

放射能の発見と地球化学

金井 豊¹⁾

1. はじめに

今年(1996年)は、放射能が発見されてちょうど百年目にあたります。「放射能」と「放射線」という言葉はどちらも良く似ていますが、「放射能」というのはある種の原子が「放射線」を出して他の種類の原子に変わる性質のことをいいます。今や、放射能・放射線は私達の生活の一部といえるほど生活の中に溶け込んでいます。また、私達の身体そのものが放射線源で、ホールボディカウンター(ヒューマンカウンター)で体内の放射性物質(カリウム-40)を検出することができます。平均的な日本人一人の全身で2400-6000ベクレルといえます(草間, 1990)、ウランにすれば0.2-0.5gに相当します。さらに、私達

の身の回りいたる所にいろいろな放射線が飛び交っています。しかし、それにもかかわらず、放射能・放射線に対する認識が曖昧なため単にイメージや不安だけが先立ってしまい、嫌われている側面があるように思われます。世界中いたるところに放射能・放射線であふれ、日本の電力の約1/3が原子力発電でまかなわれている事実を考えると、私達は今後さまざまな選択を迫られることとなるでしょう。そのためにも、放射能を新たな観点から見つめ直し、今後のあり方を探ってみることは有用と考えられます。放射能は自然界から見い出されたものであり、地球化学や私たちの生活においても不可避かつ不可欠となっている今、その百年を振り返って、地球化学をはじめ科学における放射能の役割を再認識してみたいと思います。



写真1 ベクレル(Antoine Henri Becquerel)の肖像。彼の祖父や父も物理・化学の学者でした。出典:大沼正則 訳,「元素発見の歴史」から朝倉書店の許可を得て転載。

2. パリの曇天がもたらした放射能の発見

放射能は、今からちょうど一世紀前の1896年にフランスのA.H.ベクレル(Antoine Henri Becquerel, 1852-1908)によって見い出されました(写真1)。彼は、もともと燐光(一度光に当たった物質がその後しばらく暗所で光り続ける現象)を研究するパリ工科大学の物理学教授で、太陽光によるウランの燐光を調べていました。ある時、太陽の見えない曇天ばかり続いたため諦めて現像したところ、机の引き出しの中に置いてあった黒い紙で保護したはずの写真乾板がいつのまにか感光して、重しに使った鍵の影ができていたことに気がきました。そのそばにはウランの鉱石があり、彼はこれがエックス線のような目に見えない、しかし写真乾板には写る光を出しているのではないかと考えたのです。1896年といえば、レ

1) 地質調査所 地殻化学部

キーワード:放射能, 発見, 元素, 核種, 放射性鉱物, 地球化学

ントゲンによるエックス線の発見が1895年ですから、その翌年になります。放電管から目に見えない常に透過性の良い、それでいて写真乾板に写る放射線(エックス線)が出るという発見は、当時の社会を非常に驚かせました。ベクレルによる放射能の発見も、このエックス線の発見に負うところが大きかったと思います。

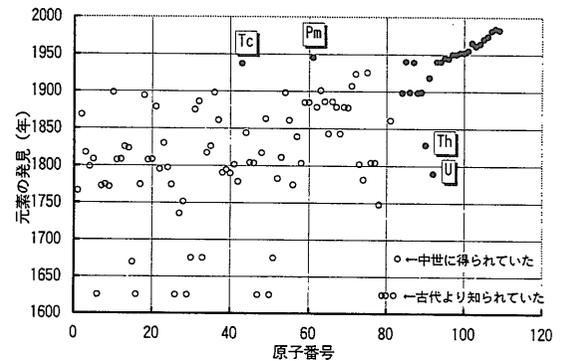
その後彼は研究を続け、すべてのウラン化合物はエックス線のような透過性の線を放射して写真乾板を黒くし(感光作用)、空気を伝導体と変え(電離作用)、帯電した検電器の電荷を失わせて金箔を互いに重ならせることができることを見出しました。しかも、これはウランが自発的に行っているという結論を得たのです。このようにして彼は放射能を見出し、このウラン化合物からの放射線はベクレル線またはウラン線と呼ばれました。この発見に威力を発揮したのがウラン金属塊です。反応性のフッ素を単離したことで知られているモアサン(F.F.H.Moissan)が、非常な高温になる電気炉を考案してウランの金属塊を作り、これをベクレルに与えたのでした。これがなければ放射能の発見がもう少し遅れていたかも知れません。ベクレルは、放射能の発見によって1903年ノーベル物理学賞を受け、彼の名「ベクレル」は、現在放射能のSI単位として使用されています。

放射能の単位とくれば、以前はキュリー(Ci)が使われていましたから、キュリー夫妻のことを避けては通れません(写真2)。彼らをはじめとする放射化学者は、20世紀初頭までにウラン以外の自発的に放射線を出す元素をいくつも見つけ、これによって放射能に関する研究は大きく進展しました。放射能はある種の原子の特性でもあるので、放射能に関する研究は、原子構造に関する研究の発展にも大きく寄与しているものと考えられます。

また、元素発見の歴史においても、それまでは化学分離や分光学的手法(スペクトル線解析)で多くの元素が見い出されてきていましたが、天秤やスペクトル線の撮影にも引っかけられないほど微量に存在する元素に関しては、放射能という新しい検出手段によって40を越える多くの核種が見い出されることとなりました(第1図、第1,2表参照)。原子番号84(ポロニウム)以上の元素および43(テクネチウム)、61(プロメチウム)の元素はすべて放射能と核合成を利用して見い出されました。こうした意味でも、放射



写真2 キュリー夫妻一家。夫妻には二人の娘がいて、姉のイレヌはジョリオ夫人となり人工放射能を発見しました。妹のエーヴは著名なピアニストになりました。出典：大沼正則 訳、「元素発見の歴史」から朝倉書店の許可を得て転載。



第1図 原子番号と元素の発見年。黒丸は放射能に関連する元素で、ウラン・トリウムを除くと19世紀末から次々と見い出され、核合成されていきました。

能の発見は科学に大きな貢献をしていると言えます。

3. その後に続く放射性元素の発見

放射能を用いる放射性元素の発見の最初は、キュリー夫人(Marie Sklodowska Curie, 1867-1934)によるポロニウム(Po)です。彼女は、放射能に関する研究を継承してそれまでに知られていた元素の放射能を試験し、ウランとトリウムのみが電離作用のあ

