

## 原子力機構-東海タンデム加速器の現状

### PRESENT STATUS OF JAEA-TOKAI TANDEM ACCELERATOR

松田誠<sup>#</sup>, 田山豪一, 石崎暢洋, 株本裕史, 中村暢彦,  
杵掛健一, 乙川義憲, 遊津拓洋, 松井泰, 阿部信市

Makoto Matsuda<sup>#</sup>, Hidekazu Tayama, Nobuhiro Ishizaki, Hiroshi Kabumoto, Masahiko Nakamura,  
Ken-ichi Kutsukake, Yoshinori Otokawa, Takuhiro Asozu, Yutaka Matsui, Shin-ichi Abe  
Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency

#### Abstract

The JAEA-Tokai tandem accelerator was operated over a total of 112 days, and delivered 17 different ions to the experiments in the research fields of nuclear physics, nuclear chemistry, atomic physics, solid state physics and radiation effects in material in FY2020. Maximum acceleration voltage was 15.4 MV. During the period from April 20th to May 7th, the operation was suspended due to refraining from commuting to prevent the spread of the new corona-virus. Even in that situation, from May 8th, experiments using the rare radioactive isotope Es target could be resumed only by in-house researchers. After that, it gradually shifted to normal operation in line with the removal of restrictions. As the main maintenance, we also carried out work to replace 16 acceleration tubes (equivalent to 8MV) on the low energy side with reduced performance with spare parts. This paper describes the operational status of the accelerators and the major technical developments of our facility.

#### 1. はじめに

原子力機構-東海タンデム加速器施設には 20UR 型ペレットタンデム加速器と、その後段ブースターである 1/4 波長型超伝導空洞 40 台で構成される重イオン超伝導リニアック(超伝導ブースター)が設置されている[1]。

タンデム加速器は地上電位にある 3 台の負イオン源と高電圧端子内の ECR イオン源[2]により H から Bi までの約 50 元素の多様なイオンを 5~500 MeV のエネルギーまで加速することが可能である。またタンデム加速器からの重イオンビームを再加速する超伝導ブースターはヘリ

ウム冷凍機の廃止により運転を休止している。

当施設は RI や核燃料を標的として利用できる照射室を有しており、この特徴を活かして半減期 276 日の 99 番元素であるアインスタイニウム (Es) を標的とした核物理・核化学実験を 2017 年度から開始している。

本報告では、2020 年度の原子力機構-東海タンデム加速器施設の運転状況について報告する。

#### 2. 加速器の運転状況

2020 年度のタンデム加速器の日毎の加速電圧の発生状況および施設の稼働状況を Fig. 1 に示す。

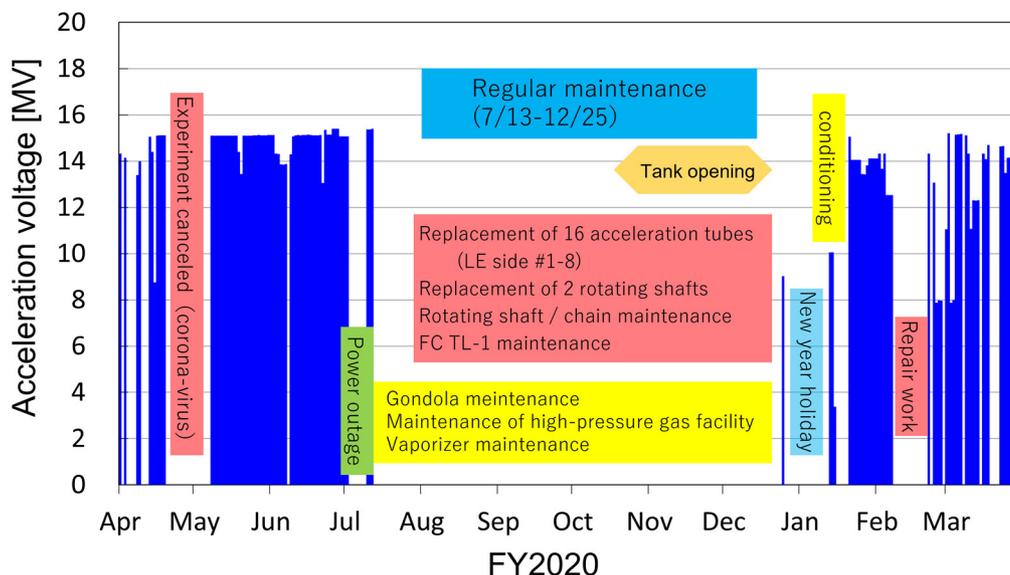


Figure 1: Daily accelerating voltage and operation status in the FY 2020.

