

## 放射線と放射性物質（その2） 原子と分子

2015/02/10

解説

原子力利用について

二瓶 啓



国際環境経済研究所主席研究員

(これまでの解説は、[「放射線と放射性物質（その1） 原子と分子」](#)をご覧ください)

### 3. 原子核と放射能

ところが、安定な原子核から構成されているはずの自然界に、極めて量は少ないが不安定な原子核が定常的に存在する。その成り立ちに違いがあるので二つに分けて説明する。第一のグループは、遠くの天体から飛来する高エネルギー粒子が大気中の窒素、酸素、アルゴン原子などと衝突して定常的に生成している放射性物質で、代表格は窒素からできる炭素 14 である。高エネルギー粒子の核反応により副次的・連鎖的に生成する素粒子やガンマ線が宇宙線として地上に降り注いでいる。前述の放射性水素トリチウムも宇宙線の働きにより定常的に生成している。

もう一つのグループは、長寿命のため宇宙創成以来崩壊しないで残ってきたカリウム 40 や、アクチニウム、トリウム、ウランなどの重い原子核が段階的に放射線を出しながら徐々に変化し安定な鉛あるいはビスマスの核になるまで、放射壊変系列という過程で生成している、ラドン、ラジウムなどである。壊変および自然の放射線量については後述する。

これらの放射性物質は放射線を出しながら安定な他の原子核に変わる。例えば炭素 14 は原子核から電子を放出してプラス電荷が一つ増え窒素に戻るが、戻るまでに数千年の寿命がある。この寿命を半減期、放射性物質が半分になるまでの時間で表している。

なお、自然を構成する元素が安定だといっても、地球の 46 億年 ( $4.6 \times 10^9$  年) の歴史の中で崩壊していないという意味でありいずれ壊れるという。最も安定な陽子 (水素の原子核) でも崩壊するとされ、小柴昌俊博士のノーベル物理学賞受賞の業績、ニュートリノ発見で有名なスーパー・カミオカンデで観測中であるが、まだ確認されていないことから半減期は 10 満年 ( $10^{33}$  年!) 以上との話である。いずれにせよ人間の寿命に比べたら全く意味はない。心配はそれこそ杞憂というものである。

キュリー夫人 (Maria Skłodowska-Curie) によるラジウム発見以来、多くの科学者の研究成果によって原子核物理学が発達し、近年人工放射性物質が意図的、非意図的に作られるようになった。原子爆弾や原子炉内の核分裂で生成する原子核のほとんどは、それぞれの原子の安定同位体の質量数からずれていて不安定であり、例えばセシウム 137 は核から電子 (ベータ線) とそれに伴うエネルギー (ガンマ線) を放出し、安定なバリウムの原子核になる。これを放射性崩壊、壊変という。質量数の大きな原子には、ヘリウムの原子核を放出するアルファ崩壊 ( $\alpha$ 壊変) を起こす原子がある。

また、一部の大きな質量数の原子核はもともと安定ではないが、ウランのうち質量数が 235 および 233、トリウム、プルトニウム 239 の 4 種の核が核分裂を起こす。これらを核燃料と呼んでいる。

これらの原子核に低速の中性子（分子の熱運動程度の速度で動いている中性子なので熱中性子という）を吸収させると、原子核がさらに不安定になって分裂し、2 個程度の破片になるとともに大量のエネルギーを放出する。1 個の中性子により分裂する原子核 1 個から 2~3 個の熱中性子が放出されるので、周囲に同じ種類の原子核があると次々に連鎖的に分裂を始め爆発する。これを連鎖反応という。ガボン共和国のウラン鉱山で 20 億年前に自発核分裂を起こした痕跡が見ついている。ウラン 235 がある程度の濃度になると自然界でも核分裂が起きることを示している。

この連鎖反応を利用したのが濃縮ウランやプルトニウムを原料とする原子爆弾である。連鎖的に分裂が始まることを臨界という。99 年 9 月に東海村 JCO で 2 名の死者を出した臨界事故は、濃縮した核燃料溶液が臨界を起こす量になってしまっただけ起きた事故である。

