

プラズマとの相互作用実験のための真空保護インターロックシステムの高精度化 IMPROVING THE ACCURACY OF VACUUM INTERLOCK SYSTEM FOR PLASMA INTERACTION EXPERIMENTS

伊東幸輝^{#,A)}, 住友洋介^{A)}, 高岸太陽^{A)}, 根岸慧^{A)}, 山口晴矢^{A)}, 小口治久^{B)}, 境武志^{C)}, 早川建^{C)}, 早川恭史^{C)}
Koki Ito^{#,A)}, Yoske Sumitomo^{A)}, Taiyo Takagishi^{A)}, Satoru Negishi^{A)}, Haruya Yamaguchi^{A)}, Haruhisa Koguchi^{B)},
Takeshi Sakai^{C)}, Ken Hayakawa^{C)}, Yasushi Hayakawa^{C)}

^{A)} College of Science and Technology, Nihon University

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{C)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University

Abstract

At the Nihon University Electron Beam Facility, we are preparing an experiment for the interaction between a high-energy electron beam and a plasma. In these experiments, the high vacuum state on the accelerator side and the low vacuum state on the plasma side must be separated due to each different, and hence we use a titanium film with a thickness of 20 μm for this separation and the beam penetrations. However, if the electron beam is accidentally - focused on a point of the film, the titanium film may melt, and the vacuum leakage occurs from the plasma side. If this happens, we encounter a situation that some components of the accelerator suffer from serious damages. In order to protect the accelerator, an interlock device is being developed so as to detect leaks and automatically close the gate valve when the vacuum deteriorates to a set value. However, from the results of the operation at the test stand, it was discovered that the device may not operate normally when the amount of exhaust from the ion pump on the high vacuum side exceeds the amount of leak from the low vacuum side. To address this, we are currently developing a system that directly detects the leakage of ionized gas caused by plasma generation in order to improve the sensitivity. In this presentation, we will introduce the outline of the current interlock device and report on the development status of a new detection system.

1. はじめに

宇宙観測の分野において「高速電波バースト」と呼ばれる発生メカニズムが未解明の天文現象 ([1-3]参照)がある。これは宇宙から地球に飛来する電波 (110 MHz ~ 8 GHz) パルス信号である。この現象の特徴としては、突発的な事象で、ミリ秒程度の時間に電波領域において観測史上最高輝度の放出強度を持っている。またこれまでに観測されていた短時間の放出現象と異なる点として、分散度と呼ばれる量が高いことも挙げられる。宇宙から地球に電磁波が飛来する際に、間に存在する電離ガス (プラズマ) の影響を受けて、信号の到達時間が周波数ごとに遅延することを分散度として示しており、この値が高い高速電波バースト現象はプラズマの影響を色濃く受けていると推測される。

現在、高速電波バースト現象への理解を深めることを目的として、加速器が生成する高エネルギー電子ビームとプラズマの相互作用により疑似的な高速電波バースト現象の再現を試みる実験が、日本大学電子線利用施設で計画されている [4, 5] (Fig. 1)。加速器分野で知られているアンジュレータを用いた放射増幅現象を、電子ビームを逐次的に通過させることでプラズマ側の密度変調を起こし、非線形的な放射増幅現象を起こすことを推定している。また、電子ビームが約 3 GHz の周波数信号に対し、プラズマ側は密度によって決まるプラズマ振動数となる。それらの相互作用の結果、それぞれが持つ固有振動数の和周波・差周波 (数 GHz 程度) の信号測定を想定している。

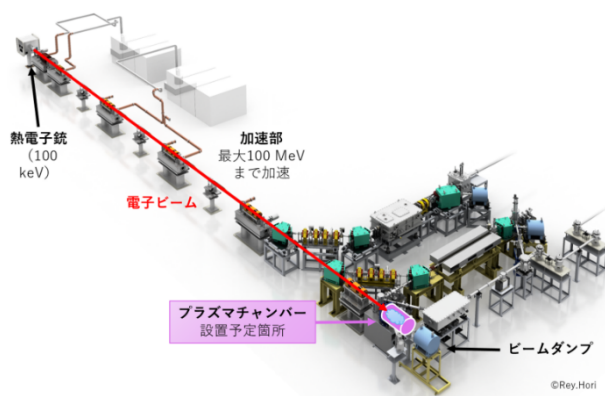


Figure 1: A schematic of the accelerator-plasma interaction experiment [4, 5].

