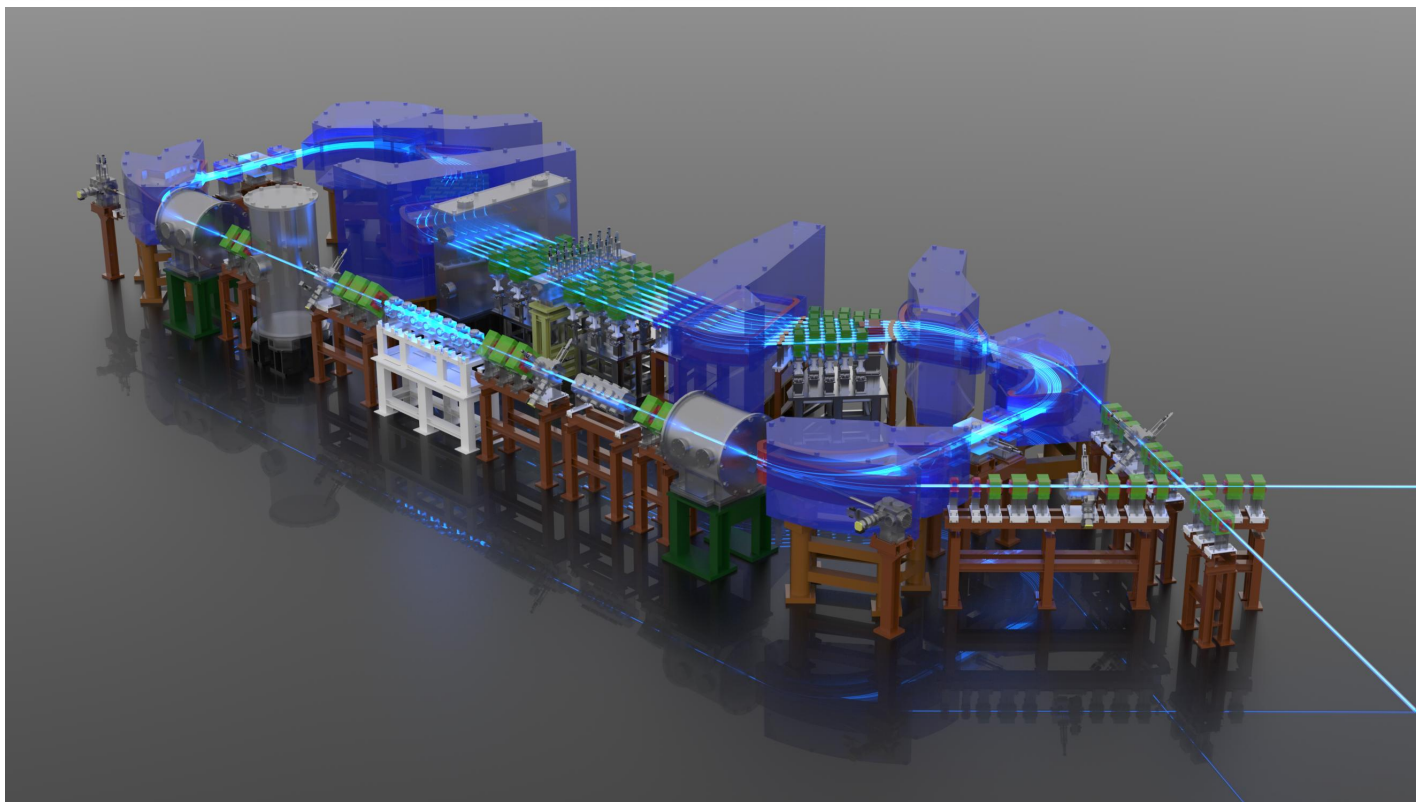
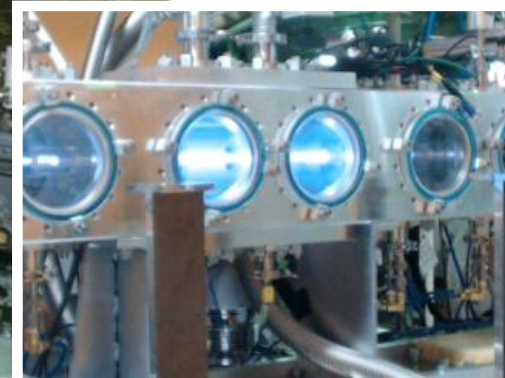
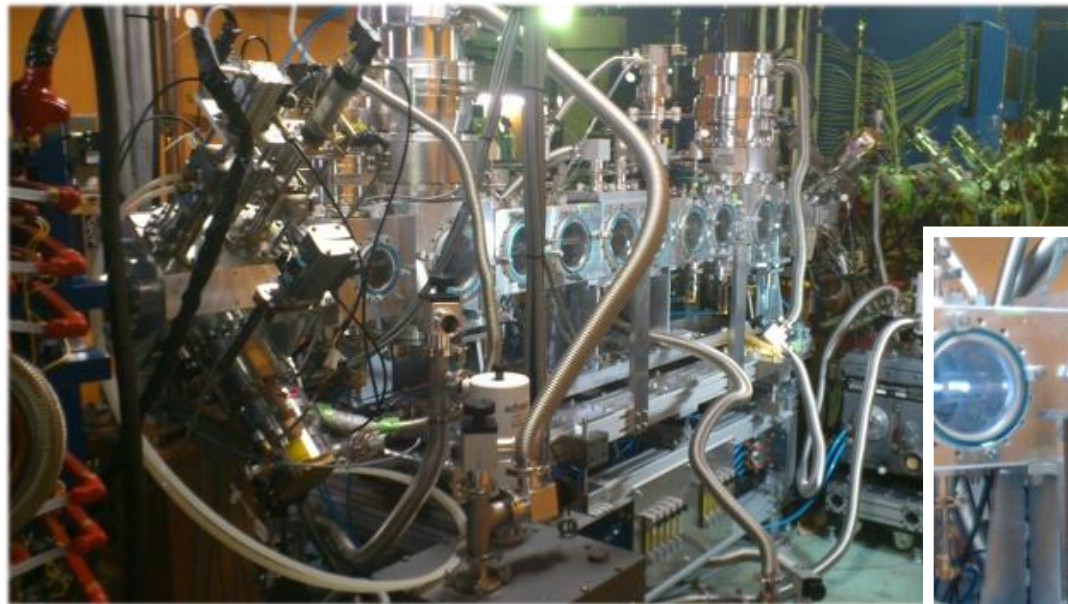


重イオンビーム荷電変換 の基礎と今後の課題

仁科加速器科学研究センター
加速器基盤研究部
加速器高度化チーム
今尾 浩士

- RIBF加速器紹介
- ストリッパーの基礎
- RIBFストリッパー
- 荷電変換リング (**CSR**)
- CSRストリッパーと課題
- まとめ

2025年2月21日

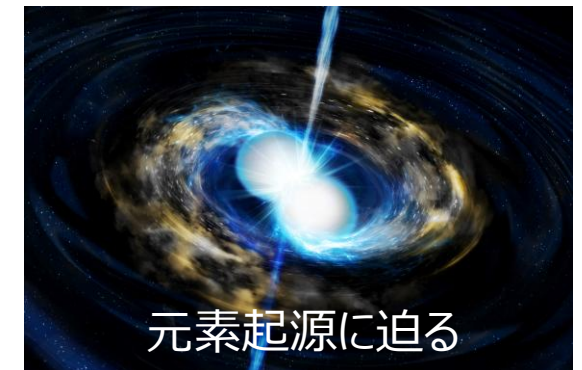


RIBFの加速器

たくさんのサイクロトロンを用いて水素からウランまで全元素を光速の約70%まで加速し、RIビームを大量につくる



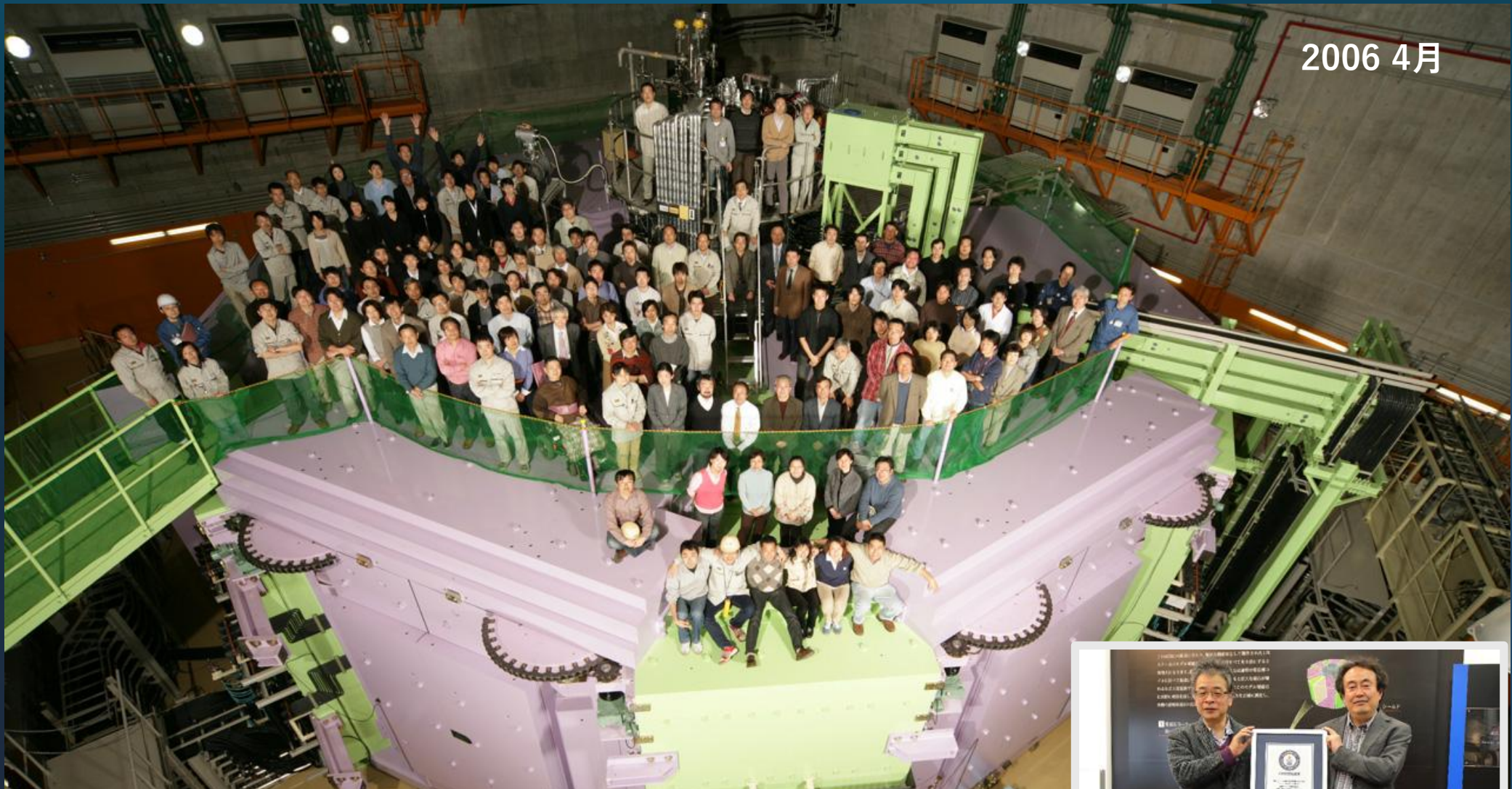
大強度ウランビームが特に重要



ビームパワー＝運動エネルギー × 強度

RIビームの効率的生成と選別
希少RIの精密研究

2006 4月



超伝導リングサイクロトロン SRC (2006) => 世界初

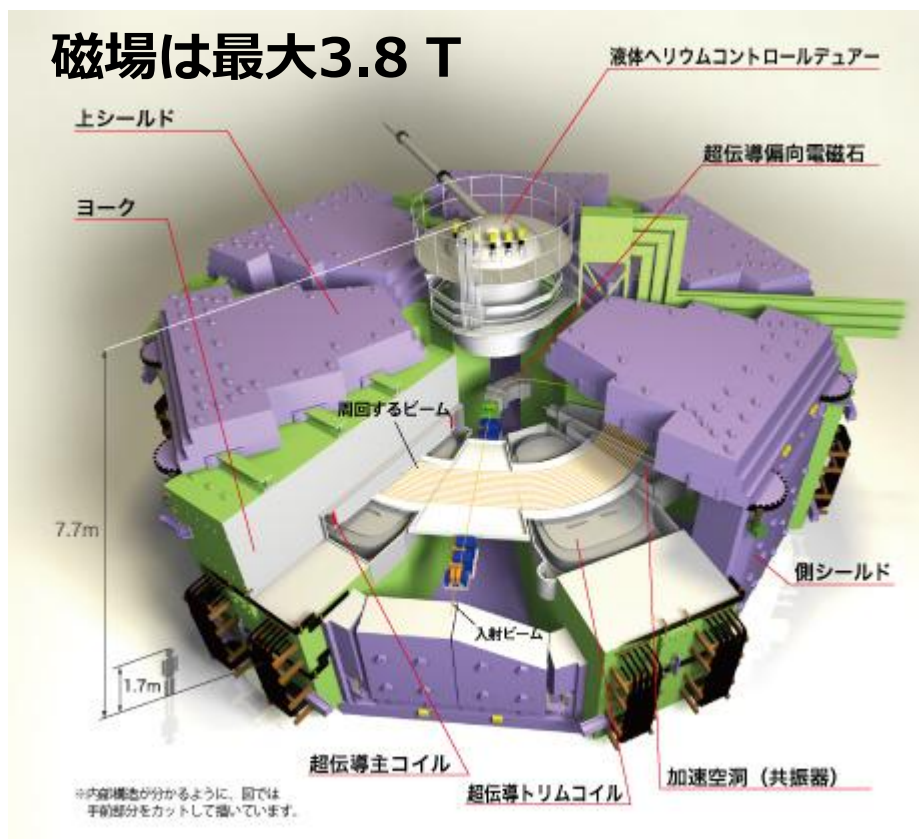
H. Okuno et al., IEEE TRANS. APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 17 (2007) 1063

ウラン80 ギガエレクトロンボルト (速さ = $0.67 \times$ 光速)

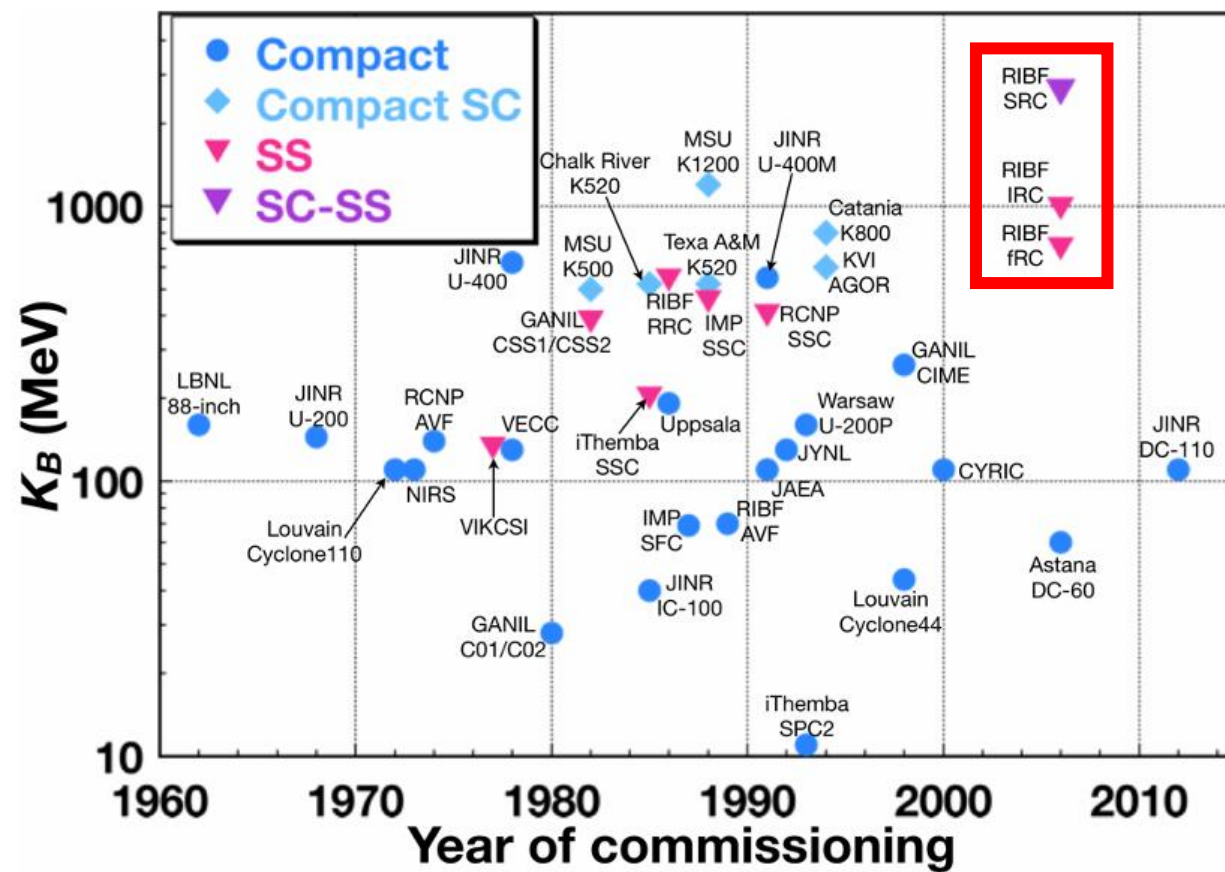
直径 : 18 m, 総重量 : 8,300 t



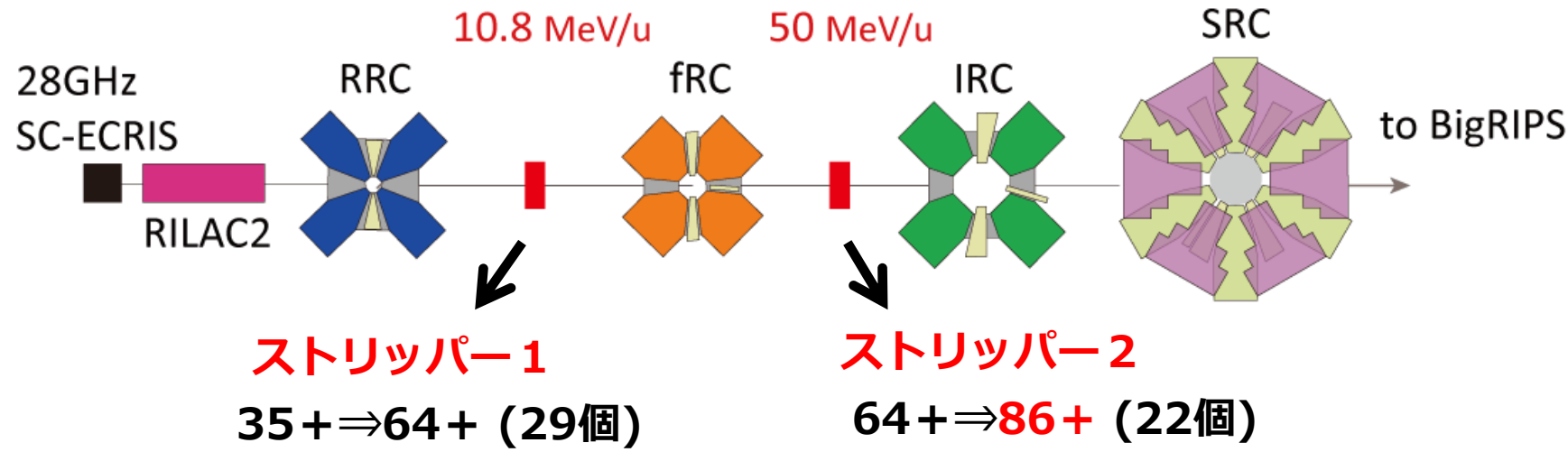
$$\text{到達エネルギー} = \frac{\text{サイクロトン性能 (} = K \text{値)} }{(\text{質量})^2} \times (\text{電荷})^2$$



K値2600 (世界最高値)

