



2023 年度 第1回 宇宙史研究センター構成員会議

2023/6/27

# RIBF における元素合成解明に向けた 大型実験装置の現状

Current status of large-scale experiments at RIBF  
towards nuclear synthesis

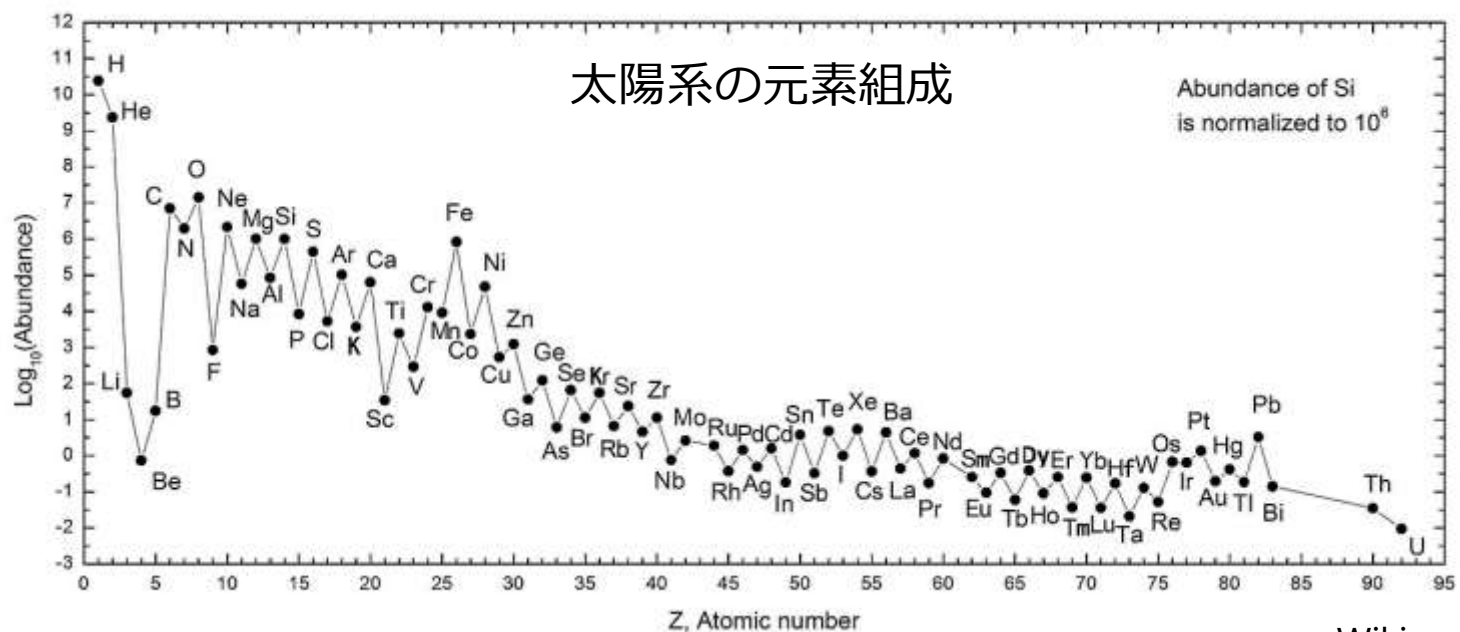
理化学研究所仁科加速器科学研究センター  
実験装置開発部  
大西哲哉



# 元素合成と原子核物理

原子核の性質：宇宙・星における原子核の存在形態

原子核の安定性・不安定性 → 元素の生成過程 = 元素の存在比率

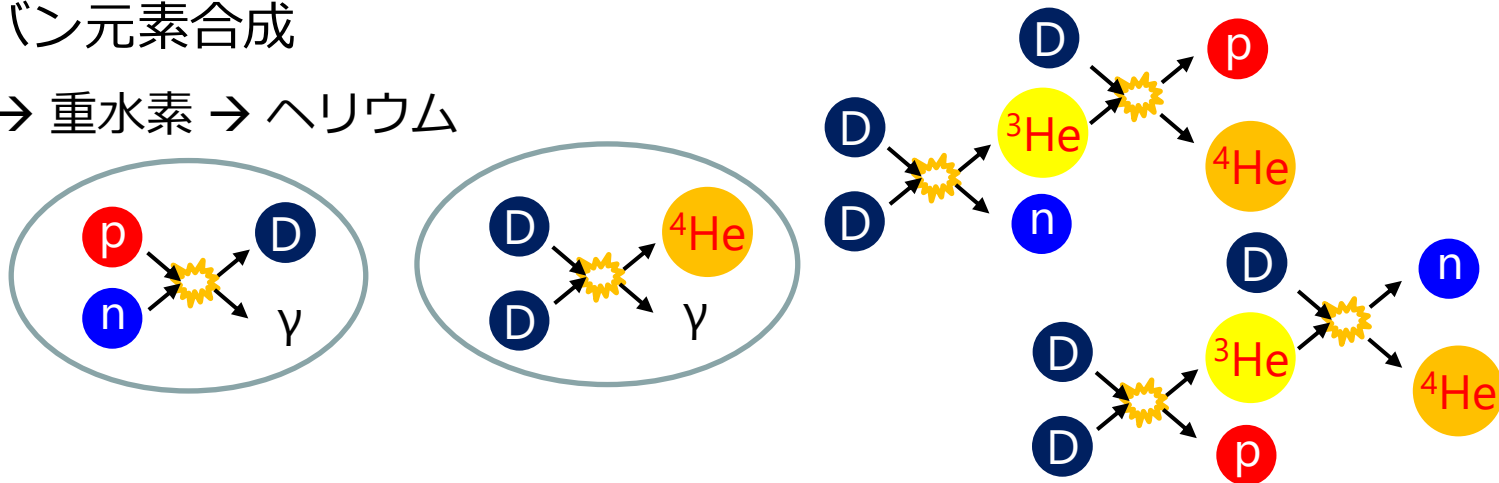




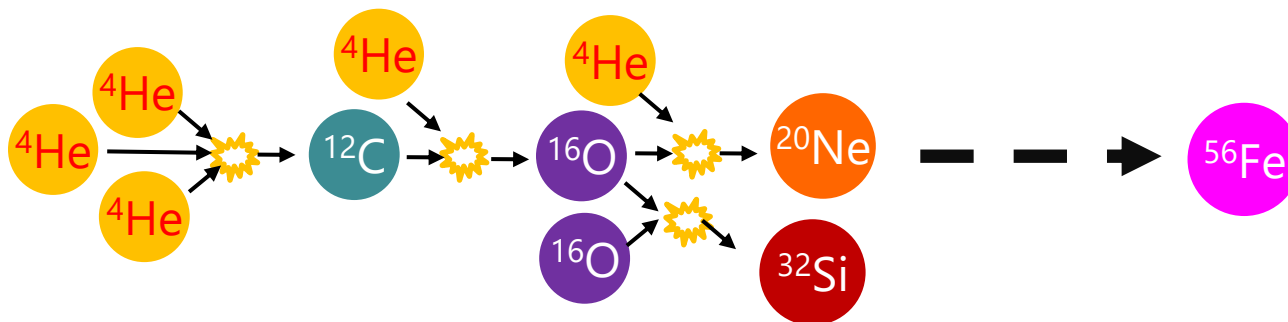
# 核融合反応による元素合成

ビッグバン元素合成

水素 → 重水素 → ヘリウム



星での元素合成

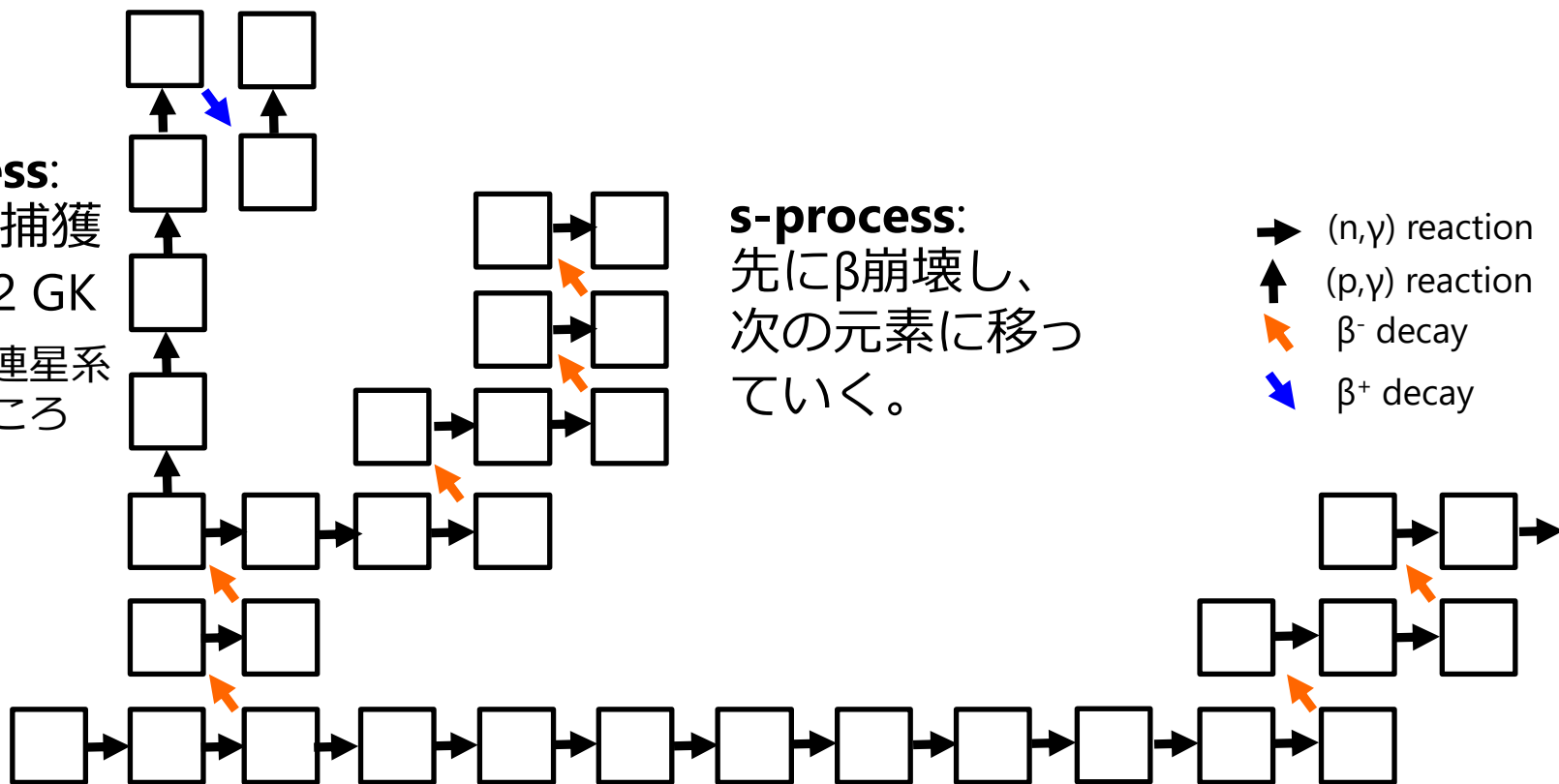


<sup>56</sup>Fe より重い元素はどうやって作られるのか？



# 重元素の合成過程

**rp-process:**  
高速陽子捕獲  
at  $T = 1-2$  GK  
中性子星の連星系  
で降着のところ



**s-process:**  
先に $\beta$ 崩壊し、  
次の元素に移っ  
ていく。

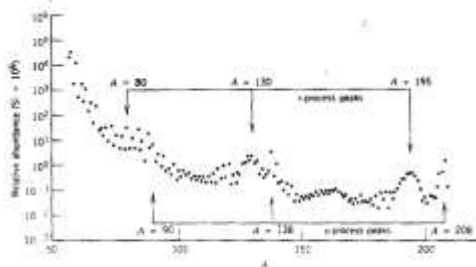
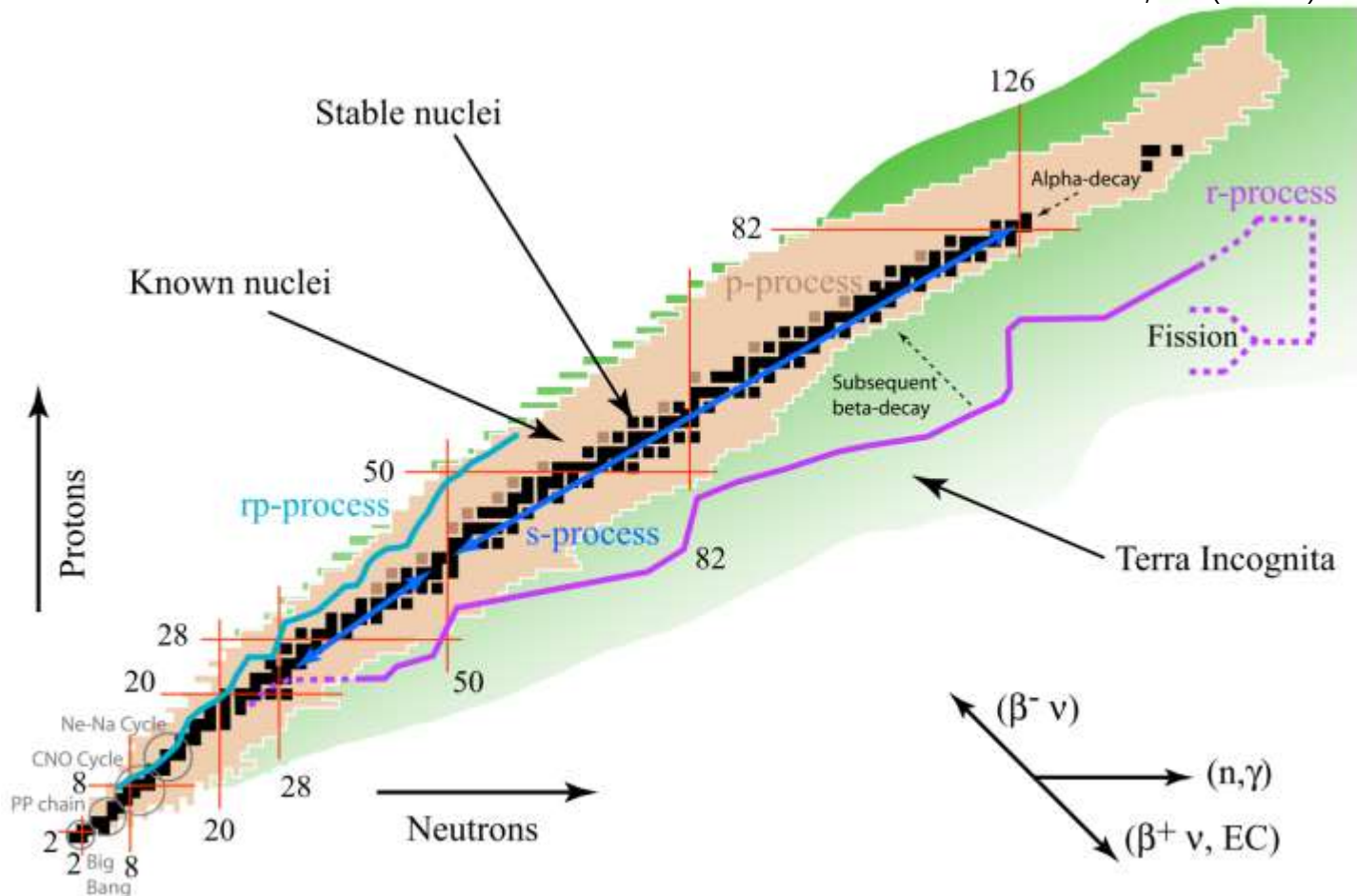
→ (n, $\gamma$ ) reaction  
↑ (p, $\gamma$ ) reaction  
↘  $\beta^-$  decay  
↙  $\beta^+$  decay

**r-process:**  $\beta$ 崩壊する前に中性子捕獲が起きる。

→ neutron capture rate (ms  $\sim$   $\mu$ s)

at  $T = 1-2$  GK, Density  $300 \text{ g/cm}^3$  (60% n)

多量の中性子: 中性子星や超新星の爆発的反応



**Figure 19.18** Abundances of s-process. The peaks near  $A = 80$ , 130, and 195 originate from the  $\beta$  decays of  $r$ -process progenitors with  $N = 50$ , 82, or 126. The peaks near  $A = 90$ , 138, and 208 result from  $s$ -process stable nuclei with  $N = 50$ , 82, or 126. Note the difference in abundance between odd- $A$  and even- $A$  nuclei.

どこの経路を通っていくのか？  
 どこまで合成されるのか？  
 → 原子核の情報が必要



# 原子核実験で調べること

- 陽子/中性子過剰核の性質: 質量、寿命  
→ 天然には存在しない不安定核の性質を調べる。
- 陽子/中性子捕獲反応、他の原子核反応の断面積
- 中性子星、超新星における原子核の振る舞い: 状態方程式  
→ 中性子スキンの研究  
etc ...

