

MOOA03

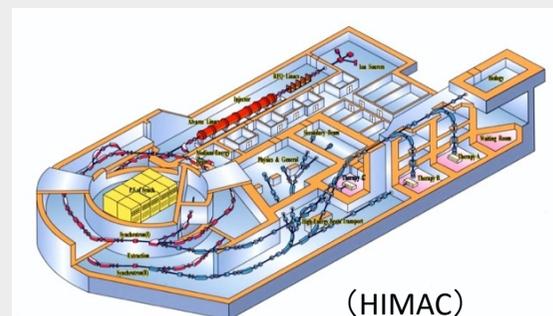
# レーザー加速イオンの超伝導シンクロトロン への直接入射の検討 IV

野田 悦夫, 白井 敏之, 岩田 佳之, 水島 康太,  
野田 章, 近藤 公伯, 藤本 哲也<sup>2</sup>

量研機構, 加速器エンジニアリング<sup>2</sup>

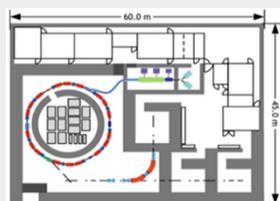
# 量子メスの開発の推移

## 重粒子線がん治療装置

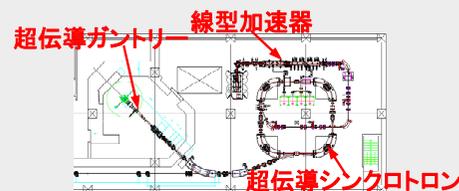


(HIMAC)

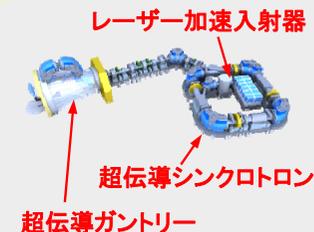
第1世代装置  
1994年 放医研  
120 x 65m



第2~3世代装置  
(例：2010年群馬大学)  
60 x 45m (1/3程度)



第4世代装置  
より小型化と高性能化  
~15 x 30m  
超伝導技術  
マルチイオン照射



第5世代装置  
さらなる小型化  
~10 x 20m  
レーザー加速

## 量子メス

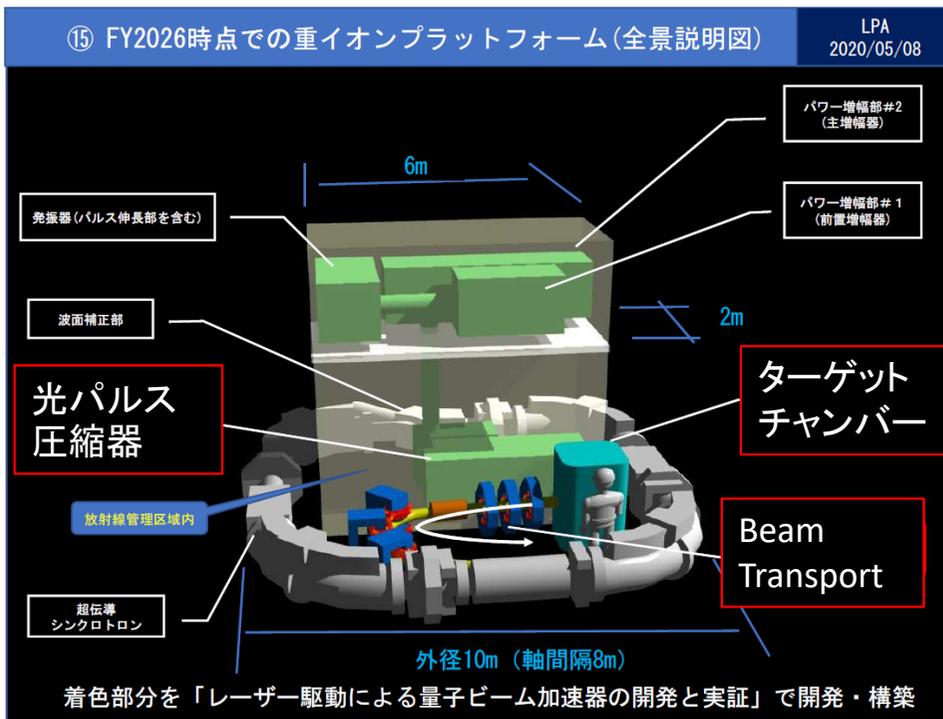


## 量子メス

- 装置が巨大で高額という課題を解決  
→超伝導技術とレーザー加速技術により、**画期的な小型化により国際的な普及を目指す**
- 腫瘍によっては、除去が完璧ではない  
→マルチイオン照射技術により、**治療短期化に向けた高性能化を実現**

## 第5世代量子メス

超伝導化とレーザー加速により大幅な小型化



第5世代量子線がん治療装置(量子メス)  
(入射器、加速器)

Beam Transportからシンクロトロン入射も大きな課題

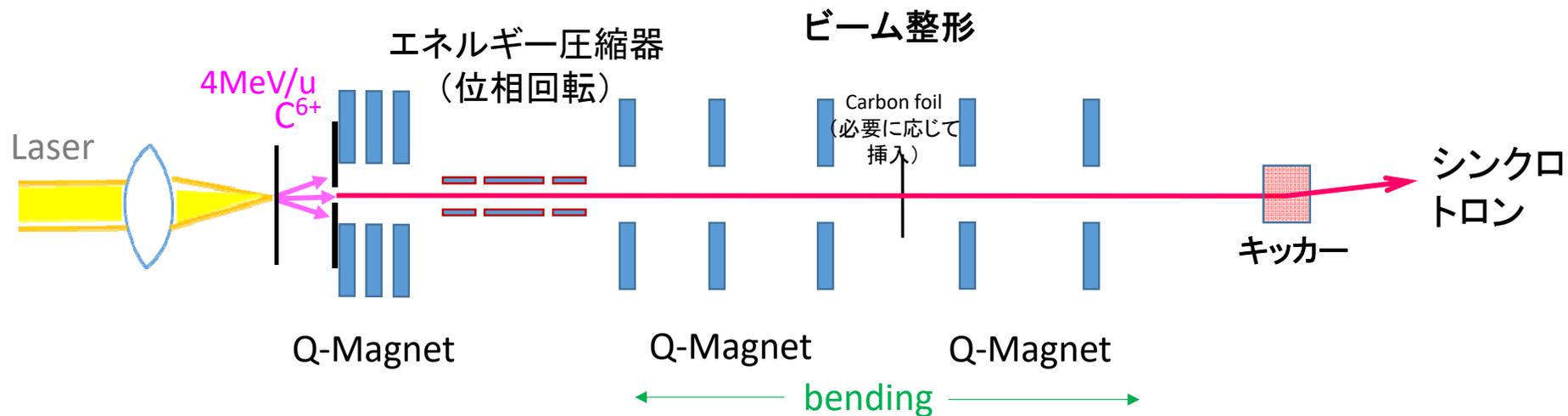
## レーザー加速入射器の特徴

- ・パルス入射：短パルス、繰り返し( $\sim 10\text{Hz}$ )  
イオン密度が桁違いに大きいため空間電荷効果大  
→ パルス伸長
- ・ブロードなエネルギー幅  
生成イオンを効率的に利用するためには速度広がり大  
→ エネルギー圧縮
- ・シンクロトロン蓄積粒子数は  $10^9$ 個 以上必要  
レーザーのイオン発生量は  $10^8$ 個/shot 程度  
→ 多重回入射 (2秒で20回、3秒なら30回)

