

【解説】

原子をつくる：人工元素物語

工藤博司

東北大学大学名誉教授

〒982-0026 仙台市太白区土手内 1-2-3

E-mail: kudo.hrs@nifty.com

(2020年2月17日受理)

1. はじめに

2019年は、メンデレーエフが1869年3月6日にロシア化学会の講演で周期表を提案してから150年にあたり、ユネスコはそれを記念して国際周期表年2019 (International Year of the Periodic Table of Chemical Elements 2019; IYPT2019) に制定し、我が国でも日本化学会を中心に多くの記念行事が催されました。奇しくも3年前には、理化学研究所 (理研) で合成に成功した113番元素の名称がIUPAC (国際純正・応用化学連合) によってニホニウム (Nihonium; Nh) と認められ、日本発の元素として初めて周期表に載りました。メンデレーエフが原子量を基にした周期表を発表した時に知られていた元素はわずか63種類でしたが、現在ではニホニウムと同時に名称が確定した他の3元素 (モスコビウム Mc, テネシン Ts, オガネソン Og) を含めて118元素になり、周期表の第7周期までが埋められました (図1)。そのうち、93から118番までの26元素と43番のテクネチウム (Tc)、それに61番のプロメチウム (Pm) を加えた28元素は自然界に存在しない人工元素です。この機会に、人工元素を中心に元素の発見と合成の歴史を振り返ってみます。

| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-----------------|--|--------------------|--|------------------|--|------------------|--|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|--|------------------|--|--------------------|--|------------------|--|-------------------|--|------------------|--|-------------------|--|
| 1 H 水素 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He ヘリウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 Li リチウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 Ne ネオン | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 Na ナトリウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 Ar アルゴン | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 K カリウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | 36 Kr クリプトン | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 Rb ルビジウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | 54 Xe キセノン | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 Cs セシウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | 86 Rn ラドン | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 87 Fr フランシウム | | | | | | | | | | | | | | | | | | 118 Og オガネソン | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 元素の周期表 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 13 B ホウ素 | | 14 C 炭素 | | 15 N 窒素 | | 16 O 酸素 | | 17 F フッ素 | | 18 Ne ネオン | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 31 Al アルミニウム | | 32 Si ケイ素 | | 33 P リン | | 34 S 硫黄 | | 35 Cl 塩素 | | 36 Ar アルゴン | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 49 In インジウム | | 50 Sn スズ | | 51 Sb アンチモン | | 52 Te テルル | | 53 I ヨウ素 | | 54 Xe キセノン | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 81 Tl タリウム | | 82 Pb 鉛 | | 83 Bi ビスマス | | 84 Po ポロニウム | | 85 At アスタチン | | 86 Rn ラドン | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 113 Nh ニホニウム | | 114 Fl フレロビウム | | 115 Mc モスコビウム | | 116 Lv リバモビウム | | 117 Ts テネシン | | 118 Og オガネソン | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | → 超重元素 (SHE) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ランタノイド | | | | | | | | | | | | | | | | | | 58 Ce セリウム | | 59 Pr プラセオジム | | 60 Nd ネオジム | | 61 Pm プロメチウム | | 62 Sm サマリウム | | 63 Eu ユーロピウム | | 64 Gd ガドリニウム | | 65 Tb テルビウム | | 66 Dy ジスプロシウム | | 67 Ho ホルミウム | | 68 Er エルビウム | | 69 Tm ツリウム | | 70 Yb イットリウム | | 71 Lu ルテチウム | |
| アクチノイド | | | | | | | | | | | | | | | | | | 90 Th トリウム | | 91 Pa プロトアクチニウム | | 92 U ウラン | | 93 Np ネプツニウム | | 94 Pu プルトニウム | | 95 Am アメリシウム | | 96 Cm キュリウム | | 97 Bk バークリウム | | 98 Cf カリホルニウム | | 99 Es アインスタイニウム | | 100 Fm フェルミウム | | 101 Md メンデルビウム | | 102 No ノーベリウム | | 103 Lr ローレンシウム | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | → 超ウラン元素 (TRU) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

(網掛けの元素の同位体は全て放射性)

