

薄膜蒸着水素透過装置のフランジ製作・プラズマ実験の支援

島袋, 瞬
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/7437051>

出版情報：九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 8, pp.12-16, 2025-07. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



薄膜蒸着水素透過装置のフランジ製作・プラズマ実験の支援

島袋 瞬

要 旨

薄膜蒸着水素透過装置は、プラズマを生成して試料に照射するとともに、試料表面に堆積層を形成させることを目的として設計した装置である。本報告では、実験の初期段階としてプラズマ生成を達成することを目的に実施した一連の取り組みを紹介する。主な内容は、装置のカソードフランジの製作および装置に用いる各種電源の仕様に合わせた安全対策とケーブルの選定・配線、プラズマ実験の支援である。

キーワード

薄膜蒸着水素透過装置 プラズマ カソードフランジ LaB6 フィラメント Mo 支持棒

1. はじめに

九州大学応用力学研究所高温プラズマ理工学研究センター花田研究室では、核融合炉におけるプラズマ・壁相互作用の理解を目的として、水素リサイクリングに関する研究¹⁾を行っている。

水素リサイクリングとは、プラズマ中の水素同位体がプラズマ対向壁に衝突し、壁材料やその表面に形成された再堆積層に一時的に吸蔵された後、材料中で拡散し、脱離・再放出を経て再びプラズマ中へ戻る一連の現象である。また、プラズマ対向壁は高温・高粒子束のプラズマにさらされるため、プラズマ粒子の衝突によって壁材料の表面原子がスパッタリングによりはじき出されることがある。はじき出された壁材料は、プラズマ中に混入した後、装置内の広い領域のプラズマ対向壁に再び付着し、再堆積層を形成する。

したがって、核融合炉において、水素同位体が壁材料および再堆積層中でどのように吸蔵・拡散・捕捉・放出されるかを明らかにすることは、安定運転や燃料粒子制御の観点から重要である。そこで当該研究室では、これらの現象を模擬できるように設計した薄膜蒸着水素透過装置を製作し、壁材料および再堆積層中の水素同位体挙動を評価する研究を開始した。

本稿では、当該研究の技術支援として実施した、装置のカソードフランジの製作および各種電源の仕様に合わせた安全対策とケーブルの選定・配

線、プラズマ実験について報告する。

2. 薄膜蒸着水素透過装置の概要

薄膜蒸着水素透過装置²⁾は、主にプラズマ生成部とプラズマ照射部に分けられる(図1)。プラズマ生成部では薄膜蒸着に用いるプラズマを生成し、プラズマ照射部では生成したプラズマビームを試料に照射するとともに、試料表面に堆積層を形成させる。本研究では、まずプラズマ生成を達成することを目的とし、プラズマ照射部の作製は、プラズマ生成条件を確立した後に行うこととした。ここで、図2にプラズマ照射部を除く、プラズマ生成部の装置の全体写真を示す。

プラズマ生成部では、6個の磁石を配置して形成したカスプ磁場内で、グロー放電によりプラズマを生成する。グロー放電とは、低圧ガス中に設置した電極間に電圧を印加することで、ガス分子や原子が電離し、電子とイオンが生成される放電現象である。生成された電子は電場によって加速され、周囲のガス粒子と衝突してさらに電離を引き起こす。これにより電子とイオンが増加し、気体が電離した状態であるプラズマが形成される。ここで、カスプ磁場は、プラズマ中の荷電粒子の運動を制御し、プラズマを一定領域に閉じ込めることを目的としている。本装置では、カソード電極にスパイラル状のLaB6を取り付け、これを加熱することで熱電子を放出させる構成とした。放

出された熱電子は電場によりアノード側へ加速され、導入した燃料ガスと衝突することで電離を促進し、プラズマ生成に寄与する。なお、本装置では真空容器全体をアノード電極として用いた。

