

原子炉崩壊熱における pandemonium 問題の 発見からその解決へ

東京都市大学

吉田 正

tyoshida@tcu.ac.jp

1. はじめに

1979年から1980年初頭にかけてアメリカで同時並行的に多くの核分裂生成物(FP)崩壊熱測定が行われた。最も代表的かつ広範なのが Dickens をはじめとするオークリッジ国立研究所のグループによるもので、そのほか、ロスアラモス、オレゴン州立大、EPRIなどの測定がある。Dickens らの測定では、 ^{235}U [1]、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu [2]の瞬時照射(理想的に言えば δ 関数型照射)後、数秒から1万秒の冷却時間まで、FP崩壊熱の β 線成分、 γ 線成分をそれぞれ測定している。両者の和が崩壊熱となる。その後わが国でも、秋山らによる広範な測定が行われたが、これは ^{233}U から ^{241}Pu までの5核種に及んだ[3]。この東大弥生炉での測定はすぐに高い評価を得た。このことは、オークリッジ国立研究所がすぐに地元テネシー大学の学生を動員して英訳し、これを大部のレポートとして刊行したことからもわかる。

2. 崩壊熱の総和計算

一方、FP崩壊熱の計算としては、当時から総和計算法という方法が知られていた。冷却時間 t における崩壊熱 $f(t)$ は

$$f(t) = \sum_i \lambda_i \cdot E_{\beta+\gamma}^i \cdot N_i(t) = \sum_i \lambda_i \cdot (E_{\beta}^i + E_{\gamma}^i) \cdot N_i(t)$$

で与えられる。全FP核種について総和をとるので総和計算(Summation Calculation)とよばれる。ここで λ_i は核種 i の崩壊定数、 $N_i(t)$ は核種 i の時刻 t における存在量(あるいは個数密度)である。また、 E_{β}^i 、 E_{γ}^i は核種 i が一回の β 壊変(β 崩壊)を起こす際に放出する β 線及び γ 線の平均エネルギーである。これら λ_i 、 E_{β}^i 、 E_{γ}^i を詳細な崩壊チェーンに関する記述とともに網羅的にまとめたのがFP崩壊データライブラリーである。崩壊熱計算には、このほか核分裂収率データが必要になるが、本稿では言及しない。

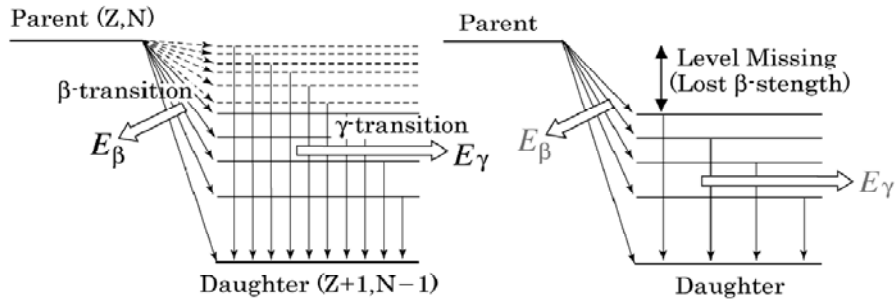


図1 Pandemonium問題が崩壊熱計算基礎データ E_β および E_γ におよぼす影響

ところで、1979年当時公開されていた総和計算用崩壊データライブラリーはデータの質、量ともに限定的なものであり、データの収納されている核種も数百核種に限られていた。そこで、当時原研におられた田坂完二氏（その後名大、故人）が1979年に公開したライブラリー[4]は画期的なもので、収納核種数が一気に1000核種を越えた。

総和計算用崩壊データライブラリーの核心はFP核種ごとの崩壊あたりの放出エネルギー E_β 、 E_γ にある。核種ごとにこの値を得るにはTable of Isotopes[5]やENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File[6])が必要になる。更に限定すれば、図1左の模式的な崩壊図式で親核(Z,N)の β 壊変に伴って、娘核(Z+1, N-1)の多数の励起状態のうちどの準位がどれだけの割合で励起されるかが重要である。この割合を β feed rateあるいは簡単に β feedと呼ぶ。しかし1960~70年代には、まだ、崩壊図表が知られている核種は多くなかった。特に短い冷却時間で支配的な寄与をする短寿命核種（特に半減期数分以下）の崩壊図式はあまり知られていなかった。そこで田坂は、このような核種に対して、

$$E_\beta^i = E_\gamma^i = Q_\beta^i / 3 \text{ と近似した。}$$

Q_β^i は核種*i*の β 崩壊のQ値である。図2、3（以下図は文末）が1980年当時のFP崩壊熱測定と総和計算結果を比較したもので、図2が β 線成分、図3が γ 線成分である。田坂ライブラリー（破線）が当時の測定データをかなり良く再現していたことがわかる。そこで、この田坂ライブラリーを更に改良し、わが国の標準FP崩壊データライブラリーを作成する必要性が指摘され、シグマ委員会の中に崩壊熱評価ワーキンググループが創設された。田坂ライブラリーを基本に、当時すでに刊行されていた崩壊図式を可能な限り収集し、それに基づいて最良の総和計算用崩壊データライブラリーを作成する努力が極めて精力的に行われた。こうして完成したのがJNDC FP Decay Data Library 試作版である。大きな期待を持って総和計算が行われたが、結果は全く意外なものであった[7]。図2、3中のⒶJNDC Library (Status; Oct., 1980)とあるのがそれである。改善どころか、 β 線成分は著しく過大に（図2）、 γ 線成分が著しく過小（図3）に評価されている。ほとんど時を同じくして、米、英でもそれぞれのNational Libraryとでも称すべきENDF/B-V、UKFPDD-2