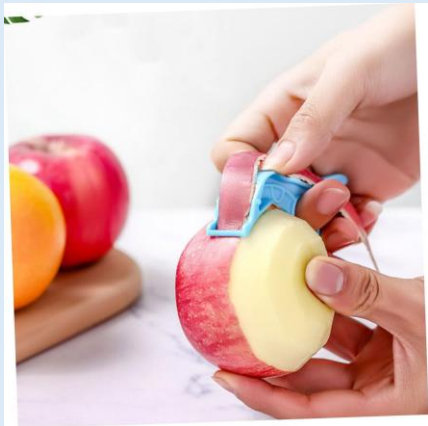


ウランビームの加速

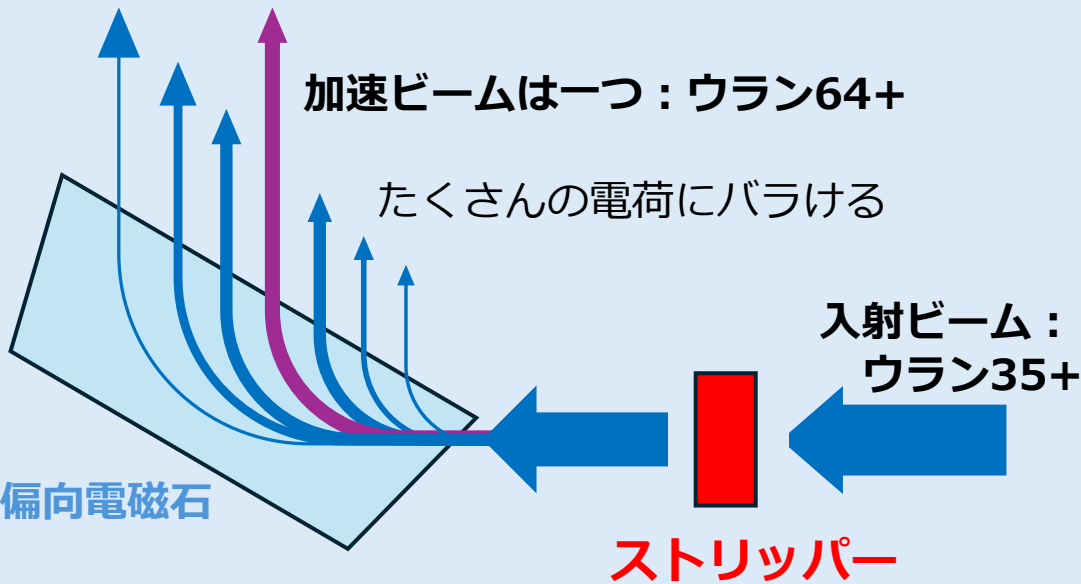


ストリッパー：重イオン加速器特有の装置

重イオンビームを物質にぶつけて
電子をはぎとり、電荷を上げる

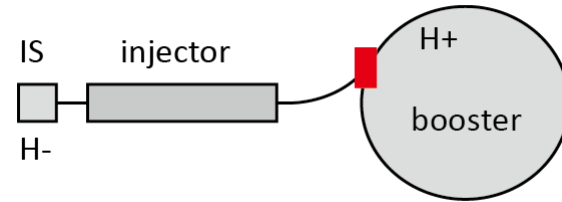


果物の皮でなく
「重イオン」から「電子の皮」
をむくイメージ！

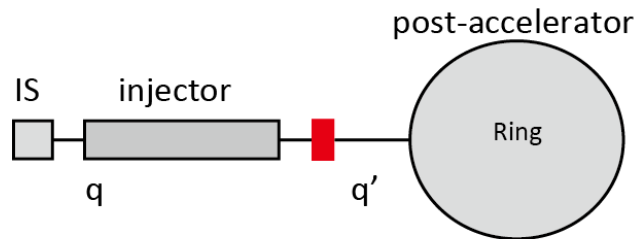
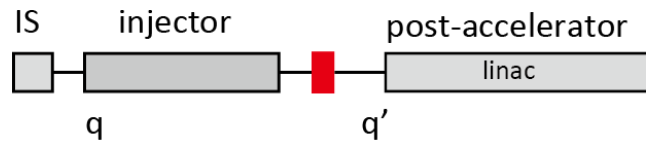


加速器における荷電変換の利用

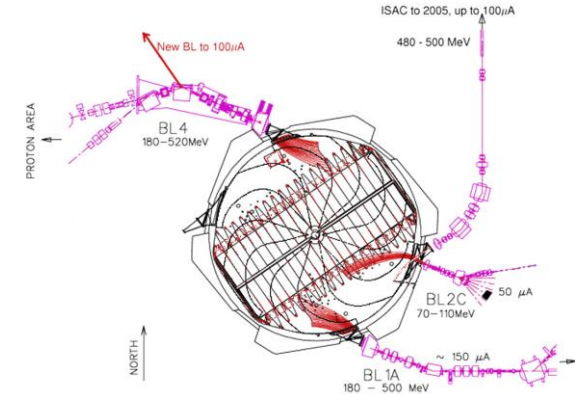
(1) 荷電変換入射・出射



(2) 加速効率を上げるためのストリッパー（重イオン）



H⁻の荷電変換取出し（カナダTRIUMF研究所）



$E \propto q'$ 加速空洞を減らせる

$E \propto q'^2$ 磁石の偏向能力を下げられる

固定型の炭素薄膜の利用（高電荷、耐熱・耐放射線、簡便性）

大強度陽子加速器: J-Parc(HBC, I. Sugai), SNS(NDC, R.W. Shaw)...

重イオンコライダー: BNL-RHIC(AL-GC, P. Thieberger), CERN-LHC, BNL-EIC...

大強度重イオン加速器: RIBF, FRIB, GSI ... ➡ **耐久性の問題、炭素膜から流体へ**

開発では原子物理学的な理解と標的技術的な探求

ストリッパー通過後の電荷q

N.Bohrの判定基準（トーマスフェルミ模型より導出、W.Lambも同時期）
「イオンの軌道電子のうちイオン速度vより遅いものは衝突によって離脱する」

$$q = Z^{1/3} \frac{v}{v_B}$$

(Z: 陽子数 v_B : ボーア速度)
加速器的には電離率 q/Z が $Z^{-2/3}$ で減少
→ウランビーム加速の難しさ

1948

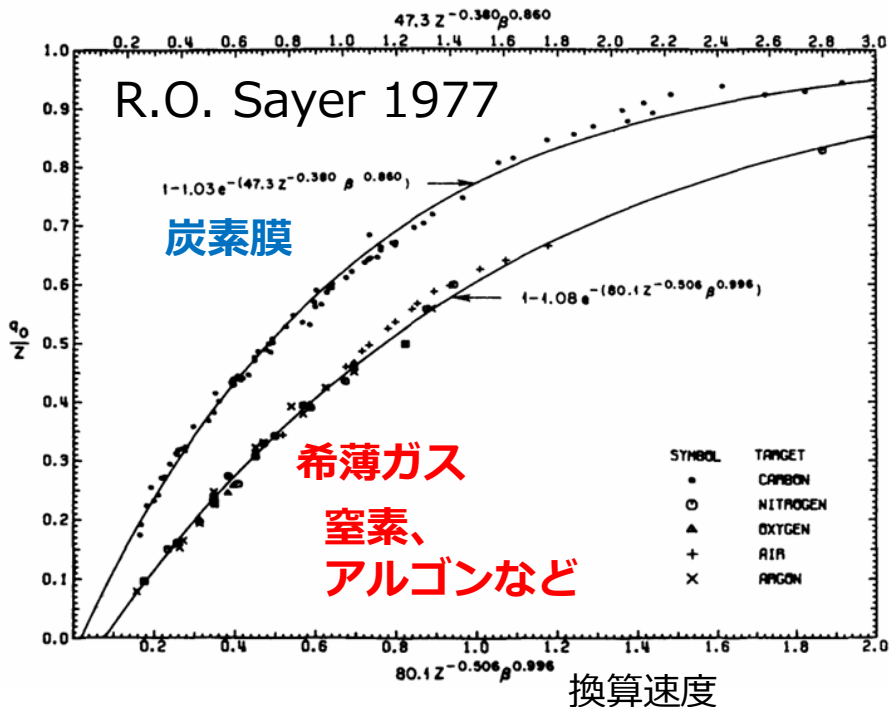
Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab.
Mathematisk-fysiske Meddelelser **XVIII**, 8.

THE PENETRATION OF ATOMIC PARTICLES THROUGH MATTER

BY

NIELS BOHR

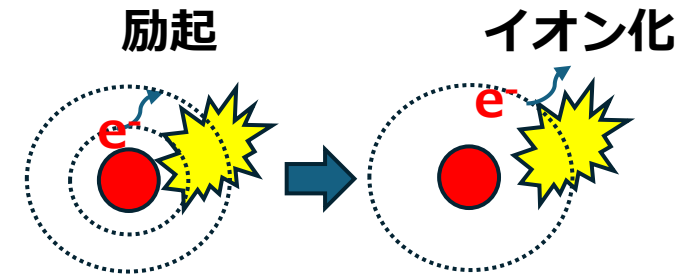
スケーリング式の例と密度効果（固体効果）



密度効果の第ゼロ近似モデル

Bohr-Lindhard(BL)モデル
標的内での励起イオン化

Betz-Grodzins(BG)モデル
標的通過後のオージェ過程



通過後のビームは散乱の確率的性質などから「ゆらぎ」が生じる
ビームと後段加速器のマッチングをよく検討する必要

電荷分布（=変換効率）

イオン化と電子捕獲の酔歩過程（釣合点が平衡電荷）
原子シェルの効果
多電子移行反応の効果

エネルギーストラグリング

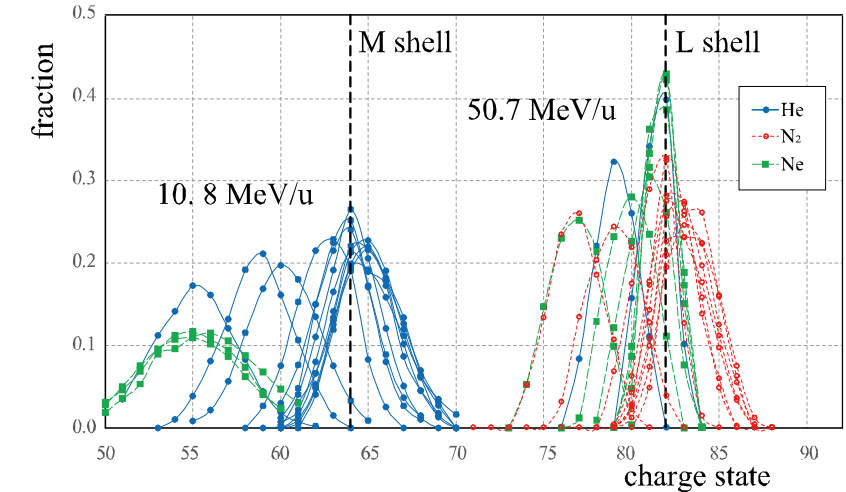
統計ゆらぎの他に**荷電変換ストラグリング**
原子配位、材質空間・時間的な均一性も大きく寄与

角度ストラグリング

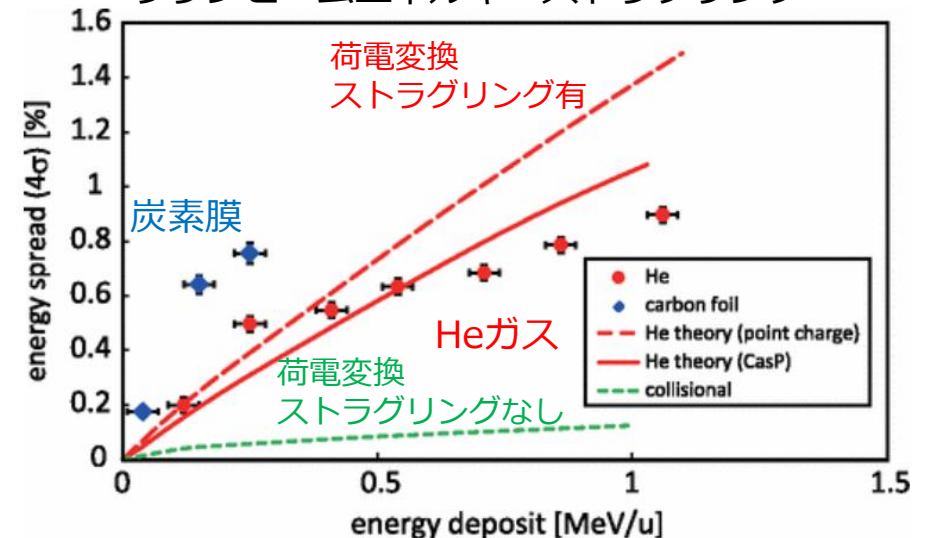
クーロン力の長距離性による小角多重散乱
 $\propto \sqrt{t} Z_1 \sqrt{Z_2}/E$

ゆらぎを理解し、制御・抑制することが課題の一つ

ウランビーム荷電分布におけるシェル効果



ウランビームエネルギーストラグリング



炭素膜における重イオンの大きなdE/dx

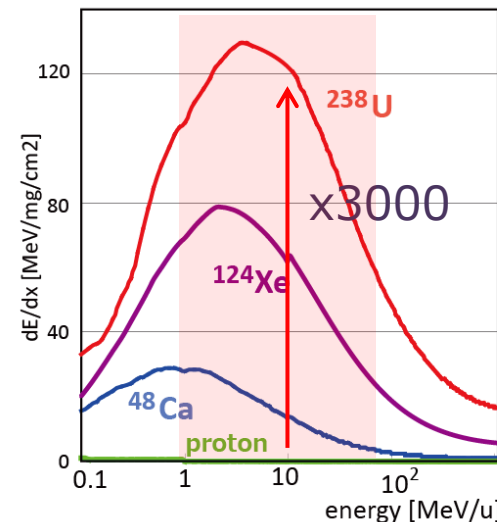
熱負荷による昇華、放射線による格子変形

力学的効果（ハンマリング）などによる短寿命化

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right]$$

試用限界のおよその目安（炭素膜の性能に大きく依存）

中間エネルギーの²³⁸Uに対して **~10¹¹/s**



照射前

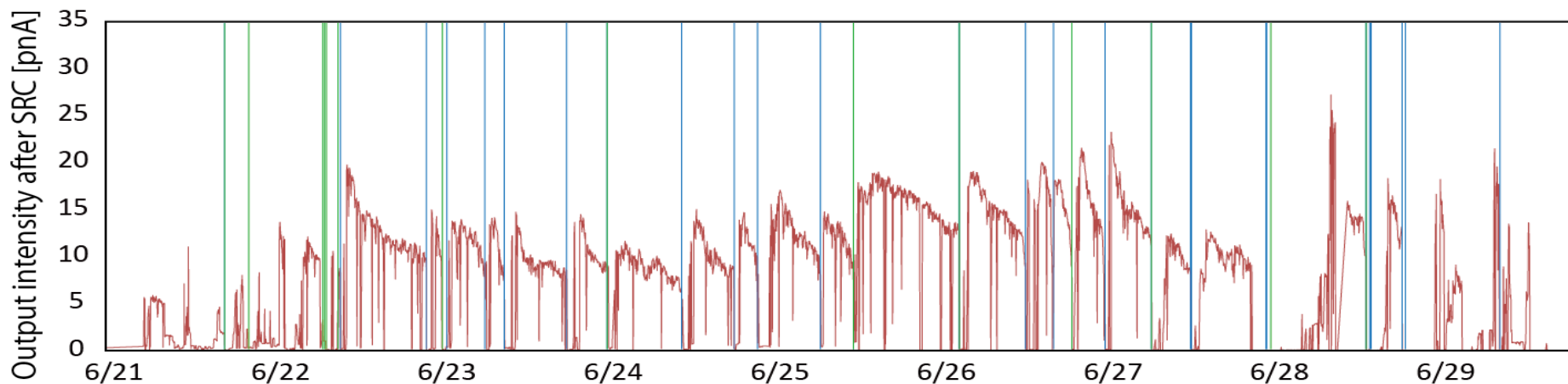


照射後

イオン速度と電子平均速度がマッチする辺りでピーク $\propto Z^{2/3}$

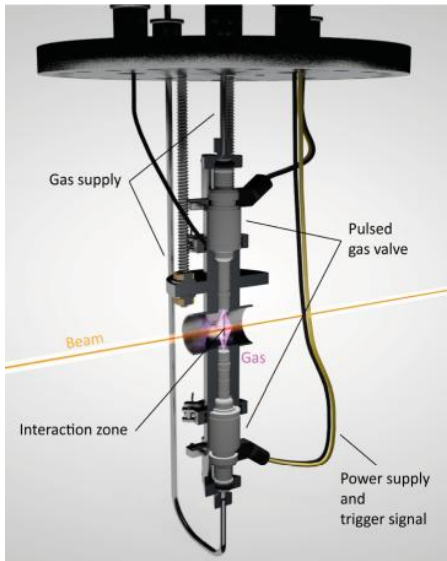
Example...

Xe-MT (6/16-7/5 in 2012 at RIBF) SRC出口強度の時間変化（約10日間）



Green : 1st stripper replacement (~50 times, 5 h for $6 \times 10^{12}/s$ at 11 MeV/u)
 Blue : 2nd stripper replacement (~20 times, 12 h for $6 \times 10^{11}/s$ at 51 MeV/u)

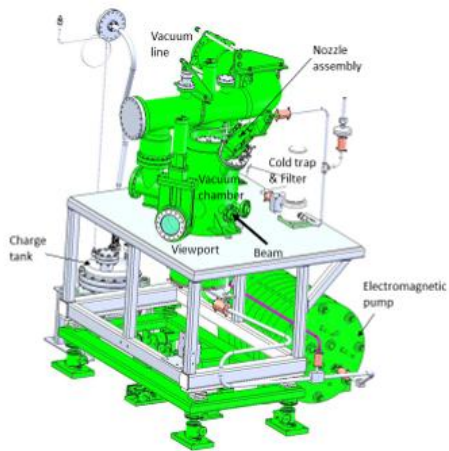
- 高寿命: 熱負荷, 放射線ダメージ ➡ 流体や回転型
- 高価数: 密度効果
- 高荷電変換効率: 電子シェル効果, 多電子過程抑制
- 高い均一性と安定性: エネルギーゆらぎの抑制
- 容易なハンドリング: 可燃性, 発火性, 毒性



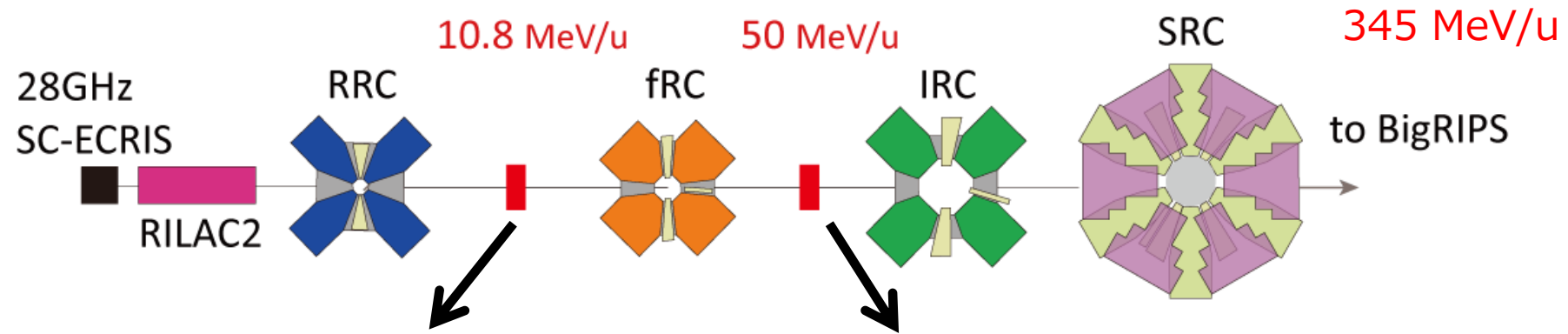
パルス型水素ガス (GSI)

Parameters of strippers for ^{238}U at FAIR(独), FRIB(米) and RIBF

	FAIR (values at GSI)	FRIB (present values)	RIBF (present values)	
media	H ₂ pulsed gas	Liq. Li	He gas	Rot. Disk
energy [MeV/u]	1.4	17	10.8	50.8
input charge	4	35	35	64
output charge	28 or 29	74-76	64	86
intensity [pps]	1.2E+12	2.7E+12	1.6E+13	2.0E+12
thickness [mg/cm ²]	0.03	1	0.7	15
energy loss [W]	10	50	200	270
key technology	pulse operation	safe operation of Li	windowless accumulation	uniform thickness strong material

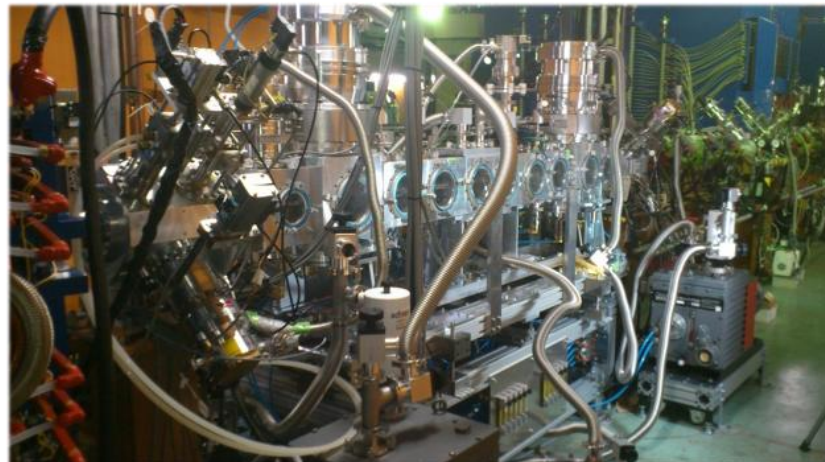


液体Li (FRIB)



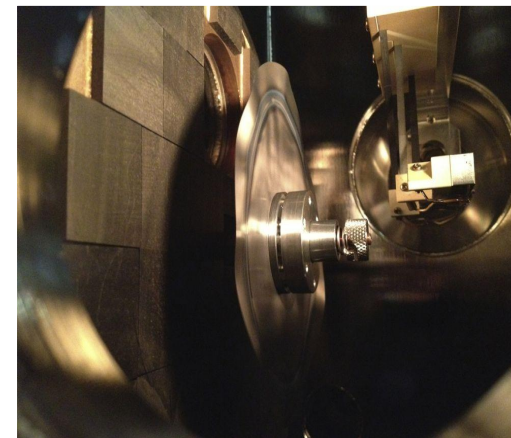
1. **Heガスストリッパー**
(since 2012)

