

核データ部会・「シグマ」特別専門委員会合同企画セッション

(2) 核分裂研究の現状と課題

日本原子力研究開発機構

岩本 昭

iwamoto.akira@jaea.go.jp

1. はじめに

核分裂の発見は 1938 年 12 月、O. Hahn と F. Strassmann がウラニウムの中性子照射による実験で、核分裂生成物であるバリウムのアイソトープを観測したことに始まった。O. Hahn の長年の共同研究者であり、当時ナチスを逃れてスウェーデンに亡命中であった L. Meitner にこの報が伝えられると、たまたまコペンハーゲンからクリスマス休暇で帰省中の甥の O. Frisch と共に、すぐに核分裂の概念を得るに至った。そしてその後 1 年以内に 100 編を超す論文が発表され、瞬く間に核分裂の概念が確立された。1939 年 9 月に出版された N. Bohr と J. Wheeler の論文は、核分裂の概念を模型として完成させたもので、変形に対する安定性より核分裂障壁の高さを評価して、自発核分裂及び励起状態からの核分裂幅の計算法を与えている。つまり最初の 1 年間の間に、現在まで 70 年間続く核分裂研究の土台が確固として確立されたことになる。

70 年たった今、我々は今後何をなすべきかを考えるにあたり、私の守備範囲である基礎研究の理論を主体とした現状の分析を行い、併せて核データとしての核分裂の今後の展望を目指すことを目的としてこのまとめを行ったものである。しかしながらあまりにも広い分野であるので、現状の分析はほとんど私が興味を持っている幾つかのトピックスを議論することに終始せざるを得なかった。また核データに関しても、基礎研究として今後どのように核データに貢献しうるかに関する私見を述べるにすぎないことを、前もってお許し願いたい。

2. 超重核合成研究から核分裂研究へのインパクト

1980 年代に入ってから、超重核の研究は $Z=107$ 番のボーリウムから $Z=112$ 番元素に至るまでの新元素が、ドイツの GSI における冷たい核融合反応で合成されたことにより非常に活気ある研究分野となった。ここでいう冷たい核融合反応とは、Pb または Bi をターゲットとして、入射粒子としては Fe, Ni 領域核を用いる核融合反応であり、その特徴は Q-value の関係でクーロンバリアーすれすれの入射エネルギーの場合には、合成後の複合

核の励起エネルギーが極めて低く、その結果複合核より放出される中性子は 1 個程度になる反応である。同じ種類の実験で、我が国の理化学研究所で $Z=113$ 番元素が 2 例見いだされている。一方、ロシアの JINS 及び米国バークレーリバモア研究所に於いては、以上に述べた元素で GSI とは違うアイソトープ、及びさらに重い元素の合成が熱い核融合反応により行われており、現在 $Z=118$ 番元素までの合成が報告されている。ここでの熱い核融合とは、アクチノイド核種を標的として、Ca の中性子過剰アイソトープを入射粒子とするもので、前記の冷たい核融合反応に比べて高い励起エネルギーの複合核を合成して、そこから 4~5 個程度の中性子放出をさせた後の残留核として新元素を合成する手法を指す。そして現在、これらの重元素のうち、 $Z=111$ 番のレントゲニウムまでの命名が国際機関により承認されている。以上に述べた超重核合成の現状については、文献 (1, 2) 等を参照願いたい。

超重核合成過程を単純に考えると、標的核と入射核とが複合系（複合核ではない）を構成する段階、この複合系が複合核形成に至る過程、及び複合核が核分裂や中性子放出などのチャンネルとの競争過程の中で蒸発残留核として超重核が生き残る過程の 3 段階で生じると考えられている。これらのうちで第 1 段階と第 3 段階は一般の重イオン核融合反応でも遭遇する過程であり、超重核に独特のものではないと考えられる。しかし第 2 段階に関しては、軽い核の融合とは異なる側面が生じ、これを示したのが図 1 である。すなわち軽い重イオンの核融合では、入射チャンネルのクーロン障壁の位置が、複合核の核分裂障壁の位置よりも内側に来る。このため、入射チャンネルのクーロン障壁を通過してきた事象は、ほぼ確実に複合核形成へ向かうことが期待できる。しかるに非常に重い系では、2 体系のクーロン障壁の位置が、複合核の核分裂障壁よりも外側に位置するために、たとえ入射チャンネルのクーロン障壁（2 体場としての障壁）を乗り越えても、その内側に核分裂障壁（1 体場としての障壁）が存在することにより、そちらの障壁で跳ね返されて複合核形成に至らない場合が生じる。この事情はエキストラプッシュと呼ばれる現象とも強く関連しているが、超重核合成に関しては非常に重要な役割を果たす。

