

地質学と環境放射能（1）

— 自然放射線と人工放射線 —

金井 豊¹⁾

1. はじめに

2011年の3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（マグニチュード9.0）による東日本大震災から早1年半近くが過ぎようとしている。震災で亡くなった方々のご冥福をお祈りし、被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。まだまだその傷跡は癒えないものの、復興に向けて果敢にも頑張っている姿を見ると心強いものがある。

一方、同時に起こった東京電力（株）福島第一原子力発電所の事故による環境中への放射性物質の放出は、これまでに我が国が経験した放射能事故の中で最大級であり、戸惑いと共に対策が急がれている。日々の生活の中でも、これまで聞き慣れなかった毎時〇マイクロシーベルト（〇 μ Sv/h）などの言葉が大震災以降非常に多く耳に入るようになり、また放射能・放射線に関する情報や関心が、これまでとは比較にならないほどの高まりを見せている。しかし、通常は目には見えず臭いもしない放射線は、直接五感で感じることもできないために、なかなか実感として正確に理解することは容易なことではなく、先入観や感情のみが先走って誤解や偏見が生じたとの話もある。

ところで、地質学や広く地球科学は、地球を構成する物質の岩石や鉱物等の存在状況や関連事項を把握する学問であるが、その物質は様々な特質を有している。その一つの物性に放射能があり、それは岩石や鉱物に含まれている放射性元素に起因する。こうした意味で、放射能は地質学とは一見無関係のように見えるが、地質学とも深く関わっている。これらは自然起源の放射能である。私達の周りにはこの自然起源の放射能の他に人工的な放射能があり、これらを総じて環境放射能というが、その実態を知ることは重要である。

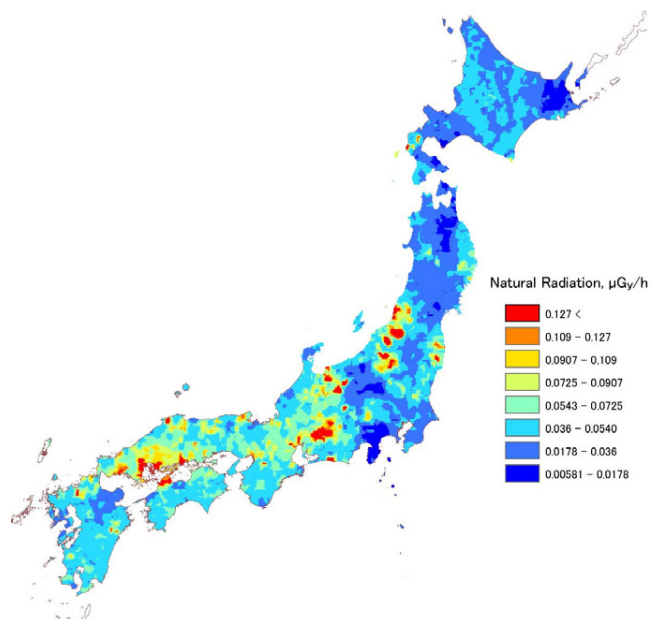
そこで、本報告では環境放射能に関する一般的な事項のおさらいを兼ねて、事故後の放射性核種の動態の一例を紹介してみたい。現在進行形でもあり、また限定された情報しかない中での紹介であるため、不十分な点や錯誤もある

かも知れないが、その点をご容赦願いたい。本報告により地質学と環境放射線との関わりや放射能・放射線に対する理解を深めることができれば幸いである。

2. 自然放射線と環境放射能

私達は普段の生活の中で常時放射線を受けており、環境放射能と一括りにされているが、それには自然界に存在している放射線（自然放射線と呼ばれる）と、人工放射線とがある。後者はエックス線や人間が核変換を起こさせて発生する放射線や生成核種からの放射線などが該当する。本来、人間が扱うものであるから、きちんと制御して管理しなければならないもので、原子炉や加速器など、特定の設備を持った場所で発生するものである。

一方、自然放射線には、主に宇宙から来る宇宙線、大地からの放射線、空気からの放射線、食べ物からの放射線、そして私達自身からの放射線などがある。世界平均では1年間に約2.4 mSvの放射線を浴びているとされるが、日



第1図 日本の自然放射線量の分布（産業技術総合研究所，2012b）。

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード：地質学，環境放射能，自然放射線，人工放射線，原発事故，エアロゾル，堆積物

