



## 「原子核とその安定性」

下浦 享 (原子核科学研究センター 教授)

原子核は、陽子と中性子(核子と総称する)が結びついた微粒子で、自然界の物質質量の大部分を担うが、その大きさは原子の大きさの約1万分の1にすぎず、約1兆分の1 cmである。原子核を構成する陽子の個数は、中性原子に含まれる電子の個数に等しく、6個なら炭素(元素記号C)、26個なら鉄(Fe)、82個なら鉛(Pb)というように、元素を決定する。ところが同じ元素でも、炭素12(中性子6個, $^{12}\text{C}$ とも書く)や炭素13(中性子7個, $^{13}\text{C}$ )のように、異なる個数の中性子をもつ原子核が存在することがあり、それらは同位元素(同位体)とよばれる。たとえば二酸化炭素 $\text{CO}_2$ の分子を構成する炭素の原子核は、 $^{12}\text{C}$ の場合も $^{13}\text{C}$ の場合もあり、わずかな質量の差を除くとそれらは区別できない。元素名の後の数(元素記号の左肩の数字)は、陽子の個数 $Z$ と中性子の個数 $N$ を足した $Z+N$ のことで、これを質

量数とよび、 $A$ と書く。このように原子核の種類(核種)は、 $Z$ と $N$ 、あるいは $Z$ と $A$ の組み合わせで表される。

原子核がばらばらにならないのは、湯川秀樹博士が示したように、核力とよばれる引力が核子間に働き、互いを束縛するためである。このため、1個の原子核の質量は、それを構成する陽子と中性子の質量の総和よりわずかに小さく、その差を束縛エネルギーとよび、その絶対値が大きいほど安定である。束縛エネルギーはおもに、核子どうしを引きつける核力と、正電荷をもつ陽子に起因するクーロン反発力のせめぎ合いで決まる。軽い核ではクーロン反発力が小さいので、酸素16( $Z=8, N=8$ )や鉄56( $Z=26, N=30$ )など、ほぼ $Z=N$ の核種が最も安定だが、重い原子核では陽子間のクーロン反発力が増すため、鉛208( $Z=82, N=126$ )などのように、 $Z < N$ の核が安定となる。

原子核は、陽子や中性子を吸収したり、他の原子核と融合したり、核子(群)をやりとりしたり、2個に分裂するなどの原子核反応により、核種やその状態を変化させることができる。ここでやり取りされるエネルギーは、化学反応に関わるエネルギー(ほぼ1電子ボルト)の100万倍にのぼるため、メガ電子ボルトの単位で測られる。自然界には、外からエネルギーを与えない限り変化を起こさない安定核種が270種類ほど存在する。それ以外の核種(不安定核)は、内部エネルギーを $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線などの放射線として放出するので、放射性同位元素(RI)ともよばれる。

自然界の安定核はすべて、宇宙におけるさまざまな原子核反応や、それにより生成された不安定核の崩壊の結果、作られたものである。また、太陽エネルギーをはじめ、星のエネルギーの大半は原子核反応によって生成されている。



## 「放射線と半減期」

下浦 享 (原子核科学研究センター 教授)

放射線とは、エネルギーの高い粒子(電子、陽子、光子など)の総称で、100ボルトのコンセントから流出する電子も、ひとたび数万ボルトの電場で加速されれば放射線となる。放射線を発生源で分類すると、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{238}\text{U}$ などの放射性同位元素(RI)の崩壊によるもの、宇宙から飛来する宇宙線、加速器で供給される高速のイオンなどがある。RIには、天然に存在するものと原子炉などで人工的に作られるものがあり、原子力発電所からの放射能は後者に起因する。RIの崩壊で放出される放射線は、おもに $\alpha$ 線(ヘリウム4の原子核)、 $\beta$ 線(電子、陽電子)、および $\gamma$ 線(光子)であり、それぞれ素粒子に働く力として、強い相互作用( $\alpha$ 崩壊)、弱い相互作用( $\beta$ 崩壊)、電磁相互作用( $\gamma$ 崩壊)に対応する。

$\alpha$ 崩壊はおもに重い原子核で起き、崩壊前の原子核(親核)から、原子番号が2、質量数が4だけ少ない核(娘核)が生成される。自然界には、 $\alpha$ 崩壊する半減期の長いRIを親核とし、娘核が再び $\alpha$

