

25. 200 MeV 陽子線型加速器の概要

The JHP 200-MeV Proton Linear Accelerator

加藤隆夫

Takao Kato

高エネルギー物理学研究所

kato@kekvox.kek.jp

Abstract

A 200-MeV proton linear accelerator for the Japanese Hadron Project (JHP) has been designed. It consists of a 3-MeV radio-frequency quadrupole linac (RFQ), a 50-MeV drift tube linac (DTL) and a 200-MeV separated-type drift tube linac (SDTL). A frequency of 324 MHz has been chosen for all of the rf structures. A peak current of 30 mA (H^+ ions) of 400 μ sec pulse duration will be accelerated at a repetition rate of 25 Hz. A future upgrade plan up to 400 MeV is also presented, in which annular-coupled structures (ACS) of 972 MHz are used in an energy range of above 150 or 200 MeV. One of the design features is its high performance for a beam-loss problem during acceleration. It can be achieved by separating the transition point in the transverse motion from that of the longitudinal motion. The transverse transition at a rather low-energy range decreases the effects of space-charge, while the longitudinal transition at a rather high-energy range decreases the effects of nonlinear problems related to acceleration in the ACS. Coupled envelope equations and equipartitioning theory are used for the focusing design. The adoption of the SDTL structure improves both the effective shunt impedance and difficulties in fabricating drift tubes with focusing magnets. An accurate beam-simulation code on a parallel supercomputer was used for confirming any beam-loss problem during acceleration.

1. はじめに

高い稼働率で長期間運転するリング加速器の入射器用の陽子リニアック（パルス運転とする）に求められる大切な性能は次の2点と考えられる。

- 1) 要求仕様を満たすビームを、
- 2) 安定に供給する。

仕様で重要な項目は、

- 1) 出力エネルギー、
- 2) エネルギーの広がり、
- 3) 横方向のエミッタンス、
- 4) 平均ビーム強度、
- 5) ピークビーム強度、
- 6) ビームの時間構造などであろう。

安定に供給するという意味は、

- 1) ビームの性質が時間的に安定している事、
- 2) 長期間の稼働率が高い事、
- 3) 故障件数が少ない事等であろう。

200 MeV 陽子リニアックのような長期安定稼働を予定する場合には、ビームの運動に関するデザインは、技術力、運転法、その他（予算など）に拘束される。簡単頑丈な構造の加速管が選択でき、適当な精度で加速管を製作すれば、仕様を満たす加速が可能であり、しかも全体コストが下がるようなデザインを求めて考慮した事は以下の諸点である。

- 1) ビームの性質の劣化の原因となる空間電荷効果を低減する、
- 2) ビームの性質の劣化の原因となる非線形効果を低減する、
- 3) 高い精度等を要する技術の使用を減らす、
- 4) 未知のパラメーター部分の使用を減らす。

これらは具体的には

- 1) 主な周波数として 324 MHz を選択、
- 2) 中間エネルギー領域の加速管として 50 MeV 以上で SDTL 方式を採用、
- 3) CCL への遷移エネルギー (150 又は 200 MeV) の設定 (upgrade の時)、
- 4) 出力 3 MeV の RFQ の採用、
- 5) クライストロンの採用等に対応する。

以上をふまえて、JHP 200 MeV 陽子リニアックのデザイン (参考文献 1) についてまとめる。

2. 要求仕様

Table 1 に要求仕様をまとめた。当初は出力エネルギー 200 MeV、平均電流 200 μ A であり、将来は出力エネルギー 400 MeV、平均電流 800 μ A を目標とする。この仕様から、以下は殆ど自明の事として決まってしまう。

- 1) ピーク電流の増加により平均電流の増加を期待するので、横方向の収束力を変化させて、空間電荷力を抑える方式が必要となる。
- 2) KEK 内の限られた範囲に建設予定なので、長さは最大 220 m 程度に抑えなければならず、平均エネルギーゲイン 2 MeV/m 程度が必要となる。
- 3) リング入射後のビーム損失を減らす為に、低エネルギー部において速いビームチョッパーが必要となる (立ち上がり数十 nsec 程度)。

当初の出力は 200 MeV であり、加速効率が高く、得られるビームの性質が良ければ、加速の途中で周波数を変化させない方式が、装置全体の簡単さ、縦方向のトランジションが存在しない点、コスト、運転のしやすさ等、殆どあらゆる観点から見て優れている。将来の 400 MeV への延長の場合には、全体の加速効率等の改善の為に、周波数転換が必要となろう。