<sup>#</sup> matsuda.makoto@jaea.go.jp

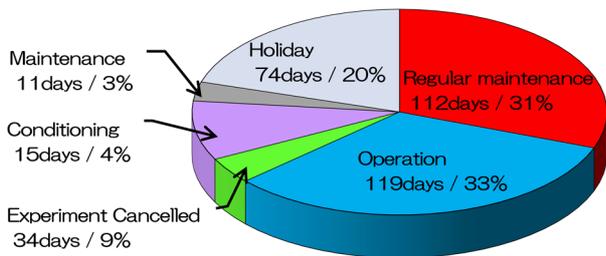


Figure 2: The operation status of the accelerator in the FY 2020.

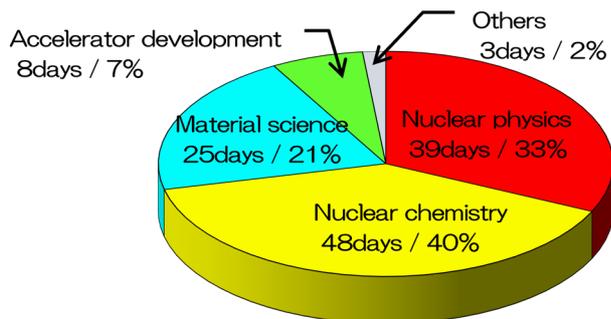


Figure 3: Usage of beam-times in different research fields.

2020年2月より2回目のアインスタイニウム(Es)を用いた実験を開始した。4月20日から5月7日まで新型コロナウイルス感染拡大対策として、在宅勤務となり加速器の運転を停止することとなった。このような状況下ではあったが感染拡大防止対策を図り、5月8日から希少なRI標的であるEsを用いた実験に特化し、拠点人員のみで利用運転を再開した。5月19日からは拠点内人員で実施できるその他のテーマの実験に限り運転を再開した。その後、制限の緩和と共に段階的に通常運転へ移行した。

2020年度は定期整備の実施は1回であった。この理由は加速器の高電圧カラム内の発電用回転シャフトの軸受の改良により、その寿命が大幅に改善したことで長期の連続運転が実現したことによる[3]。定期整備では、ビーム電流が測定できなくなったタンク内のファラデーカップ(FC TL-1)の修理、耐電圧性能が低下した低エネルギー側加速管16本(8MV分に相当)の交換などを行った。10月から11月にかけて第2照射室系排気設備の一部更新工事を行った。後期の運転期間中に、ビーム振分電磁石電源の故障、CAMACクレート電源の故障などが発生した。

Figure 2に運転・整備日数を示す。利用運転日数は例年より少なく119日であった。高圧ガス施設の六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)液化ガス貯槽の開放検査を実施したこと及び加速管交換を実施したことで、定期整備の日数は112日となり、例年より多くなった。実験中止は34日と多く、その理由は新型コロナウイルスの感染拡大を受けた緊急事態宣言により18日間の実験中止と、各ターゲット室にビームを振分けるための電磁石の電源故障により11日間の実験中止が原因である。

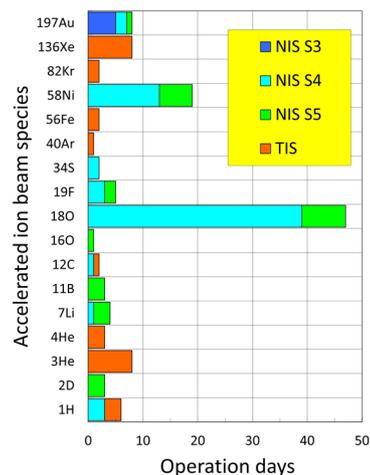


Figure 4: Distribution of accelerated ion beams for experiment.

