

6. 主役を務める不純物

麻薬と危険ドラッグ

エンケファリンは哺乳動物が体内で生合成する図 6-1 のように 5 つのアミノ酸がアミド結合で結ばれた 2 種の物質で、動物が疲労した折や厳冬時の冬眠の折に眠りを促す催眠作用を持っています。このエンケファリンはアミノ酸の窒素原子のほかにフェノール性の水酸基とベンゼン環を立体的に一定の相対位置を保った構造を持っており、体内にある受容体に入り込み窒素原子や水酸基やベンゼン環が受容体の感応する部分に近づきますと眠りが促されます。睡眠を必要とする時にはエンケファリンの供給が続けられますが、夜が明けあるいは春が近付いて睡眠が充たされるとその供給は止まります。エンケファリンは体内で容易に分解され易いアミド結合で結ばれた物質ですから、動物は睡眠から目覚めて活動を開始します。このエンケファリンの窒素原子とフェノール性の水酸基とベンゼン環の立体的に相対位置を含めて類似の分子構造を有する物質であれば、多くの哺乳動物の受容体に誤って取り込まれて催眠作用を示します。

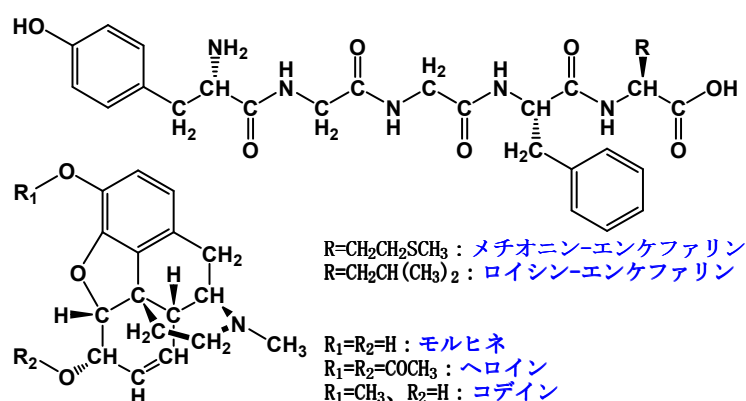


図6-1 エンケファリンと麻薬の構造

イランやアフガニスタンやタイやラオスやミャンマーなどで栽培されている鬼芥子の果実に傷を付けますと、モルヒネやコデインを含む乳液が分泌してきます。このモルヒネとコデインは図 6-1 に示すようにエンケファリンとは全く異なる分子構造を持っていますが、窒素原子とフェノール性の水酸基とベンゼン環の立体的な相対位置と分子の大きさが類似しているために受容体の中に誤って入り込みエンケファリンの約 70 倍の催眠作用を示します。そのため古くから麻薬として用いられてきましたが、特に 19 世紀には政情混乱を目的として利用されアヘン戦争に発展しました。その後国際的にモルヒネやコデインは麻薬として管理されるようになりましたが、逆に密造と密売の組織ができ闇市場では 2010 年にはアヘン 1kg 当たり約 \$ 170 で取引されるようになりました。

麻薬は催眠作用により刺激を感じなくなる働きをしますから、熱した金属板の上にマウスを載せてその動きで判断するなど種々の催眠作用の強さを調べる検査方法があります。このようにして麻薬の催眠作用の強さを調べる事が出来ますが、検体動物にもそれぞれ個体差がありますから、検査結果にばらつきが出て検査結果の信頼性が低くなってしまい

ます。そのため一般にラットやマウスなどの複数の検体動物に検査する薬物を服用させたときに、その 50%の検体動物が催眠作用のような薬効を示す薬物の最小量を検体動物の体重 1kg 当たりに換算して、50%有効量 (ED₅₀) として薬物の薬効の強さを表す指標としています。マウスへの皮下投与においてモルヒネ塩酸塩の ED₅₀ は 0.005~0.006g/kg と報告されており、エンケファリンと異なり受容体の中に入ったモルヒネが分解し難いために薬物依存症の副作用を示します。保存性や製剤性などの向上のために改良されたジアセチルモルヒネはヘロインと呼ばれ、ED₅₀ が 0.0054g/kg と催眠性や麻酔性を保っていますが薬物依存症も残ります。

エンケファリンやモルヒネに関連して分子構造と催眠作用の間の関係が明らかになってきましたので、窒素原子とフェノール性の水酸基とベンゼン環の立体的な相対位置と分子の大きさが類似した分子構造を持つフェンタニルが 1960 年に発明され、モルヒネと同じような薬理作用でその鎮痛作用はモルヒネの約 200 倍 (ED₅₀ が 0.00003g/kg) にも達することが明らかになりました。このフェンタニルはモルヒネの約 400 倍の強さの急性毒性を示していますが、現在医療現場では癌性疼痛に対して点滴静脈内投与する場合は、1 日にフェンタニル 0.1~0.3mg から開始し、患者の症状に応じて適宜増量するように処方されています。

さらに、フェンタニルと類似の構造を持ち、フェンタニルの約 6000 倍の強い薬理作用を示す α -メチルフェンタニルが 1979 年に発明されました。強力な麻酔薬や鎮痛薬としての有用性の研究に、この α -メチルフェンタニルは麻薬などの薬物を扱う闇市場にチャイナホワイトと呼ばれて出回り、そのあまりに強い薬理作用によりモルヒネ中毒に似た事故が全米で続きましたが、遺体内からは全くモルヒネの服用が認められない不審死でした。それらの事故が α -メチルフェンタニルと因果関係が認められたために、1981 年に危険な薬物として規制されるようになりました。しかし、このような危険な薬物は世界中の闇市場で取り扱われ続け、日本でも脱法ハーブとして密かに広まり各種の事故につながりました。この脱法ハーブという呼び名があたかも合法的な薬物のような印象を与えていたために、2014 年に警視庁と厚生労働省は危険ドラッグあるいは危険ハーブと改称して取り締まりを強めました。

この α -メチルフェンタニルは正確な ED₅₀ を公表されていませんが、フェンタニルの 6000 倍、モルヒネの 1200000 倍、エンケファリンの 74000000 倍の強さの催眠作用を持つと考えられています。モルヒネの ED₅₀ が 0.005~0.006g/kg と報告されていますから、 α -メチルフェンタニルの ED₅₀ が 0.00000005g/kg (5ng/kg) と見積もることが出来ます。通常の人間の体重を 60kg と仮定すれば、0.0000003g (300ng) の α -メチルフェンタニルが不純物として体内に入りますと、人間の機能や性質を失い麻酔状態に陥ってしまいます。5x10⁻¹⁰% (5ppt) と極めて少量の**不純物**が**純**な物質に影響して性質を変えてしまいます。

ギネスブックが猛毒と認めたダイオキシシン

検査する薬物をラットやマウスなどの複数の検体動物に服用させたときに、その 50% の検体動物が薬物の薬効を示す最小量を検体動物の体重 1kg 当りに換算した値を 50% 有効量 (ED₅₀) として、一般に薬物の薬効の強さを表す指標にしています。催眠作用や解熱作用など種々の薬効の中で、生物にとって最も本質的で重要な薬効は死を招くことですから、短期間に死をもたらす毒性の ED₅₀ を特に 50% 致死量 (LD₅₀) として急性毒性を表す指標にしています。この致死量を表す急性毒性の LD₅₀ も当然ラットやマウスなどの検体動物に服用させたときに、50% の確立で死ぬ最小量を検体動物の体重 1kg 当りに換算した値で表しています。例えば、人間にとって必要不可欠な食塩の LD₅₀ は 3.75g/kg ですから、検体動物と同類の哺乳動物である人間の平均体重を 60kg と仮定すれば、食塩の急性毒性による致死量は約 230g と概算できます。ナメクジに食塩を振りかければ殺すことが出来るといわれていますが、人間でも手のひらいっぱい食塩を食べれば短期間に死に至ることを意味しています。

人間は食塩に限らず多くの食べ物や調味料などの物質を摂取して、生命活動を維持していますから、それらの代表的な物質の LD₅₀ を表 6-1 に纏めました。塩化マグネシウムは豆腐を固めるために用いられる物質で、食塩と同じように金属の塩化物ですが、LD₅₀ が 0.18 g/kg ですから食塩の約 20 倍も強い毒性を示します。お酢やヨーグルトや柑橘系の果物に含まれる酢酸や乳酸やクエン酸は、口にする機会の多いカルボン酸ですが LD₅₀ が 1~4 g/kg ですし、純粋な形で口にすることはほとんどありませんから日常生活で毒物とは考えられません。砂糖は LD₅₀ が 15 g/kg ですから平均的な人間の致死量は約 1000g と見積もられ、急性毒性を示すことは現実的にありえませんが、甘いものを好み頻繁に砂糖を体内に摂取していると長期間には糖尿病などの成人病を発症します。このような長期間の間に身体に影響を徐々に示す慢性毒性は LD₅₀ では表すことが出来ません。

洗濯用や台所用の洗剤や石鹼や洗髪剤は水と油の仲を取り持つ働きをする界面活性を示す物質で直接服用することはほとんどありませんが、台所用洗剤は食物とともに誤って口にする可能性がありますから毒性を示すものであってはなりません。表 6-1 に掲げた 3 種の界面活性剤の中でドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウムは体内に入っても分解や消化をすることが出来ず毒性を示します。これに対してステアリン酸ナトリウムや砂糖ステアリン酸エステルは体内に入っても消化することが出来、消化生成物は砂糖やステアリン酸ですから、体内に吸収されて栄養にこそなれ毒にはなりません。

植物を加熱しますと多くの成分が分解したり互いに反応して、水とともに煙となって空气中に拡散します。このように発生した煙成分には種々多様な物質が含まれていますが、中でも含有量の大きな成分を表 6-1 に掲げました。これらの成分はいずれも適度の毒性を示すために虫や微生物が嫌いますから、これらの煙成分で覆うように燻製しますと鮭やハムやベーコンなどの食物は腐敗し難く長期にわたり保存できるようになります。燻製は「毒を以て毒を制する」ことにより食物を長期保存する古来の知恵です。

表 6-1 食べ物の急性毒性を示す LD50(g/kg)

化学物質	分子式	LD ₅₀	備考
エタノール	C ₂ H ₅ OH	10.30	アルコール類
砂糖	C ₆ H ₁₁ O ₆ -C ₆ H ₁₁ O ₅	15.00	糖類、調味料
ブドウ糖	C ₆ H ₁₂ O ₆	35.00	糖類
果糖	C ₆ H ₁₂ O ₆	15.00	糖類
ステアリン酸ナトリウム	C ₁₇ H ₃₅ CO ₂ Na	17.00	界面活性剤
ドデシルベンゼンスルホン酸塩	C ₁₂ H ₂₅ -C ₆ H ₅ SO ₃ Na	1.5	界面活性剤
砂糖ステアリン酸エステル	C ₁₇ H ₃₅ CO ₂ C ₆ H ₁₀ O ₅ -C ₆ H ₁₁ O ₅	20.00	界面活性剤
食塩	NaCl	3.75	調味料
炭酸水素ナトリウム	NaHCO ₃	4.20	重曹
塩化マグネシウム	MgCl ₂ ・6H ₂ O	0.18	にがり
酢酸（お酢の酸味）	CH ₃ CO ₂ H	3.53	カルボン酸類
乳酸（ヨーグルトの酸味）	CH ₃ CH(OH)CO ₂ H	3.70	カルボン酸類
クエン酸（柑橘類の酸味）	HO ₂ CC(OH)(CH ₂ CO ₂ H) ₂	0.98	カルボン酸類
グルタミン酸ナトリウム	HO ₂ C(CH ₂) ₂ CH(NH ₂)CO ₂ Na	16.20	アミノ酸類
フルフラール	C ₄ H ₃ O-CHO	2.30	燻煙成分
フェノール	C ₆ H ₅ -OH	0.53	燻煙成分
グアイヤコール	CH ₃ O-C ₆ H ₄ -OH	0.90	燻煙成分
メントール（薄荷）	C ₁₀ H ₂₀ O	2.00	香辛料、医薬品
バニリン（バニラの匂い）	C ₈ H ₈ O ₃	3.00	香辛料、医薬品
カプサイシン（唐辛子の辛味）	C ₁₈ H ₂₇ NO ₃	0.08	香辛料、医薬品
カフェイン	C ₁₂ H ₉ N ₄ O ₂ -C ₅ H ₁₁ O ₄	0.20	香辛料、医薬品
アスピリン	CH ₃ CO ₂ C ₆ H ₄ CO ₂ H	1.75	香辛料、医薬品
ネオスティグミンブロミド	C ₁₂ H ₁₉ BrN ₂ O ₂	0.00016	筋無力症治療薬
青酸カリウム	KCN	0.01	
アコニチン	C ₃₄ H ₄₇ NO ₁₁	0.0004	トリカブトの毒
テトロドトキシン	C ₁₁ H ₁₇ N ₃ O ₈	0.00001	ふぐ毒
サリン	C ₄ H ₁₀ FO ₂ P	0.00001	オーム真理教事件
パラチオン （女性） （男性）	C ₁₀ H ₁₄ NO ₅ PS	0.0036 0.013	殺虫剤、殺ダニ剤
亜ヒ酸	As ₂ O ₃	0.006	石見銀山
ダイオキシン	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂	0.0000006	ギネスブック認定
ボツリヌス菌毒素	C ₆₇₆₀ H ₁₀₄₄₇ N ₁₇₄₃ O ₂₀₁₀ S ₂₂	0.0000003	食中毒を起こす好塩菌

