

[14B-04]

## DESIGN AND APPLICATION OF MINIATURE ACCELERATORS

E. Tanabe<sup>\*)</sup> and K. Hiraoka

AET Japan, Inc.

1-2-3 Mampukuji, Asao-ku, Kawasaki-shi, 215-0004, Japan

### Abstract

Miniature electron accelerators, with less than 1MeV in energy, 5cm in length, and 1cm in diameter, have many potential medical and industrial applications. We propose various structures of miniature electron accelerators and describe several applications to replace the large, costly medical accelerators and problematic isotopes currently in use.

### 超小型加速器の設計と応用

#### 1. はじめに

ビームエネルギー 1MeV 以下、全長 5cm 以下、直径 1cm 以下の超小型加速器は多くの医療・産業応用の可能性をもっている。本文では様々な構造の超小型電子加速器を提案し、現在使われている、大型でコストのかかる医療用加速器や問題の多い放射性同位元素の線源の代替となるような応用例について述べる。

#### 2. 放射線治療

癌と心疾患は常に先進国の死亡原因のトップであり、特に癌は高齢化社会に伴って年々増加の一途を辿っている。国内では現在のところ癌治療にあたって外科手術が主流であり先進国で効果が認められている放射線治療は諸々の事情により二次的な治療法としてか又は症状軽減を目的として使われる場合が多い。この理由の一つに精度の高い放射線治療の為にリニアック装置自身の複雑さと高価さ(一システム 5 億円以上)が挙げられる。近年もっと複雑で高価なプロトンやイオン加速器システムが医療目的の名目で作られているが、国内の放射線治療の将来あるべき姿とは思われない。

放射線治療の最大の長所は機能と形態の温存(QOL)にある。特に乳癌や前立腺癌では近年、温存療法が主流となりつつあり、放射線治療が脚光を浴びている。また頭頸部(咽頭癌や舌癌)等も小線源治療を行うことで 90%以上の局所治癒が得られており、放射線治療が QOL に大いに貢献している。また子宮頸癌では外部照射と腔内照射により 50%以上の治癒率を上げている。また欧米では最近小線源による血管内照射が行われつつあ

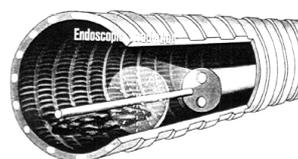
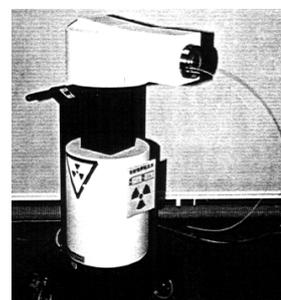


