

飯村 秀紀
Imura Hideki

1. アイソトープの核データ集

核データは、中性子データ、核反応データ、核構造崩壊データに大別される。中性子データは中性子による核反応の断面積を主に扱っている。原子力関係の人々の間では中性子データが重要視される。核反応データは中性子以外の荷電粒子核反応や光核反応の断面積である。核構造崩壊データは、主として核の準位と、崩壊における放射線についてのデータである。アイソトープの利用者に必要な核データは、主に放射性核種の崩壊に関するものであるから、本稿では核構造崩壊データについて述べる。原子炉で中性子照射により放射性核種を作るときや放射化分析を行うときには中性子データが必要であり、加速器で核医学用の放射性核種を作るためには荷電粒子核反応データが必要なことは言うまでもないが、本稿ではそうしたデータについてはふれない。

核構造崩壊データをまとめたものを挙げると、まず思いつくのが Table of Isotopes¹⁾ である。Table of Isotopes の初版は 1940 年代に米国の Berkeley のスタッフによって発表され、現在のものは 1996 年に出版された第 8 版である。第 8 版は第 7 版 (1978 年) に比べて頁数が約 2 倍になったため 2 分冊となった。また、第 8 版では CD-ROM 版も出され、CD-ROM 版のみ 1998 年にアップデートされている。第 9 版を準備する話は全く聞こえてこない。おそらく第 8 版が最後になるのであろう。なお、第 7 版と第 8 版の間に Table of Radioactive Isotopes²⁾ が出版されている。これはアイソトープの利用者向けに放射性崩壊のデータのみを掲載し、エネルギー準位に関する情報を省いたものである。

もう一つの代表的な核構造崩壊データ集は Nuclear Data Sheets である。Nuclear Data Sheets の編集作業は、1950 年代の中頃から米国の Oak Ridge Na-

tional Laboratory (ORNL) で始められ、現在は Brookhaven の National Nuclear Data Center (NNDC) に移っている。Nuclear Data Sheets は年に 8 冊ほど出版され、1 冊に 1 個か 2 個の質量数の核構造崩壊データが掲載されている。それぞれの質量数について、10 年程度の周期で改訂版が出ている。Nuclear Data Sheets は、Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) と呼ばれる計算機ファイルをプログラムで処理することによって作成されている (図 1)。ENSDF は、全ての核種について核構造・崩壊に関わる膨大なデータを含んでおり、NNDC で維持管理されている。更新のための実験データの収集と評価は質量数毎に分担して行われており、筆者も担当している。ENSDF の評価作業がどのように行われるかについては次章で述べる。

一方、Table of Isotopes と Nuclear Data Sheets 以外で崩壊データをまとめたものとして、フランスのベクレル研究所で編集されている Table of Radionuclides³⁾ がある。これは、半減期や放射線のエネルギー・強度など崩壊に関わるデータだけを集めている。2004 年から約 2 年毎に発行され、今年度で第 8 巻が予定されている。各巻に新規と更新で合わせて 30 個程度の放射性核種が掲載されている。これまでに掲載された核種数は約 190 核種であり、全ての核種を網羅した Table of Isotopes や Nuclear Data Sheets に比べると核種数ははるかに少ないが、利用

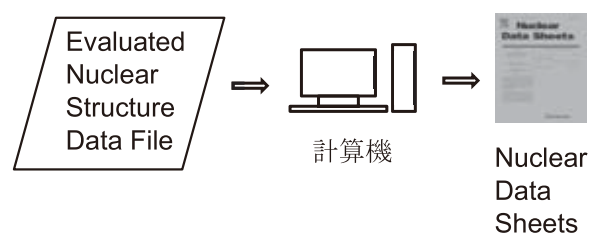


図 1

度の高い核種はほとんどすべて含まれている。Table of Radionuclides を作成するための実験データの収集と評価は、核種毎に分担して国際協力で行なわれている。

その他、国際原子力機関 (IAEA) から 2007 年に出版された Update of X-ray and Gamma-ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications⁴⁾ も有用である。これは 1991 年に出版された IAEA-TECDOC-619 の改訂版である。改訂版では、検出器の効率の較正やその他の応用目的でよく使われる 64 個の放射性核種について、半減期と X 線・ γ 線の放出率などがまとめられている。

以上に挙げた核データ集のうち、Table of Isotopes は初版から第 7 版までは ENSDF とは独立に編集されていたが、第 8 版については Nuclear Data Sheets と同様に ENSDF をもとに作成された。一方、Table of Radionuclides と Update of X-ray and Gamma-ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications は、ENSDF とは独立に作成されている。

2. 核構造崩壊データの評価

核構造崩壊データの評価とは多くの実験データからただ一つの推奨値を提示することである。また、その推奨値に不確定性を付けることである。評価はどのように行われるのか、以下では ENSDF の場合を述べる。評価の方法は Table of Radionuclides などでも基本的には同じである。ENSDF の評価作業は、質量数毎に米国や日本など 8 か国で分担している。各国の評価者による国際会議が、IAEA を事務局として隔年で開催されている。会議では、評価者間での評価作業の分担や、評価のガイドラインの見直しなどが話し合われる。

