

**表題：放射線のための物理化学基礎 (1)**

**副題：核種と同位体**

筆者：SCE-Net 環境研究会 郷 茂夫  
(化学工学会 会員, 放射線影響学会 会員)

2021年7月1日作成

本表題の連載は、物理化学の基礎的事項ですので、**ご不要の方はスキップしてください。**

副題「核種と同位体」から始めます。今回は「壊変と放射線」です。次々回は「放射線の種類と性質」です。

## 1. 原子の構成

原子は、中心に原子核（いくつかの陽子 p: proton といくつかの中性子 n: neutron が強く結合した集合体；p や n を「核子」という、また両者の質量はほぼ同じ）があり、その周囲を電子 e: electron が回っていること、p の数は原子番号の数と同じで、p+n の数を質量数という、このようなことは昔の理科の時間で習ったことと思います。

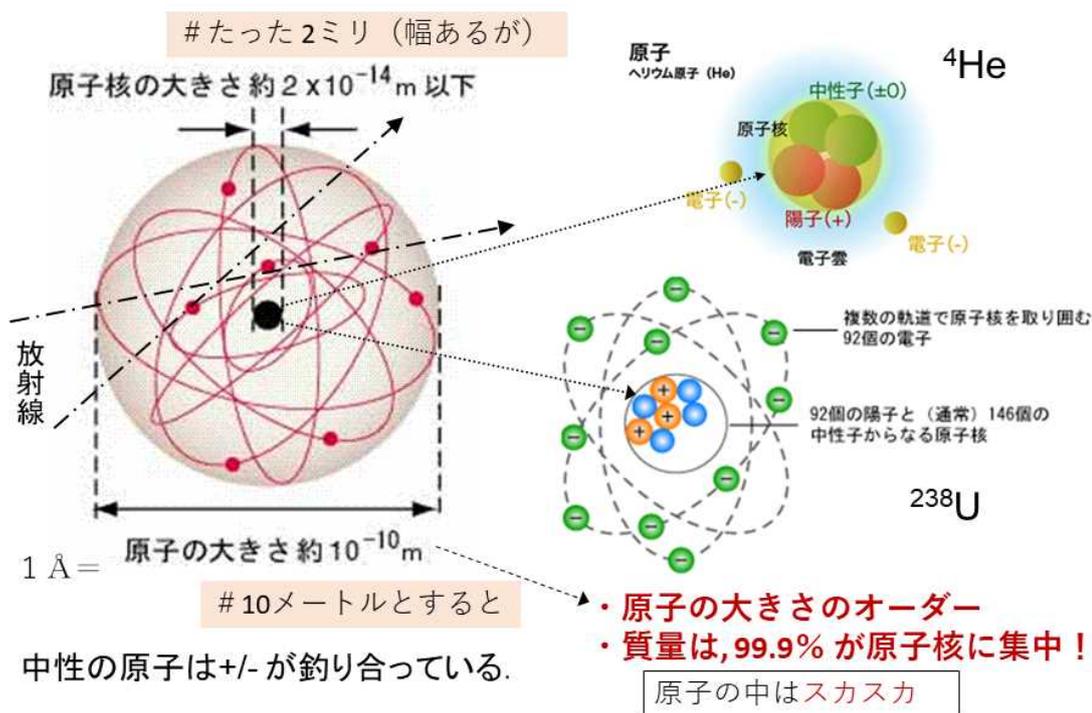
図1は良く知られた原子模型で、モデル図(左)とヘリウム、ウランの原子模型を示しています。原子と原子核の実際の大さ（原子核の大さは圧倒的に小さく、原子の径の2/10,000しかありませんが、質量は非常に大きく全体の99.9%です）とその対比、電荷バランス（中性状態ならば、p数=e数）なども図に添えています。原子の記号は以下の文節で説明します。

図1で、一つ重要なことは、矢印付き一点鎖線で表した放射線です。放射線は細く高速で直進性が強いので、物質にぶつかると、その物質の原子の中を突き抜けるのです。気体のように原子の存在が空間中に疎らならば、いったん気体原子の中を通り抜けた後は、原子間真空の中をまっすぐ進み、次の気体原子にぶち当たり、またその中を貫通しようとするのです。放射線は原子の中を通るので、その中の電子（ごく稀に原子核）と衝突してエネルギー交換の現象（後の連載で述べます）を起こすことがあるのです。何も起こさないと原子の中を通り過ぎることもありますし、粒子同士の衝突により、また電氣的引力や斥力により進む方向を変えることもあります。このような作用が放射線の物質（人体も物

