

# リニアック全体設計

---

第2回大強度陽子加速器計画技術報告会

400-MeV Linac Design

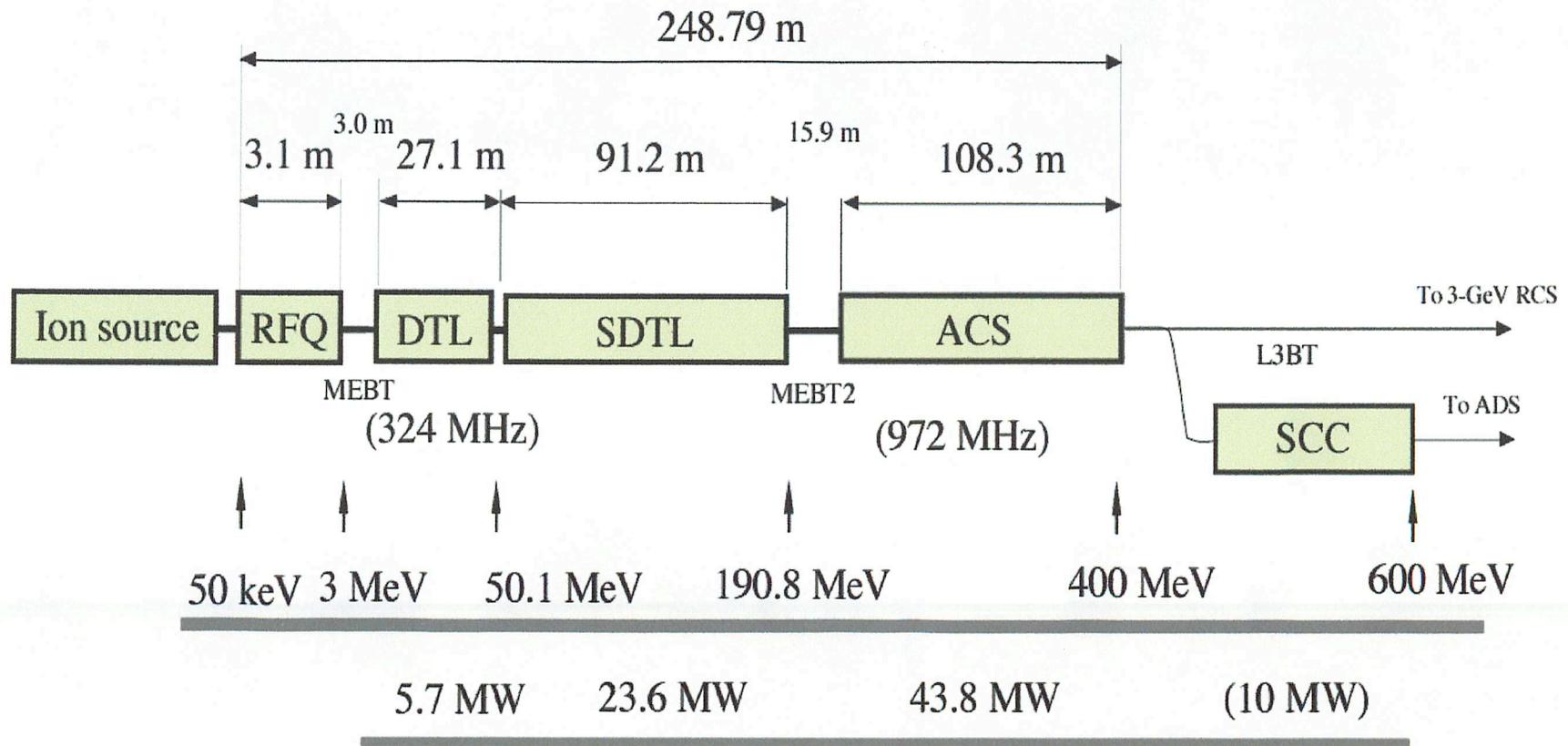
2001.11.15

KEK T. Kato

# Requirements

- **Current**
  - **Average** **675  $\mu\text{A}$**
  - **Peak** **50 mA**
- **Pulse**
  - **Pulse width** **500  $\mu\text{sec}$**
  - **Repetition** **50 Hz**
  - **Chopping ratio** **54 %**
  - **RF duty (600  $\mu\text{sec}$ )**  **$\sim 3\%$**
- **Beam**
  - **Energy** **400 MeV**
  - **Momentum width**  **$\Delta p/p = \pm 0.1\%$  (100%)**
  - **Emittance**  **$3 \sim 5 \pi$  mm-mrad (99%)**

