

Kineo Tsukada

Atomic Energy Research Institute, Nihon University

ABSTRACT

Promising roles of high power linac have been expected in the fields such as: accelerating breeding using large c.w. current up to several hundred mA and inertial fusion using very short current pulse up to several hundred terawatt. In the present paper the c.w. linac of 1 GeV, 300 mA is discussed about its feasibility of the AC-power to beam conversion efficiency of about 50%, especially from the sides of the RF system, beam loading and cooling of the accelerator. In addition the beam stability is referred as an important factor, and the capital and running costs of the linac are estimated.

31 はじめに

fertile 物質を最小限の費用で最大限に fissile 物質に変換して利用する事は原子力の研究開発に従事するものにとって最大の目標の一つである。このため高速増殖炉の開発が鋭意進められているが、その back-up system の一つとして accelerator breeder が考えられている。同様な system に Fusion-Fission Hybrid が考えられている。その優劣についてはいろいろ議論があるが、ここでは触れない。

accelerator breeder の最大の問題点の一つは、加速器を運転する電力の供給である。それが自給自足するようなターボジェットの設計をすることは原理的には可能であるが、多くの技術的問題を解決しなければならない。更に、fission products の消滅処理も breeding と同時に期待されているが、このためにもターボジェットの炉物理的検討が必要である。本稿ではターボジェットの問題には触れず加速器の問題、特に電力-ビーム変換効率、ビーム安定性、コストなどについて議論したい。

32 電力-ビーム変換効率

大電力リニアックでは電力-ビーム変換効率は比較的容易に 50% に達すると期待されている。その効率は次のような因子の積である。

$$(AC \text{ to } DC \text{ 変換率}) \times (DC \text{ to } RF \text{ 変換率}) \times (RF \text{ generation to load 比}) \times (\text{control range 比}) \\ \times (\text{beam loading 効率}) \times (\text{冷却効率})$$

ここで、RF generation to load 比：RF 系の出力の一部は加速管に入射出来ずに反射などで失われる；control range 比：加速管中の RF 場を feedback control するため一部の RF power が消費される；beam loading 効率：加速管に入射した RF power の一部はビーム加速に費やされるが、残部は加速管の壁面で失われる；冷却効率：RF 電源と加速管の冷却のため電力の一部が消費される。

Knappe⁽¹⁾ および Grand⁽²⁾ によって電力-ビーム変換効率の計算に用いられたこれ等の因子の値を表 1 に示す。この中で、特に RF 系、beam loading および冷却系について考慮を行なう。

表 1 電力-ビーム変換効率*

	Knapp (LASL, 1977)**	Grand (BNL, 1981)	
		Case 1**	Case 2***
AC to DC 変換率	0.94	0.59	0.59
DC to RF 変換率	0.74+		
RF generation to load 比	0.94		
control range 比	0.91		
beam loading 効率	0.85		
冷却効率		(included)**	(included)**
電力-ビーム変換効率	0.51	0.45	0.49

* 1 GeV 300 mA

** 使用周波数 150 MHz および 450 MHz

*** 使用周波数 200 MHz および 600 MHz

+ 最近の Knapp の通信によると 0.70 - 0.90

++ Grand からの通信によると > 0.90

(1) RF系

約 200 MHz 以下では grided tube (三極管、或は四極管) が使用され、200 MHz 以上では クライストロンが使用されている。

grided tube の RF 変換率はせいぜい 65% を僅かに越えるに過ぎないが、現在、次のような

開発が行われているので将来 RF 変換率は 90% 近くまで上り、周波数の上限は 250 MHz 程度までだろう。(3)

(a) 電極材料として pyrolytic graphite の使用、(b) Tyler technique⁽⁴⁾ の開発、(c) ビーム・コントロール技術の改善。現存の大出力管 (いづれも EIMAC 製) としては、7835 super power triode (5 MW peak and 0.45 MW max. average power at 201 MHz), X2159/8974 large tetrode (0.62 MW CW at 100 MHz), X2170/8973 large tetrode (0.5 MW CW at 100 MHz) などである。

クライストロンの RF 変換率を図 1 に示す。曲線はいづれも計算機によるシミュレーションである。クライストロンの出力限界は 1 MW CW とされているが、技術的にはもっと

図 1

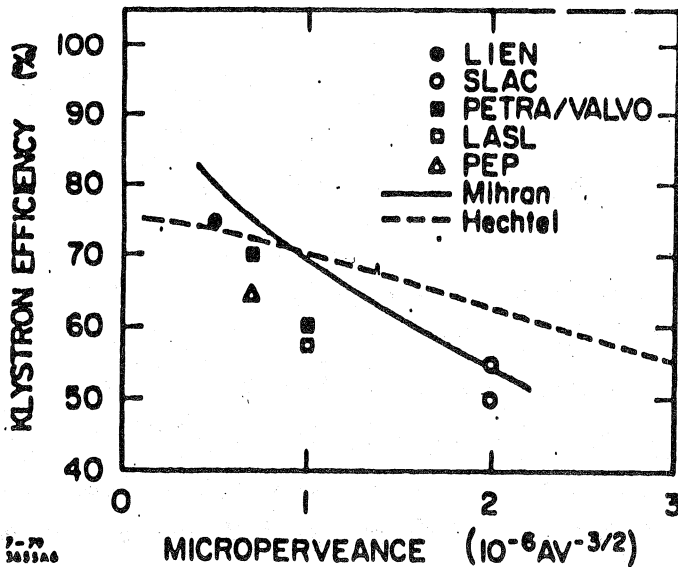


Fig. 4. Klystron efficiency vs. perveance.

