

加速器とプラズマで挑む宇宙高速電波バースト現象の実験室的検証

An Experimental Challenge with Accelerator and Plasma to Astrophysical Fast Radio Bursts

○住友洋介^{1,2}, 浅井朋彦^{1,2}, 藤井紫麻見^{1,2}, 早川恭史³, 境武志³, 小口治久⁴, 日下和大², 井浦空太², 小林大地^{1,2}, 関太一², 伊東幸輝², 内山誇心¹, 小野間綾優¹, 工藤寛大¹

*Y. Sumitomo^{1,2}, T. Asai^{1,2}, S. Fujii^{1,2}, Y. Hayakawa³, T. Sakai³, H. Koguchi⁴, K. Kusaka², S. Iura², D. Kobayashi^{1,2}, T. Seki², K. Ito², K. Uchiyama¹, A. Onoma¹, K. Kudo¹

Abstract: We have been developing a ground experimental project toward understanding Astrophysical Fast Radio Bursts. We aim to generate non-linearly enhanced emissions through integrated interactions between high-energy electron beams and plasmas, giving us a hint for a better understanding of the basic mechanism of Fast Radio Bursts, that is currently veiled in mystery. In this presentation, we report on the motivation and the status of the project, including plasma generations, an assessment of radioactivation, as well as an interlock system of the vacuum separation.

1. 導入

近年、宇宙観測において高速電波バースト現象に着目が集まっている。この現象は既知の天体現象とは異なる特徴を持ち、その発生メカニズムを含めて未だ多くのことが理解されておらず、謎に包まれた電波放出現象である。大きな特徴としては、ミリ秒程度の放出現象であることや、前触れなく発生する突発性の事象が多く存在すること、推定される放出強度（輝度）が、これまでに観測された天体現象の中でもトップクラスに高いことが挙げられる。特に、信号情報から得られる分散度と呼ばれる量が桁違いに高いことが知られており、このことは放出母天体近辺に多く電離ガス（プラズマ）が存在することを示唆している（レビュー参照^[1,2]）。

この高速電波バースト現象の発生メカニズムの理解に向けて、繰り返し再現可能な地上実験で擬似高速電波バースト現象を引き起こすプロジェクトを開始した^[3,4]。このプロジェクトでは上記多量のプラズマの存在をヒントに、加速器分野でよく知られている放射増幅メカニズムを導入して、高速電波バースト現象の特徴である、短時間パルス、高輝度、また突発性について理解の一助となる情報を取得することを目的としている。より具体的には、高エネルギー電子ビームとプラズマの積分型の衝突相互作用により自発的な密度変調をもたらし、非線形的放射増幅現象を引き起こそうというものである（Fig. 1 参照）。本発表においては、動機やプロジェクトの目的に加えて、現状の実験状況に関して報告を行う。

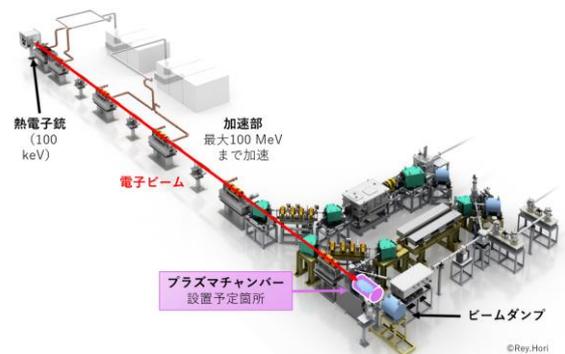


Figure 1. A schematic of the accelerator and the installation point of plasma chamber^[3].

2. プラズマ発生装置開発

電子ビームとプラズマの衝突相互作用により、それぞれに固有の振動数に由来する放射信号の生成が予想される。固有振動数として、電子ビームは電子パルスの繰り返しとして約 3 GHz 程度の周波数に対し、プラズマ側は密度に関連したプラズマ振動数となる。相互作用の結果としてこれらの和・差周波等の信号測定を行う予定であり、技術的可能性も踏まえて数 GHz 前後の広帯域の信号測定を想定している。また、加速器運転中は高い放射線環境下となり、上記帯域の信号透過性に加えて放射線耐性も兼ね備えたセラミックによる真空容器を製作しプラズマ生成実験を行っている。

プラズマ生成に関しては、パルス状に射出される電子ビームにタイミングを合わせるのは難しいと考え、13.56 MHz の高周波源を用いて連続的に水素プラズマを生成するための装置開発を行っている。真空チャンバー軸上は電子ビームが通るため、斜め 2 方向からの

