

# 粒子線治療用シンクロトロンにおける ベータトロン振動数の計算と実測

2014/08/11

○青木孝道<sup>A)</sup>，えび名風太郎<sup>A)</sup>，  
野村拓也<sup>B)</sup>，梅澤真澄<sup>A)</sup>，平本和夫<sup>A)</sup>

A)株式会社 日立製作所 日立研究所

B)株式会社 日立製作所 医療・核装置生産本部

# Contents

---

1. 章 動機と目的
2. 章 開発シンクロトロンの諸元
3. 章 ベータトロン振動数の計算
4. 章 ビームコミッショニング
5. 章 まとめ

---

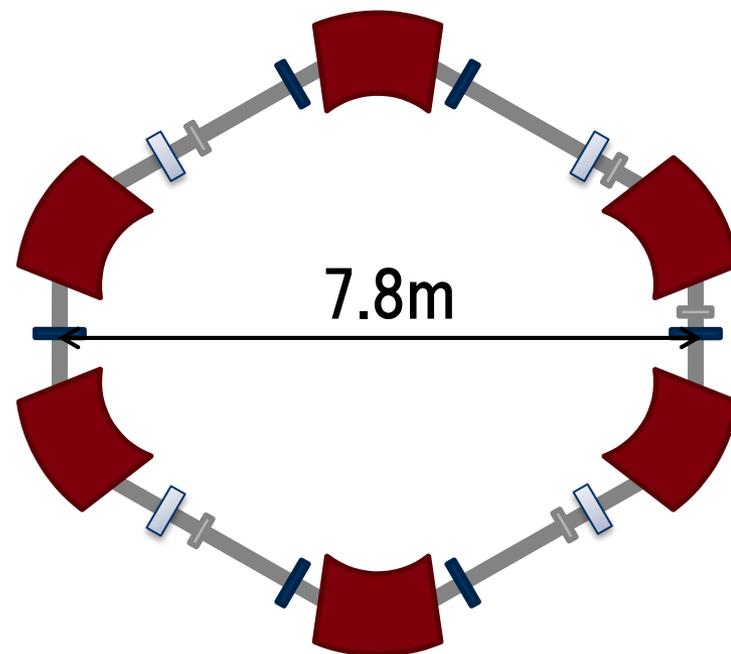
# 1. 章 動機と目的

## ■ 動機

陽子線治療では水中での飛程30cmを実現する  
220MeVの陽子ビームを利用。  
当社では加速器としてシンクロトロンを採用。  
システム小型化が必要。

## ■ 目的

小型シンクロトロンの開発



従来型シンクロトロン(周長:23m)

