

KEK iCASA における ILC に向けた陽電子源開発の現状と計画 PRESENT STATUS AND PLAN ON DEVELOPMENT OF POSITRON SOURCE FOR ILC IN KEK iCASA

榎本嘉範*, 福田将史, 森川祐, 早野仁司
Yoshinori Enomoto*, Masafumi Fukuda, Yu Morikawa, Hitoshi Hayano
High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

This report summarizes present status and plan about development of a electron driven positron source for ILC, focusing on the activity of KEK iCASA positron group. Four major elements, positron production target, Flux Concentrator (FC), accelerating structure after the target, replacement mechanism of activated components, are described.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 加速器研究施設 応用超伝導加速器イノベーションセンター (iCASA) では、超伝導加速空洞をはじめとして、ILC 建設に必要な様々な技術開発を行っている。中でも粒子源はナノビーム技術、超伝導加速空洞と並び、計画実現のための重要技術と位置づけられており、2022 年 9 月から iCASA 内に新たなグループを立ち上げて、開発を進めている。本稿では粒子源の中でも陽電子源、とりわけ電子駆動型と呼ばれるタイプに関して、我々のグループで進めている開発の現状と計画を述べる。

2. 目標パラメータ

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

Project	SuperKEKB	ILC
e^- beam on target		
energy (GeV)	3	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

Table 1 に開発目標としているパラメータを SuperKEKB の陽電子源と比較する形でまとめる¹。また過去、現在、将来の様々なプロジェクトにおける陽電子源の性能を、横軸に一次電子ビームパワー、縦軸に陽電子生成捕獲効率を取ってプロットしたものを Fig. 1 に示す。生成された粒子が一度しか衝突しないリニアコライダーでは、円形コライダーと比べて粒子源に対する要求が厳しくなる場合が多い。ILC ではこれまでに実現した最もハイパワーな陽電子源である SLC のものと比較して、3 倍ものビームパワーが必要になる

* yoshinori.enomoto@kek.jp

¹ パルスは不等間隔で 1 秒あたり 100 パルスであるが、最小パルス間隔は 3.3 ms。

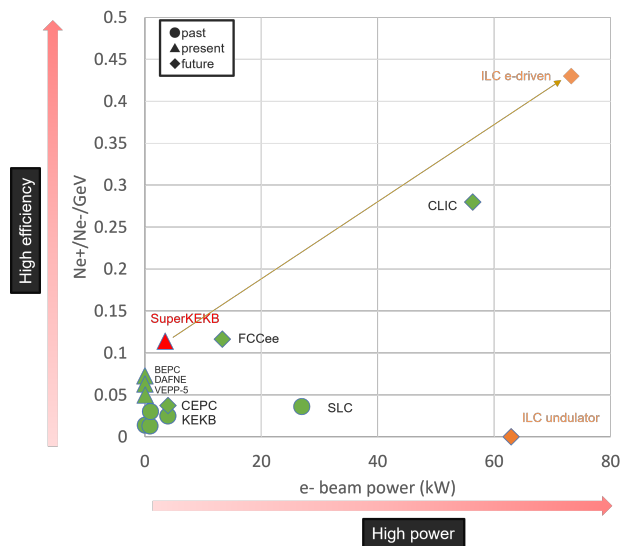


Figure 1: Primary electron beam power on target and capture efficiency of positron sources for various projects.

