

多核子移行反応を用いた核分裂の実験研究

西尾 勝久
日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター



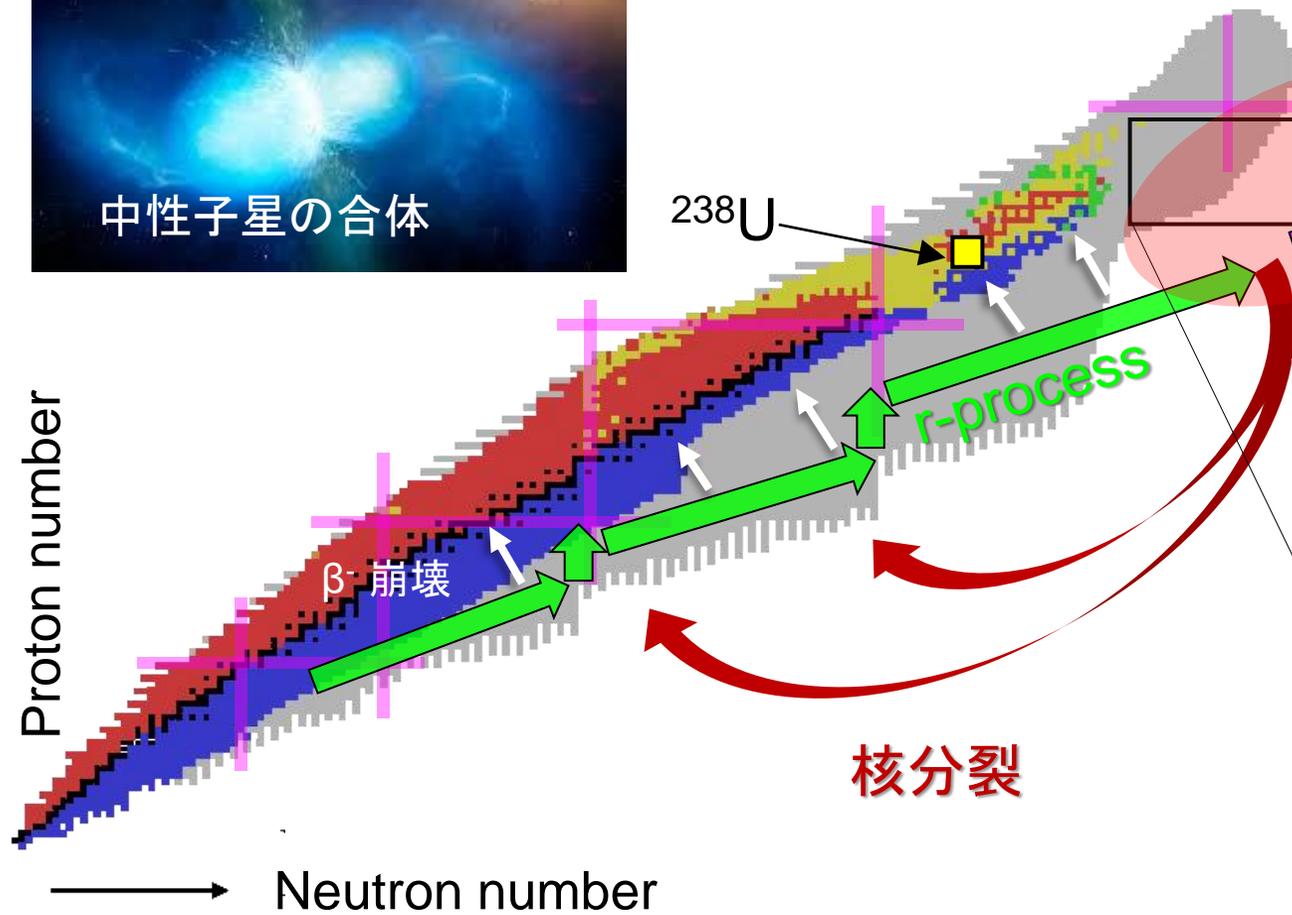
理研RIBFミニワークショップ「理論と実験で拓く中性子過剰核の核分裂」

内容

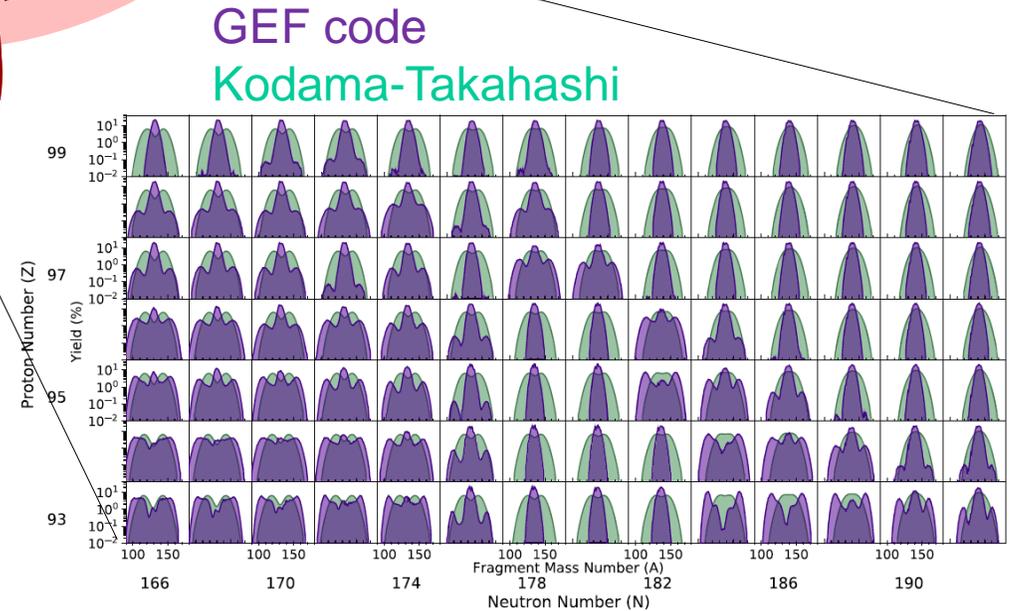
- ✓ 多核子移行反応を用いた核分裂測定
- ✓ 核分裂障壁
- ✓ マルチチャンス核分裂
- ✓ 核分裂における陽子数 $Z=54$ の効果
- ✓ β /EC崩壊遅発核分裂(中性子欠損核 ^{180}Hg の核分裂)
- ✓ まとめ

r-process 元素合成

— 核分裂の役割 —

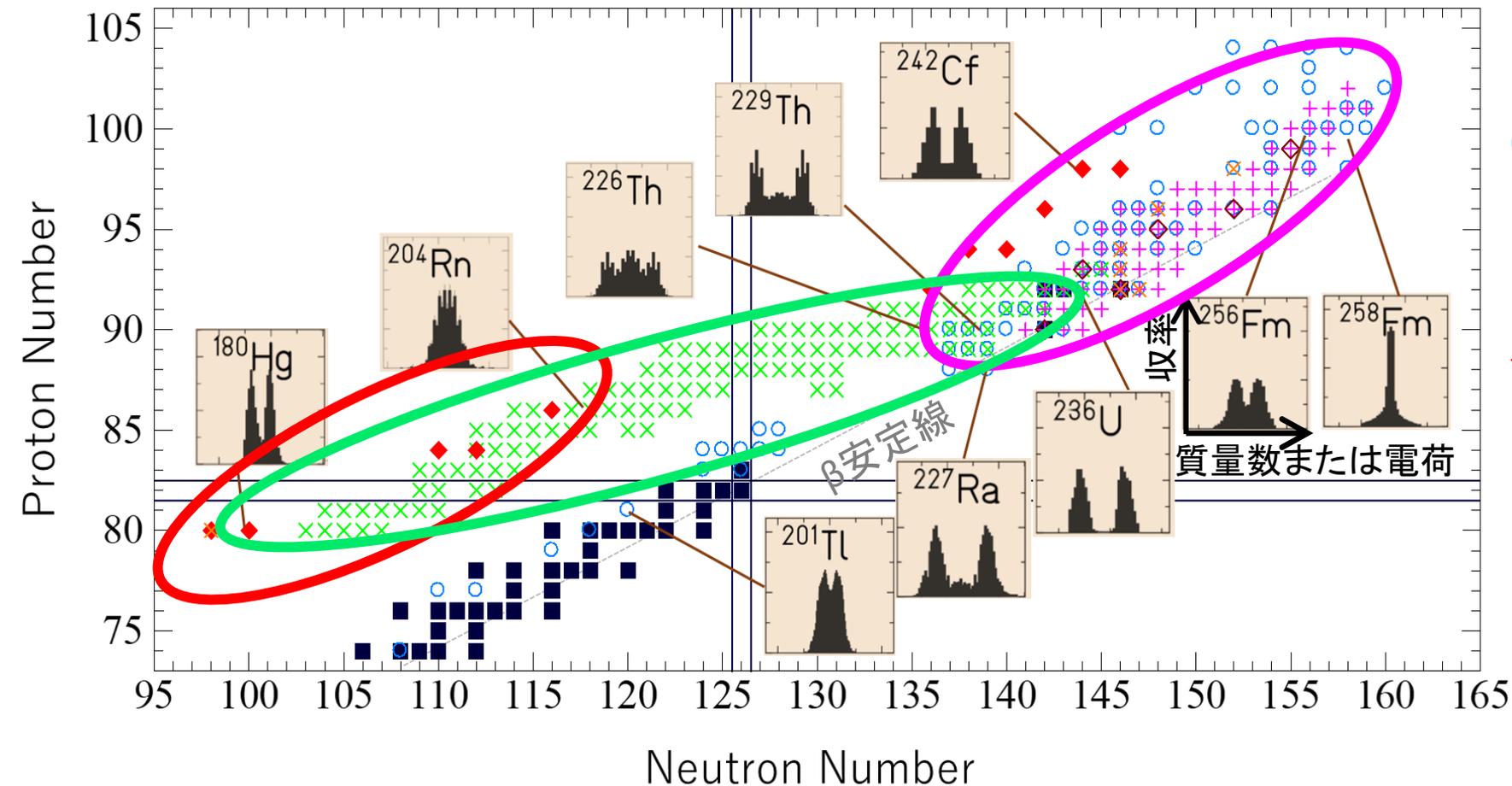


- 核分裂片の収率分布
- 核分裂障壁の高さ (中性子結合エネルギー)



核分裂片の質量数/電荷分布が測定されている核種(2022年)

低励起エネルギー核分裂（励起エネルギーが核分裂障壁より10MeV程度まで）



- SF, n-, p-, He-入射核分裂
- + 多核子移行反応(JAEA)
 $^{18}\text{O}+^{232}\text{Th}, ^{238}\text{U}, ^{237}\text{Np}, ^{243}\text{Am}, ^{248}\text{Cm}, ^{254}\text{Es}$
- × 逆運動学・クーロン励起(GSI)
- ◆ β -崩壊遅延核分裂

収率
質量数または電荷

A.N. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, Reports on Progress in Physics, **81**, 016301(2018).

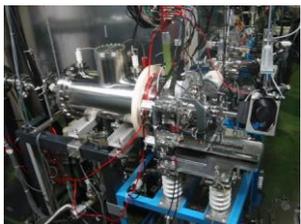
K. Nishio "Handbook of Nuclear Physics", 2023 Springer

JAEAタンデム加速器

(1) RI・核燃料試料を重イオン照射できる。

^{226}Ra , ^{232}Th , $^{233,235,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{239,242,244}\text{Pu}$, $^{241,243}\text{Am}$,
 ^{248}Cm , ^{249}Bk , $^{249,250,251,252}\text{Cf}$, ^{254}Es

(2) 実験装置



オンライン同位体
分離装置 (ISOL)

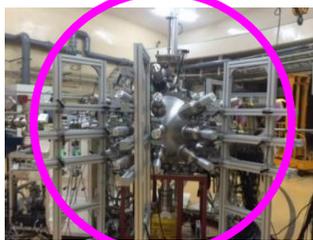


反跳生成核分離装置
(RMS)



磁気スペクトログラフ
(ENMA)

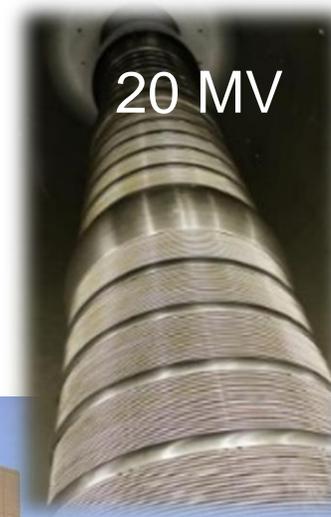
...