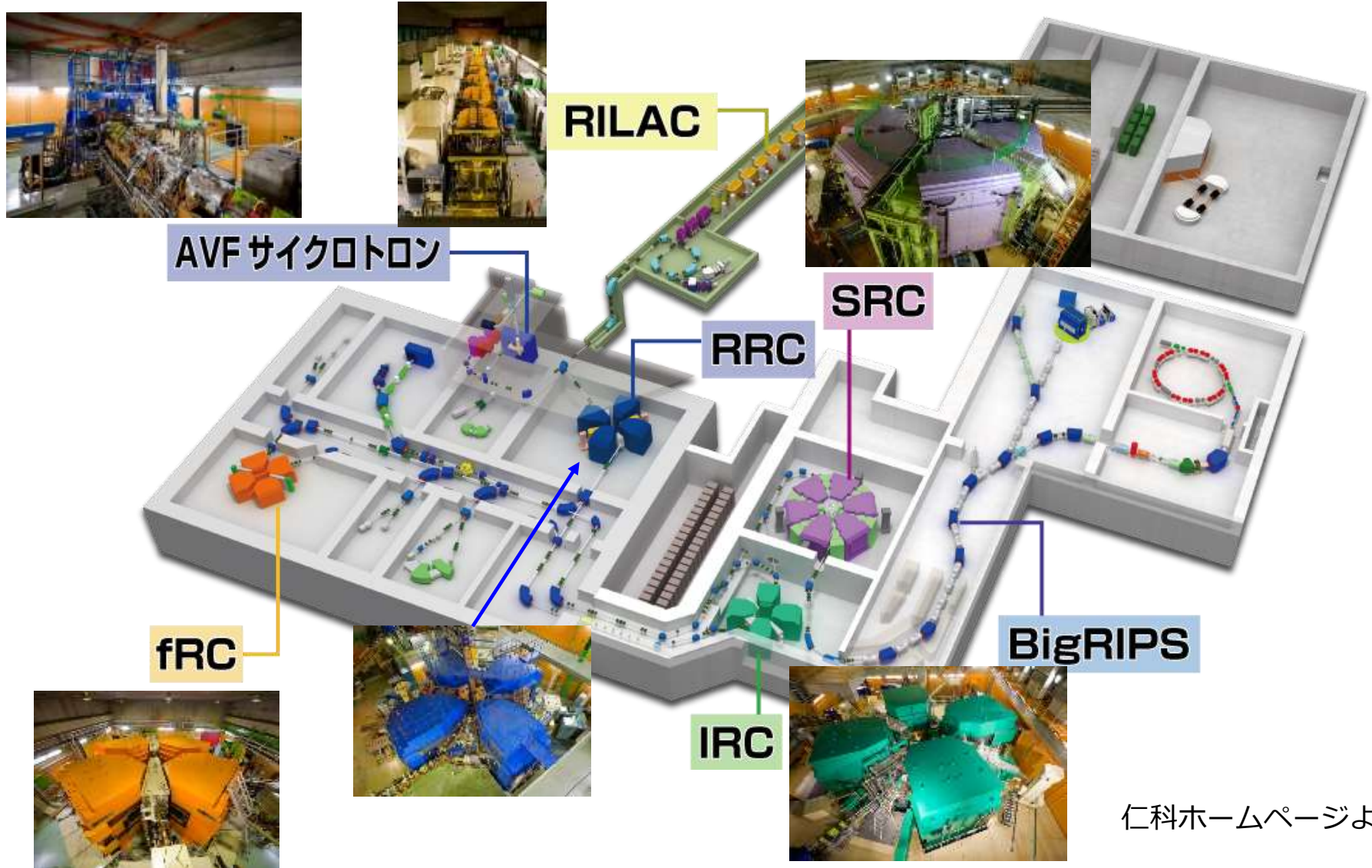
加速器を使った不安定核実験





# 理研 RI ビームファクトリー

現時点で、世界最高のRI製造能力を持つ不安定核実験施設



仁科ホームページより



# 理研 RI ビームファクトリー

現時点で、世界最高のRI製造能力を持つ不安定核実験施設



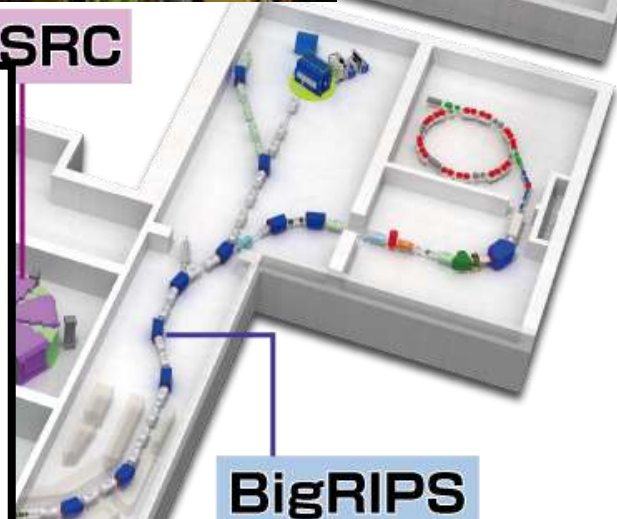
AVFサイクロトロン



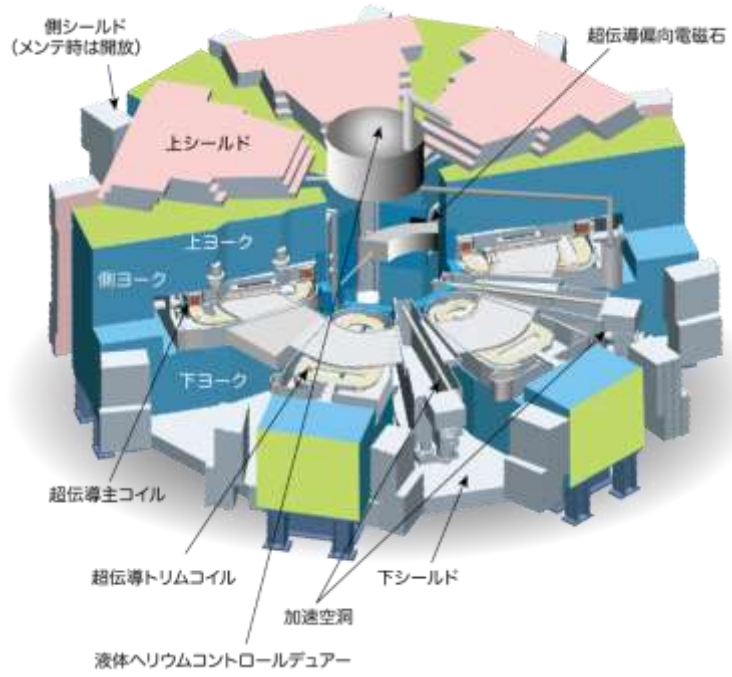
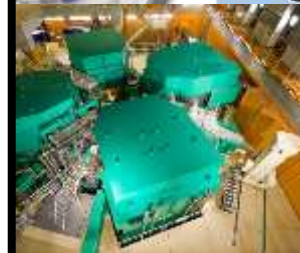
RILAC



SRC



BigRIPS



SRC  
 重量: 8300 t  
 直径: 18.4 m  
 磁場: 1.5 T  
 (8Tm)  
 周回長: 14km  
 ~U 345 MeV/u



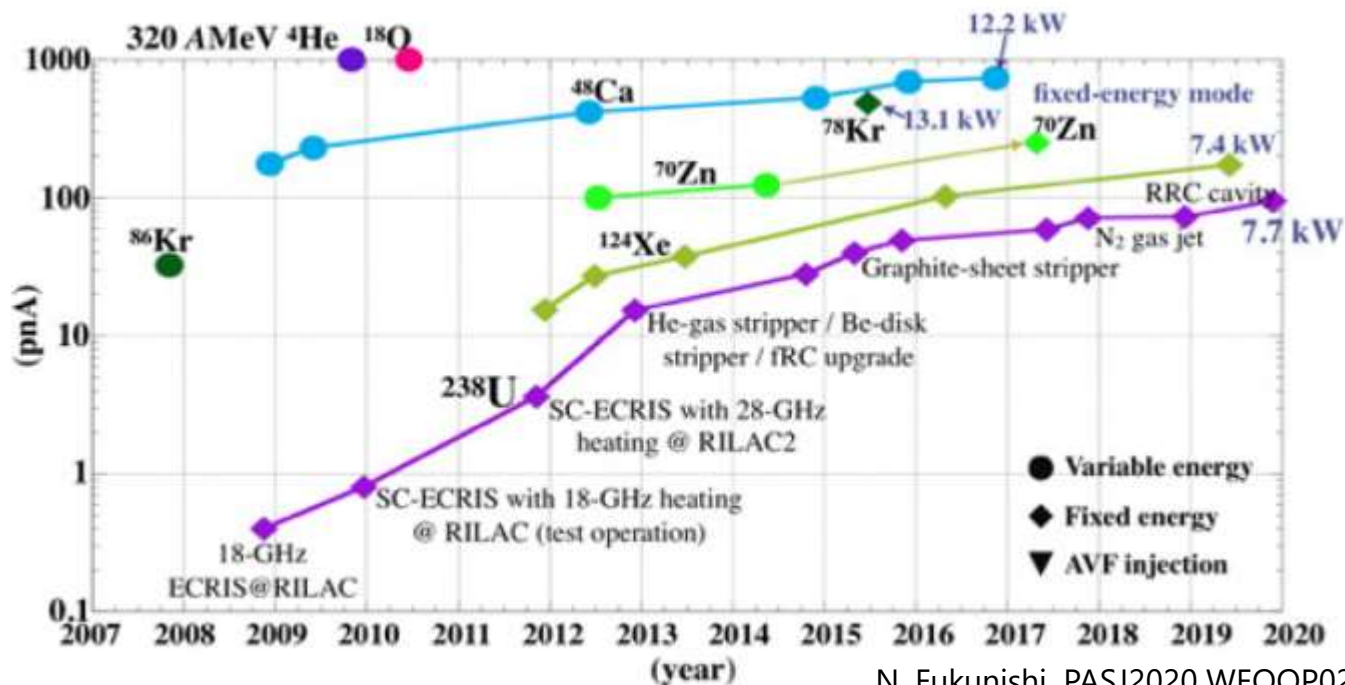


# 理研 RI ビームファクトリー

現時点で、世界最高のRI製造能力を持つ不安定核実験施設



