

会議のトピックス(IV)

## Fission2017 in TT

(核分裂に関する東京・東海ミニワークショップ)

2017年4月10～11日 東工大

東京工業大学  
科学技術創成研究院  
千葉 敏

[chiba.satoshi@lane.iir.titech.ac.jp](mailto:chiba.satoshi@lane.iir.titech.ac.jp)

### 1. はじめに

核分裂は原子力の基礎現象であるが、有限核子多体系の大振幅集団運動として未だに謎に包まれた物理現象でもある。そこでは複合核の形成から始まり、原子核の変形・振動による断裂点付近への遷移、断裂、そして即発中性子・ $\gamma$ 線の放出と引き続く核分裂片の $\beta$ 崩壊など、多くの現象が複雑に絡み合っており、その全容理解には多角的な視点が必要となる。本ワークショップは、米国ロスアラモス国立研究所の河野俊彦氏が東工大・千葉研究室に特任教授として滞在中のこの時期に合わせて、核分裂についての研究を活発に行っている東工大、ロスアラモス、IAEA、JAEA、ヨーク大学の研究者同士が核分裂研究の現状についての情報や専門知識、経験、さらには直面している問題点などを率直に交換し、国際協力の枠組みを作る糧として4月10日と11日にかけて東京で開催された。その後、一部の参加者は東海村に移動し引き続きセミナーや討論を行った。本稿では東京パートについての報告を行う。東京パートでは4月10日を発表の日とし、4月11日は主として議論の日とした。

本ワークショップは Fission2017 組織委員会、つばめラウンジ幹事会及び日本原子力学会「シグマ」特別専門委員会の共同主催にて東京工業大学・科学技術創成研究院・先導原子力研究所において開催された。

### 2. ショッププログラム

本ワークショップで行われたトークは以下の通りである。

1. Satoshi Chiba (Tokyo Tech.) (25+5)  
Opening and "Toward understanding of the whole process of nuclear fission: from compound nuclei to fission products, from fundamental aspects to applications"
2. Patrick Talou (LANL) (25+5)  
"Theoretical Developments in Nuclear Fission Research at LANL"
3. Shin Okumura (Tokyo Tech.) (10+5)  
"Are FF and FP mass distributions consistently explainable by prompt neutron emission?"
4. Roberto Capote (IAEA) (25+5)  
"New evaluations of Prompt Fission Neutron Spectra of actinides and associated data challenges"
5. Toshihiko Kawano (LANL/Tokyo Tech.) (25+5)  
"Prompt Neutron and Photon Emissions from Fission Fragments with the Hauser-Feshbach Theory"
6. Katsuhisa Nishio (JAEA) (25+5)  
"Fission study using multi-nucleon transfer reaction at JAEA tandem"
7. Andrey N. Andreyev (25+5)  
"Fission in the neutron-deficient lead region: the synergy of beta-delayed, Coulex-induced and fusion-fission methods"
8. Yoritaka Iwata (Tokyo Tech.) (25+5)  
"TDHF approach to nuclear fission"
9. Mark Dennis Usang (Tokyo Tech.) (25+5)  
"Status of the 4D Langevin calculation"
10. Tadashi Yoshida (Tokyo Tech.) (25+5)  
"Gross Theory Calculation of Antineutrino Spectra from Aggregate Fission Products"

まず、東工大千葉が本ワークショップのスケジュールと趣旨説明を行った後、理工学における核分裂研究の意義と未だに残っているいくつかの問題点について説明し、東工大におけるランジュバン模型と反対称化分子動力学による複合核から断裂点に至る部分の動力学模型による研究の現状について説明した。東工大のランジュバン模型は、微視的輸送係数を用いる3次元モデルから巨視的輸送係数を用いる4次元モデルに最近進化しており、1次元の違いがTKE分布に大きな差をもたらすことが示された。また、反対称化分子動力学による計算により、微視的な視点からBrosaのRandom neck-rupture条件の妥当性やCarjan-Capoteの断裂中性子放出条件の妥当性検証を行え

ることや、角運動量射影により核分裂片のスピ分布を導出可能なことが説明された。

続いてロスアラモスの Patrick Talou 氏からロスアラモスにおける核分裂の理論研究の現状が紹介された。主として Hauser-Feshbach タイプの計算に基づくが、核分裂断面積と核分裂片の角度分布、核分裂収率の中性子エネルギー依存性、即発中性子及びγ線放出のモデリングなどについて説明された。ロスアラモスの解析は核分裂中性子同士の角度相関など非常に詳細にまで踏み込んでおり、それらより核分裂片のスピ分布などについても間接的な情報が得られることが示された。ロスアラモスでは核分裂実験についても各種の装置が開発・整備されており、実験データと密接にリンクすることでモデル及びパラメータの精密化を図っていることが説明された。また、Arnie Sierk が行っている FRDM に基づくランジュバン計算についても簡単に紹介された。