人間が猿から進化するより以前にすでに酒は珍重される食物だったようで、その後人間が進化し文明を開花させる過程で酒にまつわる文化が広く生まれてきました。その酒の主成分のエタノールはLD₅₀が10.3g/kgですから、平均体重60kgの人間は600gのエタノールを服用すると死に至ります。一般に蒸留酒はほぼ50%の濃度の水溶液ですから、ウイスキーやブランディーなどのLD₅₀は約1L（通常の1瓶程度）と換算することができます。幸い、人間はエタノールを代謝して解毒する機構を持っていますから長時間で飲用、服用する場合には許容量が多くなりますが、多量の酒を一気に飲むことは極めて危険なことです。このように日常生活で口にする食物でもそれぞれ毒性を持っていますから、暴飲暴食や偏食は当然多くの毒物を短時間に服用することになり、必ずしも健康に良いとは思えません。

百薬の長といわれるお酒でも飲み方によっては死を招くほどの毒物としても作用するように、多くの物質は薬効と毒性の両方の性質を示します。このように両方の性質を示すときに、そのED₅₀に対するLD₅₀が医薬品の安全性を示す尺度として、治療係数（安全域）が式6-1で表されます。この治療係数が10以上の医薬品は誤って10倍量服用しても死に至らないのですから安全性が高いと判断されますし、3以下では服用に際して危険が伴うと考えられます。例えば、風邪薬として最も広く処方されているアスピリンの解熱作用のED₅₀が0.016g/kgに対してLD₅₀は1.75g/kgですから、治療係数が109と算出され非常に安全性の高い医薬品と考えることができます。前節で述べたモルヒネ塩酸塩はED₅₀が0.005~0.006g/kgに対してLD₅₀は0.456g/kgですから、この式に代入しますとモルヒネ塩酸塩の治療係数は76と算出され、医薬品の過剰摂取などの誤用に対して比較的安全な物質と思われます。ネオスティグミンブロミドは筋無力症の治療薬として用いられていますが、LD₅₀が0.00016g/kgですからかなり毒性の強い物質で、1996年にロシアのウラジオストックで韓国領事がこの医薬品で毒殺される事件が発生しました。

$$\text{治療係数} = \frac{LD_{50}}{ED_{50}} \quad \text{式 6-1}$$

さらに、表6-1には日常生活に密接に関わってきた代表的な毒性物質もその急性毒性を示すLD₅₀を併せて掲げました。中でも古くから日本では石見銀山とトリカブトの毒とフグの毒が毒物の代表と考えられてきました。島根県の石見銀山は16世紀に多量の銀を産出した鉱山として知られており、近年その遺跡が世界遺産に認定されましたが、同じ石見国(島根県)の産物であった亜ヒ酸がこの名を騙るように石見銀山として江戸時代に流通しました。亜ヒ酸はLD₅₀が0.008g/kgと報告されており、しかも全く味も香りもありませんから、鋭い味覚と嗅覚を持つネズミなどの動物でもその混入に気付くことなく食べてしまう猛毒で、明治時代以降はネコイラズの名で呼ばれる殺鼠剤として利用されました。

トリカブトは林や小川の畔などの日蔭の湿地に育ち、8月下旬に図6-2のように鶏冠に似た形の美しい青紫色の花を付けますが、その根は烏頭と呼ばれて漢方薬に用いられてきました。一年の無病息災を念じて正月にはお屠蘇を飲んで祝いますが、この屠蘇には代表的な漢方薬の赤朮（あかおけら）、桂心（けいしん）、防風（ぼうふう）、菝葜（さると

りいばら)、蜀椒(ふさはじかみ)、桔梗、大黄(だいおう)、小豆とともに烏頭(うず)が処方されています。また、トリカブトの根は附子(ぶす)とも呼ばれて毒薬として用いられていたようで、附子という演題の狂言では、太郎冠者と次郎冠者に砂糖の入った桶を附子が入っているとの偽りを言い残して主人が外出しますが、留守中に太郎冠者と次郎冠者がすべて砂糖を舐め尽してしまう話になっています。このように毒にも薬にもなるトリカブトの根にはアコニチンが含まれており、その急性毒性の強さは LD_{50} が $0.0004g/kg$ ですから、植物由来の毒物としてはかなり強い毒性を示します。



図6-2 トリカブトの花

フグは最も美味しい魚として珍重されていますが、内臓に猛毒のテトロドトキシンを含んでいます。このテトロドトキシンは表 6-1 にも掲げましたように LD_{50} が $0.00001g/kg$ でトリカブトの毒の約 40 倍の強さの毒ですから、平均体重 $60kg$ の日本人は耳搔き 1 杯ほどの量の $0.6mg$ 食べると死に至ると考えられます。このように強い毒性を持っており、鉄砲の弾のようにフグの毒に当たると必ず死に至ることから、フグを鉄砲に例えてフグのちり鍋は鉄(砲)ちり(鍋)、フグの刺身は鉄刺しと洒落て粋がっています。

人間の身体は非常に多くの機能が錯綜するように関係した複雑な組織ですから、それらの複雑な組織の中のある一つの機能でも阻害する物質は生命活動を停止させる毒物として働きます。トリカブトの毒のアコニチンやフグの毒のテトロドトキシンは神経の伝達に異常をもたらしますが、最もよく知られた毒物の青酸カリ(シアン化カリウム)は体内で分解して発生するシアン化水素が呼吸を阻害します。殺虫剤の効果を持つ農薬のパラチオンは人間の生殖器官に作用するために、男性に比べて女性に対して約 4 倍も強く毒性を示します。

世界一の記録や性質を「ガイドライン」と呼ばれる基準に従い認定しているギネスブックには、ダイオキシシン(正式名 2,3,7,8-テトラクロロベンゾダイオキシシン)が最も致死性の高い化学物質として収集されています。その LD_{50} は $0.0000006g/kg$ ですから、 LD_{50} が $0.01g/kg$ の青酸カリと比較すると 150000 倍、フグの毒の 10 倍の毒性を示すと見積もることができます。さらにギネスブックには認定されていませんが、毎年の食中毒死の原因になるボツリヌス菌と呼ばれる好塩菌の分泌する毒素の LD_{50} が $0.0000003g/kg$ ですから、今まで知られている物質の中で最も強い毒性の物質と思われます。通常の人間の体重を $60kg$ と仮定すれば、 $0.036mg$ のボツリヌス菌の毒素が不純物として体内に入りますと、食中毒を起こして人間の機能や性質を失い死に至ってしまいます。極めて少量の**不純物**が人間という**純**な物質に影響して完全にその性質を変えてしまいます。

食べ続けても安心な ADI 基準

人間は種々の機能が複雑に錯綜する組織ですから、多くの物質を代謝して体外に排出したり、分解して別の物質に変性します。当然、このような対応には時間を要しますから、短時間では毒性を示す物質も、長時間の間には毒性を軽減し、身体への影響を小さくします。前節でみてきたように食塩の LD₅₀ は 3.75g/kg ですから平均体重 60kg の人間は約 230g の食塩を短期間に食べると急性毒性により死に至りますが、長期間では人間にとって必要不可欠でこそあれ、身体のあらゆる機能に対して直接的に毒になることはほとんどありません。また、酒の主成分のエタノールは LD₅₀ が 10.3g/kg ですから、人間は 600g のエタノールを服用すると死に至りますが、幸い人間はエタノールを代謝して解毒する機構を持っていますから長時間で飲用、服用する場合には、お酒は百薬の長といわれるように種々の薬効を示します。

人間の身体への対応はその機能により要する時間が異なりますから、急性毒性を表す 50% 致死量 (LD₅₀) のような指標で示すことが慢性毒性に対しては困難です。そのために体重 1kg の哺乳類が毎日服用し続けても全く健康に影響を与えない最大量 (mg/kg/Day) を慢性毒性の強さの指標にしています。現実には安全係数と個人差を考慮して、実験で求めた最大量を 100 で割った値を一日摂取許容量 (ADI) として用いています。

前節で掲げたダイオキシンの急性毒性は青酸カリと比較すると 150000 倍でしたが、1960 年に始まったベトナム戦争で散布された枯葉剤中に含まれていたダイオキシンにより散布地域での奇形出産・発育異常の増加が認められたために、表 6-2 に掲げたようにその ADI は青酸カリと比較すると 50000000 倍に見積もられました。また、殺虫剤として使用されるパラチオンは女性に対する毒性に補正された値になっています。1970 年代に殺虫剤として用いられていたディルドリンは慢性毒性が非常に強いために現在では農薬として用いられていません。このような毒物や農薬を継続的に口にすることは通常はありませんが、農業従事者は農作物の殺虫や殺菌のために継続的に毒性の強い農薬を取り扱わな

表 6-2 生活に関係深い物質の ADI (mg/kg/day)

物質名	ADI	用途
ダイオキシン	0.000000001	毒物
青酸カリウム	0.05	毒物
ディルドリン	0.0001	殺虫剤
パラチオン	0.005	殺虫剤
食用赤色 2 号	0.5	食用着色料
食用黄色 4 号	7.5	食用着色料
亜硫酸	0.7	脱酸素剤
ソルビン酸	25	抗菌剤
アスパルテーム	40	人工甘味料
アセスルファム K	15	人工甘味料
スクラロース	15	人工甘味料
サッカリンナトリウム	5	人工甘味料
水銀	0.00057	毒物

ればなりませんから、農薬の ADI に留意しなければなりません。

本来食物は自然の賜物に限られていましたが、文明の進歩とともに食物の保存のために酸化防止剤や腐敗防止剤を、また食欲を満足させるために食用着色料や人工香料や人工甘味料を加えるようになりました。このような食品添加物は常に多くの人の口に入る可能性がありますから、表 6-2 にはそのような数例の食品添加物の ADI を掲げました。血糖値の高い人は糖尿病の危険がありますから、砂糖の摂取を抑えなければなりません。種々の人工甘味料は血糖値をあげることなく甘味を感じさせる物質ですから、血糖値の高い人にとっては必要な調味料で、日常生活の飲食において継続的に口にします。当然、慢性毒性にも留意しなければなりません、表 6-2 に掲げた人工甘味料はおおむね安全な物質と考えられます。

成人は 1 日に尿や便などで約 1.5L の水を排泄し、約 1L の水を皮膚や肺から蒸発させていますから、合計 2.5L の水を毎日補給しなければ体内の水分量が減少して脱水症などを発症し、生命を維持することが出来ません。さらに、洗面や入浴の他に食べ物や食器や衣類を清潔にするための生活用水を必要とします。そのために、現代では蛇口を開くだけで水が常時利用できるような水道が完備されるようになっていますが、水は大量にしかも欠くことのできない極めて大切な物質で、水の無いところには人間の生活は成り立ちません。このように人間は食用や飲料用ばかりでなく、入浴や洗濯や清掃などあらゆることに水を必要としていますから、人口の急増に連れて東京の生活用水の量も急激な増加をたどり、2008 年の 1 年間には、東京都水道局は $1.58 \times 10^9 \text{m}^3$ の水を配水しました。

食用や飲料用の水はたとえ低濃度でも微生物や化学物質を含みますと長期間には健康に大きな影響を与えますし、洗濯や清掃に用いる生活用水は色や臭いや濁りがあってはなりませんから、日本各地で住民の健康や生活環境や水源の水質を考慮してその土地に適した水質基準がそれぞれ定められています。東京都は表 6-3 に掲げた水質基準より不純物の少ない水を水道に供給するように定めています。この水質基準には生活用水としての種々の要素に基いた 51 項目の項目が含まれていますので、品質に関係した項目を表 6-3 の水色の枠に、水の硬度や毒性や健康に影響を与える物質に関係した項目を赤色の枠に、オゾンホール問題などの環境問題に関係する項目を黄色の枠に、浄化前の原水に含まれやすい工業用溶媒や洗剤などに関係する項目を緑色の枠に、そして水の浄化の過程で副生する物質に関係する項目を灰色の枠にそれぞれ大別しました。

