

メタバース加速器博物館の新展示室群と VR 加速器シミュレーションキット

NEW EXHIBITION ROOMS AT THE METAVERSE ACCELERATOR MUSEUM AND VR ACCELERATOR SIMULATION KIT

古坂道弘^{#A)}, 広田克也^{A)}, 池田進^{A)}, 内藤富士雄^{A)}, 設楽哲夫^{A)}, 大谷将士^{A)},
加美山隆^{B)}, 平賀富士夫^{B)}, 長倉宏樹^{B)}, 矢野博明^{C)}, 笹公和^{D)}, 大和良広^{D)}, 吉田哲郎^{D)},
長尾和樹^{E)}, 家城佳^{F)}, 高嶋圭史^{G)}, 高橋将太^{H)}, 金安達夫^{I)}, 岩下芳久^{J)},
生天目博文^{K)}, 笠井聖二^{K)}, 竹田晴信^{L)}, 山本昌志^{M)}, 城野哲^{N)}
Michihiro Furusaka^{#A)}, Katsuya Hirota^{A)}, Susumu Ikeda^{A)}, Fujio Naito^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Masashi Otani^{A)},
Takashi Kamiyama^{B)}, Fujio Hiraga^{B)}, Hiroki Nagakura^{B)}, Hiroaki Yano^{C)}, Kimikazu Sasa^{D)}, Yoshihiro Yamato^{D)},
Tetsuro Yoshida^{D)}, Kazuki Nagao^{E)}, Kei Ieki^{F)}, Yoshifumi Takashima^{G)}, Shota Takahashi^{H)}, Tatsuo Kaneyasu^{I)},
Yoshihisa Iwashita^{J)}, Hirofumi Namatame^{K)}, Seiji Kasai^{K)}, Harunobu Takeda^{L)}, Masashi Yamamoto^{M)}, Tetsu Jono^{N)}

A) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

B) Graduate School of Engineering, Hokkaido University

C) Intelligent and Mechanical Interaction Systems, University of Tsukuba

D) UTTAC, University of Tsukuba

E) National Institute of technology, Oyama College

F) Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

G) Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center (NUSR)

H) KMI, Nagoya University

I) UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science

J) RCNP, Osaka University

K) Research Institute for Synchrotron Radiation Science, Hiroshima University

L) Kyushu Synchrotron Light Research Center (SAGA Light Source)

M) Omega Solutions, Inc.

N) AET Inc.

Abstract

The Metaverse Accelerator Museum (MAM) has been developed on the VRChat social VR platform. The entrance hall of the MAM, along with the Education and Training Accelerator at KEK (KETA), was open to public last year. Recently, the 6 MV tandem accelerator at the University of Tsukuba has been added, and several other university-based accelerators will be published in the coming months. In addition, we are developing a 3D virtual accelerator simulation kit using the Unity game development environment. In this simulation program, users can place charged-particle injectors, electromagnetic fields, and RF fields attached to cuboid objects within the Unity space. Charged particles emitted from the injector travel through these fields, allowing users to observe their behavior in real time within a 3D environment.

1. はじめに

「メタバース加速器博物館 (MAM)」を立ち上げ[1-3]、Fig. 1 に示すように、現在 VRChat メタバースワールドに 10 近い VR 加速器や VR 加速器シミュレータを制作中で、完成順に公開している。VRChat は世界で最も会員数の多いソーシャルネットワーク・メタバースであり、日本と米国の利用者が特に多い。様々な加速器を常時ネットワークで公開、シミュレータも使える状態なので、人材教育・広報として大きな期待がある。単発の加速器施設をワールドとして立ち上げるだけでなく、多くの加速器施設と相互連携して様々な展示室を制作できていることが分かってきたことで、これまでとは全く違う展望が見えて来

る。

プロジェクトとしては KEK 外部連携推進室が中心となって、幾つかの大学、高専、その他の組織をネットワークして進めている。また、KEK 加速器科学国際育成事業 (IINAS-NX) の申請課題、「メタバース加速器博物館の充実とその利用」として課題採択され、予算を得ている。

2. メタバース加速器博物館

2.1 2024 年度までの状況

多数の加速器施設展示室を収容可能な「メタバース加速器博物館の玄関ホール」と、「KEK 教育加速器 (KETA)」およびそれが収容されている KEK ERL 開発棟を模擬した実験室をメタバースの中に再現し公開した。KETA には加速器本体のカットモデルがあり、物理シミュ

michihiro.furusaka@kek.jp

レーションの結果を使い詳細なビームアニメーションとして再現している。2024年9月7日(土)にKEKの一般公開、2024年10月27日に「青少年のための科学の祭典第29回広島大会」、2025年02月15日(土)に広島大学で「小学校から使える理科教材ワークショップ(X) -第28回物理教育研究会-」が開催された。それぞれ200人前後の幅広い年齢層の方々に体験してもらい、高い評価を得ている。