崩壊や $\beta$ 崩壊(および $\gamma$ 崩壊)をくり返し、最終的に安定な鉛などの同位体に至る系列が4つある。すなわち $^{232}\text{Th}$ を親核とし、質量数が $A=4n$ ( $n$ は整数)で表されるトリウム系列、 $^{238}\text{U}$ を親核とするウラン系列( $A=4n+2$ )、 $^{235}\text{U}$ が親核のアクチニウム系列( $A=4n+3$ )、 $^{237}\text{Np}$ が親となるネプツニウム系列( $A=4n+1$ )である。天然の重金属鉱物は、これらの核種を微量に含むことが多い。

$\beta$ 崩壊では、親核と同じ質量数で、原子番号が1だけ違う娘核が生成される。 $\beta$ 崩壊は、電子放出、陽電子放出、荷電粒子を放出しない電子捕獲の3種類に細分でき、いずれも反ニュートリノまたはニュートリノの放出を伴う。 $\beta$ 崩壊後の娘核は励起している場合が多く、その場合は $\gamma$ 崩壊を伴う。たとえば $^{137}\text{Cs}$ は、電子と反ニュートリノを放出して $^{137}\text{Ba}$ の安定な基底状態(8%)ないし励起状態(92%)に崩壊し、後者は $\gamma$ 崩壊によって $^{137}\text{Ba}$ の基底状態になる。

$\gamma$ 崩壊は、励起した原子核が基底状態

に落ちるとき放出され、核種の変化はない。特殊な場合として、 $\gamma$ 線に行くはずのエネルギーを原子内の電子に与えて放出させる、内部転換電子放出がある。上述の $^{137}\text{Ba}$ の崩壊では、約8%の確率でこれが起こる。

原子核の崩壊率は、親核の核種とその状態ごとに決まっていて、半減期とよぶ時間 $T$ が経過すると、親核の個数も、その個数に比例する放射線の強さも、半分になる。最初から $2T$ の後には $1/4$ 、 $3T$ の後には $1/8$ となり、 $10T$ を経過すると、 $1/2^{10} \approx 1/1000$ になる。天然に存在する $\alpha$ 崩壊核種である $^{238}\text{U}$ は45億年、 $^{235}\text{U}$ は7億年と、ひじょうに長い半減期をもつが、人工RIには数日から数年のものも多く、生命科学の研究でよく利用される $^{32}\text{P}$ では14日、 $\gamma$ 線照射源として使用される $^{60}\text{Co}$ では5.3年である。大気中で宇宙線により作られる $^{14}\text{C}$ は5730年の半減期をもち、古い有機物などに含まれる $^{14}\text{C}$ の量は、年代測定に用いられる。



## 「原子核分裂」

下浦 享（原子核科学研究センター 教授）

質量数の大きな原子核に中性子を吸収させると、内部エネルギーが大きくなって分裂することがあり、原子核分裂とよばれる。増加した内部エネルギーが、原子核に振動や変形を引き起こし、原子核をより球形に保とうとする核力を、クーロン反発力がしのぐことになり、核が2つ以上に分裂するわけである。天然の原子核も自然に核分裂することがある（自発核分裂）が、その寿命はひじょうに長い。1回の核分裂により解放されるエネルギーは、100メガ電子ボルト以上であり、1つの水素分子が燃えて水になる化学反応のエネルギー（約3電子ボルト）の3千万倍以上である。原子力発電は、このひじょうに大きなエネルギーを利用した発電方法である。

天然に存在する核種で、中性子吸収により核分裂を起こすものは、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、

$^{232}\text{Th}$  などであり、このうち  $^{235}\text{U}$  のみが速度の遅い熱中性子によりひじょうに大きな確率で核分裂を引き起こす。他の2つは高速中性子によってのみ核分裂をおこし、その確率は  $^{235}\text{U}$  に比べると1000分の1以下である。中性子数が偶数の原子核が相対的に安定であるという核力の性質のため、中性子数が奇数の原子核に中性子を吸収させる方が、内部エネルギーを大きくでき、核分裂の確率が高くなる。

たとえば1個の  $^{235}\text{U}$  原子核が核分裂すると、質量数がほぼ100と130程度の2つの原子核（核分裂生成物）と、複数の中性子（即発中性子）が放出されることが多い。核分裂生成物は安定同位体に比べ、中性子数がかなり過剰なため、その後ほぼ数分以内に $\beta$ 崩壊を起こし、たとえば  $^{131}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$  など、より半減

