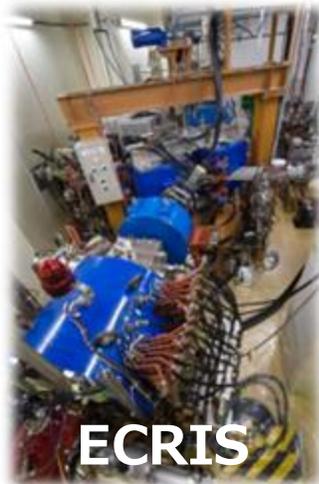
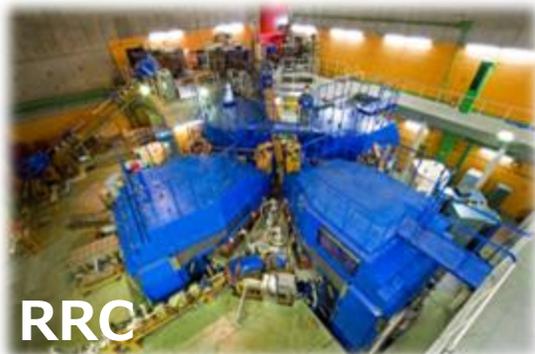


重イオン加速器 ～ 基礎・現状・課題 ～

- 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)
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	$U^{1+}, U^{2+}, U^{3+}, U^{4+}, U^{5+}, U^{6+}, \dots, U^{92+}$

価数

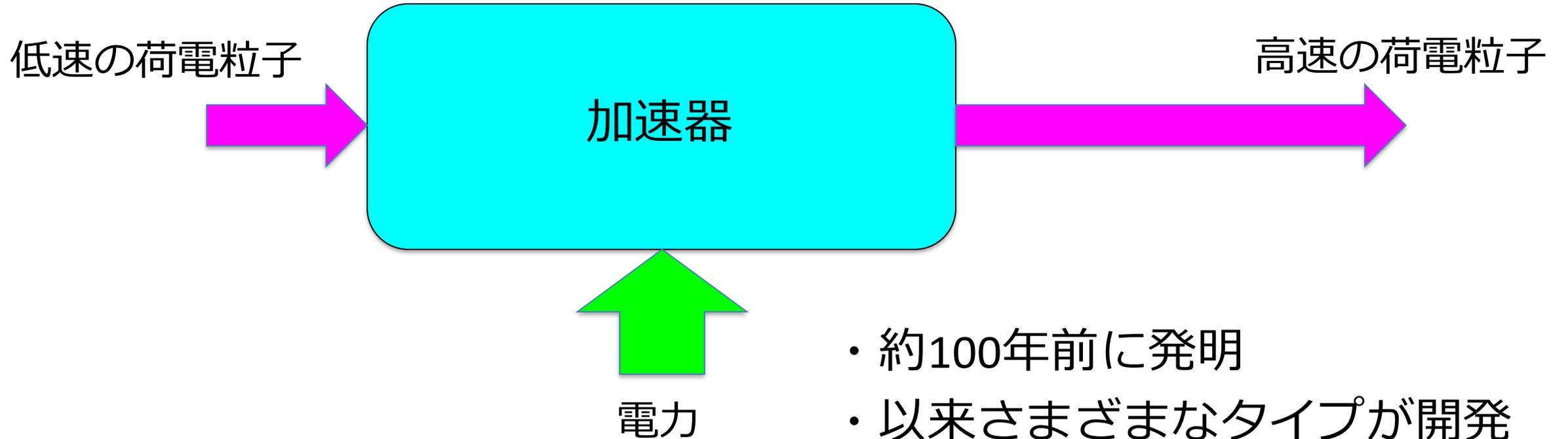
= 電子がいくつ剥がれているか

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



- ・ 約100年前に発明
- ・ 以来さまざまなタイプが開発

目的：ミクロの世界を探る（素粒子・原子核、物質の構造）

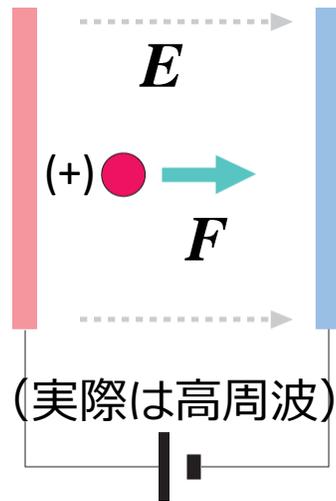
高速粒子しかできない研究開発を行う（ビーム育種・RI製造）

荷電粒子の運動方程式（ローレンツ力のもとでの運動）

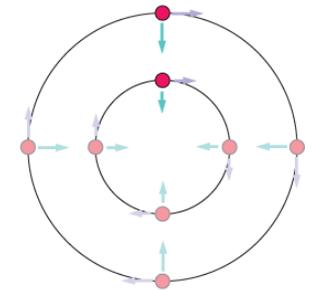
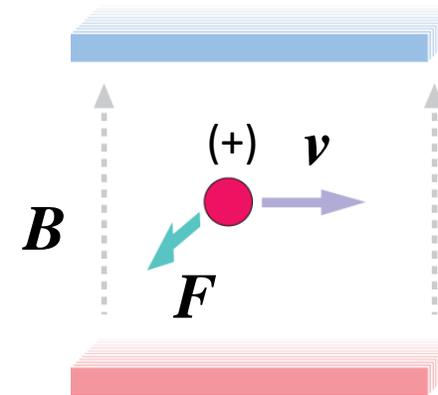
$$M \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = q \left(\vec{E} + \frac{d\vec{x}}{dt} \times \vec{B} \right)$$

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

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



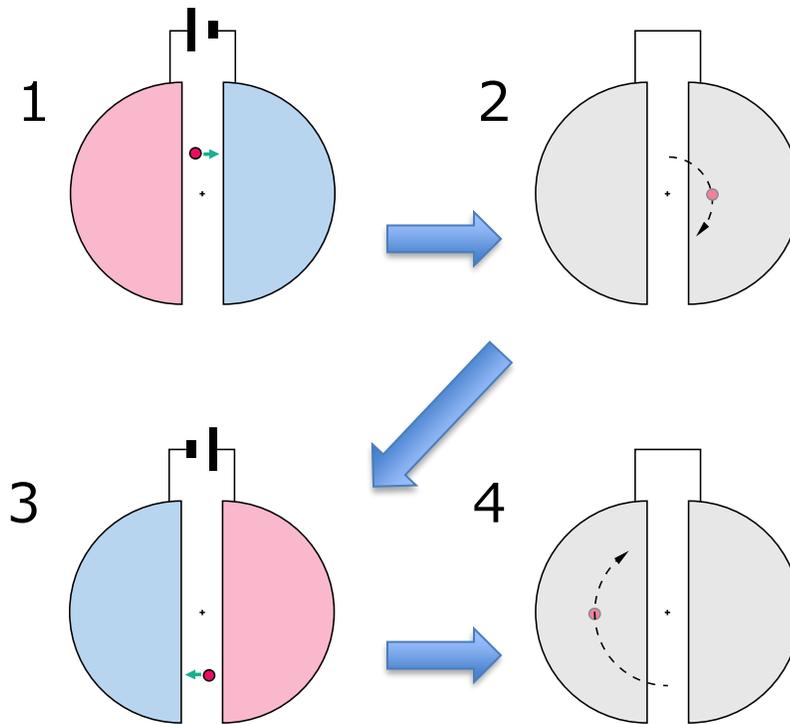
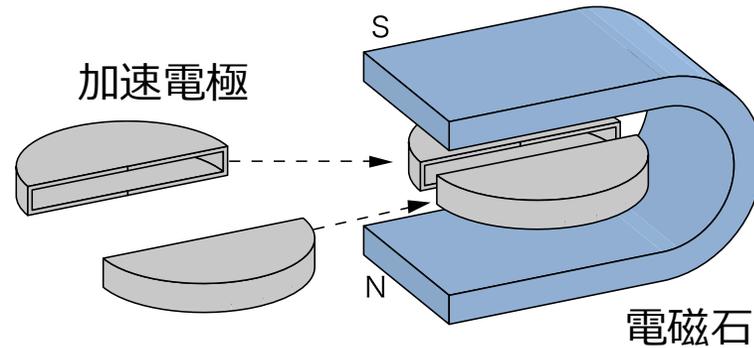
サイクロトロン の原理 (等時性 : 1929年)

$$W = qB/m$$

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。



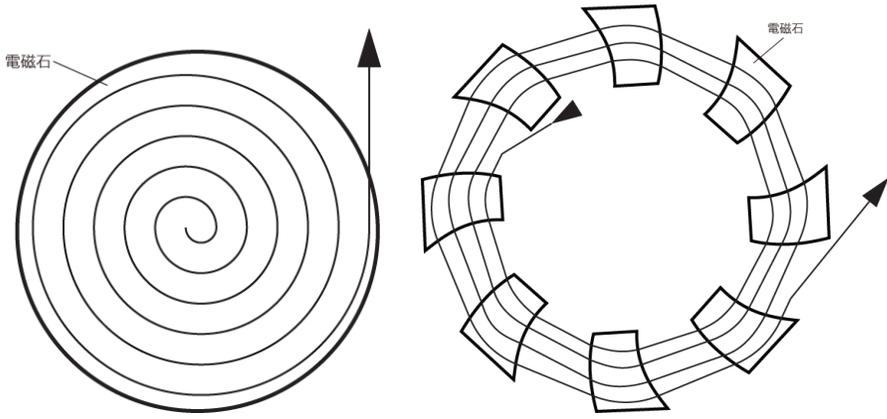
「速いイオンは遠く
を回る。」



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



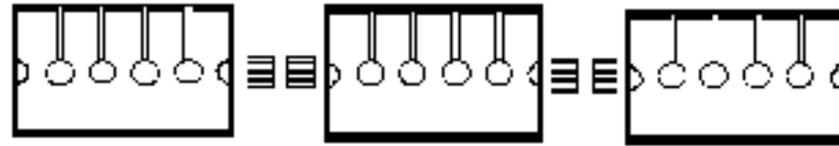
サイクロトロン (リングサイクロトロン)