第1表 元素の発見年と発見者

原子番号	元素名	元素記号	発見年	主な発見者	原子番号	元素名	元素記号	発見年	主な発見者
1	水素	H	1766	キャヴェンディッシュ	56	バリウム	Ba	1774	シェーレ
2	ヘリウム	He	1868	ロッキヤー、ジャンサン	57	ランタン	La	1839	ムーサンデル
3	リチウム	Li	1817	アルフヴェドソン	58	セリウム	Ce	1803	ベルセーリウス、ヒシニエル、クラブロート
4	ベリリウム	Be	1798	ヴォークラン	59	プラセオジウム	Pr	1885	ヴェルスバッハ
5	ホウ酸	B	1808	ゲイ・リュサック、テナール	60	ネオジウム	Nd	1885	ヴェルスバッハ
6	炭素	C		古代より知られていた	61	プロメチウム	Pm	1945	マリンスキー、グレンデニン、コリエル
7	窒素	N	1772	ラザフォード	62	サマリウム	Sm	1879	ボアボードラン
8	酸素	O	1774	プリーストリ、シェーレ	63	ユーロピウム	Eu	1901	デマルセイ
9	フッ素	F	1771	シェーレ	64	ガドリニウム	Gd	1886	ボアボードラン
10	ネオン	Ne	1898	ラムゼー、トラヴァース	65	テルビウム	Tb	1843	ムーサンデル
11	ナトリウム	Na	1807	デーヴィ	66	ジスプロシウム	Dy	1886	ボアボードラン
12	マグネシウム	Mg	1808	デーヴィ	67	ホルミウム	Ho	1879	クレーヴェ
13	アルミニウム	Al	1825	エールステッド	68	エルビウム	Er	1843	ムーサンデル
14	ケイ素	Si	1823	ベルセーリウス	69	ツリウム	Tm	1879	クレーヴェ
15	リン	P	1669	プラント	70	イットルビウム	Yb	1878	マリニヤク
16	硫黄	S		古代より知られていた	71	ルテチウム	Lu	1907	ユルバン
17	塩素	Cl	1774	シェーレ	72	ハフニウム	Hf	1923	ヘヴェシコ、コスター
18	アルゴン	Ar	1894	ラムゼー、レイリー	73	タンタル	Ta	1802	エーケベリ
19	カリウム	K	1807	デーヴィ	74	タングステン	W	1781	シェーレ
20	カルシウム	Ca	1808	デーヴィ	75	レニウム	Re	1925	ノダック、タッケ、ベルク
21	スカンジウム	Sc	1879	ニルソン	76	オスミウム	Os	1804	テナント
22	チタン	Ti	1795	クラブロート	77	イリジウム	Ir	1804	テナント
23	バナジウム	V	1830	セフストレーム	78	白金	Pt	1748	deウロア
24	クロム	Cr	1797	ヴォークラン	79	金	Au		古代より知られていた
25	マンガン	Mn	1774	シェーレ	80	水銀	Hg		古代より知られていた
26	鉄	Fe		古代より知られていた	81	タリウム	Tl	1861	クルックス
27	コバルト	Co	1735	プラント	82	鉛	Pb		古代より知られていた
28	ニッケル	Ni	1751	クロウンステット	83	ビスマス	Bi		中世に得られた
29	銅	Cu		古代より知られていた	84	ポロニウム	Po	1898	キュリー夫妻
30	亜鉛	Zn		中世に得られた	85	アスタチン	At	1940	コルソン、マッケンジー、セグレ
31	ガリウム	Ga	1875	ボアボードラン	86	ラドン	Rn	1899	ラザフォード、オーエンズ
32	ゲルマニウム	Ge	1886	ヴィンクラウ	87	フランシウム	Fr	1939	ペレー
33	ヒ素	As		中世に得られた	88	ラジウム	Ra	1898	キュリー夫妻
34	セレン	Se	1817	ベルセーリウス	89	アクチニウム	Ac	1899	ドビエルヌ
35	臭素	Br	1826	バラール	90	トリウム	Th	1828	ベルセーリウス
36	クリプトン	Kr	1898	ラムゼー、トラヴァース	91	プロトアクチニウム	Pa	1918	ハーン、マイトナー、ソディー、クランストン
37	ルビジウム	Rb	1861	ブンゼン、キルヒホフ	92	ウラン	U	1789	クラブロート
38	ストロンチウム	Sr	1790	クロフォード	93	ネプツニウム	Np	1940	マクミラン、アベルソン
39	イットリウム	Y	1794	ガドリ	94	プルトニウム	Pu	1940	シーボーグ、他
40	ジルコニウム	Zr	1789	クラブロート	95	アメリシウム	Am	1945	シーボーグ、他
41	ニオブ	Nb	1801	ハチェット	96	キュリウム	Cm	1944	シーボーグ、他
42	モリブデン	Mo	1778	シェーレ	97	バークリウム	Bk	1950	シーボーグ、他
43	テクネチウム	Tc	1937	ペリエ、セグレ	98	カリホルニウム	Cf	1950	シーボーグ、他
44	ルテニウム	Ru	1844	クラウス	99	アインスタイニウム	Es	1952	ギオルソ、シーボーグ、他
45	ロジウム	Rh	1804	ウラストン	100	フェルミウム	Fm	1952	ギオルソ、シーボーグ、他
46	パラジウム	Pd	1803	ウラストン	101	メンデレビウム	Md	1955	シーボーグ他(バークレーグループ)
47	銀	Ag		古代より知られていた	102	ノーベリウム	No	1965	フレロフ他(ドブナグループ)
48	カドミウム	Cd	1817	シュトロマイヤー	103	ローレンシウム	Lr	1961	バークレーグループ、ドブナグループ
49	インジウム	In	1863	ライヒ	104	Unnilquadium	Unq	1964	バークレーグループ、ドブナグループ
50	スズ	Sn		古代より知られていた	105	Unnilpentium	Unp	1970	バークレーグループ、ドブナグループ
51	アンチモン	Sb		中世に得られた	106	Unnilhexium	Unh	1974	バークレーグループ
52	テルル	Te	1782	ミュラー	107	Unnilseptium	Uns	1981	ダルムシュタットグループ
53	ヨウ素	I	1811	クルトア	108	Unniloctium	Uno	1984	ダルムシュタットグループ
54	キセノン	Xe	1898	ラムゼー、トラヴァース	109	Unnilenium	Une	1982	ダルムシュタットグループ
55	セシウム	Cs	1861	ブンゼン、キルヒホフ					

る化合物をつくることを示しました(トリウムの放射能に関しては、G.C.N.シュミットによっても独自に発見されました)。また、ウラン鉱物やウラン塩の放射能を金属ウランとともに計測し、さまざまな実験によってウラン化合物が最も低い放射能を持ち、金属ウランがそれに続き、ピッチブレンドとして知られているウラン鉱物が最大の放射能を持っていることを示し

て、ピッチブレンドにウランよりも高い放射能の元素を含んでいると考えたのでした。しかし、その放射性元素の量は非常に微量であるため、ボヘミアのヨアヒムスタール・ウラン鉱山産の鉱滓をなんと数トンも処理して研究を行いました。そして1898年7月キュリー夫妻(& Pierre Curie, 1859-1906)は、ビスマス塩のフラクシオンの中にウラン金属の400倍もの

第2表 ウラン・アクチニウム・トリウム系列核種の半減期および発見年。
ウラン・トリウムについては、放射能の発見年を示してあります。

核種の別称	世代	核種	半減期	発見年	発見者
ウラン系列					
ウラン-I	1	U-238	44.7億年	1896	ベクレル
ウラン-X ₁	2	Th-234	24.1日	1900	クルックス
ウラン-X ₂	3	Pa-234	1.18分	1913	ファヤンス、ゲーリング
ウラン-II	4	U-234	24.5万年	1911	ガイガー、ナットール
イオニウム	5	Th-230	8万年	1907	ボルトウッド
ラジウム	6	Ra-226	1600年	1898	キュリー夫妻、ベモン
ラジウムのエマナチオン	7	Rn-222	3.82日	1900	ドルン
ラジウム-A	8	Po-218	3.05分	1903	ラザフォード、バーンズ
				1904	P. キュリー、ダン
ラジウム-B	9	Pb-214	26.8分	1903	P. キュリー、ダン
ラジウム-C	10	Bi-214	19.7分	1903	P. キュリー、ダン
ラジウム-C'	11	Po-214	0.000164秒	1909	ハーン、マイトナー
ラジウム-C''	11	Tl-210	1.3分	1912	ファヤンス
ラジウム-D	12	Pb-210	22.3年	1900	ホフマン、シュトラウス
ラジウム-E	13	Bi-210	5.01日	1904	ホフマン、ゴンダー、ヴェルフ
				1905	ラザフォード
ラジウム-F	14	Po-210	138日	1898	キュリー夫妻
アクチニウム系列					
ウラン-235 (AcU)	1	U-235	7.04億年	1935	デンブスター
ウラン-Y	2	Th-231	25.5時間	1911	アントノフ
プロトアクチニウム	3	Pa-231	3.28万年	1918	ハーン、マイトナー
				1918	ソディー、クランストン
アクチニウム	4	Ac-227	21.8年	1899	ドビエルヌ
				1902	ギーゼル
ラジオアクチニウム	5	Th-227	18.7日	1906	ハーン
アクチニウム-K	5	Fr-223	21.8分	1939	ペレー
アクチニウム-X	6	Ra-223	11.4日	1900	ドビエルヌ
				1904	ギーゼル
				1905	ゴドレフスキー
アクチニウムのエマナチオン	7	Rn-219	3.96秒	1902	ギーゼル
アクチニウム-A	8	Po-215	0.00178秒	1911	ガイガー
アクチニウム-B	9	Pb-211	36.1分	1904	ドビエルヌ
アクチニウム-C	10	Bi-211	2.15分	1904	ブラックス
アクチニウム-C'	11	Po-211	0.516秒	1908	ハーン、マイトナー
				1913	マースデン、ウィルソン
アクチニウム-C''	11	Tl-207	4.77分	1914	マースデン、バーキンス
トリウム系列					
トリウム	1	Th-232	141億年	1898	シュミット、M. キュリー
メソトリウム-I	2	Ra-228	5.76年	1907	ハーン
メソトリウム-II	3	Ac-228	6.13時間	1908	ハーン
ラジオトリウム	4	Th-228	1.91年	1905	ハーン
トリウム-X	5	Ra-224	3.66日	1902	ラザフォード、ソディー
トリウムのエマナチオン	6	Rn-220	55.6秒	1899	ラザフォード
トリウム-A	7	Po-216	0.15秒	1910	ガイガー、マースデン
トリウム-B	8	Pb-212	10.6時間	1899	ラザフォード
トリウム-C	9	Bi-212	60.6分	1903	ラザフォード
トリウム-C'	10	Po-212	0.000003秒	1909	ハーン、マイトナー
トリウム-C''	10	Tl-208	3.05分	1906	ハーン

