

多次元ランジュバン模型による アクチナイド核分裂の系統的調査

Systematic study of nuclear fission of actinides using multi-dimensional Langevin models

研究代表者: 石塚 知香子(東工大先導原研)

メンバー: 岩田順敬(東工大先導原研)

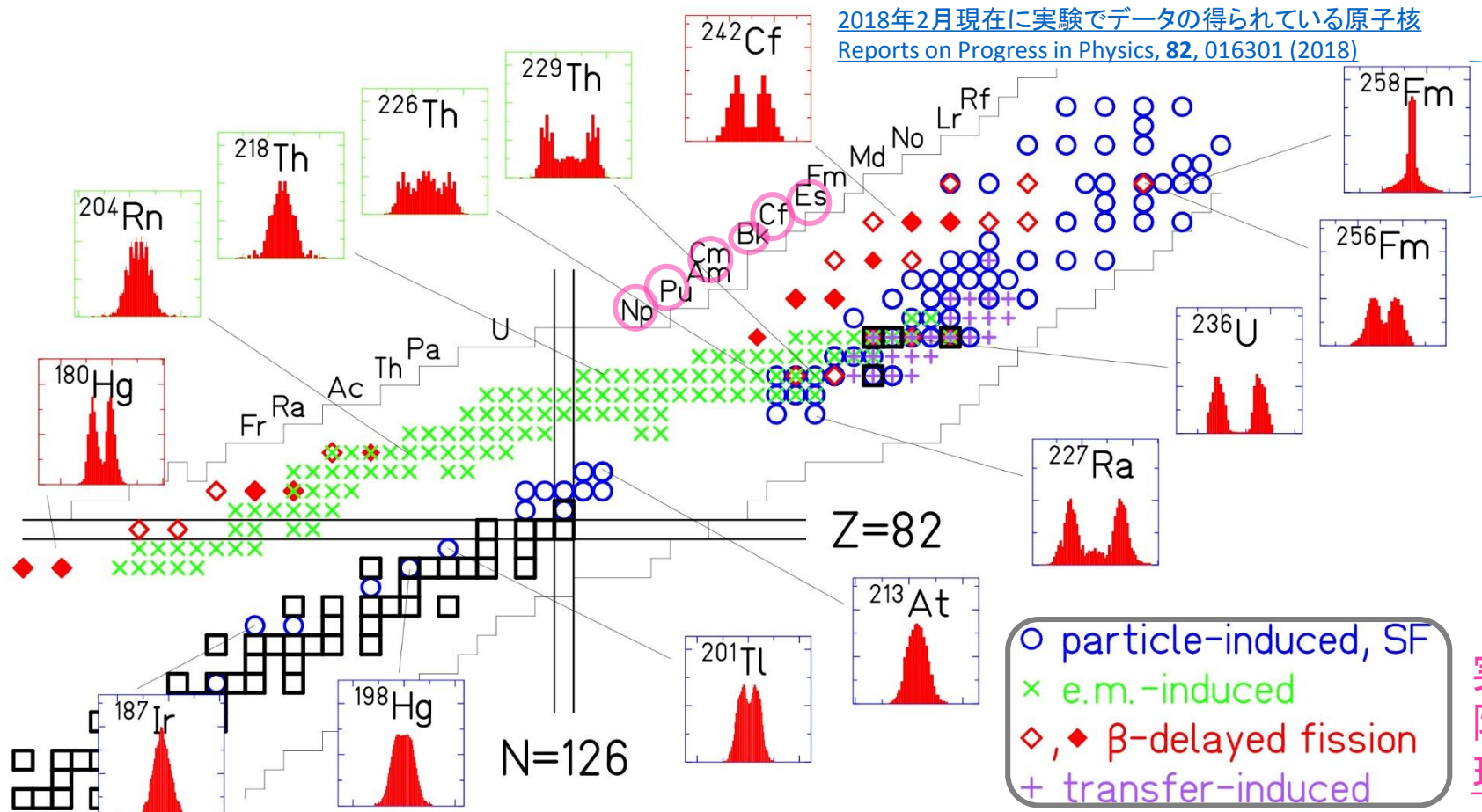
椿原康介(東工大先導原研)

奥村森(東工大先導原研)

千葉敏(東工大先導原研)

工学的に要求の高い原子核

2018年2月現在に実験でデータの得られている原子核
 Reports on Progress in Physics, 82, 016301 (2018)



各枠内は実験で計測された核分裂質量収率 (FFMD) の様子

高毒性の放射性廃棄物

核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
Np-237	214万年	110	0.6kg
Am-241	432年	200	0.4kg
Am-243	7,370年	200	0.2kg
Cm-244	18.1年	120	60g

