

# RF周波数スイープ法による遅い取り出しビーム のエネルギー変動補正

Energy compensation of the slow extracted beam  
by RF sweeping method.

藤本哲也<sup>#, A)</sup>, 山田聡<sup>A)</sup>, 金井達明<sup>A)</sup>, 想田光<sup>A)</sup>, 野田耕司<sup>B)</sup>

A) 群馬大学

B) 放医研

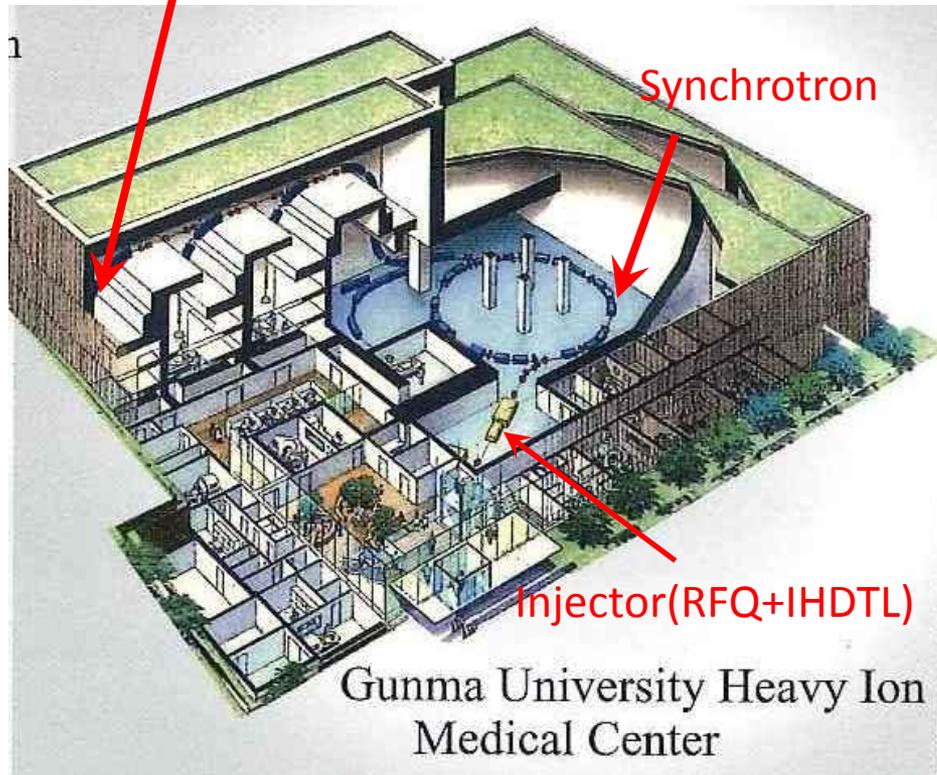
August 10 , 2014

# Contents

1. はじめに
2. 群馬大学の取組み(スキャニング照射)
3. 群馬大学重粒子線施設の遅い取り出し
4. エネルギー変動補正実験
5. まとめ

# 群馬大学重粒子線医学センター

スキャニング研究用照射室 (D室)