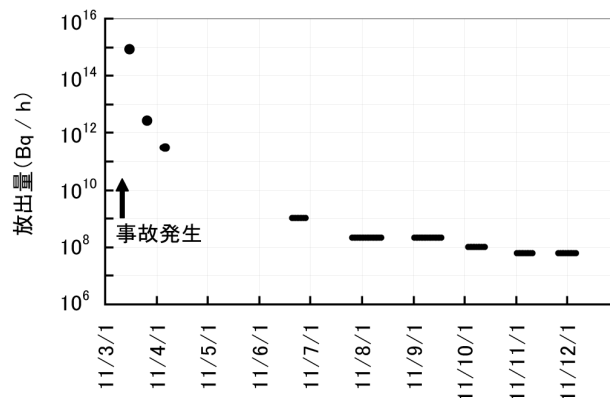
本人の平均はそれよりも幾分低く、1年間で2.15 mSvとされる。以前は1.48 mSvであったが、食品からの放射線量の見直しで改訂されたという(日本アイソトープ協会, 2011)。その内訳は、宇宙線が0.32 mSv、大地からの放射線が0.37 mSv、空気からが0.49 mSv、食べ物からが0.97 mSvとなっており、半分近く(45%)も食べ物から受けていることがわかる。一方、空気から取り込まれる放射線は、大地にあるウランやトリウムが壊変して生ずる気体のラドン・トロンや娘核種などからの放射線であり、大地とあわせると全体の40%を占めていることから、大地に関係する放射線も食べ物に次いで重要ということになる。

大地からの放射線は、半減期の長いウラン-238 (U-238, 半減期: 4.47×10^9 年) やトリウム-232 (Th-232, 4.14×10^{10} 年), そしてカリウム-40 (K-40, 1.28×10^9 年) などによるものが主である。これらは大地を構成する岩石などに様々な濃度で含まれている。従って、大地からの放射線レベルは地質分布や地域毎に異なって分布することになる。

地質調査総合センターでは、日本全土をカバーする地球化学図(元素の分布図)を作成しており(産業技術総合研究所, 2012a), ウラン・トリウム・カリウムの濃度分布をもとに計算される放射線量のマップも作成し公表している(産業技術総合研究所, 2012b)。これを第1図に示したが、環境放射能における大地からの寄与を知る上で有用であり、地質の影響により西日本で高く東日本で低いという傾向が読み取れる(今井, 2011)。ここで注意すべきこととして、環境放射能のバックグラウンドとしては宇宙線の影響を加味していないので、実際にはそれも加えないといけない。しかし、バックグラウンドレベルの概要を知る上ではこのような自然放射線量の分布図は非常に有用であり、原発事故後の人工放射性物質の広域分布の評価において、バックグラウンドとして天然核種の影響の大きな地域における航空機モニタリングでは、バックグラウンドを考慮した詳細な検討が必要である(文部科学省, 2011a)。

3. 東日本大震災と原発事故

2011年3月11日14時46分に発生した、宮城県沖を震源地とする巨大地震とその後におそった大津波は、東日本の各地、特に沿岸部の地域に大災害をもたらした。中でも海岸に立地している東京電力(株)福島第一原子力発電所においては、津波などによる非常用電源の全喪失によ



第2図 福島第1原子力発電所における1~3号機から、1時間当たり放出されたCs-134とCs-137放出量の変化(経済産業省, 2011; 読売新聞, 2011のデータから)。

て原子炉の冷却機能が失われ、その後格納容器からのベント、水素爆発、圧力抑制プールの損傷などにより、大気中に大量の放射性核種が放出され、建造物の倒壊等とは異なる別の大災害となった。更に、建屋の高濃度汚染水が亀裂を通じて海洋に流れ出てしまい、また、集中廃棄物処理施設にあった低レベル放射能汚染水等が海洋に放出されたために、海洋にも大量の放射性核種が放出され、以前に比べ環境中の放射能レベルはかなり増大した。これらは全て人工放射能であり、人間の厳しい管理下にあるべきものであったが、不幸にも施設外に放出されてしまった。

今回の事故は、国際原子力事象評価尺度(INES)による影響度の指標でレベル7と最大級であったが、我が国での原子力関連の事件・事故は、古くは1954年の第五福竜丸の船員の被ばくがあり、1999年の東海村JCO核燃料加工施設での臨界事故が記憶に新しい。海外でもスリーマイル島の原発事故、チェルノブイリ原発事故などがあつたにもかかわらず、それらの教訓を生かせず、十分な対策が講じられていなかったことは非常に残念なことである。