期の長い原子核になるが、このときにも中性子（遅発中性子）を放出することがある。

核分裂により生成される中性子のうち、平均して1個以上が次の原子核の核分裂を引き起こす場合には、分裂反応が連鎖反応として持続する。反応が持続するか否かの境界条件を臨界とよぶ。臨界を超えて連鎖反応をねずみ算式に引き起こすのが原子爆弾であり、臨界点でエネルギー生成を持続させるものが原子炉である。臨界条件は燃料の濃縮度、質量や形状、中性子の速度などに依存する。即発中性子も遅発中性子も高速なため、原子炉では水などの減速材により中性子を熱速度にまで減速し、連鎖反応を持続させている。また、中性子を吸収しやすい物質を含む制御棒を用いて、臨界条件を制御している。



## 「セシウム137およびヨウ素131の環境化学」

小橋 浅哉  
（化学専攻 准教授）

ウラン235やプルトニウム239（ $^{239}\text{Pu}$ ）が中性子を吸収して核分裂すると、さまざまな核分裂生成物が作られる。その代表が、今回の福島第一原子力発電所の事故で放出されたセシウム137（ $^{137}\text{Cs}$ ）やヨウ素131（ $^{131}\text{I}$ ）であり、 $^{137}\text{Cs}$ は半減期30.1年、 $^{131}\text{I}$ は半減期8.02日で $\beta$ 崩壊し、そのさい $\gamma$ 線を放出する。原発事故や核実験で放射性物質が環境にどう放出され、どう広がるかは、その化学的性質によって決まる。 $^{137}\text{Cs}$ および $^{131}\text{I}$ は、ともに揮発性が高い元素の同位体であるため大気中に放出されやすい。

歴史的には、広島と長崎に原子爆弾が投下された1945年の暮れ、本学部化学科の木村健二郎教授の研究室で、両市で採取された試料に核分裂生成物が含まれていることが見出されている。1951年には、長崎の試料から $^{137}\text{Cs}$ の存在が確認された。1999年に発生したJCO臨界事故のさいには、農作物などから $^{131}\text{I}$ が検出された。第二次大戦後には、大気圏内核実験が繰り返された結果、環境中に

放射性物質が大量に放出され、地球規模の放射能汚染を起こした。放出された放射性物質のうち気体でないものは降雨などにより地表に落下し、フォールアウト（放射性降下物）とよばれる。その量は、1960年代前半が最大であった。筆者はこの時期、小学生から中学生で、放射能の注意を受けることもなく、雨の中を濡れて帰宅したこともあった。農業環境技術研究所が日本各地で調査した結果によると、1963年における水田土壌中の $^{137}\text{Cs}$ の濃度は、最大100 Bq/kg、平均38.9 Bq/kgであった。 $^{137}\text{Cs}$ は半減期が長いので、ストロンチウム90（ $^{90}\text{Sr}$ 、半減期28.8年）とともに現在でも環境中に残ってはいるが、当時の濃度の2割程度にまで減少している。

今回の原発事故でも $^{131}\text{I}$ や $^{137}\text{Cs}$ が放出された。 $^{131}\text{I}$ は単体ヨウ素、有機形ヨウ素やエアロゾルの形で、 $^{137}\text{Cs}$ はエアロゾルの形で大気中を移動すると考えられる。福島県飯館村では $^{137}\text{Cs}$ が降下した結果、土壌中の濃度が10,000 Bq/kg

を超える水田があるようだ。チェルノブイリ事故では、原子炉が大きく破壊されたので、人体にひじょうに有害な $^{90}\text{Sr}$ や $^{239}\text{Pu}$ も相当な量が環境に放出されたが、福島事故では、揮発しにくい $^{90}\text{Sr}$ や $^{239}\text{Pu}$ は（本稿の執筆時点で）大気中にはほとんど放出されていない。

放射性物質の挙動は、それらの化学的性質で決まるので、たとえば食品や人体の中で放射性核種 $^{131}\text{I}$ は、放射線を出さない通常のヨウ素127（ $^{127}\text{I}$ ）と同じ挙動をする。他方で放射能そのものは、化学物質ではなく原子核に付随する性質なので、放射性物質を煮たり焼いたり、あるいは化学処理したりしたとき、放射能を担う化学物質の形態は変わらうが、放射能は無くならない。

本研究科の化学専攻RI研究室では筆者が、紙類に含まれる $^{137}\text{Cs}$ の研究を行っている。これは樹木がフォールアウトの $^{137}\text{Cs}$ を取り込み、その後木材となり、さらに紙となる過程での $^{137}\text{Cs}$ の挙動を考察するものである。



## 「放射線に関する単位」

小橋 浅哉 (化学専攻 准教授)