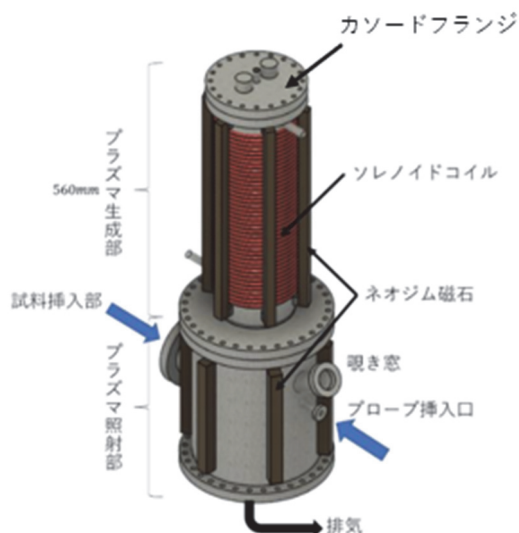


図 1 薄膜蒸着水素透過装置の概略図

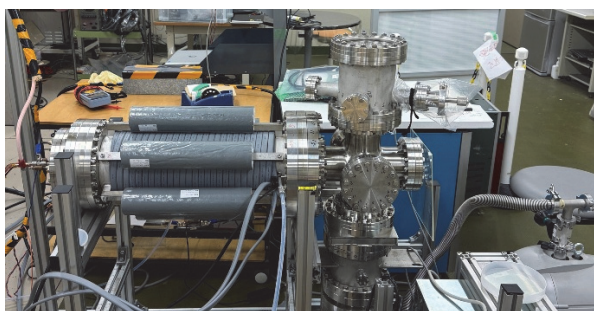


図 2 薄膜蒸着水素透過装置（プラズマ生成部）

3. 製作支援

3-1. カソードフランジの製作

始めに、薄膜蒸着水素透過装置のプラズマ生成部の構成部品であるカソードフランジの製作依頼を受けた。カソードフランジには、プラズマ生成に必要なカソード電極、電流導入端子、ガス導入部を真空容器内に接続する役割を持つ。

本装置で用いるカソードフランジは、ICF203規格のフランジを基に、電流導入用フィードスルー2本、ガス導入用フィードスルー1本、フィラメントカバー固定用フィードスルー2本を取り付ける構造とした。また、電流導入端子の先端には

Mo 電極を配置し、その先端部にスパイラル状のLaB6フィラメントを取り付ける設計とした。

花田研究室の学生が作成した3D CAD図面^[2]を基に、ボルト接続部の追加や組立時の作業性を考慮した形状変更など、実際の製作および取付けを見据えた設計修正を行った（図3）。その後、作成した図面について花田教授および製作者と打合せを行い、加工方法や取付部の仕様を確認しながら修正を重ね、最終的にカソードフランジを製作した（図4）。

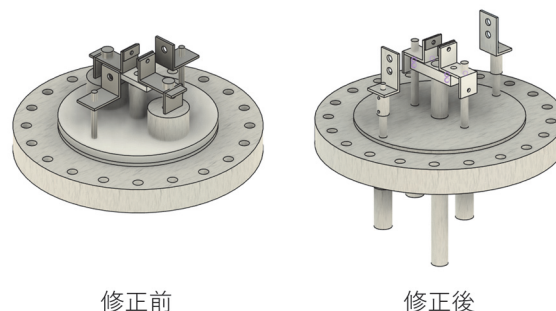


図 3 カソードフランジ 3D CAD 図の修正前後

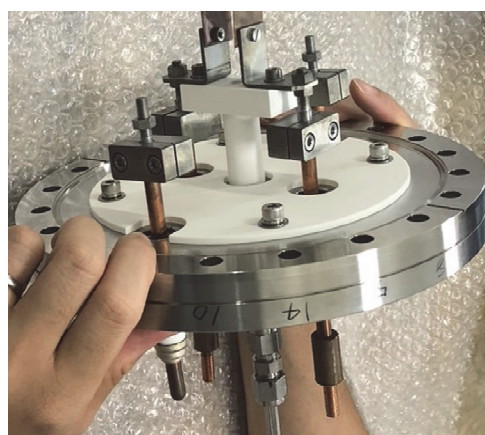


図 4 製作したカソードフランジ

3-2. 電源の仕様に合わせた安全対策とケーブルの選定・配線

カソード加熱電源は、機器の電位構成上、アース電位から浮かせた状態で使用する必要がある^[3]。そのため、絶縁トランスを介して電源を接続し、電気的な絶縁を確保した。また、カソード加熱電源の操作時には感電の危険性があるため、操作者が機器に直接触れないよう、操作つまみ部に絶縁材料であるデルリン製つまみを取り付けた（図5）。

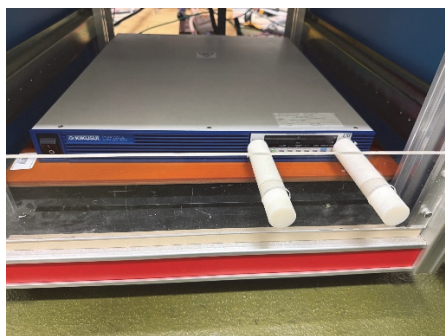


図5 カソード電源のデルリン製つまみ

放電電源は、カソード電位をアース電位に対して負にすることで、カソードから放出された熱電子を銅製アノード側へ誘導する役割を持つ。また、本来とは逆向きに大電流が流れ込むことを防ぐため、ヒューズおよびダイオードを回路内に組み込んだ（図6）。

