

200 MeV 陽子リニアックの概要

1998年6月17日 加速第4研究系 加藤隆夫

まとめ

本リニアックは大強度ビーム（ピーク電流 30 mA、平均電流 200 μ A、将来はピーク電流 60 mA）を高エネルギー（200 MeV、将来は 400 MeV）まで加速する。このような大強度高エネルギーリニアックでは、エミタンスの劣化を小さくし、加速途中のビーム損失を少なくして、ビームを安定に供給する事が重要である。その為（1）ビームに対する収束力、（2）運転時の動作特性、（3）ビームの性質の劣化の原因となる様々なエラーに注意して、デザインと製作を行う。加速効率、製作及び運転の容易さにも留意する。

1. 200 MeV リニアックの概要

要求仕様を表1に示す。全体構成を図1に示す。加速管のパラメータを表2に示す。

2. リニアックの特徴

- ・高い周波数 324 MHz（従来 201 MHz）
- ・安定な運転を期待出来る加速電場の設定
 - ・DTLでは0.6 KL（キルパトリックリミット）、SDTLでは1.2 - 1.3 KL（1 KL=17.8 MV/m）
- ・クライストロン 2.5 MW ピーク（従来 3 極管又は 4 極管）
- ・大強度 ピーク電流 30 mA、平均電流 200 μ A（従来 10 μ A）の加速
- ・RFQの採用（従来はコッククロフト 750 keV 直流加速器）
 - ・PISL (π -mode stabilizing loop)による安定化
- ・ポストカップラーにより安定化した DTL
- ・新しい加速管構成 ---> 分離型 DTL (SDTL) の採用
- ・新しい四極直流電磁石の製作法を採用（栄型電鋳製作法）

3. 設計及び建設の指針

3.1 ビーム損失が小さい、安定な、運転を目指す

- ・高い運転周波数の選定（324 MHz、従来は 201 MHz）により、空間電荷効果が低減され（表3）、且つクライストロンが使用可能となった
- ・3-MeV RFQの採用により、低エネルギー部の優れたビームの性質が期待出来る
- ・縦と横の収束力のバランスを保つ収束法の採用（図2）
(equipartitioning focusing method)
- ・様々なタイプの外乱に対して安定な加速管を使用
 - RFQ --- PISL (π -mode stabilizing loop)
 - DTL --- ポストカップラーによる安定化（図3）
 - SDTL --- 5セル構成の短い加速管（図4）
- ・加速管の運転状態での安定性への配慮
 - 低エネルギー領域の DTL は熱変形による電場の乱れが重要問題
(ポストによる安定化、高周波発熱を減らす、高い入射エネルギー、十分な冷却)
- ・ビームサイズとボア径との比を充分とる（図5）
- ・縦と横のトランジションへの配慮（図6）

3.2 ピーク電流の変化に対応してチューニングが容易な事

- ・横方向の収束力変化の為に四極電磁石を採用（永久磁石の代りに）
- ・直流磁石の採用

発熱が大きい事は欠点であるが、パルス磁石に比べて、正確な安定な動作が期待出来る。

3.3 加速管の構成

加速効率、運転時の電場分布の安定性及びエネルギー増強の時の高エネルギー加速管との接続の点でも優れている分離型ドリフトチューブリニアック（SDTL）を50MeV以上のエネルギーで採用（図7）。

4. 今年度製作部分について

初期計画では、第1期建設ではエネルギー200 MeVまで、第2期増強ではエネルギー400 MeVまでの加速管を製作する計画であった。今年度は、第1期建設分の中のエネルギーがおよそ59 MeVまでを製作する。ここに含まれる加速管の構成は、イオン源+LEBT+RFQ(3 MeV)+MEBT(チョッパー、バンチャーを含む)+DTL(3タンク、50 MeV)+HEBT+SDTL(2タンク、58.8 MeV)、全長は約40 mである。ピーク電流30 mAの負水素イオン（パルス幅500 μ sec、繰り返し周波数25 Hz）を加速するので、平均電流はおよそ200 μ A（chopping ratio=0.56）となる。ピーク出力2.5 MWのクライストロン5本を使用する。平成11年度内にトンネル内への設置を目指す。構成を図8に示す。

