

(資料) 平成23年度公開講座 「放射能と放射性物質の拡散」の紹介

岡本 眞一*

平成23年度公開講座で説明した放射性物質の拡散についての解説記事は比較的的好评であったので、ここにその内容を紹介する。すでに、その一部は、畠中伸敏監修で日本規格協会より出版された「予防と未然防止」の著書の中にも紹介されているが、その際に紙面の都合で割愛された測定データの解釈などに関する考察も含めて、ほぼ全文をここに紹介する。

キーワード：放射性物質、拡散、SPEEDI、放射能

Open Lecture 2011 “Radioactivity and Dispersion of Radioactive Material”

Shin'ichi OKAMOTO *

The author has explained about radioactivity and dispersion of radioactive material in a 2011 open lecture of the Tokyo University of Information Sciences. As this lecture could get a favorable reception, brief summary of the lecture will be reproduced here. A part of the contents was already appeared in the book looked over by Prof. Hatanaka. However, some parts were left out on account of the space of pages. Therefore, several important measured data and its considerations were shown here.

Keywords: Radioactivity, dispersion of radioactive material, diffusion, and SPEEDI

1. はじめに

昨年2011年10月15に行われた東京情報大学平成23年度公開講座の内容を紹介する。ここで説明した放射性物性の拡散についての解説は比較的に好評であったので、本論集の資料としてここに紹介する。すでに、その一部は、畠中伸敏監修で日本規格協会より出版された「予防と未然防止」の著書の中でも紹介されているが、その際に紙面の都合で割愛された測定データの解釈などに関する考察も含めて、ほぼ全文をここに掲載する。

2011年3月の福島第一原子力発電所の事故以来、毎日のように放射能の話題がTVや新聞などに登場している。しかし、放射線、放射性物質、放射能、というような言葉については、正確な意味が分からないままに何となく使用していることも多い。また、その結果の公表が遅れたことで有名になったSPEEDIという放射性物質の拡散予測システムがある。今回の騒動により、その存在を始めて知った人も多いと思います。今回は、このような放射能やその拡散予測モデルについて、その原理や考え方を分かりやすく紹介したいと思います。この資料では、分かりやすさを優先しましたので、科学的な正確性を多少は犠牲にした部分もあります。参考文献は丁寧に記載したつもりですので、他への引用には、原典での確認をお願いします。

2. 物質とは（物理の基礎）

物質は、分子、原子から構成されている。そして、原子は陽子と中性子からなる原子核とその周りを回る電子によって構成されている（図1参照）。この電子が動くことを電気が流れるという。乾燥した季節に金属のドアに触れると「パチーッ」と来るのは、私たちの体に溜まった電気（電子）が急激に流れるからである。

あまり電気を通さない水に食塩を入れると電気をよく通すようになるのは、食塩が水の中で、イオン化（陽イオンと陰イオンに分かれる

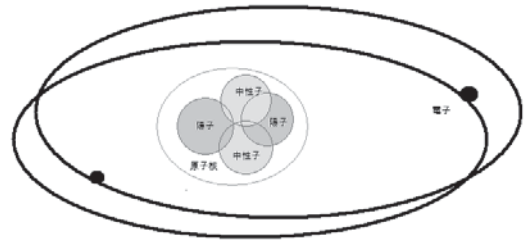


図1 原子の構成

こと) して、電気を通す溶液になるからである。原子の中から電子が抜けたものが陽イオン、原子の中の電子が増えたものが陰イオンである。このように、電気的に中性な物質が水溶液中でイオンに分かれる現象のことを電離 (electrolytic dissociation) という。

非常に高温な状態であったり、電磁波が照射されたりすると、溶液がなくても、気体を構成する分子が電離して、陽イオンと電子に分かれて動き出すことがある。このように、陽イオン（原子核）と電子が自由に運動している状態をプラズマ (plasma) という。

3. 放射線と放射能

放射線とは、高い電離性（原子核の周りを回っている電子を分離させる力を持っていること）を有する高いエネルギーを持つ電磁波や粒子線を指す。

電磁波とは、電場と磁場の変化によって形成される波（波動）である。波長の長いほうから、電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線と呼ばれている。ここで、X線、ガンマ線の違いは主に発生場所（X線は軌道電子、ガンマ線は原子核）によるものである。発生場所の区分ではなく、一般のX線よりもエネルギーが高い（波長の短い）電磁波をガンマ線という場合もある。また、電場とは、「電荷」を持った物体（帯電物体）が力を受ける場（空間）である。磁場とは、磁石を置いたときに、力を受ける場のことである。ともに、「電界」、「磁界」ということもある。

粒子線とは、原子や分子などの粒子のビーム（粒子が束状に進んでいく状態）である。たとえば、電子線、陽子線、中性子線、などです。ブラウン管（テレビ）の中では、ガラス面に向かって、電子線が放出されている。

紫外線は電離作用を有しているが、一般的に放射線には含めない。紫外線や可視光線は電離性が弱いので、非電離放射線ということもある。中性子線はどんなにエネルギーが低くても放射線の扱いとする。

放射線を出す能力を「放射能」という。放射能を持つ物質を放射性物質という。

同じ原子番号を持つ元素の原子において、中性子の数が異なるものを同位元素（アイソトープ）という。たとえば、ウラン235とウラン238など。同位元素は人工的にも作るができる。たとえば、プルトニウムなど。

不安定な同位元素（放射性同位体）は電子、陽子、中性子を放出して、別の原子に変化する。これを放射性崩壊という。特に、ヘリウム原子核より重い粒子を放出して、原子核が大きく割れる場合は、原子核分裂という。

4. 原子力発電所と放射性物質

ウラン（U）には多くの同位体がある。そして、自然界に存在するウラン（U）は大部分がウラン238であり、核分裂しやすいウラン235は約0.7%である。この比率を高める操作を濃縮といい、数%にしたものが原子力発電所の燃料になる。ウラン235の原子に中性子が衝突すると、核分裂が生じ、新たに2-3個の中性子が放出される。この現象が連続的に生じている状況が連鎖反応である。このときに放出されるエネルギーが核分裂エネルギーである（1個あたり 10^{-11} ワット/秒）。ウラン235は1gに 10^{21} 個の原子核があるので、1gのウラン235が完全に核分裂した際に放出される熱量は石炭2.8トンの燃焼に相当する。実際はこれよりもかなり小さい。これが原子力発電所の基本的なエネルギーである。

原子炉内の放射性物質の約80%は核分裂の結果生じた生成物（これを核分裂生成物 Fission Product, FPと呼ぶ）であり、残りの約20%は中性子の照射により放射能を持つようになった放射化生成物（放射性同位元素）である。核分裂生成物（さらに、そこから放射性崩壊により生成した物質を含む）の種類は100を超えるといわれている。この中には、クリプトンKr、キセノンXeなどの気体分子も含まれ、炉内圧力の上昇をもたらす。原子炉の運転に際しては、テルルTeとサマリウムSmの系列が重要である。キセノン135は炉内でも発生するが、FPであるテルル135の放射性崩壊によりヨウ素Iを経て生成されるものもある。そして、その後、セシウムCs、を経て、安定なバリウムBaに変化する。このキセノン135は炉の運転を不安定にすることもある¹⁾。このように、不安定な放射性同位体は放射線を放出して、安定な元素に変化する。この変化により、放射性同位体の量が半分減るまでの期間を半減期と呼んでいる。

表1 代表的な原子力発電所での炉停止時の放射性物質の内蔵量（文献2、p.40より引用）

核種	内蔵量 (MCi)*	半減期
クリプトン85	0.6	10.76年
キセノン133	170	5.3日
ヨウ素131	85	8.05日
セシウム134	1.7	2年
セシウム137	5.8	30年
ストロンチウム89	110	50.6日
ストロンチウム90	5.2	27.7年
テルル129	10	69.6分**
プルトニウム239	0.01	24360年

(注) *1Ci = 3.7×10^{10} Bq、Mは 10^6 （メガ）を表す。

**ウィキペディア フリー百科事典により修正、
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%86%E3%83%AB%E3%83%AB%E3%81%AE%E5%90%8C%E4%BD%8D%E4%BD%93>