放射線に関する単位は、報道にしばしば現れるが、難解である。ここでは、そのうち主要なものを解説する。単位名はいずれも人名にちなむ。

＜放射能の単位＞「放射能」には、二つの意味がある。ひとつは、物質が放射線を放出するという現象、もうひとつはその現象の強度（物理量）である。現象としての放射能は、原子核の壊変によりもたらされ、物理量としての放射能は、単位時間当たりの壊変数により表わされる。その単位はベクレル (Bq) で、ある物質で1秒間に1回の壊変が起きるとき、その放射能を1 Bqと定義する。土壌や食品に含まれる放射能を表わすにも Bq が用いられている。実用上はその千倍に当たるキロベクレル (kBq) や、百万倍のメガベクレル (MBq) を用いることが多い。旧単位はキュリー (Ci) で、1 Ci は 1 g のラジウム ( $^{226}\text{Ra}$ ) の放射能であり、 $3.7 \times 10^{10}$  Bq に等しい。

＜吸収線量の単位＞放射線が物質に当た

ると、そのエネルギー（の一部）を物質に与える。物質が、単位質量当たり吸収した放射線のエネルギーを「吸収線量」という。その単位はグレイ (Gy) で、1 Gy は、放射線のエネルギーが物質 1 kg 当たり 1 J (ジュール) 吸収されたことを意味する。Bq が放射線を出す物質についての量であるのに対し、Gy は放射線を受ける物質についての量である。

＜被曝線量の単位＞放射線は生体にもエネルギーを与え、有害な作用をする。生体に対する放射線の影響を予測・評価する上で基礎となる量が「被曝線量」で、単位はシーベルト (Sv) である。この量は、生体の組織や臓器ごとに、受けた放射線の吸収線量に、放射線の種類やエネルギーの違いによる補正係数を乗じて算出する。全身の被曝線量は「実効線量」とよばれ、組織・臓器ごとの被曝線量に、放射線感受性の違いを表わす重みを掛けて合算して求める。各組織・臓器の重みの和は 1 であるが、人体の場合、放射

線感受性の高い生殖腺には 0.20、赤色骨髄には 0.12 と、大きい値が割り当てられる。筋肉は重量に占める割合は大きいですが、放射線感受性は低いので、荷重係数は 0.05 以下である。実用上は、1シーベルトの千分の 1 や百万分の 1 に当たる、ミリシーベルト (mSv) やマイクロシーベルト ( $\mu\text{Sv}$ ) がよく使用される。

＜線量当量率の単位＞被曝線量は時間積算した値である。これに対し、単位時間当たりの被曝線量の形で表される「線量当量率」は、ある場所での放射線の強度を示し、人の被曝線量の低減に役立っている。その単位には、1時間当たりの線量である mSv/h や  $\mu\text{Sv/h}$  がよく使用される。たとえば 10 MBq の放射能をもつガンマ線源  $^{137}\text{Cs}$  から、0.5 m 離れた位置での線量当量率は、 $3.64 \mu\text{Sv/h}$  となる。報道ではしばしば、被曝線量と線量当量率が混同されており、要注意である。



## 「大気中の物質拡散」

小池 真 (地球惑星科学専攻 准教授), 中村 尚 (先端科学技術研究センター 教授, 地球惑星科学専攻 兼任)

特定の発生源から大気中に放出された物質が、どれほど広範囲に輸送・拡散されるかは、その物質の大気中での（他の物質への変容や大気からの除去によってきまる）寿命と、大気の乱渦による混合・（狭義の）拡散過程や、より大規模な流れに依存する。

まず物質の大気中での寿命や除去過程についてみてみると、それらは化学組成や形態に依存する。たとえば、原子力発電所の事故で大気中に放出される可能性のある放射性のクリプトン ( $^{85}\text{Kr}$ ; 半減期は約 11 年) は、水に溶けにくく化学的に安定した希ガスのため、放出源の場所によらず大気循環により全世界に拡散してゆく。ただし周りの空気との混合によりその濃度は次第に低下してゆく。また希ガスゆえに、人間が呼吸で摂取してもそのまま排出されると言われている。いっぽう、放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) や、最初は気体として放出されると考えられる放射性ヨウ素 ( $^{131}\text{I}$ ) のある程度の量は、粒子状物質（エアロゾル）として大気中

を輸送される。このうち直径が数十  $\mu\text{m}$  以上の大きな塵は、たとえ降水により除去されなくても、数時間から数日以内に重力落下してしまう。対照的に、小さなエアロゾル（直径数十 nm ～数  $\mu\text{m}$  程度）は、雨や雪などの降水がそのおもな除去過程となるため、降水がないと 1 週間以上も大気中に滞留し、長距離まで輸送される可能性がある。降水過程は大気中のエアロゾルを効率的に除去するため、特に降り始めの降水中には、それ以後の降水に比べて高い濃度の放射性物質が含まれる可能性がある。また降水でいったん地表に落ちた粒子が、強風により再び浮遊することもある。いっぽう、降水により除去された放射性物質は、陸水、土壌、作物、酪農などに蓄積する可能性がある。

