

## (論文内容の要旨)

本論文は、将来の普及型革新的放射線治療装置の電子加速器システムの開発及びその評価結果について纏めたものであり、8章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景、研究の目的及び論文の構成について簡略に纏めている。

第2章では、普及型の革新的放射線治療装置開発の社会的意義について述べるとともに、現在、放射線治療の主流となっている光子線治療が、将来的にも普及型放射線治療の中心となることを示した。また、光子線治療の革新技術である IMRT(Intensity Modulation Radiation Therapy)、IGRT(Image Guided Radiation Therapy)、及び動体追尾照射治療を1つのシステムに統合化し、高精度の放射線治療が容易に施行できるような統合型の放射線治療装置が、普及型の革新的放射線治療装置の主流となることを述べている。

第3章では、本研究がその開発作業の一部となった、動体追尾・画像誘導放射線治療装置の全体の概要について纏めている。高精度の光子線照準を可能とし、かつ、動体追尾照射に必要な高速のビーム追尾照準を可能とするために、「ジンバル支持 X 線ヘッド方式」を考案し、高速のビーム運動を可能とするための高剛性構造として O-Ring 方式を導入した。X 線ヘッドには、IMRT を可能とするための MLC(Multi Leaf Collimator)を装備し、O-Ring 上には、2組の kV X 線イメージング装置を搭載してシステム統合を行い、動体追尾照射治療及び IGRT が可能な統合型装置とした。

第4章では、本装置用の電子加速器システムの要求事項について纏め、続いてこれを実現するシステム設計の詳細について述べている。電子加速器システムの要求としては、想定する臨床例から加速エネルギーを選定し、また、想定する最大の照射野を必要とする臨床例から照射野を決定した。更に、高線量を必要とする定位治療を効率的に実施する観点から、線量率を設定した。高精度の線量投与の観点から、電子ビームのエネルギーの安定性を設定した。また、Step & Shoot IMRT のようにビームのオン・オフが頻繁に繰り返される治療に対応するために、電子ビームエネルギーの立ち上がり特性が極めて重要であることを示し、小線量の投与精度要求を設定した。治療 X 線の幾何学的な精度要求として、照準精度要求、MLC の位置分解能の要求、及び空間的なビームの切れ性能である半影の要求を設定した。更に、健常組織への不要被曝の原因となり、晩発性障害の原因となる恐れのある、MLC のリーフ間漏洩線量の要求を設定した。これに引き続き、電子加速器の機械的特性、システム全体構成を設計し、X 線ヘッド構成の設計を行った。更に、加速管を除く電子加速器の主要要素である、線量モニタシステム、導波管系、クライストロン RF ドライバ、クライストロン、クライストロン・モジュレータ、電子銃高圧パルス電源についての設計結果を纏めた。要求される電子ビームエネルギーの安定性や投与吸収線量精度を達成するためには、電子加速器システムの制御が極めて重要な要素となり、これを達成するために必要な各種の自動制御とその設計詳細について纏めている。最後に、臨床用の医療機器としての安全性を確保するための安全設計及びインタロック制御の設計結果を纏めている。

|    |        |
|----|--------|
| 氏名 | 神納 祐一郎 |
|----|--------|

第5章では、本電子加速器システムの中核部品であり、動体追尾照射が可能な軽量のX線ヘッドの実現を可能とする、超小型加速管の開発の詳細を纏めている。まず、加速用マイクロ波の周波数の選定に引き続き、加速管の方式及び構成を設計する。更に、各構成要素の設計の詳細について述べ、加速用マイクロ波周波数としては、従来の医療用電子リニアックの倍の周波数であるCバンド(5712 MHz)を選定し、定在波型加速管として設計を進めている。これらの設計に基づき、加速管を試作し、電子銃単体のビーム評価試験に引き続いて加速管のビーム評価試験及び漏洩線量評価試験を実施した結果を纏め、設計要求が満足されていることを確認している。

第6章では、第5章で述べた超小型加速管の共振周波数の変化に追従し、クライストロンから供給される加速用マイクロ波の周波数が、常に加速管の共振周波数に同調するように制御するための、デジタル型のAFC(Automatic Frequency Controller)の開発について述べている。従来の医療用電子リニアックでも、加速管の共振周波数の変動に追従して、加速用マイクロ波源であるクライストロンやマグネトロン周波数を制御するアナログAFCが用いられているが、本加速管は従来の医療用電子リニアックの加速管と比較して、熱密度が3倍以上、熱膨張に対する周波数感度が2倍であり、結果として6倍以上の周波数変動があるため、従来型のアナログAFCでは、キャプチャ・レンジ及び追従速度の点で対応できない。これを解決するため新規に考案したデジタルAFCの概要及び設計の詳細について述べ、試作回路を5章の加速管と組み合わせて実施した評価試験の結果を纏めている。

