

FFAG 加速器の現状と パルス中性子源に向けた ビーム増強計画

2013.1.18

京大原子炉 石 禎浩

森 義治

上杉智教

栗山靖敏

J-B Lagrange

福井大学 酒井 泉

岡部晃大*

* 現在 JAEA

目次

1.FFAGの特徴

2.FFAG加速器システム開発の経緯

3.H-ビーム入射によるビーム増強

4.ビーム増強ロードマップ

5.FFAG加速器の今後の展開（加速器中性子源）

6.まとめ

FFAG: Fixed Field Alternating Gradient

● 固定磁場（時間変化しない）

サイクロトロン的であるが、軌道の広がり小さい $B(r) = B(r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^k$

● 速い加速が可能

- 磁場とRFの同期が不要

● 高繰り返しが可能

- 一度に加速する粒子数を減らす事が可能
- 空間電荷効果やその他の不安定性を軽減

● 交互勾配一強収束（6D-focusing i.e. x, px, y, py, s, ps）

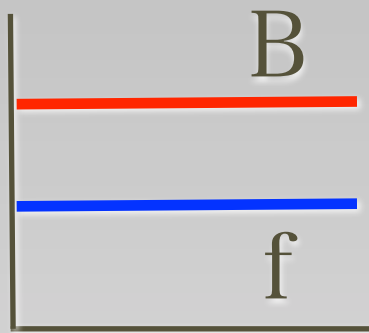
シンクロトロン的

● コンパクトサイズの電磁石

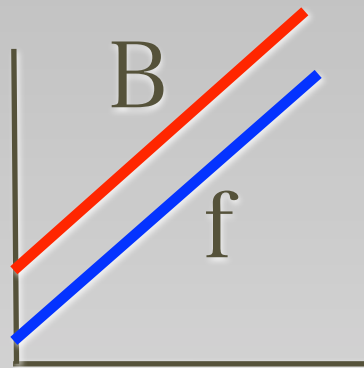
● 高エネルギーでの収束が安定

● さまざまな RF gymnasticsが可能

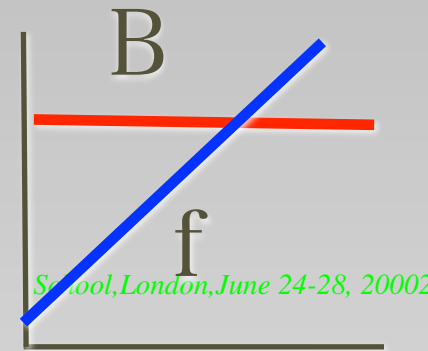
- *Bunching, Stacking etc.*



accelerating time

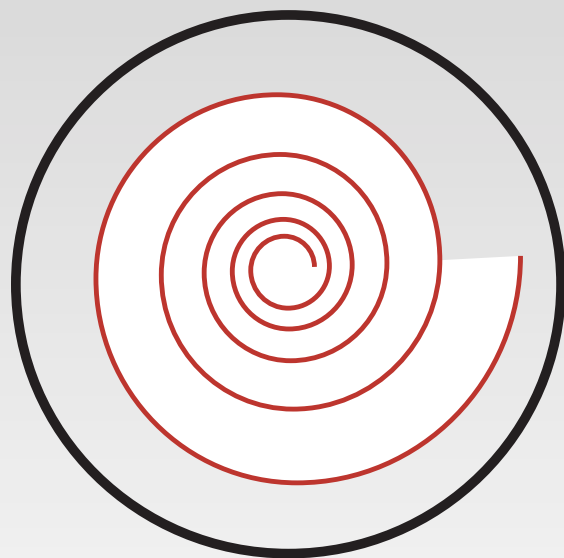


accelerating time

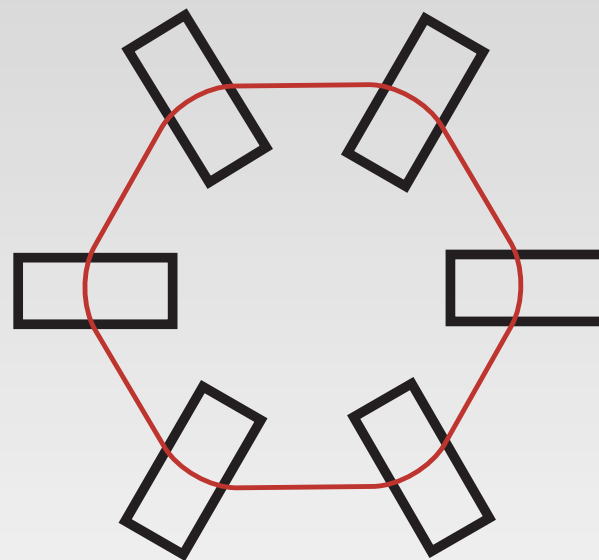


accelerating time

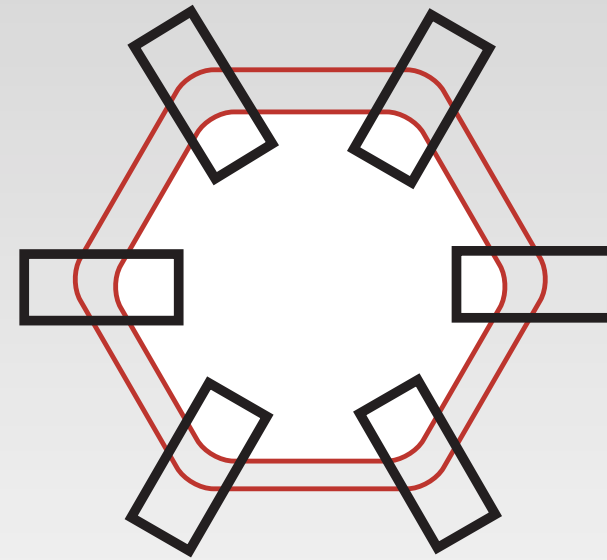
School, London, June 24-28, 20002



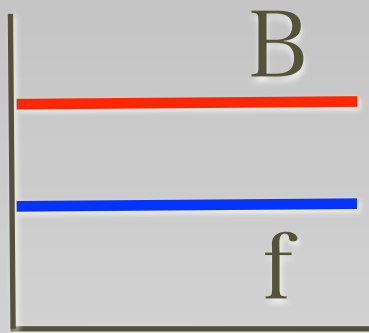
Cyclotron
*isochronous



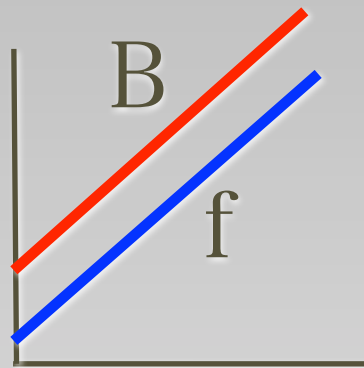
Synchrotron
*const. closed orbit
(varying mag. field)



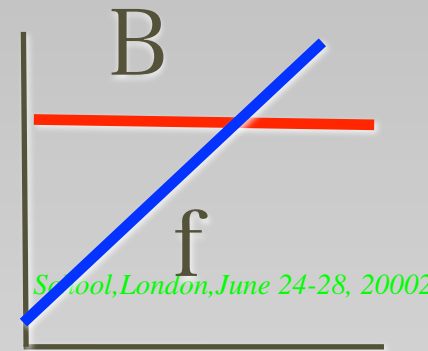
FFAG
*varying closed orbit
(const. mag. field)



accelerating time



accelerating time

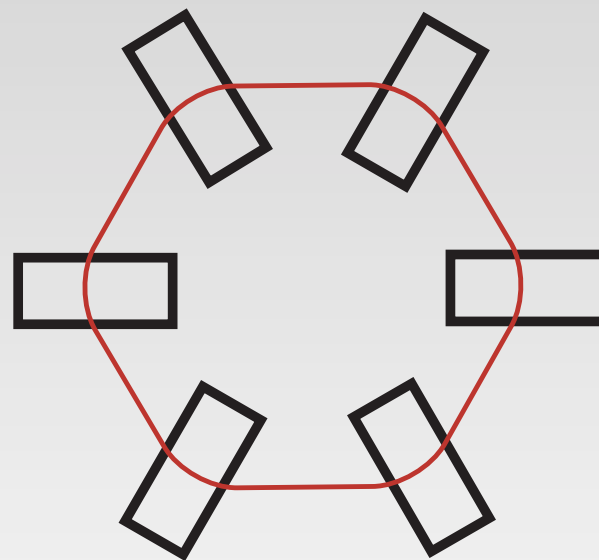


accelerating time

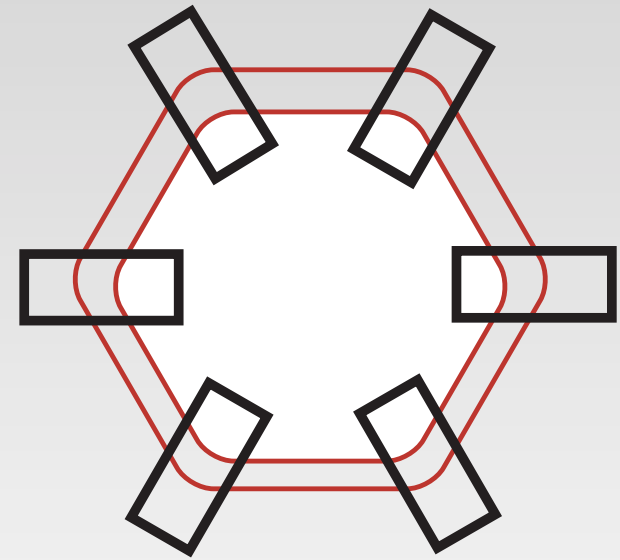
School, London, June 24-28, 2002



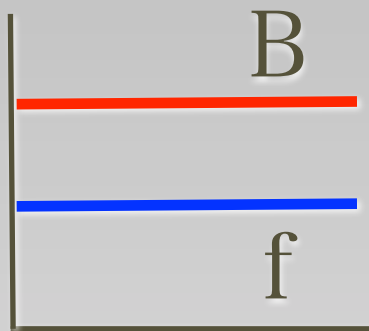
Cyclotron
*isochronous



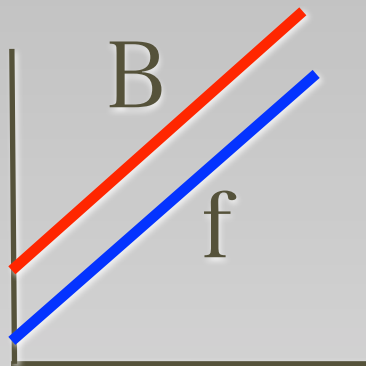
Synchrotron
*const. closed orbit
(varying mag. field)



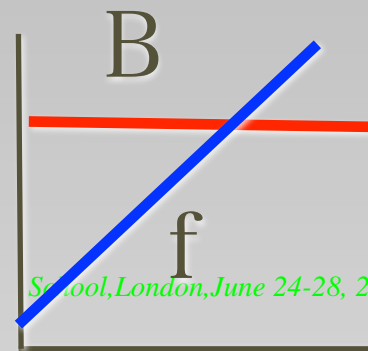
FFAG
*varying closed orbit
(const. mag. field)



accelerating time



accelerating time

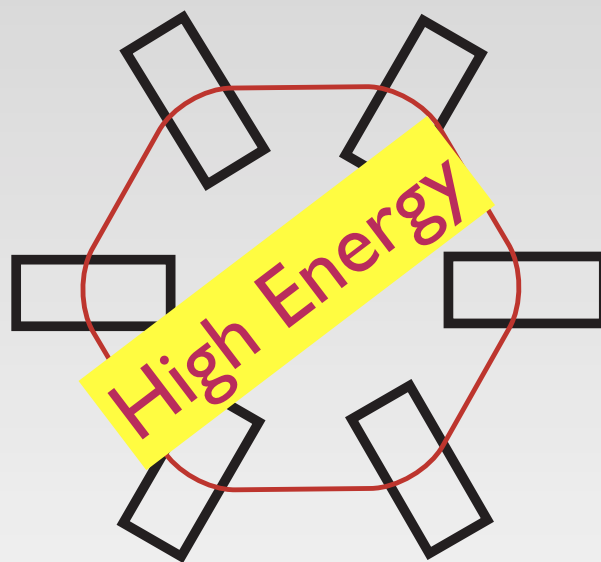


accelerating time

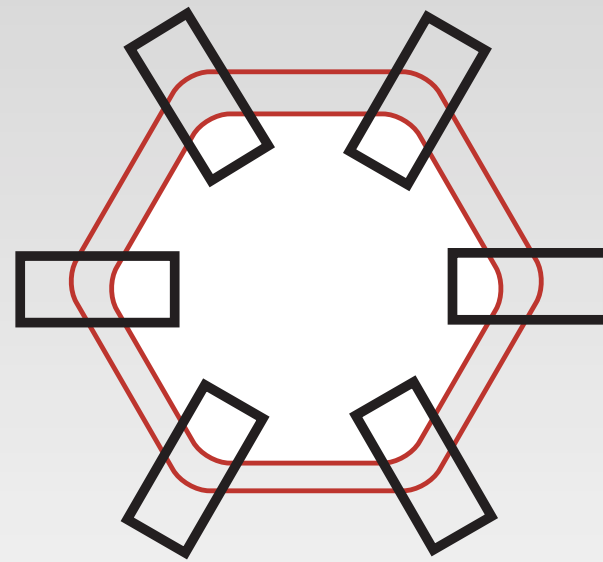
School, London, June 24-28, 2002



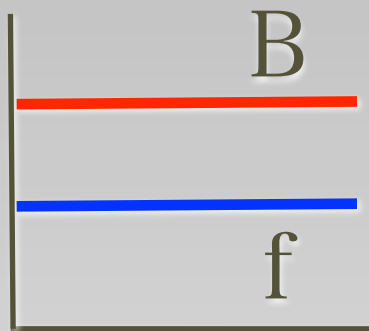
Cyclotron
*isochronous



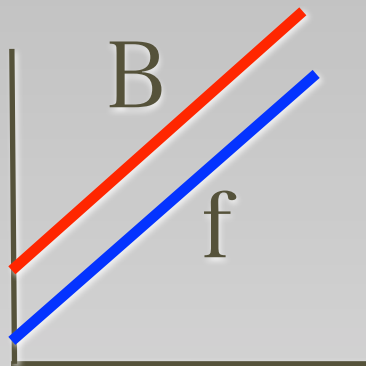
Synchrotron
*const. closed orbit
(varying mag. field)



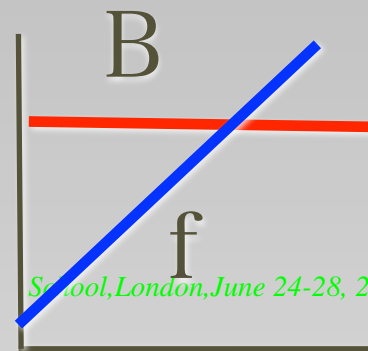
FFAG
*varying closed orbit
(const. mag. field)



accelerating time



accelerating time

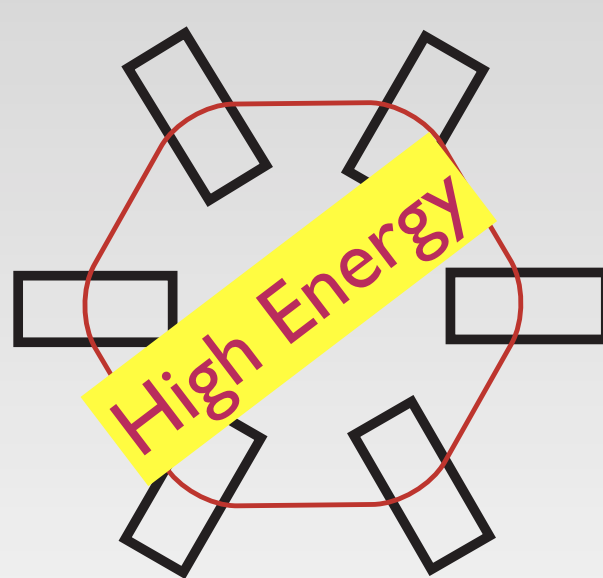


accelerating time

School, London, June 24-28, 2002



Cyclotron
*isochronous



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

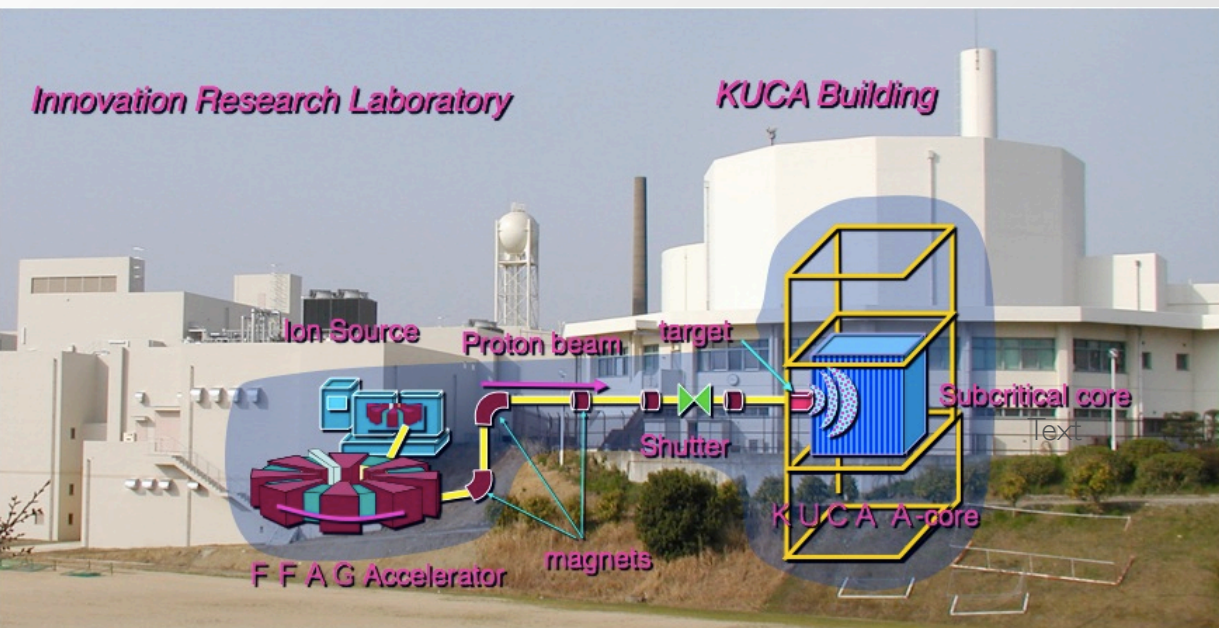


FFAG
*varying closed orbit
(const. mag. field)