次に大気中の輸送についてみてみると、地表付近から放出された化学物質の大部分は、高度約 1.5 km までの大気境界層の中に留まる。ここでは大気の乱渦による 3 次元的な混合や拡散が効果的で、さらに大気循環（大規模な風の流れ

の場）による水平輸送や地形の影響のため、物質は放出源からその時々風の風下へ向かって拡散してゆく。たとえば、沿岸にある福島第一原子力発電所から、3月15日までに起きた水蒸気・水素爆発により放出された放射性物質は、直後に吹いた海側からの風により内陸へ輸送され、発電所から北西方の請戸川の谷沿いに、相対的に高い濃度で蓄積されたと考えられる。さらにその後吹いた北寄りの風による輸送で、発電所の南側の沿岸で濃度が高まったようである。原子力安全研究センターの輸送モデル SPEEDI による放射線量の推定値マップには、このように大気中の放射性物質が多かった時の、風の影響による輸送の結果が反映されていると考えられる。境界層内に留まっていた放射性物質の一部は、3月15日頃に海寄りの風をもたらした低気圧に伴う大気の上昇運動に乗って上昇し、強い偏西風によって数日以内に北米大陸、さらには欧州上空にまで達したことが観測されている。



## 「海洋中の物質拡散」

川邊 正樹 (大気海洋研究所 教授, 地球惑星科学専攻 兼任)

海には河川から陸上の物質が流れ込み、大気運ぶ物質が海面に降りそそぎ、海底湧出域からは地球内部の物質が流出し、海中では海洋生物の糞や死骸の分解や光合成によって有機物が生成されている。これらは、海底に堆積する物を除くと、粒子として浮遊するか化学分解して海水に溶解し、流れによって運ばれる。海洋中の拡散は、このような自然の物質循環に寄与し、魚の卵稚子などを運ぶことで豊かな生物資源の生成にも寄与している。しかし、拡散への社会の関心が集まるのは、ゴミや重油、汚染水、エチゼンクラゲなど、有難くない物が大量に放出された場合である。今般福島原子力発電所から流出した放射能汚染水にも海洋の拡散効果が働く。

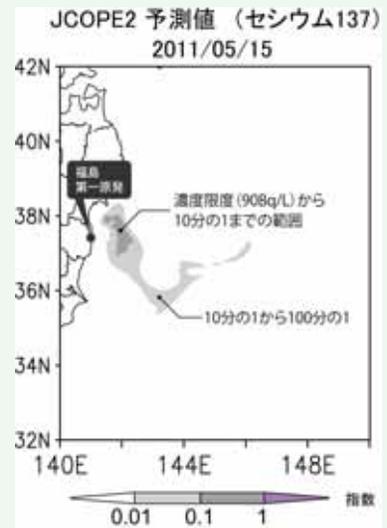
海水の流れを継続時間が測定間隔に比べて十分に長い層流と規模が小さく通常の観測にかからない乱流に分けると、物質を運ぶ移流効果により、前者は物質を効率良く下流に運び、後者は物質を拡散して濃度勾配を弱める。こうした働き方

の違いから、前者を移流、後者を拡散とよんで区別する。

拡散の研究は、分子運動による物質分散の考察から始まった。分子が衝突するまでの時間は、私たちの観測時間に比べてはるかに短いため、ランダム歩行の確率論モデルを適用して分子拡散の理論が確立された。さらに、流速を平均流速とそれからの偏差で表し、分子拡散のアナロジーを使うことで乱流拡散の方程式が導かれた。それをさまざまな条件のもとで解くことにより、物質の瞬間点源による円形パッチや固定点源からの連続放出によるプルームなどの理解が進んだ。

問題の原子力発電所は、それぞれ 36°N と 39°N の周辺を東方に流れる黒潮と親潮の間に位置し、沖合には南北流や中規模渦が存在する。漏れ出た放射能汚染水が岸近くで円形パッチ状に拡散すれば、通常の拡散係数の範囲では 1 日で数 km ~ 20 km 程度に広がり、中心の濃度は時間に比例して低下する。こうして沖に出た汚染水が、流れによって南方に運ばれ

れば、多くは黒潮に乗って 1 日に数十 km の速さで東に運ばれるであろう。文部科学省が発表した数値モデルの結果では、汚染水は一度北東に流れたのち、沖合の南下流によって南に運ばれ、蛇行する黒潮に乗って薄まりながら東に運ばれる (図)。



