



2012 年原子力学会春の年会 企画セッション 「評価済核構造データファイル ENSDF とその応用」

日本原子力学会「2012 年春の年会」2012 年 3 月 20 日 (火) 福井大学

(1) 評価済み核構造データファイル (ENSDF) の概要

日本原子力研究開発機構
応用核物理研究グループ
飯村 秀紀
iimura.hideki@jaea.go.jp

1. ENSDF とは何か

核データといえば、中性子核反応データと思われる程に、特に原子力関係の人々の間では中性子核反応データが重要視される。しかし、核データにはそれ以外に荷電粒子核反応データと核構造崩壊データが含まれる。このうち核構造崩壊データは、主として核の励起準位と、崩壊における放射線についてのデータである。核構造崩壊データをまとめたものといえば、まず思い浮かぶのが Nuclear Data Sheets (NDS) と Table of Isotopes である。NDS のソースファイルが Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) である。NDS は ENSDF を計算機プログラムで処理することにより作成されるので、内容的に両者は同一である。一方、Table of Isotopes は、初版から第 7 版までは ENSDF とは独立した流れであったが、1996 年に発行された第 8 版は ENSDF を基に作成された。

ENSDF は、全ての核について核構造・崩壊に関わるデータを含んでおり、その内容は 5 年から 7 年の周期で改訂されている。この改訂は質量数毎に行われるので、ENSDF の改訂作業は mass chain evaluation とも呼ばれている。重い核は別として、ほとんどの放射性核種は β 崩壊するので、mass chain 方式の編集は、崩壊の連鎖ごとに見ることができて便利である。

歴史的には、mass chain evaluation は 1950 年代の中頃から Oak Ridge で Katherine Way

氏により始められた。これは、崩壊に関係したデータをカードにする方式であったが、1960年代になって、雑誌の形式に切り替えられNDSとして発行されるようになった。また、内容についても崩壊データ中心から準位データ中心に変わってきた。その後、1976年のIAEAの会議で、Oak Ridgeで開発されてきた方法で実験データを編集し、評価済み核構造崩壊データの計算機化されたファイル(ENSDF)を作るようになった。これをOak Ridgeのスタッフだけであれば、改訂周期が長くなりすぎるので、国際協力により行うことになった。わが国においては、1977年に協力態勢が整い、核構造・崩壊データワーキンググループが発足した。米国では、1981年に核構造崩壊データの評価作業の中心がOak RidgeからBrookhavenのNational Nuclear Data Center(NNDC)に移っている。

現在、ENSDFはNNDCで維持管理されている。NNDCでは他に、核構造崩壊に関わるデータベースとして、Nuclear Science References(NSR)、XUNDL、NuDatなどが維持管理されている。このうちNSRは文献ファイルであり、核構造、核反応の実験と核理論の論文を編集してある。NSRでは、各論文に8文字の記号からなるKEYNOを割り振って論文を区別する。ENSDFで論文を参照するときは、KEYNOでNSRの文献データを指定するので、ENSDFとNSRは表裏一体と言える。また、XUNDLは、原子核実験のデータを編集したファイルであり、評価は行っていない。ENSDFは、実験データを評価するので、新しい実験を収録するのにXUNDLより時間がかかる。その意味で、ENSDFとXUNDLは相補的關係にある。NuDatは核図表とENSDFを組み合わせたデータベースで、インターネット上で、核図表からインタラクティブにそれぞれの核種のENSDFを参照することができる。

2. ENSDFの構造

ENSDFは図1に示すように階層的な構造をしており、先ず質量数毎に分かれ、さらに各質量数は元素毎に分かれている。それぞれの元素は、1個のadopted datasetと、複数

