

森井 保次  
MORII Yasutsugu

祐延 悟  
SUKENOBU Satoru

川口 滋  
KAWAGUCHI Shigeru

加速器は医学・産業分野で幅広く使用されており、今後さらに大きく伸びることが期待されている。医学分野では、放射光を用いた冠状動脈撮影や単色 X 線 CT および粒子線がん治療装置が期待されている。周長 45 m の電子シンクロトロン、7 T の超電導ウィングラ、X 線ビームラインおよび診断系からなる放射光を用いた小型の専用診断装置の設計を行った。また、粒子線がん治療装置では標準的な陽子線がん治療装置と小型の重粒子の設計を行った。産業分野の利用では、多数の用途に使える小型の 2.5 MeV-CW の電子線照射用加速器を製作中である。

Accelerators are widely used in the medical and industrial fields.

In the medical field, applications include intravenous coronary angiography and monochromatic X-ray computer tomography using synchrotron radiation (SR), and cancer therapy using protons and heavy ions. A compact system for medical diagnosis using SR has been designed, consisting of an electron storage ring with a circumference of 45 m, 7 T superconducting wigglers, and an X-ray beam line. A standard proton therapy system and a compact heavy ion therapy system have also been designed.

For industrial use, a compact 2.5 MeV-CW electron irradiation accelerator is under construction.

## 1 まえがき

加速器は原子核物理学や素粒子物理学の実験装置として発展してきた。近年、シンクロトロン放射光の物性や分子生物学への適応など、加速器で作られる高エネルギーの電子・イオンビームや放射光などが他の分野にも利用されるようになってきた。ここでは、特に加速器の医学・産業利用を取り上げる。

医学分野では主にがん治療と放射光の X 線を用いた診断への利用が挙げられる。また、PET (Positron Emission tomography) 用のラジオアイソトープ (RI) 製造装置などもある。

産業分野ではイオン注入装置と半導体微細加工が挙げられる。また、電子線照射によるプラスチック類の硬化処理、滅菌処理、排煙処理や排水処理への利用もある。

これらの中で、医用リニアック、PET 用小型サイクロトロンやイオン注入装置はかなりの台数が運用されており、したがって、技術的にもかなり確立されていると言ってよい。ここでは、現在は開発段階であるが今後大きく伸びることが期待されるものについて、利用内容と当社が提案中の装置の設計概要を紹介する。

## 2 放射光の医学利用

### 2.1 医学利用の概要

医学分野では胸部レントゲン撮影から CT (Computer

Tomography) まで、X 線が幅広く利用されている。ここで従来から用いられている X 線管からの X 線の代わりに電子シンクロトロンからの放射光を用いると、次の利点がある。

- (1) 高輝度 (X 線管より数けた強度が大きい)
- (2) 平行性が良い
- (3) エネルギーの単色化が容易

以下にこの放射光の特徴を生かす代表的な利用例を述べる。

**2.1.1 経静脈法による冠状動脈撮影** 心筋梗塞 (こうそく) の原因は、冠状動脈に狭窄 (さく) があり、血流が悪くなっているためである。冠状動脈の診断は、目的とする部位の動脈上流からカテーテルを挿入し、急速に造影剤を注入して撮像するという方法が採られ、危険を伴うことがある。これに対して、放射光を用いる冠状動脈撮影は放射光が高輝度であり、低濃度の造影剤でも十分診断が可能となるため、侵襲性の少ない経静脈法の利用が可能となる。診断時間の短縮や危険性が低減され、従来に比べ適用患者の範囲を広げることができる。米国で約 20 名、ドイツで約 200 名、KEK (高エネルギー加速器研究機構) と筑波大学で 4 名の臨床例がある。

**2.1.2 単色 X 線 CT** 従来の CT では、X 線管の白色光を用いるので、被写体が厚いほど透過する X 線の高エネルギー成分が多くなるビームハードニング現象が生ずる。

これに対し、単色化した放射光では単一エネルギーなの

でビームハードニングは発生せず、より正確にCT値の測定が可能になり、位置精度が向上する。また、異なる二つのエネルギーの単色X線撮影を行うと、体内の電子密度分布が定量的に測定できる。粒子線のがん治療では、CTのデータから治療計画を行うが、この電子密度分布データを用いることにより、従来のCTに比べて精度の高い治療計画をたてることができる。

## 2.2 放射光診断システムの設計概要<sup>1)</sup>

従来の放射光の医学利用は、物理・物性研究の多目的の大型の装置の一部のビームラインで行われてきた。これに対して放射線医学総合研究所では、将来の病院設置を目ざした医学研究専用の小型の放射光診断システムを計画中であり、当社は1996年度から設計に協力してきた。設計に際しては、当社の医用機器のX線アンギオ装置やCTでの実績・実験から画質に要求される条件を算出し、これを基にビームラインから加速器までの装置仕様の最適化を図った。以下に設計の概要を紹介する。

