



# *J-PARC*における 重イオン加速の 検討

原田寛之, サハプラナブ, 金正倫計

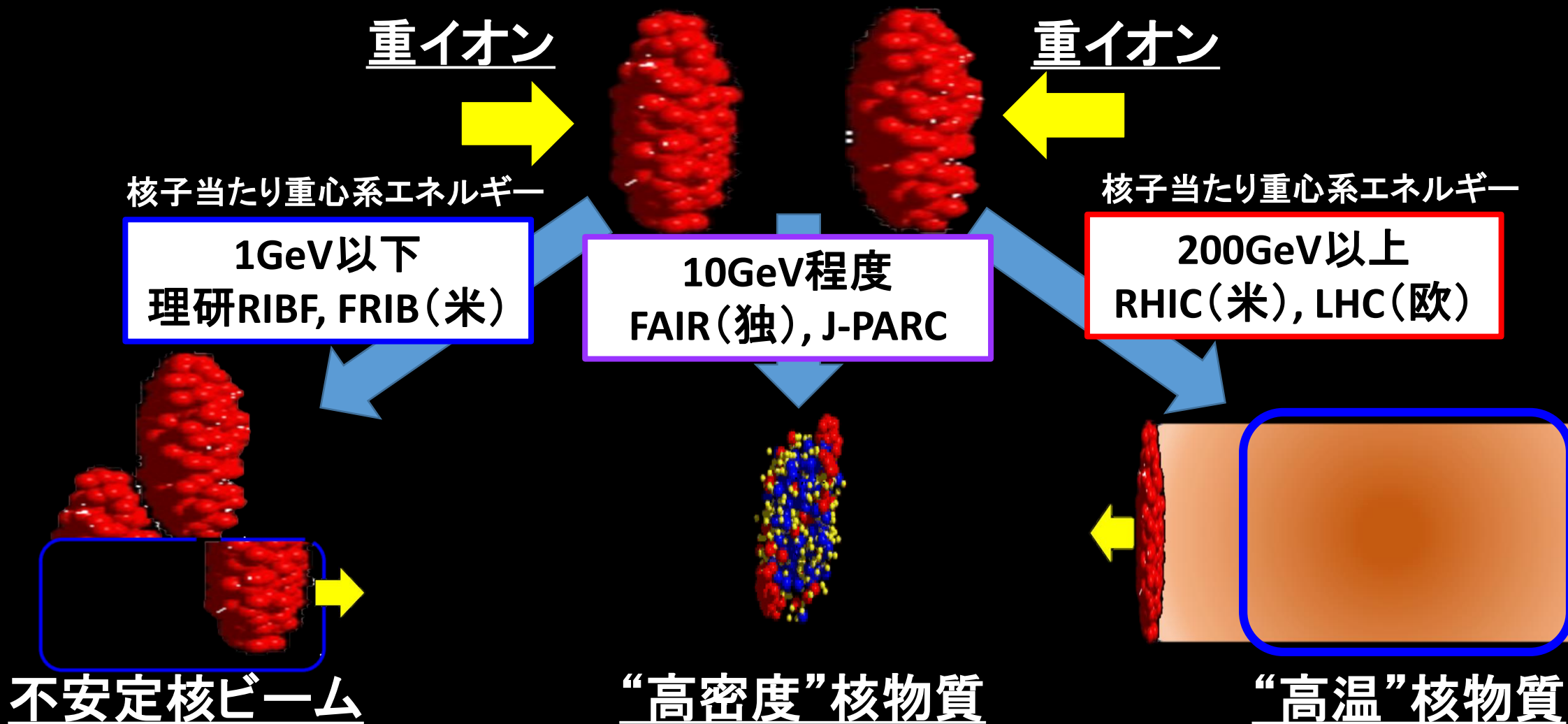
JAEA/J-PARC

*for J-PARC HI collaboration(140名)*



# **「學術的意義、國際情勢」**

# 高エネルギー重イオンビームが拓く物理





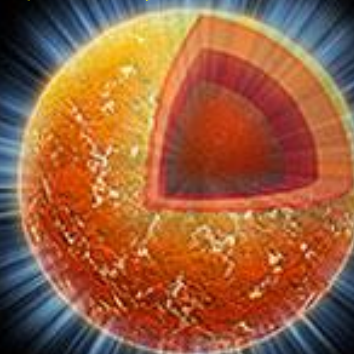
# 『中性子星』

X-ray, NASA/CXC

カシオペア座A  
超新星爆発残骸

恒星が超新星爆発を  
起こした後に残る  
極めて超高密度の  
巨大原子核のような天体

質量数:  $10^{57}$ 個



NEUTRON STAR ILLUSTRATION



# 「高密度核物質」～中性子星の構造解明

天体観測：電磁波

Nature 467 (2010) 1081-83.



中心部: クォーク物質?  
内核: スレンジ核物質?

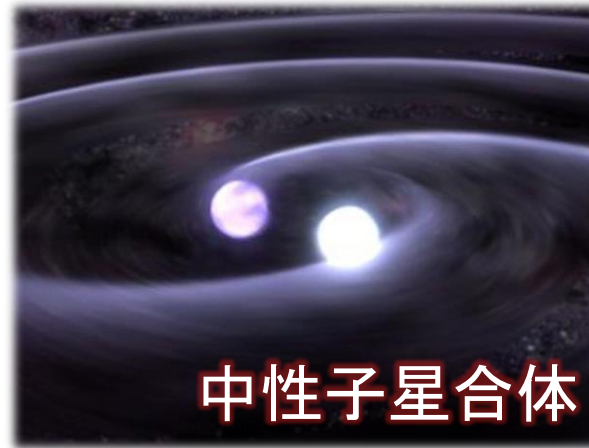
NEUTRON STAR ILLUSTRATION

太陽の2倍の質量の中性子星を観測  
半径: 10km, 密度: 原子核の5~10倍  
(理論模型: 太陽質量の1.5倍以下)

中性子星の表面情報

天体観測：重力波

Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017).

