

FFAG 加速器



森 義治(KEK)

- 1 FFAG 加速器とは
- 2 FFAG 加速器の特徴
- 3 FFAG 研究会 (倶楽部) について

加速器利用の将来

性能への要求

- * 大強度化

 - ファクトリィ：電子、中性子、陽子、重イオン、X線

- * 高速加速

 - 短寿命粒子：ミューオン / ニュートリノ、不安定原子核

機能への要求

- * 汎用性

 - 小型、効率 / 省エネルギー、運転の容易さ
フレキシビリティ

円型加速器

代表的円型加速器

(1)サイクロトロン (2)シンクロトロン

(1)サイクロトロン

一定磁場：連続ビーム（高強度 1MW@PSI)

高エネルギー加速 (>GeV)に難点

(2)シンクロトロン

強いビーム集束力（3次元）

高エネルギー加速が容易

磁場が加速とともに変化 パルスビーム

高強度化に難点（rep. 10Hz, Low Duty<1%）

円型加速器 - FFAG Accelerator

FFAG (Fixed-Field Alternating Gradient)

(特長)

一定磁場

高強度 : High Duty > 10%

強集束 (3次元)

安定加速、高エネルギー加速

コンパクト

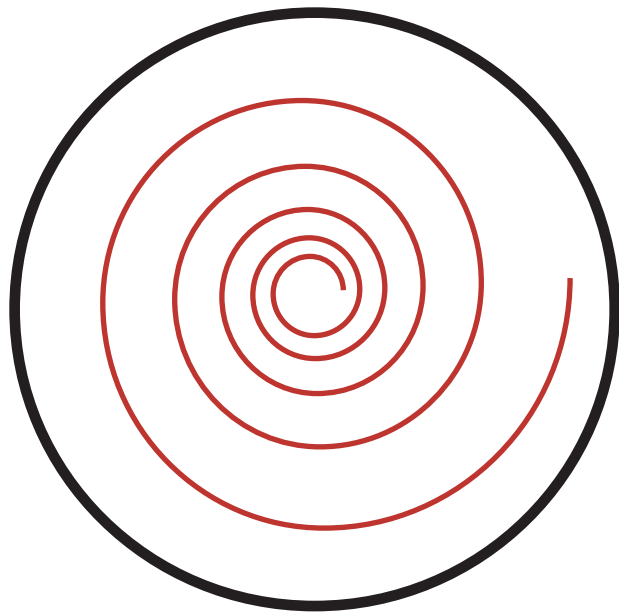
安価

シンクロトロンとサイクロトロンの長所を兼ね備えた加速器

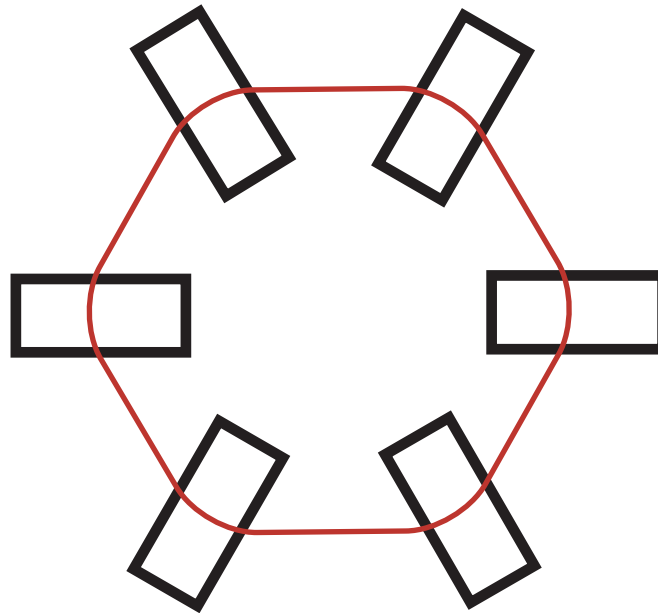
課題

(1) エネルギー変化に対して集束性が不変 : "零色収差" を実現する磁場配位

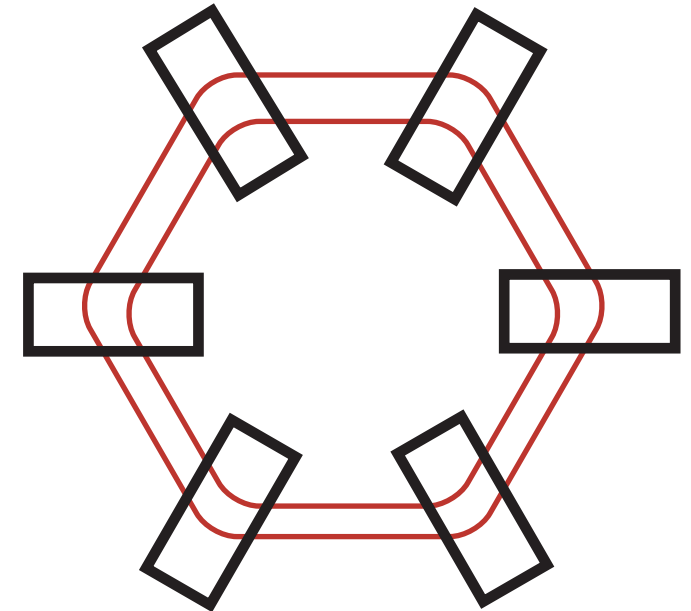
(2) 高加速勾配 & 広帯域の高周波加速装置



Cyclotron
*isochronous



Synchrotron
*const. closed orbit
(varying mag. field)



FFAG
*varying closed orbit
(const. mag. field)

FFAG加速器の特徴

シンクロトロンは加速途中で
磁場が変化する。

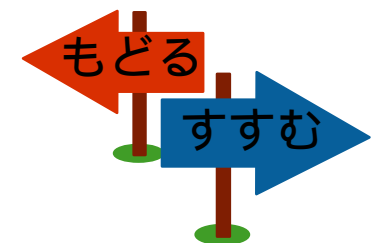
加速の繰り返しが遅い。

FFAG加速器は加速の途中でも
磁場は変化しない。

加速の繰り返しが速い。

NEXT :

FFAG加速器の未来



FFAG 加速器

FFAG 加速器の原理

大河千弘(1953)による提案

FFAG 加速器の開発

MURA(Midwestern University Research Association) project

電子加速 FFAG モデル(' 60)

陽子加速 FFAG モデルは実現されず。

高加速勾配 & 広帯域高周波装置の困難

MURA では誘導 (ベータートロン) 加速

1999 年、世界初の陽子加速 FFAG モデルの実現 PoP-FFAG:高エネルギー研

(KEK)

FFAG 加速器のビーム光学

(1) ビームの集束性がエネルギーによらず一定(一定磁場)

ベータトロンチューンのエネルギー依存性無し ($v_x, v_z = \text{const.}$)

零色収差 : zero chromaticity (Scaling type of FFAG)

ベータトロン振動式

$$x'' + g_x x = 0; g_x = \frac{K^2}{K_0^2} (1 - n)$$

$$z'' + g_z z = 0; g_z = \frac{K^2}{K_0^2} n$$

零色収差の条件

a) Geometrical similarity

$$\left. \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{K}{K_0} \right) \right|_{\theta = \text{const.}} = 0$$

b) Constant n

$$\left. \frac{\partial n}{\partial p} \right|_{\theta = \text{const.}} = 0$$

FFAG 加速器の磁場形状 : scaling type

零色収差 (a) Geometrical similarity (b) Constant field index

$$(a) r \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_\theta = \zeta = const., \quad (b) n_T = - \frac{r}{B} \left(\frac{\partial B}{\partial r} \right)_\theta$$

磁場分布:

$$B(r, \theta) = B_i \left(\frac{r_i}{r} \right)^{n_0} F \left(\theta - \zeta \ln \frac{r}{r_i} \right)$$

ζ : Spiral Angle

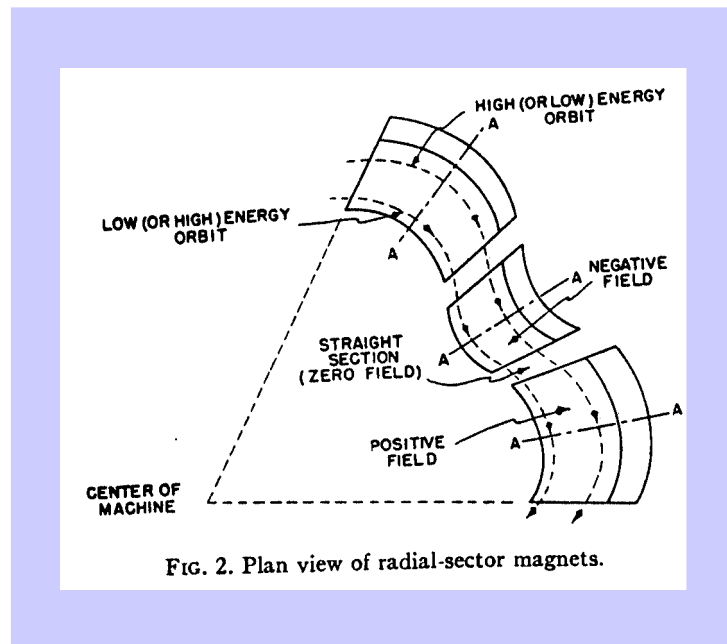


FIG. 2. Plan view of radial-sector magnets.

