

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本ードイツ共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「環境適合性を向上させた水素適合シール材料：多様で安全な水素サプライネットワーク構築を支える基盤技術の探求」
2. 研究期間：令和4年4月～令和7年3月
3. 主な参加研究者名：

日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	澤江 義則	教授	九州大学	総括
主たる共同研究者	本田 重信	部長	NOK株式会社	材料開発総括
共同研究者	田中 宏昌	助教	九州大学	エラストマー実験・分析
研究参加者	新盛 弘法	助教	九州大学	樹脂実験・分析
研究参加者	青柳 彩子	課長	NOK株式会社	材料開発
研究参加者	橋本 光	担当	NOK株式会社	材料開発
研究期間中の全参加研究者数			14名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Géraldine Theiler	Leader	BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)	総括
主たる共同研究者	Emiel Dobbelaar	Project Manager	Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG	材料開発総括
共同研究者	Natalia Cano Murillo	Specialist Surface Analysis	BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)	表面分析
研究参加者	Christian Mueller	Specialist Tribometry	Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG	トライボロジー実験
研究参加者	Thomas Schauber	Specialist Thermoplastics	Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG	樹脂エキスパート
研究期間中の全参加研究者数			10名	

4. 国際共同研究の概要

本国際共同研究は、液体水素および高圧水素ガスをエネルギー媒体として利活用するための水素インフラ構築に向け、使用するシール部材の環境適合性を向上させることを目的とする。シール部材は、配管や機器のつなぎ目から水素が漏洩することを防ぐために用いら

れ、水素インフラの安全性と信頼性を担保する極めて重要な役割を担っている。しかし、その多くは石油由来のゴムや樹脂を原材料とし、特にしゅう動を伴うシールには、環境負荷が大きいフッ素系材料が広く使用されている。

本研究では、日独のシールメーカーである **NOK** および **FTI** により提案された候補材料について、日本側九州大学（**KU**）は高温高圧水素ガス環境において、ドイツ側ドイツ連邦材料試験所（**BAM**）は $-150^{\circ}\text{C}$ の低温水素環境において耐久性と機能性を評価する。また **NOK** と **FTI** は候補材料の **LCA** を実施し、候補材料の環境負荷低減効果を評価する。これらの結果を総合し、機能性、耐久性、環境適合性の 3 点から候補材料の水素用シール材としてのフイージビリティを評価する。加えて、**KU** と **BAM** は協力して低温水素および高温高圧水素ガス中の接触・しゅう動界面で生じる物理的・化学的現象の解明を進め、これを学術知見として蓄積することで、水素が各種材料の摩擦・摩耗に関与するメカニズム解明を進める。また得られた知見を **NOK** および **FTI** にフィードバックし、候補材料のさらなる改善を行う。

## 5. 国際共同研究の成果

### 5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

**NOK** と **FTI** は、シール用ゴム材料と樹脂材料の環境適合性向上手法を検討し、総計 14 種のゴム材料、12 種の樹脂材料を試作した。また両社はシール材料の **LCA** 手法についても検討を進め、日独両国で共有可能な **LCA** 手法の素案を取りまとめた。九大と **BAM** は、**NOK** と **FTI** から提供された試作材について、摩擦・摩耗を中心に高圧水素ガス雰囲気および低温水素ガス雰囲気にて評価した。それを基に、**NOK** と九大は高圧水素ガス雰囲気に適した **PEEK** 複合材組成について特許申請を行った。また九大と **BAM** は、水素中の滑り界面で生じる現象について米国で開催された国際会議にて 3 件の共同発表を行い、現在その内容を投稿論文にまとめている。