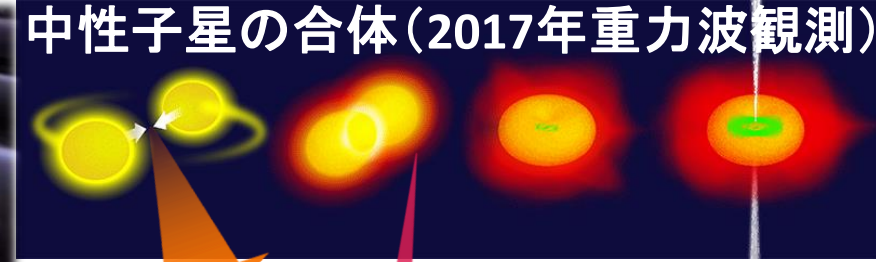


中性子星合体

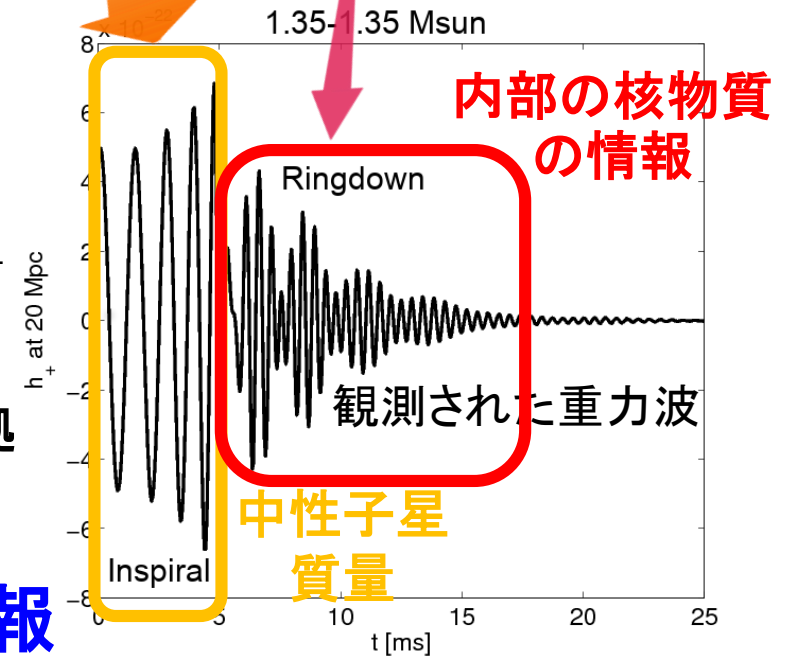
重力波による世界初の観測

中性子星の硬さの情報や  
スレンジ物質の観測的証拠

中性子星の内部情報

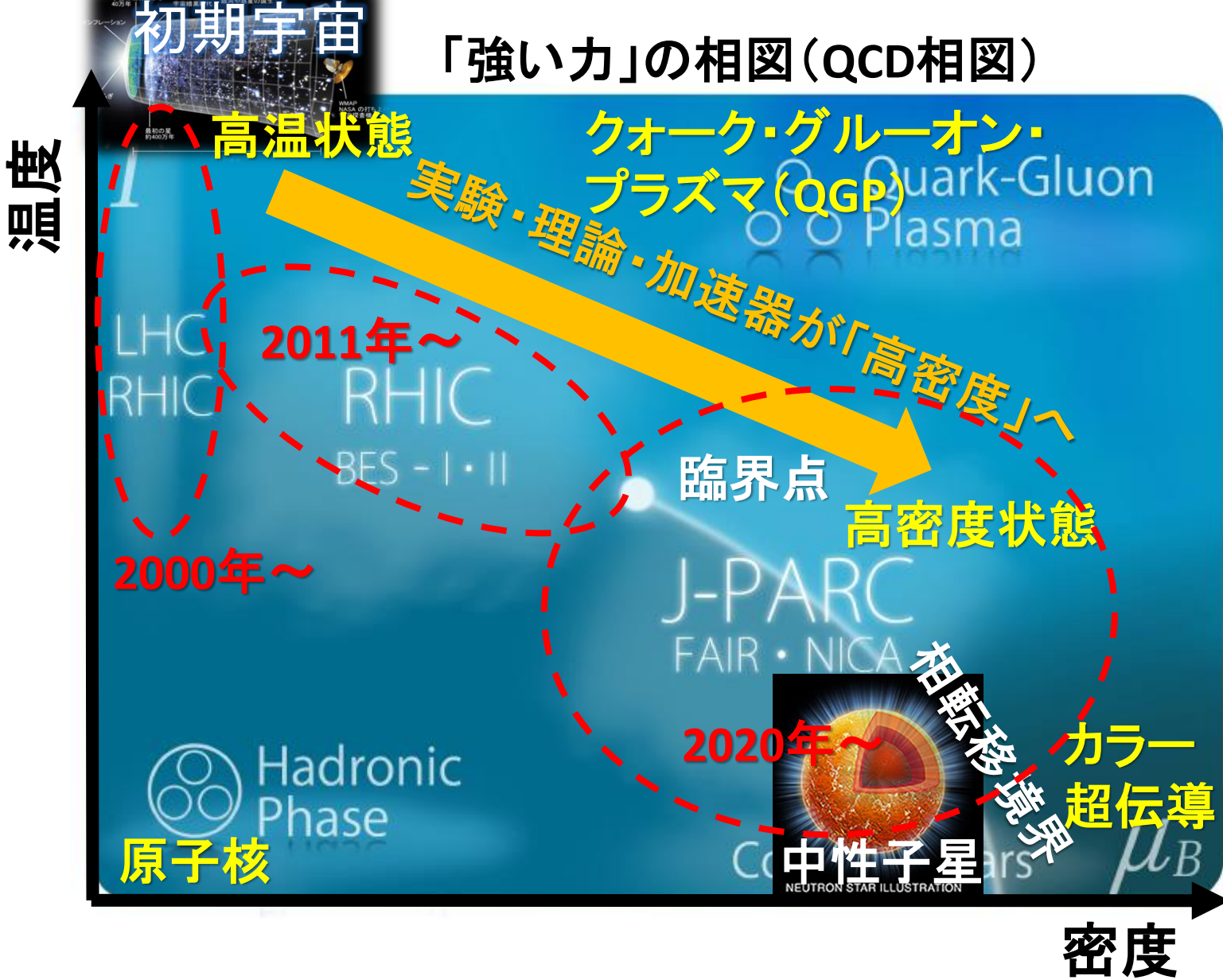


中性子星の合体(2017年重力波観測)



