

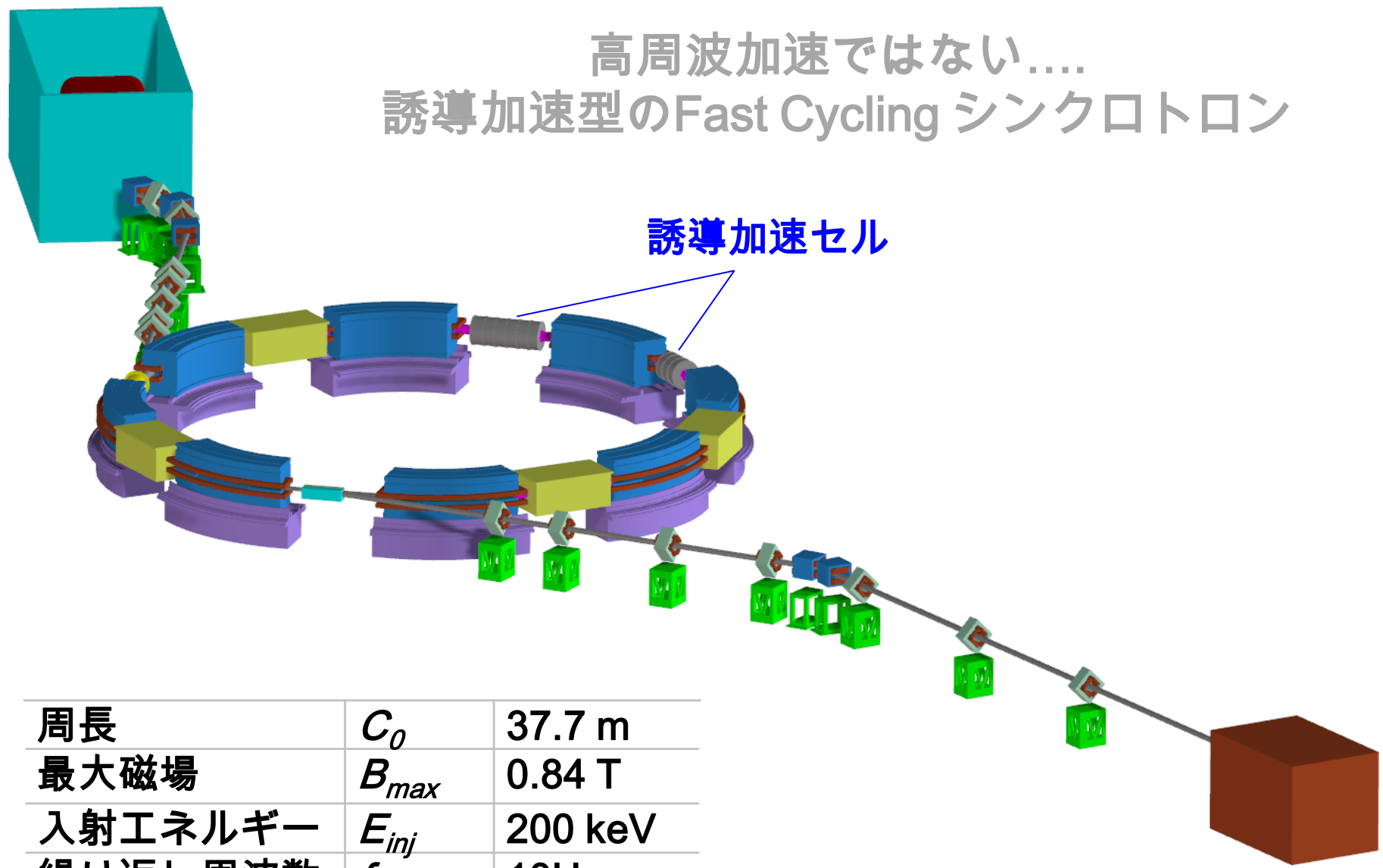
# KEKデジタル加速器におけるイオン源 からの直接入射ビームの加速

発表者: 由元 崇

\*東京工業大学 総合理工学研究科  
& 高エネルギー加速器研究機構

# KEKデジタル加速器とは？

高周波加速ではない....  
誘導加速型のFast Cycling シンクロトロン



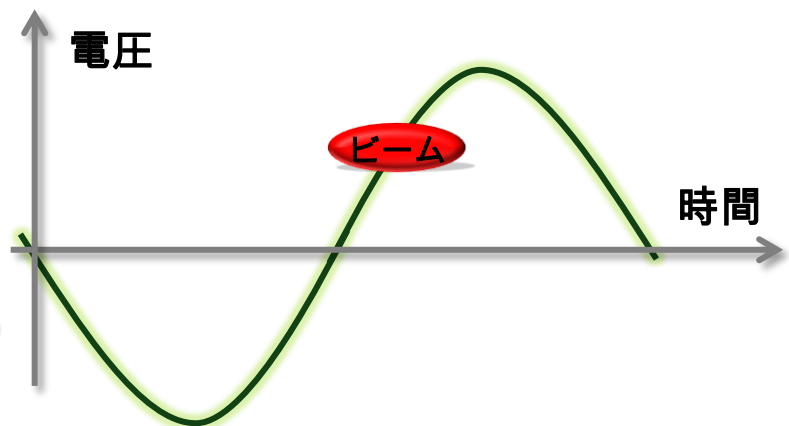
誘導加速セル

周長	$C_0$	37.7 m
最大磁場	$B_{max}$	0.84 T
入射エネルギー	$E_{inj}$	200 keV
繰り返し周波数	$f$	10Hz