FFAG加速器システム開発の経緯

2002年度文部科学省提案公募事業「革新的原子力システム技術開発」

課題「FFAG加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」



KUCAと結合、世界初の加速器駆動未臨界炉実験

2009/3, 2010/3, 2011/2, 2012/2

ウラン, トリウム燃料体系

FFAG加速器システム開発の経緯

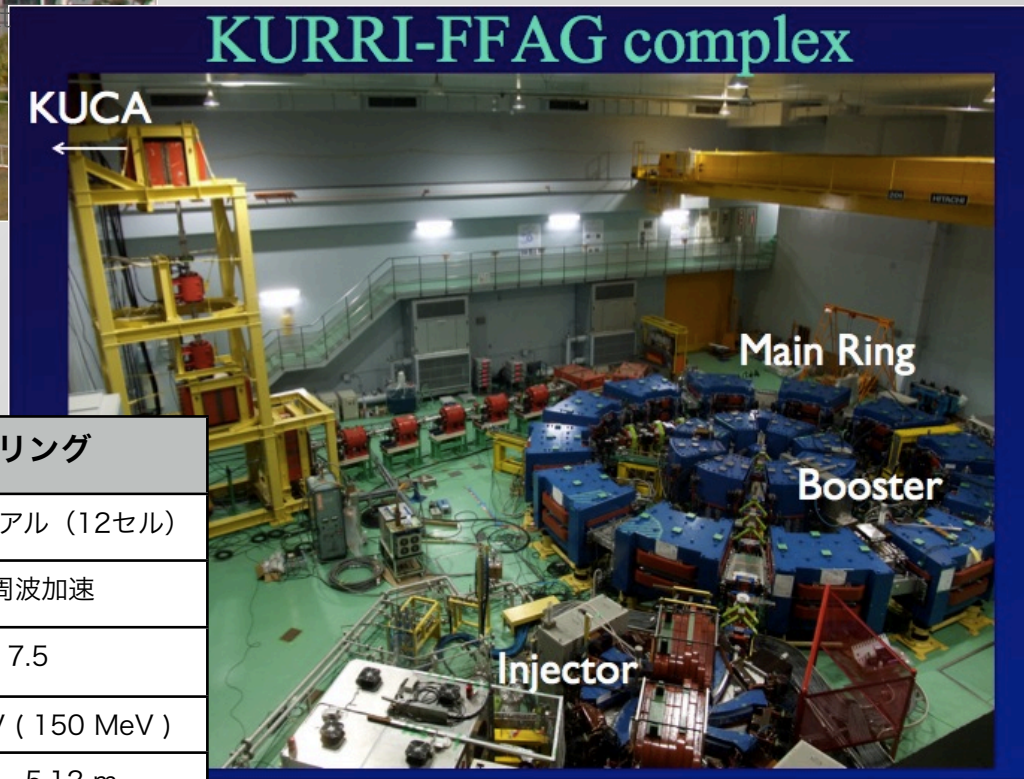
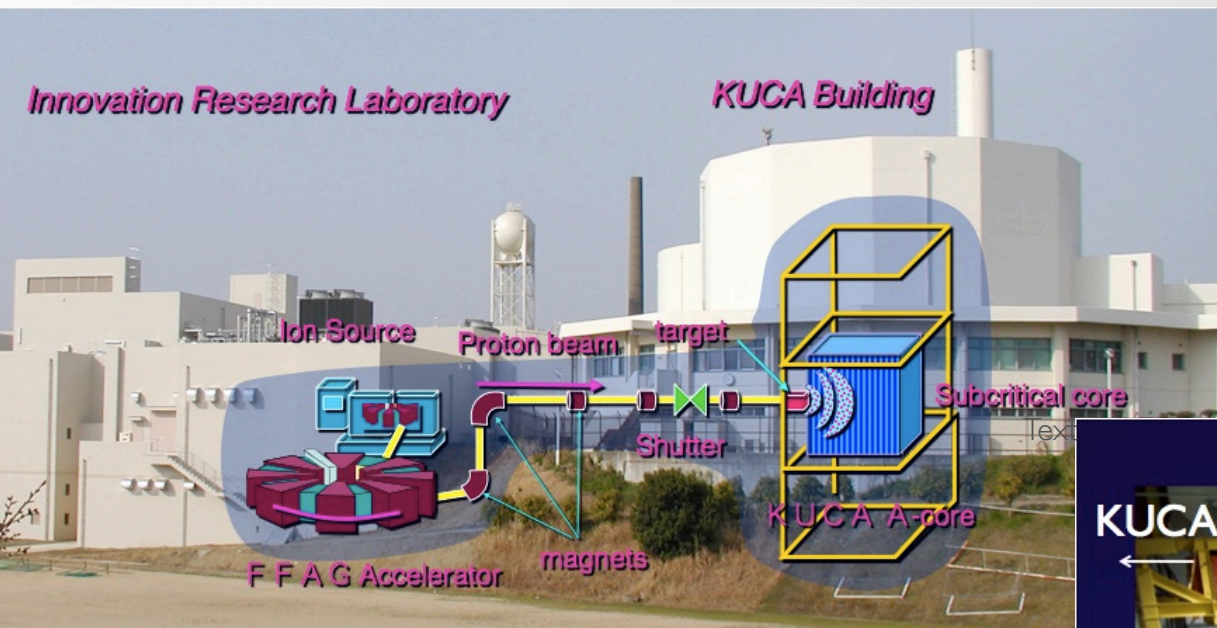
2002年度文部科学省提案公募事業「革新的原子力システム技術開発」

課題「FFAG加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」

Innovation Research Laboratory

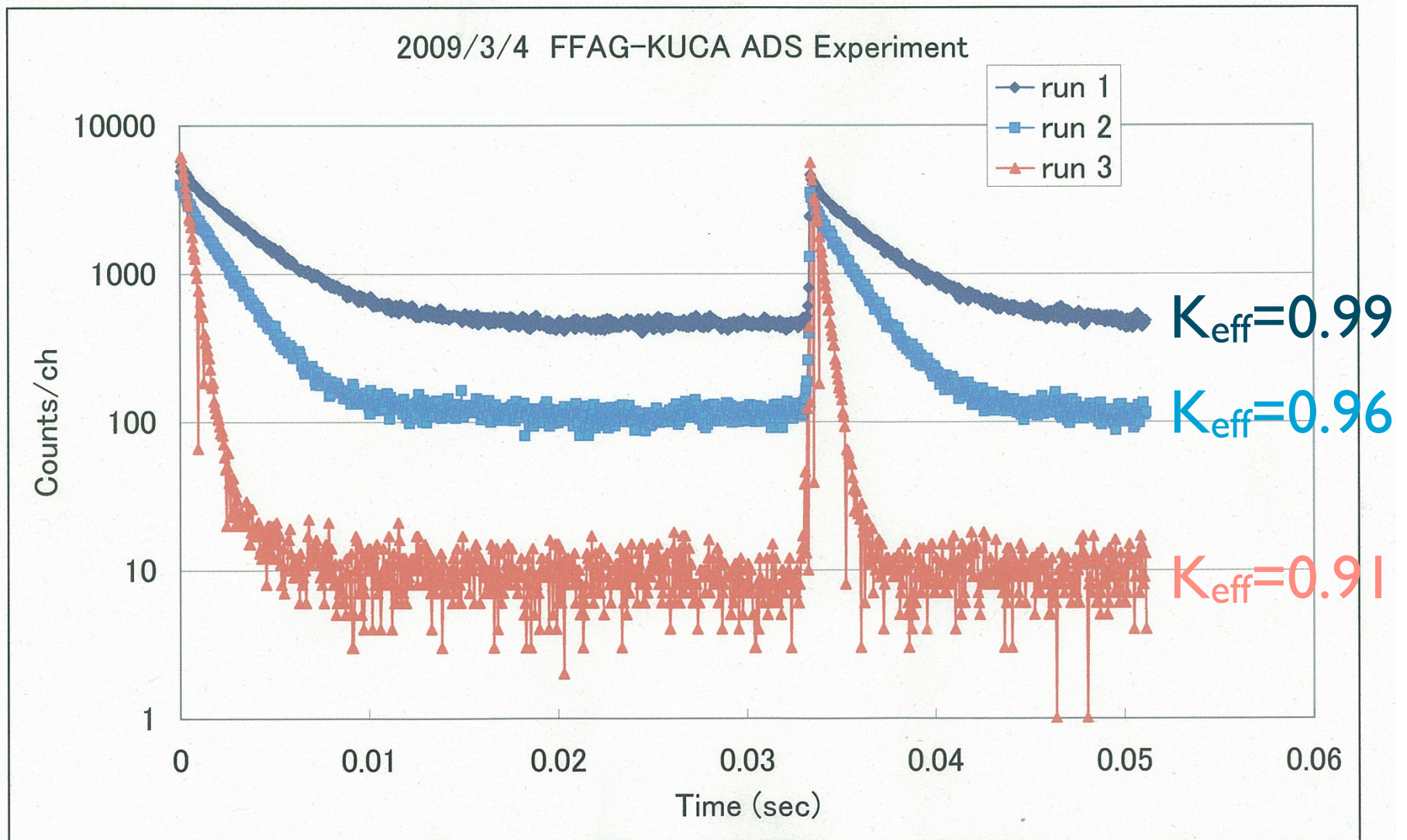
KUCA Building

KUCAと結合、世界初の加速器駆動未臨界炉実験
2009/3, 2010/3, 2011/2, 2012/2
ウラン, トリウム燃料体系



	イオンベータ	ブースター	主リング
ラティス	スパイラル (8セル)	DFDラディアル (8セル)	DFDラディアル (12セル)
加速方式	誘導加速	高周波加速	高周波加速
k値	2.5 (可変)	2.5	7.5
取出しエネルギー	1.5 MeV (2.5 MeV)	11 MeV (20 MeV)	100 MeV (150 MeV)
平均軌道半径	0.60 - 0.99 m	1.42 - 1.71 m	4.54 - 5.12 m

Neutron production vs time varying k_{eff}



加速器ビーム性能

イオンベータ ピーク電流 $25\mu\text{A}$

スパイラル・誘導加速・マルチコイルによるエネルギー可変の実現：陽子FFAGリングとしては世界初

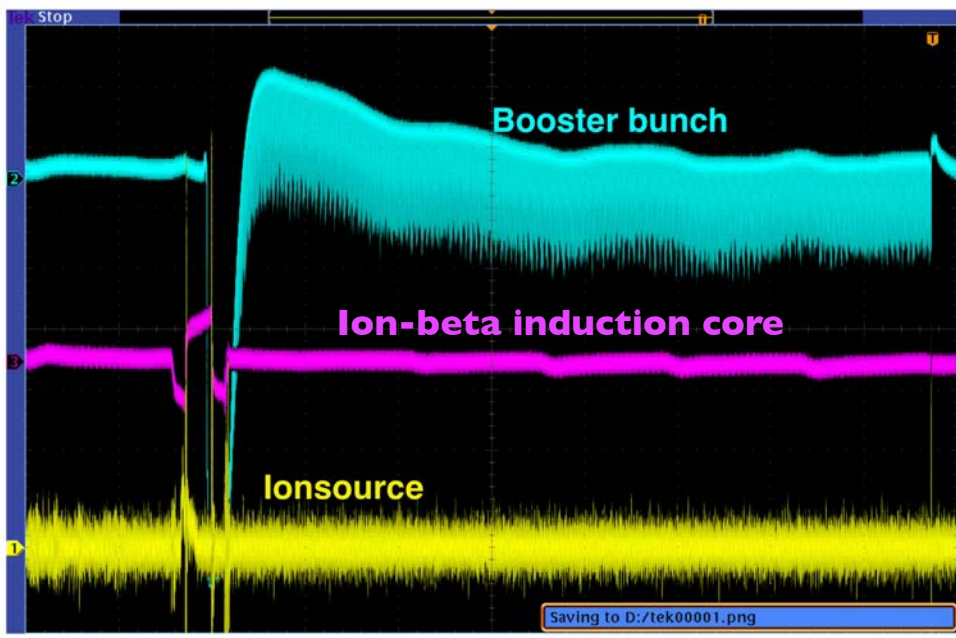
誘導加速方式：狭いスペースで加速に成功→取出しビームのエネルギーの揺らぎが大き→ブースターへの入射の安定性に欠ける

加速器ビーム性能

イオンベータ ピーク電流 $25\mu\text{A}$

スパイラル・誘導加速・マルチコイルによるエネルギー可変の実現：陽子FFAGリングとしては世界初

誘導加速方式：狭いスペースで加速に成功→取出しビームのエネルギーの揺らぎが大きい→ブースターへの入射の安定性に欠ける



ブースター 平均電流 1.5nA ($7\mu\text{s}$ i.e. 14ターン分の入射)

完成度の高いマシン：ビームコミッショニングにおいて、高周波捕獲から加速終了まで僅か数時間

基本的なマシン特性はほぼ設計通り → ビームロスなし

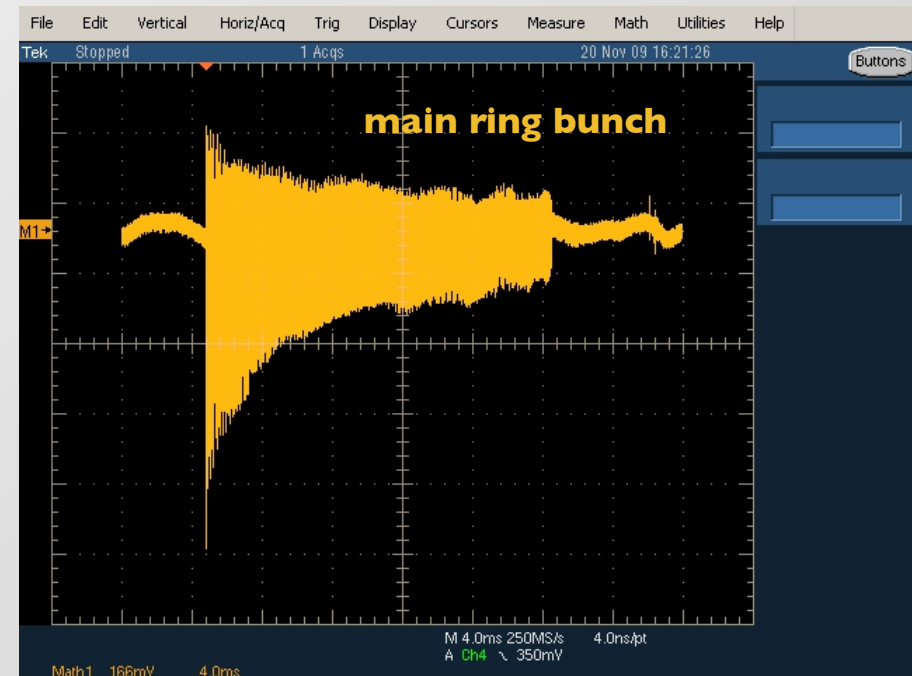
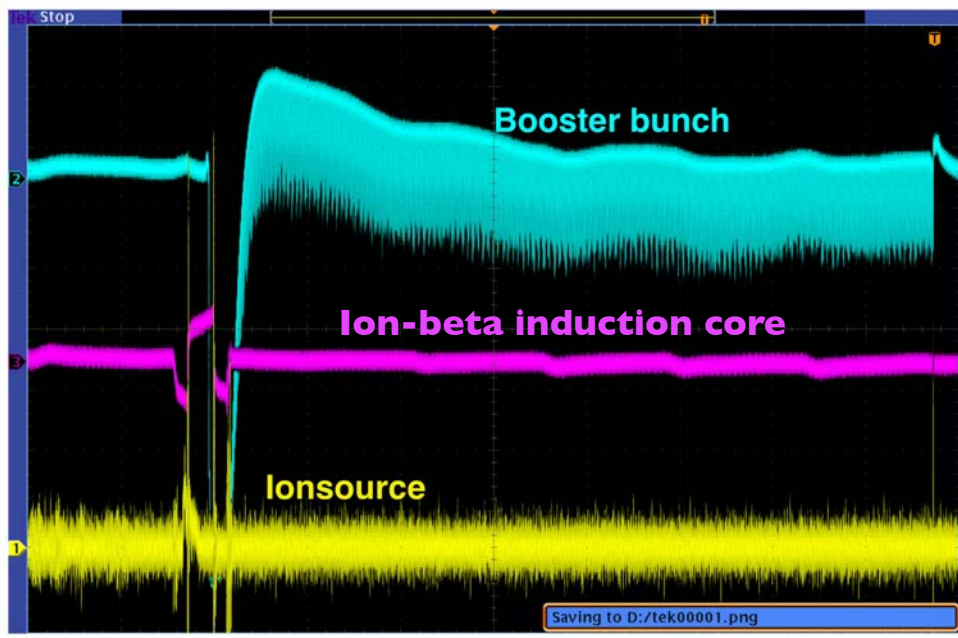
イオンベータからのエネルギー変動に対応し、入射セプタム電磁石の励磁量を調整するなどの入射角の最適化が必要

加速器ビーム性能

イオンベータ ピーク電流 $25\mu\text{A}$

スパイラル・誘導加速・マルチコイルによるエネルギー可変の実現：陽子FFAGリングとしては世界初

誘導加速方式：狭いスペースで加速に成功→取出しビームのエネルギーの揺らぎが大きい→ブースターへの入射の安定性に欠ける



ブースター 平均電流 1.5nA ($7\mu\text{s}$ i.e. 14ターン分の入射)

完成度の高いマシン：ビームコミッショニングにおいて、高周波捕獲から加速終了まで僅か数時間

基本的なマシン特性はほぼ設計通り → ビームロスなし

イオンベータからのエネルギー変動に対応し、入射セプトム電磁石の励磁量を調整するなどの入射角の最適化が必要

主リング 平均電流 0.1nA (2009年度の放射線規制値)

ヨークフリー型電磁石により、任意の場所からビームの入射・取出しが可能 → 漏れ磁場が大きい

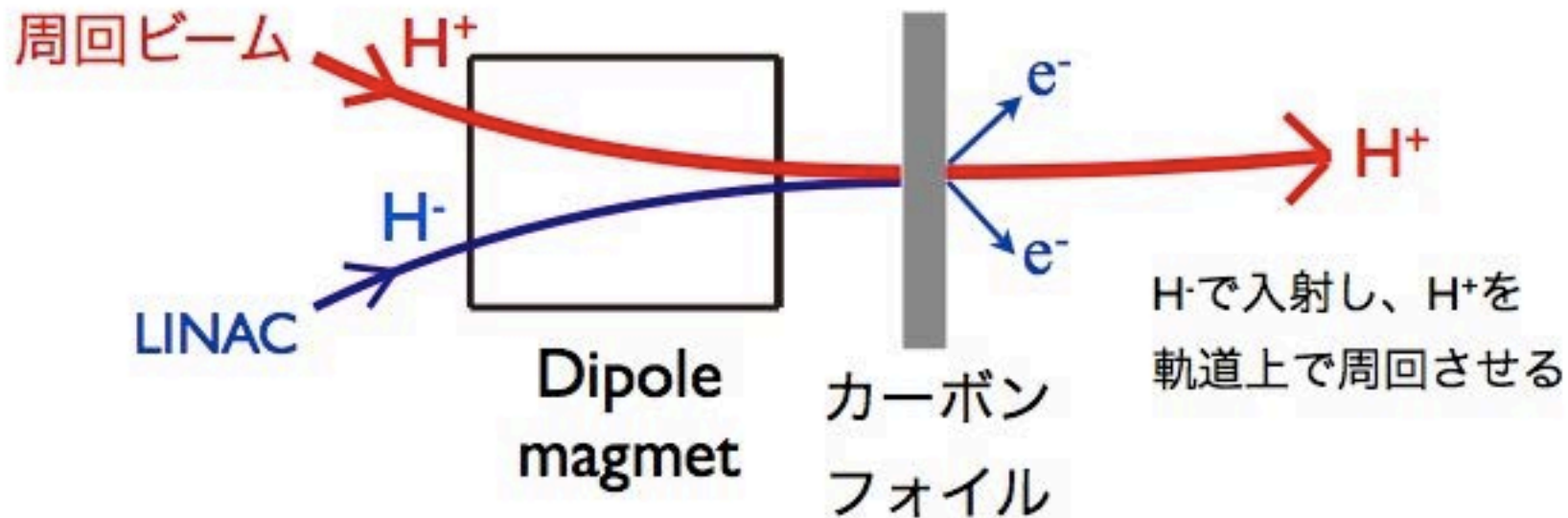
ビームロス改善であと2-3倍は増強可能 → 高々nAへの改善 → 入射方式の見直し

主リングへの荷電変換入射

ビーム増強 $\sim 1 \mu\text{A}$

- FFAG-ERIT H-Linac(11 MeV) を用いる
- 空間電荷効果からの制限
 $\sim 1 \times 10^{12} \text{ppp}$ ($1 \mu\text{A}@30\text{Hz}$, $\Delta v_y < 0.3$)

