

RCNPサイクロトロン施設

入射器更新の現状 II

— フラットトップ加速システムの開発 —

大阪大学 核物理研究センター

福田光宏、畑中吉治、斎藤高嶺、田村仁志、

依田哲彦、木林満、岡村弘之、民井淳、

酒見泰寛、永山啓一、浦城道男、森信俊平、

後藤英樹、稲田洋司、魚梁博之、大江洋一、増田欽哉、
矢富一慎、力石将樹、佐田野圭吾、羽田 知史、斎藤典亨

Contents

1. 目的
2. フラットトップ加速の原理
3. RCNP AVFサイクロトロン¹のフラットトップ加速システムの特長と性能
4. フラットトップ加速ビーム開発の現状
 - ・ 53MeV 陽子 (300MeV @Ring): 第5高調波

まとめ

High Quality Beam at RCNP Cyclotron Facility

Energy Resolution

$\Delta E/E \sim 0.005\%$

Ring Cyclotron

K=400 MeV

$\Delta E/E \sim 0.01\%$

Since 1992



Stability of Magnetic Field

$\Delta B/B < 0.001\%$

Upgraded recently



AVF Cyclotron

K=140 MeV

$\Delta E/E < 0.1\%$

Since 1973

Grand Raiden



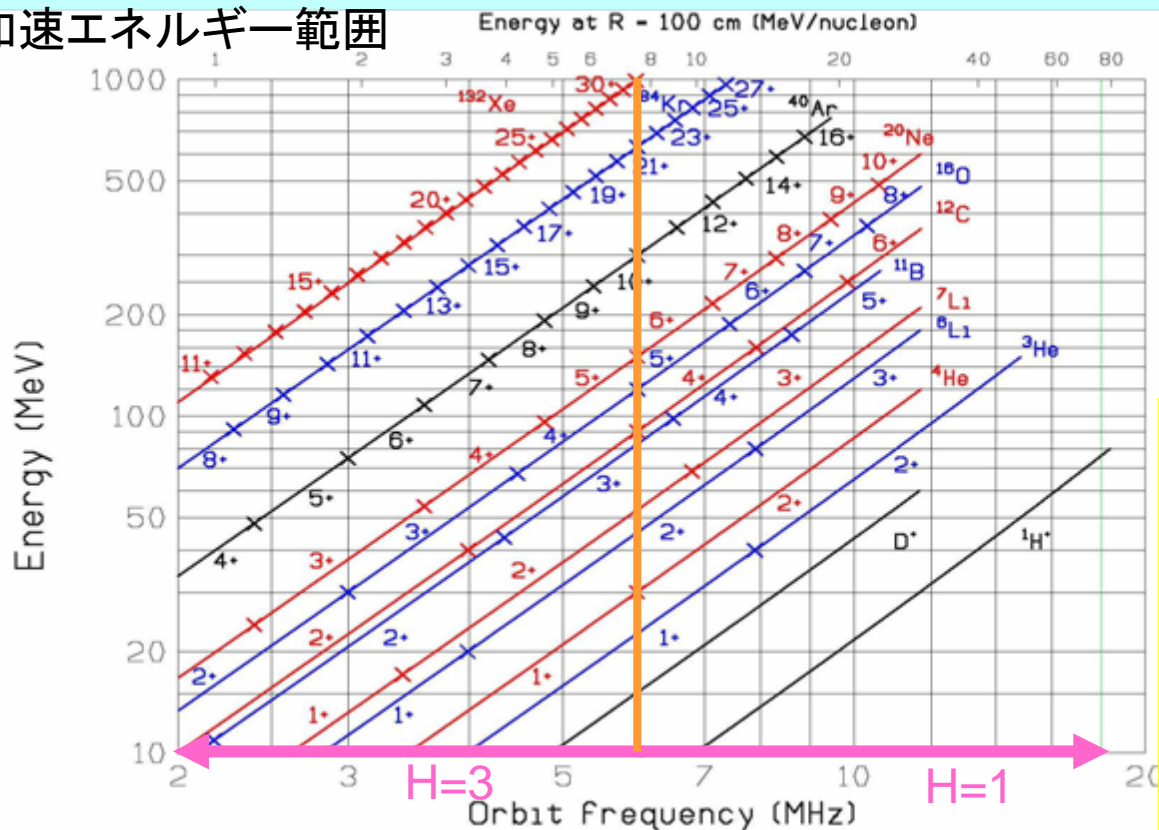
1. 目的

“質の高いビームをより多く！！”

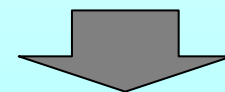
- ・エネルギー幅 $\Delta E/E \sim 10^{-4}$
- ・高安定性(ビーム強度、軌道、位相、etc.)

- ・ビーム電流～数 μA
- ・高輝度化

加速エネルギー範囲



AVFサイクロトロンへの
フラットトップ加速システム
の導入



- ・AVFサイクロトロン(入射器)の引出ビームの質と量を向上
- ・リングサイクロトロンへの入射効率を高め、良質なビームの強度を増強

AVFサイクロトロンへのアップグレード

項目	主な内容
RF系	<ul style="list-style-type: none">・フラットトップ加速システムの開発・ディー電極の更新・終段真空管アンプと電源の更新
イオン源系	<ul style="list-style-type: none">・18GHz超伝導ECRイオン源の開発・偏極Li³⁺イオン源の開発
ビーム輸送系	<ul style="list-style-type: none">・AVFサイクロトロンからの分析ビームライン (AVFサイクロトロンからリングサイクロトロン実験室へのバイパスビームラインも兼用) を新設
制御系	<ul style="list-style-type: none">・PCベースの制御システムに更新
電源系	<ul style="list-style-type: none">・トリムコイル電源等の更新

2. フラットトップ加速の原理

●高調波を用いて加速粒子のエネルギー利得分布を平坦化

➡ 加速エネルギーを均一化

【リングサイクロトロン】

- ・独立した第3高調波加速空洞によりエネルギー利得を補正

PSI、RCNP、NAC

【AVFサイクロトロン】

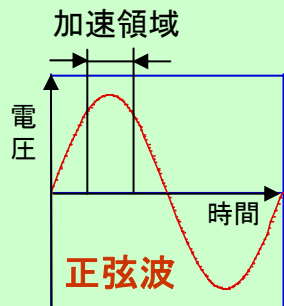
- ・基本波に高調波を重畳した電圧波形を用いて加速

NAC、RIKEN、JAEA、RCNP

フラットトップ加速電圧波形とエネルギー幅

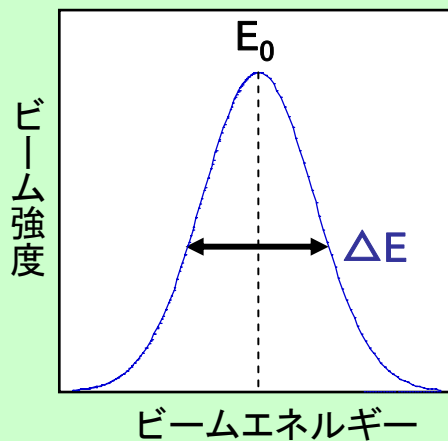
基本波加

●加速電圧波



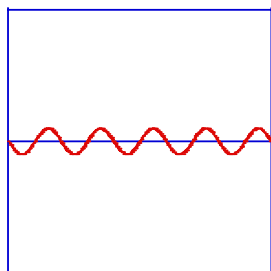
●ビームエネルギー

$$\Delta E/E_0 = 10^{-3}$$



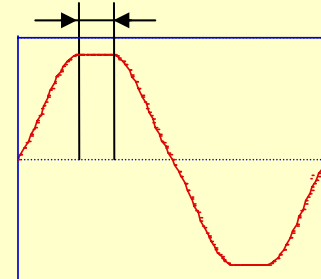
加速電圧波形の整

高調波を重畳



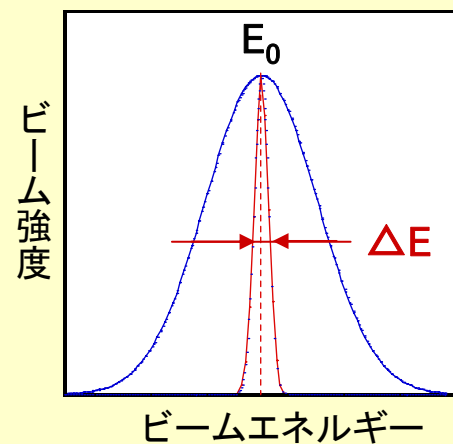
フラットトップ加

均一化



フラットトップ電圧波形

$$\Delta E/E_0 = 10^{-4}$$



1ターン当たりのエネルギー利得と高調波電圧比

●Single Deeの場合

$$E_{gain} = 2N_{dee}Q \left[V_1 \sin\left(\frac{\theta_{dee}}{2}h\right) \cos\phi + V_k \sin\left(\frac{\theta_{dee}}{2}hk\right) \cos k(\phi + \alpha) \right]$$

N_{dee} : Number of Dee

θ_{dee} : Span angle of Dee

Q: Charge state

V_1 : Fundamental voltage

V_k : k-th harmonic voltage

h: Acceleration harmonics

α : Phase offset of the k-th harmonics

$\theta_{dee}=180^\circ$ のとき、

$$E_{gain} = 2Q \left[V_1 \sin\left(\frac{\pi}{2}h\right) \cos\phi + V_k \sin\left(\frac{\pi}{2}hk\right) \cos k(\phi + \alpha) \right]$$

