

ミュオンサイクロトロンの開発状況

PROGRESS IN DEVELOPMENT OF MUON CYCLOTRON

大西純一^{#, A)}, 永谷幸則^{B)}, 後藤彰^{B)}, 山崎高幸^{B)}, 三宅康博^{B)}, 湯浅貴裕^{B)}, 安達利一^{B)},
足立泰平^{A)}, 筒井 裕士^{C)}, 楠岡 新也^{C)}, 熊田 幸生^{C)}, 恩田 昂^{C)}

Jun-ichi Ohnishi^{#, A)}, Yukinori Nagatani^{B)}, Akira Goto^{B)}, Takayuki Yamazaki^{B)}, Yasuhiro Miyake^{B)}, Takahiro Yuasa^{B)},
Toshikazu Adachi^{B)}, Taihei Adachi^{A)}, Hiroshi Tsutsui^{C)}, Shinya Kusuoka^{C)}, Yukio Kumata^{C)}, Takashi Onda^{C)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Abstract

We are developing an AVF cyclotron to re-accelerate ultra-slow muons (30 keV) obtained at J-PARC MLF to 5 MeV in order to realize a transmission muon microscope. After magnetic field measurement and isochronous magnetic field adjustment in December 2020, RF resonators was installed, and intermittent RF tests were conducted at KEK Tsukuba from June 2021 to March 2022. The RF resonators for acceleration (108 MHz) and flat top (324 MHz) were designed by KEK and manufactured by SHI. In the low-level test, adjustment of the resonance frequency and input coupling, and shunt impedance measurement were performed. Since the Q-value (unloaded) was 2200-2500, which was smaller than 50% of the design, we tried to investigate the cause and improve it, but we have not been able to improve it at present. The RF power supply for the accelerating resonator was made by ourselves by combining the output from 16 commercially available 1.5 kW amplifiers with a newly designed 16-way combiner. Although it was necessary to modify the preamplifier to increase the output power due to the low Q-value, we were finally able to inject an RF power of 18.7 kW (CW) into the resonator in the cyclotron. The cyclotron has now been installed at J-PARC's MLF U-line, and wiring and piping work have been completed, and the beam will be accelerated at the next beam time from November 2022.

1. ミュオンサイクロトロン の概要とこれまでの経緯

透過型ミュオン顕微鏡の実現をめざして、J-PARC MLF の超低速ミュオン(30 keV)を 5 MeV まで再加速するためのミュオンサイクロトロンを開発を進めている。超低速ミュオンビームは J-PARC の 3 GeV 陽子ビームから生成される、高エネルギーでエミッタンスの大きいミュオンビームをいったん標的で停止させて、そこから湧き出てくるミュオニウムの束縛電子をレーザーで乖離することによって得られる[1]。

ミュオンサイクロトロン の諸元を Table 1 に示す。サイクロトロンは4セクターAVF型で引き出し半径0.26 m、平均磁場0.4 T、加速共振器の周波数108 MHz、デュー電圧は最大50 kV の設計である。加速ハーモニクスは2で周回数は61から70ターンである。サイクロトロンで加速したミュオンを顕微鏡として使用するため、ビームのエネルギー幅を 10^{-5} オーダーにしてビーム径を10 μm 以下に収束させる。これを実現するため加速共振器に加えて3倍の周波数のフラットトップ共振器を使用する[2]。ミュオンサイクロトロン の外形は住友重機械工業(SHI)製のHM10型サイクロトロンと同であるが、外部入射に変更した上、ビームエネルギー、RF周波数、取り出し方式も異なるため、磁極形状、共振器、入射取り出しなどほぼすべての機器を新規に設計した。SHIにおいて製作を行い、電磁石をはじめ構造部品は2020年3月に完成した。一方、電源、制御、診断系などは費用面からKEKにおい

[#] ohnishi@riken.jp

Table 1: Parameters of Muon Cyclotron

Particle	positive muon
Injection energy	30 keV
Extraction energy	5 MeV
Extraction radius	0.26 m
RF acceleration frequency	108 MHz
Acceleration harmonics	2
No. turns of orbit	61-70
Average magnetic field	0.4 T
Weight of body	8 t