## RIBF 加速実績 at 2020



側シールド  
(メンテ時は開放)

上シールド

上ヨーク

側ヨーク

下ヨーク

超伝導主コイル

超伝導トリムコイル

下シールド

加速空洞

液体ヘリウムコントロールデュアー

周回長: 14km  
~U 345 MeV/u



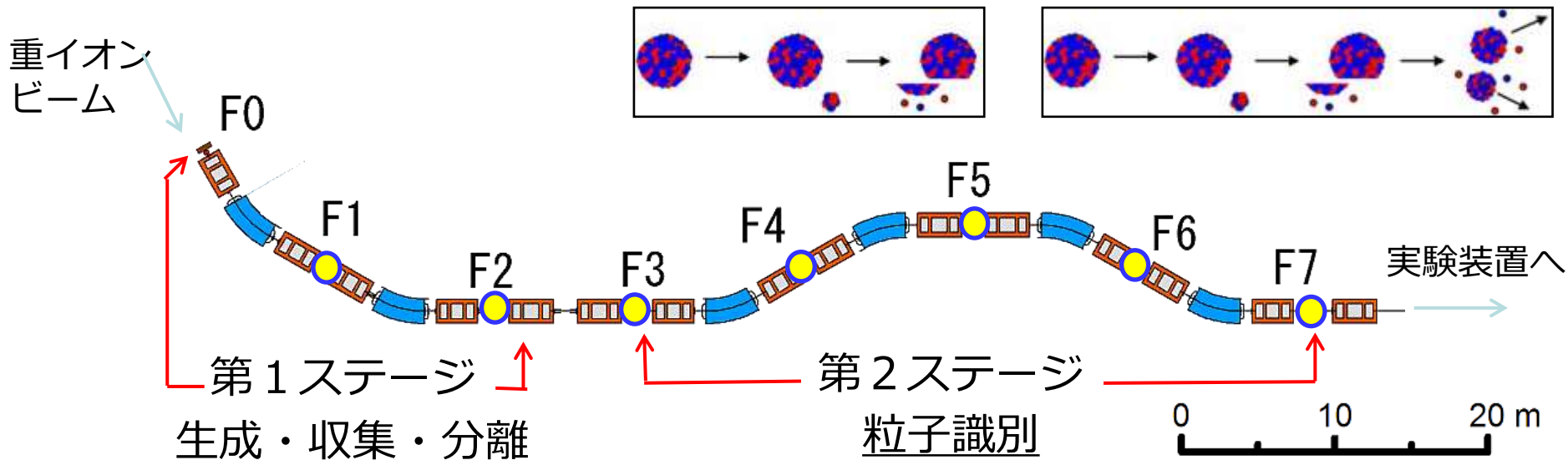
仁科ホームページより



# BigRIPS (超伝導RIビーム分離生成装置)

不安定核生成反応: 入射核破碎反応, 飛行核分裂反応

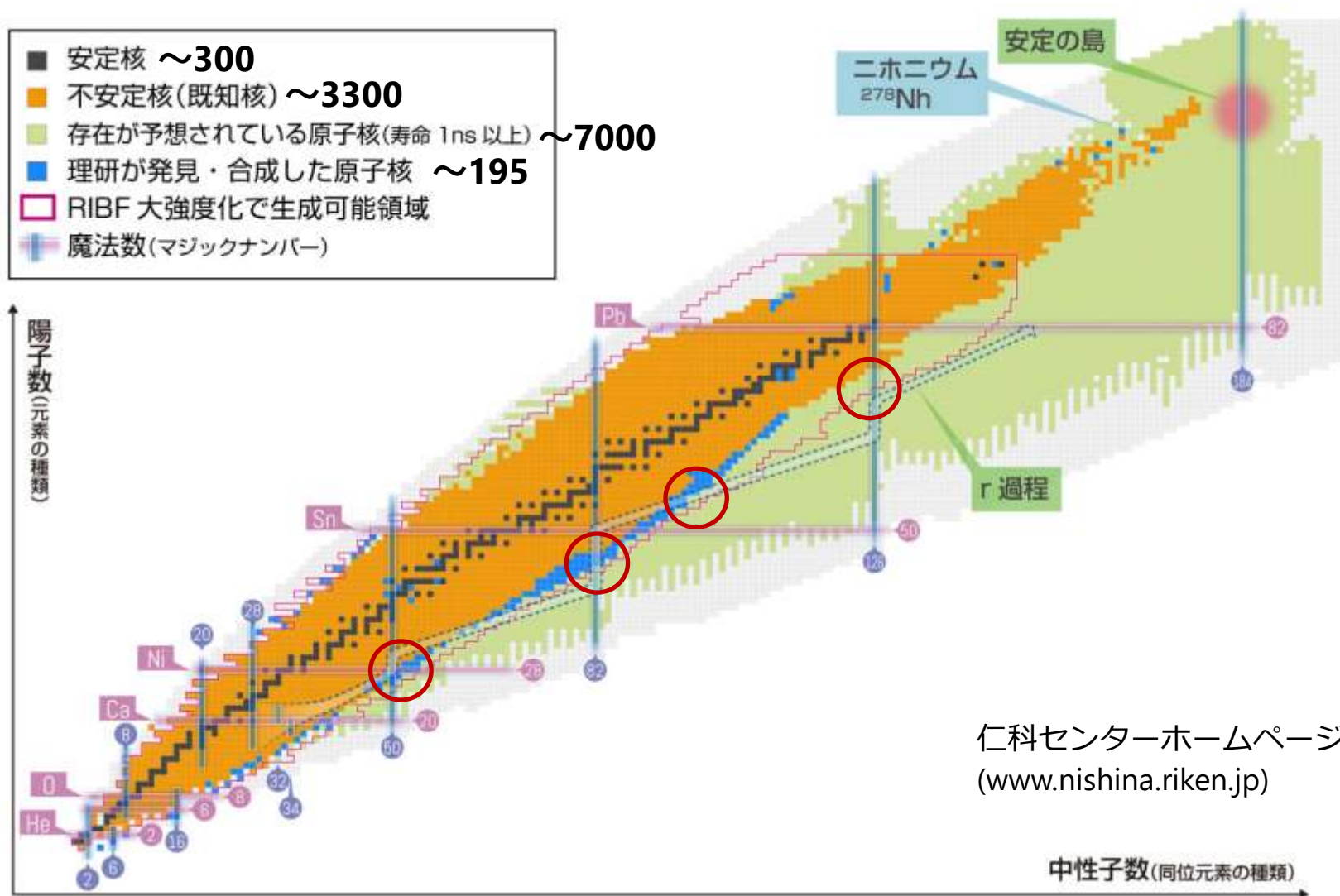
重イオン  
ビーム



磁気剛性: 9 Tm  
 磁場勾配(STQ1): 24 T/m  
 (他): 14/Tm  
 全長: 77 m



# RIBF における不安定核供給



仁科センターホームページより  
 ([www.nishina.riken.jp](http://www.nishina.riken.jp))





