



J-PARC HI *(J-PARC重イオン計画)*

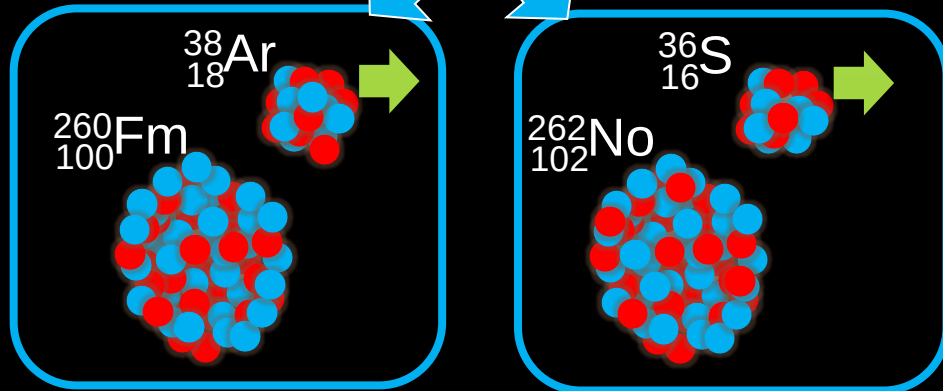
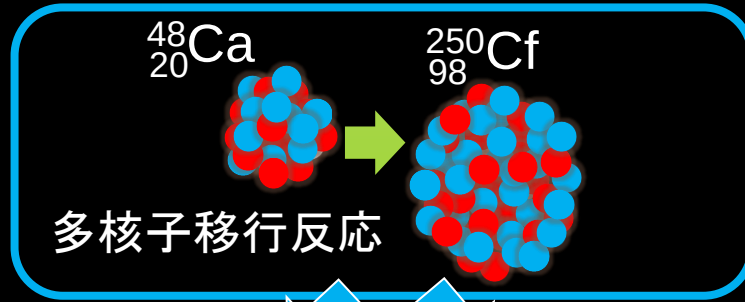
原田寛之 (JAEA/J-PARC)
for J-PARC HI collaboration
(140名)



「學術的意義、國際情勢」

大強度重イオンビームが拓く 元素合成・分裂の解明

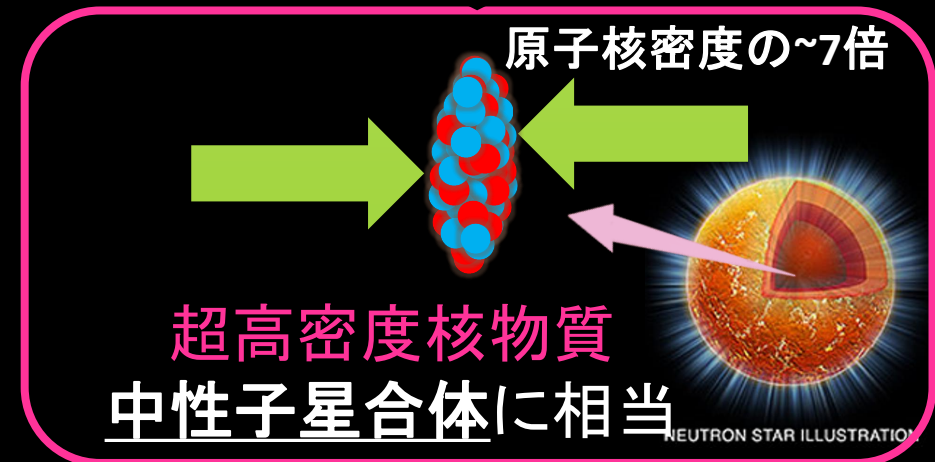
低エネルギー重イオンビーム



“未知”の超重元素, 中性子過剰核

超重元素科学
“超重元素合成・分裂の解明”

高エネルギー重イオンビーム



元素合成の源
“超高密度核物質の解明”

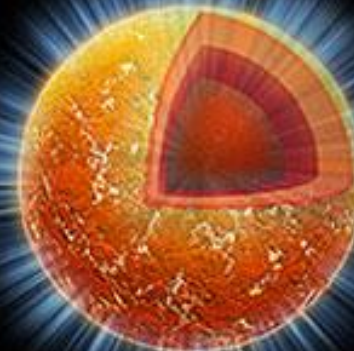
『中性子星』

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.

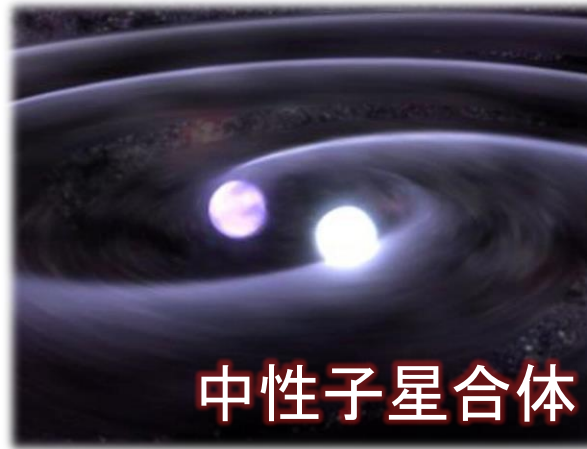


太陽の2倍の質量の中性子星を観測
半径：10km, 密度：原子核の5~10倍
(理論模型：太陽質量の1.5倍以下)