5. 放射能の測定

放射性同位体は、放射性崩壊の際に α 線、 β 線、 γ 線という放射線を放出する。放射線のエネルギーの単位は電子ボルト (eV) である。一個の電子が1 Vの電圧で加速されて得る運動エネルギーの大きさが1 eVである。そして、1 eVは 1.6×10^{-19} ジュール (J) である³⁾。

表2 放射線の種類と特徴

放射線	内容	相対的な影響度	遮蔽物質
α 線	α 粒子 (ヘリウム原子核)	20	紙
β 線	β 粒子 (電子)	1	薄い金属板
γ 線	電磁波	1	鉛、厚い鉄板、コンクリート
中性子線	中性子	5-20	水、厚いコンクリート

放射能の強さは、1秒間に崩壊する原子核の数で表される。これはベクレルという単位で表す。かつて、ラジウム1 gの放射能を1キュリーとした。すなわち、1ベクレル (Bq) は 2.7×10^{-11} キュリー (Ci) である。

放射能は直接に測定することが難しいので、放射能を持つ物質から出る放射線を測定して、放射能の量を計算する。 α 線、 β 線、 γ 線の検出には、さまざまな検出器が用いられる⁴⁾。

- ① 安価な市販の放射能測定器は、多くがガイガー＝ミュラー計数管である。これは、不活性ガスを封入した円筒に電極を装着したものである。電離放射線 (β 線、 γ 線) が円筒内を通過すると、不活性ガスの分子が電離して、パルス電流が流れるので、これを計測する。
- ② 電離放射線 (β 線、 γ 線) により、蛍光を発する物質を利用し、蛍光の明るさと蛍光の数を測定する方法がある。＝シン

チレーション検出器

- ③ 電離放射線が半導体の中を通過すると、電離した電子が発生し、電極に集まるので、それを計測する方法がある。＝半導体検出器

物質に与える放射線の影響を評価するための指標として、線量 (Dose) という考え方が導入された。物質の単位質量あたりの吸収される放射線のエネルギー量を吸収線量といい、グレイ (Gy) という単位で測定される。1 Gyの吸収線量とは1 kg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。

$$1 \text{ J} \doteq 2.8 \times 10^{-7} \text{ k W} \cdot \text{h} \doteq 0.239 \text{ cal} \doteq 0.624 \times 10^{19} \text{ eV}$$

生物 (人) に与える放射線の影響は、放射線 (α 線、 β 線、 γ 線) の種類によって異なる。同じ吸収エネルギー量でも、 α 線は β 線、 γ 線よりも生体の細胞に大きな障害を与える。このため、表2に示す相対的な影響度に対応した「放射線荷重係数 (線質係数、換算係数という場合もあった)」を吸収線量に乗じて、線量を計算する。線量の単位はシーベルト (Sv) である。放射線荷重係数が1の放射線 (β 線、 γ 線) については、1グレイの吸収線量が1シーベルトである。

$$\text{線量 (Sv)} = \text{「放射線荷重係数」} \times \text{吸収線量 (Gy)}$$

かつて、上の式で計算される量を線量当量 (dose equivalent) と呼んでいた。しかし、平成13年の法令改正で、この量は単に「線量」ということとなった。また、この改正に伴うその他の用語の変更は表3のとおりである。

不安定な放射性同位体は γ 線などの放射線を放出して、安定な元素に変化する。この際に放出されるガンマ線の波長 (エネルギー) は放射性同位元素により固有なので、このガンマ線の

表3 法令改正に伴う用語の変更

旧法令	法令改正 (平成13年4月より)
実効線量当量	実効線量
組織線量当量	等価線量
1 cm線量当量	実効線量
線量当量	線量

出典：菊池透、「放射線安全規則改正に伴う対応」平成12年度放射線従事者の再放射線安全教育訓練

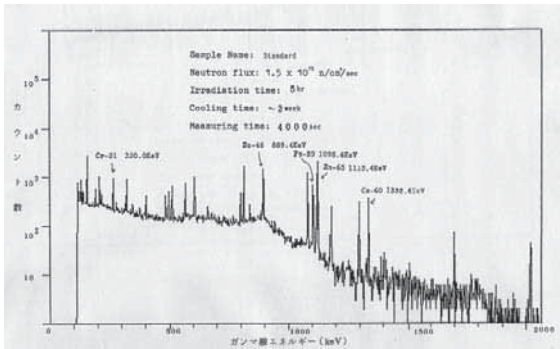


図2 ガンマ線スペクトルの例

(出典：(社)産業公害防止協会、粒子状物質の挙動に関する調査研究・昭和57年度現地調査報告、p.141)

スペクトル(図2参照)を読むと、放射線(ガンマ線)を出している核種の種類とその量を定量的に測定することができる。しかし、ストロンチウム90は主にガンマ線ではなく、ベータ線を放出しているので、この方法での測定は困難である。通常の元素でも、原子炉の中で中性子を照射して、生成された放射性同位元素(放射化生成物)についてのガンマ線スペクトルを求めれば、定量分析ができる。これは中性子放射化分析(INAA)という。

6. 物質の拡散と沈着

6.1 物質の拡散

大気中で煙の濃度の濃い部分と薄い部分が存在すると、この両者は互いに混合して、次第に全体が均一な濃度となるように変化していく。これがいわゆる拡散作用と呼ばれているもので

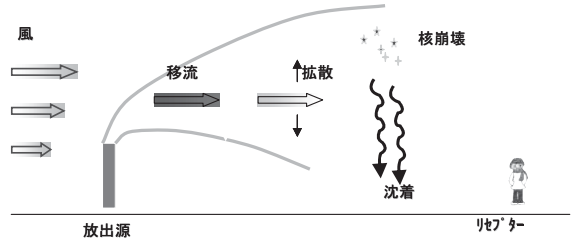


図3 大気中での放射性物質の移流、拡散と沈着

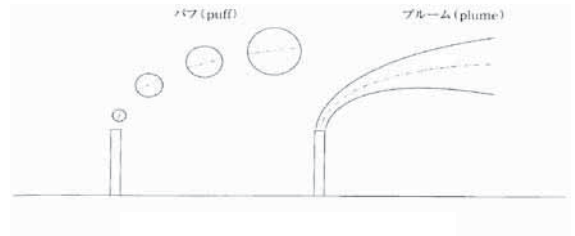


図4 煙の流れのモデル

ある。この拡散を促進するのは、風の乱れ(小刻みに風向、風速が変化していること)である。また、風(平均的な空気の流れ)により風下に輸送される現象を移流と呼んでいる。そして、これらの大気中での現象を模式的に表現したものが図3である。

大気中を拡散する物質についての濃度を計算できるように、その挙動を数学的に表現した数式を拡散式と呼んでいる。連続的に大気中へ放出されている煙は一筋の煙の流れとなるが、これはプルーム(plume)と呼ばれている。また、瞬間的に放出された煙は一固まりとなって風下へ流れていくが、このような煙はパフ(puff)と呼ばれている(図4参照)。そして、プルームについての濃度分布を記述する拡散式をプルーム式(あるいはプルーム拡散式)といい、パフについての拡散式をパフ式という。さらに、濃度分布が正規分布で表現されるプルーム式のことを正規型プルーム式という。このほかに、拡散の物理法則にしたがって、微分方程式のモデルをそのまま数値的に解く方法もある。

6.2 物質の沈着

大気中に放出された汚染物質が地上に降下

し、地面に付着する現象を沈着 (Deposition) という。大きい粒の粒子は重力で下に落下し、細かい粒子は他の物質に付着する。わかりやすい例としては、たばこを吸う人の部屋の窓やカーテンは、吸わない人の部屋に比べて汚い、窓がすぐにすすけて、カーテンもヤニでベトベトしてくるということを経験されたと思います。これは、大気中に含まれているたばこの粒子がガラス窓の表面やカーテンの繊維に付着するからである。それがこの沈着という現象である。この際の沈着量は次式で計算できる。

$$\text{沈着量} = \text{沈着速度} \times \text{地表近くの大気中の濃度}$$

この沈着のプロセスをもう少し分解して考えれば、乾性沈着と湿性沈着の2つがある。乾性沈着とは、たばこの煙がカーテンに付着するような水分の降下を伴わない沈着プロセスである。もう1つの湿性沈着とは、雨によって汚染物質が洗い流されることである。このように水分の降下を伴って、大気中から地表面に輸送される現象を湿性沈着という。地表面に降下した放射性物質の湿性沈着量は酸性雨 (酸性沈着) のモデルと同じような方法で計算される。一般的には、乾性沈着量より湿性沈着量のほうがはるかに大きく、高濃度時の降雨量の分布によって、沈着量の分布も大きく変化する。

