

重イオン入射核分裂過程の実験研究

日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター
西尾 勝久



第4回 RIBF 研究会 (新潟大学)

内容

- (1) 超重元素合成を理解するための重イオン入射
核分裂
- (2) 陽子過剰原子核の核分裂

原子力機構東海キャンパス



J-PARC

タンデム加速器施設

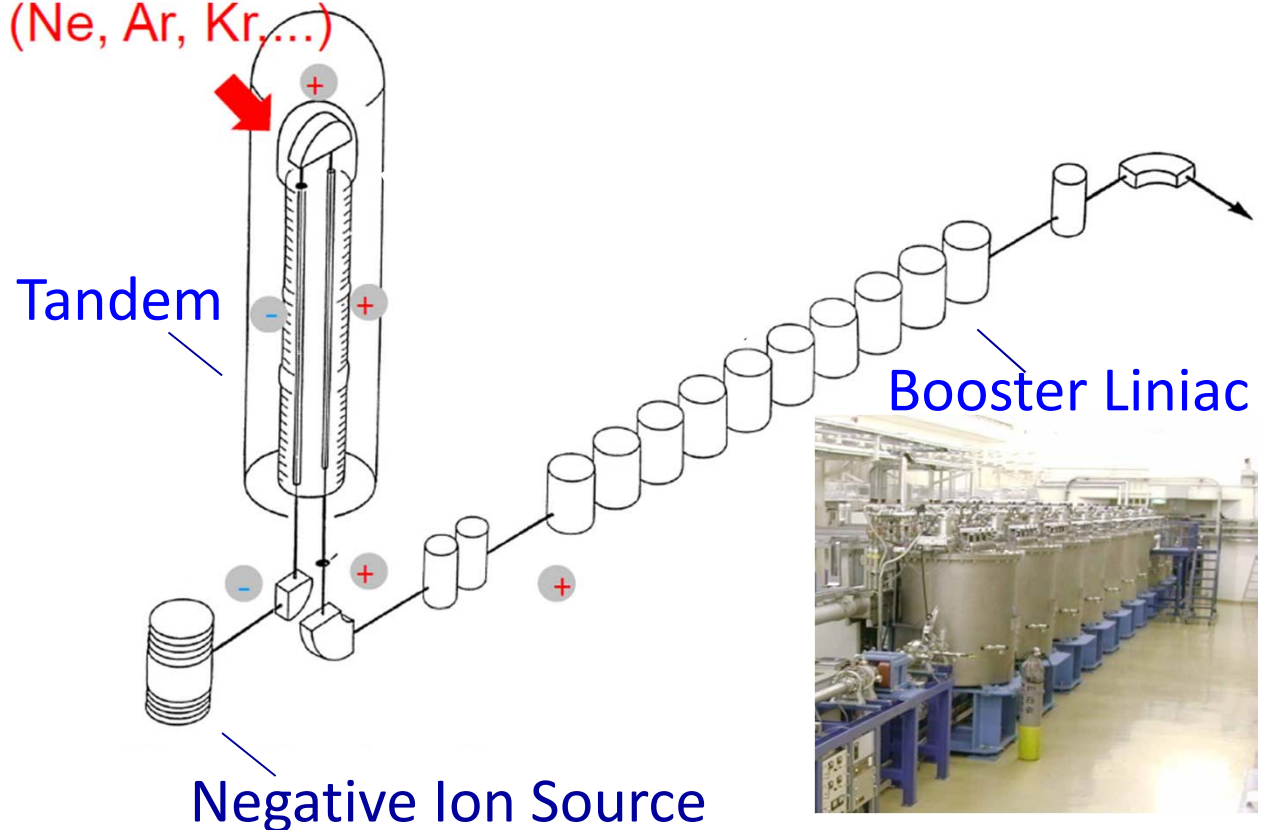


JAEA タンデム加速器施設

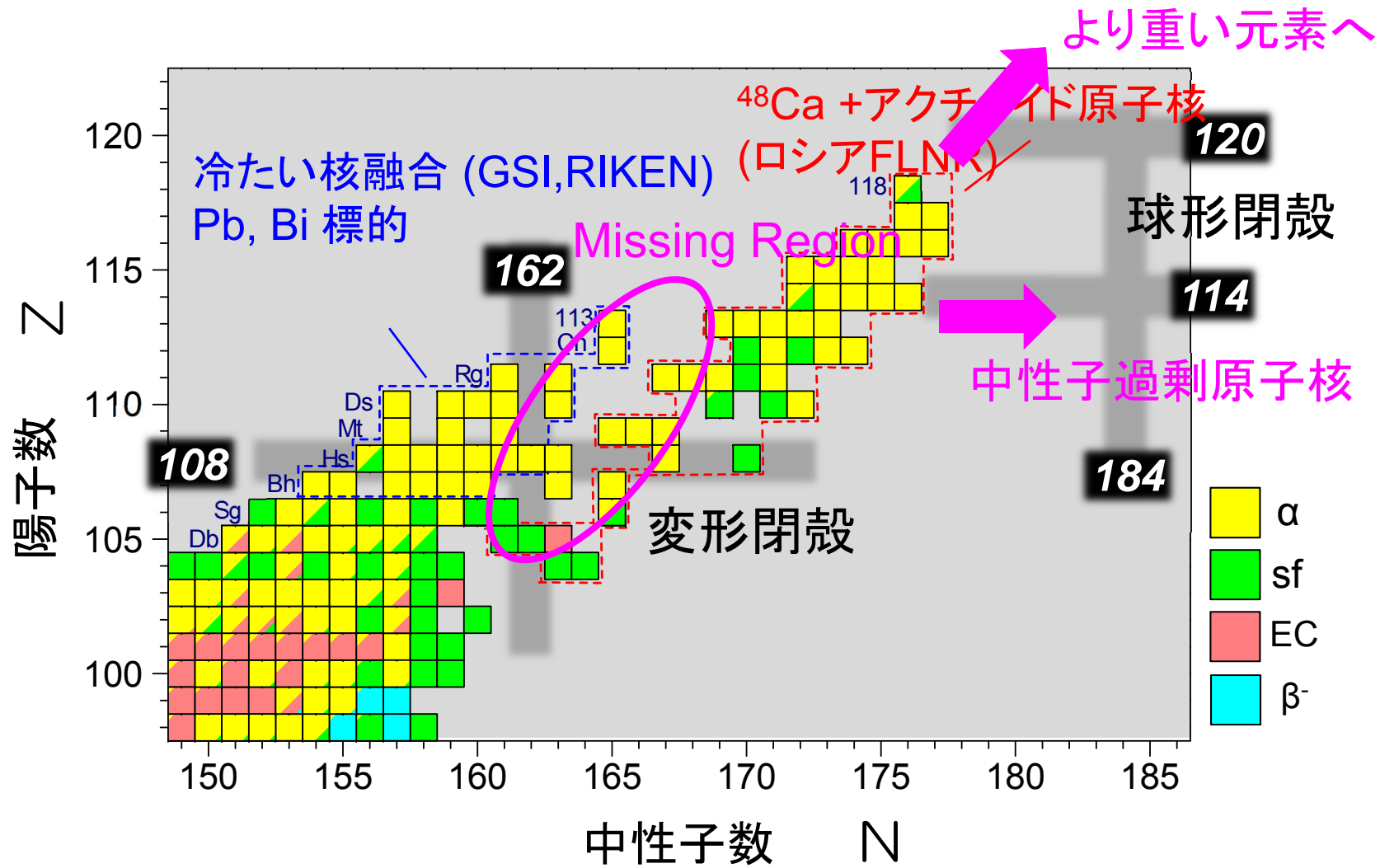
20 MV ターミナル電圧
超伝導ブースターリニアック
ECRイオン源



ECR Ion Source
(Ne, Ar, Kr...)



超重元素領域の核図表

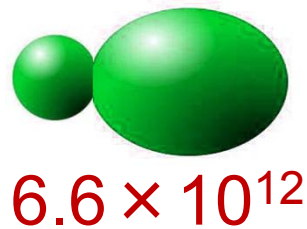


アクチノイド原子核を用いた核融合反応が、この領域の開拓には必須

超重元素合成過程 (3ステップ)



(1) クーロン障壁の
透過と接触

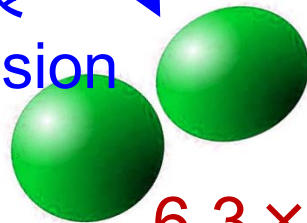


(2) 核融合

CN



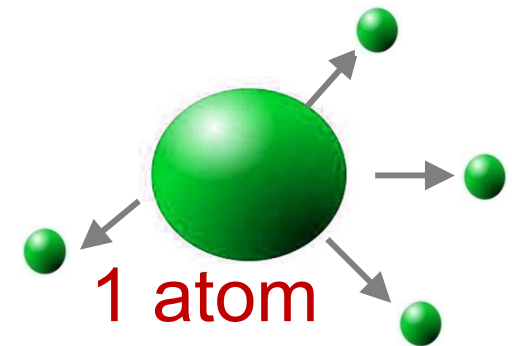
準核分裂
Quasifission



融合核分裂
Fusion-Fission



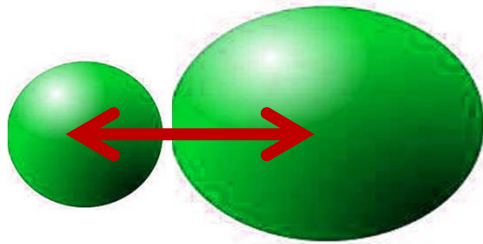
(3) 中性子等の蒸発



融合確率

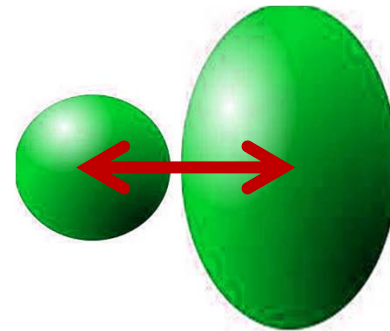
核融合反応における変形原子核の向きの効果

アクチノイド原子核は、ラグビーボール型に変形している。



先端部への衝突

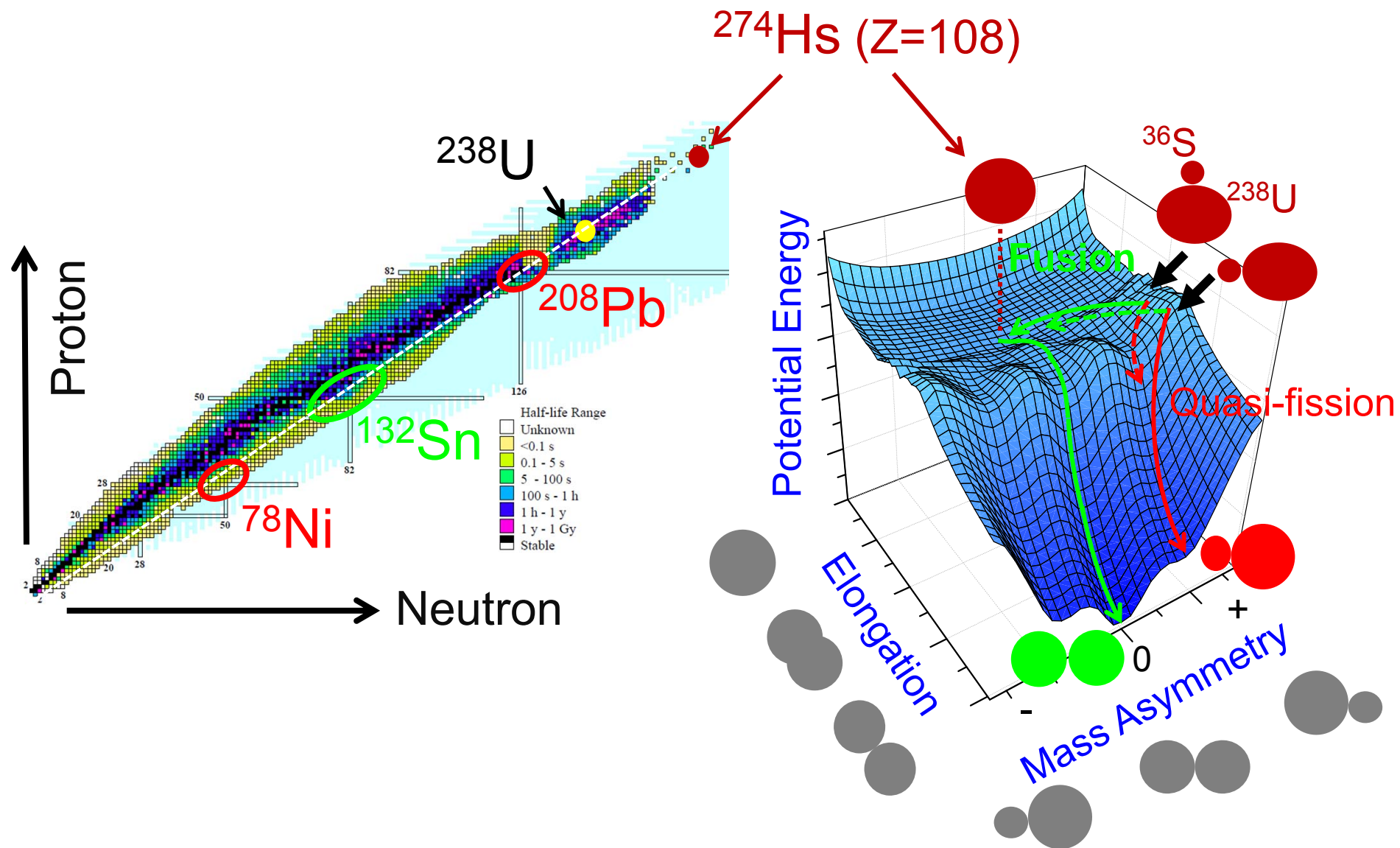
- 低いクーロン障壁
- 離れた位置からの融合



赤道面への衝突

- 高い障壁の高さ
- コンパクトな配位からの融合

核融合と準核分裂の競合における標的核の向きの効果



調べた反応

(1) インビーム実験による核分裂特性 (JAEA-Tandem)



