希土類資源開発と自然放射線源の放射線防護

河田 陽介^{*1}

(2014 年 4 月 25 日受理)

(2014 年 6 月 30 日再受理)

Rare Earth Resources Development and Its NORM Radiation Protection

Yosuke KAWATA^{*1}

There is growing demand for rare earth elements as raw materials for industrial goods such as high performance magnet. Thus, rare earth resources attract a lot of strategic attention internationally. The rare earth ore often contains uranium and thorium, that are Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Usually, such radioactive substances almost remain in the waste yielded in the extraction process for rare earth elements. Therefore, radiation protection is required in all of operation phases from mining and refining to waste disposal, and it is appropriate to the purpose to use the reference level of intervention in the ICRP recommendation. To ensure resource development, it is important that sites where wastes were disposed of are reused under monitored natural attenuation of the chemical conditions of the wastes after early physical stabilization of the land. This paper illustrates current status of rare earth development along with related radiation protection issue.

KEY WORDS: rare earth, NORM, radiation protection, waste management, environmental protection.

I はじめに

2010 年の夏、中国は、希土類元素を戦略資源として位置づけ、実質上の禁輸政策を開始した。これに対して日米欧は世界貿易機関（WTO）に提訴し、今年 3 月に勝訴したので今後輸出解禁の運びになると思われる。その間、休止鉱山の再開発及び新規鉱山の開発の気運が高まり、代替製品の開発及びリサイクルの推進が具体化し、当時より市場価格が低迷して採算分岐点が下がった。このため、新規鉱山等の開発だけでなく、中国自体も苦境を強いられることになる。しかし、希土類資源は、希少ではあるが、銅や鉛などのベース・メタルや金や銀などの貴金属の市場価格を決めるロンドン金属取引所（LME）の取引対象にもならないほどに取扱額が小さい金属であり、先物買いで市場価格が設定されて値動きが

激しいため、現物の受給が安定したとはとても言えない現状が続いている。このため、今後の市場動向が注目される場所である。

本稿では、2010 年に幕を開けた希土類資源戦争の顛末と、希土類鉱山開発に伴う自然放射性物質（NORM）問題について、いくつかの情報を提供したい。

II 希土類元素とトリウム及びウラン

ネオジム（Nd）磁石は、現在では、代表的な高性能磁石として知られている。さらに、ハイブリッド自動車のような高温環境下で使用されるネオジム磁石には高温下で磁性が消失しないようにジスプロシウム（Dy）が添加されていることや、ジスプロシウムを添加しないでも高温下で磁性が消失しないジスプロレス磁石の実用化を目指した開発競争が盛んに行われていることなどは、新聞報道を始めとして衆目の事実となっている。現在では、希土類磁石の再生利用やネオジムより産出量が多く値崩れを起こしたセリウム（Ce）やランタン（La）などの軽希土の新規用途開発に焦点が移ったことも否めない。

^{*1} 三菱マテリアル（株）エネルギー事業センター地下環境システム部：埼玉県さいたま市大宮区北袋町 1-297（〒330-8508）
Radioactive Wastes Management Dept., Energy Project & Technology Center, Mitsubishi Materials Corporation; 1-297 Kitabukuro-cho, Omiya-ku, Saitama-shi, Saitama 330-8508, Japan.
E-mail: kawata@mmc.co.jp

ところで、このネオジムやジスプロシウムといった元素は、共にランタノイドと呼ばれ、第1図に示すように、周期表では3属に属し、アクチノイドの上に位置している。これらランタノイドに、同じ3属のスカンジウム(Sc)とイットリウム(Y)を加え、希土類元素(レアアース)と総称されている。

ランタノイドは、4f軌道に電子を持たない原子番号57番のランタン(La)から4f軌道の電子がすべて揃った原子番号71番のルテシウム(Lu)まで15元素が存在する。発光体としてユウロピウム(Eu)が使用されていたブラウン管テレビに、キドカラーと呼ばれた製品があったことは今となっては懐かしい思い出である。安価な用途としては、ランタンは使い捨てライターの発火剤として使われており、セリウムはレンズやシリコンウエハーの研磨剤として使われている。

ランタノイドは、地球科学的には、不揮発性元素(incompatible element)と呼ばれ、超新星爆発によって生成した元素の中で早期に固相として析出した親石元素である。核物理的には、原子番号が奇数の元素よりも偶数の元素の方が安定であることを指摘したオッド・ハーキンスの法則が現れる典型例としても知られている。このため、地殻存在度は奇数と偶数の原子番号順にジグザグの模様を示すので、地球化学分野では、炭素質コンド

