

## 原子力機構核図表 2014

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門

先端基礎研究センター

小浦 寛之

[koura.hiroyuki@jaea.go.jp](mailto:koura.hiroyuki@jaea.go.jp)

### 1. はじめに

縦軸を陽子数（原子番号）、横軸を中性子数として地図のようにして原子核の性質を表す核図表は、原子核の性質を俯瞰的に理解するツールとして原子核・核データ関係者に広く利用されている。一方で実験データを網羅した核図表の公開はそのデータの定期的収集・評価の煩雑さもあり、世界中でもごく限られた機関でしか行われていない。日本原子力研究開発機構（原子力機構）では旧日本原子力研究所（原研）時代より継続的に原子核崩壊データ及び諸データを掲載した核図表を公開してきたが、今回 2015 年 3 月 12 日にその核図表の最新版として「原子力機構核図表 2014」を公開した[1]。学術的詳細は他の記事に譲るとして、本稿では今回の核図表の概説および作業内容の経過を中心に報告する。

### 2. 核図表のこれまで

原子力機構核図表は 1976 年度（1977 年 2 月）の発行以来、1980 年度、1984 年度、1988 年度、1992 年度、1996 年度、2000 年度、2004 年度（ここまで原研）、2010 年度（ここから原子力機構）とこれまで 9 回改訂版が公開されてきた。A4 版の一枚綴りの畳折となっており、持ち運びに便利であるというのがその大きな特徴である。図 1 にこれまでの核図表の表紙を紹介する。初回の 1976 年度のみ表紙に年が記載されていない。1980 年度版以降から表紙に崩壊様式及び年を記載するようにした。

第一回の編集者は広島大学（当時、以下略）の吉沢康和先生および堀口隆良先生と早稲田大学の山田勝美先生であった。吉沢先生、堀口先生が実験データ部分を担当し、山田先生が半減期末測定核種に対して大局的理論による  $\beta$  崩壊半減期を与える、という形で構成された。この「理論予測値を掲載する」という方式は、この原研（原子力機構）核図表を大きく特徴付ける一つであり、特に未知同位体探索実験に対して非常に有用な