# 誘導加速システムの背景

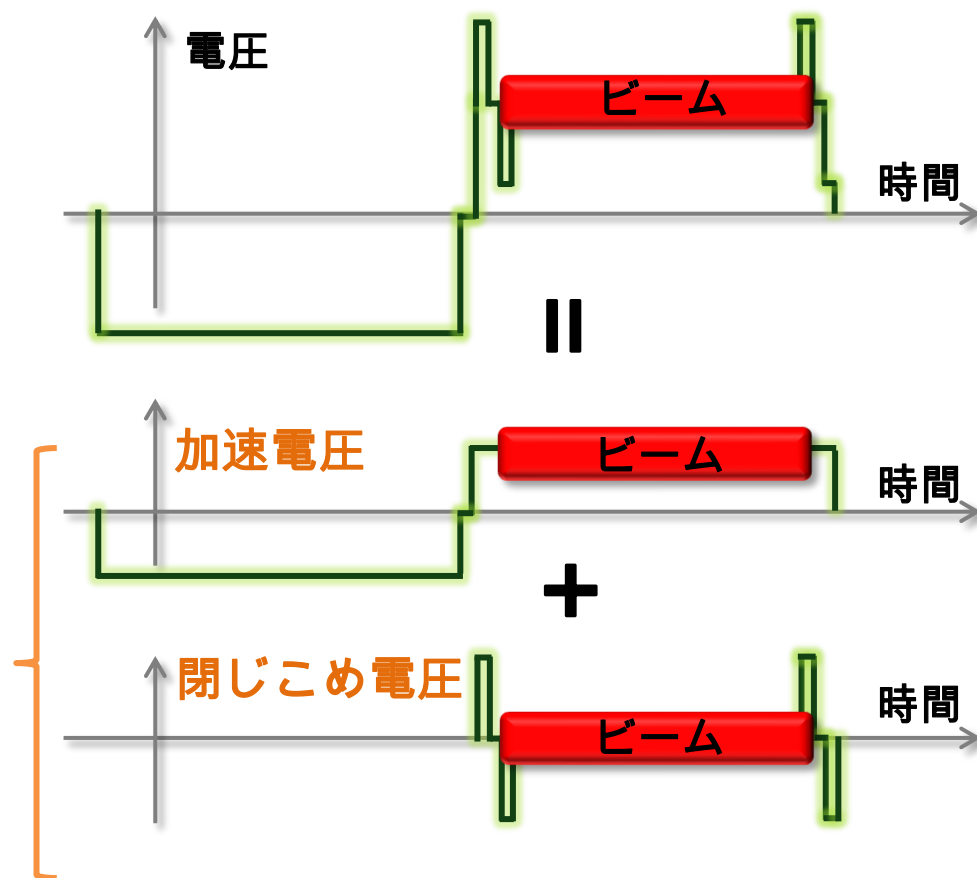
近年の高速な半導体スイッチング技術により，誘導加速システムが可能となった．

## 高周波加速方式



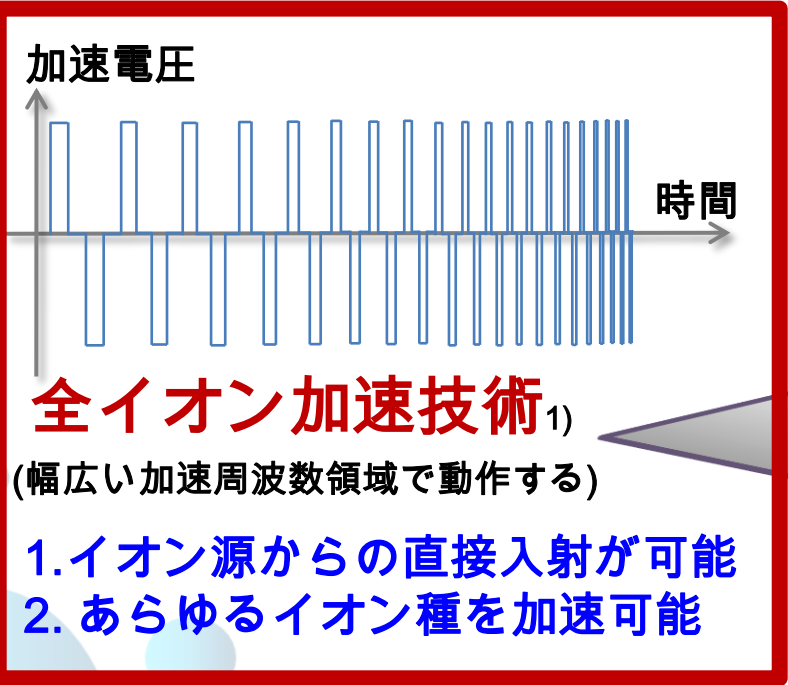
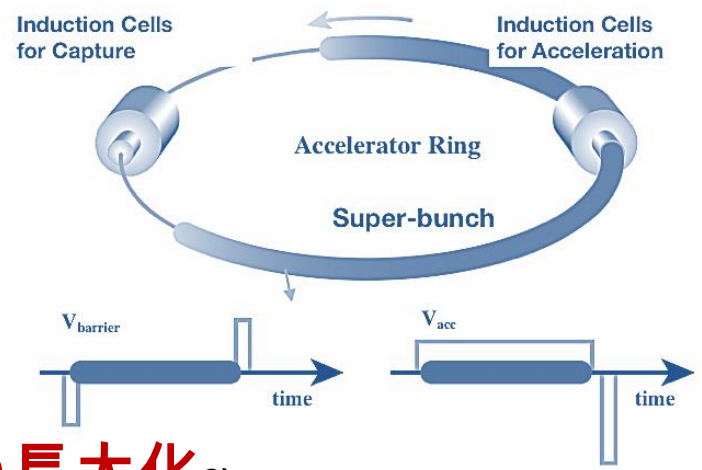
閉じ込め& 加速機能が結合

## 誘導加速方式



機能分離により最適なバケツが可能

# 誘導加速を用いる3つの利点



加速領域の長大化<sup>2)</sup>

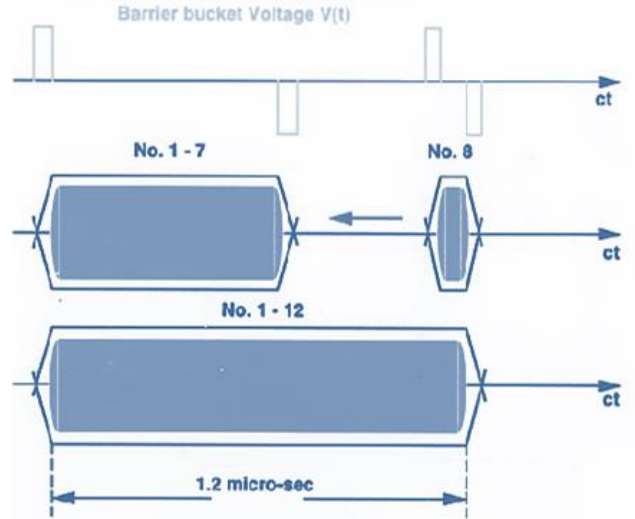
## 全イオン加速技術<sup>1)</sup>

(幅広い加速周波数領域で動作する)

