

J-PARC リニアックのイオン源 RF および空洞 RF の同期システム SYNCHRONIZATION SYSTEM OF ION SOURCE RF AND CAVITY RF IN J-PARC LINAC

柴田崇統^{#, A)}, 平野耕一郎^{A)}, 平根達也^{B)}, 神藤勝啓^{A)}, 林直樹^{A)}, 小栗英知^{A)}

Takanori Shibata^{#, A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Tatsuya Hirane^{B)}, Katsuhiko Shinto^{A)}, Naoki Hayashi^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}

^{A)} J-PARC Center, Tokai, Japan

^{B)} Cadox Systems Inc., Gyoda, Japan

Abstract

Synchronization system of the Radio Frequency (RF) in the ion source (IS) and in the accelerator cavity has been developed in order to reduce the beam loss and the improvement of the beam monitor accuracy in the J-PARC Linac. The IS RF is modulated by few kHz around 2 MHz in a single macro pulse (500 μ s) for impedance matching of plasma. This makes the synchronization between the IS and the cavity RFs difficult. In the present study, phase synchronization of the two RFs is performed by modifying the original direct digital synthesizer (DDS) in the IS RF amplifier controller. The IS RF and the cavity RF shows perfect phase synchronization. Also, the beam current wave-form extracted from RFQ (Radio Frequency Quadrupole) cavity is measured at the J-PARC RFQ test-stand for comparison of the wave-forms with the IS RF. From the comparison of the beam current wave-form and the IS RF, the same time structure for every shot has been confirmed. The results fully give expectation to reproducibility of the same intermediate beam bunch can be obtained in each shot, which leads to decrease the beam loss and to improve the beam monitor accuracy.

1. はじめに

1.1 J-PARC リニアックの稼働率向上

J-PARC リニアックでは、イオン源で生成した 50 keV の負水素イオン (H⁻) ビームを加速空洞内で 400 MeV まで加速し、3 GeV シンクロトロン (RCS) へと入射する。近年の J-PARC 大強度化の一環として、高周波 (RF) 放電型のイオン源が導入され、リニアックで加速されるビーム電流値はピーク値で 30 mA から 50 mA に増強された。さらに、将来のアップグレードを見据えて、60 mA スタディが進められている[1]。

リニアック施設における課題の 1 つはビームロスの低減である[2]。特に重要な問題は、ビームが加速空洞チャンバに衝突することで起こる機器放射化であり、これによって利用運転期間中における空洞機器のメンテナンス作業性が大きく損なわれる。また、別の問題として加速空洞の放電事象が生じると MPS (Machine Protection System) 警報発報によるビーム運転停止を余儀なくされる。放電の一因と考えられるのが、空洞内部におけるビームロスである。ビームハロ成分の衝突によってチャンバ壁面が損傷を受けると、損傷個所の周囲で電界強度が増加し、放電の要因となり得る。上記ビームロスを増加させる要因として、イオン源 RF および空洞 RF (チョップシステムを含む) の位相が同期されていないことによる、shot ごとの中間バンチ波高の“不”再現性が挙げられる。

1.2 リニアックにおける中間バンチ形成と問題点

J-PARC 利用運転におけるリニアック内のビーム加速は、以下のタイミング系で実行される。

- ・イオン源から生成された、繰り返し 25 Hz、パルス幅 300 – 500 μ s のマクロパルスのビームは、運転周波数

324 MHz の高周波四重極 (RFQ) 空洞によってバンチ化されて 3 MeV に加速される。

- ・その後、RFQ 下流のチョップシステムによって、パルス幅 456 ns の中間パルスが周期 815 ns で並んだ楕円形構造を持つビーム (本文では中間バンチと呼ぶ) に成形される。

このような中間バンチを形成することで、リニアックから RCS に入射した H⁻ビームバンチは、RCS の加速バケット内に収められるため、縦方向のビームロスを抑えることが可能である。

一方、RF イオン源では、2 MHz RF によってプラズマを点灯し、そこから静電加速によってビームを引き出す。この 2 MHz RF に起因するプラズマ密度の時間的振動 [3] により、プラズマからの引き出されたビームの初期発散角が振動する。上記の影響から、イオン源から生成されたビームには、ビーム電流値および RFQ 入射エミッタンスの時間的揺動が含まれる [4-6]。2 MHz (パルス幅 500 ns) のビーム揺動は、中間パルスの 456 ns と近い周期を持つことから、イオン源から引き出されたビームを、チョップシステムで成形すると、1 つ 1 つの中間バンチは異なる波高を持つ。