重イオンビーム: 地上実験として高密度核物質の直接生成 ⇒ 高統計実験

# 「高密度核物質」 ～ QCD相図探索



## RHIC・LHC (2000年～)

- 高温状態で“QGP状態”を発見
- 臨界点・相転移境界は未発見

## RHIC BES-I・II (2011年～)

- 「臨界点」の兆候
- 統計不足

## 次世代加速器計画

- 独FAIR、露NICA、中HIAFなど

稀な物理事象(臨界点、相転移境界、カラー超伝導など)の探索には高統計データが必要。

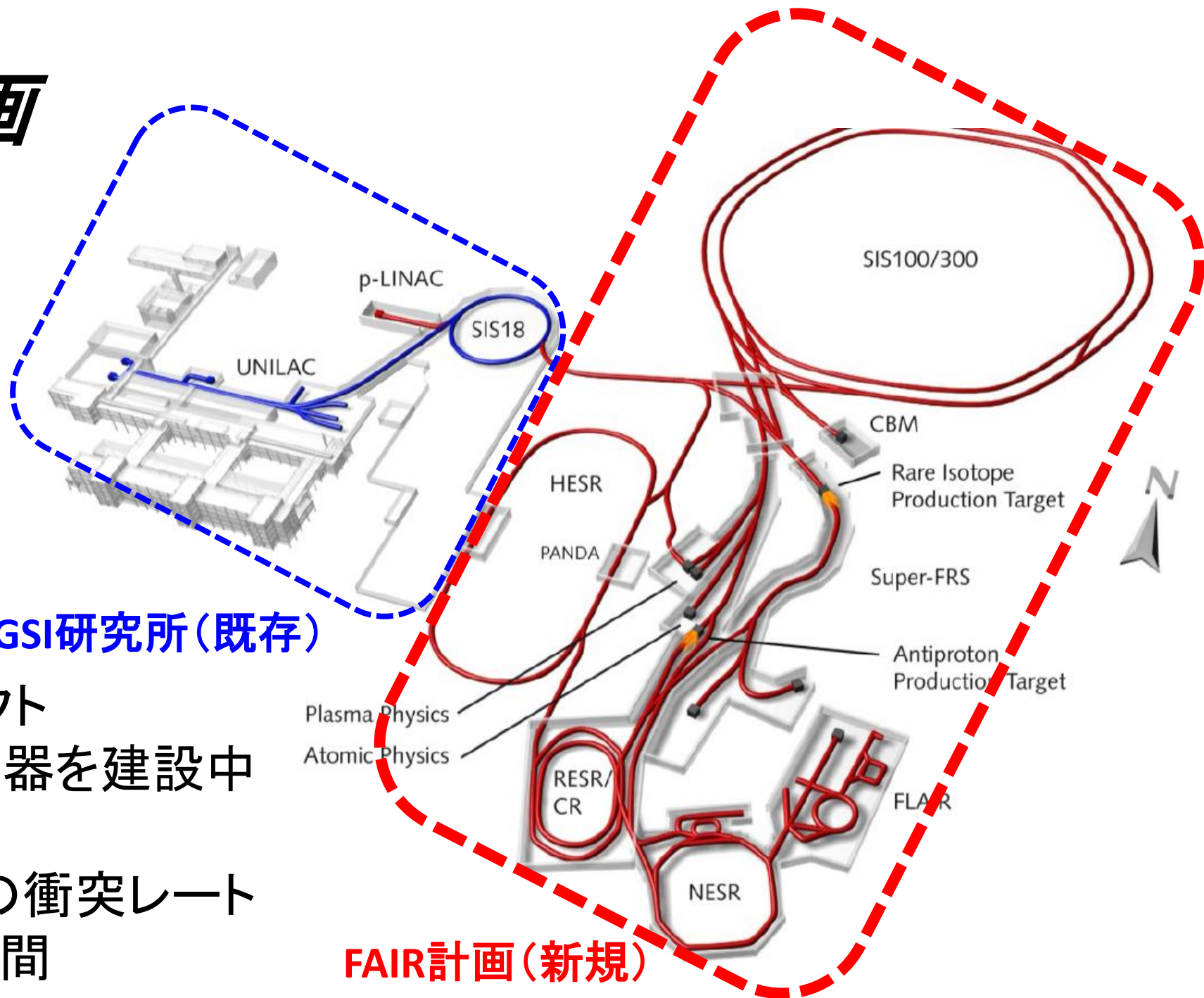
**大強度重イオンビームが必須**

# GeV級重イオン加速器の「国際情勢」





# ドイツ・FAIR計画



GSI研究所(既存)

FAIR計画(新規)

- 2000億円のプロジェクト
- 後段の大型円形加速器を建設中
- 2025年実験開始予定
- 設計では $10^6 \sim 10^7$  Hzの衝突レート
- 調整には長期間の時間