- 1. イオン源からの直接入射が可能
- 2. あらゆるイオン種を加速可能

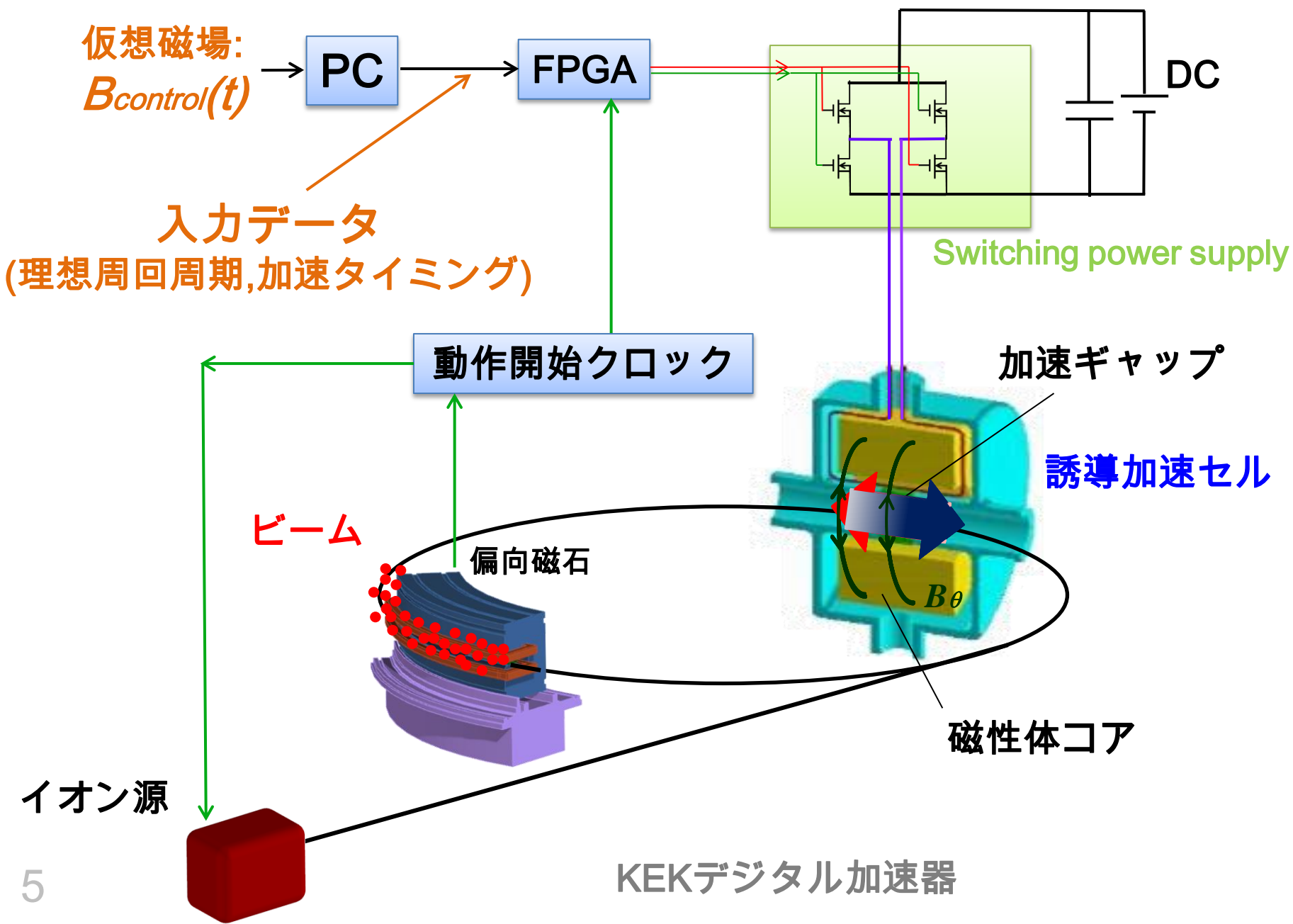
## 柔軟なビームハンドリング<sup>3)</sup>

### Multi-bunch Stacking



1) \*K. Takayama, Y. Arakida, T. Iwashita, Y. Shimosaki, T. Dixit, K. Torikai, "All-ion accelerators: An injector-free synchrotron", *Journal of Applied Physics* **101**, 063304 (2007) with Erratum  
 2) \*K. Takayama, J. Kishiro, M. Sakuda, Y. Shimosaki, and M. Wake, "Superbunch Hadron Colliders", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 144801 (2002)  
 3) \*Y. Shimosaki, K. Takayama and K. Torikai, "Quasiadiabatic, Nonfocusing Transition-Energy Crossing", *Phys. Rev. Lett.* **96**, 134801 (2006)

# KEKデジタル加速器の誘導加速システムについて



# 完全予測制御を採用

現状ではビームシグナルのSN比が悪く、フィードバック制御が困難であった

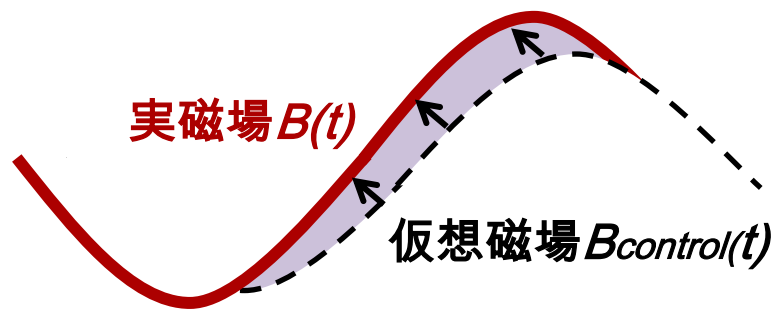


方法:

1. 仮想磁場  $B_{control}(t)$  を設定して、そこからすべての必要な理想的な周回周期と加速タイミングを計算し、必要データを予めFPGAに書き込む
2. ビームの挙動から、実磁場  $B_{actual}(t)$  に適応するように仮想磁場  $B_{control}(t)$  を修正する。