が刊行されたが、結果は JNDC Library (Status; Oct., 1980) と殆ど変わらない β 線成分の過大評価、 γ 線成分の過小評価であった。いまから考えると、当時刊行されていた崩壊図式を最大限に活用したという点で三者が同じ結果になったとしてもしごく当然のことである。しかし、その時点では理由が分からず頭を抱えた。JNDC Library (Status; Oct., 1980) と米英の ENDF/B-V、UKFPDD-2 の大きな違いは、その時点でも、測定に基づく崩壊図表が刊行されていないデータ未知核に対し、高橋-山田の β 崩壊の大局的理論[8]を使うか（日本）[9]、 $E_{\beta}^i = E_{\gamma}^i = Q_{\beta}^i / 3$ と近似するか（英）、あるいは β 強度が娘核の準位密度に比例すると近似するか（米）だけであった。その直後、東海村での崩壊熱評価 WG からの帰途、いつものように常磐線急行で中嶋龍三先生（法政大学、故人）とビールを飲みながらずっと話を続けた。中嶋先生がふと、「吉田君、測定データの有る核にも大局的理論を使ってみたら」といわれた。

3. β 崩壊の大局的理論の導入

翌日私はすぐにその結果を得た。驚くべきことに、計算は測定データをきわめて良好に再現していた。図 2、3 中の ㊸ Modified JNDC とあるのがそれである。大局的理論は、当時大変権威のあったわが国の理論物理系学術誌 Progress of Theoretical Physics 誌に掲載された三篇の長い論文を読破しないと計算コ



写真1 フロリダでのANSサテライト会合にて(1981)
左からDuchmain, Reich, 吉田, James, Dickens, Rudstam

ードはいじれない。若いころの力に任せてそれをやった。自由にそういうことをやるのを許してくれた NAIG（日本原子力事業（株））という会社も懐が深かった。翌 1981 年に私はフロリダで開かれた ANS Annual Meeting で FP 中性子断面積の Invited Talk をやることになっていたが、急遽発表内容を FP 崩壊熱に変更した。フロリダに着くと、急遽サテライト会合として日本の計算結果を中心に、総和計算の問題点を議論することになったから出席してくれと求められた。10 人に満たない小会合であったが、会場に入ると全員が拍手で迎えてくれた。自己紹介すら抜きにして前出の Dickens が「どうしてお前らの計算は、あんなに測定値を良好に再現するのか」と聞いてきた。私も正確な答えを持っていなかった。それが、私のその後 30 年を要した pandemonium 問題との出会いであった。

そのときの出席者の顔ぶれが写真 1 である。左から 2 人目が共鳴多準位公式で著名な Charles Reich、右から 2 人目が先ほどから名前の挙がっている Kirk Dickens である。今年 3 月 11 日の東日本大震災発生直後、Kirk から、お前は大丈夫だったかとのメールが入った。この写真 (1981) の何人かはもう物故された。歳をとるということは悲しいものである。黒板に $E=mc^2$ と書かれているのが時代の覇気を感じさせる。大局的理論計算値を大幅に導入したわが国のファイルは JNDC FP Decay Data Library として公開された[10]。

しかしこの会議で明確な結論がでないまま、それでは β 崩壊の専門家を集めて国際シンポジウムをやろうということになり、1983 年、Brookhaven National Laboratory で専門家会議“NEANDC Specialists Meeting on Yields and Decay Data of FP Nuclides” [11]が開催されることになり、大局的理論の高橋耕士 (当時 Saclay)、後に名前が出る Idaho (現 INL) の R.G. Greenwood、アメリカでの崩壊データ、核分裂収率データを長年にわたり仕切っていた Talmadge England、Mainz の K.L. Kratz ら多彩なメンバーが顔をそろえた。

4. Pandemonium 問題との出会い

Brookhaven 会議の前後だったと思うが、またもや中嶋龍三先生が、「吉田君、この論文を読んで見なさい」と渡してくれたのが Hardy-Jonson-Carranz-Hansen の論文“An Essential Decay of Pandemonium; A Demonstration of Errors in Complex Beta-Decay Schemes” [12]であった。このときやっと、我々が直面している問題が何であったかを覚った。ベータ崩壊図式は、Ge-検出器による γ 線の high resolution データから、ジグソーパズルのように構築される。まず Hardy らは β^+ 崩壊する Gd-145 の娘核 Eu-145 の基底状態から Q_β 値までの全準位を統計規則に従いながらコンピュータ上で発生させた。そして全ての準位への β feed とそれに引き続く γ 線カスケード遷移を、崩壊理論に則りながらシミュレーションした。さらに、論文発表当時最新の Ge 検出器のセットアップを想定し、発生させた γ 線カスケード遷移中のガンマ線がどれだけ検出されるかを推定し、これに基づいて通常の方法で崩壊図式を再現した。シミュレーションだから、「正しい」崩壊図式は分かっている。両者の比較から、彼らは多くの γ 線が検出からもれ (あるいは別の多くの γ 線が unplaced gamma として崩壊図式構築に寄与できず)、その結果得られた崩壊図式は不完全なものとなることを結論した。これが本稿の主題、pandemonium 問題で、短寿命で Q 値の高い核種の崩壊図式の娘核の高励起準位が欠落し、その結果 E_{β}^i 値が過大に、 E_{γ}^i 値が過小に評価される (図 1 の右を参照)。当時、接触可能な high-resolution data の測定者や崩壊図式の専門家何人かに意見を聞いた限りでは、Hardy らの論文は当時あまり知られておらず、支持も無かった。Hardy らは、Gd-145 をモデルにした、このような不完全な崩壊図式をもつ仮想上の核種を pandemonium (17 世紀英国の詩人ミルトンの『失樂園』に由来) と名づけた。

図 4、図 5 を参照されたい。話はだいぶ後のことになるが、これらは Pu-239 の瞬時照

射後の崩壊熱を、1994年に公開された JEF-2.2 と、2005年に公開された JEFF-3.1 で計算し、サンプル照射測定結果と比較したものである。1994年版にくらべ、新しい2005年版の方が測定との一致が明瞭に悪化している。つまり、1994年～2005年の10年の間に新たに刊行された最新の崩壊データを採用したため、 β 線成分（図4）が著しく過大に、 γ 線成分（図5）が逆に過小に評価されている。このことは、新しい、短寿命でQ値の高い核種の崩壊図式が、大きく pandemonium 問題に侵されており、新しいデータを取り入れれば取り入れるほど、測定との一致が悪化してしまうというディレンマをはっきりと示している。

