

▼ ▲ 会議のトピックス(III) ▼ ▲ ▼

## 全吸収ガンマ線分光に関する IAEA 諮問者会合

東京工業大学

吉田 正

88r9t9@bma.biglobe.ne.jp

### 1. はじめに

標記会議をウィーンで開催するからと IAEA/NDS から連絡があったのは 8 月下旬。すぐに承諾のメールを出したものの、エコノミークラスでの 12 時間がかかりきつい年齢になっている。そこで飛行機好きの私が想いついたのが最新鋭機ボーイング 787 (図 1) の利用であった。IAEA から正式の invitation が届くとすぐにヘルシンキ経由便を押さえた。これが正解で、機内減圧が少なく、シート間隔も広い。10 時間も経たぬうちに空港で一休みでき、気分も変わる。乗ってみると、窓が大きく遮光が連続的に行えるのは予想外の利点で、一昨年乗ったアリタリアの 777 ビジネスクラスより楽ですらあった。ただシベリアからフィンランドまで延々と雲に覆われ、大地をほとんど目にしなかったのも初めての経験である。雲が切れたのは、ようやく飛行機がゆるやかな降下を始め、本稿後半で触れることになる Jyväskylä (ユヴァスキュラ) の街の上空を通過するあたりだった。



図 1 成田に駐機する日本航空のボーイング 787 型機

## 2. It's a Small World

IAEAを訪れるのは9年ぶり。月曜の朝ということもあり、Registration Officeは人で溢れ、どうすればよいかとまごまごしていると、とつぜん背後から「ヨシダセンセイ」と聞き覚えのある声がある。まさか、と思って振り返ると東工大・齊藤正樹研究室にロシアからやってきて長く日本に滞在し、現在ロシアの大学で副学長を務める Vladimir Artisyuk さんだった。あまりにもタイミングよく現れた彼に驚きを隠せずにいる私に “It's a small world” と事もなげに言い、registration のやり方を的確に指示すると、いつの間にか彼は人ごみに消えていた。言われてみれば確かにブエノスアイレスのスーパーでインドの旧知にバッタリ出合ったというほどのことじゃなし、ここはIAEA、まあアリかと彼の言に妙に納得して会議室に向かった。

## 3. ことのおこり

1979年のTMI事故をきっかけに、広範な原子炉崩壊熱の実験研究、理論研究が急速に立ち上がった。前者は fissile サンプルを照射し、カロリメータないしは放射線計測により照射後サンプルからのエネルギー放出を測定するもので、米国原子力規制委員会は複数の測定（少なくとも4件）を同時並行的に国立研、大学、民間会社に委託・実施した。日本にも、秋山雅胤氏らによる東大弥生炉を用いたすぐれた実験研究があり、今も代表的な測定として頻繁に引用されている。理論の面では、800~1000核種に及ぶ不安定核分裂生成核種（FP）からの寄与を総和して崩壊熱を求める「総和計算法」のためのデータライブラリーの構築に米、英、日、（とたぶん仏）が急遽着手し、ほとんど同時期に完成している。後で分かったことだが、この種のデータライブラリー構築にあたっては、pandemonium 問題として知られるようになった短寿命核の崩壊データに不可避免的に内在する深刻な問題に直面してしまう。我々の計算はベータ崩壊理論を駆使することでこの問題を洗い出し、とりあえずの急場（とは言っても20年）を救った[1]。しかしその20年の間、理論の導入は最終的な解決策ではないと私は思い続け、多くの方々の協力を得て pandemonium 問題に浸食されない短寿命核崩壊データの実験的取得にかかわる提案を行った[2]。掲載後しばらくして意外なところから反響があった。2001年のつくばでの核データ国際会議（ND2001）の会場で、早稲田の橋孝博さんが「髭のスペイン人が吉田さんを探していたよ」と伝えてくれた。こうしてその後十数年にわたって付き合うことになる Valencia 大学の Jose Luis Tain さんに出会う。彼は「あなたたちが言っている問題を解決できる手法を我々は持っている、一緒にやらないか」と提案した。その場は総論賛成状態で別れたものの、「一緒にやる」手だてが思い浮かばない。4年が無為に過ぎた。

当時私は OECD/NEA の核データ評価国際協働ワーキングパーティー (WPEC) の JENDL 代表委員の一人だった。そこで思い立った。同じ委員だった片倉純一さん（現長岡技術科学大学）と相談し、アントワープでの WPEC 総会（2005年）でこの「全吸収ガンマ線分