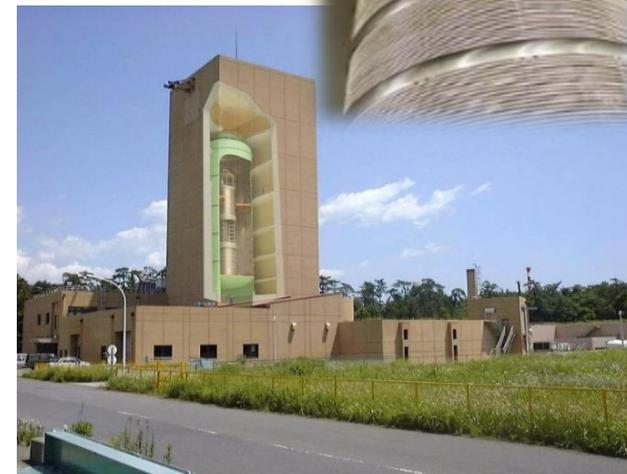
核分裂測定装置



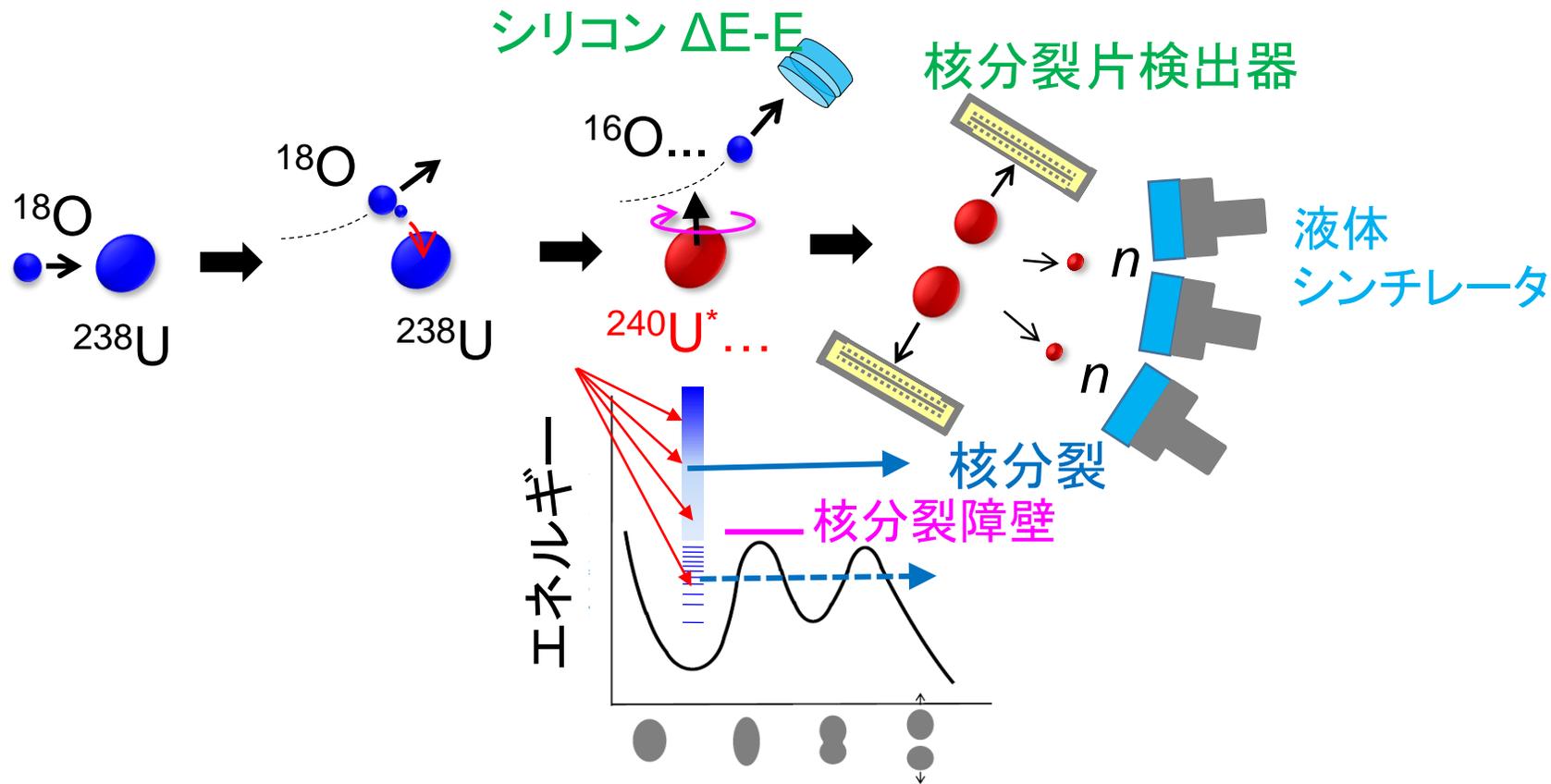
Ge検出アレイ



20 MV

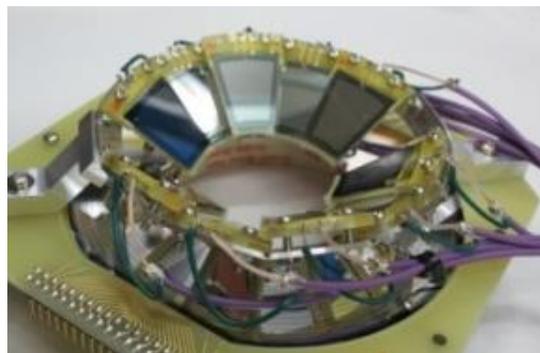
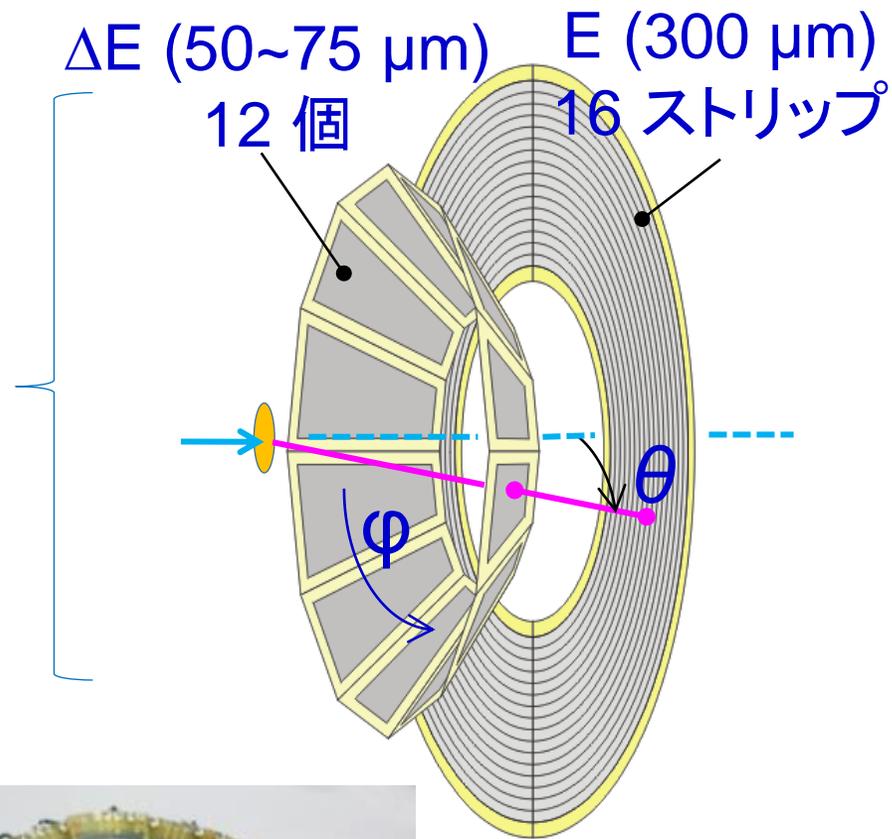
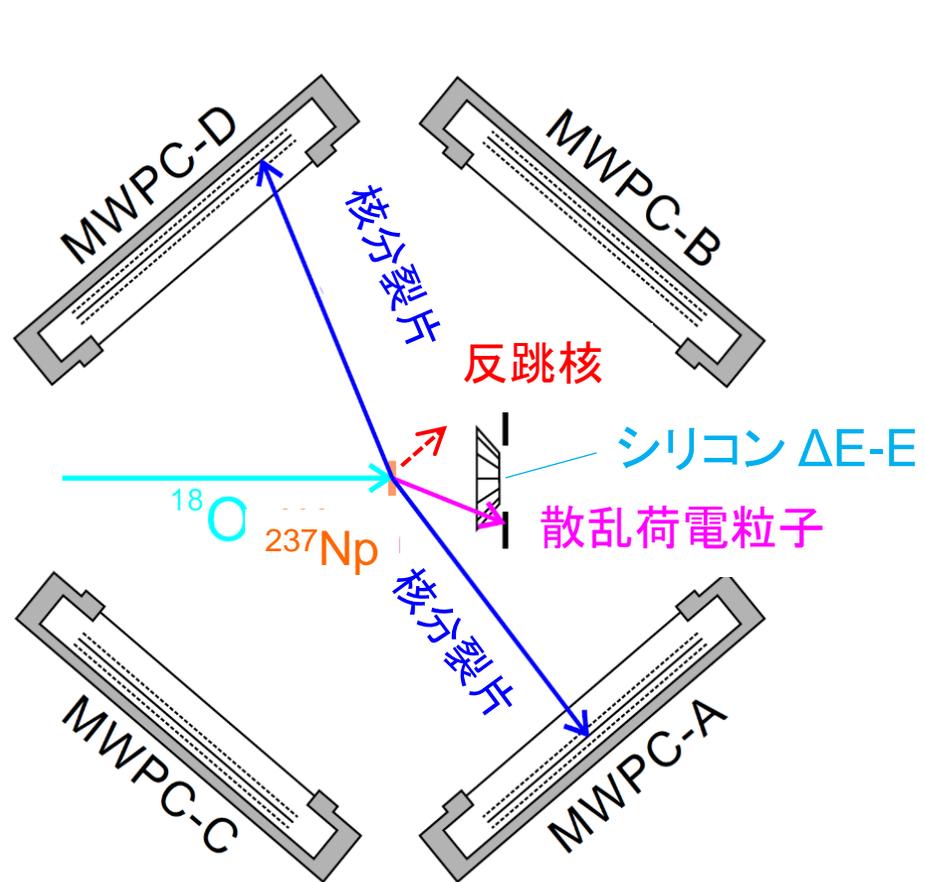