中性子星の表面情報

天体観測：重力波

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

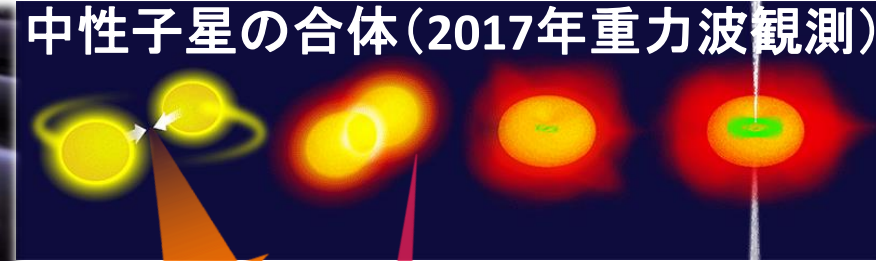


中性子星合体

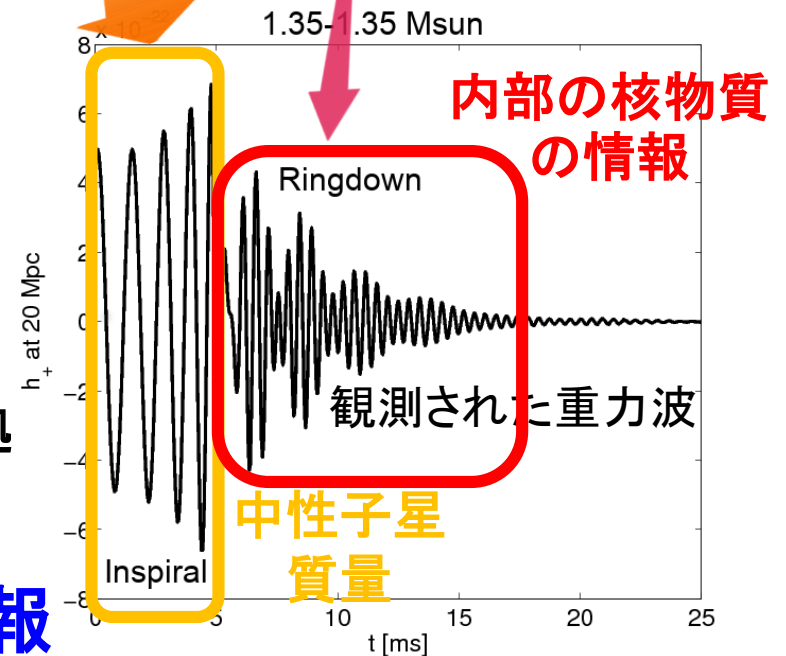
重力波による世界初の観測

中性子星の硬さの情報や
ストレンジ物質の観測的証拠

中性子星の内部情報

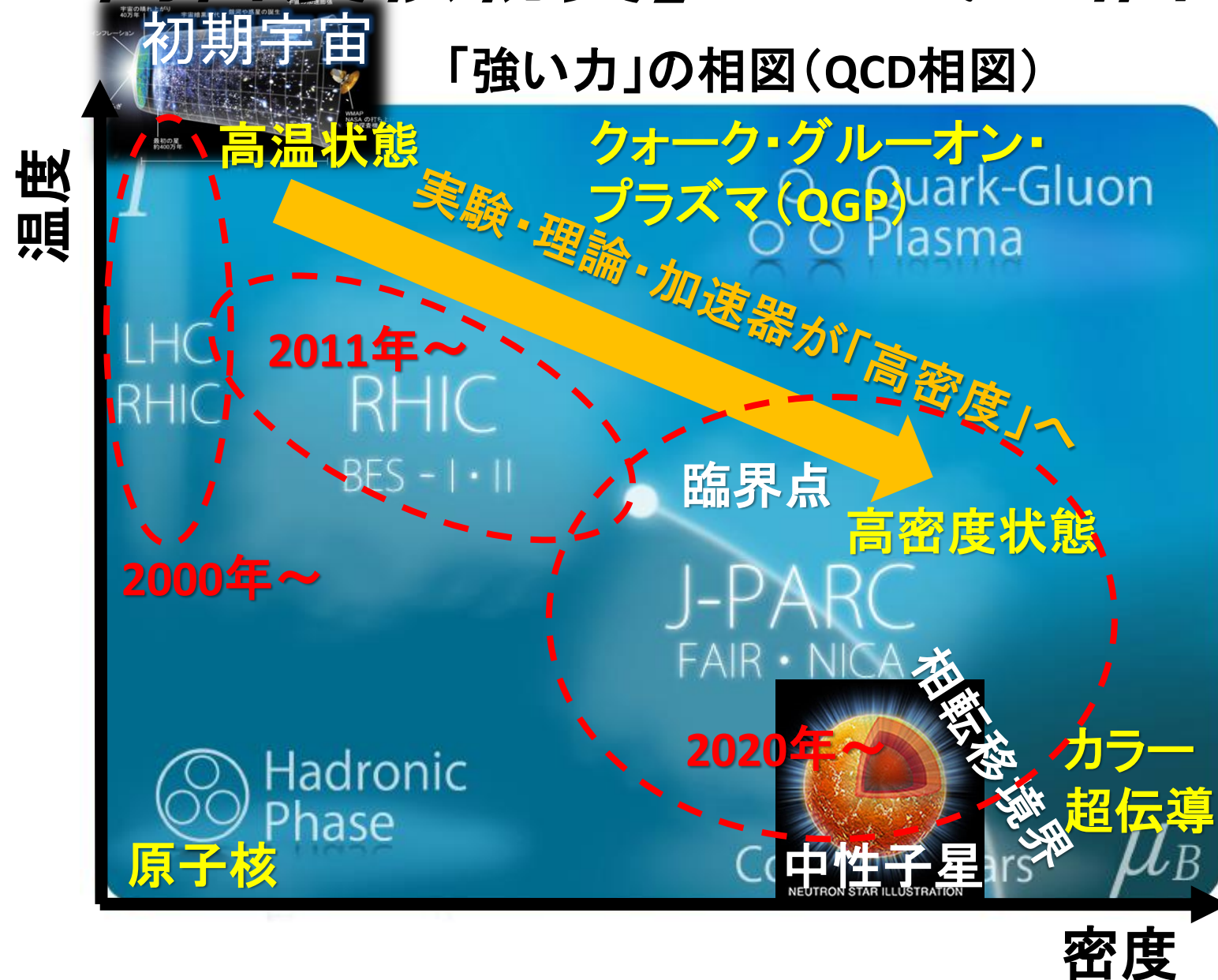


中性子星の合体(2017年重力波観測)