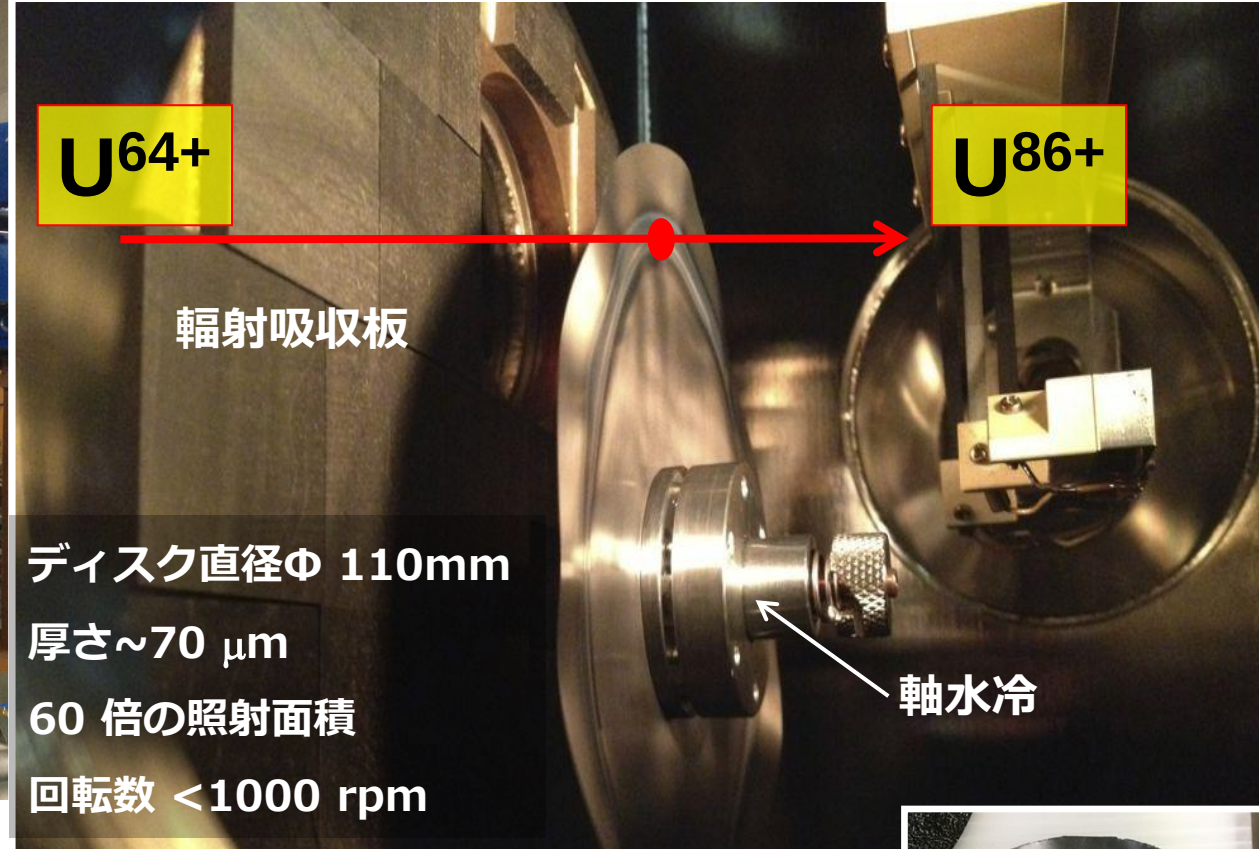
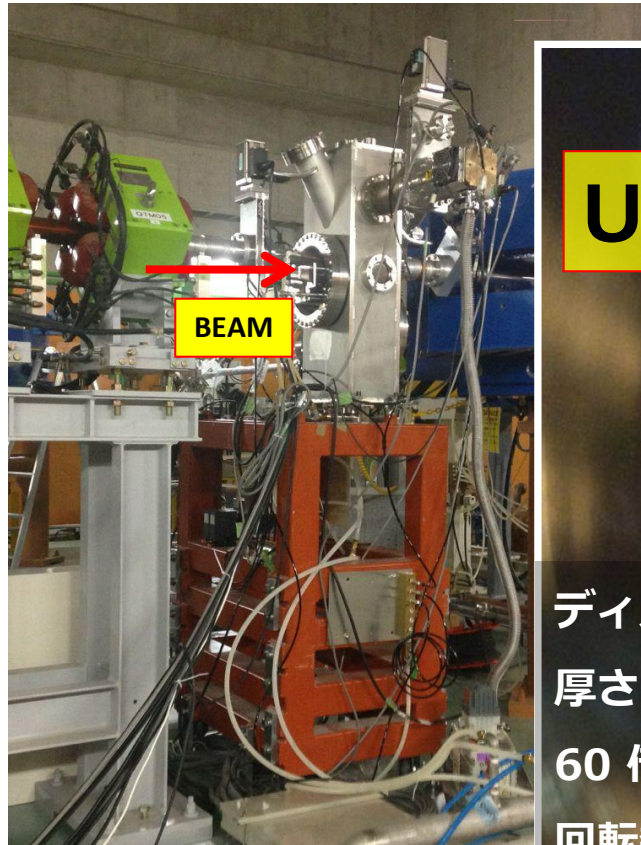
$35+ \Rightarrow 64+$ (20%)



2. **回転型ディスクストリッパー**
(since 2012)

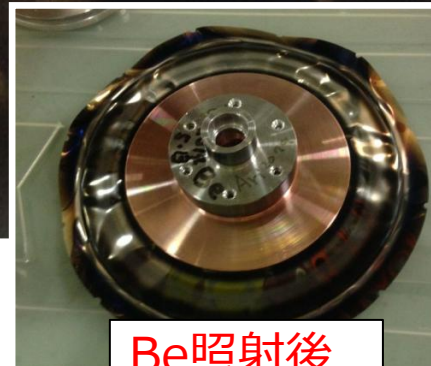
$64+ \Rightarrow 86+$ (25%)





第二ストリッパー 50 MeV/u

- 2011: 固定型炭素膜
- 2012-14: Beディスク
- 2015-: カネカ社グラファイトシート



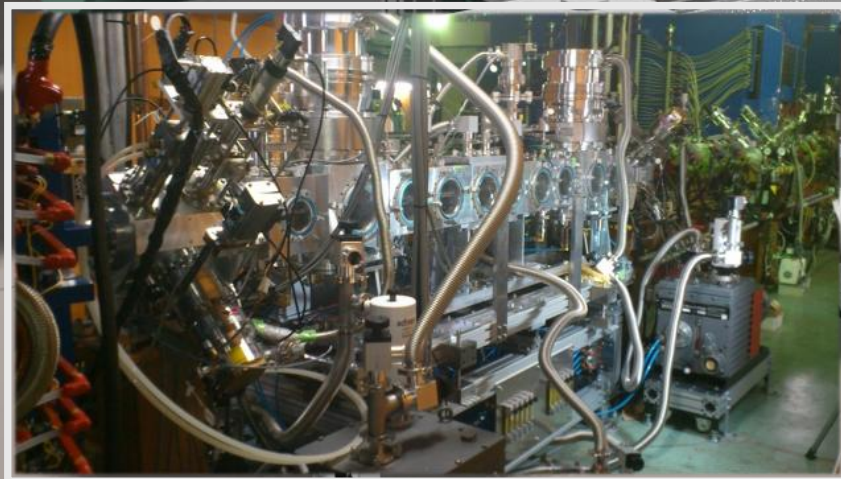
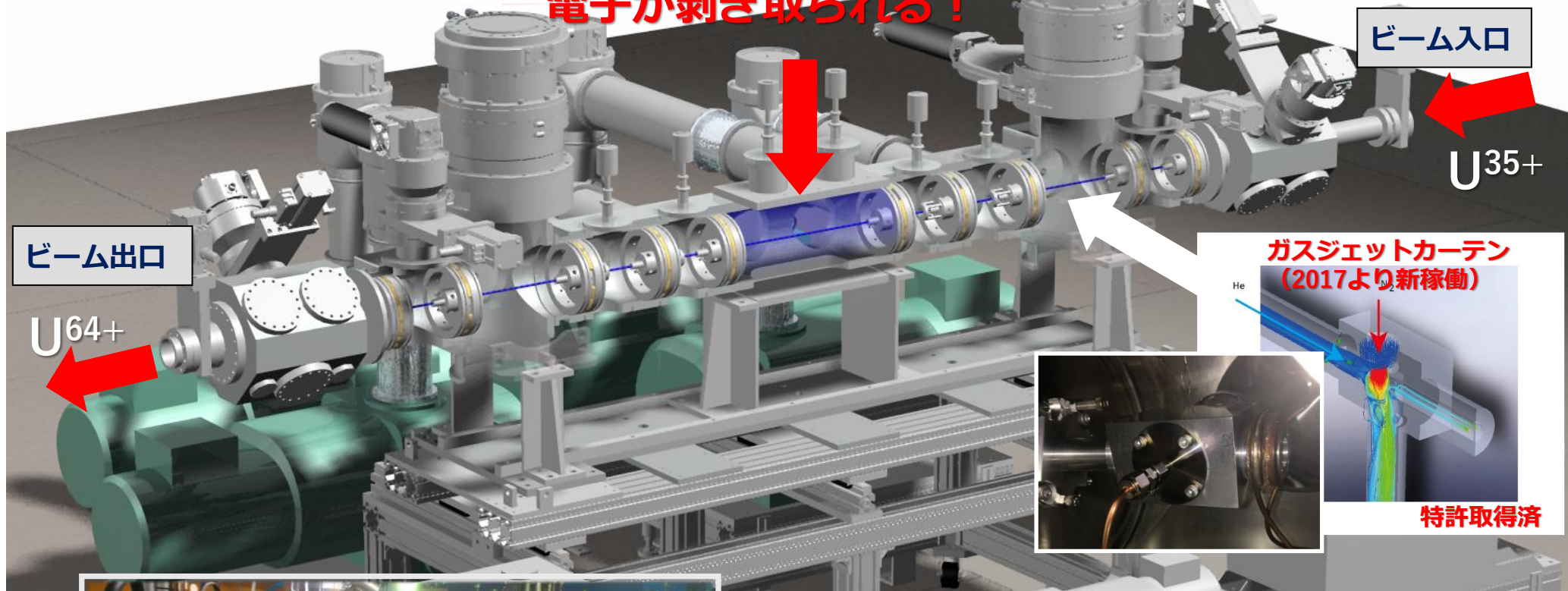
Be照射後



カネカ膜照射後

軸方向熱伝導率
1500 W/m · K

ここでウランビームの
電子が剥ぎ取られる！



- ・5段階差動排気; 25台の真空ポンプ
- ・ヘリウム大量循環; 300 m³/日
- ・ビームの通り道; >12 mm
- ・真空度差は8桁
7000パスカル(標的)
→0.00001パスカル(ビーム入口と出口)

流体ストリッパー→ダメージ緩和、均一・安定

密度効果を緩和→Low-Z (Z; 原子番号) ガスの利用 (H₂・He)

☺ 高い平衡電荷が期待できる

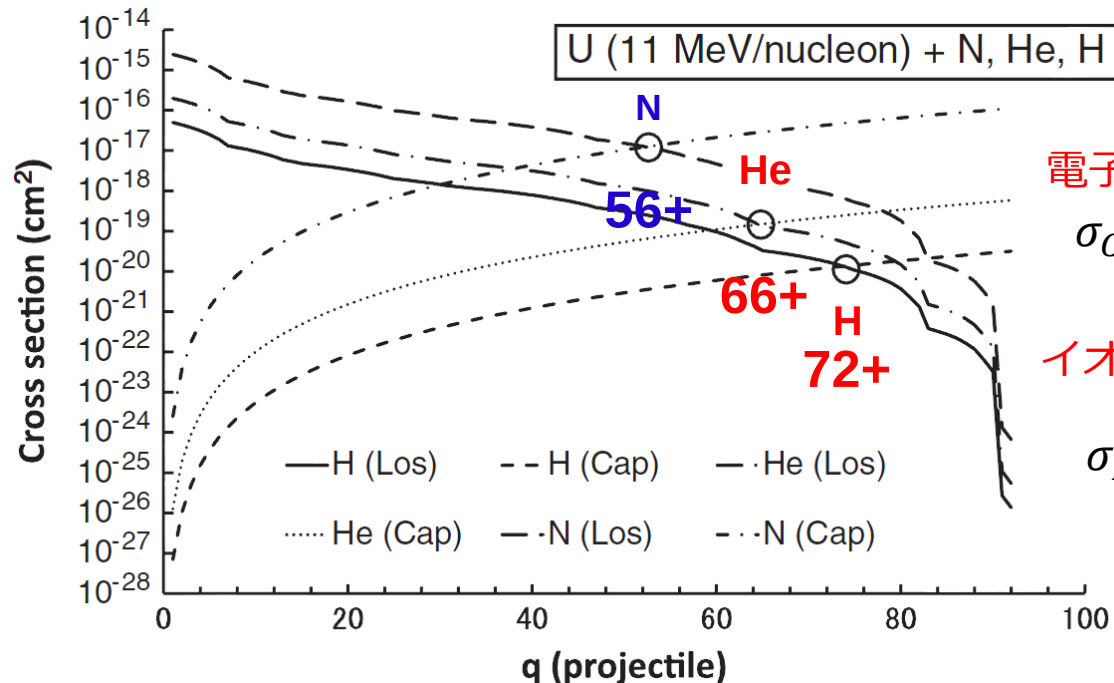
標的電子の速度が遅い($v_{1s} \propto Zc/137$)

⇒電子捕獲過程が抑制される

☹ 断面積が小さく、漏れやすい



計算例



電子捕獲断面積 (Schlachterのスケーリング式)

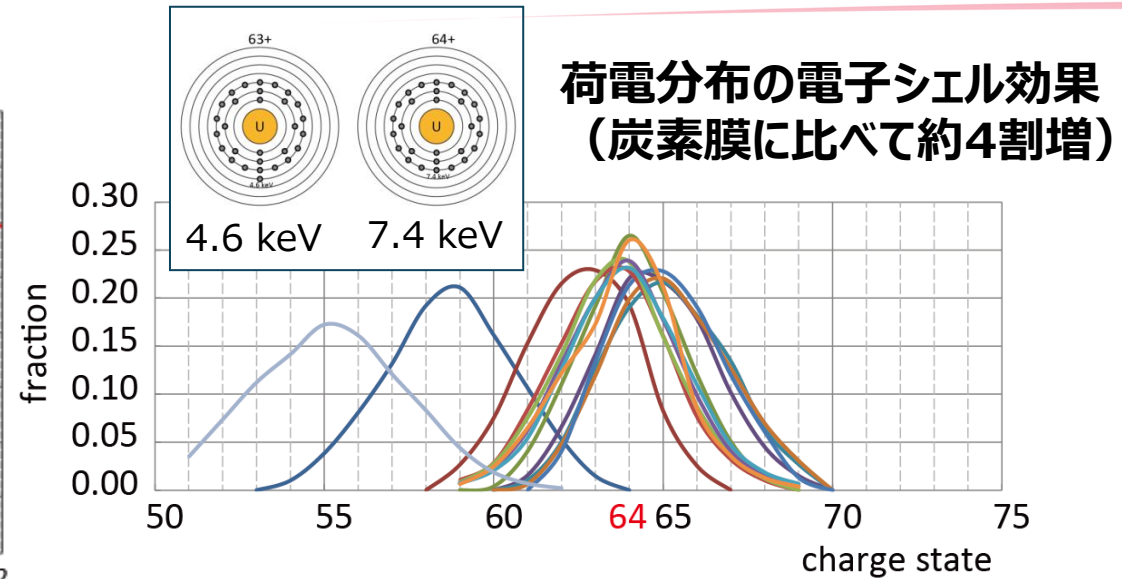
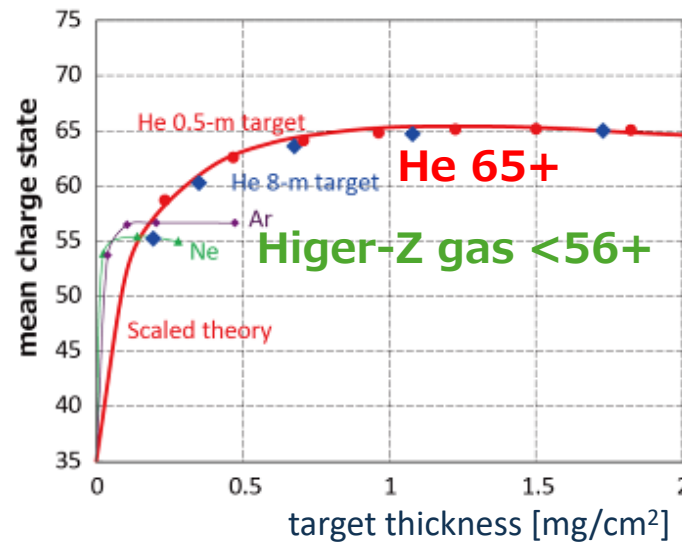
$$\sigma_c = 1.1 \times 10^{-8} q^{3.9} Z_t^{4.2} / E^{4.8}$$

イオン化断面積 (2体衝突モデル)

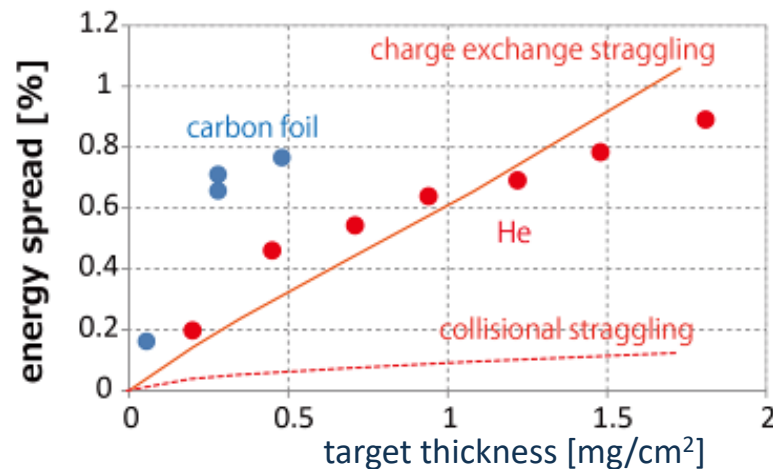
$$\sigma_{BEM} = \sum N \pi \left(\frac{Z_t e^2}{U_n} \right)^2 G \left(\frac{v_p}{v_n} \right) = \sigma_0 \sum N \left(\frac{Z_t}{U_n} \right)^2 G \left(\frac{v_p}{v_n} \right)$$

H. Okuno et al., PRST-AB 14, 033503 (2011)

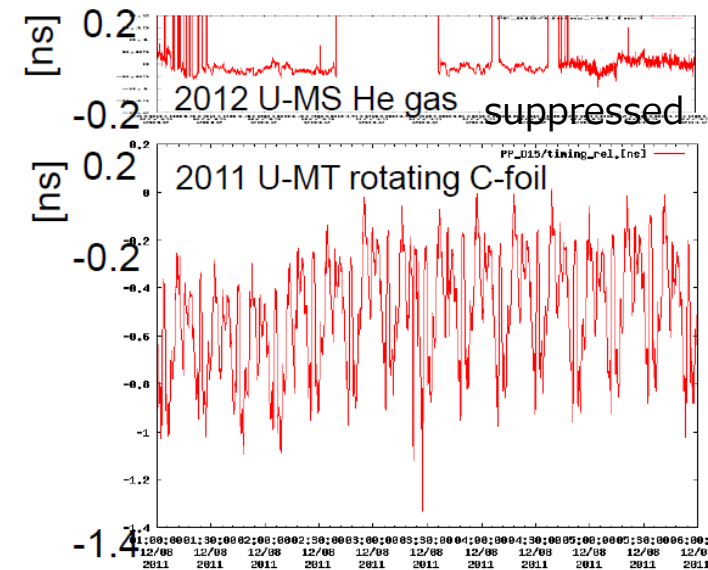
電荷発展と分布



エネルギー揺らぎ



時間的な揺らぎ



ガスかく乱板・ガスディフューザー

ガス流れかく乱板の概念図

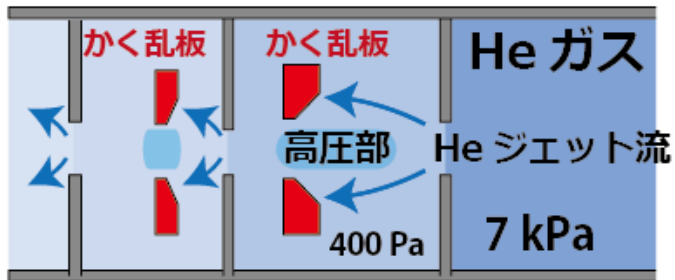
約 2 桁の違い

かく乱板あり

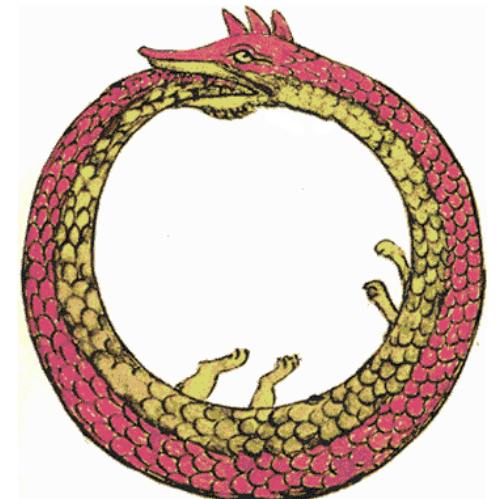
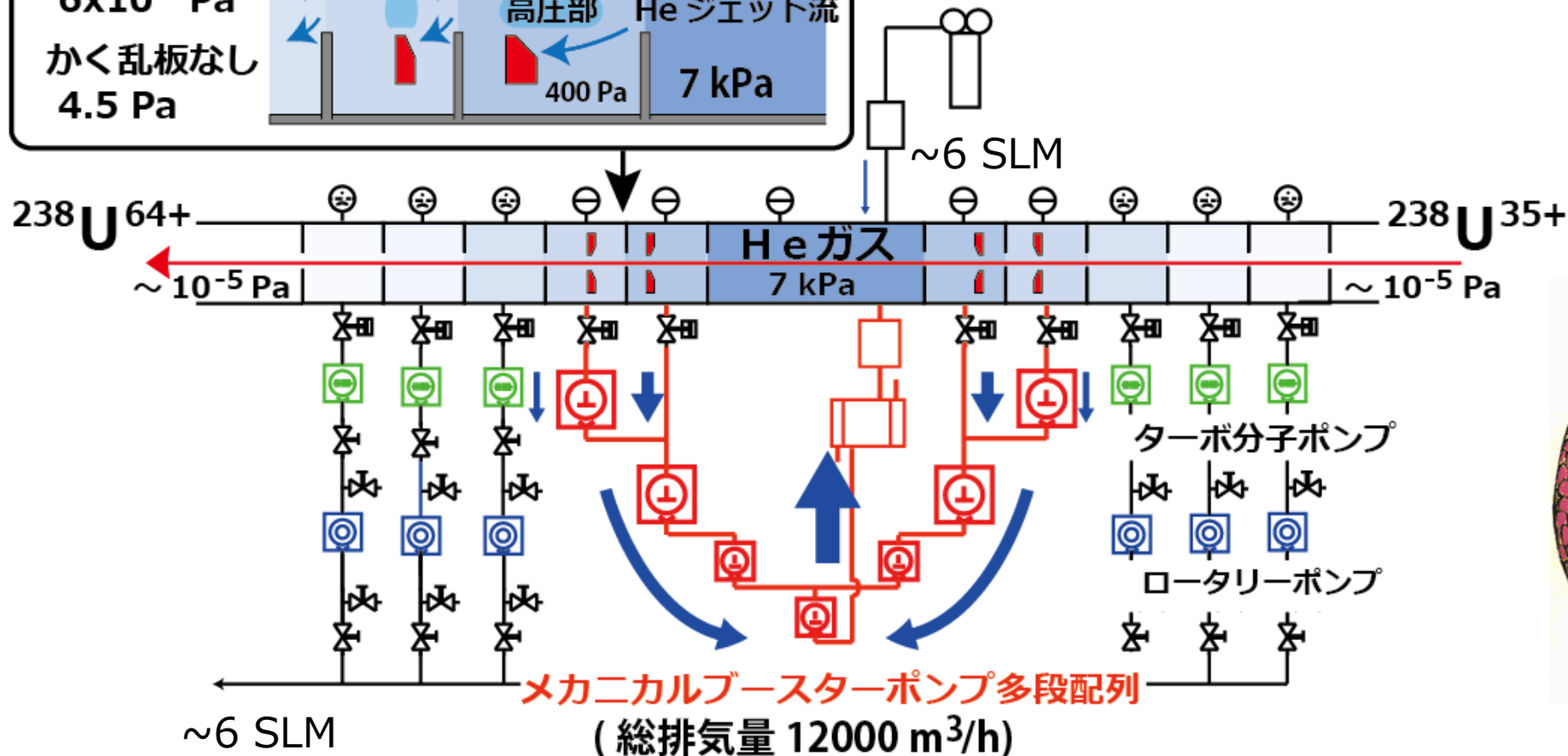
6×10^{-2} Pa