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



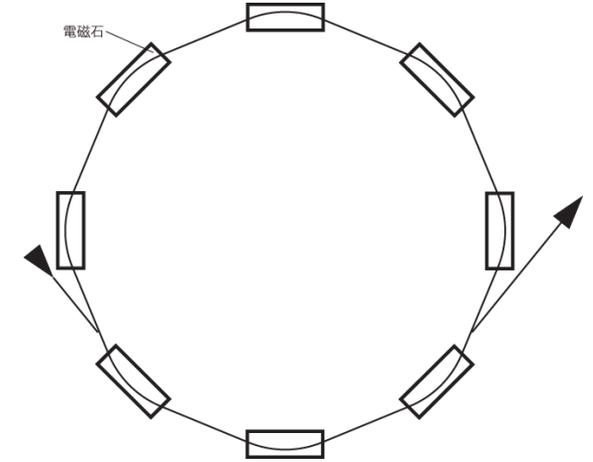
リニアック

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

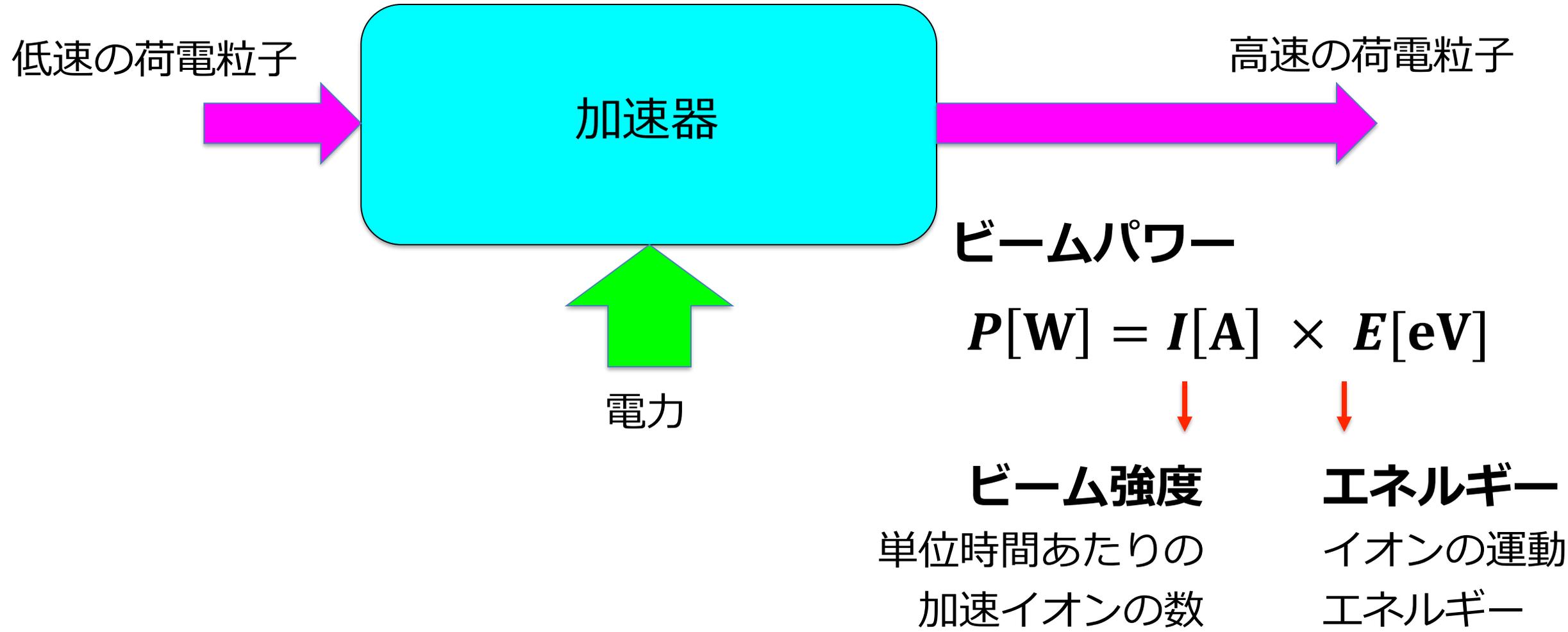
円状の軌道→パルスビーム

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

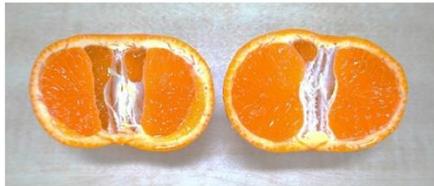
イオンビーム育種



「仁科蔵王」

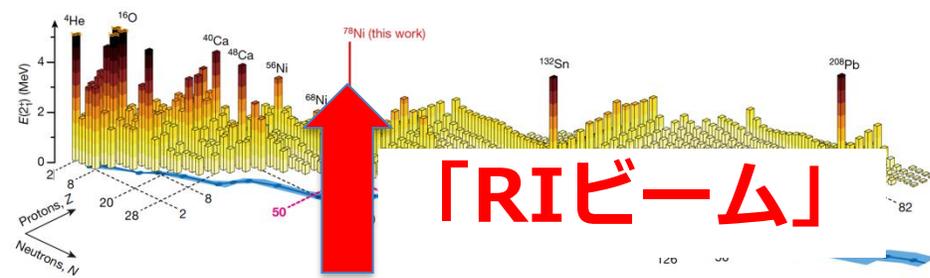


清酒酵母「仁科誉」



春先に出荷可能なみかん

原子核物理学

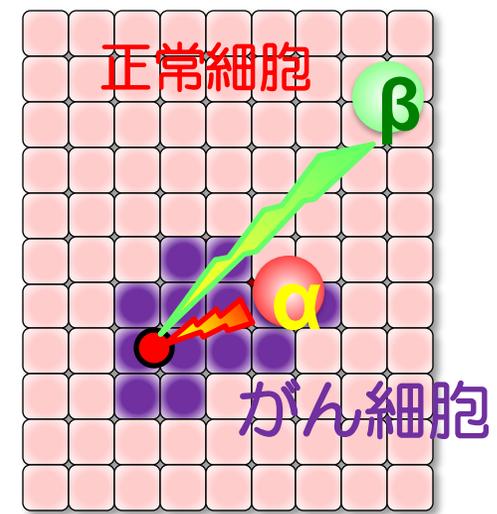


RIビーム生成分離装置

「重イオンビーム」

重イオン加速器

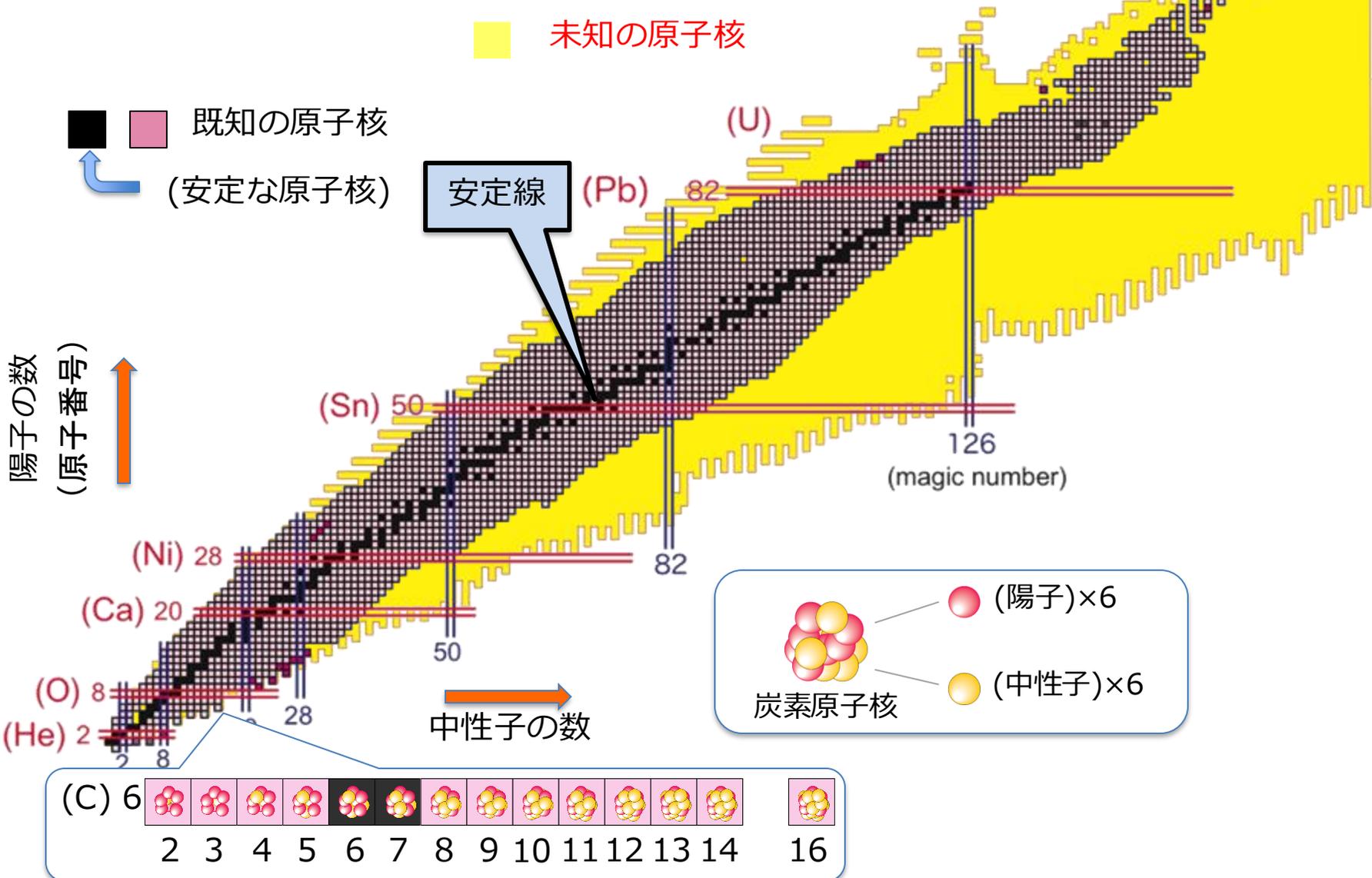
有用RI製造



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



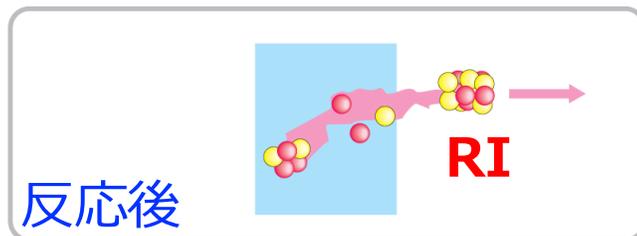
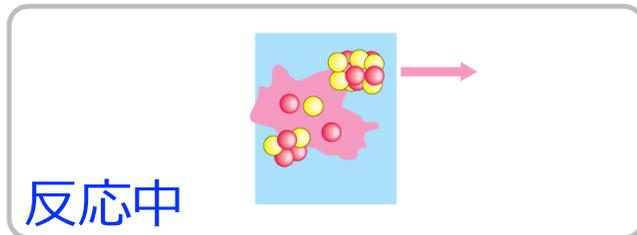
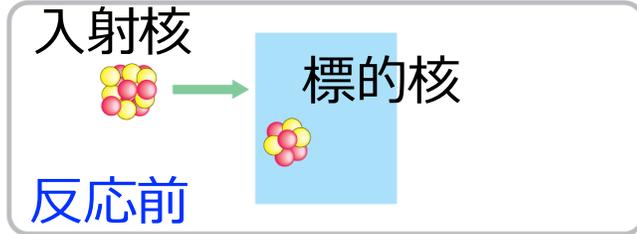
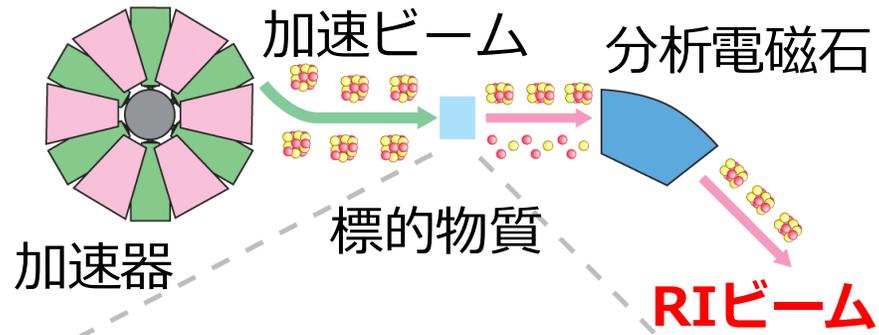
ポイント