3. リニアックの構成

Table 2 と Fig. 1 に 200 MeV リニアックの概要を示した。Fig. 2 に、ここで使用する 3 種類の加速管の有効シャントインピーダンスを示した。周波数が 972 MHz の結合型空洞 (CCL) は、出力エネルギーが増強される場合に、150 又は 200 MeV から上のエネルギー領域で使う空洞であり、具体的には環結合型空洞 (ACS) (参考文献 2) を予定している。200 MeV までの特徴は、周波数のトランジションがない事、50 MeV から上に、新しいタイプの加速管である分離型ドリフトチューブリニアック (SDTL) (参考文献 3) を使用する事、そして周波数 324 MHz を選択した結果、クライストロンを比較的容易に使用できる事である。

4. SDTL

SDTL の構造を Fig. 3 に示す。名前からわかるように、横方向の収束用の磁石を、ドリフトチューブ (DT) の中に入れなくて、CCL で行われているようにタンクとタンクの間に設置する構造とする。この方式の採用に伴い以下の長所が生まれる。

- 1) 横方向の収束のトランジションを比較的低いエネルギー領域で行う結果となり、こ

Table 1 Required main parameters of the linac.

	Initial requirement	Final goal	
Particles	H^-	H^-	
Output energy	200	400	MeV
Peak current	30	60	mA
Beam width	400	400	μ sec
Repetition rate	25	50	Hz
Average current	200	800	μ A
Length	<150	~220	m
Momentum spread	± 0.1	± 0.1	%

JHP 200 MeV PROTON LINAC

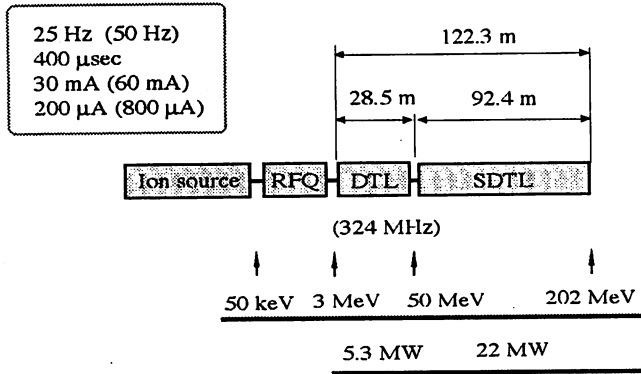


Fig. 1 Schematic view of the JHP 200-MeV proton linear accelerator.

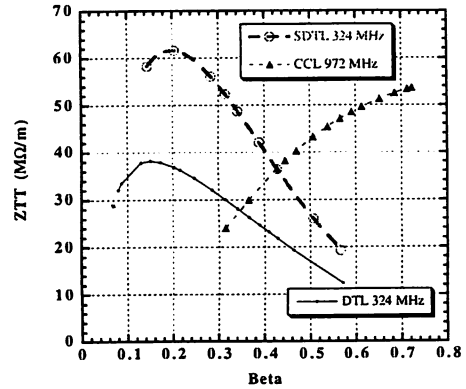


Fig.2 Effective shunt impedances used for the JHP proton linac.

これは、空間電荷効果を緩和する方向である。

- 2) 縦方向のトランジションを高いエネルギーで行う結果となるので、これは、CCL加速の非線形効果の減少をもたらす。
- 3) DTの中に四極磁石がないので、有効シャントインピーダンス (ZTT) の最適化が自由に行え、高いZTTが期待出来る。
- 4) DTの発熱除去が容易になる。
- 5) DTの中に四極磁石がないので、DTの整列精度及びタンク相互の整列精度が緩和される。
- 6) 空洞の安定化の必要が軽減される。
- 7) 四極収束磁石の数が減る。
- 8) 加速管の構造が簡単となる。

高エネルギー陽子リニアックでは、従来はCCLの導入により、縦と横のトランジションは同じエネルギーで生じていたが、SDTLの導入により、横方向だけのトランジションエネルギーを下げる結果となる。従って、一見すると、加速管のタイプが変わってトランジションの数が増えるように思われるが、縦と横に分けてトランジションを考えると、その数においては同じ

