

20-P9

## Characteristics of the Injector of High Power CW Electron Linac in PNC

S. Toyama, M. Nomura, T. Emoto, Y. L. Wang

PNC, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

4002 Narita, Oarai-machi, Ibaraki-ken, 311-13

## ABSTRACT

The injector of high power CW electron linac which accelerates 100mA electron beam consists of a buncher and an additional accelerator guide( start of regular section) for low energy acceleration. These two accelerator guide employ Traveling Wave Resonant Ring (TWRR). The multiplication and energy gain are described in this paper.

## 大強度CW 電子線形加速器入射部の特性

## 1. はじめに

現在動燃で開発が進められている大強度CW電子線形加速器の入射部では、電子を電子銃のエネルギー200 kVから加速する際に、加速効率の向上のために進行波還流型加速管(TWRR)が使用されている。今回、入射部に続く第1加速管を含めてRFのビルドアップや、電界増幅率及びエネルギー利得を解析的に求めたのでそれらの結果について報告する。

## 2. レゾナントリングのフィリングタイム

TWRR(図1参照)には方向性結合器(結合度C)を介してRFパワーを投入する。TWRR内のパワーフローはRFの群速度を用いて表わされるので、次式よりTWRRの群速度を求める。

導波管の管内波長は、

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}}$$

これから群速度は、 $v = f\lambda$ 、 $v_g \cdot v_p = c^2$  より、 $0.6869c = 2.059 \cdot 10^8$  (m)となる。

加速管の場合は、管内波長は位相速度をcにするために24cmとしている。加速管内の群速度はおおよそ、

$$v_g = -\frac{\omega P(z)}{Q \frac{\partial P}{\partial z}} \approx -\frac{\omega P_0}{Q \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_0} = -\frac{\omega}{Q 2\tau}$$

この式より、 $Q=20000$ 、 $\tau_{ac} = 0.051$  とすると、 $v_g = 0.0128c$ である。よって、TWRRの

フィリングタイムは全周を群速度で割ると  $0.3311 \mu s$ となる。

## 2. RFのビルドアップ

方向性結合器からフィードされるRFを  $A_0$ 、 $n$ 周回めのTWRRの加速管直前のRFを  $A_n$  とすると、各周回ごとに共鳴状態でのRFの蓄積は次のようになる。

$$A_1 = TC \times A_0$$

$$A_2 = T(1 - C^2) \times A_1 + C \times A_0$$

.....

$$A_{n-1} = T(1 - C^2)^{1/2} \times A_{n-2} + C \times A_0$$

$$A_n = T(1 - C^2)^{1/2} \times A_{n-1} + C \times A_0$$

ここで、 $T$ は伝播係数( $T=e^{-\tau}$ )、 $C$ は方向性結合器の結合度である。よって、上の数列よりRFの周回毎のビルドアップは、

$$A_n = \frac{(1 - (T\sqrt{1 - C^2})^n) C}{1 - T\sqrt{1 - C^2}} A_0$$

となる。

現在製作が予定されているバンチャ、第1加速管では、

$$C_b = 0.417 \quad \tau_b = 0.0316 \text{ (nep.)}$$

$$C_{ac1} = 0.500 \quad \tau_{ac1} = 0.0455$$

であるから、99.9%になる周回数は夫々36.2回24.3回、それまでの時間は夫々9.7  $\mu s$ 、6.8  $\mu s$ になる。

### 3. ビームローディング時の増幅及び電流利得特性(最適結合時)

ビーム負荷時では電圧増幅率  $M_b$  はオプティマムカップリングで次式の様に見える<sup>1)</sup>。

$$M_b = \frac{\sqrt{\frac{I^2 R^2}{E_0^2} (1 - e^{-\tau})^2 + (1 - e^{-2\tau})} - \frac{IR}{E_0} e^{-\tau}}{1 - e^{-2\tau}}$$

ここで、 $I$ 、 $E$ 、 $R$  は夫々、ビーム電流、加速電界、加速管のシャントインピーダンスである。なお、上式は定インピーダンス型であるが簡単のために採用した。 $I=0$  では前の章で見たようなゼロカレントでの増幅率になる。また、TWRRの進行波管によるエネルギー利得(加速電界)  $V_b$  は次の式で表わされる<sup>1)</sup>。

$$V_b = ME_0L \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau} - IRL \left(1 - \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau}\right)$$