ライト(C1 Chondrite)と呼ばれる始原的な隕石中の希土類元素濃度¹⁾で岩石などに含まれる希土類元素濃度を規格化することによって得られる滑らかな曲線²⁾を用いて、岩石やマグマの分化成因論などが語られてきた。その一例を、ベトナム国ドンパオ鉱山の希土類鉱石について、わが国の標準岩石³⁾から花崗岩(JG-1; 稲田石としても知られている)と玄武岩(JB-1)及び中央海嶺玄武岩(MORB)的な特徴を持つ玄武岩(JB-2)と併せて、第2図に示す。

不揮発性元素としての希土類元素の特性は、親石元素でありながらも、ケイ酸塩鉱物の主たる構成元素としては存在しない微量元素であるという特徴としても現れている。そのため、ケイ酸塩鉱物の中では、その配位空間の大きさに応じて、ランタノイド収縮と呼ばれる原子番号が増えるにつれてイオン半径が小さくなる特徴を示しながら、微量の希土類元素が普遍的に取り込まれ、岩石などの形成過程に応じた一連の希土類パターンを描いている⁴⁾。

たとえば、大陸地殻を形作る花崗岩(JG-1)では軽希土に富み、大陸地殻を分離したマントル物質由来の中央海嶺的な玄武岩(JB-2)では軽希土やトリウム及びウランが枯渇している。一方、大陸地殻が融解して形成されたマグマに由来する希土類鉱床では、希土類元素自体の

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	★ Ln	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	★ An	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							
	★ Ln	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
	★ An	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

第1図 元素周期表における希土類元素と Th/U

第2図 希土類パターンと岩石等の含有量

濃度が高められるとともにさらに軽希土に富むことが見て取れる。いわば、希土類鉱床は、マグマの絞り滓と言っても差し支えないものであり、同様にケイ酸塩鉱物には相容れないフッ化物やリン酸塩などと結合した形態を取ることが多い。

この過程で、周期表でランタノイドの下方に位置するアクチノイド、半減期が地球年代的に極めて長い実質上の安定元素であるトリウムとウランも同様の傾向を示す。したがって、希土類鉱床にはこれら NORM が随伴し、その濃度は土壌のような通常地殻物質よりも桁違いに高められることになる。

III 戦略物質としての希土類鉱床とその開発

希土類元素（レアアース）の供給源としての希土類鉱床には二つの形態がある。両者の特徴⁵⁾を第3図に示す。

一つは、先ほども述べたマグマ由来の希土類鉱床であり、希土類鉱石としてはバストネサイト ((Ce, La) CO₃F) やモナザイト ((Ce, La, Nd, Th) PO₄) が知られて

第3図 希土類鉱床の成因と特徴⁵⁾

いる。これらの鉱石から希土類元素を抽出するためには、鉱石を分級して選鉱し、精鉱へと品位を高め、その後に硫酸を加えて焙焼炉で過熱し、希土類鉱石を分解しつつ可溶性の硫酸塩へと転換するとともに、共存する鉄等を不溶性の酸化物に変換することによって分離し、さらに化学操作によって不純物を除去し、粗精製された混合希土類塩を回収する必要がある。その模式的な過程を第4図に示すが、不純物の少ない混合希土類塩を得るためには、晶析などの化学処理も必要とする。

得られた混合希土類塩は、現在では一般に PC88A という有機溶媒によって溶媒抽出され、NORM を含む不純物が除去され、あるいは、元素ごとに単離・精製され、不純物含有仕様が緩やかな発火剤や研磨剤として使用されたり、高純度希土類の原料として供給されたりしている。わが国では、これらの精製済みの混合希土類塩が輸入され、溶媒抽出によって高純度の希土類の単離を行い、高性能磁石などの素材として供給されているので、国内では希土類産業における NORM 問題は存在しない。

他方は、イオン吸着型鉱床（吸着鉱床）という、希土類元素を比較的多く含む岩石が風化し、希土類元素が粘土などに吸着・残留して形成された、いわゆる風化残留鉱床である。岩石を供給源としているため、軽希土と重希土の相対濃度比も比較的小さく、ジスプロシウムに富む混合希土類塩を供給可能である。また、大気下におけるランタノイドとアクチノイドの化学的挙動の違いにより、トリウムとウランは炭酸錯体等を形成して河川を經由して海へと流れてしまうので、吸着鉱床のトリウムとウランの濃度は低い。さらに、鉱床の成因が吸着現象であるため、環境問題に目をつぶれば、酸を鉱床に直接撒く原位置リーチングによる希土類元素の回収が可能であり、混合希土類塩を安価に得ることができる。回収された混合希土類塩は溶媒抽出工程の原料として供給される。

吸着鉱床の多くは中国南東部に分布しており、その安

第4図 希土類精鉱の焙焼・粗製錬模式工程（一例）

価な開発費用が中国産の希土類原料が市場を席卷し、寡占状態を作り上げた要因でもあった。そして、自国の混合希土類塩組成に適した有機溶媒 PC88A を用いた溶媒抽出のノウハウも蓄積され、技術的優位性を確立してきた。しかしながら近年では、吸着鉱床の枯渇と環境問題の顕在化によって、安価な供給が困難になったことも、中国の希土類資源戦略の背景として存在する。