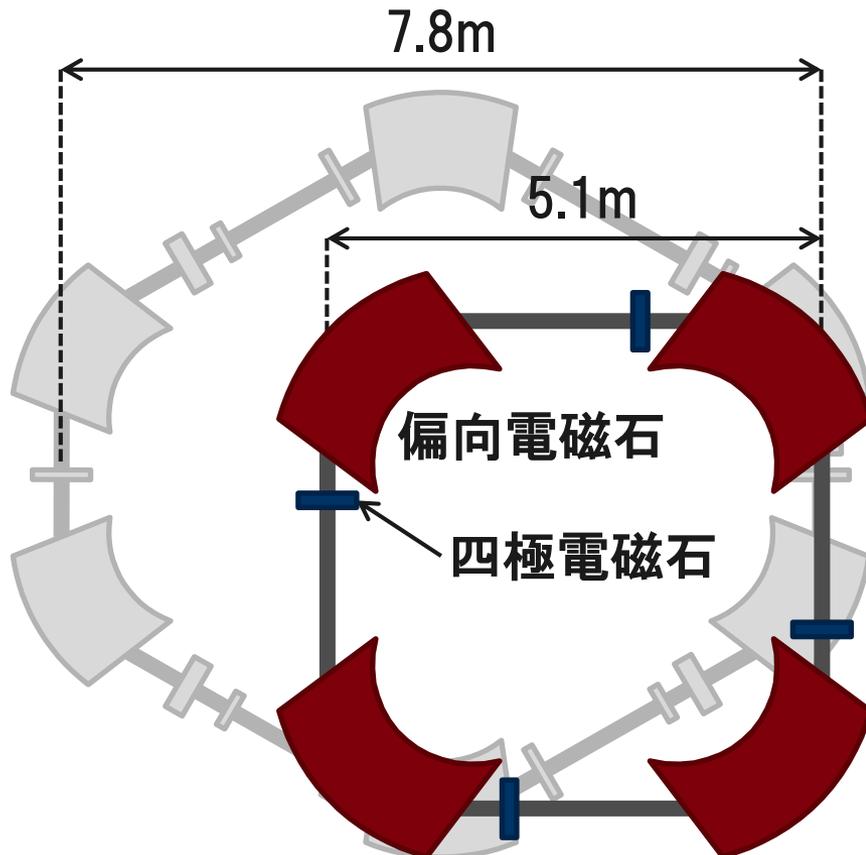
---

## 2. 章 小型シンクロトロン of 諸元

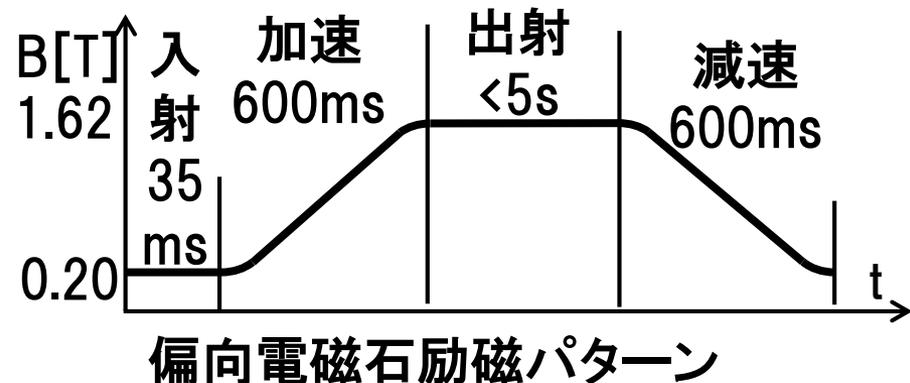
# 2-1 小型シンクロトロン of 仕様

## ■ 機器配置と運転パターン

四回対称のラティスを採用。  
四極電磁石を一系統に削減し、  
