

ことができます。原子核の中子数 ( $N$ ) と陽子数 ( $Z$ ) のバランスがよいと原子核は安定なのですが、この比 ( $N/Z$ ) が大きくなると中性子 ( $n$ ) が自ずから陽子 ( $p$ ) に変化します。



ベータ壊変 ( $\beta$  decay) と呼ばれるもので、これにより原子番号が 1 つ増えることになりま  
す ( $\bar{\nu}_e$  は反ニュートリノ)。

陽子や中性子を操るためには原子核反応 (核反応) を用いますが、そのためには化学反応  
の 100 万倍ものエネルギーが必要です。星の核融合反応や超新星爆発ではもっと高いエネ  
ルギーが与えられるので、いろいろな核反応が容易に起きますが、それを地球上で実現す  
るためには原子炉や加速器を利用します (図 7)。現代の錬金術と言えるもので、実際、人  
工元素の多くは加速器を用いてつくられました。宇宙は天然の加速器なのです。

人類が最初につくった元素は第 2 節で触れた 43 番のネチウム (Tc) です。その名称  
technetium はギリシャ語で人工を意味する technetos (τεχνητος) に由来します。この元素  
を発見したのはイタリアの物理学者セグレとペリエです。セグレは、42 番元素であるモリ  
ブデン (Mo) の原子核に陽子 ( $p$ ) を 1 個加えれば 43 番元素ができると考えました。1936 年  
の夏に米国カリフォルニア大学バークレー校 (UC Berkley) にローレンス教授 (E. O.  
Lawrence; 1951 年にサイクロトロンの開発でノーベル物理学賞受賞) を訪ね、彼が 1934 年  
に完成させたばかりの 27"サイクロトロンで重陽子 ( $d$ ) に曝されたモリブデン箔の譲渡を  
依頼しました。そして、イタリアに送られてきたモリブデン箔の元素分析をペリエととも  
に根気強く続け、1937 年 12 月に化学的性質がマンガン (Mn) やレニウム (Re) に類似する  
新しい元素の存在を確認し報告しました (図 3)。<sup>3)</sup>

テクネチウムには 40 種類近い同位体がありますがその全てが放射性で、最も寿命の長い  
 $^{98}\text{Tc}$  でも半減期 ( $T_{1/2}$ ) は 420 万年ですから、地球が誕生した約 46 億年前には存在していた  
としても、現在は自然界に存在しないので消滅元素と呼ばれます。ただし、テクネチウム  
はウランの自発核分裂によっても生成しますから、天然のウラン鉱石の中には極微量の Tc  
が存在します。全ての同位体が放射性であるプロメチウム (最も寿命の長い同位体は  
 $^{143}\text{Pm}$ ;  $T_{1/2}=17.7$  年) も、ウランの核分裂生成物として生れてくるので、これも天然のウラ  
ン鉱石の中に極微量ながら存在します。

一方、人工のテクネチウムは原子力発電所の使用済み核燃料中に大量に含まれています。

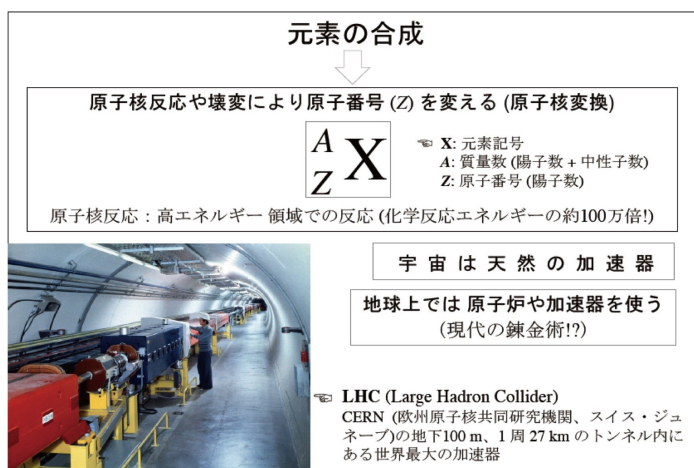


図 7

ウランの核分裂生成物であるモリブ  
デン ( $^{99}\text{Mo}$ ;  $T_{1/2}=66$  時間) のベータ  
壊変で発生する  $^{99}\text{Tc}$  ( $T_{1/2}=21$  万年)  
は核燃料中に長期間残りますから、  
近代の原子力事象の増加にともない、  
この人工元素の全世界の総量は 100  
トンの域に達すると思われます。