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

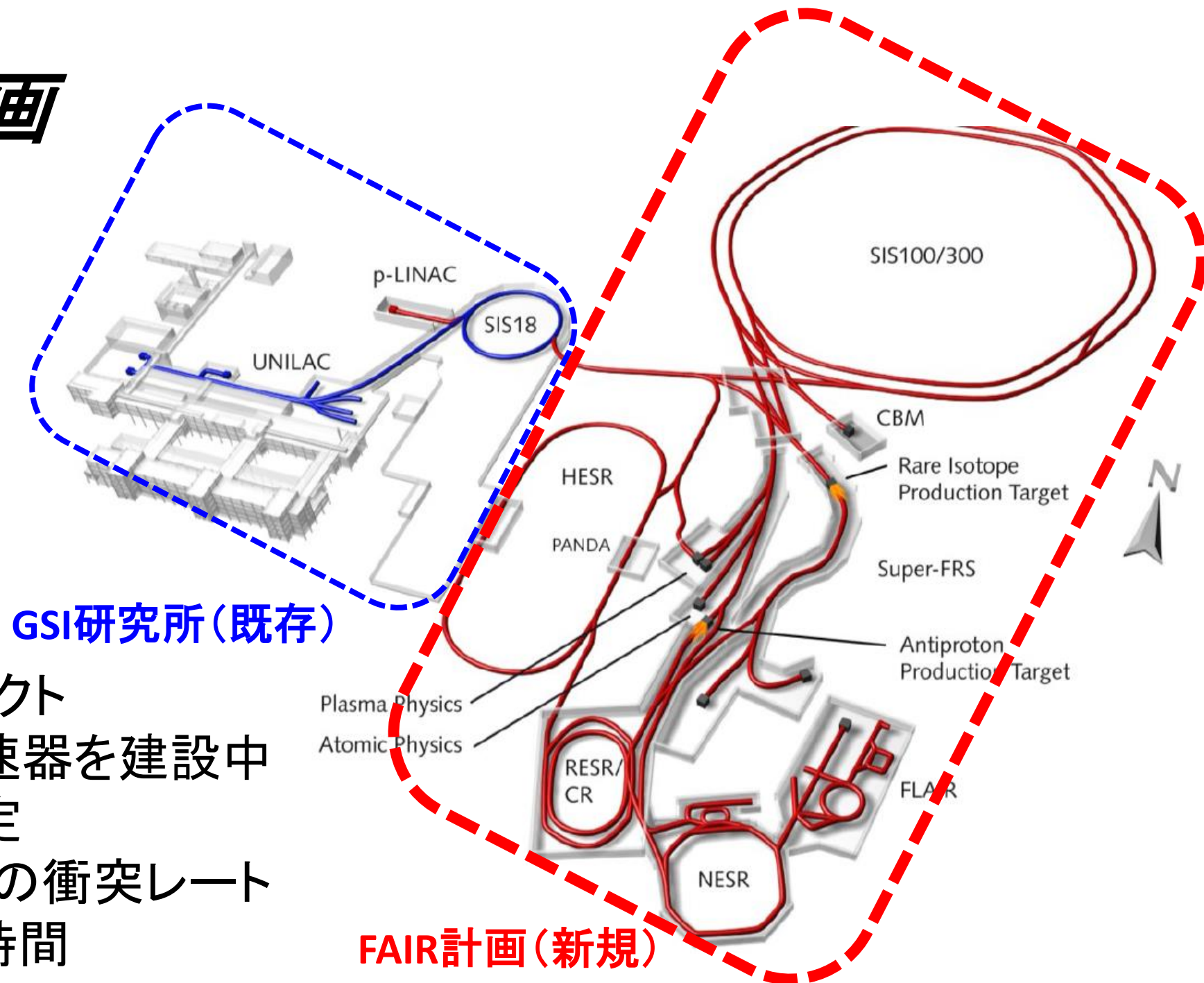
稀な物理事象(臨界点、相転移境界、カラー超伝導など)の探索には高統計データが必要。

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



- 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

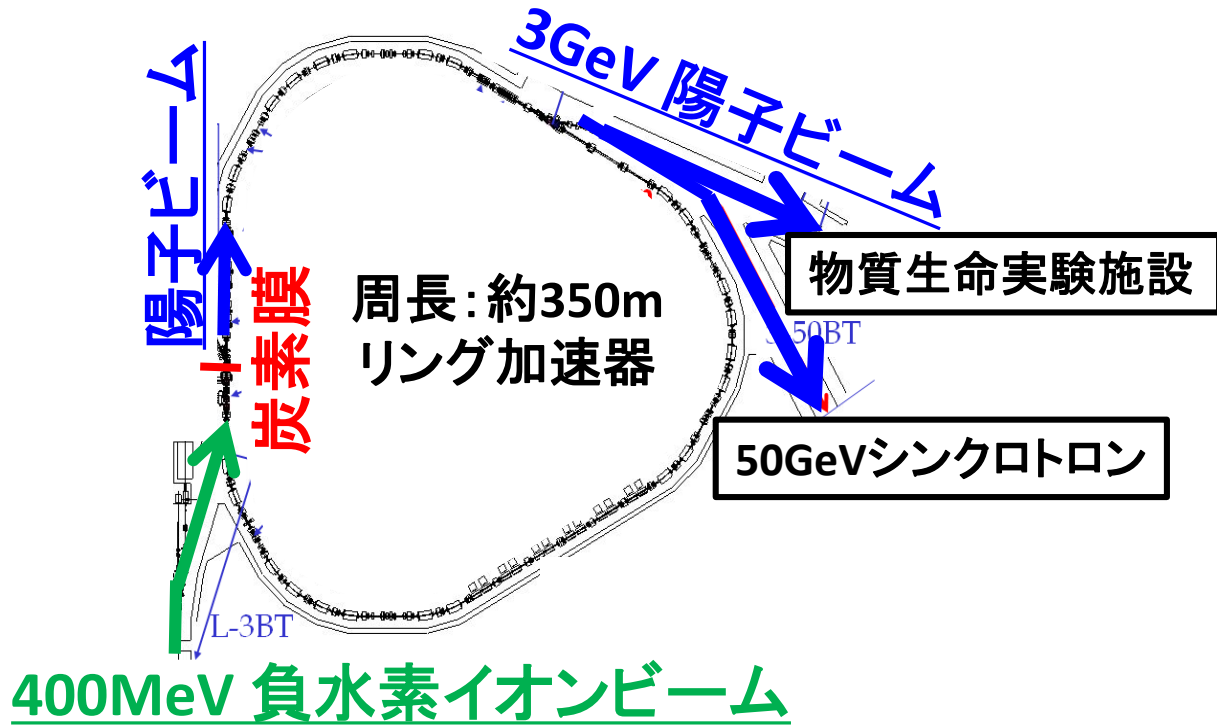
ハドロン実験施設





「J-PARC陽子加速器の現状」

3GeVシンクロトロン(RCS)



入射エネルギー: 400MeV

入射時間 : 0.5 ms (307周回蓄積)