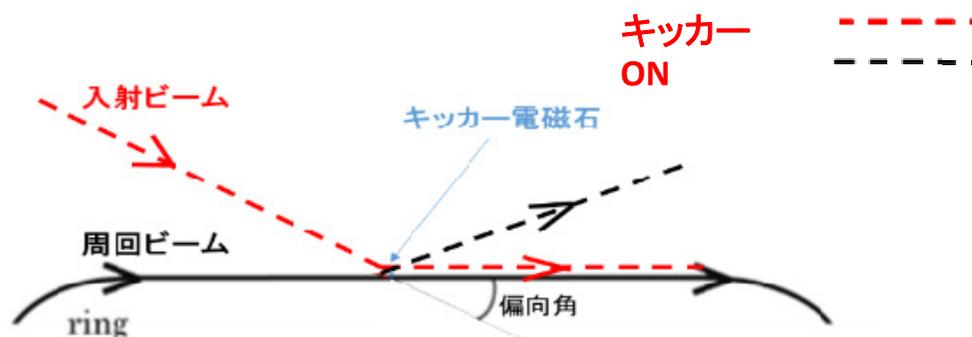
## 入射の基本的な考え方

- ・速度広がりの大きなビームを飛ばして、パルス伸長を行う。
- ・位相回転によりエネルギー圧縮を行う。
- ・Beam Transportで、ビーム整形を行った後、シンクロトロンに入射する(多重回入射)。

# Beam Transport 概要



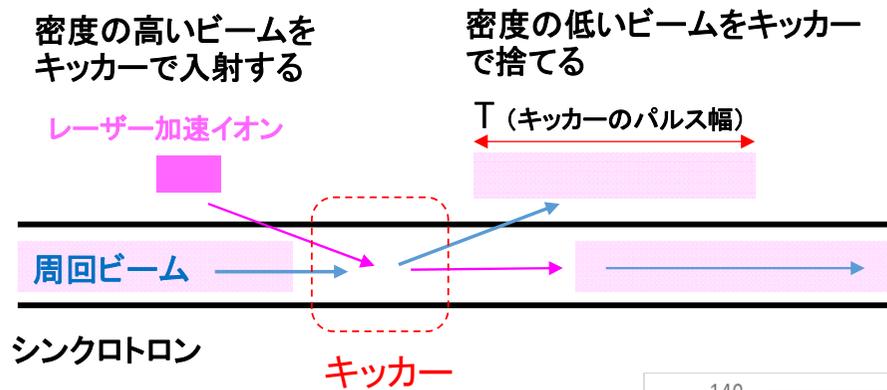
## Beam Transport 概念図



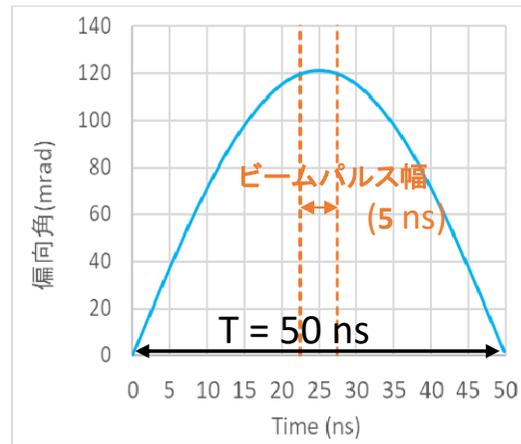
## シンクロトロンへの入射概念図

# 多重回入射

入射ビームのパルス幅(～5 ns)が周回時間(～1μsec)に比べ十分短いため、高速キッカー電磁石による多重回入射方式を提案



多重回入射の概念図



キッカーとビームのパルス幅

n回入射を行ったときの増倍率Gは

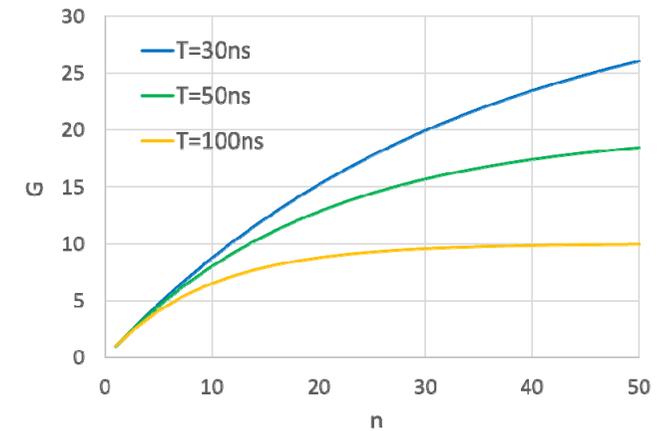
(G:蓄積粒子数/1回あたりの入射粒子数)

$$G = \frac{1 - (1 - L)^n}{L}$$

ここで、Lはビーム入射時の周回イオンビームの損失の割合

$$L = \frac{T}{\tau}$$

(T:キッカーのパルス幅、τ:ビームの周回時間)



入射回数と増幅率

τ=1μs、T=50ns、n=20 (2秒間)