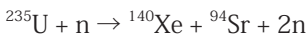
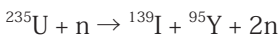
事故を起こした原子炉の現状把握や記録・観測データが未だに不十分な状況であり、それらの解析も途中段階ではあるものの、様々な推定値が暫定的に報告されている。原子炉1~3号機の放射性物質の総量は、ヨウ素-131(I-131)については 6.1×10^{18} Bq, セシウム-137 (Cs-137) については 7.1×10^{17} Bqと見積もられ、また、使用済み燃料プールではI-131が 1.1×10^{16} Bq, Cs-137が 2.3×10^{18} Bqと見積もられている(内閣官房内閣広報室, 2011)。これらのうち、3月11日から4月5日までに大気に放出された総量は、I-131が 1.5×10^{17} Bq, Cs-137が 1.2×10^{16} Bqと推定されており(内閣官房内閣広報室, 2011)、発電所に存在した量の数%とはいえ総量としては膨大な量である。10月28日に一部の建屋の覆いがなされ、放出

量は以前と比べて減少したものの、2011年の12月の時点でも毎時 6×10^7 BqのCs-137が放出され続けている(読売新聞, 2011)。経済産業省(2011)や読売新聞(2011)がまとめたこれまでの放出量の変化を第2図に示した。事故直後の1/1300万に収まりつつあるというが、既に放出された総量は莫大であり、その除染・回収などは今後の大きな課題となっている。

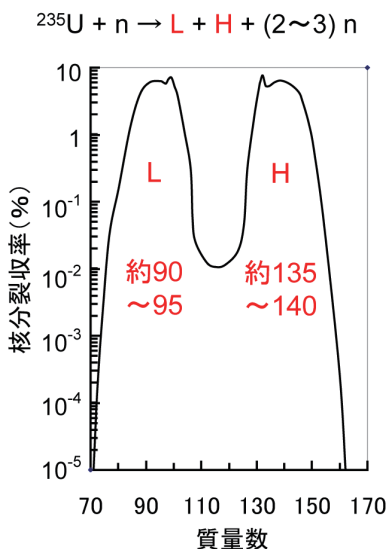
4. 原子炉とそこから放出された人工放射性核種

発電用原子炉では、火力発電のボイラーと同じく水を沸かして蒸気をつくり、その力でタービンを回して発電している。福島第一原子力発電所の原子炉は、減速材と冷却材に水を使用した軽水炉とよばれる種類で、原子炉で直接蒸気を生じさせる沸騰水型原子炉(BWR)である。その模式図を第3図に示した(東京電力, 2012)。

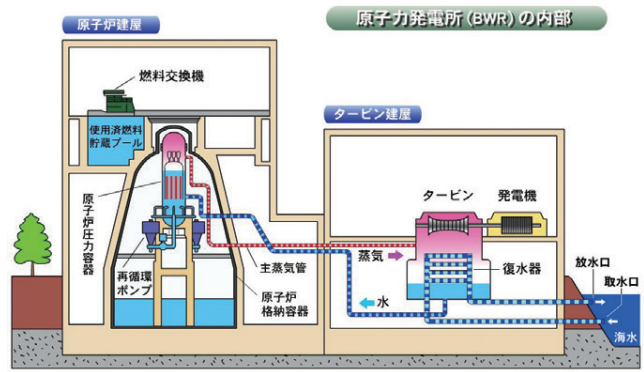
核燃料としては、ウランの同位体U-235を濃縮したウランが使用されている。U-235は中性子が当たると核分裂を起こし、2~3個の中性子と2つの核分裂片とに分かれる。原子力発電における核分裂反応にはいろいろあるが、その例を示すと、



等のように2つの核に分裂して中性子を産出する。核分裂の際の分裂片の質量は、ちょうど半分半分ではなく、約90~95の質量数と約135~140の質量数の核分裂生成物となる(第4図)。放出された中性子は次のU-235に



第4図 熱中性子によるU-235の核分裂収率(核分裂生成物ができる割合)。



第3図 福島第一原子力発電所と同型の沸騰水型原子炉の模式図(東京電力, 2012)。

当たって核分裂を起こすが、炉内の水は中性子の速度をある程度弱めて核反応を起こしやすくするための「減速材」としての作用もしている。原子炉はこの連鎖反応が、数個の中性子のうちの1個が起こすように調整された「臨界状態」に保たれている。臨界状態よりも少なく連鎖が起これば止まってしまうし、逆に多いままだと暴走してしまう。