6.3 拡散モデル

大気中での拡散現象を数式で表現して、コンピュータ言語であらわしたソフトウェアを拡散予測ソフトあるいは拡散モデルと呼んでいる (図5参照)⁵⁾。

一般に煙突から吐き出された煙の濃度を計算する場合、図6に示すような方法で座標を設定する。少し風が吹いていれば、風によって流される方向への拡散は無視できる。そして、風と直角な断面内での濃度分布は正規分布 (成績の偏差値の分布と同じ) で表現されるので、放射性物質の放出量と放出高度、風向・風速、物質



図5 現象のモデル化とコンピュータ・ソフトウェア⁵⁾

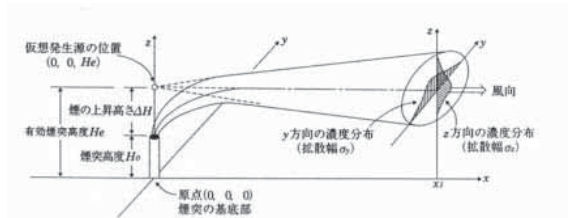


図6 高煙源 (高い煙突を有する発生源) についての濃度計算のための座標設定

の広がり (図6で拡散幅と表示されている量であり、大気の状態の関数となる) が分かれば、大気中での放射性物質の濃度が計算できる。

大気中での物質の拡散についての方程式を解く際にさまざまな仮定を置くが、その際の不確定性をより小さくするために、微分方程式を直接に解く方法がある。空間を3方向のメッシュ (格子) に切って、その格子点あるいは一つ一つのセル (メッシュ) の中心点のどちらかの濃度を計算するモデルを「3次元格子モデル」という。日本原子力研究所が開発したSPEEDIでは、この方法を採用している⁸⁾。

大気中の放射性物質の濃度推定は一般の大気汚染物質の濃度計算とまったく同じである。たとえば、公害防止管理者の試験に出るような方法で計算される²¹⁾。

7. 線量計算

大気中を浮遊している放射性物質の濃度と地表面に沈着した放射性物質の量は、前節に示したように一般的な大気拡散モデルや浮遊粒子状物質 (降下煤塵) のシミュレーションモデルにより計算できる。次にこれらの放射性物質から

表4 放射線の被曝経路⁶⁾

名称	英文名称	説明
クラウドシャイン	cloudshine	大気中に浮遊している放射性物質からの外部被曝
グラウンドシャイン	groundshine	地表に沈着している放射性物質からの外部被曝
吸引被曝	inhalation	大気中に浮遊している放射性物質を吸引したことによる内部被曝
摂取被曝	ingestion	食べ物に付着している放射性物質を摂取したことによる内部被曝
再飛散	resuspension	地表に沈着している放射性物質が再飛散したものによる外部被曝（一般的には小さい）

の放射線の被曝量を計算しよう。被曝経路によって、外部被曝と内部被曝に分けられる。飲食や呼吸により私たちの体の中に取り込まれた放射性物質が体の中で放射線を出して、体の中で組織にダメージを与えるような被曝を内部被曝という。一方、私たちの体の外にある放射性物質が放出した放射線を浴びることを外部被曝という。外部被曝では、大気中に浮遊している放射性物質からの外部被曝をクラウドシャイン (cloudshine)、地表に沈着している放射性物質からの外部被曝をグラウンドシャイン (groundshine) という。このほかに、沈着した放射性物質の粒子が土ほこりとともに再飛散するものもあるが、その影響は一般的には小さいと云われている。

最も簡単なクラウドシャインの計算は、大気中の放射性物質の濃度が均一で、無限の大きさの放射性物質の雲の中に入った場合の想定である。大気中の放射性物質が広範囲に広がった状態で、その中央付近の地表近くの人の暴露量を

計算するときは、この考え方で近似できる。ここで、雲の中心でのβ線についての被曝量は次式で計算される⁷⁾。

$$D_{\beta} = \chi E_{\beta} \times \text{係数}$$

D_{β} 大気中での線量率 (rad/s)

E_{β} 1崩壊あたりの平均βエネルギー (MeV/dis.)

χ β崩壊核種 (放射性物質) の大気中濃度 (Ci/m³)

ここで、1崩壊あたりに放出されるエネルギーは核種ごとに (放射性同位元素の種類によって) 異なるので、実際の計算では、データベースが必要である。次に、放出源の近くで、大気中の濃度が大きく変化している場所でのγ線の被曝量を計算する場合の方法を1例として示す。まず、放射線に被曝している人 (リセプター) から距離rにある1つの点放射線源からのγ線の被曝量を次式で求める⁷⁾。

$$D_{\gamma} = C_1 q E_{\gamma} (1 + C_2 r) \exp(-C_3 r) / (C_4 r^2)$$

D_{γ} 距離rでの線量率 (rad/s)

E_{γ} 1崩壊あたりの平均放出γエネルギー (MeV/dis.)

q γ崩壊核種 (放射性物質) の放射能 (Ci)

r 放射線源からリセプターまでの距離 (m)

C_1, C_2, C_3, C_4 係数

次に、大気中に分布しているすべての放射性物質からの被曝量の合計を求める必要がある。これは数学的には積分計算である。文献7及び22では、まだコンピュータが不自由な時代 (1960年代初期) の計算方法として、図4に示すパフがリセプター (被曝している人) の近く

を通り過ぎる際に、パフの中の濃度分布に対応した放射性物質からの線量率の合計が計算できる方法が示されているが、かなり複雑な計算となる。今日では、コンピュータの性能が向上したので、より正確な線量率の計算が可能になっている。たとえば、従来のSPEEDIシステムでも、 $50 \times 50 \times$ (鉛直方向格子数) の空間 (セル) について、そのセル内には、その濃度に対応する放射性物質が存在するとして、すべてのセルからの線量率を計算している。なお、最新のSPEEDIシステムでは、粒子法で放射性物質濃度を計算しているので、その個々の粒子からの線量率を積算する方法を採用している⁸⁾。

ここでは、地表に沈着している放射性物質からの線量の計算方法の説明は省略する。

8. 人体影響

放射線による人体影響を考慮する場合、以下の2つを分けて考える必要がある。

- ① 体の外にある放射性物質から放出される放射線の影響
- ② 放射性物質が付着した食べ物や飲料を摂取した場合や放射性物質を吸引して、体内にある放射性物質が放射線を放出した場合の影響

上記の①については、前節で説明した方法で被曝線量を計算し、影響を評価すればよい。しかし、②については影響の出方が複雑である。たとえば、ヨウ素の同位元素は喉の甲状腺に集まるので、甲状腺がんのリスクが高い。また、ストロンチウムの同位元素はカルシウムと体内での挙動が似ているので、骨に影響が出やすい。

ある出来事 (例えば、呼吸による放射性物質を吸引) によってもたらされた被曝を、その被曝が続く期間 (半減期の長い放射性物質ほど長くなる) について時間積分すると、その出来事によるリスクの総和を表すことができる⁹⁾。これを線量当量 (法令上の名称では「線量」とすべき) について行ったものを線量当量預託

(committed dose equivalent, CDE) という。半減期の短い放射性物質は指数関数的にその量が減少していくが、半減期の長い放射性物質については、被曝期間50年 (子供では70年) と仮定して、被曝量を計算する。

