

KEK iCASA における陽電子源開発の進捗 STATUS OF POSITRON SOURCE DEVELOPMENT IN KEK iCASA

榎本嘉範, 福田将史, 森川祐, 佐藤幹

Yoshinori Enomoto *, Masafumi Fukuda, Yu Morikawa

Motoki Sato

KEK Accelerator Laboratory

Abstract

Intense positron source is one of a key component for next electron positron collider. KEK iCASA positron group started design and prototype development of a new positron source from 2022 and 2023 respectively. Design parameters are chosen based on the requirement for the ILC but technologies developed through the project will be applicable to other broader high power machines. This report describes overall progress, present status and future plan of the positron source development.

1. はじめに

KEK iCASA では ILC 等の次世代電子陽電子コライダーで必要となる大強度陽電子源の開発を進めている [1]。全体設計を 2022 年度から開始し、2023 年度からは技術開発およびプロトタイプ制作を進めている。本稿では開発の現状、進捗、今後の予定等について述べる。

2. 開発中の陽電子源の概要

陽電子の生成は通常加速器した電子ビームを重金属標的に照射し、対生成を引き起こすことによって行われる。作られる陽電子の数は入射する電子ビームのパワーにおおむね比例するため、より多くの陽電子を得るためには、よりハイパワーな電子ビームを標的に照射する必要があるが、標的の熱的、機械的、耐放射線的性能によりリミットがある。また多くの他の 2 次粒子源と異なり、生成された陽電子は捕獲、加速する必要がある、標的直後に加速管を配置する必要がある。あわせて 2 次粒子ビームの品質にも様々な要求が課される。ILC では目標 Luminosity を達成するために、 $131.2 \times 10^{12} e^+/s$ の陽電子を供給する必要があるとされているが、これは現在稼働中の最も強力な陽電子源である SuperKEKB の陽電子源の性能が $2.5 \times 10^{12} e^+/s$ であることと比べると、非常に高い目標である。そのためよりハイパワーな入射ビームに耐え、より高効率な捕獲を実現するために、様々な技術開発が必要となってくる。但し、SuperKEKB の陽電子源と ILC の陽電子源では、バンチ構造が大きく異なるため、単純にその困難さを比較することはできない。Table 1 に両者の詳細を示す。

3. 開発の進捗

初めに全体設計について述べたあと、重要なコンポーネントである回転ターゲット、フラックスコンセントレータ (FC)、加速管、交換機構について概要、設計、試作、試験の状況等を紹介する。加えて上記 4 点以外の開発状況についても最後に述べる。

Table 1: Comparison of Parameters on Positron Sources for SuperKEKB and ILC

Project	SuperKEKB	ILC
e^- beam on target		
energy (GeV)	3.5	3
bunches per pulse	2	66
repetition (Hz)	50	100 (300) ¹
beam power (kW)	3.5	74
e^+ beam after Dumping Ring		
N_{e^+} / N_{e^-}	0.4	>1
bunch charge (nC)	4	3.2
number of positron ($10^{12} e^+/s$)	2.5	131.2

3.1 全体設計と方針

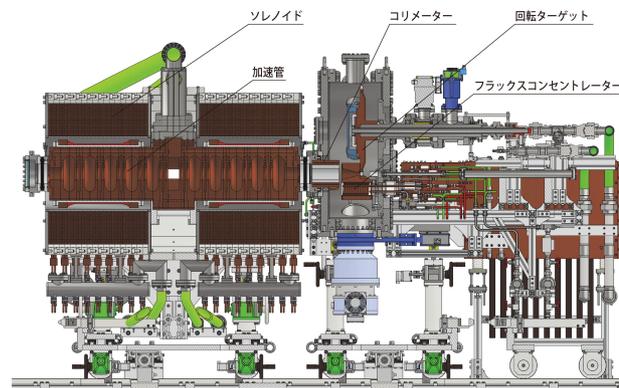


Figure 1: Cross sectional view of the positron source prototype under development in KEK iCASA.