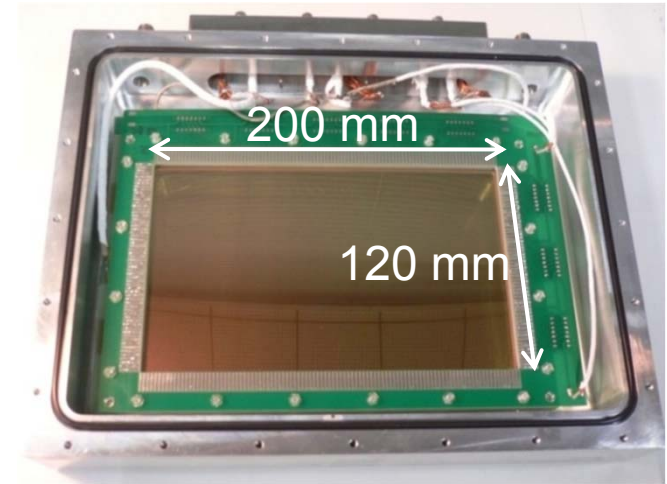
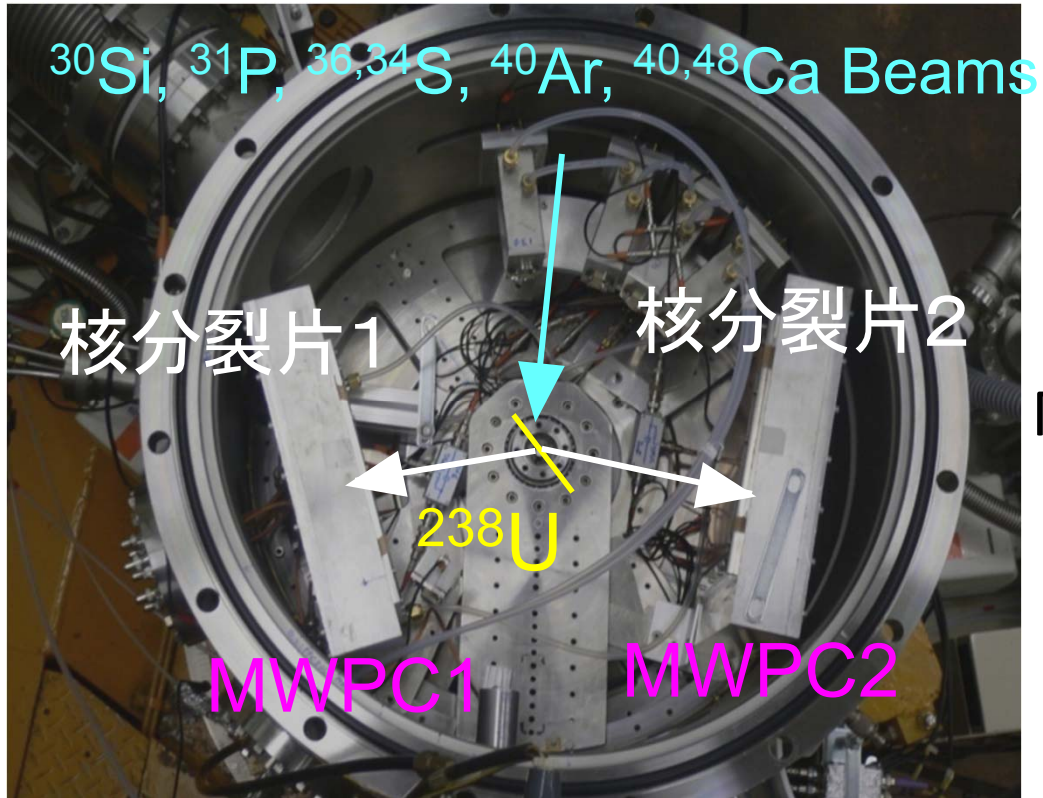
(2) 蒸発残留核断面積の測定 (GSI-SHIP)



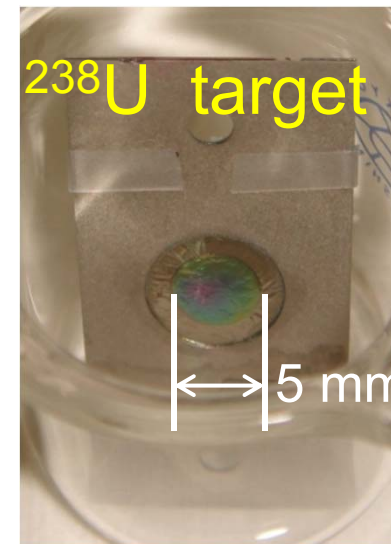
(3) 元素112の合成について



In-beam 核分裂実験

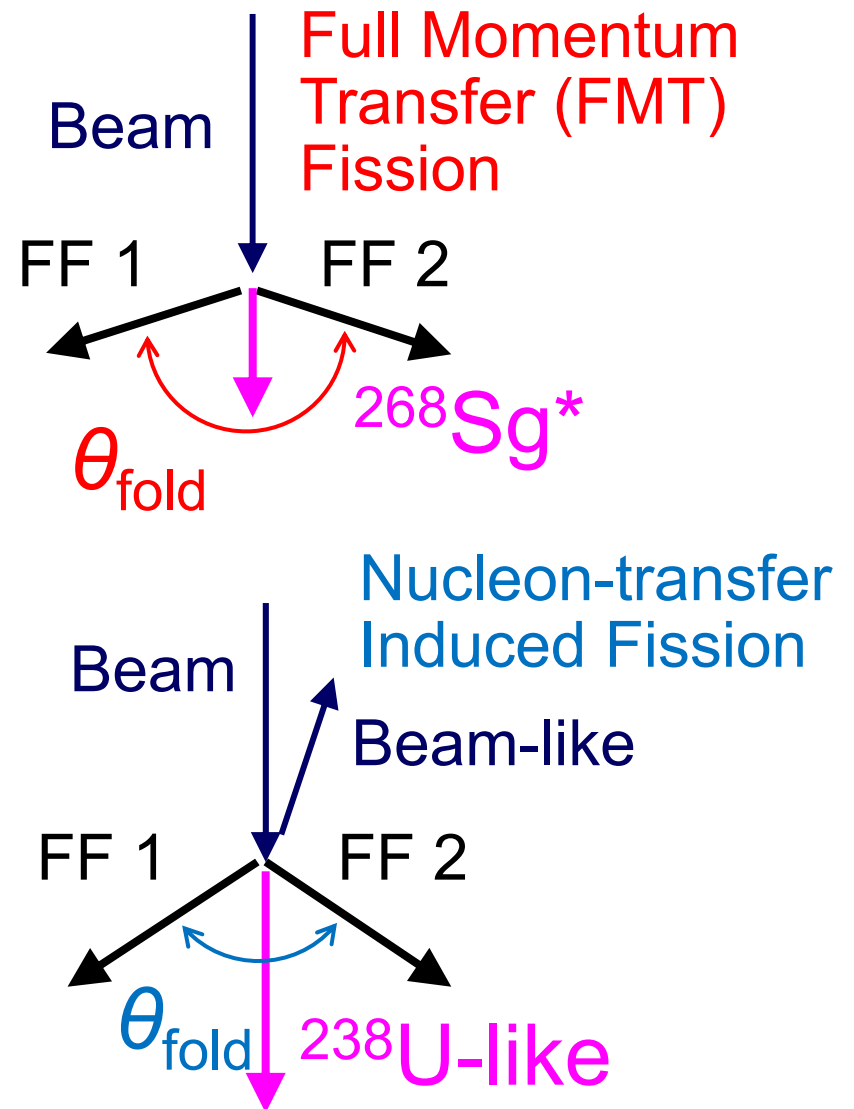
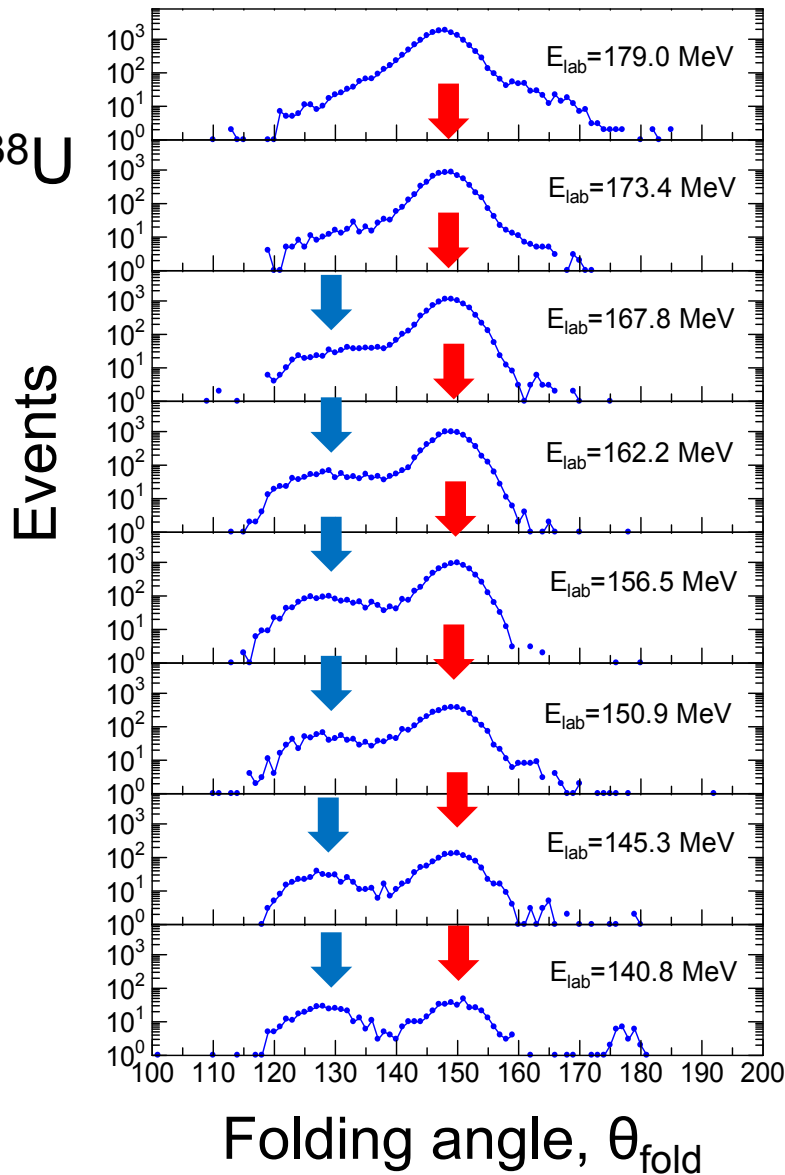