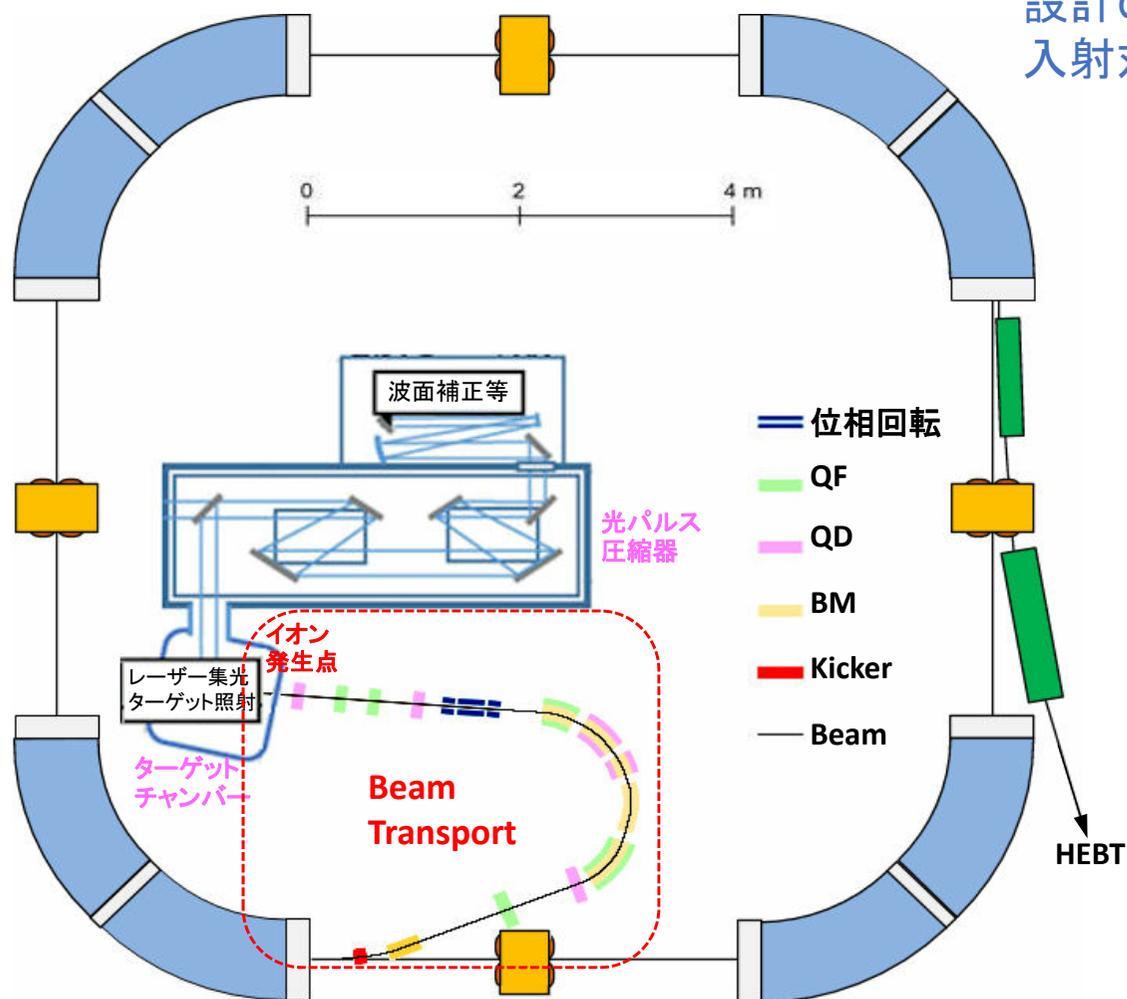
**G=12.8**

## 第5世代量子メス概観図 (Beam Transport と超伝導シンクロトロン)

量子メス設計当初の超伝導シンクロトロン(4T)から最新設計の第4世代量子メス超伝導シンクロトロン(3.5T)に入射対象を変更し、Beam Transport を新たに設計した。

今回の計算に使用 (最新バージョン)

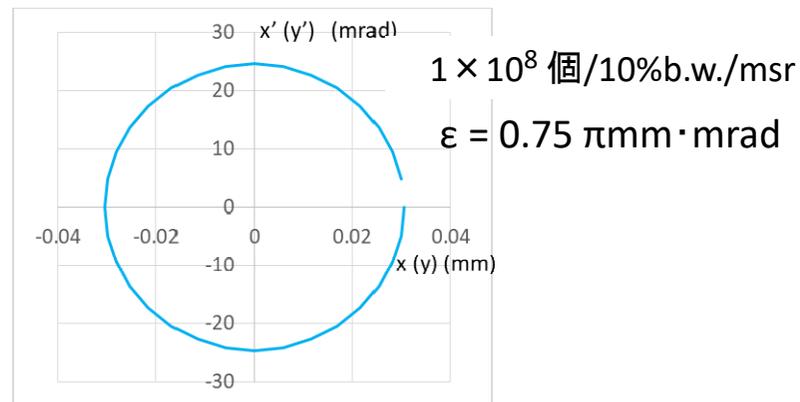
第4世代超伝導シンクロトロンの代表的パラメータ	
偏向磁場強度	<b>0.3~3.5 (T)</b>
偏向半径(90°)	1.889 (m)
シンクロトン周長	28.88 (m)
チューン $\nu_x$	~1.72
チューン $\nu_y$	~1.44
アクセプタンス $\epsilon_x$	<b>200 (<math>\pi</math> mm·mrad)</b>
アクセプタンス $\epsilon_y$	<b>30 (<math>\pi</math> mm·mrad)</b>



# レーザー加速イオン

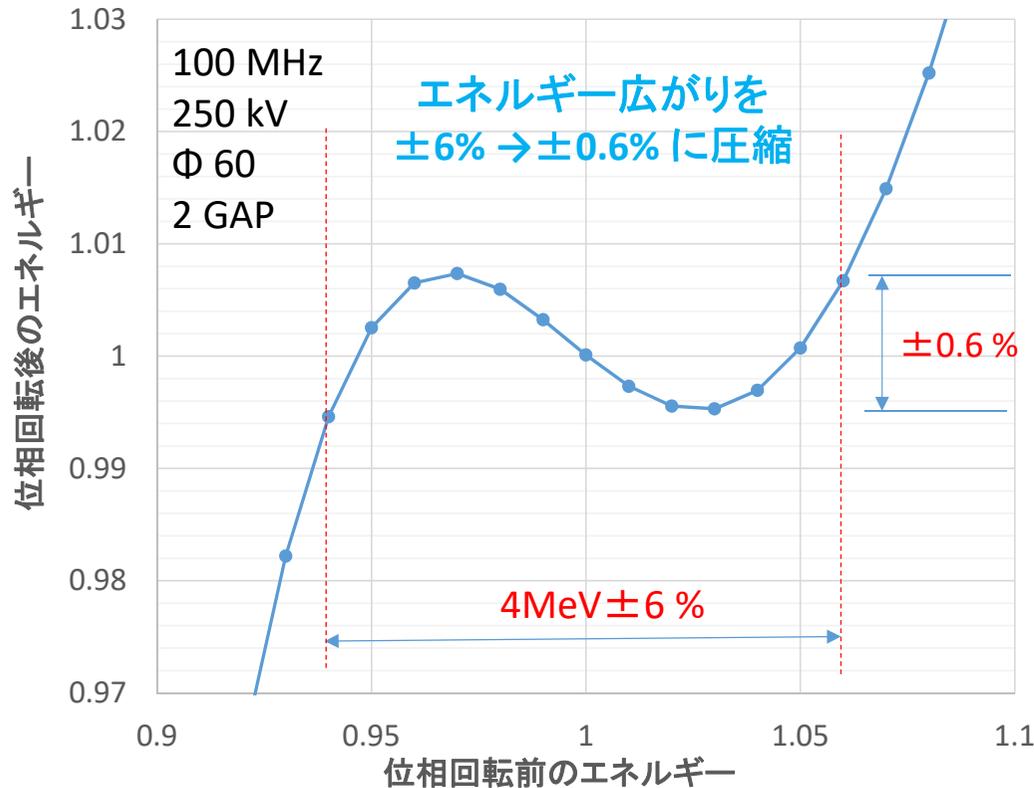
## 計算で用いた加速イオンのパラメータ

イオン発生量(中央値) :  $1 \times 10^8$  個/10%b.w./msr  
(Factor 0.5~2のバラツキを考慮)  
(発生確率は均等と仮定)  
エネルギー :  $E=4\text{MeV} \pm 6\%$   
取り出し立体角 :  $1.9\text{msr}$  ( $\pm 24.6\text{mrad}$ )  
発生時のイオンビーム半径 :  $\sim 0.03\text{ mm}$   
粒子数 :  $1.1 \sim 4.5 \times 10^8$  個 (中央値 :  $2.25 \times 10^8$  個)