・MEBT

図9にビームラインの計算結果を示す。表4と5にバンチャーとチョッパーの特性を示す。

- 1) 縦横のビームマッチング：8個の四極磁石、2個のバンチャー（図10）
- 2) ビームチョッピング：2個のチョッパー空洞（図11）

・RFQ

デザインの概略を表6に示す（by 上野）

表 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 | 500 | 500 | μsec |
| Repetition rate | 25 | 50 | Hz |
| Average current | 200 | 800 | μA |
| Length | <150 | ~220 | m |
| Momentum spread | ± 0.1 | ± 0.1 | % |

表 2 - 1 : Parameters of the JHF 200-MeV proton linac (DTL and SDTL).

| | DTL | SDTL | |
|--------------------------------|------|-------|------|
| Frequency | 324 | 324 | MHz |
| Injection energy | 3.0 | 50.1 | MeV |
| Output energy | 50.1 | 200.0 | MeV |
| Length (structure only) | 27.0 | 65.8 | m |
| Length (including drift space) | 28.5 | 92.3 | m |
| Number of tank | 3 | 31 | |
| Number of klystron | 3 | 14 | |
| Rf driving power | 3.9 | 16.7 | MW |
| Total rf power (30 mA) | 5.3 | 21.2 | MW |
| Total length | | 122.2 | m |
| Total power (30 mA) | | 26.6 | MW |
| Peak current | | 30 | mA |
| Beam width | | 500 | μsec |
| Repetition rate | | 25 | Hz |
| Average current | | 200 | μA |
| chopping ratio | | ~0.56 | |

表 2 - 2 : Parameters of the DTL

| | 1 | 2 | 3 | |
|------------------------|------|------|------|--------|
| Tank number | 1 | 2 | 3 | |
| Output energy | 19.2 | 35.4 | 50.1 | MeV |
| Length | 10.4 | 8.9 | 7.8 | m |
| Number of cell | 80 | 41 | 29 | |
| Rf driving power | 1.16 | 1.36 | 1.40 | MW |
| Total rf power (30 mA) | 1.64 | 1.84 | 1.84 | MW |
| Accelerating field | 2.5 | 2.7 | 2.9 | MV/m |
| Stable phase | -30 | -26 | -26 | degree |
| Bore diameter | 13 | 22 | 26 | mm |

表 2 - 3 : Parameters of the SDTL

| Length of unit tank | 1.48 - 2.61 m |
|------------------------|-----------------|
| Number of tank | 31 |
| Number of cell | 155 |
| Rf driving power | 0.35 - 0.64 MW |
| Total rf power (30 mA) | 0.48 - 0.78 MW |
| Accelerating field | 3.86 - 3.6 MV/m |
| Stable phase | -26 degree |
| Bore diameter | 30 mm |

(1998年4月時点の値、現在修正版を検討中。大きな変更はない予定)

表 2 - 4 : Parameters of the RFQ.

| | | |
|------------------|-------|---------------------------|
| Frequency | 324 | MHz |
| Injection energy | 50 | keV |
| Output energy | 3 | MeV |
| Length | 3.06 | m |
| Rf driving power | 0.323 | MW |
| Vane voltage | 87.1 | kV (1.89 KL) |
| Transmission | 94 | % |
| Current | 32 | mA |
| Emittance | 1 | π mm-mrad(normalized) |

表 3 Accelerator parameters for various operating frequencies.

