

小特集 高専におけるプラズマ・パルスパワーに関する地域産業との連携

7. 高専における加速器製作の取り組み

7. Making Accelerators at Colleges of Technology (KOSEN)

大谷将士, 熊谷勇喜¹⁾, 谷敷怜空¹⁾, 斎藤栄輔²⁾, 岡本恵太²⁾,
柳澤 有²⁾, 佐々井祐二³⁾, 三宅望々香⁴⁾, 長尾和樹⁵⁾, 平野進一⁵⁾
OTANI Masashi, KUMAGAI Yuki¹⁾, YASHIKI Riku¹⁾, SAITO Eisuke²⁾, OKAMOTO Keita²⁾,
YANAGISAWA Yu²⁾, SASAI Yuji³⁾, MIYAKE Momoka⁴⁾, NAGAO Kazuki⁵⁾ and HIRANO Shin'ichi⁵⁾

高エネルギー加速器研究機構, ¹⁾豊田工業高等専門学校, ²⁾長野工業高等専門学校,

³⁾岡山商科大学, ⁴⁾津山工業高等専門学校, ⁵⁾小山工業高等専門学校

(原稿受付: 2024年11月29日)

プラズマ・核融合分野をはじめとした様々な分野の基盤技術として, 利用・進化し続けている加速器技術だが, 加速器に対する世間の認知度は高いとは言えず, 高等教育課程において関連する技術や科学に実際に触れる機会も多くない. このような現状で, 持続可能な加速器科学の発展には, 次世代を担う人材の育成・発掘をめざしたプログラムの樹立が急務である. そこで, 高等専門学校(高専)スタッフと加速器分野の研究者が協力し, 高専で学生自らによる加速器製作を中心とした活動「AxeLatoon」が数年前に発足し, 現在, 4高専約40名の高専生が活動を行っている. 本記事では, 小山・長野・豊田・津山高専で実施している活動内容を紹介する.

Keywords:

accelerator, cyclotron, outreach, college of technology (KOSEN)

7.1 はじめに

20世紀初頭から現在に至る加速器科学の発展は種々の量子ビームの利用を可能にし, ヒッグス粒子の発見や量子線治療など人類の叡智を切り拓いてきた. 現在においても, 先端技術として基礎科学から様々な社会的問題の解決まで加速器技術は進化するとともに, プラズマ・核融合分野をはじめとした様々な分野の基盤技術として, その利用は拡大し続けている. 一方で, 加速器に対する世間の認知度は高いとは言えず, また, 高等教育課程において関連する技術や科学に実際に触れる機会も多くない. 持続可能な加速器科学の発展には, 加速器科学の次世代を担う人材の育成・発掘を目指した教育・アウトリーチプログラムの樹立が急務である.

そこで我々は, 高等専門学校(以下, 高専)において学生自らによる加速器製作を中心とした活動「AxeLatoon (アクセラトゥーン)」を開始した(図1は本活動のロゴマーク. 本活動メンバーについてHP[1]参照). 本プログラムでは, KEKや理研, 名古屋大学などの研究所・大学のスタッフが高専と協力して, 加速器分野の人材育成と加速器の知名度向上をめざして活動している.

本章の構成は以下の通りである. まず, AxeLatoonプログラムの構想と高専での加速器製作までの経緯を7.2節で述べる. 続いて, 7.3節では各高専での活動を紹介する. 最後に, 今後の展望とまとめをそれぞれ7.4節, 7.5節で述べる.

7.2 AxeLatoonの設立と活動準備

2019年度末に, 高専とKEKや理研の研究者からなるAxeLatoonコラボレーションを結成した. 我々は, 高専で高専生自らの手による加速器製作活動を通じて, 加速器分野の次世代を担う技術者・研究者の発掘・育成することを目的としている. 最終的には, 加速器製作活動を全国の高専に展開し, 高専生が作った加速器を競うコンテストを

