

PROTON LINAC OF TRAVELING WAVE TYPE

I.Sato

National Laboratory for High Energy Physics

Abstract

A proton linac of traveling wave type was proposed as an accelerator for high energy and high duty. The design principle of linac is based on bunchers basic parameters of electron linacs. A narrow energy spectrum within about 1% is obtained as a result to do beam traces. The paper reports specifications of the linac machine.

進行波型陽子線形加速器

§1 はじめに

最近、GeV級陽子線形加速器の建設計画が方々で提案されている。従来の長大な陽子線形加速器はアルバレ型陽子線形加速器とサイドカップル型高周波空洞の組合せた形態であり、建設費も非常に高い。そこで、Sバンド進行波型加速管のパラメーターを基礎データにして、UHF、Lバンドのモデル加速管を設計し、計算機による陽子ビームのシュミレーション・トレースを試みた。その結果について報告する。

§2 モデル陽子線形加速器

簡単化のため、5MeVの陽子を1GeVに加速するケースについて考察する。前段加速器は5MVの加圧型コッククロフトとする。イオン源の陽子は前段加速器によって規格化速度 $\beta=0.10283$ に加速される。この陽子の β は2.723 KeVの電子と等価である。同様に、1GeVに加速された陽子($\beta=0.875$)は544.6 KeVの電子と等価である。上記は2.7KeVを544.6KeVに加速する電子線形加速器のバンチャー加速管を設計する事に相当する。加速管の構造と製作上の理由から加速器をlow β mid β high β の3段階し、 β を0.1 \rightarrow 0.2, 0.2 \rightarrow 0.34, 0.34 \rightarrow 0.87に分割する。特にlow β のデスク型進行波加速は得策でない。この範囲はアルバレ型、或は単空洞連結による加速となるが、ここでは単空洞連結型を採用する。高周波システムの単純化のため、それぞれの加速周波数を433.33, 433.33, 1300 Mhzとする。従って、バンチャー加速管は3種類となる。シュミレーションの関係上、mid β high β 加速管は簡単な構造のデスク型進行波加速管とする。前段加速器並びに線形加速器の仕様は表1、線形加速器の主要パラメーターは表2に示す。加速器の凡例概略を図1に示す。

表1 加速器の仕様

	前段加速器	線形加速器
型式	加圧型コッククロフト	単空洞+進行波型
エネルギー (MeV)	5	5 \rightarrow 1000
ビーム電流 (mA)	800	400
平均ビーム電流(mA)	0.4 \rightarrow 6	0.2 \rightarrow 3

パルス幅	(μ s)	10	10
繰り返し数	(cps)	50-->750	<--
デューティ	(%)	0.05-->0.75	<--
ビーム電力	(KW)	2-->30	200->3000
所要電力	(MW)		
加速器の長さ	(m)		

表2 線形加速器の仕様パラメーター

加速部	low β	mid β	high β
型式	単空洞連結	進行波型($2\pi/3$)	<--
エネルギー (MeV)	5 --> 20	20-->60	60-->1000
ビーム電流 (mA)	400	<--	<--
パルス幅 (μ s)	10	<--	<--
繰り返し数 (cps)	50-->750	<--	<--
デューティ (%)	0.05-->0.75	<--	<--
加速周波数 (Mhz)	433.33	433.33	1300.0
波長 (cm)	69.182	69.182	23.061
比光速($\beta=v/c$)	0.1028-->0.2032	0.2032-->0.3415	0.3415-->0.8750
空洞間隔 (mm)	71.11-->140.57	46.816-->78.752	26.251-->67.261
空洞数	4 \cdot 12		
加速管 (長さm \cdot 本数)		1.4 \cdot 3+2.0 \cdot 11	2 \cdot 3+3 \cdot 47
シャント抵抗(Mohm/m)	2.2-->2.9	1.2-->6.7	12.3-->38.7
Q値	15000-->20000	4000-->12000	6700-->17800
充填時間 (μ s)	2.75-->3.6	2.1-->3.1	0.98-->1.36
高周波源 (MW \cdot 本数)	5 \cdot 3kly	5 \cdot 14kly	20 \cdot 50kly
最大高周波電力(MW)	13.6	70	1000
最大所要電力	0.43	2.2	31.5
加速部の長さ(m)	8.44	40	200

