圧力は 40MP、最高温度は 100°Cである。この容器は、摩擦試験用の試験片の曝露だけでなく、高圧水素による表面の変化を分析するための分析試験片の曝露にも用いた。

(iv) 超高压水素中摩擦試験機

超高压水素摩擦試験機を開発した(図 2.4.(1).5)。ピン・オン・ディスク形式の摩擦試験機を圧力容器内に据え付け、雰囲気圧力 40 MPa までの摩擦試験を可能とした。負荷レバー上の重錘によりピン試験片軸方向に荷重を与え、サーボモータによりディスク試験片を回転することにより、一定荷重、一定速度条件下での滑り摩擦試験を行う。試験片間に生じる摩擦力および接触荷重は、ピン試験片取り付け基部に位置する二軸ロードセルにより計測される。ここで、サーボモータから鞘管内に封入されたディスク回転軸への動力伝達には、最大伝達トルクが 10 N・m を超える大容量マグネットカップリングを使用し、回転軸固定部に円錐ころ軸受を組み合わせた軸受ユニットを設置することで、ディスク試験片の回転精度を保証した。圧力容器は温調のための熱媒層および真空断熱層に覆われており、内部の雰囲気温度を 223~373 K に調整可能である。

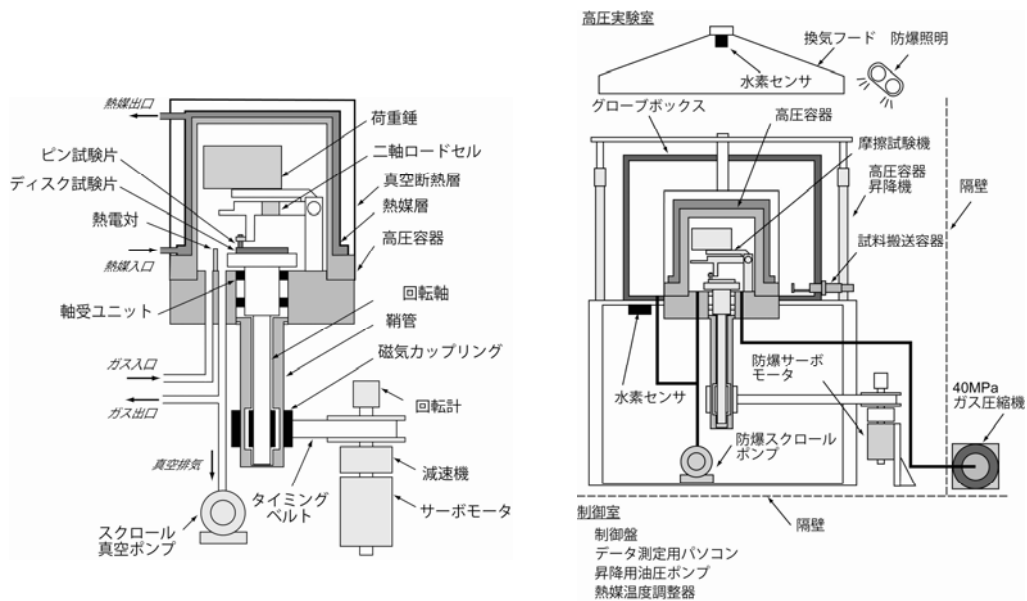


図 2.4.(1).5 超高压水素摩擦試験機

摩擦試験機はグローブボックス内に設置されており、圧力容器の開閉は油圧式の昇降機により行う。摩擦試験機への試験片取り付けおよび圧力容器内の雰囲気調整後、グローブボックス内は真空排気され、その後大気圧まで窒素ガスが充てんされる。これにより滑り試験中の高圧容器を大気から隔離し、安全性を向上させる。また試験終了後は、容器内の試験ガスを一旦窒素ガスに置換した後、圧力容器を解放する。ここで、窒素ガスで満たしたグローブボックス内において、実験後の試験片をトランスファーベッセルに収納すれことで、試験片を大気に晒すことなく表面分析装置へ移送することが可能である。

高圧ガスの供給は、隔壁により摩擦試験機から隔てられた高圧ガスコンプレッサから、高圧ガス配管を介して行う。可燃性ガスである水素を 40 MPa まで昇圧し実験を行うためには、試験機およびそれを設置する実験室が、高圧ガス保安法に定められた安全基準を満たさなければならない。そのため実験室の壁はすべて隔壁としての強度を有し、内部に設置された電灯、真空ポンプ、サーボモータ等は、すべて本質安全防爆構造となっている。計測に用いるロードセル等についても、ツェナーバリアにより安全性能を確保した。また試験機上方に大型排気フードを設け実験室内部を換気するとともに、その内部の水素センサーが基準濃度以上の水素を検出した際には、試験機へのガスと電気の供給を自動的に遮断することとした。水素センサーは試験機本体にも設置されており、圧力容器シール部からの水素漏洩を監視している。その他の計測用機器や熱媒用温調機等、防爆構造を有しない装置は隔壁外の制御室に設置した。装置の操作盤も制御室内に設置されており、容器内圧力が 1 MPa を超えた後の操作は、すべて制御室より遠隔にて行うこととした。

なお、高い雰囲気圧力中での試験を実現するため、当初は雰囲気の純度を正確に測定・制御することが困難であった。その後、試験ガスの排気系に水分計と酸素計を設置し、常圧まで減圧後のガスの水分濃度と酸素濃度を測定可能とした(図 2.4.(1).6)。

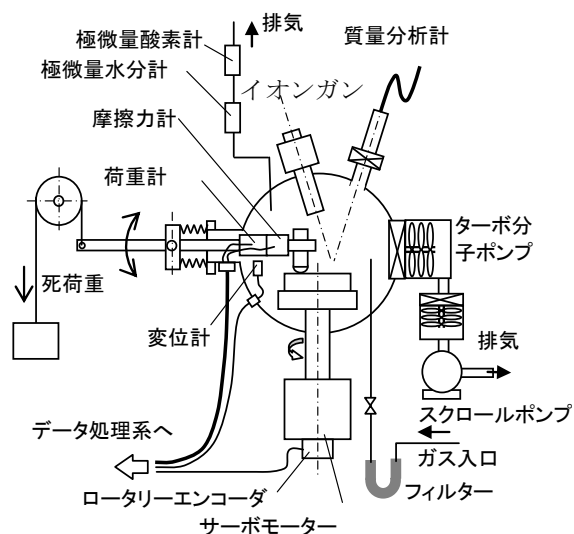


図 2.4.(1).6 高々度雰囲気制御摩擦試験機

(v) 高々度雰囲気制御摩擦試験機

水素ガス中の微量な水分や酸素と水素の作用を詳細に調べる目的で、平成22～23年度に水分と酸素を ppb レベルまでコントロールできるピン・オン・ディスク型摩擦試験機、及びこれを用いたガス中不純物量の制御方法の開発を行った。

ベーキング、ガス置換、真空引きを行った後、精製フィルターを通して H₂O、O₂、CO などを取り除いた試験ガスを導入し、オーバーフローガス中の H₂O と O₂ の量をそれぞれ CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy) 式水分計及び電量滴定式酸素計で測定した。試験条件の範囲は、荷重 5～200 N、ディスク回転速度 1～200 rpm、雰囲気圧力 2×10⁻⁶ Pa～0.2 MPa であり、不純物としての H₂O と O₂ は 10 ppb 未満まで設定することができる。また、水分量は酸素量と独立して制御することが可能である。

(1-2) 金属材料の常圧水素中の摩擦摩耗特性

水素用バルブ等のしゅう動材料の適切な設計に資するべく、各種金属材料の摩擦摩耗特性データの取得と、諸因子の影響の調査を行った。本節では常圧水素中の代表的なデータを示す。

(i) 雰囲気の影響

金属材料の摩擦摩耗特性への雰囲気ガスの影響について、代表例として水素用バルブしゅう動材料として広く使用されているステライト 6B の試験結果を示す。往復動摩擦試験を真空中、水素中、アルゴン中、空気中に行った、図 2.4.(1).7 に摩擦係数の経時変化を、図 2.4.(1).8 に摩耗痕の顕微鏡写真を示す。往復動摩擦試験では2試験片のうち一方を固定し、もう一方を往復運動させる。固定側試験片の摩耗痕は、図 2.4.(1).8 の左の写真のように概ね円形であり、運動側試験片では右の写真のように運動の振幅に対応した細長い形をもつ。

摩耗形態は真空中とアルゴン中では凝着摩耗、空気中では酸化を伴う凝着摩耗であり、水素中ではその中間の様相を呈する。XPS による表面分析から、摩擦面の酸化の程度と摩擦係数との間に相関関係がみられた(図 2.4.(1).9)。このように、水素ガスやアルゴン中であっても表面酸化が起こり摩擦摩耗に影響を及ぼす。すなわち、ガス中に微量不純物として含まれる酸素や水分の影響は小さくない。一方、不純物量が同程度の場合、不活性ガスであるアルゴン中よりも水素中で酸化の程度が高い。

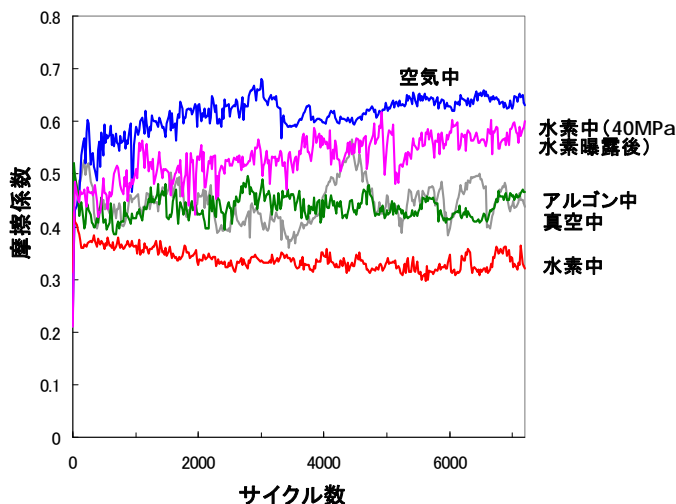


図 2.4.(1).7 種々の雰囲気におけるステライト 6B の往復動摩擦試験
荷重 2N, ストローク 1mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

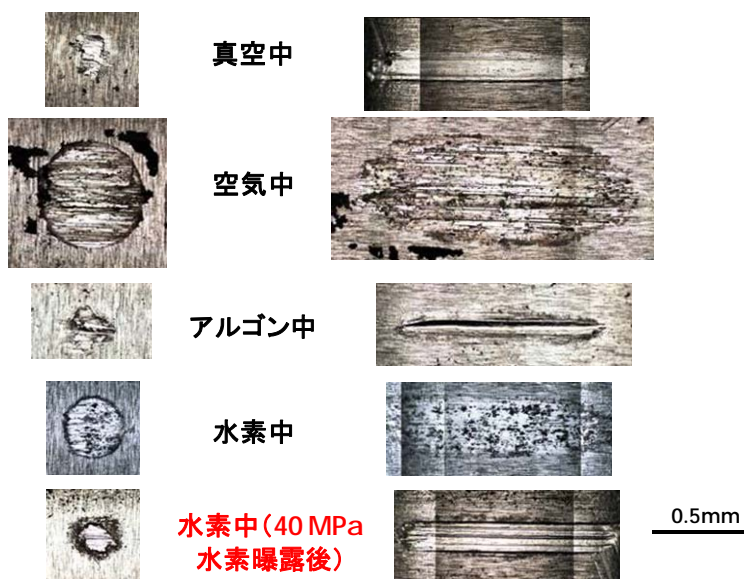


図 2.4.(1).8 種々の雰囲気におけるステライト 6B の摩擦面
荷重 2N, ストローク 1mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

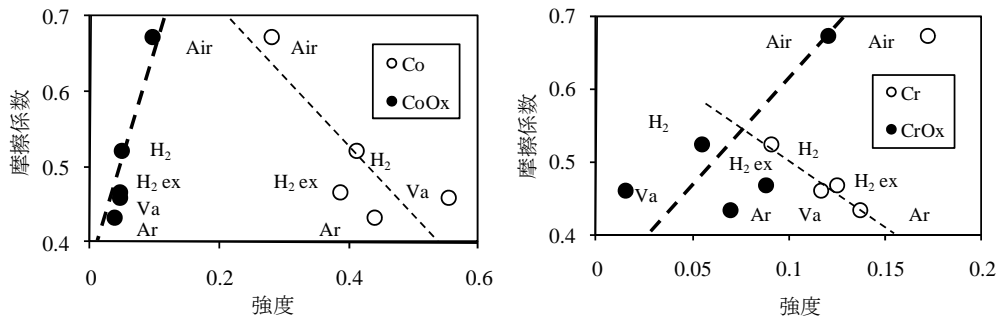


図 2.4.(1).9 ステライト 6B の摩擦面における金属と酸化物量と摩擦係数の関係

(ii) 種々のバルブ材料の水素中の摩擦摩耗特性

ステライト 6B を含む一般用バルブしゅう動材料について、常圧水素中での往復動摩擦試験を種々の荷重条件下で行った。同一材料同士の摩擦試験である。試験ガス中の微量水分の濃度として、5 ppm 前後 (3 ~7 ppm) と数十 ppm (20~60 ppm) の 2 レベルを設定した。摩擦係数の測定結果を図 2.4.(1).10(a), (b) に、また表 2.4.(1).3,4 に摩擦係数と表面損傷の大きさを ○△× で示す。ここで表面損傷の大小とは、摩耗量の大小とともに摩耗による表面粗さ増加の程度を含む。

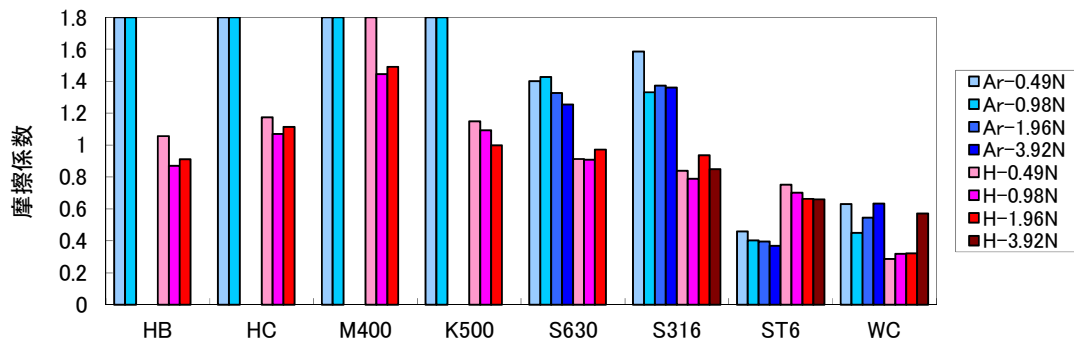


図 2.4.(1).10(a) 各種材料のアルゴン及び水素中での摩擦係数: 水分量 20-60ppm

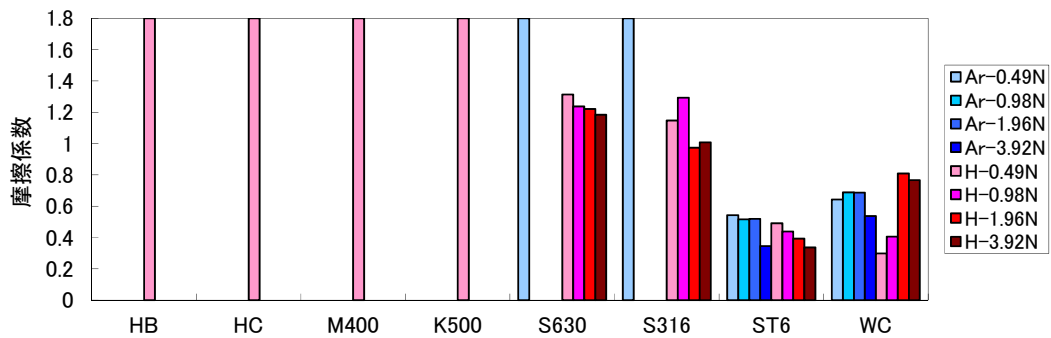


図 2.4.(1).10(b) 各種材料のアルゴン及び水素中での摩擦係数:水分量 3-7ppm

表 2.4.(1).1 供試材料

材料	表面硬さ HV	算術平均粗さ Ra μm
ハステロイ B (HB)	274	0.158
ハステロイ C276 (HC)	286	0.166
モネル M-400 (M400)	188	0.190
モネル M-K500 (K500)	236	0.363
SUS630	444	0.293
SUS316	221	0.275
ステライト 6B (ST6)	380	0.119
WC	1265	0.066

表 2.4.(1).2 試験条件

荷重 N	0.49,0.98,1.96,3.92
最大ヘルツ圧 GPa	0.58,0.73,0.92,1.2
周波数	2Hz
ストローク	1mm
潤滑	無潤滑
雰囲気	アルゴン, 水素
サイクル数	7200
滑り距離	14.4m

表 2.4.(1).3

高水分量 (20~60ppm) での水素中の摩擦摩耗の良否 (左が摩擦、右が表面損傷)

	0.49N	0.98N	1.96N	3.92N
ハステロイ B	×△	×△	—	—
ハステロイ C	○△	○△	○×	—
モネル M400	○△	○×	○×	—
モネル K500	○△	○△	○×	—
SUS630	○△	○×	○×	—
SUS316	○○	○○	○△	○×
ステライト 6B	○○	○○	○○	○△
WC	○○	○○	○○	○○

表 2.4.(1).4

低水分量 (3~7ppm) での摩擦摩耗の良否 (左が摩擦、右が表面損傷)

	0.49N	0.98N	1.96N	3.92N
ハステロイ B	×△	—	—	—
ハステロイ C	×△	—	—	—
モネル M400	×△	—	—	—
モネル K500	×△	—	—	—
SUS630	○△	○×	○×	○×
SUS316	○○	○○	○△	○×
ステライト 6B	○○	○○	○○	○○
WC	○○	○○	○○	○○

対象とした材料に共通して、水素中よりもアルゴン中で、また水分量が多い場合より少ない場合ほど、低荷重で高摩擦ないし焼付きを生じている。特に、耐食性材料として知られるニッケル系合金のモネルとハステロイの特性は著しく悪い。一方、タングステンカーバイド(超鋼)とステライト 6B は水素中で相対的にトライボロジー特性が優れ、かつ不活性ガス中、真空中よりも良好な特性を示す。

以上から、不活性ガス中ないし真空中で良好な特性を示す材料は水素雰囲気中でも良好であること、また水素中に含まれる微量の酸素や水分が摩擦摩耗を左右することがわかる。これらは合金の構成元素と関係がある。(1-5)の純金属の試験結果とあわせて後ほど考察する。

次に異種材料間の往復動摩擦試験について、一方の材料を SUS316 とした場合の比摩耗量を示す(図 2.4.(1).11(a), (b))。微量水分の濃度は 5 ppm である。いずれも、同一材同士での

結果と同様に、アルゴン中での特性が最も悪く、また一方が高摩擦材の場合には摩擦係数が高く比摩耗量も高い。また、同一材同士で低摩擦であったステライト 6B やタングステンカーバイドは、固定側、運動側いずれの場合も低摩擦、低摩耗である。概して、摩擦係数は運動側試験片の特性に準じるが、比摩耗量は固定側、運動側の材料の組合せによらず、同一材同士の比摩耗量が高いものほど高い。以上から、異種材料の組合せにおける摩擦摩耗特性は、同一材同士の特性から推測可能である。

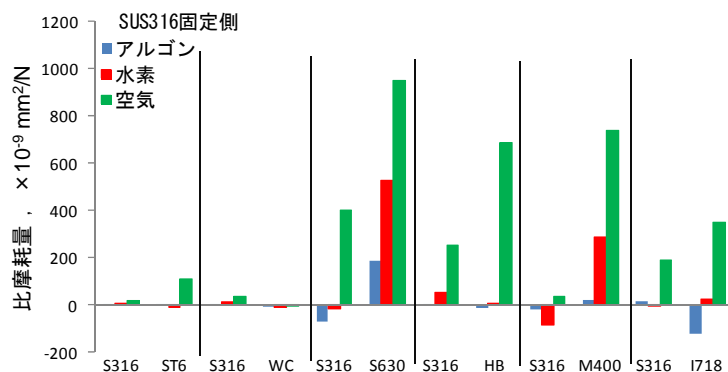


図 2.4.(1).11(a) 相手面材料が SUS316 の場合の各種材料の比摩耗量
荷重 1.96N, ストローク 1mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

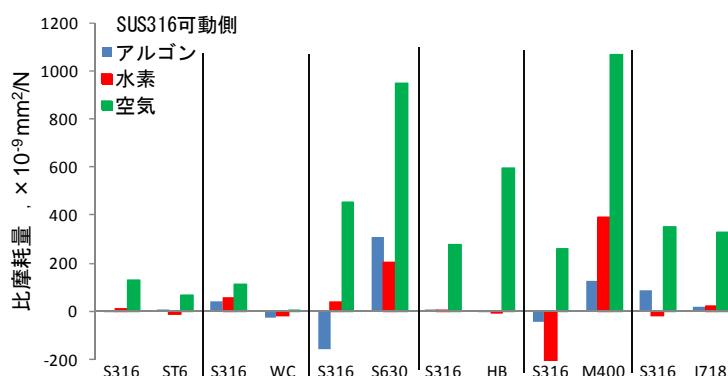


図 2.4.(1).11(b) 相手面材料が SUS316 の場合の各種材料の比摩耗量
荷重 1.96N, ストローク 1mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

(iii) 統一雰囲気条件

実用水素ガスを想定し、水素中の水分約 5ppm, 酸素約 0.5ppm を統一条件として鉄系およびアルミニウム系合金のピンオンディスク摩擦試験を高度雰囲気制御摩擦試験機を用いて行い、摩擦摩耗特性の比較を行った(図 2.4.(1).12)。これにより、実用的には各材料間の摩擦や摩耗特性の相違を知ることができる。

摩擦係数に関しては、Fe, Cr, Ni と鉄系合金が約 0.6 から 1.0 の間の値を示した。鋳鉄系の材料が低い摩擦係数を示すことが期待されたが、概ね 0.8 程度であり他の鉄鋼系材料と大差

なかった。Al と工業的に純アルミニウムとみなされる A1050 は 1.5 を超える非常に高い値を示したが、他のアルミニウム系合金は逆に 0.4 程度と相対的に低く、ほぼ同じ値を示していた。

摩耗量に関しては、ディスクからピンへの移着によって結果的に比摩耗量の値は低くなる場合もあり、比摩耗量の大小だけで実用上のしゅう動性能の可否は判断できない。凝着性が高い場合には摩耗と相手面への移着によって表面粗さが増加し、部品の良好なしゅう動を阻害するためである。このような事情を勘案しても、マルテンサイト系鉄鋼材料である SUJ2 と SUS440C の摩耗量は比較的少なかった。逆に鋳鉄と合金成分の少ないアルミニウム系合金は突出して摩耗量が大きく、水素雰囲気における同種材とのしゅう動は避けるべきであることが分かる。

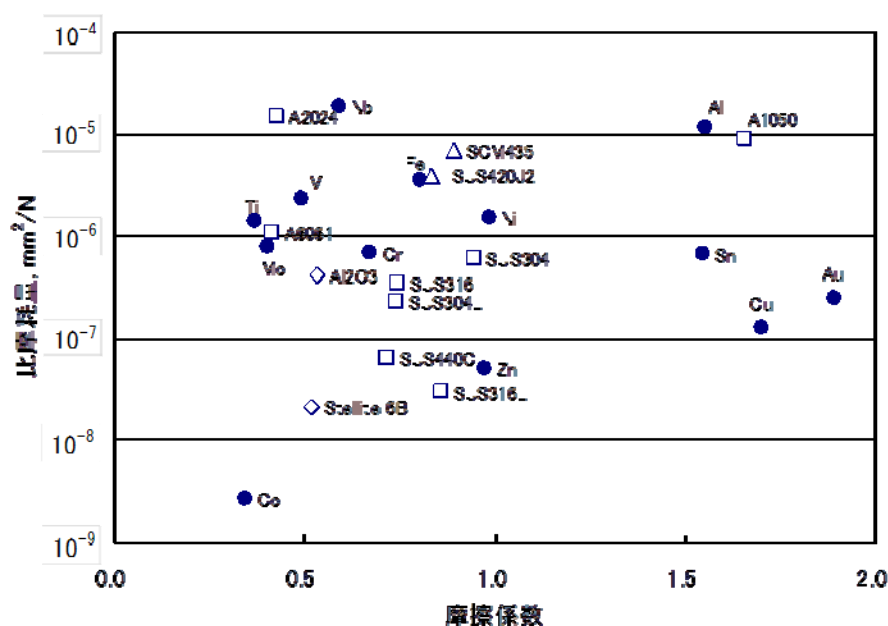


図 2.4.(1).12 統一条件による各種金属材料の摩擦係数と比摩耗量

(iv) ガス中の水分量の影響

主要なバルブしゅう動材料について、雰囲気の影響を詳細に調べた。ステライト 6B とステンレス鋼 SUS316 について、湿度 0.2% 以上、すなわち水分量が数百 ppm 以上の湿潤ガスを想定し、窒素ガス中の酸素濃度と湿度をさまざまに与えて往復動摩擦試験を行った (図 2.4.(1).13)。両材料の摩擦摩耗特性は酸素濃度に影響を受け、酸素濃度が高いほど摩擦係数、摩耗量とも大きい。ステライト 6B は酸素濃度によらず湿度数%で摩擦係数が最大値をとり、また水分量が少くかつ酸素濃度が高いほど比摩耗量が高い。一方、SUS316 は、酸素濃度が低い場合は水分は摩擦を増加させ、酸素濃度が高い場合は水分は摩擦を低下させ、比摩耗量はいずれの酸素濃度においても湿度 1~10% で高い。

摩耗痕の XPS 分析により、酸素濃度が高いほど摩擦面内部まで酸化が進むこと、酸素 0.1%、0% においても最表面に酸化物ないし水酸化物が形成されることがわかった。すなわち、

いずれの材料も本試験条件においては酸化摩耗が支配的であり、水と酸素の濃度の影響が大きい。

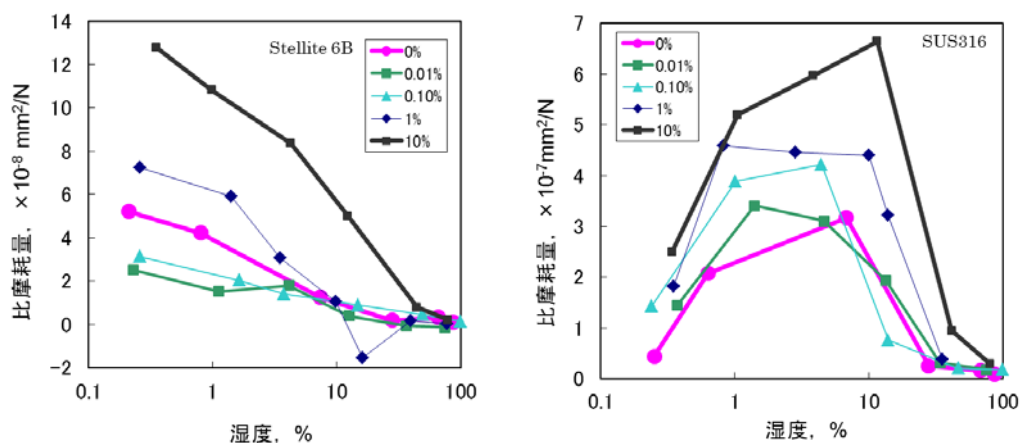


図 2.4.(1).13 ステライト湿度の影響
荷重 1.96N, ストローク 1mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

次に、水分濃度が数百 ppm 以下の微量水分の影響について、高度雰囲気制御摩擦試験機を用いて調べた。試験条件は、荷重 10N、摩擦速度 62.8mm/秒、摩擦距離 126m で統一した。水分と酸素の供給は、試験機チャンバー内部の吸着ガスなどからなされるため、それらの濃度は時間変化する。そのため、試験はこれらの濃度が比較的安定している 53 分から 66 分の間で行った。図 2.4.(1).14, 15 に示すように、軸受鋼 SUJ2、ステンレス鋼 SUS316L ともに、サブ ppm から数十 ppm の水分濃度、ないしは 1ppm 前後の酸素濃度により、摩擦摩耗特性が大きく影響を受ける。いずれも実用水素ガスの標準的な水分濃度 1~10ppm を境にして、高水分濃度側で摩擦係数と摩耗量が増大、低水分濃度側でも摩擦係数が増大する。高水分濃度側では、ガス中の水分と酸素による酸化摩耗の進行とこれに伴う接触面積増加と摩擦力の増大が原因と考えられる。1ppm 以下の低水分濃度側では、境界潤滑作用が乏しいことに起因して摩擦係数が高い。比摩耗量は低い、ピン試験片の比摩耗量がマイナス値(移着による体積増加)を示していることからわかる通り、相手面への著しい移着が起こっており、良好なしゅう動状態とは言えない。以上から、水素ガス中の水分濃度が標準的なレベル 1~10ppm からはずれるほど、トライボロジー特性は悪化する。この傾向は、概して他の鋼材や合金材料にも共通している。

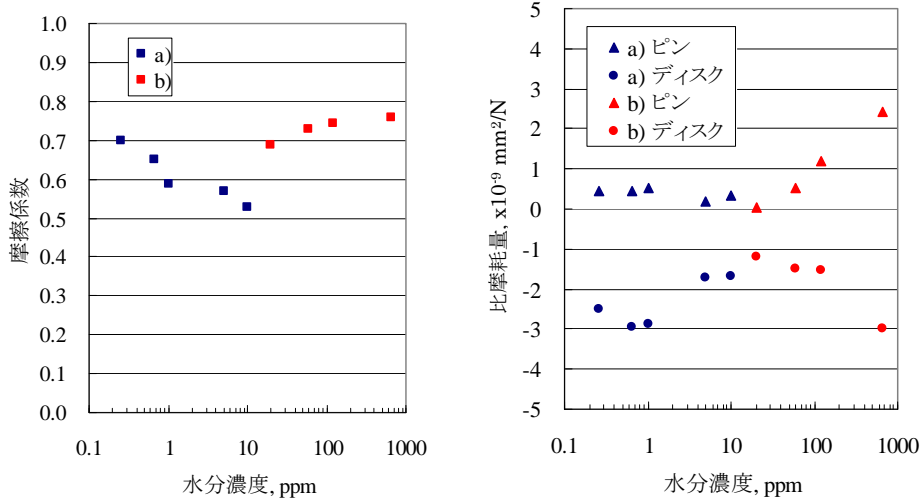


図 2.4.(1).14 軸受鋼 SUJ2 の摩擦摩耗に及ぼす水素中不純物濃度の影響
荷重 10N, 滑り速度 63mm/s, 滑り距離 126m

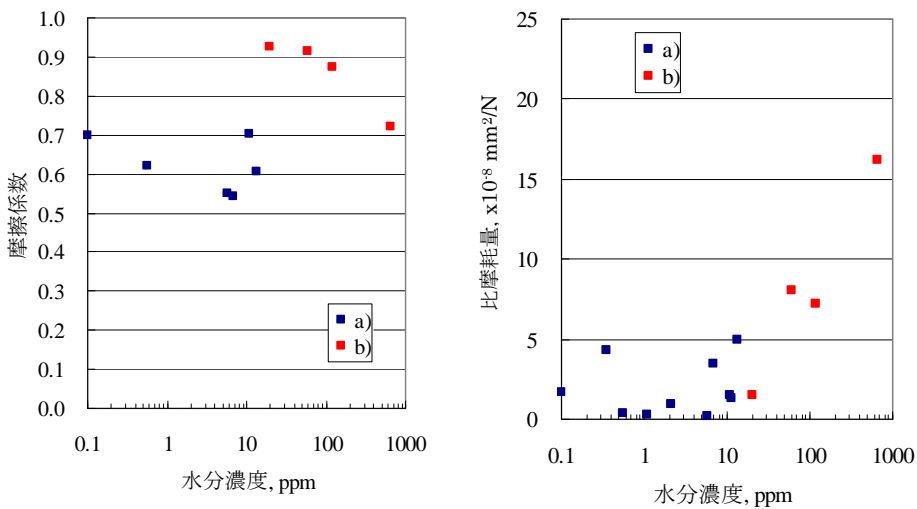


図 2.4.(1).15 SUS316L の摩擦摩耗に及ぼす水素中不純物濃度の影響
荷重 10N, 滑り速度 63mm/s, 滑り距離 126m

(1-3) 金属材料の高圧水素中の摩擦摩耗特性

超高圧水素中摩擦試験機を用いて、水素ガス圧力として 0.3, 10, 40MPa の 3通り、温度として 298K と 373K の 2通りの水素ガス中で、ピンオンディスク摩擦試験を行った。試験条件は、荷重 10N、摩擦速度 62.8mm/秒、摩擦距離 126m とした。

図 2.4.(1).16, 17 にそれぞれ SUJ2、SUS316L の試験結果を示す。

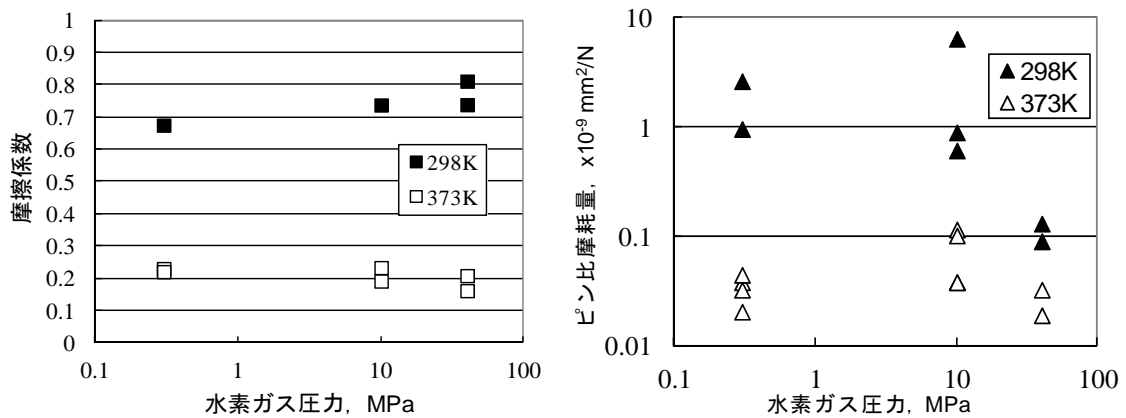


図 2.4.(1).16 SUJ2 の摩擦係数と比摩耗量に及ぼす水素ガス圧力と温度の影響

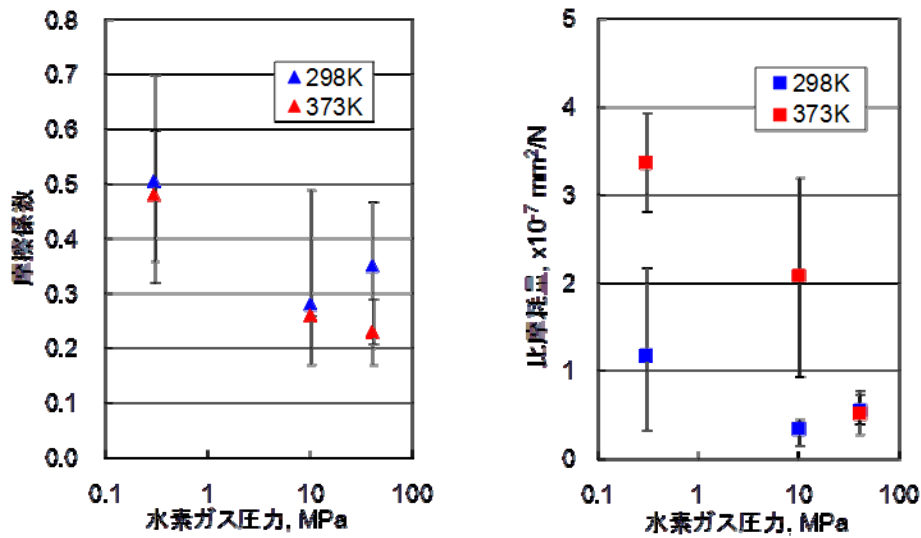


図 2.4.(1).17 ステンレス鋼 SUS316L の水素中の摩擦係数と比摩耗量に及ぼすガス圧力と温度の影響(ピンオンディスク試験 10N, 0.063m/s, 126m)

SUJ2 においては、摩擦係数は水素ガスの圧力が高いほど 298K ではわずかに上昇し、373K では逆にわずかに減少する傾向がみられる。298K での摩擦係数は、従来の SUJ2 の常圧中試験で得られた値とほぼ同じ 0.7 程度であった。これに対して 373K での摩擦係数は 0.3MPa で 0.23 程度、40MPa では 0.17 程度と、無潤滑の鋼同士の摩擦としては極めて低い値を示した。これらの低い摩擦係数は、試験開始時から最後まで安定して得られた。

298K におけるピンの比摩耗量は $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ の範囲に分布しており、室温、常圧での水素中不純物の影響を調査した結果と比較すると、水分が 100ppm 以上の場合と同等のレベルである。これに対して、373K での比摩耗量は一桁以上小さな値である。

ピンおよびディスクの摩擦面の光学顕微鏡で観察したところ、黒色半透明な膜、あるいはそれが破砕したと見られる粉が観察された。AES による表面分析、及び次節で示す分析結果から、373K の水素中において SUJ2 の表面層に炭素が現出し、この潤滑作用が低摩擦、低摩耗

をもたらしたものと推定される。一方、99.9%純鉄について 10MPa, 373K の条件で摩擦試験を行ったが低摩擦現象は見られず、表面に有意な炭素量は検出されなかった。従って、SUJ2 表面層の炭素は、雰囲気由来の汚染ではなく、SUJ2 内部から供給されたものと考えられる。

SUS316L においては、摩擦係数と比摩耗量いずれも、水素ガスの圧力が高いほど低い値を示す。高温 373K の水素中においては、摩擦係数は 298K の場合と大きな違いはないが、比摩耗量は概して高い値を示す。高圧水素中では水素の還元性による酸化膜喪失が予想されたが、本試験結果から高圧水素中ではむしろ顕著な酸化膜形成がみられ、これが低摩擦低摩耗の原因であったと考えられる。すなわち、高圧の水素中では、滑り接触下における活性の高い新生面において、水素ガス中の水分、酸素による酸化反応がより活発に起こったと考えられる。

図 2.4.(1).18 に4種類のオーステナイトステンレス鋼の 10MPa の高圧水素中におけるピンオンディスク試験結果を示す。水素ガス中の水分量は 5 ± 2 ppm、酸素 0.2 ± 0.1 ppm とした。図に示した値は複数の実験の平均値である。10 MPa の高圧水素中で、304 系よりも 316 系のほうが比摩耗量が低く、炭素含有量の少ない 316L, 304L のほうがそれぞれ 316, 304 より比摩耗量が低い傾向が明確にみられる。この原因は、鋼の種類によって形成される酸化膜の質的違いがあり、次節で述べるとおり 316 は 316L に比べて酸化膜が形成されやすいことが、摩擦摩耗特性に反映されたと考えられる。

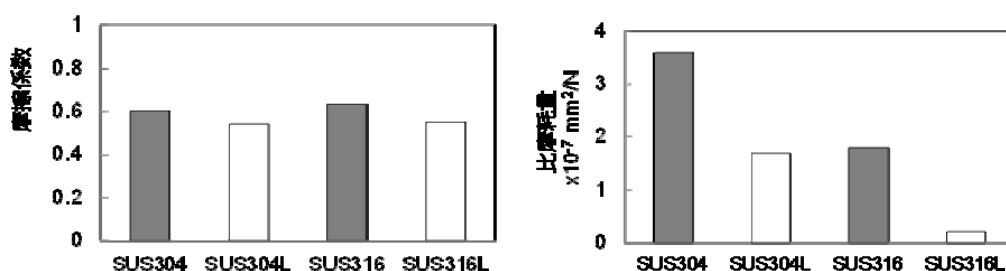


図 2.4.(1).18 4種類のオーステナイト系ステンレス鋼の 10MPa 水素中における摩擦係数と比摩耗量の平均値 (ピンオンディスク試験 13N, 0.063m/s, 126m, 298K)

図 2.4.(1).19 は個々の試験データをプロットしたものであるが、常圧水素中にくらべて値のばらつきが大きく、特に SUS316L の摩擦係数は 0.2~0.9 の広い範囲でばらついていることがわかる。しゅう動面の観察から、高圧水素中では表面酸化が顕著であり、酸化物ないし水酸化物の生成とはく離の違いが摩擦摩耗挙動の違いに現れ、ばらつきの原因であったと推測される。

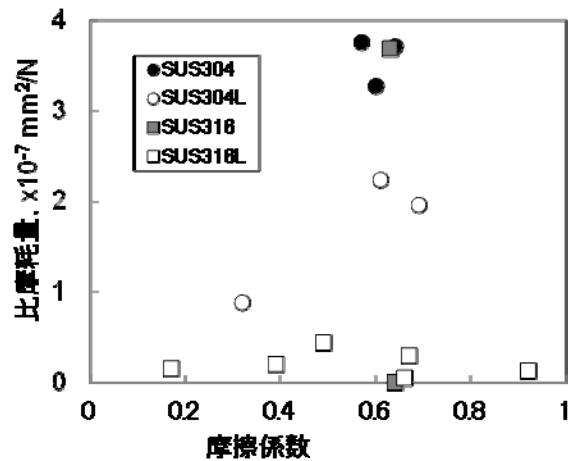


図 2.4.(1).19 4種類のオーステナイト系ステンレス鋼の 10MPa 水素中における摩擦係数と比摩耗量 (ピンオンディスク試験 13N, 0.063m/s, 126m, 298K)

ステライト 6B についても 40 MPa 中の試験を行い、概して摩擦係数は常圧水素中と同レベル、比摩耗量は 298K, 373K いずれの場合も高压水素中で若干低かった。

以上のように、金属材料の 10~40 MPa の高压水素中での摩擦摩耗特性は、概して常圧水素中に比べて良好である。その理由の第一は、水素そのものよりも水素中の水分と酸素の作用によるものであり、摩耗を生じた新生面に常が酸化環境に曝されるためである。しかし上述のオーステナイトステンレス鋼の結果で示したように、酸化膜の剥離によって摩擦がばらつくこともあり注意が必要である。また、水素中の水分量がサブ ppm 以下の極めて低い場合については、現有設備では試験が困難であるが、次節で示すように酸化膜の喪失が摩擦摩耗を悪化させる可能性がある。

第二は、深さ数ナノメートルから数十ナノメートルの極表面での水素侵入に起因する金属組織変化である。軸受鋼の場合に、その変化の一つが炭素の拡散であることを見出したが、それほかにも水素の存在による塑性変形特性の変化や相変化などの可能性があるが、極表面のそれらの変化は未だ十分に解明されていない。今後、さらなる探求が必要である。

(1-4) 金属材料の高压水素曝露

(i) 高压水素曝露材の摩擦試験

高压水素中の摩擦摩耗特性を理解するために、高压水素に曝露した試験片の摩擦試験、及び高压水素に曝露した試験片の表面分析を行った。

図 2.4.(1).20 に、SUS316 とステライト 6B の往復動摩擦試験における摩擦係数の経時変化を示す。曝露材は、圧力 40 MPa、温度 373K の水素ガス中に 200 時間曝露したものである。比較として真空中 (5×10^{-4} Pa) での結果をあわせて示す。いずれの材料も高压水素曝露材は高い摩擦係数値を示し、真空中と同レベルないし真空中よりも高い。このような結果は他の材料でもみられ、また摩擦係数が摩擦初期に高く時間とともに低下するケースもあり、前節で示

した高圧水素中摩擦試験の結果とは全く傾向が異なる。

このことは、しゅう動させることなく静的に高圧ガスに曝露した場合と、高圧ガス中でしゅう動させた場合に、表面での諸過程が異なっていたことを示唆している。高圧ガス中でしゅう動させた場合には、常にその雰囲気に曝されるため、接触・摩耗によって活性の高い新生面が生じ非接触時間中に雰囲気の影響を受ける。ピンオンディスク試験の場合、ディスク試験片でその影響が顕著である。上述のように雰囲気の不純物により酸化性が高い場合には酸化が促進される。一方、高圧ガスに曝露した試験片の場合は、高圧曝露によって変化した表面の性質が常圧中のしゅう動中にどれだけ長時間残存するかによって、高圧曝露の影響が異なる。往復動試験や次に示す微小振幅往復動試験のほうが、ピンオンディスク試験よりも影響が現れやすい。図 2.4.(1).20 の結果は、静的な高圧曝露によって酸化が抑制された表面において、常圧水素中での往復動摩擦で酸化膜の十分な修復がされなかったため高摩擦を示したものと考えられる。

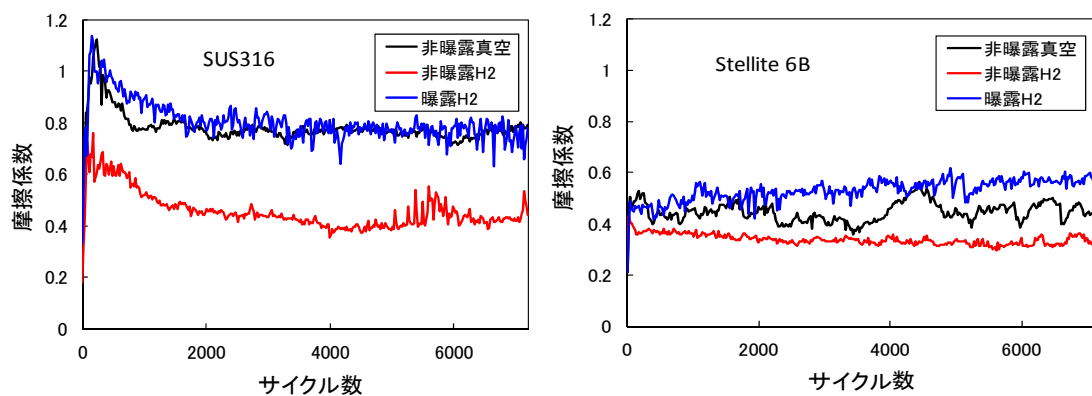
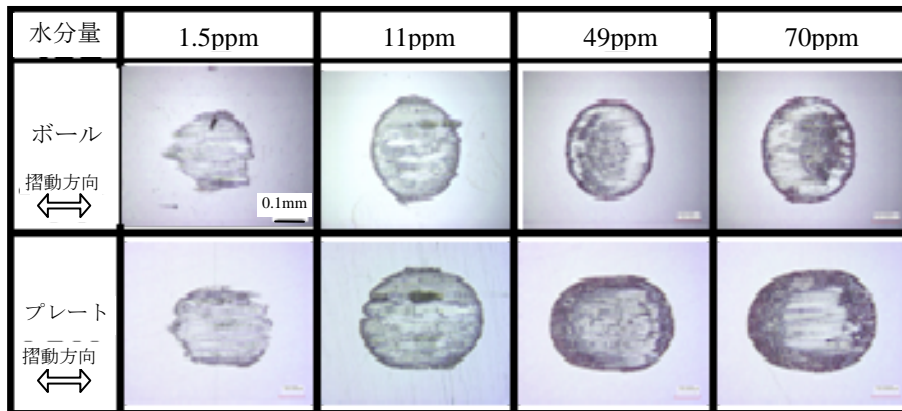


図 2.4.(1).20 高圧水素曝露した試験片による摩擦係数
荷重 2N, ストローク 1mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

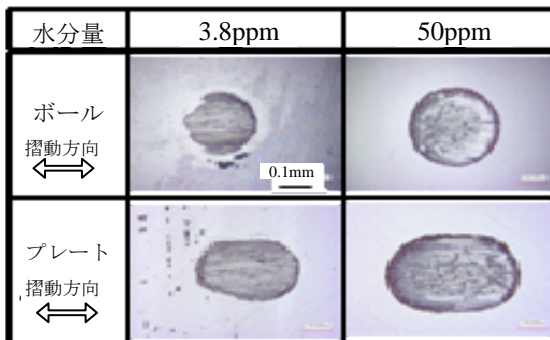
次にフレッチング摩耗に及ぼす高圧水素曝露の影響について示す。種々の鋼について、平面と球による点接触微小振幅往復動試験を実施し、フレッチング摩耗への雰囲気ガスによる影響、水素の純度の影響、高圧水素曝露による影響を調べた。軸受鋼 SUJ2 の場合の摩耗痕写真を図 2.4.(1).21 に示す。摩耗量は概して窒素中よりも水素中でわずかに多く、水分量が多いほど多い。これらは、微小滑り接触状態における腐食(酸化)が支配的なフレッチング摩耗の性質によるものである。一方、高圧水素曝露材(圧力 40 MPa、温度 373K、200 時間)では摩耗量が多く、摩耗痕の様子は異なって、接触部にくぼみがみられ摩耗痕の形もいびつである。これも上の往復動摩擦試験の場合と同様に、高圧水素曝露によって表面の酸化膜が欠落し、常圧水素中の低水分量では酸化膜が修復されなかったためと考えられる。

以上より、高圧水素曝露試験片を用いた摩擦試験結果をどう評価するかは、曝露中と曝露後に起こる支配的な現象によって異なることがわかる。

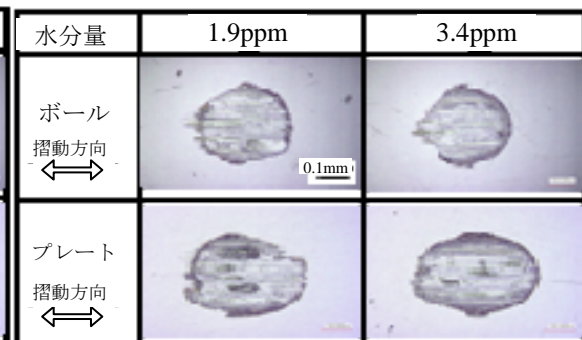
(a)水素



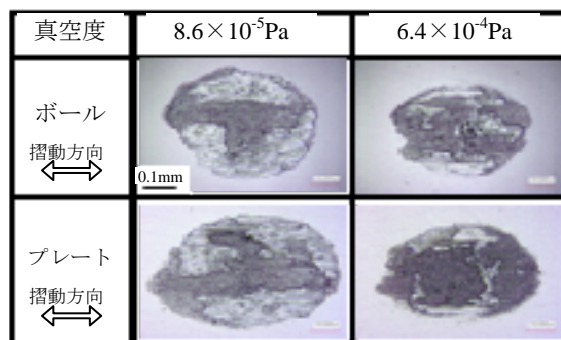
(b)窒素



(c)高圧水素曝露材



(d)真空中



(40MPa, 373K, 200 時間)

図 2.4.(1).21 SUJ2 のフレッチング摩耗に及ぼす雰囲気の影響
荷重 1.45GPa, 振幅 $80 \mu\text{m}$, 周期 10Hz, サイクル数 10^5

(ii) 高圧水素曝露材の分析

高圧水素曝露した各種鋼材について、各種表面分析、原子間力顕微鏡による測定、微小硬度測定などを行った。曝露条件は、圧力 40 MPa、温度 303 K および 373K、曝露時間 65 時間および 200 時間とした。径 14 mm、厚さ 4 mm の円板状の試験片を用いた。以下に軸受鋼 SUJ2、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C、およびオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316、SUS316L の4種類について結果を示す。

まず、曝露試験片の水素吸蔵量の昇温脱離分析法（以下 TDS）による測定結果を図 2.4.(1).22 に示す。材料ごとに未処理材の水素量、曝露後の水素量は異なる。オーステナイト系ステンレス SUS316、SUS316L においてはいずれも高く、次いでマルテンサイト系ステンレス SUS440C である。いずれも 373K での水素侵入量が顕著であるのに対し、303K においては高圧水素曝露による侵入量の増加は極めて小さいことがわかる。これは不動態膜の水素遮蔽効果のためであり、高温 373K においてその効果が低減したものと考えられる。これに対して、SUJ2 は侵入量の絶対値は小さく、373K に比べて 303K の水素侵入量は少ないが、温度の効果は上記ステンレス鋼ほど顕著ではない。TDS の昇温プロファイルは材料ごとに異なり、また水素の放出ピークの一部は水の放出ピークと一致しているものもあった。これは、昇温時の水の脱離ないし表面酸化膜の分解を意味している。

以上の結果は、一般に知られている水素侵入に及ぼす圧力と温度の影響から単純に解釈することはできず、以下で述べるとおり表面の酸化状態の違いが関与していることを示唆している。

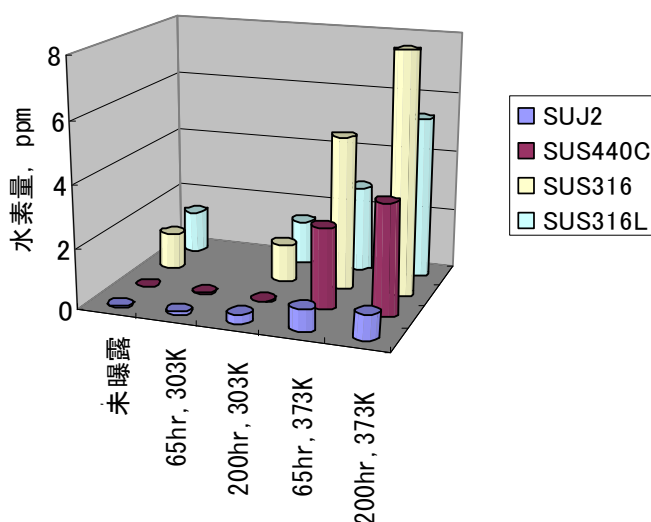


図 2.4.(1).22 TDS による水素量測定結果 (昇温速度 10°C/min)

次に、X線光電子分光法（以下 XPS）による表面分析結果を示す。図 2.4.(1).23 は SUJ2 表面の XPS 分析によって得られた酸素と炭素の組成比を表面からの深さに対してプロットしたものである。エッチング速度は SiO_2 換算で 3.8 nm/min である。図から、303K での曝露では鋼の表面酸化が進み、373K では酸化の抑制、ないしは還元が起こったことがわかる。SUS440C、SUS316、SUS316L においても類似の傾向がみられた。したがって、このような表面の組成の違いが、上述の水素侵入量の違いに影響したと考えられる。

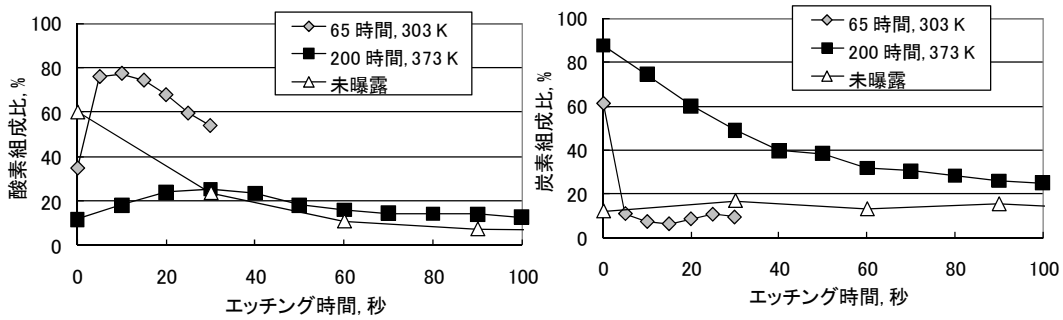


図 2.4.(1).23 高圧水素曝露した SUJ2 表面の XPS 分析 (左が酸素、右が炭素)

一方、炭素の深さ方向分布からわかるように、373K での水素曝露によって表面層に炭素が析出していることがわかる。数ナノメートルの厚さにわたって炭素が検出されており、これは単なる最表面の汚染層だけでなく、鋼の内部から析出したものである。オージェ電子分光法(以下 AES)による SUJ2 表面の分析から、炭素は島状に分布しており、SUJ2 内に分散している直径数ミクロン以下の球状セメントの面分布と一致しており、セメントから離脱した炭素が表層に拡散した可能性が高いことがわかった。高圧水素中及び高圧水素曝露材の摩擦試験において観察された低摩擦は、この炭素による固体潤滑作用である可能性が高い。しかし AES-REELS 分析によって sp² 結合の信号をとらえることはできず、現時点では析出した炭素は非晶質カーボンであると考えている。また、原子間力顕微鏡による LFM (Lateral Force Microscopy)測定においても、図 2.4.(1).24 に示すように高摩擦スポットとして炭素の存在が検出された。

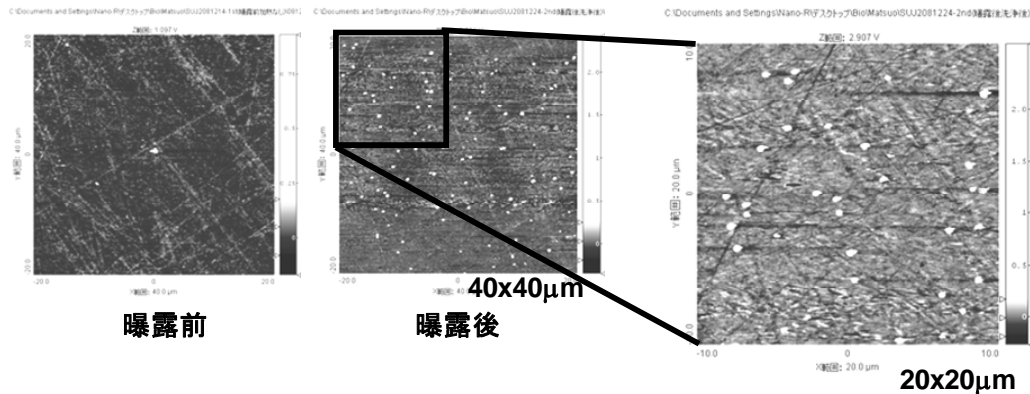


図 2.4.(1).24 高圧水素曝露した SUJ2表面の AFM(LFM) 像
(曝露条件 40MPa、373K、200 h)

以上から、303K の高圧水素曝露により酸化されるが、373K の高圧水素曝露で酸化は促進されず、炭素の層が厚く検出される。この表面膜の組成の違いが、前述の水素侵入量の劇的な変化をもたらしたと考えられるとともに、これらが高圧高温水素中及び、高圧水素曝露試験片の低摩擦係数に影響したと考えられる。

(1-9)と研究小項目(3)で示すように、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜は水素中で良好

な摩擦特性を示す。しかし、DLC 膜の高圧水素曝露を行ったところ、膜が基材界面から剥離する場合があることがわかった。この原因について SIMS を用いて調査した。対象とした DLC 膜は標準的な水素化 DLC 及び水素フリーDLC である。SIMS によって深さ方向の水素の分布を測定したところ、水素は DLC 膜内に容易に侵入し、基材(SUJ2)との界面付近に大量に停留することがわかった(図 2.4.(1).25)。この停留水素による体積変化が剥離につながった可能性が高い。したがって、DLC の利用においては、水素停留の抑制と、停留によって生じる応力に耐える DLC-基材間の密着強度の確保が必須と考えられる。

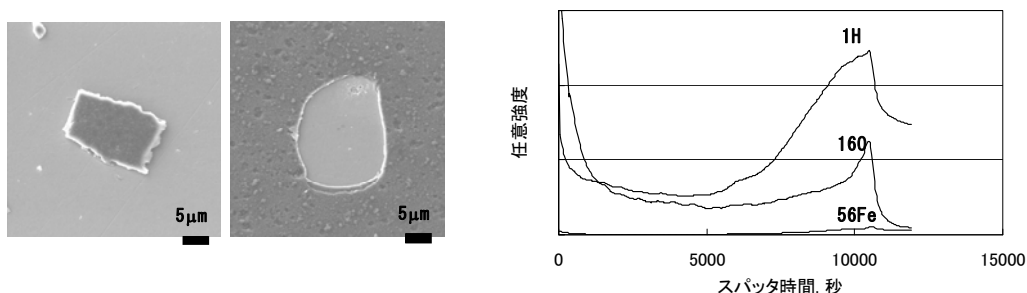


図 2.4.(1).25 高圧水素曝露による DLC 膜の剥離の様子(左)と SIMS 測定例(右)
(曝露条件 40MPa、373K、200 h)

(1-5) 構成元素の特性

(i) 純金属の摩擦試験

合金材料のトライボロジー特性に及ぼす雰囲気の影響を明らかにする目的で、それらの構成元素である純金属のピンオンディスク試験を高度雰囲気制御摩擦試験機を用いて行い、水素の表面吸着と反応、水素侵入による材料特性の変化、不純物成分の影響のメカニズムを探索した。

図 2.4.(1).26 に周期律表の族を横軸として摩擦係数と比摩耗量を示す。比摩耗量はピンとディスクの合計を示す。これらの金属においては、ピン、あるいはディスクから相手試験片への材料の移着がおり、重量増加を起こしたことがあったためである。

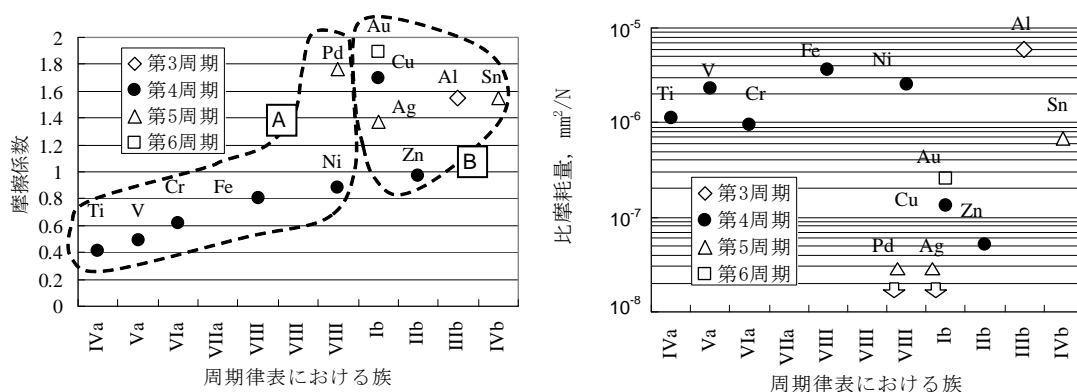


図 2.4.(1).26 各種純金属の水素中における摩擦係数と比摩耗量
荷重 10N、滑り速度 63mm/s、滑り距離 126m

これら二つの図において、Ti、V、Cr、Fe、Ni を一つの集団と見なしても差し支えない。これらの金属は大略同じレベルの比摩耗量を示しており、摩擦係数も1以下の範囲で原子番号の増加と共に摩擦係数も直線的に増加しているなど、ある傾向が見られる。これらは標準状態で水素を化学吸着する金属である。これらに対して、Pd、Cu、Ag、Au、Zn、Al、Sn は標準状態で水素を化学吸着しない金属であり、いずれも1以上の高い摩擦係数を示しており、明らかに上の集団とは異なる傾向を示す。これらの金属ではAlとSn以外は比摩耗量が少なく、吸着膜の欠如のために摩耗粒子の凝集が起こり摩耗粉として離脱しづらいために比摩耗量が低いと考えられる。

アルゴン中ではTi、V、Cr、Fe、Niは100~200・m程度の大きさの揃った塊状の摩耗粉を生成したが、水素中では様相が異なり、TiとVは水素中において微細な水素化物の摩耗粉を生じる(図 2.4.(1).27)。Pd、Cu、Ag、Au、Zn は摩擦面も摩耗粉も荒れた金属様の外観で、少数の不揃いで>200・mと大型の摩耗粉を生じた。AlとSnは、互いに異なる様相を示しており、Snは直径数十・mのころ状摩耗粉を、Alは1mm弱の塊状摩耗粉を生成した。またAlは試験した金属種中最大の摩耗量を示した。

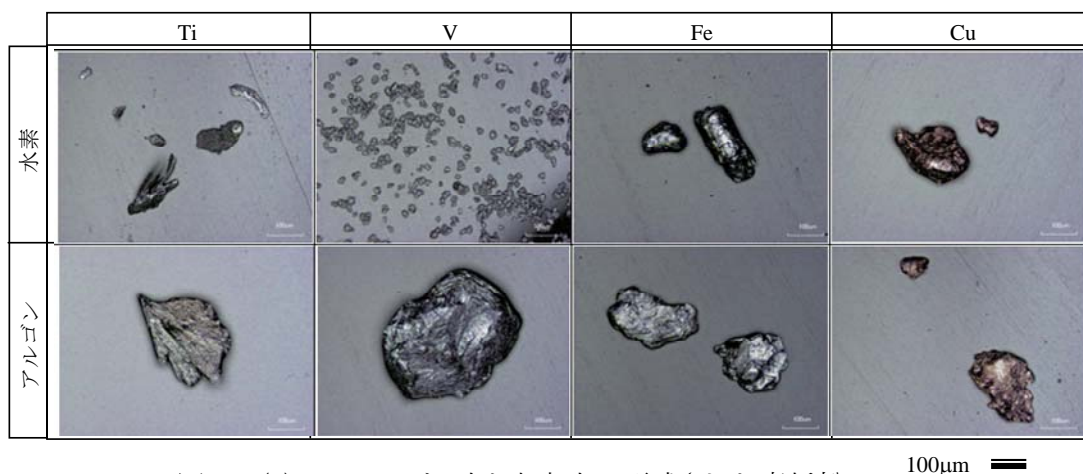


図 2.4.(1).27 アルゴン中と水素中で形成された摩耗粉
 荷重 10N、滑り速度 63mm/s、滑り距離 126m
 100μm

(ii) 純金属の高圧水素曝露試験

図 2.4.(1).28 に各種純金属の高圧水素曝露による水素侵入量を示す。水素量はTDS(昇温脱離分析装置)を用いて測定した。高圧水素の曝露は圧力 40 MPa、温度 303K と 373K、曝露時間 200 時間である。比較のため高圧ヘリウムへの曝露を 40 MPa、温度 373K、曝露時間 200 時間で行った。ヘリウム曝露の場合の水素量がもともと金属に含まれていた水素量であったと考えると、高圧水素曝露によって水素量が増えないものと、水素量が増えるものがあり、特に Fe、Ni、Cr、Mo などは水素量増加が高温(373K)での水素曝露で顕著である。この結果は前述の化学吸着能とも相関がある。現在、これら曝露表面の酸化状態について調査中である。

以上の純金属の結果から、水素中における合金材料の摩擦摩耗挙動は、それらの構成元

素の水素に対する挙動と定性的に関係があり、次節にこれらをまとめる。

(1-6) 水と酸素の作用

高精度かつレスポンスの良い水分計と酸素系の導入により、しゅう動試験による水分量と酸素量の変化が測定できるようになった。SUS316L を構成している純金属と SUS316L のしゅう動による水分と酸素濃度の変化を図 2.4.(1).29,30 に示す。しゅう動により酸素は全ての金属において消費されることが分かる。これはしゅう動により現れた金属の新生面のダングリングボンドを塞ぐために酸素が使われたためと想像される。今回調査した純金属ではしゅう動終了後も酸素の消費が続いたが、これは最表面のみならず、表面近傍の金属も酸化するために酸素が使われたためと考えられる。SUS316L においてはしゅう動試験終了と同時に酸素の消費が停止するが、これはステンレス鋼特有の酸化防止膜の形成により、内部の酸化が抑えられるためと考えられる。次に水分濃度であるが、Fe と Ni においてはしゅう動により増加する傾向がみられた。これは、Fe と Ni の触媒作用により水素と酸素の化学反応が誘起されたためと考えられる。水の生成はしゅう動試験が完了しても継続する傾向が顕著であり、摩擦により形成された面が触媒作用を維持することが分かる。また、Fe と Ni におけるしゅう動試験後に継続する酸素の消費は、内部の酸化のみならず、水の生成にも使われているものと想像される。それに対して、酸化活性の高い Cr と Mo ではしゅう動期間中のみ水分も消費されている。これはこれらの金属が水分子に含まれる酸素と反応して酸化した、あるいは水酸化物を生成するために水が消費されたためと考えられる。SUS316L のしゅう動は水分濃度に影響を与えていないように見えるが、これは構成元素である Fe と Ni が水を生成し、Cr と Mo が水を消費する傾向がバランスしたためか、新生面が瞬時に酸化防止膜で覆われるために水との反応が妨げられたためと想像される。

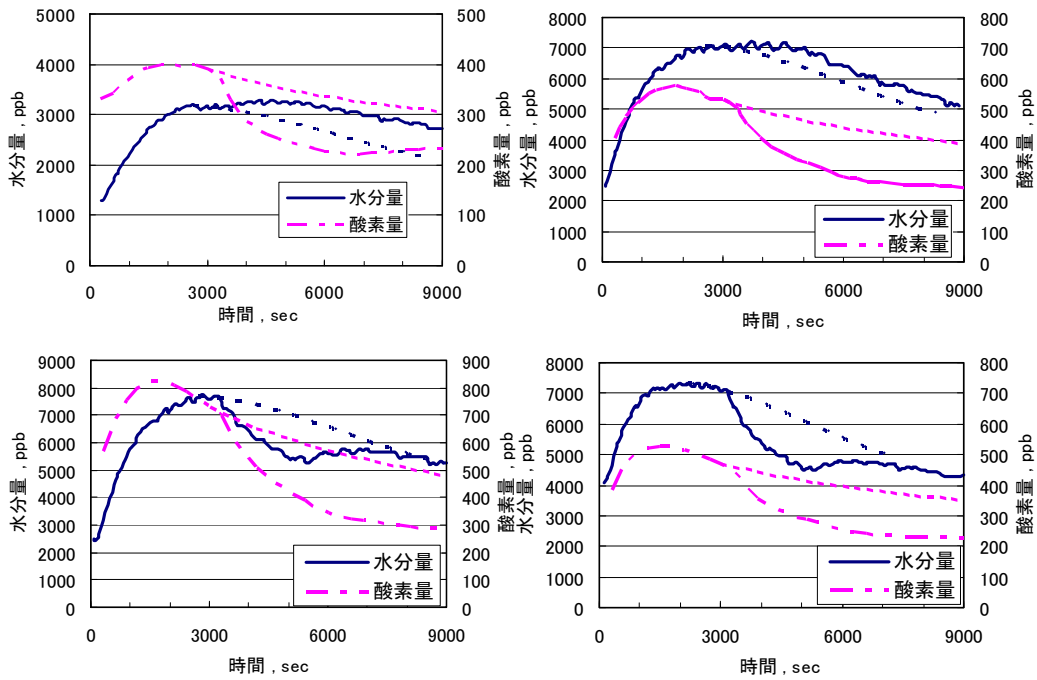


図 2.4.(1).29 各種金属の摩擦による水素中の水分と酸素の濃度変化
左上:Fe、右上:Ni、左下:Cr、右下:Mo

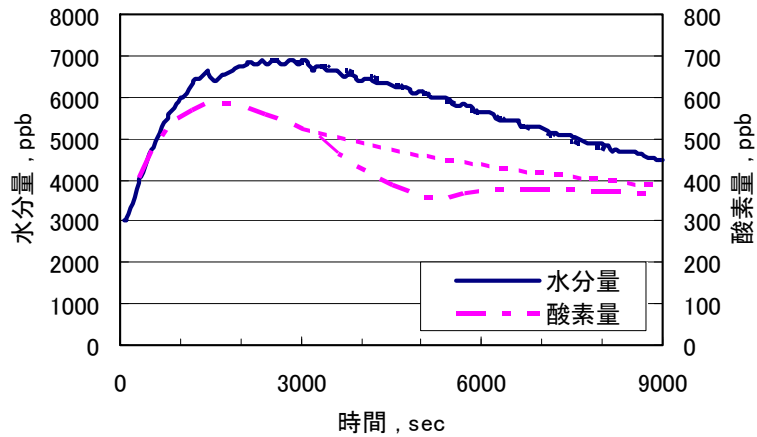


図 2.4.(1).30 SUS316L の摩擦による水素中の水分と酸素の濃度変化

上述の実験では、しゅう動を行わない場合にも水分と酸素の濃度が変化していたが、これらが一定値で安定する雰囲気調整方法を考案し、しゅう動による水分と酸素量の変化をより正確に得ることができるようになった。例として純鉄について水分量が 300 ppb、酸素濃度が 200 ppb 弱の場合とほぼ数 ppb 未満の場合の、しゅう動による変化を図 2.4.(1).31 に示す。前者では、上述の結果と同様にしゅう動によって酸素が消費され水分量が増加した。アルゴン中で

の実験との比較から、消費された酸素のうち水の生成以外に消費された酸素、すなわち表面酸化に関わった酸素量はアルゴン中と同程度であった。一方、後者では水分量が減少し、表面酸化が水のみによって起こったことがわかる。

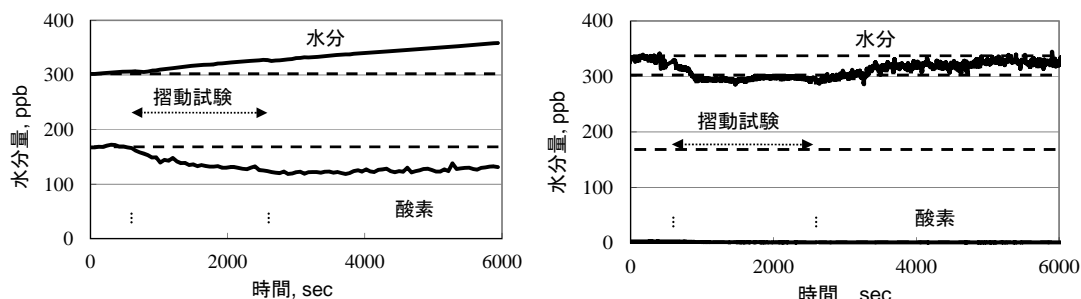


図 2.4.(1).31 純鉄の水素中摩擦における水分濃度と酸素濃度の変化；
ピンオンディスク試験, 10N, 0.063 m/s, 126 m, 左は初期酸素量を
200ppb 弱、右は酸素量を ppb レベルとした場合

以上のように、水素、水、酸素及び金属を含む系のしゅう動に伴うトライボケミカル反応は、金属種とガス成分の濃度に依存することがわかる。

図 2.4.(1).32 に、純鉄のピンオンディスク試験において、水素中の水分量を変化させたときの摩擦係数の変化を示す。図中、試験 B は水分量とともに酸素濃度が変化する場合、試験 A は酸素濃度を数 ppb 未満に制御した場合である。水分量 10ppm 以上では水分量の低下とともに摩擦係数が微増しているが、10ppm 以下では摩擦係数はほぼ 1 で変化しない。酸素量を数 ppb 未満に抑えた試験においては水分が境界潤滑作用に関与していると推測される。しかし、酸素、水分いずれも数 ppb 未満の場合、気体分子運動論からこれらの分子が摩擦しゅう動面に衝突して反応が起こる確率は極めて低く、アルゴン中では摩擦係数が真空中と同レベルの 1.5 まで上昇している(図 2.4.(1).33)。一方水素中では、この上昇がみられない。したがって、水素中では酸素や水分以外の物質、すなわち水素の吸着膜が形成され摩擦係数の上昇を抑えていると考えられる。

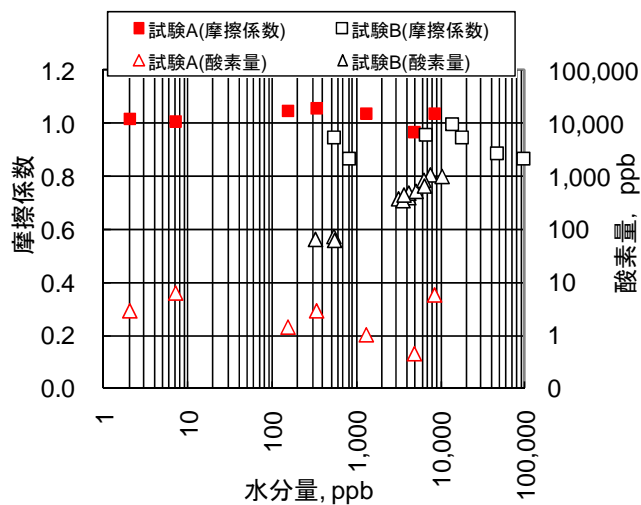


図 2.4.(1).32 純鉄の摩擦係数に及ぼす水分濃度の影響
(10N, 0.063 m/s, 126 m)

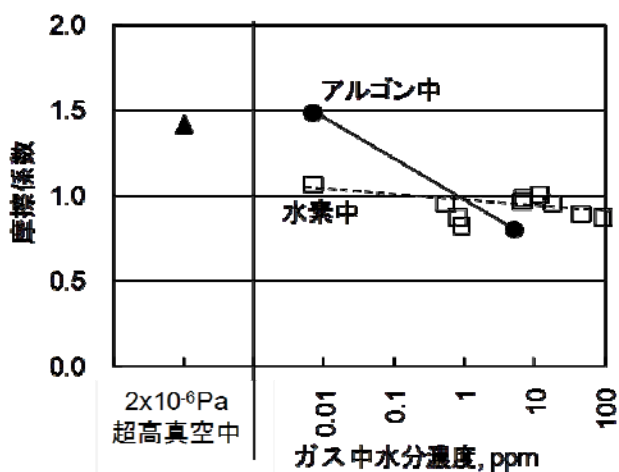


図 2.4.(1).33 純鉄の摩擦係数に及ぼす水素中水分濃度の影響
(10N, 0.063m/s)

同様の試験をステンレス鋼 SUS316L に対して行った結果を図 2.4.(1).34 に示す。純鉄とは異なり、水分量 10ppm 以上では水分量、酸素量が少ないほど摩擦係数が低い。一方、10ppm 以下では摩擦係数は上昇し、酸素、水分いずれも数 ppb 未満の場合には純鉄の場合と同様に摩擦係数が 1 程度を示した。ここでも水素の吸着膜が作用していると考えられる。超高純度の水素、すなわち酸素も水分の影響がほとんどない領域では水素そのものの潤滑作用が支配的であるのに対し、酸素ないし水分が作用する環境では純鉄とステンレス鋼では反応過程が異なり、摩擦係数の挙動の違いを生じていると考えられる。

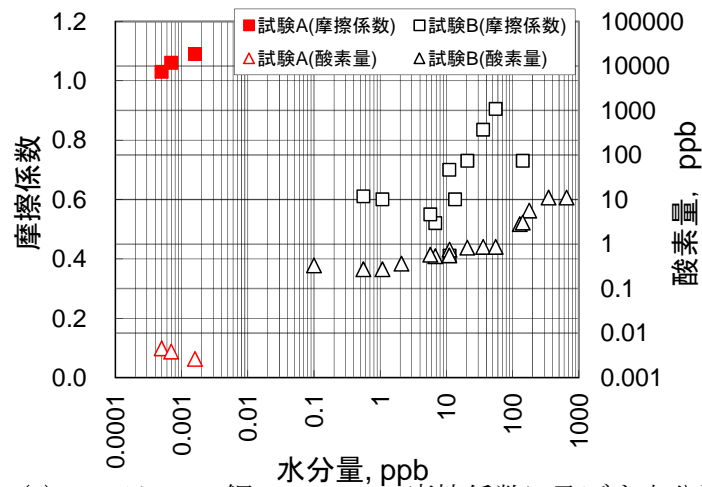


図 2.4.(1) 34 ステンレス鋼 SUS316L の摩擦係数に及ぼす水分濃度の影響 (10N, 0.063 m/s, 126 m)

以下に、純金属の摩擦摩耗に及ぼす水素の影響をまとめる。

- 1) 遷移金属は、水素の化学吸着によって摩擦摩耗が抑制される。特に 4A, 5A 族の Ti や V は水素の化学吸着に加えて水素化物の生成によって摩擦係数が低減される。
- 2) 非遷移金属は、水素自体が摩擦摩耗に影響を及ぼさない。ただし Al や Sn は水素化物の生成が摩擦摩耗に影響する可能性がある。

次に、純金属の摩擦摩耗に及ぼす水素中の水と酸素の影響をまとめる。

- 1) 酸化活性の高い Cr, Mo などは、酸素の化学吸着、及び金属と水、酸素両方との反応によって摩擦摩耗が抑制される。
- 2) 酸化活性が中程度の Fe などは、酸素の化学吸着、及び金属の酸素による酸化によって(酸素濃度が低い場合は、上記に加えて水による酸化によって)摩擦摩耗が抑制される。ただし、極高温では水素により酸化物が還元され摩擦摩耗抑制効果が失われる。
- 3) 酸化活性が低い Cu などは、酸素の化学吸着、及び金属の酸素による酸化によって摩擦摩耗が抑制される。ただし、高温では水素により酸化物が還元され摩擦摩耗抑制効果が失われる。
- 4) 酸化活性のさらに低い Ag などは、酸素の化学吸着により摩擦摩耗が抑制される。
- 5) 酸化活性の全くない Au は、水や酸素の化学吸着ないし反応による摩擦摩耗抑制効果は期待できない。