文部科学省の発表データ。海洋研究開発機構が計算したもの。



## 「生態系における濃縮 (生物濃縮)」

永田 俊 (大気海洋研究所 教授, 生物科学専攻 兼任)

生物は外界からある物質を取り込み、同時にそれを体外に排出している。この取り込みと排出が釣り合って、体内での物質の濃度が安定した状態にある時、生体内でのその物質の濃度が外界での値の何倍になっているのかを表したのが生物濃縮係数 (CF) である。

海洋の放射性物質の場合、海水中の放射性核種の濃度に対する、生物体に含まれる放射性核種の濃度の比がこれにあたる。国際原子力機関は、海産のプランクトン、海藻類、甲殻類、軟体動物、魚類、一部の哺乳類などについて CF 値をまとめているが、それによると、放射性核種や生物種、また同じ生物種でも組織・器官、成長段階、さまざまな環境条件によって CF 値は大きく異なる。放射性セシウムの場合、海藻と甲殻類の平均的な CF

値は 50、魚類では 100 とされている。いっぽう、放射性ヨウ素の場合、海藻の CF 値が 1 万、甲殻類と魚類が 10 以下とされている。残留性有機汚染物質 (PCB など) では、甲殻類や魚類における CF 値として数万~十万という値が報告されているが、これと比べると、放射性核種の CF 値は一般に 2~3 桁小さい。

汚染物質が濃縮するプロセスのうち、特に食物連鎖を介しての濃縮をバイオマグニフィケーションとよぶ。海洋では植物プランクトンを出発点とし、それが動物プランクトン、小型魚、大型魚へとつながる食物連鎖が存在する。いま、ある餌に含まれる放射性核種の濃度に対して、その餌を食べる捕食者の放射性核種の濃度が高くなれば、バイオマグニフィケーションが起きたと判断される。放射

性セシウム (半減期 30 年) では、小型魚において、餌に対して 2 倍程度の濃縮が起こるといった報告がある。ただし、大型魚や海産哺乳類など食物連鎖の上位の生物で濃縮が起こるかどうかはよく分かっていない。放射性ヨウ素 (半減期 8 日) では、食物連鎖を通過する間に放射能が大幅に減衰するため、バイオマグニフィケーションによって上位の生物に放射能の蓄積が起こるとは考えにくい。海が放射性物質で汚染された場合、さまざまな水産資源に放射能がどう蓄積するかを見積もるには、生態系における各種の放射性核種の挙動や生物濃縮をきちんと評価する必要がある。



## 「放射線の生物影響」

三谷 啓志 (新領域創成科学研究科 教授、  
生物科学専攻 兼任)

放射線が物質に入射すると、構成原子を電離したり、分子を破壊したりする。このため放射線は生体にも影響を及ぼすが、その現われ方は放射線の線量で異なる。高い線量を被曝した場合には、被曝した部位の幹細胞（さまざまな組織の細胞を生産するもとの細胞）が死滅するため、被曝から一定期間の後に、脱毛、血液細胞数の減少、皮膚炎症などの急性障害が現れる。低い線量の被曝では急性障害は現れないが、細胞内の遺伝子を構成する DNA 分子が放射線で損傷するため、集積線量が増えるにつれ遺伝子の突然変異率が増加し、結果として、細胞のがん化の確率や遺伝病の発症頻度が上昇する。ただし生体では、活性酸素（代謝などで酸素が高い反応性をもつようになったもの）、太陽光紫外線、化学物質など

他の原因によっても DNA の損傷が誘発されており、症例を見ただけでは、原因が放射線かそれ以外かを区別することは難しい。

生体では、放射線やそれ以外の要因による DNA の損傷を解消するため、以下の 3 種類の防護機構が巧みに協調して働いている。

- 1) DNA 修復：DNA 分子が切れるなどの損傷を、酵素などの働きにより、もとの状態に復元するための、さまざまな生体機構。
- 2) 細胞周期の制御：DNA 損傷が修復されるまで、細胞分裂などの細胞周期を一時停止させる機構。
- 3) アポトーシス：DNA 損傷をもつ細胞が、生体への悪影響を抑えるべく、自ら積極的に死ぬ機構。周り

の細胞はその内容物を取り込んで再利用する。

これらの防護機構に関わる生体分子の多くは、大腸菌からヒトまで機能的に保存されている。とくに細胞あたりの DNA 量が多い哺乳類細胞では、DNA 分子の損傷を回避する高度な機構が進化の過程で獲得されており、放射線による損傷に対してもそれらが有効に機能している。すなわち生体は、放射線に対する防護機構をもち合わせているのである。