# 大強度陽子加速器 J-PARC

400MeV リニアック

新設重イオン  
入射器

3GeVシンクロトロン

ニュートリノ実験施設

物質生命科学実験施設

主リングシンクロトロン

加速器施設  
実験施設

世界最高レベルの  
大強度陽子加速器

ハドロン実験施設



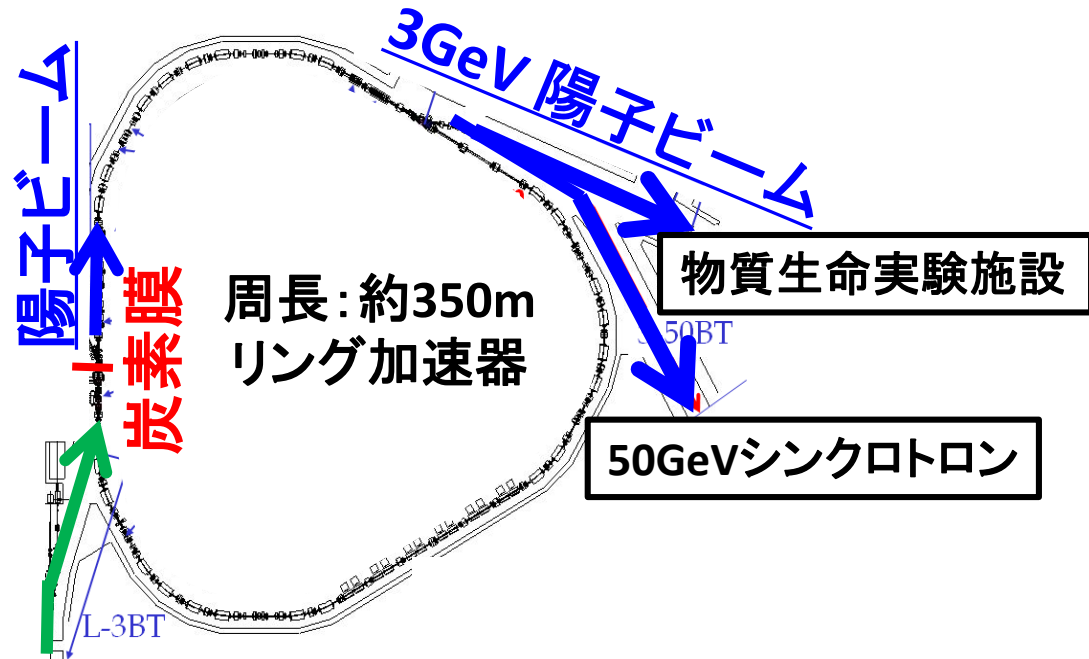




# 「J-PARC陽子加速器の現状」



# 3GeVシンクロトロン(RCS)

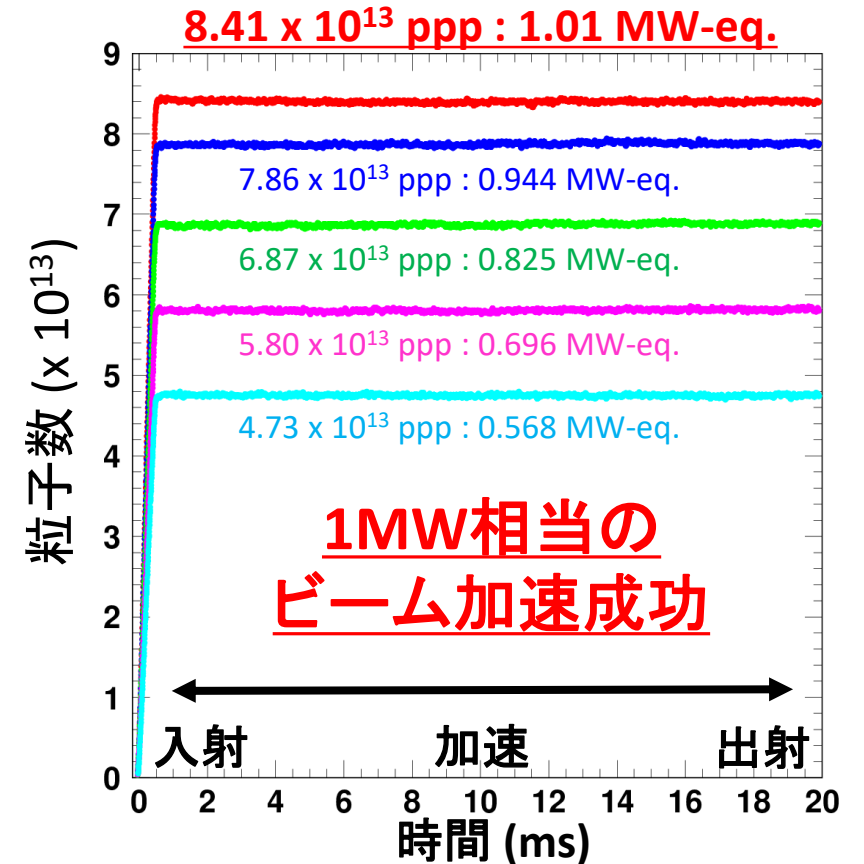


## 400MeV 負水素イオンビーム

入射エネルギー: 400MeV  
入射時間 : 0.5 ms (307周回蓄積)  
粒子数 :  $8.33 \times 10^{13}$  個  
加速時間 : 20 ms (~15000周回)  
出射エネルギー: 3 GeV  
繰返し : 25 Hz

世界最高レベルの1MW出力

## 大強度ビーム試験実績



→ 大強度重イオンビームに対しても十分なポテンシャル

陽子ビームのさらなる大強度化へ

重イオンビームも供給へ



1MW安定運転に成功！

平成30年7月3日





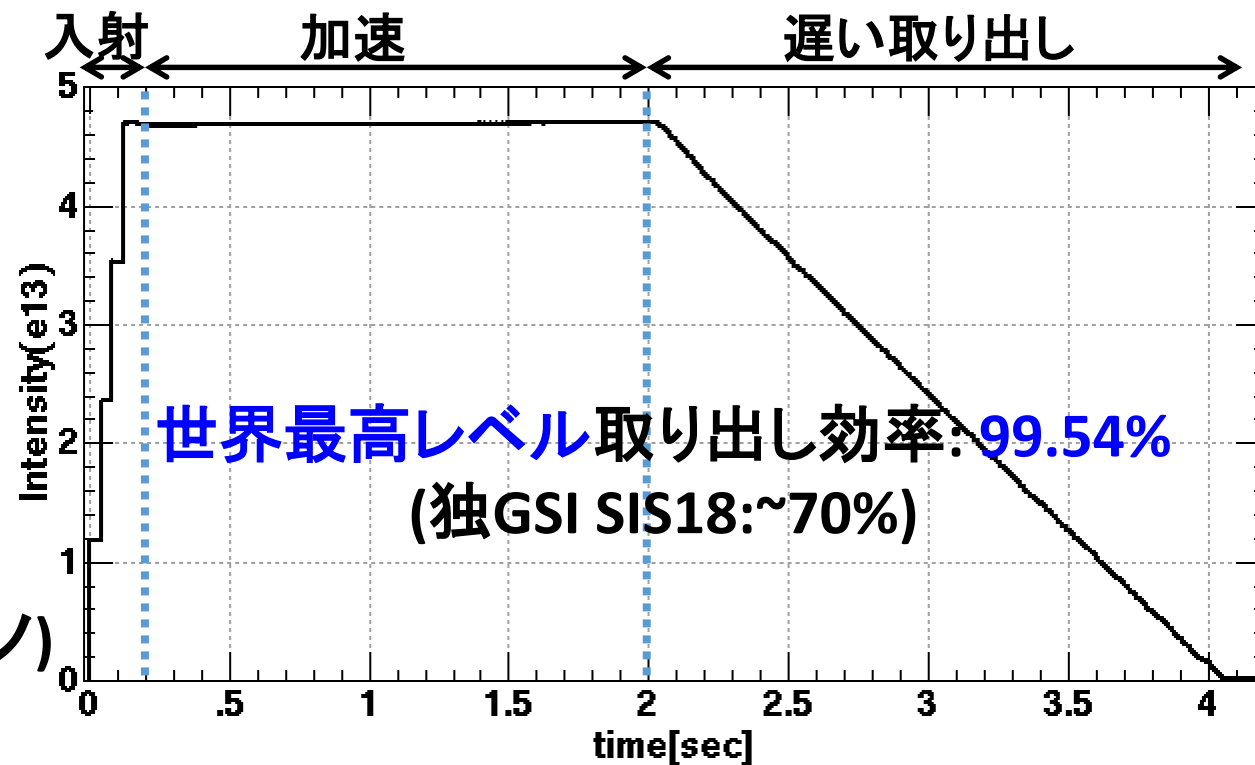
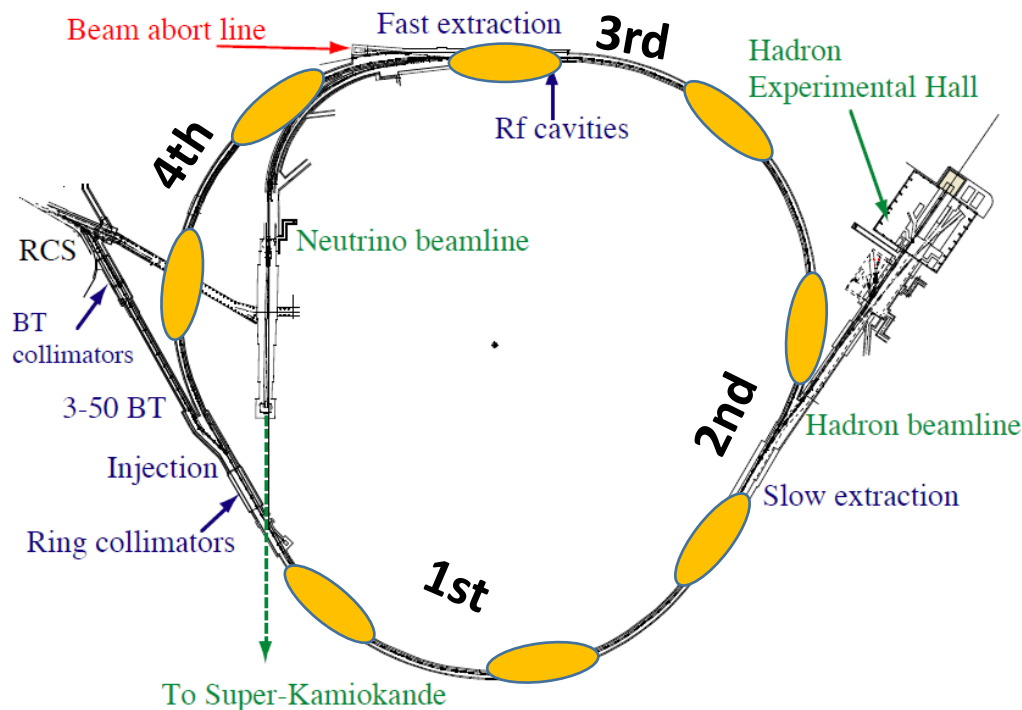
# 主リングシンクロトロン

