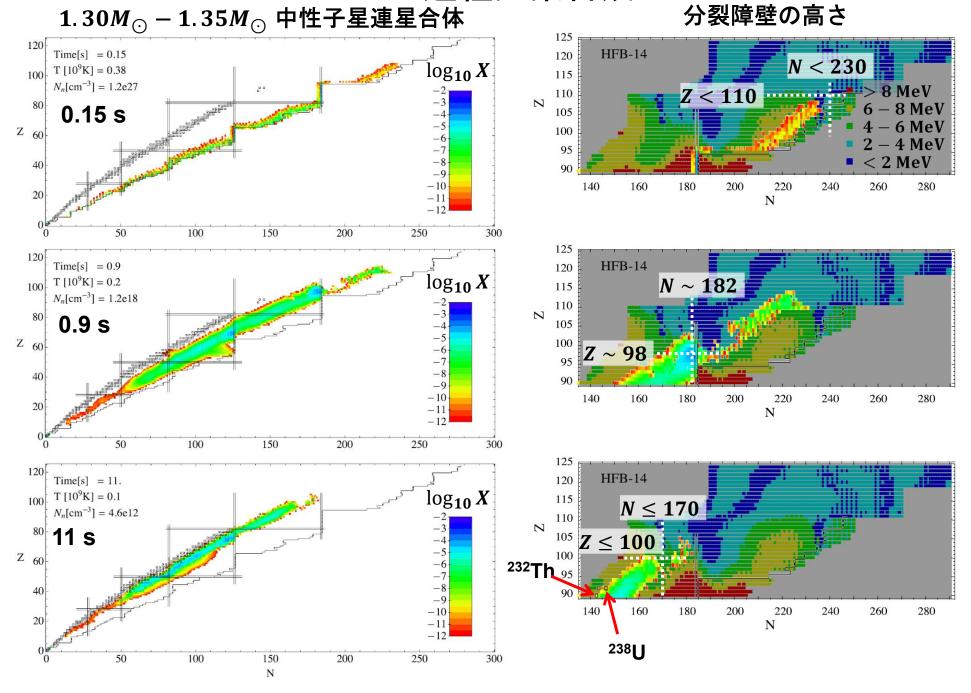
理研RIBFミニワークショップ 「理論と実験で拓く中性子過剰核の核分裂」 2023年2月16日、17日 理化学研究所・和光キャンパス・RIBF棟大会議室

# 多核子移行反応による 中性子過剰アクチノイド実験への展望

KEK WNSC 渡辺 裕

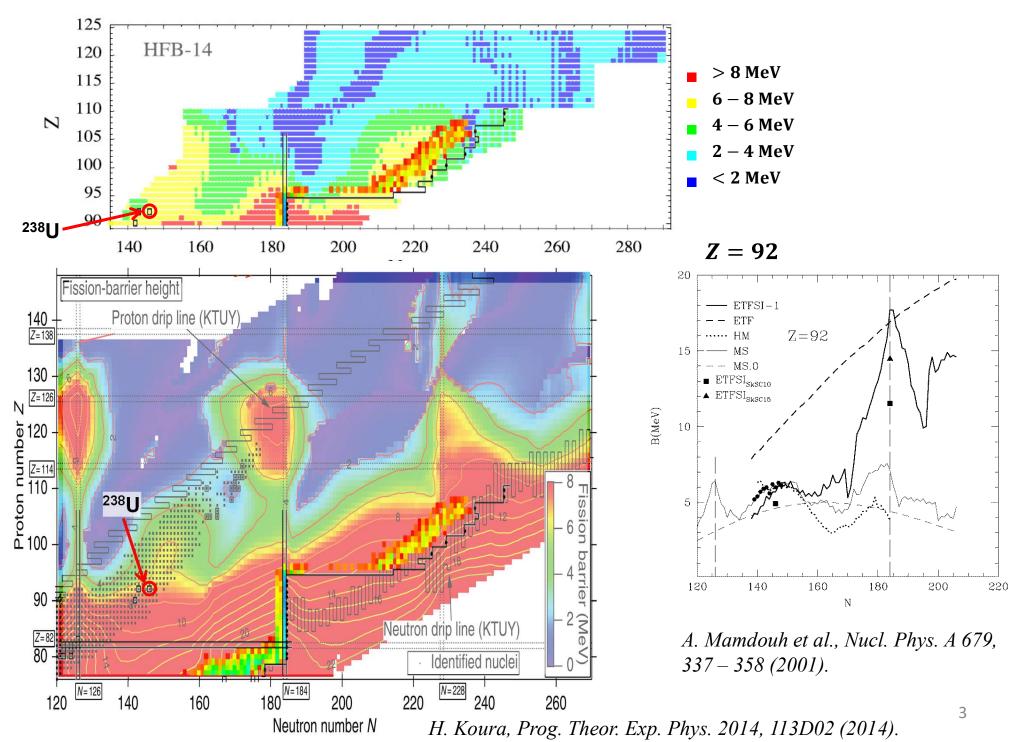
- r 過程と中性子過剰アクチノイド
- ・多核子移行反応による中性子過剰アクチノイド核の生成
- 元素選択型質量分離装置 K I S S
- 将来計画KISS-II