第1表 原子炉においてU-235の核分裂で生成する主な放射性核種(核分裂収率が0.2%を超えるもの)。

核種	半減期	壊変形式	核種	半減期	壊変形式
Br - 83	2.40 h	β^-	Sb - 127	3.85 d	β^-
Kr - 83	安定		I - 129	1.57E+07 y	β^-
Kr - 84	安定		I - 131	8.02070 d	β^-
Kr - 85	10.756 y	β^-	Xe - 131	安定	
Rb - 85	安定		Te - 132	78.2 h	β^-
Kr - 86	安定		Xe - 132	安定	
Rb - 87	4.75E+10 y	β^-	I - 133	20.8 h	β^-
Sr - 88	安定		Xe - 133	5.243 d	β^-
Sr - 89	50.53 d	β^-	Cs - 133	安定	
Sr - 90	28.79 y	β^-	I - 134	52.5 m	β^-
Sr - 91	9.63 h	β^-	Xe - 134	安定	
Zr - 91	安定		I - 135	6.57 h	β^-
Zr - 92	安定		Cs - 135	2.3E+06 y	β^-
Zr - 93	1.53E+06 y	β^-	I - 136	83.4 s	β^-
Zr - 94	安定		Xe - 136	2.36E+21 y(安定?)	
Zr - 95	64.02 d	β^-	Cs - 137	30.07 y	β^-
Mo - 95	安定		Ba - 138	安定	
Zr - 96	3.8E+19 y(安定?)	β^-	Ba - 139	83.06 m	β^-
Zr - 97	16.91 h	β^-	Ba - 140	12.752 d	β^-
Mo - 97	安定		Ce - 140	安定	
Mo - 98	安定		Ce - 141	32.501 d	β^-
Mo - 99	65.94 h	β^-	Pr - 141	安定	
Mo - 100	安定		Ce - 142	5E+16 y(安定?)	
Ru - 101	安定		Ce - 143	33.039 h	β^-
Ru - 102	安定		Nd - 143	安定	
Ru - 103	39.26 d	β^-	Ce - 144	284.893 d	β^-
Ru - 104	安定		Nd - 144	2.29E+15 y	α
Rh - 105	35.36 h	β^-	Nd - 145	安定	
Ru - 106	373.59 d	β^-	Nd - 146	安定	
Pd - 109	13.7012 h	β^-	Nd - 147	10.98 d	β^-
Ag - 111	7.45 d	β^-	Sm - 147	1.06E+11 y	α
Pd - 112	21.03 h	β^-	Nd - 148	安定	
Cd - 115n	44.6 d	β^-	Sm - 149	2E+15 y(安定?)	
Cd - 115	53.46 h	β^-	Nd - 150	1.1E+19 y	$\beta^-?$
Sn - 121	27.06 h	β^-	Sm - 151	90 y	β^-
Sn - 125	9.64 d	β^-	Sm - 152	安定	

その制御に使用されるのが、ホウ素やカドミウムなどの中性子を吸収しやすい物質からできた制御棒で、これを上げ下げして調節している。1 g の U-235 の核分裂によって得られるエネルギーは、石炭 3 トン、石油 2000 リットル分のエネルギーに相当するといわれている。

主な核分裂生成物（日本アイソトープ協会，1980；Firestone, 2012）を第 1 表に示したが、放射性核種ばかりでなく安定核種も含めて様々な核種が生成することがわかる。事故によって環境中に放出された人工放射性核種の中で、良く名前が挙がる Cs-137 は第 1 表の中に見いだせるが、同じ Cs 同位体の Cs-134 はこの表にはない。Cs-134 はウランの核分裂では直接生成せず、安定な Cs-133 分裂片や分裂片が壊変して生じた安定な Cs-133 が原子炉内で中性子捕獲反応 ((n, γ) 反応) して生成しているからである。従って、核爆弾のような瞬間的な核分裂では Cs-134 は生成しない。実は、Cs-137 も直接核分裂で生じる量は少なく、ほとんどは親核種である核分裂片の Te-137, I-137, Xe-137 などから短時間の内に壊変して生成する子孫核種である（河田・山田，2012）。また、原子炉にはウラン燃料として U-235 だけでなく、U-238 も多量に存在する。このため、これらにも中性子が当たって、更に質量の大きな超ウラン元素のネプツニウム (Np)、プルトニウム (Pu)、アメリシウム (Am) やキュリウム (Cm) なども生じ（平井，2011）、それらの核分裂生成物や崩壊生成物も混合することになる（第 5 図）。このように、原子炉内には様々な核種が生成・存在している。