かく乱板なし

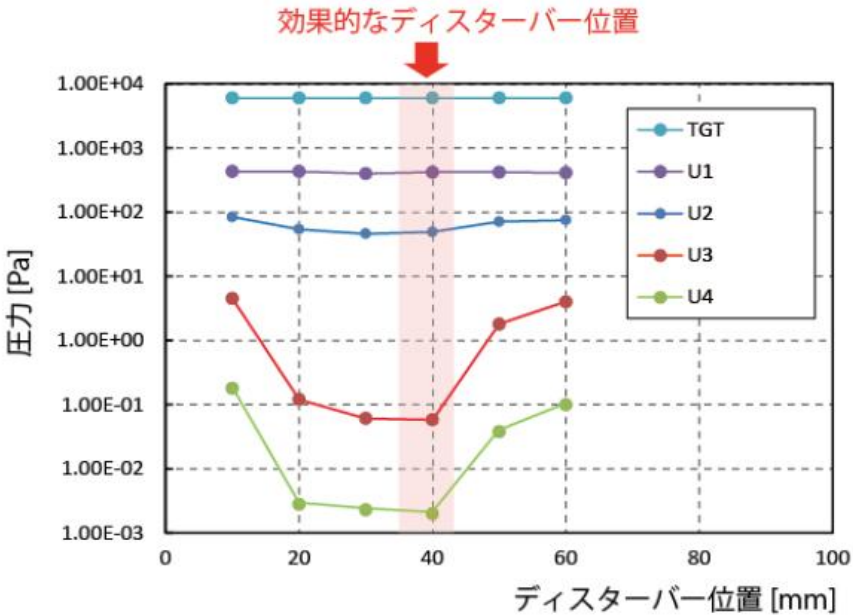
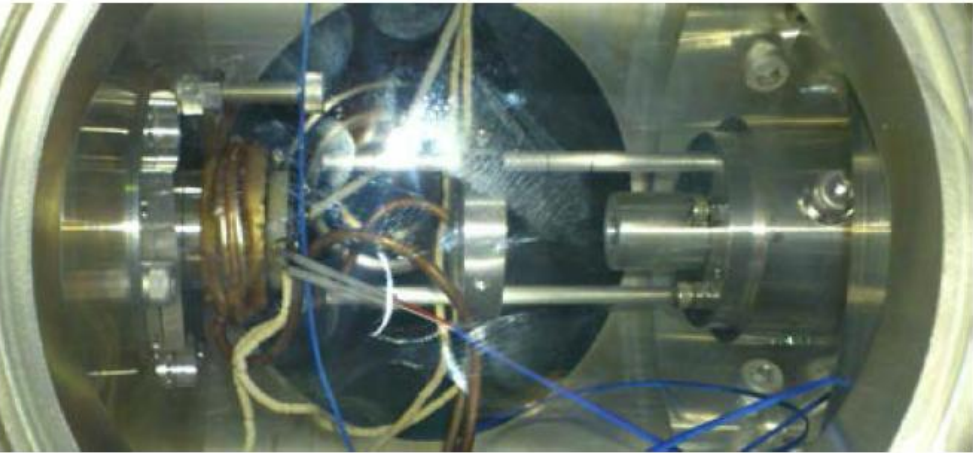
4.5 Pa



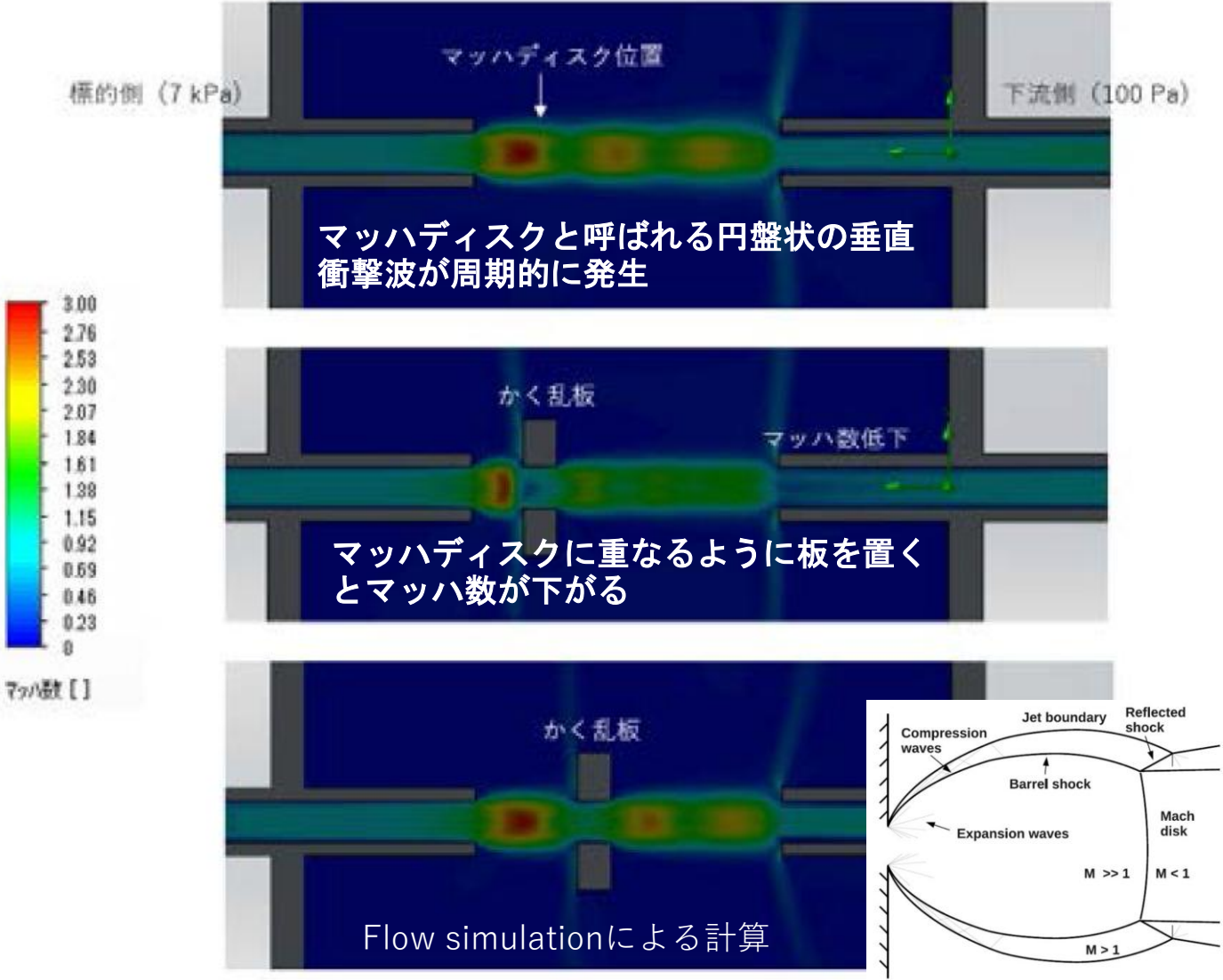
大型ルーツポンプ10台を多段で使用し循環
高い窓なし蓄積性能と油汚染のほとんどないHeガス大量循環(~350 SLM)を両立



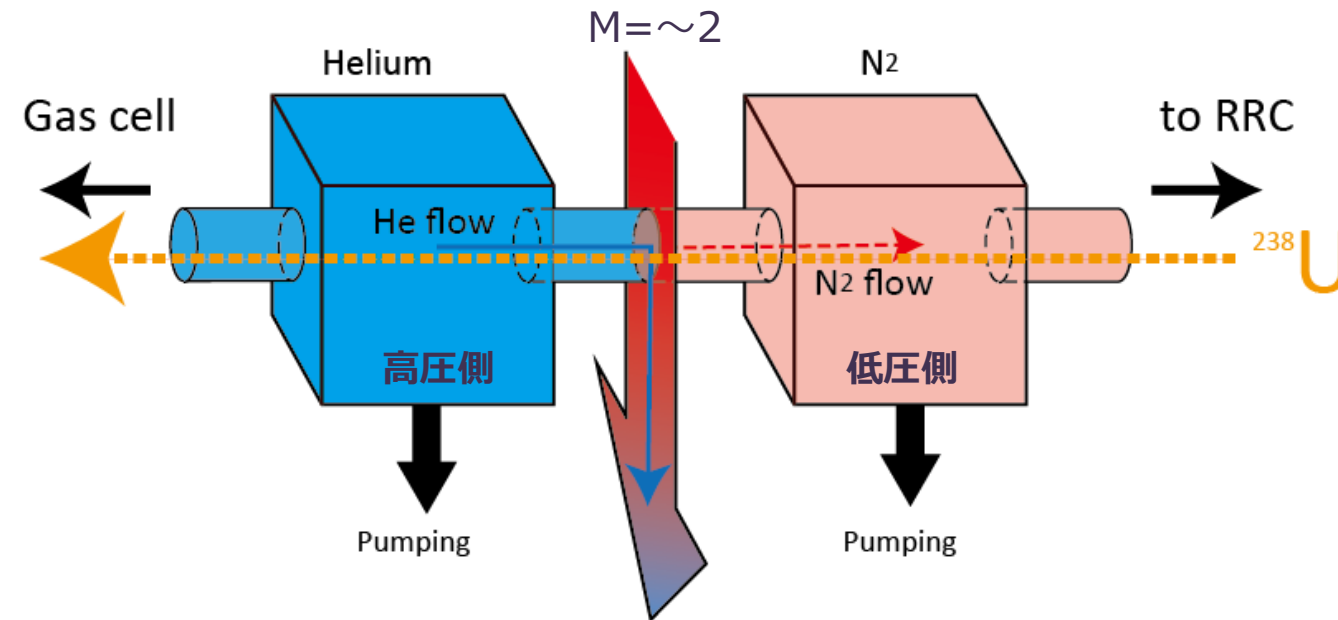
ガスかく乱板は大きな位置依存性➡流体力学的理解
(1 cm動かすと圧力が10倍以上変わる)



オリフィスの噴出流は出口圧力が背圧よりも高い**不足膨張噴流**



ガスジェットカーテン法のコンセプト

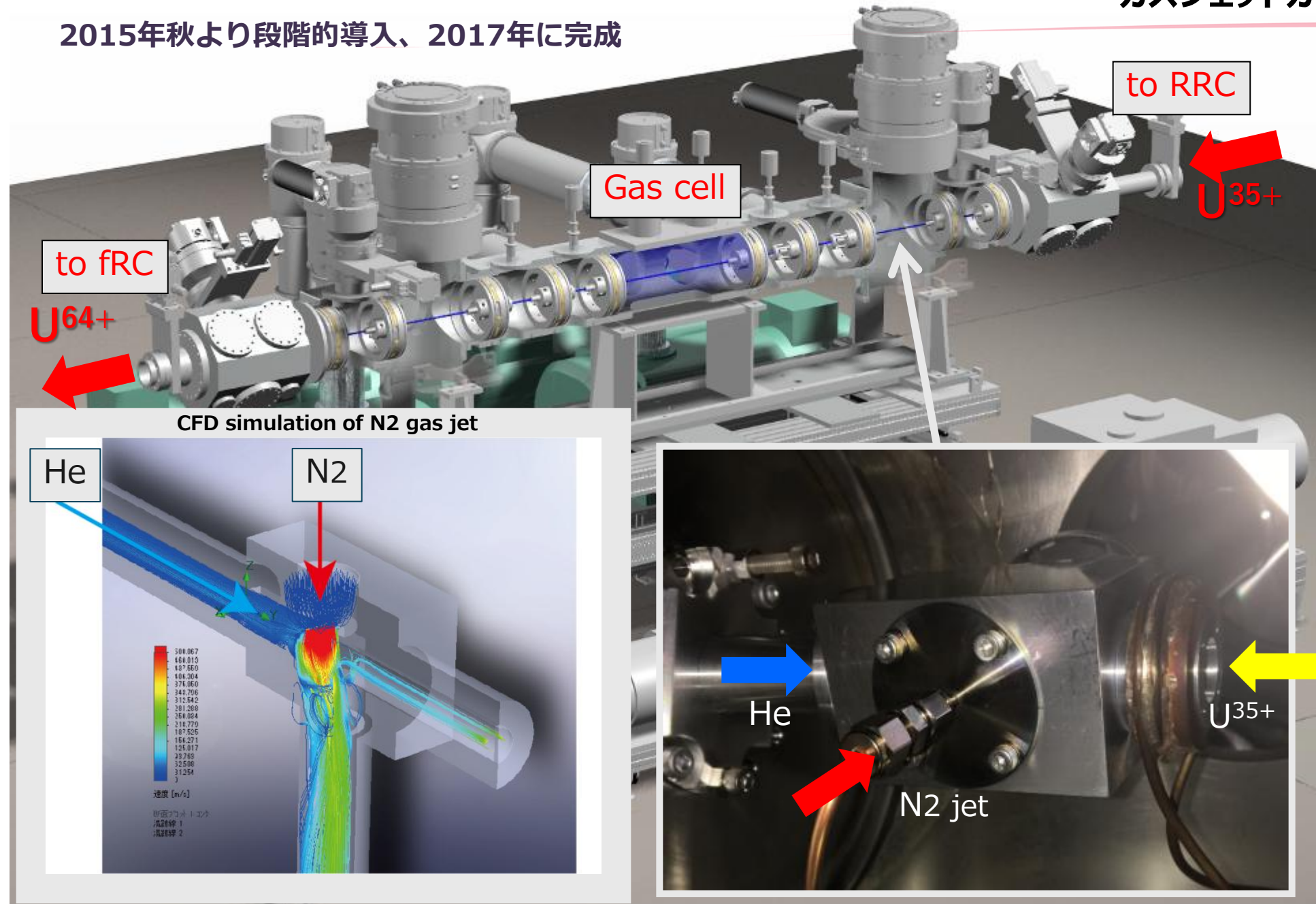


ヘリウムガスをブロックし、排気の容易な窒素ガスへ置換する



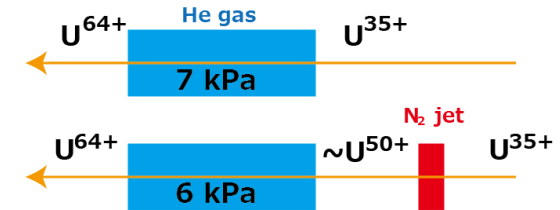
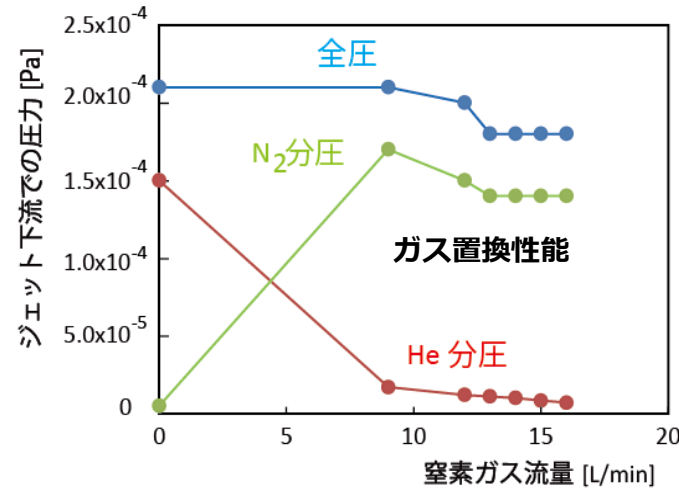
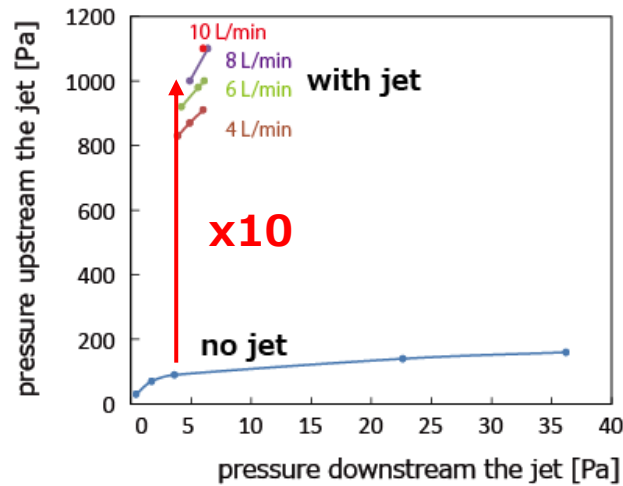
分煙用のエアカーテン
に近いイメージ

2015年秋より段階的導入、2017年に完成

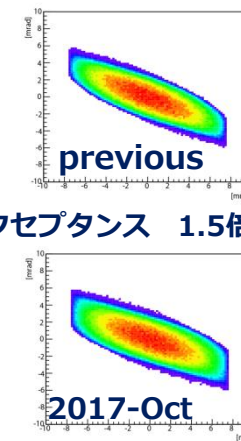
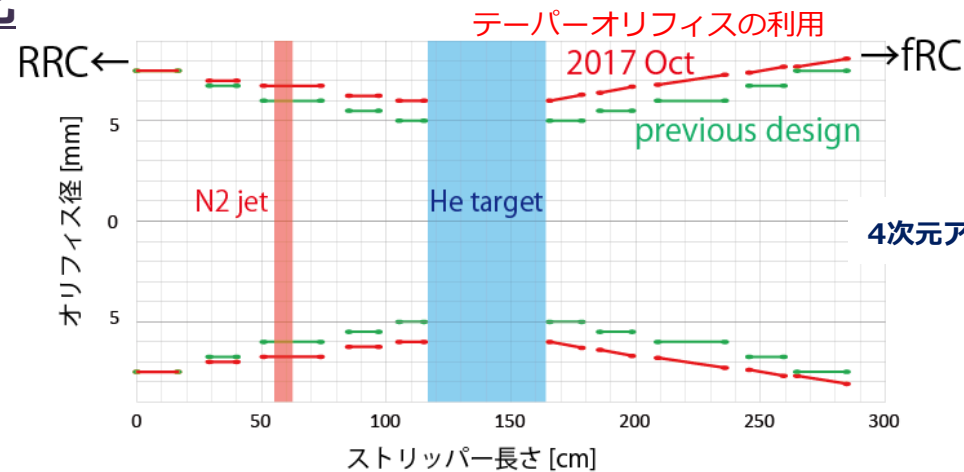