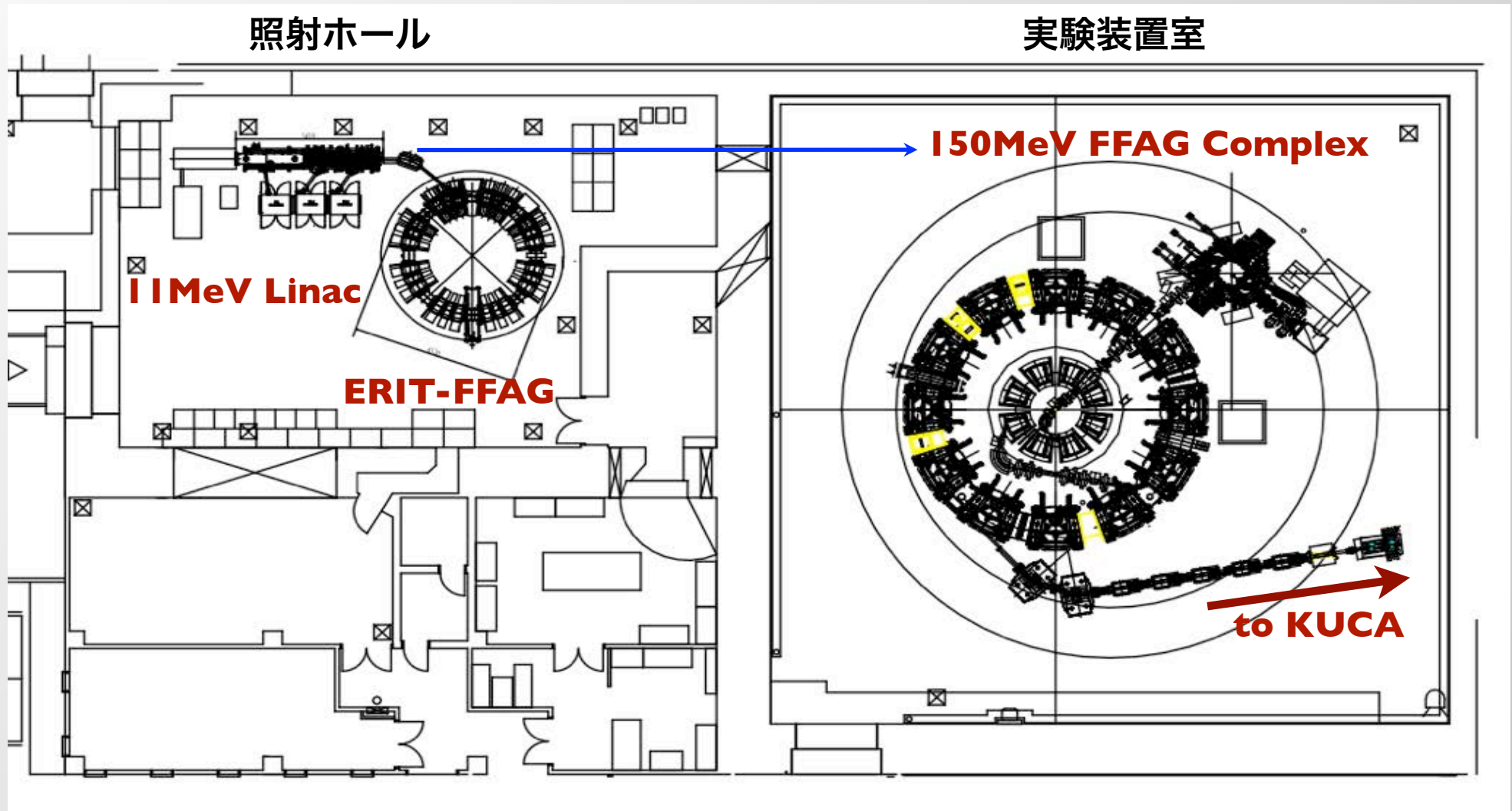
荷電変換ビーム入射



- ・ LINACからH⁻を入射
- ・ カーボンフォイルでH⁻をH⁺に荷電変換させる
- ・ MAIN RINGでH⁺を加速させる

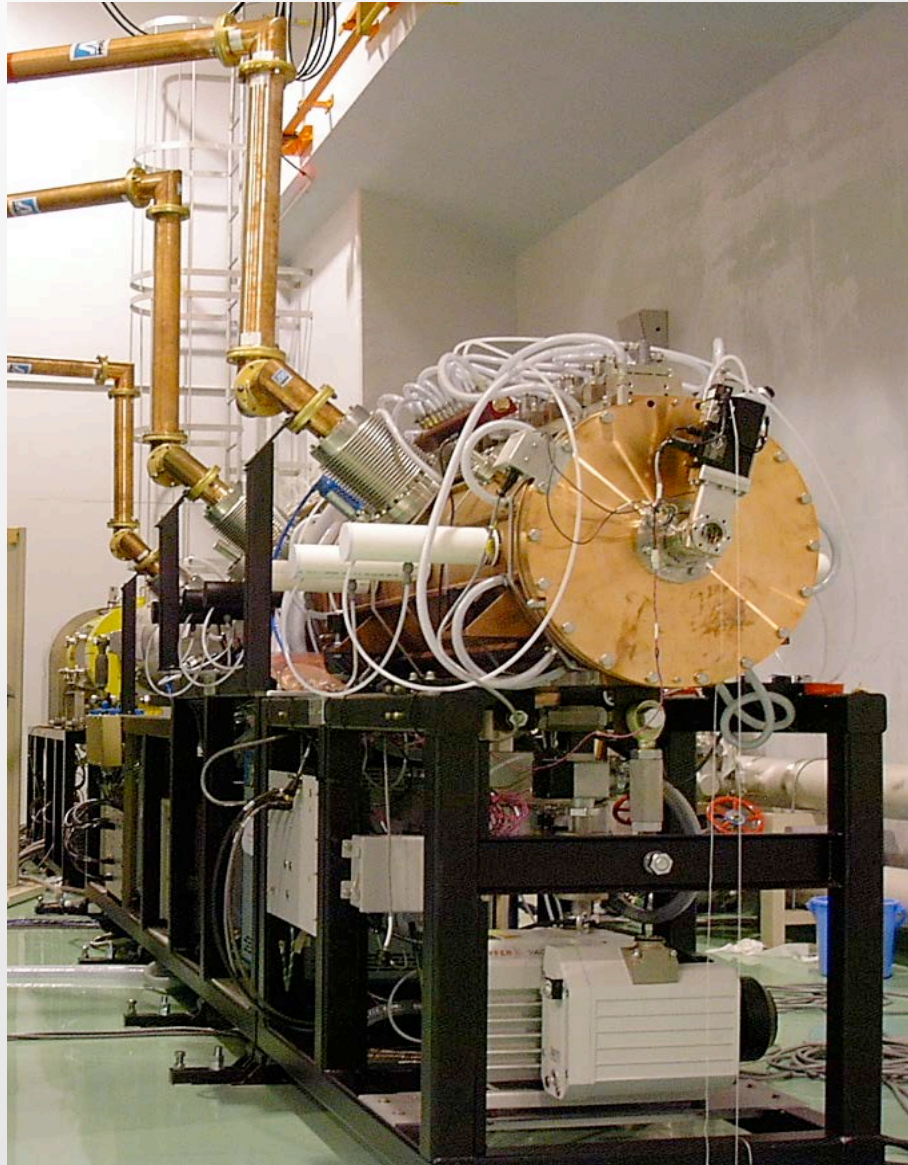
イノベーションリサーチラボ

加速器配置図



New injector

Spec of Linac + H⁻ Ion Source



Linac beam parameter

Ion : H⁻

E_{ext} : 11 MeV

Beam Pulse width(MAX) : 100 μsec

Peak Curr.(MAX) : ~5 mA

: ~3.12*10¹²[ppp]

(Present injector) : ~6.00*10⁸[ppp]

rep. rate : 1 Hz~200 Hz

Horizontal

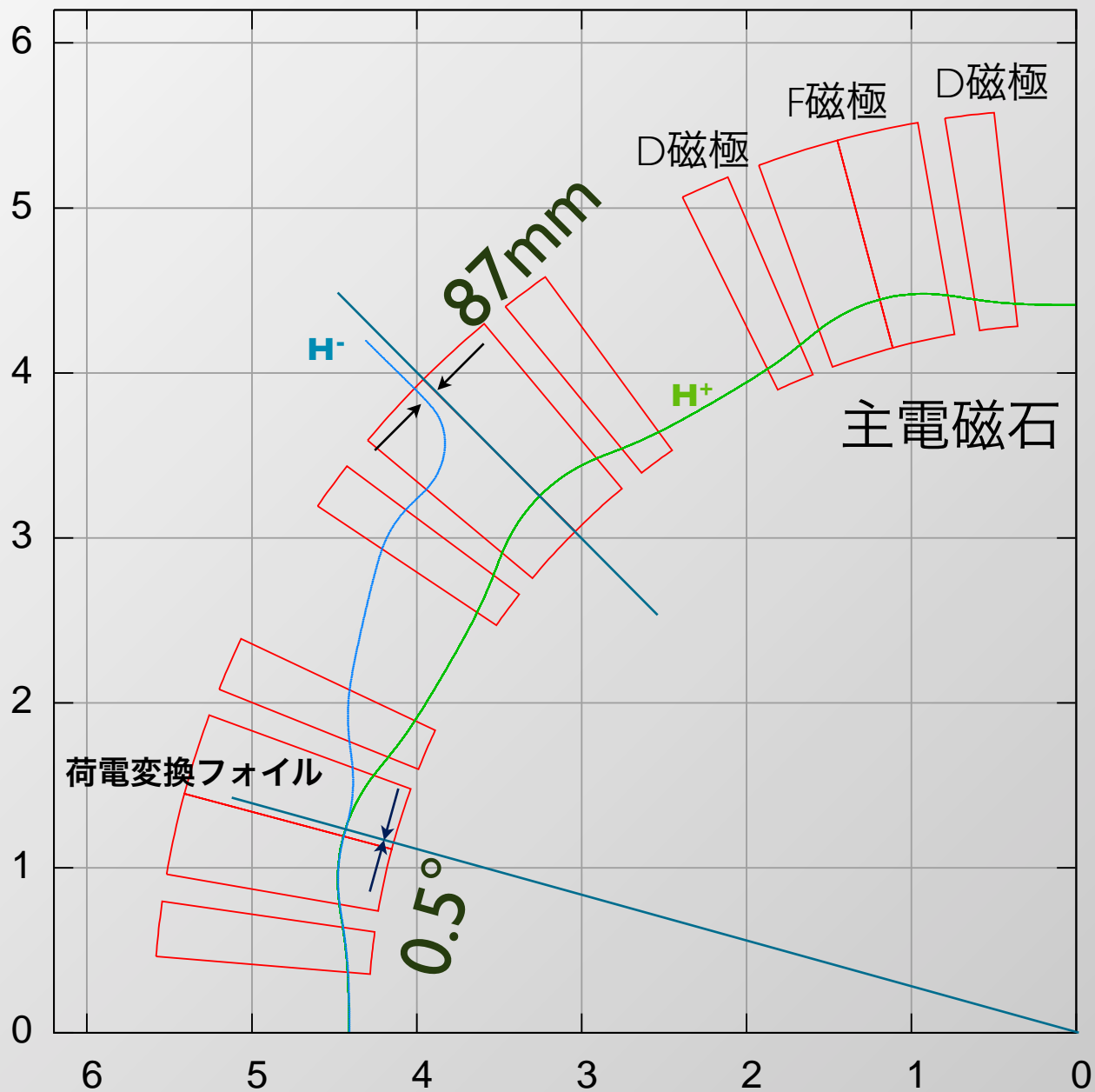
norm. emittance (90%) : 0.680 mm•mrad

Vertical

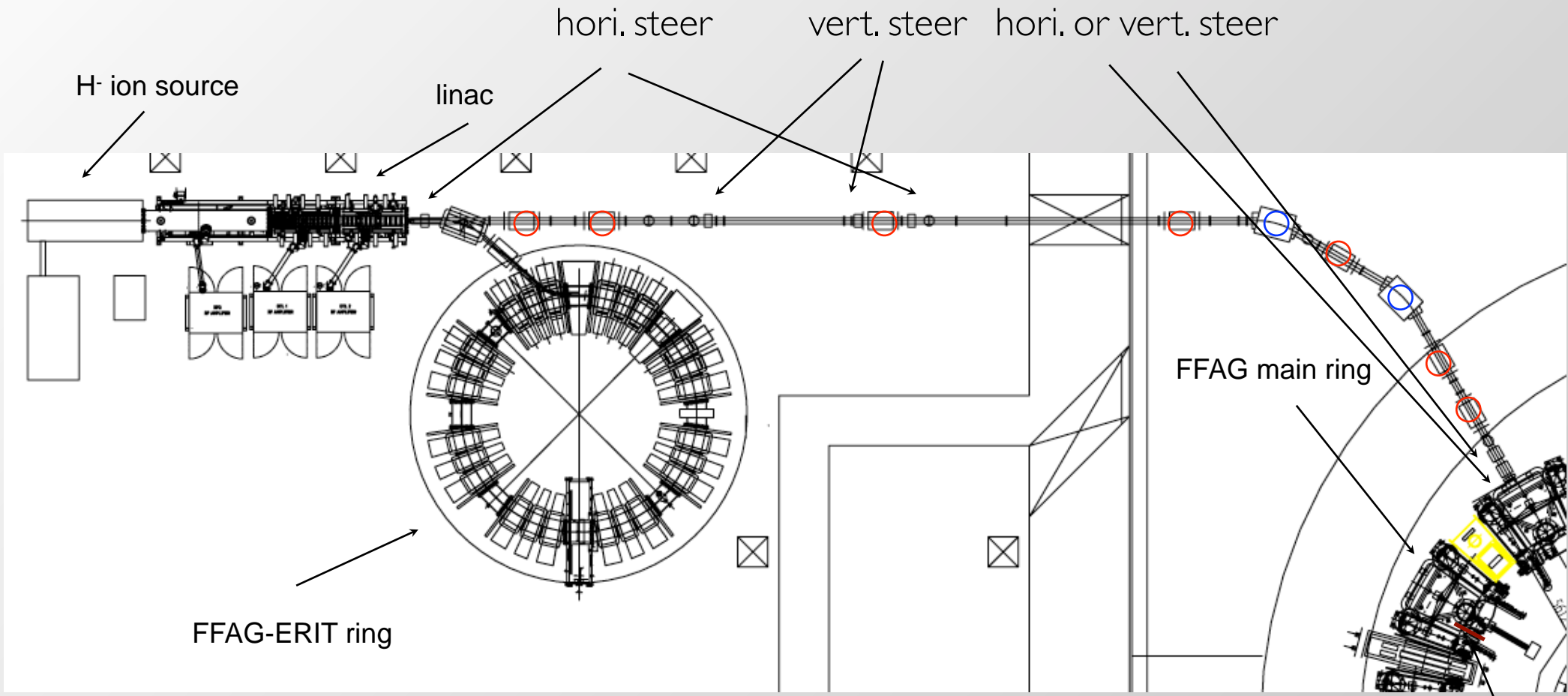
norm. emittance (90%) : 0.630 mm mrad

Ene. 90% : ΔE ~ 45 KeV

主リングへの入射



New beam-line



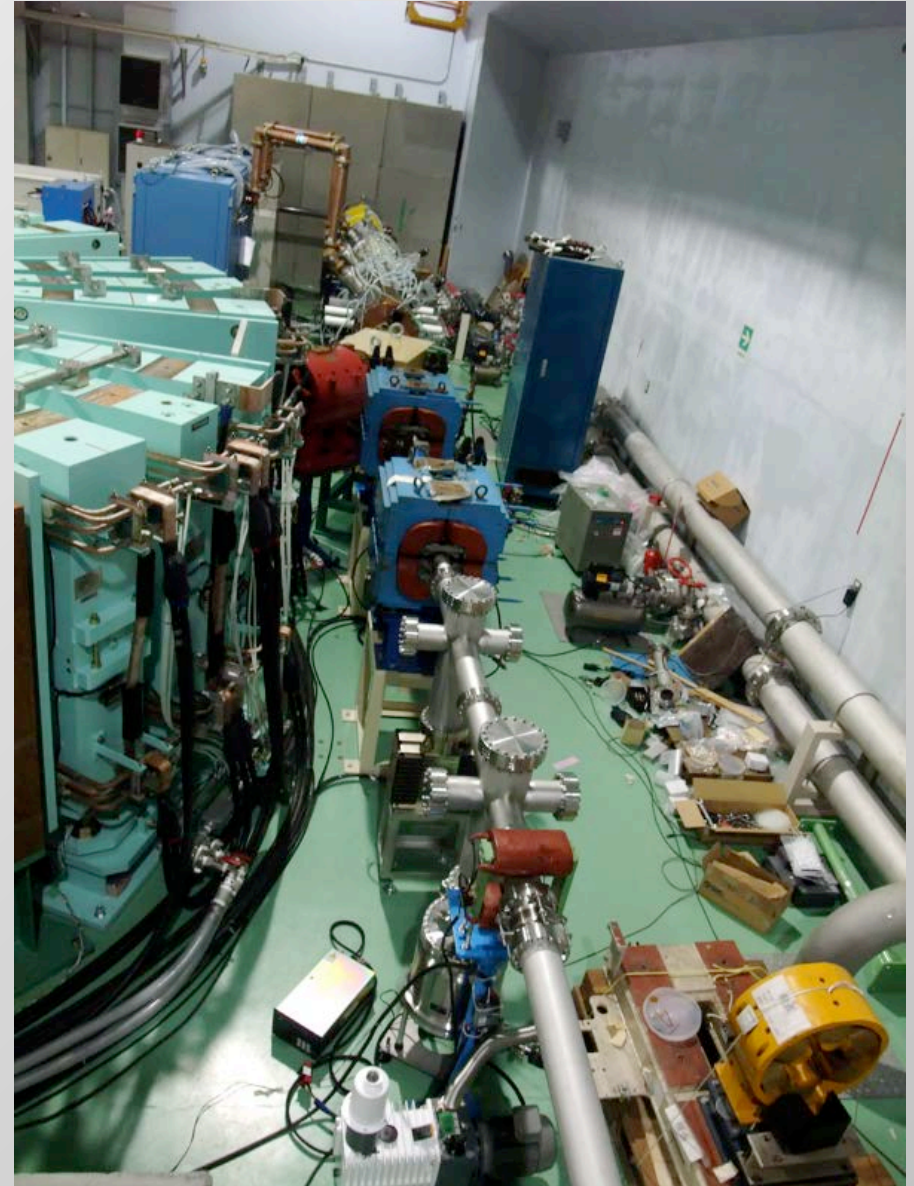
Q Magnet $\times 7^*$, B Magnet(30deg) $\times 2$