ここで、 $L$  は加速管の長さである。ただし、ここでビームとRFの加速位相の関係は波のクレストでの加速を仮定しており、位相差がある場合は  $\cos(\theta_b - \theta_{RF})$  だけ小さくなり、特に低エネルギーやバンチャでの加速で大きくなることがある。

これらをもとに、加速電流による利得の変化を求めると、上の2式に  $B$ 、 $AC1$  のパラメータを代入して電圧増幅率は夫々、

$$M_b = [143.311 (I/E_0)^2 + 16.328]^{1/2} - 11.599 I/E_0$$

$$M_{ac1} = [297.511 (I/E_0)^2 + 11.497]^{1/2} - 16.481 I/E_0$$

となる。ここでシャントインピーダンス  $R$  は各キャビティの平均を取り、 $B$  に対し 23.57、 $AC1$  に対し 33.73 とした。また、夫々のエネルギー利得は、

$$V_b, b = 1.181 M_b E_0 - 0.442 I$$

$$V_b, ac1 = 1.173 M_b E_0 - 0.907 I$$

となる。 $M_b$ 、 $V_b$  の電流、電界の単位は夫々  $\mu A$ 、 $V/m$  である。

TWRR に供給されるRFのパワーと  $E_0$  の関係は時間平均で、

$$E_0 = \sqrt{2\tau L R P_0}$$

であるから、

$$E_{0,b} (\text{MV/m}) = 1.337 [P_0 (\text{MW})]^{1/2}$$

$$E_{0,ac1} (\text{MV/m}) = 1.919 [P_0 (\text{MW})]^{1/2}$$

となる。

これらのことより、

$$M_b = [80.171 I [\text{A}]^2 \cdot P_0 [\text{MW}]^{-1} + 16.328]^{1/2} - 8.675 I [\text{A}] \cdot P_0 [\text{MW}]^{-1/2}$$

$$M_{ac1} = [72.643 I [\text{A}]^2 \cdot P_0 [\text{MW}]^{-1} + 11.497]^{1/2} - 8.589 I [\text{A}] \cdot P_0 [\text{MW}]^{-1/2}$$

$$V_b [\text{MV}] = 1.579 M_b P_0 [\text{MW}]^{1/2} - 0.442 I [\text{A}]$$

$$V_{ac1} [\text{MV}] = 2.251 M_b P_0 [\text{MW}]^{1/2} - 0.907 I [\text{A}]$$

よって、これらのことより TWRR に RF パワー  $P_0$  がフィードされたときのビーム電流を変えた時の加速器としてのエネルギー利得を求めることが出来る。 $B$  に 150~200 kW、 $AC1$  に 200~250 kW の RF パワーを供給した際のエネルギー利得を表1に示す。

### 4. ビームローディング時の増幅及び電流利得特性(固定結合時)

実際に製作する TWRR では結合度は以下のように固定されている。

$$C_b = 0.417$$

$$C_{ac1} = 0.500$$

共鳴状態の電圧増幅率は、

$$M_b' = \frac{C}{1 - T\sqrt{1 - C^2}}$$

となる。TWRR の伝達係数  $T$  は、

$$T_b' = e^{-\tau} - \frac{IR(1 - e^{-\tau})}{M_b' E_0}$$

となる。よって、結局固定結合時の電圧増幅率とエネルギー利得は、

$$M_b' = \frac{E_0 C - IR(1 - e^{-\tau})\sqrt{1 - C^2}}{(1 - e^{-\tau}\sqrt{1 - C^2})E_0}$$

$$V_b' = \frac{E_0 C - IR(1 - e^{-\tau})\sqrt{1 - C^2}}{1 - e^{-\tau}\sqrt{1 - C^2}}$$