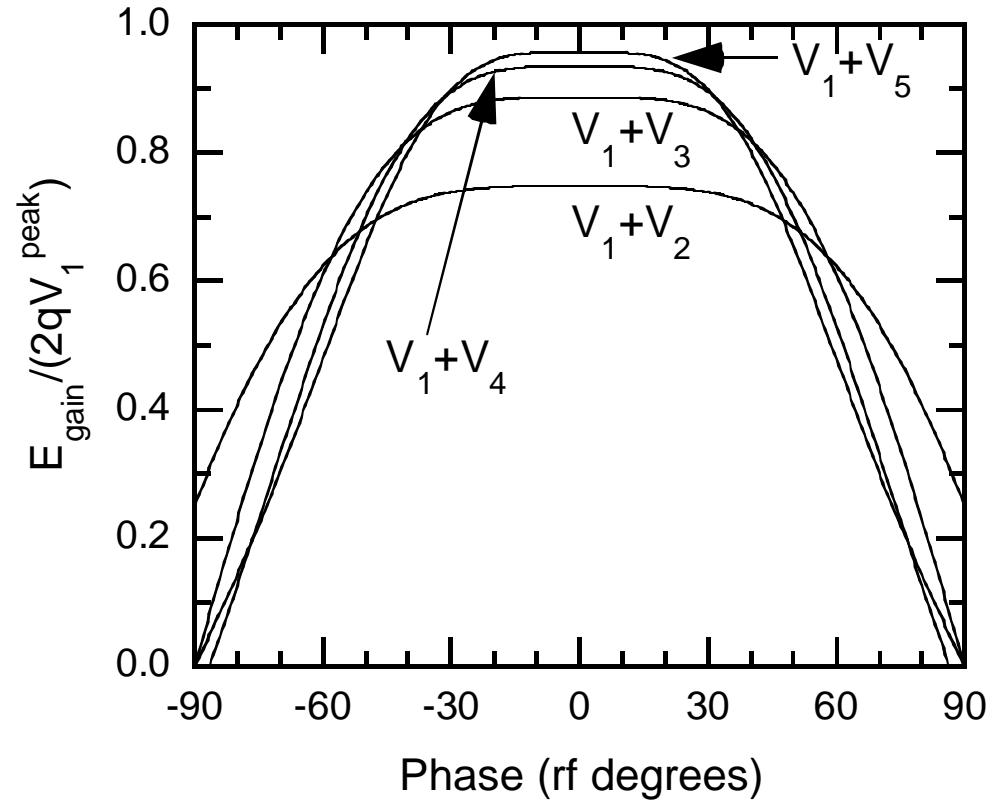
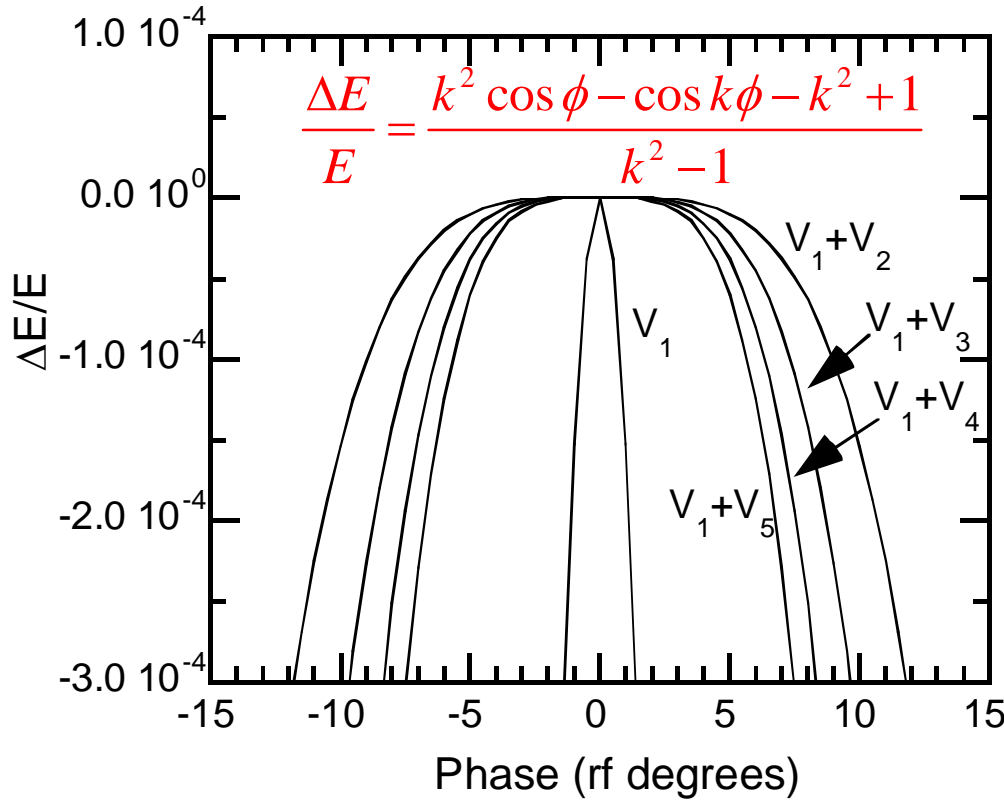
フラットトップ波形の条件: $\frac{d^2E}{d\phi^2} = 0$ at $\phi = 0$



k倍波の電圧比

$$\frac{V_k}{V_1} = \frac{1}{k^2}$$

フラットトップ加速のエネルギー利得分布



重畳する高調波の次数が上がると...

- ・フラットな位相領域は狭くなる ➡ ビーム位相幅制御と等時性磁場生成の高精度化
- ・必要な高調波電圧は小さくなる ➡ 省パワー、FT空洞のコンパクト化

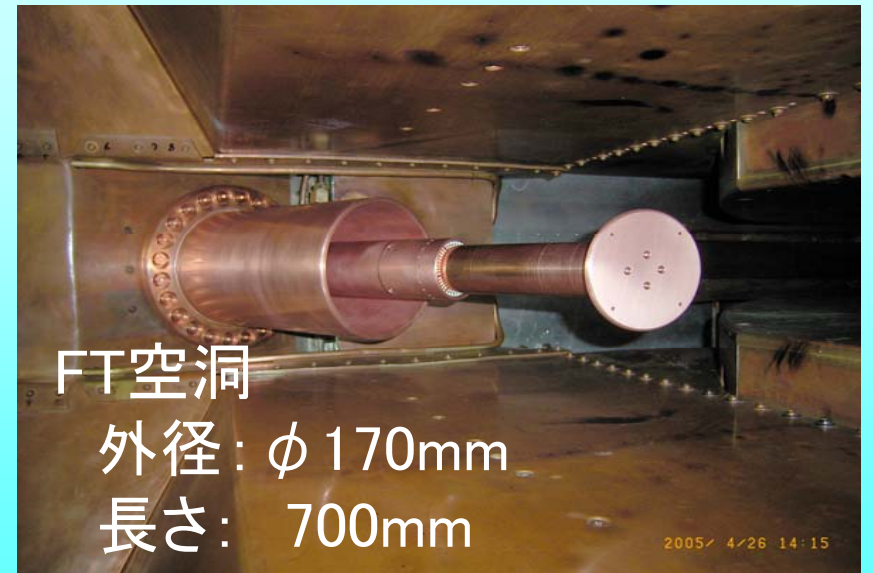
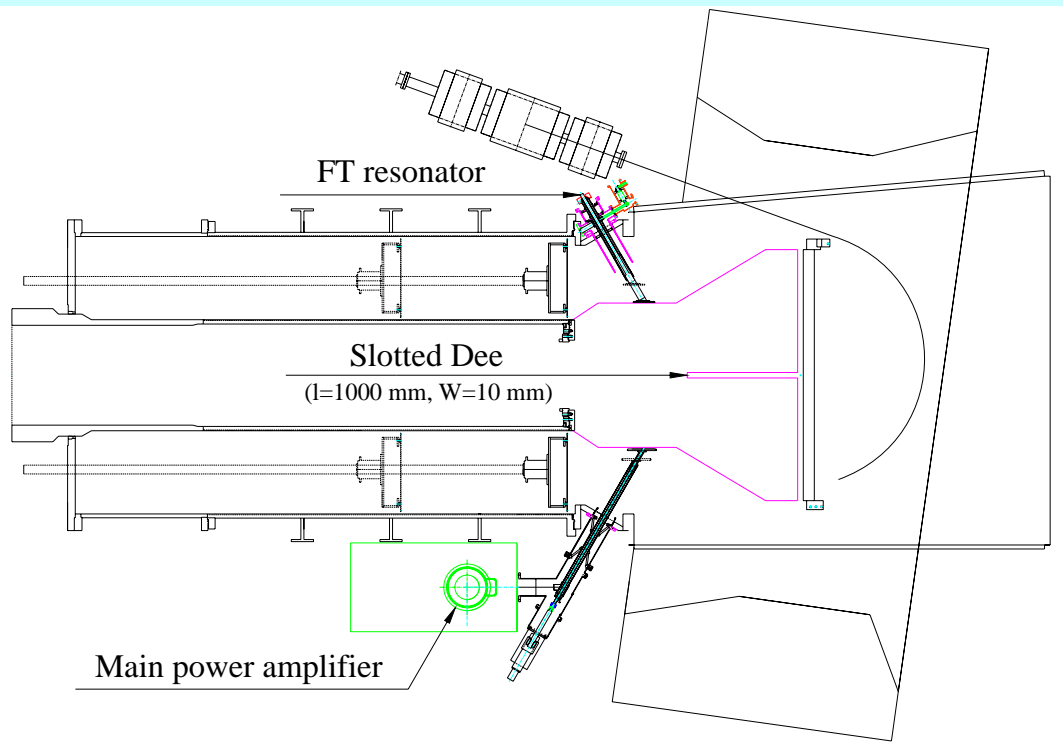
M. Fukuda, et al., RSI 74(2003)2293