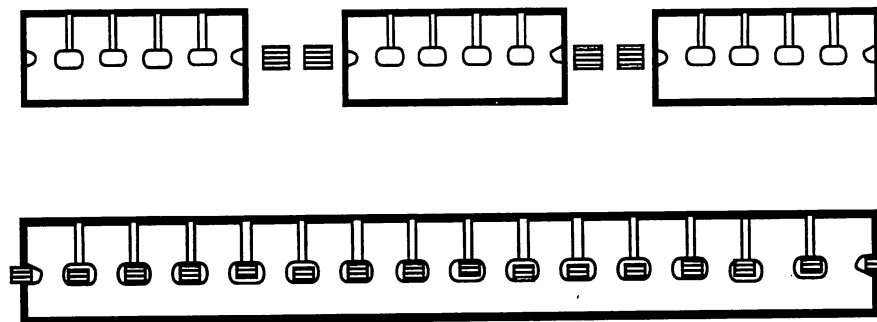


Fig.3 SDTL (upper) and DTL (lower) structures. The focusing magnets are indicated by squares.

Table 2 Parameters of the JHP 200-MeV proton linac.

Injection energy	3.0	MeV	SDTL		
Output energy	202.5	MeV	Frequency	324	MHz
Frequency	324	MHz	Injection energy	50.058	MeV
Particles	H ⁻		Output energy	202.488	MeV
Peak current	30	mA	Number of tank	31	
Beam width	400	μsec	number of cells	155	
Repetition rate	25	Hz	Structure length	65.9	m
Average current	200	μA	Total length	92.4	m
Total length (structure only)	92.9	m	Rf driving power (*)	17.4	MW
Total length	122.3	m	Beam power (30mA)	4.6	MW
Total rf driving power	21.3	MW	Total power (30mA)	22.0	MW
Total rf power (30 mA)	27.3	MW	Number of klystron	14	
Number of klystrons(*)	19		Accelerating field	3.86	MV/m
(*)includes for RFQ and debuncher			Energy gain	2.86 - 1.92	MeV/m
			Drift space (**)	0.67-1.03	m
RFQ			Acceptance		
Frequency	324	MHz	A _x (normalized 90%)	21.3	π mm-mrad
Injection energy	50	keV	A _y (normalized 90%)	18.6	π mm-mrad
Output energy	3	MeV	A _z (normalized 90%)	40.4	π MeV-deg
DTL			(*) including a factor of 1.2.		
Frequency	324	MHz	(**) shorter length is possible.		
Injection energy	3	MeV			
Output energy	50.06	MeV			
Number of tank	3				
number of cells	150				
Total length	28.51	m			
Rf driving power (*)	3.92	MW			
Beam power (30mA)	1.41	MW			
Total power (30mA)	5.33	MW			
Number of klystron	3				
Acceptance					
A _x (normalized 90%)	43	π mm-mrad			
A _y (normalized 90%)	41	π mm-mrad			
A _z (normalized 90%)	9.3	π MeV-deg			
Focusing method	Equipartitioned focusing				
Stabilization	Post-stabilized				

DTL

DTL Tank number	1	2	3	
Injection energy	3.0	19.196	35.407	MeV
Output energy	19.196	35.407	50.058	MeV
Tank length	10.36	8.87	7.81	m
Number of cells	80	41	29	
Rf driving power (*)	1.16	1.36	1.40	MW
Beam power (30mA)	0.49	0.49	0.44	MW
Total power (30mA)	1.64	1.84	1.84	MW
Accelerating field	2.5	2.7	2.9	MV/m
Stable phase	-30	-26	-26	
Drift space	4	3	0	βλ
	0.737	0.742		m

(*) including a factor of 1.3

であり、トランジションがビームに与える悪い効果を減少させている事がわかる。又、機械的構造は簡単化され、中間エネルギーまでの加速効率も高くなる (Fig. 2 参照)。しかしながら短所もある。

- 1) タンクの数が増える。
- 2) 高周波系が複雑になる。
- 3) 余分なドリフトスペース (タンクとタンクの間) が増える。
- 4) 非常に大きいアクセプタンスは実現しにくい。
- 5) チューニングのパラメーターが増える。

