

Isamu SATO

National Laboratory for High Energy Physics

Keigo.INOUE and So.HUJIE

Mitsubishi Heavy Industry Co.

Abstract

We were contrived a new accelerator structure in order to improve energy gain of linac. The new structure are lineally linked accelerator units to a waveguide. Those units are the type of power circulation. When rf-power of 25MW is supplied to the new one, it shall get higher energy gain than 200MeV. This note reports the details of the structure.

高エネルギー利得の線形加速器

1. はじめに

昨年、マイクロ波電力還流型加速装置のテスト実験では約60.8MV/mの高電界加速¹⁻²⁾を実証した。この考えを更に発展させて、一定の高周波電力の供給に対して電子ビームを出来るだけ高いエネルギーに加速する方法を検討し、具体的な加速機構を考案した。それはマイクロ波電力還流型加速装置を直列に多数並べて、これにマイクロ波源電力を適切に分割して供給する方法である。この種の加速機構は、必要な加速エネルギーを得るのに少ない高周波電力が少なくて済む利点があり、且つ、加速装置間の結合度は多少複雑であるが、その構造は単純であるから製造方法さえ確立すれば、加速器は低価格になる可能性が大きい。従って、今後建設されるであろう放射光発生用電子貯蔵リングの直接入射用電子線形加速器(入射器)や陽電子線形加速器、或いは、低電流で高いデューティを必要とする原子核実験用電子線形加速器等に適用出来ると考えている。ここでは、加速機構の詳細とその具体例について報告する。

2. マイクロ波電力還流型加速装置

還流型加速装置は加速管と立体回路で構成される。立体回路は導波管と方向性結合器を組合せた構造になっている。この立体回路は2つの目的をもっている。1つは加速管の入出力結合空洞を導波管で結合して閉回路する事であり、もう1つはこの装置に供給する高周波電力に方向性を持たせて閉回路を1方向に循環させる事である。方向性結合器を通じて加速装置に供給された高周波電力が1週して再び戻って来た時、この電力の位相が方向性結合器を通じて新たに供給される高周波電力の位相と同相になると、この閉回路は共振器になる。従って、この回路の電磁界の振幅は0週, 1週, 2週, ... するそれぞれの高周波電力に依って誘導される電磁界の重ね合せとなる。この原理の解析、並びに、数式的な取扱についての詳細は³⁾を参照の事。

3. 加速機構の解析

図1の様な加速機構の原理について解析する。まず n 番目の加速装置の方向性結合器を図2の様な4端子に置き換えて見る。ここで、a は入力波の振幅、b は出力波の振幅、i=1,2,3,4 は方向性結合器の各端子番号とする。4端子の入力波と出力波の振幅は S マトリックスによって

$$[b_i] = [S_{ij}] [a_i] \tag{1}$$

で与えられる。この4端子(方向性結合器)がAに対称であると、S マトリックスの各要素 S_{ij} は

$$S = \begin{vmatrix} 0 & (1-c^2)^{1/2} & 0 & jc \\ (1-c^2)^{1/2} & 0 & jc & 0 \\ 0 & jc & 0 & (1-c^2)^{1/2} \\ jc & 0 & (1-c^2)^{1/2} & 0 \end{vmatrix} \tag{2}$$

与えられる。ここで c は端子 1 と 4 の間の結合度、 $(1-c^2)^{1/2}$ は 1 と 2 の間の結合度、 j は端子間の変換によって位相が 90° 移動する事を意味する。