| Frequency | 201 | 300 | 324 | 350 | 432 | MHz |
|-----------------------|------|------|-------|-------|-------|-------------------------------|
| Emittance(90%) | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | π cm-mrad (normalized) |
| Eacc | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | MV/m |
| Beam radius | 2.45 | 1.85 | 1.77 | 1.69 | 1.47 | mm |
| $\Delta\phi$ | 6.4 | 8.5 | 9.0 | 9.6 | 11.6 | degree |
| B' | 43.3 | 96.5 | 112.6 | 131.4 | 200.2 | T/m |
| σ_x^0 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | degree |
| σ_x | 42.4 | 50.0 | 51.1 | 52.2 | 54.4 | degree |
| σ_x/σ_x^0 | 0.71 | 0.83 | 0.85 | 0.87 | 0.91 | |
| μ_t | 0.50 | 0.31 | 0.27 | 0.24 | 0.18 | |
| EGF | 5.0 | 2.3 | 1.9 | 1.6 | 1.1 | % |

EGF: emittance growth factor due to the field energy of the bunch of Gaussian distribution.

表 4 バンチャーの高周波特性

| | |
|-----------|-------------|
| 周波数 | 324 MHz |
| 加速電圧 | 124 kV |
| パルス幅 | 630 μ s |
| 繰り返し | 50 Hz |
| Q_0 | 28300 |
| 空洞励振ピーク電力 | 10 kW |
| 空洞平均高周波損失 | 0.3 kW |
| 加速モード | TM010 |

表 5 チョッパーの高周波特性

| | |
|-----------|----------|
| 周波数 | 324 MHz |
| 加速電場 | 1.4 MV/m |
| パルス幅 | 222 ns |
| パルス間隔 | 278 ns |
| Q_L | 20 |
| 繰り返し | 50 Hz |
| 空洞励振ピーク電力 | 20 kW |
| 空洞平均高周波損失 | 1 W 以下 |
| 動作モード | TE11 |

表 6 Beam Optics Design of JHF-RFQ (Ueno)

- (1) KEKRFQ determine the cell parameters in Gentle-buncher
(ϕ s=-88° ~ -30° : constant longitudinal acceptance)
acceleration section (ϕ s=-30° : constant transverse
acceptance).
- (2) Try and error by using simulation codes (PARMTEQ, PARMTEQm
:PARMTEQ including multipole field effects) determine the
cell parameters in shaper(ϕ s=-90° ~ -88°).

| | JHP-RFQ | JHF-RFQ-0 (Design Report) | JHF-RFQ (Recent Design) |
|---|-----------------------------|--|----------------------------|
| $E_{inj}, E_{GBE}, E_{ext}$ (MeV) | 0.05,0.25,3 | 0.05,0.25,3 | 0.05,0.29,3 |
| * E_{GBE} : Energy at the end of gentle-buncher. | | | |
| Variables in shaper design | L_{SH} (shaper length) | L_{SH1} (ϕ s=-90° ~ -88°) m_{SH1} (modulation factor at $z=L_{SH1}$) L_{SH1} (ϕ s=-88°) | |
| Cavity Length (m) | 2.69 | 2.69 | 3.06 |
| ϵ ,90%(π mm·mrad) & I(mA) of injected beam in simulation | 1 20 | 1 32 | 1 32 |
| Transmission | | | |
| PARMTEQ | 94% | 96% | 96% |
| PARMTEQm (ρ :vane-tip curvature) | 74% : $\rho = .75r_b$ | 77%: $\rho = .75r_b$ (92%: $\rho = r_b$) | 94%: $\rho = .89r_b$ |
| Inter-vane Voltage (kV) | 90.5 | 94.6 | 87.1 |
| Measured/Estimaed RF wall loss (kW) | 480 (mea.) | 367 (esti.) | 323 (esti.) |