冠状動脈撮影および単色X線CTで、必要となるX線エネルギーと強度を表1に示す。

表1. 医学用に必要なX線エネルギーと光子数  
X-ray energy and photon numbers for medical use

応用名	エネルギー (keV)	光子数 (個/cm <sup>2</sup> /s)	条件
単色X線CT	40~70	$1.7 \times 10^{11}$	頭部 50 mGy
冠状動脈撮影	33	$7.8 \times 10^{12}$	増影剤:ヨウ素 動画 2 ms/フレーム

なるべく小型の装置で、大強度の硬X線を得るには、超電導のウィグラを用いる。図1に冠状動脈撮影の装置概念を示す。電子シンクロトロン電子ビームは超電導ウィグラの磁場によりその軌道を蛇行させられ、X線を放出する。X線のビームラインにはシリコン結晶のモノクロメ

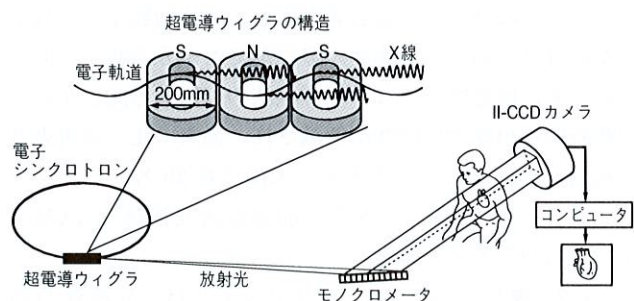


図1. 放射光による冠状動脈撮影の概要 電子がウィグラを蛇行して放出されるX線(放射光)をモノクロメータで単色化・拡大し、冠状動脈を撮像する。

Outline of intravenous coronary angiography using synchrotron radiation (SR)

ータを設置し、白色のX線を、造影剤のヨウ素のK吸収端の33 keVのエネルギーに単色化するとともに、ビーム幅を拡大する。X線は被験者の後ろのII(イメージインテンシファイア)とCCD(電荷結合素子)カメラで検出され画像が得られる。また、K吸収端の前後のエネルギーのX線での2枚画像の差分をとると、骨や心筋が消え冠状動脈だけが映し出され、狭窄の診断が行いやすい画像になる。

放射光診断システムの主な仕様を表2に、加速器のレイアウトを図2に示す。

表2. 放射光診断システムの主な仕様  
Specifications of SR diagnostics system

項目	仕様
電子ビームエネルギー	1.8 GeV
周長	45 m
ビーム電流	400 mA
ウィグラ	7 T 9 極 2 台
偏向電磁石磁場	4.5 T

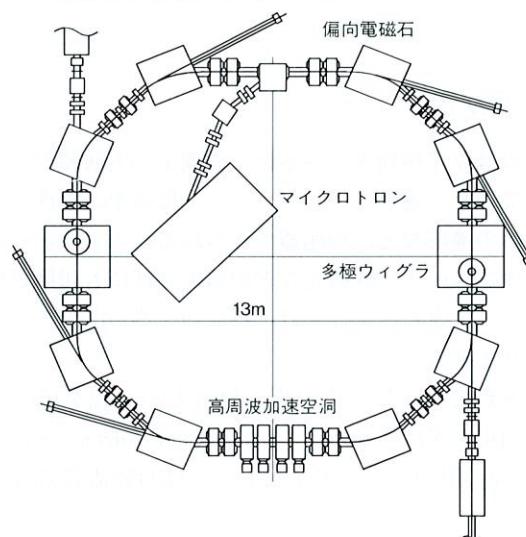


図2. 放射光診断用加速器のレイアウト 周長45mの加速蓄積リングに2台の超電導ウィグラを設置。

Layout of accelerator for SR diagnostics

このシステムのキー技術として以下のものが挙げられる。

- (1) 画像診断技術
- (2) 加速器の大電力高周波
- (3) 高磁場多極超電導ウィグラ

画像診断技術は、医用機器の実績を、また大電力高周波は本誌に取り上げているSPring-8での技術を活用した。また、超電導ウィグラは磁場7Tで9極を仕様とした。高磁場化が課題であるが、当社は1個のコイルを試作し、所定の性能を確認し、実機の見通しを得ている。