Radial sector

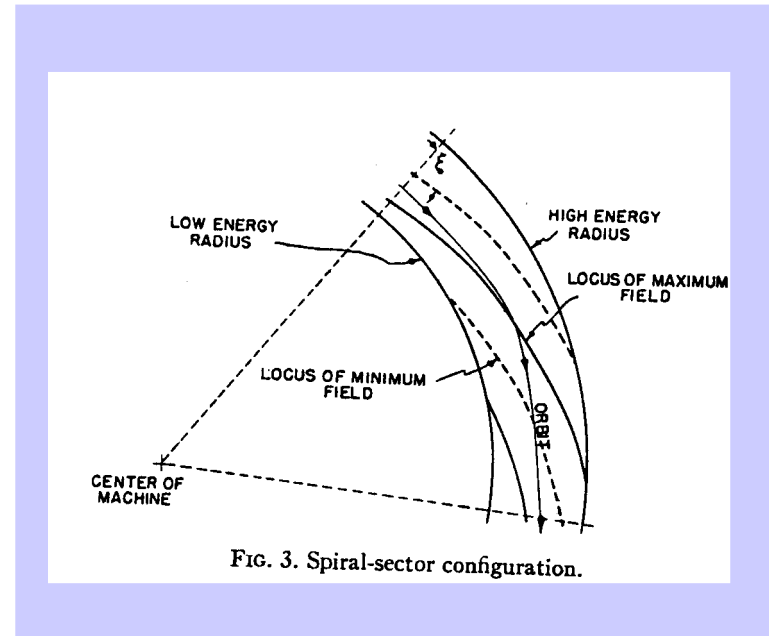


FIG. 3. Spiral-sector configuration.

Spiral sector

FFAG 加速器の磁場形状 : scaling type

(1) 零色収差を実現する磁場配位 : $B \propto B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k$ 非線形な磁場分布

$$B = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k = B_0 \left(\frac{r_0 + x}{r_0} \right)^k = B_0 \left[1 + \frac{k}{r_0} x + \frac{k(k-1)}{2! r_0^2} x^2 + \frac{k(k-1)(k-2)}{3! r_0^3} x^3 + \dots \right]$$

$$\cong B_0 \left[1 + \left(\frac{k}{r_0} \right) x + \frac{1}{2!} \left(\frac{k}{r_0} \right)^2 x^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{k}{r_0} \right)^3 x^3 + \dots \right]$$

(2) 軌道変位

$$\text{Orbit Excursion} \cong \left[\frac{P_f - P_i}{P_i} \right] \cdot \frac{r_0}{k+1}$$

電磁石設計 → 3次元磁場設計が必要

Aperture of FFAG: Is it large with large k?

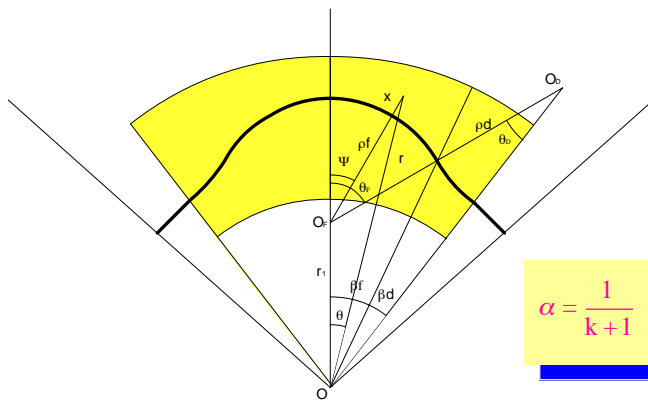
larger ring --> large k --> large non-linear field?

$$B = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k = B_0 \left(1 + \frac{k}{r_0} x + \frac{k(k-1)}{2! r_0^2} x^2 + \dots \right)$$

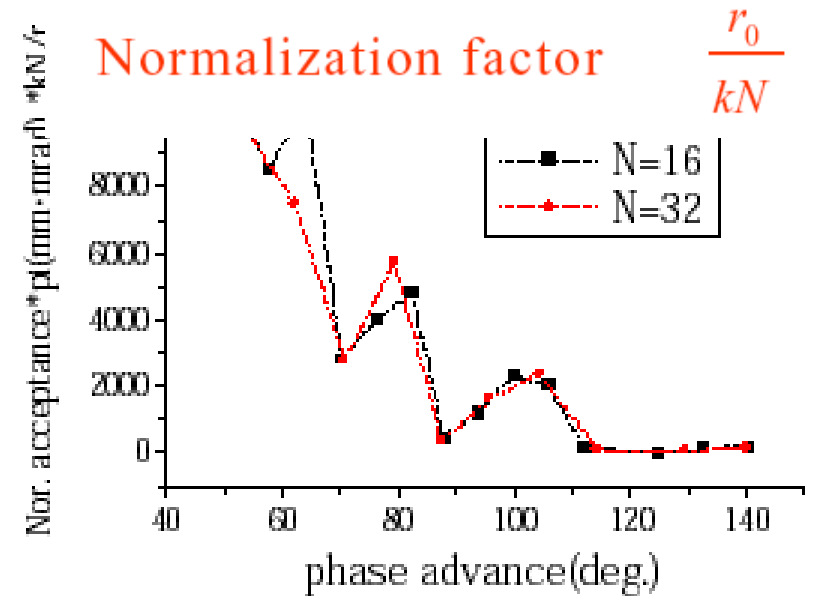
$$\cong B_0 \left(1 + \left(\frac{k}{r_0} x \right) + \frac{1}{2!} \left(\frac{k}{r_0} x \right)^2 + \dots \right)$$

$$W = \frac{x^2}{\beta}$$

$$\cong x^2 \left(\frac{k}{r_0 N} \right) = \frac{r_0}{kN} \left(\frac{k}{r_0} x \right)^2 \dots$$



$\alpha = \frac{1}{k+1}$: momentum compaction factor



Dynamic aperture depends mostly on phase advance/cell!

比較表 : FFAG <-> Synchrotron

	FFAG	Synchrotron
磁場変化	無	有
閉軌道変化	有	無
ビーム集束	強集束	強集束
Duty Factor	大(10 50%)	小(<1%)
加速繰り返し	大(1kHz)	小(10Hz)

FFAGでは、バンチ当たりの粒子数は相対的に少ない。したがって、粒子数が多いと問題となる空間電荷効果、ビーム不安定性の問題が少ない。

高周波加速装置：高勾配・広帯域高周波空洞

陽子加速 ($E = 1\text{GeV}$) の場合：

「磁性体 ($\mu \sim \text{大}$) を装荷した高周波空洞」

→ 周波数領域は $1\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$ であり、波長短縮が必要

従来使用されていたフェライトでは高勾配・広帯域は困難！

→ Q 値が電場強度の増加とともに急速に低下

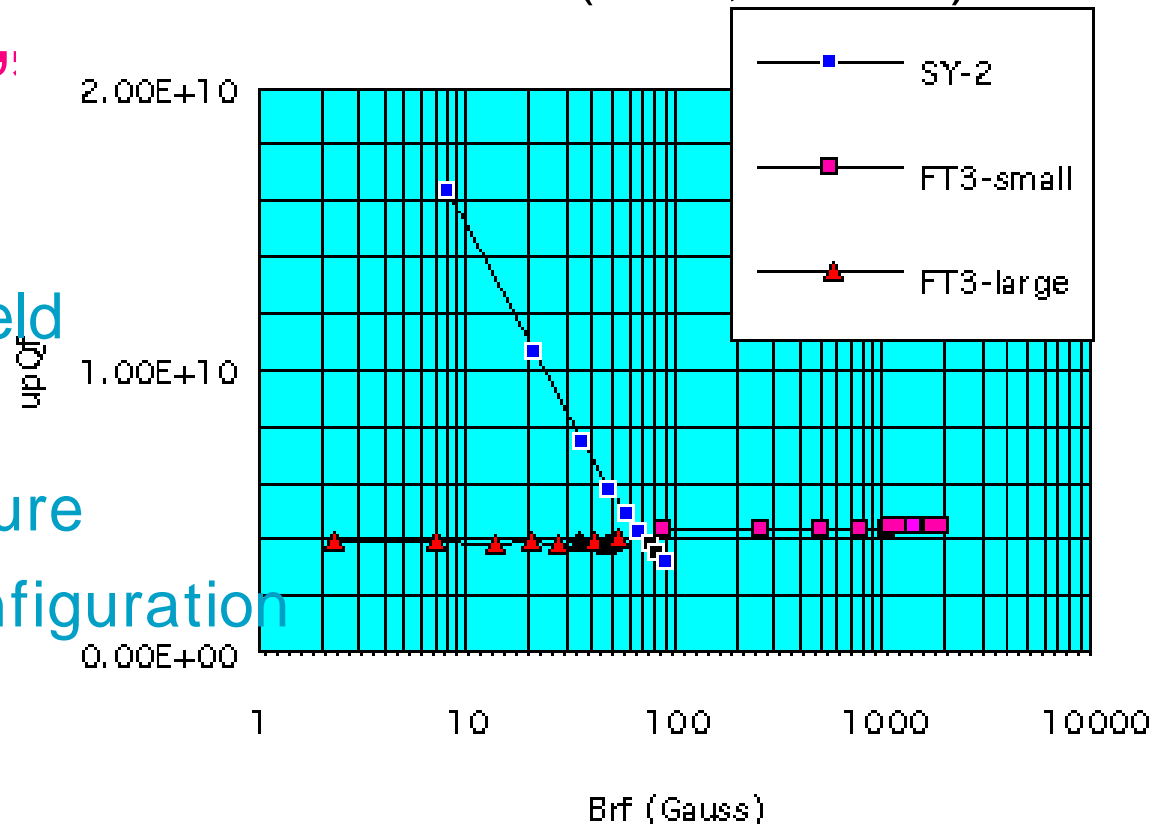
高周波加速装置：軟磁性金属合金

フェライトに替わる磁性体として軟磁性金属合金(Magnetic Alloy)の適用

→ 高勾配・広帯域高周波空洞の開発に成功 (KEK, 1996)