図 1

2. ニホニウムとニッポニウム

IUPAC は 2016 年 6 月 8 日のプレスリリースで、113 番、115 番、117 番および 118 番元素の名称と元素記号をそれぞれ Nihonium (Nh)、Moscovium (Mc)、Tennessine (Ts)、Oganesson (Og) とすると発表しました。これを受けて、日本化学会命名法専門委員会はその翌日、異例の速さで Nh の日本語名をニホニウムとすると発表し、会員に直接電子メールで伝えました(図 2)。他の 3 元素については、公開レビュー終了後の 11 月にそれぞれの日本語名称をモスコビウム、テネシンおよびオガネソンと決定し公表しました。

113 番元素は、理化学研究所(理研：埼玉県和光市)の森田浩介博士(九州大学大学院理学研究院教授)のグループが加速器を使って合成に成功した新元素です。2004 年 6 月から 2012 年 8 月にかけて 3 個の原子を合成しました。ただ、ロシアの合同原子核研究所(ドブナ)と米国のリバモア国立研究所(カリフォルニア州)の共同研究チームは理研の発見より少し前にこの 113 番元素の発見を報告し、その後さらに数十個の原子を合成していました。そのため、両者の間に 10 年以上にわたる命名権争いが続いていたのですが、軍配は理研にあり、2015 年 12 月 31 日の早朝、命名権決定の電子メールが森田教授宛に届きました。その根拠については後述しますが、この知らせを受けた森田教授は研究グループ内で検討を重ねて元素名を日本の国名をとって Nihonium とすることにし、IUPAC に提案しました。Nipponium (ニッポニウム) とする案もありましたが、それは無理でした。

新元素の命名に関してはいくつかの原則があります。国名や地名(アメリカ、バークレーなど)、科学者の名前(キュリー、アインシュタインなど)、神話(プロメテウス)や天体名(ネプチューン)に由来する名称は認められますが、過去に使われた名称は提案できません。実は、ニッポニウムという名称は過去に使われていました(図 3)。

小川正孝 43番元素を発見？(1908/明治41年)
ニッポニウム(Np)と命名!

しかし、43番元素は天然には存在せずこの発見は誤りとわかり、幻の元素といわれた。もし、周期表の1段下に当てはめていれば、ニッポニウムは残った(今は ${}_{75}\text{Re}$)。



小川正孝 (1865-1930)
東北帝国大学理科大学学長
化学第一講座(無機化学)教授
(1911年/明治44年~)



Emilio G. Segré (1905-1989)
1959年に反陽子の発見で
ノーベル物理学賞受賞

43番元素はセグレらが加速器を使って合成(1937年)
 ${}^{96}_{42}\text{Mo}(d, xn){}^{97m}\text{Tc}$ ($T_{1/2} = 91 \text{ d}$)
 $\rightarrow {}^{97}\text{Tc}$ ($T_{1/2} = 2.6 \times 10^6 \text{ y}$)
 $[\alpha = 1, 2]$
テクネチウム(Tc)と命名
 初の人工元素

図 3

日本化学会からの電子メール

113番元素の名称と元素記号の案が公表されました

2016年6月9日 日本化学会 命名法専門委員会

国立研究開発法人理化学研究所(理研)森田浩介博士(現、九州大学教授)が率いるグループによって合成・発見された113番元素の「元素名」と「元素記号」が、森田グループから国際純正・応用化学連合(IUPAC)に提案されていましたが、2016年6月8日22時30分にIUPACから公表され、5か月間の公開レビューに付されることになりました。

これを受けて、公益社団法人日本化学会命名法専門委員会は113番元素の日本語名を決定しましたので、お知らせいたします。113番元素名、元素記号、日本語名、は以下の通りです。

113番元素名: Nihonium、元素記号: Nh、日本語名: ニホニウム

なお、同時に公表された115番、117番、118番元素の下記名称の日本語名は、公開レビュー後に命名法専門委員会で決定することといたします。

115番元素名: Moscovium、元素記号: Mc
 117番元素名: Tennessine、元素記号: Ts
 118番元素名: Oganesson、元素記号: Og

以上

図 2



森田浩介(1957-)

東北帝国大学理科大学の初代学長(後に第4代総長)であり、化学第一講座の初代教授を務めた小川正孝(1865~1930)は、1908(明治41)年に43番元素を発見してニッポニウムと名付け英国の *Chemical News* 誌に2編の論文を発表しました。^{1, 2)}世界的にも注目され、ローリングの周期表1909年版に Nipponium (Np) として掲載されていたのです。小川は1904年春から1906年夏まで英国ロンドン大学に