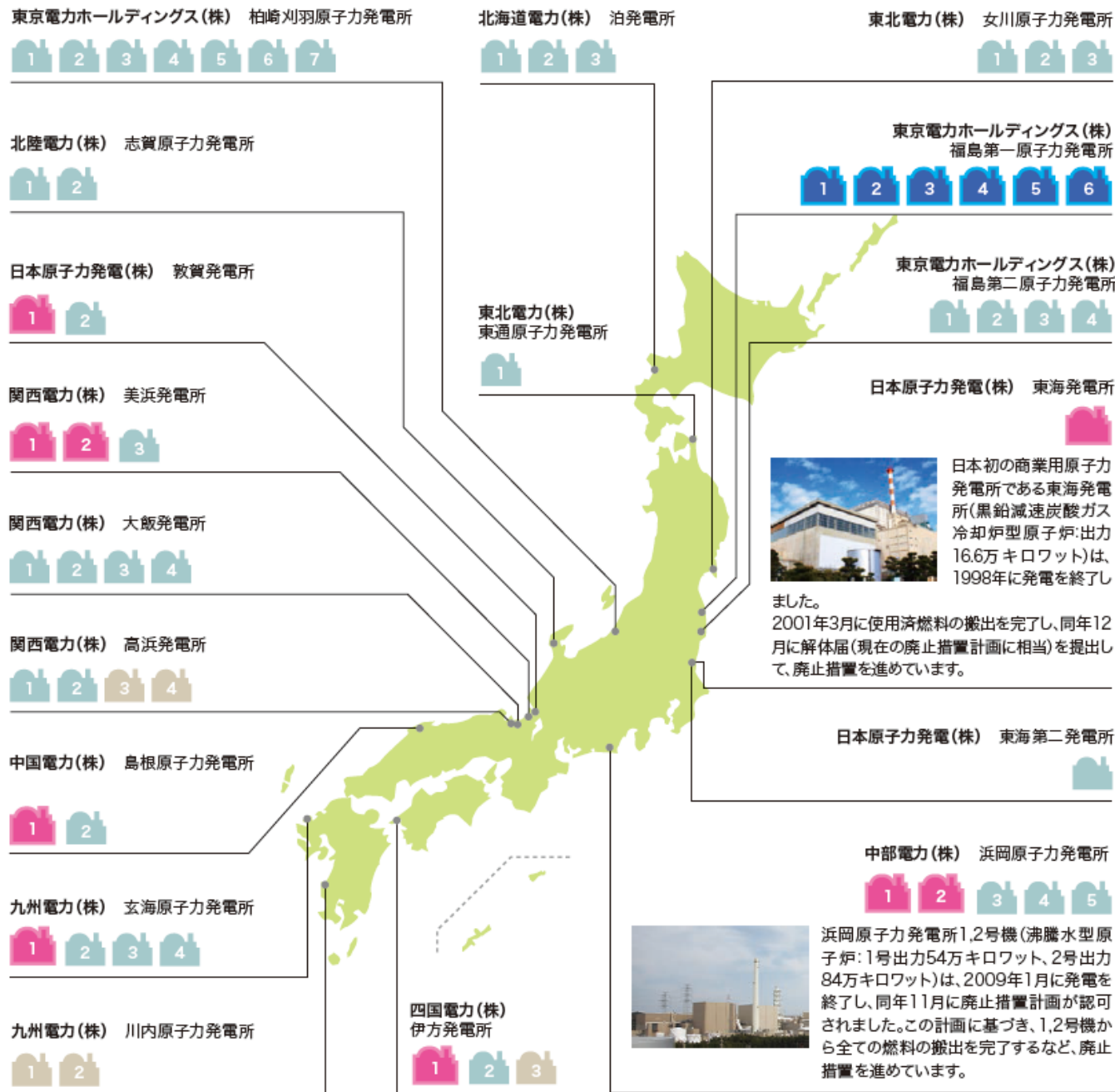
○ particle-induced, SF
 × e.m.-induced
 ◇, ◆ β -delayed fission
 + transfer-induced

実験でFFMDが得られる(A,Z,Ex)は限定的で高精度核データ作成のため理論的な予測が必要不可欠

廃止措置で高精度の核分裂核データが要求されている元素(青色が廃止措置工事等での被爆で重要な核種)

57~71	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
ランタノイド*	ランタン 138.9	セリウム 140.1	プラセオジウム 140.9	ネオジウム 144.2	プロメチウム (145)	サマリウム 150.4	ユウロピウム 152.0	ガドリニウム 157.3	テルビウム 158.9	ジスプロシウム 162.5	ホルミウム 164.9	エルビウム 167.3	ツリウム 168.9	イットルビウム 173.0	ルテチウム 175.0
89~103	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
アクチノイド*	アクチニウム (227)	トリウム 232.0	プロトアクチニウム 231.0	ウラン 238.0	ネプツニウム (237)*	プルトニウム (239)*	アメリシウム (243)*	キュリウム (247)*	バークリウム (247)*	カリホルニウム (252)*	アインスタイニウム (252)*	フェルミウム (257)*	メンデレビウム (256)*	ノーベリウム (259)*	ローレンシウム (260)*

■日本の原子力発電所の運転・廃止措置状況
(商業用・2017年8月末時点)