多核子移行反応を用いた核分裂測定



- 核分裂片の質量数分布
- 核分裂障壁の高さ
- 即発中性子の数
- 核分裂片の角度分布

実験セットアップ



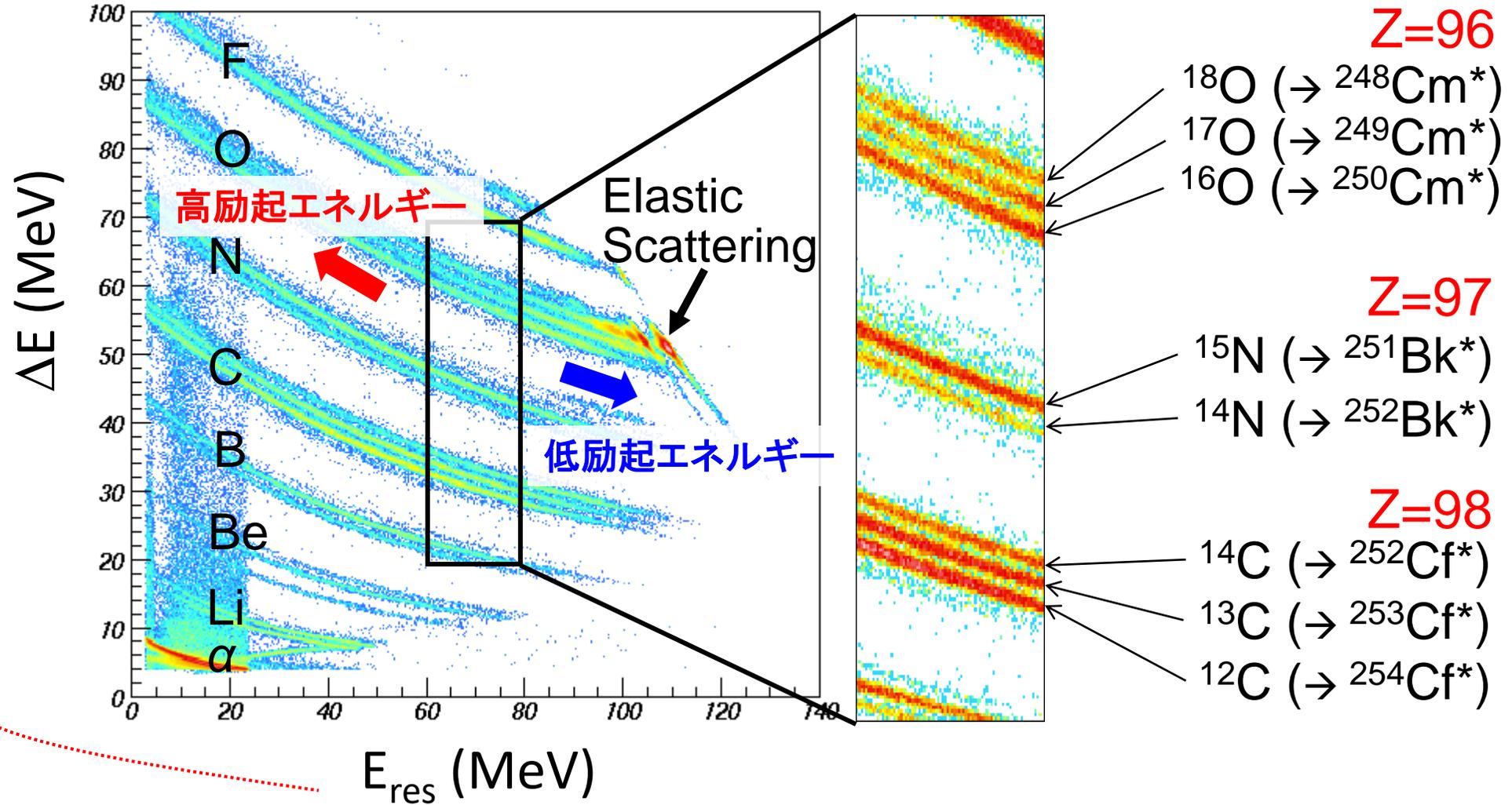
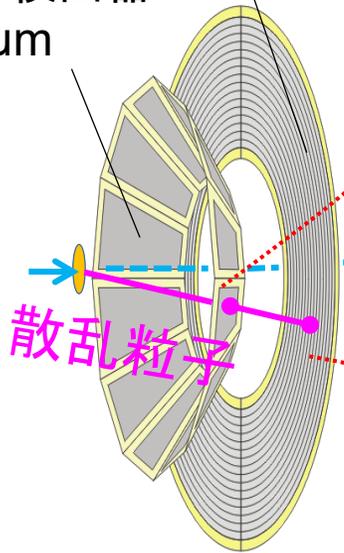
R. L guillon *et al.*, Phys. Lett. B **761**, 125 (2016).

ΔE - E 検出器を用いた粒子の識別

$^{18}\text{O} + ^{248}\text{Cm}$
($E_{\text{beam}} = 162\text{MeV}$)

E 検出器
300 μm

ΔE 検出器
75 μm



核分裂確率と核分裂障壁の高さ



$B_f(\text{cal}) = 5.43 \text{ MeV}$

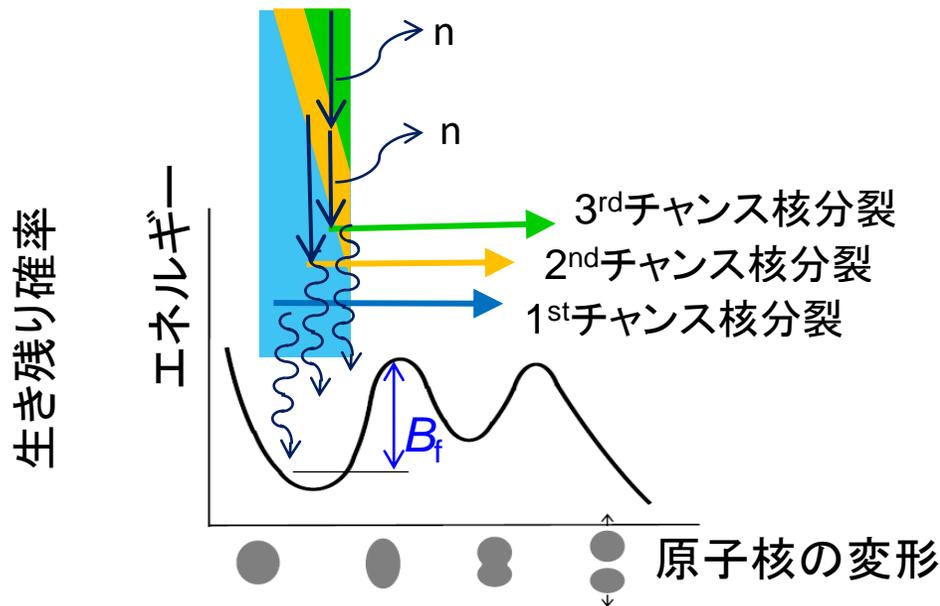
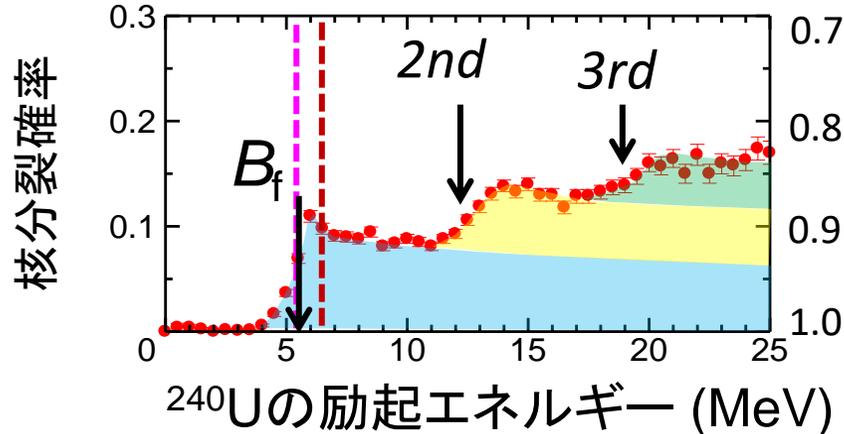
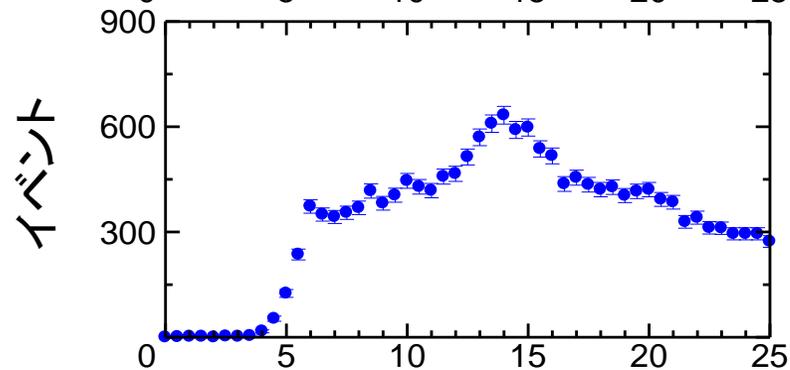
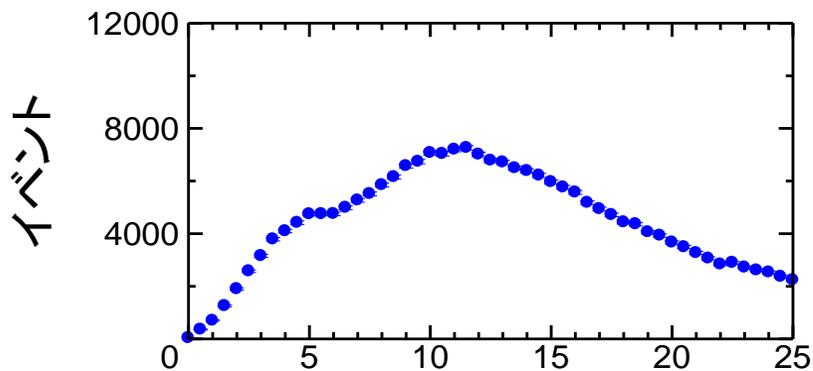
Relativistic mean field
B.N. Lu et al.,
PRC 89, 014323 (2014)

$B_f(\text{cal}) = 6.38 \text{ MeV}$

Macro-micro
P. Moller et al.,
PRC 79, 064304 (2009)

核分裂障壁の高さ
 $B_f = 5.5 \text{ MeV}$

K.R. Kean et al.,
Phys. Rev. C, **100**, 014611 (2019).



