

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)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： 融合理工学 系  
Department of Graduate major in 原子核工学 コース  
学生氏名： 鮫名 風太郎  
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)  
Academic Degree Requested Doctor of  
指導教員(主)： 林崎 規託  
Academic Supervisor(main)  
指導教員(副)：  
Academic Supervisor(sub)

## 要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

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。しかしながら、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、設置面積や機器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。そこで本研究ではシンクロトロンを用いた粒子線治療システムの小型化および性能向上に取り組んだ。シンクロトロンを用いた粒子線治療システムが普及する上では、第一に加速器システムの設置面積の低減、第二にビーム利用効率の改善を通じた線量率の向上、第三に照射ビーム位置の変動抑制による高精度化が課題となる。

第一の課題に対し、本研究ではスキャニング照射法での使用に特化した小型の陽子シンクロトロン(小型陽子シンクロトロン)を開発した。小型陽子シンクロトロンは水平方向にのみ弱収束の光学系を持つ超周期 4 のシンクロトロンであり、その周長は 18m と、従来型のシンクロトロンに比べて 30%短縮されている。また小型陽子シンクロトロンを構成する電磁石の数は従来(26 台)の半分以下となる 11 台にまで低減されている。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、従来型のシンクロトロンを用いた加速器システムに比べて約 30%低減している。小型陽子シンクロトロンの開発はシンクロトロンを用いた陽子線治療システムの普及に大きく貢献しており、世界 12 か所(2020 年 11 月時点、建設中含む)の陽子線治療施設へ小型陽子シンクロトロンが導入されている。シンクロトロンを用いた小型の一室型粒子線システムを実現する為、高エネルギービーム輸送系(HEBT 系)中の偏向電磁石を省略した加速器システムの構成とビーム輸送系の設計手法を提案した。本研究の知見はシンクロトロンを用いた一室型陽子線治療システムの小型化及び機器コストの低減に貢献し、陽子線治療の普及に一層の貢献を果たすことが期待される。

第二の課題であるビーム利用効率の向上に対し、本研究では高周波による遅い取り出しを用いるシンクロトロンにおいて、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ための条件式(スパイラルステップ一定条件)を導出した。スパイラルステップ一定条件の下では、静電デフレクタ入口におけるビーム損失の割合が従来の運転条件(Hardt 条件)に比べて低下する為、シンクロトロンからのビーム取り出し効率の向上が期待できる。スパイラルステップ一定条件の効果はシンクロトロンからのビーム取り出しの粒子トラッキング解析により検証した。解析の結果からスパイラルステップ一定条件がビーム取り出し効率の向上に一定の貢献を果たすこと、加速器の構成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のあることが判明した。本研究の知見により、Hardt 条件とスパイラルステップ一定条件がなるべく接近する様にシンクロトロン光学系を設計し、安定して高い取り出し効率を得ることが可能となる。

第三の課題である照射精度の向上について、本研究ではシンクロトロンからの取り出しビームについて運動量偏差の発生要因が異なる二種類のディスパージョンを定式化した。第一のディスパージョンは従来よりある高周波由来のディスパージョンであり、第二のディスパージョンは新しく定義した偏向磁場由来のディスパージョンである。高周波由来のディスパージョン(DBx)は高周波由来のディスパージョン(Dfx)と比例関係にあり、両者の比(DBx/Dfx)はモーメントコンパクションファクタ $\alpha$ とローレンツファクタ $\gamma$ を用いて $\alpha\gamma^2$ と表される。大阪重粒子センターへ導入された炭素シンクロトロンを用いて二種類のディスパージョンを測定した結果、偏向磁場由来のディスパージョンと高周波由来のディスパージョンとの比例係数は誤差 16%以内で理論値と一致した。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 0 補正することが効果的である。また、HEBT 系の設計時に本研究で述べる二種類のディスパージョンの関係を用いて偏向磁場由来のディスパージョンを予測することで、HEBT 系の機器コスト低減および設計負荷の軽減が可能となる。

本研究では、シンクロトロンを用いた粒子線治療システムの小型化、線量率向上、照射精度向上に貢献する技術をそれぞれ開発し、粒子線治療システムの普及性を向上した。本研究において得られた知見は 2014 年以降建設中まで含めると世界 14 か所以上の粒子線治療施設において用いられており、シンクロトロンを用いた粒子線治療システムの普及性向上に大きな貢献を果たしている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	鯨名 風太郎		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	林崎 規託	
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

The purpose of this research is to reduce the footprint of a synchrotron-based accelerator system dedicated to particle beam therapy systems, to improve the extraction efficiency from the synchrotron, and to achieve precise irradiation.

To reduce the footprint of the accelerator system, a compact synchrotron for proton beam therapy has been developed. This synchrotron has horizontally weak focusing optics, and the circumference of the synchrotron is only 18m, which is the world's smallest at the time of development. A single room dedicated proton beam therapy system has also been developed. The footprint of the single-room system is about 430m<sup>2</sup> and it is less than half of the conventional one.

To improve the extraction efficiency from a synchrotron, a new operating condition named "constant spiral-step condition" was proposed. The constant spiral-step condition gives the horizontal chromaticity that makes the spiral-steps of beams with different momentum deviations constant. The constant spiral-step condition was evaluated by particle tracking analysis. The extraction efficiency with this condition is 2.4% higher than that with the conventional operating condition.

For precise irradiation, a new type dispersion function named "BM-derived dispersion" was proposed. This dispersion gives the proportional coefficient of momentum change and beam-position change due to the magnetic field variation of the bending magnets in a synchrotron. The BM-derived dispersion is proportional to the conventional one, and the proportional constant is determined by the accelerator optics and beam energy. The relationship is verified by dispersion measurement. The BM-derived dispersion agrees with theoretical value within 16% accuracy, which is enough for beam transport design.

The results of this research have been applied to 14 particle beam therapy systems, including under construction. This research has contributed to the spread of particle beam therapy by footprint reduction of a synchrotron-based accelerator system, improvement of the extraction efficiency from the synchrotron, and realizing precise irradiation.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).