3. RCNP AVFサイクロトロンフラットトップ加速システムの特長と性能

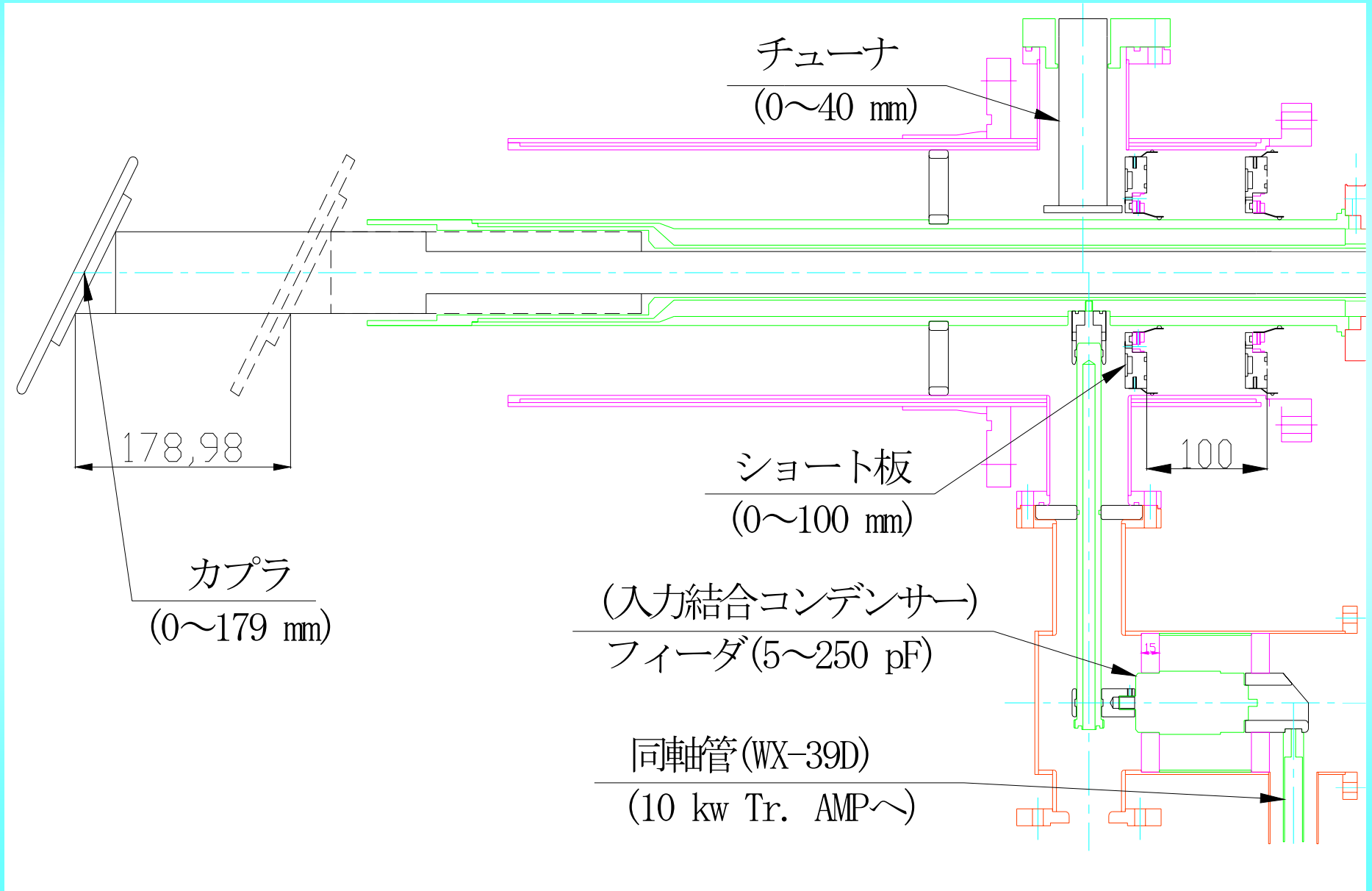
●特長

- ・高調波周波数 50~90MHz
- ・第5、第7、第9高調波を基本波 (6~18MHz)に重畳(世界初)

※第7、第9高調波は省パワーの点で優れている: 高調波電圧~数百V!!

