

## ▼ ▲ 会議のトピックス (II) ▲ ▼

# IAEA 原子炉ニュートリノ技術会議から見る原子炉ニュートリノ検出と利用技術の進展と核データ

元東京都市大学

吉田 正

[yoshida.gonneko@gmail.com](mailto:yoshida.gonneko@gmail.com)

## 1. はじめに

IAEA は崩壊熱総和計算のための核分裂生成核 (FP) 崩壊データに関わる専門家会議を 2005 年から数年おきに開催してきた [1]。そしてその延長線上で 2019 年 4 月に原子炉ニュートリノに関する技術会議が、11 か国 1 機関 35 人参加のもと、コロナ禍寸前のウィーンで開催された [2]。それから 4 年を経て人の移動も再開した今年 1 月 16 ~ 20 日、50 人以上の参加者を得て二回目の会合がハイブリッド形式で開催された。会議名称は “Nuclear Data Needs for Antineutrino Spectra Applications” であり、本稿で用いる図は全てこの会議のホームページ (HP) [3] で見ることができるので、本稿の参考資料はこの HP に即して作成した。しかし個々の発表の内容に興味を持たれる読者のために、当該発表に関連の深い雑誌論文をできるだけ “:See also ” として付記した。FP 崩壊熱と (炉心内で生成された FP の  $\beta$  崩壊で放出される) 原子炉ニュートリノは総和計算という観点に限ればほぼ同じ計算である。前者では各 FP の崩壊あたりの放出エネルギーが、後者では電子型反ニュートリノ  $\bar{\nu}_e$  の数とそのエネルギースペクトルが必要になるという点のみが異なる。両者が同じ現象 (生成 FP の集団挙動) の表と裏だからである。IAEA は原子炉の運転状態が原子炉建屋の外に置かれたニュートリノ検出器で監視できることから原子炉ニュートリノへの強い関心を堅持している。この二回の会議とも日本からの直接の出席者が筆者一人であったこともあり、日本の核データ分野の方々に原子炉ニュートリノ分野の進展を紹介しておきたいというのが本稿執筆の動機である。今回、筆者はリモート参加で、時差の関係から全ての発表を聞いているわけではないが、入手した発表資料を参照しつつできるだけ会議の進行順に紹介することとしたい。しかし 34 件の発表は全てに言及するにはあまりに多数である。そこで網羅的な紹介は諦め、この分野のおお掴みな紹介になってしまう点をご容赦頂きたい。

## 2. なぜ原子炉ニュートリノなのか

原子核を構成する陽子や中性子は基本粒子であるクォークから成る複合粒子である。基本粒子にはクォークはもとより本稿の主役であるニュートリノや電子をはじめいくつも種類が

あるが、標準モデルではこれらは“何故”か三つの「世代」に分かれていて、フレーバーと呼ばれる概念で区別される。ニュートリノは三つのフレーバーに対応して、電子型ニュートリノ  $\nu_e$  とその反粒子である  $\bar{\nu}_e$ 、ミューニュートリノ  $\nu_\mu$  (と  $\bar{\nu}_\mu$ )、タウニュートリノ  $\nu_\tau$  (と  $\bar{\nu}_\tau$ ) の三つに分類される。これらはフレーバーの固有状態としてのニュートリノである。一方、かつては zero mass であると考えられていたニュートリノが質量を持つことがやがて明らかになり、これにより質量の固有状態としてのニュートリノ  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  を考える必要が生じる。これらカテゴリーの異なる二種類の固有状態は  $3 \times 3$  の PMNS (Pontecorvo- 牧-中川-坂田) 行列  $U$  で結びつけられる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

この(1)式は、例えば、 $\nu_e$  は  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  の重ね合わせであることを表している。ニュートリノもレプトンであるから  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  に関する Schrödinger 方程式を解き、互いの“混ざり具合”の時間発展を求めると、 $\nu_e$  と  $\nu_\mu, \nu_\tau$  が時間と共に周期的に入れ替わる解が得られる。これがニュートリノ振動に他ならない。ここで簡単のため  $\nu_1, \nu_2$  しかない 2 ニュートリノ toy model での  $\nu_e, \nu_\mu$  間の変容の確率を表す  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  を求めると