周長を18m(従来23m)に短縮。



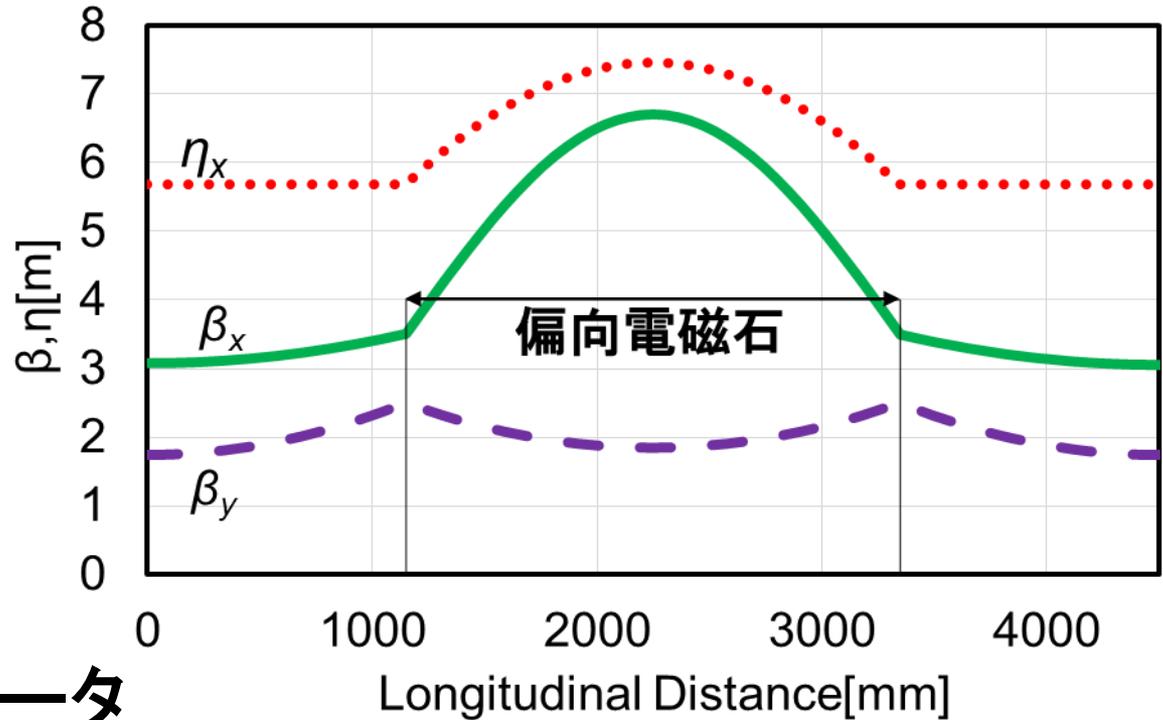
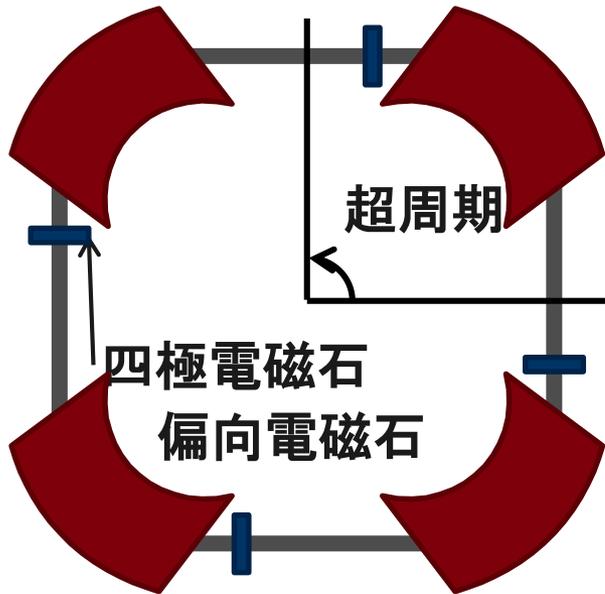
項目	仕様値
加速粒子	陽子
超周期	4
周長	18.0m
直線部長	2.3m
偏向部偏向半径	1.4m
入射エネルギー	>3.5MeV
取り出しエネルギー	70~230MeV