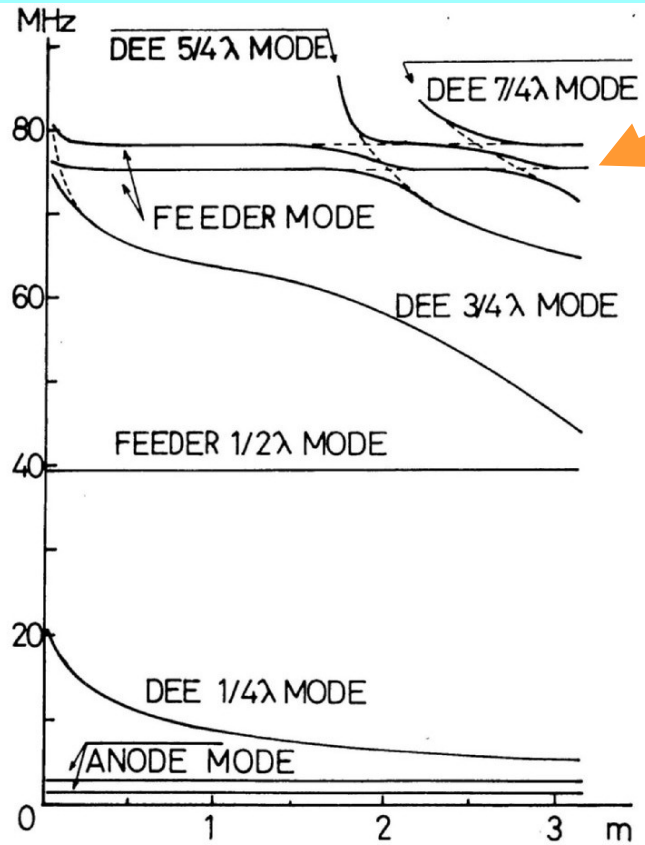


フラットトップ加速用高調波空洞の構造とパラメータ

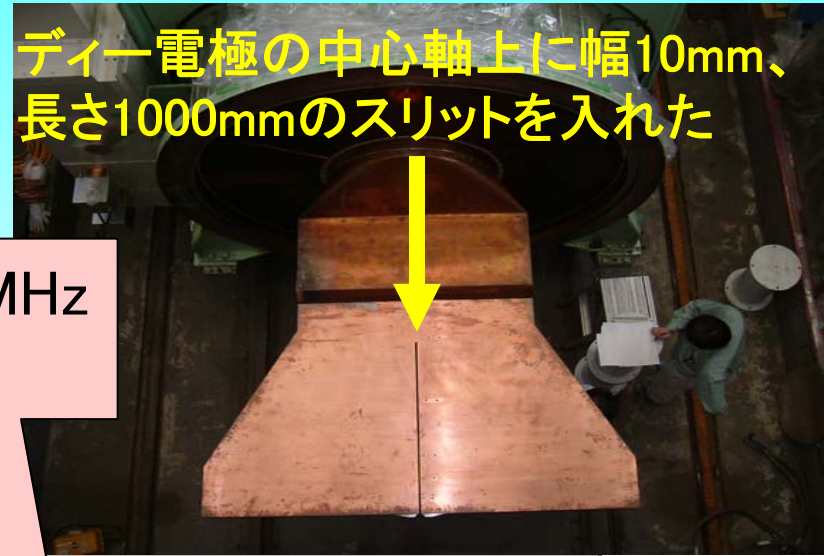


横方向の共振モードの回避

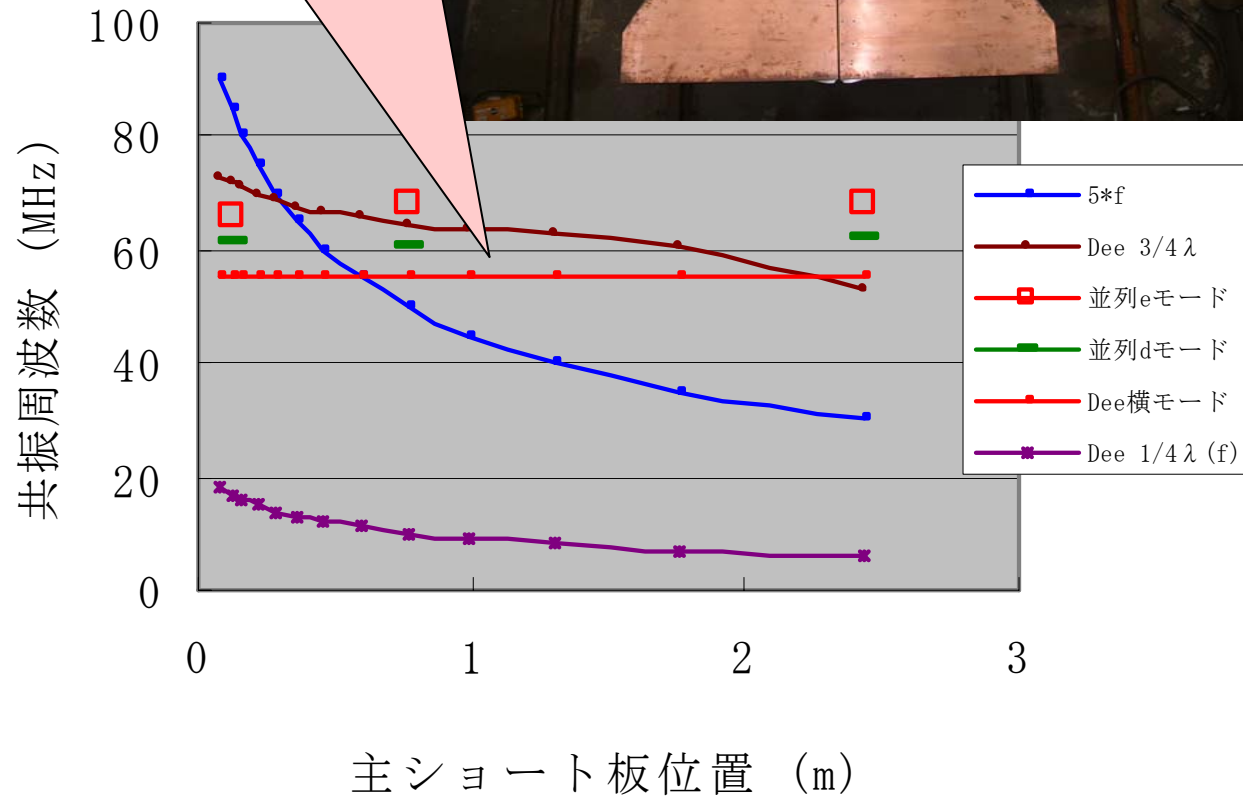
Originalの共振モード



ディー電極の中心軸上に幅10mm、長さ1000mmのスリットを入れた



76.4MHzから55MHz
付近に移動

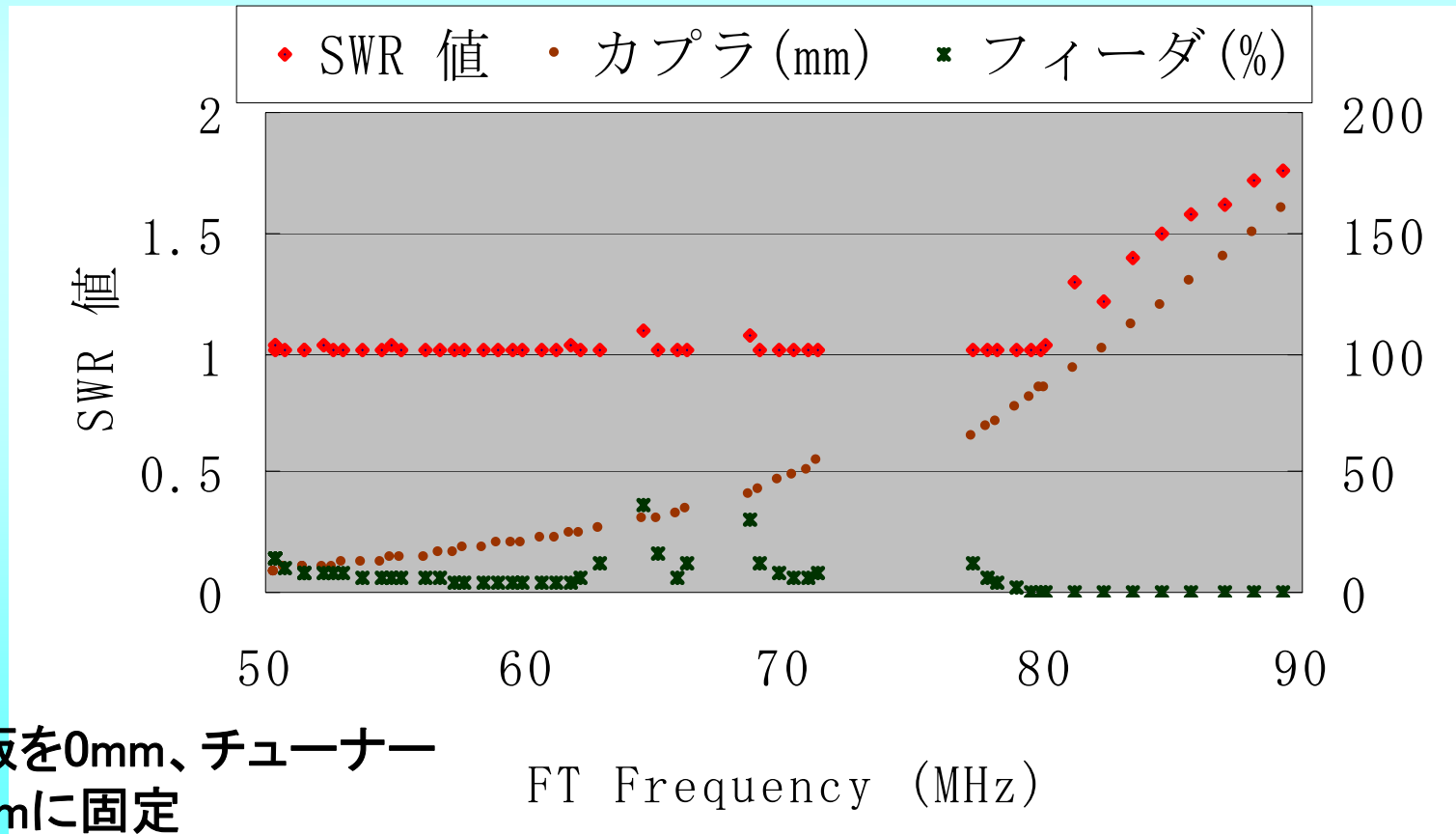


主ショート板位置 (m)

ローレベル性能試験結果

●共振周波数

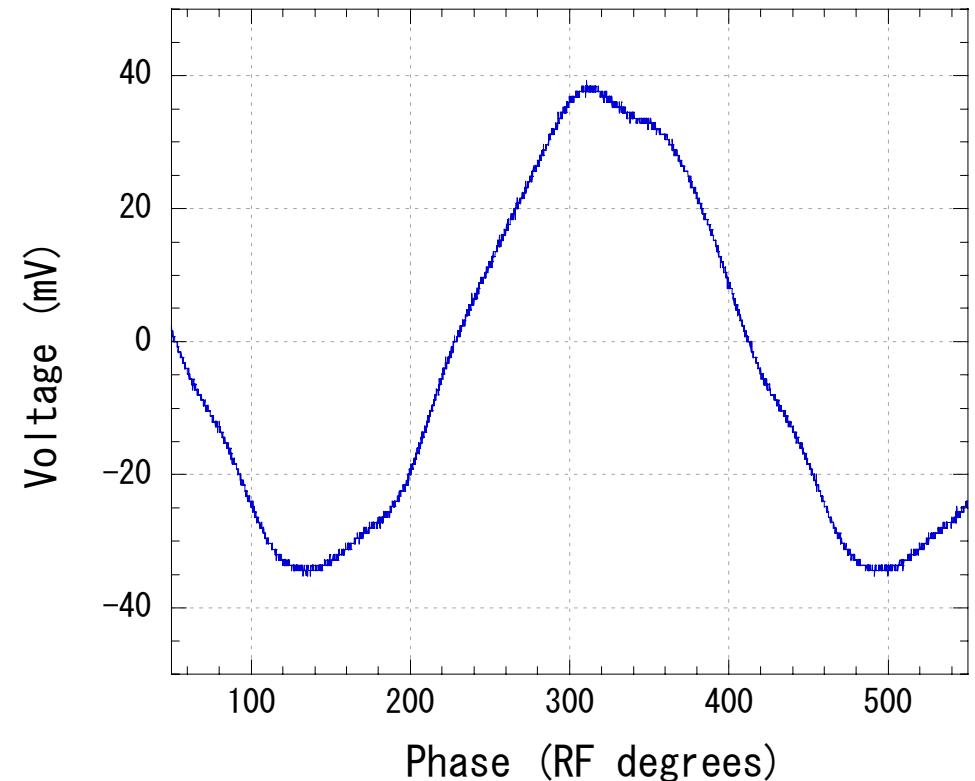
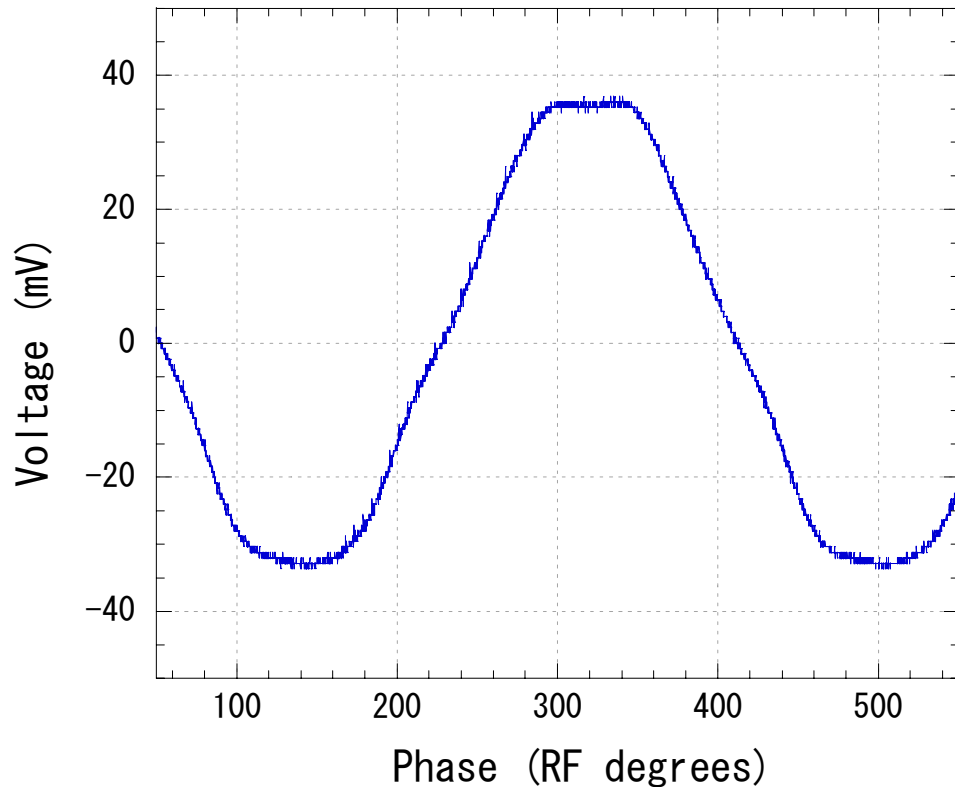
- ・50～80MHzでインピーダンスがほぼ 50Ω 、 0° (SWR= 1.0)にマッチング
- ・63～77 MHzでの寄生共振モードとの干渉、80MHz以上でのミスマッチが懸念されるが、対応策は検討中



