



Chart of the Nuclides 2000 – 21 世紀の展望 –

広島国際大学保健医療学部診療放射線学科

堀口 隆良

e-mail: t-hori@hs.hirokoku-u.ac.jp

1. はじめに

原子の中心には原子核が存在する。原子核は Z 個の陽子と N 個の中性子で構成され、その数の合計 $A = Z + N$ を質量数という。従って、原子核の種類 (核種) を指定するには Z と N (または A) を指定すればよい。横軸に N 、縦軸に Z をとって柵目をつくと、その柵目は 1 つの核種に対応する。この柵目に元素記号 (Z で識別される) と質量数、およびその他の核データを記入して図表化したものが、核図表 (Chart of the Nuclides) である。このような核図表は、現在世界のいくつかの研究所から定期・不定期に刊行されているが、日本においては日本原子力研究所・核データセンターから 1976 年度以後 4 年ごとに定期刊行されてきた。

1.1 特徴

諸外国のものと比較して、我々の核図表の異なる特徴を以下に列挙すると

- (1) A 4 版・折畳式で、全核種の領域が連続しており、持ち運びにも便利
- (2) 5 色のカラーコードによる天然存在比、半減期 ($T_{1/2}$) と崩壊様式の分類

具体的には、青は安定核または天然に存在する長寿命核種 ($T_{1/2} > 5 \cdot 10^8 \text{y}$)、緑は $30 \text{d} < T_{1/2} < 5 \cdot 10^8 \text{y}$ 、赤は $10 \text{m} < T_{1/2} < 30 \text{d}$ 、黄は $T_{1/2} < 10 \text{m}$ 、白は未合成核種を表している。崩壊様式の区別は、 β 崩壊は枠内の色ベタ、 α 崩壊は中抜きの色枠、自発核分裂 (sf) は色斜線、陽子 (p) 崩壊は縦横縞模様となっており、枠内のそれぞれの面積は大まかな % を表している。核種同定済み・ $T_{1/2}$ 未決定核種は枠の上半分を色ベタとした。また、このカラーコードは放射線障害防止法による非密封 RI の分類 (第 1 群の α 放射体は色枠、第 2 群の半減期 30 日以上は緑色、第 3 群の半減期 30 日未満は赤と黄色) にも一部例外核種を除いて対応している。

- (3) 未合成核種の β 崩壊大局理論[1]による予想部分半減期 $T_{1/2}(\beta)$ の掲載

場合によっては、陽子ドリップラインの外： $S_p < 0$ の領域の核種にも掲載した。これはこの領域でも陽子がクーロン障壁を透過するのに有限の時間を要し、 $T_{1/2}(p) = 0$ であるからである。

- (4) 裏面にも各種の図表を掲載

1.2 これまでの改訂の歴史

- (1) 1980～1988年版：おもての図表はA4版12ページで、1核種の柵目は12mm×12mm、既合成核種のみ掲載した。裏面には縮小した核図表全体図、簡単な周期律表、単位変換表、基礎物理定数表、元素の物理定数表、 γ 線エネルギー・強度 ($E_\gamma - I_\gamma$) 表を掲載した。
- (2) 1992年版：合成核種の領域が拡大し、これまでのA4版内に収まらなくなった。特に、中性子欠損核種側では陽子ドリップライン ($S_p=0$) に達するものも出てきた。そのため、1核種の柵目を10mm×10mmに縮小した結果、ページ数は10ページに減少した。余白に未合成元素の $Z=112$ まで範囲を拡張し、裏面の核図表全体図を省略した。
- (3) 1996年版：1核種の柵目は10mm×10mmのまま、ページ数を12ページに戻した。そのため、余白には超重元素 (Super Heavy Element : SHE) を含む $Z=121$ 、 $N=183$ まで拡張することができた。 $Z=104$ 以上の元素名には IUPAC1994 暫定推奨名を使用 ($_{104}\text{Db}$ 、 $_{105}\text{Jl}$ 、 $_{106}\text{Rf}$ 、 $_{107}\text{Bh}$ 、 $_{108}\text{Hn}$ 、 $_{109}\text{Mt}$) した。裏面では、周期律表に元素の物理定数表を統合し、主な α 線エネルギー・強度 ($E_\alpha - I_\alpha$) 表と中性子捕獲断面積 $\sigma(n,\gamma)$ の表 (JENDL-3.2) [2] を追加した。また、この年度から、核図表用データベースを元にしてインターネット上に WWW-Chart of the Nuclides を公開した。これは原研核データセンターの中川・片倉両氏が中心となって行っている。

