

疑似宇宙高速電波バースト現象生成に向けたプラズマとの衝突実験の準備状況

CURRENT STATUS OF INTERACTION EXPERIMENTS WITH PLASMA FOR REALIZATION OF ASTROPHYSICAL FAST RADIO BURST ON GROUND

住友洋介^{*,A)}, 浅井朋彦^{A)}, 小口治久^{B)}, 日下和大^{A)}, 井浦空太^{A)}, 小林大地^{A)}, 関太一^{A)}, 早川恭史^{C)}, 境武志^{C)}
Yoske Sumitomo^{*,A)}, Tomohiko Asai^{A)}, Haruhisa Koguchi^{B)}, Kazuhiro Kusaka^{A)}, Sorata Iura^{A)}, Daichi Kobayashi^{A)},
Taichi Seki^{A)}, Yasushi Hayakawa^{C)}, Takeshi Sakai^{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

Recently, the "Fast Radio Bursts" are getting much attention in astrophysical observations, although the basic mechanism is not completely understood yet. We initiated a project realizing the interactions between electron beams and plasma fields so as to understand the characteristic features of Fast Radio Bursts, such as the ultra high brightness and the short time emissions, especially in relation to the collective amplification effects that are familiar in accelerator physics. In this paper, we illustrate the introduction of our project and estimate the radioactivations of hydrogen gasses for plasma fields by a simulation, as well as the current preparation status of plasma generations.

1. はじめに

近年、宇宙観測の分野で「高速電波バースト現象」と呼ばれる事象に世界的に着目が集まっている。この現象の特徴としては、ミリ秒程度の間観測史上最高輝度の電波帯域での放出強度を持っており、これまで観測されていた短時間放出現象とは明らかに異なった事象として区別されている。一般に、宇宙からやってくる電波信号は周波数ごとに到達時間に遅延が見られるのであるが、これは、電波が通り抜ける銀河内や銀河間に存在している電離ガス（プラズマ）が影響することによって起こる現象であり、分散度として定量化されている。特に、高速電波バースト現象における信号からはこの分散度が他の天体現象と比べて桁違いに大きいのが特徴であり、放出母天体近辺、もしくは所属する銀河内にプラズマが顕著に存在していると推定されている。しかし、現在発見されている事象の多くは突発的な放出が多く、また、老齢な銀河からの放出が観測されていることもあり、高速電波バーストとしての放出メカニズムに対して一様の理解がなされている状況ではない（例えば、[1,2] や、[3,4] を参照）。

この高速電波バースト現象は、特に近年大きな進展があり、2020年には我々の銀河からの放出現象の報告 [5,6] や、2021年にはこれまでの観測事例を大幅に上回る500以上の事例の報告 [7] が行われている。更には、信号の詳細解析により、ミリ秒の短時間放射の中に内部構造がある可能性を指摘している報告 [8-10] もあり、観測上においても今後の進展が期待されるものとなっている。

この未知の高速電波バースト現象の理解にむけて、分散度の高さから想定されるプラズマをヒントに、加速器で用いられている集団効果から発生する非線形増幅作用を活用して、地上実験において「疑似高速電波バースト現象」を再現するための実験プロジェクトを

開始した [11,12]。重量星である中性子星が持つエネルギーが荷電粒子加速により宇宙空間に持ち出され、それがプラズマとの積分的集団相互作用により高い効率でエネルギー変換され電磁波として放出される可能性について地上実験において探るものである。加速器においては、電子ビームと周期磁場との積分的相互作用により、指数関数的な増幅効果を得て自由電子レーザーとして高強度の光パルス生成が行われており、様々な用途で用いられている。広い宇宙空間において、条件が整合し稀に放出現象が起こることは十分にありえる話であり、また、条件整合性により突発的な放射であることや、高輝度放出後は高いエネルギー放出により条件不整合となり短いパルス放射となり得ることも一考に値する。

ここにおいては、「疑似高速電波バースト現象」に向けて準備を行っているプラズマの生成状況に加えて、プラズマで用いる水素ガスの放射化評価についての報告を行う。

2. プラズマ生成状況

電子ビームとプラズマとの相互作用を起こすに当たり、熱電子銃により生成される電子パルスの繰り返しである3 GHzとの相関が想定されるため、プラズマ生成としても電子密度に関係しているプラズマ振動数が数GHzとなるようなプラズマ生成を行っている。これは、観測側としても自由空間で放出信号強度の観測を行うのに対して数GHz程度での観測が行いやすいことから都合がよく、まずは上記プラズマ振動数程度で相互作用を行い、電子ビーム由来の周波数との和・差周波や高調波などの相互作用として生成される信号を測定することを計画している。