て自主製作することとした。電磁石は2020年12月にJ-PARCにおいて磁場測定を実施し、磁極のシム調整を行って 2×10^{-4} 程度の等時性磁場が得られた[3]。磁場測定後、SHIにおいてRF共振器、入射取り出し機器の組立を行った。2021年6月からRF電源と共振器のパワー試験を開始した。RF電源の容量はCST Studio Suite[4]計算値と軌道計算の結果から13 kW(Q値5200)が必要であったので、30%程度の余裕をみて18-20 kW程度としていた。しかし、後述のように実測したQ値が計算値の半分以下だったため、RF電源の出力容量増加のための改造が必要であった。さらにRF電源回路の筐体への組み込みや安全回路の追加などを行った後2022年3月には最終的に18 kW以上のRFパワーを共振器に入力することができた。サイクロトロンは現在J-PARCのMLF

U-line に据え付け、配線、配管作業が終了して、安全審査を経て RF パワー試験、高圧印加試験などを行った後、次期のビームタイムにおいてビーム加速を行う予定である。

2. RF 共振器とローレベルの測定

Table 2 に設計パラメーター、Fig. 1 にRF共振器の配置を示す。サイクロトロンは縦置きで電磁石ヨークはヒンジが付いて真空容器のふた部分とともに開閉できる構造になっている。Figure 1 は扉を開けた状態で扉側は表示していない。加速共振器は $\lambda/4$ 共振器 2 台が中心部で連結されており、RF パワーは上部のインダクタンス結合型のカップラーから入力される。ピックアップも同じタイプである。共振周波数はアース側のブロックを容器外部から駆動してディー電極との間の静電容量を変えることによって調整する。調整範囲は 400 kHz である。一方、フラットトップ (FT) 共振器は共振周波数が 324 MHz で波長が 0.93 m と短いため中心部でアース板と短絡して $\lambda/2$ 共振器を形成している。FT 共振器は根元部分のショート板によってステム長を変えて共振周波数の粗い調整ができる。カップラー、ピックアップ、周波数チューナーは加速共振器と同じ形式である。

Table 2: Parameters of RF Resonators

	Main	FT
Resonant frequency (MHz)	108	324
Calculated Q-value	4600	5600
Dee voltage (kV)	46	10
Power loss (kW)	15	0.3
Feeder impedance (Ω)	50	50
Input coupler	L-type	L-type

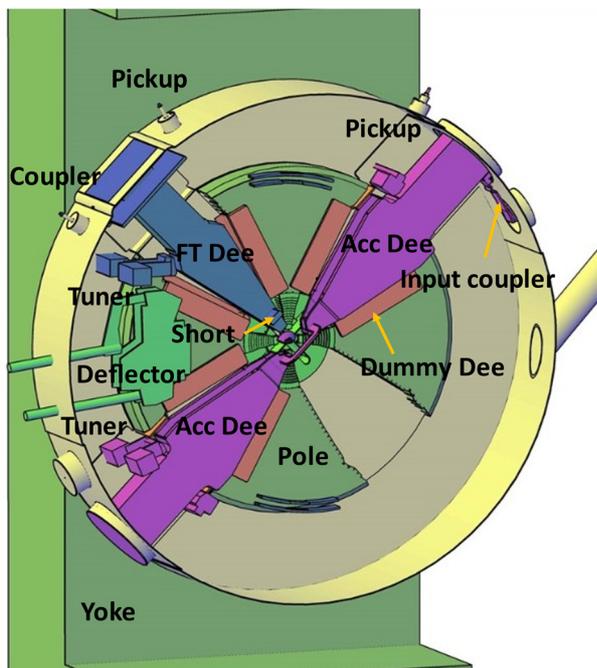


Figure 1: Arrangement of RF resonators.