# 2-2 小型シンクロトロン of 運転条件

## ■ シンクロトロン of 光学パラメータ

弱収束 ( $\nu_x < 1$ ) での運転。四極電磁石が無励磁でも安定周回可能。



## ■ 偏向電磁石パラメータ

偏向電磁石エッジの輸送行列

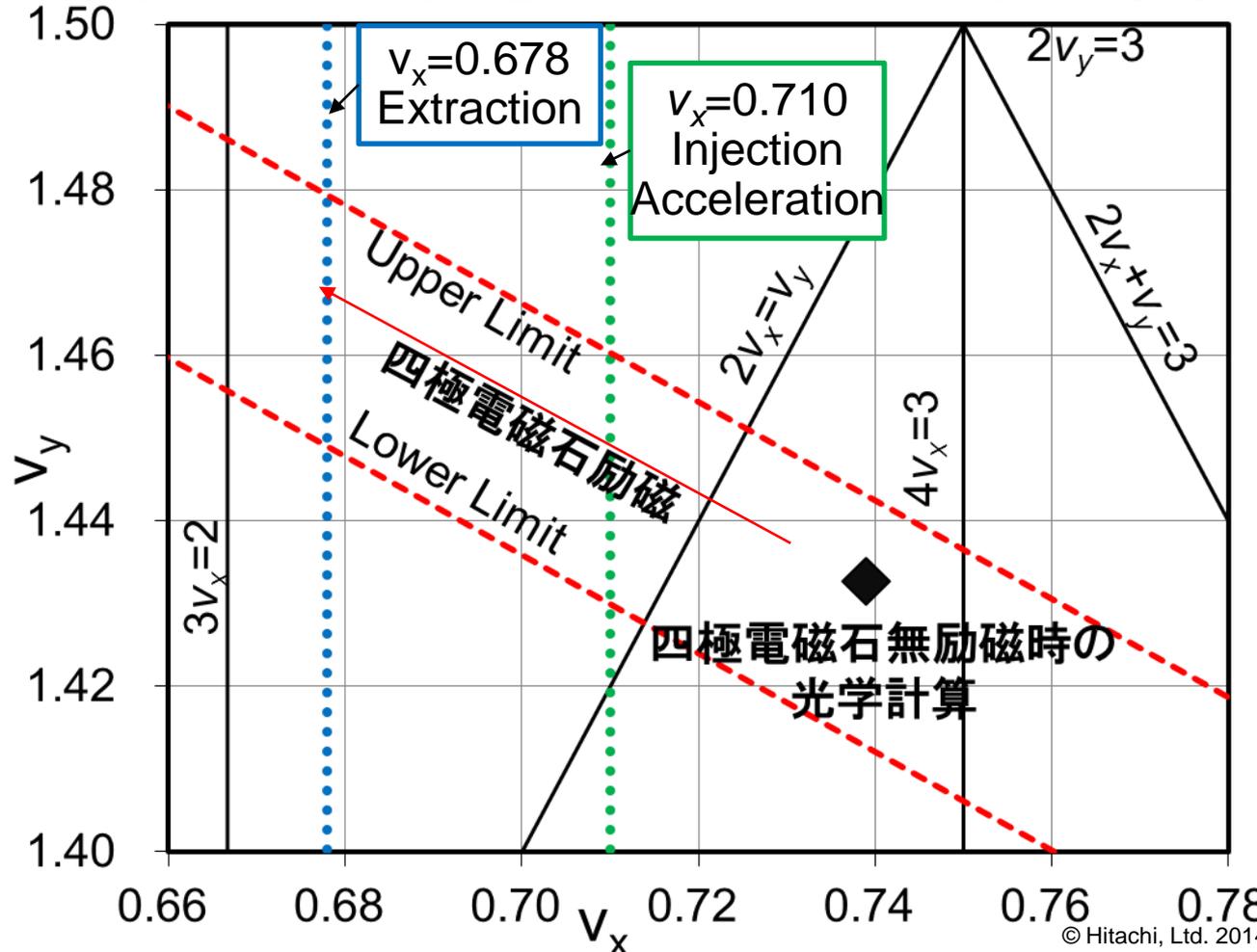
$$\text{水平: } R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\rho} \tan \varepsilon & 1 \end{bmatrix} \quad \text{鉛直: } R_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{\rho} \tan(\varepsilon - \varphi) & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \varepsilon = 37.0 [\text{度}] \\ \varphi = 1.8 [\text{度}] \end{matrix}$$