ガスジェットカーテンの3つの効果

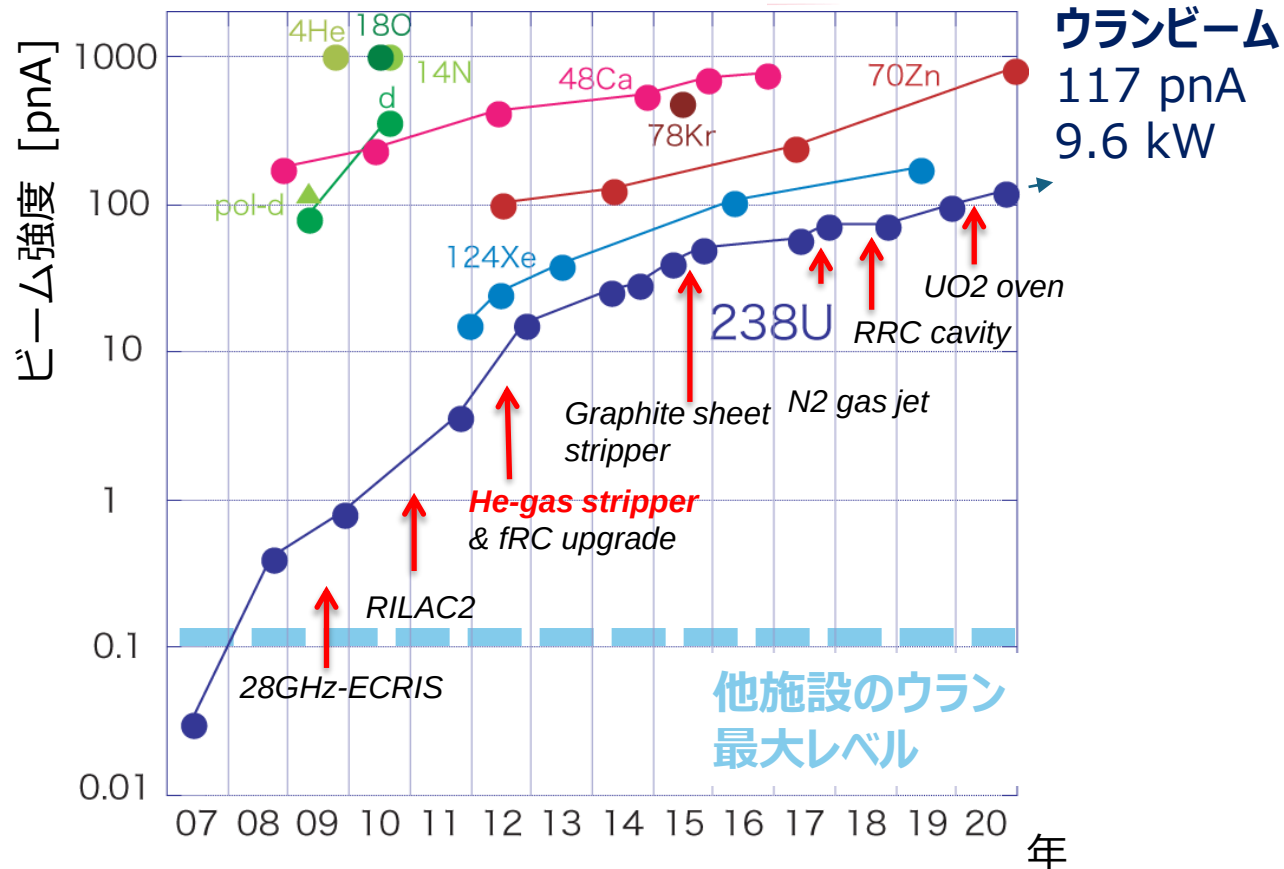
シール効果 (x10倍)、ガス置換効果、N₂プレストリッパー



大口径化



ダイナミックバキュームの問題は解決

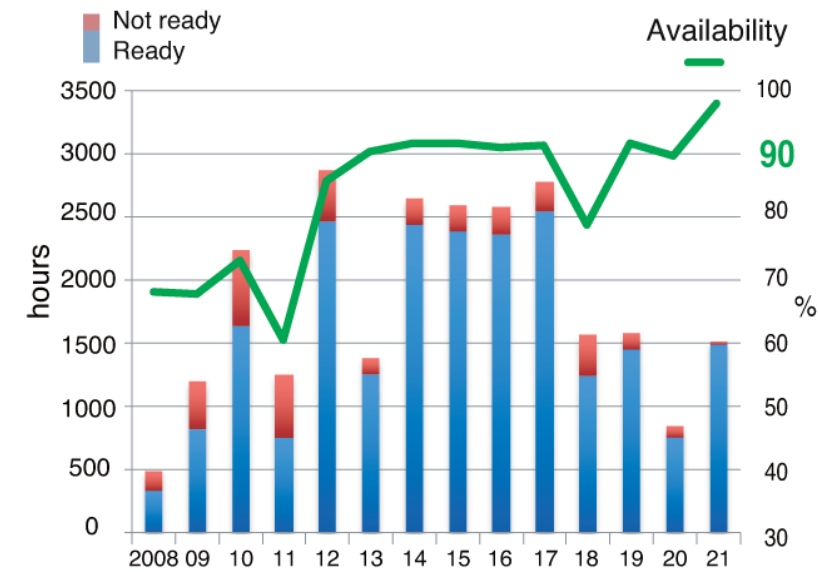


2007年から**1000倍以上**のウランビーム大強度化

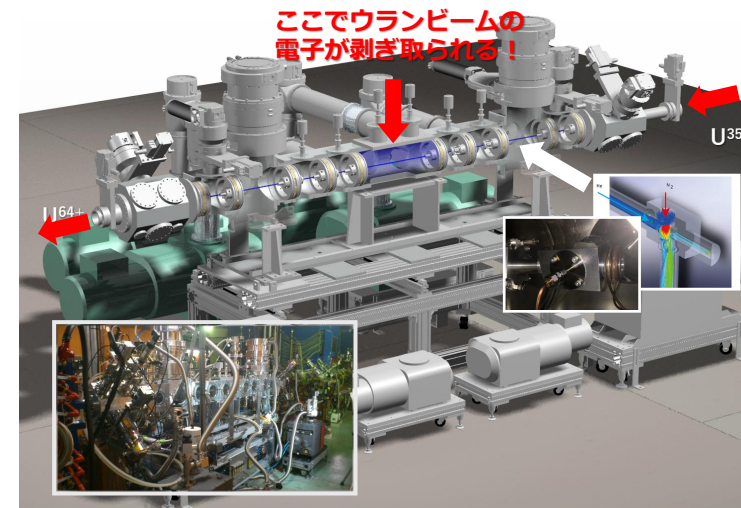
- ・ イオン源高度化と入射器の改良
- ・ **ストリッパの高耐久化**
- ・ 加速器運転技術の洗練化
- ・ 加速キャビティー改良

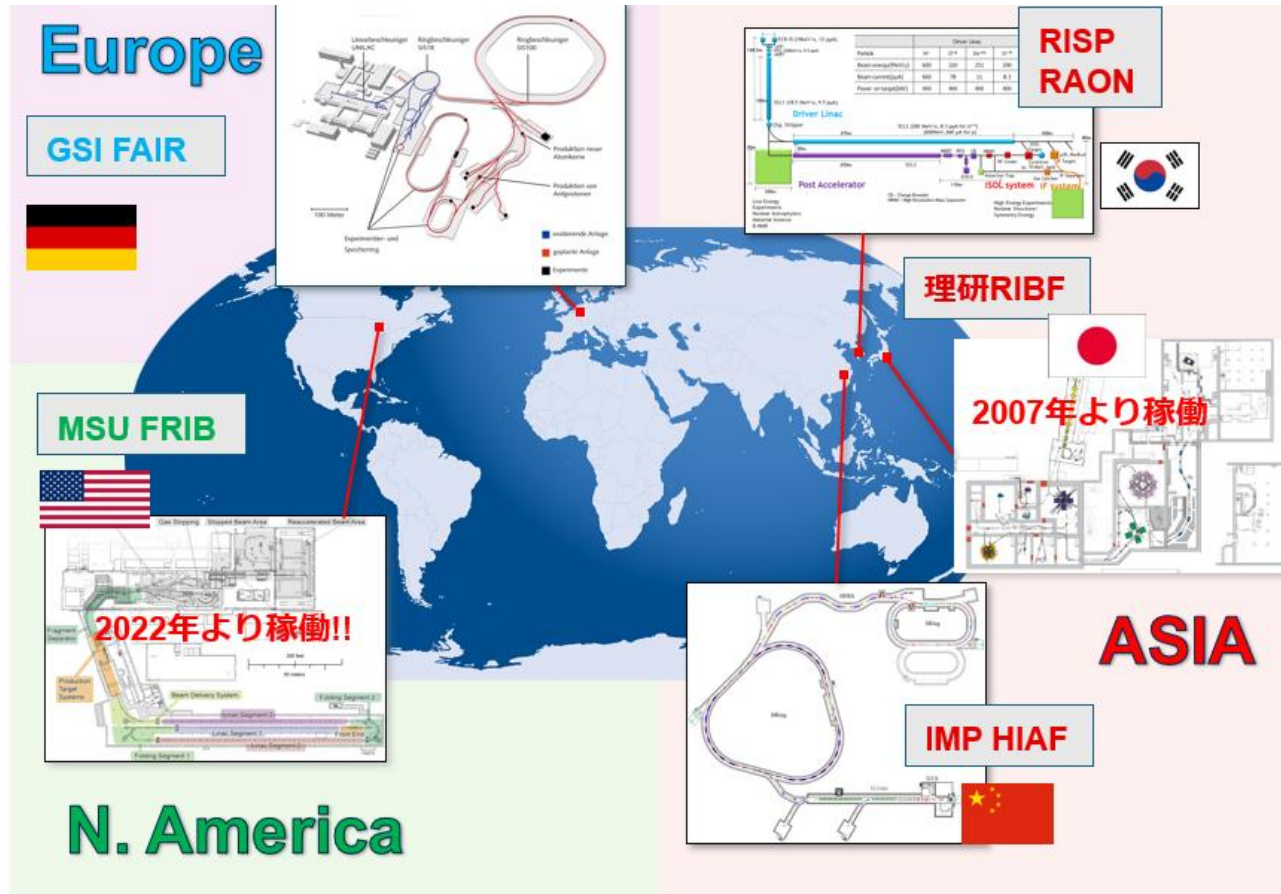
「加速器」Vol17 No4 2020 236-246
「RIビームファクトリー加速器系の性能向上と現状」
福西暢尚氏

ビームの運転効率増強



寿命無限大Heガスストリッパー





次世代インフライトRIビーム施設

($>$ 数百ns)

アジア・欧州・北米の3極の建設

FRIB (米国)

FAIR (欧州)

RAON (韓国)

HIAF (中国)

次世代ISOL施設 (相補的、 >1 s)

HIE-SOLDE (欧州)

SPIRAL2 (仏)

SPES (伊)

ARIEL (加)

EURISOL (欧州) など

施設名	主加速方式	ビームエネルギー	現在強度	目標強度	建設状況
RIBF (日本)	サイクロトロン	345 MeV/u	6×10^{11} pps	1.2×10^{13} pps	2007-
FRIB (米国)	超電導リニアック	200 MeV/u	6×10^{11} pps	5.0×10^{13} pps	2022-
FAIR (欧州)	シンクロトロン	~ 1 GeV/u	-	2.5×10^{11} pps	2028
RISP (韓国)	超電導リニアック	200 MeV/u	-	5.0×10^{13} pps	2029以降
HIAF (中国)	シンクロトロン	~ 800 MeV/u	-	6.0×10^{11} pps	2026

今後世界的なRI原子核
物理の隆盛期



FAIR (2028-)
シンクロトロン

2023 10月
ダルムシュタット (独)

RAON(2029-) 超電導リニアック

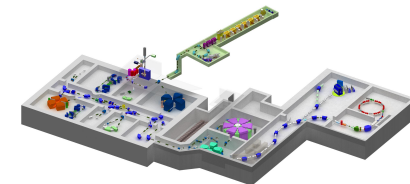
2021 11月
デジョン広域市 (韓国)



https://risp.ibs.re.kr/html/risp_en/project/project_0204.html

RIBFと次世代インフライト施設

RIBF(2007-) サイクロトロン



FRIB(2022-) 超電導リニアック

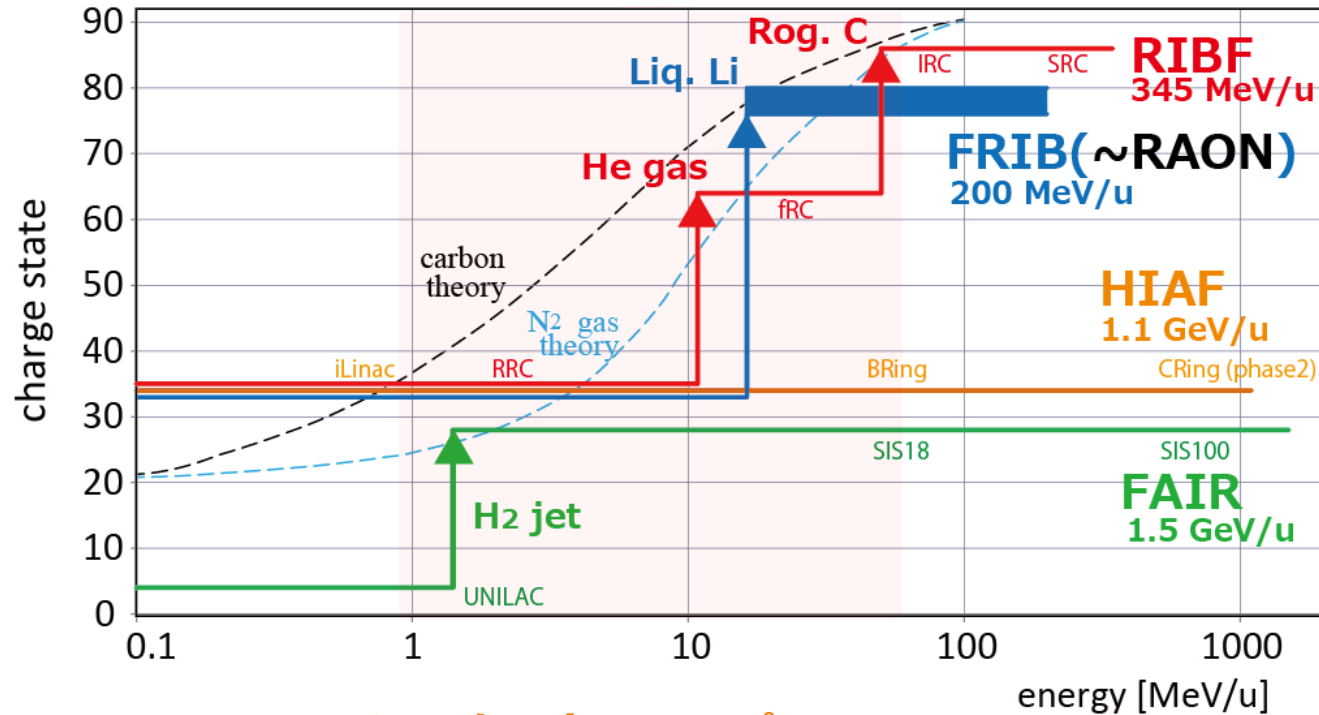
イーストラッシング
ミシガン州 (米)



HIAF (2026-) シンクロトロン



2023 10月
広東省恵州市 (中国)

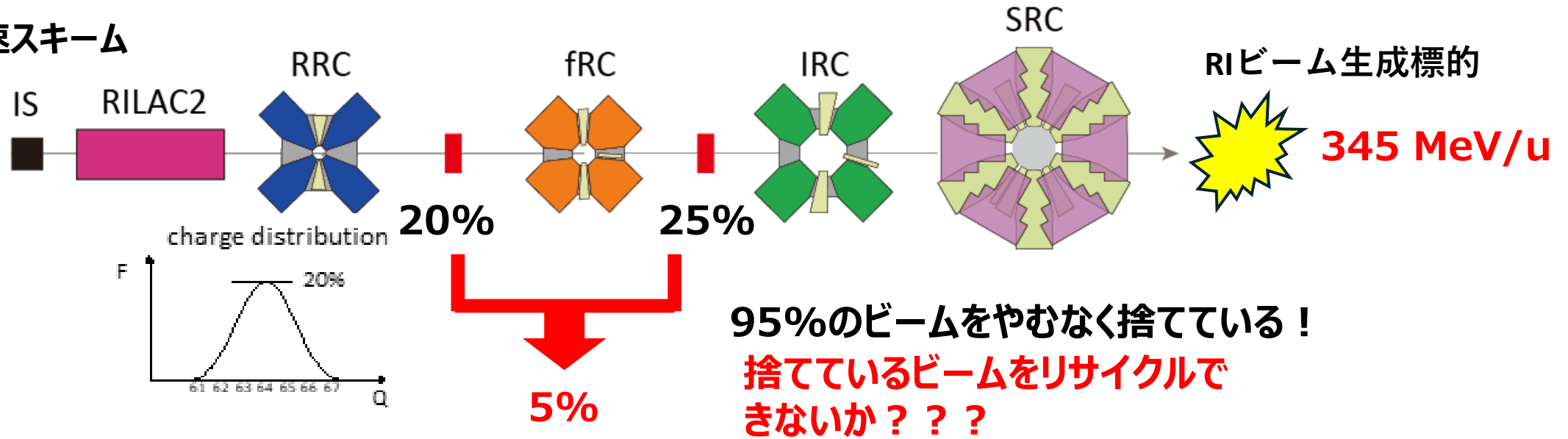


- ・ シンクロトロン
 - ・ リニアック
 - ・ サイクロトロン
- 全てによるアプローチ

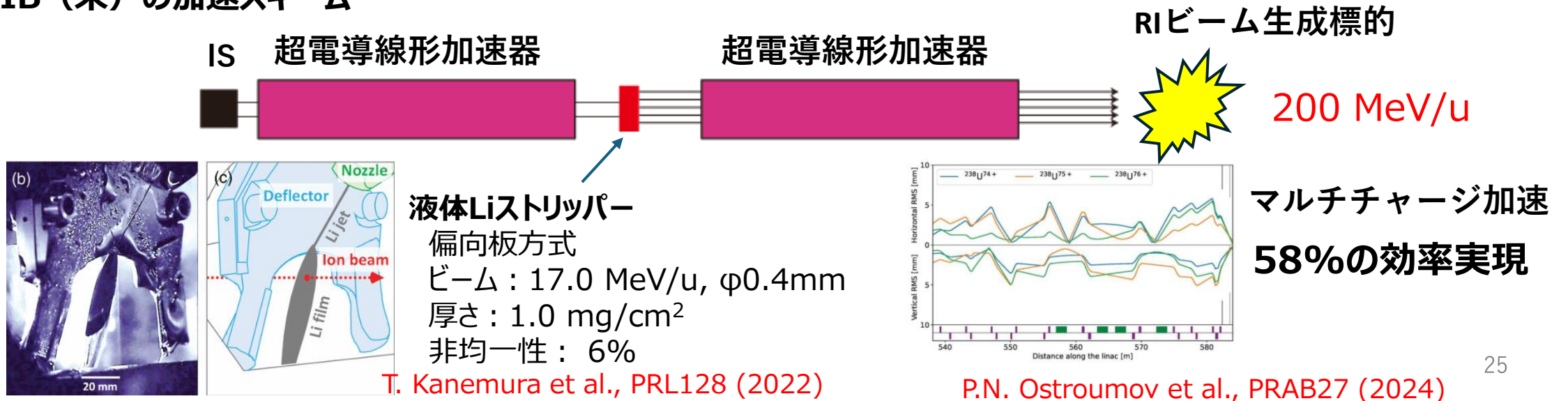
中間エネルギーでストリッパー

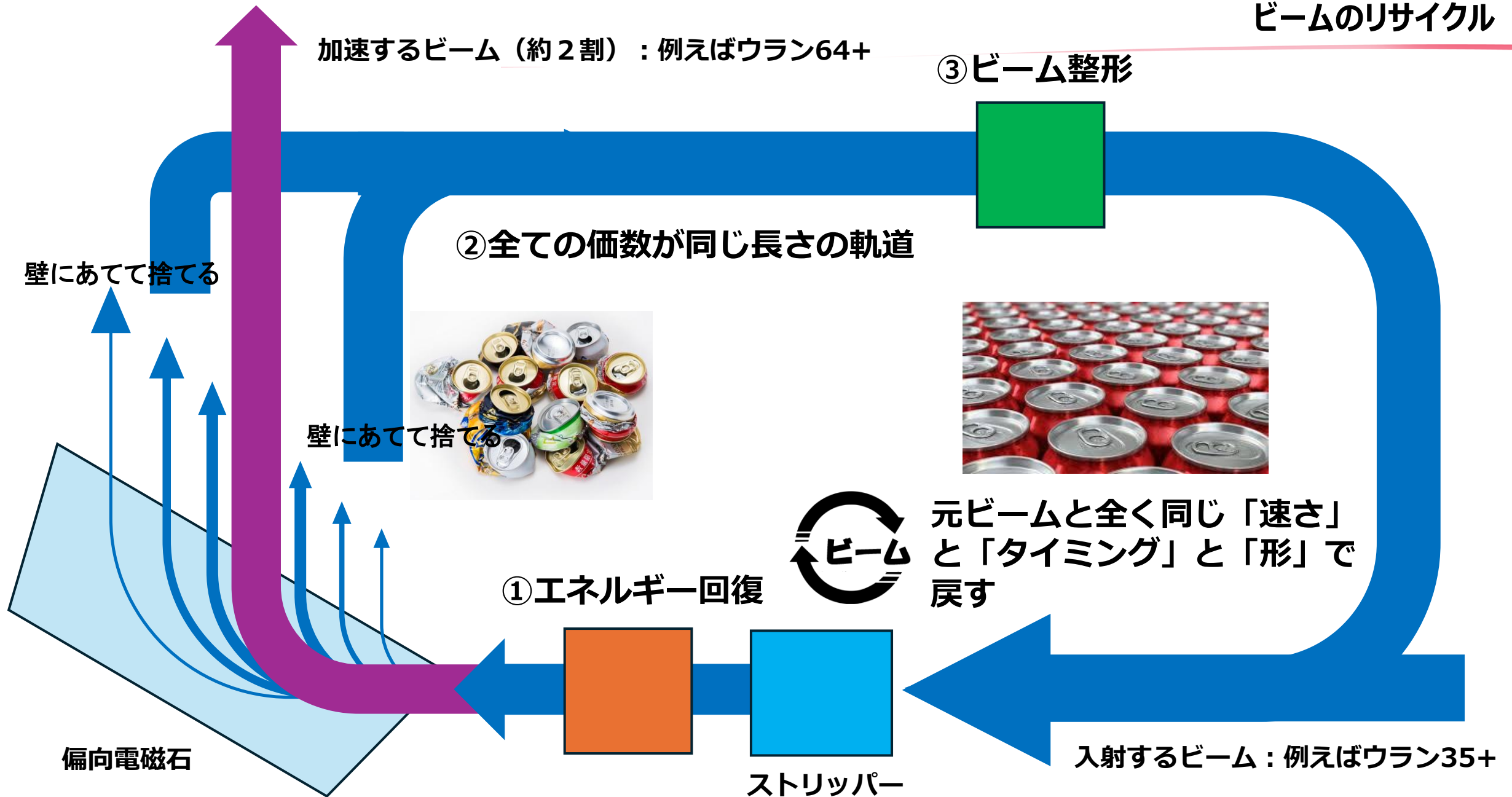
- ・ HIAF(シンクロトロン, パルス)
 U^{34+} No stripper (phase1), **afterglow ECR**, (planning $\text{U}^{34+} \rightarrow \text{U}^{78+}$ in phase2)
- ・ FAIR(シンクロトロン, パルス)
 $\text{U}^{4+} \rightarrow \text{U}^{28+}$ @ 1.4 MeV/u, **lower charge state** to reduce space charge effects
- ・ FRIB(SRF線形加速器, DC), RAON(SRF線形加速器, DC)
 $\text{U}^{33+} \& \text{U}^{34+} \rightarrow \text{U}^{76+} - \text{U}^{80+}$, **マルチチャージ加速**
- ・ RIBF(サイクロトロン, DC)
 $\text{U}^{35+} \rightarrow \text{U}^{64+}$ & $\text{U}^{64+} \rightarrow \text{U}^{86+}$, two strippers, advantage of acceleration ability