この中で、高周波系については、DTLの場合にも two-feed タイプを用いるので、高周波カップラーの数は同じである。又、収束周期の増大による横方向のアクセプタンスの減少は、ボア半径の増加で相殺出来るが、ユニットタンクを構成するセル数の上限を決める条件となる。本デザインでは、全てのタンクは5セルで構成される。従って、空洞を安定化する必要は少ないと思われる。Table 3 に DTL と SDTL の主要なパラメーターの比較を示す。

DTL から SDTL への転換エネルギーは、全体の加速効率、縦と横の出力ビームの質、タンクの長さ等を考慮して決める。転換点において、縦のマッチングまで考慮する時と、横だけのマッチングを考慮した時の出力エネルギー幅を Fig. 4 に示す。バンチャーを使わない場合には、最適な転換エネルギーがある事がわかる。

5. DTL

DTL の周波数は 324 MHz を選び、入射エネルギーは 3 MeV、出力エネルギーは 50 MeV と設定して、3 タンク構成とする。ドリフトチューブの中には四極電磁石を組み込み、横方向の収束力を細かくチューニングする。ポストカップラーを用いて空洞の安定化を行う (参考文献 4)。

6. 収束法

coupled envelope equation と等分配理論 (equipartitioning theory、参考文献 5) とを基礎にして、基本的な収束を行う。バンチビームの envelope equation は、

$$k_{x0}^2 a - \frac{3}{2} \frac{N r_c}{\beta_0^2 \gamma_0^3} \frac{1}{a z_m} \left(1 - \frac{g_0}{2} \frac{a^2}{\gamma_0^2 z_m^2} \right) - \frac{\epsilon_{nx}^2}{\beta_0^2 \gamma_0^2 a^3} = 0$$

Table 3 Typical parameters of the DTL and SDTL structures at a frequency of 324 MHz and an energy of 50 MeV ($\beta=0.31$).

	DTL	SDTL	
Tank diameter	56	52	cm
DT diameter	13	9	cm
Bore radius	1.3	1.5	cm
Outer corner radius	2.5	2.2	cm
Inner corner radius	1.0	0.5	cm
Z	78.2	75.9	MΩ/m
T	0.703	0.830	
ZTT	38.6	52.3	MΩ/m
Esurface peak	4.02	5.87	MV/m

$$k_{z0}^2 z_m - \frac{3 N r_c g_0}{2 \beta_0^2 \gamma_0^5 z_m^2} - \frac{\epsilon_{nz}^2}{\beta_0^2 \gamma_0^6 z_m^3} = 0,$$

$$r_c = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2}, g_0 = 2 \frac{z_m^2}{a^2} M_x,$$

k_{x0} と k_{z0} 横と縦の位相振動の波数、 ϵ_{nx} と ϵ_{nz} は横と縦の規格化エミッタンス、 a と z_m は横と縦のバンチ半径、 N はバンチ内の粒子数、 M_x は空間電荷効果の形状因子、 q は電荷、 ϵ_0 は真空誘電率、 c は光速、 $\beta_0=v/c$ 、 γ_0 はローレンツ因子を表す。入射時に、matched and equipartitioned のビームパラメータを与えて、加速途中は、縦と横の収束力の比が一定となるように逐次収束力を決めて、次の equipartitioning 条件が常に成立する方式を採用する。

$$\gamma_0 \frac{\epsilon_{nx} z_m}{\epsilon_{nz} a} = 1.$$

equipartitioning が成立しない入射の場合には、横の収束力を変化させて、縦と横の間のエミッタンスの増減をコントロールできる。収束の一例を Figs. 5-7 に示す。入射ビームのパラメータの例を Table 4 に示す。

7. RFQ とビームトランスポート

RFQは横の収束と縦の加速を同じ高周波で行う優れた加速管であるが、収束力だけを変えたい場合には、この特長は、逆に短所となる。又、ベインの加工を2次元カットで行う場合

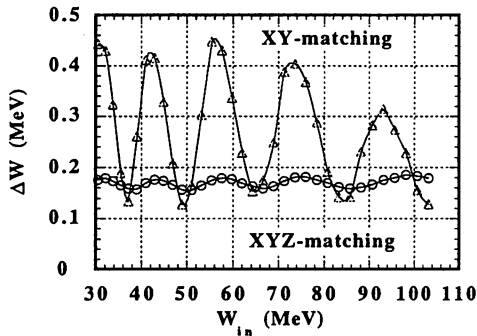


Fig. 4 Energy-width of the SDTL output beam as a function of the injection energy.

