

医療用陽子線加速器の トータルシステム展開と設計

長戸路 雄 厚

System Development and Design of Proton Beam Accelerators for Medical Use
Yuukou NAGATORO

1. はじめに

近年、医療に対する考え方が大きく変わりつつある。患者治療には低侵襲非観血システムによる、いわゆるQOL (Quality of Life, 生活の質) の高い治療法が注目を受けている。以前より医療関係者の間では、21世紀の病院システムはいかにあるべきかという議論が興きている。

特に先進国では、死亡原因の第一になっているがんの治療を病院システムの中でどのように位置付けるかが議論の中心になっている。我国においても西暦 2000 年にはがん患者数は50万人にも到ると予測されている。

がんの治療法には、外科療法、化学療法そして放射線療法等があるが、その中でも人体の機能や形態の欠損が少なく全身への影響も少ない放射線療法が注目を受けている。放射線には、電子線、X線、高エネルギーの粒子線（速中性子線、陽子線、カーボンイオン等の重粒子線）があるが、ブラッグピークによる高線量領域形成効果が利用でき、かつ放射線照射による正常細胞への障害が少なく従って後遺症が少なく済む陽子線や重粒子線による治療が注視されている。^{1)~3)} 陽子線や重粒子線は、加速器により生成する。陽子線と重粒子線とでは重粒子線の方が原理的にがん細胞殺傷力は大きく生物学的効果は大きい。しかし、これまでのX線治療の蓄積データが利用できかつ加速器システムとして重粒子線利用のものよりコンパクトで低コストである陽子線利用システムが先述のQOLの高い低侵襲非観血システムの1つとして国内病院施設への普及型として着目されている。

現在世界各国では、欧米を中心に17施設（陽子線16施設、重粒子1施設）で治療が実施され、治療患者数は2万人を越えた。陽子線や重粒子線によるがん治療は、世界的にはまず網膜メラノーマ、頭蓋内病巣そして前立線がんを実績が上がり、その後肝がんや肺がんなどの体内深部がんの治療へと進んでいる。我国では、筑波大学陽子線医学利用研究センターが1983年から臨床研究を開始した。また、科学技術庁放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置“HIMAC” (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) によって1994年から炭素イオンビームによる臨床試行が行われている。

なお、加速器本体はイオンビームの加速原理の違いによりシンクロトロン方式とサイクロト

ロン方式があるが、ここではエネルギー変更が容易に行なえかつ医療機能の拡張への適応性の高いシンクロトロン方式について考える。

医療用加速器は21世紀先端医療の1つとして着目されているが、これまでは図1に示すように加速器本体を構成する電磁石、電源、真空、高周波、制御などのシステムコンポーネントの設計が中心であった。しかし、今後は加速器本体設計のみではなく医療や病院システムの検討、病院システムの運営、施設の予防保全、患者支援業務等を含めたトータルシステム展開へと変ぼうして行くと予測される。

その内容を図2に示す。

本報告は、医療用陽子線加速器のトータルシステム展開に従いまとめたシステム設計の結果について述べる。

2. トータルシステム展開

近年議論的になっている21世紀の病院システムには、以下の事柄が要求されると考えられる。

- 1) 患者のQOLが高いこと。即ち、低侵襲非観血のがん治療システムを中心に患者が違和感や恐怖感を持たず気軽に安心して治療を受けることができる環境であること。
- 2) 高度情報ネットワーク（ギガビットネットワーク等）により、国内外の先進的がん研究機関や高機能病院と連携し、より高い質の医療サービスを患者に提供できること。電子カルテ方式の採用もネットワーク構成要素の1つとして考えられる。
- 3) 単に病気治療のみではなく、保健や福祉も視野に入れた地域統括医療センターの機能も併せ持つこと。

医療用加速器システムは、大別すると診断部、治療計画部そして照射部より成る。診断部はX線CT（断層像撮影装置）、MRI（Magnetic Resonance Imaging）そしてPET（Positron Emission Tomography）の各装置によりがん部位の深さ、形状等を特定する。治療計画部は、CT像、MRI像、PET像から患部に最も有効に線量を与えるビーム方向を決定して体内線量分布を求める。照射部は、必要な体内深さに到達する高エネルギーの陽子を発生・加速する加速器、加速器から得られる陽子線を任意の角度に輸送するガントリー、点状ビームを患部形状と同じ形に整形する照射野形成装置および患者を固定する治療ベッド等で構成される。照射部は、治療計画部によって決定されたビーム方向、照射深さそして照射広さを実現するべくビームを整形して患者に照射する。