臨界を制御することにより連続して安定的に核分裂を起こさせエネルギーを取り出す技術が原子炉技術の基礎になっている。当初の技術はアメリカ海軍の潜水艦の動力源として、ユダヤ系アメリカ人のハイマン・G・リッコーバー(Hyman George Rickover)を中心に開発された。ノーチラス号という名前の原子力潜水艦（原潜）を製造、58 年に北極点を潜水したまま横断し開発の成果を誇示した<sup>注1)</sup>。

ただし、63 年にスレッシャー号と言う原潜が大西洋マサチューセッツ州沖で沈没、乗員 129 名全員死亡という大事故を起こし、68 年には乗員 99 名のスコーピオン号がアゾレス諸島沖で沈没事故を起こした。今も大西洋の深海に二つの原子炉残骸が横たわっている。なお、スレッシャー号の事故は機関室内の海水配管の破損とそれに伴う電気系統の事故、スコーピオンの場合は投棄魚雷の爆発による事故とされている。ソビエト連邦でもクルスク号という原潜がバレンツ海で事故を起こしている。

発電用原子炉が商業化されたのは 63 年である。既に 50 年以上経過した技術であり、これまで起きた様々な事故を教訓に年々改良を加えてきたと思われるが、今回、このような重大事故を起こしたことにより、安全対策が発展途上であったという誹りを免れることはできない。稼働再開の条件として、今回の事故の経験を生かしたより安全な技術の確立を望みたい。

核分裂により生成する原子は多種類あり、例えばウラン 235 の場合には核分裂生成物は質量数 140 と 95 付近にピークがある。そのほとんどが数秒から数日で放射線を出して崩壊し安定な原子になるが、一部に安定するのに数十年以上かかる中途半端に安定な原子核がある。

環境放射線からの被ばく防止の視点で注意が必要なのはこれらの原子核で、長期にわたって放射線を出し続ける原子で半減期の長いセシウム 137 とストロンチウム 90、数日で安定化するが初期に大量に出て人体に取り込まれやすいヨウ素 131 と半減期が短い量の多いセシウム 134 である。

セシウム 137 やストロンチウム 90 は、冷戦時代、部分的核実験禁止条約が 63 年に発効するまで繰り返された、米英ソを中心とする大気圏内核実験、その後の中仏による核実験の放射性降下物として今でも地中に残っている。

注 1) Submarine Force Museum <http://www.ussnautilus.org/>

#### 4. 放射線、放射性物質の単位

ここでは放射能の単位を説明するために計算式や化学用語を使わざるを得ない。難しければ適当に読み飛ばして頂きたい。しかしながら、ベクレルは放射性物質の量の単位であり測定値にミリとかマイクロが付くことはほとんどないこと、そして、シーベルトは被ばくエネルギー量の単位でミリ・シーベルト、マイクロ・シーベルトが特に重要な単位であり、瞬間値がミリ・シーベルトより大きな単位で話題になるところは極めて危険な場所であること、の二つは是非覚えてほしい。

##### 1) 放射性物質の量の単位 ; ベクレル

ベクレル(Bq)とは放射性物質が 1 秒間に壊れる数 = 壊変毎秒 (dps) = のことであり放射能の量を表す単位である。  
 注) 1Bq(Becquerel) = 1dps (disintegration per second)

ウランの放射能を発見してノーベル賞を受賞したアンリ・ベクレル(Antoine Henri Becquerel)に因む国際単位 SI (Le Système International d'Unités = the International System of Units)である。単一の核種であればベクレル値と半減期からその放射性物質の量がわかる。

少し脱線するが、SI とはあらゆる分野に用いる単位系としてメートル法を拡張した単位系であり、60 年の国際度量衡総会で採択された。我が国で使われていた尺貫法がメートル法になったのもこの時期である。宝石のカラットやヘクタール、石油の単位のバレルなど、慣習的に用いられている単位で使用が認められているものはいくつかあるが、計量法ではメートル法表記が望ましいとされる。