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_{12} \cdot \sin^2(\Delta m_{12}^2 \frac{L}{4E}) \quad (2)$$

となる。ここで  $\Delta m_{12}$  は  $\nu_1$  と  $\nu_2$  の質量差、時間  $t$  の代わりに用いた  $L$  ( $\cong ct$ ) はニュートリノ発生源と検出器間の距離、 $E$  はニュートリノの全エネルギー (といってもほとんどが運動エネルギー) である。距離  $L$  の異なる遠近 2 つの検出器を設置し、各々でのニュートリノ強度を測定し比較すれば質量差  $\Delta m_{12}$  ( $m_1, m_2$  は別々には分からない) と  $\theta_{12}$  に関する情報が得られる。

PMNS 行列の要素は三つの独立な混合角  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$  (それにここでは言及しない因子  $\delta$ ) で書き表される。この三因子中でもっともその値が小さく、測定が困難な  $\theta_{13}$  に対しては、振動波長と振幅変動の観点に加えて強力かつコンパクトという利点を持つ  $\bar{\nu}_e$  線源である原子炉を使う方法が最適である。(歴史的にも Reines と Cowan によって初めて実験的に捉えられたニュートリノは米国サヴァンナリバー炉からの  $\bar{\nu}_e$  であった(1956))。話が前後するが、2010年代初頭、加速器を使ったニュートリノ実験で、その数とエネルギースペクトルが事前の予想から有意にズレているとの報告があり、未知の第四のニュートリノが存在するとの仮説が立てられ大きな話題を呼んだ (Sterile Neutrino 仮説)。事実とすれば大変なことである。前回と今回の会議を通じ、Sterile Neutrino の存否の確認は  $\theta_{13}$  の精密測定と並ぶ影の主役であった。

### 3. 1日目：原子炉ニュートリノの測定

第2回会合の初日最初の発表は A.Onillon によるフランスの Double Chooz 実験の総括的報告であった[4]。大きく蛇行するマース川が作る円形の台地に置かれた Chooz プラントの二機の PWR で、動力炉を用いた  $\theta_{13}$  測定の先鞭がつけられた (図1)。2011年から2020年まで稼働した

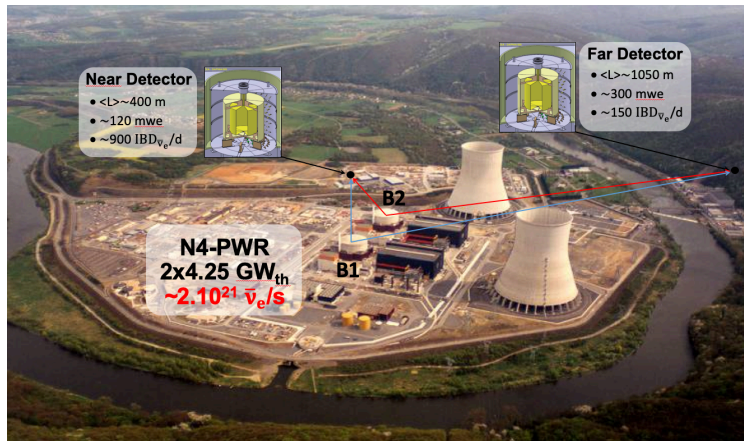


図1 Double Chooz サイト鳥瞰図： B1,B2が原子炉建屋で上方に近距離検出器が、右側川を挟んで遠距離検出器がある。講演 [4] より

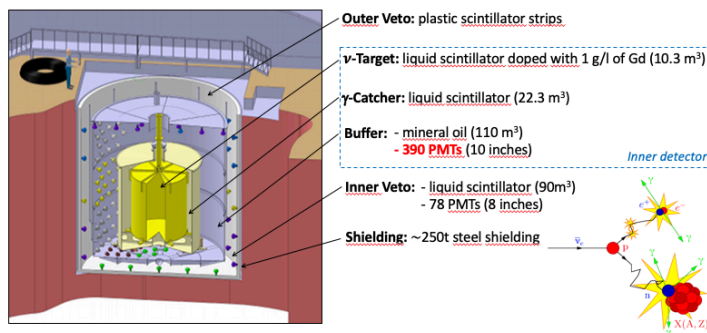


図2 Double Chooz 実験のニュートリノ検出器： 大きな円筒タンクにGdがドーピングされた液体シンチレーターが充填され壁面の光電子増倍管が光を検出する。外側の光電子増倍管はノイズ事象の veto のために用いられる。講演 [4] より