実験に際し、加速器とプラズマでは真空値の適用範囲が異なるのが課題となる。現在、高真空状態の加速器側 (10^{-6} Pa 程度) と低真空状態のプラズマ側 (数 Pa 程度) を厚さ 20 μm のチタン膜を用いて分断する予定となっている。チタン膜上を通過する電子ビームが誤って集中的に照射され続けることがあり、電子ビームからのエネルギー付与によりチタン膜が融解し、損傷した箇所からプラズマ側の真空がリークする恐れがある。そうなれば電子ビームが加速されないだけでなく、加速器側にダメージがいく可能性が否めない。そこで本研究では、加速器保護のために真空のリークを検知して、設定した値より真空が悪化した時に自動でゲートバルブが閉じる、イン

ターロックシステムの開発を行い、その現状について報告を行う。

2. インターロックシステム

インターロックシステムを構築するにあたり、試験装置を作成し、評価を行う。真空の悪化は、加速器側の真空を維持するためのイオンポンプで計測される電流値をもとに判断する。真空のリークが起き、イオンポンプからの電流量が設定した閾値を超えた場合、それをトリガーとしてチタン膜より高真空の加速器側に設置された圧空式ゲートバルブを動作させ、高真空側の真空を保護する。

作成した試験装置は、高真空と低真空を用意し、間に手動のゲートバルブを設置して真空の切り分けを行う (Fig. 2)。この手動のゲートバルブを僅かに開くことで、チタン膜が損傷して真空がリークすることを再現する。高真空側の排気を行うイオンポンプからの電流量は、イオンポンプコントローラーで計測し、電流量をもとに真空値を表示する。真空値が $A \times 10^{-B}$ Pa の時、イオンポンプコントローラーから外部デバイスに $A(1.0 \sim 9.9)$ V 出力されるので、実験ではこれをオシロスコープで測定し、真空データの取得を行う。また閾値の設定をイオンポンプコントローラーで行う。設定した閾値よりも真空値が低い場合は、イオンポンプコントローラーから 12 V の電圧が出力される。閾値を超えて真空が悪化した場合に、イオンポンプコントローラーからの電圧が出力されなくなるので、これをトリガーに圧空式ゲートバルブを動作させる。24 V の電源を用いて動作させる圧空式ゲートバルブとイオンポンプコントローラーとの接続は、Fig. 3 のようなアナログ回路となる。スイッチを押すことで圧空式ゲートバルブ側の回路が導通して、ゲートバルブが開く。真空排気を行い、イオンポンプコントローラーから 12 V の電圧が出力された時に、再びスイッチを押す。この状態でイオンポンプコントローラーからの電圧が出力されなくなった時、ゲートバルブ側の回路が開き、ゲートバルブは閉じる。高真空側の真空値が回復して、再度イオンポンプコントローラーから電圧が出力されても、ゲートバルブ側の回路は繋がっていないため、ゲートバルブは閉じた状態を保持する。

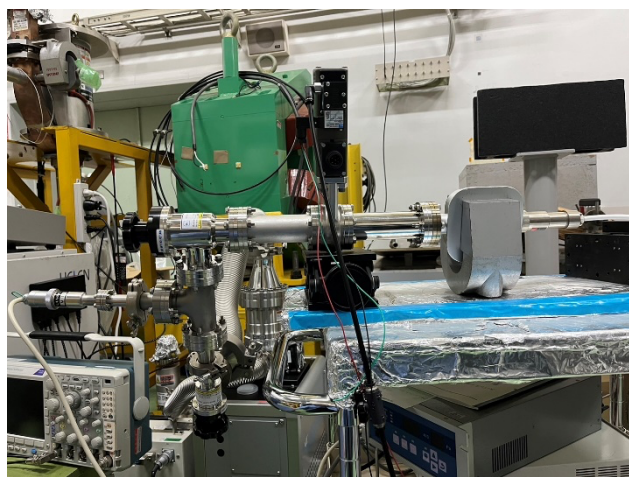


Figure 2: A test equipment of vacuum interlock system [6].

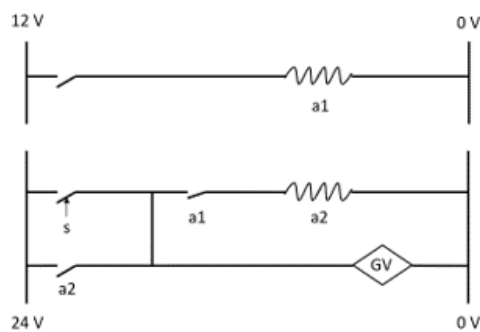


Figure 3: A circuit between test equipment and gate valve.