* added one QM in May 2011

charge exchange foil

Construction of new beam line

照射ホール(線形加速器)側



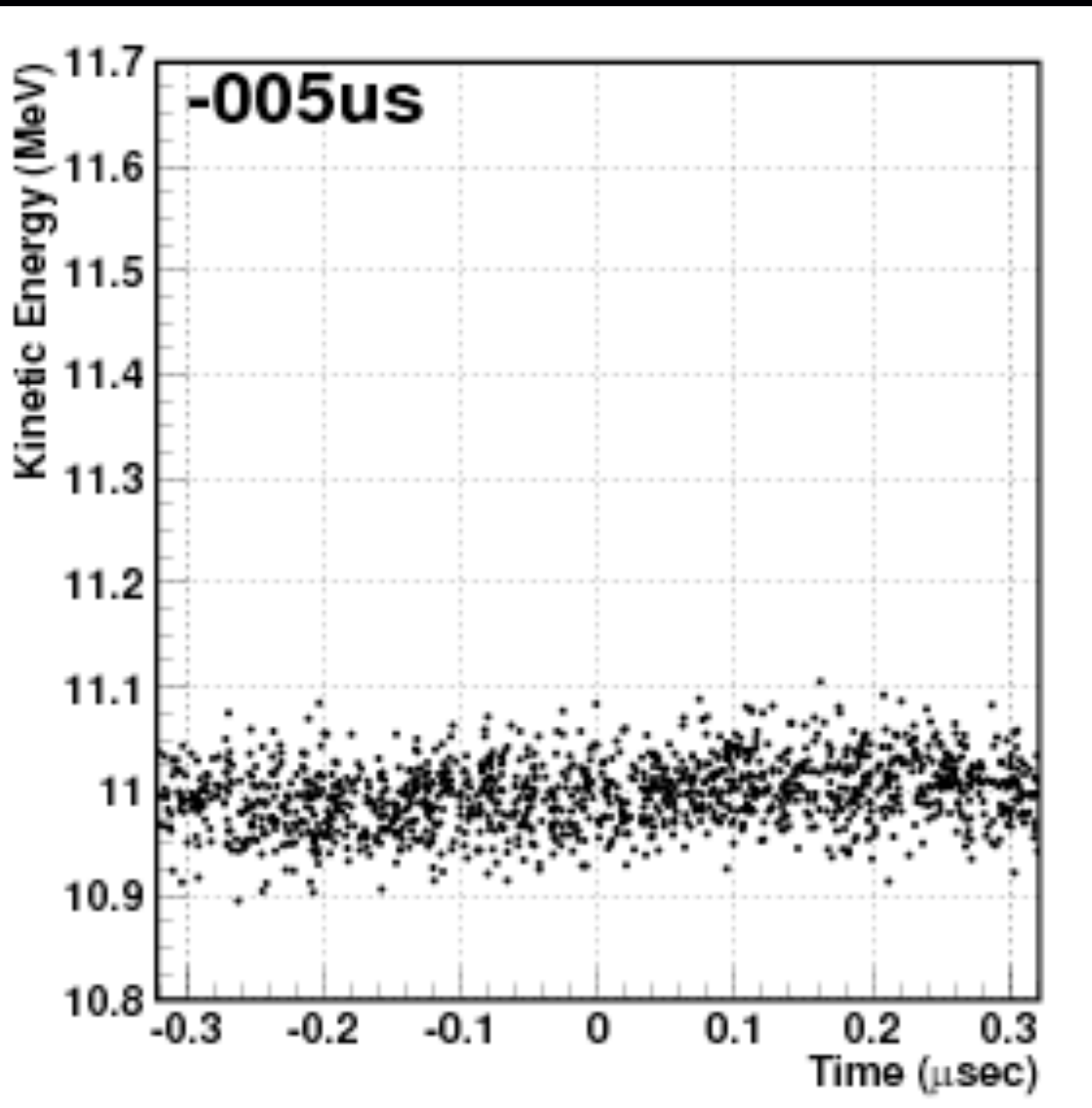
Construction of new beam line

本体室(FFAG主リング)側



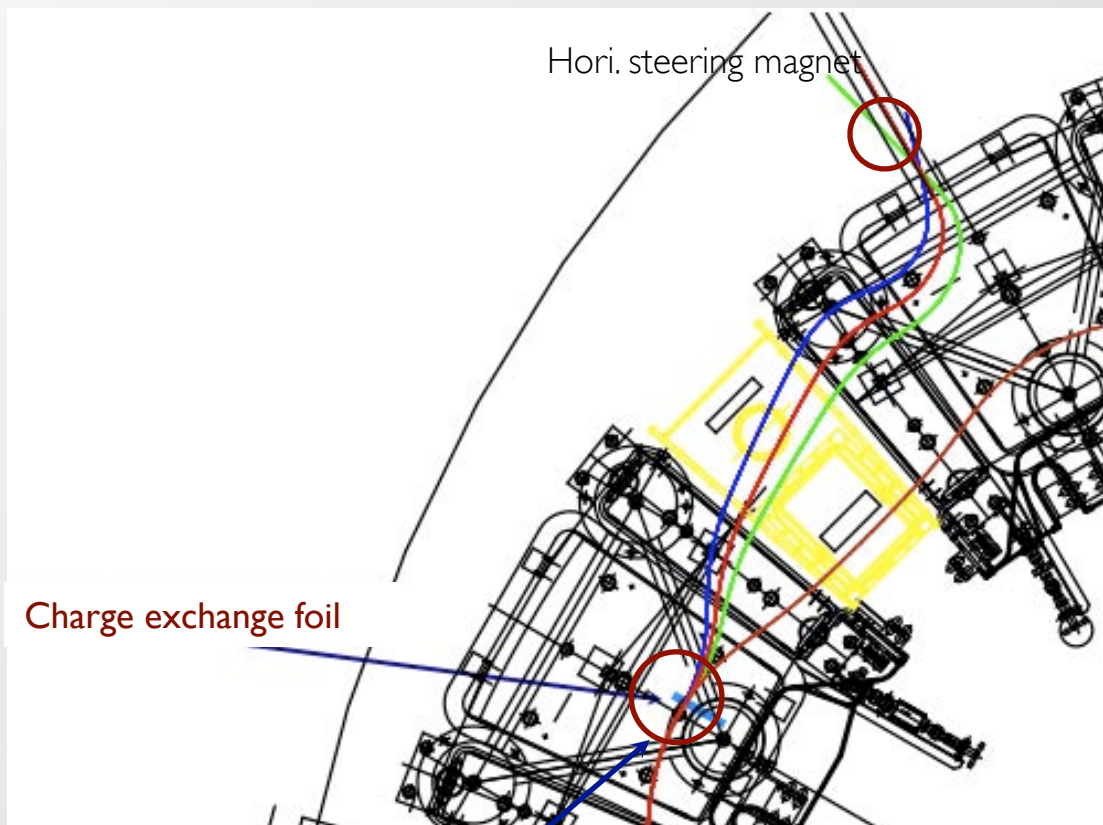
荷電変換入射基本設計（指針）

- 荷電変換用フォイルとしてカーボン $10\sim 20\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。
- 低エネルギーでの入射(11 MeV)。従って energy loss, emittance growth が大きいいため対策が必要。
- energy lossはRFで再加速、emittance growthはoff center入射でhitting prob.を下げる。また、longitudinal paintingについても検討する。
- ビーム入射後にフォイルをかわす方法として、FFAGの特徴を生かし、加速による軌道シフトを利用する。



入射軌道と荷電変換フォイル

- 入射機器(セプタム等)を使用せずに、FFAGのメイン磁場のみを用いて入射ビームと周回ビームを合流させる。
- 3D磁場マップを用いたトラッキングによる検討の結果、荷電変換フォイルはF磁石中央部分に設置した。



foil: 0.5deg upstream from the center of F magnet (red line)

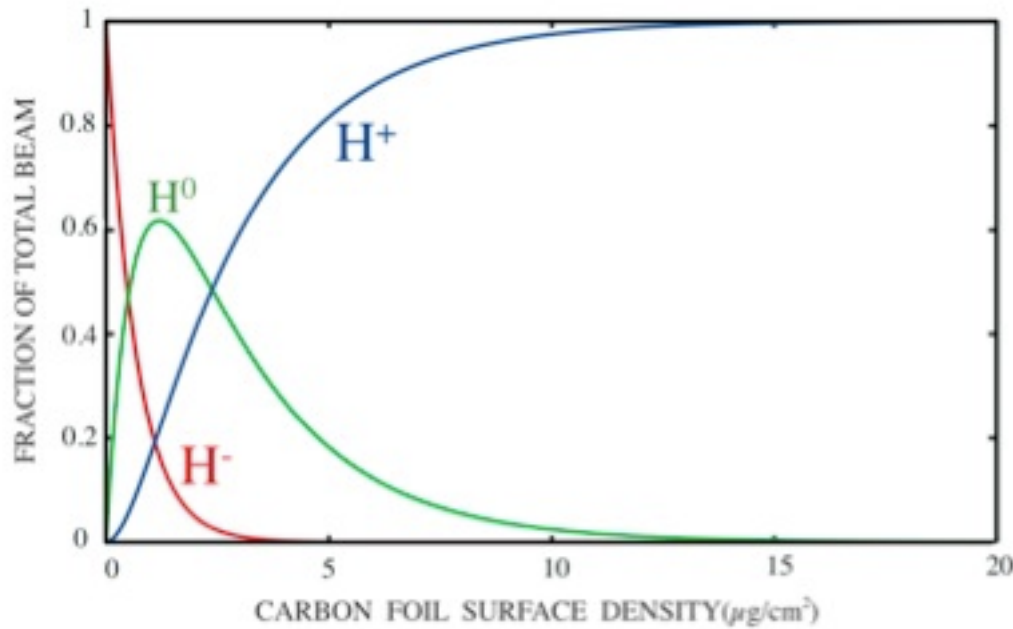
Charge exchange foil

- Carbon foil ($10 - 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)
- Stripping efficiency $\sim 98\% - 100\%$



$10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ two layer = $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

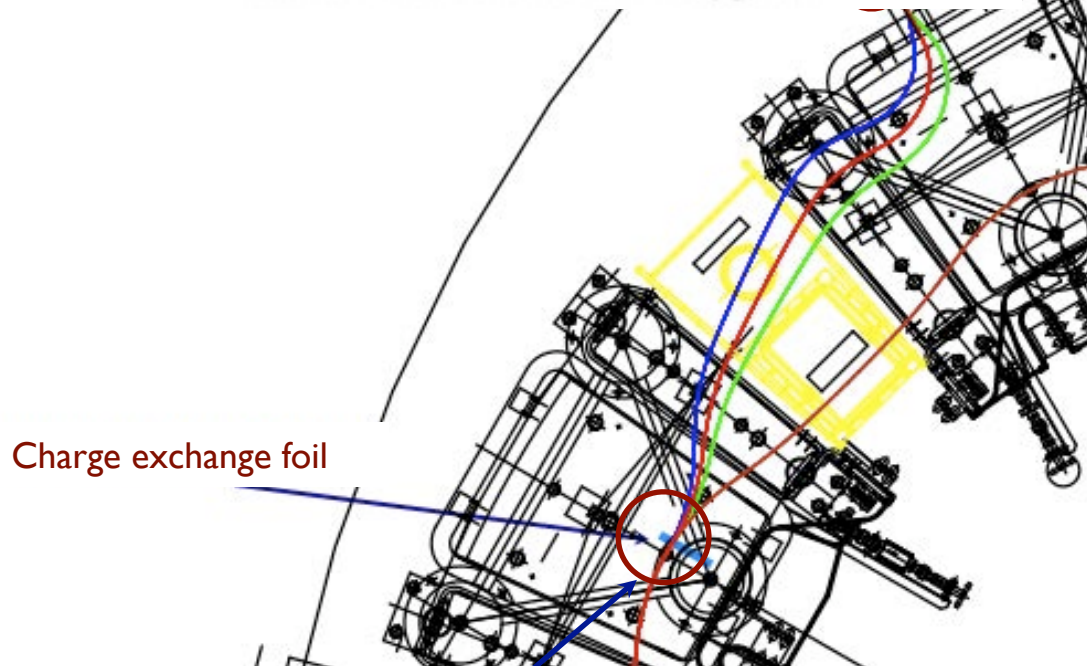
電変換フォイル



のメイン磁場のみを用いて入射ビームと周
る検討の結果、荷電変換フォイルはF磁石中

Charge exchange foil

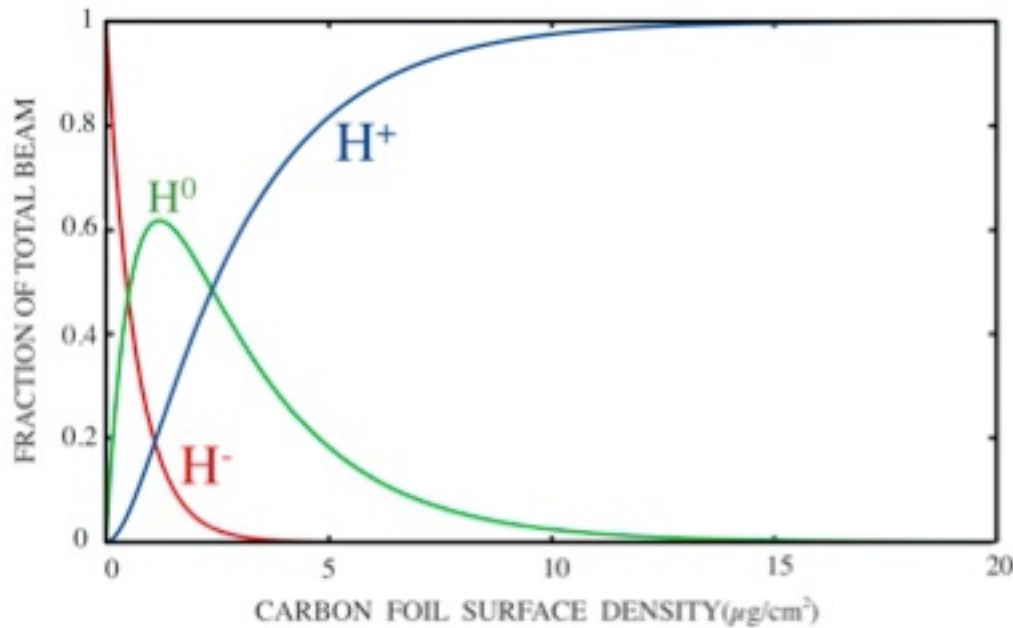
- Carbon foil ($10 - 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)
- Stripping efficiency $\sim 98\% - 100\%$



foil: 0.5deg upstream from the center of F magnet (red line)

$10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ two layer = $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

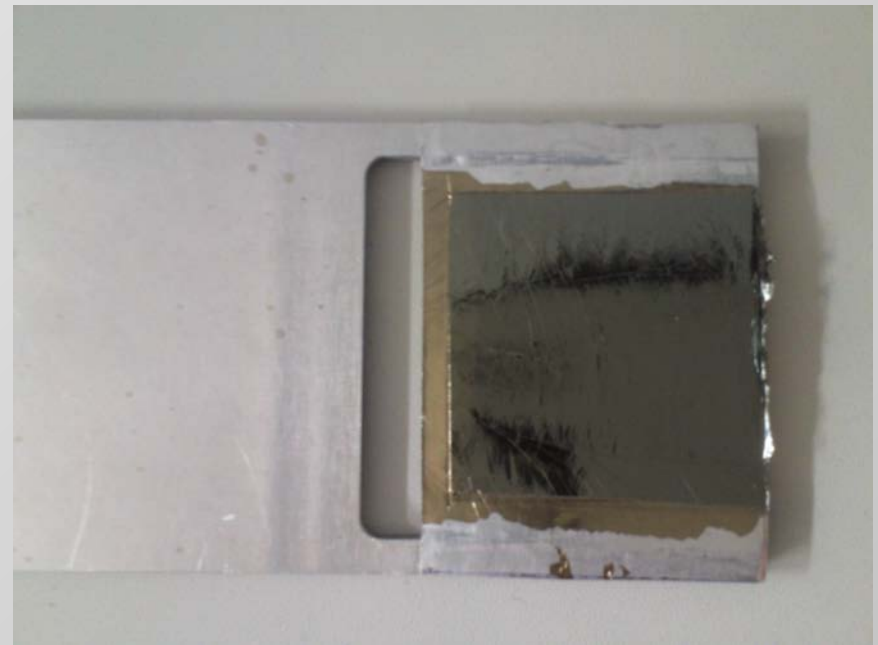
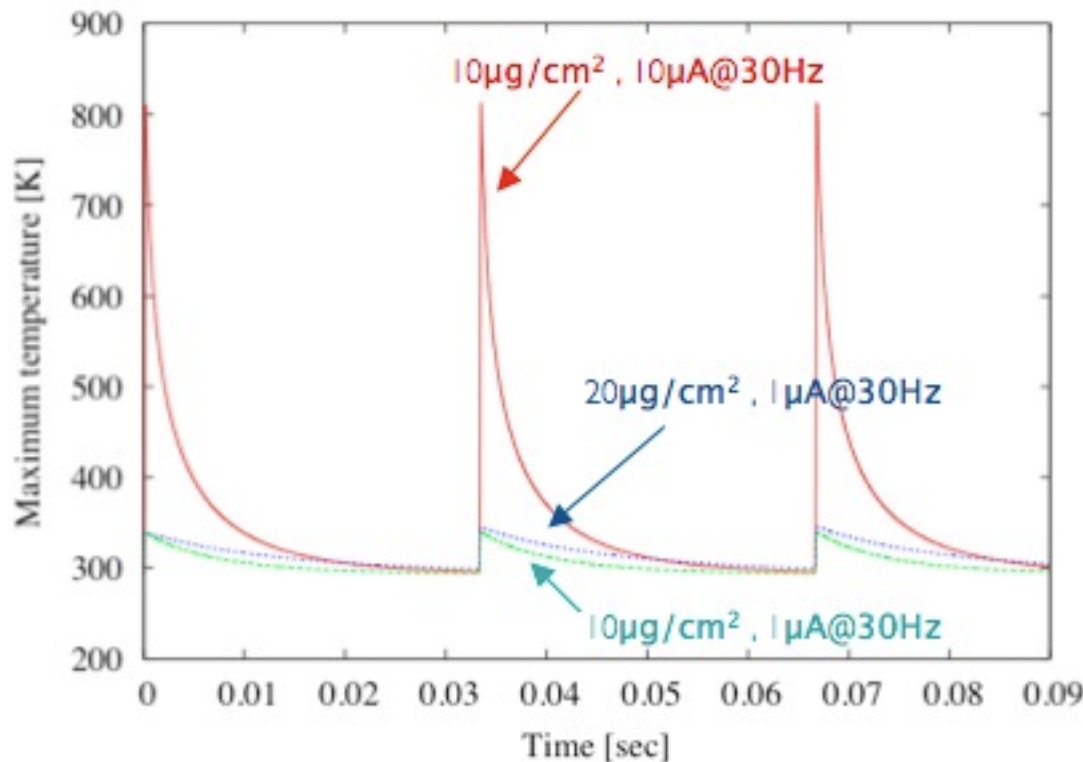
電変換フォイル



のメイン磁場のみを用いて入射ビームと周
る検討の結果、荷電変換フォイルはF磁石中

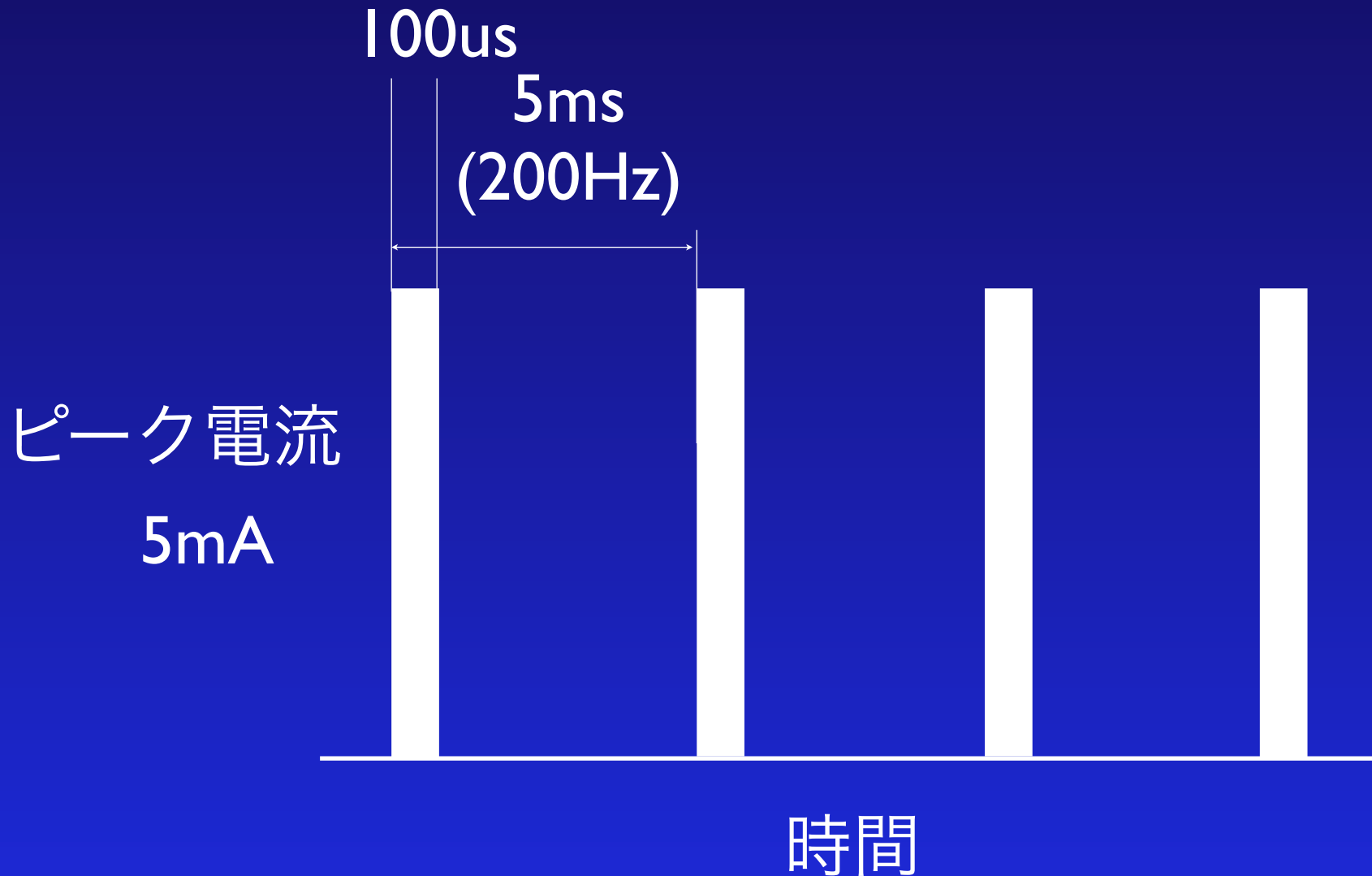
Charge exchange foil

- Carbon foil ($10 - 20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)
- Stripping efficiency $\sim 98\% - 100\%$