界面活性剤として油を水で洗い落とすために非常に役立つカルボン酸のナトリウム塩（石鹼）は水に溶解易くよく解離しますが、対応するカルシウム塩は余り高い溶解度を示しません。例えば、石鹼に多く含まれているオレイン酸のナトリウム塩は水 1L に対して 100g ほど溶けますが、オレイン酸のカルシウム塩は 0.4g しか溶けません。カルシウムやマグネシウムのイオン濃度の低い軟水の中で石鹼を使用するときには問題なく油を洗い落としますが、硬水中では石鹼は脂肪酸のカルシウム塩になり沈殿してしまいますから、界面活性剤としての働きを示すことができず、油を洗い流す洗剤として役に立ちません。その

ために洗濯や清掃に用いる生活用の水道水は軟水でなければなりませんから、水の硬度を示すカルシウムとマグネシウムのイオン濃度が 300 mg/L 以下になるよう表 6-3 の赤色の枠に定められています。また、表 6-2 に掲げたように青酸カリ（シアン化カリウム）の ADI（0.05 mg/kg/day）をもとにしますと、平均体重 60kg の人間が許容されるシアンイオンは 1.4mg 以下と概算されますから、1 日に摂取する 2.5L の水道水に含まれるシアンイオンは 0.56mg/L 以下でなければなりません。そのため、種々の条件で利用する種々の利用者に供給する水道水の水質基準は安全係数と個人差を考慮して、シアンイオンが 0.01mg/L に規定されています。

表 6-3 東京都の水道の水質基準（mg/L）

水質項目	基準値	水質項目	基準値	水質項目	基準値
濁度	2 度以下	鉛	0.01	ジブromクロロメタン	0.1
蒸発残留物	500	ヒ素	0.01	総トリハロメタン	0.1
pH	5.8-8.6	6 価クロム	0.05	ブromジクロロメタン	0.03
味	異常なし	シアンイオン	0.01	1,4-ジオキサン	0.05
色	5 度以下	フッ素	0.8	ベンゼン	0.01
臭気	異常なし	ホウ素	1	陰イオン界面活性剤	0.2
ジェオスミン	0.00001	亜鉛	1	非イオン界面活性剤	0.02
2-メチルイソボルネオール	0.00001	アルミニウム	0.2	ナトリウム	200
フェノール類	0.005	鉄	0.3	クロロホルム	0.06
一般細菌	100	銅	1	ブromホルム	0.09
大腸菌群	検出なし	マンガン	0.05	ホルムアルデヒド	0.08
亜硝酸性窒素	0.04	カルシウム,マグネシウム	300	塩素イオン	200
硝酸性窒素	10	四塩化炭素	0.002	クロロ酢酸	0.02
全有機炭素量	3	1,2-ジクロロエチレン	0.04	ジクロロ酢酸	0.04
カドミウム	0.003	ジクロロメタン	0.02	トリクロロ酢酸	0.2
水銀	0.0005	テトラクロロエチレン	0.01	塩素酸	0.6
セレン	0.01	トリクロロエチレン	0.01	臭素酸	0.01

石炭と石灰石と水を原料とするアセチレンからアセトアルデヒドや塩化ビニルなどを生成する反応が工業原料に乏しい日本で脚光を浴び、1950 年代に熊本県水俣市の新日本窒素肥料などで工業化されましたが、工場廃液中に含まれていた微量の水銀化合物により周囲の住民が水銀中毒に侵されました。この中毒事件は極めて悲惨な後遺症を伴いますから水俣病として大きな公害問題に発展しましたが、1972 年には世界保健機関（WHO）は水銀の ADI を 0.0007mg/kg/day と暫定的に決めました。さらに、表 6-2 に掲げたように 2003 年

にはその ADI の値を 0.00057 mg/kg/day に変更して注意を喚起しました。平均体重 60kg の人間が毎日許容される水銀は 0.034mg 以下と概算されますから、1 日に 2.5L を摂取する水道水に含まれる水銀は 0.014mg/L 以下でなければなりません。種々の条件で利用する種々の利用者に供給する水道水の水質基準は安全係数と個人差を考慮して水銀が 0.0005mg/L に規定されています。この極めて希薄な水銀の濃度は現在用いられている発光分光分析などの最先端の分析法でもほぼ測定の限界にあります。この水質基準値は水銀の重さが水の 20 億分の 1 以下でなければならないことを意味しており、現在の世界の人口が約 70 億人ですから全世界に 4 人以上居てはならない極めて危険なテロリストのように、水銀の毒性は考えられています。

極めて少量の**不純物**が人間という**純**な物質に影響して完全にその性質を変えてしまいます。**純**な物質に大きな影響を与える**不純物**が水のように日常生活に密接に関わる物質に含まれる場合には、非常に大きな安全係数と個人差を考慮した一日摂取許容量 (ADI) で定められる**不純物**の量は限りなく少なくなります。


色の不純物は即是空

小豆やうずら豆をゆっくりと煮込んでよく濾し、水飴で甘味を付け、色々の色付けをすれば美味しそうな和菓子になります。桃の花を思い出すような虎屋の練り切り、透き通るように赤い駿河屋の紅羊羹、餡の色を引き立たせる言問の草団子。伝統に裏打ちされた色使いが餅と餡で出来た和菓子に独特の味わいを感じさせています。夏の盛りに海辺の葦簾張りの中で食べるかき氷は、口の中に色が残りそうな赤や緑のどぎつい色のシロップでなければ似合いません。弁当の中のご飯を染めるほどに濃い黄色の沢庵や限りなく赤い紅生姜が多くの人に好まれています。上品に見せる和菓子の色も、氷を引き立たせるシロップの色も、漬物の赤色や黄色の色も全て食紅と呼ばれる化学物質が使われています。

食紅も本来はアントシアニン系のくちなしの実やサフランの花や赤紫蘇の葉などの色素を使っていましたが、透明感のある色調にすることが難しくしかも高価で収穫時期が限られます。そのため近年は化学者が合成した合成着色料を用いるようになり、非常に鮮やかにかつ多様に食物を着色できるようになっています。表 6-4 には現在使用の許可されている合成着色料の色調や主な使い道のほかに、急性毒性の尺度となる LD₅₀ と危険性が懸念される慢性毒性の指標となる ADI についても掲げておきました。食塩などのように大量に食べる物質でなく、10000~150000 倍にうすめて使用することを考え合わせれば、表 6-4 に挙げた合成着色料がほとんど急性毒性を持っていない物質と考えることが出来ます。しかし、これらの着色料は発がん性や染色体異常やアレルギー性を示すことが懸念されており、長期間にわたり食べ続けますと、これらの慢性毒性が現れる危険性を持っていることが ADI の値からも視えます。

1950 年代には沢庵を美味しく見せるためにオーラミンと呼ばれる着色料で黄色に染めていましたが、急性毒性の指標となる LD₅₀ の値が 0.480g/kg であり発がん性も報告された

表 6-4 合成着色料の色調と用途と毒性

名称	色調	主要用途	毒性症状	LD ₅₀ g/kg	ADI mg/kg/day
食用青色 1 号		漬物、菓子	発がん性	<2	
食用青色 2 号		和菓子、冷菓		<2.5	2.5
食用黄色 4 号		塩干加工品、漬物	染色体異常	12.8	1.25
食用黄色 5 号		塩干加工品、菓子	発がん性、アレルギー性	2	
食用緑色 3 号		飲料水、菓子		<2	
食用赤色 2 号		飲料水、冷菓、菓子	発がん性	<10	1.5
食用赤色 3 号		加工肉、塩干加工品	染色体異常、発がん性	1.9	1.25
食用赤色 40 号		飲料水、冷菓、菓子			
食用赤色 102 号		塩干加工品、漬物	アレルギー性、	8.0	0.75
食用赤色 104 号		塩干加工品、煎餅	発がん性	2.1	
食用赤色 105 号		塩干加工品	発がん性	6.5	
食用赤色 106 号		加工肉、塩干加工品	発がん性	<20	

ことから、厚生労働省は食品添加物などの規格基準を定めて行政指導をするようになり、オーラミンの使用が禁止されました。合成着色料に関しては 12 種類の色素を食用に許可し、これら以外の着色料の使用を制限しましたが、1969 年と 1971 年にこの食品添加物などの規格基準を改正して着色料を使用できる食品を制限しました。その後、食用紫色 1 号は使用禁止になりましたので、現在、11 種類の合成着色料の使用が許可されています。これらの着色料はカルボン酸やスルホン酸のナトリウム塩のため何れも非常に水によく溶けますから、シロップや飲料水への使用には適していますが、和菓子や蒲鉾などの固形物を着色するには適しません。そのため、これらの着色料をアルミニウム塩として水に対する溶解度を下げ、固形物の着色に用いています。

図 6-3 に挙げたこれらの合成着色料の構造式からも分かるように、食用赤色 2 号などは窒素=窒素 2 重結合を持つアゾ化合物、食用青色 1 号などはベンゼン環の 2 重結合が互いに共役したトリフェニルメタン系の化合物、トリフェニルメタン系の 2 つのベンゼン環が酸素原子で結ばれたキサントゲン系の食用赤色 3 号などの化合物、藍染めの色素インジゴの基本構造を持つ食用青色 2 号の 4 種類の化合物群に大別されます。これらの全ての合成着色料は多くの 2 重結合を持ち、共鳴した π 結合が非局在化していますから、リコピンやカロチンと同じように π 結合の結合エネルギーが小さく、長波長の光を吸収します。

物質や溶液の色の濃さは式 3-2 で表される Lambert と Beer の関係式に従いますが、この式の ϵ は全ての光の波長において物質によりそれぞれ固有の値を持っています。一般に、可視光線の吸収後の光の強さ I が吸収前の光の強さ I_0 に対して 99% 以下であればその物質の色が認識できます。合成着色料をはじめとする多くの染料や色素の ϵ はその色調となる

波長領域で 40000~50000 L/mol·cm の大きな値を持っていますから、約 10^{-7} mol/L の濃度以上であれば色を認識できると考えられます。図 6-3 で示すような合成着色料は約 500 の分子量を持っていますから、色の識別できる濃度限界は 0.05mg/L と換算できます。この限界濃度は LD₅₀ よりはるかに小さな値を持っていますし、着色した食べ物を毎日大量に食べることが考えられませんから、食用の合成着色料は有害とは考えられません。人間は身体の活力や構成素材となる物質の不足を補うように味覚や嗅覚や視覚を刺激して、本能的に食欲を促しています。食欲の増進のためには視覚を刺激することは極めて重要で、食事を楽しくする役割を演じています。合成着色料を識別限界に近い希薄な濃度に調えた和菓子は上品な甘さを連想させますし、かき氷を引き立たせるどぎついシロップの色や、漬物の赤色や黄色の際立った色は識別限界よりは濃い濃度に合成着色料を調えています。