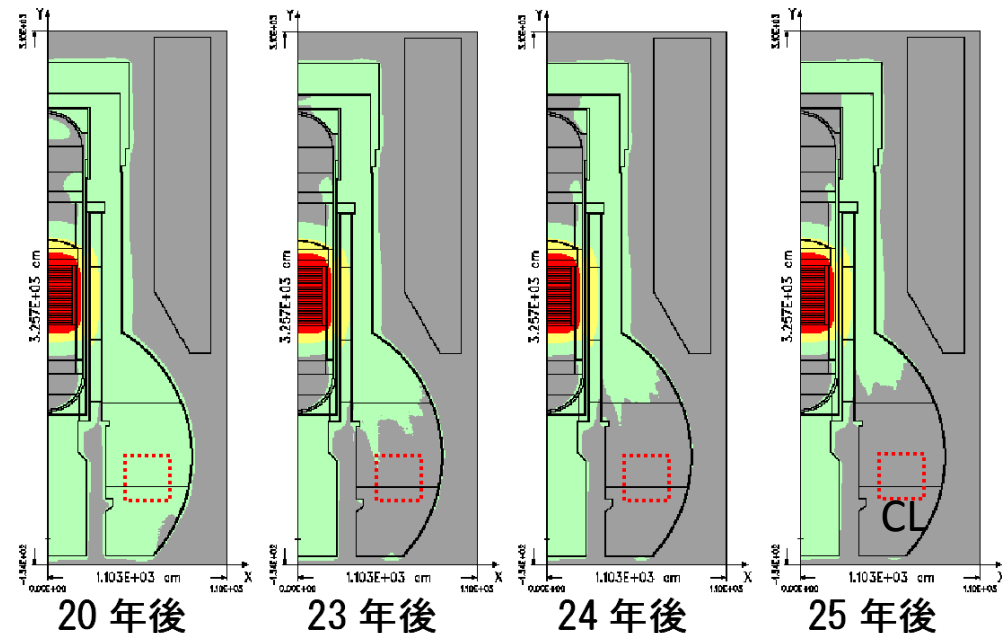


高精度アクチナイド核データの重要性

現在、4基に1基が廃止措置段階
 廃止措置費用:1基あたり350億円前後
 コスト削減のため放射性廃棄物の厳しい見積りが急務

どれくらいの期間で、どれだけの領域が
 放射性廃棄物として扱う必要がなくなるか？
 厳密評価のために高精度核分裂核データが必要

JENDL-4.0に基づく原子炉格納容器内の計算例



理論モデルによる予想の重要性

- ★原子カシステムで重要な E^* が数MeV以下の低エネルギー核分裂核データ
 - 実験: エネルギーが低いと、データが急激に減少
質量数ビンも十分ではない
- 理論予測が必要

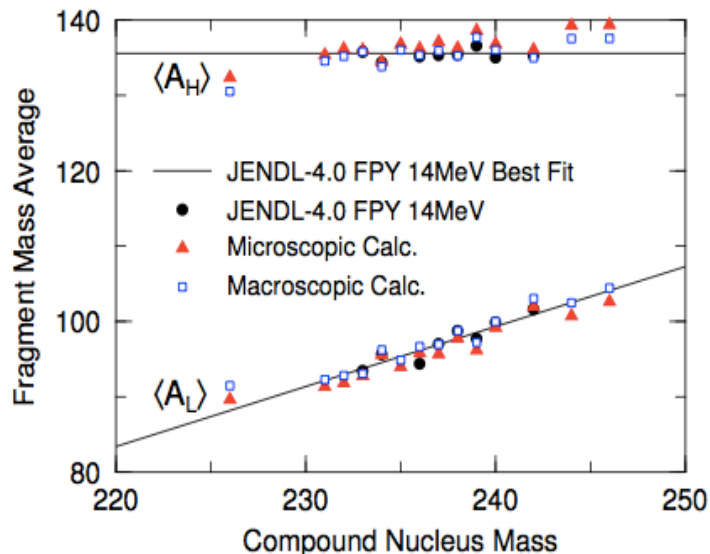
ランジュバン模型の特長

幅広いエネルギー領域の様々な核の核分裂を定量的に再現可能

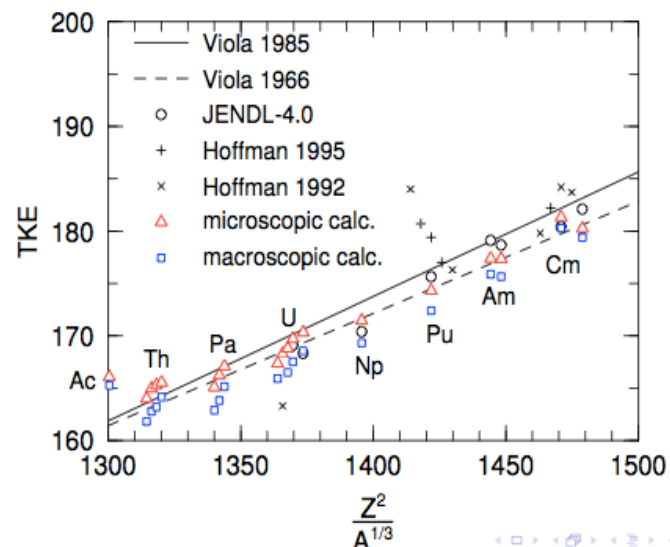
- ・核分裂片の質量分布
- ・全運動エネルギー(TKE)分布

微視的3次元ランジュバン模型の計算結果

[Ref] Usang+PRC 96, 064617 (2017).