光法 (TAGS)」における国際協力のためのサブグループの立ち上げを提案し、承認された。これが SubGroup 25 で、今でも業界では SG25 で通る。ただ WPEC は新たに実験物理学者を呼び込むには制約が多すぎるうえ、致命的なのは旅費が出せない。が、IAEA を代表してそこに出席していた Andrej Trkov さんが救いの手を差し伸べてくれた。おかげで同じ年の暮れ、ウィーンで IAEA の Consultant's Meeting (第一回 TAGS-CM) を開催し、ここに潜在的関係者を多く招聘することができた。もちろん、Tain と彼の盟友でチームの渉外も担当する Alejandro Algora さんも参加してくれた。翌年春には WPEC との共催というかたちで第二回 TAGS-CM をパリで開催し、測定対象核種を絞り込んでいった。ベースになったのは文献[2]のリストで、Tc 同位体が多くを占めた。もっともリストにあった Tc-102 には pandemonium 問題は無かった。Alejandro は会うたびにそれを言う。結構、根に持っている。7核種のデータ取得・解析に5年を要したことを考えれば、まあ根に持たれても無理はない。解析が終わり、最終結果が Physical Review Letters 誌に掲載されたのは2010年のことである[3]。ここまでの経緯は[4]に纏めたので参照いただければ幸いである。

一つ付け加えなければならないのは TAGS 測定には先行例があることである。Idaho National Engineering Laboratory (現 INL) の Greenwood らが1990年代に5年以上をかけて行った一連の測定である[5]。ここで、この Idaho TAGS に深入りする余裕はないが、本稿の主題である今回の第四回 TAGS-CM で、筆者は Valencia TAGS と、この Idaho TAGS との深い相互補完的な関係について報告した (文末 Agenda の1日目報告 6)。とはいえ Valencia グループは研究予算およびマシンタイム獲得の段階で Idaho TAGS との差別化におおいに苦勞した。

さらに付け加えておきたいのは、TAGS 結果の導入によって、少なくとも崩壊熱総和計算結果に関しては理論の導入が追認されたことである。従って、それに基づく日本原子力学会「原子炉崩壊熱推奨値」が修正を求められることは無い。ただ、崩壊熱計算値ではなく個々の核種の個々の崩壊データに関しては事情は大きく異なり、TAGS 測定によって短寿命核分裂生成核種の崩壊挙動全般に関する理解は著しく深まった。

#### 4. その後の展開

その後2009年に、第三回TAGS-CMがやはりウィーンで開催され、主に実験計画に関する議論がなされた。これには筆者は参加していないが、その時の記録 (INDC(NSD)-0551) によると、新たにアルゴンヌのKondevのグループによるATLAS (Argonne Tandem Linac Accelerator System) での実験計画、インドKolkata (旧名カルカッタ) のMukherjeeらのTAGS計画が報告された。2人とも第三回TAGS-CMに参加している。話が前後するが、今回のウィーンでの第四回TAGS-CMにこの2人は参加しておらず、参加者からの間接情報では、Argonne TAGS計画はまだ遅々としつつも動いているが、Kolkata TAGSについてはその後全く情報が得られておらず、計画は消失した可能

性が高いようである。Argonne TAGSについては「彼らはIdaho TAGSのセットアップをArgonneに移設しようとしている」、「いや、新たに装置を新調しようとしているようだ」と異説が飛び交った。フォローアップがあるだろうが皆さん多忙、情報が私まで届くかどうか。なんだかんだ言っても、この第三回TAGS-CMまで、主役は原子炉崩壊熱であった。

Pandemonium 問題の影響は崩壊熱だけにとどまるものではない。素粒子の標準理論の限界に微妙にかかわるニュートリノ振動の重要パラメータである  $\theta_{13}$  の決定、さらには Reactor Anomaly[6]と呼ばれる新たな問題の解決に原子炉ニュートリノを通じて TAGS が関わってくる。原子炉ニュートリノとそれを用いたニュートリノ振動実験については[7]に解説風にまとめたので、こちらを参照いただくと幸いである。

## 5. 第四回 TAGS-CM

ここでやっと今回の第四回 TAGS-CM（「崩壊熱総和計算およびその他の分野への応用のための全吸収ガンマ線分光」に関する IAEA 諮問者会合）[8]にたどり着く。クリスマス直前の、それにしてはいやに暖かいウィーン。初日で出席者全員の発表をすべて終えてしまつて、2日目、3日目は Round Table Discussion に充てられた。初日は Valencia TAGS