図 2

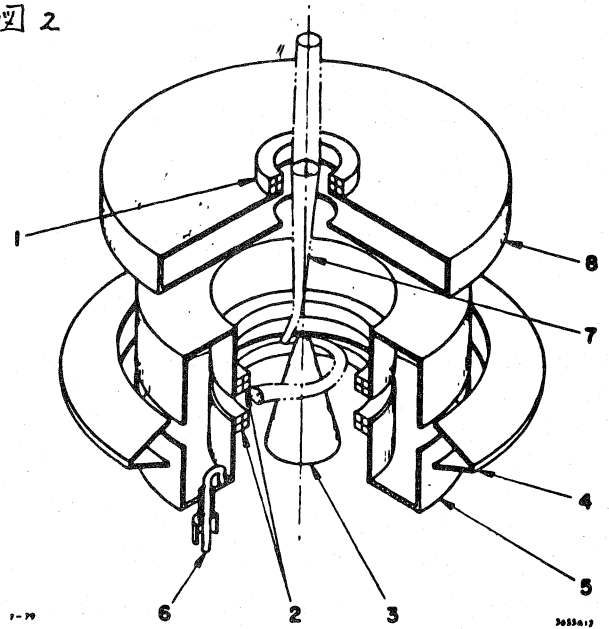


Fig. 11. The radial gyrocon: (1) gun focus coil, (2) output focal coils, (3) bender, (4) collector, (5) output cavity, (6) rf output, (7) electron beam, and (8) deflection cavity.

大きなものが、特に低周波で可能である。field-emission cathode が実現すれば hollow beam が簡単に得られ、RF 変換率および出力が向上される。これらの開発により、現在 micro-perveance 0.5 で 75 ~ 80% の RF 変換率は 85 ~ 90% に達する。現在の大型力管としては (図1) LASL: Varian klystron used on LAMPFB (500 kW CW at 805 MHz), PETRA: VALVA klystron (600 kW CW at 500 MHz), PEP (500 kW CW at 353 MHz), X-3030 (530 kW CW at 80 GHz) などである。

現在、gyrotron⁽³⁾ (LANL 図2) 或は trivatron⁽³⁾ (SLAC) のような deflection modulation, 或は rotating beam tube が開発中で、数 MW CW の出力と 200 - 500 MHz で 89% に達する RF 変換率が得られよう。

(2) beam loading

加速管の beam loading D は次のように定義される。

$$D = (\text{beam energy } E) \times (\text{beam current } I) / (\text{wall loss } P_{cu})$$

P_{cu} は effective shunt impedance Z_{eff} を用いて次のように書ける。

$$P_{cu} = E^2 / Z_{eff} \times (\text{加速管の長さ } L)$$

したがって beam loading 効率は次のようになる。

$$E \cdot I / (E \cdot I + P_{cu}) = I / (I + E / (L \cdot Z_{eff}))$$

Z_{eff} , D , E/L の例を表2に示す。

表2 Z_{eff} , D , E/L の値

	周波数 (MHz)	Z_{eff}^* (MΩ/m)	D	E/L^{***} (MeV/m)
Knapp (LASL, 1977) ⁽¹⁾	450	**	5.70	**
Schriber (LASL, 1979) ⁽⁵⁾	1350	90.6		1
Grand (BNL, 1981) ⁽²⁾	450	34.3	5.16	2
Grand (BNL, 1981) ⁽²⁾	600	39.6	7.92	1.5

* $Z_{eff} \propto \sqrt{f}$ *** L は実際の加速管の長さより 10% 位短くなる。
 Q レズ ばとを含まないからである。
 ** $Z_{eff} / (E/L) = 19$

(3) 冷却系

加速器系の全発熱量を $P_{thermal}$, RF 系の発熱量を $P_{RF thermal}$ とおると。

$$P_{thermal} \approx P_{cu} + P_{RF thermal}$$

冷凍機の必要電力に比べてポンプ系の必要電力は無視出来る。 $P_{thermal}$ は全必要電力の約 1/2 である。冷凍機の成績係数 η はカルノーサイクルでは $\eta_c = T_c / (T_c - T_h)$ で与えられるが、実際には $\eta \approx 0.6 \eta_c$ 程度である。ここで T_c は凝縮温度、 T_h は蒸発温度である。 $(T_c - T_h)$ の値を 40 とおると、

$$(\text{冷却に必要な電力}) \sim 0.12 (\text{全必要電力})$$

§3 ビーム安定性

大電流リニアックの最大の問題点はビームの安定性である。

(1) beam blow-up: cavity-beam interaction による横方向のビーム不安定性が電子リニアックでは問題とされているが、陽子リニアックでは 1 A 或はそれ以上のビームまで