### 3 粒子線がん治療

#### 3.1 がん治療の概要

がんの治療には、外科手術で患部を切り取る方法や、抗がん剤による化学療法があるが、患者への負担や副作用などの問題がある。また、放射線治療では、従来のX線や電子線によるものは正常部の放射線障害の問題がある。この問題を解決した新しい放射線治療が陽子や重イオンによる粒子線による治療である。X線や電子線と異なり、ある一定の深さで線量が大きくなり、表層の正常細胞を侵すことなく深部のがんだけを殺傷することができる。したがって、正常組織の機能保全に優れ、患者の社会復帰が短期間で可能なQOL(Quality Of Life)に優れた治療法と言える。

粒子線でがんを治療するには、加速器で粒子を高いエネルギーに加速する必要がある。このため従来は物理実験用の加速器を利用して数施設で治療が行われてきたが、その有効性により80年代後半から治療施設が建設されるようになった。

筑波大学陽子線医学利用研究センターでは、KEKの加速器のビームを利用して陽子線によるがん治療を行っている。また、放射線医学総合研究所のHIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)では重粒子線を用いて、98年2月までに389名のがん治療を行い、着実に成果をあげている<sup>2)</sup>。そのほか、兵庫県、国立がんセンターや筑波大学でもこの種の治療専用装置を建設中である。

当社は従来から医療用機器(医療用線形加速器、MRI、X線CTなど)を多数製作してきた。粒子線治療に必要な加速器においてもHIMACではシンクロトロンの高周波加速システム、真空システム、およびビーム輸送系を、また兵庫県粒子線治療センターではシンクロトロンの高周波加速システムとビーム輸送系電磁石の主要機器を担当した。

また、国立がんセンター東病院の陽子線がん治療装置では患者位置決め診断システムを担当した。当社はこれらの総合技術を生かして、次のような陽子線と重粒子線のがん治療装置システムを設計し提案している。

#### 3.2 がん治療装置の設計概要

##### 3.2.1 陽子線がん治療装置

陽子線によるがん治療装置の鳥瞰(かん)図を図3に、主な仕様を表3に示す。直径8mのシンクロトロンで加速された最高エネルギー235 MeVの陽子線はビーム輸送系を通り、回転ガントリー室または水平固定照射室の患者に照射される。患部を任意の角度で照射できる回転ガントリーは直径が10mとかなり大型である。

表3. 陽子線がん治療装置の主な仕様  
Major specifications of proton therapy

項目	仕様
建屋サイズ	50 m × 30 m
エネルギー	70~235 MeV/u
シンクロトロン周長	28 m
照射室	回転ガントリー 2室, 水平固定 1室

##### 3.2.2 重粒子線がん治療装置

重粒子線は陽子線に比べて、体内での散乱が小さく線量集中性がよい。また、生物学的効果比が高いなどの長所がある。しかし、加速器の大きさが陽子の2倍以上になり、大型で高価になる。

重粒子線の長所を生かしつつ、従来の陽子線の施設に近い寸法と価格の汎(はん)用の重粒子線がん治療装置が望まれる。シンクロトロンは直径が20mと大きくなるが、回転ガントリーを省くことで建屋の省スペース化が可能である。表4に小型重粒子線がん治療装置の主な仕様を示す。

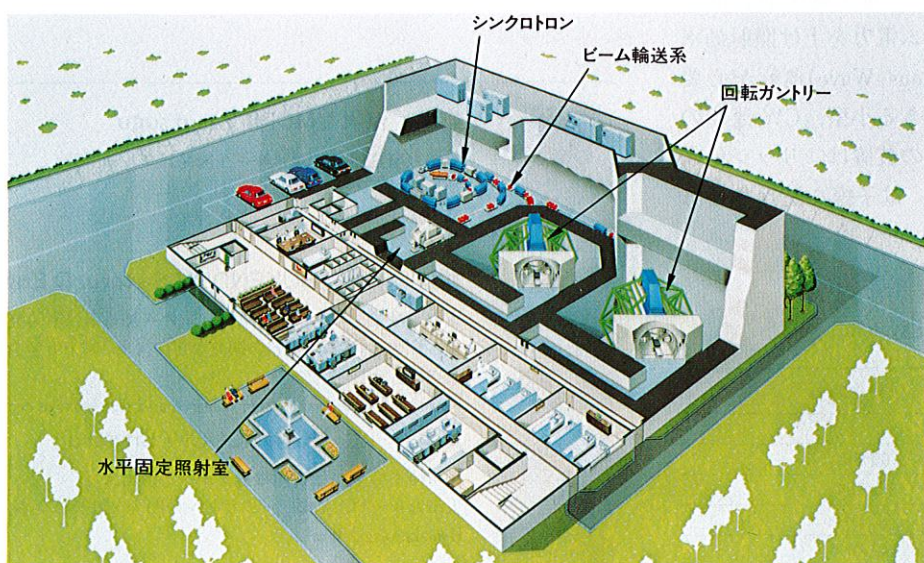


図3. 陽子線がん治療装置の鳥瞰図  
シンクロトロン、ビーム輸送系、回転ガントリー2室と水平固定照射室からなる。

Bird's-eye view of proton cancer therapy system

表4. 重粒子線がん治療装置の主な仕様  
Major specifications of heavy ion therapy

項目	仕様
建屋サイズ	50 m×30 m
イオン種	炭素
エネルギー	100~350 MeV/u
シンクロトロン周長	60 m
照射室	水平1室, 斜め45度1室