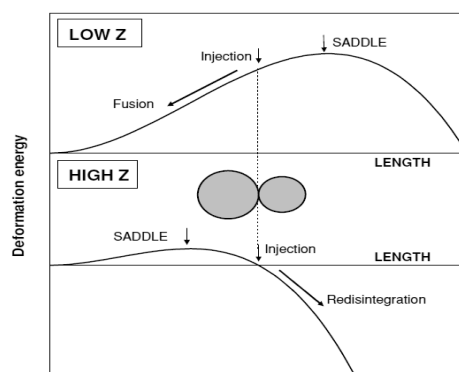


図 1

物理的にはこの現象は、標的核と入射核の動的な変形の効果、及びそれらの内部励起の効果を取り入れて計算する必要があり容易でない。動力学的効果をまともに取り入れて計算するランジュバン方程式等を用いた計算も多くなされているが、2体場と1体場との双方の効果を取り入れての計算法はまだ確立されていない。エキストラプッシュの概念の生みの親である W.J. Swiatecki 達による計算模型 (文献3) では、この内側の障壁 (これまでの記述では核分裂障壁と同一視していたが、内部励起や動的変形の効果もあり、必ずしも核分裂障壁そのものとはいえない) を現象論的に仮定した上で、この障壁を熱励起により乗り越える確率を拡散方程式で解いている。超重核領域の残留核断面積が既に測定されているものについて良い再現性を示すとともに、新規反応系の断面積の見積もりにも役に立つ模型となっている。一方私たちは、冷たい核融合の現象の特異性に興味を持ち、この系での1体場のポテンシャルエネルギーの詳細な計算を行った (文献4)。この中で見いだされたことは、ほぼ球形の Pb 領域核と大きくラグビー球的に変形した Fe-Ni 領域核との2体場的な配位に対応するポテンシャルの谷筋の経路が、1体場ポテンシャルの中に存在することである。すなわち標的核と入射核が接触する段階で入射核が動的に大きく変形して、1体場の複合系となった後にもその配位が安定に存在しうることを示した。すなわちこの研究では、入射2体場とその後の1体場とが、冷たい核融合反応の場合にはスムーズにつながることを示したもので、複合核形成に至る過程にも、核分裂ポテンシャルの様な1体場の考察が必要であることを示している。

以上述べたように、超重核合成の物理に関しては入射チャンネルでの2体場と、その後形成される1体場の繋がり、おおざっぱにいうと核融合ポテンシャルと核分裂ポテンシャルの繋がり具合が重要な役割を果たすことが示唆されており、今後この方向での研究の進展が期待される。