# r過程元素合成

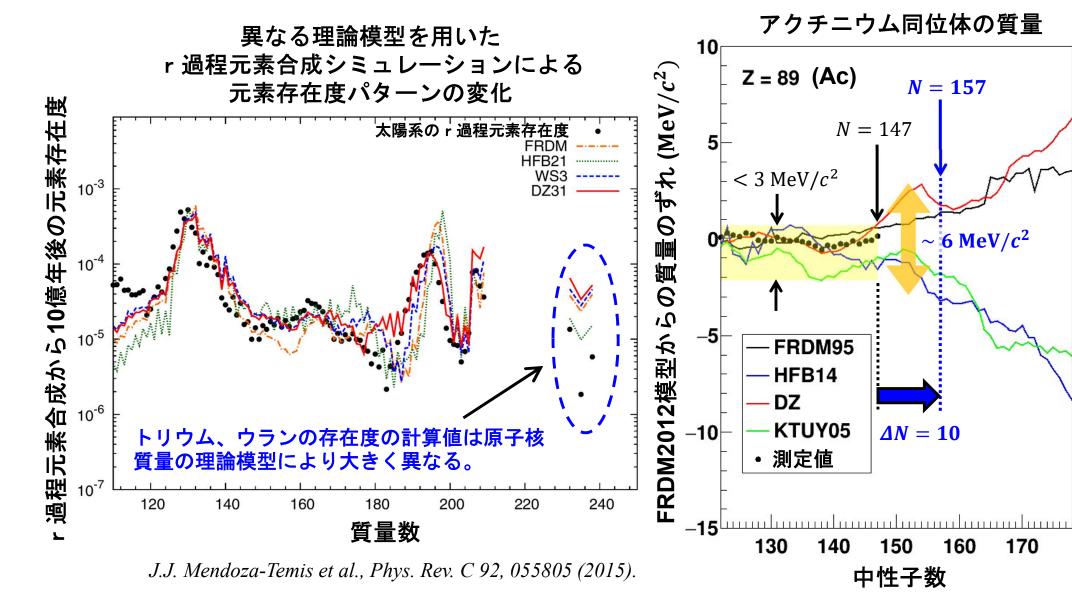


S. Goriely and G.M. Pinedo, Nucl. Phys. A 944, 158 (2015).

# 分裂障壁

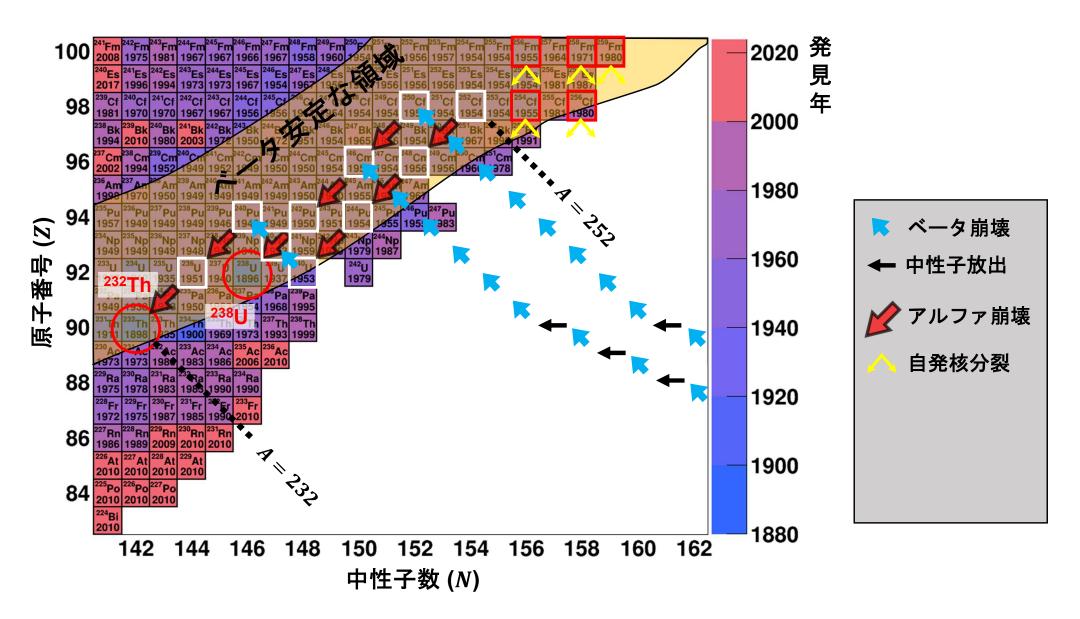


# r過程元素合成シミュレーションとアクチノイド核の質量



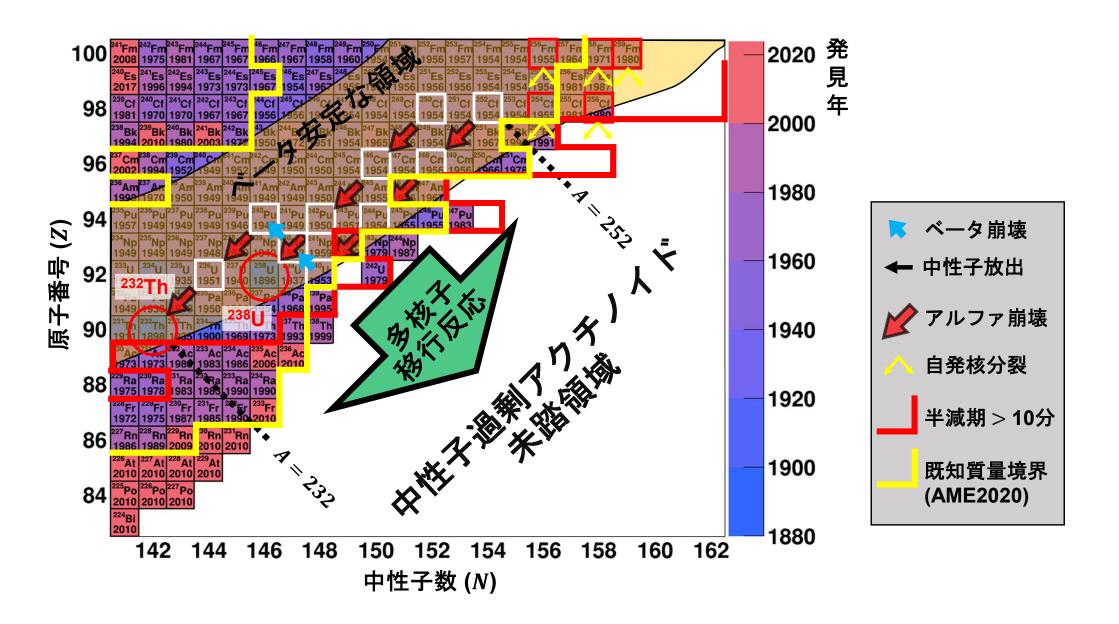
170

# 中性過剰アクチノイド領域

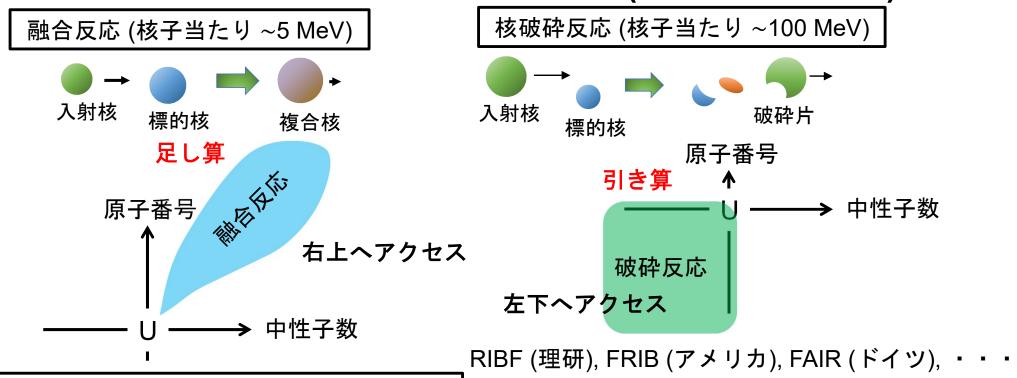


E.M. Holmbek et al., Astrophys. J. 870, 23 (2019).