核分裂障壁データの現状

◇ JAEA MNT セットアップ

● 59種 文献で得られるデータ RIPL-3

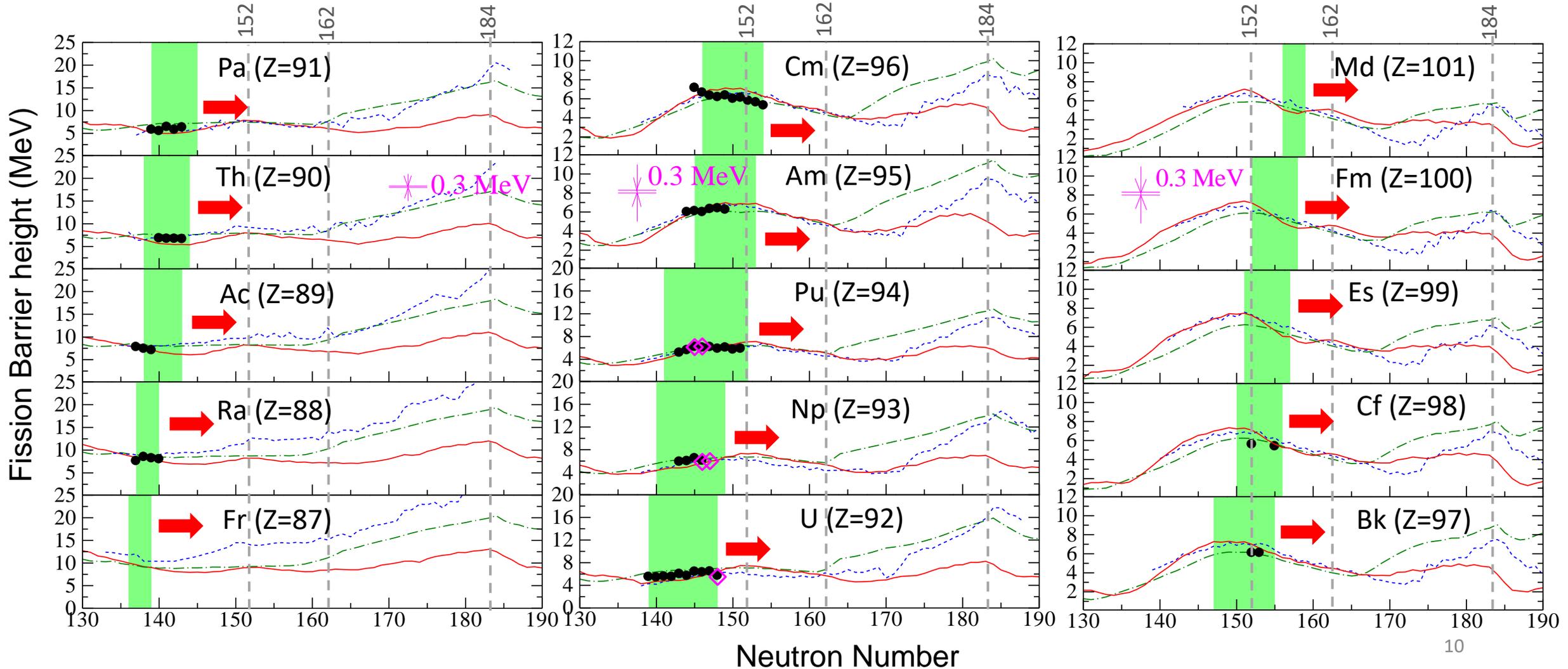
■ 111種 ^{18}O 入射多核子移行反で取得しうる核種

より重いイオンビームを用いて中性子数の多い原子核を生成

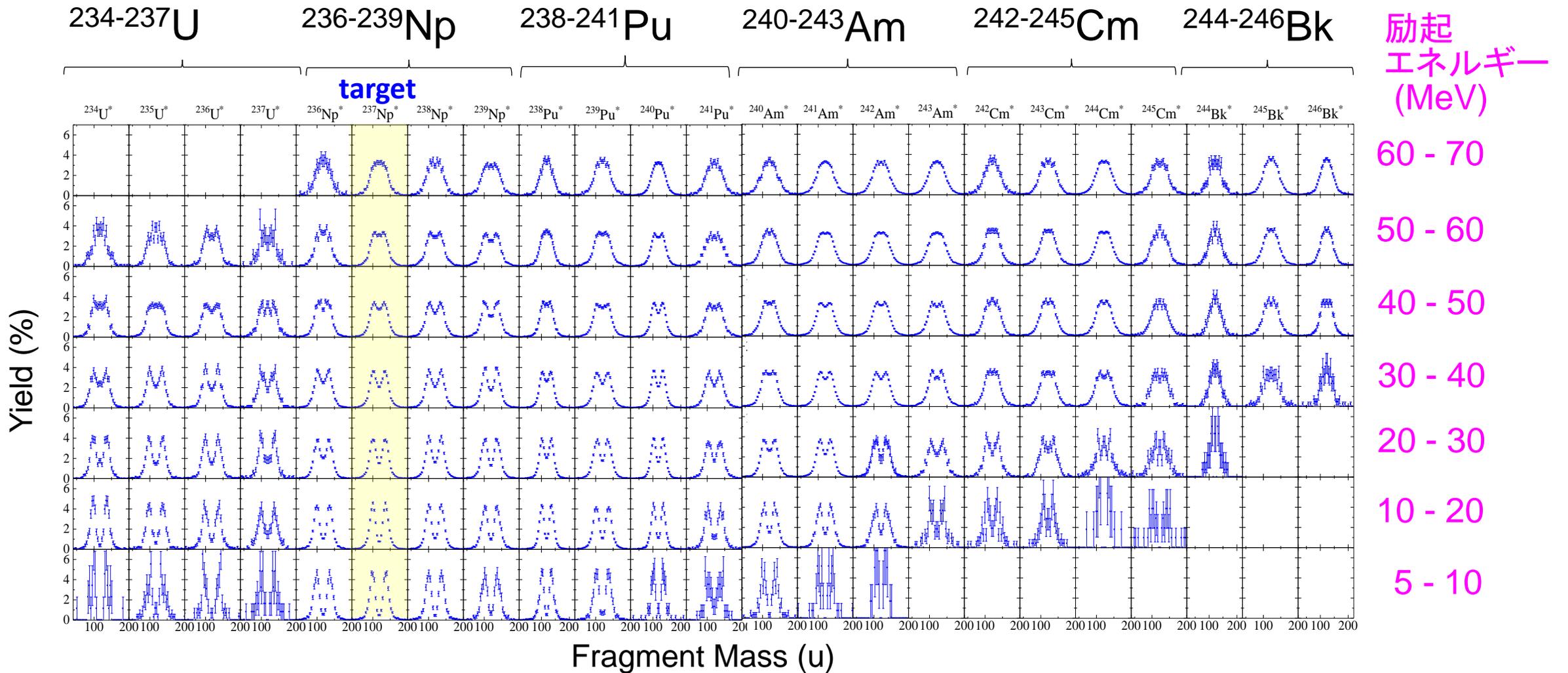
--- KUTY

--- ETFSI

--- Macro-Micro



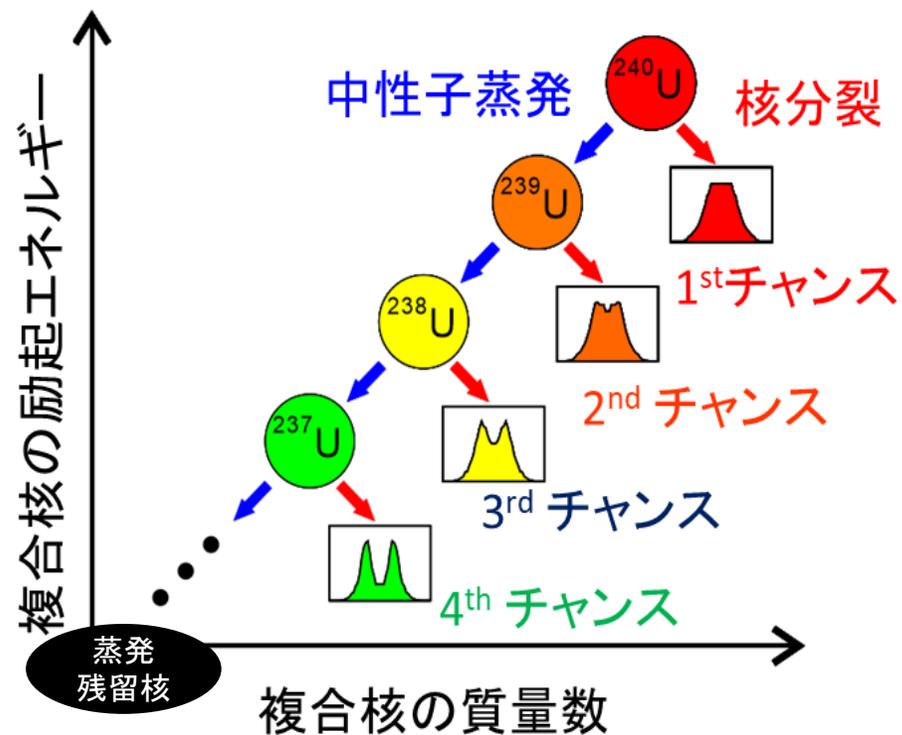
$^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ の多核子移行反応で得られた核分裂片の質量数分布



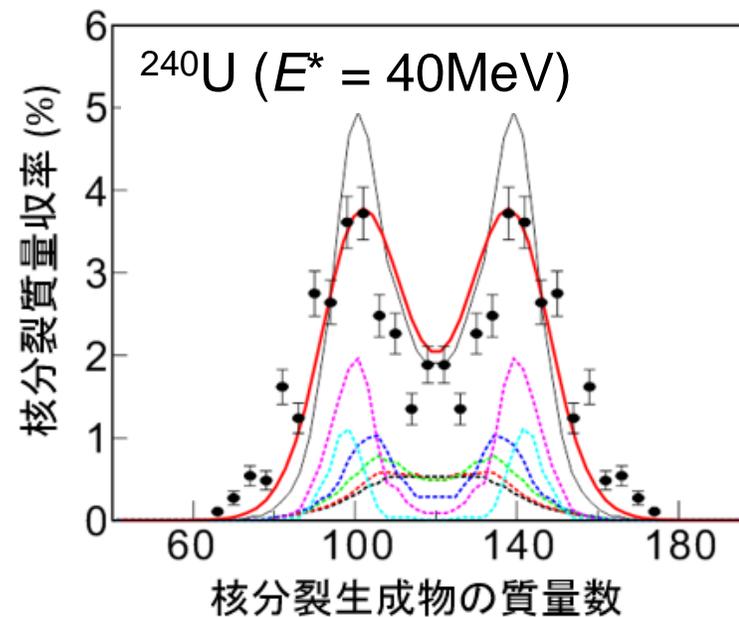
23 核種のデータを一度に取得

M.J. Vermeulen et al., Phys. Rev. C **102**, 054610 (2020).

マルチチャンス核分裂の核分裂片質量数分布への影響



計算 (揺動散逸理論) との比較
ランジュバン方程式

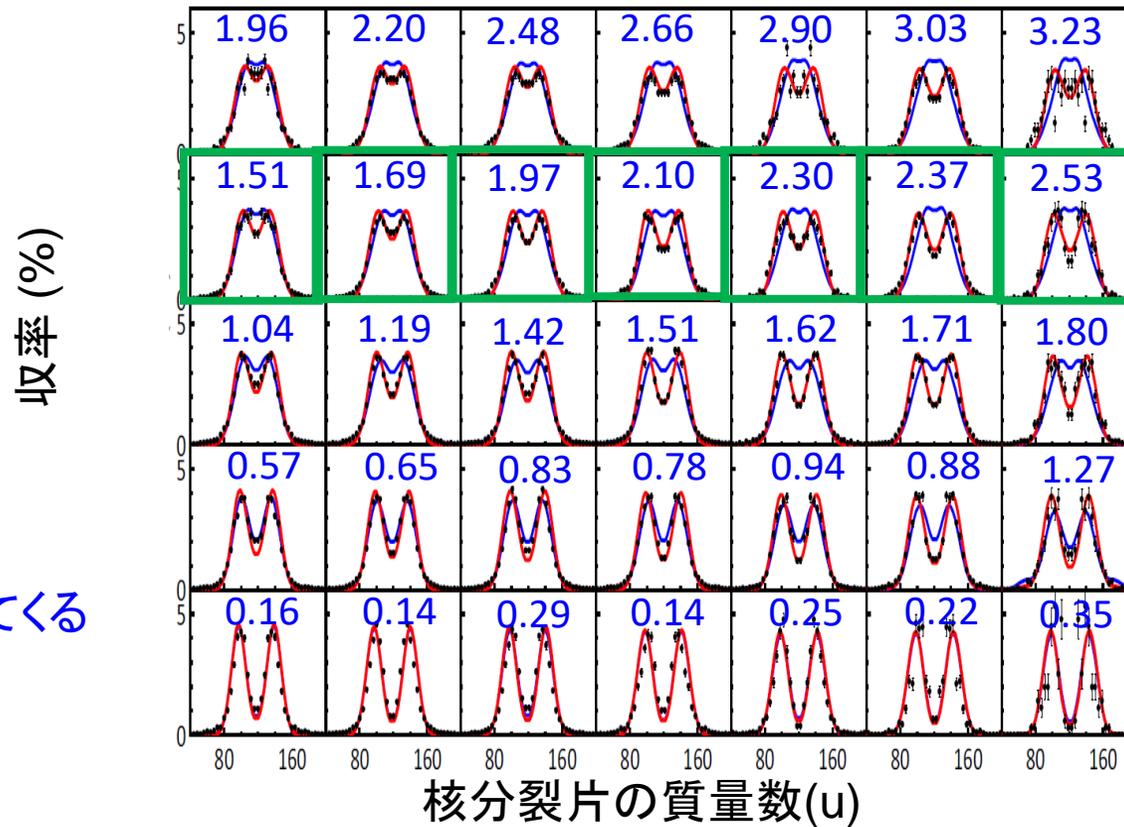


----- 放出中性子の数: 0個 (^{240}U 12.6%)
 - - - - - " : 1個 (^{239}U 13.6%)
 - - - - - " : 2個 (^{238}U 16.8%)
 - - - - - " : 3個 (^{237}U 18.2%)
 - - - - - " : 4個 (^{236}U 27.1%)
 - - - - - " : 5個 (^{235}U 11.7%)

——— 上の点線の和
 ——— 測定分解能で分散

マルチチャンス核分裂と核分裂片の質量数分布

^{236}Np ^{237}Np ^{238}Np ^{239}Np ^{240}Np ^{241}Np ^{242}Np



収率 (%)