Multi-Wire Proportional Counter

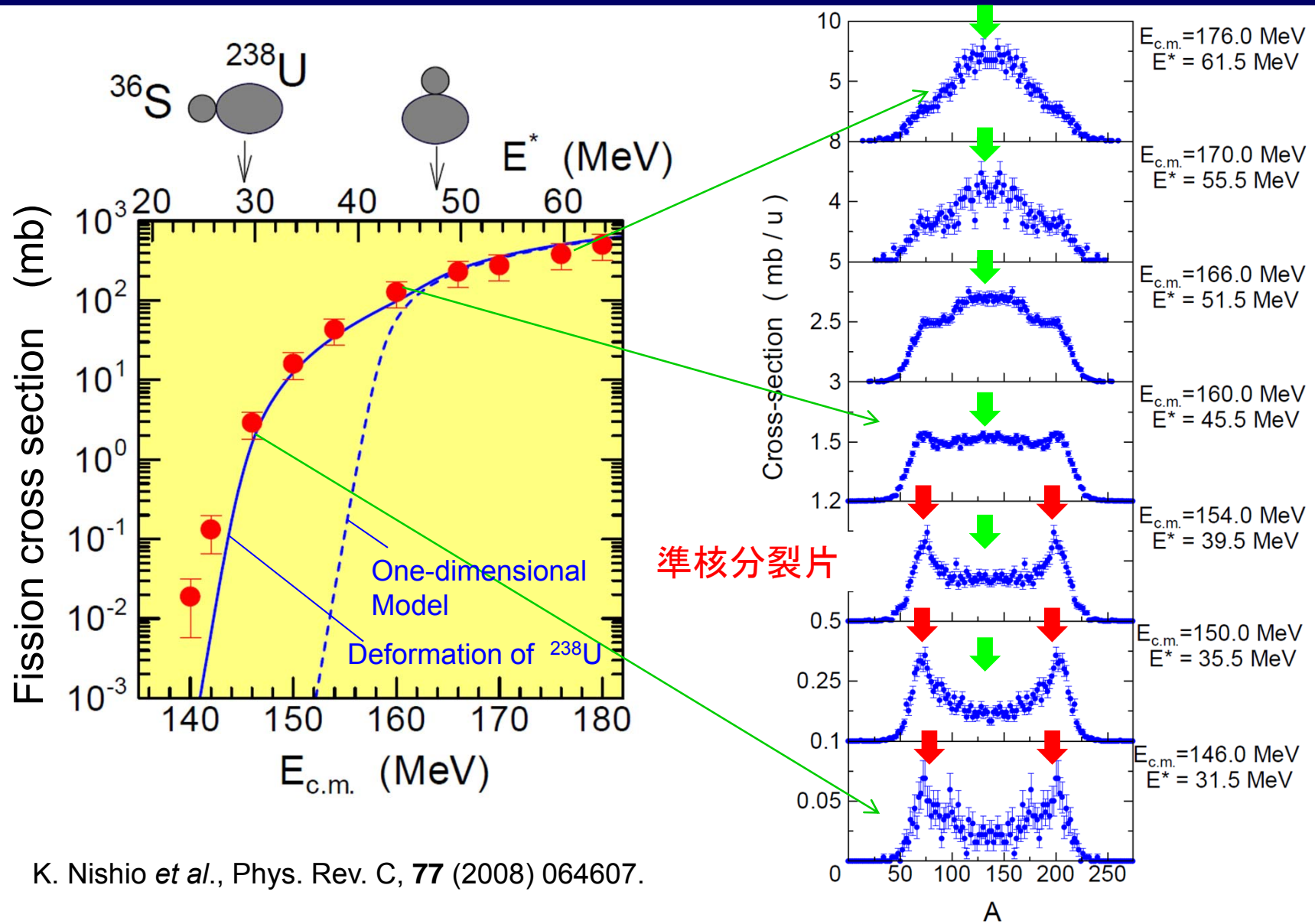


Full momentum transfer fission & Nucleon-transfer induced fission

$^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$



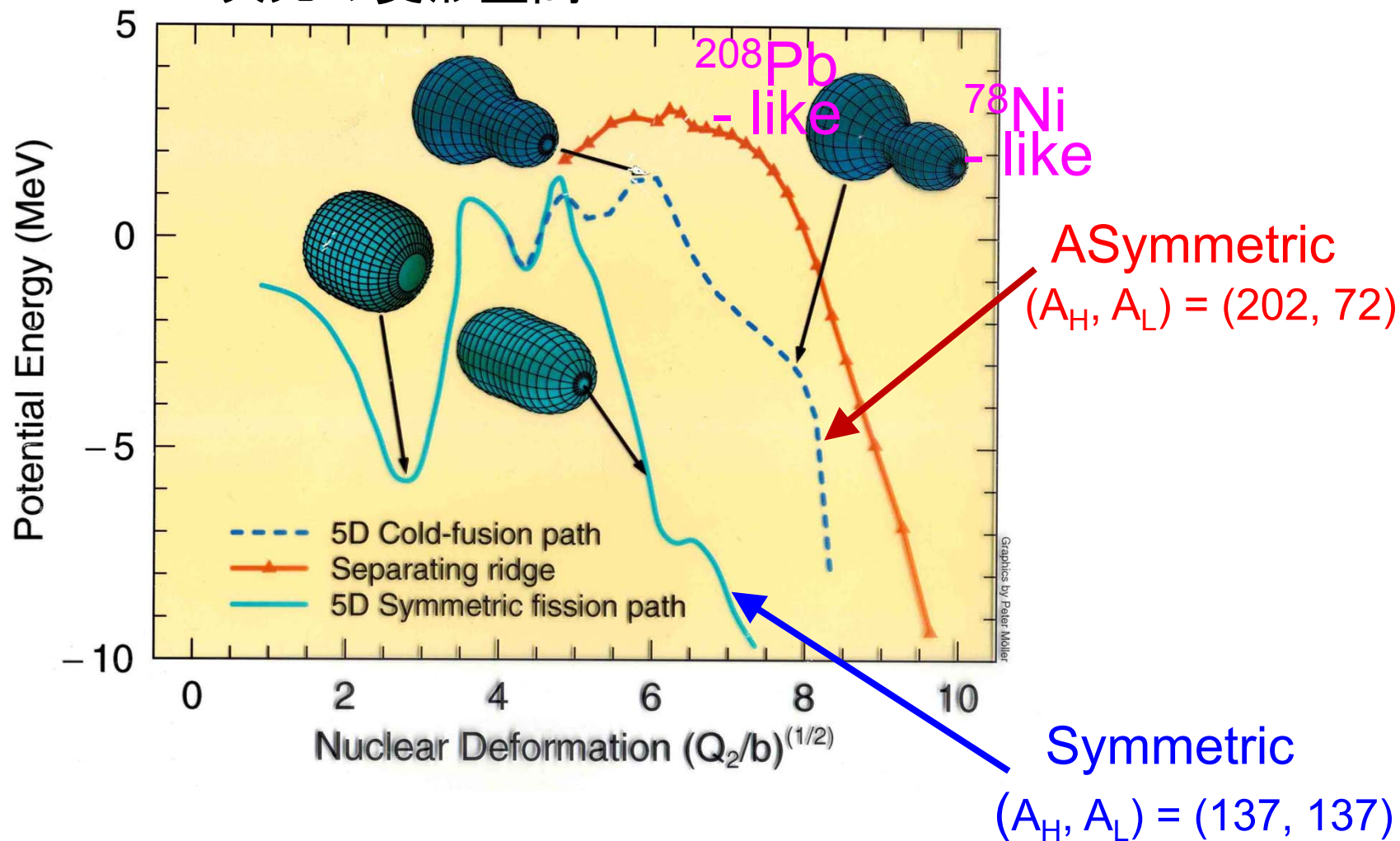
$^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応における標的核の変形効果



K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C, **77** (2008) 064607.

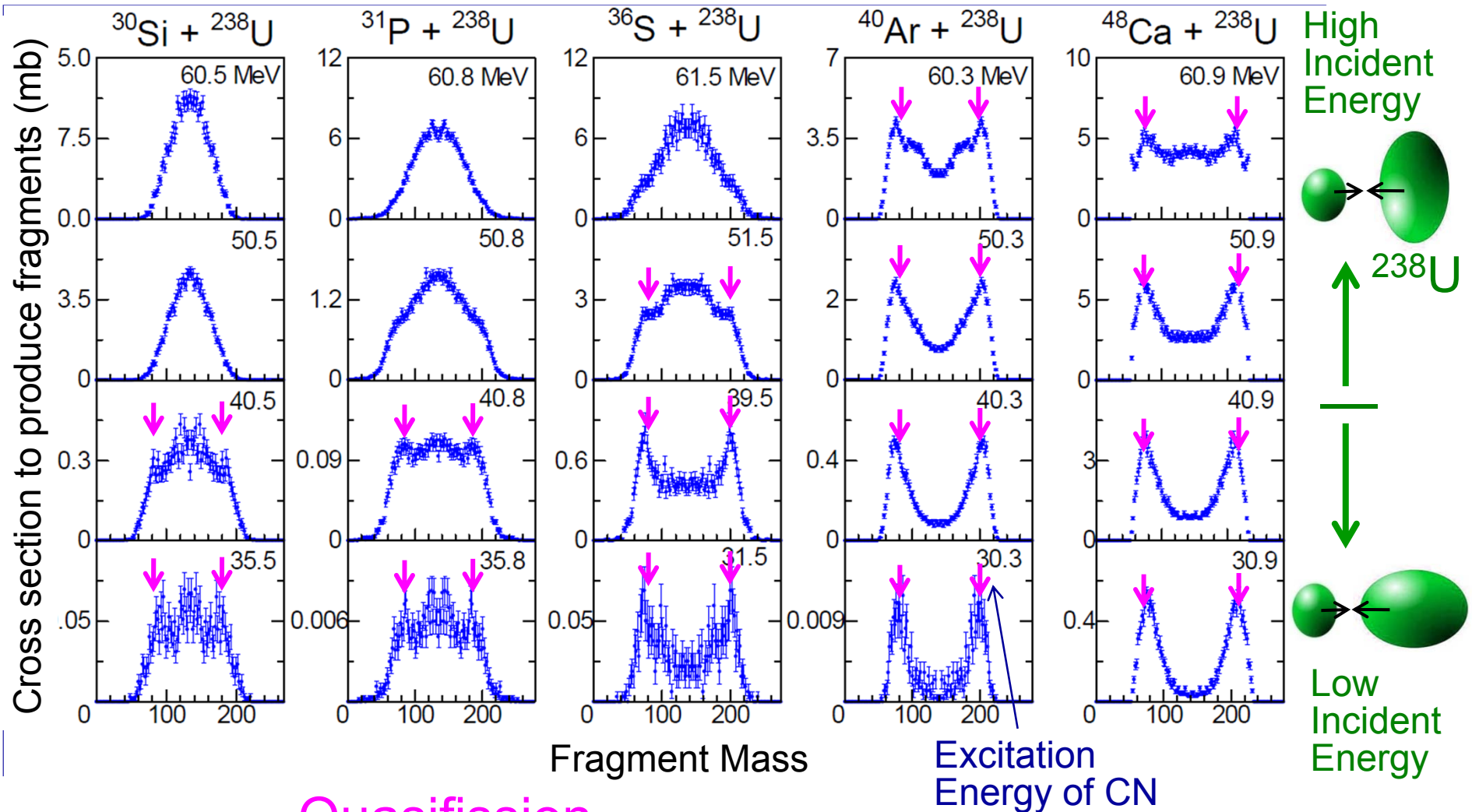
^{274}Hs のポテンシャルエネルギー計算 ($^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$)

5次元の変形空間



Calculated by P. Möller of LANL

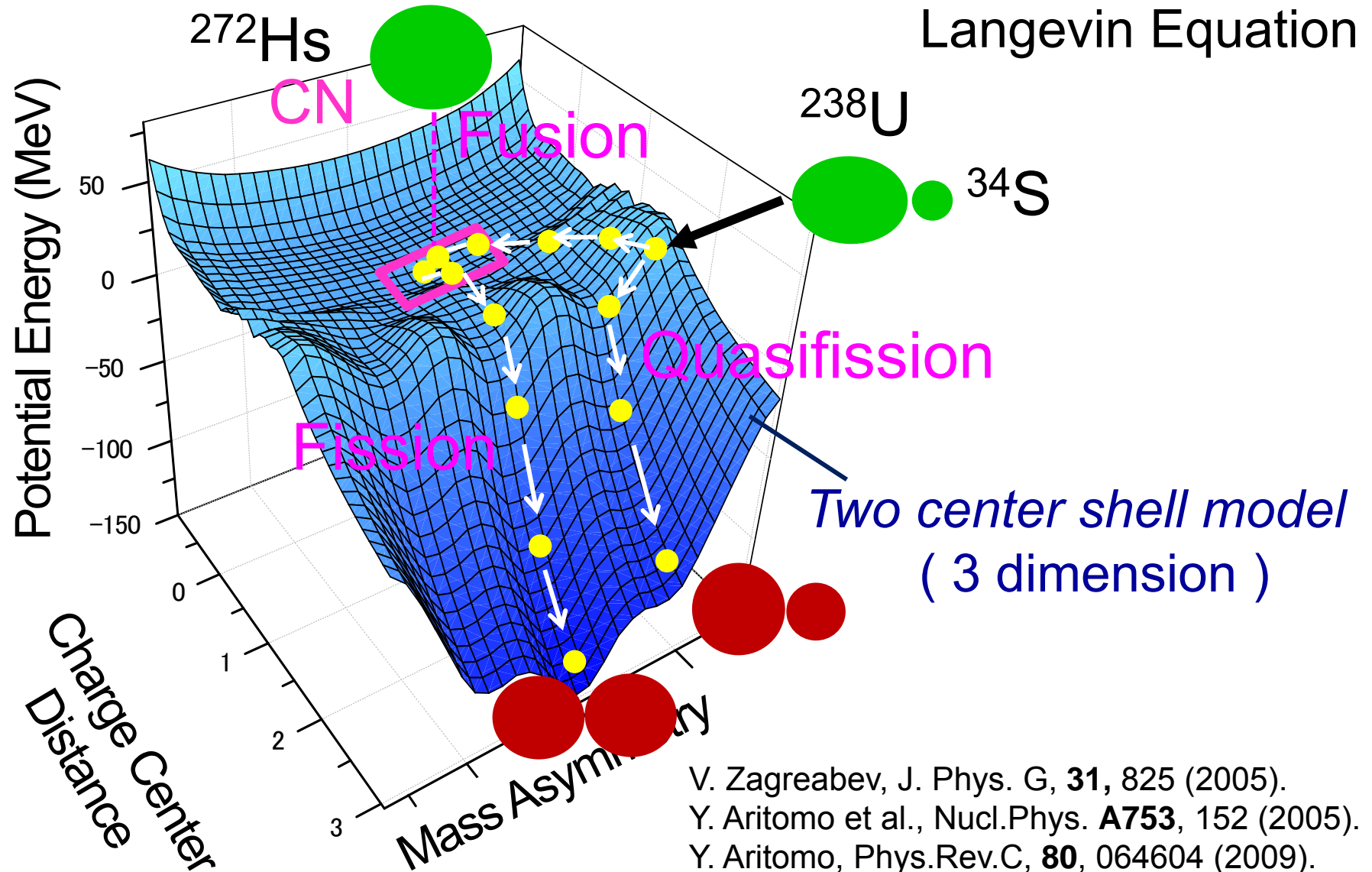
核分裂質量数分布における標的核の向きの効果



Quasifission
(準核分裂)

K. Nishio et al., Phys. Rev. C, **77**, 064607 (2008).
K. Nishio et al., Phys. Rev. C, **82**, 044604 (2010).

揺動散逸理論による原子核形状の時間変化

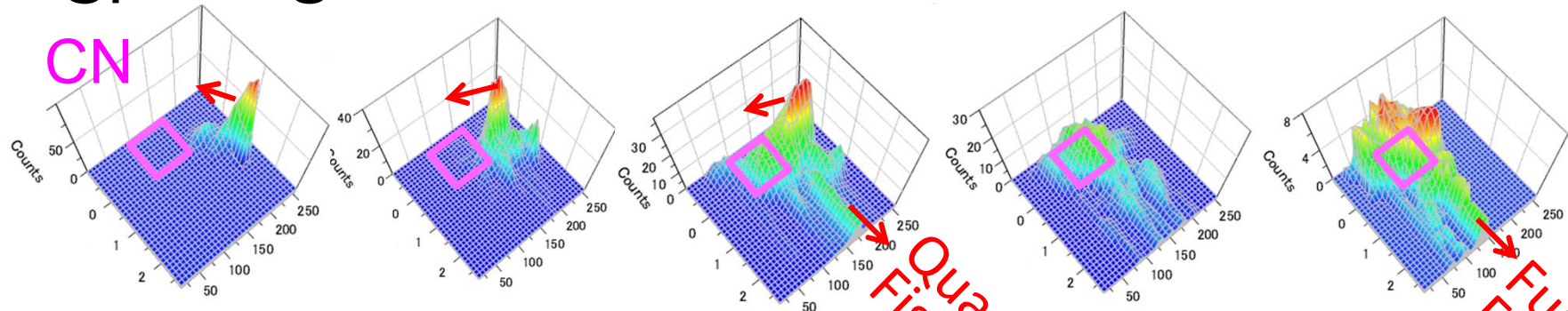


V. Zagreabev, J. Phys. G, **31**, 825 (2005).
Y. Aritomo et al., Nucl.Phys. **A753**, 152 (2005).
Y. Aritomo, Phys.Rev.C, **80**, 064604 (2009).