# 大型実験装置 at RIBF



**GARIS**



**SAMURAI**



**SCRIT**



**R3**



**RIPS**



**CRIB**



**ZDS**



**SHARQA+OEDO**



**KISS**



**BigRIPS**





# 現在進行中の研究(ほんの一部)

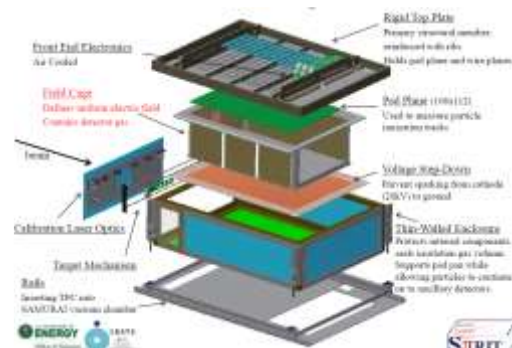
寿命測定 ZDS + BRIKEN



$\beta$ -delayed neutron 検出器

状態方程式のパラメーター

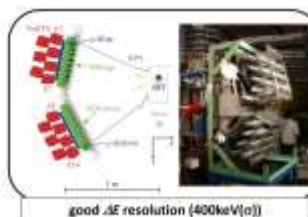
SAMURAI + SpiRIT



天体核反応 CRIB, SHARAQ+OEDO  
Spectrometer を使った測定



核子密度分布 ESPRI







# 大型実験装置 at RIBF



**GARIS**



**SAMURAI**



**SCRIT 電子散乱**



**R3 質量測定**



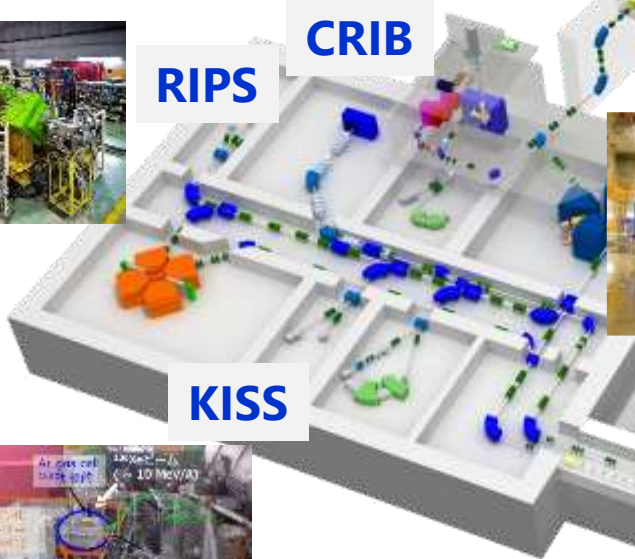
**RIPS**

**CRIB**

**ZDS**



**SHARAQ + OEDO**



**KISS**

**BigRIPS**





# 精密質量測定

原子核の質量: 束縛エネルギーを通じて原子核の構造を反映

$$Mc^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2 - B$$

$$-B = -a_v A + a_s A^{\frac{2}{3}} + a_{sym} \frac{(N - Z)^2}{A} + a_c \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + \epsilon(Z, N)$$

体積項

表面項

対称項

クーロン項

2核子系の対相互作用

エキゾチックな原子核

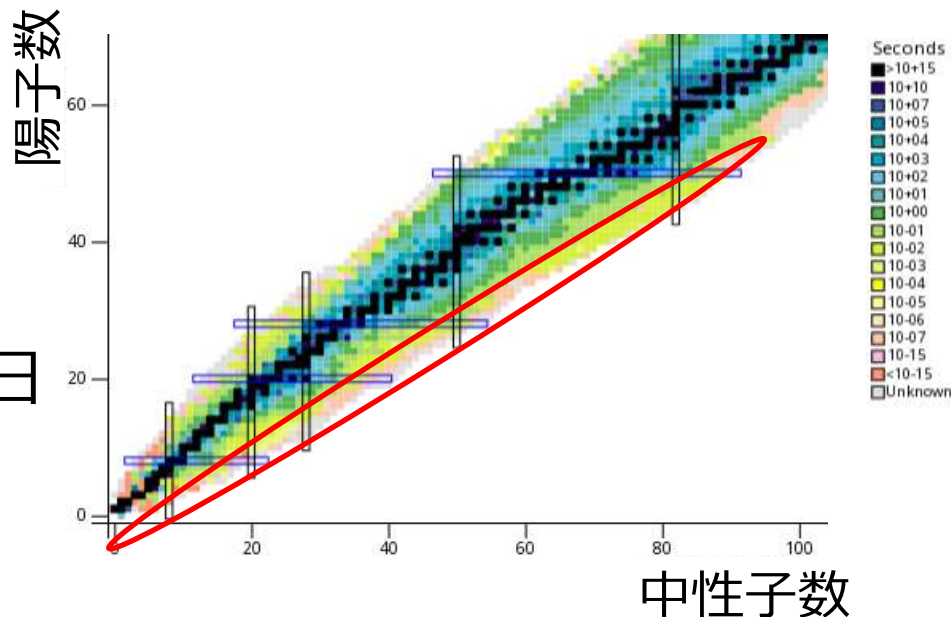


短寿命: 半減期  $T_{1/2} < \sim 20$  ms

新同位元素近辺: 収量  $\sim 1$  個/日

+

$\Delta M/M \sim 10^{-6}$  の精度





# 稀少 RI リング (Rare-RI Ring) Project

2012 建設開始

2021 物理実験開始

周長: 60.35 m

直径: 約 18 m

周回時間: (典型例)  $\sim 760 \mu\text{s}$

周回数: 約 2000 周



## 等時性リング

運動量に依存せず、周回時間から質量を導出。

→ すこし等時性がずれた粒子 = Unknown 質量を精度良く測定。  
 $\Delta m/m \sim 10^{-6}$

$$T_0 = 2\pi \frac{m_0}{q_0} \frac{1}{B_0} \quad (\text{等時性})$$

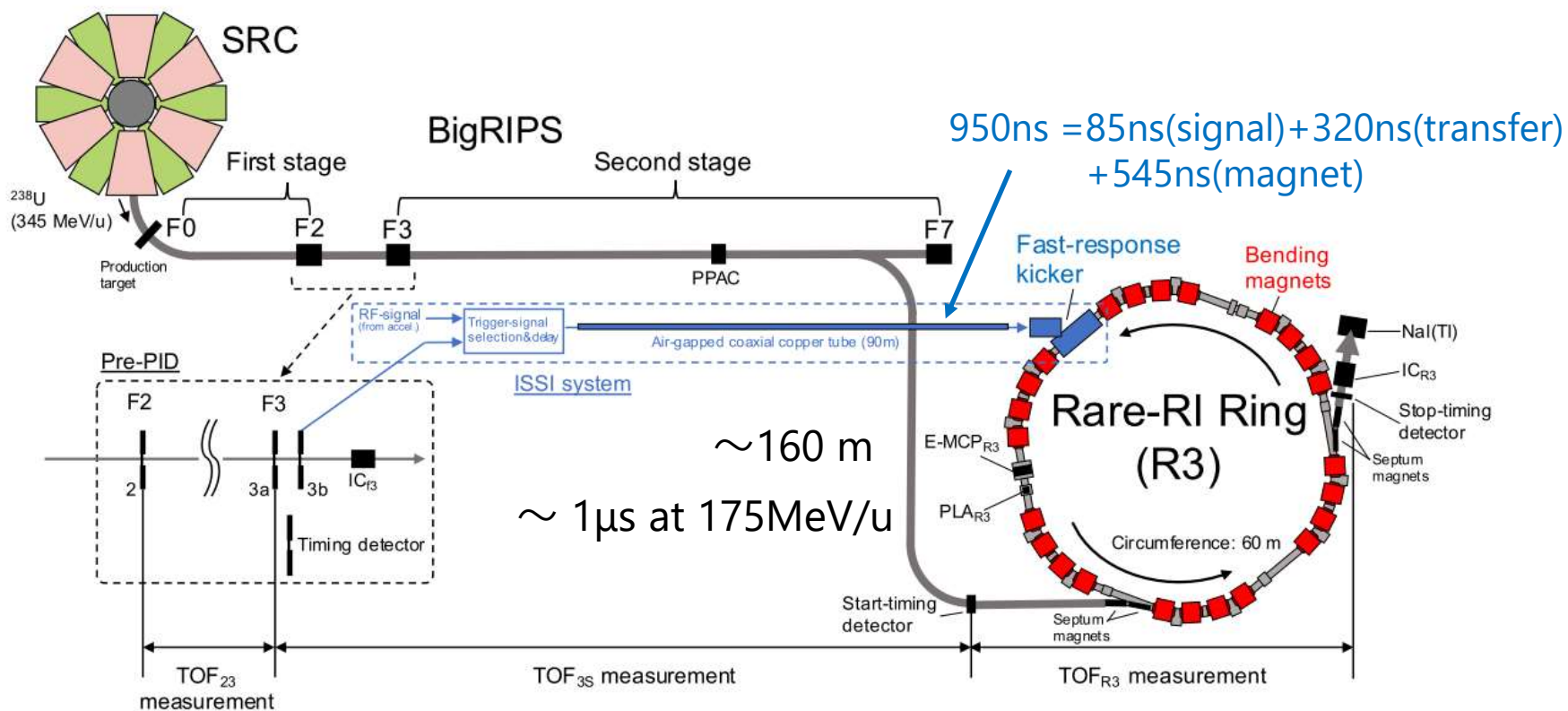
基準粒子      unknown

$$B\rho = \frac{m_0}{q_0} \beta_0 \gamma_0 = \frac{m_1}{q_1} \beta_1 \gamma_1 \quad \beta_0 T_0 = \beta_1 T_1$$

$$\frac{m_1}{q_1} = \frac{m_0}{q_0} \frac{T_1}{T_0} \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - \left(\frac{T_1}{T_0} \beta_1\right)^2}}$$