Figure 1 に開発中の陽電子源の断面図を示す。陽電子源は陽電子を作るターゲットに加えて、できた陽電子を捕獲、加速するための、FC、ソレノイド、加速管などからなる。断面図からも分かる通り、狭いスペースに多数の機器が配置されており、しかも僅かなレイアウトの変更が性能に大きな影響を与える。したがっ

* yoshinori.enomoto@kek.jp

て各コンポーネントの開発だけでなく、全体の成立性を担保するための、全体設計が重要である。製作可能なレイアウトに基づいたシミュレーション、性能評価を行わなければ、意味のあるものとならない。そこで我々は試作一号機として、性能の追求よりも確実に作れることを重視した保守的なレイアウトを採用している。そのうえで現設計に基づいたシミュレーションを行い、改良の方向性を検討して、二号機以降へつなげる戦略を取っている。

3.2 回転ターゲット

3.2.1 設計

ILCでは3GeV、74kWの電子ビームがターゲットに当たることが想定されている。そのうちターゲットへの熱負荷は約17kWと見積もられている。また直後に加速管があり、超高真空 (10^{-6} Pa 台) 環境下での動作が必要である。これらを満たすために高放射線かつ超高真空環境下で運用可能な水冷回転ターゲットの開発を進めている。Figure 2に3Dモデルの断面図、Fig. 3にFCとともに真空チャンバーに組み込んだときの写真を示す。

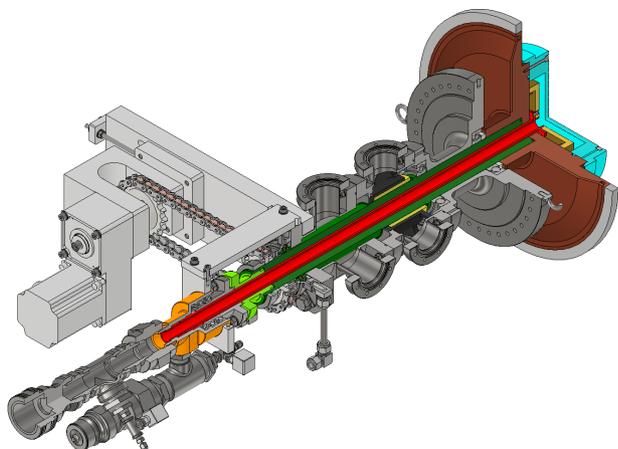


Figure 2: Cross sectional view of the rotating target.

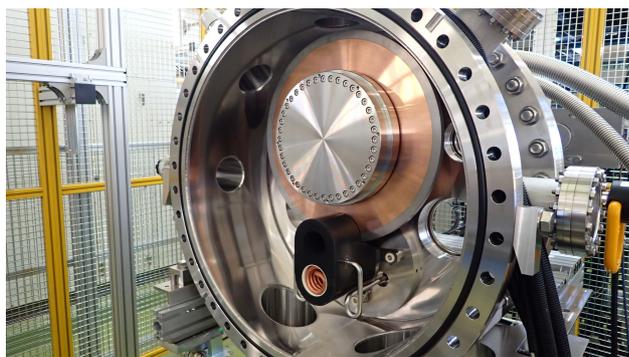


Figure 3: The rotating target assembled in the vacuum chamber with the flux concentrator.

回転機構 冷却水を通しつつ、超高真空を保って回転を伝えることが開発課題である。また放射線環境下の

ため、有機物によるシールはできるだけ避けたい。そこで今回は極小隙間による2段の差動排気とSiC製メカニカルフェイスシールによるシールを採用した[2,3]。駆動はチェーンを用いた伝達系とし、モーター設置位置を変更しやすい設計となっている。モーターは1:15の減速比のギヤボックスと一体のブラシレスDCモーター(400W, 3500rpm)を採用した。ターゲットディスクの軸での目標回転速度である、225rpmをわずかに上回る233rpmを出すことができる。

ターゲットディスク ターゲットディスクは外径500mm、内径460mm、厚さ15.7mmのタングステンリングとそれを保持し冷却するための水冷機構をもった銅合金性ディスクからなる[4]。タングステンリングと銅合金製ディスクは液体窒素を用いた冷やしばめにて接合している。接合面の熱的接触が課題であり、シミュレーションとともに実験による評価を進めている。

3.2.2 性能評価

回転機構は2023年度に、ターゲットディスクは2024年度に製作を行った。2025年度は製作した回転ターゲットに対して、真空および熱的、機械的性能評価試験を進めている。

真空試験 到達圧力の評価、およびresidual gas analyzer (RGA)による残留ガスの成分分析を行った。約1週間の排気後、圧力は 1×10^{-5} Pa以下に到達した。また残留ガスの主成分は水であり、大気成分である窒素は10分の1以下かつ、回転の有無による差は見られなかった。一部費用や試験の容易さの観点からゴム製Oリングを使用している箇所があること、またチャンバ本体のベーキングを行っていないことが到達圧力や残留ガス成分を決めているものと考えられる。現在の圧力でも実運転に支障はない。さらに大気成分の圧力から、シール性能に関しては十分な性能を示しているといえる。

