

Old and New

Sadayoshi FUKUMOTO

National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

Two Types of stabilizing structure of magnetrons which were developed in 1940's are reincarnated in modern linacs. The rising sun and hole-and-slot of the magnetron resonators are typical biperiodic structures. Electron linacs have played an important role in radiotherapy for over 30 years. Since dose distribution advantage of proton beams are recognized recently, accelerators, which are simple and easy to operate as electron linacs, are eagerly sought. The idea of incineration of transuranics by an accelerator came from the accelerator breeder concept of late 1940's or early 1950's. Its study has started again. The accelerator must be a proton linac.

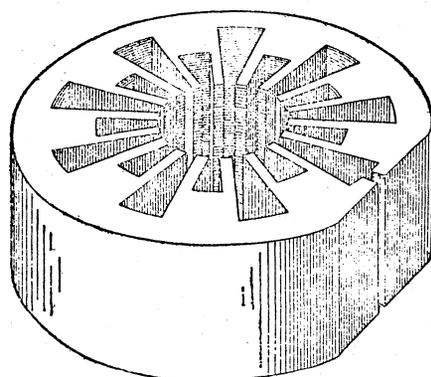
1. はじめに

1940年代の初期に開発されたmagnetron（当時日本では磁電管と呼ばれていた）に用いられた発振周波数安定化の方式が、linacのbiperiodic structureに酷似しており、その均圧環はRFQのvane coupling ringそのものである。電子linacはbetatronに代わって1960年代初期から病院に設置されて癌の放射線治療に使われてきたが、電子線・X線に対する陽子線の圧倒的優位が認められつつあり、これに適した加速器として、運転の容易さと信頼性及び知名度の高さからlinacが強く求められている。又最近漸く本格的研究が開始された長寿命超ウラン元素の消滅処理は1950年代の加速器増殖炉の構想の中に含まれており、核破砕による中性子発生に加速器が使われるとすればCW陽子linacが最有力であろう。

2. 菊型、橋型磁電管とリニアックのBiperiodic Structure

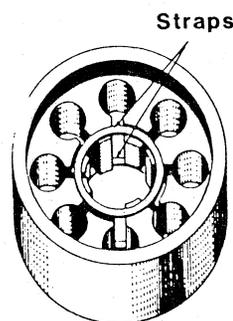
第二次大戦中に開発されたrader用magnetronでは、中心軸上の陰極から出た電

子が円筒形陽極に向かって進む時に、軸方向の磁場によってその軌道が曲げられる。陽極には数個ないし数十個の共振器があり、電子は共振器とエネルギーの授受を行う。陽極に近接した時加速された電子は陰極に衝突する。エネルギーを共振器に与えた電子は、再び共振器に接近してエネルギーを与える⁽¹⁾。隣の共振器との位相差が π となる発振が望ましいが、共振器がすべて同一構造であるとnearby modeの周波数が近接するため発振周波数が不安定となる。 π -modeとnearby modeとのmode separationのために共振器を同一形状とせず、大小を交互に配置する方式が日米独立に(?)開発された。言はばendless biperiodic structureである。日本側は菊型(旭光型)・橋型、米国側は同じ物をrising sun-hole-and-slotと呼んだ。Linacのbiperiodic structureとの違いは大共振器と小共振器の共振周波数が異なり、発振周波数はその中間に位置することである。日本側は各種の陽極構造を研究した模様であるが⁽³⁾、米国側は可能性としては色々の構造が有り得るけれども、実用になるのは上記の2種のみであるとして、研究の重点を酸化物陰極と過渡現象の解析に移した。



第17図 橋型共振器

旭光型共振器陽極⁽²⁾

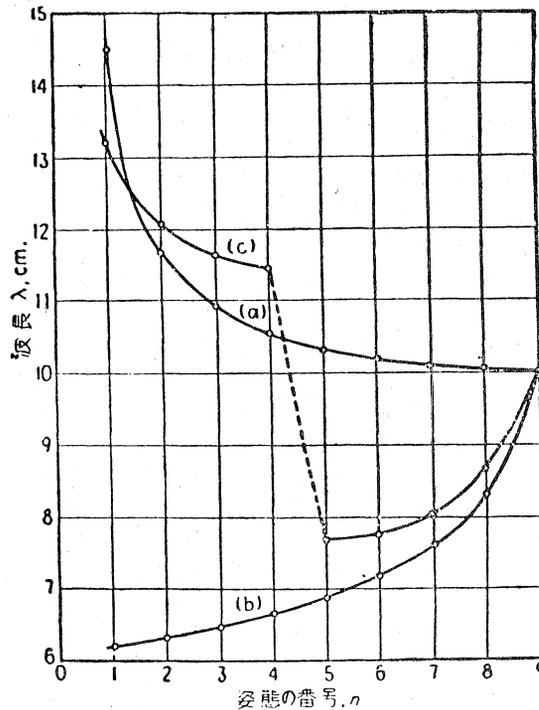


Hole-And-Slot Block

strap付き梅鉢型共振器陽極

3. 磁電管の均圧環とRFQのVane Coupling Ring

Magnetronの π -modeとnearby modeを大きく分離するためのもう一つの方法は、 π -modeで同一位相となるべき共振器の部分を電氣的に短絡することである。RFQのvane coupling ring (VCR) がmagnetronの均圧環(straps)から出てきたことは、VCRの論文にも言及されている⁽⁴⁾。