2.1 共振周波数と入力カップリングの調整

加速共振器の調整前の共振周波数は 110.37–110.89 MHz で可動チューナーの調整範囲を超えていたため、調整用固定チューナーとさらにダミーディーを動かすことにより 108 MHz に調整した。FT 共振器はショート板による共振周波数の調整範囲が 301–341 MHz と広いいため容易に 324 MHz の共振周波数に調整できた。入力カップリングはカップラーが固定式であるためスペーサーなどにより寸法調整を行った。

2.2 Q値測定

加速共振器の Q 値(unloaded)の実測値は 2300–2500 (真空状態)で、設計時に CST 計算で得られた Q 値 5200 に対して 50%以下であった。サイクロトロン共振器の Q 値はコンタクトフィンガーなどがあるため計算値の 70–80% となることが多いが、今回は大幅に小さく後述のように電源容量の不足が問題となった。原因を調査するため Fig. 2 に示すように冷却水配管、デフレクター支持材、はんだ付け部分を考慮して CST 計算モデルを詳細化して再計算を行った。この結果 Q 値は 4557 まで低下したが、まだ実測値との差が大きかった。Q 値を改善するためコンタクトフィンガーやシールドスパイラルの点検や取付寸法を確認し、共振器ステム取付部のシールドスパイラルを銀メッキのものに変更した。しかし、これまで Q 値が大きく低下するような原因は見つかっていなかったが、最近になって共振器ステム取付部に接触不良が疑われる箇所が見つかったため改修を予定している。Q 値は真空排気を行うと 10%程度向上することがわかっているが、この理由は真空容器フランジにあるシールドスパイラルの接触力が増加するためであると考えられる。

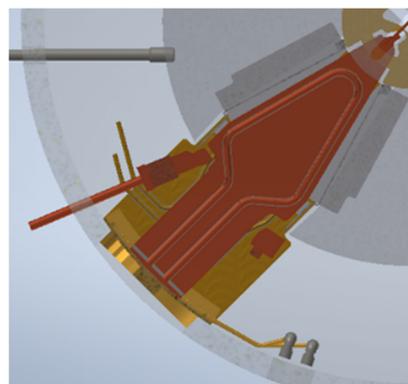


Figure 2: Detailed CST Studio calculation model (partial).

2.3 シャントインピーダンス測定

サイクロトロン中心から半径 12 cm の位置の加速ギャップ (6.9 mm) に直径 5 mm のアルミナ球を糸で吊るして共振周波数を測定した (Fig. 3)。アルミナ球ありとなしの場合の共振周波数の変化は次式で表される。

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{3(\epsilon_r - 1) \epsilon_0 \omega_0}{4(\epsilon_r + 2) P Q_0} |E_0|^2 \Delta V$$

P : 入射電力、 Q_0 : 共振器の Q 値、 E_0 : 球なしの電場、 ΔV : アルミナ球の体積、 ϵ_r : アルミナ比誘電率 9.8、測定

値は $f_0 = \omega_0 / (2\pi) = 107.986 \text{ MHz}$, $\Delta f = 18 \text{ kHz}$, $P = 4.36 \text{ mW}$, $Q_0 = 2507$ であったので、アルミナ球を置いた場所のデー電圧は 19.9 V となり、シャントインピーダンスは $R_{sh} = 45.3 \text{ k}\Omega$ と測定された。一方、CST 計算の結果 ($Q_0 = 4557$) では同じ場所のデー電圧に対して $Q_0 = 2500$ 換算で $R_{sh} = 39.8 \text{ k}\Omega$ となる。これらの結果から Q 値を 2500 とした場合の加速に必要な RF 電力を Table 3 に示

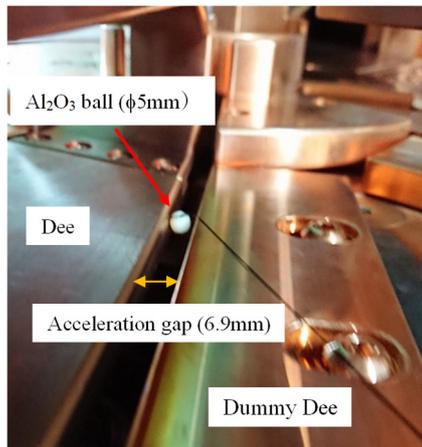


Figure 3: Electric field measurement with a bead.