留学し、ラムゼー教授 (W. Ramsay; 空气中の希ガスの発見で 1904 年にノーベル化学賞受賞) の指導でトリウムを主成分とするトリアナイト鉱の中に新元素を探す研究をしていました。元素発見熱が盛り上がっていた時期でした。研究開始から比較的早い時期に全く新しい光学スペクトルが得られ、新元素の兆候を掴んだものの確証はなく、帰国後に東北帝国大学教授に就任してからも粘り強く研究を続けたのですがなかなか再現性のよい結果が得られず、“幻の元素”と揶揄されることもありました。

小川の死後に明らかになったのですが、43 番元素は自然界には存在しなかったのです。43 番元素が実際に発見されたのは 1937 年のことでした。イタリアのセグレ (E.G. Segré) とペリエ (C. Perrier) よってカリフォルニア大学バークレー校のサイクロトロンで重陽子に曝された金属モリブデンの中に見出されたのです。³⁾ この元素は人類初の人工元素だったことからテクネチウム (Technetium, Tc) と名付けられました。

もし、小川のニッポニウムが周期表でもう一段下の 75 番元素の欄に位置付けられていれば、その元素名は今でも残っているはずなのですが、不運にも“幻の元素”に終わってしまいました。しかし、吉原賢二東北大学名誉教授 (専門は放射化学) は、小川の発見を“幻の元素”に終わらせたくないとの思いから化学史の研究を進め、小川が発見したのは 75 番元素であるとする論文を 1997 年に発表しました。⁴⁻⁷⁾ 吉原は、小川の遺品の中に彼が日本での研究に使用したモリブデンを主成分とする鉱物モリブデナイトの X 線分光写真乾板を発見し、その写真にある 2 本のスペクトルがまさにレニウムの $L_{\beta 1}$ と $L_{\beta 2}$ 線に一致することを突き止めたのです (図 4)。75 番元素は小川の新元素発見から 17 年後の 1925 年にドイツのノダック (W. Noddack) らによって発見され、レニウム (Rhenium, Re) と名付けられました。⁸⁾

ニッポニウムは周期表から消えましたが、新たにニホニウムが日本発の新元素として登場しました。森田らは理研仁科加速器施設の線形加速器 RILAC (variable-frequency linear accelerator) を使って亜鉛イオン ($^{70}_{30}\text{Zn}^{n+}$) を高速に加速し、ビスマス ($^{209}_{83}\text{Bi}$) の標的に当てることにより発生した質量数 278 の 113 番元素 ($^{278}_{113}$) を GARIS と名付けた気体充填型反跳分離器 (Gas-filled Recoil Ion Separator) を用いて原子 1 個 1 個の質量とエネルギーを精密に分析し、壊変の度に放出されるアルファ線を時々刻々追