プロメチウムはランタノイド元素  
の一つです (図 1)。ランタノイド元  
素は互いに化学的性質が類似してい  
るため相互分離は容易でないです  
が、プロメチウムは 1940 年代の米

国のマンハッタン計画 (原爆開発) で開発された陽イオン交換クロマトグラフィーを用いる実験で、1947年にマリンスキー (J.A. Marinsky) らによってウランの核分裂生成物から分離されました ( $^{147}\text{Pm}$ ;  $T_{1/2}=2.6$  年と  $^{149}\text{Pm}$ ;  $T_{1/2}=53$  時間)。<sup>12)</sup> プロメチウムは青白色の蛍光を発するので、その元素名はギリシャ神話に登場するプロメテウス (Promētheús、人類に火を伝えたとされる) に因んで命名されました。

## 5. 超ウラン元素 (TRU) の合成

93番元素ネプツニウム (Np) から103番元素ローレンシウム (Lr) までの11元素を超ウラン元素 (TRU; Transuranium elements) と呼びます。その発見年と合成反応を 図 8 にまとめて示します。<sup>13)</sup> 93番の Np、94番のプルトニウム (Pu)、95番のアメリシウム (Am) の3元素は原子炉を使い、中性子 ( $n$ ) を標的とする原子核に導入する反応 (中性子捕獲反応) によってつくられました。例えば、 $^{239}\text{Np}$  ( $T_{1/2}=2.3$  日) は天然に最も多く存在するウラン-238 ( $^{238}\text{U}$ ; 存在度 99.3%) の中性子捕獲反応 (3a) で生成する  $^{239}\text{U}$  ( $T_{1/2}=23$  分) のベータ ( $\beta$ ) 壊変 (3b) によって生まれます。式 (3b) の右辺の  $e^-$  は  $^{239}\text{U}$  の原子核から放出される高エネルギーの電子を表しますが、ベータ粒子 (線) のことです。



図 8 では、この連続する2つの過程を  $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np}$  と記しています。 $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$  という表記は (3a) 式のことです。この反応で生成した  $^{239}\text{Np}$  は 2.3 日の半減期でベータ線を出して速やかに  $^{239}\text{Pu}$  に変わります。この  $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$  過程による  $^{239}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=24,000$  年) の生成は 1941年に確認されました。

この  $^{239}\text{Pu}$  の発見に先立ち、1940年には  $^{238}\text{Pu}$  ( $T_{1/2}=87.7$  年) がカリフォルニア大学バークレー校のシーボーグ (G.T. Seaborg) とマクミラン (E.M. McMillan) らによってサイクロトロンを用いる  $^{238}\text{U}$  の重陽子 ( $d$ ) 照射によってつくられました。その後、サイクロトロンを利用して原子番号 96 のキュリウム (Cm) から 103 番のローレンシウム (Lr) までの超ウラン元素が次々と合成されました。この中で、99番のアインスタインウム ( $^{253}\text{Es}$ ;  $T_{1/2}=20$  日) と 100番のフェルミウム ( $^{255}\text{Fm}$ ;  $T_{1/2}=22$  時間) は 1952年に西太平洋で行われた米国の水爆実験の“灰”の中に偶然見付けられたのですが、軍事機密のため、発見は 1954年まで