治療照射開始 2010年～  
今年度600人の治療を目標

## 加速器構成

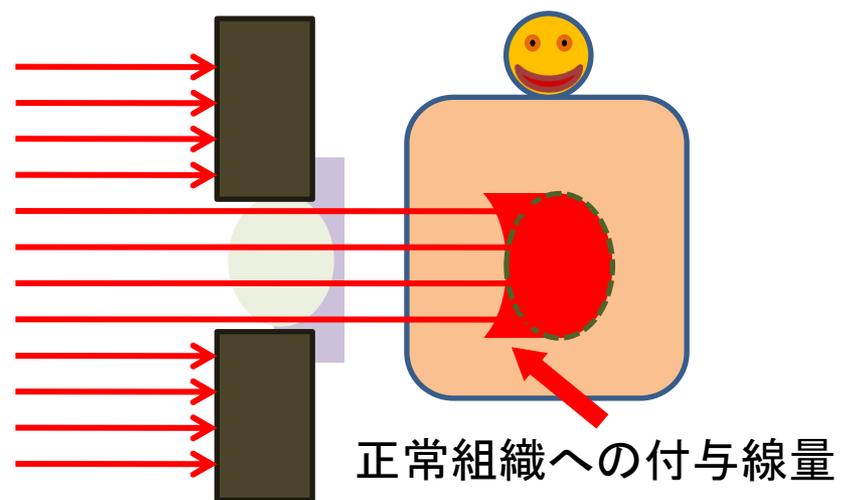
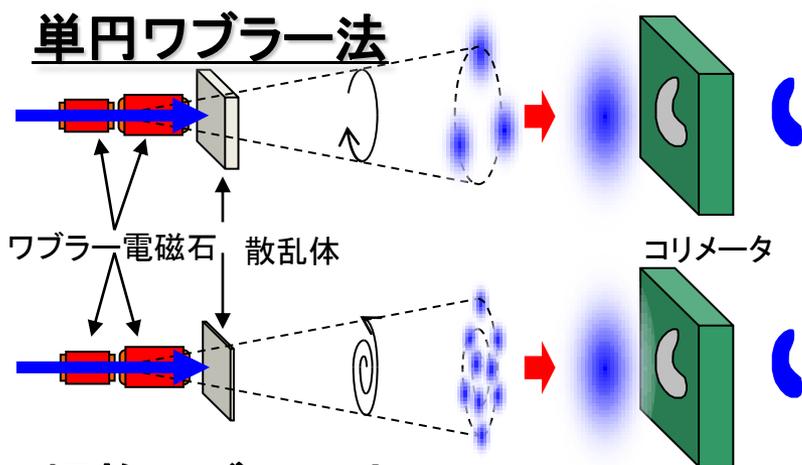
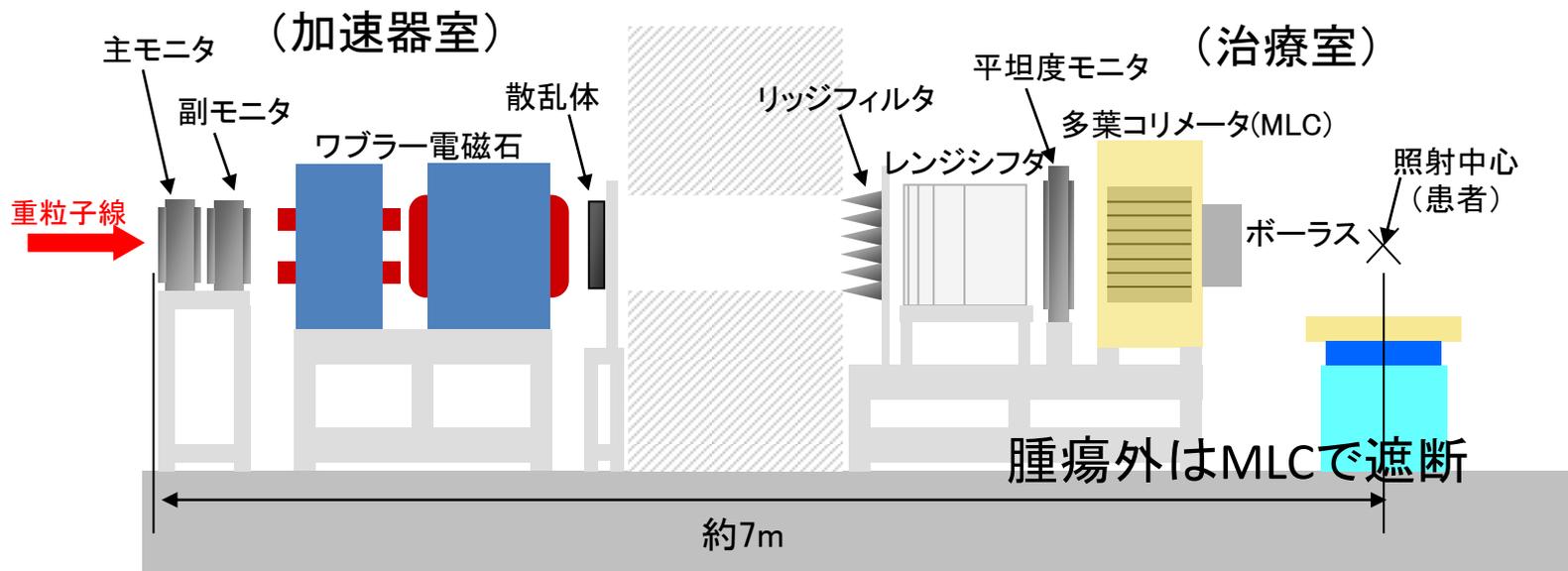
- ・小型ECRイオン源(永久磁石)
- ・RFQ + IH-DTL (4MeV/n)
- ・シンクロトロン  
周長63.3m  
最大エネルギー400MeV/n  
遅い取り出し(3次共鳴) + RF加速