強い放射能を見出し、この新元素をキュリー夫人の母国であるポーランドにちなんでポロニウムと名付けたのでした。

ポロニウムの発見と相伴って、別のバリウム塩のフラクションも強い放射能を有しているのに気づき、そこにも別の新元素があると考え分析を行いました。彼らは10,000回も根気よく分別結晶を繰り返し、同年の12月ついにラジウム(Ra)を得たのです。彼らが得た塩化ラジウムの結晶は暗闇の中で輝き、このため光を放つものという意味のラテン語の「radius」か

ら「ラジウム」と名付けました。ラジウムは、適度な半減期の長さ(約1,600年)とウランの300万倍という放射能の強さを持ちあわせており、その後の社会的放射線利用という放射能と人類との関係を考えると、画期的な発見といえるでしょう。

キュリー夫妻は、ウランやトリウム、ポロニウム、ラジウム等の元素に見られる感光作用・蛍光作用・電離作用などを引き起こす能力に対して「放射能」という言葉を、また、そこから出る光のようなものに対して「放射線」という言葉を初めて使ったのでした。

4. 放射壊変と系列核種

放射能というのは、既に述べたように放射線を放出する性質や能力をいい、放射能を有するものを放射性物質といいます。しかし、放射線や放射性物質のことも含めて放射能と呼ぶこともあります。

今では放射能が放射壊変によって起こるということが分かっていますが、当時はまだ分からず不思議なことばかりでした。例えば、クルックスは1900年ウランの化合物を分別結晶してろ液と沈殿を得たところ、ウランを含む溶液は放射能を示さず、ウランを含まない沈殿物が強い放射能を示したりしました。そしていろいろな放射能の現象が見い出されていったのです。このようなさまざまな観察から、ラザフォードとソディーは放射壊変は化学元素の転換にあると気付いたのです。すなわち、あらゆる放射性元素は独立ではなく、お互いに生起関係でつながっているとしました。今では親核種の名前をとって、ウラン系列・トリウム系列・アクチニウム系列などの名前が知られております(第2表参照)。

しかし、これらを元素とみなすためには大変な苦勞があったことと思われまふ。古い古典的な化学では常に重さを量ることのできるだけの物質を扱っていたので、元素を反応やスペクトルから確認できたのに対し、これらの系列元素ではただ放射能や半減期のみでその存在が示され、化学的なことは何も分からなかったからです。特に、ほとんどの放射性核種が短命の生成物で、数分・数秒という核種もざらにあります。第2表にそれぞれの系列核種の半減期と発見者を示しました。親の元素名にX(未知の物を指すエックス)やA・B・C等のアルファベットをつけていることから、元素として割り当てるのに苦勞をしていたことがうかがわれます。

5. 放射能の正体

キュリー夫妻によって明らかにされた放射能・放射線はその実体が不明でしたが、ウランやトリウム・ラジウムの放射能研究をしていたE.ラザフォード(Ernest Rutherford, 1871-1937)は、磁石によってベクレル線が3種類の放射線に分かれることを見い出しました。この3種の放射線はアルファ(α)線・ベータ(β)線・ガンマ(γ)線と呼ばれますが、実質的に

はアルファ線はヘリウム原子核、ベータ線は高速の電子、ガンマ線は電磁波の一種です。放射線にはこの他にエックス線・電子線・陽子線・中性子線・宇宙線・粒子線等があります。そうしますと、アルファ線・ベータ線・ガンマ線はヘリウム原子核の粒子線、電子線、エックス線と同じではないかと思う方がおられるかもしれませんが、その発生源が異なっております。すなわち、前者は放射性元素から核変換によって自発的に出るもので、後者は加速器などの放射線発生装置によって生ずるのです。

元素の壊変に伴って何が起こるのかということは、粘り強い研究によって法則化されました。それはソディ・ファヤンスの法則として知られています(Fredrick Soddy, 1877-1956; Kasimir Fajans, 1887-1975)。すなわち、アルファ壊変によって原子番号A、質量数Zの原子核(A,Z)は(A-4,Z-2)の別の核に、ベータ壊変によって(A,Z+1)の別の核に変わります。また、放射壊変は親核種の数に比例して確率的に起こっており、その壊変数は時間の指数関数で表されることも分かってきました。すなわち、放射能Aは親核種の原子数Nに関して $A = -dN/dt = \lambda N$ なる関係にあり、

$$N = N_0 \cdot \exp(-\lambda t),$$

$$A = A_0 \cdot \exp(-\lambda t) = A_0 \cdot (1/2)^{(t/T)}$$

ここで、tは経過時間を、 λ は壊変定数を、Tは半減期を、下付きの0はt=0を示しています。このようにして、放射能に関する学問は体系化されていきました。

6. 放射能を検知するには

放射能にはおいもないし、目で見たり手で触ることもできません。このようにそれを五感で察知できないことが、放射能を怖がる理由の一つにもなっています。暗がりを怖いと感じるのと同じことでしょう。また、放射能の発見よりも100年以上も前の1789年にクロプラートにより化学元素としてウランが、1815年にベルセーリウスによってトリウムが見い出されているにもかかわらず、それらの放射能の現象に長らく気が付かなかつた理由もここにあるのでしょうか。

では、味にもおいも無い放射能をどのようにして察知できるのでしょうか。それには放射線の性質を利用するのです。放射線には、前に述べたような、

第3表 主な放射線の性質とその検出器の一例

放射線の種類	構成粒子	電荷	質量	蛍光作用	感光作用	電離作用#	透過作用	到達距離*	放射線の検出に用いられる主な検出器
アルファ線	He原子核	2	4	大	大	大 (10 ⁴)	小	小	Si表面障壁型半導体検出器(SSB), ZnSシンチレーション検出器, 窓なしガスフロー計数管検出器, 液体シンチレーション検出器
ベータ線	電子・陽電子	-1/+1	1/1840	中	小	中 (10 ²)	中	中	GM計数管検出器, ガスフロー比例計数管検出器, 液体・プラスチックシンチレーション検出器, Si表面障壁型半導体検出器(SSB)
ガンマ線	電磁波(光子)	0	0	小	中	小 (1)	大	大	NaI(Tl)シンチレーション検出器, Ge半導体検出器, Ge(Li), Si(Li)半導体検出器
中性子線	中性子	0	1			(6-8)			
エックス線	電磁波(光子)	0	0						

: () の値は、電離作用の大きさをガンマ線を1としたときの相対的なおおよその比を示す

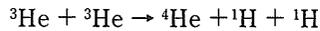
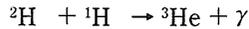
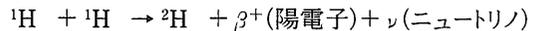
* : 透過する物質および放射線のエネルギーによって異なり、ベータ線・ガンマ線では指数関数的に減少する

透過作用、感光作用、蛍光作用、電離作用等の働きがあります。これを使って、目に見える、耳に聞こえるように変換するのです。ベクレルが放射能を発見したときには、写真フィルムに写る感光作用を利用しています。フィルムバッチやオートラジオグラフも感光作用です。このような作用は放射線によって強さが異なり、 $\alpha > \gamma > \beta$ の順に弱くなります。一方、今日のシンチレーションカウンターは、放射線の蛍光作用を使った検出器です。硫化亜鉛(ZnS)、ヨウ化ナトリウム(含タリウム)等は良く知られた蛍光物質で、放射線があたると特有の光を出すのです。強さは一般に $\alpha > \beta > \gamma$ の順です。電離作用を使ったものでは、ベクレルが使用していた箔検電器やウィルソンの霧箱、ガイガーカウンター、ガイガー・ミュラーカウンター(GMカウンター)等があります。電離作用は電荷を持ち重量の大きいアルファ線が最も大きく、 $\beta > \gamma$ と続いています。現在、放射線の検出には第3表に示したような様々な検出器が使用されています。

7. 放射性核種の起源

それでは、このような放射性核種はどのようにしてできたのでしょうか。哲学のような話となりますが、それは宇宙創世の時代に戻って考える必要があります。元素の生成に関しては宇宙理論と絡んで不確実な部分もありますが、その一つを紹介したいと思います。最も古い原始銀河はビッグバンで生成した水素(H)とヘリウム(He)のガスでできていたと考えら