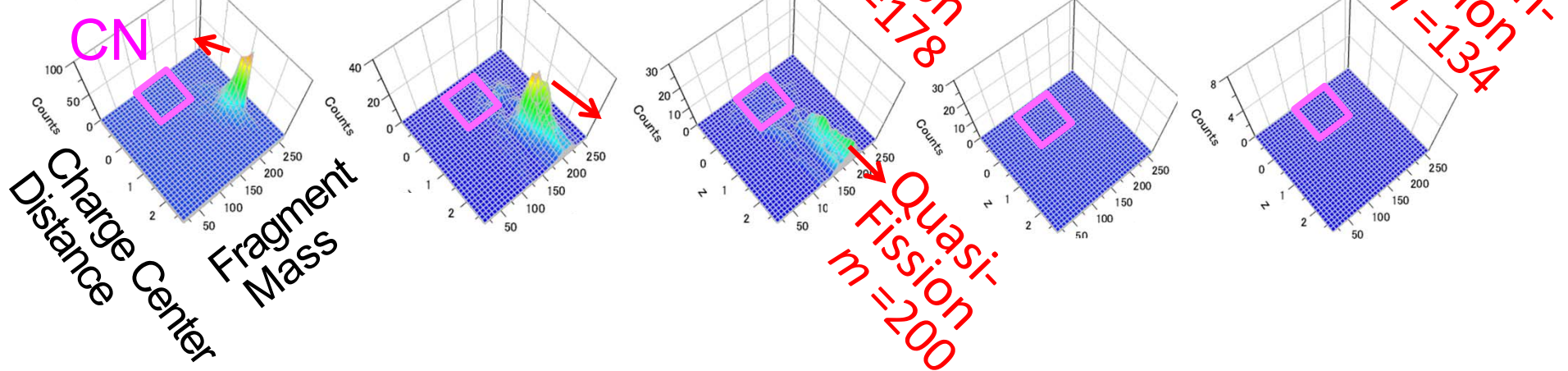
核分裂収率と時間スケール (サブバリアエネルギー)

Y. Aritomo *et al.*, Phys. Rev. C **85**, 044614 (2012).

$^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$



$^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$



0 – 5

5 – 10

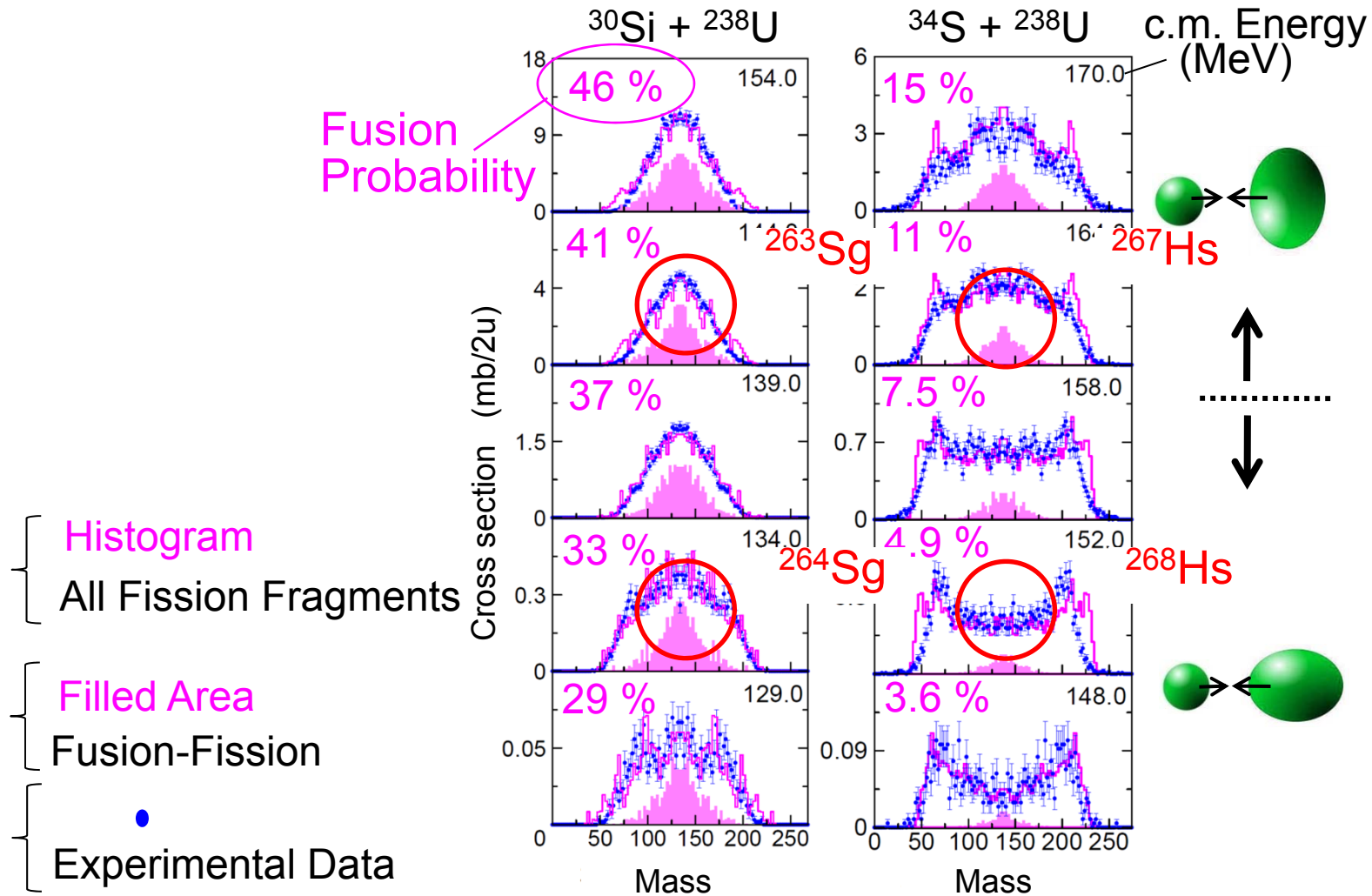
10 – 30

30 – 50

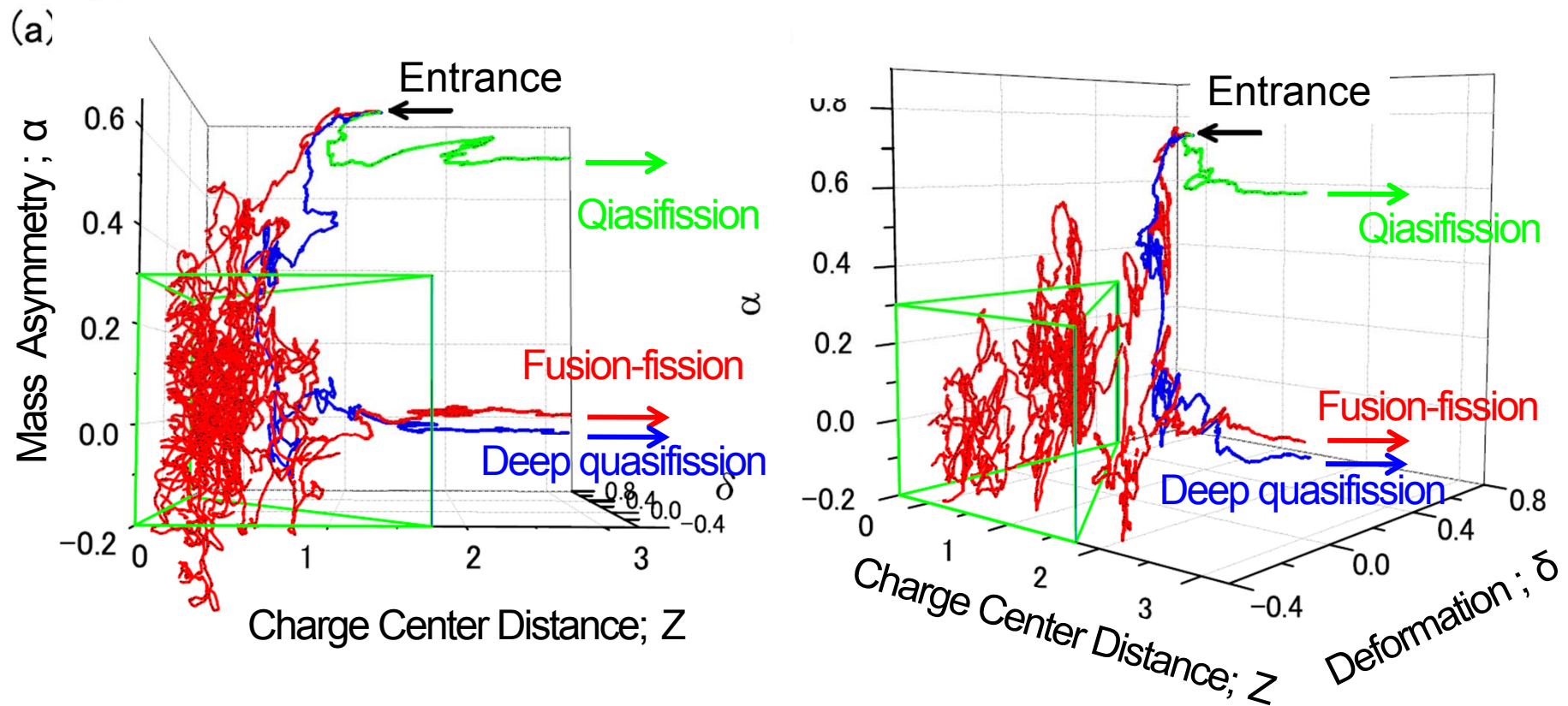
> 50

Time ($\times 10^{-21}$ s)