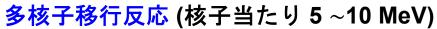
## 中性過剰アクチノイド領域

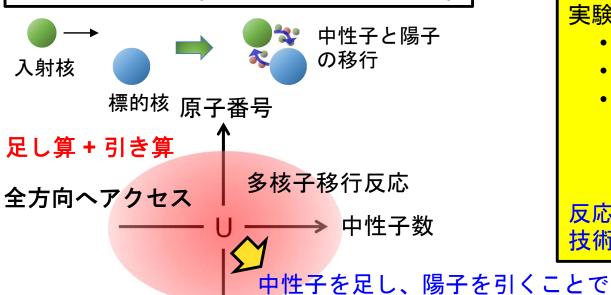


# ウランの右下方向へのアクセス (多核子移行反応)



ウランの右下方向にアクセスできる。





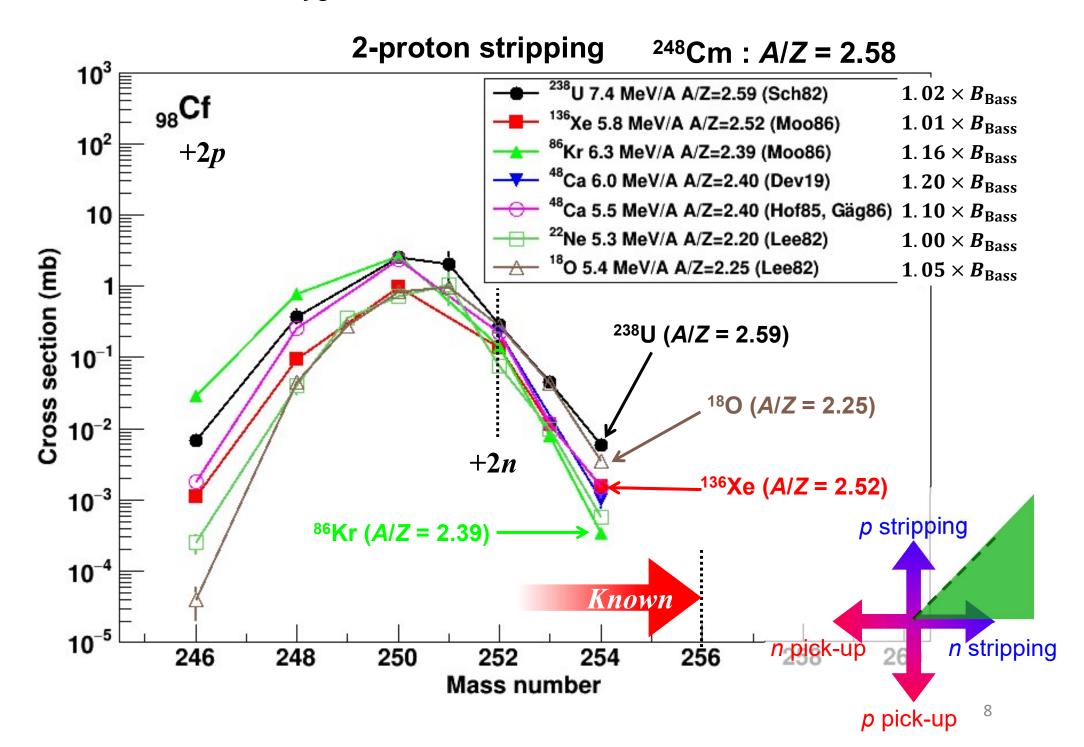
#### 実験的な困難

- 多数の核種が同時に生成される
- 低いエネルギー
- 広い角度分布とエネルギー分布

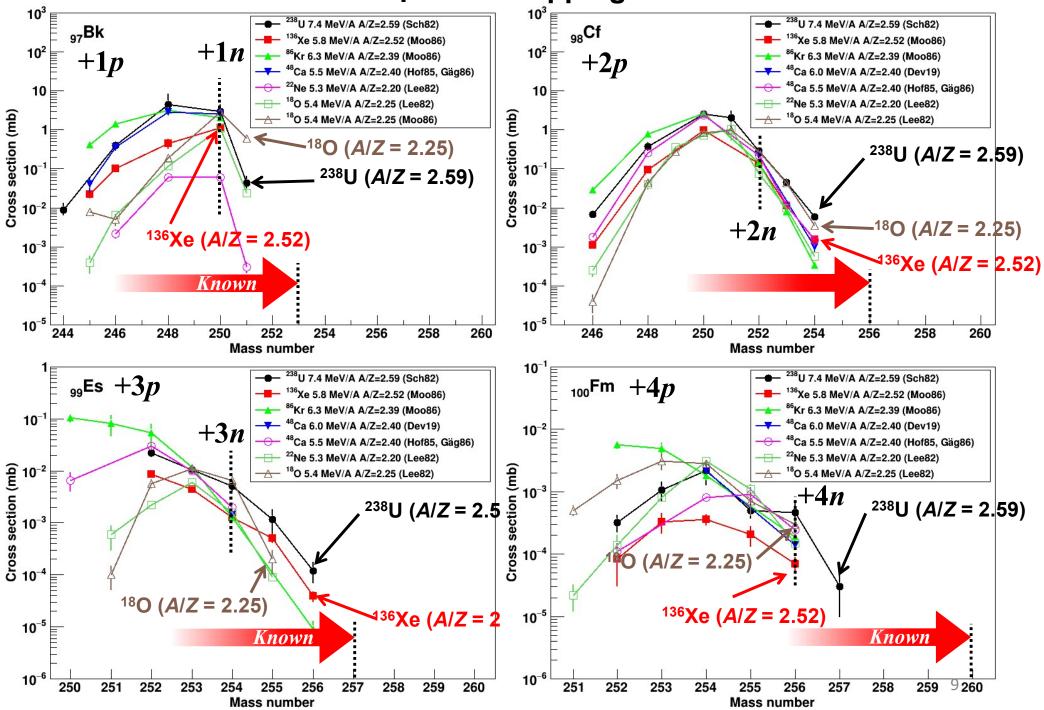


反応生成核を収集、分離、同定する実験 技術の開発が重要

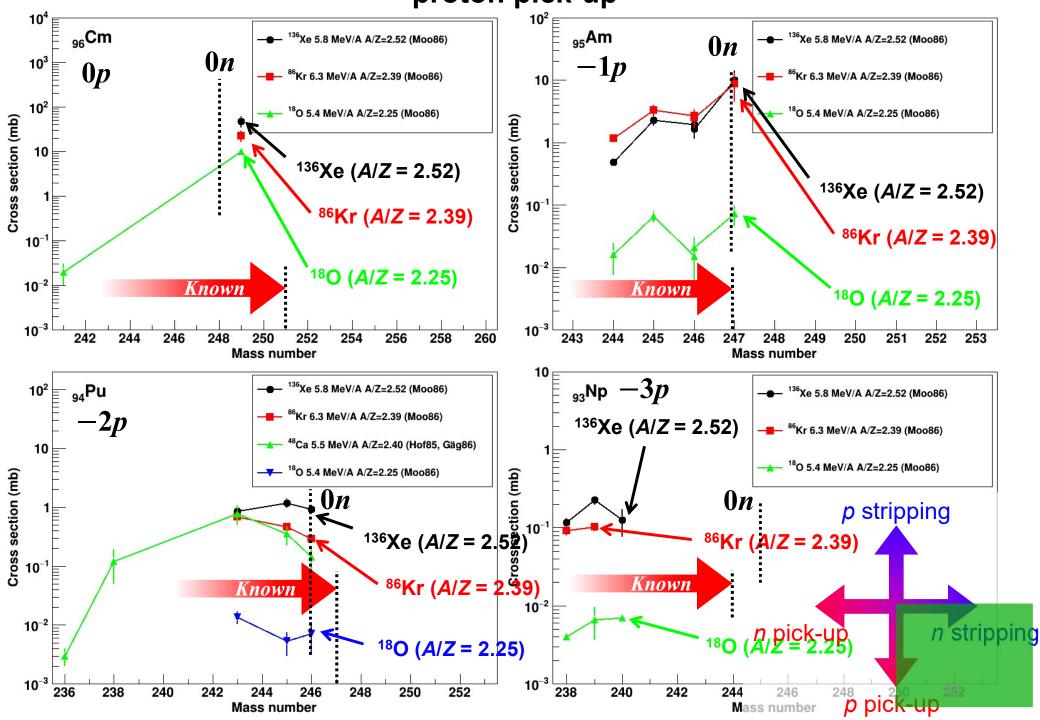
# <sup>248</sup><sub>96</sub>Cm標的による多核子移行反応



# <sup>248</sup>Cm標的による多核子移行反応 – proton stripping –

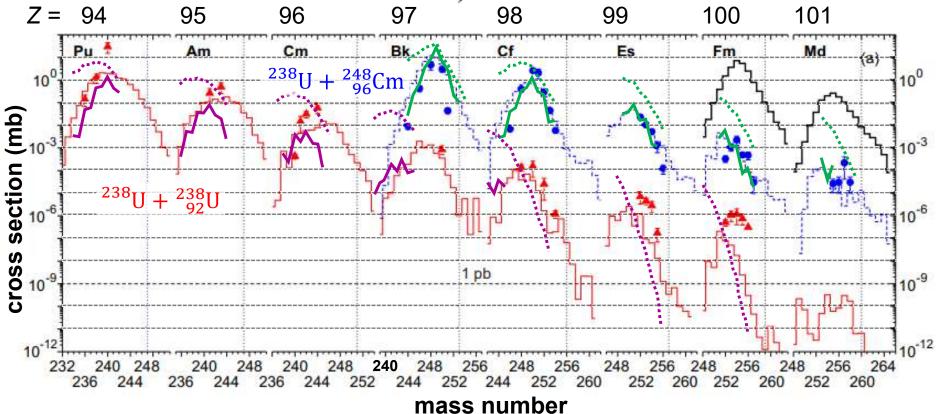


# <sup>248</sup>Cm標的による多核子移行反応 – proton pick-up –



## 多核子移行反応の計算

-238U + 238U, 238U + 248Cm -



- ▲ 測定値 (<sup>238</sup>U + <sup>238</sup>U ≤ 7.5A MeV)

  M. Schädel et al., Phys. Rev. Lett. 41, 469 (1978).
- 測定値 (<sup>238</sup>U + <sup>248</sup>Cm ≤ 7.4A MeV)

  M. Schädel et al., Phys. Rev. Lett. 48, 852 (1982).

Langevin (<sup>238</sup>U + <sup>238</sup>U 7.5A MeV)
 Langevin (<sup>238</sup>U + <sup>248</sup>Cm 7.4A MeV)
 Langevin (<sup>238</sup>U + <sup>254</sup>Es 7.3A MeV)