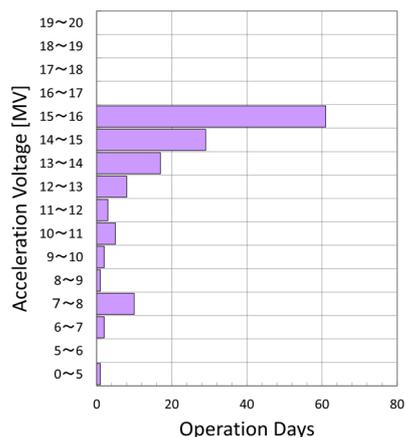


Figure 5: Distribution of acceleration voltages for experiment.

Figure 3に利用分野別の割合を示す。核物理が約33%、核化学が約40%で、材料照射・原子物理が約21%、加速器開発が約7%であった。Es標的を用いた実験に注力したこともあり核物理・化学実験の日数が割合的に多くなった。

Figure 4にイオン種別の利用日数を示す。<sup>1</sup>Hから<sup>197</sup>Auまで14元素17種のイオンが利用された。イオン源は負イオン源(NIS)が77.4%、ターミナル ECR イオン源(TIS)が22.6%の利用割合となった。Es実験に<sup>18</sup>Oが非常に多く利用され、負イオン源の利用割合が例年より多くなった。

Figure 5に加速電圧別の利用日数を示す。加速電圧3.4 MVから15.4 MVまでの利用となった。放電の頻発による加速電圧の低下のため16 MV以上での実験利用ができない状況となっている。

### 3. 加速器の整備・開発状況

2020年度の定期整備は7/13~12/25の1回のみの実施であった。主な整備事項について以下に記す。

### 3.1 TPS コントローラーの故障

東海タンデム加速器は、GVM による電圧信号またはエネルギー分析電磁石の下流に設置しているエネルギー分析スリットに当たるビーム電流により、コロナプローブの電流をフィードバック制御することで加速電圧の安定化を図っており、このシステムをターミナル・ポテンシャル・スタビライザー (TPS) という。4 月 3 日に 13.8 MV で放電後、TPS コントローラーが故障した。損傷箇所は、12 V 電源用トランスの故障とリミットスイッチの保護ダイオードの短絡および三極管のフィラメント切れが発生していた。コロナプローブに向かって放電が発生したと考えている。12 V 電源用トランスは、市販の 12 V スwitchング電源に交換し復旧させた。

### 3.2 コロナプローブの針の損傷

加速電圧 15.1 MV におけるコロナプローブの挿入位置は、通常タンク壁から約 20 mm 入る位置であるが、5 月 18 日の放電を境に、コロナプローブの挿入量が日毎に増加し、最終的に 65 mm まで入れないと加速電圧を制御できなくなった。コロナ針が短くなっているなどが原因と推測されたので、保守日にコロナプローブを取り外し確認したところ、7 本の針が最小で 2 mm、最大で 6 mm 短くなっていた。Figure 6 に、この時に撮影したコロナ針の写真を示す。針先が溶けて丸くなっていた。そのため、より高電界の位置へプローブを挿入する必要があったと考えられる。その他にカバーに放電痕が見られたので、サンドブラストと紙やすりを用いて除去し、針は予備品に交換し復旧させた。加えて、カバーの固定ネジを皿ネジに変更し、突起を少なくした。加速器タンクとの間に仕切りバルブを設けた新型コロナプローブを設置していたため、加速器タンクの SF<sub>6</sub> ガスを回収することなく 1 日の保守日で修理作業を完了することができた[4]。

### 3.3 低エネルギー側加速管の交換

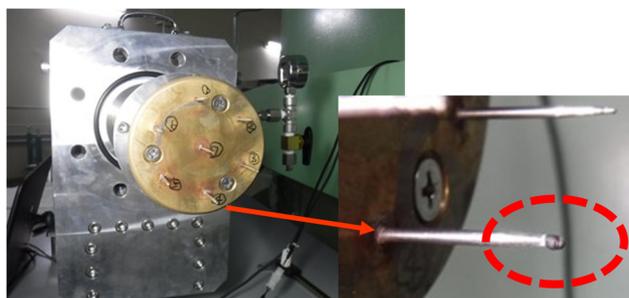


Figure 6: Corona probe melted by electric discharge.