# 400-MeV linac



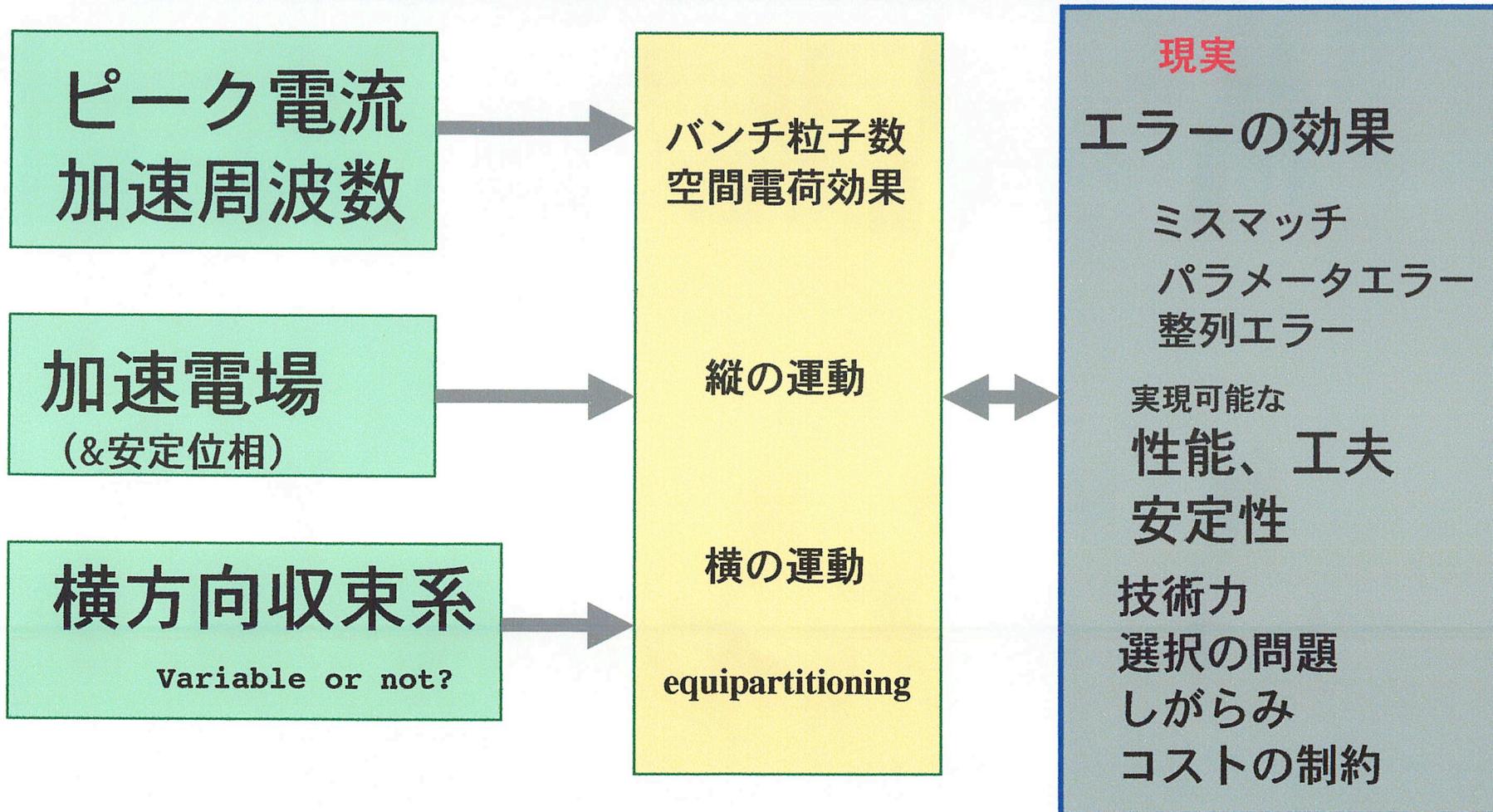
# RFQ, DTL, SDTL and ACS parameters

	RFQ	DTL	SDTL	ACS	
Output energy	3	50	191	400	MeV
Frequency	324	324	324	972	MHz
Total length	3.1	27.1	91.2	108.3	m
Structure length	3.1	26.7	65.7	68.2	m
Number of tank	1	3	32	46	
Number of cell		146	160		
Number of Klys.	1	3	16	23	
Accelerating field		2.5~2.9	2.5~3.7	4.2~4.3	MV/m
Stable phase	-30	-30	-27	-30	deg
Vane voltage	82.9(1.8KL)				kV
Drive power	0.336	3.3	16.6	33.3	MW
Beam power	0.148	2.4	7.0	10.5	MW
Total power	0.484	5.7	23.6	43.8	MW

$I_{\text{peak}}=50\text{mA}$ , beam pulse length 500  $\mu\text{sec}$

Repetition frequency 25/50 Hz, KL=Kilpatrick limit

# Beam dynamicsの基礎パラメータ



# 基本の選択

- バンチあたりの粒子数を減らす → High frequency
- 可変横方向収束 → Avoid permanent focusing magnet  
Adopt equipartitioning focusing
- 運転の安定性等 → Klystron

$$I = f * N * q$$

$$B' \propto \frac{f^2}{\beta}$$

$$(\beta = v/c)$$

収束の質を落とさずにチューン可変の横方向収束系を選ぶとすれば

DTL 3MeV入射の時 324 MHzが上限に近い値となる

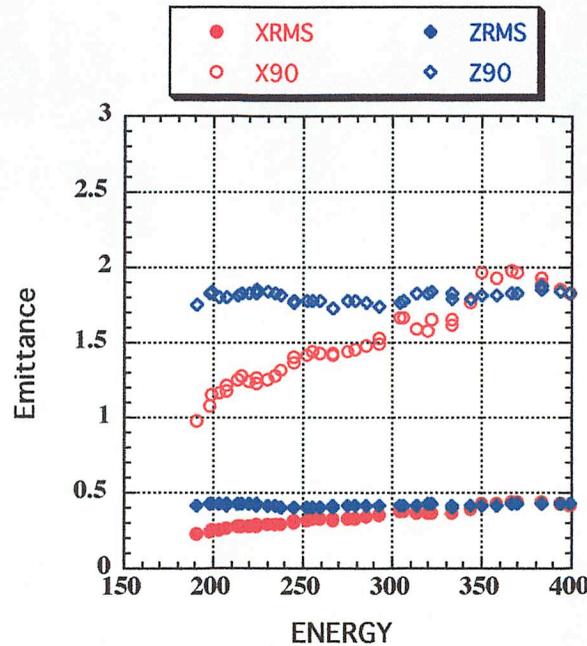
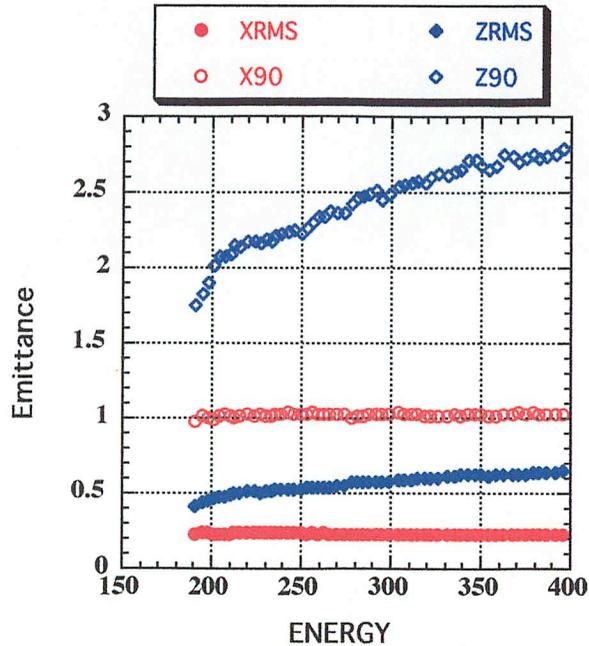
# Space-charge effects vs. frequency

Table 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	$\pi\text{cm}\cdot\text{mrad}$ (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
$\sigma_x^0$	60	60	60	60	60	degree
$\sigma_x$	42.4	50.0	51.1	52.2	54.4	degree
$\sigma_x/\sigma_x^0$	0.71	0.83	0.85	0.87	0.91	$\mu = 1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^2$
$\mu_t$	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.

# 横と縦の収束力



右図：加速電場  
(縦の収束力)が  
徐々に強くなる場  
合

左図：加速電  
場がほぼ一定  
の場合

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

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

Proton linac

$$k_{z0} = \left( -\frac{q}{mc^2} \frac{2\pi E_m \sin \phi_s}{\lambda \beta_0^3 \gamma_0^3} \right)^{1/2}$$

$$k_{x0} = \frac{\sigma_{x0}}{2\beta_0 \lambda}$$

# Equipartitioning focusing scheme

Equipartitioning focusing

$$\frac{k_{x0}}{k_{z0}} \propto \text{const}$$

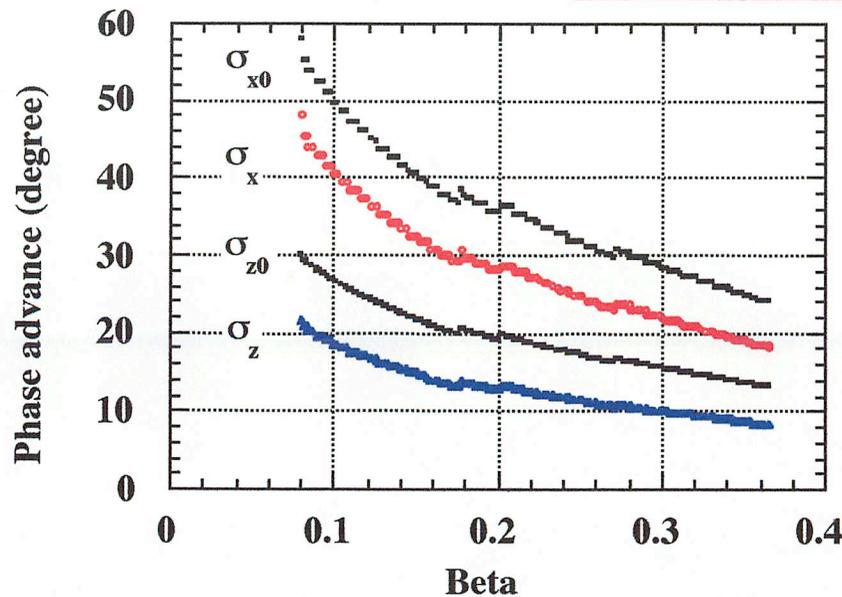
$$k_{z0} \propto \frac{1}{(\beta_0 \gamma_0)^{3/2}}$$