りに  ${}^6\text{Li}$  が用いられる場合もある。Double Chooz とほぼ時を同じくして、中国でも動力炉を用いた原子炉ニュートリノ実験が行われた。Daya Bay 実験 [5],[6] がそれである。検出器は上記の Double Chooz と同じく IBD タイプで、“ $\nu$ -Target”には 20 トンの液体シンチレーター (Gd-doped) が充填され、これが 2 台または 4 台で 1 セットを成し、3 セットが 2.9GWe の PWR6 機を囲む遠近 3 箇所地下に設置されるという大規模な構成である。主目的は  $\theta_{13}$  の高精度測定であり  $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.0851 \pm 0.0024$  [6] という値が報告されているが、得られた大量のデータは前節で述べた Sterile Neutrino 仮説検証などに極めて広く引用されている。これよりやや小規模ながら韓国の RENO 実験も広く引用されている [7]。RENO では一直線上に並ぶ 6 機の PWR に直交する線上北側 294m に IBD タイプの近検出器が、南側 1383m に遠検出器が設置され、 $\theta_{13}$  や Sterile Neutrino 仮説に関わる貴重なデータが蓄積されている。振り返って我が国では福島事故以来 KamLAND をはじめとする原子炉ニュートリノ実験が休止に追い込まれたのは何とも残念なことである。

Double Chooz 検出器 (図2) は、 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.102 \pm 0.011(\text{syst.}) + 0.04(\text{stat.})$  という最終結果を得て 2020 年に稼働を終了した。運転停止後の残留ニュートリノ検出結果にも言及されたがこれはなかなか興味深い。図2の右下の挿入は原子炉ニュートリノ測定のほぼ全てに共通する IBD (Inverse Beta Decay) とその検出の概略である。シンチレーション部 (図2にある“ $\nu$ -Target”)に入射した  $\bar{\nu}_e$  は極めて稀に陽子に捕獲され IBD で中性子と陽電子を生じる。陽電子はすぐに減速し対生成  $\gamma$  を生成する。中性子の方は数十  $\mu\text{s}$  かけて減速・熱化しドーピングされた Gd に捕獲され  $\sim 8\text{MeV}$  の捕獲  $\gamma$  線が放出される。この連続事象をシンチレーション光として検出し、バックグラウンドの中から拾い出せばよい。Gd の替わり

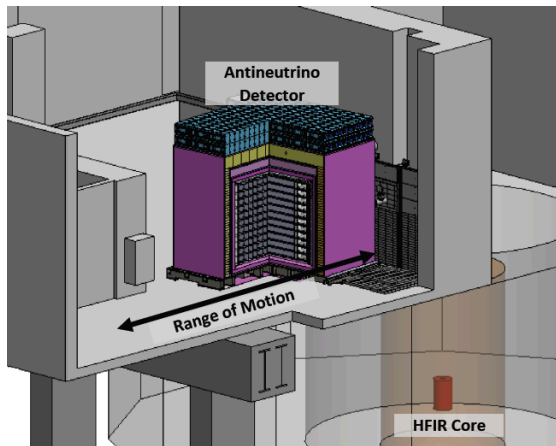


図 3 PROSPECT-I 実験のニュートリノ検出器とその配置：階下の HFIR 炉心の上階に検出器が設置されている。講演 [8] より

これら動力炉を使った実験では、近距離検出器でもプラント敷地外、炉心から数百 m 離して設置することになる。もし Sterile Neutrino が存在するとすれば、炉心から数百 m 離れた近検出器データもその影響を受けている可能性を排除できない。更に、動力炉では  $^{235}\text{U}$  ばかりでなく、 $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  の核分裂で生じる FP も考慮しなければならない。これらが、得られたデータの解釈を複雑にすると同時に、解析に model dependent な要素を持ち込む。そこで小型のウラン炉心の近傍に検出器を置く実験が複数構想され、具体化されている。最初に紹介されたのは HFIR 炉 ( $^{235}\text{U}$  fission fraction > 99%) を用いた米国 Oak Ridge の PROSPECT 実験 [8]