“ MA Cavity ”

- (1) mQ const. @high field
- (2) Q 1: broad band
- (3) high Curie temperature
- (4) possible of arb. configuration



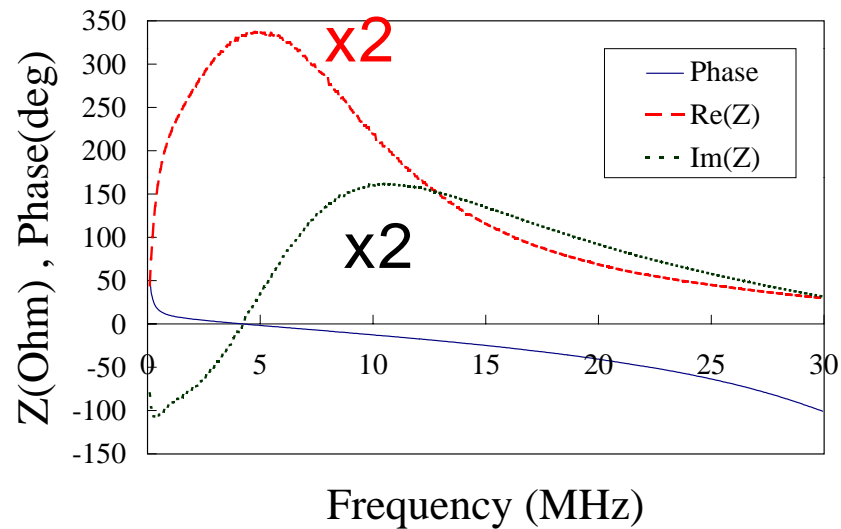
MA Cavity の開発

Single Gap MA-loaded Cavity (INS-KEK, Tanashi, 1997)

$E \sim 50 \text{ kV/m}$

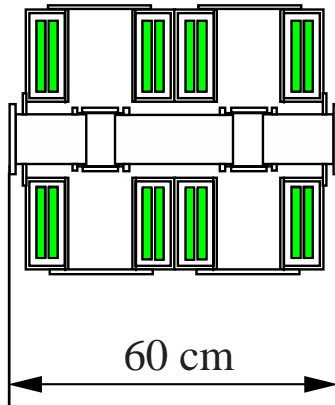
RF Voltage	20kV
No. of Cores	6
Shunt Impedance	500-750 W
Q	1
Total Length	40 cm

Measured Cavity Impedance & Phase



MA 空洞とフェライト空洞の比較

MA-loaded Cavity

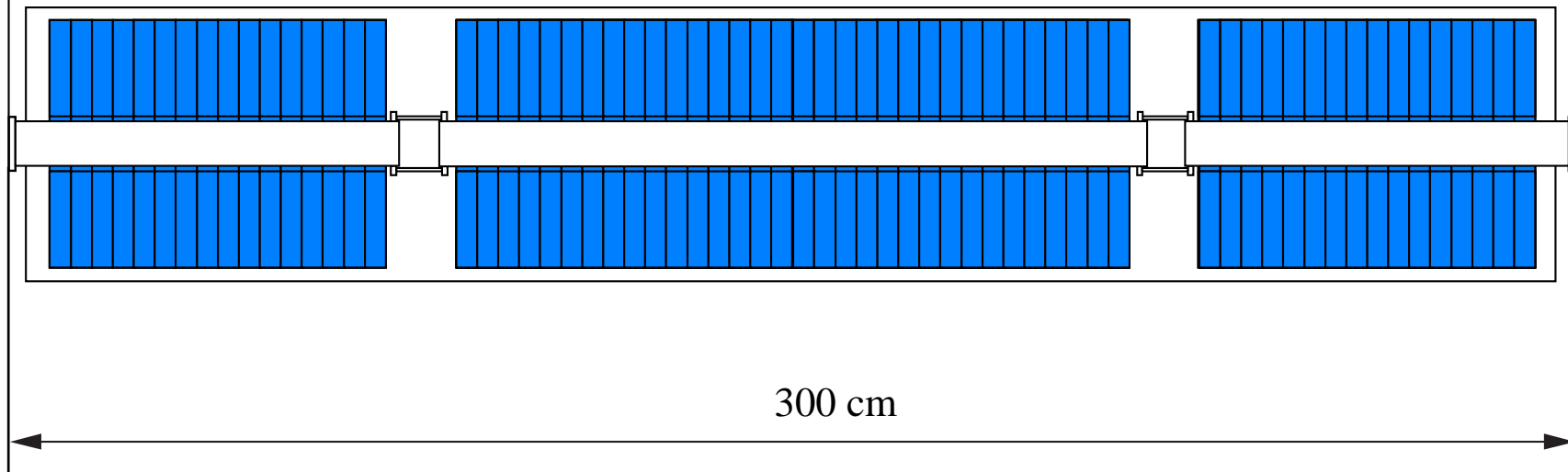


RF Voltage
No. of Cores
Total length

MA
~40kV
12
0.6m

Ferrite
~40kV
68
3m

Ferrite-loaded Cavity

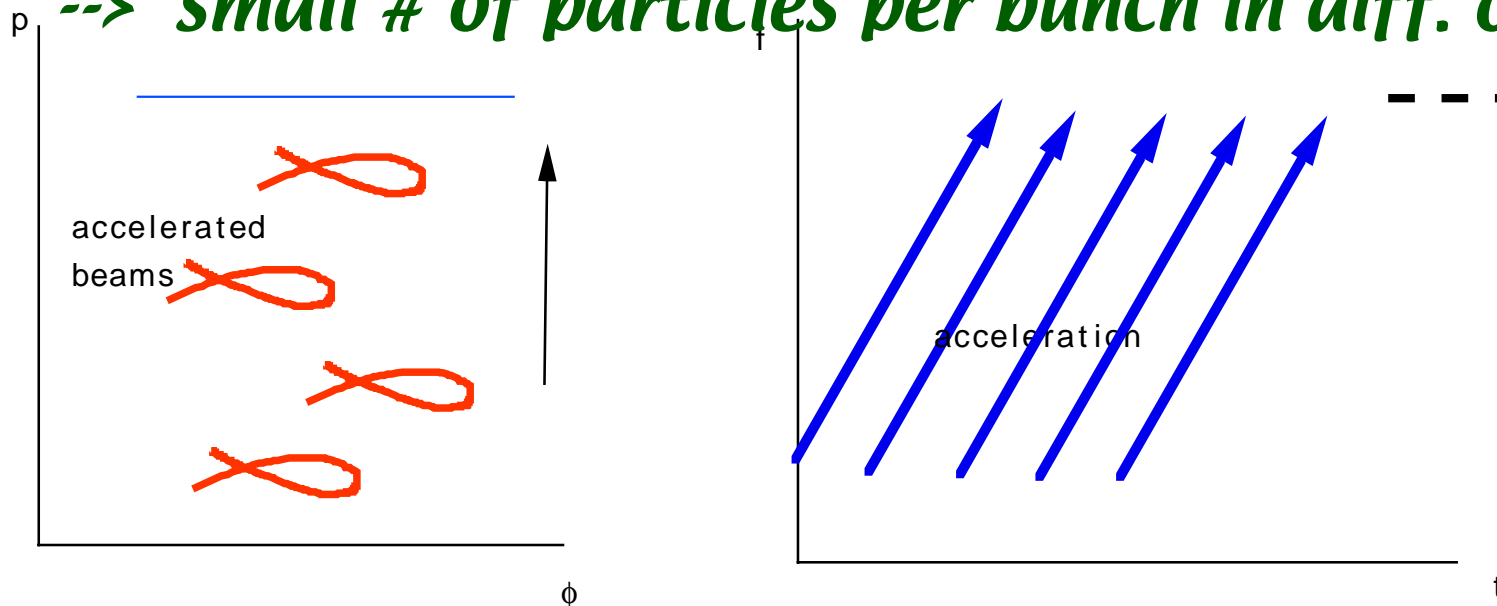


Multi-beam Acceleration

multi-bunch in different orbit :

- *cw machine (Cyclotron) as an injector*
- *increase acceleration cycle w/o large rf voltage*
- *small space charge effect*