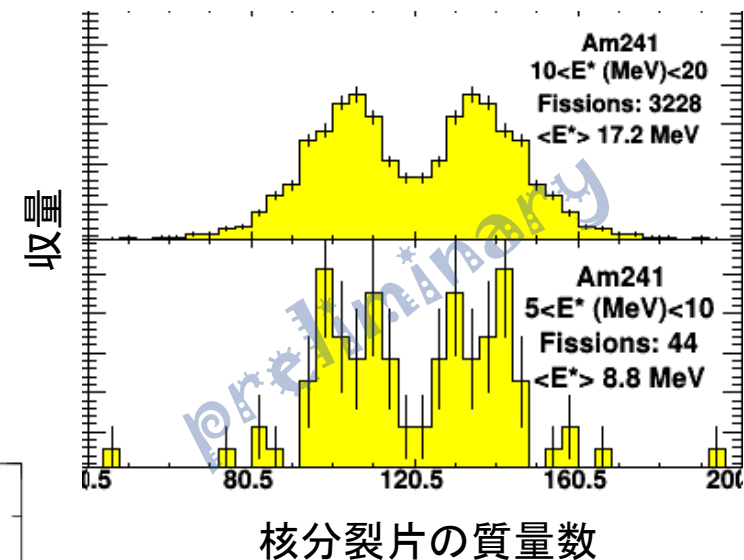


核分裂片の平均質量の系統性
※実線は実験値の系統性

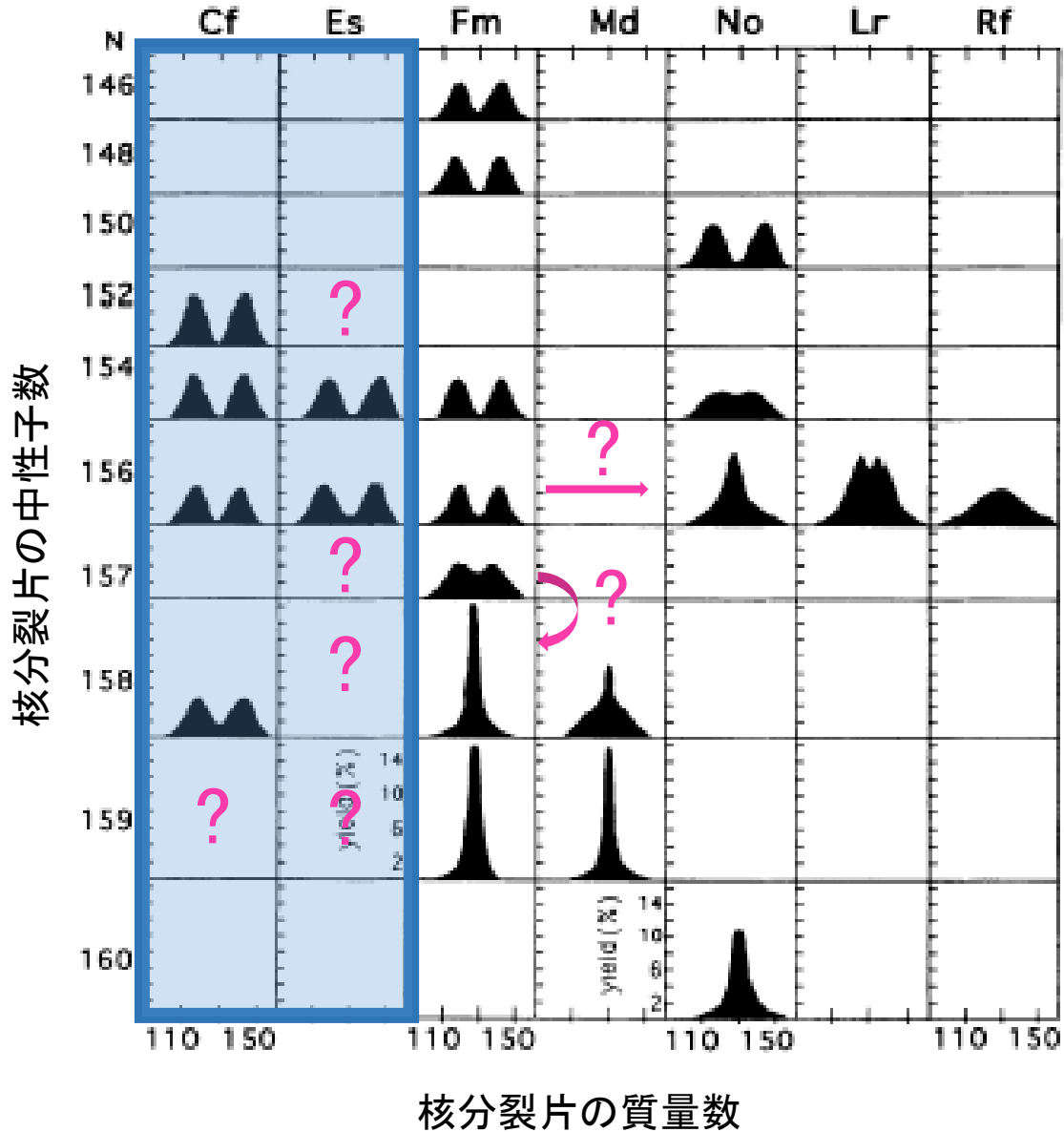


核分裂片の全運動エネルギーの
平均値における系統性

MA核変換・軽水炉廃止措置で重要な ^{241}Am の場合の実験データの例



重い核分裂片質量分布予想の難しさ



NやZの増加に伴う【ふた山】から【ひと山】への突然の変化

例) 中性子数増加に伴う変化

^{257}Fm (ふた山) \rightarrow ^{258}Fm (ひと山)

^{256}No (ふた山) \rightarrow ^{258}No (ひと山)

陽子数増加に伴う変化

^{256}Cf (ふた山) \rightarrow ^{258}Fm (ひと山)

^{256}Fm (ふた山) \rightarrow ^{258}No (ひと山)