### 5-2 国際共同研究による相乗効果

環境適合性向上材の開発にあたり、**NOK** と **FTI** が情報を共有することにより、原材料や  $\text{CO}_2$  排出量削減の手法について、より広く多様な情報とアイデアが蓄積され、結果として当初の計画よりも多様かつ多種の環境適合性向上材を開発することができた。また **LCA** の手法についても、日本とドイツ双方の関連する規格、アクセス可能なデータベースに関する情報を共有することで、国際的に共有可能な手法の構築が可能となった。九州大学と **BAM** は、双方の所有する機器、実験・分析技術を相補的に活用することで、材料に対する多面的な評価が可能となった。また双方の実験・分析結果を逐次共有することで、試験手法、分析手法の見直しを行い、評価結果の質向上を行うことができた。また、高圧水素ガスと低温水素ガスの影響について、相違点だけではなく共通点も存在することを明らかにする事ができた。

### 5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本共同研究において取得した各種ゴム材料および樹脂材料の耐久性（比摩耗量）および機能性（摩擦係数）のデータは、**NOK** および **FTI** における各種水素環境に応じた材料選定の指標として活用され、水素サプライネットワーク構築のための技術基盤となる。開発した一部の環境適合性向上材については、今後の製品化が見込まれる。加えて、本共同研究にて構築された日独間の研究ネットワークは、国内の **NEDO** 事業を通して水素ステーションの低コスト化、信頼性向上に貢献すると共に、関連する国際規格（**ISO** 規格）の制定にも活用される。また本共同研究に参加した若手研究者、若手技術者は、研究機関および企業での水素利活用技術開発・研究の中核を担い、2050 年カーボンニュートラル達成に貢献すると期待される。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)  
Japan-Germany Joint Research Program  
Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Sustainable and Hydrogen-Compatible Sealing Materials: Key Element for Ensuring Safety and Diversity of Hydrogen Supply Network」
2. Research period : April 2022 ~ March 2025
3. Main participants :

Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Yoshinori Sawae	Professor	Kyushu University	Project Lead at KU & Researcher
Co-PI	Shigenobu Honda	Manager	NOK CORPORATION	Project Lead at NOK
Collaborator	Hiroyoshi Tanaka	Assistant Professor	Kyushu University	PIC in Elastomer Testing
Collaborator	Hironori Shinmori	Assistant Professor	Kyushu University	PIC in Thermoplastic Testing
Collaborator	Ayako Aoyagi	Manager	NOK CORPORATION,	Director
Collaborator	Hikaru Hashimoto	-	NOK CORPORATION,	PIC in Material Development
Total number of participants throughout the research period:				14

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Dr. Géraldine Theiler	Leader	BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)	Project Lead at BAM & Researcher
Co-PI	Dr. Emiel Dobbelaar	Project Manager	Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG	Project Lead at Freudenberg & Researcher
Collaborator	Dr. Natalia Cano Murillo	Specialist Surface Analysis	BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)	PIC in Surface Analysis
Collaborator	Christian Müller	Specialist Tribometry	Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG	PIC in Tribology Testing
Collaborator	Dr. Thomas Schaubert	Specialist Thermoplastics	Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG	Thermoplastics Expert
Total number of participants throughout the research period:				10

#### 4. Summary of the international joint research

The purpose of this international joint research is to improve the environmental compatibility of the sealing materials used in hydrogen infrastructures for utilizing liquid hydrogen and high-pressure hydrogen gas as clean energy carriers. Sealing elements have a critical role in hydrogen infrastructures, used at interfaces between pipes and equipment to prevent hydrogen leakage and ensure the safety and reliability. However, most of them are made from petroleum-derived rubber and resins, and fluorinated materials with a large environmental impact are widely used especially for dynamic seals that exposed to sliding. In this study, the durability and functionality of candidate materials developed by NOK and FTI, Japanese and German seal manufacturers, are evaluated in a high-temperature and high-pressure hydrogen gas environment at Kyushu University (KU) in Japan, and in a low-temperature hydrogen environment at  $-150^{\circ}\text{C}$  at the German Federal Materials Testing Institute (BAM) on the German side. In addition, NOK and FTI will conduct LCA of developed materials and evaluate their effect of reducing the environmental impact. Based on obtained results, the feasibility of the developed material as a sealing material for hydrogen are evaluated from functionality, durability, and environmental compatibility. In addition, KU and BAM will work together to elucidate the physical and chemical phenomena that occur at the sliding interfaces in low-temperature hydrogen and high-temperature and high-pressure hydrogen gas, and to elucidate the mechanism by which hydrogen is involved in friction and wear of various materials. Then the obtained scientific findings will be accumulated as academic knowledge. In addition, the knowledge obtained will be fed back to NOK and FTI for further improvement of candidate materials.