5. Pandemonium の解決へ

日本では β 崩壊の大局的理論の導入により、pandemonium 問題を回避することができた。米国は ENDF/B-VI で、日本のやり方を殆どそのまま踏襲して、大局的理論による E_{β} 値、 E_{γ} 値を大幅に導入した[13]。したがって JNDC FP Decay Library と ENDF/B-VI とは殆ど同じ計算結果を与える。この方法の成功は、崩壊熱そのものばかりでなく、崩壊熱の β 線、 γ 線成分それぞれのエネルギースペクトル計算にも及んでおり、著しい成功を見ている[14]。

一方、欧州では、Heidelberg マックスプランク研究所の Klapdor が QRPA 近似 (Quasi-Particle Random-Phase Approximation) を用い、pandemonium 問題の解決を図ったが、その計算結果がヨーロッパの評価済み核データファイル JEF ないし JEFF に導入されることは無かった。それどころか、前節で記したように、JEF およびその後の JEFF では、pandemonium 問題は年を追おうごとに顕著になっている。Klapdor は「吉田の計算は multi-parameter fit だから合って当たり前だ」と書いた[15]が、それは言いがかりである。とは言うものの、ハイデルベルクの町で Klapdor と一緒にビールを飲みまくり、どうやってホテルに帰ったか覚えていない一夜を思い出す。このとき彼は人種と民族に関するかなり微妙な議論をした。ちょっと極端な主張の人だったが、ドイツ人の民族に対する考え方の深遠を一瞬除き見た感触が残っている。

ヨーロッパの JEFF が pandemonium 問題で満身創痕になりながらも、刊行された（高分解能 γ 線データに基づく）崩壊図式しかデータ源として用いない、というポリシーは、実は後に述べるように、今回我々にもおおいに役立つことになる。世界に複数のライブラリーが存在することは重要であると再認識している。

6. スペインチームとの出会いと TAGS

大局的理論の全面的な導入により、総和計算は短冷却時間における燃料サンプル照射実験の良好な再現に成功したことで、pandemonium 問題は解決したという流れが生じ、JNDC Library による総和計算値が日本原子力学会の推奨値として採用された。米国核デ

ータ界の指導的人物のひとりだった Subramanian Raman 氏からも、ある研究会で「もう pandemonium 問題は解決済みだね」とコメントされた。しかし私は、これは単に問題のとりあえずの回避でしかなく、最終的には個々の短寿命核の何らかの方法による広範な測定による最終解決が必要であると考え続けていた。

2001年の筑波での核データ国際会議（ND2001）の会場で、早稲田の橘孝博さんが、「ひげのスペイン人が吉田さんを探してるよ」と伝えてくれた。Valencia 大学グループの Jose Luis Tain との出会いであった。彼は、「お前が 1999 年の論文[16]で指摘している問題と核種に興味がある。我々のグループで、TAGS 法で測定してみたい」と共同研究を要請された。20 年後に、やっとやって来た船である。乗らないわけが無い。しかし、彼らと私の一本線の関係だけでは国際共同研究として弱い。当時私は OECD/NEA の WPEC (Working Party of International Evaluation Cooperation) の JENDL プロジェクト代表委員をしていたので、同じく代表委員で日本原子力研究所（当時）の片倉純一さんとも相談し、アントワープで 2005 年 5 月に開催された定例会合で、Tain ら Valencia 大学の TAGS 測定グループと核データコミュニティーをつなぐ新たなサブグループの設立を提案した。これがサブグループ 25 (SG25) で、私が Coordinator を勤めることになった。TAGS (Total Gamma-Ray Spectroscopy) については Appendix に概略をまとめる。しかし、WPEC では旅費が出せないで、Valencia 大学グループを WPEC の旅費で招聘することができない。それを解決してくれたのが、当時 WPEC に IAEA 代表としてきていた Trokov 氏だった。彼は、Valencia 大学グループと SG25 メンバーの合同会合を、Abdas Salam の創設した ICTP (International Center for Theoretical Physics) 予算を使い、トリエステで開催するよう努力することをその場で約束してくれた（同氏は今、故国スロベニアは Ljubljana の研究所に戻っている）。

最終的には、合同会合は IAEA Nuclear Data Section の予算で、2005 年 12 月にウィーンで開催されることとなった。ウィーンの IAEA 本部で、Valencia 大学グループと SG25 メンバーの初めての顔合わせが行われた。問題点が整理され、測定対象核種を選定する作業が始まった[17]。しかし、一回の会合では核種を絞り込むことができず、翌 2006 年の 5 月に 2 回目の会合がやはり IAEA の支援下、パリの NEA Data Bank 行われた[18]。このときの 2 日にわたる会合の司会は、私の英語力ではほとほとき



写真2 左からAlgora, 吉田, Tain (ND2010の会場にて)

つい仕事であった。しかしこの会合で、最初の結果を投稿するのは *Physical Review Letters* だ、というところまで決めてしまった（実際そのようになった）。測定計画は WPEC の SG25 報告として翌年に刊行した[19]。あとは Valencia 大学を中心とするヨーロッパのグループが測定を続けて行くのを待つのみ数年が過ぎた。測定はフィンランドの中南部にある Jyvaskyla 大学で行われた。中間結果はケルンでの国際セミナー[20]や濟州島での ND2010[21]等で発表された。一方私は、*Physical Review Letters* への投稿が新規性を失わないように、結果の一部だけを自分自身の 1999 年論文[16]での問題提起の答えとして日本原子力学会欧文誌に投稿した[22]。

7. Pandemonium 問題の解決

昨年 11 月に *Physical Review Letters* に掲載された最初の測定結果の総合報告[23]は 42 人の連名論文であり、スペイン、フィンランドを主体に米、露、英、仏、日等多国間にまたがる。中核になったのは、もちろん Jose Luis Tain、Arejandro Algora を中心とする Valencia 大学のグループである（写真 2）。測定されたのは、 ^{101}Nb 、 ^{105}Mo 、 ^{102}Tc 、 ^{104}Tc 、 ^{105}Tc 、 ^{106}Tc 、 ^{107}Tc の 7 核種である。この論文は米国物理学会でも注目され、ロスアラモスの K.P. Pykaczewski によって APS ホームページの Viewpoint で紹介・解説された（“Conquering nuclear pandemonium” [24]）。