核分裂質量収率ピーク変化のメカニズムは未解明

TKEや変形度、ポテンシャルなどの詳細な分析が必要

書面審査委員コメント

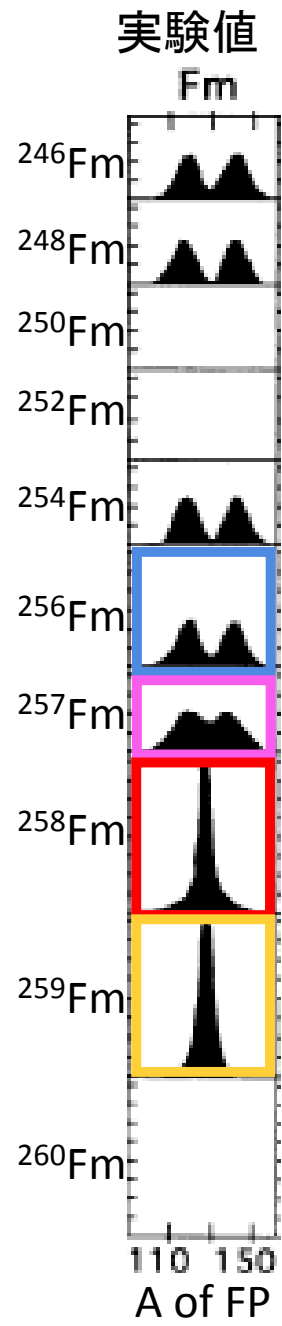
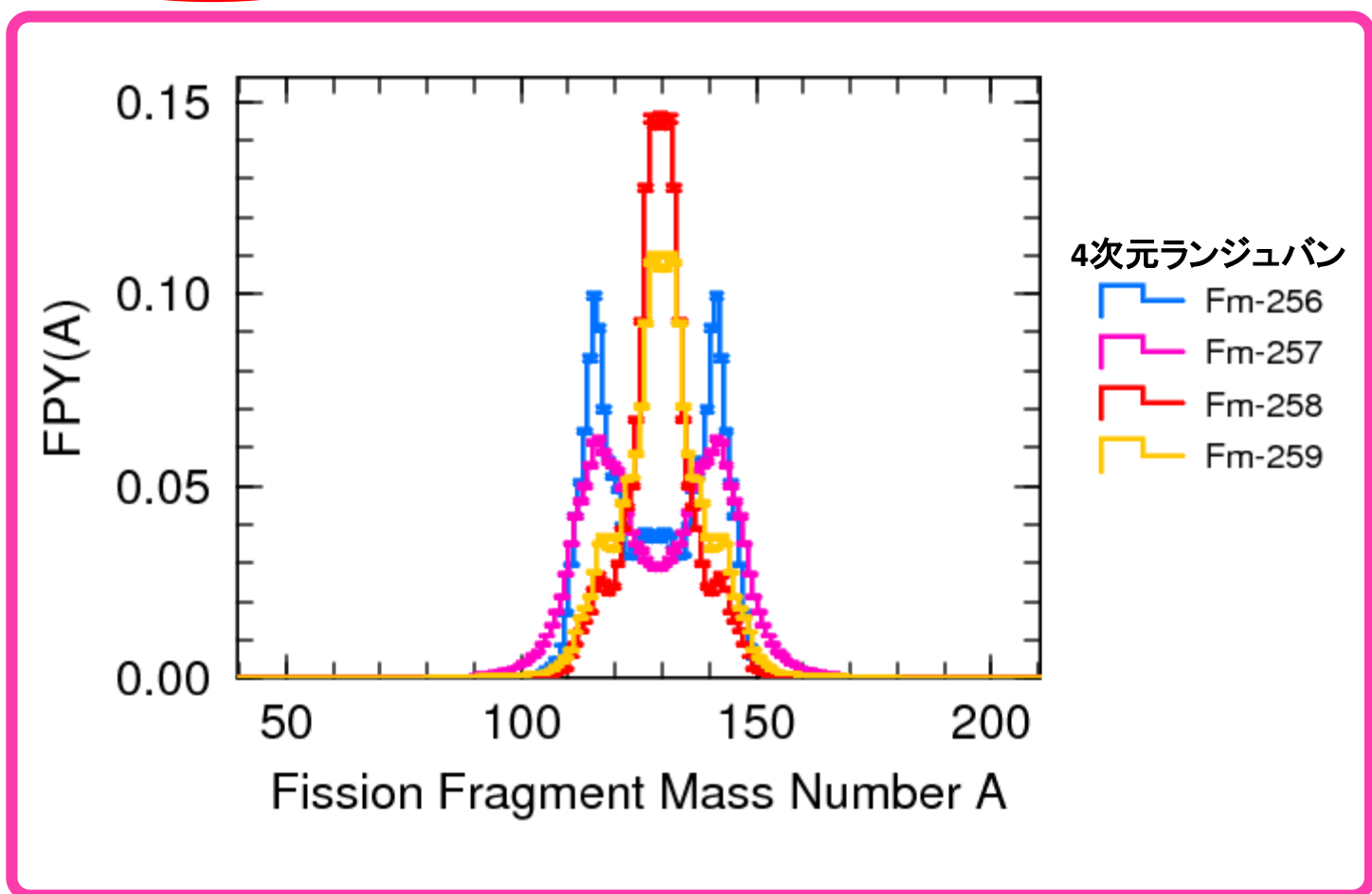
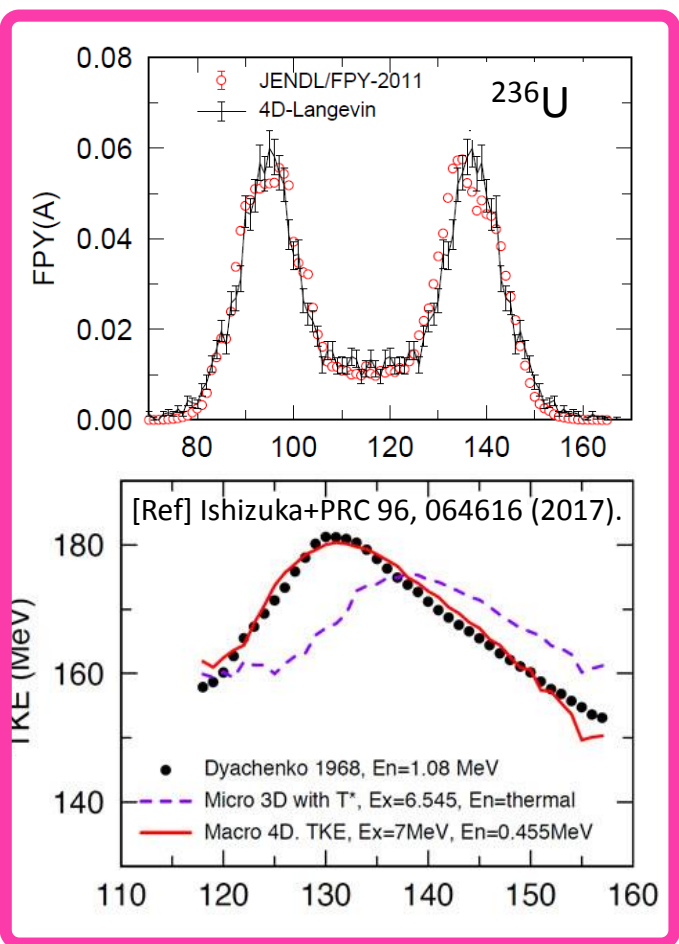
親核の違いにより突然二山分布と一山分布との間で移り変わるメカニズムを探ろうと、ランジュバン方程式によるシミュレーションを行おうとしている。

