

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400293

研究課題名(和文)国際リニアコライダーのための振り子型陽電子源標的の開発

研究課題名(英文)Development of a pendulum positron target for the International Linear Collider

研究代表者

高橋 徹 (Takahashi, Tohru)

広島大学・先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：50253050

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：国際リニアコライダーの陽電子源に関して、電子駆動方式の陽電子生成標的の設計と性能評価、および重要項目である陽電子標的の試作試験を行った。

駆動電子線のエネルギー、電子線サイズ、標的の厚さというパラメータ空間の総合的な調査と評価を行うことにより、設計の最適化を行った。これに基づき、陽電子生成標的、陽電子捕獲装置の設計を行い、また、陽電子生成標的の試作機を作成しその試験を行った。平行して、標的における陽電子生成、補角装置の効率、加速装置の構成と加速による負荷を考慮にいたった総合的なシミュレーションを行い、国際リニアコライダーの陽電子源として電子駆動方式が十分な性能をもっていることを示した。

研究成果の概要(英文)：We conducted a design of an electron driven positron target for the International Linear Collider. We also performed a test of a prototype of the positron generation target. The parameters of the positron source, such as energy and the size of the drive electron beam, thickness of the positron generation target, were optimized by a comprehensive survey of the parameter space. Based on the result of the survey, we designed a positron source, including cooling system and a positron capture device. The prototype of the target has been tested, particularly for durability the vacuum seal with a ferromagnetic fluid. We also performed a numerical simulation to estimate the positron yields, with taking realistic performance of accelerator components into account. Based on these studies, we showed that the electron driven scheme potentially has sufficient performance and reality for the ILC positron source.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：国際リニアコライダー 陽電子源 回転標的

1. 研究開始当初の背景

国際リニアコライダー (ILC) の技術要素のなかで、高強度陽電子源は高ルミノシティを達成する鍵となる重要な項目である。しかし陽電子源には、陽電子生成標的の熱破壊という難易度の高い課題が存在する。ILC の基本設計では、アンジュレーター方式と呼ばれる方法を採用し、その実現に向けた開発研究が行われてきた。しかしアンジュレーター方式では直径 1m の円形標的を真空中において接線速度 100/s で回転させる必要があり、研究開始時においてもその実現にはリスクが残っていた。そのため、アンジュレーター方式の開発が ILC の開始に間に合わない場合に備えて、バックアップとなる従来型の陽電子源を開発し、ILC の実現を技術的側面からより確実なものとするのが、プロジェクトの推進として非常に重要であった。本研究はそのための電子駆動型陽電子源の開発である。

2. 研究の目的

電子駆動方式の陽電子源においては、陽電子生成標的を接線速度 3m/s ~ 5m/s で駆動することによって熱負荷の集中を軽減する。そのため振り子型標的を検討し実現性を検討する。平行して、陽電子捕獲部、後段加速器システムの設計を行う。特に、陽電子生成標的における熱負荷の観点から入射電子のエネルギー、ビームサイズの最適化を行い、それに基づいた陽電子捕獲部、後段の加速システムの設計と評価を行う。以上を総合して、ILC における電子駆動型陽電子源の設計を確立することを目指す。

3. 研究の方法

陽電子生成標的の熱負荷計算をもとに、要求される接線速度をもとめ、それによって標的部分の設計を行う。それをもとに、標的部分の設計とその実現にむけた試験標的の作成とその評価試験を行う。

入射電子エネルギー、電子線のサイズ、標的の厚さ、電子捕獲装置、加速器の形状と性能など複数のパラメータ空間を総合的に調査することによって、電子駆動方式のパラメータを決定する。その結果をもとに、各要素を設計する。これらを総合して、陽電子生成効率とその実現性の観点から陽電子源の設計評価を行う。