カソード電源には、菊水電子工業株式会社製の PWX1500L（DC 0–150 A、0–30 V）を用い、大電流を扱うため、ケーブルには 600 V CV 38 SQ × 2C を使用した。放電電源には、菊水電子工業株式会社製 PAD110-30L（DC 0–110 V、0–30 A）を用い、ケーブルには 600 V CV 5.5 SQ × 1C を使用した。さらに、コイル用の直流電源には、TDK 株式会社製の Lambda Z36-24-J EHFP（DC 0–36 V、0–24 A）を用いた。なお、コイルは既に巻

線済みであった。

4. 実験支援

4-1. LaB6 フィラメントの接触抵抗測定

LaB6 フィラメントは、Mo 電極にねじ止めし、Mo 電極に接続された銅ロッドを介して電流導入端子に接続することで、電流を流して加熱する。先行研究^[4]から 80A 相当の電流を流すことを想定していたため、LaB6 フィラメントと Mo 電極のねじ止め箇所の接触抵抗が大きいと、ジュール熱により LaB6 フィラメントが破損することが懸念された。そのため、ねじ止め時に接触抵抗を計測することにした。

まず、接触抵抗の測定方法について、Mo 電極間に 2A の電流を流し、その両端の電圧をテスターで計測してオームの法則から全体の抵抗を計算する。全体の抵抗から LaB6 フィラメント単体の抵抗の差を取ると接触抵抗となる（Mo ねじや Mo 電極そのものの抵抗は接触抵抗と比べて十分小さいため無視）。計測の結果、全体の抵抗 $8.419\text{m}\Omega$ 、LaB6 フィラメント単体の抵抗 $8.2\text{m}\Omega$ から、接触抵抗は $0.219\text{m}\Omega$ と求められた^[5]。先行研究^[4]では、接触抵抗の値が LaB6 フィラメント単体の抵抗の 10% 以内であれば問題ないと述べている。そのため、今回の結果は約 2.7% であることから問題ないと判断した。

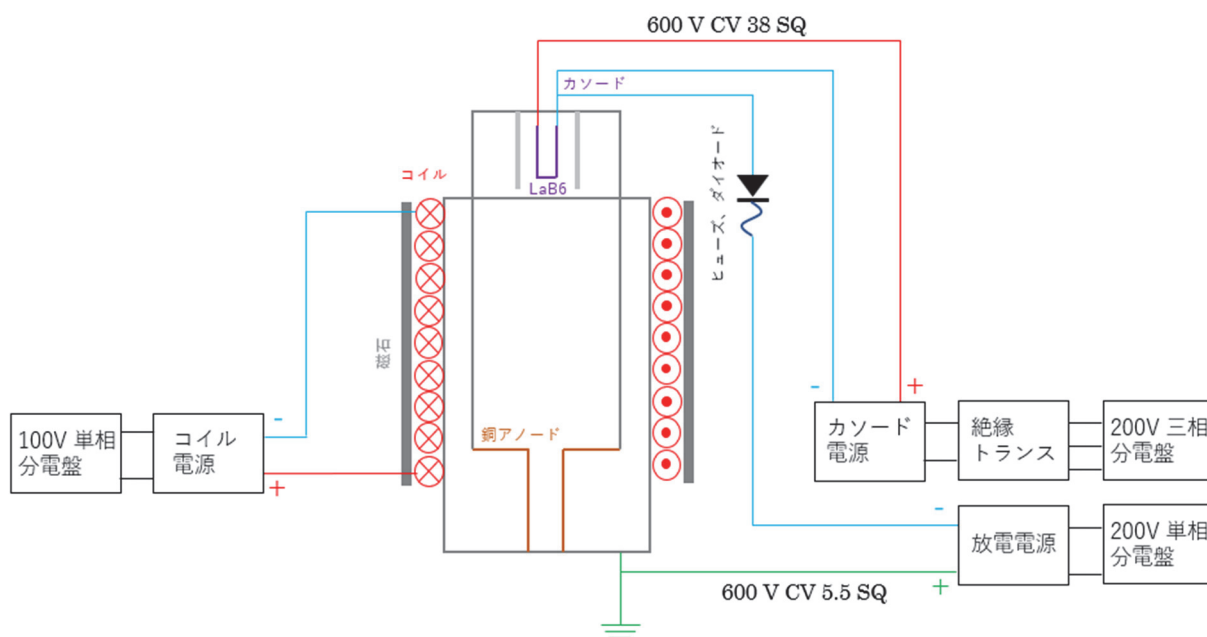
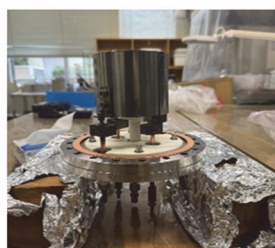


