

ノルム(NORM)と環境放射能 -最近の動向-

金井 豊¹⁾・上岡 晃¹⁾・小笠原正継²⁾・青木 正博³⁾

1. ノルムとは

「ノルム(NORM)」にはいろいろな意味があります。一般的には、規範とか基準の意味(norm(英語))ですが、数学的には空間ベクトルの長さを意味します。今回紹介するノルムとは、「Naturally Occurring Radioactive Materials」の頭文字を取って作られた「NORM」です。その単語が示すように、自然起源の放射性物質ということです。すなわち、人工的に合成された核種起源の放射能ではなく、人間の手によらないありのままの放射性物質です。現在話題となっているNORMのほかに、産業残渣のようなテノルムTENORM(Technologically Enhanced NORM)と呼ばれる人為的に濃度の高められた自然起源放射性物質もあります。本小論では、このような私たちの周りにある自然の放射線・放射能にスポットを当ててみたいと思います。なお、NORMの代表格でもあるウランやその系列核種のラジウム・ラドン・鉛についての話題は、それぞれ個別に金井(1990; 1991; 2000a; 2000b)で紹介していますので、そちらもご参照下さい。

放射線には、人工の放射線と自然の放射線とがあります。自然の放射線の代表でもあるウランの放射線は1896年にベクレルによって、またトリウムはその後2年後にシュミット及びキュリー夫人によって発見されました(詳細は、金井(1996)を参照)。その後、放射線・放射性核種を用いる実験やレントゲンによって発見されたエックス線の利用が拡大するにつれ、それに伴う脱毛症状、白内障や遺伝病・発ガン性等の放射線障害の存在も明らかにされて、障害予防・被曝低減の方策がとられるようになりました。その国際的な機関である国際放射線防護委員会(ICRP)は、定期的に見直しを行って勧告を出しています。当初、

職業人の被曝に対する規制では、自然放射線は線源および被曝を制御することが不可能もしくは非常に困難であると考えられ、規制対象から除外されてきました。しかし、1990年に出したICRP Publication60勧告の中で、自然放射線でも被曝が制御可能な場合には防護対象となり得るという立場に立ち、坑内等でのラドン被曝作業、特に指定された天然放射性物質を有意量含有する物質の作業、ジェット航空機業務、宇宙飛行業務等の例を挙げています。このようなことから、自然環境状況下でも場合によっては放射線防護を検討する必要性を示したことから、各国でもNORMおよびTENORMに関してさまざまな検討が行われることとなりました。

我が国でも文部科学省の諮問機関である放射線審議会等でNORMについて検討を重ね、学会等でもさまざまな検討がなされました。研究者間では環境科学の一つとして(例えば、Paschoa, 1997; Bhattacharyya, 1998; Tzortzis *et al.*, 2003; Kleinschmidt and Akber, 2008等)、また、研究所等でも環境整備・管理上の観点からNORMについて注目を集めました。これらは、一般の生活においても関係する部分が多いので、自然を相手とする地球科学の視点からNORMを再度見直し、放射線やNORMを巡る話題の一部を紹介してみたいと思います。

世界唯一の被曝国民として原子力・放射能に対する感情には敏感な部分があるかと思いますが、生活の中の放射線に関して関心を持っていただけの一助となれば幸いです。また、放射線を単に「怖いもの」という感覚で捉えるのではなく、生活の中に放射性核種が有効に利用されている、扱いに関しても適切な対応がなされれば十分安全・安心という認識をもっていただければ幸いです。寺田寅彦の

1) 産総研 地図資源環境研究部門
2) 産総研 地質情報研究部門
3) 産総研 広報部 地質標本館

キーワード: ノルム, 環境放射能, 放射性核種, ウラン, 生活環境

言葉に、「ものを怖がらなすぎたり、怖がりすぎたりするのはやさしいが、正当に怖がることはなかなかむづかしい」というフレーズがあります(近藤, 2005)。まずは理解が必要と思います。

なお、本小論で紹介するNORM等に関する規制等の詳細は文部科学省のホームページ(<http://www.anzenkakuho.mext.go.jp/index.html>; <http://www.norm-guideline.mext.go.jp/>)でも閲覧できますし、利用実態等に関しては放射線医学総合研究所(放医研)が「自然起源放射性物質データベース」(<http://www.nirs.go.jp:8080/anzen/db/NORMDB/index.php>)を公開していますので、そちらも参考して下さい。

2. 環境中の放射線・放射性核種

環境中の放射能としては、よく知られているように宇宙線によるもの、大地から来るもの、大気中のラドン等によるもの、植物摂取によるもの等があり、放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)の2000年報告書では、世界平均でそれぞれ年間0.39mSv, 0.48mSv, 1.26mSv, 0.29mSvと見積もられ、合計でおおよそ2.4mSvといわれています。以前とは内訳の線量は多少変化していますが、合計値はあまり変わっていません。従来、環境放射能と呼ばれてきたものです。

また、地球の至る所に存在する放射線を出す核種は、宇宙が生成したときから元素生成に伴う核反応と、その後の放射壊変とによるもので、現在ではこのような太古からの放射性核種の他に、人間が原子力関連で作って出して環境に放出された人工放射性核種や、今なお宇宙線等で生成している放射性核種等が存在しており、このような環境中に存在している放射性核種をまとめて第1表に示しました(金井, 1996)。

宇宙線は銀河宇宙線、太陽粒子等の一次宇宙線と、それによって地球大気中で生成される二次宇宙線のヴァンアレン帯粒子とがあります。銀河宇宙線では90%が陽子で、二次宇宙線では中性子・電子・ミュー粒子等です(渡利・稲葉, 1999)。ちなみに、宇宙