図 2 第四回 TAGS-CM に集まった人々：前列左から P.Dimitriou (IAEA)、A.Nichols (前 IAEA/NDS 長)、M.Fallot (Nantes)、後列 J.-Ch.Sublet (Culham)、A.Sonzogni (NNDC-BNL)、L.-L.Tain (Valencia)、筆者、M.Karney (Warsaw)、A.Algora (Valencia)

の報告 (Agenda 1) および 4)) で始まったが、Valencia についてはあとで纏めて記す。消失の可能性大の Kolkata TAGS やカタツムリ状態の Argonne TAGS を押しのけて、突然正面に出てきたのが Oak-Ridge TAGS である。一体型を使う Valencia に対して、こちらは長さ 50cm もある六角柱状の NaI シンチレータ 19 体を束ねた巨大な Modular Total Absorption Spectrometer に特徴がある。2014 年暮れまでに FP 領域の 21 核種のデータ取得が終わり、8 核種の解析が進行中との報告がワルシャワ大学の Marek Karny さんからあった (Agenda 2))。ワルシャワ大のほかテネシー大、ルイジアナ州立大、ヴァンダービルト大、ミシシッピ州立大で分担する大学連合で行われている実験である

今回の課題の中心は、原子炉ニュートリノスペクトルを高い精度で得るための TAGS 測定リクエストリストの作成である。とは言っても、ニュートリノスペクトルと TAGS の間には曲折した long story があり、それだけでも新たな 1 稿が必要である。それも下手をするとひどく退屈なものになる。ここではすべてスキップして、文献[9]を挙げて済ませたい。敵前逃亡のおもむき大だが致し方ない。

ニュートリノ (正確には反電子ニュートリノ) スペクトル形成にはきわめて多数の FP が少しずつ寄与する。これら FP を TAGS データでカバーする労力はたいへんなものになるだろう。でもヨーロッパの人たちは絶壁を前にひるまない。思い返せば彼らは、石を彫り、石を積み、パリのノートルダムやケルンの大聖堂を 200 年、300 年かけて作り上げた人々の子孫なのだ。今もバルセロナではサグラダファミリア聖堂が 200 年のタイムスパンで造営されている。筆者は、弱い相互作用標準理論の中核にある V-A 相互作用の礎を築いた一人である山田勝美先生の (不肖ではあるとはいえ) 弟子であることもあり、V-A 相互作用の導入により我々の視界から消えた (重い) 右巻きニュートリノが前述の Reactor Anomaly パズルを解く

過程で再発見されたら、とマニアックな期待も持っている。頼まれもしないのにニュートリノスペクトル問題に四か月も注力し、誰も筆者になんかに期待していない話 (Agenda 5)) を今回入れさせてもらった一因はこの辺にもある。

とは言え、Valencia TAGS は進展を続け、今回も主役であった。Algora なんか二回も話した (Agenda 1) および追加講演

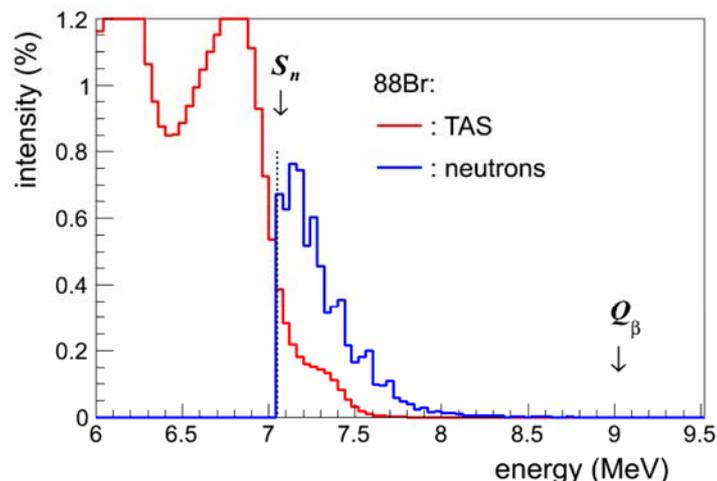


図3 遅発中性子先行核に対するガンマ強度  
中性子分離エネルギー  $S_n$  を境に激減する  
(Courtesy of Jose Luis Tain, Valencia)