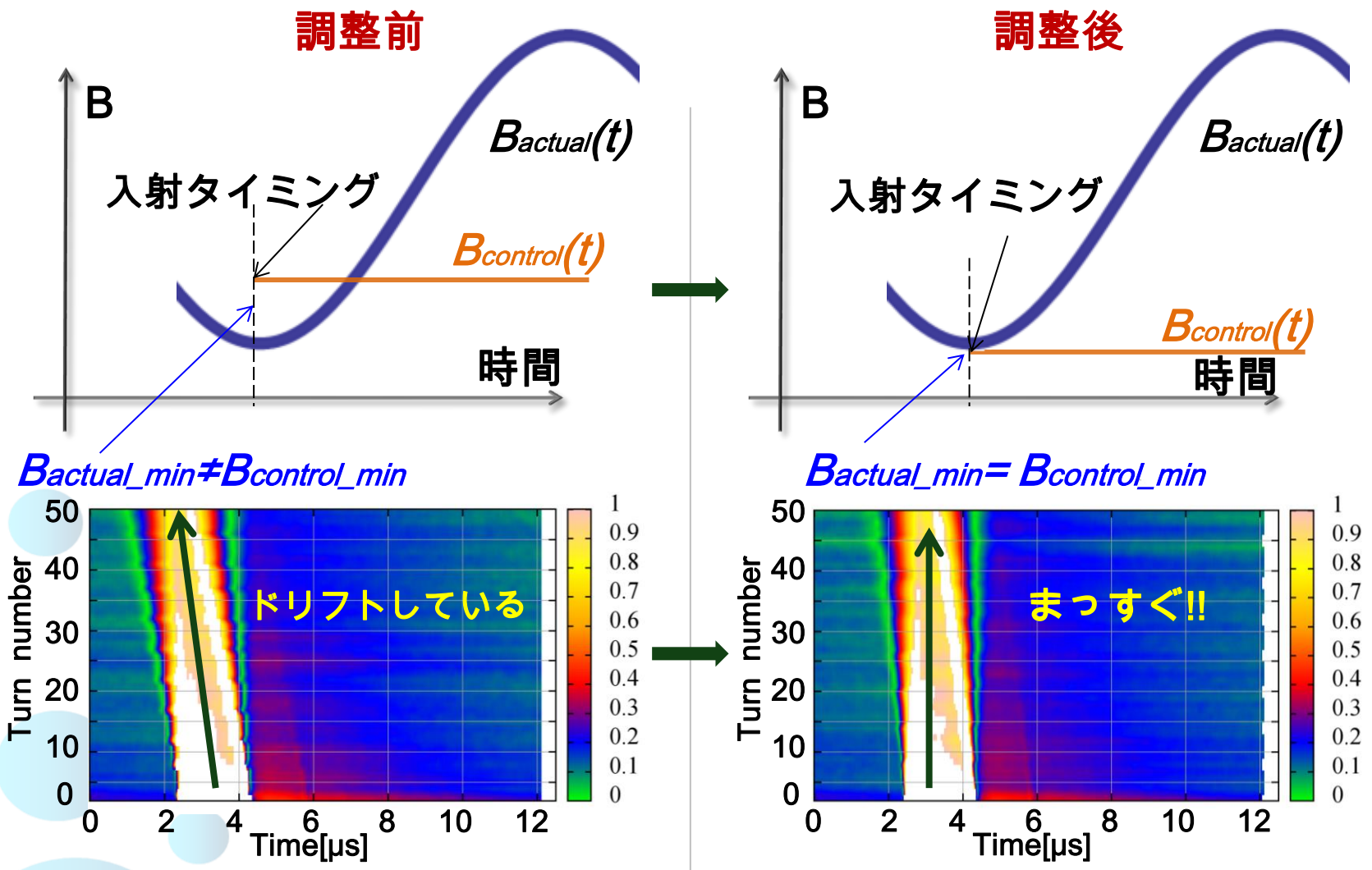
$$B_{actual}(t) = B_{control}(t) \Leftrightarrow \begin{cases} B_{actual\_max} = B_{control\_max} & \text{(最大磁場)} \\ B_{actual\_min} = B_{control\_min} & \text{(最小磁場)} \\ \delta = 0 & \text{(位相差)} \end{cases}$$

両者が一致することが  
ビーム加速に不可欠!!



# 仮想磁場の最小値 $B_{min}$ を調整する (無加速)

➡ 残留磁場の影響により、実磁場の計測値は使用できない!!

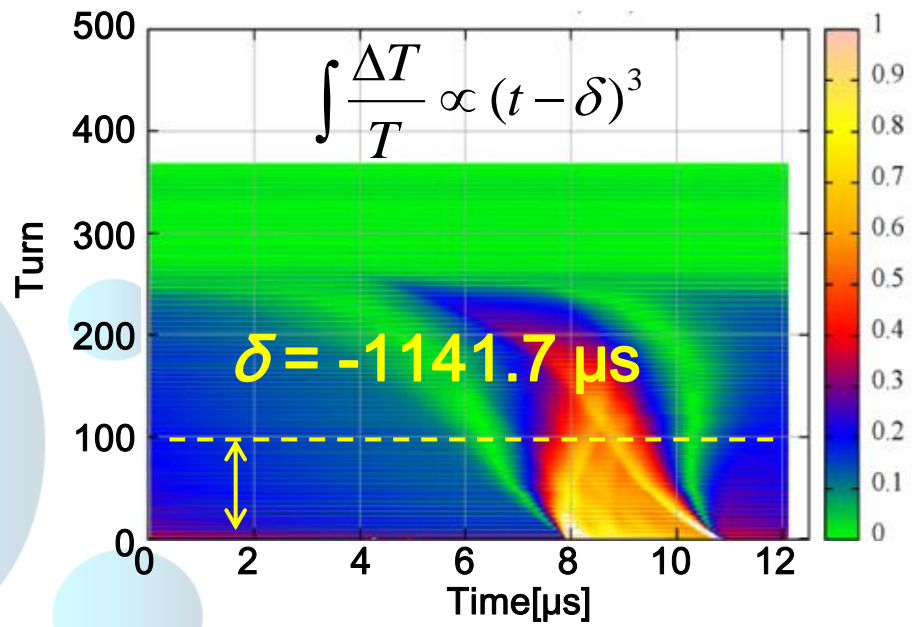
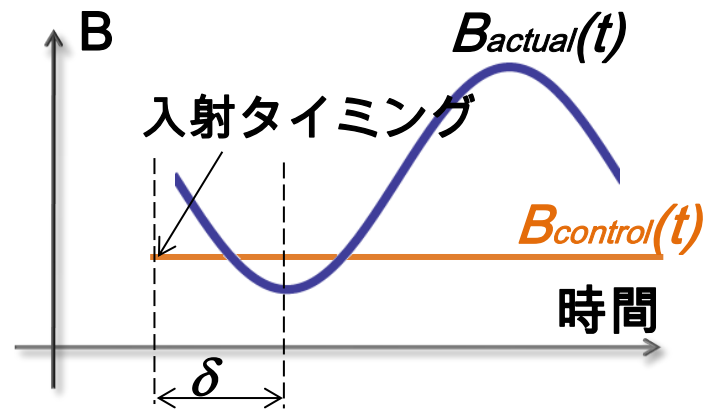


$B_{actual\_min} = B_{control\_min}$  のとき , ビームはまっすぐ動く.