つぎに、医療トータルシステムにて要求される加速器システムの具備すべき性能を以下にまとめる。⁴⁾

- 1) 小型化加速器システム（シンクロトロン周長30m以下）

- 2) 高制御性〔運転容易、小人数運転（2人）〕
- 3) 低コスト化（建設費、運転経費、メンテナンス費等経済性）
- 4) 治療計画充実化（治療計画ソフト、高精度線量分布計算、高効率運転制御ソフト）
- 5) 病院建屋設計との整合性（合理的レイアウト、放射線シャヘイ設計、安全管理予防保全）
- 6) 高度情報ネットワークシステムとの整合性（診断装置・画像処理装置を含む病院 LAN システム、他医療機関連携、電子カルテ対応等）
- 7) 医療機能拡張への高い適応性（がん患部 3 次元治療システム、コンフォーマルセラピー対応等）陽子線加速器システムが、これらの要求に応えられるがん治療システムとして有力視されている。

3. トータルシステム設計

以上の諸要求性能を満足できる陽子線加速器システムを図 3 に、陽子シンクロトロン本体を図 4 に示す。さらに病院システム全体ブロック図を図 5 に、病院システム概念図を図 6 に示す。

陽子シンクロトロン本体は、周長 23m、平均直径 7m とコンパクトでイオン種は H^+ 、そのエネルギーは 70~250MeV で可変、電流は 10nA とした。本シンクロトロンは、陽子ビームを周回させる偏向電磁石にビームを安定動作させる四極電磁石の機能を合体させた機能結合型偏向電磁石を用いることにより、装置の小型化と運転性の向上を図った。本体重量は約 80ton となった。陽子はイオン源で発生させ、ビーム入射器で 10MeV 程度の低エネルギー加速しそれをシンクロトロンに入射して高エネルギーまで加速する。250MeV の陽子は、体内に入ると約 30cm 深さまで到達でき深部がんの治療に十分に利用できる。通常、患者への標準的照射は患部の位置決めに約 30 分そしてその後の 1 回の照射治療に 1~2 分間で 2~4 Gy（グレイ）照射し、それを 20 回以内で継続するパターンと考えられている。平均電流 10nA は、陽子線の照射線量にて 2 Gy/min が確保できる。したがって、1 日 1 回の照射とすると 1 ヶ月以内に治療を終えることが可能となる。

このシステムでは、加速器本体からの細い径のビームを患者患部の形状（大きさ、深さ）に合わせて拡げるために照射野形成装置として二重散乱体法およびウォブラーと散乱体の組合せのいずれかを用いビーム径を最大 20cm（平坦度 $< \pm 2\%$ ）拡大整形できる。⁵⁾ 照射は、患者の呼吸に同期する方式をとり正常細胞への照射を防止する。また、このシステムは陽子線を患者に対し任意方向から打込むことの出来る回転ガントリーを 2 セット、固定照射装置を 1 セット具備し、年間で新患 400 人の治療を行える性能を持つ。

病院システムの敷地面積は 2,600 m^2 (65m×40m) 以下とコンパクトとなる。加速器システムを地下 1 階に設置し、電源室、制御室、診断装置室そして治療計画室等は地上 1 階および 2 階に設ける。そして、陽子線治療システムは病院内全情報システムと連結し、患者は総合的治療を受けることが出来る。

なお、照射野形成装置の先端部（患者のすぐ上方）には患者ボラスやコリメータを設け、がん患部の輪郭部に合致するよう調整し、輪郭部付近の正常細胞への照射を一層防止する工夫が成されている。

4. おわりに

以上、21世紀の病院システムにおいて中核を担うであろう低侵襲非観血システムのうち、正常細胞に影響を与えずがん細胞のみを死滅させるという本質的に優れた原理の陽子線加速器システムの設計について述べた。

陽子線によるがん治療は、現在医療関係者が鋭意治験データを蓄積しつつある段階である。

医療関係者によると、現時点では治療実績は良好で陽子線照射による後遺症は見られず、がん治療法として今後の躍進が大きく期待できると言う。

陽子線加速器システムの設計は、今後も加速器システムのハードウェア技術の向上のみならず医療ネットワーク技術も充実させ、総合力を磨き一層簡単で精度の良い治療システムの構築へと注力して行かねばならない。

本研究は、筆者が千葉敬愛短期大学に赴任する直前まで勤務した(株)日立製作所において成されたものである。筆者は、加速器トータルシステムの全体統括とシステム要素技術である真空技術の開発を中心に担当した。