フラットトップ加速電圧のPickup信号波形

H⁺ : 53.3 MeV @ AVF Cyclotron (300 MeV @ Ring Cyclotron)

第5高調波 77.084 MHz



4. フラットトップ加速ビーム開発

これまでに実施したパワー試験の条件

粒子	エネルギー(MeV)		AVF 基本波周波数 (MHz)	高調波	
	Ring	AVF		次数	周波数(MHz)
4He	400	87.14	10.144018	5	50.72009
				7	71.008126
3He	420	87.81	11.65007	5	58.25035
d	80	18.73	6.75	9	60.75
pol.D	200	43.6	10.11632	5	50.5816
p	200	39.32	13.375664	5	66.87832
p	250	46.7	14.496449	5	72.482245
p	300	53.3	15.416773	5	77.083865

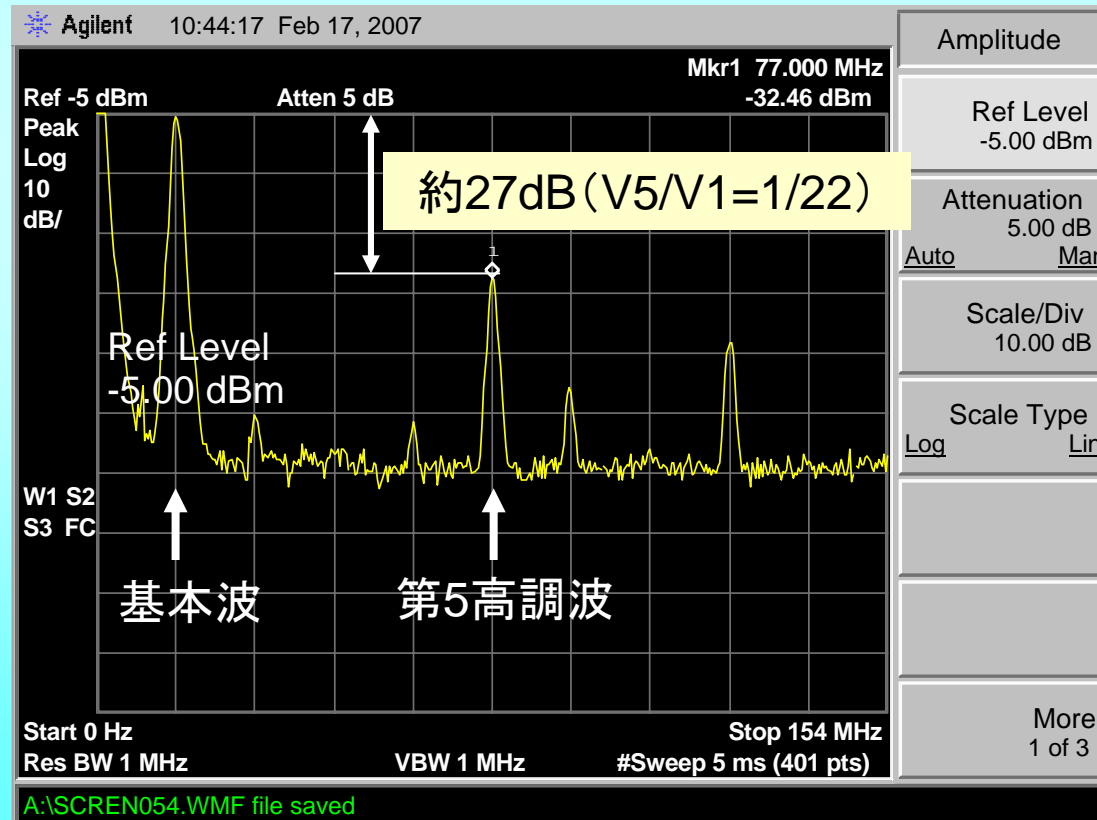
※  はビーム開発中

a) 53MeV 陽子 (300MeV @ Ring) : 第5高調波

Proton : 53 MeV @ AVF Cyclotron (300 MeV @ Ring Cyclotron)

- ・基本波: $f_1 = 15.417 \text{ MHz}$ $V_1 \doteq 42 \text{ kV}$
- ・5倍波: $f_5 = 77.084 \text{ MHz}$

ピックアップ信号の周波数分析

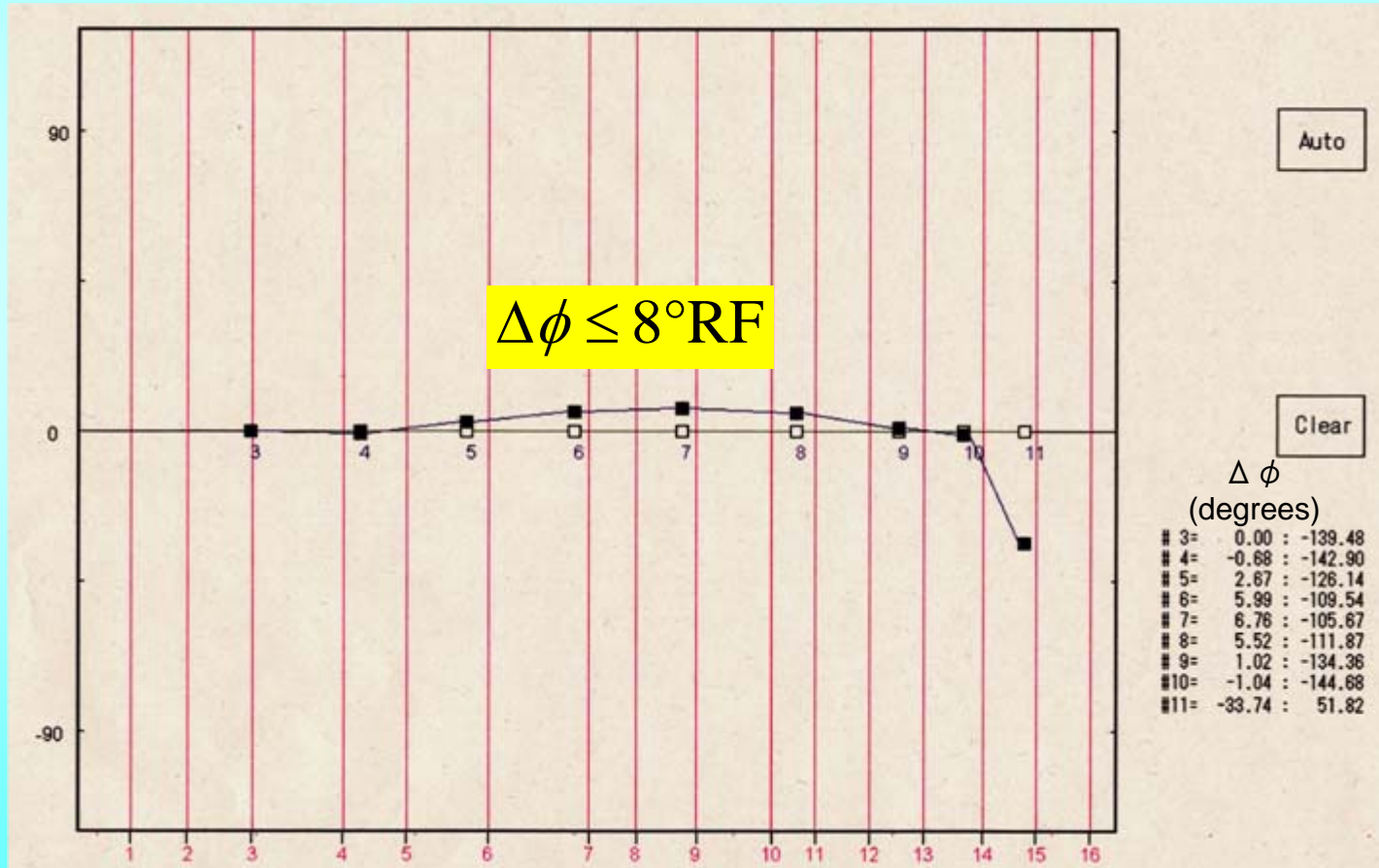


53 MeV Proton: 等時性磁場の生成

目標 $\frac{\Delta E}{E} \leq 0.02\% FWHM$ \blacktriangleright ビーム位相変化許容幅 $\Delta\phi \leq \pm 8^\circ RF$