となる。ここに TWRR のパラメータを代入すると次式が得られる。

$$M_{b',b} = (3.493 E_0 - 5.582 I) / E_0$$

$$M_{b',AC1} = (2.899 E_0 - 7.532 I) / E_0$$

$$V_{b',b} = 3.424 E_0 - 7.036 I$$

$$V_{b',b} = 3.400 E_0 - 9.743 I$$

となる。 $M_{b',b}$ 、 $V_{b',b}$ の電流、電界の単位は夫々  $\mu$  A、V/mである。よって、これらのことより次の式が得られる。

$$M_{b',b} = 3.493 - 4.574 I [A] \cdot P_0 [MW]^{-1/2}$$

$$M_{b,ac1} = 2.899 - 4.299 I [A] \cdot P_0 [MW]^{-1/2}$$

$$V_{b',b} [MV] = 4.179 P_0 [MW]^{1/2} - 7.035 I [A]$$

$$V_{b',ac1} [MV] = 5.957 P_0 [MW]^{1/2} - 9.743 I [A]$$

これらの式をもとに、B、AC1のRFパワーを夫々0.2、0.25 kWとしたときの電流、エネルギー利得特性を表2に示す。

5. まとめ

入射部のビーム加速では、規定のRFパワーでゼロカレントで、RFパワー最大で4.8MeV程度の加速が可能であり、100mAでは最大パワー以下で十分なエネルギーが得られることが分かった。

参考文献

- 1) W.-L. Wang、IEEE Tranzsaction Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 4, p.3024

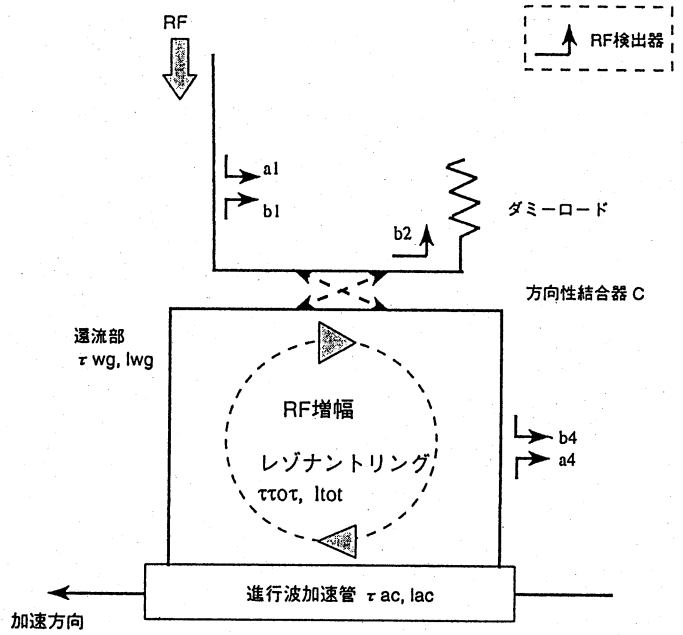


図1 レゾナントリング概念

表1 最適結合時の加速電流 - エネルギー利得特性

	$P_0$	$E_0$	$M_{b,b}$	$V_{b,b}$	$M_{b,ac1}$	$V_{b,ac1}$	$V_{tot}$
	[kW]	[MV/m]		[MV]		[MV]	[MV]
$I=0$	200	0.598	4.04	3.385 (2.877)*			
	250	0.960			3.391	3.412 (3.178)*	6.730 (6.05)*
$I=100$ mA	200	0.598	2.570	2.077 (1.765)*			
	250	0.960			2.077	2.248 (2.136)*	4.325 (3.901)*
$I=0$	150	0.518	4.04	2.469 (2.100)*			
	200	0.858			3.391	3.412 (3.241)*	4.562 (5.314)*
$I=100$	150	0.518	2.416	1.432 (1.217)*			
	200	0.858			1.967	1.889 (1.795)*	3.760 (3.005)*
$I=200$	150	0.518	1.661	0.927 (0.788)*			
	200	0.858			1.256	1.082 (1.028)*	2.342 (1.816)*

\*加速位相因子の補正で、B、AC1でそれぞれ0.85、0.95である。

表2 最適結合時の加速電流 - エネルギー利得特性

	$P_0$	$E_0$	$M_{b,b}$	$V_{b,b}$	$M_{b,ac1}$	$V_{b,ac1}$	$V_{tot}$
	[kW]	[MV/m]		[MV]		[MV]	[MV]
$I=0$	200	0.598	4.04	1.869 (1.589)*			
	250	0.960			3.391	2.976 (2.830)*	4.845 (4.419)*
$I=100$	200	0.598	2.470	1.165 (0.990)*			
	250	0.960			2.039	2.004 (1.904)*	3.169 (2.894)*
$I=200$	200	0.598	1.448	0.461 (0.392)*			
	250	0.960			1.179	1.030 (0.978)*	1.491 (1.370)*