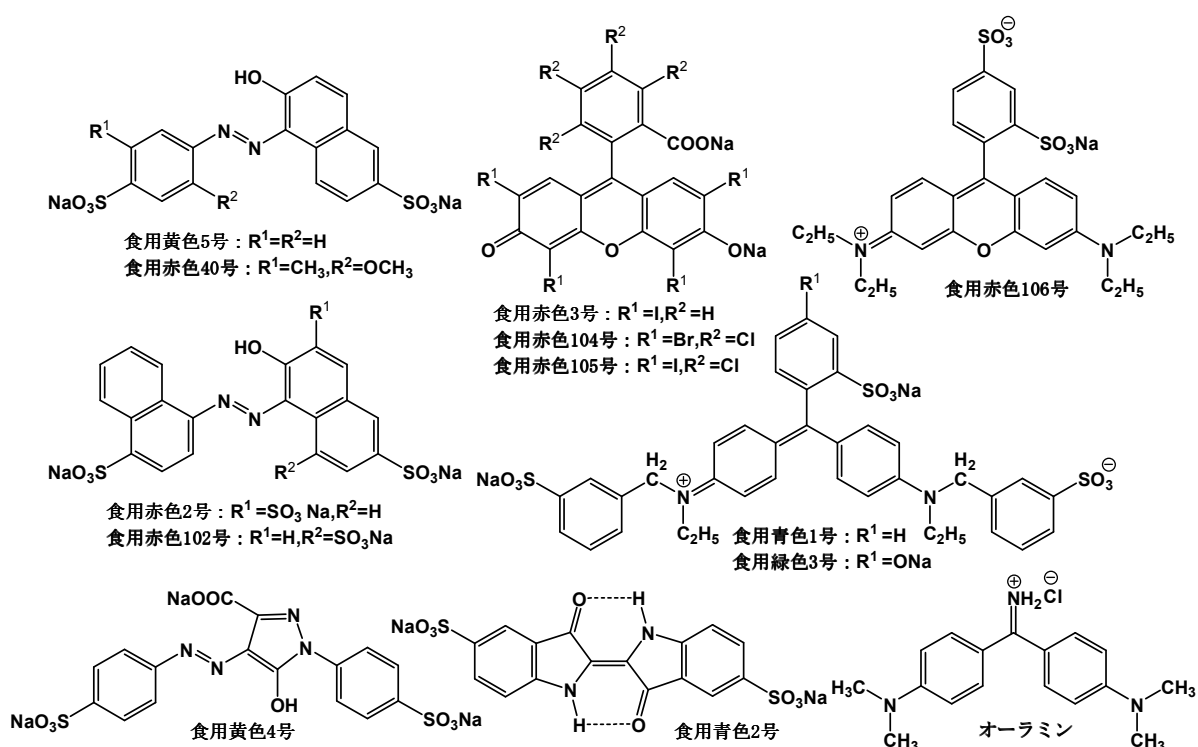


図6-3 合成着色料の構造

色の識別できる濃度限界は 0.05mg/L と換算できますから、たとえ僅か 10ppb(10^{-6} %)の**不純物**といえども大きな ϵ を持つものであれば、無色の**純物質**が着色してしまいます。著者が卒業研究に明け暮れていたある日、2種の試薬をフラスコの中で熱したところ、色が鮮やかに変化しましたので、喜び勇んで反応を停止させて生成物の分離精製をしました。この反応で生成した物質は合成着色料のように大きな ϵ の値を持っていたから、極めて少量の色鮮やかな生成物のほかには原料の2種の試薬が回収されただけでした。まさに色即是空という一節を身に染みて化学の実験で体験しましたが、「観自在菩薩行深般若波羅蜜多時、照見五蘊皆空、度一切苦厄。」で始まる般若心経は仏教の最も基本思想を表したものですから、もっと深い内容を説いているのでしょう。

金属原子の整然とした秩序を乱す不純物

金属原子は1個では不安定ですから、他の金属原子に接近し電子を出し合って結合を形成します。2個の金属原子の結合した分子に隣接する3番目の金属原子が接近するとき、2個の原子を結び付けている電子が3番目の金属原子の原子核とも相互作用しますから、新たに結合を形成します。さらに、4個でも5個でも金属原子が集合すれば、電子をそれぞれ出し合って結合を形成しますが、金属原子が集合して3次元的に整然と並んだ固体において全ての原子が相互作用して、それらの結合に関与する電子をみなで共有するように集合体を構成する全ての原子が互いに結合し、1個の分子のようなものを作り上げます。このように金属元素が集合して相互作用するとき、原子が互いに引き付け合う結合を金属結合と呼んでいます。このような金属原子の塊で共有されている電子は個々の原子に帰属されませんから、自由電子と呼ばれ極めて流動的に動き回ることが出来ます。

金属原子の塊の先端に外部から電子を入れ込みますと、入った電子はその原子の塊の中を自由に動き回ることができ、容易に金属の塊の末端にも電子が移動します。この末端で電子を外部に放出すれば、電子が先端で入り金属の塊の中を通過して末端から出てゆき、結果として金属の塊の中を電流が流れたこととなります。金属原子が緻密に整列していれば自由電子は何の抵抗もなく移動できますが、原子の間に隙間があれば移動できる道が狭まりますから電子は移動し難くなります。太い水道管は大量の水を流すことができ、細い水道管は少ししか水を流すことができません。同じように物質の太さとその流れ易さにより、物質の中を流れる電流の量が変化します。そのため断面積 1cm^2 の物質を 1cm の長さにわたり電流が流れる時に生じる電気抵抗で電導性を表していますので、種々の金属や合金の電気抵抗率を表6-5に掲げておきます。表から明らかなように金や銀や銅のような貴金属類は最も電気抵抗率が小さく、アルミニウムやマグネシウムなどの軽金属類がこれに続きます。若干非金属性を示す鉛やビスマスなどはかなり電気抵抗が大きくなり、低い電導性を示します。けい素やゲルマニウムなどのように金属結合性よりも共有結合性の優れた結合で原子が結び付けられている場合には、結合に関与する電子が原子の塊の中にあまり共有されていませんから低い電導性しか示しません。

分子は分子間に働く分子間力と分子の持つ運動エネルギーが釣り合って物質を構成していますが、温度が高くなると運動エネルギーが大きくなり分子は自由に動き回れるようになりますから、物質は液体や気体の状態に変化します。逆に低温では運動エネルギーが小さくなり相対的に分子間力が支配的になりますから、分子が緻密に整列した固体の状態になります。金属原子も運動エネルギーを持っていますから、温度が高くなりますと金属を構成する原子はムズムズと蠢き小さな隙間ができますし、温度が低くなれば動きが小さくなりますから原子が緻密に整列します。結果として、金属原子の塊で共有されている電

表 6-5 種々の金属や合金の電気抵抗率(ρ)と温度係数(α)

金属	成分	$\rho \times 10^6 (\Omega \text{ cm})$	α
マグネシウム	Mg	4.31	0.00390
アルミニウム	Al	2.74	0.00435
金	Au	2.31	0.00397
銀	Ag	1.63	0.00407
銅	Cu	1.73	0.00429
白金	Pt	11	0.00387
水銀	Hg	94.7	0.00099
亜鉛	Zn	5.92	0.00416
クロム	Cr	2.6	
タングステン	W	5	0.00464
鉄	Fe	10	0.00621
コバルト	Co	9.71	0.00658
ニッケル	Ni	11.8	0.00634
錫	Sn	11.3	0.00447
アンチモン	Sb	39	0.00473
ビスマス	Bi	114	0.00446
鉛	Pb	20.7	0.00421
ケイ素	Si	100000	
ゲルマニウム	Ge	89000	
燐青銅	Cu(96%)、Sn(3.7%)、P(0.3%)	4	0.00350
黄銅	Cu(70%)、Zn(30%)	6	0.00170
コンスタンタン	Cu(55%)、Ni(45%)	49	0.00001
ニクロム	Ni(80%)、Cr(20%)	100	0.00002
鋼	Fe(99%)、C(1%)	20.6	0.00400
けい素鋼	Fe(95.5%)、Si(4.5%)	62.5	0.00075
ステンレス 430	Fe(82%)、Cr(18%)	60	
ステンレス 301	Fe(74%)、Cr(18%)、Ni(8%)	72	

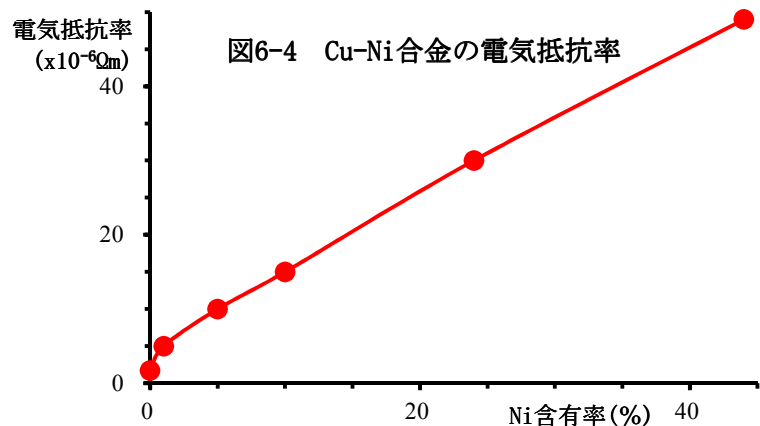
子の動きやすさが温度により変化しますから、温度による金属の電気抵抗の変化が室温付近では式 6-2 に示すような 1 次関数で近似でき、 $t^{\circ}\text{C}$ における電気抵抗率 ρ_t は 0°C における電気抵抗率 ρ_0 と温度係数 α から算出することができます。ここで温度係数 α は 0°C と 100°C における電気抵抗率をそれぞれ ρ_0 と ρ_{100} とするときに式 6-3 で定義され、表 6-5 に併せて掲げておきます。

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad \text{式 6-2}$$

$$\alpha = \frac{\rho_{100} - \rho_0}{100 \cdot \rho_0} \quad \text{式 6-3}$$

金属原子が緻密に整列しているほど金属原子の塊で共有されている自由電子の動きが容易になり電気抵抗は小さくなりますから、金や銀や銅などの貴金属は容易に純粋にすることが出来るため小さな電気抵抗を示します。鉄とクロムの金属原子が均一に混ざり合った合金のステンレス 430 の電気抵抗は純粋なそれぞれの金属の電気抵抗より大きくなっています。同じ大きさの原子が集合した純粋な金属でも温度が上昇して原子間に隙間ができれば電気抵抗が大きくなりますが、大きさの異なる原子が均一に混ざり合った合金では原子が緻密に整列できませんから、隣接した異なる原子の周囲に隙間が生まれステンレス 430 のように電気抵抗が大きくなります。ニッケルと銅の金属原子が均一に混ざり合った合金のコンスタントンの電気抵抗も純粋なニッケルと銅のそれぞれの金属の電気抵抗より大きくなっています。

種々の成分比のニッケルと銅の合金についてそれぞれ電気抵抗の値が報告されていますので、ニッケルの成分比と電気抵抗の関係曲線を図 6-4 に示します。



逆に、純粋の金属に他の原子が不純物として混ざり、原子の配列が乱れて原子間に隙間ができますと、温度が上昇してもそれらの隙間を原子はムズムズと蠢きますから、原子間の平均的な緻密さが温度によりあまり影響されず、合金の電気抵抗はほとんど変化しません。ニッケルと銅の合金のコンスタントンの電気抵抗は極めて小さな温度係数を示しており、電気抵抗が温度の変化によりほとんど変化しませんから、物質の形状の変化を電気抵抗で測定するひずみ計や標準の電気抵抗などに広く用いられています。

Ohmの法則によれば、式 6-4 に示すように電流量 I は電圧 V に比例し電気抵抗 R に反比例しますから、式 6-5 のように発熱量 W は電流量 I と電気抵抗 R に比例します。温度係数の大きな金属では温度の上昇とともに電気抵抗が大きくなりますから、温度の上昇とともに金属の通電効率が低下してしまいます。ニッケル原子とクロム原子からなるニクロムは比較的大きな電気抵抗ながら小さな温度係数を持つ合金ですから、高温まで温度上昇しても通電による効率も発熱量も変化しません。大きな電気抵抗を持つこのニクロムを電線として用いますと、通電により高温まで温度上昇しますが、温度係数が極めて小さいために温度変化に関わりなく安定した電流が流れますから、安定な発熱量を維持する電熱線に適しています。

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{式 6-4}$$

$$W = \frac{V^2}{R} = I^2 R \quad \text{式 6-5}$$

発電所から電力消費地の都会までの大電力の送電に伴い発熱を伴う大きな電力の損失を生じますが、式 6-5 から明らかなように送電の折の大きな電気抵抗はこの損失を大きくします。純粋な金属では金属原子が緻密に整列し金属原子の塊で共有されている自由電子の動きが容易ですから電気抵抗が小さくなりますが、他の金属原子などの不純物が混ざりこみますと、整列した原子の間に隙間ができてしまい電気抵抗を大きくします。電線の金属に含まれるわずかな不純物が送電の折の大きな電力の損失に繋がります。純粋な物質に含まれるわずかな不純物が大きな影響を与えます。

不純物により変わる半導体素子の性能

周期律表の 14 族に属する炭素がダイヤモンドを形作るように、14 族に属するけい素やゲルマニウムも同じく共有結合性が大きいため表 6-5 に掲げたように電導性をほとんど示さず半導体の性質を示す結晶を作ります。14 族に属する炭素とけい素とゲルマニウムを比較して分かるように、周期律表の上段にある元素ほど共有結合性が大きくなり、電導性が小さくなる傾向が見られます。けい素やゲルマニウムは最外殻に 4 個の電子を持っていますが、15 族に属する窒素やりんや砒素は最外殻に 5 個の電子を持っています。14 族の原子が規則正しく整列している金属結晶の中に少量の 15 族の原子が不純物として混ざりますと、その部分だけに電子が過剰のまま集合した構造を保ちます。しかし、集合した構造の中で過剰になった電子は極めて流動的に他の原子へ移動して過剰部分を解消しますから、15 族の原子は 4 個の電子を持つことになり陽イオンとなります。全体として、図 6-5 (A) に示すように、不純物として含まれる 15 族の原子は陽イオンになり集合した構造の中で固定されていますが、集合した構造の中に陽イオンの数と同数の電子が点在して自由に動き回ります。このように 15 族原子が不純物として含まれ、電子が過剰になっている

