

## RFQ structure in FMIT Project

高エネルギー物理学研究所

梅垣 慈 見

## § 1. 始めに

Fusion Material Irradiation Test Facility は Westinghouse 株式会社によつて Washington 州の Hanford に建設される。deuteron を 35 MeV に加速し、lithium 7-ターゲットから発生した 14 MeV neutron を核融合炉臨界物質研究に使用する。表 1 はそのパラメータである。2 MeV から 35 MeV までは post coupler による drift tube structure で加速されるが、100 keV から 2 MeV までは RFQ で行われる。筆者が LASL を訪れた 1978 年 8 月は、RFQ の検討が開始されて間もない頃で、1 年後には 425 MeV の test design parameter がほぼ決定される段階に達した (表 2)。それから半年後 (今年 2 月) には 15 mA 加速に成功したとの朗報を得た。

linac の phase stability と radial focusing を同時に得ようとする試みは foil や grid を用いる以外の各種を試みられたようであるが、1950 年 McMillan<sup>(1)</sup> は「かかる場合にも制限が存在する」という証明を与えた。1952 年 Courant, Livingston, Snyder に従き Blewett<sup>(2)</sup>によつて発表された magnet による radial focusing は現在すべての大型 proton linac で行われている。しかしながら 1956 年には Fainberg が alternating-phase-focusing structure を提唱し、1963 年には Anisimov, Teplyaev<sup>(2)</sup>によつて軸対称性を破ることはよる 4 束構造が報告されている。LASL で加速に成功した four-wave cavity (Fig. 1) は Kapchinskii-Teplyaev の four conducting wire から発展したものである<sup>(3)</sup>。

## § 2. RFQ structure の電場分布

円筒座標系でポテンシャル  $u(r, \varphi, z, t) = u_0(r, \varphi, z) \cos \omega t$  は

$$\left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) u = 0 \quad (1)$$

を満足しなければならない。z 方向の周期性 (unit cell length は  $\beta \lambda / 2$ ) と  $\varphi$  方向の対称性および隣り合う vane 同士に与えられるポテンシャル  $\pm V/2$  などの境界条件から、 $u_0(r, \varphi, z)$  は次のように表わされる。

$$U_0(r, \psi, z) = -\frac{V}{2} \left[ \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \cos 2\psi + \frac{(m^2-1) I_0(k_2 r)}{m^2 I_0(k_2 a) + I_0(k_2 m a)} \sin k_2 z \right]. \quad (2)$$

但し  $a$  は対向する vane の 最小距離,  $ma$  は 最大距離,  $k_1 = 2\pi/\beta\lambda$ ,  $k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{(2k+1)^2}{\beta^2} - 1 \right\}^{1/2}$ ,  $R_0 = a/\sqrt{\alpha}$ ,  $\alpha = (I_0(k_2 a) + I_0(k_2 m a)) / (m^2 I_0(k_2 a) + I_0(k_2 m a))$  である。これから

$$E_{0r} = \frac{V}{2} \left[ \frac{2r}{R_0^2} \cos 2\psi + \frac{(m^2-1) k_2 I_0(k_2 r)}{m^2 I_0(k_2 a) + I_0(k_2 m a)} \sin k_2 z \right], \quad (3)$$

$$E_{0\psi} = -V \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \sin 2\psi, \quad (4)$$

$$E_{0z} = \frac{V}{2} \frac{(m^2-1) I_0(k_2 r)}{m^2 I_0(k_2 a) + I_0(k_2 m a)} k_1 \cos k_1 z \quad (5)$$

が得られる。

### § 3. Beam Dynamics

injection energy を大幅に引き下げるこゝからくるいくつかの特徴がある。rigidity  $R$  が conventional proton linac よりかなり小さいのもその一つである。  $R$  は  $2\pi n^{-1/2}$ ,  $n = 2\pi e\lambda E_0 T / m_0 c^2 \gamma^3 \beta^3$  で定義され longitudinal oscillation 1 周期に要する rf cycle を表わす。750 keV injector では  $R = 16.27$  であるが, 50 keV では  $R = 8.12$  である。このため bunching 効果をかなり期待できる。injection 時には synchronous phase を  $-90^\circ$  に選ぶと方向電場を徐々に上げ、ある程度 bunching が進んだ時点で最終的 phase  $\psi_0$  とし  $-30^\circ$  に ramp させることにより 98% の capture けきのため容易に得られる<sup>(4)</sup>。万が一 cell あたり energy gain が減るといふことは避けられる。

$$\Delta W = e E_0 T L \cos \phi = \frac{e\pi V}{4} \frac{(m^2-1) I_0(k_2 m a)}{m^2 I_0(k_2 a) + I_0(k_2 m a)}. \quad (6)$$

Eq. 3 から cell ごと radial force は explicit に座標  $r$  と  $\psi$  に依存しない。その stability region は magnet による AG focusing と同様に扱われることができる。

MIT 用 test cavity は Radial Matching, Shaper, Gentle Buncher と  $v$  Accelerator の 4 つの section に分割されている。Radial Matching Section では vane modulation を行わず、四極対称性を保ち、たまに focusing force を 0 から最終値にまで徐々にあげる。Shaper では  $\psi_0$  を  $-90^\circ$  の近くに保ち、たまに、 $\psi$ 、 $\psi$  の加速電圧を上げ longitudinal に phase damp させる。Gentle Buncher section では focusing を一定に保ちながら

$\phi_s$  を最終値まで上げていく。最後の *accelerator Section* では  $\phi_s$  と  $\alpha$ ,  $mE$  - 定に保ち  $\phi_s$  -  $mE$  final energy まで加速する。