熱負荷試験 ビームによる熱負荷を模擬するために、タングステンディスク部に銅製のブロックを取り付け、そこにカートリッジヒータを挿入して加熱試験を行った。赤外線カメラを用いて、温度分布の測定を行い、測定結果から熱流束、接触部の熱抵抗を評価した。20kWのヒーター電力に対して、回転ターゲットの冷却水の流量及び水温上昇から約13.5kWがターゲットディスクへ伝わったと見積もられた。接触部の熱抵抗は事前に評価した計算値と2倍程度の誤差で一致した。これまでの試験により接合に実用上の問題はないものと考えているが、想定されるビームによる熱負荷は約17kWであり、これを上回る入熱での試験を今後予定している。

トルク測定 モーター駆動電源およびモータードライバの出力電力から回転機構のトルク測定を行った。回転数によらずトルクはほぼ一定で約9N・mであった。採用しているモーターの連続定格は約12N・mであり、連続運転に問題のないことを確認した。また回転数によらずトルクが一定という結果から、回転速度に依存する抵抗成分等がないことが確認できた。

軸剛性測定 ターゲットディスクとその直後に置かれる FC の隙間は、現在のところ 2mm で設計している。この距離が変わると陽電子の捕獲効率に大きな影響が出るとともに、最悪の場合ターゲットディスクと FC が衝突してしまう。また FC はパルスマグネットであり、この磁場とターゲットディスク上に流れる渦電流が作る磁場の反発力により、軸に力が加わることが想定される。したがって軸の回転精度および剛性は安定運転のために重要な要素といえる。そのため、レーザー変位計 (Keyence, LK-G500) を用いてディスクのブレ測定を行った。変位計はディスクの両面に設置し、測定結果の和および差からディスク自身の厚みの変動と軸のブレによる成分を分けて評価した。結果は厚みの変動が $\pm 30 \mu\text{m}$ 、ブレが $\pm 70 \mu\text{m}$ 程度であり、回転数を変えても振幅は変わらなかった。このことから回転に伴う共振の影響は無視できるものと考えられる。また距離 2mm に対して、最大 $\pm 100 \mu\text{m}$ 程度の振幅は 5% 程度の変動に相当し、陽電子の捕獲効率等に大きな影響はないものと予測している。

連続運転試験 これまでのところ約 1 ヶ月間の連続運転試験を行っている。今年度はモニター環境を整備し、様々なデータを長期間にわたり連続して取るためのセンサー、ソフト類の準備を進めており、2025 年 9 月頃より長期の連続運転試験を計画している

3.3 フラックスコンセントレータ (FC)

3.3.1 概要

フラックスコンセントレータ (FC) はテーパー上の内面を持った導体にパルス電流を流すことにより、緩やかに弱くなっていく磁場を作り出す装置であり、これまでの陽電子源でも採用されてきた [5]。ターゲットで生成された陽電子ビームは大きな角度広がりを持っており、これを後段の加速管のアクセプタンスに収めるために、位置広がり角度広がりの交換を行う必要がある。FC はそのような変換を行うマッチングデバイス的一种といえる。エネルギーアクセプタンスは磁場に依存するため、より強い磁場によって、より広いエネルギー範囲の陽電子を捕獲することが設計目標となる。Table 2 に SuperKEKB の FC と今回開発中 ILC 向けの FC の諸元を示す。

3.3.2 FC 本体

ILC では SuperKEKB の約 2.5 倍という非常に高い陽電子捕獲効率が求められており、より強い磁場、より広いアパーチャーが必要となる。またバンチ構造や運転の要請から、1 秒あたりの繰返し数は 100 pps であり、SuperKEKB の 2 倍となっている。これらを合わせると SuperKEKB に比べて一桁以上大きな Ohmic loss による発熱が想定される。この条件での運転を実現するために、水冷構造の強化、材料の見直しを行い、CST studio を用いた電磁場、熱連成解析による最適化を行った [6]。

Table 2: Comparison of Parameters of FC for SuperKEKB and ILC

	unit	SuperKEKB	ILC
peak voltage	kV	20	20
peak current	kA	12	35
repetition	pps	50	100 ¹
pulse width	μs	6	11 ²
entrance aperture	mm	7	12
peak magnetic field	T	3.5	5
peak power	MW	240	700
average power	kW	12	128
Ohmic loss on FC	kW	0.8	8.9