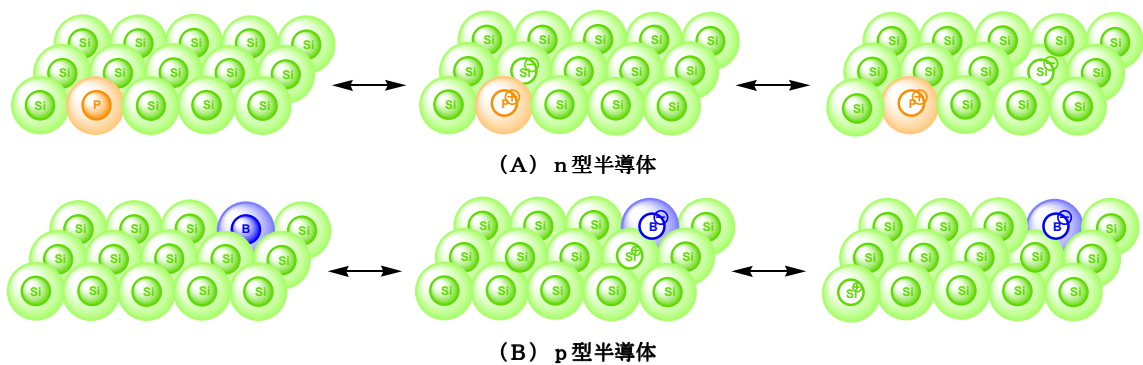


図6-5 半導体物質の模式図

14 族原子の集合した物質を n 型半導体と呼んでいます。

他方、13 族に属するホウ素やアルミニウムやガリウムは最外殻に 3 個しか電子を持っていません。最外殻に 4 個の電子を持つ 14 族の原子が規則正しく整列している結晶の中に少量の 13 族の原子が不純物として混ざりますと、その部分だけに電子が不足したままで集合した構造を保ちます。しかし、不足した部分に他の原子から電子が移動して不足部分を補充しますから、13 族の原子は 4 個の電子を持つことになり陰イオンとなります。同時に電子を供給した 14 族の原子は電子が不足しますから、陽イオンとなります。このように電子の不足した原子を正孔と呼んでいます。次々に電子が自由に移動してゆきますから正孔も次々に移動してゆきます。全体として図 6-5 (B) に示すように、不純物として含まれる 13 族の原子は陰イオンになり集合した構造の中で固定されていますが、集合した構造の中に陰イオンの数と同数の正孔が点在します。このように 13 族原子が不純物として含まれ、電子が不足して正孔が点在している 14 族原子の集合した物質を p 型半導体と呼んでいます。13 族原子の陰イオンと等しい数の正孔により電氣的に常に釣り合っていますから、p 型半導体の末端で正孔が電子を受け取って消滅しますと、別の所で電子を放出して正孔が作られます。結果として、正孔が電子を運ぶように p 型半導体の中を電流が流れます。

集合した構造の中で電子は極めて流動的に他の原子へ移動して過不足部分を解消しますから、n 型半導体では 15 族原子が 4 個の電子を持つことになり陽イオンとなり、同時に過剰の電子は集合した 14 族原子の塊の中を自由に動き回ります。他方、p 型半導体では 13 族原子が 4 個の電子を持つことになり陰イオンとなり、同時に電子を供給した 14 族の原子は電子が不足しますから陽イオンになり正孔として動き回ります。このとき、n 型半導体の 15 族原子も p 型半導体の 13 族原子も 14 族原子が相互作用しながら集合した構造の中に取り込まれていますから、自由に動くことができずそれぞれ正電荷と負電荷を持って固定されています。

このように過剰な電子を持つ n 型半導体と正孔を持つ p 型半導体を図 6-6 の模式図に示すように滑らかに接合しますと、当然接合界面を越えて n 型半導体部分から p 型半導体部分へ電子が移動できるようになり、p 型半導体部分で正孔の部分へ電子が移動して電荷を中和します。接合により界面を越えて電子が移動してしまいましたから、n 型半導体の部分では移動のできない 15 族原子の陽イオンが残り、p 型半導体の部分では移動のできない 13 族原子の陰イオンが残ります。結果として、界面を挟んで n 型半導体側の接合部分は正に帯電し、p 型半導体側の接合部分は負に帯電します。

n 型半導体部分に負の電極を p 型半導体部分に正の電極を付けて n 型半導体部分から電子を流しますと、接合界面を挟んで生じている電位差を中和するように 2 種の半導体の中を電子が移動して、p 型半導体に付けた電極から電子が流れ出ますから両電極間に電流が流れます。逆に、n 型半導体部分に正の電極を p 型半導体部分に負の電極を付けて電子を p 型半導体部分から n 型半導体部分へ流そうとしても、接合界面を挟んで n 型半導体側が正になるような電位差がありますから、電流は極めて流れ難くなっています。このように n

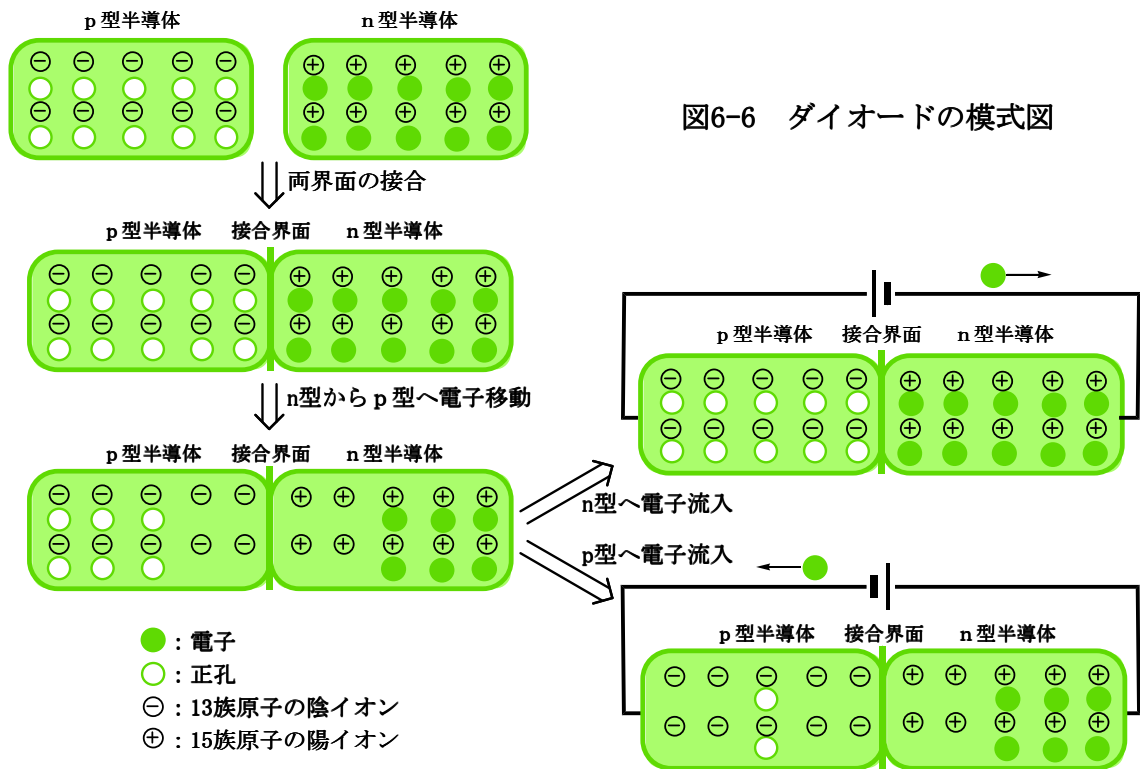


図6-6 ダイオードの模式図

p型半導体とn型半導体を接合した物質では、n型半導体部分からp型半導体部分へは電流が流れますが、反対方向には流れませんから、電流を一方方向にしか流さない整流作用を示します。常にn型半導体に付けた電極は陰極に、p型半導体に付けた電極は陽極になりますから、2つ(Di)の電極(Electrode)を持つものという意味でダイオード(Diode)と呼ばれて、広く電化製品を制御する心臓部に用いられています。

これらの半導体物質は不純物が含まれていると規則正しく整列した結晶構造をとることができず電気抵抗が大きくなりますから、通電して半導体の性質を利用するためには不純物が10ppt(1x10⁻⁹%)以下の極めて高い純度が要求されます。けい素は地殻中の岩石などの中に満遍なく多量(27.7%)に含まれる元素ですから極めて安価に原料の供給ができますが、高い純度まで精錬するためには高い技術と大量のエネルギーを要します。そのために原油価格の高騰と足並みを揃えるように半導体の素材となる金属けい素の価格も高騰します。例えば、2005年6月からの3年間に原油の価格が約2倍に跳ね上がりましたが、金属けい素もこの間に2倍以上高騰して、2008年6月には1t当たり\$170の価格で取引されている極めて高価な物質となっています。

動作や機能を制御する電化製品の心臓部に広く用いられるダイオードやトランジスタの素材は14族元素のケイ素やゲルマニウムですが、原子同士が大きな共有結合性の結合で結びついており、通電して半導体の性質を利用するためには不純物が10ppt(1x10⁻⁹%)以下の極めて高い純度が要求されます。これらのダイオードやトランジスタは15族元素をわずかに不純物として含むn型半導体と、13族元素をわずかに不純物として含むp型半

導体を組み合わせて構成されています。このように純粋なケイ素やゲルマニウムに含まれる不純物が 13 族元素か 15 族元素かそれ以外の元素かにより、半導体素子の性能を大きく左右します。あたかも**純粋**な金属の中に含まれる極めて少量の**不純物**が主役を演じているようです。

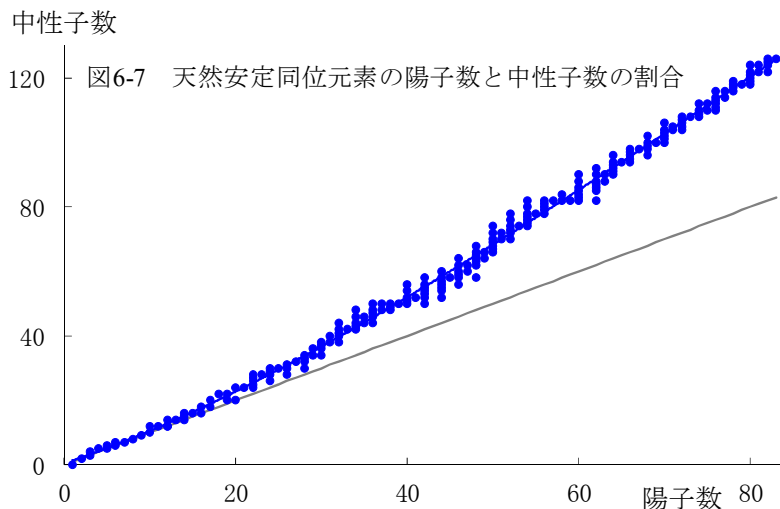
身の回りで出続ける放射線

地球上の全ての物質を構成している原子は原子核と電子で構成されていますが、原子核が正の電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子の強く引き付け合った塊となって中心に座り、負の電荷を持った電子が正の電荷を持つ陽子に静電引力で繋ぎ止められ、原子核の周囲を包み込むように動き回っています。陽子も中性子も電子も独立した微粒子ですからその数の組み合わせの異なる原子が無限に考えられますが、原子の中では陽子と電子は同数に存在し電荷を打ち消し合って原子自体は電荷を帯びていません。原子の性質は原子核の周囲に広く分布する電子の数に主として依存していますが、特に最も外側の軌道の形で原子の形と大きさがきまり、その最外殻電子の数と元素の性質の間に相関関係が見られます。そのため等しい数の陽子を持つ原子は中性子の数に関わらず同じ性質を示しますので元素と呼ばれています。中性子が陽子と同数か少し多く含まれている原子の存在が確認されており、同じ元素の中で中性子の数の異なる原子を互いに同位元素と呼んでいます。

物理学者や化学者は陽子数の異なる原子にそれぞれアルファベットの 1~2 文字の記号を割り当て、陽子と中性子の総数に相当する質量数をその記号の左に上付きの数字で示して同位元素まで表すようにしています。たとえば、天然に存在する水素原子の多くは陽子と電子が 1 つずつで中性子を含んでいませんから、 ^1H と表すことができます。また、海水の中にイオンの形で多く溶け込んでいる塩素には原子量 34.96885268 の ^{35}Cl と 36.96590259 の ^{37}Cl の 2 種の同位元素がそれぞれ 75.77% と 24.23% の割合で含まれています。これら塩素の同位元素は陽子と電子をそれぞれ 17 個ずつ含んでいますから、全く同じような性質を示しています。そのため、塩素の原子量は 2 種の同位元素の加重平均値で示すことが適当で、35.4527 と大きな端数を示しています。