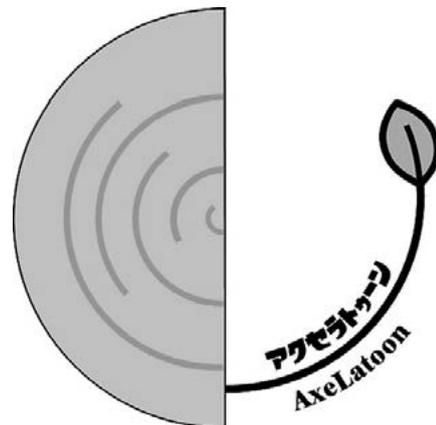


図1 AxeLatoonのロゴマーク. AxeLatoonという名前はAccelerator(加速器)とRatoon(新芽)に由来する. ロゴはこの名前に基づいており, 高専で製作しているサイクロトロン(加速器)のディー電極と, サイクロトロン(加速器)の粒子軌道をもしたものである.

開催することをめざしている。

高専は高校1年次から現場指向の高度な教育を行っており、これまでも様々な分野の優秀な技術者・研究者を輩出している。加速器科学は高周波や真空、機械工学、制御など様々な分野の技術が必要となる総合科学であり単科の教育でカバー仕切れない広い技術が要求されるが、電気や機械などの学科を有する高専生・高専スタッフが協力することで、加速器製作を行うことができると考えた。また、前述の通り加速器自体が総合科学であるとともに、その利用まで含めると素粒子原子核から化学や生物なども含めた全ての科学技術分野をカバーしていることから、本活動を通じて高専生が多様なキャリアパスを考える良いきっかけになると考えられる。さらに、本活動を通じて高専とKEKなどの研究所との連携を深め、加速器製作を通じて高専型のPBL (Project Based Learning) を加速し、高専における教育の質をさらに高めることができると考えられる。

また、高専生が作った小型の加速器を用いたワークショップ開催も検討している。高専生が作ったテーブルトップサイズの小型加速器を用いたワークショップを展開することで、世界的にもユニークな実際に加速器に触って遊べるアウトリーチ活動を実現する。また、各高専が各地域でワークショップを展開して地域との連携を深めることで、人材育成の循環を生むとともに、高専の地域での存在感を高めることができると考えている。

活動を開始するにあたって、当初からコラボレーションに参加し、加速器を専門とするスタッフのいる茨城高専で活動の準備を始めた。2020年度に入ってからすぐに茨城高専で加速器製作を進める予定であったが、COVID-19の影響で前期は現地での活動中止を余儀なくされた。そこで、2020年度前期は今後の高専での加速器製作手順の検討を行った。

加速器製作手順を確立するにあたって、数ある加速器スキームの中でサイクロトロン加速器を試作することにした。これは、サイクロトロン加速器が高校物理の範囲内で理解可能で大学入試問題にも度々用いられる良い教材である事と、既にコラボレーションメンバーの一人が自宅で小型サイクロトロン加速器を製作し[2]、スタッフ間で製作手順がある程度共有できていたことが理由である。

2020年度後期には、茨城高専において加速器製作活動や加速器の原理・利用などを紹介する説明会を計4回行った。本科・専攻科の学生30名程度が参加し、当時の本科生3年生が中心となって2021年度には加速器製作活動を開始した。残念ながら、主要メンバーが就職活動などで多忙になった2022年度後半から活動を停止しており、メンバーの世代交代は今後の他高専における持続的な活動においても課題であることが明らかとなった。

茨城高専での活動と継続して、様々な高専で本活動の説明会を実施し、いくつかの高専で活動を開始した。2021年6月には小山高専で本科1年生を対象にした説明会を開催し、それをきっかけに7名の学生で活動を開始した。長野高専でも2021年12月に現地説明会を行い、それがきつ

かけとなって2022年には同好会が設立した。津山高専でも2022年4月に説明会を行い、2023年度から加速器をテーマにした授業[3]で学生による加速器製作活動が行われている。他の高専が部活動・同好会形式で放課後に活動を行っているのに対し、津山高専では授業で加速器製作を行っているのが特徴的である。2022年度末には活動HPを見て興味を持った豊田高専生から問い合わせがあり、リモートで説明会を実施し、2023年度には豊田高専でも活動を開始した。各高専で製作している加速器はいずれも手のひらサイズであり、小電流で加速エネルギーも低いことから放射線も発生することなく安全が確保されている一方で、高周波や高電圧も扱うので、学生が思わぬ事故や怪我に遭遇する可能性はある。製作活動においては「(修理費は痛い)操作ミスで機器が壊れるのも経験のうち」としてなるべく学生の自主性に任せつつも、怪我の無いように常にスタッフ・教員が注意を払い進めている。

