

21a-1

INDUSTRIAL AND MEDICAL APPLICATION OF ELECTRON LINEAR ACCELERATORS

I. UETOMI

Mitsubishi Electric Corporation

(Kobe Works)

2-2-3 Marunouchi Chiyoda-ku Tokyo 100, Japan

ABSTRACT

Industrial & medical applications of electron linear accelerators (linacs) have become widespread in Japan in the last 30 years. There are at present, more than 550 linacs for medical use and about 90 linacs for industrial use. New applications such as the sterilization of disposable syringes, food irradiation and free electron laser are promising. Some Aspects of linac application in these areas are discussed.

電子リニアックの工業、医療利用

加速器の実現可能性が立証されたのは1920年代に遡る。その後、加速器が原子核実験以外に工業や医療に利用できることが明らかになると、加速器の研究開発に取り組む企業が現れた。英国を中心にヨーロッパで電子リニアックの製品化開発が行われ、1950年中頃には、工業用リニアックや医療用リニアックの使用が始まった。

我国は、先行していたヨーロッパや米国の技術を取入れ、ほぼ10年遅れで追従した。即ち、加速器の輸入を行うと共に、大手メーカーの研究所でも種々の加速器の開発が進められた。1970年代には、医療と工業に積極的に導入され、海外メーカーに太刀打ち出来る技術と製品が育った。

現在、加速器応用製品として普及しているものに、医療用リニアック、医療用マイクロトロン、工業用リニアック、コッククロフト・ワルトン型加速器やダイナミトロンで代表される電子線照射装置及び短寿命RI製造用サイクロトロン等がある。これから普及が期待されるものを含めて加速器の応用分野を表1に示した。

各種の加速器の中で、現在、電子リニアックが抜きん出て最も多く利用されているが、この環境は既に第二次世界大戦の後半から整えられつつあった。即ち、防衛上、レーダ性能の向上に迫られ、大電力高周波源としてマグネトロンやクライストロンが開発されたこと及び米国スタンフォード大学で超大型リニアックの研究開発が組織的に行われた結果、飛躍的な技術革新をとげた。その上、リニアックはマイクロ波電界を用いて、比較的多くの電流を直線的に加速出来、円形加速器にあるような軌道の不安定性も無く、装置をコンパクト化出来るためである。

まず最初に、最も多く普及している医療用リニアックは、X線や電子線の生体細胞に対する強い殺傷能力を利用して癌の治療を行う装置である。

1963年、放射線治療を先導する3施設に初めて海外メーカーの医療用リニアックが導入された。その後、三菱重工は1966年に6MeVの装置を、東芝は1967年に13MeVの大型装置を国産化した。以後、東芝、日本電気及び三菱電機の手

カーが新機種開発競争を行い、我国の医療用リニアックの製造技術は世界的な水準に達した。1993年に、設置台数は550台に達した。新しい機種に更新する施設もあるため、約40台/年の需要があると推定される。現在、自社生産している三菱電機と海外2社の製品が販売されている。

今後、医療用リニアックは、治療精度の向上と治療組織と健全組織の線量比を出来るだけ大きくし、そしてさらに治癒率の向上を目指す装置技術と利用技術の開発が進むはずである。

1970年中頃までは、医療用ベータトロンの普及期であったが、X線出力が十分取れず、しかも線量の安定性に難があったため、これ以降の設置はわずかである。現在、20台程度が使用されている。

1980年代から医療用マイクロトロンが登場し約20台程度使用されている。

最近、次世代の治療機として脚光を浴びているものに陽子線及び重粒子線癌治療用加速器がある。陽子線及び重粒子線はX線や電子線より更に細胞の殺傷能力が大きく、放射線感受性の低い悪性腫瘍にも治療効果があり、その上患部に集中的に照射することが出来るためである。