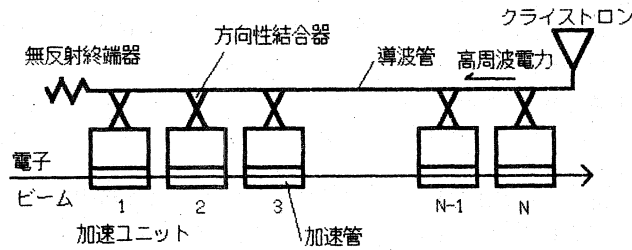


図1 還流型加速ユニットを直列に多数並べた加速機構

今、定常状態において、負荷側から反射波がない理想的な加速装置を想定すると、 $a_2=a_4=b_1=b_3=0$ であるから、この閉回路の入力波は a_3 のみが存在する。従って、(1)と(2)より出力波は

$$b_2=(1-c^2)^{1/2} a_1 + jca_3 \quad (3)$$

$$b_4=jca_1+(1-c^2)^{1/2} a_3$$

与えられる。 a_3 と b_4 の関係は閉回路の振幅減衰を τ とすると

$$a_3=b_4 \exp(-\tau) \quad (4)$$

であるから、(3)と(4)より

$$a_3=jca_1/\{\exp(-\tau)-(1-c^2)^{1/2}\} \quad (5)$$

又、(3)と(5)より

$$b_2/a_1=(1-c^2)^{1/2}-c^2/\{\exp(-\tau)-(1-c^2)^{1/2}\} \quad (6)$$

が得られる。ここで、この加速機構に供給される全高周波電力を P 、 n 番目の加速装置の入力電力を P_n とすると、その方向性結合器の端子1の入力波振幅 a_{n1} の平方は P_n に比例する筈である。 b_4 の振幅は(3),(4)より

$$b_4=jca_1/\{1-(1-c^2)^{1/2} \exp(-\tau)\} \quad (7)$$

と置き換えておく。どの加速装置の振幅減衰係数も同じであると仮定すると、この条件の下で、各加速装置の b_4 の振幅が同じになるためには、各装置の結合度を c_1, c_2, \dots, c_n とし、且つ、端子1の入力波振幅を $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}$ とすると(7)から

$$jc_1 a_{11}/\{1-(1-c_1^2)^{1/2} \exp(-\tau)\} = \dots = jc_n a_{1n}/\{1-(1-c_n^2)^{1/2} \exp(-\tau)\} \quad (8)$$

を満たす必要がある。一方、 n 番目の入力振幅 a_{1n} と $n-1$ 番目の入力振幅 $a_{1(n-1)}$ との関係は $b_{2n}=a_{1(n-1)}$ と(6)より

$$a_{1(n-1)}/a_{1n} = (1-c_n^2)^{1/2} - c_n^2 / \{\exp(-\tau) - (1-c_n^2)^{1/2}\} \quad (9)$$

で表される。 $n-1$ 番目の加速装置の端子1の入力電力を P_{n-1} とすると(9)の平方は

$$(b_{2n}/a_{1n})^2 = (a_{1(n-1)}/a_{1n})^2 = P_{n-1}/P_n \quad (10)$$

なる関係を満たす。各装置の損失電力が同じであると仮定し、それを P/n とすると

$$P_{n-1} = P - P/n = P(n-1)/n \quad (11)$$

と書換えられる。同様に、 $n-2$ 番目の加速装置の入力電力 P_{n-2} は

$$P_{n-2} = P_{n-1} - P/n = P(n-2)/n$$

となる。又、 k 番目の加速装置のパラメータを $b_{2k}/a_{1k} = A_k$ とし、結合度 c_k を求めると(6)と(9),(10),(11)より

$$c_k = [1 - \{1 + \exp(-\tau) A_k\}^2 / \{\exp(\tau) + A_k\}^2]^{1/2} \quad (12)$$

与えられる。一方、(10),(11)より $a_{1k} = \{(k-1)/k\}^{1/2} a_{1(k+1)} = \{(k-1)/n\}^{1/2} a_{1n}$ であるから、 k 番目の閉回路を還流する高周波振幅の一般式は

$$b_{4k} = jc_k a_{11} / \{1 - (1-c_k^2)^{1/2} \exp(-\tau)\} = jc_k \{(k-1)/n\}^{1/2} a_{1n} / \{1 - (1-c_k^2)^{1/2} \exp(-\tau)\} \quad (13)$$

と書換えられ、 (b_{4k}/a_{1n}) は一定となる。

ここでは、高電界加速実験に使用した加速装置の減衰定数 τ を使い、1個の高周波電源の供給波電力を $P=25\text{MW}$ とし、その電力の分割数 n を $n=100$ とした場合を例にとっ