ところで、 ^{102}Tc の TAGS 測定結果は、 β feed の 93%が娘核の基底状態に遷移するとする Table of Isotopes[5]等に掲載されている従来の崩壊図式と同じ結果を再現した。したがって、 ^{102}Tc の知られている崩壊図式は pandemonium 問題を孕んでいないことが分かった。しかし、羽倉らはこの ^{102}Tc のデータも、崩壊熱総和計算の観点から重要な知見を提供していることを論じた[25]。これらの TAGS 測定値で、JEFF-3.2 の E_{β} 値、 E_{γ} 値を 1 核種ずつ順次置き換えてゆき、Pu-239 瞬時照射後の崩壊熱計算を行った結果が図 6、7 である。あえて JEFF-3.2 をベースとしたのは、JEFF-3.2 が、JENDL のように pandemonium 問題を回避する目的での理論計算等の導入を一切行っておらず、図 4、5 で見てきたように pandemonium 問題をそのまま全て孕んでいるからである。この図 6、7 から分かることは、 E_{β} 値、 E_{γ} 値を 1 核種ずつ順次置き換えて行くに従い、計算結果はサンプル照射実験結果にどんどん近づいてゆくことである。この結果は、TAGS 測定が、期待されたように pandemonium 問題を克服するための現在知られている唯一の測定手法であることを示すばかりでなく、実験的な手法によって pandemonium 問題の存在を始めて立証したことも意味している。サンプル照射実験データを完全には再現していないが、これは測定核種を単に増やしてゆけばよいと考えられる。

ここで、しかし測定との一致は JENDL の方がまだ勝っているではないか、との疑問を持たれるかもしれない。しかし、個々の核種ごとに見てゆくと、TAGS による E_{β} 値、 E_{γ} 値は、JENDL のそれ、つまり β 崩壊の大局的理論から計算された E_{β} 値、 E_{γ} 値と大きく異

なっていることが分かる。そして、個々の核については、TAGS 測定値のほうが信頼性は高いことが始めからわかっている。なぜなら、大局的理論は平均理論であり、崩壊核の質量数 A 、陽子数 Z 、あるいは Q 値とともに大局的に変化する β 崩壊の性質を記述するが、個々の核の個性は記述できないからである。もちろん、偶奇性は巧妙に取り入れられている。つまり JENDL の成功は多数 FP に同時に大局的理論を適用した結果、平均理論としての大局的理論の長所が発揮された結果であったといえる。

TAGS 実験でまず得られるのは、 β feed であり、 E_β 値、 E_γ 値は、個々の核について、この β feed から直接計算される。一例として、 ^{105}Tc の β feed 測定結果を見てみよう。図 8 は ^{105}Tc の β feed を TAGS と従来の high resolution 測定に基づく崩壊図式にある β feed を比較したものである[26]。この例では、Table of Isotopes では与えられていないかなりの β feed が、2MeV 以上で TAGS 測定にかかっていることがわかる。明らかに従来の崩壊図式は pandemonium 問題を抱えている。

8. おわりに

福島第一の事故は崩壊熱との闘いの様相を呈している。しかし、本稿で問題にしているのは冷却時間数時間までで、その数時間はあっという間に過ぎてしまった。このような理由もあり、ここでは福島第一の影をあえて排除した記述となっている。福島第一の崩壊熱については別に論じたい。また、本稿では、Valencia 大学を中心とする欧州グループの TAGS 測定に話を絞ったが、TAGS 測定としては Greenwood らによる米国 Idaho National Engineering Laboratory (現 INL) グループの約 10 年間に及ぶ広範で優れた先例がある[27]。しかしこの測定は、原子炉崩壊熱における pandemonium 問題の解決にはすぐに繋がらなかった。それは、欧州グループはデータユーザとの密接なコンタクト[19]をとりながら、重要度の高い核種から測定して行ったのに比べ、米国のグループは測りやすい核種から測ったという違いによるといえる。

参考文献

- [1] Dickens J.K., Love T.A., McConnell J.W. and Peelle W.R.: Nucl.Sci.Eng., **74**,106(1980)
- [2] Dickens J.K., Love T.A., McConnell J.W. and Peelle W.R.: Nucl.Sci.Eng., **78**,126(1981)
- [3] Akiyama M. and An S.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Antwerp, p.237 (1982) and references therein
- [4] Tasaka K., "Nuclear data library of fission products for decay power calculation," NUREG/CR-0705, TREE-1325 (1979)
- [5] R. B. Firestone, V. S. Shirley (Eds.), Table of Isotopes, 8th edition, John Wiley & Sons, New York (1996).
- [6] ENSDF, <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf>

- [7] Yoshida T., R. Nakashima, *J. Nucl. Sc.; Technol.*, **18**[6], 393-407 (1981)
- [8] Takahashi K. and Yamada M.: *Progr.Theor.Phys.*, **41**, 1470 (1969); Koyama S., Takahashi K. and Yamada M.: *ibid.*, **44**, 663 (1970); and Takahashi K.: *ibid.*, **45**, 1466 (1971)
- [9] Yoshida T., *Nucl. Sc.; Engn.*, **63**, 376-390 (1977)
- [10] Tasaka K. et al.: *JNDC Nuclear Data Library of Fission Products*, JAERI 1320 (1990); see also Yoshida T., Ihara H., Katakura J. and Tasaka K.: *Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology*, Mito, p.819 (1988)
- [11] Chrien R.C., Burrows T.W. (Eds.) BNL 51778, Brookhaven National Laboratory (1983)
- [12] Hardy J.C., Carrez L.C., Jonson B., Hansen P.G.: *Phys. Lett.*, **71B**, 307 (1977)
- [13] Katakura J., England T., LA-12125-MS, ENDF-325, Los Alamos National Laboratory (1991)
- [14] Katakura J., Yoshida T., Oyamatsu K., Tachibana T., JAERI 1343, Japan Atomic Energy Institute (2001)
- [15] Meztinger J., Klapdor H.V., ASM's Int. Con. On Nuclear Power Plant Aging, Availability Factors and Reliability Analysis, San Diego, 8507-007, 239-246, (1985)
- [16] Yoshida T., Tachibana T., Storrer F., Oyamatsu K., Katakura J. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **36**[2], 135-142 (1999)
- [17] Nichols A.: (Ed.), Summary Report of Consultants' Meeting 'Beta-decay and decay heat,' INDC(NDS)-0483, Vienna (2005) IAEA
- [18] Nichols A.: (Ed.), Summary Report of Second Consultants' Meeting 'Beta-decay and decay heat,' INDC(NDS)-0499, Vienna (2006) IAEA
- [19] WPEC SG6 Report (Coordinator: Yoshida T., Monitor: Nichols A.L.) Nuclear Science NEA/WPEC-25 (2007) ISBN 978-92-64-99034-0
- [20] Algora A., Jordan D., Tain J.L., Rubio B., Agramunt J. *et al.*, "Application of the Total Absorption Technique to the Reactor Decay Heat Problem: Study of the Beta Decay of ^{102,104,105}Tc," *Proc. Int. Symp. on Capture Gamma-ray Spectroscopy and Related Topics*, Cologne (2008) pp.207-214
- [21] A. Algora et al., Int Conf. on Nuclear Data for Sci. Technol., Jeju, Korea (2010)
- [22] Yoshida T., Wakasugi Y., N.Hagura, *J.Nucl. Sci. Technol*, **45**[8], 713-717 (2008)
- [23] Algora A. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 202501 (2010)
- [24] <http://physics.aps.org/>
- [25] Hagura N., Tachibana T., Yoshida T., *J.Nucl. Sci. Technol*, **47**[5], 492-500 (2010)
- [26] Tajima H., Yoshida T., Proc. 2010 Symposium on Nucl. Data, Kita-kyushu (2011) in press
- [27] Greenwood R.C., Helmer R.G., Putnam M.H., Watts K.D., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A390**, 95-154 (1997)