## 個別入射: 欲しい RI だけを入射して測定



From Y. Yamaguchi





# 実験結果(一部紹介)



理化学研究所



筑波大学  
University of Tsukuba



Saitama University  
埼玉大学



東京大学 大学院  
理学系研究科・理学部  
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO

参考資料配付

**PRESS RELEASE**

2022年4月28日  
理化学研究所、筑波大学  
埼玉大学、東京大学大学院理学系研究科

## 元素起源の謎の解明に向けた世界最速質量測定が始動 — 稀少 RI リングを用いた短寿命放射性同位体の質量決定に成功 —

H. F. Li et al., Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 152701.

### First Application of Mass Measurements with the Rare-RI Ring Reveals the Solar $r$ -Process Abundance Trend at $A = 122$ and $A = 123$

H. F. Li,<sup>1,2,3,4</sup> S. Naimi,<sup>5,†</sup> T. M. Sprouse,<sup>5</sup> M. R. Mumpower,<sup>5</sup> Y. Abe,<sup>5</sup> Y. Yamaguchi,<sup>5</sup> D. Nagae,<sup>5,‡</sup> F. Suzuki,<sup>5,‡</sup> M. Wakusugi,<sup>3</sup> H. Arakawa,<sup>6</sup> W. B. Dou,<sup>6</sup> D. Hamakawa,<sup>6</sup> S. Hosoi,<sup>6</sup> Y. Inada,<sup>6</sup> D. Kajiki,<sup>6</sup> T. Kobayashi,<sup>6</sup> M. Sakae,<sup>6</sup> Y. Yokoda,<sup>6</sup> T. Yamaguchi,<sup>6</sup> R. Kagesawa,<sup>7</sup> D. Kamioka,<sup>7</sup> T. Moriguchi,<sup>7</sup> M. Mukai,<sup>7,‡</sup> A. Ozawa,<sup>7</sup> S. Ota,<sup>8,‡</sup> N. Kitamura,<sup>8</sup> S. Masuoka,<sup>8</sup> S. Michimasa,<sup>8</sup> H. Baba,<sup>9</sup> N. Fukuda,<sup>9</sup> Y. Shimizu,<sup>9</sup> H. Suzuki,<sup>9</sup> H. Takeda,<sup>9</sup> D. S. Ahn,<sup>10</sup> M. Wang,<sup>1</sup> C. Y. Fu,<sup>1</sup> Q. Wang,<sup>1</sup> S. Suzuki,<sup>1</sup> Z. Ge,<sup>1,‡</sup> Yu. A. Litvinov,<sup>10</sup> G. Lorusso,<sup>11,12</sup> P. M. Walker,<sup>12</sup> Zs. Podolyak,<sup>12</sup> and T. Uesaka,<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, People's Republic of China

<sup>2</sup>Lanzhou University, Lanzhou 730000, People's Republic of China

<sup>3</sup>Riken Nishina Center for Accelerator-Based Science, Wako, Saitama 351-0198, Japan

<sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, People's Republic of China

<sup>5</sup>Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

<sup>6</sup>Department of Physics, Saitama University, Saitama 338-8570, Japan

<sup>7</sup>Institute of Physics, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

<sup>8</sup>Center for Nuclear Study, University of Tokyo, Wako, Saitama 351-0198, Japan

<sup>9</sup>Center for Exotic Nuclear Studies, Institute for Basic Science (IBS), Daejeon 34126, Republic of Korea

<sup>10</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt, Germany

<sup>11</sup>National Physical Laboratory, Teddington, TW11 0LW, United Kingdom

<sup>12</sup>Department of Physics, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, United Kingdom

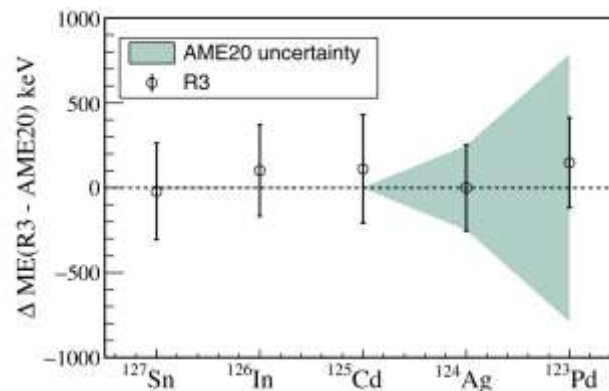


FIG. 2. Mass excess values of nuclei measured at R3 compared to literature values from AME2020 [20].

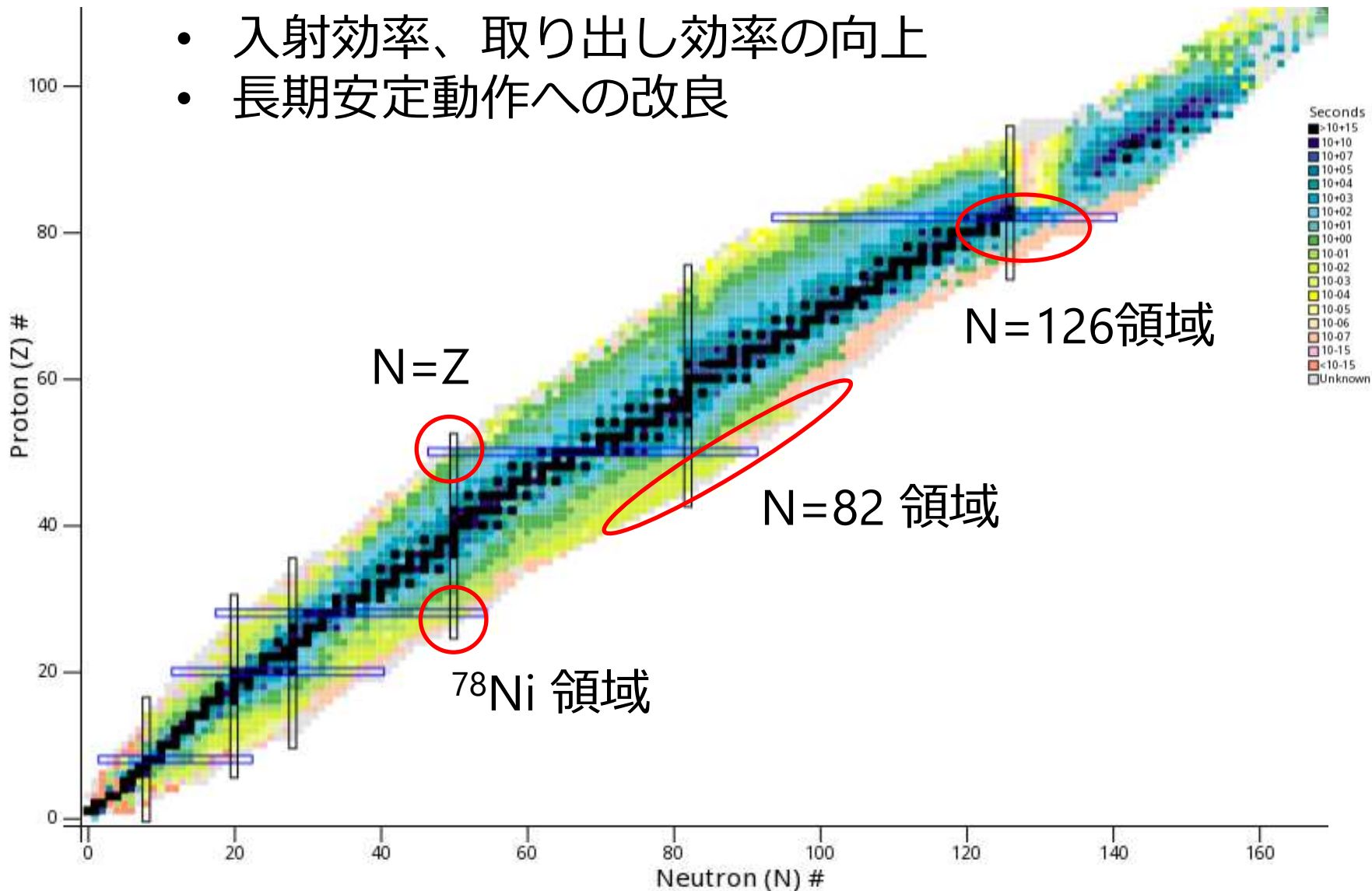
<sup>123</sup>Pd の質量値 → 元素合成過程におけるモデル計算への重要な入力





## 今後のプラン

- 入射効率、取り出し効率の向上
- 長期安定動作への改良





# 電子散乱

精度の良く、信頼できるプローブ  
原子核をあまり modify しないで、実験が行える。

中性子スキン: 中性子が染み出している領域

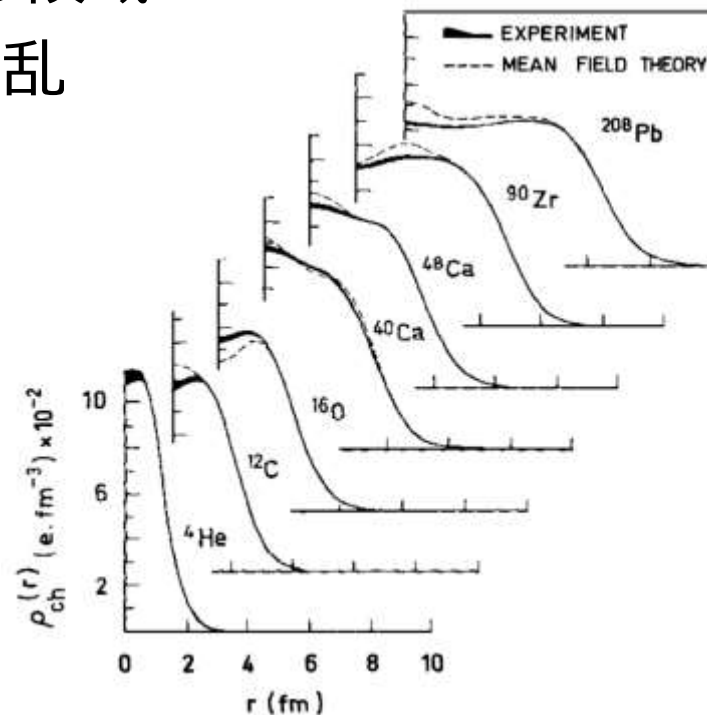
→ 核子(陽子+中性子)分布: 陽子弾性散乱

陽子分布: 電子弾性散乱

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Mott}}} \times |F_c(q)|^2$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Mott}}} = \left( \frac{Ze^2}{2m_e c^2} \right)^2 \left( \frac{1-\beta^2}{\beta^4} \right) \frac{1}{\sin^4(\frac{\theta}{2})} \left( 1 - \beta^2 \sin^2(\frac{\theta}{2}) \right)$$

