

会議のトピックス (II)

IAEA/CRP「光核反応データの格納と評価」第2回会合報告

原研核データセンター

深堀 智生

fukahori@cracker.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

IAEA/CRP「光核反応データの格納と評価」第2回会合が1998年6月23-26日ロスアラモス国立研究所(LANL)にて開催された。評価済光核反応データファイルを実験的または理論的研究のみから作成することは困難なため、光核反応データ評価方法決定の要求が高まっている。このため、IAEA/CRP「光核反応データの格納及び評価」が組織された。ここでは、参加各国個別の研究成果を持ちより、実験データの体系的なコンピュータファイル化、これを基にした実験データの吟味及び評価のための理論的なアプローチを討議する。今回の会合では、第1回会合で合意した計画の進め方及び役割分担などの進捗状況報告及び今後の作業計画を検討した。以下、敬称は略させて頂く。

R.E. MacFarlane(LANL, T2 グループリーダー)の挨拶、L.S. Waters(LANL, APT 計画リーダー)の挨拶及び APT 計画における核データファイル及びコード開発の現状の説明、P. Oblozinsky(IAEA/NDS)の挨拶に引き続き、各作業の進捗状況、各ファイルの相互比較、IAEA-TECDOC の検討等を行った。以下、会合の概略を報告する。

2. 各サイトの進捗状況及び他の参加者の発表

まず、Oblozinsky より本 CRP の現状報告が行われた。本 CRP の目的は

- IAEA Photonuclear Data File (25 MeV までは最低、50 MeV までが望ましい、可能であれば 150 MeV まで) の作成
- 関連する IAEA-TECDOC の作成

であることを確認した。経緯、参加各サイトの紹介と分担の状況及びファイルの状況が説明された。

M.B. Chadwick(LANL)は、GNASH を光核反応に利用できるように改造したことを報告し、その理論的背景(γ , DR, QDM, 光核反応における前平衡過程からの放出粒子角

度分布などの説明を行った。その他の開発として、GNASH の出力を ENDF-6 フォーマットに変換(反跳残留核を含む)する GSCAN を作成し、NJOY 及び MCNP(X)への光核反応データの取り込みに関して開発者と検討した。LANL の光核反応データファイルとして、W-184 の評価を行い、D,C,O,Al,Fe,Cu,Pb に関する評価を開始した。また、IAEA-TECDOC に関して原稿集め、ドラフトを作成した。

深堀(原研)は JENDL Photonuclear Data File 作成の進捗状況及び BOFOD, CNDC, EPNDL, JENDL, LANL 評価済光核反応データファイルの国際相互比較結果概略の報告を行った。また、IAEA-TECDOC ドラフト担当分の作成について説明した。

M.N. Martins(Sao Paulo 大)は光核反応実験データの格納について報告した。EXFOR に Cu-63(γ ,2n), (γ ,2p), Si-29(γ ,p), Si-30(γ ,p), (γ ,2p)をエントリーし、Pb-208, Bi-209, Ta-181(e,xn), U-238(γ ,n)を処理中である。また、新しい実験として KIPT(Khakov,Ukraine)の U-238 に対する σ (e,f)の 100,150,200,250 MeV での実験が紹介された。

V.V. Varlamov(Moscow State 大)は巨大共鳴パラメータの格納(WWW ページあり、<http://depni.npi.msu.ru/cdfe>)を 215 の同位体及び天然元素について行った。これらは、RIPL、EXFOR にも格納された。この他、EXFOR に 38 エントリー、253 セットの実験データを格納し、モスクワと原研(JAERI-M 93-195)の光核反応文献リストを合わせたものを作成した。評価済実験データライブラリー EPNDL-1,2 を合体した EPNDL を作成し、EPNDL-3 に取り掛かった。IAEA-TECDOC 原稿を作成した。他の文献として、巨大共鳴パラメータの表、光吸収断面積のプロット、巨大共鳴パラメータの系統性をまとめた光核反応断面積の ATLAS を IAEA から公刊の予定(10 月位)であることが報告された。これのまとめと例を TECDOC へ入れることとした。