Appendix 全吸収ガンマ線分光法 (TAGS) とは

図 A1 は、全吸収ガンマ線分光法 (TAGS) の骨子を説明するために、親核 Z 、 A の β 遷移を単純化して示したものである。親核の β 崩壊で娘核のエネルギー E_x の励起状態が励起されたとする。この励起状態は γ 崩壊で脱励起する。この時放出される γ 線は、図の、イ、ロ+ハ、ニ+ホ、ヘ+ト、チ+リの五つのパターンのいずれかであり、エネルギーの和はどれも励起エネルギー E_x に等しい。検出効率を度外視すれば、いずれの場合にもエネルギー E_x のピークが得られることになる。したがって、各ピークのエネルギーは親核から β フィードされた娘核の励起エネルギーに等しいということになる。従って、娘核の各励起レベルへの β 遷移強度の相対値が、全励起レベルについて得られる。

Valencia 大学を中心とする欧州グループが使っている Total Absorption Gamma-ray Spectrometer の中核は大きな円柱状 NaI(Tl) シンチレーターである。同位体分離されたサンプルがこの円柱の中心線に沿ってくりぬかれた導入孔を通過して、円柱の真ん中にセットされる。サンプルから出た γ 線のエネルギーはすべて発光に寄与し、系外には逃れないと考える。実際には、シンチレーターの有限の大きさ、サンプル導入孔の存在等さまざまな理由から、詳細な補正計算が必要になる。ここでは詳細は文献[20, 21]に示されている関連文献に譲る。

