

## 原子力機構核図表 2018

日本原子力研究開発機構

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

原子力機構で発行している核図表は今回 2018 年度に 11 回目の発行を行った。今回は初めて日本語版を作成し、また、翌年 2019 度には高校生向けの日本語版核図表の公開を目指したクラウドファンディングを実施した。その経緯と現在の進捗について報告する。

### 2. 2014 年版までの経緯

前回 2014 年度版までの経緯は前回の記事 [1] で紹介したのでそちらを参照していただきたいが、2014 年度は、それまでの核図表と比べてかなり多くの改訂を行なった。2014 年度版で変更された新たな箇所は以下のとおりである。

- 2014 年版のメインの核図表部分（表部分）
  - 実験的に確認された（掲載した）核種数は 3,150 核種
  - A3 一綴りの核図表を 12 ページから 16 ページへ
  - 元素名として 112 番までに加えて 114 番（フレロビウム Fl）、116 番（リバモリウム Lv）の追加
  - 陽子、中性子ドリップ線（実験質量値から定義）の掲載
  - $\beta$  崩壊遅発中性子限界（開始）線（実験質量値から定義）の掲載
  - 陽子、中性子ドリップ線外の原子核を掲載（ $10^{-19}$  秒以下の半減期）
  - 超重核領域における  $\beta$  安定核の理論予測を掲載
- メインの核図表以外の部分（裏部分）
  - 周期表：元素名の追加以外でテクネチウム Tc、アスタチン At、プロトアクチニウム Pa（全て安定同位体が存在しない）のイオン化ポテンシャルの実験値を追加（以前は推定値を掲載していた）

- CODATA による物理定数表の改訂（定期的更新）
- 核分裂収率に JENDL/FP-2011 のものを用いる
- 中性子断面積を数表から核図表に掲載する方式に変更
- その他

### 3. 2018 年版の特徴

今回 2018 年度に改訂した点は以下のとおりである。

#### 3.1 メインの核図表

##### 3.1.1 核種数

まず収集した原子核の数であるが、前回 2014 年版では 3,150 核種であったのが今回 2018 年版は 3,299 核種となった。図 1 に 1976 年度から採録した核種数の変遷を示す。1976 年度