この供給量の削減を受け、市場は、ハイブリッド自動車など高付加価値製品の需要を背景に、環境対策費用の高騰によって休山に追い込まれていた米国マウンテン・パス鉱山の再開や豪州マウント・ウェルド鉱山のような潜在化していた大規模鉱山の開発に弾みをつけることとなった。世界の主な希土類鉱床⁶⁾を第5図に示す。

ただし、マウンテン・パス鉱山は、追加の環境保護策を講じるとともに、重希土資源の探査に注力し、市場価値を高めることに専念している。また、マウント・ウェルド鉱山の希土類鉱石は、豪州ライナス社により、自国内での処理が困難と判断され、条件が整ったマレーシア国パハン州のクアンタン臨海工業地帯（ゲベング）に設けた工場に鉱石を輸出して希土類元素を抽出する製錬プロジェクト（ライナス・プロジェクト）が進められている。この工場はすでに稼働準備状態にあるが、廃棄物の埋戻しが可能な鉱石採取場所ではなく、遠方の加工国で NORM を含む多量の残渣が発生する。このことから、マレーシア政府より国際原子力機関（IAEA）に廃棄物管理等に係る専門的見解を問う要請がなされ、IAEA がその規制免除レベル等⁷⁾に照らした報告書⁸⁾を出すようなことになっている。

なお、このライナス・プロジェクトでは、鉱石を処理した結果として、NORM を含む石膏が副次産物として生成され、路盤材として利用することが計画されている。その生成工程と濃度レベルを前提とすれば、路盤材に含まれる NORM 濃度は規制免除レベルを下回るの

IAEA の見解はその計画を認める内容となっている。しかしながら、石膏の発生量が多く加工国内で消費しきれない可能性があり、円滑なプロジェクト推進には副次産物の供給先確保が必要とされている。ただし、これらを一般消費財として国外へ輸出することを考えるとすれば、免除線量⁹⁾を超える可能性がある物質を商品化することとなり、行為としての側面からの疑義が生じることとなる。このため、廃棄物処理が生産計画の命運を握るという事態に至っていると思われ、今後の推移が注目される場所である。

その他の国においては、希土類元素が他の有用元素に随伴しているという特徴に着目し、主元素を抽出した後に残る副次産物から希土類元素を再抽出しようという機運が高まっている。たとえば、インド国オリッサ州では、国策であるトリウム・サイクル政策の下に、モナザイトからトリウムなどを抽出した残渣を原料として希土類元素を抽出する工場が運転開始を迎えている。しかし、トリウム政策の進展に原料供給が依存するという困難さを伴っている。またブラジル国アラシャでは、巨大なニオブ鉱山のニオブ抽出残渣から希土類元素を抽出する計画がカンパニア・ブラジレイア・メタルジア・イ・ミネラソン（CBMM）社によって着々と進められている。その他、インドネシア国バンカ島でも、錫鉱石から希土類元素を抽出する可能性が検討されている。

一方、ベトナム国ドンパオ鉱山のようなもっぱら希土類鉱石を含む鉱山開発では、その規模の小ささや鉱石の多様性及び処理工程の複雑さから、処理費用の削減が焦点となっている。加えて、中国のような環境問題を未然に防ぐため、操業時の環境対策のみならず、鉱山開発の着手段階から廃棄物管理の適正化が望まれている。このために、規制当局や地方行政庁等の関係者の間では、環境対策・NORM 対策を開発費用として計上し、その負担を将来に先送りしないという姿勢を歓迎する雰囲気が強い。これは、事業化の損益分岐判断を別問題とすれば、持続可能な開発を模索する取り組みと考えられる。

なお、上述の希土類資源開発はわが国の資源確保政策の一環として位置づけられ、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）を始めとして商社などの努力が注がれており、今後の円滑な事業化が望まれる場所である。

IV NORM 規制に対する国際的な動向

前項において、IAEA の規制免除レベル等に言及したが、この報告に記された濃度指標が採択されるまでには、10 年以上におよぶ長き議論があり、幾多の報告書が国

第5図 世界の主な希土類鉱床⁶⁾

際放射線防護委員会（ICRP）やIAEAで、また各国レベルでも取りまとめられている。

ICRPでは、放射性固体廃棄物処分の放射線防護の諸原則を述べたPubl. 46¹⁰⁾を基礎とし、拘束値を明確化して潜在被ばくに係る考察を加えたPubl. 81¹¹⁾とそれを自然線源等に拡張して「行為」と「介入」の概念を明確にしたPubl. 82¹²⁾を経て、「計画・現存・緊急時」という被ばく状況に応じた防護体系を打ち出した2007年勧告¹³⁾の採択に至り、関連した勧告¹⁴⁻¹⁷⁾が整備されている。ちなみに、これ以上であれば介入が正当化されるかもしれないとする参照レベルは年線量でおよそ10 mSv¹²⁾である。この指標は2007年勧告においても一般公衆の線量限度あるいは介入の免除レベルである年線量1 mSvから放射線業務従事者の線量限度である平均的年線量20 mSvの線量バンドの間に位置する線量指標として引き継がれている。