中間バンチの波高が異なる場合でも、1 shot (25 Hz) ごとにビーム内の波高パターンが揃っていれば、運転開始時のビーム位相調整による効率の良いビーム運転が可能である。しかし、現状は、(1)イオン源 RF および(2)空洞 RF・チョップシステムのタイミングが同期されていないため、1 shot ごとに中間バンチ波高パターンが一致せず、位相調整条件が再現されない問題がある (Fig. 1; 空洞 RF とチョップシステムの位相同期は既に取りられているため、本文では便宜上、上記のタイミングをまとめて空洞 RF と記載する)。このようなビームの位相調整条件が得られないことが、現在リニアックで見られているビームロス

[#]Corresponding author: takanori.shibata@kek.jp

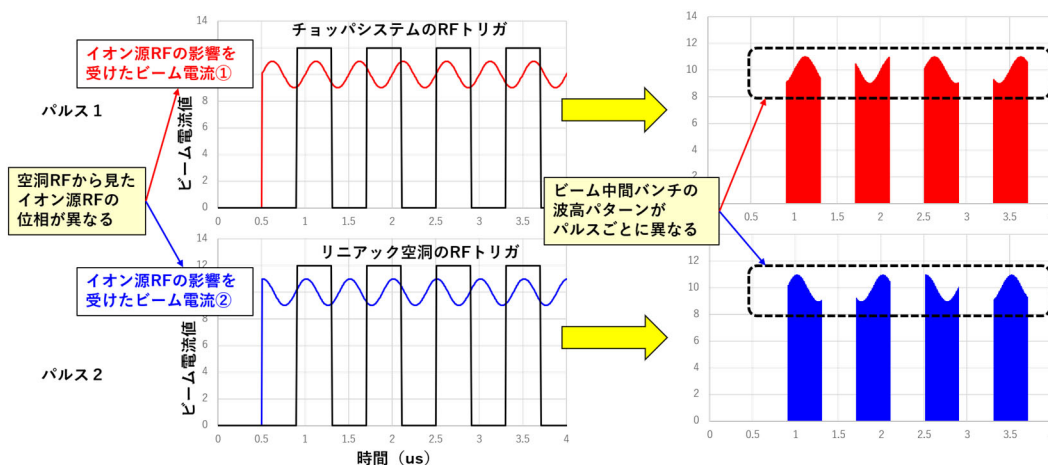


Figure 1: リニアック 1shot ごとに中間バンチの波高パターンが再現しない問題の概念図.

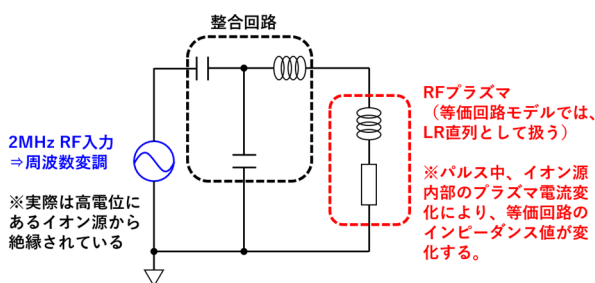


Figure 2: イオン源 RF アンプ・整合回路およびプラズマの等価回路モデル.

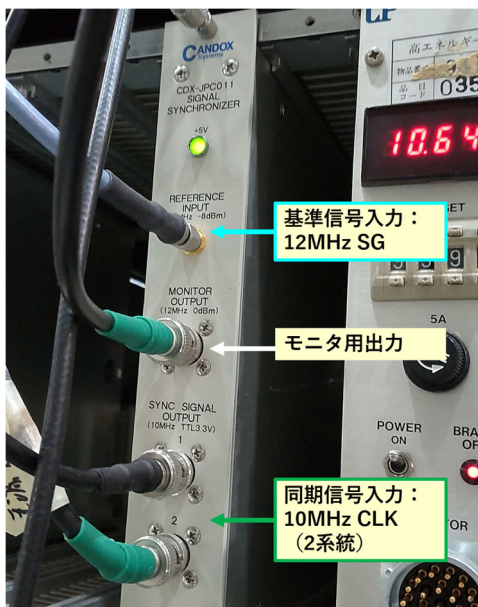


Figure 3: 製作した J-PARC リニアック 12 MHz-10 MHz 同期モジュール.