3. 核分裂ポテンシャル計算の課題

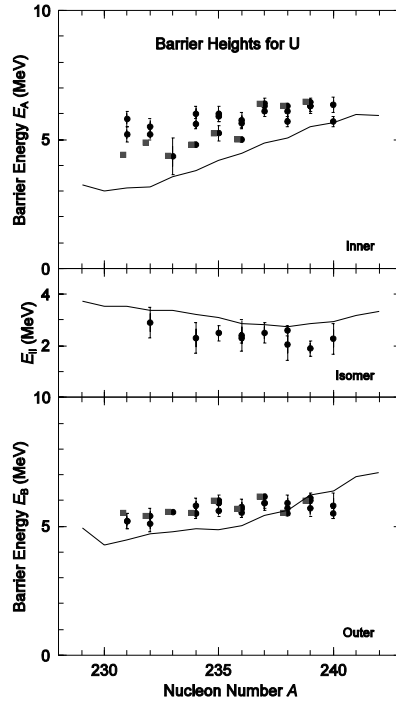
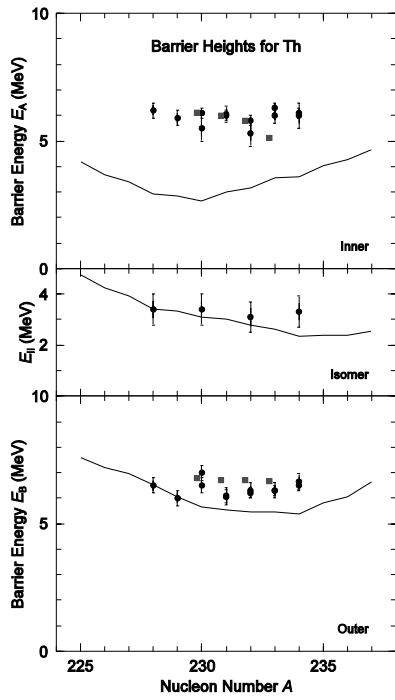
核分裂の計算法、特にポテンシャルエネルギーの計算法の発展に関して、米国での新たな動きが注目されている。それは SciDAC (Scientific Discovery through Advanced Computing) のプログラムの中に、G. Bertsch をキャップとする UNEDF (Universal Nuclear Energy Density Functional) と呼ばれるテーマが動き出したことである。このテーマは15の参加機関、約50人の参加者を擁して、年間予算\$3 Million で5年間のプロジェクトとしてスタートしている。この計画では、エネルギー密度汎関数を用いることにより、非常に軽い核 (厳密な多体論の数値解法)、中重核 (殻模型による配位相互作用による計算) 等で到達できるよりさらに重い核を計算することを目的としている。この中に核分裂に関するテーマが目標の一つに定義づけられており、Pathway finder, Action minimizer, Real time propagation, Imaginary time propagation 等が開発目標とされている。

このエネルギー密度汎関数の手法は Hohenberg-Kohn 理論 (文献5) をその根拠としてい

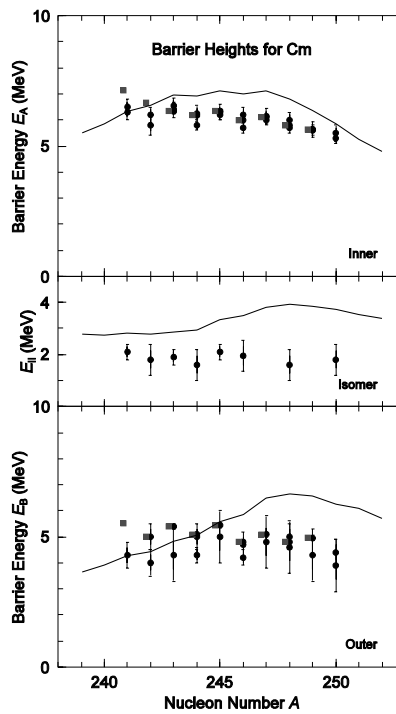
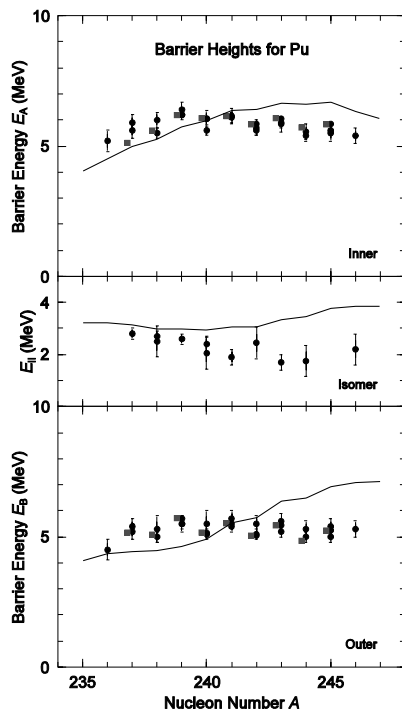
る。この理論は、座標の各点で定義される密度の汎関数として、シュレディンガー方程式の基底状態のエネルギーは書けることを保証したもので、古くは Thomas-Fermi 模型などもこの形を取っている。ただこの定理は近似解ではなくて厳密解の存在を保証するのであるが、この密度の汎関数の形は具体的には与えられない。よってこの手法で計算するためには具体的な近似が必要となるが、その代表的なものが Kohn-Sham 方程式と呼ばれるものである (文献 6)。この方程式に出てくる量は既に多粒子ではなく 1 粒子に対する物理量に変換されており、その交換ポテンシャル項を近似的に計算することにより、具体的な計算ができるようになっている。その意味でこの段階では Hartree-Fock (HF) 方程式といった手法と形式的には似たものとなっている。対応関係としては、HF の平均場が 1 粒子密度、ゼロレンジ相互作用が局所密度、有限レンジ相互作用が勾配項、と考えられる。