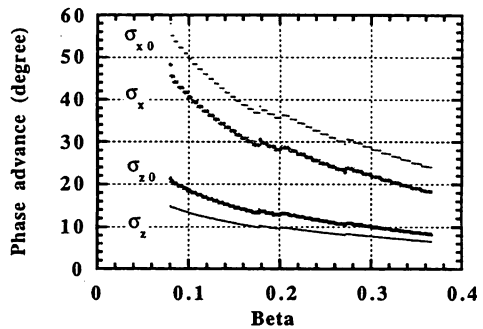


Fig. 5 Phase advances in both the transverse and longitudinal phase spaces along the DTL. A peak current of 30 mA is assumed.

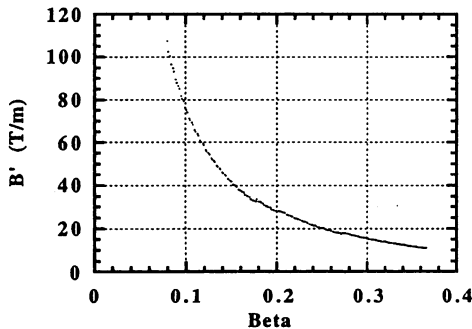


Fig. 6 Required magnetic field gradient along the DTL.

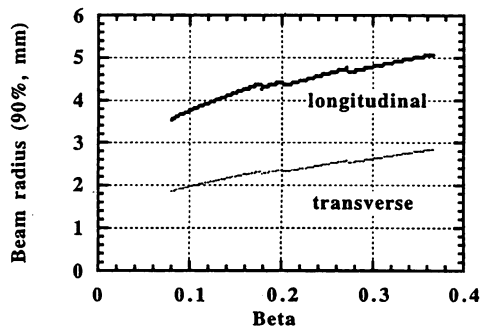


Fig. 7 Variation of the beam size along the DTL.

Table 4 Matched and equipartitioned parameters of the injection beam into the DTL.

Current	30	60	mA
Beam radius (90%)	1.83	1.98	mm
Beam radius (rms)	0.82	0.89	mm
$\Delta p/p$ (rms)	0.004	0.004	
$\Delta\phi$ (rms)	7.7	9.1	degree
Bunch length (rms)	1.6	1.9	mm
Bunch length (90%)	3.5	4.2	mm
ε_{nx} (90%)	1.5	1.5	π mm-mrad
ε_{nz} (90%)	2.5	3.0	$\times 10^{-6}$ m
B'	107.4	107.4	T/m
σ_{x0}	58	58	degree
σ_x	48	42.7	degree
σ_{z0}	30	30	degree
σ_z	21.5	18.1	degree
Δw (rms, half)	24	24	keV
Δw (90%,half)	53.7	53.7	keV
$\Delta\phi$ (90%,half)	17.2	20.3	degree
Partition parameter	1.15	1.06	

には、理論的な電磁場分布と実際の分布の対応が判然としない面がある。従って、RFQタンクを縦列につなぐ方式は、チューニングの時のビームの劣化と難しさを考えると得策ではない。DTLの四極磁石の作りやすさとRFQ自身の作りやすさから、RFQの出力ビームは3 MeV程度が適当となる(参考文献6)。RFQとDTLの間のビームトランスポートラインは、マッチングを行うと同時に、リング入射後のビーム損失を軽減する為の速いビームチョッパーに最適の場所と考えている。この場合、高周波の単一-deflecting cavityを使う方式(参考文献7, 8)が適している。

8. イオン源

KEKのH⁻イオン源では、セシウムを使わずに、ピーク電流16 mA、90%規格化エミッタンス0.41 π mm-mradを得た(参考文献6)。RFQで3 MeVまで加速した時の透過率は82.5%、エミッタンス増加は34%を得ている。従って、第一段階の目標である30 mAはようやく視野に入ってきた。その場合のDTL入射エミッタンスは、現在の値よりは多少大きい値になると思われる。

9. 将来のエネルギー増強

出力エネルギーを400 MeVまで高める場合には、150又は200 MeV以上のエネルギーでACSに転換する。トランジションエネルギーと周波数は、200 MeVリニアックのビームを測定した上で、決める。DTLの3倍の周波数972 MHzが第一候補である。

10. ビームシミュレーション

10.1 出力エミッタンス

トランジションエネルギーを147 MeVと100 MeVに選んで、その上をCCLにした時と、50 MeVから上をSDTLにした時の出力エミッタンスの比較をTable 5 (200 MeV)とTable 6 (400 MeV)に示す。SDTLの採用により良質の出力ビームが得られている事、トランジションエネルギーは147 MeV程度で、周波数比3倍が望ましい事が示されている。

Table 5 Final rms emittances for four configurations at the exit of the linac (200 MeV).