参考文献

- 1) 高田、他:陽子線によるがん治療の最前線 1～6、薬局、南山堂 (1994-12～1995-6)
- 2) 辻井:陽子線治療の進歩と展望、日本放射線腫瘍学会誌、6、63～76 (1994)
- 3) 河内:医療用重粒子加速器の現状、日本原子力学会誌、38、8、650～657 (1996)
- 4) Noda, et al.: Dedicated Accelerator Project for Proton Therapy at Kyoto University, Proc. of XXI PTCOG Meeting, P. 292 (1994)
- 5) Y. Takada: Application of the Dual-ring Double Scattering Method for Proton Field Enlargement to Beam With Finite Emittance, Proc. of XXI PTCOG Meeting, p.100 (1994)

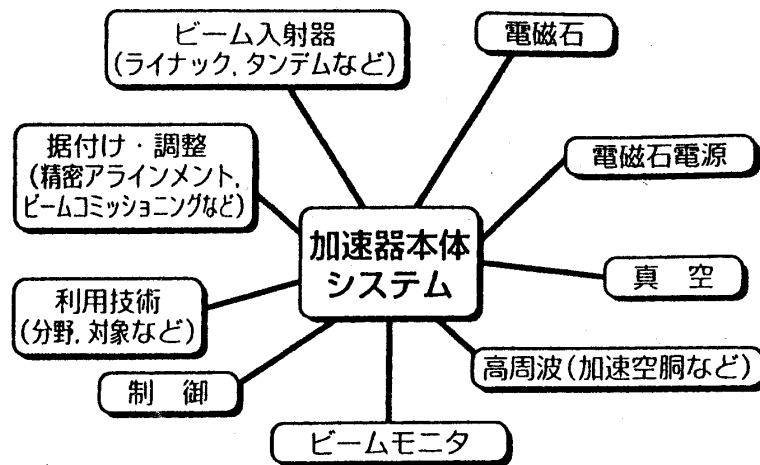


図1 加速器本体システムの構成

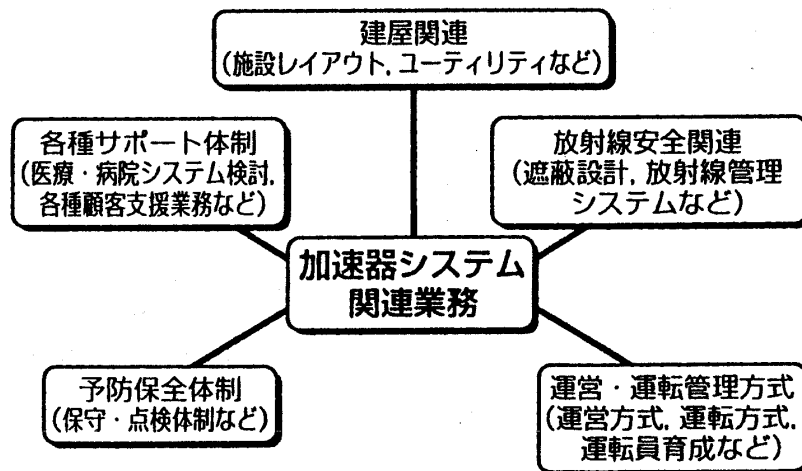


図2 加速器システム関連業務の構成

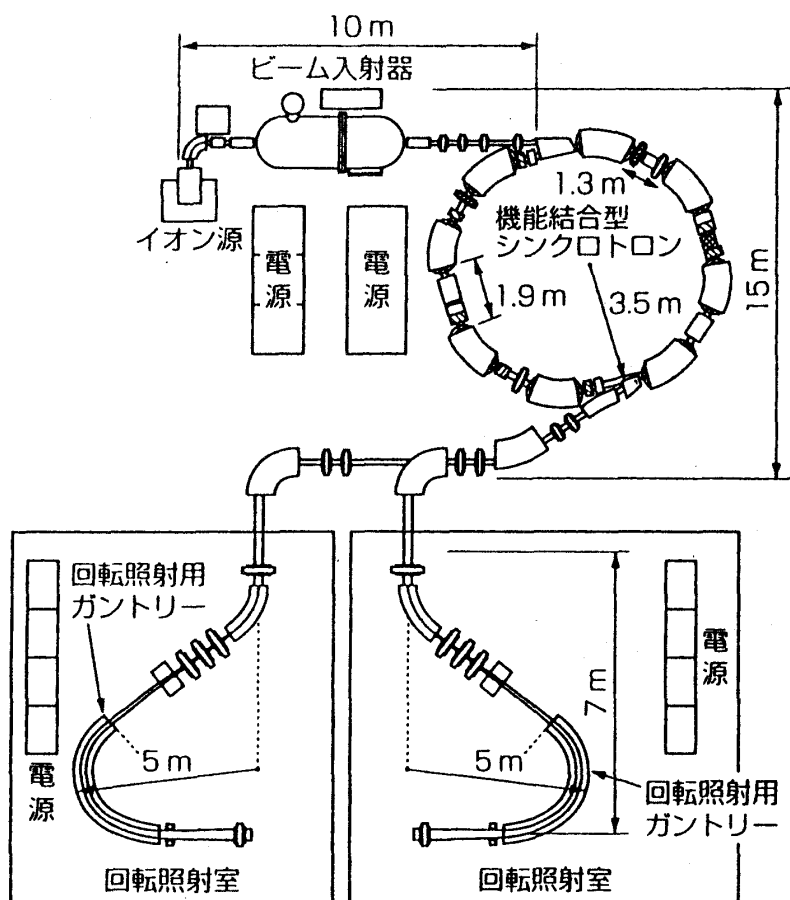


図 3 がん治療用陽子線加速器のシステム例

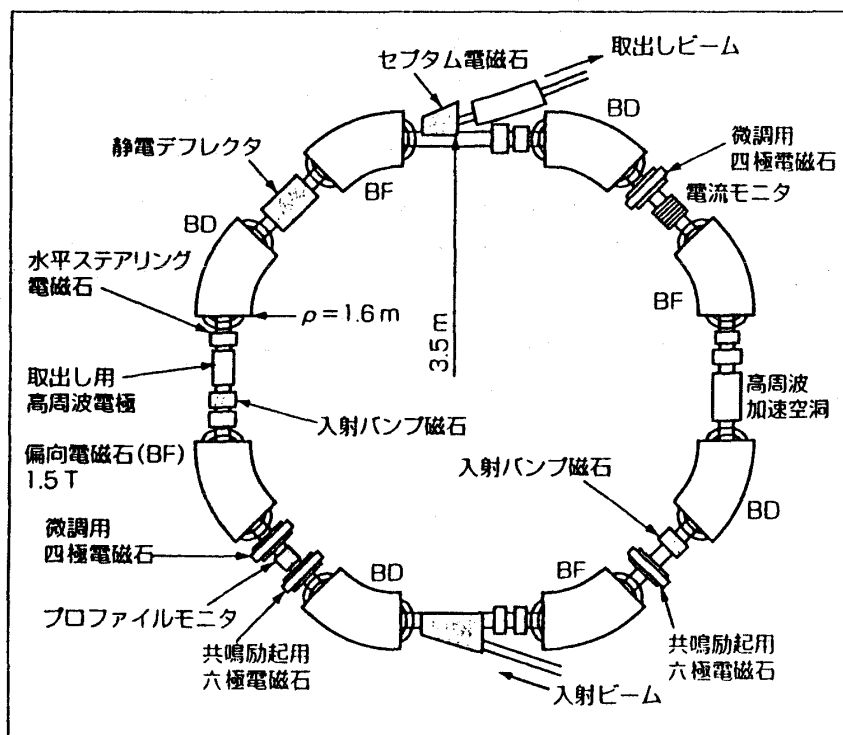
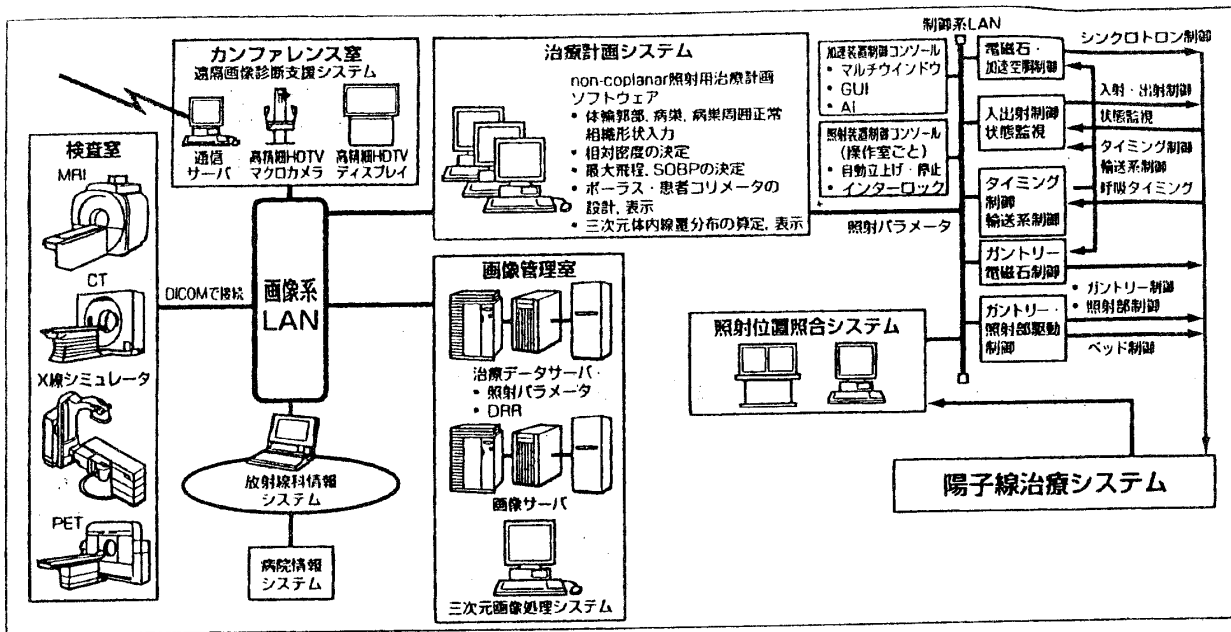