#### 5. Outcomes of the international joint research

##### 5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

NOK and FTI worked together to explore methods to improve the environmental compatibility of rubber and resin materials for seals, and finally prototyped a total of 14 rubber materials and 12 resin materials. The two companies also developed LCA methods for sealing materials, and compiled a draft LCA method that could be shared between Japan and Germany. Kyushu University and BAM evaluated the durability and functionality of sealing materials provided by NOK and FTI in a high-pressure hydrogen gas atmosphere and a low-temperature hydrogen gas atmosphere, focusing on friction and wear. Based on the obtained experimental results, NOK and Kyushu University applied for a patent for a composition of PEEK composite suitable for high-pressure hydrogen gas atmospheres. In addition, Kyushu University and BAM have jointly presented three topics at an international conference held in the U.S. on the phenomena that occur at the sliding interface in hydrogen. Based on the content of these presentations, Kyushu University and BAM are currently preparing joint publications.

##### 5-2 Synergistic effects of the joint research

In the development of sustainable materials, NOK and FTI shared information, which allowed them to accumulate a wider range of information and ideas on raw materials and methods for reducing CO<sub>2</sub> emissions. As a result, a larger number of sustainable materials could be developed than originally planned. In addition, the collaboration between NOK and FTI made the established LCA method more international by sharing information on relevant standards and accessible databases in both Japan and Germany. Kyushu University and BAM have been able to make multifaceted evaluations of materials by utilizing complementary instruments, experiments and analysis techniques owned by both parties. In addition, by having meetings frequently to share the latest outputs from experiments and analyses in both sides, Kyushu University and BAM were able to review the test and analysis methods each other, and improve the quality of the evaluation methods. In addition, it was clarified that there are not only differences but also commonalities regarding the effects of high-pressure hydrogen gas and low-temperature hydrogen gas.

### 5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

The data on durability (specific wear amount) and functionality (coefficient of friction) of various rubber and resin materials acquired in this joint research will be used as an index for material selection according to various hydrogen environments in NOK and FTI, and will serve as a technical basis for the construction of a hydrogen supply network. Some of the environmentally compatible materials that have been developed are expected to be commercialized in the future. In addition, the research network between Japan and Germany established through this joint research will contribute to the reduction of costs and improvement of the reliability of hydrogen refueling stations through NEDO projects in Japan, and will also be used for the establishment of related international standards (ISO standards). In addition, the young researchers and engineers who participated in this joint research are expected to play a central role in the development and research of hydrogen utilization technologies at research institutes and companies, and contribute to the achievement of carbon neutrality by 2050.

## 国際共同研究における主要な研究成果リスト

### 1. 論文発表等

\*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文) : 発表件数 : 計 0 件  
・査読有り : 発表件数 : 計 0 件

### 2. 学会発表

\*口頭発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 4 件 (うち招待講演 : 0 件)

