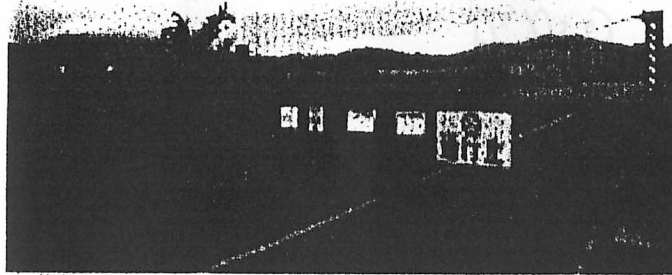
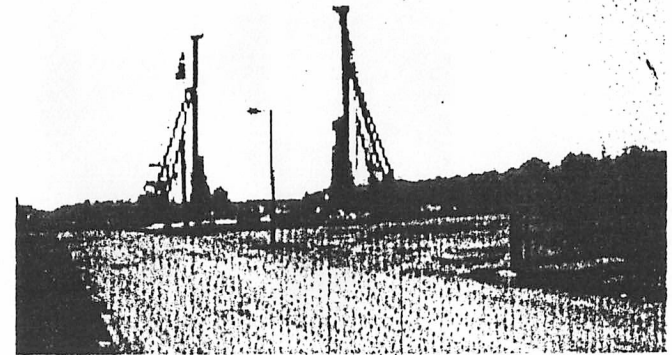


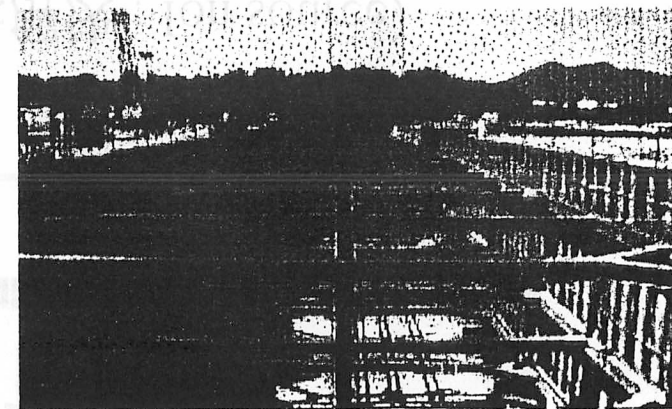
PROTON LINAC



- * 必要な特性
- * 概要
- * 細目
- * まとめ



今回は基本的話題問題及び新しい話を主として提供。開発現状のレポートは、OHP資料の形にて後日添付する。
リニアック常伝導部分詳細については、Design report KEK 97-16を参照。



KEK T. Kato

99.9.6

必要な特性 (1)

- 電流
 - 平均電流 625 μ A
 - ピーク電流 50 mA (これは未解決 : Ion source)
- パルス
 - パルス幅 500 μ sec
 - 繰り返し 25 Hz, 50 Hz
- ビームの性質
 - エネルギー 400, 600 MeV
 - 広がり
 - エネルギー幅 $\Delta p/p = \pm 0.1\%$
 - 横エミッタンス

必要な特性 (2)

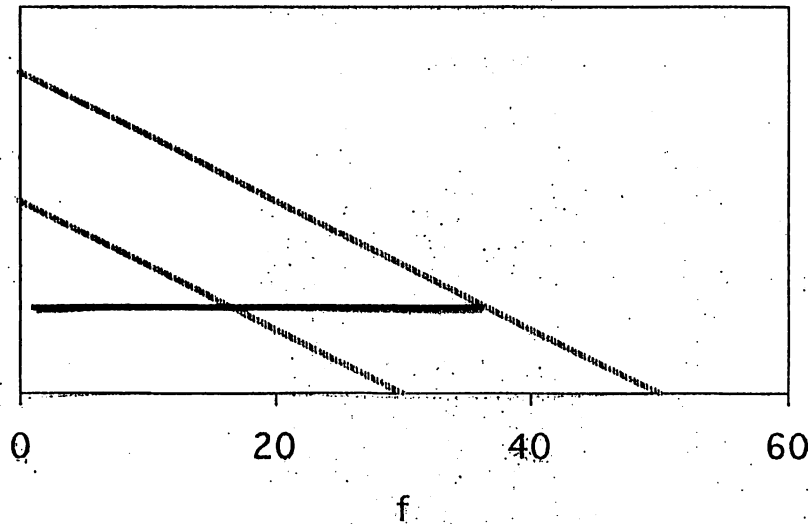


LINAC 特性Xをどのように維持するか (数値仕様に載っていない部分)

- ビーム性質の安定性
 - ビーム強度変化 - 常に最大電流 ではない
 - tuneの変化
 - transient
- リニアックの安定性
 - チューニング
 - 高稼働
 - 低故障
 - 運転に必要な労力

基本の考え方

AVOID - 裸特性が悪いものを、FB等により仕様を満たす

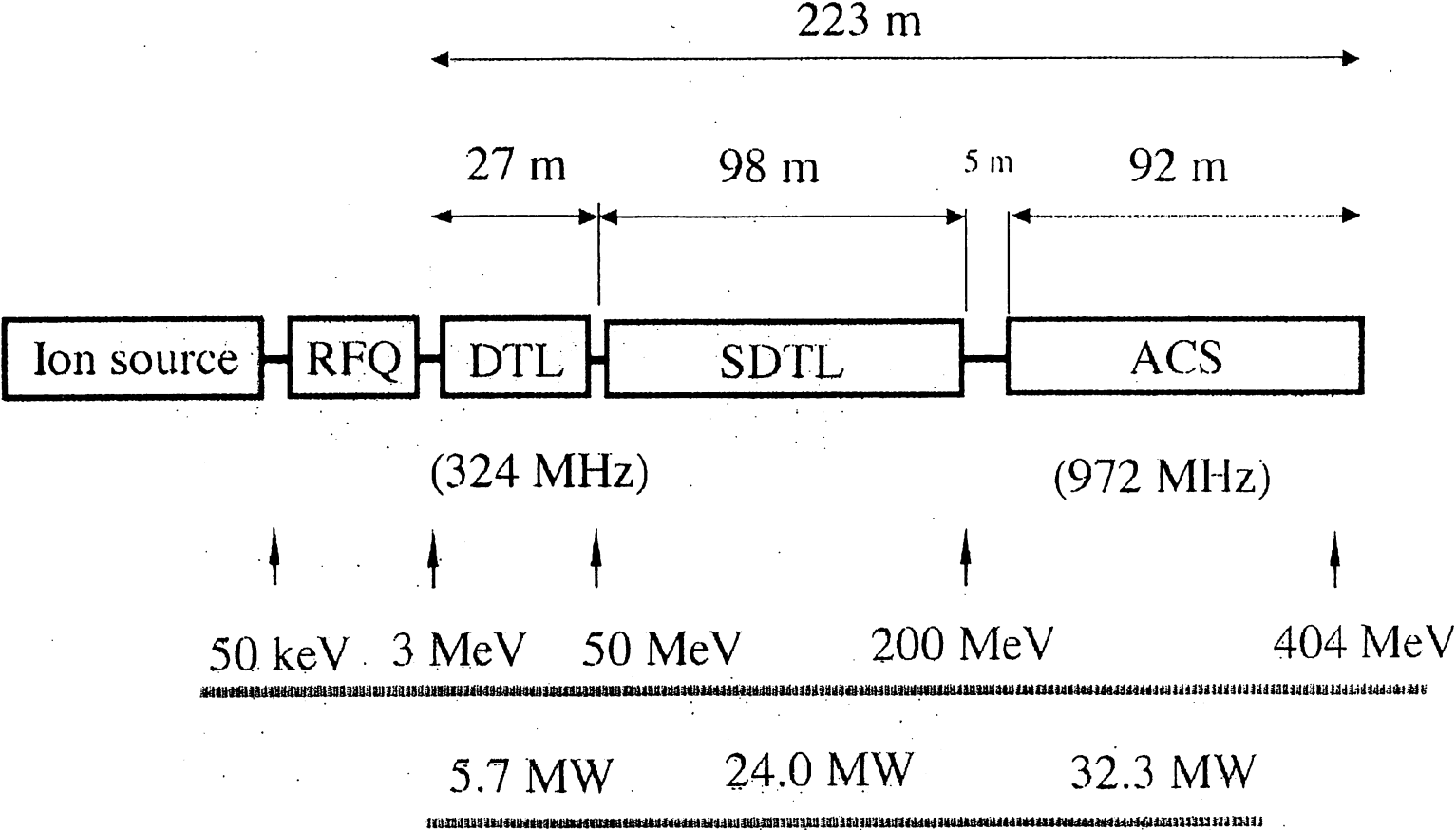


- 特性の良い
- 余裕
- 無理すじでない
- 補正の考え方
- lossを不可避と考えて、その効果の減少をmain targetと設定、その反映としてビーム性質の劣化を招く
- ある時はsimulationの結果を理由にし、ある時には、simulationの結果を理由にしない

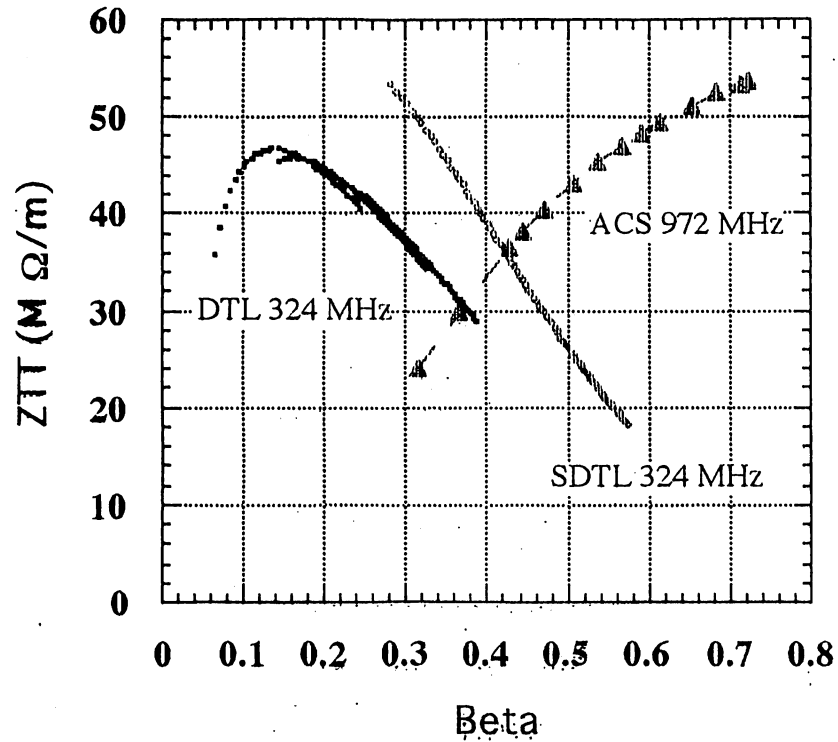
安定性とビーム強度変化への対処

- 基本周波数
 - Higher frequency
- 収束系
 - Variable focusing
- CCL周波数
- 運転時の安定性
- rfシステム
 - Klystron の使用

400-MeV linac

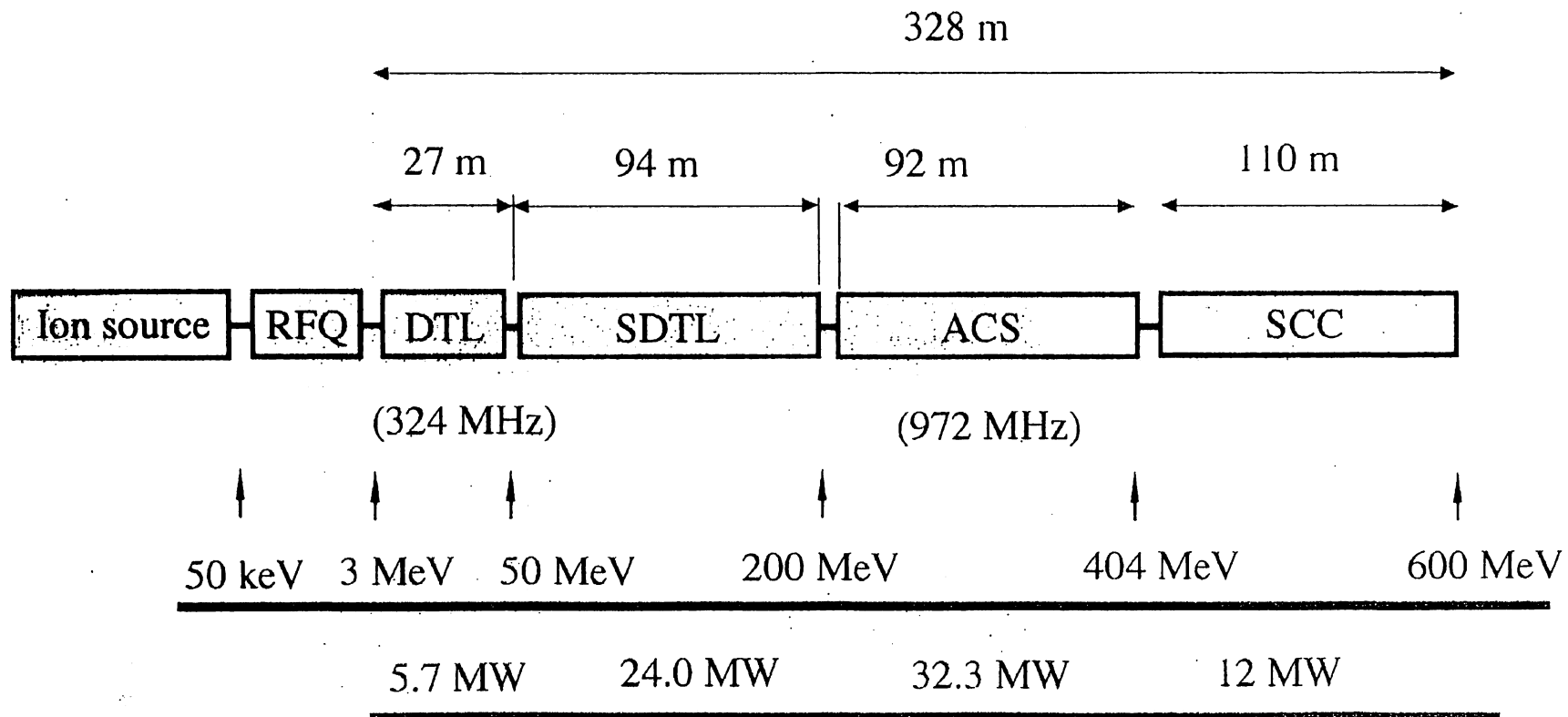


ZTT



- Effective shunt impedanceの重要性は
 - マシン仕様
 - ビームパワー / 励振電力
 - 高周波システム等による

600-MeV linac



RFQ, DTL, SDTL, ACS and SCC parameters

| | RFQ | DTL | SDTL | ACS | SCC | |
|--------------------|-------------|---------|---------|----------|---------|------|
| Output energy | 3 | 50 | 200 | 404 | 600 | MeV |
| Frequency | 324 | 324 | 324 | 972 | 972/648 | MHz |
| Total length | 3.1 | 27.1 | 98.4 | 92.1 | 110 | m |
| Structure length | 3.1 | 26.7 | 70.9 | 63.2 | 34.1 | m |
| Number of tank | 1 | 3 | 34 | 42 | 42 | |
| Number of cell | | 146 | 170 | 636 | 294 | |
| Accelerating field | | 2.5~2.9 | 2.5~3.7 | 4.4~4.8 | 7.5~8.4 | MV/m |
| Stable phase | -30 | -30 | -27 | -30~ -44 | | deg |
| Vane voltage | 82.9(1.8KL) | | | | | kV |
| Drive power | 0.336 | 3.3 | 16.5 | 22.1 | | MW |
| Beam power | 0.148 | 2.4 | 7.5 | 10.2 | 9.8 | MW |
| Total power | 0.484 | 5.7 | 24.0 | 32.3 | | MW |

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

Repetition frequency 25/50 Hz

KL=Kilpatrick limit

LINAC BEAM

Peak current

$$\underline{I_{peak} = n q f_{rf}}$$

q = unit charge

n = number of protons in a bunch

f_{rf} = rf frequency

Average current

$$\underline{I_{average} = I_{peak} \times \text{dutyFactor} = I_{peak} f_{rep} T_{pulse}}$$

*全てのrf バケットにバンチが存在すると仮定。

rfq freq = DTL freq の場合に相当。

*bunching factor は考慮されていない。

*加速途中で周波数が変わる場合には注意する。

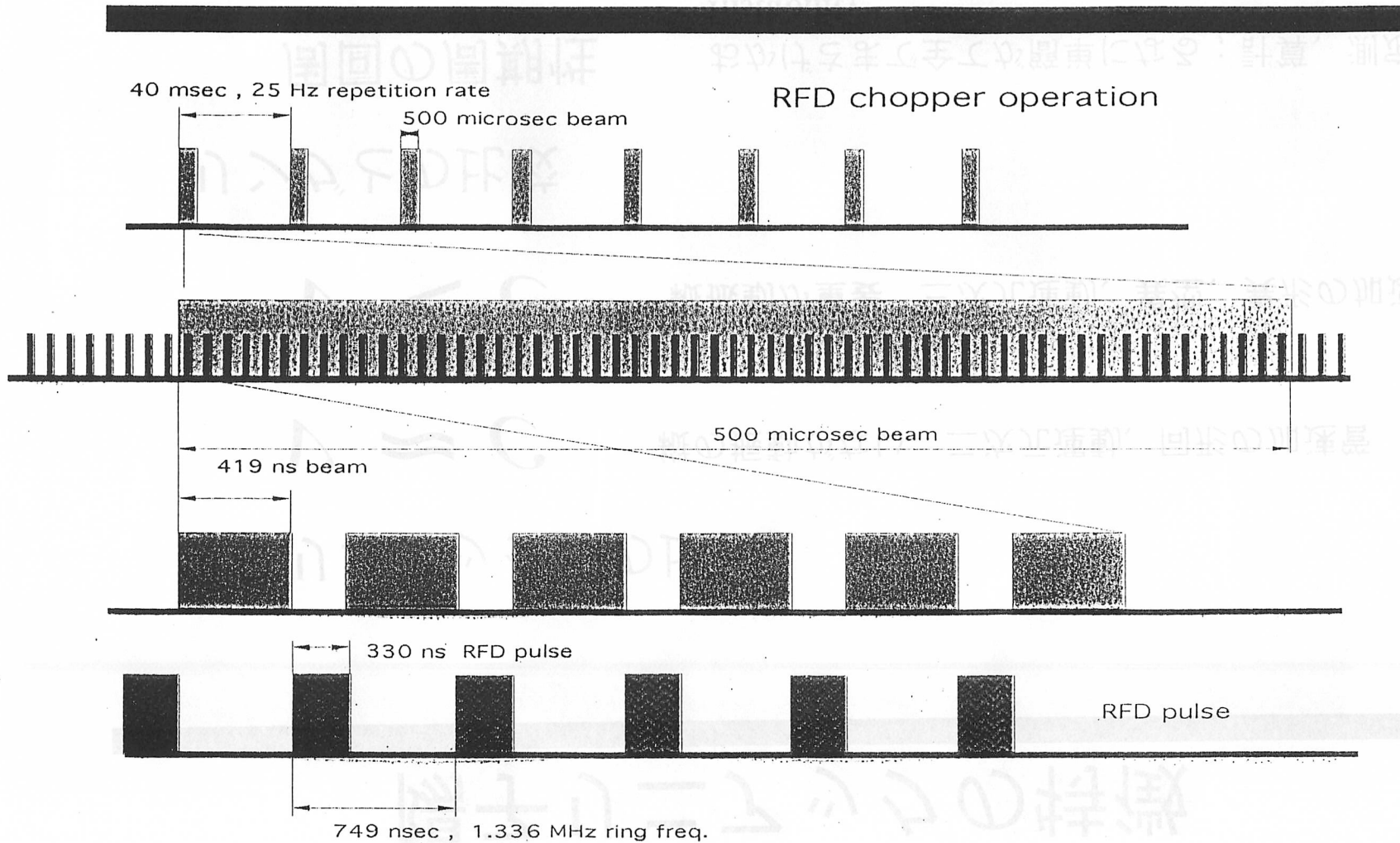
*この n が空間電荷効果に直接関与。

初段のRFQに低い周波数を用いて、後続加速管の周波数を数倍する構成では、初段の周波数により、空間電荷効果の大きさが定まる。

ESS RFQ = 175 MHz, CCL = 700 MHz

これらは、transient 期間中のビーム損失、高周波系と関係する。

Chopped beam



基本のチューニングはunchopped beamで行う可能性--> RF system

陽子リニアックの特徴

電子リニアックとの比較

$$v \approx c$$

縦の振動がない 二次元運動、同形の加速管

$$v < c$$

縦振動が重要 三次元運動、異型、異形の加速管

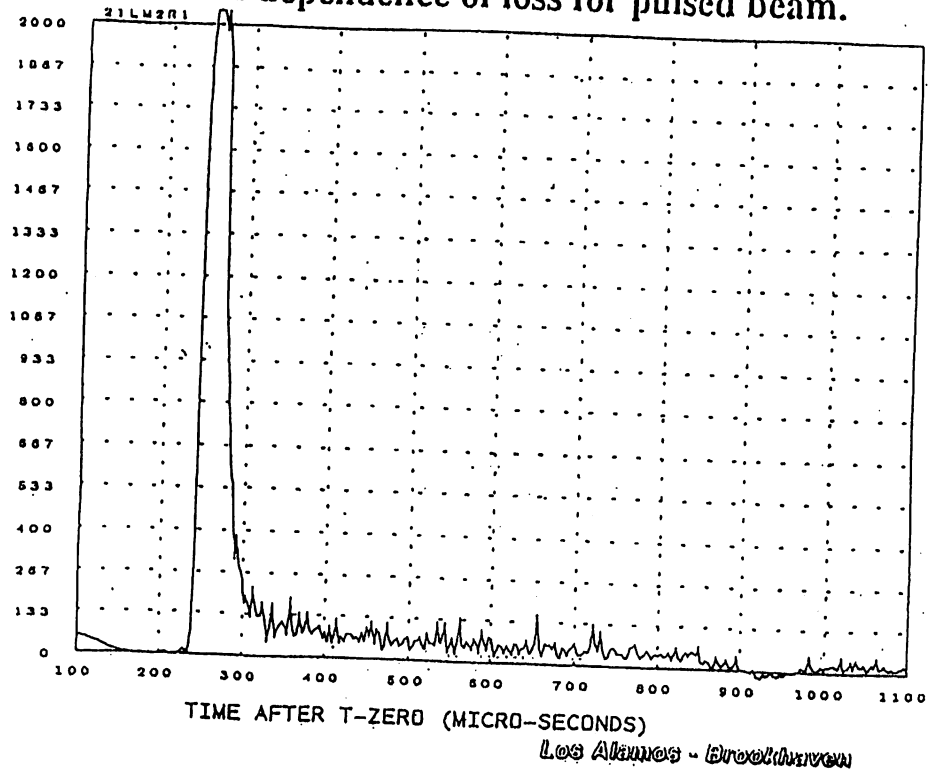
リングとの比較

周回の周期性

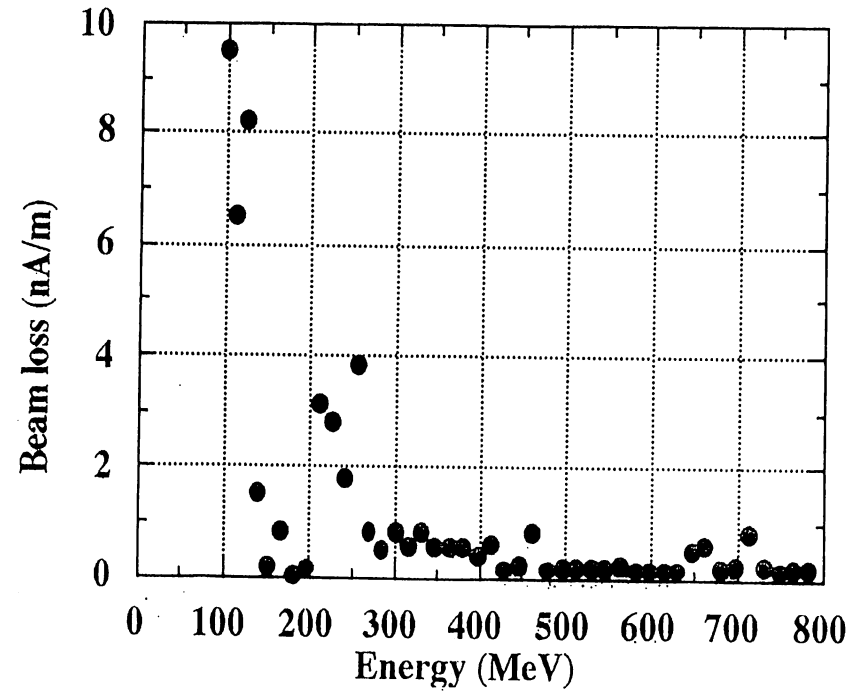
おかげさまで全てが簡単になる；計算、測定
Instability

Beam loss at LANL

LAMPF beam-loss monitor readout, showing time dependence of loss for pulsed beam.