2019 年度に低エネルギー側の加速管 4、6、7、8 段目に絶縁劣化が見られたため分割抵抗値を変更しこれらの加速管に印加される電圧を相対的に下げて運転を継続していた。2020 年 4 月以降、約 15 MV での運転中に放電が頻発したが、放電後に加速電圧は低下せず 16 MV 安定を確認して運転再開することを繰り返していた。加速電圧の回復を図るため、2020 年度の定期整備に絶縁劣化している低エネルギー側の 1~8 段目の加速管 16 本 (8 MV 相当) を交換した。交換用の加速管は、新品と

再生品で、高圧純水洗浄及び超音波洗浄後にベーキングし、窒素充填して保管していたものを用いた。交換作業は、分割抵抗の取外しや HEPA フィルタの設置、作業場所の清掃等の準備に 10 日、加速管交換及びリークチェックに 13 日を要した。加速管交換後には、ベーキング (最高 120 °C) を 7 日間実施した。

交換後の加速器の状況は、計 9 台のタンク内イオンポンプの内、高電圧端子内の 1 台 (IP TL-1) が不調のため停止した状態で運転を継続した。1 月 5 日から 20 日の 9 日間にコンディショニングを実施し、最高電圧 16.5 MV 確認し、利用運転を開始した。以降、断続的にコンディショニングを実施し、最高電圧 17.3 MV を確認したが、電圧印加時に低エネルギー側の加速管でパルス的な真空悪化が発生するなどしたため、最高加速電圧 15.2 MV で運転を継続した。電圧印加時に真空悪化する理由は、加速管へのゴミの混入等の可能性が考えられるが、はっきりとした原因は不明である。

### 3.4 ファラデーカップ (FC TL-1) の故障

高電圧端子内のファラデーカップ (FC TL-1: 負イオンビーム用) のビーム電流値が測定不能となったため、定期整備に取外し調査した。原因は二次電子抑制用のサブレッサー電極に荷電変換用の炭素フォイルの破片が付着したことによるサブレッサー電圧の印可不良であった。東海タンデム加速器は縦型であるため、上部から荷電変換フォイルの破片が落下し、FC の絶縁部分に挟まってしまったものである。フォイル破片を取り除くとともに、割れていた絶縁ガイシを交換して復旧させた。

### 3.5 電磁石電源と CAMAC の故障

2020 年度後期マシントタイム中に電磁石電源の故障が 2 件発生した。1 件目は、2 月 10 日に各ターゲット室へのビーム振分電磁石 (BM 04-2) 電源が出力しない状況となった。メーカーに依頼して調査した結果、原因は電源コントローラー内部の電源基板 AC-DC コンバータの経年劣化であった。電源基板 (新古品) をメーカーより調達し復旧させた。電源復旧するまでの間、利用運転が 11 日中止となった。2 件目は、3 月 8 日に実験準備のため 90° 偏向電磁石 (BM B4-1) の試運転をしたところ、電源の出力がでない又は最大出力となり制御できないことが判明した。メーカーに修理を依頼した結果、原因は経年劣化によるタイマリレーのソケットの接点不良とスライドトランスコントロール基板の電圧調整ボリューム単体の経年劣化であることが判明した。リレーソケットの交換および電圧調整ボリュームの交換と調整を行い復旧させた。

CAMAC クレート電源の故障も 2020 年度後期マシントタイム中に 2 件発生した。1 件目は 2 月 22 日に負イオン源 (1st デッキ) の前段加速電圧 240 kV が昇圧できない状況となった。調査の結果、CAMAC クレートの状態制御 (SC、SR) 用の 24 V 電源の発振が原因であった。不良電源を市販の 24 V スwitchング電源に置き換え復旧させた。2 件目は、3 月 15 日に CAMAC シリアルハイウエーのエラーが発生した。原因は、負イオン源デッキ内の CAMAC クレート電源の空冷ファンが故障しクレート電源がトリップしていたためであった。クレート電源を予備品 (修理品) と交換し復旧させた。当施設で使用して