$$k_{x0} \propto \frac{1}{(\beta_0 \gamma_0)^{3/2}}$$

$$\sigma_{x0} \propto \frac{1}{(\beta_0 \gamma_0^3)^{1/2}}$$

Constant phase advance

$$\frac{k_{x0}}{k_{z0}} \propto \beta_0^{1/2} \gamma_0^{3/2}$$



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

$$\frac{k_x \epsilon_{nx}}{k_z \epsilon_{nz}} = 1$$

$$T_{\perp} = T_{\parallel}$$

# Design features

---

- **Suppress space-charge effects** by selecting both higher operating frequency and suitable focusing scheme, and three times the fundamental one for high- $\beta$  structure
  - Reduce emittance growth
  - Decrease beam losses
- **Balance** transverse and longitudinal motion by using **equipartitioning focusing scheme**
- Select relatively higher energies for **structure transitions** from the viewpoint of longitudinal motion; 3 MeV, 50 MeV, 190 MeV

# Focus design features

---

- **Variable** transverse-focusing strength against a change in peak current
- Keep **sufficient** focusing-strength in transverse focusing
  - Higher  $\sigma/\sigma_0$  compared with other schemes
- Minimize bad effects on beam-**quality** parameters
  - Low modulation factor  $\sim 1.6$  (FFDD:2.3 - 3)

$\sigma$  = transverse phase advance

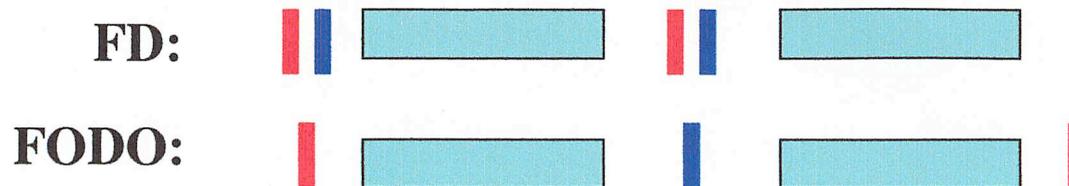
# Focus design features (2)

- SDTL 又はCCL 部分の収束法の比較例

	FD	FODO
$B'$ (T/m)	6.7	4
$\sigma/\sigma_0$	0.69	0.57
$X_{\max}/X_{\min}$	1.32	2.18

50 mA, 50 MeV  
 $\sigma_0(\text{FODO})=90$   
 $\sigma_0(\text{FD})=45$   
 同じ長さで比較

Modulation factor =  $X_{\max}/X_{\min}$   
 ビームのx-y方向の対称性  
 Cylindrical symmetryな  
 空間電荷計算では効果なし

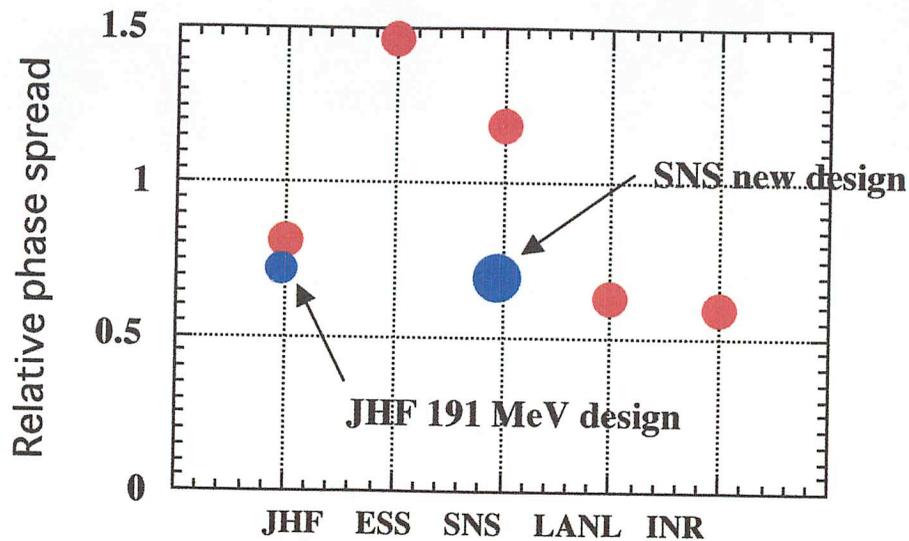
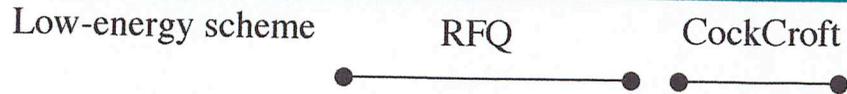


# Selection of CCL frequency

	Frequency multiple		injection
• LANL	x 4	at 100 MeV	Cockcroft
• INR	x 5	at 200 MeV	Cockcroft
• JHF/JAERI	x 3	at 190 MeV	RFQ 3MeV
• ESS	x 2	at 70 MeV (RFQ---> DTL x 2 )	RFQ 5 MeV
• SNS old	x 2	at 20 MeV	RFQ 2.5 MeV
• SNS new	x 2	at 87 MeV	RFQ 2.5 MeV
• <u>phase damping</u>			

$$\frac{\Delta\phi_2}{\Delta\phi_1} = \left[ \frac{\beta_1^3 \gamma_1^3 E_1 T_1 \sin\phi_1}{\beta_2^3 \gamma_2^3 E_2 T_2 \sin\phi_2} \right]^{1/4}$$

# Relative bunch width at CCL injection point



$$\frac{\Delta\phi_2}{\Delta\phi_1} = \left[ \frac{\beta_1^3 \gamma_1^3 E_1 T_1 \sin \phi_1}{\beta_2^3 \gamma_2^3 E_2 T_2 \sin \phi_2} \right]^{1/4}$$