transient



location

Beam quality and losses

- Transient beam loss - beam loading
- Transition
- Space-charge effects
- Errors
 - Fabrication
 - Alignment
 - Tuning: rf amplitude, phase, Q-magnet
 - matching
- Beam halos

縦エミッタンス or $\Delta p/p$

- 要求仕様を満たす為に
 - 生まれながらのビームの素性 Ion source + RFQ
 - Suppress emittance growth.
 - Rf structure, frequency,
 - focusing, matching, transition
 - Transient behavior
 - Field errors (sc では特に問題となる)
 - Rf tuning and control
 - Monitor SYSTEM
 - Debuncher
 - Energy stabilizer

リニアック中のビーム損失

- 定常状態では小さい、または小さくできる?
 - マッチング、収束力、チューニング
- 過渡状態の損失をどうするか
 - LANLは参考になるのか

縦エミッタンスの改善が必要

RFQ beam の使用

CCL design の検討

収束法の検討

CCL parameters の選択

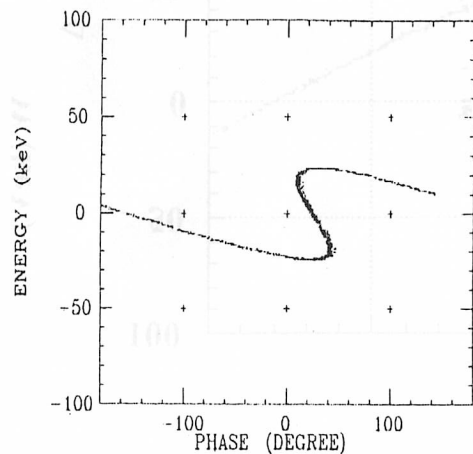
低い繰り返し周波数の採用

周波数比、エネルギー

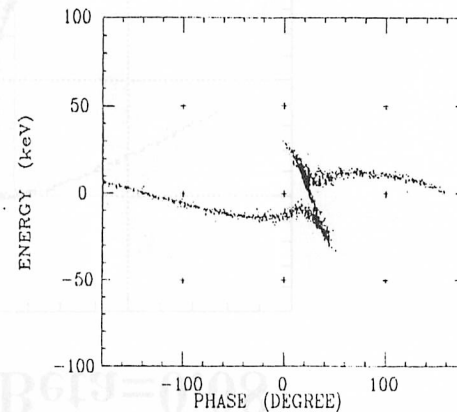
安定化空洞の採用

低エネルギー縦エミッタンス (旧型)

0 mA



100 mA



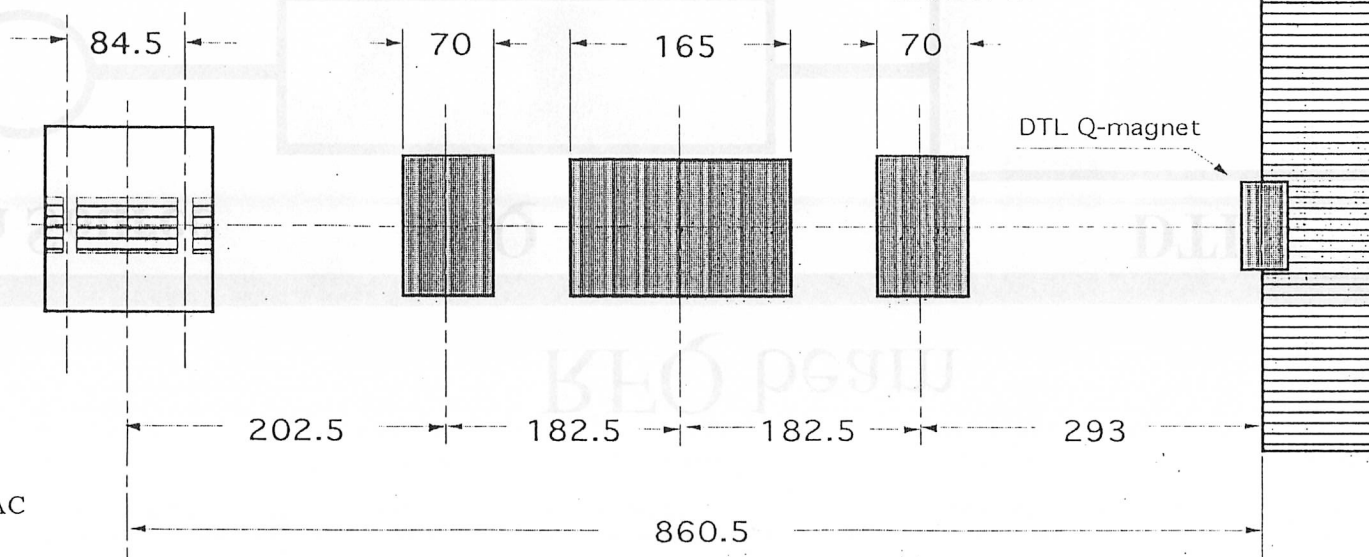
PREBUNCHER

Q13 (F)
5.62T/m

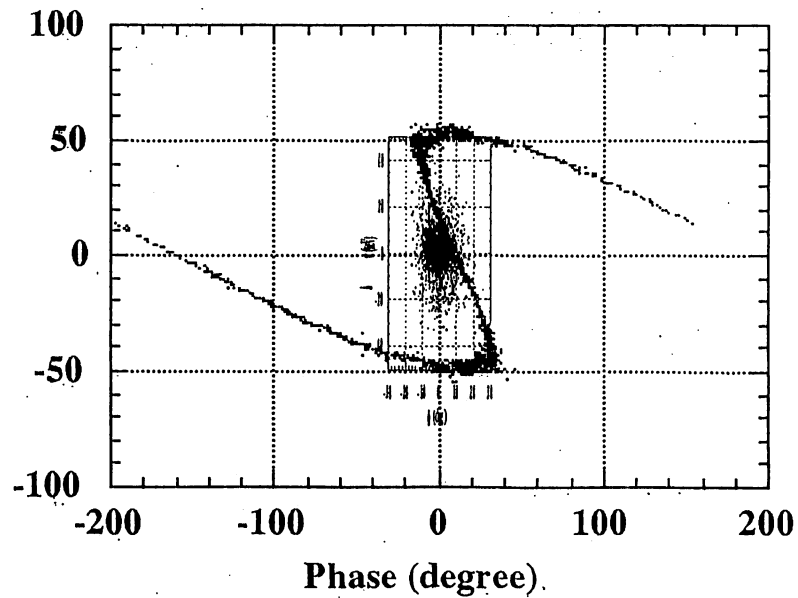
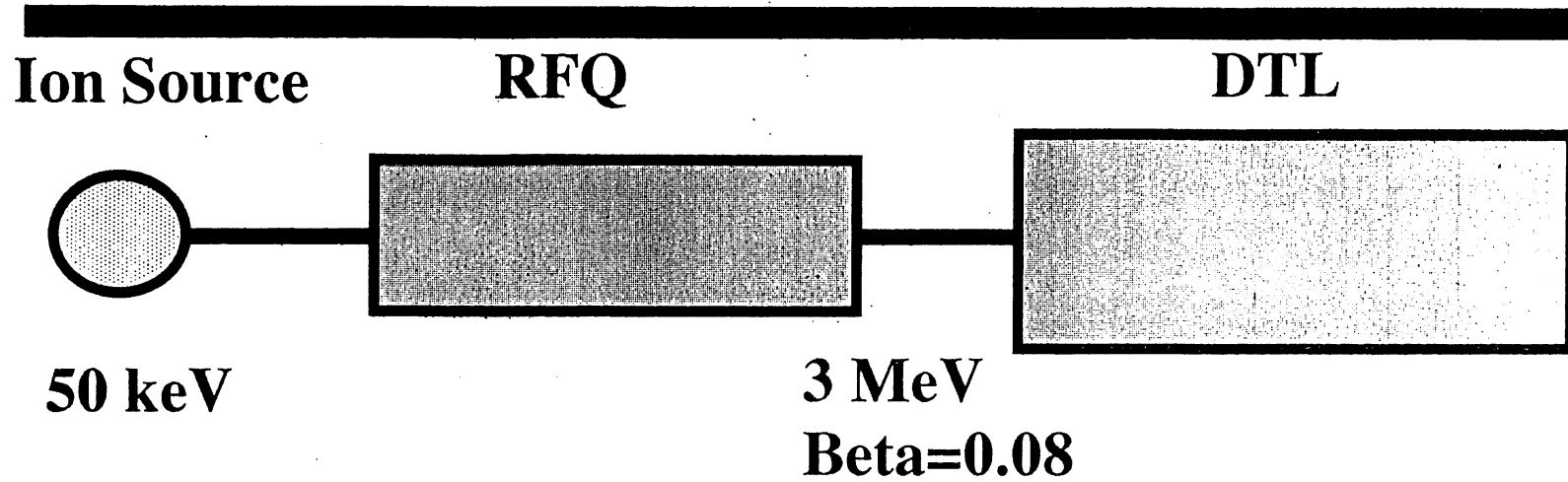
Q14 (D)
4.80T/m

Q15 (F)
5.62T/m

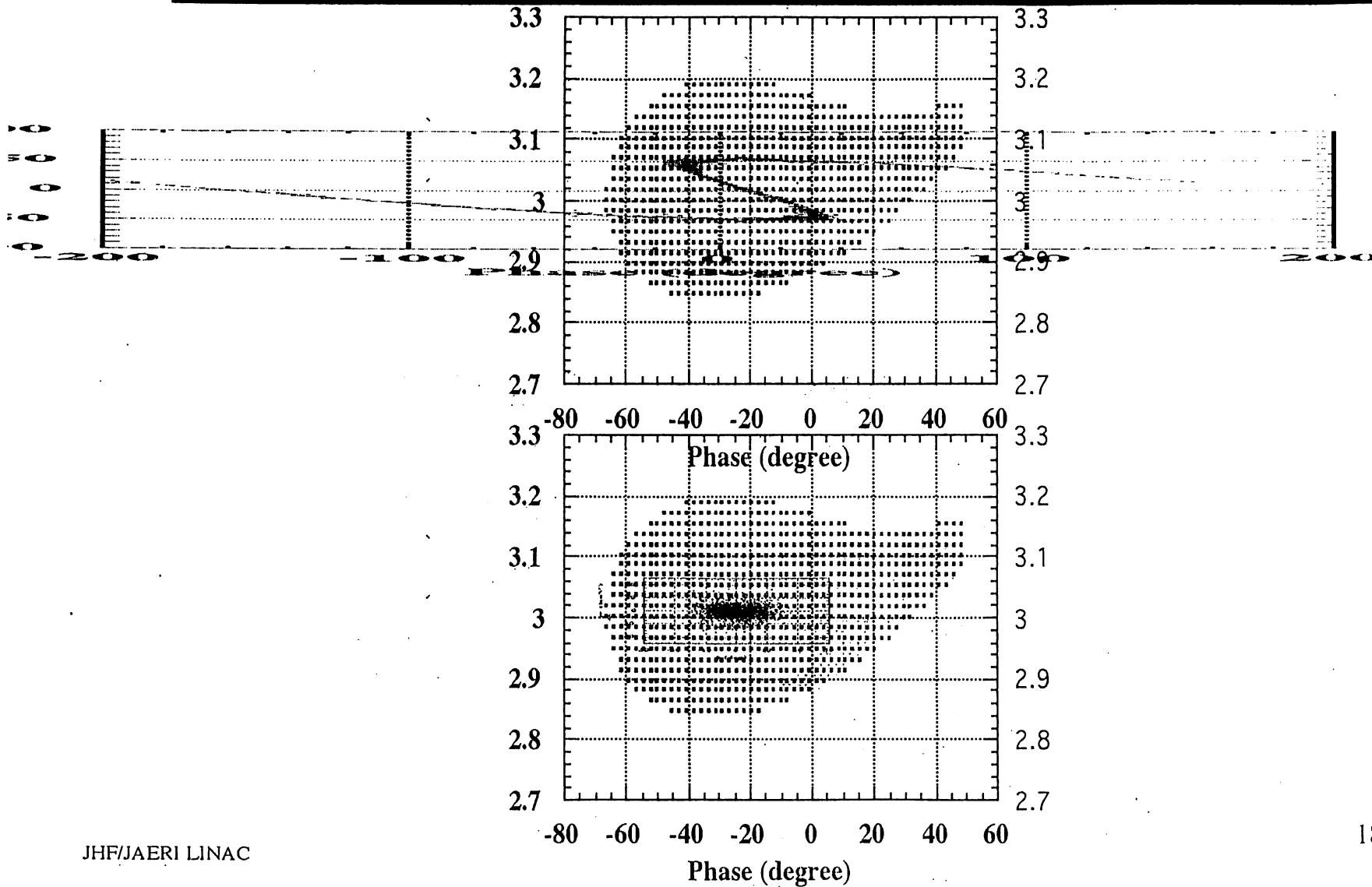
DTL TANK



RFQ beam



Injection into DTL



RFQ について

- 低エネルギー領域唯一のリニアック
- 収束と加速を電場で行う（収束力が基本）
- 高い捕獲効率
- low longitudinal emittance
- potentialから全てを導く

$$U = \frac{V}{2} \left[X \left(\frac{r}{a} \right)^2 \cos 2\phi + A I_0(kr) \cos kz \right]$$

RFQの主要設計パラメーター

| | | | |
|---------|---------|-------------|-----------------|
| 入射エネルギー | 50 keV | 収束パラメーター | 5.52 |
| 出射エネルギー | 3 MeV | 最小ボア半径 | 2.10 mm |
| ビーム強度 | 36 mA | 最大モデュレーション | 2.31 |
| 空胴長 | 3.115 m | 最大表面電場 | Kilpatrickの1.8倍 |
| 平均ボア半径 | 3.70 mm | 損失ピークRF電力 | 336 kW |
| ヴェイン電圧 | 82.9 kV | 加速セクション同期位相 | -30° |

JHF/JAERI 3-MeV RFQ & Ion source(1)

Ueno et al.

(1) 設計方針

(1-1) JHPイオン源 (Cs無し) & RFQの結果に基づいた設計

JHPイオン源 ビーム実績値 16mA, 200 μ s, 20Hz

- 問題点 * ビーム強度不足
* filament寿命不足 (約2週間)
* 直流arc pulse電源の容量不足によるdutyの制限

JHP-RFQ ビーム実績値 12.8mA, 150 μ s, 20Hz

- 問題点 * simulation結果の約90%の低ビーム伝達効率
(JHP-LEBTのsolenoid電磁石の周りに非対称loop電流が形成されビーム軸上に偏向磁場が生成されている問題が判明。
* 50keV-H⁻: 1mrad偏向/32Gauss*cm)
* 放電直後の過渡状態の共振周波数Feed Back不可
(可動tunerに使用した無酸素銅製bellowsの寿命不足)
* 入力電力を下げなければ持続する放電(1回/数時間)
:conditioning不足 & proton multipactoring条件

JHF/JAERI 3-MeV RFQ & Ion source(2)

(1-2)製作中のイオン源 & RFQの基本設計方針(JHP用の問題解決 & 高性能化) イオン源

- * 計算code BeamOrbit(by 原研・奥村)による引き出し電極形状の最適化
- * ビーム強度増強の方策 (38mA達成のLBNLイオン源との比較に基づく)
- * LBNLのRF arc放電plasma生成方式とLBNL製antennaの使用
 - plasma生成部の1ヶ月以上の長寿命化 & RF電源の定電力mode
運転により速い立上がりと安定性を併せ持つplasma生成 & 十分
な電源容量 (back-upとして、従来のfilament方式も使用可能。但
し、直流arc pulse電源は、inductanceに電力を蓄積する方式に変
更。)

- 最適化
- Collaboration

JHF/JAERI 3-MeV RFQ & Ion source(3)

(1-2)製作中のイオン源 & RFQの基本設計方針(JHP用の問題解決 & 高性能化)

RFQ

* 36mA & $0.67 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (規格化4倍のrms)入射ビームに最適化した光学設計
(縦横両方向に、必要十分なacceptance)

→LEBT用pre-chopperの立上がり立下がり時等にemittance filter効果
(本LEBTで採用予定のFNAL Chou提案のInduction Accelerator型pre-chopperの実用化実験が、放医研の重イオンRFQで開始 by KEK・高木)

* 非対称電流loop非形成のsolenoid電磁石に設計変更 & イオン源出口の
二電流四極電磁石で水平・垂直出射角補正 & 加速電場近似の向上
→ビーム伝達効率とsimulation結果の一致

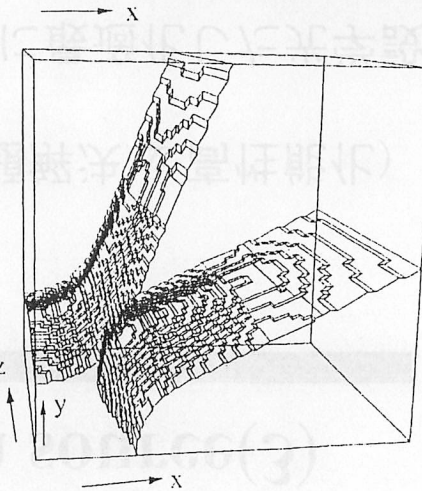
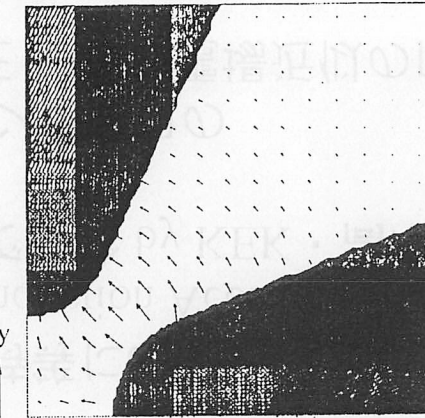
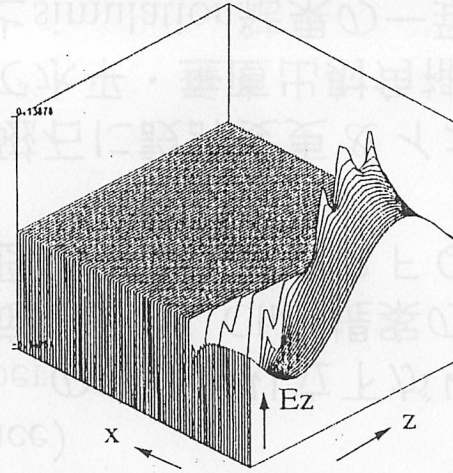
* 設計ストローク($\pm 1 \text{ mm}$)10万回以上の長寿命無酸素銅製bellowsの開発
→放電直後の過渡状態の共振周波数Feed Back & auto-conditioning可

