

# 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装置開発 DEVELOPMENT OF VACUUM PROTECTION SYSTEM FOR A PLASMA INTERACTION EXPERIMENT

伊東幸輝<sup>#, A)</sup>, 住友洋介<sup>A)</sup>, 内山誇心<sup>A)</sup>, 小野間綾優<sup>A)</sup>, 工藤寛大<sup>A)</sup>, 境武志<sup>B)</sup>, 早川建<sup>B)</sup>, 早川恭史<sup>B)</sup>  
Koki Ito<sup>#, A)</sup>, Yoske Sumitomo<sup>A)</sup>, Kokoro Utiyama<sup>A)</sup>, Ayu Onoma<sup>A)</sup>, Kanta Kudou<sup>A)</sup>,  
Takeshi Sakai<sup>B)</sup>, Ken Hayakawa<sup>B)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> College of Science and Technology, Nihon University, Chiba, Japan

<sup>B)</sup> LEBRA, Nihon University, Chiba, Japan

## Abstract

Currently, we are planning an experiment about interactions between high-energy electron beams with plasma fields. This is an experiment is devoted to realize a pseudo astrophysical fast radio burst phenomena, currently that is not understood yet. When conducting experiments, it is necessary to separate the vacuum spaces between plasma and accelerator sides, otherwise an unexpected damages may occur at the accelerator components. If the electron beam is accidentally focused at the 20  $\mu\text{m}$  titanium vacuum separation foil intensively due to miss operations, the melting of the titanium may cause a hole and the vacuum spaces cannot be separated. Therefore, in this research, we develop an interlock system to maintain the vacuum state on the accelerator side by detecting the deterioration of the vacuum. If the titanium foil is damaged, the interlock system works to close the vacuum gate valve immediately before the serious vacuum deterioration. Here we report on the detail of interlock system as well as the data acquired in detail when the deterioration of the vacuum occurs and the vacuum condition is subsequently recovered.

## 1. はじめに

### 1.1 実験背景

高速電波バースト(Fast Radio Burst)は宇宙から地球に突然到達する非常に高エネルギーな観測史上宇宙最高光度の電波パルスである。この現象は短時間の数ミリ秒程度の放射であり、突発的な事象であることも手伝い、現在もまだ未解明の天文的現象である(例えば、[1-3]参照)。

現在、高速電波バースト現象の理解を深めることを目的として、加速器による高エネルギー電子ビームとプラズマとの相互作用実験により擬似的な高速電波バースト実験の再現に挑戦する実験が日本大学において計画されている[4, 5]。加速器による非線形増幅現象を用いて、高エネルギーの加速された電子とプラズマとの逐次的な相互作用を通じて電子からの非線形的な高いエネルギー変換の可能性を探ることが目的である。

実験に際して、プラズマと加速器では真空値の適用範囲に違いがある。そのためプラズマ側と加速器側とで切り分ける必要があるのだが、現在厚さ 20  $\mu\text{m}$  のチタン膜で切り分ける計画となっている。電子ビームは加速器側からプラズマ側にチタン膜を通過するが、その際に、何かしらのアクシデントにより、電子ビームがチタン膜の一点に集中して照射されると、ビームからのエネルギー付与によりチタン膜が溶解し穴が開く可能性がある。穴が開くと真空の切り分けが出来なくなりプラズマ側から真空が流入して、加速器側の真空が悪化する(Fig. 1)。そうなれば熱陰極や加速管を含めた加速器側にダメージがいく事が予想される。そこで本研究では、チタン膜が損傷し真空が悪化した時に、悪化を検知してプラズマと加速器を切り分けるためのゲートバルブを即座に作動さ

せ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ものである。

### 1.2 目的

実験背景より本実験の目的は真空保護のためのインターロックシステムの開発である。これは真空の悪化を検知して、自動でゲートバルブが閉まるようなシステムである。

インターロックシステムを作動させるにあたり、どの段階で真空が悪化した時にゲートバルブを閉めるかしきい値を設定する必要がある。またリークの検知とゲートバルブが閉まるまでにラグが生じ、その間さらに真空が悪化する。そのためしきい値に対してどの程度真空が悪化するか、悪化後の真空の回復具合についてもデータを取りながら観察していった。

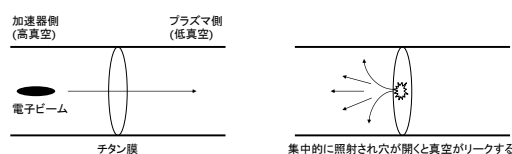


Figure 1: When the electron beam is focused on one point of titanium, a hole is made.