の 1 つの原因となっている可能性がある。

また、上記のとおり、中間バンチが 1 shot ごとに再現しない問題はビーム電流モニタ精度にも影響する。モニタでは、加速器の各位置におけるビーム電流値を常時監視している。一方、モニタでは特定の間バンチ 1 つの波高を検出していることから、ビーム電流値が shot ごとに安定し

ない問題がある。

本研究では、上記背景を踏まえ、イオン源 RF および空洞 RF の同期システムを開発することで、リニアックにおけるビームロスの一部を抑えられるか検討を行うとともに、電流値モニタの精度向上を狙う。

1.3 イオン源 RF と空洞 RF の位相同期に関する課題

従来、イオン源と空洞の RF が同期されてこなかった理由として、イオン源 RF はマクロパルス内で周波数変調を行うことが挙げられる。Figure 2 には、イオン源用 2 MHz アンプ、インピーダンス整合回路およびイオン源プラズマを模した等価回路を示した。RF プラズマ中の電流分布成長に伴い、等価回路内のプラズマ抵抗とインダクタンスが変化する。イオン源 RF では、中心周波数 2 MHz の周囲で、数 - 数 10 kHz の周波数変調をかけることで、上記の場合にもインピーダンス整合が維持される仕様となっている。このような背景から、単純にトリガタイミングを合わせるだけでは、イオン源 RF と空洞 RF の位相同期をさせることは出来ない。

2. イオン源 2 MHz アンプの DDS 改造

J-PARC イオン源 2 MHz アンプにおける周波数変調は、アンプコントローラ内部のダイレクト・デジタル・シンセサイザ (DDS) で実行する。DDS では 10 MHz の水晶発振器を基準信号として、これを逡倍した DDS クロックを、フェーズアキュムレータ (PA) でカウントする仕様である。PA 内における波数カウントを変化させることで、出力 RF の 1 周期の長さを変調させることが可能である。このことから、イオン源 2 MHz RF アンプ内の DDS クロックと、空洞 RF の位相同期が得られれば、周波数を変調したイオン源 RF の位相同期も得られる。

本報告における 2 MHz アンプの改造では、DDS クロックを生成するアンプ内の水晶発振器の代わりに、外部 10 MHz クロックを入力する仕様とした。空洞 RF (324 MHz) は、J-PARC 12 MHz 基準信号 (SG) 出力を逡倍して生成されるため、この SG 出力から、イオン源アンプに輸入する外部クロックを生成するモジュール (12 MHz-10 MHz 同期モジュール) を製作した。同期モジュール (Fig. 3) では、電圧制御水晶発信器 (VCXO) を用いた回路により 12 MHz SG を一度 2 MHz に分周し、それを