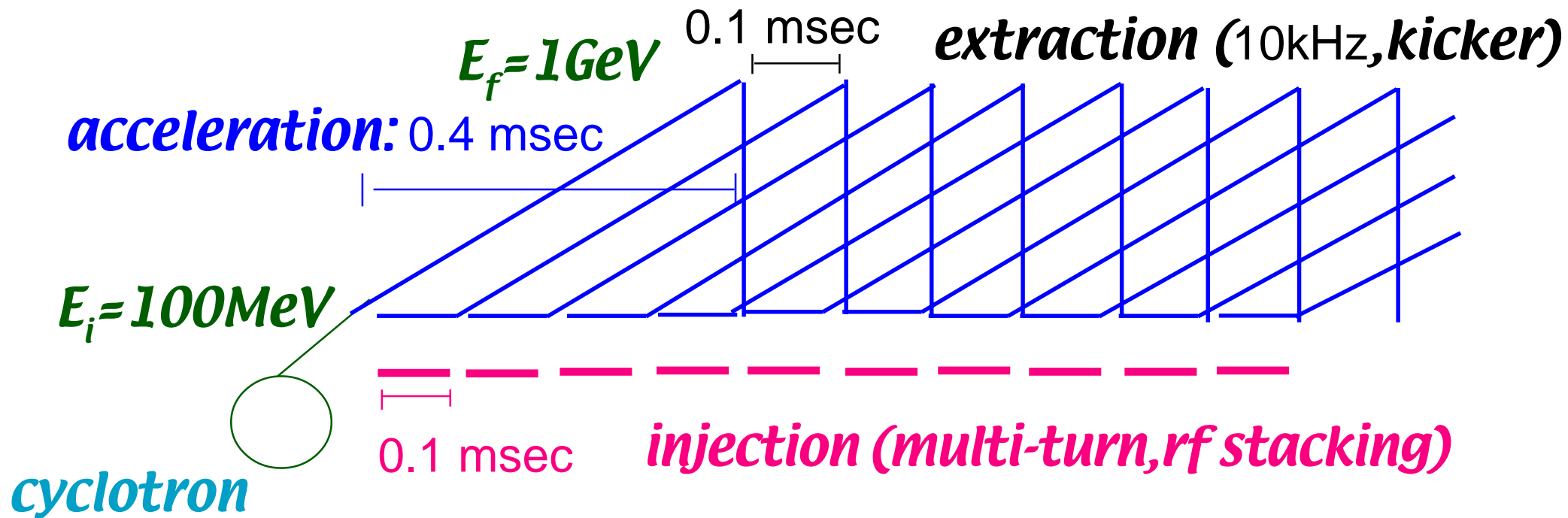
--> small # of particles per bunch in diff. orbit



FFAG : multi-beam operation

cf. 1GeV - 10mA (10MW) FFAG

Injector	Cyclotron (H ⁺ /H ⁻)	Accelerator	FFAG
energy	100MeV	energy	1GeV
current	I=10mA	intensity	6x10 ¹² ppp(ΔQ <-0.1)
		rep. rate	10kHz eq.(2.5kHz)



Development of proton FFAG accelerator

PoP (proof-of-principle) model using MA cavity

aims:

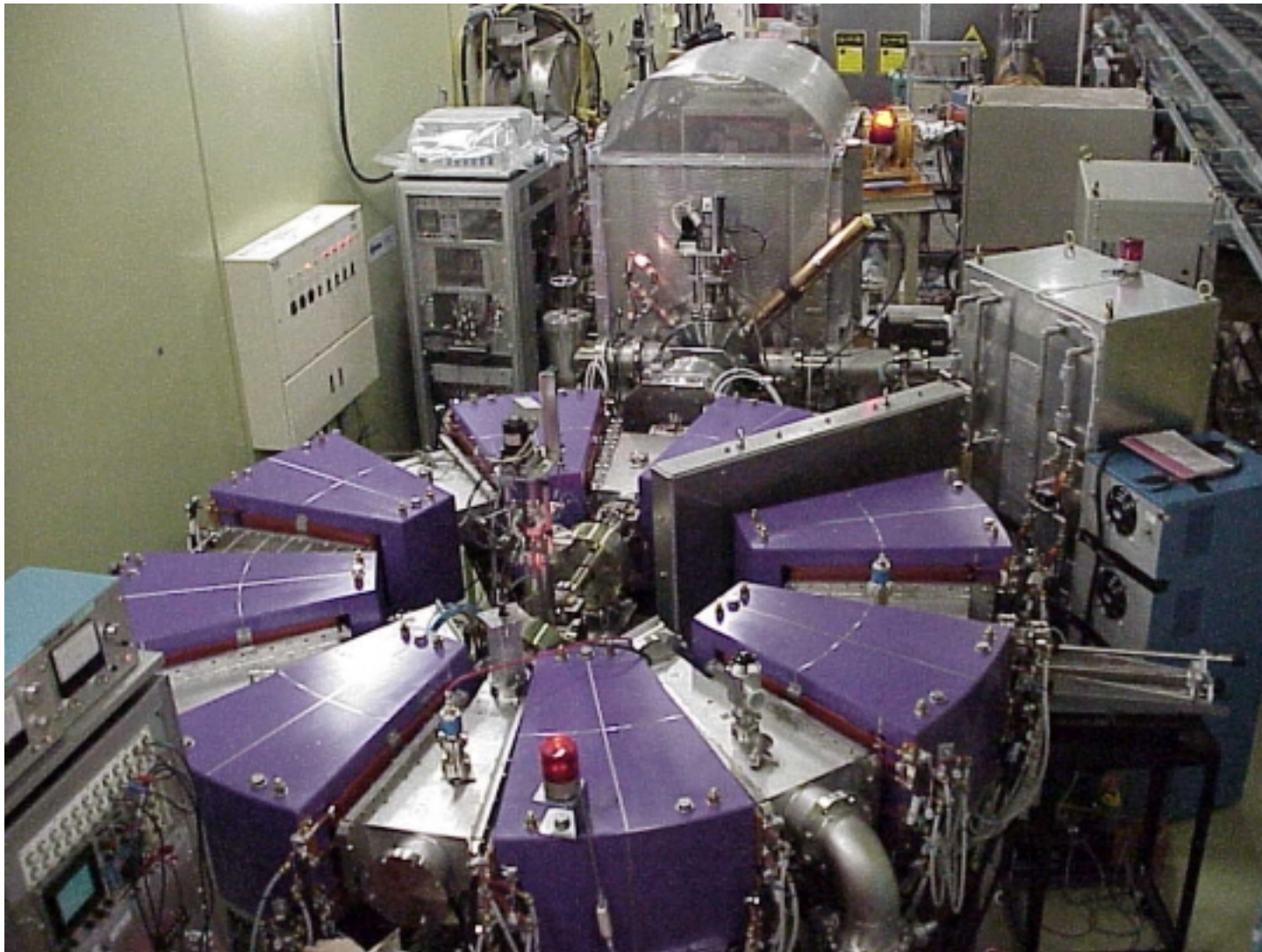
(1) fast acceleration : $t < 1 \text{ msec}$ \rightarrow 1kHz rep. rate

(2) first proton FFAG accelerator

(parameters)

Type of magnet	Radial sector type (Triplet)
No. of sectors	8
Field index(k-value)	2.5
Energy	50keV(injection) ~ 500keV
Repetition rate	1kHz
Magnetic field	Focus-mag. : 0.14~0.32Tesla Defocus-mag. : 0.04~0.13Tesla
Radial of closed orbit	0.81~1.14m
Betatron tune	Horizontal : 2.17~2.22 Vertical : 1.24~1.26
rf frequency	0.61~1.38MHz
rf voltage	1.3~3.0kVp

PoP proton FFAG model



加速空洞



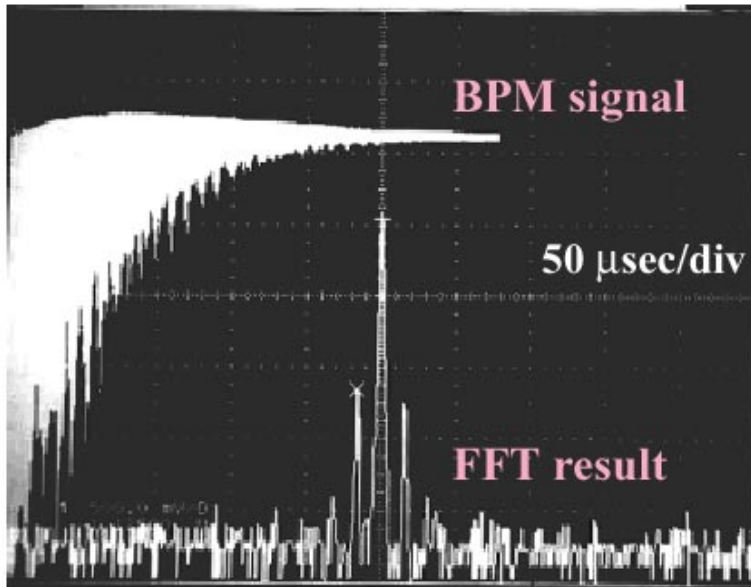
加速空洞とはビームを加速する装置です。

金属磁性体を用いた広帯域の加速空洞により従来の10倍の電場強度が得られます。

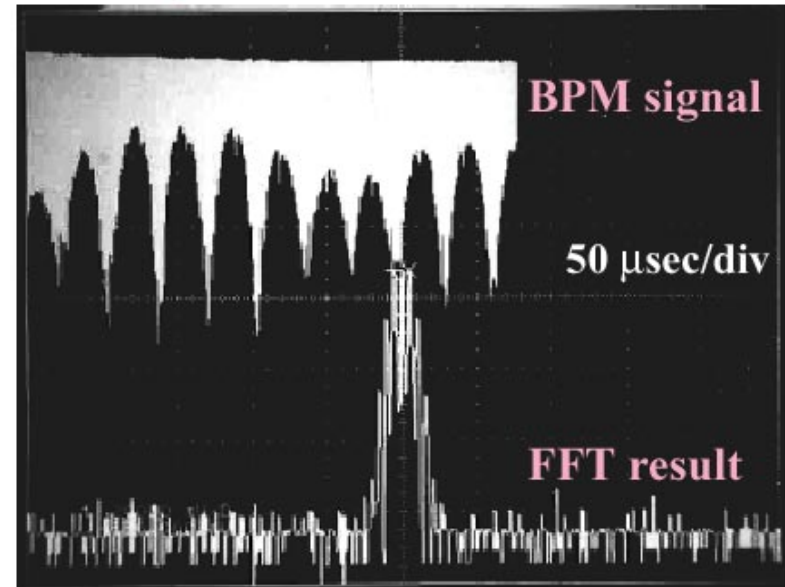
- ・ 広い加速周波数の変化に対応
- ・ コンパクトな加速空洞を実現

Beam Acceleration

[injection]