* proton multipactoringの共鳴条件から十分に離れたvane gap & vane電圧

RFQの問題点と電磁場計算

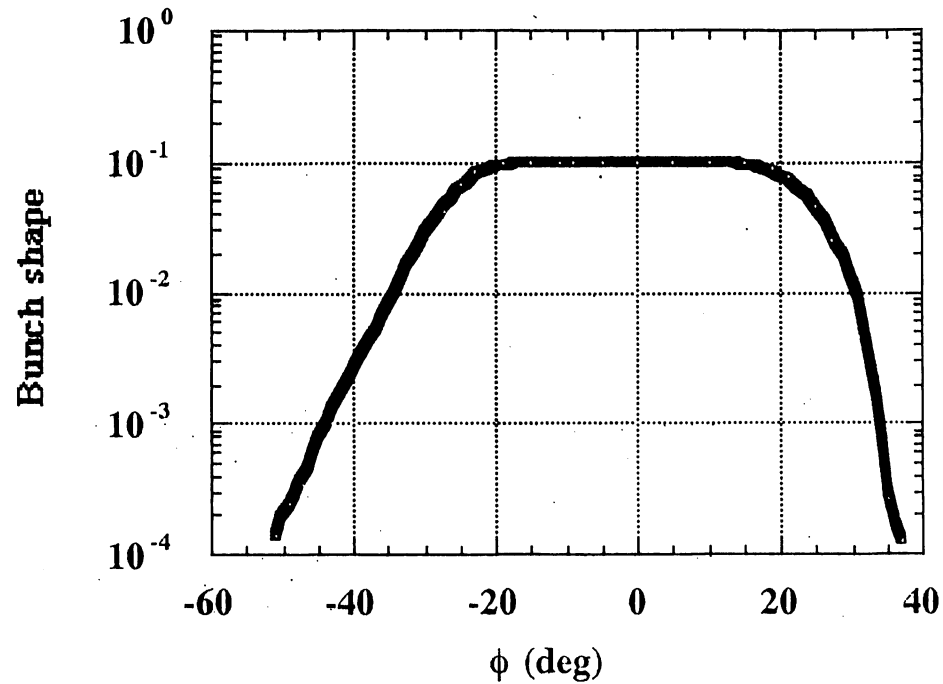
- 2次元cut vane ---- Cost
 - Ez field
 - Bunching process
 - Higher order
 - 補正
 - 加工精度
- Quasi-staticな近似

$$U = \frac{V}{2} \left[X \left(\frac{r}{a} \right)^2 \cos 2\phi + A I_0(kr) \cos kz \right]$$



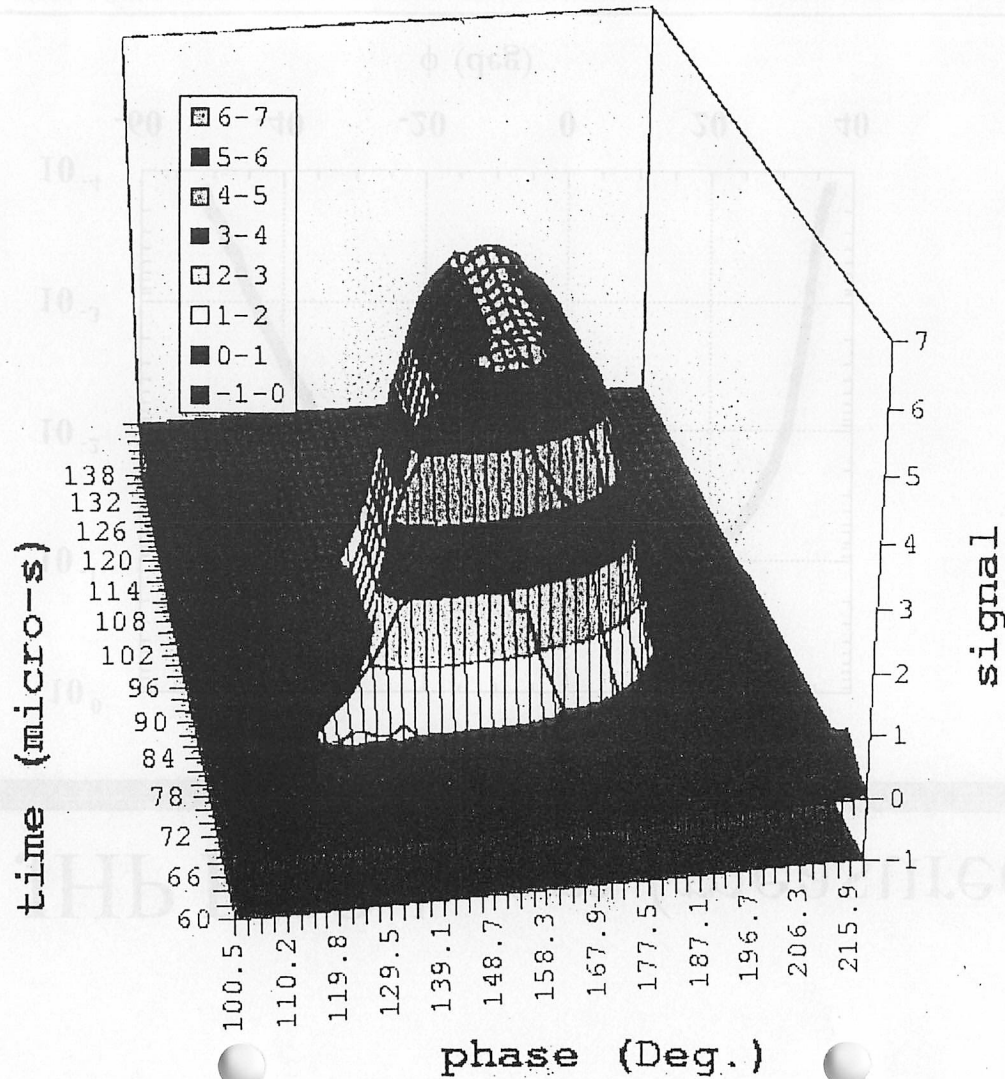
- * 従って、高精度な電極形状等の効果の計算が可能
- * 2次元cut等補正の問題の確認が必要

JHP RFQ beam (measured)



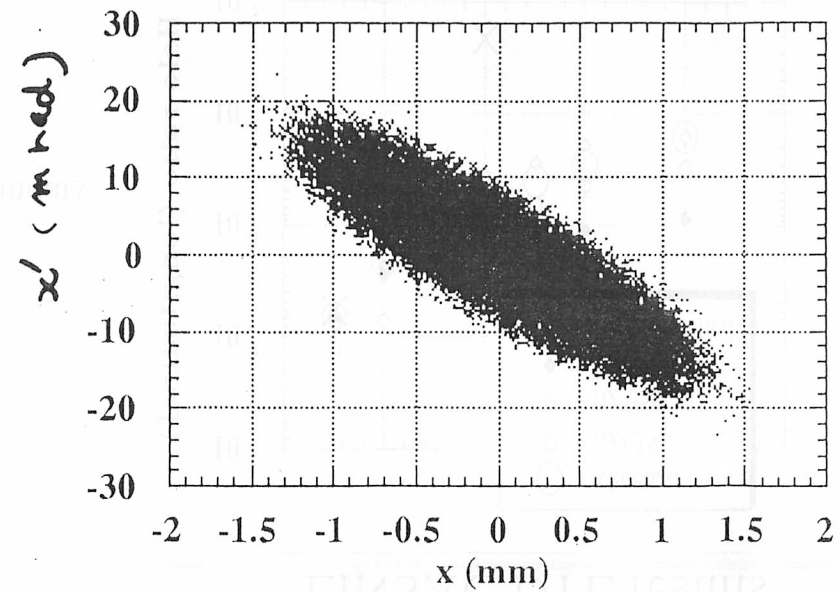
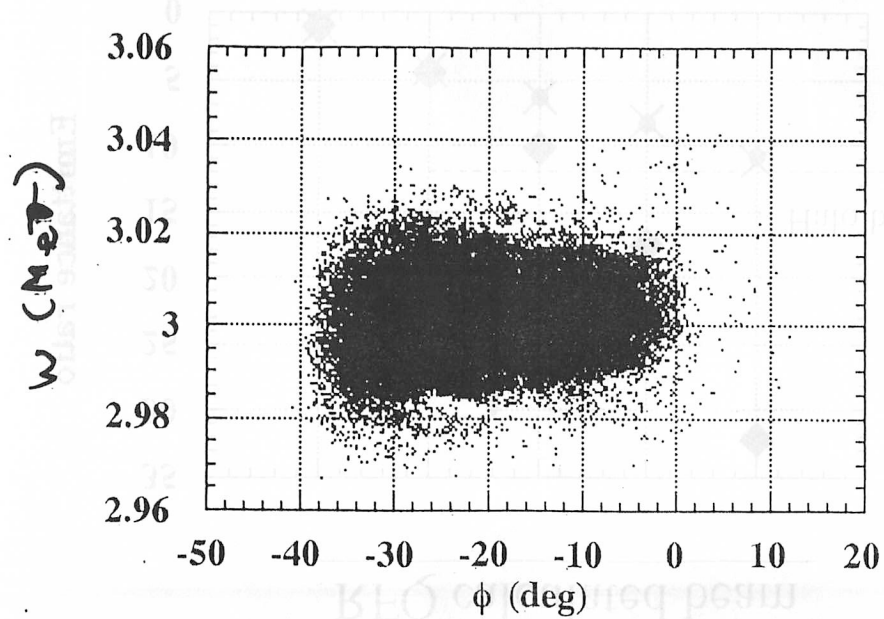
90% -full width is 52 degrees
99% -full width is 66 degrees

JHP RFQ beam (transient)



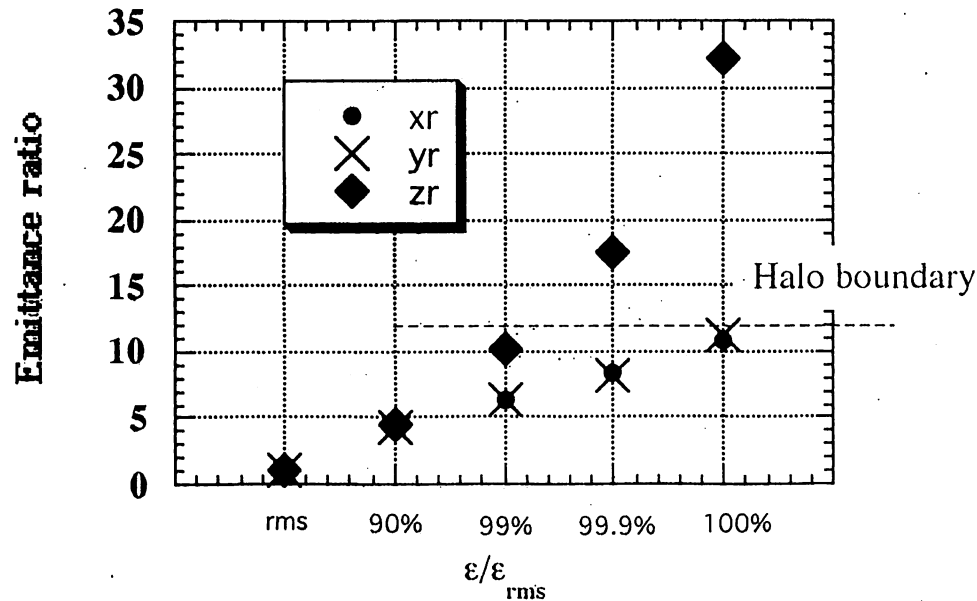
JHF/JAERI 3-MeV RFQ beam

(calculated by Ueno)



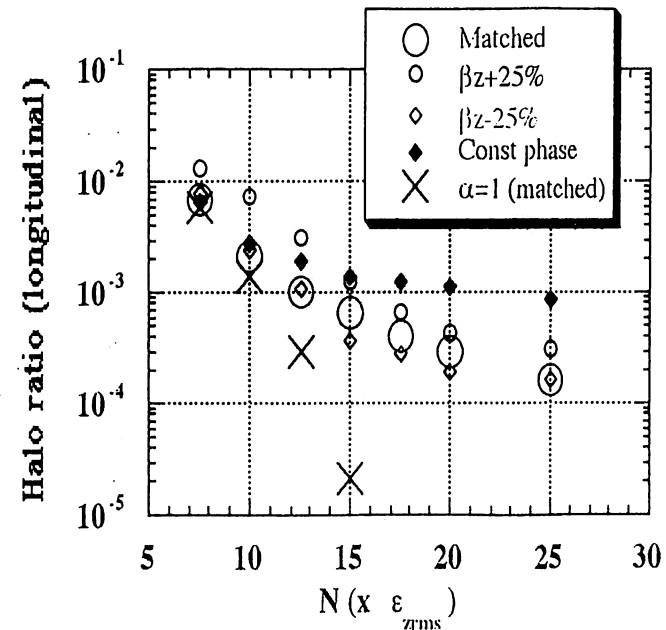
Beam halos in RFQ beam

RFQ calculated beam



Although the rms value is small, further optimization is desirable.

LINSAC DTL results



Here, halo-like particles are defined by those in the outside of 12.5 times the longitudinal output rms emittance.

RFQの課題

- 2次元カットに伴う問題
 - 補正量の確認
 - ビームダイナミックスへの影響
- 計算に示されている縦ハロー
- 放電の無い安定な運転への道
- Ueno reportは添付資料参照

基本周波数の選択 --- 前提

- DTL 横チューンを変化できる（電流可変）
 - 永久磁石でない
- 電流ゼロ時の横チューンは周波数によらず一定
- 電場は周波数によらず一定（high dutyを目指す）
 - Kilpatrick limit に従って増やさない
- 横入射エミッタンスは周波数によらない
 - 同じイオン源を使う
- クライストロン可能（現実的に）
 - 50年前の米海軍レーダー用とは縁を切る
 - T社も電子管4616の供給停止を宣言

周波数の選択 low-beta DTL

表6-1 周波数に依存する入射点 (3 MeV) の基本パラメータの例。

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

| 周波数 | セル長さ | β_{\max} | ビーム孔半径 | 磁石半径 | B' | Bsurface |
|-----|-------|----------------|--------|-------|-------|----------|
| MHz | mm | m | mm | mm | T/m | kG |
| 201 | 119.0 | 0.395 | 9.37 | 11.37 | 43.4 | 4.94 |
| 300 | 79.7 | 0.264 | 7.67 | 9.67 | 96.7 | 9.35 |
| 324 | 73.8 | 0.245 | 7.38 | 9.38 | 112.7 | 10.6 |
| 350 | 68.3 | 0.227 | 7.10 | 9.10 | 131.6 | 12.0 |
| 432 | 55.4 | 0.184 | 6.39 | 8.39 | 200.4 | 16.8 |

周波数の選択 --- 空間電荷効果

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 |
| 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 | $\mu = 1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^2$ |
| 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.

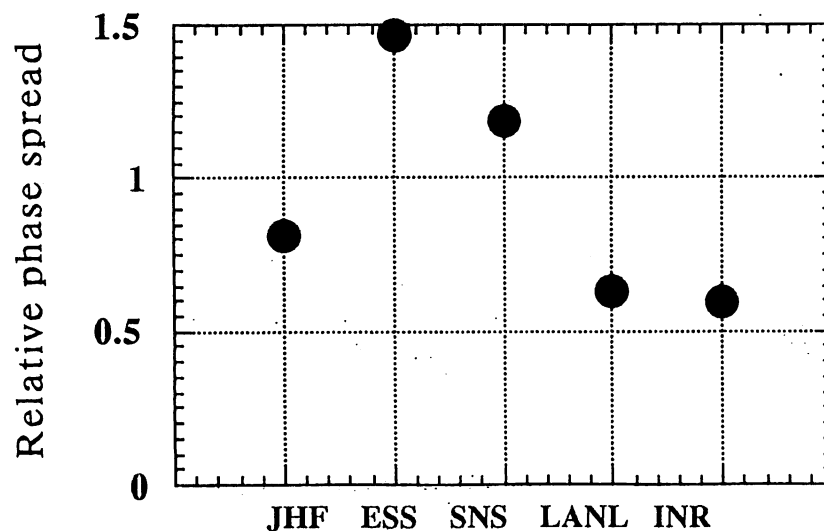
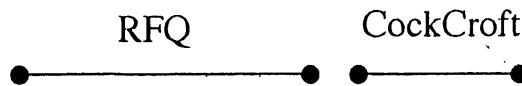
Selection of CCL frequency

| | Frequency multiple | | injection |
|------------------------|--------------------|------------------------------|-------------|
| • LANL | x 4 | at 100 MeV | Cockcroft |
| • INR | x 5 | at 200 MeV | Cockcroft |
| • JHF/JAERI | x 3 | at 150/200 MeV | RFQ 3MeV |
| • ESS | x 2 | at 70 MeV (RFQ---> DTL x 2) | RFQ 5 MeV |
| • SNS | x 2 | at 20 MeV | RFQ 2.5 MeV |
| • <u>phase damping</u> | が一つの指標 | | |

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

Relative bunch width at CCL injection point

Low-energy scheme



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

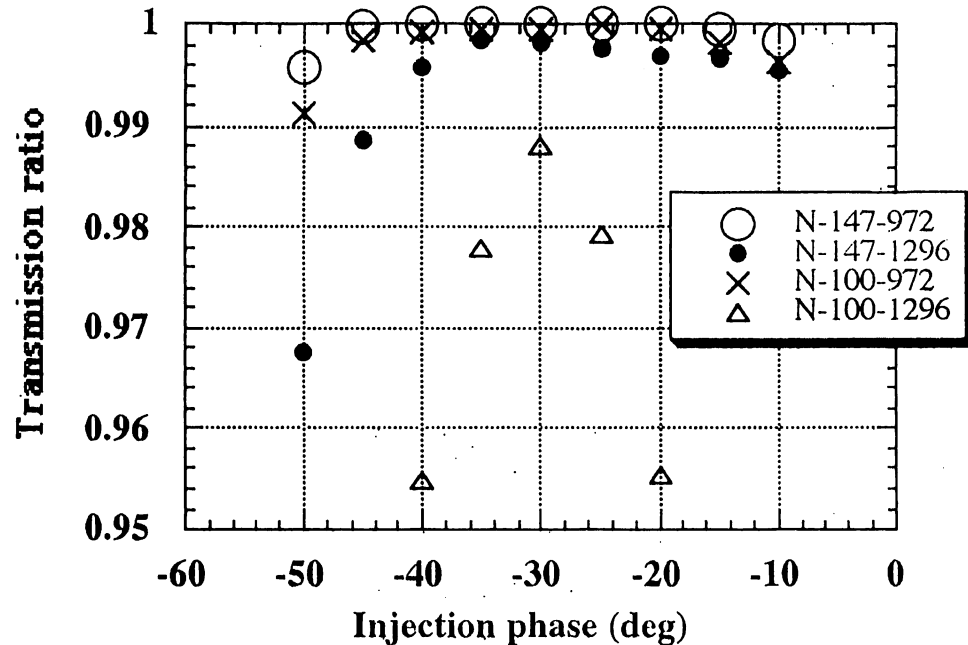
Spread at the RFQ exit is included according to phase damping formula

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

Beam losses caused by CCL transition are observed at LANL and INR.

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

CCL beam loss - simulation results



A beam-loss measurement at the Fermilab 400-MeV linac, which was extended using the CCL structure of four-times the DTL-frequency above 116 MeV, was reported (1996 Linac conf.). They observed beam losses of less than 2%. The magnitude of the beam loss is nearly the same as our simulation.

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.