通倍することで 12 MHz SG と位相同期した 10 MHz クロックを生成する。Figure 4 には、同期モジュールの入出力信号波形を示した。

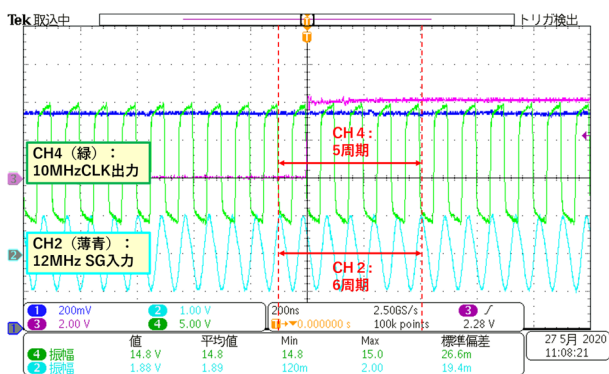


Figure 4: 12 MHz-10 MHz 同期モジュールによる入出力信号の位相同期確認。

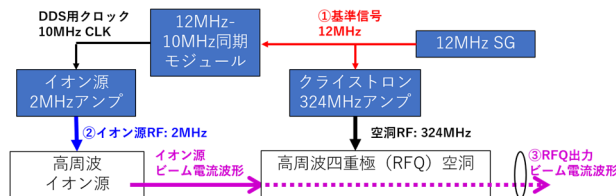


Figure 7: J-PARC リニアックの RFQ テストスタンド構造(上)およびタイミング信号系統の模式図(下)。

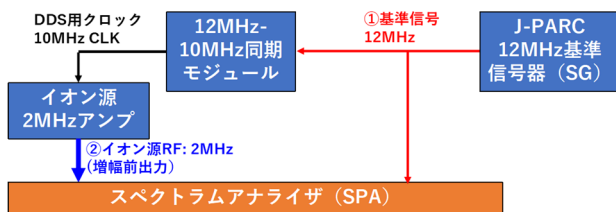


Figure 5: イオン源 RF、空洞 RF の位相同期試験体系。

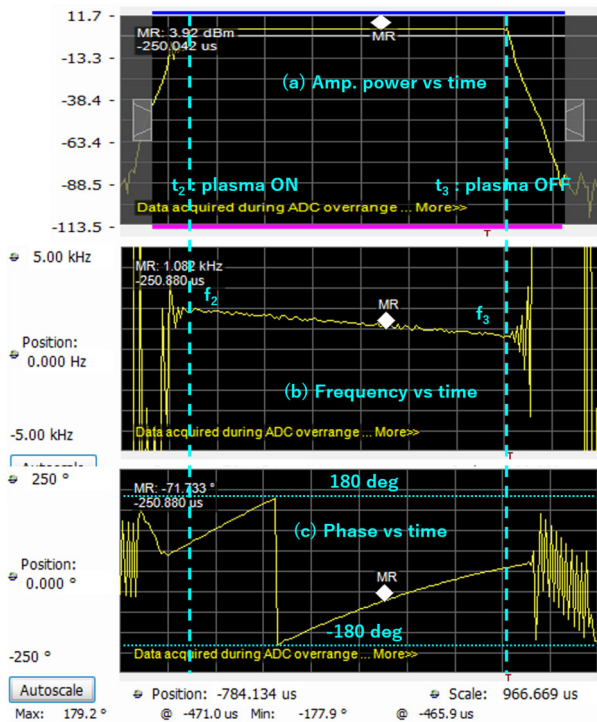


Figure 6: 12 MHz SG を基準として SPA で測定したイオン源 2 MHz RF 入力信号のマクロパルス中の時間変化; (a)入力パワー, (b)周波数, (c)位相。

3. RF およびビーム電流の位相同期試験

3.1 イオン源 RF および空洞 RF の位相同期試験

上記より、イオン源 DDS 出力 RF および空洞 RF の双方が、J-PARC 12 MHz SG を元に生成されるシステムを構築した。空洞 RF と 12 MHz SG は、元々位相同期が出来ているので、イオン源 RF と 12 MHz SG の位相同期試験を実施した。

Figure 5 には同期試験体系を示した。スペクトラム・アナライザ (SPA) へのトリガ入力に 12 MHz SG を用いた上で、イオン源アンプ DDS 出力 RF をプロットした。Figure 6(a) - (c)は、SPA で測定した出力 RF のマクロパルス内における(a)アンプ出力パワー、(b)周波数、および(c)位相の時間変化を示した。DDS では、イオン源パワー投入開始・遮断時刻における周波数 f_2 , f_3 に対し、その間の時刻の周波数を線形に変化させる。今回の改造では、 f_2 の時刻における位相を DDS 内の FPGA により固定値で与えるように設定した。これにより、周波数変調をかけた状態でも、アンプ仕様範囲の任意周波数に対し、どの shot でも Fig. 6(c)の位相波形が再現するようになった。

3.2 イオン源 RF と RFQ 出力ビーム電流波形の同期

イオン源 RF と RFQ 空洞内で加速されたビーム波形の位相が shot ごとに同期されるかを、J-PARC リニアックの RFQ テストスタンド (RFQ-TS, Fig. 7) にて確認した。RFQ-TS は、イオン源、低エネルギービーム輸送系 (LEBT)、RFQ 空洞、RFQ 出力ビーム収束用の Q 電磁石、およびビーム波形計測用の高分解能電流変換機 (FCT) から構成される。イオン源で 50 keV に静電加速されたビームは LEBT 内のソレノイドによる Twiss マッチングを介して RFQ へ入射される。