核分裂の前に出てくる
中性子の数

最初の複合核の
励起エネルギー
55 MeV

45 MeV

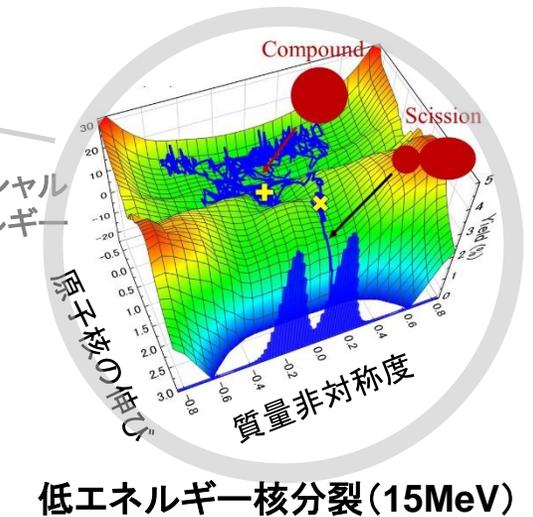
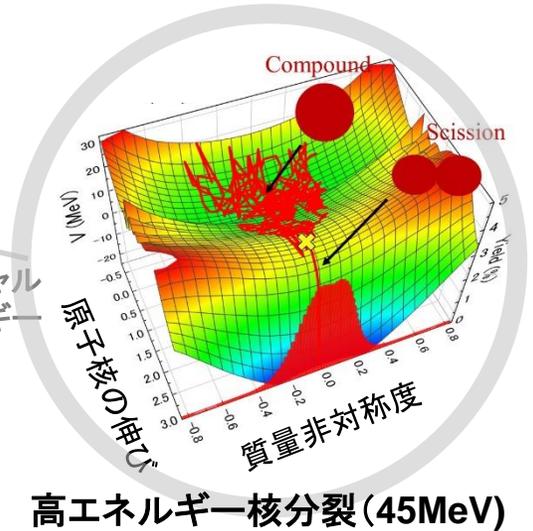
35 MeV

25 MeV

15 MeV

ポテンシャル
エネルギー

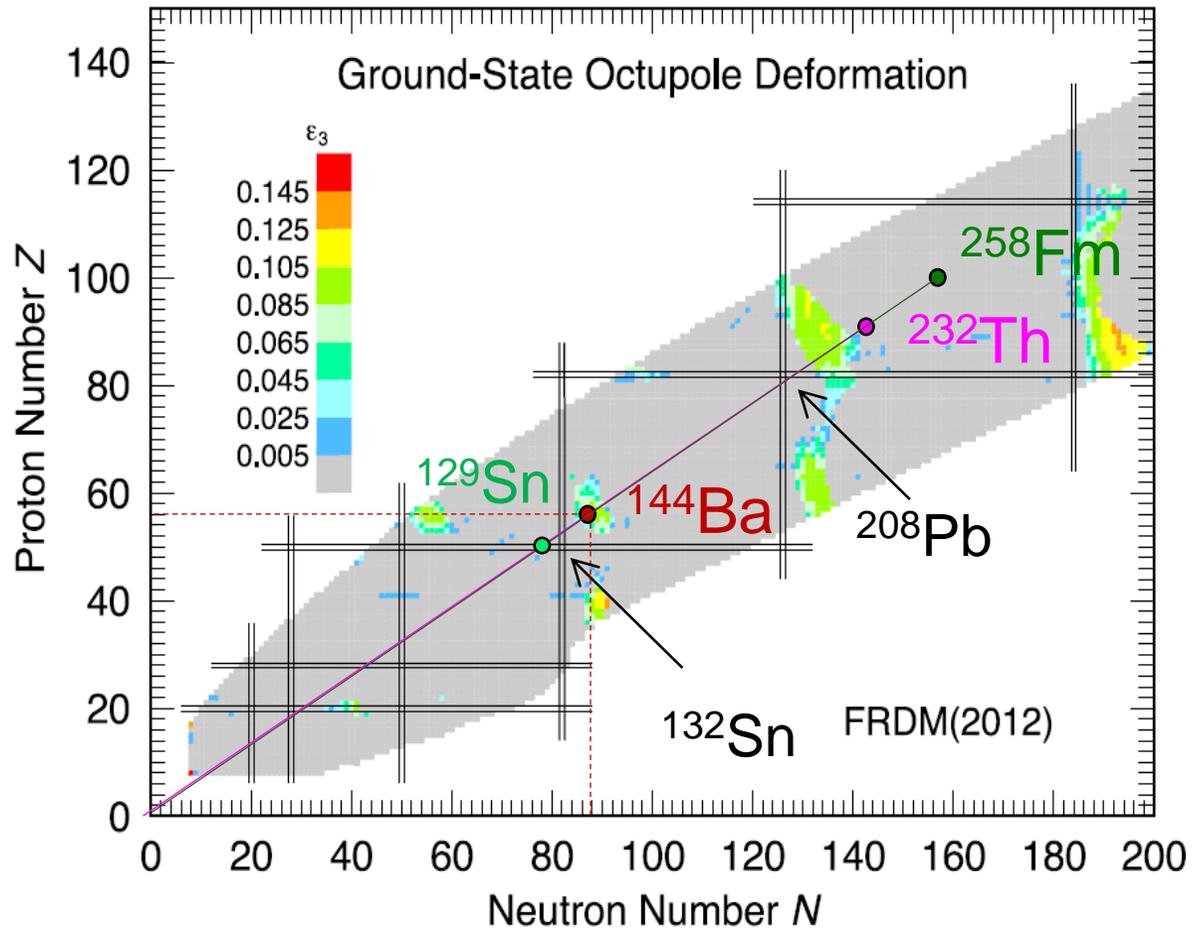
ポテンシャル
エネルギー



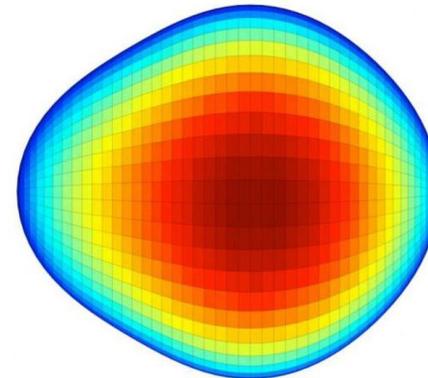
実験値 ●

ランジュバン計算 { — 中性子を出すことなく核分裂する
— マルチチャンス核分裂あり

Octupole変形と非対称核分裂

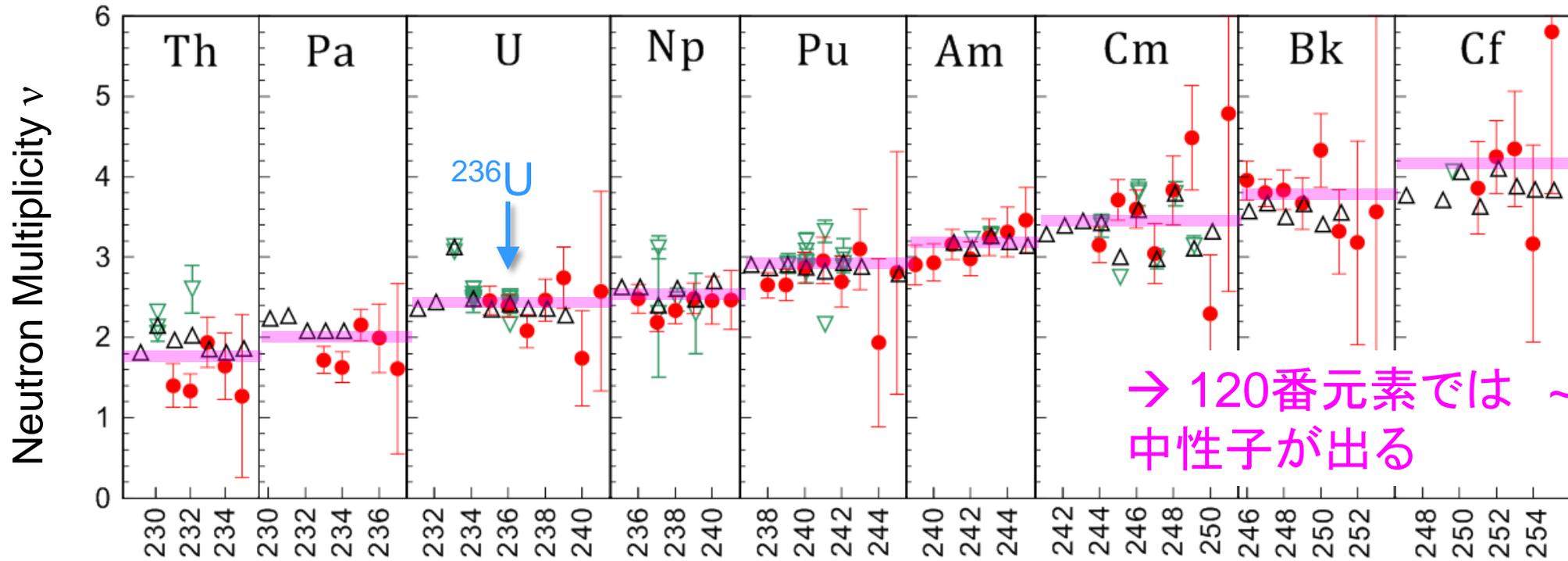


アクチノイド原子核は、 ^{144}Ba 近傍核が好むOctupole変形のために質量非対称に分裂する (^{132}Sn よりも重要)。



低エネルギー核分裂における即発中性子の数

複合核の励起エネルギー ~ 核分裂障壁の高さ近傍



→ 120番元素では ~10個程度の中性子が出る

● タンデムデータ
(59 核種)
→ 一部JENDL 5
に登録

Mass of Fissioning Nucleus

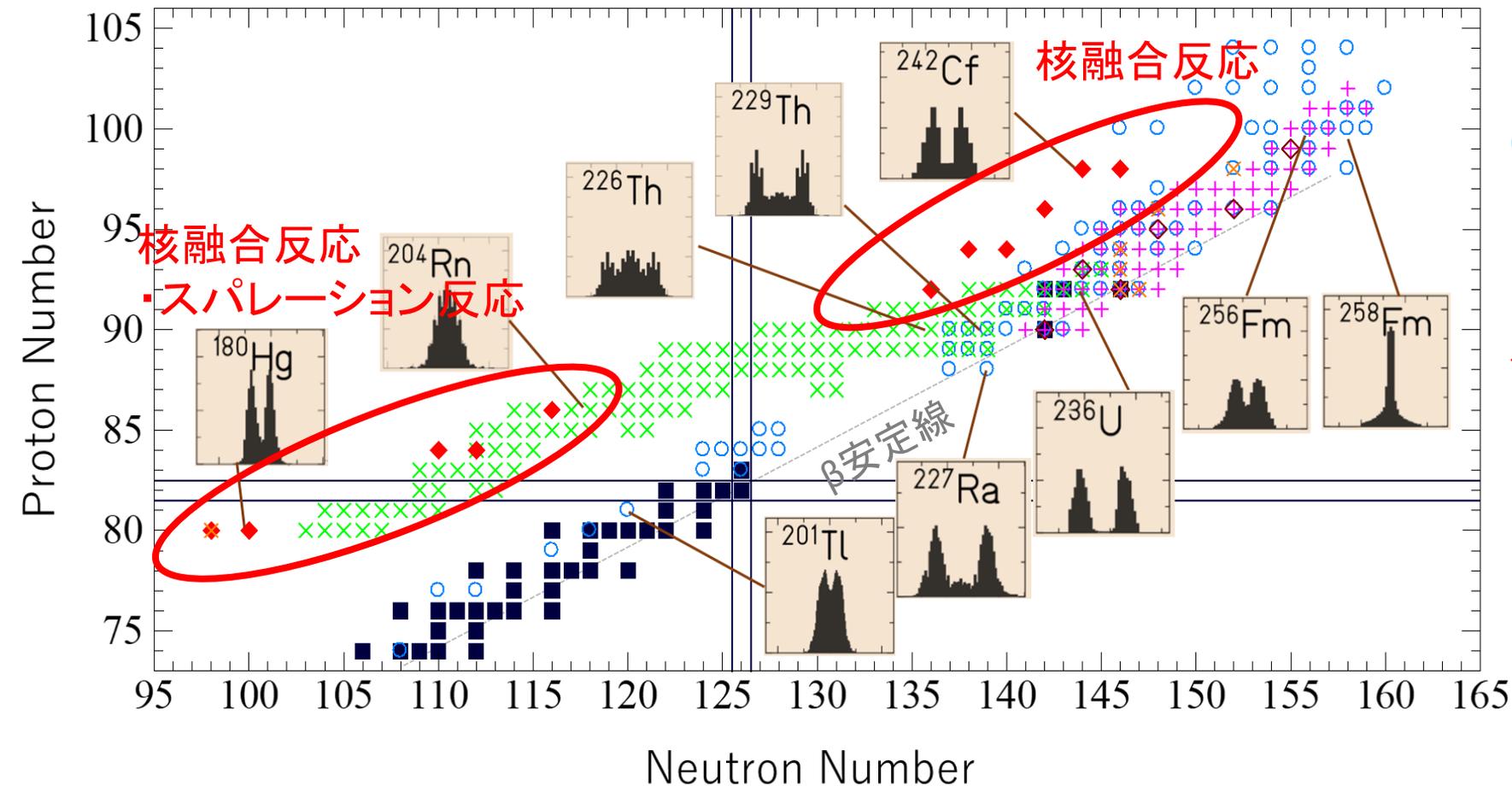
- $^{18}\text{O} + ^{232}\text{Th}$
- $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$
- $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$
- $^{18}\text{O} + ^{243}\text{Am}$
- $^{18}\text{O} + ^{248}\text{Cm}$