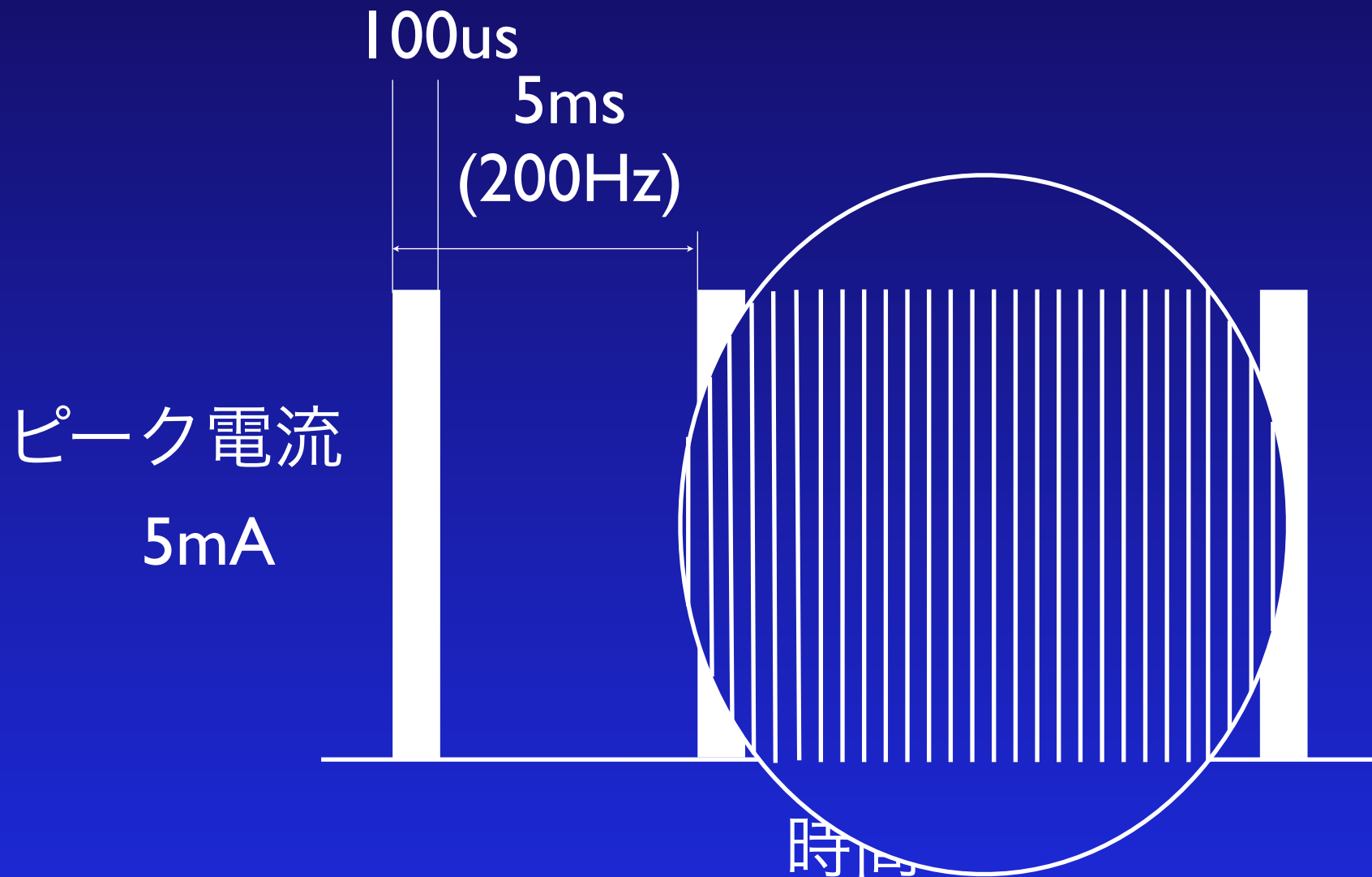


$10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ two layer = $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