[flat top]



revolution frequency :

610kHz



1.251MHz

synchrotron frequency :

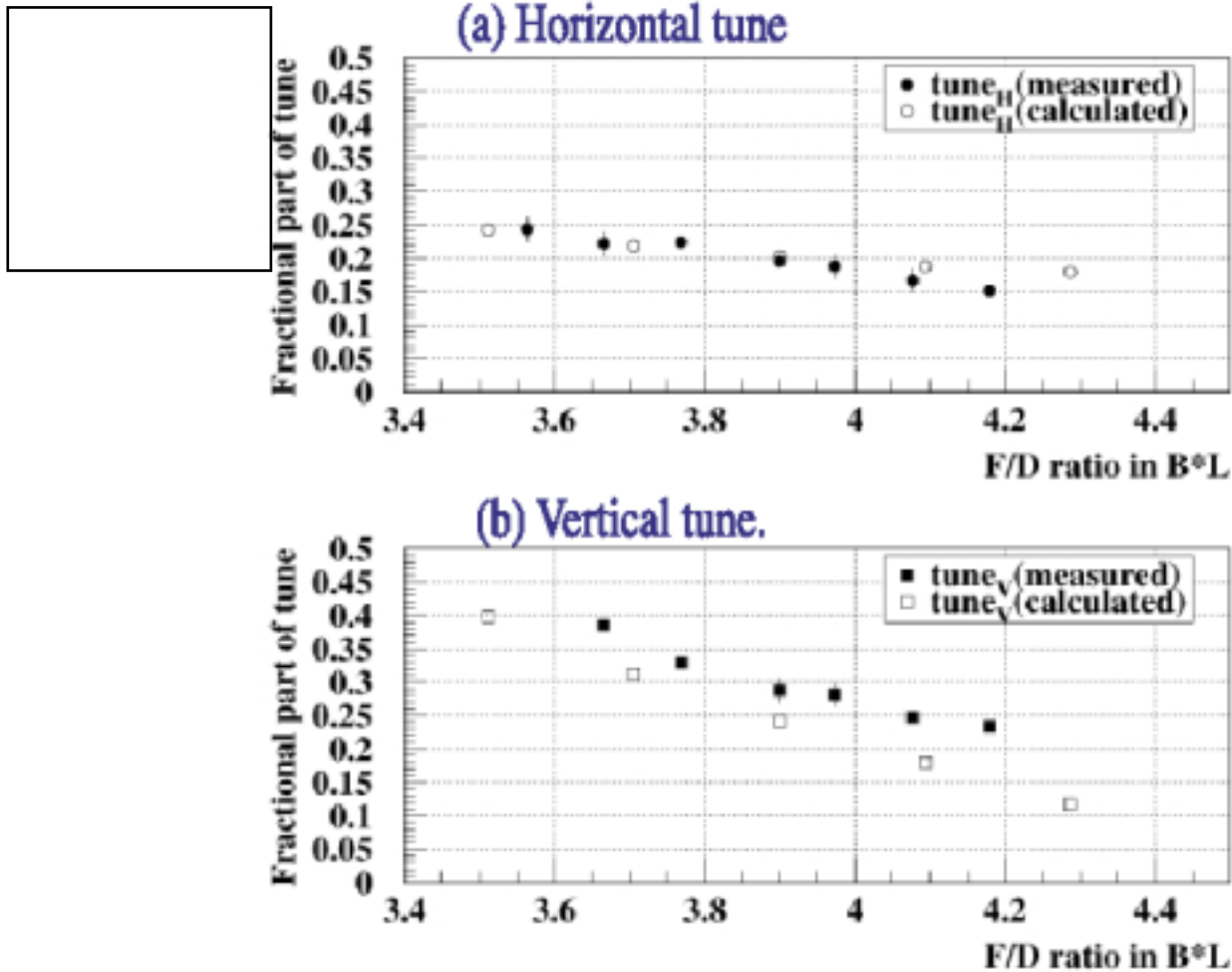
24.06kHz



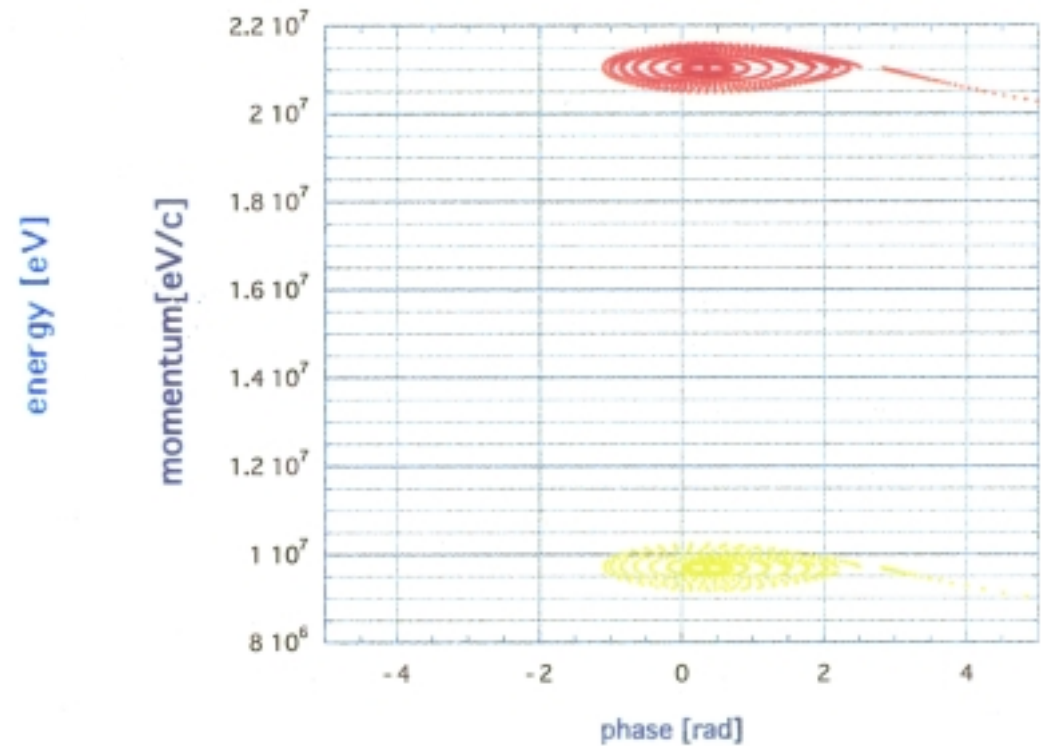
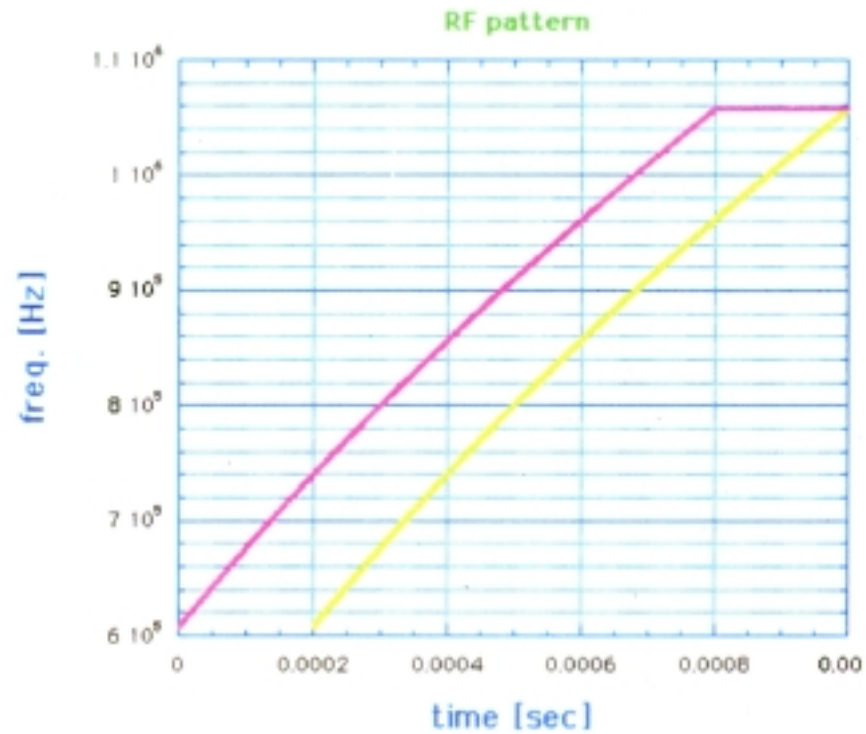
16.78MHz