Spread at the RFQ exit is included according to phase damping formula

JHF: 3-MeVRFQ  
 ESS: 5-MeVRFQ  
 SNS: 2.5 MeVRFQ

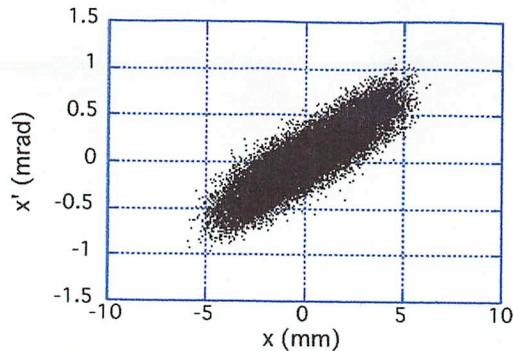
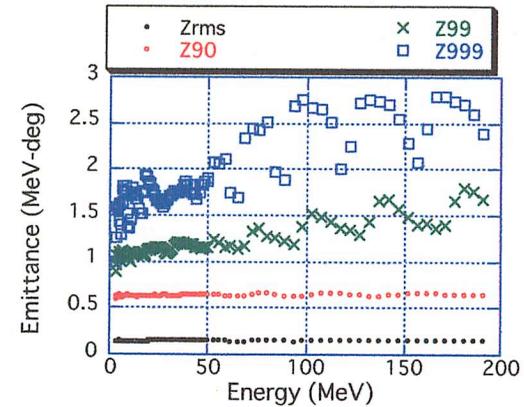
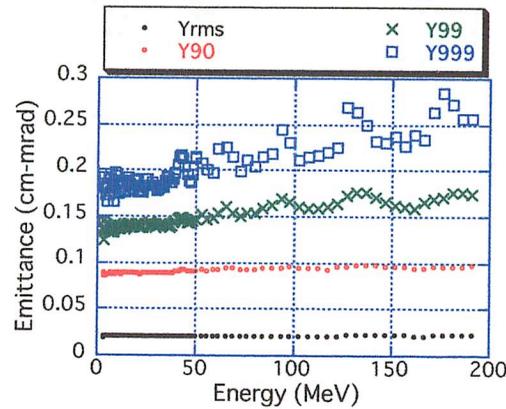
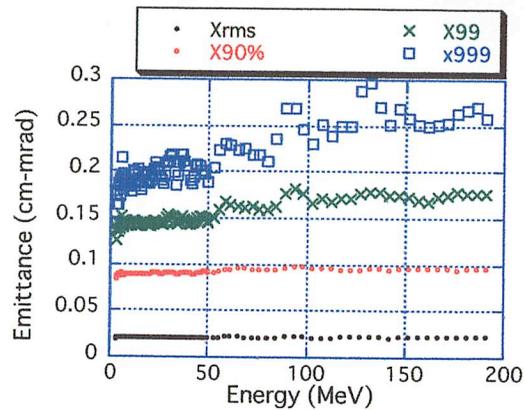
ESS: 175-MHZ RFQ + 350-MHz DTL  
 SNS: 403-MHz RFQ  
 JHF: 150-MeV SDTL

# Errors in accelerating parameters

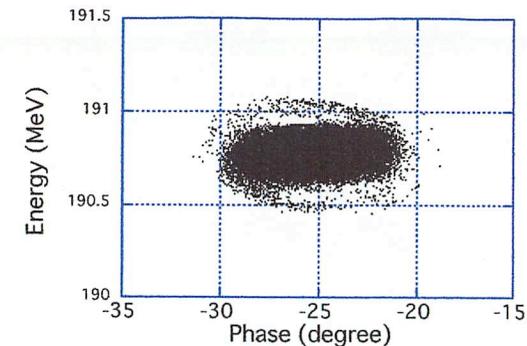
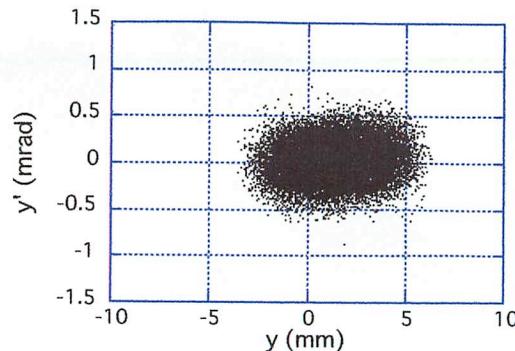
- Error - 1 ---> No beam loss
  - $\pm 1\%$  cell and tank fields
  - $\pm 1\%$  cell phase and  $\pm 3\%$  tank phase
  - Q-magnet displacement  $\pm 0.05$  mm
- Error - 2 --->  $\sim 0.1\%$  beam loss
  - $\pm 2\%$  cell and tank fields
  - $\pm 2\%$  cell and  $\pm 6\%$  tank phase
  - Q-magnet displacement  $\pm 0.1$  mm

# Simulation results: SDTL out, Type C, 50 mA

Injection beam	$\epsilon_{xrms}$ mm-mrad	$\epsilon_{zrms}$ MeV-deg	$\sigma_x/\sigma_{x0}$ deg	$\sigma_z/\sigma_{z0}$ deg	$k_x/k_{x0}$	$\mu_x$	$k_z/k_{z0}$	$\mu_z$
C-50mA	0.2	0.15	36/58	15/31	0.62	0.61	0.49	0.76

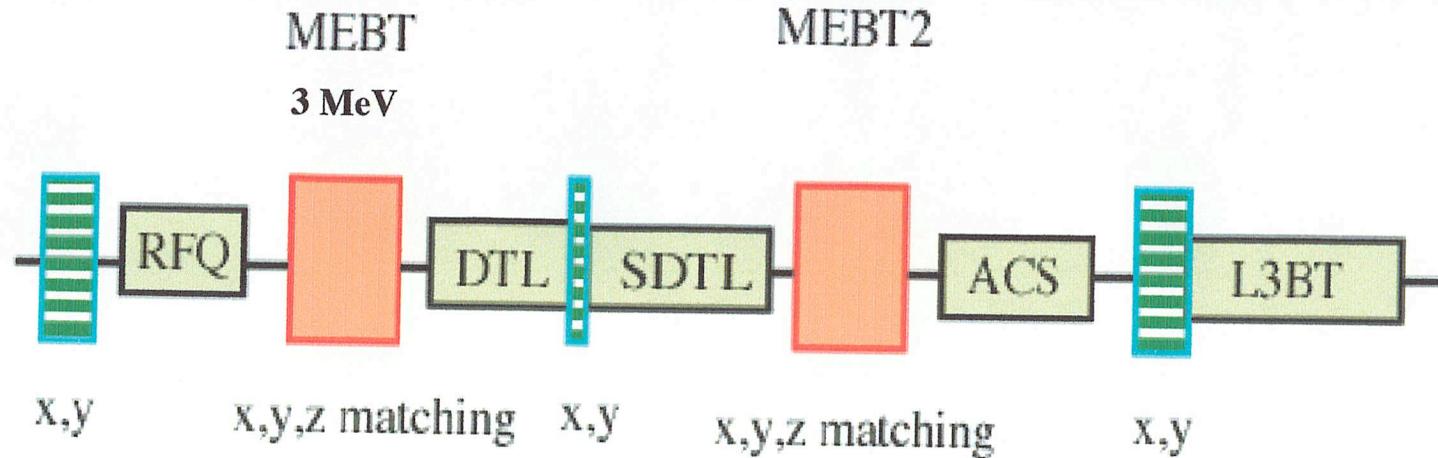


Proton linac



Εκδοκ - 1 is applied.