れます(辻本・野本, 1993)。すなわち、陽子1個からなる水素核が衝突して、



これが自己重力による収縮で、さまざまな質量の星が形成されます。星の内部では重元素が生成され、あるものは超新星爆発を起こし重元素を含むガスが宇宙空間にばらまかれ、またそこから星が形成されるというプロセス(銀河の化学進化)を延々150億年にわたって繰り返すこととなります。星の中で合成される元素は星の大きさに依存しており、それを第4表に示しました(有本, 1993)。ここで M_{\odot} は太陽質量をさします。また、s過程、r過程というのは B_2FH 理論(E.M.Burbidge, G.R.Burbidge, W.A.Fowler, F.Hoyle)における中性子捕獲による核種生成過程をいい、前者は中性子の数が少なく低速中性子の反応であるのに対し、後者では中性子の量が多く中性子捕獲反応が速やかに起こる反応です。星の内部では鉄までが核合成されます。それ以上の重い元素は、爆発に伴いs過程、r過程で合成されます。星間に飛び散ったダストは約50億年前に凝集して惑星になったといえます。第2図に宇宙と地殻における原子の相対的存在度を示しました。こうした存在度の変化から、どのような経路で元素が生成したかが推定されています。太陽のような中型以上の大きさの星では、その爆発によって2,000種を越えるような核種が生じるといわれています。そのほとんどは放射性核種なのですが、半減期が数分程度のものが多

第4表 星の内部で合成される元素と核融合反応

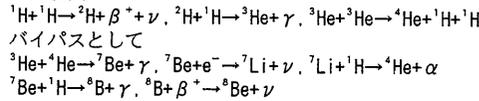
星の質量*	合成元素	放出のメカニズム
0.08M _☉ 以下	元素合成しない	—
0.08M _☉ ~0.8M _☉	元素合成するが放出しない	—
0.8M _☉ ~8M _☉ (単独星)	He, C, N, S過程元素	恒星風, 惑星状星雲
(連星)	Si, S, Ca, Fe, Co, Ni, Cu	Ia型超新星
8M _☉ ~100M _☉	C, O, Ne, Mg, Si, S, Ca, Fe, r過程元素	I型超新星
	O, Fe	Ib型超新星
100M _☉ 以上	He, C, N, Ne	恒星風
	O	放出しない?

* M_☉: 太陽の質量

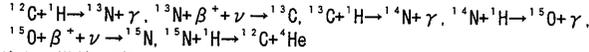
星の内部で起こっている核融合反応

1) 水素燃焼反応

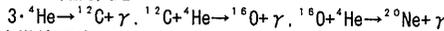
1.1) P-P連鎖反応



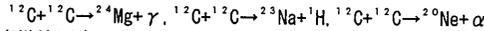
1.2) CNO循環反応



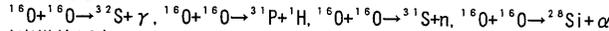
2) ヘリウム燃焼反応



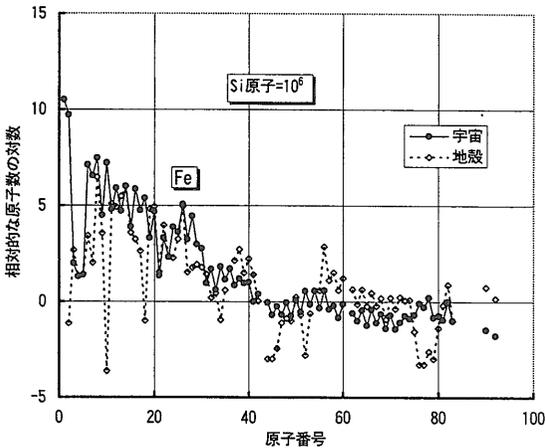
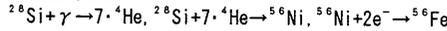
3) 炭素燃焼反応



4) 酸素燃焼反応



5) ケイ素燃焼反応



第2図 宇宙と地殻における元素の相対的存在量. 鉄(原子番号26)あたりに小さな山があります.

く、短期間のうちに放射能は無くなってしまい、わずか20-30種のみが原始放射性核種として現在も存在するわけです。すなわち、現在ある放射性核種は、単に半減期が非常に長いため、始めに生成した量のかなりが残っているにすぎません。安定同位体元素

もそれらの放射性核種と同時に生成したと考えられています。もう一つは、系列核種として存在する核種です(第2表参照)。さらに、宇宙線生成核種もあります。これらの天然放射性核種の他に、加速器などの装置で核合成したり、原子炉や核実験等で生成する人工放射性核種があります。これらの環境中の主な放射性核種を、一覧として第5表に示しました。

8. 自然界における放射性核種

環境中における放射性核種というのは、上述したように原始放射性核種が生き残って現在も存在するもの(第5表の(b)), 系列核種として存在する核種(a), 宇宙線によって絶えず生成される核種(c)のような天然放射性核種の他に、加速器などの装置で核合成したり、原子炉や核実験等で生成する人工放射性核種(d)があります。ところで、これらの放射性核種は自然界全体から見るとほんの僅かで、私達の見る物、手にする物のほとんどは放射能を有しない安定同位体からなっています。一方、元素の

第5表 環境における主な放射性核種

核種	半減期	壊変形式
(a) 系列を構成する核種		
ウラン系列 ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$)	4.468x10 ⁹ 年	8 α +6 β
トリウム系列 ($^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$)	1.41 x10 ¹⁰ 年	6 α +4 β
アクチニウム系列 ($^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$)	7.038x10 ⁸ 年	7 α +4 β
(ネプツニウム系列)	(2.14 x10 ⁶ 年)	7 α +4 β
(b) 系列を構成しない核種(同位体存在度:%)		
K-40	0.0117	1.28x10 ⁹ 年 β^- , EC, (β^+)
Rb-87	27.835	4.8 x10 ¹⁰ 年 β^-
Nb-92		3.2 x10 ⁷ 年 EC
Cd-113	12.22	9 x10 ⁵ 年 β^-
In-115	95.7	5.1 x10 ¹⁴ 年 β^-
La-138	0.0902	1.1 x10 ¹¹ 年 β^- , EC
Nd-144	23.80	2.1 x10 ¹⁵ 年 α
Sm-146		1.03x10 ⁸ 年 α
Sm-147	15.0	1.06x10 ¹¹ 年 α
Sm-148	11.3	8 x10 ¹⁵ 年 α
Gd-152	0.20	1.1 x10 ¹⁴ 年 α
Lu-176	2.59	3.6 x10 ¹⁰ 年 β^-
Hf-174	0.162	2.0 x10 ¹⁵ 年 α
Re-187	62.60	4 x10 ¹⁰ 年 β^-
Os-186	1.58	2 x10 ¹⁵ 年 α
Pt-190	0.01	6 x10 ¹¹ 年 α
(c) 宇宙線との核反応によって生成する核種		
H-3	1.23x10	年 β^-
Be-7	53.3 日	EC
Be-10	1.6 x10 ⁶	年 β^-
C-14	5.73x10 ³	年 β^-
Na-22	2.602	年 β^+ , EC
Al-26	7.2 x10 ⁵	年 β^+ , EC
Si-32	6.5 x10 ²	年 β^-
P-32	14.26 日	β^-
S-35	87.5 日	β^-
Cl-36	3.01x10 ⁵	年 β^- , EC
(d) 核実験・原子炉に由来する核種		
H-3	1.23x10	年 β^-
C-14	5.73x10 ³	年 β^-
Co-60	5.271	年 β^-
Sr-90	2.88x10	年 β^-
Tc-99	2.14x10 ⁵	年 β^-
Ru-103	39.4 日	β^-
Ru-106	367 日	β^-
Cs-137	3.017x10	年 β^-
Ce-144	284 日	β^-
Pu-239	2.41x10 ⁴	年 α
Pu-240	6.57x10 ³	年 α
Am-241	4.33x10 ²	年 α
等		

観点から見ると、不思議なことに放射能を有しない安定同位体の無い元素、すなわち放射性核種しか存在しない元素というのがあります。これを第6表に示しましたが、このことは「放射能」が「天から与えられたもの」、「宇宙を形成するために不可欠なもの」、「宇宙を進化させるエネルギー」ではないだろうかという錯覚さえ覚えるほど、不思議なことに感じられます。

第6表 安定同位体の存在しない元素

原子番号	元素記号	元素名
43	Tc	テクネチウム
61	Pm	プロメチウム
84	Po	ポロニウム
85	At	アスタチン
86	Rn	ラドン
87	Fr	フランシウム
88	Ra	ラジウム
89	Ac	アクチニウム
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	メンデレビウム
102	No	ノーベリウム
103	Lr	ローレンシウム
104	Unq	Unnilquadium
105	Uup	Unnilpentium
106	Uuh	Unnilhexium
107	Uns	Unnilseptium
108	Uno	Unniloctium
109	Uue	Unnilenium

