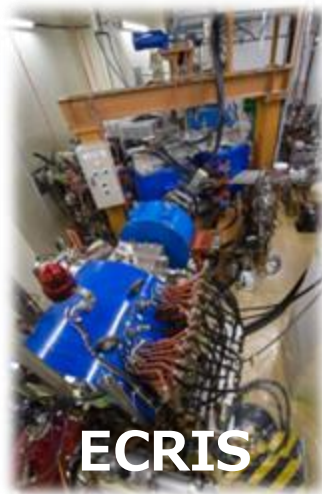
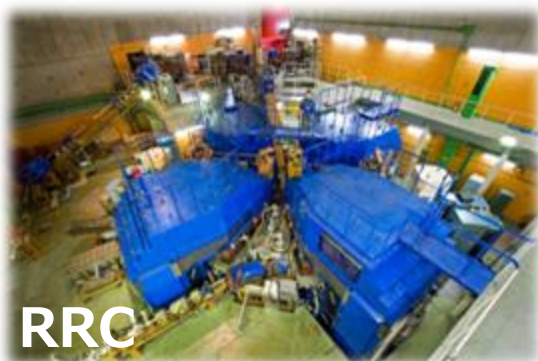


重イオン加速器 ～ 基礎・現状・課題 ～

- 1: 重イオン加速器とは
- 2: RIビームファクトリーの加速器
- 3: ビームの大強度化に向けて



1: 重イオン加速器とは

重イオンとは

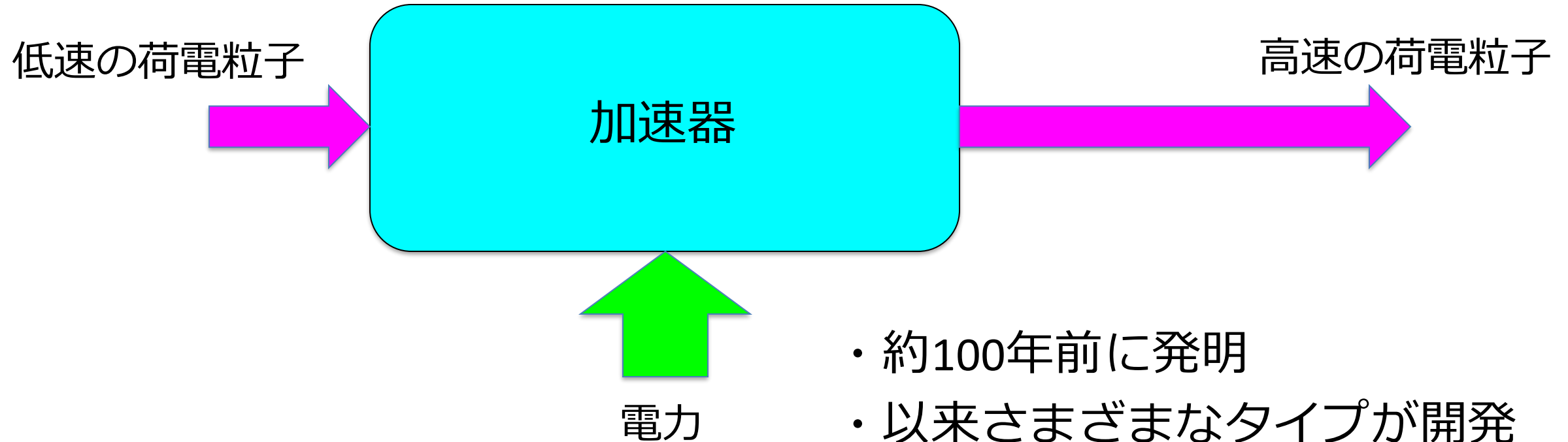
重 イ オ ン	水素	H^{1+} (p)	価数 = 電子がいくつ剥がれているか 
	重水素	D^{1+} (d)	
	ヘリウム	He^{1+}, He^{2+} (a)	
	炭素	$C^{1+}, C^{2+}, C^{3+}, C^{4+}, C^{5+}, C^{6+}$	
	ウラン	$U^{1+}, U^{2+}, U^{3+}, U^{4+}, U^{5+}, U^{6+}, \dots, U^{92+}$	

q : 価数 M : 質量数 $\rightarrow$ 電荷質量比 : q/M

重イオンでは通常 $q/M \leq 1/2$

加速器とは

加速器：荷電粒子を高速に加速する装置



目的：ミクロの世界を探る（素粒子・原子核、物質の構造）

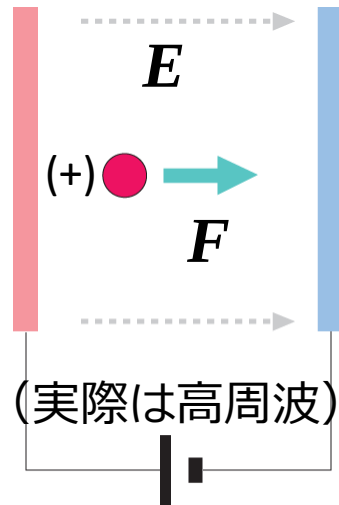
高速粒子しかできない研究開発を行う（ビーム育種・RI製造）

荷電粒子の運動方程式（ローレンツ力のもとでの運動）

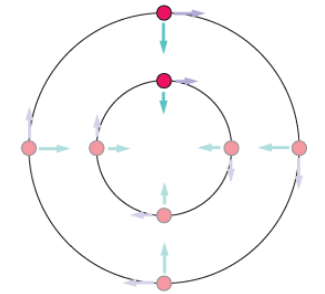
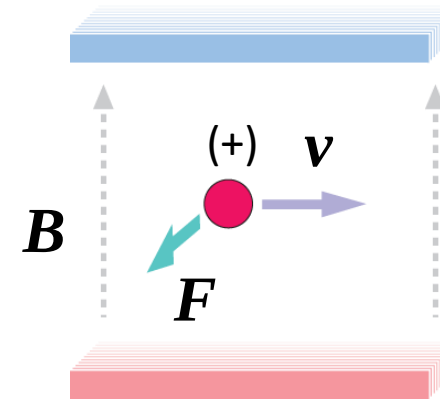
$$M \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = q \left(\vec{E} + \frac{d\vec{x}}{dt} \times \vec{B} \right)$$

$$\frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \frac{q}{M} \left(\vec{E} + \frac{d\vec{x}}{dt} \times \vec{B} \right)$$

電場：スピードを上げる



磁場：曲げる



高速にするには高電場と高磁場が必要
→ 大型化する。

世界最大の加速器 「Large Hadron Collider (LHC)」 2009年

陽子

($v/c=0.99999999905$)

あるいは

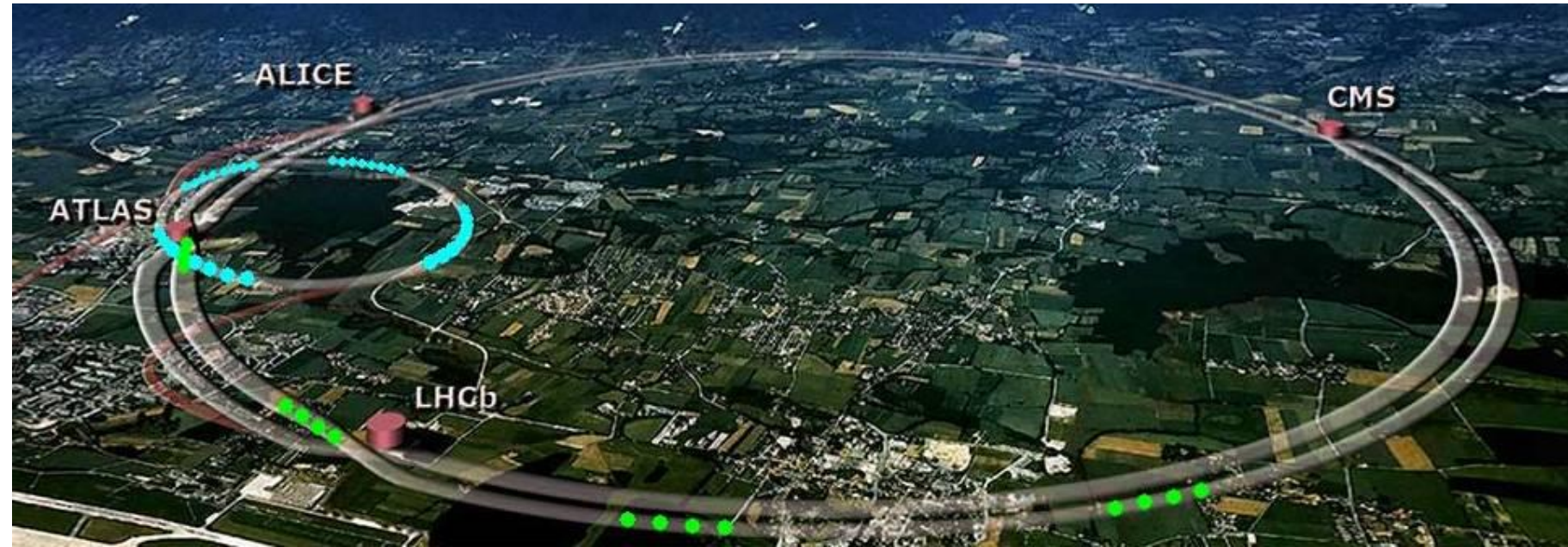
重イオン (Pb)

($v/c=0.99999999396$)

どうしの

衝突型加速器

周長27 km



トンネル (地下100 m)
の内部



←超伝導電磁石

超伝導加速空洞→



日本の大型加速器施設

名称	機関	種類	加速粒子	目的
Super-KEKB	KEK（つくば市）	衝突型蓄積リング	電子・陽電子	素粒子物理学
SPring-8	理研・JASRI（佐用町）	蓄積リング	電子	物質構造解析
J-PARC	KEK・JAEA（東海村）	シンクロトロン	陽子	素粒子・原子核物理学
HIMAC	QST（千葉市）	シンクロトロン	重イオン	がん治療
RIBF	理研（和光市）	サイクロトロン	重イオン	原子核物理学など

KEK：高エネルギー加速器研究機構 JASRI：高輝度光科学研究センター JAEA：日本原子力研究開発機構 QST：量子科学技術研究機構



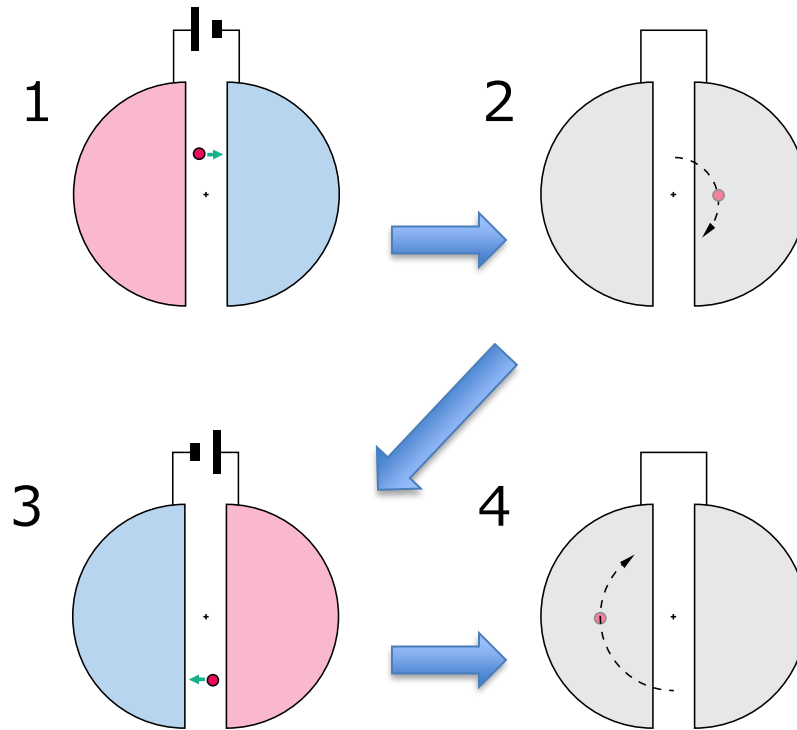
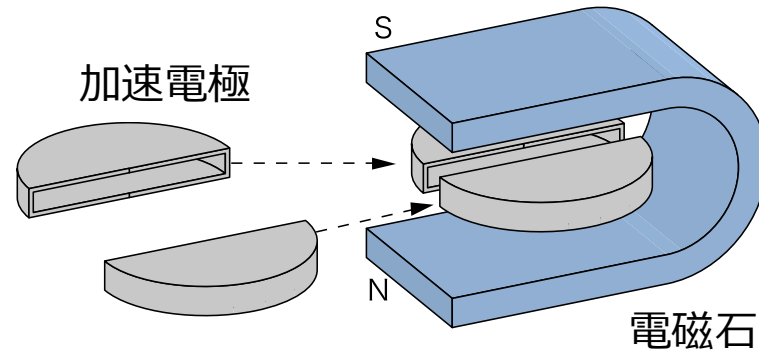
サイクロトロンの原理（等時性：1929年）