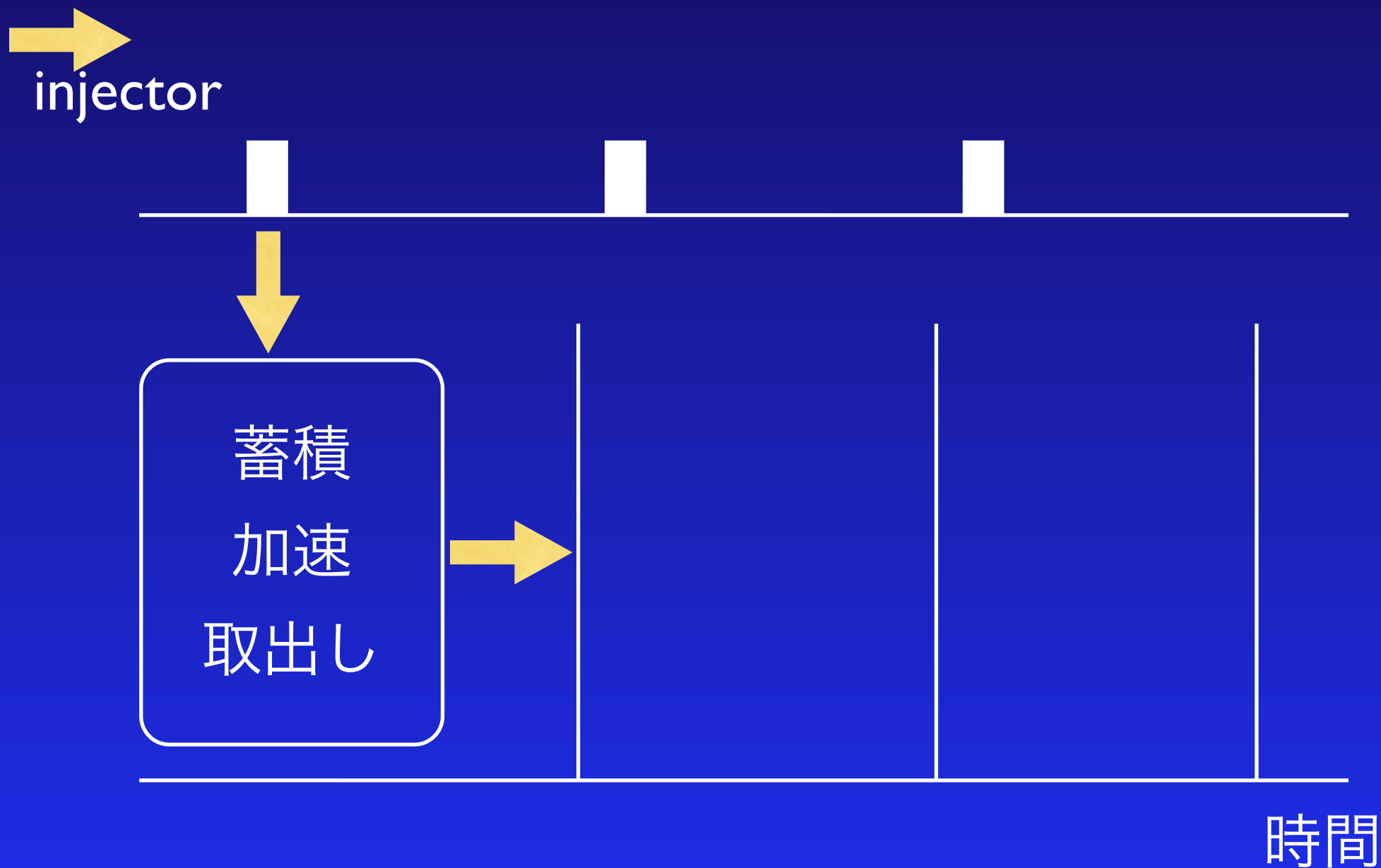
LINACから供給されるビームの時間構造



LINACから供給されるビームの時間構造



FFAG加速器から供給されるビームの時間

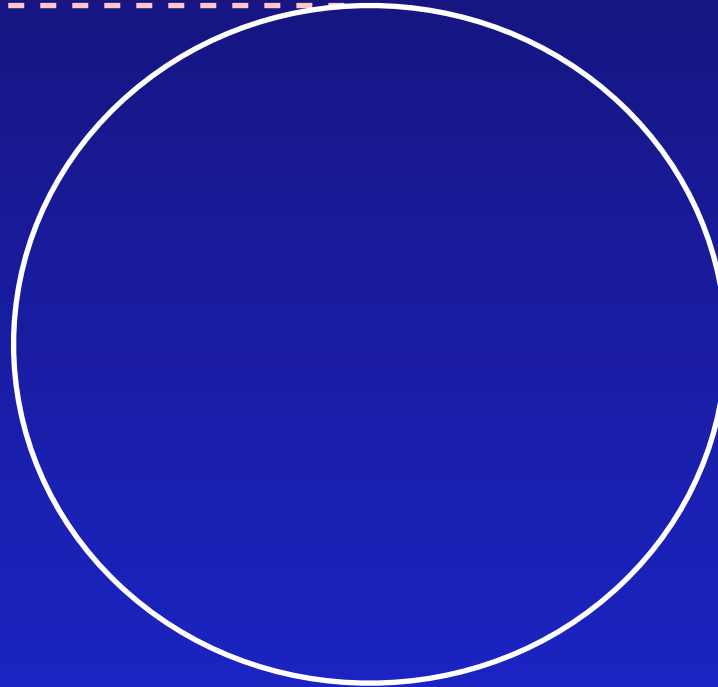


ビーム蓄積

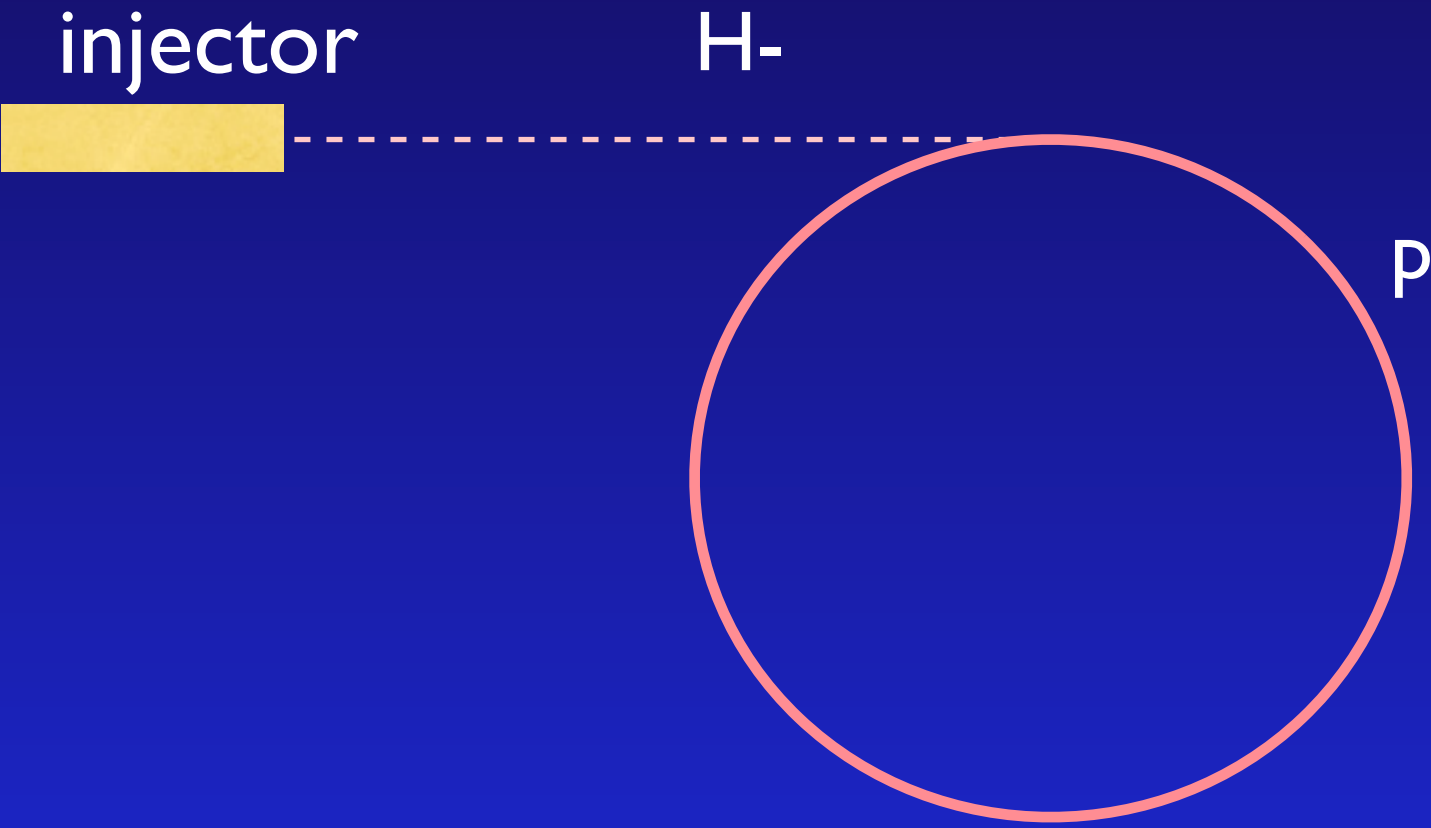
injector



H-



ビーム蓄積

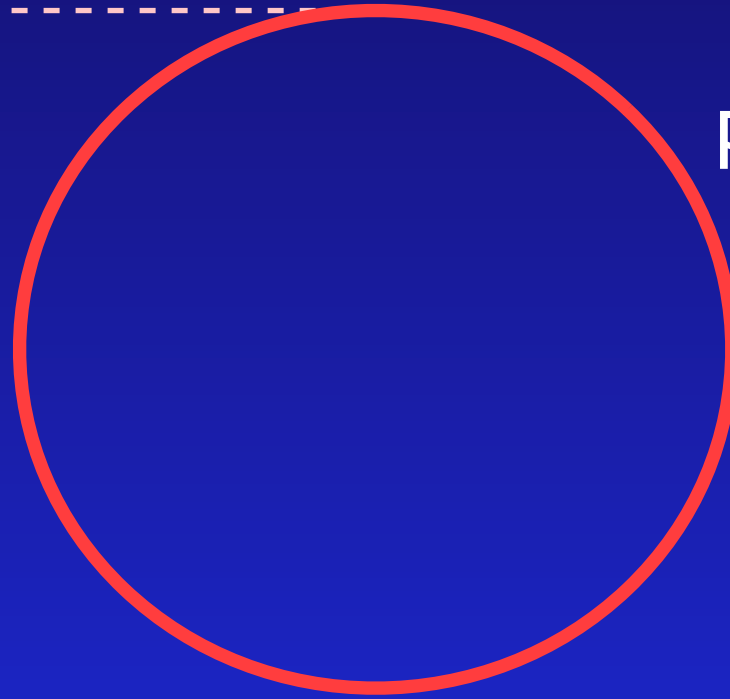


ビーム蓄積

injector



H-



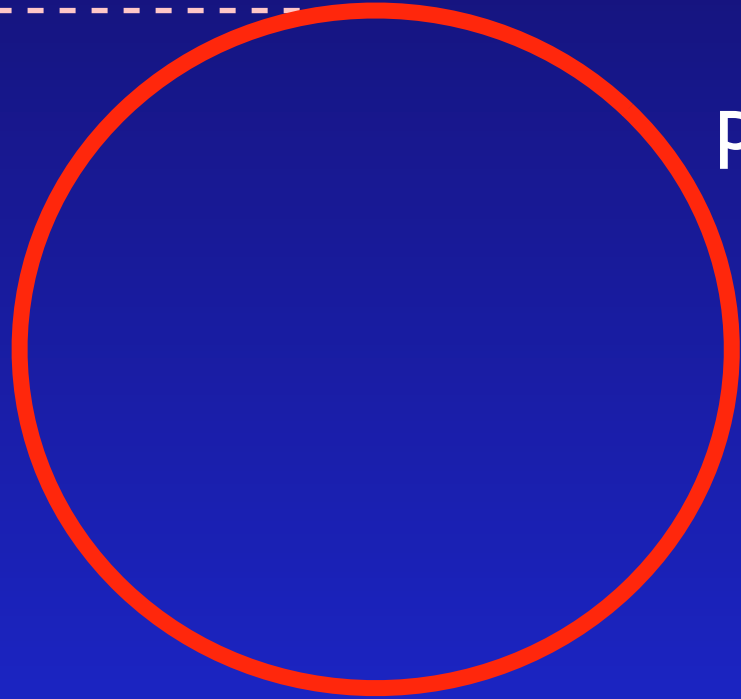
P

ビーム蓄積

injector



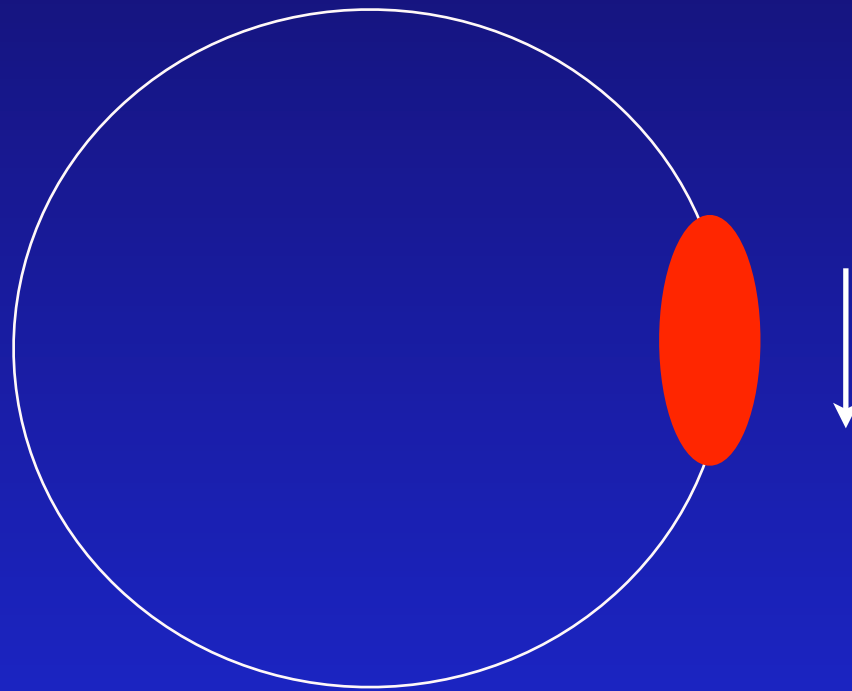
H-



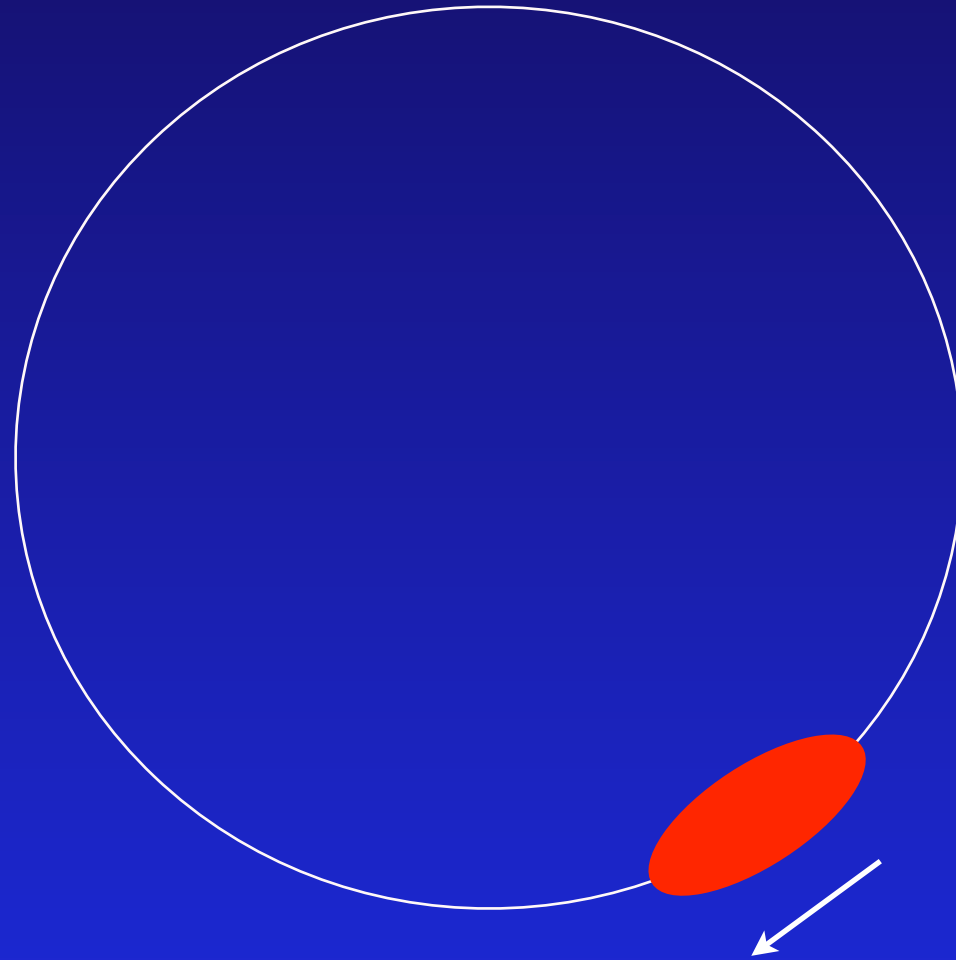
P

100ターン程度ため込む

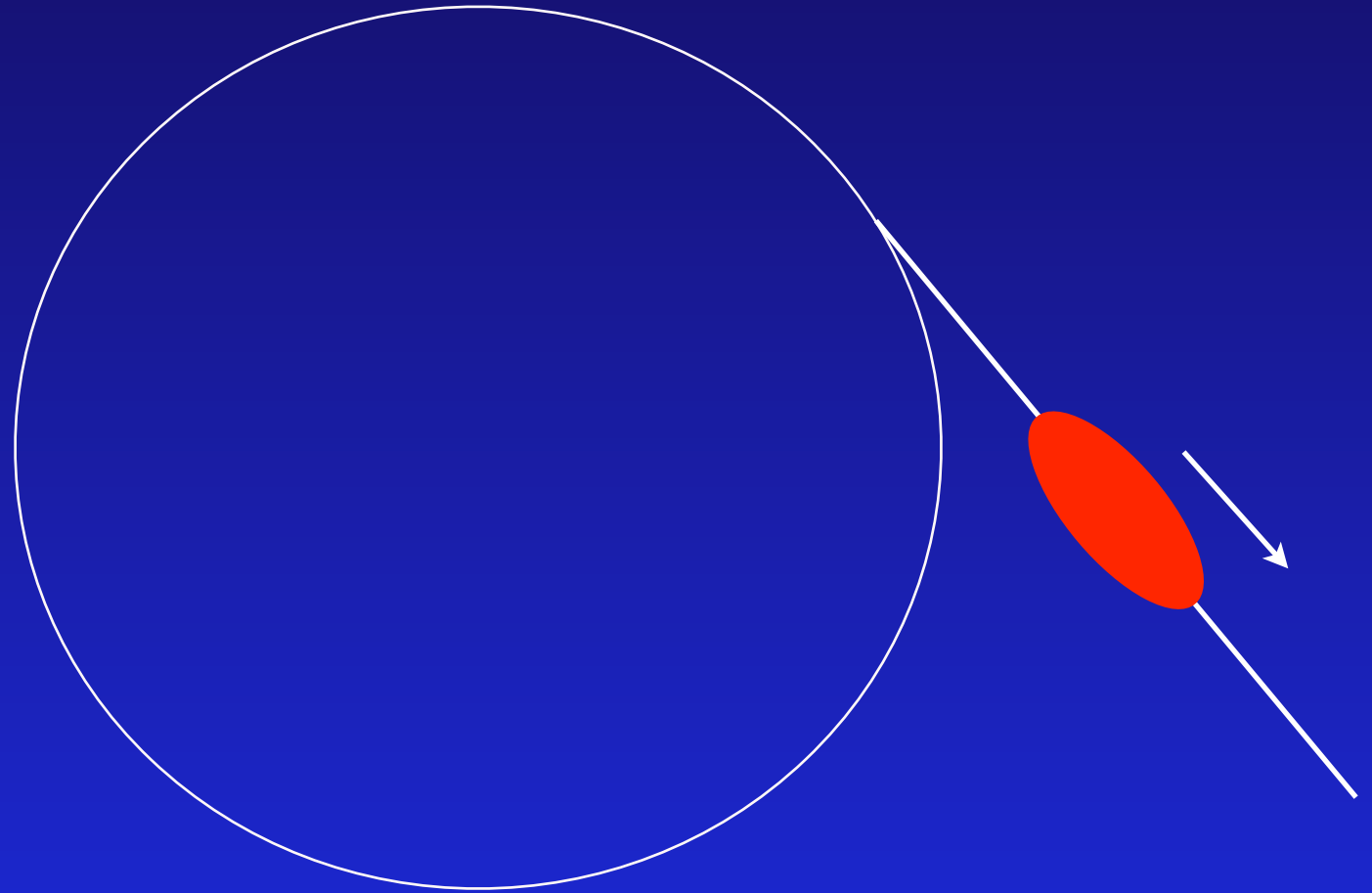
ビーム加速



ビーム加速



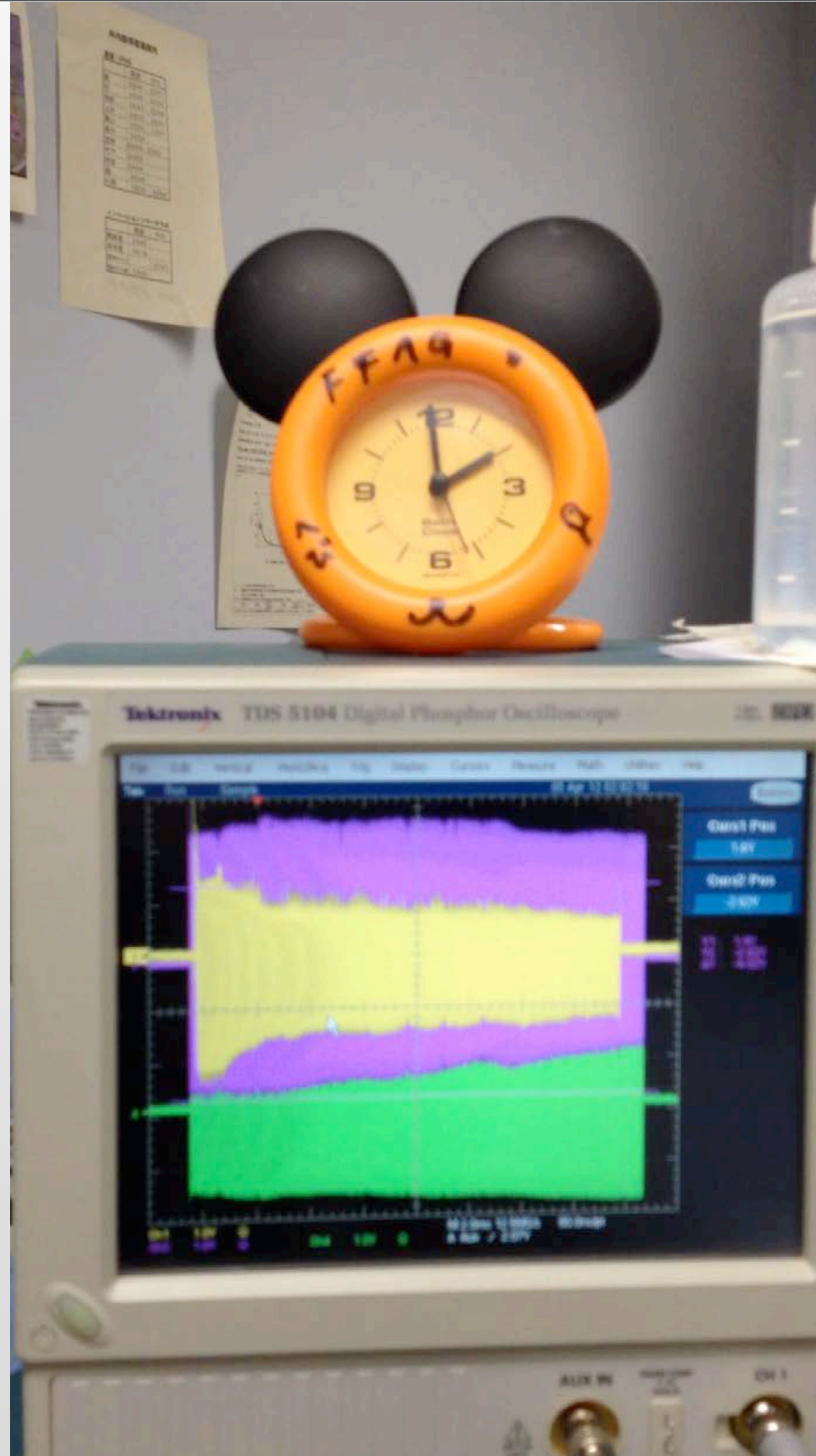
ビーム取出し



100~200ターン分の凝縮したビームの塊

RF安定→ビーム安定

入射器・主リングとも



2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

2010年3月

@主リング出口 100MeV 100pA

@KUCAターゲット 30pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

2010年3月

@主リング出口 100MeV 100pA

@KUCAターゲット 30pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

2010年3月

@主リング出口 100MeV 100pA

@KUCAターゲット 30pA

2011年3月

@主リング出口 100MeV 1nA

@KUCAターゲット 100pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

2009年3月 (ADS実験開始当初)
@主リング出口 100MeV 50pA
@KUCAターゲット 数pA

2010年3月
@主リング出口 100MeV 100pA
@KUCAターゲット 30pA

2011年3月
@主リング出口 100MeV 1nA
@KUCAターゲット 100pA

輸送効率改善
加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

取出し効率改善

2009年3月 (ADS実験開始当初)
@主リング出口 100MeV 50pA
@KUCAターゲット 数pA

2010年3月
@主リング出口 100MeV 100pA
@KUCAターゲット 30pA

2011年3月
@主リング出口 100MeV 1nA
@KUCAターゲット 100pA

2012年3月
@主リング出口 100MeV 10nA相当*
@KUCAターゲット 100pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

取出し効率改善

2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

2010年3月

@主リング出口 100MeV 100pA

@KUCAターゲット 30pA

2011年3月

@主リング出口 100MeV 1nA

@KUCAターゲット 100pA

2012年3月

@主リング出口 100MeV 10nA相当*

@KUCAターゲット 100pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

取出し効率改善

* 放射線申請上1nAが上限であるため、
繰り返しを落として運転

2009年3月 (ADS実験開始当初)

@主リング出口 100MeV 50pA

@KUCAターゲット 数pA

2010年3月

@主リング出口 100MeV 100pA

@KUCAターゲット 30pA

2011年3月

@主リング出口 100MeV 1nA

@KUCAターゲット 100pA

2012年3月

@主リング出口 100MeV 10nA相当*

@KUCAターゲット 100pA

輸送効率改善

加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

取出し効率改善

エネルギーアップ

* 放射線申請上1nAが上限であるため、
繰り返しを落として運転

2009年3月 (ADS実験開始当初)
@主リング出口 100MeV 50pA
@KUCAターゲット 数pA

2010年3月
@主リング出口 100MeV 100pA
@KUCAターゲット 30pA

2011年3月
@主リング出口 100MeV 1nA
@KUCAターゲット 100pA

2012年3月
@主リング出口 100MeV 10nA相当*
@KUCAターゲット 100pA

2012年11月
@主リング出口 150MeV 10nA相当*
@KUCAターゲット 1nA

輸送効率改善
加速空洞電源改造 2.5kV → 4kV

Hマイナス入射 (LINAC採用)

取出し効率改善

エネルギーアップ

* 放射線申請上1nAが上限であるため、
繰返しを落として運転

FFAG ユーザー (KURRI)

- 現在

- FFAG-KUCA ADS実験 (100MeV / InA)

- 照射実験

- 材料照射 (原子カイニシアティブ)

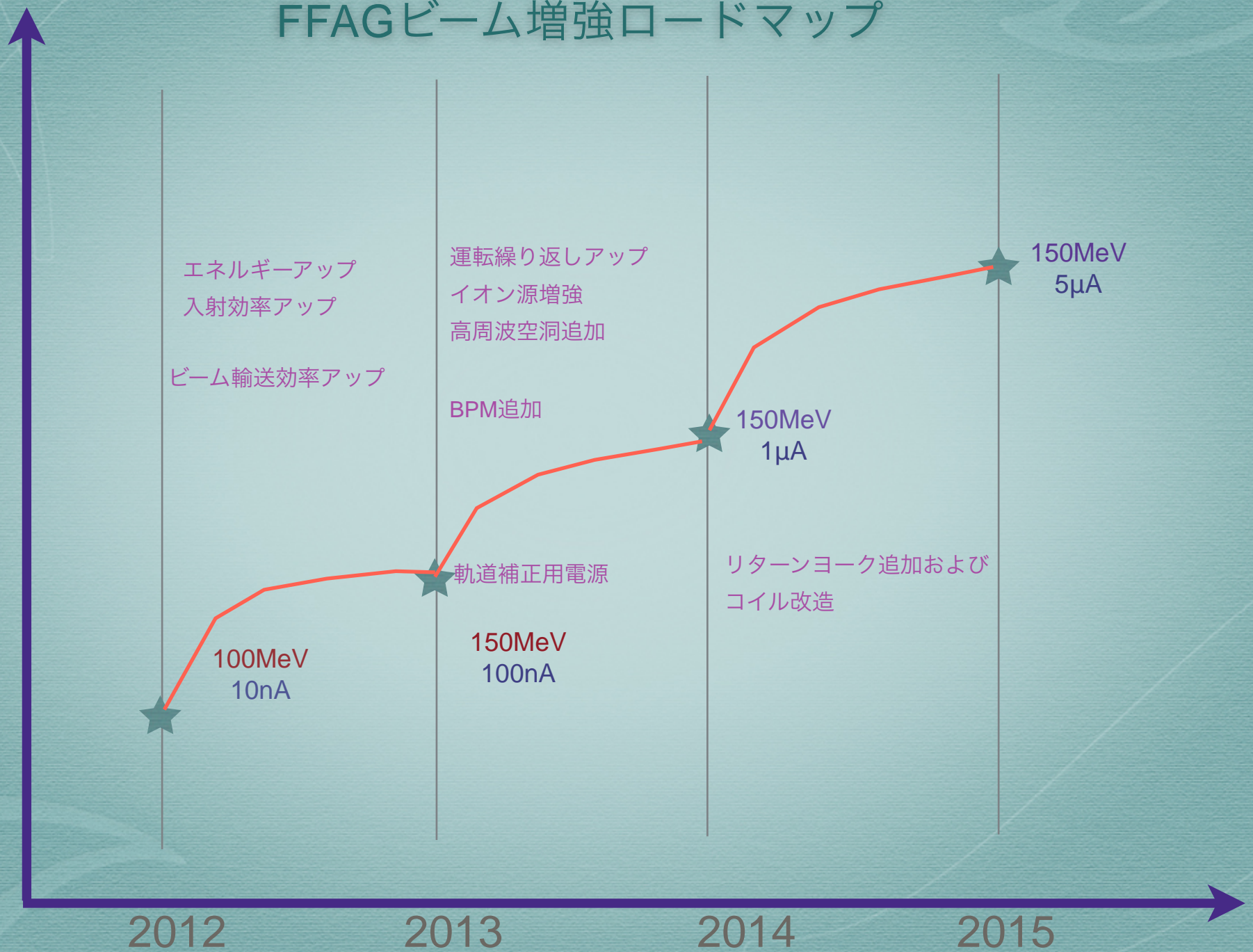
- 放射化学

- 将来

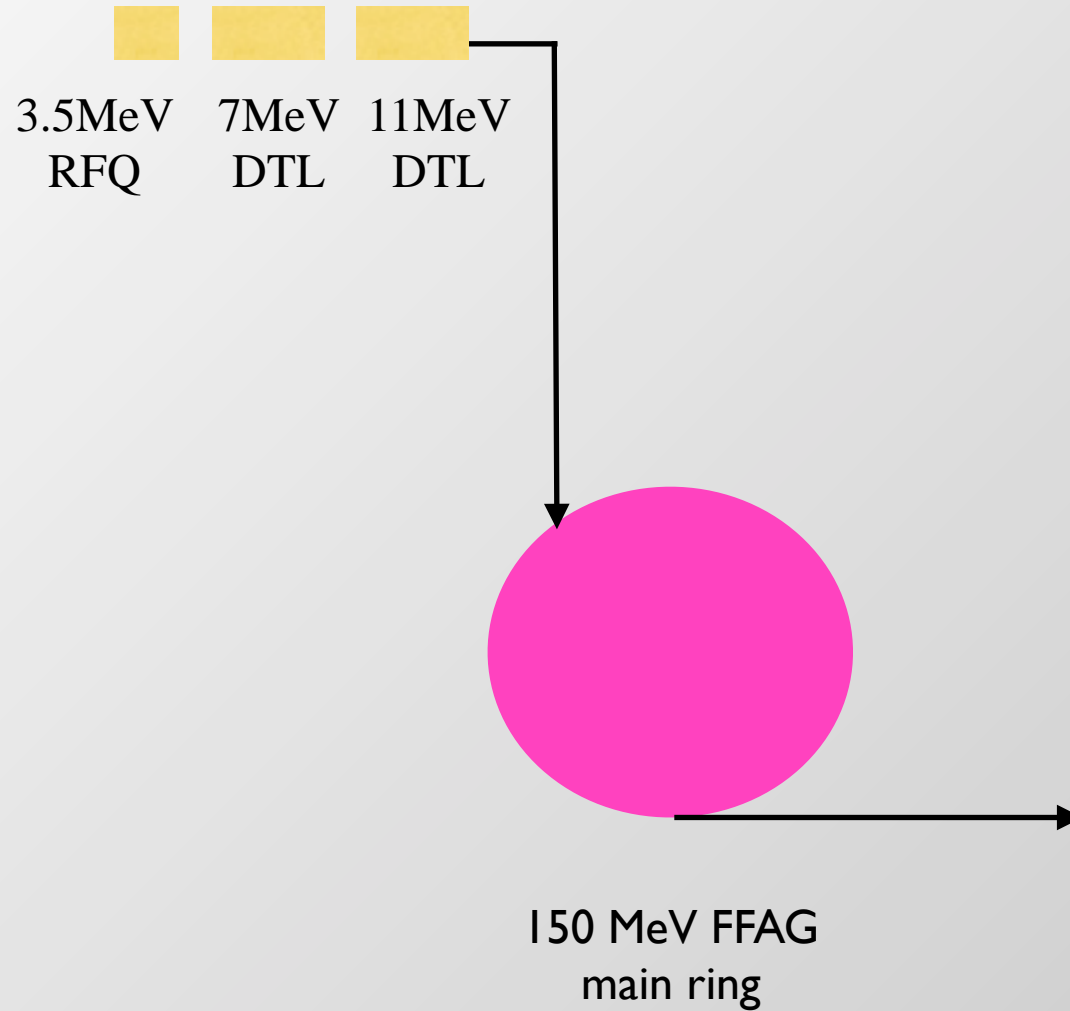
- 陽子ビーム利用 (irradiation, cancer therapy : BNCT complementary)

- パルス中性子利用

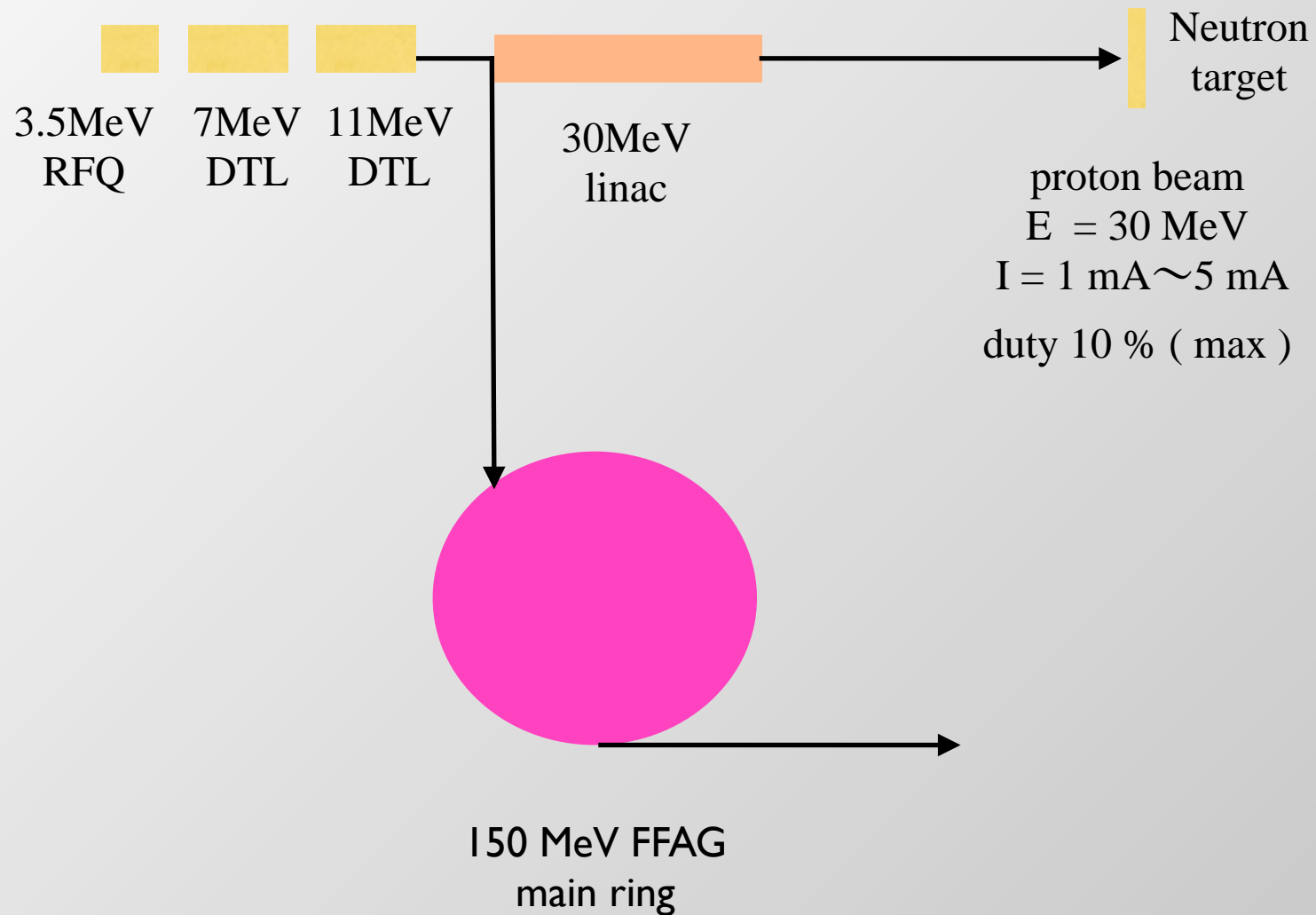
FFAGビーム増強ロードマップ



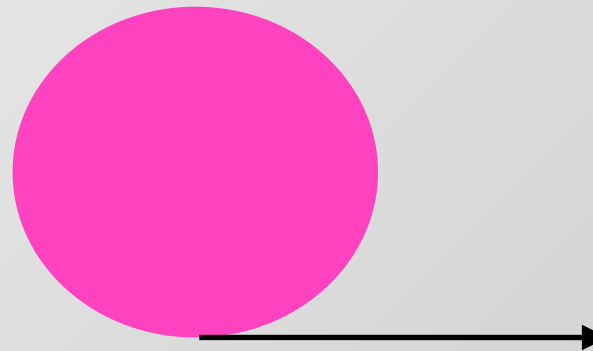
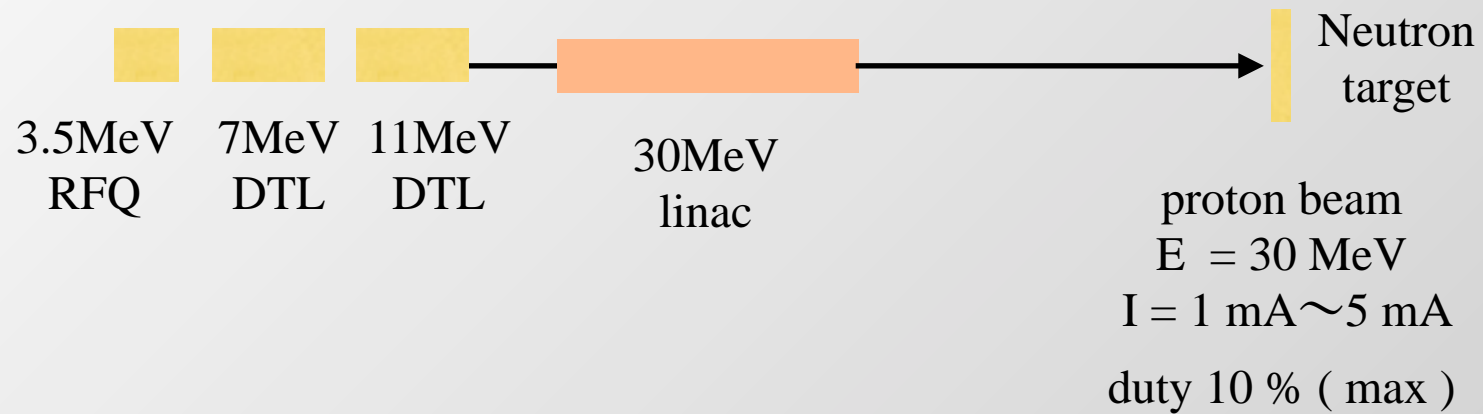
加速器中性子源案 (Linacベース)