● 位相プローブで測定した半径方向のビーム位相の変化

RF位相
(degrees)

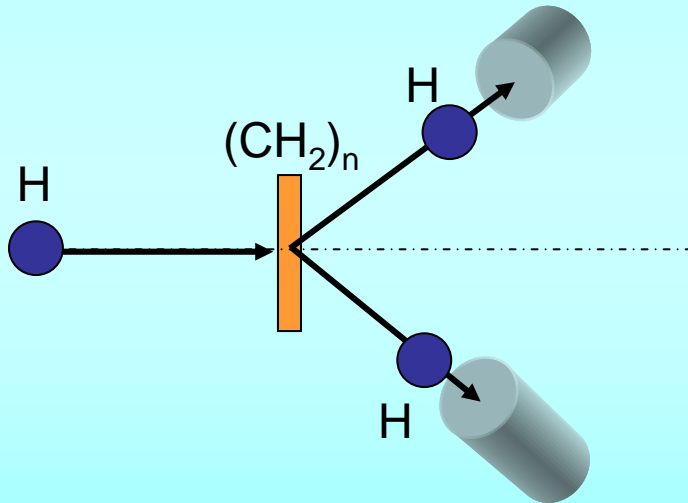


半径方向のトリムコイルの位置

53 MeV Proton: ビーム位相幅

【測定法】

弾性散乱陽子と反跳
水素を同時測定



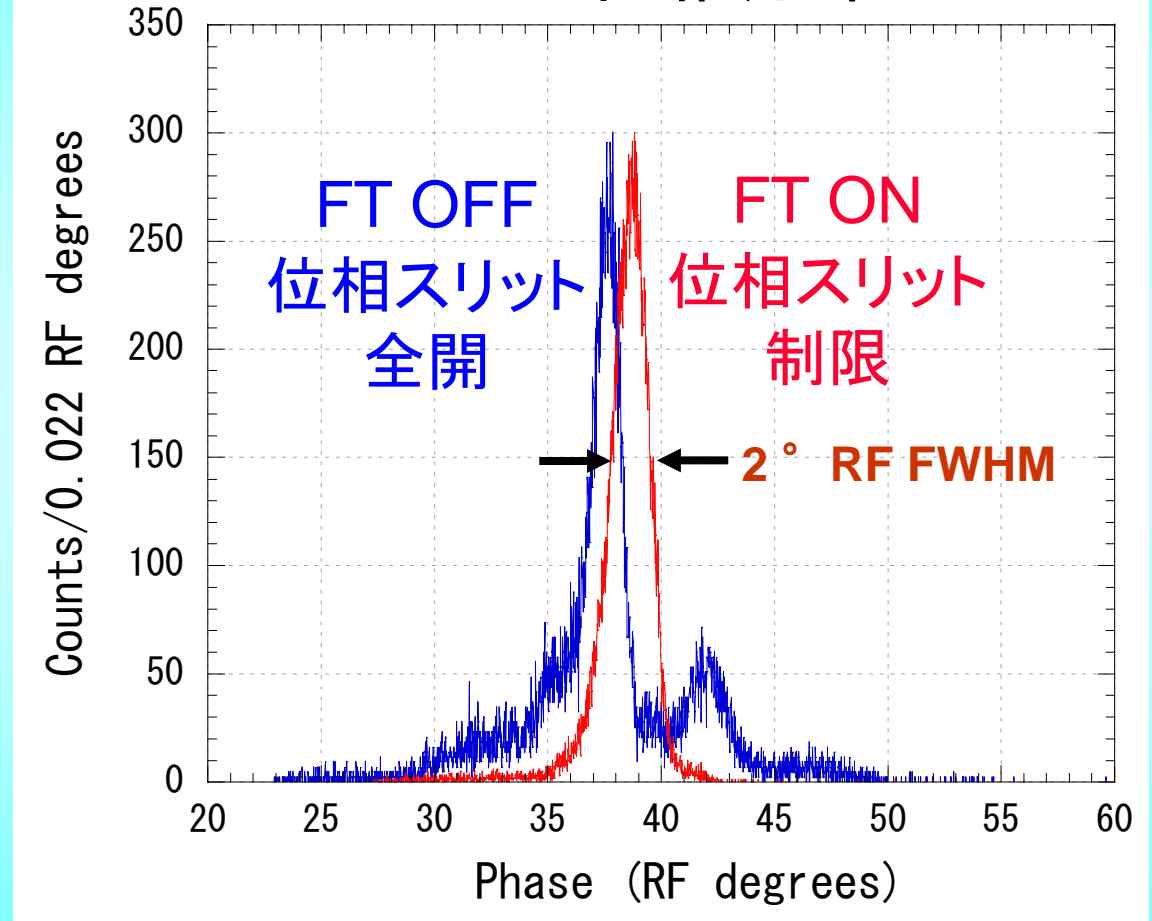
目標

$$\frac{\Delta E}{E} \leq 0.02\% \text{ FWHM}$$



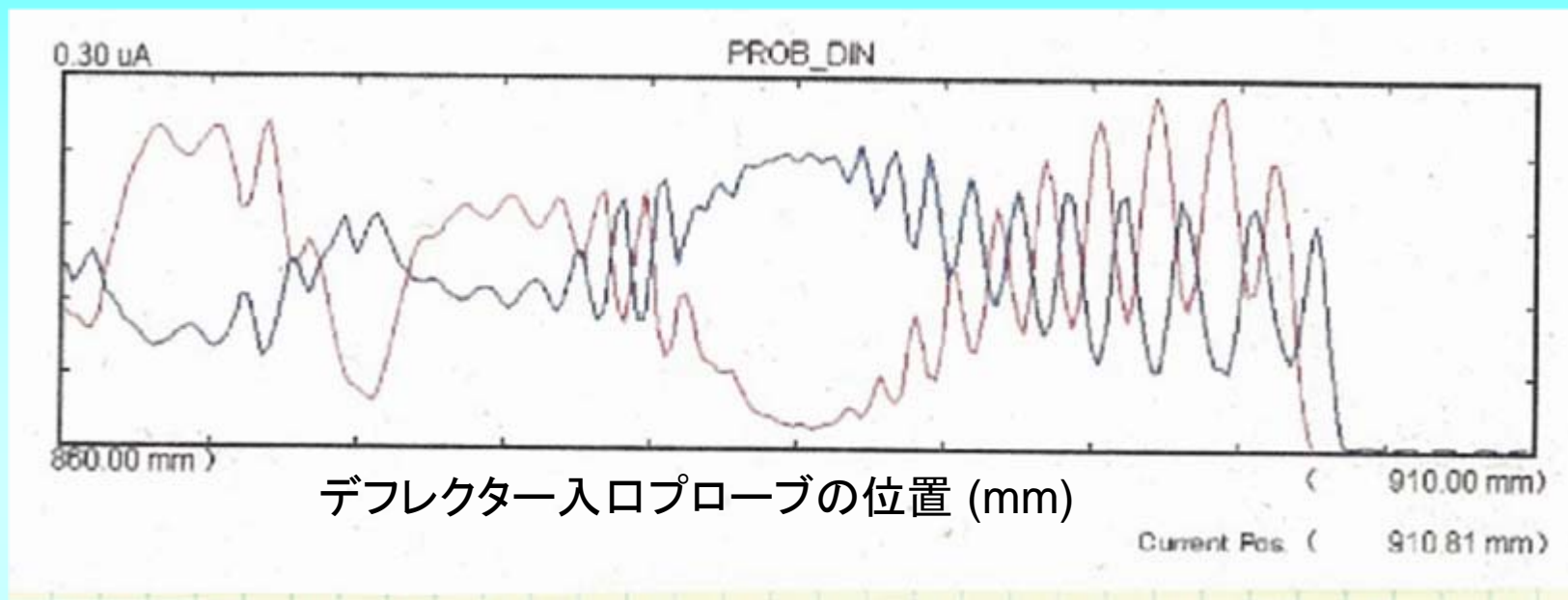
ビーム位相許容幅 $|\Delta\phi| \leq 8^\circ$ RFを満足

ビーム位相分布

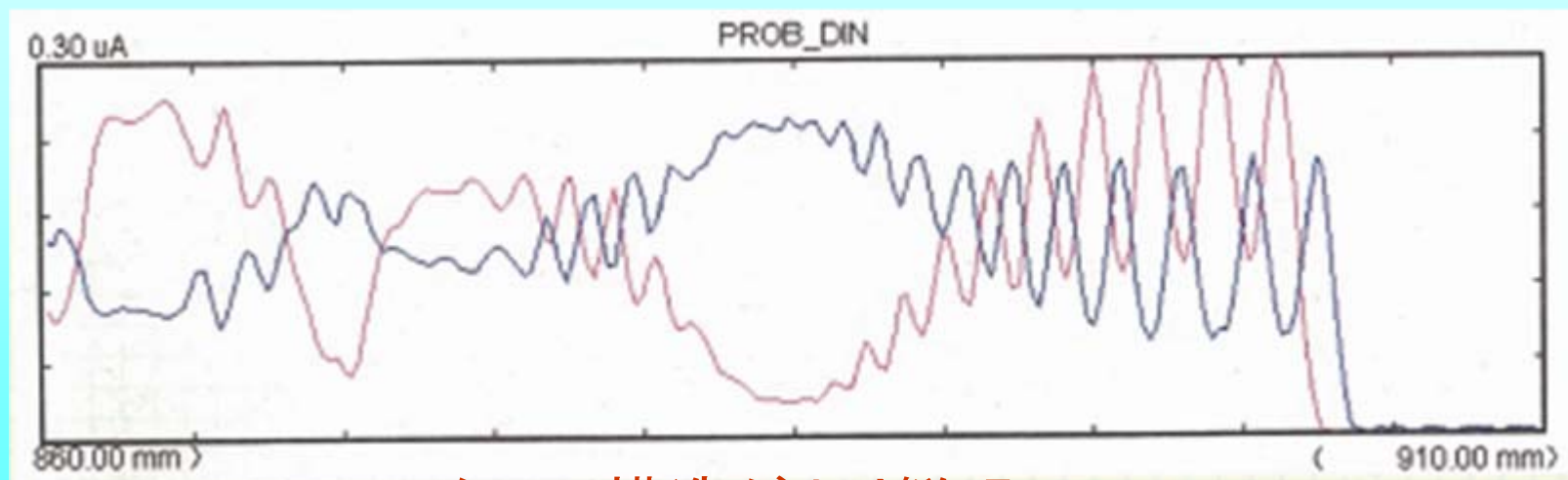


53 MeV Proton: 引出前のターンパターン

基本波加速
(FT OFF)