質) に対する影響の根源です (これらを物理学では「相互作用」と言います)。相互作用については後日扱います。

また, 図1の中で, 原子の大きさはオーダー的には1 オングストロームくらいの大きさですが, 厳密には, 電子の状態で大きさのある範囲の変化があり, 複雑ですが, 後の連載で触れます。

図1 原子モデル



下の図2は原子の原子核を指定する記号です (一般には「原子記号」と言われることが多いですが, 核の周囲の電子については何も明示しておらず「原子核記号」と言うのが正しい)。ここで, 元素は記号 X (炭素 C, 酸素 O, 鉄 Fe, など) で示され, かつ原子核の陽子 p の数 (記号 Z=原子番号) で決まるものであり, 例外はありません。従って, X と Z は結局同じ意味であること, また, 中性子数  $N=A-Z$  で計算できますから, A と X だけで原子核を示すのが通常の原子核記号の書き方です。本連載でもそういう書式をとります。

なお, この原子核記号では電子 e の数は示されません; 原子イオンや他原子との化学結合などでは e の数はいろいろ変わりますので。

図2. 原子核記号の表し方

通常表現は ;  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{18}\text{O}$ ,  ${}^{56}\text{Fe}$ ,  ${}^{200}\text{Au}$ ,  ${}^{238}\text{U}$  などとします。

<b>原子記号</b> $\begin{matrix} A \\ Z \\ X \\ N \end{matrix}$	X: 元素記号 Z: 原子番号 = 陽子数(p) A: 質量数 (= p + n) N: 中性子数(n)
---	---

## 2. 核種と同位体

図3は皆様よくご存じの周期表(2021年最新版)です。原子番号1番の水素(元素記号:H)から、色々な元素を経て、最後に原子番号118番のオガネソン(元素記号:Og)までが、原子番号順に例外なく並んでいます。将来、さらに新元素119, 120番が発見承認されるかもしれませんが。

これらの118種の元素の中で、地球史のずっと昔のことはいざ知らず、今の地球に実在するのは90種です。あと28種は、人間が合成した(あるいは副生物でできた)人造元素なのです。または宇宙から隕石同伴で飛び込んできたものがあるかもしれません。