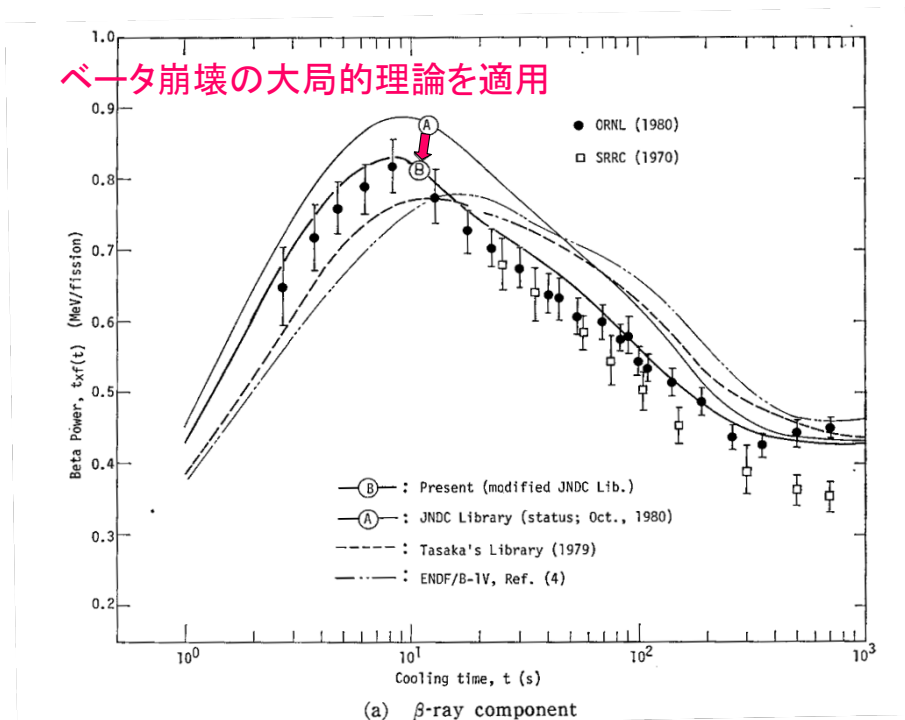


図2 1980年頃の総和計算とサンプル照射実験結果の比較
U-235瞬時照射後崩壊熱ベータ線成分

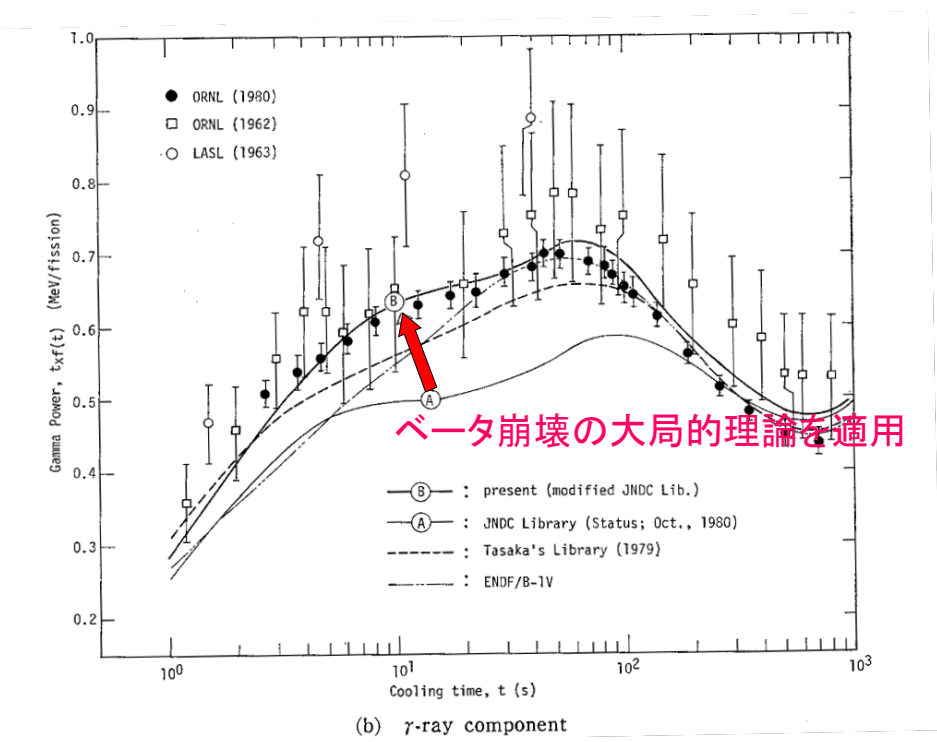


図3 1980年頃の総和計算とサンプル照射実験結果の比較
U-235瞬時照射後崩壊熱ガンマ線成分

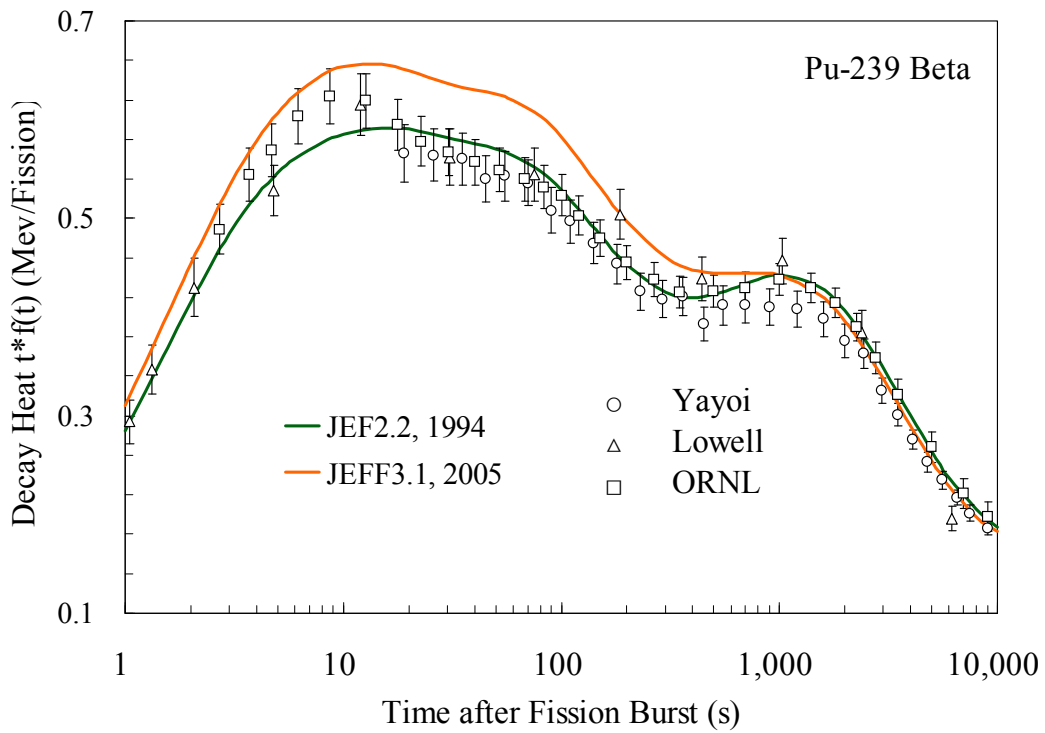