# 2-2 小型シンクロトロンでの運転条件

## ■ベータatron振動数の条件

四極電磁石によってベータatron振動数を変更。

共鳴線との距離を基に四極電磁石無励磁時の値に許容範囲を設定。



---

## 3. 章 ベータトロン振動数の計算

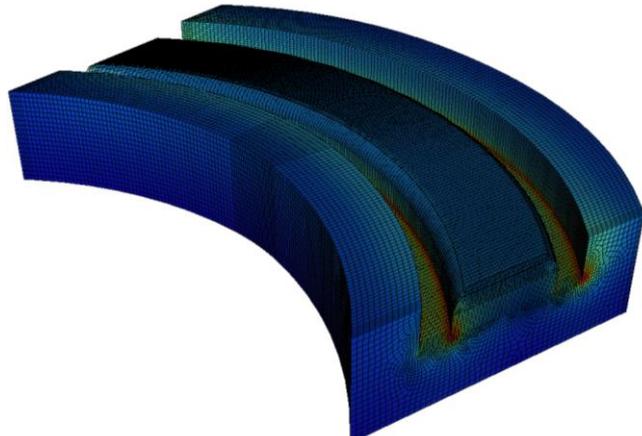
### ■三次元磁場計算体系

計算コード:EM-Solution 要素数:400万

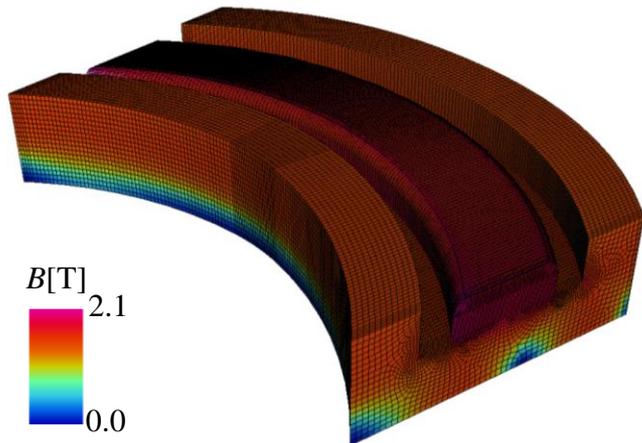