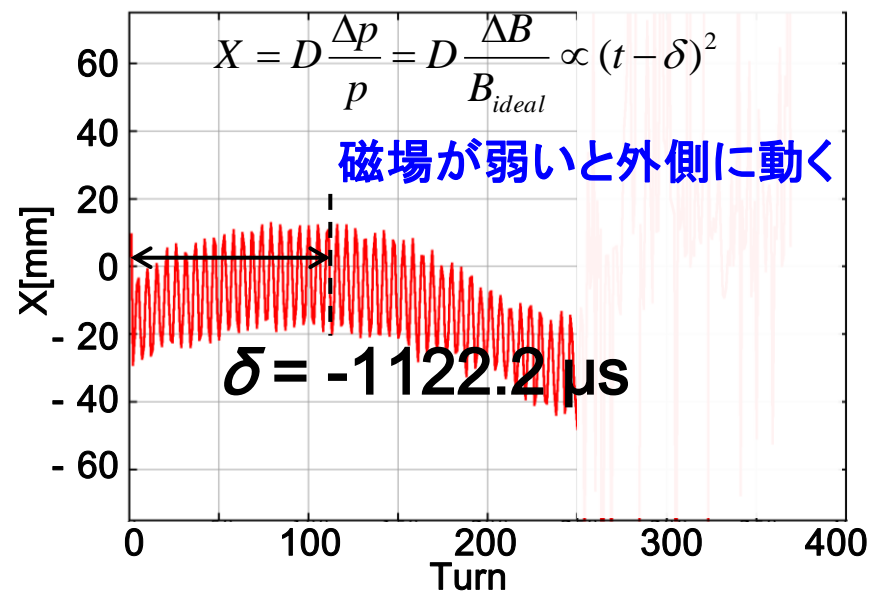
# 仮想磁場と実磁場の位相差 $\delta$ の極小化(無加速)

方法:

1. 意図的に実磁場の入射タイミングよりも前にビームを入射する
2. 位置モニターで、水平方向のビーム位置と周期の時間変化を観察



周期の時間変化



水平方向の時間変化

この方法で、一周回周期程度の精度で位相差 $\delta$ を極小化できる



# 閉じ込め電圧の発生方法

ビームの理想周回周期毎に発生する参照信号 (12μs→1μs)

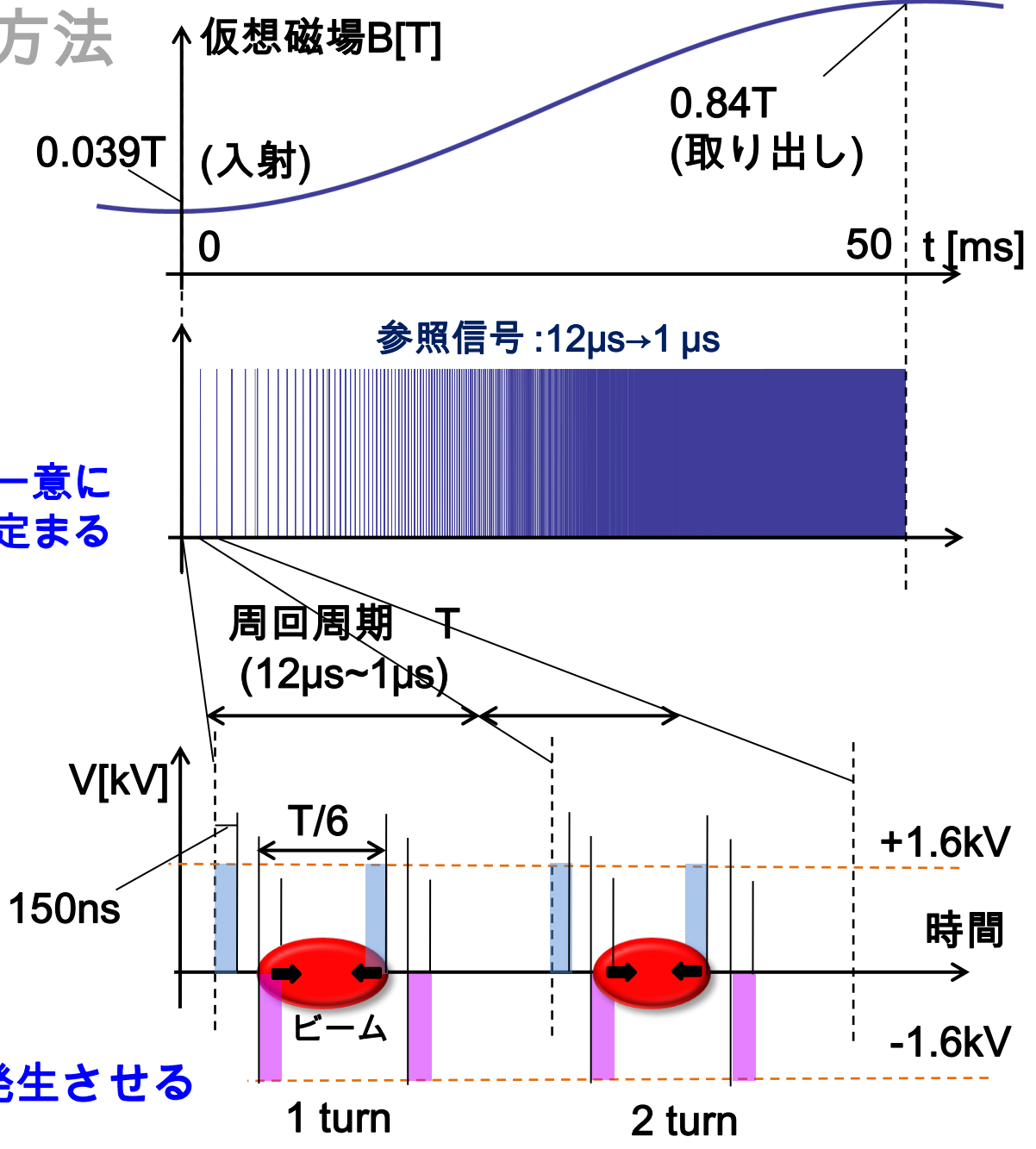
$$T(t) = \frac{C_0}{c} \sqrt{\frac{1+D}{D}}$$

磁場で一意に周期が定まる

$$D = \left\{ \left( \frac{Q}{A} \right) \left( \frac{e\rho}{m_0c} \right) \right\}^2 B^2$$

