

electron linac の小型化と high duty 化

日本大学原子力研究所

塚田 甲子男

§ 1. はじめに

electron linac は standing-wave acc. structure から始まったが travelling-wave structure の出現と、その 1960 年代初期の成功によって、travelling-wave linac 全盛となった。しかし、1960 年代末の LASL の resonantly-coupled acc. structure の開発によって、ふたたび情勢は変り、group velocity の大きな standing-wave acc. structure が出現し、マイクロ波を有効に利用して accelerating electric field を発生する事に成功した。(s band で shunt impedance が travelling-wave structure の約 3 倍) また、温度、周波数及び機械精度への依存性が従来の travelling-wave structure より敏感でなくなった。(ref. 1) この技術はすみやかに linac の応用分野(医療、工業用など)でも採用されているが、まだこの方式による大型のものはないようである。

最近つくられている代表的な高出力の electron linac (次表) はいずれも travelling-wave structure で大きな duty cycle のため、特に大型となっている。大電流(平均電流)を得るためには、peak current での blow-up をさけるための high duty 化が是非必要である。

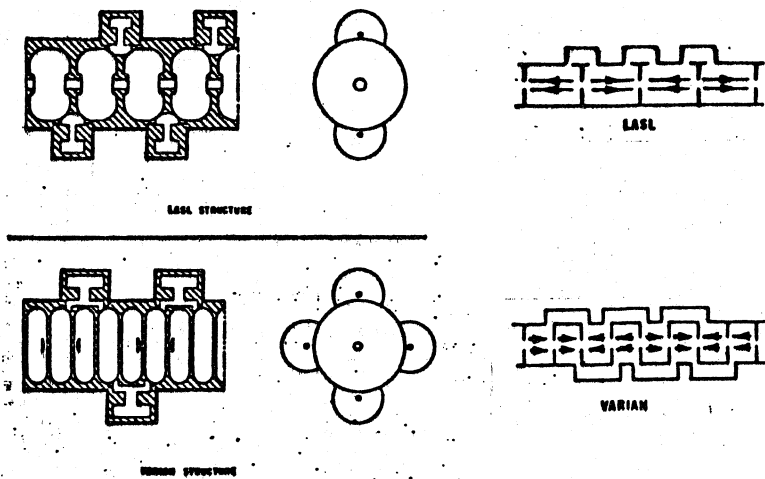
| 研究機関 | エネルギー (MeV) | duty cycle (%) | peak power (MW) | 周波数 | 長さ (m) |
|-----------------|---------------------|----------------|-----------------|--------|--------|
| Bates (MIT) | 430 (750 MeV に改造予定) | 1.8 | 40 | s band | 180 |
| Saclay (France) | 640 | 1.0 | 60 | s band | 185 |
| IKO (Amsterdam) | 500 (建設中) | 2.5 | 72 | s band | 200 |

初期の electron linac は特に low duty cycle である。Stanford Univ. の Mark III では 0.01% or less である。製品化されているクライストロンは duty cycle が 0.1% 程度のものであるが、フランスの某社では 0.2% のものをつくっている。SLAC で開発中の新型クライストロンは 1.6% 25 MW (0.1% 47 MW) である。

§ 2. コストの面より見た standing-wave structure linac

ここでは 2 つの方式の standing-wave structure をとり上げる。1 つは LAMPF (

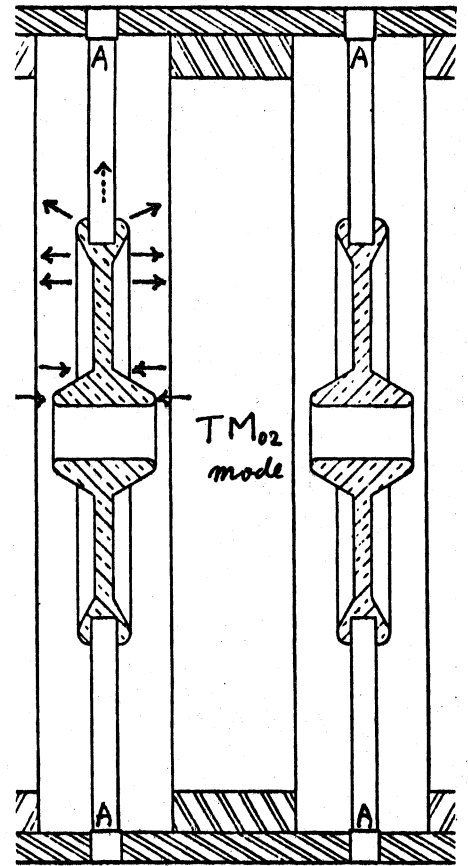
LASL) をつくる時に開発された side-coupled structure (ref. 2) (オ1図) であり、
 もう一つはソ連で考案され、現在 LASL でテストされている Disc and Washer 方式 (ref. 3)
 (オ2図) である。



A cross sectional view of LASL (top) and Varian (bottom) structures.