## 2. 実験に向けた準備

目的のインターロックシステムを構築するにあたりテストスタンドを作成する必要がある。作成したテストスタンドが Fig. 2 である。本実験の主な実験装置はダクトの他に粗排気、ターボ分子ポンプ、8 L イオンポンプ、イオンポンプコントローラー、真空ゲージ、手動ゲートバルブ、圧

空式ゲートバルブ、24 V の電源を使用した。

本実験において実際に 20  $\mu\text{m}$  のチタン膜に穴を開けて使用するわけにはいかないので代わりに手動ゲートバルブを用いた。手動ゲートバルブを僅かに開くことでチタン膜に穴が開いたことを再現した (Fig. 3)。ただし手動ゲートバルブで開く穴はおよそ 1 mm 程度と大きく、チタン膜に穴が開いてリークする量よりリーク量が多いため、データを取るときは実際より真空が悪化していることに注意する。またこの手動ゲートバルブは  $10^{-5}$  Pa 程度でリークしてしまう。これは使用したゲートバルブが古いものであり、長期間大気に晒されていたことによる密閉シールの劣化が原因であると思われる。24 V の電源は圧空式ゲートバルブの動作に必要なものである。圧空式ゲートバルブは開くのに 0.1 秒程度、閉まるのに 1 秒程度の時間を要する。

イオンポンプコントローラーはイオンポンプに高電圧をかけると同時に、真空をひいた時イオンポンプから出力される電流をもとにダクト内の真空値をモニターに表示する。真空値が  $A \times 10^{-B}$  Pa の時、外部デバイスに A V (1.0 ~ 9.9 V) 出力する。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。またイオンポンプコントローラーは真空値によって電圧を外部に出力することが可能である。設定した真空値より低い時は 12 V 出力。高くなった時 (真空悪化時)、電圧が出力されなくなる。このしきい値 (設定した真空値) を変えることで圧空式ゲートバルブの動作するタイミングを変えることが可能になる。

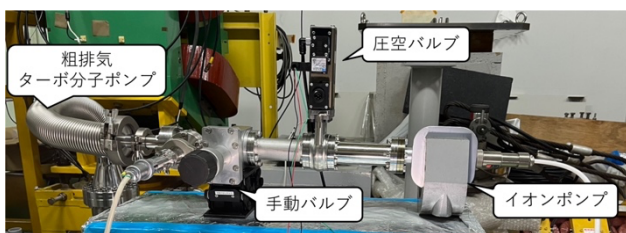


Figure 2: Test stand.

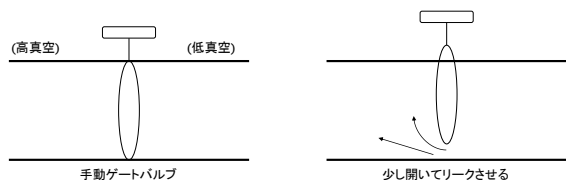


Figure 3: A leak by a manual gate valve.

### 3. インターロックシステム

設定した真空値に応じて 12 V 出力するイオンポンプコントローラーと圧空式ゲートバルブ、動作に必要な 24 V 電源は Fig. 4 のような回路で接続する。

最初にスイッチを押す。すると C 接点リレーのコイルに 24 V の電圧かかり、接点が繋がる。接点が繋がったことで圧空式ゲートバルブに電流が流れ、ゲートバルブが開く。次にイオンポンプコントローラーで設定した値より真空値が低くなるとコントローラーから 12 V が出力されて、A 接点リレーの接点が接続される。その時にスイッチを切るが、C 接点リレーの接点側の回路は繋がったままの

でゲートバルブは開いたままである。この状態で真空が悪化した時、イオンポンプコントローラーから電圧が出力されなくなり A 接点リレーの接点が解放される。すると電流が流れなくなったゲートバルブは自動で閉まる。その後真空が回復してコントローラーから 12 V 出力されたとしても、スイッチを切ったままなのでゲートバルブに電流は流れず、閉まった状態を保持し続ける。ゲートバルブを開きたいときは再びスイッチを押せばよい。以上がインターロックシステムの動作するまでのプロセスである。

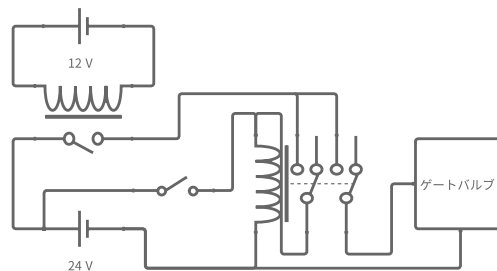


Figure 4: Circuit for system operation.