この研究は ILC の陽電子検討グループとして、広島大学、高エネルギー加速器研究機構 DESY, CERN, ANL のグループによる世界協力で行う。

4. 研究成果

図 1 に電子駆動方式による陽電子生成システムの概要を示す。

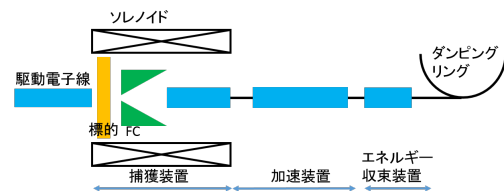


図 1 陽電子生成システム概要

熱負荷の評価

陽電子生成標的としてとして想定しているタングステンに電子線を入射した場合の、陽電子生成標的、下流の補角装置における熱負荷の評価を数値計算によって行った。入射電子エネルギー、標的に入射する際の電子線の大きさ、標的の厚さをパラメータとし、ILC に要求される陽電子源の性能を満たし、かつ熱負荷の観点から実現可能な領域を包括的に調査した。図 2 には計算によって得られた陽電子補角部におけるエネルギー損失 (熱負荷) の計算例である。

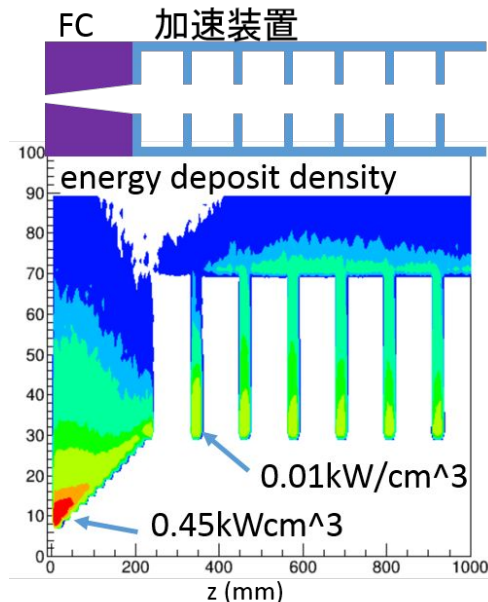


図 2 陽電子補角装置周辺におけるエネルギー損失の分布

この最適化の結果、陽電子生成標的、補角装置 (FC)、加速装置における平均エネルギー損失は、それぞれ 16.3kW, 12.6kW, 31.5kW とすることが可能であり、熱負荷の観点から電子駆動陽電子源の実現性に目処をつけることができた。

陽電子源要素の開発

熱負荷の観点からの実現性を受け、実際の要素開発を行った。

陽電子捕獲部はフラックスコンцентрーター (図 1, FC) とよばれる電磁を陽電子生成標的直後に設置することによって、標的によって生成された陽電子を捕獲し、後端の加

速部へ入射する。熱負荷の観点からの計算の結果、電子駆動型においては、半径（RMS）で2mmという比較的大きな電子線を用いる必要がある。そのためにFCも大口径のものが必要とされる。その一方、FC内部においては、最大5Tの磁場を時間、空間的に均一に生成する必要がある。これについて、ロシア、ブドカー研究所の専門家と協力して、設計検討を行った結果、口径、内部磁場の均一性ともに、ILC陽電子源の要求を満足できる設計をするに至った。図3はその概念図であり、口径16mm（直径）、最大磁場5Tの設計である。