また、私たちの体は同じ量の放射線を浴びても、(体の中の) 組織によってその影響の大きさが異なる。このため、組織ごとの影響の起こりやすさを考慮して、全身が均等に被曝した場合と同一尺度で被ばくの影響を表す量を実効線量という。実効線量を表す方法として、ある組織・臓器の等価線量に、臓器ごとの影響に対する放射線感受性の程度を考慮した組織荷重係数 (表5参照) をかけて、各組織・臓器について足し合わせた量が用いられる¹⁰⁾。実効線量 (単位Sv) は、かつて、実効線量等量と呼ばれていたが、平成13年 (2001年) の法令改正でこのような標記となった¹¹⁾。

$$\text{実効線量 (Sv)} = \Sigma (\text{等価線量 (Sv)} \times \text{組織荷重係数})$$

ここで、 Σ (合計を表す数学記号) はカッコ内の計算値を合計することである¹⁰⁾。なお、実効線量は直接に測定できるものではなく、私たちが摂取あるいは吸引した放射性物質、あるいは、私たちが浴びた放射線量に基づいて、一定のモデル式で計算される量である。

空気や物体 (測定器も含めて) の吸収線量は科学的に測定することができる。しかし、ここで議論している線量 (人が被曝している量) は、さまざまな約束 (決め事) に基づいて計算された値であって、科学的な測定方法による直接の測定値ではないということである。これらの「決め事」とは、たとえば、アルファ線の影響はベータ線の20倍、肝臓のダメージは皮膚の5倍、などである。これらの諸量について、科学的にその正しさを厳密に証明することはできない。しかし、このことについての国際的な合意は得られている値である。さらに、多くの人

表5 組織荷重係数(一例)¹¹⁾

組織・臓器	組織荷重係数
生殖腺	0.2
骨髄、肺、胃	0.12
膀胱、肝臓、甲状腺	0.05
皮膚、骨表面	0.01

表6 用語の概略説明

用語	説明
線量率	放射線被曝の強さ、時間当たりの吸収エネルギー量(Gy/s)
吸収線量	放射線被曝量の大きさで、吸収エネルギー量で表される。線量率に時間を乗じて(掛け算して)求められる。(Gy)
線量 (旧名称、線量当量)	放射線ごとの生体への影響の強さを加味して補正した被曝量で、線量率に時間と放射線荷重係数を乗じて(掛け算して)求められる。(Sv)
等価線量	放射線ごとの生体への影響の強さを加味して補正した被曝量です。線量当量と同じ意味で使用される。(Sv)
実効線量	組織ごとの等価線量に組織荷重係数をかけて求められる量で、全身が均等に被曝した場合に換算した被曝量である。(Sv)
1 cm線量当量	人体の皮膚から内部に1 cmのところの被曝量である。一般的には、実効線量よりも高い値となることが多い。個人用の計測バッジなどでは、この値が表示できるように調整されているものもある。
預託線量	体内に取り込まれた放射性物質が体内に留まる間に放出する放射線による被曝量の合計である。一般には、被曝期間50年として計算する。

にとって、理解を困難にしている原因のひとつは、平成13年の法令改定で用語が変わっているにもかかわらず、市販のテキストやWEBページでも、旧名称が多く使用されていることである。ここで、これらの用語について、簡単な説明を表6に示す。なお、これは、正確な用語の定義ではないので、必要に応じて、それぞれの資料を参照してください。

放射性物質の影響については良く分からないことも多い。とくに放射線の影響による「がん」発生確率の増加についてはさまざまな報告がある。通常の化学物質による毒性の出現率に関しては、まったく影響の現れない「閾(しきい)値」があるが、発ガン物質に関しては、閾値が存在しないとも言われている¹²⁾。

ここで、被曝経路別の計算値について考えて見ましょう。当初、わが国では、被曝線量の発表に際して、「今回の計測値は、〇〇から〇〇まで、飛行機で旅行する程度です。」という表現が多く使われていた。これは、地球には宇宙から放射線が降り注いでいるからである。しかし、この宇宙線の被曝はすべて外部被曝であって、放射性物質が体内に取り込まれることはない。このことについても注意する必要がある。わが国のWSPEEDIでも、被曝経路別の計算が行われているが¹³⁾、あまり詳細な結果は報告されていないようなので、米国の資料¹⁴⁾に基づいて考えて見よう。

ここで、2011年3月16日に米国原子力規制委員会が発した避難指示文書に添付されている

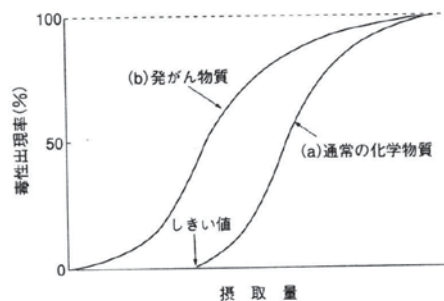
図7 化学物質の摂取量と毒性出現率の関係¹²⁾

表7 米国原子力規制委員会が2011年3月16日の発表した避難指示文書の参考資料¹⁴⁾

(2350MWの沸騰水型原子力発電所での仮想事故時の線量計算結果、このデータは仮定の条件に基づくものであり、実際とは異なることもあり得るとの注釈がついている。) 単位はrem (1 rem = 0.01Sv)

Distance Mi (km)	距離 マイル (km)	0.5 (0.8)	1.0 (1.61)	20. (32.2)	50. (80.5)
Total EDE	全実効線量当量	<u>5400</u>	<u>2000</u>	<u>63</u>	<u>8.1</u>
Thyroid CDE	甲状腺・預託線量当量	<u>28000</u>	<u>11000</u>	<u>270</u>	<u>23</u>
Inhalation CEDE	吸引 預託実効線量当量	3700	1400	31	1.3
Cloudshine	浮遊放射性物質からの外部被曝	19	9.3	0.38	0.027
4-day Groundshine	地表堆積放射性物質からの外部被曝 (4日間)	1700	650	32	6.7

EDE = effective dose equivalent, CDE = committed dose equivalent, CEDE = committed effective dose equivalent

米国のPAGs (Protective Action Guideline, 防護活動指針) における指針値を超過した数値にはアンダーラインが引かれている。

た参考資料¹⁴⁾の一部(1 km以遠の一部を割愛)を表7に示す。これを見ると、外部被曝では指針値を超過していないにもかかわらず、全実効線量当量と甲状腺・預託線量当量が指針値を超過している。このことは、放射性物質を体内に取り込まないようにすることが大切であることを示唆しているようにも思われる。

9. 環境中での放射線量及び放射性物質の測定結果

ここで、環境中での放射線量のデータについて、見てみよう。都内では、新宿区百人町の健康安全研究センターにおいて、大気中の放射線の量(ガンマ線)を、モニタリングポストと呼ばれる据え置き型の装置(シンチレーション検出器)で、1年を通じ24時間連続して測定を行っている¹⁷⁾。この結果の一部を図8に示す。この結果を見ると、1時間毎の値の最大値は2011年3月15日10時の0.496 $\mu\text{Gy/h}$ であるが、日平均値での最大値は3月23日の0.146 $\mu\text{Gy/day}$ である。3月15日のピーク値は放射性物質の雲が通り過ぎたことによるものであり、3月22日以降の高い値は3月21-22日の雨により沈着したもので、現在もその一部が地表にとどまっているものと思われる。

表8に気象庁(大手町)での気象データを示す。3月15日は雨量0 mmであり、雨量計には溜

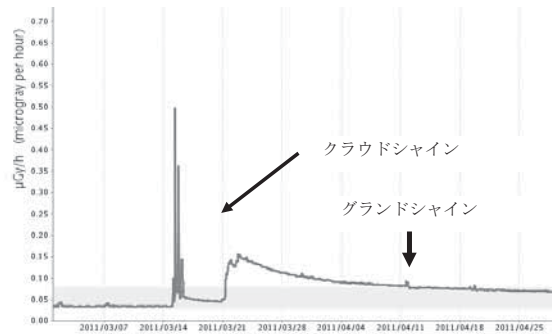


図8 新宿(百人町)での環境放射線量測定結果

(出典 <http://ftp.jaist.ac.jp/pub/emergency/monitoring.tokyo-eiken.go.jp/monitoring/graph.html>)