また、それまで筑波大 放射線・アイソトープ地球システム研究センター応用加速器部門 UTTAC で開発されてきた6MV タンデムの Unity VR model をベースに、VRChat のワールドとして使えるように手直しを行なった。Figure 2 に示すように、加速器室を再現し、各種の配管などを設置し、最終的にメタバースとして照明などの光としての雰囲気を作ることで、3次元のVRモデルではあるのだが、メタバース独特の雰囲気を出すことに成功している。また、加速器本体の入っている高圧タンクに関しては、担当の職員ですら保守の時を除いてその中を見ることはほとんどないが、メタバースワールドの中では Fig. 3 に示すようにいつでも中を詳細に見ることが可能である。

2.2 多くの加速器施設のメタバースワールド開発

2025年度には前年度に作成した筑波大 UTTAC の6MV タンデムをブラッシュアップし、6月には公開した。Fig. 2 にその全貌を、Fig. 3 にそのタンデム加速器本体圧力容器内部の様子を示した。これに引き続き、Fig. 4 に示した広島大学の放射光施設 HiSOR、Fig. 5 に示した愛知シンクロトロン AichiSR についてはすでに VRChat ワールドとして非公開の形で作成されており、施設の説明パネルなどが出来次第公開の予定である。なお AichiSR は(公財)科学技術交流財団が主体となって運営する施設で、名古屋大学もその一員である。

スーパーカミオカンデについてはすでに VRChat とは別の Cluster と呼ばれるメタバースで公開されている。これを VRChat として新たな形で公開の予定である。その

際に関連するものの展示室などを新たに公開予定で、完成度の高い博物館となりそうである。

その他に分子研 UVSOR、北大電子加速器中性子施設 HUNS などは、加速器とその先のビームラインなどを含めて開発中である。BELLE II に関しては米国 Virginia Tech の Leo Piilonen が Unity を用いて Belle II in Virtual Reality という教材を開発しており、そのモデルを VRChat に組込む合意が得られている。

大学関係だけではなく、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター(SAGA-LS)の放射光施設も独自にメタバースワールドを制作していて、その施設とも近々相互接続する予定である。

2.3 加速器関連企業との連携

加速器関連企業のメタバースワールド、様々な3Dメタバースモデルとその説明パネルなどをMAMに取り入れ、加速器を支える基盤技術の広がりを見せたいと考えており、企業の参加を募集しているところである。その第一歩として、既に非常に充実した VRChat メタバースワールドを開発している京セラ株式会社と協力し、2025年9月にはMAMと相互接続する予定である。この他にもメタバースワールドに展示室あるいは展示コーナーを作ることに関心を示している会社がある。メタバースワールドでどのようなものを作成・公開すればよいのか、例えば広報・人材のリクルートとしてどのような効果が得られるのかまだ未知数であるが、Web pageと同様、ある臨界点を超えると急速に発展して行くことが期待される。

2.4 相互接続の容易さ

Web 同様、他のホームページに link を貼るのと同様に、どこでもドアのようなドアを設定することで自由に別のワールドに飛ぶことができる。MAMの玄関ホールは現在1フロアに7個のワールドへのドアを持ち、それが3フロアあるが、これを拡張、あるいは既存のワールドへのリンクを作るのは容易である。



Figure 1: Current development status of the Metaverse Accelerator Museum.

2.5 加速器、施設、構成機器の説明

MAM では電子直線加速器、バンデグラフ、放射光リングなど様々な加速器が収容される。このため、それぞ



Figure 2: The complete layout of the 6 MV tandem accelerator at University of Tsukuba.

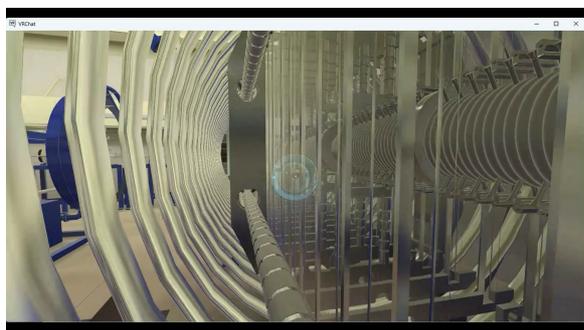


Figure 3: Inside structure of the 6 MV tandem accelerator at University of Tsukuba. The accelerator tube is shown in the righthand side and the pellet-chain at almost at the center.