図6 装置の配線簡略図

4-2. プラズマ実験（初回）の問題点とその改善

プラズマ実験（初回）は、Ar による放電を実施した。ガス流量および放電電源の調整により、プラズマは生成したが、目視によるとカスプ磁場内に閉じ込められたプラズマではなく、カソード電極周りのみに放電が見られた。大気開放して容器内を確認した所、カソード近くの真空容器の入り口部分に放電痕が見られた。この原因として、カソードフランジを取り付けた際、図 6 からも分かるように、プラズマのソースとなる LaB6 フィラメント部がコイルおよび磁石領域内に届いていないため、生成したプラズマがカスプ磁場に閉じ込められていないことが推察された。

そのため、LaB6 フィラメント部がコイルおよび磁石領域内に届くよう、Mo 支持棒を 150mm 延長することとし、Mo 支持棒を製作した。Mo 棒の加工には汎用旋盤を用い、タップ加工はダイスを使用した。特にタップ加工において、Mo のネジ山が欠けやすく、完璧なネジ山に仕上げるのは困難であったが、タッピングスプレーを塗布してゆっくりと加工することで欠けの少ないネジ山を作製した。この Mo 支持棒に交換することで、LaB6 フィラメント部が十分にコイルおよび磁石領域内に挿入された（図 7）。



Mo支持棒延長前



Mo支持棒延長後

図 7 Mo 支持棒延長前後のカソードフランジ

4-3. プラズマ実験（二回目）の結果と課題

二回目のプラズマ実験も初回と同様に Ar による放電を実施した。Mo 支持棒延長の結果、生成したプラズマはカスプ磁場内に閉じ込められていた（図 8）。図 8 の写真からは判別しづらいが、目視では、Mo カバー付近の発光が強く、真空容器内全体では不均一なプラズマが確認された。Mo カバー自体は浮遊電位であるものの、アノードである真空容器との距離が近いため、Mo カバ

ーを介して真空容器へ向かう電流経路が形成された可能性がある。その結果、Mo カバー周辺にプラズマが集中し、局所的な発光が生じたと考えられる。

今後は、真空容器内で均一なプラズマを生成するため、カバーの材質をセラミクスなどの絶縁材料に変更することを検討している。



図 8 二回目実験のプラズマの様子

5. まとめ

今回の支援では、カソードフランジの製作に加え、電源の仕様に合わせた安全対策、ケーブルの選定・配線を行った。また、LaB6 フィラメントの接触抵抗を測定して抵抗値に問題がないことを確認したうえで、フィラメントに通電してプラズマを生成した。初回のプラズマ実験では、プラズマがカスプ磁場内に到達していなかったため、カソード電極の Mo 支持棒を 150mm 延長した。その結果、二回目のプラズマ実験では、カスプ磁場内にプラズマを生成することができたが、Mo カバー付近にプラズマが集中する様子が確認された。そのため、カバーの材質をセラミクスなどの絶縁材料に変更することを検討している。

現状の課題を解決できた後、プラズマ照射部の製作に取り掛かる予定である。プラズマ照射部では、プラズマ生成部で生成したプラズマを試料側へ引き込む必要があるため、プラズマ引き出し用のアノードの設計・開発も必要である。

参考文献

- [1] K.Hanada et al.: Particle balance investigation with the combination of the hydrogen

- barrier model and rate equations of hydrogen state in long duration discharges on an all-metal plasma facing wall in QUEST, Nucl. Fusion, 59, 076007, 2019.
- [2] 平中 芳樹：タンゲステン堆積層形成過程における水素透過挙動のモデル解析と薄膜蒸着水素透過装置の作製，九州大学総合理工学府修士論文，2020.
- [3] 剣菱 祥：プラズマ透過計測用直線プラズマ照射装置の製作，九州大学総合理工学府修士論文，2024.
- [4] S.Takamura: Characteristics of the compact plasma device AIT-PID with multi-cusp magnetic confinement, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 7(S1), S19–S24, 2012.

謝辞

本装置の整備および実験を実施する機会を与えて頂きました、高温プラズマ理工学研究センターの花田和明教授に厚く御礼申し上げます。また、一連の作業を共に進めて頂いた花田研究室の学生の皆様にも深く感謝申し上げます。