粒子数 : 8.33×10^{13} 個

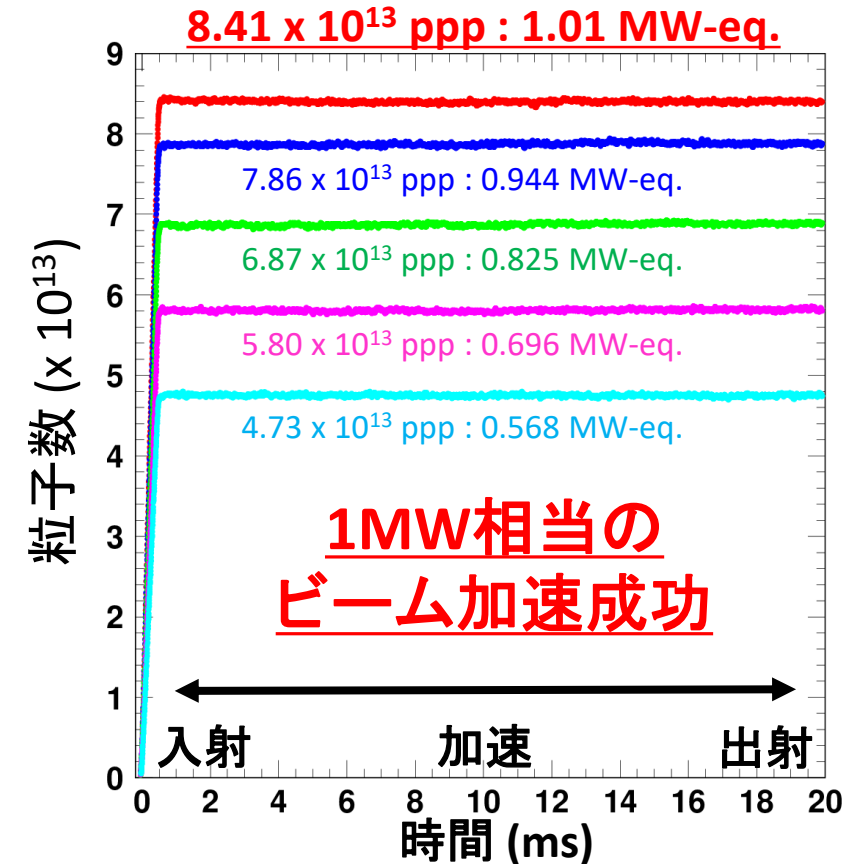
加速時間 : 20 ms (~15000周回)

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



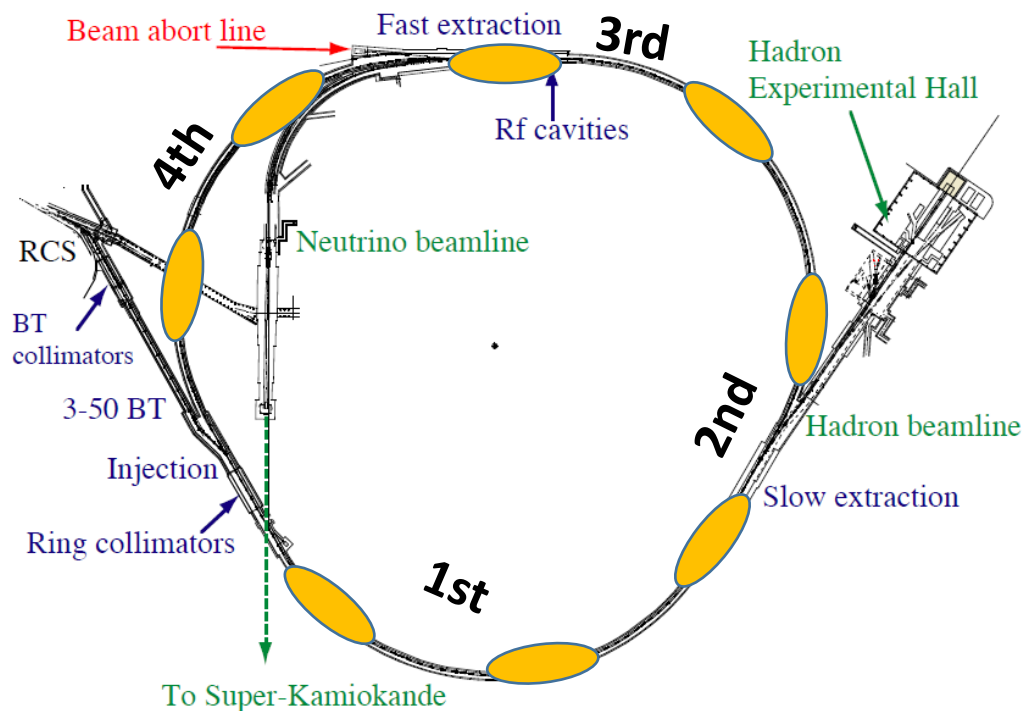
主リングシンクロトロン

MR 供用運転:

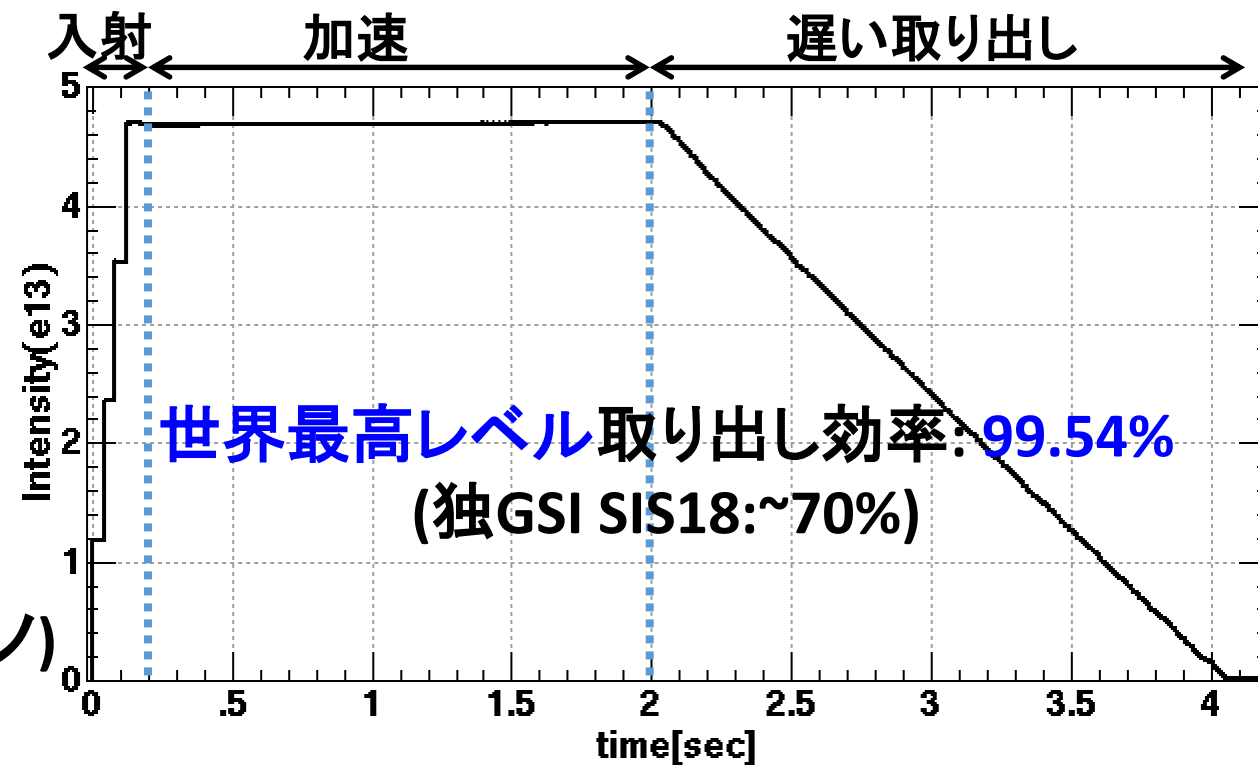
MR ニュートリノ実験: $\sim 25 \times 10^{13}$ パルスあたり