104番以降はIUPAC命名法による

9. 放射性鉱物

自然界における放射能を有する鉱物はどのようなものなのでしょうか。それは当然のことながら自然界における放射性元素を含む鉱物ということになるのですが、自然界で私達が観察できるにはその半減期がある程度大きく、またその元素が濃集していなければなりません。第5表に示した核種で見つけることができるでしょう。最初にベクレルが放射能を発見したのはウラン鉱でした。キュリー夫妻がポロニウムやラジウムを見つけたのもピッチブレンド(瀝青ウラン鉱)でした。ピッチブレンドというのは古くから知られていたのですが、初期の頃は亜鉛と鉄の鉱石と考えられていたようです。今では閃ウラン鉱の一種で鉄・銅・鉛等の硫化物と共生する非晶質なウランの酸化物であることが分かっています。このように、ウランやトリウムの鉱物は明らかです。系列を構成しない核種では、同位体存在度が重要です。ルビジウムやカドミウム、インジウム、ネオジウム、サマリウム、レニウム等を主成分とする鉱物は放射能を有する可能性があります。その存在度が少ないため、あまり問題とされることは少ないと思われま

第7表 ウラン・トリウム鉱物の一例

鉱物名	化学組成	U(%)	Th(%)	色
(酸化物・水酸化物)				
Thorianite	トリアン石 (Th, U)O ₂	42.6	88.0	黒
Uraninite	センウラン鉱 (U, Th)O ₂	88.3	10	〃
Pitchblende	ピッチブレンド (U, Pb) ₃ U ₂ O ₁₂	65		〃
Ianthinite	ムラサキウラン鉱 UO ₂ ・5UO ₃ ・10.56H ₂ O	75		紫黒
Schoepite	シェップ石 2UO ₃ ・5H ₂ O(?)	74		硫黄～淡黄
Becquerelite	ベッケレル石 7UO ₃ ・11H ₂ O	75.8		黄～褐黄
"Becquerelite"	CaO・6UO ₃ ・11H ₂ O	72.6		〃
Curite	キュリー石 3PbO・8UO ₃ ・4H ₂ O	62.8		橙赤～緋
(ニオブ・タンタル・チタン複酸化物)				
Davidite	デービド鉱 (Fe, U, Ca, Zr, Th, R)(Ti, Fe, V, Cr) ₃ (O, OH) ₇	8.3	0.1	黒～灰黒
Zirkelite	チルケル石 (Ca, Fe, Th, U)(Ti, Zr) ₂ O ₅ (?)	12.1	6.4	黒～黒
"Zirkelite"	チルケル石 (Ca, Ce, Y, Fe)(Ti, Zr, Th) ₃ O ₇	1.3	18	黒～褐黒
Uran-pyrochlore	ウラン・パイロクロール (Na, Ca, U) ₂ (Nb, Ti, Ta) ₂ (O, OH, F) ₇	16.4	0.5	褐～黒
Betafite	ベタフォ石 (U, Ca)(Nb, Ta, Ti) ₃ (O, OH) ₇ (?)	22.6	3.7	褐黄
Euxenite	ユークセン石 (Y, Er, U, Ca)(Nb, Ta, Ti) ₂ (O, OH) ₆	7.6	4.5	〃
Brannerite	ブランネル石 (U, Ca, Th, Y)Ti ₂ O ₆	43.7	11.2	黒～黄褐
Fergusonite	フェルグソン石 (Y, Er, Ce, U, Th...)(Nb, Ta) ₄	7.2	4.3	黒～褐黒
Ishikawaite	イシカワ石 (U, Fe, Y) ₂ (Nb, Ta) ₂ O ₇ ~8(?)	20		黒
Samarskite	サマルスキー石 (Y, Er, U, Ca, Fe) ₂ (Nb, Ta) ₂ O ₇ ~8(?)	19.5	3.7	漆黒～褐黒
(炭酸塩鉱物)				
Rutherfordine	ラザフォード石 (UO ₂)(CO ₃)	12.2		黄～緑黄
Liebigite	リービヒ石 Ca ₂ (UO ₂)(CO ₃) ₃ ・12H ₂ O	33.5		緑～黄緑
Andersonite	アンダーソン石 Na ₂ Ca(UO ₂)(CO ₃) ₃ ・10H ₂ O	37		鮮黄緑
Rabittite	ラビット石 Ca ₃ Mg ₃ (UO ₂) ₂ (OH) ₄ (CO ₃) ₆ ・18H ₂ O	32.1		淡緑
Schroekingerite	シュレッキンゲル石 NaCa ₃ (UO ₂) ₂ F(SO ₄)(CO ₃) ₃ ・10H ₂ O	26.8		緑黄
(硫酸塩鉱物)				
Uranopilite	ウラノピル石 (UO ₂) ₆ (SO ₄)(OH) ₁₀ ・12H ₂ O(?)	70.2		淡黄～黄
Zippeite	チツペ石 K ₄ (UO ₂) ₆ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₀ ・H ₂ O	63.4		橙黄
Johannite	ヨハン石 Cu(UO ₂) ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₂ ・6H ₂ O	50.8		淡緑～暗緑
(モリブデン酸塩鉱物)				
Umohoite	ウモホ石 (UO ₂)(MoO ₄)・4H ₂ O	47.5		黒～青黒
(リン酸塩・ヒ酸塩鉱物)				
Xenotime	ゼノタイム (Y, U, Th)PO ₄	3.6	2.2	黄褐～緑褐
Monazite	モナズ石 (Ce, Th)(P, Si) ₄	0.4	23	褐
Ningyoite	ニンギョウ石 U _{1-x} Ca _{1-x} R _{2x} (PO ₄) ₂ ・1-2H ₂ O	40		褐緑～黒
Parsonsite	パーソンズ石 Pb ₂ (UO ₂)(PO ₄) ₂ ・0-2H ₂ O	27		黄～緑褐
Walpurgite	ワルブルギス石 2Bi ₂ O ₃ ・UO ₃ ・As ₂ O ₅ ・3H ₂ O	15.9		黄
Torbernite	リンドウウラン石 Cu(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ ・10H ₂ O	48.9		緑
Autunite	リンカイウラン石 Ca(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ ・10H ₂ O	50.1		淡黄～硫黄
Zeunerite	ヒドウウラン石 Cu(UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ ・10H ₂ O	44.8		緑
Meta-uranocircite	メタウランシロイト Ba(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂ ・8H ₂ O	47.2		黄緑
Troegierite	トレゲル石 H ₂ (UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ ・8H ₂ O	54.8		淡黄
Uranospinite	ヒカイウラン石 Ca(UO ₂) ₂ (AsO ₄) ₂ ・8H ₂ O	43.7		淡黄～黄緑
(バナジウム酸塩鉱物)				
Carnotite	カルノー石 K ₂ (UO ₂) ₂ (V ₂ O ₈)・3H ₂ O	52.8		鮮黄～淡黄
Tyuyamunite	ツヤムン石 Ca(UO ₂) ₂ (V ₂ O ₈)・5-8.5H ₂ O	48.5		黄～淡黄
(ケイ酸塩鉱物)				
Zircon	ジルコン (Zr, Th, U)SiO ₄	4.3	13.1	無, 緑褐, 黄褐
Thorite	トール石 Th(SiO ₄)	71.7		褐黄, 橙黄
Uranothorite	ウラン・トール石 (Th, U)(SiO ₄)	14.7	64.1	暗褐, 緑
Thorogummite	トロゴム石 (Th, U)(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x}	18.4	36.5	黄褐～白
Coffinite	コフィン石 U(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x}	71.5		黒
Huttonite	ハットン石 Th(SiO ₄)	71.7		無～白
Soddyite	ソディ石 (UO ₂) ₅ (SiO ₄) ₂ (OH) ₂ ・5H ₂ O	71.3		〃
Uranophane	ウラノフェン Ca(H ₃ O) ₂ (UO ₂) ₂ (SiO ₄) ₂ ・5H ₂ O	55.6		黄～黄緑
Sklodowskite	スクロドウスク石 Mg(UO ₂) ₂ (SiO ₃) ₂ (OH) ₂ ・5H ₂ O(?)	56.7		黄
Yttrialite	イトリア石 (Y, Th) ₂ Si ₂ O ₇ (?)	0.7	11	暗緑
Allanite	カツレン石 (Ca, Ce, Th...) ₂ Fe(Al, Fe)Si ₃ O ₁₂ (OH)	0.0	3.2	黒褐
Beta-uranophane	ベータ・ウラノフェン Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃) ₂ (OH) ₂ ・5H ₂ O	53.3		黄緑～緑黄

ウム(K)は私達の身の回りに多く存在していますが、同位体存在度が低いためその放射能は検出可能ですが、放射性鉱物として問題とされることはそれほど多くはありません。放射性元素を含む鉱物として実際的なものは、やはりウランとトリウムの鉱物でしょう。