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

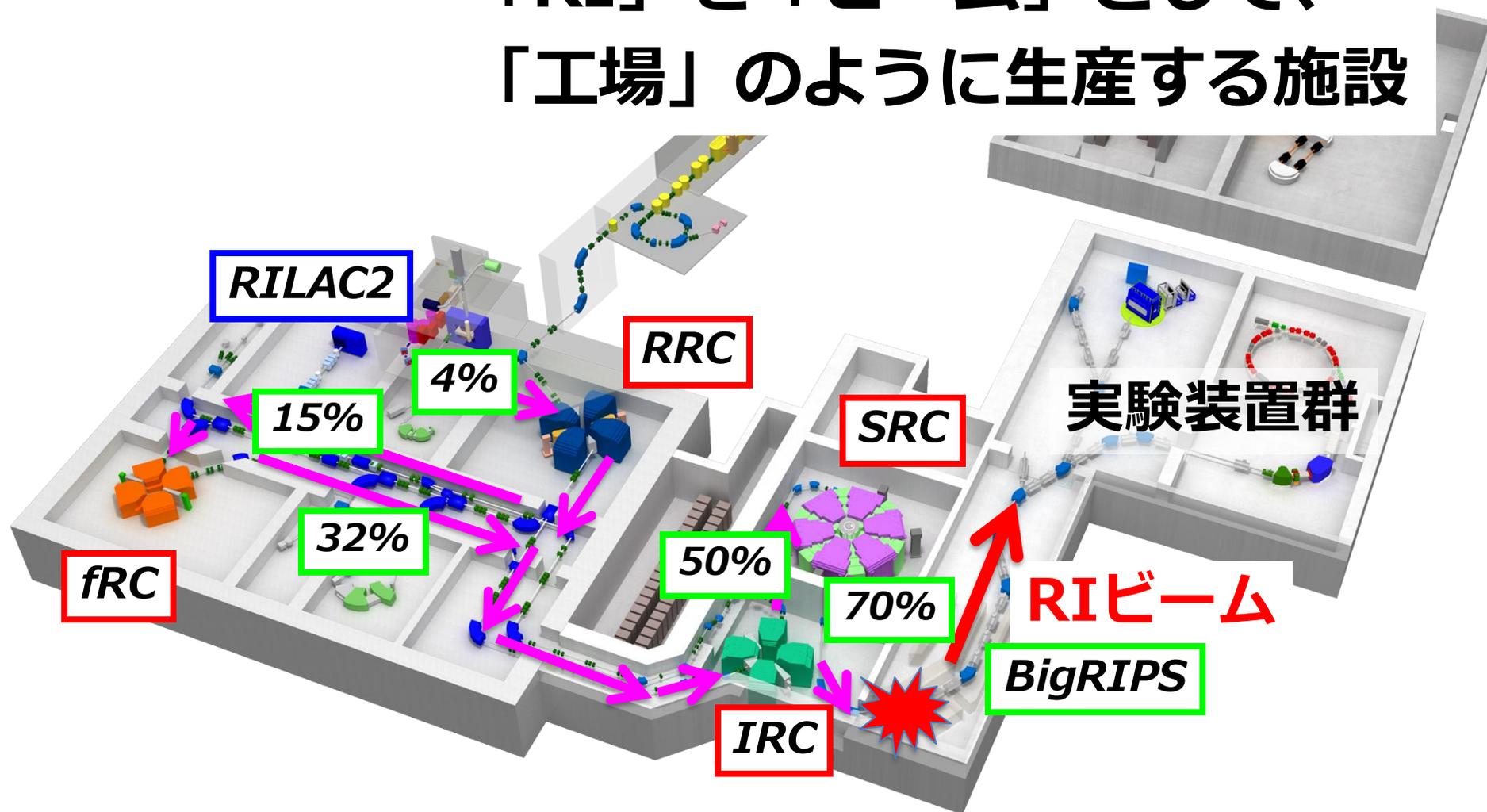


RIビーム法(1980) :

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

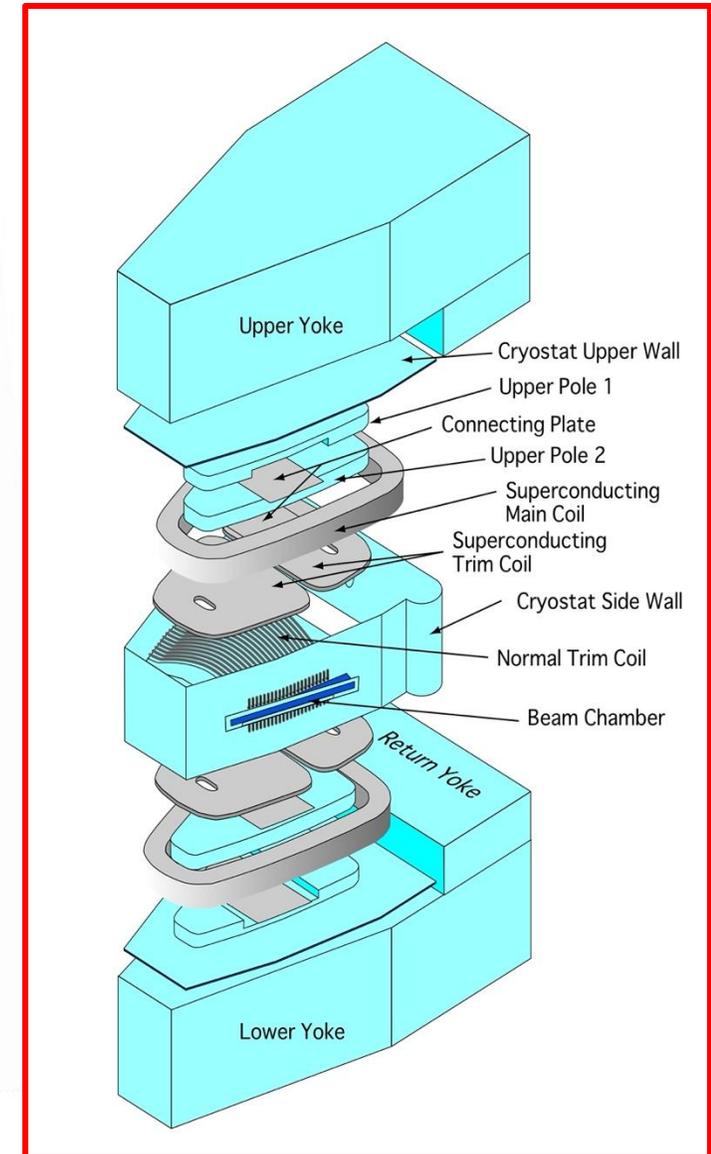
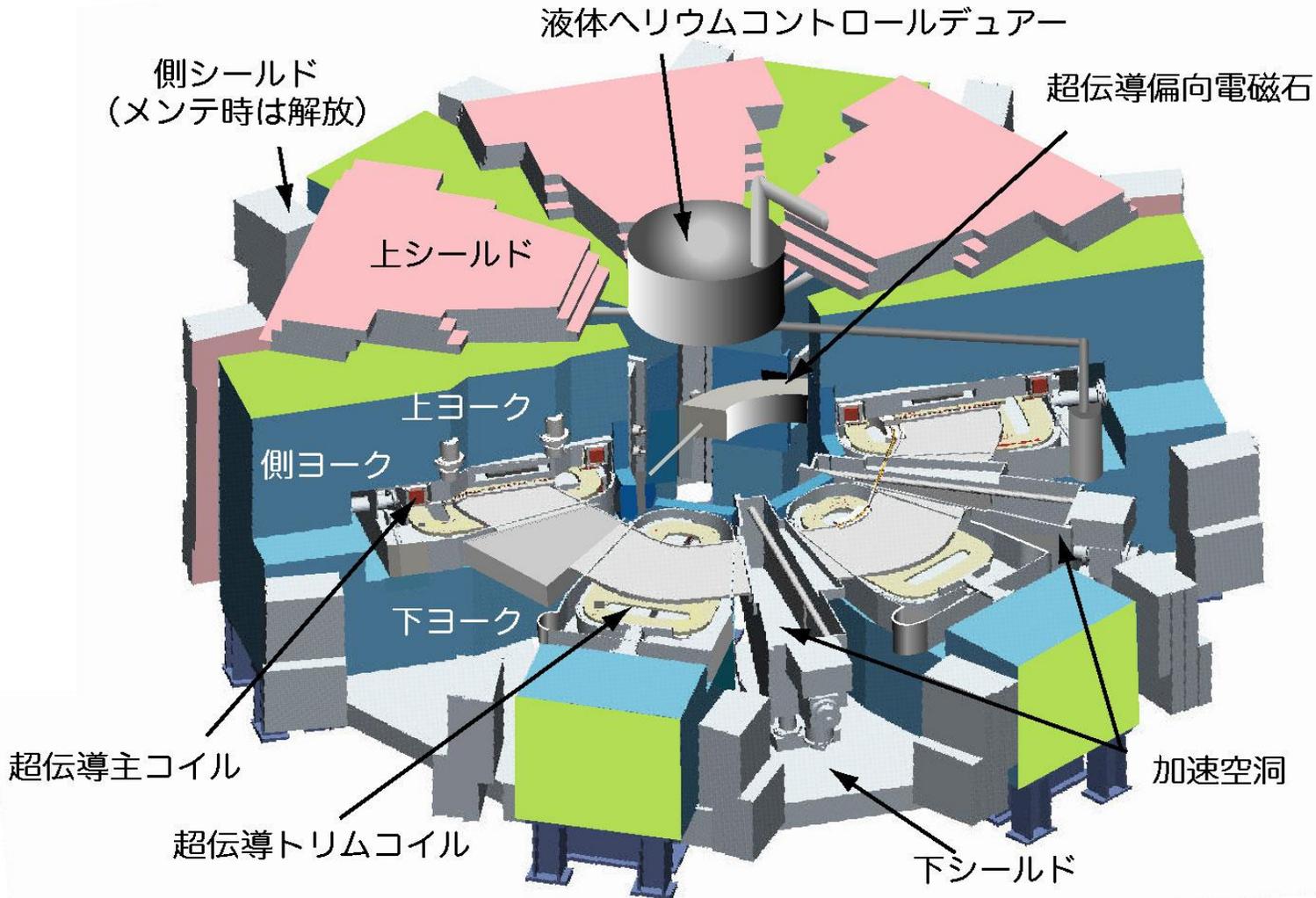