ビーム発生点でのビーム形状

## 位相回転によるエネルギー圧縮



## 位相回転前後のエネルギー広がり

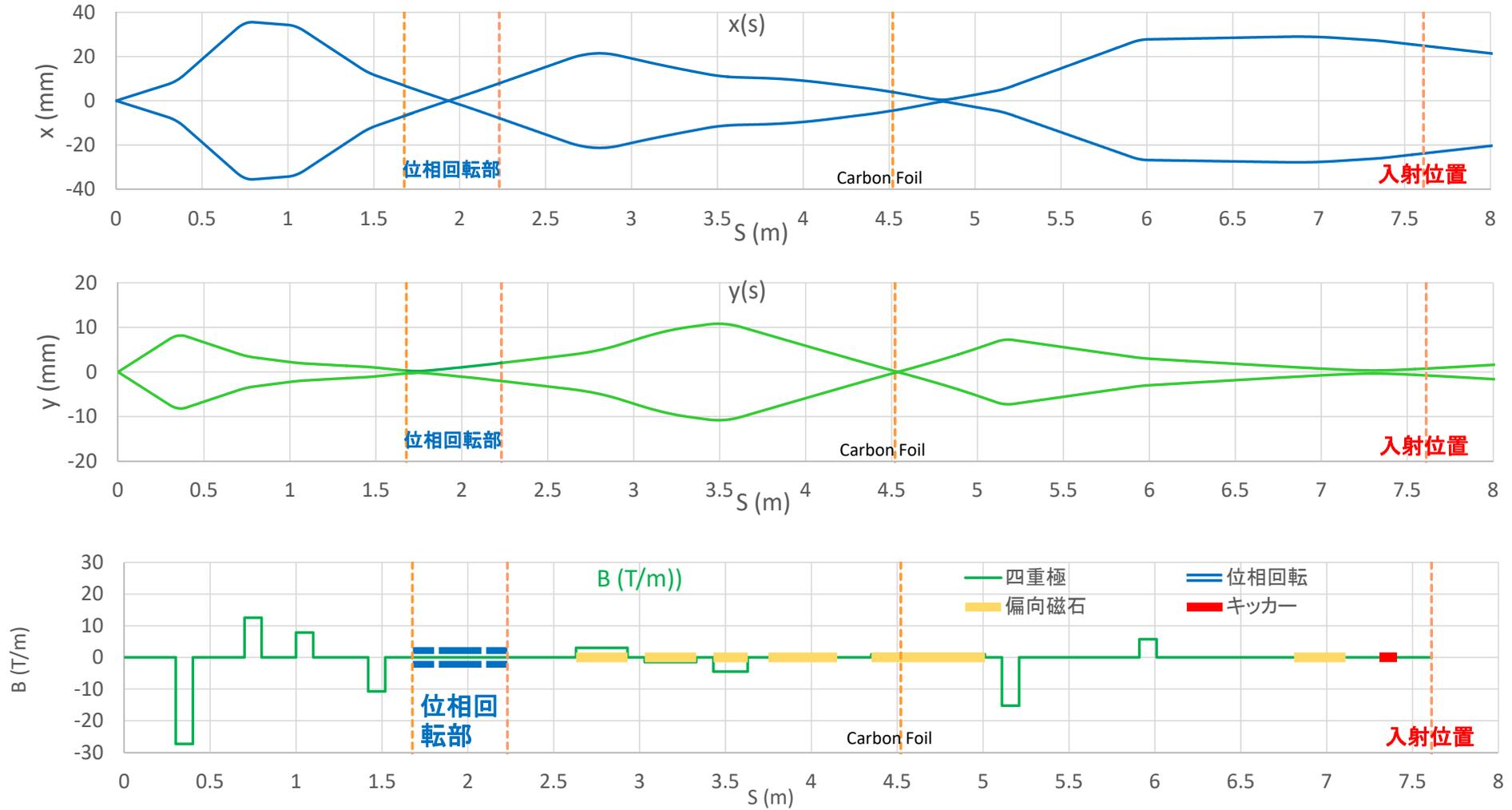
## シンクロトロン入射時のビームパラメータ

- ・パルス幅 **5.5 ns**
  - ・ビーム全長 **0.15 m \***
  - ・エネルギー **4 MeV/u ± 0.6 %**
  - ・速度広がり **±0.3 %**
  - ・イオン種 **C<sup>6+</sup>**
  - ・入射間隔 **100 ms (10Hz)**
- (\*速度広がりによりビームは伸長していく)

# Beam Transport 中での Beam Envelop と磁石配置

foil あり

空間電荷効果を考慮して計算



## Beam Transport 内でのビーム形状(位相空間)

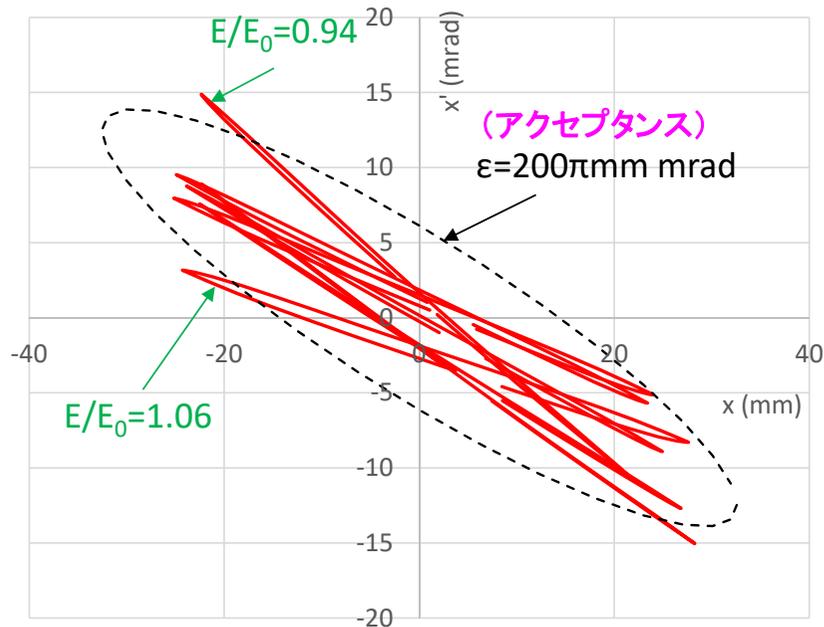
発生イオン数:

$1 \times 10^8$  個/10%b.w./msr

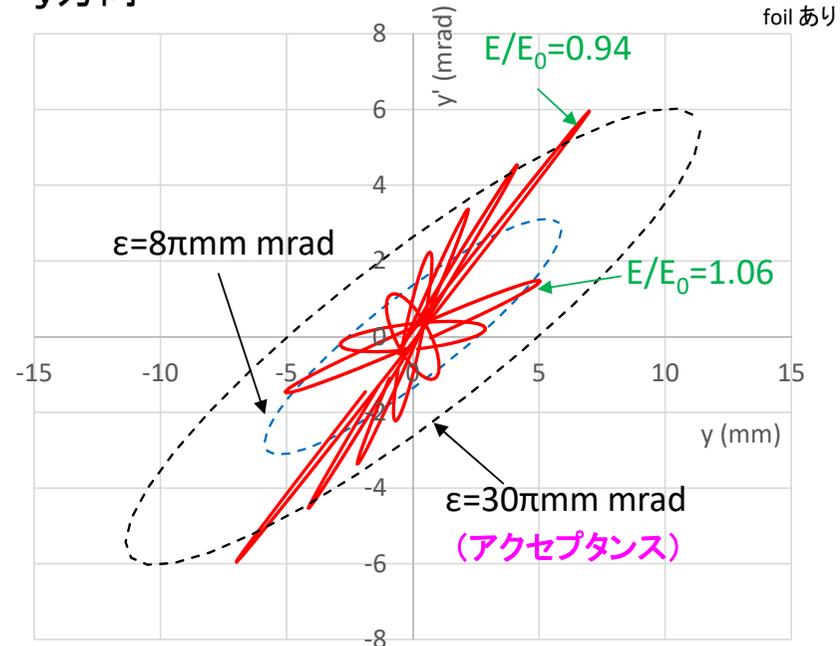
取り出し立体角:

1.9 msr ( $\pm 24.6 \times 12.3$  mrad)

x方向



y方向



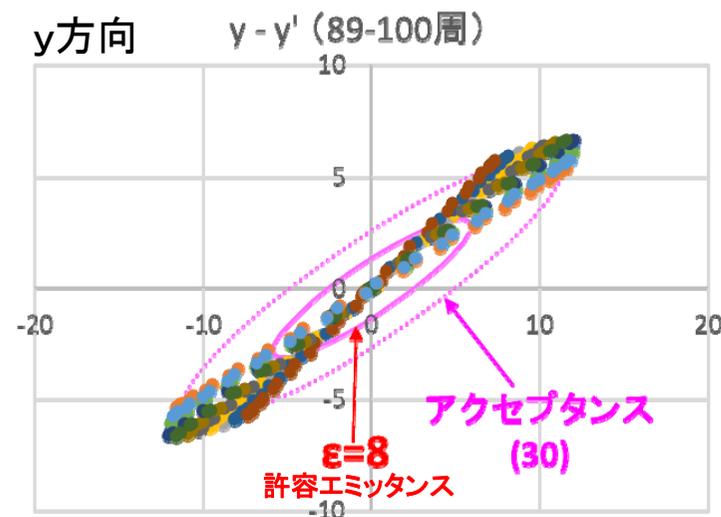
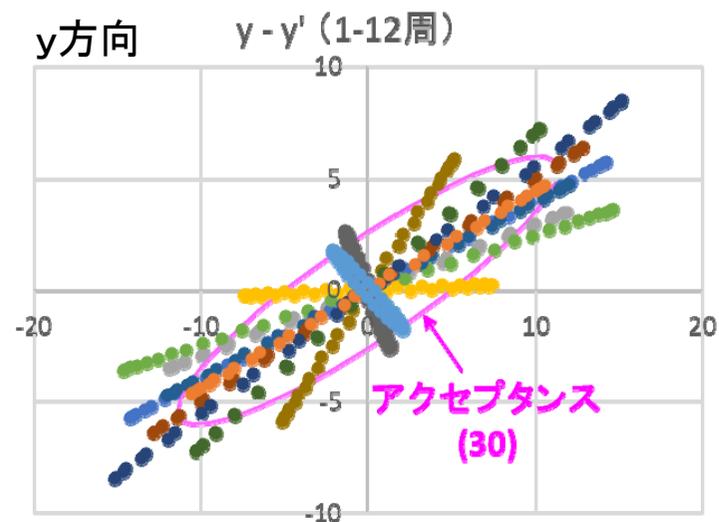
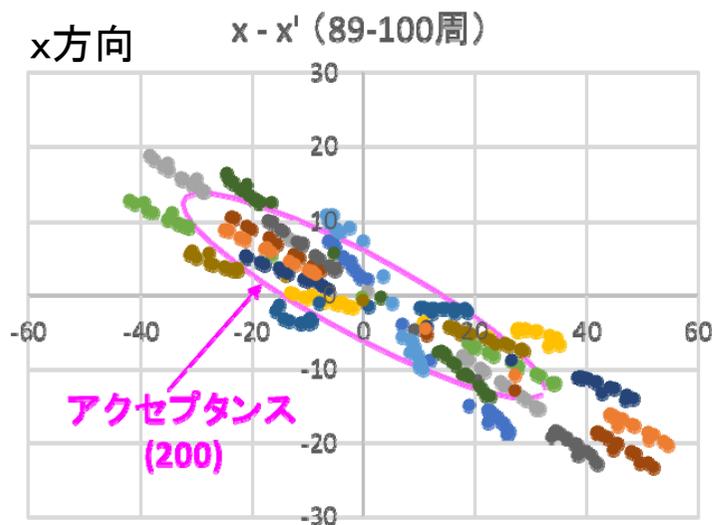
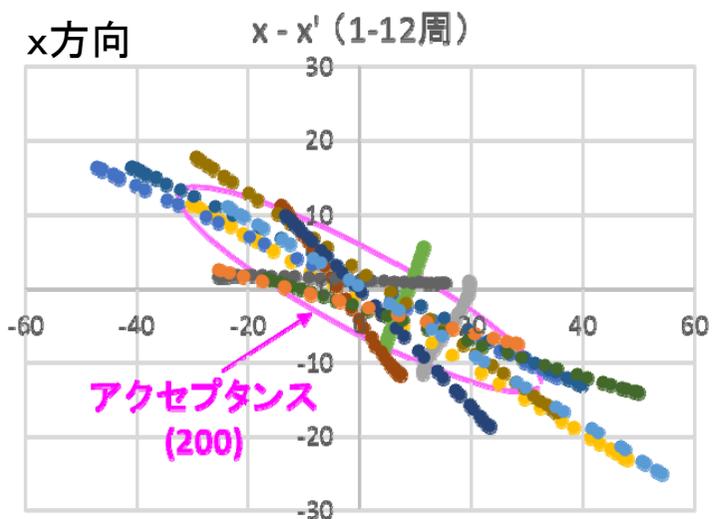
シンクロトロン入射位置でのビーム形状

入射位置でのビーム形状をシンクロトロンのアクセプタンスにできるだけ合わせた。

# シンクロトロン周回時のビーム形状 (計算方法1)

foil あり

発生イオン数:  
 $2 \times 10^8$  個/10%b.w./msr  
 初期エネルギー ( $E/E_0$ ):  
 1.06



## 計算方法1 (これまでの方法)

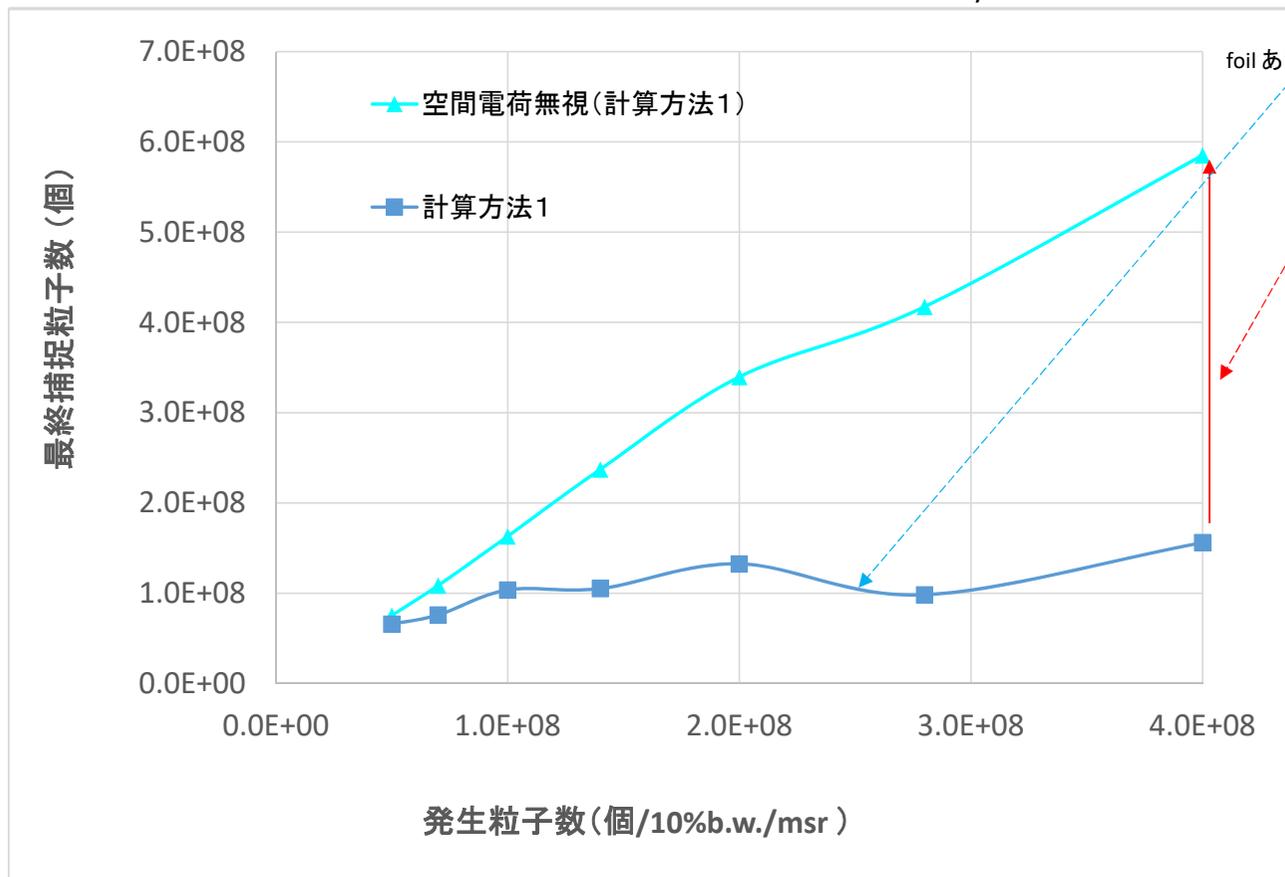
入射した粒子は最後まで切り捨てることなくそのままシンクロトロン中を周回させる。

## 最終捕捉粒子数の求め方

1~25周、及び、76~100周の間で1度でもアクセプタンスをはみ出した粒子を除外することで生き残る粒子数を調べる (x, y両方向)。  
 y方向については、76~100周の間で、 $\epsilon_y > 8$  ( $\pi$ mm mrad) となる粒子も除外する。