一方IAEAでは、各国の規制基盤を確立するための道標となる安全指針GS-G-1.5¹⁸⁾が、2002年に出された関連安全指針GS-G-1.1~1.4¹⁹⁻²²⁾を統括して、2004年に取りまとめられている。この中では、教育・訓練・就労経験が放射線防護と線源の安全な使用を構築するための必要能力であることを指摘した安全指針RS-G-1.4²³⁾も規制の枠組み作り指標として参照されている。また、この頃には、放射線業務従事者被ばくの防護に係る安全指針RS-G-1.1²⁴⁾や、その対象をNORM産業で働く従事者へと拡大した安全指針RS-G-1.6²⁵⁾や規制免除レベルの礎となった除外・免除・クリアランスの概念とその適用に係る安全指針RS-G-1.7²⁶⁾が相次いで出版されている。

この安全指針RS-G-1.7においてNORMの規制除外レベルが定められており、その値は、国連科学委員会（UNSCEAR）報告²⁷⁾に示されている土壌に含まれるNORMの濃度を包含する、K-40で10 Bq/g、トリウムやウランなどの連鎖崩壊する崩壊系列の先頭核種に対して1 Bq/gというものであった。そして、線源制御の相応しさ（amenability）の考え方を背景として、最適化の原則に従って数倍から10倍までの超過であれば規制管理の対象とするか否かを判断する余地を規制当局に認める、等級別アプローチ（graded approach）^{脚注)}という考え方を示している。これらの値等は、2011年の放射線源の放射線防護と安全に係る一般安全要件GSR Part3⁷⁾に引き

継がれることになる。ただし、GSR Part3では、自然起源の放射性核種を含む物質のクリアランスレベルとして位置づけられている。

この過程において、ICRPとIAEAは協調しつつも、人の被ばくを防護するための線量体系の構築はICRPが担い、線源に対する規制管理等を必要とする実用的な濃度指標はIAEAが基準化するという分担がなされてきたように見受けられる。

これらの国際的な検討の根底では各国における規制の現状が考慮されているが、指標値を含むICRPの国際規準やIAEA等の国際基準の採択と刊行までには時間を要することもあり、各国でも第1表に示すようにさまざまな試みがなされている。

たとえば、欧州では、クリアランスに係る議論²⁸⁾を経て、NORM産業に係る実態や各国の規制状況の調査²⁹⁾がなされ、欧州指令を発行する準備書³⁰⁾が配布されている。なお、欧州では自然線源からの管理を必要としない指標として年線量6 mSvを使用している国々があり、先のIAEA安全指針RS-G-1.1²⁴⁾とRS-G-1.6²⁵⁾にも反映されているようである。米国では、その概略をTenorm.com³¹⁾が記すように、米国保健物理学会（HPS）が技術的に濃度が高められた自然起源の放射性物質（TENORM）の管理と解放に関する文書をまとめ、アメリカ規格協会（ANSI）から発行³²⁾されている。カナダ国では、西部カナダ委員会（Western Canadian Committee）の報告³³⁾を踏まえ、固体廃棄物や液体廃棄物等の排出規準等を定めたガイドライン³⁴⁾が厚生労働大臣の権限の下に発行されている。これらの国では、主にNORMが一般公衆に与える被ばくに着目しているが、豪州では、労働環境に着目し、作業環境の線量レベルに応じて管理の厳格さを変えるガイドライン³⁵⁾が発行されている。

各国の規制は、産業活動が国境を越えて営まれていることから、ICRPの線量勧告やIAEAの免除濃度レベルと等級別アプローチの概念を根幹として、いずれは統一化されていくものと考えられる。しかし、発展途上国が参照する可能性を考慮すれば、出来る限り速やかに統一化されることが期待される。

V 必要とされる放射線防護レベル

希土類資源の開発に伴って必要となるNORMへの放射線防護レベルがいかなるものであるかを、限られた情報ではあるが、ドンバオ鉱山を例として以下に整理する。希土類鉱石に含まれる希土類元素の濃度とNORMの

脚注) “graded approach” は、ISO9001:2000「品質マネジメントシステム要求事項」における“grade”が「等級」と訳されていることを参考に、処分場開発などにおけるstepwise approachの訳語「段階的アプローチ」と区別し、「等級別アプローチ」と訳した。

