

## 農産物から人への放射性物質の移行を理解するための基礎知識

福島第一原子力発電所事故（以下、「福島原発事故」とする）による放射性核種の放出と分布、その挙動や農産物への汚染については、科学的な理解とそれに基づく対策が強く求められている。そこで、ここでは、このような要望にできるだけ応えられるように、まず専門的な用語の解説、次に福島原発事故とチェルノブイリ原発事故の比較、さらに大気圏核実験で放出された放射性核種の特徴、そして最後に放射性核種の農作物への移行、摂取による人体への移行、農耕地からの被曝について、全般的な理解を助けるための解説を行なう。

### (1) 放射性核種とは

「放射性核種」に関する説明は、中学・高校の教科書でも記載が限られ、一般に馴染みが薄い。そのため、まず放射性核種と、これに関連する用語について簡単に説明する。

放射性核種とは、同じ元素で中性子の数が異なる不安定な同位体のことで、放射性崩壊して放射線（ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 線など）を放出し、最終的には放射線を出さない安定元素になる。放射性崩壊によって、存在した放射エネルギーが半分になるまでの期間を「半減期」といい、放射性核種によって固有の半減期を示す。放射性核種は、天然放射性核種と人工放射性核種とに区別されることもあり、放射線の種類やエネルギーによる影響に違いはあるが、天然放射性核種と人工放射性核種から受ける影響に変わりはない。

放射性核種の量を表わす単位は、「Bq（ベクレル）」と表記され、1秒間に1つの原子核が崩壊して放射線を放出する量が1Bqである。一方、放射線による人体への影響（実効線量）を表わす単位を「Sv（シーベルト）」と表わす。BqからSvへの換算は核種ごとに異なり、たとえば、経口摂取によるI-131（ヨウ素131）、Cs-134（セシウム134）およびCs-137の値は、それぞれ $1.6 \times 10^{-8}$ 、 $1.9 \times 10^{-8}$ および $1.3 \times$

$10^{-8}$ Sv/Bqである。

天然放射性核種はどこにでも存在する。地球誕生以来から存在している長半減期核種の放射性カリウム（K-40）や放射性ルビジウム（Rb-87）、ウラン（U-238、U-234、U-235）やトリウム（Th-232）が放射性崩壊して生成する放射性ラジウム（Ra-228、Ra-226）、ラドン（Rn-220、Rn-222）、放射性ポロニウム（Po-210）、放射性鉛（Pb-211、Pb-210）や放射性ビスマス（Bi-212、Bi-214）、大気圏上層で宇宙線との反応によって生成する放射性ベリリウム（Be-7、Be-10）、放射性炭素（C-14）、放射性ナトリウム（Na-22）、放射性リン（P-32）などが存在する。そのため、飲食物の摂取や吸入により人体（成人男子一人当たり）中にも、約4,000BqのK-40、3,500BqのC-14、300BqのRb-87など、合計約8,000Bqの天然放射性核種が存在している。

一方、原爆や原子炉によって生み出された放射性核種は、一般に人工放射性核種と呼ばれる。“人工放射性核種”と聞くと負のイメージを抱く方は多いが、医療、工業などの分野でも人工放射性核種はたいへん重要で欠かせない。医療分野では人体に注入して利用する放射性核種として、前立腺がん治療（I-125）、パセド一病治療（I-131）、血管造影（Tc-99m）、がん検査（F-18、ペット検査）などがある。また、外部から照射して利用される放射性核種としては、がん治療（Co-60）、脳腫瘍治療（中性子）などが知られている。さらに、温泉治療としてのRn-222（ラドン）は一般にも馴染みが深い。このように、われわれの身近で多くの放射性核種が利用されており、医療技術が進んだ先進国では、医療などによる人的行為によって受ける年間の実効線量は、自然放射線から受ける実効線量よりも高いことが知られている。

### (2) 福島原発事故・チェルノブイリ原発事故で放出された放射性核種の特徴

2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震（マグニチュード9.0）で発生した津波により、福島原発の電源がすべて断絶された結