第1表 環境における主な放射性核種(金井, 1996)。

核種	半減期	壊変形式
(a) 系列を構成する核種		
ウラン系列(U-238→Pb-206)	4.468x10 ⁹ 年	8α+6β
トリウム系列(Th-232→Pb-208)	1.41 x10 ¹⁰ 年	6α+4β
アクチニウム系列(U-235→Pb-207)	7.038x10 ⁸ 年	7α+4β
(ネプツニウム系列)	(2.14 x10 ⁶ 年)	7α+4β
(b) 系列を構成しない核種		
K-40	1.28x10 ⁹ 年	β-, EC(β+)
Rb-87	4.8 x10 ¹⁰ 年	β-
Nb-92	3.2 x10 ⁷ 年	EC
Gd-113	9 x10 ¹⁵ 年	β-
In-115	5.1 x10 ¹⁴ 年	β-
La-138	1.1 x10 ¹¹ 年	β-, EC
Ni-144	2.1 x10 ¹⁵ 年	α
Sm-146	1.03x10 ⁸ 年	α
Sm-147	1.06x10 ¹¹ 年	α
Sm-148	8 x10 ¹⁵ 年	α
Gd-152	1.1 x10 ¹⁴ 年	α
Lu-176	3.6 x10 ¹⁰ 年	β-
Hf-174	2.0 x10 ¹⁵ 年	α
Re-187	4 x10 ¹⁰ 年	β-
Os-186	2 x10 ¹⁵ 年	α
Pt-190	6 x10 ¹¹ 年	α
(c) 宇宙線との核反応によって生成する核種		
H-3	1.23x10 年	β-
Be-7	53.3 日	EC
Be-10	1.6 x10 ⁶ 年	β-
C-14	5.73x10 ³ 年	β-
Ni-22	2.602 年	β+, EC
Al-26	7.2 x10 ⁵ 年	β+, EC
Si-32	6.5 x10 ² 年	β-
P-32	14.26日	β-
S-35	87.5 日	β-
Cl-36	3.01x10 ⁵ 年	β-, EC
(d) 核実験・原子炉に由来する核種		
H-3	1.23x10 年	β-
C-14	5.73x10 ³ 年	β-
Co-60	5.271 年	β-
Sr-90	2.88x10 年	β-
Tc-99	2.14x10 ⁵ 年	β-
Ru-103	39.4 日	β-
Ru-106	367 日	β-
Cs-137	3.017x10 年	β-
Ce-144	284 日	β-
Pu-239	2.41x10 ⁴ 年	α
Pu-240	6.57x10 ³ 年	α
Am-241 等	4.33x10 ² 年	α

ステーションのある大気圏外では被曝線量が高いことが知られ、宇宙飛行士には被曝管理がきちんとなされ、また飛行士には放射線リスクの説明と同意が得られているそうです(文部科学省科学技術・学術政策局 放射線安全規制検討会, 2005)。大気圏での二次宇宙線生成時に、第1表(c)のトリチウムや炭素-14、ベリリウム-10、塩素-36等が生成されるのですが、長寿命の核種はいずれ私たちの生活圏に降ってきます。私達の利用する航空機も上空を飛行するために二次宇宙線を浴びることになります。高度12kmで約5μSv/h, 8kmで約3μSv/hと見積もられており、地表ではぐんと下がって先に見たように0.04μSv/hと

第2表 ウラン・トリウム鉱物の一例.