偏向電磁石と四極電磁石からなる1超周期分の体系で計算。

# 3-2 偏向電磁石の三次元磁場結果

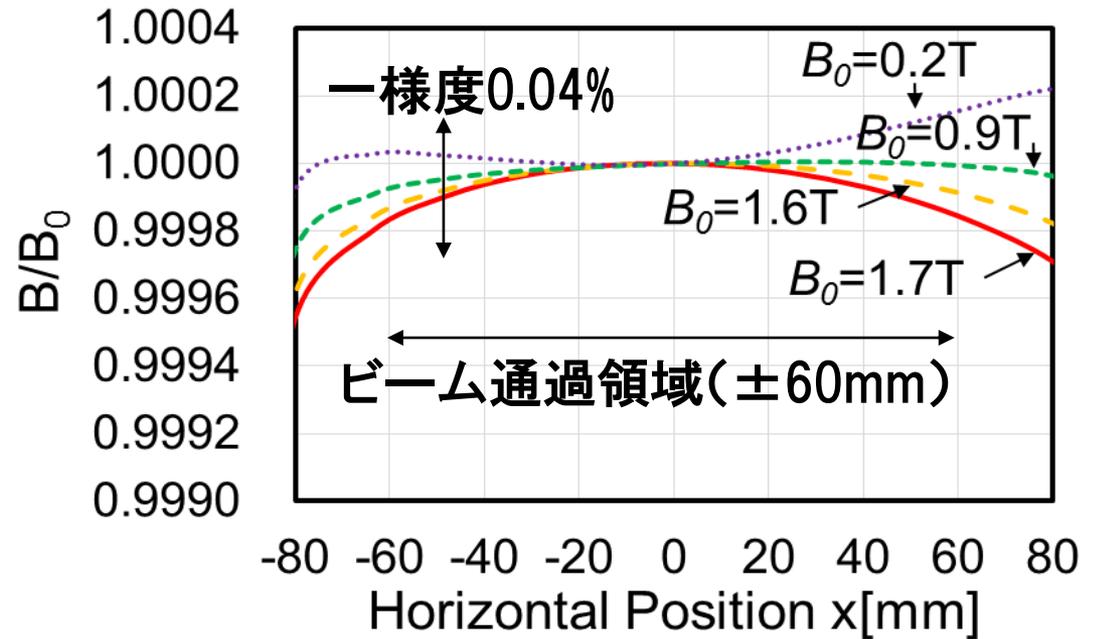
## ■三次元磁場計算結果



中心磁場  $B_0 = 0.2\text{T}$



中心磁場  $B_0 = 1.7\text{T}$

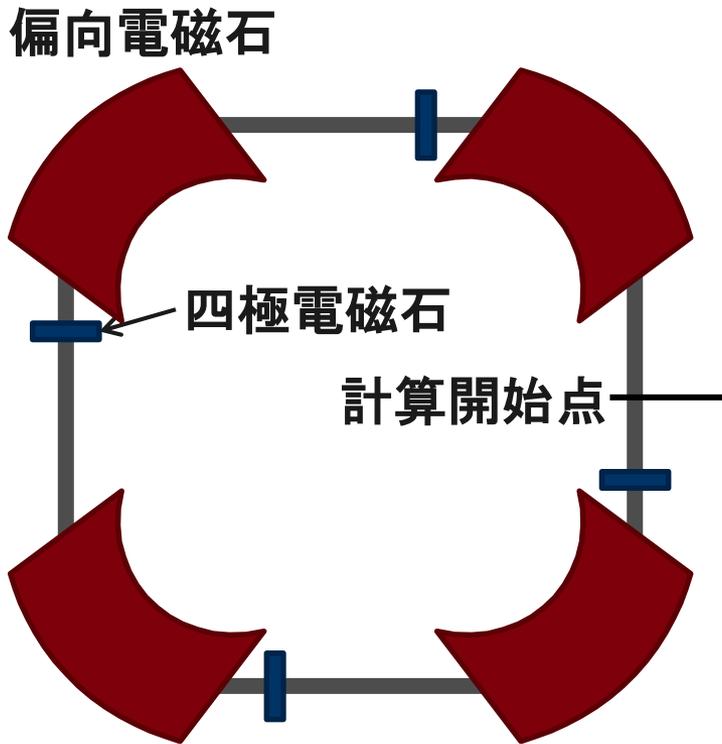