融合確率



核分裂における3種類の軌道 — Fusion-fission, quasi-fission, Deep quasifission —



Calculated by Y. Aritomo

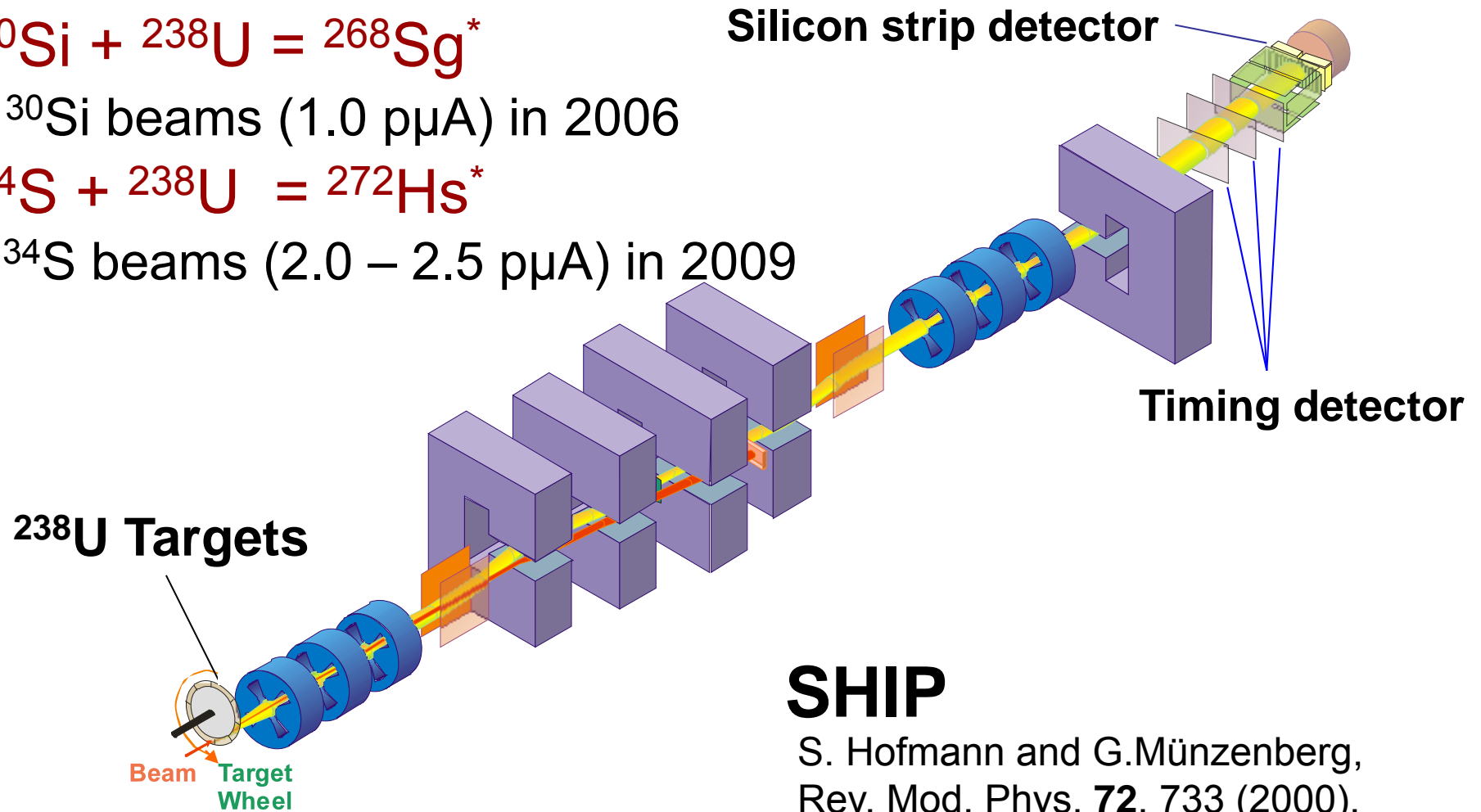
蒸発残留核断面積の測定



^{30}Si beams (1.0 pμA) in 2006



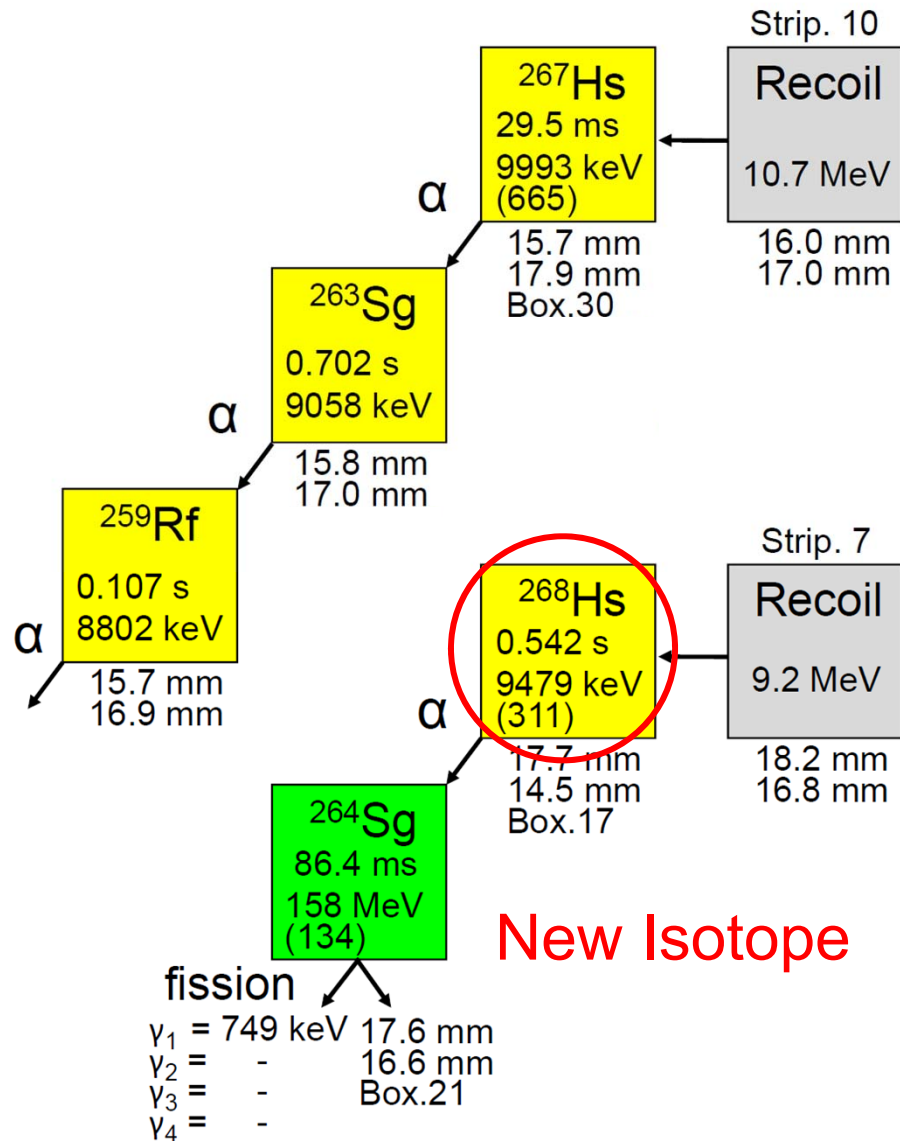
^{34}S beams (2.0 – 2.5 pμA) in 2009



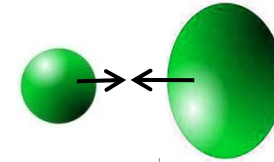
SHIP

S. Hofmann and G.Münzenberg,
Rev. Mod. Phys. **72**, 733 (2000).

$^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応による Hs 同位体の生成

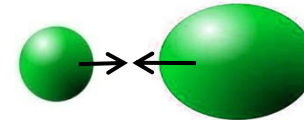


$E_{\text{c.m.}} = 163\text{ MeV}$
 $E^* = 51\text{ MeV}$



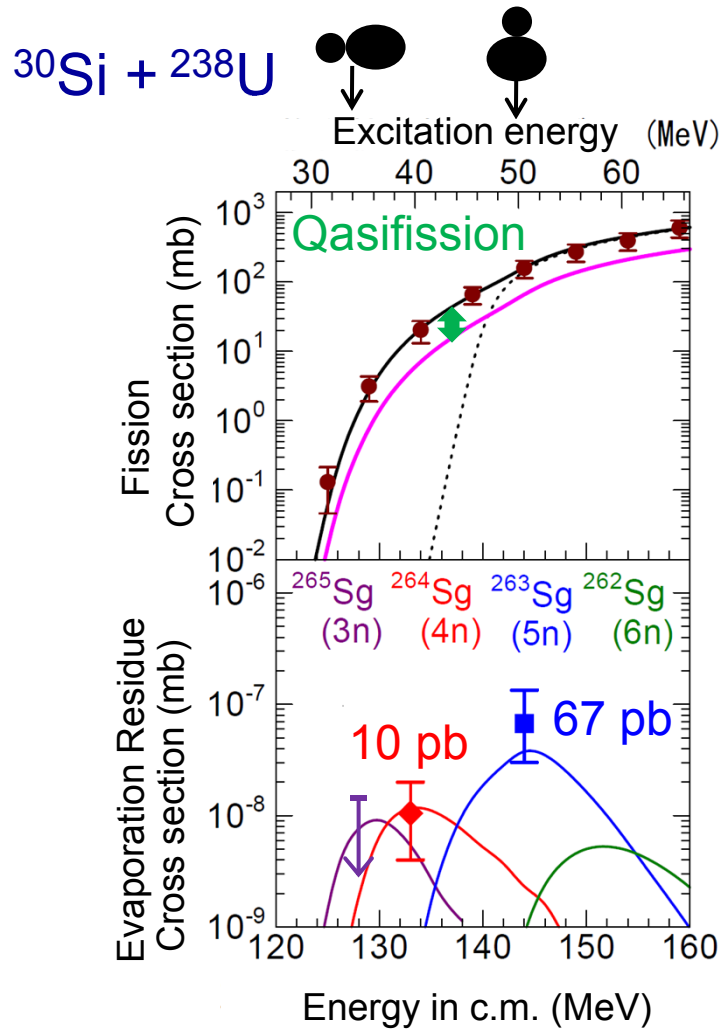
$1.8^{+4.2}_{-1.5}\text{ pb}$

$E_{\text{c.m.}} = 152\text{ MeV}$
 $E^* = 40\text{ MeV}$

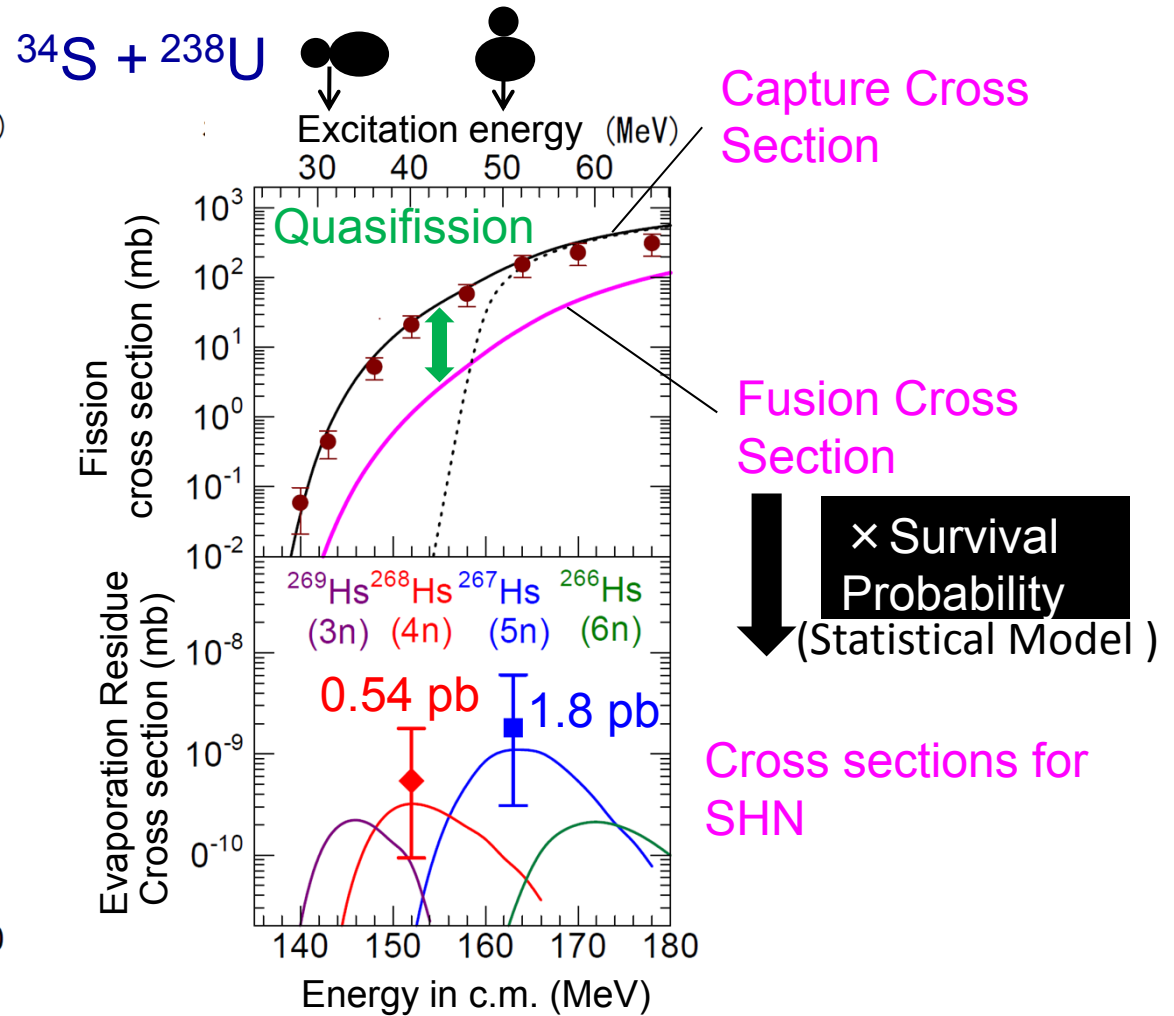


$0.54^{+1.3}_{-0.45}\text{ pb}$

核融合断面積と蒸発残留核断面積

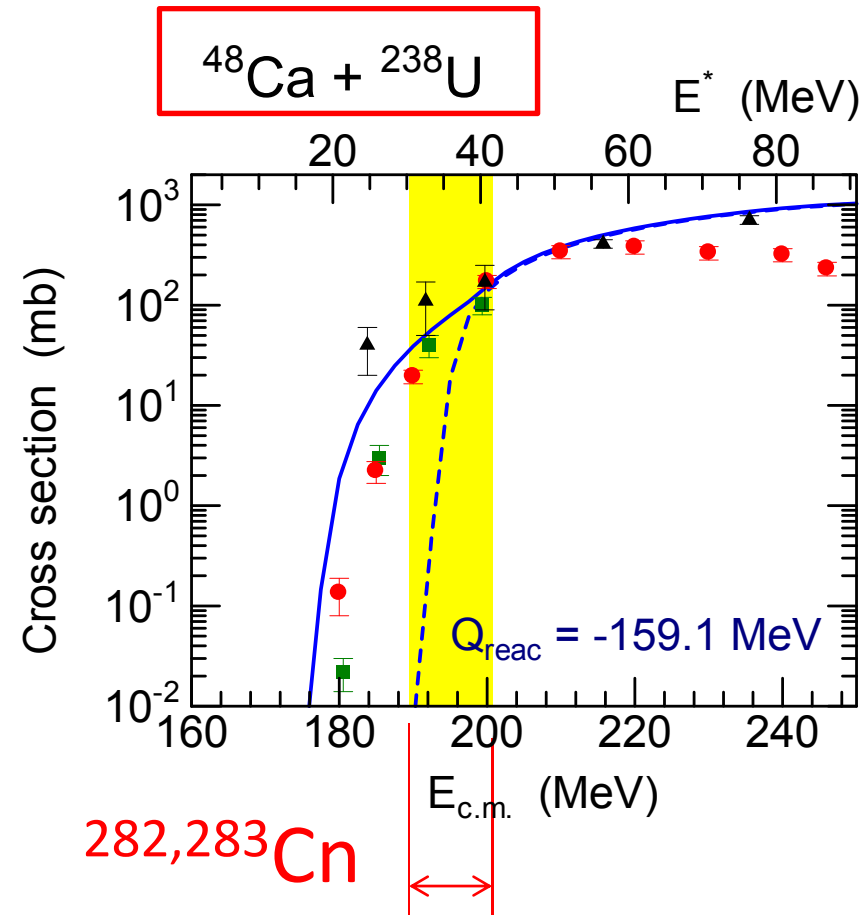


K. Nishio *et al.*, PRC **82**, 044604 (2010).



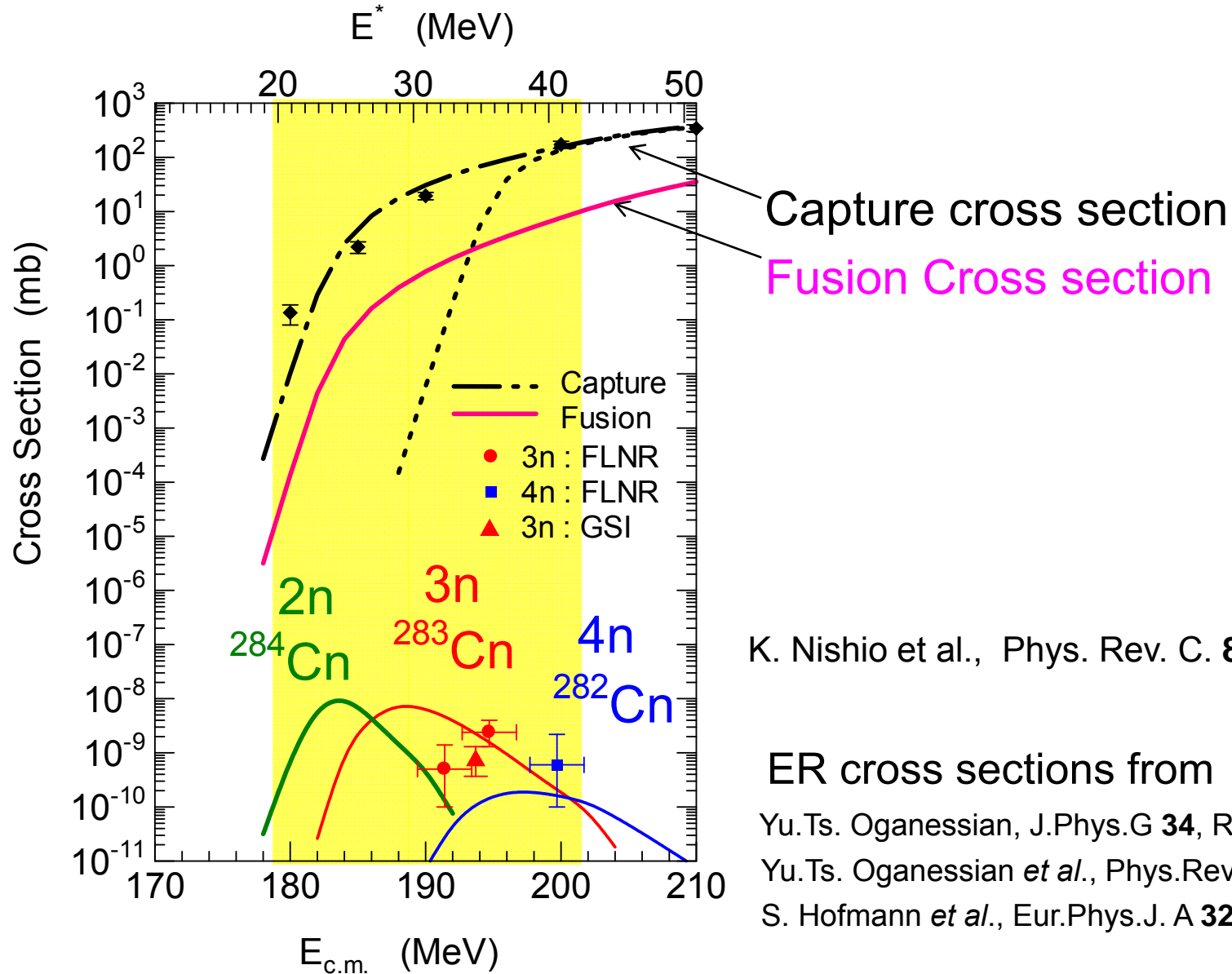
K. Nishio *et al.*, PRC **82**, 024611 (2010).