いる CAMAC クレート電源は約 40 年使用を継続しており、補修部品の入手も困難であるため、更新を計画しているところである。

### 3.6 カラムショート機構およびカラム電圧測定器の開発

東海タンデム加速器は 1 MV のカラムユニットが 20 段直列に積み重なって 20 MV の高電圧を発生する。電圧発生時は高電圧端子から電圧分割抵抗を介して地上電位に電流が流れるが、すべてのカラムユニットの抵抗には同じ値の電流が流れることになる。したがって、放電等により一部の加速管の耐電圧性能が劣化すると、この劣化した加速管で許容できる電流までしか電流を流せないことになり、全体として高い電圧を発生できなくなってしまう。この不良カラムユニットを特定するには、金属のロッドにより特定のカラムユニットをショートし、診断したい部分のみに電圧を印加し性能を確認する操作を行っている。また、このように特定のユニットのみに電圧を印加しコンディショニングという手法で耐電圧性能の回復を図ることもできる。このようなカラムのショート操作は、加速器タンクの底部から、金属ロッドおよびナイロンロッドを挿入する

ことで行うが、加速器タンク内の SF<sub>6</sub> ガスの漏えいの可能性のある危険な操作でもある。また、一度のロッドの抜き差しには約 40 分程度必要なため不良ユニットの特定に時間を要している。

そこで、Fig. 7 に示すようなカラムショート機構と各カラムユニットの電圧測定器の開発を進めている。各カラムユニットに加速器タンク内の SF<sub>6</sub> ガスの圧力に対し、加圧または減圧したガスを用いガスシリンダ駆動によりショートバーを上下させカラムをショートまたは絶縁させる機構を搭載する。加速器タンクの地上電位部にコンプレッサを設置し、絶縁された各ユニットには絶縁チューブにて加圧または減圧されたガスを送気し動作させる。

カラム電圧測定器の概要を Fig. 8 に示す。電圧を測定する方法として、ひずみゲージによるロードセルを使う手法を考案した。加速器の各ユニットに、円板電極を取り付けたロードセルを設置し、電極にかかる静電気力によるロードセルのひずみを測定することでユニットの電圧測定が可能となる。ロードセルに取り付ける円板電極には φ 130 mm のアルミ板を用い、加速器カラムとの接続には編素線(自然折径 6 mm)を用い、ロードセルと円板電極はアクリルで絶縁した。この場合カラムユニットに 1 MV の電圧が印可されると円盤電極に働く静電気力は 10 gf 程度となり、十分に検出可能な値である。ロードセルの電気信号に変換する信号変換回路には、絶縁型ロードセル用アンプ(オメガ電子製)と自作の増幅回路を組み合わせた回路を試作し装置内に組み込んだ。

試作した電圧測定器を実機の地上電位にある 1 段目ユニットに設置して加速電圧を 8.72 MV から 0 MV まで低下させたときの出力電圧測定の結果を Fig. 9 に示す。加速電圧 8.72 MV のときの電圧測定器の出力約 1.8 V はカラムへの印加電圧にほぼ対応した値となっており、開発した電圧測定器が機能していることが確認できた。また、加速器圧力容器内の SF<sub>6</sub> ガス循環や電動機等による振動環境であっても電圧変化がきれいに読み取れること、加速器タンクの真空引き(7 Torr)と 0.5 MPa までの SF<sub>6</sub> ガスによる加圧環境でも電圧測定器が故障せず加圧下で正常に動作することが確認できた。今後、完成形を複数ユニット製作し不具合ユニットの検出等に使用する。

カラムショート機構の制御や動作状態のモニタ、カラム電圧測定機構の出力電圧信号の測定等に使用する通信法の開発も併せて行っている[5]。設置場所は加速器

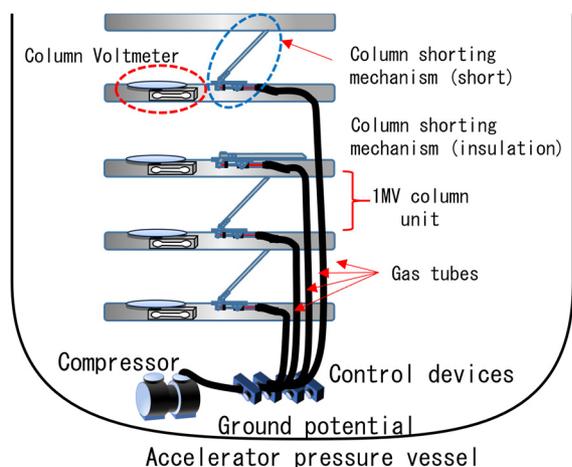


Figure 7: Overview of column shorting mechanism and column voltage measuring system.