▽ 文献の実験値 (19 核種)

△ JENDL-4.0

核分裂片の質量数/電荷分布が測定されている核種(2022年)

低励起エネルギー核分裂（励起エネルギーが核分裂障壁より10MeV程度まで）

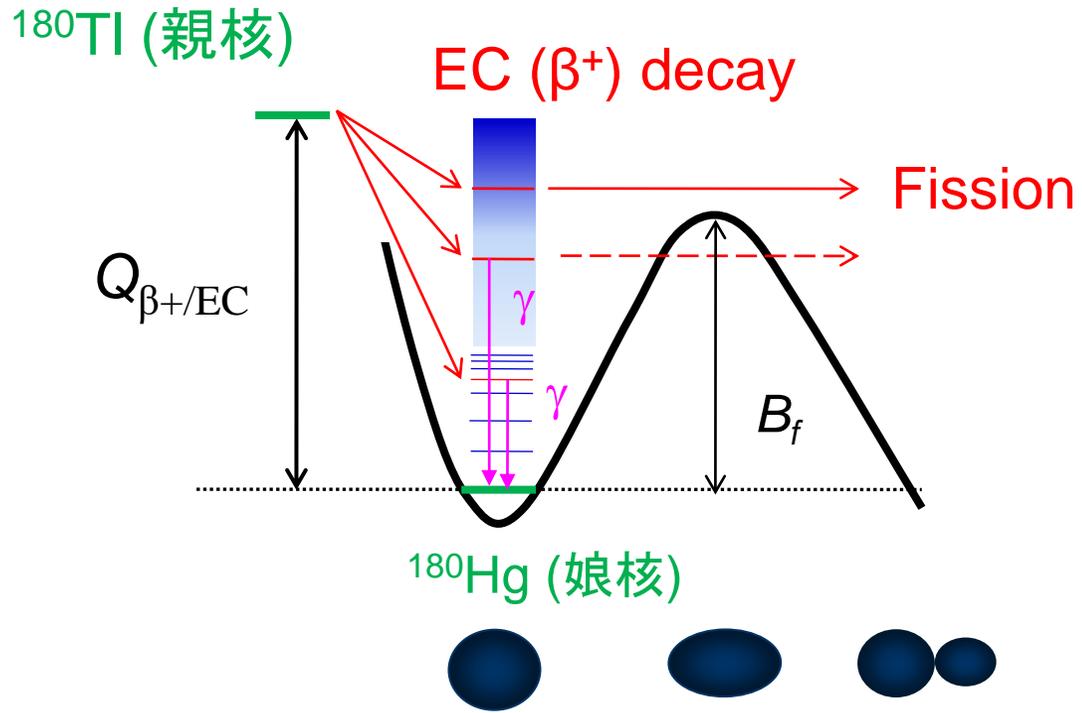


- SF, n-, p-, He-入射核分裂
- + 多核子移行反応 (JAEA)
 $^{18}\text{O} + ^{232}\text{Th}, ^{238}\text{U}, ^{237}\text{Np}, ^{243}\text{Am}, ^{248}\text{Cm}, ^{254}\text{Es}$
- × 逆運動学・クーロン励起 (GSI)
- ◆ β -崩壊遅延核分裂

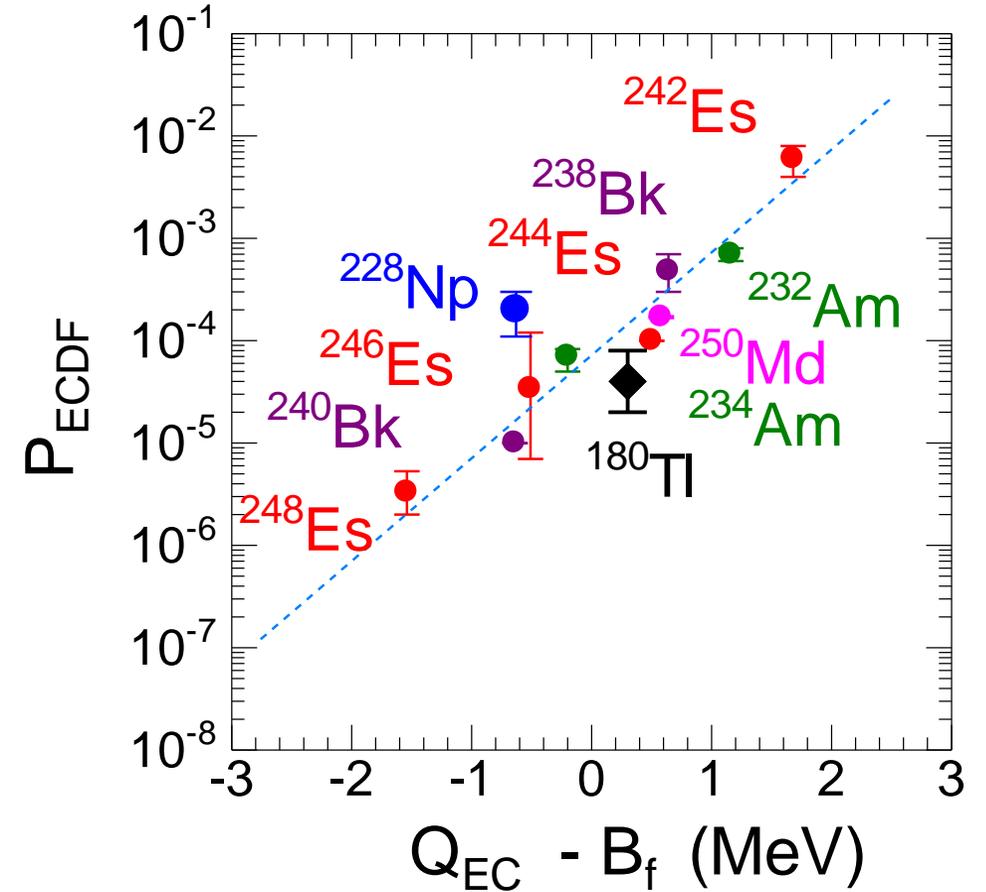
A.N. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, Reports on Progress in Physics, **81**, 016301(2018).

K. Nishio "Handbook of Nuclear Physics", Springer

β^+ /EC崩壊遅発核分裂

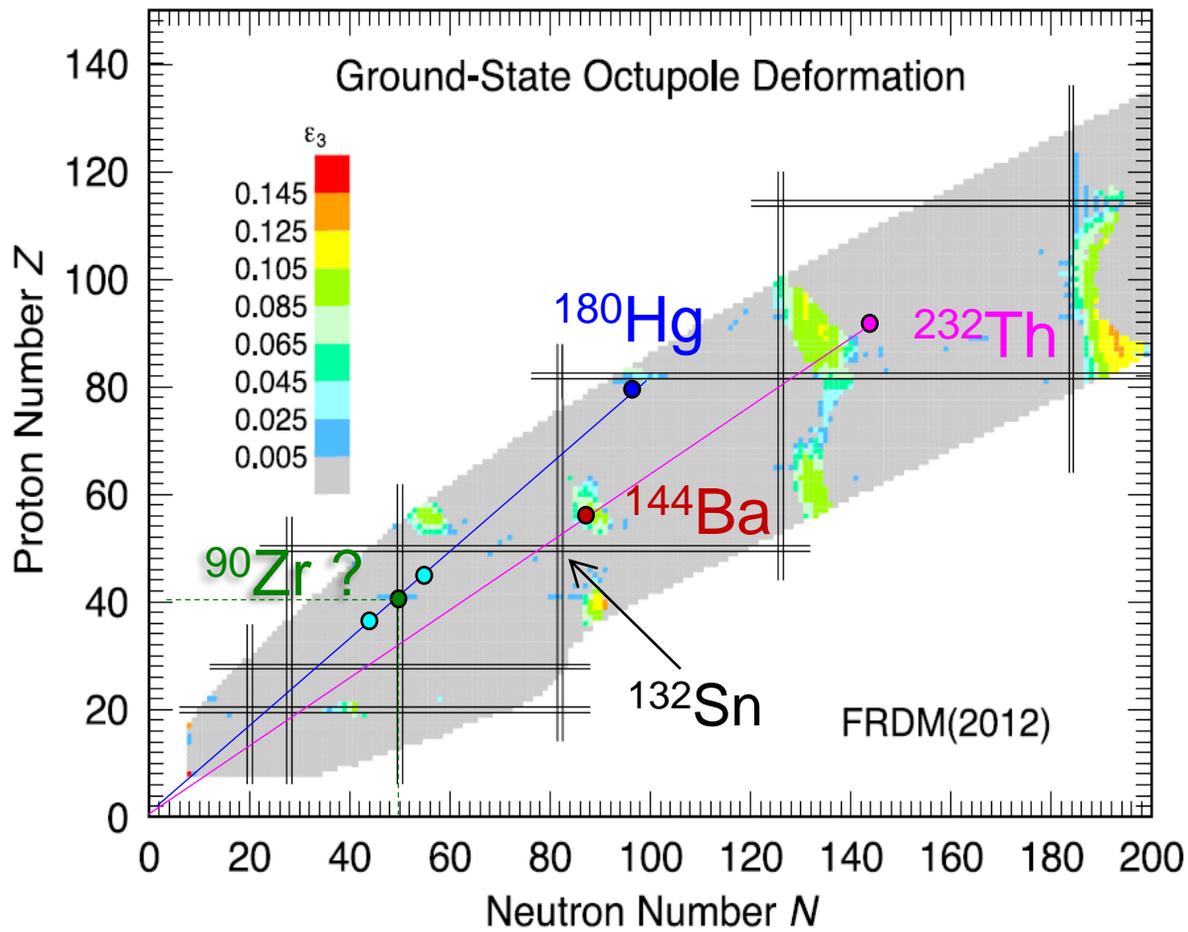


$Q_{\beta^+/\text{EC}}$: β^+ /EC-decay Q-value (^{180}Tl : 10.4 MeV)
 B_f : Fission barrier height (^{180}Hg : 9.8 MeV)



E. Ye. Berlovich and Yu.N. Novikov, Phys. Lett. B **29**, 155 (1969).

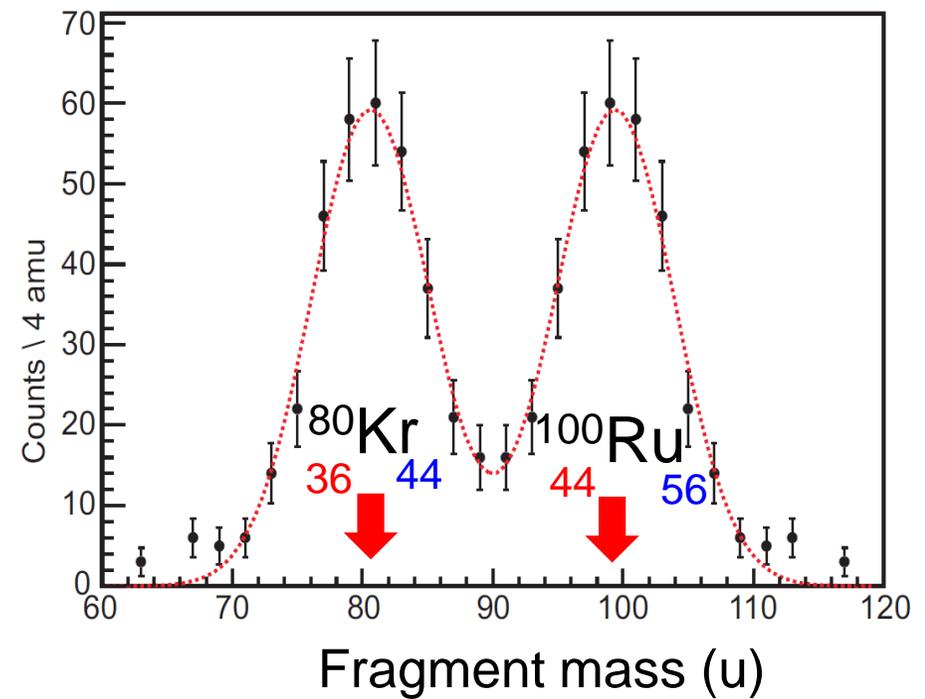
中性子欠損核 ^{180}Hg の核分裂



P. Möller et al., At. Data Nucl. Data Tables, **109-110**, 1 (2016).

^{180}Hg は質量対称分裂 ($^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$)ではなく、質量非対称分裂を示した ($^{80}\text{Kr} + ^{100}\text{Ru}$).