Table 3: RF Power Required for Beam Acceleration

	Bead Measurement	CST Calculation
Q-value	2507	4557
Rsh (kΩ)	45.3	72.5
Rsh (kΩ) for Q=2500	45.2	39.8
RF power for 61 turns (kW) Vdee=46.9kV	24.3	27.7
RF power for 70 turns (kW) Vdee=40.9kV	18.5	21.0

す。軌道計算の結果では、これまで 61 ターンの取り出しを想定していたが加速電圧を下げた場合にはつぎに 70 ターン前後で径方向のビーム幅が小さくなり、入射ビームのエミッタンスが小さい場合はシングルターン取り出しが可能で、エミッタンスもほとんど悪化しないことがわかっている。これらを考慮すると必要な最小の RF 電力は、測定結果と CST 計算で違いがあるものの、 Q 値が 2500 の場合それぞれ 18.5 kW と 21.0 kW となる。

3. RF 電源と加速共振器のパワー試験

Figure 4 に RF 加速共振器への電力供給および制御回路のブロック図を示す。加速共振器の RF 電源は 4 W プリアンプを入力とする 16 台の 1.5 kW アンプ (NXP 社) からの出力を新規設計したコンバイナーで結合する方式で、 1.5 kW アンプからの出力にはそれぞれ 1.5 kW のダミーロードをもつインレーター (TMT 社) を設置している。 1.5 kW アンプの電源は $60 \text{ V} - 500 \text{ A}$ の直流電源を使用した。ローレベル制御は FPGA によるデジタル処理方式で現在製作中である。ミュオン顕微鏡を実現するためにはシングルターン取り出しが必須である上エネルギー分散を 10^{-4} 以下にする必要がある。このため FT 共振器によってバンチ内のエネルギー幅を最小化するとともに RF 電圧を 0.01% 以下、RF 位相を 0.1° 以下に安定化させなければならない。従って、これらの RF 電源の制御が極めて重要であるが今後の課題である。

Figure 5 に KEK つくばにおけるパワー試験時の写真を示す。サイクロトロン共振器への RF パワー入力試験は最初に低真空度で行ったため真空窓が焼損して 2 か月程度中断したが、2021 年 7 月に 2-3 時間のうちに 1.5 kW の RF を入力することができた。さらに 5 kW 程度まですぐに上げることができたが、デフレクターの支持材 (SUS) が高温になっていることが分かり PEEK 材に交換すること

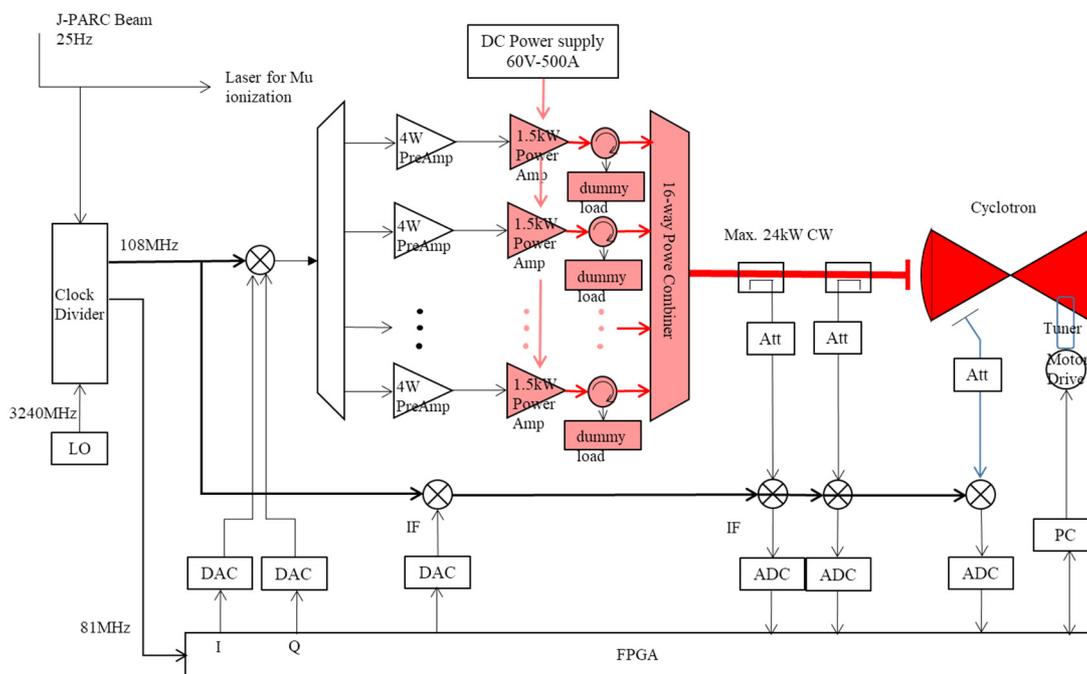


Figure 4: Block diagram of RF power and control system.