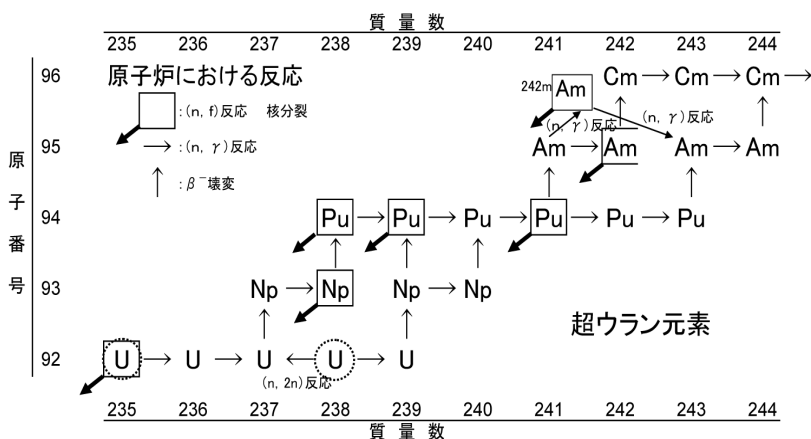
核燃料のウランはペレット状に加工され、更にジルコニウム合金でつくられた燃料被覆管につめられており、通常は多くの核分裂生成物はその中に留まっている。それは、原子炉の放射性物質を外に出すことはないという説明の一

つでもあった。ちなみに、原子炉の安全性を示す説明として、「5 重の壁」とよばれる閉じ込めシステムがあり、第 3 図に示されるように、「燃料ペレット」（生成する放射性核種をペレット内部に保持）、「燃料被覆管」（燃料ペレットから放射性核種が外部に漏洩することを防止）、「原子炉圧力容器」（冷却材に溶け込んだ核種の閉じ込め）、「原子炉格納容器」（原子炉圧力容器の外側の障壁）、「原子炉建屋」（原子炉格納容器の外側の障壁で、外部への漏洩を防止）がそれである。

核燃料の中心部の温度は約 1800℃ほどで冷却水表面では約 300℃程度といわれている。しかし、今回の事故のように炉内の水位が下がってジルコニウムがむき出しとなると、原子炉の中では高温であるため金属-水反応を生じて水素発生等が起こり、水素爆発や炉心溶融などによっていくつもの壁が破られ、核分裂生成物が被覆管の亀裂から冷却水に溶け出たり、気体状になって放出されたと推定される。事故当時、原子炉内では先に述べたように多くの核種が存在していたが、環境に放出された人工放射性核種は、沸点の低い核種が中心と考えられ、それらの中で主なものは、最初に述べたように希ガスやヨウ素同位体、セシウム同位体であった。

環境中における放射性核種の存在は、空間放射線量率で推測できる。原子力発電所では常にモニタリングが行われており、事業所正門付近での線量率の変化が報告されている（東京電力，2011a）。原子炉格納容器内の圧力変化は、放射性物質の放出に関連するパラメータとなっているので、その変化と線量率との変化を見ると、3月16日までに放射性物質の多大な放出が起こってバックグラウンドの上昇が起こっている。それ以降は次第に低下しており、地面等にフォールアウトした放射性核種の崩壊によって次第に低下していったと見られている（東京電力，2011a）。

放出核種に関しては、2011年3月19日11時53分～12時13分に採取した敷地内の空気から I-131, I-133, Te-132 / I-132, Cs-134, Cs-137 を検出しており、その後も Te-129m, Tc-99m, Nb-95, Ag-110m, La-140 等も認められた（東京電力，2011b）。敷地内の土壌では、3月21日に採取した土壌から Pu 同位体を検出し、 γ 線放出核種ではヨウ素、セシウム、テルル (Te)、バリウム



第 5 図 原子炉において U-238 から生成する超ウラン元素やその核分裂核種。

(Ba), ニオブ (Nb), ルテニウム (Ru), モリブデン (Mo), テクネチウム (Tc), ランタン (La), ベリリウム (Be), 銀 (Ag) などを検出している (東京電力, 2011c). また, Pu 同位体が検出された土壌では, Am-241, Cm-242, Cm-243, Cm-244 も検出されている. 4月18日に採取した土壌では Sr-89, Sr-90 も検出された. これらの観測は, その後も継続して続けられている.