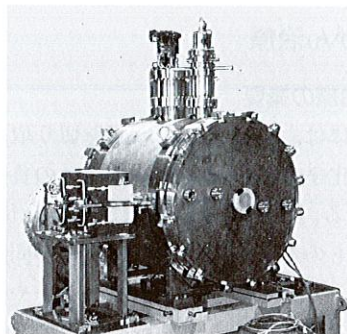


図4. 小型電子線照射装置 リッジ付き高周波加速空洞型電子加速器。設置スペースは2m×1m, ビーム出力は2.5MeV-6.5kWである。  
Compact electron irradiation system

## 4 電子線照射の産業利用

### 4.1 電子線照射利用の概要

電子線照射は国内でも300台以上が使用され、工業、医学、農業、環境などの多くの分野で利用されている。

電子線照射はプラスチックの耐熱性、耐水性、対衝撃性、硬度などを向上させ、高品質、高機能のさまざまな工業製品を生み出している。プラスチック材料の一種であるビニル系モノマーに電子線を照射すると、重合開始材が不要なためクリーンなプラスチックを作ることができる。また、電子線照射は、溶剤を使わず、速く、常温で下地の上に高品質のプラスチック硬化塗膜を作ることができる。紙容器オフセット印刷、フロッピーディスク、トンネル内包材、防曇フィルム、マスキングテープ、感熱紙などに用いられ、溶剤や熱に強くなり、機械的強度も向上する。タイヤの分野では材料である生ゴムの強度を増し粘着性を下げることができる。

また、医療器具の滅菌、排煙処理、汚泥の殺菌など、その用途はますます拡大している。排煙処理の例では、中部電力(株)のパイロットプラントで、脱硝率80%、脱硫率94%以上を達成している<sup>(3)</sup>。環境問題が重要視されるなかで、この成果が注目されている。

### 4.2 電子線照射装置

数MeVから10MeVの高エネルギー電子線照射装置ではパルス運転型が多いが、平均ビーム電力を上げ照射効率を向上させるためにはCW(Continuous Wave)運転が必要である。当社では、多目的に利用できる小型、CW運転の電子線照射装置を開発中である。この装置は、リッジ付高周波加速空洞型電子加速器<sup>(4)</sup>であり、電子線を蛇行させて

表5. 電子線照射装置の主な仕様  
Major specifications of electron irradiation system

項目	仕様
本体サイズ	2 m×1 m
加速周波数	100 MHz
最大エネルギー	2.5 MeV
ビームパワー	6.5 kW
高周波電力	42 kW

何度も加速するので小型化が可能である。表5にこの電子線照射装置の主な仕様を、図4に外観を示す。

## 5 あとがき

加速器の医学・産業利用は多方面にわたり広がりつつある。そのなかでも今後特に注目される放射光の医学利用、粒子線がん治療装置、電子線照射装置ととりあげた。当社は物理実験用の加速器で培った技術と、医用機器や一般産業機器の技術を融合し、加速器の医学・産業利用に注力していく所存である。

## 文献

- (1) Torikoshi.M., et al. "Design of a compact synchrotron light source for medical application at NIRS" J.Synchrotron Rad. 1998 5. p.336-338.
- (2) 放射線医学総合研究所('98年3月25日プレス発表)“重粒子線がん治療臨床試験の状況について”
- (3) 田中 雅. “電子ビームによる石炭火力発電所排煙処理” 第6回放射線プロセスシンポジウム 1998, p 57-58.
- (4) Hayashizaki.N., et al. "Application of ridged RF Cavity Resonator for Electron Accelerator" Linear accelerator meeting in Japan 1998, p.307-309.



森井 保次 MORII Yasutsugu

原子力事業部 先端エネルギー開発グループ長。  
加速器のシステム開発・設計に従事。  
Nuclear Energy Div.



祐延 悟 SUKENOBU Satoru, D.Eng.

電力・産業システム技術開発センター 加速器技術開発主任査, 工博。加速器用機器の開発などに従事。原子力学会, 真空協会会員。  
Power and industrial system research and development center



川口 滋 KAWAGUCHI Shigeru

浜川崎工場 新技術応用機器グループ担当課長。  
大出力レーザ, X線ビームラインの開発・設計に従事。  
Hamakawasaki Works