鉱物名	化学組成	産状	色
(酸化物・水酸化物)			
Thorianite	トリアン石 (Th, U)O ₂	鉱脈 (I)、砂鉱	黒
Uraninite	閃ウラン鉱 (U, Th)O ₂	鉱脈、ペグマタイト、堆積岩 (I)	"
Pitchblende	ピッチブレンド (U, Pb) 3U ₂ O ₁₂	"	"
Ianthinite	ムラサキウラン鉱 UO ₂ ・5UO ₃ ・10・56H ₂ O	鉱脈 (II)	紫黒
Schoepite	シェップ石 2UO ₃ ・5H ₂ O (?)	"	硫黄～淡黄
Becquerelite	ベッケレル石 7UO ₃ ・11H ₂ O	鉱脈、堆積岩 (II)	黄～褐黄
"Becquerelite"	CaO・6UO ₃ ・11H ₂ O	鉱脈 (II)	"
Curite	キュウリー石 3PbO・8UO ₃ ・4H ₂ O	"	橙赤～緋
(ニオブ・タンタル・チタン酸化物)			
Davidite	デービド鉱 (Fe, U, Ca, Zr, Th, R) (Ti, Fe, V, Cr) 3 (O, OH) 7	高温熱水鉱床 (I)	黒～灰黒
Zirkelite	チルケル石 (Ca, Fe, Th, U) (Ti, Zr) 2O ₅ (?)	輝岩 (I)	黒
"Zirkelite"	チルケル石 (Ca, Ce, Y, Fe) (Ti, Zr, Th) 3O ₇	砂鉱	黒～褐黒
Uran-pyrochlore	ウラン・パイロクロール (Na, Ca, U) 2 (Nb, Ti, Ta) 2 (O, OH, F) 7	ペグマタイト、炭酸塩岩 (I)	褐～黒
Betafite	ベタフォ石 (U, Ca) (Nb, Ta, Ti) 3 (O, OH) 7 (?)	ペグマタイト (I)	褐黄
Euxenite	ユークセン石 (Y, Er, U, Ca) (Nb, Ta, Ti) 2 (O, OH) 6	"	"
Brannerite	ブランネル石 (U, Ca, Th, Y) Ti ₂ O ₆	鉱脈、ペグマタイト (I)、砂鉱	黒～黄褐
Fergusonite	フェルグソン石 (Y, Er, Ce, U, Th...) (Nb, Ta) O ₄	ペグマタイト (I)	黒～褐黒
Ishikawaite	イシカワ石 (U, Fe, Y) 2 (Nb, Ta) 2O ₇ ~8 (?)	"	黒
Samaraskite	サマルスキー石 (Y, Er, U, Ca, Fe) 2 (Nb, Ta) 2O ₇ ~8 (?)	"	漆黒～褐黒
(炭酸塩鉱物)			
Rutherfordine	ラザフォード石 (UO ₂) (CO ₃)	鉱脈、ペグマタイト (II)	黄～緑黄
Liebigite	リービヒ石 Ca ₂ (UO ₂) (CO ₃) 3・12H ₂ O	鉱脈 (II)	緑～黄緑
Andersonite	アンダーソン石 Na ₂ Ca(UO ₂) (CO ₃) 3・10H ₂ O	鉱脈、堆積岩 (II)	鮮黄緑
Rabbittite	ラビット石 Ca ₃ Mg ₃ (UO ₂) 2 (OH) 4 (CO ₃) 6・18H ₂ O	堆積岩 (II)	黄緑
Schroekingerite	シュレッキングエル石 NaCa ₃ (UO ₂) F (SO ₄) (CO ₃) 3・10H ₂ O	鉱脈、堆積岩 (II)	緑黄
(硫酸塩鉱物)			
Uranopilite	ウラニル石 (UO ₂) 6 (SO ₄) (OH) 10・12H ₂ O (?)	鉱脈 (II)	淡黄～黄
Zippeite	ツッペ石 K ₄ (UO ₂) 6 (SO ₄) 3 (OH) 10・H ₂ O	"	橙黄
Johannite	ヨハン石 Cu(UO ₂) 2 (SO ₄) 2 (OH) 2・6H ₂ O	"	淡緑～暗緑
(モリブデン酸塩鉱物)			
Umbohite	ウモホ石 (UO ₂) (MoO ₄)・4H ₂ O	"	黒～青黒
(リン酸塩・ヒ酸塩鉱物)			
Xenotime	ゼノタイム (Y, U, Th) PO ₄	ペグマタイト、鉱脈 (I)	黄褐～緑褐
Monazite	モナズ石 (Ce, Th) (P, Si) O ₄	ペグマタイト、鉱脈 (I)、砂鉱	褐
Ningyoite	ニンギョウ石 U _{1-x} Ca _{1-x} R _{2x} (PO ₄) 2・1-2H ₂ O	堆積岩 (I)	褐緑～黒
Parsonsite	パーソンズ石 Pb ₂ (UO ₂) (PO ₄) 2・0-2H ₂ O	鉱脈、ペグマタイト (II)	黄～緑褐
Walpurgite	ワルブルギス石 2Bi ₂ O ₃ ・UO ₃ ・As ₂ O ₅ ・3H ₂ O	鉱脈 (II)	黄
Torbernite	リンドウウラン石 Cu(UO ₂) 2 (PO ₄) 2・10H ₂ O	鉱脈、ペグマタイト、堆積岩 (II)	緑
Autunite	リンカイウラン石 Ca(UO ₂) 2 (PO ₄) 2・10H ₂ O	"	淡黄～硫黄
Zeunerite	ヒドウウラン石 Cu(UO ₂) 2 (AsO ₄) 2・10H ₂ O	鉱脈、ペグマタイト (II)	緑
Meta-uranocircite	Ba(UO ₂) 2 (PO ₄) 2・8H ₂ O	鉱脈、堆積岩 (I)	黄緑
Troegierite	トレゲル石 H ₂ (UO ₂) 2 (AsO ₄) 2・8H ₂ O	鉱脈 (II)	淡黄
Uranospinite	ヒカイウラン石 Ca(UO ₂) 2 (AsO ₄) 2・8H ₂ O	鉱脈 (II)	淡黄～黄緑
(バナジウム酸塩鉱物)			
Carnotite	カルノー石 K ₂ (UO ₂) 2 (V ₂ O ₈)・3H ₂ O	堆積岩、鉱脈 (II)	鮮黄～淡黄
Tuyamunite	ツヤムン石 Ca(UO ₂) 2 (V ₂ O ₈)・5-8・5H ₂ O	堆積岩 (II)	黄～淡黄
(ケイ酸塩鉱物)			
Zircon	ジルコン (Zr, Th, U) SiO ₄	ペグマタイト (I)	無・緑褐・黄褐
Thorite	トール石 Th(SiO ₄)	ペグマタイト、鉱脈 (I)、砂鉱	褐黄・橙黄
Uranothorite	ウラン・トール石 (Th, U) (SiO ₄)	"	暗褐・緑
Thorogummitite	トロゴムミット石 (Th, U) (SiO ₄) 1-x (OH) 4x	ペグマタイト (II)	黄褐～白
Coffinite	コフィン石 U(SiO ₄) 1-x (OH) 4x	堆積岩、鉱脈 (I)	黒
Huttonite	ハットン石 Th(SiO ₄)	砂鉱	無～白
Soddyite	ソディ石 (UO ₂) 5 (SiO ₄) 2 (OH) 2・5H ₂ O	鉱脈、ペグマタイト、堆積岩 (II)	"
Uranophane	ウラノフェン Ca(H ₃ O) 2 (UO ₂) 2 (SiO ₄) 2・5H ₂ O	ペグマタイト、鉱脈、堆積岩 (II)	黄～黄緑
Sklodovskite	スクロドフスク石 Mg(UO ₂) 2 (SiO ₃) 2 (OH) 2・5H ₂ O (?)	鉱脈 (II)	黄
Yttrialite	イットリア石 (Y, Th) 2Si ₂ O ₇ (?)	ペグマタイト (I)	暗緑
Allanite	カツレン石 (Ca, Ce, Th...) 2Fe (Al, Fe) Si ₃ O ₁₂ (OH)	酸性火成岩、ペグマタイト (I)	黒褐
Beta-uranophane	ベータ・ウラノフェン Ca(UO ₂) 2 (SiO ₃) 2 (OH) 2・5H ₂ O	鉱脈、ペグマタイト、堆積岩 (II)	黄緑～緑黄

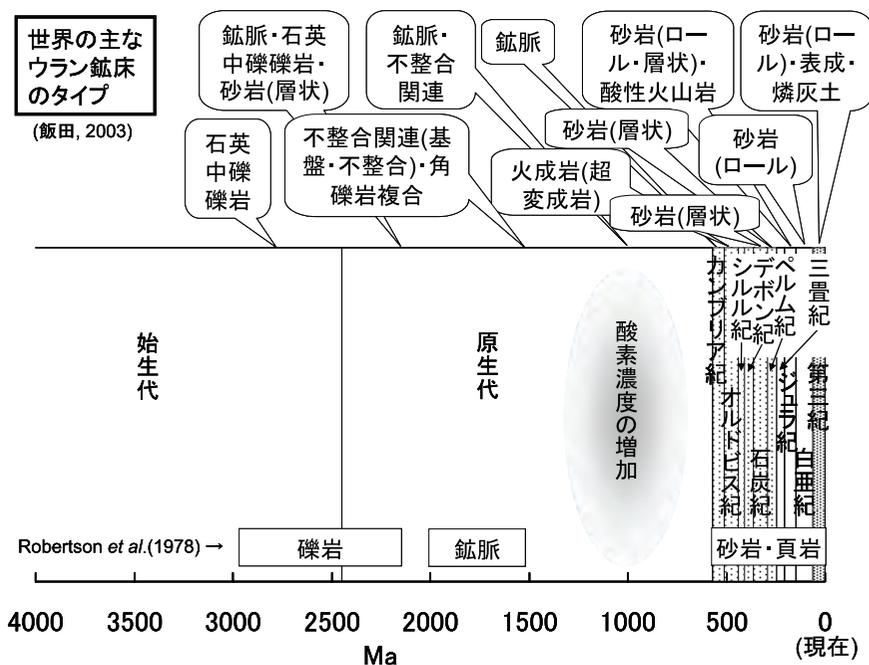
低下しています。地球は大気のおかげで人間が生活できるようにしているのです。また、高度の他に緯度・時間にも依存して変化するといいます(佐藤, 2007)。