図 4 陽子エネルギー250 MeVの機能結合型シンクロトロン

医療用陽子線加速器のトータルシステム展開と設計



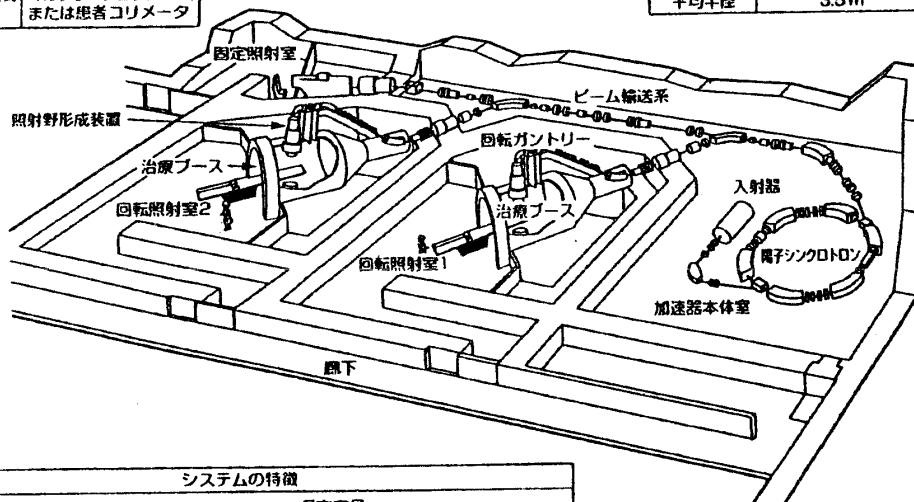
注：略語説明 PET(Positron Emission Tomography), DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)
HDTV(High Definition Television), DRR(Digital Reconstruction Radiography), SOBPP(Spread Out Bragg Peak)
GUI(Graphical User Interface)

図5 医用治療システムの全体構成

照射野	φ20 cm以上
照射深さ	水中30 cm
照射野形成方法	・ウォブラー+散乱体 ・二重散乱体 ・スポットスキニング
SAD	3.2 m
コリメータ方式	マルチリーフコリメータ、または患者コリメータ

項目	シンクロトロン仕様
イオン種	H ⁺
エネルギー	70~250 MeV可変
電流	10 nA平均
周長	23 m
平均半径	3.5 m

項目	シンクロトロン仕様
エネルギー連続可変	70~250 MeV
メンテナンス容易	
放射化少	
高品位ビーム取出し 拡散共鳴射出法*	
コンパクトタイプ 周長23 m, 80 t	
運転・制御容易 制御パラメータミニマム	
拡張性 エネルギー増強容易	



システムの特徴
・コンパクトレイアウト 回転ガントリー×2+固定照射×1 敷地面積60×45(m)以内(医療設備、管理設備を含む) 天井走行クレーン不要
・保守容易 システムの放射化少 呼吸同期照射 高速スイッチング(100 μs以下)に対応

注：略語説明など SAD(Source to Axis Distance), *電磁石強度一定で高周波を加える共鳴取出し法

図6 陽子線治療システムの概念図