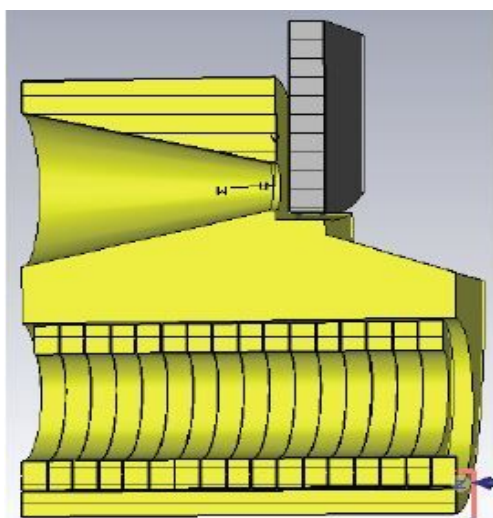


図3 フラックスコンцентрータの概念図

陽電子生成標的に関して、静的な標的では熱負荷の集中によって標的が破壊されるため、電子線照射部を動かす必要がある。当初の計画では電子線照射部の接線速度が3m/s~5m/sと想定し、振り子型標的を想定していたが、熱負荷による標的へのストレスとそれによる変形等の詳細な検討を有限要素法によって行った結果、接線速度は5m/s以上が必要であることが判明した。これをもとに振り子型の標的の設計検討を行ったところ、振り子型では標的装置が非常に大きくなり、加速器内における運転が困難であることが判明した。したがって、陽電子生成標的の本体は回転型が有利であると判断し、その実現性を考察するに至った。図4は回転標的試作器の概念図である。

本研究は株式会社リガクと共同しておこなっている。標的については冷却方法まで含めた詳細設計がなされているが、同社との協定により、詳細な図面の公表は控えている。

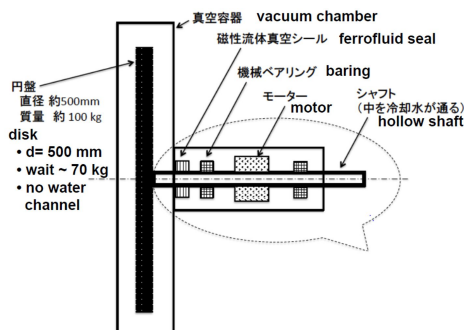


図4 回転標的試作器

回転駆動型における開発要素のなかで、最も重要な課題は、磁性流体による真空維持である。加速器中において、 10^{-6} Pa程度の高真空の維持が要求される。その中に回転体を導入するため真空維持が必要となる。これに関してまず、磁性流体の放射線耐性に関して、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所において、ガンマ線照射試験を行った。その結果ILCの約3年分に相当する照射後も、磁性流体の粘性度に大きな変化は観察されず、放射線の観点からは、十分に実用に耐えることが判明した。次に、試作器による真空維持試験を行った。図4に示す試作器は実機と同じ大きさの回転体を想定しているが、本研究においては、最初の段階の検証として、実機の回転体と同じ質量だが直径の小さい（10cm）ものを取り付けた。図5は試作器の試験時における写真である。



図5 試作器の真空試験セットアップ

実験は高エネルギー加速器研究機構でおこなった。図6に実験結果を示す。

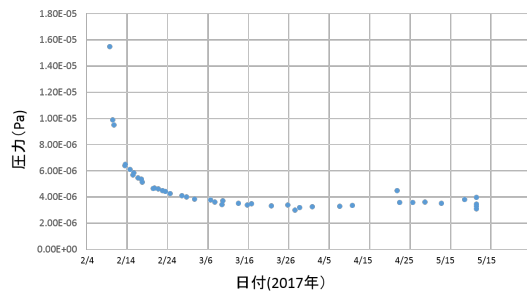


図6 試作機による真空試験経下図

真空試験は回転標的を実機運転と同じ毎分225回転で駆動した状態で行っている。試験は平成29年2月4日から開始し、現在も継続している。平成29年度末の時点において、ILC加速器が要求される真空度を満足していることがわかる。今後長期にわたる安定性の観測を継続する。

陽電子生成量の現実的な見積

これらと平行して、想定される電子駆動パラメータにおいて、加速器に対するビーム負荷、実際に想定される加速勾配など、現実的な加速条件のもとにおいて、陽電子生成効率の見積を行った。その結果、入射電子1個あたり、1.7個の陽電子をILCダンピングリングまで輸送できることが判明した。これは陽電子生成効率の観点から十分に要求を満たすものである。