次節で、各高専での活動の詳細を紹介する。

7.3 各高専での活動

7.3.1 小山高専

小山高専における本プロジェクトは、2021年7月から始まった。当時1年生の本科生12名(機械/電気電子/物質材料工学科)がAxeLatoonスタッフの協力を得て、サイクロトロン加速器製作に向けた設計を開始した。3D電磁界解析ソフトCST Studioによる磁場分布シミュレーションや粒子軌道計算を行い、製作に向けてチャンバーの設計を進めた。2022年春からは加速器のチャンバー本体の製作を開始し、それと並行してフィラメントやその駆動回路、水素ガスなど、周辺機器の準備も進め、7月頃から真空ポンプやRF発振器をチャンバーに接続、真空引き試験やRFチューニングを確認、2023年1月に稼働を開始した。図2に加速器チャンバー内部の様子と関連機器の全体像を示す。加速器の運転実験を繰り返し、チャンバー内部のディテクタが何らかの粒子をキャッチして電流として計測できはじめてきたが、所望のイオンビーム初観測にはまだまだ微調整と時間が必要ではあるが、確実に進んでいる状態である。

本校では2021年に活動を開始し、放課後に有志メンバーが集まって活動していたが、2023年10月には正式な愛好会として発足し、2024年度からは本活動に興味を持ってくれた多くの1年生も加わり一緒に活動を行っている。学生は3Dプリンタを用いて細かな部品を製作するなど、柔軟なアイディアで製作を行っている。また、本校のプロジェクト経費の支援(2023/2024年度)を得て、3DプリンタとLEDで視覚的にサイクロトロン加速器を理解できる教材や、様々な粒子加速の原理をあそびながら理解できる教育教材の開発も学生主体で並行して取り組んでいる(図3)。

これらの活動の成果は物理学会Jr.セッション(2021/2022/2023年)や国際会議STI-Gigaku 2023(ベストポスター賞受賞)での発表を行ってきたほか、KEK dayにおける活動紹介や、Maker Fair Tokyo(2022/2024年)

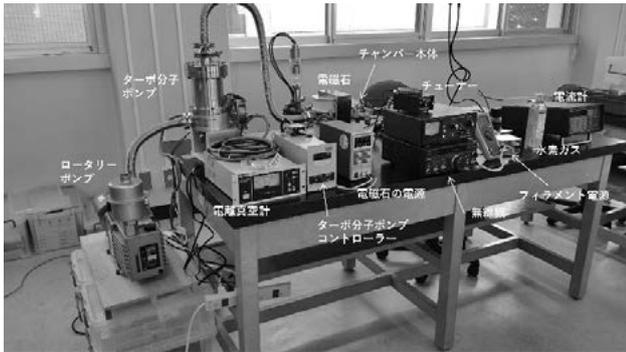
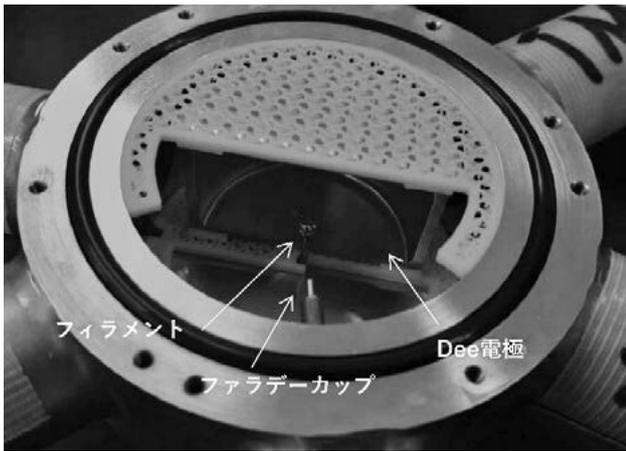


図2 小山高専で製作中のサイクロトロン加速器の(上)チャンパー内部の様子、(下)全体写真。3Dプリンタでディー電極上下のメッシュ状の板を作製し、その板で電極とフィラメントを固定していたが、加速電界の加わり方を考慮して、今は別の形にしている。