陸上の水では, タービン建屋内のみならず建屋外のトレンチにも汚染水が存在した. 3月29日に1号機トレンチで確認された水から, Nb, Tc, Ru, Ag, Te, I, Cs, Laなどを検出している. 建屋付近のサブドレン水でも I-131, Cs-134, Cs-137 等を検出し, 更に Sr-89, Sr-90, H-3 等もその後のサンプリングで検出している.

海水では, 3月21日14時30分に南放水口付近 (1~4u 放水口から南側に約330 m地点) で採取した海水中から, Te-129m, I-131, Te-132/I-132, Cs-134, Cs-136, Cs-137, La-140等が検出されたことが初めて報告されており, 特にI-131, Te-132, Cs-134, Cs-137の濃度が告示濃度限度の基準値よりも一桁以上高かった (東京電力, 2011b). 5月9日の採水では, Sr-89, Sr-90も検出されている. また, トリチウムは6月13日に採水した海水から検出している. 4月2日に発電所から約15 km沖合で採水された海水からは, I-131, Cs-134, Cs-137が検出された. その後は, Te-132, Cs-136, La-140, Ba-140も時々検出されており (東京電力, 2011b), 海洋への汚染の拡大が観測されている.

海に放出された核種は, 海底土へと移動する. 発電所から約3 km 沖合の所において4月29日に採取された海底土からは, I-131, Cs-134, Cs-137 が検出され, 6月2日の採取試料では Pu-239, Pu-234, Sr-89, Sr-90, Am-241, Cm-242, Cm-243, Cm-244 も検出されており, 福島県沖合で6月28日に採取した海底土でも Cs-134, Cs-137 が検出されている (東京電力, 2011c).

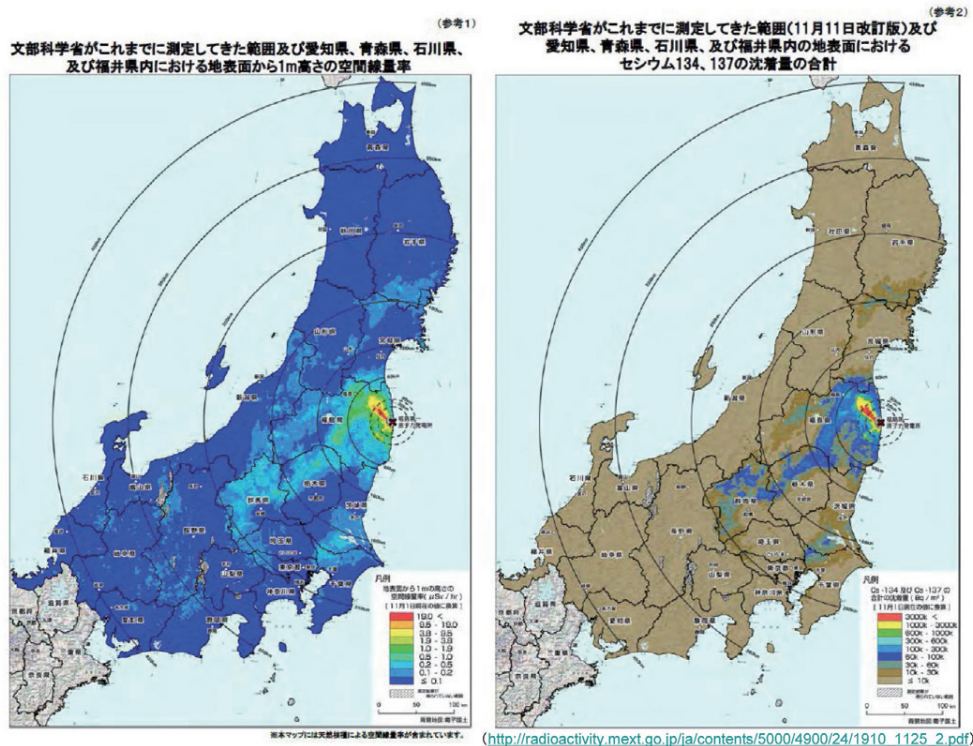
このように, 原子炉内に存在した様々な核種のうち, 多くの核種が発電所周辺の環境へ放出された. それは気体やエアロゾルとして大気中に放出されたものもあれば, 爆発によって飛び散ったもの, 冷却水の漏出など, 様々であろう. しかし, 放出量や核種の半減期などを考慮すると, 現時点における環境中の放射性核種としては, 半減期の長い Cs 同位体などに注目する必要がある. また, データは少ないが骨などの構成元素である Ca と同族で, 類似する挙動をする Sr 同位体についても, 注目して監視していく必要がある.