図3. 周期表(最新版); この周期表で、字が小さくて見難いかと思いますが、元素記号の上の数字が原子番号、下は日本語名と数字が平均原子量です。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																				
1 H 水素 1.008	2 He ヘリウム 4.0026															2 He ヘリウム 4.0026																																					
3 Li リチウム 6.94	4 Be ベリリウム 9.0122															5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.011	7 N 窒素 14.007	8 O 酸素 15.999	9 F フッ素 18.998	10 Ne ネオン 20.180																																
11 Na ナトリウム 22.990	12 Mg マグネシウム 24.305															13 Al アルミニウム 26.982	14 Si ケイ素 28.085	15 P リン 30.974	16 S 硫黄 32.06	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.948																																
19 K カリウム 39.098	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.956	22 Ti チタン 47.867	23 V バナジウム 50.942	24 Cr クロム 51.996	25 Mn マンガン 54.938	26 Fe 鉄 55.845	27 Co コバルト 58.933	28 Ni ニッケル 58.693	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.630	33 As ヒ素 74.922	34 Se セレン 78.971	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.798																																				
37 Rb ルビ듐 85.468	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.906	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb ニオブ 92.906	42 Mo モリブデン 95.95	43 Tc テクネチウム (98)	44 Ru ルテチウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.91	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.87	48 Cd カドミウム 112.41	49 In インジウム 114.82	50 Sn スズ 118.71	51 Sb アンチモン 121.76	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.90	54 Xe キセノン 131.29																																				
55 Cs セシウム 132.91	56 Ba バリウム 137.33	57-71	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.95	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.21	76 Os オスマニウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.22	78 Pt 白金 195.08	79 Au 金 196.97	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.38	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ヒスマス 208.98	84 Po ポロニウム (209)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)																																				
87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89-103	104 Rf ラファージウム (261)	105 Db ドブニウム (268)	106 Sg シーボグム (269)	107 Bh ボヘリウム (270)	108 Hs ハフニウム (277)	109 Mt マイタネリウム (276)	110 Ds ダズニウム (281)	111 Rg ルンゲニウム (282)	112 Cn クニヒウム (285)	113 Nh ニホニウム (286)	114 Fl フルロビウム (289)	115 Mc モスコビウム (290)	116 Lv リバモリウム (293)	117 Ts テネシン (294)	118 Og オガネソン (294)																																				
不安定な同位体を持つ元素については、最も半減期の長い同位体の質量数を括弧に示す。																																																					
<table border="1"> <tr> <td>57 La ランタン 138.91</td><td>58 Ce セリウム 140.12</td><td>59 Pr プラセオジム 140.91</td><td>60 Nd ネオジム 144.24</td><td>61 Pm プロメチウム (145)</td><td>62 Sm サマリウム 150.36</td><td>63 Eu ユウロピウム 151.96</td><td>64 Gd ガドリニウム 157.25</td><td>65 Tb テルビウム 158.93</td><td>66 Dy ジロロビウム 162.50</td><td>67 Ho ホルミウム 164.93</td><td>68 Er エルビウム 167.26</td><td>69 Tm タムリウム 168.93</td><td>70 Yb イットリビウム 173.05</td><td>71 Lu ルセチウム 174.97</td><td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>89 Ac アクチニウム (227)</td><td>90 Th トリウム 232.04</td><td>91 Pa パラチニウム 231.04</td><td>92 U ウラン 238.03</td><td>93 Np ネプチウム (237)</td><td>94 Pu プルトニウム (244)</td><td>95 Am アメリシウム (243)</td><td>96 Cm キュリウム (247)</td><td>97 Bk バークリウム (247)</td><td>98 Cf カホリウム (251)</td><td>99 Es エンスハイム (252)</td><td>100 Fm フェルミウム (257)</td><td>101 Md メンデレビウム (258)</td><td>102 No ノーベリウム (259)</td><td>103 Lr ローレンシウム (266)</td><td colspan="3"></td> </tr> </table>																		57 La ランタン 138.91	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセオジム 140.91	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユウロピウム 151.96	64 Gd ガドリニウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.93	66 Dy ジロロビウム 162.50	67 Ho ホルミウム 164.93	68 Er エルビウム 167.26	69 Tm タムリウム 168.93	70 Yb イットリビウム 173.05	71 Lu ルセチウム 174.97				89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.04	91 Pa パラチニウム 231.04	92 U ウラン 238.03	93 Np ネプチウム (237)	94 Pu プルトニウム (244)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カホリウム (251)	99 Es エンスハイム (252)	100 Fm フェルミウム (257)	101 Md メンデレビウム (258)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (266)			
57 La ランタン 138.91	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセオジム 140.91	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユウロピウム 151.96	64 Gd ガドリニウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.93	66 Dy ジロロビウム 162.50	67 Ho ホルミウム 164.93	68 Er エルビウム 167.26	69 Tm タムリウム 168.93	70 Yb イットリビウム 173.05	71 Lu ルセチウム 174.97																																							
89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.04	91 Pa パラチニウム 231.04	92 U ウラン 238.03	93 Np ネプチウム (237)	94 Pu プルトニウム (244)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カホリウム (251)	99 Es エンスハイム (252)	100 Fm フェルミウム (257)	101 Md メンデレビウム (258)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (266)																																							

このように、公認されている「**元素の種類**」は**118種**ですが、元素とは違って「**原子の種類**」は約**1,800個**もあります。元素と原子でそれ程の違いのある理由は、ある数の **p** (それで元素の種類は決まる) に対して、**幾通りもの数の n** がくっついて、同じ元素の名前の複数個の原子種 = 原子核の種類を構成できるからです。