図3 ガウス加速器を利用したボーリングゲームの様子。2024年のKEK施設公開で展示した。小さな子ども達に好評であった。

への出展（2024年は長野高専のかそ☆けんと合同で出展）など積極的に校外へ広くアピールしている。これらの活動の成果もあり、2024年10月には愛好会から同好会へ昇格、ロボコン/プロコンと並び、本高専を象徴する学生活動として校内での認知が広まってきた。また中学生を対象とした高専説明会やオープンキャンパスでは本活動紹介で興味を持ってくれる中学生も多く（保護者も）、中には「この活動をやりたいから頑張って勉強して高専に入学する」と言う中学生も数名いた。さらに、東北大や東大の物理サークルの見学や、民間企業からの興味関心も高く、製品開発に使えないかと相談も複数件あった。

本活動は加速器製作を通じて技術者としての作り能力を向上させる一方、目の前の現象の物理を純粹に「楽し

む」という側面もある。それだけでなく、講義の学修単位の導入や講義内容の圧縮（いわゆるスリム化）が進む高専教育において、“予期せぬ失敗”や“意図せぬ成功”を学生が経験できる数少ない機会であると感じている。実際に起こった“予期せぬ失敗”の一例を挙げると、「大気中でフィラメントに通電するとどうなるのか」があった。チャンパー内の真空が引けていないのに、フィラメントに通電してしまったために生じた。この時フィラメントは非常に強い光を放ち、わずか1.5秒程の短い時間で燃え尽きてしまうわけだが（図4）、学生らには強烈な記憶として残っている。普段の講義や実験では体験できない（体験させられない）、予期せぬ失敗と成功を通じて様々な経験を深く積むことができ、技術者教育として有益な活動となっていると言えるだろう。

7.3.2 長野高専

2022年7月に加速器研究同好会を結成し、現在は実働12~14名程度で活動している。新入部員の1年生2名も加わり、継続的な活動をめざすことができている。最近の活動内容は、1)長野高専オリジナルの加速器真空チャンパーをCADでデザインしながら、2)どのような部品をいかに組み合わせて製作するかについて議論し、3)実現可能と考えられるサイクロトロン加速器の粒子軌道を計算したり、Geant4を用いた一様磁場中での電子の円運動についてのシミュレーションをしたりしている。活動進捗について毎年文化祭でアピールするなど、活動をさらに活発化し、より多くの部員を入部させたいと考えている。

つぎに最近の長野高専の活動についてハード面とソフト面に分けて報告する。

(1) ハードウェア開発について

機材については電磁石、ターボ分子ポンプ、ロータリー真空ポンプなどがそろっており、あとは高周波電源とチャンパー本体、真空計などがそろえば実験を始められる状態である。現在は真空チャンパーとDee電極をCADにて設計しており、厚さを薄くする、パイプの位置を考える、などの工夫をしながら設計している。この工夫によって出力や作業性の向上をめざしている。

また、電磁石やターボ分子ポンプ、ロータリー真空ポン

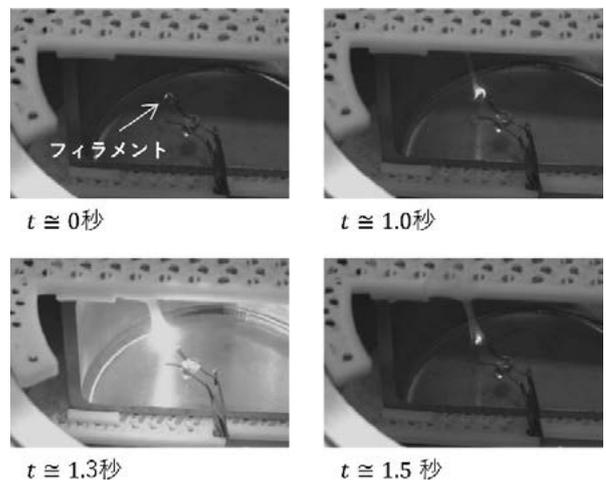


図4 大気中でフィラメントが燃焼する様子。

プなどの動作確認を2024年度内に行い、機器が十分に動作しているか確認する予定である。動作確認をした後は一部機材を製作した真空チャンバーや回路構成と合うように改造する予定である。2025年始めには実験を行えるようにしたいと考えている。