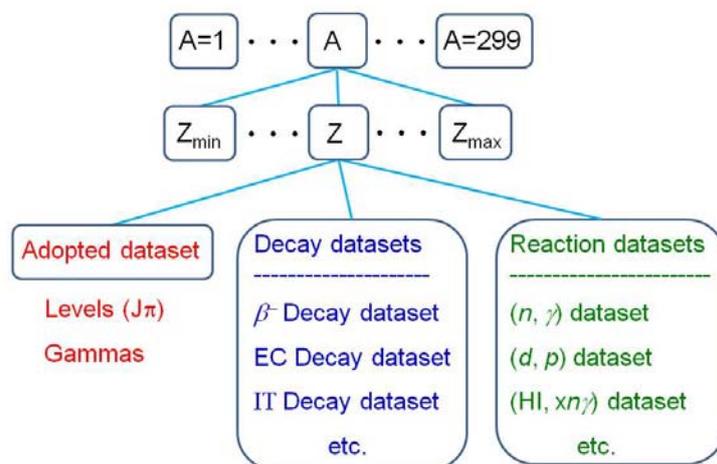


図1 ENSDFの構造

個の decay dataset と reaction dataset から構成されている。adopted dataset は、decay dataset と reaction dataset から作成され、崩壊や反応で見えている全ての準位と γ 線が与えられる。また、それらの準位のスピン・パリティも、崩壊や反応から推定して与えられる。

例として、質量数 124 の場合だと Ru から Pr まで 13 個の元素を含む。その中で、例えば Te は、1 個の adopted dataset、3 個の decay dataset、15 個の reaction dataset で構成されている。このうち decay dataset は、 ^{124}Sb の β 崩壊、 $^{124\text{m}}\text{Sb}$ の β 崩壊、 ^{124}I の電子捕獲崩壊である。これらは、娘核が共通で ^{124}Te である。このように、ENSDF では、崩壊データは娘核で分類される。また、reaction dataset には $^{123}\text{Te}(n,\gamma)$ 反応や $^{125}\text{Te}(p,d)$ 反応などがある。これらは、核反応の残留核が共通で ^{124}Te である。

図 2 に例として、 ^{124}Te の adopted dataset の一部と、 ^{124}Sb の decay dataset の一部を示す。各行はレコードないしカードと呼ばれ、ENSDF の最小単位である。各準位、各 γ 線、各 β 線はそれぞれ、1 ないし数個のレコードで記述される。全てのレコードを通じて 1 から 5 のカラムには核種が入る。この例だと“124TE”と記してあり、decay dataset の親核種についてのレコードのみ“124SB”となっている。コメントレコードは第 7 カラムに“C”が入る。第 8 カラムはレコードの区別を示す。“L”は準位、“G”は γ 線、“P”は親核、“B”は β 線のレコードであることを示す。“N”は崩壊当たりの γ 線の規格定数のレコードであり、応用分野ではとくに重要である。第 10 カラム以降は、レコードの区別ごとの物理量が入る。準位レコードの場合はエネルギーとスピン・パリティ、 γ 線レコードの場合はエネルギー、相対強度、多重度、混合比、親核レコードの場合は半減期と崩壊の Q 値、 β 線レコードな場合はエネルギー、相対強度、 $\log ft$ 値などが主要な物理量である。

ENSDF 全体は、2012 年 3 月の段階で約 238 万レコードあり、毎年 3~4% 増えている。ENSDF に含まれる核種数は 3120 核種、データセットの総数は約 17,000 個、全体の大きさは約 190 MB である。

```

124TE L 1957.899 12 4+
124TE CL J L=4 IN (P,P'); GG(THETA) IN 124SB B-DECAY (60.20 D)
124TE G 709.304 17 100.0 14 M1+E2 -0.18 5
124TE G 1355.176 17 79.1 21 E2(+M3) -0.32 +23-18

124SB P 0.0 3- 60.20 D 3 2904.3 15
124TE N 0.9779 22 1.0 1.0
124TE L 0.0 0+
124TE L 602.7278 21 2+
124TE B 2301 4 23.2 3 10.251 6

```

図 2 ENSDF データセットの例。中間の空白より上部は ^{124}Te の adopted dataset の一部、下部は ^{124}Sb の β decay dataset の一部を示す。