Yu Bousheng(CIAE)は、W,Zr,V の 11 同位体(W-180,182-184,186, Zr-90-92,94,96, V-51)の 30 MeV 以下での光核反応データの評価を GUNF コードで行った旨報告した。

A.I. Blokhin(IPPE)は、20 MeV までのアクチニド光核反応データ評価への理論的手法の応用に関して、光核分裂断面積への核分裂障壁評価の影響を考慮した評価手法を報告した。BOFOD-98 では、新たに光中性子スペクトルの評価を行ったが、Ta-181、Au-197、Bi-209 に 14, 20 MeV の実験データがある。BOFOD-98 は、20 MeV までの入射エネルギーで 59 同位体の評価を格納している。最終版を 10 月までに公開する予定である。

Y. Lee(KAERI)は、韓国における光核反応データ作成計画及び Pohang に建設予定の電子リニアックによるパルス中性子源(Pohang Neutron Facility, PNF)開発計画について報告した。PNF の安全審査に必要な Ta-181 の光核反応データの評価について、吸収断面積は実験データ及び巨大共鳴モデル(γ ,DR)と疑似重陽子吸収モデル(QDM)を用

いて、 (γ, n) 、 $(\gamma, 2n)$ 、 $(\gamma, 3n)$ 反応に関しては Sao Paulo の方法を利用し、崩壊過程は ALICE-F を用いて評価した。

S.F. Mughabghab(BNL) は準位密度計算へのアプローチ及び光核反応データ評価へのコメントについて報告した。準位密度計算へのアプローチに関して、高エネルギー領域での準位密度公式の改良に関する研究を行っている。中性子発生は高エネルギーでも蒸発過程が支配的である。スピンカットオフパラメータ(SCP)の見積もりについて Porter-Thomas 分布で s-、p-波共鳴データをフィットし、これを基に Bohr-Mottelson, Gilbert-Camelon 公式で SCP をフィットした。a パラメータに関しては、液滴模型(LDM)では直線になり、Ignatyuk モデルでは殻構造が見える。これらのモデルで実験データをフィットしている。LAHET で使用されている a は過大評価であるようだ(20 %、LAHET には反映済)。また、高エネルギー領域では T 依存のパラメータが必要となると報告した。光核反応データ評価へのコメントとして、光中性子生成反応の共鳴エネルギーに関する Berman'75 の報告があるので、実験値がない場合はこれと比較すべきであると報告された。これに関する系統性の研究も行っている。準位密度パラメータに関しては、中性子入射反応の方が a は大きく、 Δ は小さい(符号が反転)の傾向があるとの見解を示した。

3. LANL における光核反応データ関連研究

T. Brown 及び M.B. Chadwick が電子線リニアック(Dual-Axis Radiographic Hydrotest Facility, DARHT)における放射線防護計算のための MCNP に必要な光中性子生成反応についての報告した。DARHT は、2つの電子線リニアック (ビームラインは 90° の角度を持つ)による熱水力のためのラジオグラフィック施設で、20 MeV, 4 kA peak, 60ns-period の仕様を予定している。この施設の遮蔽設計に光核反応データが必要となる。MCNP で以下の計算を行っている。

- 電子、光子の輸送→線源項 (C, W ターゲット領域)
- 光子輸送計算→光子による線量評価(ターゲットに近い作業領域)
- 中性子、光子輸送計算→全体の線量評価
- 光中性子スペクトルの実験値は非常に少ない→GNASH による計算値を使う

「JENDL-PDF は光子入射反応の角度分布は入っているか」との質問があった。

M. White 及び R.C. Little は光核反応データライブラリー使用のための MCNP 増強について報告した。医学利用と放射線輸送に関して医療用電子線加速器中の中性子の影響に興味があるようだ。MCNP(X)の現状について、中性子入射では中性子、陽子を生成、陽子入射では電子、陽子及び中性子を生成、電子(光子)入射では電子と陽