1 : 日本大学理工学部 CST, Nihon Univ. 2 : 日本大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ. 3 : 日本大学量子科学研究所 QST, Nihon Univ. 4 : 産業技術総合研究所 AIST

プラズマ導入を行い軸上における対称性を持つようにしている。現状では、水素原子のバルマーH α 線も測定され、想定している密度程度でのプラズマの点火導入には成功しており^[5] (Fig. 2 参照) プラズマ中の電磁場配位の変化を時間発展的に計測するための多点静電プローブや、電子密度制御のための磁場コイルの開発を行っている。

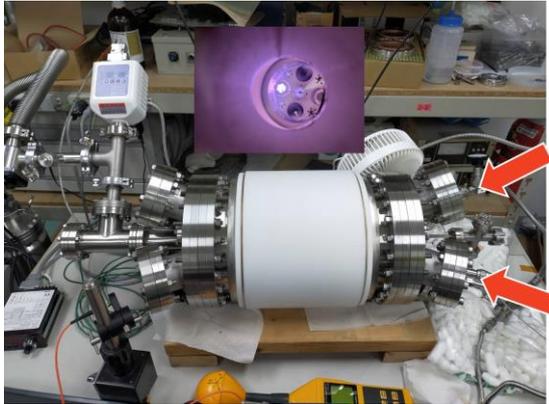


Figure 2. A photo of plasma generation in the ceramic chamber. Hydrogen plasmas were generated and introduced around the points of red arrows^[5].

3. 排気ガスの放射化評価

プラズマ生成中は常時導入した水素ガスの排気が必要となるが、加速器室内は高い放射線環境下である。安全に排気可能か判断を行うため、放射線シミュレーションコード PHITS^[6]を用いて水素ガスの放射化評価を行った^[5]。

プラズマ側の数 Pa 程度の真空と 1E-6 Pa 程度の加速器側の真空とを切り分けるために 20 μ m 厚のチタン膜を用いており、電子ビームを通過させて水素プラズマに照射する。放射化の主因は中性子によるトリチウム生成となるが、このチタン膜や直接照射による影響は殆どなく、主にはビーム終点から生成される中性子による影響となる。想定される電子ビーム強度から計算したところでは、生成されるトリチウムは 3.5E-15 Bq/cm³ となり、法定排気濃度限度よりも圧倒的に低いものであることがわかった。

4. 真空インターロックシステム開発

プラズマ側と加速器側においては必要とされる真空値に大きな差があり、双方の切り分けには 20 μ m 厚のチタン膜を用いる。電子ビーム通過の際に誤って一点に集中照射されることがあると、チタン膜上に小さな穴が空き加速器側の真空が悪化してしまうことが想定される。加速器側では電子生成を行う陰極保護の観点

からも真空維持は重要であり、万が一のための真空インターロックシステムの開発を行っている^[7]。

真空の悪化は、加速器側で真空維持に利用しているイオンポンプで計測されている電流値により測定が可能であり、これをトリガーとしてチタン膜よりも加速器高真空側に設置された真空ゲートバルブを圧縮空気にて動作させることで、真空を維持することが可能となる。製作した真空インターロックの試験装置では、手動のゲートバルブによりチタン膜損傷を演出して実験を行っているが、真空が大きく悪化する前にインターロック回路が正常に動作することが確認されている。チタン膜状に生じる損傷穴はこの手動ゲートバルブによる模擬損傷穴よりも小さくなると推定され、より厳しい環境下で安全側の評価が行えている。

5. 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助成を受けたものである。

6. 参考文献

- [1] B. Zhang.: “Unexpected emission pattern adds to the enigma of fast radio bursts”, *Nature* 582, 344–346 (2020).
- [2] E. Petroff, J. W. T. Hessels, D. R. Lorimer: “Fast radio bursts”, *The Astronomy and Astrophysics Review* 27, 4 (2019).
- [3] Y. Sumitomo, et al.: “Toward understanding of astrophysical Fast Radio Bursts from an accelerator and plasma experiment”, *Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021)*, TUP001 (2021).
- [4] Y. Sumitomo, et al.: “A Ground Experimental Approach Toward Understanding Mysterious Astrophysical Fast Radio Bursts”, *JACoW LINAC2022, THPOJO22* (2022).
- [5] Y. Sumitomo, et al.: “Current Status of Interaction Experiments with Plasma for realization of Astrophysical Fast Radio Burst on ground”, *Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023)*, FRP43 (2023).
- [6] Tatsuhiko Sato, et al.: “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, *J. Nucl. Sci. Technol.* 55(5-6), 684-690 (2018).
- [7] K. Ito, et al.: “Development of a Vacuum Protection Interlock System for Plasma Interaction Experiments”, *Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023)*, THP45 (2023).