実際の評価作業は、各評価者がまず、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。様々な論文誌、会議録、研究機関報告などを調べて文献にもれがないようにする。次に、集めた文献を読んでそこにある実験データを評価する。作成した評価結果は別の評価者によって査読され、それをもとに修正する。最終的に確定した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。NNDC では、評価結果を ENSDF に収納するほか、Nuclear Data Sheets にその質量数の改訂版を出版する。

ENSDF では、各評価者が異なった基準で評価しないように、評価作業は国際会議で決められたガイドラインに従って行うことになっている。評価の手順は次のとおりである。①文献にある実験データを、実験方法や文献の種類 (査読されているかどうか) などによって採用するか否か決める。古いデータに対して、より適切な方法で測定された新しいデータがある場合は、古いデータは採用しない。同じ研究グループから新旧のデータが発表されている場合は、旧データは採用しない。誤差の付いていないデータは採用しない。②採用したデータの誤差を吟味する。データの中には統計的誤差だけを求めて、小さな誤差を安易に表示しているものもある。そのようなデータについては、実験で見落とされている系統的誤差を見積もって誤差を大きくする。③採用したデータのばらつきを統計的に分析する。カイ二乗値が大きすぎるようなら、平均値から大きく離れたデータを平均から除外する。あるいは誤差の小さなデータの誤差を大きくする。④どの実験データを採用し、どのように平均したかを表記する。これによって、後で利用者が、評価値が得られた過程をトレースできるようにしておく。

評価の例として、 ^{60}Co の半減期の測定値と ENSDF での評価値を図 2 に示す。1950 年代以前の測定も 10 あまりあるが、それらは測定精度が良くないとして不採用とされている。半減期以外では、利用価値が特に高いデータは γ 線の強度である。 γ 線の強度には、相対強度と崩壊あたりの強度がある。相対

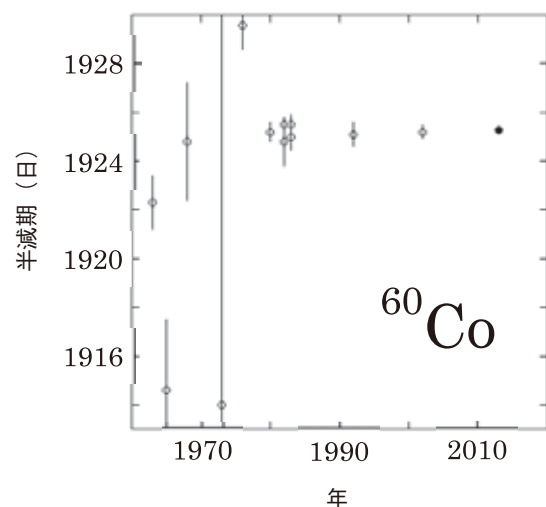


図 2 ^{60}Co の半減期の測定値○と評価値●

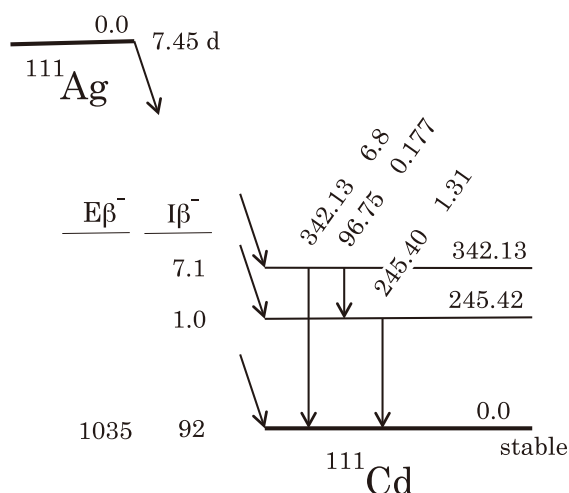


図3 ^{111}Ag の崩壊図式

横線（準位）の右上の数字は準位の励起エネルギー（keV）である。 β 崩壊は途中で切れている斜めの矢印で示されている。準位の左の表は、それぞれの準位に崩壊する β 線の最大エネルギー $E\beta^-$ 、%で表した分岐比 $I\beta^-$ である。準位間の縦の矢印は γ 線を表す。縦の矢印の上の斜めの数字は、 γ 線のエネルギー（keV）と100崩壊あたりの遷移強度（ γ 線と内部転換電子の和）である

強度は、核種が崩壊したときに放出される各 γ 線の強度比（光子数比）である。一方、崩壊あたりの強度は、核種が1個崩壊したときに各 γ 線が放出される確率である。図3にNuclear Data Sheetsにある ^{111}Ag の崩壊図式を例として示す。崩壊あたりの γ 線強度を決めるには、各 γ 線の強度比に加えて、基底状態への β 崩壊の分岐比が必要である。 β 崩壊の分岐比と崩壊あたりの γ 線強度に矛盾が無いようにする。一般に β 崩壊の分岐比の測定精度はあまり良くないので、基底状態への β 崩壊分岐比が大きい場合、崩壊あたりの γ 線強度は相対強度に比べて精度が低くなる。

