

審査の結果の要旨

氏名 坂本 文人

論文は東京大学原子力専攻で開発中の小型コンプトン散乱 X 線源要素技術開発に関する研究である。この装置に用いられる電子線形加速器の特徴として、電子の加速周波数として X-band を採用している点が上げられる。X-band 帯域でのマルチバンチ電子ビーム発生及び大電力立体回路の実証は世界的に前例がなく、放電現象の把握と対策及び実験により得られた知見を整理することは、小型電子線形加速器の実現の上で非常に重要な役割を持つ。本論文では、世界初の試みとなる X-band 熱陰極高周波電子銃による電子ビーム発生試験、電子銃・進行波型加速管のための全 RF 立体回路システムの構築とその大電力高電界試験がなされ、その実験を通して得られた知見を体系的にまとめ、RF コンディショニングの最適手法についての検討がなされている。

第一章ではまず、現状の単色 X 線源とその応用に関して、その詳細な説明がなされている。現状の単色 X 線源としては第 3 世代に代表される大型放射光施設が主流であるが、汎用性に限界がある。そのため、コンプトン散乱による X 線発生が近年注目を浴び、世界各国の研究施設でコンプトン散乱 X 線源の開発が行われている。しかしながら現状のコンプトン散乱 X 線源は強度が足りず、またその不安定性と更なる小型化が実用へ向けて急務であることが述べられている。他の研究機関と比較し、東大システムは電子加速周波数に X-band (11.424GHz) を採用することで装置の規模が飛躍的に小型化されると共に、熱陰極高周波電子銃とロングパルスレーザーを採用することで、安定な X 線発生が実現可能であると示している。このシステムの構築にあたり、本論文は熱陰極高周波電子銃によるビーム発生試験、及び加速管を含む全 RF システムの構築と高電界試験の実施、更にコンプトン散乱のためのレーザーシステムの構築と X 線発生試験体系の構築を研究範囲とし、加速器分野、X 線応用分野における本研究の位置付けを明確に述べている。

第二章では東大原子力専攻で構築が進められている小型 X-band 電子線形加速器と Nd:YAG レーザーからなる小型コンプトン散乱 X 線源の詳細を説明し、クライストロンモジュレータの極限の小型化、PPM 型クライストロンの採用、X-band 熱陰極高周波電子銃とアルファ電磁石からなるマルチバンチ電子ビーム発生等、東大システムの特徴と有効性を明確に示している。

第三章においては、コンプトン散乱により得られる X 線の特性について理論的アプローチから数値計算を行い、電子ビームとレーザーパルスの最適化及び安定性について議論されている。また、コリメータを用いることで得られる X 線の単色性についても定量的に議論されており、得られる X 線のエネルギー分散が 10%程度であり、この値が 2 色 X 線 CT 等に十分な単色性であることが定量的に示されている。

第四章では、世界初の試みである X-band 熱陰極高周波電子銃試験の詳細が記されており、放電箇所の原因特定のためのモニター系を充実させた高周波立体回路を構築し、高周波窓や電子銃空洞における放電現象への対策として、RF コンディショニング手法の確立と外部磁場による回避法を提唱し、それらを実証している点は独創的と言える。更に、高電界試験を進め、熱陰極からの電子ビーム発生に世界で初めて成功し、エネルギースペクトルをアルファ電磁石内のスリットを用いる事で定量的に測定したことは非常に重要な成果と言える。また、熱陰極の熱による RF コンタクトとして装填している SUS スプリングの昇華現象が発生したが、X-band 故の小型化に伴う熱拡散の問題を打開するために、スプリング材質と熱陰極近傍構造の改造を行い、これらの問題点を解決した点には独自性が見られた。SUS スプリングの空洞への蒸着を考慮に入れ、電磁場計算コード SUPERFISH とビームトラッキングコード PARMELA による数値計算を行い、更に航跡場の影響を定量的に評価することで、実験で得られたデータに良好な一致が確認され、実験・数値計算両面から X-band

熱陰極高周波電子銃の有効性を世界で初めて実証している。

第五章では、熱陰極高周波電子銃によるマルチバンチ電子ビームの発生に引続き、ビーム加速のための加速管を含む全RF立体回路とビームラインの構築及びコンプトン散乱用レーザーシステムの構築が示されている。RFシステムは電子銃と加速管でのRFのジッターをなくすために一台のクライストロンからの大電力を合成・分配を行うため、非常に複雑な構造となるため、各箇所では様々なトラブルが発生した。しかしながら、各箇所での諸問題を徹底的に調査することで、逐次改善を加え、加速管・電子銃への理想的な大電力供給に成功し、全RFシステムを完成させた点には強い独自性が感じられる。また、高電界試験を実施し、加速管へ40 MW、電子銃へ5 MWの大電力投入に成功し、電子銃からの電子ビーム発生を実証した。更に、高電界試験の効率化につながるRFコンディショニングの方針を体系化し、様々な放電現象への的確な対応方法がまとめられている。また、ビーム輸送用のビームラインの構築に当たっては、レーザーパルスとの衝突点に、高分解能のビームプロファイルモニターを設置し、電子ビーム・レーザーパルスの4次元測定が可能なシステムを完成させた点は非常に独創的と言える。一方、コンプトン散乱によるX線発生に用いるレーザーパルスのための光学系を構築し、電子ビーム・レーザーパルス衝突点における、プロファイル、強度、重心位置の安定性を評価し、それらが10%以下であることを測定し、レーザーシステムがコンプトン散乱X線源に有効である事を実証した。

以上のように本論文は、コンプトン散乱X線源システムの非常に重要な位置を占めるX-band熱陰極高周波電子銃によるビーム発生、加速管を含む全RF立体回路の構築、ビームライン及びレーザーシステムの構築と、それら全ての性能評価を実施し、実験・数値計算両面からそれらを実証した。また、結論においては小型高エネルギー加速器を構築する上で課題となった点を、原子力保全工学を基にきれいにまとめられている。これらの成果は、今後の小型大強度X線源及び小型電子線形加速器の発展に貢献するところが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。