JHF 200-MeV PROTON LINAC

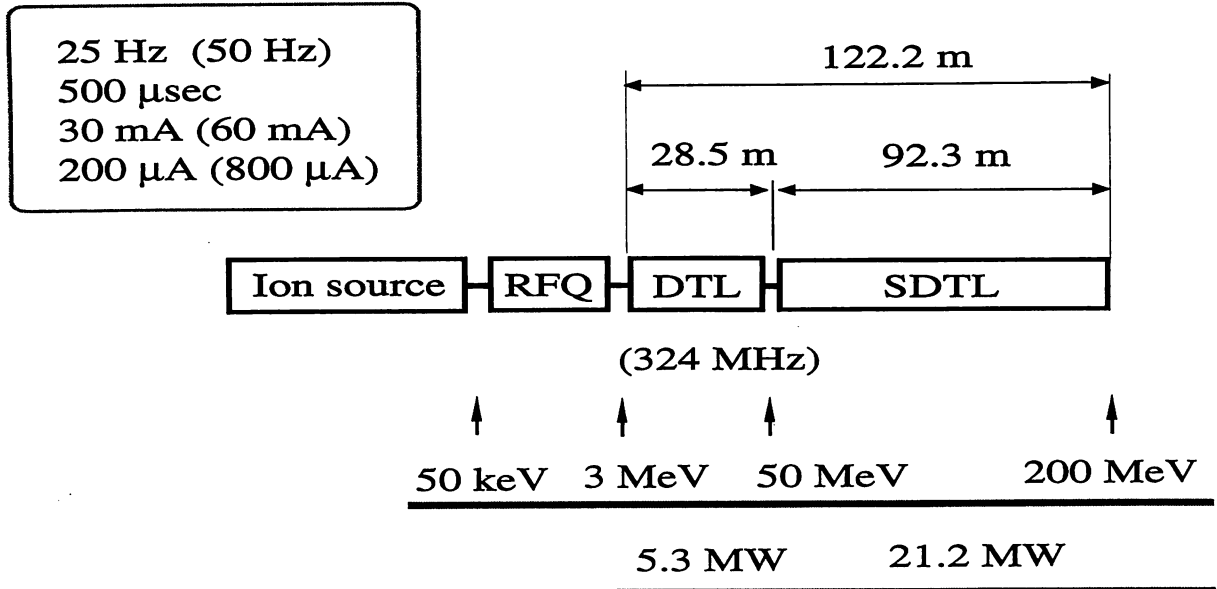


図1 200 MeV リニアック全体構成。

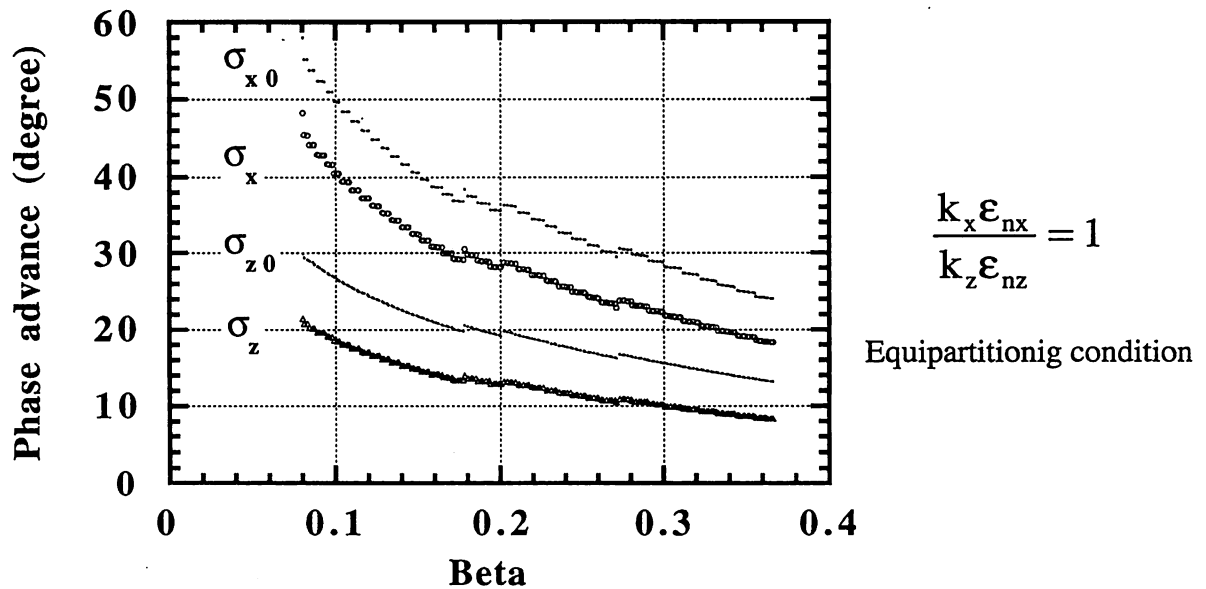
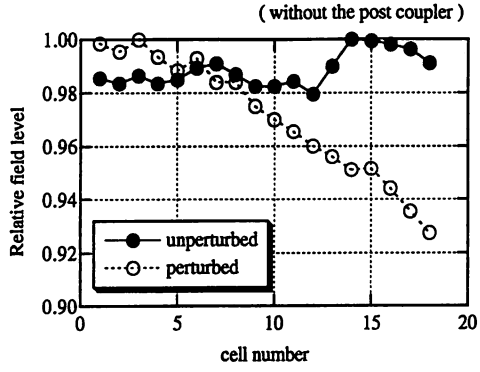
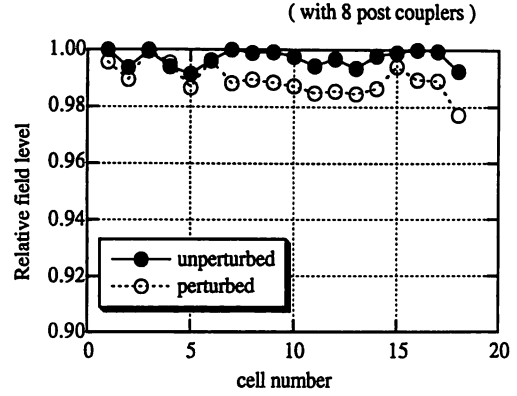