第7表にはウランとトリウムの鉱物の一例を示しま

した。日本で最初にウランの見つかった人形峠には人形石(ningyoite)という鉱物があります。人名から命名されたベクレル石(Becquerelite), キュリー石(Curite), ラザフォード石(Rutherfordine)もあります。また、ウラン・トリウム以外ではラジウムがあります。ラジウムでは、台湾の北投温泉から最初に見つかった北投石(hokutolite)が有名です。北投石は、

第8表 年代測定に用いられる主な放射性核種

親核種	存在比(%)	半減期(年)	年代の示す内容
天然放射性核種			
¹⁴⁷ Sm		1.06×10^{11}	固化年代 (Sm-Nd法)
⁸⁷ Rb	27.85	4.88×10^{10}	固化年代 (Rb-Sr法)
¹⁸⁷ Re	62.93	4.30×10^{10}	固化年代 (Re-Os法)
¹⁷⁶ Lu	2.588	3.6×10^{10}	固化年代 (Lu-Hf法)
²³² Th	100	1.41×10^{10}	固化年代 (U, Th-Pb法)
²³⁸ U	99.274	4.47×10^9	固化年代 (U, Th-Pb法, フィッシュントラック法)
⁴⁰ K	0.0118	1.28×10^9	固化年代 (Ar-Ar法), 気体保持年代 (K-Ar法)
²³⁵ U	0.72	7.04×10^8	固化年代 (U, Th-Pb法)
¹²⁹ I		1.7×10^7	固化年代
¹⁰ Be		1.5×10^6	海底堆積物年代
²³⁰ Th (10)		8.0×10^4	海底堆積物年代・沈澱成長年代
²³¹ Pa		3.28×10^4	海底堆積物年代
¹⁴ C		5.73×10^3	考古試料年代・古生物年代・堆積年代
²¹⁰ Pb		2.23×10^1	海底・湖底堆積物年代
人工放射性核種			
¹³⁷ Cs		3.02×10^1	海底・湖底堆積物年代
³ H		1.23×10^1	滞留時間
宇宙年代学			
¹⁴⁷ Sm		1.06×10^{11}	消滅核種年代・元素の年代
⁸⁷ Rb	27.85	4.88×10^{10}	消滅核種年代・元素の年代
¹⁸⁷ Re	62.93	4.30×10^{10}	消滅核種年代・元素の年代
²³² Th	100	1.41×10^{10}	消滅核種年代・元素の年代
²³⁸ U	99.274	4.47×10^9	消滅核種年代・元素の年代
²³⁵ U	0.72	7.04×10^8	消滅核種年代・元素の年代
¹⁴⁶ Sm		1.03×10^8	消滅核種年代・元素の年代
²⁴⁴ Pu		8.2×10^7	消滅核種年代・元素の年代
¹²⁹ I		1.7×10^7	消滅核種年代・元素の年代
²⁰⁵ Pb		1.5×10^7	消滅核種年代・元素の年代
¹⁰⁷ Pd		6.5×10^6	消滅核種年代・元素の年代
²⁶ Al		7.2×10^6	消滅核種年代・元素の年代

地球年代学

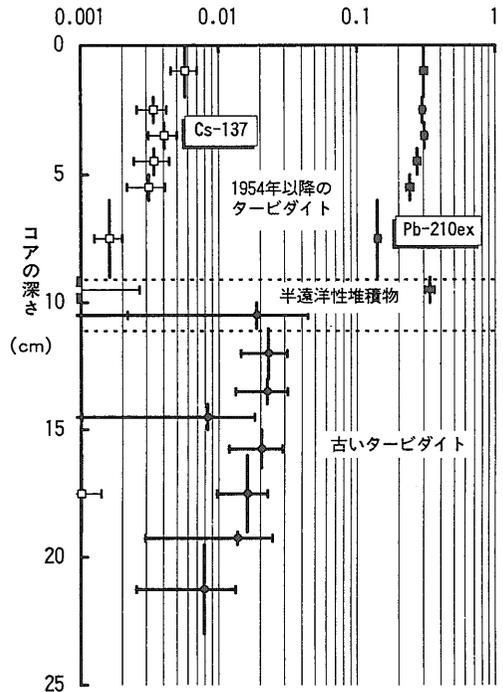
宇宙年代学

含鉛重晶石 ((Ba,Pb)SO₄) の一種で、日本では秋田県の玉川温泉でも温泉沈殿物として見い出され、国の天然記念物にも指定されています(蟹澤, 1992)。

10. 地球化学・生活における放射能の利用

地球化学における放射能の利用は、まず何といっても年代測定でしょう。年代測定についての概要や地球化学的応用例については、既に富樫(1996)や金井(1987)が紹介しているので、ここでは年代測定に利用される放射性核種を簡単にまとめて第8表に示しました。この他には、トレーサーとしての利用があります。ウラン系列の鉛-210は同系列のラドンガスから生まれ、半減期22.3年で減衰していくベータ壊変核種であり、堆積物の年代測定に利用されています。定常的な堆積環境ならば指数関数的に減少していきますが、洪水堆積物やタービダイトのような堆積物が堆積すると一時的に鉛-210の濃度に変動的な変化を生じます(例えば、Cursius and Anderson,

奥尻島北方における海底コア中の鉛-210、セシウム-137放射能 (Ba/g)



第3図 北海道奥尻島北方の海底コア試料における鉛-210とセシウム-137放射能の変化の一例。タービダイトでは放射性核種の分布が乱れて、半遠洋性堆積物とは異なる分布となります。

1991; Macdonald et al., 1991; 中嶋・金井, 1995; 金井・中嶋, 1996 等)。第3図は、北海道南西沖(奥尻島北方)の海底コア試料における鉛-210の放射能変化とセシウム-137放射能変化を示したものです。この図から、1993年の北海道南西沖地震に起因するタービダイトが堆積したことが推定されています。放射能を含む放射線の地球化学的応用や分析技術への応用は、金井(1987)にまとめられていますのでそちらを参考にしてください。

医学における利用は、病気の診断・治療でしょう。放射性化合物を投与し、トレーサーとして、またイメージング技法によって器官の情報を得ることができます。治療には放射線のエネルギーを利用して、腫瘍部位の効果的治療がなされています。産業・工業面での放射能の利用は、非破壊の厚み計、密度計、レベル計等があり、静電除去器や煙感知器にも利用されています。電気陰性な元素に特異的で高感度

な電子捕獲型検出器にも放射線源が利用されており、オゾン層の破壊で騒がれた環境中のハロカーボン類の超微量分析 (ppt:10⁻¹²) にも威力を発揮しました (富永・巻出, 1978; 巻出ほか, 1981)。農業面での利用は、動植物の挙動を知るためのトレーサーとして、また、農作物の品種改良、発芽抑制、昆虫の不妊化等があります。病虫害の駆除というのは、不妊化した雄の成虫を野外に放ち、カップルとなった雌が子孫を残さないようにして駆除するわけです。農業ですと無差別に駆除してしまいがちですが、この方法では選択的な駆除が可能となる利点があります。このような様々な応用例をまとめて第9表に示しました。

11. 放射能の善と悪

このように現在では私達の身の回りにさまざまな放射能・放射線があるわけで、こうした現実を全く無視して生活するわけにはいきません。上手に利用すれば非常に重宝するものです。このようにいうと、大変すばらしいとばかりいっているようですが、よい面ばかりではありません。火で煮炊きする、便利さだけを強調して、家が火事になる可能性を教えないのはいけません。ですから、公正さを保つために良い面と同時に悪い面も公にして、正しく認識することが必要です。物事何でもそうですが、正しい知識を持って正しく利用しないととんでもないことになります。紙を切るはさみやナイフでさえ、使い方を間違えると凶器になると全く同じです。

放射線の悪というのは、放射線と物質 (生体) との相互作用で生じる、放射線障害にほかなりません。放射線が人間以外の物と作用すると「利用」となり、人間の組織に過剰に作用すると「障害」となるのは、人間の身勝手かもしれないが、

放射線は生物を殺すことができます。高線量では組織に重傷の障害を引き起こし、低線量でもガンや遺伝的影響の原因となる可能性があります。このような放射線による障害に最初に気付いたのは、エックス線の発見1年後からでした。エックス線は医療関係ですばやく広がり多量に利用されたので、エックス線技師等の間に様々な障害が生じました。放射性物質については、放射能の発見者であるベクレルが、放射性物質をポケットに入れて皮膚の潰瘍が生