手始めに、様々な有効相互作用を用いた HF 計算や Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 計算などが盛んに行われており、核分裂ポテンシャルの計算にも constraint HF (制限付き HF 法) や constraint HFB (制限付き HFB 法) などが盛んに応用されている。ただここで、制限付き自己無撞着法による計算の落とし穴について注意を喚起したい。それは局所的な極小点などを求める場合には生じない問題であるが、核分裂で重要になる核分裂障壁の計算で特に問題となる。核分裂障壁は鞍点であり、鞍点はその数学的な定義により一般には多次元集団変形空間で、ある一方向のみで極大となり、その他の独立な方向についてはすべて極小となっている。この条件を満たす点をどのように求めるかの問題である。この問題はかなり複雑で非常に込み入った考察が必要であり、その内容をここでは議論できない。しかし制限付き自己無撞着法で計算される鞍点が時として本当の鞍点にならないことがあり、特に核融合経路と核分裂経路とが共存する領域でそれが起こることの考察が、文献 7 の Appendix A でなされており興味のある方は参考にされたい。

これに比べると、Strutinsky 法による我々の計算は鞍点の求め方に於いては、自己無撞着法より安心して使うことができる。しかしながら何れにせよ、少しでも精密に核分裂障壁を求めるため必然的に多次元にならざるを得ない状況で、計算に用いた集団変形パラメーターすべてを用いて鞍点を求めることは容易ではない。この点で、我々が多次元用に開発した imaginary-water-flow 法 (文献 8) は、この困難な数値計算にうまく対応したものであるといえよう。この手法を用いて計算した、5 次元集団変形空間の鞍部点の直接計算の結果の一部を、図 2 及び図 3 に示す (文献 9)。図では各々、内側の障壁、第 2 極小点、外側の障壁、各々のエネルギーを、各々の核の基底状態から計った理論値 (実線) を実験値とともに示している。全体として、計算は 1~2 MeV 程度の精度で実験値を再現している。



☒ 2



☒ 3

4. 核分裂幅計算の課題（ポテンシャル以外）

ポテンシャル以外にも様々な課題が残されている。一つの大きな課題である、質量分布の計算については次章で取り上げるとして、それ以外の残された課題を簡単に箇条書きの形で文献の引用なしに触れてみよう。

- 1) 前章で多次元集団変形空間での鞍部点の同定の困難さを述べたが、imaginary-water-flow法を用いると実に多数の鞍部点が見出される。もちろんエネルギー的に低いものほど重要であるが、場合によっては重要な鞍部を通過した後に、下り坂の途中で生じるような鞍部点もあり、これらの重要度はさほど高くないと思われる。このように多数の鞍部点から重要なものをいくつか選ぶことには、意外に困難が伴う。
- 2) 自発核分裂の計算に決定的に重要な物理量が、ポテンシャルエネルギーと並んで、集団変形変数に付随する慣性テンソルがある。この慣性テンソルの計算が非常に問題である。現象論的には、非圧縮非回転性の液滴模型による値を計算して、それを10~20倍に増やして使うことなどが行われている。このファクターの値は、液滴模型で計算した原子核の低い集団的な励起状態と実験値との比較から、液滴模型の慣性テンソルを10~20倍に増やす必要があることと対応はしている。しかしながら、より微視的な模型、例えばクランキング模型とか時間依存 HF (TDHF) 等による計算が期待されるが、少なくとも系統的な研究はされていない。ポテンシャルに関しては殻構造の影響が顕著な貢献をすることが分かっているので、慣性テンソルに関しても殻効果が強く働くことが予想されている。しかしこの慣性テンソルへの殻補正の計算法などは全く手つかずの状態であるといっても良い。
- 3) 励起状態からの核分裂に関して重要な物理量に状態密度がある。特に、基底状態での状態密度と、核分裂障壁に於けるそれとでは、状態密度のパラメータに違いがあっても不思議はない。実際、実験データの解析に於いては、多少違ったパラメータを用いて解析が行われるのが普通である。問題は、理論的にこの違いを出すことができるかどうかである。各々の変形に於ける1粒子準位を用いた計算もされているが、それ以外の不確定さ、特に集団励起の順位密度への寄与であるとか対相関の寄与また温度に依存する殻効果の寄与などが、変形状態に応じてどのように変わるかなどが明確ではなく、純理論的に実用に堪える値を出すことは現在のところできていない。
- 4) 多次元集団変形空間に於ける、核分裂経路の決定に関しても問題が残る。半古典論模型に従えば最も生じやすい経路は、負エネルギー領域の有効作用積分の値を極小にするように決まっているはずである。よってこの作用を極小にする経路を決定する必要