「 $\beta$ 崩壊理論の検証のための TAGS」)。Tain (Agenda 4) の話で印象的であったのは遅発中性子放出核の TAGS 測定 (TAS とも略記する) である。娘核の励起エネルギーを横軸に見ると、中性子分離エネルギー  $S_n$  を越えたところで、突然縦軸のガンマ線強度が激減する。中性子放出との競争に負けるためだ。この負けっぷりは関連するレベルのスピンの・パリティに強く依存するから、この「激減」の様子が核種によってさまざまに変わっているところも納得がゆく [10]。いずれにせよ、遅発中性子の存在をこのようにリアルに目撃するのは初めてで感動的でした (図 3)。

フランス・ベルギー国境にある Chooz (ショー) プラントの二基の PWR からのニュートリノを用いた “Double Chooz” 実験に深くかかわる Nantes 大学 Muriel Fallot さんは、 $\theta_{13}$  の決定と Reactor Anomaly 問題を導入に持ってきたあと、ニュートリノ振動実験解析における FP 総和計算と TAGS データ取得の重要性を説いた。但し Reactor Anomaly の解釈にはニュートリノスペクトルに高い精度が要求される。筆者がファンあるいはマニアとしてお好みの「Sterile Neutrino=重い右巻き電子ニュートリノ」シナリオ実証への道は細くて遠そうだ。でも皆さん怯まない。以後二日にわたる Round Table Discussion は、Fallot さんがニュートリノスペクトルの観点から作成した重要 FP リストを出発点とする TAGS 測定核種候補の選定に収斂していった。

Round Table Discussion では (私から見れば) 若い UKAEA (Culham) の Jean-Christoph Sublet さんが核分裂収率データの重要性を足場に活発な論陣を張った (口数は彼と Alejandro Sonzogni さんがいちばん多かった)。私もこれにまったく異存はないのだが、崩壊データの会議をあんまり収率に引っ張ってしまうのも?との思いもあり、結構彼の議論の足を引っ張った。反省している。その Sublet さんから今さっきメールが来て、大川内-庄野の ND2001 論文にある  $Np-237$  の FP 崩壊熱の数値データが手に入らないかと言ってきた。手元にないがフォローしてみると返事を返したところである。(くどいようだが私から見れば) 若い人がやる気満々なのは気持ちがいい。

さらに、座長の Alan Nichols とならぶ Round Table Discussion の牽引役は scientific secretary の Paraskevi Dimitriou さん (自称 Vivian) である。一夜、英語抜きで夕食で私をリラックスさせてくれた IAEA の大塚直彦さんによると、彼女は Hodgeson の弟子で反応理論が専門とのことだが、崩壊データに関する見識にも並々ならぬものがあつた。NDS Head の Robin Forrest さん、Deputy Head の Roberto Capote さんも時間をやりくりしつつ (と思えた) 議場に頻繁に出入りしていた。

## 6. またまた It's a Small World、Jyväskylä 実験

このニュートリノスペクトル→FP 総和計算→TAGS 路線に絡んで、Valencia グループが Nantes の Subatech グループと係わりを持ち始めたと聞いてはいた。でも、一昨年秋 Nantes に向けて旅立った M1 時代からの旧知である芝知宙さん (現東工大研究員) から昨年一

月、「これから Jyväskylä に実験に行きます」というメールをもらった時にはやはり驚いた。良質の不安定イオンビームのある所ならどこにでも自分たちのシンチレータをかついで出かけて行く **Algora**、**Tain** たちにとって、フィンランド **Jyväskylä** 大学は最も重要な実験サイトである。芝さんの興味はニュートリノを用いたプラント外部からの原子炉運転状況監視であるが、これも **Fallot** さんの研究分野に入っている。従って芝さんが **Nantes** から **Jyväskylä** に行って何の不思議もないのだが、ここでも“*It's a small world*”という感は強かった。そして、**Jyväskylä** に行ったことがなく、日本にいて、実験遅いなーとか思っただけの私にとって、芝さんから聞いたリアルな現場状況は実に有益であった。今回の会議での **Tain** および **Algora** 報告からわかったデータ取得後の緻密な解析の難しさとその苦労と併せて、**TAGS** 実験の実相に少しでも近づけたかと思う。**Valencia** グループは **Lucrecia**、**Rocinante**、**DTAS** など複数のシンチレータを所有しており、図 5 にはこのうちいちばん愛想のない名をもつ **DTAS** が写っている。ちなみに **Rocinante** はドンキホーテが乗っている馬の名前に由来している。最後にひとことつけ加えるなら、われわれ原子力技術に携わるものは、“*We are living in a small world*”という意識を常に持ち続けてよいように思う。