## 照射系

- ・治療室 A(水平) B(水平/垂直) C(垂直)
- ・照射方式  
拡大ビーム照射法
- ・最大照射野  
15cm × 15cm

普及型炭素線治療装置

# 現状の照射野形成(拡大ビーム照射法)



# 研究背景 1

## 現状の拡大ビーム照射法

### メリット

- ・シンプルなビームコントロール
- ・ビーム位置、強度の多少の変動が許容

### デメリット

- ・正常組織への線量の付与が避けられない。(副作用)
- ・複雑な形状の腫瘍への適用が困難

## 群馬大学の取り組み

群馬大学では普及型炭素線治療装置での3次元スキヤニング照射の実現に向けたR&Dに取り組んでいる。

# 研究背景 2

## スキャンニング照射

細いビームを使って腫瘍の形状に合わせて塗りつぶすように照射する方法。ビームコントロールが難しくなるが、

- メリット
- ・腫瘍の形に合った照射が可能
  - ・ボース、コリメータが不要
  - ・照射期間中の腫瘍形状の変化への対応が可能

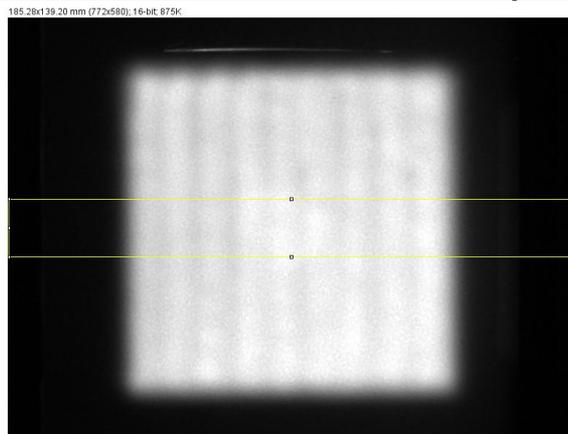
## スキャンニング照射を実現させるために

ビームの横方向位置変動、サイズ変動の抑制  
ビームのエネルギー変動の抑制。

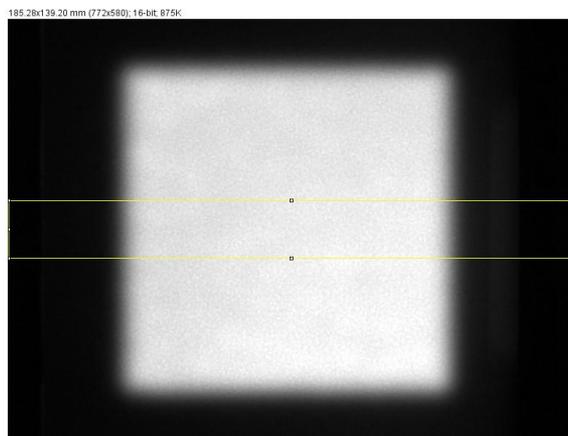
⇒ 3次共鳴による遅い取り出しを行うために、RF周波数掃引による加速をしているため、時間とともにエネルギーが変動している。

# 2次元照射野平坦度へのビーム安定度の影響

$\Delta x$ 、 $\Delta y \sim 0.3\text{mm}$ 、 $\Delta\sigma_x$ 、 $\Delta\sigma_y \sim 0.3\text{mm}$

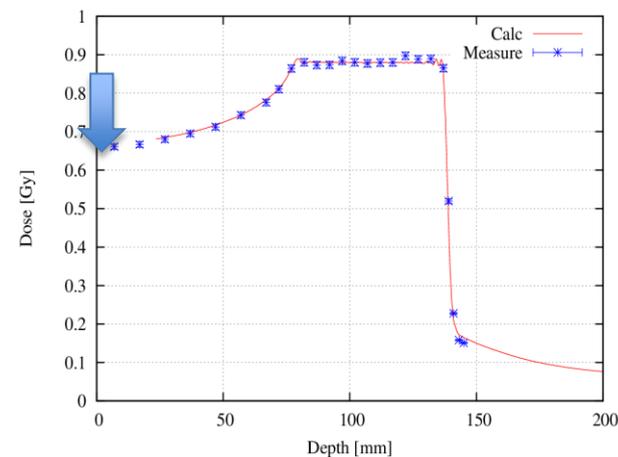


$\Delta x$ 、 $\Delta y \sim 0.1\text{mm}$ 、 $\Delta\sigma_x$ 、 $\Delta\sigma_y \sim 0.1\text{mm}$