第1表 各国における NORM 規制の事例

国	線量指標	濃度指標	規制の概要
EC - 2009 ⁻³⁰⁾	作業者； 1 mSv/y 一般公衆； 0.3 mSv/y 等級別アプローチ； 6 mSv/y	(参照濃度 ²⁶⁾) U・Th 系列； 1 Bq/g K-40； 10 Bq/g	IAEA の濃度指標を超えなければ一般公衆に与える線量は免除線量を満たすとして、ICRP の公衆に対する線量限度と線量拘束値を NORM 産業に対する規準として提案している。 ただし、等級別アプローチを考慮して、1 mSv/y を超えて 6 mSv/y 以下の作業者に対しては、線量低減策を講じることや作業時間の延長や作業環境の変更などがないようにすることにより、規制当局が規則や認可を与えることに基づいて、さらなる規制を受けないようにすることも提案している。 なお、この提案では、6 mSv/y を超えて作業者が被ばくする場合には、その行為は規制当局による許認可が必要とされている。
米国 - 2009 ⁻³²⁾	操業線源起因； 1 mSv/y 残留線源起因； 0.25 mSv/y	ラジウムとトリウム； 0.1 Bq/g 天然ウラン； 1 Bq/g K-40； 30 Bq/g	一般公衆に対する規制値として、施設からの放流物などに起因する TENORM を扱う操業に伴う被ばくや操業を止めてから土地や施設に残留する線源からの被ばくに対する線量指標や、TENORM を使用する行為に対して、行政上の管理から解放する濃度指標が定められている。 なお、解放濃度指標は、ラジウムとトリウムの濃度には随伴核種への分数和則 ($\Sigma Ci/CL \leq 1$) を適用しており、天然ウランは同位体組成を考慮した総放射能濃度として定めている。
カナダ - 2000 ⁻³⁴⁾	職業的作業者； 20 mSv/y 偶発的作業者及び一般公衆； 1 mSv/y 同上への拘束値； 0.3 mSv/y	水中 U-238； 1 Bq/L 固体 U-238； 0.3 Bq/g 気体 U-238； 0.003 Bq/m ³ 固体 K-40； 17 Bq/g	NORM 産業に携わる人々を、職業的に被ばくする作業者及び偶発的に被ばくする作業者と一般公衆に分け、ICRP の線量限度を適用し、ALARA に則った放射線防護策を講じることが求めている。 また、水・固体・空気に含まれる自然放射性核種について、永続平衡や過渡平衡にある U-238 と Th-232 や Ra-226 及び Th-228 など、自然界に存在し得るさまざまな状態を選定し、拘束値に基づく無制約誘導解放限度 (Unconditional Derived Release Limits) として、濃度指標値を定めている。 ちなみに、水はカナダの飲料水質値の 10 倍とし、固体は土壌からの放射線や野菜等の経口摂取と浮遊粉塵の吸入摂取を考慮して、空気は被ばく割合を 25% として、拘束値から算出したとされている。
オーストラリア - 2010 ⁻³⁵⁾	制限区域； >15 mSv/y 管理区域； >5 mSv/y 監視区域； ≤5 mSv/y	—	ICRP の除外と免除に係る勧告を踏まえ、最良の実行可能な技術 (Best Practicable Technology) の採用を前提として、採鉱・製錬活動における放射線防護として、線量に応じた三つの区域区分を実施し、作業者の被ばく線量低減に努めることを要求している。このうち監視区域の具体的な指標としては、週 40 時間の作業で被ばくの実効率を 25% とし、γ 線線量率で 2.5 μSv/h・誘導空气中粉塵濃度の 1/4 の環境が目安とされている。なお、区域外の一般公衆に対する線量指標は 1 mSv/y とされている。

濃度はさまざまであるが、それらを原料として精製した精鉱では、希土類元素濃度は酸化物換算で 50 wt% を超えることが目標とされている。そのときの NORM を含む廃棄物の濃度は、高いもので、トリウムで 10 Bq/g を超え、ウランで 20 Bq/g 程度に達する可能性がある。希土類元素とトリウムやウランの挙動は類似しているので、資源開発としては喜ばしいことが、放射線防護の観点からは悩ましいこととなる。

精鉱には崩壊系列の先頭核種である Th-232 と U-238 と放射平衡状態にある子孫核種が随伴しており、そのほとんどは粗製錬等に伴って廃棄物に残留する。QAD コードを用いて十分に大きい平板線源から距離 1 m の地点における外部被ばくに係る線量換算係数 (DCF^{Th} , DCF^U) を計算すると、おおむね、次のような値となる³⁶⁾。

$$* DCF^{Th} = 0.72 (\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/g})$$

$$* DCF^U = 0.52 (\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/g})$$

これは、仮に、精鉱から被ばくする時間を年間 1,000 時間と仮定すると、その被ばく線量は年線量で 18 mSv となるようなレベルである。このような高純度の精鉱ばかりが得られるとは限らないし、機械化などの作業実態を考えれば被ばく時間は仮定した 1,000 時間よりも短いと考えられる³⁷⁾ものの、放射線防護としては、作業場の管理を実施すべきレベルにあると思われる。