CCL configuration	x	y	z
	π mm-mrad		π MeV-deg
147 MeV - 972 MHz	0.509	0.523	0.48
147 MeV - 1296 MHz	0.570	0.535	0.51
100 MeV - 972 MHz	0.602	0.843	0.43
100 MeV - 1296 MHz	0.708	1.06	0.48
DTL 51 MeV +SDTL	0.433	0.443	0.364
Injection beam at 3 MeV	0.373	0.379	0.268

* z-z' emittances are normalized to those at 324 MHz for comparison.

Table 6 Final rms emittances for four configurations at the exit of the linac (400 MeV).

CCL configuration	x	y	z	
	π mm-mrad		π MeV-deg	
147 MeV - 972 MHz	0.539	0.534	0.468	no beam loss
147 MeV - 1296 MHz	0.572	0.628	0.641	0.18% beam loss
100 MeV - 972 MHz	0.675	0.585	0.600	no beam loss
100 MeV - 1296 MHz	0.733	1.05	0.545	0.12% beam loss

* z-z' emittances are normalized to those at 324 MHz for comparison.

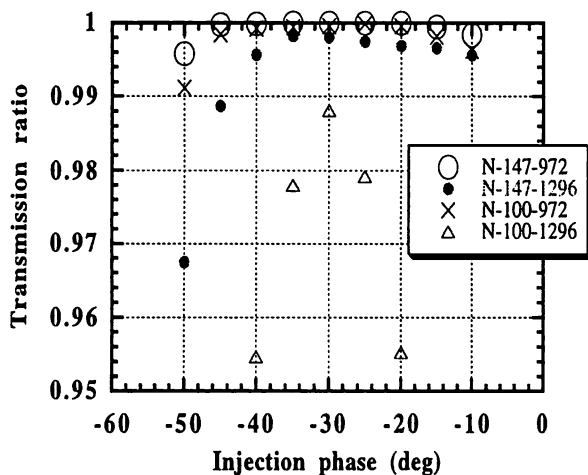


Fig. 8 Transmission ratio through the CCL as a function of an injection phase for four configurations of the linac. No field errors are assumed. The number of particles is 10000. The notation 'N-147-972' means an injection energy of 147 MeV and a frequency of 972 MHz.

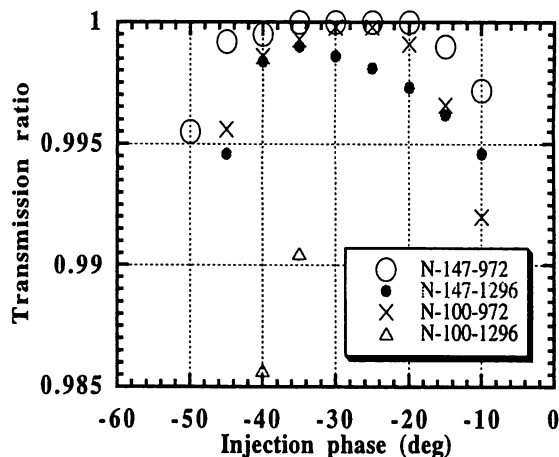


Fig. 9 Transmission ratio through the CCL as a function of the injection phase for four configurations of the linac. Rf amplitude errors of 1% for each cell and 3% for each tank are assumed. Rf phase errors of zero for each cell and 4% for each tank are assumed. The number of particles is 10000.