MR 供用運転:

MR ニュートリノ実験:  $\sim 25 \times 10^{13}$  パルスあたり

MR 原子核実験 :  $\sim 5 \times 10^{13}$  パルスあたり

⇒ 大強度ビーム出力のポテンシャル有する



周長	1567.5 m (RCSの4.5倍)
入射エネルギー	3 GeV
出射エネルギー	30 GeV
ビームバンチ数	8 (RCSから4回入射)
目標出力(実績)	100 kW (51kW, 原子核)
	750 kW (500kW, ニュートリノ)

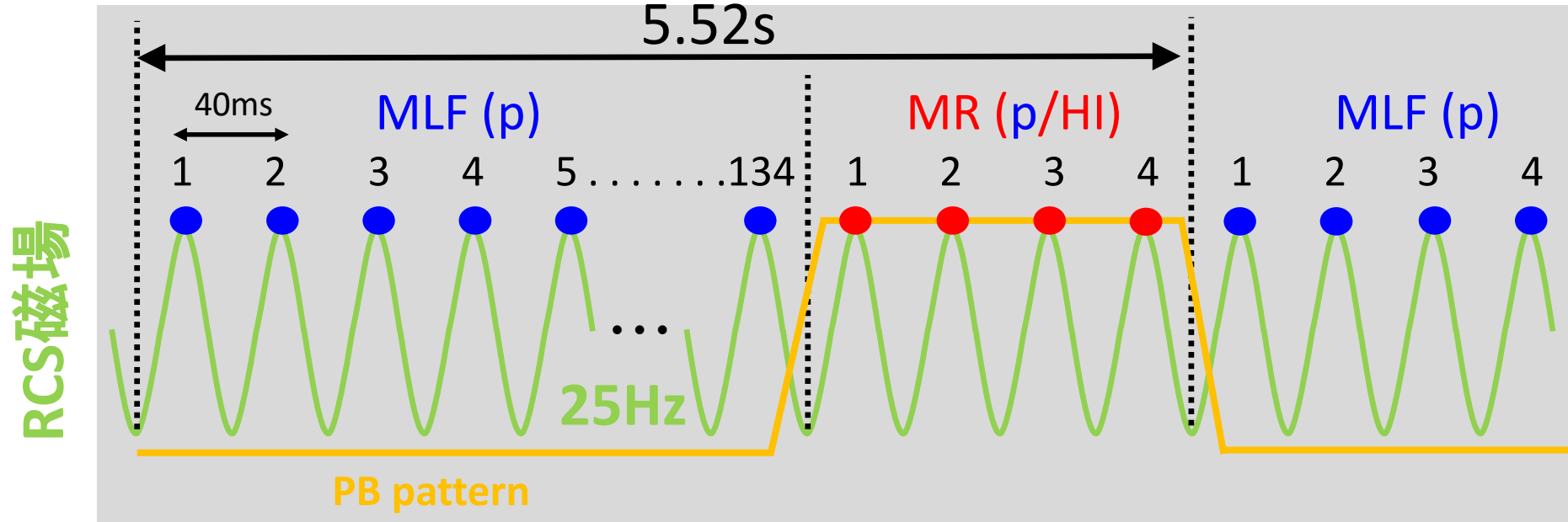


# **「重イオン加速の検討」**



# 陽子ビーム利用と重イオンビーム共存

(例) RCSのビーム供給サイクル



- 現在でもMLFとMRで異なるビーム強度やビームサイズで供給
- MRはNU/HDで独立のパラメータを設定
- 電荷数・質量・運動量を磁場とマッチさせれば“陽子と同じ運動”

- 行き先HDの時のみRCSに重イオンビームを入射
  - MLF/NUへの陽子ビーム利用を制限しない
  - RCS主電磁石の磁場は固定(制限あり)

# 制限の強いRCSにおけるビーム損失の見積もり

## 1. 残留ガスとの相互作用

(電子剥離・捕獲)

GSI SIS18( $U^{28+}$ ), BNL BR( $Au^{33+}$ ):  $\sim 10^{-9}$  Pa

BNL AGS( $Au^{77+}$ ):  $\sim 10^{-6}$  Pa

$10^{-6}$  Paでも高電荷であれば問題ない

J-PARCにおける電荷数と真空度

	電荷数	真空度
HI LINAC	$U^{35+}$	-
HI Booster	$U^{66+}$	-
RCS	$U^{86+}$	$\sim 10^{-7}$ Pa
MR	$U^{92+}$	$\sim 10^{-7}$ Pa

積分ビームロスの見積もり( $U^{86+}$ ): 0.12%

## 2. 大強度時の空間電荷効果

高電荷により空間電荷力が強くなる

- ◆ 空間電荷力込みの多粒子シミュレーション
- ◆ RCSパラメータセット: 1MW陽子利用運転
- ◆  $U^{86+}$ ビーム: 1バンチあたり  $1.1 \times 10^{11}$