収束法の選択

- 横の収束だけ積極的に考える
 - 縦の収束力は横とは独立に考える
- 横と縦の収束力を関連させて考察する
 - 1) 電場と位相は構造の問題（熱）等により制限されていた
 - 2) 縦の収束力は、運転時に変えられない
 - 3) せめて、縦横の比を変えてみよう

Equipartitioning

$$\gamma_0 \frac{\varepsilon_{nx}}{\varepsilon_{nz}} \frac{Z_m}{a} = 1 \quad \frac{k_x \varepsilon_{nx}}{k_z \varepsilon_{nz}} = 1 \quad \varepsilon_{nx} \sigma_x = \varepsilon_{nz} \sigma_z$$

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

$$\frac{k_{x0}}{k_{z0}} = \left(\frac{3}{2} \frac{\varepsilon_{nz}}{\varepsilon_{nx}} - \frac{1}{2} \right)^{1/2}$$

$$\tilde{\varepsilon}_{nx} = \tilde{x} \left(\frac{\gamma_0 k_B T_{\perp}}{mc^2} \right)^{1/2} \quad \tilde{\varepsilon}_{nz} = \tilde{z} \left(\frac{\gamma_0^3 k_B T_{\parallel}}{mc^2} \right)^{1/2}$$

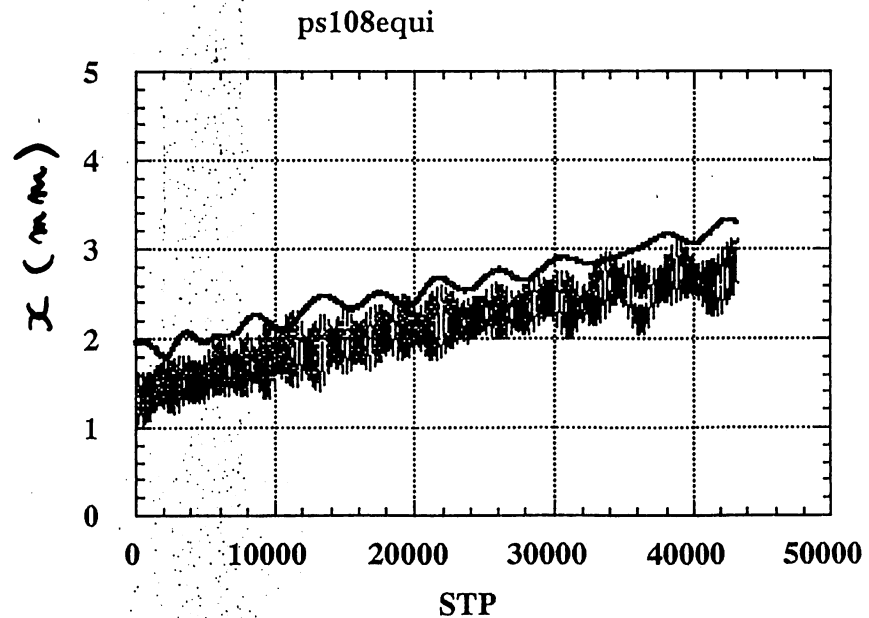
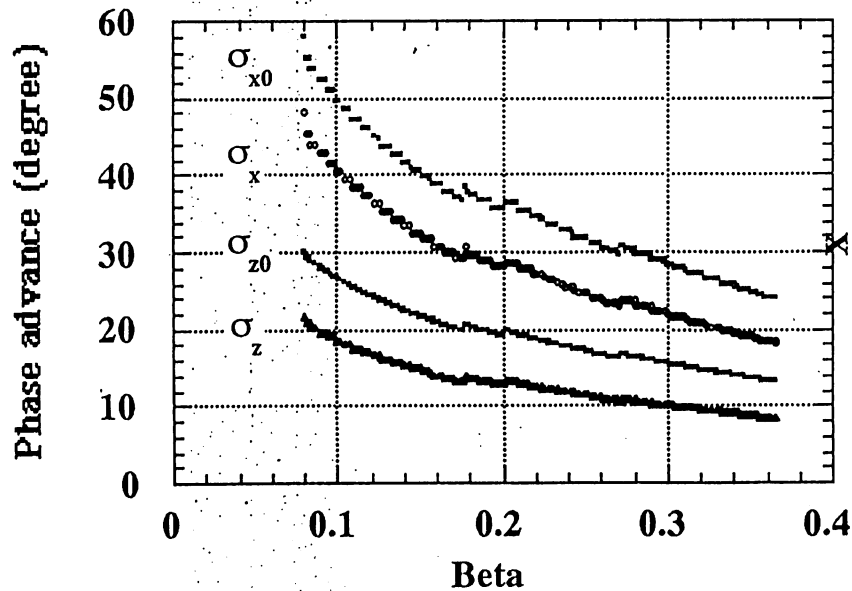
収束法

Equipartitioning focusing

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

Constant phase advance

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

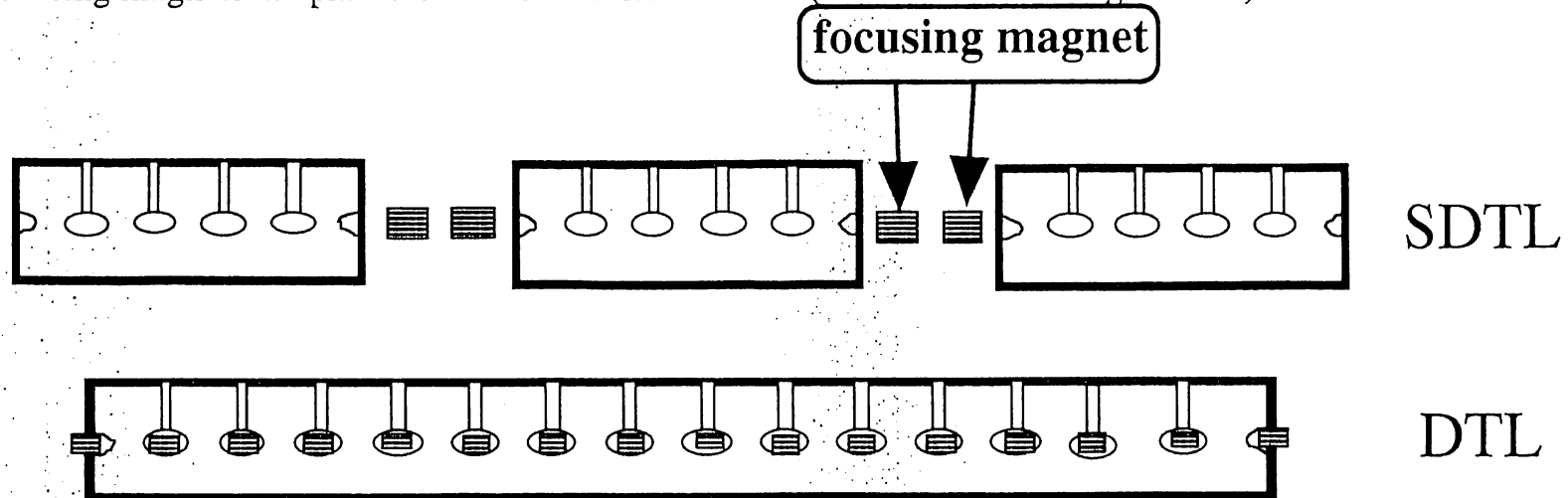


Simulation 予測はいろいろある。
 実機にて最適加速を与える横収束法を求める

SDTL (Separated-type DTL)

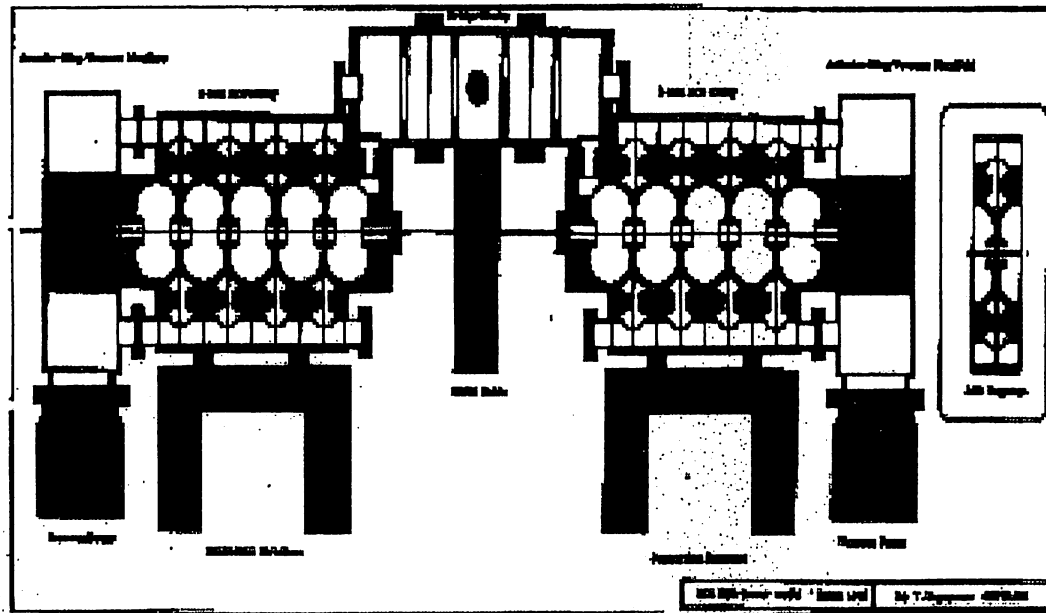
- SDTL structure for a medium energy range
 - a new structure concept proposed in 1992
 - many advantages of beam dynamics and construction

Focusing magnets are placed between two SDTL tanks (like a CCL focusing scheme)

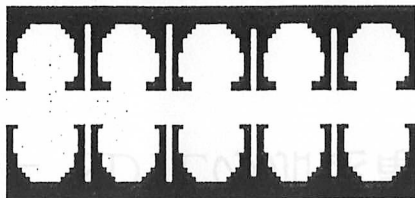


ACS

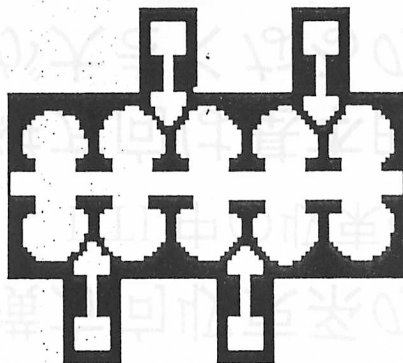
- * JHP 1296-MHz ACS製作 (Kageyama)
- * 空洞自体の問題解決
- * 製作法
- * 大電力テスト OK



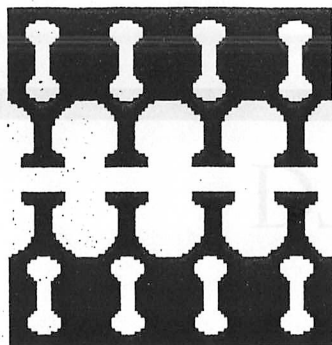
CCL structure --> Yamazaki



OCS (APS)
TRISTAN



SCS (LAMPF)



ACS

DTL - SDTL matching

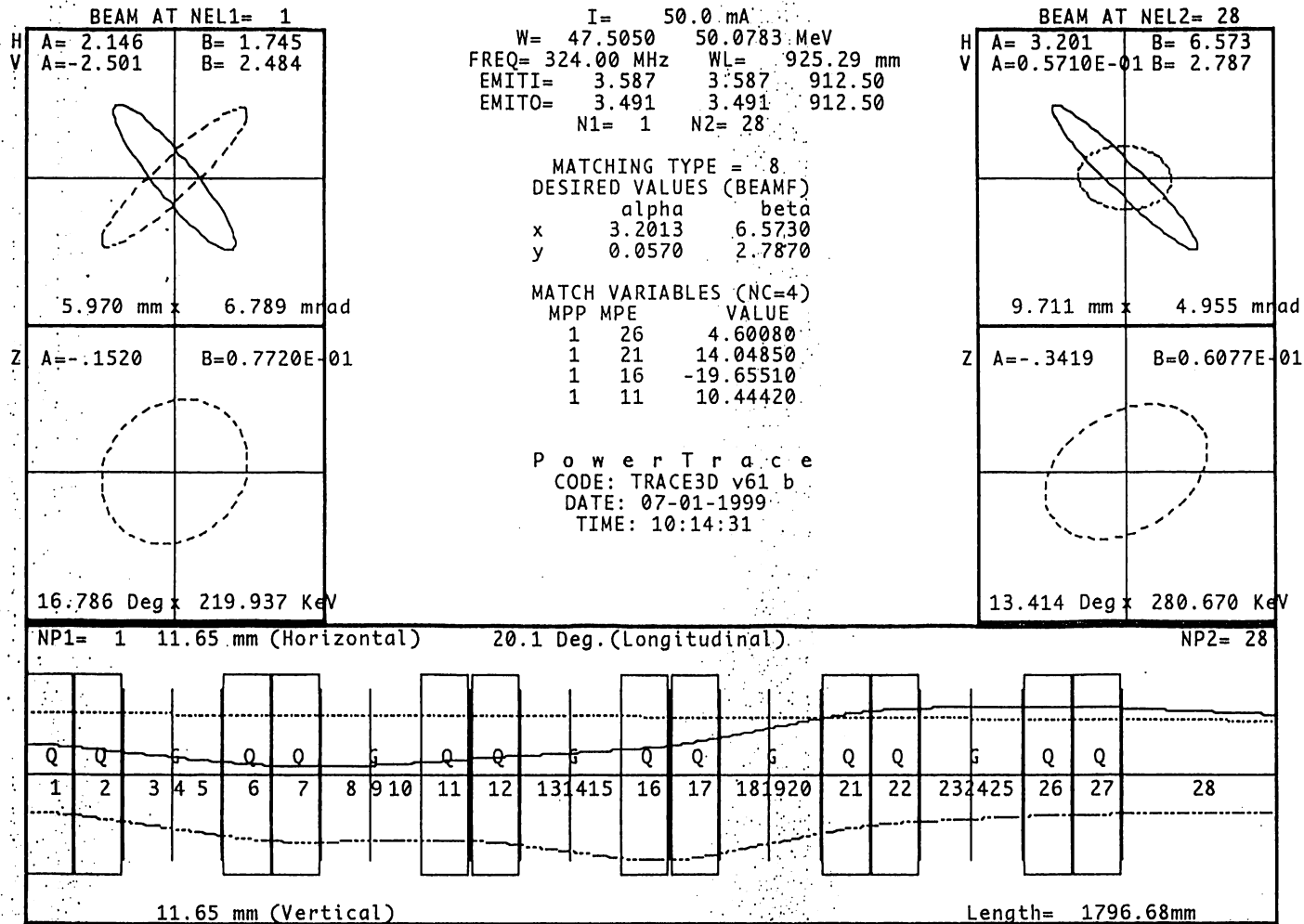
- 横方向収束系の変化
 - DTL中の収束磁石を調整してmatchingさせる
- 縦方向は基本的な変化はないが、SDTLの加速（収束）が大きくなるのでtuningが必要
 - SDTLの加速電場を変化させる

* DTL-SDTL間に余計なdrift spaceを入れない

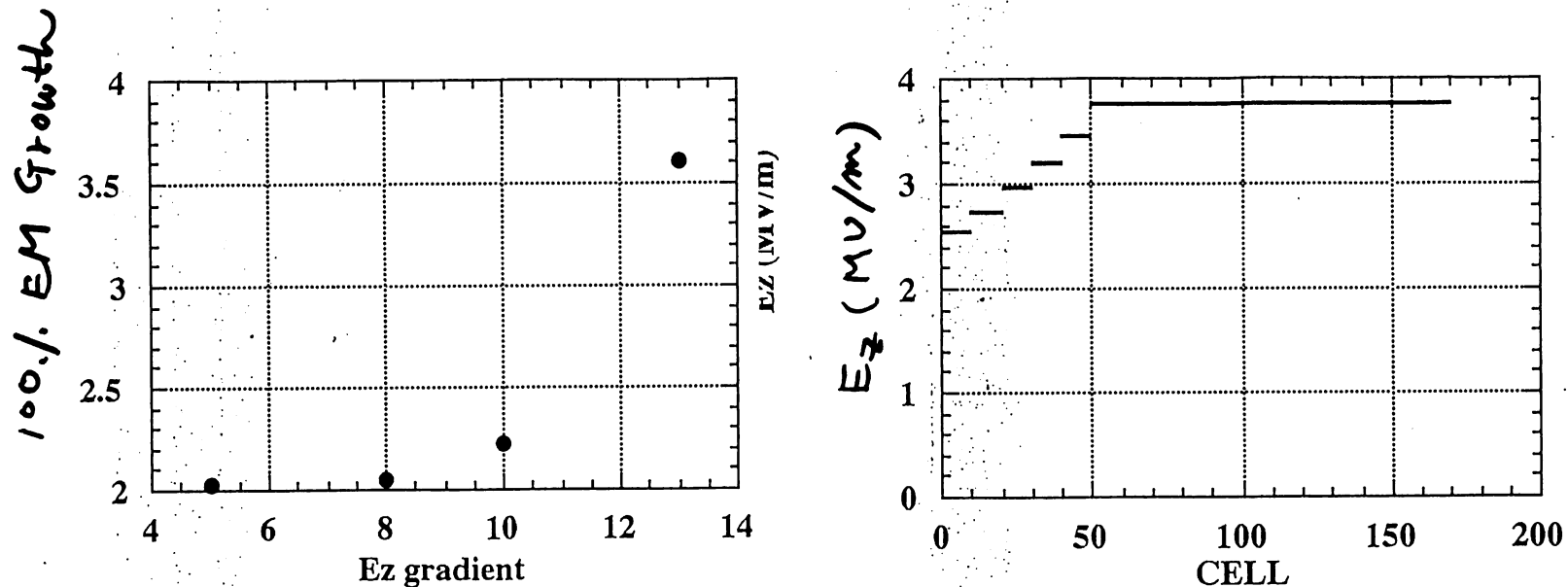
* ビーム測定は第1番目のSDTL-SDTL drift spaceにて

DTL - SDTL transverse matching

DTL - SDTL matching example 990701 T. Kato

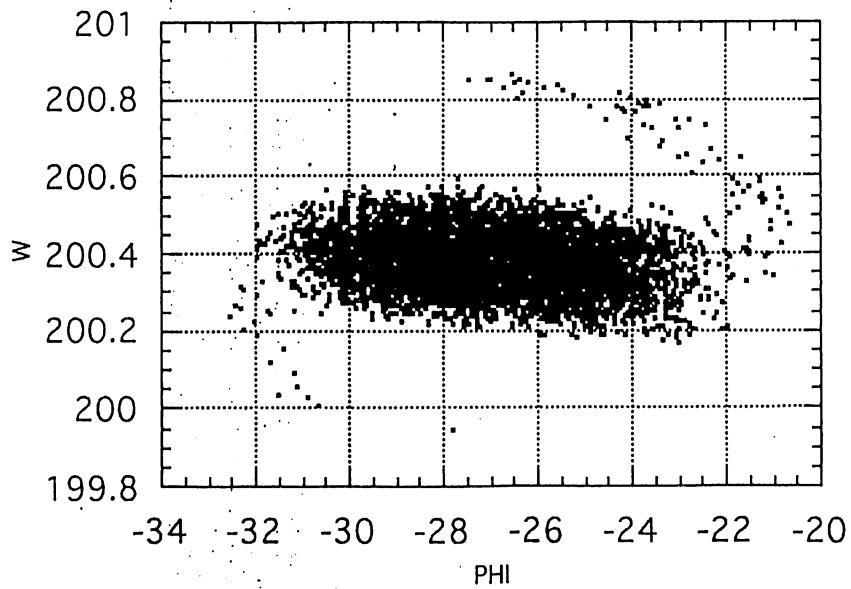


DTL - SDTL longitudinal matching

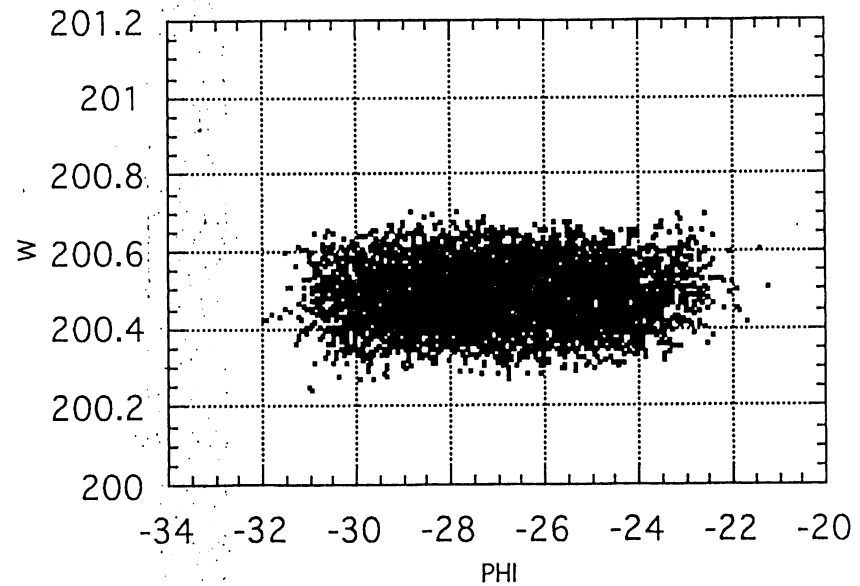


縦方向の収束力がDTLとSDTLとの間で小さい変化となるように接続する。バンチャー等の特別な空洞は使用しない。SDTLの中での、電場の変化の大きさにより、SDTL内での縦方向のエミッタンス増加が異なる。縦軸はSDTL中の100% エミッタンスの増加率、横軸は、2タンク毎の加速電場の増加率（%、入射部分のみ）を表す。ここでは8%の増加率を採用した。

DTL - SDTL simulation results



OLD design



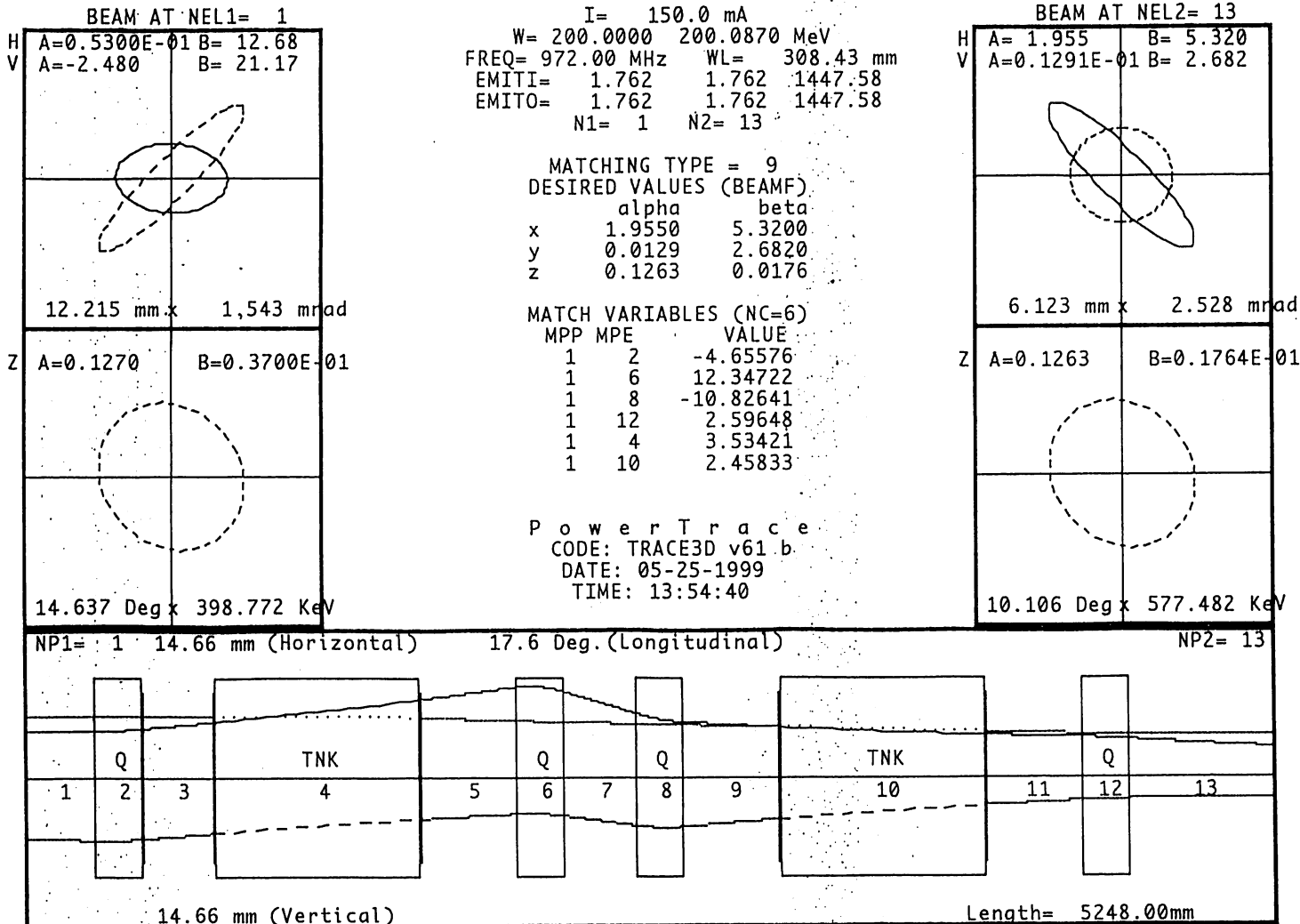
NEW design

SDTL - ACS matching

- transverse - no transition
- longitudinal - three times the frequency

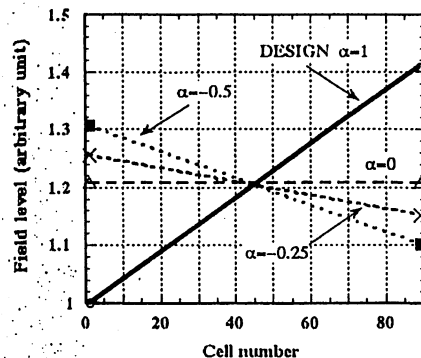
| | | |
|------------|-----------------|----------------|
| Length | | 5.2 m |
| Q-magnet | number | 4 |
| | length | 20 cm |
| | B' | 2.6 - 12 T/m |
| ACS cavity | freq. | 972 MHz |
| | number | 2 |
| | number of cells | 10 |
| | Accel. Vol. | 3.5, 2.5 MV/m |
| | RF power | 195 kW, 100 kW |
| | * max 5 MV/m | max 400 kW |