## 最終捕捉粒子数に対する周回計算方法変更の影響

$$\varepsilon_y < 8 (\pi \text{mm} \cdot \text{mrad})$$



発生粒子数が増えても捕捉粒子数が増加しない

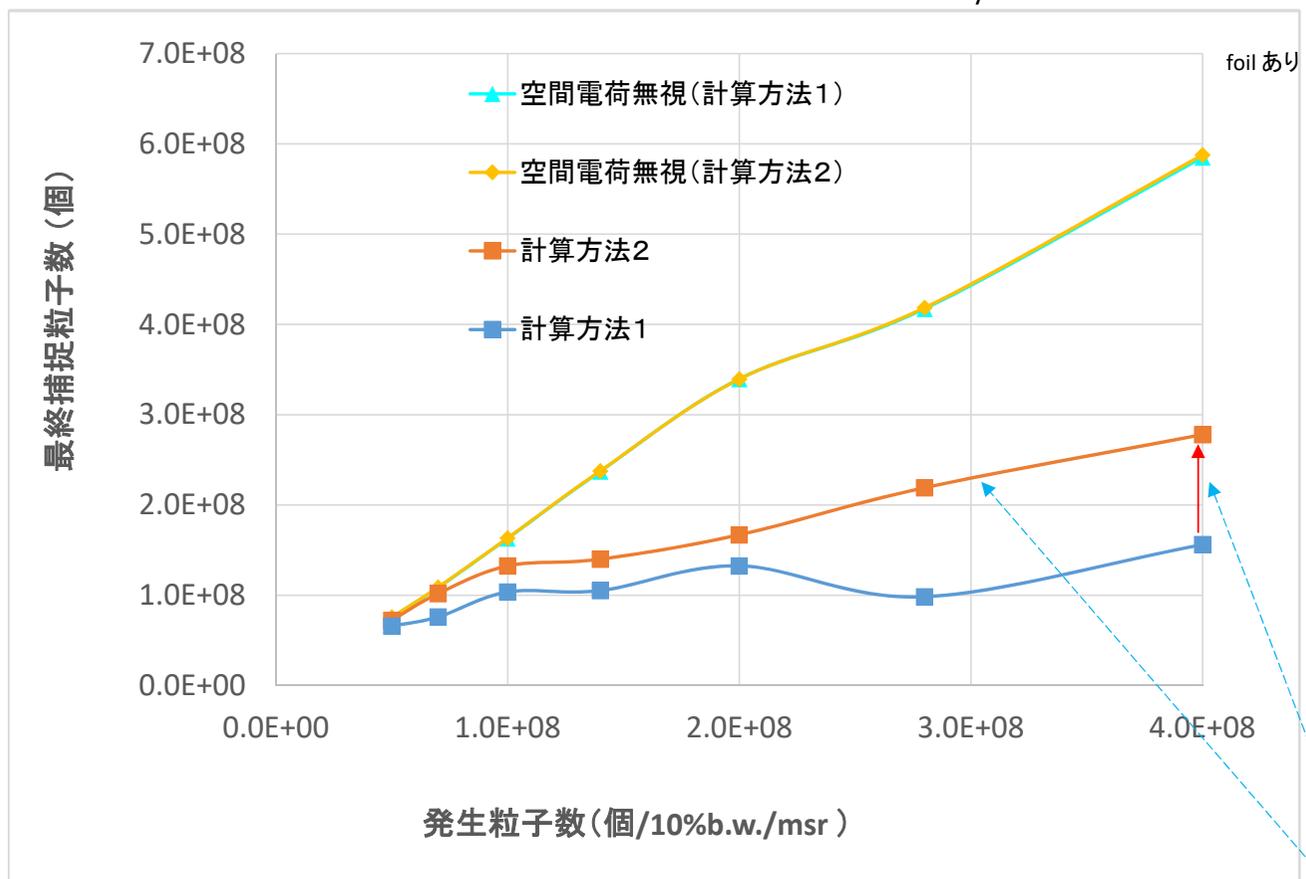
シンクロトロン中の周回計算で、空間電荷を無視すると粒子損失を大幅に改善

周回中の粒子損失の最大の要因は空間電荷効果

最終捕捉粒子数/1shot の発生粒子数依存

# 最終捕捉粒子数に対する周回計算方法変更の影響

$$\epsilon_y < 8 (\pi \text{mm} \cdot \text{mrad})$$



周回中の粒子損失の最大の要因は  
空間電荷効果



空間電荷効果をできる限り過大評価しないように計算方法を変更する必要がある

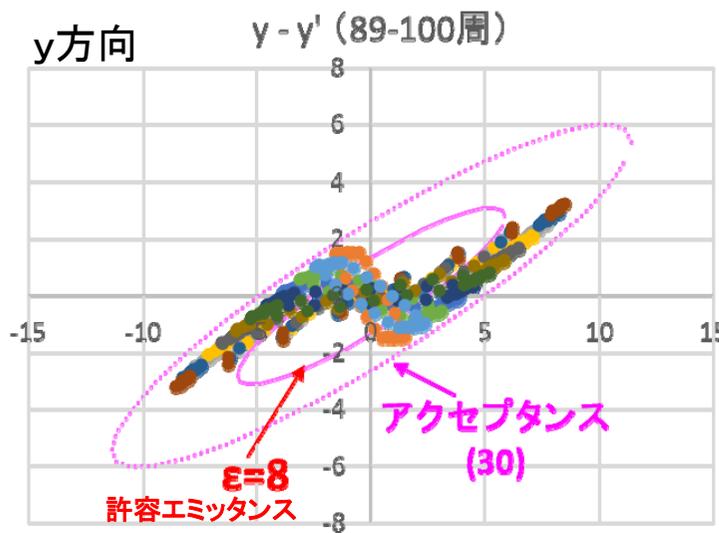
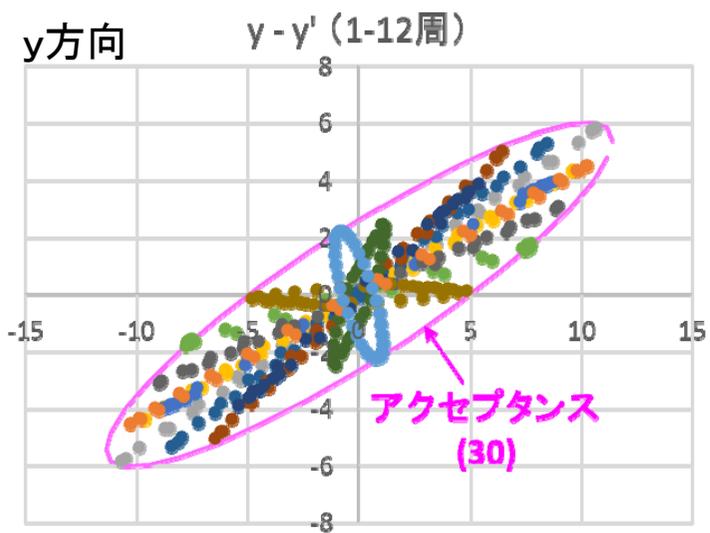
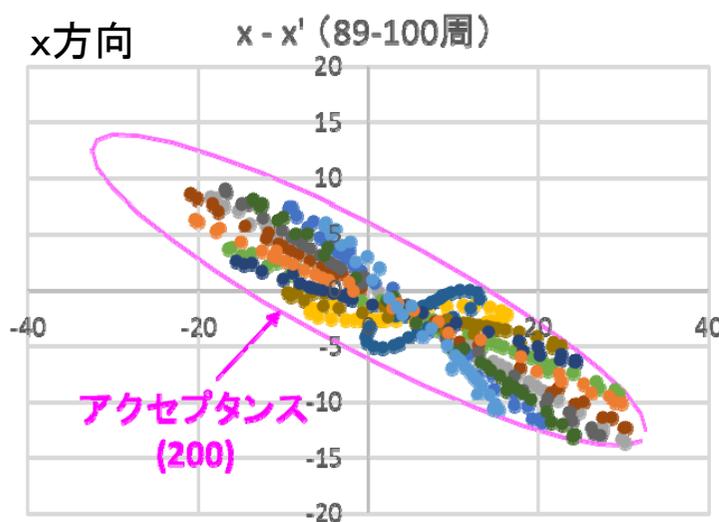
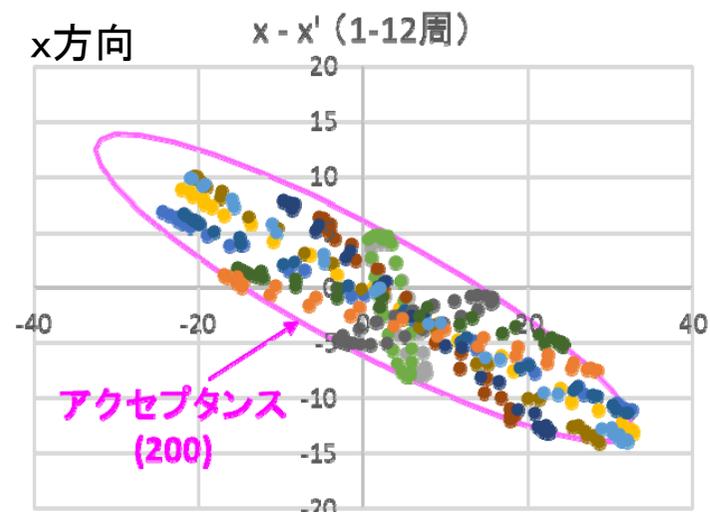
周回中にアクセプタンスをはみ出した粒子を周回ごとにすべて切り捨てることで、  
空間電荷効果の過大評価を低減  