と見込まれている。同時に効率も現在最高性能である SuperKEKB と比べて 2.5 倍を目指している。

3. 全体設計と 4 つの開発項目

陽電子源は中性子源やミューオン源などの他の二次粒子源と比べて、二次粒子を生成後、捕獲、加速するという点が大きく異なる。そのため陽電子生成標的だけでなく、マグネットや加速空洞といったコンポーネントを標的直後に配置する必要がある。エミッタンスやエネルギー拡がりが悪い二次ビームをなるべく効率的に集めるには、標的のなるべく近くに機器を置く必要があるが、標的からの二次粒子のシャワーが大量に当たる中で、安定運転を実現するのは容易ではない。加えて他の大強度ターゲットとも共通な問題ではあるが、事前に大強度ビームを使った試験ができないため、ビームに起因する諸問題に対しては、これまでの経験と入念なシミュレーションによる検討で対処するしかない。これらを踏まえた上で、ビーム物理的、電磁氣的、熱的、機械的、放射線的に問題のない全体設計を行えるかどうか陽電子源開発の鍵を握っている。幸い

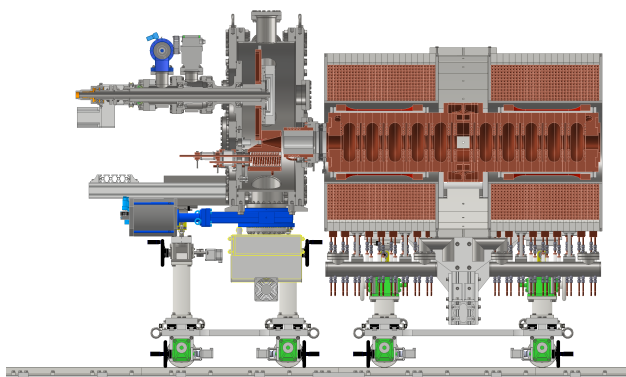


Figure 2: Cross sectional view of the electron driven positron source under development.

KEK では TRISTAN 以来長年に渡って陽電子源を開発、運用してきた実績と経験 [1] があるため、既存のレイアウトを参考にしつつ改良を検討していくことができる。Figure 2 に現在検討中の陽電子源の 3D モデルを示す。

全体設計に加えて、ILC の場合は要求が非常に高いため、個別のコンポーネントについても新たな開発が必要になってくる。具体的には

- 陽電子生成標的
- フラックスコンセントレータ (FC)
- 標的直後の加速管
- 放射化した機器の交換機構

の 4 点が特に重要と考えられており、本稿ではそれぞれについて以下で現状を述べる。

4. 陽電子生成標的

Figure 3 に現在設計中の陽電子生成標的の様子を示す。陽電子生成標的は通常タングステンまたはタングステン合金が用いられる。ILC の陽電子源においてもタングステンをベースとした材料を採用する予定である。ただし SuperKEKB のような固定式では冷却が不足するため、回転式のターゲットを採用する。回転ターゲットは既に J-PARC ミューオンターゲット [2] や RIKEN RIBF ターゲット [3] で運転実績があるが、今回の陽電子源ターゲットの特徴として、以下の要求がある。

- 水冷であること
- 超高真空仕様であること
- スペースの制約が大きいこと
- 標的サイズが直径 50 cm、重量が約 50 kg 程度と大きいこと

回転機構に加えて、標的であるタングステンとヒートシンクとなる銅の接合も重要な課題である。タングステンと銅は熱膨張率が大きくことなるため、発熱時に接合部に熱応力が生じる。条件にもよるが、概算の見積もりでは 100 MPa 程度の応力が生じる可能性は十分ある。したがって、機械的にしっかりと接続方法の検討が重要となる。加えて温度差を抑えるために熱接触が良いことも必要である。SuperKEKB では HIP(Hot Isotropic Pressing) を採用したが、今回は SPS(Sparc Plasma Sintering) とい

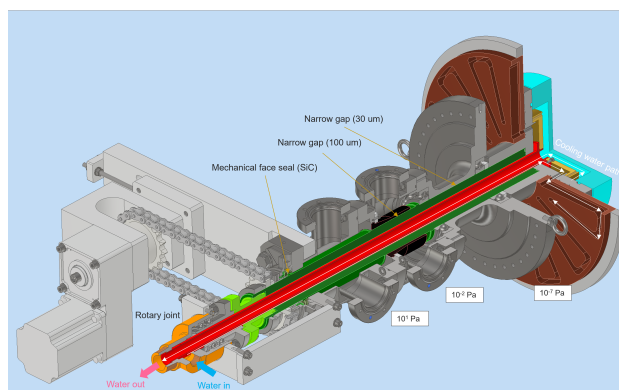


Figure 3: Positron production target with rotating mechanism.