1. G. Theiler, N. Cano Murillo, H. Hashimoto, A. Aoyagi, E. Dobbelaar, "On the way to sustainable and hydrogen compatible sealing materials", 5th International Conference on Polymer Tribology, 2024/10/3, Portoroz, Slovenia.
2. G. Theiler, N. Cano Murillo, Y. Sawae, H. Shinmori, H. Hashimoto, A. Aoyagi, E. Dobbelaar, "Toward Sustainable and Hydrogen Compatible Sealing Materials", 79th STLE Annual Meeting & Exhibition, 2025/5/20, Atlanta, USA.
3. Y. Sawae, H. Shinmori, Q. Chen, W. Li, G. Theiler, N. Cano Murillo, H. Hashimoto, A. Aoyagi, E. Dobbelaar, "Tribo-Film Formation at Polymer/Metal Sliding Interface in Hydrogen – Effects of Gas Pressure and Temperature", 79th STLE Annual Meeting & Exhibition, 2025/5/20, Atlanta, USA.
4. H. Tanaka, Y. Sawae, G. Theiler, N. Cano Murillo, H. Hashimoto, A. Aoyagi, E. Dobbelaar, "Wear Mechanisms of Several Elastomers for Hydrogen Facility", 79th STLE Annual Meeting & Exhibition, 2025/5/20, Atlanta, USA.

\*口頭発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 13 件 (うち招待講演 : 1 件)

1. K. Furusho, H. Tanaka, K. Yagi, Y. Sawae, S. Honda, Reciprocating Sliding Test of Rubbers in Hydrogen, 9th International Tribology Conference, 2023/9/30, Fukuoka, Japan.
2. 橋本 光, シール製品やゴム材料における水素社会へ向けた取り組み, 第 5 回水素のトライボロジー研究会, 2024/3/11, 福岡
3. K. Ishii, H. Shinmori, Y. Sawae, H. Hashimoto, A. Aoyagi, S. Honda, "Effect of High-Pressure Hydrogen Gas on the Friction and Wear of PTFE Composite", 78th STLE Annual Meeting & Exhibition, 2024/5/23, Minneapolis, USA.
4. 新盛弘法, 石井康太郎, 森田健敬, 橋本 光, 青柳彩子, 本田重信, 澤江義則, 水素雰囲気圧力が PEEK 複合材の摺動特性に及ぼす影響, トライボロジー会議 2024 春 東京, 2024/5/27, 東京.
5. H. Hashimoto, "Recent R&D Trends in Sealing Solutions for Hydrogen Applications Towards a Carbon-Neutral Society", HYDROGENIUS Symposium 2024, 2024/9/12, Fukuoka, Japan.
6. H. Tanaka, A. Aoyagi, H. Hashimoto, Y. Sawae, J. Sugimura, "Friction and wear properties of several rubber materials for high pressure O-ring", 22nd International Sealing Conference, 2024/10/1, Stuttgart, Germany.
7. H. Hashimoto, S. Norikyo, A. Aoyagi, H. Tanaka, T. Morita, Y. Sawae, J. Sugimura, "Influences of hydrogen and trace moisture content on the friction of silicone rubber", 22nd International Sealing Conference, 2024/10/1, Stuttgart, Germany.
8. H. Hashimoto, S. Norikyo, A. Aoyagi, H. Tanaka, T. Morita, Y. Sawae, J. Sugimura, "Analysis of worn rubber surface after sliding test in hydrogen", 5th International Conference on Polymer Tribology, 2024/10/3, Portoroz, Slovenia.
9. H. Shinmori, H. Hashimoto, K. Ishii, T. Morita, A. Aoyagi, S. Honda, Y. Sawae, "Friction and wear of PTFE and PEEK composites in high pressure hydrogen gas", 5th International Conference on Polymer Tribology, 2024/10/3, Portoroz, Slovenia.