子を生成出来る。MCNP で光核反応データファイルに対応するために以下を反映できるようにした。

- 粒子収率
- 粒子ごとの heating number
- MT=5 の取り扱い→反応断面積の認識
- DDX の取り扱い
- 光子衝突距離計算のための全断面積修正
- main material card の分離と光核反応データの格納
- 問題ごとの粒子生成に対するバイアス作成
- 新しい入射粒子に対応するための表の整備

R.E. MacFarlane は NJOY による光核反応データの処理について報告した。群定数用モジュール(γ , ROUPR, HEATER, MATXSR)改造の必要があり、別のコード (TRANSX)が full-coupled セットを作るのに必要である。モンテカルロ用モジュールに関しては ACER の改造の必要あり、光核反応版の ACE 形式が新しい XCI モジュールで設計中である。GROUPR は LCT=3 (n, p, d, t, He-3, α は CMS 系、 γ と残留核は LAB 系(新しく ENDF-6 フォーマットに入れられた)) に対応し、Kinematics の修正、Chadwick の開発した光核反应用の Kalbach システムイクスの導入を行った。HEATER は GROUPR が OK ならば変更の必要がない。MATXSR に関しては、出力群構造が MATXS 形式が良いが、通常のものとは繋ぐためには TRANSX コードが必要である。ACER では、ACE 形式で光核反応データの MCNPX ライブラリー用格納が可能とした (荷電粒子も OK)。

W.B. Willson は LWR 停止後の光核反応中性子源の強度とスペクトルに関する報告を行った。1000 cph の中性子が炉停止後 24 日まで観測される。これに関して、

- 単一燃料での研究：1つの半減期(約 15 日)で説明される
- NSCR 炉での研究：重水素の濃度に比例して増える
- PWR 燃料中の $D(\gamma, n)$ スペクトルの研究：スペクトルソース計算に PHONEX(光中性子スペクトルの計算コード)を使用

等の実験を行った。炉停止後の中性子源としては、停止直後では光核反応が(α, n)の 1000 倍もある (5×10^5 秒後と同じくらい)。

A. Mashnik は光核反応データにおける cascade-exciton モデルについて報告した。CEM95 では $40 \text{ MeV} < E < 5 \text{ GeV}$ のエネルギー範囲で計算可能である。比較対象となる実験値に関して

- NP, A586 (1995) 281-292: Ca-40(γ, xp), E=60 MeV, spectrum
- NP, A457 (1986) 645: C(γ, xp), E=198 MeV, DDX 角度積分したものは前方

ピークを無視しているので、信じられない

● Au-197(γ , fis) : 実験値を持っている
が紹介された。

4. 光核反応データファイルの国際相互比較

以下に示す 39 反応のプロット図により相互比較がなされた。

Si-28(γ , n)Si-27,	V-51(γ , n)V-50,	V-51(γ , 2n)V-49,
Cr-52(γ , n)Cr-51,	Fe-54(γ , n)Fe-53,	Fe-56(γ , abs),
Fe-56(γ , n)Fe-55,	Cu-63(γ , n)Cu-62,	Cu-63(γ , p)Ni-62,
Cu-63(γ , np)Ni-61,	Cu-65(γ , n)Cu-64,	Cu-65(γ , p)Ni-64,
Cu-65(γ , np)Ni-63,	Mo-94(γ , n)Mo-93,	Mo-94(γ , 2n)Mo-92,
Mo-96(γ , n)Mo-95,	Mo-96(γ , 2n)Mo-94,	Mo-98(γ , n)Mo-97,
Mo-98(γ , 2n)Mo-96,	W-182(γ , abs),	W-182(γ , n)W-181,
W-184(γ , abs),	W-184(γ , n)W-183,	W-186(γ , abs),
W-186(γ , n)W-185,	W-186(γ , 2n)W-184,	W-186(γ , 3n)W-183,
Pb-nat(γ , abs),	Bi-209(γ , abs),	Bi-209(γ , n)Bi-208,
Bi-209(γ , 2n)Bi-207,	U-235(γ , abs),	U-235(γ , fis),
U-235(γ , n)U-234,	U-235(γ , 2n)U-233,	U-238(γ , abs),
U-238(γ , fis),	U-238(γ , n)U-237 and	U-238(γ , 2n)U-236.