$$W = qB/m$$

一様な磁場の中では、
イオンの周回周波数は
スピードによらず
一定である。



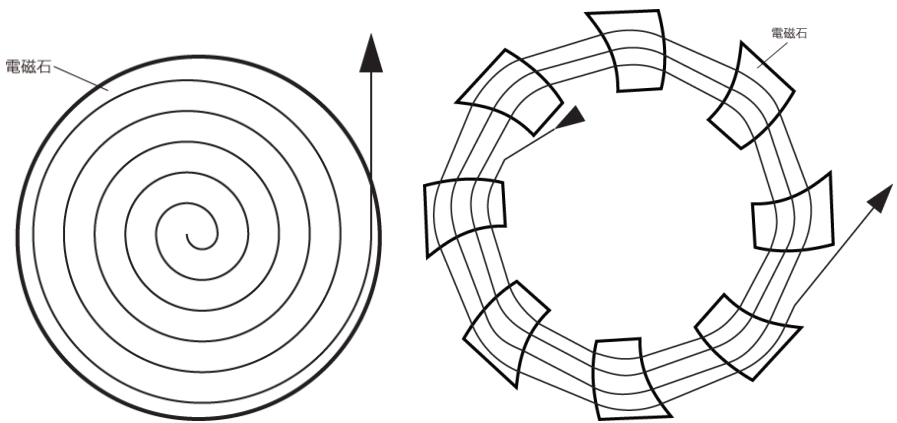
「速いイオンは遠く
を回る。」



E. O. Lawrence
(1901-1958)

1939年ノーベル物理学賞受賞
「サイクロトロンの発明と開発、
特に人工放射性元素に関して得
られた成果に対して」。

重イオン加速器の種類と特徴



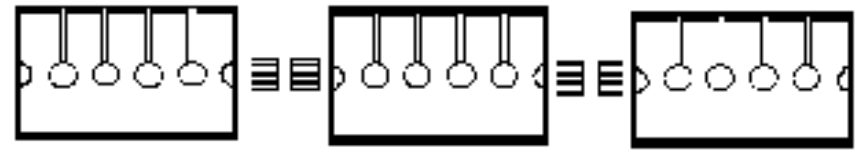
サイクロトロン (リングサイクロトロン)

渦巻き状の軌道→連続(CW)ビーム

スペース：小さい

ビーム強度：中

エネルギー：中



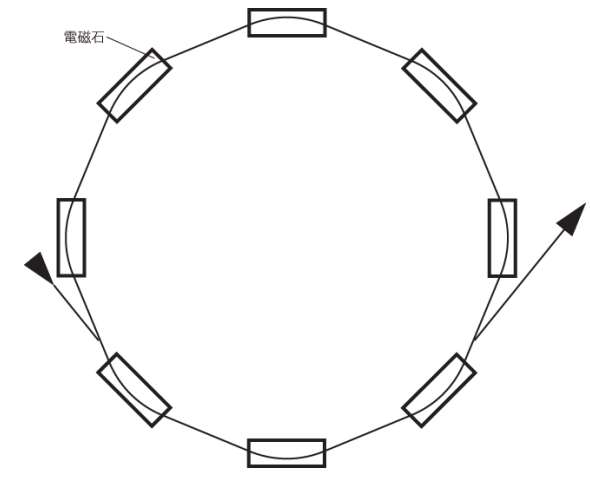
リニアック

直線軌道→連続(CW)ビーム

スペース：長い

ビーム強度：強

エネルギー：低～中



シンクロトロン

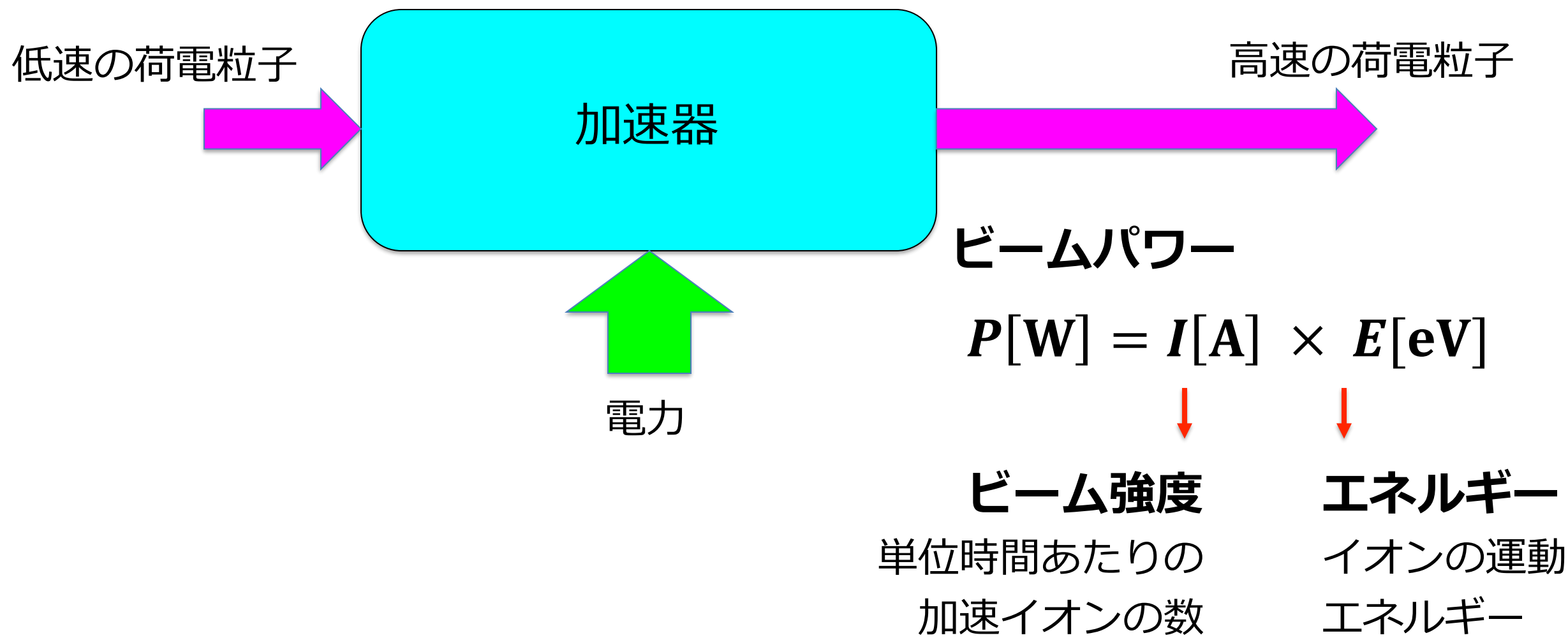
円状の軌道→パルスビーム

スペース：大きい

ビーム強度（平均）：低～中

エネルギー：高

加速器の性能指標



2: RIビームファクトリーの加速器

RI : ラジオアイソトープ→短寿命原子核のこと

RIビームファクトリーでの研究と加速器の役割

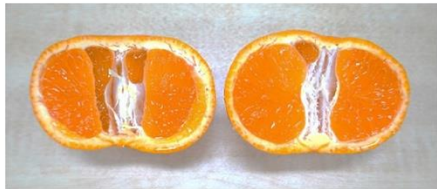
イオンビーム育種



「仁科蔵王」

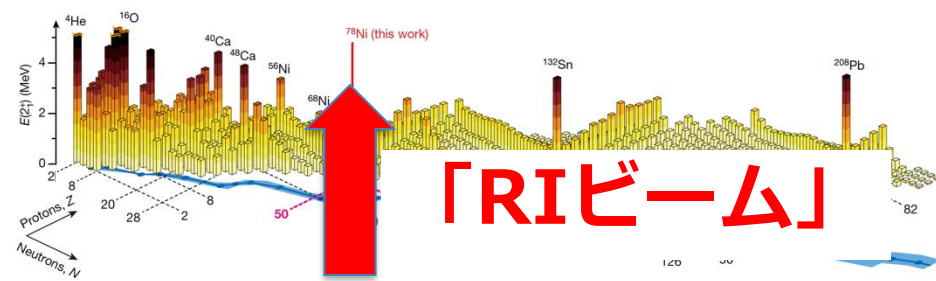


清酒酵母「仁科蔵」



春先に出荷可能なみかん

原子核物理学

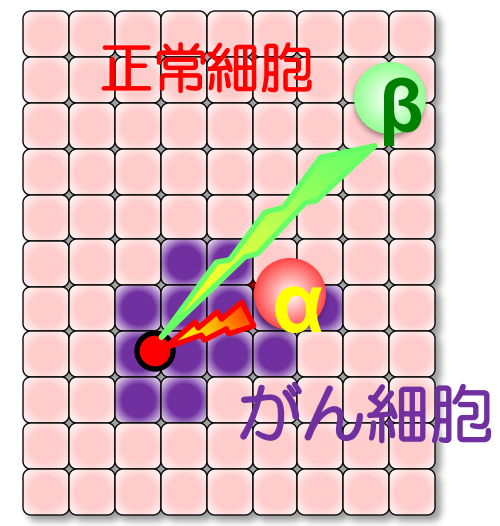


RIビーム生成分離装置

「重イオンビーム」

重イオン加速器

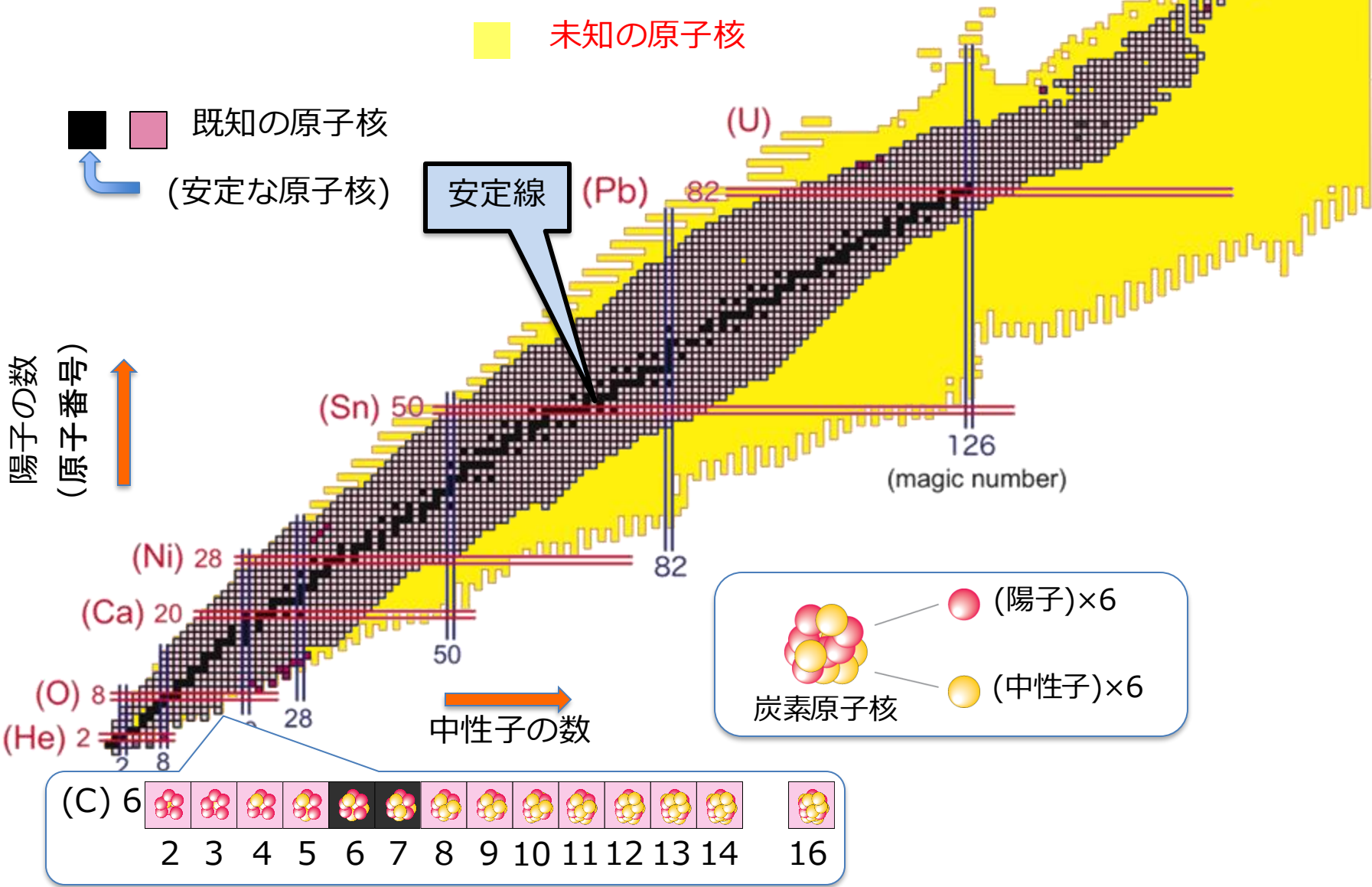
有用RI製造



アスタチン-211 (^{211}At)