図4 JEF崩壊データライブラリーに見られるpandemonium効果
Pu-239瞬時照射後の崩壊熱ベータ線成分

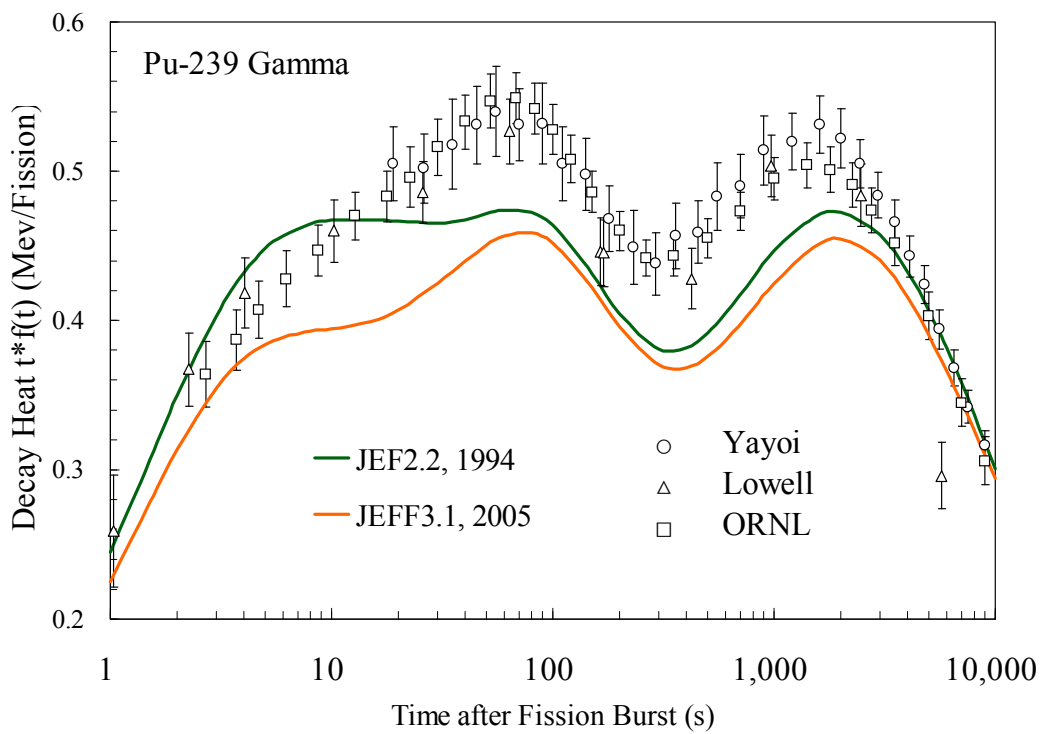


図5 JEF崩壊データライブラリーに見られるpandemonium効果
Pu-239瞬時照射後の崩壊熱ベータ線成分

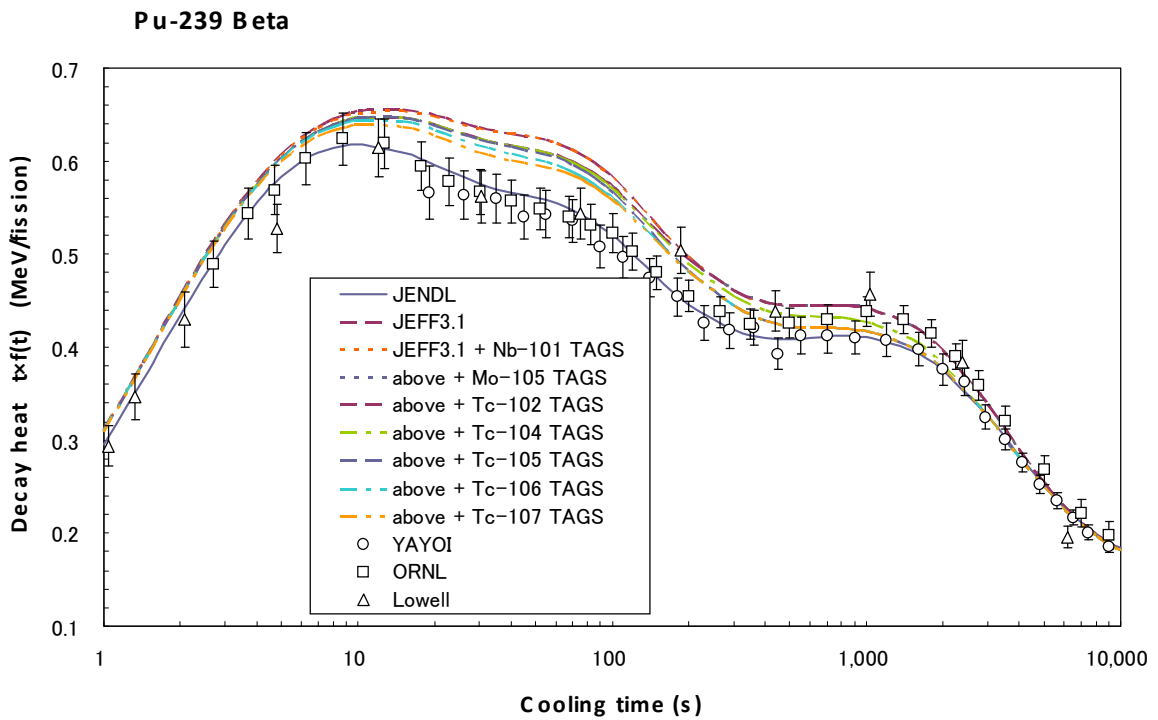


図6 欧州グループTAGSデータの導入の効果
Pu-239瞬時照射後の崩壊熱ベータ線成分