伏せられていました。なお、シーボーグとマクミランは 1951年に「超ウラン元素の発見」でノーベル化学賞を受賞しました。

ここで少し横道にそれますが大事なことで、原子炉で使用されるウラン燃料中には核分裂性の“燃える”  $^{235}\text{U}$  が通常 3~5%含まれていますが (天然存在度

超ウラン元素の合成 (1940-1961年)			
シーボーグ、マクミランら (カリフォルニア大学バークレー校)			
原子番号	元素 (記号)	発見年	合成反応
93	ネプツニウム (Np)	1940	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np}$ (2.3日)
94	プルトニウム (Pu)	1940	$^{238}\text{U}(d,2n)^{238}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu}$ (87.7年)
		1941	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ (24000年)*
95	アメリシウム (Am)	1944	$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)^{240}\text{Pu} (n,\gamma)^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ (433年)
96	キュリウム (Cm)	1944	$^{239}\text{Pu}(\alpha,n)^{242}\text{Cm}$ (163日)
97	バークリウム (Bk)	1949	$^{241}\text{Am}(\alpha,2n)^{243}\text{Bk}$ (4.5時間)
98	カリホルニウム (Cf)	1950	$^{242}\text{Cm}(\alpha,n)^{245}\text{Cf}$ (44分)
99	アインスタインウム (Es)	1952	核実験(水爆) $^{253}\text{Es}$ (20日)
100	フェルミウム (Fm)	1952	核実験(水爆) $^{255}\text{Fm}$ (22時間)
101	メンデレビウム (Md)	1955	$^{253}\text{Es}(\alpha,n)^{256}\text{Md}$ (1.3時間)
102	ノーベリウム (No)	1958	$^{244}\text{Cm}(^{12}\text{C},4n)^{252}\text{No}$ (3秒)
103	ローレンシウム (Lr)	1961	$^{249-252}\text{Cf}(^{10,11}\text{B},xn)^{258}\text{Lr}$ (4秒)

\*原子炉内の核燃料中に  $^{239}\text{Pu}$  が生成する反応:  $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$  の表記は  $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} + \gamma$  のこと

図 8

0.7%の  $^{235}\text{U}$  を濃縮して使用)、大部分は“燃えない”  $^{238}\text{U}$  (天然存在度 99.3%) です。原子炉の中でこの  $^{238}\text{U}$  に中性子が取り込まれると、先に述べた  $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$  によって  $^{239}\text{Pu}$  がつくられるので、稼働中の原子炉の核燃料中には  $^{239}\text{Pu}$  が時々刻々と溜まってきました。使用済み核燃料から  $^{235}\text{U}$  と  $^{239}\text{Pu}$  を分離精製することを核燃料再処理といい、青森県の六ヶ所村に再処理工場があります。大事なことは、わが国が現在保有しているプルトニウムの総量です。国内の原子力発電所の使用中および使用済み核燃料中の存在量と英国とフランスに依頼して再処理済みの量を合わせると約 47 トンになります (内閣府発表)。なお、 $^{239}\text{Pu}$  は  $^{235}\text{U}$  と同様に核分裂しやすい核種なので、核燃料として再利用が可能です。わが国でも、四国電力伊方原子力発電所 (愛媛県伊方町) 3号機などで  $^{235}\text{U}$ - $^{239}\text{Pu}$  混合酸化物燃料 (MOX 燃料) として実際に使われています。

## 6. 超重元素 (SHE) の合成

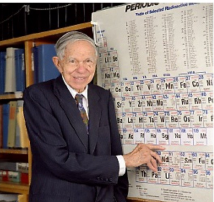
104 番元素ラザホージウム (Rf) から先の元素を超重元素 (SHE; Superheavy elements) と呼びます。現在までのところ原子番号 118 番のオガネソン (Og) までの 15 元素がつけられています (図 9~11)。いずれの合成実験でも重イオン加速器が用いられましたが、年代を追って 3 期に分けてみました。