$^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 反応の核分裂断面積



- Present : K.Nishio *et al.*, Phys. Rev. C, **86**, 034608 (2012)
- M.G. Itkis *et al.*, Nucl.Phys. **A787**, 150c (2007).
- ▲ W.Q. Shen *et al.*, Phys.Rev.C **36**, 115 (1987).

$^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$



K. Nishio et al., Phys. Rev. C. **86**, 034608 (2012).

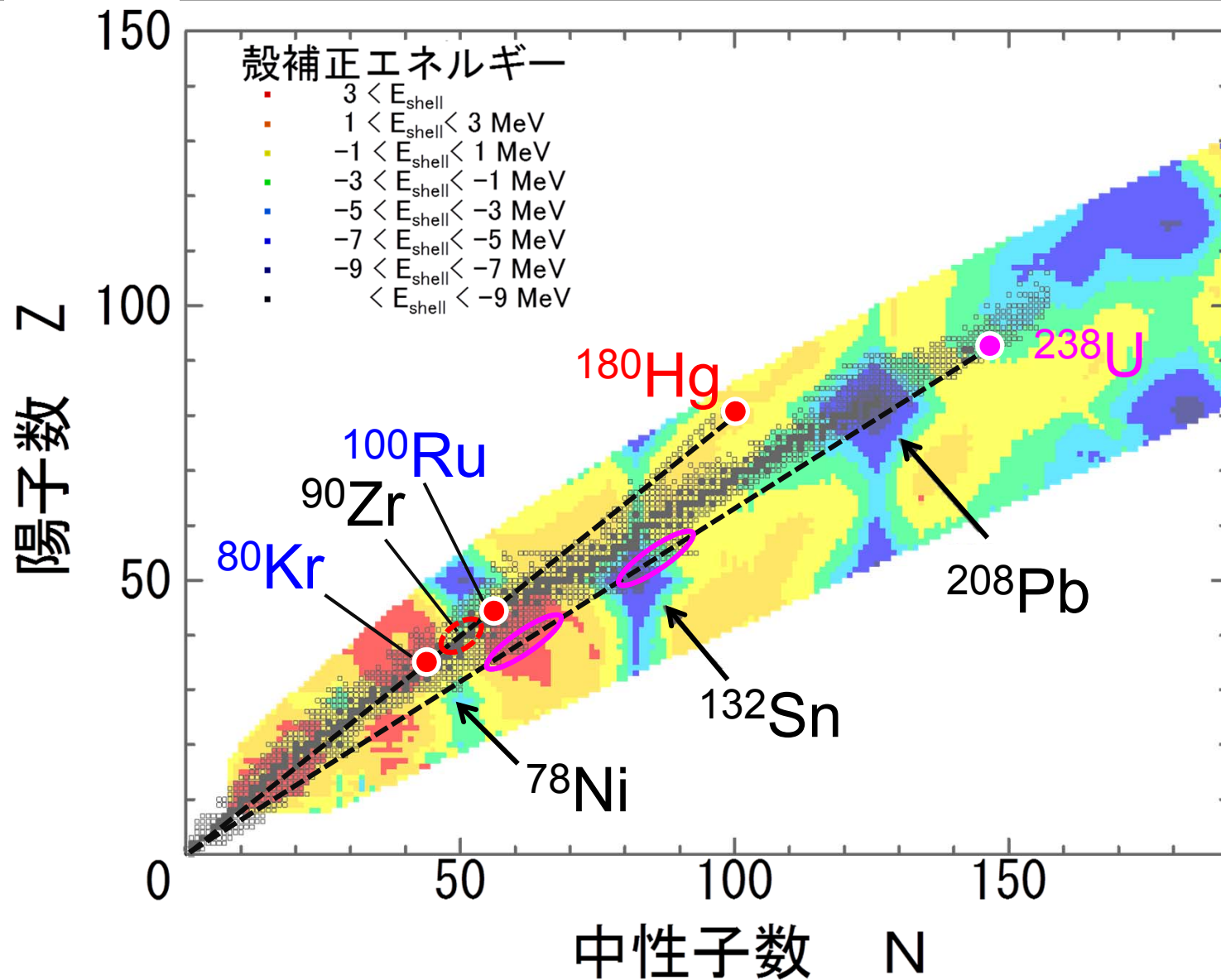
ER cross sections from

Yu.Ts. Oganessian, J.Phys.G **34**, R165 (2007).

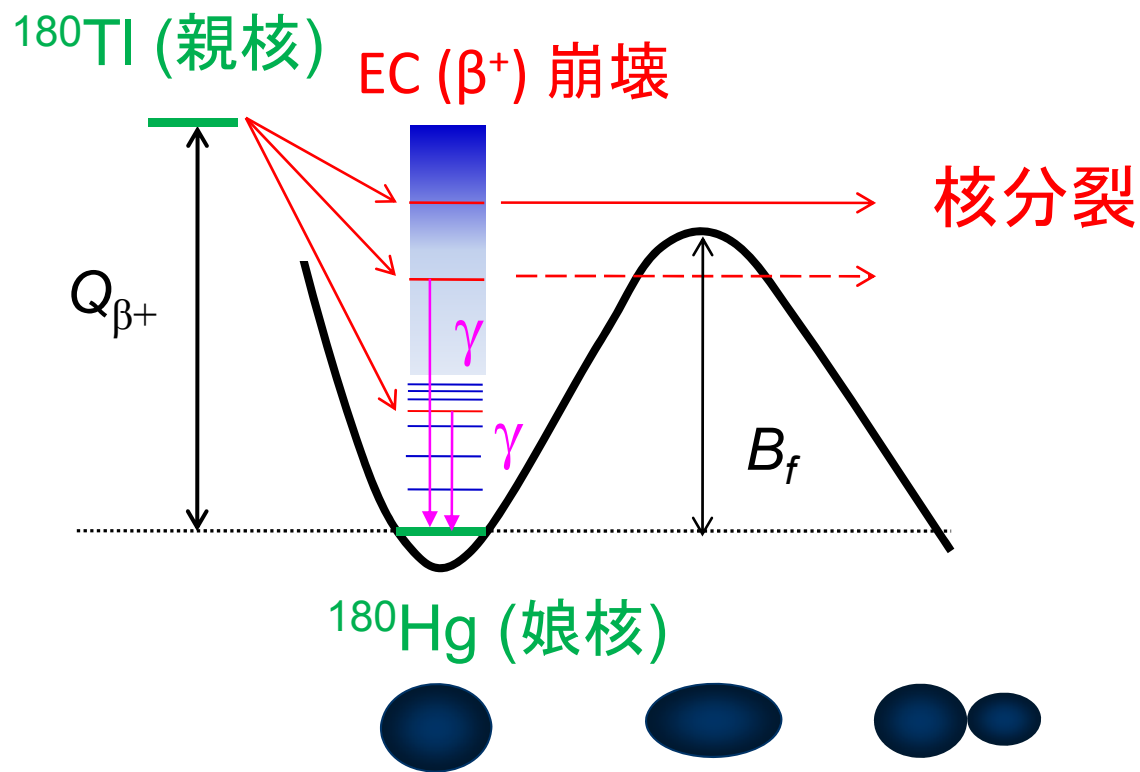
Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Phys.Rev.C **70**, 064609 (2004)

S. Hofmann *et al.*, Eur.Phys.J. A **32**, 251 (2007).

陽子過剰原子核 ^{180}Hg の核分裂



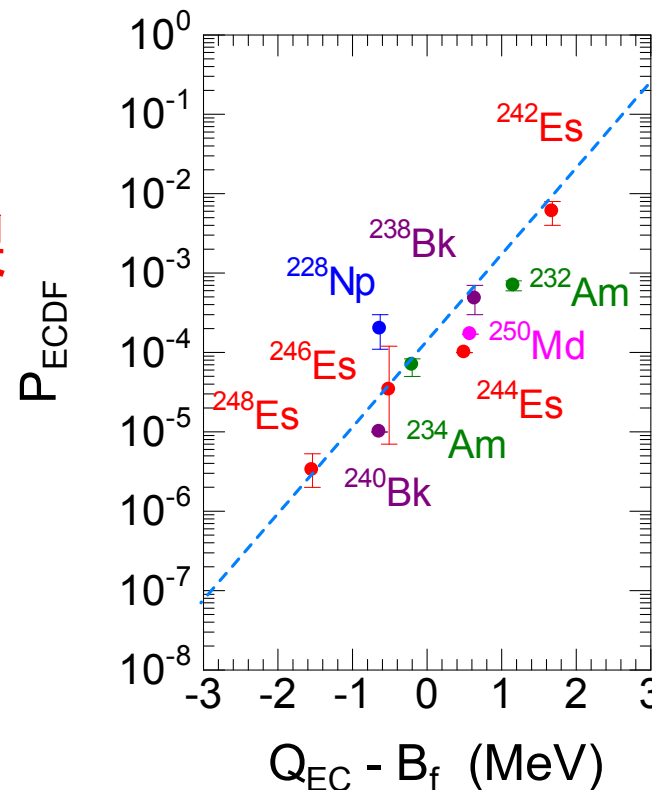
β^+ 崩壊遅延核分裂



Q_{β^+} : β^+ 崩壊のQ値 (^{180}TI : 10.4 MeV)
 $Q_{\beta^+} = \text{質量}(A, Z) - \text{質量}(A, Z-1)$

B_f : 核分裂障壁の高さ (^{180}Hg : 9.8 MeV)

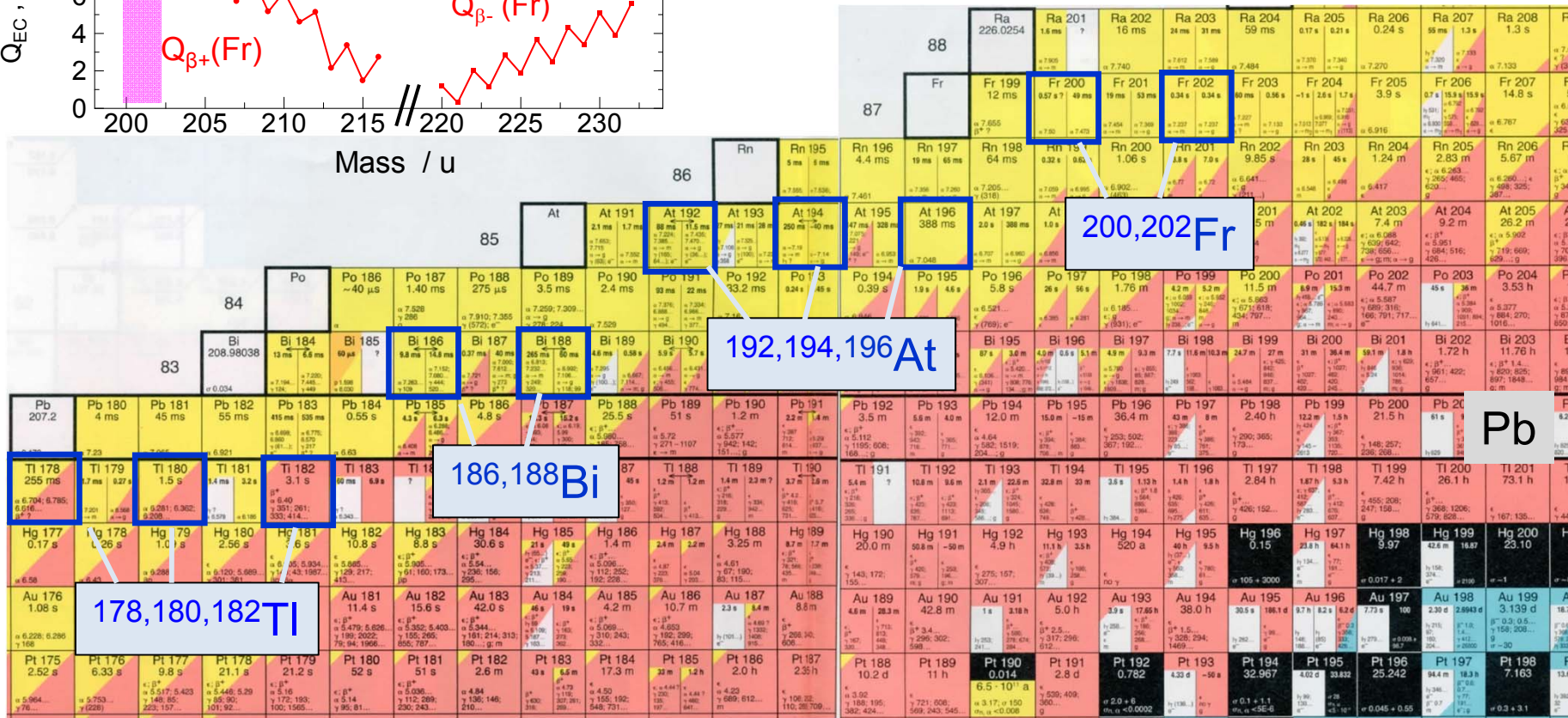
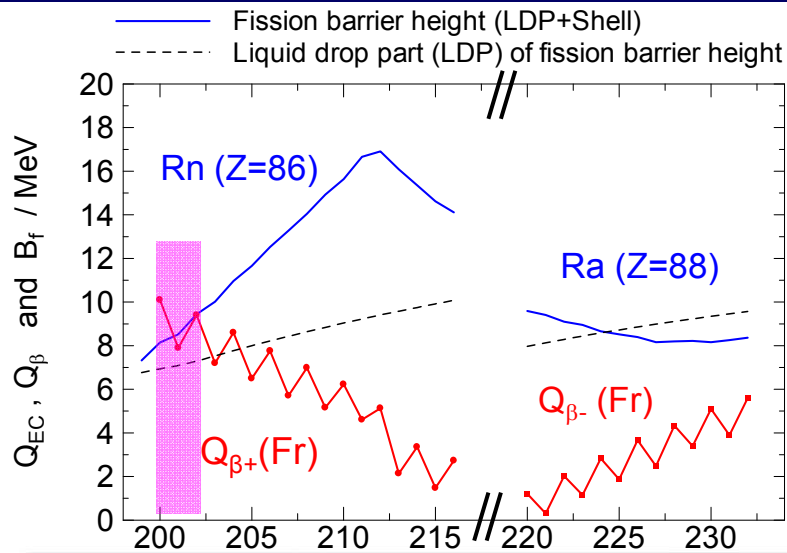
E. Ye. Berlovich and Yu.N. Novikov, Phys. Lett. B **29**, 155 (1969).