一方、メートル法の起源がフランスだったため、アメリカ、イギリス、カナダ西部などでは、ゴルフ・コースの距離や道路標識、ガソリンの単位のガロン、大リーグでの投球のスピードガン表示などのように、未だにヤード・ポンド法が幅を利かせているところがある。

SIが登場するまでは、ラジウムを発見してノーベル賞を受賞したキュリー夫人に因んで放射能の量をキュリーという単位で呼び、ラジウム 1g を 1Ci (curie) =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq (dps) = 37 GBq (ギガベクレル) としていた。それはこういう意味である。ラジウム 226 の半減期は 1,600 年 =  $5.05 \times 10^{10}$  秒、1g のラジウム 226 の原子核の数(a)は  $2.66 \times 10^{21}$  個であるので、放射能(b)は約  $3.7 \times 10^{10}$  Bq = 37 GBq となる。SI 単位に付く G(ギガ)や M(メガ)など桁数を表す接頭辞(接頭語)の主なものを表に示した。

注) 1 mCi = 37 MBq (百万ベクレル) 1 $\mu$ Ci = 37 kBq = 37,000 dps。

ラジウム 1g の放射能の量

$$(a) \text{ [ラジウム 1g の原子数] } = \text{ [アボガドロ数} = 1 \text{ モルの原子数]} \div \text{ [ラジウム 1 モルの質量数]}$$

$$\therefore [6.02214 \times 10^{23}] \div [226] = [2.6647 \times 10^{21} \text{ 個}]$$

$$(b) \text{ [ln2 ; 2 の自然対数]} \div \text{ [半減期]} \times \text{ [ラジウム 1g の原子数]} = \text{ [放射能の量]}$$

$$\therefore [0.69315] \div [5.05 \times 10^{10} \text{ 秒}] \times [2.6647 \times 10^{21} \text{ 個}] = 3.659 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

同様に、問題のセシウム 137 は半減期 30.07 年であるから次のように  $3.21 \times 10^{12}$  Bq となる。半減期が短い分、同じ 1g の重さで放射能は約 100 倍近くになる。

セシウム 1g の放射能の量

$$(a') \text{ [セシウム 1g の原子数]} = [6.02214 \times 10^{23}] \div [137] = [4.4 \times 10^{21} \text{ 個}]$$

$$(b) \text{ [セシウム 1g の放射能]} = [0.69315] \div [9.5 \times 10^8 \text{ 秒}] \times [4.4 \times 10^{21} \text{ 個}] = 3.21 \times 10^{12} \text{ Bq}$$

## 単位の換算 ナノ・マイクロ・ミリ・キロ・メガ・ギガの関係

$$1\text{Sv} = 1,000\text{mSv} = 1,000,000\mu\text{Sv}$$

(1シーベルト = 千ミリシーベルト = 百万マイクロシーベルト)

$$1\mu\text{Sv} = 0.001\text{mSv} = 0.000001\text{Sv}$$

$$1\mu\text{Sv/h} \rightarrow 24\mu\text{Sv/日} \rightarrow 8,760\mu\text{Sv/年} = 8.76\text{mSv/年}$$

倍数	記号	接頭語(読み)	国語(読み)	実数
$10^9$	G	giga(ギガ)	十億(じゅうおく)	1,000,000,000
$10^6$	M	mega(メガ)	百万(ひゃくまん)	1,000,000
$10^3$	k	kilo(キロ)	千(せん)	1,000
$10^2$	h	hecto(ヘクト)	百(ひゃく)	100
10	da	deca(デカ)	十(じゅう)	10
$1^{-1}$	d	deci(デシ)	分(ぶ)	0.1
$1^{-2}$	c	centi(センチ)	厘(りん)	0.01
$1^{-3}$	m	milli(ミリ)	毛(もう)	0.001
$1^{-6}$	$\mu$	micro(マイクロ)	微(び)	0.000001
$1^{-9}$	n	nano(ナノ)	塵(じん)	0.000000001