プラズマ生成装置としては、上記GHz付近での信号透過がよく、放射線耐性の高いセラミック素材を用いたチャンバーを製作し用いている。また、通常は中心軸上に点火装置を入れることが多いのであるが、電子ビームが通ることから、点火装置はFig. 1の赤矢印で

* sumitomo.yoske@nihon-u.ac.jp

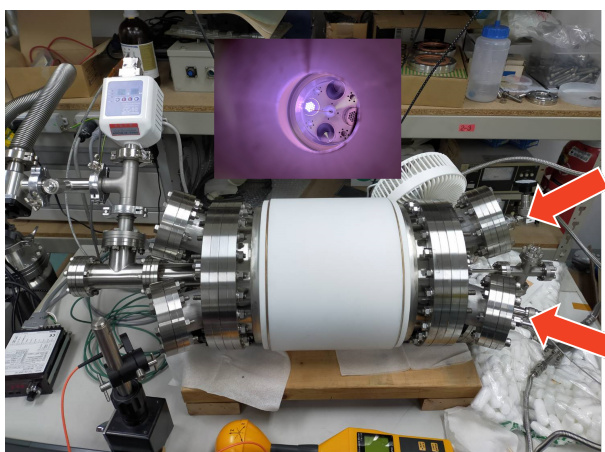


Figure 1: A photo of the plasma chamber planned to be installed at the accelerator. A photo when plasma was generated is also shown at the middle top.

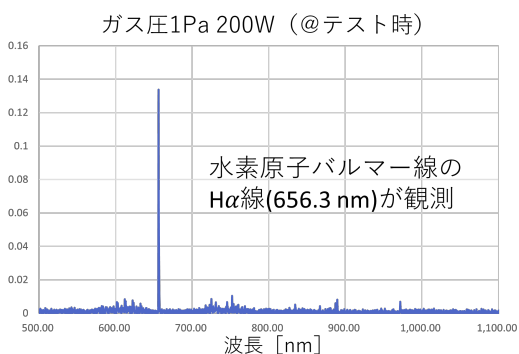


Figure 2: The spectrum data when the plasma was generated on trial. We observed the Balmer H α line of hydrogen atom.

示している通り、斜め2方向からのプラズマ導入の方法を取ることで、軸上における対称性を持つようにしている。また、加速器側はRFが20 μ sの2Hzでの運転となるのであるが、プラズマをこのタイミングに合わせてパルス的に生成するのは難易度が高いと判断し、13.56 MHzの連続高周波源を用いて定常プラズマを生成することにした。これに電子ビームの20 μ sの間でおこる放出現象を時間発展的に測定することで、相互作用による増幅現象の条件を探索する。また、プラズマ側でも多点での静電プローブ測定を行うことでプラズマの電磁場配位の変化を時間発展的に計測し、総合的に相互作用により引き起こっている状態の判断を行う。

現在のところでは、プラズマの斜め2方向からのプラズマの点火導入には成功しており (Fig. 1)、また、水素原子のバルマー H α 線の観測も確認され (Fig. 2)、水素によるプラズマ生成が行われている状態である。今後は、セラミック壁面への電子衝突を防ぐよう外部コイル磁場を配置した上での試験を行い、加速器への設置へと進めていく予定でいる。

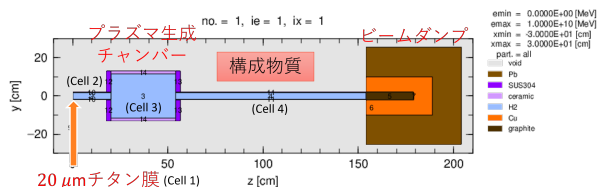


Figure 3: The configuration of components around the plasma chamber.

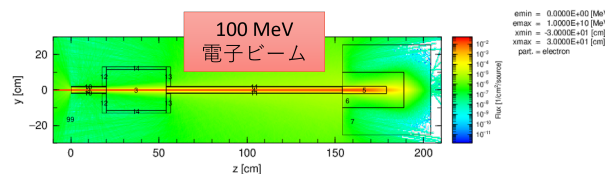


Figure 4: A 100 MeV electron beam interaction simulation around the plasma chamber.

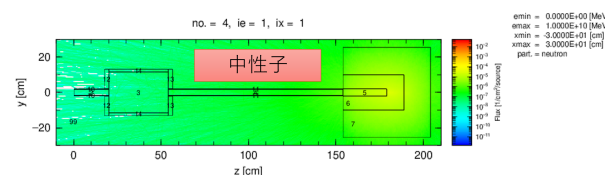


Figure 5: A neutron generation when the 100 MeV electron beam reaches at the dump.