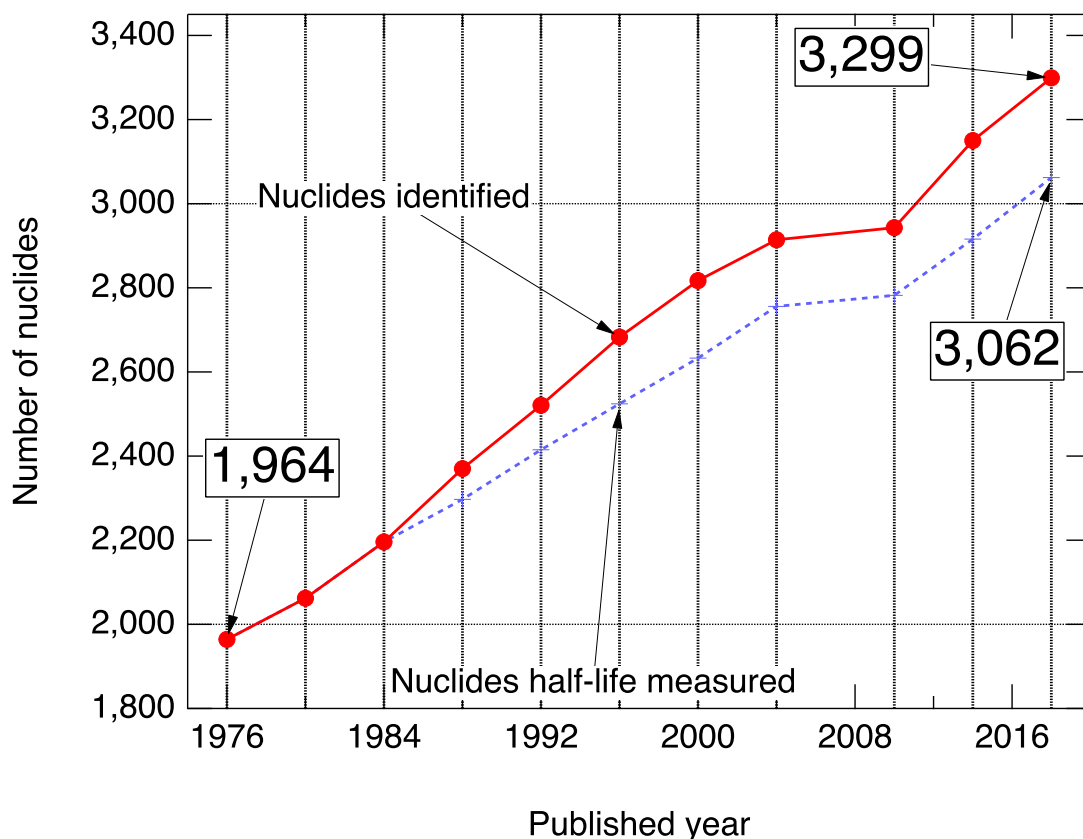


図 1 発見された核種数の変遷 図中の縦線は原子力機構核図表が公開された年度（1976, 1980, 1984, 1988, 1992, 1996, 2000, 2004, 2010, 2014, 2018）を表す。

版では 2,000 核種を切っていたのが、2018 年度版ではほぼ 3,300 核種に達した。また、図 1 の通り、1988 年度版から「核種の同定はできたが半減期が測定できない」、という原子核が現れ始め、両者は別にカウントされることになった。その意味で「半減期測定がされた原子核の数」が 2018 年度版では 3,000 核種を超えた。また、増えていく様子で見ると、2010 年

版の数値が顕著に少ないが、それを除くとほぼ単調に増加しているようである。2010年版での下りは片倉さんの前々回の報告 [2] でも指摘されたが、前回の報告 [1] で述べたようにやはり2010年版の数え落としであったようである。この数え落としは2014年版でカバーされている。

### 3.1.2 全体概略図

図2は核図表2018の掲載範囲の外観図である。2014年版 [1] と比べて149核種増えたことになるが、その主な部分には中性子過剰核側における核破碎反応による大量の合成であり、理研RIBFの成果が大きい。一方、超重核領域は2014年版からの新同位体の増加はほとんどなく、半減期と崩壊分岐比の改訂があった程度である。2014年から2018年の4年間はすぐ後に述べるように超重元素の命名について大きく動きがあった期間であり、その影響があったのであろう。