8

福島事故が起きた当初、コメの食用流通の出荷制限基準として、暫定的に 500 Bq/kg と決められたが、2012 年 4 月から一般食品が 100Bq/kg、乳児用食品および牛乳が 50Bq/kg、飲料水が 10Bq/kg に改定された。また、一時期学校給食の基準が 40Bq/kg と報道されたが、計測機器の検出限界と混同しており明らかに誤りである。40Bq/kg が基準になれば「自然由来放射性物質を含めて含有しないこと」を意味するので自然界には存在し得ない。後述するが人体も計算上一人あたり 3,000~5,000Bq の放射能を持つ。

廃棄物の埋立て基準は 8,000Bq/kg 以下は通常廃棄物の扱い、8,000~100,000Bq/kg の廃棄物はセメント固化し不透水性土壌層で覆って埋立て、100,000Bq/kg 超は遮断型処分場のみで埋立て処分する、とされた。セメント工場は廃棄物を原料として逆有償で受け入れており受入基準は 100Bq/kg と極めて厳しい。例えば、500Bq/kg の玄米の灰分が 1% とすると焼却により放射性物質は 100 倍の 50,000Bq に濃縮する。当然、汚染された玄米も受入れないことになる。

### 2) 放射線被ばく量の単位 ; 吸収線量グレイと線量当量シーベルト

ある物質が放射線を浴びたときに吸収した放射線量をグレイ(Gy)という単位で表す。

1Gy とは 1kg の物質が 1 ジュール(J)のエネルギーを吸収することである。放射線の影響はその種類や浴びる組織によって異なることから、吸収線量 Gy に放射線の種類と組織ごとの修正係数をかけて線量当量シーベルト(Sv)を計算する。

修正係数(放射線荷重係数)は X 線・ $\gamma$ 線・ $\beta$ 線は 1、陽子線が 5、 $\alpha$ 線が 20、中性子線はそのエネルギーによって 5~20 の範囲である。今回の事故で問題になる放射線はセシウム 137 が主で X 線・ $\gamma$ 線・ $\beta$ 線であり修正係

数は1であるから吸収線量 Gy と線量当量 Sv は同じ値になる。この修正係数に単位はないので、Sv の単位は Gy と同じ J/kg になる。SI が登場するまで、線量当量はレム rem、吸収線量はラド rad を単位にしていた。

注)  $1\text{Gy} = 1\text{J/kg} = 107\text{erg/kg} = 100\text{rad}$   $1\text{rad} = 100\text{erg/g}$

$1\text{Sv} = 1,000\text{mSv} = 1,000,000\mu\text{Sv}$   $1\text{Sv} = 100\text{rem}$ ,  $1\text{mSv} = 100\text{mrem}$

1 時間あたりの生体の被ばくの大きさを毎時シーベルト (Sv/h) という単位で表し、1Sv/h は 1 時間に 1Sv の被ばくを受けることに相当する強さである。1 $\mu\text{Sv/h}$  の被ばくを 8 時間受けると、蓄積線量は 8 $\mu\text{Sv}$  になる。200mSv/h の被ばくを 15 分間受けると、蓄積線量は 50mSv になる。電力のキロワット(kW)と kWh の関係と同じである。

短時間に 2 Sv の放射線を全身に浴びると 5%の人が死亡、4Sv で 50%、7 Sv で 99%の人が死亡すると言われる。200mSv 以下の短時間被ばくでは、急性症状は認められないが、長期的な放射線曝露の影響についてはいろいろと議論がある。Sv は今回のような低線量率被ばく環境下での蓄積線量の人体への影響を評価することを目的に作られた単位であり、放射線の種類や対象組織による係数をかけて値を求める。人体保護を目的とする放射線管理のために用いられる社会学的な単位である。

Sv の名称は放射線防護の研究で功績のあったロルフ・M・シーベルト(Rolf Maximilian Sievert)に、Gy は吸収線量の概念を単位にしたレイス・H・グレイ(Louis Harold Gray)にちなむ SI である