加速器中性子源案 (Linacベース)

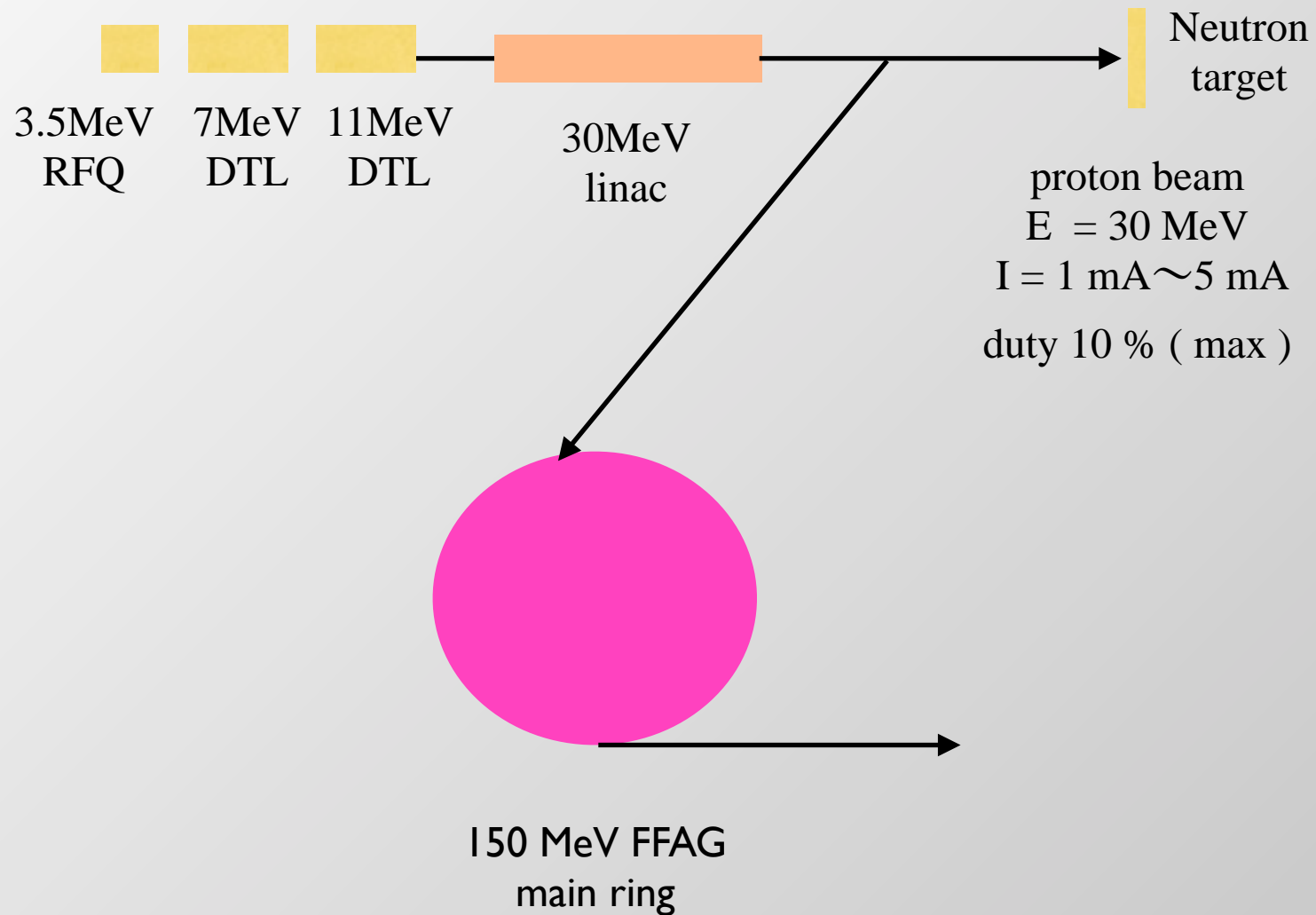


加速器中性子源案 (Linacベース)

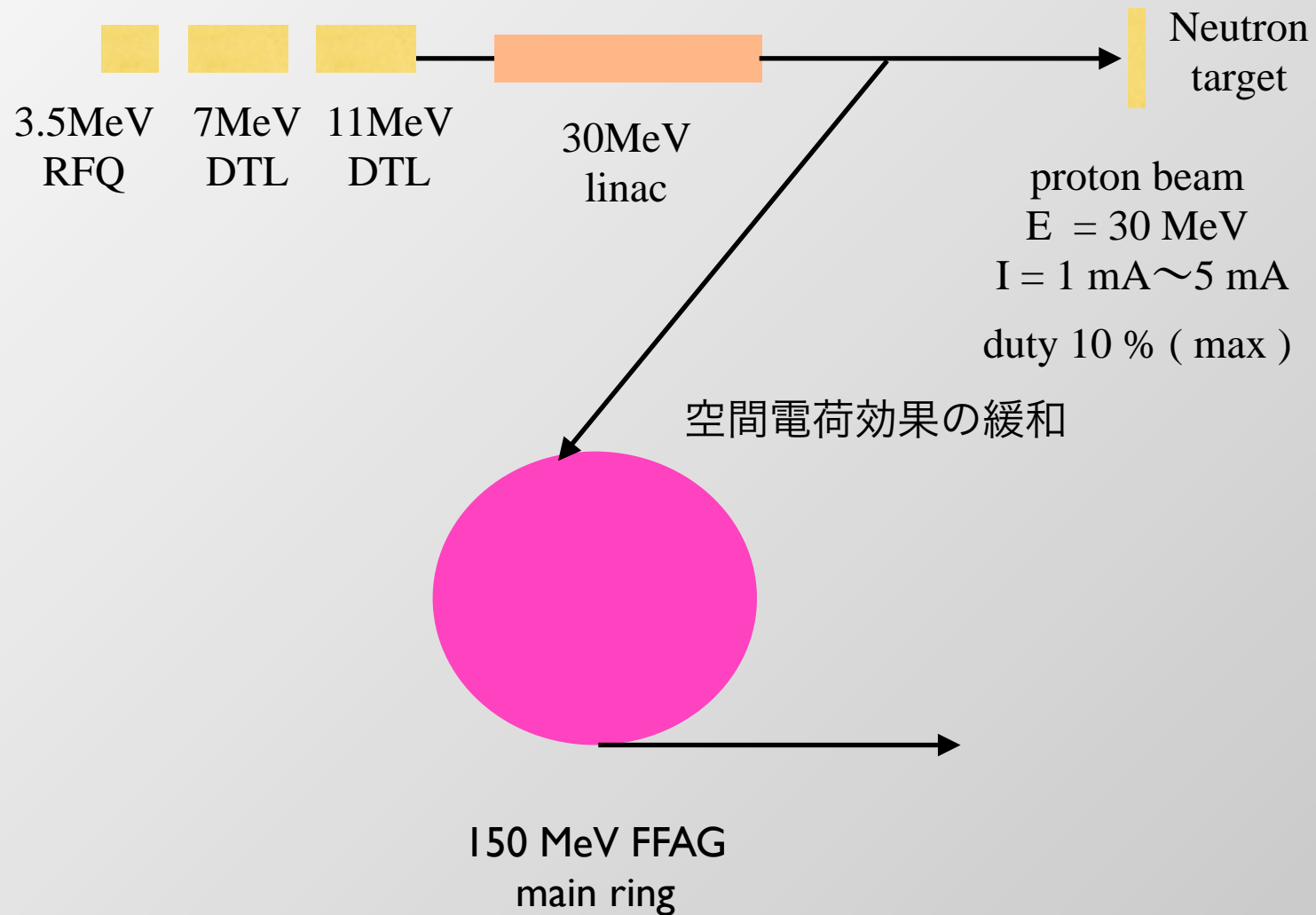


150 MeV FFAG
main ring

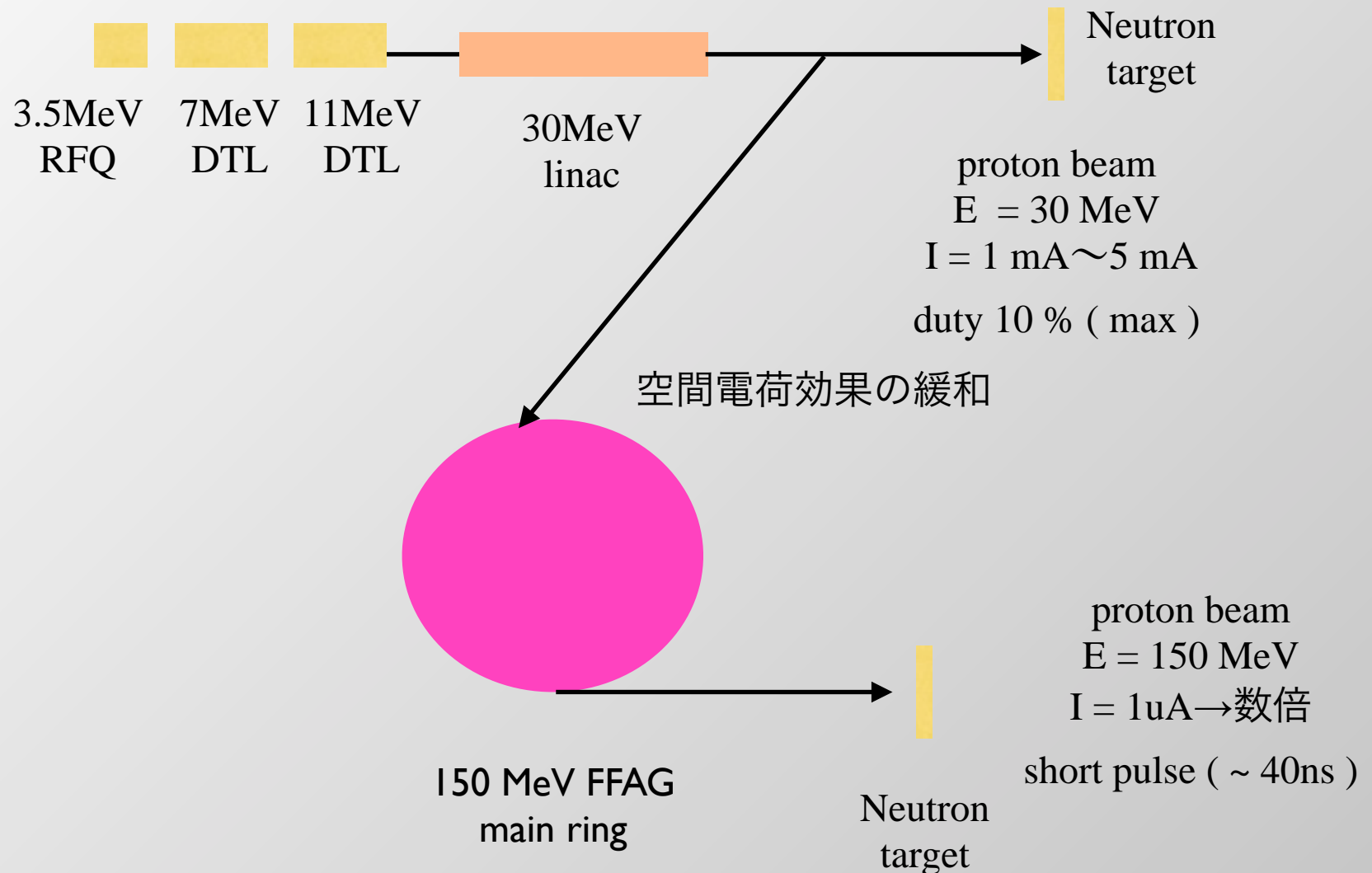
加速器中性子源案 (Linacベース)



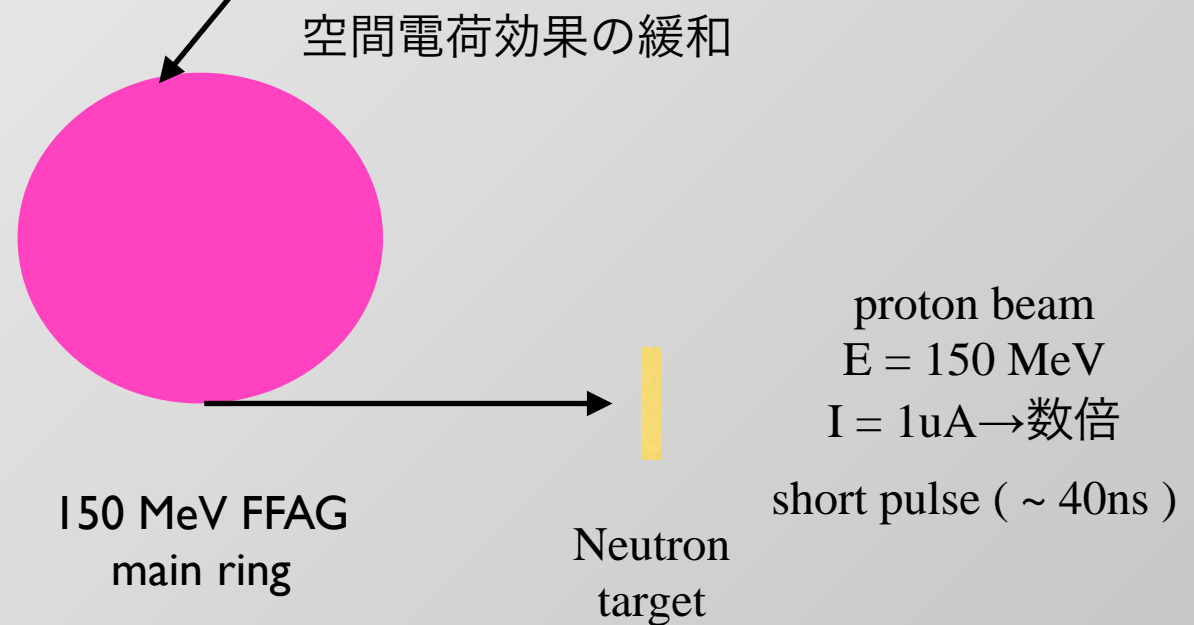
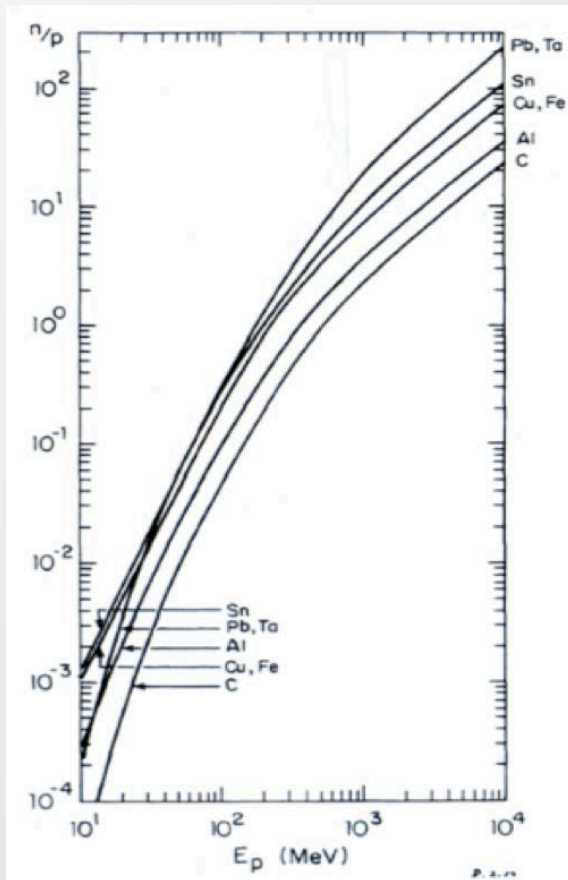
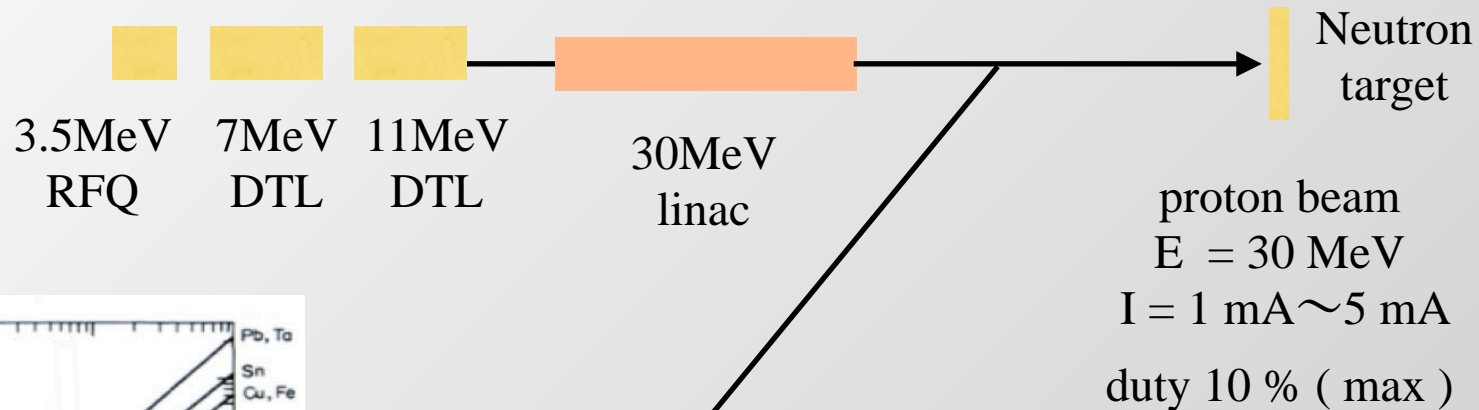
加速器中性子源案 (Linacベース)