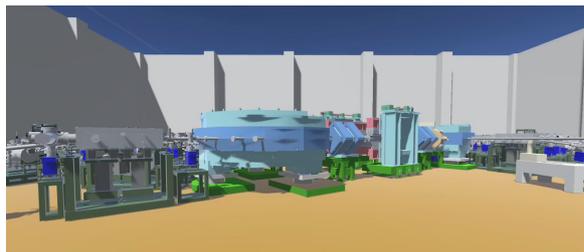


Figure 4: The HiSOR Synchrotron Radiation accelerator and beamlines at Institute for Synchrotron Radiation Science, Hiroshima University.

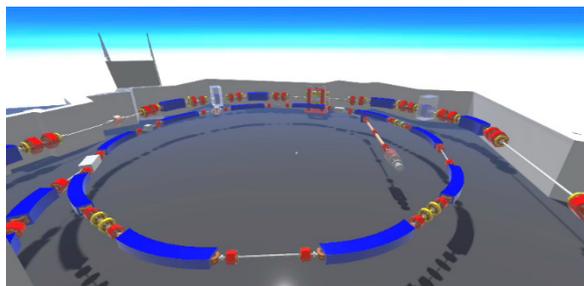


Figure 5: The accelerator for synchrotron radiation at Aichi Synchrotron Radiation Center. Nagoya university is cooperating the facility.

れの加速器の説明、研究成果などを端的にわかりやすく説明する必要がある。ポスター看板を標準化し、各加速器展示室に数枚置くこととした。VRChat の中ではテキストを表示させる処理が重くなるので、あらかじめ png などのピクセルデータに変換したものを表示させる仕様としている。

さらに VRChat の中では信頼できる URL からの動画を表示することは可能なため、URL を入力することで動画を流す仕組みを置いている。この中で幾つかの広報ビデオ的なもの、あるいは説明の動画を表示できるようにしてある。

常時展示されている加速器を構成する各機器の説明は必須である。KEK 教育加速器 KETA では周辺の机に幾つかのボタンがあり、それを押すことで対応する機器の周りが光り、説明が音声とテキストで聞けるようになっている。しかし、この方式は自由度があまり無いため、近づくとその部分が青く光り、それをクリックすることで説明が出る仕掛けを開発中である。これにより非常に多くの機器、部品の説明を入れることが可能になる。

2.6 ビームアニメーション、動く部品のアニメーション

KETA では物理シミュレーションに基づいたビームアニメーションを実装している[1]。データは事前に計算し、ファイルに収めている。アニメーション表示にはシェーダーと呼ばれる GPU で独立に動作するプログラムを用いてそれを実現している。シェーダーとは 3 次元空間内のメッシュモデルを変形させ、表面の表現を作成し、それを物体の奥行きや陰影などを考慮しながら描画を行う、といった一連の流れを念頭に動作するプログラムである。様々な方式、ライブラリがあり、しかも GPU に依存しているため、その開発はかなり難しい。特に VRChat、特に VR ゴーグル向けのプログラムでは使えるシェーダーの制限がかなり厳しく、特に難しい。

今回公開したタンデム加速器では、ペレットチェーン、荷電変換フォイルの交換機構、プラズマが灯っているなど、動きを見せることが重要な部品が幾つかある。このため、これもシェーダーを用いたプログラムを開発しており、プロトタイプは完成している。

筑波大のバンデグラフ加速器のビームシミュレーションに関しては、現在加速器の引き出し電極の形状、パラメタ、偏極磁石・集束磁石などの形状・配置などのパラメタを収集中で、それらを元に物理シミュレーションを行う予定である。また、その結果を元にシェーダーを用いた標準的なビームアニメーションができるプログラムを開発中である。

3. VR 加速器シミュレーションキット

3.1 VR 加速器シミュレーションキット(AcceleratorSim)

AcceleratorSim は電子ブロックおもちゃのようなもので、あらかじめ作成してあるイオンソース、電磁場を定義した直方体などのブロック加速器のパーツを置き、パラメタを調整すると荷電粒子の動きが 3 次元・リアルタイムで見えるものである。すでにイオンソース、一様電磁場、四重極磁石、RF 電場などのモジュールがあり、四重極磁石による集束、サイクロトロンシミュレーションなどができるようになっている。モジュールの開発はまだ初期段階で、