## 測定条件

- ・照射野  $\square 102\text{mm}$
- ・2000counts/spot
- ・3mm pitch
- ・ZnSシンチレーションシート  
+ CCDカメラ



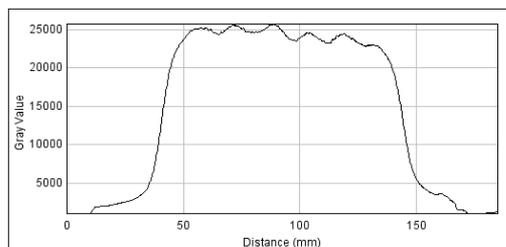
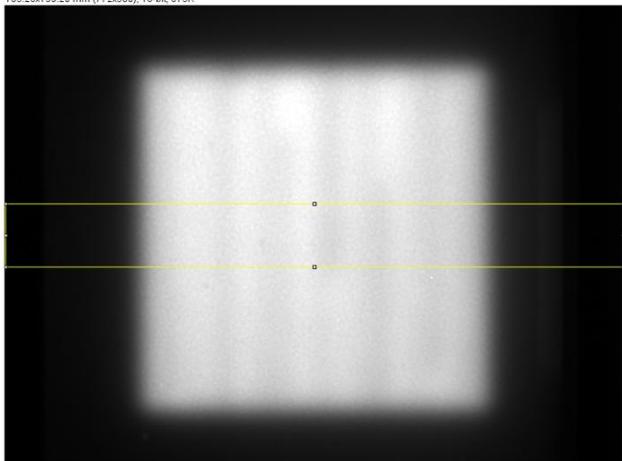
平坦度 < 2%