電荷を打ち消すために陽子と電子の数は等しくなりますが、中性子の数の異なる同位元素の存在は無限に考えられます。しかし、原子核の中では中性子と陽子の間に働く引力のほかに電荷を持つ陽子同士の斥力も働きますから、陽子の数が 84 以上の元素では不安定で、如何なる環境でも放射線を出しながら一定の寿命を持って徐々に壊れてゆきます。また、原子核の中で陽子と中性子を結び付けている力が相対的に弱くなるため、自然界に安定に存在する元素の陽子と中性子の数の割合は図 6-7 に示すように 1~1.5 の範囲で一定しており、陽子に対して中性子の割合が極端に大きな同位元素も小さな同位元素も不安定で放射線を出しながら分解します。さらに陽子数が 93 以上の全ての元素は極めて寿命が短く、例えどこかで生成したとしても、きわめて短い年月で全て消滅してしまいます。このことから地球上で性質を知ることの出来る元素は 90 種類に限られています。

二人の性格のずれや些細な生活習慣の違いから生じる不平や不満が少しずつ積もり積もって精神的に不安定になり、二人を結び付け続けることができなくなるときに A 子さんと B 君の間に悲しい別れが訪れます。原子核の中で陽子と中性子を結び付けている力が相対的に弱くなるために、原子核が不安定になって分解するときの原子核 A の別れの反応は原子核 A が多ければどんどんと変化してゆき、少なければ変化する量も少なくなります。物質中の原子核 A の濃度を [A]、比例定数を反応速度定数 k としますと、原子核 A の別れの反応の速度 v は式 6-6 に示す時間 t に関する微分式で表されます。この式は別れの反応の速度が原子核 A の濃度のみに比例し、生成する種々の原子核の濃度には関係しないことを意味しています。



$$v = \frac{d[A]}{dt} = -k [A] \quad \text{式 6-6}$$

自動車の走る場合でも別れの反応の場合でも走行距離などの変化量は速度を時間で積分することにより求めることができますから、別れの反応の速度式 6-6 を時間 t で積分することにより変化量が式 6-7 のように表されます。ただし、反応が始まる直前の原子核 A の濃度を [A₀]、時間 t を経過した後の原子核 A の濃度を [A] とします。式 6-7 が変化量と時間 t の間の 1 次比例関係を表していますから、反応速度定数 k を比例定数から容易に求めることができます。反応の速さはこの反応速度定数 k で比較することができますが、感覚的に捉え難いために、しばしば式 6-7 に [A]=0.5 x [A₀] を代入した式 6-8 により、変化が半分進行するために要する時間 τ (半減期) で比較します。

$$\ln \frac{[A]}{[A_0]} = 2.3026 \times \log \frac{[A]}{[A_0]} = -k_A t \quad \text{式 6-7}$$

$$\tau = \ln(0.5) \times \left(-\frac{1}{k_A} \right) = \frac{0.6931}{k_A} \quad \text{式 6-8}$$

陽子と中性子が非常に大きなエネルギーで結びついているために、通常の生活環境の温度変化にはほとんど無関係に原子核は式 6-7 に従った単純な別れの反応で分解してゆきます。不安定な原子核は半減期の間に半減しその崩壊した原子核の数に対応した放射線を出しますが、分解する変化は半減期の 10 倍の時間では半分になる変化を 10 回繰り返すことになり、不安定な原子核は $(0.5)^{10}$ まで減少しますから、その時間内の分解量は $1 - (0.5)^{10}$ となります。これらの値を計算しますと不安

表 6-6 U の核反応由来と天然の放射性元素

核種	半減期	核種	半減期
^3H	12.46y	^{131}I	8.06d
^{14}C	5570y	^{139}I	2.7s
^{40}K	$1.2 \times 10^9\text{y}$	^{133}Xe	5.27d
^{87}Kr	78m	^{134}Cs	2.3y
^{92}Kr	3.0s	^{137}Cs	30y
^{90}Sr	28y	^{141}Ba	18m
^{95}Y	10.5m	^{147}Pm	2.6y
^{93}Zr	$9.5 \times 10^5\text{y}$	^{235}U	$7.13 \times 10^8\text{y}$
^{99}Tc	$2.12 \times 10^5\text{y}$	^{238}U	$4.51 \times 10^9\text{y}$
^{129}I	$1.72 \times 10^7\text{y}$	^{239}Pu	24360y

定な原子核は約 0.1% しか残らないことになり、その原子核が 99.9% まで壊れてしまう原子核の寿命に相当します。大きな陽子数の元素や陽子数に比べて多くの中性子を持つ同位元素には、比較的安定なものから極端に不安定なものまでありますから、変化の速さを半減期で表して原子核の安定性とその崩壊した原子核の数に対応して出す放射線の強さを比較しています。表 6-6 には緑色で色分けした身近に存在する天然放射性同位元素のほかに、原子爆弾や原子力発電に関係する ^{235}U 由来の放射性同位元素を赤色で、 ^{238}U の核反応由来の放射性同位元素を黄色で色分けしてそれらの半減期を抜粋して掲げました。

高電圧の電極を中央に置く管に封入したアルゴンなどの不活性ガスが放射線により電離する現象を利用した Geiger-Müller 計数管 (GM 計数管) により放射線の数容易に計測できますから、物質が 1 秒間に出す放射線数をベクレル (Bq) という単位で表します。崩壊する原子核の個数や放射線の強さは式 6-7 のように物質の量に比例しますから、液体や溶液の放射線の強さは Bq/L で、金属など物質の塊のときは Bq/g あるいは Bq/mol で表されます。1mol の物質に含まれる原子の数が Avogadro 定数の $6.022 \times 10^{23}\text{mol}^{-1}$ とするモルの概念に従えば、1mol の不安定な原子核は半減期の時間で 0.5mol 分解して、0.5mol に相当する数 3.011×10^{23} 個の放射線を出すと考えることが出来ます。たとえば、半減期 4.51×10^9 年の ^{238}U は $2.94 \times 10^6\text{Bq/mol}$ あるいは $1.23 \times 10^4\text{Bq/g}$ の放射線を、また半減期 12.46 年の ^3H は $1.06 \times 10^{15}\text{Bq/mol}$ あるいは $3.54 \times 10^{14}\text{Bq/g}$ の放射線を出していると算出されます。このように放射線の強さが半減期に反比例するように変化しますから、 ^3H のように半減期の短い放射性同位元素は多くの放射線を出しますが短時間に消滅してしまいますし、 ^{238}U のように長い半減期の放射性同位元素は比較的少なながら極めて長時間にわたり放射線を出し続けます。放射壊変をする不安定な原子核には太く短い一生も細く長い一生もあります。

天然に存在するカリウムには 1.2×10^9 年の半減期を持つ放射性同位元素 ^{40}K が 0.0119% 含まれていますから、原子量 39.0983 のカリウムは 33.6Bq/g の放射線を常に発しています。焚火をしたときに残る木灰 (Ash) 中の水に溶ける成分を鍋 (Pot) で煮詰めて作っていたために英語では Potassium と呼ばれるカリウムは、植物の根の発育に多量に必要なために、作物を栽培する上で窒素やリン酸とともに与えるべき主要な肥料です。カリ肥料には木灰と塩化カリウムと硫酸カリウムが主に用いられていますが、塩化カリウムと硫酸カリウム中のカリウムの含有量はそれぞれ 52% と 45% ですから、その放射能の強さはそれぞれ $1.75 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ と $1.51 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ と計算されます。

不純物として 0.0119% の放射性同位元素 ^{40}K を含んだカリウムが海水の中には 0.038% 含まれていますから、1t の海水は放射性同位元素 ^{40}K を 0.046g 含んでおり、 $1.3 \times 10^4 \text{Bq}$ の放射線を常に出しています。1t は 1000000g ですから、海水に含まれる放射性同位元素 ^{40}K の重量濃度は 46ppb と換算されますが、その放射線量は $1.3 \times 10^4 \text{Bq}$ と大きな値として計測できます。海岸に近い地域では海水中のカリウムが染み込んでいますから、比較的放射能の高い地域と考えられます。

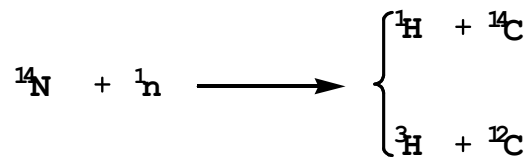
種々の岩石の中で花崗岩には比較的高い 4.53% の濃度でカリウムが含まれていますので、1t の花崗岩は放射性同位元素 ^{40}K を 5.4g 含んでおり、 $1.5 \times 10^6 \text{Bq}$ の放射線を常に出しています。この花崗岩が神戸市の御影地区から切り出されて御影石と呼ばれて多くの神社仏閣や城郭の重要な石材に使われてきましたが、神戸の北に横たわる六甲山はすべて花崗岩でできています。文部科学省が発表する放射能モニタリング情報によりますと、著者の住むさいたま市は富士山や浅間山の噴火に由来する火山性の土砂が堆積した土地ですから、福島原子力発電所の事故後の 2012 年 1 月の環境放射能の月平均値は $0.053 \mu\text{Sv/h}$ でしたが、神戸市の同じ時期の月平均値が $0.068 \mu\text{Sv/h}$ で、花崗岩の露頭の影響を受けているために神戸市が比較的放射能の高い土地と考えられます。

このように地域により強弱の差がありますが、地球上の到る所であらゆる物質から常に放射線が観測されます。測定時間を 1 秒より延長することは可能ですから、**純粋**の物質に含まれる 1ppb (1×10^{-7} %) 以下の量の**不純物**の ^{40}K が出す放射線でも測定することができますが、 ^3H や ^{14}C や ^{40}K などの自然環境に広く存在する放射性同位元素に由来する放射線も同時に測定されてしまいますから、これらの環境放射線が測定値の誤差として**不純物**の ^{40}K の検出を妨害してしまいます。

内と外からの放射線に曝されている身体

紫外線や可視光線や赤外線などの太陽光と呼ばれる電磁波と共に、太陽からは宇宙線と呼ばれる電子や陽子や中性子などの多くの粒子が飛んできます。中性子は電荷を持たない小さな粒子ですから、地球の持つ地磁気の影響も原子核の周囲を囲んでいる電子の影響も全く受けずに直進して原子核に衝突します。主に窒素ガスからなる大気が地球を取り巻いていますから、中性子 7 個を持つ窒素の原子核 (^{14}N) が式 6-9 に示すように宇宙線の中性

子 (^1_0n) と衝突して、質量の同じような ^1_1H や ^3_1H などの粒子を玉突きのように $^{14}_7\text{N}$ の原子核から弾き飛ばします。結果として陽子の数が 1 個少ない $^{14}_6\text{C}$ や $^{12}_6\text{C}$ などの炭素の同位元素が取り残されます。ここで、 $^{14}_7\text{N}$ に 1 個



式6-9 宇宙線と空気の反応

の中性子が取り込まれますから合計 8 個の中性子がこの核分裂反応系に関与することになりますが、破片として中性子を放出しませんから、連鎖反応は起こりません。太陽は地球が誕生する以前から現在に至るまで高い温度で燃え続けており、太陽光と共に常に一定量の中性子を宇宙線として地球にも送り続けています。しかも地球の周囲を大気となって窒素ガスが取り巻いていますから、 $^{14}_7\text{N}$ の中性子による核分裂反応が定常的に起こり、一定の量の ^3_1H と $^{14}_6\text{C}$ が定常的に生成し続けます。

自然界では水素は中性子を持たない ^1_1H が、炭素は中性子を 6 個持つ $^{12}_6\text{C}$ がそれぞれ同位元素の大部分を占めています。しかし、水素には ^1_1H のほかに中性子を 1 個持った重水素（デュテリウム、 ^2_1H ）と 2 個持った三重水素（トリチウム、 ^3_1H ）の 2 種類が存在しますし、炭素には $^{12}_6\text{C}$ のほかに中性子 7 個を持つ $^{13}_6\text{C}$ と中性子 8 個を持つ $^{14}_6\text{C}$ の 2 種類の同位元素が存在します。表 6-6 に掲げたように、水素の 3 種類の同位元素のうちで ^3_1H は陽子に対する中性子の割合が大きいため不安定で放射線を出しながら半減期 12.46 年で分解して ^3_2He に変化してしまいます。 ^3_1H と同じように陽子に対する中性子の割合が大きいため、 $^{14}_6\text{C}$ も不安定ですから半減期 5570 年で放射線を出しながら $^{14}_7\text{N}$ に変化します。このように ^3_1H と $^{14}_6\text{C}$ は太陽からの宇宙線により一定の速度で定常的に生成し、一定の半減期で分解し減少してゆきますから長い年月の間に平衡状態に達します。地球の上空と地上の間を水と二酸化炭素は循環して常時交換をしていますから、地球上のあらゆるところで水と二酸化炭素中の ^3_1H の同位元素比 $1 \times 10^{-16}\%$ と $^{14}_6\text{C}$ の同位元素比 $1.2 \times 10^{-10}\%$ を一定にそれぞれ保ちます。このように平衡に達した水の出す放射能の強さは ^3_1H により $5.90 \times 10^{-5} \text{Bq/g}$ ($2.12 \times 10^{-3} \text{Bq/mol}$) ですし、二酸化炭素に含まれる $^{14}_6\text{C}$ による放射能の強さは $6.48 \times 10^{-2} \text{Bq/g}$ (2.85Bq/mol) と計算されます。