3. ENSDF の利用

一つの質量数の評価が終了すると、評価結果は ENSDF に格納される他に NDS として出版される。ENSDF は図 2 に示したようにそのままでは読みづらいが、NDS では崩壊図式や、準位や γ 線の表などの形にまとめられるので見やすくなる。NDS は、ほぼ毎月発行され、各号に 1 つか 2 つの質量数の評価結果が掲載される。1 つの質量数で平均 200 頁程度である。質量数 21 以下の評価結果は、歴史的な理由から Nuclear Physics 誌に掲載されるが、ENSDF には入っている。図 3 に、ENSDF に収録されている評価結果の基になった実験データの最終年(カットオフ年)の分布を示す。大体 2000 年代中頃が多いが、1990 年代以来改訂されていないデータも少なくないことを示している。

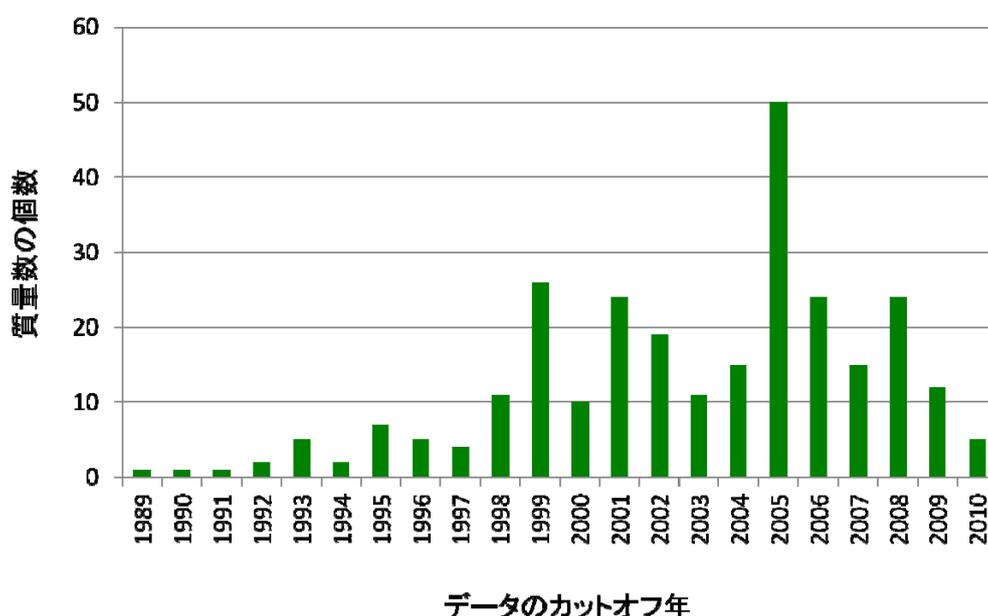


図 3 ENSDF に収録されているデータの cutoff 年の分布

NDS は Elsevier 社が販売しているが、現在では印刷された NDS の購入は少なくなり、大部分がインターネットによるアクセスのみの契約となっている。NDS の有料でのダウンロード数は、2009 年は約 15000 件で毎年 2000 件ほど増えている。NDS の国別のダウンロード数を図 4 に示す。NDS は有料であるが、ほぼ同じものを NNDC のデータベースから無料で取り出すことができる。ENSDF と NuDat の取り出し数は、2010 年は合わせて約 150 万件であり非常に良く利用されている。

ところで、ENSDF が利用しやすいかどうかを考えて見ると、ENSDF にはあまりに多くのデータが詰め込まれているので、核物理の専門家向きではあるが、応用分野の研究者にはわかりにくいのではないだろうか。応用分野は、核物理分野と違い、例えば放射線防護、医療内部線量、崩壊熱、保障措置と核物質管理、放射化分析と即発 γ 線分析など

多様であり、必要とされる核構造崩壊データもそれぞれ異なっている。それに対応するには、それぞれの利用分野に合った ENSDF のサブファイルを作るのが有効だと思われる。