また、これらの NORM は、ほとんどが焙焼後の浸出残渣あるいは中和澱物として回収される。この工程を通じて、希土類鉱石である精鉱が微細粉に分解されるに伴って、廃棄物としての体積は数倍に増え、NORM の単位体積当たりの濃度は数分の一に低くなる。このため、廃棄物が有する一般公衆におよぼす潜在的な被ばく線量のレベルは 1,000 時間オーダーの被ばく時間を仮定

すると年線量で 10 mSv を超える程度になると予想される。したがって、廃棄物には適切な厚さの覆土を行うなどの措置が必要となる。たとえば、厚さ 50 cm の土壌には 1/100 程度の遮蔽効果が期待でき、これは実行可能な措置であり、一般的な廃棄物管理の手法とも一致している。

このように、希土類鉱山開発に伴う NORM に起因する放射線被ばくは、年線量で 1 ～ 20 mSv の間にある。このため、ICRP が勧告する現存する被ばく状況に対する介入の参照レベルである年線量でおよそ 10 mSv¹²⁾ が管理の指標として相応しいと考えられる。言い換えれば、行為として捉え、計画被ばく状況における公衆の線量限度を適用するには、線源が NORM であるゆえに相応しくないだけでなく、それを満足する範囲で活動を実施することは困難と考えられる。また、放射線作業従事者として捉えて、その線量限度を適用するには、全面マスクや防護服を着用しての作業や個人線量の管理などの作業面での、又、放射線防護管理上の負担が、開発がもたらす社会的便益に比べて過大になると考えられる。

したがって、希土類資源開発では、開発の主目的に付随する NORM に対する放射線防護であることに留意して、その諸活動を現存する被ばく状況として位置づけ、それに応じた放射線防護体系と作業場所の管理などの具体的で実行可能な対策を講じることが重要と考えられる。

なお、廃棄物を埋め立てた堆積場等からは、ウランや Ra-226 などを微量含んだ排水が流出するので、これらは回収して処理することになる。その環境放出の指標としては、ウランや全 α 及び全 β の飲料水濃度指標が示されている世界保健機構（WHO）の飲料水ガイドラインが参考になる。ただし、WHO ガイドラインは現在のところ第 4 版³⁸⁾ が最新であるが、わが国を始めとする東南アジア各国が指標値として参照しているのは、その第 2 版³⁹⁾ のようである。第 4 版では、ウランの指標値は第 2 版の 0.002 mg/L から 0.03 mg/L に引き上げられており、全 α 及び全 β の指標値も値が 0.5 Bq/L に引き上げられるとともにスクリーニングレベルとして位置づけが明確化されている。

なお、この値は放射能濃度にすれば 0.372 Bq/L となり、放射線防護の観点よりも重金属としての影響の方が強いことを示唆している。しかし、トリウムについては指標値が検討されていない。

国際的指標相互間の整合を図ることや国際的指標を各国の国内法令等に取り入れるには苦労が伴うものと考え

られるが、産業活動が国境を越えてなされている現代においては、このように影響が大きな国際的指標の改訂は、相互の整合性が保たれ、また適宜国内法令等に反映される仕組みを整えることが必要と思われる。

VI 小規模鉱山から発生する廃棄物の管理

鉄や銅など、いわゆるベース・メタルと呼ばれる金属の大規模鉱山では、その残渣等廃棄物の量も多く、その運搬はスラリー搬送が主流である。そのために、谷に堰堤を設けて堆積場を造り、スラリーを貯めるとともに、浸出水を処理しながら、自然の成り行きに委ねて堆積場が安定するまで管理を継続するのが現実的に取り得る選択肢である。

たとえば、過去に鉛製錬を行っていた細倉鉱山の場合でも、堆積場面積 234,300 m²、埋立容量約四百万トンの入釜沢堆積場が、1940 ～ 1949 年の操業に伴い、閉鎖に至っている。沢の開口部を塞ぐように設けられた堰堤は、堆積場に浸透した降雨の水圧による円弧すべりによって崩壊しないように法面の設計が行われ、埋立量の増加とともに嵩上げされ、最終的には長さ 480 m・高さ 45 m に達している。法面では、高木が育成して倒壊することによる堰堤の崩壊を防ぐため、定期的な伐採等の維持管理が継続されている。また、埋立地の地表面は、鉱山保安法によって構造物の建造は禁止されているので、パークゴルフ場などとして遊休地利用するとともに維持管理が図られてきた。しかし、50 年以上経過した現時点においては、第 6 図に示すように土地の安定化が進んだことから、特別に許可を受け、近い将来には雨水が残っている窪地を整地して 8.8 MW のメガソーラーパネルを設置する計画が進んでいる。