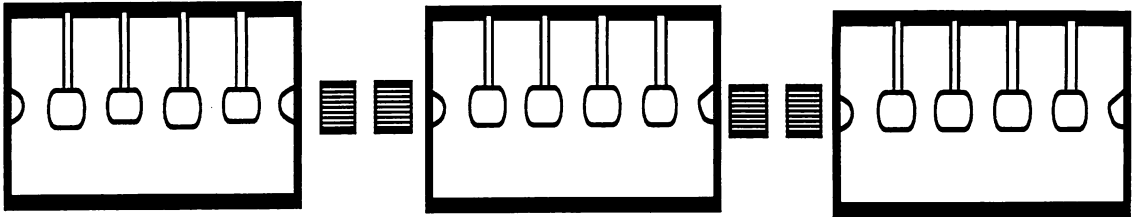
図2 Phase advances in both the transverse and longitudinal phase spaces along the DTL. A peak current of 30 mA is assumed.



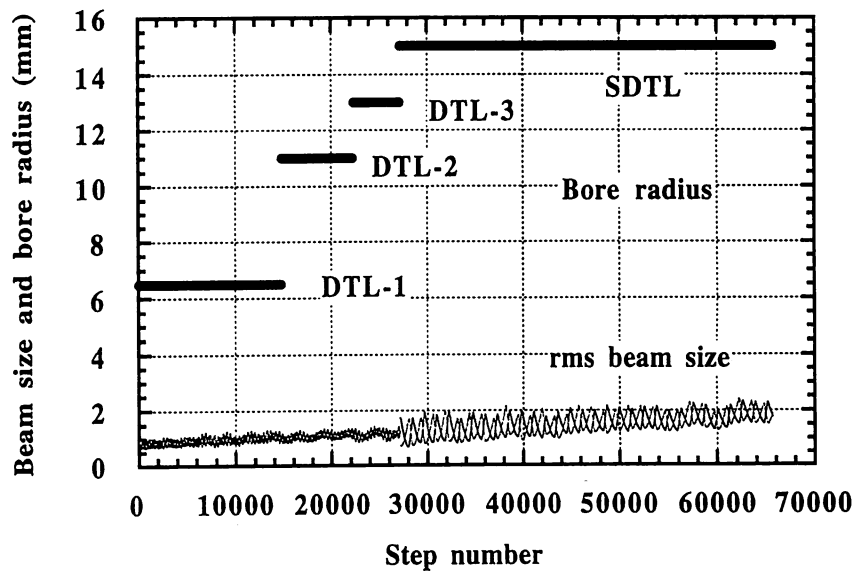
☒ 3 - 1 Average Accelerating field distribution of the high-power model of the 432-MHz DTL without post couplers.