があるが、多次元の場合にはこの計算が容易でない。計算テクニックとしては、これを求める A. Schmid の手法などが知られているが 2 次元以上の空間での実計算は行われていない。よりプリミティブに格子空間での作用を計算することなども古くより行われているが、最近に至るまで特段の進展には繋がっていない。

5. 核分裂での質量、荷電分布

核分裂で最も特徴的な観測量の一つが、質量・荷電分布である。核分裂の発見当初から注目を集めていたこの物理量が実際に理論的に計算できるかという点、これがすこぶる難しい。現在のところ、実用的にこれを計算できるモデルは存在しないと考えたほうが良い。しかしながら現在に至るまで数多くの理論モデルが提案されてきた。ここではこれらのうちで代表的なものを取り上げ、そのモデルの持つ問題点などを検討することとする。これらどの一つをとっても長い歴史があるために、各々の分野の引用文献を挙げるときりが無いので、ここでは議論に最も関係する 1~2 の文献しか引用しないことを前もって断りたい。

1) 統計モデル

このモデルでは、質量・荷電分布は、分離点 (scission point) での統計的な性質により決定されると考える。当初の P. Fong のモデルに於いては (文献 10)、集団変数と内部励起とを含めた全系に対して熱平衡が達成されているものと仮定したのに対して、後の B.D. Wilkins 達のモデルにおいては、この仮定を拡張して集団変数と内部励起とが別々の温度を持ちうると仮定した (文献 11)。このモデルはその簡明さに魅力があるものの、理論的にはそもそも分離点における統計平衡仮定そのものの妥当性に関して疑問がある。別の問題として、後に述べるほとんどの分離点を導入するモデルと同じく、分離点の配位がそもそも理論的には決定できないために恣意的とも見られる仮定をおかざるを得ず、その配位で仮定する統計平衡の妥当性を議論すること自身が困難である。数値計算の結果として得られる質量分布に関しては、アクチノイド核の非対称核分裂の定性的特徴を再現することができるが、分布の幅に関しては良い結果を与えていない。

2) 遷移状態 (Transition State) モデル

R. Nix (文献 12) や R.W. Hasse (文献 13) は核分裂障壁での統計的な分布によって、質量分布が決定されると仮定して、温度による集団変形座標 (この場合には 2 つの分裂片の質量比) の極小値の周りの揺らぎを計算してこれを質量分布の幅に対応させるモデルを提案した。Nix のモデルと Hasse のモデルの違いは、後者では単純化された仮定の下での殻効果導入により、非対称分裂を計算することを狙った。このモデルは、核分裂障壁 (鞍点) という数学的にもはっきり定義された変形での物理量を計算することになるので、その

点で、前節で扱った分離点での模型に比べて理論として優れている。しかし当時は、いわゆる殻補正エネルギー (V.M. Strutinsky) の計算手法がまだ提案された直後であったため、殻効果を含めた核分裂障壁の決定そのものに大きな問題があった。しかしこの点はその後の計算機及び計算技術の発展により容易に解決できる問題であるが、最大の問題は、Nix の計算では質量分布の幅が実験値に比べて系統的にかなり小さいことである。また Hasse の計算では非常に簡単な殻補正を行ったため、質量分布の中心も実験値とは大きくずれたものになっている。これらの欠点は核分裂障壁での質量分布の揺らぎだけでは質量分布の幅が計算できないことを示している。