この関係を定量的に整理して不純物を含む水素中での摩擦摩耗を予測する解析モデルの構築を検討中である。

(1-7) 表面反応と水素侵入

(i) 滑り摩擦試験

しゅう動にともなう金属表面の酸化反応と水素侵入の関係を研磨機を利用した滑り試験と制御された雰囲気中での点接触単純繰返し接触試験を行って調べた。

しゅう動によって生じる金属新生面の触媒作用によって水や潤滑油が分解し、水素が生成されることはよく知られている。このことを利用して表面酸化と水素侵入の関係を調べるために、精密研磨機を用いて軸受鋼と耐水研磨紙とをしゅう動させ、しゅう動後の鋼内の水素侵入量を TDS によって測定した。また試験前後、及び TDS 測定後の表面を XPS によって分析した。試験片の形状は、側面の2箇所を削り落した円板である。図 2.4.(1).35 に、大気中での試験を異なるしゅう動時間行ったときの水素と水の昇温脱離強度曲線を示す。

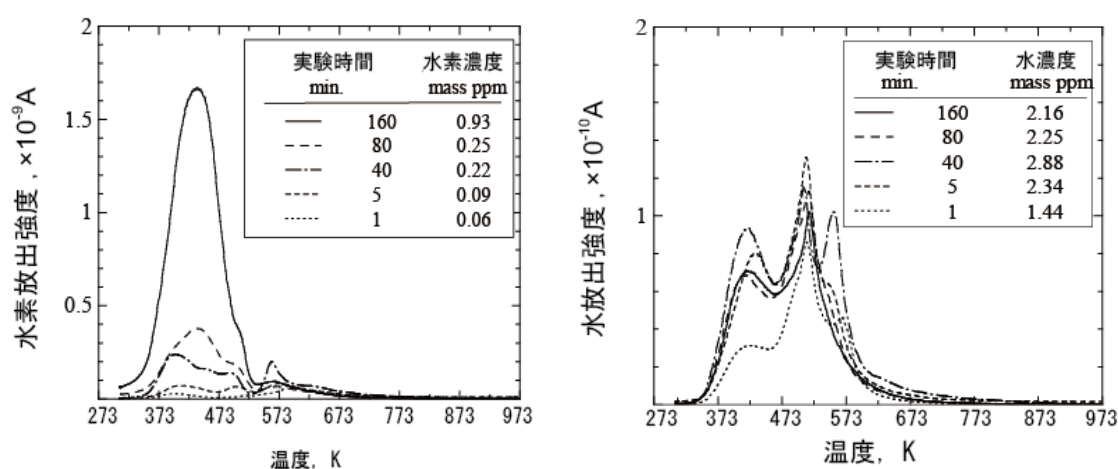


図 2.4.(1).35 空気中の摩擦による水素侵入
滑り試験, 荷重 11.8N, 滑り速度 0.63~0.77m/s, 実験時間 1~160 分

水素の昇温脱離強度曲線から、しゅう動によって発生し鋼内に侵入した水素が、433K 及び 553K 付近をピークとする強度曲線として捉えられた。これらのピークはチオシアン酸アンモニウム浸漬により化学的に水素チャージした場合と同様であり、強度は滑り時間が長いほど高く、また水の脱離強度曲線にも同じ温度領域でのピークがみられた。一方、XPS 分析から、しゅう動によって鋼表面に酸化膜ないし水酸化膜が形成され、TDS 測定によってこれらの膜が減少していることがわかった。以上から、大気中の水分によって摩擦面で酸化反応が起き、その際に生じた水素が鋼内に侵入したこと、TDS 測定における高温下で水素が脱離するとともに脱離にともなって表面酸化膜が還元されて水として放出されること、などがわかる。3番目の点は、TDS による水素量の測定では、水の強度も考慮する必要があることを示している。

(ii) 繰返し単純接触試験

次に、繰返し接触形態の違いによる水素侵入量への影響を調べる目的で、雰囲気をコントロールしたチャンバー内で図 2.4.(1).36 に示すような繰返し単純接触試験を行った。垂直荷重のみの接触において荷重を繰返し増減させると、水素雰囲気中では、他の条件よりも固体への水素侵入量が多かった。図 2.4.(1).37 は SCM435 のディスクに対して SUJ2 のボールを用いた垂直荷重増減試験における D-SIMS 測定結果である。最大ヘルツ圧力 4.05 GPa、最小へ

ルツ圧力 1.7 GPa とし、荷重変動の周波数 10 Hz、繰返しサイクル数 10 万回である。

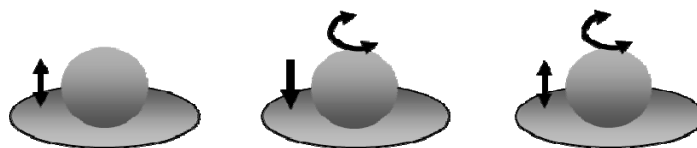


図 2.4.(1).36 繰返し単純接触試験

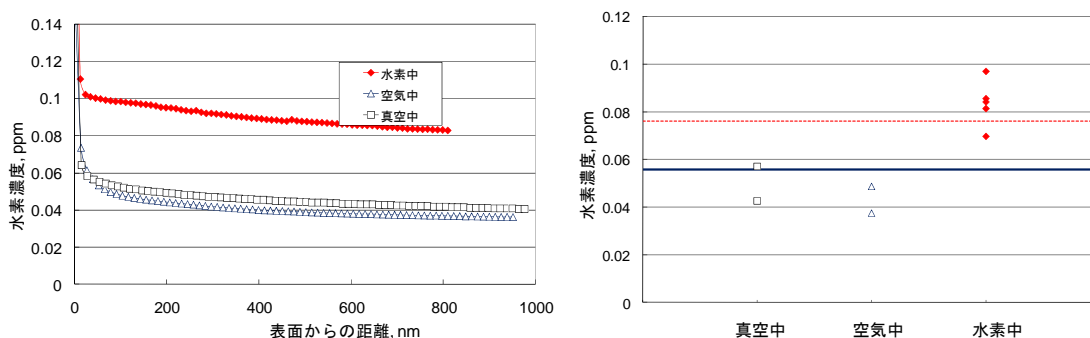


図 2.4.(1).37 垂直荷重の繰返し増減によるディスク(SCM435)中の水素量
左は水素濃度の深さ方向分布、右は深さ 700nm における値であり
青線は空气中非接触部の測定値、赤線は水素中非接触部の測定値

一方、上述の負荷形態に繰返し往復滑りを重畳すると、水素雰囲気においても微量水分、酸素による表面酸化が起こり、表面下への水素の侵入を抑えることがわかった。図 2.4.(1).38 はディスク試験片材料を SUJ2 としたときの TDS による水素量測定結果である。測定は試験ディスク全体に対して行ったため、水素侵入量が多かったと思われる接触点のごく近傍での水素濃度の違いがクリアではない。分解能を改善して続行中である。

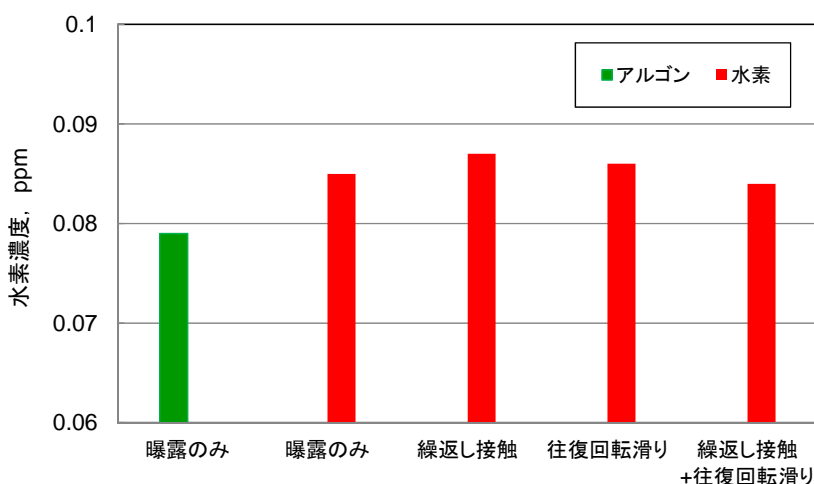


図 2.4.(1).38 繰返し接触による水素侵入量
荷重 20~270N, 10Hz, 10 万サイクル, ねじり角 0.18 度, 2.5Hz

(1-8) 鋼の転がり疲れ特性

転がり軸受は水素インフラにおいて欠かせない機械要素であり、一般に知られる水素脆化によるフレーキング損傷のメカニズムの理解と損傷防止策の検討が急務である。本プロジェクトの他の項目でのしゅう動状況との大きな違いは、第一に転がり-滑り接触であること、第二に潤滑油ないしグリースで潤滑されていること、である。

水素雰囲気で作動する機器、あるいは通常雰囲気で作動する機器内で使用されている転がり軸受の損傷事例から、転がり疲れ損傷の早期発生の原因となりうる因子は、荷重の変動や部分滑りの発生などを含む接触形態、潤滑油ないしグリースの分解、混入水分の影響、潤滑剤の供給に起因する潤滑不良、温度や電気化学的条件に起因する材料表面の化学的組成の変化、水素の侵入、固体内でのひずみの繰返しによる水素拡散の促進ないし抑制と材料組織の変化とこれに伴う機械的強度の変化、など多岐にわたる。したがって、これらの個々の影響を明らかにし、実用に即して支配因子に関する対策をとるといった総合的なアプローチが必要である。本プロジェクトでは特に接触形態と潤滑状態の違い、及びそれらに関連する表面状態に着目して研究を進めた。

転がり疲れ試験は、接触圧力(ヘルツの接触圧力)と膜厚比(Λ 値:潤滑膜厚を表面粗さで除した値であり、潤滑状態を示す指標である)をコントロールした試験を意図し、ボール・オン・ディスク型の転がり疲れ試験機を使用して行った。ボールの径は 6.35mm、ディスク上のトラック径は 43 mm である。接触点での平均滑り率はほぼゼロであるが、ボールの公転にともなうスピンによる微小滑りが存在する。試験雰囲気として、常圧水素ガス、及び比較雰囲気としてアルゴンと乾燥空気を用いた。材料は主に SUJ2 と SUS440C を対象とした。潤滑油として鉱油 P60 と合成潤滑剤ポリアルファオレフィン(以下 PAO) 数種類を使用した。主な成果は以下のとおりである。

(i) 接触圧力が軸受の定格荷重に相当する接触圧力より高い場合

水素雰囲気は寿命に影響しないことがわかった。これは繰返し転がり接触による鋼内への水素侵入量が顕著ではなく、水素侵入による著しい組織変化がないためである。水素侵入量は水素雰囲気中よりも空気中で若干多いケースもあった。

一方、強制的に鋼に水素を吸蔵させると寿命が低下する。図 2.4.(1).39 は、試験片をチオシアン酸アンモニウムに 48 時間浸漬させて水素を吸蔵させた場合と、40MPa、373K の高圧水素中に 200 時間曝露させて水素を吸蔵させた場合に、寿命が低下したことを示す。

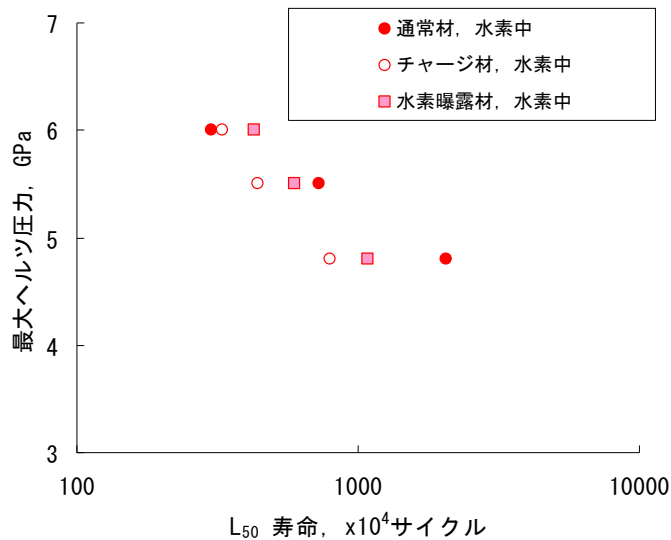


図 2.4.(1).39 転がり疲れ寿命に及ぼす試験前の水素チャージの影響
潤滑油 P60

(ii) 接触圧力が軸受の定格荷重に相当する接触圧力付近ないしそれ以下の場合

水素雰囲気の影響を調べるためには、接触回数が 1000 万回以上の試験を行う必要がある。以下に述べる試験では、ディスク試験片における繰返し接触回数の上限を 2 億回として試験を行った。試験油としては、鉱油 P60 と合成潤滑剤 PAO5、PAO10、PAO17 を用いた。同一条件で複数回試験を行うとともに、TDS による水素侵入量の測定と、試験後の潤滑油の劣化状態を調べるために全酸価の測定を行った。

図 2.4.(1).40 に潤滑油 PAO10、温度 363K、接触圧力 4.8 GPa (シェークダウン限界よりわずかに高い)、 $\Lambda=1.69$ の条件で行った試験の結果をワイブルプロットの形で示す。水素中では、空气中、アルゴン中にくらべ、低寿命である。

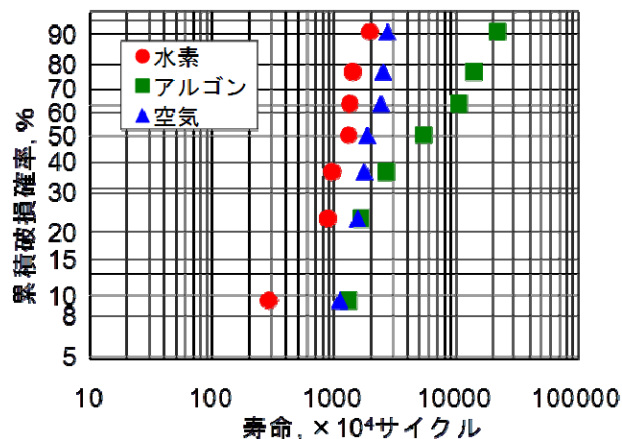


図 2.4.(1).40 ボールオンディスク転がり試験(常圧ガス中);接触圧力 4.8GPa における転がり疲れ寿命のワイブルプロット(SUJ2, PAO10, 363K, $\Lambda=1.69$)

図 2.4.(1).41 は、PAO10/363K, PAO10/333K, PAO5/333K の潤滑条件で行った転がり疲れ試験直後にディスク試験片の水素侵入量を測定した結果である。図示した値は複数の試験片に対する測定値の平均値である。水素侵入量は水素中での試験で多く、水素中では試験温度が高いほど水素侵入量が多く、水素量とフレーキング寿命との間に相関がある。なお、363K での試験ではフレーキングはボール試験片で先に生じた。

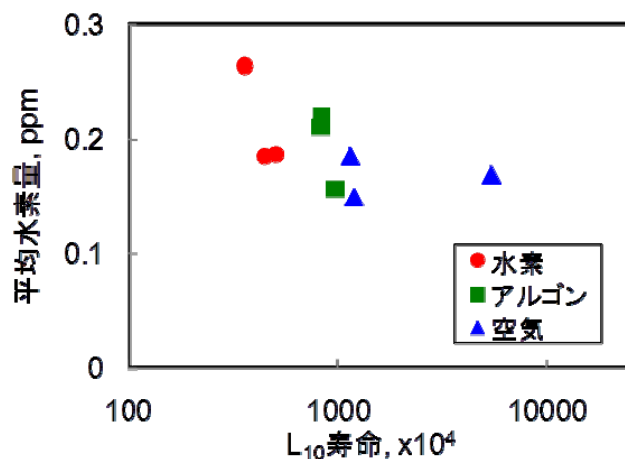


図 2.4.(1).41TDS により計測した水素侵入量と寿命の関係
PAO10/363K, PAO10/333K, PAO5/333K

水素中で鋼へ侵入する水素は、主として雰囲気水素を起源とする水素と考えられるが、鋼表面での潤滑剤の分解または水分等の反応によっても水素が生じる。空気中とアルゴン中では、後者が鋼内の水素量の若干の増加に寄与している。表面分析から、水素中と空気中とで、形成される表面膜の酸化鉄の種類が異なることがわかった。一方、(1-7)で述べたように、酸化膜は水素の生成に関与するとともに、水素侵入速度を低下させると考えられている。その作用が酸化膜の種類と形成状態によってどのように変化するか、さらに調査が必要である。

潤滑油 PAO32 を使用し、温度 393K (膜厚比 $\Lambda=1.96$) で行った試験でも、フレーキングはボール試験片で生じた。このときの寿命とボール試験片の水素量の関係を図 2.4.(1).42 に示す。水素侵入量は水素中の試験で多いが、寿命は空気中で低い。空気中では、水素侵入ではなく、表面酸化物形成にともなう表面荒れによって表面起点のき裂が生じたためと考えられる。一方、ボール試験片断面の観察から、水素中の試験においてはボイド状の欠陥、針状を呈する組織、及び白色層の形成がみられ、これらが早期フレーキング破壊につながったと考えられる。組織変化とフレーキングの関係について継続調査中である。

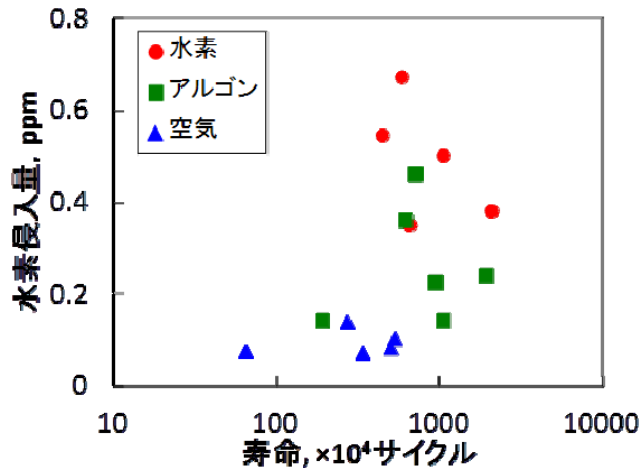


図 2.4.(1).42 TDS により計測した水素侵入量と寿命の関係
PAO32, 393K

以上から、水素雰囲気における早期フレーキングは水素の侵入と組織変化によって生じ、これらは温度条件に依存することがわかった。また(1-7)の単純接触試験の結果から、表面酸化膜が水素侵入を妨げることがわかった。しかし、転がり接触における酸化膜の形成状態と水素侵入の関係について、さらに理解を深める必要がある。また早期はく離を防止する方法の一つとして、人為的な酸化膜形成による水素侵入量の制御について検討を進める必要がある。

(iii) グリース潤滑下の転がり疲れ

種々のグリース、及びそれらの基油による潤滑下の転がり疲れ試験を水素中、及び空気中に行った。また、TDS による侵入水素量の測定、及び XPS, FT-IR による表面分析を行った。図 2.4.(1).43 に結果を示す。試験回数がまだ不十分ではあるが、以下のことが示された。

- 1) 水素中におけるグリース潤滑下の転がり疲れ寿命は空気中に比べて著しく短くなることがある
- 2) フッ素系グリースでは概して他のグリースに比べて転がり疲れ寿命が長い
- 3) グリース潤滑下の転がり疲れはしゅう動面の酸化、増ちょう剤による保護膜形成、水素侵入などの複数の要因に影響される

今後、本試験を継続して行い、グリースのタイプごとに水素雰囲気での潤滑と転がり疲れの詳細を調べる予定である。

(1-9) その他の材料

本研究項目は、軸受・バルブしゅう動材料の水素雰囲気中での基礎特性と支配的因子を理解して設計に資することを主眼としており、経済性に鑑み金属材料を主な対象としてきたが、産業界ではセラミクスや各種コーティング材の使用可能性も検討されており、本事業への要望もあった。このうち、特に耐水素材料として有望と考えられているダイヤモンドライクカーボ

ン(DLC)膜について調査を行った。DLCに限らず多くのコーティング材は、同じ名称であっても材質や製法によって無数の種類が存在し、これらを網羅することは本研究の目的からはずれる。そこで本研究では、基本的な水素フリーDLCと水素添加DLCに絞った調査(一部は研究小項目(3)に記載)、及びメーカーの開発におけるDLC候補材の試験を行った。いずれも水素雰囲気中で良好な摩擦特性を示した。

今後、DLC膜の水素中の摩擦と寿命の評価に関して、産業界のニーズが高まると推測される。

(2) シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究

動的シールの摺動材料、すなわち四フッ化エチレンに代表される樹脂材料の水素雰囲気中でのトライボロジー基礎特性データの蓄積とメカニズム解明をめざして、小項目(1)と同様に常圧気体中の特性の把握からスタートし、次に高圧水素に曝露した試験片による試験を行い、さらに40MPaまでの高圧水素中での試験を実施した。また、諸現象のメカニズム解明のために、摺動表面の各種分析を行って、現象の支配的因子を抽出した。これらを実施するために、小項目(1)と連携して実験装置の開発を行って研究体制を整備した。動的シールは水素機器の安全性を確保する重要な要素であり、そのトライボロジー特性に関する産業界からの要望は高い。そのため本研究項目では、民間企業数社との連携による試験も多く行って機器の開発に貢献している。

一方、Oリングなどのゴム材料の静的シールは、動的なシールとして使用される場面があり、また静的シールとして使用される場合においても、機械の振動にともなって接触部に微小振幅の往復動が生じる。これらの水素雰囲気中での影響を調べるために、往復動摩擦試験と一方向滑り試験を実施した。

(2-1) 樹脂材料の常圧水素中の摩擦摩耗特性

圧縮機や調整弁の動的シールとして用いられる各種樹脂材料について、常圧気体中における摩擦摩耗特性を評価した。実験には雰囲気制御チャンバーを備えた3ピン・オン・ディスク型試験機、及び高度雰囲気制御摩擦試験機を用いた。樹脂材料を上部ピン試験片、摩擦相手材となるステンレス鋼 SUS316L を下部ディスク試験片とし、ピンとディスク間に生じる摩擦係数と樹脂材料の比摩耗量を計測した。

平成19年度までは、無充てんPTFEについて、雰囲気ガスの影響、相手面の粗さの影響、滑り速度の影響などを調べ、転移膜の形成に雰囲気と粗さの影響が大きいことを明らかにした。PTFE転移膜の形成量が多いほど比摩耗量は少ない。また、水素が相手面に吸着することにより、転移膜の形成を阻害する可能性があることを示した。さらに、金属表面でのフッ化金属の形成が転移膜の形成に影響を及ぼすことを示した。

平成20年度以降は、雰囲気ガス中の水分の影響、転移膜形成に及ぼす不動態膜とフッ化金属形成量の影響、各種充填材の摩擦摩耗特性、相手面金属の影響などについて明らか

にした。

(i) PTFE の摩耗に及ぼすガス中水分の影響

雰囲気ガス中の水分量の影響を調べた結果を図 2.4.(2).1 に示す。相手面金属は SUS316L である。図からガス中の水分量が多いほど PTFE 転移膜の形成量が多く、比摩耗量が小さいことがわかる。また、アルゴン中よりも水素中においてこの傾向が強い。XPS による表面分析から、この水分による違いは金属表面に形成される酸化物と水酸化物の形成状態の違いによるものである。アルゴン中では酸化物の形成が主であるのに対し、水素中では水酸化物の形成が顕著である。

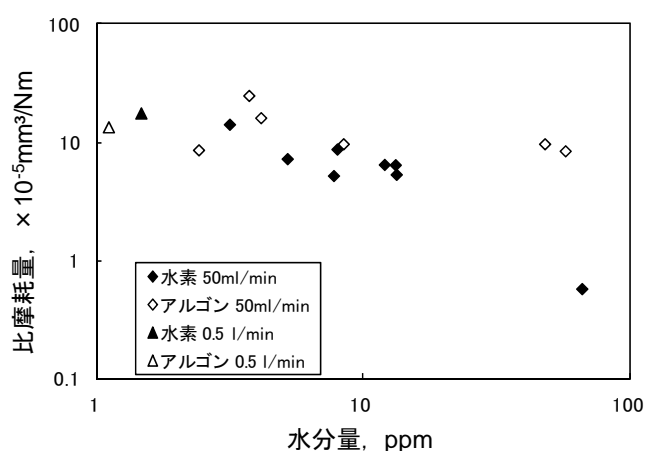


図 2.4.(2).1 無充てん PTFE の比摩耗量に及ぼすガス中水分量の影響
荷重 50N, 滑り速度, 40mm/s, 滑り距離, 1300m

図 2.4.(2).2 に無充てん PTFE の比摩耗量に及ぼす PV 値の影響を示す。図中の「高水分量」は3ピン・オン・ディスク試験機による結果であり、試験ガスの水分量は数百~1000ppm であった。「低水分量」は高度雰囲気制御型摩擦試験機による結果であり、試験ガスの水分量は 0.5~3.5ppm である。ディスク試験片の表面粗さは Ra0.05 μm に統一した。試験片間にかかる平均接触面圧は 0.89~4.00MPa、滑り速度は 20~100mm/s、総滑り距離は高水分量ガスでは 800m、低水分量ガスでは 500m として面圧と速度による比摩耗量の変化について計測した。

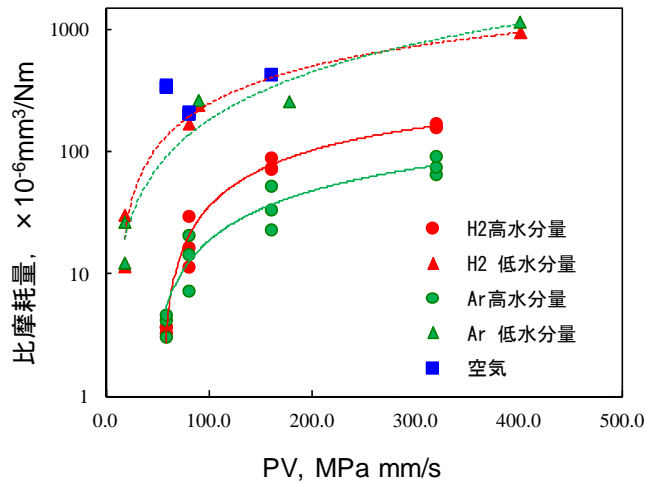


図 2.4.(2).2 無充てん PTFE の比摩耗量に及ぼす PV 値の影響；
相手面 SUS316L

水素ガス中・アルゴンガス中では PV 値が大きくなると共に比摩耗量はガスに含まれる水分量に関わらず増加することが認められる。また、雰囲気ガスに含まれる水分量が多いほうが PTFE の摩耗が低下する。ガスに含まれる水分量が多い場合には PV 値が大きくなるにつれ水素ガス中での比摩耗量がアルゴンガス中と比較して増加することが示された。ガス中に含まれる水分量が数 ppm の低水分量の場合では水素ガス中とアルゴンガス中での比摩耗量に大きな差は現れなかった。水分量が多い大気中では荷重・速度への比摩耗量の依存性は観察されなかった。なお、本試験においても PTFE の比摩耗量が転移膜形成状態に依存することを表面分析により確認した。

(ii) 転移膜形成に及ぼす不動態膜とフッ化金属の影響

PTFE の摩擦摩耗特性が相手面上の PTFE 転移膜の形成に依存することは上で述べた。さらに水素の持つ金属酸化膜の還元性が PTFE 転移膜形成に及ぼす影響を評価することを目的として、アルゴンイオンエッチングによるステンレス鋼表面の不動態膜の除去による影響を調べた。

その結果、ステンレス鋼表面の金属酸化膜を一部取り除くことにより、PTFE 転移膜形成が促進され、PTFE の比摩耗量が減少することを明らかにした。また、エッチングされた表面ではフッ化金属の形成が認められ、これが PTFE 転移膜の形成を助けていると考えられる。ただし、フッ化金属の形成は水素中よりも不活性ガスであるアルゴン中で顕著であった。

これらの結果は、高圧水素中における還元作用によって PTFE 転移膜の形成が促進され比摩耗量が低減すること((2-2)(2-3)参照)を裏付けるものである。

(iii) 各種 PTFE 充てん材

図 2.4.(2).3~5 にグラファイト 15wt%添加 PTFE, ブロンズ 60wt%添加 PTFE, グラスファイバ 15wt%添加 PTFE の比摩耗量に及ぼす雰囲気と速度の影響を示す。3ピン・オン・ディスク試験機を用い、相手面金属はグラファイト添加 PTFE の面圧 4MPa の試験では SUS316L、それ以外はマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440C である。SUS316L、SUS440C の表面粗さ Ra はそれぞれ $0.05\ \mu\text{m}$ 、 $0.03\ \mu\text{m}$ とした。以下に要点をまとめる。

水素雰囲気においてグラファイト 15wt%添加 PTFE は、特に高面圧、高滑り速度条件下で良好な低摩擦、低摩耗となる。

ブロンズ 60wt%添加 PTFE は、滑り速度の増加に伴う高摩擦、高摩耗状態への遷移を示し、特に水素雰囲気では、高滑り速度条件下での摩擦・摩耗挙動が他の雰囲気中と比較し悪くなる傾向がある。

グラスファイバ 15wt%添加 PTFE の摩擦・摩耗挙動への雰囲気の影響はきわめて限定された物であり、水素雰囲気においても、高接触面圧、高滑り速度条件まで安定した低摩擦、低摩耗特性が維持された。

このほか、カーボンファイバー、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリフェニレンスルフィド (PPS)などを添加した PTFE 複合材数種について、圧縮機のピストンリングを想定した高すべり速度条件 ($2\ \text{m/s}$)での水素中ピンオンディスク摩擦試験を行い、比摩耗量と摩擦係数の評価を行った。

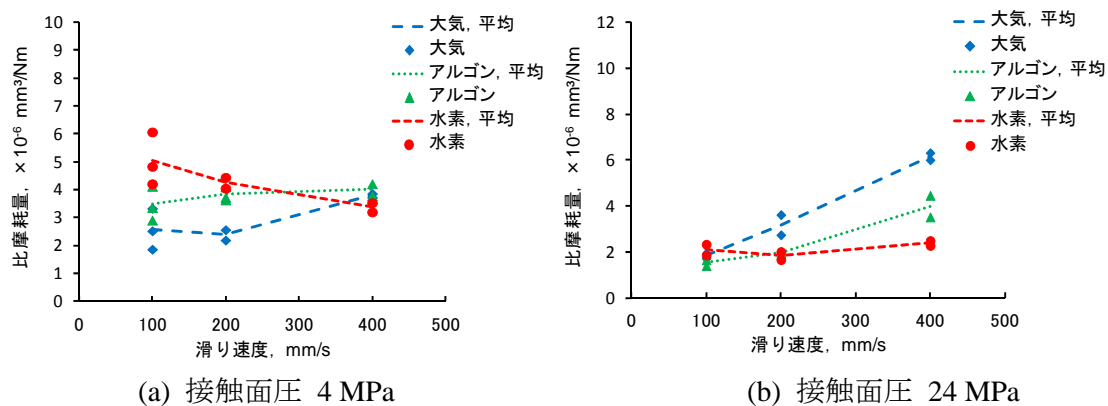


図 2.4.(2).3 グラファイト 15wt%添加 PTFE の比摩耗量

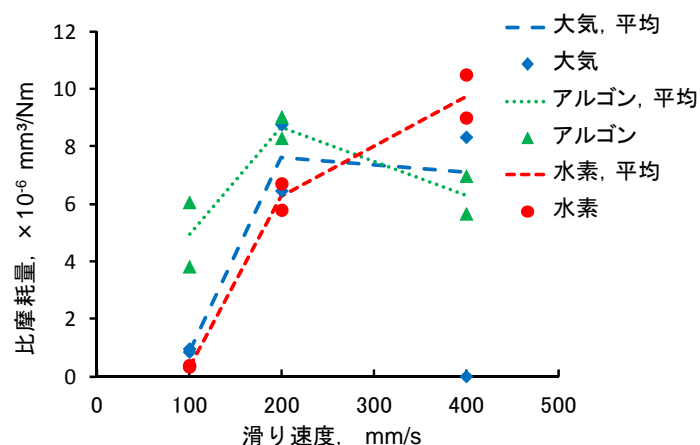


図 2.4.(2).4 ブロンズ 60wt%添加 PTFE の比摩耗量;接触面圧 24MPa

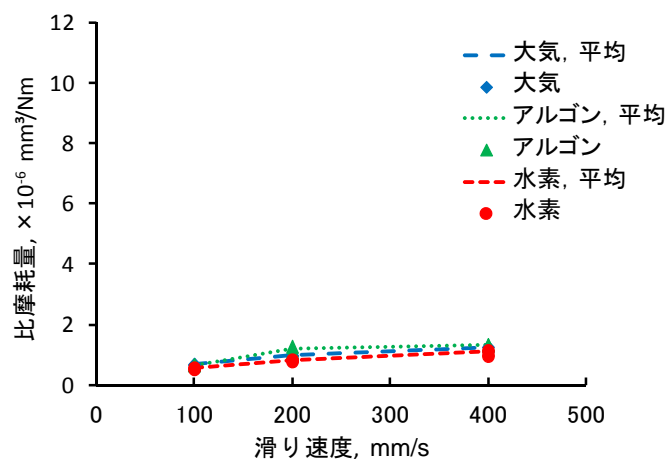


図 2.4.(2).5 グラスファイバ 15wt%添加 PTFE の比摩耗量;接触面圧 24MPa

(iv) PEEK

図 2.4.(2).6 にポリエーテルエーテルケトン(PEEK)の比摩耗量を示す。相手面材料は SUS440C である。PEEK は耐摩耗性に優れるものの、自己潤滑性が乏しいために摩擦係数が高く、滑り速度の上昇に伴う発熱量の増加により、PEEK 表面に激しい損傷が生じた。水素雰囲気では、おそらく水素の高い熱伝導率による冷却効果により、表面損傷が抑制され高滑り条件下まで安定した摩擦挙動が得られた。

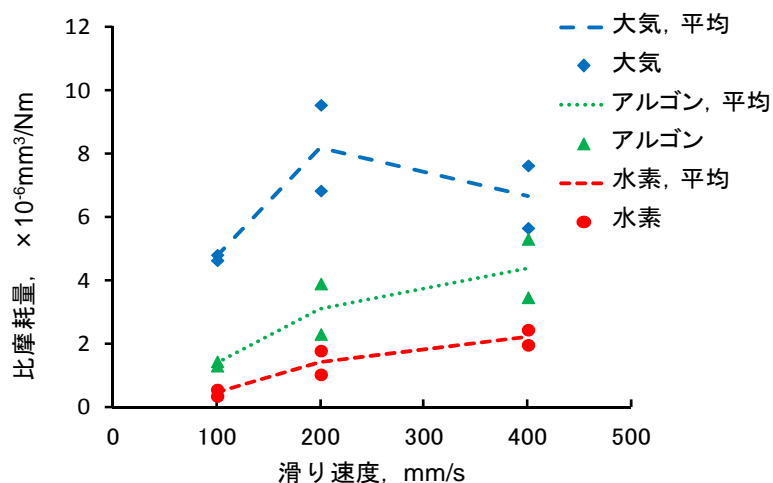


図 2.4.(2).6 PEEK の比摩耗量;接触面圧 24MPa

図 2.4.(2).7 に PEEK の比摩耗量に及ぼす水分の影響を示す。水素中で比摩耗量は水分量が多いほど低下するのに対し、アルゴン中では逆の傾向を示している。PTFE と同様に、PEEK の転移膜が相手面に形成され、転移膜量が多いほど比摩耗量が低いこと、転移膜量は相手面上の水酸化物量と相関があること、などを表面分析により明らかにした。

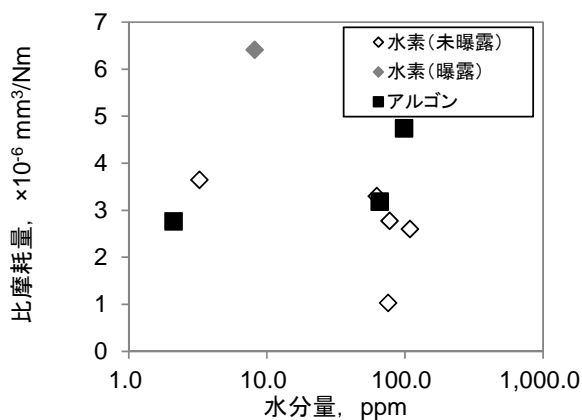


図 2.4.(2).7 PEEK の比摩耗量に及ぼす水分濃度の影響
荷重 56.5N, 滑り速度 40mm/s, 滑り距離 1500m

(v) その他の材料

流量調整弁のシール用樹脂材料として用いられる超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)について、水素雰囲気中における摩擦および摩耗を評価した。摩擦相手面には SUS316 を使用した。

自己潤滑性を有する UHMWPE は、グラファイト添加 PTFE と同程度の摩擦係数を示し、良好な低摩耗性を示した。また、自己潤滑性を有しない PVDF は PEEK と同程度の高い摩擦係

数を示し、摩擦挙動も不安定であった。比摩耗量は小さかったことから、PEEK に似た水素中での摩擦・摩耗特性を持つと思われる。

(vi) 相手面金属の影響

動的シール用樹脂材料の摩擦摩耗特性に及ぼす相手面金属種の影響を調べる目的で、高度雰囲気制御摩擦試験機を用いたピンオンディスク試験、及び往復回転ピンオンディスク試験を行った。その結果、相手面金属材料の影響を受けやすいものと、そうでないものがあることがわかった。

図 2.4.(2).8 に、5 種類の樹脂材料と 4 種類の金属材料の組合せにおける比摩耗量を示す。グラファイト添加 PTFE は相手面の違いによる影響を受けにくい。これは、PTFE 転移膜よりもグラファイトの移着膜の影響が強いためと考えられる。

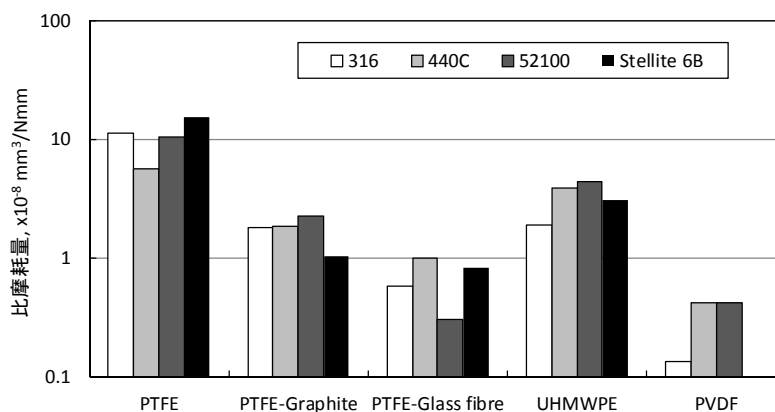


図 2.4.(2).8 樹脂材料と相手面金属材料との組合せによる比摩耗量の違い
 接触面圧 3MPa, ストローク 7.6mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

樹脂材料のうちフッ素系樹脂 4 種類について相手面金属表面の XPS 分析を行った結果、金属種によってフッ化金属の生成状態が異なり、それぞれの樹脂の比摩耗量と相関が認められた(図 2.4.(2).9)。

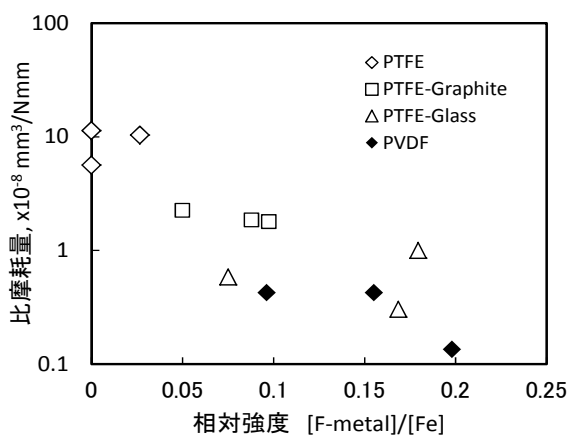


図 2.4.(2).9 表面フッ化金属の強度と比摩耗量の関係

ブロンズ 60wt%添加 PTFE の比摩耗量に及ぼす相手面金属の影響について調べた結果を図 2.4.(2).10 に示す。ブロンズ 60wt%添加 PTFE は常温よりも高温 (373K) における比摩耗量が小さく、また空気中よりも水素中において比摩耗量が小さい。相手面金属による違いはアルゴン中よりも水素中で少ない。これは、相手面金属上にブロンズの移着膜が形成され、これが支配的に働いているためと考えられる。

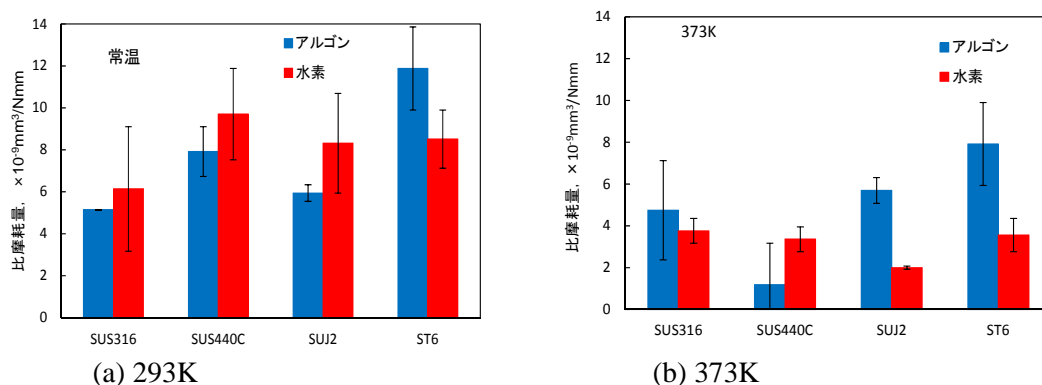


図 2.4.(2).10 ブロンズ 60wt%添加 PTFE の比摩耗量に及ぼす相手面材料と温度の影響荷重 1.96N, ストローク 7.6mm, 周波数 2Hz, サイクル数 7200

以上のように、樹脂材料の摩擦摩耗に及ぼす相手面金属の影響は、雰囲気としゅう動条件、温度に依存する。

(2-2) 樹脂材料の高圧水素曝露

高圧水素環境下で動的シールとして使用される樹脂材料について、摺動時のトライボロジー特性に及ぼす高圧水素の影響を評価することを目的に、高圧水素中に曝露した試験片の摩擦摩耗試験を行った。

(i) 無充てん PTFE

摩擦摩耗試験に先立ち、無充てん PTFE ピンとステンレス鋼 SUS316L ディスク試験片を高圧水素ガス曝露容器内に封入し、圧力 40 MPa, 温度 373 K の高圧水素ガスに 200 時間曝露した。曝露後、容器から取り出した試験片を速やかにピン・オン・ディスク試験機に取り付け、常圧の水素(純度>99.999%)中において滑り距離 400m の摩擦摩耗試験を行った。試験結果を図 2.4.(2).11 に示す。比摩耗量は滑り速度が高いほど大きく、水素曝露試験片のほうが小さい。

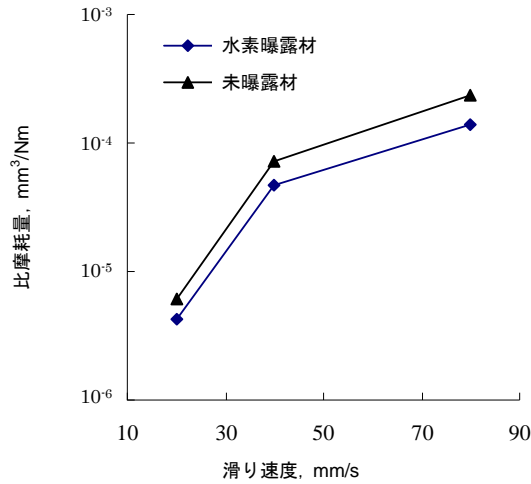


図 2.4.(2).11 常圧水素雰囲気における PTFE 比摩耗量への高圧水素曝露の影響
荷重 338 N、滑り距離 400m、SUS316L ディスク、 $R_{max}=0.5 \cdot m$

高圧水素曝露前後の SUS316L 表面について XPS を用いた化学分析を行った。特に、ステンレス鋼の場合、表面を主としてクロムと鉄の酸化物からなる不動態膜が覆っていることが知られている。そこで、この不動態膜の状態に対する高圧水素の影響を検討するため、クロム Cr2p3/2 および鉄 Fe2p3/2 の光電子スペクトルを取得した。

表面分析用の試験片は、摺動試験に用いるディスク試験片と同様に、表面をバフ研磨仕上げした後、有機溶媒により洗浄した。ステンレス表面の高圧水素ガス曝露前および曝露後の光電子スペクトルを図 2.4.(2).12 に示す。ここでは、最表面の分析を行った後、アルゴンイオンエッチングを 20 秒ずつ行いながら分析を繰り返し、表面から深さ方向の化学組成分布を求めた。曝露前のステンレス表面は、主にクロム酸化物の不動態膜に覆われていることから、クロムからのスペクトルでは、純クロムを示す 573eV 付近のピークと比較し、酸化物と水酸化物を示す 575eV 付近のピークが顕著に高くなっている。この傾向は 80 秒のエッチング後も変化しないことから、ある程度の厚さを持ったクロム酸化物の不動態膜が存在することが確認された。また鉄からのスペクトルにおいても、最表面では酸化物と水酸化物を示す 708eV 付近のスペクトルが高くなっており、エッチングにより掘り下げることで、徐々に純鉄を示す 705eV 付近のピークが高くなった。このことより、最表層部の不動態膜には鉄の酸化物ないし水酸化物も含まれていることがわかる。曝露後のステンレス表面の光電子スペクトルは、最表面では曝露前と類似しているものの、20 秒のエッチングによりスペクトルは大きく変化した。特にクロムからのスペクトルでは、純クロムを示すピークが顕著となり、深さ方向に行くに従い、酸化クロムのピークと比較し、純クロムのピークが徐々に高くなっている。鉄からのスペクトルにおいても、20 秒のエッチング後には純鉄のピークが最大値を示した。これらの分析結果は、高圧水素ガス曝露によりステンレス表面の不動態膜が還元され、その一部が失われたことを示すものと思われる。最表面に見られた酸化物層は、曝露容器から取り出した後、大気にすることにより再形成されたものと考えられる。

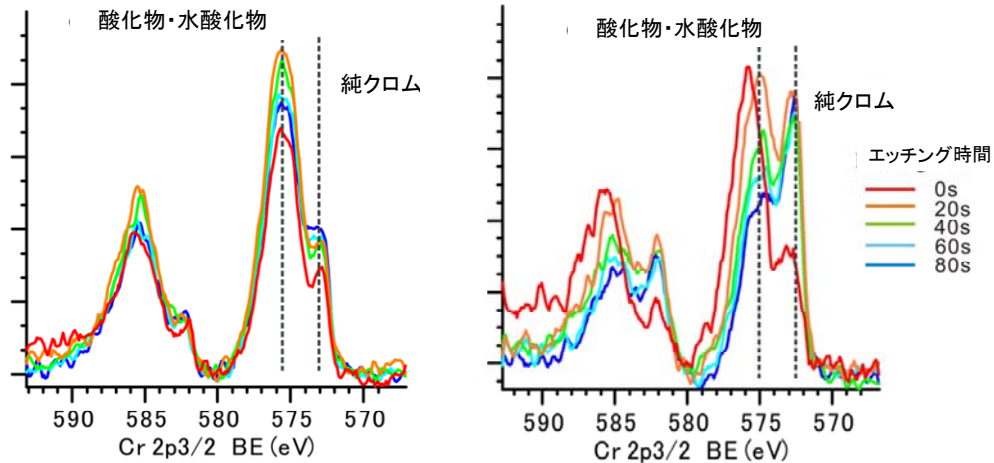
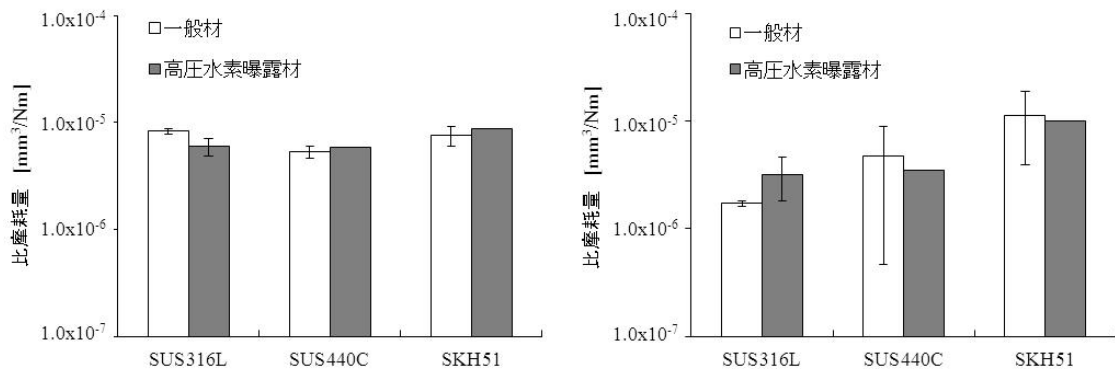


図 2.4.(2).12 SUS316L 高圧水素曝露材(右)と未曝露材(左)の XPS 分析

一方、摩擦試験後の光学顕微鏡観察と XPS 分析を行った結果、高圧水素曝露材ではディスク表面への PTFE 転移膜形成が促進されており、これにより PTFE の比摩耗量減少したことが示された。したがって高圧水素曝露によりステンレス表面の酸化膜を還元除去され、これが密度の高い転移膜形成を促し、PTFE の摩耗を抑制したものと考えられる。

(ii) PTFE 複合材

ブロンズ 60wt%添加 PTFE とグラファイト 15wt%添加 PTFE について、相手面材料の影響と、高圧水素曝露の影響を調べた。相手面金属として、ステンレス鋼 SUS316L, SUS440C、及び工具鋼 SKH51 を用いた。図 2.4.(2).13 に結果を示す。



(a) グラファイト 15wt%添加 PTFE

(b) ブロンズ 60wt%添加 PTFE

図 2.4.(2).13 比摩耗量に及ぼす相手面材料と高圧水素曝露の影響
接触面圧 1MPa, 滑り速度 200mm/s, 滑り距離 1000m

ブロンズ 60wt%添加 PTFE の摩擦摩耗は、グラファイト添加 PTFE と比較して水素雰囲気における比摩耗量が概して少なく、相手面材料の影響を受けやすいことがわかる。本試験では相手材を SUS316L としたときが最も良好な摩擦摩耗特性を示した。

ブロンズの移着は摺動相手面の影響を受けやすく、相手面材質および高圧水素曝露により移着量が増加した。その結果、ブロンズ添加 PTFE の摩擦・摩耗挙動にも相手面材質や高圧水素曝露の影響が認められたと考えられる。一方、グラファイトの移着に対する相手面材質および高圧水素曝露の影響は少なく、グラファイト添加 PTFE の比摩耗量および摩擦係数は、いずれの相手面に対してもほぼ一定であった。

(2-3) 樹脂材料の高圧水素中の摩擦摩耗特性

前述の超高圧水素摩擦試験機を用い、高圧水素ガス雰囲気における各種 PTFE とオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 間の摩擦試験を行った。上部ピン試験片に樹脂材料、下部ディスク試験片にステンレス鋼を用いた。ピン試験片の形状は、直径 6 mm、長さ 15 mm の円柱状であり、ディスク試験片は外径 58 mm、内径 20 mm の円環状とした。ディスク表面は複数の耐水ペーパーにより研磨し、 $R_a = 0.05 \cdot \mu\text{m}$ に仕上げた。

実験は雰囲気温度 323 K とし、雰囲気圧力 1 MPa または 40 MPa の高純度水素中にて行い、試験片間に生じる摩擦係数を評価した。また同条件の高圧ヘリウムガス中においても実験を行って結果を比較した。実験終了後のディスク表面の化学組成について、X 線光電子分光法 (XPS, X-ray photoelectron spectroscopy) により分析し、ディスク表面に形成された樹脂転移膜の状態に対する雰囲気の影響を検討した。実験は各雰囲気において 2 回ずつ行った。

(i) 無充てん PTFE

図 2.4.(2).14 に無充てん PTFE の結果を示す。高圧水素ガス雰囲気では、大気中およびヘリウムガス中と比較して若干摩擦係数が高くなるものの比摩耗量は小さい。また大気圧下と比較して高圧下において水素ガス雰囲気中での比摩耗量が小さい。

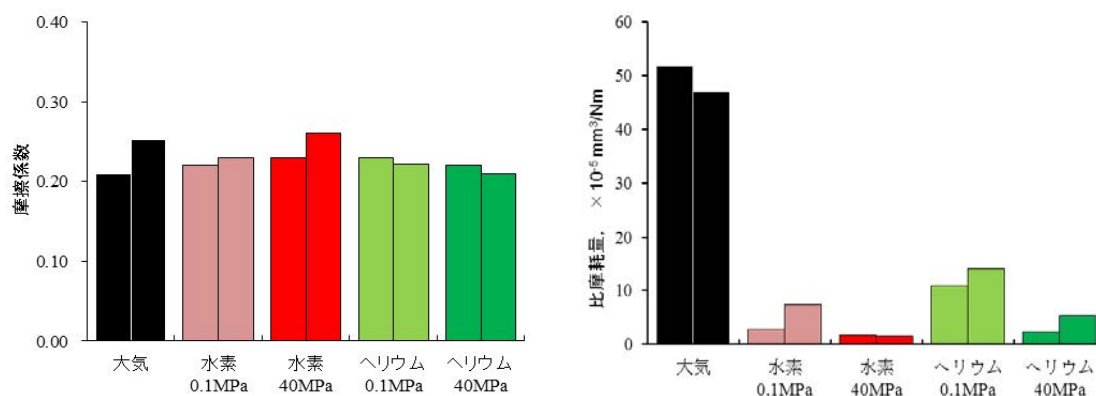


図 2.4.(2).14 無充てん PTFE の摩擦係数と比摩耗量に及ぼすガス種と圧力の影響

XPS によるディスク表面の化学分析の結果、大気圧条件下では、水素ガス雰囲気とアルゴンガス雰囲気の間で、ディスク表面へのフッ化金属および PTFE 転移膜形成に相違が認められず、いずれのガス雰囲気においても、大気中と比較しフッ化金属量が少なく PTFE の転移量が大きくなった。このことが、大気中と比較し両ガス雰囲気での PTFE 比摩耗量が少なくなった

主な原因と考えられる。

水素ガス雰囲気中の圧力を大気圧から 40MPa に昇圧すると、PTFE の転移量が増加した。また 40MPa の高圧条件下では、水素ガス雰囲気とアルゴンガス雰囲気の間で XPS スペクトルに相違が認められ、アルゴンガス雰囲気と比較し水素ガス雰囲気では、フッ化金属の形成が少なくなるとともに PTFE 転移量が増加した。また AFM 画像より、高圧アルゴンガス雰囲気と比較し高圧水素ガス雰囲気では、PTFE 転移膜の構造がより均一で平滑であることが分かった。このように、しゅう動相手面である SUS316L 表面への転移膜形成が高圧水素ガス雰囲気の影響を受けることで、PTFE 比摩耗量が最も少なくなったものと考えられる。

(ii) PTFE 複合材

グラファイト添加 PTFE およびブロンズ添加 PTFE の摩擦摩耗特性を測定し、高圧ヘリウムガス雰囲気および大気中の特性と比較した。図 2.4.(2).15 に結果を示す。ブロンズ添加 PTFE はガス種やガス圧の影響を顕著に受け、特に高圧ヘリウムの中では摩擦摩耗特性が悪化したものの、高圧水素ガス雰囲気においてはグラファイト添加 PTFE と比較し、良好な低摩擦・低摩耗特性を示した。

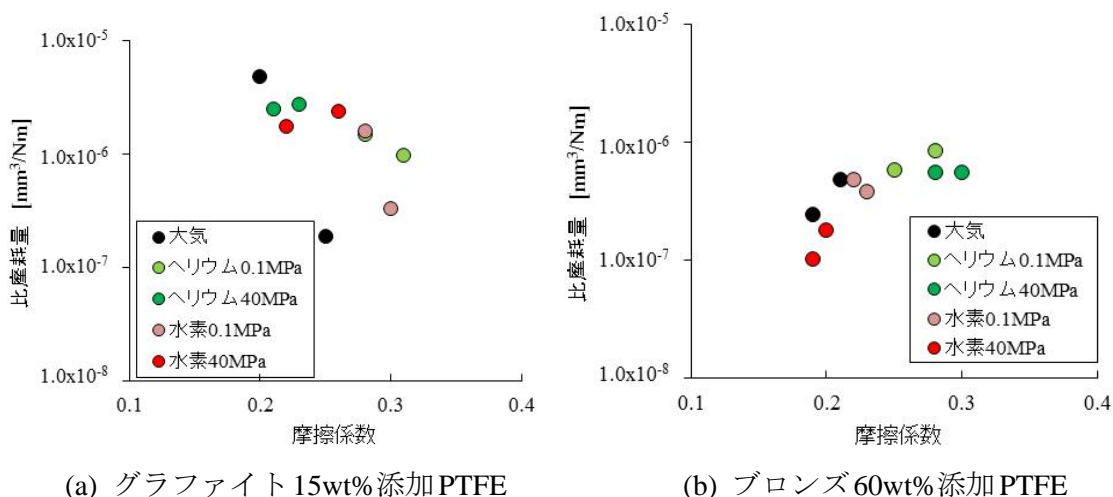


図 2.4.(2).15 無充てん PTFE の摩擦係数と比摩耗量に及ぼすガス種と圧力の影響

XPS による化学組成分析の結果、グラファイト 15wt% 添加 PTFE から形成される転移膜は、強固に吸着したグラファイト層の上に PTFE 層が転移した構造的特徴を持っており、この特徴は水素雰囲気においてもヘリウム雰囲気においても共通している。また両ガス雰囲気においてガス圧が上昇しても転移膜の組成への影響は少なく、わずかにフッ化金属の形成量が増えるのみであった。このように、グラファイト 15wt% 添加 PTFE からの転移膜形成は、ガス種、ガス圧の影響を受けにくく、このことは AFM による転移膜表面の形態観察からも確認できる。これが、グラファイト 15wt% 添加 PTFE が高圧水素雰囲気と高圧ヘリウム雰囲気において同様の摩擦・摩耗特性を示す原因と考えられる。

一方、ブロンズ 60wt% 添加 PTFE から形成される転移膜は、ディスク表面に強固に付着した

ブロンズとフッ化金属が主であり、低圧雰囲気ではその上に炭素が付着している。ガス圧が上昇すると最表面の PTFE 量が増加する点は水素、ヘリウム量雰囲気に共通しているものの、水素雰囲気ではガス圧の上昇により下層で形成されるフッ化金属量が減少し、ブロンズの移着量が減少するのに対し、ヘリウム雰囲気ではフッ化金属の形成量の変化が少なく、ブロンズの移着量が増加した。このように、ブロンズ 60wt% 添加 PTFE から形成される転移膜の組成と構造はガス種、ガス圧の影響を顕著に受けている。このことは AFM による観察からも確認できる。特に高圧状態では水素雰囲気とヘリウム雰囲気において転移膜の状態が大きく異なっており、これが両雰囲気間の摩擦・摩耗特性の相違につながったものと思われる。特に、高圧ヘリウム雰囲気におけるブロンズの過剰な移着が、同雰囲気における高い摩擦係数の原因となったと考えられる。

以上より、ブロンズ 60wt% 添加 PTFE は高圧水素ガス雰囲気において良好な摩擦・摩耗特性を示すものの、転移膜形成が雰囲気ガスのガス種およびガス圧の影響を受けやすいことから、動的シールとしての使用に際してはこの点を十分に注意する必要があると考えられる。一方、グラファイト 15wt% 添加 PTFE は高圧水素ガス雰囲気における摩擦・摩耗特性がブロンズ 60wt% 添加 PTFE と比較し劣っていたものの、転移膜形成がガス種およびガス圧の影響を受けにくく、いずれの雰囲気においても安定した性能が期待できる。

無充てん PTFE と 2 種類の PTFE 複合材について、40 MPa 水素中での摩擦・摩耗特性を比較する(図 2.4.(2).16)。高圧水素中で、複合材はいずれも無充てん PTFE に比べて低摩耗である。特にブロンズ添加 PTFE は高圧水素中で低摩耗であるとともに低摩擦である。

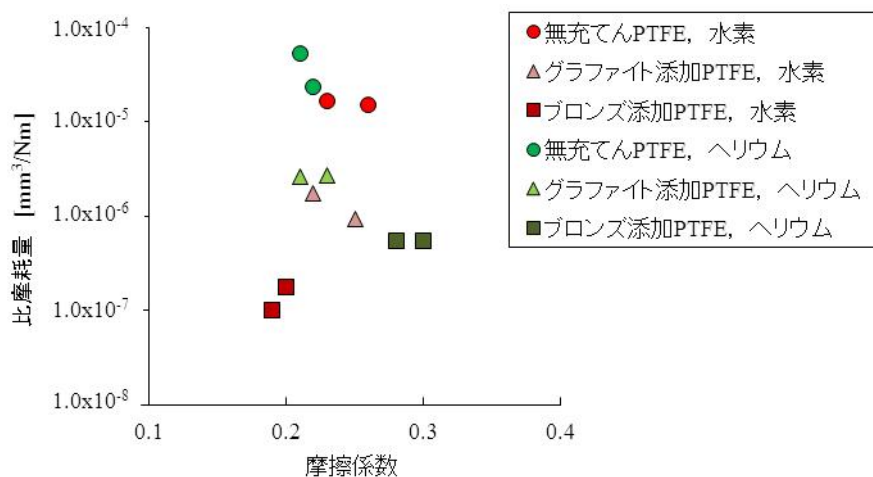
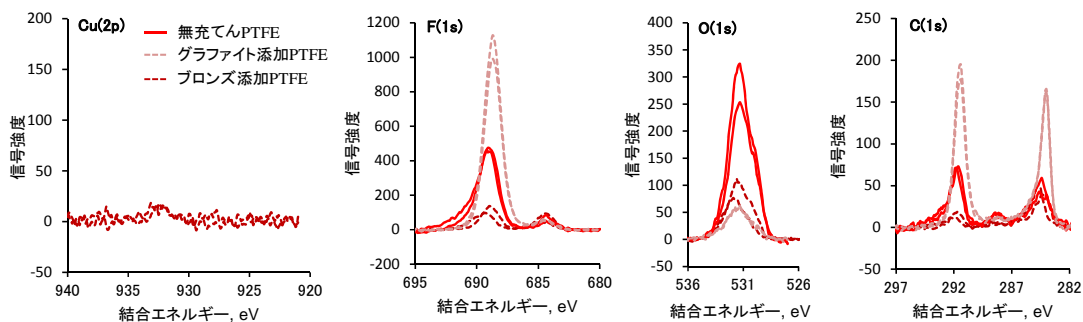


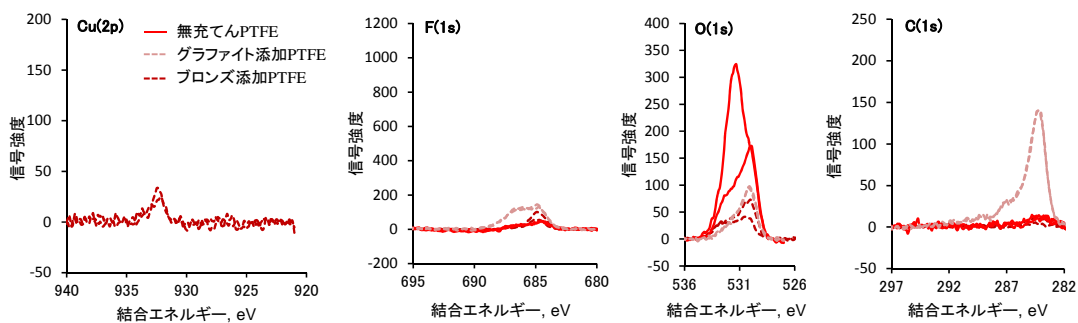
図 2.4.(2).16 充てん材による摩擦・摩耗の改善効果

図 2.4.(2).17,18 にステンレス鋼の XPS 分析結果を示す。無充てん PTFE と PTFE 複合材の間でディスク表面に形成された転移膜の組成と構造を比較すると、グラファイトを充てん材として添加した場合には、高圧水素ガスおよび高圧ヘリウムガスのいずれの雰囲気においても、グラファイトが強固にディスク表面に移着するとともに PTFE 転移膜の形成も促進されている。この転移膜形成の促進が、グラファイト添加による摩耗特性改善の主因と考えられる。一方、

ブロンズを添加した場合 PTFE 転移膜量はむしろ減少しており、高圧水素ガス雰囲気では認められた顕著な摩擦係数と比摩耗量を減少は、ディスク表面にわずかに移着したブロンズによりもたらされた可能性がある。しかし高圧ヘリウムガス雰囲気では、ブロンズの移着量が過大となり、逆に摩擦係数を著しく上昇させた。

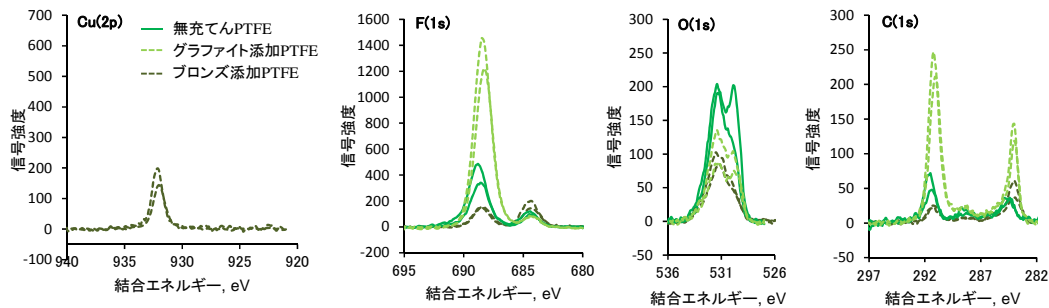


(a) 最表面

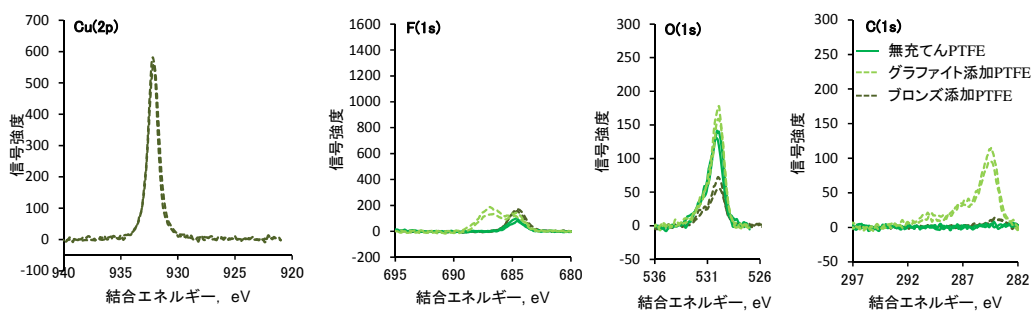


(b) エッチング 80 秒後

図 2.4.(2).17 40MPa の高圧水素ガス雰囲気において形成された転移膜の化学組成比較



(a) 最表面



(b) エッチング 80 秒後

図 2.4.(2).18 40MPa の高圧ヘリウムガス雰囲気において形成された転移膜の化学組成比較

このように、ブロンズ添加 PTFE はブロンズの移着量が摩擦摩耗に大きな影響を持っており、それに対する雰囲気の影響を十分に把握しておく必要がある。

(2-4) 樹脂シールのガスシール性

動的シールのシール面を模擬した樹脂の円筒試験片と金属のディスク試験片の接触しゅう動試験機を製作した。円筒内外に差圧を与えることにより漏れ量を計測することができる。これまでに、金属面の表面粗さの方向性の影響、転移膜形成の影響について結果を得ており、摩耗の進行と漏れ量との関係、樹脂材料による影響などについて現在調査中である。

(2-5) ゴム材料の水素中の摩擦摩耗特性

(i) EPDM ゴムの各種雰囲気におけるすべり摩擦

EPDM と SUS316L のしゅう動試験を、水素、アルゴン、高真空及び相対湿度を変化させた大気中で行った。図 2.4.(2).19 に結果を示す。SUS316L 表面にゴムが凝着することにより摩擦摩耗特性に影響を及ぼすこと、ゴムの凝着は SUS316L の加工の目とガス種により影響を受けること、などを明らかにした。ゴムは加工の目に平行にしゅう動した場合に多く凝着し、垂直にしゅう動した場合に少なく凝着する。

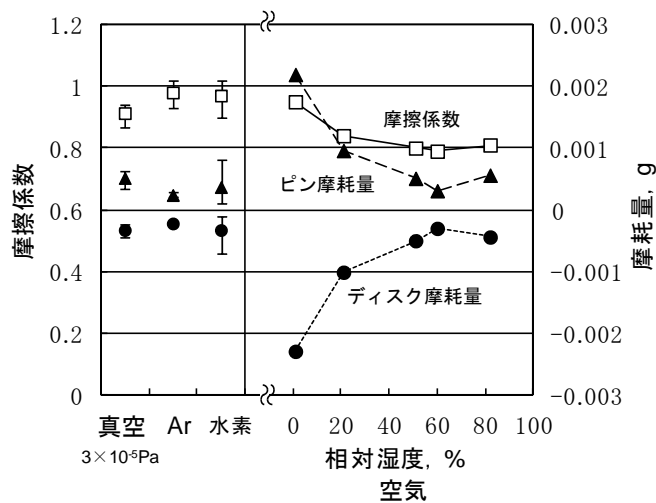


図 2.4.(2).19 EPDM ゴムと SUS316L の摩擦係数と比摩擦量

雰囲気による影響については、真空あるいはガス種の違いによる差は少なく、大気中の相対湿度の違いによる影響が大きかった。水や酸素が微量であると EPDM と SUS316L の凝着を促進し、大量になると凝着を妨げる効果があると推定された。水素中では他の雰囲気と比べて摩擦摩耗データのバラツキが大きかった。

(ii) Oリングの微小振幅摩擦試験

Oリングによる水素密封部に外来振動が加わった状態を想定してOリングを微小振幅で往復動させ、その接触部の変化を観察した。P18サイズ(内径17.8mm, 線径2.4mm)のOリングを円筒面シールとして使用し、2台の試験機を用いて雰囲気チャンバーの中で摩耗試験を行った。Oリングの材質は、水素に対してメーカーが推奨するエチレンプロピレンゴム(EPDM)とした。

実験には2種の試験機を使用した。部分滑り試験機ではストローク 160・m 周波数 100Hz で外側ハウジングを往復動させ、全体滑り試験機(図2.4.(2).20)は加速試験を目的とし、ストローク 2mm、サイクルタイム2秒で内側円筒を往復させた。実験後の接触部の観察とともに外側ハウジングにはたらく軸方向力を摩擦力としてロードセルで測定した。

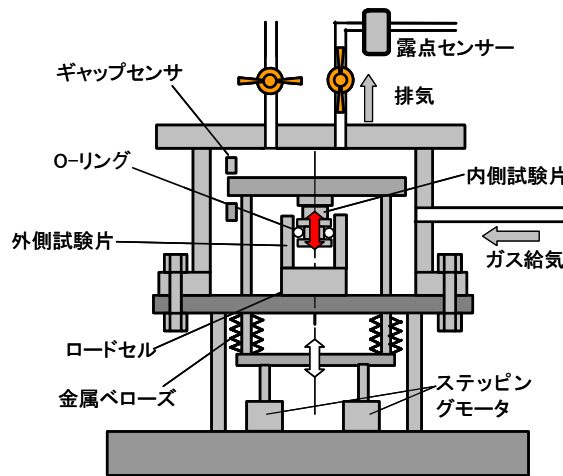


図 2.4.(2).20 Oリング長振幅摩擦試験機

いずれの試験機においてもOリング溝は内側円筒に設け、Oリングが接触する外側ハウジングと内側溝円筒の材料は水素用構造材料として推奨されている SUS316L とした。Oリングの接触する溝寸法および表面粗さは推奨設計値としたが、一部外側ハウジングの表面粗さを推奨値である $Rz=1.6\cdot\mu\text{m}$ のほかに $12.5\cdot\mu\text{m}$ へ粗くした実験も行った。

図 2.4.(2).21 に長振幅摩擦試験の結果を、図 2.4.(2).22 に試験後のOリング外周面の SEM 像を示す。Oリングの摩擦摩耗は水素中で最も高く、空気中で最も低い。また雰囲気ガス中の微量水分が多いほど摩擦摩耗は増加するが、水分量が数万 ppm と極端に高い場合は摩擦摩耗は低くなる。また、相手面粗さが大きいほどゴムの損傷は大きく、雰囲気ガスによる差異が顕著になる。

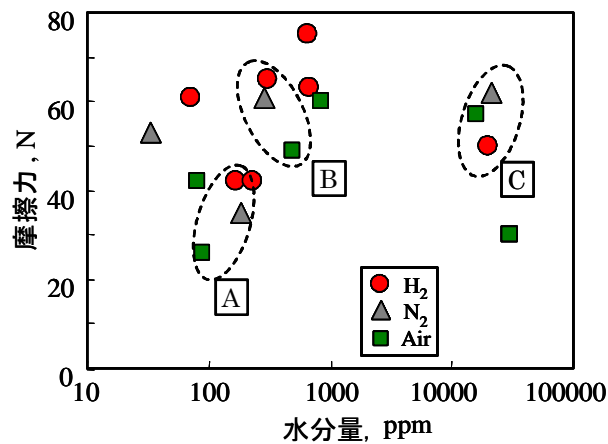


図 2.4.(2).21 Oリング長振幅摩擦試験の結果
ストローク 2mm, 周波数 0.5Hz, サイクル数 3×10^3

水分量	H2	N2	Air
A 100ppm ~ 200ppm	165ppm 変化領域 0.2mm	180ppm	90ppm
B 300ppm ~ 500ppm	300ppm	290ppm	490ppm
C 20,000ppm	20,000ppm	21,000ppm	16,000ppm 相対湿度 44%

図 2.4.(2).22 Oリング外周面の SEM 像
ストローク 2mm, 周波数 0.5Hz, サイクル数 3×10^3

(3) 耐水素表面のトライボロジー特性(耐水素表面改質)の調査研究

本小項目では、水素環境下での利用に最適なトライボマテリアルを探索するため、材料選択および新材料開発にフレキシビリティの高い表面改質法に着目し、その適用の可能性を調査した。ここで開発目標とする耐水素表面とは、材料表面における水素侵入によるトライボロジー特性劣化を防止するとともに、水素雰囲気中において十分な低摩擦係数と耐摩耗性を発現するコーティング膜を付与した改質表面である。摩擦試験は、常温および 220 K で行い、硬質コーティング膜のほか固体潤滑剤 MoS_2 の評価も行った。小項目 (1) (2) と連携して、(5) ヘデータを提供する。

(3-1) 水素透過を抑制する水素バリア性コーティング膜の探索と開発

水素バリア性については、コーティング膜の水素拡散係数を一つの評価指標とした。ただし、水素拡散係数については、いくつかの金属材料や高分子膜等では測定データが存在するものの、トライボマテリアルとして用いられるような膜厚数 μm の硬質膜の水素拡散係数については、測定データはもとより確立された測定手法さえないのが実状であった。そこで本研究では、硬質薄膜の水素透過性を評価するための計測方法の検討からはじめた。水素透過性の評価手法としては、薄板にコーティング膜を施した試験片を用い、高温環境下において実際の水素透過量を計測する手法をはじめ、水素チャージしたコーティング試験片から水素放出量を計測する手法など、いくつかの方法について実験的検討を行った。その結果、高圧水素チャージしたコーティング試験片から一部を切り出し、これを昇温脱離法 (Thermal Desorption Spectrometer, TDS) を用いて評価する手法が、コーティング膜の特性を把握する上で優れることを明らかにした。図 2.4.(3).1 に評価結果の一例を示す。コーティング膜として

は、SUJ2 に DLC 及び TiN を片面コートしたものをを用いた。TDS 測定は、高圧水素暴露(40 MPa、100 °C、200 時間)により水素チャージした SUJ2、DLC 被覆 SUJ2、TiN 被覆 SUJ2 の各試料から、厚さ約 1 mm の測定試料を切り出して行った。高圧水素暴露した SUJ2 では、470 K 付近、600 K 付近に 2 つの水素放出ピークが存在する。それぞれ、第 1 ピーク、第 2 ピーク、とする。DLC 被覆 SUJ2 では、第 1 ピークと第 2 ピークが観察されるが、第 1 ピークが減少している。さらに TiN 被覆 SUJ2 では、第 1 ピークが 450K 付近に現れ、低温側にシフトしている。さらに第 2 ピークは著しく減少し、570 K 付近にピークが現れる。得られた昇温脱離プロファイルより、各試料の水素含有量を見積もると、SUJ2 では 1.26 ppm、DLC 被覆 SUJ2 では 1.06 ppm、TiN 被覆 SUJ2 では、0.75 ppm であった。TiN コーティングで水素含有量が減少していることから、TiN コーティングは水素バリア性を有していると考えられる。

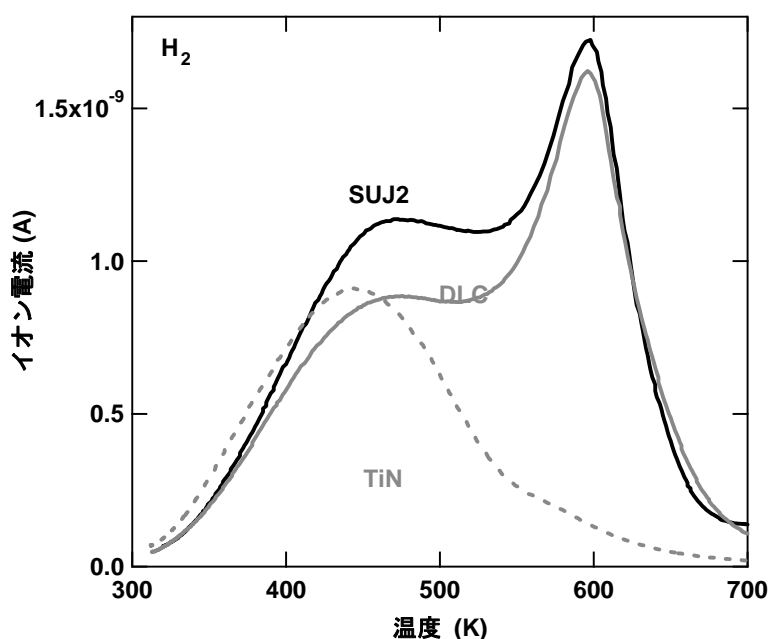


図 2.4.(3).1 コーティング膜の昇温脱離プロファイル特性

水素バリア性を有する候補材料としては、DLC、TiN、TiC、TiAlN などの硬質薄膜のほか、ジルコニウムやニオブなどの高融点金属薄膜を考えている。平成 21 年度に導入した電子ビーム蒸着法を用いて成膜プロセスの最適化を図りつつ、水素バリア性の評価試験を開始した。

(3-2) 耐水素表面のトライボロジー特性評価

水素バリア性は温度の影響を受けるため、水素雰囲気中において摩擦面温度(220～370K)を制御可能なトライボロジー特性評価試験機を開発した。図 2.4.(3).2 に母材の軸受鋼、TiN、水素フリーPVD-DLC、CVD-DLC の各種雰囲気中における摩擦係数を示した。軸受鋼とTiNは、水素中において高い摩擦係数を示す一方で、2種類のDLCはともに水素中での摩擦係数は低く、真空中との比較では水素による摩擦低減効果が顕著に見られた。トライボロジー特性への水素の直接の影響は、摩擦表面における水素吸着もしくは水素化物の形成に

よるものと考えられる。すでに DLC では、表面炭素原子のダングリングボンドが水素終端されることにより、摩擦係数が低減することが報告されているが、本研究でもこれを裏付ける結果が得られたものと考えられる。低温(220K)水素雰囲気中では、すべての材料において室温時よりも摩擦係数の低下が確認されたが、この原因については雰囲気中の微量水分の吸着の影響も排除できない。

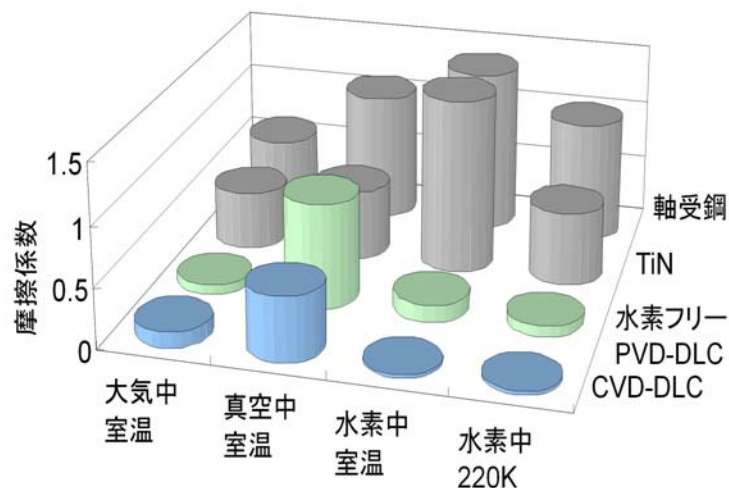


図 2.4.(3).2 各種コーティング膜の摩擦特性

高融点金属膜のジルコニウムニオブ、チタン合金などの場合でも、水素雰囲気中における摩擦低減効果が観察された。摩擦表面の X 線回折分析結果より、金属水素化合物の形成が確認されているが、特にジルコニア同士を摺動させた場合、得られる摩耗粉は層状の結晶構造を持つ水素化物 ZrH_2 より構成されることがわかった。これらのことから、水素雰囲気中でのトライボロジー特性向上には、水素と適度な反応性を有し、かつ固体潤滑性を発現する層状構造を有する水素化合物を形成する材料系を選択することが有効であることを明らかにした。