まらない程度の僅かな降雨があったことが分かる。21日には日雨量20mmの降雨があり、この日に最も多くの放射性物質が降下したものと思われる。

これと同じようなデータは、千葉市稲毛区の日本分析センターでも得られており²³⁾、このデータを見ると、新宿区百人町のデータと比較して、3月15日のピーク値では約1.5倍、3月21-22日のピーク値では約2倍の線量を示している。この結果より、3月15日には放射性物質のブルームの中心がより近くを通過したことが分かる。3月21-22日は降雨強度との関係があり、この結果のみからでは断定的なことはいえない。

表8 気象庁 日ごとのデータ

2011年3月

日	雨量合計	最大風速	
		風速	風向
10	--	7.1	北西
11	0	8.8	北北西
12	--	7.4	南
13	--	4.4	西北西
14	--	7.5	南
15	0	5.2	東北東
16	0	11.2	北北西
17	--	8.8	北西
18	--	6.2	南南東
19	--	5.8	南
20	--	8.9	南
21	20	5	東北東
22	13.5	3.9	東
23	1.5	5	南
24	0	5.7	南南東
25	0	8.3	南南東
26	0	9.6	北西
27	0	6.6	北西
28	0	4.7	南
29	--	6.2	南東
30	0	6.9	南南東
31	0	7.2	北北西

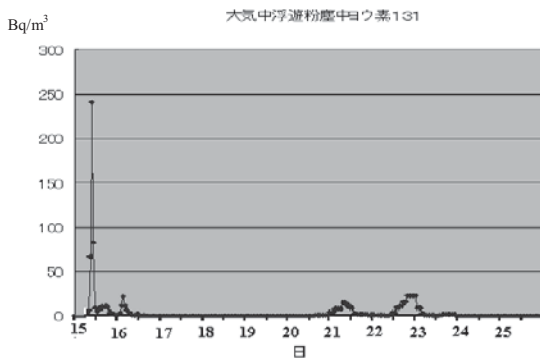
出典 <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>

図9 東京都立産業技術研究センター駒沢支所での浮遊粒子状物質中のヨウ素131の濃度

(測定場所、世田谷区深沢) (2011年3月15~27日)

東京都内では空間放射線量（環境中での吸収線量）のみではなく、大気中に浮遊している放射性物質（具体的にはヨウ素とセシウム）の濃度も測定されている¹⁸⁾。東京都立産業技術研究センター駒沢支所が世田谷区深沢で測定している浮遊粒子状物質中の放射性物質の中からヨウ素131のデータを図9に示す。この結果を見ると2011年3月15日、午前10時ごろに最大値となっており、これは新宿区百人町で空間線量率が最大となった時間とも一致している。しかし、図9では、新宿区百人町で日平均値が最大となった3月21-23日のピークは小さいことがわかる。この結果より、3月21-23日に高い値を示した放射性物質の大部分は、粒子として沈着したのではなく、雨（降水）によってもたらされたものであることを示している。このことから、大気中の放射性物質濃度が高いときに、雨量が多かった地域では、沈着量が多くなると考えられるので、地表近くの線量の精密測定が必要であろう。

軍縮・不拡散促進センター（CPDNP）が高崎CTBT放射性核種探知観測所において放射性核種の探知を行っており、2011年3月19日以降にその状況を順次、発表している¹⁹⁾。この中

表9 高崎CTBT放射性核種探知観測所における放射性核種探知状況

(CPDNP、軍縮・不拡散促進センター、2011年4月23日発表) 単位 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$

開始	3月13日	3月15日	3月16日
終了	3月14日	3月16日	3月17日
Ba-140		312,725	542
Cs-134	613	6,921,136	14,311
Cs-136	160	857,713	2,781
Cs-137	714	5,644,666	16,380
I-131	2,668	14,680,552	55,607
I-132	5,219	11,156,850	35,700
La-140	62	1,770,189	1,521
Tc-99m	3,564		130,378
Te-129	387	2,127,038	7,792
Te-129m	1,046	22,588,878	13,173
Te-132	7,792	27,094,139	25,177

で、当初の発表資料には含まれていた幾つかの核種についてのデータがその後の資料からは消去されているなど、物議を醸している。ここでは、4月23日の発表資料を表9に示す。世田谷区深沢の資料は限られた核種について、比較的短い捕集時間でのサンプル（高濃度時は1時間のサンプリング）を分析している。一方、高崎では、原則24時間捕集のサンプルについて、多くの核種の分析を行っている。このような複数の核種についての詳細なデータを分析することにより、世界中の何処かで行われた核実験の詳細を推測できる。また、同時に、原子力発電所の事故時のデータを解析することにより、これらの放射性物質が放出されたときの原子炉の状態を推測することも可能である。ここで注目される記述は以下の点である。

資料¹⁹⁾より引用すれば、「これらの放射性核種は、福島原子力発電所事故を起源とするものと考えられるが、3月12～14日の間に捕集された大気中に含まれていたかどうかは不確かであり、大気捕集後の測定中（15日以降）に飛来して検出器及びその周辺を汚染し、検知されたものではないかと見られる。したがって、観測された放射性核種は定性的には正しいが、その濃度については正確な測定値を示していない。」とのことである。一般的に、このような試料は、自然界の放射線による汚染（コンタミネーション）を防止するために厳重に管理されているはずである。それにも拘らず、汚染が生じたということは、データが発表されていない3月14～15日の濃度がいかに高かったかということを示唆しているようにも思われる。また、コンタミネーションの程度から、この期間中の濃度を推定できるかも知れない。

東京（世田谷）及び高崎の空間線量が最も高くなった3月15日の関東地方での降雨の状況を見ると、3月15日の夕刻から16日の早朝に北関東で降雨があり、3月15～16日の積算雨量の分布は図10に示すようになる。群馬県北部では、東京の21日と同じ10mm程度の降雨があったこと

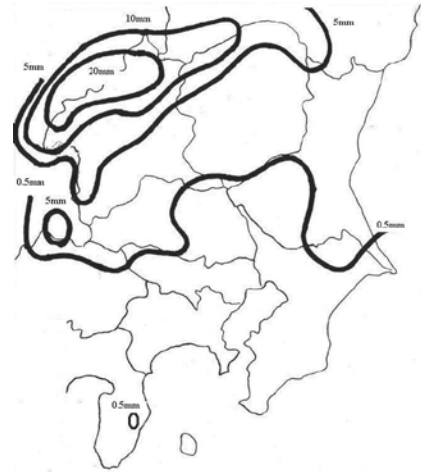


図10 AMEDAS 降水量分布
(2011年3月15-16日)

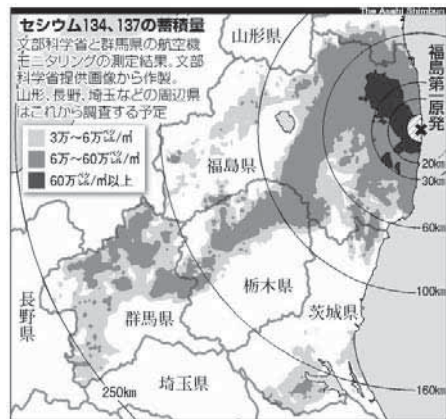


図11 文部科学省が9月27日の公表したセシウム134,137の蓄積量 (asahi.comより転載)²⁴⁾

<http://www.asahi.com/national/update/0927/TKY201109270600.html>

から、図9に示す大気中濃度と図8に示す空間線量率の比率から、この地区での放射性物質の湿性沈着量を推定できる可能性もある。

その後、文部科学省は9月27日に地表でのセシウム134,137の蓄積量の分布データを公表した。この結果をasahi.com²⁴⁾より転載して、図11に示す。この両者を比較すると、北関東での分布はよく対応していることが分かる。また、

0.5mm程度の降雨があった千葉県北東部から茨城県南部にも高汚染地域が存在することが分かる。

千葉県環境研究センター（市原市）では、降下物（チリ、雨水、等）中の放射性物質の分析を行っている。ここでの核種分析結果を図12に示す。降雨のあった3月21-23に最大値を記録し、その後は減少に向かっていている。しかし、降雨がない日には検出下限以下の低い値が続くようになってからも、しばらくは降雨日には線量の上昇が見られることもわかる。4月下旬には降雨日以外はほとんど不検出となっている。これは、3月21-23日に雨とともに地表に落下した放射性物質の再飛散（土埃として舞い上がった粒子の落下）が、1ヵ月でほぼ収束したことを意味している。この結果からも、湿性沈着（雨に伴う降下）は乾性沈着（微粒子としての降下）よりもはるかに大きく、地表での放射線の分布は放射性微粒子の高濃度日における雨量分布で決まることが分かる。