て、上述の関係式から加速装置のそれぞれのパラメータを求めた値を表1に示す。但し、 $\tau = \alpha l = 0.272 \times 0.35 = 0.0952$ とした。

表1 加速装置のパラメーター

順番	入力電力	A_k^2	C_k	b_{4k}/a_{1k}	b_{4k}/a_{1n}
100	n	$P_n = P$	$(n-1)/n$	0.021861	0.24016
99	$n-1$	$P_{n-1} = P(n-1)/n$	$(n-2)/(n-1)$	0.021972	0.24137
98	$n-2$	$P_{n-2} = P(n-2)/n$	$(n-3)/(n-2)$	0.022084	0.24260
...				
50	50	$P_{50} = P(50/n)$	49/50	0.030991	0.33964
...				
3	3	$P_3 = P(3/n)$	2/3	0.137972	1.38659
2	2	$P_2 = P(2/n)$	1/2	0.179210	1.69822
1	1	$P_1 = P(1/n)$	0/1	0.416379	2.40165

k番目の加速装置の還流電力 P_{rk} は $P_{rk} = (b_{4k}/a_{1k})^{2P} (k/n) = (b_{4k}/a_{1n})^{2P}$ で与えられ、例題の場合はどの加速装置の還流電力も $P_{rk} = 1.4419\text{MW}$ と一定になる。

4. エネルギー利得

加速装置の加速管が定インピーダンス進行波型の場合、そのエネルギー利得 V_g は、

$$V_g = (2r_0 |P_{rk} / \tau)^{1/2} \{1 - \exp(-\tau)\} \quad (14)$$

で与えられる。従って、1個の高周波電源の高周波電力を n 分割して供給する加速構造による加速装置の全エネルギー利得 E_t は

$$E_t = nV_g \quad (15)$$

となる。ここでは、1987年に高電界加速実験に使用した還流型加速装置のパラメーター(表2)を基本として、例題として取上げた加速装置のエネルギー利得を求めると、(14)、(15)から1個の高周波電源で得られる加速エネルギーは約210MeVとなる。この場合の有効加速管の全長は34.13mである。従って、加速電界強度は約6.15MV/mとなり、必ずしも低いとは言えない。この加速機構では1個の加速装置に尖頭値で約250kWの高周波電力の供給となるので、デューティの高い加速器の可能性を秘めている。25MWの高周波供給電力で約210MeVの加速エネルギーを得られる事は、現時点では他の常電導の定在波型加速空洞より遙かに省エネルギーである。

参考までに、高電界加速実験では、加速装置に26MWの高周波電力を供給し18.23MeVのエネルギー利得²⁾があった。これは設計値¹⁾に非常に近い結果であった。

表2 高電界加速装置のパラメーター

型式	定インピーダンス	群速度	(Vg/c)	0.0098
位相シフト	$\pi/2$	Q値		11000
加速周波数 (MHz)	2856	電界減衰係数(neper/m)		0.277
加速空洞数	13	充填時間 (ns)		116.1
加速管有効長 (cm)	34.13	閉回路の電界減衰率		0.816
デスク穴径 (mmφ)	20.0	閉回路の総電力減衰量(db)		-0.882
シャント抵抗 (Mohm/m)	50.0	閉回路の周回転時間 (ns)		130.2

5. あとがき

この加速機構は高いデューティに耐える常伝導加速器として有望であるが、実用的な線形加速器として役に立つまでには、加速構造に寄生する加速ビームの不安定性、ジュール熱の処理等、未解決の問題点を多く抱えているのそれらを1つ1つ克服する必要がある。従って、今後の継続した開発研究を必要とする。

1) I.Sato et al., Proc.12th Linear Accl.Meet.in Japan Aug.1987 p137.

2) I.Sato et al., The 6th Symp. on Accelerator Science and Technology,1987, Tokyo,Japan, p95.

3) I.Sato et al., Proc.11th Linear Accl.Meet.in Japan