2. 2000年版核図表の変更点

この年度の改訂に際して最も注目すべき出来事は、長年の原子核物理学の懸案であり大きな目標であった超重元素 (SHE: $Z=114$, 116 , 118) が1999年に相次いで合成されたことである。21世紀を直前にして、このような事態に対応するため、今回の改訂では以下のような変更を行った。

- (1) A4 12ページ、1核種の柵目 10mm×10mm は踏襲しつつ、説明文を移動して図表を長寿命 SHE を含む $Z=130$ 、 $N=200$ まで拡張した。
- (2) $Z=104$ 以上の元素名として、IUPAC 1997 最終決定名を採用 ($_{104}\text{Rf}$ 、 $_{105}\text{Db}$ 、 $_{106}\text{Sg}$ 、 $_{107}\text{Bh}$ 、 $_{108}\text{Hs}$ 、 $_{109}\text{Mt}$) した。
- (3) 同位体に複数の核異性体がある場合、その核異性体の半減期の前に星印 () を付

けて区別した。ただし、カラーコードは必ずしも基底状態ではなく、最も長い半減期により決定した。

- (4) 重核領域でβ崩壊とα崩壊が競合する可能性がある場合は、 $T_{1/2}(\beta)$ と $T_{1/2}(\alpha)$ の部分半減期の両方を掲載した。α崩壊の部分半減期は、早稲田大学理工学研究所橋・小浦両氏の Viola-Seaborg の公式[3]を用いた計算値を掲載し、数値の前にαを付けて区別した。
- (5) 裏面の Table 1 の周期律表を Z=118 まで拡張した。
- (6) Table 2 の基礎物理定数表は、前回の改定 (1986 年) から十数年ぶりに、1999 年末に全面改訂された数値[4]を採用した。

3. 核図表 21 世紀の展望

現在、各種の質量公式による原子 (原子核) 質量をもとに、束縛状態としての原子核の存在数を推定すると、およそ 6000 種程度と予想されている。今回刊行した核図表 2000 年版を基に、2000 年末 (20 世紀最後) の時点における、安定同位元素と実験的に合成された同位元素 (不安定核を含め、核異性体は含めない) の数を調べると 2824 核種となる。すなわち、存在が予想される数の約半数が 20 世紀中に合成され、残りの半数の合成は 21 世紀に委ねられたことになる。以下に、新元素合成を中心に、21 世紀を展望してみたい。

3.1 過去 20 年間の新同位元素合成数の推移

表 1 新同位元素合成数

これまでの過去 4 年ごとの核図表改訂の際の、新同位元素合成数の推移を調べてみると表 1 のようになる。

平均で 150 核種 / 4 年、38 核種 / 年の割合で核種数が増加してきたことが分かる。以下に、これらの核種の合成の実験手段の推移を概観してみる。

核図表	期間	追加数
1984 年版	1980 ~ 1984 年	132
1988 年版	1984 ~ 1988 年	166
1992 年版	1988 ~ 1992 年	153
1996 年版	1992 ~ 1996 年	161
2000 年版	1996 ~ 2000 年	140

- (1) 1980 年以前： 迅速化学分離法や CERN の ISOLDE に代表されるオンライン同位体分離器 (ISOL) が中心であった。ISOL による研究対象核種は、イオン源の元素選択性のため低融点・高蒸気圧元素および低イオン化ポテンシャル元素が中心であり、半減期も 10ms 以下の核種が対象であった。
- (2) 1980 ~ 1990 年中頃： GSI (ドイツ、Darmstadt の重イオン研究所) の Velocity Filter SHIP に代表される重イオン融合核反応の反跳核直接分離装置が活躍した。この方法は高融点元素も含む全ての元素に適用可能であるが、分離・収集効率が小さいのが欠点である。