(2) ソフトウェア開発について

サイクロトロン加速器の設計のためのシミュレーション班を結成し、Geant4を用いたシミュレーション環境を作成している。これまでのGeant4シミュレーションにより、一様磁場および時間変化する高周波電場を通過する陽子の加速運動を確認することができた(図5)。現在はこの陽子の平均自由行程を求めるためのデータ解析の方法を考案して作成している。

7.3.3 津山高専

津山高専では2023年度から授業として卓上静電型加速器の実現へ向けた活動を進めている。2023年度の3年自発的学習科目「全系横断演習Ⅰ」では、先進科学系の学生3名が週1時間半ずつ演習テーマ「津山高専で加速器を作っちゃおう」に取り組み、調査・設計(電子回路・電界シミュレーション)・製作・真空度試験を行った[3]。この3名は、引き続き2024年度4年前期の自発的学習科目「全系横断演習Ⅱ」において、検出器検討・ビーム観測をめざした活動を行った。

電界シミュレーションの結果、加速部としてアクリルパイプは長さ35 cm・外径56 mm・厚さ3 mmとし、電極は銅テープ(厚さ0.035 mm)2巻きを9本、電極間を高電圧用5 GΩの抵抗8個で繋いだ。加速電源としては、安価に入手できる400kV出力のテスラコイルを利用することとした。当初は検出器として既存の霧箱の利用を考えていた。

2024年1月17日より、真空ポンプで空気引きを始め、空気漏れ箇所の特定と接着剤の補填を行った。3月7日には 1.58×10^{-2} Paに減圧し、豆電球フィラメントに電圧3 Vを印加させ、図6のように安定的な発光を観察した。

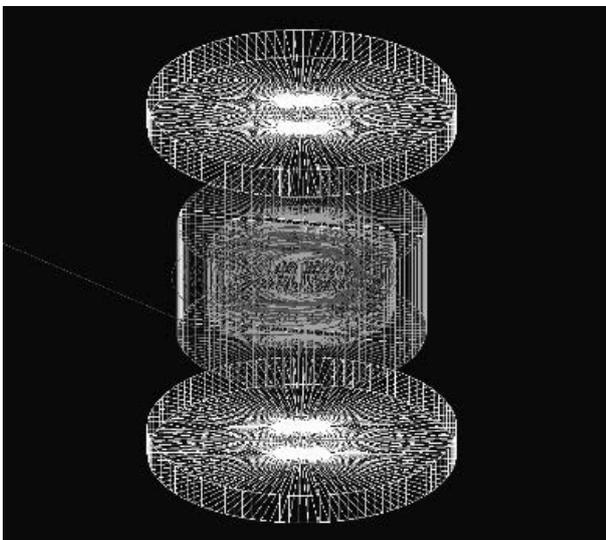


図5 Geant4を用いた陽子のサイクロトロン加速のシミュレーション(青線:陽子の軌道)。

加速電圧次第であろうが、 β 線が出口アクリル板と霧箱チャンバーを通過するという確証がなかった。そこで β 線も観察可能な秋吉式ベルチェ霧箱導入の他に、クルックス管類似で電子ビームをガラス板に照射する蛍光観察を考えた。加速電圧が10 kV程度までであればX線の影響は少ない。そこで、アクリル板内側に貼ったガラス面の半分に硫化亜鉛ZnSを主成分とする夜光蓄光顔料を塗布した検出用ZnSショートフランジ(図7)も製作した。

使用予定のテスラコイルのパルス出力が交流であることが6月18日にわかった。そこで6月24日に 1.74×10^{-2} Paまで減圧し、1.5 Vで豆電球フィラメントを弱く発光させ、ナリカ社高圧発生BOX WMS-001にてDC5 kVを加速部に印加したが、検出用ZnSショートフランジの蛍光の有無は分からなかった。使用した蓄光顔料の蓄光効果が大きく、フィラメントからの光が影響した可能性がある。