## 4. 真空測定

### 4.1 測定手順

イオンポンプコントローラーでしきい値を設定し、手動ゲートバルブと圧空式ゲートバルブを開いた状態で粗排気を使用して  $10^{-1}$  Pa 程度、続いてターボ分子ポンプで真空をひく。  $10^{-4}$  Pa 程度まで真空がひけたら手動ゲートバルブを閉じてイオンポンプを動作させる。この時ターボ分子ポンプは停止させる。低真空側が 0.5 Pa 程度、高真空側が  $2 \times 10^{-5}$  Pa に到達後、手動ゲートバルブを少し開いてリークさせる。リークを検知してインターロックシステムが動作、圧空式ゲートバルブが自動で閉まる。この真空が悪化してから回復するまでのイオンポンプから出力される真空値のアナログデータをオシロスコープで測定する。

### 4.2 真空データ取得にあたり

グラフ縦軸の電圧が A V のとき、真空値は  $A \times 10^{-B}$  Pa となる。B 値についてはグラフの色を変えて表示する。

またグラフには手動バルブを開いて悪化し始めた時から元の真空値の 1.1 倍の値に回復するまでの時間と完全に回復した時間、最大電圧を記載した。本実験では元の真空値の 1.1 倍に戻った時を回復したとみなす。

Figure 5 はしきい値を  $1 \times 10^{-3}$  Pa にした時のデータである。リーク後、真空は  $1 \times 10^{-4}$  Pa まで悪化した但那れよりは悪化せず、そこから  $8 \times 10^{-5}$  Pa まで回復した。しきい値に到達しないためインターロックシステムは動作しなかった。

従ってしきい値は -5 乗オーダーで設定する。ただし、出力される電圧にはブレがあり、システムの誤作動を防ぐため  $3 \times 10^{-5}$  Pa は除くとする。

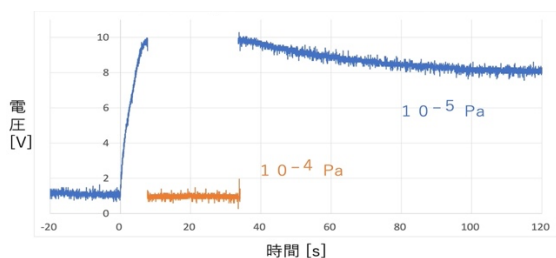
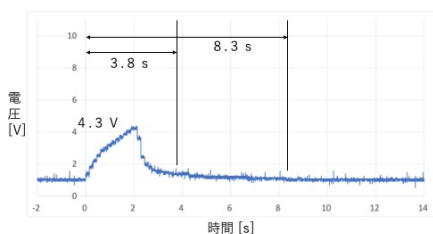


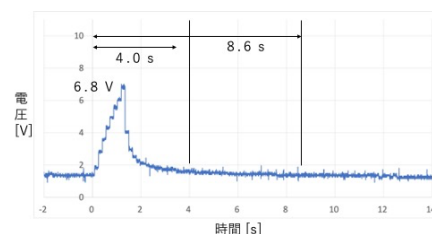
Figure 5: Set point  $1 \times 10^{-3}$  Pa.

#### 4.3 真空データ

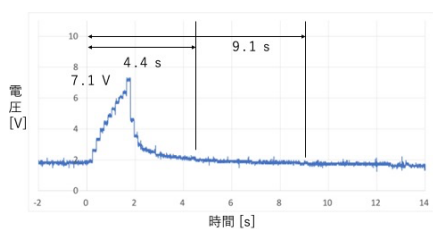
- しきい値  $4 \times 10^{-5}$  Pa (Fig. 6(a)) の時、しきい値の 1.08 倍まで悪化。また回復するのに 3.8 秒、完全に回復するまでに 8.3 秒要した。



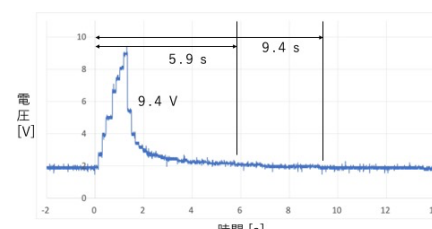
(a) Set point  $4 \times 10^{-5}$  Pa.