第7章では、完成された装置の状態を実施した、電子加速器システムの総合的な性能評価試験の結果を纏めている。まず、当該工業規格であるIEC 60976やIEC 60977、及びJIS Z 4714に規定される基本的なシステム性能の評価を実施し、その要求事項を全て満足していることを確認している。続いて、アイソセンター照準精度の評価を更に詳細に実施した。また、ジンバル軸をPan軸及びTilt軸の両軸で2.5°の最大角度まで駆動して放射線照射野の平坦性を試験評価して、IEC 60976やJIS Z 4714の規定を満足していることを確認し、動体追尾照射が可能であることを確認している。更に、MLCの漏洩線量評価を行っている。IMRT性能の評価としては、MLCの動作精度を確認するブロック・パターン評価試験、及びStep & Shoot IMRTに必要な少線量投与能力評価試験の2種類の基礎試験で性能を確認した上で、前立腺ファントムを使用した総合性能の評価を実施した。

第8章では、得られた成果を総括し、今後の課題及び研究の方向性について述べている。

|    |        |
|----|--------|
| 氏名 | 神納 祐一郎 |
|----|--------|

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、動体追尾画像誘導放射線治療装置用の電子加速器システムの開発及びその評価結果について纏めたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 近年、陽子線治療装置や重粒子線治療装置等のブラッグ・ピークによる深度方向の吸収線量制御が可能な優れた放射線治療装置が開発されつつあるが、初期設備経費や運転経費の点から普及性に問題があり、近未来の放射線治療の鍵となる普及型の革新的放射線治療装置は、光子線治療の革新技術である IMRT(Intensity Modulation Radiation Therapy)、IGRT(Image Guided Radiation Therapy)、及び動体追尾照射治療を全て備え、高精度の放射線治療が容易に施行できるような統合的な光子線放射線治療装置と考えられることを導いた。

2. 上記の放射線治療装置を実現するための基本的なコンセプトとして「ジンバル支持 X 線ヘッド方式」及び「O-Ring」方式を導入し、X 線ヘッドには、IMRT を可能とするための MLC(Multi Leaf Collimator)を装備し、O-Ring 上には、2組の kV X 線イメージング装置を搭載してシステム統合を行い、IGRT が可能な統合型の装置の概要を示した。更に動体追尾照射の概念を考案した。

3. 本装置用の電子加速器システムの要求事項について纏め、続いてこれを実現するシステムの詳細設計を実施した。特に、要求される電子ビームエネルギーの安定性や投与吸収線量精度を達成するためには、電子加速器システムの制御が極めて重要な要素となる。これを達成するために、クライストロン電力自動制御方式を新規に考案した。

4. 本電子加速器システムの中核部品である電子加速管としては、超小型・軽量性が要求されるが、従来の医療用電子リニアックの倍の周波数である C バンド (5712 MHz) を選定し、プリバンチャー空洞と 2 個のバンチャー空洞及びこれらの空洞を同軸結合するための 2 個の結合空洞の計 5 空洞から構成されるアキシアル・カップリング型のインジェクタ部をユニークな特徴とする定在波型加速管を開発し、ビーム特性及び漏洩線量の評価を実施して、要求性能を全て満足していることを確認した。

5. 上記の電子加速管は、熱密度が極めて高く、共振周波数がビーム・オン後、急速かつ大幅に変動するが、これに追従可能なデジタル型の AFC(Automatic Frequency Controller)を新規に考案し、試作及び評価を実施した。

6. 放射線治療システム全体としての評価を実施し、厚生労働省の薬事承認や米 FDA (Food and Drug Administration)の承認に必要な機能・性能を保有するとともに、IMRT、IGRT 及び動体追尾に必要な機能・性能を有することを確認した。

以上、本論文は、近未来の放射線治療の鍵となる放射線治療装置の中で、その中核となる超小型電子加速器システムの開発について纏めたものであり、この成果は、医工連携の革新的な国産高精度放射線治療装置として結実し、単に工学分野に止まらず、臨床医学の分野にも一定の貢献をしつつある。また、がん治療の実際の場合でも、がん患者救済に成果を発揮しつつあり、学術上も社会的にも寄与するところ大である。よって、本論文は、博士 (工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 1 月 13 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。