である (図 3)。ここでは小型のセグメント型液体シンチレーター IBD 検出器が炉心から 12m 程度の位置に設置されている。ユニークなのは異なった  $L$  (線源-検出器間距離) に複数台設置する代わりに、コンパクトな固体検出器の利点を生かし、その 1 台の位置を前後に移動する点である。 $\bar{\nu}_e$  束の高い炉心の近傍に設置されるため小型化が可能で、かつ質量が 1eV 程度と推測される Sterile Neutrino の探索に適した配置である。更に pure な  $^{235}\text{U}$  炉心であるためスペクトル解析も容易で、測定されるスペクトルをそのまま標準 (あるいは参照) スペクトルとして広く利用できる。同様の実験がベルギー Mol の BR2 炉でも進行中で、現在そのユニークな固体シンチレーター IBD 検出器の calibration のフェーズである [9]。こちらは炉心からの距離  $L$  が 6~9m と更に短い。

フランス Laue-Langevin 研究所の STEREO 実験 [10] は Grenoble の  $^{235}\text{U}$  燃料高中性子束炉 (以下 ILL 炉) を  $\bar{\nu}_e$  線源として使うモジュール型液体シンチレーター IBD 検出器による測定である。ユニークな注目点は多々あるが、前記 PROSPECT との類似点も多く、あえてここでは発表者の結論の冒頭のみを引用しよう。“Sterile neutrino hypothesis strongly disfavored”。これでここ十数年に渡った Sterile Neutrino 論争になんらかのピリオドが打たれるのか否か？は筆者の知見を大きく超えた判断となるので差し控え、今後の展開を注視したい。ちなみにこの発表の 4 日前、この結論は “Nature” 誌上で公開されている [10]。

第 1 回会議から今回の第 2 回会議の間の固体 IBD 検出器関連技術の進展は著しい。4 年前は構想中ないしは calibration 中であつたそれぞれユニークなアイデアを詰め込んだ検出器は今や稼働のクライマックスにあるといえる。小型化と実効感度の向上により、 $\bar{\nu}_e$  束の高い炉心の近傍の地表レベルに設置できるようになり、トレーラーに積んで原子炉建屋に横付けして測定することも可能となった [11]。



#### 4. 2日目：トピックス1題

2日目午前中のセッションは進行中ないし計画中のIBD検出器による原子炉ニュートリノ実験等に焦点が当てられた。中国のJUNO, TAO, 韓国のNEOS, 米国のPROSPECT-IIなどである。しかし読者諸氏の興味という点では前節に屋上屋を重ねることにもなるのでこれらは割愛しここでは同日午後のセッションから今後有望と思われる新しいニュートリノ検出法“CE $\nu$ NS (Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering)”をYu.Efremenkoの発表[12]に沿って以下で紹介したい。原子炉ニュートリノのエネルギーは高々十数MeVまでであり、IBD反応で検出するには好適である。しかし、1) IBDは1.8MeVの反応閾値以下では機能しない、2) 反応断面積が極めて小さい(弱い相互作用しかしない $\nu$ 検出の宿命ではあるが)、の2点は避けがたい。前回の第1回会議でもCE $\nu$ NSの報告はあったが、その意義を見抜けないまま筆者の記憶から遠ざかっていた。しかし、IBD法に比べ、1) 反応閾値の問題は無くなり、2) 断面積は2~3桁増大するという大きな利点を持つCE $\nu$ NS法は、素粒子物理、天体核物理、宇宙論といった基礎物理分野からの期待が大きい。そして原子炉ニュートリノ分野だけが無風状態であるわけではない。それどころか、その(低い)エネルギー領域はCE $\nu$ NS法が得意とする領域なのである。

図4はCE $\nu$ NS反応とその検出に至る過程の略図である。まず弱い相互作用の根幹にあるウィークボゾン $W^\pm, Z^0$ の中で、われわれの関心の中心にあるベータ崩壊には全く関わりを持たない中性ウィークボゾン $Z^0$ がこの過程を引き起こす点が甚だ興味深い。さらに肝心な点は原子炉ニュートリノのエネルギー領域ではCE $\nu$ NSで移行する運動量(従ってエネルギー)が小さいため( $\leq 1\text{keV}$ )、 $Z^0$ 波長が原子核半径より長く核全体を包みこむ。これこそがニュートリノが核の構成要素(煎じ詰めればquark)とコヒーレントに弾性衝突する理由である。