- (3) 1990～現在： ガス充填型反跳核分離装置に移行しつつある（特に、後に述べる超重元素合成で活躍）。このガス充填型分離器は約 30 年前の 1971 年に P.Armbruster が考案したもの[5]の復活版で、質量分解能は良くないが、高い分離・収集効率が特徴である。測定系の $\Delta E - E$ カウンターテレスコープと TOF の組合せで Z、A を分離する。最近の新同位元素合成の傾向は、この装置によりまず核種の同定と原子質量が決定され、その後 1～2 年の間にさらに統計を上げて崩壊特性と半減期が決定される場合が多い。

3.2 新元素合成の推移

106 番元素 (^{106}Sg) までは 1980 年以前に合成済みで、詳細は省略する。107 番元素以後の合成のまとめを表 2 に示す。

表 2 107 番元素以上の新元素合成の歴史

原子番号	合成反応	合成年	グループ	文献
107	$^{209}\text{Bi} (^{54}\text{Cr} , n) ^{262}\text{Bh}$	1981	GSI	Z. P. A300, 107
108	$^{208}\text{Pb} (^{58}\text{Fe} , n) ^{265}\text{Hs}$	1984	GSI	Z. P. A317, 235
109	$^{209}\text{Bi} (^{58}\text{Fe} , n) ^{266}\text{Mt}$	1982	GSI	Z. P. A309, 89
110	$^{208}\text{Pb} (^{62}\text{Ni} , n) ^{269}110$	1994	GSI	Z. P. A350, 277
111	$^{209}\text{Bi} (^{64}\text{Ni} , n) ^{272}111$	1994	GSI	Z. P. A350, 281
112	$^{208}\text{Pb} (^{70}\text{Zn} , n) ^{277}112$	1996	GSI	Z. P. A354, 229
114	$^{244}\text{Pu} (^{48}\text{Ca} , 3n) ^{289}114$	1999	JINR	P. R. L. 83(16), 3154
	$^{242}\text{Pu} (^{48}\text{Ca} , 3n) ^{287}114$	1999	JINR	Nature V400, 242
	$^{288}114$ (decay of $^{292}116$)	1999	LBL	P. R. L. 83(6), 1104
116	$^{289}116$ (decay of $^{293}118$)	1999	LBL	P. R. L. 83(6), 1104
	$^{248}\text{Cm} (^{48}\text{Ca} , 4n) ^{292}116$	2000	JINR	P. R. C63, 011301(R)
118	$^{208}\text{Pb} (^{86}\text{Kr} , n) ^{293}118$	1999	LBL	P. R. L. 83(6), 1104

表 2 に示すように、 ^{107}Bh は 1981 年、 ^{108}Hs は 1984 年、 ^{109}Mt は 1982 年に GSI の SHIP により合成された。SHIP の反跳核分離・収集効率は 1～3%、測定系の検出効率は 5～10% 程度であった。これらの元素の生成断面積は $\sigma=30\sim 10\text{picobarn}$ (pb , $10^{-12}\text{barn} = 10^{-36}\text{cm}^2$) と極めて小さいため、検出率は 1 ヶ月間のマシンタイムで 1～2 イベントと小さく、この方法の限界かと思われた。

GSI ではその後約 10 年かけて SHIP の改造に取り組み、分離・収集効率*検出効率で旧 SHIP の約 50 倍の改良を達成した。この装置を用いて Z=110、111 番元素が 1994 年、

Z=112 番元素は 1996 年に合成された。生成断面積は $\sigma=3 \sim 1\text{pb}$ と更に小さいにもかかわらず、検出率は 2~3 イベント/10d であった。