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)

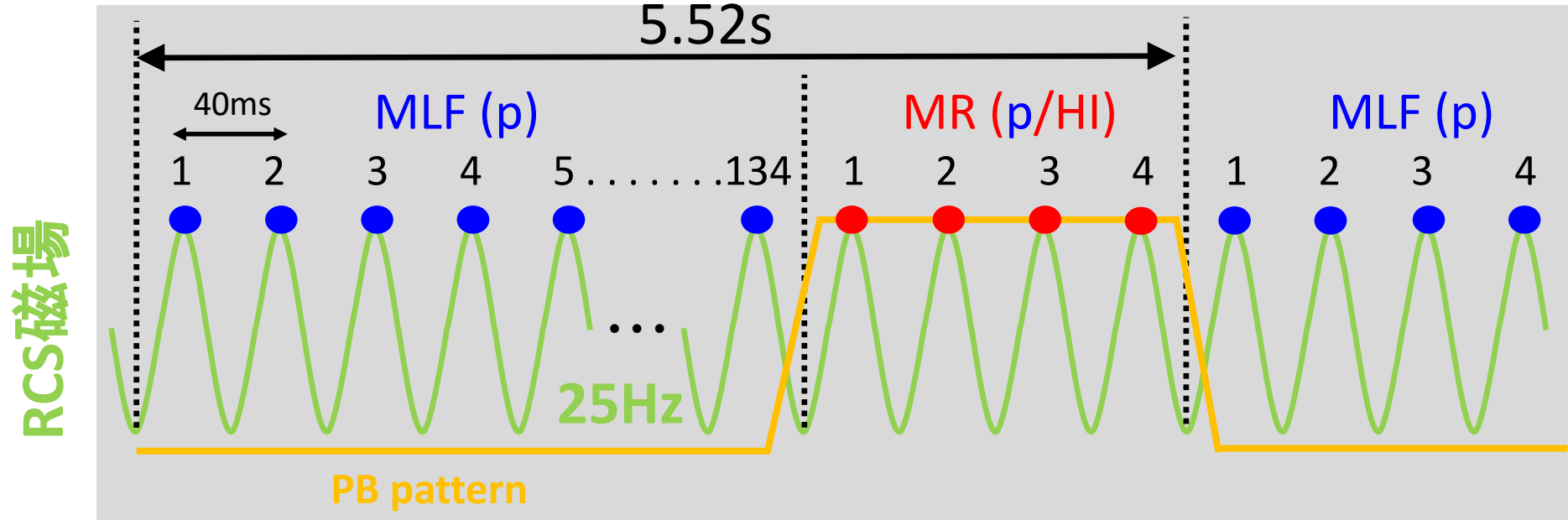


An aerial photograph of a coastal town. A river flows through the town, and a large, fenced-in area with several buildings and a circular structure is visible. The town is situated along a coastline with a beach and a pier. The text "「重イオン加速の検討」" is overlaid on the image.

「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”
- 重イオンビームを行き先HDの時のみRCSに重イオンを入射
 - **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 1.1×10^{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+} : 1.1×10^{11}



荷電変換

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

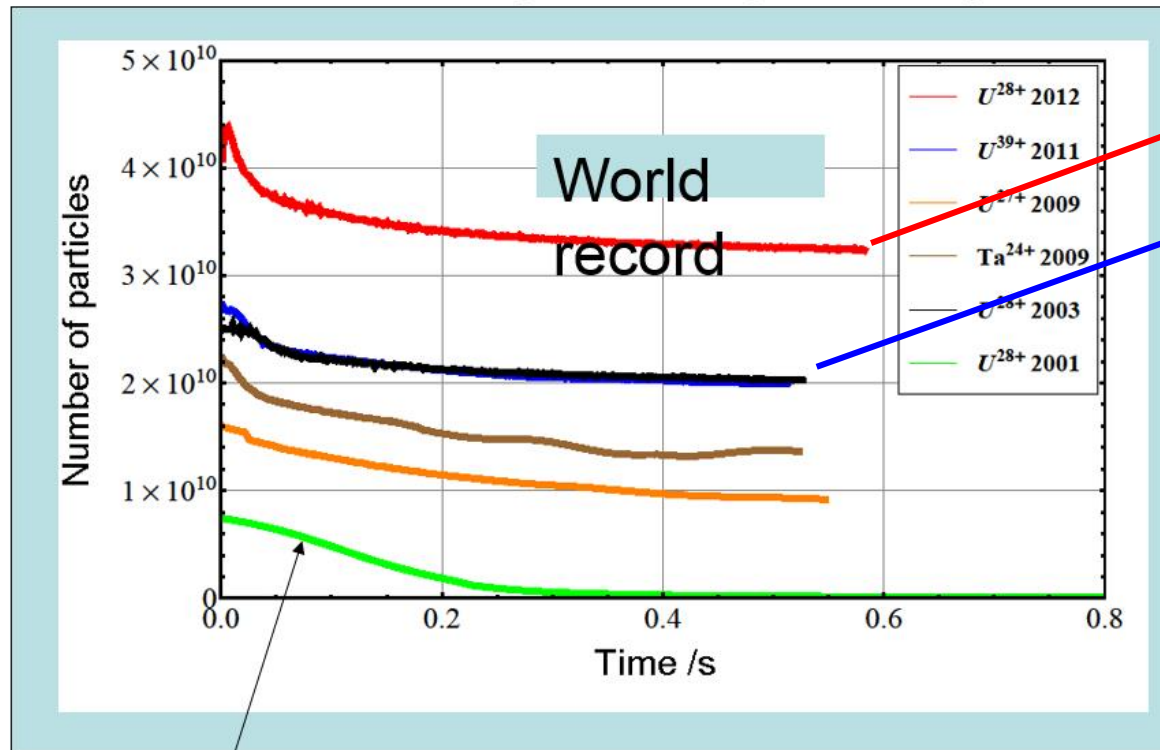
MRへ4回入射: 4×10^{11} /MR cycle!