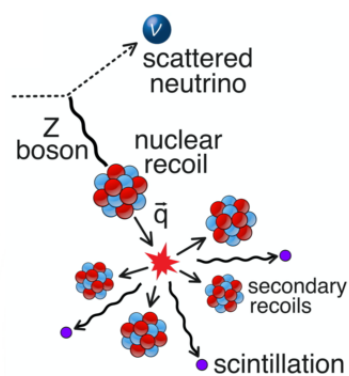


図4 ニュートリノ原子核弾性散乱 (CE $\nu$ NS) 過程：講演[12]より

CE $\nu$ NSは理論的には以前から知られていたが、今述べた通り、この散乱からうける原子核の反跳エネルギーも小さいためほぼ40年にわたりつい最近まで、それを検出するのは困難とされてきた。しかし2010年代からの研究成果に立脚して、COHERENTグループはOak Ridgeの核破碎反応中性子源から副産物として発生するニュートリノ $\bar{\nu}_\mu, \nu_\mu, \nu_e$ が引き起こすCE $\nu$ NS反跳原子核に起因するシンチレーション光を有意なカウント数で検出することに成功している。

CE $\nu$ NSがすぐに(例えば $\bar{\nu}_e$ を用いた原子炉監視等に)使えるわけではないだろうが、技術分野としては急速に発展する余地があると思われる。実際、講演で示された“Worldwide Efforts to Detect CE $\nu$ NS”と題された世界地図には、現在実験が進行ないし計画中の南北アメリカ、欧州、極東の13箇所に○が付されていた(日本には○は無かった)。その13箇所中の11箇

所が原子炉を、2箇所が核破碎中性子源を $\nu$ 線源として用いている。

## 5. 3日目： $\bar{\nu}_e$ スペクトル，総和計算，崩壊データ，核分裂収率

原子炉ニュートリノ ( $\bar{\nu}_e$ ) は炉心内に蓄積した核分裂生成核 (FP) が安定を求めて  $\beta$  崩壊する際に放出される。従って、全放出量やそのエネルギースペクトル (以下両者まとめて  $\bar{\nu}_e$  スペクトルと呼ぶ) は各 FP 核種の蓄積量とその  $\beta$  崩壊特性で決まる。動力炉では主に4つの核分裂核 ( $^{235,238}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$ ) が核分裂を起こしているため、少なくともこの4核種についてその  $\bar{\nu}_e$  スペクトルを正確に知っておく必要がある。これには二つの方法がある。変換法と総和計算法である。変換法ではこれまで Schreckenbach らのグループが Grenoble の ILL 炉 (既出) の炉心直近に  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$  それぞれ単体のサンプルを置いて中性子照射し、長い導管で放出電子を炉心真上のオペレーションフロアに置かれたスペクトロメーターに導き、平衡に達した電子スペクトルを測定した。そして遷移ごとの電子と  $\bar{\nu}_e$  のエネルギーの和が始状態-終状態のエネルギー差に等しいことを利用して電子のエネルギースペクトルを  $\bar{\nu}_e$  スペクトルに変換する方法である (この計算は言うほど簡単ではない)。もう一つの方法は総和計算法である。これは FP 崩壊熱の計算と同様なので細論は避けるが、(停止後ではなく) 運転中の原子炉の、例えば  $^{235}\text{U}$  核分裂で生成した各 FP 核種の蓄積量に、崩壊定数とその崩壊に際して放出される  $\bar{\nu}_e$  スペクトルを乗じて最後に関与する全 FP について総和をとればよい。どちらかの方法で、主要4核分裂核 ( $^{235,238}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$ ) に起因する  $\bar{\nu}_e$  スペクトルを用意しておけば、動力炉炉心から飛んでくる原子炉ニュートリノのスペクトルは容易に計算することができる。