このシミュレーションは質量数分布の再現性が良いと述べているが、実際どの程度なのか？

核種の違いで分布が突然変化する状況の再現性は、ここでは一番重要なのに全く明らかにしていない。

一山と二山の移り変わりが実験と同じ核種で再現できなくとも良いので、どこかで移り変わる事が再現できれば定性的な議論は可能。再考をお願いしたい。

核データで要求される精度で定量的に議論したい



計画変更

【当初の研究計画】

$E^* = 5 \sim 10 / 10 \sim 20 / 20 \sim 30 / 30 \sim 40 / 40 \sim 50 / 50 \sim 60 / 60 \sim 70 / 70 \sim 80$ MeV

236,237,238,239,240Np

238,239,240,241,242Pu

240,241,242,243,244Am

242,243,244,245,246Cm

244,245,246,247,248Bk

246,247,248,249,250Cf

30の原子核の核分裂を
8つのエネルギービンで計算

【変更後の研究計画】

質量数分布ピーク構造の変化を再現できている【Fm】や
質量数分布を高精度で再現できている【U】を主軸に順次展開

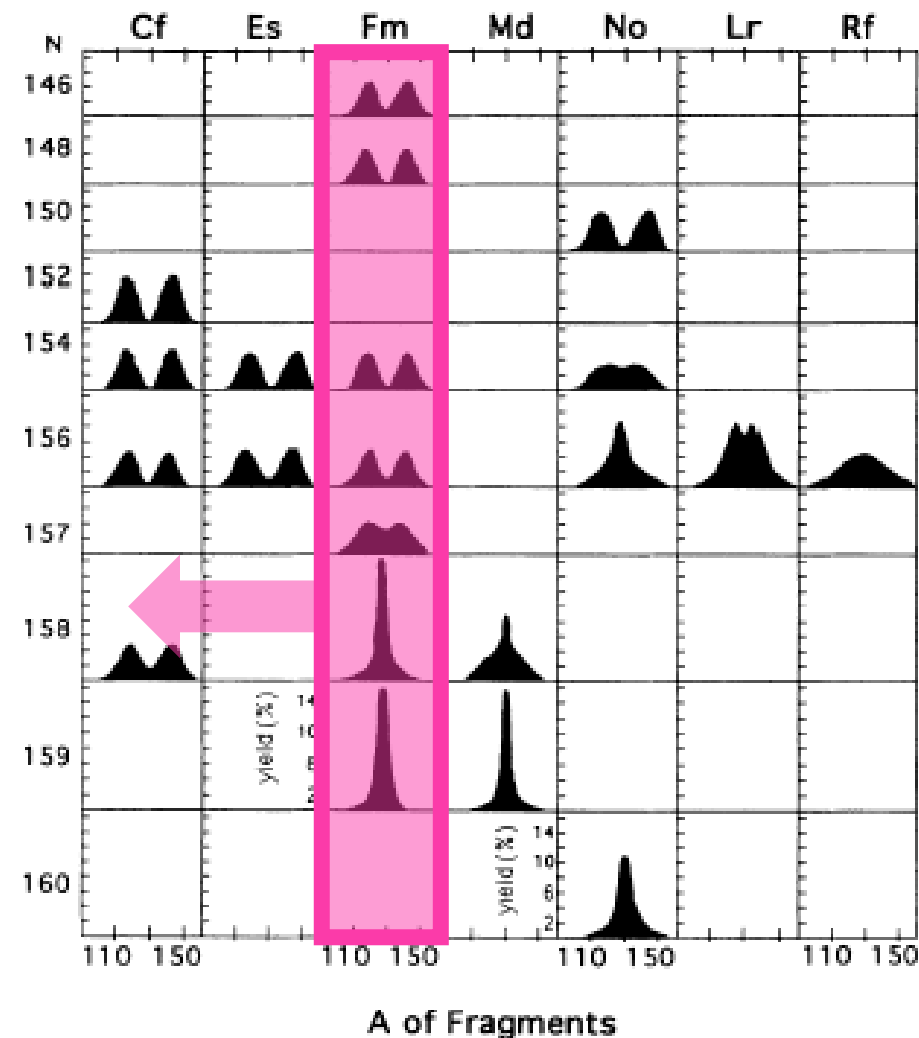
① $E^* = 0 \sim 10$ MeV

253,255,256,257,258Es

246,247,248,249,250,252,254,255,256,257Cf

新しい実験データ

② 様々な励起エネルギーでのNp, Pu-isotopes

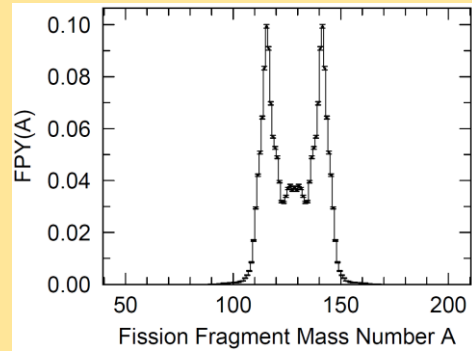