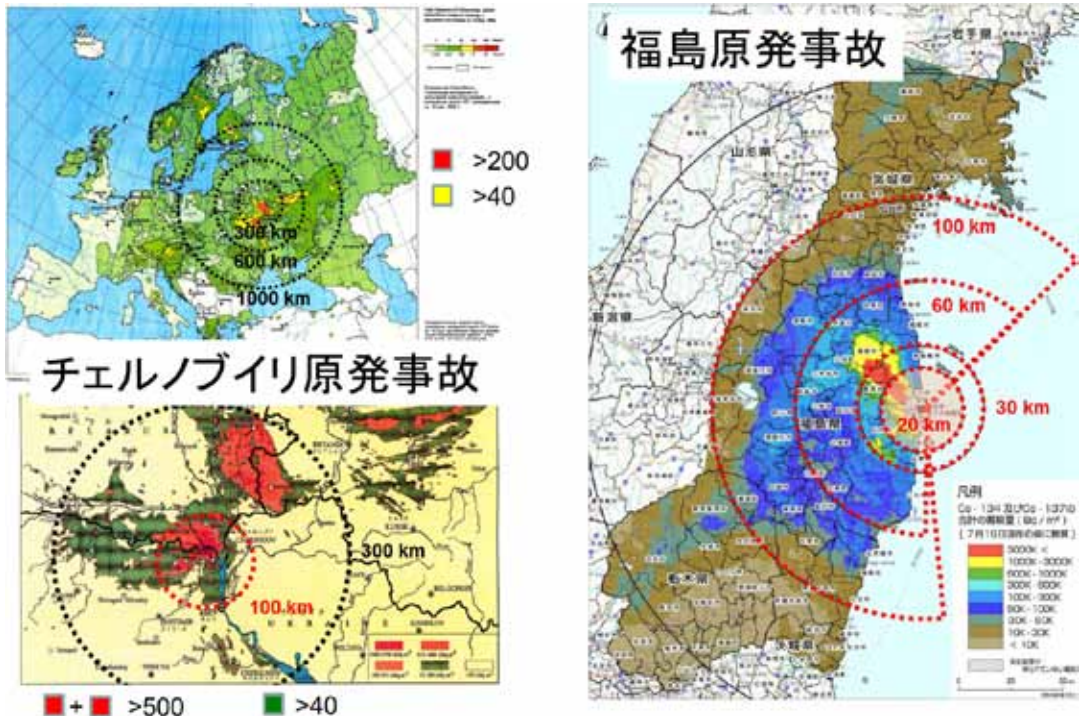
## 放射性物質による汚染とその対策

果、原子炉の制御が困難となり環境中に大量の放射性核種を放出する事態となった。原子炉から放出された放射性核種は、放射性雲となり広い範囲に拡散した。

放出時に最も多かったのは、おもに放射性希ガスと呼ばれるクリプトン (Kr-85)、キセノン (Xe-133) などの放射性核種である。これらは、常温でガス状として存在するため農作物へ移行することはないが、放出と同時に大気中を拡散し、これら放射性希ガスが通過する際にガンマ線により被曝する。そのため、「防災指針」(原子力安全委員会)では屋内退避するように勧告している。また、放射性雲には他の放射性核種も含まれ、福島原発事故では、おもに放射性ヨウ素 (I-131, I-132など)と放射性セシウム (Cs-134, Cs-137)が大気中に放出された。ほかにも、放射性ストロンチウム (Sr-89, Sr-90), 放射性銀 (Ag-110m), 放射性テルル (Te-127m, Te-129m, Te-132), プ

ルトニウムなどが一部の土壌から検出されているが、検出された範囲は限定されている。このように多種類の放射性核種が環境中から検出される理由は、原子炉内でのウランの核分裂によって生成されたさまざまな放射性核種が放出されたためである。