(4) トライボシステム中の気体分子の挙動解析

本研究実施項目では、トライボシステムにおける気体分子の拡散、吸着、摺動表面の凝着力に及ぼす気体分子の影響をとらえることを目的として分子動力学解析によるシミュレーションを実施した。

(4-1) 拡散と吸着に及ぼすせん断の影響

潤滑剤中に溶存した水素分子の拡散と固体表面への吸着について検討するため、水素分子が溶存した潤滑剤をモデル化し、分子動力学(Molecular Dynamics:MD)法を用いた解析を行った。吸着については潤滑面モデル、拡散はバルク潤滑剤モデルを設定して計算した。以下では潤滑面モデルについて示す。潤滑面モデルでは計算系を 2 つの固体壁面とその間に

潤滑剤分子を配置した直方体とし、計算系の四方の側面には周期境界条件(二次元周期境界条件)を適応した。潤滑剤の上下方向への移動は固体壁面によって制限され、潤滑剤分子の挙動は壁面原子と潤滑剤分子間の相互作用力の影響を受ける。また、下側壁面を設定の速度で移動させることによりせん断を与えた。潤滑剤分子を固体壁面間に配置して緩和させた後、水素分子を潤滑膜の内部(中央部)に配置し、上側壁面に外部より垂直方向に一定荷重を与えたまま600ps間計算した後、下側壁面を[100]方向へ移動させることによりせん断をかけた(600ps間)。この計算系を用いて水素分子の壁面への吸着量の時間変化を検討した。

潤滑剤はパーフルオロヘキサン C_6F_{14} およびヘキサン C_6H_{14} とし、潤滑剤分子間および潤滑剤分子内のポテンシャル関数としてOPLS-AA力場を用いた。また、水素分子内における水素原子間の結合はばねで表されるモデルを用いた。固体壁面はbcc構造をもつ・鉄で、(001)面を摩擦面とする。壁面原子間のポテンシャルはJohnsonポテンシャルを用い、潤滑剤分子と溶存分子の相互作用力の計算はLennard-Jonesポテンシャルを用いた。せん断速度、温度、圧力を変えた計算を行い、これらが水素分子の挙動に及ぼす影響を検討した。

せん断速度が10から200m/sの場合における固体壁面に吸着する水素分子の変化を図2.4.(4).1に示す(潤滑剤 C_6F_{14} 、圧力1GPa、温度300K)。縦軸は系内の水素分子の総数に対する吸着している分子の割合で、横軸は経過時間である。ここで、潤滑面の固体原子から4Å以内に存在する原子を吸着原子としている。計算開始後0~600psはせん断なしの状態であり、600~1200psまでは所定の速度でせん断を与えた。せん断のない600psまでは吸着量は数%でほぼ一定であるが、600ps以降は吸着量が増加している。また、せん断速度が大きいほど、吸着量の増加が大きい。

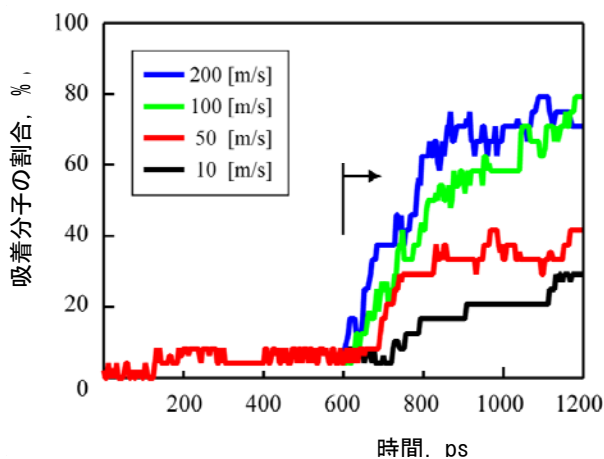


図 2.4.(4).1 吸着量の時間変化 (せん断速度の影響)

潤滑剤分子が水素分子の挙動に及ぼす影響を検討するため、パーフルオロヘキサンとほぼ同じ分子鎖長をもつ炭化水素であるヘキサンを潤滑剤として設定した計算を行った。わずかながら、ヘキサンの方がパーフルオロヘキサンに比べて吸着が早い。

(4-2) 固体表面への吸着と侵入に及ぼす吸着膜の影響

添加剤などによってしゅう動面に形成される吸着分子に着目し、温度、圧力、吸着分子長さが吸着分子近傍における水素の挙動に及ぼす影響について、分子動力学法を用いて検討を行った。

図 2.4.(4).2 にシミュレーションモデルを示す。吸着分子近傍の潤滑面をモデル化するため、2つの吸着分子膜とその間に配置した潤滑剤分子、水素分子で立方体の計算系を構成し、四方側面に周期境界条件(二次元周期境界条件)を適用した。各分子を速度スケールリング法によって温度制御を行い、吸着分子に設定圧力に相当する荷重を付与することで系内の圧力を一定にした。吸着分子はn-ヘキサン C_6H_{14} 、n-ドデカン $C_{12}H_{26}$ 、潤滑剤はn-ヘプタン C_7H_{16} とし、吸着分子、潤滑剤分子間および分子内のポテンシャル関数として OPLS-AA 力場を用い、水素分子は、原子間がばねで結ばれているモデルを用いた。吸着分子または潤滑剤分子と水素分子の間のポテンシャル関数は Lennard-Jones ポテンシャルを用いた。温度 300K、500K、圧力 0.5GPa、1.0GPa とした。

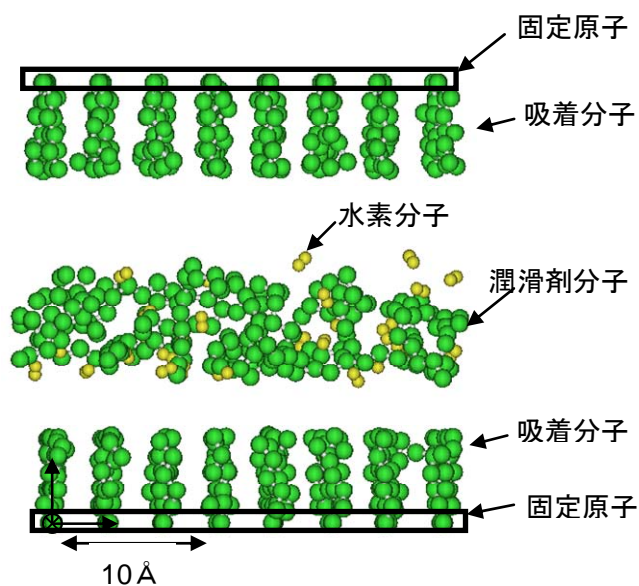


図 2.4.(4).2 計算モデル

固体壁面上に吸着分子が存在する場合の潤滑剤中に溶存した水素分子の挙動について検討した。潤滑膜の内部に水素分子を配置した初期状態から計算を始めた場合の潤滑膜内部の水素分子の分布求めた。水素原子と潤滑剤分子、吸着分子の炭素原子の膜厚方向に対する個数分布から、吸着分子近傍に水素原子の密度のピークが見られ、水素分子が吸着分子に集まることわかった。この傾向は、潤滑膜にせん断を与えた場合に顕著に見られた。

吸着分子近傍に達した水素分子は吸着分子内に侵入、または吸着分子を通過することがある。これらの水素分子は固体表面に到達し、水素脆化を引き起こす可能性のある水素原子である。これらの分子の時間変化を、さまざまな温度、圧力、吸着分子を設定して計算した。そ

の結果、水素分子が吸着分子を通過して固体壁面に到達しにくくなるのは、温度が低い場合、圧力が低い場合、吸着分子の長さが長い場合であることがわかった。

また、鉄表面近傍における水素の挙動の MD シミュレーションを行った。分子状態で存在する水素は鉄表面に吸着する際に解離して原子状態となり、鉄表面を拡散し、表面の欠陥に侵入する。

(4-3) PTFE の凝着力

摺動部材および固体潤滑材として広く用いられる PTFE(四フッ化エチレン)のトライボロジー特性に及ぼす水素の影響を検討するため、PTFE と固体壁面との凝着力およびせん断力に及ぼす水素の影響について分子動力学法(MD 法)を用いた計算を行った。

計算モデルを図 2.4.(4).3 に示す。計算系は、上方に配置した PTFE と下方に配置した固体壁面で構成する。水素分子を設定密度で固体壁面上に配置後、PTFE を所定の圧力で壁面に接触させる。その後、PTFE 分子を引き上げることで凝着力の検討を、また PTFE 分子を x 方向に移動させることでせん断力の検討を行った。計算系の x、y 方向には周期境界条件を適応し、z 方向上方は鏡面反射するとした。PTFE 分子内の相互作用力の計算には REBO ポテンシャルを用い、PTFE、水素と固体壁面との分子間相互作用力の計算には Lennard-Jones ポテンシャルを用いた。

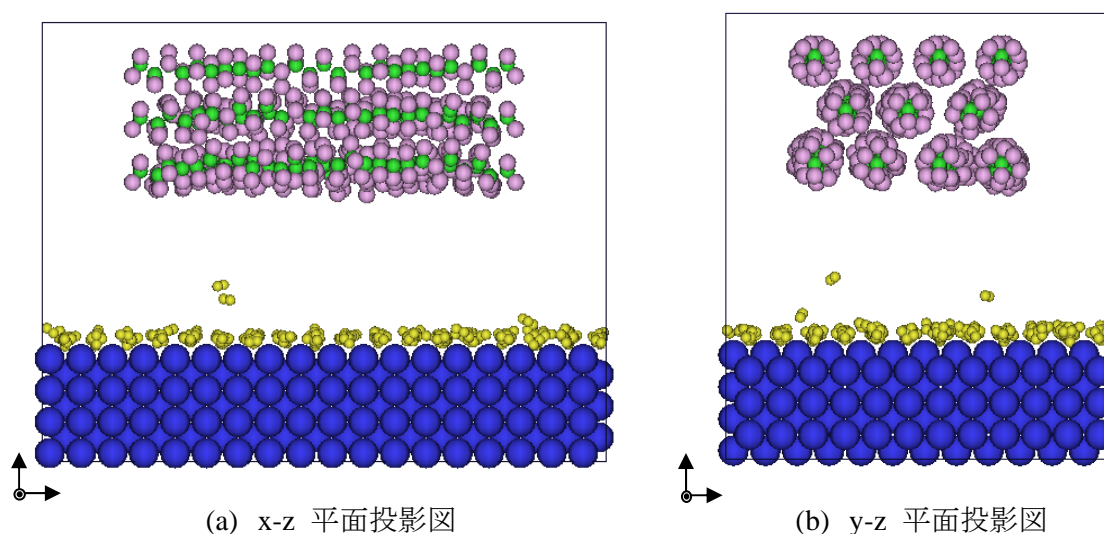


図 2.4.(4).3 計算モデル

計算条件は、PTFE と固体壁面の接触圧力を 100、150、200、600MPa とし、せん断速度を 20m/s とした。壁面上に配置した水素原子の個数密度は 0.0 、 6.11×10^{-2} 、 12.2×10^{-2} 、 24.5×10^{-2} 個/ \AA^2 とし、温度制御の設定温度は 300K とした。

PTFE 分子の固体表面への凝着力に及ぼす水素の影響を検討するため、PTFE を固体壁面から引き上げるのに要した仕事を求めた。また、

計算の結果、固体表面の水素密度が大きいほど凝着力が小さいことがわかる。これは、接

触域の水素密度が増加すると固体壁面とPTFE間の距離が長くなり、固体表面とPTFE間の相互作用力が小さくなるためである。凝着力は転移膜形成と関係があり、水素が存在することによって転移膜の形成が阻害されることを示しているが、この結果は小項目(2)の試験結果と一致する。

次に、水素密度が高いほどせん断力が大きいという結果が得られた。これは、接触域内に水素量が多いほどフッ素原子がよく移動するため、エネルギーの散逸が大きいためであると考えられる。

(5) 耐水素トライボロジー信頼性評価

本小項目は、本プロジェクトで得た試験結果をトライボアトラス(データベース)として整理し、水素利用機械の設計の指針を提供することを目的としている。

(5-1) トライボアトラス

(i) 目標・・・トライボアトラスとは

本課題で得られた結果を、実際の設計において有効に活用できるようにするためのデータベースである。従来、トライボロジーのハンドブック等に掲載されている摩擦や摩耗のデータは、単一の数値であることがほとんどであり、また試験条件もまちまちであった。そのため、異なる材料のトライボロジー特性を総合的に比較することや、必要な条件にあわせた検索が不可能であった。

そこで本課題では、実用性を高めるために、対象とする材料や作動条件に応じてデータをひくことができ、また必要に応じて数値だけでなく摩擦面の損傷の特徴などがわかるデータ集を構築する。

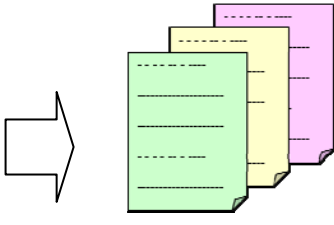
(ii) データの構成と項目

データ原簿には、試験片の性状、試験条件、摩擦係数や比摩耗量、試験後の摩擦面の様相など、200 を越える入力項目を設けた。試作版は、操作方法がよく知られている Microsoft Excel を用いて構築したが、閲覧や検索での操作性に問題があった。そこでデータベースソフトウェア FileMaker を用いて更新を行った。データ入力には Excel でも可能とした。また入力、閲覧いずれもリモートデスクトップ機能を利用したインターネット経由で可能である。(図 2.4.(5).1)

データ選択・表示インターフェース

実験条件																
試料名	試料形状	水分量			摩擦係数			摩擦係数			摩擦係数			摩擦係数		
		大	小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	最大	最小	平均				
連続試験(L/1min)	H2 0.12	変態	-	100	3.2	10	0.08	32	1.0E+02	167	1	0.85	0.57	1.82	SIJ2	865
水分量制御<0.785P>	H2 0.1	変態	行	100	3.2	10	0.08	32	1.0E+02	167	3	0.76	0.52	1.66	SIJ2	865
水分量制御<0.435P>	H2 0.1	変態	行	100	3.2	10	0.08	32	1.0E+02	167	0.5	0.43	0.29	0.928	SIJ2	865

実験結果															
摩擦係数															
摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数
レーザー	SEM	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数	摩擦係数
摩擦係数<1>.log															
摩擦係数<2>.log															
摩擦係数<3>.log	摩擦係数<1>.SEM.log	1.34E-05	1.39E-10	0.102	0.464	0.631	0.457	摩擦係数<Word>E1.7.xls							
摩擦係数<4>.log	摩擦係数<1>.SEM.log	-4.10E-05	-4.27E-10	0.102	0.924	1.187	0.596	摩擦係数<Word>E1.8.xls							
摩擦係数<5>.log	摩擦係数<2>.SEM.log	-6.67E-06	-4.17E-10	0.026	0.560	1.181	0.577	摩擦係数<Word>E2.1.xls							



要点をデータシート化して提供

実験条件															実験結果																			
試料名	試料形状	水分量			摩擦係数			摩擦係数			摩擦係数			摩擦係数	摩擦係数			摩擦係数			摩擦係数													
		大	小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	最大	最小	平均	最大		最小	最大	最小	最大	最小	最大		最小												
H2 0.12	変態	-	-	100	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	1	-	-	0.85	0.57	0.0018	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<1>.log	摩擦係数<1>.SEM.log	1.34E-05	1.39E-10	0.102	0.464	0.631	0.457	摩擦係数<Word>E1.7.xls	0.457
H2 0.12	変態	-	-	100	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	1	-	-	0.85	0.57	0.0018	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<2>.log	摩擦係数<2>.SEM.log	-4.10E-05	-4.27E-10	0.102	0.924	1.187	0.596	摩擦係数<Word>E1.8.xls	0.596
H2 0.12	変態	-	-	100	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	1	-	-	0.85	0.57	0.0018	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<3>.log	摩擦係数<3>.SEM.log	-6.67E-06	-4.17E-10	0.026	0.560	1.181	0.577	摩擦係数<Word>E2.1.xls	0.577
H2 0.1	変態	-	-	13	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	3	-	-	0.76	0.52	0.0057	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<4>.log	摩擦係数<4>.SEM.log	1.34E-05	1.39E-10	0.102	0.464	0.631	0.457	摩擦係数<Word>E1.7.xls	0.457
H2 0.1	変態	-	-	14	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	0.5	-	-	0.43	0.29	0.0017	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<5>.log	摩擦係数<5>.SEM.log	-4.10E-05	-4.27E-10	0.102	0.924	1.187	0.596	摩擦係数<Word>E1.8.xls	0.596
H2 0.1	変態	-	-	13	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	0.5	-	-	0.43	0.29	0.0017	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<6>.log	摩擦係数<6>.SEM.log	1.34E-05	1.39E-10	0.102	0.464	0.631	0.457	摩擦係数<Word>E1.7.xls	0.457
H2 0.1	変態	-	-	24	-	-	0.08	0	32	1.0E+02	-	167	0.5	-	-	0.43	0.29	0.0017	-	-	SIJ2	C4805	865	-	摩擦係数<7>.log	摩擦係数<7>.SEM.log	-4.10E-05	-4.27E-10	0.102	0.924	1.187	0.596	摩擦係数<Word>E1.8.xls	0.596

図 2.4.(5).1 データベースとデータシート

このデータベースを使って、例えば図 2.4.(5).2 に示すような情報を得ることができる。これは PTFE について水分量の大小が摩耗量を支配していることを示しているが、その代表的な摩擦表面を示す写真や試験装置の図面を見ることができる。

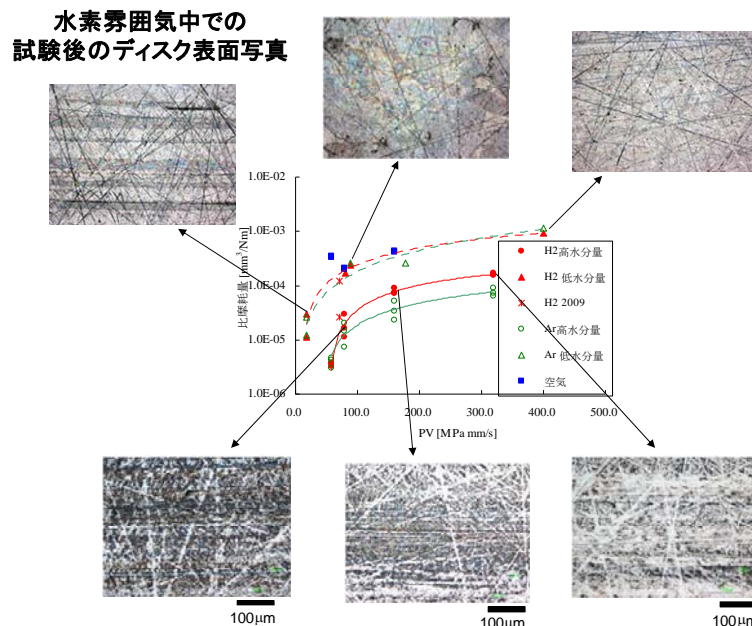


図 2.4.(5).2 データの例

(iii) データ提供の形

産業界へのヒアリングから、材料、しゅう動形態、条件などが多岐にわたる本データベースを一般のユーザが使用することは容易ではないことがわかった。またニーズとしては、材料のジャンル、しゅう動条件などを限定して材料の優劣を知りたい、しゅう動条件の違いによる摩擦摩耗特性の違いとその要因を知りたい、トラブル対策において有用な情報を知りたい、などであった。

そこで、当面トライボアトラスのシステム全体を一般へ提供することはさし控えることとした。その代わりに、摩擦摩耗挙動と関連因子の要点、例えば「オーステナイト系ステンレス鋼の高圧水素中の摩擦摩耗特性」といったポイントごとに主要データと解釈を記載したデータシートの形で提供することにした。これまでに、基本的な要点に関するデータシートを揃えたが、さらに産業界の要望を調査しながら新たな観点のデータシートを追加していく予定である。

(5-2) 設計指針

一般的な指針を以下にまとめる。材料ごとの指針は上述の内容、及びデータシートを参照いただきたい。

(i) 共通事項

1) 水素雰囲気における材料のトライボロジー特性は水素中の微量水分、酸素に大きく影響を受けるため、使用ガスの性状を正しく把握することが必要である。

2) 高圧水素 40MPa においては、水素の影響、ないし水素中の微量水分、酸素の影響が常圧水素中よりも顕著に現れる。高圧中の試験を行って特性を確認することが望ましい。

3) 生成摩耗粉の大きさ、形は、材料としゅう動条件によって異なる。

(ii) 金属材料等の摩擦摩耗

1) 材料の水素との反応性の大小によって、摩擦摩耗特性に及ぼす水素および水素中の微量水分、酸素による影響が異なる。また温度依存性は大きい。条件に応じて、表面酸化膜の減少ないし増加、材料組織や硬度の変化、炭素等の析出などの有無を知っておく必要がある。

2) 既存のバルブ材料では、ステライト、タングステンカーバイド、オーステナイト系ステンレス鋼が相対的に良い摩擦特性を示す。ニッケル系合金、アルミ合金等は水素用しゅう動材料には適さない。

3) 一般に、水素中の微量水分、酸素の濃度が高ければ摩耗増加が問題となり、少なければ凝着力の増大による摩擦増加が問題となる。常圧水素中においては、水素ガス中の水分濃度が標準的なレベル 1~10ppm からはずれないほど、概してトライボロジー特性は悪化する。

4) 水素雰囲気における低摩擦しゅう動材料として DLC 膜は有望である。ただし、水素中で耐剥離性と低摩耗性であることが必要である。

(iii) 鋼の転がり疲れ

1) 軸受鋼の転がり接触におけるフレーキング寿命は、鋼への水素侵入量が多いほど短い。

2) フレーキング寿命は水素雰囲気中で概して低下するが、低下の程度は転がり滑り接触の形態と潤滑条件、及びこれらによって決まる水素侵入量と表面酸化膜形成状態によって変わる。

3) 微小滑りは、新生面の形成を通じて水素発生と水素侵入を促進させる作用と、酸化膜形成を通じて水素侵入を抑制する作用の両面がある。

4) 雰囲気が水素の場合、潤滑剤に溶解した水素が容易に鋼表面に到達する。

(iv) 樹脂対金属の摩擦摩耗

1) 四フッ化エチレン (PTFE) を代表とする樹脂材料の摩擦摩耗特性は、相手面材料 (一般に金属) の表面での転移膜形成状態に依存し、これらは酸化物、水酸化物、フッ化金属などの形成によって影響を受ける。

2) 樹脂材料の摩擦摩耗は、相手面材料の種類によって変化する。材料を変える場合、組合せの影響を確認せずに一方の材料、例えば樹脂材料側だけを変えることは危険である。

3) 樹脂系複合材料では添加されている材料によって水素雰囲気中の摩擦摩耗特性が異なる。PTFE 複合材では、グラファイト添加 PTFE は雰囲気や条件の違いによって摩擦摩耗の変化が少なく、ブロンズ添加 PTFE は高圧水素中で低摩擦低摩耗を示す。

(5-3) 有明水素ステーション使用部品の調査

有明水素ステーションにおいて使用されたバルブ等の調査を、メーカーの協力を得て行った。以下に調査項目ごとに要点を記す。

調査結果を本事業の成果に照らして検討したが、いずれの部品も正常に使用されていたものであり、大きな問題点を見出すことはできなかった。実使用部品の調査から有効な情報を得るためには、部品ごとに経過を追跡すること、不具合が生じた部品を調査すること、などが必要である。また、メーカーごとに異なる部品、構造のものが多く、各社の協力がなければ調査は難しい。今後の課題としたい。

(i) 自動流量調節弁

分解調査および気密試験・弁座漏洩試験を行った。試験後、主にバルブシステム及びシステムとしゅう動する部品について、顕微鏡観察、表面粗さ測定、表面分析などの調査を行った。バルブシステムに、しゅう動方向の傷、不均一な堆積物、摩耗粉やグリースの付着が見られたが、いずれも調整弁の機能を大きく損なうものではなく、また外部漏洩を生じるものではなかった。

(ii) 手動弁

分解調査と気密試験を行った。いずれも異常は認められなかった。

(iii) ディスペンサー充填カプラ

分解調査、気密試験を行った。分解後、顕微鏡観察、表面粗さ測定、表面分析などの調査を行った。摩耗が認められた部品があったが、カプラの機能を損なったり水素の外部漏洩を生じるものではなかった。

(5-4) まとめ

1) 試験ガス中の微量不純物(水、酸素)の量を制御可能な摩擦試験装置、摩擦試験片を大気に曝露せずに表面分析が可能な実験分析システム、圧力40MPa、温度373Kまでの摩擦力測定技術を確立までの高圧水素雰囲気中で摩擦試験が可能な摩擦試験機などを独自に開発し、水素トライボロジーの研究体制を築いた。

2) 広範な摺動材料のトライボロジー特性の基礎データを蓄積し、諸現象の支配的影響因子を明らかにするとともに影響因子の作用機構を検討した。

3) 産業界と連携し、軸受、バルブ、動的シール、ピストンリング等の候補材料について、常圧中、及び40MPaまでの高圧水素中における摩擦摩耗特性データを蓄積し、実機の開発に貢献した。

4) 水素ガス中の微量水分、酸素が水素中のトライボロジー現象の重要な支配因子であることを見出し、代表的な摺動材料についてこれらの微量成分の影響を明らかにした。

5) 高圧水素中に曝露された鋼材表面を分析し、高圧水素曝露により表面酸化膜の減少、表面硬度の上昇、炭素の析出などが起こり、温度依存性があることを明らかにした。

6) 四フッ化エチレンを代表とする動的シール用樹脂材料の摩擦摩耗特性の支配因子として、転移膜形成とこれに及ぼす相手面金属表面での化学反応の影響を明らかにした。

7) 軸受鋼の転がり疲れ寿命に及ぼす潤滑条件、水素侵入量、表面酸化膜形成状態の影響を明らかにした。

8) 水素トライボロジー基礎データのデータベース(トライボアトラス)を構築し、産業界からの要望にもとづいて改良を加え、データシート化して関連企業に提供した。

(5-5) 今後の課題

(i) 本事業期間中

1) 産業界のニーズの高い軸受・バルブ・シール摺動材料について、超高压水素中摩擦試験、高压水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を続行してデータを蓄積し、実際の開発における材料選択に引き続き貢献する。

2) 高压中試験の効率化と、高压水素曝露試験片による評価方法の確立をはかる。

3) 高压中摩擦試験、高压水素曝露試験における雰囲気ガス中の不純物の把握とその影響解明をさらに進める。

4) 基本原理を体系づけて整理する。その一環として、転がり疲れにおける諸因子の関与をより具体的、定量的にまとめ、水素による寿命低下の防止策検討につなげる。

5) 製品レベルでの実用化の問題点を産業界と連携して分析し、評価計画に反映させる。その一環として、樹脂シールについてトライボ特性とシール性の関係を明確にする。

6) 産業界にトライボアトラスのデータシートと耐水素設計指針の評価を依頼し、さらに改善をはかる。

(ii) 本事業終了後

1) 水素エネルギーの普及へ向けて、水素トライボロジーのデータ拡充と評価法、保全・故障対策の検討を行って、安全性・信頼性・経済性の向上に資する。

2) 実部材の試験や実機試験をメーカーと連携して行い設計開発を支援する。

3) バルブの固着や軸受の剥離など突発事故の原因となるトライボ損傷に関する基盤研究を行って安全性・信頼性の向上に資する。

4) トライボロジー特性にもとづいた改良やトライボロジー特性を活かした機構を検討する。

IV. 実用化の見通しについて

1. 事業全体における実用化の見通しについて

本事業では、水素エネルギー社会に不可欠である「水素を長期間安全に利用するための学術的な基盤」を確立することを目的としている。また水素を取り扱う容器や機器における材料の水素脆化やトライボロジーなど、水素に関わる現象や挙動の基礎的メカニズムを解明するとともに、基礎的な水素物性のデータベースを構築することで関係産業界の誰もが、その成果を活用できるようにすることで水素利用技術の信頼性向上、安全性確立に資することを意図している。

具体的には、2008年7月に発表された燃料電池実用化推進協議会が描く「燃料電池自動車を2015年に一般ユーザーに普及開始」、「商用水素ステーションの設置開始」のシナリオに向けて、産業界と連携を取りながら必要なデータ、考え方を提示していく(図1)。2010年に予定される「商用水素ステーションの仕様決定」、「高圧容器および付属品の新基準発行」に関しては、産業界における設計、評価に資するために、各材料の疲労寿命を考えた使い方や設計方針を提言していく。2011年後半以降、水素製造・輸送・貯蔵等技術開発事業に参画する企業及び規制機関等への水素構造材料及び水素物性に関するデータを250件以上提供し、高圧水素の使用に関わる規制見直し、水素関連機器の技術開発、および、2015年に向けて設置される水素ステーション用機器の特認申請に広く活用されている。今後さらに、2015年以降の、安全性と低コスト化を実現した水素機器への規制見直しと産業界の技術開発への基盤として本事業で取得されたデータに期待される部分は大きい。また、随時最新の水素物性データベースを広く世に公開していくこと。金属材料だけでなく、バルブなど摺動材やOリングのようなシール材に関する水素環境下での劣化特性を明らかにし、データベース化を進めていくことを通して、水素インフラに使用する機器の設計手法構築や、構成部材の疲労寿命予測、メンテナンス指針を確立し、安全な水素社会を構築するための基盤となる知見を産業界に提供する。

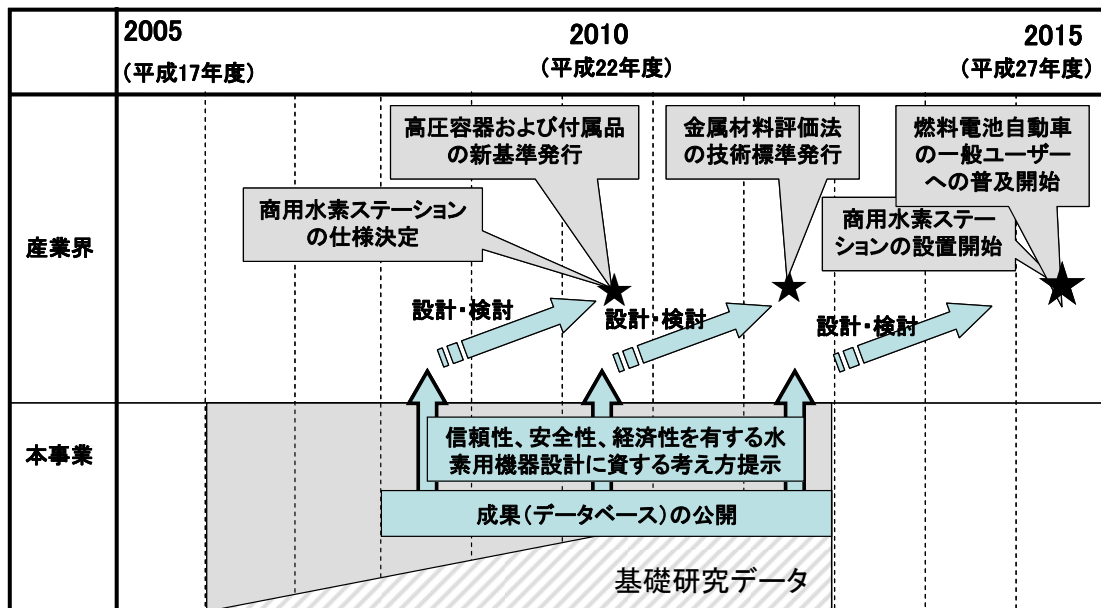


図1 事業全体における実用化の見通し

2. 波及効果

基礎研究により技術的基盤を形成する過程において、研究の初期から海外の基準作成に影響のある研究者と一緒に考察・評価することにより、日本が国際標準の場に出遅れることなく、むしろ初めから同じ考え方に基づいた国際標準提案や国内基準整備等が行えるような研究体制とすることにより、結果として日本にとって技術的に有利になる産業界展開が可能となる。

また、産学官と地域が連携した水素エネルギー社会の実現に取り組む福岡水素エネルギー戦略会議(企業 516, 大学 111, 行政, 研究・支援機関 35)と連携し、研究成果の普及や定着のために若手技術者を対象とした水素人材育成セミナーを定期的を開催しており、さらに中小企業等の水素機器開発を支援するために設立された水素エネルギー製品研究試験センター(平成21年4月設立)に対して技術的なサポートを行うなど、人材育成や本技術分野の基礎・基盤技術の底上げを図り、近い将来、文字通り産業界で活躍する戦力となる技術者育成にも活用反映させている(図2)。



図2 産学官ならびに地域と連携した成果の波及効果

(付録) 特許、文献、発表リスト

【特許】

平成 18 年度 国内特許(1件)

発明の名称	出願番号	発明者名
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	特願 2007-022467	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二

平成 18 年度 外国特許(0 件)

平成 19 年度 国内特許(3 件)

発明の名称	出願番号	発明者名
金属表面に四フッ化エチレン樹脂転移膜を形成する方法、及びそれを用いた摺動部材	特願 2007-139752	澤江義則、中嶋和弘、村上輝夫、山口晃、伊藤 竜馬
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	特願 2007-262057	村上敬宜、松岡三郎、峯洋二、金崎俊彦、村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二
水素ガス中疲労試験方法	特願 2008-011048	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦

平成 19 年度 外国特許(6 件)

発明の名称	出願国	発明者名
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	アメリカ	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	カナダ	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	中国	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	インド	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	韓国	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	欧州	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、金崎 俊彦

平成 20 年度 国内特許(3 件)

発明の名称	出願番号	発明者名
高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	特願 2009-522691	村上 敬宜、山辺 純一郎
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素添加方法	特願 2008-202713	村上 敬宜、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	特願 2010-500636	村上敬宜、松岡三郎、峯洋二、金崎俊彦

平成 20 年度 外国特許(18 件)

発明の名称	出願国	発明者名
高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	アメリカ	村上 敬宜、山辺 純一郎
高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	カナダ	村上 敬宜、山辺 純一郎

高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	中国	村上 敬宜、山辺 純一郎
高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	インド	村上 敬宜、山辺 純一郎
高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	韓国	村上 敬宜、山辺 純一郎
高圧タンクの損傷検知方法、及びそのための装置	欧州	村上 敬宜、山辺 純一郎
水素ガス中疲労試験方法	アメリカ	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦
水素ガス中疲労試験方法	カナダ	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦
水素ガス中疲労試験方法	中国	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦
水素ガス中疲労試験方法	インド	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦
水素ガス中疲労試験方法	韓国	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦
水素ガス中疲労試験方法	欧州	松岡 三郎、村上 敬宜、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	アメリカ	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	カナダ	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	中国	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	インド	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	韓国	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	欧州	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦

平成 21 年度 国内特許(2 件)

発明の名称	出願番号	発明者名
水素充填システムの水素用熱交換器	特願 2009-231123	高田 保之、Woodfield Peter、村上 敬宜
耐水素疲労フェライト鋼とその製造方法	特願 2010-018322	松岡三郎、早川 正夫、竹内 悦男、長島 伸夫

平成 21 年度 外国特許(6 件)

発明の名称	出願国	発明者名
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素添加方法	アメリカ	村上 敬宜、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素添加方法	欧州	村上 敬宜、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素添加方法	インド	村上 敬宜、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素添加方法	韓国	村上 敬宜、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素添加方法	カナダ	村上 敬宜、峯 洋二、金崎 俊彦
オーステナイト系ステンレス鋼、及びその水素除去方法	アメリカ	村上 敬宜、松岡 三郎、峯 洋二、 金崎 俊彦

平成 22 年度 国内特許(0 件)

平成 22 年度 外国特許(4 件)

発明の名称	出願国	発明者名
水素充填システムの水素用熱交換器	アメリカ	高田保之,WoodfieldPeter,村上敬宜
水素充填システムの水素用熱交換器	カナダ	高田保之,WoodfieldPeter,村上敬宜
水素充填システムの水素用熱交換器	欧州	高田保之,WoodfieldPeter,村上敬宜
ゴム製品の検査方法及びゴム製品の検査装置	PCT	山辺純一郎,松本隆志,西村伸

平成 23 年度 国内特許(0 件)

平成 23 年度 外国特許(0 件)

合計 国内特許 9 件、外国特許 34 件

【文献】

(1)「高圧水素物性の基礎研究」(水素物性研究チーム)

(2006 平成 18 年度 なし)

(2007 平成 19 年度 1 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.12	Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 67, No. 4, pp209-220	Numerical simulation for design of probe to measure hydrogen thermal conductivity at high pressure by the transient short-wire method	P.L.Woodfield, J.Fukai, M.Fujii, Y.Takata, K. Shinzato, et.al.

(2008 平成 20 年度 6 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.05	Heat Transfer-Asian Research	Enhancement of Heat Transfer in Hydrogen Storage Tank with Hydrogen Absorbing Alloy (Optimum Fin Layout)	Y. Mitsutake, M.Monde, K.shigetaka, S.Tsunokake, T.Fuura
2008.05	圧力技術	高圧水素の急速充電及び放出中の温度特性に関する無次元支配因子について	高野俊夫, 門出政則
2008.07	International Journal of Thermophysics, Vol. 29 (2008), pp1278-1298.	A Two-Dimensional Analytical Solution for the Transient Short-Hot-Wire Method,	P.L.Woodfield, J.Fukai, M.Fujii, Y.Takata, K.Shinzato
2008.07	International Journal of Thermophysics, Vol. 29 (2008), pp1299-1320.	Determining Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Low-Density Gases Using the Transient Short-Hot-Wire Method	P.L.Woodfield, J.Fukai, M.Fujii, Y.Takata, K.Shinzato
2008.11	熱物性	Numerical Simulation of Natural Convection in a Transient-Short-Hot-Wire Thermal Conductivity Cell	Woodfield Lloyd Peter, 深井潤, 藤井丕夫, 高田保之, 新里寛英
2009.03	International Journal of Thermophysics, Vol. 30 (2009), pp397-415.	Application of the Three-Omega Method to Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Hydrogen Gas	E. Yusibani, P.L.Woodfield, M.Fujii, K. Shinzato, X.Zhang, Y.Takata

(2009 平成 21 年度 13 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.04	International Journal of Thermophysics, Vol.30, No.2, pp397-415	Application of the Three-Omega Method to Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Hydrogen Gas	E. Yusibani, Peter L. Woodfield, M. Fujii, K. Shinzato, X. Zhang and Y. Takata
2009.06	Journal of Thermal Science and Technology, Vol.4, No.1, pp146-158	A Procedure for Application of the Three-Omega Method to Measurement of Gas Thermal Conductivity	E. Yusibani, Peter L. Woodfield, S. Moroe, K. Shinzato, M. Kohno and Y. Takata and M. Fujii

2009.06	International Journal of Thermophysics, Vol.30, No.3, pp796-809	An Accelerated Two-Dimensional Unsteady Heat Conduction Calculation Procedure for Thermal-Conductivity Measurement by the Transient Short-Hot-Wire Method	Peter L. Woodfield, J. Fukai, M. Fujii, Y. Takata
2009.06	International Journal of Thermophysics, Vol.30, No.3, pp833-850	End Effects in the Three-Omega Method to Measure Gas Thermal Conductivity	E. Yusibani, Peter L. Woodfield, M. Kohno, K. Shinzato, Y. Takata, M. Fujii
2009.06	Abstracts of the 17th Symposium on Thermophysical Properties, pp369-370	Thermal Conductivity Measurement of Hydrogen Gas using the Transient Short Hot-Wire Method	Shogo Moroe, Peter L. Woodfield, Koichi Kimura, Jun Fukai, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii and Yasuyuki Takata
2009.06	Abstracts of the 17th Symposium on Thermophysical Properties, pp370-371	PVT Measurements of Hydrogen at High Pressures	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2009.06	The Eleventh UK National Heat Transfer Conference (UKHTC2009)	Measurement of hydrogen thermophysical properties at high pressure	高田保之, Peter L. Woodfield, 迫田直也, 新里寛英, 藤井丕夫
2009.11	ICOPE-09	PVT MEASUREMENTS OF HIGH PRESSURE GAS BY THE BURNETT METHOD	Naoya Sakoda, Kenta Shindo, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Motoo Fujii
2009.12	International Journal of Thermophysics, Vol.30, No.6, pp1748-1772	Techniques for Accurate Resistance Measurement in the Transient Short-Hot-Wire Method Applied to High Thermal Diffusivity Gas	Peter L. Woodfield, Moroe Shogo, Fukai Jun, Motoo Fujii, Shinzato Kanei, Kohno Masamichi, Takata Yasuyuki
2009.12	水素エネルギーシステム, Vol.34, No.4, pp4-10, 2009	高圧水素の熱物性測定	高田保之, 迫田直也, 新里寛英, 藤井丕夫
2010.01	International Journal of Thermophysics, Published online	Review of the Thermodynamic Properties of Hydrogen Based on Existing Equations of State	N. Sakoda, K. Shindo, K. Shinzato, M. Kohno, Y. Takata, and M. Fujii
2010.02	熱物性, Vol.24, No.1, pp21-28	高温高圧水素の粘性係数推算式の提案	Elin Yusibani, Peter L. Woodfield, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2010.02	熱物性, Vol.24, No.1, pp28-34	高圧水素用バーネット式PVT性質測定装置の開発	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫

(2010 平成 22 年度 4 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.11	International Journal of Thermophysics Volume 31, Numbers 11-12, pp.2394-2401	An Application of Hydrogen Thermophysical Properties Database - All in One Live CD -	桃木悟, ジャンバル オダゲレル, 山口朝彦, 赤坂亮, 高田保之
2011.02	Experimental Heat Transfer, Volume 24, Issue 2, 2011, pp.168 - 178	Thermal Conductivity Measurement Of Gases By The Transient Short-Hot-Wire Method	Shogo Moroe, Peter L Woodfield, Jun Fukai, Kanei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii, Yasuyuki Takata
2011.03	Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011-44206.	Dew And Frost Points Measurements And Estimation For Residual Gases In High-Pressure Hydrogen	Kenji Ishida, Masataka Kosaka, Masanori Monde
2011.03	Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011-44415.	Thermal Conductivity Measurement of Hydrogen at High Pressure and High Temperature	Koichi Kimura, Shogo Moroe, Peter Lloyd Woodfield, Jun Fukai, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii, Yasuyuki Takata

(2011 平成 23 年度 9 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.06	International Journal of Thermophysics, Vol.32, No.6 pp.1111-1124	A Capillary Tube Viscometer Designed for Measurements of Hydrogen Gas Viscosity at High Pressure and High Temperature	Elin YUSIBANI, Yosuke NAGAHAMA, Masamichi KOHNO, Yasuyuki TAKATA, Peter L Woodfield, Kanei SHINZATO, Motoo FUJII
2011.06	Proceedings of the 11th Asian Symposium on Visualization, ASV11-po-12	Dew and Frost Point Measurements of Residual Water in High Pressure Hydrogen Utilizing Visualization and Image Analysis	石田賢治, 高坂祐顕, 門出政則
2011.09	International Journal of Thermophysics, Vol.32, No.9, 1887-1917	Measurements of Hydrogen Thermal Conductivity and High Pressure and High Temperature	S. Moroe, P. L. Woodfield, K. Kimura, M. Kohno, J. Fukai, M. Fujii, K. Shinzato and Y. Takata
2011.09	水素エネルギーシステム, Vol. 36 pp. 32-36	車載水素容器の亀裂発生時における圧力変化の解析	迫田直也, 尾上清明, 高田保之

2011.10	ECS Transactions, vol.41 pp.1423-1430	Measurement of Hydrogen-gas Solubility and Diffusivity in Polymer Electrolyte Membrane by NMR Method	Ryosuke Nagahisa, Daiki Kuriya, Kuniyasu Ogawa, Yasuyuki Takata and Kohei Ito
2011.11	International Journal of Thermophysics	An Application of Hydrogen Thermophysical Properties Database	Satoru Momoki, Odgerel Jambal, Tomohiko Yamaguchi, Ryo Akasaka
2012.1	長崎大学工学部研究報告	球形共鳴器による水素の音速測定装置の開発 ～測定原理とヘリウムによる半径較正～	山口朝彦, 桃木悟, 松崎勇人, 上滝祐介, 今道統也, 金丸邦康
2012.1	International Journal of Thermophysics Int Jthermophys(2012) 33:6-21	Burnett Method with Absolute Pressure Transducer and Measurements for PVT Properties of Nitrogen and Hydrogen up to 473 K and 100 MPa	N. Sakoda, K. Shindo, K. Motomura, K. Shinzato, M. Kohno, Y. Takata, M. Fujii
2012.3	International Journal of Thermophysics Int Jthermophys Online 01-15	Burnett PVT Measurements of Hydrogen and the Development of a Virial Equation of State at Pressures up to 100 MPa	N. Sakoda, K. Shindo, K. Motomura, K. Shinzato, M. Kohno, Y. Takata, M. Fujii

(2)「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」(水素材料強度特性研究チーム)

(2006 平成 18 年度 2 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2006.12	日本金属学会誌, Vol.70, No.12	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, 福島良博, 村上敬宜, 他
2007.03	Vol.93, No.3, pp247-256	高圧水素ガス雰囲気暴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, 金崎俊彦, 松岡三郎, 村上敬宜, 他

(2007 平成 19 年度 5 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.12	Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University Vol. 67, No. 4, pp191-197	”SIMS Analysis of Hydride in Commercially Pure Titanium”	Shigeru HAMADA and Katsu Ohnishi, et.al.
2007.12	日本機械学会論文集 (A 編), 第 73 巻 736 号, pp1335-1342.	加工硬化したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の疲労特性に及ぼす水素の影響	早川正夫, 松岡三郎, 他
2007.12	日本機械学会論文集 (A 編) 73 巻 736 号 pp1358-1365	水素ステーション蓄圧器用 SCM435 鋼の疲労特性に及ぼす水素と繰り返し速度の影響	松岡三郎, 村上敬宜, 他

2008.03	TMS2008 Collected Proceedings, Vol.3, pp217-222, USA	EFFECTS OF LATTICE DEFECTS INDUCED BY HYDROGEN AND STRESS ON ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF METALS	K.Takai ,et.al.
2008.03	材料, 第 57 巻, 第 3 号, pp255-261	ステンレス鋼 SUS304 および SUS316L の微小領域における塑性変形挙動に及ぼす水素の影響	峯 洋二, 松岡三郎, 村上敬宜, 他

(2008 平成 20 年度 19 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.04	International Journal of Hydrogen Energy, vol. 33 (2008), pp2604-2619.	Effects of Hydrogen on Fatigue Crack Growth Behavior of austenitic Stainless Steels	T. Kanezaki, C. Narazaki, Y. Mine, S. Matsuoka and Y. Murakami
2008.06	Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 39 (2008), pp1327-1339.	Hydrogen Embrittlement Mechanism in Fatigue of Austenitic Stainless Steels	Y. Murakami, T. Kanezaki, Y. Mine and S. Matsuoka
2008.06	日本金属学会誌, 第 72 巻- 6 号, pp448- 456.	Inconel 625 と SUS 316L の水素昇温脱離特性と電解チャージによる高圧水素ガス環境の模擬	高井健一, 村上耕太, 矢部宣明, 鈴木啓史, 萩原行人
2008.07	Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures(2008)	The effect of frequency on the giga-cycle fatigue properties of a Ti-6Al-4V alloy	E. Takeuchi, Y. Furuya, N. Nagashima and S. Matsuoka
2008.07	日本機械学会論文集 A 編, 第 74 巻-第 743 号 (2008), pp971-981.	10 MPa 水素ガス中で曝露したエチレンプロピレンゴムの水素侵入特性とブリスタ破壊に及ぼす充てん剤の影響	山辺純一郎, 中尾匡利, 藤原広匡, 西村伸
2008.07	日本機械学会論文集 A 編, 第 74 巻- 743 号(2008), pp1016- 1025.	1MPa 水素ガスパイプライン用炭素鋼 STPG370(0.19C-0.21Si-0.56Mn, mass%) の引張特性に及ぼす水素と予ひずみの影響	西口廣志, 福島良博, 松岡三郎, 村上敬宜
2008.08	日本機械学会論文集 A 編, 74 巻- 第 743 号 (2008), pp1164-1173.	0.1 MPa 水素ガスパイプライン用炭素鋼 SGP(0.078C-0.012Si-0.35Mn, mass%) の引張特性に及ぼす水素と予ひずみの影響	松尾尚, 本間紳浩, 松岡三郎, 村上敬宜
2008.08	Tribotest 2008; Vol.14 , Issue 3, pp177-191	Fretting fatigue strength of SCM435H steel and SUH660 heat resistant steel in hydrogen gas environment	M. Kubota, Y. Tanaka and Y.Kondo
2008.09	日本機械学会論文集 A 編, 74 巻 745 号(2008), pp1249-1255	12Cr 鋼の遅れ破壊のき裂経路遷移に及ぼす応力変動の影響	近藤良之, 久保田祐信, 永末知広

2008.10	Acta Materialia, Vol.56(2008), pp5158-5167.	Lattice defects dominating hydrogen-related failure of metals	K. Takai, H. Shoda, H. Suzuki and M. Nagumo
2008.10	International Journal of Fatigue, Vol. 30, Issues 10-11, pp1978-1984	High-temperature fatigue properties of austenitic superalloys 718, A286 and 304L	K. Kobayashi, K. Yamaguchi, M. Hayakawa and M. Kimura
2008.10	日本機械学会論文集 A 編, 74 巻 746 号(2008), pp1358-1365	疲労限度以下の応力による2段2重変動 応力下の疲労破壊に及ぼす微小切欠き の形状と水素の影響	近藤良之, 久保田祐信, 江田光
2008.10	日本機械学会論文集 A 編, 74 巻 746 号 (2008),pp1366-1372	微小疲労き裂の下限界近傍進展特性に 及ぼす侵入水素の影響(低合金鋼, 炭 素鋼, 析出強化型耐熱鋼 A286 につい ての検討)	近藤良之, 久保田祐信, 志々目佳 子, 山口純一郎
2008.12	日本機械学会論文集 A 編, 74 巻 748 号(2008), pp1528-1537.	炭素量 0.08mass%の配管用炭素鋼鋼管 の疲労き裂進展とストレッチゾーンに及 ぼす水素の影響	松岡三郎, 堤紀子, 村上敬宜
2009.01	Scripta Materialia, Vol. 60, Issue 8, April (2009), pp717-720	High-voltage Electron-microscopic Observation of Cyclic Slip Behavior around a Fatigue Crack Tip in an Iron Alloy	Y. Takahashi, M. Tanaka, K. Higashida and H. Noguchi
2009.01	日本機械学会論文集 A 編, 75 巻 749 号(2008), pp93-102.	水素ステーション水素漏洩トラブルの解 析と SUS316L フレキシブルホースの疲労 寿命予測	村上 敬宜, 金崎 俊彦, 福島 良 博, 田中裕之, 戸室仁一, 久保山 孝治, 松榮雅樹, 伊藤義雄, 安藤 晴彦
2009.02	International Journal of Hydrogen Energy Vol. 34-4(2009), pp1977-1989	Influence of fillers on hydrogen penetration properties and blister fracture of rubber composites for O-ring exposed to high-pressure hydrogen gas	J. Yamabe and S. Nishimura
2009.02	International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34 (2009), pp1097-1107.	Hydrogen transport in solution-treated and pre-strained austenitic stainless steels and its role in hydrogen-enhanced fatigue crack growth	Y. Mine, C. Narazaki, K. Murakami, S. Matsuoka and Y. Murakami
2009.03	圧力技術	クリープ疲労したフェライト系耐熱鋼 (12Cr-2W)のサブグレイン組織解析	早川正夫, 木村恵, 小林一夫

(2009 平成 21 年度 33 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.04	SCRIPTA MATERIALIA, 60 巻 8 号 pp717-720	High-voltage electron-microscopic observation of cyclic slip behavior around a fatigue crack tip in an iron alloy	高橋 可昌, 田中 将己, 東田 賢二, 野口 博司

2009.04	Tribology International, Volume 42, Issue 9, pp1352-1359	The effect of hydrogen gas environment on fretting fatigue strength of materials used for hydrogen utilization machines	Masanobu Kubota, Yasuhiro Tanaka and Yoshiyuki Kondo
2009.04	圧力技術 ,47 巻 2 号 pp107-114	クリープ疲労したフェライト系耐熱鋼 (12Cr-2W)のサブグレイン組織解析	早川 正夫,木村 恵,小林 一夫
2009.06	Acta Materialia, 57 巻 10 号 pp2993-3002	Effect of hydrogen on martensite formation in austenitic stainless steels in high pressure torsion	峯 洋二,堀田善治,村上敬宜
2009.06	日本機械学会論文集A 編, 75 巻 754 号 pp752-760	低合金鋼 SCM440H の長周期変動およ び静応力下の水素に助長されたき裂進 展挙動	近藤 良之,久保田 祐信 ,嶋田 勝也
2009.06	Proceedings of International Conference on Fracture 12, CD-ROM	Effects of Earthquake Loads and Absorbed Hydrogen on the Fatigue Strength Reduction of Notched Component	Yoshiyuki Kondo, Takashi Yamanouchi
2009.06	圧力技術, 47 巻 3 号 pp154-160	クリープ疲労特性に優れるフェライト系耐 熱鋼(12Cr-2W)のサブグレイン組織解析	早川 正夫,木村 恵,小林 一夫
2009.07	SCRIPTA MATERIALIA , 61 巻 2 号 pp145-148	Hydrogen-induced slip localization around a quasi-brittle fatigue crack observed by high-voltage electron microscopy	高橋 可昌,田中 將己,東田 賢二, 野口 博司
2009.07	Proceedings of PVP2009 of ASME, 電 子媒体	Effects of Gaseous Hydrogen on Fatigue Crack Growth Behavior of Low Carbon Steel	李 東善,西川 嗣彬,尾田 安司, 野口 博司
2009.07	Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference - Effects of Hydrogen on Materials, pp105-112	Influence of Hydrogen and Prestrain on Tensile Properties of Type 316L Austenitic Stainless Steel	松尾尚,山辺 純一郎,松岡 三郎, 村上 敬宜
2009.07	Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference - Effects of Hydrogen on Materials, pp373-380	The Effect of Residual Hydrogen on High-Cycle Fatigue Property of Welded Joints for Gas Pipeline steel	山岡鉄史,Sergiy Mikolayovich Stepanyuk,松岡 三郎
2009.07	Proceedings of the 12th International Conference on Fracture ,CD-ROM	Microscopic study on the effect of hydrogen on deformation process near Stage II fatigue crack tip	高橋 可昌,田中 將己,東田 賢二, 野口 博司
2009.07	Proceedings of the 12th International Conference on Fracture , CD-ROM	Microscopic study on the effect of hydrogen on fatigue crack growth process in a chromium-molybdenum steel	山口慶悟,重長正人,高橋 可昌,田 中 將己,東田 賢二,野口 博司

2009.07	Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference - Effects of Hydrogen on Materials , pp203-210	Effect of hydrogen on microscopic deformation process near Stage II fatigue crack tip	高橋 可昌,田中 将己,東田 賢二, 野口 博司
2009.08	日本機械学会論文集 A編,75 卷 756 号 pp1082-1089	Fe-3.2wt.%Si 合金単結晶の疲労き裂先 端における繰返しすべり挙動におよぼす 水素ガスの影響	高橋 可昌,田中 将己,東田 賢二, 山口慶悟,野口 博司
2009.08	Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Volume 32, Issue 9, pp736-743	Effect of Small Notch and Absorbed Hydrogen on the Fatigue Fracture in Two-step Stress Test within Fatigue Limit Diagram	Yoshiyuki Kondo, Hikaru Eda, Masanobu Kubota
2009.09	Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference - Effects of Hydrogen on Materials , pp131-138	Hydrogen-Induced Fatigue Crack Growth Acceleration and Martensitic Transformation of Austenitic Stainless Steels	金崎 俊彦,峯 洋二,松岡 三郎,村 上 敬宜
2009.09	Eurocorr 2009 CD-R, p1-8	Effect of Enhanced Lattice Defect Formation on Hydrogen Degradation of Alloy 625 and Type 316L	Kenichi Takai and Hiroki Shoda
2009.09	Proceedings of Crack Paths 2009, CD-ROM	Crack Propagation Behavior of SCM440H Low Alloy Steel Enhanced by Hydrogen under Long-term Varying Load and Static Load	Yoshiyuki Kondo, Masanobu Kubota, Katsuya Shimada
2009.10	Journal of materials science, 44 卷 20 号 pp5692-5696	SIMS Analysis of Low Content Hydrogen in Commercially Pure Titanium	濱田 繁,大西 勝,西川 嗣彬,尾田 安司,野口 博司
2009.10	日本機械学会 論文集 A編,75 卷 758 号 pp1300-1308	水素ガス環境における高強度鋼の切欠 き引張特性に及ぼす水素曝露の影響	鈴木裕一, 井藤賀久岳, 野口 博 司
2009.10	日本機械学会 論文集 A編,75 卷 758 号 pp1440-1442	S10C における微小穴からの極低速度疲 勞き裂伝ば挙動に及ぼす水素ガス雰 囲気の影響	李 東善,西川 嗣彬,尾田 安司, 野口 博司
2009.11	日本機械学会 論文集 A編,第 75 卷 759 号, pp1608-1614	低合金鋼切欠き材における繰返し過大 応力と水素侵入による疲労強度の低下	山之内隆志, 近藤良之
2009.11	日本機械学会 論文集 A編,75 卷 759 号 pp1615-1623	水素ガス中における低炭素鋼 S10C の疲 勞き裂伝ば挙動に及ぼす繰返し速度の 影響*	西川 嗣彬,尾田 安司,野口 博司

2009.11	Proceedings of Asian Pasific Conference for Materials and Mechanics 2009, Flash memory	Effect of Absorbed and Environmental Hydrogen on Short Fatigue Crack Propagation Near Threshold in Low Alloy Steel	Yuta Ueda, Masanobu Kubota and Yoshiyuki Kondo
2009.11	Proceedings of Asian Pasific Conference for Materials and Mechanics 2009, Flash memory	Effect of Hydrogen Concentration on Fretting Fatigue Strength	Masanobu Kubota, Tsuyoshi Nishimura, Yoshiyuki Kondo
2009.12	日本金属学会誌(まとめ), 48巻12号 p609	超高圧電子顕微鏡を用いた疲労き裂先端のすべり挙動解析	高橋 可昌, 田中將己, 東田 賢二, 野口 博司,
2009.12	材料, 58巻 12号 pp1009-1016	軸受鋼のモードII疲労過程における水素誘起組織変化	藤田慎治, 峯洋二, 松岡三郎, 村上敬宜
2009.12	日本機械学会 論文集 A編, 75巻 760号 pp1754-1762	水素ガス雰囲気中における低炭素鋼 S10C の疲労き裂粒界進展機構の検討	西川 嗣彬, 尾田 安司, 野口 博司
2010.12	鉄と鋼 95巻 12号, pp870-879	A New Inclusion Rating Method by the Tensile Test with Hydrogen-precharged Specimens	Shinji Fujita, Saburo Matsuoka, Yukitaka Murakami
2010.01	Acta Materialia, 58巻 2号 pp649-657	Effect of high-pressure torsion on hydrogen trapping in Fe-0.01 mass% C and type 310S austenitic stainless steel	峯 洋二, 堀田善治, 村上敬宜
2010.01	Materials Science and Engineering A	High pressure torsion of hafnium	Kaveh Edalati, 堀田善治, 峯 洋二
2010.02	日本機械学会論文集 A編, 76巻 762号 pp251-253	Fe-3.2wt.%Si 合金単結晶の stage I 疲労き裂先端における繰返し変形の TEM 観察	高橋 可昌, 坂本惇司, 田中將己, 東田 賢二, 野口 博司,

(2010 平成 22 年度 36 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.07	Engineering Fracture Mechanics, 77巻 11号, pp.1926-1940	Effect of hydrogen on fatigue crack growth of metals	村上敬宜, 松岡三郎
2010.10	Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 41, Number 10, pp.2548-2562	Hydrogen Effect against Hydrogen Embrittlement	Yukitaka Murakami, Toshihiko Kanezaki and Yoji Mine
2010.04	ACTA MATERIALIA, 58巻, 6号, pp.1972-1981	An intrinsic effect of hydrogen on cyclic slip deformation around a {110} fatigue crack in Fe-3.2wt.%Si alloy	高橋可昌, 田中將己, 東田賢二, 山口慶悟, 野口博司

2010.05	日本機械学会論文集, A編 76巻 765号 pp.602-609	低合金鋼の下限界近傍の微小疲労き裂進展に及ぼす水素侵入と水素雰囲気の影響	植田裕太,久保田祐信,近藤良之
2010.05	日本機械学会論文集, A編 76巻 765号 pp.594-601	低合金鋼の水素誘起き裂進展加速とき裂の開口状態について	近藤良之,久保田祐信,溝部浩志郎
2010.06	材料, Vol.59 No.6 pp.439-446	SUS304の水素ガス中フレットング疲労における疲労限度低下機構	久保田祐信, 田中康宏, 桑田喬平, 近藤良之
2010.06	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering , 4巻6号 pp.816-829	Effect Of Hydrogen Concentration On Fretting Fatigue Strength	久保田祐信, 西村剛, 近藤良之
2010.06	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4巻6号 pp.830-839	Effect Of Absorbed And Environmental Hydrogen On Short Fatigue Crack Propagation Near Threshold In Low Alloy Steel	植田祐太, 久保田祐信, 近藤良之
2010.07	日本機械学会論文集, A編 76巻 767号 pp.918-927	70MPa水素ステーション蓄圧器用 SNCM439鋼の疲労特性に及ぼす水素と繰返し速度の影響	矢野大樹, 本間紳浩, 福島良博, Arnaud Macadre, Jader Furtado, 松岡三郎
2010.07	日本機械学会論文集 A編 76巻 767号 pp.1002-1004	Fe-3.2wt.%Si合金単結晶の傾斜疲労き裂先端における繰返し変形におよぼす水素の影響のTEM解析	高橋可昌,坂本惇司,田中將己,東田賢二,野口博司
2010.07	Engineering Fracture Mechanics, Vol. 77, No.11, pp.1963-1974	Hydrogen enhanced crack propagation of SCM440H low-alloy steel under long-term varying load	近藤良之, 久保田祐信, 嶋田勝也
2010.07	日本機械学会論文集, A編 76巻 767号 pp.126-135	水素ガス中におけるフェライト・パーライト鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす水素圧力と試験周波数の影響	吉川倫夫, 堤紀子, 松岡三郎, 村上敬宜
2010.08	Fatigue and fracture of engineering materials, Vol. 33, issue8, pp.522-529	The effects of multiple overloads and absorbed hydrogen on the fatigue strength of notched specimens	近藤良之, 山之内隆志
2010.08	18th European Conference on Fracture, CDROM	Effect of Gaseous Hydrogen on Cyclic Slip Behavior around a Stage I Fatigue Crack Tip in an Iron Alloy	坂本惇司,高橋可昌,田中將己,東田賢二,野口博司
2010.08	18th European Conference on Fracture, CDROM	Consideration On Hydrogen Condition In Fatigue Crack Growth Test In Hydrogen Gas Environment: Focusing On Concentrated Hydrogen Zone Nearn Crack Tip	A. Nishimoto, H. Nishikawa, Y. oda, H. Noguchi

2010.09	18th European Conference on Fracture, CDROM	Fatigue Crack Growth Properties Of Quenched And Tempered Cr-Mo Steel In 0.7 Mpa Hydrogen Gas	松尾尚, 松岡三郎, 村上敬宜
2010.09	18th European Conference on Fracture, CDROM	Fatigue Crack Growth Behavior Of A 1900-Mpa-Class High-Strength Steel Pre-Charged By High-Pressure Hydrogen Gas	松本拓哉, 藤田慎治, 松岡三郎, 村上敬宜
2010.09	18th European Conference on Fracture, CDROM	Effects Of Hydrogen On Fatigue Properties Of Ni-Cr-Mo Steel Candidate For A 70 Mpa Storage Cylinder Of A Hydrogen Filling Station	Arnaud Macadre, 松岡三郎, Barbier Francoise, Furtado Jader
2010.09	日本機械学会論文集, A編76巻769号 pp.1204-1213	低合金鋼 SCM440H の長周期変動応力下の水素誘起き裂進展加速に及ぼす水素濃度, 板厚, 周波数および温度の影響	近藤良之, 久保田祐信, 溝部浩志郎
2010.09	Metallurgical And Materials Transactions A, vol.41 pp.2248-2256	Gigacycle Fatigue Properties of Hydrogen-Charged JIS-SCM440 Low-Alloy Steel Under Ultrasonic Fatigue Testing	古谷佳之, 蛭川寿, 早川正夫
2010.09	SCRIPTA MATERIALIA, Vol.63 Issue 5, pp.552 - 555	Hydrogen trapping on lattice defects produced by high-pressure torsion in Fe-0.01 mass% C alloy	Mine, Yoji; Tsumagari, Takayuki; Horita, Zenji
2010.10	日本機械学会論文集 A編 76巻770号 pp.1325-1334	低炭素鋼の水素ガス中疲労におけるぜい性スライエーション形成機構の検討 (負荷波形と試験環境の制御により破壊過程を可視化した破面の観察)	西川嗣彬, 尾田安司, 野口博司
2010.10	日本機械学会論文集 A編 76巻770号 pp.1335-1342	低炭素鋼の水素ガス中疲労におけるぜい性スライエーション形成機構の微視的検討 (疲労破面観察と対応させた TEM および EBSD 観察)	西川嗣彬, 尾田安司, 高橋可昌, 野口博司
2010.10	Ultramicroscopy 110巻11号 pp.1420-1427	A combined environmental straining specimen holder for high-voltage electron microscopy	高橋可昌, 田中將己, 東田賢二, 安田和弘, 松村晶, 野口博司
2010.11	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4巻11号 pp.1627-1635	Effect of hydrogen absorption on the fatigue strength reduction caused by multiple overloads in notched component	久保田祐信, 佐久間亨, 山口純一郎, 近藤良之

2010.11	Materials Letters 64 卷 22 号 pp.2416-2419	Microscopic characterization of hydrogen-induced quasi-brittle fatigue fracture in low-strength carbon steel	高橋可昌,西川嗣彬,尾田安司,野口 博司
2010.11	日本機械学会論文集 A 編 76 卷 771 号 pp.1459-1468	Effect of Hydrogen on Tensile Properties of Ferritic-Pearlitic Carbon Steels	西口廣志,福島良博,松岡三郎,村上敬宜
2010.12	材料,Vol. 59 (2010) , No. 12 pp.916-923	水素圧力センサーダイヤフラムの破損解析	宮本泰介,金崎俊彦,田崎治彦,小林信夫,松岡三郎,村上敬宜
2010.12	材料,Vol. 59 (2010) , No. 12 pp.924-931	35MPa 水素ステーション蓄圧器用 SCM435 鋼のシャルピー衝撃特性に及ぼす組織の影響と LBB 評価	松尾尚,山辺純一郎,福島良博,松岡三郎,村上敬宜
2010.12	Metallurgical and Materials Transactions A Volume 41, Issue 12, pp.3110-3120	Effect of high-pressure torsion processing and annealing on hydrogen embrittlement of type 304 metastable austenitic stainless steel	Mine Yoji, Tachibana Kazutaka; Horita Zenji
2010.12	日本機械学会論文集 A 編 76 卷 772 号 pp.1636-1642	水素ガス環境における 1,300MPa 級 SCM435 高強度鋼切欠き材の引張強度に及ぼす様々な環境因子の影響	鈴木裕一, 井籐賀久岳, 野口博司
2011.01	Scripta Materialia, Volume 64, Issue 2, pp.157-160	Characterization of dislocation structures around a mixed-mode fatigue crack tip in a single-crystalline iron-silicon alloy	高橋可昌,坂本惇司,田中將己,東田賢二,野口博司
2011.02	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering , 5 卷 3 号 pp.104-116	Loading-Frequency Effects on Fatigue Crack Growth Behavior of a Low Carbon Steel JIS S10C in Hydrogen Gas Environment	Hide-aki Nishikawa, Yasuji Oda And Hiroshi Noguchi
2011.03	Scripta Materialia 64 卷 6 号, pp.537- 540	On the micro-mechanism of hydrogen-assisted cracking in a single-crystalline iron-silicon alloy thin sheet	高橋可昌,山口慶悟,田中將己,東田賢二,野口博司
2011.03	日本機械学会論文集 A 編 77 卷 775 号 pp.483-494	水素侵入した低合金鋼 SCM440 の破壊じん性に及ぼす負荷速度と焼戻し温度の影響	池宮秀也,久保田祐信,近藤良之
2011.03	Analytical Chemistry, Online DOI:10.1021/ac 103100b	Highly Sensitive Detection of Net Hydrogen Charged into Austenitic Stainless Steel with Secondary Ion Mass Spectrometry	Tohru Awane, Yoshihiro Fukushima, Takashi Matsuo, Saburo Matsuoka, Yukitaka Murakami, and Shiro Miwa

(2011 平成 23 年度 20 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
------	------	--------	-----

2011.04	SCRIPTA MATERIALIA , 64 卷 8 号 pp.721-724	Effect of hydrogen on dislocation structures around a mixed-mode fatigue crack tip in a single-crystalline iron-silicon alloy	高橋 可昌, 坂本惇司, 田中 將 己, 東田 賢二, 野口 博司
2011.05	日本材料学会 第60期 通常総会・講演会 講 演論文集	水素侵入下の低合金鋼の破壊じん性特 性および Ni 添加による改善	近藤良之, 久保田祐信, 池宮秀也
2011.06	4th JSME / ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P2011), ICMP2011-51138	EFFECT OF HYDROGEN ON FRETTING FATIGUE STRENGTH OF SUS304 AND SUS316L AUSTENITIC STAINLESS STEELS	Koshiro Mizobe, Yuki Shiraishi, Masanobu Kubota, Yoshiyuki Kondo
2011.06	Journal of Computational Science and Technology, Vol.5, No.1, pp.62-76	Finite Element Analysis of a Coupled Elastoplastic-Transient Hydrogen Diffusion in Materials	劉麗君, MIRE SMAEILI Reza, 荻野 正雄, 金山寛
2011.07	International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 14, pp, 8630-8640	Analyses of hydrogen distribution around fatigue crack on type 304 stainless steel using Secondary Ion Mass Spectrometry	N. Saintier, T. Awane, J.M. Olive, S. Matsuoka, Y. Murakami
2011.07	International Journal of Fatigue, Volume 33, Issue 12, pp.1608-1619	The effect of hydrogen on the fatigue life of Ni-Cr-Mo steel envisaged for use as a storage cylinder for a 70 MPa hydrogen station	MACADRE Arnaud, 矢野 大樹, 松岡 三郎, FURTADO Jader
2011.09	日本機械学会論文集 A 編, 77 卷 781 号 pp.1554-1558	オーステナイト系ステンレス鋼における溶 接接合管材の疲労強度に及ぼす微小欠 陥と水素の影響	松本圭純, 久保田祐信, 近藤良之
2011.09	Proceedings of ATEM2011	Effects of hydrogen and multiple overloads on the fatigue strength of notched component	久保田祐信, 佐久間亨, 山口純一 郎, 近藤良之
2011.10	Tribology International, Volume 44, Issue 11, pp1495-1502	Mechanism of reduction of fretting fatigue limit caused by hydrogen gas in austenitic stainless steel SUS304	久保田祐信, 桑田喬平, 田中康 博, 近藤良之

2011.10	材料, 第 60 卷, 第 10 号, pp898-904	熱処理で硬化した低炭素鋼 S25C の長周期変動応力下の水素誘起疲労き裂進展	近藤良之, 久保田祐信
2011.10	日本機械学会論文集 A 編, 77 巻 782 号 pp.1747-1759	オーステナイト系ステンレス鋼切欠き材の高サイクル疲労強度に及ぼす過大応力と水素の影響	久保田祐信, 佐久間亨, 山口純一郎, 近藤良之
2011.10	MS&T2011Conference proceedings, pp.1218-1225	Hydrogen dragging and transportation by moving dislocation in Type 316L and 304	M.Kitamura, H.Suzuki, Y.Hagihara, K. Takai
2011.10	The 2nd Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures	Fracture Toughness of Low Alloy Steels in Absorbed Hydrogen Condition	青木辰郎, 池宮秀也, 久保田祐信, 近藤良之
2011.12	Engineering Fracture Mechanics, Volume 78, Issue 18, pp.3196-3211	Effects of hydrogen pressure and test frequency on fatigue crack growth properties of Ni-Cr-Mo steel candidate for a storage cylinder of a 70 MPa hydrogen filling station	MACADRE Arnaud, ARTAMONOV Maxim, 松岡 三郎, FURTADO Jader
2012.3	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering	Effects of Mechanical and Environmental Factors on the Notch Tensile Strength of 1,300 MPa Class SCM435 High-strength Steel in Hydrogen Gas	鈴木裕一, 井藤賀久岳, 野口博司
2012.03	日本機械学会九州支部第65期総会講演会講演論文集 No.128-1 431-432	水素ガスによるフレッティング疲労強度低下に対する凝着の寄与	白石 悠貴, 薦田 亮介, 久保田祐信, 近藤 良之
2012.03	日本機械学会九州支部第65期総会講演会講演論文集 No.128-1 439-440	溶接構造用圧延鋼材 SM400A 溶接部の疲労強度に及ぼす溶接欠陥と水素の影響	松本 圭純, 久保田 祐信, 近藤良之
2012.03	日本機械学会九州支部第65期総会講演会講演論文集 No.128-1 435-436	10MPa 水素ガス中における炭素鋼 S35C の高サイクル疲労特性	石崎 敬之, 久保田 祐信, 近藤良之
2012.03	日本機械学会九州支部第65期総会講演会講演論文集 No.128-1 437-438	水素ガス中フレッティング疲労の疲労強度低下メカニズムに関する研究	薦田 亮介, 近藤 良之, Jader Furtado, 久保田 祐信

2012.03	日本機械学会九州支部第65期総会講演会講演論文集 No.128-1 433-434	水素ガスの不純物がフレット疲労強度に及ぼす影響	足立 裕太郎, 薦田 亮介, Jader Furtado, 久保田 祐信, 近藤 良之
---------	--	-------------------------	---

(3)「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」(水素高分子材料研究チーム)

(2009 平成 21 年度 10 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.04	SAE Paper,2009-01-0999	A Study on Sealing Behavior of Rubber O-Ring in High Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸, 古賀敦
2009.05	日本機械学会論文集 A 編, 75 巻 753 号 pp633-643	高圧水素ガス環境下における EPDM のプリスタ発生限界	山辺純一郎, 西村伸
2009.08	EFFECTS OF HYDROGEN ON MATERIALS, Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference, pp307-315	A Study on Blister Damages of Rubber O-ring by High Pressure Hydrogen Durability Tester	古賀敦, 中山純一, 徳光英之, 大塚雅也, 山辺純一郎, 西村伸
2009.08	EFFECTS OF HYDROGEN ON MATERIALS, Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference, pp389-396	Blister Fracture of Rubbers for O-ring Exposed to High Pressure Hydrogen Gas Effects of Hydrogen on Materials	山辺純一郎, 中尾匡利, 藤原広匡, 西村伸
2009.08	Semiconductor FPD World, pp45-47	燃料電池自動車普及のカギ 水素技術の最新動向	山辺純一郎, 西村伸
2009.08	日本機械学会論文集 A 編, 75 巻 756 号 pp1063-1073	高圧水素ガス圧力容器用ゴム製シール材の損傷解析	山辺純一郎, 西村伸, 藤原広匡
2009.09	高分子論文集, 66 巻 9 号 pp363-372	加硫アクリロニトリルブタジエンゴムの膨潤状態, 溶液および固体 ¹ H, ¹³ C NMR による構造解析	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2009.10	SAE International Journal of Materials & Manufacturing, 2 巻 1 号 pp452-460	A Study on Sealing Behavior of Rubber O-ring in High Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸

2009.11	日本機械学会論文集 A編, 75巻 759号 pp1531-1541	Oリング用エチレンプロピレンゴム(EPDM)の静き裂 進展特性および下限界引裂きエネルギーに及ぼす架 橋剤と水素曝露の影響	山辺純一郎, 西村伸
2009.12	日本機械学会論文集 A編, 75巻 760号 pp1726-1737	高圧水素ガス中で露したシリカ充填エチレンプロピ レンゴムのき裂発生限界	山辺純一郎, 西村伸

(2010 平成 22 年度 10 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.04	NOK TECHNICAL REPORT, vol.22 pp.16-23	高圧水素ガス雰囲気下におけるゴム O リングのシー ル挙動に関する研究	古賀敦, 山辺純一郎, 西 村伸
2010.06	日本ゴム協会誌, 第 83 巻, 第 6 号, pp.159-166	高圧水素ガス環境下におけるエチレンプロピレンゴム 製のシール材の破壊現象と水素透過特性	山辺純一郎, 古賀敦, 西 村伸
2010.09	ECF18, CDROM	Estimation of Critical Pressure of Decompression Failure of EPDM Composites for Sealing under High-Pressure Hydrogen Gas	Junichiro Yamabe, Shin Nishimura
2010.09	Chemical Physics Letters, vol.498 pp.42-44	Determination of chemical shift of gas-phase hydrogen molecules by 1H nuclear magnetic resonance	Hirotda Fujiwara, Junichiro Yamabe, Shin Nishimura
2010.11	Journal of Materials Science, Volume46, Number 7, pp.2300-2307,	Nanoscale Fracture Analysis by Atomic Force Microscope of EPDM rubber due to High-Pressure Hydrogen Decompression	山辺純一郎, 西村伸
2010.12	材料, Vol. 59 (2010) ,No. 12 pp.956-963	高圧水素ガスシール用エチレンプロピレンゴムの内部 き裂発生・進展挙動とき裂損傷に及ぼす試験片形状 の影響	山辺純一郎, 松本隆志, 西 村伸,
2011.01	材料, Vol. 60 (2011) ,No. 1, pp.63-70	シール用ゴム材料のガス吸収による体積増加と引張 特性に及ぼす高圧水素ガス曝露の影響	山辺純一郎, 中尾匡利, 藤 原広匡, 西村伸,
2011.01	Journal of Environment and Engineering, Vol.6 (2011), No.1, pp.53-68.	Fracture Analysis of Rubber Sealing Material for High Pressure Hydrogen Vessel	Junichiro Yamabe, Hirotda Fujiwara, Shin Nishimura
2011.02	Polymer Testing, Volume 30, Issue 1, pp.76-85	Application of acoustic emission method to detection of internal fracture of sealing rubber material by high-pressure hydrogen decompression	山辺純一郎, 松本隆志, 西 村伸
2011.02	日本機械学会論文集 A編, Vol. 77 (2011), No. 774, pp.323-334.	高圧水素ガス中で曝露したシール用ゴム材料のき裂 損傷に及ぼすカーボンブラックの影響	山辺純一郎, 西村伸

(2011 平成 23 年度 5 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.05	自動車技術会国際会議 EVTeC'11	Evaluation on High-Pressure Hydrogen Decompression Failure of Rubber O-ring using Design of Experiments	Atsushi KOGA, Kenichi UCHIDA, Junichiro YAMABE, Shin NISHIMURA
2011.09	Proceeding of ATEM'11, OS12F063, CD-ROM	Tensile properties and swelling behavior of sealing rubber materials exposed to high-pressure hydrogen gas	山辺純一郎, 西村伸
2011.09	Proceeding of ATEM'11, OS12F035, CD-ROM	Visualizing evaluation on blister generating behavior inside of rubber O-ring under high-pressure gas	Atsushi KOGA, Junichi NAKAYAMA, Hiroyuki SATO, Junichiro YAMABE, Shin NISHIMURA
2011.12	Journal of Applied Polymer Science, Vol.122, Issue.5 pp.3172-3187	Influence of Carbon Black on Crack Damage and Hydrogen Permeation Properties of Filled EPDM rubbers Exposed to High-Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸
2011.12	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol5, No.12, pp.690-701	Crack Growth Behavior of Sealing Rubber under Static Strain in High-Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸

(4)「高圧水素トライボロジーの解明」(水素トライボロジー研究チーム)

(2006 平成 18 年度 なし)

(2007 平成 19 年度 なし)

(2008 平成 20 年度 なし)