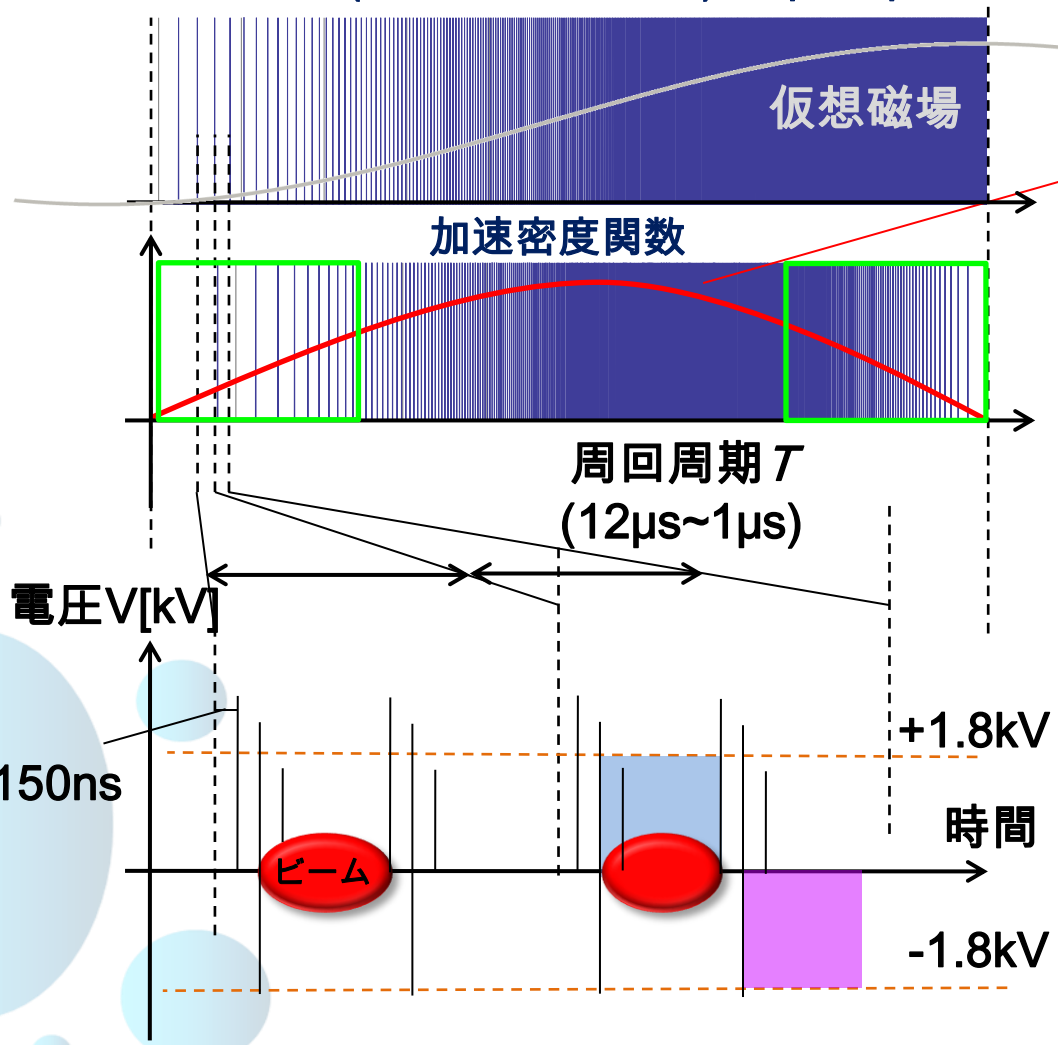
- ただし
- 質量価数比 :  $Q/A$
- 素電荷 :  $e$
- 曲率半径 :  $\rho$
- 陽子質量 :  $m_0$
- 仮想磁場 :  $B(t)$

閉じ込め電圧は毎ターン、発生させる



# 加速電圧の発生方法

参照信号(理想周回周期信号):  $12\mu\text{s} \rightarrow 1\mu\text{s}$



1ターンあたりに必要な加速電圧  $V(t)$ :

$$V(t) = \rho C_0 \frac{dB(t)}{dt}$$

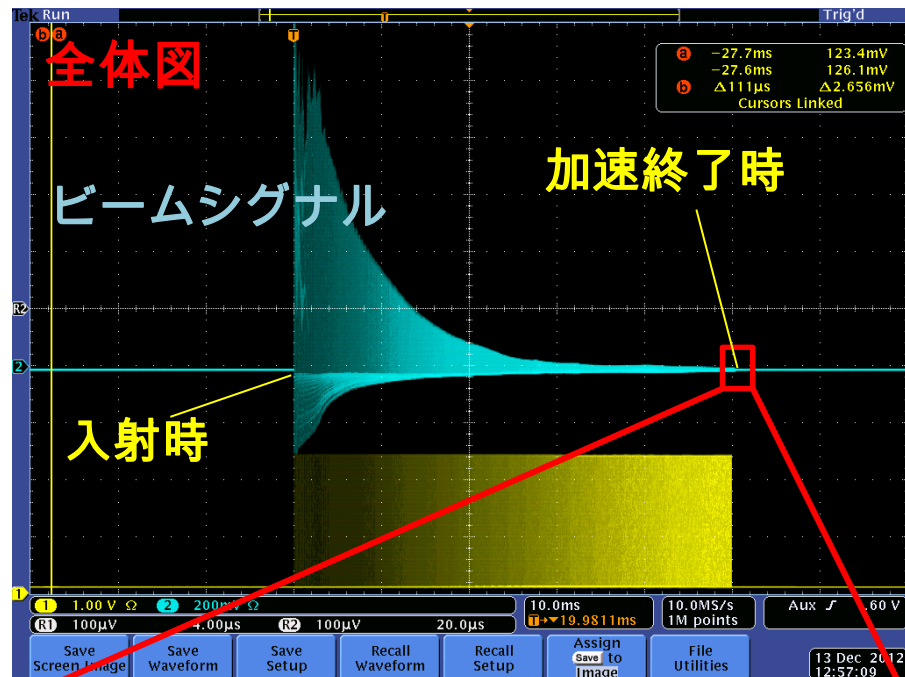
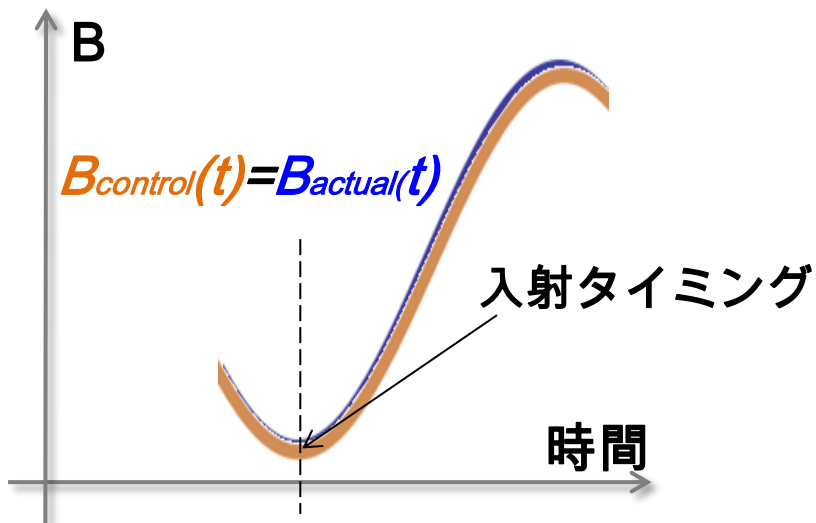
- $\rho$  : リングの曲率半径
- $C_0$  : リング周長
- $B(t)$ : 仮想磁場

$$\delta(N+1) = \begin{cases} 1 & \dots (\sum_{n=1}^{N+1} V(n) - V_0 \sum_{n=1}^N \delta(n) > V_0) \\ 0 & \dots (\sum_{n=1}^{N+1} V(n) - V_0 \sum_{n=1}^N \delta(n) < V_0) \end{cases}$$