本計測では、イオン源入力 2 MHz RF 波形および RFQ-TS 終端にある FCT で計測した RFQ 出力ビーム波

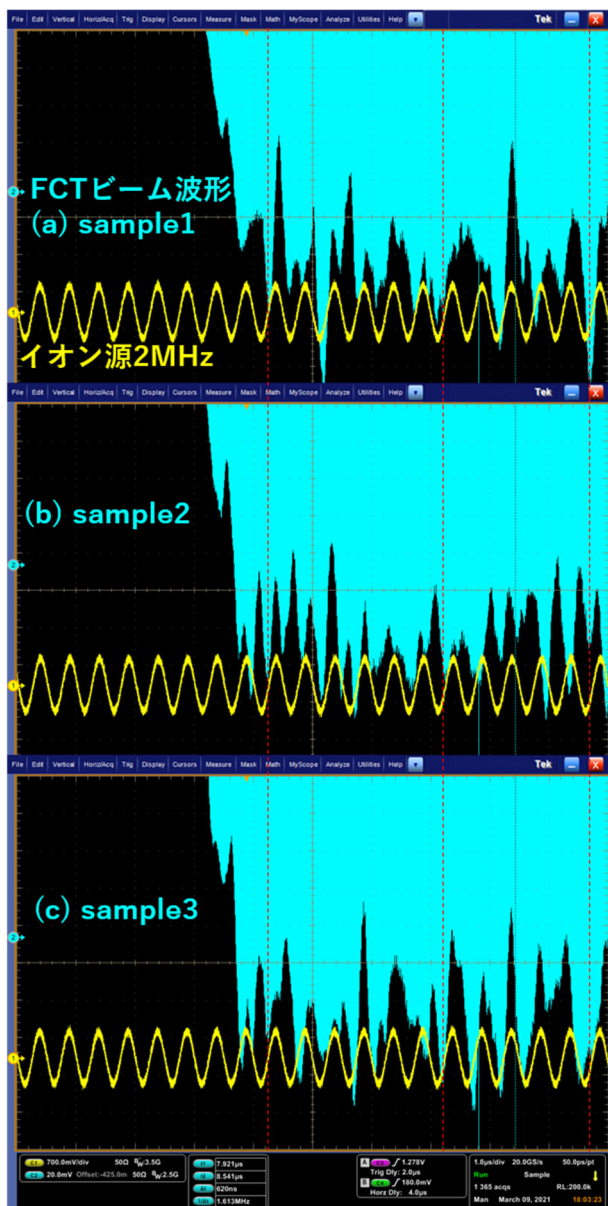


Figure 8: RFQ-TS 位相同期試験におけるイオン源 2 MHz RF および RFQ 出力ビーム (FCT) 信号の比較. 異なる 1 shot における sample 波形3つを(a-c)で示した.

形を広帯域オシロスコープにて測定・比較し、shot ごとの位相同期が得られるかを調べた。Figure 8, 9 には異なる 3 つのビーム sample 波形および 8 shot ごとの average 波形を示した。イオン源・空洞 RF の位相同期によって、ビーム電流波形の位相は平均的には一致するようになったものの、平均値の周りで、ビーム振幅・位相の揺らぎ成分が見られた。この原因として考えられるのは、イオン源内部のプラズマ振動の位相揺らぎ、イオン源静電加速部において H⁺とともに引き出される電子による拡散、あるいは空洞内部の 2 次電子発生、ノイズなどが挙げられるが、RF の位相同期によるものではない。上記、原因の調査として、分光計測を活用したプラズマの応答測定や LEPT 内部のビーム波形測定などが今後の課題である。