§3 ビーム・トレース

進行波型加速管に於ける単位長さ当りの加速利得量 $d\gamma/d\xi$ と加速位相スリップ $d\phi/d\xi$ はそれぞれ(1),(2)

$$d\gamma/d\xi = \alpha \sin\phi \quad (1) \quad d\phi/d\xi = 2\pi(1/\beta_w - 1/\beta_o) \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 z を進行方向の長さ、 T と m_o を加速粒子の運動エネルギー並びに静止質量、 eE を加速電界強度、 λ を加速高周波波長とすると、 γ 、 α 、 ξ はそれぞれ規格化された全エネルギー $\gamma=(T+m_o)/m_o$ 、加速量 $\alpha=eE\lambda/m_o c^2$ 、長さ $\xi=z/\lambda$ を意味し、 β_w 、 β_o は光速度で規格化した加速高周波の位相速度、並びに加速粒子の速度である。しかし、陽子は電子の約 1800 倍の静止質量を持っているので、 α は非常に小さい値となる。

$$\beta_o = (\gamma^2 - 1)^{1/2} / \gamma \quad (3)$$

であるから、 γ 、 β ともに徐々にしか大きくなる。 (1),(2),(3)を使ってビーム・トレースした計算結果を図2、図3に示す。ここで、 E は加速管の個々の加速空洞に与えられたシャン