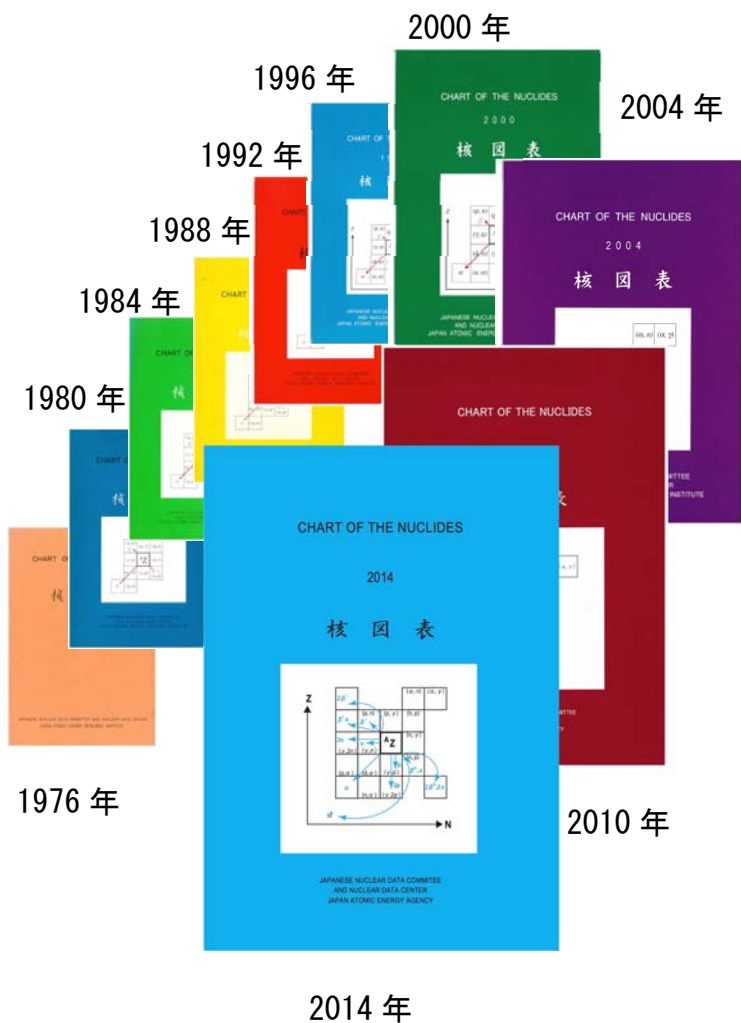


図 1：原子力機構核図表の変遷（表紙）

データを与えている。他の研究機関で公開されている核図表ではいまだにそのようなものはなされていないようである。

第一回の 1976 年版をもとに当時の実験的に確認された核種を見ると、元素記号は 103 番まで、最重の核種は（陽子数, 質量数）＝（106, 263）（現在の  $^{263}\text{Sg}$ ）で、最も大きい原子番号は 107（現在の  $\text{Bh}$ ）までであった。当時の実験的に確認された核種数は 1,964 核種と、二千を下回っていた状況であった。裏面に付録があり、縮小した核図表の全体図、元素の周期表、物理基礎定数表、元素の物理定数表、ガンマ線強度の標準値が掲載されていた。

その後改定を重ね、また編集者も交代し、現在は片倉純一氏（長岡技術科学大学、元原子力機構）、橘孝博氏（早稲田大学）、湊太志氏（原子力機構）と筆者（小浦）で作業を進めている。これまでの編集者の一覧を表 1 に紹介する。

筆者は 2000 年度版から橘氏からの依頼で手伝うこととなり、これまで理論半減期が  $\beta$  崩壊のみだったのを、新しく  $\alpha$  崩壊部分半減期を計算し、掲載する仕事を担当した。その後 2004 年に自発核分裂部分半減期の理論計算を追加した。中性子欠損側の重核・超重核領域においてはこれら 3 崩壊が混在する 경우가多く、これらに対してより現実的な予想を与えるためである。その後 2005 年に原研から新法人である原子力機構に移行し、2008 年版を公開する予定であったが、作業が遅れ、収集データは 2008 年までのもので編集したものを 2 年遅れの 2010 年版として公開した。

Compilers	Year
Y. Yoshizawa	1976-1988
T. Horiguchi	1976-2004
M. Yamada	1976-1988
T. Tamura	1992
J. Katakura	1992-
T. Tachibana	1992-
H. Koura	2000-
F. Minato	2014-

表 1：原子力機構核図表の編集者の変遷。概ね 1 改定作業時に 3~4 人で編集。

### 3. 核図表 2014 の編集作業

#### (1) 実験値部分

今回の核図表の編集作業で問題となったのは実験データの評価を中心的に行ってきた片倉氏の原子力機構の定年退職（長岡技科大に転出）である。これまで片倉氏、橘氏と小浦と 3 人で手分けして調査した実験データを片倉氏が中心的に取りまとめる形を取っていたが、今回その取りまとめ部分を小浦が担当することとし、片倉氏にはサポートおよびクロスチェックをお願いして頂いた。編集作業は基本的に ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) 2014 年 4 月版を基本とし、これに加えて最近の査読付き論文 (2014 年 6 月末を Cut-off とした) より得られた最新データを集め、評価をするという方針で進めた。ENSDF は基本的に Nuclear Data Sheets (NDS) でアップデートされたものを採用するという方針だが (ENSDF として独自に編集する場合もあり)、NDS は質量数 A ごとに編集を行い、しかも数年に 1 度 (20 年以上更新されていないものも存在する) 程度の更新なので、最新のデータがよく反映されないという問題が生じる。そこで最近の論文を調べる必要が生じるのである。

なお、JENDLに関連したデータのチェックは（後述の核分裂生成物収率など）、湊氏に作業をお願いした。

## (2) 理論計算部分

理論計算部分は前節の通りこれまで $\beta$ 崩壊、 $\alpha$ 崩壊、自発核分裂の部分半減期を掲載してきたが、今回 $\alpha$ 崩壊計算に関しては最近筆者が開発した現象論式[2]を新たに用いた。さらに、陽子ドリップ線の外側の陽子放出の原子核研究が進み、陽子放出予測への重要性が高まってきたのに対応し、今回陽子放出（1陽子、2陽子それぞれ）部分半減期を新たに計算し、掲載することにした。