この後、IAEA Photonuclear Data Library へ向けての今後の選択指針について討議し、
以下のような合意を得た。

[最重要選択指針]

- 評価の質 (実験データとの一致、実験データがない場合は EPNDL を実験値として取り扱う)
- 完全性 (放射化断面積及び輸送断面積が格納されていること)

[追加の考慮されるべき選択指針]

- エネルギー上限は高い方がよい
- NJOY で処理可能であり (NJOY の最新版で処理したものは、LANL のために働いているという感じをなくすため、各サイトに無償で配布する)
- 整合性が保たれている
- 選択されなかったライブラリーも参考ファイルとして含める (RIPL の場合と同じ)

その他のコメントとして、

- 各評価者は EXFOR に含まれていない実験データが有れば深堀へ送付する

- 実験値の中には2つ以上の反応 ((γ, n) の実験データには $(\gamma, n)+(\gamma, np)$ の値が格納されている場合がある) が含まれているので注意を要する
- 優先度の高い核種については実験値が無くとも比較プロットに含める
- EPNDL 中の Pb-nat、C-12 のデータは核子当たりになっているので注意を要する

が提案された。

5. TECDOC ドラフトの検討

IAEA-TECDOC 第1 ドラフトを基に検討を行った。エンドユーザのことを考えるとあまり詳細すぎるのは問題であるため、適当な範囲に説明はとどめることとした。また、各章の責任担当分担を以下のように決めた。

- 第1章 Introduction: Oblozinsky(+Foreword)
- 第2章 Determinations and Notations: Martins(+Varlamov)
- 第3章 Available Experimental Data: Martins(+Varlamov)
- 第4章 Nuclear Models: Chadwick
- 第5章 Evaluations: Chadwick(+Fukahori)
- 第6章 Summary of IAEA Photonuclear Library: Oblozinsky
- 第7章 Summary of Recommendations: Chadwick

以下、各章毎の決定事項の概略を述べる。(ドラフト版に興味のある方は、深堀まで連絡して頂ければ、対応いたします。)

第2章では、全体をシンボルを使った式にし、第3章以降のシンボルの表を付け加えるため、各章の担当者がこれを知らせる。エンドユーザーのために JAERI、EPNDL 等の名前の説明を入れる。

第3章では、基本的に全体を減量する。但し、3.3 節(Compiled Data in EXFOR System)では減量と同時に、

- 何が EXFOR に入っているかの説明がもっと必要
- 実際のデータがどうか、リストなど
- 各サイトからの実験データも含める
- アクセスの方法を示す

とする。3.4 節(Additional Data in Other Formats)に GDR パラメータの参考文献を入れる。

第4章では、4.1,4.2 節(Photoabsorption, Particle Decay Models)にはもっと式を入れ、4.4 節(Nuclear Modeling Codes)は JAERI,CNDC,LANL 各2 ページ(必要であれば、4.1-3 へ情報を移す)とする。4.3 節(Photofission) は obninsk のものの説明だけであるので、一