1986年4月26日に起きたチェルノブイリ原発事故でも、放射性ヨウ素、放射性セシウムなど多くの放射性核種が放出された。チェルノブイリから約8,000km離れたわが国でも、放射性ヨウ素などによって一部の飲食物が汚染されたが、とくにヨーロッパでの汚染は広範囲にわたる(第1図)。チェルノブイリから1,200km離れた北欧でも放射性セシウムによって激しく汚染されたことはよく知られている。チェルノブイリ原子力発電所事故では、激しい爆発によって上空高くまで放射性雲が拡散したことにより、広域にわたって汚染した。一方で、福島原発事故では他国にまで激しく汚染するよう



第1図 東電福島第一原子力発電所事故およびチェルノブイリ原子力発電所事故に伴う放射性セシウムの表層汚染マップ(単位: kBq/m<sup>2</sup>)

IAEA, 文部科学省ホームページおよびUNSCEARから作成

な状況とはならなかった。両者を比較すると、事故を起こした原発周辺の汚染濃度レベルは同程度であるが、水平的な広がり大きく異なる。なお、福島原発から放出されたI-131は $1.5 \times 10^{17}$ Bq、Cs-137は $1.3 \times 10^{16}$ Bqと試算され、チェルノブイリ原子力発電所事故時に放出された量の約10%であったとされている (Chino *et al.*, 2011)。

### (3) 大気圏核実験で放出された放射性核種の特徴

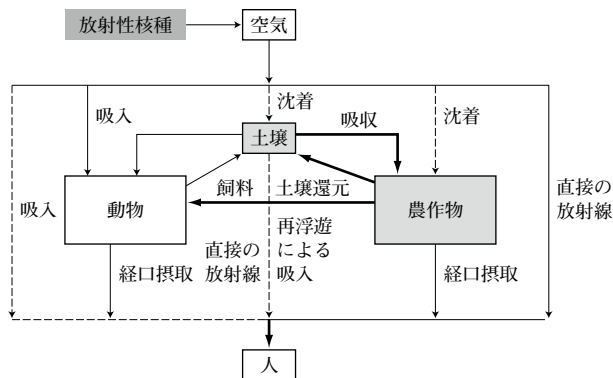
1950年代～1960年代にアメリカ、ロシア、中国、イギリス、フランスなどの国々で行なわれた大気圏核実験によっても、多くの放射性核種が環境中に拡散した。福島原発事故と同様に、放射性ヨウ素や放射性セシウムも飛散したが、放射性ストロンチウムも多量に飛散していることが知られている。ほかには、原爆構造物が中性子を受けて放射性核種となった、放射性マンガン (Mn-54)、放射性鉄 (Fe-55)、放射性コバルト (Co-57、Co-60)、放射性ジルコニウム (Zr-95) など、さらにウランやプルトニウムも飛散した。

### (4) 放射性核種の作物への移行と濃度

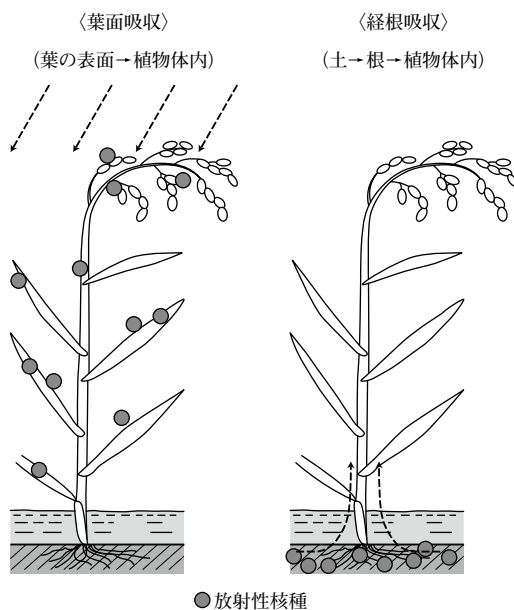
大気中に放出された放射性核種の陸域での人体への移行経路は第2図に示すとおりで、呼吸による直接的な吸入、農作物や畜産物の摂取に伴う移行である。