放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置の稼動と共に、他施設への普及も早まりそうである。

次に多く普及しているのは電子線照射用加速器（電子線照射装置）である。

従来のエチレンオキサイド法にある残留毒性と吸毒性の問題がないこと、高い線量率で大量処理が出来ること、ON-OFF制御が出来るので、安全性も高いこと等から着実に普及している。

現在、絶縁材料、発砲ポリエチレン等の放射線架橋、塗料、インク等の電子線キュアリング、テフロン、ポリマー等の分解、フロッピーディスク等の表面加工の工業生産ラインに放射線照射処理工程が組み込まれている。約280台使用されている。

これまで、この分野に大きく貢献して来たのがコッククロフト・ワルトン型加速器とダイナミトロンの静電型加速器及び変圧器型加速器で

ある。

電子線照射では、照射目的や物質の種類と厚さで、エネルギーや照射線量が異なる。

電子リニアックによる照射が有望と言われている分野は、比較的高エネルギーを必要とする食品照射や医療用具の滅菌である。外国では既に各地で電子リニアックが使用されている。日本では、医療用具に Co^{60} の γ 線が用いられているが、今後これらの分野でも電子リニアックの利用が始まると考えられる。

現在、照射用リニアックを製造しているメーカーは、フランスとカナダにあり、エネルギー10MeV、出力20kWクラスの装置がある。ビームパルス幅を長くすることで大出力化に対処している。

この種の大出力電子リニアックでは、高効率化、コンパクト化の他、大きなビーム電力を大気中に取り出す方法や効果的に効率良く照射対象範囲に限定して照射する方法等の技術開発がなされつつある。

続いて、工業用リニアックである。

1960年代後半から1970年代にかけて原子力発電所の建設ブームがあり、この圧力容器の非破壊検査に使用された。続いて化学プラントと脱硫や脱硝プラントの圧力容器の非破壊検査に使用された。1980年代にはこれらの圧力容器の生産も下火になり、現在はわずかにロケット推進や自動車の構造物の検査用に数台/年の需要となっている。三菱電機のみ製造しており、約90台使用されている。

この非破壊検査分野では、解像度の向上とオンライン検査を目指すリニアックCTやリニアックTVの性能向上に期待がかかる。

他に、核医学で使用する短寿命RIを製造するサイクロトロンが約20台普及しているが、RI処理の厄介さも有って、大きな市場を形成するまでに至っていない。

以上がここ30年の間に大きく普及した加速器の利用状況と技術動向である。今後、普及が期待される加速器応用分野には、次のものがある。

電子線照射装置の大規模な利用として、電子

線による排煙処理（脱硫、脱硝、酸性雨対策）がある。日本や米国でパイロットプラントで立証されており、今後の普及が期待される。

円形電子加速器の分野で最も注目されているのは、SR装置（放射光発生装置）による放射光利用である。

微細加工（リソグラフィ）、物質の構造解析、半導体欠陥や歪みの評価及び元素分析から物質の改良、光化学反応プロセスなどの分野で産業利用が考えられる。医療分野ではアンギオグラフィ（血管造影法）に期待がかかる。

現在稼動しているSR装置は、電子リニアック、シンクロトロン及び蓄積リングで構成されている。省スペース、低コストで信頼性の高い装置を指向する超伝導蓄積リングや加速蓄積リングの実用化開発を進めているメーカーもある。

放射光に続いて、波長をマイクロ波から極紫外まで変えることが出来、かつ単色で放射光より強力な光が得られる自由電子レーザーに期待がかかる。

精密化学工業における光化学反応プロセス、材料の精密加工や表面構造解析から新素材への展開、原子核の同位体分離、医療のレーザーメスなど新しい分野に応用出来ると言われている。

現在考えられているFEL光の発生法は、大きく分けて二つある。

蓄積リングの直線部にアンジュレータを挿入する方法と加速器で得られる電子ビームをアンジュレータに入射させてFEL光を発生させる方法がある。

自由電子レーザー研究所では、310MeV電子リニアック、アンジュレータ及び光共振器から成るシステムで赤外から紫外までの自由電子レーザーの実用化研究が行われている。