フラットトップ
加速
(FT ON)

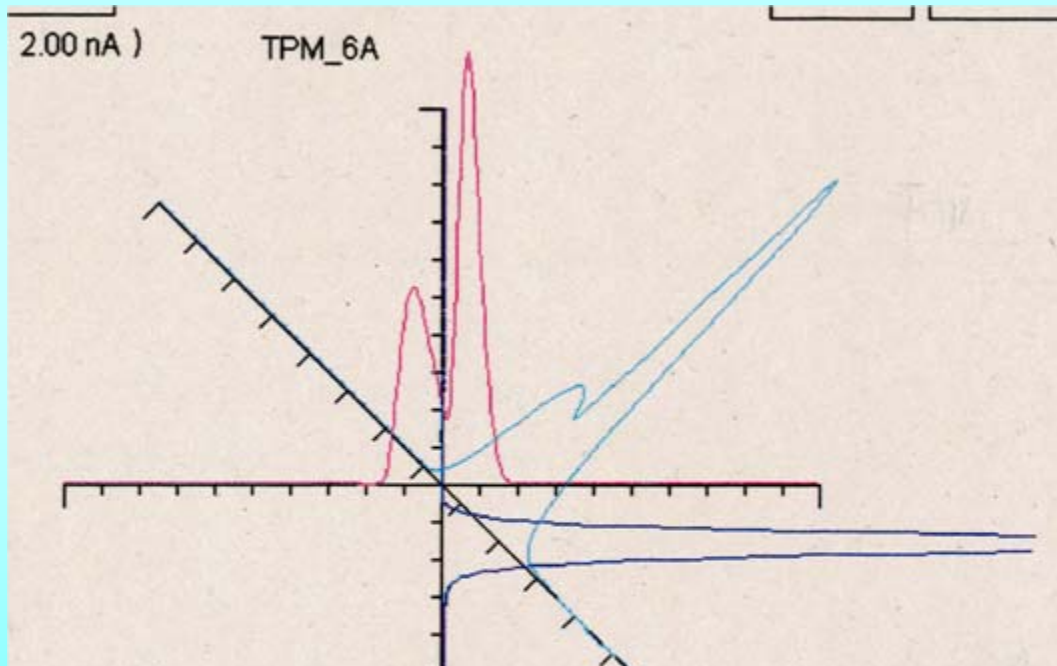


ターン構造がより鮮明に

53 MeV Proton: シングルターン引き出し

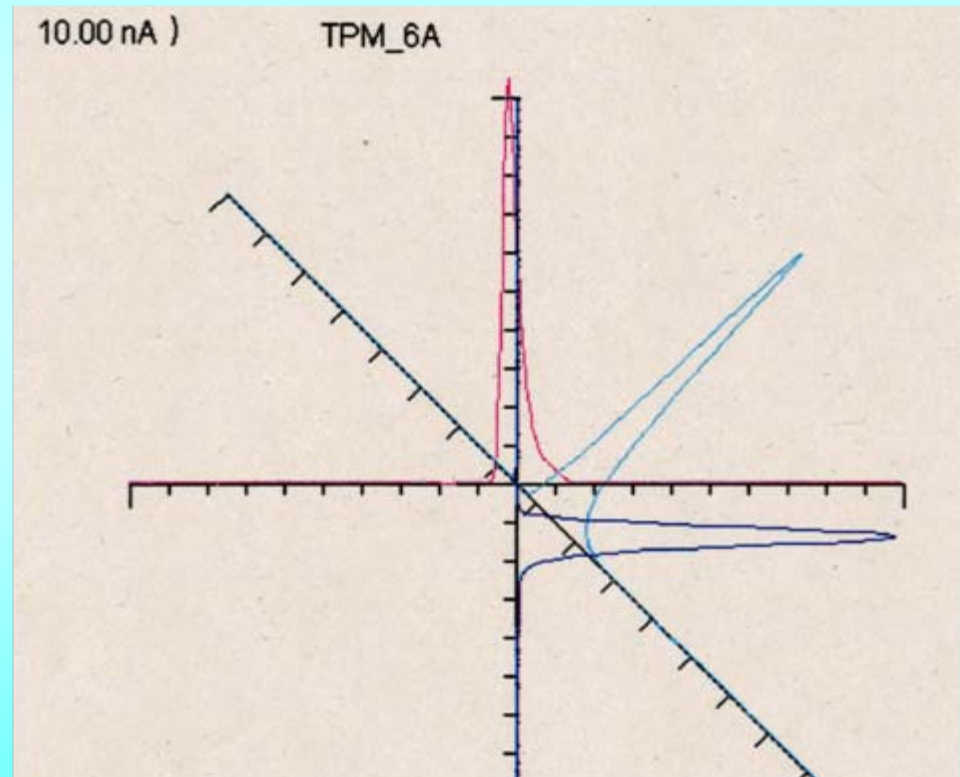
- 分析コースに分散モードで輸送し、TPM-6Aでビームプロファイルを計測
フラットトップ加速 (FT ON)