生きている植物は大気中の二酸化炭素と地中の水を吸収してブドウ糖を光合成し、さらにこのブドウ糖をでんぷんやセルロースなどに变化させて植物の根や幹や葉や花を形作っています。そのため生物の組織は主に水素と炭素を主体とする物質で構成されていますが、これらの組織は新陳代謝をしていますから、大気中の二酸化炭素や雨水と同じ同位元素比で ^3_1H と $^{14}_6\text{C}$ が含まれています。さらに、地中に含まれるカリウムなどのミネラルは根から吸収して植物の組織の中に取り込まれています。草食動物はこれらの植物を食べていますし、肉食動物はこの草食動物を食べていますから、全ての生物はみな大気中の二酸化炭素や雨水と同じ同位元素比の ^3_1H と $^{14}_6\text{C}$ を含む蛋白質や脂肪で構成されていますし、地中に含まれるカリウムと同じ同位元素比の $^{40}_{19}\text{K}$ を含んでいます。表 6-7 には人間の身体を構成している主な元素の組成を掲げましたが、人間も生物の一種にすぎませんから含まれる水素

と炭素とカリウムは同じ同位元素比の³Hと¹⁴Cと⁴⁰Kを含んでいます。

水素と炭素とカリウムの放射同位元素比と半減期から算出される天然放射能の強さと人体の元素組成から、人間の体内で常に発せられ続けている放射線量を表 6-7 に併せて掲げました。人間の平均体重を 60kg とすれば、一人の人間が体内から出す放射線量は $1.0 \times 10^4 \text{Bq/man}$ と概算できます。さらに、前節で述べたようにカリウムは地球上のあらゆるところに万遍なく分布していますが、不純物として放射性同位元素 ⁴⁰K を含んでいますから、太古の昔から地球上の到る所で弱い放射線を出し続けています。

4.5 億年前までは生物は海中に棲息していましたから、海水中に含まれる ⁴⁰K により $1.3 \times 10^4 \text{Bq/t}$ の放射線に常に曝されていました。人間に限らずこのように地球上に棲息するあらゆる生物は身体の内からも外からも発する弱い放射線に常に曝されて進化してきましたから、放射線に対する防御機構が生体組織中に用意されています。

このように地球上に棲息するあらゆる生物は新陳代謝により一定の弱い放射線を出し続けていますが、これらの生物が死に新陳代謝が止まりますと、生物の身体を構成する水素と炭素はこの生物の遺骸には新たに補給されなくなりますから、³H と ¹⁴C はそれぞれ 12.46 年と 5570 年の半減期で減少してゆきます。法隆寺の金堂に使われている檜の材木に含まれる ³H の同位元素比を調べても ³H の寿命を過ぎていますから何も情報を得られませんが、¹⁴C の同位元素比を調べれば大気中の割合より若干少なくなっています。同じようにツタンカーメンやマンモスの死んだ年代も推測することが出来ますから、古生物学や考古学などの研究対象になる数万年間を調べる化学時計にすることが出来ます。

水素と酸素でできている水は上空から雨になって地上に降り、山を流れ下って海に注ぎ、海で蒸発して雲になり、再び雨になって地上に還ります。この間に上空で生成した ³H も常に取り込まれますから、雨に含まれる ³H の割合は一定しています。しかし、雨が地面に吸い込まれて地下水となり、長い年月をかけて移動する場合には短時間の水の循環から切り離されます。当然、水に含まれる ³H が新たに補給されなくなりますから、12.39 年の時間経過とともに半減してしまいます。井戸から汲み上げた水に含まれる ³H の同位元素比を測定すれば、その水が何年間地下に留まっていたか逆算できますから、地下水の移動の様子を時間的に調べる化学時計にすることが出来ます。また、降り積もった雪が氷となって固

表 6-7 人体の元素組成と放射能の強さ

元素	天然放射能 Bq/Kg	元素組成 %	体内放射能 Bq/Kg
O		64.60	0
C	238	18.10	43.08
H	1.06	9.98	0.11
N		3.10	0
Ca		1.96	0
P		1.08	0
Cl		0.45	0
K	33600	0.37	124.32
S		0.25	0
Na		0.11	0
Mg		0.04	0

まったままになる場合にも水の循環から取り残されますから、 ^3H の同位元素比の減少変化を用いる化学時計によりその氷が凍結した時間が逆算できます。

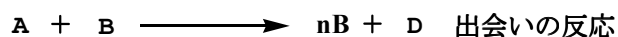
しかし降り積もった雪が結晶化した南極の氷やカナディアンロッキーの大氷河の氷は極めて長時間の間にゆっくりと移動していますから、その移動速度と比較して短い半減期を持つ ^3H はあまり良い精度の化学時計にすることが出来ませんが、積雪の折に空気中から取り込まれた二酸化炭素の ^{14}C が南極の氷やカナディアンロッキーの大氷河の氷の年代測定に良い精度の化学時計として働きます。地球の表面の約70%は多くのカリウムを含む海の水で覆われていますから、万物を構成する物質には水素と炭素とカリウムの原子が多くの場合に満遍なく含まれています。そのため含まれている ^3H と ^{14}C と ^{40}K の同位元素比をそれぞれ調べるのが万物の変化を追跡する化学時計になりますが、それらの半減期が大きく異なりますから、万物の変化の速さにより時計に用いる同位元素は異なってきます。

太陽からの宇宙線による不安定な原子核の生成反応とその原子核の分解反応による平衡状態にある ^3H と ^{14}C の同位元素比はそれぞれ $1 \times 10^{-16}\%$ (1刹那、1 part per quintillion)と $1.2 \times 10^{-10}\%$ (1.2 漠、1.2ppt) ですから、**純粋**の ^1H と ^{12}C に対して**不純物**のこれらの同位元素は極めてわずかな量に過ぎませんが、十分に測定可能な放射能として検出できます。このように極めて少量の放射線量でも比較的正確に測定できますから、他の多くの測定法と比較して極めて高い精度と感度で**不純物**の存在を確認でき、その変化から考古学的あるいは地質学的に地球上の変化を調べる化学時計にも利用できます。逆にある程度の弱い放射線に生物の身体は常に曝されて進化してきましたから、放射線に対する防御機構が生体組織中に用意されており、 $1.0 \times 10^4 \text{Bq}$ 程度の大きな数字で表される放射線でも無視しうる値と考えることができます。

原爆と原発は一字違いの同じ仲間

A子さんとB君はそれぞれ広い東京にわびしく暮らしていましたが、二人は仕事の都合で同じ電車に乗るようになり毎日の出会いが始まりました。いつの日からかB君はA子さんに惹かれるようになりました。B君の情熱が通じて、ついに二人は幸せな恋人として結ばれることになりました。この恋愛物語を振り返ってみると、A子さんもB君もわびしい生活をしてきたためかなり精神的に不安定で恋人の欲しい状態にありました。また、偶然に二人が度々出会う機会に恵まれました。さらに、B君の情熱的なエネルギーがA子さんの心を動かし二人が幸せに結ばれてD坊が生まれました。

万物の変化における出会いの反応もこの恋愛物語と極めてよく似ています。A子さんとB君が電車の中で出会ったように、式6-10に示すように基質Aに対して基質Bの関与する



式6-10 2種の基本的な反応

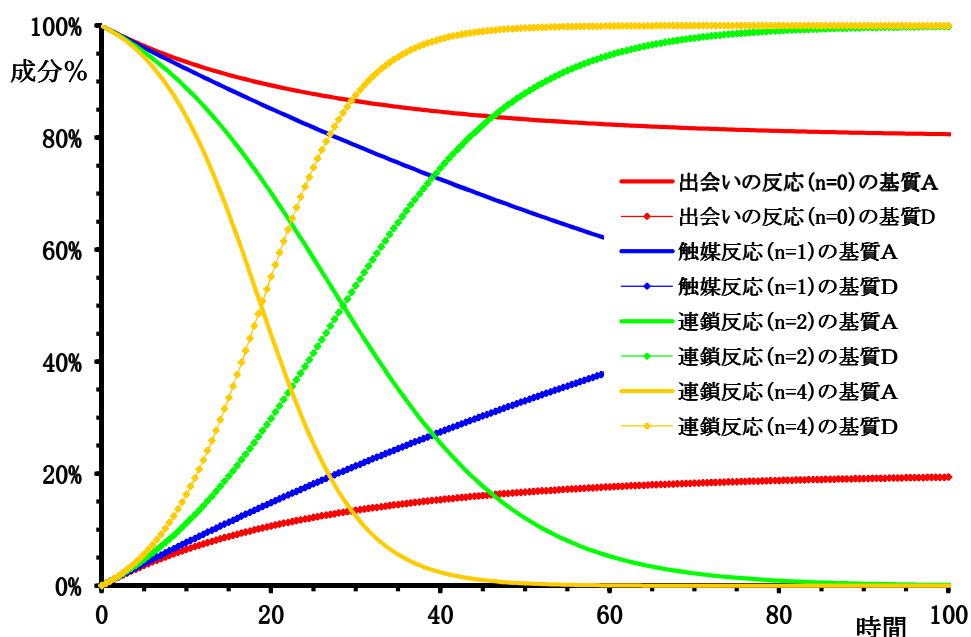
る出会いの反応においては互いに衝突する機会が多いほど反応が速やかに進行します。こ

の2種の基質がそれぞれ多ければ多いほど、その衝突する機会は多くなります。ある体積の中の基質の量を濃度と呼んでいます。出会いの反応の速度はそれぞれ基質の濃度の積に比例します。自動車の走る速度でも出会いの反応の速度でも、速度は一瞬 (dt) の間の変化量の大きさですから、速度は変化量を時間で微分する式で表されます。基質 A と基質 B の濃度をそれぞれ [A] と [B] とし、比例定数を反応速度定数 k_{AB} としますと、このような出会いの反応の速度 v_A は式 6-11 に示す微分式で表されます。この式は基質 A と基質 B のそれぞれの濃度にも比例し、結果として生じる基質 D の濃度には関係しないことを意味しています。

$$v_A = \frac{d[A]}{dt} = -k_{AB} [A][B] \quad \text{式 6-11}$$

式 6-10 に示す反応において、基質 B (n=0) が生成しない単純な出会いの反応では、反応の進行と共に次第に基質 B が減少しますから、式 6-11 の速度で基質 D が生成します。関与する基質 B と同量の基質 B (n=1) が生成する場合には、反応の進行に関わらず基質 B の濃度が変化しませんから、基質 B は触媒として働き基質 A と基質 B の出会いの反応による基質 D の生成が加速されます。さらに、このような出会いの反応に関与する基質 B よりも多くの基質 B (n>1) が生成する場合には、反応の進行に伴い基質 B の濃度が増加しますから、反応が鼠算式に加速しますので連鎖反応と呼ばれています。反応が始まる直前の基質 A に対する基質 B の濃度を 20% とするとき、単純な出会いの反応 (n=0) を赤色線で、触媒反応 (n=1) を青色線で、連鎖反応 (n=2 と n=4) の基質 A と基質 D の時間変化をそれぞれ緑色線と黄色線で図 6-8 にまとめました。これらの時間変化の曲線から分かるように、