(2009 平成 21 年度 14 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.05	月刊トライボロジー, 261 巻 pp16-19	高圧水素雰囲気におけるトライボロジー	澤江義則, 杉村 丈一
2009.06	Proceedings of ECOTRIB 2009, pp903-908	Sliding experiments in hydrogen and surface analysis of DLC coating films	田中宏昌, 杉村 丈一
2009.07	Tribology Online, 4 巻 4 号 pp82-87	New Experiment System for Sliding Tests in Hydrogen and Surface Analysis with Transfer Vessel	田中宏昌, 澤江義則, 福田 応夫, 山神成正, 森田健 敬, 和泉直志, 杉村 丈一
2009.08	Tribology Online, Vol.4, No.4, pp92-95	Molecular dynamic simulation of gas molecules dissolved in lubricant under shear	奥村哲也, 杉村 丈一

2009.09	トライボロジスト, 5 巻 9 号 pp637-641	ステライト 6B と SUS316 の摩擦摩耗に及ぼす雰囲気 中酸素濃度の影響	森田健敬,和泉直志,松隈 直樹,杉村 丈一
2009.10	トライボロジスト,54 巻 10 号 pp701-709	水素ガス雰囲気における DLC コーティング膜の摩 擦摩耗	田中宏昌,和泉直志,杉村 丈一
2009.10	トライボロジスト,54 巻 10 号 pp710-718	水素雰囲気における無充てん PTFE の摩耗特性	澤江義則,山口晃,土井俊 一郎,中嶋和弘,村上輝 夫,黒野好恵,杉村 丈一
2009.10	Tribology Online, Vol.4, No.5, pp103-108	Effect of Residual Gas on Tribochemical Reactions of SUJ2 Steel in Vacuum and in Argon Gas Atmosphere	Hiroki Mano, Koji Miyake, Miki Nakano, Atsushi Korenaga, Takashi Murakami, Shinya Sasaki, Joichi Sugimura
2009.10	Tribology Online, Vol.4, No.5, pp109-114	Fretting Wear Tests of Steels in Hydrogen Gas Environment	和泉直志,三室日朗,森田 健敬,杉村 丈一
2009.12	トライボロジスト,54 巻 12 号 pp848-856	DLC 膜に及ぼす 40MPa 水素ガス曝露の影響	田中宏昌,森田健敬,澤江 義則,杉村 丈一
2010.01	トライボロジスト,55 巻 1 号 pp53-61	鋼の摩擦摩耗特性に及ぼす水素雰囲気中の微量 不純物の影響	福田応夫,橋本正明,杉村 丈一
2010.01	Materials Science Forum, Vols.638-642, pp3412-3417	Friction and Wear Properties of Ar and TiC-Based Cermet Specimens in a Hydrogen Gas Atmosphere	Takashi Murakami, Katsuo Kaneda, Hiroki Mano, Masayuki Hata, Shinya Sasaki, Joichi Sugimura
2010.01	Wear, Vol. 268, pp721-729	Friction and wear properties of zirconium and niobium in a hydrogen environment	Takashi Murakami, Hiroki Mano, Katsuo Kaneda, Masayuki Hata, Shinya Sasaki, Joichi Sugimura
2010.03	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology	Effect of High-Pressure Hydrogen Exposure on Wear of PTFE Sliding against Stainless Steel	Kazuhiro Nakashima, Akira Yamaguchi, Yoshie Kurono, Yoshinori Sawae, Teruo Murakami, Joichi Sugimura

(2010 平成 22 年度 4 件)

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.04	Tribology Online, Vol5,No,2 pp.80-86	Influence of Trace Water and Oxygen in a Hydrogen Environment on Pure Fe Friction and Wear	福田応夫,黒野好恵,和泉 直志,杉村丈一
2010.05	Journal of the Vacuum Society of Japan, 53	水素雰囲気でのトライボロジー	澤江義則,杉村丈一

	卷第4号, pp280-287		
2011.01	Tribology Online, Vol6,No,2 pp.142-147	Friction and Wear of Ferrous Materials in a Hydrogen Gas Environment	福田応夫,橋本正明,杉村 丈一
2011.01	Tribology Online, Vol6,No,2 pp.148-154	Fretting Wear of a Bearing Steel in Hydrogen Gas Environment Containing a Trace of Water	和泉直志,森田健敬,杉村 丈一

(2011 平成 23 年度 8 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.06	プラントエンジニア, 43 巻 6 号 pp.10-16	水素用シール材料のトライボロジー	杉村 丈一, 澤江義則
2011.09	Tribology Online, Vol.6,No.7 pp.291-296	Observation of Hydrogen Permeation into Fresh Bearing Steel Surface by Thermal Desorption Spectroscopy	谷本啓, 田中宏昌, 杉村 丈一
2011.11	Tribology Online, Vol.6,No.7, pp.311-316	Simple Experiment on Permeation of Hydrogen into Steel in Cyclic Contact	大津健史, 田中宏昌, 大 西 勝, 杉村 丈一
2011.11	21st International Conference on Fluid Sealing, pp.167-178	Effects of metal counter surfaces on friction and wear of polymeric seal materials in hydrogen	森田健敬, 佐藤文則, 澤 江義則, 杉村丈一
2012.3	日本機械学会球種支 部第 65 期講演会講 演論文集 No.128-1 117-118	摩擦顕微鏡により捉えられた軸受鋼表面に対す る高圧水素ガスの影響	坂井伸朗, 今関裕司, 田 中宏昌, 宮越栄一, 澤江 義則, 村上輝夫, 杉村 丈 一
2012.3	日本機械学会球種支 部第 65 期講演会講 演論文集 No.128-1 217-218	水素雰囲気下におけるグリース潤滑下の転がり疲 れ	田中宏昌, 大原祐樹, 橋 本正明, 杉村 丈一
2012.3	日本機械学会球種支 部第 65 期講演会講 演論文集 No.128-1 215-216	水素雰囲気における PTFE 複合材の摩擦摩耗に 及ぼす充てん材の影響	澤江義則, 日高泉展, 森 田健敬, 杉村 丈一, 宮越 栄一, 黒野好恵, 村上輝 夫, 杉村 丈一
2012.3	日本機械学会球種支 部第 65 期講演会講 演論文集 No.128-1 221-222	樹脂/金属の滑り接触における表面膜形成に及ぼ す雰囲気気体と材料の影響	森田健敬, 鍋島瑞貴, 黒 野好恵, 澤江義則, 杉村 丈一

(5)「材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究」(水素シミュレーション研究チーム)

(2006 平成 18 年度 なし)

(2007 平成 19 年度 3 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.01	日本機械学会論文集 A 編, Vol.74, No.737 , pp28-36.	鈍化き裂まわりの非定常な水素拡散-弾塑性連成解析	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, 他
2008.02	Journal of Materials Science, Vol.43, No.3 pp1166-1169.	Atomistic Simulation of the Effects of Hydrogen on the Mobility of Edge Dislocation in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI
2008.02	Theoretical and Applied Mechanics, Vol.56, pp389-400	Numerical Analysis of Hydrogen Diffusion Problems Using the Finite Element Method	Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA and Hiroshi KAWAI

(2008 平成 20 年度 6 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.08	International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, No.8 (2008), pp540-549.	Transient Hydrogen Diffusion Analyses Coupled with Crack-tip Plasticity under Cyclic Loading	Hirokazu KOTAKE, Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI
2008.08	材料, Vol. 57, No.8 (2008), pp768-773.	α 鉄における(112)[111]刃状転位芯近傍の水素占有位置に関する原子モデルを用いた研究	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2008.09	Acta Materialia, Vol. 56, No. 15 (2008), pp3761-3769.	Atomistic Study of Hydrogen Distribution and Diffusion around a $\langle 112 \rangle \langle 111 \rangle$ Edge Dislocation in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI
2008.09	Journal of Computational Science and Technology, Vol. 2, No. 4 (2008), pp447-458.	A Stabilization Method for the Hydrogen Diffusion Model in Materials,	Stephane NDONG-MEFANE, Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO and M.F.El-AMIN
2008.11	Journal of Computational Vol. 2, No. 4 (2008), pp499-510.	Hydrogen Transport in a Coupled Elastoplastic-Diffusion Analysis near a Blunting Crack Tip	Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Reza MIRESMAEILI, Takuya NAKAGAWA and Takahiro TODA
2008.12	Memories of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 68, No. 4 (2008), pp151-161.	Finite Element Analysis of the Stress and Deformation Fields around the Blunting Crack Tip	Reza MIRESMAEILI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi KAWAI and Hiroshi KANAYAMA

(2009 平成 21 年度 7 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.04	Scripta Materialia, Vol.60 Issue 7, pp555-558	Influence of Shear Strain on the Hydrogen Trapped in Bcc-Fe: A First-Principles-Based Study	松本龍介, 井上義規, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.07	Effects of Hydrogen on Materials, (Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference) pp663-670	Estimation of Hydrogen Distribution around Dislocations Based on First Principles Calculations	松本龍介, 井上義規, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.07	Effects of Hydrogen on Materials, (Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference) pp580-587	Finite Element Analysis of Hydrogen Diffusion in Materials	金山寛, Stephane Ndong-Mefane, 荻野正 雄
2009.07	Effects of Hydrogen on Materials, (Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference) pp655-662	Atomistic Study of Hydrogen Diffusion around Dislocations in Alpha Iron, Effects of Hydrogen on Materials	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.12	International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, Issue 23, pp9576-9784	Atomic Simulations of Hydrogen Embrittlement	松本龍介, 武富紳也, 松本壮平, 宮崎則幸
2009.12	Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.69, No.4, pp149-161	Reconsideration of the Hydrogen Diffusion Model Using the McNabb-Foster Formulation	金山寛, Stephane Ndong-Mefane, 荻野正 雄, Reza Miresmaeili
2010.02	International Journal of Mechanical Science, Vol.52, pp334-338	Atomistic Study of the Effect of Hydrogen on Dislocation Emission from a Mode II Crack Tip in Alpha Iron	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸

【口頭発表・講演】

(1)「高圧水素物性の基礎研究」(水素物性研究チーム)

(2006 平成 18 年度 1 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2006.10	第 27 回日本熱物性シンポジウム	超高压水素熱物性研究プロジェクト	藤井 夫, 高田保之, 藤井賢一, 新里寛英

(2007 平成 19 年度 8 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.08	Proceedings of the 8th Asian Thermophysical Properties Conference	Review of Thermophysical Properties of Hydrogen and the Related Work of HYDROGENIUS	Naoya SAKODA, Elin YUSIBANI, Peter Lloyd WOODFIELD, Kan'ei SHINZATO, Masamichi KOHNO, Yasuyuki TAKATA, and Motoo FUJII
2007.09	化学工学会第 39 回 秋季大会	高压下での水素溶解度測定装置の準備状況	伊藤衡平, 城田農, 高田保之, 藤井丕夫, 他
2007.09	Sixth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Potsdam Germany	Research Project of Hydrogen Thermophysical Properties at Ultra High Pressure	Y. Takata, N. Sakoda, K. Shinzato, K. Fujii and M. Fujii
2007.10	28th Japan Symposium on Thermophysical Properties	STUDY ON CHAPMAN-ENSKOG EQUATION TO ESTIMATE HYDROGEN GAS VISCOSITY IN THE LIMIT OF ZERO DENSITY,	Elin Yusibani, Peter L. Woodfield, Kan'ei Shinzato, Yasuyuki Takata and Motoo Fujii
2007.10	28th Japan Symposium on Thermophysical Properties,	Numerical simulation of natural convection in a transient-short-hot-wire thermal conductivity cell	P. L. Woodfield, J. Fukai, M. Fujii, Y. Takata, K. Shinzato
2007.11	九州伝熱セミナー in 由布院	高压水素熱物性の研究	迫田直也
2007.11	Japan-Korea Joint Seminar on Heat Transfer IV-Thermal Solutions for Renewable Development.	Hydrogen Thermophysical Properties at very High Pressure	M.Kohno, Y. Takata

2007.12	第27回水素エネルギー協会大会	On the Prediction of Hydrogen Gas Viscosity by Chapman-Enskog Theory,	Elin Yusibani, Peter L. Woodfield, Kan'ei Shinzato, Yasuyuki Takata and Motoo Fujii
---------	-----------------	---	---

(2008 平成20年度 24件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.05	第45回日本伝熱シンポジウム	非定常短細線法による気体の熱伝導率測定	諸江将吾, Woodfield Lloyd Peter, 深井潤, 藤井 丕夫, 河野正道, 高田保之, 新里寛英
2008.06	The 17th World Hydrogen Energy Conference	Estimation of Rarefied Gas Effects on Thermal Conductivity of Hydrogen in a Transient-Hot-Wire cell	P. L. Woodfield, J. Fukai, M. Fujii, Y. Takata, K. Shinzato
2008.06	第13回動力・エネルギー技術シンポジウム	高圧水素の充てん・放出時の水素の温度挙動を支配する無次元パラメーターについて	門出政則, 大井手竜二, 光武雄一
2008.06	第13回動力・エネルギー技術シンポジウム	水素の水に対する溶解度	城田農, 今田智之, 伊藤衡平, 村松秀隆, 高田保之, 藤井丕夫
2008.07	The 2nd JOINT SEMINAR KYUSHU UNIVERSITY BORDEAUX UNIVERSITY	Hydrogen Thermophysical Properties at Very High Pressure	M. Kohno
2008.09	KAIST-Kyushu University Joint Seminar 2008	Study on Thermal Conductivity Measurement of Fluids using Transient Short-Hot Wire Method	諸江将吾, Woodfield Lloyd Peter, 深井潤, 藤井丕夫, 河野正道, 高田保之, 新里寛英
2008.09	The 18th European Conference on Thermophysical Properties	Development of PVT Measurement Apparatus and Preliminary Measurements for Hydrogen	迫田直也, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2008.09	The Second International Forum on Heat Transfer	The Effect of Wire Heat Capacity in the Three-Omega Method Applied to Measurement of Thermal Conductivity of Hydrogen Gas	Yusibani Elin, Woodfield Lloyd Peter, Xing ZHANG, 新里寛英, 高田保之, 藤井丕夫
2008.09	The Second International Forum on Heat Transfer	Application of a Two-Dimensional Analytical Solution to the Transient Short-Hot-Wire Method for Determining Thermal Conductivities of Fluids	Woodfield Lloyd, 深井潤, 高田保之, 藤井丕夫, 新里寛英

2008.10	The 29th Japan Symposium on Thermophysical Properties	Hydrogen Gas Viscosity At High Temperature and High Pressure	Yusibani Elin, 大塚章, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2008.10	The 29th Japan Symposium on Thermophysical Properties	Three- Dimensional Numerical Simulation of Heat Conduction in a Short-Hot-Wire Thermal Conductivity Measurement Cell	Woodfield Lloyd Peter, 諸江将吾, 河野正道, 深井潤, 藤井丕夫, 高田保之, 新里寛英
2008.10	The 29th Japan Symposium on Thermophysical Properties	非定常短細線法による流体の熱伝導率測定	諸江将吾, Woodfield Lloyd Peter, 木村浩一, 深井潤, 藤井丕夫, 河野正道, 高田保之, 新里寛英
2008.10	第 29 回日本熱物性シンポジウム	An application of the thermophysical properties database for hydrogen	Odgerel Jambal, 山口朝彦, 赤坂亮, 桃木悟
2008.10	第 29 回日本熱物性シンポジウム	高圧水素用 PVT 測定装置の開発	迫田直也, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	固体高分子形燃料電池のその場計測 ―厚さ方向を中心に―	伊藤衡平
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	高圧・高温における気体水素の粘性係数	Yusibani Elin, 新里寛英, 藤井丕夫, 大塚章, 河野正道, 高田保之
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	高圧水素の熱物性測定	河野正道
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	高圧水素用PVT測定装置の開発	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	質量分析による水に対する水素溶解度測定法	城田 農, 今田智之, 伊藤衡平, 藤井丕夫, 高田保之
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	非定常短細線法による水素の熱伝導率測定	諸江将吾, Woodfield Lloyd Peter, 木村浩一, 深井潤, 新里寛英, 河野正道, 藤井丕夫, 高田保之

2008.10	第7回日韓熱流体工学会議プレセミナー	水素利用技術と熱物性	高田保之
2008.12	第28回水素エネルギー協会大会	高圧水素充てん中の容器内水素温度と容器壁温度特性について	大井手竜二, 門出政則, 光武雄一
2008.12	第28回水素エネルギー協会大会	水素吸蔵合金を用いた水素貯蔵容器の熱特性	伊藤潤, 門出政則, 光武雄一
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Hydrogen Thermophysical Property Measurements and Database	Y. Takata

(2009 平成 21 年度 23 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.06	第46回日本伝熱シンポジウム	低温高圧域における露点測定と露点推算法	石田賢治, 門出政則
2009.06	第46回日本伝熱シンポジウム	遠隔操作機能を兼ね備えた高圧 PVT 測定装置の開発および水素の PVT 測定	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2009.06	第46回日本伝熱シンポジウム	Comparison of Calculation Methods for the Transient Short-Hot-Wire Thermal Conductivity Measurement Problem	Peter L. Woodfield, Shogo Moroe, Jun Fukai, Motoo Fujii, Yasuyuki Takata, Kanei Shinzato
2009.06	第46回日本伝熱シンポジウム	細管法による高圧水素ガスの粘性係数測定	Elin Yusibani, Peter L. Woodfield, Kanei Shinzato, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Motoo Fujii
2009.06	第46回日本伝熱シンポジウム	低圧水素ガスの熱伝導率測定	諸江将吾, ウッドフィールドドピーター, 木村浩一, 深井潤, 新里寛英, 河野正道, 藤井丕夫, 高田保之
2009.06	17th Symposium on Thermophysical Properties	PVT Measurements of Hydrogen at High Pressures	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2009.06	17th Symposium on Thermophysical Properties	Thermal Conductivity Measurement of Hydrogen Gas using the Transient Short Hot-Wire Method	Shogo Moroe, Peter L. Woodfield, Koichi Kimura, Jun Fukai, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii and Yasuyuki Takata.
2009.06	17th Symposium on Thermophysical Properties	An Application of Hydrogen Thermophysical Properties Database - All in One Live CD -	Satoru Momoki, Odgerel Jambal, Tomohiko Yamaguchi, Ryo Akasaka

2009.06	第14回動力・エネルギー技術シンポジウム	小型 NMR センサーによる高分子材料内の水素溶解度の計測—その場計測手法の開発—	伊藤衡平,村松秀隆,小川邦康
2009.06	The Eleventh UK National Heat Transfer Conference (UKHTC2009)	Measurement of hydrogen thermophysical properties at high pressure	高田保之, Peter L. Woodfield, 迫田直也, 新里寛英, 藤井 丕夫
2009.10	長崎講演会	高压水素の PVT 測定とビリアル係数	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2009.10	第30回日本熱物性シンポジウム	バーネット法による 200 °C, 100 MPa までの高压水素の PVT 測定	進藤健太, 迫田直也, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2009.10	第30回日本熱物性シンポジウム	PVT 実測値に基づく高压水素のビリアル係数	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2009.10	第30回日本熱物性シンポジウム	非定常細線法による水素異性体の熱伝導率	諸江将吾, ウッドフィールド ピーター, 木村浩一, 深井潤, 藤井丕夫, 河野正道, 高田保之, 新里寛英
2009.10	第30回日本熱物性シンポジウム	気体の粘性係数測定のための半円型振動細線法	Peter L. Woodfield, Elin Yushibani, Kanei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii, Yasuyuki Takata
2009.10	第30回日本熱物性シンポジウム	The Challenges for High-Pressure Hydrogen Gas Viscosity Measurement	Elin Yushibani, Peter L. Woodfield, Yosuke Nagahama, Kanei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii, Yasuyuki Takata
2009.10	第30回日本熱物性シンポジウム	水素物性データベースの開発 --物性計算インターフェースの改善--	ジャンバルオダゲレル, 桃木悟, 赤坂亮, 山口朝彦
2009.11	日本機械学会 熱工学コンファレンス 2009	水素中の微量高沸点ガスの露点測定	高坂祐頭, 石田賢治, 門出政則
2009.11	ICOPE-09	PVT Measurement of High Pressure Gas by the Burnett Method	Naoya Sakoda, Kenta Shindo, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Motoo Fujii
2009.12	第29回水素エネルギー協会大会	バーネット法による高温高压水素の PVT 測定	河野正道, 迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 高田保之, 藤井丕夫

2009.12	第 29 回水素エネルギー協会大会	ゴム内に溶解した水素ガスの NMR 計測	村松秀隆, 栗屋大樹, 滝田千夏, 藤原広匡, 西村伸, 小川邦康, 高田保之, 伊藤衡平
2009.12	第 29 回水素エネルギー協会大会	水素物性データベースの開発 - 既存の整理式を利用した熱物性値推算システム -	桃木悟, Jambal Odgerel, 赤坂亮, 高田保之
2009.12	第 29 回水素エネルギー協会大会	細管法による高温高圧水素ガスの粘性係数測定	Elin Yusibani, 新里寛英, Peter L. Woodfield, 藤井丕夫, 長浜洋輔, 河野正道, 高田保之

(2010 平成 22 年度 18 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.05	第 47 回日本伝熱シンポジウム	NMR によるゴム内への水素溶解度および拡散係数の計測	栗屋大樹, 村松秀隆, 滝田千夏, 藤原広匡, 西村伸, 小川邦康, 高田保之, 伊藤衡平
2010.05	第 47 回日本伝熱シンポジウム	水素の PVT 性質測定とビリアル状態方程式の開発	迫田直也, 進藤健太, 本村晃一, Supriatno, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2010.05	第 47 回日本伝熱シンポジウム	細管法による高温高圧水素ガスの粘性係数測定	E. Yusibani, 長浜洋輔, 河野正道, 高田保之, P. L. Woodfield, 新里寛英, 藤井丕夫
2010.05	第 47 回日本伝熱シンポジウム	水素の熱伝導率に及ぼすオルソ・パラ存在比率の影響	諸江将吾, 木村浩一, P.L.Woodfield, 深井潤, 新里寛英, 河野正道, 藤井丕夫, 高田保之
2010.08	Kyushu University - KAIST Joint Seminar	Experimental analysis of hydrogen gas properties in rubber by NMR method	伊藤衡平, 栗屋大樹, 滝田千夏, 藤原広匡, 西村伸, 小川邦康, 高田保之
2010.08	Kyushu University - KAIST Joint seminar	Measurements of Hydrogen Viscosity under High Pressures with Capillary Tube Method	Yosuke Nagahama, Elin Yusibani, Kan' Ei Shinzato, Masamichi Kohno, Motoo Fujii, Yasuyuki Takata
2010.09	電気化学会九州支部トークショー・イン・九州 2010	ゴムに対する水素ガスの溶解度および拡散係数の NMR 法による計測 (ポスター)	栗屋大樹, 村松秀隆, 滝田千夏, 藤原広匡, 西村伸, 小川邦康, 高田保之, 伊藤衡平
2010.10	水素エネルギー先端技術展	オルト・パラ水素と熱物性	河野正道
2010.10	The 9th Asian	Hydrogen Viscosity At 295 To 400 K Up To 100	E.Yusibani, 長浜洋輔, 河野

	Thermophysical Properties Conference (ATPC2010)	Mpa	正道,高田保之, P.L.Woodfield,新里寛英,藤井丕夫
2010.10	The 9th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2010)	Dependence of Hydrogen Thermal Conductivity on Ortho-Para Composition Ratio	諸江将吾,木村浩一,深井潤,河野正道,高田保之, P.L.Woodfield,新里寛英,藤井丕夫
2010.10	The 9th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2010)	Measurement of PVT Property of Hydrogen at High Pressures up to 100 MPa and Development of a Virial Equation of State	迫田直也,進藤健太,本村晃一, Supriatno,新里寛英,河野正道,高田保之,藤井丕夫
2010.11	第31回日本熱物性シンポジウム	定容積法による高温水素のPVT性質の測定	本村晃一,迫田直也,Supriatno,深谷侑輝,新里寛英,河野正道,高田保之,藤井丕夫
2010.11	第31回日本熱物性シンポジウム	高圧水素用磁気式密度計の開発	迫田直也,Supriatno,本村晃一,新里寛英,河野正道,高田保之,藤井丕夫
2010.11	第31回日本熱物性シンポジウム	高温・高圧における水素の熱伝導率測定	木村浩一,諸江将吾, P.L. Woodfield,新里寛英,深井潤,河野正道, 藤井丕夫,高田保之
2010.11	第31回日本熱物性シンポジウム	細管法による高圧水素の粘性係数測定	長浜洋輔,E. Yusibani,吉村幸祐,新里寛英,河野正道,藤井丕夫,高田保之
2010.11	第31回日本熱物性シンポジウム	水素ステーションの高圧水素中における微量水分の露点推算について	石田賢治,高坂祐顕,門出政則
2011.03	The 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference (AJTEC2011)	Thermal Conductivity Measurement of Hydrogen at High Pressure and High Temperature	Koichi Kimura,Shogo Moroe, Peter Lloyd Woodfield, Jun Fukai, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohn,Motoo Fujii, Yasuyuki Takata
2011.03	The 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference (AJTEC2011)	Dew And Frost Points Measurements And Estimation For Residual Gases In High-Pressure Hydrogen	Kenji Ishida, Masataka Kosaka, Masanori Monde

(2011 平成 23 年度 22 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.06	第48回日本伝熱シンポジウム	Nafion 膜内の水素ガス溶解度および拡散係数の NMR 法によるその場計測	永久亮介, 栗屋大樹, 村松秀隆, 滝田千夏, 小川邦康, 高田保之, 伊藤衛

			平
2011.06	第48回日本伝熱シンポジウム	高圧 H ₂ +H ₂ O 系の露点推算における相互作用パラメータに関する実験的研究	高坂祐顕, 石田賢治, 門出政則
2011.06	第48回日本伝熱シンポジウム	Measurement of Hydrogen PVT Properties at High Temperatures up to 500°C	Supriatno, Naoya Sakoda, Koichi Motomura, Yuki Fukatani, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Motoo Fujii
2011.06	The 11th Asian Symposium on Visualization	Dew and Frost Point Measurements of Residual Water in High Pressure Hydrogen Utilizing Visualization and Image Analysis	石田賢治, 高坂祐顕, 門出政則
2011.08	日本混相流学会	高圧水素の熱物性測定	高田 保之
2011.08	19th European Conference on Thermophysical Properties	Measurement of hydrogen viscosity with capillary tube method in the range from 295K to 400K and from 5MPa to 100MPa	Y. Nagahama, E. Yusibani, K. Yoshimura, K. Shinzato, M. Kohno, M. Fujii and Y. Takata
2011.08	19th European Conference on Thermophysical Properties	Development of Apparatuses for PVT Properties of Hydrogen and Measurements at High Temperatures and High Pressures	Naoya Sakoda, Koichi Motomura, Supriatno, Yuki Fukatani, Kan'ei Shinzato, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, Motoo Fujii
2011.08	19th European Conference on Thermophysical Properties	Measurement and correlation of high-pressure high-temperature hydrogen thermal conductivity	P. Woodfield, S. Moroe, K. Kimura, M. Kohno, J. Fukai, Y. Takata, K. Shinzato and M. Fujii
2011.09	19th European Conference on Thermophysical Properties	Measurement of sound speed of n-hydrogen from 100kPa to 1MPa and from 323K to 373K	山口朝彦, 桃木悟, ジャンバル・オダゲレル, 上瀧祐介, 今道統也, 松崎勇人, 金丸邦康, 茂地
2011.09	the 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale HTFFM-IV	MEASUREMENT OF HYDROGEN GAS VISCOSITY WITH A CURVED VIBRATING WIRE METHOD	Elin Yusibani, Peter P. L. Woodfield, Yosuke Nagahama, Kosuke Yoshimura, Kanei Shinzato, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata
2011.10	220th ECS Meetings	Measurement of Hydrogen-gas Solubility and Diffusivity in Polymer Electrolyte Membrane by NMR Method	Ryosuke Nagahisa, Daiki Kuriya, Kuniyasu Ogawa, Yasuyuki Takata and Kohei Ito

2011.11	第32回日本熱物性シンポジウム	定容積法による500 °C, 100 MPaまでの高温高圧水素のPVT性質測定	本村晃一, 迫田直也, Supriatno, 久保圭佑, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2011.11	第32回日本熱物性シンポジウム	細管法による500K, 100MPaまでの水素の粘性係数測定	吉村幸祐, エリン・ユシバニ, 長浜洋輔 新里寛英, 河野正道, 高田保之
2011.11	水素エネルギー協会 第31回大会	高圧水素雰囲気中における残留水分の露点計測	高坂祐顕, 石田賢治, 門出政則
2012.02	水素先端世界フォーラム2012 物性チームワークショップ	Database for Thermophysical Properties of Hydrogen - Application for Engineering Calculation Softwares -	桃木悟, 山口朝彦, 今道統也, 上滝祐介, 神宮和行
2012.02	水素先端世界フォーラム2012 物性チームワークショップ	Development of Measurement Apparatus for Sound Speed of Hydrogen with Spherical Resonator	山口朝彦, 上滝祐介, 今道統也, 神宮和行, 桃木悟
2012.03	The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC8)	Frost Point Measurements and Estimation of Residual Water in High Pressure Hydrogen concerning Hydrogen Filling Stations	石田賢治, 高坂祐顕, 門出政則
2012.02	INTERNATIONAL HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT FORUM 2012 Workshop on Thermal Issues for Hydrogen Energy Systems	PVT Property Measurements of Hydrogen at High Temperatures and High Pressures up to 773 K and 100 MPa by the Isochoric Method	N. Sakoda, K. Motomura, Supriatno, K. Kubo, K. Shinzato, M. Kohno, Y. Takata, M. Fujii
2012.02	INTERNATIONAL HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT FORUM 2012 Workshop on Thermal Issues for Hydrogen Energy Systems	Measurements of Hydrogen Viscosity in the Range of Room Temperature up to 500 C, and Pressures up to 100 MPa with a Capillary Tube Method	Elin YUSIBANI, Yosuke NAGAHAMA, Kosuke YOSHIMURA, Temujin UEHARA, Kan'ei SHINZATO, Yasuyuki TAKATA, Masamichi KOHNO
2012.02	INTERNATIONAL HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT FORUM 2012 Workshop on Thermal Issues for Hydrogen Energy Systems	Experimental Analysis of Hydrogen-gas Dissolving Process into Polymer Electrolyte Membrane by NMR Techniqu	Ryosuke Nagahisa, Daiki Kuriya, Kuniyasu Ogawa, Yasuyuki Takata and Kohei Ito

2012.03	日本機械学会九州支部第 65 期総会・講演会	773 K, 100 MPa まで適用可能な定容積式 PVT 性質測定装置の開発と水素の PVT 性質測定	迫田直也, 本村晃一, Supriatno, 久保圭祐, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2012.03	日本機械学会九州支部第 65 期総会・講演会	細管法を用いた 100MPa, 500K までの 水素の粘性係数測定	吉村幸祐, エリン・ユシバニ, 長浜洋輔, 上原帝臣, 新里寛英, 河野正道, 高田保之

(2)「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」(水素材料強度特性研究チーム)

(2006 平成 18 年度 7 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.02	International HydrogenEnergy Development Forum	Effects on Hydrogen on Metal Fatigue	Y. Murakami
2007.02	International HydrogenEnergy Development Forum	Influence of high pressure hydrogen charging on fatigue crack growth on a type304 stainless steel	J. M. Olive, Y. Mine and K. Murakami, et.al.
2007.02	International HydrogenEnergy Development Forum Workshop	Effects of hydrogen on high cycle fatigue properties-Torsional fatigue under cathodic polarization and fretting fatigue in hydrogen gas	Y. Kondo and, M. Kubota
2007.02	International HydrogenEnergy Development Forum Workshop	Effect of hydrogen on the tensile properties of 900-MPa-class JIS-SCM435 low-alloy steel for use in the storage cylinders of hydrogen station	S. Matsuoka, Y. Fukushima and Y. Murakami, et.al.
2007.03	日本機械学会九州学生会第 38 回学生員卒業研究発表講演会	水素による疲労強度低下機構への応力ひずみ特性の寄与	久保田祐信, 近藤良之, 他
2007.03	日本機械学会九州学生会・第 38 回学生員卒業研究発表講演会	ステンレス鋼のフレッティング疲労強度に及ぼす水素チャージの影響	久保田祐信, 近藤良之, 他
2007.03	日本機械学会九州支部第 60 期総会・講演会	微小疲労き裂進展下限条件に及ぼす水素の影響に対する材料組織因子の検討	久保田祐信, 近藤良之, 他

(2007 平成 19 年度 31 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.05	日本材料学会・第 56 期通常総会・学術講演会	水素による疲労強度低下機構解明へのアプローチ	久保田祐信, 近藤良之, 他

2007.06	Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-5)	Effect of Absorbed Hydrogen on the Near Threshold Fatigue Crack Growth Behavior of Short Crack	久保田祐信, 近藤良之, 他
2007.09	The 3rd International Scientific Conference on Environmental Degradation of Engineering Materials	Influence of High pressure Hydrogen Charging on Fatigue Crack Growth on JIS-SUS304 Austenitic stainless steel	J. -M. Olive, Y. Mine, Y. Murakami, et.al.
2007.09	日本機械学会・2007年度年次大会	応力振幅が疲労限度以下での切欠き材の2段2重変動応力疲労	久保田祐信, 近藤良之, 他
2007.09	International conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007 (ATEM' 07)	Effect of hydrogen on stress-strain behavior of materials used in hydrogen environment	久保田祐信, 近藤良之, 他
2007.09	International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007	Effect of Hydrogen on Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Surface Morphology of Austenitic Stainless Steels	T.KANEZAKI, Y.MINE, S.MATSUOKA, Y.MURAKAMI, et.al.
2007.09	第154回日本鉄鋼協会秋季講演大会	高強度鋼の格子欠陥生成促進と遅れ破壊に及ぼす水素とひずみの影響	高井健一, 他
2007.09	第154回日本鉄鋼協会秋季講演大会	加工硬化したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の疲労特性に及ぼす水素の影響	早川正夫, 松岡三郎, 他
2007.09	第154回日本鉄鋼協会秋季講演大会	純鉄の弾性・塑性変形過程における水素の放出挙動	高井健一, 他
2007.10	福岡水素エネルギー社会近未来展 2007	SUS316L 鋼加工硬化材の疲労特性に及ぼす水素の影響	早川正夫, 松岡三郎, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	オーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂先端の塑性変形挙動に及ぼす水素の影響	峯 洋二, J-M.Olive, 松岡三郎, 村上敬宜, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	ガス配管用炭素鋼鋼管溶接継ぎ手の高サイクル疲労特性に及ぼす水素の影響	S. M. Stepanyuk, 松岡三郎, 村上敬宜, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	低炭素鋼の引張特性に及ぼす水素と予ひずみの影響	松岡三郎, 村上敬宜, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	高応力比・低繰返し速度下における水素ガス蓄圧器用SCM435 鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす水素の影響	松岡三郎, 村上敬宜, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	軸受鋼の動的ねじり-静的圧縮荷重下での疲労挙動に及ぼす水素の影響	松岡三郎, 村上敬宜, 他

2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カ ンファレンス	炭素量 0.08mass%の低炭素鋼板の疲労き裂進展とス トレッチゾーンに及ぼす水素の影響	松岡三郎, 堤紀子, 村 上敬宜
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カ ンファレンス	純鉄の水素脆化に及ぼす格子欠陥の同定	高井健一, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カ ンファレンス	水素と応力の相互作用によるトラップサイト生成促進 と脆化への寄与	高井健一, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カ ンファレンス	析出硬化型マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS630 の疲労き裂進展挙動に及ぼす水素の影響	金崎俊彦, 峯洋二, 松 岡三郎, 村上敬宜, 他
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Workshop	Development of Hydrogen Measurement Method by SIMS	Shigeru HAMADA
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008	Basic Mechanism of Hydrogen Embrittlement and Its Application to Design and Structural Integrity	Y.Murakami
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Workshop	Acceleration of Lattice Defects Induced by Hydrogen and Strain on Hydrogen Degradation	K.T akai
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Workshop	Some aspects of the influence of internal hydrogen on fatigue crack growth in stainless steels	J-M.Olive,Y.Mine,他
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Workshop	Effects of Diffusible and Nondiffusible Hydrogen on the Mechanical Properties of Pipeline Steels Welded Joints	S.M.Stepanyuk,S.Matsu oka, et.al.
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Workshop	Hydrogen-induced Fatigue Crack Growth Acceleration and Martensitic Transformation in Austenitic Stainless Steels	T.KANEZAKI,Y.MINE, S.MATSUOKA,Y.MUR AKAMI
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Workshop	Blister Fracture of Rubbers for O-ring Exposed to High Pressure Hydrogen Gas	S.Nishimura,J.Yamabe
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008, Kyushu University Ito Campus	“Development of hydrogen measurement method by SIMS”	Shigeru HAMADA, Katsu OHNISHI, Saburo MATSUOKA, et.al.
2008.03	日本機械学会 九州支 部 第 61 期総会・講演 会	水素ガス環境中における高強度切欠き材の引張特 性	井藤賀 久岳, 濱田 繁, 野口 博司, 他

2008.03	TMS2008	EFFECT OF LATTICE DEFECTS INDUCED BY HYDROGEN AND STRESS ON ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF METALS	K.Takai, et.al.
2008.03	日本機械学会九州学生会・第39回学生員卒業研究発表講演会	微小疲労き裂進展下限界近傍のき裂開閉口挙動に及ぼす水素の影響	久保田祐信, 近藤良之, 他
2008.03	日本機械学会九州支部・第61期総会講演会	高圧水素ガス暴露試験片のフレット疲労強度	久保田祐信, 近藤良之, 他

(2008 平成 20 年度 58 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.05	第57回高分子学会年次大会	Oリング用ゴム材料の100MPa水素雰囲気下における変形・破壊挙動	藤原広匡, 中尾匡利, 山辺純一郎, 西村伸
2008.05	日本材料学会 第57期学術講演会	10MPa水素ガス中で曝露したOリング用ゴム材料のブリスタ破壊と水素量に及ぼすカーボンブラックの影響	山辺純一郎, 中尾匡利, 藤原広匡, 西村伸
2008.05	日本材料学会 第57期学術講演会	水素ガス中における過大荷重負荷後の切欠き材の疲労強度について	山口純一郎, 久保田祐信, 近藤良之
2008.06	日本化学会講演会	水素は、いかに材料の強度に影響するか	村上敬宜
2008.08	Summer school on Hydrogen organized by NEDO, Kyushu University, AIST, and Hydrogen Technology Research Center Cooperation, Fukuoka, 28 August 2008.	Research and development on Hydrogen in France and in Europ	Jean-Marc Olive
2008.08	日本機械学会 2008 年度年次大会	高圧水素ガス環境中で曝露したゴム材料のブリスタ破壊と引張特性・水素侵入特性に及ぼす充てん剤の影響	山辺純一郎, 中尾匡利, 藤原広匡, 西村伸
2008.08	日本機械学会 2008 年度年次大会	水素チャージしたIF鋼のナノインデンテーション	長島伸夫, 早川正夫, 竹内悦男
2008.08	日本機械学会 2008 年度年次大会	高濃度に水素侵入させたステンレス鋼のフレット疲労強度	西村剛, 久保田祐信, 近藤良之
2008.09	(社)日本鉄鋼協会第156回秋季講演会	水素による延性低下と格子欠陥生成促進との関係	生田裕樹, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人
2008.09	ECF17(17th European Conference on Fracture)	Effect of Hydrogen on Fatigue Crack Growth of Metals	Y. Murakami
2008.09	ECF17(17th European Conference on Fracture)	The decrease of tensile strength for the notched specimens in the hydrogen gas	H. Itoga, Y. Suzuki and H. Noguchi

2008.09	ECF17(17th European Conference on Fracture)	Effect of Hydrogen on Mode II Fatigue Behavior of Bearing Steel under Cyclic Torsion with Compressive Mean Stress	S. Fujita, S. Matsuoka and Y. Murakami
2008.09	ECF17(17th European Conference on Fracture)	Effect of Notch Shape and Absorbed Hydrogen on the Fatigue Fracture below Fatigue Limit	Y.Kondo, M.Kubota and H.Eda
2008.09	ECF17(17th European Conference on Fracture)	Fatigue Strength Reduction of Notched Component in Hydrogen Gas after Multiple Overloading	M. Kubota, J. Yamaguchi and Y. Kondo
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	Effect of hydrogen on microscopic deformation process near Stage II fatigue crack tip	K. Takahashi, M. Tanaka, K. Higashida and H. Noguchi
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	A Study On Blister Damages of Rubber O-ring by High Pressure Hydrogen Durability Tester	Koga, J. Nakayama, H. Tokumitsu, M. Otuka and J. Yamabe
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	Blister Fracture of Rubbers for O-ring Exposed to High Pressure Hydrogen Gas	J. Yamabe, M. Nakao, H. Fujiwara and S. Nishimura
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	Structural Materials Issues in Development of Hydrogen Energy Infrastructure in Japan	Y. Murakami
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	Hydrogen-Induced Fatigue Crack Growth Acceleration and Martensitic Transformation of an Austenitic Stainless Steel	T. Kanezaki, Y.Mine, S. Matsuoka and Y. Murakami
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	The effect of residual hydrogen on high-cycle fatigue property of welded joints for gas pipeline steel	T. Yamaoka, S. Stepanyuk, and S.Matsuoka
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	INFLUENCE OF HYDROGEN AND PRESTRAIN ON TENSILE PROPERTIES OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL JIS-SUS316L	T. Matuo, J. Yamabe, S. Matsuoka and Y. Murakami
2008.09	International Hydrogen Conference 2008	Lattice defect formation and degradation enhanced by hydrogen and strain of metals	K. Takai and H. Shoda
2008.09	第 57 回高分子討論会	高圧水素下における Oリング用ゴム材料の機械的特性に対するフィラーの影響	藤原広匡, 中尾匡利, 山辺純一郎, 西村伸
2008.09	日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス	低合金鋼の微小疲労き裂進展及びき裂開口挙動に及ぼす水素の影響	植田祐太, 久保田祐信, 近藤良之
2008.09	日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス	Oリング用ゴム材料の機械的性質に及ぼす高圧水素ガス曝露の影響	中尾匡利, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2008.09	日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス	高強度鋼 SCM435 切欠き材の引張強度に及ぼす水素の影響	鈴木裕一, 井藤賀久岳, 濱田繁, 野口博司

2008.09	日本機械学会 M&M2008 材料力学カ ンファレンス	加工硬化したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の疲労特性に及ぼす水素の影響	竹内悦男, 早川正夫, 長 島伸夫, 古谷佳之, 松岡 三郎
2008.09	日本鉄鋼協会「構造材 料の組織と破壊」フォー ラム	低炭素オーステナイト系ステンレス鋼の加工硬化材 の組織と強度解析	長島伸夫, 早川正夫
2008.09	日本鉄鋼協会第 156 回 秋季講演大会	550°Cで焼き戻した炭素鋼 S45C の疲労特性に及ぼ す水素の影響	竹内悦男, 早川正夫, 長 島伸夫, 松岡三郎
2008.10	3rd EPRI Expert Workshop on Creep-Fatigue Damage Interaction	The Effect of Compressive Strain Hold on the Low Cycle Fatigue Life of Various Materials at Elevated Temperature	M. Hayakawa, K. Kobayashi and M. Kimura
2008.10	Proceedings of Materials Science & Technology 2008, MS&T'08 CD-ROM, pp.1348-1358(2008).	Role of Vacancies and Dislocations in Hydrogen Degradation	K.Takai and H.Shoda
2008.10	Proceedings of the 3rd International Conference on Material and Processing	Mechanism of Reduction of Fretting Fatigue Limit in Hydrogen Gas Environment	M. Kubota, Y. Tanaka, K. Kuwada and Y. Kondo
2008.10	水素エネルギー協会第 126 回定例研究会	ブリスタに強いゴム材料	西村伸
2008.10	水素エネルギー先端技 術展 2008 燃料電池・ 水素エネルギー専門技 術セミナー	高圧水素環境下における Oリング用ゴム材料の破壊 ・変形挙動	山辺純一郎
2008.11	Welding and Related Technologies Into the Third Millennium	Effects of Hydrogen on Mechanical Properties of Welded Joints of STPG370 and SGP Pipe Steels	S. M. Stepanyuk, T. Yamaoka, S. Matsuoka, H. Nishiguchi and Y. Murakami
2008.11	日本機械学会 第 21 回 計算力学講演会	疲労破壊と引張破壊メカニズムに及ぼす水素の影 響	松岡三郎
2008.11	日本機械学会 第 21 回 計算力学講演会	金属材料中の水素存在状態と水素脆化	高井健一
2008.11	日本材料学会 第 29 回 疲労シンポジウム	高圧水素ガスに曝露した 1900MPa 級高強度鋼の疲 勞き裂進展挙動	松本拓哉, 藤田慎治, 福 島良博, 松岡三郎, 村上 敬宜
2008.11	日本材料学会 第 29 回 疲労シンポジウム	70MPa 水素ステーション蓄圧器用 SNCM439 鋼の疲 勞特性に及ぼす水素の影響	矢野大樹, 本間紳浩, 福 島良博, 松岡三郎, 村 上敬宜
2008.12	2008 年度高分子の崩 壊と安定化研究討論 会	Oリング用ゴム材料の高圧水素による劣化挙動	藤原広匡, 中尾匡利, 山 辺純一郎, 西村伸

2008.12	第20回エラストマー討論会	高圧水素ガスシール用ゴム材料の変形・破壊挙動 (2) -ブリスタ発生・進展のメカニズム-	山辺純一郎, 中尾匡利, 藤原広匡, 西村伸
2008.12	第20回エラストマー討論会	高圧水素ガスシール用ゴム材料の変形・破壊挙動 (1) -水素量とブリスタ破壊の関係-	藤原広匡, 中尾匡利, 山 辺純一郎, 西村伸
2008.12	日本ゴム協会トライボロ ジー研究会	ブリスタに強いゴム材料	西村伸
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Fatigue Crack Growth Mechanism in Hydrogen : For the Safe Design of Hydrogen Infrastructure	S. Matsuoka
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009 Symposium of HYFROGENIUS Research Team	Sealing Behavior of Rubber O-ring for High Pressure Hydrogen Gas	S. Nishimura and J. Yamabe
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009 Symposium of HYFROGENIUS Research Team	The Effect of Hydrogen and Test Frequency on Fatigue Crack Growth in Austenitic Stainless Steels	T. Kanazaki, Y. Mine, S. Matsuoka and Y. Murakami
2009.02	水素セミナー2009 in SAGA	水素エネルギー実用化に向けた課題と HYDROGENIUS の取り組み	西村伸
2009.03	(社)日本鉄鋼協会第 157回春季講演会	安定および準安定オーステナイトステンレス鋼の昇 温脱離プロファイルと水素脆化	高井健一, 廣瀬貴規, 鈴 木啓史, 萩原行人
2009.03	日本機械学会九州学 生会 第40回学生員卒 業研究発表講演会	SCM435 鋼の疲労き裂伝ばの微視的機構におよぼ す水素ガス雰囲気の影響	重長正人, 山口慶悟, 高 橋可昌, 野口博司
2009.03	日本機械学会九州学 生会 第40回学生員卒 業研究発表講演会	疲労き裂伝ば速度に及ぼす雰囲気水素と材料内水 素の影響	堀内優, 西川嗣彬, 尾田 安司, 野口博司
2009.03	日本機械学会九州学 生会 第40回学生員卒 業研究発表講演会	連続水素チャージ条件下の低合金鋼の破壊靱性	山之口和輝, 久保田祐信 近藤良之
2009.03	日本機械学会九州学 生会 第40回学生員卒 業研究発表講演会	過大荷重による疲労強度低下に及ぼす水素の影響	佐久間亨, 久保田祐信, 近藤良之
2009.03	日本機械学会九州支 部 第40回総会・講演 会	高濃度水素を含むステンレス鋼のフレットイング疲 労強度	西村剛, 久保田祐信, 近 藤良之
2009.03	日本機械学会九州支 部 第40回総会・講演 会	地震による過大荷重を考慮した水素利用機器部材 の疲労設計基準に関する研究	山口純一郎, 久保田祐 信, 近藤良之

2009.03	日本機械学会九州支部 第62回総会・講演会	SCM435 鋼の疲労き裂伝ばの微視的機構におよぼす水素の影響	山口慶悟, 重長正人, 高橋 可昌, 田中將己, 東田賢二, 野口博司
2009.03	日本機械学会九州支部 第62回総会・講演会	低炭素鋼 S10C の疲労き裂伝ば特性に及ぼす水素ガスの影響	李東善, 西川嗣彬, 尾田安司, 野口博司
2009.03	日本機械学会九州支部 第62回総会・講演会	水素ガス中での疲労き裂進展速度に及ぼす繰返し速度の影響	西川嗣彬, 藤嶋正博, 尾田安司, 野口博司
2009.03	日本機械学会九州支部 第62回総会・講演会	水素ガス中におけるステンレス鋼のフレタィング疲労強度低下機構	桑田喬平, 久保田祐信, 近藤良之

(2009 平成 21 年度 35 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.05	日本材料学会 第58期 学術講演会	軸受鋼のモードII 疲労き裂の発生・進展挙動に及ぼす水素の影響	藤田慎治, 松岡三郎, 村上敬宜
2009.05	日本材料学会 第58期 学術講演会	シリコン鉄合金中の疲労き裂先端におけるすべり挙動の透過型電子顕微鏡観察	高橋 可昌, 東田 賢二, 野口 博司, 田中將己
2009.05	日本材料学会 第58期 学術講演会	SUS316L の過大荷重による疲労強度低下に及ぼす水素の影響	佐久間亨, 山口純一郎, 久保田祐信, 近藤良之
2009.06	International Conference on Fracture 12	Effects of Earthquake Loads and Absorbed Hydrogen on the Fatigue Strength Reduction of Notched Component	Yoshiyuki Kondo, Takashi Yamanouchi
2009.07	12th International Conference on Fracture	Loading-Frequency Effects on Fatigue Crack Growth Behavior of a Low Carbon Steel in Hydrogen Gas Environment	西川 嗣彬, 尾田 安司, 野口 博司
2009.07	12th International Conference on Fracture	Hydrogen exposure effect on tensile strength of high strength steel sharp notched specimen	鈴木 裕一, 井藤賀久岳, 野口 博司
2009.07	12th International Conference on Fracture	Characterization of Subgrains for Ferritic Heat-Resisting Steels with Different Creep-Fatigue Susceptibility	早川 正夫, 木村 恵, 小林 一夫
2009.07	12th International Conference on Fracture	Microscopic study on the effect of hydrogen on fatigue crack growth process in a chromium-molybdenum steel	山口慶悟, 重長正人, 高橋 可昌, 田中 將己, 東田 賢二, 野口 博司
2009.07	日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス	炭素鋼 S45C の疲労特性に及ぼす水素の影響	竹内 悦男, 早川 正夫, 長島 伸夫, 松岡 三郎
2009.07	日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス	ナノインデンテーション法による鋼の塑性変形開始点挙動に及ぼす水素の影響評価	長島 伸夫, 早川 正夫, 竹内 悦男

2009.07	日本機械学会 M&M2009 材料力学カ ンファレンス	TEM 法による疲労き裂先端のすべり挙動におよぼ す水素の影響評価	高橋 可昌, 田中 将己, 東田 賢二, 野口 博司
2009.07	PVP2009 conference of ASME	Effects of Gaseous Hydrogen on Fatigue Crack Growth Behavior of Low Carbon Steel	李 東善, 西川 嗣彬, 尾田 安司, 野口 博司
2009.09	Crack Paths 2009	Crack Propagation Behavior of SCM440H Low Alloy Steel Enhanced by Hydrogen under Long-term Varying Load and Static Load	Yoshiyuki Kondo, Masanobu Kubota, Katsuya Shimada
2009.09	7th EUROMECH Solid Mechanics Conference (ESMC2009)	Effect of Crosshead speed on tensile strength in high pressure hydrogen gas environment for high strength steel	井藤賀 久岳, 野口 博 司, 濱田 繁
2009.09	機械学会年次大会	疲労き裂伝ばの微視的機構におよぼす水素の影響	高橋 可昌, 田中 将己, 東田 賢二, 野口 博司
2009.09	日本鉄鋼協会第 158 回 秋季講演大会	電解チャージを施した純鉄の水素存在状態変化と 力学特性との関係	種市直紀, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人
2009.09	日本鉄鋼協会第 158 回 秋季講演大会	焼戻しマルテンサイト鋼の水素脆化感受性に及ぼす 温度とひずみ速度の影響	伊藤博史, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人
2009.09	日本鉄鋼協会第 158 回 秋季講演大会	純鉄および伸線パーライト鋼の水素とひずみの相互 作用により促進された格子欠陥の同定	宮下友徳, 生田裕樹, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人, 平出哲也
2009.09	第 56 回材料と環境討 論会	高強度鋼の水素脆化特性に及ぼす水素存在状態と 水素ひずみ誘起格子欠陥の影響	土信田知樹, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人
2009.09	第 56 回材料と環境討 論会	応力下における安定および準安定オーステナイトス テンレス鋼の水素存在状態変化と水素脆化特性	廣瀬貴規, 鈴木啓史, 高 井健一, 萩原行人
2009.10	第 53 回日本学術会議 材料工学連合講演会	微細結晶粒ステンレス鋼 SUS304 の引張特性に及ぼ す水素の影響	橘 和孝, 峯 洋二, 堀 田善治, 村上敬宜
2009.10	日本材料学会	高圧水素ガス中におけるき裂を有する高強度鋼の 引張強度のひずみ速度依存性	井藤賀 久岳, 野口 博 司
2009.10	水素エネルギー先端技 術展 2009	SUS304 鋼の水素ガス中フレッティング疲労における 疲労限度低下機構と水素量の影響	久保田祐信
2009.10	水素エネルギー先端技 術展 2009	耐水素疲労設計法構築のための部品・部材の強度 評価	近藤良之, 久保田祐信
2009.11	日本ばね学会	パーライトバネの疲労破壊メカニズム特性	井藤賀 久岳, 野口 博 司
2009.11	第 17 回機械材料・材料 加工技術講演会 (M&P2009)	SUS304 鋼の水素ガス中におけるフレッティング疲労 限度低下機構の検討	久保田祐信, 田中康宏, 桑田喬平, 近藤良之
2009.11	Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics APCMM2009	Effect of Absorbed and Environmental Hydrogen on Short Fatigue Crack Propagation Near Threshold in Low Alloy Steel	植田裕太, 久保田祐信, 近藤良之

2009.11	Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics APCMM2009	Effect of Hydrogen Concentration on Fretting Fatigue Strength	久保田祐信,西村剛,近藤良之
2010.03	日本機械学会九州学生会 第41回学生会卒業研究発表講演会	高圧水素ガス配管溶接継ぎ手の疲労強度特性	松本圭純,久保田祐信,近藤良之
2010.03	日本機械学会九州学生会 第41回学生会卒業研究発表講演会	多量に水素侵入させた SUS304 鋼の水素ガス中フレッティング疲労強度	白石悠貴,久保田祐信,近藤良之
2010.03	日本機械学会九州支部 第63期総会講演会	ステンレス鋼の二段多重変動応力疲労に及ぼす水素の影響	萩原 龍,久保田祐信,近藤良之
2010.03	日本機械学会九州支部 第63期総会講演会	低合金鋼の破壊じん性に及ぼす水素と負荷速度の影響	池宮 秀也,久保田祐信,近藤良之
2010.03	日本機械学会九州支部 第63期総会講演会	微小疲労き裂の進展挙動に及ぼす侵入水素, 周囲環境および応力比の影響	植田 祐太,久保田祐信,近藤良之
2010.03	日本機械学会九州支部 第63期総会講演会	切欠き材の疲労強度に及ぼす過大荷重と水素の影響	佐久間亨,久保田祐信,近藤良之
2010.03	日本鉄鋼協会第159回秋季講演大会	冷間伸線パーライト鋼の水素脆化感受性と格子欠陥形成促進との関係	土信田知樹,鈴木啓史,高井健一,萩原行人

(2010 平成 22 年度 31 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.04	The 6th International Symposium on Fretting Fatigue	Mechanism of fretting fatigue limit reduction in hydrogen gas in SUS304	M. Kubota, Y. Tanaka, K. Kuwada, Y. Kondo
2010.05	日本顕微鏡学会第66回学術講演会	水素による擬脆性的疲労亀裂進展の超高压電子顕微鏡観察	高橋可昌,田中将己,野口博司,東田賢二,大尾岳史,松村晶
2010.05	日本材料学会第59期学術講演会	透過型電子顕微鏡による傾斜疲労き裂先端の微視的すべり挙動におよぼす水素の影響解析	坂本惇司,高橋可昌,田中将己,東田賢二,野口博司
2010.06	平成22年度日本金属学会九州支部学術講演会	High-Pressure Torsion による準安定オーステナイト系ステンレス鋼のマルテンサイト変態に及ぼす水素の影響	峯洋二, 堀田善治
2010.06	The Sixth International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture (MSMF-6)	Effects of Hydrogen Concentration, Specimen Thickness, Loading Frequency and Temperature on the Hydrogen Enhanced Crack Propagation of Low Alloy Steel	Yoshiyuki Kondo, Masanobu Kubota and Koshiro Mizobe
2010.07	TMS-ABM International Materials Congress	Hydrogen behavior and hydrogen embrittlement of metals	K.Takai

2010.07	TMS-ABM International Materials Congress	Dynamic Behavior of Hydrogen Desorption from Pure Iron and Inconel 625 during Elastic and Plastic Deformation	K.Takai, H.Shoda
2010.08	18th European Conference on Fracture	Consideration On Hydrogen Condition In Fatigue Crack Growth Test In Hydrogen Gas Environment: Focusing On Concentrated Hydrogen Zone Near Crack Tip	A. Nishimoto, H. Nishikawa, Y. oda, H. Noguchi
2010.09	18th European Conference on Fracture	Effects Of Hydrogen On Fatigue Properties Of Ni-Cr-Mo Steel Candidate For A 70 Mpa Storage Cylinder Of A Hydrogen Filling Station	Arnaud Macadre,松岡 三郎,Barbier Francoise,Furtado Jader
2010.09	18th European Conference on Fracture	Fatigue Crack Growth Behavior Of A 1900-Mpa-Class High- Strength Steel Pre-Charged By High-Pressure Hydrogen Gas	松本拓哉, 藤田慎治, 松岡三郎, 村上敬宜
2010.09	18th European Conference on Fracture	Fatigue Crack Growth Properties Of Quenched And Tempered Cr-Mo Steel In 0.7 Mpa Hydrogen Gas	松尾尚, 松岡三郎, 村上敬宜
2010.09	18th European Conference on Fracture	Mechanistic Role of Hydrogen on the Enhanced Crack Propagation of Low Alloy Steel SCM440H	Yoshiyuki Kondo, Masanobu Kubota and Koshiro Mizobe
2010.09	日本機械学会 2010 年 度年次大会	水素侵入した低合金鋼の破壊じん性に及ぼす負荷 速度と焼戻し温度の影響	池宮秀也,久保田祐信, 近藤良之
2010.09	日本鉄鋼協会第 160 回 秋期講演大会	純鉄の流動応力および応力緩和に及ぼす水素存在 状態の影響	種市直紀, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人
2010.09	日本鉄鋼協会第 160 回 秋期講演大会	一定弾性応力下における高強度鋼の水素量変化	土信田知樹, 鈴木啓 史, 高井健一, 萩原行人
2010.09	日本鉄鋼協会第 160 回 秋期講演大会	水素ステーション蓄圧器用 SCM435 鋼のギガサイク ル疲労特性に及ぼす水素の影響	蛭川寿, 古谷佳之, 松 岡三郎
2010.10	日本機械学会 M&M 2010 材料力学カンファ レンス	ステンレス鋼の二段多重変動応力下の疲労挙動に 対する水素の影響	萩原龍,久保田祐信, 近藤良之
2010.10	Conference of Metallurgists (COM)2010	Strain-induced defects associated with hydrogen embrittlement of cold-drawn pearlitic steel	T. Doshida, H. Suzuki,K. Takai, Y. Hagihara
2010.10	日本機械学会 中国四 国支部・九州支部 合 同企画 徳島講演会	炭素鋼の引張強度特性に及ぼす水素の影響	堤紀子,金子祥太郎, 曾根雅史
2010.10	日本材料学会 疲労部 門委員会 第30回疲労 シンポジウム	低炭素鋼(S25C)溶接模擬熱処理材の水素誘起 裂進展	近藤良之, 久保田祐信

2010.11	日本機械学会 第18回 機械材料・材料加工技 術講演会 (M&P2010)	オーステナイト系ステンレス鋼のフレッティング疲労 に及ぼす水素の影響	白石悠貴,久保田祐信, 近藤良之
2010.11	日本機械学会 第18回 機械材料・材料加工技 術講演会 (M&P2010)	溶接接合管材の疲労強度に及ぼす微小欠陥と水素 の影響	松本圭純,久保田祐信, 近藤良之
2011.03	International HYDROGENIUS and I2CNER Joint Symposium on Hydrogen- Material Interaction	Visualization of Hydrogen Diffusion in a Hydrogen-enhanced Fatigue Crack Growth in Type 304 Stainless Steel	Hisao Matsunaga
2011.03	日本機械学会九州支 部第64期総会・講演会	10MPa 水素ガス中における炭素鋼の高サイクル疲 労特性	石崎敬之,久保田祐信, 近藤良之
2011.03	日本機械学会九州支 部第64期総会・講演会	オーステナイト系ステンレス鋼のフレッティング疲労 強度に及ぼす水素の影響とその機構	溝部浩志郎,白石悠貴, 久保田祐信,近藤良之
2011.03	日本機械学会九州支 部第64期総会・講演会	低合金鋼の切欠き材の高サイクル疲労強度に及ぼ す過大荷重と水素の影響	佐久間亨,久保田祐信, 近藤良之
2011.03	日本機械学会 第42回 学生員卒業研究発表 講演会	水素によって加速された長周期変動応力下の疲労 き裂進展挙動	大田浩司,久保田祐信, 近藤良之
2011.03	日本機械学会 第42回 学生員卒業研究発表 講演会	水素用高圧バルブの漏洩発生条件の検討	足立裕太郎, 久保田祐 信, 近藤良之
2011.03	TMS 2011 Annual Meeting & Exhibition	Effect of Hydrogen on Tensile Properties of a Ductile Cast Iron	Hisao Matsunaga, Kenshin Matsuno and Katsuya Hayashida
2011.03	第161回日本鉄鋼協会 春季講演大会	弾性・塑性変形過程における SUS16L および SUS304 中の水素放出挙動	北村恵, 鈴木啓史, 高 井健一, 萩原行人
2011.03	2011年春期(第148回) 日本金属学会大会	金属材料中の水素存在状態解析	高井健一

(2011 平成 23 年度 32 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.05	(社)腐食防食協会	弾性・塑性変形過程における SUS316L および SUS304 の転位と水素の相互作用 解析	北村恵, 鈴木啓史, 高井 健一, 萩原行人
2011.05	International Symposium on Fatigue Design & Material Defects	Material defects as the basis of fatigue design	村上敬宜

2011.05	日本材料学会第60期通常総会・講演会	水素侵入下の低合金鋼の破壊じん性特性およびNi添加による改善	池宮秀也, 久保田祐信, 近藤良之
2011.05	日本材料学会第60期通常総会・講演会	炭素鋼の高サイクル疲労特性に及ぼす10MPa水素ガス環境の影響	石崎敬之, 近藤良之, 久保田祐信
2011.05	第16回計算工学講演会	4面体要素を用いた高圧FRPタンク解析システムの構築に関する研究	荻野正雄, 市田翔平, 金山寛
2011.06	11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials	A perspective on hydrogen embrittlement in fatigue	村上敬宜
2011.06	4th JSME / ASME International Conference on Materials and (ICM&P2011)	EFFECT OF HYDROGEN ON FRETTING FATIGUE STRENGTH OF SUS304 AND SUS316L AUSTENITIC STAINLESS STEELS	Koshiro Mizobe, Yuki Shiraishi, Masanobu Kubota, Yoshiyuki Kondo
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	水素に関する最新の話	村上敬宜
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	水素は如何に材料の疲労強度に影響するか?	村上敬宜
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	水素チャージした水素ステーション蓄圧器用 SCM435 鋼のギガサイクル疲労特性	蛭川 寿, 古谷佳之, 松岡三郎
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	オーステナイト系ステンレス鋼切欠き材の高サイクル疲労強度に及ぼす過大応力と水素の影響と疲労限度低下の予測	久保田祐信, 佐久間亨, 山口純一郎, 近藤良之
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	水素用高圧バルブの繰返し開閉による損傷に関する研究	足立裕太郎, 近藤良之, 久保田祐信
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	水素ガス中における炭素鋼の疲労き裂進展挙動に及ぼすVおよびMoの微量添加の影響	丸田賢, 宮本泰介, 松岡三郎, 村上敬宜

2011.07	6th International Conference on Advanced Materials Development and Performance	Effect of Hydrogen on Uniaxial Tensile Behaviors of a Ductile Cast Iron	Kenshin Matsuno, Hisao Matsunaga, Masahiro Endo, Keiji Yanase
2011.07	日本機械学会 M&M2011	SUS316L および SUS304 の水素脆化におよぼす転位と水素の相互作用	北村恵, 鈴木啓史, 高井健一
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス	水素ステーション蓄圧器用 SCM435 の短いき裂の疲労特性に及ぼす水素の影響	堤圭之介, 松尾尚, 松岡三郎
2011.09	日本機械学会2011年度年次大会	SUS316 鋼のフレッティング疲労強度に及ぼす水素の影響	白石悠貴, 久保田祐信, 近藤良之
2011.09	International conference on advanced technology in experimental mechanics ATEM2011	Effects of hydrogen and multiple overloads on the fatigue strength of notched component	久保田祐信, 佐久間亨, 山口純一郎, 近藤良之
2011.9	日本鉄鋼協会	SUS316L, SUS304 ステンレス鋼における転位と水素の相互作用と水素脆化感受性	北村恵, 鈴木啓史, 高井健一, 萩原行人
2011.09	International Conference on steel and Hydrogen 2011	Hydrogen Embrittlement: Observation and Mechanism in Wide Range of Strength and Microstructure	村上敬宜
2011.10	The 2nd Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures	Fracture Toughness of Low Alloy Steels in Absorbed Hydrogen Condition	青木辰郎, 池宮秀也, 久保田祐信, 近藤良之
2011.11	Nordic Green Japan	Hydrogen Research at HYDROGENIUS and I2CNER: Basic and Applied Research and International Collaborations	村上敬宜
2011.11	8th Korea-Japan joint symposium of composite materials in 2011	A Study on the Ductility Loss in Metals by Hydrogen	Kenshin Matsuno, Keiji Yanase, Hyonji Kim, Hisao Matsunaga
2012.2	International Hydrogen Energy Development Forrum 2012	Hydrogen dragging and transportation by moving dislocation in Type 316L and 304 stainless steels	K.Takai and M.Kitamura

2012.2	Joint HYDROGENIUS and I2CNER International Workshop on Hydrogen-Materials Interactions	Ultrasonic fatigue tests of hydrogen-charged specimens	Y. Furuya, H. Hirukawa and M. Hayakawa
2012.2	Joint HYDROGENIUS and I2CNER International Workshop on Hydrogen-Materials Interactions	Effect of hydrogen on fatigue crack initiation, small crack growth and long crack growth	Masanobu Kubota, Yoshiyuki Kondo, Saburo Matsuoka and Yukitaka Murakami
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会講演会	水素ガスによるフレッティング疲労強度低下に対する凝着の寄与	白石 悠貴, 薦田 亮介, 久保田 祐信, 近藤 良之
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会講演会	溶接構造用圧延鋼材 SM400A 溶接部の疲労強度に及ぼす溶接欠陥と水素の影響	松本 圭純, 久保田 祐信, 近藤 良之
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会講演会	10MPa 水素ガス中における炭素鋼 S35C の高サイクル疲労特性	石崎 敬之, 久保田 祐信, 近藤 良之
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会講演会	水素ガス中フレッティング疲労の疲労強度低下メカニズムに関する研究	薦田 亮介, 近藤 良之, Jader Furtado, 久保田 祐信
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会講演会	水素ガスの不純物がフレッティング疲労強度に及ぼす影響	足立 裕太郎, 薦田 亮介, Jader Furtado, 久保田 祐信, 近藤 良之
2012.3	TMS2012	Mechanism of Hydrogen Embrittlement in Fatigue	村上敬宜

(4)「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」(水素高分子材料研究チーム)

(2009 平成 21 年度 19 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.04	SAE World Congress 2009	A Study on Sealing Behavior of Rubber O-Ring in High Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸, 古賀敦
2009.05	日本材料学会学術講演会	高圧水素ガスシール用ゴム材料のプリスタ発生限界の推定	山辺純一郎, 西村伸
2009.05	日本ゴム協会年次大会	高圧水素ガス圧力容器用ゴムシール材料の損傷解析	山辺純一郎, 西村伸, 藤原広匡

2009.05	日本ゴム協会年次大会	高圧水素ガス曝露によるゴムシール材料の劣化評価	西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡
2009.05	日本ゴム協会年次大会	高圧水素耐久試験機によるゴムシール材料の破壊評価	古賀敦, 山辺純一郎, 西村伸
2009.05	高分子学会年次大会	固体 NMR を用いた高圧水素ガスシール用ゴム材料中の水素量評価	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2009.09	高分子学会高分子討論会	Oリング用ゴム材料の高圧水素ガスによるプリスタ破壊現象	西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡
2009.10	The 1st FAPS Polymer Congress (Federation of Asian Polymer Societies)	Influence of Fillers on Decompression Failure of Rubber Composites for O-Ring Exposed to High Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸, 藤原広匡
2009.10	The 1st FAPS Polymer Congress (Federation of Asian Polymer Societies)	The Influence of High Pressure Hydrogen Gas on Rubber Material for Pressure-Resistant Vessels Sealing -The Evaluation of Hydrogen Contents in Rubber Material Using Solid State NMR Spectroscopy	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2009.10	第 14 回破壊力学シンポジウム	水素曝露した未充填およびシリカ充填エチレンプロピレンゴム EPDM のき裂発生限界の破壊力学的検討	山辺純一郎, 西村伸
2009.11	NMR 討論会	高圧水素ガスシール用ゴム材料中に溶解した水素の固体 NMR による解析	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2009.12	日本ゴム協会エラストマー討論会	高圧水素ガス環境中で曝露した O リング用ゴム材料の引張特性	中尾匡利, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2009.12	日本ゴム協会エラストマー討論会	L18 直交実験によるゴム O リングのプリスタ破壊の要因解析	古賀敦, 山辺純一郎, 西村伸
2009.12	日本ゴム協会エラストマー討論会	高圧水素ガス中で曝露したエチレンプロピレンゴムのプリスタ発生限界	山辺純一郎, 西村伸
2009.12	日本ゴム協会エラストマー討論会	水素ガスシール用エチレンプロピレンゴムの 70MPa 水素ガス環境中での水素透過特性とプリスタ損傷	山辺純一郎, 西村伸, 古賀敦
2009.12	The 11th Pacific Polymer Conference	The Influence of High Pressure Hydrogen Gas on Rubber Composite Materials for O-rings of High Pressure Hydrogen Vessels	西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡
2009.12	Osaka University Macromolecular Symposium on Chemistry, Physics, and Biology in Macromolecular Science(OUMS'09)	A Study on Rubber Composites as Sealing Materials for High-pressure Hydrogen Gas Vessels	西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡

2010.02	第12回機械・構造物の強度設計, 安全性評価のシンポジウム(日本材料学会)	高圧水素ガス圧力容器用ゴム製 Oリングの損傷解析	山辺純一郎, 西村伸, 藤原広匡
2010.03	第1回 日本複合材料合同会議(日本材料学会, 日本複合材料学会)	高圧水素ガス中で曝露したフィラー充填エチレンプロピレンゴムのプリスタ損傷と水素透過特性に及ぼすカーボンブラック粒径の影響	山辺純一郎, 西村伸

(2010 平成 22 年度 24 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.04	Symposium on Mechanics and Structure of Rubber Materials in HYDROGENIUS	Opening Remarks/Activities of Hydrogen Polymer Team, HYDROGENIUS	西村伸
2010.04	Symposium on Mechanics and Structure of Rubber Materials in HYDROGENIUS	Analysis of Dissolved Hydrogen Molecules in Rubber Materials by 1H NMR	藤原広匡
2010.04	Symposium on Mechanics and Structure of Rubber Materials in HYDROGENIUS	Blister Fracture of Rubber Materials by High-Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎
2010.04	Symposium on Mechanics and Structure of Rubber Materials in HYDROGENIUS	Study on the Effect of Filler Materials on the Higher Order Structure of Rubber Materials by FT-IR Spectroscopy	伊藤雄三
2010.05	NMR 研究会	ゴム中に溶解した水素の NMR による解析	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2010.05	第47回 固体NMR・材料フォーラム	固体 NMR による高圧水素シール用ゴム材料の評価	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2010.05	第 59 回高分子学会年次大会	アクリロニトリルブタジエンゴム中に溶解した水素の固体 NMR を用いた評価 高圧水素容器用 Oリングゴム材料(1)	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2010.05	第 59 回高分子学会年次大会	FT-IR による検討－高圧水素容器用 Oリングゴム材料(2)	伊藤雄三, 佐藤亮太, 川井忠智, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2010.05	(社)日本ゴム協会 2010 年年次大会(第 77 回通常総会)	フィラー充てん EPDM のプリスタ損傷と水素透過特性に及ぼすカーボンブラック粒径の影響	山辺純一郎, 西村伸

2010.05	(社)日本ゴム協会 2010 年年次大会(第 77 回通常総会)	高圧水素曝露によるアクリルニトリルブタジエン中に 溶解した水素の固体 NMR を用いた評価	山辺純一郎, 西村伸
2010.05	(社)日本ゴム協会 2010 年年次大会(第 77 回通常総会)	高圧水素ガス環境下におけるゴム O リングのシール 機能への影響因子評価	古賀敦, 山辺純一郎, 西 村伸
2010.05	第 59 期学術講演会	高圧水素ガス中で曝露したシール用エチレンプロピ レンゴムの内部き裂発生・進展に及ぼす試験片形状 の影響	山辺純一郎, 西村伸, 藤 原広匡
2010.09	(社)日本機械学会 2010 年度年次大会	高圧ガス中で曝露したシール用ゴム材料の内部き裂 検知に対するアコースティックエミッション(AE)法の 適用	山辺純一郎, 松本隆志, 西村伸
2010.09	第 59 回高分子討論会	高圧水素曝露したポリテトラフルオロエチレンの水素 侵入特性と水素透過性 - 高圧水素容器用 O リング ゴム材料(3)	西村伸, 山辺 純一郎, 藤 原広匡, 湯川宏和
2010.09	第 59 回高分子討論会	NBR 中に溶解した水素の曝露圧力依存性評価への 固体 NMR の利用高圧水素容器用 O リングゴム材料 (3)	藤原広匡, 山辺純一郎, 西 村伸
2010.09	第 59 回高分子討論会	水素貯蔵用ゴムの水素暴露による高次構造変化の FT-IR による検討(2)-高圧水素容器用 O リングゴム 材料(4)	伊藤雄三, 佐藤亮太, 川井 忠智, 藤原広匡, 山辺純一 郎, 西村伸
2010.09	第 59 回高分子討論会	アコースティックエミッション法による高圧水素ガス容 器用ゴムシール材の内部破壊検出-高圧水素容器 用 O リングゴム材料(5)	西村伸, 山辺純一郎, 松本 隆志
2010.10	第 54 回日本学術会議 材料工学連合講演会	高圧水素ガス中で曝露したシール用ゴム材料の内 部き裂発生・進展に及ぼすマイクロ不均一構造の影響	山辺純一郎, 西村伸
2010.10	水素エネルギー先端技 術展 専門技術セミナ ー	高圧ガス用 O リングで生じるプリスタ現象の可視化	佐藤博幸
2010.12	第 22 回エラストマー討 論会	高圧水素ガス環境下におけるゴム O リングのガス透 過挙動	古賀敦, 山辺純一郎, 西 村伸
2010.12	日本ゴム協会 エラストマーの補強研 究分科会	高圧水素ガス環境下におけるシール用ゴム材料の 内部破壊 および水素透過特性に関する研究	山辺純一郎
2011.02	水素先端世界フォーラ ム 2011	Design of hydrogen seal for high pressure hydrogen vessels	西村伸, 山辺純一郎, 泉 義徳, 佐藤博幸, 古賀 敦, 中山純一
2011.02	水素先端世界フォーラ ム 2011	O-ring groove design evaluation influencing on fracture of rubber O-ring by high-pressure hydrogen durability tester	古賀敦, 中山純一, 佐藤 博幸, 山辺純一郎, 西村伸
2011.03	第 60 回理論応用力学 講演会	高圧水素ガスシール用ゴム材料の内部破壊発生限 界	山辺純一郎, 西村伸

(2011 平成 23 年度 31 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.05	日本ゴム協会 ゴム協年次大会	ブリスタによるゴム内部クラックの成長挙動の可視化 評価	古賀敦, 中山純一, 佐藤 博幸, 山辺純一郎, 西村 伸
2011.05	自動車技術会国際会 議, EVTeC'2011	Evaluation on High-Pressure Hydrogen Decompression Failure of Rubber O-ring using Design of Experiments	Atsushi KOGA, Kenichi UCHIDA, Junichiro YAMABE, Shin NISHIMURA
2011.05	2011 年日本材料学会 年次大会	大気中と水素ガス環境中で熱劣化させたカーボンブ ラック充てん硫黄加硫エチレンプロピレンゴムの引張 特性と疲労き裂進展特性	山辺純一郎, 西村伸
2011.05	第 60 回高分子年次大 会	固体 NMR を用いた高圧水素曝露によるアクリロニト リルブタジエンゴムの影響評価 高圧水素容器用 O リングゴム材料(6)	藤原 広匡, 山辺 純一 郎, 西村 伸
2011.05	第 60 回高分子年次大 会	アコースティックエミッション法による高圧水素ガス容 器用ゴムシール材の内部破壊検出—高圧水素容器 用 O リングゴム材料(7)	西村 伸, 渡辺博之, 山 辺 純一郎, 藤原 広匡
2011.05	2011 年日本ゴム協会年 次大会	高圧水素ガスシール用 EPDM の引張特性と疲労き 裂進展特性に及ぼす劣化の影—大気中で熱劣化さ せた試験片の引張特性と疲労き裂進展特性—響	山辺純一郎, 田中史浩, 西村伸
2011.05	2011 年日本ゴム協会年 次大会	水素ガスシール O リング用ゴム材料の熱膨張挙動	西村 伸, 泉義徳, 山辺 純一郎
2011.06	JSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing, ICM&P2011	Crack Growth Behavior of Sealing Rubber under Static Strain in High-Pressure Hydrogen Gas	山辺純一郎, 西村伸
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カ ンファレンス	タグチメソッドによるゴム O リングの高圧水素ガスによ る損傷の感度解析	古賀敦, 山辺純一郎, 西村伸
2011.07	日本機械学会 M&M2011 材料力学カ ンファレンス	高圧ガスによるゴム O リング内部損傷の可視化	山部匡央, 古賀敦, 山辺純一郎, 西村伸

2011.09	日本機械学会国際会議, ATEM'11	Visualizing evaluation on blister generating behavior inside of rubber O-ring under high-pressure gas	Atsushi KOGA, Junichi NAKAYAMA, Hiroyuki SATO, Junichiro YAMABE, Shin NISHIMURA
2011.09	日本機械学会国際会議, ATEM'11	Tensile properties and swelling behavior of sealing rubber materials exposed to high-pressure hydrogen gas	山辺純一郎, 西村伸
2011.09	6th International conference on the Fracture of Polymers, Composites and Adhesives	Study on Decompression Failure of Rubber O-ring for High-pressure Hydrogen Gas Sealing	西村伸, 山辺純一郎
2011.09	第 60 回高分子討論会	水素貯蔵用ゴムの水素曝露による高次構造変化の FT-IR による検討(3) 高圧水素容器用 O リングゴム材料(14)	伊藤雄三, 佐藤亮太, 川井忠智, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2011.09	第 60 回高分子討論会	GC-MS による水素曝露したゴム材料の劣化 高圧水素容器用 O リングゴム材料(13)	甲斐絢也, 西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡
2011.09	第 60 回高分子討論会	高圧水素に曝露したアクリロニトリルゴムの分子運動性評価 高圧水素容器用 O リングゴム材料(12)	小野皓章, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2011.09	第 60 回高分子討論会	高圧水素環境下での NBR の化学構造変化 高圧水素容器用 O リングゴム材料(11)	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2011.09	第 60 回高分子討論会	高圧水素シール用ゴム材料の水素による膨潤挙動 - 高圧水素容器用 O リングゴム材料(10)	西村伸, 山辺純一郎, 泉義徳, 藤原広匡
2011.09	第 60 回高分子討論会	高圧水素曝露にさらされたシール用ゴム材料の NMR による評価高圧水素容器用 O リングゴム材料(9)	藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2011.09	第 60 回高分子討論会	高圧水素シール用ゴム材料の熱膨張挙動 - 高圧水素容器用 O リングゴム材料(8) -	西村伸, 山辺純一郎, 泉義徳
2011.10	NEDO22 年度成果報告会	水素雰囲気下におけるゴム材料の研究	古賀敦, 山部匡央, 中山純一