ISOLDE@CERN



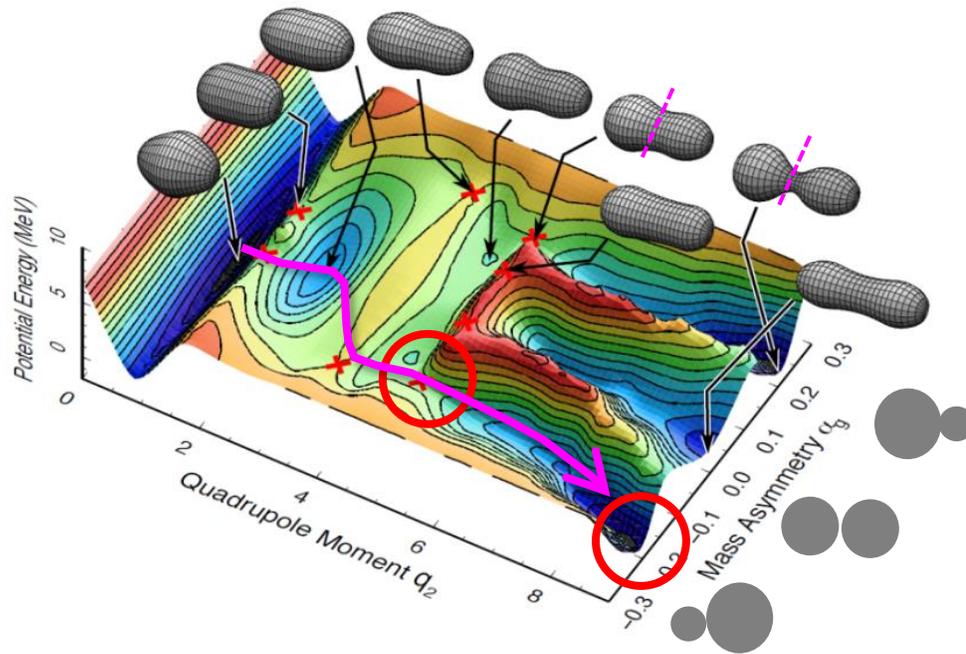
“ New Type of Asymmetric Fission in Proton-Rich Nuclei ”

A. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett., **105**, 242502 (2010).

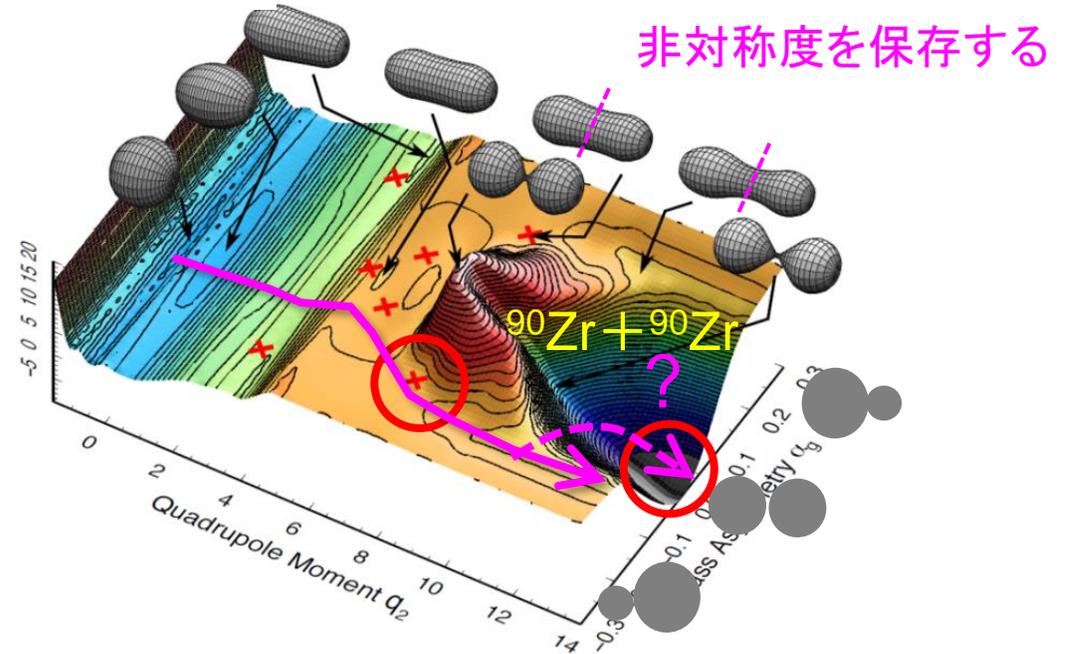
^{236}U と ^{180}Hg の核分裂

ウランなどアクチノイド原子核では、鞍点の質量非対称度と、エネルギー極小値を与えるscissionの質量非対称度は、一致している。
一方、 ^{180}Hg では、ずれが生じている。

^{236}U



^{180}Hg

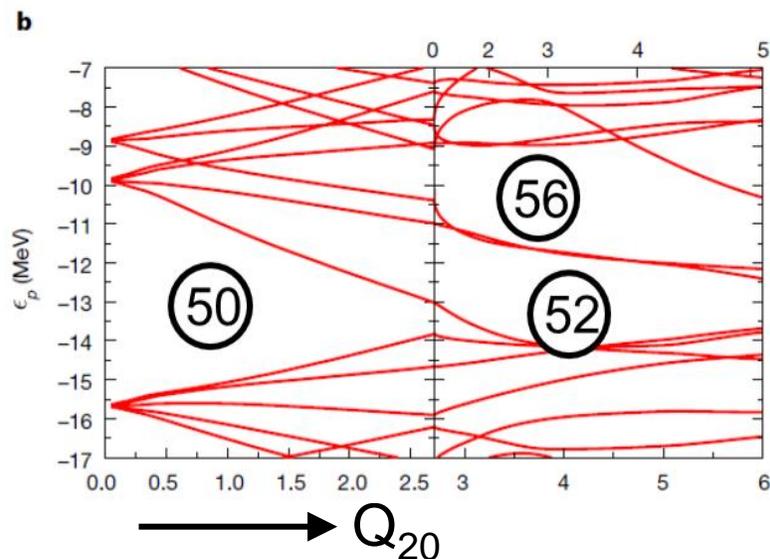
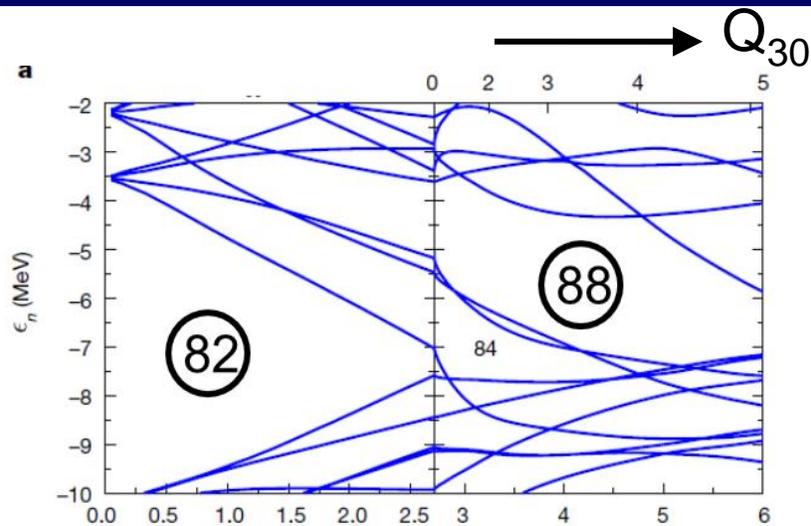


アクチノイドと ^{180}Hg の違い

$^{144}\text{Ba}_{88}$
56

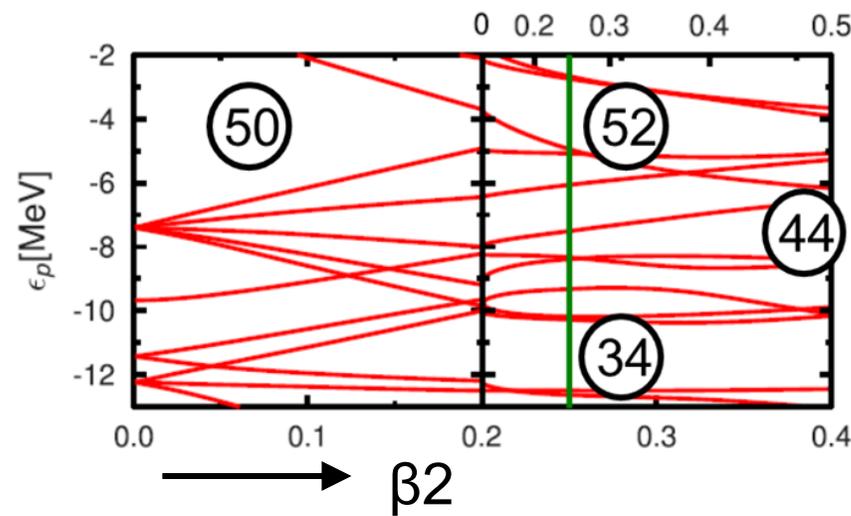
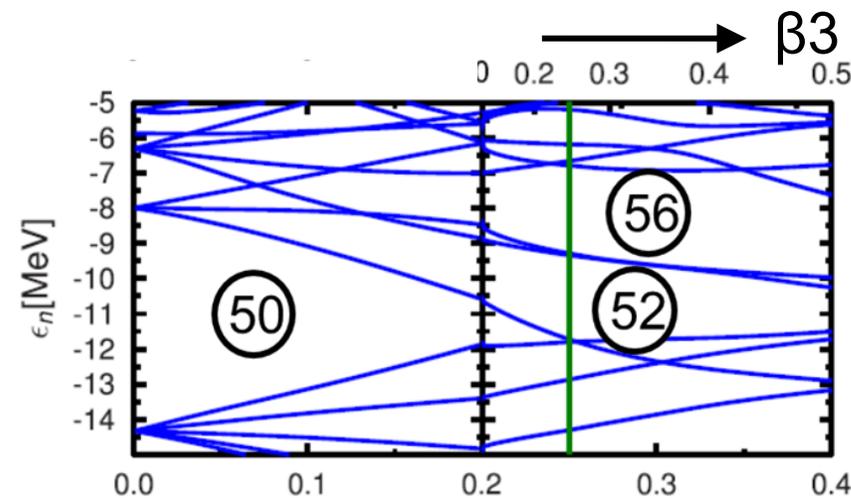
アクチノイド