農作物への放射性核種の移行には二つの経路がある。一つは大気から農作物に直接沈着し吸収される経路 (葉面吸収) であり、もう一つは土壤に沈着した放射性核種が根を経由して植物体内へ移行する経路 (経根吸収) である (第3図)。福島原発事故でも明らかなように、事故直後は葉面吸収の寄与が大きく、大気中放射性核種濃度の減少に伴い直接沈着が減り、経根吸収の寄与が大きくなる。

福島原発事故により放出され農作物を汚染したおもな放射性核種は、放射性ヨウ素 (I-131) と放射性セシウム (Cs-134とCs-137) である



第2図 大気中に放出された放射性核種と人との間の移行経路 (ICRP Pub. 29から作成)



第3図 植物へ吸収される放射性核種の移行経路

が、ほかの放射性核種についても、モニタリングと線量の評価が行なわれている。

これら放射性核種の経時変化に伴う減衰率を第1表に示す。I-131は半減期が8.0日と短いため、1か月後に100分の7、3か月後に10,000分の4に減少する。一方、半減期2.1年のCs-134は、1年後に10分の7、5年後に10分の2に減少するが、半減期30年のCs-137は5年後に10分の9、10年後でも10分の8が残る。したがっ

放射性物質による汚染とその対策

第1表 原子炉から新たな放出がないときのI-131, Cs-134およびCs-137の減衰率

核種	半減期	1週間後	1か月後	3か月後	1年後	5年後	10年後
I-131	8.0日	1/2	7/100	4/10,000	≈0	≈0	≈0
Cs-134	2.1年	≈1	≈1	9/10	7/10	2/10	4/100
Cs-137	30年	≈1	≈1	≈1	≈1	9/10	8/10

て、半減期が短いI-131の農作物への移行については、事故後の比較的早い段階で葉面吸収による影響に注意が必要であるが、生長に伴う経根吸収の寄与は少ない。一方、半減期の長い放射性セシウムは、たとえ事故時に農作物が生長していなくても、生長に伴う経根吸収によって農作物へ移行するため、長い間影響が残る。なお、福島原発事故時のCs-134/Cs-137の放射能比は約1であるが、両核種の半減期が異なることから事故からの時間経過に伴いこの比は、1年後には0.7、5年後には0.2、10年後には0.04と減少し、Cs-137の割合が増加する。

福島原発から陸域環境への追加的な放出も最小限に留まっているため、今後の作物への放射性セシウムのおもな移行経路は経根吸収となる。とくに、半減期の長いCs-137については、今後も多くの課題が残っている。

セシウムは、アルカリ金属に属し、必須元素であるカリウムと同族元素である。カリウムのなかには、放射性核種であるK-40（存在比0.0117%）が存在する。土壌中の平均的なカリウム濃度を10g/kgとすると、300Bq/kgのK-40が土壌中に存在する。また、農作物中のK-40濃度は、白米で20Bq/kg乾物、根菜類、葉茎菜類、果菜類などで数百から数千Bq/kg乾物であり、われわれは毎日摂取している。

各種作物の移行係数の幾何平均値を用いて、土壌中放射性セシウム濃度を5,000Bq/kg（2011年4月に農林水産省によって定められた玄米中放射性セシウム濃度が食品衛生法上の暫定規制値500Bq/kg以下となる土壌中放射性セシウム濃度の上限値）として算出した代表的な農作物中放射性セシウム濃度は、6～29Bq/kg新鮮物（白米：7、ダイコン：6、ニンジン：15、ジャガイモ：29、ハクサイ：14、キャベツ：9、ニ

ンニク：6、キュウリ：14、カボチャ：13、トマト：10、メロン：14）となる。したがって、多くの作物は暫定規制値を下まわると予想されると同時に、農作物中K-40濃度（19～157Bq/kg新鮮物）も下まわる。