原子核=元素の起源

核図表：原子核の地図



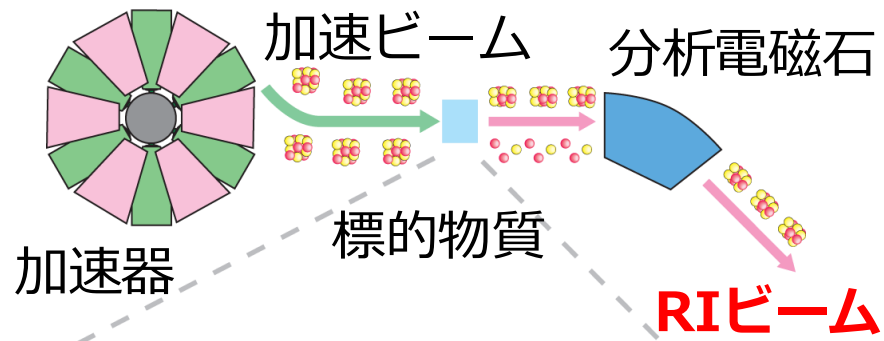
ポイント

陽子と中性子は「強い力」で結びついている。

ここでの安定／不安定は「弱い力」に関する性質（ベータ崩壊）。

「強い力」で結びついた原子核は全て「安定」と考えて、研究対象とする。

RIビームの発生



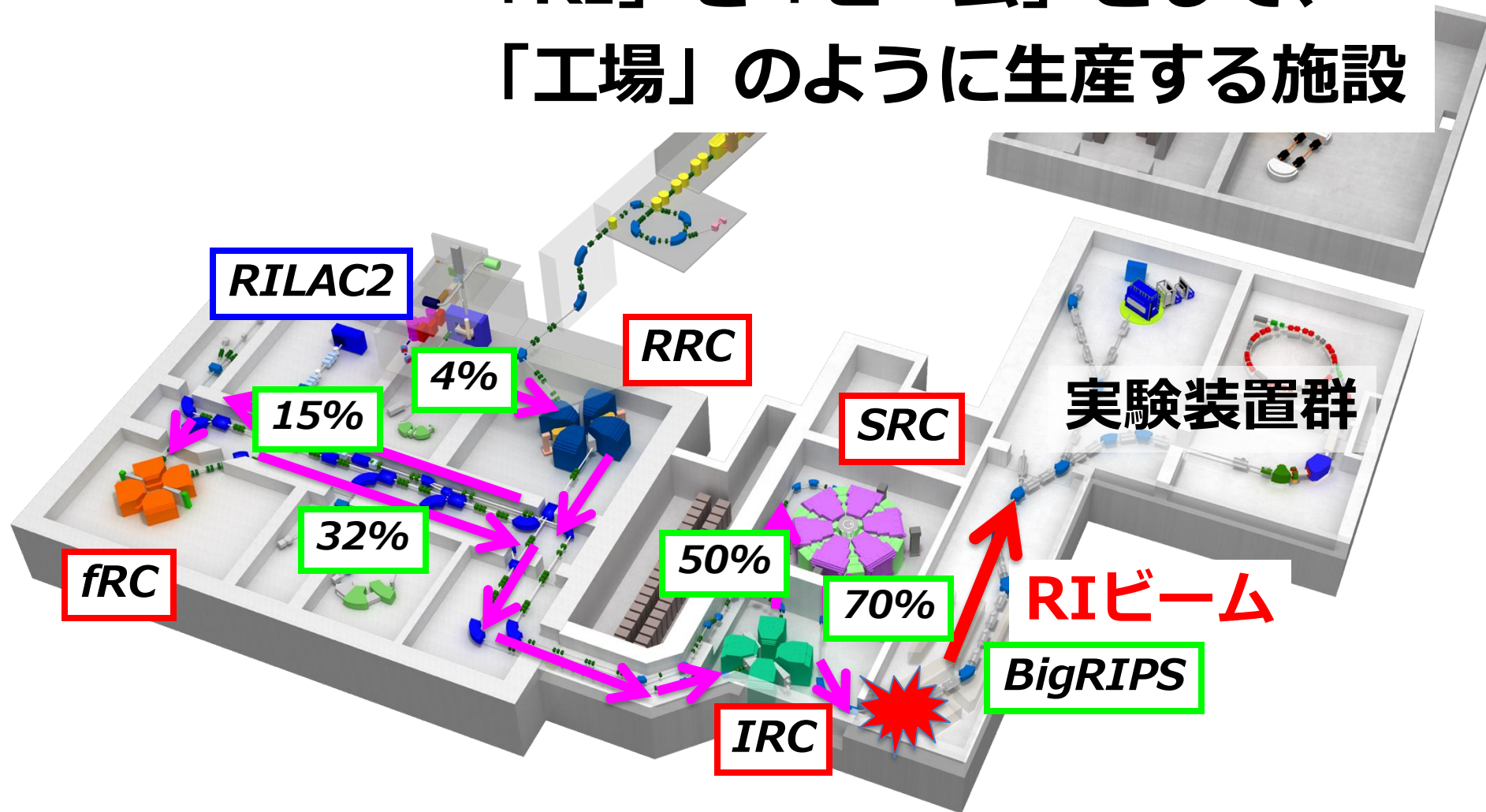
RIビーム法(1980) :

重い原子核を加速して標的原子核に衝突させ、生成した破碎片・分裂片 (RI) を電磁石で分離して、ビームとして利用する方法

- ・ 生成した不安定核の性質を調べる
- ・ RIビームを使って原子核の反応を調べる
- ・ RIビームを道具として使う



「RI」を「ビーム」として、 「工場」のように生産する施設

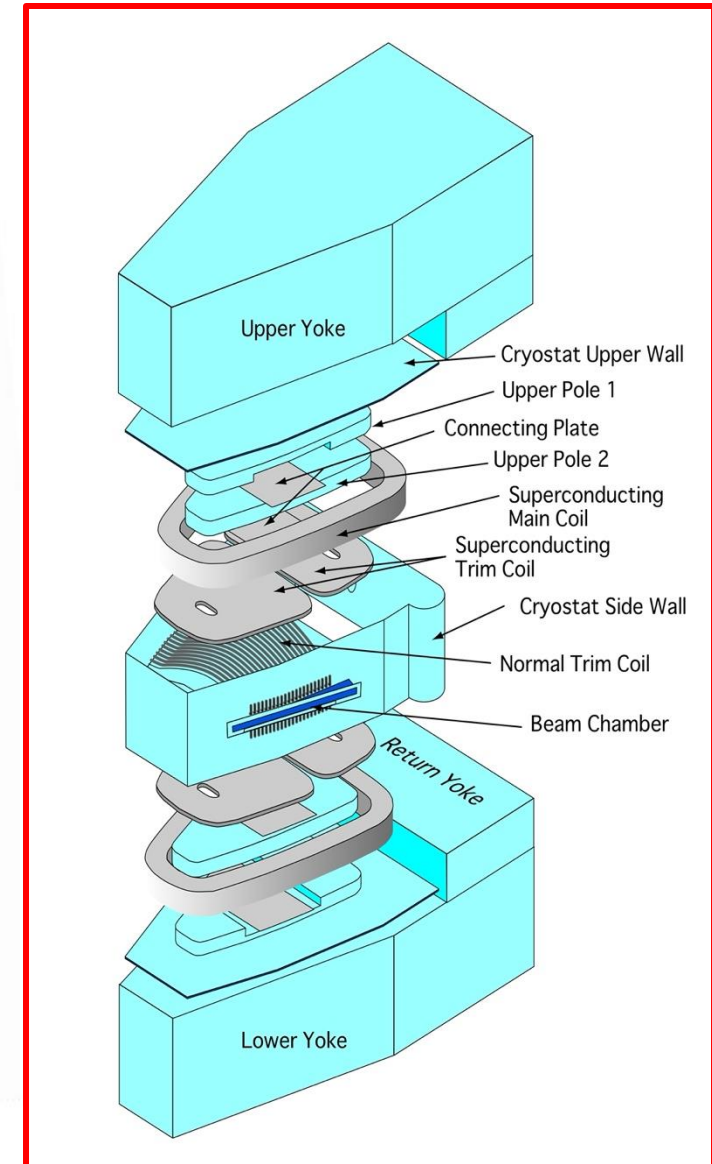
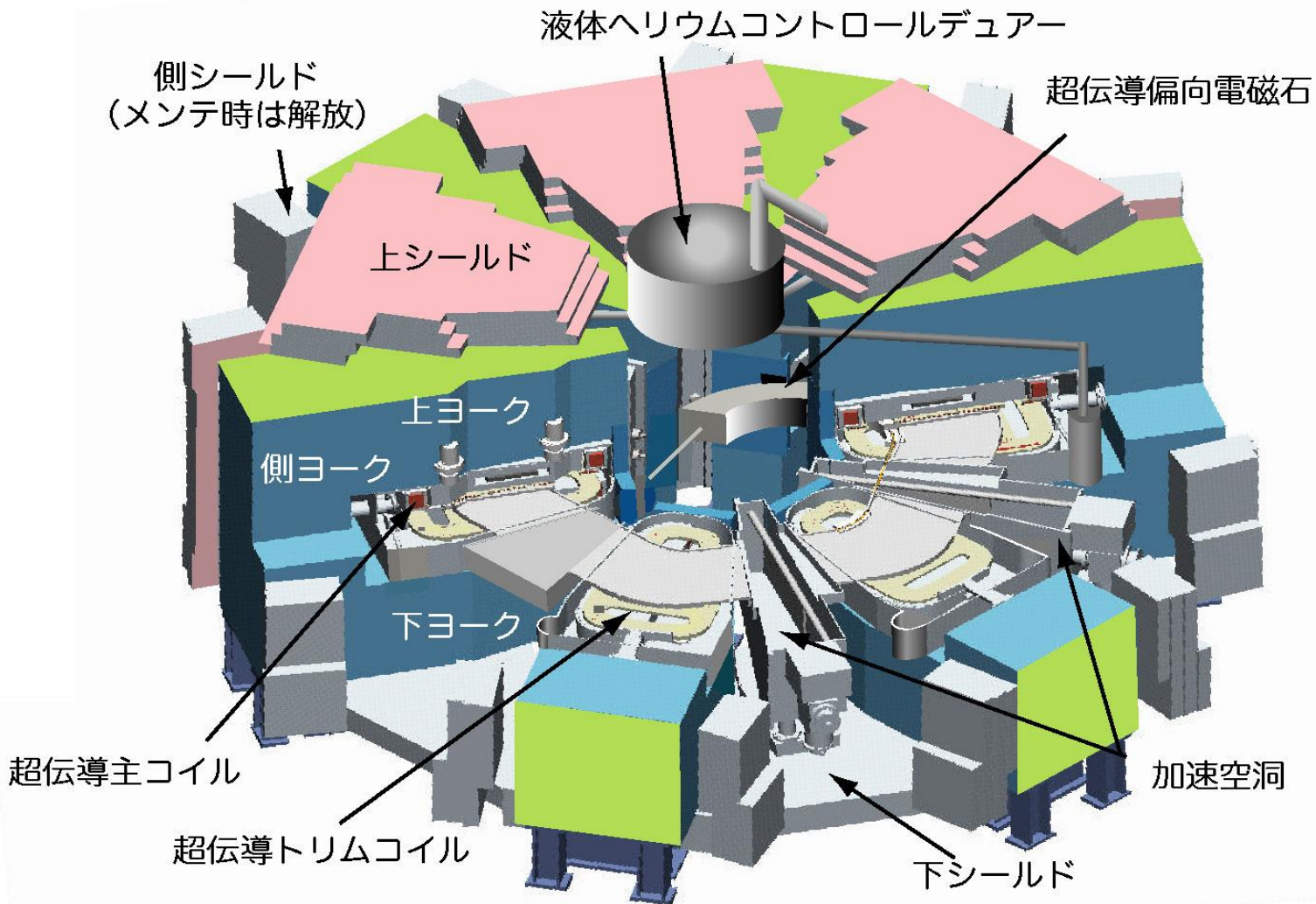