Conceptual evolution

オ1図 ↑
 オ2図 →



Disk and Washer Linac Structure.

effective shunt impedance Z_{eff} は次のように定義される。

$$Z_{eff} = \frac{(\text{energy gain} / \text{section length})^2}{\text{power loss} / \text{section length}} \quad \text{----- (1)}$$

2つの structure では、周波数を f (MHz) とすると 凡そ次のような関係がある。

$$Z_{eff} = 0.8 f \text{ M}\Omega/\text{m} \quad (\text{travelling-wave structure, 例 SLAC})$$

$$Z_{eff} = 2 f \text{ M}\Omega/\text{m} \quad (\text{standing-wave structure, 例 Disc and Washer 方式})$$

linac のコスト E は建設に必要な空間などのコストは別として

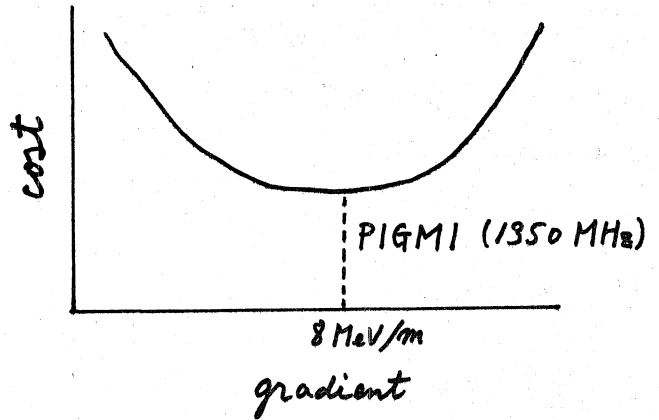
$$E = C_s P_s + CL + C_b P_b \quad \text{----- (2)}$$

- ここで
- C_s : structure power term coef.
 - P_s : wall loading power
 - C : structure term coef.
 - L : section length
 - C_b : beam power term coef.
 - P_b : beam power

全入力を P_c とすると

$$P_c = P_s + P_b$$

コストと加速電界との関係は、(1)及び(2)式を考慮してオ3図のようになる。ここで LASL で開発している医療用 π generator PIGMI の例を図に示しておく。



650 MeV, 500 μ A (duty cycle 0.2% peak 250 mA), s band の場合の例をとると、長さ 40m とし (1) 式を使って次表のようになる。

オ3図↑

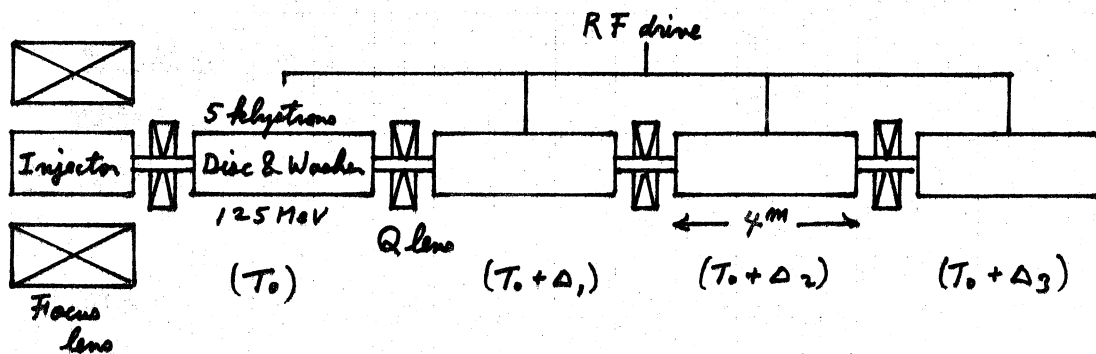
| | standing-wave structure | travelling-wave structure |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| P_s | 100 MW | 250 MW |
| P_b | 160 MW | 160 MW |
| P_c | 260 MW | 410 MW |

§ 3. Disc and Washer 方式と side-coupled structure の比較

Swenson (LASL) によると、電界の限界は、理由は不明であるが、より高い周波数では、より高い電界に耐えられる。また、周波数が同じならば、electron 加速でも proton 加速でも同じである。彼によると、Disc and Washer 方式で 48 MeV/m (1350 MHz) で arc が発生した。

Disc and Washer 方式の利点は各 cavity の間の coupling が大きくなる他に (coupling 50%、LAMPF [side-coupled structure] では 5%)、オ2図の A 点に電流が流れない事である。side coupled structure は Z_{eff} が Disc and Washer 方式より大きくなり、また電界が大きくとれる。しかし coupling coefficient が小さい。Vaguine (Varian Associate) によると、同社では 1977 年 40 MeV/m ^(ref. 4)、1979 年には 110 MeV/m (いずれも s band) のものの開発に成功した。500 mA の beam current では beam-blow up の危険があるが、250 mA ではその危険は少ない。しかし、250 mA でもパルス巾を大きくとり、duty cycle が大きくしないと standing-wave structure では Q 値が大きいため立上り時間が長く、この電流値を達成するのは困難かもしれない。Vaguine の意見によると、250 mA 位以上では Disc and Washer 方式がそれ以下では side-coupled structure が優れているよう。

彼の考えによると 500 MeV の electron linac はオ4図のようなシステムになる。(30 MeV/m) 各 section の共鳴周波数を同じにするため、各セクションの温度の差 Δ でコントロールする。



π 4 □

References

- (1) ed. by R.S. Livingston et al. (DOE/NSF study group):
The Role of Electron Accelerators in U.S. Medium Energy Nuclear
Science, ORNL/PPA-9714 (Dec. 1977)
- (2) V.G. Andreev et al. : Study of High-Energy Proton Linac Structures,
Proc. of 1972 Proton Linac Conf., LA-5115 (LASL, 1972)
- (3) E.A. Knapp, B.C. Knapp and J.M. Potter : R.S.I. 39 (1968) 979
- (4) V.A. Vaguine : R.S.I. 48 (1977) 1658