大強度重イオン蓄積の比較

*FAIRプロジェクトのスライドより引用

Intensity Progress

World Record Intensity for Low Charge State Heavy Ions



2001 FAIR conceptual design report (FAIR proposal)

独・GSIでの重イオン実績
(world record)

$U^{28+}: 3.2 \times 10^{10}$ ppp

$U^{39+}: 2.0 \times 10^{10}$ ppp

↓ 1桁高い

設計粒子数

<RCS>

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

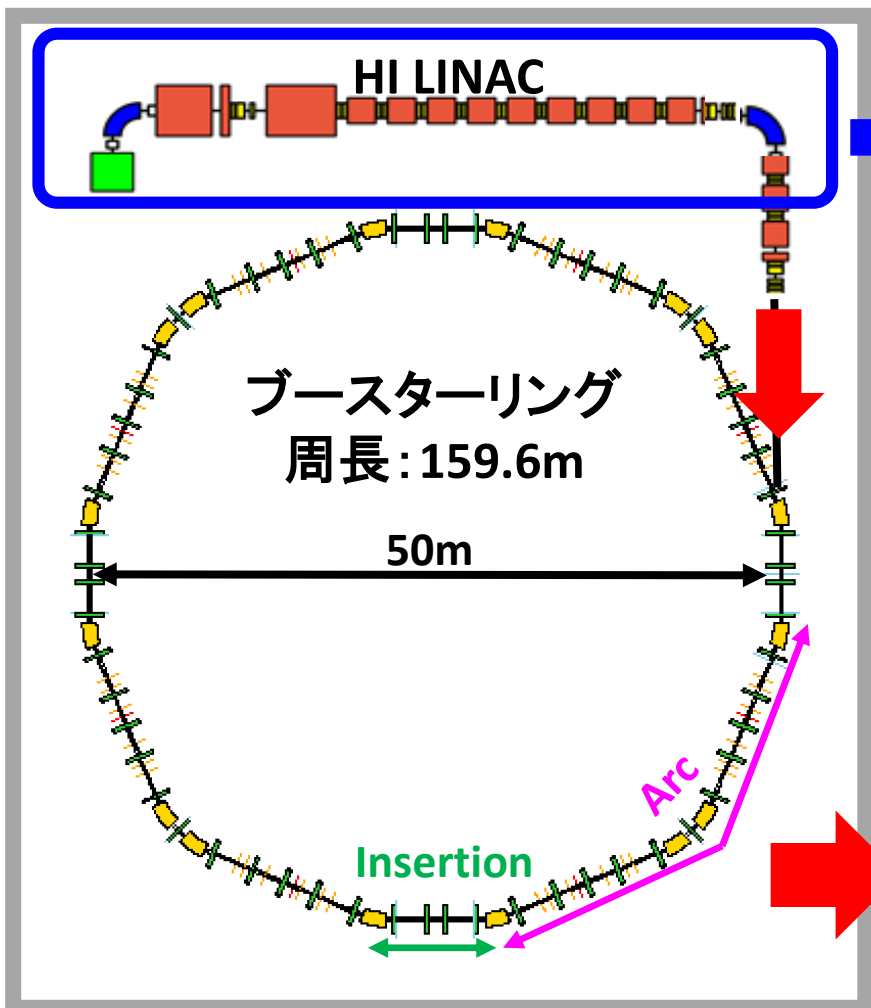
<MR>

$U^{92+}: 4.0 \times 10^{11}$ ppp

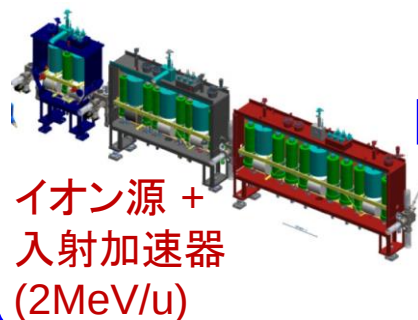
An aerial photograph of a coastal city. A river flows through the center, with a large, complex industrial or research facility situated along its banks. The facility includes several large buildings and a prominent circular structure. The city is densely packed with residential and commercial buildings, and the coastline is visible on the right side of the image.

「新設加速器の設計」

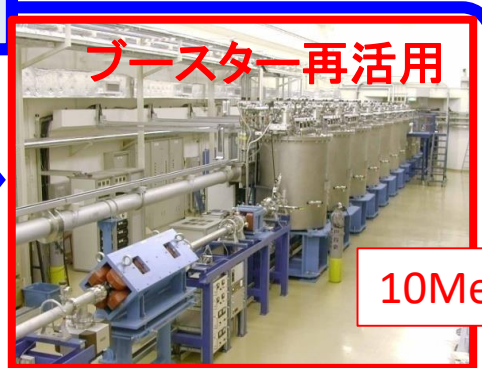
重イオン用入射器 ～線形加速器とブースターリング～



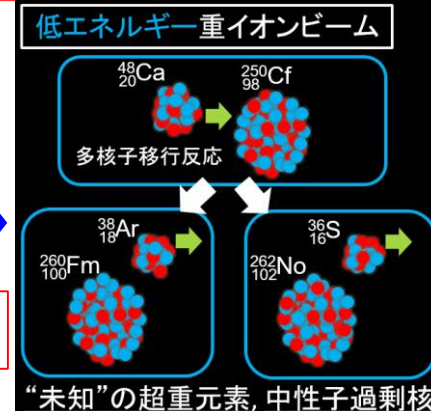
タンデム後継機計画



ブースター再活用



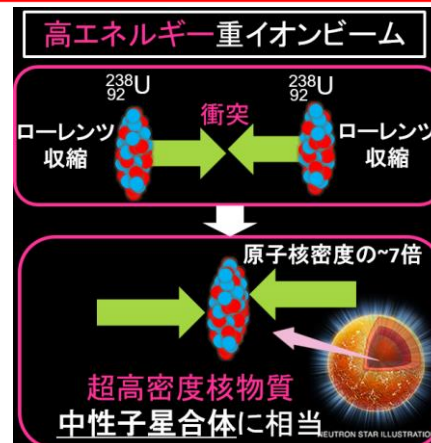
超重元素科学
“超重元素合成・
分裂の解明”