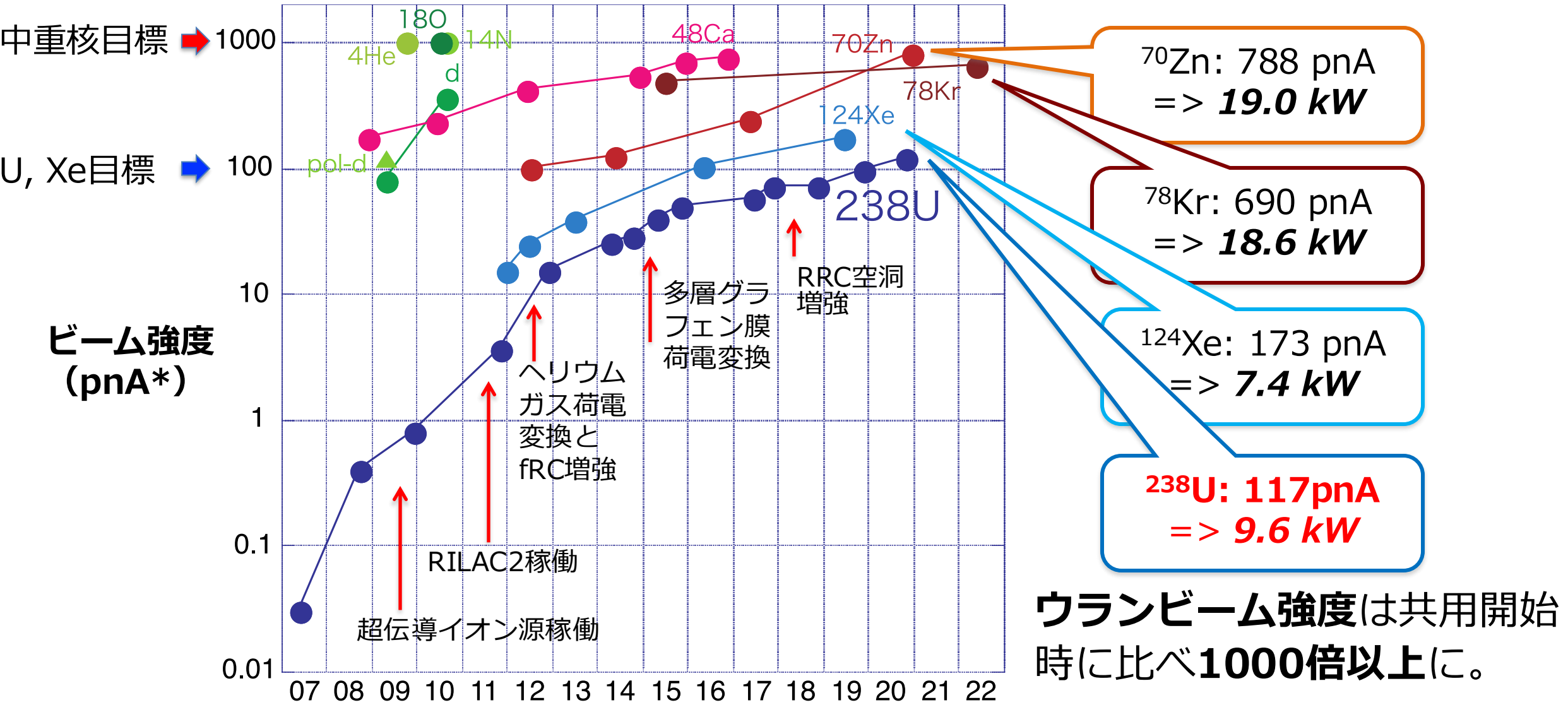
世界初の超伝導リングサイクロトロン
最大磁場: 3.8 T、総加速電圧: 640 MV
総重量: 8,300 トン

H. Okuno et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 17 (2007) 1063

超伝導電磁石により、高速ウランビームの加速をコンパクトなスペースで実現。



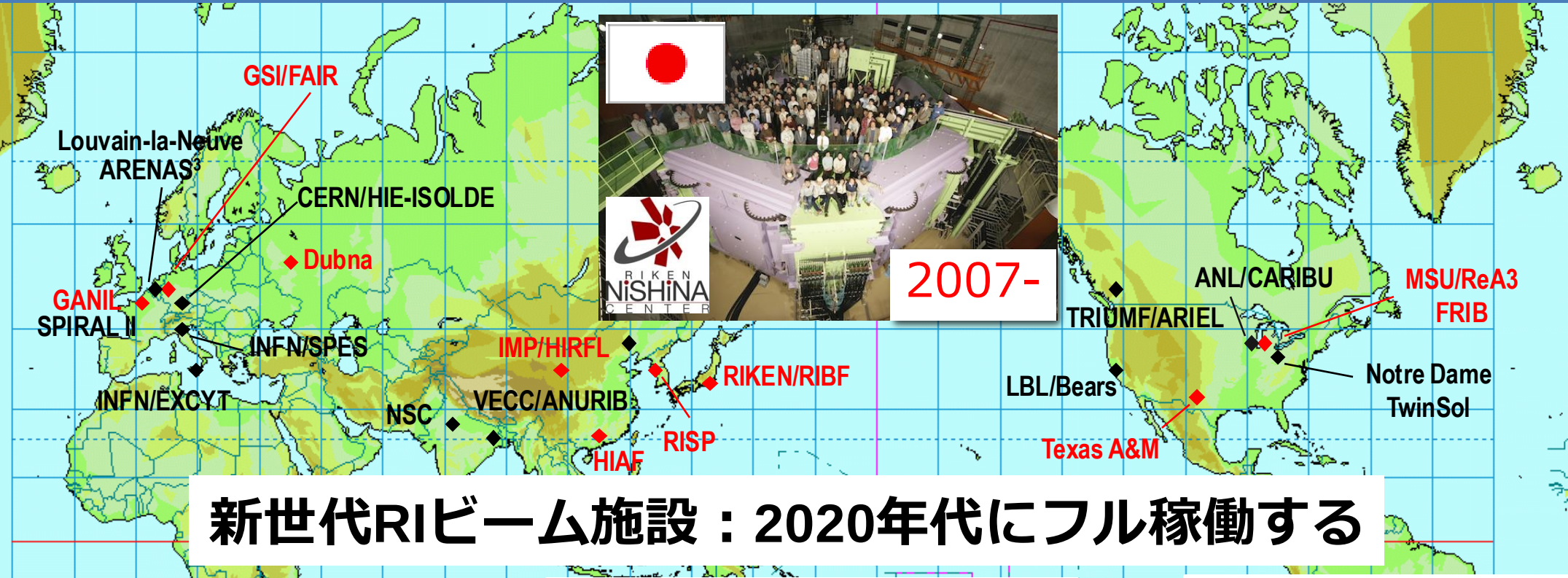
RIBF加速器(SRC)から出力されるビーム強度



*パーティクルナノアンペア。
1 pnA = 毎秒60億個の原子核

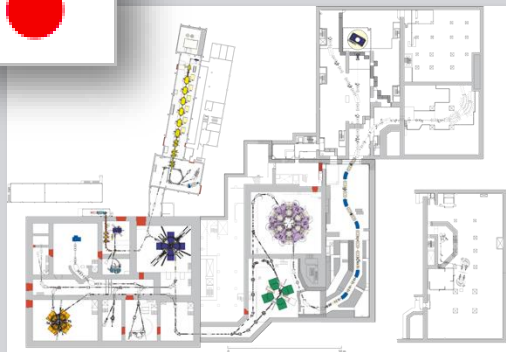
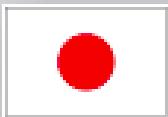
3: ビームの大強度化に向けて