$$F_c(q) = \int \rho_c(\vec{r}) e^{-i\vec{q}\vec{r}} d\vec{r}$$

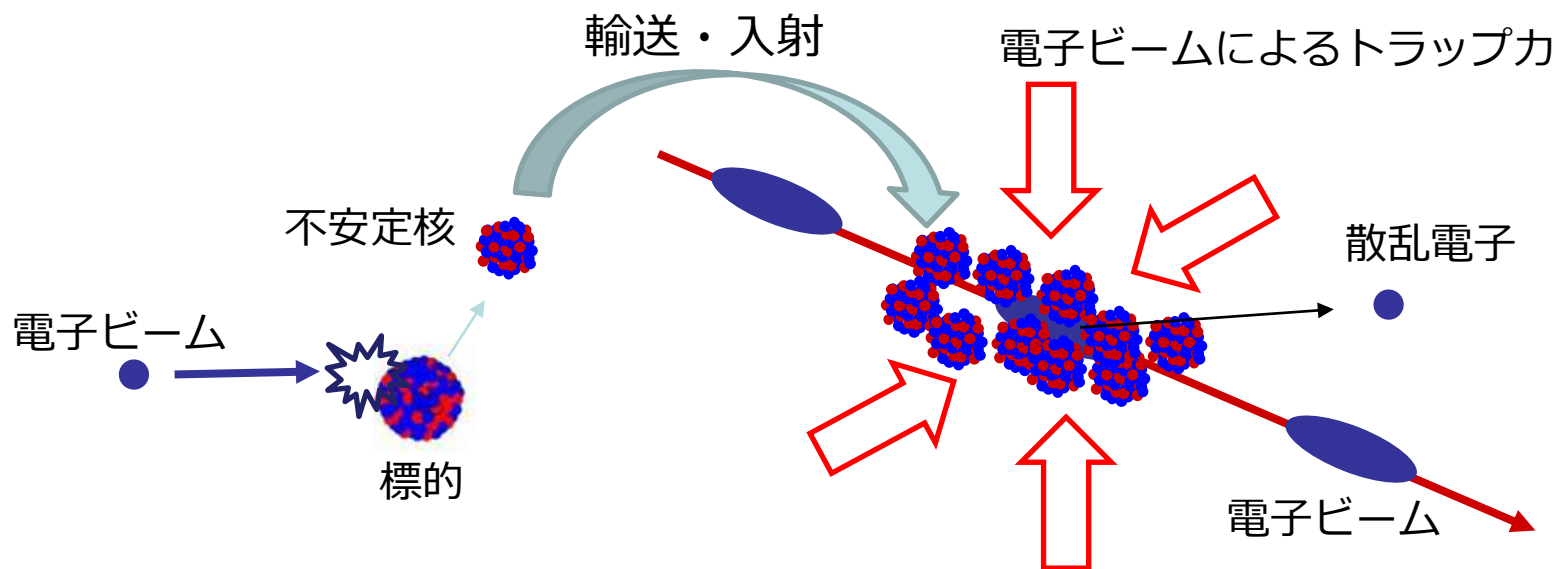




# SCRIT Project

これまでオンライン生成した不安定核での実験はない。  
= 天然には存在しない静止標的 & 数( $\sim 10^{20}$ 個)が必要

SCRIT = Self Confining Radioactive Ion Target  
→ **新しい不安定核静止標的作成法**

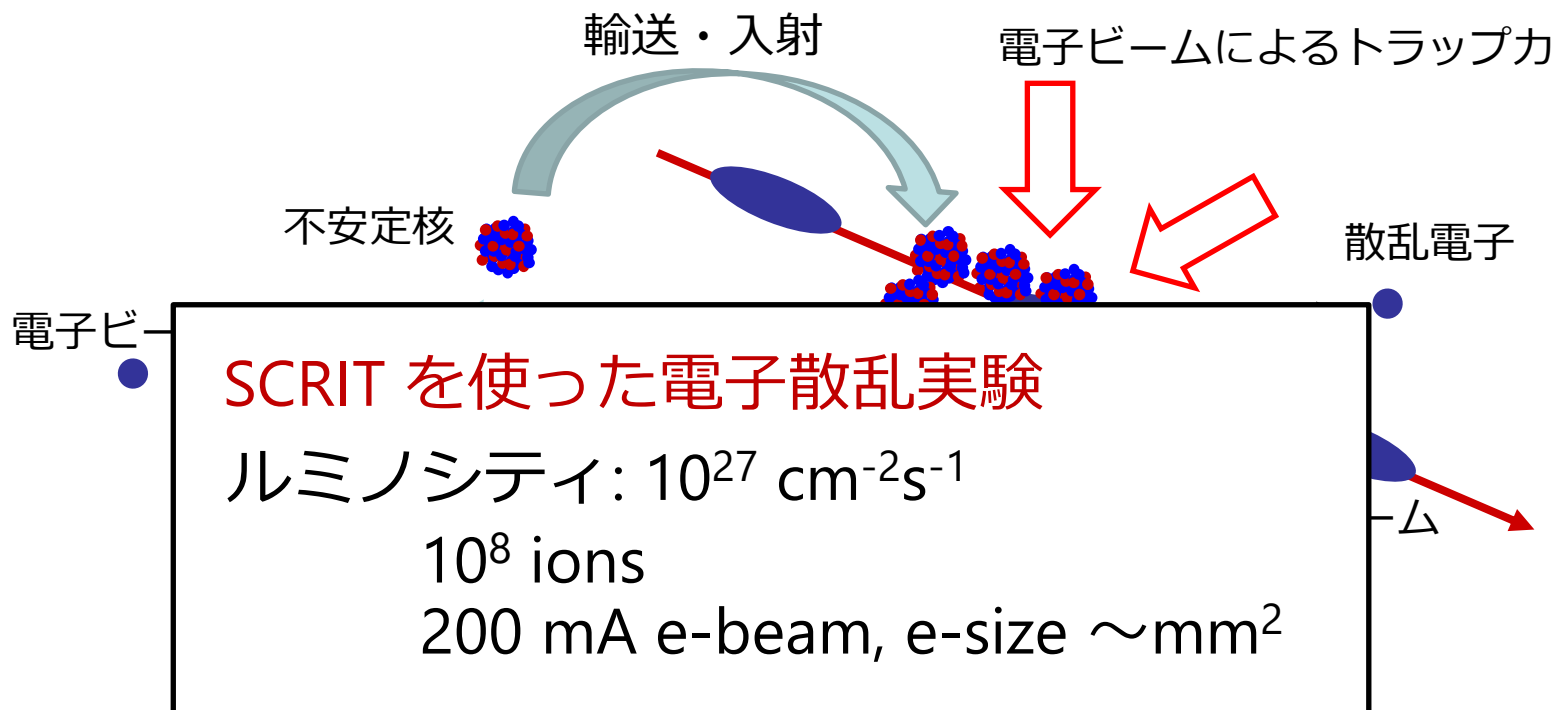




# SCRIT Project

これまでオンライン生成した不安定核での実験はない。  
 = 天然には存在しない静止標的 & 数( $\sim 10^{20}$ 個)が必要

SCRIT = Self Confining Radioactive Ion Target  
**→ 新しい不安定核静止標的作成法**





# SCRIT施設

2009 建設開始

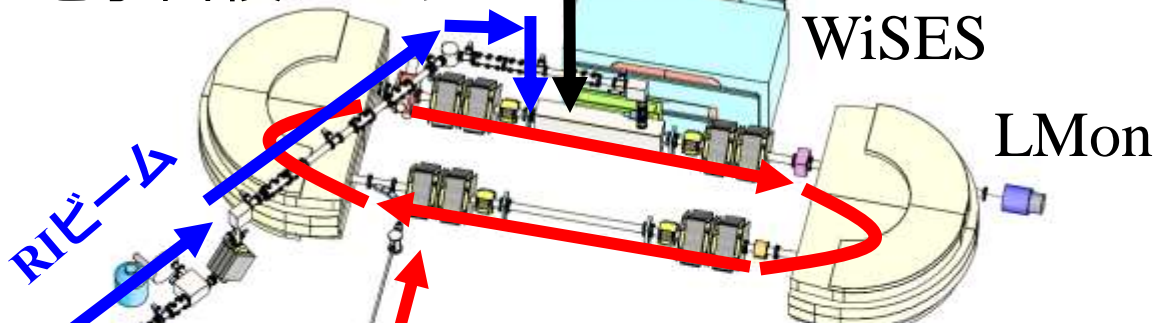
2013 ISOL から RI ビーム供給

2016 コミッショニング

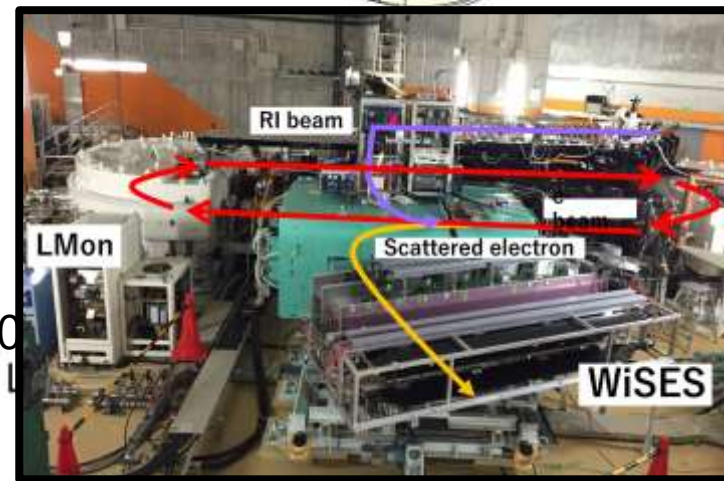
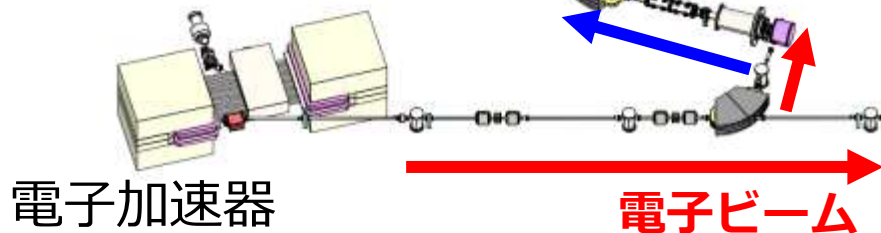
M. Wakasugi et al., NIMB317(2013)668.