自由電子レーザーは、従来の技術レベルをはるかに越えた高性能の電子リニアックを用いて発振が可能となる。

具体的には、大電流、低エミッタンス電子銃（マイクロ波電子銃）、高安定マイクロ波源、高性能集束装置（空間電荷対策）等の開発が必要である。

このような高性能リニアックはFELばかりか新しい応用分野発掘の可能性も秘めている。

又、物質表面の特性評価に新局面を開くと期待される陽電子顕微鏡の強力陽電子源として電子リニアックの建設計画（ポジトロンファクトリ）がクローズアップされている。

この他、超強力陽子線又は電子線を超大型リニアックで製造し、これを用いて放射性廃棄物の消滅処理を行う研究も進められている。

以上、電子リニアックを中心に既に利用されている加速器応用分野の現状とこれから期待される分野を展望し、技術開発の方向について触れて見た。

表2に技術開発の方向についてまとめて示した。

参考文献

- (1) J. E. Leiss: Linear Accelerators, eds. P. M. Lapostolle and A. L. Septier (North-Holland Publishing, Amsterdam, 1970) Chap. A1.
- (2) 尾内能夫、日放腫会誌、J. Jpn. Soc. Ther. Radiol. Oncol. 5:229-244(1993).
- (3) 原子力産業会議、原子力資料、No. 271、(1993. 9. 1).
- (4) 新医療、1993年12月号。
- (5) 町末男、日本原子力学会、Vol. 29, No. 7, 40-46(1987).
- (6) 徳永興公、放射線と産業、No. 44, 16-20(1989).
- (7) 石垣 功、放射線と産業、No. 44, 21-27(1989).
- (8) 鳥居賢治、放射線と産業、No. 46, 15-17(1990).
- (9) 田中裕実、放射線と産業、No. 46, 18-24(1990).
- (10) 冨增多喜夫、シンクロトロン放射技術、工業調査会(1990).
- (11) 山本幸佳、応用物理、第62巻第7号、654-665(1993).

表1 加速器の主な利用分野

* ; これから普及が期待される。

加速器の種類	利用分野	エネルギー	利用目的
サイクロトロン	核医学	60MeV以下	内臓診断用短寿命RIの製造(PET用)
シンクロトロン	半導体製造用*	~1GeV	リソグラフィ (蓄積リングの入射器)
	放射線治療	~320MeV	癌の治療
リニアック	放射線治療	50MeV以下	癌の治療
	非破壊検査	15MeV以下	ラジオグラフィ
	精密化学*	300MeV以下	FELの電子線源
	精密化学*	150MeV以下	ポジトロン発生用電子線源
ベータトロン	放射線治療	50MeV以下	癌の治療
マイクロトロン	放射線治療	50MeV以下	癌の治療
静電型加速器 変圧器型加速器	照射用	6MeV以下	素材改質 (架橋、重合) 塗膜硬化、滅菌
S R 装置	半導体製造用*	~1GeV	リソグラフィ (放射光源)

表2 電子リニアック技術開発の方向

分野	対象物	利用技術	共通装置技術	固有装置技術
医療	患者、癌組織	治療精度	コンパクト化 取扱いが容易 信頼性向上 安定性向上 低コスト化 低維持費化	原体照射性能の向上
工業用 (非破壊検査)	鋼板、フィルム	解像度		照準の自動化 リニアックTVとCT
照射用	素材、食品	照射効率		ビーム電力の大出力化
	医療用具	ビーム走査		電力変換効率の向上
放射光発生器の 入射器	シンクロトロン	高輝度電子線		低エミッタンス
	蓄積リング			エネルギースペクトルの向上
FELの 電子ビーム源	アンジュレータ 光共振器	高輝度電子線	低エミッタンス、バンチ幅の圧縮、 エネルギー安定度、エネルギースペクトルの向上	
ポジトロン源	ターゲット	低速ポジトロン	ターゲット熱除去 電力変換効率の向上	