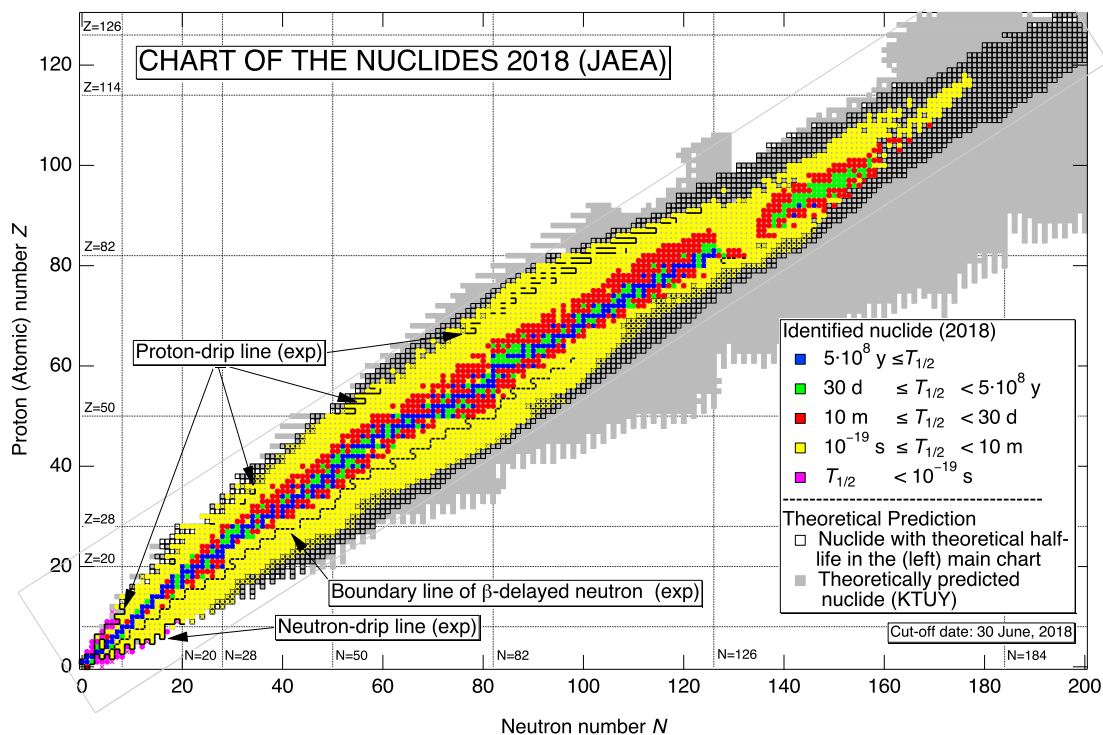


図2 原子力機構核図表2018の掲載範囲の外観図 縦軸が陽子（原子番号）の数、横軸が中性子の数を表す。灰色以外の色のついている核種は実験的に存在が確認された原子核。斜めに傾いた長方形で囲まれた領域が、今回数値を掲載した核図表の領域。その斜めの長方形をはみ出す形で薄い灰色が広がっているが、これは理論予想による原子核が存在する領域である。前回2014年版での理論存在予測は陽子中性子ドリップ線までと定義したが、今回の版では半減期を存在範囲の指標として定義を改め、理論半減期が1ナノ秒以上の原子核とした。用いた質量計算は小浦-橘-宇野-山田 (KTUY) 質量模型計算 [3]。

この全体図における大きな改訂は理論予測による存在領域の変更である。前回までは理論予測による“存在の範囲”は陽子・中性子ドリップ線までとしていた。これはこれで十分意味のある定義であるが、陽子ドリップ線（Proton drip line）側で問題が生じる。図2で、実験値の陽子ドリップ線が描かれているが、例えば中性子数50から126にかけてを見ると、そ

の外側でも原子核が同定されている（色は黄色で、半減期も測定されている）。これは陽子ドリップ線の外は確かに陽子放出に対して不安定であるが、陽子がポテンシャルをトンネル透過する際の時間が有意に長いから起こる現象である。このことを考慮し、今回の版では理論計算で半減期を計算し、その半減期が有意に長い原子核を存在範囲と定義を改めた。その理論半減期は今回1ナノ秒以上とした。こうすることで陽子放出を含む原子核が理論的に存在しうる対象として扱うことができる。

この定義に変えたのはもう一つ理由がある。それは「超重核の安定の島」の一端を示しておきたい、というのがその理由である。図2を見ると、 $Z = 114$  から原子番号の大きい側に丸みを帯びた理論予測の領域が広がっているのがわかる。これがその超重核の安定の島の一端である。近年、ニホニウムの発見もあり、超重元素または超重核への関心も高まっており、この核図表でもその様子を示しておきたい、ということでこのような変更を行った。なお、この島の中心は採用している理論計算によると  $Z = 114$ 、 $N = 184$  となっており、これまでの伝統的 (conventional) な理論計算と同様な結果となっている。

### 3.1.3 新元素名

この4年間で元素名に新たに4つが加わった。113番元素ニホニウム (Nh)、115番元素モスコビウム (Mc)、117番元素テネシン (Ts)、そして118番元素オガネソン (Og) である。2016年11月に正式に決定された。前回の記事でもこれらの元素について少々触れているが[1]、その時は113番元素が日本の命名権で決まるかわからず、非常に微妙な時期であった。今回晴れて113番元素ニホニウム (Nh) を紹介できるのは関係者として嬉しく思う。この2004年から2018年の間は超重元素研究がある意味ひと段落した時期と言え、新元素、新同位体に関する実験データがあまり増えていないのはこのこととも多少関連があるように見える。

### 3.1.4 中性子、テトラ中性子

中性子データについて2つトピックを紹介する。

一つは中性子の寿命である。中性子の寿命は物理量として極めて基本的な量であるが、実は現在その中性子の寿命が2つの異なる実験手法で一致しない。詳細はここでは述べないが一つはボトル法<sup>1</sup>、もう一つはビーム法<sup>2</sup>と呼ばれる方法である。その2つの方法で求めた半減期が実験誤差の範囲で一致しないという結果となっている。実際ボトル法で878.5秒、実験誤差0.8秒、一方ビーム法は887.7秒で、実験誤差2.2秒となっている<sup>3</sup>。掲載時にこの違いに大いに悩まされたが、一方の値を載せざるを得なかった。今後もこの問題を注視していきたい。

