

審査の結果の要旨

氏名 中村 啓

論文は米国ローレンスバークレー国立研究所 (Lawrence Berkeley National Laboratory, 以下 LBNL) で研究開発中のレーザープラズマ加速器 (Laser-plasma WakeField Acceleration, 以下 LWFA) に関する研究である。この研究では、ターゲットに通常用いられるガスジェット (通常長さ数ミリ) ではなく、英国オクスフォード大学で開発されたキャピラリー放電型プラズマチャンネル (Capillary Discharge Guide, 以下 CDG) を用い、世界で初めて3センチメートル長の LWFA を実現させ、電子エネルギーをこれまでの 100 MeV レベルから、1000 MeV レベルまで引き上げたものである。この GeV 級 LWFA の開発研究は、LBNL の LOASIS グループのプロジェクトであり、大きく分けて4つのサブプロジェクトから構成されている。

- 1) 100 TW、10 Hz チタンサファイアレーザーの開発
- 2) されたキャピラリー放電型プラズマチャンネルの開発
- 3) レーザー計測システムの開発
- 4) 電子ビーム計測システムの開発
- 5) 実験結果解析システムの開発

本研究は主に、4) 電子ビームの計測システムの開発、5) 実験結果解析システムの構築がなされ、システムの開発、そして LWFA としては世界初の GeV クラスの電子ビーム生成に大きく貢献したものである。さらに、実験結果の解析を通し、重要なパラメーターや、それらに求められる入力精度、システムの最適化、そして次世代の LWFA について議論されている。

第一章ではまず、LWFA の発展の歴史について議論されている。レーザープラズマ加速器の性質、物理についての定性的な議論、積み重ねられて来た知見を通し、レーザープラズマ加速器の高エネルギー化への必要条件が示されている。また、通常の RF 加速器とは異なり、エネルギー分散の大きい LWFA の電子ビーム計測系に対する性能要求も議論されており、併せて、プロジェクト全体、つまり GeV クラスレーザープラズマ加速器の開発研究の動機と要求、サブプロジェクト、つまり計測、解析システムに対する動機と要求が示されている。また、レーザープラズマ加速器の現状と将来性を含めた応用例も議論されている。

第二章にまとめられているのは、LWFA に関するプラズマ物理理論である。第一章で述べられた定性的議論が、この章では数式を通してより厳密に、定量的に議論されている。前半はレーザープラズマ加速器の加速構造である航跡場について、後半は前半議論された航跡場に於ける電子の捕捉と加速について示されている。それぞれについて、レーザー強度、プラズマ密度等の入力パラメーター依存性が議論されており、第4章に示される CDG-LWFA の実験結果解析への理論的基盤を提供している。

第三章に記されているのはサブプロジェクト(4)である電子ビーム計測システムのデザインと開発である。本論文研究で開発されたのは超広帯域電子ビームスペクトロメーターであり、10 MeV から1000 MeV までの電子を、数パーセントの分解能で一度に計測することができるものである。これは GeV 級の LWFA 電子ビーム計測システムに化された非常に特殊かつ困難な要求を満たしたもので、その帯域は前例を見ないものであり、今後の LWFA 用電子ビームスペクトロメーターの設計開発に大きく影響を与えて行くものと思われる。また、相対論的電子のディテクターとして、シンチレーションプレート LANEX が用いられているのだが、シンチレーションプロセスの電子ビームエネルギー依存性がエネルギー可変 RF 加速器を用いて実験的に研究されている。これもまた、今後の LWFA 用電子ビームスペクトロメーターの設計開発に有益な情報を提供するものである。

第四章では、サブプロジェクト(5)である実験結果解析システムの構築と併せて、CDG-LWFA から生成された電子ビームの特性が詳細に議論されている。実験結果の解析を

通して、どのようにして GeV 級の電子ビームが CDG-LWFA より生成されたのか、またその安定性が議論されている。第二章で示された理論的モデルを用い、入力レーザーパワーと、プラズマ密度より見積もられるエネルギーゲインを超えるエネルギーゲインが実験より観測されたが、これは航跡場とレーザーパルスの相互作用により、レーザーが更に時間的に圧縮され、理論値を超える高エネルギー電子ビームが得られたものであることが示された。キャピラリー放電プラズマチャンネルを用いることにより延長されたインタラクション長が、この航跡場-レーザーインタラクションを増長させ、この高ゲインにつながったものである。このパラメータ領域は航跡場-レーザーインタラクションの非線形性により不安定になるというデメリットがあることも示された。また、0.5GeV の電子が安定に生成されるパラメータ領域があることも示された。この安定領域は、非常に高精度のレーザーエネルギーコントロール（4%未満）と、数ナノ秒の放電-レーザー間タイミング精度が要求されることが示された。このように、この章では世界初の CDG-LWFA のオペレーションに関して、統計的解析を通してその特性が幅広く示されている。この結果は今後の世界中に於ける LWFA 開発に多大なる影響と有益な情報をもたらすものである。

第五章において本論文は結論されているのであるが、前章に示された解析結果をもとに、GeV 級 LWFA のコントロールについて議論されている。更なる安定性と電子ビームの高品質化を得る為に、短い将来を見た場合の示唆提案と、長い期間で見据えた場合の次世代 LWFA に対する示唆提案がなされている。

以上に示されたように、本論文は超広帯域電子スペクトロメーターの開発を通して世界初の GeV 級 LWFA の開発に大きく貢献し、実験結果の解析よりその制御と将来計画を議論したものである。GeV 級電子ビームの生成は LWFA コミュニティーに於けるマイルストーンの結果である。さらに航跡場加速電子ビーム特性のレーザー、キャピラリパラメータ依存性の分析結果は、LWFA の安定か、高品質化の研究に貴重な情報を与えるものである。従って、今後の LWFA 研究開発に本論文が与える影響は非常に大きいと判断される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。