空間電荷力由来のビームロス: 0.05%

◆ “大強度”重イオン加速が可能

$U^{86+}$ :  $1.1 \times 10^{11}$



荷電変換

$U^{92+}$ :  $\sim 1 \times 10^{11}$

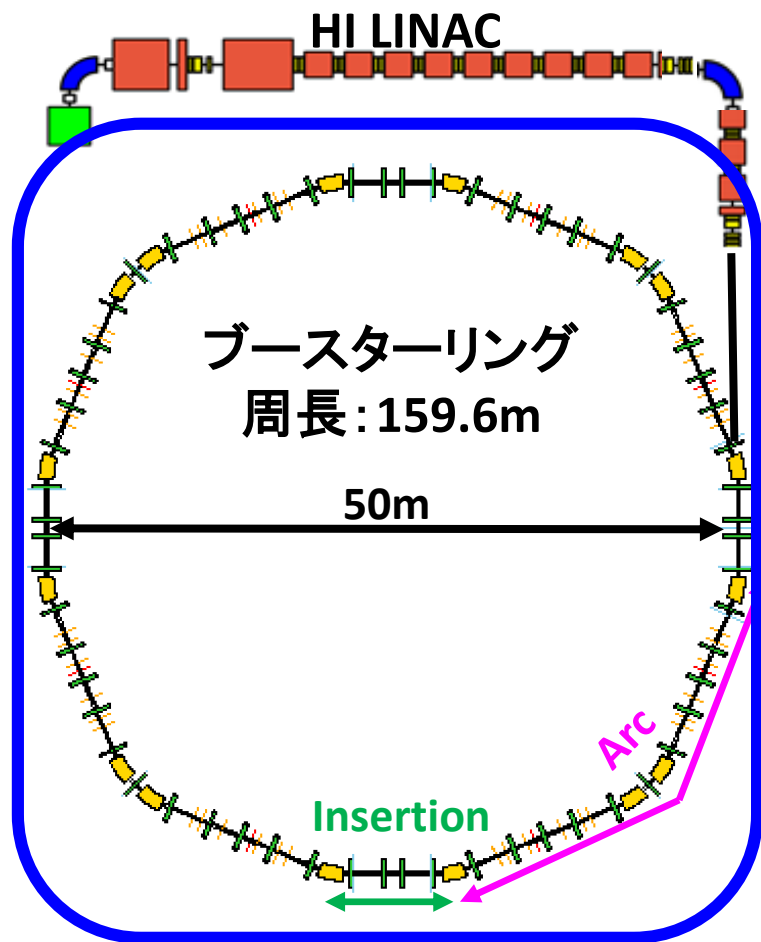
MRへ4回入射:  $4 \times 10^{11}$  /MR cycle!