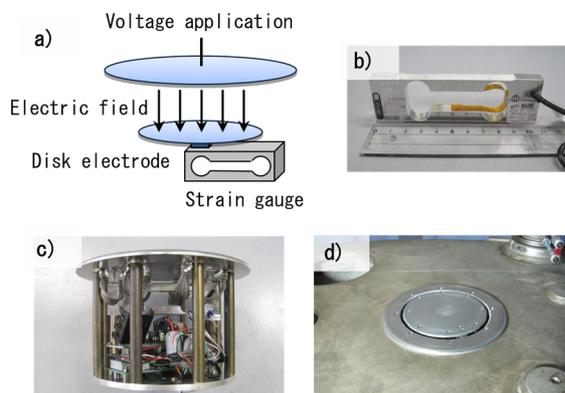


Figure 8: a) measurement principle. b) load cell sensor. c) Inside the developed voltmeter. d) installed photo.

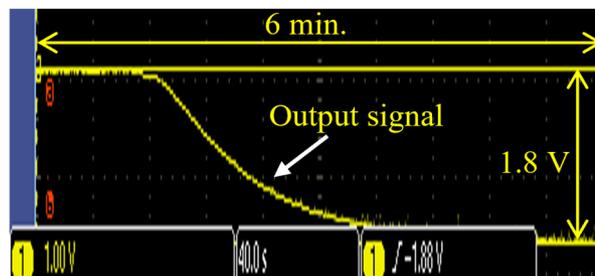


Figure 9: The output voltage change of the first-stage column voltage measuring system when the voltage is lowered from the acceleration voltage of 8.72 MV (0.46 MV / column).

圧力容器内の最大 20 MV の高電圧上であるため、プラスチック光ファイバ(POF)による LAN を加速器の全カラムユニットで構築する通信システムを開発している。高電圧端子内の各種機器を LAN で配線し、LAN/POF 変換器で光信号に変換してタンクベース(地上電位)に伝送し、タンクベースで光変換器、LAN/同軸コンバータを用いて電気信号としてタンク外に取り出すシステムである。

加速器高電圧端子内に設置したネットワークカメラの映像取得、温度計を用いたデータ取得、LED を用いた ON/OFF 制御の動作試験の結果、これらがすべて正常に動作することを確認した。一方で、加速器の大放電後には通信ができなくなる現象が発生している。電源の再起動で通信システムの復旧が可能であるが、今後、放電サーージ対策を強化する予定である。

今後取り組むべき課題として、電力供給機構の開発が残っている。今回開発した機器は、既に電力供給されているカラムユニット部に設置して動作試験をしていき、それと並行して電力供給機構の開発を進めていく予定である。

#### 4. まとめ

2020 年度の利用運転は 112 日であった。放電頻発によって徐々に加速電圧が低下し 16 MV 以上での運転が困難となっており、加速電圧 15 MV 付近での運転を余儀なくされている。これを解決するため、2020 年度の定期整備に性能劣化した低エネルギー側の 1~8 段目の加速管 16 本(8 MV 相当)を新品と再生品に交換を行った。しかし、電圧印加中に低エネルギー側の加速管で真空悪化するため、最高加速電圧 15.2 MV で運転を継続している。今後の対応として、2021 年度定期整備で加速管の調査及び交換を実施するとともに、不良のイオンポンプ(IP TL-1)の整備を実施し、加速電圧の回復を図る予定である。また、加速管の診断やコンディショニングの効率化を図るためカラムショート機構やカラム電圧測定器の開発を進めている。その他、2020 年度の後期メンテナンス中に電磁磁石電源及び CAMAC 電源の故障が集中的に発生したため、計画的に電源類の更新を進めていく予定である。

#### 参考文献

- [1] S. Takeuchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A382 (1996)153-160.
- [2] M. Matsuda *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A654 (2011)45-51.
- [3] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, Tsuruga, (2015) 357.
- [4] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, Chiba, (2016) 1413.
- [5] M. Matsuda *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, online, (2020) 948.