第 1 期 (1960 年代末~1970 年代前半) はローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL; Lawrence Berkeley National Laboratory) の重イオン線形加速器 HILAC (Heavy Ion Linear Accelerator) を利用した元素合成です。カリフォルニア大学の放射線研究所が国立研究所に改組され、マクミランが所長を務めていた頃 (1958~1972 年) の研究が中心です。シーボーグの指導で原子番号 104 のラザホージウム (Rf)、105 番のドブニウム (Db) そして 106 番のシーボーギウム (Sg) の 3 元素がつけられました (図 9)。標的にした原子核はいずれもカリホルニウム-249 ( $^{249}\text{Cf}$ ) ですが加速粒子は異なり、それぞれ  $^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}$ 、 $^{18}\text{O}$  などのイオンでした。Sg という元素名は TRU を含め元素合成の中心的役割を果たしたシーボーグに因んで命名され、発見から 14 年後の 1998 年 5 月に IUPAC に認められました。図 9 の写真は、新しい周期表に載った Sg を指差すシーボーグ本人です。存命中の科学者の名が元素名に採用されたのはこれが初めてでした。

なお、ラザホージウム (Rf) は 1908 年に「元素の崩壊と放射性物質の研究」でノーベル化学賞を受賞した英国の科学者ラザフォード (Ernest Rutherford) に、ドブニウム (Db) はロシアの合同原子核研究所 (JINR; Joint Institute for Nuclear Research) があるモスクワ近郊の科学都市ドブナ (Dubna) の地名に因んで命名されました。

**超重元素(SHE)の合成 [第1期 (1969-1974年)]**  
重イオン加速器HILACを利用  
米国 LBNL (ローレンス・バークレー国立研究所)/Berkeley

104	ラザホージウム (Rf)	1969	$^{249}\text{Cf}(^{12}\text{C}, 4n)$ $^{257}\text{Rf}$ (4.4秒)
105	ドブニウム (Db)	1970	$^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N}, 4n)$ $^{260}\text{Db}$ (1.8時間)
106	シーボーギウム (Sg)	1974	$^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4n)$ $^{263}\text{Sg}$ (1.9分)



☞ 周期表の Sg (シーボーギウム) を指さす G.T. Seaborg 本人 (1998年5月)  
Sg は存命中の人に因んで1977年に命名された最初の元素 (Seaborg は1951年に「超ウラン元素の発見」でノーベル化学賞を受賞)

図 9

第 2 期 (1980 年代) の主役は、1969 年に設立されたドイツの重イオン研究所 (GSI; GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung) でした。ミュンツェンベルク (G. Münzenberg) やホフマン (S. Hofmann) らが 1975 年に完成した大型の線形加速器 (UNILAC; Universal Linear Accelerator) を使って高速に加速した

$^{54}\text{Cr}$  や  $^{58}\text{Fe}$  イオンを  $^{209}\text{Bi}$  や  $^{208}\text{Pb}$  の標的に当て、107 番のボーリウム (Bh)、108 番のハッシウム (Hs)、109 番のマイトネリウム (Mt) の3 元素をつくりました (図 10)。この方法は“冷たい核融合”と呼ばれ、<sup>14)</sup> その後の超重元素 (113 番まで) の合成にも利用されました。また、一連の合成研究に欠かせなかったのは加速器に直結した大型の分離装置 SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) の開発でした。

ボーリウム (Bh) は量子力学を育てたデンマークの理論物理学者ボーア (Niels Bohr)、108 番のハッシウム (Hs) は GSI の所在地であるドイツのヘッセン州の地名、109 番のマイトネリウム (Mt) は核分裂を発見したオーストリアの女性科学者マイトナー (Lise Meitner) に因んで命名されました。

第3 期 (1990 年代~2000 年代) には、日本の理研も大いに貢献しましたが、引き続き GSI がリードし、ロシアと米国の共同研究チームが大きな成果をあげました (図 11)。