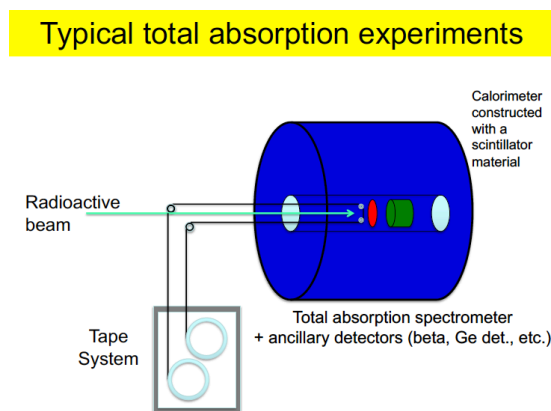


図5 TAGS 測定の概要:FP 同位体はテープに載って大きな個体シンチレータ (青) 中央に移動し、全ての  $\gamma$  線がシンチレータで捕捉されることで Pandemonium 効果の介入が抑止される。補助検出器 (赤) が  $\beta\gamma$  coincidence を取る。講演 [17] より

に基づくスペクトル [14] も広く参照されるようになって来ているようである。崩壊熱総和計算の根幹を揺るがした Pandemoniumu 問題が、TAGS 測定データの蓄積により大きく改善しつつあることがその背景にある [1]。

三日目の冒頭、米国 Virginia 工大の P.Huber が上に記した核分裂核種ごとの標準 (参照) スペクトルと Sterile Neutrino 仮説の両方に軸足を置きながら “Antineutrino Modelling Overview” と題する講演を行い、ここほぼ5年の原子炉ニュートリノ研究の歴史を概観・総括した [13]。Huber は Schreckenbach らの  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239,241}\text{Pu}$  からの電子線スペクトルを自身で  $\bar{\nu}_e$  スペクトルに変換し、これに仏 Nantes 大の Mueller が総和法で計算した  $^{238}\text{U}$  データを併せ、爾来このスペクトルは HM-model (スペクトル) として広く使われてきた。近年はこれに加え Fallot らによる総和計算法

TAGS (Total Absorption Gamma-Ray Spectroscopy)がこの数十年に崩壊熱や $\bar{\nu}_e$ スペクトルの総和計算の信頼性向上に貢献した度合いははかり知れない。三日目の後半はTAGS測定の現状報告が並んだ。Argonne[15], Oak Ridge[16], Valencia-Nantes[17]の発表がそれである。その成果は崩壊熱や $\bar{\nu}_e$ スペクトルへの応用にとどまらず崩壊データの質的改善を通じて核物理学全般にも波及しつつある。図5にその動作原理とともにTAGS検出器の概念図を附す。娘核の基底状態への集中的な $\beta$ 遷移は崩壊熱、 $\bar{\nu}_e$ スペクトル共に大きな影響をもたらすが、従来の方法ではその測定がなかなか難しい(いわゆる“ground-state  $\beta$ 問題”)。TAGSはground-state  $\beta$ の最も信頼のおける測定方法であることもここに付記しておきたい。

本稿では深掘りできなかったが、総和計算の一方の柱は核分裂収率データである。崩壊熱計算でも然りであるが、原子炉ニュートリノ計算で特に結果に大きな影響を与えるのがIsomeric Yieldである。IYについては世界中がここ数十年にわたりMadland-Englandの経験式でなんとか凌いできたと言え、このような観点からもLos AlamosのLovellがより広い視野から行った講演が興味深い[18]。その内容を一言で要約すれば彼女の3枚目のスライドの表題にもある通り“BeoH calculates prompt/delayed fission observables using the statistical Hauser-Feshbach theory”(BeoHはコード名)となろう。核分裂収率データの高度化は現在JENDLでも喫緊の課題となっており、その重要性を最後に強調しておきたい。

## 6. おわりに

本稿のはじめで混合角 $\theta_{13}$ の精密測定とSterile Neutrinoの存否が二つのIAEA会議の二大伏流であると述べた。 $\theta_{13}$ の精密測定についてはこの5年で精度の向上は大きく、今後の理論研究の礎となるものと考えられる。Sterile Neutrinoの存否に関しては、問題が提起された2010年頃に感じられた熱気は下降気味であり、本稿第3節で紹介したSTEREO実験に見られるような否定的見解も勢いを得つつあるようにも見える。そして、全ての発端となった $\bar{\nu}_e$ の個数とそのエネルギースペクトルの事前予測との間のズレの原因は、むしろ事前予測のために変換法で用いられた電子線測定データ(前節参照)にあるのではないかとの疑念も生じている。このような背景からロシアのV.Kopeikinらのグループは $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ からの電子線スペクトルを再測定し、一方では総和計算法の信頼性も著しく向上して来ている。今後、これまでに蓄積された膨大なマイクロ、マクロの測定データと標準となる $\bar{\nu}_e$ スペクトルの整合的解釈に基づく真相究明が行われるだろう。そのような展開に向けて本連続会議の総合報告の刊行が待たれる。総合報告は文献[1]のPart IIとして関係者がいま執筆に取り掛かろうとしているところである。