SDTL - ACS matching (TRACE 3D)

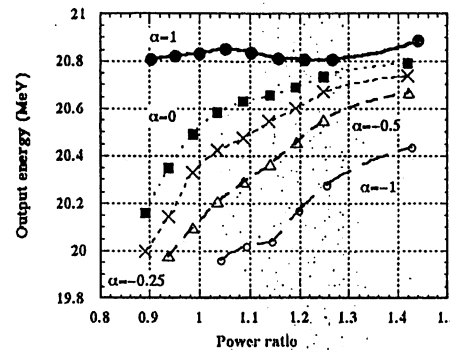


空洞の安定化

- 電磁場のエラー（設計値からのずれ）を減らすには
 - 空洞安定化 stabilized rf structure
 - 加速モードに他のモードがmixした状態 $TM_{010} + TM_{011} \rightarrow$ field tilt
- 混ざりにくい構造の加速管にすればよい
 - 嫌なモード周波数を、加速モードから離す
 - RFQ-PISL(横), SDTL short tank(縦)
 - 混ざるモードを対称に配置してそれらの励起がキャンセルする構造
 - ACS - $\pi/2$ mode(縦)、DTL - post coupler(縦)、DTL - two feed(縦)
- Transient 特性の改善(group velocity の増加)
- 超伝導空洞 π -modeには、これらの安定化機構はない



電場分布例



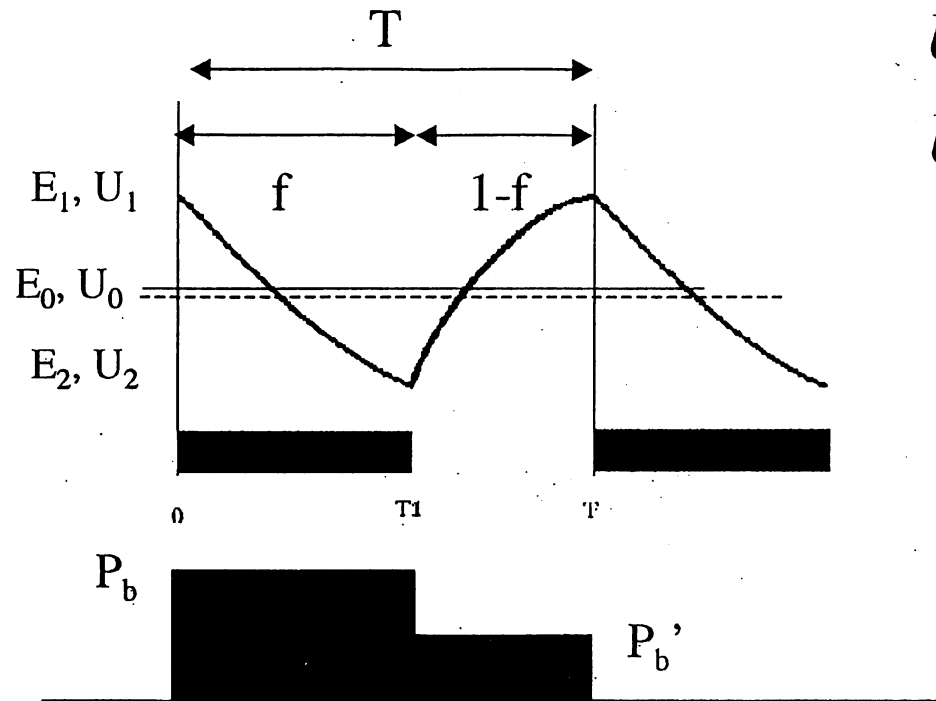
非安定化空洞
Kek PS 20-MeV linac
計算例
200 MHz, 16m

加速エネルギーの変化

Beam quality & reducing beam losses

- higher frequency with less increase in emittance growth
- beam matching in all transition sections
- Equipartitioning focusing method
 - keep ratio between transverse and longitudinal focusing strength through the linac
- avoid longitudinal transition in low-energy region
 - two or three times the frequency for CCL instead of more than four
- Adoption of RFQ
- Stabilized rf structures and short SDTL unit tank
- Simple DTL injection scheme, avoiding tuning errors
- small repetition frequency, reducing transient loss

Beam loading in chopper operation



$$U_1 + P_b' T f - P_b T f = U_2$$

$$U_2 + P_b' T (1 - f) = U_1$$

$$P_b' = f P_b$$

$$U = \frac{Q_0}{\omega} \frac{E^2 L}{Z}$$

$$T = 1/f_{\text{RING}}$$

$$\frac{E_1 - E_2}{E_0} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{Q_0} \frac{P_b}{P_c} T f (1 - f) = \frac{1}{2} \frac{P_b}{U_0} T f (1 - f)$$

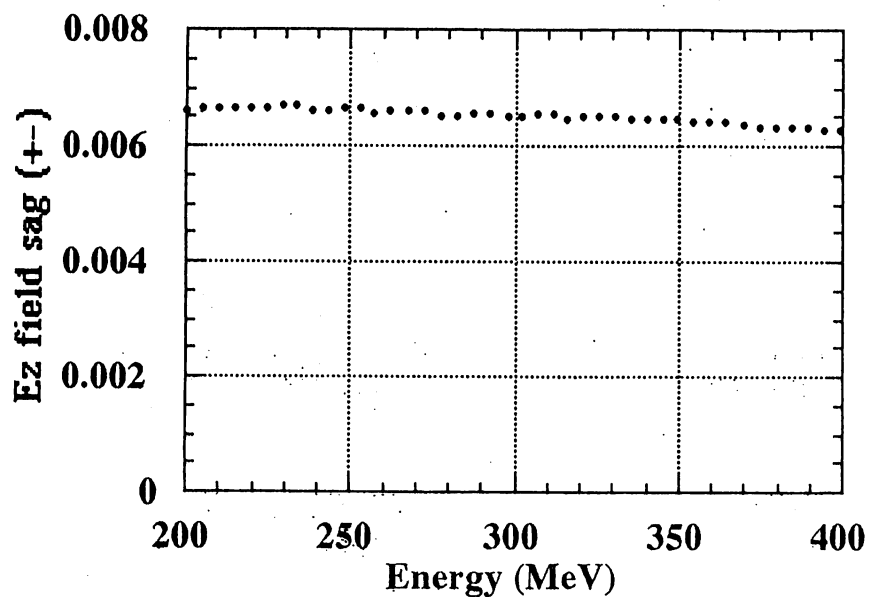
P_c 一定の仮定

P_b は I_{peak} に対応

P_b' は平均 I_{peak} に対応

Calculated Ez field sag

ACS results

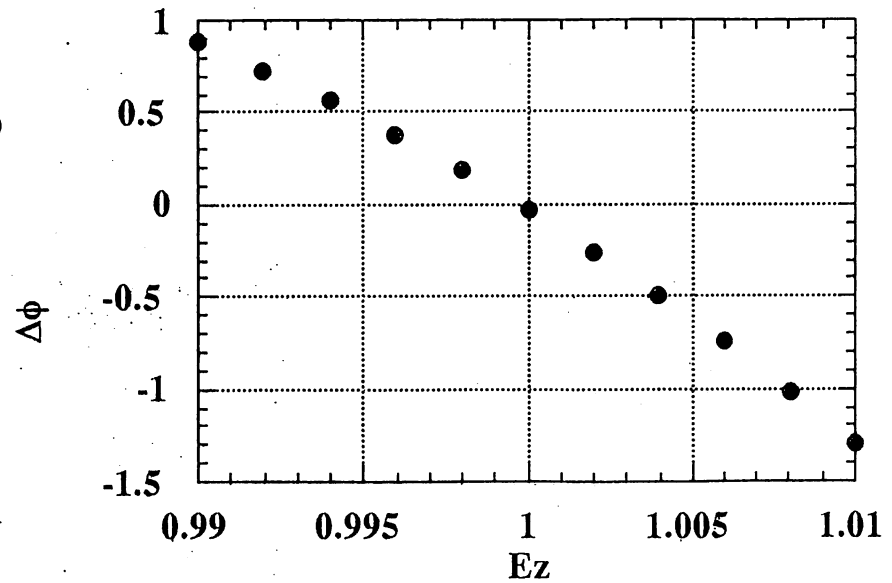
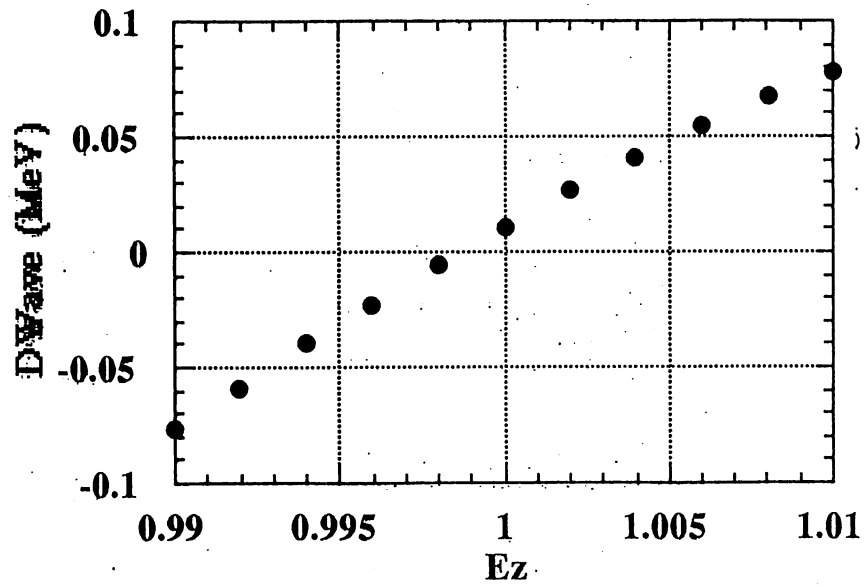


Average calculated sag

| | |
|------|---------------|
| DTL | ± 0.0013 |
| SDTL | ± 0.00097 |
| ACS | ± 0.0066 |

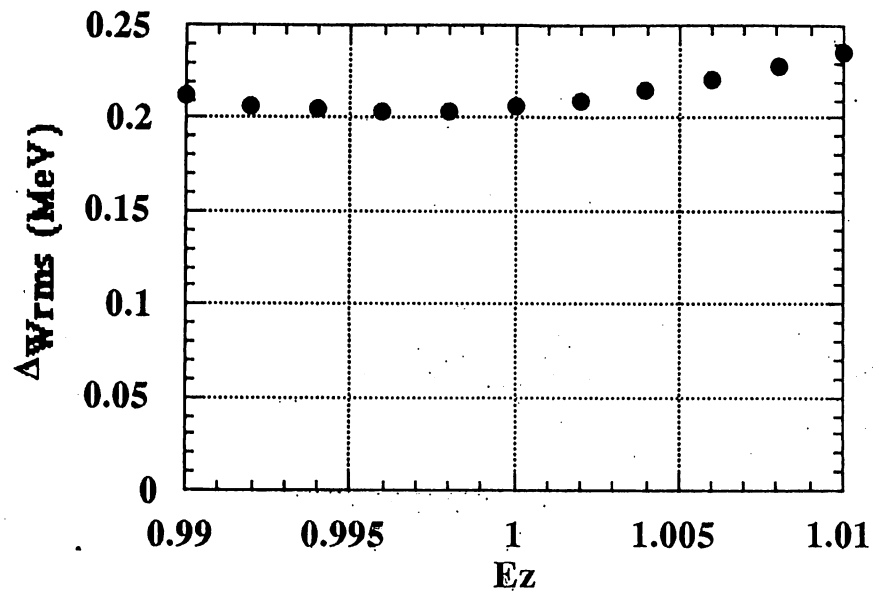
972 MHz ACS, $f_{\text{rev}}=0.56$, 50 mA, $\text{frf}=1.336$ MHz

Simulation results in chopped-beam loading(1)



ACS 200 - 400 MeV accelration

Simulation results in chopped-beam loading(2)



Full energy width $\sim \pm 500$ keV

Average-energy compensation

エネルギーの幅 (約1 MeV) と比較すれば、本当に必要かどうかは今後検討を要す。平均エネルギー安定化(stabilizer)も必要とすれば、そこに以下のような機能を持たせてもよい。

- 5cell ACS cavity with a low-loaded Q value, $L=0.55\text{m}$
- operation from -45 to $+45$ degrees
- energy shift of ± 90 keVの場合

空洞時定数 $1/\text{frf}$ ---> $P_c = 617$ W, $Q_L = 2286$

空洞時定数 $1/(10*\text{frf})$ ---> $P_c = 5664$ W, $Q_L = 229$

Control and tuning

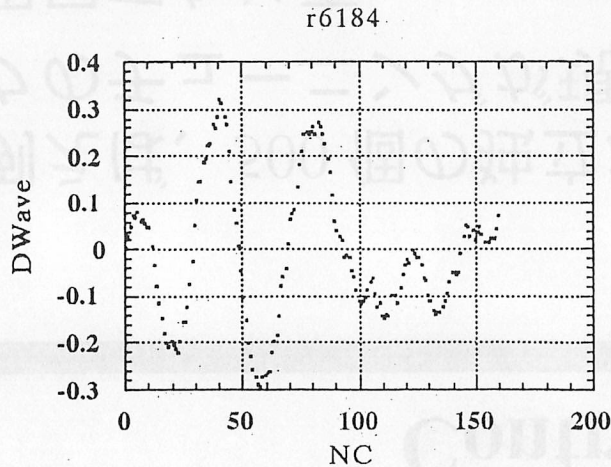
- 例えば、500 個の独立な単一空洞から成るリニアックのチューニングが現実的に可能か？
- 周回でない事
 - $\beta < 1$ (電子加速とは違う)
 - 1 本のklystronの出力低下は、全体の運転停止を意味する
- Field error ± 1 degree , 1%
- その為には、monitor system design & construction が重要

- 1) 縦運動のモニター及びtuning system
- 2) 精度を得る為に何が必要か

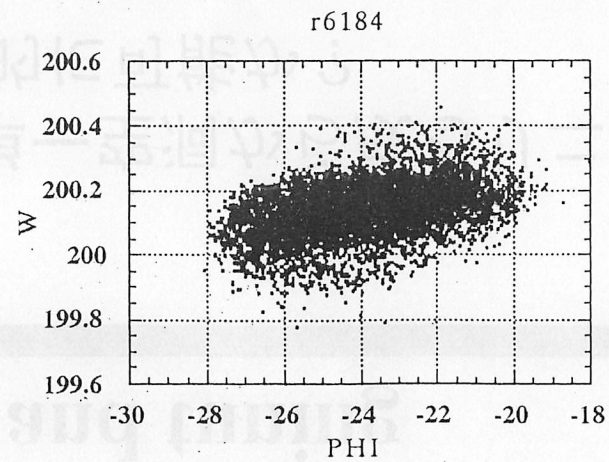
Longitudinal tuning

- 各タンクの電場と位相とが独立に決められる事
- 精度目標 $\pm 1\%$ 、1 degree
 - 電場のエラーは位相補償で相殺できる？
 - 出来るが程度により副作用をともなう

$$\Delta W_{\tan k} = \bar{E} \bar{T} \cos \bar{\phi} L = \bar{E}_c \bar{T} \cos \bar{\phi}_c L$$