5. 環境放射能としての人工放射性核種の分布

文部科学省では, 4月6~29日にかけてアメリカエネルギー省と共同で航空機モニタリングを行い, 福島第一原子力発電所から80 kmの範囲内の地表面1 m高さでの空間線量率, セシウム同位体の沈着状態を調査した (文部科学省, 2011b). その後, 調査地域を順次広げてゆき, 11月25日には450 kmを超える範囲までの東日本 (1都21県) の全地域について航空機モニタリングの測定結果を報告した (文部科学省, 2011c). その公表されている空間線量率とセシウム同位体の濃度分布を第6図に示した. この図で空間線量率ではバックグラウンドの差し引きがなされていないので注意が必要である. 文部科学省は, 北海道や西日本についても放射性セシウムの沈着量が少ないことを確認するため, 航空機モニタリングの実施を継続中である.

原発から環境に放出された放射性セシウムは, 福島県原発の北西方向と, 県中央部の郡山盆地に沿って南西方向, 並びに原発から南西方向の関東平野にかけて相対的に多く沈着していることが第6図からわかる. これらはその時の気象条件によってこのような分布になってしまったもので, 環境放射能のレベルも濃度分布も第1図に示したバックグラウンドとはかなり異なる分布となっている. これらの分布状況の一部は, 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) によって早期に予測されたものの, 十分に活用されなかったのは残念なことであった (原子力安全委員会, 2012). 気象条件をパラメータとして様々なモデル計算で解析しようとする試みは, ローカルなものばかりでなく (Chino *et al.*, 2011; Katata *et al.*, 2012; 気象研究所, 2011; 国立環境研究所, 2011), 地球的な解析もなされている (CTBTO, 2011; Takemura *et al.*, 2011).

現時点の空間放射線量率は第6図左に示されるようなマップになるが, 人工放射線としてはセシウム同位体由来するものがほとんどであるため, 現在の大地の環境放射能としては, 第1図に示したようなバックグラウンドと第6図右のセシウム同位体由来の放射線を加えあわせたものと同等と考えて良いだろう. 日本における大地からの平均の放射線量は 0.37 mSv ($0.04 \mu \text{ Sv/h} = 370/365/24$) であったが, 一般大衆における年間 1 mSv のレベルを基準に考えると, 野外に8時間と遮蔽効果0.4の室内に16時間という平均的な日常生活を仮定すると, 計測器で測定される空間線量率は約 $0.23 \mu \text{ Sv/h}$ ($= 1000/365 / (8 + 0.4 \times$



第6図 約450 km 範囲までの東日本についての航空機モニタリングによる空間線量率とセシウム同位体沈着量の測定結果 (文部科学省, 2011c).

16) + 0.04) に相当する (環境省, 2011a). しかし, バックグラウンドの $0.04 \mu\text{Sv/h}$ というのは日本の平均であり, 詳細には第1図のように地域や地質により変動があるので, このような $0.23 \mu\text{Sv/h}$ という数値は一つの目安と考えておいた方が良いでしょう. 第6図のマップで示されるセシウム同位体の沈着量の多い地域における環境放射能レベルは, それとは比較にならないほど大きく, 事故前の環境放射能レベルにするために原発周辺域のみならず広範囲にわたる高線量率地域の除染を進めていくことが, 如何に必要かつ重要であるかがよくわかる.

本報告では, これまでの環境放射能と事故後の環境放射能について簡単に述べた. 環境中に付加された莫大な量の放射性核種を, 私達の生活環境から除染し回収して, 以前の環境放射能レベルに近づけていくことは喫緊の課題である. 次号では, 放射性核種の観測例を紹介する.