ト抵抗 r , factor of merit Q , と高周波電力 P に基づいて計算したものである。

図1 陽子線形加速器の概略

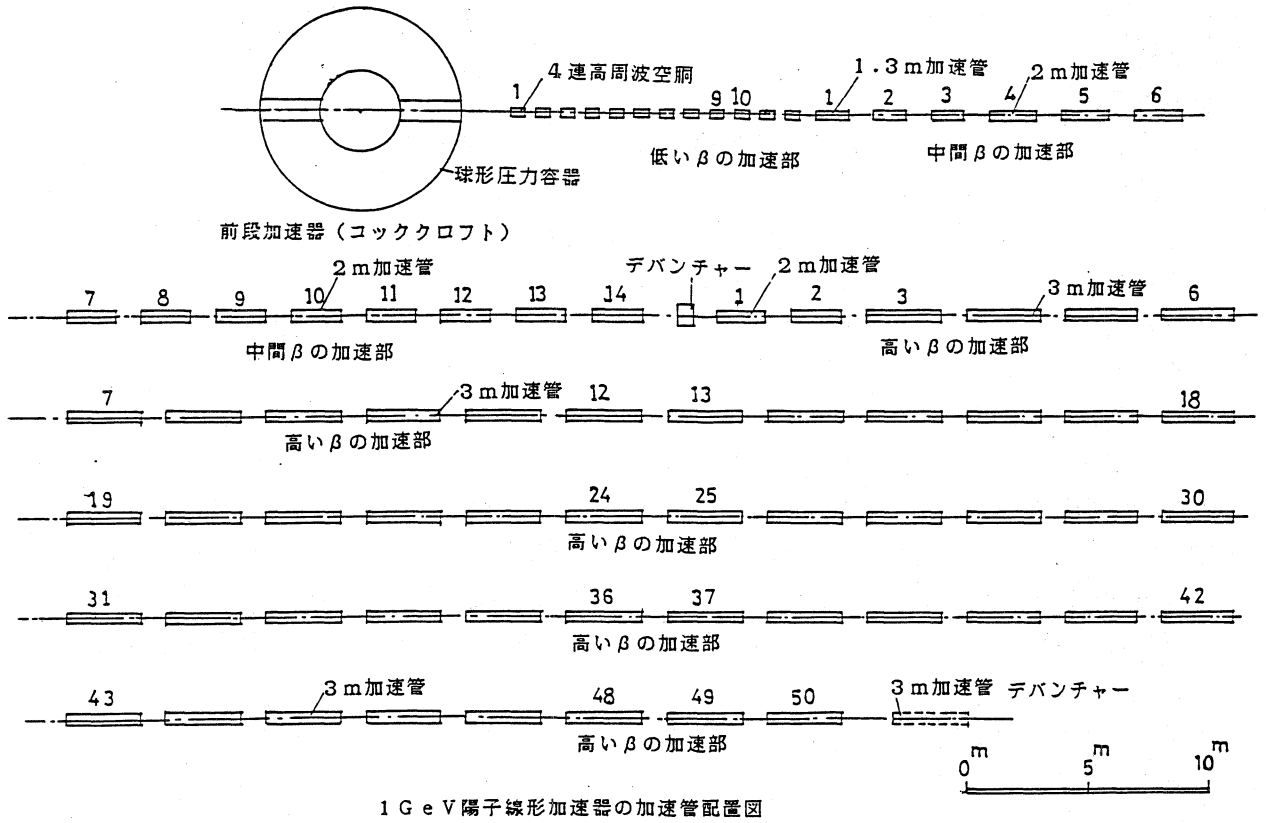


図2 (a) mid β 加速部のエネルギー利得

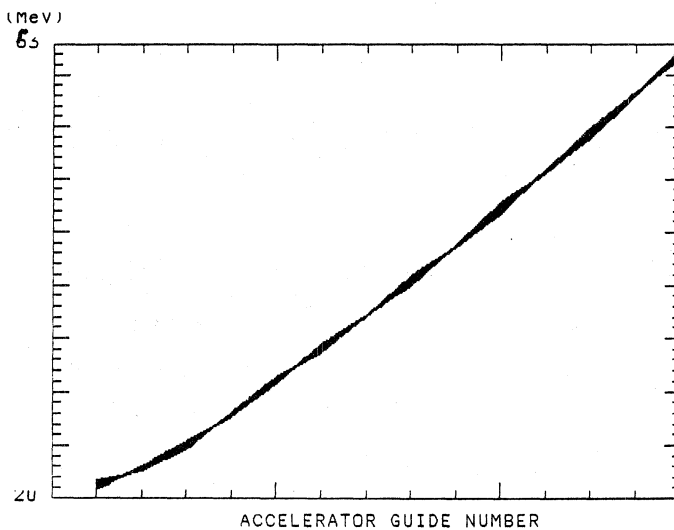


図2 (b) mid β 加速部のビーム位相

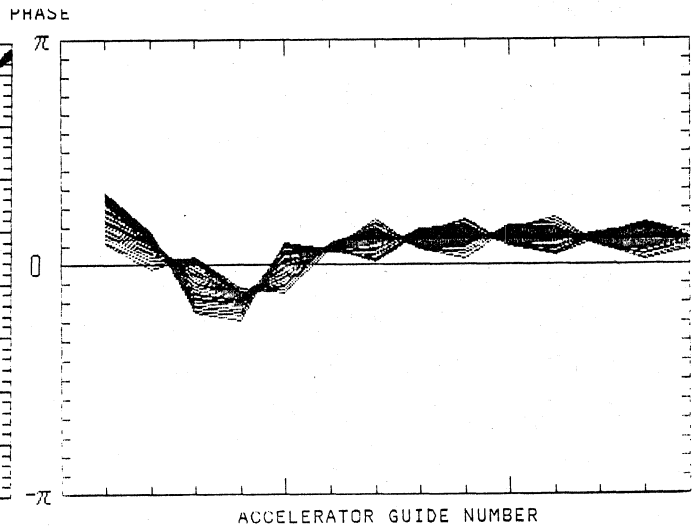


図3 (a) high β 加速部のエネルギー利得

図3 (b) high β 加速部のビーム位相

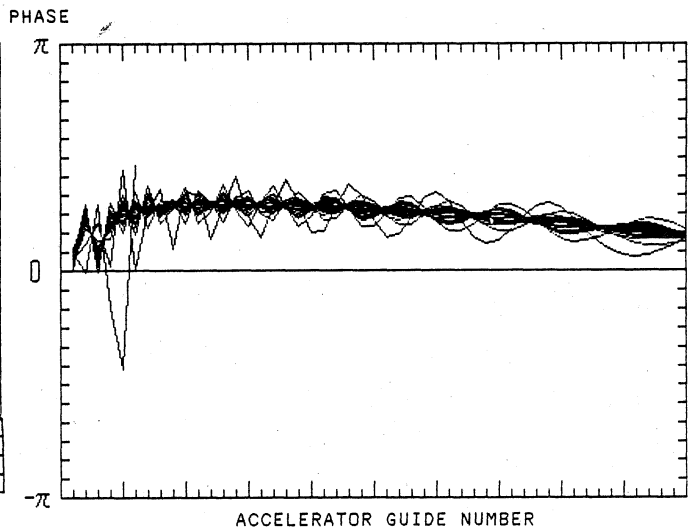
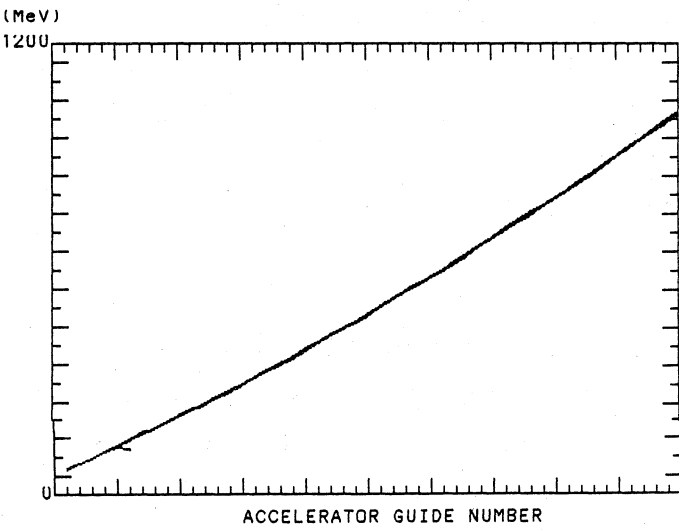
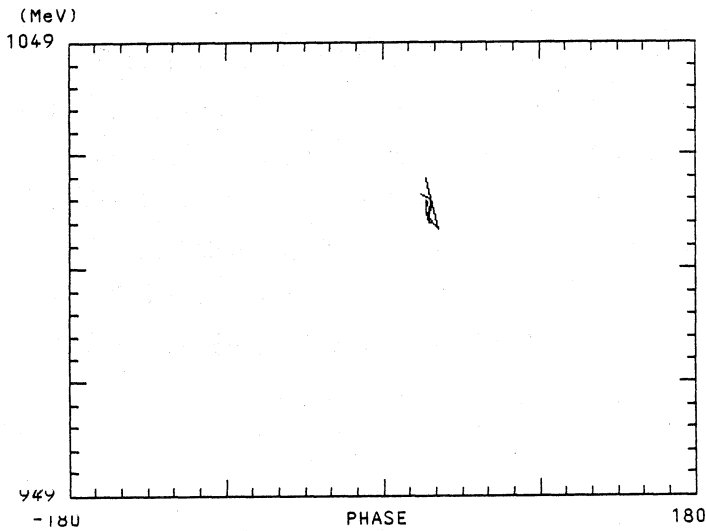


図3 (c) high β のビーム・エネルギー



§4 おわりに

ビーム・トレースした結果、ビーム負荷を考慮したエネルギー・スペクトルがほぼ 1% 以内に治まったのは予想外であった。これは非常に長いバンチャーで加速ビームをゆっくり位相振動させることが出来る系の特徴であり、ビーム負荷に依って加速電界の振幅が減少しても、それに対応して非振動加速位相角も移動する。この作用は加速ビームのエネルギー利得量が余り変化しない方向に働く。当然の事であるが、加速ビームの位相振動周期はパルス内にある各点で異なる。ビーム・シュミレーションの結果として、進行波型陽子線形加速器では極端な加速ビーム負荷でない限りビーム負荷保証を必要としないと思われる。但しこのシュミレーションでは加速管の間のドリフト空間効果は取り入れているが、空間電荷効果については計算時間の制約から考慮していない。