世界初の超伝導リングサイクロトロン
最大磁場: 3.8 T、総加速電圧: 640 MV
総重量: 8,300 トン

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。

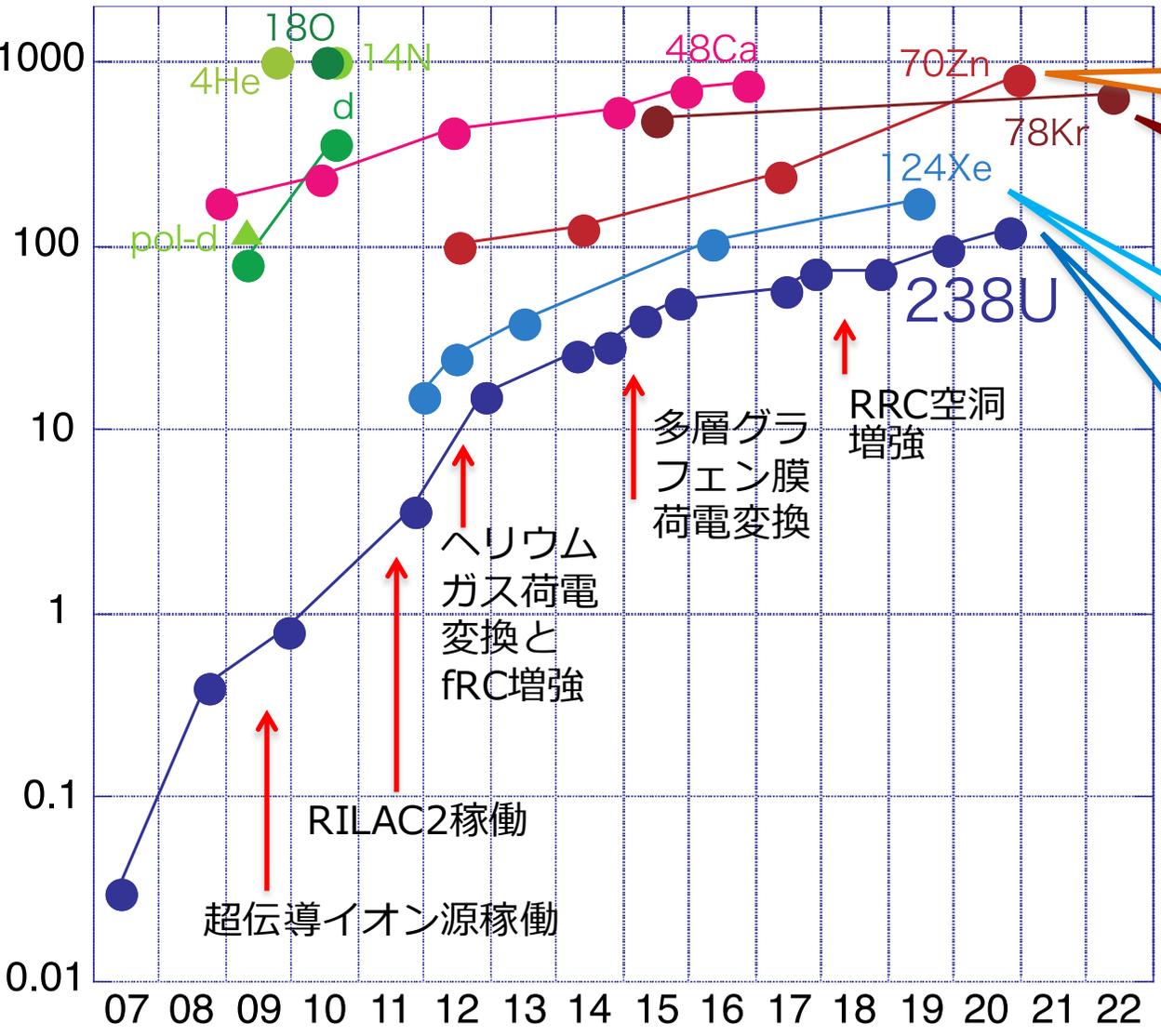


RIBF加速器(SRC)から出力されるビーム強度

中重核目標 → 1000

U, Xe目標 → 100

ビーム強度
(pnA*)