3.3.3 パルス電源

FC に電流を流すためのパルス電源も、要求性能の高度化に伴って SuperKEKB より大規模なものが必要となる。特にバンチ構造の要請から、パルス数は 1 秒間あたり 100 回であるものの、パルス間隔は 3.3 ms のため、より短い充電時間が求められる。そのため、充電負荷と電源内部での熱負荷を抑える目的で、コイルに溜まったエネルギーを抵抗へダンプするのではなく、コンデンサへ回収するエネルギー回収型のパルス電源の開発を進めている。

3.3.4 給電ライン

FC へのパルス電流の供給は SuperKEKB と同様、同軸ケーブルとブスバーを用いて行う。放射線によるケーブルの劣化を避けるため、ケーブルはある程度ターゲットから離れた位置で、ブスバーへ接続する必要がある。また SuperKEKB ではブスバーは空冷であったが、今回は 1 秒間あたりのパルス数が 2 倍、ピーク電流が約 3 倍となるため、ブスバーも面積が取れない部分は水冷としている。

3.4 加速管

3.4.1 概要

ターゲットで生成された陽電子をなるべく効率よく捕獲、加速するためには、加速管の位置を極力ターゲットへ近づける必要がある。一方でターゲットからのシャワーによる熱負荷の影響は加速管を近づけるほど大きくなり、ビーム off、on の状態によってより大きく熱の影響が変化することになる。今回の設計ではターゲット直後の加速管は約 20 kW のシャワーによる入熱があるものとし、その状態でも共振周波数のズレが許容範囲となるよう、冷却構造の設計を行うこととした。更に、エネルギー広がりの大きな陽電子ビームを素早くバンチングするためには高い加速勾配が望ましいが、一方で捕獲効率を高めるためには大きなアパーチャーが必要である。加えてマルチバンチのビームによるローディングを補償するために、ある程度の群速度が求められる。またソレノイド中へ設置されることから、外形、サポートについても様々な制約を満たさ

¹ ILC の場合は不等間隔で最短間隔は 3.3 ms だが、1 秒間のパルス数は 100 回

² SuperKEKB では half sine、ILC では立ち上がり、立ち下がりが 5 μs 、フラットトップ 1 μs の台形電流波形を想定

なければならない。これらをクリアするために、アイリス部にも水冷構造をもった Large aperture L-band APS 空洞の開発を進めている [7,8]。

3.4.2 試作セル

2024 年度までにレギュラーセル 1 つの試作を行った。現在はこれを用いて空洞周波数の測定を行い、シミュレーションとの比較から加工精度の評価等を進めている。Figure 4 に試作したセル (left) および RF 測定の様子 (right) を示す。

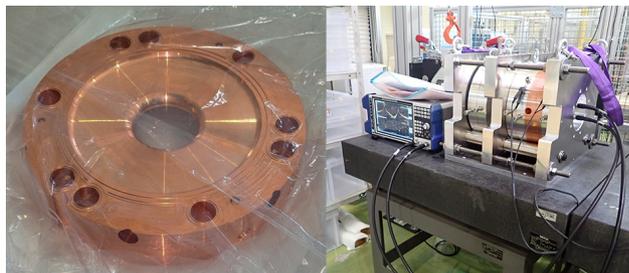


Figure 4: Prototype cell (left) and RF measurement setup (right).

3.4.3 製作

2024 年度までに材料調達、切断を行い、2025 年度は粗加工、水路加工、ホットプレスによる接合を進めている。2026 年度にセル形状の加工、全体の接合を行う予定である。合わせて RF 測定や接合のための治具類の整備も進めている。

3.5 交換機構

3.5.1 設計方針

ビーム運転後はターゲットを中心に周辺部が放射化することが想定される。標的に当たるビームパワーが SuperKEKB の約 20 倍であることを考えると、放射化の強さも概ねその比率で高まることが想定されるため、付近での長時間作業はできない可能性が高い。また設置位置がトンネル内地下深くであり、特に上からのアクセスに制約がある。これらの条件のもとで、故障時および定期的な交換が可能な機構が必要であり、今回の試作においても、そのような機構を製作し性能評価を行うこととしている。但し、細かい部分は実際の環境によって制約条件が変わるため、今回は主要機構の評価を中心目標とし、試作を進めている。