もう一つはテトラ中性子である。4つの中性子から成る原子核の共鳴状態「テトラ中性子共鳴」を発見したと理化学研究所RIビームファクトリー（理研RIBF）の東京大学原子核科

<sup>1</sup>容器に多数の中性子を閉じ込め、一定時間の経過後に容器内に残っている中性子数を数える

<sup>2</sup>冷中性子のビームを“トラップ”の中に通し、トラップ内で崩壊した陽子の数を数える

<sup>3</sup>興味のある方は、例えば参考文献[4]を読みたい

学研究センター（東大 CNS）で 2015 年に報告された [5]。原子核の少数系は核力が持つ多様な効果があらわに現れ、今回の結果もその一つであると考えられる。

## 3.2 メインの核図表の裏側

### 3.2.1 周期表

新元素が 4 つ増えたことは既に核図表のところで述べた。周期表においても 4 元素が新たに掲載された。

それ以外では、ローレンシウム Lr のイオン化ポテンシャルが新たに掲載された。これは日本原子力研究開発機構のタンデム加速器で測定されたもので、2015 年に発表された<sup>4</sup>[6]。これは通常レーザーを利用して測定するのが主流であり、その精度も高いが（例えば前回掲載したアスタチン At もその方法で測定）、原子力機構では表面吸着という手法を用いた。これはレーザーの方法に比べて、より少ない原子数でイオン化ポテンシャルを決定することができる。この成果自体は周期表の周期性が破れることを示唆する実験でその点興味深いがここでは割愛する。なお、まだ未決定であったフェルミウム Fm、メンデレビウム Md、ノーベリウム No のイオン化ポテンシャルも原子力機構の同グループと別のグループが 2018 年に世界初測定を果たしている。これは次回の核図表に掲載する予定である。

### 3.2.2 物理定数

例年通り科学技術データ委員会（Committee on Data for Science and Technology, CODATA）のデータを元に掲載したが、物理定数は 2019 年 5 月 20 日にかなり大規模な改訂が行われた。それは SI 単位系の再定義であり、この結果以下の 4 つの物理定数が（これまでは測定値であったが）今後定義値として扱われることとなった。

- プランク定数  $h$  :  $6.62607015 \cdot 10^{-34}$  (J·s) (定義値)
- 電気素量  $e$  :  $1.602176634 \cdot 10^{-19}$  (C) (定義値)
- ボルツマン定数  $k$  :  $1.380649 \cdot 10^{-23}$  (J·K<sup>-1</sup>) (定義値)
- アボガドロ定数  $N_A$  :  $6.02214076 \cdot 10^{23}$  (mol<sup>-1</sup>) (定義値)

核図表 2018 は 2019 年 3 月公開であり、この改訂を含めずに CODATA2014 (2016 年公表) を掲載したが、上記の改訂があることは明記し、上記の 4 つの物理定数を欄外に掲載した。

### 3.2.3 その他

他の部分は一部に改訂が加えられているが、基本的に 2014 年版を踏襲して構成した。

---

<sup>4</sup>Nature 誌のこの号の表紙となった

### 3.3 日本語化

今回の2018年度版での大きな動きは、核図表の「日本語版」を作成したことである。メインの核図表はそのままであるが、凡例、説明、全体概略図、裏面の全てを日本語で記載した。これは後でも触れるが高校での核図表紹介の機会に、先生方から日本語化の希望が多かったのが理由である。核図表を教育関係にも広く普及したいと考え、今回英語版と比べて少数であるが、日本語版を併せて制作した。

## 4. 配布におけるアンケート：今後の核図表の形式

今回の核図表2018の配布に際してアンケートを実施した。それは現在の利用状況と今後の配布のあり方、有償化の可能性についての調査が目的である。これについては本号の別記事である「原子力機構(JAEA)核図表 アンケート集計」で改めて報告するのでそちらを参照されたい。

## 5. 教育利用とクラウドファンディング

### 5.1 アウトリーチ

核図表は視認性が高く、原子核の性質の系統的な見通しをつけるのに良いので、例えば高校生、一般に対しても「原子核の世界地図」という観点で親しんでもらうことは可能ではないかと考えている。筆者は核図表を用いたアウトリーチ活動を進めていて、過去に様々な場所で核図表を用いた講演・サイエンスカフェを行ってきた(表1)。