大強度陽子加速器 J-PARC

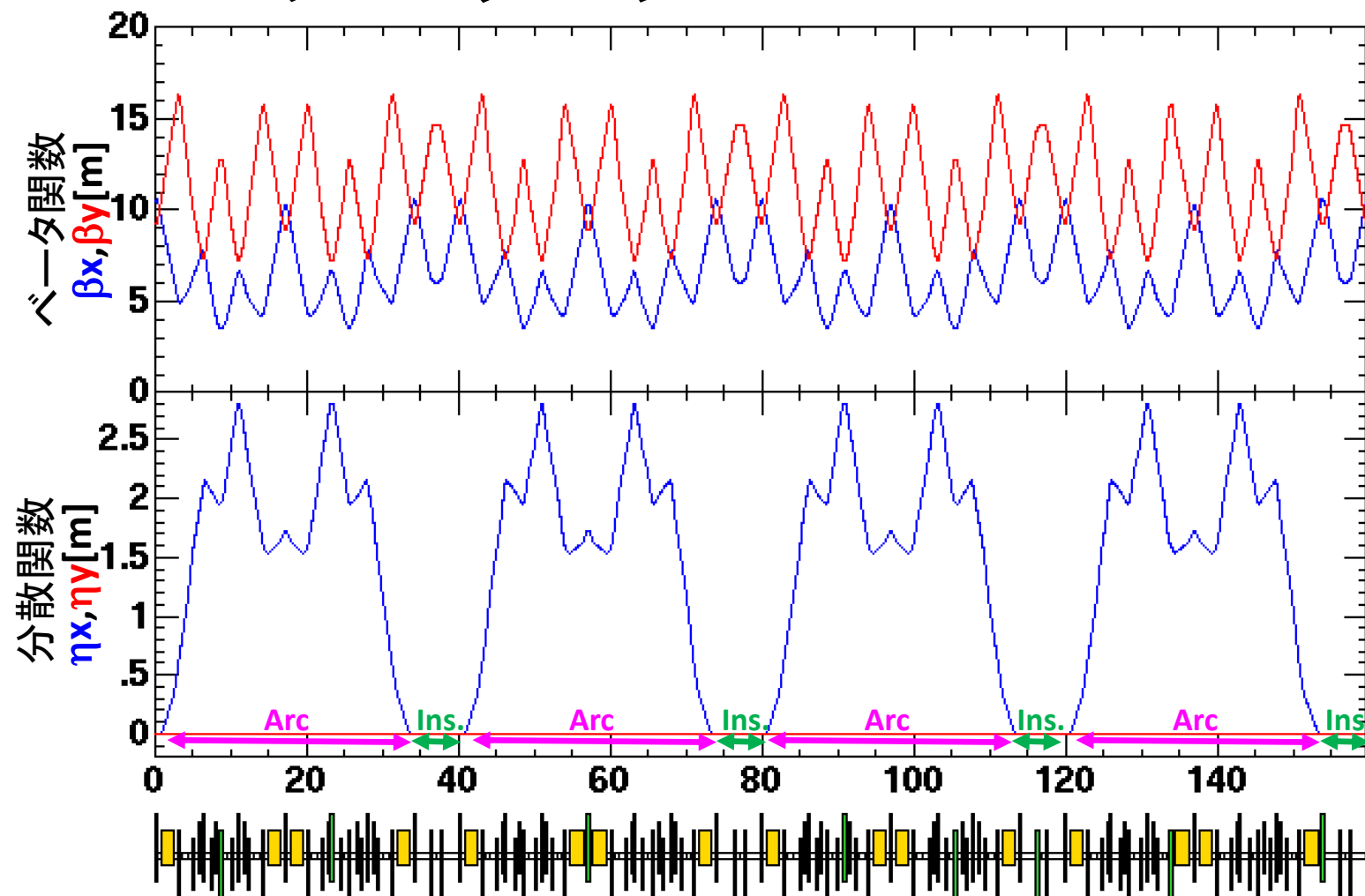
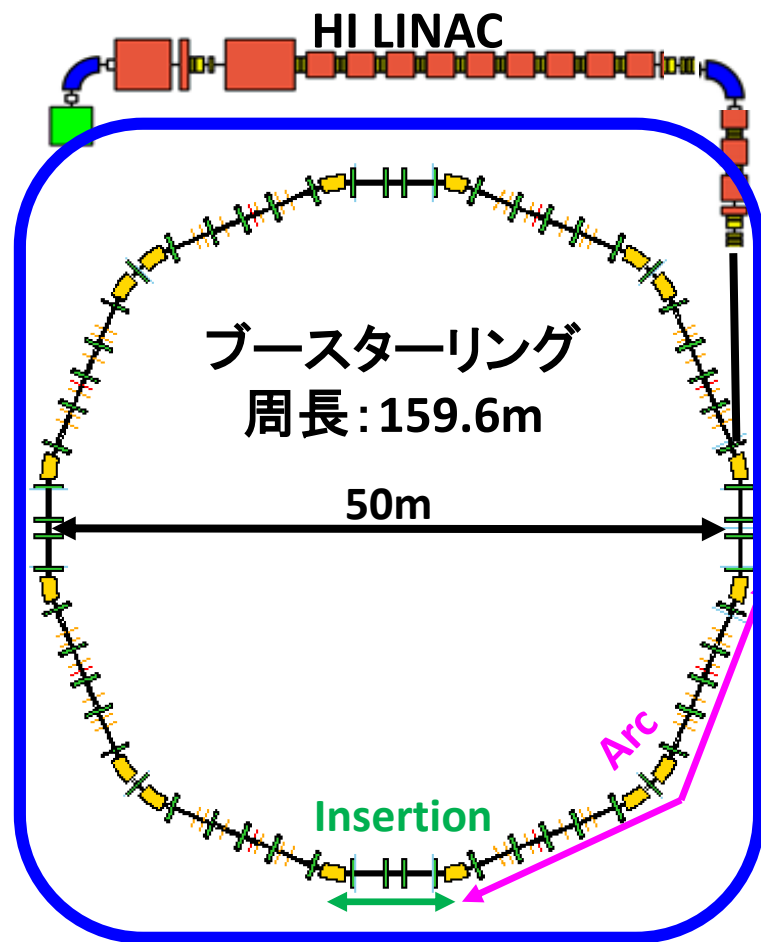