2011.10	トライボロジー学会国際会議, ITC2011	A visualization study on blister initiation behavior by gas decompression	Atsushi KOGA, Junichi NAKAYAMA, Hiroyuki SATO, Junichiro YAMABE, Shin NISHIMURA
2011.11	ISNMR 2011	Evaluation the mobility of rubber molecules exposed to high-pressure hydrogen gas	小野皓章, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2011.11	ISNMR 2011	Evaluation of hydrogen gas dissolved in rubber material of O-ring for high-pressure Vessels	Hirofusa Fujiwara, Junichiro Yamabe, Shin Nishimura
2011.12	第23回エラストマー討論会	高圧水素曝露したカーボンブラック充填アクリロニトリルブタジエンゴムにおける水素溶解状態の検討	大山恵子, 西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡
2011.12	第23回エラストマー討論会	NMRによる高圧水素貯蔵タンク用ガスシール用ゴム材料の評価	藤原 広匡, 山辺 純一郎, 西村 伸
2011.12	第23回エラストマー討論会	高圧水素ガスシール用 EPDM の引張特性と疲労き裂進展特性に及ぼす劣化の影響—大気中と水素中で熱劣化させた試験片の疲労き裂進展特性の比較—	山辺純一郎, 田中史浩, 藤原広匡, 西村伸
2011.12	第23回エラストマー討論会	高圧水素ガス圧力容器用ゴムシール材料の熱分解における分解生成物の解析	甲斐絢也, 西村伸, 山辺純一郎, 藤原広匡
2011.12	第23回エラストマー討論会	高圧水素シール用ゴム材料のパルス NMR 法による分子運動性評価	小野皓章, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸
2011.12	第23回エラストマー討論会	高圧水素ガスの加減圧サイクルによるゴムOリングのシール耐久性評価	古賀敦, 山辺純一郎, 西村伸
2011.12	11-2NMR研究会	高圧水素ガスシール用ゴム材料中に溶解した水素ガスの評価	藤原 広匡, 山辺 純一郎, 西村 伸

(4)「高圧水素トライボロジー」(水素トライボロジー研究チーム)

(2006 平成 18 年度 1 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.02	International Hydrogen Energy Development Forum	Hydrogen in Tribology	杉村丈一

(2007 平成 19 年度 17 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.09	34th Leeds-Lyon Symposium on Tribology	Novel Acoustic Emission Measurement for Evaluation of Rolling Bearing's Lubricating Condition	間野 大樹, 佐々木 信也, 他
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	金属の摩擦摩耗に及ぼす水素の影響	福田応夫, 杉村丈一
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	水素雰囲気におけるシール用樹脂材料の摩擦・摩耗	澤江義則, 中嶋和弘, 村上輝夫, 杉村丈一, 他
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	軸受鋼の転がり疲れに及ぼす水素雰囲気の影響	田中宏昌, 橋本正明, 杉村丈一
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	各種雰囲気中における SUJ2 及び SUS440C の摩擦特性	橋本正明, 田中宏昌, 杉村丈一
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	各種雰囲気におけるバルブ摺動材料の摩擦摩耗	森田健敬, 杉村丈一, 他
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	水素雰囲気による金属摩擦表面の変化と摺動特性への影響	間野 大樹, 村上 敬, 佐々木 信也, 杉村丈一, 他
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	鋼系材料の各種雰囲気中における摩耗特性の温度依存性	村上 敬, 間野 大樹, 佐々木 信也, 福田応夫, 杉村丈一, 他
2007.09	トライボロジー会議 2007 秋 佐賀	せん断場における潤滑剤バルクの分子動力学シミュレーション	奥村哲也, 他
2007.10	福岡水素エネルギー社会近未来展 2007	水素トライボロジーの課題	澤江義則
2007.10	International Joint Tribology Conference 2007	Effects of Hydrogen Atmosphere on Wear Behavior of PTFE Sliding against Austenitic Stainless Steel	澤江義則, 中嶋和弘, 村上輝夫, 杉村丈一, 他
2007.11	日本機械学会第 15 回機械材料・材料加工技術講演会	水素雰囲気中のフレッチング摩耗試験	和泉直志, 三室日朗, 森田健敬, 杉村丈一
2008.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2008	Behavior of hydrogen in tribosystems	杉村丈一
2008.02	Hydrogen Tribology Workshop	Influences of Hydrogen on Some Pure Metals in Dry Friction	福田応夫
2008.02	Hydrogen Tribology	Development of Tribometer for Measuring in	村上敬

	Workshop	Hydrogen Gas at Low Temperature	
2008.02	Hydrogen Tribology Workshop	Wear and Friction of Polymeric Sealing Material in Hydrogen Enviroment	中嶋和弘
2008.02	Hydrogen Tribology Workshop	Friction Test and Analysis System with Transfer Vessel	田中宏昌

(2008 平成 20 年度 27 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	シール用樹脂材料の摩擦・摩耗に対する高圧水素 曝露の影響	中嶋和宏, 山口晃, 澤 江義則, 村上輝夫, 杉 村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	各種雰囲気における SUS316L の摩擦面上の酸化膜 形成	山神成正, 橋本正明, 田中宏昌, 杉村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	トランスファーベッセルを用いた摩擦試験・表面分析 システム	田中宏昌, 澤江義則, 福田応夫, 山神成正, 森田健敬, 和泉直志, 杉村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	摩擦力と試験片変位の面内分布を用いた水素雰 囲気における摩擦摩耗現象解析	福田応夫, 森田健敬, 杉村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	鋼のトライボロジー特性に及ぼす水素雰 囲気とその純度の影響	福田応夫, 長野清翔, 田中宏昌, 橋本正明, 杉村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	金属の摩擦摩耗に及ぼす水素の影響 その2	福田応夫, 長野清翔, 杉村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	水素雰 囲気中のフレッチング摩耗試験 (第 3 報)	和泉直志, 三室日朗, 森田健敬, 山神成正, 杉村丈一
2008.05	トライボロジー会議 2008 春東京	各種雰 囲気におけるバルブ摺動材料の摩擦摩耗 (第 2 報)	森田健敬, 松隈直樹, 山神成正, 杉村丈一
2008.08	日本機械学会年次大 会	ジルコニウム系合金の水素ガス中におけるトライボ ロジー特性	村上敬, 間野大樹, 佐 々木信也, 杉村丈一
2008.09	35th Leeds-Lyon Symposium on Tribology	Effect of High Pressure Hydrogen Exposure on Wear of PTFE Sliding against Stainless Steel	K.Nakashima, A.yamaguchi, Y.Sawae, T.Murakami, J.Sugimura
2008.09	35th Leeds-Lyon Symposium on Tribology	Behaviour of gas at tribo-interface in hydrogen environment	J.Sugimura, K. Fukuda, H.Tanaka, Y.Sawae, N.Izumi
2008.09	トライボロジー会議 2008 秋 名古屋	水素雰 囲気中におけるジルコニウム-ニオブ系材料 の摩擦・摩耗特性	村上敬, 間野大樹, 金 田克夫, 畑政行, 佐々 木信也, 杉村丈一

2008.09	トライボロジー会議 2008 秋 名古屋	シール用樹脂材料の摩擦・摩耗に対する高圧水素 曝露の影響(第二報)	中嶋和弘, 澤江義則, 村上輝夫, 杉村丈一
2008.09	トライボロジー会議 2008 秋 名古屋	気体分子を溶存した潤滑剤バルクの分子動力学シミュレーション	奥村哲也, 杉村丈一
2008.09	トライボロジー会議 2008 秋 名古屋	PTFE の転移膜形成と摩耗量に及ぼす水素雰囲気 の影響	澤江義則, 中嶋和弘, 土井俊一郎, 山口晃, 村上輝夫, 杉村丈一
2008.09	トライボロジー会議 2008 秋 名古屋	金属の摩擦摩耗に及ぼす水素の影響 その3	福田応夫, 杉村丈一
2008.10	STLE/ASME International Joint Tribology Conference 2008	Sliding properties of pure metals in hydrogen environment	K. Fukuda, J.Sugimura
2008.10	STLE/ASME International Joint Tribology Conference 2008	Wear behavior of polymeric sealing material in gaseous hydrogen	Y.Sawae, A.Yamaguchi, K.Nakashima, T.Murakami, J.Sugimura
2008.10	水素エネルギー先端技 術展 2008 燃料電池・ 水素エネルギー専門技 術セミナー	水素中の摩擦摩耗試験	和泉直志
2008.10	水素エネルギー先端技 術展 2008 燃料電池・ 水素エネルギー専門技 術セミナー	シール用樹脂材料の摩耗に及ぼす高圧水素ガスの 影響	中嶋 和弘, 山口 晃, 澤江 義則, 村上 輝 夫, 杉村 丈一
2008.12	2nd International Conference on Advanced Tribology 2008 (iCAT 2008)	Tribological properties of zirconium alloys in a hydrogen gas atmosphere	T.Murakami, H.Mano, K.Kaneda, S.Sasaki, J.Sugimura
2009.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Sliding friction and wear of DLC coating films in hydrogen environment	H.Tanaka, J.Sugimura
2009.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Tribological properties of Zr and Nb disk specimens in various gas atmospheres	T.Murakami, H.Mano, K.Kaneda, K.Miyake, M.Hata, S.Sasaki, J.Sugimura
2009.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Wear of polymer composite in hydrogen	Y.Sawae, K.Nakashima, D.Yamamoto, Y.Kurono, S.Doï, T.Murakami, J.Sugimura
2009.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Fretting wear tests of steels exposed to high pressure hydrogen	N.Izumi, T.Morita, N.Mimuro, J.Sugimura

2009.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Effects of small amount of water on tribological behaviors in hydrogen	K. Fukuda, M.Hashimoto, J.Sugimura
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Tribosurfaces exposed to high pressure hydrogen	J.Sugimura

(2009 平成 21 年度 32 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.05	トライボロジー会議 2009 春東京	水素雰囲気における鋼の摩擦摩耗	橋本正明,福田応夫,杉村 丈一
2009.05	トライボロジー会議 2009 春東京	水素雰囲気における純鉄の摩擦摩耗	福田応夫,杉村丈一
2009.05	トライボロジー会議 2009 春東京	コバルト基合金の摩擦摩耗に及ぼす雰囲気ガスの影響	森田健敬,福田応夫,杉村 丈一
2009.05	トライボロジー会議 2009 春東京	PTFE 複合材の水素雰囲気における摩耗特性	澤江義則,山本大智,中嶋和弘,黒野好恵,村上輝夫,杉村 丈一
2009.06	2nd European Conference on Tribology (ECOTRIB 2009)	Sliding experiments in hydrogen and surface analysis of DLC coating films	田中宏昌,杉村 丈一
2009.08	THERMEC 2009(International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials)	Friction and wear properties of zirconium and niobium disk specimens in a hydrogen gas atmosphere	Takashi Murakami, Katsuo Kaneda, Hiroki Mano, Masayuki Hata, Shinya Sasaki, Joichi Sugimura
2009.09	36th Leeds-Lyon Symposium on Tribology	Tribological Properties and Trace Impurities in Gaseous Environment	福田応夫,杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	New Challenges to Tribology in Hydrogen	杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Friction and Wear of Ferrous Materials in Hydrogen Gas Environment	福田応夫,杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Wear Characteristics of PTFE and PTFE Based Composites in Gaseous Hydrogen	澤江義則,山本大智,中嶋和弘,黒野好恵,土井俊一郎,村上輝夫,杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Fretting wear tests of steels in hydrogen gas environment	和泉直志,三室日朗,森田健敬,杉村 丈一

2009.09	World Tribology Congress 2009	Evaluation of tribo-coatings in hydrogen atmosphere	間野大樹,村上敬,畑政行,佐々木信也,杉村丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Influence of water vapor in hydrogen gas on the friction and wear of cobalt-based alloy	森田健敬,岩尾拓也,福田応夫,杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Simple Experiment on Permeation of Hydrogen into Steel in Contact	大津 健史,田中宏昌,杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Sliding Friction and Wear of DLC Coating Films in Hydrogen Environment	田中宏昌,杉村 丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Effect of Moisture Content on Wear of PTFE in Hydrogen	中嶋和弘,黒野好恵,澤江義則,村上輝夫,杉村丈一
2009.09	World Tribology Congress 2009	Molecular dynamics simulations of dissolved hydrogen molecules under shear condition	奥村哲也,杉村 丈一
2009.10	日本機械学会長崎講演会	水素雰囲気におけるPTFEの摩擦・摩耗特性に及ぼす転移膜形成の影響	中嶋和弘,野田博敬,澤江義則,黒野好恵,Carlos Morillo,村上輝夫,杉村 丈一
2009.10	日本機械学会長崎講演会	水素曝露された材料の表面特性と摩擦挙動	坂井伸朗,松尾智弘,澤江義則,中嶋和弘,村上輝夫,杉村 丈一
2009.10	日本機械学会長崎講演会	PTFE 複合材の水素雰囲気における摩耗特性	澤江義則,山本大智,中嶋和弘,黒野好恵,土井俊一郎,村上輝夫,杉村丈一
2009.10	日本機械学会長崎講演会	Co 基合金の摩擦摩耗に及ぼす各種雰囲気気体としゅう動条件の影響	森田健敬,長野清翔,杉村 丈一
2009.10	日本機械学会長崎講演会	水素雰囲気中微量不純物が SUS316L の摩擦摩耗に与える影響	福田応夫,松尾幸浩,三室日朗,杉村 丈一
2009.10	日本機械学会長崎講演会	Oリングの水素雰囲気中微小振幅摩耗試験	和泉直志,九十九慧輔,森田健敬,杉村 丈一
2009.10	2009 STLE/ASME International Joint Tribology Conference	Effects of High Pressure Hydrogen on Wear of PTFE and PTFE Composite	澤江義則,中嶋和弘,土井俊一郎,村上輝夫,杉村 丈一
2010.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2010	Progress in Hydrogen Tribology in Hydrogenius	Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Effects of exposure to high pressure hydrogen on DLC films	Hiroyoshi Tanaka, Takehiro Morita, Yoshinori Sawae and Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Evaluation of tribo-coatings in hydrogen atmosphere	Shinya Sasaki, Takashi Murakami, Koji Miyake,

			Hiroki Mano, Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Influence of high-pressure hydrogen gas on microstructure of metallic surface analyzed by AFM and SEM	Nobuo Sakai, Tomohiro Matsuo, Yoshinori Sawae, Hiroyoshi Tanaka, Teruo Murakami, Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Chemical characterization of polymer transfer film formed on stainless steel surface in hydrogen	Carlos Morillo, Yamamoto Daichi, Yoshie Kurono, Kazuhiro Nakashima, Yoshinori Sawae, Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Permeation of hydrogen into steels in simple contact experiments	Takefumi Otsu, Hiroyoshi Tanaka, Katsu Ohnishi, Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Tribology in a practical hydrogen environment - Influence and control of trace impurities -	Kanao Fukuda, Joichi Sugimura
2010.02	Hydrogenius Tribology Symposium	Experimental characterization of friction and wear in gaseous hydrogen at pressure up to 40 MPa	Yoshinori Sawae, Eiichi Miyakoshi, Kanao Fukuda, Shunichiro Doi, Hideki Watanabe, Kazuhiro Nakashima, Yoshie Kurono, Joichi Sugimura

(2010 平成 22 年度 32 件)

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010.04	6th International Symposium on Fretting Fatigue	Fretting Wear Tests of Steels in a Hydrogen Gas Environment	和泉直志, 三室日朗, 森田健敬, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	水素雰囲気中のフレッチング摩耗試験(第 4 報)	和泉直志, 石崎敬之, 森田健敬, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	Oリングの水素雰囲気中微小振幅摩耗試験	和泉直志, 九十九慧輔, 森田健敬, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	実用水素ガス雰囲気想定した金属の摩擦摩耗データ	福田応夫, 森田健敬, 田中宏昌, 橋本正明, 三室日朗, 杉村 丈一

2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	軸受鋼の高圧水素雰囲気における摩擦摩耗	福田応夫, 澤江義則, 田中宏昌, 宮越栄一, 橋本正明, 渡辺秀樹, 土井俊一郎, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	ゴム対オーステナイト系ステンレス鋼の各種雰囲気におけるすべり摩擦	福田応夫, 松尾幸浩, 黒野好恵, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	高圧水素ガス雰囲気におけるシール用樹脂材料の摩擦・摩耗評価	澤江義則, 福田応夫, 宮越栄一, 土井俊一郎, 渡邊秀樹, 黒野好恵, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	ステライト 6B の摩擦摩耗に及ぼす水素雰囲気の影響	森田健敬, 長野清翔, 田中宏昌, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	高圧水素ガス雰囲気が鋼表面に及ぼす影響の AFM による評価	坂井伸朗, 松尾智弘, 田中宏昌, 澤江義則, 村上輝夫, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	高圧水素ガス雰囲気が鋼の表面特性に及ぼす影響	田中宏昌, 坂井伸朗, 黒野好恵, 澤江義則, 福田応夫, 杉村丈一
2010.05	トライボロジー会議 2010 春 東京	昇温脱離分析法による軸受鋼新生面への水素侵入挙動観察	田中宏昌, 谷本啓, 杉村丈一
2010.06	14th Nordic Symposium on Tribology - Nordtrib 2010	Behaviours of tribosurfaces exposed to high pressure hydrogen	杉村丈一, 森田健敬, 田中宏昌, 澤江義則, 中嶋和弘, 坂井伸朗, 和泉直志, 福田応夫
2010.09	トライボロジー会議 2010 秋 福井	Tribological Characteristics of PTFE and PTFE Composite in High Pressure Hydrogen Gas	澤江義則, 宮越栄一, 福田応夫, 土井俊一郎, 渡邊秀樹, 黒野好恵, 杉村丈一
2010.09	トライボロジー会議 2010 秋 福井	金属の摩擦摩耗に及ぼす水素の影響 その4	福田応夫, 森田健敬, 杉村丈一
2010.09	トライボロジー会議 2010 秋 福井	水素雰囲気におけるトライボケミカル反応	福田応夫, 秋吉進典, 杉村丈一
2010.09	トライボロジー会議 2010 秋 福井	ステライト 6B と SUS316 の摩擦摩耗に及ぼす酸素濃度と水分の影響	森田健敬, 田中宏昌, 杉村丈一
2010.09	水素エネルギー先端技術展 2010 九大・産総	高圧水素に曝露した鋼表面の AFM による評価	坂井伸朗, 田中宏昌, 澤江義則,

	研・NEDO 専門セミナー		福田応夫, 村上輝夫, 杉村丈一
2010.09	37th Leeds-Lyon Symposium on Tribology	Friction and wear of some alloys in gaseous hydrogen	杉村丈一, 森田健敬, 田中宏昌, 福田応夫
2010.09	日本機械学会 2010 年度年次大会	PTFE の摩擦・摩耗に及ぼす水素雰囲気の影響	澤江義則, 野田博敬, 田中宏昌, 黒野好恵, 中嶋和弘, 村上輝夫, 杉村丈一
2010.10	STLE/ASME 2010 International Joint Tribology Conference	Tribological Characterization of Polymeric Sealing Materials in High Pressure Hydrogen Gas	澤江義則, 福田応夫, 宮越栄一, 土井俊一郎, 渡邊秀樹, 中嶋和弘, 杉村丈一
2010.10	STLE/ASME 2010 International Joint Tribology Conference	Tribological Properties of Austenitic Stainless Steel in Pressurized	福田応夫, 澤江義則, 宮越栄一, 橋本正明, 田中宏昌, 渡邊秀樹, 土井俊一郎, 杉村丈一
2010.11	Advance Forum on Tribology 2010, Morioka	Progress in tribology in hydrogen gas	杉村丈一
2010.12	International Tribology Conference - Asiatrib 2010	Effects of high pressure hydrogen gas on surface properties of steels	田中宏昌, 坂井伸朗, 澤江義則, 杉村丈一
2010.12	International Tribology Conference - Asiatrib 2010	Friction and Wear of PTFE and PTFE composites in High Pressure Hydrogen Gas	澤江義則, 福田応夫, 宮越栄一, 土井俊一郎, 渡邊秀樹, 黒野好恵, 杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Progress in Tribology Researches at Hydrogenius	杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Hydrogen Tribology Database-Triboatlas	和泉直志, 坂井伸朗, 黒野好恵, 杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Observation of Hydrogen Permeation into Fresh Bearing Steel Surface by Thermal Desorption Spectrometry	田中宏昌, 谷本啓, 杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Effect of Hydrogen Environment on Friction and Wear of PTFE	澤江義則, 野田博敬, 田中宏昌, 黒野好恵, 中嶋和弘, 村上輝夫, Carlos Morillo, 杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Effects of Oxygen Concentration and Water Content on Friction and Wear of Stellite 6B and SUS316	森田健敬, 田中宏昌, 杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Effects of high pressure hydrogen gas on surface properties of steels	田中宏昌, 坂井伸朗, 澤江義則, 杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius	Tribological Characterization of Polymeric Sealing	澤江義則, 宮越栄一, 福

	Tribology Symposium	Materials in High Pressure Hydrogen Gas	田応夫,土井俊一郎,渡邊秀樹,黒野好恵,杉村丈一
2011.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium	Tribo-chemical Reaction in Hydrogen Environment	福田応夫,秋吉進典,杉村丈一

(2011 平成 23 年度 37 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011.04	The Second Advanced Forum on Tribology 2011	Friction and wear of polymeric sealing materials in hydrogen	杉村 丈一, 澤江義則, 中嶋和弘, 森田健敬, 福田応夫
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	水素雰囲気下における転がり疲れに及ぼす温度の影響	田中宏昌, 諸藤達彦, 橋本正明, 杉村 丈一
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	樹脂材料とステライト 6B の水素雰囲気における摩擦摩耗	森田健敬, 佐藤文則, 澤江義則, 杉村 丈一
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	水素雰囲気におけるステンレス表面への PTFE 転移膜形成に及ぼす不動態膜の影響	澤江義則, 野田博敬, 田中宏昌, 黒野好恵, 中嶋和弘, 杉村 丈一
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	シール用樹脂材料の水素雰囲気における摩擦摩耗特性に及ぼすガス中の水分量の影響	中嶋 和弘, 澤江 義則, 黒野 好恵, 村上 輝夫, Carlos Morillo, 杉村 丈一
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	水素雰囲気におけるトライボケミカル反応 その2	福田応夫, 秋吉進典, 杉村 丈一
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	水素雰囲気における純鉄の摩擦摩耗 その2	福田応夫, 田中宏昌, 黒野好恵, 杉村 丈一
2011.05	トライボロジー会議 2011 春 東京	繰返し接触に伴う表面膜形成と組織変化に及ぼす水素雰囲気の影響	田中宏昌, 谷本啓, 若松裕太, 大津健史
2011.08	6th China International Symposium on Tribology	Tribology in High Pressure Hydrogen Gas	杉村 丈一
2011.09	38th Leeds-Lyon Symposium on Tribology	Oxidation of steel surface under repeated contact in hydrogen	田中宏昌, 谷本啓, 大津健史, 橋本正明, 杉村丈一

2011.10	ASME/STLE 2011 International Joint Tribology Conference	Friction and Wear of Bronze Filled PTFE and Graphite Filled PTFE in 40 MPa Hydrogen Gas	澤江義則, 宮越栄一, 土 井俊一郎, 渡邊秀樹, 黒野好恵, 杉村 丈一
2011.10	ASME/STLE 2011 International Joint Tribology Conference	Influences of Gases on the Tribological Properties of Pure Iron	福田応夫, 杉村 丈一
2011.10	ASME/STLE 2011 International Joint Tribology Conference	Surface Film Formation and Hydrogen Permeation of Austenitic Stainless Steel Under High Pressure Hydrogen	田中宏昌, 澤江義則, 杉村 丈一
2011.10	ASME/STLE 2011 International Joint Tribology Conference	Wear Mechanisms of PTFE in Humidified Hydrogen Gas	中嶋和弘, カルロスモリ ジヨ, 黒野好恵, 澤江義 則, 杉村 丈一
2011.11	International Tribology Conference, Hiroshima 2011	Effects of Water Concentration and Sliding Conditions on Friction and Wear of Some Alloys in Hydrogen	森田健敬, 田中宏昌, 澤 江義則, 杉村 丈一
2011.11	International Tribology Conference, Hiroshima 2011	Influences of Trace Water in a Hydrogen Environment on the Tribological Properties of Pure Iron	福田応夫, 杉村 丈一
2011.11	International Tribology Conference, Hiroshima 2011	Friction and Wear of PTFE and PTFE Composites in 40 MPa Hydrogen Gas	澤江義則, 宮越栄一, 土 井俊一郎, 渡邊秀樹, 黒野好恵, 杉村 丈一
2011.11	International Tribology Conference, Hiroshima 2011	Effect of Temperature on Surface Initiated Rolling Contact Fatigue in Hydrogen Environment	田中宏昌, 諸藤達彦, 橋 本正明, 杉村 丈一
2011.11	International Tribology Conference, Hiroshima 2011	Effect of Humidity on Wear Properties of PTFE in Hydrogen Gas	中嶋和弘, カルロスモリ ジヨ, 黒野好恵, 澤江義 則, 村上輝夫, 杉村 丈 一
2011.11	第41回石油・石油化学 討論会(山口大会)	水素雰囲気におけるトライボ界面の 諸現象	杉村丈一
2011.11	21st International Conference on Fluid Sealing	Effects of metal counter surfaces on friction and wear of polymeric seal materials in hydrogen	森田健敬, 佐藤文則, 澤 江義則, 杉村丈一

2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会・講演会	摩擦力顕微鏡により捉えられた軸受鋼表面に対する高圧水素ガスの影響	坂井伸朗, 今関裕司, 田中宏昌, 宮越栄一, 澤江義則, 村上輝夫, 杉村丈一
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会・講演会	水素雰囲気下におけるグリース潤滑下の転がり疲れ	田中宏昌, 大原祐樹, 橋本正明, 杉村 丈一
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会・講演会	水素雰囲気における PTFE 複合材の摩擦摩耗に及ぼす充てん材の影響	澤江義則, 日高泉展, 森田健敬, 杉村 丈一, 宮越栄一, 黒野好恵, 村上輝夫, 杉村 丈一
2012.3	日本機械学会九州支部第65期総会・講演会	樹脂/金属の滑り接触における表面膜形成に及ぼす雰囲気気体と材料の影響	森田健敬, 鍋島瑞貴, 黒野好恵, 澤江義則, 杉村丈一
2011.11	水素エネルギー先端技術展 2011 九大・産総研・NEDO 専門セミナー	合金摺動材料のトライボロジー特性に及ぼす水素雰囲気の影響	森田健敬
2012.2	第81回メンテナンス・トライボロジー研究会	鋼表面における酸化膜形成と水素侵入	田中宏昌
2012.2	第81回メンテナンス・トライボロジー研究会	水素トライボロジー研究の概要	杉村丈一
2012.2	第81回メンテナンス・トライボロジー研究会	PTFE複合材の水素トライボロジー特性	澤江義則
2012.2	2012 Hydrogenius Tribology Symposium	Influences of Ultra Pure Gases on the Tribological Properties of Pure Iron	福田応夫, 杉村丈一
2012.2	2012 Hydrogenius Tribology Symposium	Friction and wear of Bronze Filled PTFE and Graphite Filled PTFE in 40 MPa Hydrogen Gas	澤江義則, 宮越栄一, 土井俊一郎, 渡邊秀樹, 黒野好恵, 杉村 丈一
2012.2	2012 Hydrogenius Tribology Symposium	Surface Film Formation and Hydrogen Permeation of Austenitic Stainless Steel under High Pressure Hydrogen	田中宏昌, 澤江義則, 杉村 丈一

2012.2	2012 Hydrogenius Tribology Symposium	Effects of Water Concentration and Sliding Conditions on Friction and Wear of Some Alloys in Hydrogen	森田健敬, 田中宏昌, 澤江義則, 杉村 丈一
2012.2	2012 Hydrogenius Tribology Symposium	Effect of Humidity in Hydrogen Gas on PTFE Transferred Film Formation	中嶋和弘, 黒野好恵, 澤江義則, 村上輝夫, 杉村丈一
2012.2	2012 Hydrogenius Tribology Symposium	Progress in Tribology Researches at Hydrogenius	杉村丈一
2012.3	第8回国際水素・燃料電池展 アカデミックフォーラム	水素ガス中のトライボロジーの諸現象	杉村丈一
2012.3	SATELLITE KICK-OFF SYMPOSIUM	Oxidation at tribo-interface under repeated contact in hydrogen	杉村丈一

(5)「材料内の水素挙動シミュレーション研究」(水素シミュレーション研究チーム)

(2006 平成 18 年度 5 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.01	International Seminar “Simulation Technology towards the Hydrogen Use World” 2007	Finite Element Analysis of Hydrogen Diffusion in Materials and Related Topics	Hiroshi KANAYAMA (Kyushu Univ.)
2007.02	International Hydrogen Energy Development Forum	Applications of Molecular Dynamics Method to Strength of Materials (Toward Studying Hydrogen Effects)	Noriyuki MIYAZAKI, Ryouyuke MATSUMOTO, Kenji NISHIMURA, et.al.
2007.03	第56回理論応用力学講演会	安定化有限要素法を用いた移流拡散現象の数値解析	金山寛, 他
2007.03	日本機械学会関西支部第82期定時総会講演会	分子動力学法による水素が α 鉄中のき裂進展挙動に与える影響の検討	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, 他
2007.03	日本機械学会関西支部第82期定時総会講演会	有限要素法によるき裂まわりの応力-水素拡散連成シミュレーション	松本龍介, 宮崎則幸, 他

(2007 平成 19 年度 30 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2007.05	日本材料学会第12回分子動力学シンポジウム	原子モデルによる α 鉄中の転位の可動性に及ぼす水素の影響	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸, 他

2007.06	IIASA-Kyoto University The Forth Joint International Seminar on Applied Analysis and Synthesis of Complex Systems	Molecular Dynamics Simulation of Hydrogen Related Fracture of Iron	Ryosuke MATSUMOTO
2007.06	日本材料学会塑性力学分科会(主催)・日本機械学会計算力学部門 A-TS01-15 研究会(協賛), 個々の転位挙動に基づく材料強度評価のためのマルチスケール解析	金属材料の水素による強度劣化機構に関する原子論的・転位運動論的検討	松本龍介
2007.06	日本機械学会関西支部材料力学談話会	原子モデルを用いた金属材料の破壊挙動解析(水素脆化機構および鉄ナノ多結晶体の破壊挙動についての検討)	松本龍介
2007.07	9th US National Congress on Computational Mechanics	Effects of Hydrogen Atom on Dislocation Mobility in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI
2007.10	日本機械学会九州支部・四国支部合同企画 沖縄講演会講演論文集	ADVENTURE システムによる CFRP 圧力容器の 3 次元弾塑性有限要素解析	荻野正雄, 塩谷隆二, 金山寛河合浩志, 他
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	分子動力学法を用いた α 鉄中の刃状転位近傍の水素拡散挙動解析	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2007.10	日本機械学会 M&M2007 材料力学カンファレンス	原子モデルを用いた水素による滑り面での破壊機構に関する考察	松本龍介, 武富紳也, 松本壮平, 宮崎則幸
2007.11	日本機械学会第 20 回 計算力学講演会 (CMD2007)	材料内の水素拡散の有限要素解析	金山 寛, 荻野 正雄, 塩谷 隆二
2007.11	日本機械学会第 20 回 計算力学講演会	水素と転位の相互作用が bcc 鉄単結晶中のモード I き裂進展に与える影響の検討	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, 他
2007.11	日本機械学会第 20 回 計算力学講演会(ポスター)	き裂に繰り返し負荷が作用するときの非定常水素拡散解析	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, 他
2007.11	日本機械学会第 20 回 計算力学講演会	第一原理計算による Fe と Fe-H 系の基本物性と原子間ポテンシャルの評価	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸, 他
2007.12	APCOM'07 in	Numerical Analysis of Hydrogen Diffusion Problems	Hiroshi KANAYAMA,

	conjunction with EPMESC XI, Session MS10-1 “Simulation Technology towards the Hydrogen Use World”, 2007	in Materials Using the Finite Element Method	Masao OGINO and Ryuji SHIOYA ,et.al.
2007.12	APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Session MS10-1 “Simulation Technology towards the Hydrogen Use World”, 2007	Modeling of the Hydrostatic Stress and Equivalent Plastic Strain Distributions around the Blunting Crack Tip in Impure Iron	Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi KAWAI and Hiroshi KANAYAMA, et.al.
2007.12	APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Session MS10-1 “Simulation Technology towards the Hydrogen Use World”, 2007	Unsteady Hydrogen Diffusion-Elastoplastic Coupling Analysis near the Crack Tip during Cyclic Loading	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI ,et.al.
2007.12	APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Session MS31-4, 2007	Atomistic Study of Hydrogen Effects on the Fracture Behavior of Bcc-Fe	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI, Noriyuki MIYAZAKI , et.al.
2007.12	APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Session MS10-2 “Simulation Technology towards the Hydrogen Use World”, 2007	Molecular Dynamics Study of Hydrogen Diffusion around an Edge Dislocation in Bcc-Fe	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI
2007.12	APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Session MS10-2 “Simulation Technology towards the Hydrogen Use World”, 2007	First Principle Estimation of the Basic Physical Properties of Fe and Fe-H Systems and Evaluation of Interatomic Potentials	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI, et.al.
2007.12	APCOM’07 in conjunction with EPMESC XI, Session MS10-2 “Simulation Technology towards the	Molecular Dynamics Simulations Effects of Hydrogen on Mode I Crack Growth Behavior in Alpha-Iron Single Crystals	Sohei MATSUMOTO, Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI

	Hydrogen Use World”, 2007		
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008	Hydrogen Diffusion Analysis in Materials	Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO and Ryuji SHIOYA ,et.al.
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008	Simulation of Hydrogen-Plasticity Interactions. The Effect of Microstructure	Jean-Marc OLIVE, Hiroshi KANAYAMA , et.al.
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008	A CFRP Tank Simulation for High Pressure Hydrogen Gas Storage	Ryuji SHIOYA, Masao OGINO, Hiroshi KAWAI
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008	Dynamic Analysis of H:Fe by Molecular, Dynamics and First Principal Calculation	K.KAKIMOTO, et.al.
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008, Fukuoka	Introduction of MD Research at AIST	Kenji NISHIMURA
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008, Fukuoka	Molecular Dynamics Study of Hydrogen Effects on Mode I Crack Growth Behavior in Bcc-Fe	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIZAKI
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008, Fukuoka	Transient Hydrogen Diffusion Analyses with Crack-tip Plasticity	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI,et.al.
2008.02	International Hydrogen Energy Development Workshop 2008, Fukuoka	Molecular Statics Study of Hydrogen Occupation Sites around a (112)[111] Edge Dislocation in Bcc-Fe	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI
2008.03	International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES'08), Honolulu	Application of Computational Mechanics to Hydrogen Embrittlement	Noriyuki MIYAZAKI, Ryosuke MATSUMOTO and Shinya TAKETOMI

2008.03	International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES'08), Honolulu,	Molecular Dynamics Study of Hydrogen Effects on the Fracture Behavior of bcc-Fe Single Crystals	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI, et.al.
2008.03	International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES'08)	Molecular Dynamics Study of Hydrogen Diffusion around a (112)[111] Edge Dislocation in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO, Noriyuki MIYAZAKI

(2008 平成 20 年度 27 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008.04	第 52 回材料強度と破壊総合シンポジウム	水素脆化現象評価に関わるナノからマクロレベルシミュレーション	宮崎則幸, 松本龍介, 武富紳也
2008.05	第 13 回日本計算工学講演会	材料内水素拡散現象の有限要素解析	金山寛, 塩谷隆二, 荻野正雄, 富田隆浩, 中川拓也
2008.05	第 13 回分子動力学シンポジウム	き裂先端まわりの水素分布と転位射出応力拡大係数に関する原子モデルによる検討	武富紳也, 松本龍介, 松本壮平, 宮崎則幸
2008.05	第 13 回分子動力学シンポジウム	原子モデルにもとづく刃状転位芯近傍水素トラップエネルギー解析	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2008.05	第 13 回分子動力学シンポジウム	弾性ひずみによる水素トラップに関する検討 (転位芯まわりとき裂先端での水素濃度分布)	松本龍介, 井上義規, 武富紳也, 松本壮平, 宮崎則幸
2008.05	第 13 回分子動力学シンポジウム	粒界特性が水素拡散挙動に与える影響の分子動力学解析	陸茉莉花, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2008.05	第 13 回分子動力学シンポジウム	第一原理計算による弾性ひずみが水素の溶解熱に及ぼす影響の評価	井上義規, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2008.06	8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in Conjunction with 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy	Atomistic Study of Interaction between Hydrogen Atoms and Dislocations around Mode I Crack Tip	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI, Sohei MATSUMOTO, Yoshinori INOUE and Noriyuki MIYAZAKI

2008.06	8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in Conjunction with 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy	Effect of Hydrogen on (110)[111] Edge Dislocation Mobility in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI
2008.06	8 th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in Conjunction with 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy	Finite Element Analysis of Hydrogen Diffusion Problems in Materials	Hiroshi KANAYAMA, Stephane NDONG-MEFANE, Masao OGINO, and Takuya NAKAGAWA
2008.06	8 th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in Conjunction with 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy	Molecular Dynamics Study on Dislocation Activities in Iron Specimens Including Hydrogen	Kenji NISHIMURA, Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI and Noriyuki MIYAZAKI
2008.06	8 th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in Conjunction with 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Venice, Italy	Numerical Simulation of the Crack Tip Elastic-Plastic State	Reza Miresmaeili, Masao OginO, Ryuji Shioya, Hiroshi Kawai, Hiroshi KANAYAMA
2008.09	2008 International Hydrogen Conference Wyoming USA, September (2008)	Atomistic Study of Hydrogen Diffusion Around a Dislocation in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI

2008.09	2008 International Hydrogen Conference Wyoming USA, September (2008)	Estimation of Hydrogen Distribution Around Dislocations Based on First Principle Calculations	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI, Yoshinori INOUE and Noriyuki MIYAZAKI
2008.09	2008 International Hydrogen Conference, Wyoming USA, September (2008)	Finite Element Analysis of Hydrogen Diffusion in Materials	Hiroshi KANAYAMA, Stephane NDONG-MEFANE, Masao OGINO
2008.10	水素エネルギー先端技術展 2008 燃料電池・水素エネルギー専門技術セミナー	材料内の水素拡散現象の数値解析	金山寛
2008.11	日本機械学会第 21 回 計算力学講演会	Phase-field 法を用いたステンレス鋼のマルテンサイト変態下での水素拡散解析	小竹広和, 高木知弘, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2008.11	日本機械学会第 21 回 計算力学講演会	α 鉄における $\{112\}\langle 111 \rangle$ 刃状転位射出応力拡大係数に及ぼす水素の影響の考察	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2008.11	日本機械学会第 21 回 計算力学講演会	原子モデルを用いた格子欠陥への水素トラップ状態に関する検討	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2008.11	日本機械学会第 21 回 計算力学講演会	原子モデルを用いた粒界特性と水素トラップ量の関係の検討	陸茉莉花, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2008.11	日本機械学会第 21 回 計算力学講演会	第一原理計算と原子間ポテンシャルを用いた応力特異点まわりの水素トラップエネルギー分布の評価	井上義規, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2008.11	日本機械学会第 21 回 計算力学講演会	材料内の水素拡散の有限要素解析	金山 寛, NDONG-MEFANE BORIS STEPHANE, 中川 拓也, 荻野 正雄
2008.12	5th International Symposium on Advanced Fluid Solid Science and Technology in Experimental Mechanics	Atomistic Simulations of Hydrogen Embrittlement	Noriyuki MIYAZAKI, Ryosuke MATSUMOTO and Shinya TAKETOMI
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Computational Mechanics Simulations for Hydrogen Embrittlement : Nano to Macro-Scale Simulations	Noriyuki MIYAZAKI, Ryosuke MATSUMOTO and Shinya TAKETOMI
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Reconsideration of the McNabb and Foster Formulation for Hydrogen Diffusion in Materials	Hiroshi KANAYAMA, Stephane Boris NDONG-MEFANE, Reza MIRESMAEILI and Masao OGINO

2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Interaction between Hydrogen and Lattice Defects in Alpha Iron	Ryosuke MATSUMOTO, Shinya TAKETOMI, Yoshinori INOUE and Marika RIKU
2009.02	International Hydrogen Energy Development Forum 2009	Effect of Hydrogen on Edge Dislocation Emission from Mode II Crack Tip in Alpha Iron	Shinya TAKETOMI, Ryosuke MATSUMOTO and Noriyuki MIYAZAKI

(2009 平成 21 年度 38 件)

発表年月	発表媒体	発表タイトル	発表者
2009.05	第 14 回 計算工学講演会	材料内水素拡散現象の有限要素法による双方向連成解析	小柿啓嗣, 中川拓也, 荻野正雄, 金山寛
2009.05	第 14 回分子動力学シンポジウム	電子・原子レベル解析を用いた格子欠陥の水素トラップエネルギーの評価	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.05	第 14 回分子動力学シンポジウム	第一原理計算を用いた AI 中の格子欠陥と水素の相互作用エネルギーの評価	榎本龍博, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.05	第 14 回分子動力学シンポジウム	水素環境下の α 鉄における粒界凝集エネルギーに関する原子モデル解析	陸茉莉花, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.05	第 14 回分子動力学シンポジウム	水素による原子空孔の増殖機構に関する原子モデル解析	西口直, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.05	第 14 回分子動力学シンポジウム	α 鉄中の転位及び水素の運動に要するエネルギー障壁に関する研究	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.06	応用解析セミナー	流れ問題のための特性曲線有限要素スキームとその応用	野津裕史
2009.06	日本材料強度学会平成 20 年度総会学術講演会・シンポジウム	α 鉄中の転位及び水素の競合運動に関する原子モデルを用いた研究	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.07	10th US National Congress on Computational Mechanics	A Coupled Elastoplastic-Transient Hydrogen Diffusion Analysis to Simulate the Onset of Necking in Tension by Using the Finite Element Method	Reza Miresmaeili, 荻野正雄, 中川拓也, 金山寛
2009.07	10th US National Congress on Computational Mechanics	Atomistic Study of Hydrogen Effect on Cohesive Energy of Grain Boundaries in Alpha Iron	松本龍介, 陸茉莉花, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.07	10th US National Congress on Computational Mechanics	Atomistic Study of the Effect of Hydrogen on Dislocation Emission from Crack Tip in Alpha Iron	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.07	12th International Conference on Fracture	Atomistic Study of Hydrogen Distribution around Lattice Defects and Defect Energies under Hydrogen Environment	松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸

2009.07	12th International Conference on Fracture	Hydrogen Effect on Dislocation Emission from a Crack Tip in Alpha Iron	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.07	12th International Conference on Fracture	Transient Hydrogen Diffusion Analyses of a Surface Crack in a Three-Dimensional Body	宮崎則幸, 小竹広和, 松本龍介, 武富紳也
2009.07	偏微分方程式セミナー	流れ問題のための特性曲線有限要素スキームと材料内の水素拡散問題への応用	野津裕史
2009.09	応用数学会	保存型特性曲線有限要素法を用いた多結晶金属内の水素拡散解析	野津裕史, 田端正久, Reza Miresmaeili I, Nicolas Saintier, Jean-Marc Olive, 金山寛
2009.09	産業技術数理研究センター第7回ワークショップ 水素利用社会の実現に向けた数値解析からの貢献	応力誘起マルテンサイト層を含むオーステナイト系ステンレス鋼内の水素拡散有限要素解析	野津裕史, Reza Miresmaeili, 中川拓也, Jean-Marc Olive, 荻野正雄, 金山寛
2009.09	産業技術数理研究センター第7回ワークショップ 水素利用社会の実現に向けた数値解析からの貢献	A One-Way Coupled Crystalline Plasticity-Transient Hydrogen Diffusion Analysis to Simulate the Effect of the Heterogeneity of Stress-Strain States on Hydrogen Distributions in Microstructure	Reza Miresmaeili, Nicolas Saintier, 野津裕史, Jean-Marc Olive, 金山寛
2009.09	産業技術数理研究センター第7回ワークショップ 水素利用社会の実現に向けた数値解析からの貢献	水素が空孔の生成と拡散挙動に及ぼす影響に関する原子モデル解析	松本龍介, 西口直, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.09	産業技術数理研究センター第7回ワークショップ 水素利用社会の実現に向けた数値解析からの貢献	α 鉄中の刃状転位と水素の相互作用に関する原子モデルを用いた研究	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.10	水素エネルギー先端技術展 九大・産総研 専門セミナー 九州大学・産総研における最新の研究動向	材料内の水素拡散を考慮した弾塑性解析	金山寛
2009.10	水素エネルギー先端技術展 九大・産総研 専門セミナー 九州大学・産総研における最新の研究動向	応力誘起マルテンサイト層を含むオーステナイト系ステンレス鋼内の水素拡散解析	野津裕史, Reza Miresmaeili, Nicolas Saintier, Jean-Marc Olive, 金山寛

2009.10	第22回計算力学講演会	A One-Way Coupled Crystalline Plasticity-Transient Hydrogen Diffusion Analysis to Simulate the Effect of the Heterogeneity of Stress-Strain States on Hydrogen Distributions in Microstructure	Reza Miresmaeili, Nicolas Saintier, 野津 裕史, Jean-Mark Olive, 金山寛
2009.10	第22回計算力学講演会	A Finite Element Analysis of Hydrogen Diffusion in a Stainless Steel Containing Strain-Induced Martensite	Reza Miresmaeili, 野津 裕史, 中川拓也, Jean-Mark OLIVE, 荻野正雄, 金山寛
2009.10	日本機械学会 第22回計算力学講演会	繰り返し荷重下における材料内の水素拡散問題の有限要素解析	野津裕史, 荻野正雄, 金山寛
2009.10	日本機械学会第22回計算力学講演会	水素が α -Fe 中の空孔濃度に及ぼす影響に関する原子モデル解析	西口直, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.10	日本機械学会第22回計算力学講演会	第一原理計算に基づく水素ガス環境下におけるAl中の格子欠陥まわりの水素占有率の評価	榎本龍博, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.10	日本機械学会第22回計算力学講演会	水素ガス環境下の α 鉄における粒界凝集エネルギーに関する電子・原子シミュレーション	陸茉莉花, 松本龍介, 武富紳也, 宮崎則幸
2009.10	日本機械学会第22回計算力学講演会	α 鉄における刃状転位芯近傍の水素拡散障壁に関する検討	武富紳也, 松本龍介, 宮崎則幸
2009.11	加速法ワークショップ	材料内の水素拡散現象に現れる制約付き最小化問題の解法について	野津裕史, Reza Miresmaeili, 中川拓也, Jean-Marc Olive, 荻野正雄, 金山寛
2009.11	研究集会:「数値解析の現状と展望」-九州大学数値解析セミナーとその協力者からの発信-	特性曲線有限要素法と材料内の水素拡散問題	野津裕史, Reza Miresmaeili, Nicolas Saintier, Jean-Marc Olive, 金山寛
2010.02	研究集会「数値シミュレーションの理論と実践」	材料内の水素拡散問題への特性曲線有限要素法の適用	野津裕史, Reza Miresmaeili, 荻野正雄, 金山寛
2010.02	水素先端世界フォーラム	Hydrogen Diffusion Analysis in an Austenitic Stainless Steel Including a Strain Induced Martensite	野津裕史
2010.02	水素先端世界フォーラム	One-Way Coupled Crystal Plasticity-Hydrogen Diffusion Analysis to Simulate the Effects of Stress and Strain Heterogeneities on Hydrogen	Reza Miresmaeili
2010.02	水素先端世界フォーラム	Atomistic Study of Hydrogen Effects on Vacancy Concentration in α -Fe	松本龍介, 西口直, 武富紳也, 宮崎則幸
2010.03	KSME-JSME Joint Symposium on CM & CAE 2010	An Uncoupled Crystal Plasticity-Transient Hydrogen Diffusion Analysis to Investigate the Effect of Crystallographic Orientation on Hydrogen Redistributions	Reza Miresmaeili, 野津裕史, Nicolas Santier, Jean-Marc Olive, 金山寛
2010.03	日本機械学会 九州	有限要素法を用いた材料内水素拡散解析	金山寛, 荻野正雄, 野津裕史,

	支 第 63 期総会・講演会		中川拓也
2010.03	日本機械学会 九州支部第 63 期総会・講演会	繰り返し荷重下におけるき裂を含む材料内の水素拡散解析	金山寛, 荻野正雄, 野津裕史, 瀬戸島敏宏

【受賞実績】

平成19年度（7件）

受賞年月	学会賞名	受賞者
2007.05	日本機械学会論文賞	近藤 良之, 栄 中, 久保田 祐信, 北原 寛樹, 柳原 一智
2007.05	日本伝熱学会学術賞	Peter Woodfield
2007.05	The 3rd International Scientific Conference on Environmental Degradation of Engineering materials EDEM 2007, Silver Medal and Special Award	Jean-Marc Olive
2007.10	日本機械学会創立 110 周年記念会員功労者表彰	宮崎 則幸
2007.10	日本熱物性学会奨励賞	迫田 直也
2007.12	APACM Award for Computational Mechanics	宮崎 則幸
2007.12	JACM Award for Computational Mechanics	宮崎 則幸

平成 20 年度（6件）

受賞年月	学会賞名	受賞者
2008.	鉄鋼協会学術記念賞	高井 健一
2008.	Metallurgical Transactions A で Important Paper に選定	村上 敬宜他
2008.	日本機械学会熱工学部門研究功績賞	門出 政則
2008.	日本機械学会奨励賞	松本 龍介
2008.05	日本伝熱学会学術賞	藤井 丕夫
2008.05	日本材料学会論文賞	近藤 良之, 久保田 祐信

平成 21 年度（4件）

受賞年月	学会賞名	受賞者
2009.04	日本機械学会九州支部フェロー賞	桑田 喬平
2009.	JACM Award for Young Investigators in Computational Mechanics	松本 龍介
2009.05	日本トライボロジー学会論文賞	杉村丈一/塩見/牧野
2009.06	第 8 回産学官連携推進会議、産学官連携功労者表彰、日本経済団体連合会会長賞	村上 敬宜、(麻生 渡 福岡県知事)

平成 22 年度（12 件）

受賞年月	学会賞名	受賞者
2010.05	日本伝熱学会学術賞	伊藤 衡平
2010.05	CERI 若手奨励賞	山辺 純一郎
2010.05	日本材料学会論文賞	藤田慎治, 峯洋二, 松岡三郎, 村上敬宜
2010.06	日本シミュレーション学会論文賞(平成 21 年度発表論文)	金山寛
2010.06	日本計算工学会論文賞(平成 21 年度発表論文)	荻野正雄
2010.07	JACM Fellows Award	Hiroshi Kanayama
2010.07	APACM Award for Young Investigators in Computational Mechanics	Masao Ogino

2010.07	APACM Award for Young Investigators in Computational Mechanics	Ryosuke Matsumoto
2010.09	日本機械学会機械材料・加工部門 部門一般表彰 (優秀講演論文部門)	久保田 祐信, 田中 康博, 桑田 喬平, 近藤 良之
2010.10	日本機械学会熱工学部門業績賞	高田 保之
2010.11	日本熱物性学会賞論文賞	迫田直也, 進藤健太, 新里寛英, 河野正道, 高田保之, 藤井丕夫
2010.12	「奨励賞」, 日本 MRS (第 20 回日本 MRS 学術シンポジウム)	阪上恭之, 榎本龍博, 松本龍介 武富紳也, 宮崎則幸

平成 22 年 6 月、福岡水素エネルギー戦略会議の「水素経済のための国際パートナーシップ (IPHE)」優秀リーダーシップ賞受賞に貢献した。

平成 23 年度 (2 件)

受賞年月	学会賞名	受賞者
2011.04	文部科学大臣表彰「科学技術賞(研究部門)」	松岡三郎
2011.12	日本ゴム協会第23回エラストマー討論会若手優秀発表賞	小野皓章, 藤原広匡, 山辺純一郎, 西村伸

【シンポジウム等の開催】

平成 18 年度 (1件)

開催年月	名称
2007.02	水素先端世界フォーラム(福岡市)

平成19年度 (3件)

開催年月	名称
2007.10	水素エネルギー社会近未来展(北九州市)
2007.12	水素材料先端科学研究センター実験棟開所式(福岡市)
2008.02	第 2 回水素先端世界フォーラム(福岡市)

平成 20 年度 (2件)

開催年月	名称
2008.10	水素エネルギー先端技術展(北九州市)
2009.02	水素先端世界フォーラム 2009(福岡市)

平成 21 年度 (4件)

開催年月	名称
2009.09	第 4 回世界トライボロジー会議(京都市)
2009.10	水素エネルギー先端技術展(北九州市)
2009.10	高圧水素物性データベース、水素物性推算ツール活用セミナー(東京)
2010.02	水素先端世界フォーラム 2010(福岡市)

平成 22 年度 (6 件)

開催年月	名称
2010.04	Symposium on Mechanics and Structure of Rubber Materials in HYDROGENIUS
2010.09	水素エネルギー先端技術展 2010(北九州市)
2010.02	水素先端世界フォーラム 2011(福岡市)
2010.02	水素・燃料電池システムの熱問題に関するワークショップ
2010.02	International HYDROGENIUS and I2CNER Joint Symposium on Hydrogen- Material Interaction
2010.02	2011 Hydrogenius Tribology Symposium

平成 23 年度 (7 件)

開催年月	名称
2011.11	Symposium “Hydrogen Tribology for Future Energy” in International Tribology Conference, Hiroshima 2011
2011.11	水素エネルギー先端技術展 2011
2012.02	水素先端世界フォーラム 2012
2012.02	HYDROGENIUS & I2CNER Research Symposium - Workshop on Hydrogen Thermal Issues for Hydrogen Energy Systems(水素・燃料電池システムの熱問題に関するワークショップ)
2012.02	Joint HYDROGENIUS and I2CNER International Workshop on Hydrogen-Materials Interactions
2012.02	International Symposium of Hydrogen Polymers Team
2012.02	2012 HYDROGENIUS Tribology Symposium

【展示会等への出展】

平成19年度 (2件)

開催年月	名称
------	----

2007.10	第2回新エネルギー世界展示会(千葉市)
2008.02	FC EXPO2008(東京)

平成20年度 (4件)

開催年月	名称
2008.06	NEDO 成果報告シンポジウム(東京)
2008.07	第3回新エネルギー世界展示会(東京)
2008.10	産総研オープンラボ(つくば市)
2009.02	FC EXPO2009(東京)

平成21年度 (4件)

開催年月	名称
2009.06	第8回産学官連携推進会議(京都市)
2009.07	NEDO 成果報告シンポジウム(東京)
2009.10	産総研オープンラボ(つくば市)
2010.02	FC EXPO2010(東京)

平成22年度 (3件)

開催年月	名称
2010.07	NEDO 成果報告シンポジウム(東京)
2010.10	産総研オープンラボ(つくば市)
2011.02	FC EXPO2011(東京)

九州大学は平成22年7月、文部科学省の「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」の拠点として「カーボンニュートラルエネルギー研究拠点」が採択された。この事業とも連携することで、本NEDO事業の成果を広く発信することが可能となった。

平成23年度 (3件)

開催年月	名称
2011.10	NEDO 成果報告シンポジウム(東京)
2011.10	産総研オープンラボ(つくば市)
2012.02	FC EXPO2012(東京)

エネルギーイノベーションプログラム基本計画

1. 目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。以下に 5 つの政策の柱毎に目的を示す。

1 - . 総合エネルギー効率の向上

1970年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、2030年までにGDPあたりのエネルギー利用効率を約30%向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

1 - . 運輸部門の燃料多様化

ほぼ100%を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（2030年に向け、運輸部門の石油依存度が80%程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

1 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

1 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にCO₂を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

1 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

2. 政策的位置付け

エネルギー基本計画（2007年3月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

1. 総合エネルギー効率の向上に資する技術
2. 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
3. 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
4. 新エネルギーに関する技術
5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。

新・国家エネルギー戦略（2006年5月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 運輸エネルギーの次世代化計画
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進4分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（2006年3月総合科学技術会議）における「推進4分野」であるエネルギー分野に位置付けられている。

経済成長戦略大綱（2006年7月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

1. 省エネルギーフロントランナー計画
2. 次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
3. 新エネルギーイノベーション計画
4. 原子力立国計画
5. 資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。

京都議定書目標達成計画（2005年4月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要である。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

3. 達成目標

3-1. 総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、エネルギー消費効率を2030年度までに少なくとも30%改善することを目指す。

3-2. 運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、GTL、BTL、CTLなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ100%の運輸部門の石油依存度を2030年までに80%程度とすることを目指す。

3-3. 新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

3-4. 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

2030年以降においても、発電電力量に占める比率を30～40%程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

3-5. 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

4．研究開発内容

4 - . 総合エネルギー効率の向上

4 - - . 共通

(1) エネルギー使用合理化技術戦略的開発(運営費交付金)

概要

省エネルギー技術開発の実効性を高めるために、シーズ技術の発掘から実用化に至るまで、民間団体等から幅広く公募を行い、需要側の課題を克服し得る省エネルギー技術開発を戦略的に行う。

技術目標及び達成時期

中長期的視点に立った省エネルギー技術戦略を構築し、技術開発の相互連携によりシナジー効果が発揮され技術開発が促進されるよう、超燃焼システム技術、時空を超えたエネルギー利用技術、省エネ型情報生活空間創生技術、先進交通社会確立技術、次世代省エネデバイス技術の技術群に重点化して、省エネルギー技術戦略に沿った技術開発を戦略的に推進する。

研究開発時期

2003年度～2010年度

(2) エネルギー使用合理化産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える省エネルギー技術のシーズの発掘とその育成、並びに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって省エネルギー効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術的目標及び達成時期

独創性のある研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的省エネルギー技術の研究開発を促進する。本事業では革新的省エネルギー技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、省エネルギー技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

(3) 研究開発型中小企業挑戦支援事業(スタートアップ支援事業)

概要

省エネルギー対策に資する中小企業の優れた技術シーズ、ビジネスアイデアの事業化による創業・新事業展開を促進するため、実用化研究開発に要する経費(原材料費、直接人件費、機械装置費、知的財産取得費等)の一部を補助するとともに、補助事業を行う中小・ベンチャー企業等に対して中小企業基盤整備機構によるビジネスプランの具体化・実用化に向けたコンサルティング等を一体的に実施

する。

技術的目標及び達成時期

中小企業の技術開発を推進し、産業におけるエネルギー使用合理化技術の利用を図り、もって、中小企業の振興と経営の安定を促進する。

補助事業期間終了後2年後の採択企業の研究開発成果の事業化率50%を目標とするとともに、省エネルギー技術開発の高度化を戦略的に推進する。

研究開発期間

2004年度～

(4) 地域イノベーション創出エネルギー研究開発

概要

地域において新産業の創出に貢献し得るような最先端の技術シーズを基に、企業、公設試、大学等の研究開発資源を最適に組み合わせて形成された共同研究体が行うエネルギー使用の合理化並びに非化石エネルギーの開発及び利用に寄与する実用化研究開発の実施。

技術的目標及び達成時期

研究開発終了後3年後における成果の事業化達成率30%以上を目標とする。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(5) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

(6) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 超燃焼システム技術

(1) 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

高炉ガスからの効率的な二酸化炭素分離と中低温排熱の有効活用及び水素を炭素(コークス)の一部代替として鉄鉱石を還元する革新的製鉄プロセスの開発を行う。

技術的目標及び達成時期

最終的な技術開発目標として製鉄プロセスにおけるCO₂排出量を30%削減することを目指し、2050年までに実用化する。

研究開発期間

2008年度～2017年度

(2) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発(運営費交付金)

概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、

カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(3) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 植物機能を活用した高度モノ作り基盤技術開発

i) 植物利用エネルギー使用合理化工業原料生産技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、現在の化学工業プロセスに代わる、植物の有する有用物質生産能を活用した省エネルギー・低環境負荷型の工業原料生産プロセスへの変換を促進する。具体的には、工業原料の生産に関わる重要な物質生産プロセスに関する代謝系をゲノム情報に基づき解析するとともに、有用物質生産制御に必要な一連の代謝遺伝子群の発現を統一的に制御する技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、工業原料として有望なバイオマスとしてイソプレノイド、油脂などの有用物質生産に関わる代謝経路とその調節メカニズム及び生産物質の蓄積・移動に係るメカニズムの解析を行い、関連遺伝子情報を整備するとともに、統括的発現制御技術を開発する。

研究開発期間

2002年度～2009年度

(5) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発(運営費交付金)

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)及びクリープ破壊、金属組織制御技術を基本とする溶接材料技術(クリープ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板(高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼)の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 高機能チタン合金創製プロセス技術開発プロジェクト

概要

大量の電力を必要とする従来のバッチ処理方式のチタン製錬法(クロール法)を、エネルギー効率の高い連続処理方式へ転換する抜本的なプロセス改善のための技術を開発する。また、併せて、成形性の高いチタン合金設計技術及び成形プロセス技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに省エネ型チタン新製錬プロセスの基盤技術を開発し、2010年までに実用化を目指す。また、本製錬技術により得られるチタンをベースとして、加工性、強度等をさらに向上させた合金設計・成形プロセス技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(7) 革新的分離膜技術の開発

概要

河川水等の浄水工程における、微量の有害物質、微生物等の除去に係る水処理技術のうち、分離膜方式による高効率(省エネ)な分離技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2013年度末までに、現行の分離膜に比較して単位処理水量当たり50%のエネルギー削減を図る技術を確立する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(8) 微生物機能を活用した環境調和型製造基盤技術開発

i) 微生物機能を活用した高度製造基盤技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーかつ環境負荷が少ないといった特徴を有する微生物機能を活用した有用物質の革新的な生産プロセス (モノ作り) の技術を構築するため、産業用途に必要な機能既知遺伝子で構成されたゲノムを持ち、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞の創製や、微生物反応の多様化・高機能化技術を開発するとともに、バイオマスを原料として有用物質を体系的かつ効率的に生産する (バイオリファイナリー) ための基盤技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、物質生産性向上につながる性能を備えた高性能宿主細胞を創製するとともに、バイオプロセスの実用化適用範囲の拡大のための微生物反応の多様化・高機能化技術の開発を行う。バイオリファイナリー技術については、バイオマスを高効率で糖化し、糖から高効率で各種化成品の基幹物質を生産するバイオプロセス体系を構築する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

ii) 微生物群のデザイン化による高効率型環境バイオ処理技術開発 (運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、従来エネルギー多消費・廃棄物多排出型であった廃水・廃棄物処理において、微生物群の構成及び配置等を人為的に制御 (デザイン化) することで、その処理効率を大幅に向上させ、省エネルギーで廃棄物も少ない高効率型廃水、廃棄物処理の基盤技術を確立する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、特定有用微生物群を人為的に安定導入・維持もしくは人為的に空間配置・優先化させる等のデザイン化技術を開発し、従来の廃水、廃棄物処理に比べより高効率で省エネルギーな処理技術を開発するとともに、実用化に資するための実証可能なテストプラント規模にて評価する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(9) 省エネルギー型化学技術創成研究開発補助事業

概要

化学産業はそれ自身が裾野の広い産業というだけでなく、自動車、IT機器等の川下製品の部材として産業界・国民生活の様々な分野に深く関連している。従って化学業界において、省エネポテンシャルの大きい有望な技術シーズがありながら民間だけでは十分な研究開発投資が行われていない技術について、戦略的な研究開発支援を実施することにより、化学産業のみならず、各種最終製品、他産業においてエネルギー効率の改善を促進する。

技術的目標及び達成時期

2007年度までに、化学分野の生産プロセスや、製品等に関する環境に配慮した省エネルギー技術の革新に向けて、国内・国際市場の創出・拡大も見据えつつ、将来の発展が有望な技術に関する研究開発を行うことにより、化学産業のみならず、我が国の省エネルギー対策に一層寄与する。

研究開発期間

2004年度～2010年度

(10) 高効率酸化触媒を用いた環境調和型化学プロセス技術開発プロジェクト

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、N-オキシ系触媒等の炭素ラジカル創生触媒を化学反応プロセスに適用し、製造工程の短縮や製造効率の向上を図ることで、温暖化効果ガスの排出抑制や省エネルギー効果など総合的なプロセスコストを低減させるため要素技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2008年度までにカルボン酸、アルコール、ケトンなどの含酸素化合物製造プロセスに対し、N-オキシ系触媒を適用していくため、現状の触媒活性・選択性の向上、触媒の安定性・寿命の改善、触媒分離プロセスの効率化等を開発する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(11) エネルギー使用合理化繊維関連次世代技術開発

概要

製造エネルギーの低減を図ることができる革新的な繊維製品製造技術の開発や、使用することでエネルギー消費の低減が可能となる新たな繊維製品を開発。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、以下の開発を行う。

炭素繊維製造エネルギー低減技術の研究開発

廃棄衣料のリサイクル技術及び高付加価値商品の開発

排水処理における余剰汚泥の減容化技術開発

次世代資材用繊維の開発

ポリエチレンテレフタレート製造エネルギー低減技術の開発

VOC含有廃棄物の溶剤回収及び再利用処理技術の開発

研究開発期間

2005年度～2009年度

(12) 無曝気・省エネルギー型次世代水資源循環技術の開発（運営費交付金）

概要

所用動力が少なく、汚泥発生も少ない嫌気性処理の利点と、良好な水質が得られる好気性処理の利点の双方の特長を生かし、かつ双方の欠点を克服した、省エネルギー性に優れた廃水処理技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、既存技術で廃水処理を行った際に発生する汚泥量の70%削減を実現し、廃水処理に要するエネルギーの70%削減を実現する廃水処理システムを開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(13) 高効率ガスタービン実用化技術開発

概要

省エネルギー及びCO₂削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指し、大容量機(25万kW程度(コンバインド出力40万kW))の高効率化(52%～56%)のために1700級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施する。また、小中容量機(10万kW程度)の高効率化(45%～51%)のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービンの実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を行う。

技術的目標及び達成時期

1700級ガスタービン実用化技術開発：先端要素技術を活用した燃焼器、タービン、圧縮機等各モジュールの検証等を行い、送電端熱効率56%以上の達成が可能なことを確認する。

高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発：2011年までに軸流圧縮機の3.5%(空気重量比)吸気噴霧冷却技術、低NO_x燃焼技術(運用負荷帯で10ppm以下)等を開発すると共に、実機に近い条件での要素機器の信頼性・耐久性を確認する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(14) エネルギー使用合理化高効率パルプ工程技術開発(運営費交付金)

概要

紙パルプ産業では、環境に関する自主行動計画に基づき、2010年度までに製品当たり化石エネルギー原単位を1990年度比13%削減し、CO₂排出原単位を10%削減することを目指し、紙パルプ工程における省エネルギー対策を着実に進めているものの、より一層の省エネルギー対策を進めるためには、技術開発によるブレークスルーが必要となっている。紙パルプ産業は、エネルギー多消費型産業のひとつであり、紙パルプ工程での省エネルギー対策は波及効果が大いことから、紙パルプ工程におけるエネルギー使用合理化に資する技術開発を提案公募により実施する。

技術的目標及び達成時期

京都議定書の第1約束期間中、又は、第2約束期間中を目途として実用化に至るような技術開発を行うことで、京都議定書の第1約束期間の目標を着実に達成するとともに、現在、検討が行われている第2約束期間に向けた省エネルギー対策の更なる深化を進めていく。

研究開発期間

2005年度～2010年度

- (15) 発電プラント用超高純度金属材料開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (16) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発(4 - - 参照)
- (17) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発(4 - - 参照)
- (18) 石油精製高度機能融合技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 時空を超えたエネルギー利用技術

- (1) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト(運営費交付金)

概要

従来の活性炭電極では不可能な高出力かつ高エネルギー密度の電気二重層キャパシタを実現するため、高度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いたキャパシタ電極の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、20Wh/Kgの高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (2) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 固体酸化物形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (13) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 省エネ型情報生活空間創生技術

- (1) グリーンITプロジェクト(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展により、ネットワークを流れるデータ量が大幅に増加する中で、IT機器による消費電力量の大幅な増大に対応し、環境調和型IT社会の構築を図るため、個別のデバイスや機器に加え、ネットワーク全体での革新的な省エネルギー技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までに、IT機器・システムのエネルギー消費効率を2倍に向上させる基盤技術を開発する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ネットワークで伝送されるデータ量の爆発的増加に伴い、関連機器の消費エネルギーが増大している中で、ネットワーク全体の消費電力量を抑制することが喫緊の課題であり、消費エネルギーの低減に大きく貢献するルータ・スイッチの高速化のための研究開発を実施するとともに、機器そのものの消費エネルギーを低減するための研究開発を実施する。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、1チャンネルあたり40Gbps超の通信速度に対応するトラフィック計測・分析・管理技術や40Gbpsのインターフェース、さらなる通信速度向上(100Gbps超)を実現するハードウェア技術、SFQ(単一磁束量子)スイッチに関する実現を可能とするための基盤技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代大型低消費電力ディスプレイ基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、次世代の大型液晶及び大型プラズマディスプレイに関する低消費電力ディスプレイを実現するための研究開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、液晶に関しては、高効率バックライト、革新的なTFTアレイプロセス技術・製造装置及び低消費電力型の画像処理エンジン等に係る技術を確立する。また、プラズマディスプレイに関しては、超低電圧駆動等に係る技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 有機発光機構を用いた高効率照明の開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、蛍光灯に代わる高効率照明として有機EL発光機構を用いるための技術開発課題(発光効率、演色性、面均一性、生産コスト)等を明らかにし、それをブレークスルーしうる技術シーズを抽出する。

技術目標及び達成時期

2009年までに現在一般に普及している蛍光灯照明に代わる高効率照明としての必要スペックを達成するとともに、次世代照明として同じく期待されているLEDとの差別化要素を技術的に達成し、大面積/高スループット/低コストで量産するプロセス技術を開発する。また、現在蛍光灯の間接・拡散照明が用いられている照明機器を代替する有機EL照明を実用的なコストで製造できる技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2009年度

(5) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発(運営費交付金)

概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を示す壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やナノ羽毛状構造およびセラミックス・ポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率(熱の伝わりやすさ)が $0.3\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{ W/m}^2\text{K}$ 以下、光(可視光)透過率が65%以上(Low-Eガラス使用)、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から、製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを効率よく製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 低損失オプティカル新機能部材技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、近接場光の原

理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(8) 高環境創造高効率住宅用VOCセンサ等技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、住宅における換気負荷を最小化することによって省エネルギーを達成するため、VOCセンサ及びモニタリング併用型換気システム等を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、VOCに対して高選択性・高感度性・即応性を有するVOCセンサ及びVOCセンサを用いたモニタリング併用型換気システム等を開発する。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(9) 革新的構造材料を用いた新構造システム建築物研究開発

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、我が国鉄鋼業の約50%を占める建設市場において、建築物のメインフレームに高強度鋼を用いることで、鉄鋼部材の軽量化(リデュース)とそれに伴う輸送効率の向上、高強度化、非溶接化に伴う部材のリユース促進、製造・施工の省エネ・省力化等を図る。

同時に、柔剛混合構造(高強度鋼とダンパーの組み合わせ)技術の確立、関連法規への対応等により、震度7にも耐えうる新構造システム建築物の建設が可能となり、我が国で大きなリスクである大規模地震災害から国民を守り、安心安全社会の実現に寄与する。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、最大規模の地震(震度7)に対しても倒壊・損壊しない建築物を高強度鋼(800N/mm²級鋼材)とダンパーの組み合わせによる柔剛混合構造により実現を図るものであり、国土交通省や民間企業と連携してこの建築物のメインフレームに必要な高強度鋼部材、接合法等の開発を行う。主な研究開発目標は以下の通りである。

・震度7弾性新構造システム開発

- ・高強度部材の製造技術開発
- ・超高強度接合部品開発
- ・高強度部材の接合技術開発

研究開発期間

2006年度～2008年度

(10) 次世代光波制御材料・素子化技術（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - - . 先進交通社会確立技術

(1) エネルギーITS（運営費交付金）

概要

平成19年5月の「次世代自動車・燃料イニシアティブ」に基づき、運輸部門のエネルギー消費効率改善のため、自動運転・隊列走行技術、高度交通流制御技術等の省エネルギーに資するITS技術の開発を行う。

技術的目標及び達成時期

2012年度までにプローブ情報を利用した信号制御機能の実用化を図るとともに、2020年代に実用化が見通せる運転制御、隊列走行の基盤技術の確立を目指す。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 革新的次世代低公害車総合技術開発（運営費交付金）

概要

大気環境・地球温暖化・エネルギー問題の同時解決に向けて、次世代の低公害車の技術開発を実施する。

特に、都市間の輸送に用いられる「都市間トラック・バス」を中心とした分野における要素技術の開発を自動車技術・燃料技術の両面から実施していく。

技術目標及び達成時期

平成20年度において、都市間の輸送に用いられる「都市間バス・トラック」を中心とした分野における次世代低公害車の要素技術を確立する。具体的には、以下のとおり。

- ・燃費向上率

貨物車 現行基準値に対して10%

乗用車 2015年基準値に対して20%

・排出ガス

貨物車 NOx：ディーゼル重量車のポスト新長期（挑戦目標）規制値

PM：ディーゼル重量車のポスト新長期規制値

乗用車 NOx：ガソリン車のポスト新長期規制値

PM：ガソリン車のポスト新長期規制値

研究開発時期

2004年度～2008年度

(3) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発（運営費交付金）

概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料（CFRP）の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、熱可塑性CFRP加工技術を開発する。

研究開発時期

2008年度～2012年度

(4) 次世代構造部材創製・加工技術開発（次世代航空機用）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、航空機、高速車両等の輸送機器への先進材料の本格導入を加速させるため、先進複合材料及び先進金属材料について部材開発、設計試作及び評価を実施することで、軽量化によりエネルギー使用効率を大幅に向上させる革新的な構造部材の創製・加工技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、複合材の構造健全性診断技術、チタン合金の創製・加工技術を確立するとともに、航空機用エンジンへの適用を目指し、耐熱・耐衝撃性に優れた複合材料を開発する。

研究開発期間

2003年度～2012年度

(5) 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、エネルギー使用効率を大幅に向上し、環境対策にも優れた次世代の小型航空機用エンジンの開発にとって重要な要素技術の研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、エネルギー使用効率を大幅に向上する構造設計技術、騒音、NOx等の環境負荷対応に優れた環境対策技術、インテグレーション技術、高バイパス比化等の高性能化技術といった要素技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

(6) 省エネ用炭素繊維複合材技術開発

概要

航空機、自動車、鉄道、船舶等の輸送機械等における炭素繊維複合材の適用範囲を拡大し、省エネルギーの促進を図るため、先進的な炭素繊維複合材成形技術や、耐雷対策の低コスト化技術等の研究開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2013年度までに、従来の方法に比べ低コストであり、曲率の大きな部位の成形も行うことができるVaRTM(バータム)法等の炭素繊維複合材成形技術や、炭素繊維複合材を用いた製品の耐雷性能を低コストで確保する技術の研究開発・実証を行う。

研究開発期間

2008年度～2013年度

(7) 燃料電池システム等実証研究(4 - - 参照)

4 - - . 次世代省エネデバイス技術

(1) パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)

概要

窒化物系化合物半導体は日本が強みを有し、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、今後のIT社会を支えとなることを期待されている分野である。しかし、既存のバルク単結晶基板成長技術やエピタキシャル成長技術では、従来の半導体では実現できない領域で動作可能なハイパワー、超高効率デバイス性能を十分に引き出すには至っていない。

これを突破するため、大学あるいは研究所を拠点に材料メーカー、デバイスメーカー、装置メーカー等が相互連携して、窒化物半導体の結晶欠陥低減技術やナノ構造作製技術等の革新を図り、これらデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減の実現を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

- ・ 基板技術（GaN、AlNバルク結晶作製技術）
 - 口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。
- ・ エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）
 - 低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
 - 高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
 - 高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 次世代低消費電力半導体基盤技術開発（MIRAI）(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード（微細化レベル）45nm以細の次世代低消費電力半導体を実現するため、微細加工の基盤技術やマスク（半導体素子製造過程で用いる原板）の低コスト化・製造時間短縮に必要な基盤技術の開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、マスク設計・描画・検査の各工程に共通的なマスクデータ処理技術、繰り返しパターンやパターン重要度を利用した描画・検査高速化技術等の基本的な開発及びEUVLマスク基盤技術として、許容欠陥の指標明確化、ブランクスの位相欠陥検査技術の確立等を完了する。

研究開発期間

2001年度～2010年度

(4) 半導体アプリケーションチッププロジェクト（運営費交付金）

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、情報通信機器、特に、情報家電の低消費電力化を実現できる半導体アプリケーションチップ技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、情報家電の低消費電力化を実現できるアプリケーション

チップ技術を開発する。

研究開発期間

2003年度～2009年度

(5) 次世代高度部材開発評価基盤の開発(CASMAT2)(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。半導体産業分野で、集積回路の消費電力低減に必要な配線形成用各種材料等の開発のネックとなっているナノレベルでの材料間の相互影響を評価可能な統合部材開発支援ツールを開発する。これにより、集積回路の種類やデザインルールに応じて、配線形成用各種材料とプロセスの最適な組み合わせの提案技術(統合的材料ソリューション提案技術)を確立する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、半導体材料開発に貢献する材料評価基盤を構築するとともに、上記の統合的材料ソリューション提案技術を確立する。また、本プロジェクトを通して得られた基礎データ等については、プロジェクト実施期間中にデータを体系的に整理し、幅広く社会に提供を図る。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(6) 次世代プロセスフレンドリー設計技術開発(運営費交付金)

概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、IT化の進展、IT利活用の高度化を支え、あらゆる機器に組み込まれている半導体の低消費電力化を図るため、テクノロジーノード45nm以降の半導体に対応するSoC(System on Chip)設計技術を開発する。具体的には、テクノロジーノード45nm以細の半導体の共通設計基盤技術開発として、DFM(Design For Manufacturing)基盤技術を中核とした設計及び製造の全体最適を確保する全く新しいSoC製造フローを開発する。

技術目標及び達成時期

テクノロジーノード45nm以細のSoC開発において製造性を考慮した共通設計基盤技術を確立し、システムLSIデバイスの省エネルギーを実現するとともに、設計生産性を従来予想に比べ2倍にすることを目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - - . その他

(1) 希少金属等高効率回収システム開発

概要

小型電子・電気機器にはベースメタルや、金、銀等の貴金属の他、インジウム、ニッケル等の希少金属等を含有している。現状では、これらの機器が廃棄された後は、非常に高温で処理する乾式製錬技術を用いてリサイクル・処理されている

ため、多大なエネルギーを消費するばかりか、回収可能な金属が銅、金、銀等に限定されており、その他の希少金属等は回収できずに廃棄処分されている。このため、湿式製錬技術を活用した高効率な最適技術の開発等を通じて、回収工程の省エネルギー及び希少金属等の回収率向上を図る。

技術目標及び達成時期

- ・ 従来方法（乾式製錬）で処理する場合に比べて、大幅な省エネルギーの実現（省エネルギー効果：原油換算で約78万kl/年削減）
- ・ 廃小型電子・電気機器、廃超硬工具等中に含まれる希少金属等の回収率の向上（インジウム0%→90%、ニッケル50%→95%、コバルト0%→95%、タンタル0%→80%、タングステン90%→95%、レアアース0%→80%）

研究開発期間

2007年度～2010年度

（2）次世代構造部材創製・加工技術開発（次世代衛星基盤）

概要

国際商業市場における我が国衛星メーカーの競争力を強化するべく、次世代の衛星技術として期待されている、準天頂衛星システム（移動中の利用者等に対し、米国が運用するGPSとの補完による高精度な位置情報等の提供を可能にする新システム）の構築に不可欠な基盤技術（産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等）の開発を行う。本プロジェクトの一部については、他部門と比較して需要増加の割合が高い運輸部門のエネルギー消費を抑制すべく、航空機、自動車、高速車両等の輸送機器の軽量化・効率化にも資する複合材料製造設計のための基盤技術を確立するためのものであり、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

静止軌道と一定の角度をなす傾斜軌道に複数の衛星を配置し、見かけ上、常に天頂付近に最低1つの衛星を位置させるシステム。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、準天頂衛星システムの構築に不可欠な基盤技術（産業競争力強化にも直結する衛星の軽量化、長寿命化に関する技術等）の開発を行う。

