

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	シンクロトロンを用いた粒子線治療用加速器システムの小型化及び性能向上に関する研究
Title(English)	Research on footprint reduction and performance improvement of synchrotron-based accelerator systems dedicated to particle beam therapy
著者(和文)	鮫名風太郎
Author(English)	Futaro Ebina
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11995号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:林崎 規託,小栗 慶之,赤塚 洋,長谷川 純,松本 義久
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11995号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	鮫名風太郎	
		氏名	職名	氏名	職名
論文審査 審査員	主査	林崎 規託	教授	審査員	松本 義久 准教授
	審査員	小栗 慶之	教授		
		赤塚 洋	准教授		
		長谷川 純	准教授		

## 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「シンクロトロンを用いた粒子線治療用加速器システムの小型化及び性能向上に関する研究」と題し、全7章から構成されている。

第1章「序論」では、放射線治療の一種である粒子線治療には、正常組織の被ばく低減による副作用の低減効果が期待されているものの、粒子線治療システムは一般的なX線治療装置に比べて大型の装置であり、設置面積や診療コストの制約から医学的な要請に対して十分に普及しているとは言い難いことを指摘している。そして、本論文の目的が、シンクロトロンを用いた粒子線治療システムの普及拡大に向けて、第一に加速器システムの小型化、第二にビーム利用効率の改善を通じた線量率および治療スループットの向上、第三に照射ビーム位置の変動抑制による照射の高精度化が課題となるため、これらに資する加速器技術の開発を通じて小型化と性能向上を実現するものであることを述べている。

第2章「粒子線治療用シンクロトロンの原理」では、シンクロトロンを用いた粒子線治療用加速器システムの基本構成、シンクロトロン中を周回するビームの光学パラメータの調整手法、粒子線治療で広く用いられているビームの入射法(多重回転入射法)と取り出し法(高周波を用いた遅い取り出し法)について概説するとともに、ビームの取り出し効率を向上するために一般的に用いられるシンクロトロンの運転条件(Hardt条件)について言及している。

第3章「陽子線治療用小型シンクロトロンの設計」では、第一の課題である加速器システムの小型化に対して、スキヤニング照射法用に特化した、水平方向にのみ弱収束の光学系を持つ超周期4の小型陽子シンクロトロンを新しく開発し、その周長は従来型(周長23m)よりも22%短縮された18mであり、電磁石数は従来型(26台)の半分以下の11台まで低減できたことを述べている。そして、この小型陽子シンクロトロンを用いた陽子線治療用加速器システムの設置面積は783m<sup>2</sup>であり、従来型(設置面積1080m<sup>2</sup>)に比べて約30%の小型化が達成されたことを述べている。

第4章「スパイラルステップ一定条件の導出と評価」では、第二の課題であるビーム利用効率の改善を通じた線量率および治療スループットの向上に対して、ビーム取り出し用の静電デフレクタに入射するビーム粒子とシンクロトロン中を周回するビーム粒子との間隔(スパイラルステップ)がビーム粒子の運動量に依らず一定となる運転条件では、同じく運動量に依存するHardt条件よりも静電デフレクタ入口部におけるビーム損失を低減できる可能性があることを提案し、その条件を成立させるための水平クロマティシティの制約条件を導出している。そして、粒子トラッキング解析により検証した結果、セバトトリクス(Sevatronics)の歪みを抑えた理想的な解析用シンクロトロンではスパイラルステップ一定条件を適用した場合の取り出し効率(87.6%)はHardt条件の場合(85.2%)よりも2.4%高いのに対し、セバトトリクスに歪みがある実際の小型シンクロトロンでは両条件が成立しなかったことから、ビーム取り出し効率の向上に一定の貢献を果たすものの、シンクロトロンの光学系によってはビーム取り出し効率が最大となる水平クロマティシティが理論式から外れる可能性があると考えられている。

第5章「シンクロトロン偏向磁場由来のディスパージョンの評価」では、第三の課題である照射ビーム位置の変動抑制による照射の高精度化に対して、シンクロトロンからの取り出しビームの運動量分散(ディスパージョン)を患部位置(アイソセンタ)においてゼロにすることが効果的なため、従来からの高周波由来のディスパージョンに加えて偏向磁場由来のものを新しく定義して定式化し、両者をアイソセンタにおいて同時にゼロにするための高エネルギービーム輸送系が満たすべき条件を導出している。そして、大阪重粒子センターに導入された炭素シンクロトロンでの実測結果より、偏向磁場由来のディスパージョンが実用上十分な精度で理論値と一致したことを示している。とりわけシンクロトロン偏向電磁石の磁気余効による運動量の変化に起因する照射ビーム位置の変動を抑制するには、アイソセンタにおける偏向磁場由来のディスパージョンをゼロに補正することが有効であり、本論文で示された二種類のディスパージョンの比を用いて予測することで、高エネルギービーム輸送系の設計負荷の軽減や機器コストの低減が可能であることを指摘している。

第6章「小型陽子シンクロトロンを用いた一室型の加速器システム」では、前章までの成果を統合した小型陽子シンクロトロンによる一室型の陽子線治療システムを提案し、複数治療室を想定した場合に比べて4割以上小さい430m<sup>2</sup>の設置面積で済むこと、さらにアイソセンタにおけるディスパージョンが全てのガントリー回転角に対してゼロにできることを述べている。

第7章「結論」では、各章において得られた結果を総括し、本論文の結論としている。これを要するに、本論文は、シンクロトロンを用いた粒子線治療用加速器システムの小型化・線量率向上・照射精度向上に資する加速器技術を開発したことにより、粒子線治療システムとしての性能と普及性を向上し、加速器工学の分野に新たな知見を与えたものであり、工学上及び工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値あるものと認められる。