今後は、蓄光顔料の種類および冷陰極を検討し、検出用ZnSショートフランジによる蛍光の観察、直流出力テスラコイルあるいはコッククロフト・ウォルトン回路により高電圧で加速した高エネルギー電子線を真空窓経由で秋吉式ベルチェ霧箱に入射させ、X線に留意しながら β 線の観察をめざしたい。

7.3.4 豊田高専

豊田高専では、2023年3月からAxeLatoonの活動に参加している。機械工学科、電気・電子システム工学科、情報工学科の学生からなる7人のメンバーが、同好会の形で放課後に課外活動として週に2回程度活動している。この活動を始めた経緯は、当時高専2年生の学生が本活動のHPを見て、サイクロトロン加速器や真空装置、高周波電



図6 豆電球フィラメント点灯実験の様子。



図7 ZnS ショートフランジ。

磁場などの普通の高専生活では見慣れない、魅力的で心躍る世界に惹かれ参加してみたいと思い、友人や教員を巻き込んで開始した、という学生主体の活動である。

開始した2023年当初は、メンバー全員が加速器の原理や用途について学ぶため、豊田高専近隣の加速器施設の見学を行った。あいちシンクロトロン光センターと、名古屋大学のダイナミトロン加速器施設を訪問し、それぞれ研究者から説明を受けた。メンバーの一部は加速器に関する知識がほとんどなく活動を始めたため、実物の加速器を見てその巨大な施設の運用やエネルギーの大きさ、超高真空、応用研究について知り、加速器のイメージを持つことは、この活動には不可欠な経験であった。

次に製作活動について述べる。KEKから小型真空チェンバー、ロータリーポンプ、ターボ分子ポンプなどの真空系や、電磁石、テスラメータ、無線発信機、ベクトルネットワークアナライザなど磁場、電場を発生する機器を借用し、一つ一つの役割を勉強し特性を調べた。参照した資料は参考書やWebの他、先行して活動している他高専のアドバイスも得ながら学んでいった。特に高周波電場のチューニングについては、小山高専のメンバーが詳細な手順書を作成しており、それに沿って調整すれば反射波が0にできる。また真空系の全体設計についてKEKや大学、他高専の研究者より助言を受けながら進め、必要な配管等を手配し製作した。現状では、例えば到達真空度については約1時間で 1.9×10^{-2} Paまで真空引きすることができている。

次に、加速器としては異色ではあるが、部員勧誘用の実験装置の製作について述べる。新入部員を勧誘するため見栄えの良い実験装置を新しく製作することにした。見た目のインパクトを重視し、光を発すること、身近な道具を使うこととした。調理用のステンレス鍋を真空容器として使い、その中にタングステンのフィラメントと加速電極、そしてLEDを設置する。LEDの陽極側はGND電位に接続する一方、陰極側は電氣的に浮かせておく。フィラメントに電流を流し熱電子放出で飛び出した電子を電極間で加速させ、LEDの陰極に電子を衝突させることでLEDに電子電流を流し発光させるというものである。鍋と真空系配管との接続は、溶接するのは難しいため、浴室用コーキング材でシールすることを検討した。実験した様子を図8に示す。この実験により、到達真空度は 2.4×10^{-2} Paに到達することが確認できた。このときの平均自由行程は約27 cmであり、フィラメントとLEDの間隔をこれ以下にすれば真空度は十分である。現在、製作進行中であり、鍋に配管を接続した様子を図9に示す。このように真空用の専用部品ではなく身近な道具を用いるため学生の創意工夫の余地があり、興味深い実験テーマである。文化祭などの公開の機会に、フィラメントからの電子放出と、LED発光を実演できるよう今後も実験と製作を続けていく。

7.4 今後の展望

これまで述べた通り、4つの高専で既に加速器製作活動が進んでいる。また、各高専間の交流も活発に行われてお

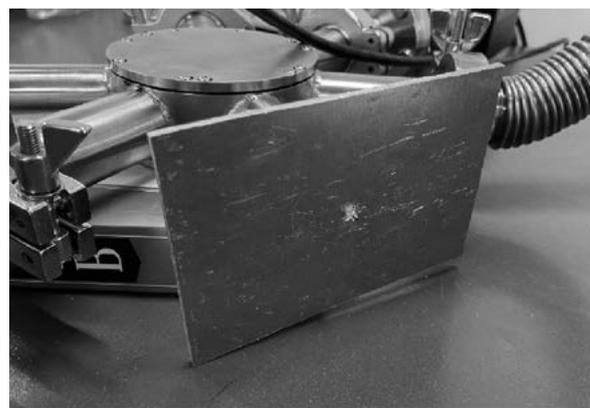


図8 浴室用コーキング材を用いて、どこまで真空封止できるか検証した実験。アルミ板に直径2 mmの穴を開け、直径1.5 mmの銅の棒を挿入し、隙間をコーキング材で埋め、真空引きした。