☒ 3 - 2 Average Accelerating field distribution of the high-power model of the 432-MHz DTL with tuned 8 post couplers.



☒ 4 Schematic view of the SDTL structure. The focusing magnets are indicated by squares.



☒ 5 Variation of rms transverse beam size and bore radii along the linac. One cell corresponds to 181 steps.

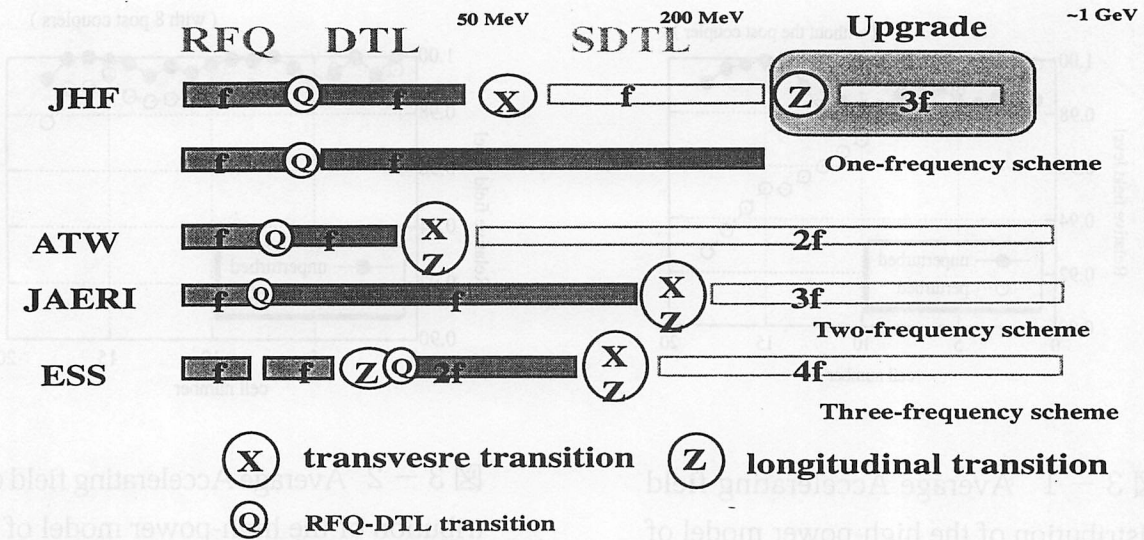


Fig. 6 Configuration of the linac; 'f' means the operating frequency.