## (3) その他

実験的に確認された核種に関して、これまで軽核の極短寿命核種は掲載しない方針を

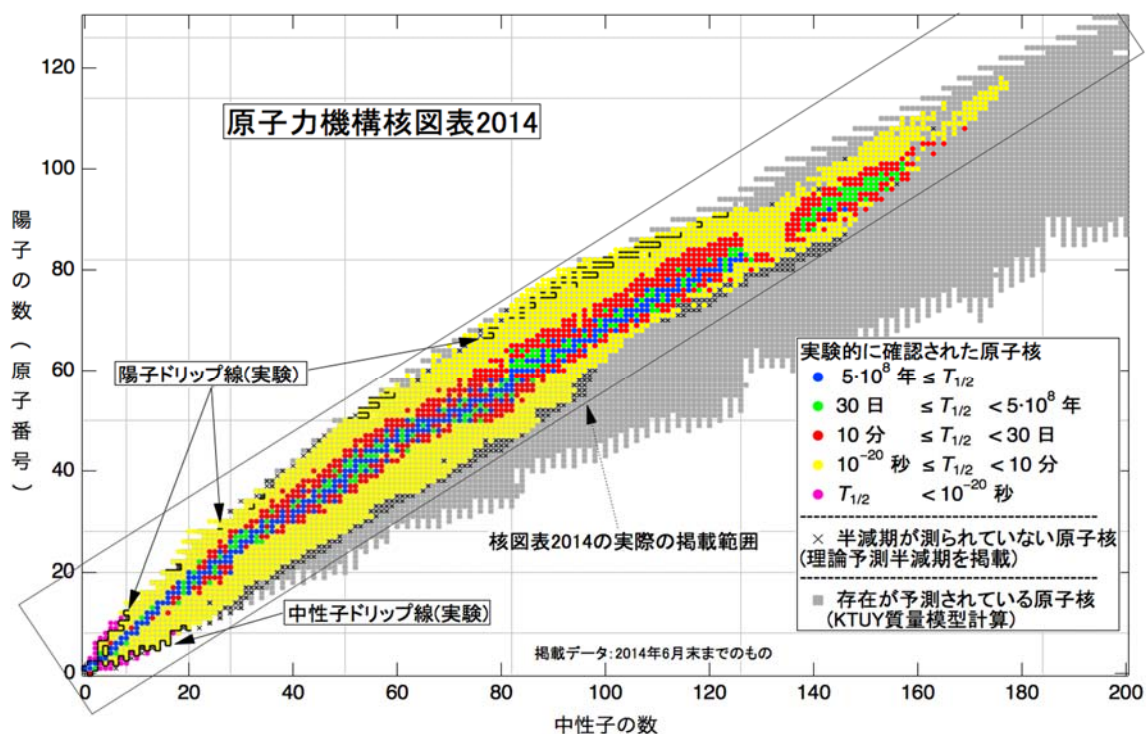


図 2：原子力機構核図表 2014 の掲載範囲の外観図 縦軸が陽子（原子番号）の数、横軸が中性子の数を表す。灰色以外の色のついている核種は実験的に存在が確認された原子核。斜めに傾いた長方形で囲まれた領域が、今回数値を掲載した核図表の領域。その斜めの長方形をはみ出す形で薄い灰色が図中右側に広く楡の歯状に広がっているが、これは理論予想による原子核が存在する領域（小浦-橘-宇野-山田（KTUY）質量模型計算 [3]による）。

とっていたが、近年のこの領域の崩壊測定（共鳴状態の観測）が著しく、特に中性子ドリップ線の外側（非束縛状態）の共鳴状態の測定報告が多くなされたことを反映し、 $10^{-20}$ 秒以下の半減期の核種も掲載することにした。そのようにすると、今度は陽子、中性子ドリップ線の位置が不明瞭になることを配慮し、今回より陽子・中性子ドリップ線の実験値（実験質量値の差より定義できる）を新たに掲載することとした。その作業の一環として、中性子過剰核の研究の助けにする目的で、 $\beta$ 崩壊遅発中性子放出現界線（やはり実験質量値の差より定義できる）も掲載した。また、安定核付近の閉核魔法数である2、8、20、28、50、82、114（陽子のみ）および126については文字を大きくし、より利用しやすいようにした。また、今回の改定の過程で核種数が多く増え、これまでのA4版12ページに入らなくなることがわかり、今回から16ページに拡張することにした。

#### 4. 今回の特徴

##### (1) 核図表部分

今回の編集作業の結果、実験的に確認された核種数（2014年6月末まで）は3,150核種となった。図2にその外観図を示す。斜めに傾いた長方形で囲まれた領域が、今回数値を掲載した核図表の領域である（本核図表の1ページ～12ページに相当）。前述の1976年度版から千核種以上増えた結果となった。図3はこれまでの核種数の変遷を示したものである。1976年版から概ね直線的に増加していることがわかる。2004年から2010年にかけて頭打ちになっていて（片倉氏の前回の核図表2010の報告[4]で触れられていた）、2014年に急激に増加しているように見られるが、今回の編集作業では2004年