Measured Betatron Tunes

[Betatron tune in various magnetic field]



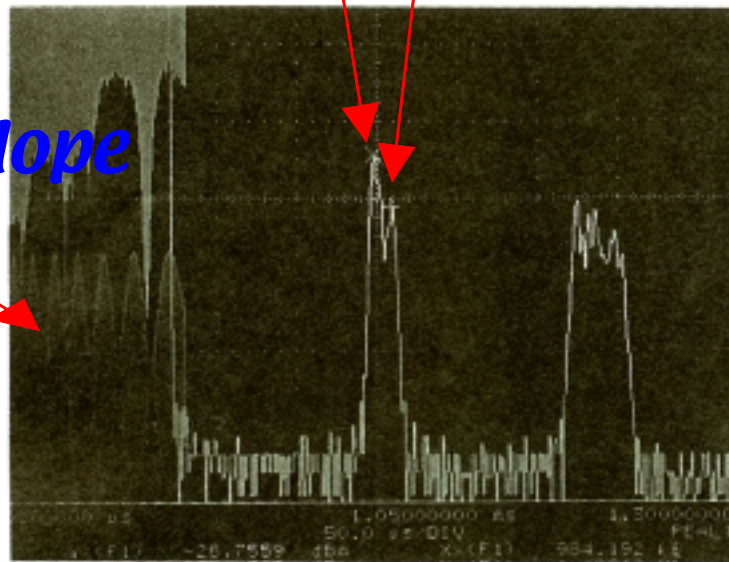
Two bunch acceleration in PoP FFAG



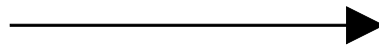
Two beam acceleration - Experiment

984.192kHz 1068.12 kHz

RF voltage envelope



rev. frequency



150-MeV proton FFAG accelerator

Prototype for various applications:

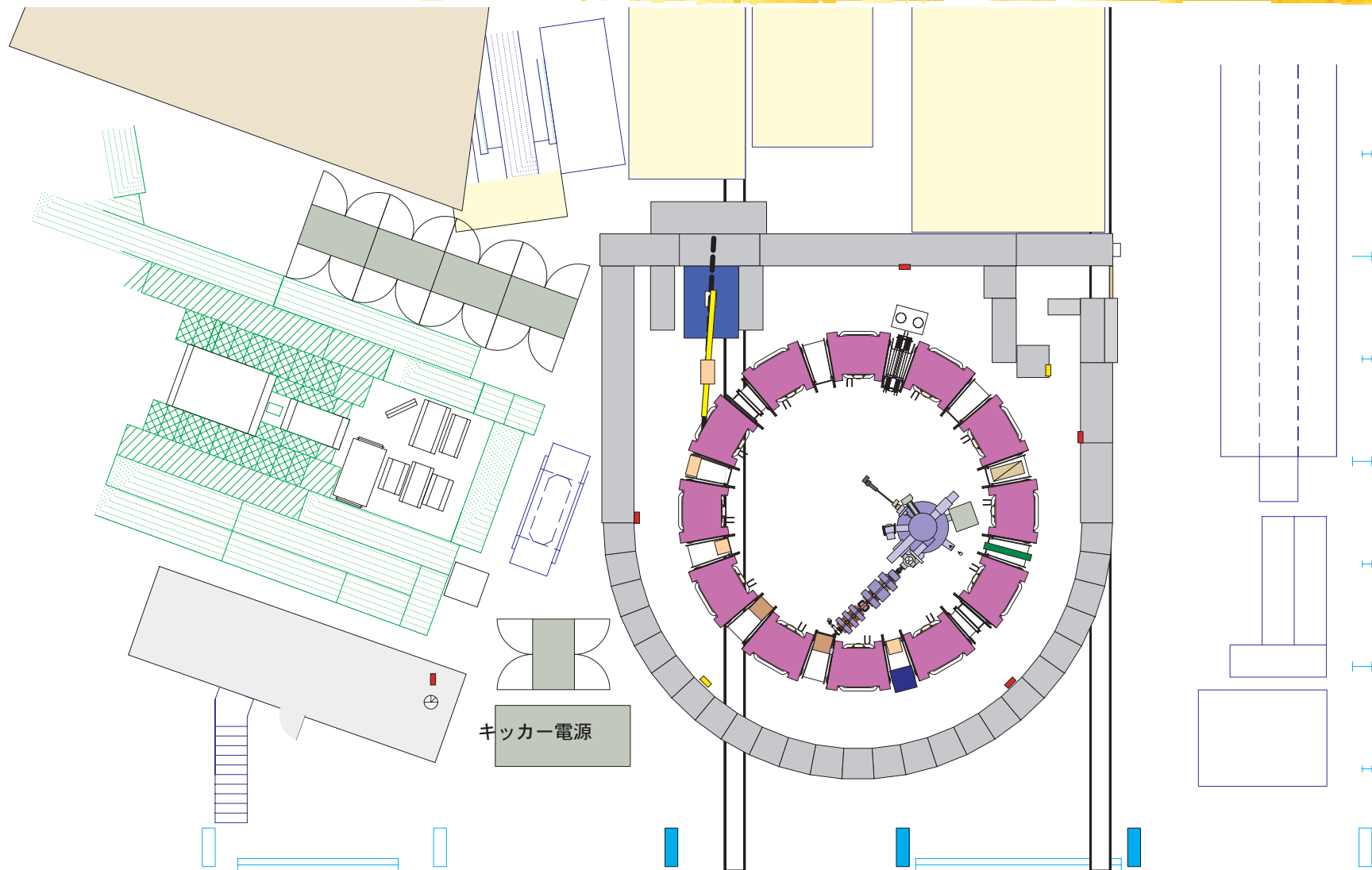
Medical application : Cancer therapy

Muon phase rotation : PRISM project

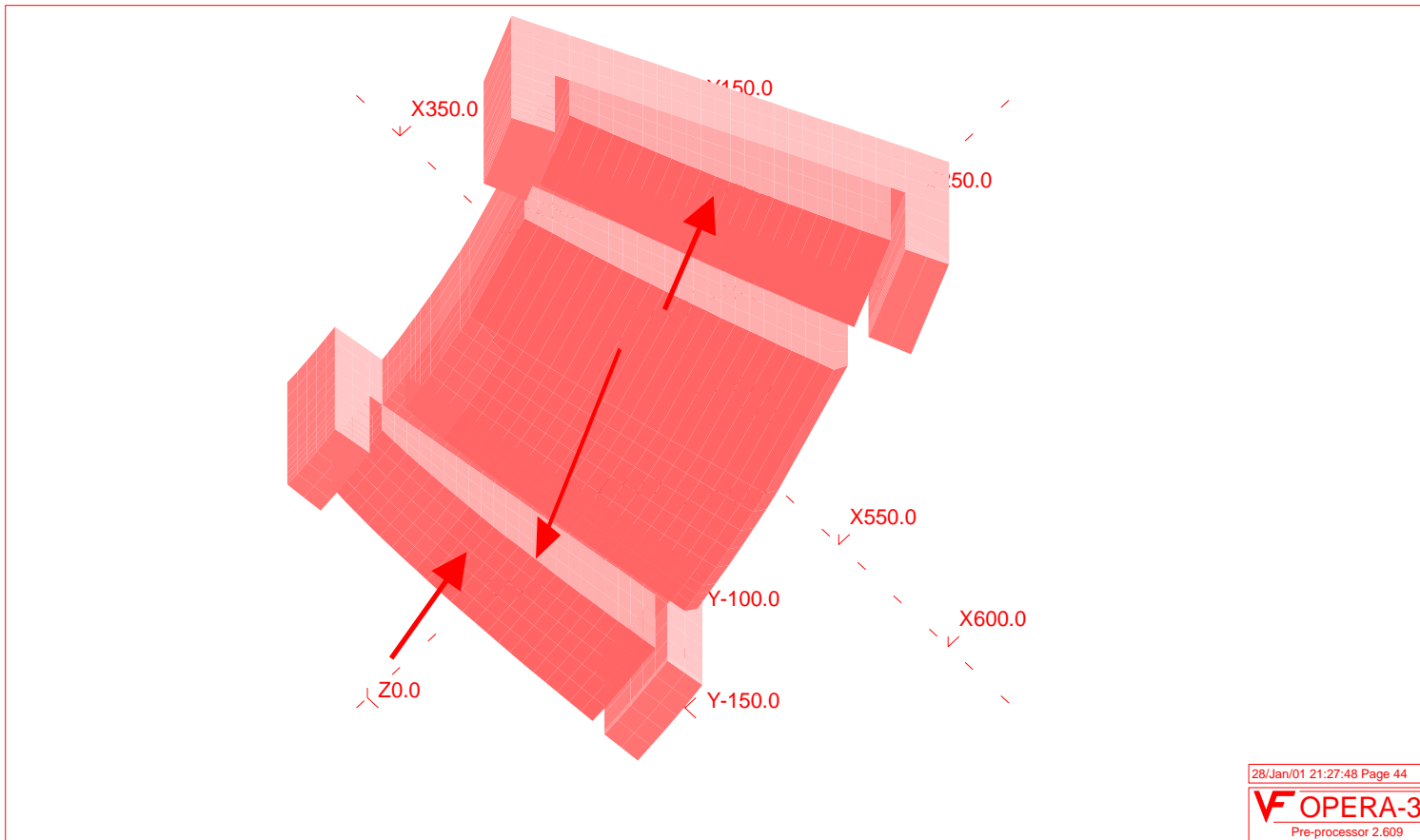
150MeV FFAG main parameters

No. of sectors	12
Field index(k -value)	7.5
Energy	12MeV - 150MeV
Repetition rate	250Hz
Max. Magnetic field	
Focus-mag.:	1.63 Tesla
Defocus-mag.:	0.13 Tesla
Closed orbit radius	4.4m -5.3m
Betatron tune	
Horizontal :	3.8
Vertical :	2.2
rf frequency	1.5 -4.6MHz