図1 ワイヤ先端に小型線源を取り付けた治療装置  
上は貯蔵容器、下は腫瘍に照射治療を行っているところ

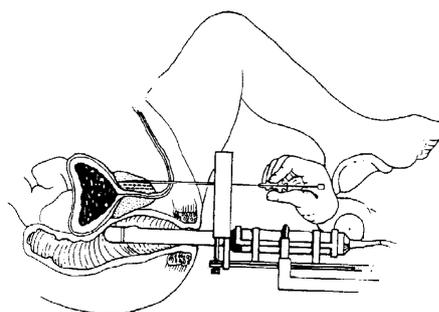


図2 前立腺癌に対する低線量率組織内照射  
経直腸超音波ガイド下に会陰部より前立腺組織内に線源を永久刺入する。

り、動脈硬化性狭窄の治療に威力を発揮している。本文ではこれらの様々な医療応用に対する全く新しいタイプの小型×線源について述べる。

<sup>\*)</sup> E. Tanabe, 044 966-9981, info@aetjapan.co.jp

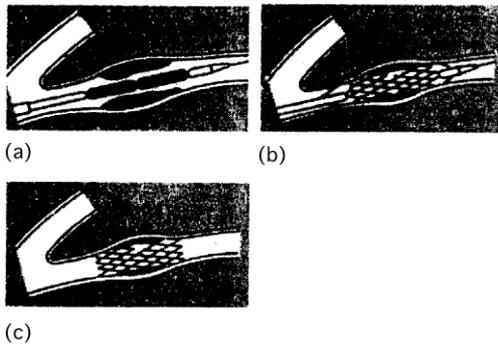


図3 バルーンカテーテルとステントによる動脈瘤治療  
 (a)バルーンカテーテルにより動脈瘤の狭窄を治療、  
 (b)ステントを拡張、(c)再狭窄を防ぐために放射能ステントまたはワイヤに取り付けた小線源によって血管内膜を照射

### 3. 小線源治療と口腔内放射線治療

小線源治療は直径 2mm 以下の放射線源としてイリジウムなどのガンマ線源やリンなどの放射性物質を詰め込んだ針または棒状のものやワイヤ先端に線源をつけたものが用いられている。治療法としては子宮や食道などの体腔内あるいは管腔内に棒状またはワイヤ状の小線源を挿入する腔内照射法(図 1[1])と舌や乳房などの組織内に針状小線源を刺入する組織内照射法(図 2)に大別される。子宮癌、舌癌などの治療においては長い臨床実績がある。

近年  $^{192}\text{Ir}$  線源を用いた線源寸法の非常に小さな治療装置が小線源治療の適応範囲を広げつつある。また米国においては前立腺癌の治療に於いて図 2 に示すような  $^{125}\text{I}$  や  $^{103}\text{Pd}$  の粒子状線源の永久刺入が良好な治療成績をあげている。そして最近では動脈硬化性狭窄に対して、図 3 に示すように、バルーンカテーテルを用いて詰まった血管を広げ治療した後に、血管内膜を照射して再狭窄を予防するという血管内放射線治療が注目を集めている[2]。

しかしこれら放射線物質を用いた線源は、常時放射線を放出しているのので、患者の治療を始める前、例えば照射すべき患部を探す準備段階でも、他の人体部分を照射することになる。取扱いが非常に複雑且つ危険を常に伴うので、医師の負担となっている。遠隔操作で線源を体内に送出する装置も開発されたが、放射性元素を使っている以上管理が難しく高価であり、トータルコストは大きい。

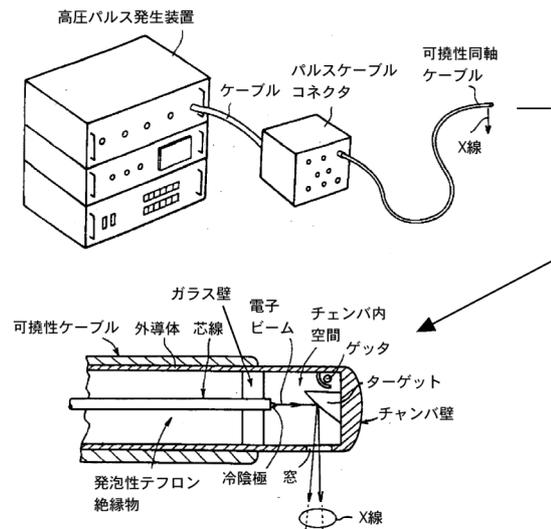


図4 超小型 X 線発生装置概略図

### 4. 超小型 X 線源

#### 4.1 小型 X 線源

前節で述べたような小線源治療の欠点を解決するために、体内に挿入しても自由に曲がり、カテーテル的に治療でき、しかも同位元素等を用いず治療時のみ照射する安全な X 線源として、同軸ケーブル、高電圧パルス電源部、およびケーブル先端に配置された X 線発生真空チェンバー部からなる直径 2mm 以下の超小型 X 線源の開発を目的とし、実用化に向けて研究開発を始めた。図 4 に装置の構成の一例を示す[3]。高圧パルス発生装置は、パルス発生部からケーブルを通じてパルスケーブルコネクタに接続され分配されて複数の可撓性ケーブルに高電圧パルス 60~120kV を供給する。そしてその電圧を先端部の超小型真空チェンバー部に印加する。パルス幅は 100ns 程度以下である。高電圧のパルスが印加されると陰極の先端で高電界放出により電子が発生し、加速されてターゲットに衝突する。この重金属ターゲットから X 線が発生し、この X 線は窓を透過して外部に放出される。