大気中のラドンから受ける放射線は、環境放射線の半分以上を占めています。ラドン(Rn-222)はウラン系列に属する気体で、ラジウムから生じます。トリウム系列では、同位体のラドン(Rn-220)はトロン(Tn)とも呼ばれています。大地から地表に放出され、また屋

内でも高濃度で存在していることがあります。これについての詳細な話題は、金井(1991)に記載されていますので、そちらをご参照下さい。

3. 自然・生活環境における放射性核種を含む物質

第1表に示したものは核種・元素ですが、物質として見ると私たちの周りにはどのような放射性物質があ



第1図
ウラン鉱床のタイプと形成年代。

るのでしょうか。一つには、ウラン・トリウム鉱石です。これは、核燃料物質であるウラン・トリウムを取り出す元となる鉱石で、核原料物質です。このほかにも、第1表に示した核種が含まれる鉱石や岩石があります。また、生活の中に使用されている放射性物質としても、さまざまな工業製品があります。人工のRIを使用したものもあれば、NORMを使用した製品や人為的に濃度の高められた自然起源放射性物質TENORMもあります。既に金井(1996)でも一部紹介していますが、これらについて再度注目してみましょう。

(1) ウラン鉱石・トリウム鉱石

ウラン・トリウムを含む鉱石は色々なものが知られています。その一部を、第2表に示しました。閃ウラン鉱とかピッチブレンド等の名前がよく知られています。キュリー夫人が強い放射能を求めて研究した鉱物は、ピッチブレンドでした(そこから発見した元素がポロニウムとラジウムです)。ちなみにウラン鉱石を含む鉱床は、時代によってさまざまなタイプがあります。始生代末から原生代初期にかけては、一次鉱物の漂砂鉱床のような礫岩タイプのウラン鉱床が、原生代には高品位な不整合関連の鉱床が、そして中生代以降は植物等や酸化還元に伴う砂岩型のウラン鉱床が形成されたと考えられています(Robertson et al., 1978; 飯田, 2003)。これを第1図にまとめました。

ウランには四価のU(IV)と六価のU(VI)とがあり、後者はウラニルイオン(UO₂²⁺)となって前者よりもかなり溶解度が高い特徴があります。また、大気環境下では二酸化炭素と炭酸錯体を形成して溶存していることも知られています。このようにそれぞれの溶解特性が異なるため、酸化還元環境に応じて違った挙動をします。環境中では酸化帯であるか還元帯であるかが重要です。第2表の中で示される産状には、ペグマタイト中に産するもの、鈾脈型鉱床で産するもの、堆積岩中に産するもの等があり、環境・成因に依存しています。光合成をする植物に伴って酸素濃度が上昇し、人類等の酸素呼吸する生命体ばかりでなく、ウランもいろいろな影響を受け挙動していることは、おもしろいことです。

(2) 副成分としてウラン・トリウムを含む鉱石

宇宙は混合物ですから、色々な元素が入り交じっています。さまざまな過程を経て元素が集まり純化したものとなるのですが、神様もおとぼけで、イオン半径の類似したものとか化学挙動の似たものは区別できなくて、本来のものと置換していたり、固溶体をつくったりするので、ウランやトリウムも他の元素の結晶に不純物として紛れ込んでいることが多々あります。また、随伴鉱物として類似の挙動をする場合があります。

第3表 鉱石や産業残渣に含まれるウラン・トリウム濃度等 (Cooper et al., 2003; IAEA, 2003).

NORM		ウラン	ラジウム	トリウム	カリウム
		(U-238)	(Ra-226)	(Th-232)	(K-40)
		(Bq/g)			
【鉱石・鉱物砂】					
リン鉱石	リン酸塩	0.03-5	0.03-5	0.025-2	0.003-0.2
モナザイト砂	希土類元素	0.37		1.8	0.16
モナザイト	希土類元素	6-40		8-900	
バストネサイト	希土類元素 (Ce)・研磨材			0.4	
ゼノタイム	希土類元素	3.5-500		180	
トリアナイト	トリウム			2500-5500	
スズ鉱石	スズ	1		0.3	
バイロクロア	ニオブウム	10		80	
チタン鉱石	チタン	0.07-9		0.07-9	
イルメナイト	チタン	2		1	
ジルコン砂(パッドレイ石)	耐火物	10	3-4	10	
ボーキサイト	アルミニウム	0.4-0.6		0.4-0.6	
石炭	いろいろ	0.02		0.02	0.04
鉄鉱石	鉄	0.015			
銅鉱石	銅	0.03-100		0.02-0.11	
ホタル石のくず			4		
【産業残渣・廃棄物】					
スズの鉱滓		1-4	1-4	0.23-0.34	
石油のスケール			< 4		
石油のスケール(低減技術)			0.04-0.1		
希土類元素の副産物			3-450		
イルメナイトから酸化チタン製造の残渣			< 400		
モナザイト工程の残渣			< 450		
ジルコン工程の残渣			2-50		
スラッジ(汚泥)			0.2-7		
銅の鉱滓			0.5-2		
アルミニウム工程のスラッジ		0.26-0.54	0.15-0.33		
フライアッシュ		0.4			
スチール生産における溶鉱炉の鉱滓		0.15		0.15	

(3) 岩石・土壌

岩石にも造岩鉱物として、また、斑晶のまわりを埋める物質としてウラン等が存在しています。岩石が風化してできた堆積物やさまざまな過程を経て生成した土壌にも、ウラン・トリウム等が含まれています。ボーキサイトや風化カーボナタイト等にもウランが残留濃縮しています(金井, 1992)。

(1)～(3)の鉱物、岩石、土壌等におけるウラン・トリウム濃度は、生成時の環境によって、また、起源物質によってかなりの幅があります。一例として、鉱石

やその残渣等に含まれるウラン・トリウム等の濃度を第3表に示しました。工業用に使用される鉱石類の中には、ウランやトリウムの濃度の高いものがあることが分かります。

(4) 石炭・石油・天然ガス

地下では有機物によって還元的になり、また有機体による吸着作用等が働くため、ウラン等が沈着・吸着されやすい環境になっていますが、その有機物が作った石炭・石油にもウラン等が集まっていることがあります。これらは燃焼によって不燃性残渣に濃縮す

第4表 一般消費財におけるウラン・トリウム濃度 (吉田ほか, 2005).