元素合成の源
“超高密度核物質
の解明”



11GeV/u

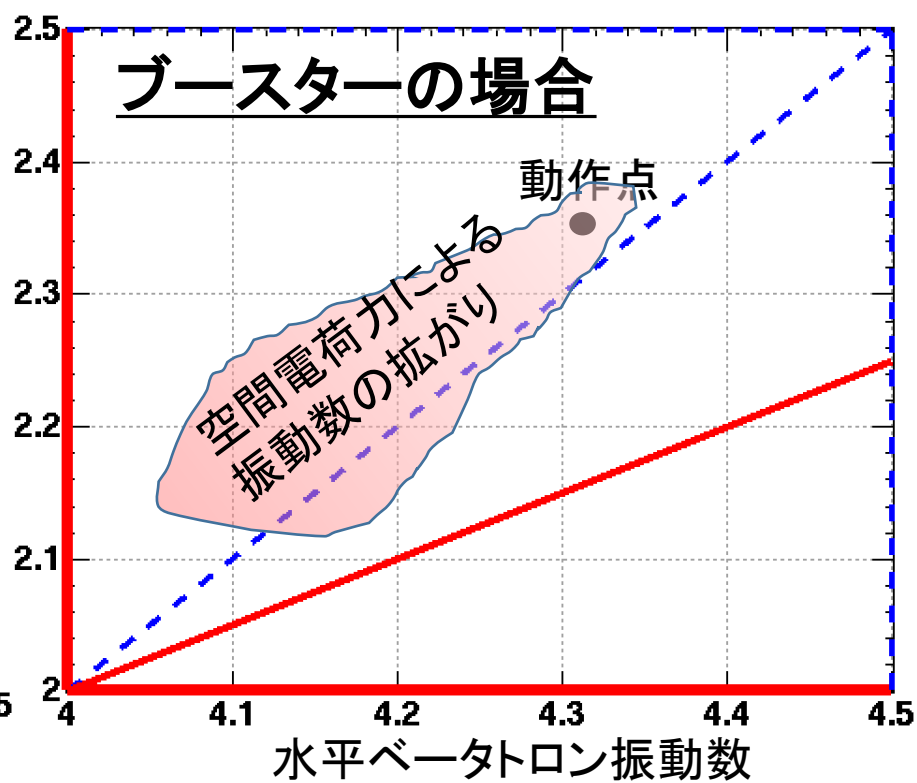
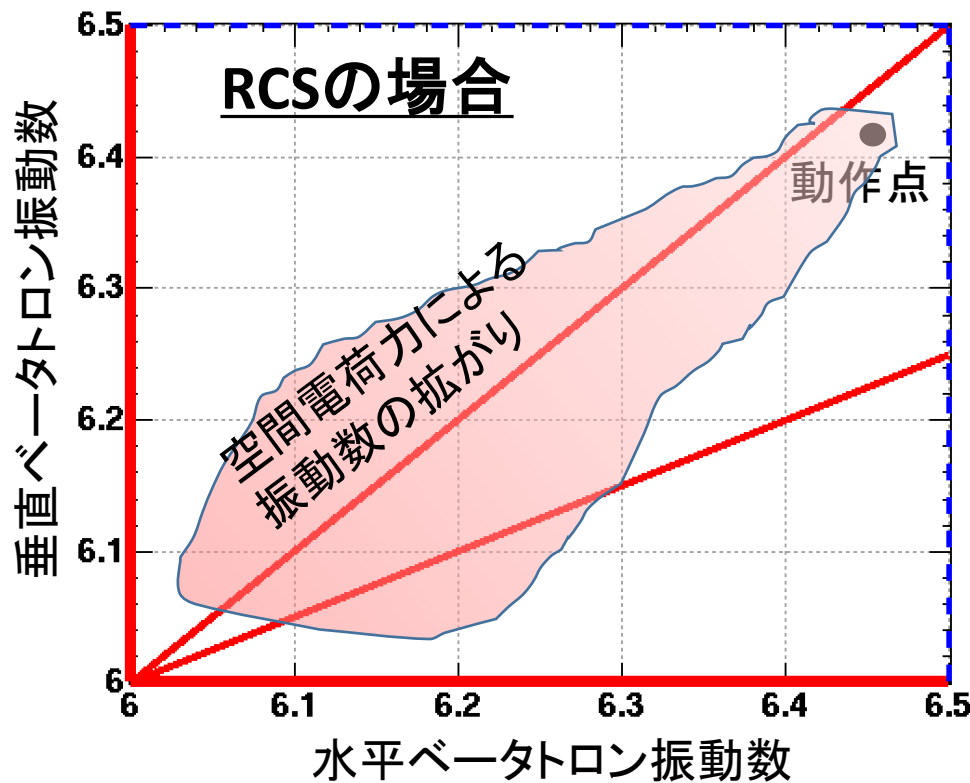
重イオン用入射器 ～線形加速器とブースターリング～



「4回対称性の光学リング」

ベータトロン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)



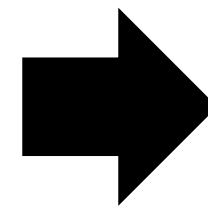
空間電荷力による
振動数広がり

- ・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)
- ・ ϵ 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広がりの小さい



**大強度に強い
光学設計**

J-PARC HIの国際的優位性

- ◆ 既存の加速器を使用することで立地や予算を大幅に削減
 - 独FAIR計画：2000億円 > J-PARC重イオン計画：150億円
1桁安い予算規模
- ◆ 「約10年」かけて大強度陽子ビーム出力($\sim 10^{14}$ ppp)の実績
 - 独FAIR計画： $>10^{10}$ ppp < J-PARC重イオン計画： $>10^{11}$ ppp
1桁高いビーム強度
- ◆ 世界最高レベルの遅い取り出し効率を達成
 - 独GSI・SIS18： $\sim 70\%$ < J-PARC陽子：99.54%
世界最高レベルの取り出し効率
- ◆ 既存の加速器を陽子ビームを用いて詳細に理解
 - 独FAIR計画：後段建設中 < J-PARC重イオン計画：入射器のみ
大強度化の早期実現の可能性が高い

∴ 国際的な優位性が非常に高い計画

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%

過熱する国際情勢 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)

「陽子ビーム」でも大強度、
「重イオンビーム」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