# 2次元照射野平坦度へのエネルギー変動の影響

横方向動的補正有り。

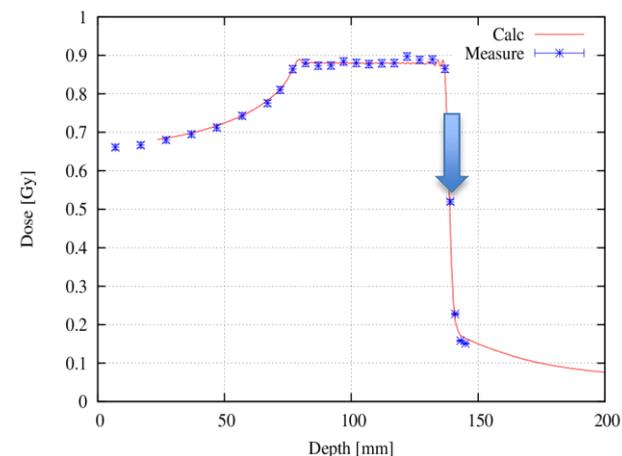
SOBP末端の線量が落ちる位置での照射野は縞模様ができる。

185.28x139.20 mm (772x580), 16-bit, 875K



## 測定条件

- ・照射野 □102mm
- ・5000counts/spot
- ・3mm pitch
- ・ZnSシンチレーションシート  
+ CCDカメラ

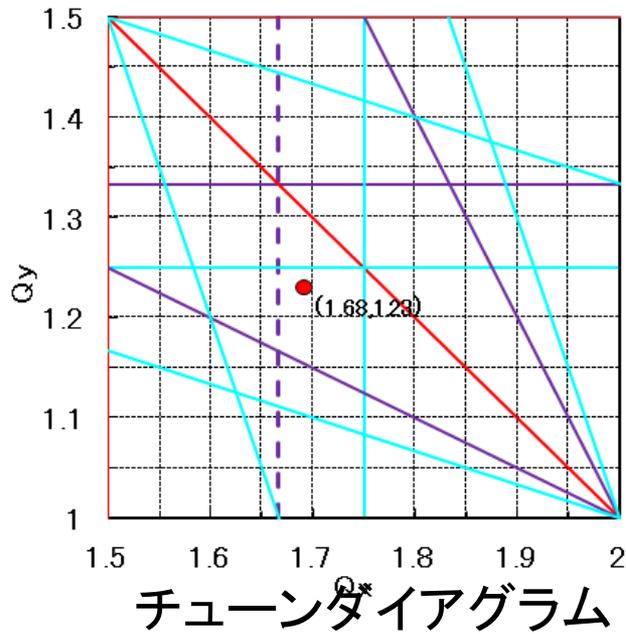


群馬大学普及型炭素線施設で  
スキャンニング照射を実現するために  
エネルギー変動の抑制が必要

# 群馬大学における遅い取り出し 1

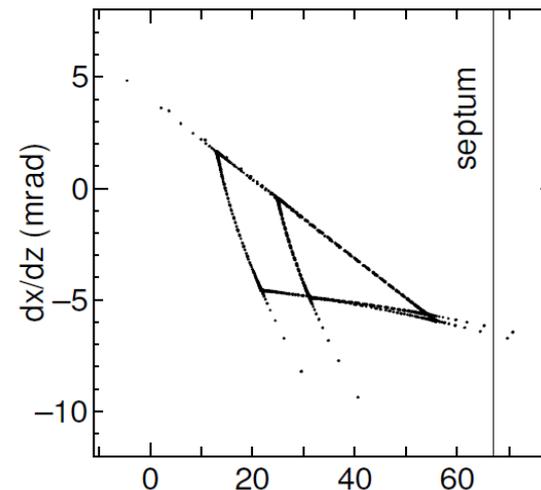
群馬大学重粒子線施設では有限のクロマティシティのもと、リングRF周波数を掃引することでチューンを変化させて、3次共鳴による遅い取り出しを行っている。

出射時リングチューン  
( $Q_x, Q_y$ ) = (1.68, 1.23)



$$\Delta Q = \xi \frac{\Delta p}{p}$$

$\xi$ : クロマティシティ



セパトリグスの変化

# 群馬大学における遅い取り出し 2

## リング加速周波数掃引による遅い取り出し

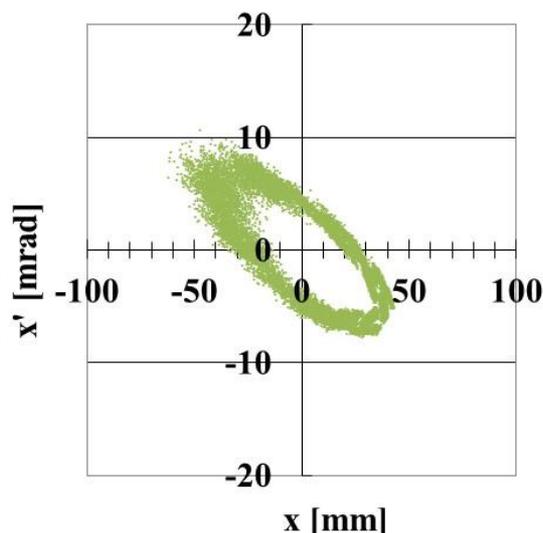
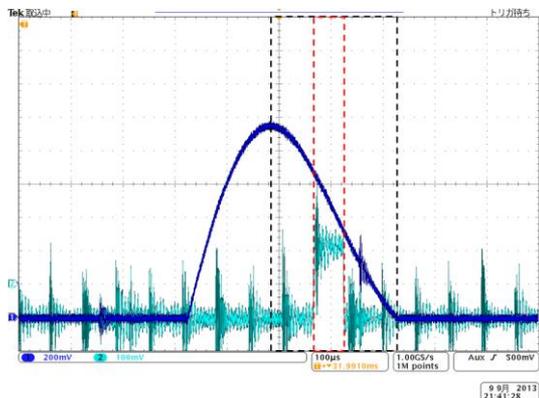
- ・メリット

