

# 科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間	：2020年度～2024年度
課題番号	：20H05644
研究課題名	：水素化物の室温超伝導化とデバイス化の研究
研究代表者氏名（ローマ字）	：清水 克哉（SHIMIZU Katsuya）
所属研究機関・部局・職	：大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号	：70283736

## 研究の概要：

本研究は、室温で動作する超伝導デバイスを目標に、室温または室温に迫る水素化物高温超伝導体を高圧力下で合成すること、超伝導体によるデバイス回路を高圧装置内で動作させることを目的とする。これまで研究代表者が築いてきた、高圧力を用いた物質合成および物性測定技術をより高度に拡張し、室温超伝導の実現にとどまらず、社会実装へつなげる指針を示すことを試みる研究である。

研究分野：物性物理学、高圧物質科学、超伝導

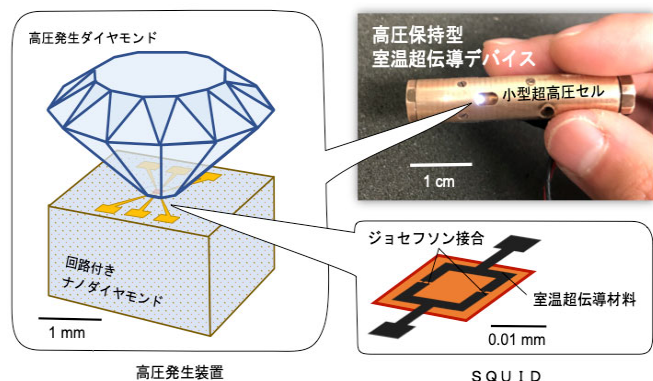
キーワード：高温超伝導、超伝導デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

近年、水素化物が高圧力条件下で 200 K を超える超伝導を示すことが明らかになり、いよいよ室温超伝導が視野に入ってきた。水素化物超伝導の研究には、100 万気圧を超える圧力下での超伝導検出実験が必要であるが、その高圧実験技術と水素化物の合成とを組み合わせる実施できる研究グループは、国内においては研究代表者のグループ以外には存在しない。しかし、代表者から当該技術を習得したドイツをはじめ米国および中国に活発な研究グループが、理論予測にいち早く適応させ、水素化物の高圧合成と超伝導計測が大型資金を投入して先行して行われている。

## 2. 研究の目的

高圧力の技術を駆使して、現在その実現に最も近いと考えられる水素化物を対象とし、室温超伝導は実現できるのか、超伝導転移温度はどこまで上げることができるのか、を追究する。「室温超伝導」が社会に与えるインパクトは計り知れない。広くエネルギーシステムやエレクトロニクス・通信システムにおいて、人類の将来に大きな影響をもつ重要性をもつ。本研究は、水素化物をその候補として高圧力環境での実現に加えて、高圧力を保持したままの利用に挑戦する。室温超伝導の社会実装への指針を与え、さらには実用に叶う低圧力での実現、そして常圧力下の実現に向けた研究へ発展させる契機となる。本研究が目指す最終形である「室温動作超伝導デバイス」の例として概略を図に示した。デバイス形状に微細加工された高温超伝導材料（右下）を、高圧発生装置に封入して高圧下で超伝導体を合成する（左）。その高圧発生装置の圧力を保持した小型超高压セルが、室温で動作する超伝導デバイス（右上）＝高感度磁気センサーとなる。



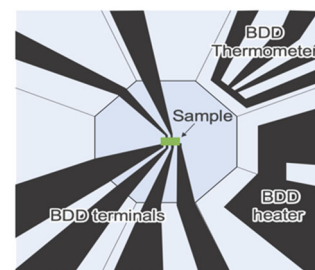
（本研究が目指す最終形：室温動作超伝導デバイスの概略）

## 3. 研究の方法

原料元素と水素を高圧装置：ダイヤモンドアンビルセル（DAC）内で圧縮し、高圧力条件下でレーザー加熱等により目的の水素化物を合成する。3 元素を含め様々な金属水素化物が理論研究者から提案されていなかから候補物質を見極め、低温下の加圧やジュール加熱など新しい合成経路にもチャレンジして合成する。これらは結晶構造解析を同時に行い、組成と結晶構造を実験的に決定する。平行して、高圧力下超伝導デバイスの構築を目指す。計算科学及びデータ科学を超高圧実験へ適用させ、新奇高温超伝導水素化物の探索を促進させ、研究期間を通じて取得した超伝導性に関する各種データをデータベースに集約し、このデータを基に進化的アルゴリズムを使って超伝導性を予測し、実験的検証をフィードバックして高温超伝導体の予測精度を高める。圧力下ジョセフソンデバイスの動作原理検証など、圧力下超伝導デバイス構築のノウハウを確立させ、高温超伝導体を超伝導材料としてデバイスへ組み込む。