0.2T(入射時)から1.7T(最大エネルギー)まで水平方向±60mmの範囲で0.04%の一様度を確認。

# 3-3 粒子追跡計算

## ■ 粒子追跡計算の計算条件

計算磁場分布に基づき直線部の中点を開始点とし  
粒子軌道をRunge-Kutta法により計算。



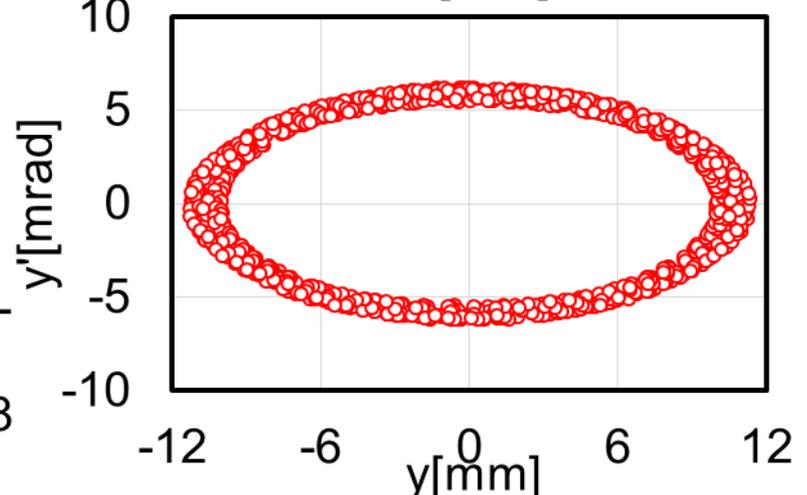
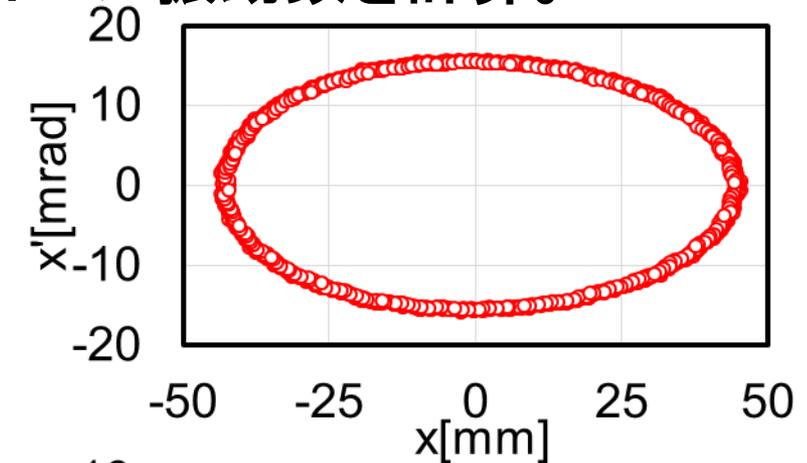
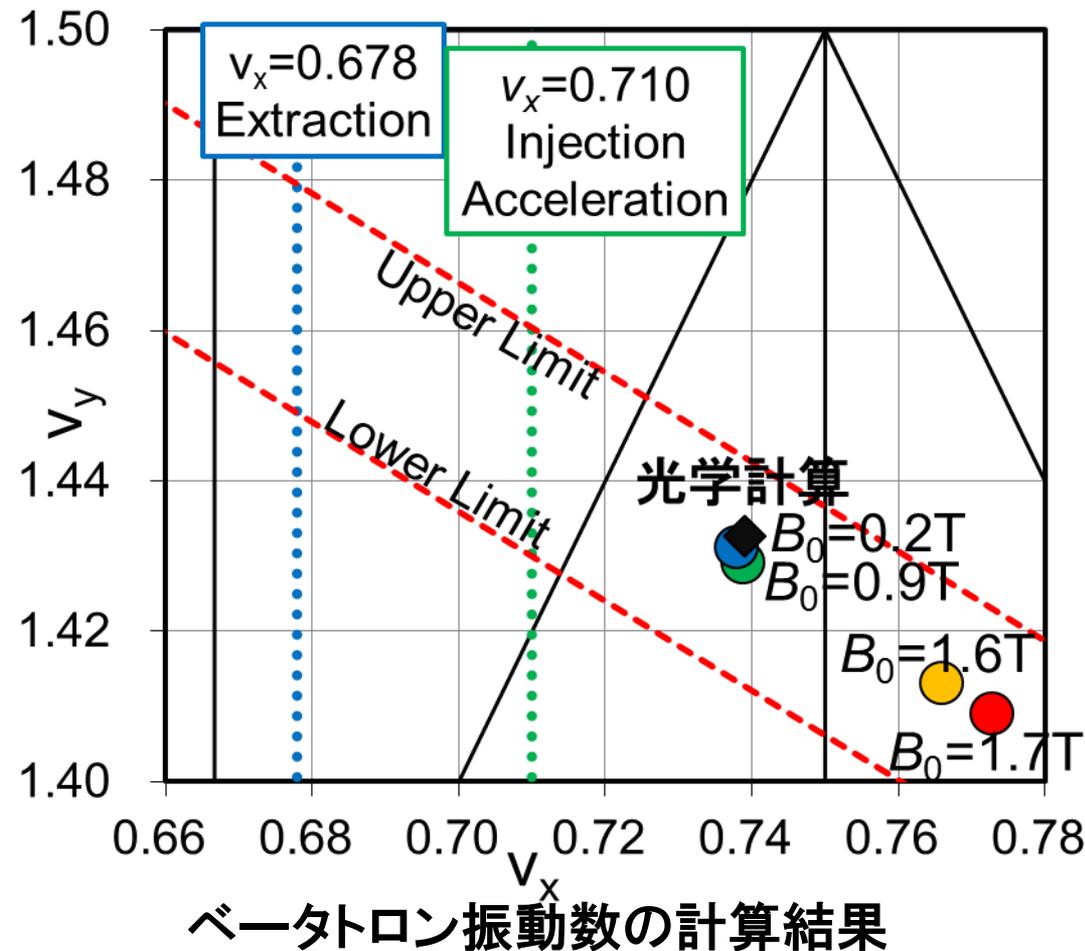
### 計算条件