原子力発電所等の施設のある地方自治体では、日常的に環境中での放射線量の測定を行っており、そのデータを公開している。関東地方では、このような施設が集中している茨城県では、測定ネットワークが充実している²⁴⁾。このデータの一例を図13に示す。福島県でも、同様なネットワークがあり、緊急時対応のシステムも組み込まれていたが、今回の災害では、ほとんど機能しなかったようである。

チェルノブイリ原子力発電所の事故の際には、大気中に放出された放射性微粒子がわが国でも検出された。今回の福島の事故においても、アラスカ、カリフォルニア、ハワイ、など北半球の太平洋沿岸のほぼすべての地域で放射性物質が観測されている。とくにアメリカでは、環境保護庁（EPA）のRadNetシステムの測定局³⁰⁾で、ガス状成分の放射性物質も捕集できるエアール・カートリッジ（活性炭入り）のデータも公開されているので、その一部を表10に示す。ここで、フィルター上に捕集される微

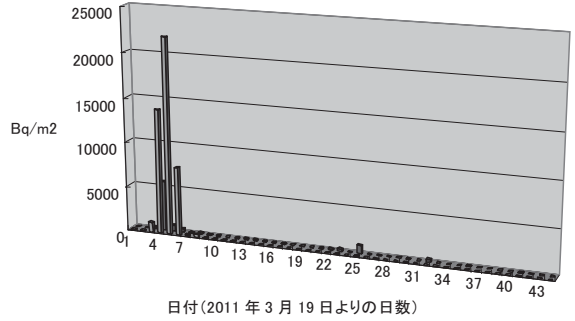


図12 千葉県環境研究センター（市原市）での降下物（チリ、雨水、等）の核種分析結果（手前側はヨウ素131、後側はセシウム134と137の合計）²⁵⁾

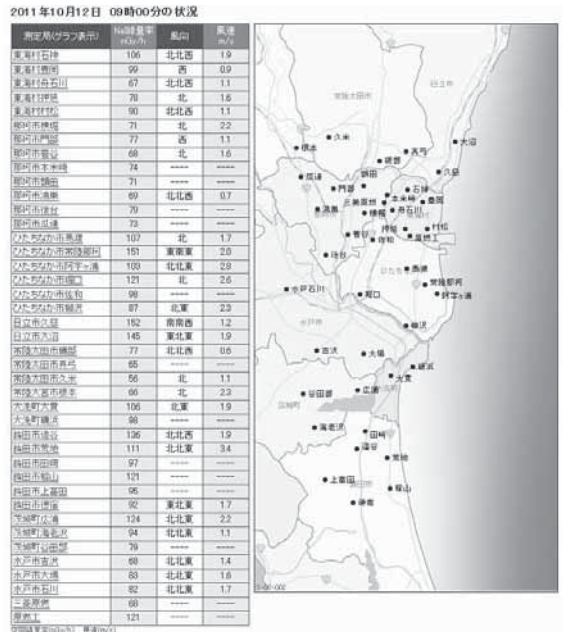


図13 茨城県 放射線テレメータ・インターネット表示局データの一例²⁶⁾

出典 <http://www.houshasen-pref-ibaraki.jp/present/result01.html>

粒子の放射線量を計測するエアール・フィルターのデータとガス状成分も吸着できるエアール・カートリッジのデータではかなりの差が見られる。なお、Cs-134は測定誤差が大きいことがコメント（脚注）に記されている。

福島から大気中に放出された放射性物質の

表10 大気中放射性物質の観測データ (単位: pCi/m³)³⁰⁾

state	location	date	collector	Cs-134	Cs-136	Cs-137	I-131	I-132	I-133
アラスカ	Dutch harbor	3/19/2011	air cartridges	nd	nd	nd	2.42	nd	nd
アラスカ	Dutch harbor	3/19/2011	air filter	0.037	nd	0.053	0.66	0.17	nd
カリフォルニア	Anaheim	3/20/2011	air cartridges	nd	nd	nd	0.87	nd	nd
カリフォルニア	Anaheim	3/20/2011	air filter	nd 0.0076	nd nd	nd 0.008	0.13 0.13	nd 0.018	nd nd
グアム	Guam	3/22/2011	air cartridges	nd	nd	nd	0.58	nd	nd
グアム	Guam	3/22/2011	air filter	0.018	nd	0.022	0.12	0.016	nd

このデータは文献³⁰⁾に記載されているデータのごく一部である。分析された核種は表9に示される高崎CTBT観測局のデータとはほぼ同等である。(pCiは一兆分の1キュリー)、ndは検出下限以下である。

流れは、世界各国の研究機関で解析されている。これらのシミュレーション結果²⁷⁾を見ると、放射性物質は、初めに北太平洋をアリューシャン列島方面に流れ、さらにカリフォルニア沖を南下して、その後、北太平洋全域の拡散していったことが分かる。

10. 放射性物質・放出量の推定

10.1 原子力事故の大きさ

国際原子力機関 (IAEA) と経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA) は、原子力事故・故障の評価の尺度として、国際原子力事象評価尺度 (INES、International Nuclear Event Scale) を策定している。これは、表11に示すように7段階に分類されている。経済産業省原子力安全・保安院は、当初はレベル4と発表した。その後、2011年4月12日に正式な評定は事故収束後の予定としているが、レベル7へ暫定値として修正している³²⁾。このスケールは放射性物質の外部放出量によって規定される。

10.2 IAEAに対する報告書での評価

平成23年(2011年)9月に原子力災害本部は国際原子力機関 (IAEA) に対する日本国政府の追加報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－(第2報)²⁹⁾を公表し、このなかで「発電所から大気への放出量の評価」について言及している。ここでのポイントは以下の2

表11 国際原子力事象評価尺度³²⁾

7. 深刻な事故	放射性物質の重大な外部放出
6. 大事故	放射性物質のかなりの外部放出
5. 事業所外へリスクを伴う事故	放射性物質の限定的な外部放出
4. 事業所外への大きなリスクを伴わない事故	放射性物質の少量の外部放出
3. 重大な異常事象	放射性物質の極めて少量の外部放出
2. 異常事象	
1. 逸脱	

点である。

① 事故発生後、爆発等の放射性物質放出と関連が考えられる事象と周辺での線量率の経時変化に着目した解析。

② 拡散モデルによる逆推定

爆発時における放射性物質の放出量算定でも重要な課題は放出ガスの吐出状況の解析であり、それには噴煙等のビデオ画像の解析が重要である。しかし、報告書からは、まったく、そのような解析が行われ形跡が見られない。YOMIURI ONLINEに掲載された画像³¹⁾を見ると上向きの吐出速度がかなり大きいように思われる。さらに、ガスが高温の場合、煙が流れる高度はかなり高くなる。このため、放出物質

の大部分は上層の気流に乗って風下へ流されるので、地表近くの濃度はあまり高くない。したがって、施設周辺での濃度上昇が見られないという理由で、放出量が少ないと断定するのは危険である。また、シビアアクシデント解析コードMELCOR²⁶⁾による解析も行われているが、このコードで今回のような爆発の際の放出量を評価できるのか、その検証データ等が示されていないことも問題であろう。

拡散モデルによる逆推定は、発生源の状況がつかみにくい場合に放出量を推定する手段とし、有効である。今回の事故では、大気への開口部の状況が必ずしも十分に把握されていないように思われるので、発生源に近い位置での環境濃度を使用すると推定誤差が大きくなる。これは、気象・大気拡散の知識があれば、当たり前のことであろう。しかし、今回の報告書での解析では、発電所敷地内のモニタリングデータが使用されており、このことが理解されていないようにも思われる。大きな構造物からの放出、あるいは、その近くの排出源からの拡散では、僅かな風向の変化、ダウンウォッシュ（建物等による風の乱れによる煙の巻き込み現象）発生状況の変化などによって、濃度が大きく変動する。このため、このような場所での拡散計算では、拡散式の選定、拡散パラメータの設定に際して、慎重な配慮が求められる。今回の報告では、逆推定にどのような拡散式を採用し、どのようにパラメータを推定したのかの記述が全く示されていない。