70Zn: 788 pnA
=> **19.0 kW**

78Kr: 690 pnA
=> **18.6 kW**

124Xe: 173 pnA
=> **7.4 kW**

238U: 117pnA
=> **9.6 kW**

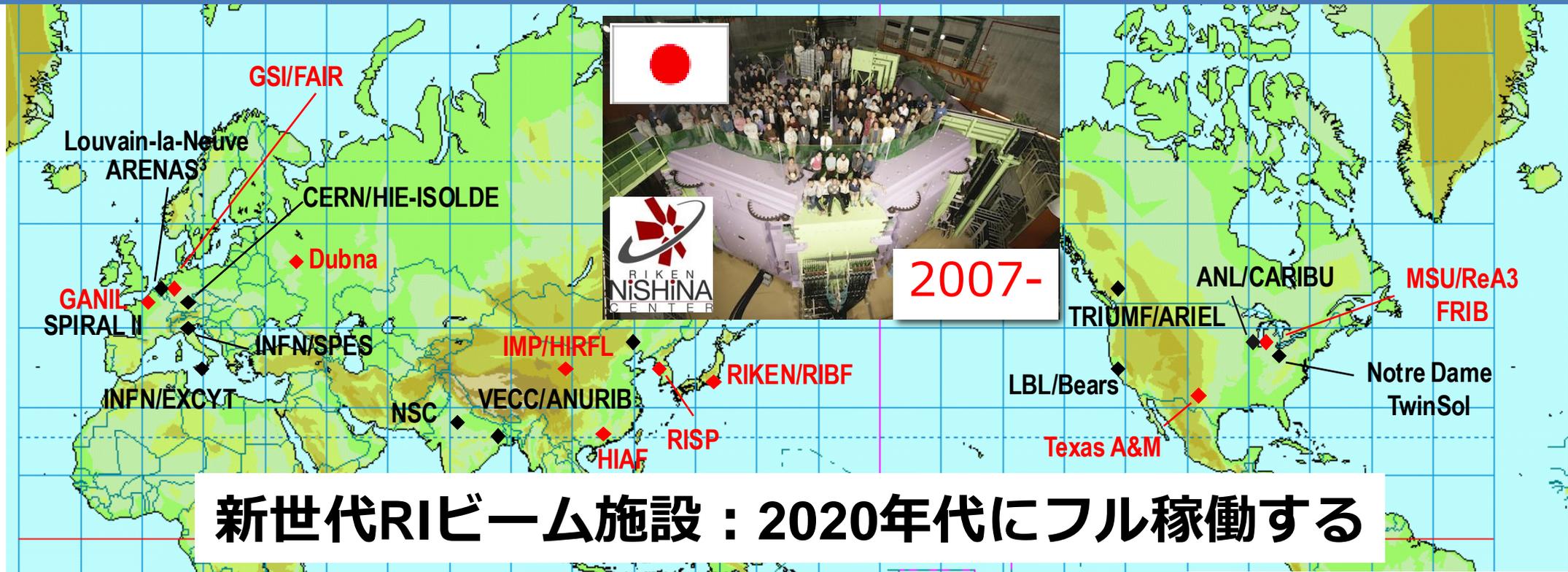
ウランビーム強度は共用開始時に比べ**1000倍以上**に。

*パーティクルナノアンペア。
1 pnA = 毎秒60億個の原子核

年

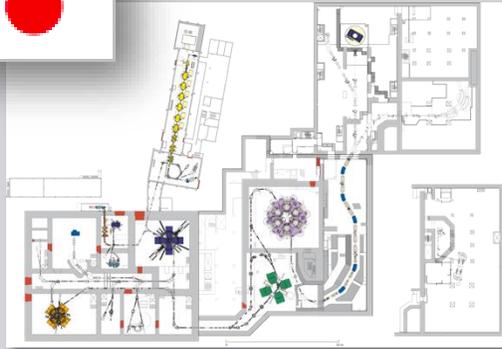
3:ビームの大強度化に向けて

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-

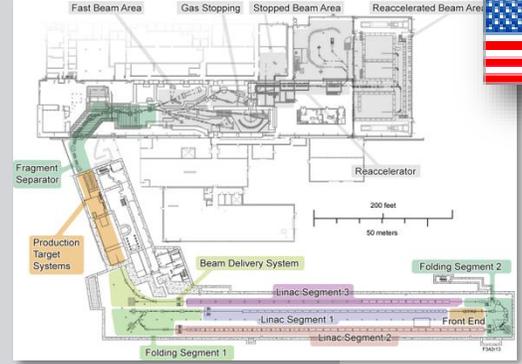
100 m

SIS 100/200

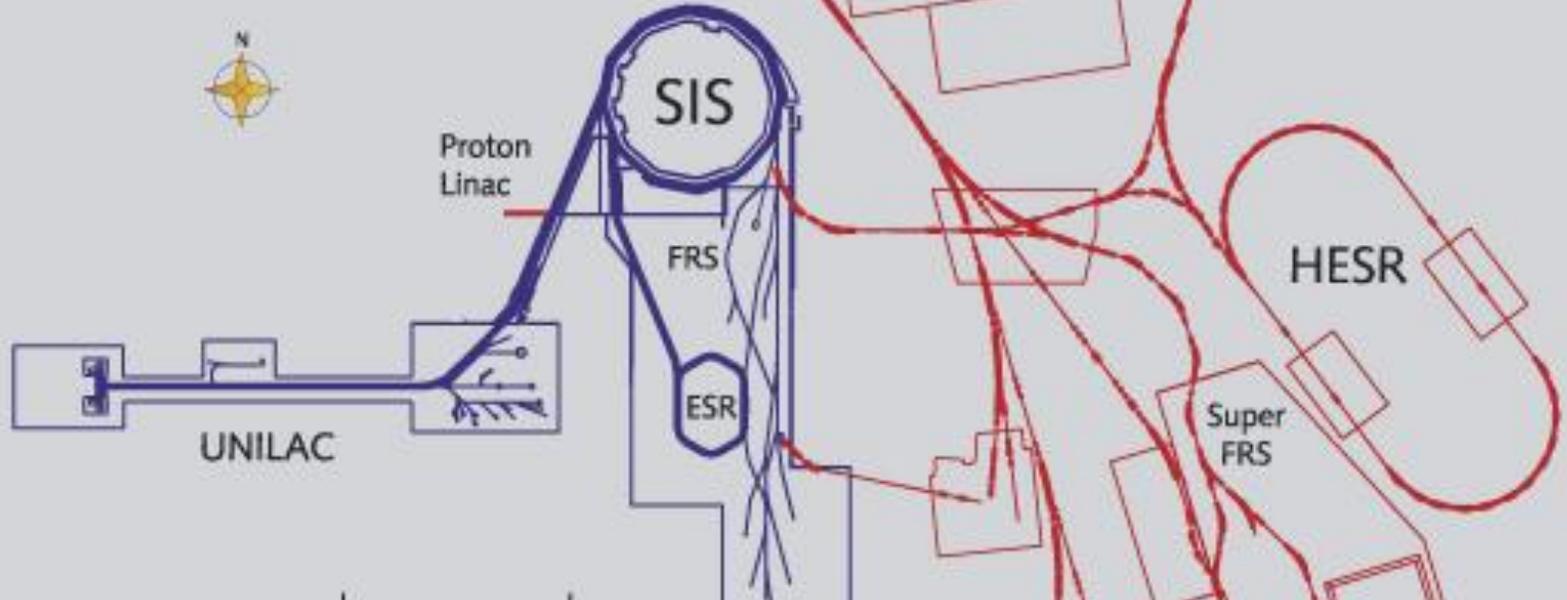
FAIR



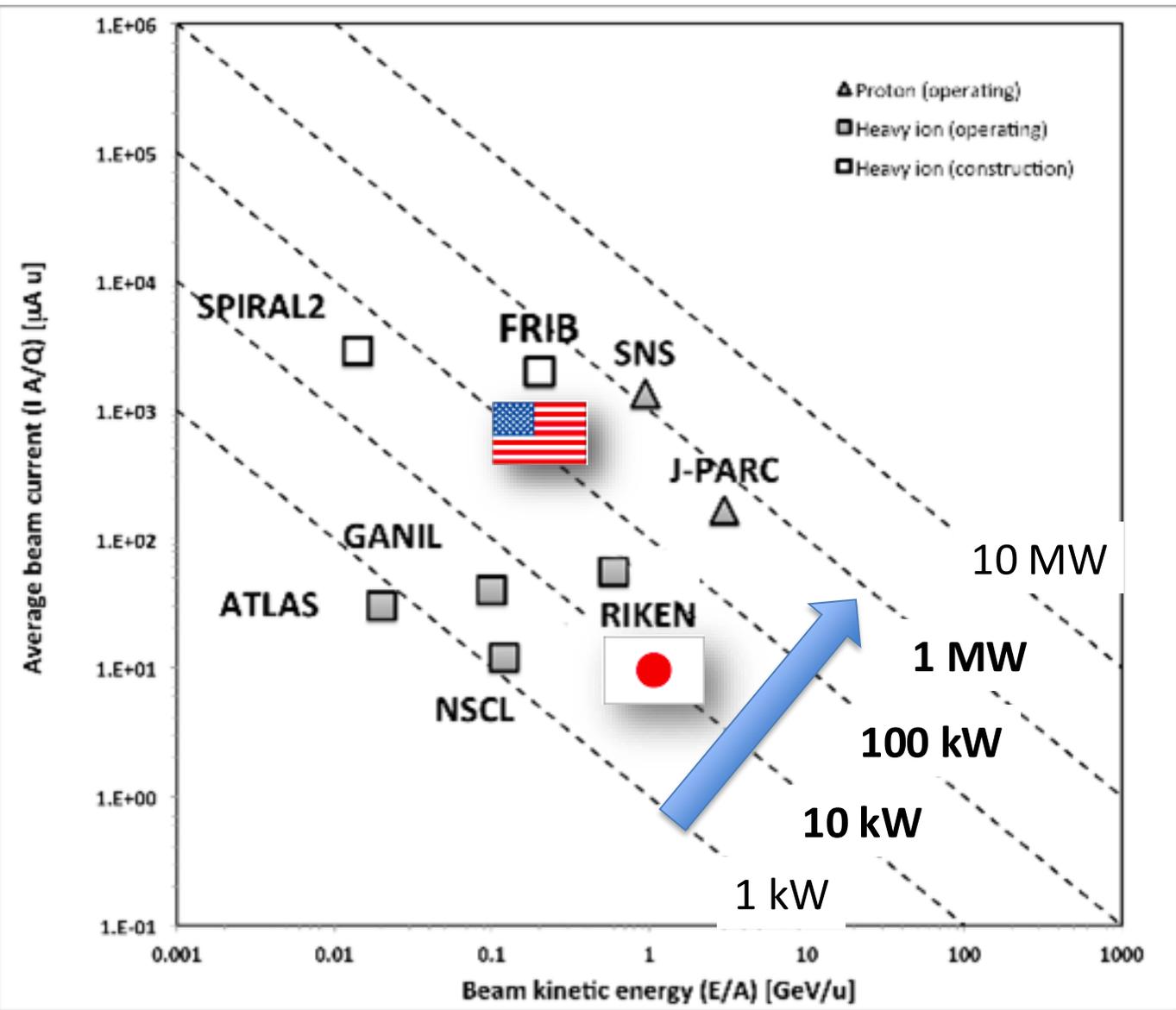
2028-



FRIB 2022-



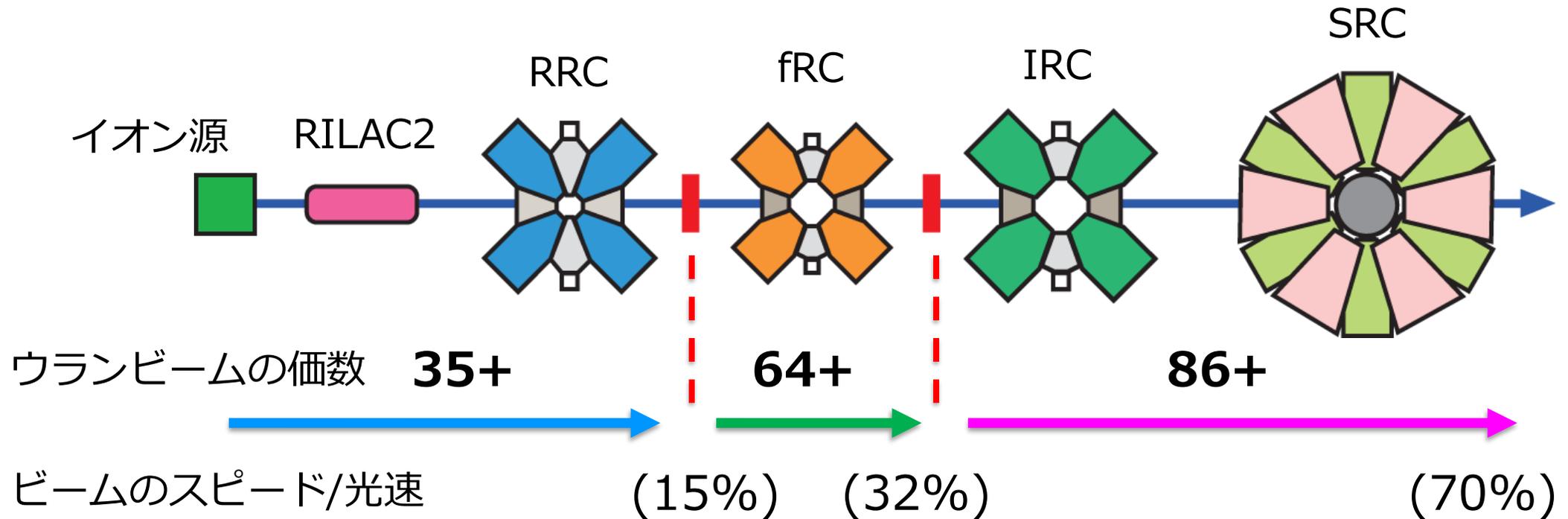