以上の結果、電子駆動型陽電子源に関して、ILCの要求性能を満足する設計が可能であることを示した。

当初想定していた、振り子型陽電子標的は困難であることが判明したが、代替となる回転型標的について、冷却、真空維持まで含んだ設計と、試作機を用いた試験、フラックスコンセントレーターの設計、数値計算による電子捕獲効率の現実的な推定など総合的な研究により、電子駆動型陽電子源の実現に大きな進展があった。陽電子源はILCの開発要素のなかでも最も難易度の高い部分である。政府における公式検討が行われている中で、その実現のめどをつけることは、計画自体はもとより素粒子物理学実験分野に対する貢献も大きい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. Yuji Seimiya, Masao Kuriki, Tohru Takahashi, Tsunehiko Omori, Toshiyuki Okugi, Masanori Satoh, Jyunji Urakawa, and Shigeru Kashiwagi, “Positron capture simulation for the ILC electron-driven positron source”, Progress of Theoretical and Experimental Physics,

2015-10, 103G01—19, 2015 査読有, 10.1093/ptep/ptv136,

2. Y. Seimiya, M. Kuriki, T. Takahashi, M. Urano, T. Okugi, T. Omori, M. Satoh, J. Urakawa, S. Kashiwagi, “AN OPTIMIZATION OF ILC POSITRON SOURCE FOR ELECTRON-DRIVEN SCHEME”, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, WEPWA017, 2530 – 2501, 2015、査読無
3. M. Kuriki, Y. Seimiya, T. Takahashi, T. Okugi, M. Satoh, J. Urakawa, T. Omori, S. Kashiwagi, “A design study of ILC positron source by electron driven scheme”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1, 119 – 123, 2014 (査読無)

〔学会発表〕(計 11 件)

1. Tohru Takahashi, “Energy deposition around the target of the E-driven e+ source”, LCWS2016 (国際学会), 2016年12月04日~2016年12月09日, Morioka, Japan
2. Yoske Sumitomo, “A start to end simulation of E-driven Positron Source for ILC”, LCWS2016 (国際学会), 2016年12月04日~2016年12月09日, Morioka, Japan
3. Tohru Takahashi, “Energy deposition around the target of the electron driven positron source”, POSIPOL2016 (国際学会), 2016年9月14日~2016年9月16日, Orsay, France
4. Tsunehiko Omori, “Rotation target R&D of electron driven positron source”, POSIPOL2016 (国際学会), 2016年9月14日~2016年9月16日, Orsay, France
5. Masao Kuriki, “A start to end simulation of electron driven positron source for ILC”, POSIPOL2016 (国際学会), 2016年9月14日~2016年9月16日, Orsay, France
6. 根岸健太郎, 栗木雅夫, 高橋徹, 大森恒彦, 横谷馨, 浦川順治, 佐藤政則, 奥木敏行, 清宮裕史, 柏木茂, “ビームローディングにおける過渡的状態の定在波マルチセル加速空洞の振る舞いの研究”, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年03月19日~2016年03月22日, 仙台市青葉区
7. T. Takahashi, “Energy deposition around the conventional source target - an update -”, LCWS2015 (国際学会), 2015年11月02日~2015年11月02日, Whistler B.C. Canada
8. M. Kuriki, Y. Seimiya, T. Takahashi, T. Okugi, M. Sato, J. Urakawa, T. Omori, S. Kashiwagi, “Positron Capture

- Simulation for 300Hz Electron Driven Scheme ”, ALCW2015, 2015年04月20日, つくば市 日本
9. Y. Seimiya, M. Kuriki, S. Kashiwagi, T. Okugi, T.Takahashi, M. Satoh, J. Urakawa, “Positron Capture Simulation for ILC Electron-Driven Positron Source ”, LINAC2014 (国際学会), 2014年08月05日, ジュネーブ市 スイス
 10. T.Omori, ”E-driven overview & Target R&D ”, Americas Workshop on Linear Colliders 2014 (国際学会), 2014年05月14日, バタビア市 米国
 11. Tohru TAKAHASHI, “Pendulum Target ”, PosiPol2014 (国際学会), 2014年08月29日, 一関市 日本

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 徹 (Tohru Takahashi)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：50253050