第9表 放射性核種の利用の一例

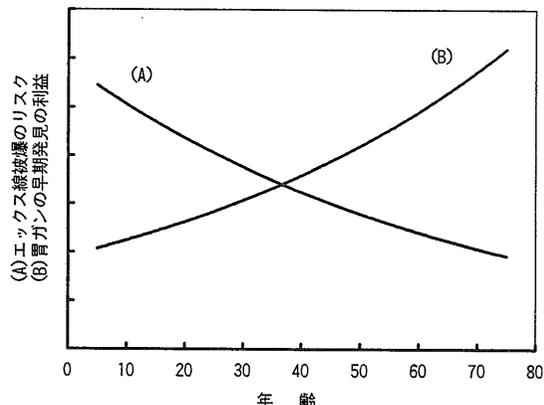
種 類	使用される核種	備 考
透過型β線厚さ計	¹⁴ C, ⁹⁰ Sr, ²⁰⁴ Tl 等	
反射型β線厚さ計	¹⁴ C, ⁹⁰ Sr, ²⁰⁴ Tl 等	
透過型γ線厚さ計	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁹² Ir	
反射型γ線厚さ計	⁶⁰ Co	
密度計	⁶⁰ Co	
レベル計	⁶⁰ Co	重量法よりも迅速
雪量計	⁶⁰ Co	
真空計	²²⁶ Ra	
中性子水分計	²¹⁴ Am+Be, ²⁵² Cf	盛り土の迅速な品質管理
静電除去器	²¹⁰ Po 等	
煙感知器	²⁴¹ Am	光電式の煙感知器が増加
電位計	²²⁶ Ra	
電子捕獲型検出器	⁶³ Ni	
バルブ開閉度探知装置	¹³⁷ Cs	
スケールチェッカー	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	
充填率測定器	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	
流向・流量測定装置	²⁵² Cf	
粉塵濃度計	¹⁴⁷ Pm	光散乱法よりも精・確度が高い
夜光時計	¹⁴⁷ Pm	蓄光塗料を用いる夜光時計が増加
グロー放電管	¹⁴⁷ Pm, ⁸⁵ Kr, ⁶³ Ni	蛍光灯グロースタータはほぼ100%
避雷器 (アレスター)	¹⁴⁷ Pm	業務用
白熱灯 (ガスマントル)	²³² ThO ₂	キャンプ用ランタン (外国製)
核医学検査	^{99m} Tc, ¹²³ I, ¹²⁵ I, ²⁰¹ Tl, ⁶⁷ Ga	放射性医薬品による診断・治療
放射線治療	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁹² Ir, ¹⁹⁸ Au, ²²⁶ Ra	
健康・保健衛生を名目とする用品	ウラン・トリウム系列核種	ラドン温泉器・ミネラルウォーター製造器・水質改善物・プレスレット等

じたことを報告していましたが、当時放射性物質は研究者の間でしか扱われなかったのが、エックス線ほど騒がれませんでした。けれども、障害はじわじわと多くの研究者を蝕んでいたのです。ラジウムやポロニウムのような強い放射能を頻繁に使用して研究をしていたキュリー夫人も、白内障、再生不良性貧血という放射線障害を受けて亡くなりました。親に続いてノーベル賞を授与された娘夫妻も放射線障害で亡くなっています。ノーベル賞という輝かしい栄光の陰には、放射線障害という悲劇が隠されていたのです。

現在、放射線障害に関する知識も豊富となり、いかにして障害を防止できるかという知識も備わってきています。すなわち、外部放射線に対しては、①線源との間に遮蔽物を置く、②線源との距離を長くする、③放射線にさらされる時間をできるだけ短くする、という3つのことが大原則となっています。さらに、国際放射線防護委員会 (ICRP) では根本的な3原則として、正当化の原則 (いかなる行為も正味でプラスの利益を生むものでなければ採用してはならない)、最適化の原則 (すべての被曝は経済的および

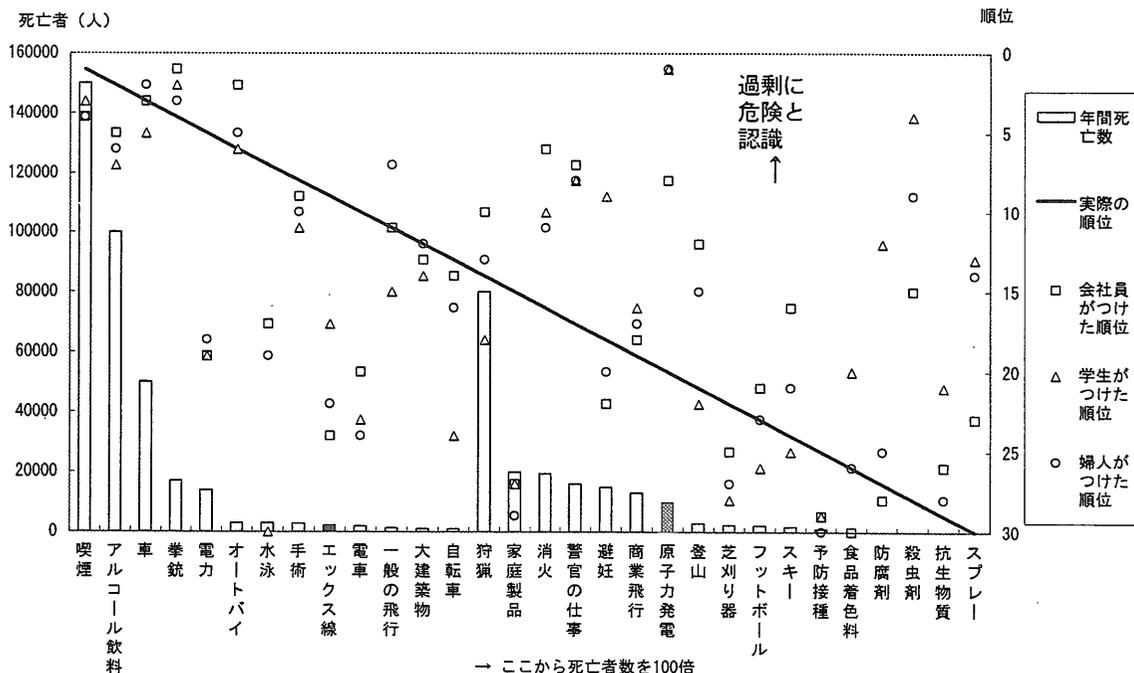
び社会的な要因を考慮しながら合理的に達成できる限り低く保たなければならない)、線量限度遵守の原則(個人に対する放射線被曝線量は勧告限度を超えてはならない)の三つをあげています。物事には利益とともにリスクはつきものです。その両者のバランスが問題なのです。一例として、胃部レントゲン検診による被曝のリスクと胃ガンの早期発見という利益の関係を模式的に第4図に示しました。40歳頃から胃の集団検診を受診するようになるのも、利益がリスクを上回るからです。こうした両者のバランスをよく考慮しながら、意味のない被曝は避けて意味のある被曝もできるだけ少なくするよう、節度をもって利用するというを常に忘れずにいることが重要なのでしよう。

ところで、物事のリスクの度合いを測る尺度として、国連科学委員会がまとめた報告書にあるアメリカでの死亡率を第5図に示しました(国連環境計画編, 1985)。一般の女性や学生の危険率トップと認識されている原子力発電は、実の所20番目で、エックス線は17-24番目と認識されていますが、実際は原



第4図 胃部レントゲン検診による被曝のリスクと胃ガンの早期発見という利益の模式的関係図

子力発電よりも高い9番目であるというように、認識のずれが指摘されています。ちなみに、殺虫剤も死亡者はほとんど無いのに過剰に危険と認識されています。このようなことは、正しいリスクの感じ方・受けとめ方が難しいことを示しており、放射能・放射線に関する社会の容認・拒絶ということに関連して



第5図 アメリカにおける実際の死亡率と認識されるリスクの順位との関係。斜線よりも上位は過剰に危険と認識されることを示します。原子力発電は20番目ですが、一般の女性や学生の危険率トップと認識されています。エックス線は17-24番目と認識されていますが、実際は9番目です。

第10表 自然放射線による年間放射線量 (UNSCEAR, 1985). 単位は実効線量当量 (ミリシーベルト).