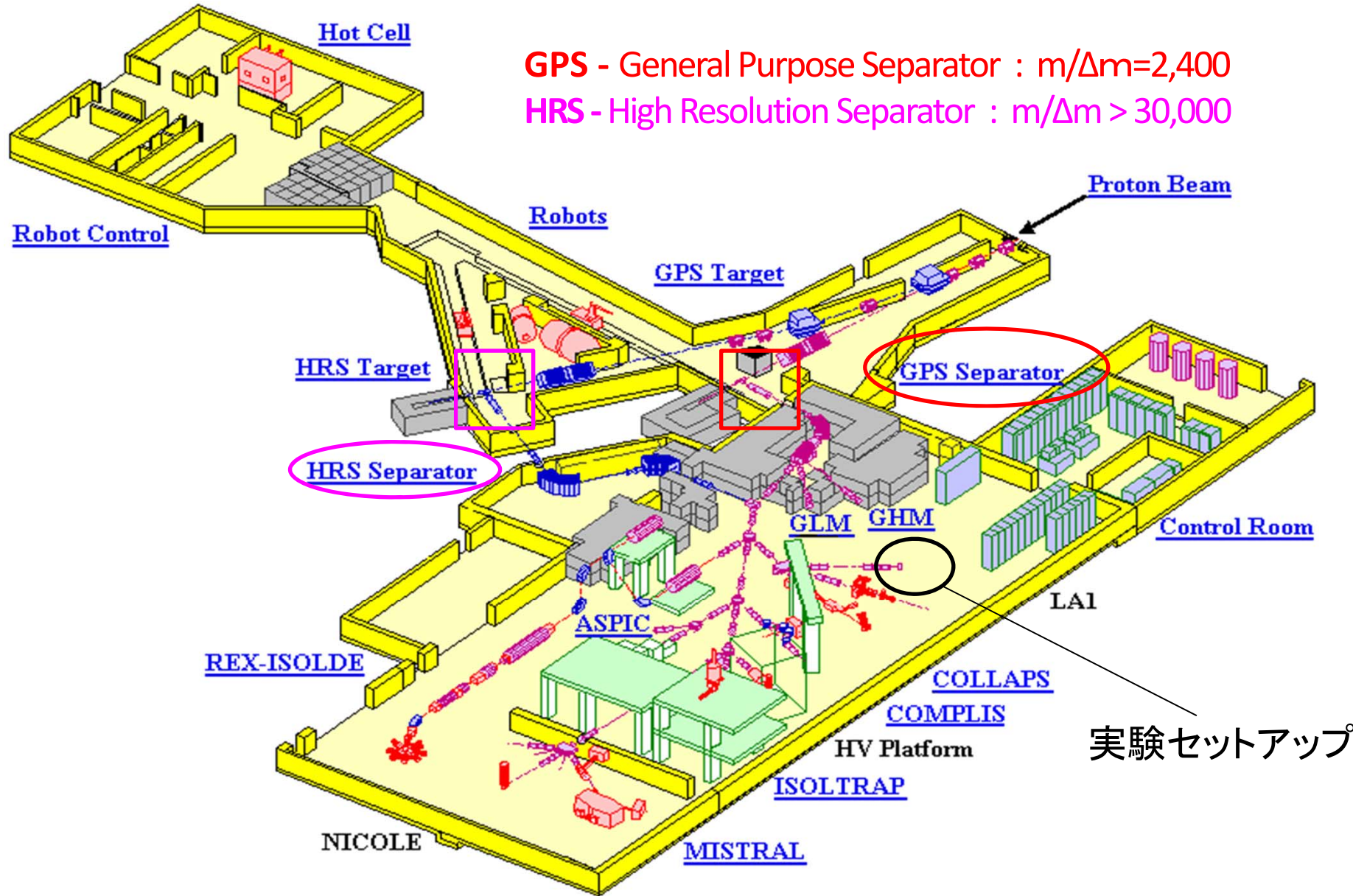
アクチノイド原子核で見られる現象として知られてきた (10核種)

$$P_{\text{ECDF}} = \frac{\text{EC崩壊したのち核分裂}}{\text{EC崩壊の数}}$$

β崩壊のQ値と核分裂障壁の高さ



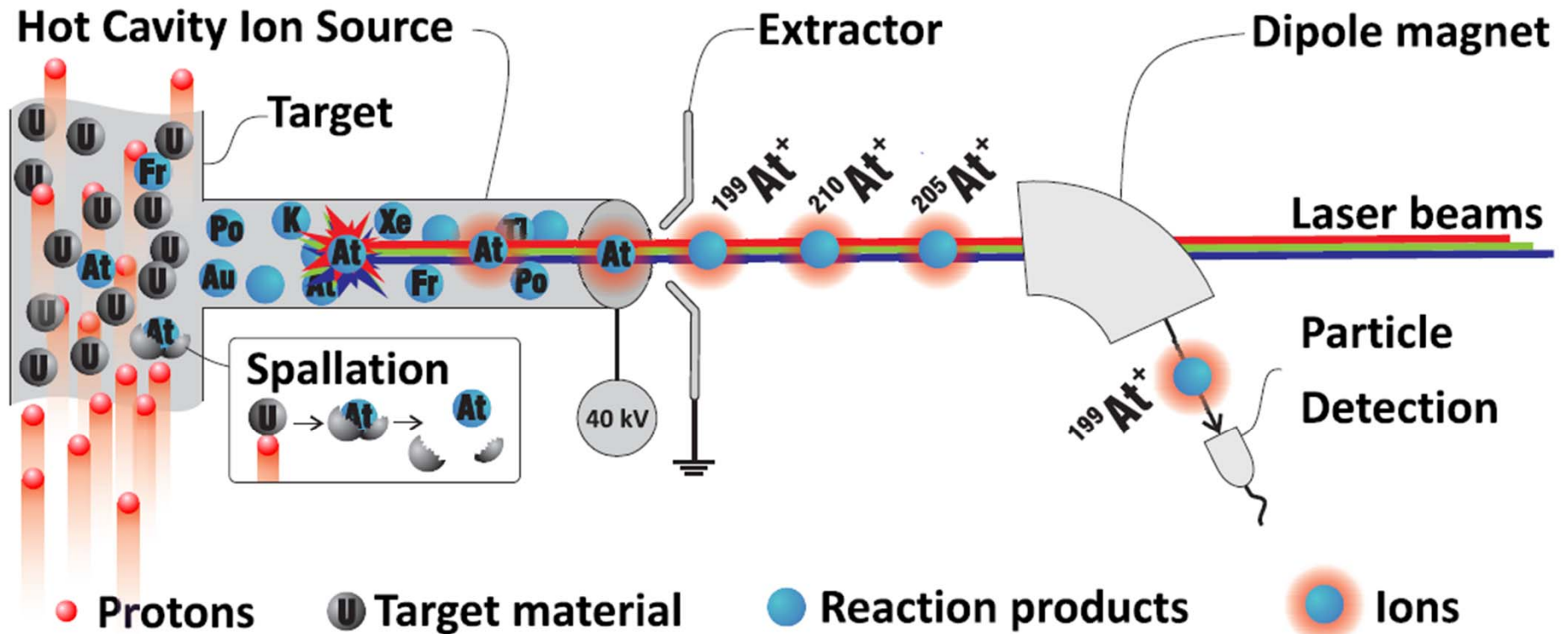
CERN - ISOLDE



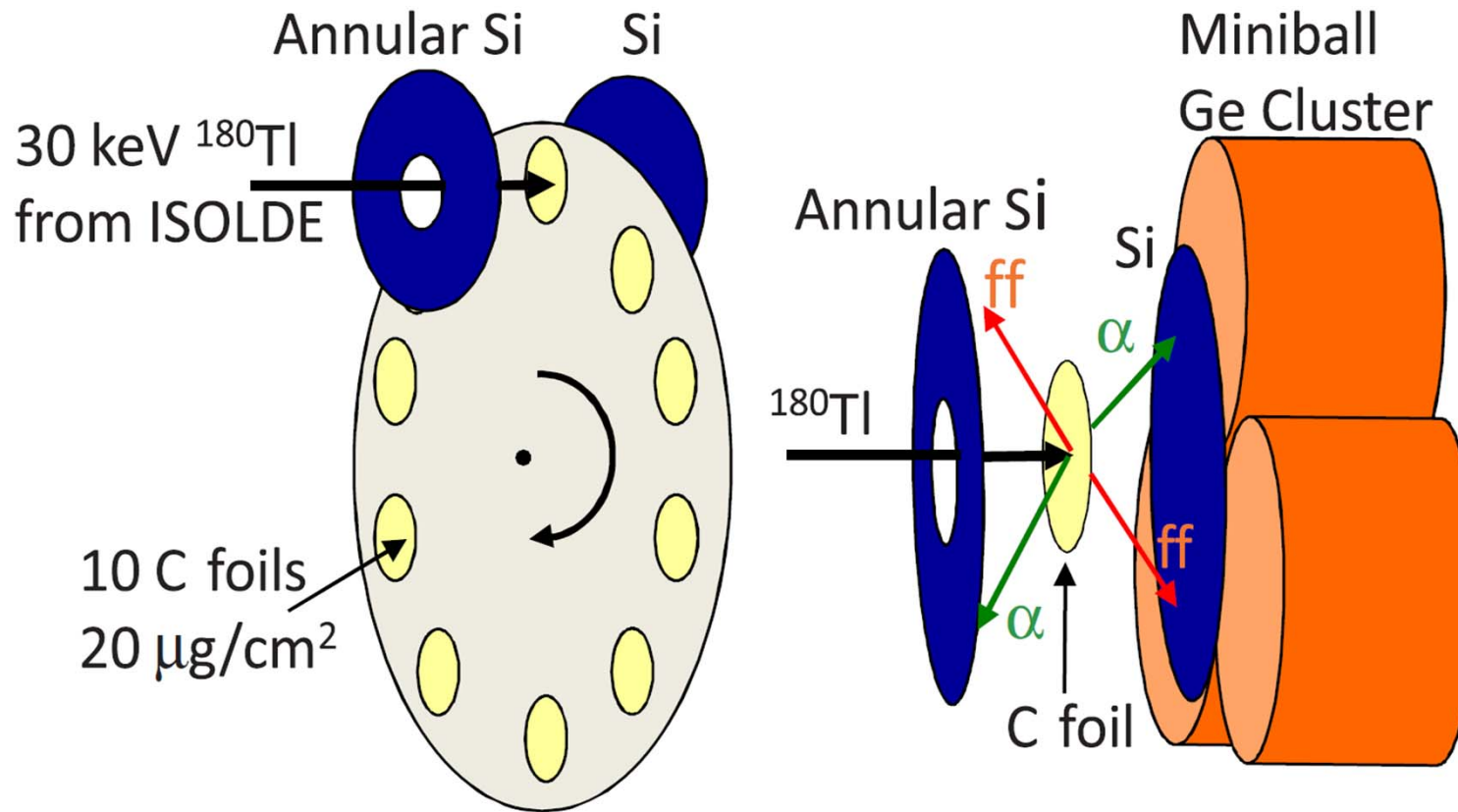
GPS - General Purpose Separator : $m/\Delta m=2,400$