GSI では加速粒子を  $^{54}\text{Cr}$  や  $^{58}\text{Fe}$  から  $^{62}\text{Ni}$ 、 $^{64}\text{Ni}$ 、 $^{70}\text{Zn}$  イオンに変え、冷たい核融合反応によって新たに 110 番から 112 番までの元素の合成に成功しました。110 番元素の名称は GSI の所在都市ダルムシュタットの都市名からダームスタチウム (Ds)、111 番は X 線を発見し 1901 年に世界初のノーベル物理学賞を受賞したドイツの科学者レントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen) に因んでレントゲニウム (Rg)、そして 112 番は地動説を唱えて世界観を変えたポーランドの科学者コペルニクス (Nicolaus Copernicus) に敬意を払ってコペルニシウム (Cn) と命名されました。

113 番元素ニホニウム (Nh) の最初の 1 個は 2004 年に理研の森田らによって理研の線形加速器 RILAC を用いてつくられましたが、詳しくは第 2 節で述べたとおりです。

超重元素(SHE)の合成 [第3期 (1994-2006年)]				
重イオン加速器による核融合反応				
GSI (ドイツ) : 線型加速器 UNILAC				
110	ダームスタチウム (Ds)	1994	$^{208}\text{Pb} (^{62}\text{Ni}, n)$	$^{269}\text{Ds}$ (0.2 ミリ秒)
		1994	$^{208}\text{Pb} (^{64}\text{Ni}, n)$	$^{271}\text{Ds}$ (0.1 ミリ秒)
111	レントゲニウム (Rg)	1994	$^{209}\text{Bi} (^{64}\text{Ni}, n)$	$^{272}\text{Rg}$ (3.8 ミリ秒)
112	コペルニシウム (Cn)	1996	$^{208}\text{Pb} (^{70}\text{Zn}, n)$	$^{277}\text{Cn}$ (0.7 ミリ秒)
RIKEN (理化学研究所) 和光市 : 線型加速器 RILAC				
113	ニホニウム (Nh)	2004	$^{209}\text{Bi} (^{70}\text{Zn}, n)$	$^{278}\text{Nh}$ (2 ミリ秒)
FLNR (ロシア)-LLNL (米国) 共同チーム : U-300/U-400 サイクロトロン				
114	フレロビウム (Fl)	1999	$^{244}\text{Pu} (^{48}\text{Ca}, 3n)$	$^{289}\text{Fl}$ (2 秒)
115	モスコビウム (Mc)	2004	$^{243}\text{Am} (^{48}\text{Ca}, 3n)$	$^{288}\text{Mc}$ (90 ミリ秒)
			$\alpha \rightarrow$	$^{284}\text{113}$ (0.5 秒)
116	リバモミウム (Lv)	2000	$^{248}\text{Cm} (^{48}\text{Ca}, 4n)$	$^{292}\text{Lv}$ (13 ミリ秒)
117	テネシン (Ts)	2010	$^{249}\text{Bk} (^{48}\text{Ca}, 4n)$	$^{293}\text{Ts}$ (22 ミリ秒)
118	オガネソン (Og)	2006	$^{249}\text{Bk} (^{48}\text{Ca}, 3n)$	$^{294}\text{Og}$ (0.7 ミリ秒)

図 11

超重元素(SHE)の合成 [第2期(1980-1985年)]				
線型加速器 (UNILAC) を利用 ドイツGSI (重イオン研究所) / Darmstadt				
107	ボーリウム (Bh)	1981	$^{209}\text{Bi} (^{54}\text{Cr}, n)$	$^{262}\text{Bh}$ (83 ミリ秒)
108	ハッシウム (Hs)	1984	$^{208}\text{Pb} (^{58}\text{Fe}, n)$	$^{265}\text{Hs}$ (1.9 ミリ秒)
109	マイトネリウム (Mt)	1982	$^{209}\text{Bi} (^{58}\text{Fe}, n)$	$^{266}\text{Mt}$ (1.7 ミリ秒)



ドイツ重イオン研究所 (GSI/Darmstadt)