う方法も検討している。今年度は試験片を用いていくつかの条件を試し、実際に引張試験や熱負荷試験を通して性能評価することを目指して開発を進めている [4]。

これらを踏まえて、現在設計中の陽電子生成標的の様子を Fig. 3 に示す。

5. フラックスコンセントレータ

フラックスコンセントレータ (FC) はマッチングデバイス的一种で、標的直後に置かれ、標的からの角度広がり大きな陽電子ビームを、後段の加速管のアクセプタンスに合うよう、位相空間上で回転する為に使われる。元々は SLAC で開発されたものであるが [5]、SuperKEKB でも採用されている [6]。ILC では、繰り返し、要求磁場、パルス幅、アパーチャーに対する要求がいずれも SuperKEKB に比べて高く、その結果 SuperKEKB の 10~20 倍である、10 kW オーダーの発熱が想定されている。そのため水路のレイアウトを初めとした冷却機構の検討、最適化が重要で、本体だけでなく、フィードスルーやフランジ、給電ラインも含めた熱設計を進めている。また電源に対する要求も極めて高く、現在の仕様では、電圧 20 kV、電流 35 kA、パルス幅 10 us、繰り返し 300 Hz のパルス電源が必要であり、これは SuperKEKB の FC 電源の 30~40 倍のパワーに相当する。これを実現するためには、負荷に蓄えられたエネルギーを回収して、再利用する機構を備えた電源の開発が必要と考えられる。

Figure 4 に CST studio による電磁界、熱解析の結果を示す。温度は場所によって大きく異なるが、標的直後の内径が最も狭い部分が最大で、局所的には 240°C を超える部分もある。無酸素銅は通常 200°C を超えると軟化するため、FC の材料には耐熱合金の採用も含めて検討を行っている。

6. 標的直後の加速管

標的直後の加速管は標的からの二次粒子による熱負荷を受ける。SuperKEKB においては加速管でロスする RF のパワーに比べて、ビームパワーが小さいため、大きな問題とはならなかったが、ILC の場合は二次粒子による熱負荷が 10 kW オーダーになると想定されており、無視できない。

また陽電子の輸送効率を上げるためにはアイリス部

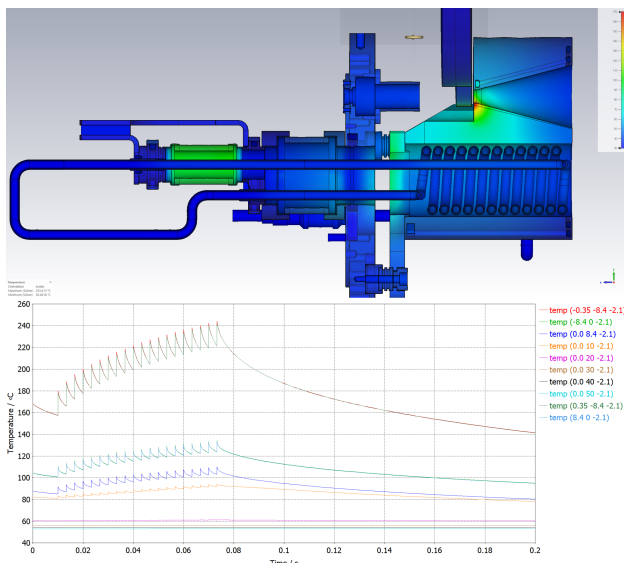


Figure 4: Simulation results using CST studio. Temperature distribution (top) and time variation of temperature at several points (bottom).