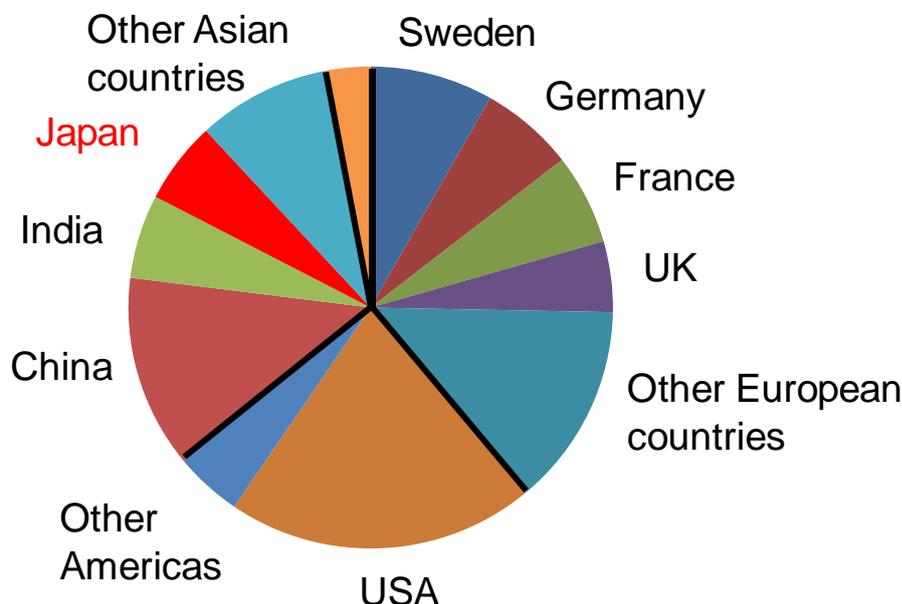


図4 NDS ダウンロード数の比較 (2006~2007 年)

4. 評価と国際ネットワーク

ENSDF を改訂するための評価作業は、分担した質量数の核構造崩壊に関わる実験の文献を収集することから始まる。一つの質量数で、200 以上の文献が発表されていることも珍しくない。次にこれらの文献を読んでデータを評価する。これは時間のかかる作業であり、例えばある物理量に対して互いに矛盾する実験データが発表されている場合などは、どう評価すべきか悩んでたちまち時間が過ぎてしまう。特にスピン・パリティの評価に時間がかかる。評価が終われば、評価結果を決められた書式で計算機ファイルにまとめ、NNDC に送る。査読されて返されてきた意見を基にファイルを修正し、最終的なファイルを NNDC に送り返して改訂が完了する。

評価作業では、次のような点に注意する。

- (1) 対象となる物理量を完全に網羅する。
- (2) 多くの実験からのデータを評価して、ただ一つの数値を表示する。
- (3) 全ての評価値について、可能な限り誤差を付ける。
- (4) 採用したデータの評価方法をコメントする。また、参考データ、文献を完備させる。
- (5) 信頼できる評価値が得られている場合は、それらを採用する。
- (6) 評価方法は、評価者ネットワーク会議で決めた方針に従う。

このうち(4)について解説すると、NDS を読んだ人が、そこにある評価値がどのような理由で決まったかをトレースできるようにしておくということである。また、(5)について、**mass chain evaluation** とは別に、質量、電磁気モーメント、 γ 線強度などの特定の物理量を全ての核種について評価する活動があり、これらは **horizontal evaluation** と呼ばれている。特に重要なのは質量で、これについては A.H. Wapstra と G. Audi が長く評価を行ってきた。彼らの質量表は何回か改訂され、最新版は来年に出版予定である。ENSDF では、**horizontal evaluation** で良い評価値が得られている場合には、それらを採用するようになっている。ただし **horizontal evaluation** も実験データに基づく評価値である。最後の(6)については、評価の基準を評価者の会議で決めて、全ての評価者がそれに従って同じ基準で評価をするということである。こうした基準の例として、どのような条件が満たされればスピンのパリティが決まったとするかを定めた基準などがある。