3.5.2 位置決め機構

各コンポーネントはユニット化され、レールの上を移動可能な架台に設置されている。レールはビームライン方向に沿って敷設され、この上をユニットが移動し、所定の位置まで運ばれた際にユニットは固定される。ユニットを固定する方法として、Fig. 5 (bottom left) に示すモジュールをユニットに設置し、地上に固定してある Fig. 5 (bottom right) のモジュールと円柱部が押し合うことで固定する方法を開発している。ユニット側に設置されるモジュールのカップ部分は可動式となっており、レール上を移動中は他の地上固定側モジュール

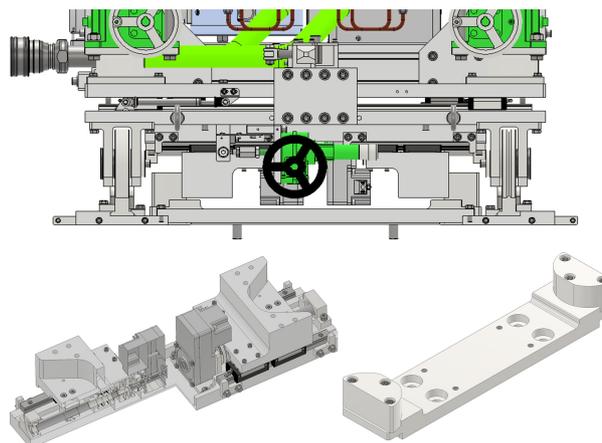


Figure 5: Unit lock mechanism. movable module mounted on girders (left) and fixed module on the floor (right). The movable module is shown upside down to show its mechanism.

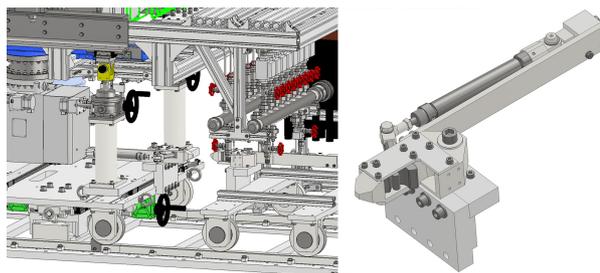


Figure 6: Unit connection mechanism.

と衝突しないよう、中心に寄せた位置で固定することができるようになっている。

3.5.3 連結機構

ユニットを所定の位置へ運ぶためには、何らかの走行機構が必要となるが、ユニット側に走行機構を設置すると、各ユニット架台が複雑化するうえ、放射線環境下に置かれた駆動部のメンテナンスを行うことができない。そこで、ユニットの運搬はモーター付きの台車を用いて牽引することとし、普段台車は人が立ち入ることができるエリアに保管しておくことを想定している。その際、牽引台車と各ユニットを連結、切り離す機構が必要となる。Figure 6 に鉄道車両の自動連結器を参考にした連結機構の様子を示す。各ユニットはこの機構を持つことによって、動力付き台車との、連結、切り離しをリモートで行うことができる。

3.5.4 ピローシールフランジ

ビームラインの真空配管の着脱は J-PARC でも実績のあるピローシールを利用することを想定し、試作を行った。スペースの制約から、最初の加速管とターゲットチャンバーの接続にはピローシールフランジと、ビームコリメータを一体としたものを開発した [9]。通常ピローシールの相手方となるフランジはシール性能の要求から、複合電解研磨されたステンレスが用いられるが、今回は相手方が加速管であり、製造上の都合から銅合金 (NC50) を採用することとした。Figure 7 に試作フ

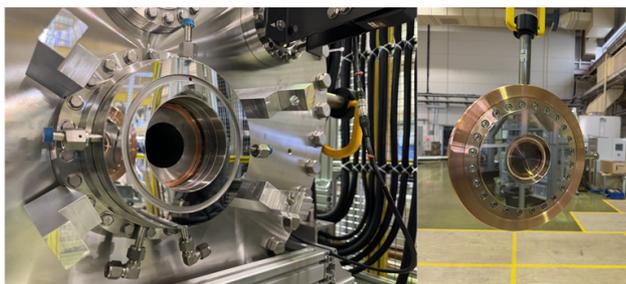


Figure 7: Pillow seal flange (left) and dummy blank flange made of NC50(right).

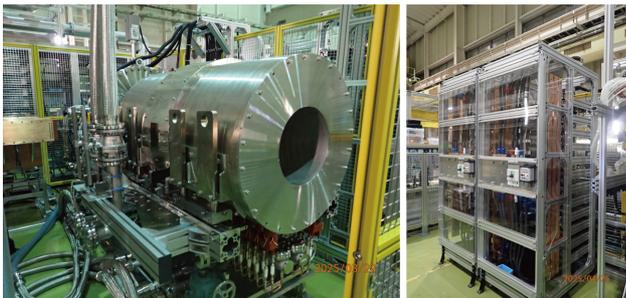


Figure 8: Solenoid (left) and power supply for solenoid (right).