世界のRIビーム加速器施設



新世代RIビーム施設：2020年代にフル稼働する





RIBF

2007-

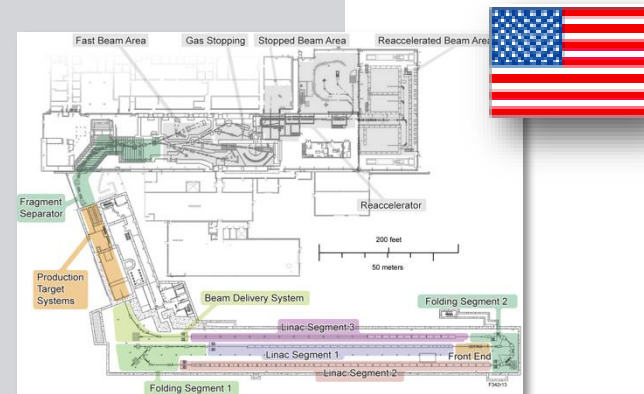
100 m

SIS 100/200

FAIR

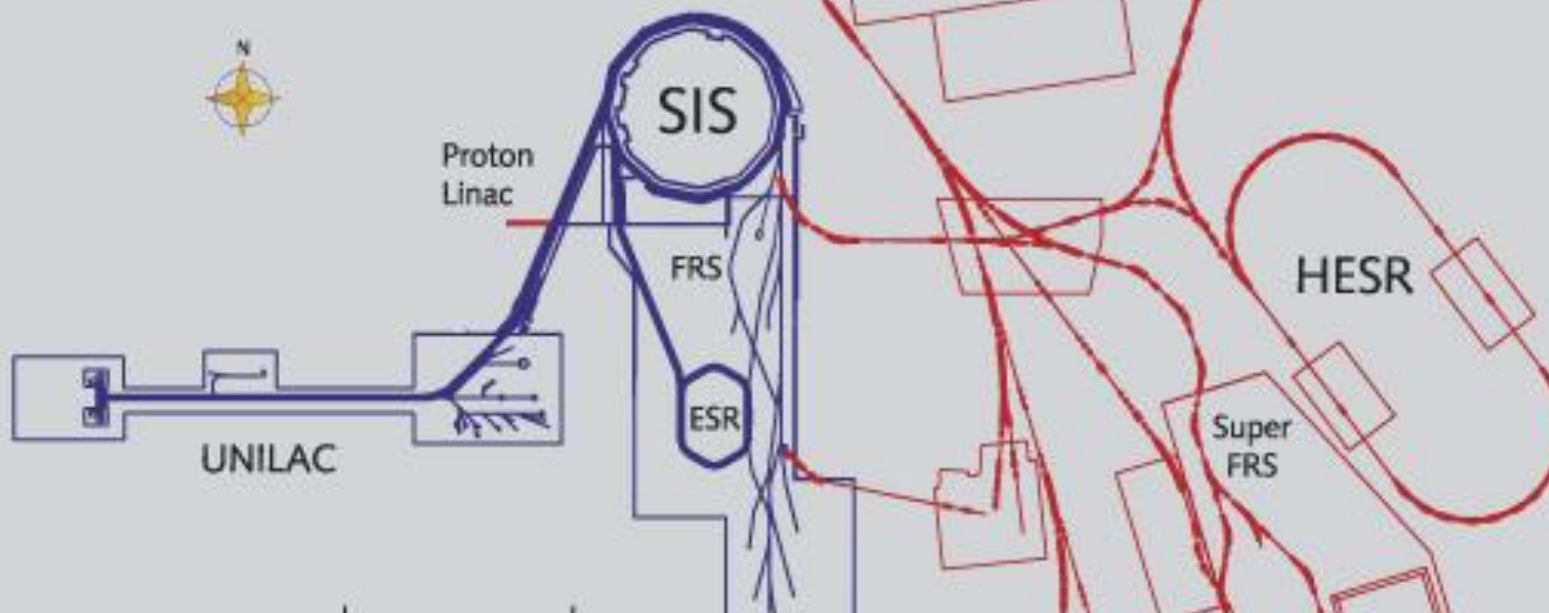


2028-

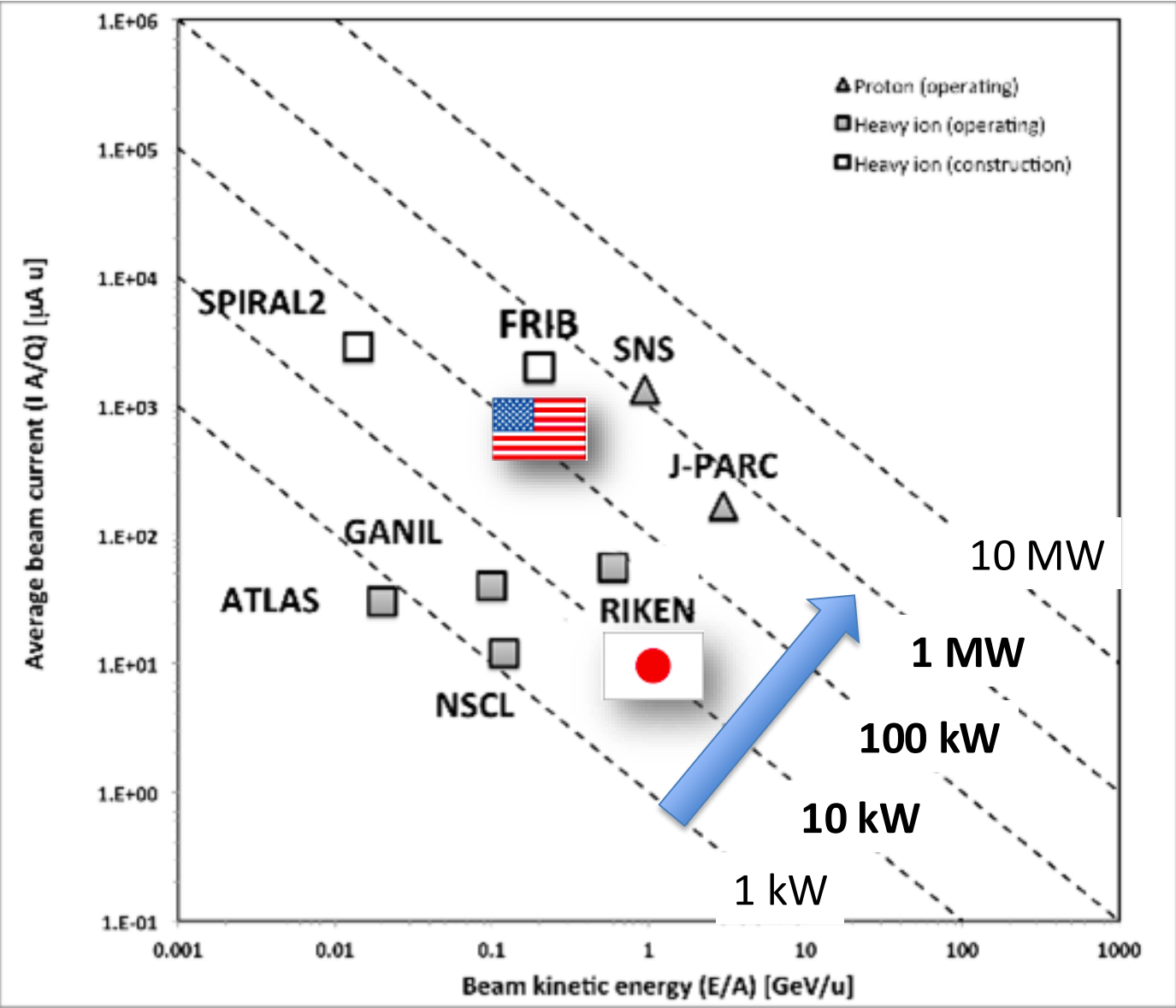


FRIB

2022-



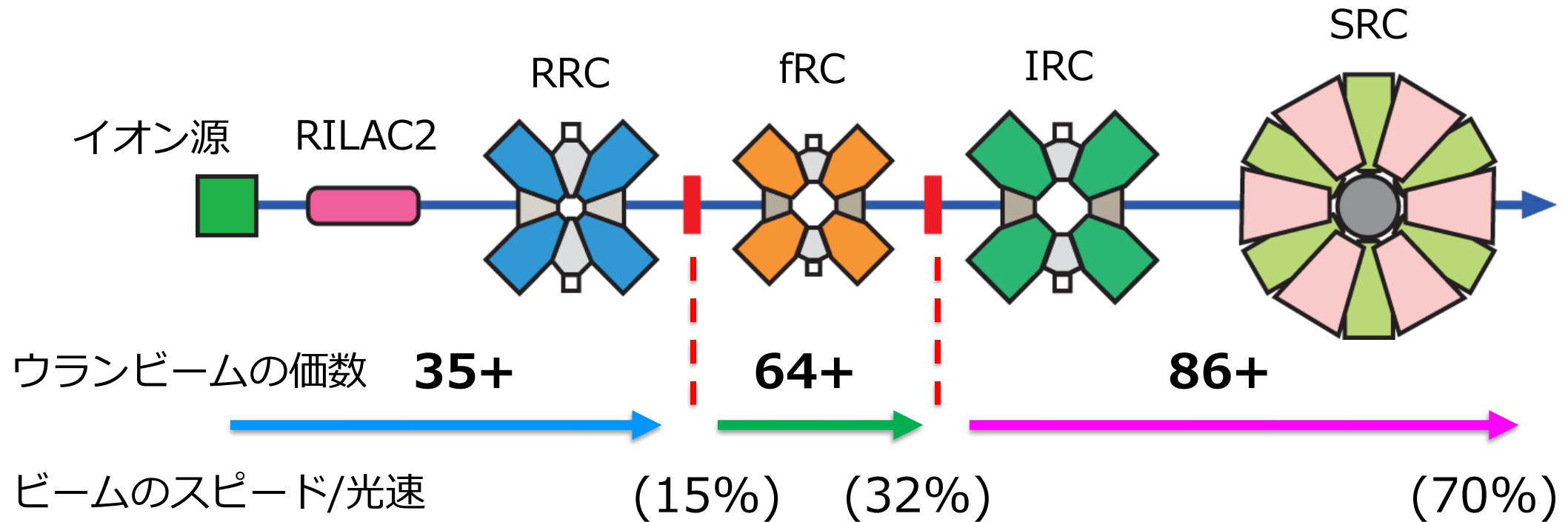
主な(重)イオン加速器のビームパワー



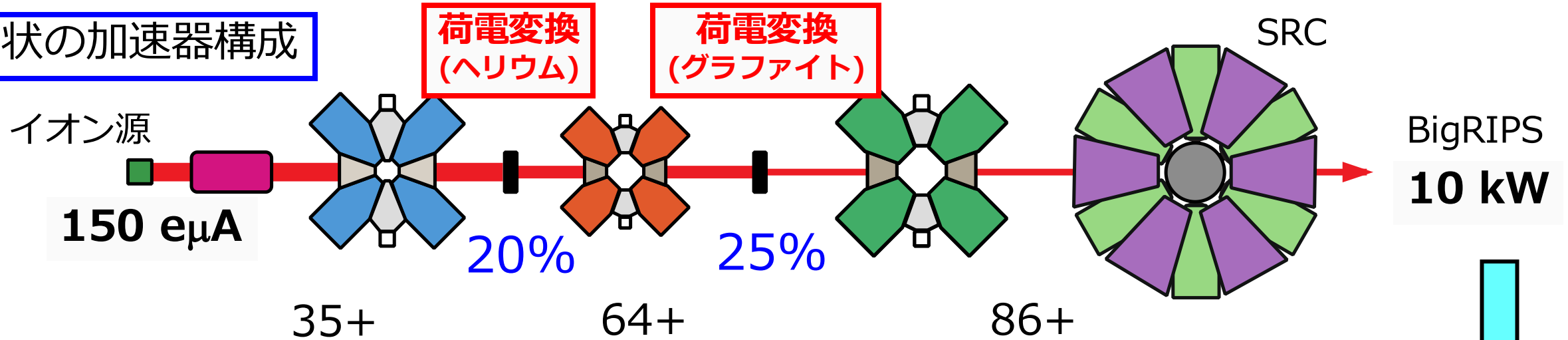
100 kW以上のビームパワー
を目指して開発が行われて
いる。

重イオンビームは価数が高い方が加速し易い。→スピードを上げ易い&曲げ易い。

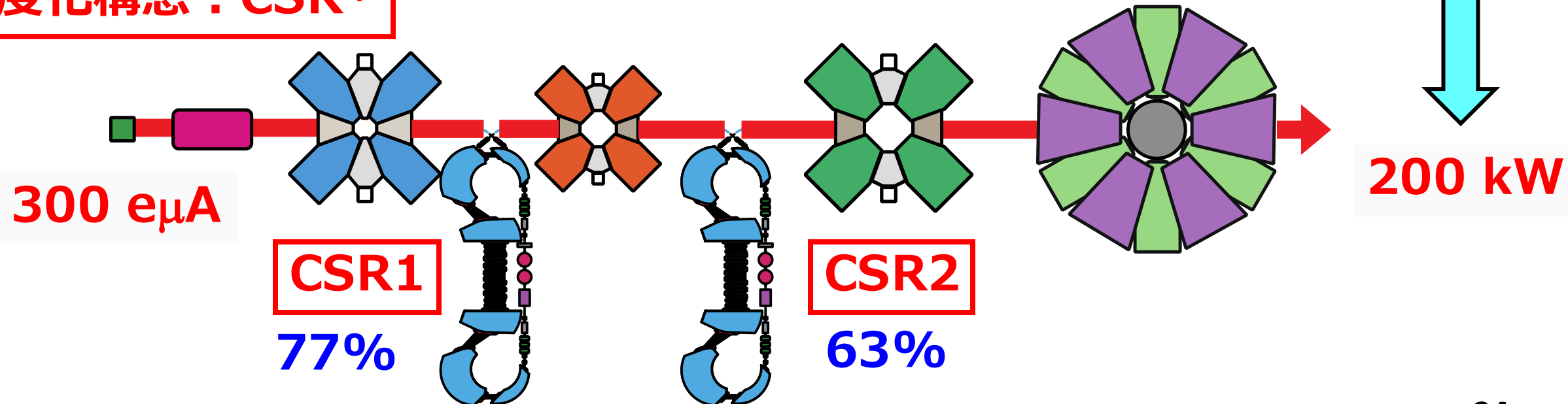
多価イオン源 と 荷電変換*による多段階加速



現状の加速器構成



高度化構想 : CSR*



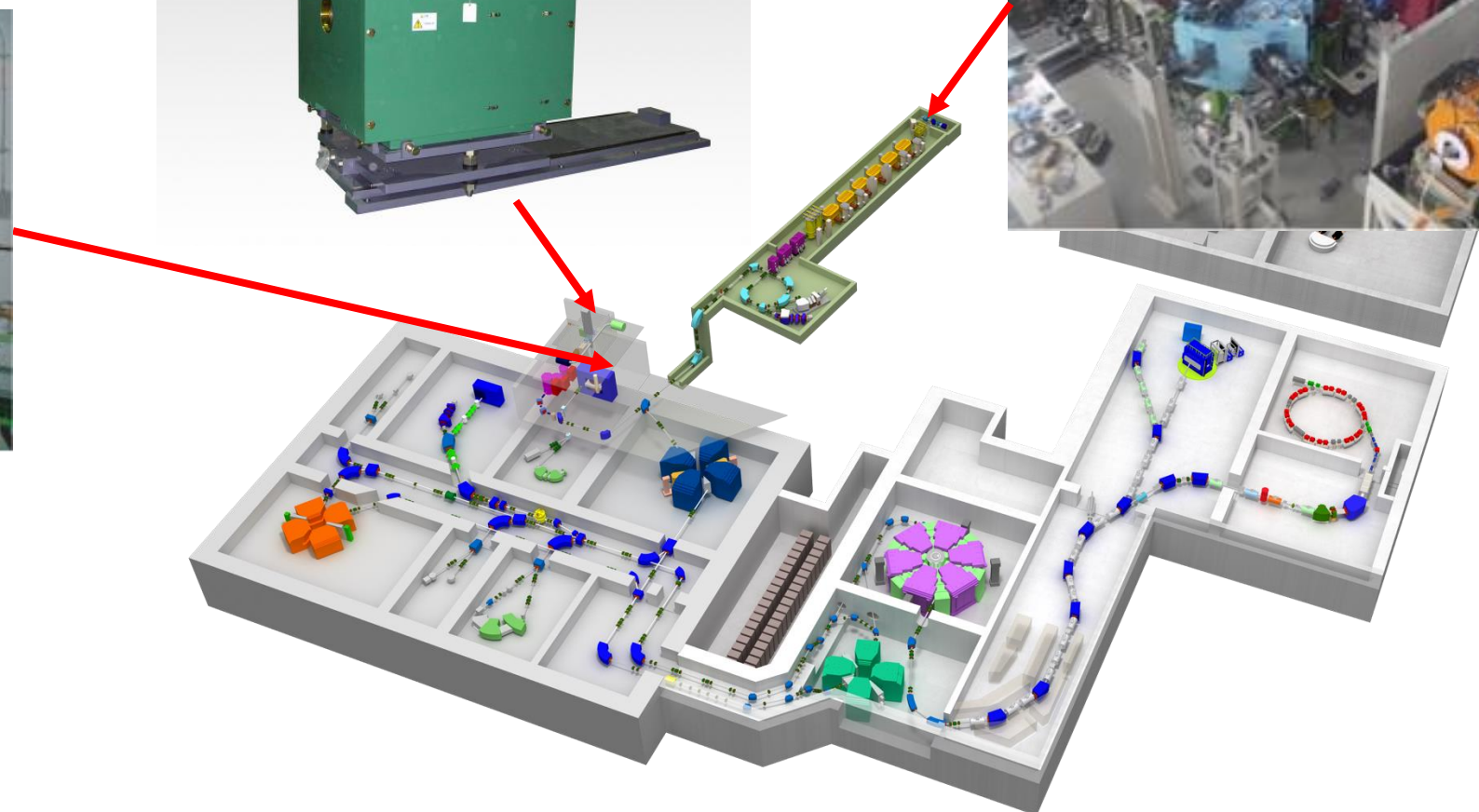
常伝導ECRイオン源(1996-)
比較的軽いイオン(α , O, Ar)