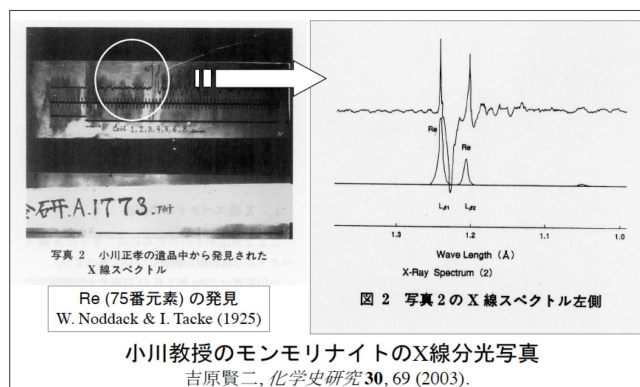


図 4

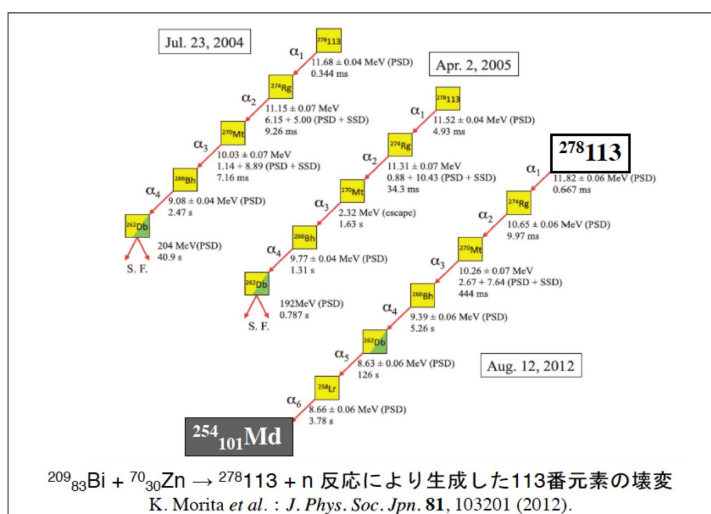


図 5

どちらも消えて無くなってしまったのです（消滅核種）。前節で述べたように、小川はニッポニウムを、当時の周期表で空欄になっていた 43 番に位置付けてしまいましたが、その欄に置く元素は天然に存在しないことなど当時は知る由もありませんでした。

天然にある元素は星（恒星）の燃焼（核融合）や超新星爆発でつくられます。その原料は 138 億年前のビッグバンの 3 分後には既に存在した水素（H）です。太陽などの恒星は軽い元素を融合させて重い元素に変え、熱や光、ニュートリノ（ ν ）を出します。水素の核融合でヘリウムが生まれ、水素がなくなるとヘリウムが核融合を始めます。現在の太陽では、水素の原子核 4 個が融合してヘリウム-4 (${}^4\text{He}$) になる PPI 過程と呼ばれる核融合反応が続いています（図 6）。アインシュタインの有名な式 $E=mc^2$ によると、エネルギー（ E ）と物質の質量（ m ）は等価で入れ替わります。光の速さ（ c ）はとても大きな数なので、わずかな質量でも大きなエネルギーを生み出します。太陽は骨身を削って私たちに恵みを与えてっていますが、毎秒 40 億キログラムずつ軽くなっていて、50~60 億年後にはエネルギーを放出できない赤色巨星となり、その後白色矮星となって“星の死”を迎えます。

星は元素の製造工場です（図 6）。 ${}^4\text{He}$ 原子が 2 個融合してベリリウム-8 (${}^8\text{Be}$) に、 ${}^4\text{He}$ が 3 個融合して炭素-12 (${}^{12}\text{C}$) に、さらに ${}^{12}\text{C}$ が ${}^4\text{He}$ と融合して酸素-16 (${}^{16}\text{O}$) にという具合に星の中で元素の合成が進みます。しかしどこまでも続くわけではなく、一連の核融合反応による元素合成は原子番号 26 の鉄-52 (${}^{52}\text{Fe}$) で止まってしまいます（図 6）。核融合反応によるエネルギー放出がなくなるためです。それより先の原子番号の元素をつくるためには、既に生成した元素の原子核に多量の中性子（ n ）を短時間に入れてやる必要があります。それを可能にするのが超新星爆発や中性子星の合体です。太陽の 8 倍以上の質量をもつ星の寿命が尽きる時、突然大爆発を起こして中性子星やブラックホールになる星の自爆です。その時、莫大な量の中性子が原子核に注入され、爆発から 1 分後にはウランまでの元素が生成します。そこでできた元素は爆発にともなって宇宙にばら撒かれ、その星間物質が再び集まって新たな星や惑星が生まれます。138 億年前のビッグバン以来、そのようなことが宇宙のあちこちで頻繁に繰り返されています。

4. 現代の錬金術の始まり

前節で述べたように、地球の自然界に存在する元素は全て宇宙でつくられたものです。星の核融合反応や超新星爆発によってつくられた元素が集まって地球を構成しています。それでは、テクネチウム（Tc）とプロメチウム（Pm）、それに原子番号 93 のネプツニウム（Np）から 118 番のオガネソン（Og）までの人工元素はどのようにしてつくられたのでしょうか。

17 世紀までは錬金術師が金をつくりたいと頑張っていました。化学反応で元素を変えることはできません。原子から電子を剥ぎ取ったり（イオン化）、原子に電子を付ける（電子付加）たり、いくつかの原子同士を結び付けて分子をつくったりすることは化学反応エネルギーの範囲内ですることはできますが、元素を変えるために必要な陽子や中性子を操ることはできません。

原子は原子核と電子からできていて、原子核は陽子と中性子で構成されます。原子核の中にある陽子の数そのものが原子番号（ Z ）ですから、元素を変化させるためには、原子核の中の陽子の数を変えてやればよいことになります。それには、原子核に直接陽子を導入したり、取り除いたりする方法がありますが、中性子を取り込ませても陽子の数を増やす