作成した試験装置では、低真空側が 0.5 Pa 程度で、高真空側が 2×10^{-6} Pa で動作確認を行った。真空がリークした際に回路が正常に動作して、真空値が大きく悪化する前に圧空式ゲートバルブが閉じることが確認された。その時の真空データが Fig. 4 である。グラフの赤いラインがインターロックシステムを動作させる閾値で、 4×10^{-6} Pa とし、これを超えて真空が悪化した際に圧空式ゲートバルブが閉じる。青色のデータは手動のゲートバルブを早く開いた場合で、橙色のデータはゆっくり開いた場合である。どちらもインターロックシステムが動作してから 12 s 程度で真空が回復している。

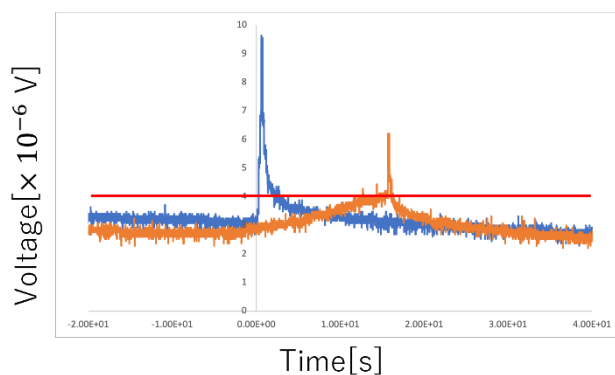


Figure 4: Two different vacuum data when the interlock system was activated.

試験装置での動作確認時、低真空側からのリーク量より、高真空側のイオンポンプの排気量が上回った場合に、装置が正常に動作しないことがあることが発見された (Fig. 5)。これに対応するため、リークした中性ガスとイオンポンプを用いた検知システムではなく、プラズマ生成による電離ガス、もしくは電離しやすい活性化ガスのリークを直接検知するシステムの開発を行っている。プラズマ発生装置から少し離れた位置に電極を設置して、電極に絶縁抵抗計を接続する (Fig. 6)。電極に 10 kV の電圧を加えて、プラズマ発生時にリークした電離ガスと電極間電圧によって生じる絶縁破壊を測定する。検出精度を高める目的で、インターロックシステムを動作させるためのリーク検知を、この絶縁破壊をもとに判断することを計画している。

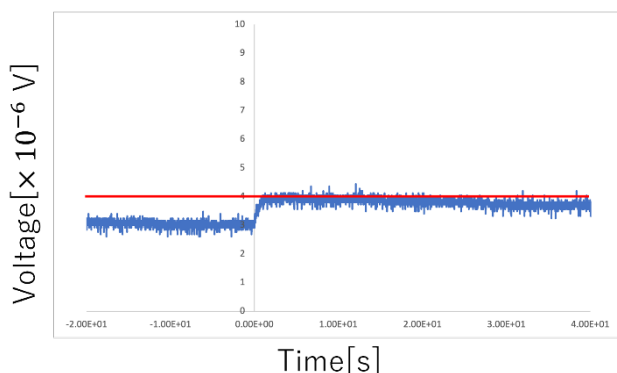


Figure 5: A vacuum data when the interlock system did not operate.

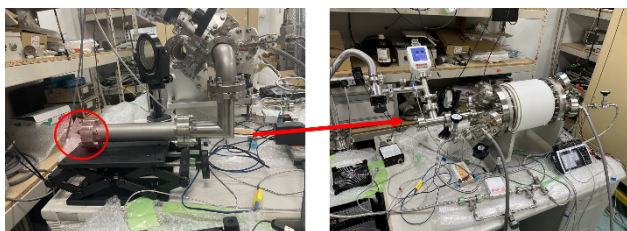


Figure 6: A new vacuum leak detection system - using plasma.

3. 他の対策と PHITS を用いたチタン膜評価

3.1 光学遷移放射ポート

遷移放射は、誘電率の異なる物質へ入射する際にその境界面から発せられる輻射で、金属や半導体で強く観測される。境界面の前方と後方にそれぞれ放射され、前方放射はX線領域が、後方放射では可視光領域が大部分を占める。

加速器側のチタン膜前に光学ポートを設置することで、チタン膜上を電子ビームが通過した際に発せられる後方遷移放射の可視光をモニターする。チタン膜上の電子ビームの通過点だけでなく、電子ビーム径も測定可能となる (Fig. 7)。真空のリークを検知して圧空式ゲートバルブを閉じるインターロックシステムはチタン膜が損傷した後の対策であるのに対し、この光学ポートを用いたモニタリングはチタン膜が損傷する前の対策である。

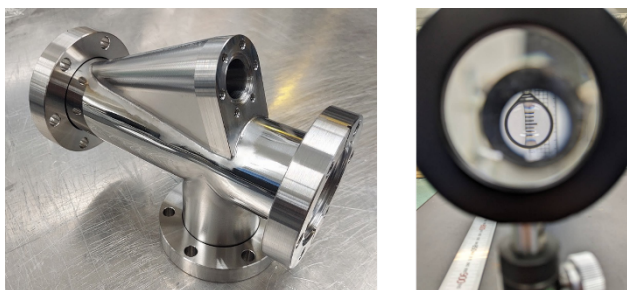


Figure 7: The optical port and a photo showing a beam size monitoring test.