評価では、作業のための計算コードが重要な役割を果たす。こうしたコードには、 γ 線のエネルギーから準位のエネルギーを計算する GTOL、 γ 線の内部転換の割合を計算する BrIcc、 β 崩壊の log ft 値を計算する LOGFT、ENSDF から NDS 形式の図や表を作成する ENSDAT などがある。これらのコードは、評価作業以外にも例えば実験データの解析などにも有用であるので、実験をする人などにも使ってもらいたい。

(コードの所在は、http://www.nndc.bnl.gov/nndcscr/ensdf_pgm/analysis/)

ENSDF の評価者は、核構造崩壊データ評価者国際ネットワークを形成している。ネットワークでは、各国の評価者の代表者による会議を、IAEA を事務局として隔年で開催している。会議の目的は、評価者間での評価作業の分担の調整と、評価の規則や標準を改善することなどである。昨年行われた会議には、20 カ国から 40 人弱の出席者があり、各国の評価センターの作業の進捗状況、ネットワークの運営に関する事項、評価作業の技術的な問題などが話し合われた。筆者はずいぶん久しぶりに出席したのであるが、その間に参加者の顔ぶれも相当変わった。今は、ネットワーク発足のころからずっと評価をやってきた古い人が辞めていき、新しい人が入りつつある時期であるように思う。

図 5 は各国の評価センターが分担している質量数である。米国とカナダが約 80% で多くの質量数を分担している。これに対してヨーロッパは 6% 程度の分担でありながら、図 4 に示したように 40% 近くの利用があるので、米国は不満を持っている。日本は 4% 程度の分担に対して 6% 程度の利用であるので、今のところはバランスを保っている。

最近のネットワークの会議で問題になっているのは、評価者が高齢化して評価を止めていっていることである。この問題は、特にヨーロッパで深刻である。これに対処するために最近 IAEA では、若い人に ENSDF の評価手法を教えるワークショップを、トリエステその他において数回開催している。こうした活動は、ある程度うまくいっており、最近新しい評価者がネットワークに加わっている。ただし、一度加わっても長続きせず辞めてしまう例もあり、なかなか難しいようである。

US/BNL	45-50, 57, 58, 60-73(ex 62-64), 82, 84-88, 94-97, 99, 118, 119, 136-148, 150, 152-165(ex 164), 180-183, 185, 189, 230-240, >249
US/ORNL	241-249
US/LBNL	21-30, 59, 81, 83, 90-93, 166-171, 184, 186, 187, 191-193, 210-217
US/TUNL	2-20
US/ANL	106-112, 176-179, 199-209
Canada	1, 31-44, 64, 89, 98, 100, 149, 151, 164, 188, 190, 194
France	113-117
Hungary	101-105
Russia	130-135, 146
China	51-56, 62, 63, 195-198
India	218-229
Japan	120-129
Kuwait	74-80
Australia	172-175

図5 核構造崩壊データ評価者国際ネットワークでの質量数評価の分担

日本の ENSDF グループは、JENDL 委員会核データ専門部会の中にある。担当している質量数は 120 から 129 である。このうち現在は、改訂年の比較的古い質量数 120 の評価を橋爪朗氏（元理研）が、質量数 126 を大矢進氏（元新潟大）、片倉純一氏（元原子力機構、現長岡技術科学大）、飯村（筆者）が行っている。また、質量数 118 の評価を喜多尾憲助氏（元放医研）と神戸政秋氏（東京都市大）が行っているが、この質量数については今回の改訂終了後に担当を返上することが決まっている。現在このようなメンバーで評価を行っているが、メンバーが高齢化しているので、このままだとそう遠くない将来、国際ネットワークでの質量数評価を分担するのが困難になると予想される。そうなると、日本は ENSDF の評価に貢献することが無く利用するだけということになってしまうので、新しい人に ENSDF の評価作業にぜひ加わってもらいたい。

以上