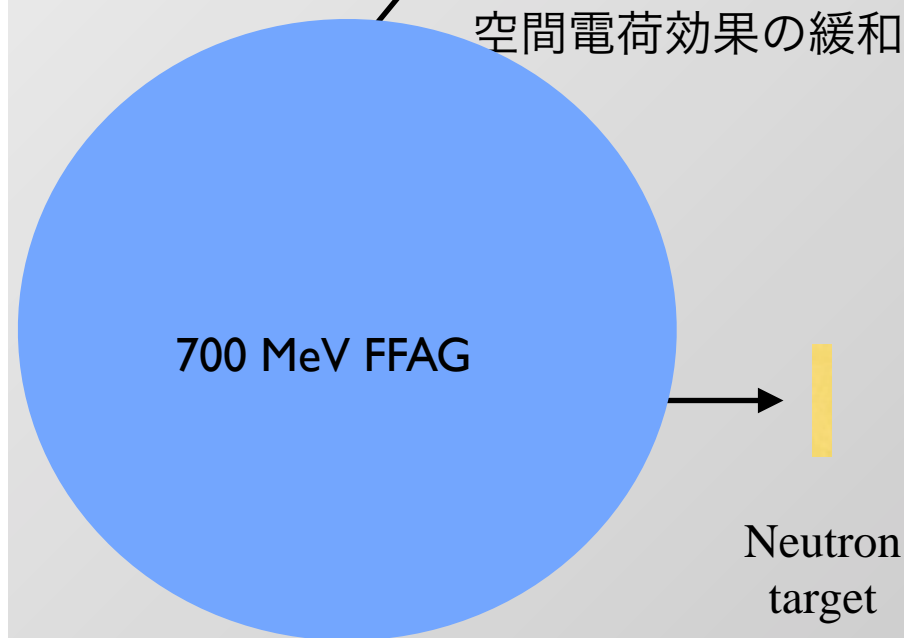
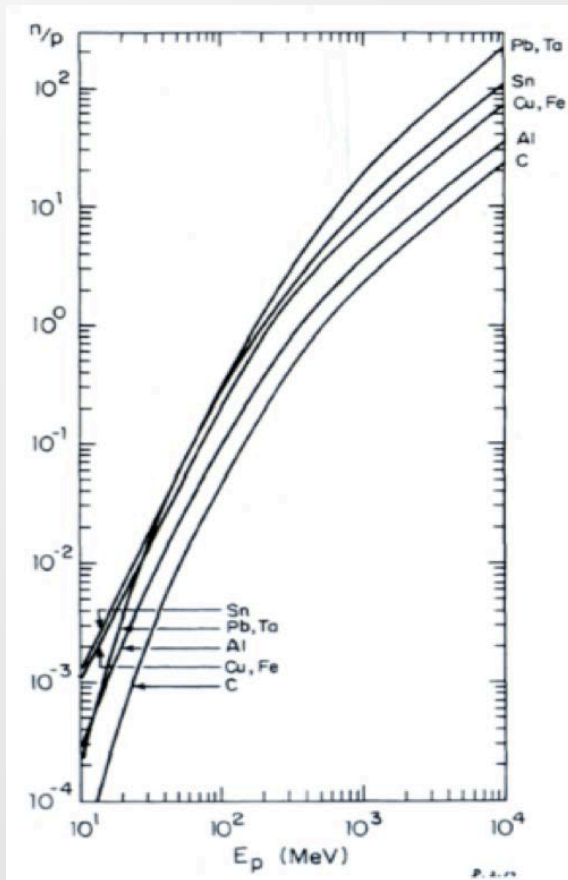
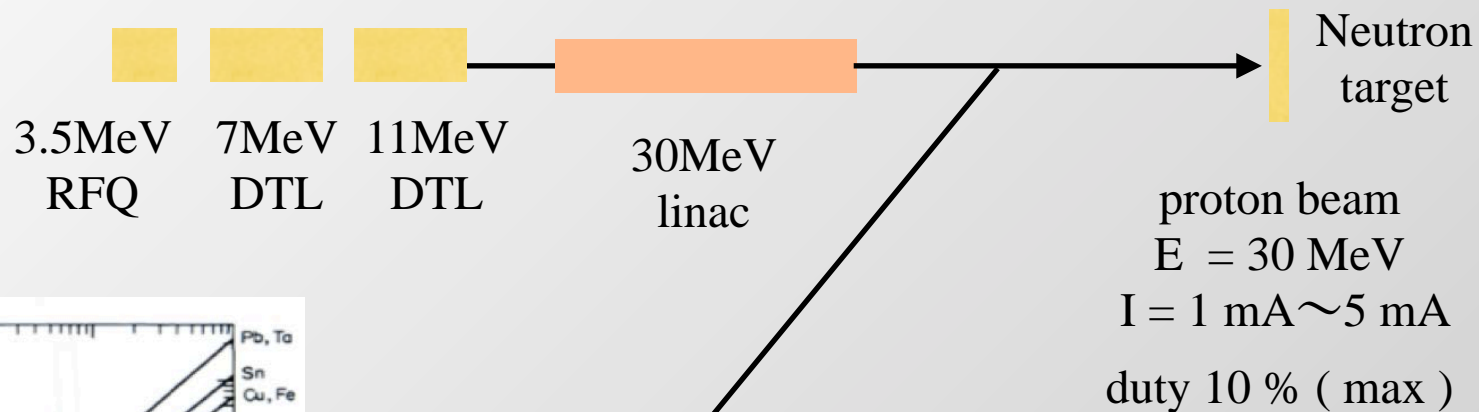
加速器中性子源案 (Linacベース)



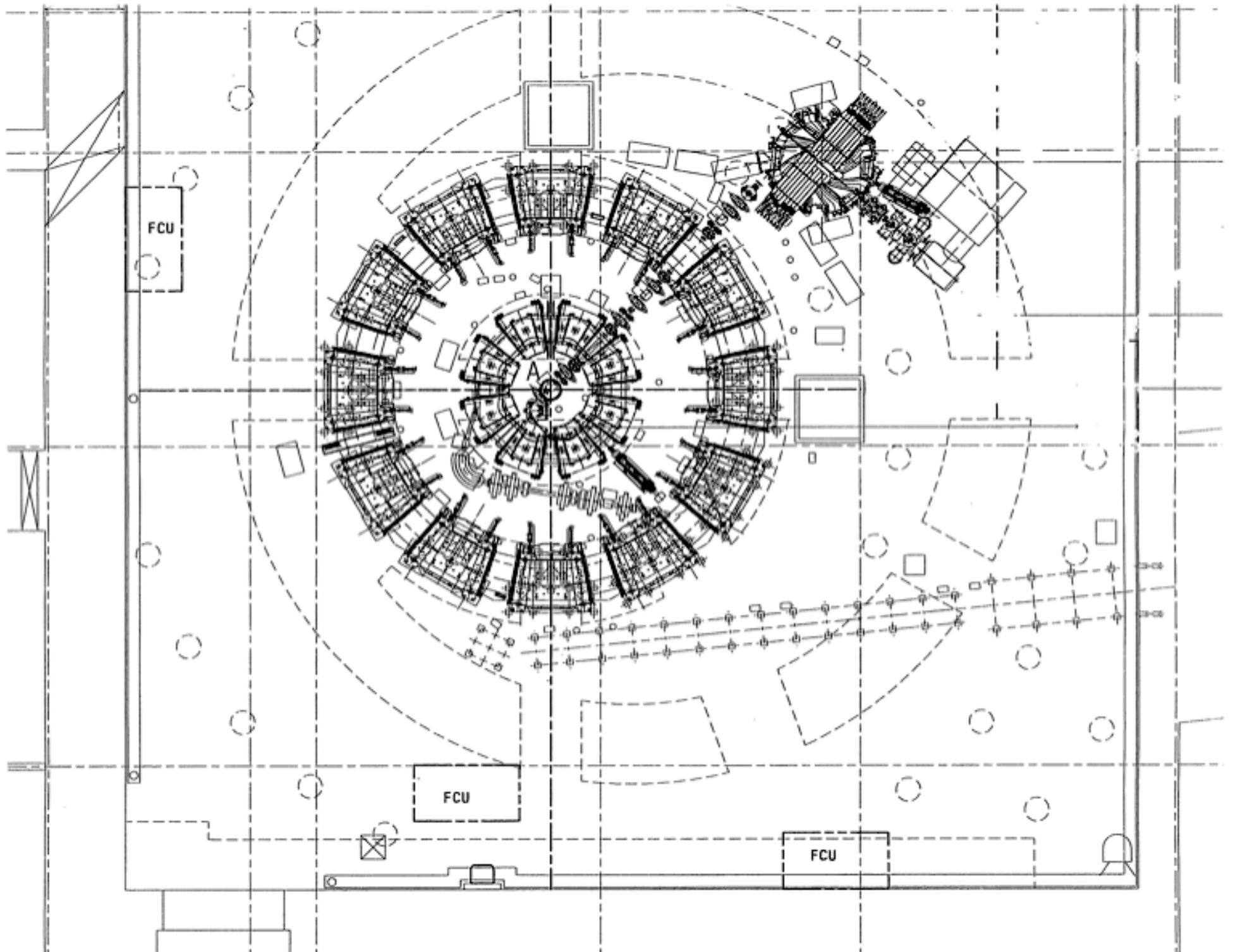
加速器中性子源案 (Linacベース)



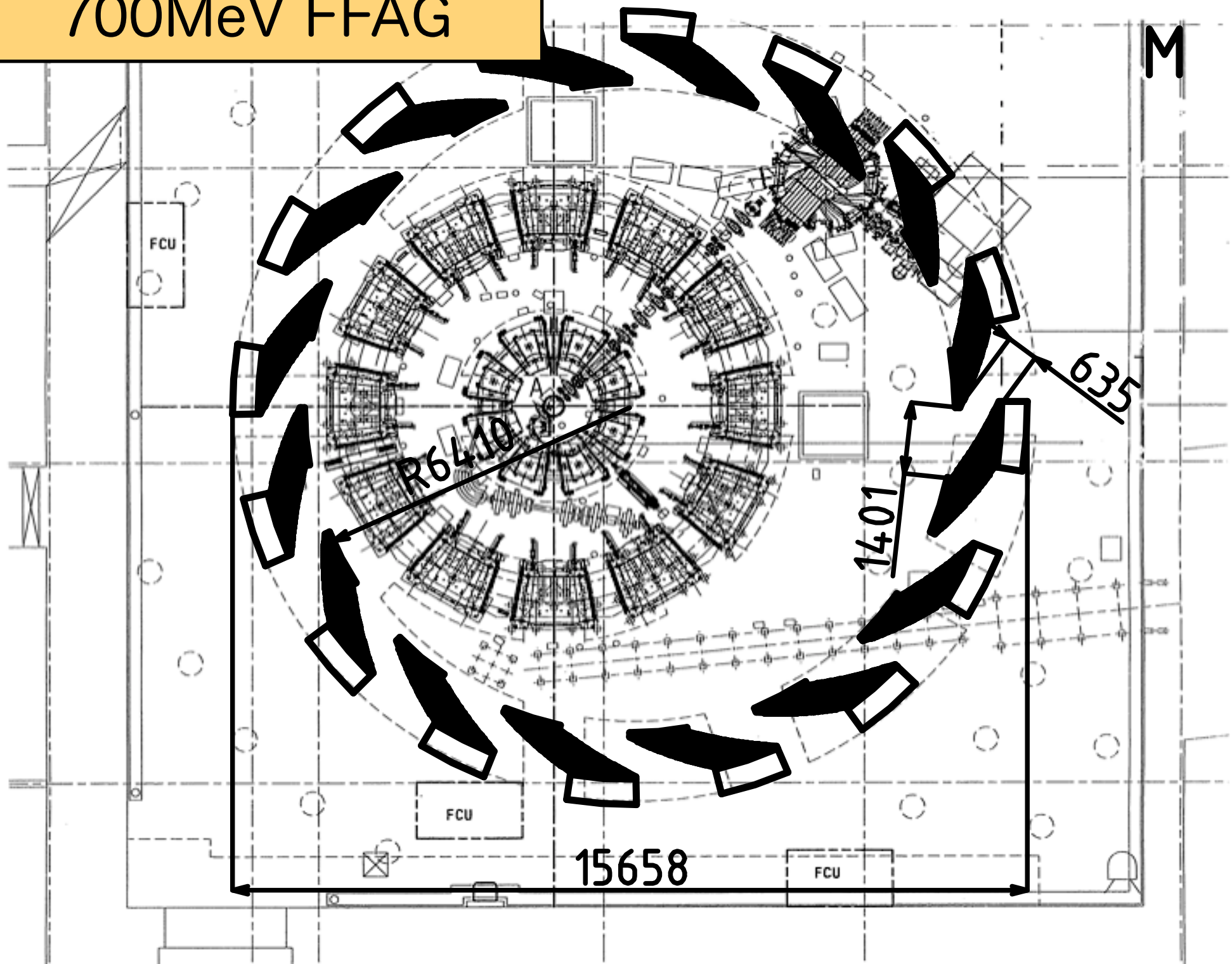
加速器中性子源案 (Linacベース)



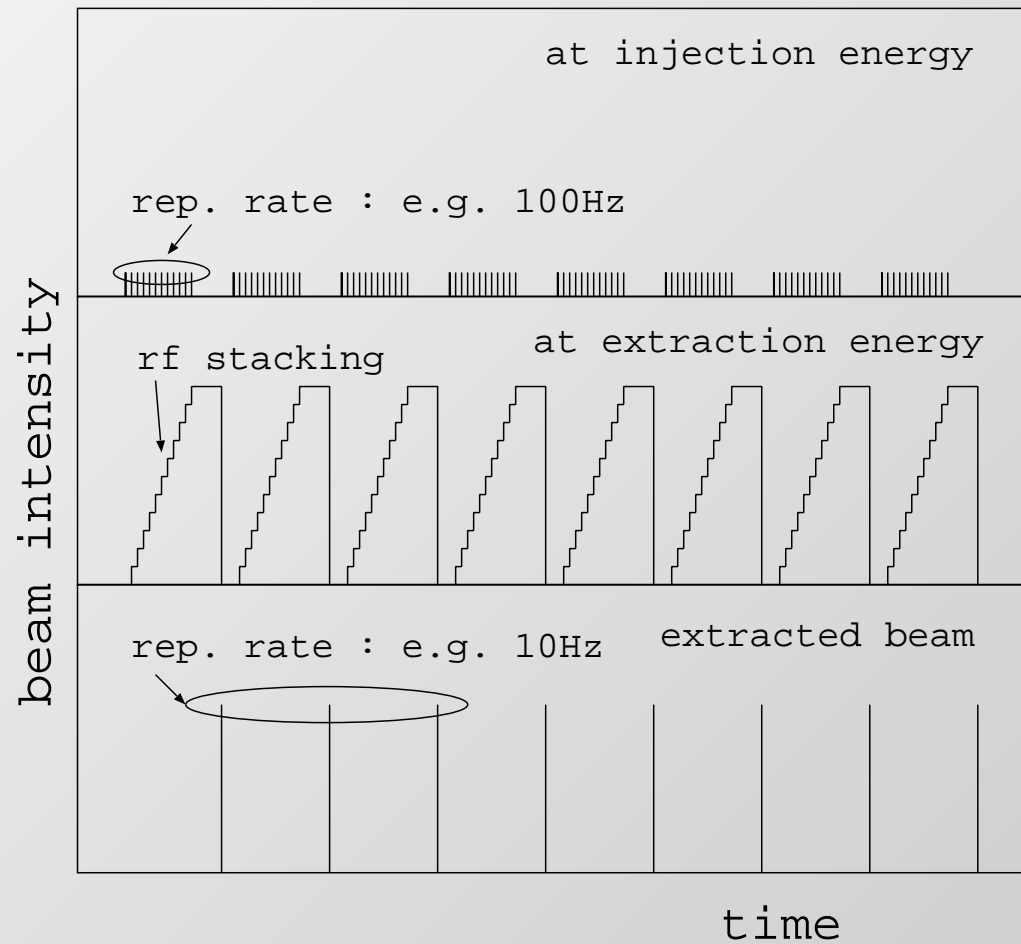
proton beam
 $E = 150 \text{ MeV}$
 $I = 1 \mu\text{A} \rightarrow \text{数倍}$
 short pulse ($\sim 40 \text{ ns}$)



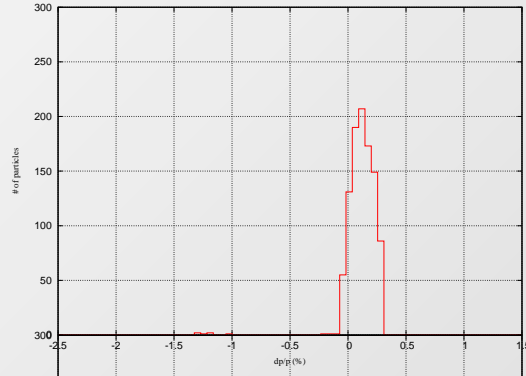
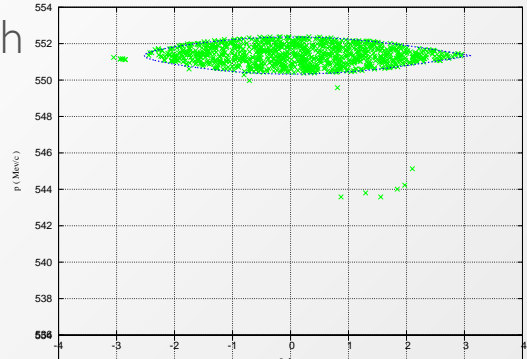
700MeV FFAG



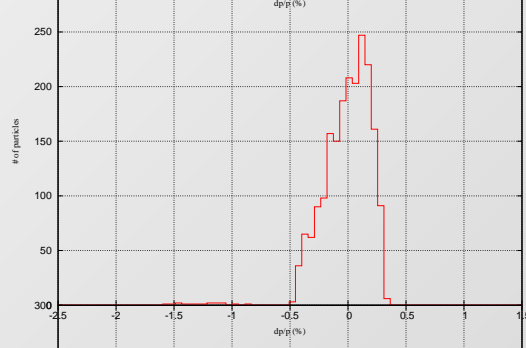
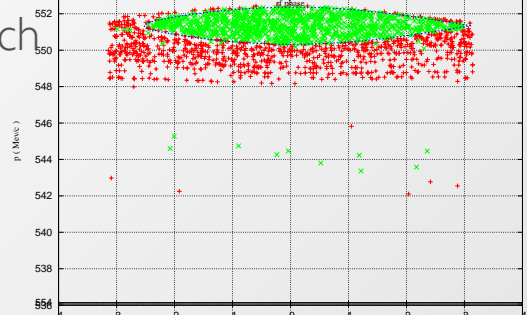
取出しエネルギーでのRFスタッキング



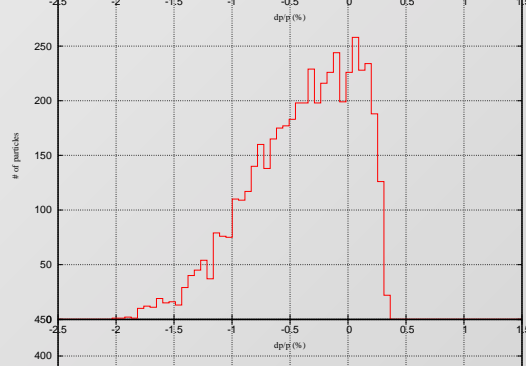
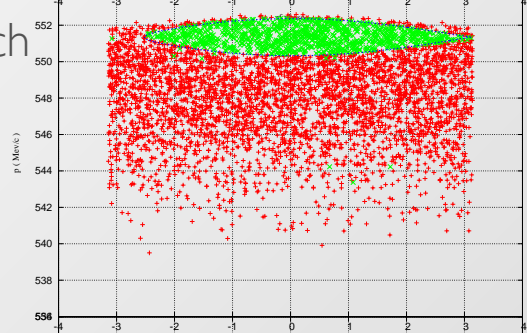
1st batch



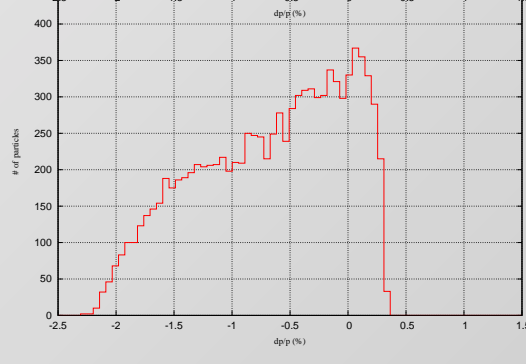
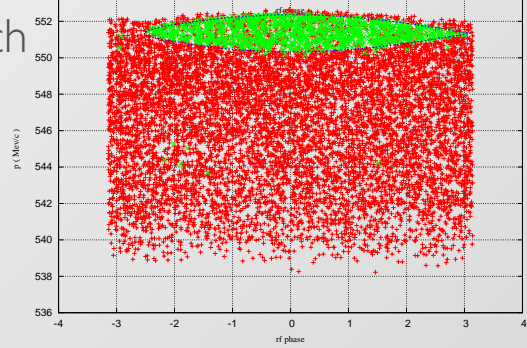
2nd batch



5th batch



10th batch



Stacking processes are simulated using 1 000 test particles for each acceleration batch. After first acceleration, full width of momentum spread is about 0.5%, the final momentum spread after 10 stacks is 2.5% of full width.

まとめ

- KUCAにビームを輸送し、加速器駆動未臨界炉実験を実施中。
- H-荷電変換入射に成功した。
- これによりビーム強度は100倍アップした。
- パルス中性子源に向けて150 (700) MeV, 5 μ Aのビーム増強を目指す。