# Matching & tuning



## xy matching & current

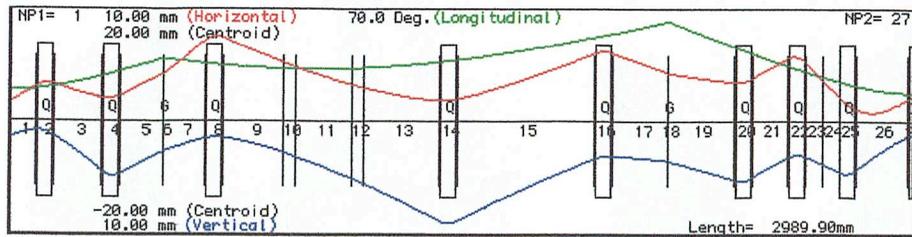
Profile monitor  
Emittance monitor  
Beam width with BPM  
Scraper & loss monitor

大強度ビーム  
ビーム電流の大幅な変化  
必要な測定時間

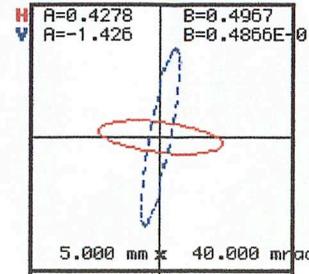
## 3 MeV: DTL matching example

0mA:  $\sigma_0=58$ ,  $\beta_x=0.26$   
10mA:  $\sigma=51$ ,  $\beta_x=0.29$   
50mA:  $\sigma=37$ ,  $\beta_x=0.41$

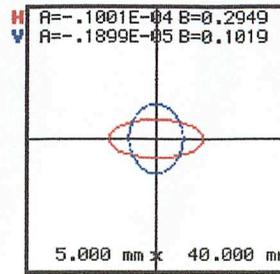
# MEBT transverse tuning vs. current



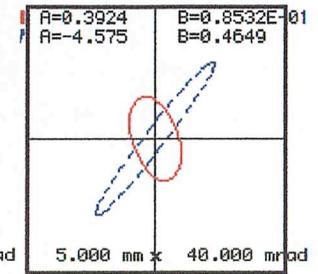
Q 1 2 3 4



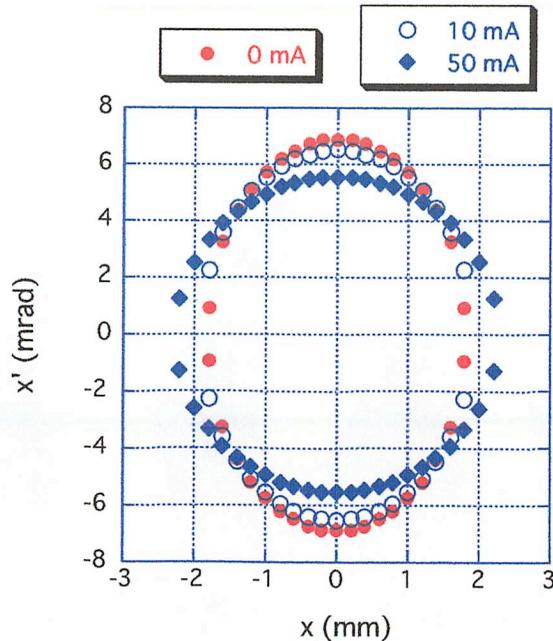
0 mA



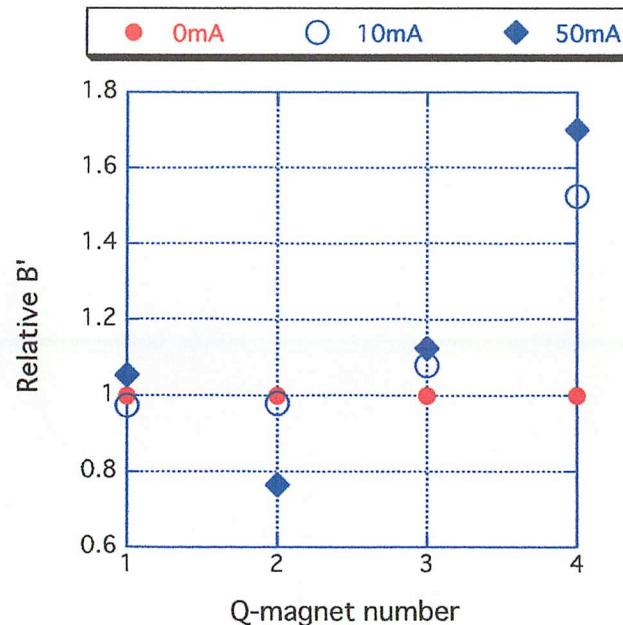
10mA マッチ



50 mA



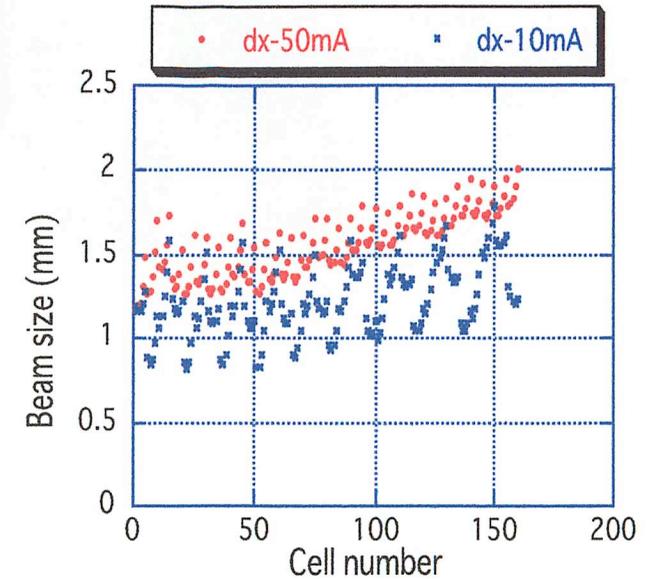
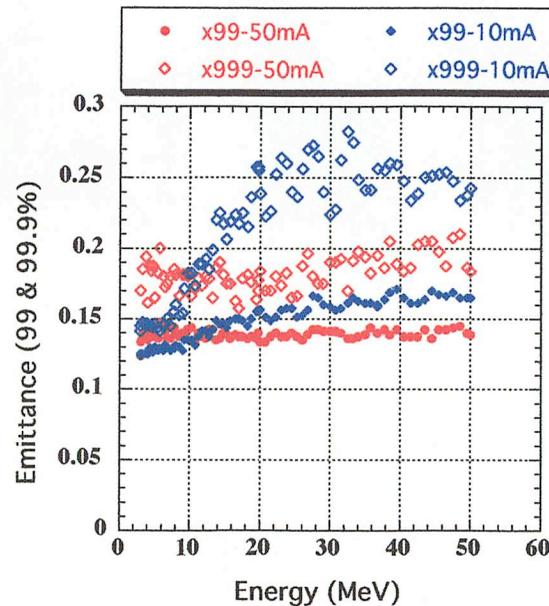
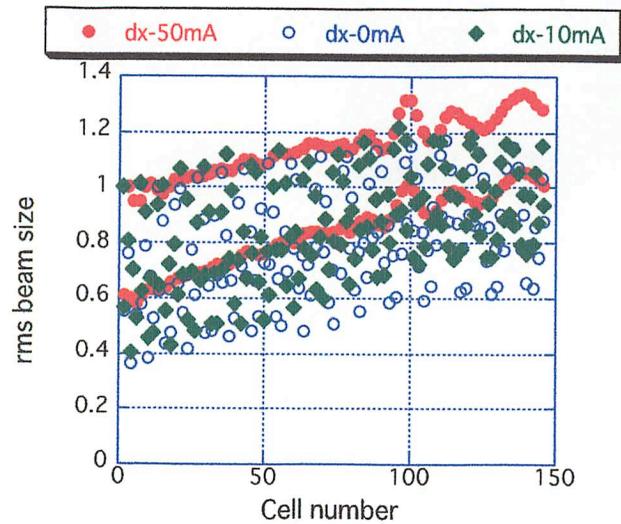
DTL入り口のmatched beamの形  
Proton linac