の内径はなるべく大きくしたい。加えて ILC では陽電子の生成において、Table 1 に示したように、66 バンチのマルチバンチ運転が想定されている。ビームローディングによるバンチ間の加速勾配変化を抑える為に、 V_g は大きな値でなければならない。さらに、全体をソレノイドマグネットの中に挿入する必要があり、マグネット設計や組み立ての観点から、外径は極力小さく、外周に突起等がないことが望ましい。これらを満たす為に、冷却能力を大幅に強化した、L バンドの APS 空洞の設計を進めている [7]。

7. 放射化した機器の交換機構

放射化した機器のメンテナンスは陽電子源に限った課題ではなく、ハイパワー標的を運用する全ての施設に関わる課題と言える。幸い日本国内では J-PARC、RIKEN RIBF といった施設が運用中であり、参考になる部分は多い。一方陽電子源特有の点として、標的を専用のターゲットステーションではなく、加速器トンネルの中に設置しなければならないという問題がある。そのため十分な遮蔽を用意するのが現実的でない場合が多い。SuperKEKB では放射化のレベルがそこまで厳しくないことも有り、現場近くでの作業はなるべく短時間で済ますことにより被爆を抑えるという設計方針を採用した。作業性を上げるために極力作業スペースを取り、ジグや容器も最低限の遮蔽でなるべく軽量とし、離れた位置まで速やかに移動してから、大きな遮蔽容器へ移すといった多段階の方法を取っている。作業トラブルを避けるため、凝った機構やリモート制御はほとんど採用していない。しかしながら、ILC においてはビーム強度が 20 倍になることから、遠隔での作業が必須となる可能性が高い。加えて ILC のトンネルは地下深く、地上へのアクセスやトンネルには制約がある。現時点で完璧な解決策が出来上がっているわけではな

いが、テストスタンドでの試作と運用を通して、少しずつ改良と最適化を進めるとともに、広く他施設と情報交換を進めていく以外に方法はないと考えている。

8. まとめ

ILC の陽電子源開発に関して、課題、現状と iCASA 陽電子グループが進めている内容を述べた。具体的な設計結果や性能評価については今後それぞれのテーマ毎に紹介していくことができると考えている。陽電子源の開発は ILC に限らず、FCCee、CLIC、C3、CEPC といった将来の電子陽電子コライダー共通の課題であり、今後も国際的な協力を更に深めつつ進めていく予定である。二次粒子の再加速という観点では、これまでは陽電子特有ということができたが、近年盛り上がりつつあるミューオンコライダーでも同様の課題があるものと思われる。ILC の陽電子源は非常に要求が高く、慎重な設計が求められるが、かつて 1980 年代から 1990 年代にかけて、SLC の陽電子源開発を通して得られた知見が現在に至るまで活用されているように、今回の開発を通して得られた成果が、今後数十年にわたり役に立つものと期待している。

参考文献

- [1] A. Enomoto *et al.*, “Focusing system of the KEK positron generator”, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **281**, 1 (1989).
- [2] S. Makimura *et al.*, “J-PARC MLF ミュオン生成標的”, 加速器 **18**(4), 202 (2021).
- [3] K. Yoshida, “RIBF の RI ビーム生成ターゲットシステム”, 加速器 **18**(4), 241 (2021).
- [4] H. Morikawa *et al.*, “ILC 陽電子生成標的の開発”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, FRP37, this meeting.
- [5] A.V. Kulikov *et al.*, “SLC POSITRON SOURCE PULSED FLUX CONCENTRATOR”, SLAC-PUB-5473 (1991).
- [6] Y. Enomoto *et al.*, “陽電子源と陽電子生成標的”, 加速器 **18**(4), 269 (2021).
- [7] M. Fukuda *et al.*, “ILC 陽電子捕獲ライナック用 L バンド APS 加速管の設計”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 2023, FRP52, this meeting.