文 献

Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G. and Yamazawa, H. (2011) Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere. *J. Nucl. Sci.*

Technol., **48**, 1129–1134.
 CTBTO(2011) Fukushima-related measurements by the CTBTO - Page1 2011, <http://www.ctbto.org/press-centre/highlights/2011/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto/fukushima-related-measurements-by-the-ctbto-page-1/> (2012/07/15 確認)
 Firestone, R. B.(2012) The Berkeley Laboratory Isotopes Project's, Exploring the Table of Isotopes, <http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm> (2012/07/15 確認)
 原子力安全委員会 (2012) 文部科学省 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) を活用した試算結果, http://www.nsc.go.jp/mext_speedi/index.html (2012/07/15 確認)
 平井昭司 (2011) 放射能および放射線をどのように測定するか?. *ぶんせき*, no. 438 (2011年第6号), 315–322.
 今井 登(2011)日本の自然放射線量, <http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html> (2012/07/15 確認)
 環境省 (2011a) 追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方. 平成23年10月10日災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会 第1回合同検討会 資料(別添2), http://www.env.go.jp/press/file_view.

- php?serial=18437&hou_id=14327 (2012/07/15 確認)
- Katata, G., Ota, M., Terada, H., Chino, M. and Nagai, H. (2012) Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. *J. Environ. Radioact.*, **109**, 103-113.
- 河田 燕・山田崇裕 (2012) 原子力事故により放出された放射性セシウムの $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比について. *Isotope News*, no. 697, 16-20.
- 経済産業省 (2011) 添付 2 福島第一原子力発電所における現状の放射性物質の放出量評価及び敷地境界における被ばく線量評価について, <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/111216e.pdf> (2012/07/15 確認)
- 気象研究所 (2011) 東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の移流拡散について, http://www.mri-jma.go.jp/Topics/H23_tohoku-taiheiyo-okieq/1107fukushima.html (2012/07/15 確認)
- 国立環境研究所 (2011) 4. 福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気輸送沈着シミュレーション, <http://www.nies.go.jp/shinsai/#title04>. (2012/07/15 確認)
- 文部科学省 (2011a) (平成23年11月11日) 文部科学省による, 岩手県, 静岡県, 長野県, 山梨県, 岐阜県, 及び富山県の航空機モニタリングの測定結果, 並びに天然核種の影響をより考慮した, これまでの航空機モニタリング結果の改訂について, http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/5000/4899/24/1910_11112.pdf (2012/07/15 確認)
- 文部科学省 (2011b) 平成 23 年 5 月 6 日 文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリングの測定結果について, http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf (2012/07/15 確認)
- 文部科学省 (2011c) 平成23年11月25日 文部科学省による, 愛知県, 青森県, 石川県, 及び福井県の航空機モニタリングの測定結果について, http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/5000/4900/24/1910_1125_2.pdf (2012/07/15 確認)
- 内閣官房内閣広報室 (2011) VI. 放射性物質の環境への放出, <http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/pdf/06-kankyo.pdf> (2012/07/15 確認)
- 日本アイソトープ協会 (1980) アイソトープ手帳. 丸善, 東京, 144p.
- 日本アイソトープ協会 (2011) やさしい放射線測定—誰もが正しく測定するために—, <https://jrias.smktg.jp/public/seminar/view/19> (2012/07/15 確認)
- 産業技術総合研究所 (2012a) 海と陸の地球化学図, <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/> (最終確認日: 2012/07/15 確認)
- 産業技術総合研究所 (2012b) 日本の自然放射線量, <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/setumei/radiation/setumei-radiation.htm> (2012/07/15 確認)
- Takemura, T., Nakamura, H., Takigawa, M., Kondo, H., Satomura, T., Miyasaka, T. and Nakajima, T. (2011) A numerical simulation of global transport of atmospheric particles estimated from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *SOLA*, **7**, 101-104.
- 東京電力 (2011a) 福島原子力事故調査報告書 (中間報告書), http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202c.pdf (2012/07/15 確認)
- 東京電力 (2011b) 当社福島第一原子力発電所における核種分析結果の嚴重注意に対する対応について (続報 2), <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11050807-j.html> (2012/07/15 確認)
- 東京電力 (2011c) 「東北地方太平洋沖地震による影響などについて」実績ファイル, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/past-progress/images/past_110731-j.pdf (2012/07/15 確認)
- 東京電力 (2012) 原子力発電のしくみ, <http://www.tepco.co.jp/nu/knowledge/system/index-j.html> (2012/07/15 確認)
- 読売新聞 (2011) 「冷温停止状態」宣言. (2011/12/17 朝刊)

KANAI Yutaka (2012) Geology and environmental radioactivity (I) : natural and artificial radioactivities.

(受付: 2012年7月6日)