電子蓄積リング



ISOL施設: ERIS







# SCRIT施設

2009 建設開始

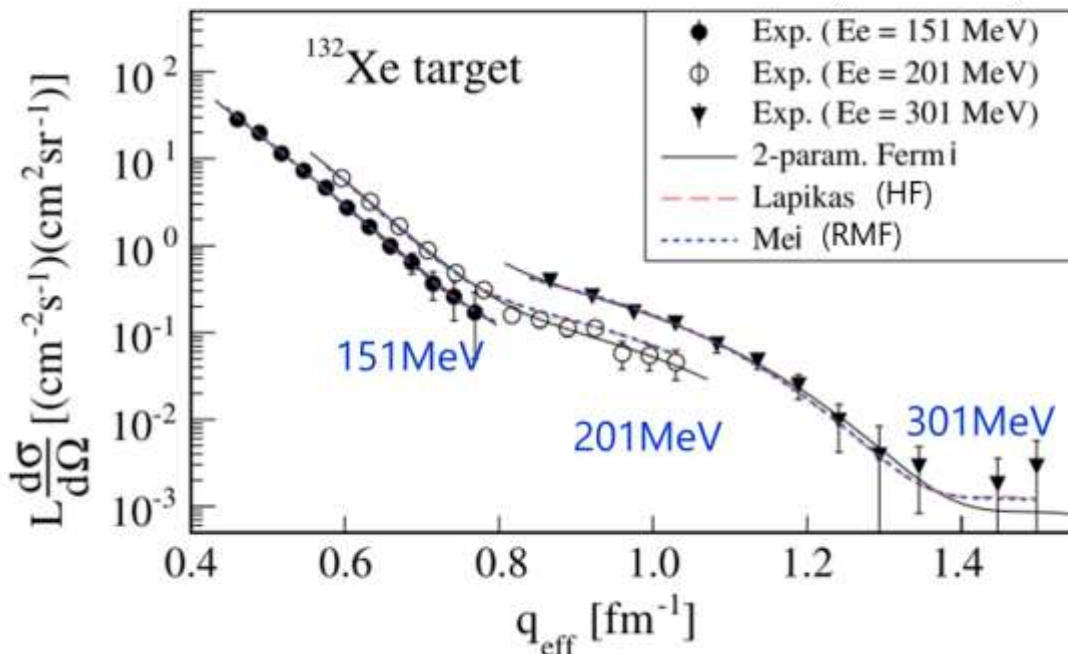
2013 ISOL から RI ビーム供給



SCRIT device

K. Tsukada et al., Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 262501.

Calc: DREPHA(Phase shift)

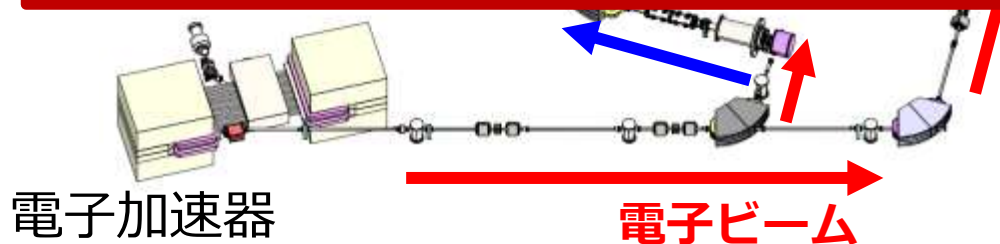
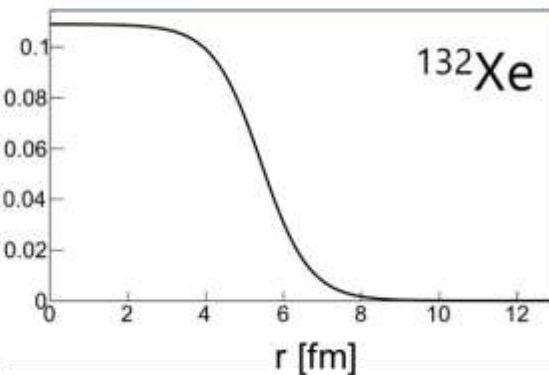


$$\rho_c = \rho / (1 + e^{4.4(r-c)/t})$$

$$C = 5.42^{+0.11}_{-0.08}$$

$$t = 2.71^{+0.29}_{-0.38}$$

$$\langle r \rangle^{1/2} = 4.79^{+0.12}_{-0.10}$$





# さらなる研究プラン

## ・ 全光吸収断面積測定

0 度散乱 → 蓄積リングを分離装置として活用

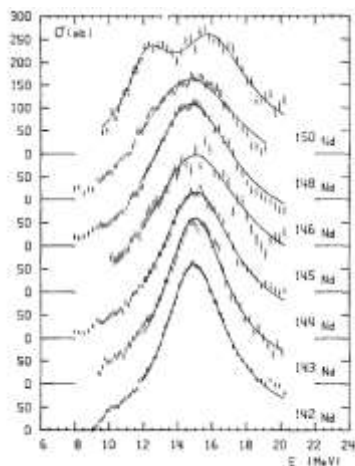
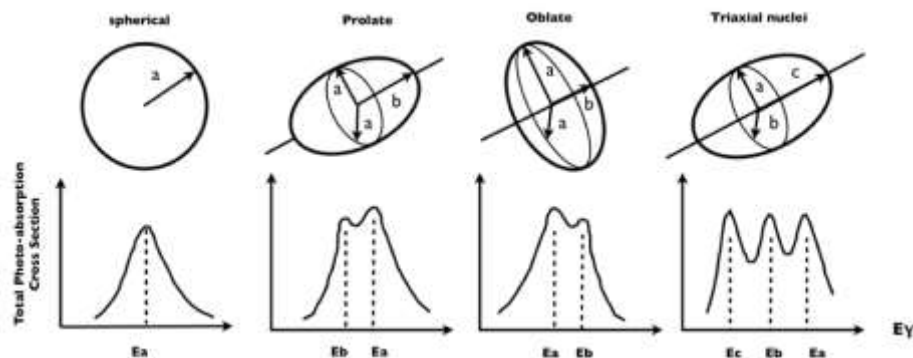


Fig. 10. Lorentz-line fits of the  $\sigma_{\gamma}(E)$  curves of neodymium isotopes.

$$\sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, pn) + \sigma(\gamma, 2n)$$



原子核の構造の理解  
合成過程計算におけるインプット



# 四次モーメント測定による中性子分布測定

"The nth-order moment of the nuclear charge density and contribution from the neutrons"

H. Kurasawa and T. Suzuki, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 113D01.

$$\rho_C(r) = \rho_C^p(r) + \rho_C^n(r)$$

$$\langle r_C^2 \rangle = \int r^2 \rho_C(r) dr^3$$

$$= \langle r_{p(point)}^2 \rangle + \langle r_p^2 \rangle + \langle r_n^2 \rangle \frac{N}{Z} + \text{relativistic corr. (spin-orbit terms and ...)}$$

Point proton radius  
proton radius

neutron radius

$$\langle r_{p(point)}^2 \rangle = \int r^2 \rho_{p(point)}^p(r) dr^3$$

$$\langle r_{n(point)}^2 \rangle = \int r^2 \rho_{p(point)}^n(r) dr^3$$

$$\langle r_C^4 \rangle = \int r^4 \rho_C(r) dr^3$$

$$= \langle r_{p(point)}^4 \rangle + \frac{10}{3} \langle r_{p(point)}^2 \rangle \langle r_p^2 \rangle + \frac{10}{3} \langle r_{n(point)}^2 \rangle \langle r_n^2 \rangle \frac{N}{Z} + \text{relativistic corr.}$$

Point neutron radius

|                   | $\langle r_C^4 \rangle_{\text{exp}}$ | $\langle r_C^4 \rangle_{\text{calc}}$<br>(Full rel. calc NL3) | n-cont. (3 <sup>rd</sup> term)<br>(calc) | n-skin<br>(calc) |
|-------------------|--------------------------------------|---|--|------------------|
| <sup>48</sup> Ca  | 194.7 fm <sup>4</sup>                | 191.7 fm <sup>4</sup>   | 7.3 fm <sup>4</sup> (6.9%)               | 0.06 fm          |
| <sup>208</sup> Pb | 1171.58 fm <sup>4</sup>              | 1156.81 fm <sup>4</sup>                                       | 20.254 fm <sup>4</sup> (1.8%)            | 0.28 fm          |



# $\langle r_C^4 \rangle$ の測定方法

1. 荷電分布を広い運動量領域で測定 → 高いルミノシティが必要。
2. 低運動量移行領域で、高精度で荷電分布を測定。  
→ 低いルミノシティでも可能(大きい断面積 ( $1/q^4$ ))

Low-q region

$$F_C(q) = \int \rho_C(\vec{r}) e^{-i\vec{q}\cdot\vec{r}} d^3r$$

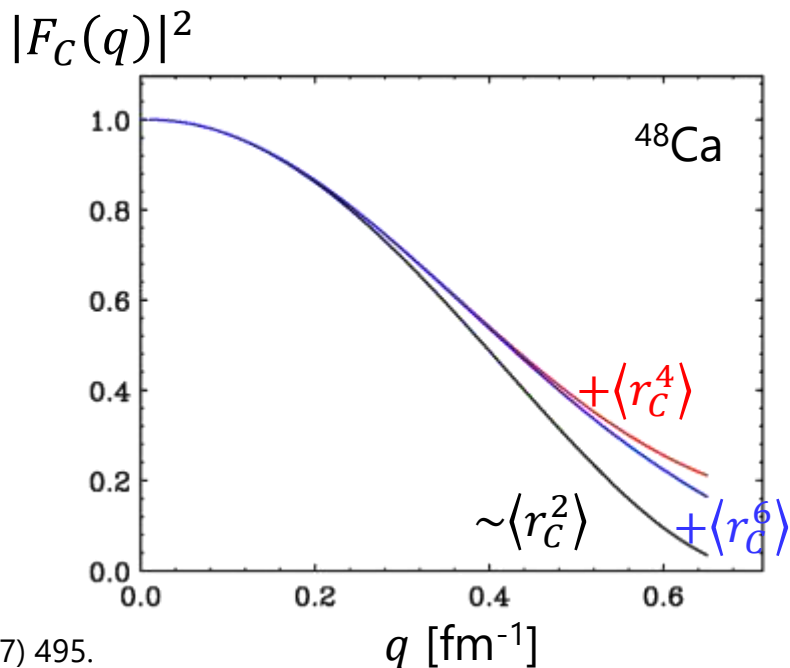
$$\sim 1 - \frac{\langle r_C^2 \rangle}{3!} q^2 + \frac{\langle r_C^4 \rangle}{5!} q^4 - \frac{\langle r_C^6 \rangle}{7!} q^6 + \dots$$

(PWIA)

Calculated values

|                  | $\langle r_C^2 \rangle$ | $\langle r_C^4 \rangle$ | $\langle r_C^6 \rangle$ |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $^{48}\text{Ca}$ | 11.91                   | 194.7                   | 3913                    |