研究開発期間

2003年度～2010年度

（3）高効率重金属処理剤研究開発

概要

重金属等によって汚染された土壌、飛灰、ばいじん、排水・廃液等を安全かつ経済的に処理する技術開発として、少量の使用で重金属等を安定的かつ効率的に捕捉できる複合金属汚染土壌のオンサイト処理に適した高性能の無機系重金属等処理剤及び自然環境への負荷が少ない新規有機系処理剤を開発する。

技術的目標及び達成時期

2008年度までに、飛灰における金属選択性が高く安価な重金属等処理・回収剤及び排水中における亜鉛や6価セレンなどを処理できる重金属等処理剤を開発する。

研究開発期間
2003年度～2008年度

4 - . 運輸部門の燃料多様化

4 - - . 共通

- (1) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス由来燃料

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) E3地域流通スタンダードモデル(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . G T L等の合成液体燃料

- (1) 革新的次世代低公害車総合技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 天然ガス未普及地域供給基盤確立実証試験(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 天然ガスの液体燃料化(G T L)技術実証研究(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . 燃料電池自動車および水素関連技術

- (1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)(4 - 参照)
- (4) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 燃料電池システム等実証研究(4 - - 参照)

4 - - . 電気自動車

- (1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - . 新エネルギー等の開発・導入促進

4 - - . 共通

- (1) 新エネルギー技術研究開発(運営費交付金)

概要

新エネルギーの自立的普及に向けて、太陽光、風力、バイオマスなど新エネルギー分野でのイノベーションを促進すべく、高効率かつ低コストを目指した先進的技術開発を実施する。具体的には以下の研究開発を実施する。

- A. 革新的な太陽電池の開発を実施する研究拠点を形成し、海外との研究協力等を行いながら、超長期の視野に立って、飛躍的な性能向上を目指した太陽光発電技術の開発を推進する。(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)
- B. 中長期的に、より一層の高効率化と低コスト化を目指して、革新的な材料、構造等を採用した太陽光発電技術の開発を推進する。(太陽光発電システム未来技術研究開発)

- C．2020年の目標発電コスト14円/kWhおよび太陽光発電システムの大幅な効率向上を実現すべく、未来技術研究開発などで得られた要素技術開発の成果の内、実用化が期待できる太陽電池作製に係る技術について課題を設定し早期実用化を助成する。(太陽光発電システム実用化促進技術開発)
- D．電力供給源としての太陽光発電の信頼性を確立し、今後の太陽光発電システムの円滑な普及促進を図るため、太陽光発電システムの大量普及時に不可欠な性能評価技術やリサイクル・リユース技術等システムの共通基盤技術に係る研究等を実施する。(太陽光発電システム共通基盤技術研究開発)
- E．PVシステムの普及拡大のため、「集中連系型太陽光発電システム実証研究」の設備を有効利用しながら、認証制度にも資する複数台連系に係わる試験方法を確立する。(単独運転検出装置の複数台連系試験技術開発研究)
- F．風力発電技術の国際的な動向を把握しつつ、我が国の複雑地形における風力発電利用上の各種課題を克服するための基礎から応用までの技術について研究開発を行う。具体的には我が国の厳しい風特性を反映した風特性モデルの確立及び高々度風況観測を簡便に行うためのリモートセンシング技術の精度検証・評価を行う。
- また、全国規模での落雷電流計測、落雷様相観測による雷特性の把握、落雷特性・落雷保護対策と被害実態との相関把握、上記を踏まえた効果的な落雷保護対策の検討及び実機規模での実雷による保護対策検証等を実施し、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。(次世代風力発電技術研究開発事業)
- G．我が国特有の海上特性や気象・海象条件を把握し、これらの自然条件に適した洋上風況観測法や風力発電システムに関する技術開発とその実証を行なうと共に、環境影響評価システム手法を確立する。(洋上風力発電技術研究開発)
- H．バイオマスのエネルギー利用の促進を図るためには、発生地域が分散し、形状・性状が多種多様にわたるバイオマス資源を利用しやすい形態の有用エネルギーへ効率的に転換できる技術を開発する。(バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発)
- I．世界的にもベンチャー企業による太陽光発電、新型風力発電、燃料電池、バイオ燃料分野におけるイノベーション活動が活発化していることを踏まえ、詳細目標設定・多段階選抜形の米国SBI R制度を参考に特定のキーテクノロジーに対するベンチャーのチャレンジを強力に支援する。(新エネルギーベンチャー技術革新事業)

技術目標及び達成時期

- A．2050年までに「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、変換効率40%超の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。
- B．2020年頃に業務用電力料金並の発電コスト(14円/kWh、モジュール製造原価として75円/W程度)、2030年頃に火力発電の発電コスト(7円/kWh、モジュール製造原価として50円/W程度)の実現に向けた中・長期的な技術開発を行う。

- C．2015年に向けて市場競争力を備えた本格生産・商用化を目指す。
- D．2020年度の技術開発目標である発電コスト14円/kWhを目指し、中期的な視点での太陽光発電の普及拡大に資する。
- E．2009年度末までに、電力系統側が受け入れ可能な、導入台数の制限のない能動型単独運転検出装置の試験方法を確立する。
- F．2012年度までに、風力発電の基礎から応用までの技術について、国際的な動向を把握しつつ、我が国特有の気象・地形に起因する各種問題（風車耐久性等）を克服するための研究開発を行って、我が国の風車産業の振興に資するとともに、IEA RD&D WINDなどの最先端の国際的風力発電共同研究に研究成果を反映させる。
また、2012年度までに、高精度落雷リスクマップを作成するとともに、風力発電設備へのより効果的な落雷等に対する対策を策定する。
- G．2013年度までに、我が国の海象・気象条件に適した、洋上風況観測システム、洋上風力発電システム及び環境影響評価の手法等の技術を確立する。
- H．2004年度より、バイオマスエネルギー転換プロセスにおける各工程のボトルネックを抽出し、2008年度までに開発が完了するよう、それぞれのボトルネックをブレイクスルーする要素技術開発を提案公募方式により実施する。更に、2005年度より2009年度まで、バイオマスのエネルギー転換・利用技術等の分野において2030年の普及を目指した新規な革新的技術を開発するための先導技術研究開発を提案公募方式により実施する。
- I．潜在的なオプションの顕在化や関連産業分野の技術開発による技術革新により、新エネルギー導入促進技術オプションの多様化と経済性の向上に寄与する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 新エネルギー技術フィールドテスト事業（運営費交付金）

概要

2010年度の新エネルギー導入目標達成に向け、新技術を活用した太陽光発電及び太陽熱利用システムの有効性の検証、バイオマス熱利用システムの性能・経済性等の検証、風車立地に必要な高所の風況データの収集・解析など総合的な新エネルギーフィールドテストを実施する。具体的には以下のフィールドテストを実施する。

- A．新技術を活用した太陽光発電システム等を設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。（太陽光発電新技術等フィールドテスト事業）
- B．新利用形態の太陽熱利用システムや未利用分野においてシステムを設置し、出力特性等の情報収集及び分析を行うことで、その有効性を確認するとともに、ガイドラインの策定等により広く情報発信を行う。（太陽熱高度利用システムフィールドテスト事業）
- C．広く薄く賦存するバイオマスを、民間企業や研究機関等において研究開発が終了段階をむかえた高効率に熱利用できるシステムを設置し、設置場所の熱需要に合わせたフィールドテストを実施することにより、実運転におけるバイオマス熱

利用転換システムとしての課題抽出、解決を行い、早期実用化を図り、バイオマスエネルギーの導入促進を行う。(地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業)

- D. 風力発電の導入目標(2010年度300万kW)を達成するため、共同研究事業者と大型風車の導入普及に必要な高所の風況データの収集・解析・評価を行い、公開する。(風力発電フィールドテスト事業)

技術目標及び達成時期

- A. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- B. 設置システムについて、2007年度に策定したガイドラインを2009年度に改訂する。また、2012年度及び2015年度に見直し改訂する。
- C. 一定レベルまで確立されたバイオマス熱利用技術について、性能や経済性等の状況・データを収集・分析し、熱利用システムの有効性を実証するとともに、これらの結果を公表することで汎用性の高い熱利用システムの確立し、2010年度のバイオマス熱利用の導入目標(308万KL)達成を目指す
- D. 2010年度までに、高所の風況データの解析・評価を行い、導入普及に有用な資料の取りまとめを行い、これらの結果を風力発電事業者、研究機関や風力発電事業を計画している各種団体等に公開することにより、風力発電導入の素地を形成し、風力発電の導入を拡大する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) イノベーション実用化補助金(運営費交付金)

概要

科学技術基本計画における戦略的技術領域・課題にかかる技術課題等で石油代替エネルギーの製造・生成・利用に資する実用化開発を行う民間企業に対し助成支援する。

技術目標及び達成時期

助成事業終了後3年以上を経過した時点で25%の実用化達成率。加えて、知的資産経営の方針に対する審査時の評価を通じて、「技術等の知的資産を活かす経営の下で収益拡大を図る(技術を経営、収益につなげる)」意識を普及させる。

研究開発期間

2000年度～

(4) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業(運営費交付金)

概要

産業界や社会のニーズに応える石油代替技術のシーズの発掘とその育成、並びに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。この目的のため、産業界からの期待が高い技術領域・課題を提示した上で、大学や独立行政法人の若手研究者等から研究開発テーマを募集する。厳正な外部評価によって石油代替効果があり且つ独創的・革新的なテーマを選定し、研究者代表者個人を特定して助成金を交付する。

技術目標及び達成時期

独創性のある若手研究者等を助成すると共に、中間評価ゲート方式が醸成する競争的環境の下で企業との連携を強化させることにより、10～15年後の実用化が有望な革新的石油代替技術の研究開発を促進する。本事業では革新的石油代替技術の実用化への第1歩となる特許について、助成期間終了後の出願比率を100%とすることを目標とするとともに、石油代替技術に関する次世代の研究リーダーの育成を図る。

研究開発期間

2000年度～

4 - - . 太陽・風力

(1) 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

概要

新たな電力供給方式として地上において様々な用途への応用が見込まれ、また、長期的には将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核的技術として応用可能な太陽光発電無線送受電技術を確立するため、安全性等を確保しつつ、太陽エネルギーを効率良く伝送するための要素技術等について研究開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに高効率半導体増幅回路の開発、複数フェーズドアレイパネルの統合による精密ビーム制御技術の開発、高効率受電整流回路の開発を目指すことにより、無線送受電技術の高効率化を図る。

研究開発期間

2008年度～2010年度

4 - - . 電力系統制御・電力貯蔵

(1) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(2) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

(3) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . バイオマス・廃棄物・地熱等

(1) E3地域流通スタンダードモデル創成事業(運営費交付金)

概要

離島(全域)におけるエタノール3%混合ガソリン(E3)の製造から給油までの大規模なフィールドテストを通じ、E3利用に関する社会システムモデルの構築と一般社会へ適用する際の技術課題の抽出を行う。

技術目標及び達成時期

2010年の「京都議定書目標達成計画」の導入目標(50万kl)に資するため、2009年度にE3利用の社会モデルを構築し、2011年度までにその検証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) バイオマス等未活用エネルギー実証事業(運営費交付金)

概要

地域に賦存する未活用の資源であるバイオマスをエネルギーとして有効活用するため、溶融ガス化等熱化学的変換技術による燃料化システムやメタンガス等生物化学的変換技術による燃料化システム等の実証試験事業、事業可能性調査等を実施し、利用ノウハウ等を蓄積、本格的なバイオマス等エネルギーの導入を推進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、バイオマス等の種別やエネルギー変換手法、更には地域特性を加味した一連のエネルギー転換システム毎のフィージビリティスタディや試験設備の設置により、バイオマス等の運搬・収集、エネルギー転換及びエネルギー利用に係るデータの収集、分析、評価を実施し、その結果をフィードバックすることによって本格的なバイオマス等エネルギーの導入を目指す。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) バイオマスエネルギー地域システム化実験事業(運営費交付金)

概要

バイオマスエネルギーの資源収集・運搬、転換、残渣処理、利用までの一連の利活用システムについての、各要素の連携の最適化を図るための実証を実施することによって、地域特性に適合した地域主導によるバイオマスの地産地消・地域循環型の先導的モデルシステムを構築することによりバイオマスエネルギーの導入を促進する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国内バイオマス資源の安定的かつ経済的な供給システム、最適なエネルギー転換技術、エネルギー転換後に発生する残渣の処理等の一連の地産地消型エネルギー転換システムについて、ノウハウ蓄積、課題抽出及びその対策方法の策定、技術確立を行う。また、ここで確立されたバイオマスエネルギーシステムは他地域への波及を先導する事例となることを目標とする。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - - . 燃料電池

(1) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

自動車用、家庭・業務用等に利用される固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化・普及に向け、要素技術、システム化技術及び次世代技術等の開発を行うとともに、共通的な課題解決に向けた研究開発の体制の構築を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、固体高分子形燃料電池の経済性・耐久性の向上や高性能

化のための技術開発を行い、燃料電池の普及段階へ向けて必要な基本的技術を確立する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(2) 燃料電池先端科学研究(運営費交付金)

概要

燃料電池の基本的反応メカニズムについての根本的な理解を深めるために、高度な科学的知見を要する現象解析及びそのための研究体制の整備を行い、現状の技術開発における壁を打破するための知見を蓄積する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、燃料電池内における反応機構を電気化学(電極触媒反応、イオン移動、分子移動等)及び材料化学(溶解・腐食反応、錯形成反応、ラジカル反応、固相内拡散等)の観点から解明する。また、燃料電池新技術の性能を適切に評価・実証するための基本システムを構築する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(3) 新利用形態燃料電池技術開発(運営費交付金)

概要

ユビキタス社会に対応する燃料電池の実用化・普及拡大を図るため、小型可搬電源となり得る小出力燃料電池等の安全性確保等を目的とする基準・標準化研究開発及び燃料電池の用途開拓のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年までに、燃料電池の新利用形態、使用環境の拡がり等を考慮した高出力特性等の性能特性向上によって必要となる燃料容器等の周辺機器を含めたシステムの安全・環境基準の設定・標準化、規制緩和に資する試験データの取得、試験方法の開発及びこれらの規格・標準化に準じた新利用携帯用燃料電池技術を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 高耐久性メンブレン型LPガス改質装置の開発(運営費交付金)

概要

高耐久性の水素透過型メンブレン(膜)を開発し、家庭用LPガス供給システムから高純度の水素を供給可能な高効率LPガス改質装置を開発する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、家庭用LPガス供給システムから燃料電池へ高純度の水素を供給する高効率かつ低コストでコンパクトなメンブレン型LPガス改質装置を開発する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(5) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)

概要

固体酸化物形燃料電池(SOFC)は発電効率が高く、分散型電源として期待されるが、実用化・普及のためには耐久性・信頼性向上、低コスト化等の課題を解決することが必要であり、材料開発や劣化要因解明など基盤的な要素技術の研究を行う。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、耐久性・信頼性の向上のための劣化要因解明等の基礎研究、低コスト化のための材料等や高出力セルスタックの開発、起動停止対応等の実用性向上のための技術開発を実施する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) セラミックリアクター開発(運営費交付金)

概要

電気化学的に物質やエネルギーを高効率で変換する次世代型セラミックリアクターの実現のため、低温作動と急速作動停止を可能とする材料の開発とマイクロセルの集積構造化技術等の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時(650以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証(出力性能2kW/部等)を行う。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(7) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発(運営費交付金)

概要

水素の製造・輸送・貯蔵等に係る機器やシステムについて、性能・信頼性・耐久性の向上や低コスト化を目指す水素利用技術の研究開発を行い、水素社会の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素製造・貯蔵・輸送・充填に関する機器やシステムの信頼性・耐久性向上、低コスト化、性能向上等実用化検証や要素技術開発、及び当該技術を飛躍的に進展させることができる革新的技術開発や調査研究などを行い、その成果を産業界に提供することにより、水素エネルギー初期導入間近の関連機器製造・普及技術として完成させ、水素社会の真の実現に必要な基盤技術の確立を図る。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(8) 水素貯蔵材料先端基盤研究事業(運営費交付金)

概要

世界トップ水準の優れた研究者を中核に、国内外の研究機関・企業のバーチャルな連携の下、高圧水素貯蔵に比べよりコンパクトかつ効率的な水素貯蔵を可能とする水素貯蔵材料の性能向上に必要な条件等を明らかにすることにより、燃料電池自動車の航続距離の飛躍的向上を図る。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、水素貯蔵材料の基本原則、さらには水素貯蔵能力の革新的向上に必要な条件を明らかにすることにより、水素をより安全・簡便・効率的かつ低コストに輸送・貯蔵するための技術基盤を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(9) 水素先端科学基礎研究事業(運営費交付金)

概要

水素の輸送や貯蔵に必須な材料に関し、水素脆化等の基本原則の解明及び対策の検討を中心とした高度な科学的知見を要する先端的研究を、国内外の研究者を結集し行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、水素脆化、水素トライボロジーの基本原則の解明及び対策の検討等を行い、水素をより安全・簡便に利用するための技術指針を産業界に提供する。

研究開発期間

2006年度～2012年度

(10) 水素社会構築共通基盤整備事業(運営費交付金)

概要

燃料電池の導入・普及に資する基盤整備のため、製品性能の試験・評価手法及び国内外の基準・標準の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度を目途に、安全性等に係るデータを取得し、そのデータを基に試験・評価手法の確立、国際標準の確立、規制の再点検を三位一体で進める。

研究開発期間

2005年度～2009年度

(11) 固体酸化物形燃料電池実証研究(運営費交付金)

概要

発電効率が高く、分散型電源として期待される固体酸化物形燃料電池(SOFC)の研究開発・実用化の促進のため、耐久性を始めとしたデータの取得・課題

抽出等のための実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、SOFCシステムの実証試験を数十～数百台規模で実施し、蓄積が不足している耐久性を始めとした実証データの取得・課題抽出等を行い、SOFC技術開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(12) 定置用燃料電池大規模実証事業(運営費交付金)

概要

定置用燃料電池コージェネレーションシステムの実用化開発を支援するため、量産技術の確立と実用段階に必要なデータ収集を行う大規模実証を実施する。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、定置用燃料電池を大規模かつ広域的に設置し、実使用条件下における耐久性等の運転データを取得・分析、コストダウンに向けた課題抽出を行い、製品改良へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2005年度～2008年度

(13) 燃料電池システム等実証研究

概要

実条件に近い中での燃料電池自動車等の実証走行や、高圧水素貯蔵システム、多角的な燃料供給システムの検証を進め、水素エネルギー社会における水素利用の課題等を抽出するとともに、燃料電池・水素に対する国民的理解の醸成を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実使用条件下における技術的課題を抽出するとともに、環境特性、エネルギー総合効率、安全性、耐久性等に関する基準・標準に資するデータを取得し、燃料電池自動車、水素ステーションの研究開発等へのフィードバックを行う。

研究開発期間

2006年度～2010年度

4 - . 原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

4 - . . 軽水炉・軽水炉核燃料サイクル

< 新型軽水炉 >

(1) 次世代軽水炉等技術開発

概要

2030年前後に見込まれる大規模な代替炉建設需要に対応するため、安全性・経済性、信頼性等に優れ、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉の技術開発を行う

技術目標及び達成時期

2010年度までに、次世代軽水炉の実現に必要な要素技術開発等及びプ

ラント概念の成立性について見通しを得るための概念設計検討を行う。

研究開発期間

2008年度～2010年度（見直し）

< プルサーマルの推進 >

(2) 全炉心混合酸化物燃料原子炉施設技術開発

概要

プルサーマルが当面のプルトニウム利用策として期待されていることを踏まえ、既存の軽水炉に比べ約3倍のプルトニウムを装荷することができる全炉心混合酸化物燃料原子炉に必要な技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、原子炉の開発に必要な設計、解析、試験等を行い、全炉心混合酸化物燃料原子炉技術を確立する。

研究開発期間

1996年度～2011年度

< 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの円滑な移行のための技術開発 >

(3) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。そのなかで、次世代再処理工場から発生する高線量回収ウラン等を既存軽水炉燃料製造施設で取扱可能とする、次世代再処理工場と調和可能な回収ウラン等の除染技術について、調査・基礎試験等を行い、商業的に利用可能な除染技術候補の検討等を実施する。選定された技術については、プロセス試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、回収ウラン等の除染プロセスの候補技術の洗い出し及び候補プロセス技術の基礎試験を終了し、次世代再処理技術との適合性の検証を行い、プロセス試験を実施すべき除染プロセス技術を選定する。

また、2015年までに、選定した除染プロセス技術について工学化規模でのプロセス試験を行い、商業的に利用可能な転換前高除染技術としての実効性を検証する。

研究開発期間

2007年度～2015年度

< ウラン濃縮技術の高度化 >

(4) 遠心法ウラン濃縮技術開発

概要

我が国におけるウラン濃縮技術や生産能力の維持・向上のため、世界最高水準の性能を有するなど国際的に比肩し得る経済性と性能を有する新型遠心分離機を開発する。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、国際役務価格\$100/kg SWU相当を目指して、現在実用化している金属胴遠心分離機の約5倍という高い分離性能や同遠心分離器を上回る寿命など国際的に比肩し得る技術レベルを有する新型遠心分離機の開発を目指すとともに、最終仕様の新型遠心分離機を多数台用いたカスケード試験の実施により商用プラントとしての信頼性を確立し、運転要領の策定を行う。

研究開発期間

2002年度～2009年度

< 回収ウラン >

(5) 回収ウラン利用技術開発

概要

六ヶ所再処理工場で回収される回収ウランを再濃縮し、再び軽水炉で利用するため、濃縮施設等既存施設への影響等を把握し、転換プロセスを中心とした回収ウラン利用技術を開発する。併せて劣化ウラン酸化固形化についても検討を行う。

技術目標及び達成時期

2012年頃までに、劣化ウランの取扱・管理の容易さや貯蔵効率を向上させるための劣化ウラン酸化固形化（再転換を含む）技術の研究開発を行い、同技術に係る基礎プロセスを確立する。2015年度頃までに、再処理により回収される回収ウランの濃縮が可能な商用遠心分離機の設計を確定する。

研究開発期間

2008年度～2015年度

< 共通基盤技術開発 >

(6) 革新的実用原子力技術開発費

概要

原子力発電及び核燃料サイクルに関する革新的かつ基盤的技術であって実用化につながる研究開発テーマを競争的環境の下で広く提案公募方式により募集し、将来の原子力技術の発展及び技術の多様化につながる研究開発を行う。

なお、実施に当たっては、研究開発の特性に応じて既存技術分野、基盤技術分野、国際協力技術分野の3分野を設け事業を実施する。

技術目標及び達成時期

2012年まで、既存技術分野、基盤技術分野、国際協力技術分野において個別テーマ毎に研究開発を実施する。

なお、既存技術分野は2008年度で終了となる。

研究開発期間

2000年～2010年（見直し）

4 - - . 高速増殖炉（FBR）サイクル

(1) 発電用新型炉等技術開発

概要

FBR実証炉及び関連サイクル施設の早期実現を図るため、文部科学省と連携し、「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」を推進する。具体的には、実証炉に必

要な要素技術のうち、設計・建設段階において必要となる実プラント技術として、格納容器設計技術、耐震性評価技術、高温材料設計技術、保守技術の試験等を実施する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証炉の概念設計へ反映しうる設計基準データ等の技術的根拠を得る。

研究開発期間

2007年度～2010年度

(2) 高速炉再処理回収ウラン等除染技術開発(4 - - 参照)

4 - - . 放射性廃棄物処理処分

(1) 地層処分技術開発

概要

) 地層処分共通技術開発

高レベル放射性廃棄物等の地層処分における共通的技术として、今後段階的に進められる処分地選定の際に重要となる地質等調査技術の高度化開発を行う。

) 高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

高レベル放射性廃棄物処分に係る基盤技術として、人工バリア等の長期性能評価技術、処分場操業の際のオーバーパック溶接や搬送・定置等の遠隔操作技術の開発を行う。

) TRU廃棄物処分関連技術開発

TRU廃棄物の地層処分に係る基盤技術として、高レベル放射性廃棄物との併置処分の可能性も念頭に、TRU廃棄物に固有に含まれる核種の閉じ込め技術や人工バリア等の長期性能評価技術の開発を行う。

技術目標及び達成時期

) 地層処分共通技術開発

2011年度までに、処分地選定の初期段階で必要となる地上からの調査技術のうち、特に沿岸域の環境や高精度での地下水評価等に係る調査評価技術の高度化・確証を行う。

) 高レベル放射性廃棄物関連処分技術開発

2011年度までに、人工バリア等の長期性能評価技術や遠隔操作等の工学技術について高度化を図り、幅広い地質環境に対応可能な技術選択肢と成立性を提示する。

) TRU廃棄物処分関連技術開発

2011年度までに、TRU廃棄物に固有に含まれるヨウ素129や炭素14の閉じ込め、高アルカリ環境下での人工バリアの性能評価等に関し、幅広い地質環境に対応可能なデータ・モデルの整備と技術選択肢の提示を行う。

研究開発期間

1998年度～2011年度

(2) 管理型処分技術開発

）地下空洞型処分施設性能確認試験

概要

T R U廃棄物や発電所廃棄物等の余裕深度処分において検討されている「地下空洞型処分施設」の成立性確認のため、実規模大の空洞を利用した総合的な確認試験を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、実規模大の空洞内にコンクリートピット等からなる地下空洞型処分施設を構築し、施工性や初期性能の総合的な確認を行う。

研究開発期間

2006年度～2011年

(3) 放射性廃棄物共通技術開発

概要

）放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

放射性廃棄物処分に係る国内外の最新知見の収集・分析、重要かつ基礎的な課題の抽出並びに研究を実施し、長期に及ぶ処分事業等を支える技術基盤の拡充を図る。

）放射性核種生物圏移行評価高度化調査

放射性廃棄物処分の安全評価に共通的な基盤情報として、生物圏における核種移行プロセスを評価するため、日本の風土を反映した核種移行パラメータ・モデルを整備する。

技術目標及び達成時期

）放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

2011年度までに、放射性廃棄物処分に共通的な重要基礎技術として、地質環境の長期安定性評価、人工バリアや岩盤の長期挙動評価等に係る知見を整備する。

）放射性核種生物圏移行評価高度化調査

2011年度までに、沿岸域の環境も含めたわが国表層環境への適用とT R U廃棄物に固有の核種等を考慮した、生物圏核種移行のモデルとデータベースを構築する。

研究開発期間

2001年度～2011年度

4 - - . 原子力利用推進に資する電力系統技術

(1) イットリウム系超電導電力機器技術開発(運営費交付金)

概要

世界的にも我が国が最先端の技術力を有する次世代高温超電導線材を活用し、経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的な供給システムを実現するため、系統を適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立を目指す。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、イットリウム系超電導線材を用いたS M E S、電力ケー

ブル、変圧器実現のための重要な技術開発を行い、各機器の成立性を実証する。

研究開発期間

2008年度～2012年度

(2) 高温超電導ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)

概要

革新的な超電導送電技術を確立するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材を活用し、実用化のための実証試験及び評価を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

4 - - . その他電力供給安定化技術

(1) 風力発電電力系統安定化等技術開発(運営費交付金)

概要

大規模風力発電所等の普及拡大時において懸念される周波数変動等系統上の問題対策として、蓄電システムの併設による出力安定化技術を開発し、実態に応じたシステム稼働データの抽出や当該システムの有効性の検証を行う。

技術目標及び達成時期

長期実証運転を強いられた大容量システムの耐久性や信頼性を評価するため解体分析調査を行うことにより、当該技術の有効性を検証するとともに、そのシステムを確立する。

研究開発期間

2003年度～2008年度

(2) 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証事業(運営費交付金)

概要

大規模太陽光発電を電力系統に連系した場合に課題となる系統安定化対策やピーク対策のための技術等を開発するとともに、その有効性を実証する。

また、国内外の先進的な次世代技術の価格性能を比較することを通じて技術開発を加速する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、下記の実証研究を行い、その有効性を確認する。

(イ) 蓄電池等を組み合わせた出力変動抑制システムの有効性。

(ロ) 発電出力のピーク制御(午後のピーク帯へのシフト)の有効性。

(ハ) 大型インバータによる高調波抑制システムの有効性。

(ニ) 国内外メーカーの太陽電池モジュールの特性比較を行い、性能、経済性等を比較・検証。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 次世代蓄電システム実用化戦略的技術開発(運営費交付金)

概要

蓄電池技術は、新エネルギーの出力安定化や燃料電池自動車(FCV)・ハイブリッド自動車(HEV)・電気自動車(EV)等の高効率次世代自動車に共通する重要なコア技術である。そこで、高性能蓄電システムに係る要素技術開発、新材料開発及び基盤技術の開発を行う。

A. 系統連系円滑化蓄電システム技術開発

B. 次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発

技術目標及び達成時期

A. 2010年度末において、寿命10年、コスト4万円/kWh、1MW規模のシステムおよび要素技術の確立と2030年において寿命20年、コスト1.5万円/kWh、20～30MW規模の蓄電システムを見通せる技術開発。また、新エネルギー対応の充放電パターン等、基礎データの整備、大型化に伴う安全性や寿命等の評価手法の確立。

B. 2011年度末において、電池開発では、0.3kWhモジュールを作製し、重量エネルギー密度100Wh/kg、出力密度2000W/kg、寿命10年、コスト4万円/kWhを達成すること(条件:3kWhの組電池、100万台生産ベース)。電池構成材料及び電池反応制御技術の開発では重量エネルギー密度200Wh/kg、出力密度2500W/kg、コスト3万円/kWhを小型単電池で達成すること(上記と同条件)。また、電池周辺機器開発では、格段の高性能化、コンパクト化、低コスト化を達成すること。さらに、重量エネルギー密度500Wh/kgを見通せる新規概念・構造の蓄電池基礎開発の他、劣化・寿命診断法、安全性評価などの各種試験法等の開発およびそれら共通基盤技術の基準・標準化。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)

概要

従来の金属材料と比べ耐食性、耐久性、加工性などの飛躍的な向上が期待できる超高純度金属材料の発電プラント部材としての実用化を目指し、低コスト・量産化製造プロセス、及び加工・溶接技術等の開発を行い、部材としての実用特性の評価・検証を行う。

また、実用化に向けたフィージビリティ調査を行い経済性の評価等を実施するとともに、材料特性に関するデータベースの整備及びそれに必要な試験研究を行う。

技術目標及び達成時

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って

発揮できることを確認する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

4 - . 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

4 - - . 石油・天然ガス・石炭の探鉱・開発・生産技術

(1) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型ノ特別研究(運営費交付金)

概要

石油及び可燃性天然ガス資源の開発に係る技術の振興を図る観点から、大水深、複雑な地層といった悪条件化が進む石油・天然ガスの探鉱・開発技術、利用拡大が見込まれる天然ガス田の開発促進に資する天然ガス有効利用技術等について、短期間で実用化が期待され、民間ニーズに直結した研究開発を提案公募により実施する。

技術目標及び達成時期

2012年度までに、我が国の石油・天然ガスの探鉱・開発技術力の向上、及び天然ガスの利用の促進に向けた天然ガスの有効利用技術の開発を行う。

研究開発期間

2001年度～2012年度

(2) 石炭生産技術開発(クリーン・コール・テクノロジーの研究開発の一部)

概要

石油代替エネルギーである石炭の安定供給を図るため、低品位炭の有効利用、石炭生産性の向上のための研究開発等を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、インドネシアにおいて低品位炭の有効利用を図ることを目標に、低品位炭の発熱量を高め、自然発火性を抑制する低品位炭改質技術を確立する。

研究開発期間

2001年度～2009年度

(3) 石油精製物質等簡易有害性評価手法開発(運営費交付金)

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から、石油製品等に含まれる化学物質によるリスクを把握し、必要な対策を適切に行うことを可能とするため、*in vitro*培養系技術等の活用により遺伝子組換え細胞等を用いた*in vitro*系簡易有害性予測手法、また、トキシコゲノミクスを活用した短期動物試験結果と相関する遺伝子発現データセットを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、遺伝子導入技術、幹細胞分化誘導技術、生物発光技術等を適用した培養細胞を用いて、試験期間1ヶ月程度、発がん性、催奇形性及び免疫毒性を予測評価できる試験手法を開発し、また、遺伝子発現解析技術を短期動物試験に適用し、28日間反復投与試験結果と相関する遺伝子発現データセット

を完成させる。また、標準的な試験プロトコルを策定する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 石油資源遠隔探知技術の研究開発

概要

我が国が開発・運用する多様な地球観測センサ(ASTER、PALSAR等)の地球観測データを用いて、石油・天然ガス等の安定供給確保のため、資源開発・探査、環境観測等に有効なデータの処理解析手法の研究開発を行う。また、地球観測データのような大容量のデータを容易に扱えるシステムの研究開発を実施することで資源開発・探査、環境観測を含む多様な分野でのリモートセンシングの利用拡大を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、資源開発・探査、環境観測等の分野における地球観測データ処理・解析技術の向上及び地球観測データの利用の拡大を図る。

研究開発期間

1981年度～2010年度

(5) ハイパースペクトルセンサ等の研究開発(運営費交付金)

概要

資源開発に有効な岩石・鉱物や地質構造解析の高次元解析を可能とするハイパースペクトルセンサの開発を行うとともに、軌道上におけるデータ取得の実証を行い、センサ技術の確立を行う。

技術目標及び達成時期

2011年度までにスペクトル分解能200バンド前後のハイパースペクトルセンサを開発し、地表面のスペクトル情報を取得して資源開発に有効なセンサ技術の実証を行う。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(6) 次世代合成開口レーダ等の研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した合成開口レーダである次世代合成開口レーダ(PALSAR)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

PALSARの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、レーダ技術の高度化(アンテナ指向の電子制御化、分解能の向上、多偏波観測等)を図る。

研究開発期間

1993年度～2010年度

(7) 極軌道プラットフォーム搭載用資源探査観測システムの研究開発

概要

石油の生産及び流通の合理化を図る観点から行うものであり、石油及び可燃性天然ガス資源等の開発に資するため、資源探査能力を格段に向上した光学センサである資源探査用将来型センサ(ASTER)の健全性評価やセンサを維持することにより、取得される画像データを用いた石油・天然ガス資源の遠隔探知を行う技術を確立する。

技術目標及び達成時期

ASTERの開発、健全性の評価・維持を実施することにより、2010年度までに、センサ技術の高度化(ポインティング機能の追加、分解能の向上、熱センサの搭載等)を図る。

研究開発期間

1987年度～2010年度

4 - - . 石油・天然ガスの有効利用技術

(1) 石油燃料次世代環境対策技術開発

概要

バイオマス燃料から製造した石油製品が自動車排出ガスに及ぼす影響、新たな自動車燃焼技術(自着火燃焼(着火までに燃料と空気を十分に混合し、その混合気体を点火プラグの使用なしで圧縮することにより着火させる燃焼法でNOx排出低減、熱効率が高い等の利点がある))に適応した燃料に関する技術開発を実施する。

また、建設機械、発電機等のオフロードエンジンの排ガスによる環境負荷低減や石油燃焼機器の効率的な利用を進めるための技術開発を実施する。

技術目標及び達成時期

バイオマス燃料の利用時における、燃料と自動車エンジン技術の両面の影響評価を進め、技術的課題を解決し、運輸部門における燃料多様化を目指す。

また、オフロードエンジンの規制は欧米が先行していることから、2012年頃、欧米において規制強化が予定されている排ガス規制に対応した技術を確立し、我が国における規制強化に対応可能な燃焼技術を実現することを目指す。

研究開発期間

2002年度～2011年度

(2) 石油精製高度機能融合技術開発

概要

石油精製業を中心とする石油コンビナート全体の横断的かつ高度な運営機能の融合を図り、単独企業のみでは達成困難なコンビナート域内の省資源、省エネルギーの向上を進めるため、異業種異企業間における限りある貴重なエネルギー資源の利用効率の高い生産技術に関し技術の開発・実証を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、我が国における他のコンビナートへの波及効果を含め、CO₂排出量を63万トン/年削減可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(3) 将来型燃料高度利用技術開発

概要

省エネ、二酸化炭素削減効果が見込まれる燃料電池自動車の燃料である高純度(99.99%以上)水素を安定的かつ経済的に供給することは重要である。石油は、その長所として豊富な水素供給余力と安価な水素製造技術及び全国に展開した災害に強いガソリンスタンドを保有している。これら石油の長所を活かした水素供給システムの確立により、水素社会の早期実現に貢献するものである。本事業では、製油所からの高純度水素供給技術開発とガソリンスタンドを拠点とする高純度水素製造技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

コスト低減のため製油所におけるナフサから高効率(80%以上)な高純度水素製造を可能とする新たな技術を開発する。また、供給地のガソリンスタンドにおいて有機ハイドライドから高純度の水素を高効率(80%)に取り出すための水素発生装置を開発する。また、脱硫後の灯油硫黄分を検出限界以下の10ppb以下とする脱硫剤の開発を行うとともに、貴金属使用量を2-3wt%から0.5wt%以下まで低減しても、従来と同等の高い性能が維持できる改質触媒を開発する。さらに、膜分離型反応器を用いた99.99%高純度水素の製造効率を80%、4万時間の耐久性が期待できる水素製造システムを開発する。

研究開発期間

2008年度～2010年度

(4) 革新的次世代石油精製等技術開発

概要

原油価格の高騰・高止まりや原油の重質化と製品需要構造変化等の石油を巡る大きな環境変化のなか、連産品である石油製品を今後とも長期的に安定化かつ効率的に供給するためには、製油所の更なる高度化に向けた技術の開発実用化が必要である。このため、非在来型原油を含めた重質油を原料として、製油所におけるボトムレス化、余剰となる分解留分の高付加価値等のためのプロセスや触媒技術等の開発を行う。また、次世代の技術シーズ創出のため、これまでの技術とは異なる発想により我が国唯一の革新的な新規触媒研究、新規膜分技術研究、新規製造プロセス研究等を産官学の連携等により実施する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに重質油対応型高過酷度接触流動分解技術(HS-FCC)については、3千BD規模(商業レベルの1/10規模)の実証研究を通じ、プロピレン収率20%以上(既存技術4%程度)、将来不足が予想される高オクタン価ガソリン基材(RON98(既存技術92程度))の製造を可能とする技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

(5) 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサー（COセンサー・メタンセンサー）を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジーおよびMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性（数百PPM以下の故障率）、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

(6) 天然ガス未普及地域供給基盤確立実証試験（運営費交付金）

概要

天然ガスの供給手段が存在せず（パイプラインはもとよりサテライト供給でも採算が合わないため）石油等の燃料に依存している地方都市部の中小規模の天然ガス需要に対し、天然ガスハイドレートを利用した、新たな輸送技術を確認する。

技術目標及び達成時期

従来のLNGチェーンによる供給に係る投資コストに対し、そのコストを約1/4に低減する事が可能な天然ガスハイドレート（NGH）供給システムを2008年度までに確立する。

研究開発期間

2006年度～2008年度

(7) 天然ガスの液体燃料化（GTL）技術実証研究（運営費交付金）

概要

硫黄等を含まず排出ガスがクリーン、着火性が高いという特徴を有することから石油系燃料代替として期待されるGTLについて、天然ガス中に含まれるCO₂を除去せず、原料として積極的に活用することから、従来利用が困難であったCO₂を多く含むガス田からの天然ガスが利用可能、CO₂除去装置が不要であることによる生産設備コストの低減が可能、といった強みを有する我が国独自のGTL製造技術の確立を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、実証プラントによる運転研究（500バレル/日）を行い、商業規模でのGTL製造技術を確認する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

- (8) 高耐久性メンブレン型 L P ガス改質装置の開発 (運営費交付金) (4 - - 参照)
- (9) 石油・天然ガス開発・利用促進型大型 / 特別研究 (運営費交付金) (4 - - 参照)
- (1 0) 高効率ガスタービン実用化技術開発 (4 - - 参照)

4 - - . オイルサンド等非在来化石資源の利用技術

(1) メタンハイドレート開発促進委託費

概要

日本周辺海域に相当量の賦存が見込まれ、国産のクリーンなエネルギー資源として有望なメタンハイドレートを利用可能とするため、資源量評価手法、生産手法及び環境影響評価手法等の確立のための技術開発を行う。

技術目標及び達成時期

2 0 1 6 年度までに、商業的産出のための技術を整備することを目指し、日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化、有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択及び現場産出試験等による生産手法の確立等を推進する。

研究開発期間

2 0 0 1 年度 ~ 2 0 1 6 年度

(2) 革新的次世代石油精製等技術開発 (4 - - 参照)

4 - - . 石炭クリーン利用技術

(1) 革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト

概要

石炭の高効率な利用を図るために、

- ・ 酸素吹きによる石炭ガス化発電 (I G F C) の開発実証
- ・ 化学吸収法による C O 2 の分離・回収技術の実証
- ・ C O 2 を輸送するための船舶の設計
- ・ C O 2 を貯留するための発生源近傍における貯留ポテンシャルやコストの評価
- ・ 石炭ガス化から CCS まで一貫したトータルシステムの設計等を行う。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化については、2 0 0 9 年度までに、パイロットプラントにおいて、高圧の石炭ガスから C O 2 の分離・回収技術の確立及びガス化炉の信頼性向上へ向けて、3 炭種以上の適応炭種拡大試験を実施する。また、C C S については、2 0 1 6 年度頃から C O 2 地中貯留の実証試験に着手する。

研究開発期間

2 0 0 7 年度 ~ 2 0 1 2 年度

(2) 国際革新的ゼロエミッション石炭火力発電プロジェクト補助金

概要

石炭火力発電から排出されるCO₂の削減技術について諸外国との実証普及事業等を実施し、当該技術の普及基盤を整備することにより、エネルギー供給に対する環境上の制約を取り除き、もって我が国エネルギー需給構造の安定化を図る。

技術目標及び達成時期

石炭ガス化技術等実証普及事業では、ゼロエミッション型石炭火力発電の実証プロジェクト(Future Genプロジェクト)への参画を通じた石炭ガス化・発電技術、CO₂分離回収技術、CO₂輸送貯留技術等に関する情報収集や関連する技術調査の実施等により、我が国におけるゼロエミッション型石炭火力発電の実用化開発に資する技術・知見を得る。また、将来のCO₂の地中貯留に際しては、国民の正しい理解が不可欠であり、これを念頭においたゼロエミッション型石炭火力発電に係る普及啓蒙活動を積極的に実施する。

酸素燃焼国際共同実証事業では、既存の微粉炭火力発電の改造による酸素燃焼方式のゼロエミッション型石炭火力発電プラントの実用化を目標とするものであり、既存のプラントの改造により対応可能であること、酸素燃焼を行うことにより、燃焼ガスからCO₂を分離する装置が不要であることから、比較的低コストで極めて大きなCO₂削減効果が期待できる。

研究開発期間

2007年度～2016年度

(3) 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発費補助金

概要

従来の超々臨界圧火力発電(USC)は、蒸気温度の最高温度は630程度が限界で、送電端熱効率も42～43%が原理的限界といわれてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電技術(A-USC)の開発を行うものである。A-USCは、蒸気温度700級で46%、750級で48%の高い送電端熱効率の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレイス需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。そのため、ボイラーメーカー、タービンメーカー及び材料メーカーが共同でA-USCの技術開発に取り組む。

技術目標及び達成時期

平成22年度までにシステム基本設計を完了し、シミュレーションにより送電端熱効率46%～48%の達成が可能なことを確認する。平成24年度までにボイラー、タービン部材等が700以上の蒸気温度に耐えられるかどうかを試作、評価し、経済性を含めたシステム成立性への見通しを得る。平成27年～平成28年度に実缶試験、回転試験を実施し、蒸気温度700以上の条件下でボイラー、タービンの信頼性を確認する。また、ボイラー、タービン部材について3万～7万時間の長期信頼性試験を実施し材料特性を検証する。

研究開発期間

2008年度～2016年度

(4) 石炭利用技術開発(一部、運営費交付金)(クリーン・コール・テクノロジーの

研究開発の一部)

概要

環境適合的な石炭利用の拡大を図るため、石炭ガス化、無灰化技術による転換効率向上に資する技術や石炭からの水素製造技術等、クリーン・コール・テクノロジーの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2008年度までに、

- ・ 石炭から合成ガスや軽質オイルを併産する高効率な石炭部分水素化プロセス技術を20t/日のパイロットプラント規模で確立する(石炭部分水素化熱分解技術の開発)

2009年度までに、

- ・ 化学原料等に利用可能な合成用ガスを石炭乾留ガスから無触媒で製造する技術をパイロットプラントで確立する(無触媒石炭乾留ガス改質技術開発)

2011年度までに、

- ・ 石炭利用プロセスにおいて、環境分析技術の高精度化、環境影響成分の挙動解析のためのモデルの構築等により、環境への影響低減手法を開発する(戦略的炭ガス化・燃焼技術開発)

研究開発期間

1995年度～2008年度(2008年度見直し)

- ・ 戦略的炭ガス化・燃焼技術開発 2007年度～2011年度
- ・ 無触媒石炭乾留ガス改質技術開発 2006年度～2009年度
- ・ 石炭部分水素化熱分解技術 2003年度～2008年度

(5) 噴流床石炭ガス化発電プラント開発費補助金

概要

供給安定性に優れた石炭の高効率かつ低環境負荷での利用を図るため、石炭をガス化して燃料とし、コンバインドサイクル(ガスタービンと蒸気タービンの組合せ)を駆動する高効率発電技術(石炭ガス化複合発電技術(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)の実証試験を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、25万kWの実証機を用いた実証試験により、熱効率40.5%(送電端、高位発熱量ベース)を目指す。この目標は50万kWの商用機における熱効率46～48%に相当する。本技術は実証試験終了後の2010年度より商用化が可能である。

研究開発期間

1999年度～2009年度

(6) 環境調和型製鉄プロセス技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)

4 - - . その他共通

(1) イノベーション実用化補助事業(運営費交付金)(4 - - 参照)

- (2) 非化石エネルギー産業技術研究助成事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (3) 固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (4) 燃料電池先端科学研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (5) 新利用形態燃料電池技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (6) 高耐久メンブレン型 L P ガス改質装置の開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (7) 固体酸化物形燃料電池システム要素技術開発(運営費交付金)(4 - - 参照)
- (8) 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (9) 水素貯蔵材料先端基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (10) 水素社会構築共通基盤整備事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (11) 水素先端科学基礎研究事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (12) 固体酸化物形燃料電池実証研究 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (13) 定置用燃料電池大規模実証事業 (運営費交付金)(4 - - 参照)
- (14) 燃料電池システム等実証研究 (4 - - 参照)

5．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

5 - ．総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークアプローチの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

5 - ．運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

5 - ．新エネルギー等の開発・導入促進

- 事業者支援補助金等による初期需要創出
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

5 - ．原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

5 - ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

6．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1) 平成16年7月7日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用プログラム基本計画(平成16・02・03産局第6号)は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (2) 平成17年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第8号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第10号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第12号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第11号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成16・06・04産局第13号)は、廃止。
- (3) 平成18年3月31日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第14号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第9号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第17号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第12号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成17・03・25産局第13号)は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画(平成17・03・29産局第2号)は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (4) 平成19年4月2日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成17・03・31産局第19号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第15号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第18号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第17号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成18・03・31産局第16号)は、廃止。
- (5) 平成20年4月1日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・26産局第1号)、新エネルギー技術開発プログラム基本計画(平成19・03・20産局第4号)、燃料技術開発プログラム基本計画(平成19・03・19産局第7号)、電力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・16産局第3号)、原子力技術開発プログラム基本計画(平成19・03・23産局第2号)は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

(エネルギーイノベーションプログラム)

「水素先端科学基礎研究事業」基本計画

新エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となることを目指し「エネルギーイノベーションプログラム」が制定された。本事業は、その「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として実施する。

燃料電池は、上記の目的達成に向けたキーテクノロジーとして、その実用化への期待が高く、燃料電池実用化戦略研究会（経済産業省資源エネルギー庁長官の私的研究会、1999年12月設置）において「固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略」が策定され、産学官が一体となって燃料電池実用化のための技術開発等に積極的に取り組んでいる。

また、2002年5月に「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」が設置され、関係各省庁の緊密な連携のもとで燃料電池実用化に必要な安全性確保のための燃料電池・水素インフラ等に係る6法律28項目の関連規制の包括的な再点検をはじめとする規制・技術基準の整備及び標準化が進展している。さらに第3期科学技術基本計画（2006年3月）においては「先進燃料電池システムと安全な革新的水素貯蔵・輸送技術」が戦略重点科学技術として選定され、新・国家エネルギー戦略（2006年5月）では燃料電池自動車に関する技術開発の推進が記され、経済成長戦略大綱（2006年7月）において運輸エネルギーの次世代技術開発が重点分野として位置付けられている。エネルギー基本計画（2007年3月）、次世代自動車・燃料イニシアティブ（2007年5月）においても燃料電池および燃料電池普及のために必要となる水素技術開発の重要性が述べられ、さらには、Cool Earth 50－エネルギー革新技術に定置用燃料電池、燃料電池自動車及び水素製造・輸送・貯蔵が位置付けられている。

また、2010年7月には燃料電池実用化推進協議会によって、産業界の総意として2015年にFCVの一般ユーザーへの普及開始を目指すことが発表されている。さらに、2011年1月には自動車メーカー及び水素供給事業者13社が共同声明を発表し、自動車メーカーがFCV量産車を2015年に4大都市圏を中心とした国内市場への導入と一般ユーザーへの販売開始を目指し、開発を進めていることや、水素供給事業者が2015年までにFC

V量産車の販売台数の見通しに応じて100箇所程度の水素供給インフラの先行整備を目指すこと等が示された。このように、官民挙げて燃料電池の導入・普及に積極的に取り組んでいるところであるが、燃料である水素を高圧化した状態で輸送・貯蔵する等水素を高いエネルギー密度で取り扱う場合の水素物性については、いまだ世界的にも知見の集積が乏しく、特に、これらの状態における容器や機器で使用する材料の水素脆化（水素の吸収によって金属材料が脆くなる現象）のメカニズム解明は、水素を長期間、安全に利用するために早急に確立しなければならない重要な基礎的科学的知見である。

このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、水素物性等に係る基礎的な研究を実施し、高度な科学的知見の集積を行い、水素社会到来に向けた基盤整備を行うことを目的に、高圧化状態における水素物性の解明や材料の水素脆化にかかる基本原理の解明及び対策検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を実施する。

また、2015年燃料電池自動車普及開始に向けて、産業界と連携をとりながら必要なデータ、考え方を提示し、NEDOの他の水素関連事業との連携関係も整理して、産業界全体の効率的な技術開発に貢献することを目指す。

本プロジェクトの実施により、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な水素物性、水素環境下での材料特性に関わる基礎研究が進展し、水素エネルギー社会構築に向け、燃料電池を広く一般社会への普及を円滑に実現するための水素エネルギー・燃料電池の実用化技術の進展及び安全の確保、標準化、研究開発及び利用を支える優秀な人材の養成・確保等に大きく貢献することが期待される。

(2) 研究開発の目標

・燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及、水素社会構築のためのインフラ整備に向け「NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010」に記載された2015年普及開始段階での技術レベル*1を実現するために必要な水素物性・材料特性に係るデータ取得、材料劣化等の基礎的な研究及びメカニズム解明を行う。

・基礎的研究を踏まえ、水素環境下で長期使用に使用できる材料又は劣化評価方法や運用方法などの提案を行う。

・自動車業界および水素インフラ業界が取り組んでいる水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題について「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」と連携し、2015年までに水素関連機器の鋼種拡大等が可能となるデータ取得・提供に貢献する。

(* 1) 水素ステーションコスト : 4億円 (70MPa) ~ 3億円 (35MPa)
 水素供給コスト : 90円 / Nm³

(3) 研究開発の内容

上記の目標を達成するため、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

なお、本事業の推進にあたっては、水素社会構築共通基盤整備事業の進捗や規制再点検及び国際標準化の必要なテーマに対応する水素物性、材料特性データの取得

を行う等国内の規制再点検及び国際標準化活動の動向を踏まえながら基礎研究を実施する。なお、今後の展開如何によって追加の必要が生じた項目については、逐次、追加的に実施する。

- ① 高圧水素物性の基礎研究
- ② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究
- ③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究
- ④ 高圧水素トライボロジーの解明
- ⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究(平成22年度まで実施)

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独又は複数の企業、研究組合、公益法人、大学、国研等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。)から公募によって研究開発実施者を選定後、業務委託契約、共同研究契約等を締結する研究体制を構築し、委託、共同研究により実施する。

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDOが指名するプロジェクトリーダー 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長 村上敬宜氏の下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、NEDOに設置する委員会や技術検討会等において外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度、プロジェクトの進捗について報告を受けるなどを行う。また、年に一回程度、事業を効率的に推進するために、本事業の実施者が一堂に会する報告会を開催し、それぞれのテーマ間の連携、情報共有、共通認識を図る。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成18年度～平成24年度の7年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果などについて、外部有識者による研究開発の中間評価を平成20年度及び22年度に、事後評価を平成25年度に実施する。なお、評価の

時期については、当該研究開発に係わる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等適宜必要に応じて前倒しする等の見直しを行うものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 研究成果の普及

本事業により得られた成果は、NEDO及び実施者ともに水素社会に向けた燃料電池自動車、定置用燃料電池システム、水素インフラ等の普及に資する企業等における材料開発及び国際標準形成に必要な基礎的科学的知見としてその普及に努めるものとする。

② 知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第一号ハに基づき実施する。

(4) その他

本事業により得られた成果の普及や定着のために、近い将来を担う産業界若手 技術者等の人材育成活動を実施し、本技術分野における基礎・基盤技術の底上げを図る。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成18年2月、制定。

(2) 平成20年3月、プロジェクトリーダーの設置に伴い研究開発の実施体制、人材育成活動に関する事項を記入し、その他重要事項を各々変更して改訂。

(3) 平成20年7月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1)研究開発の目的」の記載を改訂。

(4) 平成23年3月、研究開発の実施体制などを変更して改訂。

(別紙)研究開発計画

研究開発項目：

- ① 高圧水素物性の基礎研究
- ② 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究
- ③ 高圧化状態における高分子材料の長期使用および加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究
- ④ 高圧水素トライボロジーの解明
- ⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究(平成22年度まで実施)

1. 研究開発の必要性

燃料電池及び水素技術開発の進展により、更に高い圧力の圧縮水素等により、より多くの水素を貯蔵・輸送するための水素貯蔵容器・材料の普及が見込まれている。これに伴って、さらに高圧化した場合の安全性等を確保しながら、低コストで、長期使用できる材料が求められる。具体的には、高圧化した状態における水素物性の解明及び高圧化による材料の水素脆化の基本原理の解明及び対策検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を基本とする基礎研究が不可欠である。

さらに、当該分野における我が国の国際競争力確保のためには、水素社会構築に向けた標準化・規制見直しに必要なデータを取得し、世界に先駆けた高度な国際標準提案を行う必要がある。このため、高圧水素などを利用する燃料電池自動車やインフラなどでの関連機器で使用する材料の試験データ取得や基礎的なメカニズム解明を行う必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

研究開発の具体的内容は、次の通り。なお、各研究開発の成果をより実効的に普及・定着させるために、近い将来を担う産業界若手技術者等の人材育成活動(成果を活用した講義を含む)にも活用し、本技術分野における基礎・基盤技術の底上げを図る。

① 高圧水素物性の基礎研究

より高い圧力状態にある水素の基本的な挙動を解明する。水素圧力100MPa、温度400℃までのPVTデータ、粘性係数、熱伝導率などの水素基礎物性値を測定し、データベースを構築する。これらの物性値情報は、水素熱流動系の機器設計や各種のシミュレーションに活用することができる。

② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本理解明及び長期使用および加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究

より高い圧力状態にある水素が、その環境下にある材料の水素が与える影響を解明する。例えば、材料の相転移などの構造変化(マルテンサイト転移)や材料中の異種介在物の関与、材料中の水素拡散の影響などを明らかにして、水素脆化による材料の劣化メカニ

ズムを解析する。これにより、水素インフラなどに利用できる新規材料の設計方針に寄与する提案を行う。

また、燃料電池自動車や水素インフラで実使用する金属材料は、長期に水素環境下で使用され、さらに、実際に材料が利用されるときは、加工（成形、溶接、表面修飾）が成されてから利用される。そこで、材料に施される加工の水素脆化に与える影響を解明する基礎研究を実施するとともに、加速劣化試験方法など、材料の劣化を簡易に短期間で評価できる方法を提案する。また材料中の水素拡散や、シール材からの漏洩をシミュレーションを用いて実験結果に理論的根拠を与え、材料や機器の設計方針として活用できるよう一般化を試みる。

③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究

燃料電池自動車や水素インフラで実使用する高分子材料は、長期に水素環境下で使用され、さらに、実際に材料が利用されるときは、加工（成形、溶接、表面修飾）が成されてから利用される。そこで、材料に施される加工が水素中での材料劣化に与える影響を解明する基礎研究を実施するとともに、加速劣化試験方法など、材料の劣化を簡易に短期間で評価できる方法を提案する。

④ 高圧水素トライボロジーの解明

燃料電池自動車や水素インフラでは、水素環境下で動作する機器が不可欠であるが、水素環境下では、大気中とは異なる材料表面が形成され、特異な摩擦挙動が予想される。水素環境下でのトライボロジーのメカニズムを解明し、水素環境下で作動する機器の確実な動作を確保するのに資する。

⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究

水素環境下に長期に使用される材料中の水素拡散や、機器のシール材からの漏洩をシミュレーションして、材料や機器の設計方針を提案する。（平成22年度まで実施）

3. 達成目標

本事業の実施により、燃料電池を広く一般社会への普及を円滑に実現するために、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で、必要となる水素物性、材料特性に関わる基礎研究が進展し、燃料電池の実用化及び標準化、国際競争力の確保に大きく貢献するものとする。国内の規制再点検及び国際標準化活動の動向を踏まえながら、水素社会構築の進捗や規制再点検及び国際標準化の必要なテーマに対応する水素物性、材料特性データを取得し、提供する。

具体的には、燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及、水素社会構築のためのインフラなど水素社会構築（例えば、「NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010」に記載された2015年普及開始段階での技術レベル^{*1}を実現する）に必要とされる水素物性、材料特性に係るデータ取得等と材料劣化などの基礎的な研究とメカニズム解明する。また、基礎的研究を踏まえ、水素環境下で長期使用に使用できる材料、または、劣化評価方法や運用方法などの提案を行う。

研究開発項目毎の個別研究開発テーマの開発目標（中間目標・最終目標）及び実施

内容の詳細については、採択が決定した後、NEDOと委託先との間で協議の上、基本計画に追加的に定めるものとする。

追加として定めた中間目標及び最終目標は以下に示す通り。

(1) 中間目標(平成19年度末)

水素高圧状態下における水素の物性や水素機器材料中の水素挙動等基礎的メカニズム解明等に必要となる研究体制(人材招聘を含む)、研究設備や評価機器など 研究環境を整備し、基礎的考察・評価を進めるための手法を検討・導出するとともに、当該分野における今後の研究開発の方向性等が有効である目処付けを行う。

① 高圧水素物性の基礎研究

PVTデータ、粘性係数、物質に対する水素の溶解度等水素物性に関する測定環境を整備し、精度良く計測できる手法(例えば、温度、圧力および 密度測定装置用シンカーの校正等)を検討・導出する。

② 高圧/液化による金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び対策検討

高圧又は液化水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムを解明するための試験・分析・解析環境を整備し、基礎的考察や評価を進めるための手法(例えば、材料中の水素濃度測定法やき裂先端近傍の組織・強度測定法等)を検討・導出する。

③ 液化・高圧化状態における長期使用及び加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究

液化・高圧化状態に曝される材料、部品等の加工(成形・表面修飾)等の影響について、上記②における科学的知見も鑑み、考察・評価を進めるための具体的な試験や分析等に必要となる環境を整備し、例えば、ステンレス鋼、低合金鋼並びに部品・部材等加工品における水素侵入特性や、加工品に生じる加工ひずみや欠陥の差異が材料疲労強度に及ぼす影響について明らかにする。

④ 高圧水素トライボロジーの解明

高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール 材料等について、滑り摩擦試験、フレッティング摩擦試験、摺動試験等トライボロジー基礎物性データを測定できる環境を整備し、精度良く計測できる手法を検討・導出する。

⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究

高圧または液化水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムを理論的に裏付けるための材料内水素拡散挙動に関するシミュレーターに関する基本設計を行い、解析ツールを整備するとともに、実験結果との照合を行い、基礎的考察やシミュレーション技術開発の ための方向性等が有効であるめど付けを行う。

(2) 中間目標(平成21年度末)

水素高圧状態下における水素の物性や水素機器材料中の水素挙動等基礎的メカニズム解明等に関し、具体的な試験、分析、解析、評価等を重ね、理論的考察を進めるとともに、科学的裏付けとなる検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・指針等内容を精査・強化する。

① 高圧水素物性の基礎研究

PVTデータ、粘性係数、物質に対する水素の溶解度等水素物性(20年度から熱伝導率を追加)について、具体的な試験、解析、評価を重ね、その有効性について、理論的考察を進めるとともに、測定精度や信頼性向上に向けた検討に基づき、校正技術を確立する。

② 高圧/液化による金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び対策検討

高圧または液化水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムを解明するために、具体的な材料に対する各種試験、分析、解析、評価等を重ねるとともに、水素脆化の基本原理に関する考察を深める。また、発生した現象を科学的に裏付ける検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・利用のための管理指針等の内容を精査・強化する。

③ 液化・高圧化状態における長期使用及び加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究

液化・高圧化状態に曝される材料、部品等の加工(溶接等)プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記②における科学的知見も鑑み、例えば、溶接材の疲労強度に及ぼす水素の影響について明らかにするとともに、炭素鋼のような低コスト材料における水素の影響評価手法について検討・導出する。

④ 高圧水素トライボロジーの解明

高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な材料を用い、滑り摩擦試験、フレッティング摩擦試験、摺動試験等の試験、分析、解析、評価等を重ね、理論的考察を進めるとともに、発生した現象を科学的に裏付ける検証データを取得・蓄積し、自ら導出した仮説・提案・材料利用のための設計指針等の内容を精査・強化する。

⑤ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究

例えば、機械システム全体も考慮した流体及び機械構造内の水素拡散挙動(有限要素法によるき裂先端応力場と水素拡散の連成現象等)を考慮した水素漏洩評価に関するシミュレーターに関する基本設計拡張を行い、解析ツールを整備するとともに、繰り返し実験結果との照合を行い、基礎的考察やシミュレーション技術開発の有効性を評価する。

(3) 最終目標(平成24年度末)

燃料電池自動車や水素ステーションなど、高圧状態の水素を利用する際に重要となる、水素高圧状態下における水素の物性、水素を取り扱う容器や機器における材料の水素脆化やトライボロジーなど、水素に関わる現象や挙動の基礎的メカニズムなどを解明するとともに、基礎的な水素物性のデータベース構築など学術的な基盤を確立し、関係産業界が水素を利用する際の技術の信頼性向上や安全性の確立に資する。

① 高圧水素物性の基礎研究

PVTデータ、粘性係数、熱伝導率、比熱、物質に対する水素の溶解度等 水素物性について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素物性データベースを纏め、関係産業界に提供するとともに、更なる測定精度や信頼性向上のための校正技術を纏める。

② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究

高圧水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムについて、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素環境下における組織・強度変化予測手法や疲労き裂進展挙動予測手法を纏め、関係産業界に提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

また、高圧化状態に曝される材料、部品等の加工(成形・溶接・表面修飾)プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記②における科学的知見も含めて、水素材料データベース、最適水素材料探索指針を纏め、関係産業界に提供するとともに、水素用機械要素設計法や材料劣化判断・健全性評価法等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

さらに、水素関連機器に用いる材料内の水素拡散挙動・漏洩挙動を計算するシミュレーション手法を用いて、上記の実験・解析データに理論的根拠を与え、産業界に対して水素材料や水素機械の信頼性向上や安全性の確立のための科学的知見を可能な限り一般化して提供することを試みる。

③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究

高圧化状態に曝される高分子材料、部品等の加工(成形・溶接・表面修飾)プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記②における科学的知見も含めて、水素材料データベース、最適水素材料探索指針、耐水素 ゴム・樹脂創製指針を纏め、関係産業界に提供するとともに、水素用機械要素設計法や材料劣化判断・健全性評価法等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

④ 高圧水素トライボロジーの解明

高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを纏め、関係産業界に提供するとともに、高圧水素トライボシステムや使用する材料に関する設計指針や管理指針等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の摺動材料やシール材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。

平成23年度実施方針

新エネルギー部

1. 件名:プログラム名 エネルギーイノベーションプログラム
(大項目) 水素先端科学基礎研究事業

2. 根拠法:

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第一号ハ及び第七号

3. 背景及び目的・目標

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となることを目指し「エネルギーイノベーションプログラム」が制定された。本事業は、その「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として実施する。

燃料電池は、上記の目的達成に向けたキーテクノロジーとして、新産業創造等に資する水素エネルギー社会の構築に向けたキーテクノロジーとしてその実用化への期待が高く、燃料電池実用化戦略研究会（経済産業省資源エネルギー庁長官の私的研究会、1999年12月設置）において「固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略」が策定され、産学官が一体となって燃料電池実用化のための技術開発等に積極的に取り組んでいる。

また、2002年5月に「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」が設置され、関係各省庁の緊密な連携のもとで燃料電池実用化に必要な安全性確保のための燃料電池・水素インフラ等に係る6法律28項目の関連規制の包括的な再点検をはじめとする規制・技術基準の整備及び標準化が進展している。

また、2010年7月には燃料電池実用化推進協議会によって、産業界の総意として2015年にFCVの一般ユーザーへの普及開始を目指すことが発表されている。さらに、2011年1月には自動車メーカー及び水素供給事業者13社が共同声明を発表し、自動車メーカーがFCV量産車を2015年に4大都市圏を中心とした国内市場への導入と一般ユーザーへの販売開始を目指し、開発を進めていることや、水素供給事業者が2015年までにFCV量産車の販売台数の見通しに応じて100箇所程度の水素供給インフラの先行整備を目指すこと等が示された。このように、官民挙げて燃料電池の導入・普及に積極的に取り組んでいるところであるが、燃料である水素を高圧化した状態で輸送・貯蔵する等水素を

高いエネルギー密度で取り扱う場合の水素物性については、いまだ世界的にも知見の集積が乏しく、特に、これらの状態における容器や機器で使用する材料の水素脆化（水素の吸収によって金属材料が脆くなる現象）のメカニズム解明は、水素を長期間、安全に利用するために早急に確立しなければならない重要な基礎的科学的知見である。

このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、水素物性等に係る基礎的な研究を実施し、高度な科学的知見の集積を行い、水素社会到来に向けた基盤整備を行うことを目的に、高压化状態における水素物性の解明や、材料の水素脆化に係る基本原理の解明及び対策検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を実施する。また、2015年の燃料電池自動車普及開始に向けて、産業界と連携をとりながら必要なデータ、考え方を提示し、NEDO の他の水素関連事業との連携関係も整理して、産業界全体の効率的な技術開発に貢献することを目指す。

本プロジェクトの実施により、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な水素物性、水素環境下での材料特性に関わる基礎研究が進展し、水素エネルギー社会構築に向け、燃料電池を広く一般社会への普及を円滑に実現するための水素エネルギー・燃料電池の実用化技術の進展及び安全の確保、標準化等に大きく貢献することが期待される。

<研究開発の目標>

- ・燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及、水素社会構築のためのインフラ整備に向け「NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010」に記載された2015年普及開始段階での技術レベル*1を実現するために必要とされる水素物性、材料特性に係るデータ取得等と材料劣化などの基礎的な研究とメカニズム解明を行う。
- ・基礎的研究を踏まえ、水素環境下で長期使用に使用できる材料、または劣化評価方法や運用方法などの提案を行う。
- ・自動車業界及び水素インフラ業界が取り組んでいる水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題について「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」と連携し、2015年までに水素関連機器の鋼種拡大等が可能となるデータ取得・提供に貢献する。

*1【2015年普及開始段階での技術レベル】

○ 水素供給インフラ

水素ステーションコスト: 4億円(70MPa)～3億円(35MPa)

水素供給コスト : 90円/Nm³

○ FCV

システムコスト*2 : 約100万円

*2: 生産台数を50万台と想定した場合の製造コスト(システム出力100kW、水素タンクを除く)を示す。

4. 平成22年度(委託、2/3共同研究)事業内容

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長 村上 敬宜氏をプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施した。

なお、平成22年度より、産業技術総合研究所からの再委託先となっていた5大学、1公的研究機関、1民間企業を NEDO からの直接委託先に変更し、責任体制をより明確にするとともに情報の横通しを強化した。加えて産業界におけるニーズを的確に把握し、研究成果を効率よく展開することを狙い、平成22年度上期中に民間企業等実施者の公募を実施した。

また、平成22年9月に実施した中間評価の結果を受け、自動車業界及び水素インフラ業界と水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題への対応について検討し、産業界における機器開発や規制見直し等に貢献するための体制を強化した。

(実施体制:独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人長崎大学、国立大学法人京都大学、NOK株式会社、学校法人福岡大学、国立大学法人九州大学、岩谷産業株式会社、株式会社共和電業、日本合成化学工業株式会社)

① 高圧水素物性の基礎研究

圧縮機などの機器や水素ステーションなどの設備を設計する際に不可欠な水素熱物性データの体系的なデータベース化を進めた。

- ・平成21年度に水素関連の NEDO 事業参画研究者に展開した水素物性データベースについて、水素ステーションにおける技術検討のための改良を開始。
- ・平成21年度に導入した磁気式密度計により 100MPa、250°C(523K)までの条件下の PVT の測定を実施。その他、粘性係数、熱伝導率、水素溶解度、露点等の実測データの拡充を実施。
- ・比熱測定については測定装置設計のための情報収集を実施。

② 高圧/液化による金属材料等の水素脆化の基本原理の解明と材料強度特性に関する研究

金属材料の水素脆化メカニズムの解明を目指し、提唱中の脆化機構(き裂先端でのすべりの局在化が鋼材の水素脆化の本質と考える)を確認強化するため、ナノ・メゾレベルにおける強度・変形過程、高圧ガス水素下における疲労き裂発生と伝ば機構の計測を継続した。

- ・水素脆化・材料強度特性に関して、以下に示す新しい知見を得た。
 - 水素の関与する疲労亀裂進展速度の加速には上限が存在。
 - 水素が過飽和の状態では疲労亀裂進展特性が向上。
 - 極低周波数疲労評価試験において亀裂進展加速が消滅。
 - 微細組織の制御により耐水素疲労炭素鋼創製の可能性を発見。

③ 液化・高圧化状態における長期使用及び加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究(金属材料)

産業界からの要望に応じて、各種組成、加工形態の金属材料の強度評価を継続し、設計指針、使用基準策定に資するデータの提供を行った。また、水素機器に使用された

材料の健全性及び強度評価を実施した。

- ・ 2015年燃料電池自動車の普及開始に向け、水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業と連携し、水素ステーション用鋼種拡大に係るオーステナイト系ステンレス鋼材料評価検討を開始。
- ・ 燃料電池自動車用圧縮水素容器の技術基準検討の一環として、低コスト材料を活用のための性能基準に基づく材料評価法を提案。
- ・ 実証試験が終了した35MPa水素用蓄圧器の材料を調査し、組織観察結果と強度特性との関係から得られた材料の品質管理に関する知見を実証事業関係者に報告・展開。
- ・ 有明ステーションにて実証試験が終了した高圧水素・液体水素関連機器の調査計画を作成。
- ・ 追加公募により以下の2件の応用研究を開始
 - 高圧水素プレクーラーの高強度材料の水素中材料強度特性評価
 - 高圧水素用ひずみゲージの開発とひずみゲージ箔材の電気抵抗に及ぼす水素の影響解明

④ 液化・高圧化状態における長期使用及び加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究(高分子材料)

高圧水素に対する耐性に優れたゴム材料の設計指針策定を目指し、種々のゴム材料分析を進めた。

- ・ 高圧水素曝露によるゴム材料のブリスタ発生メカニズムを明確にし、ブリスタへの耐性に優れたゴム材料の特徴を明確にした。またゴム材料の水素曝露前後のIR、ラマン、NMRスペクトルを比較した結果、素材の化学的な構造変化は生じていないことが判明。
- ・ 水素曝露直後のゴム材料の固体¹H-NMRを測定した結果、分子運動性の異なる2種類の水素分子が検出され、ピーク面積比から水素溶解量を算出した結果、昇温脱離ガス分析法により測定した水素溶解量と良く一致。
- ・ Oリングの評価のため、高圧水素耐久試験機を開発し、高圧水素シール用Oリングを評価した結果、Oリングの破断強度低下に対して、材料、温度、充填率、減圧時間の影響が大きいことが判明。また破壊モードとして、ブリスタ破壊の他、はみ出し及び座屈による破壊が発生していることが判明。はみ出し、座屈による破壊の原因は水素溶解によるゴム材料の膨潤に伴う体積増加であることが示唆。
- ・ 70MPa水素ステーション用ホースに応用可能な高いバリア性を有する樹脂材料の強度特性評価を開始(追加公募分)。

⑤ 高圧水素トライボロジーの研究

水素環境下で用いる機械装置設計に貢献すると考えられる水素トライボロジーのデータベース(トライボアトラス)の構築を目指し、以下を実施した。

- ・ 40MPa水素中における微量不純物(酸素、水等)が、軸受鋼・ステンレス

鋼の表面性状、摩耗特性、疲労特性に与える影響を調査し、許容不純物濃度等を検討。

- ・ 高圧水素のシール材として用いられる樹脂・ゴム材料について軸シール構造を想定した摩擦試験を実施し、表面性状、摩耗特性を調査した。シール材と相手材との組合せの影響が大きいことを確認。
- ・ データベースの骨格を作成し、データの活用方法について産業界からのニーズ調査を開始。

⑥ 材料等内の水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究

水素脆化メカニズムの解明、耐水素材料開発指針の確立を目指し、他の研究チームと連携により実測との比較による精度検証、実測が不可能な条件での結果予測提供を行い相互の研究加速を図った。

- ・ 水素の関与する疲労亀裂進展において、水素拡散速度を計算することで材料内の水素濃度分布を求め、実験による観察結果との定量的比較・照合を推進中。
- ・ 表面亀裂先端の応力計算及び水素拡散速度計算により、LBB (Leak Before Break) 成立性の判定による安全性評価法を検討。
- ・ 上記を用いた水素タンクの疲労寿命予測システムを試作。
- ・ 原子シミュレーションを用いてアルミニウム材料中の欠陥及び転位の影響を解析した結果、添加元素が析出した粒界面が水素をトラップしやすく、強度に与える影響が大きいことが判明。

また、これらに加え、研究開発の成果をより実効的に普及・定着させるために、平成20年度から実施している、産業界等の若手技術者の人材育成活動を継続実施し、本技術分野における基礎・基盤技術の底上げを図った。

4.2 実績推移

	18年度	19年度	20年度	21年度
実績額推移（百万円）：	1,649	1,665	2,220	1,020
需給勘定				
特許出願件数（件）	1	8	8	8
論文発表数（報）	10	13	58	72
フォーラム（件）	3	70	110	126
	22年度（12月現在）			
実績額推移（百万円）：	950			
需給勘定				
特許出願件数（件）	0			
論文発表数（報）	36			
フォーラム（件）	93			

5. 事業内容

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招聘研究員 村上敬宜氏をプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

5.1 平成23年度(委託、2/3共同研究)事業内容

① 高圧水素物性の基礎研究

圧縮機などの機器や水素ステーションなどの設備を設計する際に不可欠な水素熱物性データの体系的データベース化を進めるとともに、水素物性データベースの改良について、ユーザー側のニーズを取り入れた応用・改良検討を本格化する。

- ・100MPa、500°Cをまでの高精度 PVT データ測定等、最終目標に向け各種物性値の実測データ測定範囲を拡大する。
- ・水素利用機器の技術検討への応用を想定したアプリケーション型の物性計算システム(例えば、水素ステーションにおける熱物性値シミュレータ)の検討を具体化する。
- ・100MPa、500°Cまで拡張した状態方程式の構築を開始する。

② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究

金属材料の水素脆化メカニズムの解明を目指し、ナノ・メゾレベルにおける強度・変形過程、高圧ガス水素下における疲労き裂発生と伝ば機構の計測・解析を継続する。また産業界と連携をとりながら、規制見直しや技術基準の作成に貢献する材料データの取得体制を強化する。

- ・水素関連機器用材料選定基準の検討の継続
- ・水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業と連携し、オーステナイト系ステンレス鋼をはじめとする水素関連機器の鋼種拡大に向けた材料強度特性データ取得の推進
- ・有明ステーション及び70MPaステーション実証事業終了品の材料調査及び水素影響の解明
- ・プレクラー、ひずみゲージ等の水素関連機器に係る金属材料特性評価を継続する。
- ・水素デバイス等の安全設計シミュレーション手法の開発及び実験データとの整合化検討

③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工(成形・溶接・表面修飾)、温度などの影響による材料強度特性研究

高圧水素に対する耐性に優れたゴム材料の設計指針策定を目指し、種々のゴム材料研究を進める。

- ・ゴム材料強度評価に加えて、樹脂材料の強度評価システムを用いた破壊靱性評価を行う。

- ・産業界のニーズが高い水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して強度・劣化特性評価を実施し、本事業のデータの充実を図る。
- ・水素雰囲気下におけるゴム材料研究
- ・水素ステーション緊急離脱カプラ用Oリング改良につながる新規材料設計によるOリングの施策評価
- ・Oリングの疲労耐久試験や実用配合によるゴム材評価など、実用化を念頭に置いた検討を開始する。
 - 平面固定溝の設計指針を検討する。
 - 水素充填用レセプタクル用シール(Oリング+バックアップリング)の装着部の設計指針検討及び評価データ収集
 - 定期メンテナンス期間設定を目標として、Oリング寿命推定を進める。
 - 各種条件下におけるOリング破壊現象の可視化評価。
 - 実用的Oリング等の試作を行いし、高圧水素ガスにおける溶解・拡散挙動特性を評価する。

④ 高圧水素トライボロジーの研究

水素環境下で用いる機械装置設計に貢献するための摩擦・摩耗・潤滑に係るデータ取得及び提供を継続する。

- ・70MPaステーション実証事業終了品摺動部の材料調査及び水素の関与する摩耗、摩擦現象に係る課題の抽出
- ・産業界のニーズの高いシール材料(主として樹脂材料とゴム材料)について、超高圧水素中摩擦試験、高圧水素中に曝露した試験片及び非曝露試験片の常圧水素中での摩擦試験を続行してデータを蓄積する。
- ・製品レベルでの実用化の問題点を産業界と連携して分析し、評価計画に反映させる。
- ・産業界にトライボアトラス試供版の試用・評価を依頼し、その結果にもとづいてトライボアトラスの改善を図る。

加えて、研究開発の成果をより実効的に普及・定着させるために、近い将来を担う産業界若手技術者等の人材育成活動を実施し、本技術分野における基礎・基盤技術の底上げを図る活動を継続する。

5.2 平成23年度事業規模

需給勘定 676百万円(委託、2/3共同研究)(継続)
事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

(1) 運営・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、NEDOに設置する委員会や技術検討会等において外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度、プロジェクトの進捗について報告を受けるなどを行う。また、年に一回程度、事業を効率的に推進するために、本事業の実施者が一堂に会する報告会を開催し、情報共有、共通認識を図る。

(2) 複数年度契約の実施

原則、平成18～22年度の複数年度契約を平成24年度まで延長して実施する。

7. 実施方針の改訂履歴

(1) 平成23年3月8日 制定

(別紙) 事業実施体制の全体図



平成 2 4 年度実施方針

新エネルギー部

1. 件名：プログラム名 エネルギーイノベーションプログラム
(大項目) 水素先端科学基礎研究事業

2. 根拠法：

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 1 5 条第 1 項第一号ニ及び第八号

3. 背景及び目的・目標

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となることを目指し「エネルギーイノベーションプログラム」が制定された。本事業は、その「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として実施する。

燃料電池は、上記の目的達成に向けたキーテクノロジーとして、新産業創造等に資する水素エネルギー社会の構築に向けたキーテクノロジーとしてその実用化への期待が高く、燃料電池実用化戦略研究会（経済産業省資源エネルギー庁長官の私的研究会、1 9 9 9 年 1 2 月設置）において「固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用技術開発戦略」が策定され、産学官が一体となって燃料電池実用化のための技術開発等に積極的に取り組んでいる。

また、2 0 0 2 年 5 月に「燃料電池実用化に関する関係省庁連絡会議」が設置され、関係各省庁の緊密な連携のもとで燃料電池実用化に必要な安全性確保のための燃料電池・水素インフラ等に係る 6 法律 2 8 項目の関連規制の包括的な再点検をはじめとする規制・技術基準の整備及び標準化が進展している。