線源核種	外部被曝	内部被曝	合計
宇宙線	0.355	-	0.355
宇宙線生成核種	-	0.015	0.015
カリウム-40 (⁴⁰ K)	0.15	0.18	0.33
ルビジウム-87 (⁸⁷ Rb)	-	0.006	0.01
ウラン-238 (²³⁸ U) 系列	0.10	1.24	1.34
トリウム-232 (²³² Th) 系列	0.16	0.18	0.34
合計	0.765	1.621	2.39
由来			
宇宙線による			0.36
大地の放射性物質			0.41
経口食品中の放射性物質			0.34
呼吸により取り込まれた放射性物質			1.28
合計			2.4

いるのかも知れません。

一方、私達が正しく認識しておかなければならないことは、私達の被曝に最も大きく寄与しているのは、一般の関心が高い放射性降下物や原子力発電所からの被曝ではなく、地球ができたときから存在した大地等からの自然放射線だということです。自然放射線は第10表に示しましたように平均2.4ミリシーベルト(mSv)ですが、その半分以上は大地とそこから生じるラドンガスによるもので、放射性降下物や原子力発電による寄与はそれぞれ0.02, 0.001ミリシーベルトにすぎません。また、医療用のエックス線は、そうしたものより一時的ですがより大きな被曝をもたらしています(平均として年0.4ミリシーベルトとされています)。さらに、高気密な住宅はラドン等による自然放射線の被曝の増大をもたらしているのです(詳細は金井(1991)を参照)。多くの人が正しい認識をもって対処することがいかに重要で、また難しいことであるか、お分かりになるでしょう。

12. 終わりに

日本における放射化学の先駆者の一人ともいえる木村健二郎先生(1896-1988)は、偶然にもベクレルが放射能を発見した100年前に時を同じくして生まれました。先生は、柴田雄次先生の下で地球化学的研究を行い、さらにソディの所に留学した飯盛里安先生のご指導を受け、さらにヘベシーの所に留学して、帰国後も放射性元素に関する多大な研究をされました。また、湯川秀樹博士がノーベル賞を受賞し

第11表 放射能・放射線関連分野でのノーベル賞受賞者の一例

年	受賞者	研究項目
1901	W.C. レントゲン	X線の発見
1903	H.A. ベクレル P. キュリー, M. キュリー	放射能の発見 放射能の研究
1905	P.E.A. レナルト	陰極線の研究
1908	E. ラザフォード	元素の崩壊及び放射性物質の化学に関する研究
1911	M. キュリー	ラジウム及びポロニウムの発見とラジウムの性質及びその化合物の研究
1914	M. von ラウエ	結晶によるX線回折現象の発見
1915	W.H. ブラッグ, W.L. ブラッグ	X線による結晶構造解析に関する研究
1917	C.G. バークラ	元素の特性X線の発見
1918	M. プランク	量子論による物理学進歩への貢献
1921	F. ソディ	放射性物質の化学に対する貢献と同位体の存在及びその性質に関する研究
1922	N. ボア F.W. アストン	原子の構造とその放射に関する研究 非放射性元素における同位体の発見と整数法則の発見
1924	M. シーグバーン	X線分光学における発見と研究
1925	J. フランク, G. ヘルツ	原子に対する電子衝突に関する法則の発見
1927	C.T.R. ウィルソン	霧箱による荷電粒子の観察に関する研究
1935	J. チャドウィック F. ジョリオット, I. ジョリオット・キュリー	中性子の発見 人工放射性元素の研究
1936	V.F. ヘス C.D. アンダーソン	宇宙線の発見 陽電子の発見
1938	E. フェルミ	中性子衝撃による新放射性元素の研究と熱中性子による原子核反応の発見
1939	E.O. ローレンス	サイクロトロンの開発と人工放射性元素の研究
1943	O. ステルン G. ヘベシー	原子線の方法の開発と陽子の磁気モーメントの発見 化学反応の研究におけるトレーサーとしての同位体の利用に関する研究
1944	O. ハーン	原子核分裂の発見
1945	W. パウリ	パウリの原理の発見
1948	P.M.S. ブラケット	ウィルソン霧箱による原子核物理学と宇宙線の領域における発見
1949	湯川秀樹	核力の理論による中間子存在の予言
1950	C.F. ポウエル	写真による原子核破壊過程の研究方法の開発と諸中間子に関する発見
1951	J.D. コックロフト, E.T.S. ワルトン G.T. シーパー, E.M. マクミラン	加速荷電粒子による原子核変換に関する先駆的研究 超ウラン元素の発見

以下略

たことから分かるように、日本においても放射能をはじめ原子核物理分野で大きな世界的成果があるのです。このことは、記憶に留めておきたいことの一つでしょう。

18世紀の末から19世紀にかけて始まった産業革命が社会を変えたように、19世紀から20世紀にかけてのエクス線の発見・放射能の発見は、今まで未知のものであった物質の根源(原子・原子核や素粒子など)への道を開き(第11表),核への扉を開いて人間世界を変えていきました。医学や科学においてはめざましい変化といえるのですが、その一方でそれを扱う人間社会が互いに戦い傷つきあって、必ずしも良い面ばかりとはいえませんでした。自然を理解し自然の原理を解明するという科学は、常に正しく社会に大きく貢献するとは考えられなくなり、科学離れの現象すら起こりつつあります。これは社会の問題ともいえますが、同時に科学者の責任でもありましょう。地球環境問題も然り、あと数年で21世紀を迎えようとしている現在、世紀の変わり目とともに私達は新しい社会観・倫理観で科学と技術に対峙していかなければならないと思います。そして、世界全体・人間社会全体を未来にわたって見通す力が、これから私達に必要なようになってくるのではないのでしょうか。キュリー夫人がラジウムを発見したときの言葉を最後に、筆を置きたいと思います。「誰もラジウムで金儲けをしてはいけません。それは一つの元素です。それは万人の物なのです。」

参 考 文 献

- 有本信雄(1993):進化する銀河。科学, 63, 86-94.
- Barber, R.C., Greenwood, N.N., Hryniewicz, A.Z., Jeannin, Y.P., Lefort, M., Sakai, M., Ulehla, I., Wapstra, A.H. and Wilkinson, D.H. (1992): Discovery of the transfermium elements. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 29, 453-530.
- Cursius, J. and Anderson, R.F. (1991): Immobility of ^{210}Pb in Black Sea sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 327-333.
- 藤原鎮男・濱口 博・櫻井欽一(1988):木村健二郎先生をしのぶ、ぶんせき, 1988, 942-945.
- 金井 豊(1987):原子が奏でる不思議なメロディー —ぶんせきと放射線—, 地質ニュース, no.396, 14-25.
- 金井 豊(1991):ラドンと環境問題—地球化学について—, 地質ニュース, no.446, 33-46.
- 金井 豊(1993):微量試料における放射能測定, 地質ニュース, no.469, 49-55.
- 金井 豊・中嶋 健(1995):放射能測定などによって明らかにされる1993年北海道南西沖地震に起因する海底タービダイト, *Radioisotopes*, 44, 856-864.
- 蟹澤聰史(1992):東北地方の天然記念物, 地質ニュース, no.453, 15-23.
- 草間朋子(1990):放射能 見えない危険, 読売科学選書28, 読売新聞社, 227p.
- Macdonald, R.W., Macdonald, D.M., O'Brien, M.C and Gobeil, C. (1991): Accumulation of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd), carbon and nitrogen in sediments from Strait of Georgia, B.C., Canada. *Mar. Chem.*, 34, 109-135.
- 巻出義紘・金井 豊・富永 健(1981):大気中のハロカーボン類の超微量分析, 日本化学会誌, 1981, 133-144.
- 中沢 清(1980):元素の生成, 化学総説 No.30, 17-47.
- 中嶋 健・金井 豊(1995):1983年日本海中部地震震源域でのタービダイトによる地震発生間隔の推定, 地震第2輯, 48, 223-228.
- 日本アイソトープ協会(1980):アイソトープ手帳, 丸善, 95.
- 佐藤乙丸(1992):微弱アイソトープ利用技術の現状と問題点, 第29回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 185-190.
- 富樫茂子(1996):最近の年代測定法の進歩と概要:イントロダクション, 地質ニュース, no.501, 7-11.
- 富永 健・巻出義紘(1978):痕跡有機ハロゲン化物のガスクロマトグラフィ, 化学増刊, 78, 163-176.
- Trifonov, D.N. and Trifonov, V.D. (1980): Chemical elements. 阪上正信・日吉芳朗 訳, 化学元素発見の道, 内田老鶴圃, 267p.
- 辻本拓司・野本憲一(1993):銀河の化学力学進化と超新星, 科学, 63, 103-112.
- ウラン・トリウム鉱物研究委員会編集(1961):ウラン—その資源と鉱物, 朝倉書店, 558p.
- Weeks, M.E. and Leicester, H.M. (1968): Discovery of the elements. 大沼正則 訳, 元素発見の歴史, 朝倉書店, 844-887.
- 吉原賢二(1993):107, 108, 109番元素の命名について, 化学と工業, 46, 649-651.
- 吉澤康雄・草間朋子 訳(1989):国連環境計画 編(1985), 放射線その線量, 影響, リスク, 同文書院, 64p.

KANAI Yutaka (1996): Discovery of radioactivity and its geochemistry.

< 受付: 1996年10月3日 >