## 参考文献

- [1] A.L.Nichols, P.Dimitriou, A.Algora, *et al.*, Improving Fission-product Decay Data for Reactor Applications: Part I—Decay Heat, *Eur. Phys. J. A* 59, 78 (2023)  
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-00969-x>
- [2] <https://conferences.iaea.org/event/337/attachments/13714/21371/indc-nds-0786.pdf>

- [3] <https://conferences.iaea.org/event/337/registrations/73/>
- [4] A.Onillon, Residual Reactor  $\bar{\nu}_e$  Measurement with Double Chooz Experiment, Technical Meeting on Nuclear Data Needs for Antineutrino Spectra Applications, Jan. 16, Vienna (2023) :See also, The Double Chooz collaboration, *Nature Physics* **16**, (2020) 558-564
- [5] F.Ann & the Daya Bay Collaboration, Reactor Antineutrino Flux and Spectrum Measurement at Daya Bay, 同上会議, Jan. 16, Vienna (2023)
- [6] L.Zahn & the Daya Bay Collaboration, Recent Results from Daya Bay:1)High Energy Reactor Antineutrinos, 2)Oscillation parameters, 3)Sterile neutrinos, 同上会議, Jan. 16, Vienna (2023)
- [7] J.Yoo, RENO Reactor Experiment for Neutrino Oscillation, 同上会議, Jan. 16, Vienna (2023)
- [8] N.Bowden for the PROSPECT Collaboration, Continuing Physics Results from PROSPECT-I, 同上会議, Jan. 16, Vienna (2023) :See also, M.Adriamirado, A.B.Balantekin, C.D.Bass *et al.*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.10669>
- [9] A.Vacheret for the SOLID Collaboration, Status of the SoLid experiment and recent analysis developments, 同上会議, Jan. 16, Vienna (2023)
- [10] D.Lhuillier The STEREO Experiment, 同上会議, Jan. 16, Vienna :See also, The Stereo collaboration, *Nature* **613**, (2023) 7943, 257-261, public access: <https://rdcu.be/c3dsz>
- [11] J.Link, CHANDLER: A Technology for Surface-level Reactor Neutrino Detection, 同上会議, Jan. 17, Vienna (2023)
- [12] Yu.Efremenko, Study of CE $\nu$ NS by the COHERENT Collaborarion, 同上会議, Jan. 17, Vienna (2023) :See also, D.Akimov *et al.* & COHERENT collaboration, *Science* **357**, (2017) 1123-1126
- [13] P.Huber, Antineutrino Modelling Overview, 同上会議, Jan. 18, Vienna (2023) The Double Chooz collaboration, :See also, P.Huber, *Phys. Rev. C* **84**, (2011) 024617
- [14] M.Fallot, Summation Calculations - Nantes, 同上会議, Jan. 18, Vienna (2023) :See also, M.Estienne, M.Fallot, A.Algora *et. al.*, *Phys. Rev. Lett*, **123**, (2019) 022502
- [15] P.Kondev, Nuclear Data Measurement at ANL, 同上会議, Jan. 18, Vienna (2023) :See also, Ref.[1]
- [16] K.Rykaczewski, Nuclear Data Measurement at ORNL, 同上会議, Jan. 18, Vienna (2023) :See also, Ref.[1]
- [17] A.Algora, Nuclear Data Measurement - IFIC/Valencia-Nantes, 同上会議, Jan. 18, Vienna (2023) :See also, A.Algora, J.L.Tain, B.Rubio *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **57** (2021) 85
- [18] A.Lovell, Fission Yield Modelling and Evaluation, 同上会議, Jan. 18, Vienna (2023) :See also, A.E.Lovell, T.Kawano, S.Okumura *et. al.*, *Phys. Rev. C*, **103**, (2021) 014615