3) 破碎 (Fragmentation) 理論

上記 2 節の模型が (殻効果を除いて) 古典論に基づいた模型であることに対して、この破碎理論 (高エネルギー核反応で生じる核破碎反応とは無関係) はフランクフルト大学を中心に開発された核分裂に対する模型で、核分裂片の質量比という集団変数に対するシュレディンガー方程式を解くことにより質量分布を計算する模型である。その基本的な考え方は、核分裂の分離点よりやや内側の適当な変形状態を設定して、そこで核分裂片の質量比に対する集団変数座標に対する 1 次元のシュレディンガー方程式を解き、質量比に対する波動関数を求め、その絶対値の 2 乗を観測される質量分布と対応させるものである (文献 14)。この模型による当初の計算では、非対称分裂核について、その分布の幅は系統的に実験値よりも小さくなっており、その点では前節の模型と同様である。分離点付近で準定常状態が本当に実現されるのかの理論的な問題が不明であると同時に、またこの模型は分離点での統計模型と同様に、そもそもの計算に用いる分離点付近の変形の決め方が非常に恣意的であるという問題点がある。

4) Random Neck Rapture 模型

上記の種々の模型が、決定論的方程式または統計的状态数の計算により核分裂の質量・荷電分布を求めているのに対して、この模型では分離点直前の配位を仮定した上で、長く伸びたネック部分が、ある確率分布に従って切断されるという模型である (文献 15)。前述した幾つかの模型との違いは、流体力学的な不安定さを原因とした揺らぎによって質量分布の幅を計算するという点で、独自の非定常状態をベースとした模型になっていることである。核分裂障壁と異なり、分離点付近である種の統計的な平衡が成り立っているという上記 1) や 3) の模型には理論的なサポートが難しいという現実を考えると、理論的には簡明である。しかしながらこの模型に於いても、ある特別な配位を仮定しておりその形に関しては現象論的に実験値をあわせるように選ぶ点などにおいては、1) や 3) と同様な問題を抱えている。現象論であるが、幾つかの配位の重ねあわせを仮定するマルチモード模型においては、実験の質量分布を良く合わせる事が出来る (文献 16)。

5) 最近の幾つかの模型と今後の課題

近年、制限付きの HF 法や HFB 法などによる核分裂ポテンシャルの計算がされつつあることは前述した。この流れの中で注目される計算の一つに、H. Goutte 達による ^{238}U の核分裂の研究がある (文献 17)。ここでは HFB 法により、4 重極変形及び 8 重極変形 2 つの変形パラメーターに対する 2 次元のポテンシャルエネルギーが計算されている。このポテンシャルを用いて、時間に依存する生成座標の方法 (Generator Coordinate Method) によりその質量分布が計算された。数値計算の結果は、例えば従来の破砕理論 (文献 14) の結果に比べて質量分布の幅が有意に広がり、実験値との対応も良くなっている。今後、より系統的な計算に則した実験値との比較が待たれる。

この点で、重アクチノイド核に見られる特徴的な現象である 2 重モード核分裂 (bimodal fission) 領域の現象が、上記の模型で再現可能かどうか興味深い。この領域では、自己無撞着な扱いと殻効果の適切な組み込みが要求される。例えばこの領域での典型的な論文として L. Bonneau による制限付き HF-BCS 模型による計算 (文献 18) を見ると、ポテンシャルエネルギー計算には確かに二つのモードに対応する構造が見られる。しかしながら前述したように、鞍点領域のポテンシャルの構造を制限付きの自己無撞着模型で計算することに起因する問題点が生じて、二つのモードのつながり具合が明確には求まらない。おそらくこのことに起因して、高エネルギー成分として観測される対称核分裂の質量分布の幅については、実験値との対応に大きな問題がある。この難しい課題に関して、最近我々は波動関数に立脚した殻補正模型により、非常に鋭い対称核分裂の質量分布を再現しうることを示した (文献 19)。今後より進んだ取り扱いが待たれる。

6) 基礎理論は今後核データにどう貢献できるか?