中性子



陽子

G. Scamps and C. Simenel, Nature **564**, 382 (2018).

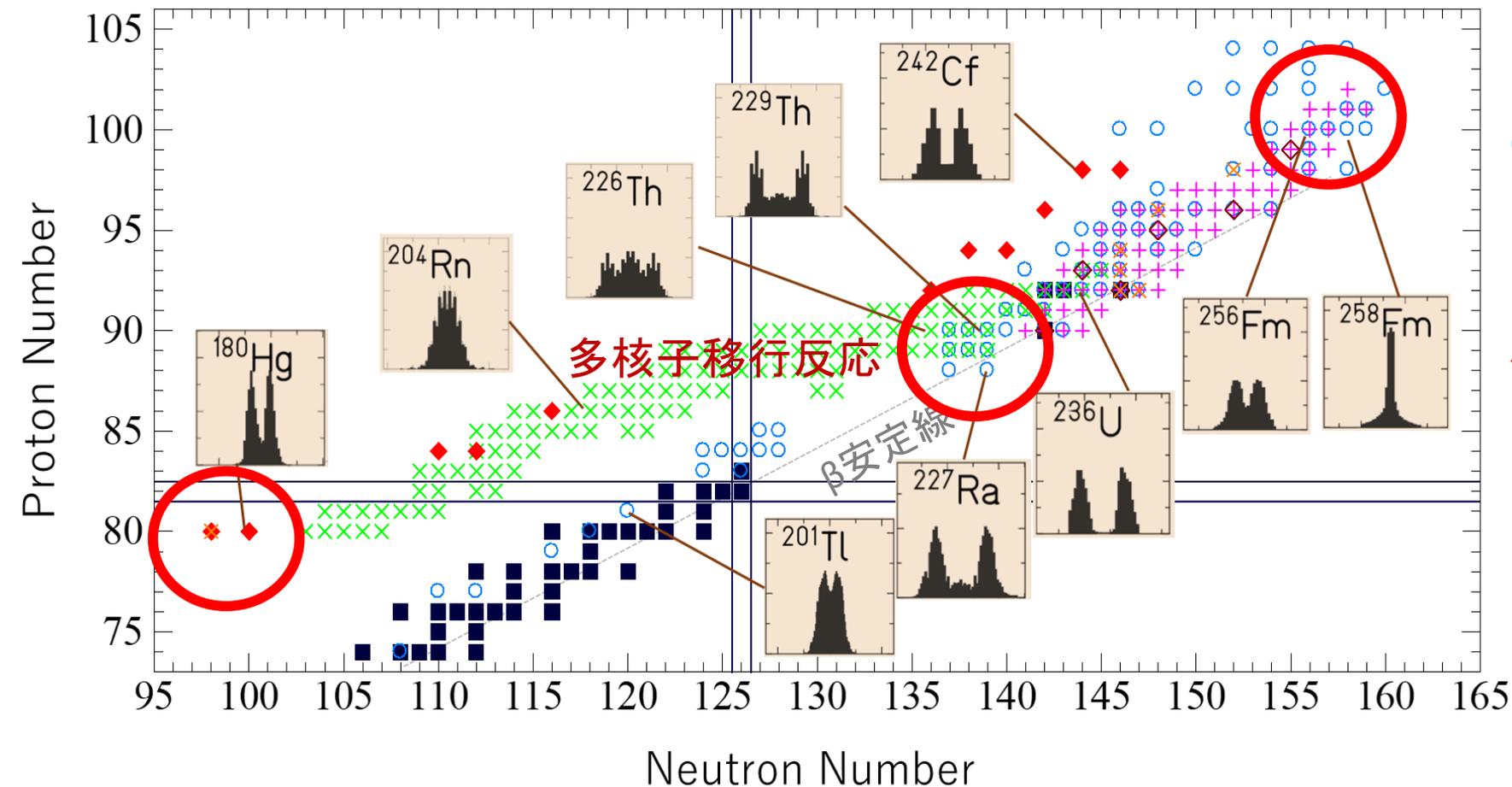


$^{100}\text{Ru}_{56}$
44
 ^{180}Hg 領域

G. Scamps and C. Simenel, Phys. Rev. C **100**, 041602(R) (2019).

核分裂片の質量数/電荷分布が測定されている核種(2022年)

低励起エネルギー核分裂（励起エネルギーが核分裂障壁より10MeV程度まで）

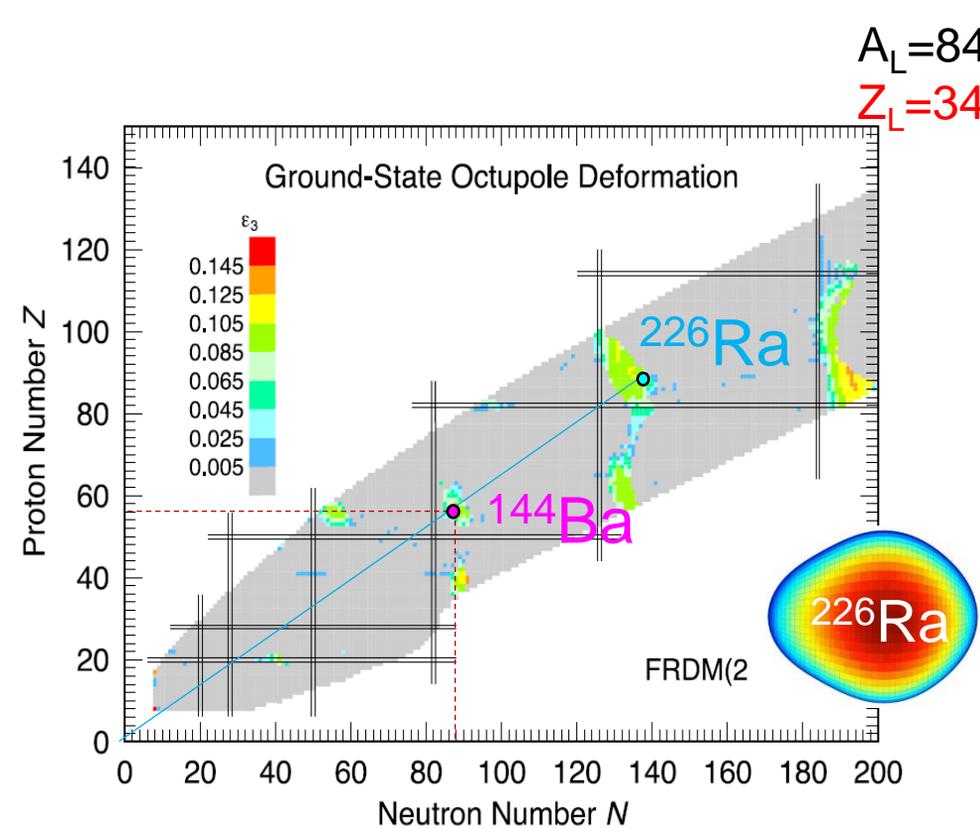


- SF, n-, p-, He-入射核分裂
- + 多核子移行反応 (JAEA)
 $^{18}\text{O} + ^{232}\text{Th}, ^{238}\text{U}, ^{237}\text{Np}, ^{243}\text{Am}, ^{248}\text{Cm}, ^{254}\text{Es}$
- × 逆運動学・クーロン励起 (GSI)
- ◆ β-崩壊遅延核分裂

A.N. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, Reports on Progress in Physics, **81**, 016301(2018).

K. Nishio "Handbook of Nuclear Physics", Springer

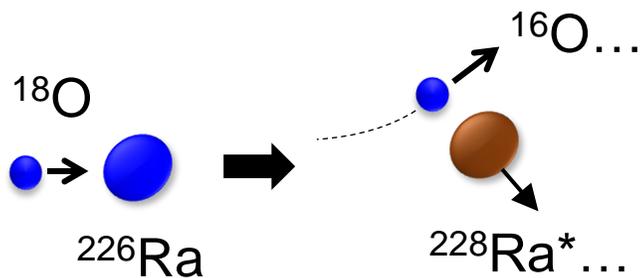
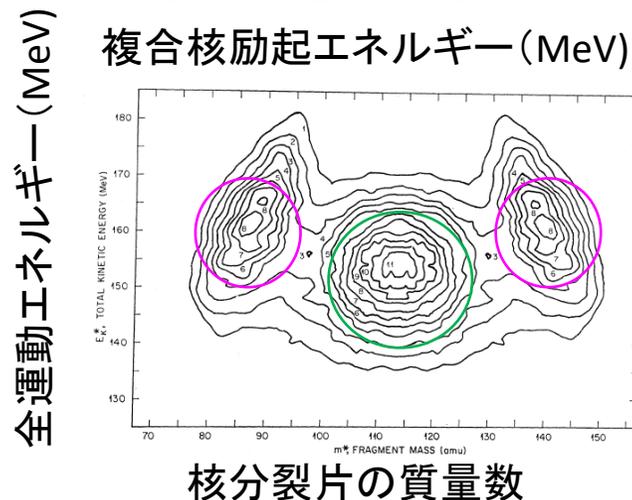
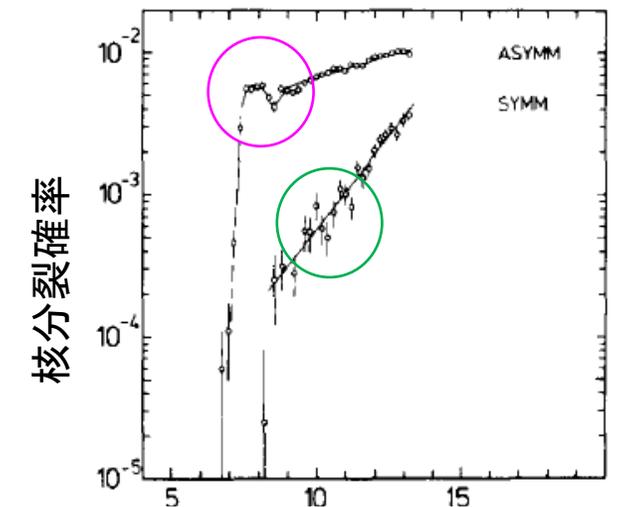
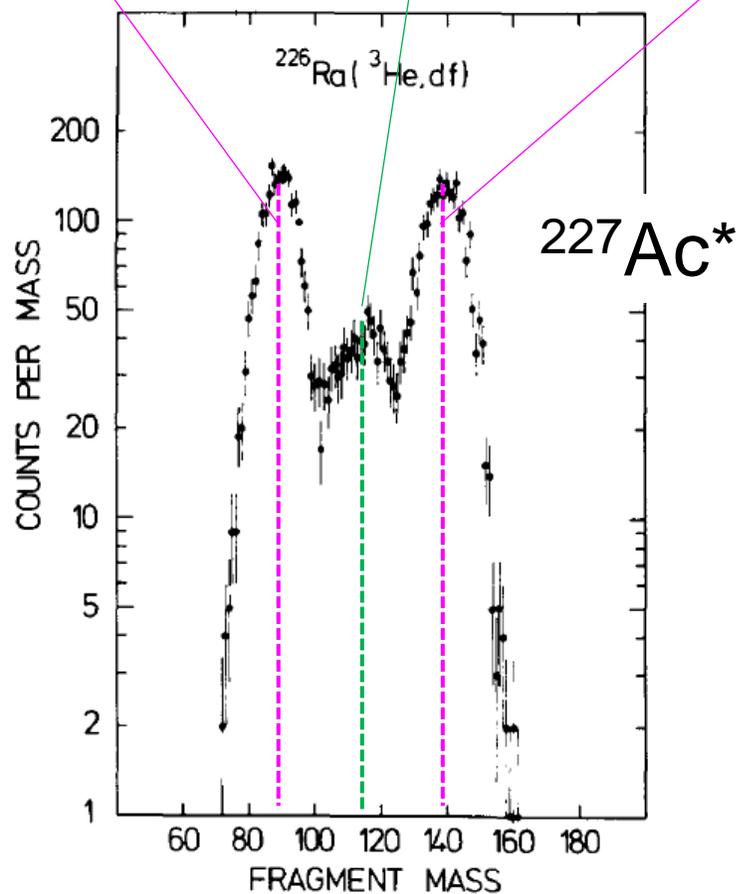
次の実験プラン ^{226}Ra 領域



$A_L=84$
 $Z_L=34(35), N_H=53$

$A_{1/2}=113.5$
 $Z_{1/2}=44.5, N_{1/2}=69$

$A_H=140$
 $Z_H=55(54), N_H=85$



E. Konecny et al., Phys. Lett. **45B**, 329 (1973).

まとめ

- ☑ 多核子移行反応によって中性子数の多いアクチノイド原子核の核分裂データを取得できる。
- ☑ 多くのアクチノイド原子核の核分裂に $Z_H=54$ の効果が顕著に表れている。
- ☑ アクチノイドと ^{180}Hg 領域では核分裂を支配する構造が異なるが、Octupole変形の効果で統一的に理解できるかもしれない。
- ☑ 中性子過剰核の核分裂の記述を試みる理論は、アクチノイド核分裂に加え、Fm258、Hg180、およびRa226領域の核分裂を統一的に説明すべである。

協力