ここで着目すべきは、自然に委ねた場合、生産量が多

第 6 図 細倉鉱山の入釜沢堆積場(細倉金属鉱業(株)提供)

かったとはいえ、わずか10年間の操業で堆積場が閉鎖されながらも、スラリーから含有水が絞り出され、降雨の浸透と排水が定常状態に達し、土地が安定化するまでに半世紀余りの歳月を要していることである。

一方、現在の細倉鉱山は、廃バッテリーのリサイクル工場として再起を果たしている。その工場からも廃棄物は発生するが、鉱山当時に比べて発生量は少なく、廃棄物発生量元単位当たりの付加価値も高くなっている。加えて、現在稼働している堆積場の延命化措置は重要な課題である。このため、廃棄物の処理費は無視できないコスト要因として認識され、長期的視点において、廃棄物管理費を現時点の必要経費として内在化しようとする機運が生じてきた。そのための廃棄物処理として、現在では、フィルタープレスの導入が図られ、廃棄物の事前脱水による減容化を行って堆積場の延命化を図るとともに、早期の堆積場の安定化・浸出水管理の軽減措置が講じられている。

旧来型の残滓処理プロセスとこのような進化した処理プロセスを併記して示すと、第7図のような廃棄物処理フローが描かれる。

ただし、堆積場や堰堤の管理に関しては、脱水化や降雨浸透を防ぐだけでなく、科学的自然減衰（Monitored Natural Attenuation）⁴⁰⁾の力も借りながらも、第8図に示

第7図 安定化と環境保護を目指した廃棄物処理フロー

第8図 堆積場と堰堤の維持管理と土地利用の促進

すような、積極的な対策を講じることが必要と考えられる。

ここで積極的な対策とは、脱水化処理した廃棄物を難透水性覆土や遮水シートで覆い、覆土した堆積場に浸透する雨水を出来るだけ廃棄物に接しないようにして排出して水処理し、堆積場自体の安定化を促進するとともに、高木の伐採等の堰堤の植栽管理を行うという、積極的な堆積場の安定化と環境保護策を講じることによる、堆積場の早期土地利用を目指す考え方である。

このような考え方では、技術的には自然に依存しつつも、費用負担の観点からは、自然に際限なく依存してもっぱら支払いを続けるよりも、堆積地の跡地利用を促進して事業化し、その維持管理経費を必要経費として事業費の中に内在化させるという、積極的な向き合い方を選択することとなる。

このような事例から判断すると、希土類元素のような高付加価値小規模鉱山においては、その計画段階から、廃棄物堆積場の管理を高度化し、当初から堆積場の跡地利用に付加価値を期待することが望まれる。跡地利用としては、ベトナム国ドンパオ鉱山の場合には、数少ない地場産業である茶畑として十分な厚さの覆土を施し産物を管理しつつ行う従来の利用よりも、経口摂取の可能性がない用途である、不足する電力を補うメガソーラーパネルの設置や旧正月に高い需要が見込まれるランなどの温室花卉栽培などが考えられ、見込みがありそうで付加価値の高い跡地利用を鉱山開発計画に組み込むことが可能と思われる。

VII おわりに

鉱山開発は現在でも営まれているが、有用希少資源に随伴する NORM 規制と放射線防護、とりわけ、開発の後に残される廃棄物に対する実行可能で必要十分な具体策と世界的に共通した規制管理の在り方に係る合意は整備の途上にあると思われる。

本稿は、2011～2013年度にわたって開催された HIDA（（一財）海外産業人材育成協会、旧 AOTS；（財）海外技術者研修協会）によるベトナム国関係者を対象とした研修などの資料をとりまとめ、NORMを含む鉱山開発における放射線防護について解説したものである。この作成に当たっては、ベトナム国の関係機関や専門家との協議内容やその関心事、わが国の経済産業省鉱物資源課及び開発出資者の開発に掛ける責務と環境保護に対する理解も反映されている。

ここに、両国関係者の希土類資源開発と環境保護に掛

ける熱意に対して改めて敬意を表するとともに、希土類元素など、NORMを伴う鉱物資源の多くは発展途上国に産出することから、環境を保護しつつ、合理的で持続的な産出地域の発展を支える技術的な放射線防護対策やその背景となる防護の考え方が早期に整備されることを期待する。

なお、NORMに係る放射線防護を検討するに当たっては、本学会の放射線防護標準化委員会による学会標準、「現存する被ばく状況に関する防護の安全規準」を参考にした。本学会の先見の明を感じ、関係者に感謝するとともに、このような考え方が国際的に賛同を得て具体化されていくことを願うところである。