製 品	性 状	U (ppm)	Th (ppm)	U-238 (Bq/g)	Th-232 (Bq/g)
掛け布団	布, わた	3.5 ± 0.05	2.5 ± 0.04	0.043 ± 0.0007	0.01 ± 0.0002
敷き布団	布, わた	20 ± 0.3	580 ± 3	0.26 ± 0.004	2.3 ± 0.01
半袖肌着	布	82 ± 0.6	2200 ± 40	1 ± 0.01	8.8 ± 0.16
腹巻A	布	76 ± 0.5	2100 ± 30	0.94 ± 0.006	8.5 ± 0.12
腹巻B	セラミック	430 ± 3	8400 ± 60	5.4 ± 0.04	34 ± 0.2
リストバンド	布(プリント転写)	0.93 ± 0.02	23 ± 0.3	0.011 ± 0.0002	0.093 ± 0.0014
靴下	布	57 ± 0.7	1500 ± 30	0.7 ± 0.009	6.2 ± 0.14
靴中敷A	布	25 ± 0.4	660 ± 5	0.31 ± 0.004	2.7 ± 0.02
靴中敷B	布(プリント転写)	6.9 ± 0.12	160 ± 3	0.085 ± 0.0015	0.63 ± 0.012
靴中敷C	セラミック	34 ± 0.6	680 ± 9	0.42 ± 0.008	2.8 ± 0.04
プレスレットA	セラミック	140 ± 2	3000 ± 40	1.7 ± 0.03	12 ± 0.2
リストバンド	セラミック	710 ± 3	18000 ± 100	8.8 ± 0.04	71 ± 0.4
家庭用温泉器A	粉末	2800 ± 20	67000 ± 800	34 ± 0.2	270 ± 3
家庭用温泉器B	セラミック	830 ± 14	20000 ± 400	10 ± 0.2	81 ± 1.7
マイナスイオンシール	布	54 ± 0.3	1300 ± 20	0.67 ± 0.003	5.4 ± 0.1
壁紙塗布材	ペースト	47 ± 0.5	770 ± 11	0.58 ± 0.006	3.1 ± 0.05
Th入りタングステン溶接電極	金属	0.96 ± 0.08	21000 ± 300	0.012 ± 0.001	86 ± 1.3
船底塗料	粉末	970 ± 14	20000 ± 100	12 ± 0.2	81 ± 0.6
マフラー触媒	金属	270 ± 4	52000 ± 500	3.3 ± 0.05	210 ± 2
研磨剤	粉末	16 ± 0.2	170 ± 2	0.2 ± 0.003	0.7 ± 0.007

ることになります。天然ガスは気体ですが、同じ気体であるラドンと挙動を共にすることがあり、ガス付随水(ラジウムが多いことがあります)、スケール(缶石:析出・沈着した塩類)と共に放射性核種の存在に注目する必要があります。

(5) 河川水・地下水・温泉・海水

ガス付随水と同様に、液体の水は様々な物質を溶かし込みます。ウラン等を含む鉱物や岩石・堆積物等と接触している間に、可溶性の放射性核種を取り込み、運搬・移動させます。温泉には、ラジウム・ラドンを豊富に含有する放射能泉もあり、痛風、動脈硬化症、高血圧症、慢性皮膚病、慢性婦人病等に効能があるとされて人気もあるようです。ラドンは、地下の帯水層にも蓄積されて井戸水の蛇口から出るということもあるそうです。

(6) 一般消費財

一般消費財では、NORMの他に人工の放射性核種も使用されており、例えば自発光性塗料(Pm-147, H-3等)、煙探知器(Ni-63, Kr-85, Pm-147, Am-241等)、グロースターター(Kr-85, Pm-147等)等があります。NORMの利用では、(a)放射線源として利用、(b)元素の特質を利用、(c)意図せず不純物として含有されている場合とが考えられます。(a)の放射線源としての利用では、入浴剤として使われる温泉の湯ノ華(Raやその娘核種)や、ラドン発生器(ウラン・ラジウム

鉱石やモナザイト等のトリウム)があります。放射線によるイオン化や皮膚の活性化等を目的に装飾品や寝具、健康器具等に利用されています。タンブラーとして鉱石を使用した例もあります。(b)の元素の特性を利用したものでは、合金にして金属特性を改良した酸化トリウム入りタングステン電極(放電特性・機械的強度の改善)やトリウム棒、レンズの光学特性を改善したトリウムガラス、装飾品となるウランガラス等があります。ウランガラスは0.1%程度ウランが含まれていますが装飾品として人気が高く、含まれている核種で産地識別もできるようです(鈴木ほか, 2005)。(c)の不純物として含有するものとしては肥料があります。植物の三大栄養素として、窒素・リン酸・カリウムが有名ですが、生育を良くするためにリン酸肥料として使用される過リン酸石灰はリン鉱石を硫酸で分解して生成されるため、不純物としてウラン・ラジウムやその娘核種が含まれます。こうした肥料をたくさん使用している農耕地土壌中のウラン濃度は、それでも平均で2.75 ppmですが、非農耕地土壌と比べると平均で50%ほど付加されていると推定されています(田上・内田, 2006)。

第4表には、日常の生活用品から産業用製品にわたる製品中のウラン・トリウム含有量の一例を示しました(吉田ほか, 2005)。極低濃度のものから鉱石レベルのものまで様々な存在していることが分かります。

RI線源		試薬		核原料物質		NORM
密封	非密封	ウラン	トリウム	ウラン鉱石	トリウム鉱石	
指定された機器・線源は施設検査・定期検査あり 許可	(BSS国際免除レベルの10万倍以上) 更に施設検査・定期検査あり	(300gを超える) 核燃料物質使用の許可	(900gを超える) 核燃料物質使用の許可	(370Bq/gを超える、かつ $U_{235}+Th > 900g$) 使用の届け出		(指定された原材料で1Bq/gを超えるものおよびそれを使用した製品) ガイドライン適用
(BSS国際免除レベルの1000倍以下) 届け出	許可	(300g以下) 国際規制物資の使用の許可	(900g以下) 国際規制物資の使用の許可	規制外 だが、ガイドライン適用		
(BSS国際免除レベル以下) 規制外	(BSS国際免除レベル以下) 規制外	国際規制物資の使用の許可		(1Bq/g以下) 対象外		適用外

第2図
種々の放射性物質に関する規制の概略。

4. 放射性物質の扱いと規制

一般の人工RIと同様に、NORMを規制するかどうかは非常に難しい問題です。ただここで注目しなければならないことは、国際原子力機関(IAEA)が1996年に報告した「電離放射線に対する防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準」、いわゆるBSS(Basic Safety Standards)です。ここでは、科学的根拠に基づき、はじめから放射線規制を免除することのできる核種ごとの放射能と濃度である「国際免除レベル」を設定しています。これは通常時は $10\mu\text{Sv/y}$ 、事故時には 1mSv/y 、かつ1年間の集団線量が $1\text{man}\cdot\text{Sv}$ を超えないように設定されています(山本, 2003)。このため、国際免除レベル以下のものは規制から除外できると考えられます。このBSSが現在RI利用における基本の法である、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」に取り入れられています。