この装置は放射性物質を使わず必要なときのみ X 線を発生させることができ、非常に小型で患部のすぐ近くで照射するので、患部以外の被爆を最小限に抑えつつ患部への放射線投与を増やすことができる。放射性物質を用いず廃棄の問題もなく、照射時間も容易に制御でき、電圧を変えることにより X 線のエネルギーも制御可能である。

口腔内、血管内の放射線照射は装置が高価で危険を伴い、管理コストもかかるので、全世界でもこれらの治療を受けている人は年間 5 万人程度と考えられるが、安価で安全な照射装置が開発さ

れることにより飛躍的にその応用が増加し、年間100万人以上の人がこの装置の恩恵を受けることになると思われる。患者・医師に対する負担も少なく、手術と同程度あるいはそれ以上の治療効果を得る可能性があるため、急速な普及が期待できる。

#### 4.2 超小型加速器

直径3cm程度のリニアックの応用はいくつか過去に報告されている[4]。口腔内の治療に使うためには加速管直径をさらに小さくする必要があり、ミリ波のリニアックの設計技術が必要となる。ここでは28GHzのリニアックを考えてみる。長さ5cmで実効シャントインピーダンス150M/mを仮定すると1MeV程度のビームエネルギーを得るのに300kW程度のピーク電力が必要となり、市販のクライストロンが使える。この加速管は全長にわたってバンチャーとなるので加速効率率は上がらないが近年のマイクロマシーニング技術と表面処理技術を組み合わせることにより製作可能である。この加速器の設計パラメータを表1にまとめてみた。

これ以上直径の小さい加速管の設計にはもっと高い周波数を用いた新しい構造を考える必要があり、製作にリソグラフィーの技術を使うことが報告されている[5]。これらの加速器はビームの縦方向に輪切りにしたキャビティを組み合わせる従来の方法と違って、ビーム軸方向にそって遅波回路をEDMまたはリソグラフィーで形成し、拡散接合により導波管とはり合わせて加速管を作る方法によって歪みを少なく精度高く製作されうる。図5にその概略図を示した。現在これらの加速器の試作を検討中である。

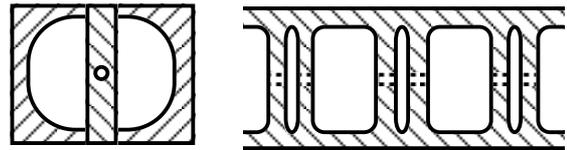


図5 ミリ波定在波加速管概略図

## 5. まとめ

様々な大型の加速器が開発される時代にあたって超小型の加速器の応用と構造を考えてみた。これらの小型加速器やX線源は癌の局所治療や動脈瘤治療に将来非常に有用であると考えられる。

### 参考文献

- [1] 小野良祐 「Brachytherapy」中山書店 1995年
- [2] 広川裕, 「小線源治療の現状」, 新治療 1998年12月号 p.80
- [3] エー・イー・ティー・ジャパン, 平成11年特許願第10313号
- [4] 田辺英二 「超小型リニアックの医療応用」リニアック研究会 1998年
- [5] R. L. Kustom, et al., "Microcavity Structures", proc. LINAC'94, p.940

表1 28GHz小型リニアック

エネルギー :	1MeV
ビーム電流 :	20mA
パルス幅 :	2 μ sec
周波数 :	28GHz
ピーク電力 :	300kW
平均電力 :	30W
実効シャントインピーダンス :	150M /m
軸上平均加速電界 :	20MV/m
加速モード :	/2モード定在波
加速管直径 :	11mm
加速管長 :	5cm