150-MeV proton FFAG



Yoke-free magnet of triplet sector FFAG



Magnet of 150-MeV proton FFAG

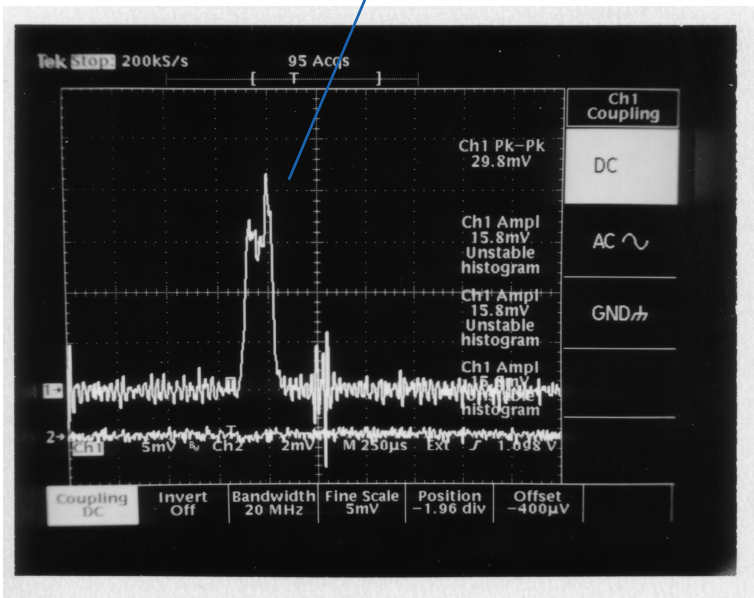




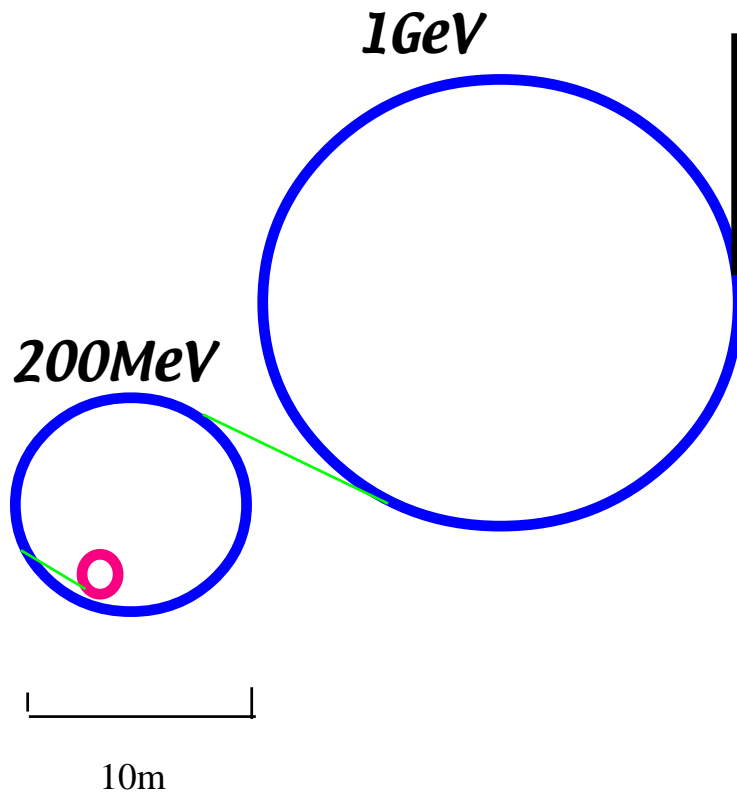
150MeV FFAG

1st turn

April 24th, 2003



1GeV-1MW-10kHz FFAG Proton Driver



Energy	200MeV-1GeV
Intensity	6 E11 ppp
Rep. Rate	10kHz (1kHz x10)
Ave. Current	1mA (Beam Power 1MW)
Radius	~15m
k	25
# of cell	48
rf freq.	1.8MHz - 2.8MHz
rf voltage	~600kV
bunch width	~40ns

FFAG 加速器の小型化を目指して

これまでの開発 => radial sector 型で triplet lens 方式

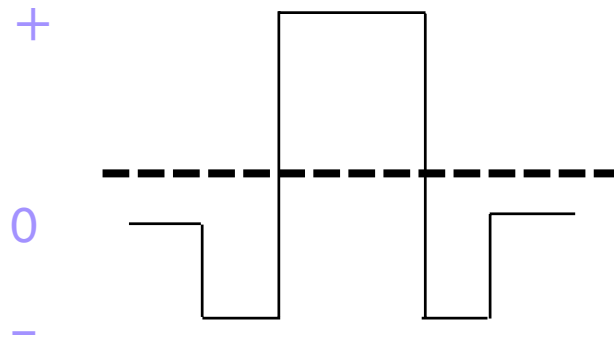
- 1) 磁場分布、特に fringing field の影響が少ない。
- 2) straight section が長くとれる。

短所 リングが大きくなる。radial sector => large flutter

Field Flutter

$$\Phi = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}$$

radial sector $\Phi \gg 1$



FFAG 加速器の小型化を目指して

Field Flutter を小さくする。 => **Spiral Sector 型**

$$\text{Field Flutter} \quad \Phi \cong 1$$

Spiral Sector 型の問題点

1) 垂直方向のビーム集束は edge focus に依る。

磁場分布の性能は？ fringing field の効果は？

2) Tunability (ベータートロンチューンの可変性)

一つの磁石。radial sector 型のように F,D 磁石の磁場を変えることができない。

FFAG 加速器の小型化を目指して

解決法

電磁石の困難

マルチコイルによる磁場分布の形成 => fringing field の均一化

Tunability の困難

マルチコイルの電流分布を変えることで field index が可変となる。

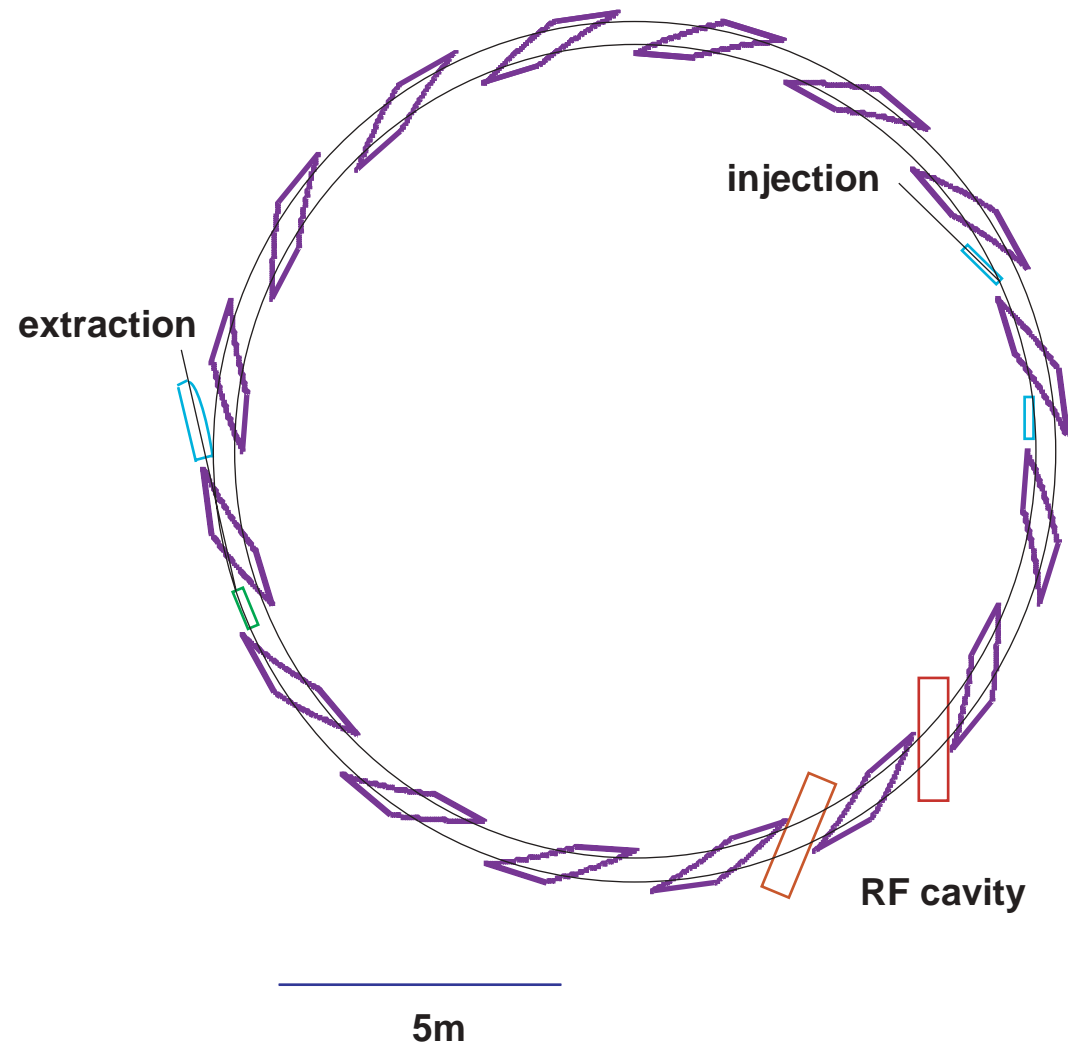
FFAG 加速器の小型化を目指して

1GeV 陽子 FFAG 加速器

(パラメーター)