図9 ステンレス鍋に穴あけ加工し、真空配管を接続した様子。

り、2023年2月には小山高専に当時の活動校である小山・長野高専の活動メンバーが集まって報告会を実施した。さらに翌年の2024年2月には小山・長野に加え豊田高専も加わって小山高専で報告会を実施、2024年7月にはオンラインでの報告会を実施した。オンライン報告会には、並行して説明会を実施し活動に興味を持った沖縄・呉・群馬高専の先生・学生が参加し、沖縄高専では具体的な活動準

備が進んでいる。本活動は全国の高専の先生が意見交換を行う KOSEN フォーラムでも活動を報告しており[4]、全国展開に向けた準備を進めている。将来的に各高専で自主的に高専生が加速器について学べるように、星野進学ゼミの佐藤徳弥氏と協力して「高1から始めるサイクロトロン」動画資料を作成している[5]。

本活動は加速器関係の企業関係者からも注目されており、住重加速器サービスと活動協力を検討している。既に、香川高専・新居浜高専では、2024年2～3月に、医療用加速器などの製造を手掛けている住友重機械工業株式会社新居浜工場・西条工場の見学会を実施した。2024年度も同時期に工場見学を予定しており、既に香川高専で住友重機械工業株式会社の加速器技術担当者による加速器に関する講義が行われた。

2022年12月にオンラインで行われた国際会議 CYC2022 において我々の活動を報告した際、コーブルク大学（ドイツ）で教育用小型サイクロトロン COLUMBUS を製作し高校生に向けたワークショップを行っておられる C. Wolf 先生に強い関心を持っていただいた。この縁で、AxeLatoon コラボレーションメンバーの一人が2023年5月にコーブルク大学を訪問し、COLUMBUS グループとの意見交換を行った。日本とドイツで教育システムの違いなど若干の障壁があるものの、これを足がかりとして、より具体的なコラボレーションの検討を開始した。また、COLUMBUS グループによる教育用サイクロトロンの教科書[6]の日本語訳についても快諾を得ており、出版に向けての準備を進めている。今後の展望として、高専生のコーブルク大学訪問、ドイツからの訪問受け入れ等による

相互交流の発展を計り、本活動を通して技術や知見を身につけた高専生たちが、さらには国際的な人材へと成長できる環境を整備していく。

7.5 まとめ

次世代の加速器技術者・研究者の育成をめざした高専での加速器製作活動を2019年度から開始し、茨城・小山・長野・豊田・津山高専で活動を行い、更なる全国展開に向けた準備も進んでいる。持続可能な活動と最終的な加速器コンテストの開催には、高専、大学、研究所、企業と産学を巻き込んだ活動展開が必要不可欠であり、企業との連携を準備している。

もし本原稿を読んで興味を持っていただければ、本活動のパンフレットとロゴマークのステッカーを送付するので、お気軽に大谷までご連絡いただきたい。本報告を通じて、加速器製作のメンターなど一緒に活動していただける仲間が増えることを願っている。

参考文献

- [1] <https://www2.kek.jp/axltn/about/>
- [2] https://makezine.jp/blog/2019/08/mft2019_report_01.html
- [3] <https://www.tsuyama-ct.ac.jp/images/oshirase/renraku/zenkeioudan/2023/s-sasai.pdf>
- [4] 服部綾佳 他, 「茨城高専における加速器製作プロジェクト」, 令和2年度 KOSEN フォーラム2021年3月3日.
- [5] <https://www2.kek.jp/axltn/videos/>
- [6] M. Prechtel and C. Wolf, *Das Lehr-Zyklotron COLUMBUS* (Springer Spektrum, 2020).