超伝導ECRイオン源(2009-)
重いイオン(**U**, Xe, Kr, Zn)



超伝導ECRイオン源(2020-)
主に金属イオン



ECRイオン源*

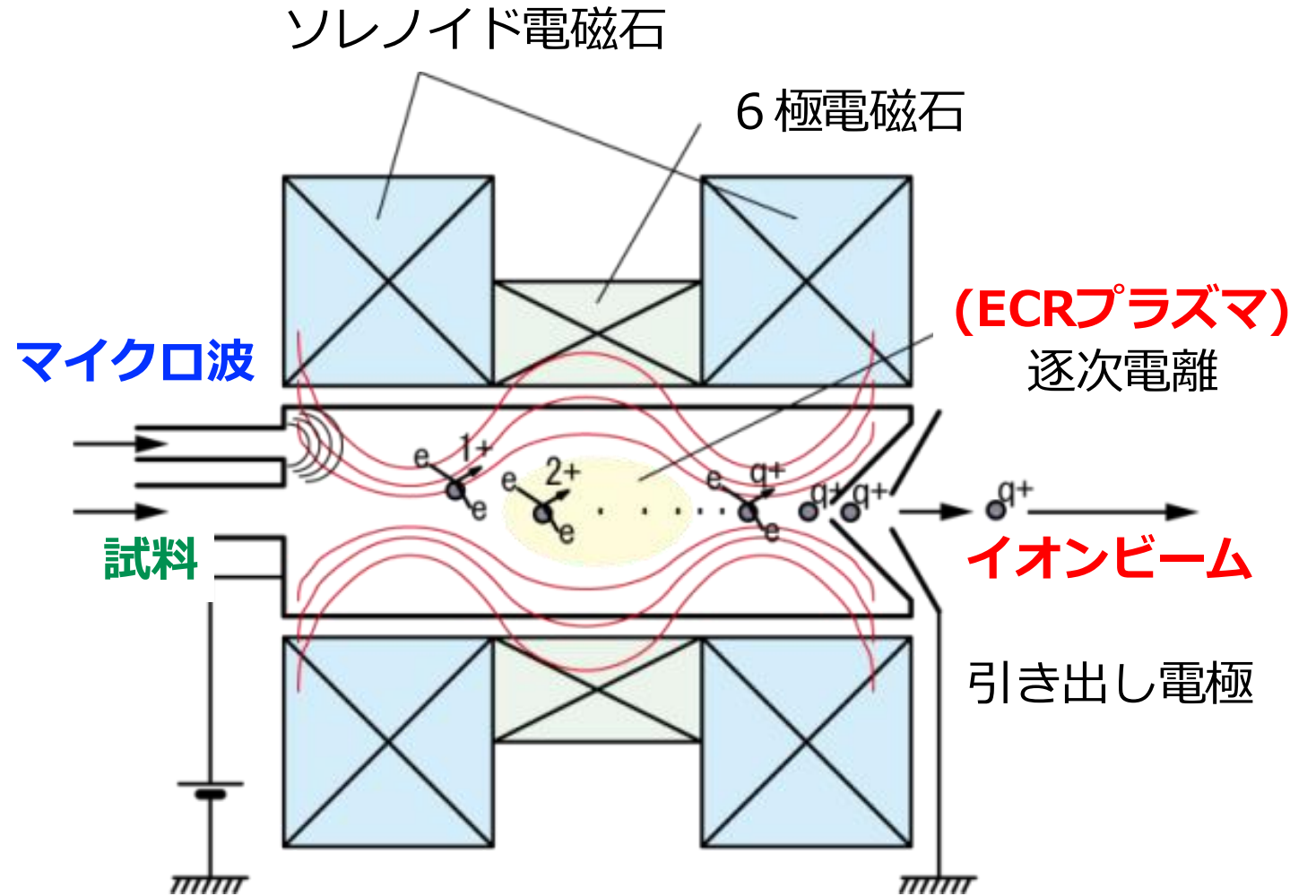


多価イオンの生成に適している。

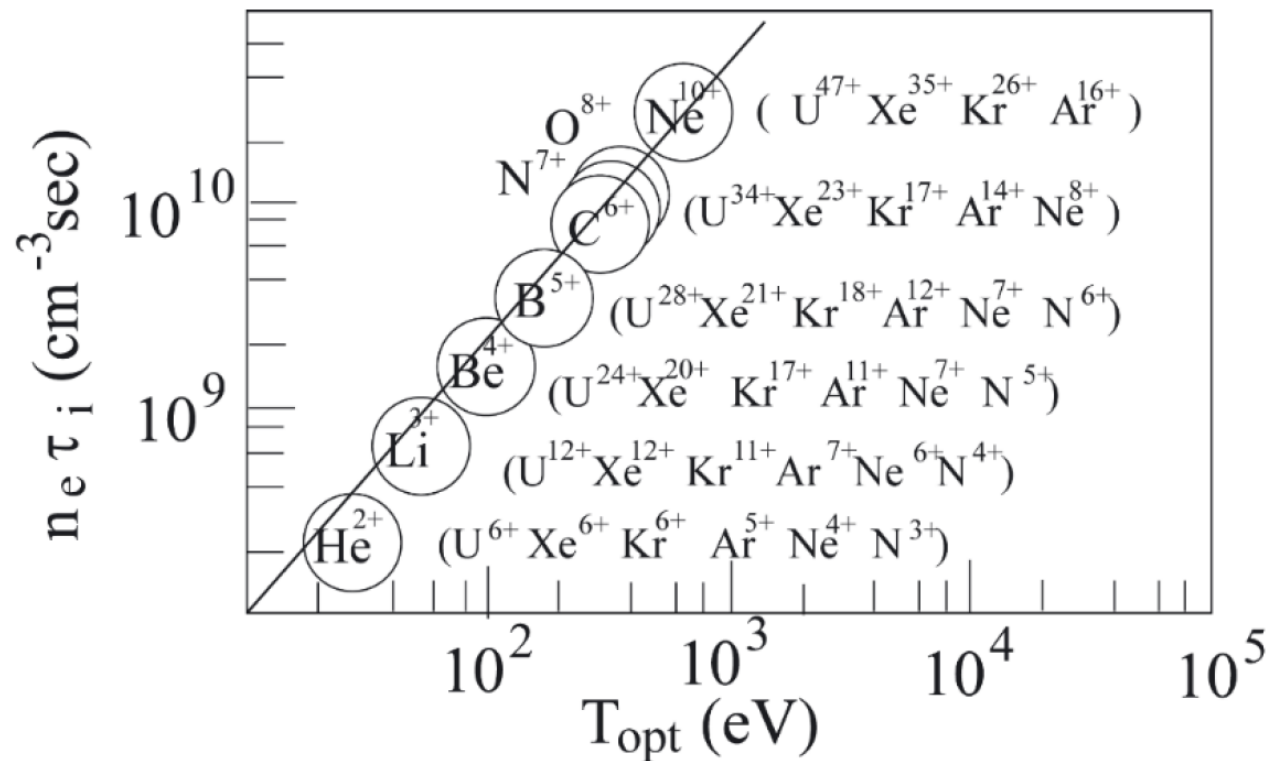
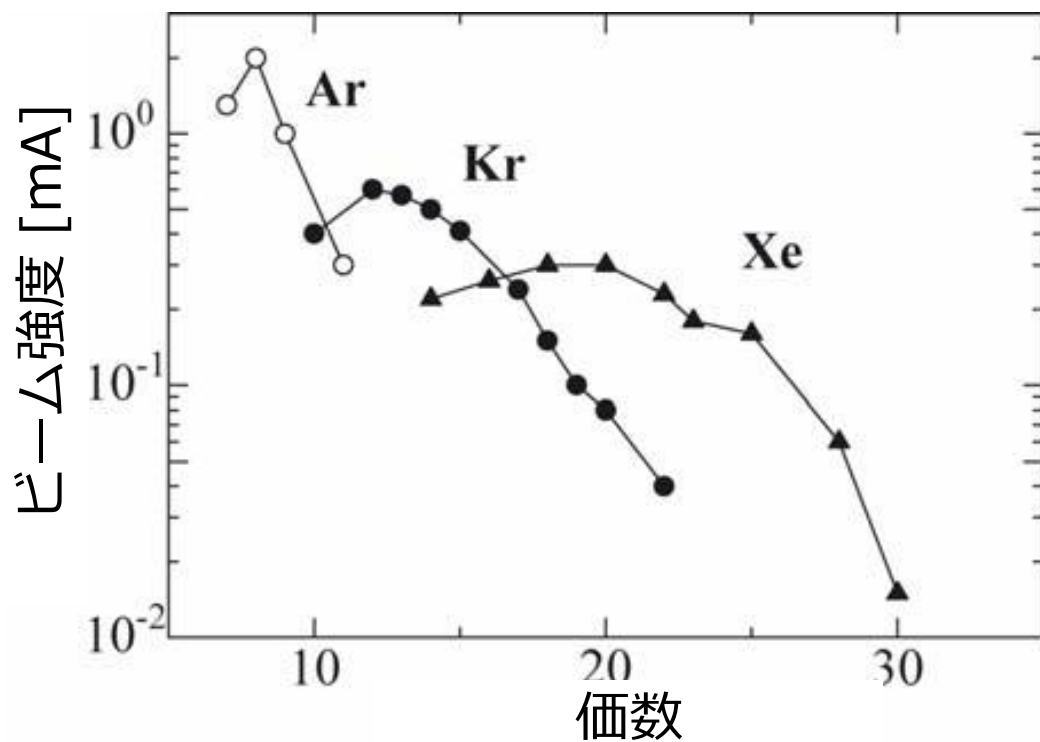
ECR共鳴条件