ランジの写真を示す。銅合金側の接触面は酸化防止と表面硬度向上をのため硬質クロムメッキを行っている。完成後真空試験を行いリークレートが $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下かつ到達真空度が、通常のブランクフランジを用いた場合と変わらないこと ($1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 以下) を確認した。

3.5.5 その他の脱着機構等

冷却水、圧空、真空、導波管、ソレノイドケーブル、その他電気配線等のリモート着脱が必要になると考えられる。これらの多くは様々な施設で運用実績のあるコネクター等が利用可能と考えているが、実際の設置環境によって制約が変わってくるため、現時点では詳細を追求していない。

3.6 その他

3.6.1 ソレノイド

Figure 8 (left) にソレノイドの写真を示す。Figure 1 に示すように、1本の加速管の両側からソレノイドが挟み込むように設置され、一つの架台上にまとめられており、これで1つのユニットを構成する。実際には40ユニット(約60m)同様のユニットが並び、陽電子を加速したあと、電子陽電子分離用シケインを通して、ソレノイドのない通常の加速セクションへと接続される。ソレノイドの基本的な構造は SuperKEKB のものを踏襲しているが、加速管のサイズに合わせて、内径が2倍、外径が1.5倍に拡大されており、スペース的制約や組み立て性などの観点から、冷却水配管のレイアウト等が改良されている。



Figure 9: Overview of the experimental area in July 2025.

3.6.2 ソレノイド電源

Figure 8 (right) にソレノイド用 DC 電源の外観を示す。ソレノイド用電源にはコストを抑えるため TDK ラムダ社製のモジュール電源 (HWS3000-24) を採用し、3直列10並列での運用を目指している。現在は9モジュールのみ納入されており、3直列3並列での運転となっているが、2025年8月中に残りのモジュールが納入される予定である。その後はフルスペックでの試験が行えるものと考えている。なお2台のソレノイドはそれぞれ独立した電源ユニットに接続されており、個別に制御することが可能となっている。

3.6.3 制御

インターロック、制御系のコントローラとしては NI 社の compactRIO を採用した。ソフトはおもに LabVIEW と EPICS を用いて作られている。データのアーカイブは Archiver Appliance を採用した。現在約 2500 個の PV がアーカイブされている。

4. まとめ

Figure 9 に 2025 年 7 月時点での実験室全景を示す。2022 年の設計開始以来、開発は順調に進んでおり、加速管、フラックスコンセントレータ用パルス電源を除き現時点で試作一号機の製作はほぼ完成している。試験に必要なインフラ(電力、冷却水)の整備も完了しており、今年度は上記未完成の2点の開発を進めるとともに、製作した回転ターゲットの性能評価試験を進めている。また FC に関しては、電源が完成予定の 2026 年度以降にフルパワーでの性能評価試験を予定している。

謝辞

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。Arichver Appliance の導入にあたっては KEK 加速器の佐武いつか氏にご協力いただきました。また加速管の開発にあたっては、KEK 加速器の肥後壽泰氏、KEK 機械工学センターの高富俊和氏にご協力をいただきました。皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Enomoto *et al.*, “Present status and plan on development of positron source for ILC in KEK iCASA”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 766-768.
- [2] Y. Morikawa *et al.*, “Development of ILC positron production target”, The 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. -Sep. 2023, FRP37.
- [3] Y. Morikawa *et al.*, “Development of ILC positron production target”, The 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul- Aug. 2024, THOT09.
- [4] Y. Morikawa *et al.*, “大強度陽電子生成標的の開発”, The 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRO704, this meeting.
- [5] Y. Enomoto, “陽電子源”, OHO19, 2019.
- [6] Y. Enomoto *et al.*, “Development of a flux concentrator for positron source”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 502-506.
- [7] M. Fukuda *et al.*, “Design of an L-band alternating periodic structure(APS) cavity for the ILC positron capture linac”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 985-989.
- [8] M. Fukuda *et al.*, “Design and fabrication study of L-band alternating periodic structure (APS) cavity for the ILC positron capture linac”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 662-667.
- [9] Y. Morikawa *et al.*, “コリメータ付きビローシールの開発”, The 22nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Tokyo, Japan, Aug. 2025, WEP006, this meeting.