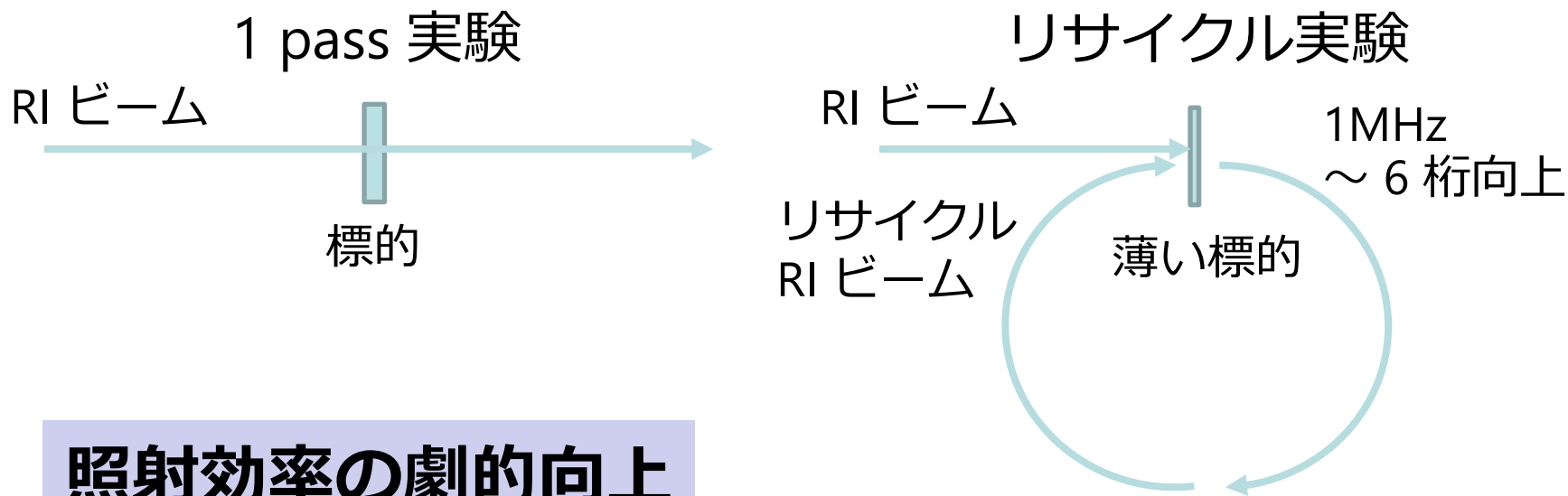
H. De Vries et al., Atomic data and nuclear data tables 36 (1987) 495.



中性子スキンの導出 & under discussion...



# 将来計画 イオン蓄積リサイクルリング



## 照射効率の劇的向上

**問題点: 周回ビームのクオリティ悪化**

**解決策: 個別エミッタンス補正**

- ・ 粒子毎の情報に基づいた補正
- ・ 他のイオン蓄積リングには無い方法

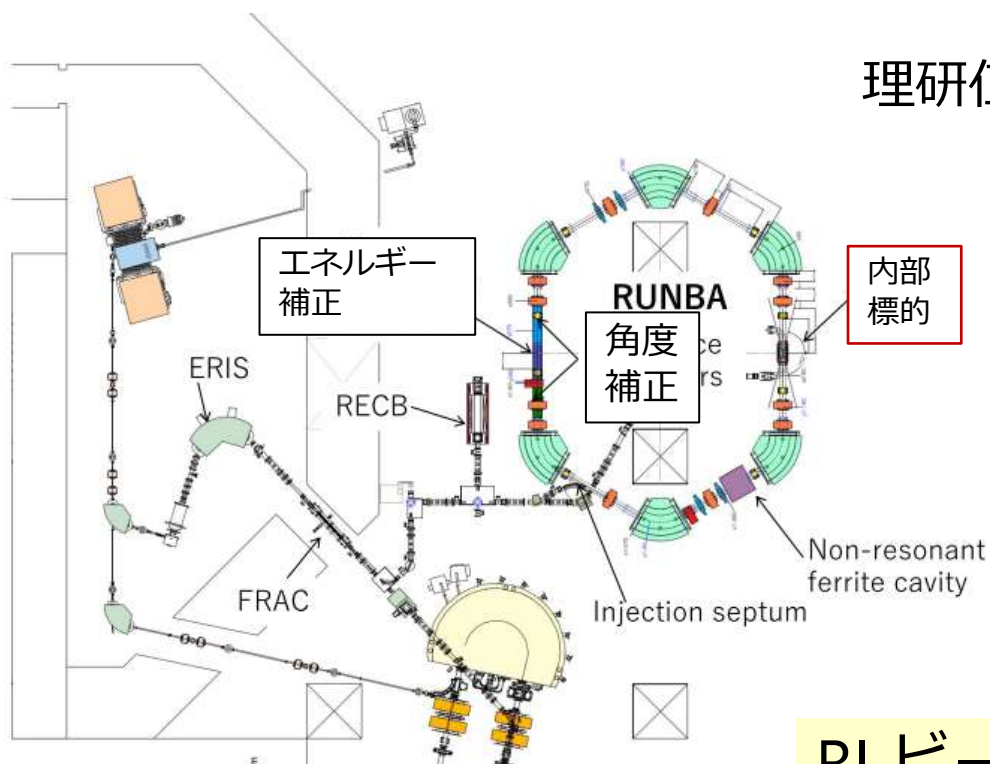
技術開発及び実証機 → RUNBA プロジェクト





# Recycled-Unstable-Nuclear Beam Accumulator (RUNBA) プロジェクト

理研仁科センター&京都大学化学研究所



RI beam  $\sim 10$  MeV/u  
 少数粒子  $< 10$ , 1MHz  
 内部標的 ( $10^{18}/\text{cm}^2$ )  
 $\rightarrow$  衝突頻度  $\sim 10^{24}/\text{cm}^2/\text{s}$

RI ビームを使った核反応実験  
 従来:  $10^3$  cps RIビームが限界  
 RUNBA:  $< 1$  cps RIビームが可能

**適用例: 天体核反応実験**





# 稀少 RI ビームを使った核反応実験

(n, $\gamma$ ) 反応  $\rightarrow$  (d,p) 反応  
with ANC 法

既存実験 必要レート  $> 10^4$  cps  
 $\rightarrow$  そこまで遠くにいけない

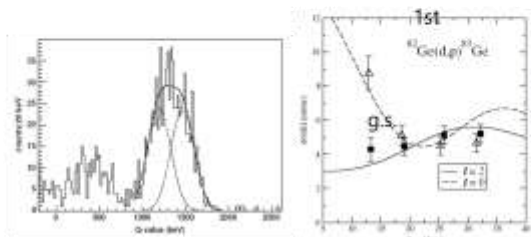
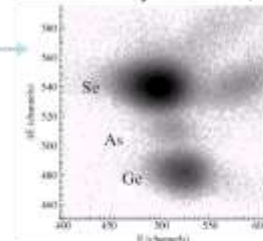
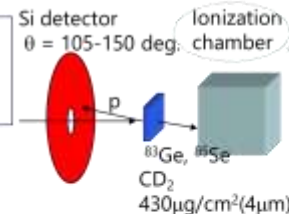
**1 cps の不安定核 with RUNBA**

Example for past experiment @HRIBF:  $^{82}\text{Ge}(d, p)$  reaction

J.S. Thomas  
Phys. Rev. C71(2005)021302

$^{82}\text{Ge}$  beam (GeS+) E = 4 MeV/u  
 $^{82}\text{Se} = 6 \times 10^4$  pps  
 $^{82}\text{As} < 7 \times 10^2$  pps  
 $^{82}\text{Ge} = 1 \times 10^4$  pps

$^{84}\text{Se}$  beam E = 4.5 MeV/u  
 $^{84}\text{Br} = 9.2 \times 10^4$  pps  
 $^{84}\text{Se} = 8 \times 10^3$  pps



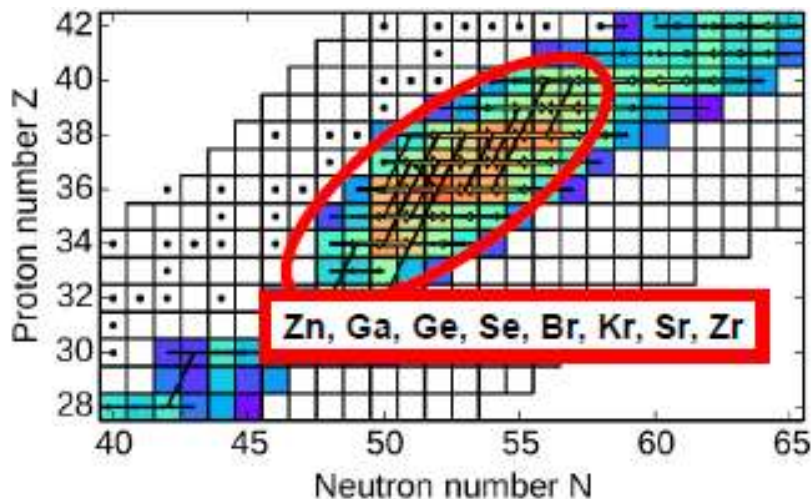
$^{82}\text{Ge}(d, p)^{83}\text{Ge}$  Q-spectrum

Angular distribution

| Q (MeV)     | Ex (keV) | J <sup>π</sup> | S <sub>11</sub> |
|-------------|----------|----------------|-----------------|
| 1.47 ± 0.07 | 0        | 5/2+           | 0.48 ± 0.14     |
| 1.19 ± 0.07 | 280 ± 20 | 1/2+           | 0.5 ± 0.15      |

**Direct measurements** of ( $\alpha, n$ ) reaction in lighter mass region

e.g.,  $^{80,82}\text{Ge}$ ,  $^{84,85}\text{Se}$ ,  $^{85,86}\text{Br}$ ,  $^{86-90}\text{Kr}$ ,  $^{91}\text{Rb}$ ,  $^{93,94}\text{Sr}(\alpha, n)$  reactions



• ( $\alpha, n$ ) cross sections at  $T \sim 1-5$  GK

- Detect **exclusive channels** 1n, 2n...
- **Energy and angle** of neutrons: separate compound-nucleus, preequilibrium, direct

• ( $\alpha, \alpha$ ) elastic scattering: alpha OP



## まとめ

### RIBF における不安定核研究

新しい大型実験装置

R3: 精密質量測定

SCRIT: 不安定核電子散乱

将来計画

RUNBA: イオン蓄積リサイクルリング



**研究対象 & 手法の拡大**  
**元素合成過程の解明に向けたさらなる進展**



## 主な共同実験グループ

### R3 project

筑波大            小沢・森口グループ  
埼玉大            鈴木・山口グループ  
京大化研          若杉グループ  
東大CNS, 東工大, Surrey 大, GSI, IJCLab, CENS, IMP

### SCRIT project

東北大ELPH      須田グループ  
京大化研          若杉グループ  
立教大            栗田グループ  
埼玉大            鈴木・山口グループ  
長岡技術大学、山形大学、GSI, Shandong 大

### RUNBA project

京大化研          若杉グループ