調整が悪いと二山が出現



2ターン引き出し！？
一山のピーク幅は狭い

電圧比 V_5/V_1 を調整すると一山に



シングルターン引き出し！？

53 MeV Proton: エミッタンス

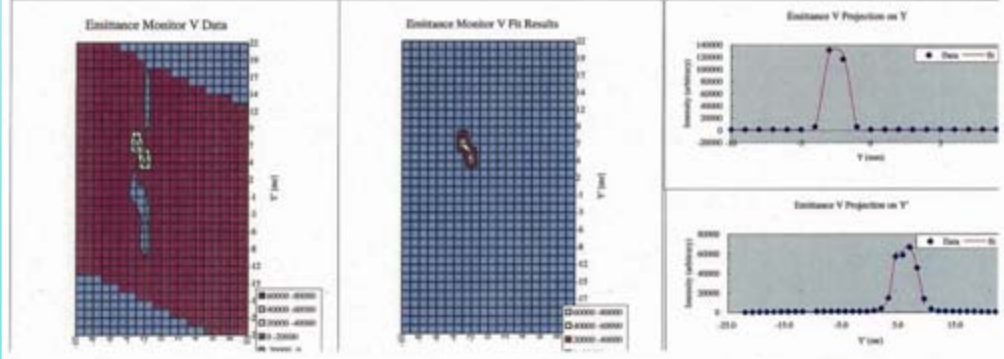
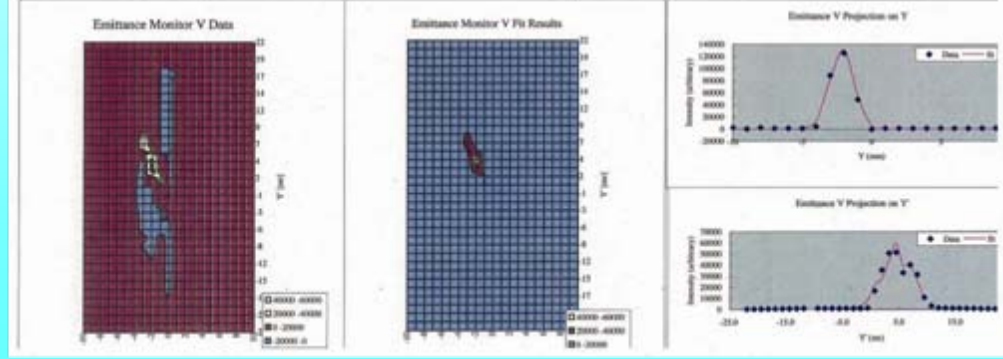
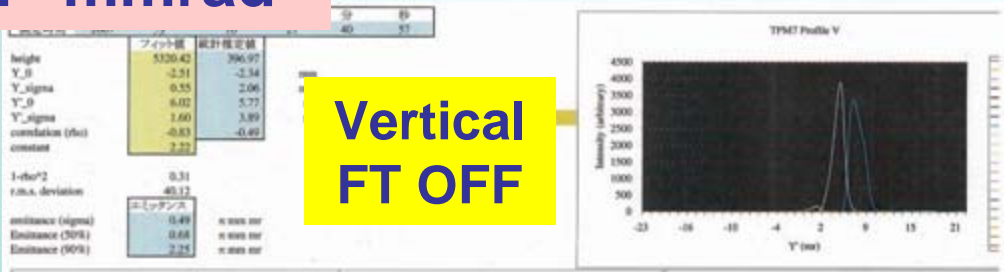
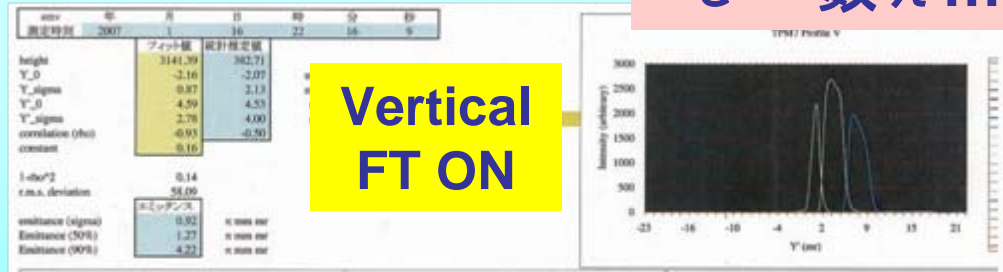
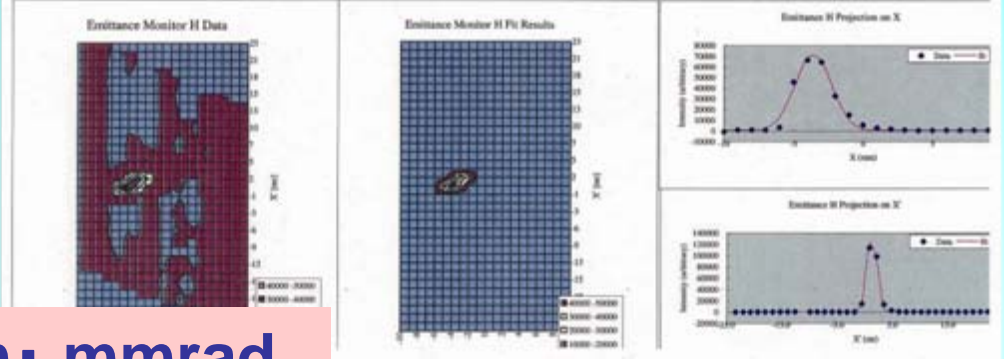
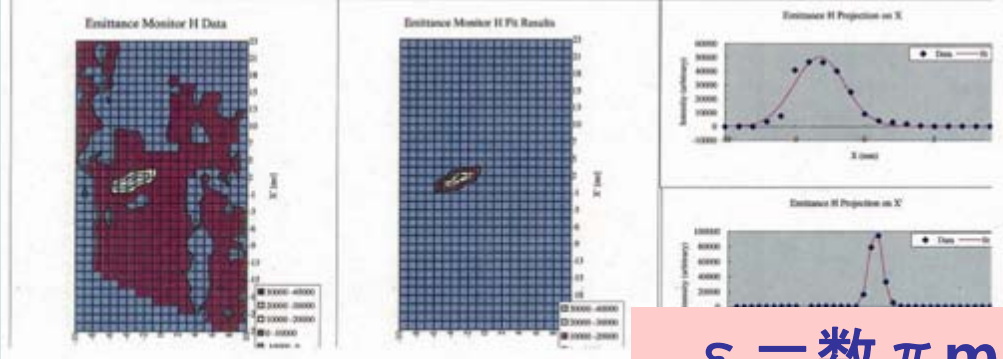
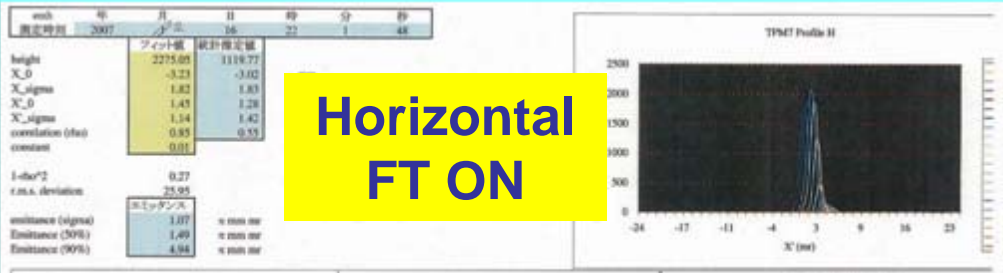
Horizontal
FT ON

Horizontal
FT OFF

$$\varepsilon = \text{数} \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

Vertical
FT ON

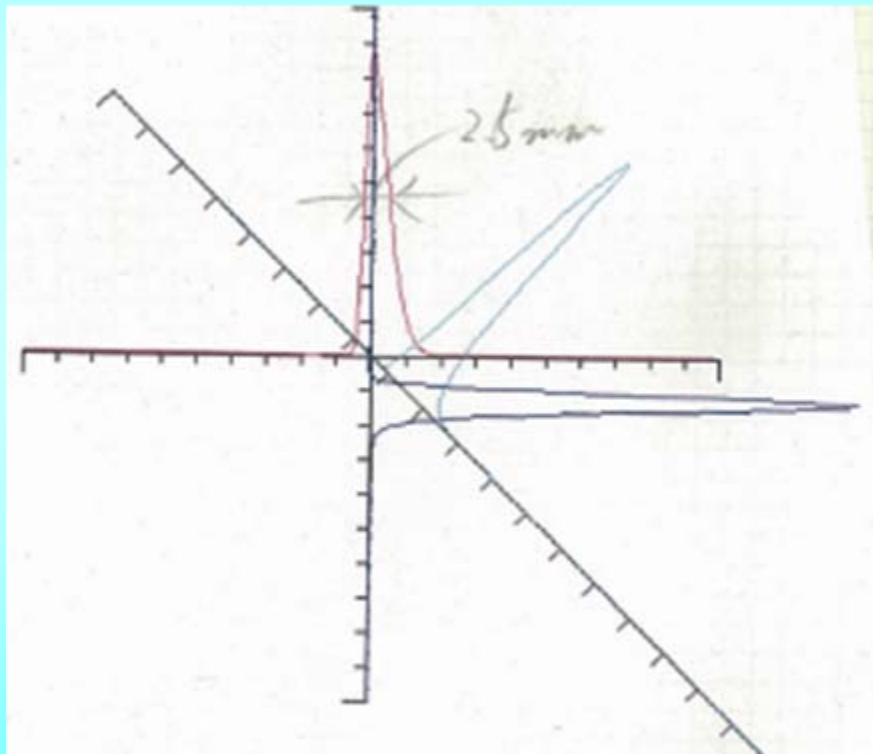
Vertical
FT OFF



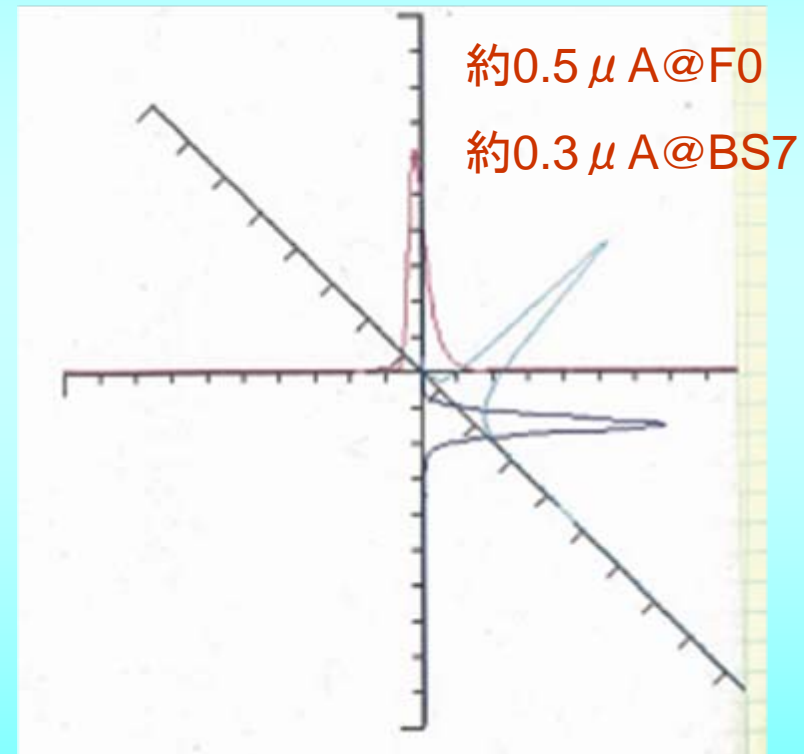
53 MeV Proton: エネルギー幅の最小化

- 分析コースに分散モードで輸送し、TPM-6Aで計測したビームプロファイルのビーム幅が小さくなるように5倍波電圧・位相などを調整

基本波加速 (FT OFF)



フラットトップ加速 (FT ON)



エネルギー幅を正確に見積るためには、横軸の較正、測定系の分解能、エミッタンスの寄与などを考慮する必要あり

5. まとめ

- AVFサイクロトロン(入射器)のフラットトップ加速システムが本格的に稼働を開始
- 高調波周波数 50~80 MHzにおいて、5倍波、7倍波、9倍波の励振に成功
- フラットトップ加速ビーム開発に着手
- 53 MeV Proton(300MeV@RingCyclotron)のフラットトップ加速において、約 $0.5 \mu A$ の引き出しビーム電流を実現

今後の課題

- 制御信号用ピックアップ電極の改良
- 寄生共振モードへの対策
- フラットトップ加速ビーム開発とリングサイクロトロンへの入射
- グランドライデンを用いた分析
などなど