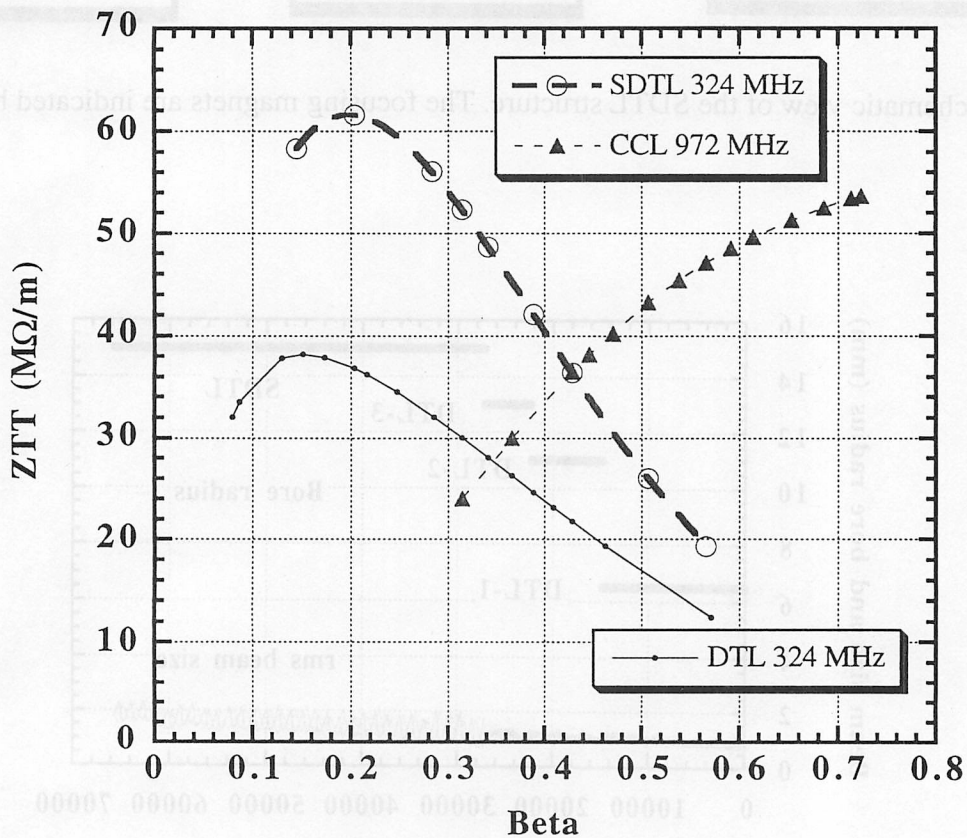


Fig. 7 Effective shunt impedances used for the JHF proton linac.