わが国の事故評価に対する海外（とくにアメリカ）の論調は厳しく³⁴⁾、アメリカは表7に示す計算結果に基づいてわが国在住の自国民に対して一時避難勧告も出している³³⁾。今回の報告によって、このような海外の専門家を納得させることができるのか、それは今後の課題であろう。

10.3 拡散モデルによる放出強度の逆推定

拡散モデルは汚染物質の放出量と気象条件のデータから環境中での濃度を計算するために使

用される。一方、環境中の濃度が十分な場所で、適切に計測されていれば、拡散モデルを使用して、逆算で排出量などを推定することもできる^{15,16)}。これを拡散モデルの逆推定という。前回の試算では³⁵⁾、3月15日に観測されたヨウ素131の最高濃度241Bq/m³に対応する放出強度を求めた。この結果は、同じ時刻を対象としたSPEEDIの結果にほぼ一致する10¹⁴~10¹⁵Bq/hであった。

今回は、SPEEDIの計算で、3月15日に放射性物質の雲の中心が通過したと思われる北茨城市のモニタリングデータ³⁶⁾を用いて同様の計算を行った。茨城県では、福島第一原子力発電所1号機の爆発後、北茨城市役所に可搬型モニタリングポストを設置し、放射線量を確認している³⁶⁾。

まず、初めに、放射性物質の雲（プルーム）の広がり幅を推定する。図6で拡散幅と表示されている量である。大気安定度D（この日は、ほぼ終日、曇りであったので、D階級が妥当）における拡散幅はパスキル・チャートの外挿により、以下のようになる。

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.1467 x^{0.889} \\ \sigma_z &= 0.811 x^{0.555}\end{aligned}$$

ここで、 σ_y については時間補正係数として2倍する。風下距離は75kmである。

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 2 \times 0.1467 \times 75000^{0.889} = 6330 \\ \sigma_z &= 0.811 \times 75000^{0.555} = 412\end{aligned}$$

館野高層気象データより、高度675mに逆転層がある。（581mと767mの間とした。）すなわち、 σ_z の大きさは逆転層高度の1/2よりも大きく、逆転層による反射を考慮しなくても、逆転層の下側では近似的に一様分布が仮定できるものと考えられる。この層内の平均風速は約8.7m/s（93, 297, 581m高度の風速の平均）である。また風向は56-71度で北東風であった（表12参照）。

表12 館野高層気象台での観測データ
2011.3.15 9:00

高度	風速	風向	高度	気温
26	3.8	60	26	8.9
93	5	71	51	8.3
297	8	56	581	3
581	13	60	767	4.1
845	6	44	845	5.7
890	5	49	927	5.5
1235	1	333	1478	1.6

北茨城市では、空間線量のデータはあるが、大気中の放射性物質濃度のデータがないので、以下の方法で推定した。

- ① 3月15日以前には降雨日がないので、グランドシャイン（地表堆積物からの放射）は無視できる。
- ② 拡散幅 σ_z の大きさは逆転層高度と比較して、十分に大きく、濃度鉛直分布は一様分布で近似できる。
- ③ 東京までの風下距離は230kmであり、 $\sigma_y = 17000\text{m}$ に比べて、新宿と世田谷との距離は無視できる。

以上の仮定により、新宿での $0.496 \mu\text{Gy/h}$ 、世田谷での 241 Bq/m^3 、北茨城市での約 $4.8 \mu\text{Sv/h}$ (数値は $\mu\text{Gy/h}$ でも同じ) (5:30-6:30の平均) より、北茨城市での濃度を次のように推定した。

$$C = 241 \times (4.8/0.496) = 2300 \text{ Bq/m}^3$$

逆転層の下側に汚染物質が閉じ込められる、すなわちトラップされた状態での拡散式は次式で示される。ここで、 L は逆転層高度、 u は風速、 C は濃度、 Q は放出強度である。ここで、リセプターは放出源の風下主軸上にあると仮定しているので、 $y = 0$ であり、 \exp の項は1となる。

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\sigma_y}Lu} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

したがって、 $Q = C \sqrt{2\pi\sigma_y}Lu$ で表される。この値は毎秒であるから、毎時に換算する。

$$Q = 2300 \times (2 \times 3.14)^{0.5} \times 6330 \times 675 \times 8.7 \times 3600 = 7.7\text{E}+14 = 7.7 \times 10^{14}$$

したがって、資料²⁰⁾のWSPEEDIの入力条件、ヨウ素 ^{135}I 10^{15} Bq/h はほぼ妥当であるように思われる。さらに、北茨城市と東京の距離は155kmであり、風向はNNEでほぼ直線状にある。北茨城市のピーク時刻は5:30、東京では10:30であるから、この間を $155000 / (5 \times 3600) = 7.2 \text{ (m/s)}$ の速度で通過したことが分かる。すなわち、上記の拡散式中の風速設定値とも一致している。

この計算結果は、放射性物質が2011年3月15日午前10時ごろに世田谷に到着するように放出された時刻での放出強度であって、すべての時間帯についての結果を保証するものではない。

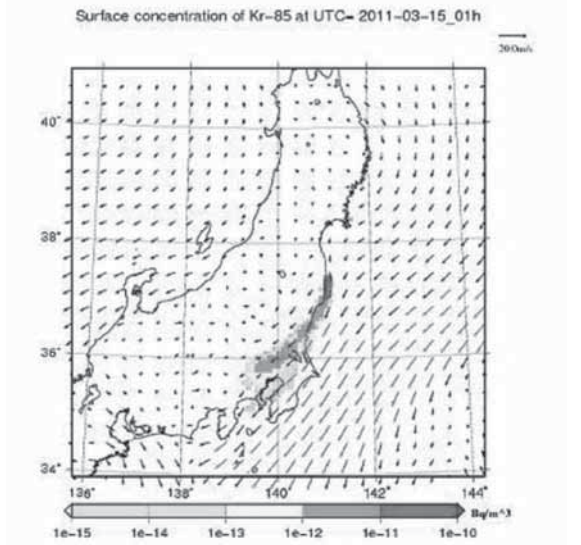


図14 文部科学省が公開したSPEEDI等の計算結果

(独) 日本原子力研究開発機構が平成23年(2011年)3月15日に実施した「東京電力福島第一原子力発電所事故に伴うWSPEEDI-IIによる放射能拡散予測結果について」のシミュレーション結果(2011年3月15日午前1時に単位排出量の排出があった場合の同日午前10時の計算値) http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afieldfile/2011/05/10/1305748_0315_06.pdf

おそらく、3月15日の早朝（午前1時から4時ごろ）の放出強度に対応しているものと思われる。（ $T = x/u = 230000/8.7/3600 = 7.3$ 時間前）

次に、前回の試算結果³⁵⁾を日本原子力研究開発機構が実施したWSPEEDI-IIの拡散予測結果と比較してみる。このシミュレーションは2011年3月15日午前1時に単位排出量（1 Bq/h）の排出があった場合の大気中放射性物質の計算値が数時間間隔で表示されている。同日午前10時の結果を資料²⁰⁾より引用して図14に示す。この結果より、世田谷近辺の濃度は 1 E-13 (10^{-13} Bq/m^3)である。ここでの濃度が約 240 Bq/m^3 であるから、排出量は $2.4 \times 10^{15} \text{ Bq/h}$ となり、上記の簡易計算による逆推定と概ね一致していることが分かる。

11. まとめ

今回の資料では、なかなか理解することが難しい「放射線」や「放射能」についてなるべく易しく説明したつもりである。多少、理論的には正確ではない点もあるが、分かりやすさを優先した。しかし、放射線の生体への影響はまだわからないことも多く、さまざまな仮定を置いて作られたモデルを使用して影響評価が行われている。この点については、この資料でも、あまり解りやすいとはいえないように思うが、基本的な考え方は理解されたのではないかと思う。この資料も、残念ながら「これを読めばすべてが分かる。」というレベルまでには至っていないようである。しかし、新聞やTVのニュース解説に出てくる言葉については、多少は理解できる部分が多くなったのではないかと期待する。