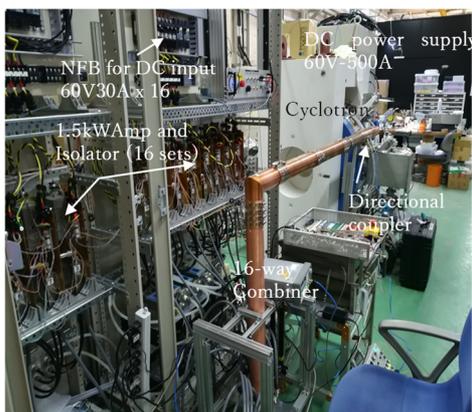


Figure 5: RF power test at KEK Tsukuba campus.

にした。プリアンプ回路の出力不足や 1.5 kW アンプの故障など改造と修理に時間を要したが最終的に 1.5 kW アンプ 14 台 (2 台は故障) で 18.7 kW (CW) のパワー入力を行うことができた。14 台の入力の場合、コンバイナーの特性から 3 kW 程度の反射があるため、16 台のアンプを同じ条件で使用した場合は最大出力が $18.7 \text{ kW} \times (16/14)^2 = 24.4 \text{ kW}$ となる。入射されるミュオンビームは J-PARC のシンクロトロンと同期して 25 Hz であるため、RF 電源のパルス運転 (パルス幅 100–1000 μs) が可能である。実際にも運転テストを行って問題はなかった。パルス運転では、電源、共振器ともに熱負荷が数 10 分の 1 になるため熱的にはビームの安定化に有利である一方、加速電圧の振幅位相制御が CW の場合より難しくなる可能性がある。

4. サイクロトロンへのビーム入射

サイクロトロンは超低速ミュオンを生成する標的から約 10 m 下流に設置されている。Figure 6 に入射部付近のビームラインの一部を示す。Figure 7 にサイクロトロン入射点の 1.27 m 上流の F5B 地点からトラッキング計算して求めた加速アクセプタンスの大きさを入射位相 (相対値) の関数として示す。X 方向と Y 方向は Fig. 6 に示す。加速アクセプタンスは 20 ターンまで加速したものとし、ディー電圧は $R = 12 \text{ cm}$ の位置で 43 kV (Q 値 2500 で 23.5 kW) とした。ディー電圧がこの電圧より小さくなると入射アパーチャーが制限されるためアクセプタンスは減

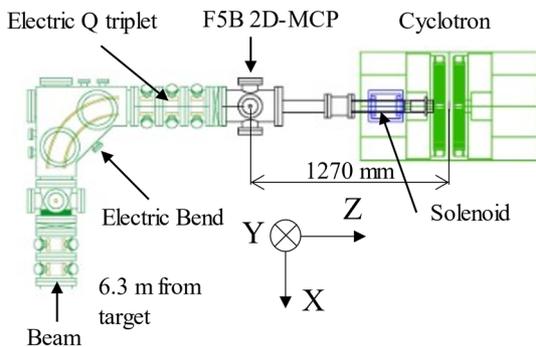


Figure 6: Injection beam line near the cyclotron.

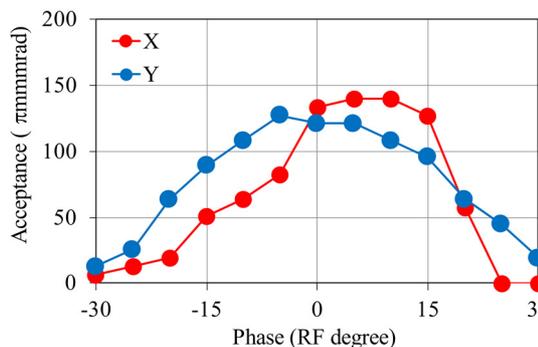


Figure 7: Beam acceptances for the accelerated particles up to 20 turns in the cyclotron as a function of relative phase.