MEBT out emittance  
0,10,50mA

\* マッチングさせる時の  
4個のQ磁石の変化  
\* 電流 0 mAの値を基準と  
した  
\* DTLの収束系は一定  
\* マッチングの確認法が  
重要

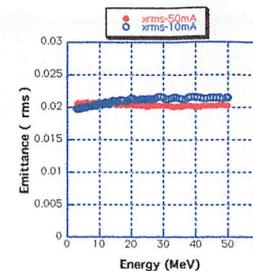
# Beam size & EM.growth vs. current (tuningの為に)



DTL内のビームサイズ  
収束磁場勾配一定で、50mA  
の時マッチングがとれている。  
電流が変われば、ミス  
マッチが起こる。

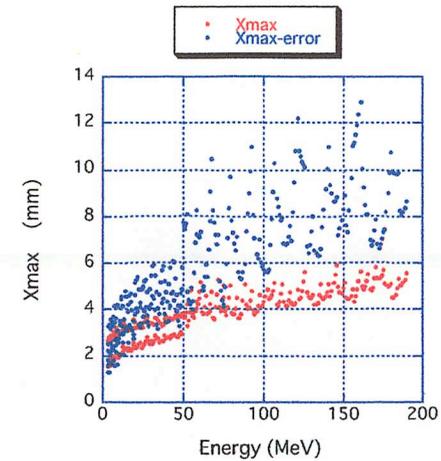
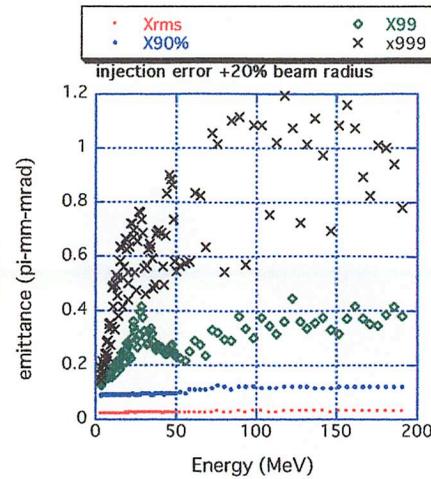
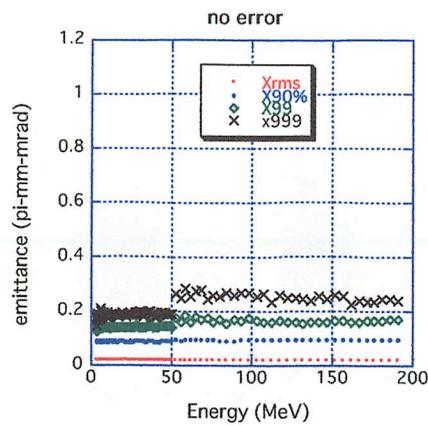
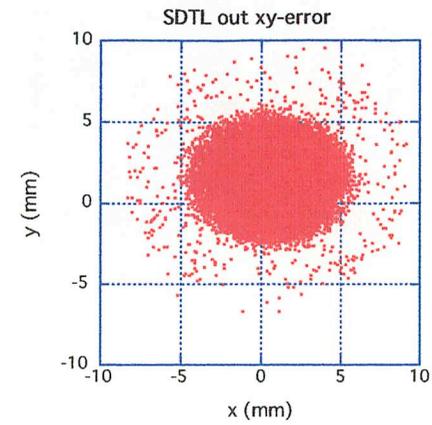
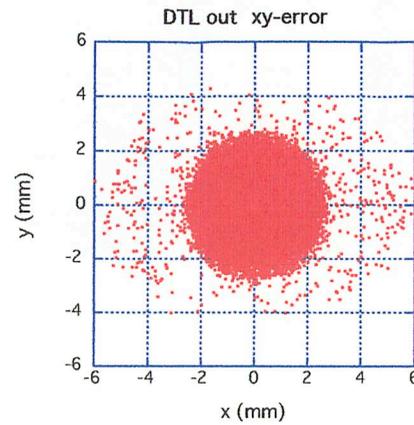
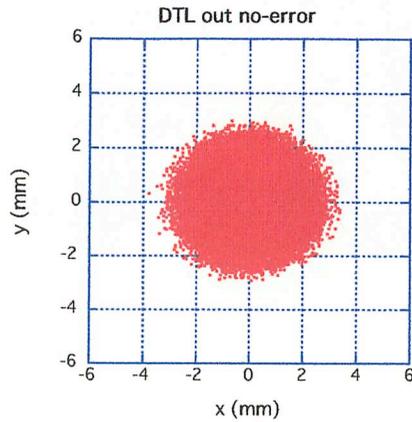
左図の場合のエミッタンス  
(99% & 99.9%)の変化。  
マッチングがとれている50mAでは  
エミッタンス増加が少ない。  
 mismatch入射の10mA時には  
エミッタンス増加が大きい

SDTL内のビームサイズ  
収束磁場勾配一定



Rmsエミッタンスは測定  
精度に入るかどうか劣化  
する

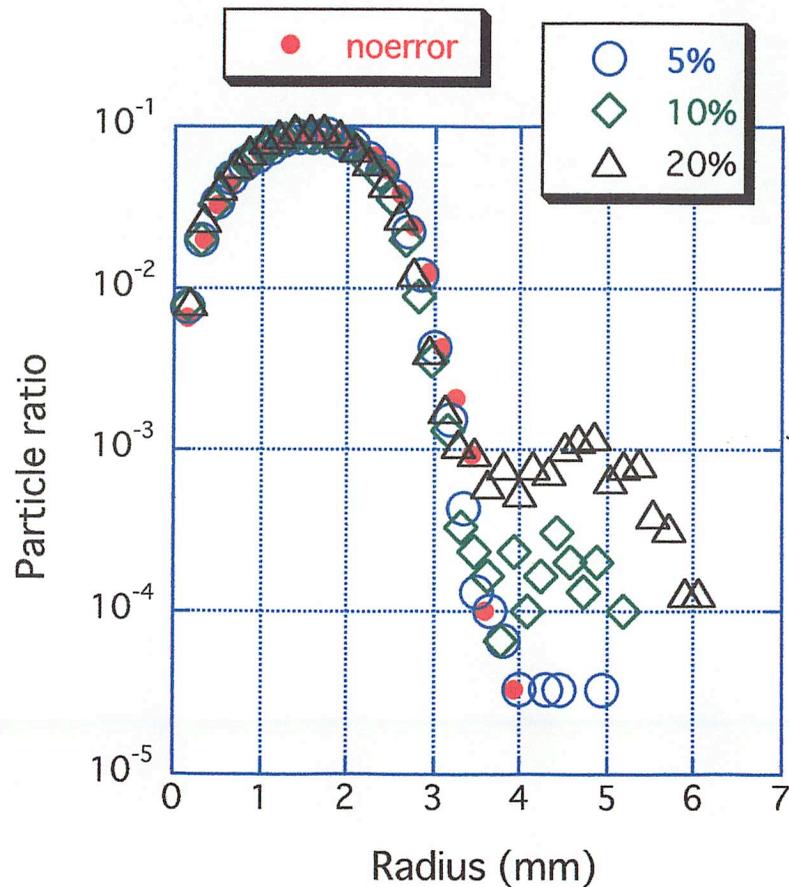
# Injection error simulation in DTL & SDTL