HRS - High Resolution Separator : $m/\Delta m > 30,000$

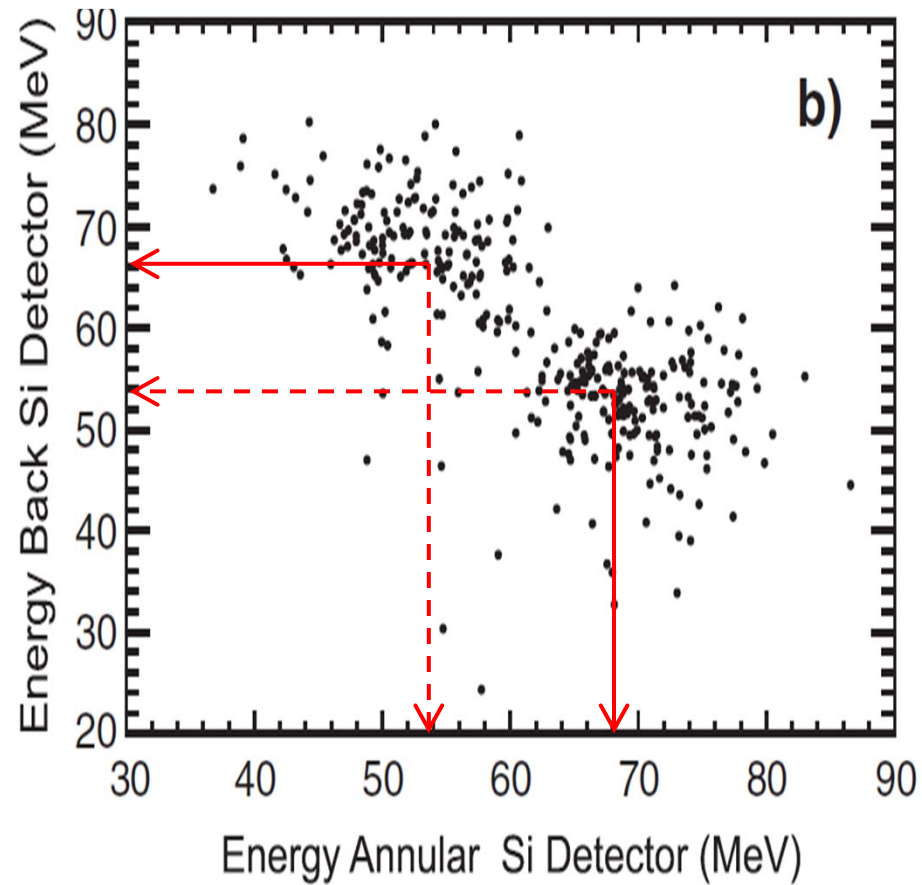
ISOLDE ISOL



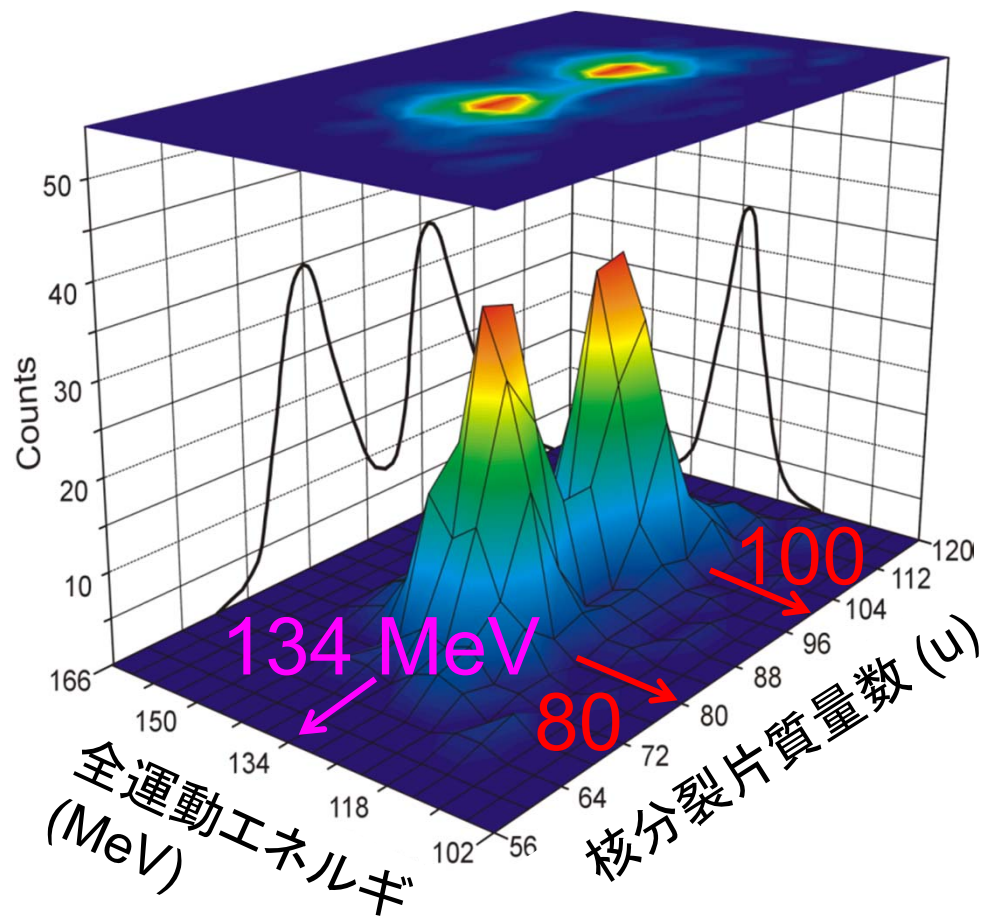
実験セットアップ



核分裂片の運動エネルギー (^{180}Hg)



^{180}Hg の低励起エネルギー核分裂

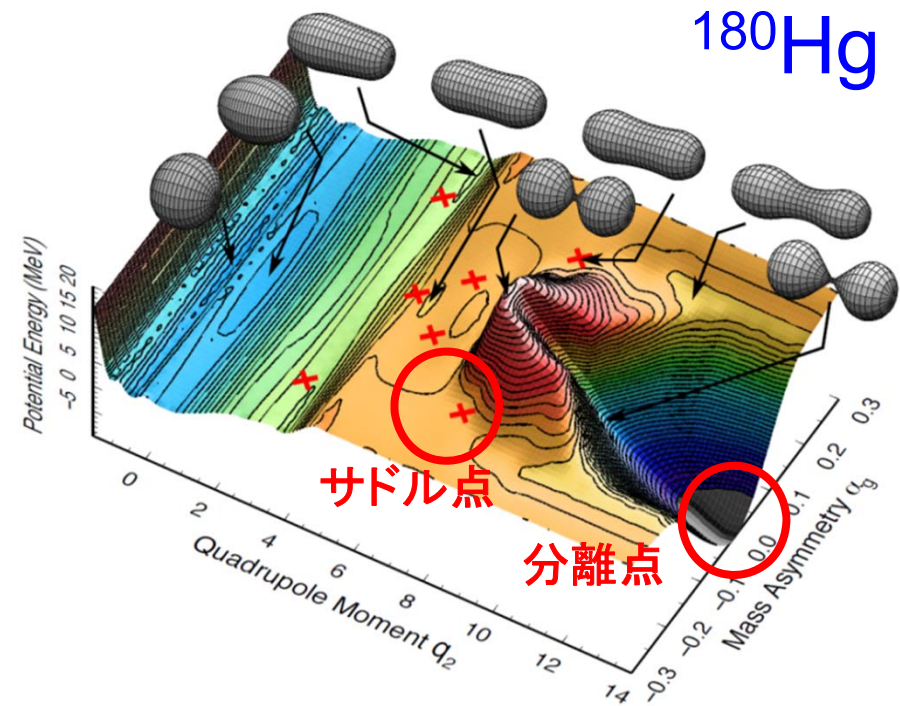
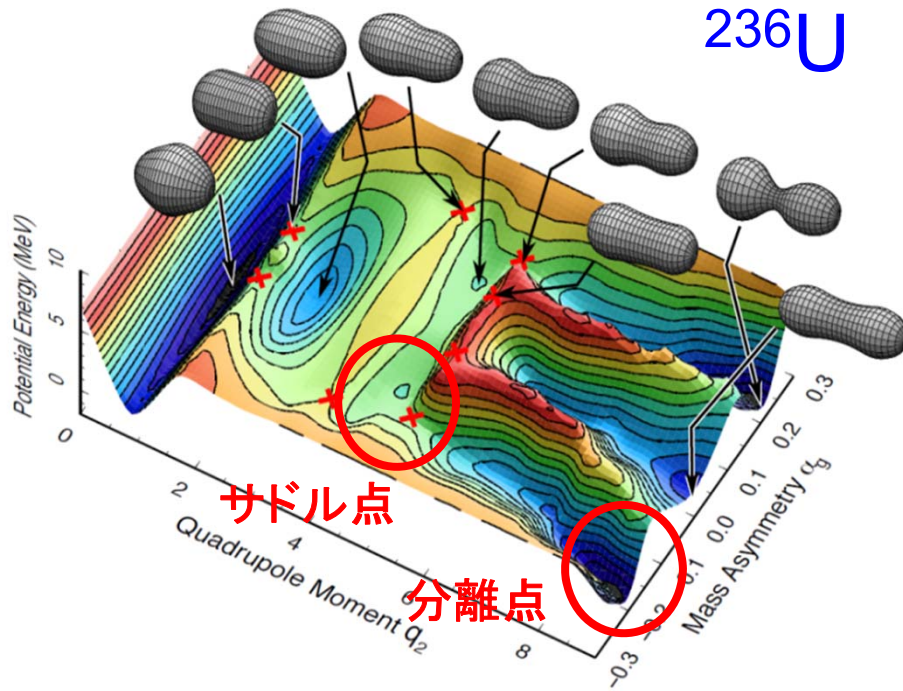


A. Andreyev *et al.*, Phys. Rev. Lett., **105**, 242502 (2010).

naturenews

December 2010

^{180}Hg のユニークなポテンシャル形状

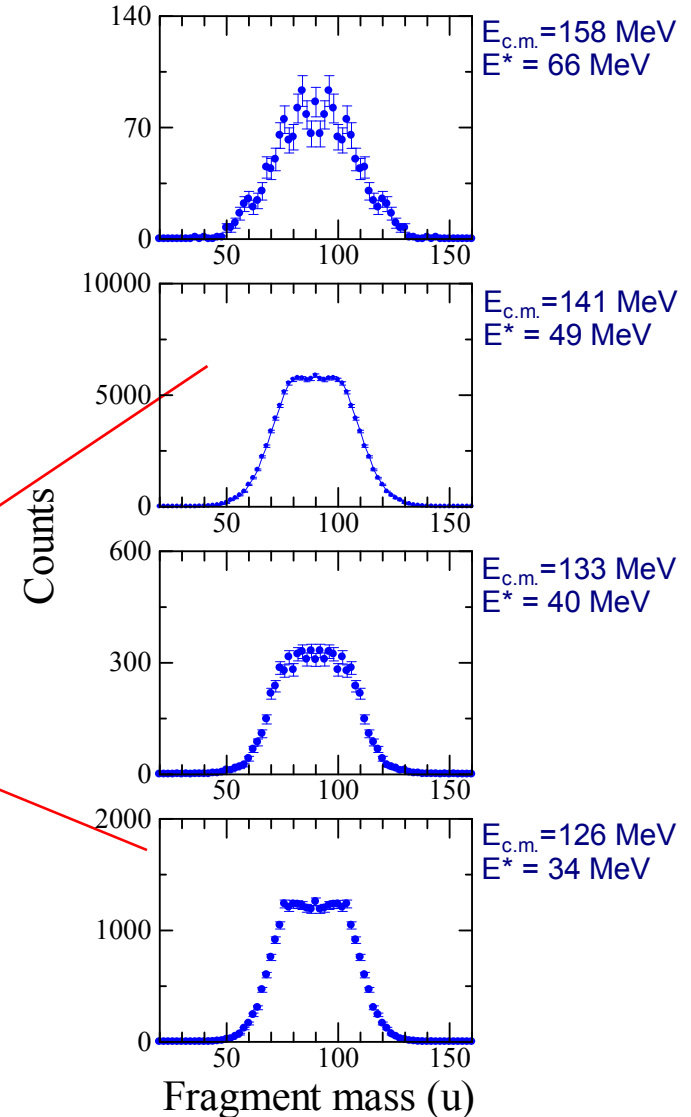
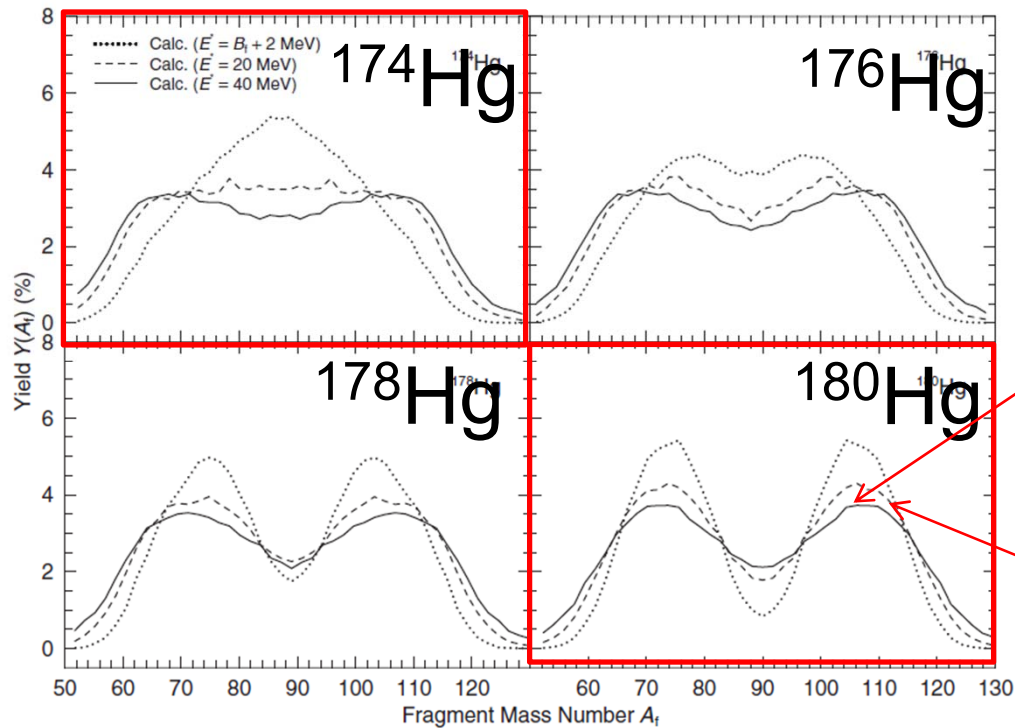


T. Ichikawa, A. Iwamoto, P. Möller, A.J. Sierk,
Phys. Rev.C.**86**, 024610 (2012).

高励起状態からの核分裂

^{180}Hg の励起エネルギー依存性。
 → 従来の核分裂とは、顕著な違い

理論



P.Moller and J. Randrup, Phys.Rev.C **85**, 024306 (2012).

今後の計画

- (1) 超重元素合成のための重イオン入射核分裂
 - Z=120にむけた反応 ($^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$)
 - 核分裂に伴う中性子の測定

- (2) 陽子過剰原子核の核分裂
 - 広い範囲にわたる核種の測定

終わり