さらに最近、ガス充填型反跳核分離器が世界の主要研究所で建設・稼動を始め、成果が出始めた。そしてついに 21 世紀を直前にした 1999 年に Z=114 番超重元素が JINR(ロシア、Dubna の合同原子核研究所)他のグループにより合成された。彼らの分離器の反跳核分離・収集効率は 40%、測定系の α 検出効率は約 87%であった。それに引続き同年、Z=118 番元素とその崩壊娘核種としての Z=116 番、114 番超重元素が LBNL(米国、Berkeley のローレンス・バークレイ国立研究所)他のグループにより相次いで合成された。このグループの分離器の反跳核分離・収集効率は約 75%、測定系の α 検出効率は 60%であった。

これら 2 グループの測定系はいずれも、全立体角 4 中 3 近い範囲を位置感応型を含む Si 半導体検出器で覆っている。いずれも、分離器全体の効率は旧 SHIP の数百倍の改善である。表 2 に示すように反応機構の違いにもよるが、生成断面積の減少は予想外に小さく、 $\sigma=1 \sim 3\text{pb}$ であった。このような新元素合成の最新の状況は、文献[6]に詳説されている。

3.3 今後の課題 長寿命超重元素合成に向けて

現在までに合成されている超重元素(SHE)は、まだ中性子欠損領域に存在するため、半減期が短い。すなわち、 β 安定線を延長した領域に存在が予想されている長寿命 SHE には、まだ遠い。これまでの合成実験で、この領域に最も接近しているのは JINR の $^{244}\text{Pu} (^{48}\text{Ca}, 3n) ^{289}114$ 反応の結果である。すなわち、 $^{289}114$ 核種の半減期は $T_{1/2} = 21\text{s}$ であり、 α 崩壊の娘核種の中の 2 核種は $^{285}112$ ($T_{1/2} = 10.7\text{m}$)、 ^{277}Hs ($T_{1/2} = 11.4\text{m}$) のように、半減期 10 分を超えたものがあることは注目に値する。

上記の長寿命 SHE 領域に到達する実験手段としては、現在、理化学研究所をはじめ世界各地で開発が進められている中性子過剰不安定核ビーム(n-rich RI beam)が最も有望である。しかし、このビームを新元素合成に使用するには、数段の強度の増強が必要である。また、核図表 2000 年版にも示されている、半減期が 1 年を超える SHE を合成する(synthesize)には、生成できた(produce)としても、長寿命ゆえの検出し(detect)同定する(identify)という困難が伴う。この検出・同定には、これまでとは異なるシングルアトム化学(one-atom-at-a-time-chemistry)が威力を発揮するものと思われる。

今後とも、これまで述べてきたような新元素・新核種の合成に、核図表 2000 年版が少しでもお役に立てば、幸いである。

4. 謝 辞

この核図表 2000 年版は、著者の他に、早稲田大学理工学研究所の橘孝博・小浦寛之両

氏、及び原研核データセンターの片倉純一氏との共同作業により完成したものである。また、1996年以降、毎年改訂された核図表用データベースを基に、核データセンターからインターネット上に WWW-Chart of the Nuclides[7]を公開して下さっている核データセンター中川庸雄・片倉純一両氏に深く感謝致します。更に、1988年版までの核図表作成をご指導下さった広島大学名誉教授吉沢康和先生、早稲田大学理工学部教授山田勝美先生に深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Tachibana and M. Yamada, Proc. Int. Conf. on exotic nuclei and atomic masses, Arles, 1995, eds. M. de Saint Simon and O. Sorlin (Editions Frontueres, Gif-sur-Yvette, 1995) p.763.
- [2] T. Nakagawa et al., J. Nucl. Sci. Technol. 32, 1259 (1995).
- [3] V. E. Viola, Jr. and G. T. Seaborg, J. Inorg. Nucl. Chem. 28, 741 (1966) with newly adjusted parameter values.
- [4] P. J. Mohr and B. N. Taylor, J. Phys. Ref. Data, 28(6), (1999) and Rev. Mod. Phys. 72(2), 351 (2000).
- [5] P. Armbruster et. al., Nucl. Instrum. Methods 91, 499 (1971).
- [6] S. Hofmann and G. Munzenberg, Rev. Mod. Phys. 72(3), 733 (2000).
- [7] <http://wwwndc.tokai.jaeri.go.jp/CN00/index.html>