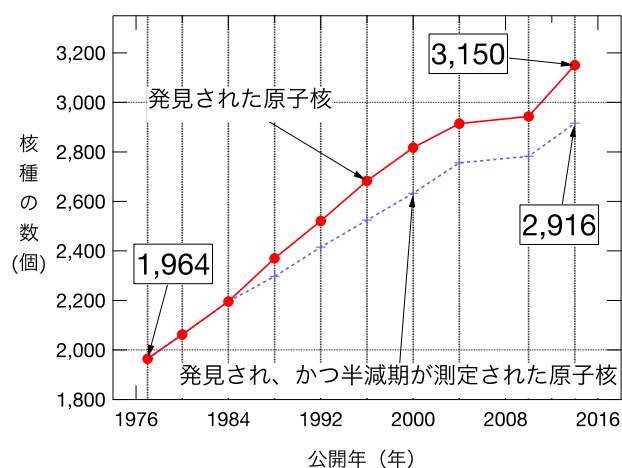


図3：発見された核種数の変遷 図中の縦線は原子力機構核図表が公開された年（1977, 1980, 1984, 1988, 1992, 1996, 2000, 2004, 2010, 2014）を表す。

以降2008年までのデータもかなり収録しており、どうも2010年版の編集時にかなりの見落としがあったようである。ただし実験の進展としても理化学研究所のRIBFにおいて一度で45核種の中性子過剰核の新同位体合成に成功（2009年報告）[5]や、ミシガン州立大学での一度で15核種の中性子ドリップ線近傍の新同位体合成に成功（2010年報告）[6]など、特筆すべき進展があったことを触れておく。

極短寿命核種については今回

32 核種を数えた (図 2 のピンクの核種に相当)。これに伴い崩壊半減期の区分を今まで 4 区分だったのを今回  $10^{20}$  秒以下という新たな区分を設け、全部で 5 区分で表現することとした (図 2 の区分参照)。半減期の区分は堀口氏の核図表 2000 の報告[7]で触れられているように、元々は放射線障害防止法による非密封 RI の分類 (当時の分類で第 1 群の  $\alpha$  放射体は本核図表の枠、第 2 群の半減期 30 日以上は本核図表の緑、第 3 群の半減期 30 日未満は赤と黄色。現在と異なることに注意) をもとに対応させていた。「いた」というのはこの定義が平成 17 年 (2005 年) までのもので、平成 17 年から個々の核種の放射線レベルで与えるように定義が変更されたからである。そのため本核図表でこの区分を採用する積極的な理由はなくなっている。ただし色で大まかな半減期が把握できるという利点はあるので、今回も同様の採用をした。崩壊様式の区分は、様々な複数の崩壊様式が混在している核種の例が報告され、これまでの 12 種類では対応できなくなり、今回の改定で 23 種類用意することとなった。

## (2) 元素の周期表

前回の 2010 年度版では沸点、融点、原子量、イオン化ポテンシャルといった物理化学基礎データは 1996 年までの古いデータを採用していた。今回は 2013 年時点の最新データを採用した。特にイオン化ポテンシャルは近年の研究が進み、いくつかの元素で更新を行った。元素記号に関しては 2012 年に国際純正・応用化学連合 (IUPAC) で承認された 114 番元素 (Fl、フレロビウム)、116 番元素 (Lv、リバモビウム) を掲載した[8]。113,115,117,118 番元素は元素記号なしの数字のみの記載としてあるが、これらは合成の報告が論文でなされたのみの状態である。現在 IUPAC でそれらの学術的成果を審議中であり、優先権が認められればその元素の命名権を得ることができるという流れになっている (優先権が認められた実験実施者 (機関) が IUPAC に元素名及び元素記号を提案できる)。

## (3) 物理基礎定数表

前回の 2010 年度版では科学技術データ委員会 (Committee on Data for Science and Technology, CODATA) が公開している CODATA2006 (2008 年論文公開) を用いたが、今回は CODATA2010 (2012 年論文公開) を採用した。編集時点で論文の形で公開されている最新の物理基礎定数表を掲載した。CODATA は最近では 4 年ごとに公開されており、本稿執筆時点では 2014 年版が 2015 年 6 月 25 日に Web 公開されている (論文公開はまだ)。