図6-8 連鎖反応の時間変化

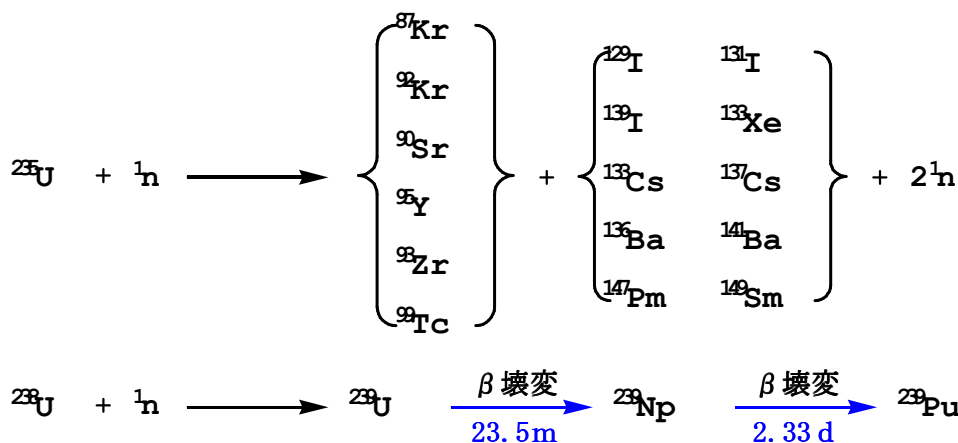


反応の初期には基質 B の濃度があまり高くありませんから、連鎖反応 ($n>1$) の基質 A と基質 D の変化も小さく誘導期と呼ばれています。しかし、基質 B が臨界点と呼ばれる一定の濃度に達しますと、爆発的に反応の速度が増加して急速に反応が完結してしまいます。

静電的斥力に打ち勝って強く結び付き陽子と中性子が原子核を構成していますが、陽子の数が 84 以上の元素では静電的斥力が強くなり、陽子と中性子を結び付ける力が相対的に弱くなりますから、原子核は不安定になり徐々に壊れてゆきます。また、自然界に存在する元素の陽子と中性子の数の割合は 1~1.5 の範囲に限られており、陽子に対して中性子の割合がこの範囲から大きく外れた同位元素も不安定で壊れてしまいます。このように陽子と中性子の数が適当でない原子核は分解して安定な原子核に変化して行きます。また、中性子のような粒子が原子核に衝突するときには、その衝撃により原子核の不安定要素を一気に発散するように核分裂し、原子核は大きなエネルギーの発散を伴い多くの破片に壊れます。

この核分裂により発散する破片の中に中性子を含まない ($n=0$) 時には、1 個の中性子が衝突して壊れる原子核は 1 個に過ぎない単純な出会いの反応ですから、大量の中性子が衝突しない限り多くの原子核の核分裂は起こりません。しかし、この破片の中に複数の中性子が含まれる時には、式 6-10 の $n>1$ に相当しますから、1 個の中性子が原子核に衝突すると複数の中性子が破片となり、さらにこの複数の中性子により複数の原子核が核分裂を引き起こすことになり、鼠算式に反応が加速する連鎖反応になります。結局、不安定な原子核を持つ原子がすべて核分裂するまで連鎖的に続きますから、膨大なエネルギーを放出することになります。このような不安定な原子核を持つ原子を爆弾に詰めて、中性子を発生させる誘発装置を付ければ原子爆弾の完成です。

1945 年 8 月に広島に投下された原子爆弾は質量数 235 のウラン (^{235}U) に中性子発生装置を付けたものでした。この爆弾で使用された ^{235}U は式 6-12 に示すように中性子の衝突により ^{87}Kr 、 ^{92}Kr 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Y 、 ^{93}Zr 、 ^{99}Tc などの質量数 80~100 の元素と ^{129}I 、 ^{131}I 、 ^{139}I 、 ^{133}Xe 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{141}Ba 、 ^{147}Pm などの質量数 125~150 の元素に 2 分しますが、同時に半端な破片として 2~3 個の中性子も生じます。この 2~3 個の中性子が近くに存在する ^{235}U とさら



式6-12 ウランと中性子との反応

なる核分裂を引き起こしますから、爆弾の中に装填された全ての ^{235}U が連鎖的に一瞬にして核分裂し、大きなエネルギーの発散を伴い多くの破片の元素を飛散させながら爆発します。

陽子を92個含んでいますから ^{238}U の原子核も不安定ですが、この ^{238}U に中性子が衝突しても核分裂することなくその原子核に飲み込まれてしまい、式6-12に示すように不安定な ^{239}U に変化します。しかしこのウランの同位元素は極めて不安定で、2度の分解が続けて進行して比較的長い半減期24360年を持つ質量数239のプルトニウム(^{239}Pu)を生成します。この一連の反応では、超ウラン元素と呼ばれるウランよりも陽子数の大きなネプツニウム(^{239}Np)や ^{239}Pu などの元素が人工的に生成してきますが、破片として中性子を二次的に放出することもなく外部から衝突した中性子を飲み込んでしまいから、連鎖的な反応が起こりません。天然に産するウランの ^{235}U と ^{238}U が競争的な出会いの反応により中性子と衝突しても、 ^{235}U の天然存在量は極めて少量で ^{238}U が大部分を占めていますから、外部からの中性子をすべて ^{238}U が飲み込んでしまい ^{235}U の核分裂はほとんど進行しません。そのため原子爆弾を作るためには ^{235}U を多く含むウランを調製しなければなりません。しかし、これらの同位元素は化学的にほとんど同じ性質を持っており、同位元素の分離や濃縮には高い分離技術を要します。

単純な出会いの反応で ^{235}U と中性子が衝突すれば核分裂しますが、同時に半端な破片として2~3個の中性子が生じ、この中性子が近くに存在する ^{235}U に衝突して連鎖的な出会いの反応を引き起こして膨大なエネルギーの発散を伴い爆発します。 ^{235}U と中性子の衝突により2次的に生じる中性子を他の物質に飲み込ませてしまえば、連鎖的な出会いの反応が起こりませんから、膨大なエネルギーの発散も爆発も起こりません。他の物質を用いて2次的に生じる中性子を飲み込み $n=1$ になるように調節ができれば、爆発を抑えながら膨大なエネルギーを定常的に発生させる触媒反応にできますから、大電力の発電が可能になります。天然存在比の高い ^1H 、 ^{10}B 、 ^{23}Na 、 ^{24}Mg 、 ^{27}Al 、 ^{28}Si 、 ^{35}Cl 、などの元素は効率的に中性子を飲み込む性質を持っていますが、中でも ^1H を多く含む水は利用し易い物質ですから原子力発電の中性子の調節に用いられています。チェルノブイリの原子力発電所では、液状の水と黒鉛を用いて中性子を飲み込む量の調節をしていましたが、温度が上がりすぎて水が水蒸気になってしまい、中性子の調節ができなくなって原子爆弾のように爆発してしまいました。福島原子力発電所では水蒸気を用いて中性子の調節をしていましたが、水蒸気の発生用の水の供給が地震により止まってしまい、原子炉の調節機能が停止して爆発寸前の危険な状態まで陥りました。

このように原子爆弾でも原子力発電所でも、 ^{235}U と中性子の衝突により起こる核分裂反応で発生する莫大な熱エネルギーを利用していますが、同時に表6-6に掲げるような多くの不安定な原子核を持つ元素を生じます。定常運転時の原子力発電所ではこのような不安定な原子核を持つ物質は反応容器の中に閉じ込められて安全な状態に保管されていますが、事故が起こりますと原子爆弾と同じように核分裂による多くの破片の元素が撒き散らされます。

不安定な元素の寿命が半減期の 10 倍程度ですから、半減期の短い破片の元素は短時間に消滅してしまいます。⁹³Zr や ⁹⁹Tc や ¹⁴⁷Pm の性質は人間の身体を構成している元素の性質と似ていませんから、ほとんど体内に取り込まれることはありません。

人間の体内ではカルシウムの化合物が骨を形成していますし、ナトリウムイオンとカリウムイオンによるイオン濃度の拮抗で細胞内の圧力均衡や神経伝達を司っていますから、表 6-8 に示す 4 種の金属イオンがミネラルとして人間の体内に主に含まれています。原子爆弾や原子力発電所で利用される ²³⁵U の核分裂反応で生じる ⁹⁰Sr と ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs はストロンチウムとセシウムの放射性同位元素ですが、周期律表上でストロンチウムはカルシウムの下に、セシウムはカリウムの下に位置する元素ですから、それぞれ互いに類似した化学的挙動を示します。人体にとって極めて重要な役割を果たしているカルシウムやカリウムの摂取が不足しますと、本来全く体内に含まれていないストロンチウムやセシウムが代用品として骨や細胞などの中に摂取されてしまいます。原子爆弾や原子力発電の事故で拡散した ⁹⁰Sr や ¹³⁴Cs や ¹³⁷Cs はストロンチウムやセシウムの放射性同位元素ですから、カルシウムやカリウムの代用品として摂取され体内に留まれば内部被爆し、発癌などの放射線障害を引き起こす危険性を持っています。この危険を除外するためにはカルシウムやカリウムを十分に摂取することが肝要になります。ストロンチウムやセシウムは化学的に非常に類似した性質を示すためにそれぞれ純粋なカルシウムやカリウムの不純物として代用品の働きをします。

表 6-8 体内のミネラル

元素	成分比(%)
Ca	1.96
K	0.37
Na	0.11
Mg	0.04
Al	Trace
Si	Trace
Fe	Trace

甲状腺に蓄積し易いヨウ素の放射性同位元素

人間の頸の前面にある甲状腺はチロキシンとトリヨードサイロニンの 2 種の甲状腺ホルモンを分泌し、全身の細胞に作用してその代謝を促す働きをしていますから、成長期にある青少年にとっては特に重要な内分泌器官です。この 2 種の甲状腺ホルモンは図 6-9 に示すような構造のアミノ酸で海草などの食物や飲料水などから摂取したヨウ素と必須アミノ酸のチロシンから常に体内で生合成されています。そのためヨウ素は甲状腺に偏在し易く人間にとって少量ながら欠くことのできない極めて重要な元素です。その天然に存在するヨウ素の同位元素は安定な ¹²⁷I に限られていますから、通常は甲状腺ホルモンに含まれるヨウ素も ¹²⁷I に限られています。124~139 の質量数を持つ不安定な 15 種類の放射性同位元素が知られており、¹²⁷I と全く同じようなヨウ素の性質や化学的挙動を示します。

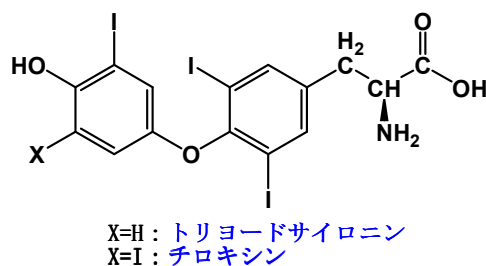


図6-9 甲状腺ホルモンの構造

1986年のチェルノブイリ原子力発電所の事故では、ウランの核分裂反応で発生する¹³¹Iが発電所の周囲ばかりでなく欧州各地に拡散しましたし、2011年の福島原子力発電所の事故では事故後間もなく、¹³¹Iが東日本一帯に拡散し東京都の水道水にも微量ながら検出されました。¹³¹Iも半減期8.06日でβ線を発しながら分解するヨウ素の放射性同位元素で、人間などの生物に対しても¹²⁷Iと全く同じような元素の性質や化学的挙動を示します。拡散した¹³¹Iは食物や飲料水とともに体内に取り込まれ、甲状腺ホルモンの中に凝縮されます。極少量といえども甲状腺に凝集した¹³¹Iから発せられるβ線により甲状腺が損傷を受けますから、発がん率が飛躍的に増大します。特に成長期にある幼児や青少年は甲状腺の活動が活発ですから甲状腺に多くの¹³¹Iが蓄積され易く、成長を司る器官が放射線障害を引き起こし悲惨な結果をもたらす極めて憂慮すべき事態になります。

全ての生物の組織は日々新陳代謝を繰り返して次第に成長したり更新したりしますが、甲状腺ホルモンも新陳代謝しますから、新しく摂取吸収されたヨウ素によりこのホルモンが生成され、全身の組織の新陳代謝を促した後に排泄されます。結果として新しいヨウ素を吸収して古いヨウ素を排泄する新陳代謝が繰り返されます。放射性同位元素を含まないヨウ化カリウムを主成分とするヨウ素剤を服用しますと、必要以上に¹²⁷Iが体内に吸収され、体内に取り込まれている放射性同位元素の¹³¹Iは希釈され、過剰の¹²⁷Iとともに体外に排出されます。ヨウ素剤は比較的副作用の少ない医薬品ですから、福島第1原子力発電所の事故の後に¹³¹Iの放射障害の危険が憂慮された地域で、体内に吸収された¹³¹Iを身体の外に排出するために多く服用されました。因みに、2011年3月14日以降には放射性物質の重大な漏洩や¹³¹Iによる放射線障害の報告が幸いなままに、半減期の10倍以上の時間が経過しましたから、現在では飛散した¹³¹Iはすでに消滅してしまっていると考えられます。

原子爆弾や原子力発電で発生する¹³¹Iはヨウ素の人為的な不純物ですが、放射能を持っているために発癌などの放射線障害を引き起こす危険性を持っています。¹³¹Iを含まない天然存在のヨウ素を大量に服用して¹³¹Iによる障害を抑えるこの方法は、純粋な物質で希釈して不純物の影響を取り除く希釈法です。