····· GRAZING (<sup>238</sup>U + <sup>238</sup>U 7.5*A* MeV)

GRAZING (<sup>238</sup>U + <sup>248</sup>Cm 7.6*A* MeV)

A. Winther et al., Nucl. Phys. A 572, 191 (1994); 594, 203 (1995).

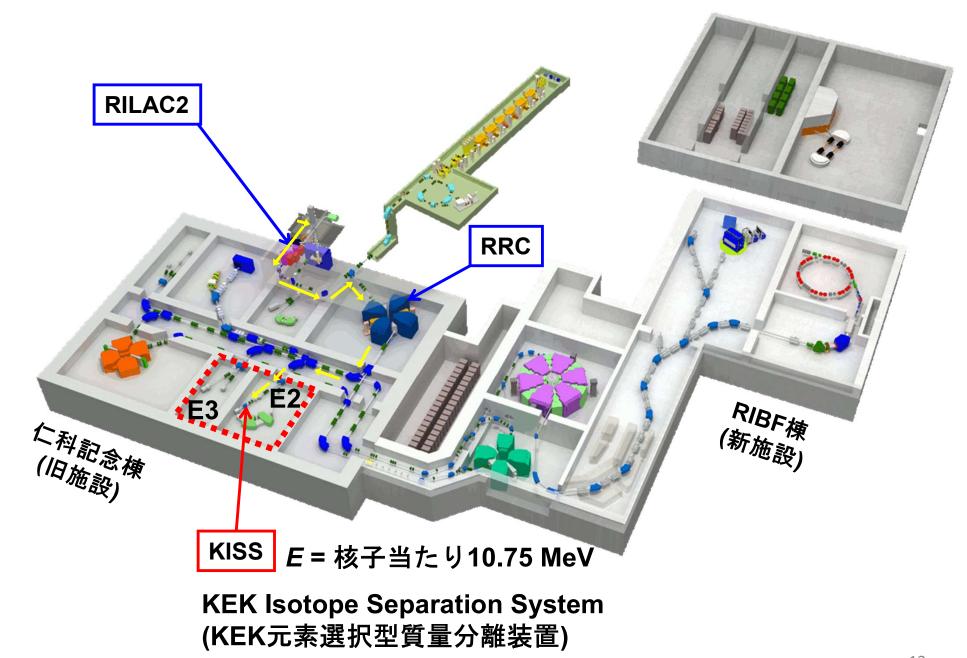
——— GRAZING-F (<sup>238</sup>U + <sup>238</sup>U 7.5*A* MeV)

GRAZING-F (<sup>238</sup>U + <sup>248</sup>Cm 7.4*A* MeV)

R. Yanez et al., Phys. Rev. C 91, 044608 (2015).

反応生成核の核分裂に対する残存確率~10%

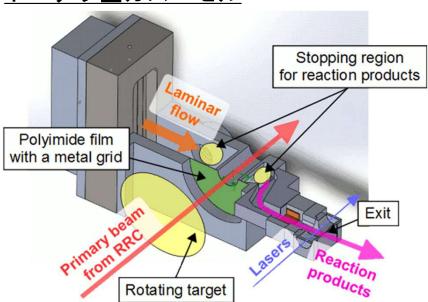
# 理研RIBF施設 (RIビーム・ファクトリー)



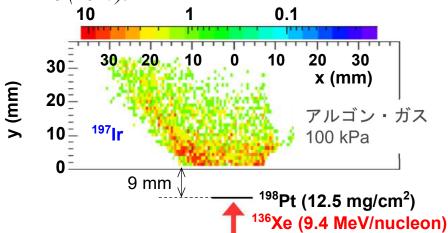
# KEK元素選択型質量分離装置 (KISS)

- 多核子移行反応によるRIの生成
- ガス・セルによるRIの収集
- レーザー共鳴イオン化による元素選択
- ISOLによる質量分離

#### ドーナツ型ガス・セル



*Y. Hirayama et al., Nucl. Instrum. and Meth. B 412,* 11 – 18 (2017).



### 質量測定

- ガス・セル・クーラー・ バンチャー
- MRTOF-MS

#### 崩壊核分光

- ・ テープ輸送装置
- 多重セグメント比例係数 管(ベータ線)
- ゲルマニウム検出器(ガンマ線)

#### 双極電磁石

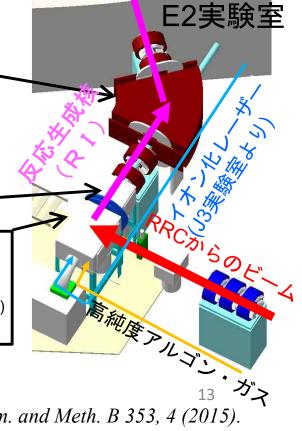
- 相対質量分解能 ~ 900
- 質量数選択

#### 引出しチェンバー

•  $\Delta V = 20 \text{ kV}$ 

#### ガス・セル装置

- ・ 標的 (エンリッチ<sup>198</sup>Pt, 92%)
- 多核子移行反応
- ・ ガス・セル (アルゴン・ガス、中性化)
- レーザー共鳴イオン化 (元素選択)