廃止処置で高精度の核分裂核データが要求されている元素

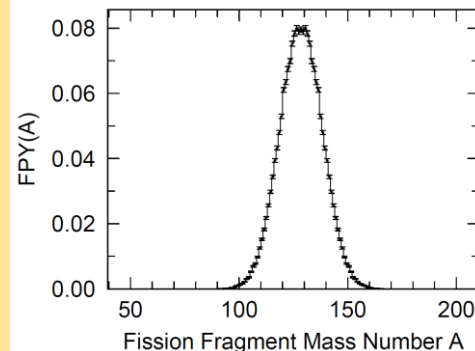
57~71	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
ランタノイド*	ランタン 138.9	セリウム 140.1	プラセオジウム 140.9	ネオジウム 144.2	プロメチウム (145)	サマリウム 150.4	ユウロピウム 152.0	ガドリニウム 157.3	テルビウム 158.9	ジスプロシウム 162.5	ホルミウム 164.9	エルビウム 167.3	ツリウム 168.9	イッテルビウム 173.0	ルテチウム 175.0
89~103	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
アクチノイド*	アクチニウム (227)	トリウム 232.0	プロトアクチニウム 231.0	ウラン 238.0	ネプツニウム (237)*	プルトニウム (239)*	アメリシウム (243)*	キュリウム (247)*	バークリウム (247)*	カリホルニウム (252)*	アインスタイニウム (252)*	フェルミウム (257)*	メンデレビウム (256)*	ノーヘリウム (259)*	ローレンシウム (260)*

励起エネルギーの上昇に伴うマルチチャンス核分裂の寄与の増大

1st chance fissionの場合



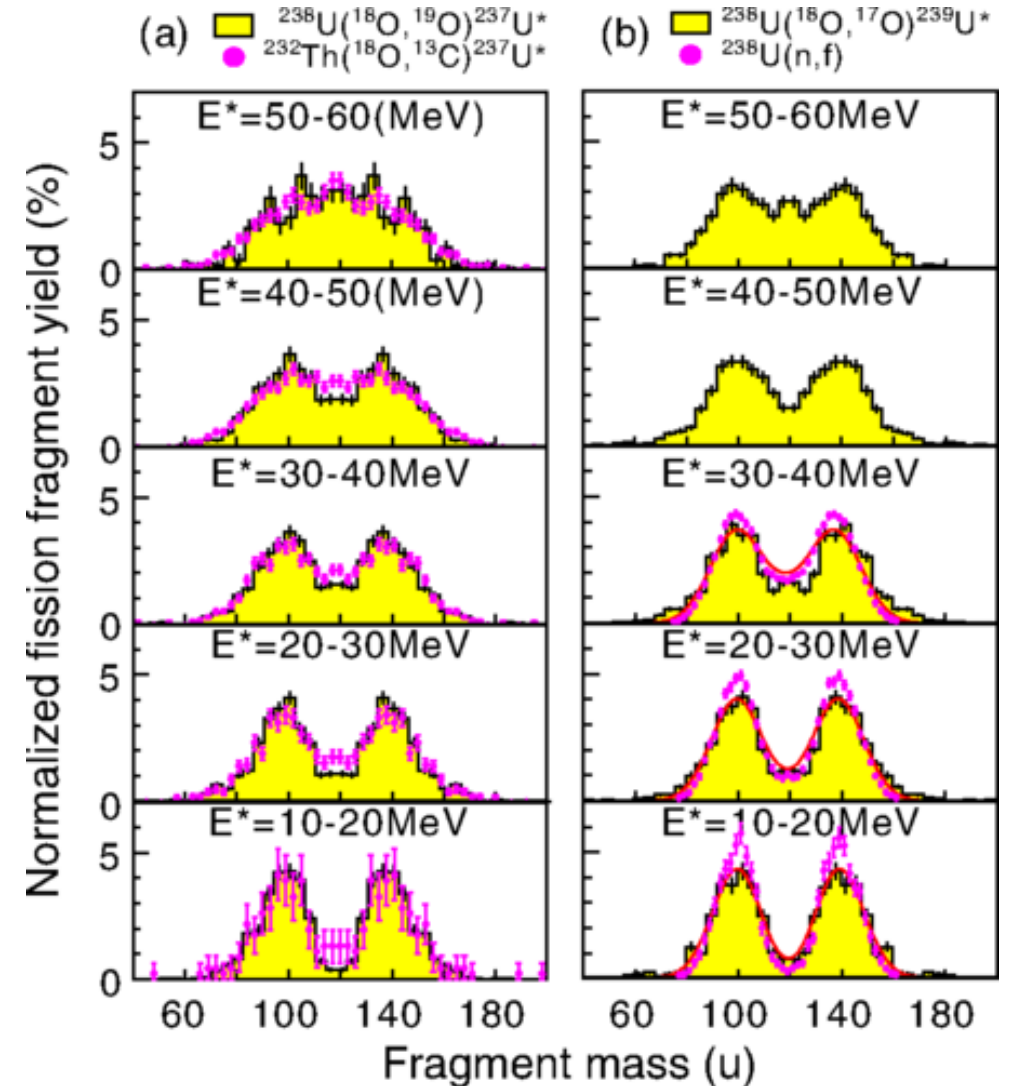
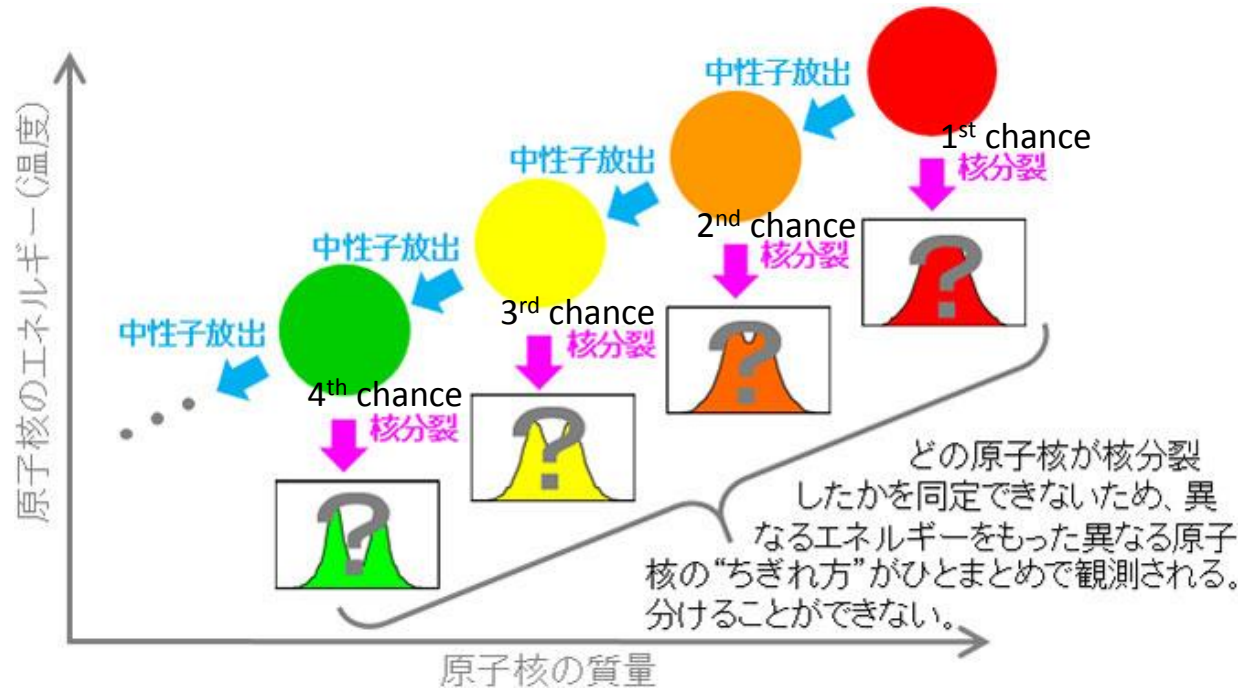
低E*では殻効果が支配的