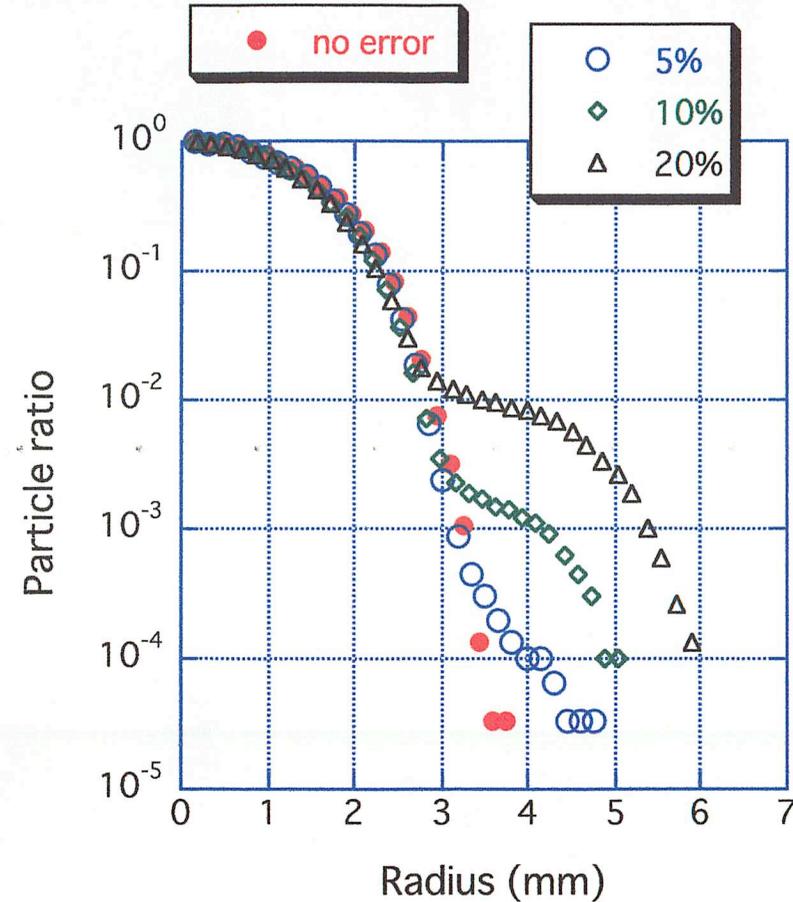
Proton linac **Nearly matching**

**20% increase in both x and y radii**

# Profile of the DTL output beam with an injection error



隣あうデータで決まる半径の帯の中の存在確率



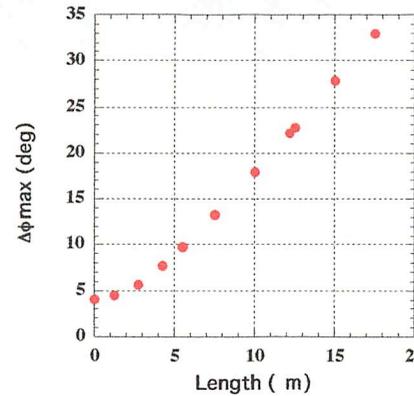
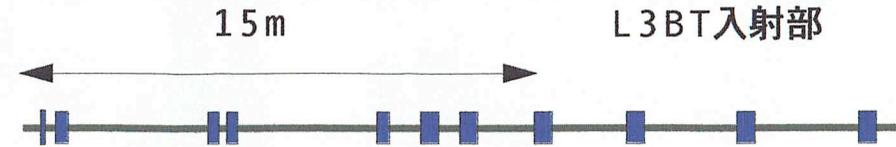
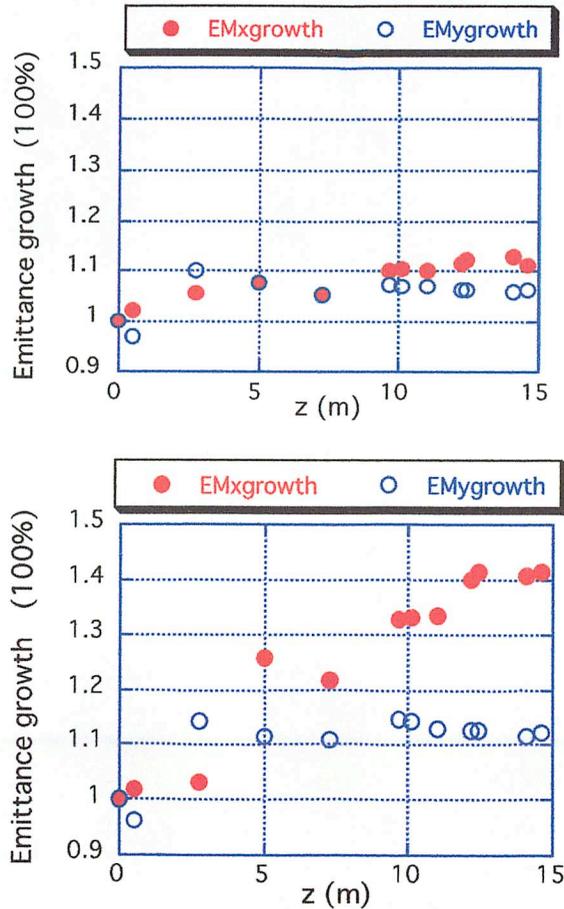
半径Rの外にある全粒子の存在確率

Proton linac

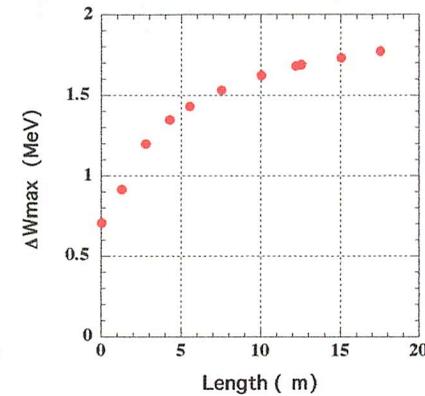
\* 入射エラー  
ビームサイズを増加させる

\* DTL 出力ビームの横方向の粒子分布

# Example of emittance growth in L3BT



バンチ幅の変化例



バンチエネルギー幅の変化例

リニアック部分の横方向チューニングの変化へ対応出来る事

L3BT入射部の100%エミッタンス増加例  
 上図：マッチングがよい場合  
 下図：x入射ビーム幅が20%小さい時

# Beam monitorsについて

目的用途、チューニングの実際に注意して

- Large change in current intensity
- Fine tuning
  - Halo measurement, minimize beam loss
  - Beam scraper and loss monitor
- Steady high-current operation
  - Non destructive type
  - CT, FCT, BPM(for beam size), loss monitor
- Beam study
- Avoid unknown (part or beam parameters)