## (4) 中性子断面積

熱中性子断面積に関しては前回までは捕獲断面積を表形式で掲載していた (元となる

データは JENDL-4.0)。今回からこれを核図表形式に改めた。また、アクチノイド核種に関しては新たに核分裂断面積を掲載した。このような改定により、例えば原子炉内での“燃焼”を核図表上の動きとして追うことが平易になり、中性子捕獲と中性子誘起核分裂との競合の流れを把握しやすくすることを意図した。また、星の s 過程 (slow-neutron capture process) 元素合成における中性子捕獲の程度の概ねの様子を捉えやすくし、さらに原子炉の材料の放射化の程度を核図表上で把握する目的などといったことなどに利用できればと期待している。

#### (5) 核分裂生成物分布

今回新たに熱中性子による累積核分裂収率の  $^{233}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$  に対するものを掲載した。アイソマーのある核種に対しては\*印をつけ、基底状態とアイソマーとの和として収率を載せた。元となるデータは JENDL FP Fission Yields Data File 2011 を用いた。

#### (6) その他

放射線の較正に用いるエネルギーと強度の標準値に関しては前回と同様のデータを採用した ( $\alpha$  崩壊、 $\gamma$  崩壊、特性 X 線)。

#### (7) WWW 版核図表

本核図表の公開後、対応する WWW 版[9]を作成し、2015 年 6 月 8 日に公開した。本作成作業は岡本力氏 (原子力機構 原子力基礎工学研究センター核データ研究グループ) の尽力によりなされたものである。今回はインターフェイスも 1999 年以來の改定を行い、同時にスマートフォンなどモバイル端末からのアクセスも想定されている。是非こちらでもご利用頂きたい。

### 5. 本核図表の普及について

今回の核図表は日本原子力学会、同核データ部会、日本放射化学会、日本物理学会素粒子論グループ、同核物理談話会などのメーリングリストで無料配布を通知させて頂いた。そのおかげもあり、多くの方々、研究機関より問い合わせがあり、当初予定していた部数では全く足りず、急遽増刷を行った。それでも不足気味で現在再増刷を検討しているところである。この場を借りて配布の不十分さをお詫びするとともに、広く利用して頂いていることに感謝する。

本核図表はまた高校生や一般での利用にも供したいと考えている。2011 年の東京電力福島第一原子力発電所事故への関心や、最近の医療における放射性同位体の利用普及とも相まって、放射線への関心が高まっている。筆者は最近核図表を用いたアウトリーチ活動を行っているが[10-12]、核図表は高校生や一般の方々にも (その用途次第で) 十

分把握していただけるものであるという印象を持っている。今後も様々な場面で核図表の普及に努めていきたい。

## 6. おわりに

今回の核図表 2014 は筆者の他に、片倉純一氏（長岡技術科学大学）、橘孝博氏（早稲田大学）、湊太志氏（原子力機構 原子力基礎工学研究センター核データ研究グループ）との共同作業により完成したものである。また、原田秀郎氏（原子力機構 原子力基礎工学研究センター）には今回の改定にあたり有益な助言をいただいた。WWW 作成においてインターフェイスの変更により大幅に使いやすくなったのは岡本力氏（原子力機構 原子力基礎工学研究センター核データ研究グループ）のおかげである。この場を借りて感謝致します。

## 参考文献

- [1] 原子力機構プレスリリース「最新の原子核崩壊データを手の中に-原子核崩壊データを網羅した原子核の世界地図「原子力機構核図表 2014」の完成-」2015年3月12日  
URL: <http://www.jaea.go.jp/02/press2014/p15031202/>
- [2] H. Koura, J. Nucl. Sci. Technol. **49** (2012) 816-823
- [3] H. Koura, *et al.*, Prog. Theor. Phys. **113** (2005) 305-325
- [4] 片倉純一、核データニュース **98** (2011) 61-63
- [5] T. Ohnishi, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 073201-1-5
- [6] O.V. Tarasov, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 142501-1-4
- [7] 堀口隆良、核データニュース **70** (2001) 11-16
- [8] R.D. Loss and J. Corish, Pure Appl. Chem. **84** (2012) 1669-1672
- [9] WWW Chart of the Nuclides 2014. Constructed by Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency. (June, 2015)  
URL: <http://www.ndc.jaea.go.jp/CN14/index.html>
- [10] 小浦寛之、基礎科学ノート（日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター）Vol. **21**, No.1 (2013) 17-19
- [11] H. Koura, Phys. Educ. **49** (2014) 215-220
- [12] 小浦寛之、放射化学（日本放射化学会）Vol. **30**, (2014) 19-20