図 10

114 番から 118 番までの 5 元素はロシアのフリューロフ核反応研究所 (FLNR; Flerov Laboratory of Nuclear Reactions) と米国のローレンスリバモア国立研究所 (LLNL; Lawrence Livermore National Laboratory) の共同研究チームによってつくられました。彼らはドブナの JINR 内にある FLNR の U-300 あるいは U-400 サイクロトロンで  $^{48}\text{Ca}$  イオンを加速し、 $^{244}\text{Pu}$ 、 $^{243}\text{Am}$ 、 $^{248}\text{Cm}$ 、 $^{249}\text{Bk}$  などの標的にぶつけたの

ですが、ここで使った  $^{48}\text{Ca}$  (天然存在度 0.19%) は濃縮して使わなければならない、標的とした原子は全て人工元素という特殊なものだったため、これらの試料を確保していた LLNL の協力が必要でした。

114 番元素フレロビウム (Fl) の名称は FLNR に因んで、115 番のモスコビウム (Mc) はロシアの首都モスクワの地名、116 番のリバモリウム (Lv) は共同研究チームの米国 LLNL の貢献に敬意を表し、117 番のテネシン (Ts) は標的として使った  $^{249}\text{Bk}$  の供給元であった米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL; Oak Ridge National Laboratory) の所在地テネシー州の地名に因んで付けられました。118 番元素のオガネソン (Og) は、一連の超重元素合成研究でロシア-米国共同研究チームを指揮したロシアの科学者ユーリ・オガネシアン (Yuri Tsolakovich Oganessian) の功績を称えて命名されました。存命の科学者の名が元素の命名に使われたのはシーボグに次いで二人目です。彼は日本の研究者とも親交が深く、何度も来日しています。



Yu. Ts. Oganessian (1933-)

## 7. あとがき

118 番で周期表の第 7 周期は全て埋め尽くされ、次の狙いは 119 番元素です。理研の森田らは誰も踏み入れたことのない第 8 周期に歩を進めようと、2017 年から加速器 (RILAC) のパワーを増強中で、準備が整えば 2020 年度中にも 119 番元素の合成実験を開始する予定です。ただ、119 番元素が第 8 周期の先頭に収まるとは限りません。技術的には原子の寿命が数秒以上あれば原子 1 個でも化学的性質を調べることが可能なので、秒単位の寿命をもつ新元素の出現が切望されています。<sup>15, 16)</sup>

## 参考文献

- 1) Ogawa, M., *Chem. News* **98**, 249-251 (1908).
- 2) Ogawa, M., *Chem. News* **98**, 261-264 (1908).
- 3) Perrier, C., Segré, E., *J. Chem. Phys.*, **5**, 712-716 (1937).
- 4) Yoshihara, K., *Radiochim. Acta*, **77**, 9-13 (1997).
- 5) Yoshihara, H. K., *Hist. Scientiarum*, **9**, 247-269 (2000).
- 6) 吉原賢二、*化学史研究* **30**, 69 (2003).
- 7) Yoshihara, H. K., *Proc. Jpn. Acad., Ser. B* **84**, 232 (2008).
- 8) Noddack, W., Tacke, I. and Berg, O., *Naturwiss.* **26**, 567 (1925).
- 9) Morita, K. 他, *J. Phys. Soc. Jpn.* **73**, 2593 (2004).
- 10) Morita, K. 他, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 103201 (2012).
- 11) Oganessian, Yu. Ts. 他, *Physical Review C* **69**, 021601 (2004).
- 12) Marinsky, J.A., Glendenin, L. E., Coryell, C. D., *J. Am. Chem. Soc.* **69**, 2781 (1947).
- 13) Nagame, Y., Hirata, M., *Radiochim. Acta* **99**, 377-393 (2011).
- 14) Hofmann, S., *Radiochim. Acta* **99**, 405-428 (2011).
- 15) Ball, P., *Nature* **565**, 552 (2019).
- 16) Kean, S., *Science* **363**, 466 (2019).