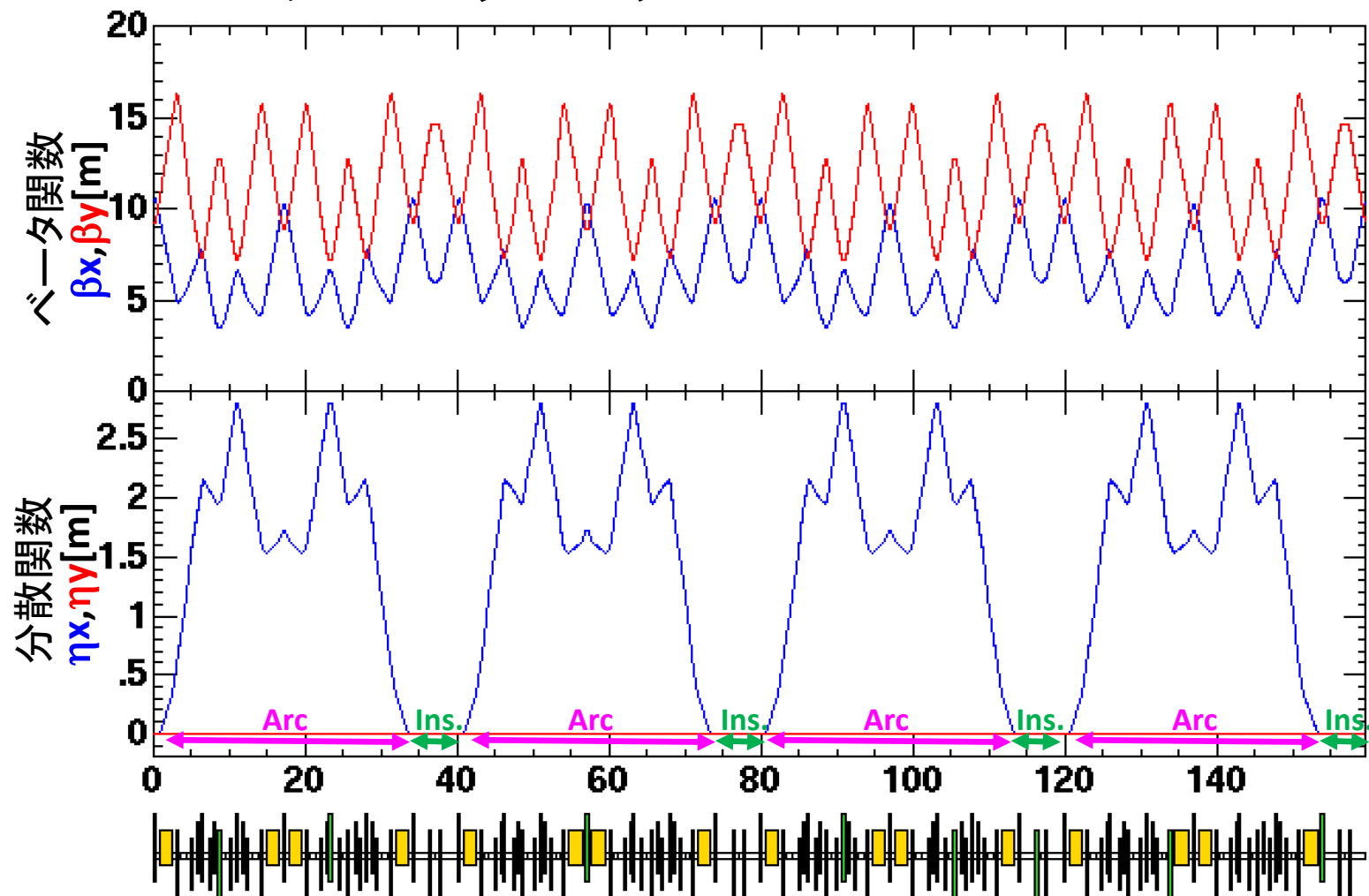


# **「新設加速器の設計」**

# 重イオン用入射器 ～線形加速器とブースターリング～



今回のトーク

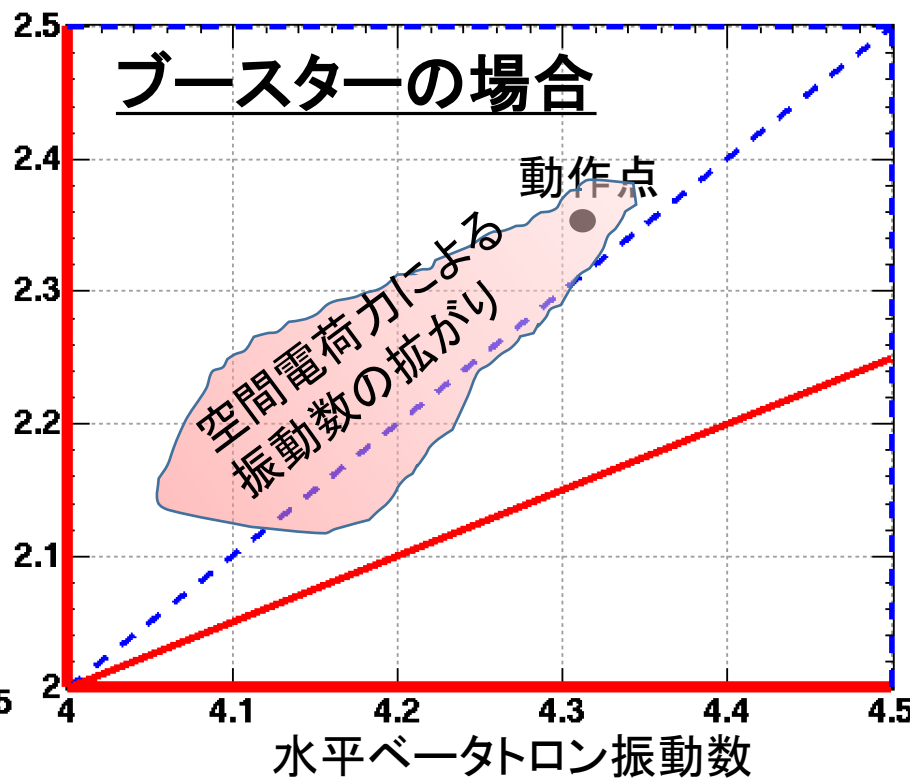
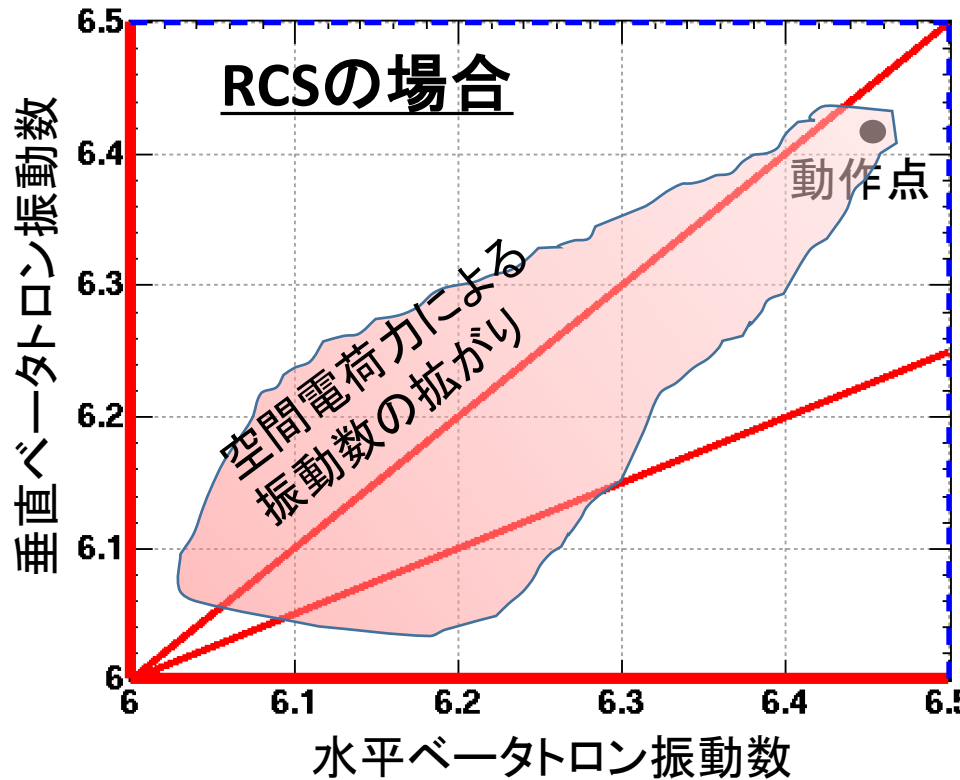


「4回対称性の光学リング」



# ベータatronチューンマップと空間電荷効果

— 構造共鳴(強い)    ..... 非構造共鳴(やや強い)



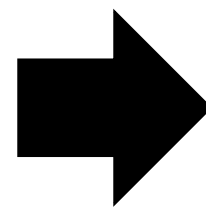
空間電荷力による  
振動数拡がり

- ・電荷数に比例 (RCSの2/3倍)
- ・粒子数に比例 (RCSの3/2倍)
- ・速度 $\beta^2\gamma^3$ に反比例 (RCSの3倍)
- ・ $\epsilon$ に反比例 (RCSの1/2倍)
- ・周長に比例 (RCSの1/2倍)