また、2 0 1 0 年 7 月には燃料電池実用化推進協議会によって、産業界の総意として 2 0 1 5 年に燃料電池自動車（F C V）の一般ユーザーへの普及開始を目指すことが発表されている。さらに、2 0 1 1 年 1 月には自動車メーカー及び水素供給事業者 1 3 社が共同声明を発表し、自動車メーカーが F C V 量産車を 2 0 1 5 年に 4 大都市圏を中心とした国内市場への導入と一般ユーザーへの販売開始を目指し、開発を進めていることや、水素供給事業者が 2 0 1 5 年までに F C V 量産車の販売台数の見通しに応じて 1 0 0 箇所程度の水素供給インフラの先行整備を目指すこ

と等が示された。このように、官民挙げて燃料電池の導入・普及に積極的に取り組んでいるところであるが、燃料である水素を高圧化した状態で輸送・貯蔵する等水素を高いエネルギー密度で取り扱う場合の水素物性については、いまだ世界的にも知見の集積が乏しく、特に、これらの状態における容器や機器で使用する材料の水素脆化（水素の吸収によって金属材料が脆くなる現象）のメカニズム解明は、水素を長期間、安全に利用するために早急に確立しなければならない重要な基礎的科学的知見である。

このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、水素物性等に係る基礎的な研究を実施し、高度な科学的知見の集積を行い、水素社会到来に向けた基盤整備を行うことを目的に、高圧化状態における水素物性の解明や、材料の水素脆化に係る基本原理の解明及び対策検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を実施する。また、2015年燃料電池自動車普及開始に向けて、産業界と連携をとりながら必要なデータ、考え方を提示し、NEDOの他の水素関連事業との連携関係も整理して、産業界全体の効率的な技術開発に貢献することを目指す。

本プロジェクトの実施により、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な水素物性、水素環境下での材料特性に関わる基礎研究が進展し、水素エネルギー社会構築に向け、燃料電池を広く一般社会への普及を円滑に実現するための水素エネルギー・燃料電池の実用化技術の進展及び安全の確保、標準化等に大きく貢献することが期待される。

<研究開発の目標>

- ・燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及、水素社会構築のためのインフラ整備に向け「NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010」に記載された2015年普及開始段階での技術レベル*1を実現するために必要とされる水素物性、材料特性に係るデータ取得等と材料劣化などの基礎的な研究とメカニズム解明を行う。
- ・基礎的研究を踏まえ、水素環境下で長期使用に使用できる材料、または劣化評価方法や運用方法などの提案を行う。
- ・自動車業界および水素インフラ業界が取り組んでいる水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題について「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」と連携し、2015年までに水素関連機器の鋼種拡大等が可能となるデータ取得・提供に貢献する。

*1：【2015年普及開始段階での技術レベル】

○ 水素供給インフラ

水素ステーションコスト：4億円（70MPa）～3億円（35MPa）

水素供給コスト：90円/Nm³

○ FCV

システムコスト*2：約100万円

* 2 : 生産台数を50万台と想定した場合の製造コスト(システム出力100kW、水素タンクを除く)を示す。

4. 実施内容及び進捗(達成)状況

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長 村上 敬宜氏をプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施した。

4. 1 平成23年度(委託)事業内容

(実施体制:独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人物質・材料研究機構、国立大学法人九州大学、国立大学法人長崎大学、国立大学法人佐賀大学、学校法人上智学院)

① 高圧水素物性の基礎研究

- ・ 条件を拡大した領域について水素ガスのPVT性質(99MPa、500℃まで)、粘性係数(99MPa、22-223℃)、熱伝導率(99MPa、500℃まで)、露点(水分20~60ppm、10MPaまで)のデータを実測した。状態方程式の高精度化及び水素漏洩シミュレーションのために水素中の音速(100kPa~1MPa、60~100℃)を球形共鳴器により測定した。
- ・ NMRによってゴム材料及び固体高分子電解質膜への水素ガスの溶解度及び拡散係数の測定に成功した。
- ・ 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業との連携し、圧縮機などの機器設計や水素ステーション性能シミュレーションに資する水素物性データを、石油エネルギー技術センター(JPEC)等に提供した。

② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究

- ・ 引張強度1000MPa以上の鉄鋼材料では、水素により助長された変形双晶で粒界き裂が形成され、疲労き裂進展速度が加速することを見出した。
- ・ SUS316(12%Ni以上)の4種類の水素構造材料評価データ(水素拡散、低速引張(SSRT)特性、疲労特性、疲労き裂進展特性)と関連資料とを、「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業/水素インフラ等に係る基準整備に関する研究開発」との連携を通じて同研究開発における検討委員会に提供し、2015年燃料電池自動車の普及開始に向けた水素インフラの規制見直し・使用材料拡大に関する技術検討に貢献した。
- ・ 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業/燃料電池自動車等に係る国際標準化及び規制見直しのための研究開発と連携し、水素系材料評価法検討会において低コスト材料を活用のための性能基準に基づく材料評価法の検討に貢献した。
- ・ 「地域水素供給インフラ技術・社会実証」と連携し、水素ステーションの改造

等において使用する低コスト構造材の安全性検証評価および有明水素ステーションにて実証試験が終了した高圧水素・液体水素関連機器の調査を実施した。

- ・ 疲労き裂進展特性や破壊靱性に及ぼす水素の影響を調査するためのシミュレーション研究において、き裂からの水素侵入及び金属内部での水素拡散現象に対する境界条件を、従来の境界条件（内部水素）から流束指定境界条件（外部水素）に変更することにより、亀裂周りの水素濃度に関する計算値が従来に比べ実測値とより整合することが明らかになった。

③ 高圧化状態における長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究（高分子材料）

- ・ モデル配合ゴム試験片により水素透過率、水素溶解量等や各種物理特性への水素影響について、ゴム材料配合設計に資するデータベース構築を推進した。
- ・ つぶし率、溝充填率を変数として破壊発生状況を評価し、水素用Oリング溝設計基準策定を推進。高圧水素中における使用時を想定し、上記変数の許容範囲をマップ化した。その結果、通常推奨範囲に比べて許容範囲が限定される傾向が見られた。
- ・ 100サイクルの水素圧力加減圧評価結果の外挿によりシール材が5500回の耐久性を示す上限圧力を推定した。5500回レベルのOリング加減圧試験方法を確立した。

④ 高圧水素トライボロジーの研究

- ・ 産業界と連携し、軸受、バルブ、動的シール、ピストンリング等の候補材料等に関する常圧中及び40MPaまでの高圧水素中における摩擦摩耗特性データを活用し、圧縮機およびバルブのしゅう動部品の開発に貢献した。
- ・ 動的シール用樹脂材料の水素中における摩耗が相手面金属に依存し、金属表面上のフッ化金属形成量、水酸化物形成量が多いほど良好な転移膜が形成され摩耗が少ないことを明らかにした。
- ・ ガス中の水分と酸素の量をppbオーダーまで制御する技術をさらに発展させ、水素中の微量の水、酸素の挙動を検討した。
- ・ 鋼の転がり疲れ寿命と水素侵入量、表面酸化膜形成状態の関係を見出した。
- ・ トライボアトラス（データベース）の試作版についてユーザー利便性の改良を実施した。

これらに加え、研究開発の成果をより実効的に普及・定着させるために、平成20年度から実施している、産業界等の若手技術者の人材育成活動を継続実施し、本技術分野における基礎・基盤技術の底上げを図った。

4. 2 平成23年度（2／3共同研究）事業内容

（実施体制：NOK株式会社、岩谷産業株式会社、株式会社共和電業、日本合成化学工業株式会社）

- ② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究
- ・ 高圧水素プレクーラーに使用する高強度ステンレス鋼HP160等の評価を行い、特にHP160が水素脆化に対し優れた強度特性を有することを明らかにした。この成果は高圧ガス保安法特定側に関する材料事前評価を経て、同材料による大臣特認の取得に貢献した。
 - ・ 高圧水素ガス用ひずみに関して、ゼロ点移動が水素侵入による電気抵抗の変化によることを見出し、高性能化が可能となる知見を得た。
- ③ 高圧化状態における長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究（高分子材料）
- ・ モデル配合ゴム試験片により水素透過率、水素溶解量等や各種物理特性への水素影響について、ゴム材料配合設計に資するデータベース構築を推進した。
 - ・ つぶし率、溝充填率を変数として破壊発生状況を評価し、水素用Oリング溝設計基準策定を推進。高圧水素中における使用時を想定し、上記変数の許容範囲をマップ化した。その結果、通常推奨範囲に比べて許容範囲が限定される傾向が見られた。
 - ・ 100サイクルの水素圧力加減圧評価結果の外挿によりシール材が5500回の耐久性を示す上限圧力を推定した。5500回レベルのOリング減圧試験方法を確立した。
 - ・ 70MPa水素ホースの耐久性向上のため、ガスバリア層を有する多層構造ホースを検討中。ガスバリア性樹脂材料G-Polymerを70MPa高圧水素曝露試験後に固体NMR解析を実施したところ、高次構造に大きな変化はなく、また機械的特性の低下も確認されなかったため、水素ホースとして試作を開始した。

4.3 実績推移

	18年度	19年度	20年度	21年度
実績額推移（百万円）： （需給勘定）	1,649	1,665	2,220	1,020
特許出願件数（件）	1	8	8	8
論文発表数（報）	10	13	58	72
フォーラム（件）	3	70	110	126
	22年度	23年度		
実績額推移（百万円）： （需給勘定）	950	690		
特許出願件数（件）	6	0		
論文発表数（報）	54	27		
フォーラム（件）	119	92		

5. 事業内容

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長 村上 敬宜氏をプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 平成24年度（委託）事業内容

最終年度につき、成果取りまとめと今後に向けた課題整理を実施する。また2015年に向け産業界にて推進中の規制見直し等に貢献するデータ提供については継続的に実施する。

① 高圧水素物性の基礎研究

- ・圧縮機などの機器や水素ステーションなどの設備を設計する際に不可欠な水素熱物性データの体系的データベース化を完了し、運用方法を定める。特に水素物性データベースの改良については、ユーザー側のニーズを取り入れた応用・改良検討を本格化し、実際の開発において直接活用されることを想定した運用方法を検討する。
- ・水素物性に関する測定領域を広げ、99MPa、500℃までのPVT性質、粘性係数、熱伝導率のデータを拡充し、実測値を基に状態方程式および整理式を高精度化する。
- ・核磁気共鳴手法を用いてゴム材料に対する溶解度、拡散係数を測定する。
- ・水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業と連携し、水素ステーションおよび水素利用機器を想定した物性計算システムを拡充する。

② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究

- ・水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業／水素インフラ等に係る基準整備に関する研究開発と連携し、2015年燃料電池自動車の普及開始に向けた水素インフラの規制見直し・使用鋼種拡大に資するデータ提供を継続的に実施する。SUS316鋼（12%Ni以上）に続いてSUH660鋼、6061アルミ合金の水素構造材料の評価を実施し、評価データおよび関連資料と一緒に水素インフラの規制見直しを検討する委員会等に提供する。その他水素構造材料の評価データを産業界における規制見直しに活用する。
- ・引張強度1000MPa以上の高強度材料の水素脆化メカニズム、高強度ステンレス鋼HP160の耐水素脆化メカニズムを解明する。
- ・水素脆化の基本原理解明に関する基礎研究成果、構造材料データベースをもとに、水素エネルギー機器の設計・製造に関する、材料選択・疲労設計法について指針を提案する。
- ・「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業／燃料電池自動車等に係る国際標準化及び規制見直しのための研究開発」と連携し、水素系材料評価法検討会に

において低コスト材料を活用のための性能基準に基づく材料評価法の検討を継続する。

- ・地域水素供給インフラ技術・社会実証事業と連携し、新規商用ステーション建設において使用する低コスト構造材の安全性検証評価を継続する。また水素ステーションにて実証試験が終了した高圧水素関連機器の調査を実施する。

③ 高圧化状態における長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究（高分子材料）

- ・ゴム材料について、き裂発生状況・水素曝露の影響・疲労進展特性を評価することで、耐性に優れた配合指針を提示する。
- ・水素によるゴム材料の劣化状況とその化学構造を評価する。
- ・5500回レベルのOリング加減圧試験を実施し、定期メンテナンス期間設定を目標としたOリング寿命を推定する。
- ・2015年に向け産業界にて推進中の水素系部品開発においてOリング等に用いられる高分子材料の安全性確認評価および標準化等に資するデータ提供を継続実施する。
- ・産業界のニーズが高い水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して強度・劣化特性評価を実施し、本事業のデータの充実を図る。
- ・水素ステーション緊急離脱カプラ用Oリング改良につながる新規材料設計によるOリングの施策評価を実施する。

④ 高圧水素トライボロジーの研究

- ・最終年度につき、成果取りまとめと今後に向けた課題整理を実施する。
- ・実証試験等で長期間用いられた70MPa水素ステーション部品等の摺動部において水素あるいは高圧水素が影響する摩耗等の課題が明らかになった場合には、産業界のニーズへの対応について検討する。
- ・産業界のニーズの高い軸受・バルブ・シール摺動材料について、超高圧水素中の摩擦試験等を進め、産業界と連携して実用化の問題点を試験に反映する。
- ・ガス純度を高度に制御した試験、材料表面の力学的特性と化学的特性の測定、侵入水素量の測定などにもとづき、水素とその純度、及び他の諸条件の影響に関する基本原理をまとめる。
- ・トライボアトラスのデータ蓄積及び改良を進め、耐水素トライボ設計指針を整理する。

上記に加えて、研究開発の成果をより実効的に普及・定着させるために、近い将来を担う産業界若手技術者等の人材育成活動を実施し、本技術分野における基礎・基盤技術の底上げを図る活動を継続する。

5. 2 平成24年度（2／3共同研究）事業内容

最終年度につき、成果取りまとめと今後に向けた課題整理を実施する。

- ② 高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究
- ・ 高圧水素ガス用ひずみゲージの高圧水素ガス中における荷重負荷時の出力変化等を測定し、ゲージの出力変化に及ぼす水素の影響を解析し、抵抗変化のメカニズム解明に資する。
- ③ 高圧化状態における長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究（高分子材料）
- ・ ゴム材料について、き裂発生状況・水素曝露の影響・疲労進展特性を評価することで、耐性に優れた配合指針を提示する。
 - ・ 水素によるゴム材料の劣化状況とその化学構造を評価する。
 - ・ 5500回レベルのOリング加減圧試験を実施し、定期メンテナンス期間設定を目標としたOリング寿命を推定する。
 - ・ 2015年に向け産業界にて推進中の水素系部品開発においてOリング等に用いられる高分子材料の安全性確認評価および標準化等に資するデータ提供を継続実施する。
 - ・ 産業界のニーズが高い水素機器に使用されるゴム・樹脂材料について、産業界と協力して強度・劣化特性評価を実施し、本事業のデータの充実を図る。
 - ・ 水素ステーション緊急離脱カプラ用Oリング改良につながる新規材料設計によるOリングの施策評価を実施する。
 - ・ ガスバリア層を有する多層構造ホースの耐久性確認と構造の最適化を実施する。

5. 3 平成24年度事業規模

需給勘定

694百万円（継続）

事業規模については、変動があり得る。

6. その他重要事項

（1）運営・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らし適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、NEDOに設置する委員会や技術検討会等において外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度、プロジェクトの進捗について報告を受けるなどを行う。また、年に一回程度、事業を効率的に推進するために、本事業の実施者が一堂に会する報告会を開催し、情報共有、共通認識を図る。

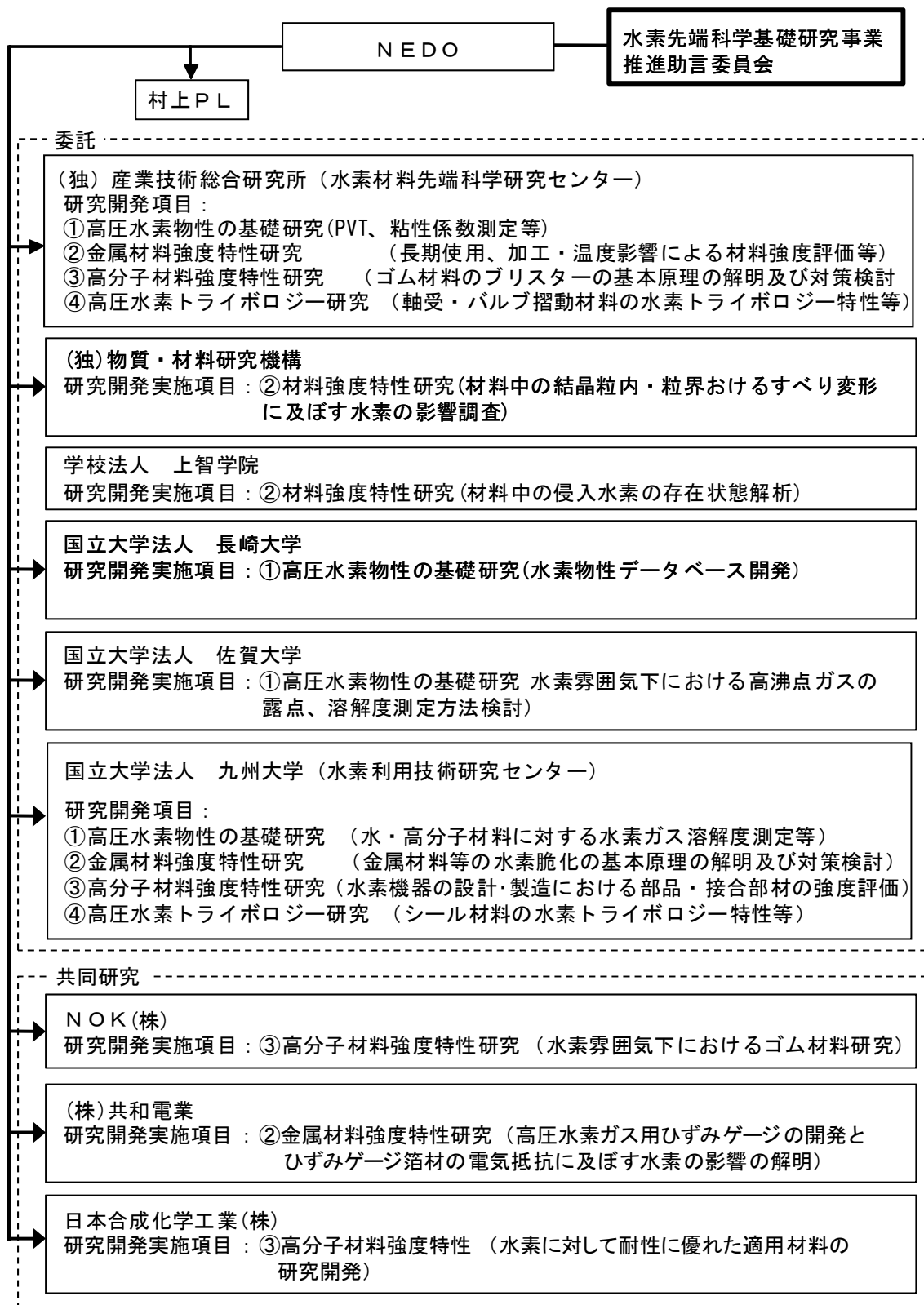
（2）複数年度契約の実施

平成18年度～平成23年度の複数年度契約を平成24年度まで延長して実施する。

7. 実施方針の改訂履歴

- (1) 平成24年3月30日 制定。
- (2) 平成24年5月21日 改訂。

(別紙)
平成24年度事業実施体制図



事前評価書

		作成日	平成17年10月25日
1. 事業名称 (コード番号)	水素先端科学基礎研究事業		
2. 推進部署名	燃料電池・水素技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1)概要:</p> <p>水素エネルギー社会の構築には、大容量の水素のコンパクトな輸送・貯蔵等を行うことが必要であるが、そのためには、高圧化又は液化した状態の水素の取扱いが不可避である。一方、安全利用に必須な水素の基礎的挙動等のデータや科学的知見の蓄積は必ずしも十分とは言えない状況にある。特に、高圧化又は液化の状態における水素脆化（水素を吸収することによって金属材料が脆くなる現象）、水素トライボロジー（水素雰囲気下で摩擦、摩耗、潤滑など2つの物体面の接触面に見られる現象や過程など）に係る科学的知見の蓄積・深化は、企業等が水素関連製品、部品、材料等を製品化し、一般ユーザーの利用に供するために必要不可欠である。</p> <p>本事業は、このような情勢認識のもと、水素脆化、水素トライボロジーの基本原理の解明及び対策の検討などを幅広い分野で横断的に行うため、国内外の優秀な研究者を結集して世界に唯一無二の研究拠点構築を目指し、その成果をより安全・簡便な水素利用のための指針として産業界に提供することにより、水素エネルギー社会の真の実現を目的とするものである。</p> <p>(2) 事業規模:平成18年度事業費 17億円(委託研究)</p> <p>(3) 事業期間:平成18年度～24年度(7年間)</p>		
4. 評価の検討状況			

(1) 事業の位置付け・必要性

新エネルギー技術の開発、コスト削減及び利便性・性能の向上を図ることによって、新エネルギーの実用化を図り、我が国のエネルギー供給の安定化・効率化、地球温暖化問題(CO2)・地球環境問題(NOx、PM等)の解決、新規産業・雇用の創出を図ることが求められている。その中で、燃料電池・水素を利用する水素経済社会の実現が期待されている。

水素社会の真の実現を目指すためには、水素利用での各種機器に用いる材料等の高圧化などの環境下における水素脆化、水素トライボロジーに係る科学的知見の蓄積・深化が不可欠であるが、これらは、産業界のみならず学界においてすら、これまで世界的に殆ど研究がなされていない。

本事業は、個々の企業による研究にはなじみにくい高度な科学的知見を要する根本的な現象の解明等を行うため、国内外の研究者を結集し、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

なお、本技術開発は、新エネルギー技術開発プログラムに則って推進する予定である。

(2) 研究開発目標の妥当性

以下の項目を研究開発目標とする。

- ①超高圧及び液体水素下での長期使用・機械加工での材料設計法とデータベース整備
- ②ポンプ・バルブなどでの高圧水素トライボロジーを考慮した材料設計指針の提案
- ③超高圧水素基礎物性値、及び基礎伝熱特性データ整備(データベース化及びモデルの提供)
- ④水素挙動(漏洩・拡散・燃焼)シミュレータ及び関連固体力学シミュレータの開発
- ⑤長期使用の材料劣化等の非破壊評価方法の開発

上記の目標は、高圧・液化水素環境下における金属材料等の水素脆化、水素トライボロジーの基本原理の解明及び対策の検討を中心に、高度な科学的な知見を要する先端的研究を行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立するものであり、妥当である。

(3) 研究開発マネジメント

これまでの個々の企業による研究にはなじみにくい高度な科学的知見を要する根本的な現象の解明を幅広い分野で横断的に行うため、国内外の優秀な研究者を結集して世界に唯一無二の研究拠点を構築し行うことにより、水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を確立する。

担当部である燃料電池・水素技術開発部は、水素社会構築の進捗、及び、技術開発の動向を見ながら、NEDO技術開発機構の推進する標準・基準作り・実証・技術開発事業と連携しながら、積極的に関与して推進する。

また、PLを設置する予定。

(4) 研究開発成果

高圧化又は液化した状態の水素による金属材料などの水素脆化、水素トライボロジーなどの根本的な現象解明及び対策検討等は、高圧ガス及び液体の水素に関連した製品を工業的に完成させ、低コスト化に資する。このことにより水素経済社会の実現が可能となり、波及効果は大きい。

(5) 実用化・事業化の見通し

燃料電池に対する認識も高まってきている現状のもと、水素経済社会構築が実現した際には広く燃料電池発電システム、特に、ゼロエミッションの燃料電池自動車の導入・普及が可能である。

なお、燃料電池自動車に水素を供給するステーションの設置については、2010年には500箇所(300Nm³/h)、2020年には3600箇所(500Nm³/h)が政府の目標であり、経済省の「新産業創造戦略」によれば、燃料電池の市場規模は2020年で8兆円と試算されている。

(6) その他特記事項

○第13回燃料電池実用化戦略研究会(資源エネルギー庁長官私的研究会)における提言

- ・Back to the basic ということで、基礎研究を充実することは重要。
- ・基礎研究は、幅広く行うことが必要。また、成果を得るためには、系統的な研究が必要。

5. 総合評価

本事業は、水素経済社会の真の実現に不可欠な水素をより安全・簡便に利用するための技術基盤を構築するものである。水素経済社会構築に向け、必要不可欠な技術開発であり、早急に取り組むことが望まれる。水素脆化、水素トライボロジーの基本原理の解明及び対策の検討など、高度な科学的知見を要する根本的な現象解析を行うものであることから、国内外の研究者を結集し集中的に行うことが最適と考えられる。



水素先端科学基礎研究事業

研究目的

○背景
水素エネルギー社会構築には、大容量の水素のコンパクトな輸送・貯蔵が必要であるが、そのためには、高圧化又は液化した状態の水素の取扱いが不可避である。一方、これらの状態における水素の安全利用に必須な水素脆化、水素トライボロジーに係る科学的知見の蓄積・深化は、我が国のみならず世界的にも不十分な状況にある。

○目的
本事業では、水素脆化、水素トライボロジー等の基本原理の解明及び対策の検討などを幅広い分野で横断的に行い、その成果を水素をより安全・簡便に利用するための技術開発指針として産業界に提供することにより、水素社会の真の実現を目指す。

○必要性
水素社会構築に向け、水素安全利用を確保しつつ、大容量の水素のコンパクトな輸送・貯蔵を実現するためには、本事業による水素の基礎的、科学的知見の蓄積・深化が必要。

研究内容

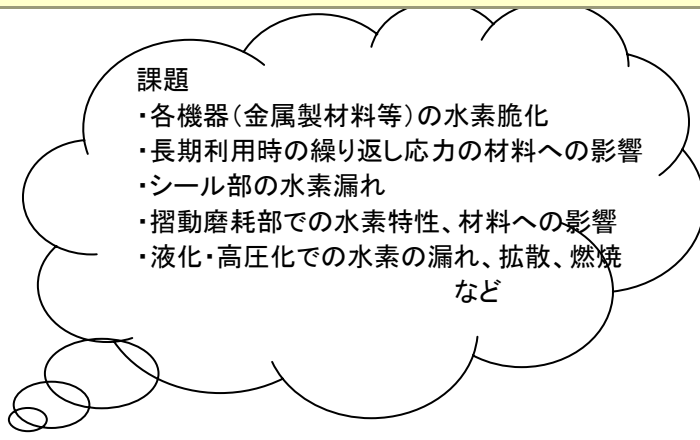
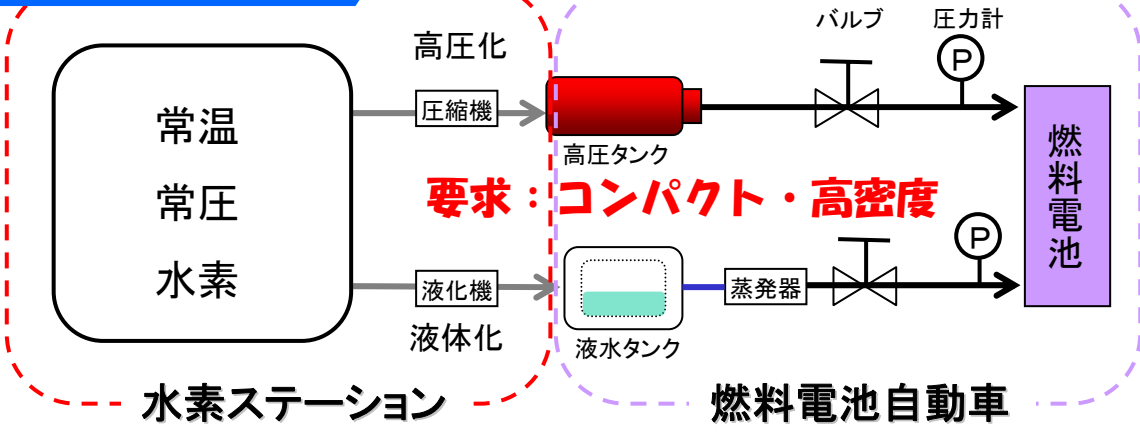
- 研究開発課題** (目的達成のための技術課題)
- (1) 高圧水素物性の基礎研究
 - (2) 高圧/液化による金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び対策検討
 - (3) 液化・高圧化状態における長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究
 - (4) 高圧水素トライボロジーの解明
 - (5) 水素拡散、漏洩などの水素挙動シミュレーション研究
- キーテクノロジー、ブレークスルーのポイント、オリジナリティ** (課題を解決するためのポイントおよびその現状)
- (1) 材料への水素侵入量を把握し、超高圧水素ガス雰囲気下の疲労特性と構造転移特性(水素のローカル分布、マルテンサイト分布、疲労破面性状、すべり挙動特性、化学成分制御など)の関係を調査することにより、水素脆化機構解明の探求が可能。
 - (2) 高度な科学的知見を要する根本的な現象であることから、高圧・液化状態での水素物性基礎研究を実施し、より安全に幅広く利用できる金属材料等の課題解決を図る。
- 目標値(技術水準)とその条件および設定理由(根拠)**
- (1) 超高圧及び液体水素下での長期使用・機械加工での材料設計法とデータベース整備
 - (2) ポンプ・バルブなどでの高圧水素トライボロジーを考慮した材料設計指針の提案
 - (3) 超高圧水素基礎物性値、及び基礎伝熱特性データ整備(データベース化及びモデルの提供)
 - (4) 水素挙動(漏洩・拡散・燃焼)シミュレータ及び関連固体力学シミュレータの開発
 - (5) 長期使用の材料劣化等の非破壊評価方法の開発

プロジェクトの規模

○事業費と研究開発期間(目安として)

① 18年度事業費総額 17億円, 研究開発期間 7年

その他関連図表



2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

水素先端科学基礎研究事業

2006年度～2012年度(7年間)

プロジェクトの概要(公開)

- I. 事業の位置づけ・必要性
- II. 研究開発マネジメント
- III. 研究開発成果
- IV. 実用化、事業化の見通し

NEDO 新エネルギー部

2012年10月5日(金)

I. 事業の位置づけ・必要性

公開

【日本のエネルギー政策①】

「燃料電池」はエネルギー政策上、**重要な技術分野**と位置付けられている。

新・国家エネルギー戦略	2006年5月	燃料電池を基幹技術として位置付け。 石炭ガス化燃料電池複合発電を総合資源戦略として位置付け。
Cool-Earth エネルギー革新技術計画	2008年3月	燃料電池をCO2排出量の大幅削減を可能とする革新技術として選定。
環境エネルギー技術革新計画	2008年5月	燃料電池を低炭素社会実現に必要な技術と位置づけ。
低炭素社会づくり行動計画	2008年7月	2020～2030年に定置用燃料電池を本格普及を目指す。
エネルギー基本計画	2010年6月	低コスト化を進めて、燃料電池普及による天然ガスシフトを推進。
新成長戦略	2010年6月	日本がイニシアティブを取り、国際標準化を推進。
日本再生戦略	2012年7月	燃料電池自動車などの次世代自動車について世界市場を獲得するため、他国を圧倒する性能・品質を実現し、世界的な潜在市場の掘り起こしを図る。

I. 事業の位置付け・必要性

【研究開発政策上の位置づけ】

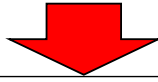
本事業はエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施。

「エネルギーイノベーションプログラム」

- ・資源の乏しい我が国は、革新的なエネルギー技術の開発、導入普及により、次世代型のエネルギー利用社会の構築が不可欠。
- ・政府が長期を見据えた技術進展の方向性を示し、官民が共有することで長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能。

エネルギーイノベーションプログラムの5つの柱

- ①総合エネルギー効率の向上
- ②運輸部門の燃料多様化
- ③新エネルギー等の開発・導入促進
- ④原子力等利用の促進とその大前提となる安全の確保
- ⑤化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用



本事業は、燃料電池自動車の導入や水素インフラストラクチャーの整備を行う上で必要な水素物性、水素環境化での材料特性に関わる基礎研究の進展を目標としており、上記①②③⑤の目標達成に寄与する。

I. 事業の位置付け・必要性

【日本のエネルギー政策②】

燃料電池自動車(FCV)、定置用燃料電池、水素製造・輸送・貯蔵技術を、長期的、重点的に取り組むべきエネルギー革新技術に選定。

— 重点的に取り組むべきエネルギー革新技術 —



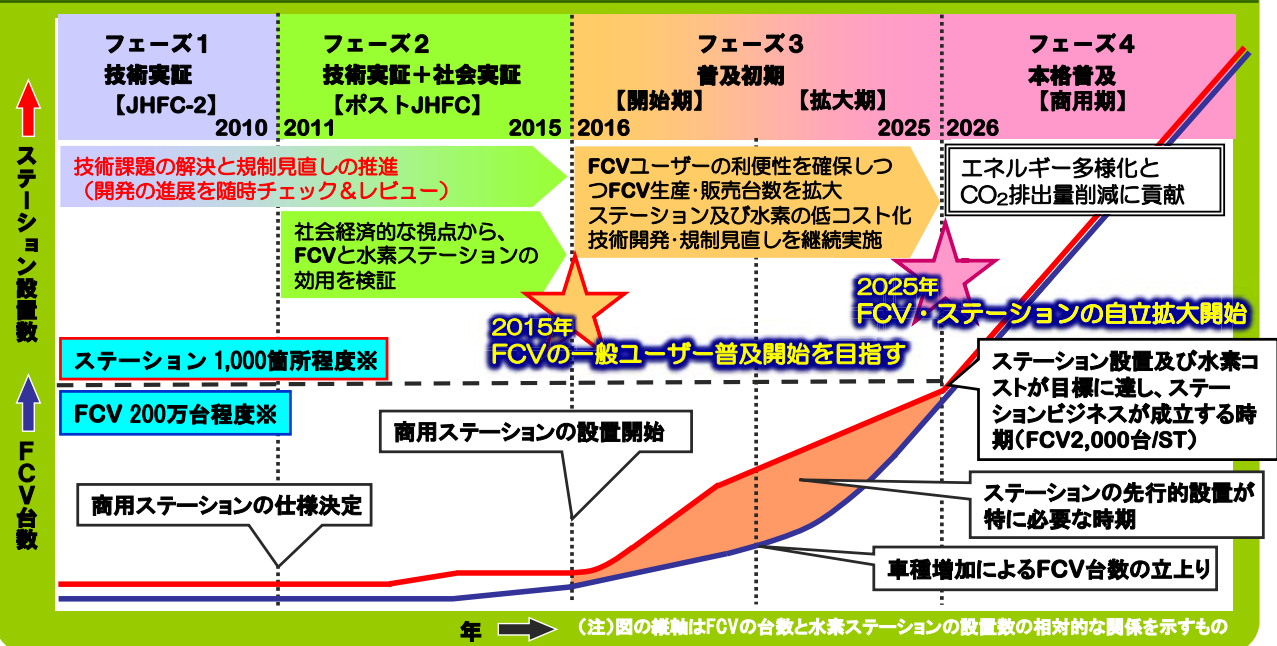
*EMS: Energy Management System, HEMS: House Energy Management System, BEMS: Building Energy Management System

I. 事業の位置付け・必要性

【民間のシナリオ①】燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)の新シナリオ (H22.3月更新)

2025年以降の燃料電池自動車と水素ステーションの自立拡大開始を見据え、2015年に燃料電池自動車が普及開始を目指す。

FCVと水素ステーションの普及に向けたシナリオ



事業原簿 I-2, I-3, I-7

※前提条件:FCVユーザーのメリット(価格・利便性等)が確保されて、順調に普及が進んだ場合

p.4/20

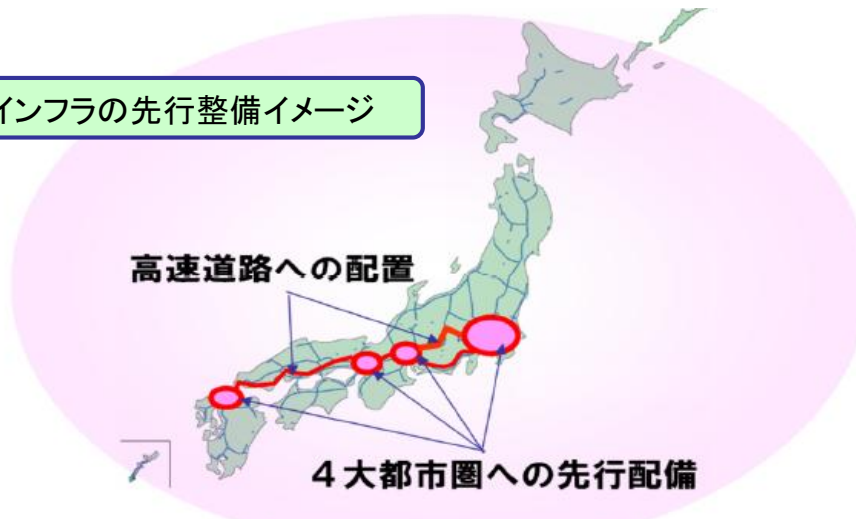
I. 事業の位置付け・必要性

【民間のシナリオ②】【燃料電池自動車の国内市場導入と水素インフラ整備に関する共同声明】

2015年に燃料電池自動車が普及開始の実現を目指し、4大都市圏を中心として100箇所程度の水素ステーションの先行整備を実施する。

平成23年1月、自動車メーカー及び水素供給事業者13社がFCVの国内市場導入に向けて共同で取り組むことに合意し、共同声明を公表。声明においては、2015年に自動車会社がFCV量産車を販売すること、エネルギー事業者が4大都市圏を中心としてFCV量産車の販売台数の見通しに応じて必要な規模(100箇所程度)の水素ステーションを先行的に整備することを目指すことが示された。

水素インフラの先行整備イメージ



※ 導入以降、全国的なFCV導入拡大と水素供給インフラの整備に取り組む

p.5/20

事業原簿 I-2, I-3

出典:燃料電池自動車の国内市場導入と水素供給インフラ整備に関する共同声明(トヨタ自動車他、平成23年1月13日)

I. 事業の位置付け・必要性

【世界のFCV・ステーション技術開発動向】

FCV車載用水素貯蔵技術、水素を供給するインフラ技術共に70MPaの高圧ガス貯蔵、高圧ガス充填が主流。日本は海外と国際基準調和を積極的に推進している。

○FCV車載用水素貯蔵技術

- ・高圧水素ガス貯蔵が主流。1回の充填による走行距離を延ばすため、水素充填量を5kg/回とする。そのためには、70MPaの高圧化が必要となる。

○水素供給インフラ技術

- ・FCVの水素貯蔵の方向性に合わせ、水素ステーションも高圧ガス充填が主流。70MPaの水素を供給する高圧ガス充填設備が必要となる。
- ・充填技術では、ガソリン車並みの利便性を求めることから、3分間で5kgの水素を充填する技術(例えば-40℃のプレクール技術等)が要求される。
- ・FCVへの水素供給に関する法整備がこれまで行われてこなかったが、大容量圧縮機による直接充填、通信充填(FCVの車載水素容器の状態をステーションに逐次伝えて充填)に関する規制を整備中。
- ・北米(特に米国)、欧州(特にドイツ)も日本と同様の技術開発動向で、日本としては、国際基準調和を積極的に推進している。

I. 事業の位置付け・必要性

【事業の目的】

水素ステーション等で水素の長期間の安全利用に向けた水素脆化に関する基本原理の解明。

高圧水素の物性や材料への影響は世界的にも知見が乏しい。

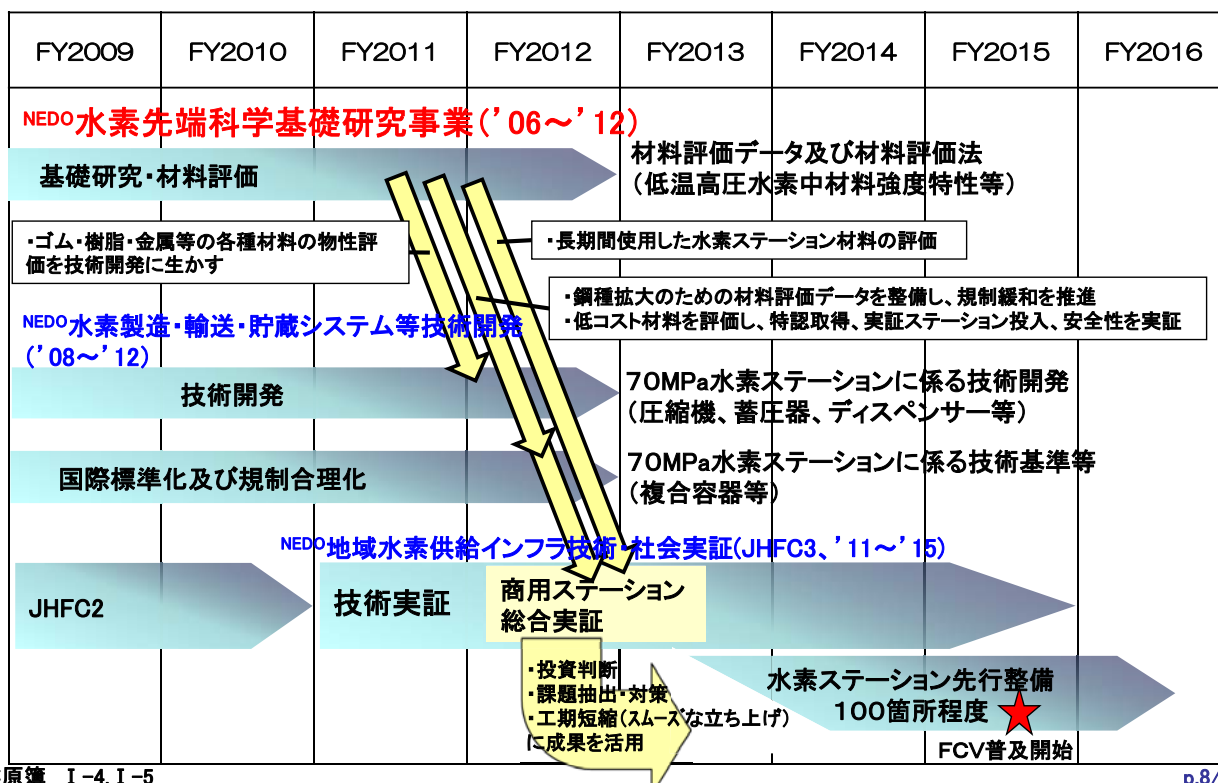
- ・材料の水素脆化に係る基本原理の解明及び対策
 - ・水素利用技術の確立に資するデータの取得
- を 実施

水素の安全利用が可能となり、水素ステーション等での基盤整備が推進される。

I. 事業の位置付け・必要性

【本事業の位置付け】

基礎研究の成果を技術開発、規制合理化、実証事業等に活かして研究開発を推進。



I. 事業の位置付け・必要性

【NEDOが関与する意義】

水素の**安全利用**に資するデータ取得には多大な労力と投資が必要であり、**規制合理化**の取り組みを民間負担で実施するには限界有り。
 技術開発につなげるために、**その他プロジェクトとの連携**が重要であるため、NEDOの関与が必要になる。

- ・水素関連機器の安全確保のためには、材料特性と水素物性の基礎的なデータを蓄積し、未知の領域を含む多岐にわたる検証が必要。
- ・規制合理化の推進。

⇒ 民間企業のみでは実施が困難

- ・NEDOの他の水素関連事業(「地域水素供給インフラ・社会実証」「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業」)との連携を図ることで、産業界全体として効率的な技術開発につなげることが可能。

⇒ NEDOの関与は必要である

II. 研究開発マネジメント

【事業全体の目標】

水素ステーションコスト4億円(70MPa)～3億円(35MPa)、水素供給コスト90円/Nm³の実現(2015年時点)に貢献するために、水素物性の解明等を実施。

- (1) 燃料電池自動車や定置用燃料電池システムの普及のためのインフラなど、**2015年普及開始段階**での技術レベル(上記目標)を実現するために必要な**水素物性・材料特性に係るデータ取得、材料劣化等の基礎的な研究及びメカニズム解明**を行う。
- (2) 基礎的研究を踏まえ、**水素環境下で長期使用**できる材料又は劣化評価方法や運用方法などの提案を行う。
- (3) 自動車業界及び水素インフラ業界が取り組んでいる**水素機器の材料に係る規制見直し・標準化の課題**について、2015年までに水素関連機器の**鋼種拡大**等が可能となるデータ取得・提供に貢献する。

II. 研究開発マネジメント

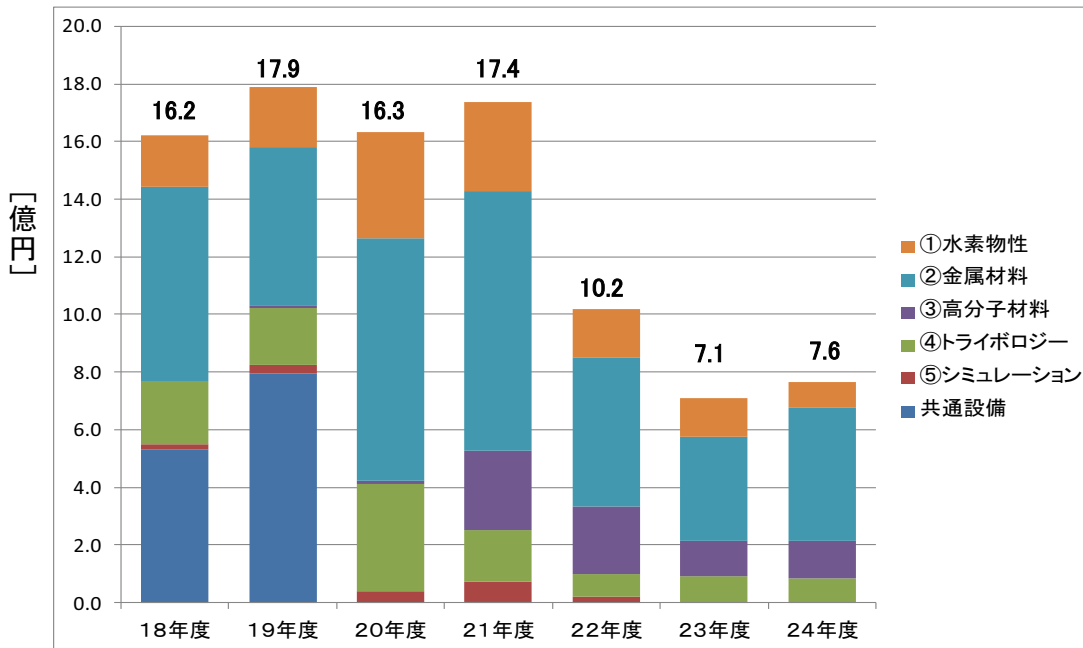
【研究開発ごとの目標】

研究開発項目	研究目標	成果	アウトカム
(1)水素物性研究 (高圧水素物性の基礎研究)	<ul style="list-style-type: none"> 水素物性データベース纏め、関係産業界に提供 測定精度や信頼性向上のための校正技術の纏め 	<ul style="list-style-type: none"> 500°C, 100MPaまでのPVT性質、粘性係数、熱伝導率等水素物性データを測定し、世界初となる高温高圧水素物性データベースを体系的に整備した 	<ul style="list-style-type: none"> 水素物性データベースが水素ステーションの設計に係る充填シミュレーションに活用された
(2)水素金属材料強度特性研究 (高圧化状態における金属材料等に係る水素脆化の基本原理解明及び長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性)	<ul style="list-style-type: none"> 金属材料等の材料劣化判断・健全性評価法等を関係産業界に提供する。 水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。 規制見直し、使用材料拡大、国際標準化に貢献する。 	<ul style="list-style-type: none"> 疲労における水素脆化メカニズムを解明した 金属材料について水素構造材料データベースを作成した 実証後の水素ステーションの調査に貢献し、安全性向上・高性能化への提言を行った 	<ul style="list-style-type: none"> 水素ステーションに関わる鋼材において2種類から7種類の提案につながった 水素ステーション設置(3か所)のために水素構造材料データベース15冊提供され、特認取得に向けて30件の事前審査が行われている
(3)水素高分子材料研究 (高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度特性研究)	<ul style="list-style-type: none"> 高分子材料の組成、長期使用及び加工、温度などの影響を評価し、最適な耐水素高分子材料創製指針を纏め、関係する産業界に提供する。 水素を利用する際の高分子材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。 	<ul style="list-style-type: none"> シール用ゴムの破壊挙動及び溝構造の影響を解明した。 化学構造変化の把握に基づく水素による破壊・劣化メカニズムを解明した 産業界における材料開発に活用しうるデータを整備した 	<ul style="list-style-type: none"> -40°Cで使用するためのシール材及びシール構造に関する評価結果が、水素ステーション用高圧水素用バルブの開発・製品化につながった
(4)水素トライボロジー研究 (水素トライボロジーの解明)	<ul style="list-style-type: none"> 高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料等について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを纏め、関係産業界に提供する。 材料に関する設計指針や管理指針等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の摺動材料やシール材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。 	<ul style="list-style-type: none"> 常圧及び高圧水素中での摩擦摩耗特性データを蓄積した 水素機器設計の基盤となる高圧水素トライボロジーデータベース(トライボアトラス)を世界に先駆けて整備し、利用しやすい形で産業界に提供した。 	<ul style="list-style-type: none"> バルブや圧縮機における実機試験を大幅に簡略化可能となった。 企業における適切な材料選択と製品耐久性の大幅な向上につながった。

II. 研究開発マネジメント

【研究項目ごとの予算推移(年度毎)】

事業全体の予算は約93億円。うち43億円は高圧水素用材料評価設備の開発に重点的に配分し、鋼種拡大検討につなげた。



事業原簿 I-3, I-10

II. 研究開発マネジメント

<ご参考>【水素関連研究の世界的研究拠点】

水素脆化等に係る基本原理の解明と水素社会実現に向けた技術基盤の確立を目的として、九州大学に国内外より研究者を結集し、世界的研究拠点として先端的な基礎研究を推進。

HYDROGENIUS

水素の世界的研究拠点

国内外より研究者を結集し、水素と材料に関わる先端的な基礎研究を推進。

世界初となる高温高圧水素物性データベースの整備

水素機器設計の基盤となる高圧水素トライボロジーデータベースを世界に先駆けて整備

材料	試験条件	試験結果
材料A	条件1	結果1
材料B	条件2	結果2
材料C	条件3	結果3
材料D	条件4	結果4
材料E	条件5	結果5

世界で唯一の一貫した水素集中研究施設

独自で開発した唯一無二の装置群

国際規格・標準化に向けた戦略的取組み

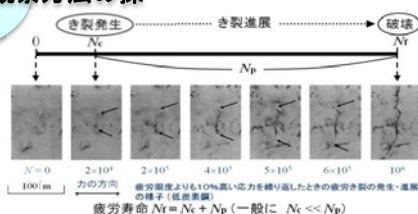
世界唯一の水素トライボロジーの系統的な研究



120MPa水素環境疲労試験機(3台)を世界で初めて運用



世界に類を見ない観察方法の採用



事業原簿 I-3

II. 研究開発マネジメント

<ご参考>【委託先別ごとの予算推移(年度毎)】

産総研を九大に誘致し、九大を拠点とした研究開発をするため、投資は九州大(約40%)、産総研(約50%)に集約

委託先名	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度	事業期間全体
国立大学法人九州大学	708,109,091	1,089,693,498	484,737,163	468,501,074	518,144,928	322,761,405	421,181,500	4,013,128,657
(独)産業技術総合研究所	911,818,066	670,682,798	1,075,718,308	1,178,073,224	436,009,828	317,702,155	301,503,950	4,891,508,327
(独)物質・材料研究機構	0	3,989,580	4,999,050	7,998,900	5,999,700	7,999,950	7,999,950	38,987,130
国立大学法人京都大学	0	8,307,600	9,394,350	21,829,500	8,861,000	0	0	48,392,450
国立大学法人佐賀大学	0	0	21,638,400	19,948,950	8,397,000	5,000,000	5,000,000	59,984,350
国立大学法人長崎大学	0	7,887,600	20,595,750	19,047,000	7,875,000	5,000,000	5,000,000	65,405,350
学校法人上智学院	0	3,675,120	4,760,700	3,999,450	3,000,000	2,500,000	2,500,000	20,435,270
学校法人福岡大学	0	997,500	997,500	998,550	109,000	0	0	3,102,550
小計	1,619,927,156	1,785,233,695	1,622,841,220	1,720,396,648	988,396,455	660,963,510	743,185,400	9,140,944,084
2/3 共同 研究								
NOK(株)	0	5,324,550	10,053,750	15,884,400	7,353,150	9,881,200	8,470,700	56,967,750
日本合成化学工業(株)	0	0	0	0	4,427,500	13,937,000	10,087,000	28,451,500
(株)共和電業	0	0	0	0	8,754,900	7,361,200	2,964,500	19,080,600
岩谷産業(株)	0	0	0	0	7,945,000	15,724,100	0	23,669,100
小計	0	5,324,550	10,053,750	15,884,400	28,480,550	46,903,500	21,522,200	128,168,950
合計	1,619,927,156	1,790,558,245	1,632,894,970	1,736,281,048	1,016,877,005	707,867,010	764,707,600	9,269,113,034

II. 研究開発マネジメント

【実施の効果(費用対効果)】

水素脆化の解明、低コスト・高強度材料の評価により、高圧水素の安全利用技術等が確立され、FCV導入・普及の推進に貢献

■ 阻害要因の解決

水素ステーションでの低コスト材料の使用、低コストな設計の適用によって、水素ステーションの低コスト化に寄与するなど。

■ 普及台数(2025年時点)

FCV累計 200万台程度、水素ステーション 1000箇所程度
(燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)のシナリオより)

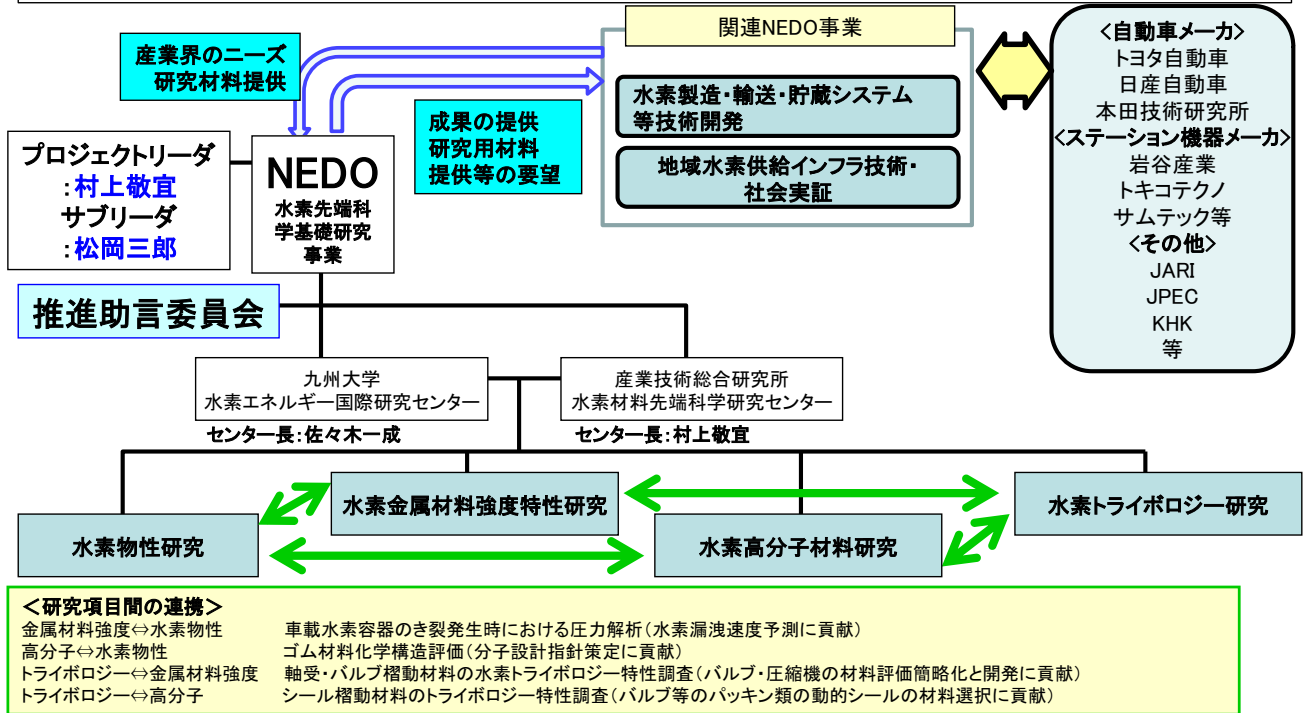
■ 経済的な効果(2025年時点)

FCVの市場規模: 6兆円(FCV価格を300万円、保有台数を200万台として算出)

Ⅱ. 研究開発マネジメント

【実施体制】

本プロジェクト内の研究間で連携しつつ、関連のNEDO事業と連携し、産業界のニーズの集約と産業界への成果の提供を相互に実施。



Ⅱ. 研究開発マネジメント

【平成22年度の中間評価の主な指摘に係る対応①】

(1) 指摘: 水素の基礎的成果は出ているが、実用化に近づいているか不明

対応: 鋼種拡大の成果を70MPaプレクール対応に反映するため、岩谷産業を実施者に加え、体制を強化した。また、正しく測定できる歪みゲージを開発するために、共和電業を加え、体制の強化を行った。

・2015年の商用水素ステーション整備のために特に緊急性の高い鋼種拡大に資する金属材料の評価を大幅に強化。

成果: 成果が水素ステーションの建設許可に活かされ、2015年に向けた実証研究につながった。

II. 研究開発マネジメント

【平成22年度の中間評価の主な指摘に係る対応②】

(2) 指摘：NEDOの他の水素関連事業と一体感をもって実施することが必要。

対応①：「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」との連携強化

成果①：・規制合理化、国際標準化に資する材料データを特定し、取得。

- ・水素充填ホース亀裂対策について、日本合成化学を共同研究者に追加し、連携して「耐水素性を有する水素バリア樹脂」のデータを提供。それにより水素充填ホース実用化（亀裂対策）に向けた課題検証（水素溶解量低減／異物対策）完了見込み。

- ・トキコテクノでの試験、解析により弾性特性の感度の高い因子を把握。それにより緊急離脱カップリングのリングの水素漏洩対策の指針を得た。

対応②：「地域水素供給インフラ技術・社会実証」との連携強化

成果②：・水素ステーションにおいて長期間使用した70MPa関連部品の材料を調査することにより残存寿命が判った。

- ・低コスト鋼材の水素中の強度データをHySUTに提供することで、HySUTはそのデータを水素ステーションの特認取得に役立てた。それにより、水素ステーションの使用材料の耐久性が実証された。

II. 研究開発マネジメント

【平成23年度の推進助言委員会の主な指摘に係る対応】

(1) 指摘：材料評価データは軽々しくオープンにせず、戦略的に活用されるべき。適切な活用方法の検討が必要。

対応：・秘密保持を前提にデータ開示規程を整備し、データの流出防止対応を実施。

- ・提供先とは覚書を結んで運用（関係者間では研究成果を有効的に使う）。

成果：・外部への不適切な情報の流出を防止した。

- ・適正にデータを提供することで規制合理化を推進。

(2) 指摘：-40℃プレクールへの対応を考えると-50℃までのデータ取得を検討すべき。

対応：高圧ガス保安法の要求する強制換気に起因する温度誤差を解決しつつ、-50℃における材料データ取得見込み（～H24年末）

成果：プレクール時の材料の安全が確保できる。

Ⅱ. 研究開発マネジメント

【情勢変化への対応】

(1) 鋼種拡大に係る規制の再点検に対する対応

平成22年6月に閣議決定された「規制・制度改革に係る対応方針(グリーンイノベーション分野)」を受け、平成22年末に水素ステーションの鋼種拡大に係る**規制の再点検**及びその結果を踏まえた対応について今後の具体的な工程表が作成され、「例示基準に記載された使用可能鋼材の拡大」が項目の一つに位置付けられた。

⇒「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業」と連係して、鋼種拡大に資するデータ・安全性のデータ取りを加速して実施。

⇒工程表の進捗に貢献。平成24年度末に技術基準(案)完成見込み。

(2) 水素ステーション100箇所の先行整備に向けた対応

平成23年1月、2015年のFCV普及開始に先駆け、100箇所程度の商用水素ステーション設置・実証を行う共同声明が発表された。

⇒鋼種拡大にかかる規制合理化のためのデータの取得を加速して実施すると共に、基準化対象外の材料についても高圧ガス保安法の特認を取得するために材料データを取得。

⇒2015年の商用水素ステーションの目標コスト達成に資する低コスト水素ステーション実証が可能となる見込み。

水素先端科学基礎研究事業

2006年度～2012年度(7年間)

プロジェクトの概要 (公開)

- I. 事業の位置づけ・必要性
- II. 研究開発マネジメント
- III. 研究開発成果
- IV. 実用化の見通し

2012年 10月5日(金)

p.1/27

III. 研究開発成果(プロジェクトの概要)

公開

2012年7月

NEDO水素先端科学基礎研究事業

九州大学
水素エネルギー国際研究センター

産業技術総合研究所
水素材料先端科学研究センター



研究センター長:村上敬宜
(九州大学カーボンニュートラル
エネルギー国際研究所所長代理)

センター長:
佐々木一成



客員研究員:佐々木一成
(産学連携)

副研究センター長:光山準一(総括)



副研究センター長:松岡三郎(研究)



副研究センター長:栗山信宏(企画/管理)



合計 208名
(2012. 3. 31)

伊都キャンパス・福岡西支所

つくば西事業所

水素物性
研究チーム



チーム長:高田保之
メンバー 36名

長崎大学・佐賀大学

計測標準研究部門

水素材料強度特性
研究チーム



チーム長:松岡三郎
メンバー 90名

上智大学,福岡大学
物質・材料研究機構

岩谷産業(株)

(株)共和電業

水素高分子材料
研究チーム



チーム長:西村 伸
メンバー 24名

NOK(株)

日本合成化学工業(株)

水素トライボロジー
研究チーム



チーム長:杉村文一
メンバー 34名

長崎大学

先進製造プロセス
研究部門

水素脆化評価
研究チーム



チーム長:飯島高志
メンバー 13名

計測フロンティア
研究部門

産総研つくばの研究ユニットからの併任

外部関連機関との連携 (JAMA, JHFC, JARI, 民間企業)

III. 研究開発成果(プロジェクトの概要)

公開

本プロジェクトは、水素の物性、材料、トライボロジーに関する集中的研究を行い、企業と連携しながら国の施策を支える恒久的な世界的拠点、HYDROGENIUSを設立した。

水素の世界的研究拠点

国内外より研究者を結集し、水素と材料に関わる先端的な基礎研究を推進。

世界唯一の水素トライボロジーの系統的な研究



世界で唯一の一貫した水素集中研究施設

世界初となる高温高圧水素物性データベースの整備



120MPa 水素環境疲労試験機(3台)を世界で初めて運用



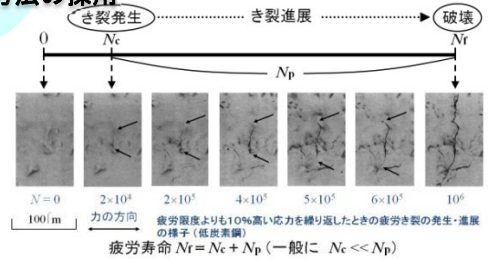
水素機器設計の基盤となる高圧水素トライボロジーデータベースを世界に先駆けて整備

項目	単位	値	単位	値	単位	値	単位	値	単位	値	
圧力	MPa	120	温度	°C	300	湿度	%	100	電圧	V	200
電流	A	10	回転数	rpm	1000	振動	m/s²	0.1	騒音	dB	70
材料	鋼材	304	材料	アルミ材	6061	材料	樹脂	PPS	材料	セラミックス	AlN
試験機	疲労試験機	3台	試験機	圧縮機	1台	試験機	蓄圧器	1台	試験機	ディスペンサー	1台

独自で開発した唯一無二の装置群

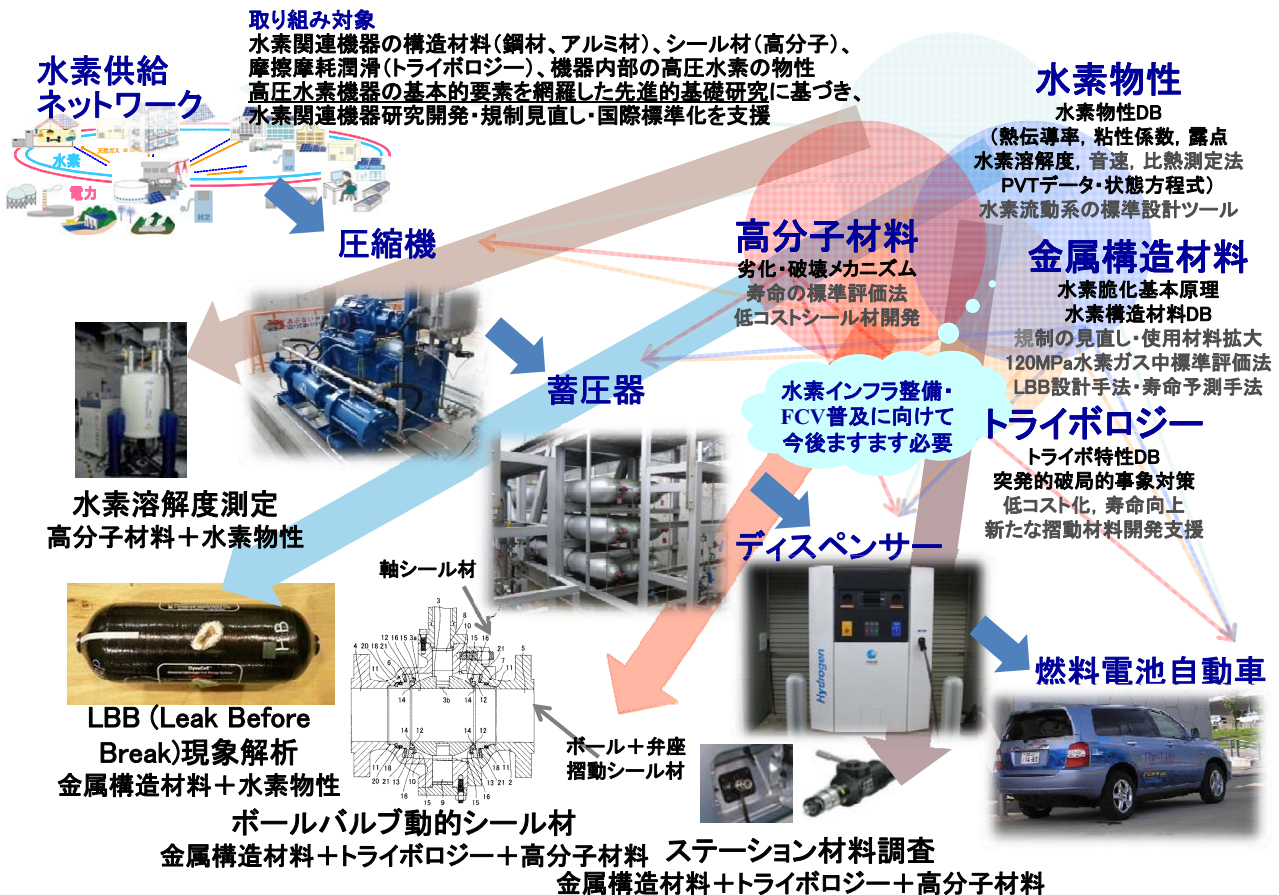
世界に類を見ない観察方法の採用

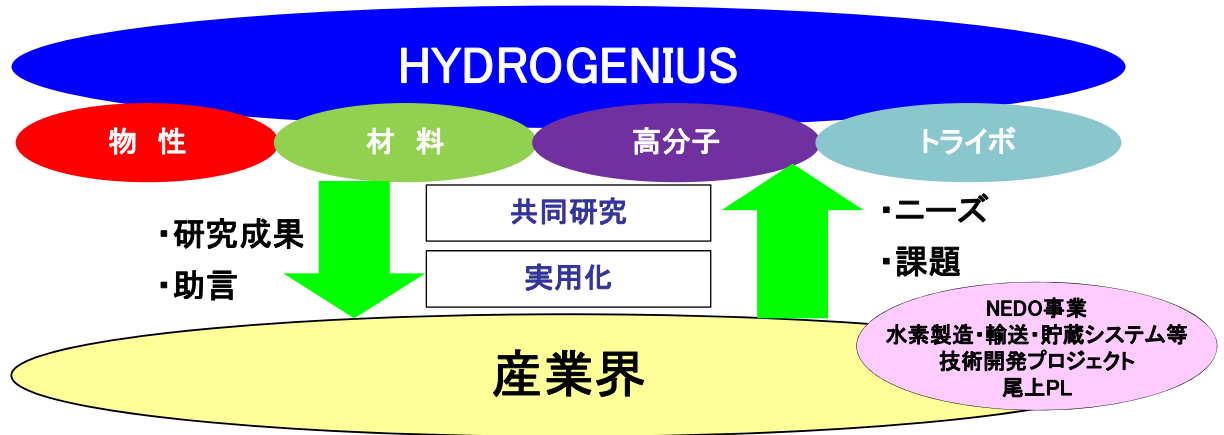
国際規格・標準化に向けた戦略的取組み



III. 研究開発成果(プロジェクトの概要)

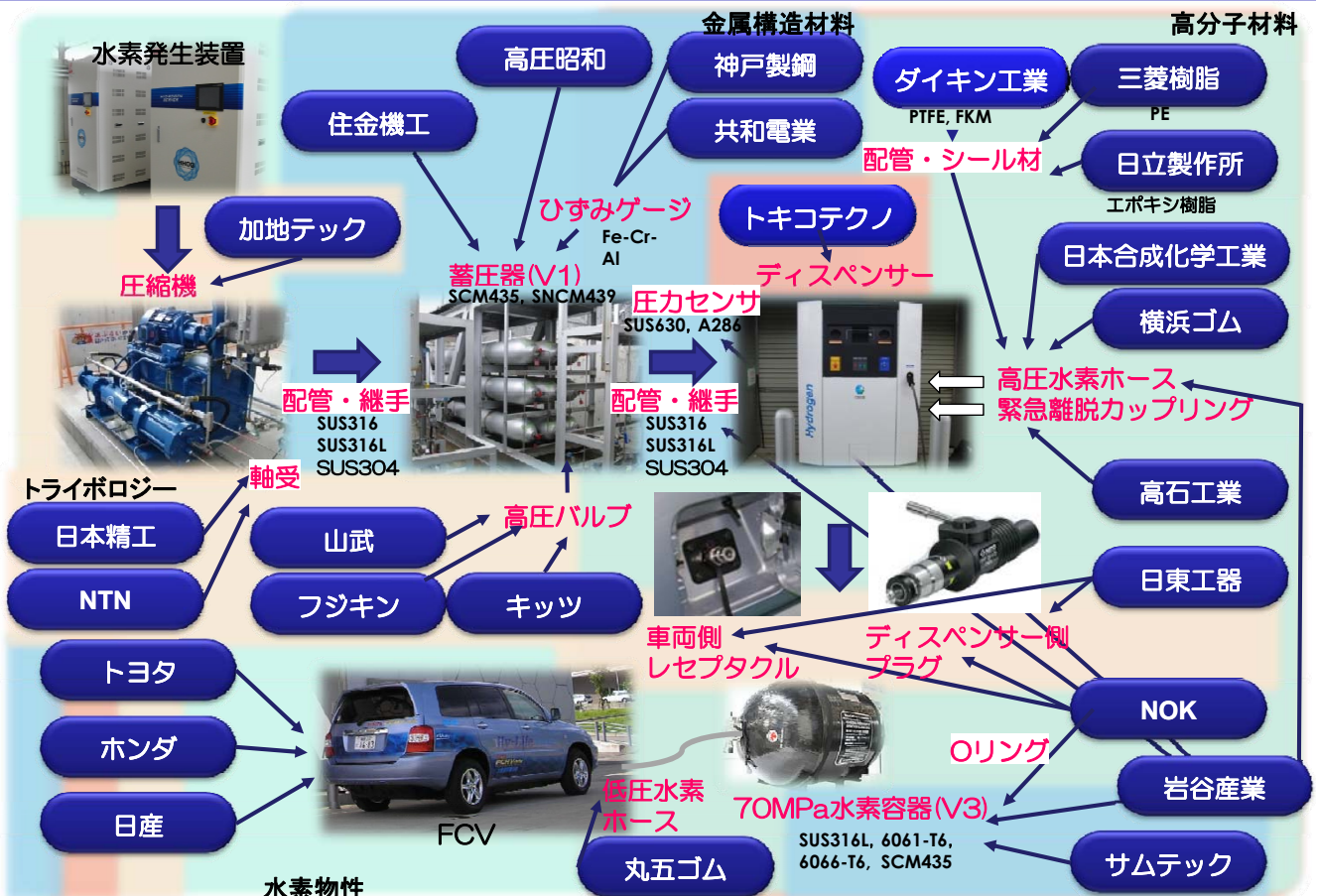
公開





企業及び関係機関 (●物性, ●材料, ●高分子, ●トライボ)

● 岩谷産業(株)	● ダイキン工業(株)	● ● トヨタ自動車(株)
● (株)共和電業	● 三菱樹脂(株)	● ● 日産自動車(株)
● ● NOK(株)	● トキコテクノ(株)	● ● (株)本田技術研究所
● ● 日本合成化学工業(株)	● 高石工業(株)	● ● 高圧ガス保安協会
● ● (株)山武	● ● 日本精工(株)	● ● (社)日本自動車工業会
● ● (株)フジキン	● ● (株)加地テック	● ● (財)石油エネルギー技術センター (40数社内, 個別数社)
● ● 日東工器(株)	● ● (株)キッツ	● ● (財)エンジニアリング協会
● ● (株)明豊エンジニアリング	● ● 川崎重工業(株)	● ● HyTReC
● ● 豊田通商(株)	● ● (株)IHI	



プロジェクト全体の最終目標(～平成24年度)

燃料電池自動車や水素ステーションなど、高圧状態の水素を利用する際に重要となる、水素高圧状態下における水素の物性、水素を取り扱う容器や機器における材料の水素脆化やトライボロジーなど、水素に関わる現象や挙動の基礎的メカニズムなどを解明するとともに、基礎的な水素物性のデータベース構築など学術的な基盤を確立し、関係産業界が水素を利用する際の技術の信頼性向上や安全性の確立に資する。

研究開発項目	研究チーム	最終目標	達成度
① 高圧水素物性の基礎研究	水素物性研究チーム	PVTデータ、粘性係数、熱伝導率、比熱、物質に対する水素の溶解度等 水素物性について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素物性データベースを纏め、関係産業界に提供するとともに、更なる測定精度や信頼性向上のための校正技術を纏める。	○
② 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用、加工、温度などの影響による材料強度特性研究	水素材料強度特性研究チーム	高圧水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムについて、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータをもとに、水素環境下における組織・強度変化予測手法や疲労き裂進展挙動予測手法をまとめ、関係産業界に提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。 また、高圧化状態に曝される材料、部品等の加工(成形・溶接・表面修飾)プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記の科学的知見も含めて、水素構造材料データベース、最適水素材料探索指針をまとめ、関係産業界に提供するとともに、材料劣化判断・健全性評価法や水素用機械要素設計法等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資することに加え、規制見直し、使用材料拡大、国際標準化に貢献する。 さらに、水素関連機器に用いる材料内の水素拡散挙動・漏洩挙動を計算するシミュレーション手法を用いて、上記の実験・解析データに理論的根拠を与え、産業界に対して水素材料や水素機械の信頼性向上や安全性の確立のための科学的知見を可能なかぎり一般化して提供することを試みる。	◎
③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価	水素高分子材料研究チーム	高圧化状態の水素に曝される高分子材料等の材料強度及び化学構造について、高分子材料の組成、長期使用及び加工、温度などの影響を評価し、基礎研究の結果に基づく知見も含めて、最適な耐水素高分子材料創製指針を纏め、関係する産業界に提供する。また、水素シールとして実使用されるOリング等の性能評価法等、高分子材料の劣化や破壊に関する評価法や基礎的データを提供し、関係する産業界が水素を利用する際の高分子材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。	◎
④ 高圧水素トライボロジーの解明	水素トライボロジー研究チーム	高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを纏め、関係産業界に提供するとともに、高圧水素トライボシステムや使用する材料に関する設計指針や管理指針等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の摺動材料やシール材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。	○

①「高圧水素物性の基礎研究」

水素物性研究チーム

チーム長: 高田保之(九州大学工学研究院 教授)



共同研究機関: 長崎大学, 佐賀大学

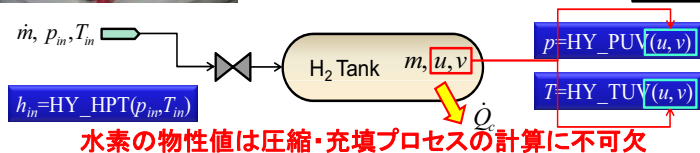
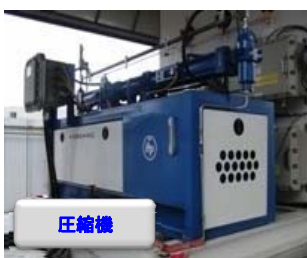
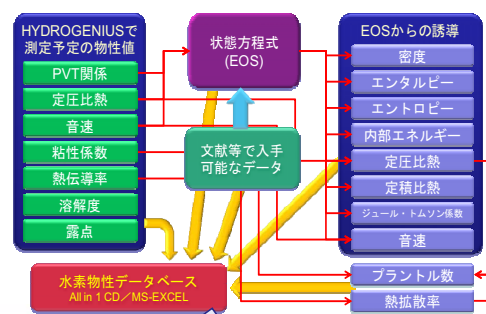
研究実施項目

- (1) PVTデータの測定装置の開発および状態方程式の作成
- (2) 粘性係数の測定
- (3) 熱伝導率の測定
- (4) 水素ガスの種々の物質に対する溶解度の測定
- (5) 水素物性データベースの研究開発
- (6) 水素雰囲気における高沸点ガスの露点の測定
- (7) 比熱の測定

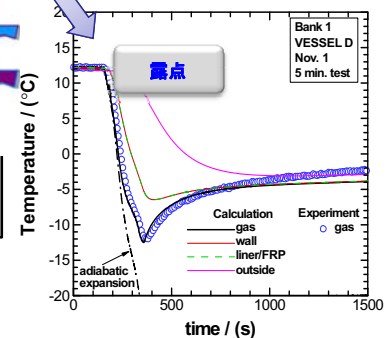
研究実施項目	① 高圧水素物性の基礎研究	
研究チーム	水素物性研究チーム	
最終目標 (24年度末)	PVTデータ、粘性係数、熱伝導率、比熱、物質に対する水素の溶解度等 水素物性について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを元に、水素物性データベースを纏め、関係産業界に提供するとともに、更なる測定精度や信頼性向上のための校正技術を纏める。	
研究開発成果	<ul style="list-style-type: none"> ・ PVT性質に関し、100MPa、500°C (773K)までの定容積法測定装置、250°C(523K)までのパーネット式PVT測定装置および磁気式密度計を開発し、異なる測定法によるデータをクロスチェックを可能にした。得られた信頼性の高いデータを基に高精度の状態方程式を作成した。 ・ 状態方程式のさらなる高精度化のために必要な音速に関し、球型共鳴器音速測定装置を開発し、1MPa、60-90°Cまでの条件下の測定技術を確立した。 ・ 粘性係数に関し、細管法により100MPa、500°C (773K)まで測定可能な高圧水素粘性係数測定装置を開発し、データを取得し、従来のデータを含めて推算式(偏差2%以内)を作成し、データベースに組み込んだ。 ・ 熱伝導率に関し、非定常短細線法を確立し世界で初めて高温高圧条件下の水素に適用した。本方法では熱伝導率と熱拡散率の同時測定が可能である。100MPa、500°C (773K)まで測定可能な高圧水素熱伝導率測定装置を開発し、データを取得し、既存のデータを含めて推算式(偏差2%以内)を作成し、データベースに組み込んだ。 ・ 種々の物質に対する水素の溶解度に関し、物質内拡散係数を測定可能なNMR装置を開発し、ゴム材料および固体高分子電解膜への水素ガスの溶解度及び拡散係数の測定法を確立した。 ・ 水素雰囲気中の高沸点ガスの露点の測定に関し、鏡面冷却方式計測システムを開発し、5-10MPa、水分濃度5-55ppmの実測値を蓄積し、露点推算法を構築し、70MPa水素ステーションへの適用を試みた。 ・ 全く新しいコンセプトに基づいた物性推算機能付きデータベースシステム(All-in-1 CD/DVD/USB)を完成し、本プロジェクトで収集されたデータに基づいてデータベースの拡充を行った。また、プロセス設計に使える熱物性値推算ツールとしての水素物性ライブラリ(MS-Excel版, Mathcad版)を作成した。 ・ 水素物性推算アドインライブラリには、水素物性値計算用の既存の推算式と本実測を基にして得られたビリアル状態方程式および粘性係数と熱伝導率のそれぞれの推算式が関数として組み込まれている。 ・ 水素関連のプロセス・システム設計、計測装置開発等関係業界への普及のため、「高圧水素物性データベース、水素物性推算ツール活用セミナー」を開催し、さらに、プロジェクト参加企業や公的機関へ本データベースのプロトタイプを提供を開始した。 	
達成度	○	<p><達成状況 評価基準> 7月末における研究成果が</p> <p>◎:最終目標を超過達成済み。 ○:最終目標を達成済み。 △:最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み。 ×:最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。</p>

- ・水素の物性値データは水素エネルギー技術を支える基盤情報
- ・**世界初**となる高温高圧水素物性データベースの体系的な整備を実施

- ・水素の物性値は、水素関連機器の設計の基盤情報であり、高精度かつ高信頼性の機器設計には、高精度の物性値が必要不可欠である。
- ・エンジニアが機器を設計する際に必要となる物性値について、その使用範囲や精度を分かりやすい形で提供するとともに手軽に入手できる環境を整備する必要がある。
 - 水素物性データベース(All in 1 CD)
- ・圧力、温度に対する物性値を与えるだけでなく、プロセス設計に使えるツールとして提供することが重要である。
 - MS-Excel版水素物性ライブラリ



水素の物性値は圧縮・充填プロセスの計算に不可欠



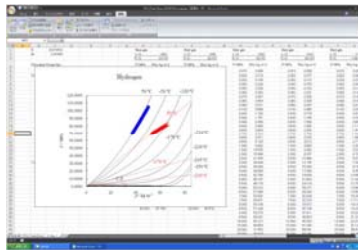
供給側タンク内の水素温度低下の例
(供給側 P = 35 MPa, 車載タンク P₀ = 0.1 MPa)

エクセル(MS-Excel)用水素物性ライブラリの使用例

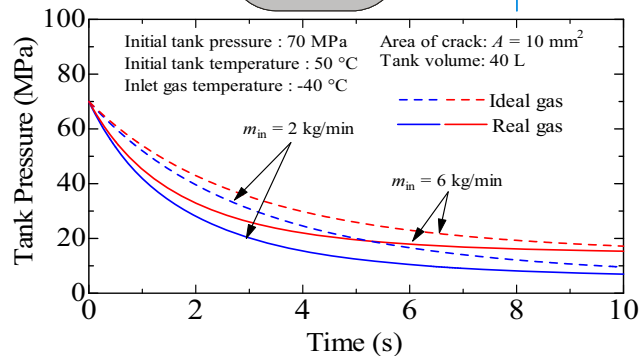
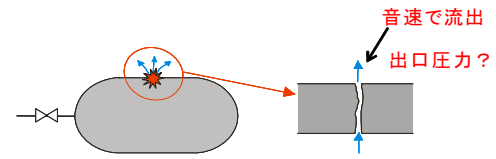
1. 水素ステーションの圧縮仕事の計算シート
2. 車載水素容器の亀裂発生時における圧力解析用シート



使用例1: 水素ステーションの圧縮仕事の計算



使用例2: 車載水素容器の亀裂発生時における圧力解析



き裂発生時の容器内の圧力変化

SAE J2579 委員会(高圧水素容器の規格)日本側関係者にヘデータと技術情報を提供

1st ステップ: ライブラリ (DLL) をシステムフォルダ (もしくはパスが通ったフォルダ) にコピー
 2nd ステップ: Excelにインポートモジュール (関数定義ファイル) を追加
 SUMやAVERAGE等の関数を使って計算するのと同じ感覚で、水素物性が計算できる。
 ユーザー認証機能付きインストーラーを作成し、制限付き配布の準備完了。

②「高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究」

水素材料強度研究チーム

チーム長: 松岡三郎 (九州大学工学研究院 教授)



共同研究機関: 上智大学, 福岡大学, NIMS
 岩谷産業(株), (株)共和電業

研究実施項目

「高圧/液化による金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び対策検討」

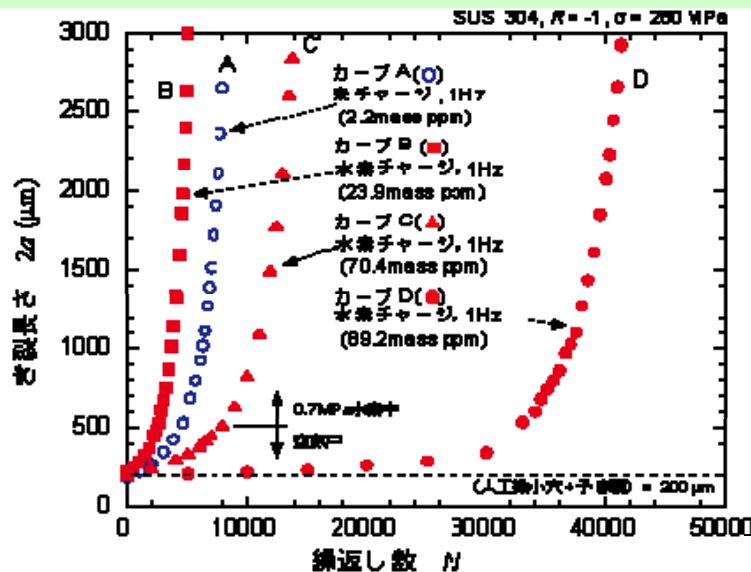
- (1) 疲労き裂先端における塑性変形(すべり変形)と水素の相互作用の解明
- (2) 高圧ガス水素下における疲労き裂発生・進展メカニズムの解明
- (3) 水素機器に使用される金属材料の強度評価
- (4) 水素機器の設計・製造における部品・接合部材の強度評価
- (5) 材料中の侵入水素の存在状態解析
- (6) 材料中の結晶粒内・粒界におけるすべり変形に及ぼす水素の影響調査
- (7) 材料中の疲労き裂先端の水素状態の調査
- (8) 水素ステーションに使用された金属材料の健全性及び強度評価
- (9) 水素デバイス等の安全設計シミュレーション

研究実施項目	② 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用および加工、温度などの影響による材料強度特性研究	
研究チーム	水素材料強度特性研究チーム	
最終目標 (24年度末)	<p>高圧水素環境下における金属材料等に発生する水素脆化メカニズムや水素疲労メカニズムについて、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータをもとに、水素環境下における組織・強度変化予測手法や疲労き裂進展挙動予測手法をまとめ、関係産業界に提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。</p> <p>また、高圧化状態に曝される材料、部品等の加工(成形・溶接・表面修飾)プロセスや同プロセスにおける温度等の影響について、上記の科学的知見も含めて、水素構造材料データベース、最適水素材料探索指針をまとめ、関係産業界に提供するとともに、材料劣化判断・健全性評価法や水素用機械要素設計法等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資することに加え、規制見直し、使用材料拡大、国際標準化に貢献する。</p> <p>さらに、水素関連機器に用いる材料内の水素拡散挙動・漏洩挙動を計算するシミュレーション手法を用いて、上記の実験・解析データに理論的根拠を与え、産業界に対して水素材料や水素機械の信頼性向上や安全性の確立のための科学的知見を可能なかぎり一般化して提供することを試みる。</p>	
研究開発成果	<p>(基礎研究)</p> <ul style="list-style-type: none"> 材料強度チームと高分子材料チームの基礎研究成果をもとに、著書「水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方」(村上敬宜、松岡三郎、近藤良之、西村伸 共著)を出版した。 水素環境下におけるオーステナイト系ステンレス鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす荷重荷速度、製造時に侵入した水素、過飽和水素の重要性を発見した。 水素による疲労き裂進展速度の加速には上限値が存在することを見出し、上限値は水素機器の安全な疲労設計の根拠になることを提示した。 水素により疲労き裂先端ですべりが局在化することに注目し、水素助長疲労き裂継続進展機構を提案した。 高圧水素ガス中での低速引張(SSRT)特性、疲労特性、疲労き裂進展特性を評価する方法並びに水素拡散係数と固溶度を評価する方法を確立した。 <p>(応用研究)</p> <ul style="list-style-type: none"> 水素構造材料データベース(材料強度特性データベースと水素拡散特性データベース)を作成し、外部の関係機関に提供している。提供したデータベースは、規制見直し、使用材料拡大(KHK, JPEC)並びに水素ステーション設置のための特認取得(HySUT)に使用されている。 外部の関係機関と連携し、実証が終了した35 MPa水素ステーションなどの部品・部材の調査・解析(事例解析)を行っている。事例解析の結果をもとに、水素機器の安全性確保、高性能化の指針を提言している。 オーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手の高サイクル疲労特性に及ぼす水素の影響を明らかにし、溶接施工の水素機器への適用可能性を示した。 10MPa水素ガス中、周波数26Hzで疲労試験が可能な試験装置を開発し、水素ガス中での疲労限度のデータベース作成を可能にした。 	
達成度	◎	<p><達成状況 評価基準> 7月末における研究成果が</p> <p>◎:最終目標を超過達成済み。 ○:最終目標を達成済み。 △:最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み。 ×:最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。</p>

基礎研究—疲労における水素脆化メカニズムの解明

疲労破壊における水素脆化の新現象:

過飽和に水素をチャージすることで疲労き裂進展が大幅に減速



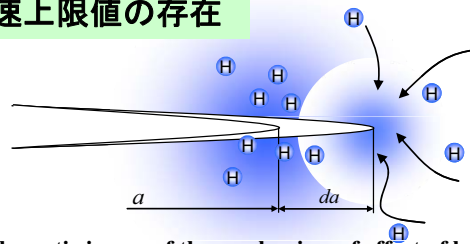
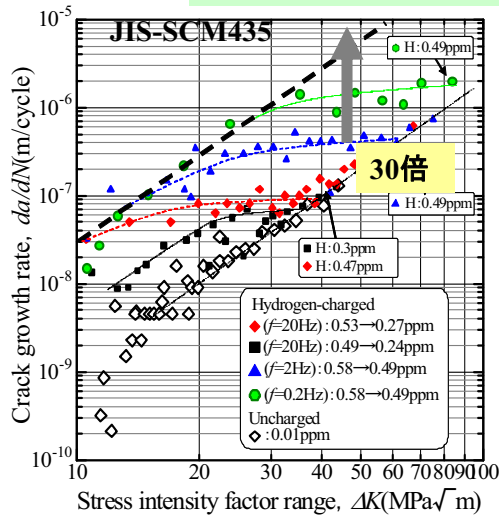
日本経済新聞
 「技術トレンド調査」で
 第4位になる。
 (国内研究機関が2010年6月~8月に公表した主な開発成果63件中)

図 オーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lの疲労き裂長さとの繰返し数の関係

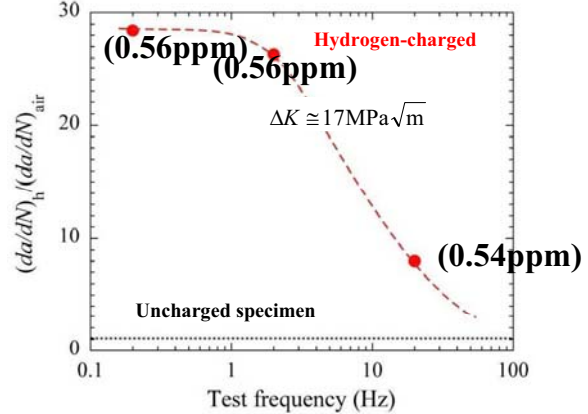
・70 mass ppm 以上の過飽和水素で疲労き裂進展抵抗が大幅に向上

基礎研究一 疲労破壊における水素脆化メカニズムの解明

繰返し速度効果とき裂進展加速上限値の存在



Schematic image of the mechanism of effect of hydrogen and test frequency on fatigue crack growth.