主な(重)イオン加速器のビームパワー



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。

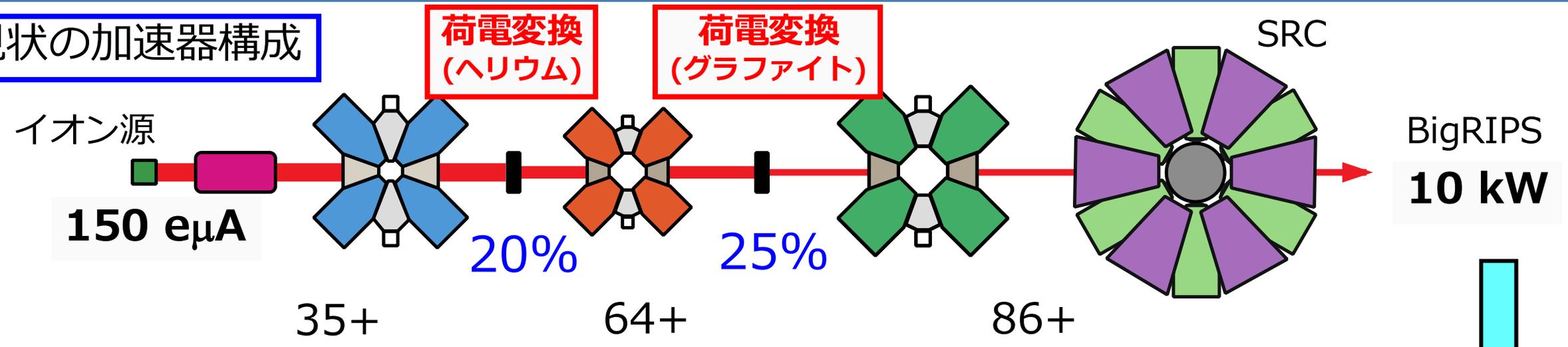
多価イオン源 と 荷電変換*による多段階加速



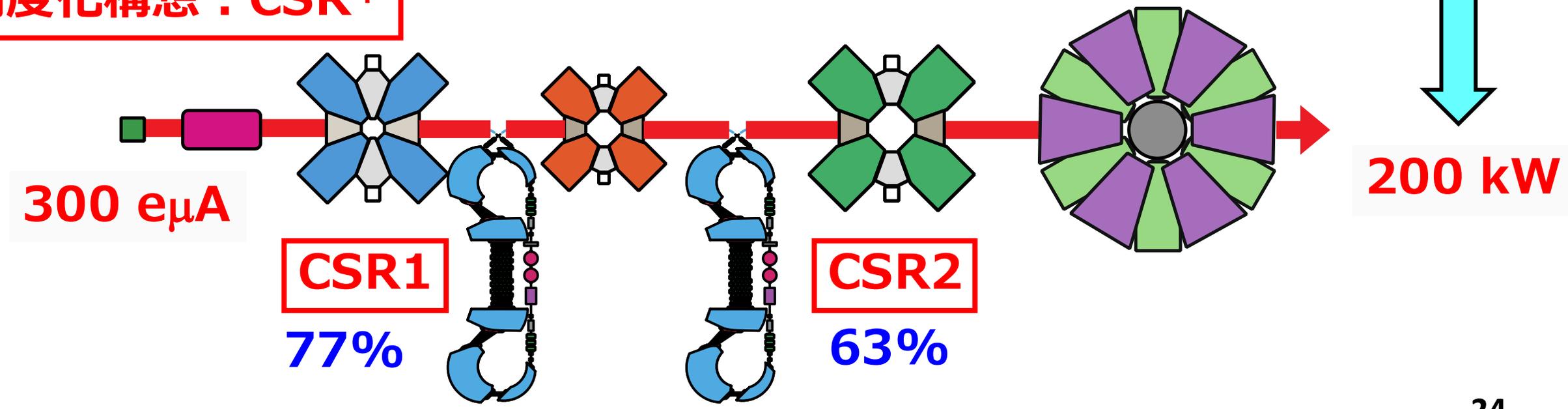
RIビームファクトリー高度化構想

***) 明日の今尾氏講義**

現状の加速器構成



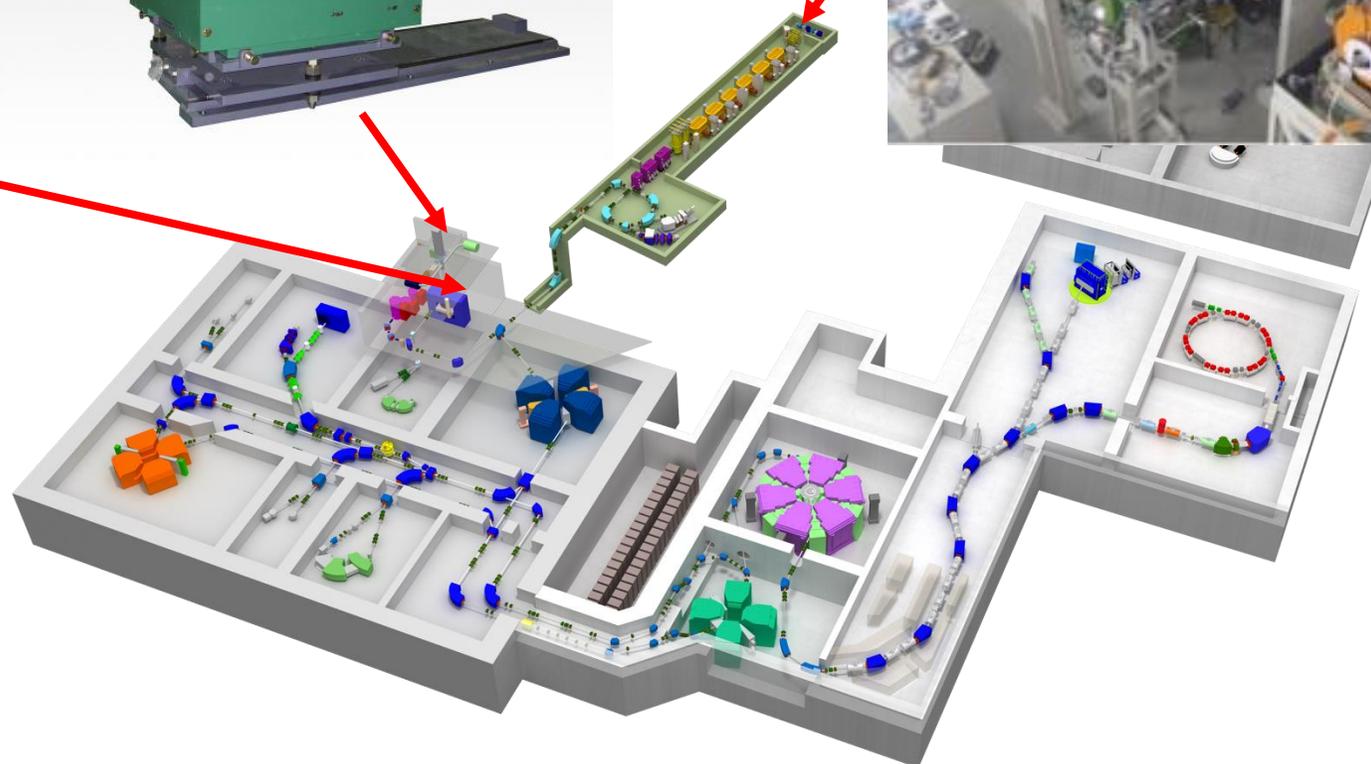
高度化構想 : CSR*



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

常伝導ECRイオン源(1996-)
比較的軽いイオン(α , O, Ar)



ECRイオン源*

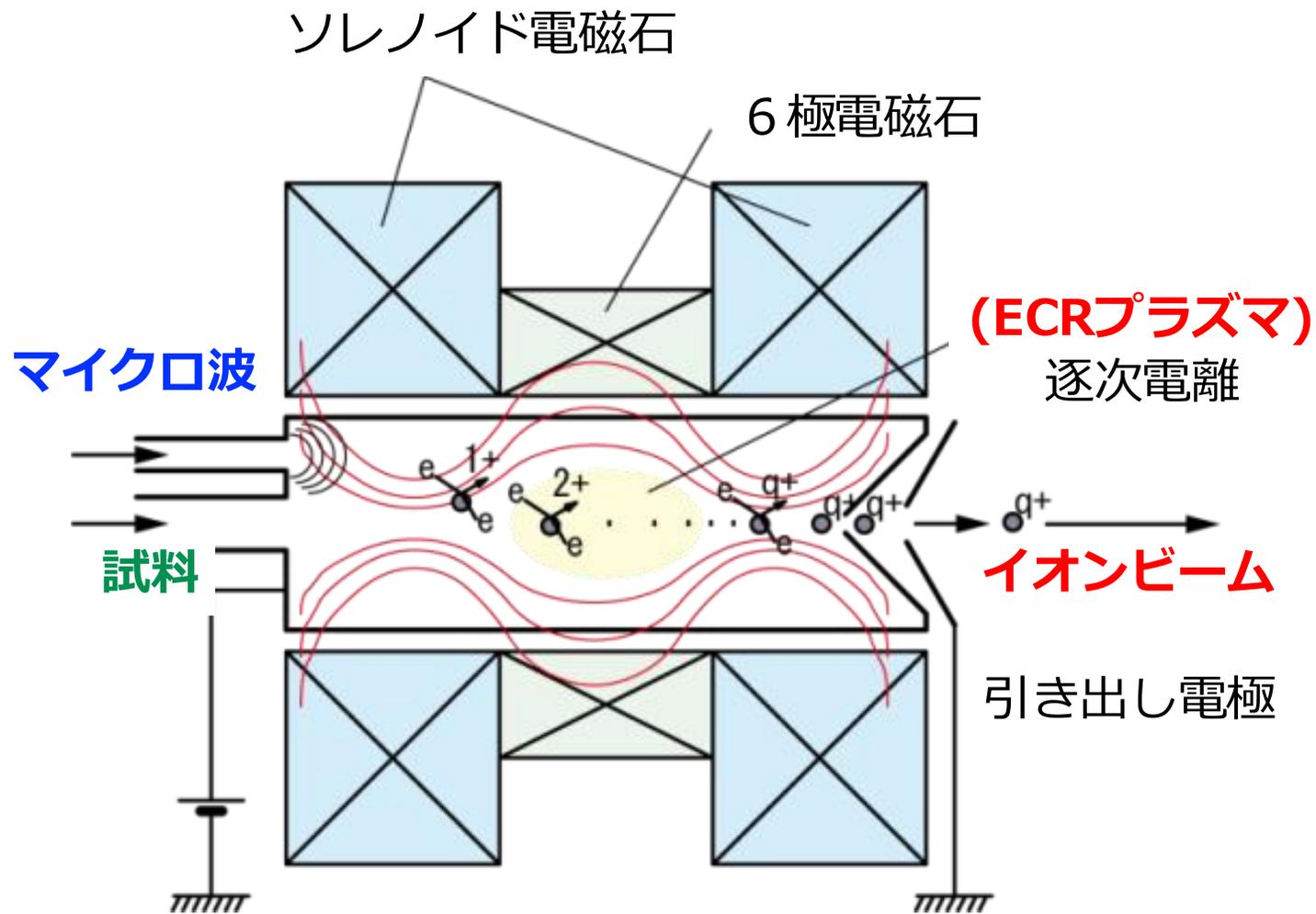


多価イオンの生成に適している。

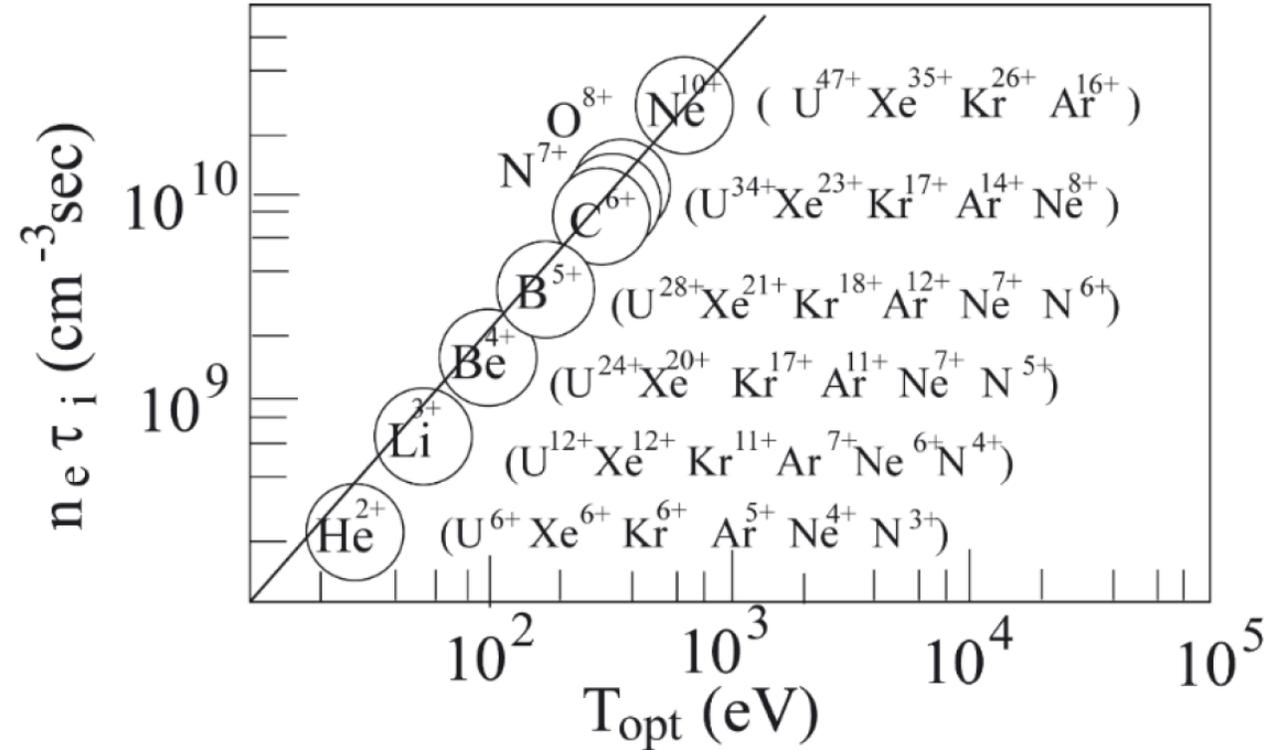
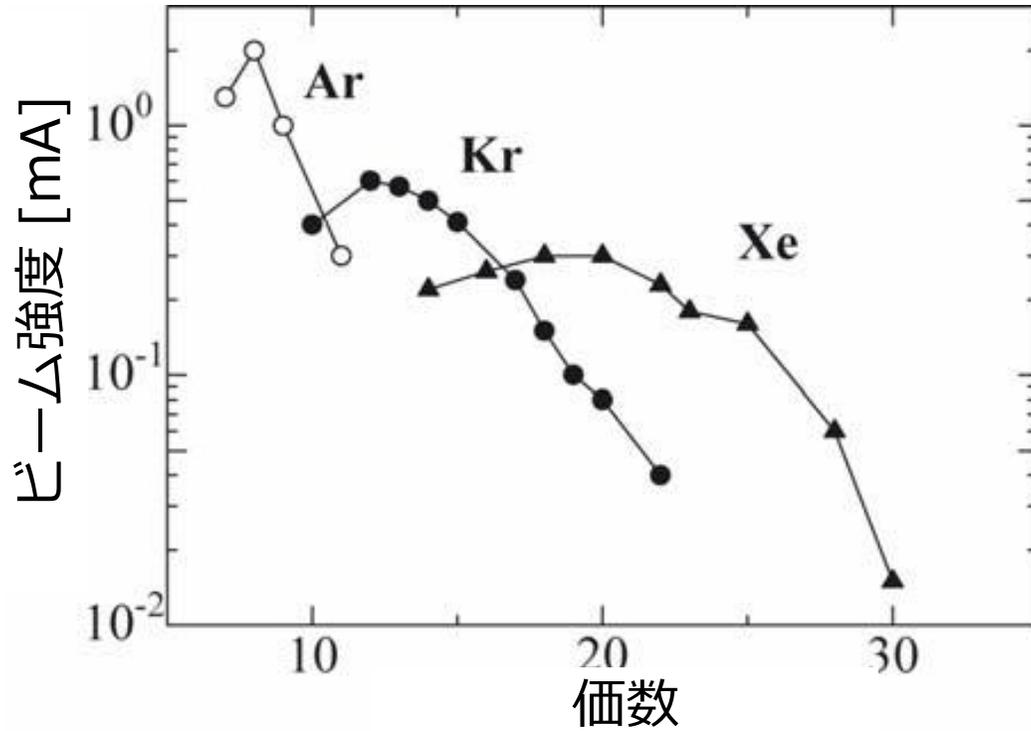
ECR共鳴条件