⇒ RCSの「約3/4倍」

大強度実績のあるRCSと比較して

- ◆ チューンの安定領域が広い
- ◆ 空間電荷力によるチューン拡がりの小さい

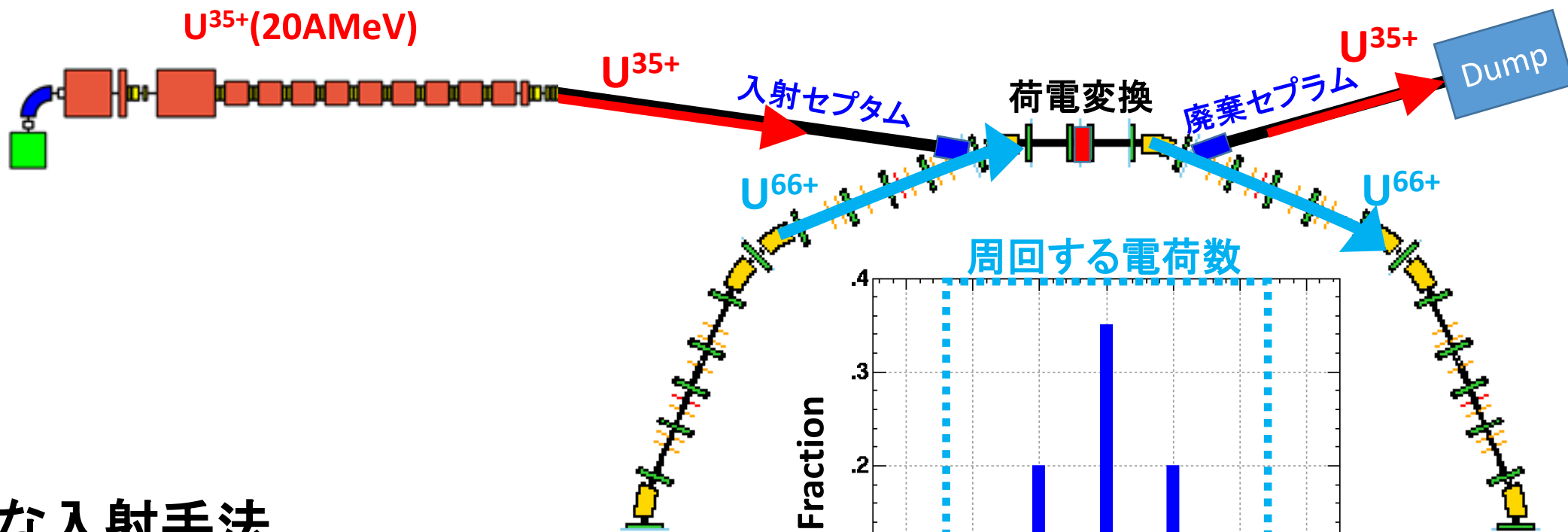


**大強度に強い  
光学設計**

# 大強度重イオン蓄積に向けた入射手法

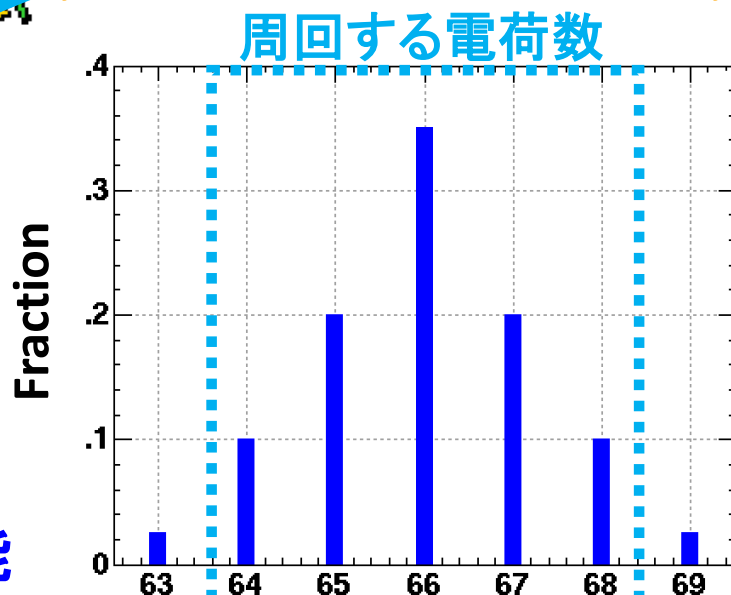
従来の入射手法: 20周回入射、40%ロス、光学系に制限

$3.2 \times 10^{10}$  ppp (world record: 独GSI-SIS18)



## 新たな入射手法

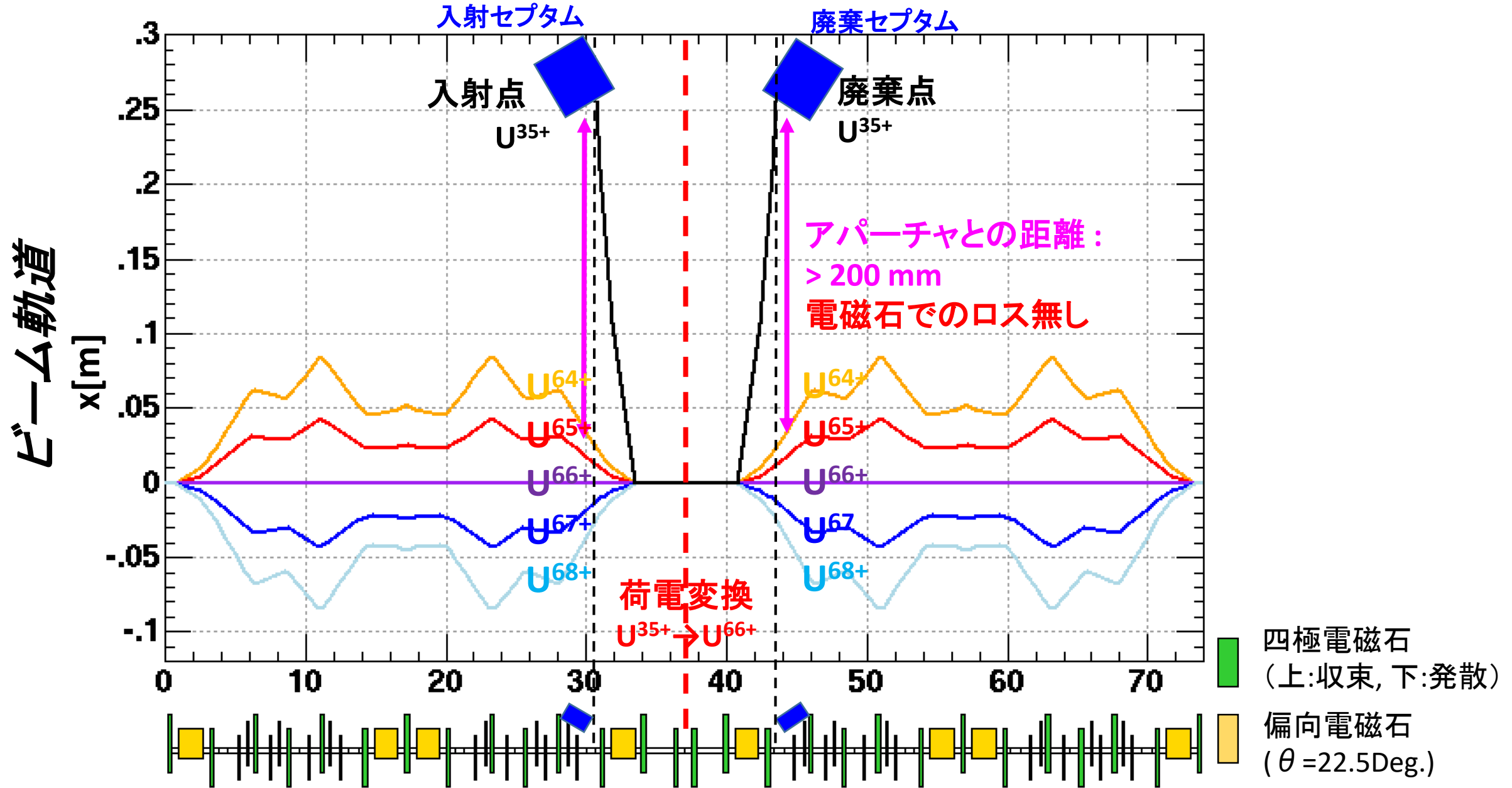
- ⇒ 原理的に入射回数を制限しない
- ⇒ 1桁以上大強度の重イオンの蓄積が可能
- ⇒ 周回ごとに平衡電荷あたりで電荷数が交換



運動量シフト $\Delta p/p_0$ :  $\pm 3\%$ 相当



# 重イオン入射部の機器配置とビーム軌道



# 発表のまとめ

## 大強度陽子加速器 J-PARC

## 世界最高レベルの 大強度陽子加速器

- ◆陽子ビームにて詳細に理解
- ◆パルス当たり $10^{14}$ 個の大強度陽子ビーム実績
- ◆世界最高レベルの取り出し効率99.5%

## 加熱する国際情勢 GeV級重イオン加速器計画

- ◆重イオン入射器を新設
- ◆既存加速器へ接続しGeV級まで加速
- ◆パルス当たり $10^{11}$ 個を超えるの大強度重イオンビーム供給の可能性が高い  
(ドイツFAIR計画より1桁高い)

「陽子」でも大強度、  
「重イオン」でも大強度

高統計の地上実験  
による宇宙最高密度  
物質「中性子星」の  
構造解明へ