一般的に書き直し、減量する(3-4 ページ)。

第5章では、5.1節(Evaluations Based on Experimental Data)の図は最後の2枚だけ、文章は70%削除する。5.2節(Evaluations Based on Theories)の Fukahori が書いたものは4.1.4.2節へ移動し、Chadwick が短いレビューを書く。5.3節(Evaluated Libraries)は各5ページを上限とする。5.4節(Intercomparison)は反応名を図中に入れ、凡例を統一、Chadwick が文章化した国際相互比較のまとめをテキストに含む。評価値の凡例として、CNDCL, EPNDL, BOFOD, LANL 等をライブラリーの名前(Beijing (CNDCL), Moscow (EPNDL), Obninsk (BOFOD), Los Alamos (LA150), JAERI (JENDL-PDF))にする。最低、Be, C, O, Al, Fe, Ni, Cu, Zr, W, Pb, Bi, U の abs, Xn, fis (一個の評価値でもプロットする)を含める。

第6章では、6.3節(Illustration of Evaluated ...)を除く。

第7章を新たに付け加え、医療用、遮蔽、加速器工学関連応用のための実験及び単色光子源の開発など将来へ向けての提案を加える。

この他、光核反応データファイルに関するフォーマットを MacFarlane、Yu、Lee、Blokhin、Little、Fukahori で討論した。結果を下表にまとめる。

MF	MT	Explanation
1	451	Descriptive information and dictionary
3	1	Total photoabsorption cross section
3	4	Total (γ , 1n) cross section
3	5	Photoabsorption cross section from which production cross sections for particles and isotopes are determined using yields in MF6/MT5
3	16	Total (γ , 2n) cross section
3	18	Photofission cross section
3	103-107	Total (γ , 1z) cross sections
4	18	Photofission neutron angular distribution
5	18	Prompt photofission neutron spectrum
5	455	Delayed photofission neutron spectrum
6	5	Yield (branching ratios or multiplicities) and double-differential cross sections
6	16	DDX for (γ , 2n)
6	18	DDX for photofission neutron
6	103-107 600-850	DDX for discrete and continuum levels

Sum-rule は以下の通りである。

- $MT1=MT5+MT18+MT4+MT16+MT103+\dots$
- $MT4=\text{sum}(MT\ 50-91)$

- MT103=sum(MT 600-649) etc.

この他、

- MT=4,16,103 等を用いた場合、重複を避けるために、これらの分を MT5 の記述から除く。
- MF3/MT4 は MF3/MT50-91 の合計だけに用い、スペクトルを格納する場合は、MF6/MT91 等を用いる (MF6/MT4 は使用不可)。MT103-107 も同様。
- 光核分裂 γ 線生成に MF12,14,15 を使った場合は、中性子データは MF4,5 に入れる。中性子データに MF6 を使った場合は γ 線データも MF6 で格納する。
- MT201-207 は使用不可、MT5 を使う。この際、同位体生成分岐比のみ与えて(LAW=0)、粒子スペクトル(LAW=1 or 7)と混在可能。
- 粒子スペクトルは必ず MF6 で与える (MF4,5 は使用不可)。
- γ 線データに関して、MF13 は使用不可。

等が提案され、了承された。JENDL-PDF の場合、処理のための前段変換プログラムが必要となる。

6. 会合報告書の作成

以上議論してきた国際相互比較、IAEA-TECDOC、フォーマット、各サイトの Progress Report、各サイトの将来計画(KAERI を含む)を含んだ会合報告書を作成した。Oblozinsky がドラフトを 1~2 が月以内にメンバーに送る。

7. おわりに

次回予定は 1999 年 10 月 25-29 日、原研の予定(back-up: ウィーン)であり、締切等は以下の通りである。

- 1998 年 10 月末: 各担当者は TECDOC 原稿改訂版を Chadwick へ送る
- 1999 年 2 or 3 月: 2nd ドラフト

以上、会議の様子及び IAEA/CRP の進捗状況を簡単に概観した。JENDL Photonuclear Data File はこの CRP で大きな位置を占めており、同ファイルの信頼性及び日本に対する期待が大きいことが伺われた。シグマ委員会と協力の下、ファイル作成を進め、CRP への貢献を果たしていきたいと思う。