項目	値
ステップ数	5100ステップ/ターン
計算ターン数	1000ターン
水平初期変位	45mm
水平軌道傾き	0mrad
鉛直初期変位	10mm
鉛直軌道傾き	0mrad
中心磁場	0.2, 0.9, 1.6, 1.7T

# 3-4 粒子追跡計算

## ■計算結果

位相空間上に描く固有楕円からベータatron振動数を計算。



位相空間上の固有楕円 ( $B_0=1.7T$ )

---

## 4. 章 ビームコミッショニング

# 4-1 ビームコミッショニング

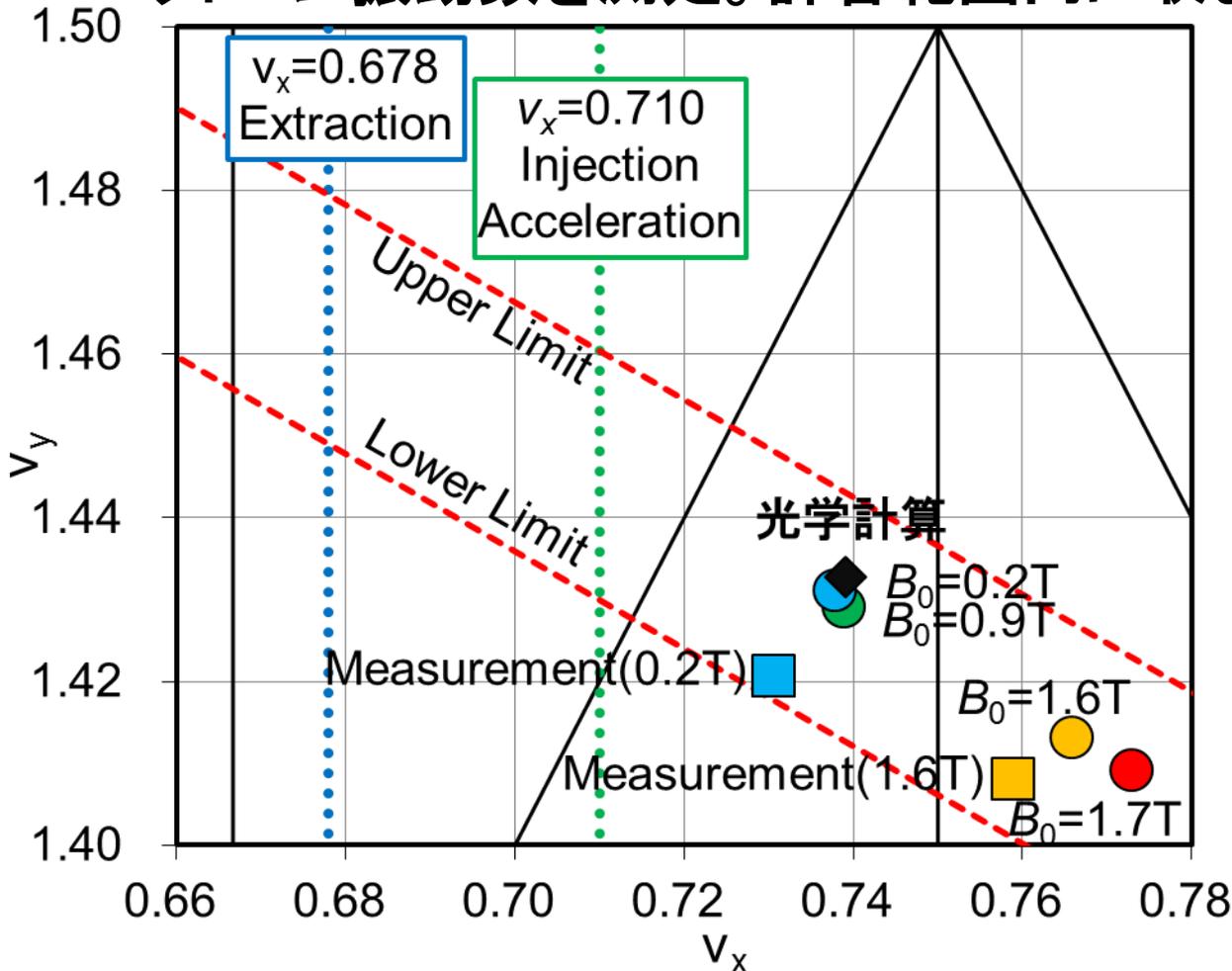
## ■ 製作したシンクロトロン

北海道大学病院に設置。2013年4月ビームコミッショニングを開始。

# 4-2 ベータトロン振動数の測定

## ■測定結果

入射時と最大エネルギーでの四極電磁石無励磁のベータトロン振動数を測定。許容範囲内に収まることを確認。



ベータトロン振動数の計算値と実測の差は0.01以下。差の原因は磁極透磁率のばらつきと空間電荷効果によるチューンシフトと考察。

---

## 4. 章 まとめ

## ■まとめ

- 陽子線治療用の小型四回対称シンクロトロンを開発した。従来二系統あった四極電磁石を一系統のみにすることで、小型化を実現した。
- ベータトロン振動数の計算には三次元磁場計算と粒子追跡計算を用い、所定の収束力が得られることを確認した。
- 2013年4月よりビームコミッショニングを開始した。当初の設計通りの運転が実現され、2週間で最大エネルギーのビームの取り出しに成功した。
- 2014年3月より開発シンクロトロンは治療に供用されている。

## ■謝辞

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

**END**

---

## 粒子線治療用シンクロトロンにおける ベータトロン振動数の計算と実測

2014/08/11

○青木孝道<sup>A)</sup>, えび名風太郎<sup>A)</sup>,  
野村拓也<sup>B)</sup>, 梅澤真澄<sup>A)</sup>, 平本和夫<sup>A)</sup>

A) 株式会社 日立製作所 日立研究所

B) 株式会社 日立製作所 医療・核装置生産本部

**HITACHI**  
**Inspire the Next**