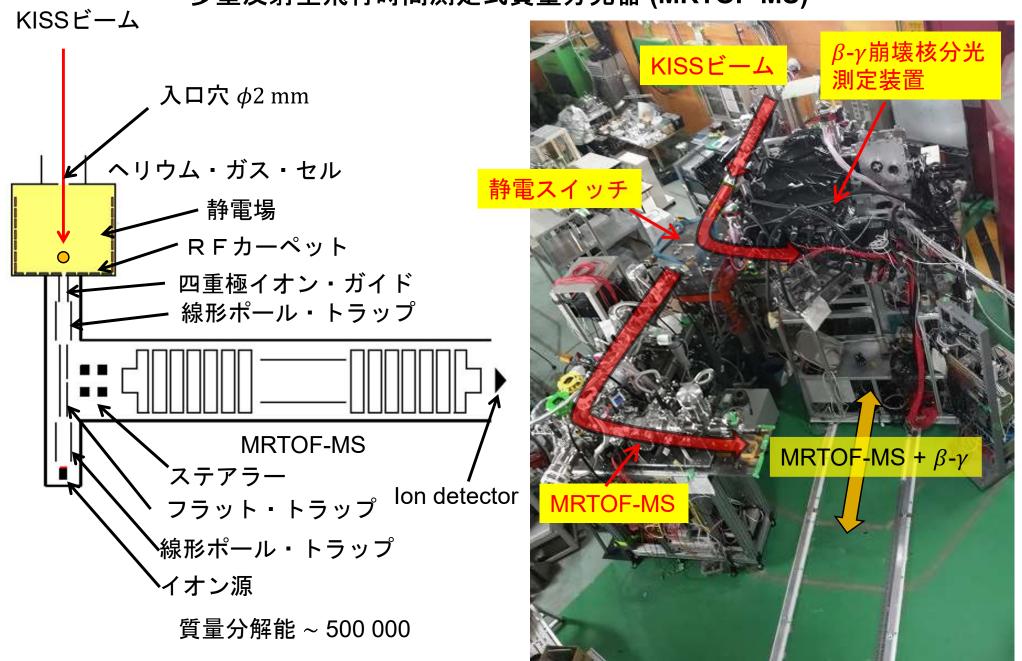
静電スイッチ

E3実験室

Y. Hirayama et al., Nucl. Instrum. and Meth. B 353, 4 (2015).

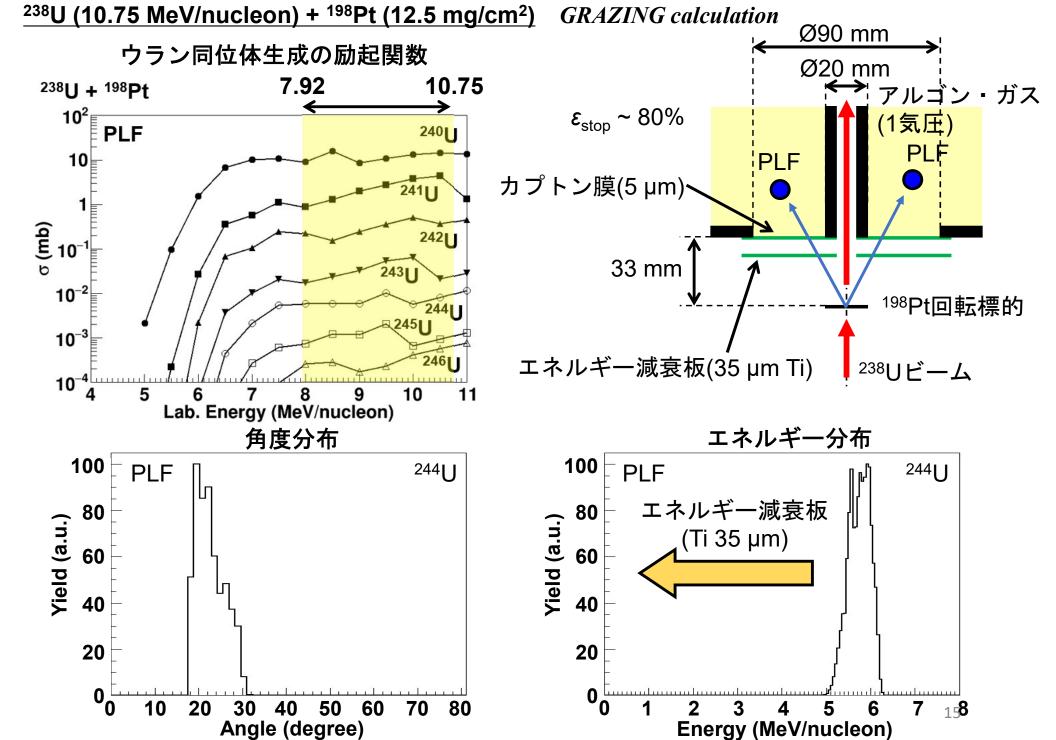
# KISS実験セットアップ: 質量測定

多重反射型飛行時間測定式質量分光器 (MRTOF-MS)



数10 msの時間、数10イベントで1 ppmの精密質量測定 (アクチノイド領域で $\delta M < 100~{
m keV}$ )。

# <sup>238</sup>U + <sup>198</sup>Ptによる中性子過剰アクチノイドの生成





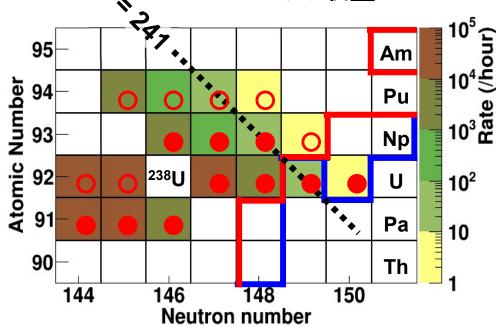
15

10

5

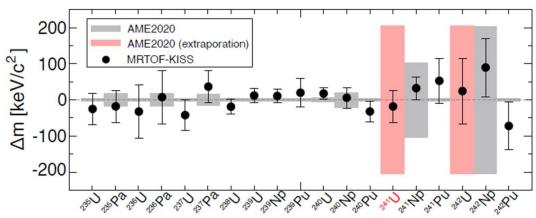
0 🔤

-100

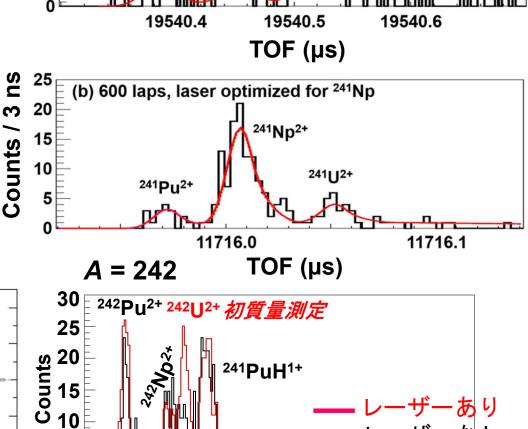


非共鳴イオン ▶共鳴イオン

既知質量境界 既知寿命境界 AME2020との質量差



T. Niwase et al., Phys. Rev. Lett. (accepted)



<sup>241</sup>PuH<sup>1+</sup>

TOF - 13766.107  $\mu s$  (ns)