安定であるという推論⁽⁶⁾がある。

(2) space charge effect: radial および longitudinal space charge forces が問題となる。いづれも β 値および phase advance が大きくなる程、その影響は小さい。計算の一例では 300 mA 程度までは充分加速可能である。

(3) beam spill: 300 mA では 10^{-9} の beam spill でもかなりの放射化を伴う。LAMPF では $\leq 10^{-3}$ であるが、それでもかなりの放射化になやんでいる。これを減らす事はこれからの研究課題の一つであろう。

通常の設計では最大ビーム電流は space charge よりも他の因子、例えば入射器からの emittance, 電界傾度や四重極磁界傾度などによって制約を受ける。これ等には一般的に云って周波数が低い方が有利である。入射系についてはビームの電氣的収束が非常に有利である。これは force equation の中に velocity term が入っていないからである。このため最近 Radio Frequency Quadrupole (RFQ) が注目を注びている⁽⁷⁾。

§4 コスト

Knapp⁽¹⁾ および Grand⁽²⁾ による capital cost の見積りを表3に示す。running cost について前記 (§2 (1)) の PEP klystron で消費費を試算すると⁽³⁾ 平均寿命 20,000 時間、/ 本のコストが \$100,000 であるから、1セント / RF kW hr とはり、全 RF 電力を 420 MW とすると、

1セント / RF kW hr \times 420 MW = \$4200 / hr = M\$36.8 / year
 加速器の寿命を同じく 20,000 時間とし、そのコストを M\$75 (表3) とすると、

$$M\$75 \times 8760 \text{ hr} / 20,000 \text{ hr} = M\$32.8 / \text{year}$$

電力代は、10セント / kWhr とすると、300 MW の beam power に電力ビーム変換効率を 50% とし、M\$526 / yr とはる。

表3 capital cost の見積り*

energy 1000 MeV, beam current 0.3A, total RF power 420 MW**			
	Knapp (LASL, 1977) (1)***	Grand (BNL, 1981) (2)	
		No.1	No.2
RF系 (DTL)	150 MHz _z	150 MHz _z	200 MHz _z
0 - 150 MeV	M\$0.43/MW	M\$1.0/MW	M\$1.0/MW
	M\$27.09	M\$63	M\$63
RF系 (DAW)	450 MHz _z	450 MHz _z	600 MHz _z
150 - 1000 MeV	M\$0.37/MW	M\$0.8/MW	M\$0.8/MW
	M\$/32.09	M\$285.6	M\$285.6
加速構造部	M\$54	M\$75	M\$75
その他	injector & control console	RF building	M\$21
	M\$5	cooling system	M\$33.6
		tunnel	M\$/0.79
計	M\$218+	M\$489++	M\$489+++

* 臨時費, インフレ因子を含まない。
 ** D = 5.5, (RF generation to load 比) \times (control range 比) = 0.85 とした。
 *** 精度 ≥ 2
 + 原論文では M\$213, ++ 原論文では M\$453, 原論文では M\$420。

§5 おわりに

電力ビーム変換効率が50%程度となる事は余り困難はなさそうである。それにしては電力代は莫大なコストになるため、ターゲットの発熱を電力に変換し、加速器を運転する事は *accelerator breeding* にとって必要条件の一つになる。

一番の技術的問題は *beam spill* であろう。加速器の放射化は僅かな *beam spill* でも引き起され、その対策はやかいな問題となる。適当な周波数、加速器構造の寸法の選択などと共に、*beam* の不安定性の僅かな徴候にも速やかに対処するコントロール系や放射化した部品の交換技術_{の開発}が必要であろう。

文献

- (1) E. Knapp, "Accelerator Cost and Efficiency", Proc. Information Meeting on Acc. Breeding (BNL, 1977) P. 294
- (2) P. Grand, private communication (1981)
- (3) P. J. Tallerico, "Advances in High Power RF Amplifier", IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-26 (1979) 3877
J. V. Lebacqz, "RF Sources Developments", Proc. 1979 Linear Acc. Conf. (Montauk, 1979) BNL 51134, p. 327
- (4) V. J. Tyler, "A New High-Efficiency High Power Amplifier", Marconi Review 1 (1958) 96
- (5) S. O. Schreiber, "High Beta Linac Structure", Proc. 1979 Linear Acc. Conf. (Montauk, 1979) BNL 51134, p. 164
- (6) R. L. Gluckstern, private communication (1964)
- (7) D. A. Swenson, "Low-Beta Linac Structures", Proc. 1979 Linear Acc. Conf. (Montauk, 1979) BNL 51134, p. 129