# Matching & tuningのまとめ

- 電流の大幅な変化への対応 10 - 50 mA
  - シミュレーションとの比較が必要
    - その為の基礎、注意等
  - 入射ビームを調整
  - 横収束力を変化
- 横方向マッチングを確認、又は達成するためのモニター
  - Rms 測定 ----> twiss parameters
- 最終的に問題となるエミッタンスの外側部分 - fine tuning
  - Rms エミッタンス測定だけでは不十分
  - 外側部分の測定（大強度の時）
    - ビームロスモニターの積極的な活用
- 定常状態と過渡状態の識別（チョッパー動作）
  - チョッパー過渡状態では電流値は異なる（密度が一定の保証なし）
  - 初期のチューニングはチョッパー無しで行う

## SNSとの比較 (中エネルギーまで)

	統合リニアック	SNS
周波数	324, 972 MHz	402.5, 805 MHz
ピーク電流	50 mA	38 mA
RFQ	3 MeV	2.5 MeV
DTL	50 MeV, EQM	87 MeV, PQM
	SDTL 190 MeV	CCL 186 MeV
長さ	124.4 m	99.1 m
加速電場	0.6 - 1.3 KL	1.3 KL
クライストロン	20 * 2 MW = 40 MW	7*2.5 MW + 4*5 MW =37.5 MW

# SNSリニアックの特徴

- 収束力を固定
  - PQM（永久磁石）の採用（402MHzだから空間電荷的に有利なはずだが、例えば、  
SNS:  $\mu=0.68$ ,  $\psi=2.3$ , 38mA,  
統合:  $\mu=0.69$ ,  $\psi=1.3$ , 50 mAである
  - DTL-CCL の間の縦のマッチングを固定
- 高電場使用
  - 1.3 KL at 402 and 805 MHz
- 805-MHz CCL & klystron を前提

( $\mu=\sigma/\sigma_0$ ,  $\psi$ =modulation factor)

# 問題点（１）

- **イオン源**（危機感は？、10年以上の開発結果が現状である）
  - ピーク電流不足
  - 寿命不足
  - 不安定（RFQ加速のデータがうまくとれない）
  - Csイオン源 + RFQの問題
  - 仕事に専念出来る体制
- **ありうるエミッタンス増加**
  - ミスマッチ
  - デザイン時の優先度
- **コスト等（？）による仕様の劣化**

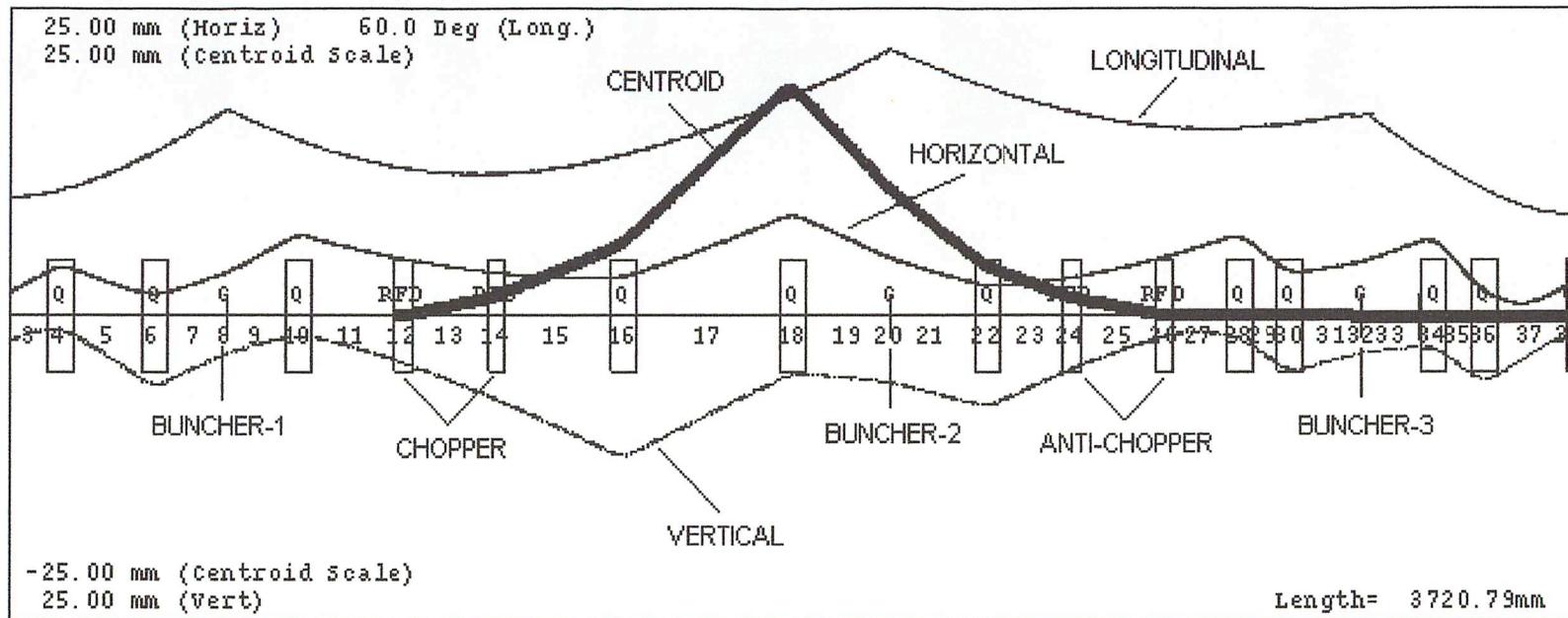
## 問題点（2） chopper system

- チョッパーの過渡状態の問題
  - 1. 全体としての過渡状態の改善
    - Anti-chopperの使用（additional cost）
  - 2. 個々の空洞の過渡状態の改善
    - 独立励振方式との差が許容できるか

現在、二つの空洞を1台の電源で励振 ---> コスト削減狙い  
しかし、全体性能の劣化が予想される

ビームテストにより検証する

# Anti-chopper



スクレーパーにより取りきれない粒子を元の軌道（中心軸）に戻す

\*MEBTの改造

コスト、効果

\*必要機器の製作

## ビーム供給までに (proposal)

- 大強度ビームテスト---> RFQ+MEBT
  - DTL設置後では難しい点あり
  - プロトンイオン源使用
  - 大電流時の振る舞いが問題
- Csイオン源+RFQのテスト(200-MHz RFQ)

KEKにて出来ない場合は、原研設置時に、大電流RFQ+MEBTだけのテストが望まれる

- \* その時に大電流イオン源はまにあうのか?
- \* 日程的に無理?
- \* 当初、ピーク電流は少なくともよい?