蓄圧器用低合金鋼SCM435における疲労き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係 $R = -1$

・水素環境下では、繰返し荷重をゆっくりかけると、疲労き裂進展速度は加速する。
 ・水素による疲労き裂進展速度の加速には上限がある。上限値は約30倍である。

田中, 本間, 松岡, 村上, 機論A編, 75-736(200712)pp1358-1365

③「高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価」

水素高分子材料研究チーム

チーム長: 西村伸 (九州大学工学研究院 教授)



共同研究機関: NOK(株), 日本合成化学工業(株)

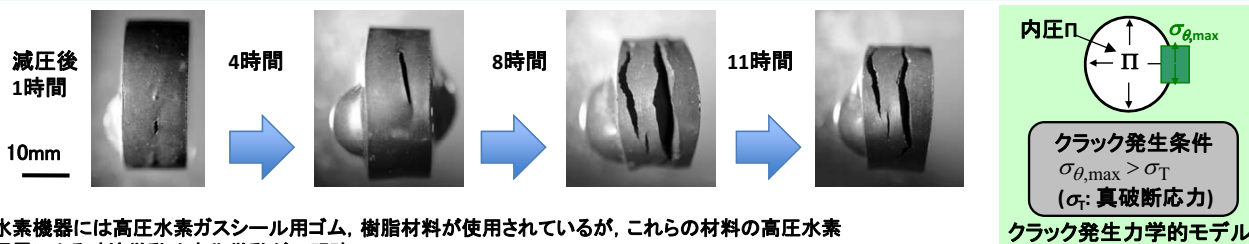
研究実施項目

- (1) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価
- (2) 水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価
- (3) 材料強度に及ぼす水素の影響に関する最新研究状況調査
- (4) 水素雰囲気下におけるゴム材料研究

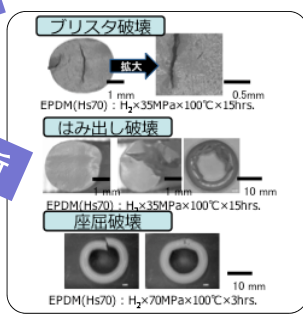
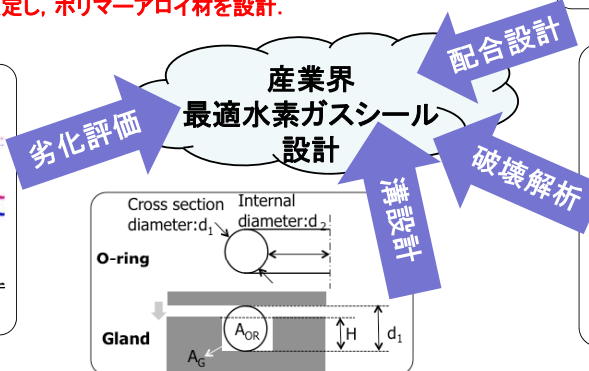
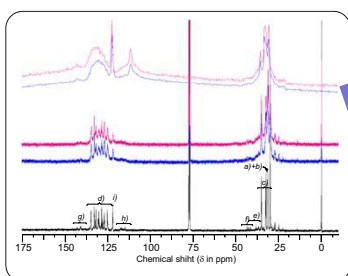
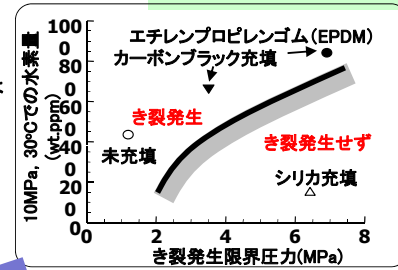
研究実施項目	③ 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工、温度などの影響による材料強度及び化学構造評価	
研究チーム	水素高分子材料研究チーム	
最終目標 (24年度末)	高圧化状態の水素に曝される高分子材料等の材料強度及び化学構造について、高分子材料の組成、長期使用及び加工、温度などの影響を評価し、基礎研究の結果に基づく知見も含めて、最適な耐水素高分子材料創製指針を纏め、関係する産業界に提供する。また、水素シールとして実使用されるOリング等の性能評価法等、高分子材料の劣化や破壊に関する評価法や基礎的データを提供し、関係する産業界が水素を利用する際の高分子材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。	
研究開発成果	<p>(1)水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の強度評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・圧力差、減圧速度、ゴム材とプリスタ発生状況の関係を把握した。 ・プリスタによる内部クラックの進展状況を観察し、プリスタ発生メカニズムを推定した。 ・配合が明確なモデル配合材料による評価結果をまとめてデータベース構築を推進中。 ・取得したデータの産業界における水素機器開発への適用を進めた。 <p>(2)水素機器に使用される非金属材料(ゴム・樹脂)の化学構造評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素曝露前の状態で分析を実施し初期のゴム材料の化学構造を把握した。 ・長時間水素雰囲気下に曝露された、ゴム材料の分析を実施し、水素曝露による構造変化を把握した。 ・水素曝露によるゴム材料の化学構造変化(劣化)を評価した。 ・水素曝露時に溶解した水素の溶解状態を分析し、耐プリスタ性に優れた分子設計指針の検討を実施した。 <p>(4)水素雰囲気下におけるゴム材料研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ゴム材料の高圧水素耐久試験機を開発し、プリスタ発生に起因する機構側要因(圧力差、昇圧・減圧速度等)、Oリング材料および溝設計の影響度を把握した。 ・Oリングの使用条件を模擬した温度、加減圧条件によるシールからの漏洩量により、Oリングの破壊モードを把握し、対策の指針を確立した。 ・5,500回加減圧サイクルによる長期シール性を確認し、加減圧周期がOリング損傷への影響が大きいことを確認した。 <p>(5)水素耐性に優れた適用材料の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素に対して耐性に優れたガスバリア層のベース樹脂を選定した。 ・選定したベース樹脂を用いて高圧水素用ホースとして適用可能な柔軟性を持つガスバリア層として適用可能なポリマーアロイ材を設計した。 ・開発した材料に対する水素燃料の付臭剤の影響を調査した。 ・開発した材料の実機への適用評価を実施し、水素耐久性材料の設計指針を策定した。 	
達成度	◎	<p><達成状況 評価基準> 7月末における研究成果</p> <p>◎:最終目標を超過達成済み。 ○:最終目標を達成済み。 △:最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み。 ×:最終目標未達であり、年度末においても未達となること懸念される。</p>

Ⅲ. 研究開発成果(成果の意義) 水素高分子材料研究チーム

Oリング用ゴム材料(カーボンブラック充てんエチレンプロピレンゴム)の高圧水素暴露-減圧後プリスタ破壊



- 水素機器には高圧水素ガスシール用ゴム、樹脂材料が使用されているが、これらの材料の高圧水素曝露による破壊挙動や劣化挙動が不明確。
 - **破壊挙動のモデル化、化学構造変化の把握に基づく水素による破壊・劣化メカニズムの解明**
- ゴム、樹脂材料は多種多様な種類があり、さらに充てん材など配合試薬や資材などの組み合わせにより評価対象は膨大な数になる。また、メーカーは独自の配合による材料を使用。
 - **明確な配合の試験片による体系的な評価**
 - 産業界における材料開発に活用しうるデータ整備**
- 高圧水素シール用Oリングの溝設計指針の確立によるシール構造全体の最適化が必要。
 - **高圧水素耐久試験機によるOリング溝形状の影響評価**
- 高圧水素機器用樹脂材料として水素耐久性の高い材料が必要。
 - **水素バリア層のベース樹脂を選定し、ポリマーアロイ材を設計。**



④「高圧水素トライボロジーの解明」

水素トライボロジー研究チーム

チーム長: 杉村丈一(九州大学工学研究院 教授)



共同研究機関: 長崎大学

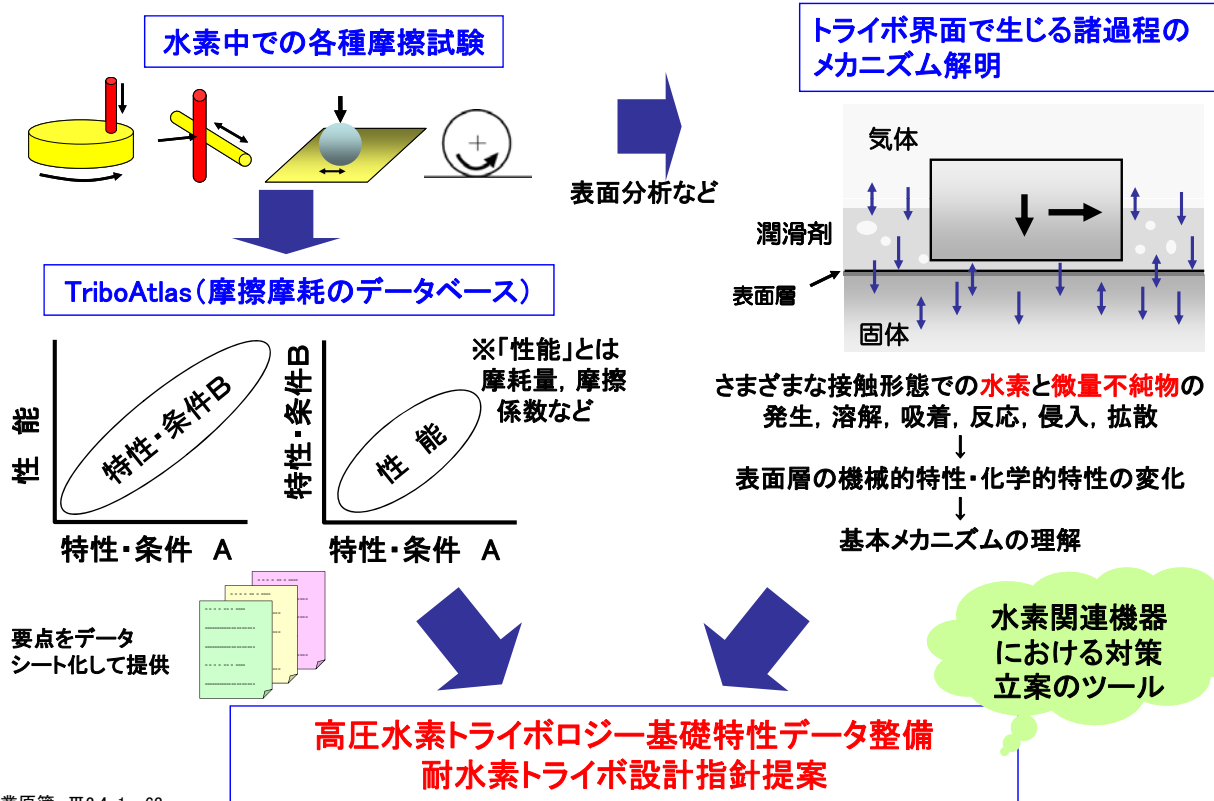
研究実施項目

- (1) 軸受・バルブ摺動材料の水素トライボロジー特性の調査研究
- (2) シール材料の水素トライボロジー特性の調査研究
- (3) 耐水素表面のトライボロジー特性(耐水素表面改質)の調査研究
- (4) トライボシステム中の気体分子の挙動解析
- (5) 水素トライボロジー信頼性評価

Ⅲ. 研究開発成果(研究開発の最終目標と達成度) 水素トライボロジー研究チーム

研究実施項目	④ 高圧水素トライボロジーの解明	
研究チーム	水素トライボロジー研究チーム	
最終目標 (21年度末)	高圧水素環境下における軸受け、バルブ摺動材料、締結部材料、シール材料等について、具体的な計測値及び理論的考察に裏付けられたデータを纏め、関係産業界に提供するとともに、高圧水素トライボシステムや使用する材料に関する設計指針や管理指針等を提供し、関係産業界が水素を利用する際の摺動材料やシール材料に関する信頼性向上や安全性の確立に資する。	
研究開発成果	<ul style="list-style-type: none"> ・試験ガス中の微量不純物(水、酸素)の量を制御可能な摩擦試験装置、摩擦試験片を大気に曝露せずに表面分析が可能な実験分析システム、圧力40MPa、温度373Kまでの摩擦力測定技術を確立までの高圧水素雰囲気中で摩擦試験が可能な摩擦試験機などを独自に開発し、水素トライボロジーの研究体制を築いた。 ・広範な摺動材料のトライボロジー特性の基礎データを蓄積し、諸現象の支配的影響因子を明らかにするとともに影響因子の作用機構を検討した。 ・産業界と連携し、軸受、バルブ、動的シール、ピストンリング等の候補材料について、常圧中、及び40MPaまでの高圧水素中における摩擦摩耗特性データを蓄積し、実機の開発に貢献した。 ・水素ガス中の微量水分、酸素が水素中のトライボロジー現象の重要な支配因子であることを見出し、代表的な摺動材料についてこれらの微量成分の影響を明らかにした。 ・高圧水素中に曝露された鋼材表面を分析し、高圧水素曝露により表面酸化膜の減少、表面硬度の上昇、炭素の析出などが起こり、温度依存性があることを明らかにした。 ・四フッ化エチレンを代表とする動的シール用樹脂材料の摩擦摩耗特性の支配因子として、転移膜形成とこれに及ぼす相手面金属表面での化学反応の影響を明らかにした。 ・軸受鋼の転がり疲れ寿命に及ぼす潤滑条件、水素侵入量、表面酸化膜形成状態の影響を明らかにした。 ・水素トライボロジー基礎データのデータベース(トライボアトラス)を構築し、産業界からの要望にもとづいて改良を加え、データシート化して関連企業に提供した。 	
達成度	○	<p><達成状況 評価基準> 7月末における研究成果が</p> <ul style="list-style-type: none"> ◎:最終目標を超過達成済み。 ○:最終目標を達成済み。 △:最終目標未達であるが、年度末までに達成する見込み。 ×:最終目標未達であり、年度末においても未達となることが懸念される。

水素機器設計の基盤となる高圧水素トライボロジーデータベース(トライボアトラス)を世界に先駆けて整備



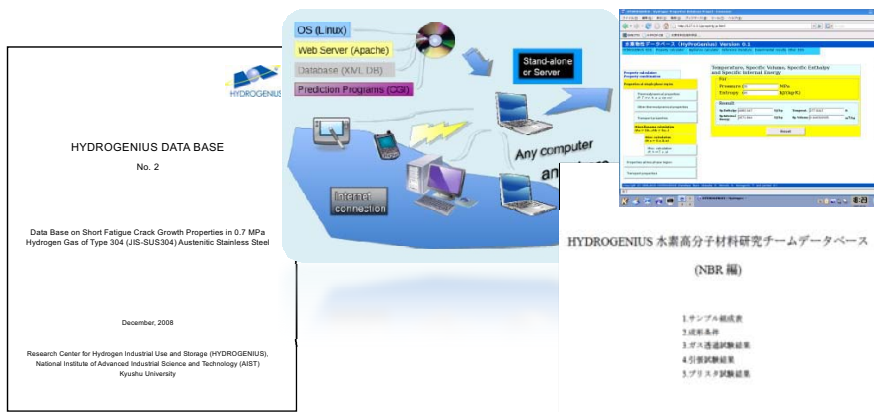
HYDROGENIUSで取得した評価データを取りまとめ、利用しやすい形で産業界に提供

- ・水素構造材料データベース
- ・水素物性データベース
- ・水素トライボロジーデータベース
- ・ゴム材料データベース

産業界等における研究開発、規制見直し、高圧ガス関係申請に大きく貢献

2011年6月以降、産業界・公的機関へ延べ330件を超える提供実績

「水素脆化メカニズムと水素機器強度設計の考え方」としてデータベースの基盤となる研究成果を書籍として出版(2012年1月)
最新の成果を水素機器の設計、製造の現場へ提供
世界的にも初めての書物



データ利用シート 実験条件

試験番号	材料	形状	寸法	試験機	試験速度	試験温度	試験圧力	試験時間	試験結果
1	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
2	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
3	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
4	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
5	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001

実験結果

試験番号	材料	形状	寸法	試験機	試験速度	試験温度	試験圧力	試験時間	試験結果
1	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
2	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
3	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
4	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001
5	304	丸棒	φ10×100	MTS	0.01	300	0.1	1000	0.001

図像表示 経時変化表示

	H18FY	H19FY	H20FY	H21FY	H22FY	H23FY	計
特許出願	国内1 海外0	国内3 国外6	国内3 海外18	国内2 海外6	国内0 海外4	国内0 海外0	国内9 海外34

発明の名称

水素物性

・「水素充填システムの水素用熱交換器」

材料強度特性

- ・「オーステナイト系ステンレス鋼, 及びその水素除去方法」
- ・「高圧水素タンクの損傷検知方法, 及びそのための装置」
- ・「水素ガス中疲労試験方法」
- ・「オーステナイト系ステンレス鋼, 及びその水素添加方法」

水素高分子

・「ゴム製品の検査方法及びゴム製品の検査装置」

水素トライボロジー

・「金属表面に四フッ化エチレン樹脂転移膜を形成する方法, 及びそれを用いた摺動部材」

- ◆毎年、「水素先端世界フォーラム」を福岡市で開催。年々活況を呈しており、第6回(平成24年2月)は、延べ787名(うち18ヶ国93名)が参加。産業界を初めとした世界の水素関係者の重要な意見交換の場に発展。
- ◆毎年、「水素エネルギー先端技術展」を北九州市で開催。地場中小企業に対する成果の報告、専門技術セミナーを開催。
- ◆平成21年6月、福岡水素エネルギー戦略会議とともに、福岡県麻生知事とともに、第8回産学官連携推進会議、日本経済団体連合会会長賞を受賞
- ◆平成22年5月、水素経済のための国際パートナーシップ(IPHE)優秀リーダーシップ賞の福岡水素エネルギー戦略会議受賞に貢献。
- ◆平成23年4月、松岡チーム長が「水素脆化の基本原理解明と水素機器の安全性確保の研究」について、文部科学大臣表彰「科学技術賞(研究部門)」を受賞。

	H18FY	H19FY	H20FY	H21FY	H22FY	H23FY	計
文献	2	9	31	77	54	42	215
口頭発表・講演	14	86	136	147	119	122	624
受賞実績	0	7	6	4	12	2	31
シンポジウム等の開催	1	3	2	4	6	7	23
展示会等への出展	0	2	4	4	3	3	16

III. 研究開発成果(標準化の取り組み)

公開

- ◆ 世界的研究拠点を形成するだけでなく、国際規格作成に有力な研究者との連携を密に行い、国際標準化を戦略的に推進
- ◆ 日本自動車業界とSAEとの標準化協議にデータを提供し、日本案での合意に貢献



III. 研究開発成果(成果の実用化可能性)

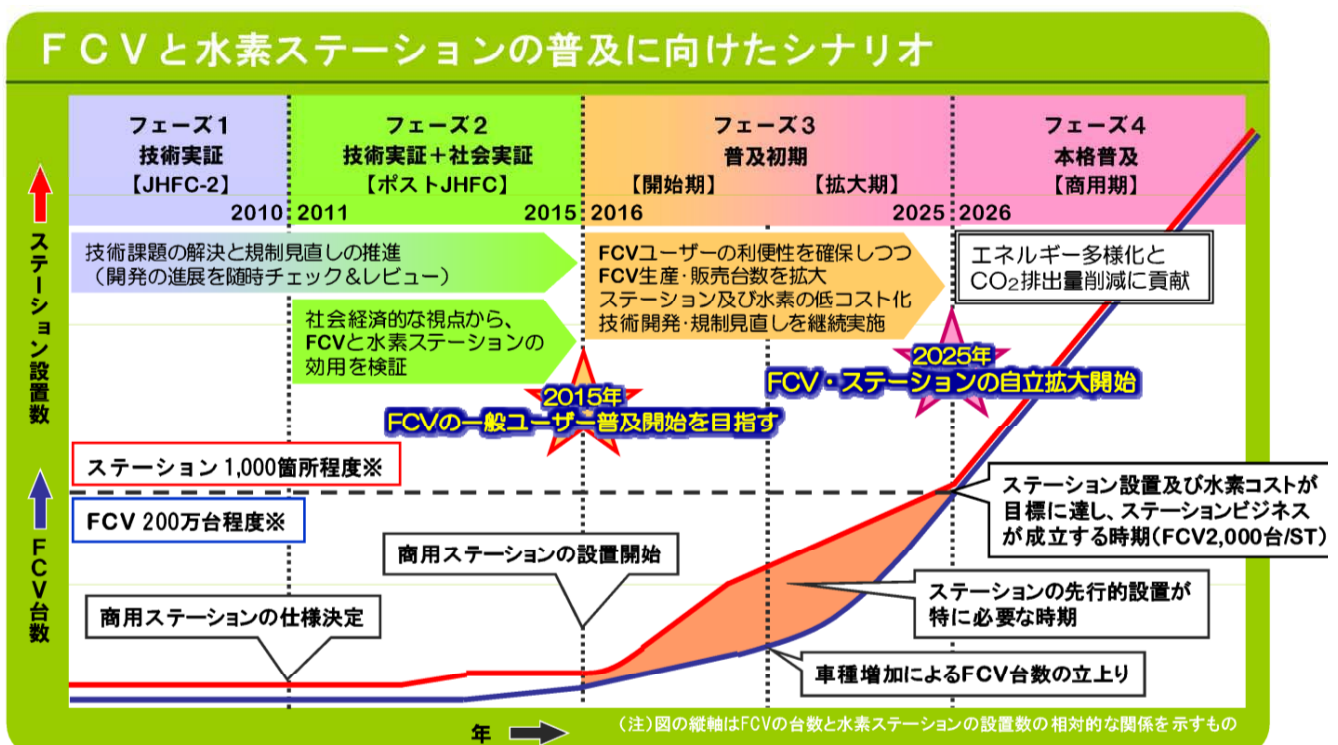
公開

燃料電池自動車・水素ステーションの将来シナリオ

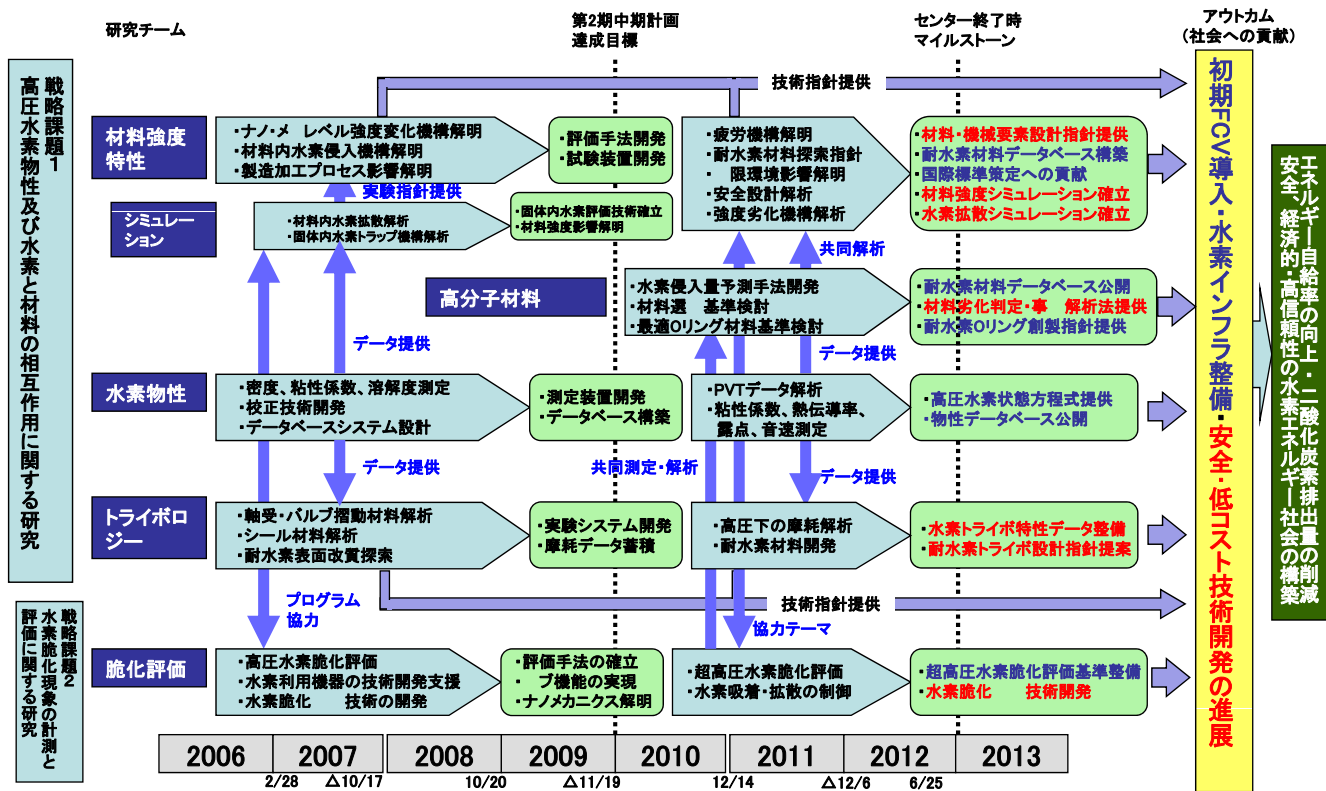
(燃料電池実用化推進協議会FCCJ 2008年7月発表, 2010年3月更新)



ニワトリか卵かを解消



水素材料先端科学研究センターのロードマップ

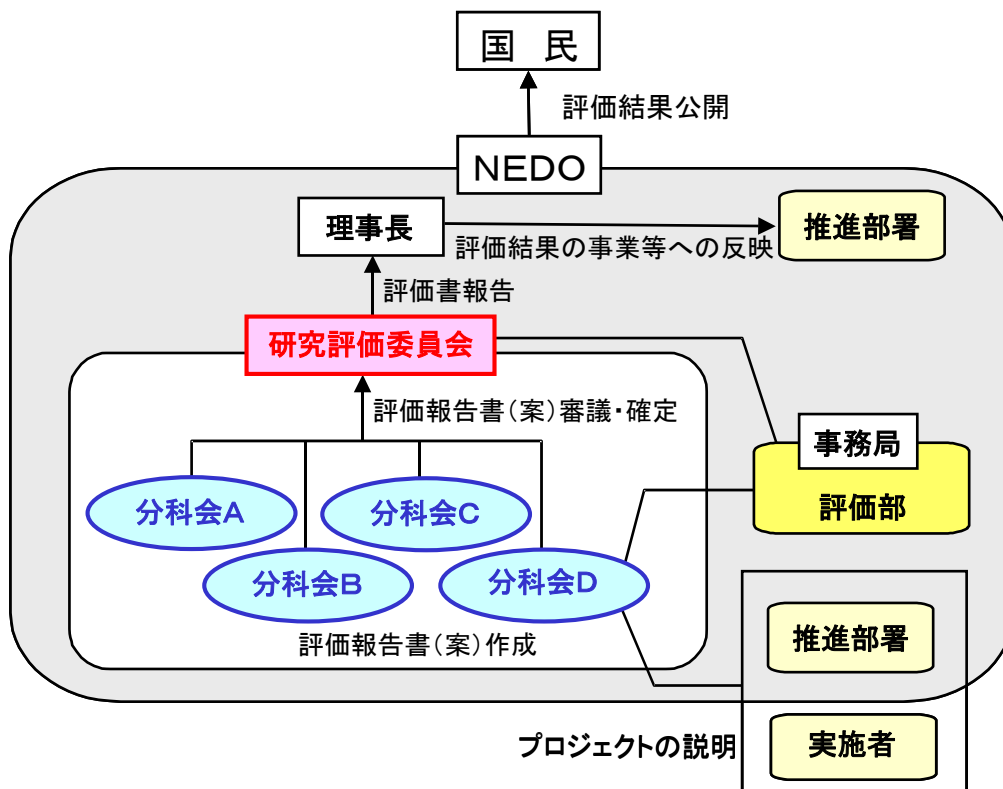


参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、
経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を
促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者
- ジャーナリスト

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある8名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

平成18年度に開始された「水素先端科学基礎研究事業」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プ

プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-7 頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ エネルギーイノベーションプログラムの目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。

- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
 - ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。
- (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性
- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
 - ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。
- (5) 情勢変化への対応等
- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
 - ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

- (1) 目標の達成度
- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
 - ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
 - ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。
- (2) 成果の意義
- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
 - ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
 - ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
 - ・ 成果は汎用性があるか。
 - ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
 - ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- (3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組
- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。

プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

標準的評価項目・評価基準（事後評価）

2010. 3. 26

【事後評価 標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】

標準的評価項目・評価基準は、第25回研究評価委員会（平成22年3月26日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による1…、2…、3…、4…が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)…、(2)…が標準的評価基準、それぞれの基準中の…が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの事後評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。

- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアする見込みか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)事業化までのシナリオ

- ・ N E D O 後継プロジェクト、N E D O 実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※ 基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

* 基礎的・基盤的研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアする見込みか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアする見込みか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。

- ・ 成果は公開性が確保されているか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

参考資料 2 評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

参考資料 3 分科会議事録

研究評価委員会
「水素先端科学基礎研究事業」(事後評価) 分科会
議事録

日時：平成24年10月5日(金) 10:00～17:50

場所：WTCコンファレンスセンター Room A

〒105-6103 東京都港区浜松町2-4-1 世界貿易センタービル3階

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長	森永 正彦	名古屋大学	名誉教授
分科会長代理	水流 徹	東京工業大学 大学院理工学研究科	名誉教授・特任教授
評価委員	粟飯原 周二	東京大学 大学院工学系研究科システム創成学専攻	教授
評価委員	尾方 成信	大阪大学 基礎工学研究科	教授
評価委員	小野 信市	株式会社日本製鋼所	執行役員研究開発本部長
評価委員	小堀 良浩	JX日鉱日石エネルギー株式会社 中央技術研究所 水素・FC研究所	エグゼクティブリサーチャー
評価委員	白根 義和	一般社団法人日本産業・医療ガス協会 医療ガス部門	常務執行役員
評価委員	野坂 正隆	株式会社IHI 航空宇宙事業本部宇宙開発事業推進部	技術顧問

<推進者>

徳岡 麻比古	NEDO 新エネルギー部	統括主幹
山本 将道	NEDO 新エネルギー部	主任研究員
森 大五郎	NEDO 新エネルギー部	主査
主藤 祐功	NEDO 新エネルギー部	主査
畠山 正博	NEDO 新エネルギー部	主査
齋藤 春香	NEDO 新エネルギー部	職員
横本 克巳	NEDO 新エネルギー部	プログラムマネージャー

<実施者>

村上 敬宜	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター	研究センター長/プロジェクトリーダー
高田 保之	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター 水素物性研究チーム	チーム長
新里 寛英	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター 水素物性研究チーム	招聘研究員
松岡 三郎	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター 水素材料強度特性研究チーム	チーム長
松永 久生	九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門	准教授
西村 伸	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター 水素高分子材料研究チーム	チーム長
杉村 丈一	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター 水素トライボロジー研究チーム	チーム長

澤江 義則	九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門	教授
光山 準一	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター	副研究センター長
栗山 信宏	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター	副研究センター長
金森 優介	産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター	主査
松岡 美治	岩谷産業（株） 水素エネルギー部	シニアマネージャー
広谷 龍一	岩谷産業（株） 水素エネルギー部	マネージャー
鈴木 芳博	（株）共和電業 技術本部	取締役
佐藤 信二	（株）共和電業 技術本部 技術管理部	部長
兼平 光隆	（株）共和電業 技術本部 センサ開発部	課長
勢木 克郎	（株）共和電業 技術本部 センサ開発部	主任
黒木 雄一	NOK（株） 技術本部	副本部長
内田 賢一	NOK（株） 材料技術部 材料開発二課	課長
古賀 敦	NOK（株） 材料技術部 材料開発二課	
佐々木 憲司	NOK（株） 新商品開発部 開発技術一課	課長
岡部 均	NOK（株） 新商品開発部 開発技術一課	副課長
山部 匡央	NOK（株） 新商品開発部 開発技術一課	
渋谷 光夫	日本合成化学工業（株） 中央研究所コアテクノロジー研究室	室長
神田 泰治	日本合成化学工業（株） 中央研究所物性分析センター担当課	課長
稲熊 章誠	日本合成化学工業（株） 中央研究所コアテクノロジー研究室	研究員
尾上 清明	九州大学 水素エネルギー国際研究センター	教授

<企画調整>

中谷 充良	NEDO 総務企画部	課長代理
-------	------------	------

<事務局>

竹下 満	NEDO 評価部	部長
三上 強	NEDO 評価部	主幹
土橋 誠	NEDO 評価部	主査
中村 茉央	NEDO 評価部	職員

<一般傍聴者> 2名

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、分科会の設置、資料の確認
2. 分科会の公開について
3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について
4. プロジェクトの概要説明
 - 4-1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメントについて
 - 4-2 研究開発の成果、実用化・事業化の見通しについて

非公開資料の取扱いの説明

(非公開セッション)

5. プロジェクトの詳細説明
 - 5-1 高圧水素物性の基礎研究
 - 5-2 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
 - 5-3 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
 - 5-4 高圧水素トライボロジーの解明
6. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

7. まとめ・講評
8. 今後の予定、その他
9. 閉会

議事録

(公開セッション)

1. 開会、分科会の設置について、資料の確認

- ・開会宣言（事務局）
- ・事務局土橋主査より、分科会の設置について資料1-1及び1-2に基づき説明があった。
- ・森永分科会長挨拶
- ・出席者（委員、推進者、実施者、事務局）の紹介（事務局、推進者）
- ・配布資料の確認（事務局）

2. 分科会の公開について

事務局より資料2-1に基づき説明し、今回の議題のうち議題5「プロジェクトの詳細説明」、議題6「全体を通しての質疑を非公開とすることが了承された。

3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について

評価の手順を事務局より資料3-1～3-5、資料4に基づき説明し、了承された。

4. プロジェクトの概要説明

推進者（NEDO 新エネルギー部 山本主任研究員）および村上PLより資料6に基づき説明が行われた。

4-1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメントについて

4-2 研究開発の成果、実用化・事業化の見通しについて

説明に対し以下の質疑応答が行われた。

(森永分科会長) ただいまのご説明に対して、ご意見、ご質問等がございましたらお願いします。技術の詳細につきましては、後ほど議題5以降で議論しますので、ここでは主に事業の位置付け、必要性、マネジメントについてのご意見をお願いします。

(白根委員) 私もずっとこのインフラには関わってきているので、だいたい話は理解しているつもりです。やられている成果についても、その情勢の変化に合わせ、また民間からその都度いろいろな要望があり、それを吸い上げてくれたことには感謝しています。プロジェクトの成果として、NEDOで実施しているほかのプロジェクト、例えば水素製造・輸送とか、実証研究などにフィードバックされているのは分かりますが、それを定量的、数値的に評価する手法は何かあるのですか。例えば、この成果がこっちへ影響して、フィードバックされて非常にいい成果が出たからAだとか、そのようなシステムがNEDOにあれば教えてください。例えば今回のHYDROGENIUSの事業では、関連する4つ、5つの事業がありますが、その中の1つのテーマにこのように影響があったとか、成果が反映されたとかあれば、マトリックス・手法みたいなものがあるのではと思うのですが。

(NEDO・山本主研) 手法という意味ではありません。あくまでも我々はまずここを潰していかなければならないだろうということを考えて、テーマを設定したわけです。それと並行して先ほどの規制緩和の工程表が公表されたこととも連動して、民間企業からその都度、その都度いろいろなご注文や課題が出されます。まずそれにタイムリーに対応していかなければいけないということが1つあります。それから実際にいつまでにやらなければいけない、というのもありますので、それは状況に応じてやってきたというのが基本としてはあると思っています。今日ご紹介した中に例示的に示したものでは、今の資料の6-1の8ページのところで、HYDROGENIUSの中でゴム材料とか樹脂の各種材料の物性

を評価して、水素製造・輸送・貯蔵のほうにデータを提供、展開して、そして個別の機器開発や鋼種の拡大、規制緩和に繋がったというように書いております。今までやっていたものにこういうものがある、それをいろいろな分野で分類をしていくと、こういうマトリックスになるというものはファクトとして我々は押さえておりますので、それを追加的にお示しすることは出来ると思います。そういう主旨でよろしいでしょうか。

(白根委員) まさにそのとおりです。私はインフラにずっと携わってきているので分かりますが、初めて見られた方は個別にどこにどのような影響があったのかというのが分からないのではないかと思います。

(NEDO・山本主研) 必ずしも事業原簿の中ではそこを全部整理は出来てはいないと思います。分科会終了後に整理して、委員の皆様全員に改めて見て頂くということで宜しいでしょうか。

(森永分科会長) お願いいたします。

(白根委員) お願いいたします。

(栗飯原委員) まず7年間精力的にこの分野の研究開発をしていただきましたことに敬意を表したいと思います。基盤研究だけではなく産業界とも結び付いて、実際に鋼種拡大ですとか、実用面でフィードバックが出来ているということで、体制としてもよろしいと思います。具体的に産業界の関係企業もありましたが、金属系の材料は鉄鋼メーカーをはじめとして金属系の材料を扱っている企業だと思えますが、鉄鋼メーカーは具体的な企業名は出ていませんでした。鉄鋼メーカーとの関係はどういうことだったのかを教えていただければと思います。

(NEDO・森主査) NEDOの森と申します。先ほど説明の中で出てきました鋼種拡大に係る規制合理化については、本事業のデータを使った基準案というのを作ったわけですが、その中身の審議は高压ガス保安協会等にNEDOから委託をしております水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発という別事業の中に委員会を作って審議を進めております。その中に鉄鋼メーカーも委員として参画しております。同じく水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発事業の中で、材料開発ということで鉄鋼メーカー3社に入っていて、開発を進めていただいています。そちらの標準化、基準化というところで、今後NEDOとしてどのように進めていくかということをして現在、検討しているところです。

(産総研・村上PL) 私たちがやっている基礎研究と規制見直しは、実証というのは全部つながっているわけですが。そういう観点から理解していただきたいのですが、実は海外の既製品が日本に入ってきている状況があります。そこにある材料が使われているのですが、それはヨーロッパのある企業の材料です。それが日本の規制のために日本ではいまままでテストが出来なかったのですが、海外で実績があるからといって高压ガス保安協会が特認を出しました。その時に、私たちがそのテストを担わされたということがあります。ところが私たちがよく調べてみると、日本の鉄鋼メーカーのほうが実力が高く、そういう材料を開発する能力があるということが分かりました。いま、その鉄鋼メーカーが入ってやっているのですが、ここは名前を出すのはいろいろ会社のご都合もあるので出しておりません。そういう関連が出来ております。それから事例解析というのは何年間かステーションなどで実証した後に私たちが調べるのですが、その時の材料を調べましてその材料が間違ってもが入っているというものもありますし、熱処理が大変まずいものもあります。較べてみるとそれぞれの実証はステーションごとに違うというのもありまして、そういうようなことはメーカーと連携を取りながらやっております。

(栗飯原委員) しっかりと連携を取ってやっているということであればよろしいかと思います。

(小野委員) いまの質問とも関連するかもしれませんが、先ほどこういった事業の成果がほかのNEDOの事業、あるいは高压ガス保安協会(KHK)の基準の見直しに影響を与えているということでした。実際にどういう形で相手側がどういうレスポンスをしたかということをもう少し具体的に、どういう動

きをしているかというところを紹介してください。例えばいまの材料の問題でも、316Lしかダメだということに対して、ではどういう方向に見直しすべきかという議論が、実際にどこで、どのように行われているか、この事業の成果がそういった議論にどのように反映されているのかということをお示しただけならばということです。

(産総研・村上 PL) 規制の見直しの議論に関しましては、NEDO 主導で行われ、資料の 38 ページにまとめてあります。そういうところに HYDROGENIUS のデータ、あるいはほかの鉄鋼メーカーなども同席してデータ等を出して、それから尾上先生がプロジェクトリーダーをしています水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発のグループも参加してやっております。

(産総研・村上 PL) 資料の 38 ページを出してください。自動車メーカー等も加わって今これを進めているところです。これで最終的に KHK が OK するかどうかということになります。そのところをこういうデータなので、今議論をしているところです。それからこれは設計の考え方でも関係してきます。例えば原子力関係であれば ASME のセクション 3 というのが 1960 年代に出来ましたが、そういう設計思想にするか、例えばほかの自動車部品のサスペンション、トランスミッション等というのは全然設計思想が違っていると私たちは思っています。例えば 1 万回とか 5 千回という回数も限られている、圧力も最大圧力が限られているという設計の議論をしていかないと鋼種拡大は出来ないと考えています。自動車メーカーもみんなそのように考えていると私は理解しております。もう 1 つは法律上の問題がございます。例えば水素ステーション等いろいろデモンストレーションをしたものを事例解析いたしました。そうしましたら同じ高压の容器でも移動用と定置用ではまったく違います。これは何なのだろうと、私たちは本当に疑問に思います。私たちがどうにも出来ない世界がありまして、私たちは研究をやっているのですが、法律が違うのです。移動用に対してはものすごく緩いというか、合理的なのですが、定置用に関してはものすごく厳しい取り締まり、昔は取締法といっていましたから、そういう類のものになっていて、「安全」と言うときに物差しが違うという世界があるので、そういう問題も将来解決していけないと国際競争に太刀打ち出来ないと私たちは考えています。

(産総研・松岡 TL) 私は「材料設計基準分科会」の委員もしています。そこでは金属材料の鋼種拡大ということが検討されています。1 つの例としては、SUS316L だけではダメなので、SUS316 も使えるようにして、ただしその時にはニッケル当量を少し安全のために制限しようとして検討されています。もっと大きいのは、ハイニッケルと呼んでいる 316L とか 316 はそのままでは 70MPa の水素ステーションには強度的には使えないということで、20%とか 40%の冷間加工した材料も 70MPa 水素ステーションで使えるように考えていきたいと思います。これは委員として参加してみていると非常に良い方向に行っており、水素ステーションの性能が非常に上がる方向に向かっているのではないかと思います。今後、他の材料についても、今のような考え方で鋼種拡大が委員会の中で図られていくのではないかと考えております。

(尾方委員) まず実用化の期限が迫る中でこのように基礎研究からビルドアップされて、7 年間で非常に有用なデータを出されているということに敬意を表したいと思います。私が非常に興味があるのは、この HYDROGENIUS という組織を作って、それを拠点に、水素の、日本での研究技術と技術開発を推進してこられたのですが、このように拠点を作って進めてきたことによって世界的にもリード出来るような基盤が出来たのではないかと思います。その一番の利点は何だったのでしょうか。

(産総研・村上 PL) 大変重要な点です。実は私たちがこのセンターを立ち上げる時に一番大変だったのは高压ガス保安法をクリアする設備を作ることでした。普通は NEDO 事業では建物等は作らないのですが、これは特別な施設で、水素を安全に使う実験をする施設を持たないといけないということでこれを作ったわけです。「特殊な水素物性の計測装置、トライボロジーの装置、材料の装置というものはやはり国として持たないと、1 企業が持てるものではない」ということを始めた時よりも私

私たちは今ますますそういう思いを持っています。先ほどの半年以上の実験や3カ月以上の実験だけではなく、その機器を持つ、維持する、私たちは法定の検査等で年間5千万円、これも非常に不合理な検査を強いられているところもありますし、もちろん安全は大事なので法律に沿ってやりますが、5千万円も検査等に費やしているという現実がございまして、それは国として持たないといけないと思います。例えばフィンランドやノルウェーの人たちが来た時には、自分たち人口5百万、6百万の国ではこういうものは持たないということをおっしゃいます。ですから実験にしても、1つの実験が120MPaの、1200気圧のチャンバーの中で疲労試験をするというようなものは、例えば2週間かかるとしましたら、人件費を別にしても1回に60万円かかります。そういうものは日本の中の民間企業は持たないと思います。各企業がバラバラに特殊な、小さいものを持っていてやるべきものではありません。これは水素の社会をいまから作っていくわけで、例えば燃料電池車を世界展開しようと思ったら、こういう施設を日本が持たないとやっていけないと思っています。それが一番大事な意味だと思います。

(NEDO・山本主研) NEDOから感じたことは、例えばこういう金属材料の評価をしていただくときに、民間企業の方がどこかから材料をぽつと持って来て、決まった規定のルールに従って測ればすぐに何かが分かるという世界ではないのではないかと思います。そこで実際にこの九州大学のいろいろな研究チームの中では、そういう企業からいろいろ提案があった評価なり試験に対して、実際のその評価試験法も新しい分野ですから一緒になって考えて、このように測ったら良いのではないかとということまで九大さんにも入り込んでいただいてやってきたということは、非常に企業にとっても優位に働いたかなとNEDOは考えています。

(尾方委員) 今回この拠点が九州大学に設置されたが、この技術を推進する拠点である一方で、今後この日本の水素技術を世界のトップクラスに保つためにはやはり人材の確保が大事だと思います。特に大学に設置されたということで、今後の水素技術を担う将来の人材の育成という観点からはどのような指針をお持ちでしょうか。

(産総研・村上PL) 産総研のセンターを九州大学に置きましたが、これは非常に特殊なセンターで、マネジメントは産総研でやっています。この産総研のマネジメントで、産総研の応援、それから九州経済産業局からも応援していただいているのですが、それがなければ大学の先生が教育とか研究とかいろいろなことの中で、これは7年間とても出来なかったと思います。チーム長の皆さんは私と同意見だと思います。産総研と一緒にやれたのでここまでこられました。人材育成では、このプロジェクトが始まってから人材育成の大学院を作りました。これに関しましては、実際に大学の専攻を進めている高田先生にひと言お願いします。

(産総研・高田TL) 物性チーム長の高田です。我々のところでは3年前に水素エネルギーシステム専攻という大学院の専攻を作りました。定員は30名です。このHYDROGENIUS以外にも燃料電池等の研究室が多数ありますので、そういうところで水素に係る基礎的なところから応用的なところまでの学生を輩出しています。今年3月に初めて修了生を出しました。

(小堀委員) JXエネルギーの小堀です。我々はこれから水素インフラを作っていかなければいけないわけですが、例えば最初の100個ぐらいの水素ステーションを作るときにはコストは、問題にならないわけでもないのでしょうかけれども、それほどのことはないのかもしれないかもしれません。しかし、これを千、万と展開するときには話が違って、エネルギーの技術というのは普及しなければ何の意味もないので、コストを徹底的に安くしていかなければいけないと思います。そういう意味でコストを下げるための技術の基盤、ロケットを上げるのを例にすると、発射台の基礎は固まってきたと思うのですが、これをますます発展させるためにはこの後、いろいろな技術を総合的に合わせ、それぞれの技術を1つひとつ進展させていくことが必要だと思います。そういう意味で取り扱う技術の領域というものをもっと広げなけれ

ばいけないのか、ほかの研究機関と協力をもっと深めなければいけないのか、今後のこの技術センターの立ち位置をどうお考えになっているのでしょうか。

(産総研・村上 PL) 大変な重要なお質問だと思います。これから 2015 年までに水素ステーションを 100 箇所作っていくときに、私たちはそれに大きな関心を持っています。現在なぜそんなに高くかかるかと言いますと、まず 1 つは規制です。今の規制の中でいろいろな部品を積み上げて、そして合算すると 6 億円という世界になっているわけです。一方で、例えば移動用の水素ステーションにするとしたら、そんなに大きいものは必要ありません。例えばインフラメーカーはそんなに大きいものを作っても、車はそんなに来ないんだからビジネスにならないから移動用で済ませようということになるかもしれません。例えば経済産業省の中庭には移動用のものがあって、それには定置用の規制で必要とされる壁がありません。壁がなくても良いのです。同じ 40MPa の容器を置く場合でも、九州大学の定置用水素ステーションでは、20 センチ以上の鉄筋コンクリートの壁の中に装置を置かなければいけません。同じものが移動用で動かせるようなものになっていると壁は要らないのです。安全から見たらそれは非常に不合理です。移動用のもののコストは定置用に比べて格段と安いのです。ですからこのコストというものは法律、規制によるものが非常に大きいというのが 1 つあります。そのように積み上げていくとそうなります。それから、いま欧米のステーションに較べて材料費が 2~3 倍とされています。それから国土交通省とか、経済産業省、総務省というのが日本は分かれていますので、エンジニアリング費がやはり 3 倍ぐらいとされています。そういうものが積み上がって 5 億円とか 6 億円という世界に日本はなっています。ただ、私たちが貢献できるのは、私たちの研究に基づけばこれは安全ですよと、だからこういうふうに安全係数も下げていけますよと、こういう材料も可能ですよということを発信しつづけることですし、これまでも私たちはずっと主張し続けています。ただ、積み上げ方式でいきますと安全を、安全をということになりますので、どうしても定置用の水素ステーションのコストは上がるばかりです。そこで積み上げ方式でないもの、先ほど連携というのがありましたが、実は九州大学のキャンパスの近くに HyTRec という試験センターを福岡県が作りました。これは部品の試験センターで経済産業省の支援で作っております。カナダでパワーテックというのがありますが、麻生知事がパワーテックのようなところで日本の部品、製品を試験していたらダメだと、日本に作るべきだということで作ったわけです。そこそ私たちは連携していますが、その渡邊センター長と私はよく話をするのですが、積み上げ方式ではなく、定置用、移動用という容量の違うものを 3 つぐらい実際に壁の中で作ってみて、テストをして、これは大丈夫だねというものを作ってみる。例えばコストを上限 2 億円に定めて部品を企業が提供して、テストしてみて大丈夫だと確認してそれを世の中に出すほうが、6 億円のを百個とか、千個とか 1 万個作るよりもそういうところに投資したほうがはるかにいいという議論はよく私たちはしています。ただなぜそういうものを組み上げて作る必要があるかということですが、私たちは材料の研究、物性の研究、トライボロジーの研究をしています。それぞれの要素の材料の安全面での性質と組み上げた時のシステムの安全というのは違うと私は思っています。車でもそうですが、いろいろな部品を 2 万点、3 万点組み合わせると車が出来ますが、それぞれの部品のテストで合格しても組み上げたときにいろいろなトラブルが出ます。これはいろいろたくさんの要素の接点の品質の問題ですが、これはエネ庁の室長にも私は説明しました。接点というのは特異点です。つなぎのものというのは部品の品質管理にかからないところなのです。そういうものの安全を確認しないとダメなので、1 つの部品ではなく、そういうものを全部組み上げた、ステーションとして組み上げてテストを早期にするほうがコストダウンが速く進むということ私たちが考えているわけで、渡邊センター長もエネ庁に行ってそのような説明をしています。ですからそういう方向に行かないと、千、1 万箇所というのは、特に定置用のステーションを作るというのはとても無理だと思います。ですから、地方であまり車が来ないところは移動用で、当面は例えば移

動用の簡易型で済みますかという話に当面はいかざるを得ないというふうに思っております。こういう回答でよろしいでしょうか。

(NEDO・森主査) NEDO から少し補足をさせていただきます。水素ステーションを普及させるために今後どういう展開が必要かということですが、水素が関与するいろいろな機器の設計においては材料に関する知見、あるいは設計するときに材料が占めるファクターは非常に大きくなると考えています。水素でない設計においては、設計者は設計して、材料はリストから持ってくればいわけなのですが、水素の機器に関しては、まず材料を何にするかというところを決めなければ多分設計は出来ないのではないかと考えています。そういう意味で設計技術における材料の重要性というのは非常に水素の分野では高い、特に高圧水素を使う水素ステーションについては非常に材料のファクターが大きいと思います。ですから設計者がきちんと材料を使えるようにこの事業の知見等を普及させていく、あるいは設計技術にどう応用していくかということが今後非常に重要なのではないかと考えています。

(小堀委員) そういう意味でいい材料を開発するということがキーポイントだと思いますが、村上先生もおっしゃったように、組み合わせの上でその材料をいかに使いこなすかということもやはり非常に重要だと思いますので、よろしく願いいたします。

(産総研・村上 PL) 新しい材料を開発するということが、当然 1 つのやらなければいけないことで、鉄鋼メーカーが当然それは考えていると思います。ただ、それだけではなく既存の材料をいかに使うかということが非常に大事です。私は自動車メーカーの人たちと議論をしますし、私は金属疲労をもう何十年もやっていますが、この水素の機器の設計というのは疲労設計から見ればむしろ他の部品よりも、水素に関係ないものより易しいのです。例えば車のサスペンション、トランスミッション、ブレーキ、それからバルブスプリング等の疲労というのは乗る人によって全然負荷が違います。走る道によっても違います。市街路、高速道路、山道それぞれの負荷の分布は世界の自動車メーカーが統計的な分布でテールの分布は、あいまいにしているのですが、分からないのです。負荷が分からないのです、ランダム疲労と言います。ところが水素の機器は最高圧力が決まっています。15 年間使うといったら、最高を繰り返す回数も決まっているわけです。ですからそういう使い方、水素の影響だけが明確になればむしろ安全な設計が出来ます。その水素の影響を私たちは出しているわけです。例えば私たちは加速試験をしていません。普通私たちは金属疲労をやるときには、いままでは 50Hz とか 100Hz とかで 1 日とか 2 日で終わるようなデータは出していますが、そんなものを使ったらいけないということが分かってきたわけです。ですから 5 分間に 1 回とか、10 分間の 1 回の繰返し速度データだとどれぐらい寿命が短くなるか、上限値はどれぐらいかというのがありますので、それさえ出れば普通の鋼材でも使えるというのが私たちの今の考え方です。ですが規制当局がそんなに簡単には見直してくれないというのがあります。しかし私たちはどんどんそういうことを実際に部品まで応用して、テストをするということにして、やはり解決していかないとコストは下がらないと思います。材料の使い方は 2 つの方向だと思います。新しい材料の開発ともう 1 つは設計負荷を考えた時に安全に使えるのだというように思います。松岡さん、何かありますか。

(産総研・松岡 TL) そこにあります緑の枠の中の材料設計基準分科会のところの話なのですが、この委員会は KHK の中にあります。1 つのほうは鋼種拡大をやっているという話です。いまは安全率 4 でやっていますが、それを 2.4 にしようとかそういうふうになっています。ところがいちばん大きなところは、例えば安全率を 2.4 にする時に、本当に正しいデータがあるのか、あるいは水素脆化というメカニズムはどうなっているのかということが少し不安なところなんです。ということで、私どもとしてはこういう委員会に積極的に参加して、規制側の人、鉄鋼メーカーの人、あるいはインフラ側の人と話し合う場を持って、データの共有と知識の共有を速やかに図って、例えば安全率 2.4 の蓄圧器を設計す

るとか、そういうふうにもっていければと思っております。私自身としてはそういう努力をしてみたいと思っております。

【非公開セッション】（非公開のため省略）

詳細説明に先立ち、非公開資料の取扱について評価部より説明があった。

5. プロジェクトの詳細説明

- 5-1 高圧水素物性の基礎研究
- 5-2 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
- 5-3 高圧化状態における高分子材料等の長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
- 5-4 高圧水素トライボロジーの解明

6. 全体を通しての質疑

（公開セッション）

7. まとめ・講評

各評価委員から以下の講評があった。

（野坂委員） 本日はどうもご苦労様でした。これは私事ですが、日本で開発しましたロケットは液体水素を使ったロケットでして、その技術がいろいろ成熟を迎え、宇宙開発を支えてきました。多分皆さまもご存じかと思いますが、水素エネルギー関係は将来の非常に大事なキーエネルギーとして考えられております。昨今、震災の後、今後の我が国のエネルギー政策をどうするのかという新たな問題が出ております。長期にわたって水素先端技術の研究事業が行われてきたわけですが、今回の大きなエネルギー問題に関しては必ずその成果が役に立つ時代が来ると思います。お聞きしましたところ初期はやはり水素の基礎的な研究ということで各方面の方がかなりトライ&エラーで努力されて、その成果がようやく今日の発表に反映されたと思います。こういう水素を使った基礎的研究というのはメーカーでは出来なくて、やはりある程度の危険を伴いますので国が事業としてやるべきものだと考えております。従いまして、この事業を次の新しいプロジェクトに向けて是非とも継続して遂行していただければよろしいと思います。そのためには何をやり残してきたのか、それから将来の新しい水素エネルギーに転用すべく何を重点的にやるべきかという技術マトリックスを考える必要があります。是非とも今回事業によって得られました成果を新しい観点で再度見直して、より高いレベルでの研究開発を望みます。よろしく願いいたします。

（白根委員） 白根です。今日はどうも長時間いろいろありがとうございました。私も少なからずこの件に関係してきましたが、これまでは1つのテーマとか1つの研究の中になんか絞った、深く入り込んだ形で私もやってまいりましたが、これだけ多くのテーマ、それと世の中の技術の発展や状況の変化に対応するにはこれだけたくさんのテーマが出てきているのだなというのが今回つくづくよく分かりました。それに対応するために柔軟に新しいチームを作り、また発展させてきたというやり方については、私は大変よろしかったのではないかとと思っておりますし、さらに今後もまた別のテーマがどう

してもという急ぎのものがあればチームを作るというように、体制、組織を作っていく柔軟な姿勢が大切だと思います。その中でやはりチーム間の団結といいますか、チームひとつひとつではなく、みんながチームひとつになって、この水素のテーマを解決しているのだなということが今日はよく分かりました。是非、これからもこのチームの結束力で研究開発、民間が出来ないテーマに取り組んでいただけるととっても良いことだと思いますので、どうぞよろしく願いいたします。それから後ひとつ、村上先生がおっしゃっていましたが、新しい技術ではありませんが移動式というステーションに向けた規制についても、ある程度今後は明確にしていかなければいけないと思うので、是非、業界と一緒に頑張って取り組んでいただくよう、お願いします。

(小堀委員) 小堀です。今日は長い時間ありがとうございました。私は中間評価の時もやらせていただいているのですが、その時は各テーマがバラバラでそのテーマの一番やりやすいところをやっているという印象があったのですが、それから年月を経てここまでそれぞれのテーマが持ち場を広げて、発展してきたということに感銘を受けています。やはりそういったことが実現するのにこういう集中研が寄与しているのではないかと思います。いつでも顔を拝めるところにいるという良さというのが出てきているのではないだろうかと思います。もう1つお願いといいますか、先ほども申したのですが、水素エネルギー社会というものを実現するためには、もちろん性能というところはありますが、コストというところを重要視していただきたいと思います。コストが安くなければ絶対に普及しません。普及しなければエネルギー技術は何の意味もない。そういったところで、現象に理解はかなり進んだと思いますが、それを実際にものに組み立てていくという技術というものがカギとなって、いろいろな要素がありますが、どこを集中的に強化しなければいけないとか、そういったことを明らかにするような技術や、要素技術を応用技術につなげるような1つのものがシミュレーションではあると思いますが、そういった技術に是非取り組んでいただきたいと思います。今日はどうもありがとうございました。

(小野委員) 今日は7年間にわたる研究の成果をご紹介いただきましてありがとうございました。これをお聞きしまして、まずこの7年の間に非常に大きな環境の変化があったと思います。我々も水素との関わりはずいぶん早くから始めましたが、世の中の要求は本当にそれほど大きかったのかというと、そうではなかったのではないかという感じはあります。水素エネルギー社会というのは到来すると一時言われたわりには、我々企業人にとってはそれほど市場性そのものがハッキリ伸びたかというところでもなかったわけです。ただ、大震災以後、あるいは昨今の世界的なエネルギー需要の中で、やはり国のエネルギーというのはどうあるべきかというのが、いまここで問われていると思います。特に化石燃料の枯渇、あるいはCO₂削減の問題もあり、それを同時に解決するような手段として水素エネルギーというのが再び脚光を浴びているのではないかと思います。この研究が7年前に始まったときに、このタイトルにも「基礎研究事業」とうたわれているわけですし、そのことを噛み締めると水素の現象というのは深いところにあって、いまだに実は水素脆性というメカニズムは本当に全部解明し切れたのではないと思います。そういう意味でこの研究はまだ基礎的なところでやらなければならないことがたくさんあるのだらうと思いますが、環境がそれを待ってくれなくなったというのが実情ではないかと思います。その結果、先ほどアメリカやドイツで水素ステーションの数が増えつつあるというように計画が具体的に進行していますが、やはり日本もそれに遅れずに付いていくためには、先ほどのいわゆる法律の壁というものを見直すことがどうしても必要なのではないかと思います。そこに資するためには、この事業が水素の影響というものをきちっと捉えるという意味で、技術の根幹をきちっと定めるという意味では非常に有意義な研究であると感じています。いろいろな現象が解

明されて、本当にこれからまだまだやることは多いのですが、実用化するためのデータベースのあり方ですとか、そういったことをこれからまたいろいろ検討していただいて、さらに次年度以降の研究に続けていただければいいなと思っております。どうもありがとうございました。

(尾方委員) 尾方です。本日は本当にありがとうございます。今日、7年間やってこられたことをお聞きいたしまして、自分も本当にいろいろ勉強させていただくことが出来ました。幅広いレンジで村上先生のリードの下、研究をされてきて、これだけの素晴らしい成果が上げられたということに非常に感銘を受けております。冒頭「駆け込み寺」という表現があったかと思いますが、おそらく企業の方々にとってでも、水素のことで何か聞きたいことがあったらここに行ったらいいというものがあるというだけで、日本の水素技術の向上に貢献されたのではないかと感じています。私は大学におりますので、この事業が最も素晴らしいと私自身が思うのは、基礎からしっかりとビルドアップしていくところだと思います。そこをおろそかにすると短期的には新しい技術というのは出てくるかもしれませんが、長期的に見ると基礎がしっかりと出来上がっていないと、すぐに別の技術に追い抜かれてしまうということになると思います。しっかりと基礎から考えられているというところで本当に素晴らしいと思います。今後もこういった形で水素の拠点というものが続いていって、水素だけではなく、これに関連する技術も含まれると思いますが、そういったものをリードしていくような組織形態であったらと思っています。応用に向けてはいろいろなサジェスションがあったと思いますが、基礎の部分でも非常に素晴らしい理論体系みたいなものが構築されつつあると思います。しかし、もう少し世界に向けて日本の水素基礎研究はここにありというようなアピールを、既にされておりますが、論文発表などいろいろなところで更にしていただき、欧米を含め日本の基礎研究にはかなわないなと思うような、基礎研究レベルでも是非ともアピールをしていただきたいと思います。せっかくこれだけ集中してやり始めたということで、これを日本としても継続していかなければいけないと思います。そのためには人材をしっかりと育成していく必要があると思います。そういう意味で新しい、若い人たちをこういう拠点にしっかりと糾合していただいて、この研究に携わって、そういう人たちを次の日本を支える人材に育成していくということも是非ともお願いしたいと思っております。以上でございます。

(栗飯原委員) 栗飯原です。今日は1日広いテーマにわたって研究成果を聞かせていただきまして、どうもありがとうございました。私も中間評価でお話を聞かせていただいたのですが、その時と較べるとターゲットも非常に明確になって、よくマネジメントもされていたと思います。特に企業の参加もあり、さすが日本の企業はターゲットも明確で、タイムリーに開発が進み、基盤研究と開発がうまく結びついて進んできたと思います。今後は具体的な材料開発とかこの分野の技術開発を進める上で、やはり基盤がしっかりしていないと、原理原則が分からないとなかなか先に進みにくいということだと思います。原理原則、メカニズムが全部解明されて、その後開発するということはありませんが、やはりそれは必要です。いろいろ開発している上で出てきた知見が、また原理原則とかメカニズムの解明につながるわけで、是非ともそういう形で進めていただきたいと思います。データベースに関しましても、この事業でしかない装置もありまして、データそのものは非常に貴重だと思いますが、データベースを作る、公表する上でも、やはりそのバックにある思想といいますか、原理原則といいますか、そういうものがないと単なるデータの羅列になってしまうと思いますので、原理原則、メカニズムの追求も是非ともやっていただきたいと思います。水素脆性に関しましても、まだまだ深いところがありまして、モデルを提案されたというレベルだと認識しましたが、もう1段、2段深い研究も続けていただきたいと思います。そういう意味で、国内、国外、他の団体、企業、大学、研究所でもこの分野の研究は進んでいるわけですから、そういうところとも学会等を通じて十分に議論を

進めていただきたいと思います。以上でございます。

(水流分科会長代理) 水流です。今日は非常に広範囲にわたって素晴らしい結果を聞かせていただきましてありがとうございます。私の印象としては非常に広範なものが、かなり学術的にもきちんとした展開をもって、それが次の例えば実用化とか応用とかに向けて進められているという感じがしました。今日はどうしても発表の時間が短いということがあったのだと思いますが、その基礎的な研究あるいは学術的な成果と、それからその次の応用との間を十分に説明していただけなかったという印象が残念だったと思います。村上先生が最初におっしゃいましたが、例えば小学生に、「水素ステーションが近くに出来ても大丈夫だよ」ということのための説明が必要だとありましたが、小学生は無理かもしれませんが、「学術的な基礎の上の立ってこういう結論が出ている、こういう材料を選んでいる」というようなものがあれば、社会に対しての、あるいはお金を使ったことに対する社会への説明にもなります。そしてやはりこれだけのパワーでこれだけの学術的な成果が出たということアピールすることも非常に重要だと思います。報告書をきちんと読めばそういうことになっているのかもしれませんが、そういうアピールの仕方でも是非考えていただければ、もっともっと評価が高まるのではないかと感じました。以上でございます。

(森永分科会長) 森永です。これは水素先端科学基礎研究ということで、本当に基礎的なところからしっかり仕事を組み立てていこうという、そういう気持ちを感じられて大変喜んでおります。先ほどから先生方が言われておりますように、必ずしも全体像がハッキリしているわけではなく、まだこれからやらなければいけないことはたくさんあるという意味でも先端的な研究ではないかと思えます。人材育成、企業との連携、あるいは国際標準化の取り組みということについても、私はうまくやっておられるという印象を持ちまして、非常に好感を持った次第です。産総研、九州大学、あるいはこの他の大学の方や企業の方が大変真摯にこの研究に取り組まれているということが分かりまして、これからは是非続けていただきたいと思います。私も中間審査をさせていただきましたが、格段の進歩ではないかという認識を持っております。ただ、まだまだ先端研究は続けるべき研究だと思いますので、是非、皆さまの今後のご努力をよろしく願いいたします。どうもありがとうございました。

8. 今後の予定、その他
9. 閉会

配布資料

- 資料 1-1 研究評価委員会分科会の設置について
- 資料 1-2 NEDO技術委員・技術委員会等規程
- 資料 2-1 研究評価委員会分科会の公開について（案）
- 資料 2-2 研究評価委員会関係の公開について
- 資料 2-3 研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘について
- 資料 2-4 研究評価委員会分科会における非公開資料の取り扱いについて
- 資料 3-1 NEDOにおける研究評価について
- 資料 3-2 技術評価実施規程
- 資料 3-3 評価項目・評価基準
- 資料 3-4 評点法の実施について（案）
- 資料 3-5 評価コメント及び評点票（案）
- 資料 4 評価報告書の構成について（案）
- 資料 5-1 事業原簿（公開）
- 資料 5-2 事業原簿（非公開）
- 資料 6-1 プロジェクトの概要説明資料（公開）
 - ・ 事業の位置付け・必要性及び研究開発マネジメント
- 資料 6-2 プロジェクトの概要説明資料（公開）
 - ・ 研究開発成果及び実用化の見通し
- 資料 7.1 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
 - ・ 高圧水素物性の基礎研究
- 資料 7.2.1 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
 - ・ 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工（成形・溶接表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
- 資料 7.2.2 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
 - ・ 高圧化状態における金属材料等の水素脆化の基本原理の解明及び長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
- 資料 7.3.1 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
 - ・ 高圧化状態における分子材料等の水素長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
- 資料 7.3.2 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
 - ・ 高圧化状態における分子材料等の水素長期使用及び加工（成形・溶接・表面修飾）、温度などの影響による材料強度特性研究
- 資料 7.4 プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
 - ・ 高圧水素トライボロジーの解明
- 資料 8 今後の予定

参考資料4 評価結果の反映について

「水素先端科学基礎研究事業」（事後評価前倒し実施）の評価結果の反映について

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<ul style="list-style-type: none"> ・世界レベルの水素関連研究拠点を構築し、基礎研究だけでなく企業との応用研究も進めている。中間評価以降、基礎研究と開発がうまくかみ合っていて進んでおり、目標は概ね達成されている。2015年に向けた実用化研究・開発の加速が必要であることは自明であり、今後も安全・安心な水素エネルギー社会実現に向けた研究開発の継続が望まれる。 ・環境の変化により研究成果には水素の安全性確保と低コスト化の課題を同時に解決する方向性が求められている。 ・水素の実用に向け、性能（安全性、耐久性、効率、など）を低下させることなくコスト削減を果たすための一つはオーバースペックを排除することであり、これを実現するためにも、より使いやすいデータベース利用環境、及びデータ蓄積を継続することが必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・後継事業において、水素ステーションコスト2億円以下を目標として技術開発に取り組むが、それを達成する規制見直しや材料開発においては安全性の確保を大前提とすることはこれまでも今後においても普遍である。 継続事業の基本計画へ反映。 ・本事業で整備した水素物性データ群は、高圧水素中の材料特性を知る貴重なデータとして我が国産業界による今後の材料・機器開発に戦略的に活用するとともに、後継事業においても、規制見直しや低コスト材料等の開発につながるデータ整備は引き続き積極的に取り組んでいく。また、現在、産総研とNEDO（技術開発推進部、新エネ部、総務企画部）で各データベースの特徴に合わせた公開戦略を検討しており、近いうちに効果的な取り扱い方法の成案を得る計画である。 継続事業の基本計画へ反映。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術
総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集して
います。

平成25年1月

NEDO 評価部

部長 竹下 満

主幹 三上 強

担当 加藤 芳範

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載していま
す。

(http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミュージア川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162