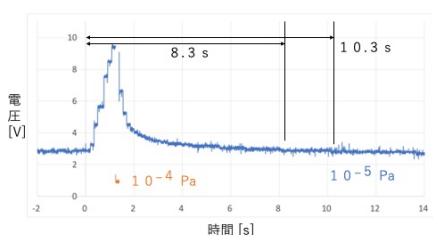
(b) Set point  $5 \times 10^{-5}$  Pa.



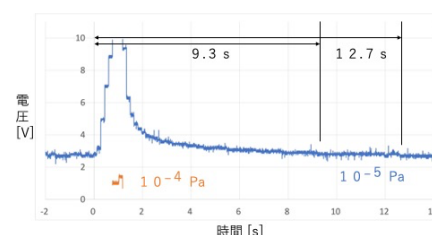
(c) Set point  $6 \times 10^{-5}$  Pa.



(d) Set point  $7 \times 10^{-5}$  Pa.



(e) Set point  $8 \times 10^{-5}$  Pa.



(f) Set point  $9 \times 10^{-5}$  Pa.

Figure 6: Vacuum data.

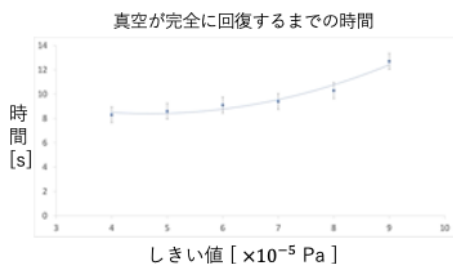


Figure 7: Time for the vacuum value to return to its original value.

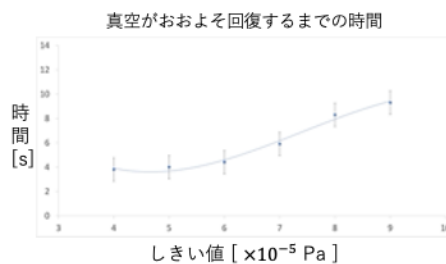


Figure 8: Time until the degree of vacuum returns to normal.

#### 4.4 考察

0.5 Pa と  $2 \times 10^{-5}$  Pa でリークさせたところ  $1 \times 10^{-4}$  Pa までしか悪化しなかった。理由としてはそれより先のリーク量よりイオンポンプの真空をひく速度の方が速いためである。

ゲートバルブが閉まる 0.1 秒ほどの間にしきい値の 1.1~1.4 倍ほど真空が悪化する。

本実験のデータより、真空の回復時間としきい値との関係は、完全に回復するまでにかかる時間としきい値との関係は二次関数のようになる (Fig. 7)。しかし真空が回復したとみなす値(元の真空値の 1.1 倍)まで回復する時間は二次関数のようにならない (Fig. 8)。

### 5. まとめと今後の予定

疑似高速電波バースト実験の準備として、真空保護のためのインターロックシステムの開発をした。また設定したしきい値でのシステムの動作の確認と真空測定を実施。現状では実験の試行回数が少ないため再現性を高める意味でも引き続き真空値のデータを取得していく。その際、新品の手動ゲートバルブが手元に届いたので、今取り付けられている手動ゲートバルブと取り替えて真空測定を行う。

今後の予定として、PHITS コード[6]を用いてチタン膜上を通過する電子ビームがどの程度集中して照射されると融解する熱量に達するかをシミュレートする。

また、より万が一の機器の損傷に備える意味でチタン膜上において発生する遷移放射のうち可視光成分を観測するシステムを構築し、チタン膜上の電子ビームサイズをリアルタイムでモニターできるようにすることも計画している。

### 謝辞

本研究は、日本大学理工学部 理工学研究所 令和3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] 檜山和己, “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”, 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”, PASJ2021, TUP001.
- [6] PHITS. 「PHITS とは？」.  
<https://phits.jaea.go.jp/indexj.html> (参照 2023-5-30).