核図表は確かに初めて察する際に難しい概念が含まれていると思うが(「元素の周期表」を存在を知っていることが望ましい)、筆者が接してきたいくつかの講演や科学イベントでは、高校生は生き生きと核図表の世界に親しんできたという印象である。高校生の興味を原子核と結びつけるという点では、宇宙の錬金術(宇宙での元素は星内の原子核反応によってつくられ、それは核図表上を走るように作られる)は効果的であるし、最近ではニホニウム合成(実際は原子核合成)のトピックも楽しんでもらっている印象である。

なお、今回新たに日本語版の作成を試みた大きな理由は、やはり高校に配布する際に、特にこれを授業や部活で指導する時に日本語で書かれたほうが良い、と感じたからである。

表1 核図表を用いた小学中学高校生向け講演(2015年以降、抜粋)。その他地元の一般向け、原子力人材育成の研修講義、大学での科目講義(茨城大学、津田塾大学など)での使用もある。

年月日	会合開催名	場所	対象
2016年11月27日	第16回青少年のための科学の祭典・日立大会	日立市シビックセンター	中・高校生
2017年3月26日	第35回ミーツ・ザ・サイエンス	つくばエキスポセンター	小学生
2018年3月23日	つくばサイエンスエッジ	つくば国際会議場	高校生

## 5.2 クラウドファンディング「1校に1枚核図表」

そうこうしているうちに、原子力機構として「クラウドファンディング」を始める、という動きが2019年に始まった。これはこの核図表を教育向けに作成する良い機会であると思いい、プロジェクト「「1校に1枚核図表」を！原子核の世界観を届けたい」[7]を立ち上げた。この趣旨は

- 核図表を各高校へ配布し、「1校に1枚核図表」を実施
- 核図表を用いた出張講演を高校生を対象に実施する

である。重要な試みとして、裏面は周期表を除き全て書き直し、高校生向けの原子核、核図表に関する解説を載せる体裁とし、より教育現場で利用しやすいように試みた。

機構内の事業計画統括部、財務部、広報課<sup>5</sup>、先端基礎研究センター協力でプロジェクトを推進し、目標額を1,500,000円とし（日本語版1,200部相当）、2020年1月30日から3月26日までの8週間の募集期間で行った。

その結果は157人から合計1,731,000円の支援金をいただく事となり、プロジェクトは成立した[8]。これを受け現在実施準備を進めている。現在、新型コロナウイルス拡大の影響により作業が制限されていて、当初の工程から遅れ気味である。この秋には配布を計画していたが、この遅れで配布開始は12月中旬にずれ込む予定である。また、出張講演も目処が立たない状況であり、年度を遅らせるか、もしくは動画配信を検討している状況である。ご協力頂いた方々には申し訳ないが、誠意努力して進めていきたい。

## 6. おわりに

今回の核図表作成では、本来の原子核崩壊データの収集・評価に加えて、「日本語版作成」も含めた教育及び一般への普及活動にも重点を置くこととなった。このような普及活動はこれまでもある程度行ってきたが、今回のクラウドファンディングを通し、より積極的に進めることとなった。核図表作成のもう一つの大きな柱の一つとして、今後も活動を広げていきたい。

## 参考文献

- [1] 小浦寛之、核データニュース 112 (2015) 54-61
- [2] 片倉純一、核データニュース 98 (2011) 61-63
- [3] H. Koura, et al., Prog. Theor. Phys. 113 (2005) 305-325
- [4] G. L. グリーン、P. ゲルテンボルト（監修 三島賢二）、中性子の寿命の謎、日経サイエンス 2016年6月号（2016）p.55-60
- [5] K. Kisamori, et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 052501

<sup>5</sup>JAEAのtwitterなどの動画を作成した

- [6] T.K. Sato, et al., Nature 520 (2015) 209
- [7] クラウドファンディングプロジェクト  
「1校に1枚核図表」を！原子核の世界観を届けたい  
<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2020/013001/>  
<https://academist-cf.com/projects/169>
- [8] 未来へげんき 第56号 (2020) p.10-11  
<https://www.jaea.go.jp/genki/56/>