入射エネルギー	200MeV
取り出しエネルギー	1GeV
セクター数	16
field index (磁場係数)	10.5
スパイラル角	65度
平均半径	
入射	6.99m
取り出し	7.60m
周長	48m
磁場強度	
入射	0.83T
取り出し	2T
ベータートロンチューン	
水平	3.74
垂直	3.35

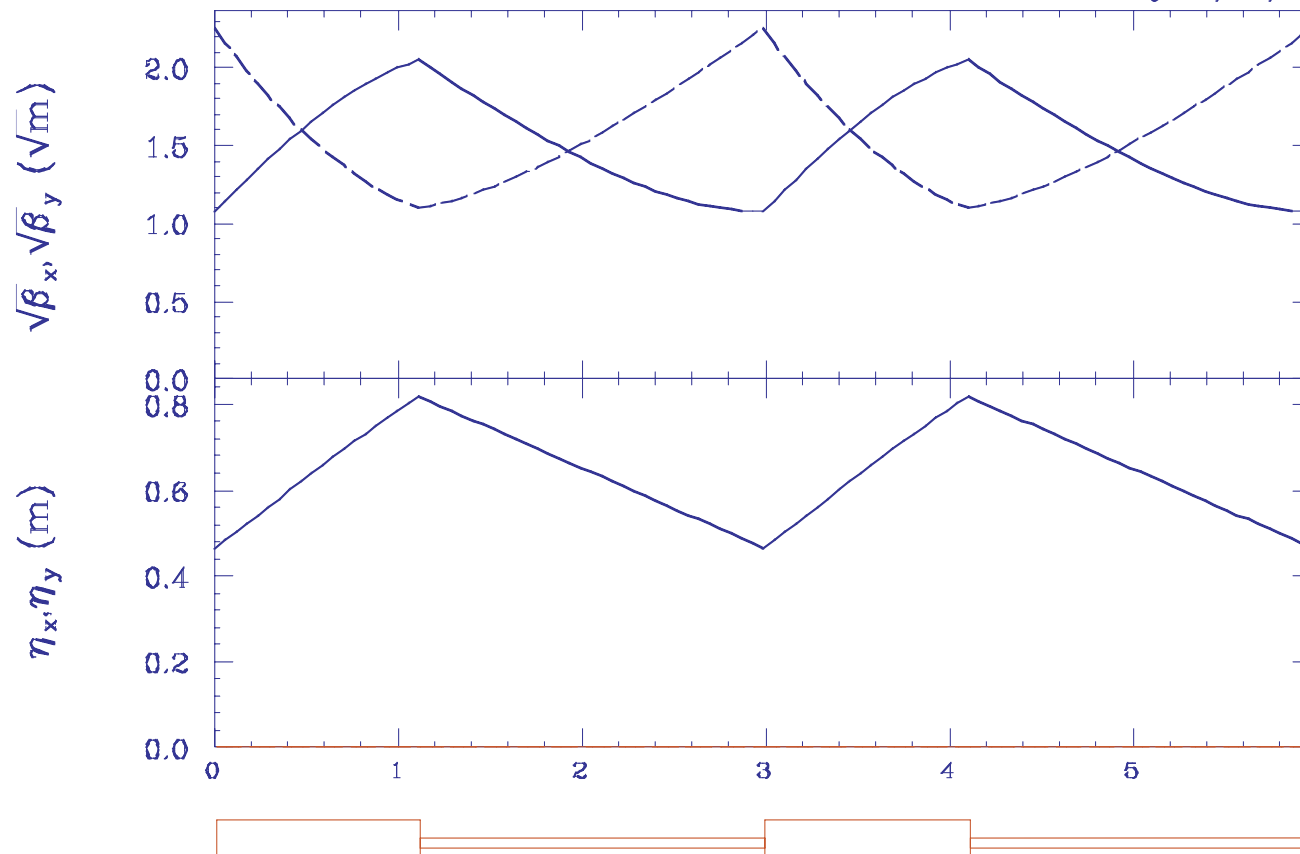
1 GeV spiral FFAG (16 cells)



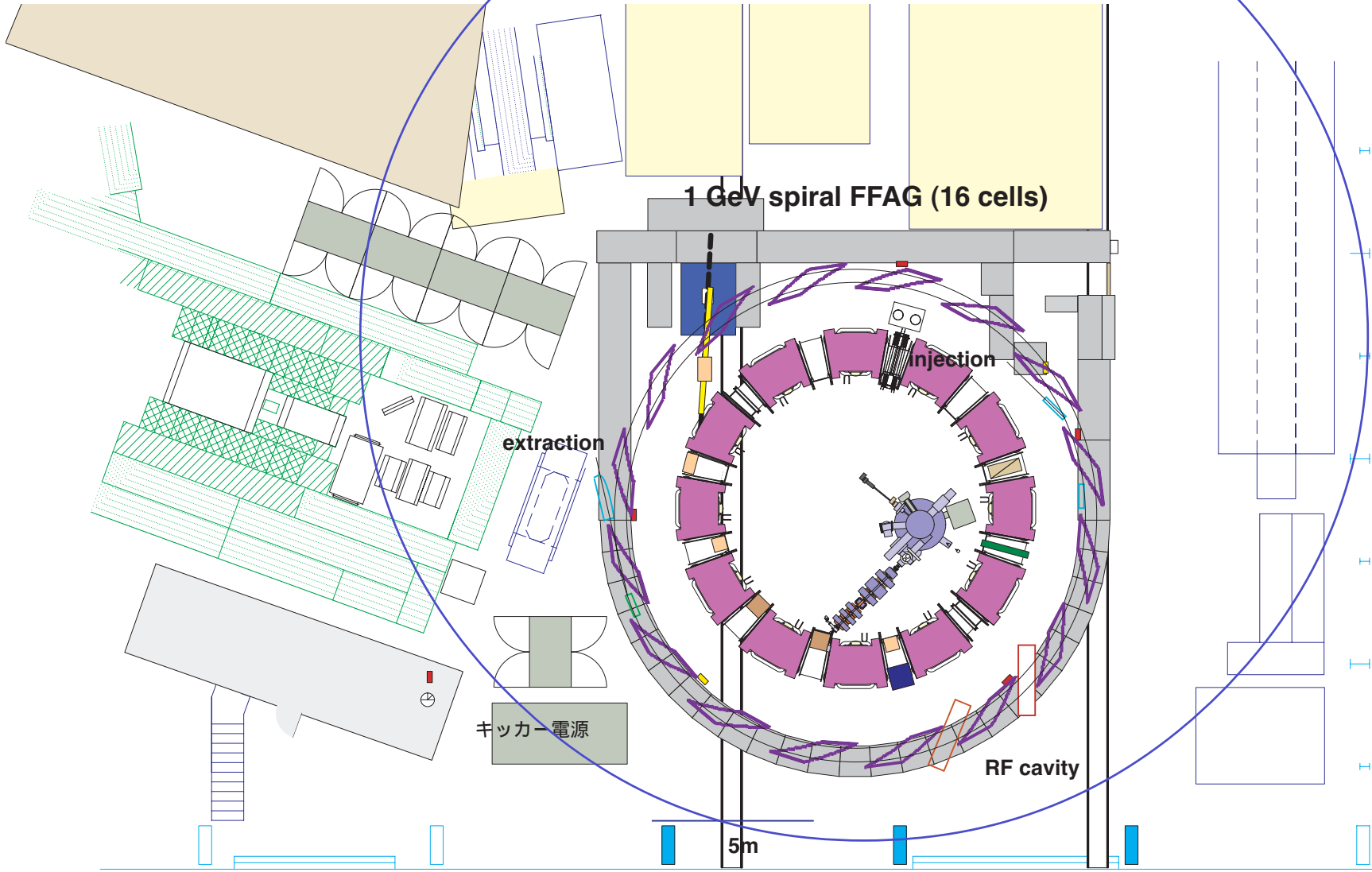
FFAG 加速器の小型化を目指して

1-GeV FFAG Accelerator (16cells)

11:13:42 Tuesday 03/11/2003



1-GeV proton (400-MeV Carbon) FFAG



FFAG 加速器の可能性

20世紀

電子

リニアック

陽子

サイクロトロン、シンクロトロン

21世紀

レプトン（軽粒子）

ハドロン（重粒子）

短寿命、高強度

汎用性、独創性

FFAG 加速器