RIBFの加速スキーム



FRIB（米）の加速スキーム





理研オリジナルの全く新しいリング

等長軌道用偏向電磁石

U59-66+

ビーム整形用磁石

エネルギー
回復空洞

ストリッパー

荷電変換リング (Charge Stripper Ring, CSR)

ビームをリサイクルするための装置：

7つの価数をリサイクル

- ・ エネルギー回復用加速空洞
- ・ 精密な磁石を用いてビーム軌道が同じ長さ
- ・ ビーム整形用の磁石ステーション

U35+

U64+

© 2024 RIKEN, M. Nishida

分散関数

ストリッパー位置

ビーム包絡線 x

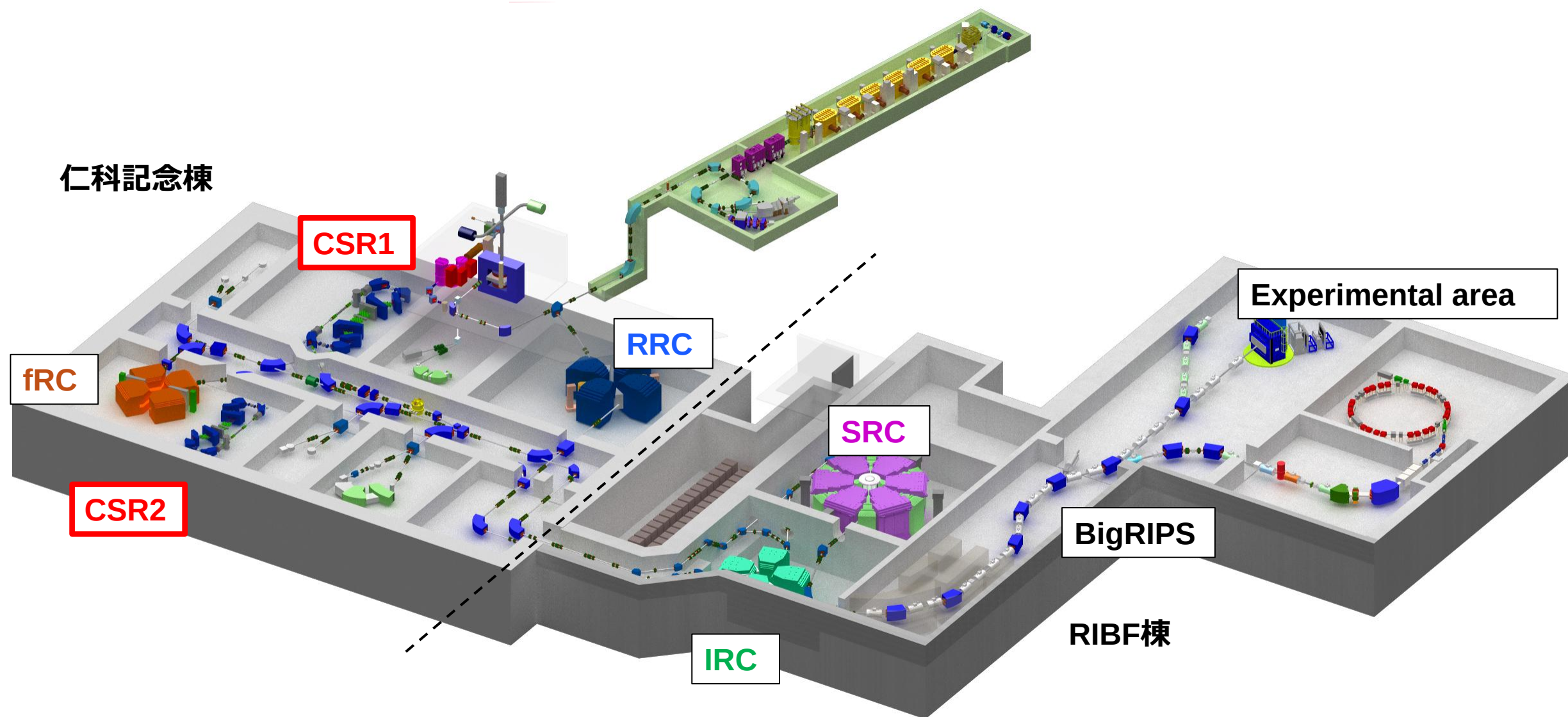
y

z

44.64 m

8つの価数について安定周回する解

H. Imao, JINST, 15, P12036 (2020)



非常にコンパクトに作成可能で既存の実験施設に収まる

CSR2

E4 room

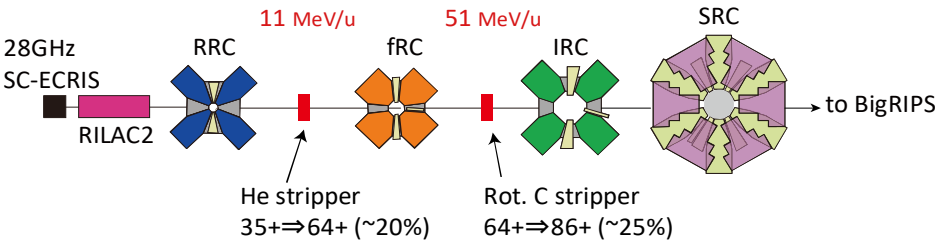
CSR1

E6 room

加速スキームの比較

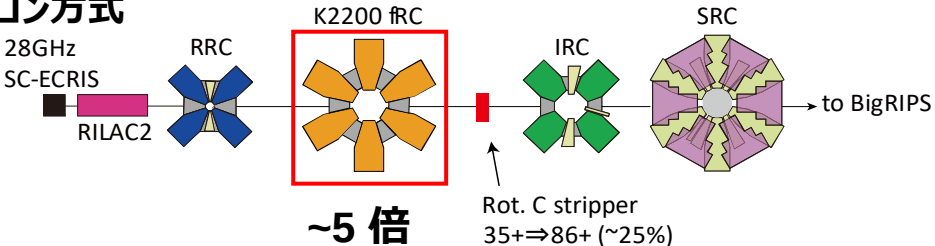
(a) present acceleration scheme of uranium ions

現状



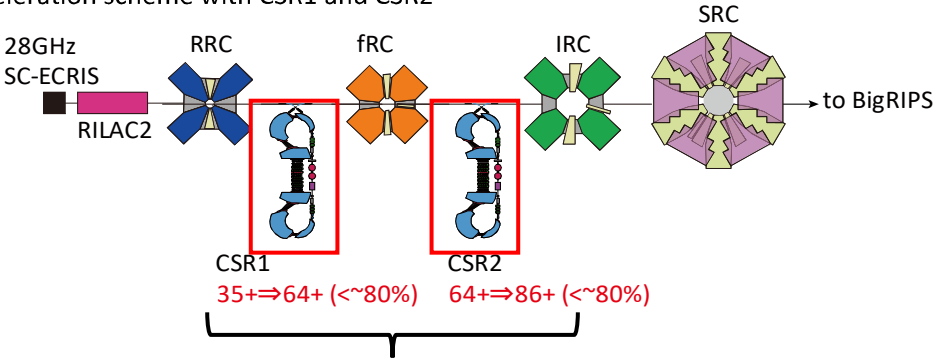
(b) acceleration scheme with K2200 fRC

サイクロトロン方式



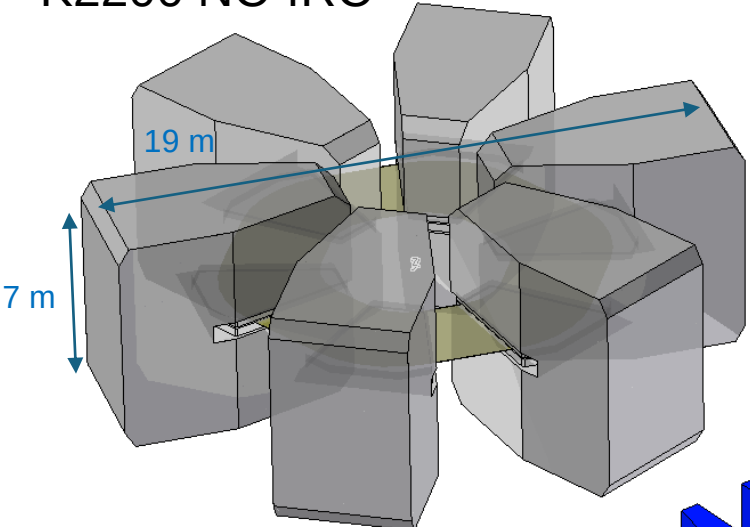
(c) acceleration scheme with CSR1 and CSR2

CSR方式



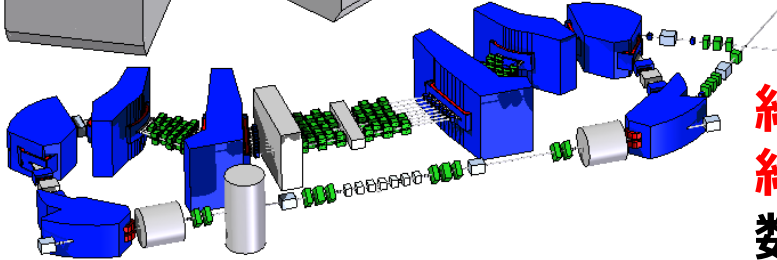
~10 倍以上

K2200 NC-fRC



重さ: 7000トン以上
単体電力: 4 MW以上
建屋増設を含め
数百億円規模

CSR1

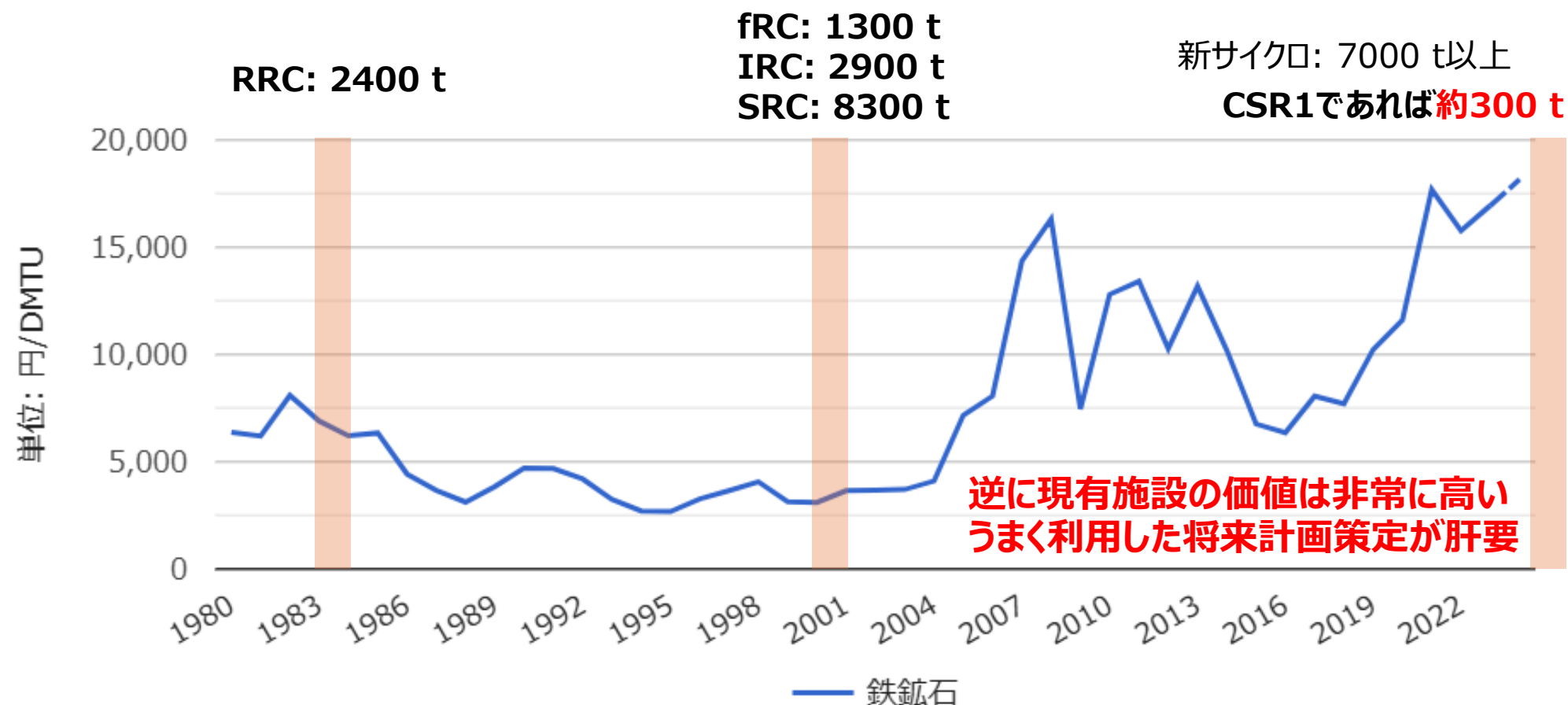


約300 トン,
約1.5 MW
数十億円規模

CSRビームリサイクル方式による電力効率化

RIビーム生成効率 (^{238}U ビームパワー/電力)

現状	: 1
CSR1	: 3.3 倍
CSR2	: 12.7 倍

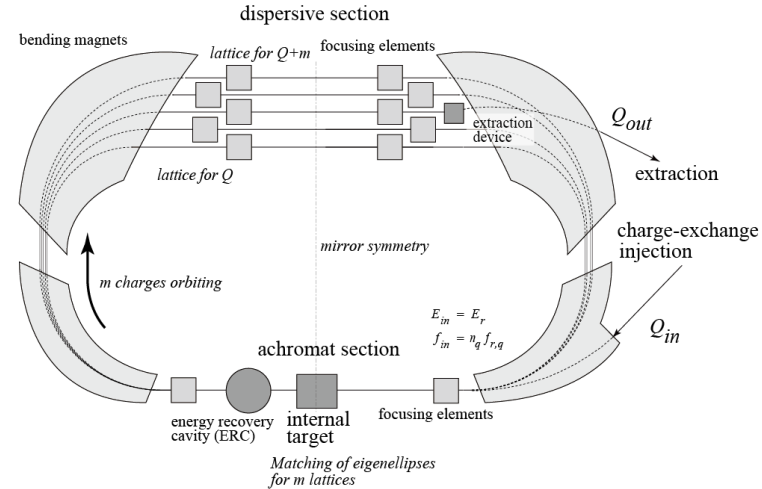


円為替を考慮した鉄鉱石価格推移(https://ecodb.net/commodity/iron_ore.html)

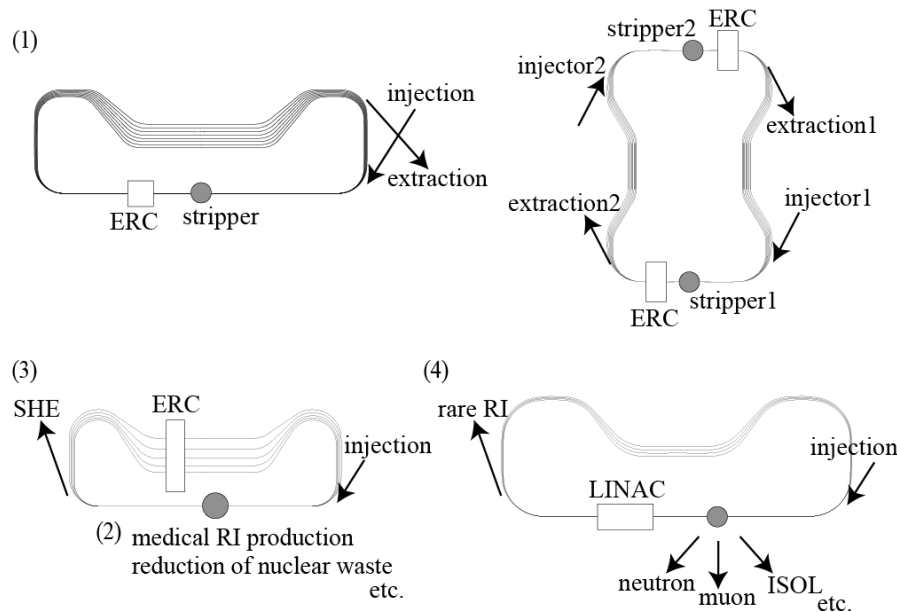
CSRの一般化と応用可能性：クレオストロン(Chreostron)

Chreostron

内部標的での荷電変換を伴う複数電荷の重イオンビームをリサイクル周回するリング



ギリシャ語で「charge」は「 $\chi\rho\epsilon\omega\sigma\eta$ 」
(発音: chréosi)
ただし、「料金」、「負担」、「装填」を意味するcharge
電荷だと「 $\phi\omicron\rho\tau\acute{\iota}\omicron$ 」(発音: fortío)
フォルティオトロンでも良いが語感と略名をCSRとも出来るようにしたかった



Chreostronは 重イオンビームにおける

- (1)ビーム自体の改変、
- (2)内部標的の核変換、
- (3)稀少イベントの生成と観測、
- (4)二次粒子発生、

など幅広い利用法があると考えられる

2022年

若手WGによる概念設計
12月学術会議→未来の学術構想
IPAC22 招待講演
LINAC22 招待講演

2023年

6/14-15 **技術審査会開催（技術レポート作成）**
6/30 文科省ロードマップ提出
7/24-26 仁科センターアドバイザー委員会開催
HPTW23 招待講演

2024年

1/23-24 **ADRI24主催**
AccelApp24 招待講演

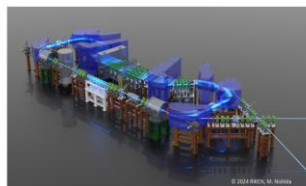
2025年

1/22-23 **ADRI25主催**
HIAT25 招待講演予定
IPAC25 招待講演予定

Advancing physics at next RIBF (ADRI25)

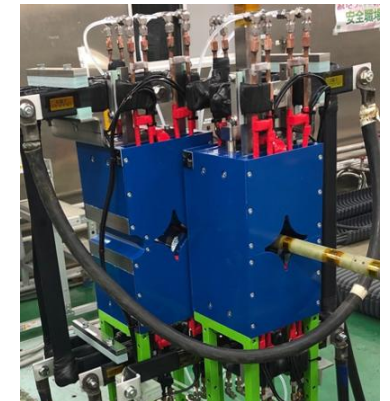
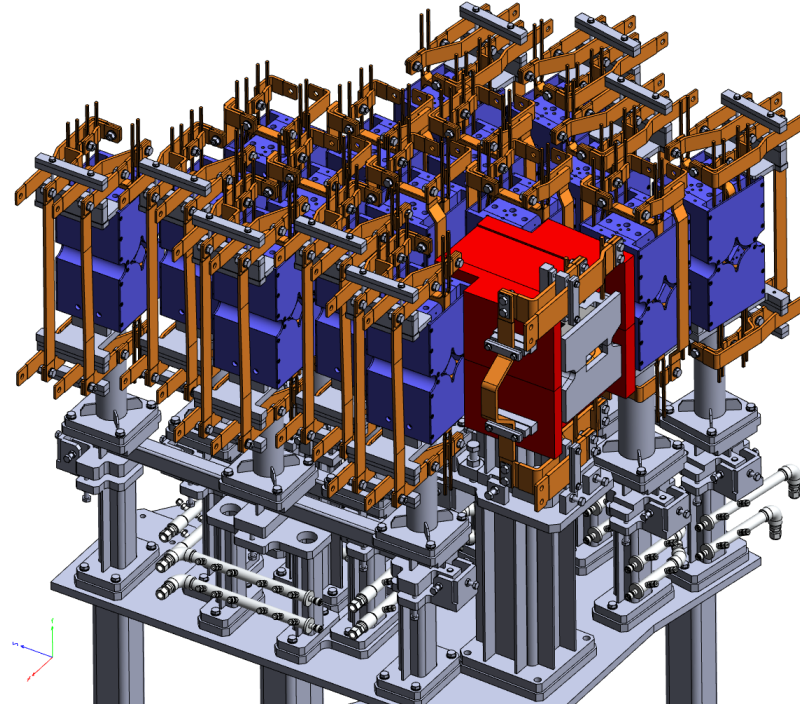
22-23 Jan 2025
RIKEN Wako campus
Asia/Tokyo timezone

Overview
Call for Abstracts
Registration
Timetable
Workshop photos



The workshop on advancing physics at next RI Beam Factory (ADRI25) will be held at the Nishina Hall of the RIKEN Nishina Center on January 22 and 23, 2025.