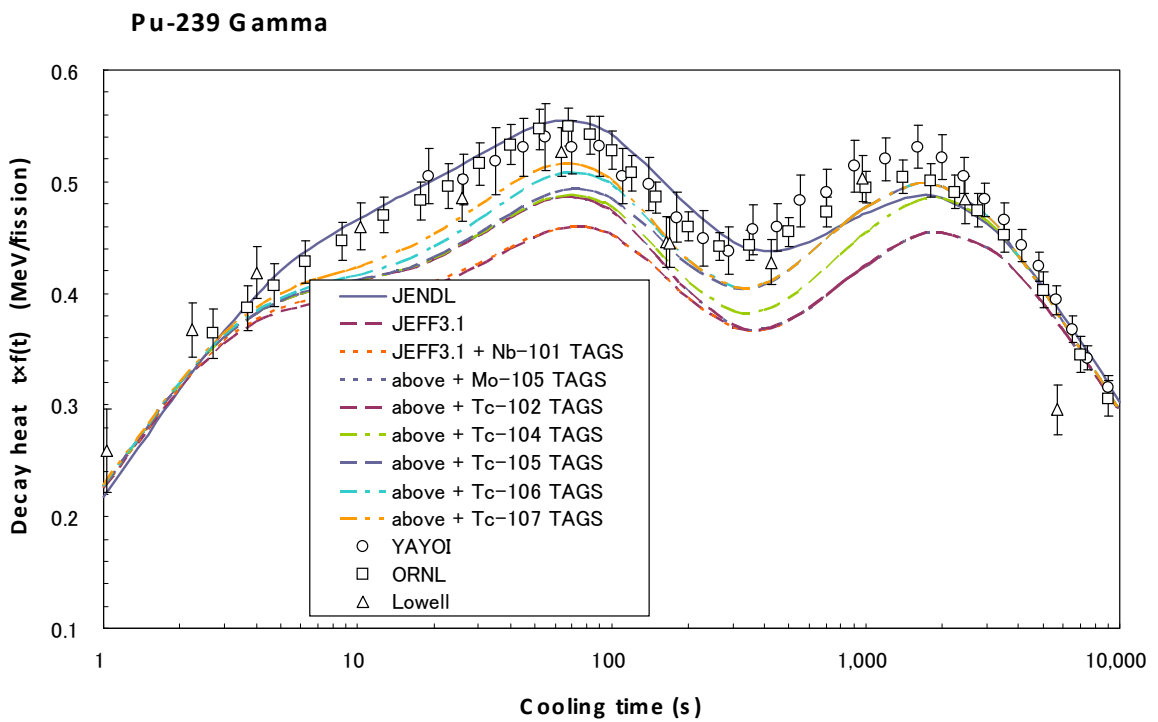


図7 欧州グループTAGSデータの導入の効果
Pu-239瞬時照射後の崩壊熱ガンマ線成分

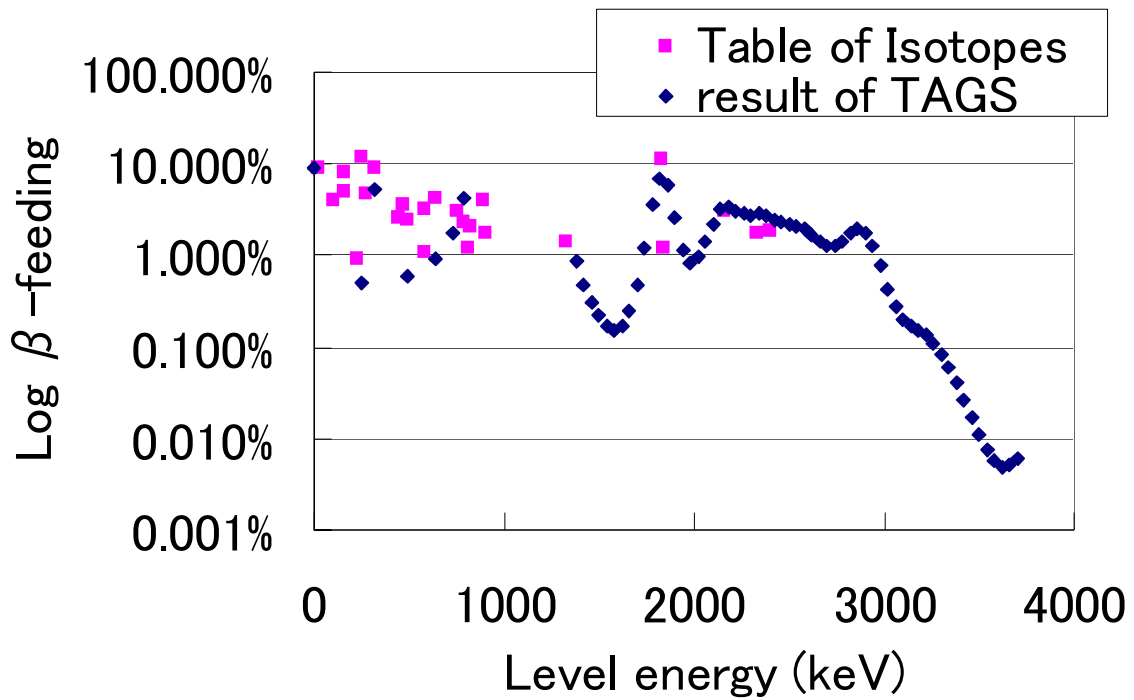
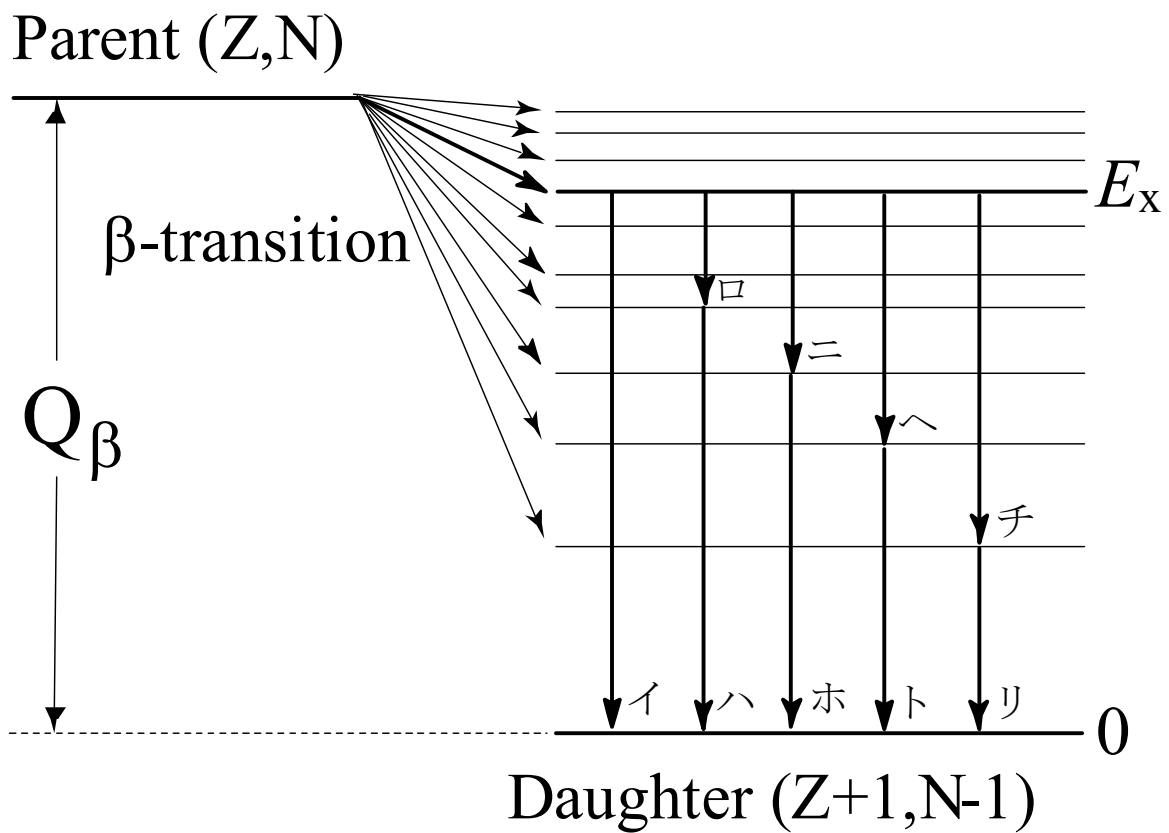


図8 Tc-105のβ feed (TAGSとTOIの比較)



図A1 TAGS法によるβ-feed測定の方法