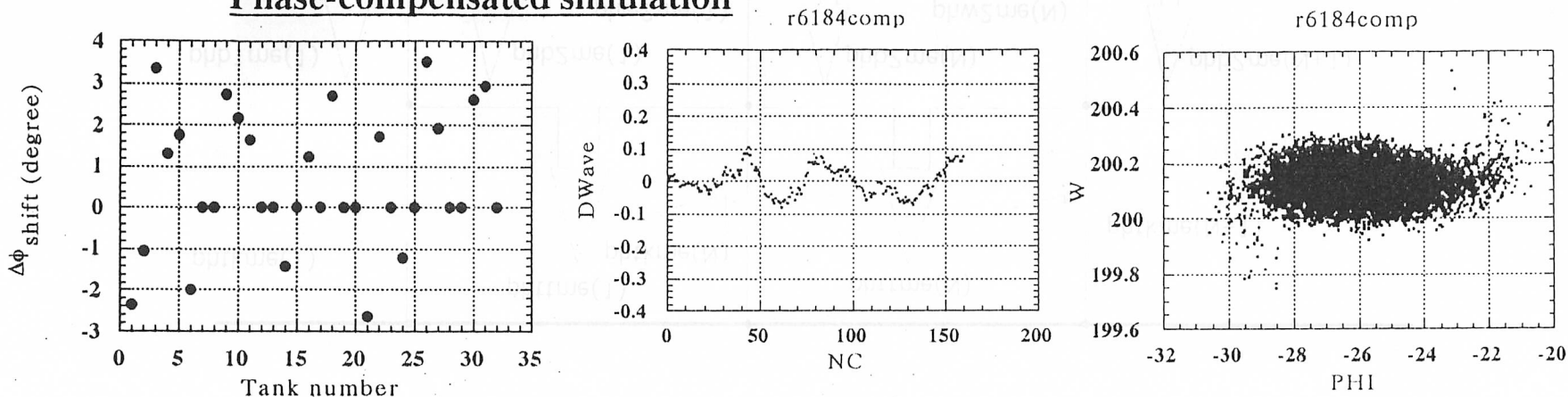
Error simulation in SDTL



ep error 32-21

Phase compensation in SDTL

Phase-compensated simulation

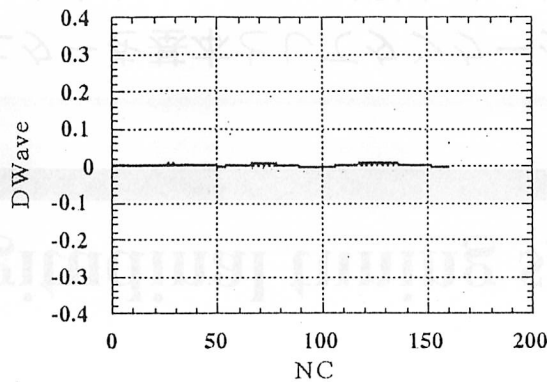


Compensation phase in each tank

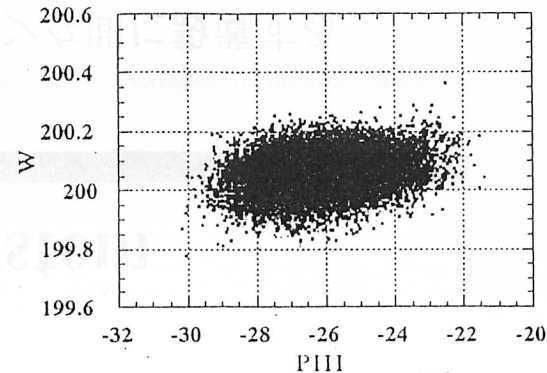
Deviation of average energy

Output emittance

r6186 no error



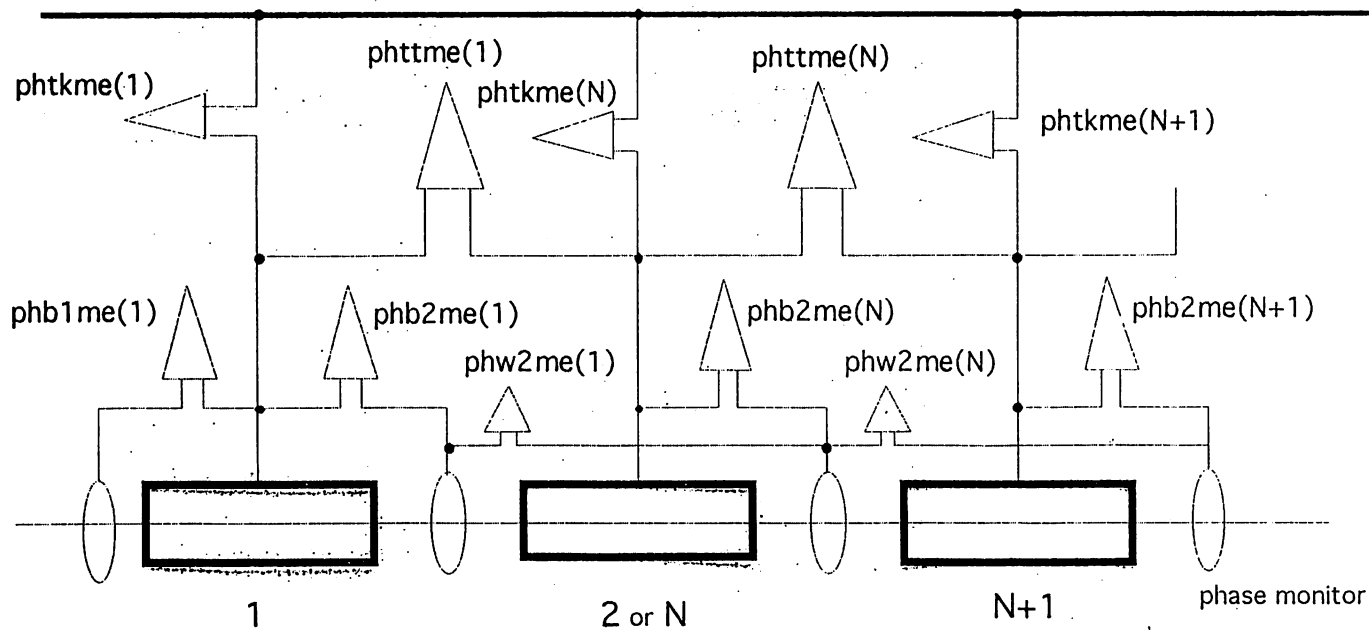
r6186 no error



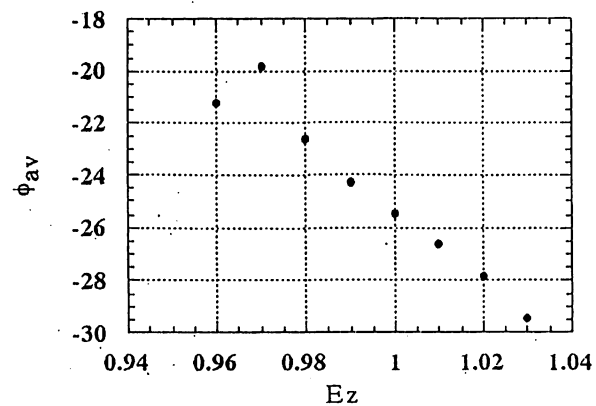
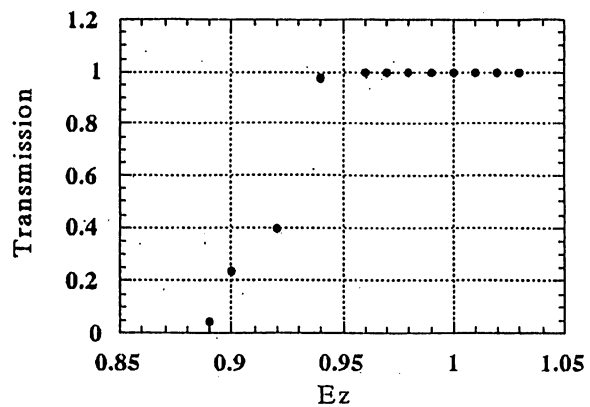
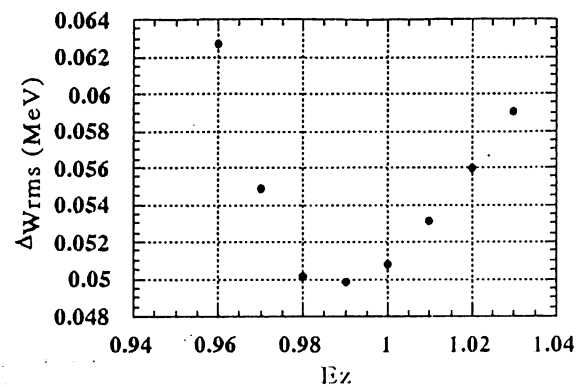
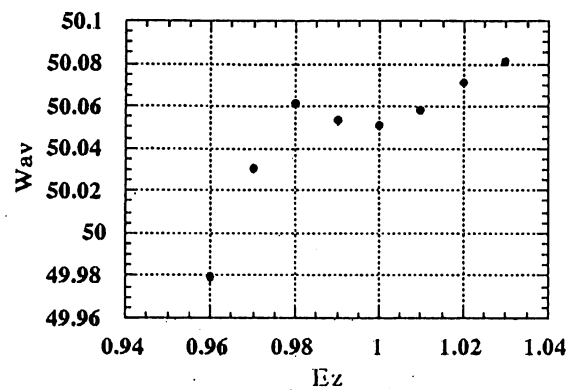
No-error simulation

Longitudinal tuning system

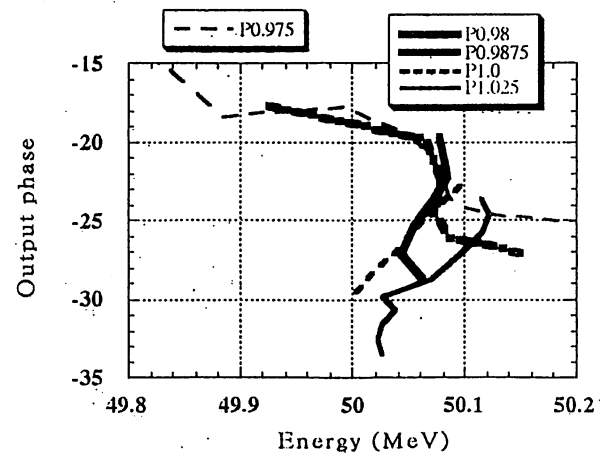
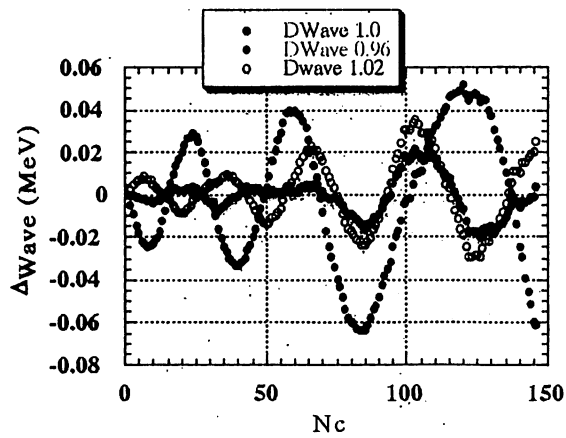
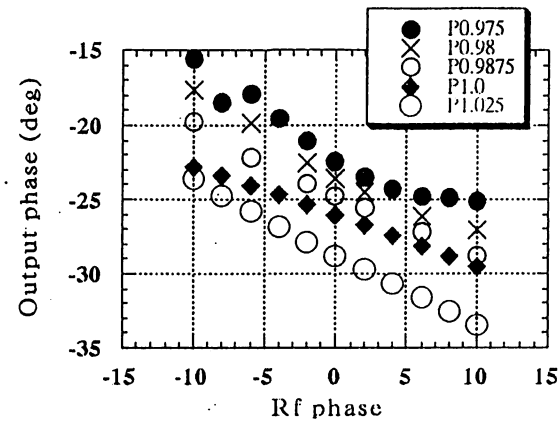
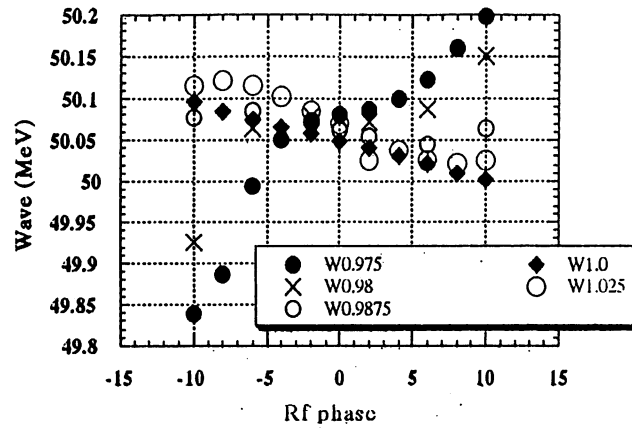
- 常時観測可能モニターを基本としてタンクータンク間に設置する
- 位相規準を含めた安定なシステムが測定時の精度信頼性の基礎
- チューニング法はリニアックチューニングメモ



Tuning simulation in DTL (1)



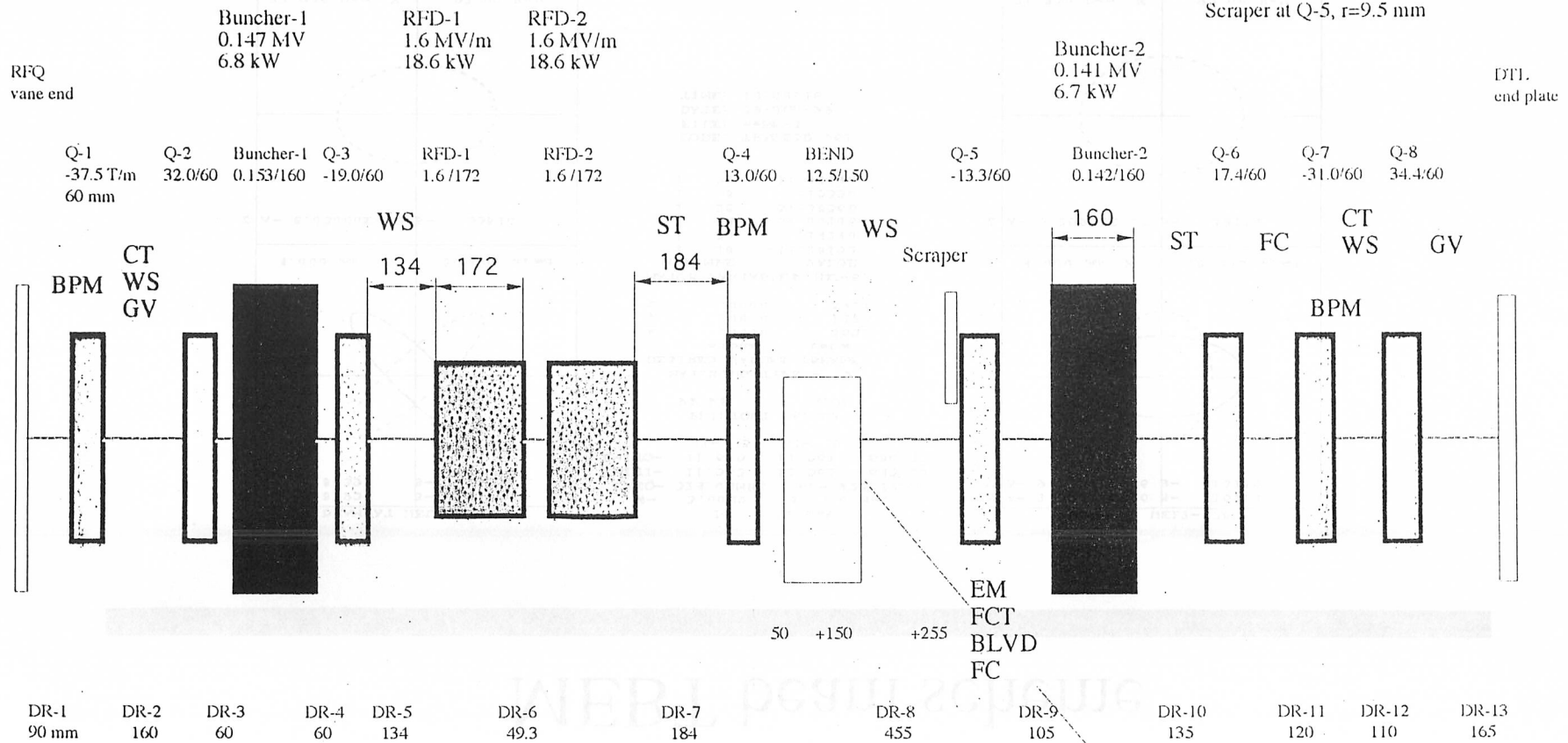
Tuning simulation in DTL (2)



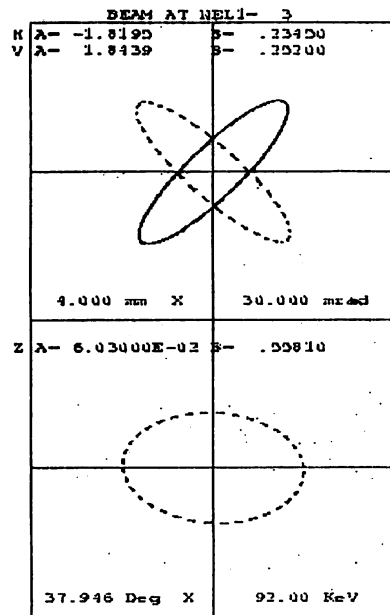
MEBT

Matching, chopping and measurements

negative charge
 Total length 2989.9 mm
 Normal beam size < 10 mm
 Deflected < 26 mm
 Scraper at Q-5, r=9.5 mm



MEBT beam scheme

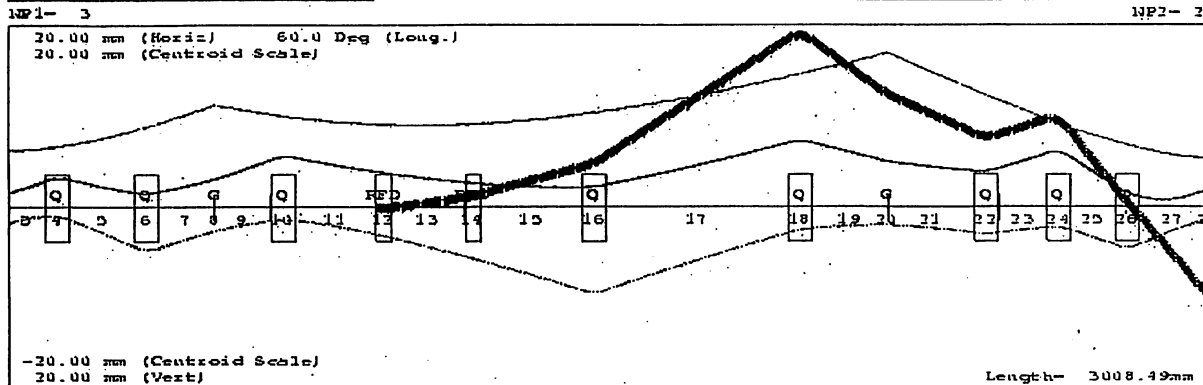
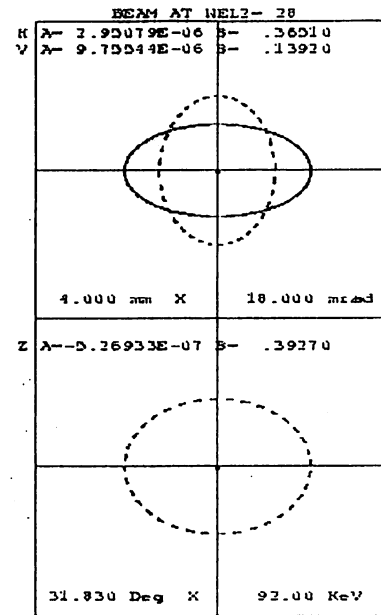


I- 30.0mA
W- 3.0000 3.0000 MeV
FREQ- 324.00MHz WL- 925.29mm
EMITI- 11.563 11.563 645.00
EMITD- 11.685 11.567 680.23
N1- 3 N2- 28

PRINTOUT VALUES
PP PE VALUE
MATCHING TYPE - 2
DESIRED VALUES (BEAM)
alpha beta
x .0000 .3651
y .0000 .1392
z .0000 .3927

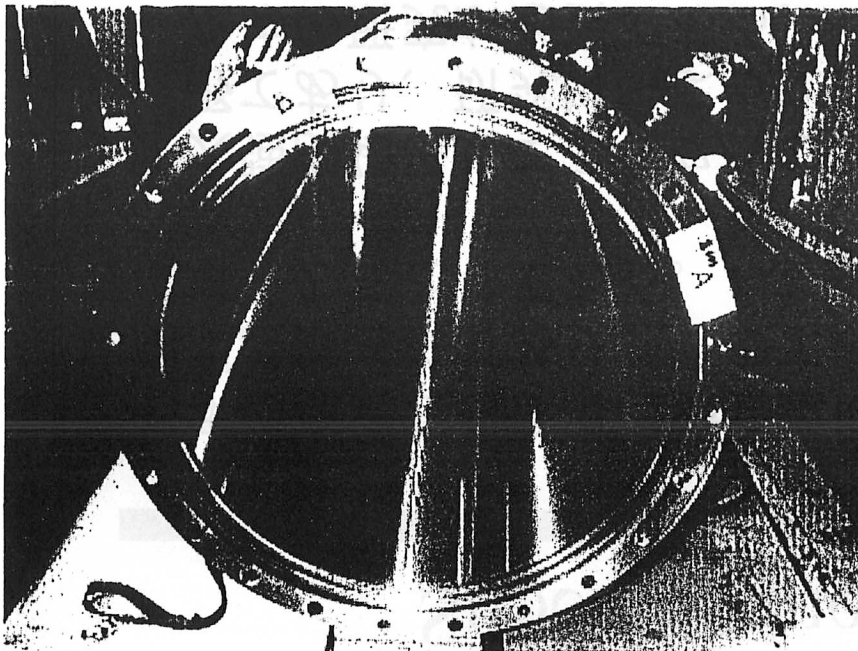
MATCH VARIABLES (NC-6)
MFP MPE VALUE
1 18 -13.28153
1 20 .14240
1 24 -31.00106
1 26 34.38366
1 8 .15350
1 22 17.41140

CODE: TRAC3D v61
FILE: mebt-3
DATE: 29-Jun-99
TIME: 10:02:16

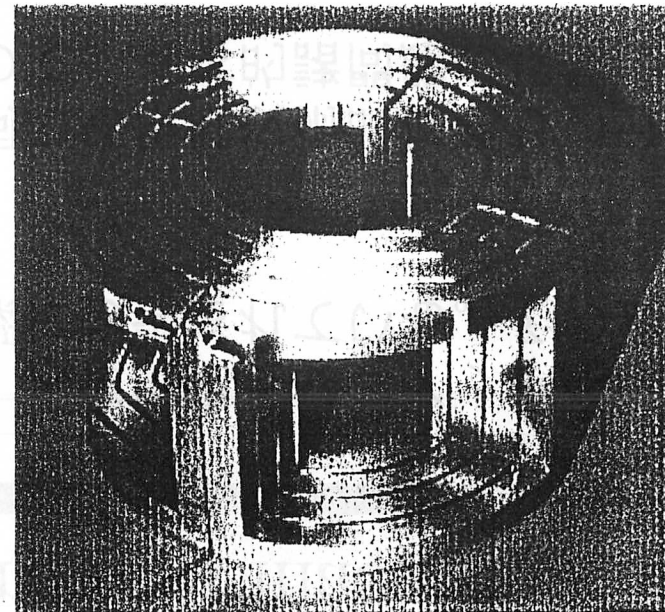


DTL under construction

- * 50-MeV, 324-MHz DTL
- * New developed techniques
 - Electro-plating tank (Periodic Reverse) : $Q_{\text{measure}} \sim 0.98 Q_{\text{ideal}}$
 - Pulse Q-magnets with electro-plating



EP test tank



Q-magnet coil

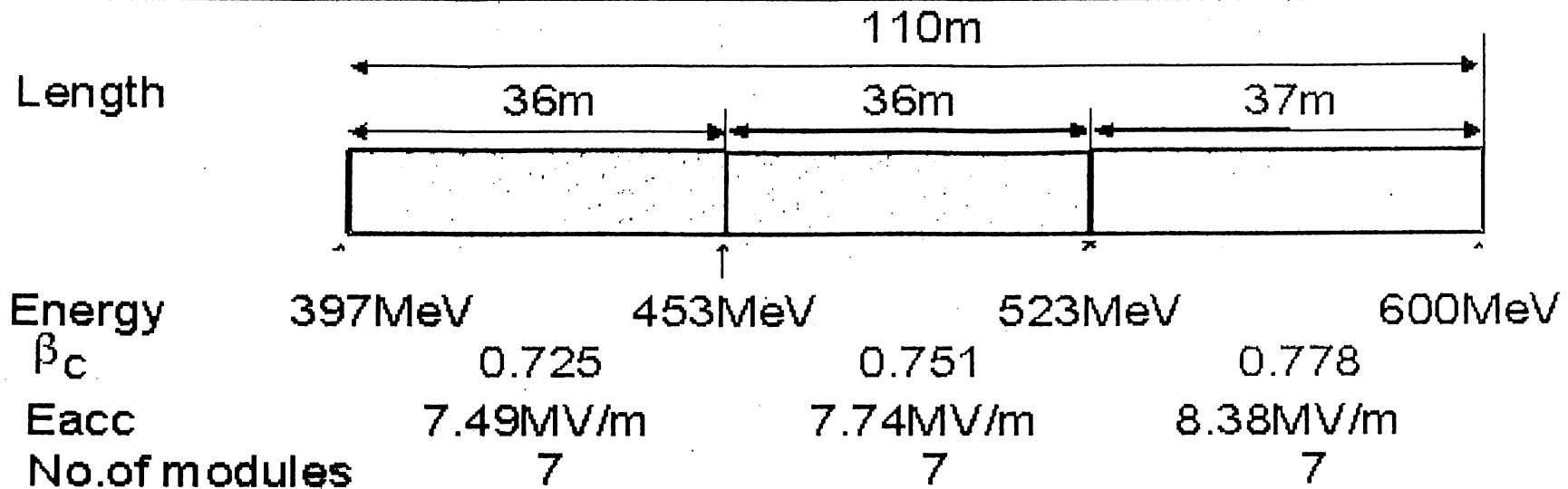
Superconducting Proton Linac

1995年の高周波超伝導国際会議において、大強度陽子リニアックへの応用が議論されており、そのまとめが簡潔に報告されている。その要旨は以下のごとくである。

- 1) 大強度陽子リニアックへの超伝導空洞の応用は技術的に新しい分野であり、研究は始まったばかりなので、基本的諸問題の理解のための研究が必要である。
- 2) 超伝導空洞を使う利点の程度は、そのマシンの動作等に依存している。
- 3) パルスマシンとCWマシンには大きな差がある。核消滅処理用のCWリニアックへの応用は、よい選択であると考えられる。パルス陽子リニアックへの応用に関しては、メリットはあると考えられるが、CWに比べて、一層の開発研究が必要である。

Proc. 7th Workshop on RF Superconductivity, p.752 (1995).