$$f [\text{GHz}] = 28 B [\text{T}]$$

ECRイオン源の原理



K. S. Golovanivsky, *Instrum. Exp. Tech.* 28, 989 (1986).



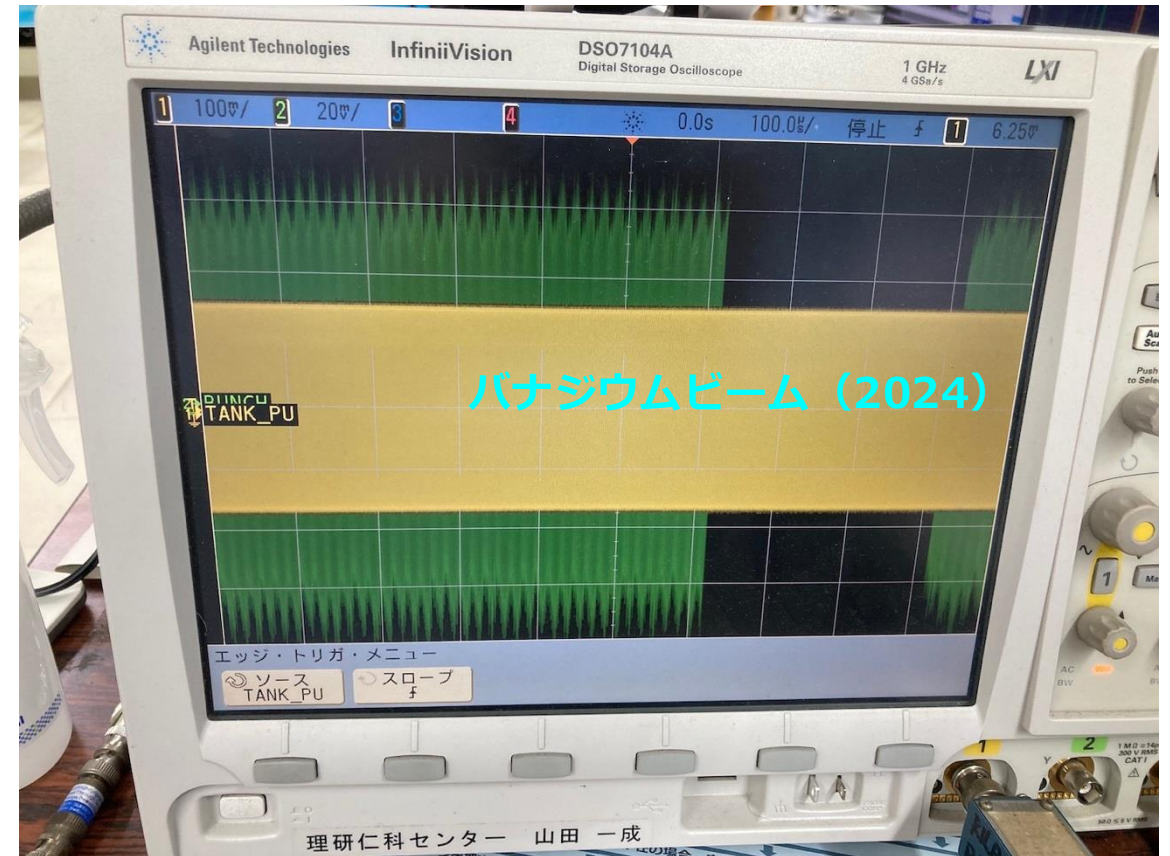
T_e : 電子温度

n_e : 電子密度

τ_i : イオン閉じ込め時間

如何に強度を上げるか？

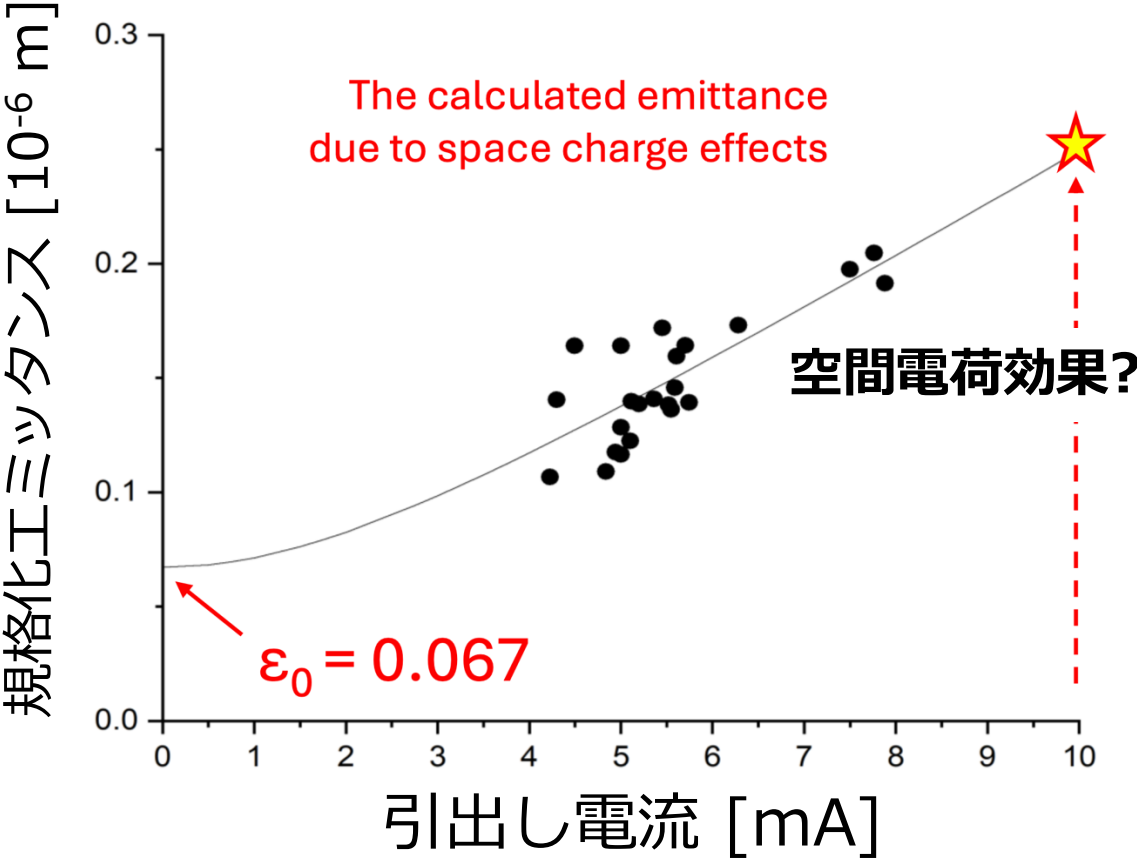
課題 2 : ビームの安定度



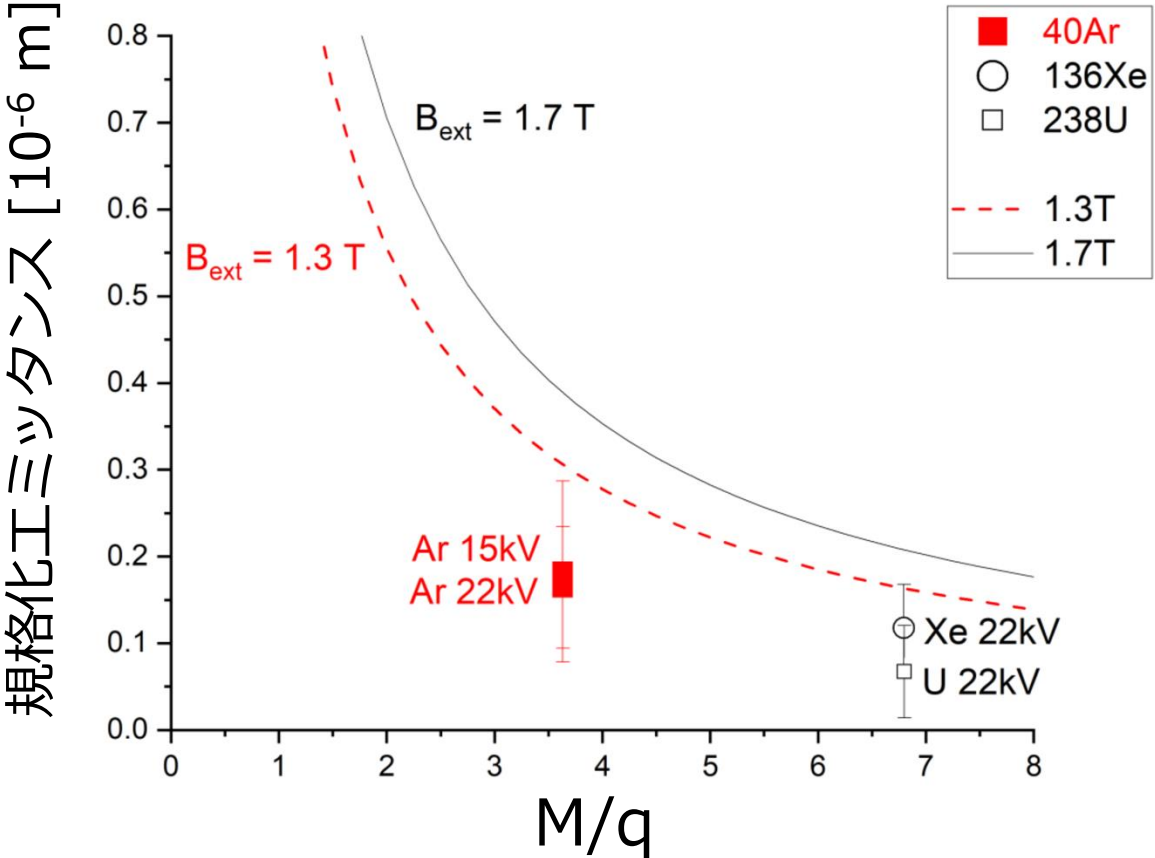
数十kHzの強度変調が見られる。

如何に安定化するか？

U³⁵⁺ビームのエミッタンス

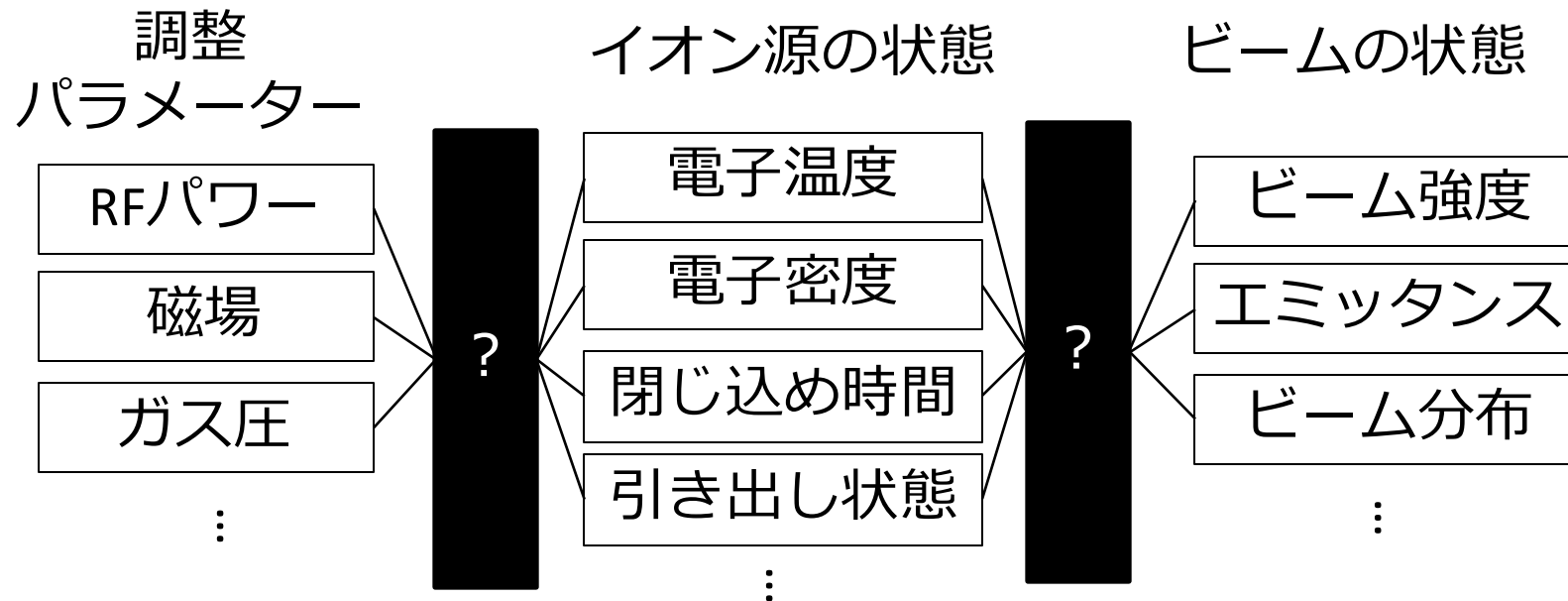


エミッタンスの系統性



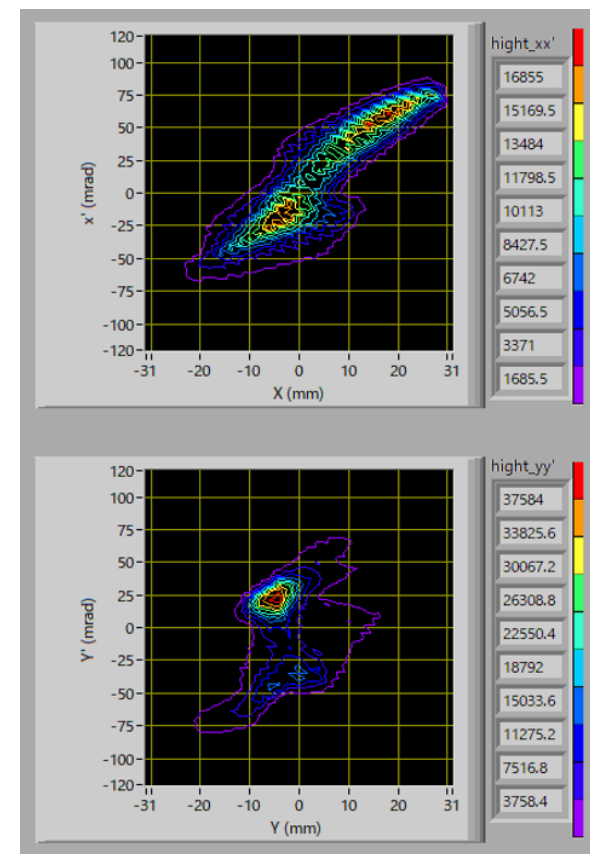
如何に輝度を上げるか？

ECRイオン源開発の現状



- ・機械学習による推定
- ・プラズマ計測

4次元位相空間分布の 高精度測定



Y. Morita, T. Nagatomo, ICIS2023

次世代ECRイオン源に向けて



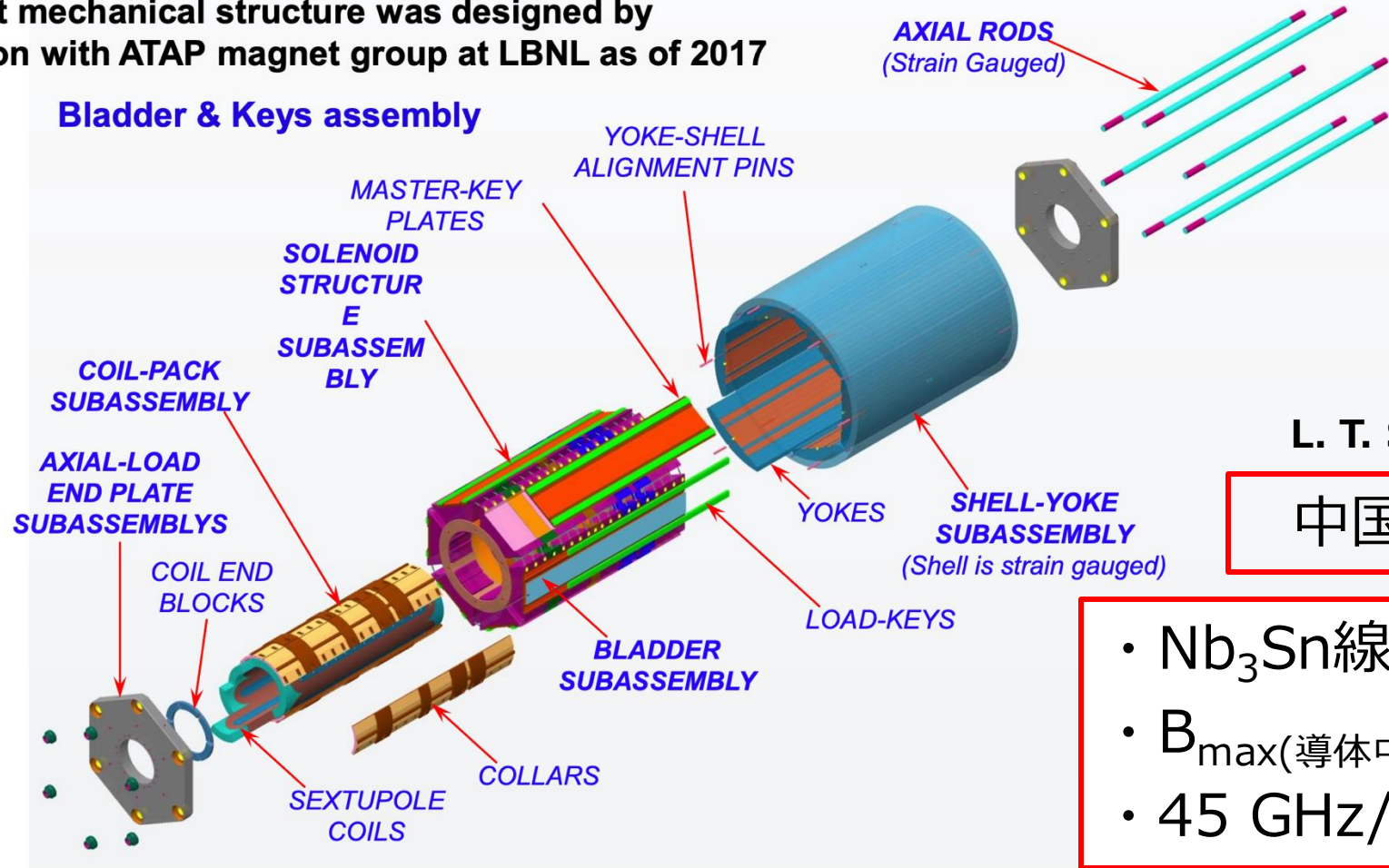
Status of FECR development

The magnet mechanical structure was designed by collaboration with ATAP magnet group at LBNL as of 2017

「スケーリング則」

$$I^q \propto \omega^2 M^{-1} \tau^{-1}$$

R. Geller, "ECRIS and ECR Plasmas", p.395



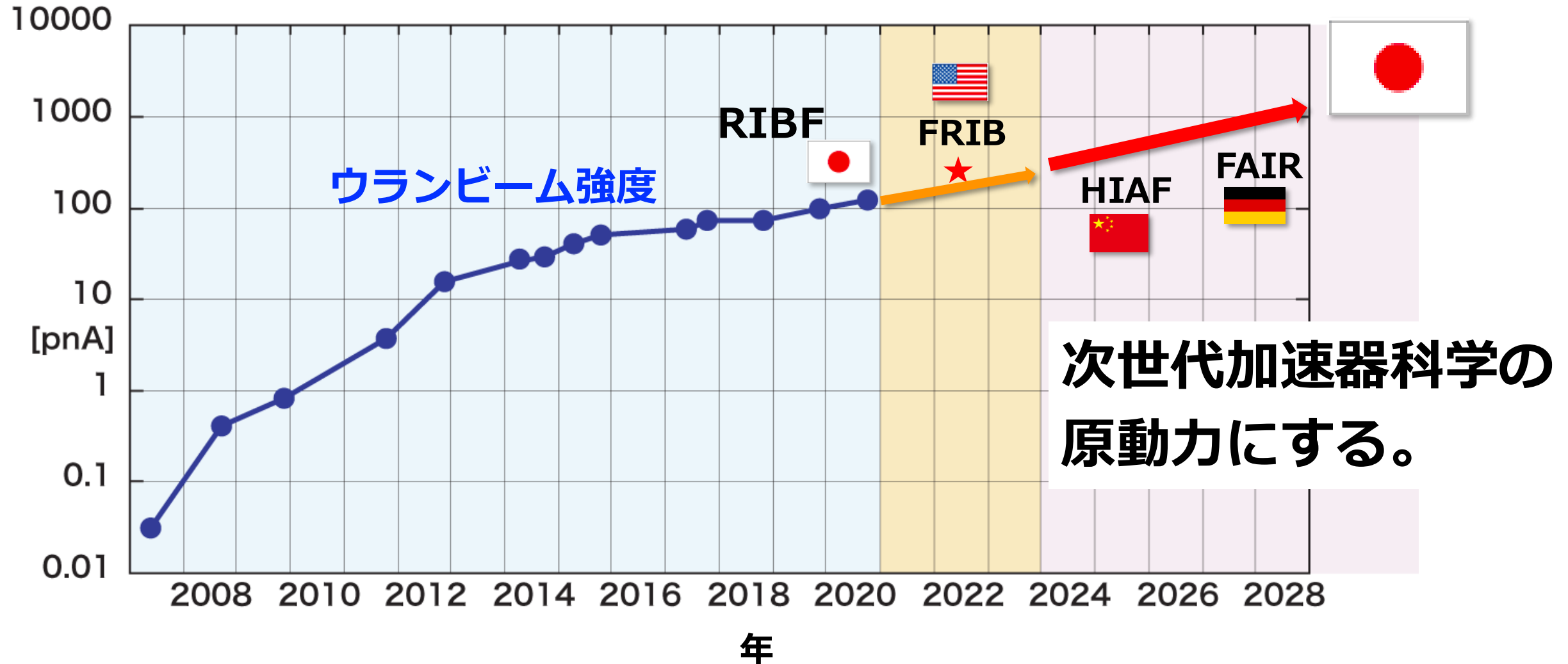
L. T. Sun, ICIS2023

中国IMPの例

- Nb₃Sn線材
- B_{max}(導体中) = 11.8 T
- 45 GHz/20 kW

This Nb₃Sn magnet is being built by a Chinese company without collaboration with ATAP/LBNL. DOE did not approve such collaboration.

RIビームファクトリー高度化



RIBF Facility Upgrade Project