電場を利用⇒磁場と比較して高速でのビームオフが可能になる。  
精密な線量コントロール、呼吸同期照射が可能

- ・デメリット

リングRF周波数を変化させるのでエネルギー変動が生じる。

## エネルギー変動幅(RF周波数幅)低減のために



ドーナツ入射

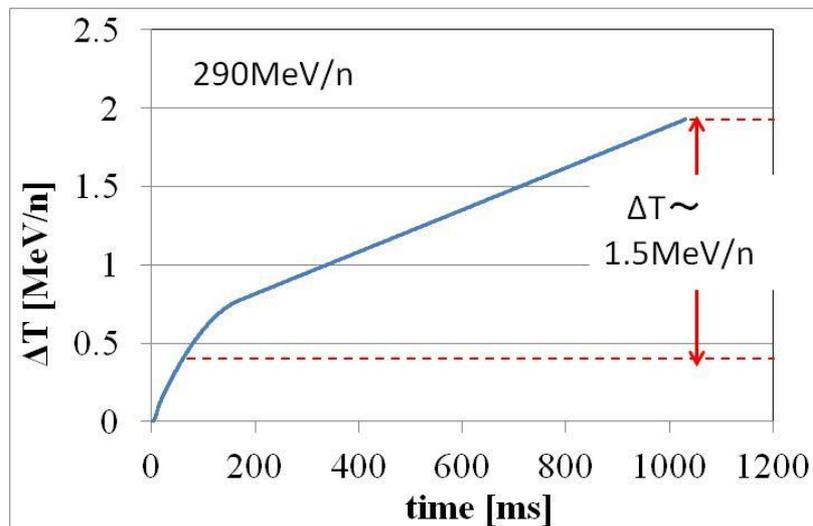


取り出し時のリングRF周波数幅  
(エネルギー変動幅)の低減

入射器からのビーム強度 +  
照射系側からの要求粒子数  
( $1.0 \times 10^9$ pps)  
入射ターン数 25Turn (58 $\mu$ s)

# 群馬大学における遅い取り出し 3

## 取り出しビームのエネルギー変動幅



例 : 290MeV/n

$$\Delta T = 1.5 \text{ MeV/n}$$

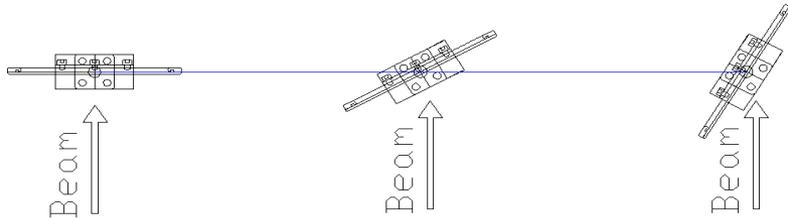
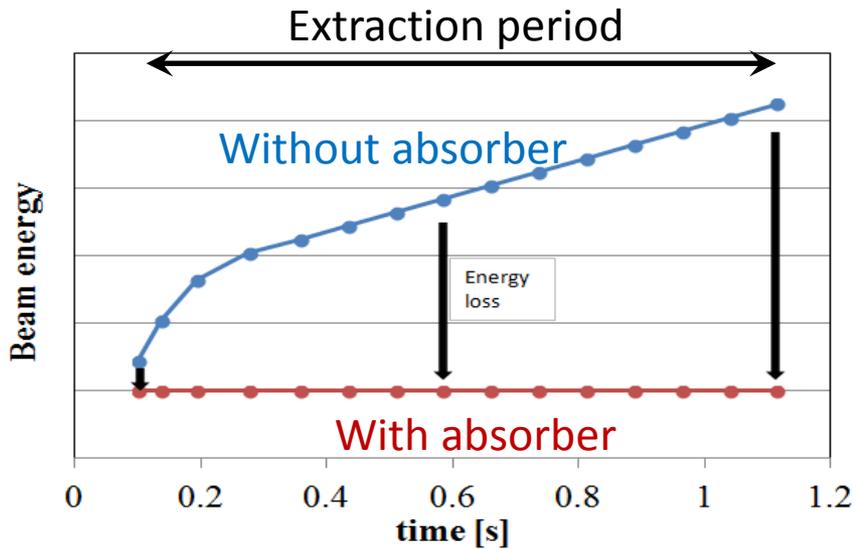
$$\Delta p/p = 0.3\%$$

$$\Delta \text{range in water} = 1.6 \text{ mm}$$

これを電場で補正することは難しいことから、荷電粒子が物質中を通過した時に生じるエネルギーロスを利用した補正を検討

⇒エネルギーアブソーバー

# エネルギー補正実験 (原理)



荷電粒子が物質中を通過した時に  
生じるエネルギーロスを利用して一  
定のエネルギーを得る



エネルギーロス量のコントロール



アブソーバーを回転させることで  
ビームから見た厚さを調整



連続的に変化するエネルギーを補  
正可能

# エネルギー補正実験 (アブソーバー回転角度)

アブソーバーの回転角度

⇒ビーム取り出し区間のRF周波数パターンから算出

表: 1mm厚アルミ板をアブソーバーとして使用した場合のアブソーバー回転角度

		400MeV/n		290MeV/n		140MeV/n	
		start	end	start	end	start	end
Beam energy	[MeV/n]	400	402.68	290	292.02	140	141.05
Scatter thickness	[mm]	1.155	2.523	1.155	2.031	1.015	1.295
Scatter rotation angle	[degree]	30.00	66.64	30.00	60.50	10.00	39.46
Energy after scattering	[MeV/n]	397.8	⇐	287.2	⇐	134.7	⇐