100

200 300 400

500 600

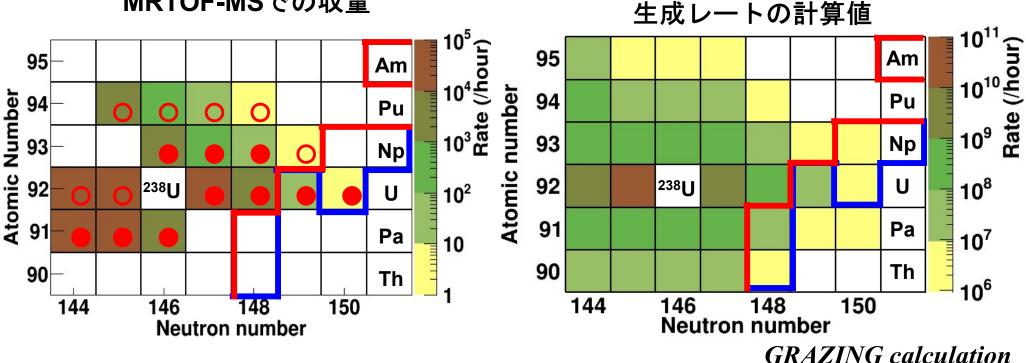
241U2+

新同位体

# 中性子過剰アクチノイド核の収量

 $^{238}$ U (10.75 MeV/nucleon, 30 pnA) +  $^{198}$ Pt (12.5 mg/cm<sup>2</sup>)

MRTOF-MSでの収量



共鳴イオン 〇 非共鳴イオン

既知質量境界 既知寿命境界

- ightharpoonup MRTOF-MSでの収量 / 生成レートの計算値 =  $10^{-6} \sim 10^{-5}$
- ・ 引き出し効率 = 0.01% ~ 0.05%
- **MRTOFの効率** = 2% ~ 5%
- レーザー共鳴イオン化の効率 = 50% (repitition 50 Hz)

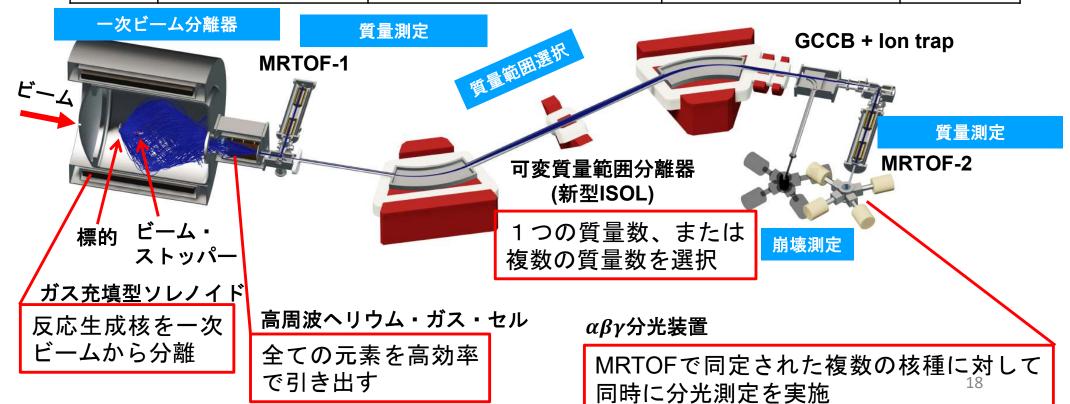


核分裂に対する残存率 = 10% ~ 100%?

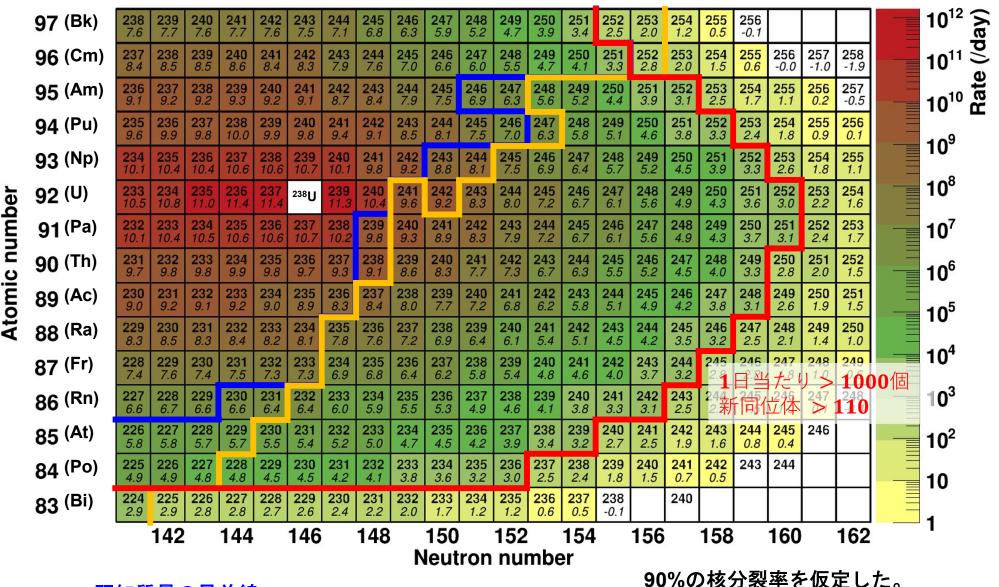
#### "分離せずに複数の核種を同時測定"

- ▶ 一次ビーム分離器 → 高強度ビーム
- ▶ 高周波へリウム・ガス・セル → 全ての元素の高効率な捕集
- ➤ 可変質量範囲分離器、MRTOF-MS → 複数核種の同時測定、崩壊測定の核種同定