【文 献】

- 1) 深井佑造, 鈴木穎二, 1986, 解説 原子力発電, 東京電気大学出版局.
- 2) 小野周, 1988, 1.4節 原子力発電の安全性, 日本物理学会編「原子力発電の諸問題」東海大学出版会.
- 3) 日本原子力文化振興財団, 平成3年3月, 食品照射に関する文献検索 Q & A (Question and answer) 専門的解説 効果と安全性 Q & A集タイトル: 食品照射の効果と安全性 5. 放射線の単位, <http://foodirra.jaea.go.jp/dbdocs/004045002005.html>
- 4) 文部科学省, 1996改定, 連続モニタによる環境 γ 線測定法, 放射能測定法シリーズ17.
- 5) 岡本眞一, 2001, 大気環境予測講義, ぎょうせい.
- 6) 本間俊充, 野口宏, 1998, 環境放出放射性物質による被曝評価, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 74, No. 7, pp. 707-715.
- 7) Healy, J. W., 1984, Radioactive cloud dose calculations, Chapter 16 of "Atmospheric Science and Power production" ed. Randerson, D., DOE/TIC-27601.
- 8) 財) 原子力安全技術センター, 2007, 高度化SPEEDI運用の現状, 平成19年9月21日, http://www.nsc.go.jp/senmon/shidai/kanhou_shishin/kanhou_shishin003/siryos3-9-2.pdf
- 9) 池田長生, 関季紀, 1990, 環境放射能とモニタリング, 河村武, 橋本道夫, 編, 環境科学Ⅲ測定と評価, 第13章, pp. 250-263.
- 10) 財団法人 原子力安全技術センター, 2004 (2008改定), 原子力防災基礎用語集, www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/.../si11.html
- 11) FERMC (福井県原子力環境監視センター), 2011, 原子力放射線用語 - Weblio 工学, 実効線量, <http://www.weblio.jp/content/%E5%AE%9F%E5%8A%B9%E7%B7%9A%E9%87%8F>
- 12) 保田仁資, 1996, やさしい環境科学, 化学同人, pp. 1-9.
- 13) Chino, M., et al., 1995 WSPEEDI (Worldwide version of SPEEDI): A computer code system for the prediction of radiological impacts on Japanese due to a nuclear accident in foreign countries, Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI 1334.
- 14) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2011 "NRC provides protective action recommendations based on U.S. Guideline" NRC News No. 11-050, March 16, 2011.
- 15) Terada, H., Furuno, A., Chino, M., 2004, Improvement of worldwide version of system for prediction of environmental emergency dose information (WSPEEDI), (I) new combination of models, atmospheric dynamic model MM5 and particle random walk model GEARN-new, J. Nuclear Sci. and Tech.,

- vol. 41, no. 5, pp. 632-640.
- 16) 古野朗子, 茅野政道, 山澤弘実, 2006, 緊急時対応のための長距離大気拡散計算による放出源推定手法の開発, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, no. 3, pp. 229-240.
 - 17) 東京都健康安全研究センター, 2011, 都内の環境放射線測定結果, <http://ftp.jaist.ac.jp/pub/emergency/monitoring.tokyo-eiken.go.jp/monitoring/graph.html>
 - 18) 東京都産業労働局, 2011, 都内における大気浮遊塵中の核反応生成物の測定結果について, <http://www.sangyo-rodo.metro.tokyo.jp/whats-new/keisoku-0331-0315.pdf>
 - 19) 軍縮・不拡散促進センター (CPDNP), 2011, 高崎に設置されたCTBT放射性核種探知観測所における放射性核種探知状況 (4月23日時点) http://www.cpdnp.jp/pdf/110427Takasaki_report_Apr23.pdf
 - 20) 文部科学省, 2011, (独) 日本原子力研究開発機構が平成23年3月15日に実施した「東京電力福島第一原子力発電所事故に伴うWSPEEDI-IIによる放射能拡散予測結果について」のシミュレーション結果
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afeldfile/2011/05/10/1305748_0315_06.pdf
 - 21) 岡本眞一, 溝呂木昇, 2009, 公害防止管理者国家試験・新エッセンシャル問題集, 大規模大気特論, 産業環境管理協会.
 - 22) Healy, J. W. and Baker, R. E, 1968, Radioactive cloud-dose calculations, Chapter 7 of "Meteorology and Atomic Energy, ed. Slade, D., U. S. Atomic Energy Commission, TID-24190.
 - 23) 財) 日本分析センター, 2011, 空間放射線量率の測定結果について (平成23年3月測定分), www.jcac.or.jp/senryoritu_kekka.html
 - 24) asahi.com (朝日新聞社), 2011年9月28日, セシウム飛散, 250キロ以遠にも, <http://www.asahi.com/national/update/0927/TKY201109270600.html>
 - 25) 千葉県, 2011, 千葉県における降下物 (塵, 雨水等) の核種分析結果 (平成23年3月分) - 地震関連, <http://www.pref.chiba.lg.jp/taiki/h23toughoku/houshasen/list-kekka-dropping.html>
 - 26) 茨城県, 2011放射線テレメータ・インターネット表示局 <http://www.pref.ibaraki.jp/bukyoku/seikan/houshasen/>
 - 26) Sandia National Laboratories, 2011, MELCOR homepage, <http://melcor.sandia.gov/>
 - 27) Winiarek, V, Bocquet, M., Roustan, Y., Birman, C., and Tran, P., 2011, Atmospheric dispersion of radionuclides from the Fukushima-Daichii nuclear power plant, CEREAs, joint laboratory École des Ponts ParisTech and EDF R&D <http://cerea.enpc.fr/fr/fukushima.html>
 - 28) (独) 日本原子力研究開発機構. 2011, 福島第一原子力発電所事故に伴うCs137の大気降下状況の試算 - 世界版SPEEDI (WSPEEDI) を用いたシミュレーション -, nsed.jaea.go.jp/fukushima/data/20110906.pdf
 - 29) 経済産業省, 国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書 - 東京電力福島原子力発電所の事故について - (第2報) <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/20110911.html>
 - 30) U. S. Environmental Protection Agency, RadNet-Tracking Environmental Radiation Nationwide EPA RadNet Air Filter and Air Cartridge Results Last updated on April 6, 2011, <http://www.epa.gov/japan011/docs/rert/radnet-cart-filter-final.pdf>
 - 31) 読売新聞, 2011, 「福島第一原発3号機の水素爆発, けがは11人」, YOMIURI ONLINE (2011年3月14日13時15分 読売新聞) <http://www.yomiuri.co.jp/national/news/20110314-OYT1T00313.htm>
 - 32) フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』2011年10月14日閲覧, 国際原子力事象評価尺度, <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E5%8E%9F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E4%BA%8B%E8%B1%A1%E8%A9%95%E4%BE%A1%E5%B0%BA%E5%BA%A6>
 - 33) The New York Times Asia Pacific, Up dated March 25 2011, The Evacuation Zones Around the Fukushima Daiichi Nuclear Plant, <http://www.nytimes.com/interactive/2011/03/16/world/asia/japan-nuclear-evacuation-zone.html>
 - 34) 今村卓, 2011, 福島原発事故, 米国政府・メディアも情報不足の下で混乱した対応続く, 丸紅ワシントン報告, http://www.marubeni.co.jp/dbps_data/_material_/maruco_jp/data/research/w_pl_ec/pdf/110322imamura.pdf
 - 35) 岡本眞一, 2011, 放射能と放射性物質の拡散, 2011年度 大学院・情報哲学特論 講義資料 (2011年6月14日), <http://www.edu.tuis.ac.jp/~okamoto/material/lecturenotes2011.pdf>

- 36) 茨城県, 2011, 茨城県の放射線量の状況 3月15日 15時00分現在 (健康に影響はありません), http://www.pref.ibaraki.jp/important2/20110311eq/20110315_11/