以上述べたように、現状では基礎理論に多くの任意性があるために、実験値のない核種の核分裂を実用上要求される精度で予言できるかと問われると、ノーといわざるを得ない。もちろん現象論的な系統性で、ある程度の予想はできる。しかし例えば非常に重い核で見られるような、核分裂に対する高い sensitivity 等を考えると、一般にはこの方向も容易ではない。

一方、米国での密度汎関数法などの取り組みに見られるように、核分裂理論の新しい方向性が切り開かれる可能性も高まっている。しかしながら、非常に重い核も含めるとポテンシャルエネルギーが非常に複雑で多重の障壁などが生じるのみでなく、ポテンシャル以外にも質量テンソル等の問題もあることから、実用的な計算への途が簡単に開かれるとは思えない。求められることは、多重核分裂障壁 (いわゆる、二コブの障壁以外の、例えば対称と非対称に生じる別々の障壁なども加えたもので一般に多数存在) での有効作用極小の軌道をいかに実用的に決定することである。この点での実用的な計算手法を今後開発する必要がある。もう一つ私自身の経験から強く感じることは、核分裂障壁近

傍の問題点以外に、分離点付近の取り扱いに改革が求められることである。分離点では、1 体場が 2 体場に移るために、理論的に諸々の難しさが生じる。そもそも分離点の定義自身が数学的にはっきりしないこともあるが、ネックが切断する前後で何が起きるかは、量子力学的な多体系の相転移であることから難しい問題である。この領域での物理が質量・荷電分布などに大きな影響を与えていることはほぼ明白であるので、今までと違った理論の枠組みを開発する必要性を強く感じる。以上まとめると、多重障壁での作用極小軌道とその周りの揺らぎを実用的に計算する手法の開発、及び分離点付近の新しい理論の枠組みの開発、この二つが不可欠である。計算機的能力がここまで発達したのだから、今度は人間がその脳力を注ぎ込めば解決できない問題ではないと考える。

参考文献

- 1) S. Hofmann and G. Munzenberg, Rev. Mod. Phys. **72** (2000) 733.
- 2) Yu.Ts. Oganessian et al, Phy. Rev. **C70** (2004) 064609.
- 3) W.J. Swiatecki, K.S. Wilczynska and J. Wilcrynski, Phys. Rev. **C71** (2005) 014602.
- 4) T. Ichikawa, A. Iwamoto, P. Moller and A.J. Sierk, Phys. Rev. **C71** (2005) 044608.
- 5) P. Hohenberg and W. Kohn, Phys. Rev. **136** (1964) B864.
- 6) W. Kohn and L.J. Sham, Phys. Rev. **140** (1965) A1133.
- 7) W.D. Myers and W.J. Swiatecki, Nucl. Phys. **A601** (1996) 141.
- 8) P. Moller, D.G. Madland, A.J. Sierk and A. Iwamoto, Nature **409** (2001) 785.
- 9) P. Moller et al., submitted to Phys. Rev. C
- 10) P. Fong, Phys. Rev. **C10** (1974) 1122.
- 11) B.D. Wilkins, E.P. Steinberg and R.P. Chasman, Phys. Rev. **C14** (1976) 1832.
- 12) J.R. Nix, Nucl. Phys. **A130** (1969) 241.
- 13) R.W. Hasse, Nucl. Phys. **A128** (1969) 609.
- 14) P. Lichtner, D. Drechsel, J. Maruhn and W. Greiner, Phys. Lett. **45B** (1973) 175.
- 15) U. Brosa and S. Grossmann, Z. Phys. **A310** (1983) 177.
- 16) Z. Buyukmumcu and M. Kildir, Phys. Rev. **C74** (2006) 054613.
- 17) H. Goutte, J.F. Barger, P. Casoli and D. Gogny, Phys. Rev. **C71** (2005) 024316.
- 18) L. Bonneau, Phys. Rev. **C74** (2006) 014301.
- 18) T. Ichikawa, A. Iwamoto and P. Moller, Phys. Rev. **C79** (2009) 014305.