様々なモジュールをオープンソース的に開発したいと考えている。

これはUNITYというゲーム作成プログラム環境で作成されている。これは3D VR開発環境で、重力などの影響下での物体の運動のシミュレーションなどができる非常に柔軟な環境である。これを使い、ChatGPTなどでC#のプログラミングを作成することで、従来考えられないほど簡単に加速器の3Dシミュレータを作成できる。

例えば荷電粒子には電磁場下での相対論的運動方程式を貼り付けている。そこで必要となる電磁場の情報を与えるのは直方体のオブジェクトで、そこにも電磁場を供給するC#スクリプトが貼り付けてある。必要があれば電磁場形状、分布なども関数として入れることが可能である。

UNITYは基本的には画面更新のタイミングで物理計算をするため、通常60fps(毎秒60回画面を更新)程度で時間的揺らぎの多い計算ステップになるが、10ms毎など定期的に計算をすることも可能である。また、数値計算ライブラリは基本的に単精度浮動小数点演算を行なっている。特にGPUを使う際に倍精度にするにはかなり特殊なことをせざるを得ず、現状ではあまり現実的ではない。

一例としてFig. 6に1台の四重極磁石によるビーム集束の様子を示した。磁石を出た後で線状に集束しているのが分かる。実は四重極磁石のように見えるのは単なる3次元のモデルで、磁場勾配はそれを囲むような直方体の中で定義されている。また、見やすくするために出射ビームの発散角はかなり大きく設定されている。

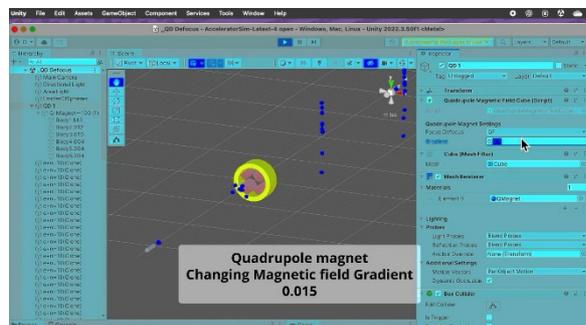


Figure 6: Beam focusing simulation by single quadrupole magnet.

VRゴーグルを単体で使う場合、粒子数が数十のオーダーを超えるとかなり遅くなる。しかし、GPU付きのPCで計算をさせ、それをそのまま、あるいはVRゴーグルに接続して見るような使い方であれば、CPU-GPUの能力に応じた計算及びアニメーションが可能になる。

Figure 7はタブレットでビームは点状に集束しているが、最初の四重極磁石が水平、垂直にずれていて、ビームが曲がって出ていく様子が分かる。これはUNITYの編集機能を使っていて、図の中の矢印を動かすことにより、実時間でその変化の様子を観測できるようになっている。

また、Fig. 8にはサイクロトロンを構成するために、垂直にかかった一様磁場の直方体の中に高周波加速する薄い直方体を重ねて入れたもののシミュレーションである。磁場と高周波のパラメータを正確に計算して入れれば螺旋

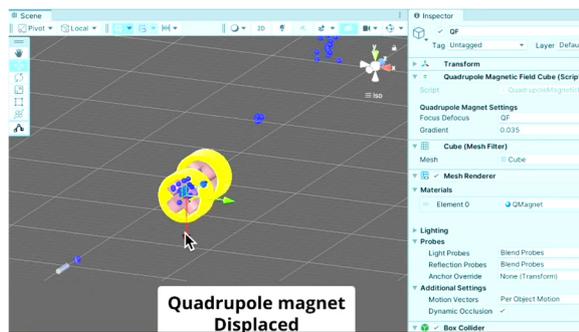


Figure 7: Beam focusing by two quadrupole magnets. The first one is displaced in horizontal and vertical direction.

状に加速される粒子群を見ることが出来る。

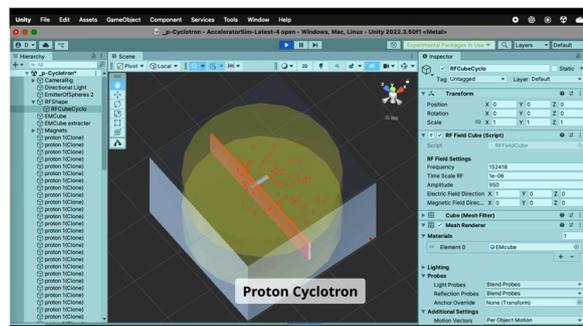


Figure 8: Proton cyclotron setup. White cuboid is the magnetic field defined one, and the overlapped orange slab is the RF field. Proton beam is injected from the gray pipe at the center.