\* アブソーバー回転角度幅を変えることで様々なエネルギーに対応可能  
⇒装置の小型化に有効

# エネルギー補正実験 (実験)

エネルギー補正の確認のためアイソセンターに水厚可変水槽を配置し、ブラッグピーク測定を行った。

実験条件

実験コース:D室

(スキャンニング実験室)

ビームエネルギー:290MeV/n

アブソーバー材質:アルミニウム

アブソーバー厚:1mm



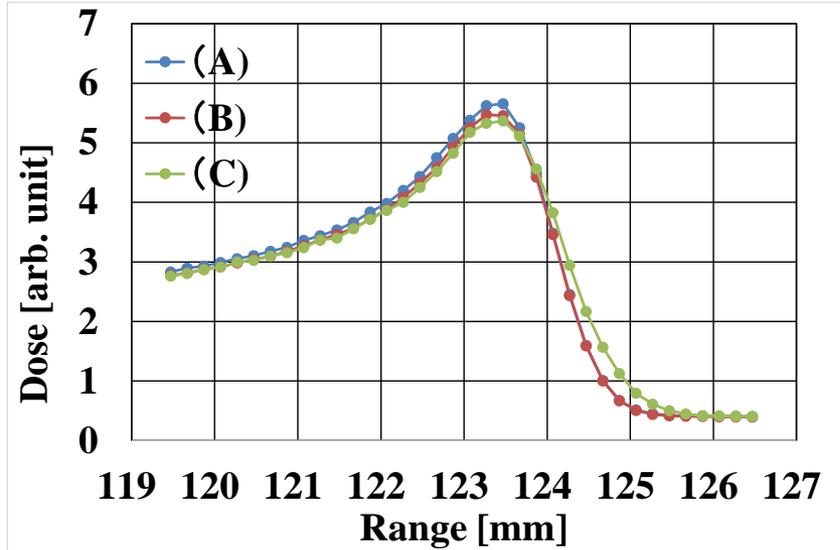
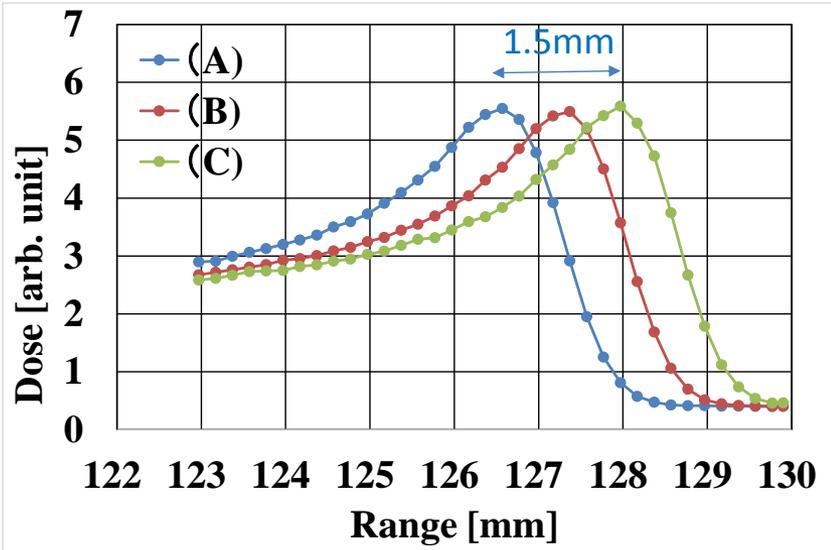
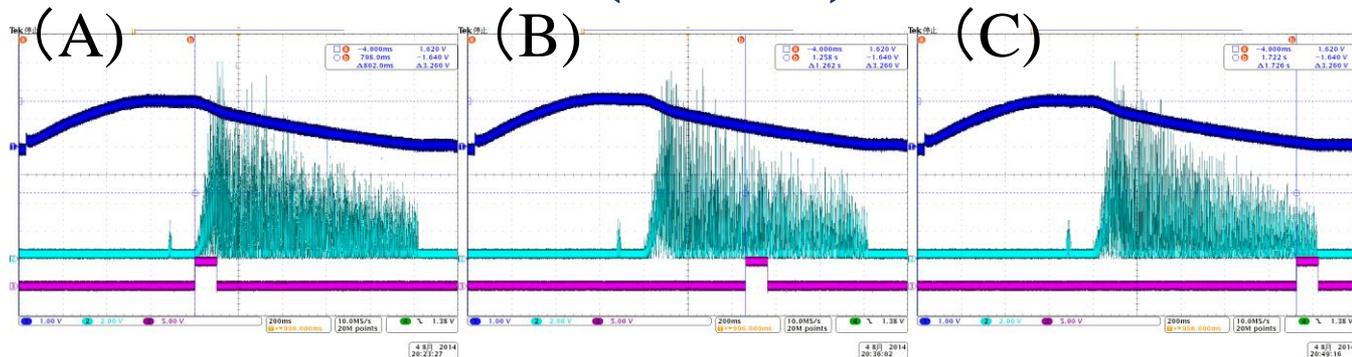
正線量モニター