この中では、天然のウラン・トリウムは濃度で 1Bq/g 、数量で 1kBq と規定されています。天然のウラン・トリウムは壊変系列を作っていますので、その娘核種も同様です。単独のU-238やTh-232はその10倍の 10Bq/g 、 10kBq となっています。ところで、元素状のウラン・トリウム(金属や試薬類)は核燃料物質ですので(同時に国際規制物資でもあります)、RIとは別の「原子力基本法」や、「核原料物質・核燃料物質及

び原子炉の規制に関する法律」、いわゆる炉規法でその使用に関しては次のように規制されています。第五十二条で「核燃料物質を使用しようとする者は、政令で定めるところにより、文部科学大臣の許可を受けなければならない。(以下略)」また、第六十一条の三で「国際規制物資を使用しようとする者は、政令で定めるところにより、文部科学大臣の許可を受けなければならない。(以下略)」いずれにしても、事業所毎に少量(法律施行令第三十九条でウラン 300g 、トリウム 900g まで)ならば国際規制物資の、多量ならば核燃料の使用許可を取らなければならず、それぞれの使用においては種々の規制を受けるのです。ウラン・トリウムに関しては下限がありません。

一方、核原料物質としてウラン・トリウム鉱石をみると、放射能濃度では 74Bq/g (固体は 370Bq/g)かつ数量が「ウランの量の3倍」と「トリウムの量」の和が 900g を超える場合に届け出が必要となります。鉱石類の場合には固体ですから、 370Bq/g はウラン濃度換算した目安として約 1.4% (U-238+U-234)、トリウム濃度としては約 4.5% (Th-232+Th-228)としています(文部科学省：http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/15/01/030123.htm)。また、この規制に当てはまる可能性のある鉱石として、ウラン・トリウム鉱石の他にリン鉱石、ジルコン、コロムバイト、タンタライト、ゼノタイム、パイロクロール、バストネサイト、カツレン石、タングステン鉱等、36種を提示しています。

第5表 環境における主な放射性核種による放射能とBSS免除レベル。

環境における 主な放射性核種	同位体存在比 (%)	地殻存在度	放射能(Bq/g)		BSS免除レベル (Bq/g)
			地殻存在度で は	金属(100%) では	
U-238	99.275	2.7 ppm	3.3E-02	1.2x10⁴	1
Th-232	100	9.6 ppm	3.9E-02	4.0x10³	1
K-40	0.0177	2.09 %	9.6E-01	46	100
Rb-87	27.83	90 ppm	7.9E-02	881	10000
Nb-92	2x10 ⁻¹¹	20 ppm	1.80E-11	<0.1	
Cd-113	12.2	0.2 ppm	3.2E-10	<0.1	
In-115	95.7	0.1 ppm	2.2E-08	0.2	1000
La-138	0.089	30 ppm	2.3E-05	0.8	10
Nd-144	23.8	28 ppm	2.9E-07	<0.1	
Sm-146	< 2x10 ⁻⁷	6 ppm	1.1E-08	<0.1	
Sm-147	15.1	6 ppm	7.7E-04	128	10
Sm-148	11.3	6 ppm	7.6E-09	<0.1	
Gd-152	0.2	5.4 ppm	8.5E-09	<0.1	
Lu-176	2.61	0.5 ppm	2.7E-05	54	100
Hf-174	0.16	3 ppm	1.8E-10	<0.1	
Re-187	62.6	0.001 ppm	1.1E-06	1110	1000000
Os-186	1.6	0.001 ppm	5.7E-13	<0.1	
Pt-190	0.013	0.005 ppm	7.5E-11	<0.1	

太字はBSS免除レベルを超えるもの

濃度が低い場合もしくは総量が少ない場合には核原料物質に該当しないため、これまで規制は受けていませんでしたが、既に述べてきたように実際には生活のあらゆる場での使用が散見され、同じ放射性物質ということでNORMとして検討する必要が出てきたのです。これらの規制の概略を、第2図に示しました。

5. NORMの扱いに関する動き

ここで再度第1表に示された環境中の放射性核種を見直してみましょう。地殻に存在する放射性核種の存在度と同位体割合とを考慮して、これらの核種による放射能を計算してみたのが第5表です。この表に示されているように、平均地殻存在量(Taylor, 1964; Mason, 1958)ではその放射能は最大のカリウムでも0.96Bq/gで、以下ルビジウム-87の0.08Bq/g、トリウム・ウランの0.04-0.03Bq/gと続き、更にその1/40以下のサマリウム-147等です。これらは平均地殻存在

量では全く問題のない放射線の量です。ところが、自然界では鉱床のような元素の濃集現象があるため、その濃度にはかなり広い幅があります。仮に100%の金属であったと仮定して計算すると、ウラン・トリウム、レニウム、ルビジウム、サマリウム、ルテチウム、カリウムがかなりの高放射線量となることが分かります。この中でBSS免除レベルを超えるものには、ウラン・トリウムとサマリウムがあります。レニウムやルビジウムは放射線の量が多いのですが、β線核種でエネルギーが低いため人体への影響は少ないのです(BSS免除レベルが高い)。このため、結果的にウラン・トリウムと共にサマリウムに注目すればよいことが分かります。ちなみにサマリウムは、強力な磁石の原料として利用されています。

我が国でも放射線審議会基本部会での検討・報告書を踏まえ、文部科学省科学技術・学術政策局 研究炉等安全規制検討会では、BSS免除レベルを超える恐れのあるNORMを含む物のうちで、ウランまたはトリウムを含む物の取り扱いについて、作業員・周辺