	一次ビーム	全効率	同時測定核種数	能率
KISS	10 pnA	<0.1%	1	1
KISS-II	1 ρμΑ	>1%	> 10	> 10 000
	一次ビーム分離器	高周波ヘリウム・ガス・ セル	可変質量範囲分離器 MRTOF-MS	



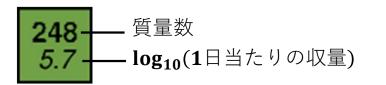
# KISS-IIで期待される収量 <sup>238</sup>U (9.4*A* MeV, 1 pµA) + <sup>nat</sup>U (13 mg/cm²)



既知質量の最前線

既知核の最前線

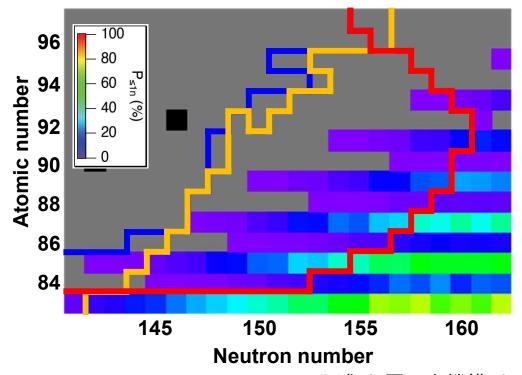
1日当たり1000個以上の収量



# ベータ遅延中性子放出、ベータ遅延分裂

ベータ遅延中性子放出確率

ベータ遅延分裂確率

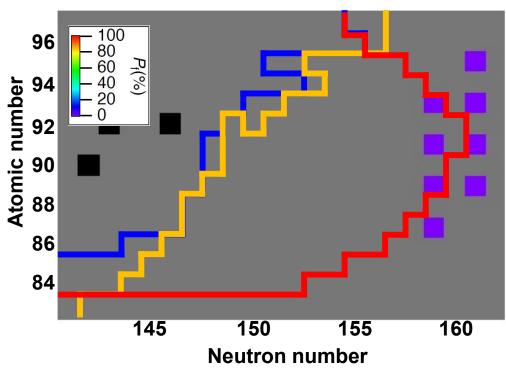


小浦氏(原子力機構)より

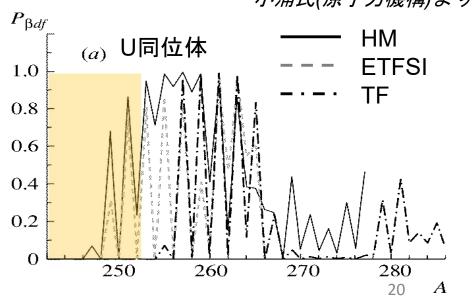
━━ 既知質量の最前線

既知核の最前線

1日当たり1000個以上の収量



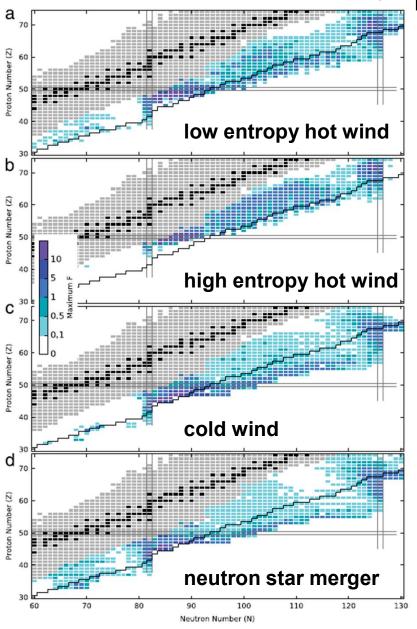
小浦氏(原子力機構)より



I.V. Panov et al., Phys. Atom. Nucl. 76, 88 – 101 (2013).

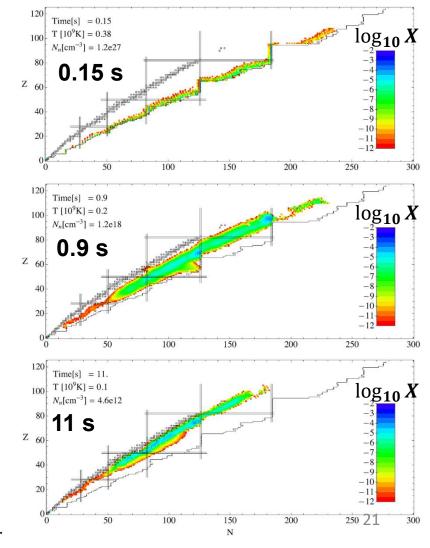
## 理論家の方々へ

# Impact parameter from the $\pm 500~{\rm keV}$ mass uncertainty



### アクチノイド近傍、超重核領域版

- <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U, <sup>254</sup>Cfの収量へのインパクト
- 希土類元素近傍の存在度パターンへのインパクト
- 質量、寿命、中性子誘導分裂確率、
  - ベータ遅延分裂確率、分裂片質量分布、・・・



M.R. Mumpower et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 86, 86 – 126 (2016).

### まとめ

- > r 過程の終端部
  - 分裂障壁の不定性 ← 質量の不定性
  - ・ 質量の不定性 → 元素存在度パターンの不定性
- ▶ トリウム、ウランの起源
  - $A = 232 \sim 252$ の中性子過剰アクチノイドが寄与
  - ・ 未踏領域 ← 多核子移行反応: 断面積? 実験的難点(角度、エネルギー、分離・ 同定)
- > 多核子移行反応による中性子過剰アクチノイド核の生成
  - U、Cmを標的として陽子ピックアップ、中性子ストリッピング
  - <sup>238</sup>Uなどの重いイオンビームが有利
- ➤ 元素選択型質量分離装置KISS+MRTOF質量分光器
  - 多核子移行反応の生成核を効率的に収集、分離、同定
  - <sup>238</sup>U + <sup>198</sup>Pt反応で新同位体<sup>241</sup>Uを同定
- > KISS-II
  - KISSの10,000倍の能率
  - ・ 110種類以上の中性子過剰アクチノイド近傍の新同位体の質量を精密測定  $(\delta M < 100 \ {
    m keV})$