高E*では液滴模型に従う

^{237}U $E^*=65\text{MeV}$ の核分裂質量収率には
同じエネルギーの $^{234,235,236}\text{U}$ の計算結果も必要

実際の実験ではmulti-chance fissionのために高E*でも【ふた山】



書面審査委員コメント

ランジュバン計算によって、現象論的4次元模型を用いた核分裂現象の解析を目指した新規プロジェクト。モチベーションは理解できるが、計算時間の評価がPCクラスタの計算時間に基づいており、かなり荒い見積もりのように思われる。

準備計算の計算環境

Intel® Xeon® CPU E5-2650 v4 @ 2.20GHz
24コア Memory 256GB



シングルコアあたりの性能は同等とみなせる

COMA

Intel® Xeon® CPU E5-2670v2 @2.50GHz x2
20コア Memory 64GB

一つの核の核分裂

①ランジュバン計算のための準備計算

4次元ポテンシャル : シングルプロセスで12ノード時間 ※モジュールやサブルーチン毎にはCPUを割当てない

4次元巨視的輸送係数: シングルプロセスで168ノード時間

合計: 180ノード時間必要

②4次元ランジュバン計算

$E^*=10\text{MeV}$ 以下で1st chance fissionだけの場合: シングルプロセスで500万イベントに最低でも120ノード時間

各計算でMemory 最大2GB使用 【要求される精度を出すには統計数が更に必要】

計算ディレクトリを分割等で複数のジョブを同時に投入可能⇒スパコンによる大規模計算の効率が高い

まとめ

● アクチナイド核分裂の系統的理論計算の重要性

- ・アクチナイドの低エネルギー核分裂核データの高精度化は重要な課題
- ・低エネルギーアクチナイド核分裂は実験で十分な精度を出すのが非常に困難
- ・核データを高精度化するには実験を良く再現し、実験値のない領域を予言できる理論が必要

● COMAでの計算の必要性

- ・核データで要求される精度を計算で出すためには【十分な統計をためることが必要不可欠】
- ・重いアクチナイドでは核分裂質量収率が【ひと山】から【ふた山】に突然変化するが、そのメカニズムは未解明⇒【大規模計算による系統的調査】が必要
- ・励起エネルギーが上がるとマルチチャンス核分裂の寄与の検証が重要課題となるが、そのためには【1つの核に対して多数のアイソトープの核分裂計算】が必要となる。

● 計画の変更

- ・当初計画: 30種の核に対して各々8つの励起エネルギーで核分裂の計算をする
- ・変更後: これまでの準備計算で実験の再現性が明らかな核を主軸に実験データとの整合性を検証しつつ、計算対象核種および励起エネルギーを順次増やしていく

● 申請した計算時間の見積り根拠

- ・クラスターPCによる見積りだが、単体CPUでの見積りであるため、その面での誤差は少ない
- ・モジュールやサブルーチンごとの並列化ではないため、並列化効率が非常に高い