第6表 自然放射性物質を含む物質の分類と対応案(放射線審議会基本部会, 2003による)。

区分	検討を要する事例*8	除外、行為、介入の区別	法令による規制	対応の方法	対応のための線量の目安/規準	
1	鉱物、鉱石等に含まれる自然放射性物質の比率を高める処理をしていないもの(区分2、3、4、5、6を除く)	除外	対象外	—	—	
2	過去に廃棄された自然放射性物質を含む残渣	介入	対象外	対策レベル	今後の検討(1~10mSv/年)	
3	産業で生成される灰、缶石など(原材料として取り扱う物質は免除レベル濃度以下のもの)	介入	対象外	対策レベル	今後の検討(1~10mSv/年)	
4	現在操業中の鉱山の残土、産業利用の残渣(処分)	行為/介入*9	対象	<ul style="list-style-type: none"> 一定濃度を超える可能性のあるものを特定する 特定物質の利用のうち、作業者または一般公衆が受ける線量に応じ放射線防護上の適切な管理を求める。 	1 mSv/年(これを超えたら規制するか、介入するかを検討)	
5	産業用原材料(製造、エネルギー生産、採掘)(区分7を除く)	行為/介入*9	対象	区分4と同様	1 mSv/年(同上)	
6	一般消費財(使用)	行為	商品ごとに対象とするか否かを検討	基本的にBSS免除レベルを適用	10 μSv/年	
				型式承認に相当する制度を検討	1 mSv/年	
7	放射線を放出する性質等を意図して利用するために精製された核燃料物質や放射線源として使用するもの	行為	対象	BSS免除レベルを適用	10 μSv/年	
8	ラドン	規制下にあるラジウム線源から発生するラドン	行為	対象	BSS免除レベルを適用	—
		核原料物質鉱山における職業環境のラドン	行為	鉱山保安法の対象	—	—
		住居、一般職業環境におけるラドンで上欄を除く	介入	対象外	対策レベル	今後の検討

* 8: ここにあげた事例は、文献調査及び自然放射性物質が比較的多く含まれていると考えられるものを実態調査したものについて記載したものである。なお、物質や鉱物の産地、種類、物量等により、自然放射性物質の含有量は異なってくることから、区分4及び区分5については、一定濃度を超える可能性のあるものを特定し、さらに放射線防護の必要があるものについては、適切な管理を求めることとなる。

* 9: 基本的には行為であるが、行為と介入の両面を持ち、原材料を取り扱う初期過程は、介入の対象の要素が大きい。

* 10: 区分7及び区分8は、今回の基本部会において規制免除に関して検討対象としていない。

住民ならびに一般消費財の製品利用者の放射線被曝の低減をはかるため、ガイドラインを作成しました(文部科学省科学技術・学術政策局 研究炉等安全規制検討会, 2006)。これによると、事業者は自主的に被曝線量評価を行い、それによって放射線量率低減措置をするよう求められ、そのための具体的な事項がまとめられています。ガイドラインで指定される原材料には、モナズ石、バストネサイト、ジルコン、タンタライト、リン鉱石、ウラン鉱石、トリウム鉱石、チタン鉱石、石炭灰等の鉱石及び鉱物砂、精製したウランま

たはトリウムを添加した合金またはガラスが挙げられ、これらを使用した製品も対象とされています。これによって生活の中の放射線の利用形態が変わらないにしても、順次見直されていくことと思われます。

ガイドライン適用外となるのは、BSS免除レベルに対応する1Bq/gのレベルですので、ウランの場合約80ppm(U-238)、トリウムの場合には約240ppm(Th-232)以下となります。また、審議会では、NORMの分類と同時に対応案を表としています。これを第6表に示しましたが、「(区分2、3、4、5、6を除く)庭石、

研究・教育用鉱物サンプル、博物館所有の鉱物サンプル、工事現場や河原等から出た鉱石」等に該当する「区分1(鉱物、鉱石等に含まれる自然放射性物質の比率を高める処理をしていないもの)」については、規制になじまないもの及び規制しても放射線傷害防止の効果が低いものとして、今のところ「除外」の対象となっています(放射線審議会基本部会, 2003)。なお、この表で「除外」というのは、宇宙線や大地、体内のK-40等の放射能のように本質的に制御不可能なものを扱う場合で、「行為」とは放射性物質を扱って被曝を増大させる人間活動を指し、「介入」とはすでに存在する放射線被曝を低減させる人間活動という意味です。ちなみに、BSS免除レベルのような「免除」というのは、本来は原子力・放射線利用における放射線管理の範疇ですが、それによる線量が取るに足らないほど低い場合に限ってその制御対象から外するという考え方です(下, 2007)。いずれにしても、低放射線量とはいえ適切で安全な対処や管理が望まれます。また、区分1でもNORMレベルを超えて核原料物質レベルとなると、それに見合った適切な対応が必要でしょう。

6. 放射線の影響

放射線が人体に与える影響は、よく知られているように確定的影響と確率的な影響とがあります。前者は閾値があってその閾値を超えると影響が現れ、後者は閾値が無く線量に比例して確率が高まるというものです。急性被曝では1,000mSvで吐き気、嘔吐、全身倦怠の症状、500mSvで一時的なリンパ球の減少が見られますが、それ以下では自覚症状は無く、250mSvではほとんど臨床症状は現れません(渡利・稲葉, 1999)。ちなみに、ICRP Publication60の勧告では放射線作業者の線量限度は5年間に100mSv、1年につき50mSvとしています。

これまでこのような放射線の影響は高レベルの線量に対して確認されてきましたが、低線量の影響についてはまだ確定的なことはいえていません。自然起源の本当に極低レベルの放射線がどのような影響を与えるかという問題は、解決されていないのです。低線量の疫学調査データでは有意な影響は認められていないようですが、低線量に対しても確率的影響があるとする考えは、今のところ放射線防護の立場から

保守的に仮定されているにすぎないのです。確定的影響は、全身被曝に対して200mSv以下では臨床症状は確認されていないといえます。NORMで議論されているのは、年間1mSvの問題ですから、かなり低いことが分かります。

低線量率の放射線影響の研究は継続されているものの、フランス科学アカデミーは現在100mSv以下では発がんが見られないことから、放射線の発がんリスクは無いとする見解を示しているそうです(田ノ岡, 2008)。空気中の酸素由来の1日当たりのDNA損傷の生成量は、放射線量に換算すると200mSvに相当するようで、多くのデータからの議論をしています。放射線リスクについては近藤(2005)も数多くの調査結果をまとめて報告しており、興味深い読み物です。しかし、低線量率の放射線影響については、未だに何とも結論の出ない議論です。

また、微量であれば逆に良い作用を示す生理的刺激作用である「放射線ホルミシス」と呼ばれる効果もあり(服部ほか, 1990)、小島(2008)はその提唱者であるラッキー博士の講演を紹介しています。そこでは、年間1mSvから6Svの場合には豊かな健康生活が送れるとのことでした。これらのいずれの議論についても未だに決着がつきませんが、放射線を有効に利用して恩恵を被るためには、定量化して評価できるような体制が必要だと思われます。

放射線は少なければ少ないほど本当によいのか、少なくするための労力と経済資源はその利益とリスクに見合っているのか、という問題は、今後重要な課題となるでしょうし、そのためには科学的なデータと議論による判断基準が必要となってくることでしょう。