第 18 図 18 分割磁電管における振動姿態数と波長との関係。(a) 均圧環のない共振器系, (b) 嚴重に均圧環を設けた共振器, および (c) “桶型”共振器. π 型は $n=9$ に相当する. (Bell System Tech. Jour の好意による).

均圧環と二重周期構造による発振モード分離、 π モードは $n=9$ (2)

4. 放射線治療：電子線と陽子線

放射線治療用電子linacは1986年現在時世界で2500台と言われており、加速器利用の大きな分野である(5)。回転照射系の導入と小型化、操作性、信頼性により広く普及した。電子・X線・中性子は体内で指数関数的に減衰するのに対して陽子はそのenergyに対応するrangeを持ち、range終端近くにBragg peakと呼ばれるionizationの極大が生じる。生体に対する効果はionizationに比例するので、標的に所要の線量を付与する時、明らかに陽子線の方が周辺の線量を低減出来る。Dr.H.SuitによればHarvard Cyclotronを用いたMGH(Masachusetts General Hospital)では、従来眼球摘出ししか方法のなかった目のメラノーマを視力を維持して96.5%/1006人の治癒率をあげている。KEKブースターを用いた筑波大でも食道癌10/11(5-10%)、肺癌9/12(30,50%)を得ている。ここで()内は現在の一般的な治癒率である。従って問題は加速器の側にある。最大所要エネルギーは230MeV(水中でのrange30cm)で低い値からの可変が望ましく、平均所要電流は20nA程度のため、円形加速器がより経済的とも考えられるけれども、操作性や医療に於ける電子linacの実績から新しいconceptが強く望まれる。

5. 加速器増殖炉と長寿命R Iの消滅処理

Fissionを起こす ^{235}U は天然Uの僅か0.72%なので、1950年頃に ^{233}U 、 ^{239}Pu 、 ^3T を劣化Uに中性子を照射して生産するための中性子発生用加速器の開発が行われた⁽⁶⁾。そして各種の加速器炉が提案された。しかしその後ウラン鑛が新しく発見され、開発は中止された。1970年代後半にこの課題が再びCRNLとBNLで取り上げられ、fissile materialの生産と共に、長寿命TRUの消滅処理を同時に行う方式が提案された^(7,8,9,10)。FPの半減期は ^{137}Cs (30年)、 ^{90}Sr (27.7年)であるから数百年でほぼbackground levelになるが、TRUは ^{237}Np ($2.2 \cdot 10^6$ 年)、 ^{239}Pu ($2.44 \cdot 10^4$ 年)等で隔離技術の限界を越える。1-2 GeV, 300 mAは陽子linac最大のchallengeである。

- 1) G.B.Collins, Microwave Magnetrons, Massachusetts Institute of Technology Radiation Laboratory Series 6, McGraw Hill, 1947.
朝永振一郎、小谷正雄、極超短波磁電管の研究、みすず書房、1952.
- 2) A.B.Bronwell, R.E.Beam, Theory and Applications of microwaves, McGraw-Hill, 1947(岡村総吾訳、極超短波工学、無線従事者教育協会、1952).
- 3) 岡村総吾編、電子管の歴史、オーム社、1987.
- 4) H.R.Schneider, H.Lancaster, Improved field stability in RFQ structures with vane coupling ring, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol.NS-30(1983), 3007.
- 5) R.W.Hamm, Linacs for medical and industrial applications, 1986 Linac Conference Proceedings, 33.
- 6) P.V.Livdahl, The Livermore MTA project and its influence on modern linacs, Proceedings of 1981 Linac Conference, 5.
- 7) スポレーション工学、日本原子力学会、1984.
- 8) S.O.Schriber, ZEBRA(Zero Energy Breeder Accelerator) program at CRNL, Proceedings of 1981 Linac Conference, 363.
- 9) M.Steinberg, The spallator and APEX nuclear fuel cycle, a new option for Nuclear power, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol.NS-30(1983), 14.
- 10) P.Grand, The Accelerator breeder, a viable option for the production of nuclear fuels, ibid. 3057.