図 4 冬のユヴァスキュラ、低く垂れこめた雲と凍結した湖面（図 4、5 とも芝知宙さん提供）

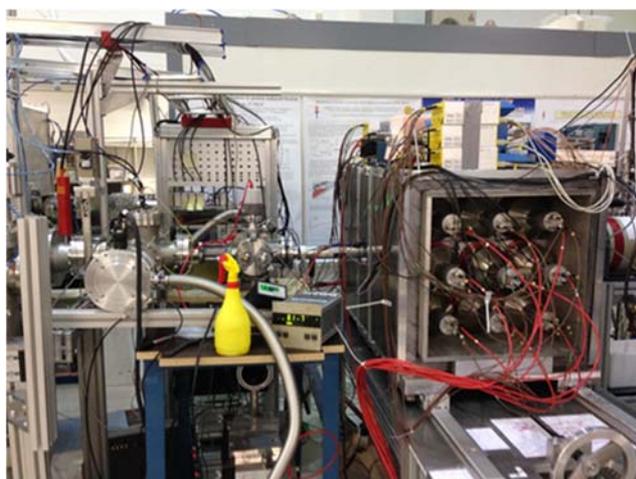


図 5 ユヴァスキュラでの **TAGS** セットアップ  
右に **DTAS** シンチレータを見込む **PM** と赤いケーブルが見える

## 7. おわりに、再会を約して

今回の座長 **Alan Nichols** さんは **JEFF** の崩壊データを長い間みていた核構造の専門家であり、**TAGS-CM** 立ち上げ当時、彼が **IAEA/NDS** の **head** であったことは幸運であったと

言える。パリでの第二回 TAGS-CM (2006年5月)は WPEC との共催であったこともあり、Alan は英語もおぼつかない私を三日間座長に据え、隣席にいて私を手繰りながら、りっぱな議事録を書いてくれた。もう彼も私も定年を迎えている。別れぎわ、もうお会いすることもないでしょうが十年間ほんとうにお世話になりましたのと万感の思いを込めて握手を求めると、無愛想な彼にしては上出来の笑顔で応じてくれた。

Algora さんとは、彼が Valencia チームの渉外担当であったことから、十年間、頻繁にメールのやり取りをし、今回も席が近くて会議中も折にふれて話げできた。しかし Tain さんは席がいちばん遠かったし、一日目の晩の会食時も、彼は国立歌劇場に「椿姫」を観に行ってしまうて話げできなかった。心残りだったが、帰路、ウィーン国際空港で経由地パリ行きけの飛行機を待っているて、なんと彼げニコニコしながらゲートに現れた。パリ経由バレンシア行きだという。会議の内容にかかわるやりとりけのあと、彼「初めて会ったの、あれトーキョーだった?」、私「いやツクバでの核データ国際会議だった」、彼「あの時まで中性子捕獲ガンマをやっていたんだが、あんたに会ったのげ転機だったよ。・・・来年は理研で実験やりけ日本に行く」、「でっかい検出器を担いで飛行機で諸国飛び回るって実際どうやってるの?」、「そう、まさにそこなんだよ・・・」と面白くなるところで搭乗案内が入り「来年はぜひ日本で会おう」と約して別れた。でも、実際 Rocinante かが何かを担いで日本にやってきたら、とてもこんな約束を思い出している余裕は無いだろう。でもここは総論賛成状態で十分だ。四年たったら、また何かげ起こらないとも限らない。

補記：今回の会議でも存在感の大きかった Sonzogni さんの報告にあまり触れられなかったなど思っているところに、有友嘉浩さん(東工大)から、昨日刊行の Physical Review にこんな論文が出てましたよと彼らのニュートリノスペクトル総和計算論文を知らされた[11]。やっぱり最前線は手が早い。うかうかしているて・・・。

## 参考文献

- [1] Yoshida T., R. Nakashima, *J. Nucl. Sc.; Technol.*, **18**[6], 393-407 (1981)
- [2] Yoshida T., Tachibana T., Storrer F., Oyamatsu K., Katakura J. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **36**[2], 135-142 (1999)
- [3] Algora A. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 202501 (2010)
- [4] 吉田 正、日本原子力学会誌、**53** (2013) pp.197~200
- [5] Greenwood R.C., Helmer R.G., Putnam M.H., Watts K.D., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A390**, 95-154 (1997)
- [6] Mention G., *et al.*, *Phys. Rev. D* **83**, 073002 (2011)
- [7] 吉田 正、日本原子力学会誌、**56** (2014) pp.521~524
- [8] Summary Report of TAGS Consultants' Meeting, prepared by Dimitriou P. and Nichols A.L.,