Basic parameters of superconducting Linac

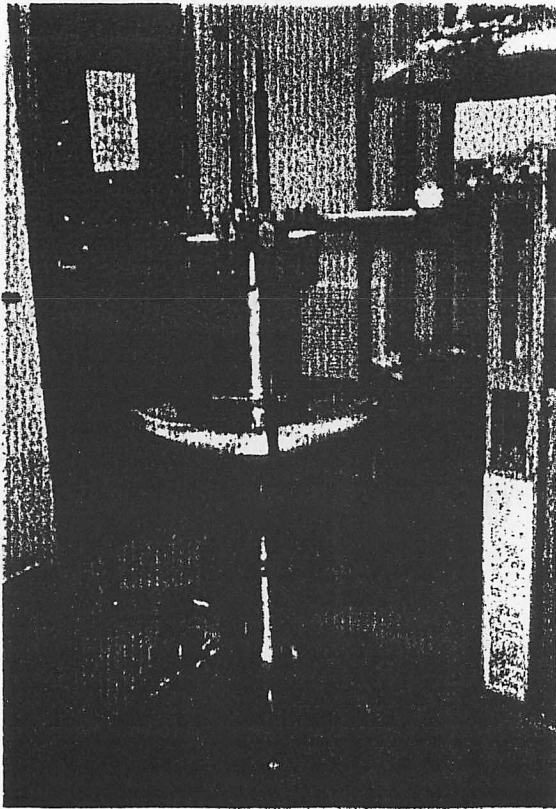


| | | | |
|---------------------------------|------------------------------------------------------|----------|-------|
| <u>Beam Condition</u> | <u>RF Source (RF Duty Factor*: 2.5msx25Hz=6.25%)</u> | | |
| Energy Gain: 200MeV | Peak RF Power: 12MW | | |
| Frequency: (972MHz) | Average RF Power: 0.75MW | | |
| Peak Current: 50mA | *Rise time is 2ms | | |
| Duty Factor: 0.5msx25Hz = 1.25% | <u>Refrigerator (Duty Factor*: 2.5msx25Hz=6.25%)</u> | | |
| No. of Cells/Cavity: 7 | 2K | 4 - 20 K | 4K |
| No. of Cavity: 42 | RF Load 24W | 970W | |
| No. of Modules: 21 | Static Loss** 140W | 910W | 910W |
| Total Length: 110m | Total AC Power 165kW | 273kW | 564kW |
| | **Static Losses do not depend on duty factor | | |

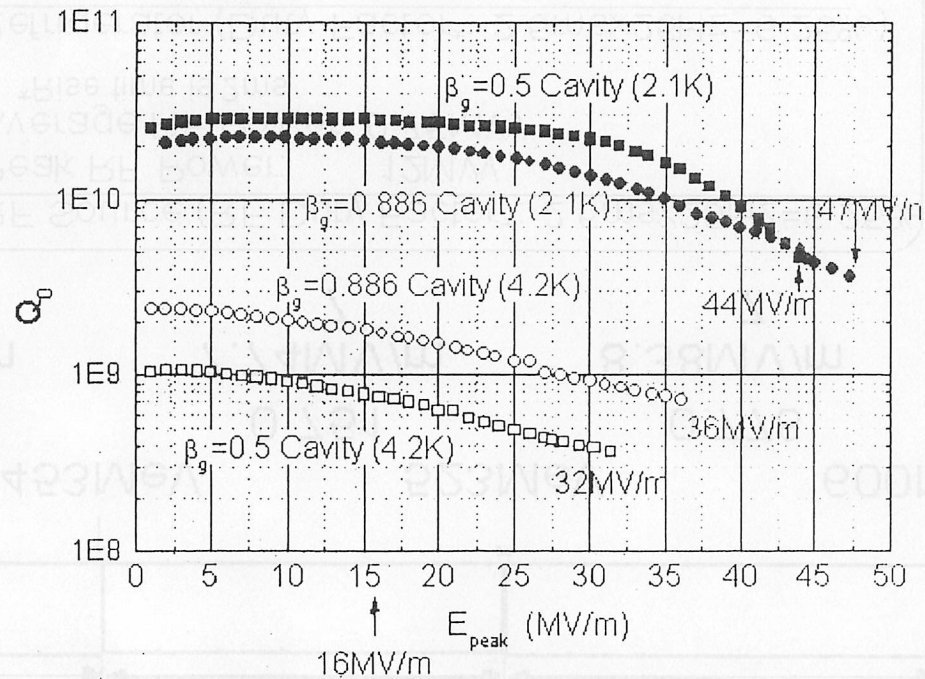
Maximum peak surface fields 20MV/m

SC Cavity Development

Beta=0.5 Single Cell Cavity
(E=145MeV)



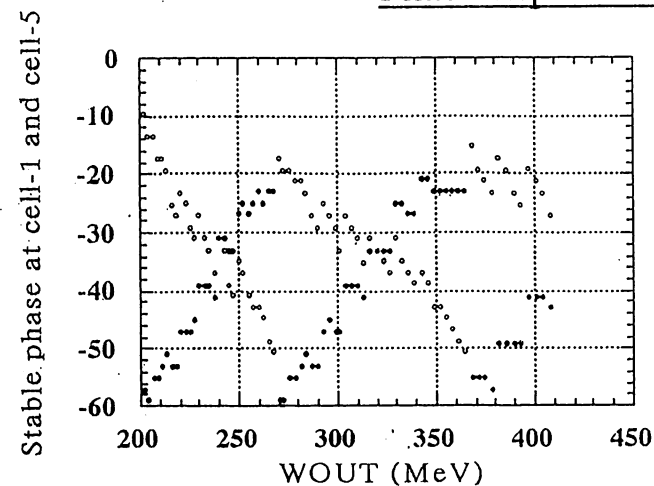
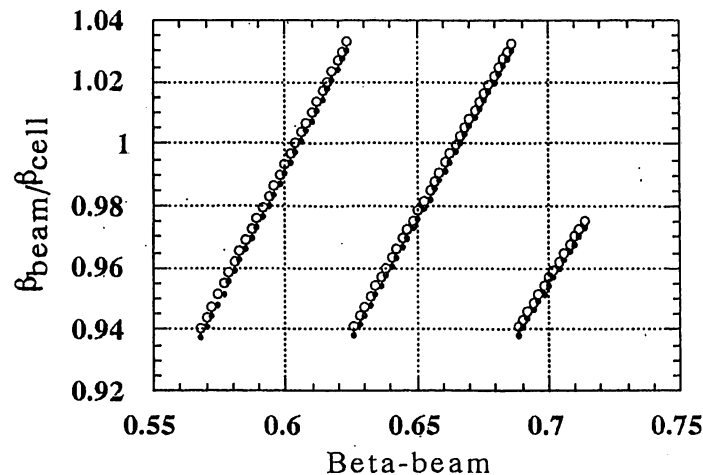
$\beta=0.5$ Niobium single cell cavity (600MHz, $\phi=45$ cm)



Quality factor as a function of E_{peak} obtained the vertical tests for the $\beta=0.5$ and 0.886 cavities.

PROTON 加速空洞

- 原則 $\beta_{\text{cell}} = \beta_{\text{beam}}$ for RFQ, DTL, SDTL
 - 縦収束力 (一定)
- Costのために
 - $\beta_{\text{cell}} \neq \beta_{\text{beam}}$ for ACS, SCC
 - Phase slip 縦収束力の変化、rf 非線形領域の拡大
 - 特に量産による cost down
 - ACS タンク毎
 - SCC あるエネルギー領域



Fundamentals

$$V = E_0 TL \quad P_c = \frac{V^2}{R} = \frac{V^2}{\left(\frac{R}{Q}\right) Q_0} \quad P_b = VI \cos \phi$$

Optimum coupling

$$\beta = 1 + \frac{P_b}{P_c} = \frac{I \cdot \cos \phi \frac{R}{Q} \cdot Q_0}{E_0 TL}$$

$\sim P_b/P_c$

$$Q_L = \frac{E_0 TL}{I \cdot \cos \phi \frac{R}{Q}}$$

$$2\Delta f = \frac{f}{Q_L} \quad Q_0 = (1 + \beta) Q_L$$

600 MHz, 50 mA, $E_0=6.1$ MV/m
 $T=0.78$, $R/Q=30$, $L=0.15$

$$T_f = \frac{2Q_L}{\omega_0} \quad Q_L = \frac{Q_0}{\beta}$$

$Q_L=5.3E5$, $\Delta f=\pm 560$ Hz, $T_f=280$ μ sec
 $Q_0=1E9$, $\beta=1900$

Beam induced field

$$V_c = V_g + V_b$$

$$V_b = -V_{bo} \left[1 + \sum_{n=1}^N \exp(-n\tau + jn\delta) \right]$$

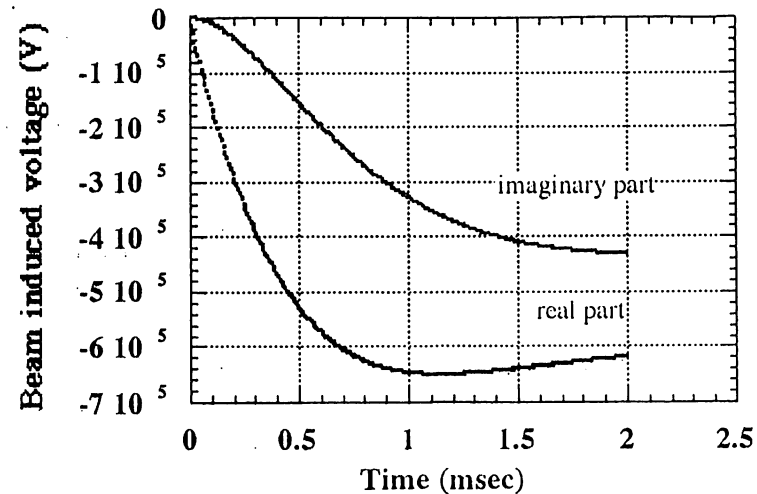
$$V_{bo} = 2kq = \frac{\omega_0}{2} \left(\frac{R}{Q} \right) I_0 T_b$$

$$\delta = T_b (\omega_0 - \omega)$$

$$\tau = \frac{T_b}{T_f} \quad T_f = \frac{2Q_L}{\omega}$$

$$T_b = \frac{1}{f}$$

$$\tan \psi = 2Q_L \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = T_f (\omega_0 - \omega)$$



Beam-induced voltage in a superconducting cell. $Q_0 = 1 \times 10^9$, $Q_L = 9 \times 10^5$, $f_0 = 600$ MHz, cell length = 0.15 m, $R/Q = 31 \Omega$, $I = 30$ mA, $T_b = 1/f$, and $\Psi = 35$ degree. The injection beam energy is 200 MeV.

$$\text{Re}(V_b) \sim 0.7 \text{ MV}$$

SC cavity の特徴

最大の長所が短所ともなる ---- pulse operation

• Q_0 が大きい $Q_0 = \frac{\omega U}{P_c} = \frac{f_0}{2\Delta f}$ $Q_0 = 10^9 \sim 10^{10}$

運転時の $Q = 10^6$

時定数 $\tau = \frac{2Q_L}{\omega} \approx 300 \mu \text{sec}$ ~ pulse length

Normal conducting $3 \mu \text{sec} \ll \text{pulse length}$

Pulse operation では、過渡状態において安定にビーム加速を行うという原理的な困難を含む

SC proton linac (pulse operation) の問題点

しばしば取り上げられる問題点

- 共振周波数の変化による電場と位相の乱れ
 - Microphonic noise (random, ± 30 Hz?)
 - Lorentz detuning (~ 100 Hz?)

T.Kが言い出した事

- Beam loading と $\beta_{\text{cell}} \neq \beta_{\text{beam}}$ に起因する電場と位相の乱れ

問題の由来は

- 1) SC の Q_0 が大きい事
- 2) 薄肉構造の空洞
- 3) 量産空洞
- 4) pulse operation

大きさの程度

| | SC-1 | SC-2 | LEP2 | ESS(old) | |
|-------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Freq | 600 | 600 | | 350 | MHz |
| Energy | 439 | 200 | | 600 | MeV |
| Q_0 | 1E9 | 1E9 | | 3E9 | |
| E | 6.4 | 6.1 | 6 | 13.6 | MV/m |
| I _{peak} | 50 | 30 | | | mA |
| β | 3300 | 1100 | | | |
| Q_L | 2.99E5 | 4.3E5 | | 2.6E5 | |
| Filling time | 159 | 477 | 620 | 480 | μ sec |
| Δf | ± 1000 | ± 700 | ± 180 | ± 675 | Hz |
| Microphonic | | | ± 30 | | Hz |
| Lorentz detuning | | | ± 108 | | Hz |
| Ψ | 29.9 | 35 | | | deg |
| Detuning freq. | 580 | 230 | | | Hz |

$$Q_L = \frac{E_0 T L}{I \cdot \cos \phi \frac{R}{Q}}$$

(入射器としての) 問題点 (2)

- エラーが制御 (予測) できるかどうか
 - ビームパルス毎の差があるかどうか
 - ビームパルス内の差がどうか
 - 問題の時定数&程度により解決法が異なる
- しばしば指摘される次の問題
 - ビーム強度が増えるとチューニング (ビーム) が突然変る (LANL)
 - ビーム強度に対するマシンの感度
 - それ自体の耐力
 - 運転法

Studies for Pulse Operation

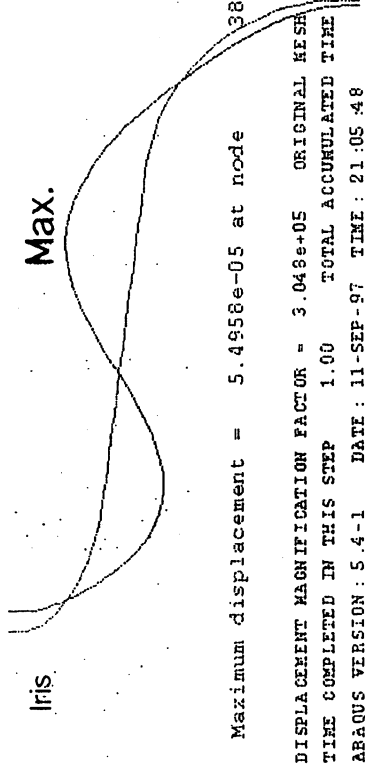
Lorentz Detuning

$$P = \frac{1}{4}(\mu_0 |H|^2 - \epsilon_0 |E|^2)$$

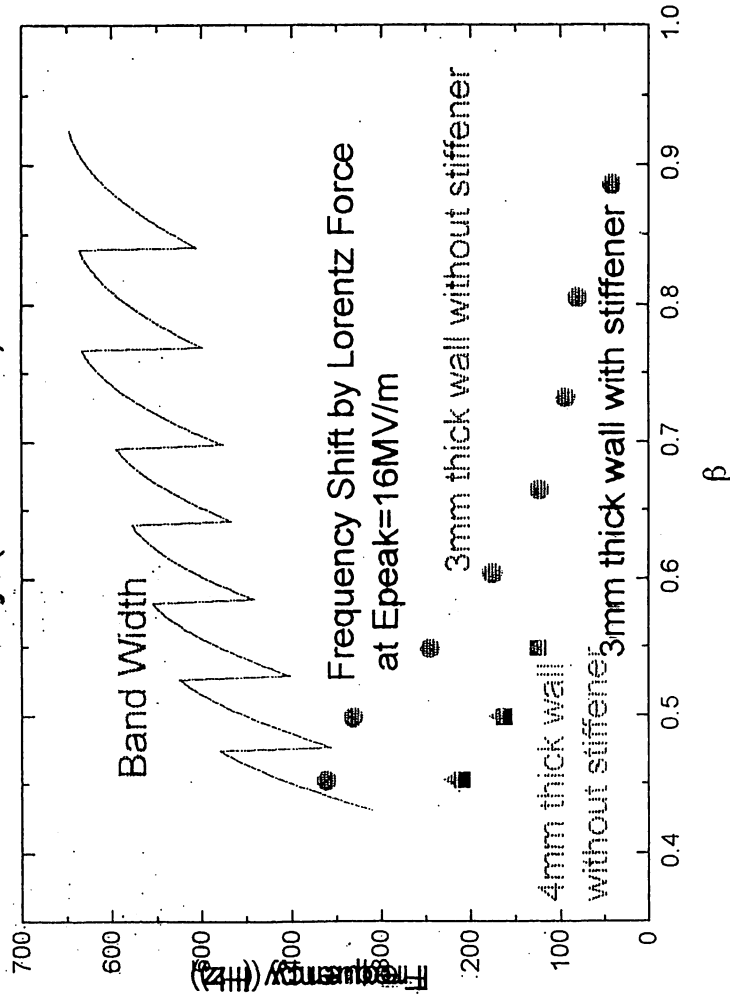
P : Pressure by Lorentz Force
 H : Magnetic Field on the Surface
 E : Electric Field on the Surface

Beam Axis

SUPERFISH/ABAQUS



Deformation due to Lorentz force for $\beta=0.666$ cavity (600MHz)



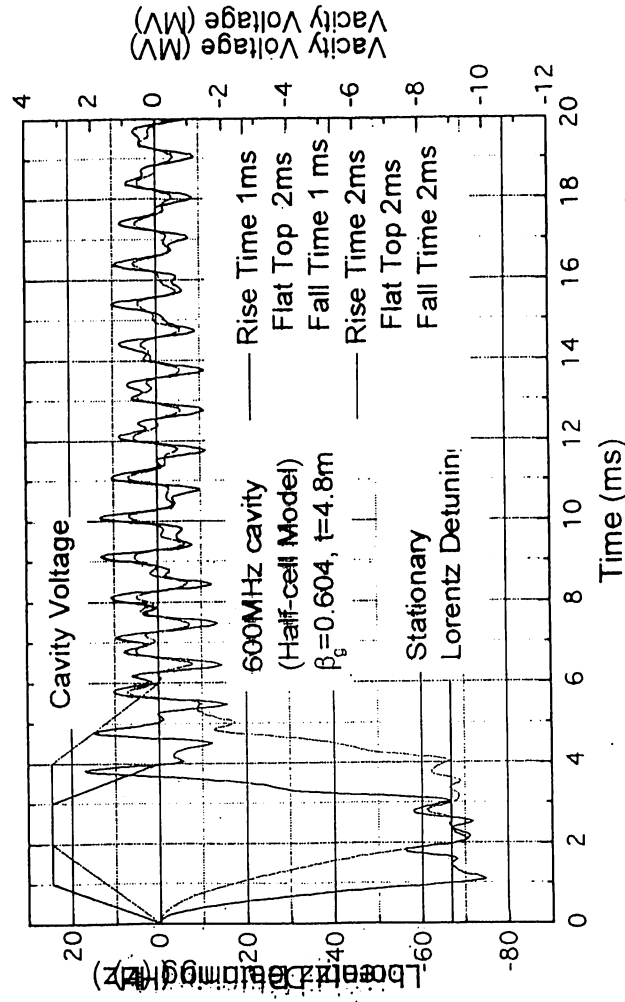
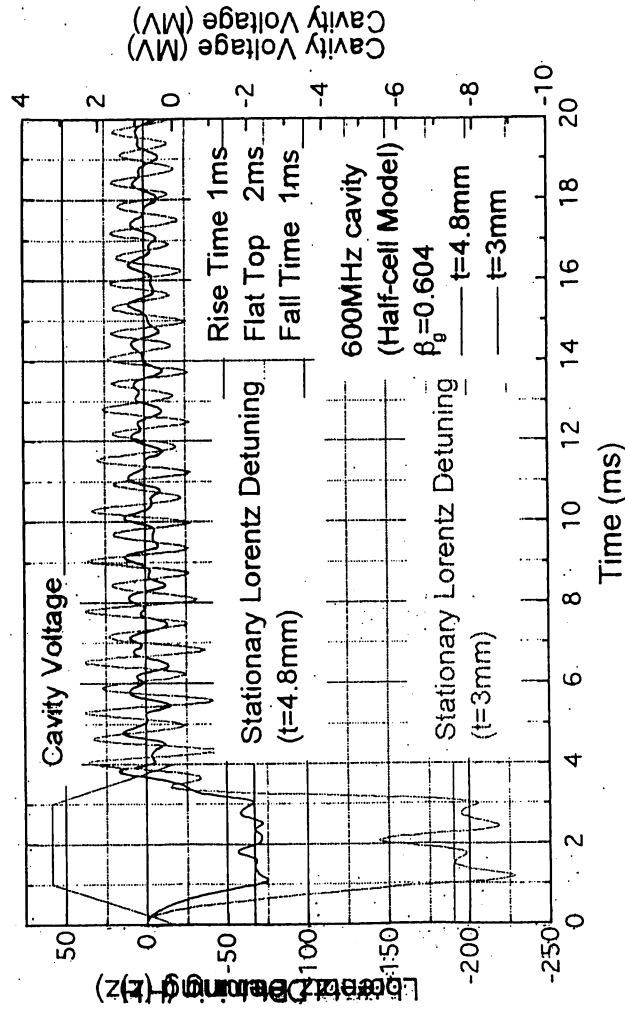
Lorentz detuning for 600MHz cavities (half cell)

パルス運転におけるローレンツデチューニングの動的挙動
空腔電場強度、位相の変動を引き起こす

・SUPERFISH/ABAQUSによる解析(半セルモデル)