10.2 透過率

前節の場合の、透過率を Figs. 8-9 に示す。Fig. 9 は加速電場にランダムなエラーが存在する場合である。但し、ビーム損失を減らす為の最適化を行っていない状態の加速パラメータを使っている。

10.3 入射ビーム

前節の結果は、どのような入射ビームを使うかにより、結果が違ってくる。シミュレーションに使った入射ビームを Table 7 にまとめた。このパラメータの妥当性の判断は難しい問題として残るが、最近行われた Fermi Lab 400 MeV リニアックのビームロス (2% 以下) のデータ (参考文献 9) とは、およそ一致している (Figs. 8-9 参照)。

11. 計算コード LINSAC

DTL 計算用コード LINSAC (参考文献 10) の特徴は、加速ギャップの電場の形をそのまま計算に使っていること、空間電荷効果を全粒子間のクーロン力を計算して評価する事の 2 点である。このような計算は、膨大な計算量を必要とするので、コードはベクトル化され、更に、並列計算機用書きなおされている。スーパーコンピュータ (富士通 VPP500) の 64 個の演算ユニットを使った並列化計算では、粒子数 48000、ステップ数 63350 の 150 MeV リニアックの計算を 33 時間で完了する。

12. まとめ

JHP の 200 MeV 陽子線型加速器は、出力エネルギーが 3 MeV の電気四重極リニアック (RFQ)、50 MeV のドリフトチューブリニアック (DTL)、そして 200 MeV の分離型ドリフトチューブリニアック (SDTL) により構成される。全ての加速管の周波数は 324 MHz と設定されており、高周波源としてクライストロンを用いる。繰り返し周波数 25 Hz で、パルス幅 400 μ sec、ピーク電流 30 mA の負水素イオンが加速される。エネルギーを 400 MeV まで増加させる将来計画では、150 もしくは 200 MeV より高いエネルギー領域で、周波数 972 MHz の環結合型空洞 (ACS) が使われる。このデザインの一つの特徴は、加速過程におけるビーム損失の問題がよく考慮されている事であり、それは、縦運動の遷移位置と横運動の遷移位置を分離する事によ

Table 7 Beam parameters used for the simulations in the low-energy region.

Results of the preliminary simulation of 3-MeV, 324 MHz RFQ.

Normalized emittances	x			y		
	rms	90%	100%	rms	90%	100%
	π mm-mrad			π mm-mrad		
Injection into RFQ	0.193	0.822	1.49	0.196	0.831	1.47
Output from RFQ	0.282	1.29	3.04	0.270	1.23	3.34
$\Delta\phi$ (full width)	48.4 degrees					
Δw (full width)	116 keV					
Injection beam into the DTL (10000 particles for LINSAC simulation)						
DTL injection beam	0.373	1.59	2.88	0.379	1.61	2.85
$\Delta\phi$ (full width)	50.5 degrees					
Δw (full width)	155 keV					

り達成されている。収束のデザインには、coupled envelope equation と等分配理論 (equipartitioning theory) を使う。SDTL の採用により、有効シャントインピーダンスと収束磁石を含むドリフトチューブの製作の難しさが改善された。加速過程のビーム損失の問題は、並列型のスーパーコンピュータ上で走る正確なビームシミュレーションコードを使って検証した。

参考文献

1. T. Kato, "Design of the JHP 200-MeV Proton Linear Accelerator," KEK Report 96-17.
2. T. Kageyama et al., "Development of Annular Coupled Structure," Proc. 1994 International Linac Conf., p. 248 (1994).
3. T. Kato, "Proposal of a Separated-Type Proton Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure," KEK Report 92-10.
4. F. Naito et al., "Rf Characteristics of a High-Power Model of the 432 MHz DTL," Proc. 1994 International Linac Conf., p.137 (1992).
5. M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams", Section 5, John Wiley & Sons, INC, 1994.
6. A. Ueno et al., "Beam Test of the Pre-Injector and the 3-MeV H^- RFQ with a New Field Stabilization PISL," Proc. 1996 International Linac Conf., p.293 (1996).
7. T. Kato, "Design of Beam-Transport Line between the RFQ and the DTL for the JHP 1-GeV Proton Linac," Proc. 1994 International Linac Conf., p.59 (1994).
8. T. Kato, "New Design of an RF Beam Chopper," Proc. 7th Symposium on Accelerator Science and Technology, p.288 (1989).
9. L. J. Allen et al., "Operation and Improvements of the Fermilab 400 MeV Linac," Proc. 1996 International Linac Conf., p.329 (1996).
10. T. Kato, "Beam Simulation Code Using Accurate Gap Field Distributions in a Drift Tube Linac," Proc. 1994 International Linac Conf., p.523 (1994).