今回わが国ではじめての大規模な原子力発電所事故によって放出された放射性核種は、環境を汚染し、2011年8月現在、福島第一原発から全方位半径20kmの避難区域（警戒区域）と計画的避難区域は同発電所から北西方向半径50kmにまで及んでいる。冒頭でも述べたように、放射性核種からの放射線の種類やエネルギー、内部被曝の場合人体中での分布による被曝線量への影響に違いはあるものの、天然放射性核種と人工放射性核種による違いはない。無用な被曝を低減化することは重要な課題であるが、過剰な対応も避けるべきである。放射性核種の濃度の数値のみに惑わされることなく、これまでに培ってきた栽培方法にできるだけ負担にならないように、土壌——作物系における放射性核種の動態に関する科学的知見に基づいたうえで、汚染レベルに応じた効率的対策が求められる。

農作物の放射性セシウム暫定規制値は、500Bq/kgである（第2表）。この値は、実効線量レベルを5mSv/年として平均的な食品摂取量で日割りして、放射線被曝をもたらすことが予測される放射能濃度を求めたものである。なお、2011年10月に食品安全委員会から出された「緊急時・平常時を通じた食品の健康影響評

第2表 食品などに含まれる放射性核種の国が定めた暫定規制値の抜粋（単位：Bq/kg）  
（厚生労働省，2002）

対象物	放射性ヨウ素	放射性セシウム
飲料水	300	200
牛乳・乳製品	300	200
穀類または穀物	—	500
茶（生茶葉・荒茶・製茶）	—	500
肉・卵・魚・その他	—	500
野菜類（根菜、いも類を除く）	2,000	500

価として、現在の科学的知見に基づき、生涯における食品からの追加的（通常の一般生活において受ける放射線量を除く）な累積線量として、おおよそ100mSv以上と判断した」ことから、2011年12月現在、規制値の検討がなされている最中である。

最後に、農業従事者にとって注意が必要なことは、圃場での作業に伴う被曝（土壌の再浮遊の吸入による内部被曝、土壌表面に蓄積した放射性核種からの外部被曝）である。被曝低減化のために、放射能濃度の比較的高い地域での作業には、農作業に伴う土壌粒子の再浮遊による吸入を避けるためマスクの使用と手袋の着用が望ましい。また、乾いた農地での耕うん作業などでは土壌の舞上がりが多いので、農作業に支障がない限り土壌水分の比較的高い日に作業するなどにも留意したい。加えて、作業時には線量計を携帯するなどの外部被曝の適切な管理が必要となろう。

\*

2011年10月27日に食品安全委員長が厚生労働大臣に対して、食品健康影響評価を答申した。これを受けて厚生労働大臣より薬事・食品衛生協会会長あてに諮問がなされるとともに、放射性セシウムについて食品から許容することのできる線量を「年間5ミリシーベルトから1ミリシーベルトへ引き下げる」とする基本的な考えが提案された。放射性物質対策部会で新しい「基準値」を検討し、2011年12月22日に一般

食品（飲料水、乳児用食品、牛乳を除く）の放射性セシウムの基準値（限度値）を100Bq/kg（案）とする中間報告を提出した。

執筆 塚田祥文（（財）環境科学技術研究所）

鳥山和伸（（独）国際農林水産業研究センター）

---

#### 参考文献

- Chino, M., H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata and H. Yamazawa. 2011. Preliminary estimation of release amount of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere. *J. Nucl. Sci. Tech.* **48**, 1129—1134.
- IAEA. 2006. Environmental Consequences of Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience.
- ICRP. 1979. Radionuclide Release into the Environment - Assessment of Doses to Man. ICRP Publication 29.
- 厚生労働省. 2002. 緊急時における食品の放射能測定マニュアル.
- 文部科学省. 2011. 放射線モニタリング情報. 文部科学省（米国エネルギー省との共同を含む）による航空機モニタリング結果. [http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring\\_around\\_FukushimaNPP\\_MEXT\\_DOE\\_airborne\\_monitoring/](http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_MEXT_DOE_airborne_monitoring/)
- UNSCEAR. UNSCEAR 2000 Report Vol.II. Source and Effects of Ionizing Radiation.