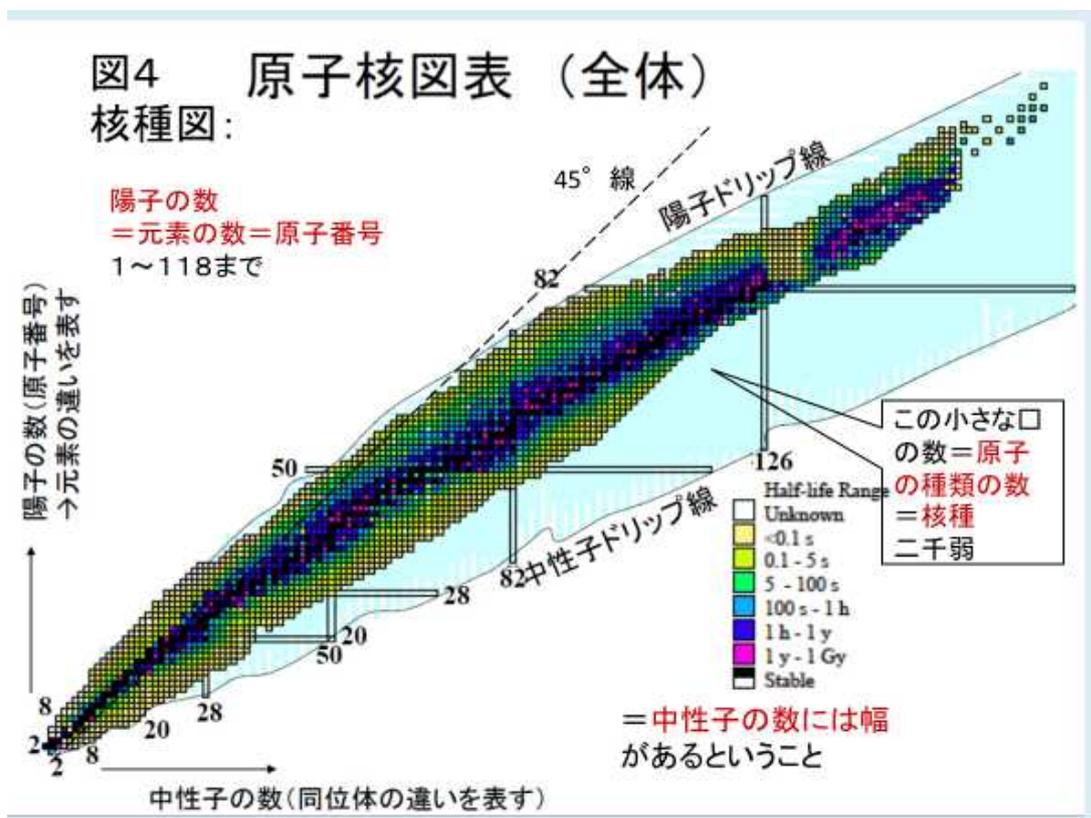
例えば、酸素Oのpは8個で決まりですが、nは5から16個まで12通りにもくっついて酸素の原子核を構成できるのです。つまり酸素と言う1種の元素には、原子核のn数の違う12種類の酸素原子があるのです。これらの酸素原子の一群を酸素の「同位体」と呼びます。Oの同位体は12個あるわけですが、その中で安定な(=放射線を出さない；地球上に安定して存在する)原子は少数で、大部分は不安定(=放射線を出す)です。

同位体の中で不安定体である放射性同位体をRI(英語: Radioisotope)と言います。酸素Oの例でいえば、安定体Oは、n8個の $^{16}\text{O}$ , n9個の $^{17}\text{O}$ , n10個の $^{18}\text{O}$ の3つで、他の9個はRIです。そのうちの1, 2つは医療で大いに役立っています。

図3で各元素の平均原子量と言うのは、各元素の地球上に実在する同位体の原子量の存在比率の平均値を言います。存在比率の例として、地球上の実在安定酸素は、 $^{16}\text{O}$ ; 99.76%,  $^{17}\text{O}$ ; 0.039%,  $^{18}\text{O}$ ; 0.201% が存在比です(合計100%)。

上述した約1,800個の原子の種類は原子核の種類なので、用語として「核種」と言います。図4に「核種図」を添付します。縦軸がp数=下から原子番号順(1~118), 横軸がn数(0~160くらい)ですので、この図にすべての核種が表されています(図中の小さな四角で)。

図4 原子核図=核種図(全体図)



上図で、n-p 方眼図の 45°線を書いています。見にくいですが、中心の黒色の四角ポッチが安定体ですが、この帯の中心域は、原子番号の低い域では 45°線にほぼ一致していますが、原子番号が大きくなると、45°線の下側で右上り弓なり帯状に分布存在しています。その意味は、原子番号が大きくなると、安定体の原子核構成は n の数が相対的に多くなるということです。原子核の安定存在のためには、相対的に多くの n が必要です。

図4では見難いので、縦軸に下側、原子番号で (H 1 ~ Ca 20) の拡大図を図5に示します。図5で、程良い n 数を持つ核種が黒色の四角で安定核種を示しており、空色と黄色は不安定核種を表します。不安定のあり方については次回連載でお話しします。図5の中に、 $\alpha$  線や  $\beta$  線の移動方向などについて記入していますが、それも次回説明します。(ただし、図5のような低い原子番号の核種のなかで $\alpha$ 崩壊をするものはありません。図示したのは説明のためだけです。) 今回は、上下の不安定帯にはさまれて安定核種の帯が右上り弓なりに伸びているということをご認識ください。

図5 核種図の下側拡大図: p/n 個数比の様子