ビーム整形装置（大きな技術的チャレンジ）

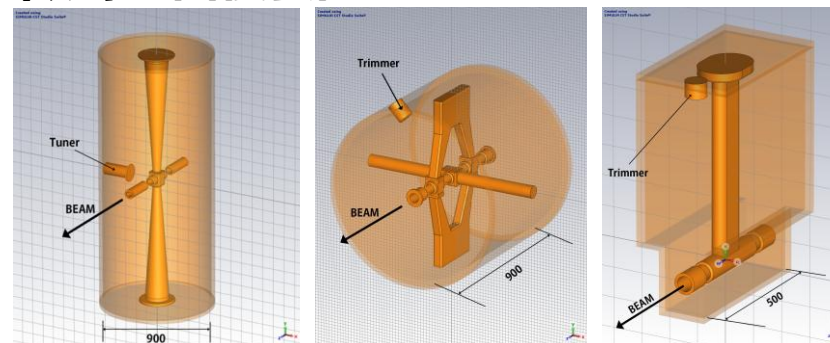


コンパクトQ磁石



取出し磁石

エネルギー回復装置



**4件の特許案件を含む
（2件が企業と共願）**

Table of Contents

1. Accelerators at the RIBF and Upgrade Plan with CSR 4

1.1 Charge stripping of uranium ions at RIBF 5

1.2 Conceptual layout and system parameters 9

1.3 Equilibrium orbits 12

1.4 Fundamental symmetry of magnetic fields 14

1.5 Mirror-symmetric optics with double rebunchers 15

1.6 Beam dynamics 17

1.7 Design of eigen-elliptic matchings 19

1.8 Asymmetry of equilibrium orbits due to energy recovery process 20

1.9 Effective parameters of magnets and linear calculations 22

1.10 Betatron tune 28

1.11 Emittance growth and eigenellipse 30

1.12 Compensation of closed orbit distortion 32

1.13 Beam loss control 35

1.14 Beam emittance and efficiency 39

1.15 Beam tuning method 43

2.16 Possible extension of CSR1 to ion species other than uranium 44

2.17 Design of quadrupole magnets 46

2.18 Basic parameters 47

2.19 Optimization of pole shape of the quadrupole magnet 48

2.20 Optimization of leakage field on adjacent lines 49

2.21 Crosstalk 51

2.22 Calculation of stress and deformation 51

2.23 Prototype production 52

2.24 Various tests of prototype magnets 52

2.25 Harmonic coil method 53

2.26 Arrangement planning at QS 54

2.27 Movable platform for quadrupole magnet 54

2.28 EBM1 56

2.29 Prototype production and field measurement 59

2.30 Design of BM1-8 62

2.31 CBM 66

2.32 Others 66

3. Stripping Design

3.1 Interactions with beam 68

3.1.1 Ionization and electron capture cross-section 68

3.1.2 Charge state evolution 69

3.1.3 Circulating calculation considering only the change state 70

3.1.4 Equilibrium charge state 70

3.1.5 Charge state evolution in gas target 71

3.1.6 Second-stage stripper 72

3.1.7 He thickness for maximum extraction yield of 64+ 76

3.1.8 Energy straggling 79

3.1.9 Angular straggling 80

3.1.10 Evaluation of the number of circulating charge states 81

3.1.11 Extraction yield for other nuclides 83

3.2 Design of stripper section in CSR1 84

3.2.1 Comparison with the current He gas stripper in RIBF 84

3.2.2 Design of differential pumping system 86

3.2.3 Flow-disturbing plate 87

3.2.4 Gas jet curtain 88

3.2.5 Heat removal by circulation of gas 89

3.2.6 Stable gas supply method and consumption 89

3.2.7 Issue of activation 89

3.2.8 Longitudinal monitor via Rutherford backscattering 90

3.3 Energy recovery cavity 92

3.4 Rebuncher 94

3.5 Energy corrector 96

3.6 Rf amplifier and control system 98

3.7 Beam in CSR1 101

3.8 Requirements 101

3.9 Components 101

3.9.1 Beam Position Monitor (BPM) 102

3.9.2 Phase Probe (PP) 103

3.9.3 Profile Monitor (PF) and Differential Probe (DP) 104

3.9.4 Baffle monitor (BF) 104

3.9.5 Faraday Cup (FC) 104

3.9.6 Longitudinal monitor and transverse beam profile monitor in the stripper 104

3.10 Beam transport system 105

3.10.1 Beam conditions for design and magnet configuration 105

3.10.2 Optical design of RRC - CSR1 106

3.10.3 Optical design of CSR1 - fRC 109

3.10.4 Summary of beam envelopes and losses from RRC to fRC 111

3.11 Control System 114

3.11.1 General System Architecture 114

3.11.2 Networking 114

3.11.3 Machine Protection System 115

3.11.4 Control Framework 115

3.11.5 Field Network 116

3.12 Data Integration for Infrastructure Enhancement 116

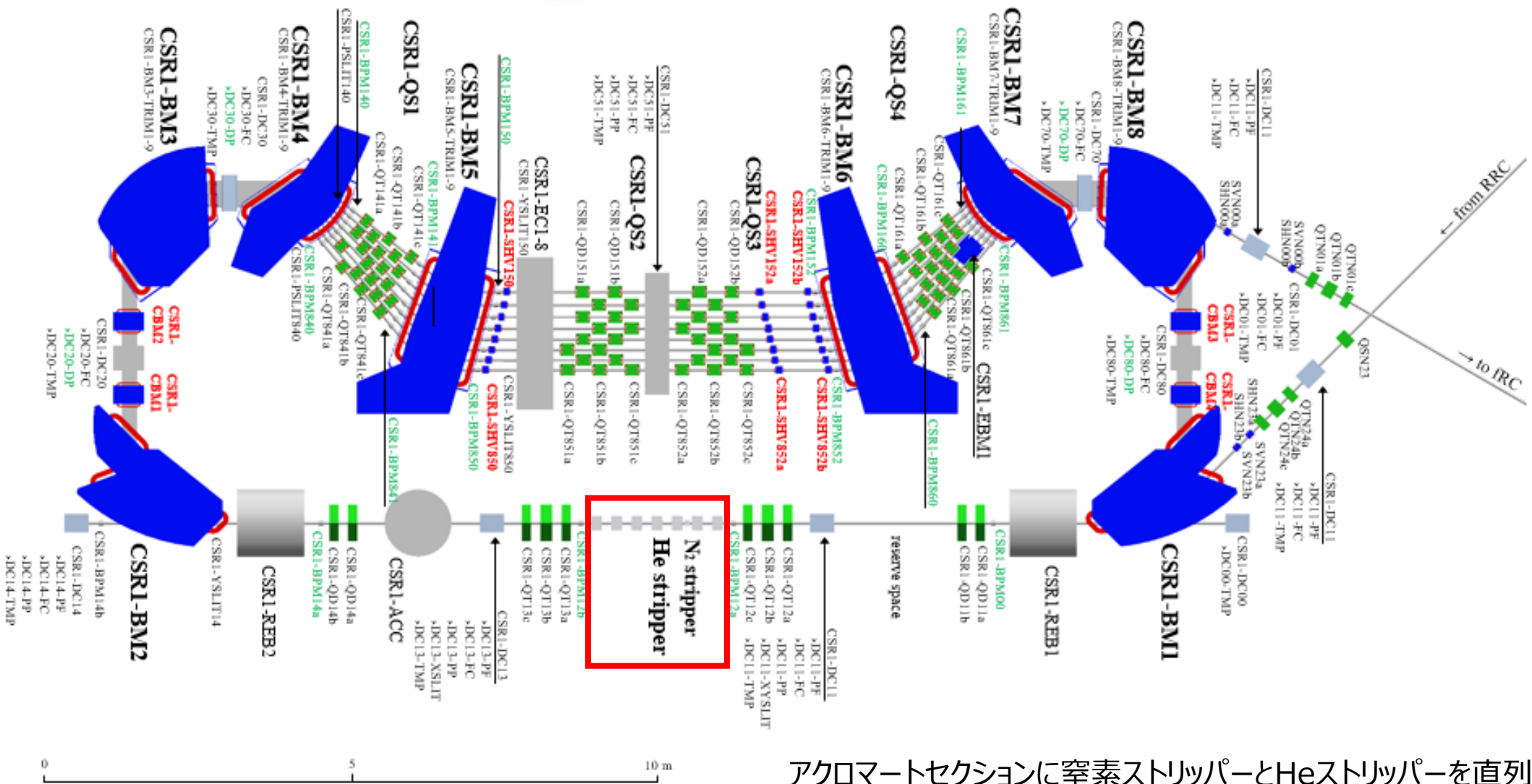
3.13 E6 Experimental Room Renovation 117

3.14 Power Infrastructure Development 118

3.15 Cooling Water System Upgrades 118

3.16 Air Conditioning System 119

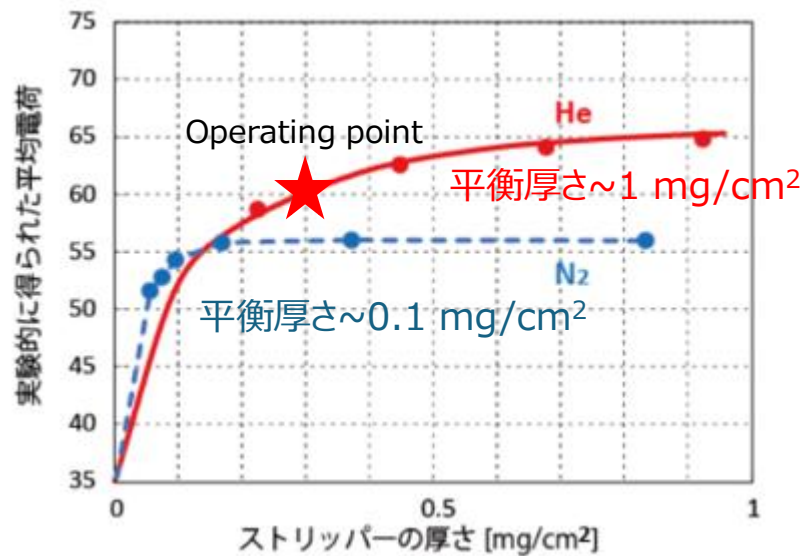
3.17 References 120



アクロマートセクションに窒素ストリッパーとHeストリッパーを直列に配置
 最大40 kWのビームが突入
 荷電変換ロスを減らす必要がある

2段階ストリッパによる荷電変換サイクル

N₂ ($\sim 0.1 \text{ mg/cm}^2$) + He ($\sim 0.3 \text{ mg/cm}^2$)

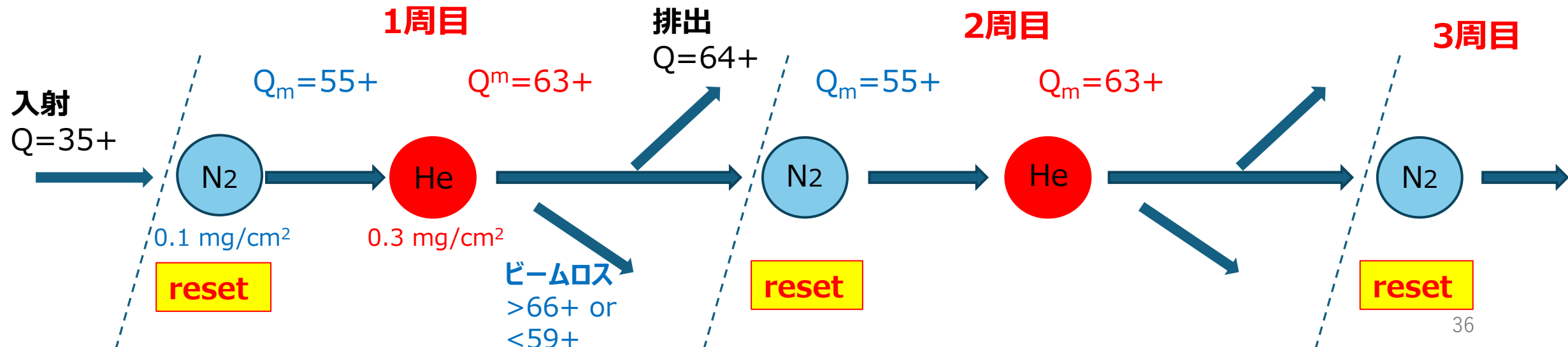


ビームゆらぎを減らすために**厚さは最小化**したい
(平衡厚さ $\sim 1 \text{ mg/cm}^2$ より薄い運転)

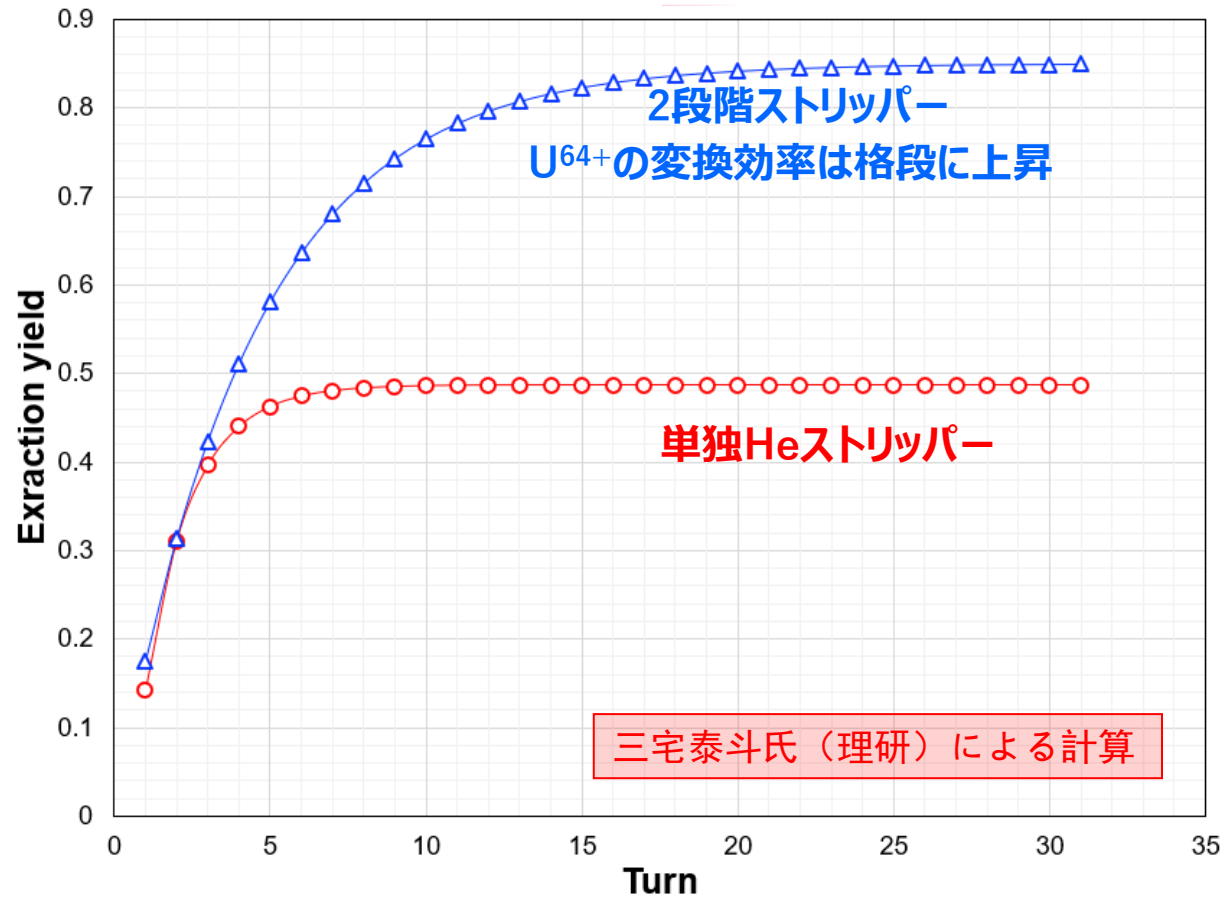
薄いHeガスだけでは**価数がドリフト**し「8価」のウィンドウから外れる

薄い窒素を用いて**周回毎に価数を55価へリセット**
薄いHeで63価を中心とする価数分布を保つ

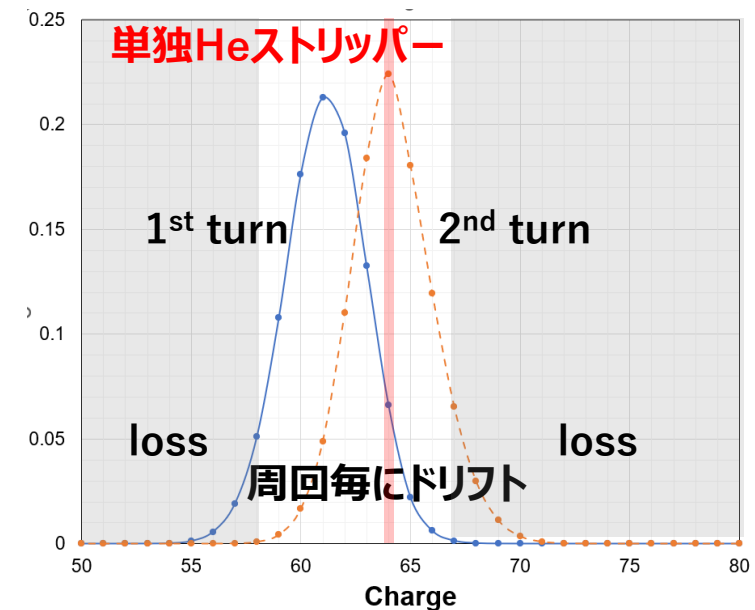
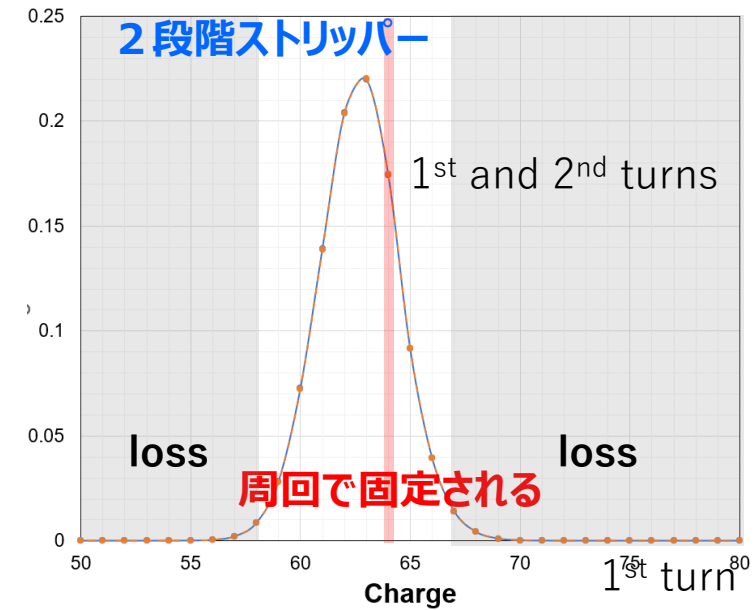
荷電変換サイクル



2段階ストリッパーの計算例



2段階ストリッパーのアイデアはCSR1実現のために非常に重要



パラメータ	現行Heストリッパーでの値	CSRでの典型値
入射ビーム量	1.6e13 /s (6.4 kW)	1e14 /s (40 kW)
ビームバンチ形状	φ10 mm x L70 mm	φ3 mm x L18 mm
Heガス	0.7 mg/cm ²	0.3 mg/cm ²
窒素ガス	0.07 mg/cm ²	0.1 mg/cm ²
標的長	50 cm	30 cm
エネルギー損失	200 W	600 W
エネルギー損失密度	5 W/cm³	280 W/cm³

内部標的と大強度ビームの相互作用

- ・ ビーム損失エネルギーパスと標的への影響
- ・ 電離による自己場形成や遮蔽とビームへの影響



ストリッパーの工学的デザインに直結

U + Heガス系：原子・原子核・プラズマ物理学を内包

重イオン誘起の弱電離プラズマ

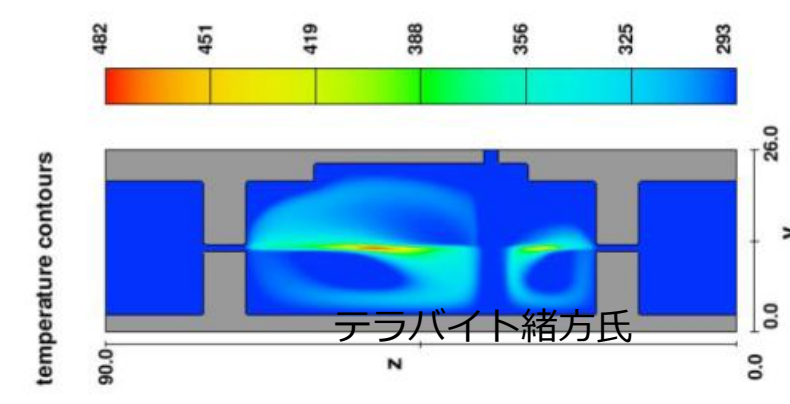
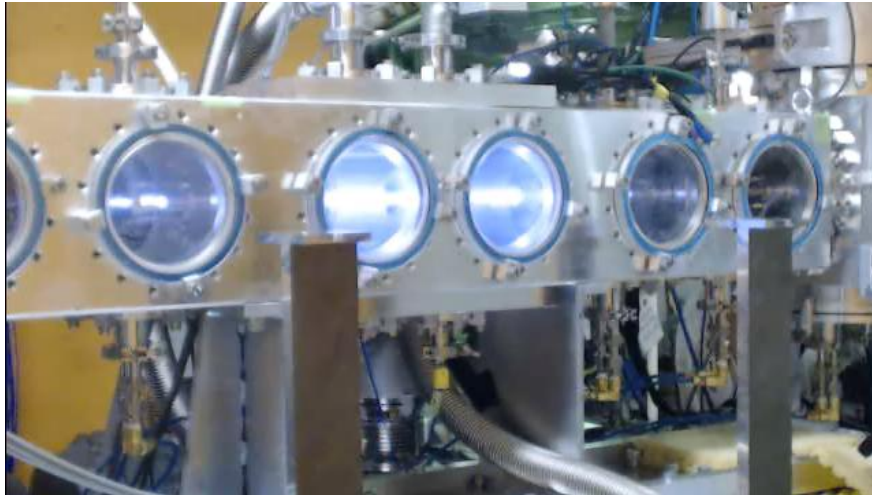
ビーム起因のミクロな散逸過程：原子衝突過程・緩和・輻射