10. H. Tanaka, H. Hashimoto, A. Aoyagi, J. Sugimura, Y. Sawae, "Friction and wear of several elastomers in hydrogen", 5th International Conference on Polymer Tribology, 2024/10/3, Portoroz, Slovenia.
11. 新盛弘法, 石井康太郎, 森田健敬, 橋本 光, 青柳彩子, 李 文肖, 陳 乾, 乗京 傑, 本田重信, 澤江義則, 水素雰囲気中における PEEK 複合材の摺動特性に対する充てん材の効果, トライボロジー会議 2024 秋 名護, 2024/10/31, 沖縄.
12. 青柳彩子, 橋本光, 本田重信, 田中宏昌, 森田健敬, 澤江義則, 杉村丈一, 水素環境下で摩耗したシリコンゴム表面の調査, トライボロジー会議 2024 秋 名護, 2024/10/31, 沖縄.
13. 新盛弘法, 橋本 光, 森田健敬, 青柳彩子, 本田重信, 澤江義則, 高純度水素ガス雰囲気における樹脂複合材のトライボロジー特性に対するしゅう動相手材料の影響, トライボロジー会議 2025 春 東京, 2025/5/28, 東京.

\*ポスター発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 1 件

1. G. Theiler, N. Cano Murillo, H. Hashimoto, A. Aoyagi, E. Dobbelaar,, "Effect of temperature on the friction behaviour of rubber materials in hydrogen", 5th International Conference on Polymer, 2024/10/3, Portoroz, Slovenia.

\*ポスター発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 0 件

### 3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. Hydrogenius Symposium 2024, 主催者: 澤江義則 (九州大学・教授), 九州大学 椎木講堂, 福岡, 日本, 2024 年 9 月 12 日~13 日, 参加人数 150 名程

### 4. 研究交流の実績 (主要な実績)

#### 【合同ミーティング】

- ・2022 年 6 月 24 日 : 日本側キックオフミーティング, NOK 湘南 R&D, 神奈川, 日本
- ・2022 年 9 月 28 日 : 全体ミーティング, Freudenberg 社, ヴァインハイム, ドイツ
- ・2022 年 11 月 21 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 2 月 4 日 : 全体ミーティング, 九州大学, 福岡, 日本
- ・2023 年 3 月 16 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 4 月 18 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 5 月 12 日 : 全体ミーティング, BAM, ベルリン, ドイツ
- ・2023 年 5 月 23 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 6 月 1 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 6 月 15 日 : 全体キックオフミーティング, Web
- ・2023 年 7 月 10 日 : 日本側ミーティング, 九州大学, 福岡, 日本
- ・2023 年 9 月 14 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 10 月 2 日 : 全体ミーティング, NOK 湘南 R&D, 神奈川, 日本
- ・2023 年 11 月 13 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2023 年 12 月 17 日 : 日本側ミーティング, 九州大学, 福岡, 日本
- ・2024 年 1 月 16 日 : 日本側ミーティング, Web
- ・2024 年 2 月 16 日 : 全体ミーティング, Web
- ・2024 年 3 月 14 日 : 全体ミーティング, Web
- ・2024 年 5 月 31 日 : 日本側ミーティング, 九州大学東京オフィス, 東京, 日本
- ・2024 年 6 月 26 日 : 全体ミーティング, Web

- ・2024年8月1日：全体ミーティング，Web
- ・2024年9月11日：全体ミーティング，Web
- ・2024年9月30日：全体ミーティング，Freudenberg社，ヴァインハイム，ドイツ
- ・2024年10月21日：全体ミーティング，Web
- ・2025年1月24日：全体ミーティング，Web
- ・2025年2月28日：日本側ミーティング，Web
- ・2025年3月20日：全体ミーティング，Web
- ・2025年4月24日：全体ミーティング，Web

両国のチームメンバーを交えて、3年間の間に計15回、ミーティングを開催した。  
日本チームのみでも、3年間の間に計13回、ミーティングを開催した。

#### 5. 特許出願

研究期間累積出願件数：1件

1. 特願2024-130820，密封装置、および転移膜を形成する方法，2024/8/7，NOK株式会社，  
国立大学法人九州大学

#### 6. 受賞・新聞報道等

該当なし

#### 7. その他

該当なし