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

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？

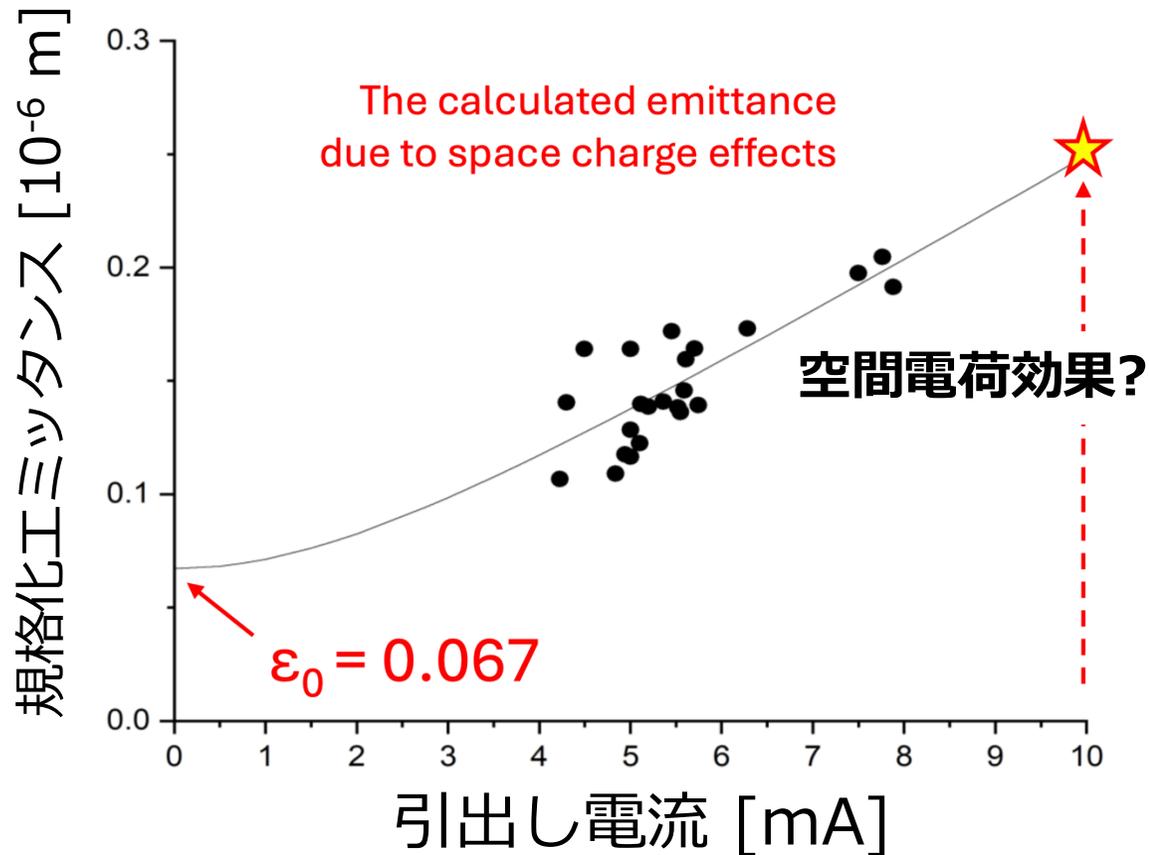
課題 2 : ビームの安定度



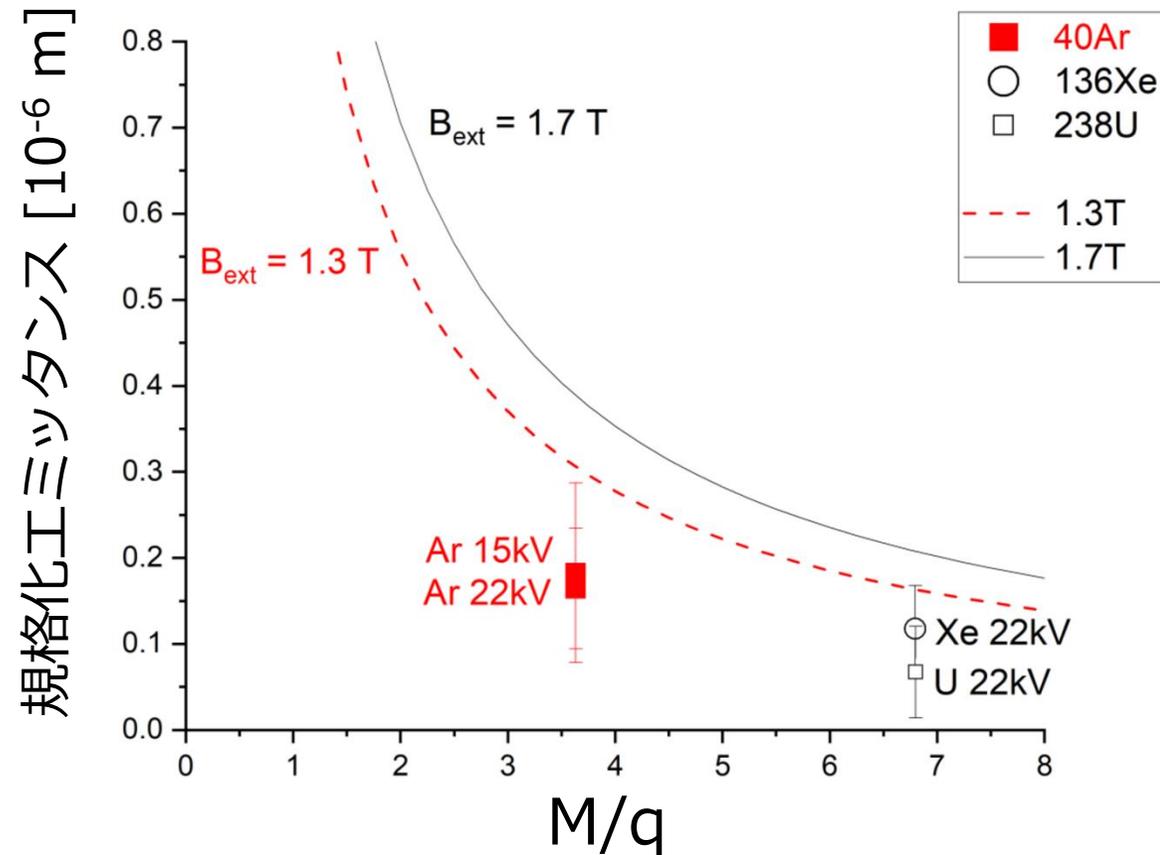
数十kHzの強度変調が見られる。

如何に安定化するか？

U³⁵⁺ビームのエミッタンス

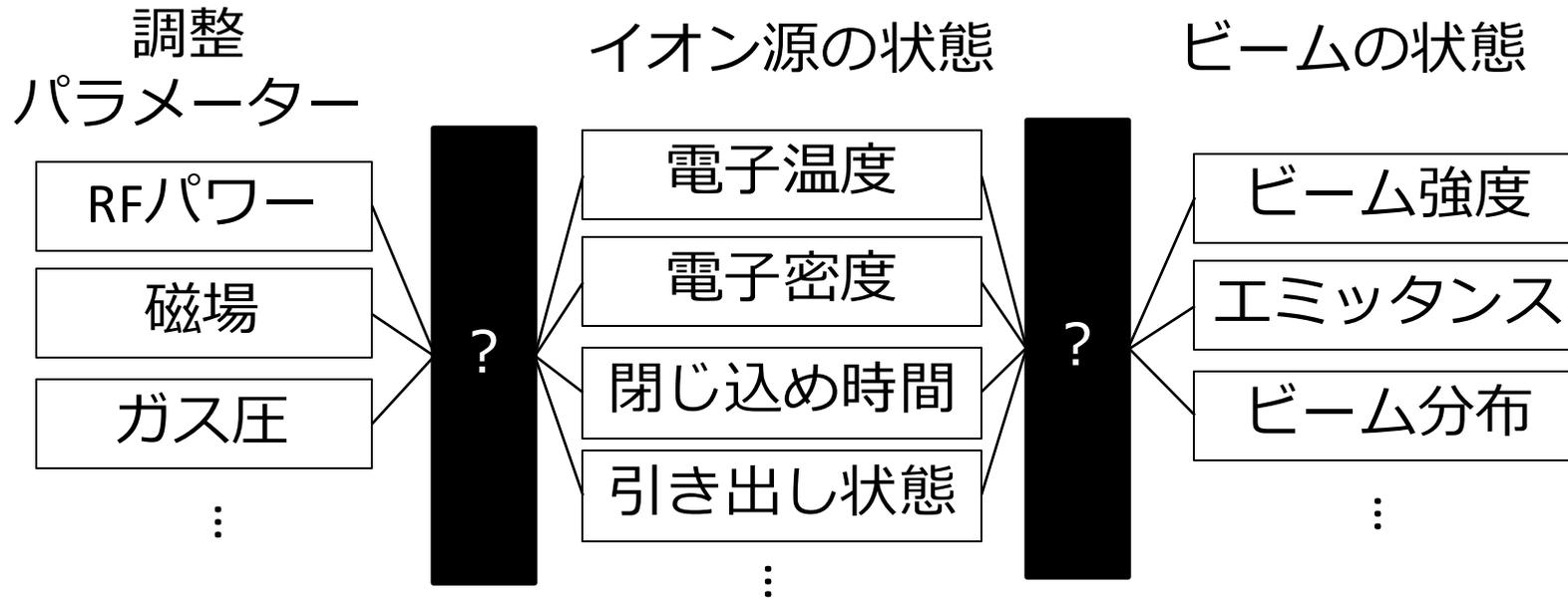


エミッタンスの系統性



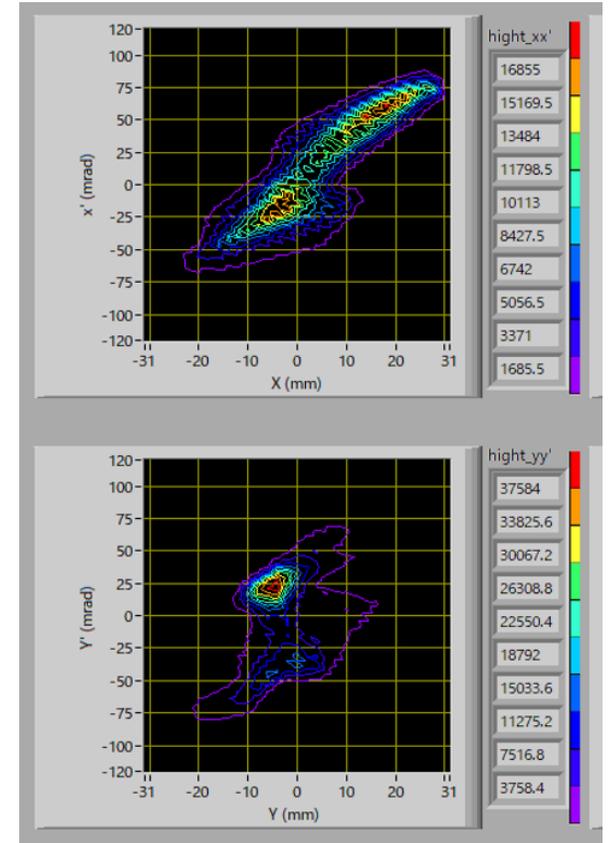
如何に輝度を上げるか？

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



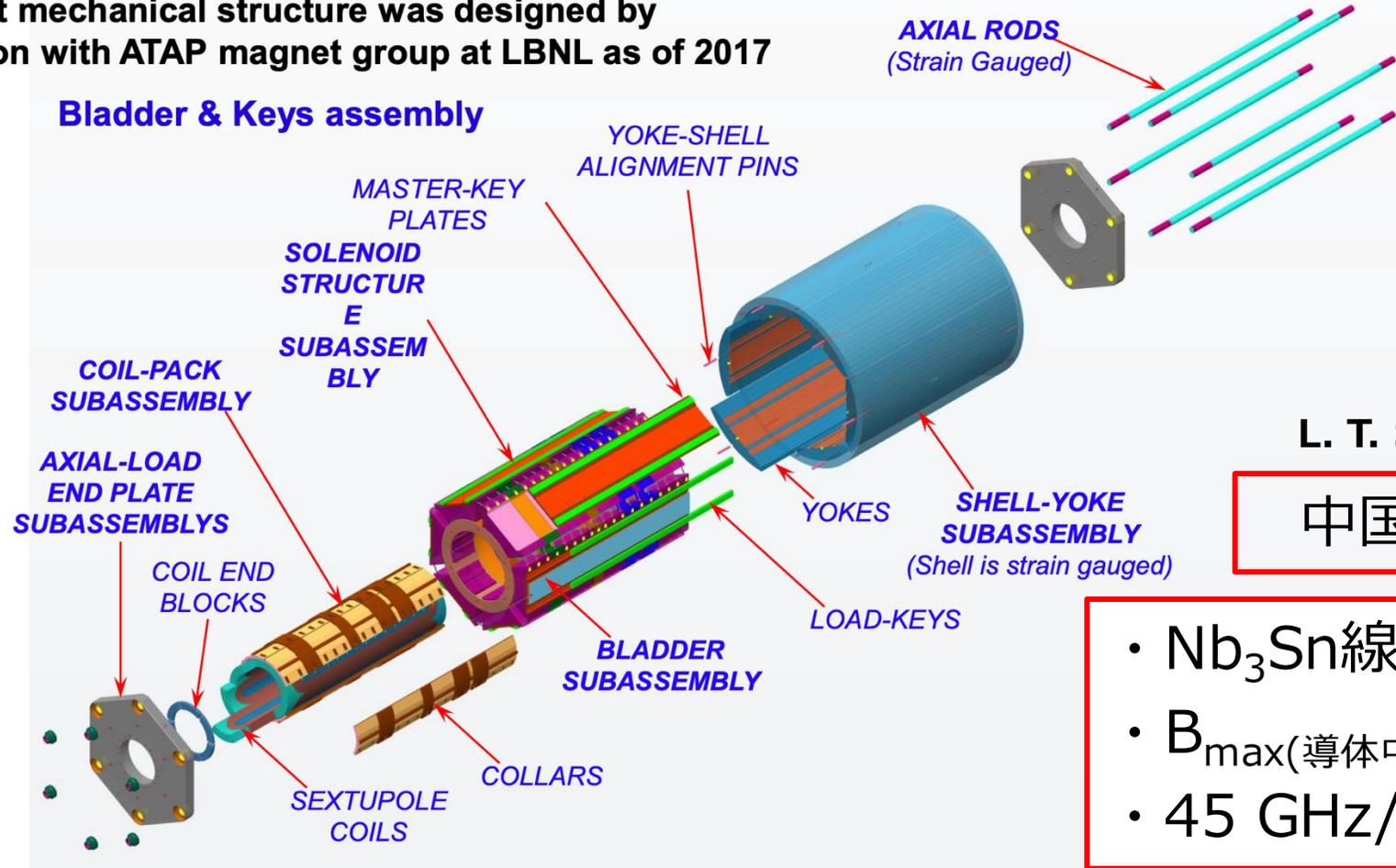
Status of FECR development

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



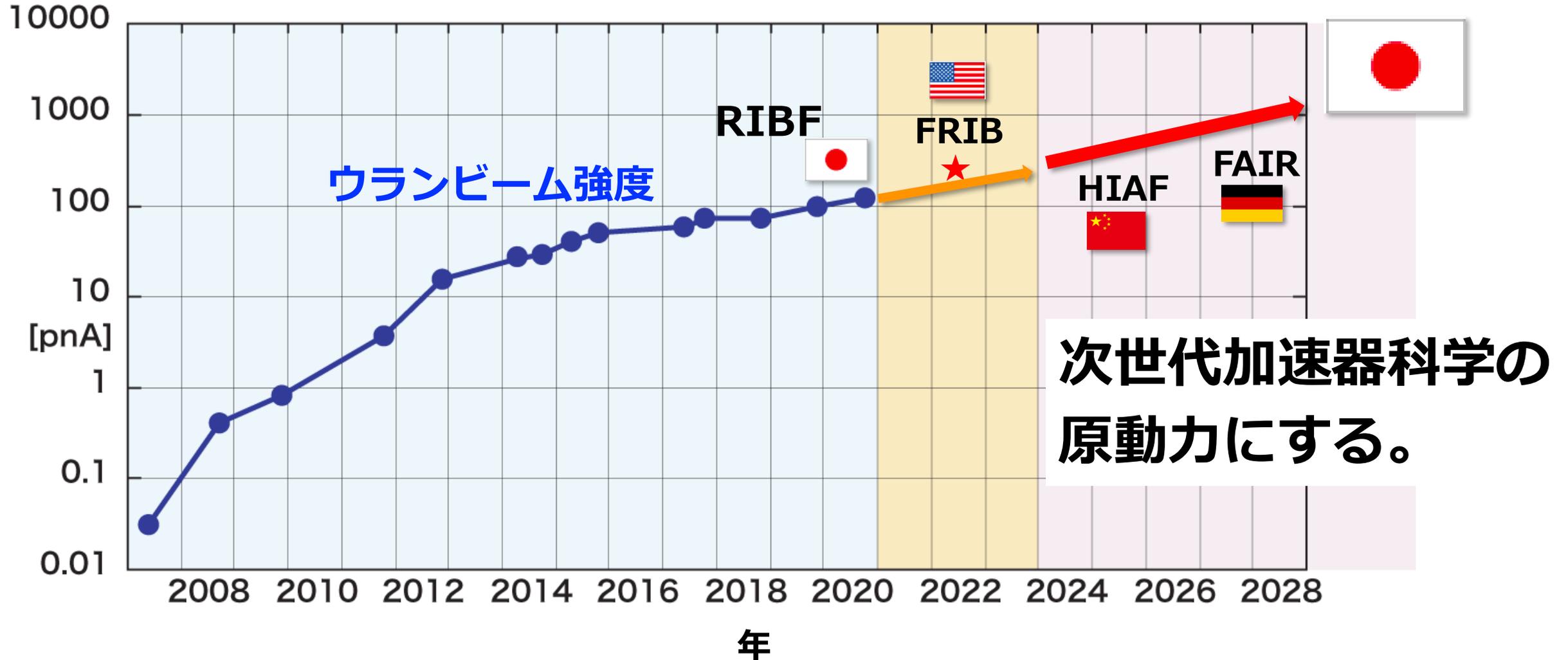