RIBF upgrade project

July 2023

RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science (RNC)

理化学研究所
仁科加速器科学研究センター

https://www.nishina.riken.jp/researcher/RIBFuprade/index_e.html

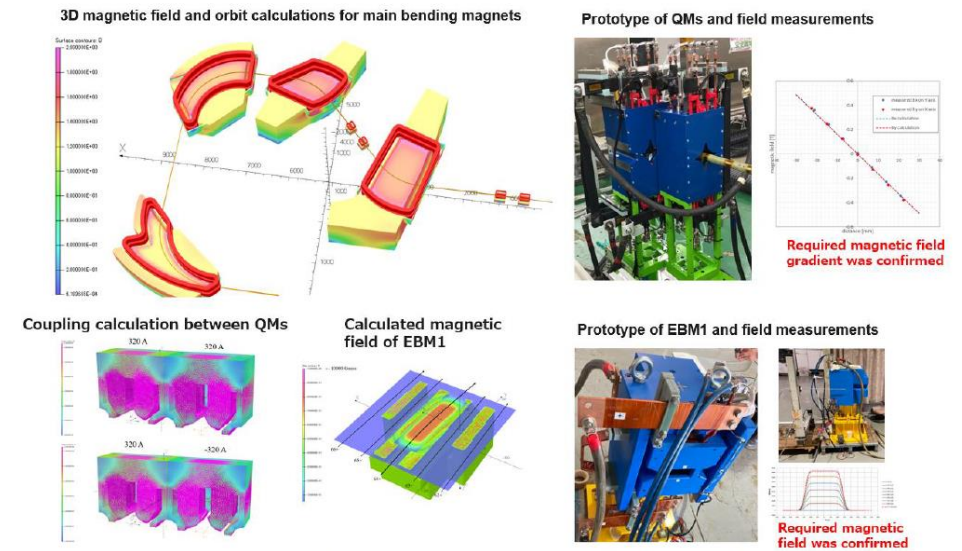


Figure 3.2.7. Magnet design and development works for CSR1.

Other necessary tasks have been almost completed, including calculation of interactions in the stripper and 2-stage stripper design, RF cavities design and optimization, beam position monitor (BPM) design calculations [3.2.12], design of beam transport (BT) systems before and after CSR1, and their beam-matching methods (Fig. 3.2.8).

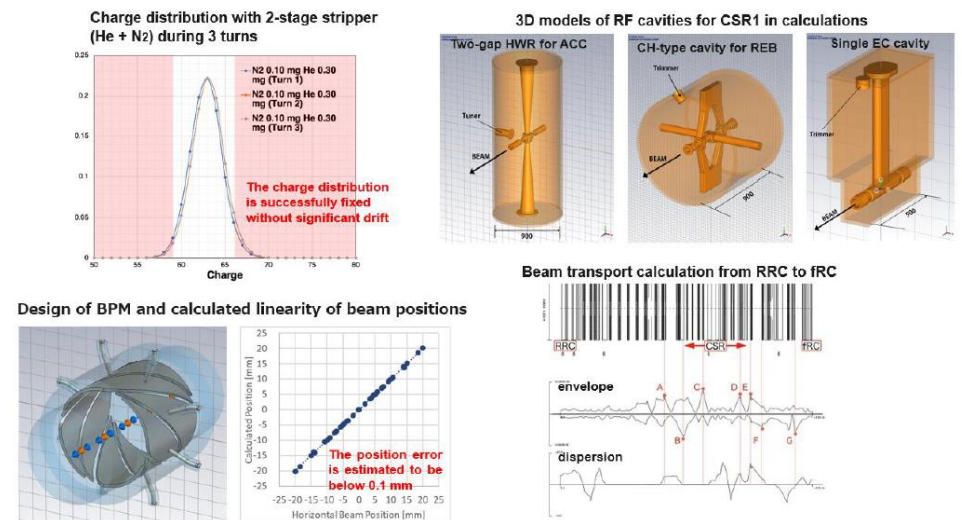


Figure 3.2.8. Component design works for CSR1.

仁科センターホームページ	https://www.nishina.riken.jp
仁科センター紹介パンフレット	https://www.nishina.riken.jp/about/brochure/nishinaBrochure.pdf
核図表	https://www.nishina.riken.jp/enjoy/kakuzu/kakuzu_web_v2.pdf
VR案内	https://vr.riken.jp/ribf/
「元素の起源を探る」	https://www.youtube.com/watch?v=rskUa_qGa8s
「地下の案内」	https://www.youtube.com/watch?v=FUCqly1ZIE4
「SRC組立」	https://www.youtube.com/watch?v=42WZK-Z6Et0
「RIBF加速器の躍進と挑戦」	https://www.youtube.com/watch?v=LH1bzZSYLHs