動物生殖システム分野（新領域・先端生命科学専攻）では、DNA 損傷の回避機構に欠損をもつ変異体メダカに放射線を照射することで、上記の 3 つの機構が、組織幹細胞の増殖分化の制御や突然変異の生成機構に、どのように関わっているかを研究している。



## 「体外被曝と体内被曝」

井尻 憲一 (アイソトープ総合センター 教授、  
生物科学専攻 兼任)

体外に存在する放射性物質や放射線発生装置からの被曝を体外被曝（外部被曝）という。γ線、X線、中性子線などの透過力の強い放射線では人体内部の組織まで被曝するが、β線は体表面で吸収されるため皮膚の被曝が主となる。放射性物質から出るα線は極端に透過力が弱いいため、通常は体外被曝の対象にはならない。

これに対し、体内に取り込まれた食物や空気中に含まれる放射性物質によって、体内から被曝する場合を体内被曝（内部被曝）という。この場合はむしろ、透過力の弱い放射線（α線、β線）の方が被曝線量への寄与が大きい。被曝が体内の組織のみに限られるからである。とくにα線は短い飛跡内に集中してエネルギーを与えるため、細胞内の DNA に幾つもの損傷を密に生じさせる。このため、DNA 修復を行うタンパク質がうまく働かず、細胞への障害は大きくなる。

体外被曝を抑えるには、距離をとる、遮へいをする、作業時間を短くすること（体外放射線防護の 3 原則）が重要となる。いっぽう、体内被曝を防ぐには放射性物質の体内への摂取を防ぐことが一番

であり、テレビ映像でよく見る防護マスクや使い捨ての防護服はこのためのものである。

体内に入った放射性物質は壊変による減少（物理的半減期で減少）だけでなく、代謝、排泄によっても体内から出されていく（生物的半減期）。体内の放射性物質は時間とともに減少していくが、残留している間は被曝が継続する。被曝が放射線を受けているときだけに限られる体外被曝と異なる点である。このため、体内被曝による被曝線量は体内に残留している期間の積分値で表す。これが預託線量であり、放射性物質を摂取した時点において、その後体内に残留し続ける全期間に受ける被曝の総線量を前もって計算した値である。1 Bq の摂取で積分期間を 50 年とした預託実効線量を実効線量係数といい、<sup>131</sup>I では  $2.2 \times 10^{-5}$  (mSv/Bq)、<sup>137</sup>Cs では  $1.3 \times 10^{-5}$  (mSv/Bq) が経口摂取での実効線量係数である。例えば飲食により毎日 2,000 Bq の <sup>131</sup>I を 1 年間摂取し続けた場合、その後 50 年間に受ける総被曝線量は  $2,000 \times 2.2 \times 10^{-5} \times 365 = 16$  mSv となる。

体内に入った放射性物質は、全身に均等に分布する場合と、特定の 1 つまたは幾つかの組織・器官に選択的に吸収される場合がある。<sup>131</sup>I は甲状腺に選択的に取り込まれ、甲状腺がんや甲状腺機能低下を引き起こす。<sup>137</sup>Cs は全身（主に筋肉）に分布し、白血病や不妊の原因となる。1 mSv の被曝で身体のだこかにがんが発症する確率は  $1.7 \times 10^{-4}$  とされるので、前述の総被曝線量 16 mSv はがん発生率を、 $16 \times 1.7 \times 10^{-4} = 2.7 \times 10^{-3} = 0.27\%$  上昇させる。日本人男性は現在 2 人に 1 人（53.6%）が生涯でがんになるので、リスクは 53.6% から 53.87% となる。ただし、放射線発がんには閾値があり、100 mSv までではがん発生が無いとの説もある。

チェルノブイリ事故では、牛乳が検査されず、<sup>131</sup>I で汚染された牛乳を飲んだ子供たちに甲状腺がんが発生した。日本では今回、牛乳、野菜などの放射能測定により、出荷停止など措置が講じられた。



## 「土壌中の汚染物質の拡散の数理と予測」

山本 昌宏  
(数理学研究科 教授)