INDC(NDS)-0676, (2015) IAEA Nuclear Data Section, Vienna

[9] Mueller Th. A. *et al.*, *Phys. Rev. C* **83**, 054615 (2011)

[10] Tain J.L., to be published

[11] Sonzogni A.A., Johnson T.D., McCutchan, E.A., *Phys. Rev. C* **91**, 011301(R) (2015)



**Consultants' Meeting on  
Total Absorption Gamma-ray Spectroscopy for Decay Heat Calculations  
and Other Applications**

IAEA Headquarters, Vienna, Austria  
15 – 17 December 2014  
Room A2311

**AGENDA**

**Monday, 15 December**

**08:30 – 09:30**

**Registration (IAEA Registration Desk, Gate 1)**

**09:30 – 10:00**

**Opening Session**

Welcoming address

Administrative matters

Election of Chairman and Rapporteur

Adoption of the Agenda

Goals of meeting

**10:00 – 12:30**

**Presentations by participants (45 min. each)**

1) TAGS measurements by Valencia group (I), A. Algora (IFIC – Univ. Valencia)

2) TAGS measurements by ORNL-Warsaw group, M. Karny (Univ. Warsaw)

3) TAGS measurements for anti-neutrino spectra-recent anti-neutrino measurements, M. Fallot (SUBATECH – Univ. Nantes)

**12:30 – 14:00**

**LUNCH**

**14:00 – 18:00**

**Presentations by participants (cont'd)**

- 4) TAGS measurements by Valencia group (II), J.-L. Tain (IFIC – Univ. Valencia)
- 5) Part I: Analysis of reactor beta- and anti-neutrino energy spectra on the basis of the gross theory, T. Yoshida (Tokyo Inst. Technol.)
- 6) Part II: Contributions of Valencia and Idaho TAGS to FP Decay-Heat Calculations: Their Complementarity and Problems Left, T. Yoshida (Tokyo Inst. Technol.)
- 7) TAGS data in ENDF/B VII.1, A. Sonzogni (NNDC-BNL)
- 8) Connection with IAEA CRP on Database for beta-delayed neutrons, P. Dimitriou (NDS-IAEA)
- 9) Verification and Validation: EASY=II & TENDL-2013, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0u or JEFF-3.2, J.-Ch. Sublet (AEA UK)

*Coffee break as needed*

**19:00**

***Dinner at a restaurant (see separate information)***

**Tuesday, 16 December**

**09:00 – 12:30**

**Round Table Discussion**

BDN collaboration site on IAEA NUCLEUS, M. Verpelli

(NDS-IAEA)

Discussion: See List of Topics

*Coffee break as needed*

**12:30 – 14:00**

**LUNCH**

**14:00 – 18:00**

**Round Table Discussion (cont'd)**

Discussion cont'd

Formulation of Requirements/Recommendations

**Wednesday, 17 December**

**09:00 – 12:30**

**Drafting of the Summary Report**

*Coffee break as needed*

**12:30 – 13:00**

**Closing of the meeting**

## LIST OF PARTICIPANTS (Abbreviated)

Muriel FALLOT  
Laboratoire Subatech  
Ecole des Mines de Nantes  
FRANCE

Tadashi YOSHIDA  
Tokyo Institute of Technology  
Research Laboratory for Nuclear Reactors  
JAPAN

Marek KARNY  
Institute of Experimental Physics  
Warsaw University  
POLAND

Alejanrdo ALGORA  
Instituto de Fisica Corpuscular  
Uni. Valencia – C.S.I.C.  
SPAIN

Jose TAIN  
Instituto de Fisica Corpuscular  
Uni. Valencia – C.S.I.C.  
SPAIN

Alan NICHOLS  
Abingdon, Oxfordshire  
UNITED KINGDOM

Jean-Christophe SUBLET  
UK Atomic Energy Authority  
Culham Center for Fusion Energy  
UNITED KINGDOM

Alejandro SONZOGNI  
Brookhaven National Laboratory  
National Nuclear Data Center  
UNITED STATES

Paraskevi DIMITRIOU  
Nuclear Data Section  
Division of Physical and Chemical Sciences  
IAEA