・肉厚増によりデチューニング量振幅を抑制
・遅い立上り、立ち下がりにより振幅を抑制

・RF制御シミュレーションリンク
電圧振幅、位相の安定性を評価



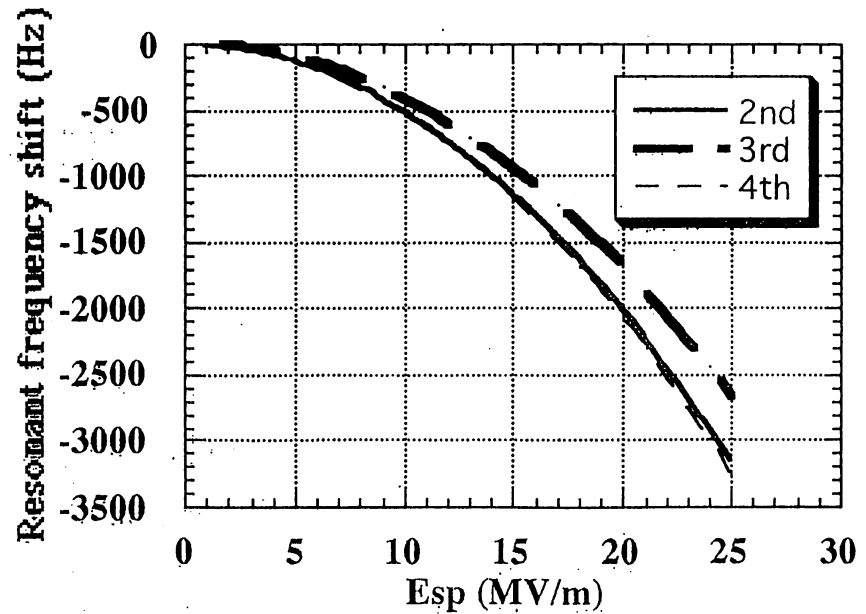
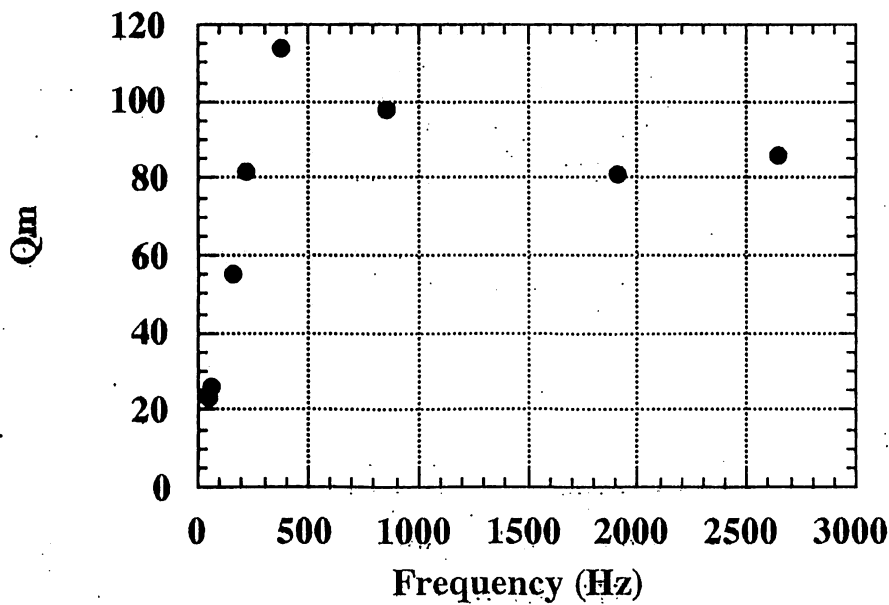
Lorentz detuning (measurement)

600 MHz, $\beta=0.805$, single cell, 4mm thickness

$$\Delta f_{measure} \approx (-4.28 \sim -5.19) E_{sp}^2$$

$$\Delta f_{cal} \approx -3.06 E_{sp}^2$$

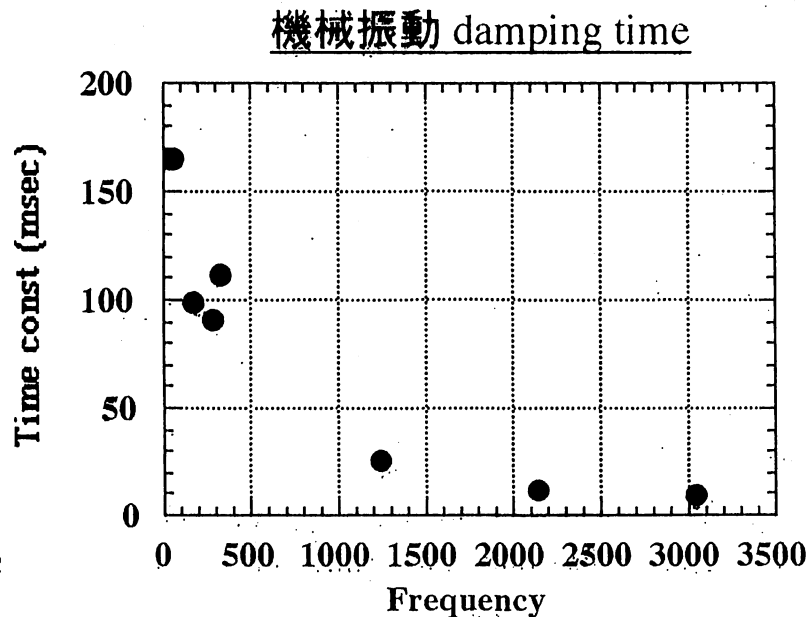
$$\Delta f_{ESS} \approx (-1 \sim -3) (E_0 T)^2$$



(from Mukugi et al., 99 linac meeting)

空洞製作法と直結する問題

- 機械的振動
 - Nbの薄肉空洞 (3 - 5 mm) と同調機構
 - 変形による共振周波数の変化
 - 空洞に所要の電場を作る過程(rise and fall)にて機械振動を励起して、Lorentz detuningを生じる
 - Beam loading 補償のずれ
 - Transient beam loading



振動が次のパルスまで持続するのか

振動の位相がパルス毎に変わるのか

コントロールの為のポイント

機械的振動

Microphonic noise

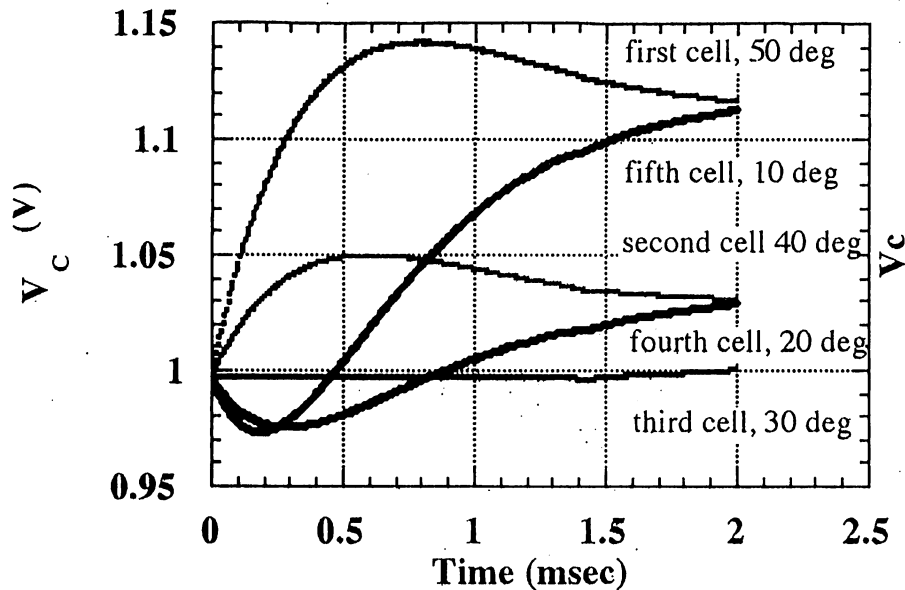
- ESS measured ± 30 Hz
 - LEP2 ± 30 Hz ----> ± 3.5 deg.
- TRISTAN measured ± 4 deg.
- LISA operation experience
 - 30 Hz, 1.5 mbar fluctuation --> ± 50 deg.
 - Improve 0.2 mbar at 250 mbar ope. ---> ± 5 deg.
 - If ± 1 deg, required $dp/p \sim 1.6 \text{ E-}4$?

JAEIの測定データは？

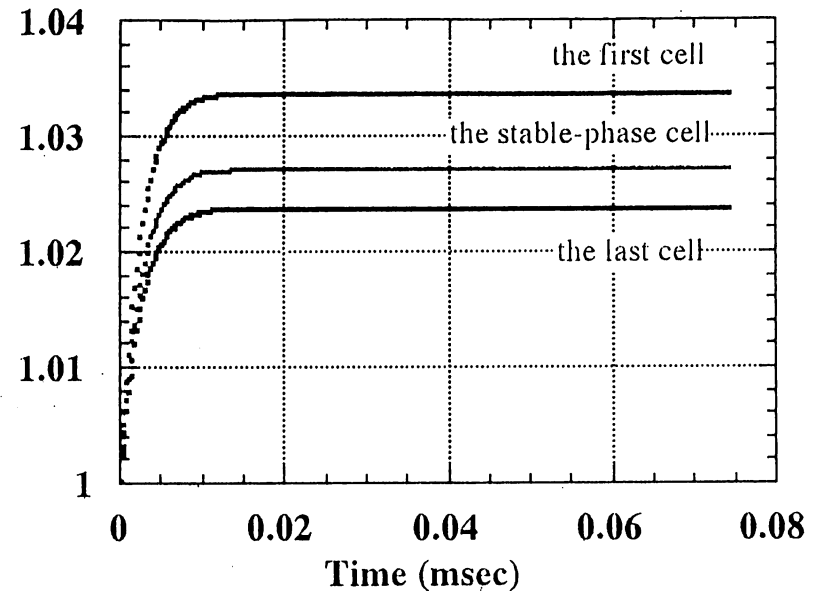
その性質は？ Random?

Transient tank field (sc vs. nc)

Be careful that there is no coupling between two adjacent cells.

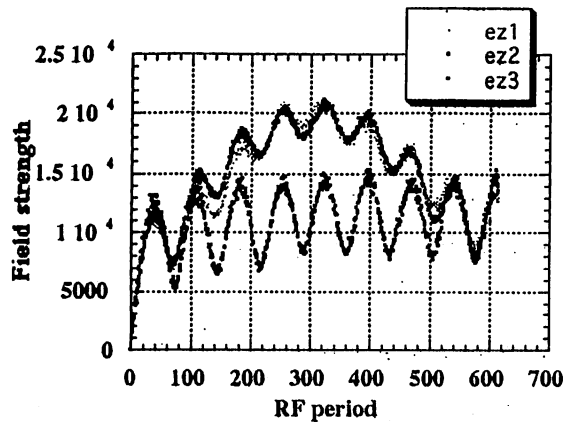


Cell-voltage variation for each cell due to beam loading in a five-cell superconducting tank. The accelerating phase angles from 58 to 10 degrees are assigned to the five cells. $Q_0 = 1 \times 10^9$, $Q_L = 9 \times 10^5$, $f_0 = 600$ MHz, cell length = 0.15 m, $R/Q = 31 \Omega$, $I = 30 \mu A$, $T_\beta = 1/f$, and $\Psi = 35$ degree. The injection beam energy is 200 MeV.

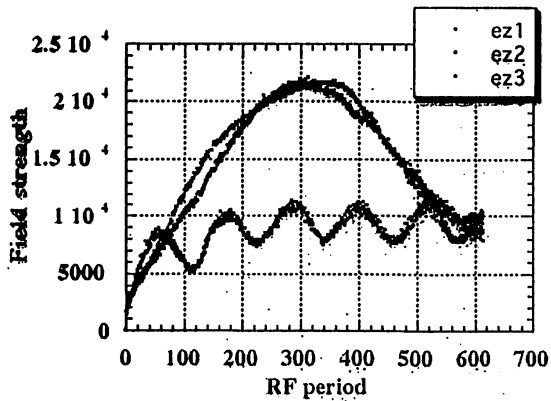


Cell-voltage variation for three kinds of cells (the first cell, the assumed average-phase cell and the last one) due to beam loading in a 36-cell normal-conducting tank. The accelerating phase angles from 37 to 26 degrees are assigned. $Q_0 = 16800$, $Q_L = 7350$, $f_0 = 805$ MHz, cell length = 0.08 m, $R/Q = 48 \Omega$, $I = 17$ mA, $T_b = 1/f$, and $\Psi = 6.3$ degree. The injection beam energy is 100 MeV. An average stable angle of 30 degrees is assumed.

Beam-induced field calculated with MAFIA

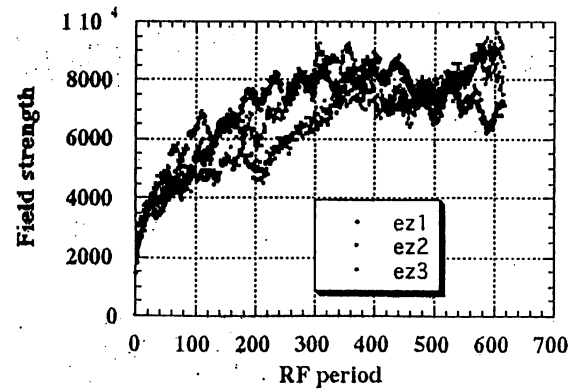


$\beta_{\text{beam}}=0.504$



$\beta_{\text{beam}}=0.53$

600 MHz, 3-cell pillbox cavity,
coupling $\sim 4\%$, $\beta_{\text{cell}}=0.52$
Monitor the induced-fields of all
modes at the mid-point of each cell.



$\beta_{\text{beam}}=0.52$

600 periods $\sim 0.2 T_f$

Number of section in SCC

| Number of section | 3 | 6 | 10 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| E_0 (MV/m) | 5.6 - 7.2 | 5.3 - 7.3 | 5.3 - 8.1 |
| ϕ_s | -20 - -51 | -24 - -46 | -28 - -42 |
| Number of tank | 64 | 64 | 62 |
| Structure length | 47.324 | 47.378 | 45.873 m |
| Total length | 141.971 | 142.134 | 137.44 m |
| Ratio of E_0 increase | 1.087 | 1.035 | 1.016 |
| Transient Lorentz detuning | 1.18 | 1.07 | 1.03 |

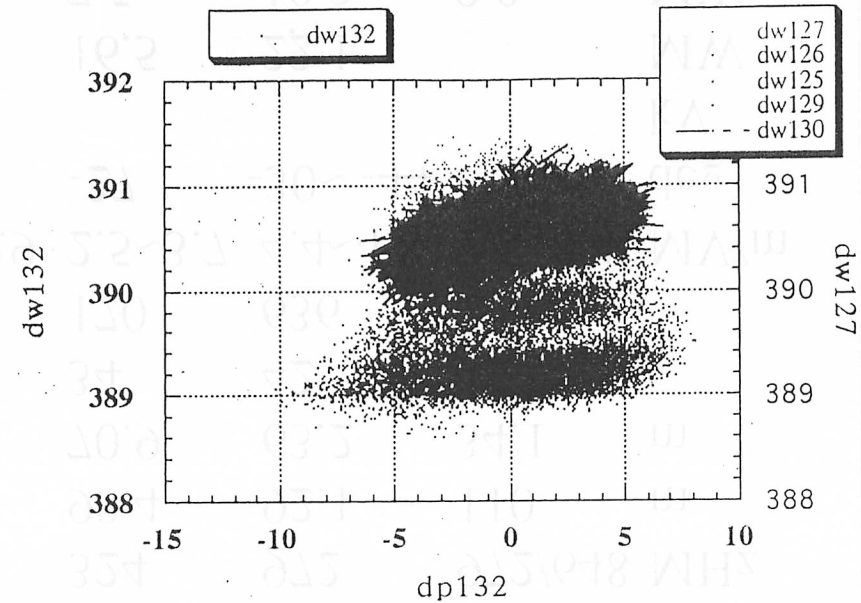
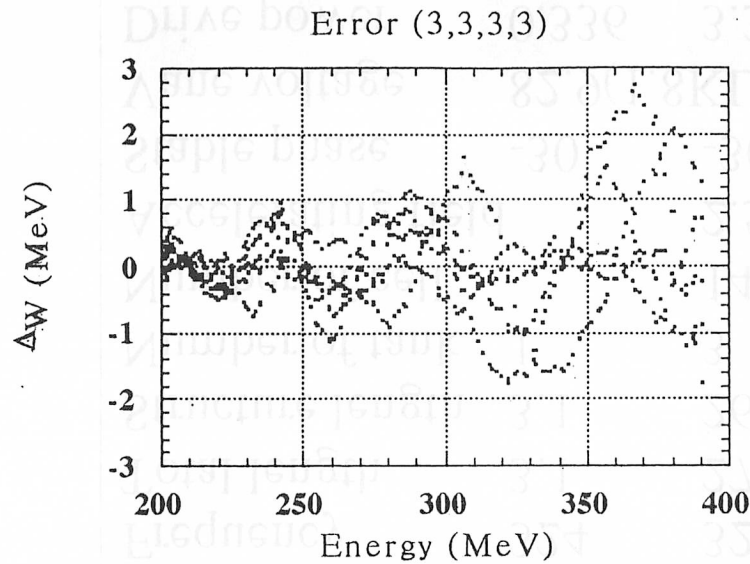
600 MHz, 200 - 400 MeV

Effects of beam-induced field

今後も解析が必要
全体設計にも影響を与える可能性

- 等価回路
- 解析計算
 - Ikegami
- Pspice
 - Ouchi et al
- MAFIA
- ビーム実験が必要

Effects of field errors



電場強度エラー（セル及びタンク双方に $\pm 3\%$ ）と位相エラー（セル及びタンク双方に ± 3 度）の5種類のエラー分布に対する平均エネルギーの変化。

こうしたエラーがビームパルス内でランダムに起こる時には、最終出力のdebuncher, stabilizerによるエネルギー幅補正が困難となる

RFQ, DTL, SDTL, ACS and SCC parameters

| | RFQ | DTL | SDTL | ACS | SCC | |
|--------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|------|
| Output energy | 3 | 50 | 200 | 404 | 600 | MeV |
| Frequency | 324 | 324 | 324 | 972 | 972/648 | MHz |
| Total length | 3.1 | 27.1 | 98.4 | 92.1 | 110 | m |
| Structure length | 3.1 | 26.7 | 70.9 | 63.2 | 34.1 | m |
| Number of tank | 1 | 3 | 34 | 42 | 42 | |
| Number of cell | | 146 | 170 | 636 | 294 | |
| Accelerating field | | 2.5~2.9 | 2.5~3.7 | 4.4~4.8 | 7.5~8.4 | MV/m |
| Stable phase | -30 | -30 | -27 | -30~-44 | | deg |
| Vane voltage | 82.9(1.8KL) | | | | | kV |
| Drive power | 0.336 | 3.3 | 16.5 | 22.1 | | MW |
| Beam power | 0.148 | 2.4 | 7.5 | 10.2 | 9.8 | MW |
| Total power | 0.484 | 5.7 | 24.0 | 32.3 | | MW |

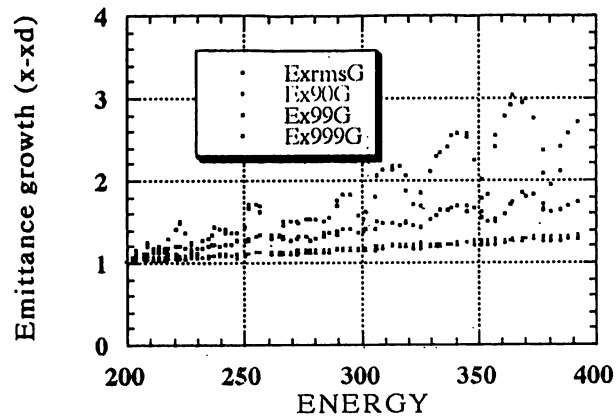
$I_{peak}=50\text{mA}$, beam pulse length 500 μsec

Repetition frequency 25/50 Hz

KL=Kilpatrick limit

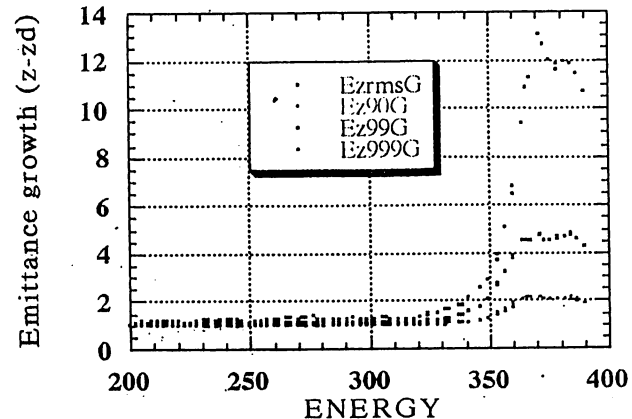
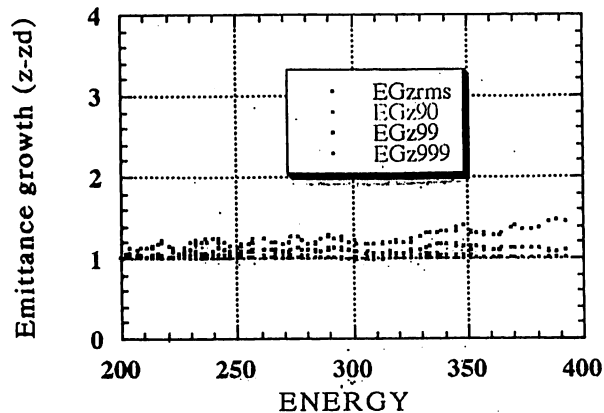
Effects of field errors (EM growth)

No errors



- LINSAC code
- 648 MHz, 200 - 400 MeV
- 60 mA
- Rms, 90,99,99.9% emittance growth

Cell field $\pm 3\%$ Tank field $\pm 3\%$
 Cell phase $\pm 3\%$ Tank phase $\pm 3\%$



リニアック今後の課題

- Ion Source: 要求仕様の達成 (18 --> 50 mA)
- RFQ: 30-mA design の確認、50-mA design
 - 縦ハロー
- DTL: 新製作技術の確認
 - 鍍金法、四極磁石
- CCL: structure type 選定、基本デザイン
 - ACS ならば、基礎製作法は確立
- SCC: パルス運転に伴う問題の解決
- Sub section のデザイン (matching, beam transport etc.)
- Monitor, control and tuning system design

Summary

- 常伝導加速管 (up to 400 MeV)
 - 最近の要求仕様の変更(50mA)により、更に開発が必要、早まった
 - Ion source & RFQ
 - First stage に建設となった為に
 - CCL デザイン及び製作を急ぐ必要
 - 60-Mev リニアックの建設運転により、600-MeVリニアックの望ましい運転の基礎研究を行う。
 - 低エネルギー領域のビームの性質(IS, RFQ, MEBT, DTL, SDTL)
 - Chopped beam system
 - Monitor, tuning & control system
 - RF system
- 超伝導加速管
 - パルス運転にともなう問題を解決する必要
 - 加速管製作&構造、beam dynamics デザイン、高周波源、コントロールを総合的に進め、ビームによる実証試験を折り込んで、開発研究を早急に進める。
 - 基本的データの早期収集が問題解決の近道