3.2 PHITS を用いたチタン膜評価

放射線挙動を模擬する計算コード PHITS[7]を使用して、加速器で生成された電子ビームがチタン膜の一点に集中的に照射され続けた場合の、チタン膜に付与されるエネルギーを計算した (Fig. 8)。チタン膜に、100 MeV、100 mA、 ϕ 1.5 mm、20 μ s の電子ビームを 2 Hz で通過させると仮定する。計算結果、チタン膜への吸収線量は 0.296 Gy/s となった。これはチタンの融点である 1668 $^{\circ}$ C を考えると、融解するのは 2.89×10^8 s となる。つまり、仮定した電子ビームがチタン膜上の一点に照射され続けた場合、およそ 9 年でチタン膜が融解することになり、実験条件から考えると集中照射を避ければ安全に運転することが可能であることがわかる。

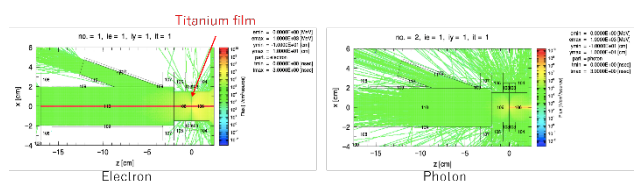


Figure 8: A calculation of beam energy deposition in titanium film using PHITS.

4. まとめ

日本大学電子線利用施設では、加速器からの高エネルギー電子ビームとプラズマを用いた相互作用実験を計画している。これは地上で擬似的に高速電波バースト現象を再現し、現象への理解を深めるためである。この実験に際して、真空リーク時の加速器保護を目的としたインターロックシステムが必要となり、作成した試験装置で動作確認を行った。

真空のリークを、中性ガスを排気した際のイオンポンプの電流量を測定して、インターロックシステムを動作させていた。しかし電子ビーム径から想定されるリーク量を考慮した場合に、インターロックシステムが正常に動作しない恐れがあることがわかった。そのため現在は、プラズマからリークした電離ガスによる、高電圧電極の絶縁破壊をトリガーとしてインターロックシステムを動作させることを計画している。今後はこの検知方法でデータを取得していき、インターロックシステムとして機能するか模索していく。

チタン膜が損傷する前の対策として、加速器側のチタン膜前に光学ポートを設置する。電子ビームがチタン膜上を通過する際の後方遷移放射の可視光をモニタリングすることで、電子ビームの通過点だけでなく、ビーム径も測定が可能になる。

放射線挙動を模擬する計算コード PHITS を用いて、電子ビームがチタン膜上を通過する際の吸収線量を求めた。そこからチタン膜の一点に集中的に照射された場合の、融解するまでの時間を求めた。

謝辞

本研究は、日本大学理工学部 理工学研究所 令和三年度プロジェクト研究助成金の支援を受けています。

参考文献

- [1] E. Petroff, J. W. T. Hessels, D. R. Lorimer, “Fast radio bursts”, *The Astronomy and Astrophysics Review* 27, 4 (2019).
- [2] B. Zhang, “The physical mechanisms of fast radio bursts”, *Nature* 587, 45 – 53 (2020).
- [3] 櫻山和己, “謎の天体 Fast Radio Burst は若い中性子星が起源か?”, *日本物理学会誌* 74, 7, 476-482 (2019).
- [4] Y. Sumitomo, T. Asai, S. Kisaka, H. Koguchi, K. Kusaka, R. Yanagi, Y. Onishi, Y. Hayakawa, D. Kobayashi, S. Kumagai, T. Sakai, T. Seki, “A Ground Experimental Approach Toward Understanding Mysterious Astrophysical Fast Radio Bursts”, *Proc. LINAC2022, THPOJO22*.
- [5] 住友 洋介, 浅井 朋彦, 木坂 将太, 境 武志, 早川 恭史, 熊谷 紫麻見, 小林 大地, 関 太一, 稲垣 滋, 川中 宣太, 小口 治久, 清 紀弘, “加速器とプラズマを用いた宇宙高速電波バースト現象への実験室的挑戦”, *Proc. PASJ2021, TUP001*.
- [6] K. Ito, Y. Sumitomo, K. Utiyama, A. Onoma, K. Kudou, T. Sakai, K. Hayakawa, Y. Hayakawa, “Development of Vacuum Protection System for a Plasma Interaction Experiment”, *Proc. PASJ2023, THP45*.
- [7] T. Sato *et al.*, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code. System - PHITS version3.33, *J. Nucl. Sci. Technol.*