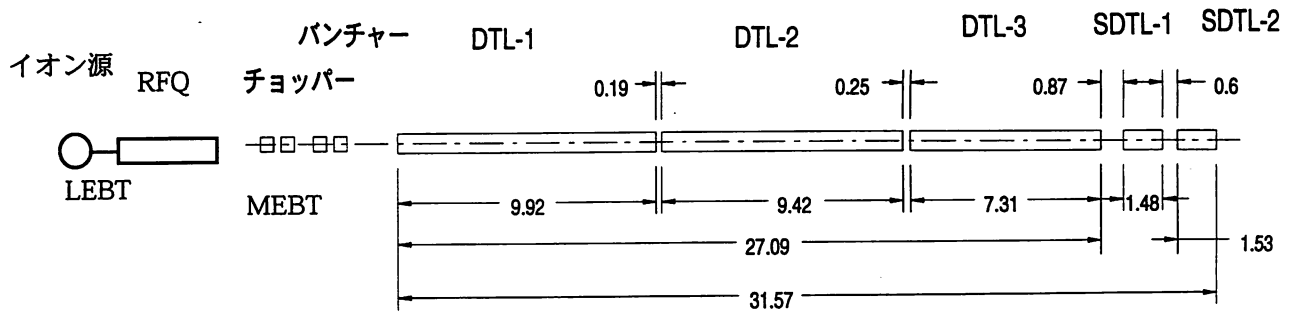


図8 今年度製作部分の加速管。

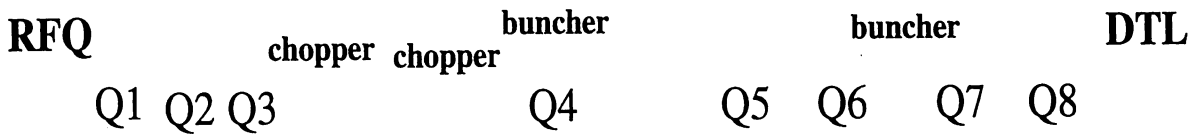
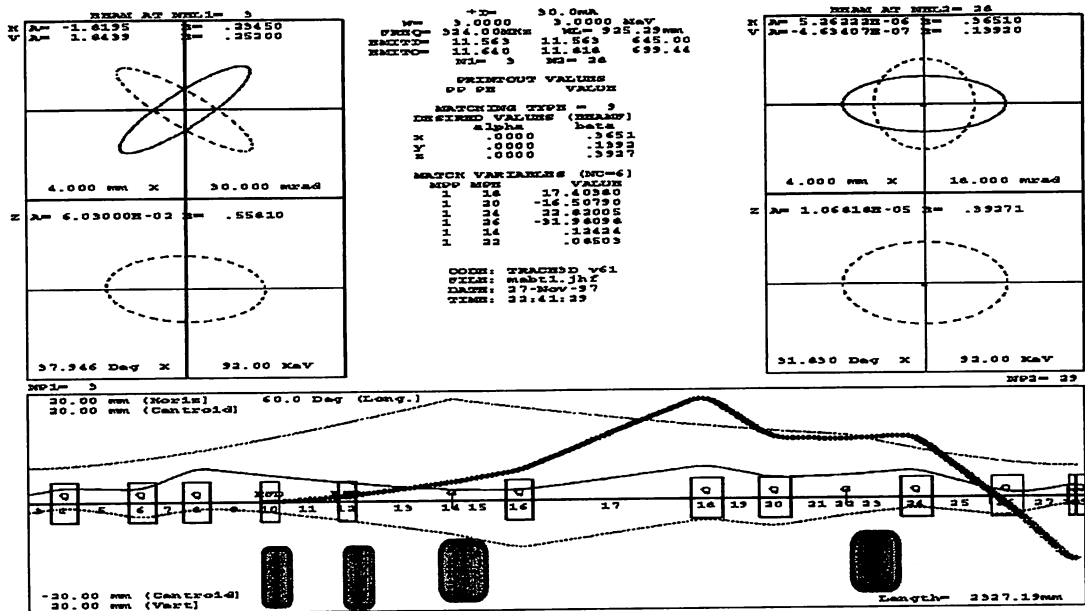
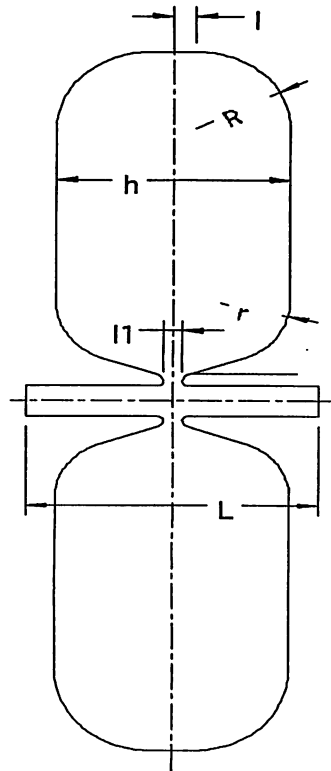


図9 TRACE 3-D output of the MEBT for Type A. In the up-left are the input beam phase spaces and in the up-right is the matched beam with DTL. The bottom are the beam profiles in z, x and y directions, respectively. The dark line traces the beam-centroid offset by the two RFQs.

図10 パンチャー空洞



パンチャー基本寸法

| | |
|-------------|--------|
| 直径 | 580 mm |
| ビームフランジ間の長さ | 160 mm |
| ギャップ長さ | 14 mm |
| 外半径 | 65 mm |
| 内半径 | 48 mm |
| ビーム孔直径 | 13 mm |

チョッパーの基本寸法

| | |
|-------------|---------|
| ビームフランジ間の長さ | 172 mm |
| 軸方向空洞内壁間距離 | 172 mm |
| 横方向空洞内壁間距離 | 306 mm |
| 縦方向空洞内壁間距離 | 270 mm |
| 電極軸方向長さ | 29 mm |
| 電極横方向幅 | 20 mm |
| 電極ギャップ長 | 10 mm |
| 磁場シールドパイプ長さ | 80.5 mm |
| 外側半径 | 61 mm |

図11 チョッパー空洞