#### 4. これまでの成果

水素化物高温超伝導体のデバイス化を視野に入れ、3元系水素化物を中心に水素化物の合成実験に取り組んだ。このような水素化物超伝導体の候補物質は3元系の水素化物であり、理論計算によっていくつか提案されている。既知の高温超伝導体水素化物 (LaH<sub>10</sub>) への軽元素ドーピングと、LaBH<sub>8</sub>水素化物などの合成である。SPring-8内に整備された高圧ガス充填装置によって、高密度に圧縮された水素ガスを水素化させる試料の入った試料室に充填することが可能になった。さらにレーザー加熱システムにおいて、外部トリガ制御によるレーザー出力・射出時間および間隔の制御と発生温度の測定を可能にした。ホウ素ドーピングダイヤモンド電極を進展させ、ヒーター内蔵型ダイヤモンドアンビルを開発した(図参照)。これをもちいて新超伝導体の合成/発見に成功した。



(開発した水素化物合成用  
ダイヤモンドアンビル)

#### 5. 今後の計画

期間を通じて、室温または室温に迫る水素化物超伝導体の探索を行うが、理論予測された高温超伝導水素化物は、予測された圧力で高温合成するだけでは、目的の組成の水素化物が合成できるとは限らず、我々は、その合成には合成経路＝「レシピ」が重要であると考えている。3元系の水素化物高温超伝導体の探索を継続し、パルス形状のレーザー出力、連続加熱時間の制御と、高速なX線回折測定と組み合わせた、「レシピ」の解明をすすめ、他のグループが合成に成功していない水素化物の合成にチャレンジする。統計解析や機械学習に利用できるような水素化物超伝導体のデータベース化に取り組み、新奇高温超伝導水素化物の高効率・高精度探索をめざす。ヒーター内蔵型ダイヤモンドアンビルをさらに、高圧力下で利用出来るように、アンビル形状の微細化に取り組む。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. 室温超電導：極限環境が切り拓く材料開発とその展望, 清水 克哉, 電気学会誌, 142(2) 89 (2022).
2. High-pressure synthesis of superconducting Sn<sub>3</sub>S<sub>4</sub> using diamond anvil cell with boron-doped diamond heater, R. Matsumoto, Y. Takano et al., Inorg. Chem., 61, 10, 4476, 2022.
3. XERUS: An Open-Source Tool for Quick XRD Phase Identification and Refinement Automation, P. Baptista de Castro, Y. Takano et al., Adv. Theory Simul., 2100588-1~12, 2022.
4. 肥後祐司, 河口沙織. "SPring-8 高圧実験ビームラインの概要と最新研究." 日本結晶学会誌 64.1 (2022), 33-40.
5. Mixed-valence state and structure changes of EuH<sub>x</sub> (x=2 and 2 < x ≤ 3) under high-pressure H<sub>2</sub> atmosphere, K. Kuno, K. Shimizu, et al., Journal of Alloys and Compounds, 865 (2021).
6. Synthesis and electrical transport measurement of superconducting hydrides using diamond anvil cell with boron-doped diamond electrodes, Takano Y. et al., J. J. Appl. Phys. 60, 9, 090902-1, 2021.
7. Diamond anvil cell with boron-doped diamond heater for high-pressure synthesis and in situ transport measurements, Matsumoto R., Takano Y. et al., Appl. Phys. Lett., 119, 053502-1~6, 2021.
8. Pressure-induced superconductivity in TiGeTe<sub>6</sub>, Yamamoto Sayaka, Matsumoto R., Takano Y. et al., Solid State Communications, 334, 114363-1~5, 2021.
9. Experimental Observation of Pressure-Induced Superconductivity in Layered Transition-Metal, R. Matsumoto, Y. Takano et al., Chemistry of Materials, 33,10, 3602-3610, 2021.
10. Crystal Growth and High-Pressure Effects of Bi-Based Superconducting Whiskers, \*Matsumoto R., Takano Y. et al., ACS OMEGA, 6, 18,12179-12186, 2021.
11. High-pressure effects on La(O,F)BiS<sub>2</sub> single crystal using diamond anvil cell with dual-probe diamond electrodes, R. Matsumoto, Y. Takano et al., Appl. Phys. Exp., 14, 4, 043001-1~4, 2021.
12. THz emission from a Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> cross-whisker junction, Y. Saito, Y. Takano et al., Applied Physics Express, 14, 3, 033003-1~4, 2021.
13. Beryllium polyhydride Be<sub>4</sub>H<sub>8</sub>(H<sub>2</sub>)<sub>2</sub> synthesized at high pressure and temperature, T. Matsuoka, T. Ishikawa, K. Shimizu et al., Phys. Rev. Materials 4 125402, (2020)."
14. Electrical transport measurements for superconducting sulfur hydrides using boron-doped diamond electrodes on beveled diamond anvil, K. Shimizu, Y. Takano et al., Supercond. Sci. Technol., 33 12, 124005-1~7, (2020).
15. Superconductivity of hydrogen superoxide under high pressure, T. Ishikawa, Supercond. Sci. Technol. 33, 114003 (2020).

#### 7. ホームページ等

[http://www.hpr.stec.es.osaka-u.ac.jp/kibans\\_home/](http://www.hpr.stec.es.osaka-u.ac.jp/kibans_home/)