このようなシミュレーションの中では、物理現象が起きているpsから μ sの時間領域を、我々が見て理解可能な時間s領域に変換していて、そのスケーリング・パラメータも実時間で自在に変えることができる。その設定は手計算レベルで当たりをつけるようなことが必要で、それだけでもかなりの教育効果がある。例えばサイクロトロン共鳴周波数なども正確に計算して入力しなければ適切なアニメーションにはならない。例えば電子と陽子では全く違った振る舞いをしたりするのがよく理解できる。

現在 AcceleratorSim のマニュアル・簡単な教科書を作成中で、最終的には16コマの大学の講義として使えるような物を作成したいと考えている。AcceleratorSimを教材として使うことで、例えば大学の1-2年生の授業として、あるいは高専の学生などの教材として電磁気学、加速器科学などの基本的知識を得る場を提供できると考えている。

また、AcceleratorSimの主なターゲットは高校生・大学生であるが、ゲームとしての事前準備さえ用意すれば小学生でも遊べる。それを実現するため、VRChatワールドとして加速器シミュレータの幾つもセットアップを持つ展示室を作成しようとしている。

3.2 力覚デバイスで時間変化する電磁場を感じる

荷電粒子が電磁場からどのような力を受けているか、それを指で感じられたらこれまでに無い触覚という次元を一つ追加できる。2024年度からそのような興味で、力覚デバイスを手で握り、その先につけられた3軸のアー

ムで人差し指に三方向の力を加えるような力覚のデバイスを開発中である。すでに PC 上の UNITY 環境で動作するプロトタイプは完成しているが、さらにそれを VRChat の中の電磁場を指で感じられるような物として開発しようとしている。これは PC で動作している VRChat からの信号を PC 経由のインターフェースを通して機能させようとしているもので、PC に接続した VR ゴーグルで 3 次元の映像を見ながら、力覚デバイスで力を感じられるようにしようとするものである。

3.3 高専生によるゲーム発案

ゲームとして高校生などに興味を持ってもらうためにどんなアプローチをしたら良いのかについて、高専生を交えて数度のブレインストーミングも行った。ゲームとして楽しいものと我々が開発をしているものの間には相当の距離があり、今後どんなアプローチをしていけば良いのか色々考える良い機会となった。

3.4 バーチャルワールド作成の方法

現在、VR の開発をするのに最も普及しているのは UNITY という VR 開発環境・フレームワークである。これは商用のゲーム開発などにもかなり使われているものである。VRChat のワールドを作成するためには UNITY に VRChat 用のモジュールをインストールし、そこで 3D モデルを作成、UNITY の C# スクリプトフレームワークのサブセットに近い環境でベースのプログラミングを行う。VRChat 固有のスクリプト、UdonSharp を使う。UNITY のモジュールには VRChat 環境のエミュレータもあり、そこで試験ができるようになっている。この環境で Windows PC の VRChat アプリとして、あるいは Android 携帯、ほぼ Android と同じ環境である Oculus Quest 3 ヘッドセット向けにコンパイルし、実行イメージを作成する。VRChat は現在 iOS 向けの環境がベータ試験状態で、2025 年夏には公開される予定であるが 2025 年 8 月の段階でまだベータ試験の状態である。また Mac では iOS アプリとして実行できるのではないかと推測されている。なお、UNITY は Windows PC、Mac、Linux で開発環境として

の利用可能であるが、VRChat の開発をするには Windows PC がほぼ必須である。

4. まとめ

VRChat のワールドとしてメタバース加速器博物館を製作中であり、順次公開が始まっており、それらは常時、世界に公開されている。KEK だけでなく、大学施設としての放射光用加速器など 10 台近い加速器の展示ホールを作成中である。企業のメタバースワールドとの接続も調整を進めており、将来的に多くの企業展示の場所として使うことを目指している。広報として使えるだけでなく、加速器科学の人材教育教材としても大きな広がりを持ちつつある。

さらに AcceleratorSim という VR 加速器シミュレーションキットではビーム加速、ビーム制御、加速器の原理などを遊びながら理解できるようなフレームワークを開発中である。

謝辞

KEK 加速器科学国際育成事業 (IINAS-NX) の支援を感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Furusaka *et al.*, “Metaverse accelerator museum for education and public relations”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2024, Yamagata, Japan, Aug. 2024, pp. 44-48.
- [2] M. Furusaka *et al.*, “高エネ機構における UNITY 上での VR 加速器開発-II”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, 2023, Funabashi, Chiba, Japan, 2023, pp. 620-622.
- [3] M. Furusaka *et al.*, “高エネ機構における加速器 VR コンテンツ開発”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), August 29-September 1, Chiba, Japan, 2022, pp. 984-988.