- $V_0$  : 一定の誘導加速電圧
- $\delta(n)$ : 加速密度テーブル
- $n$ : ターン数

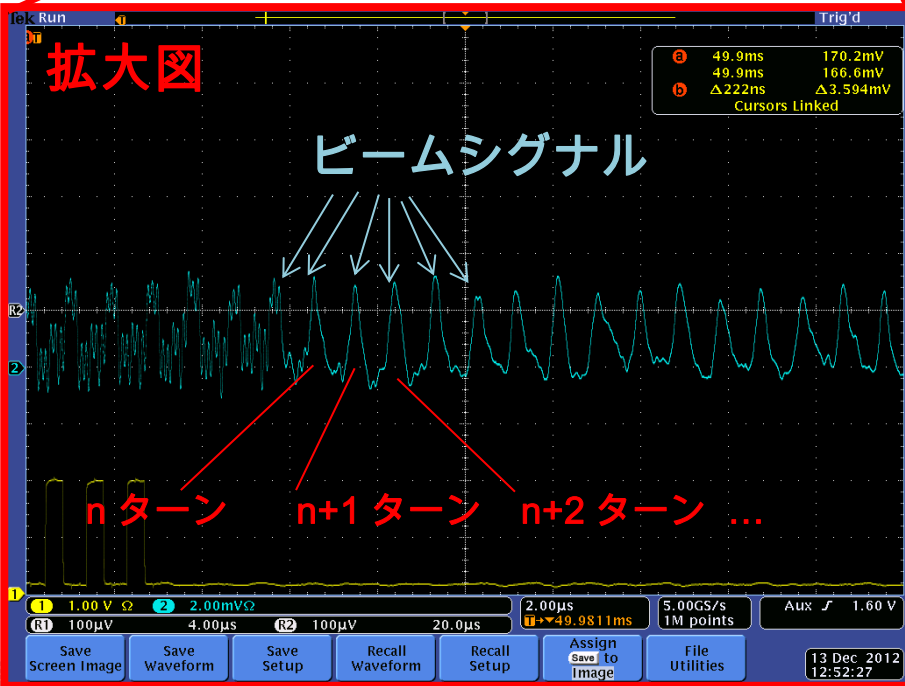
疑似的に必要な加速電圧を与えるように、誘導加速電圧を離散的に発生させる

# ビーム加速実験の結果



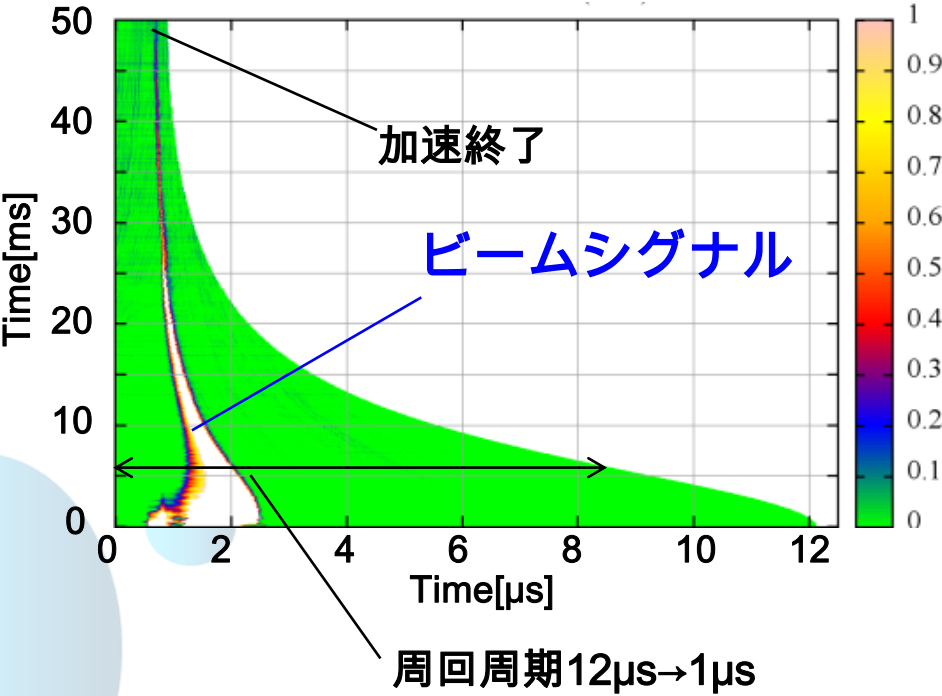
## 実験条件:

偏向磁場	0.039→0.51[T]
質量価数比A/Q	4/1
エネルギー	0.05→8[MeV/u]
入射電流	~100 $\mu$ A

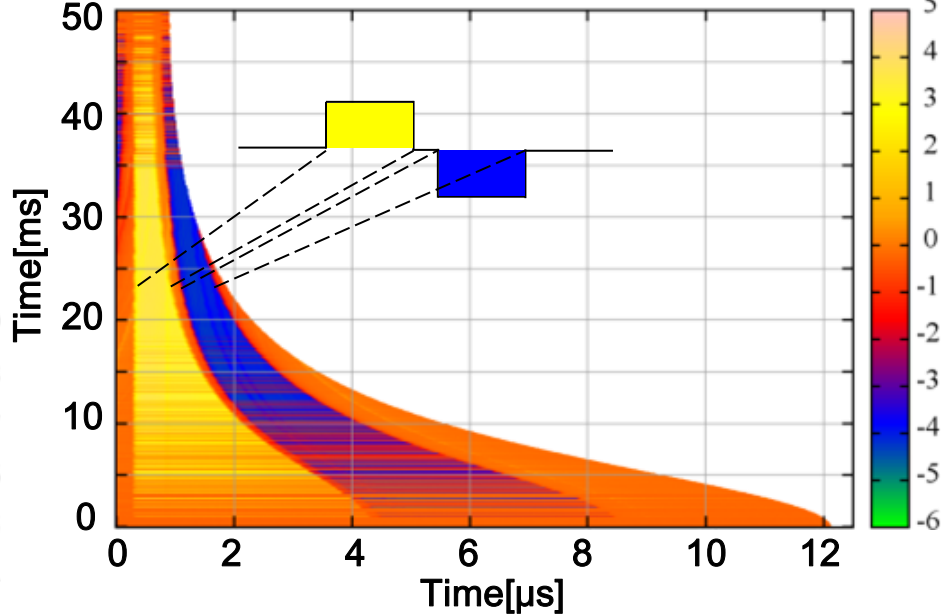


# ビーム加速の解析結果 1

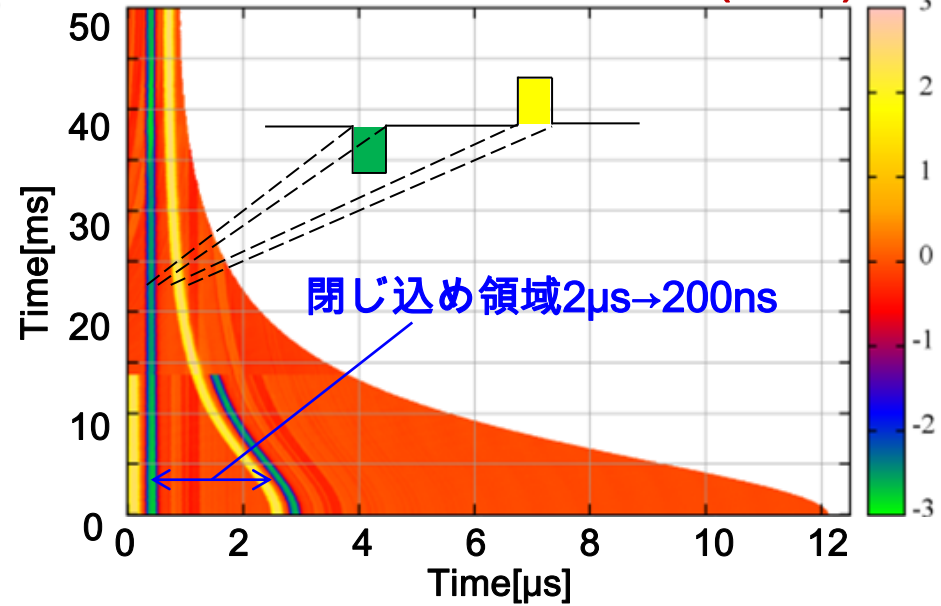
### ビームの実験波形



### 加速電圧の実験波形(±1.6kV)



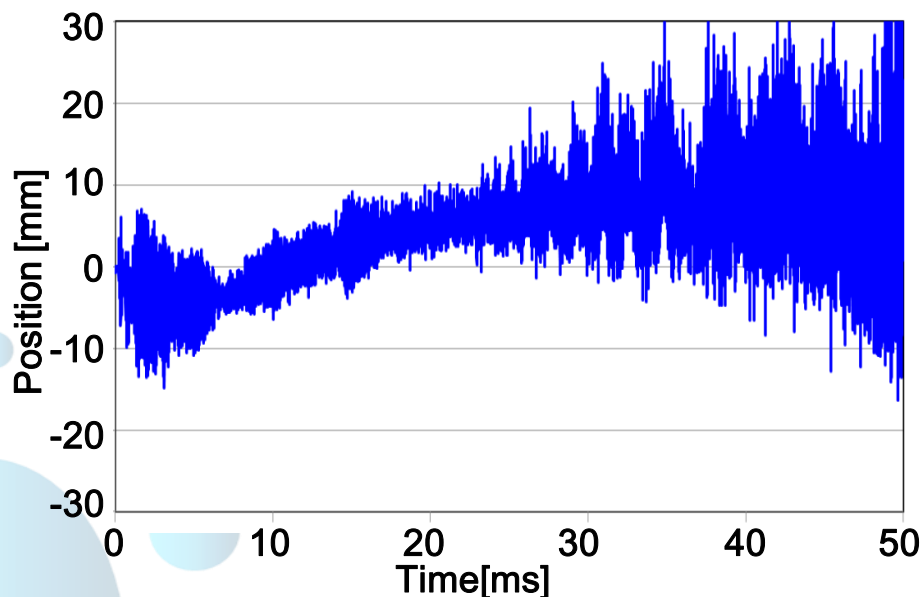
### 閉じこめ電圧の実験波形(±2kV)



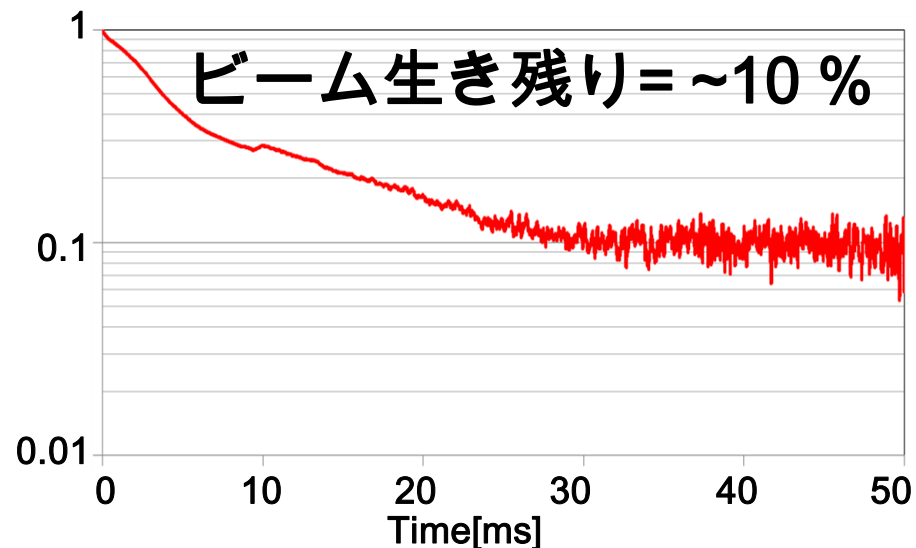
周回周波数が10倍変化する加速に成功!  
→全イオン加速技術を原理的に実証した

# ビーム加速の解析結果 2

## ビーム水平位置の時間変化



## ビームロス



ビーム軌道が外側へ移動している  
→ 仮想磁場と実磁場との微妙なずれが原因?

低エネルギー領域における  
残留ガスとの相互作用が大きい  
→ 高真空化へ

# 結論

- ◆ 完全予測制御における、仮想磁場の決定方法を見出した
- ◆ 加速機器調整のための試験運転ではあるが、  
KEKデジタル加速器において超低エネルギー領域からの加速に成功した  
➡ **Fast Cycling 誘導加速シンクロトロンを用いた  
全イオン加速技術を原理的に実証!!**

## 今後の予定

- ◆ KEKデジタル加速器のビーム供給へ向けた  
さらなる全イオン加速技術の追求
- ◆ 誘導加速をもちいたビームハンドリング技術の実証
- ◆ 加速領域の長大化の実証

ご静聴ありがとうございました。