アブソーバー  
(サーボモーター駆動)

水厚可変水槽

電離箱

# エネルギーアブソーバー実験 (結果)



ブラッグピーク測定結果 (左:アブソーバーなし、右:あり)

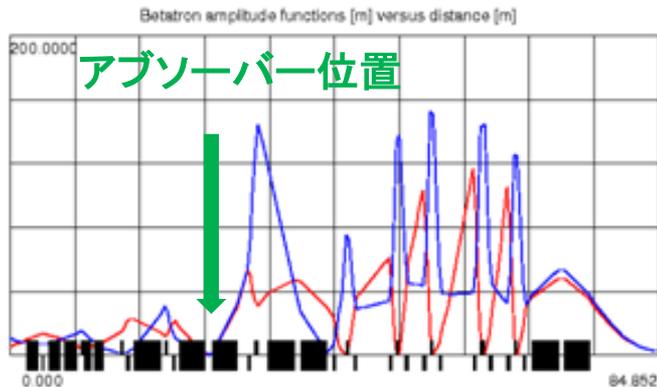
# エネルギー補正実験 (オプティクス)

エネルギーアブソーバーをスキャンニング照射に利用するには

- ① アブソーバーによるemittance growthを出来るだけ小さくする。
- ② アブソーバー厚の変化によりアイソセンタースポットサイズが変化しない。

⇒高エネルギービーム輸送ラインのオプティクス最適化

- (1) アブソーバー設置位置の $\beta$ 関数で出来るだけ小さくする。
- (2) アブソーバーおよびアイソセンター間のphase advance ( $\mu_{x,y}$ )を $n \times \pi$ にする。
- (3) アブソーバーおよびアイソセンターの $\alpha=0$ にする。



アブソーバーのために最適化したB関数  
(ESD～アイソセンター)

表: 計算によるビームパラメータ

		400MeV/n		290MeV/n	
		ext.-start	ext.-end	ext.-start	ext.-end
T from synchrotron	[MeV/n]	400	402.68	290	292.02
T after scatter	[MeV/n]	398	398	287.7	287.7
Absorber thickness	[mm]	1	2.38	1	1.879
Horizontal $1\sigma$ -emittance	[ $\pi$ mm $\cdot$ mrاد]	0.602	0.920	0.770	1.061
Vertical $1\sigma$ -emittance	[ $\pi$ mm $\cdot$ mrاد]	0.729	0.992	0.978	1.247
$\beta_x$ at iso-center	[m]	3.64	2.40	2.86	2.09
$\beta_y$ at iso-center	[m]	3.36	2.47	3.00	2.36
x-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.0	3.0	3.0	3.0
y-size at iso-center	$\pm$ [mm]	3.1	3.1	3.4	3.4
Energy spread	[%]	0.101	0.102		

# まとめ

群馬大学重粒子線医学センターでは3次元スキヤニング照射の実現に向けたR&Dに取り組んでいる。

RF周波数掃引による遅い取り出し ⇒ エネルギー変動が問題

エネルギー変動をエネルギーアブソーバーを使って補正。

- ・実験により計算通りエネルギー補正できる
- ・計算によりアイソセンターでのビームサイズが変化しない条件を求めた。

スキヤニング照射に要求される高品質ビームの供給が加速器側から可能になる。