少する。現状のミュオンビームの横方向のエミッタンスは数 $10 \pi \text{ mmmrad}$ (1σ)、位相方向は 5 ns (1σ) 以上である。しかし、位相アクセプタンスは ± 15 度 ($\pm 0.39 \text{ ns}$) 程度しかないため入射効率は 10% 程度でかなり悪くなる。このため Fig. 8 に示すようなドリフトチューブ型のバンチャーを F5B に設置することを計画している。このバンチャーに Fig. 9 に示すようなピーク電圧 1.2 kV のパルス電圧を印加した場合、ドリフトチューブの中心軸を通過する粒子が受ける加減速実効電圧は Fig. 10 の青線になる。この図の横軸はドリフトチューブの中央を通過する時間である。また 2 本のオレンジ線の間はサイクロトロンの入射点 (インフレクター出口) において中心粒子 ($t=0$ で通過した粒子) に対する位相が ± 15 度 ($\pm 0.39 \text{ ns}$) 以内となる領域を表しており、この図から読み取ると F5B において $\pm 2.7 \text{ ns}$ 以内の粒子がこの領域 (加速アクセプタンス) に入っていることがわかる。従って、入射効率は 7 倍程度向上することになる。一方、バンチャーの使用はビーム

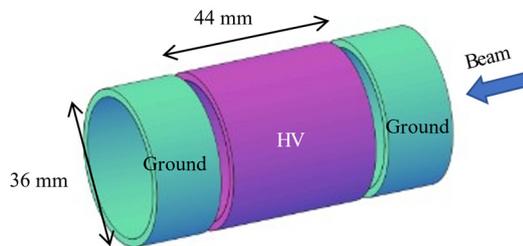


Figure 8: Drift tube for beam buncher.

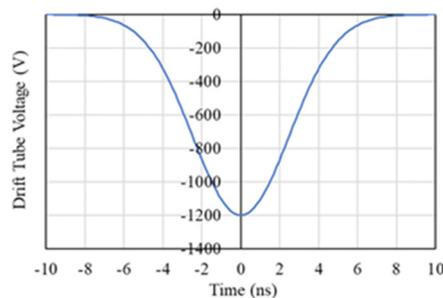


Figure 9: Voltage waveform applied to the drift tube.

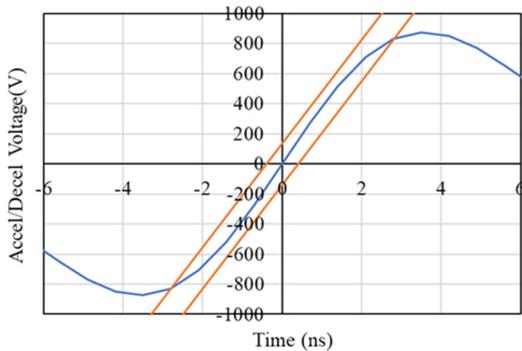


Figure 10: Acceleration/deceleration voltages acting on particles moving along the axis of the drift tube (blue line). The abscissa indicates the time when the particle crosses at the center of the drift tube. The orange lines indicate the region where the particles can be focused within $\pm 15^\circ$ at the injection point of the cyclotron.

のエネルギー幅を増加させることになるが、入射ビームの横方向のエミッタンスを X、Y それぞれ一桁程度小さくする計画であるため、その場合はバンチ効率を低下させずにバンチャーを 90 度偏向デフレクターより上流に移動して印加電圧を下げ、エネルギー幅の増加を小さくすることが可能となる。

5. おわりに

サイクロトロンは 2022 年 10 月現在、電源類とともに J-PARC MLF の超低速ミュオンビームラインへ設置して配線、冷却水配管などがほぼ終了している。安全審査終了後、RF パワーの再投入や高電圧の印加試験を行った後 2022 年 11 月末からのビームタイムにおいて加速試験を開始したいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17H06126 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Miyake *et al.*, “Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE”, JPS Conf. Proc. 2, 010101 (2014).
- [2] T. Yamazaki *et al.*, “ミュオンマイクロビーム生成のためのフラットトップ RF 空洞の開発”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Sep. 2-4, 2020, pp. 885-887.
- [3] J. Ohnishi *et al.*, “ミュオンサイクロトロンの磁場測定結果の分析”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, pp. 849-849.
- [4] <https://www.3ds.com/product-servic/simulia/products/cst-studio-suite/>