#### § 4. Coupling Manifold

RFQ の各々の *quadrant* はすべて等しく結合してなければならぬ。このため RFQ を中心導体とする TEM coaxial resonant mode で励起されている manifold の中に RFQ cavity を入れる方法が考案された。manifold の長さ (幅) は周波数の半波長の整数倍にしなければならぬ (Fig. 2)。

#### § 5. 総りこ

CERN conference で行入射された 30 mA proton beam のうち 28 mA 加速されたという報告があった。これからは proton, deuteron のみならず heavy ion にても適用される見通しが強まった。一方 focusing force の harmonics component, fabrication tolerance, space charge effect, emittance growth 等面白い問題も残されている。また SUPERFISH で計算できる cavity は軸対称でなければならず、vane に modulation をつけた場合の電磁場は求められぬので三次元 cavity での開発の要求が高まっている。LASL でたった 2 年で RFQ が成功したことは驚くべきことである。これは技術的レベルも勿論であるが、cavity field, beam dynamics, space charge 等の計算が誰にでもつくることができるというプログラムの蓄積および高速度コンピュータ処理が可能であることも見逃せない。日本においてモット軽視の風潮は戒められなければならない。

#### 謝 辞

LASL に滞在する機会を与えて頂いた諸先生や KEK の皆様および吉田科学技術財団に感謝いたします。

#### 文 献

1. E. M. McMillan, "The Relation between Phase Stability and First-order Focusing in Linear Accelerators", *Phys. Rev.* **80**, 493 (1950)
2. G. M. Anisimov and V. A. Teplyakov, "Focusing by an Accelerating Field", *Pribory i Tekhnika Eksperimenta* **1**, 21 (1963)

3. I. M. Kapchinskii and T. A. Teplyaev, "Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focusing", *Priory i Tekhnika Eksperimenta* 2, 19(1970)
4. S. Inagaki, "Longitudinal Capture in the Radio-Frequency-Quadrupole Structure", LA-8290-MS (1980)
5. K. Crandall, R. Stokes and T. Wangler, "RF Quadrupole Beam Dynamics Design Studies", LA-UR-79-2489

PARTICLE	DEUTERONS
OUTPUT ENERGIES	20 MeV AND 35 MeV
MAXIMUM BEAM CURRENT	100 mA
DUTY FACTOR	100 %
INJECTION ENERGY	100 keV
RFQ OUTPUT ENERGY	2 MeV
FREQUENCY	80 MHz
NUMBER OF LINAC TANK	2
NUMBER OF DRIFT TUBES	72
INNER DIAMETER OF LINAC TANK	2.48 m AND 2.40 m
LENGTH OF LINAC TANKS	32 m
TOTAL LENGTH OF ACCELERATOR	42.7 m
TOTAL RF POWER	5.35 MW

Table 1 FMIT Accelerator Specification

PARTICLE	PROTON
INJECTION ENERGY	100 keV
OUTPUT ENERGY	640 keV
FREQUENCY	425 MHz
INTERVANE VOLTAGE	44 kV
MINIMUM RADIUS	0.126 cm
VANE LENGTH	110.8 cm
NUMBER OF CELLS	165
BEAM CURRENT	15 mA

Table 2 Test Design Parameters

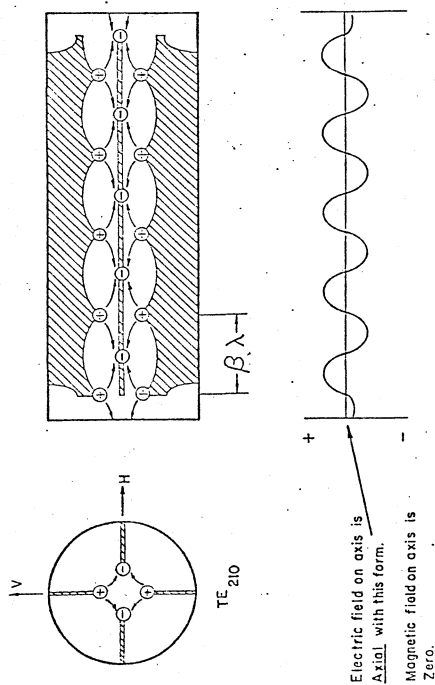


Fig. 1 Four-Vane Linac Structure

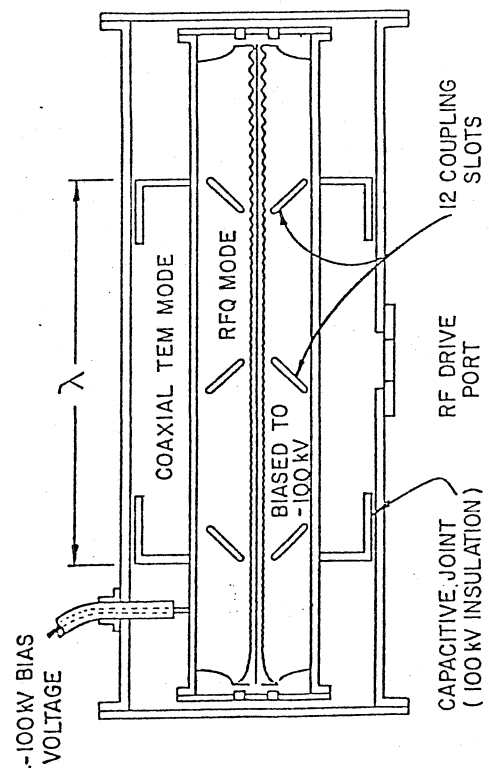


Fig. 2 Coaxial RFQ Manifold