β 崩壊のエネルギーは、Audiらが全ての核種について継続的に評価している。この評価は、 β 崩壊のエネルギーの測定データに加えて、原子質量や核反応のエネルギーの測定データをもとにしており信頼性が高い。最新版は2012年に発表されている⁵⁾。ENSDFでは、 β 崩壊のエネルギーは、Audiらの評価値を採用することに取り決めている。また、内部転換電子の放出割合については、決められた計算コードを使って得られる理論値を採用することになっている。ENSDFでは、半減期や γ 線のエネルギー・強度などほとんどの物理量は実験値のみから評価されるが、内部転換電子の放出割合や、 β 崩壊

の軌道電子捕獲と陽電子（ β^+ ）放出の比などの原子過程については、理論計算の精度が十分良いとして一般に理論値を推奨している。

3. アイソトープ手帳に記載されている核データ

日本アイソトープ協会から発行されているアイソトープ手帳⁶⁾にも核データが記載されている。アイソトープ手帳の特徴はコンパクトで手軽に利用できることであろう。手帳サイズであるにもかかわらず、崩壊データに加えて中性子データ、核分裂に関するデータなどもまとめられていて便利である。“おもな放射性同位元素の表”に記載された核種数は、最新の第11版（2011年）では405核種で、10版（2001年）の319核種より大幅に増えている。第11版では、ORNLで開発され日本原子力研究開発機構で改良が加えられたプログラムEDISTR04を用いて、ENSDFをもとにし、原子核の崩壊に伴い放出される種々の放射線のデータを作成している⁷⁾。また、半減期などについては、Audiらの2003年の評価（NUBASE2003）とENSDFとを比較して、異なる場合は新しい方の評価値を採用している。

一方、“放射線検出器の校正に用いられる核種”に掲載されたX線と γ 線のデータは、ENSDFではなくUpdate of X-ray and Gamma-ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications⁴⁾の値を転載している。

4. 核データ集の利用

おわりにアイソトープの核データ集の利用方法について述べる。最近では、印刷された核データ集を調べることは少なく、大部分がインターネットによる利用であろう。Nuclear Data Sheetsは出版元であるElsevier社のページ⁸⁾からダウンロードできる。各巻の最初には質量数に対する最新版の巻号をまとめた表があるので、調べたい核種の掲載されている巻号を知ることができる。歴史的な理由から、質量数20以下のENSDFの内容はNuclear Physics誌に発表されている。Elsevier社からのダウンロードは有料であるが、ほぼ同じ内容をNNDCのデータベース⁹⁾から無料で閲覧できる。また、NNDCのNuDatデータベース¹⁰⁾は、調べたい核種を核図表上でクリックすることでENSDFの内容の一部を参照できるので便利である。

Nuclear Data Sheets は、親核種の崩壊データ中心ではなく娘核種の準位データ中心に編集されている。そのため例えば ^{60}Co の崩壊図式は、娘核の ^{60}Ni の項にある。このことは、 β 崩壊の場合は Nuclear Data Sheets が質量数毎にまとめてあるのでまだよいが、 α 崩壊を調べるには不便である。また、Nuclear Data Sheets にはあまりに多くの種類のデータが詰め込まれているので、核構造の研究者向きではあるが、アイソトープの利用者には分かりにくいのではなからうか。その点からいうと、Table of Radionuclides³⁾ やアイソトープ手帳⁶⁾ は崩壊データのみであるので見やすいと思う。ENSDF をもとにしていない Table of Radionuclides と Nuclear Data Sheets では評価値がわずかに異なることが多い。これは、一つには評価を行った時期の違いによって最新の実験データが採用されているかどうかによる。もう一つは、収集した実験データが同じで、評価の方法が基本的に同じであっても、評価の過程での細かな判断が評価者によって分かれるためである。

謝辞

アイソトープ手帳 11 版の改訂に携わられた日本原子力研究開発機構の遠藤章氏から、掲載された核データの作成について情報をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) R.B. Firestone *et al.*, Table of Isotopes (8th Edition, 1996), John Wiley & Sons, INC.
- 2) E. Browne *et al.*, Table of Radioactive Isotopes (1986), John Wiley & Sons, INC.
- 3) http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- 4) https://www-nds.iaea.org/xgamma_standards/
- 5) <http://amdc.impcas.ac.cn/evaluation/data2012/ame.html>
- 6) 日本アイソトープ協会編, 「アイソトープ手帳 11 版」(2011), 丸善
- 7) A. Endo, Isotope News, **654**, 2-6 (2008)
- 8) <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00903752>
- 9) <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>
- 10) <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

(日本原子力研究開発機構 核データ研究グループ)