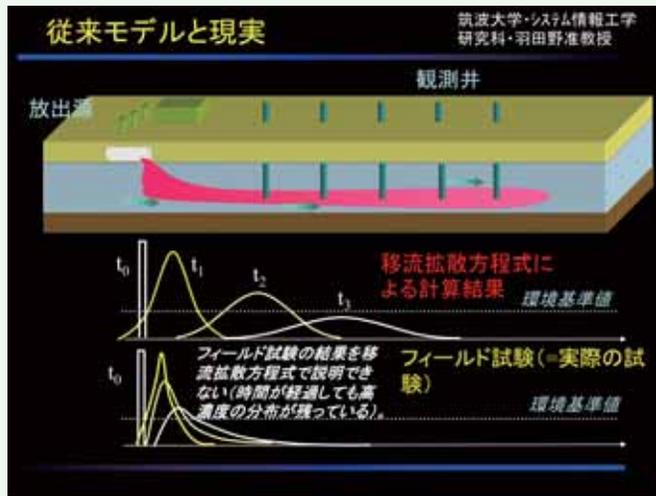
福島第一原子力発電所の施設の復旧は現場の方々の懸命な努力によるが、いっぽうで中長期的に環境に与える影響を評価・予測することが重要になっている。課題のひとつは、汚染物質が土壌中でどのように拡散してゆくかを予測することである。拡散の単純な例として、コップの中の水に汚染物質と見立てたインクを垂らした場合には、インクは水中を一様に拡がってゆき、その時間変化は、インク粒子が無作為（ランダム）に移動すると考えたとき、拡散方程式と言われる理論式で記述できる。水の流れがある場合にも、その効果を考慮した移流拡散方程式でうまくモデル化することができ、予測のための理論と方法はよく確立されている。

ところが水を土壌に置き換えると、拡がりや予測することは一般論として複雑になる。その理由は、水と異なり土壌では、さまざまな大きさの粒子が、ある場所ではびっしりつまっていたり、別の場所ではスカスカであったりという不均質性があることや、地下水によって流れていくためである。すると汚染物質は、あるところでは停留したり、別のところで

はスルスと移動したりする。その結果、移動する物質の粒子が次に現れる位置が、確率的に無作為には決まらなくなる。このような場合は図に示すように、通常の拡散方程式などを用いた単純な予測値に比べて、想定外の場所で（放射性とは限らないが）物質の濃度が高くなることが知られている。

よりの確な予測のためには、適切なモデルが必要であり、連続時間ランダムウォークや非整数階の微分（理学のキーワード 2010年7月号）を用いた「異常拡散方程式」などのモデルが提案されている。またコンピュータを用いた数値計算が必要であるが、広い範囲をカバーしなくてはならないため、膨大な量の数値計算が必要になり、実用的でない可

能性もある。計算精度を犠牲にせず計算量を節約できる方法の研究と並んで、不均質な媒質中の拡散をより適切に表す方程式の研究が進められており、一層の安心・安全を保障するような予測に結び付けることができると期待されている。既存の方法にとらわれない方法の開発のために、筆者は国内外の工学や産業界の研究者とともに、理論・実験・現場というそれぞれの立場を生かして研究にあたっている。



従来モデルと現実の比較。従来モデルの計算結果（中）は、実測結果（下）を説明し切れていない。

## 研究科長主催留学生・外国人客員研究員との懇親会

五所恵実子（国際交流室 講師）

2011年3月9日午後6時より東大病院入院棟15階レストラン・ブルークレール精養軒で、毎年恒例の研究科長主催「理学部教職員と留学生・外国人客員研究員との懇親会」が留学生・研究員の家族を含め、約70名の参加者を迎えて開催された。会は女子留学生とスタッフによる韓国の人気グループ、ワンダー・ガールズの「Nobody」のダンスパフォーマンスと山形研究科長の英語による歓迎の挨拶・乾杯で開始早々大いに盛り上がり、目の前の世界一高い電波塔である東京スカイツリーが薄暮から夜の闇の中に



記念撮影

消える中、美しい色とりどりの料理と飲み物、デザートと共に和やかな雰囲気できらびやかな懇談が始まった。

来賓および理学部教員の紹介後、会半ばには3月に博士課程を修了する物理学専攻のドイツからの留学生、アレクサンダー・ロトコプさんのスピーチがあり、そのたいへん流暢な日本語と示唆に富んだ内容に参加者全員拍手喝采であった。そして、理学部職員の協力で全員がチームに分かれて伝言ゲームと時間当

てゲームを楽しみ、上位チームから順に東大グッズと日本のお菓子が詰め合わされた景品が授与された。会は相原副研究科長の修了者へのエールを含む英語でのメッセージの後、全員での記念撮影で終了した。1年に1度ではあるが教員、職員、留学生、外国人研究員が一同に会し、会話と交流を通して親交を深めることで理学系研究科での研究生活がより充実したものになればと、心から願っている。