→マクロな構造とビームへの影響：密度分布、自己場

関連トピックス

- ・放電・アフターグロー
- ・放射線損傷
- ・光源
- ・空間電荷補償
- ・ガス検出器
- ・電流中性化

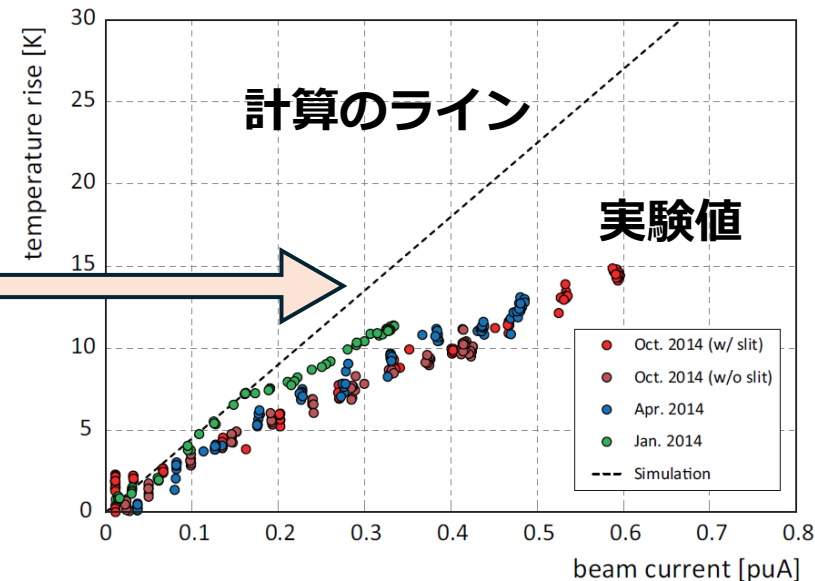
エネルギー損失による密度減少効果($\rho=p/RT$)⇒通過後のビームエネルギー上昇



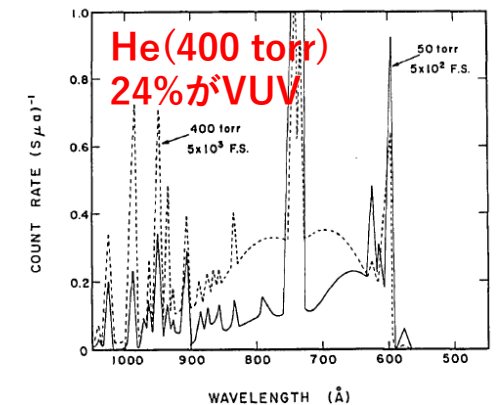
流体計算⇒1puA（80 W入熱）で45℃上昇

～2 puAで約10%のガス圧力の補正

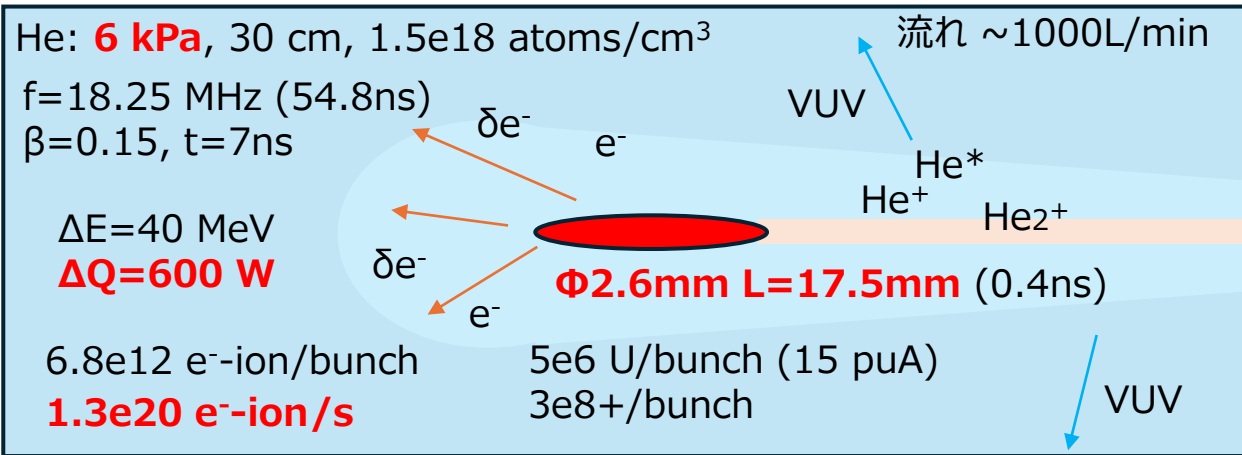
温度上昇が予想より小さい
光（特に真空紫外光）として
ビーム領域外へエネルギーが
持ち出される可能性を示唆



陽子線の場合のVUV分光の例
(Stewart JOSA 1970)



Heガス中での関連パラメータ



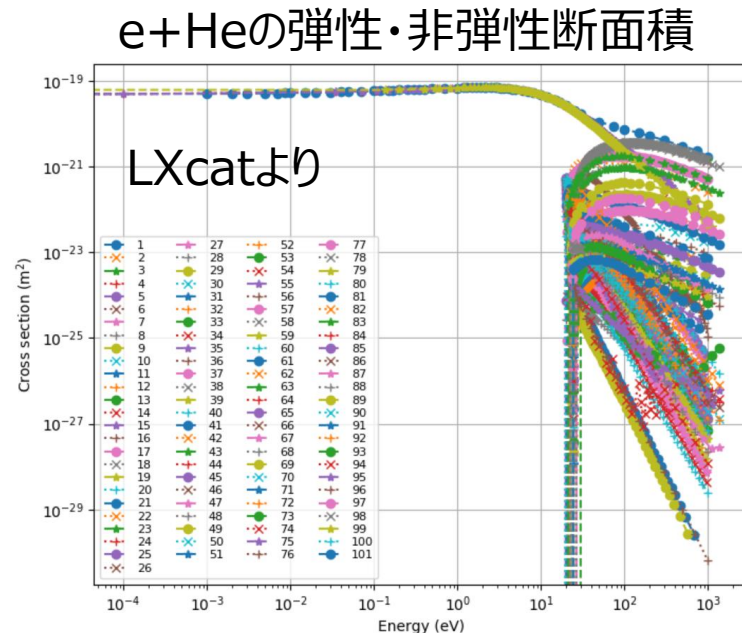
- UビームがHe中へ入射
- **デルタ電子発生**と He^+ (He^{2+})、励起He原子形成
- デルタ電子のカスケード反応
- ビームによる電磁場と電子・イオン電場
- 自己場の中での緩和過程（脱励起・光放射）
- 熱化・再結合過程

次の入射・・・

ガスの対流

・・・平衡状態

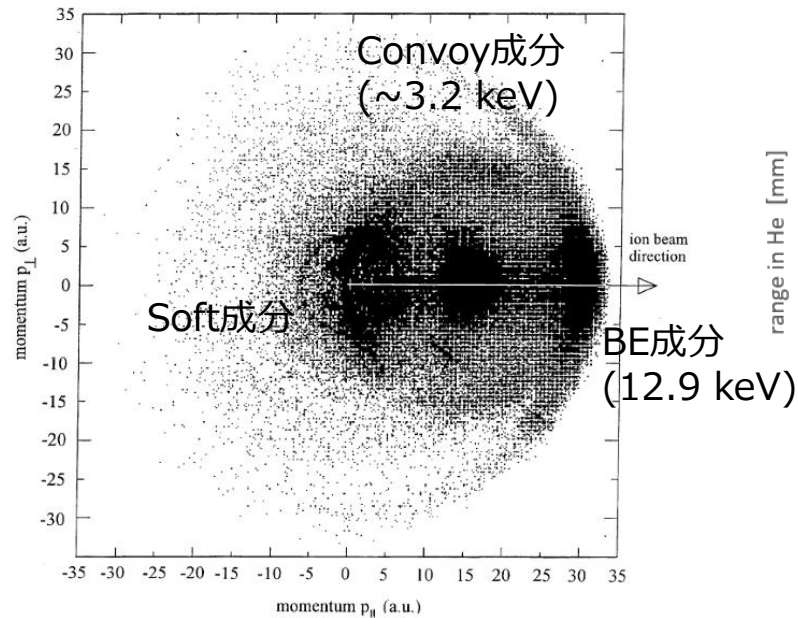
デルタ電子発生が起点で、それ以外は既存の枠組みで理解可能？



U. Bechthold et al., NIMB143 (1998)

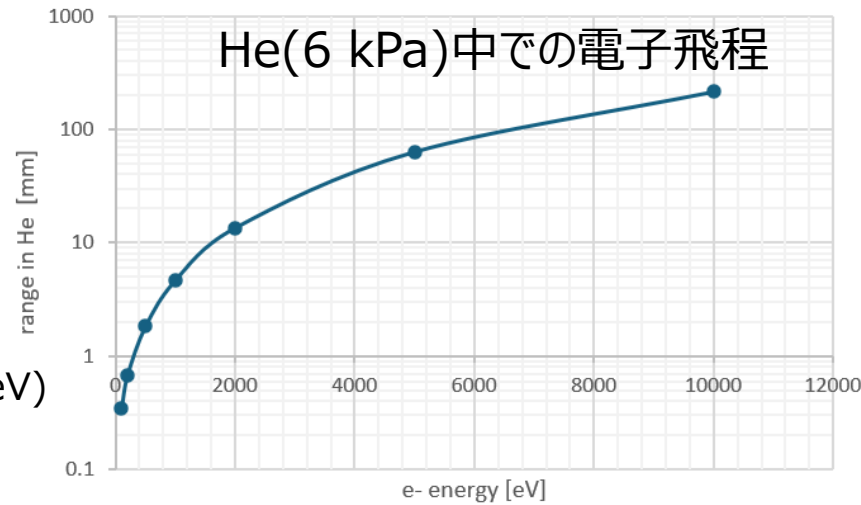
5.9 MeV/u U^{29+}

平均エネルギー **3 keV**



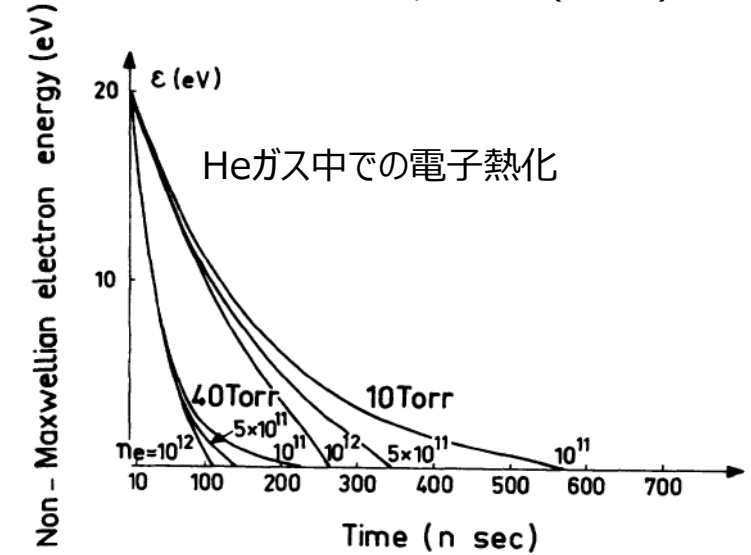
価数が低いほどBE強度が上がる
(虹散乱の効果、Olsonら)

我々の条件でも数 keV電子が前方に出る
(BEエネルギー: 23.5 keV)



自己場を無視すれば数mmの飛程

W.E. Wells et al., PRA8 (1973)



自己場を無視すれば200 ns程度
の熱化時間

HeガスのW値 46 eV $\rightarrow$ 30 eV (ppm不純物)

ウランビーム1個が100万個程度の電子・イオンペア生成

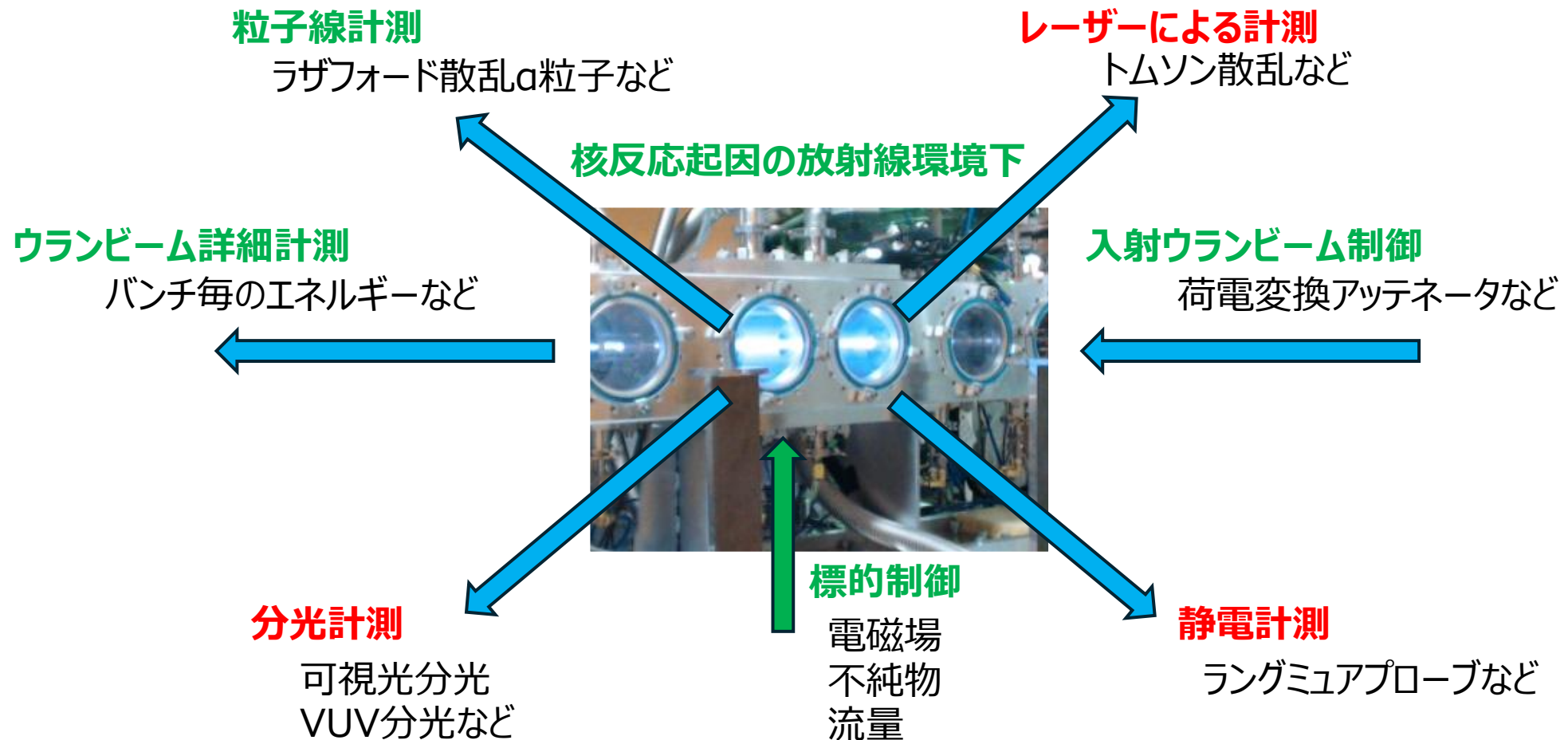
生成レートは 1.3×10^{20} /s

寿命を200 nsとすると、 **1.4×10^{13} /cm³程度の電子密度**？

今後自己場を考慮したPIC計算などが必要

- 重イオンによる弱電離プラズマの理解と制御
- ビームモニター（アクティブストリッパ）
- 標的状態モニター

プラズマ診断技術の導入は大きな鍵



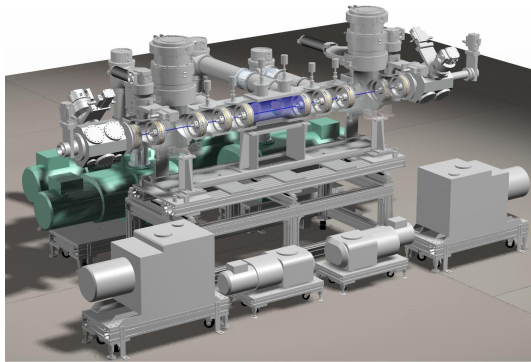
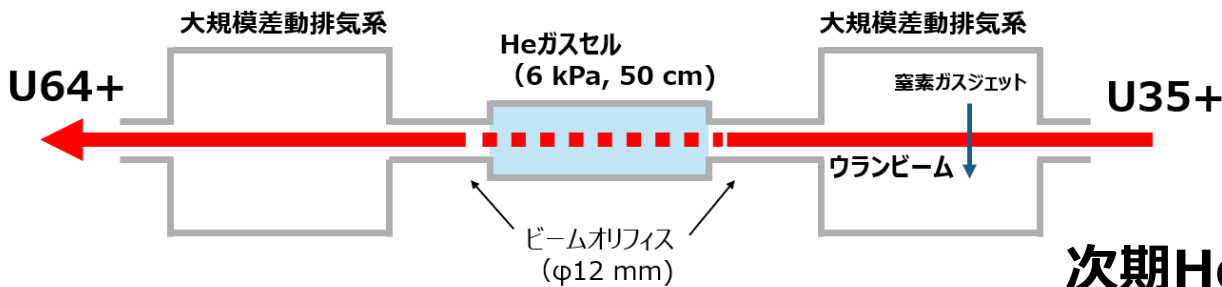
大強度ウランビームへの対応

ビームロス抑制→オリフィス径の増大 (φ15 mm以上)→差動排気能力向上

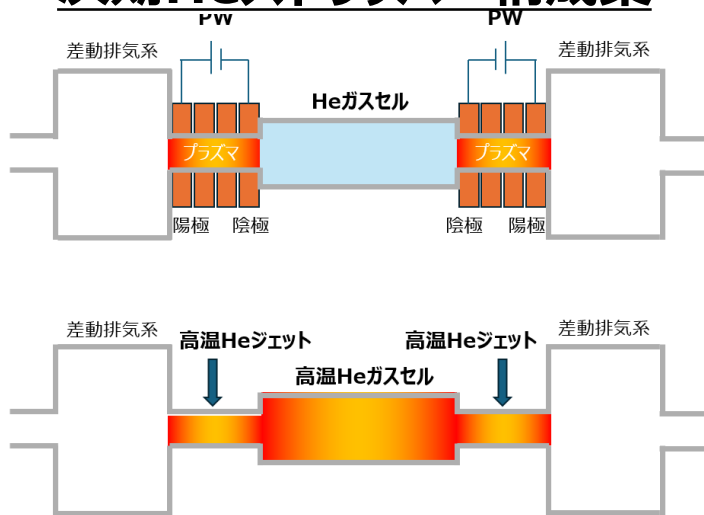
耐熱負荷性向上→循環量増大、高温標的

- ・ ポンプ増強 (ベースライン)
- ・ プラズマウィンドウ(PW)法
- ・ 高温ガスジェット

現状のHeストリッパー



次期Heストリッパー構成案

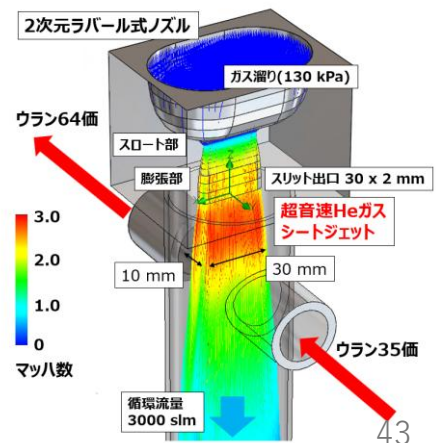


ガスの温度を上げて粘性を上げる
熱負荷の影響を相対的に下げる

更に未来のストリッパー

ガスジェットストリッパー

プラズマストリッパー
(放電・レーザー・EUV)



究極のストリッパー？

U^{1+}

U^{92+} ?

•Ref.: <https://www.iter.org/>

・重イオントリッパー開発

原子物理→価数デザイン、ビーム揺らぎ
標的技術→重イオンへの耐久性

・RIBFストリッパー

Heストリッパー、回転膜の開発の成功
ウランビーム大強度化のブレークスルー

・荷電変換リング（CSR）

理研オリジナルの新しい荷電変換装置
ストリッパーへの更なる要求

・プラズマ・重イオンビームをキーワードとした課題

大強度ウランとHeガス相互作用の理解
シミュレーション・計測の両面アプローチ