しかし、それでも位相同期がない場合と比較して、空洞内で加速されるビーム波形の時間的構造は、shot ごと

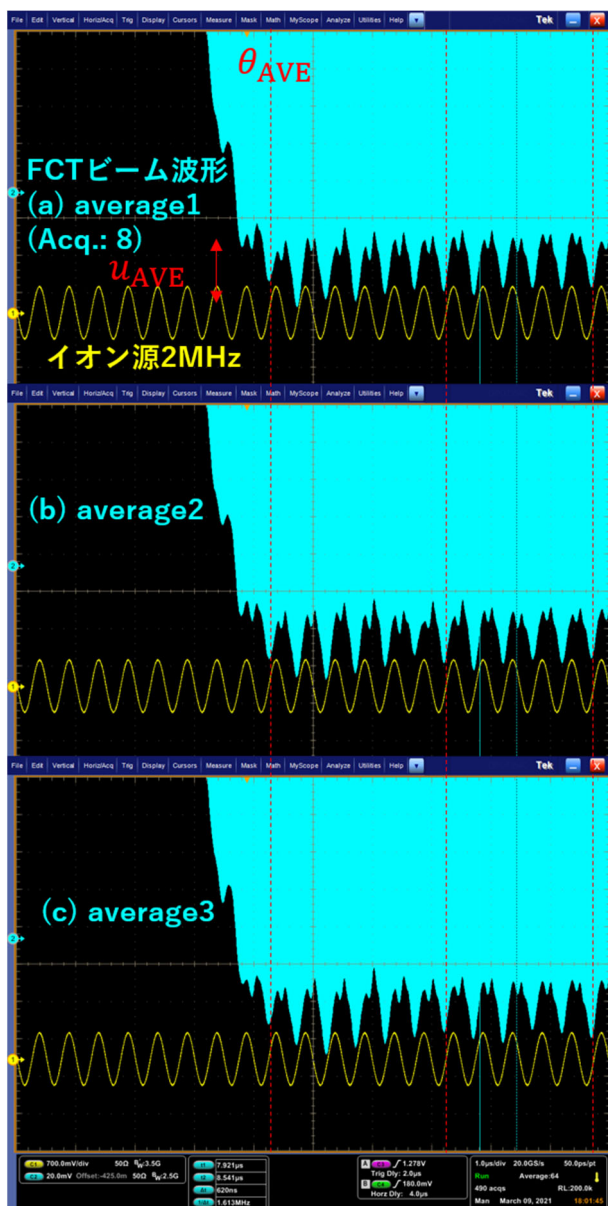


Figure 9: RFQ-TS 位相同期試験におけるイオン源 2 MHz RF および RFQ 出力ビーム (FCT) 信号の比較. 8 shot ごとの average 波形 3 つを(a-c)で示した.

に再現するようになった。特に、Fig. 9 の average 波形では、イオン源 RF の 2 MHz に加え、2 倍高調波 (4 MHz) 成分も見られる。これは、プラズマ密度の時間的振動によって生じる成分であり、プラズマの分光計測で見られた Balmer 発光線強度の 2 MHz および 4 MHz 合成波形と綺麗にかさなる[7]。このようにビーム波形にプラズマ固有の物理的振舞いが現れる結果は、各 RF の位相同期システムが十分な精度で動作していることを意味する。

4. まとめ

本報告では、J-PARC リニアックビーム運転における shot ごとの中間バンチ波高パターンを一致させることによるビームロスの低減およびモニタ精度の向上を目的として、イオン源 RF および空洞 RF の位相同期システムを開発した。空洞 RF と位相同期したクロック信号を生成す

る 12 MHz-10 MHz 同期モジュールを制作し、この 10 MHz クロックを、イオン源 RF アンプ内で周波数変調を実行する DDS に入力する改造を施した。これにより、イオン源 RF 位相と空洞 RF 位相が完全に同期することを確認した。これにより、本報告の冒頭で問題提起した中間バンチの波高パターンに対する再現性は、以前と比べて向上すると期待できる。

上記システムを、J-PARC リニアックの RFQ-TS に導入し、イオン源 RF および RFQ 出力ビーム波形の位相同期を確認した。平均値の周りでは、振幅と位相に揺らぎ成分が残っており、完全なる位相同期には至っていない。これらの調査は、今後 RFQ-TS での課題として試験を継続する。

参考文献

- [1] K. Shinto, K. Ohkoshi, T. Shibata, K. Nanmo, K. Ikegami, A. Takagi, Y. Namekawa, A. Ueno and H. Oguri, AIP Conf. Proc. 2052, 050002 (2018).
- [2] Y. Liu, M. Otani, T. Miyao, T. Shibata, Z. Fang, K. Futatsukawa, T. Ito, T. Morishita, J. Tamura, K. Okabe, K. Moriya and A. Miura, Proc. IPAC2019, Melbourne, Australia, 1990 (2019).
- [3] T. Shibata, H. Asano, K. Ikegami, F. Naito, K. Nanmo, H. Oguri, K. Ohkoshi, K. Shinto, A. Takagi and A. Ueno, AIP Conf. Proc. 1869, 030017 (2017).
- [4] T. Shibata, K. Shinto, M. Wada, H. Oguri, K. Ikegami, K. Ohkoshi and K. Nanmo, AIP Conf. Proc. 2373, 050002 (2021).
- [5] M. Wada, K. Shinto, T. Shibata and M. Sasao, Rev. Sci. Instrum. 91, 013330 (2020).
- [6] K. Shinto, T. Shibata, A. Miura, T. Miyao and M. Wada, AIP Conf. Proc. 2011, 080016 (2018).
- [7] T. Shibata, K. Shinto, A. Takagi, H. Oguri, K. Ikegami, K. Ohkoshi, K. Nanmo and F. Naito, AIP Conf. Proc. 2011, 020008 (2018).