東工大の奥村森氏は、断裂直後の核分裂片の分布(pre-neutron distribution)と、即発中性子放出後の分布(post-neutron distribution)の関係が現状の即発中性子放出モデルで説明可能かどうか、という問題について説明した。核分裂生成物の質量数分布は核データライブラリーや England-Rider の編集値に格納されているが、 $^{235}\text{U}$  や  $^{239}\text{Pu}$  の熱中性子核分裂生成物収率は  $A=134$  に強いピークを有する非対称の分布となっており、これが対称であるはずの pre-neutron distribution から導出できるのか、という問題である。即発中性子放出は  $(A,Z)$  に依存する河野氏の最新の計算値を用いているが、今の所 pre-neutron と post-neutron の質量数分布を整合的に説明できるには至っていない。これは Patrick Talou や Roberto Capote にもできないということであり、我々は未だに、 $^{235}\text{U}$  や  $^{239}\text{Pu}$  の熱中性子核分裂生成物の質量数分布の形状の起源すら理解出来ていない、ということが明らかとなった。

IAEA 核データセクションの Roberto Capote 氏は、主として IAEA の CRP 及び CIELO の一貫として行った  $^{235}\text{U}$  の即発中性子エネルギースペクトル評価についての講演を行った。これまで JENDL や ENDF/B では、低エネルギー領域のスペクトルは積分データを説明するために実験値より小さい値が採用されていたが、Capote の意見ではそれは間違いで、実験データを再現する高い値となるべきである、とのことであった。これはこの 3 月に卒業した千葉研究室の城島君が計算した結果とも非常に良く一致するものである。一方、高エネルギー側でもこれまでより高い値となるべきであるとのことである。CIELO では本スペクトルが採用されているが、他の断面積も適切に調整しているため、積分データとの非整合も無いとのことである。微分データを評価するにあたって、不完全な積分データの使用は結果を歪めることがあることが明確に示された。

ロスアラモス/東工大の河野俊彦氏は自身の開発した Hauser-Feshbach 模型コードによる核分裂の統計崩壊について詳細な解析の結果を示した。核分裂片のスピンの分布の設定方法、軽いフラグメントと重いフラグメントへの励起エネルギーの配分方法を決定し、その後は ENSDF などに含まれる核分裂片の構造データを取り入れつつ統計崩壊を丁寧に追いかける手法で、現在、世界で最も信用されている計算である。それにより(N,Z)依存の核分裂片からの中性子放出多重度や、その結果得られる  $\nu(A)$  の結果、即発  $\gamma$  線スペクトルの結果、それらの核分裂収率への依存性を議論すると共に、最近開発した Random Walk Model による核分裂片の質量数及び陽子数分布、断裂時の中性子及び陽子の密度分布等の重要な量を導出可能であることが示された。

JAEA の西尾勝久氏は、 $^{18}\text{O}$  ビームを使って行っている重イオン多核子移行核分裂研究の現状について説明した。この方法では一つのターゲットを用いて多くの複合核からの核分裂片の質量数分布の測定が可能であるが、ターゲットとしても数種類を用いることで非常に多くの核種についての情報を得ており、ピーク位置の系統性などについて新たな情報が得られている。今後はさらに重いターゲットを用いて、非常に良く議論の対象となる Fm 領域の核分裂片分布の測定を行う予定である。

ヨーク大学/JAEA の Andrey N. Andreyev 氏は、自身が発見した Pb、Be 領域中性子欠損核での核分裂の実験研究について講演した。方法は  $\beta$  遅延核分裂やクーロン励起核分裂である。またより高いエネルギーでの融合・分裂反応から、 $^{180}\text{Hg}$  領域核の非対称分裂が高い励起エネルギーでも生起することを示した。

東工大の岩田順敬氏は、時間依存密度汎関数法による核分裂研究の現状についてのレビューの後、自身が行っている摩擦係数導出についてのトークを行った。この方法ではエネルギーが高くなると摩擦係数が小さくなる傾向にあるが、それと他のモデルとの整合性などについての議論が行われた。

東工大の Mark Dennis Usang 氏は最近東工大で可能となった 4 次元ランジュバン計算についての結果を説明した。質量数分布や TKE 分布を示し、 $^{236}\text{U}$  領域の Standard 1,2 と super long モードの存在、 $^{257}\text{Fm}$  における Super short モードの存在を示し、TKE の系統性及び異常性をランジュバンモデルで説明できることが示された。

最後に東工大の吉田正氏が大局的理論による原子炉反ニュートリノスペクトル解析についての現状を説明した。これまでの理論計算では反ニュートリノスペクトルの高エネルギー部分が過大となっていたが、その原因が odd-odd 核からの  $\beta$  崩壊であり、

その部分のスピンの依存性から可能な崩壊モード（ガモフ・テラーv.s.1st forbidden）を注意深く選択し、さらに特定の核種については実験的に測定されている $\beta$ 線スペクトルから変換した反ニュートリノスペクトルを用いることで、以前の過大評価が大きく改善されることが示された。

翌4月11日は千葉研究室でフリーディスカッションを行った。

### 3. おわりに

核分裂は原子力の基礎でありながら、まだその全貌が理解されていない現象である。このため世界的には、逆運動学や $4\pi$ カウンター、核破碎+ISOLなど、新たな実験手法の開発により精力的な測定が行われるようになってきている。理論的にも動的計算や統計モデル計算が進展し、計算機パワーの増大と相まってこれまで不可能であった計算が可能となってきている。核データとして見ると、核分裂片の分布などはまだまだ不確定性が大きいので、国内でももっと核分裂研究の機運が盛り上がることを期待する。



研究会の様子



東工大本館前の桜の前で



evening session in 自由が丘