(計算方法1 → 計算方法2)



捕捉粒子数の増加  
発生粒子数が増えると捕捉粒子数も増加

## 最終捕捉粒子数/1shot の発生粒子数依存

## シンクロトン周回時のビーム形状 (計算方法2)



foil あり

発生イオン数:  
 $2 \times 10^8$  個/10%b.w./msr  
 初期エネルギー ( $E/E_0$ ):  
 1.06

### 計算方法2(今回の方法)

シンクロトン周回中にアクセプタンスをはみ出した粒子をすべて切り捨てて計算を行う。

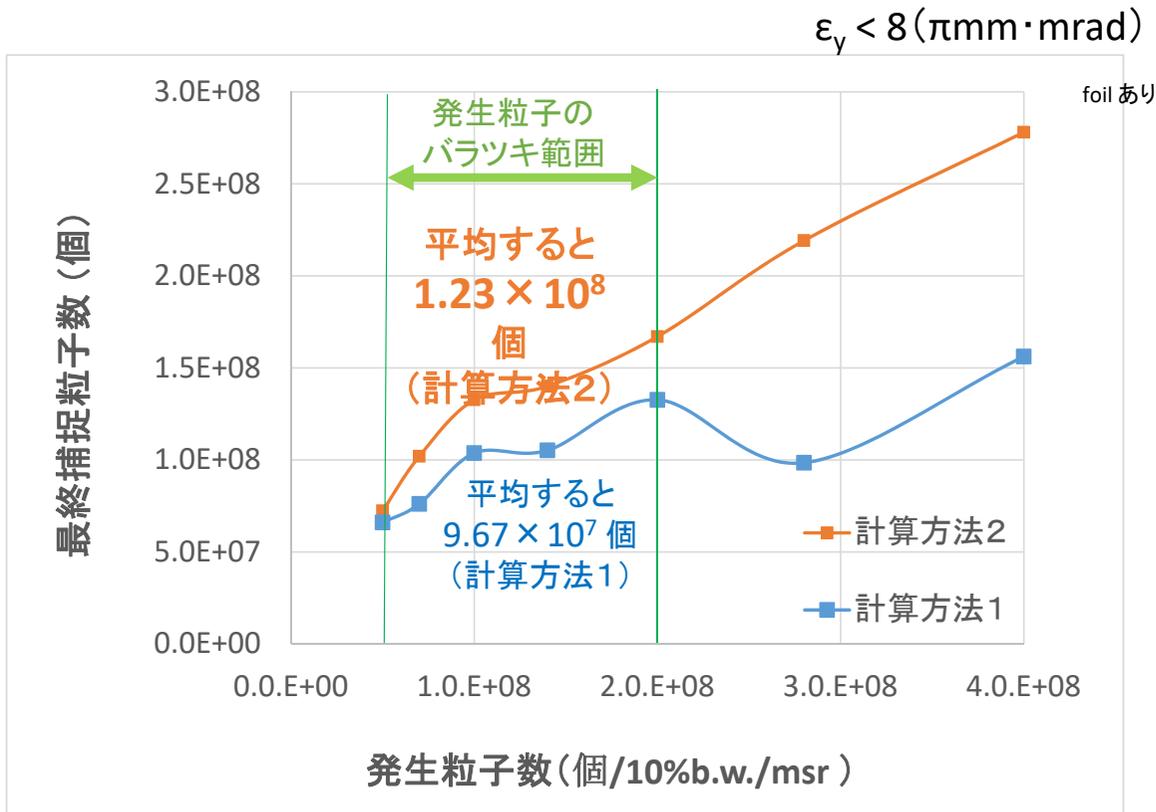


空間電荷効果の過大評価を低減

### 最終捕捉粒子数の求め方

y方向についてのみ、76~100周の間で、一度でも  $\epsilon_y > 8$  ( $\pi$ mm mrad)となる粒子を除外する。

## 最終捕捉粒子数の計算結果



## 最終捕捉粒子数/1shot に対する計算方法変更の効果

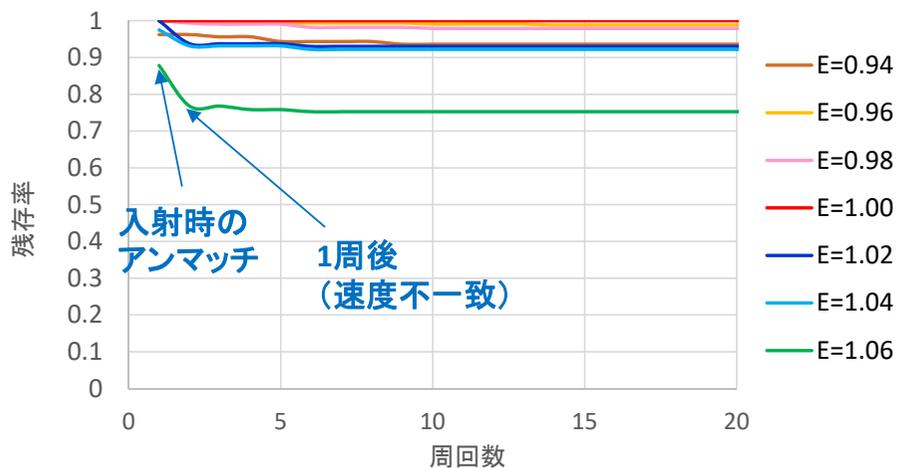
- ① Beam Transport を3.5T超伝導シンクロトロン用にできる限り最適化した。
- ② 空間電荷効果をできる限り過大評価しないように計算方法を見直した。  
(計算方法1 → 計算方法2)  
→ 最終捕捉粒子数が2割強増加