3. 放射化評価

プラズマ生成時には常に水素の導入と排気を行う必要があり、また、水素ガスは加速器内部で電子ビームにより影響を受けるため、安全に排気を行うための放射化評価を行った。加速器室内での設置場所の都合上、ビームダンプ前となってしまうため、ビームダンプで生成される多量の中性子による影響も踏まえた評価を行う必要がある (Fig. 3)。電子ビーム側は単色 100 MeV と単純化し、20 μ s、2 Hz に相当する、連続 4 μ A を 8 時間照射したものとし、プラズマ側は想定よりも少し高めの 10 Pa、室温の 27 $^{\circ}$ C を仮定し、常時の排気は行っていない条件で安全側としての評価を行った。

計算は PHITS コード [13] を用いて行い、電子ビームの結果は Fig. 4、生成された中性子の結果は Fig. 5 に、8 時間のビーム照射とその後のチタン膜と水素ガスの放射線量の様子を Fig. 6 に示す。放射化には中性子が重要となるが、20 μ m チタン膜や水素ガス中での中生子生成は無視できるほどであり、ビームダンプで光核反応により生成される中生子が主体となっている。ただ、水素ガスのガス圧 10 Pa だとしても相当に低い量であり、また、ビームダンプはグラファイトで中生子発生を抑えるように設計されていることも有り、結果と

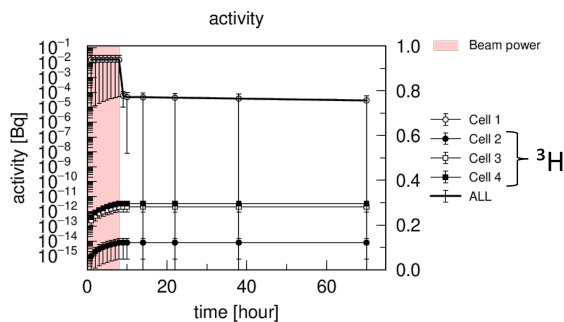


Figure 6: An estimation of radioactivations of 10 Pa hydrogen gasses and the 20 μm titanium window for a 8 hours beam irradiations.

して、一番放射化の強いビームダンプ前のダクトにおいても主体として生成されるトリチウムは 3.5×10^{-15} Bq/cm³ 程度となっており、圧倒的に法定排気濃度限度よりも低いものであることがわかった。

4. まとめ

近年世界的には大きく着目を集めている「高速電波バースト現象」に対して理解を行うため、繰り返し再現可能な地上実験を行うことを計画している。これは、プラズマとの相互作用により加速器でよく用いられている増幅現象を引き起こすことで「疑似高速電波バースト現象」を作り出し、理論的には予測の難しい集団効果による非線形増幅現象としての可能性を追求するものである。

現在は測定技術や環境による制限から、実験のためのプラズマ装置を製作し、実際に水素ガスを用いた点火導入実験に成功している段階にある。また、プラズマ生成上水素ガスは常時排気する必要があるため、ビーム照射状態における水素ガスの放射化を PHITS コードを用いて評価を行い、安全に排気が可能であることを確認した。

今後はチャンバーでの余計な衝突を防ぐようなコイル磁場を追加の上で、プラズマ生成試験を行い、加速器への設置へと進めていく予定である。

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助成を受けたものである。

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] 木坂将太, 宇宙からの謎の電波突発現象、高速電波バースト, *日本物理学会誌* 69, 9, 600-601 (2014).
- [4] 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).
- [5] The CHIME/FRB Collaboration, A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar, *Nature* 587, 54 – 58 (2020).
- [6] C. D. Bochenek *et al.*, A fast radio burst associated with a Galactic magnetar, *Nature* 587, 59 – 62 (2020).
- [7] M. Amiri *et al.* [CHIME/FRB], The First CHIME/FRB Fast Radio Burst Catalog, [arXiv:2106.04352 [astro-ph.HE]].
- [8] W. A. Majid *et al.*, A Bright Fast Radio Burst from FRB 20200120E with Sub-100-Nanosecond Structure, [arXiv:2105.10987 [astro-ph.HE]].
- [9] K. Nimmo *et al.*, Burst timescales and luminosities link young pulsars and fast radio bursts, [arXiv:2105.11446 [astro-ph.HE]].
- [10] B. C. Andersen *et al.* [CHIME/FRB], Sub-second periodicity in a fast radio burst, [arXiv:2107.08463 [astro-ph.HE]].
- [11] 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).
- [12] Y. Sumitomo *et al.*, A Ground Experimental Approach Toward Understanding Mysterious Astrophysical Fast Radio Bursts, JACoW LINAC2022, THPOJO22 (2022). doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-THPOJO22
- [13] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.* 55(5-6), 684-690 (2018).