7. おわりに

原子力発電所の放射能については、かなり厳しく規制されています。ホンのちょっとした放射能漏れがあったとしても大事件の扱いですが、これはハイน์リッヒの法則の如く、ちょっとしたミスの繰り返しが大きな事故につながるため、注意喚起の意味でそれはそれで結構なことです。しかし、環境レベルの放射能については、これまで私たちはあまりにも鈍感であったのかも知れません。人工の放射線や原子力発電所の放射線も環境に存在する放射線も、同じ放射線です。かといって、環境レベルの放射能に恐怖心を抱かせた

り、放射線防護をしようとか言っているのでは決してありません。むしろ過剰な対応をしないで欲しいと願っています。環境レベルを知るとともに、低放射線の影響議論を通して安全レベルを明らかにしていくことが、安全・安心のために重要とされます。

放射線は、毒にも薬にもなります。生活に利益を与え、病巣を攻撃して治療を行うこともできれば、逆に病気を引き起こすこともできます。このように放射線も自動車や薬物の利用と同じで、正しい理解と適切な利用とが重要なこととなっています。更に大げさに言えば、何事にも当てはまることですが、人類の誕生以来私たちは急激に自然を変えてきてしまいましたが、人類が永らえるためにはありのままの自然との調和と共生を常に考えていくことが必要でしょう。

謝辞：本小論をまとめるに当たり、寒川 強氏(環境安全管理部)ならびに関係者各位にお世話になりました。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Bhattacharyya, D. K. (1998) : Issues in the Disposal of Waste Containing Naturally Occurring Radioactive Material. Applied Radiation and Isotopes (Incorporating Nuclear Geophysics), 49, 215-226.
- Cooper, J.R., Randle, K. and Sokhi, R. S. (2003) : Radioactive releases in the environment. Impact and assessment. John Wiley & Sons, Ltd., England, 473p.
- 服部禎男・根本和泰・石田健二・御園生淳・菅沼浩敏・石井敬一郎・山岡聖典(1990) : 放射線ホルミシス. 日本原子力学会誌, 32, 688-696.
- 放射線審議会基本部会(2003) : 自然放射性物質の規制免除について, 平成15年10月. 参考資料2 平成16年7月22日修正.
- IAEA(2003) : Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. Technical Report Series no.419. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.
- 飯田義正(2003) : I-B8 ウラン鉱床. 資源環境地質学-地球史と環境汚染を読む-, 資源地質学会, 117-130.
- 金井 豊(1990) : ウランと先端産業 -マクロとミクロの世界. 地質ニュース, 426, 34-41.
- 金井 豊(1991) : ラドンと環境問題 -地球化学について-. 地質ニュース, 446, 33-46.
- 金井 豊(1992) : アルミニウム試葉及びボーキサイトに含まれる不純物ウランとそのウラン-234/ウラン-238放射能比. 分析化学, 41, T83-86.
- 金井 豊(1996) : 放射能の発見と地球化学. 地質ニュース, 508, 48-61.
- 金井 豊(2000a) : ラジウムの地球化学-ラジウムと放射線測定器の1世紀-. 地質ニュース, 554, 17-29.
- 金井 豊(2000b) : 鉛の地球化学-ウラン系列核種²¹⁰Pbの堆積学的応用法を中心として-. 地質ニュース, 556, 20-34.
- Kleinschmidt, R. and Akber, R. (2008) : Naturally occurring radionuclides in materials derived from urban water treatment plants in southeast Queensland. Journal of Environmental Radioactivity, 99, 607-620.
- 近藤宗平(2005) : 低線量放射線の健康影響. 近畿大学出版局, 大阪, 250p.
- Mason, B. (1958) : Principles of Geochemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York, 310p.
- 文部科学省科学技術・学術政策局 放射線安全規制検討会(2005) : 航空機乗務員等の宇宙線被曝に関する検討について. 平成17年11月1日. 資料20-2.
- 文部科学省科学技術・学術政策局 研究炉等安全規制検討会(2006) : 自然起源の放射性物質を含むものの被曝線量測定及び措置に関するガイドライン. 平成18年2月6日.
- 小島周二(2008) : 低レベル放射線のバイオポジティブ効果について(ミズーリ大学名誉教授トーマス・D・ラッキー). Isotope News, 649, 17-21.
- Paschoa, A. S. (1997) : Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) and Petroleum Origin. Applied Radiation and Isotopes (Incorporating Nuclear Geophysics), 48, 1391-1396.
- Robertson, D.S., Tilsley, J.E. and Hogg, G.M. (1978) : The time-bound character of uranium deposits. Economic Geology, 73, 1409-1419.
- 佐藤達彦(2007) : 宇宙線被ばく線量率の高度・地域・時間依存性. Isotope News, 643, 9-13.
- 下 道國(2007) : 自然環境中のウラン-環境中ウラン濃度とウランのクリアランスレベル-. 原子力バックエンド研究, 14, 43-50.
- 鈴木章悟・永山明彦・大井 昇(2005) : ウランガラスからのγ線スペクトル測定. 日本原子力学会和文論文誌, 4, 1-6.
- 田上恵子・内田滋夫(2006) : U/Th非を用いたリン鉱石原料のリン酸肥料施肥による農耕地土壤中ウラン増加割合の推定. Radioisotopes, 55, 71-78.
- 田ノ岡 宏(2008) : テュビアナ博士の2007年度マリーキュリー賞受賞講演「低線量放射線のがんリスク:反LNTの根拠」. Isotope News, 649, 13-16.
- Taylor, S.R. (1964) : The abundance of chemical elements in the continental crust - a new table. Geochimica Cosmochimica Acta, 28, 1273-1285.
- Tzortzis, M., Tsertos, H., Christofides, S. and Christodoulides, G. (2003) : Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks. Radiation Measurements, 37, 221-229.
- 渡利一夫・稲葉次郎(1999) : 放射能と人体 -くらしの中の放射線-. 研成社, 東京, 122p.
- 山本幸佳(2003) : Q&A : BSS免除レベルの取り入れて法令はどう変わるのか. Isotope News, 2003(11), 63-75.
- 吉田昌弘・遠藤 章・左藤滋朗・大畑 勉・渡辺正敏・大山柳太郎・古屋廣高(2005) : 天然ウラン, トリウムを含む消費財中の放射能濃度とその利用等による被曝線量の評価. 日本原子力学会和文論文誌, 4, 213-218.

KANAI Yutaka, KAMIOKA Hikari, OGASAWARA Masatsugu and AOKI Masahiro (2008) : Recent trend of NORM and environmental radioactivity.

<受付:2008年8月20日>