JST未来社会創造事業で最終目標としている1shotあたりの捕捉粒子数  $1 \times 10^8$  個の目途がついた。  
(イオン発生量:  $1 \times 10^8$  個/10%b.w./msr)  
(バラツキ: factor 0.5~2.0)  
( $\epsilon_y < 8 (\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$ )

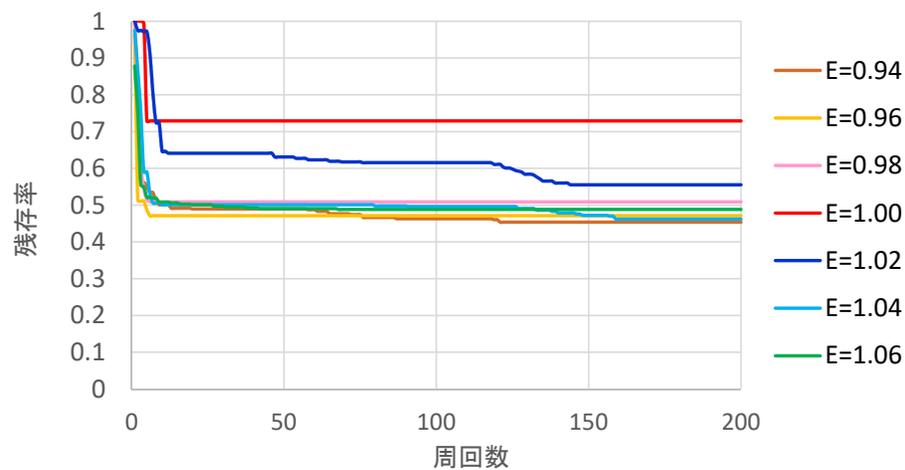
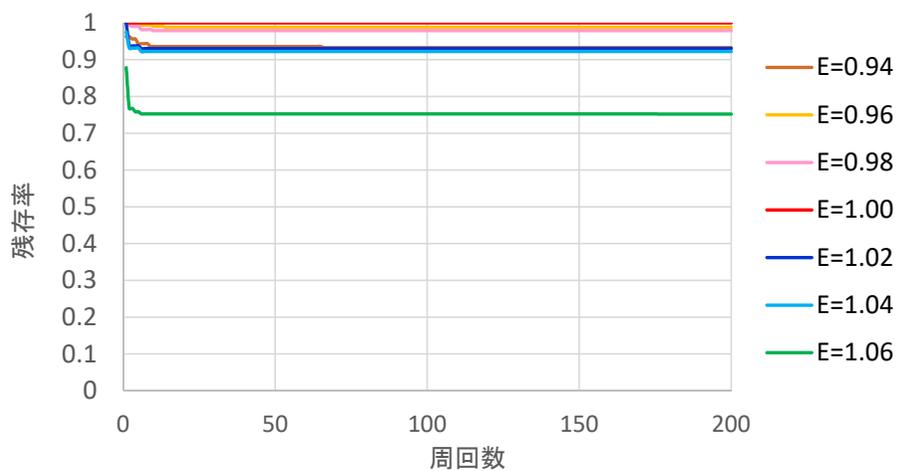
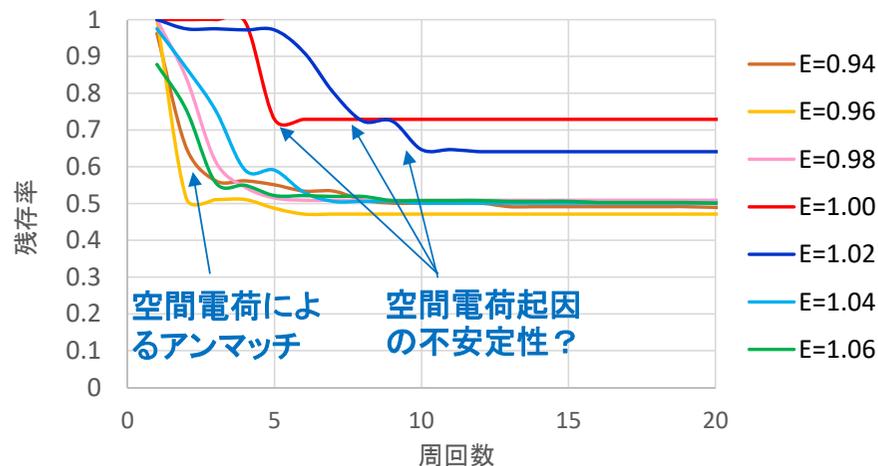
# 残存率の周回数依存

発生イオン数:  
 $2 \times 10^8$  個/10%b.w./msr

空間電荷効果無視



空間電荷効果あり



## 多重回入射を行った時の最終捕捉粒子数(蓄積粒子数)

最終捕捉粒子数の y 方向許容エミッタンス 依存性

	最終捕捉粒子数 (個)				
y 方向の許容エミッタンス $\varepsilon_y (\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad})$	8	10	15	20	30
1shot あたり	1.23.E+08	1.34.E+08	1.53.E+08	1.63.E+08	1.68.E+08
多重回入射 20回(2秒間)	1.57.E+09	1.72.E+09	1.96.E+09	2.08.E+09	2.15.E+09

y 方向許容エミッタンス  $\varepsilon_y$  を 15~20 ( $\pi \text{ mm mrad}$ )  
まで許せば、シンクロトンへの蓄積粒子数として  
 $2 \times 10^9$  個が可能となる。  
(第4世代量子メスでの想定値)

## まとめ

今回、当初設計の超伝導シンクロトロン(4T)から最新設計の第4世代量子メス超伝導シンクロトロン(3.5T)に入射対象を変更し、Beam Transport を新たに設計し、捕捉粒子数を調べた。

### 検討内容・方法

・ 空間電荷、速度広がり、発生粒子数のバラツキを考慮して、Beam Transport からシンクロトロン中でのビーム周回までのビーム軌道を計算し、最終的にシンクロトロンに捕捉された粒子数を調べた。

### 今回の変更

- ・ ビームラインを3.5T超伝導シンクロトロン用にできる限り最適化した。
- ・ 空間電荷効果をできる限り過大評価しないように計算方法を見直した。

### 検討結果

- ・ JST未来社会創造事業で最終目標としている1shotあたりの捕捉粒子数  $1 \times 10^8$  個を捕捉可能なことを確認した ( $\varepsilon_y < 8\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ )。
- ・ y方向許容エミッタンスを  $15 \sim 20 (\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad})$  とすれば、20回の多重回入射を行うことでシンクロトロンへの蓄積粒子数として  $2 \times 10^9$  個が可能となる。

謝辞

本研究は、JST未来社会創造事業 JPMJMI17A1  
の支援を受けたものである。