L. T. Sun, ICIS2023

中国IMPの例

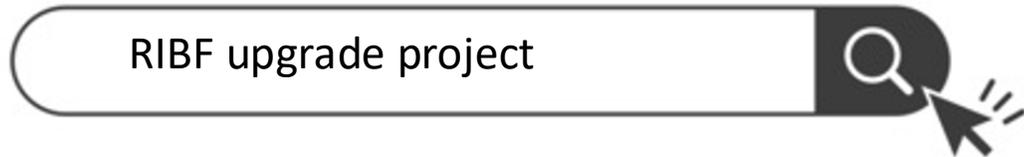
- Nb₃Sn線材
- B_{max}(導体中) = 11.8 T
- 45 GHz/20 kW

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



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/RIBFupgrade/index_e.html

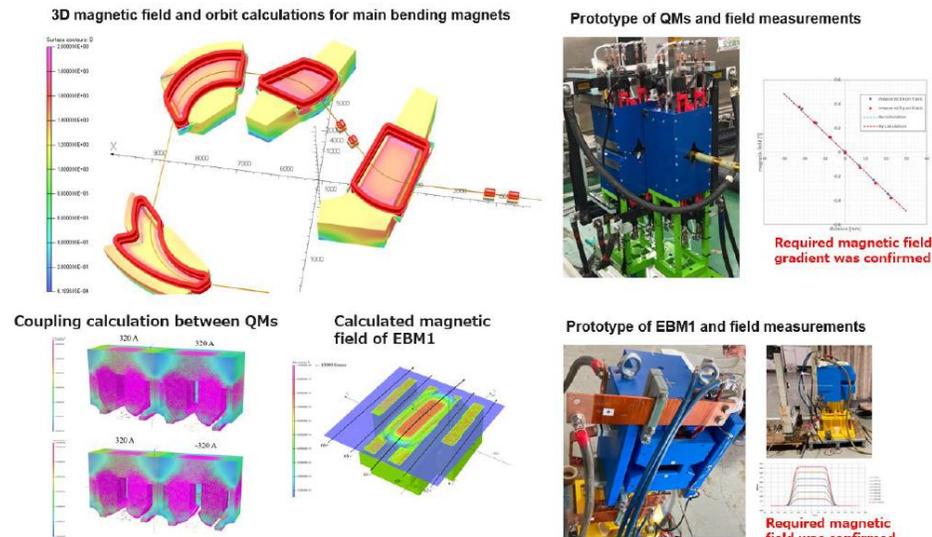


Figure 3.2.7. Magnet design and development works for CSR1.

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).

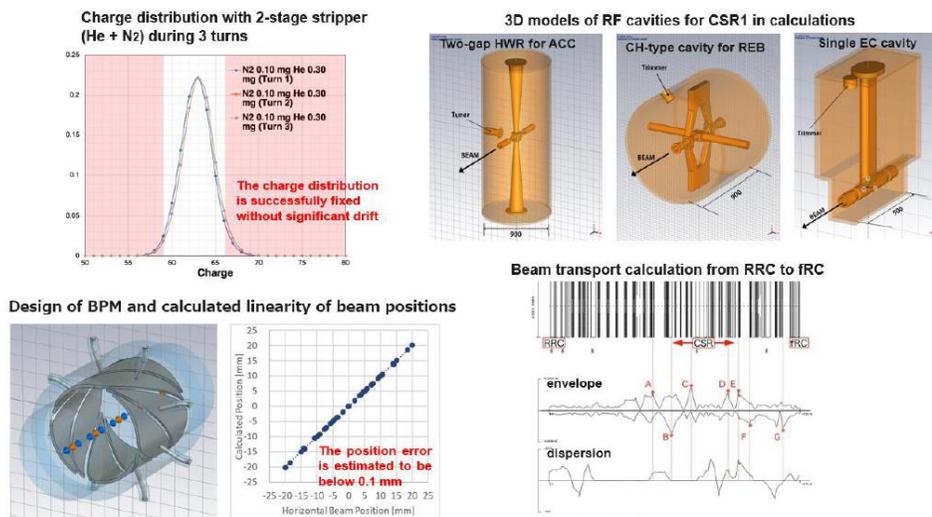


Figure 3.2.8. Component design works for CSR1.

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>