参 考 文 献

- 1) Anders and Grevesse; Abundances of the elements: Meteoritic and solar, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 197–214 (1989).
- 2) 増田彰正；希土類元素からみた火成岩の多様性，松井義人，坂野昇平（編）“岩波講座地球科学 4 地球の物質科学Ⅲ”，p. 241（1979），岩波書店，東京。
- 3) 産業総合研究所 地質調査総合センター；地球化学標準物質データベース，独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ，Available at: <https://gbank.gsj.jp/geostandards/>，閲覧 2014 年 4 月 30 日。
- 4) 松井義人；火成作用における元素の行動，松井義人，坂野昇平（編）“岩波講座地球科学 4 地球の物質科学Ⅲ”，p. 165（1979），岩波書店，東京。
- 5) JOGMEC；レアアースの通説正と誤，JOGMEC News Vol. 27, 2011/12（2011），JOGMEC ホームページ，Available at: <http://www.jogmec.go.jp/content/300059413.pdf>，閲覧 2014 年 4 月 30 日。
- 6) 中村威一；最新先行技術事情 鉱種別代表的プロセス編 (4) —PGM, レアアース—，JOGMEC 金属資源レポート 2013/11（2013），JOGMEC ホームページ，Available at: <http://mric.jogmec.go.jp/public/kogyojoho/2013-11/MRv43n4-04.pdf>，閲覧 2014 年 4 月 30 日。
- 7) IAEA；Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3 (Interim) (2011).
- 8) IAEA；Report of the International Review Mission on the Radiation Safety Aspects of a Proposed Rare Earths Processing Facility (the Lynas Project) Malaysia, IAEA NE/NEFW/2011 (2011).
- 9) ICRP；Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework, ICRP Publ. 64 (1993).
- 10) ICRP；Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, ICRP Publ. 46 (1985).
- 11) ICRP；Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publ. 81 (1998).
- 12) ICRP；Protection of the Public in Situation of Prolonged Radiation Exposure, ICRP Publ. 82 (1999).
- 13) ICRP；The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publ. 103 (2007).
- 14) ICRP；Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public and the Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publ. 101 (2005).
- 15) ICRP；Scope of Radiological Protection Control Measures, ICRP Publ. 104 (2007).
- 16) ICRP；Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situation, ICRP Publ. 109 (2008).
- 17) ICRP；Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency, ICRP Publ. 111 (2009).
- 18) IAEA；Regulatory Control of Radiation Sources, IAEA Safety Guide No. GS-G-1.5 (2004).
- 19) IAEA；Organization and Staffing of the Regulatory Body for Nuclear Facilities, IAEA Safety Guide No. GS-G-1.1 (2002).
- 20) IAEA；Review and Assessment of Nuclear Facilities by the Regulatory Body, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.2 (2002).
- 21) IAEA；Regulatory Inspection of Nuclear Facilities and Enforcement by the Regulatory Body, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.3 (2002).
- 22) IAEA；Documentation for Use in Regulating Nuclear Facilities, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-1.4 (2002).
- 23) IAEA；Building Competence in Radiation Protections and the Safe Use of Radiation Sources, IAEA Safety Guide No. RS-G-1.4 (2001).
- 24) IAEA；Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Guide No. RS-G-1.1 (1999).

- 25) IAEA; Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials, IAEA Safety Guide No. RS-G-1.6 (2004).
- 26) IAEA; Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Guide No. RS-G-1.7 (2004).
- 27) UNITED NATIONS; Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2000).
- 28) EC; Effluent and Dose Control from European Union NORM Industries; Assessment of Current Situation and Proposal for a Harmonized Community Approach, EC Radiation Protection 135 Vol. 1 and Vol. 2 (2000).
- 29) EC; Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption-Part I, EC Radiation Protection 122 (2000).
- 30) EC; European Commission Services Considerations with regard to Natural Radiation Sources in BSS Directive (2009).
- 31) Tenorm.com; Regulation, Control, and Management of TENORM, Available at: <http://www.tenorm.com/regs.htm#Introduction>, Accessed 30 June 2014.
- 32) ANSI; Control and Release of Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material (TENORM); ANSI/HPS N13.53 (2009).
- 33) Western Canadian Committee; Guidelines for The Handling of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) (1995).
- 34) Health Canada; Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) (2000).
- 35) Government of Western Australia; Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Mining and Mineral Processing Guideline NORM-1; Applying the System of Radiation Protection to Mining Operations (2010).
- 36) 渡邊正敏, 武田聖司, 木村英雄; ウラン及び TRU 廃棄物のクリアランスレベル評価のための外部被ばく線量換算係数, JAEA-Data/Code 2008-001 (2008).
- 37) 放射線審議会基本部会; 自然放射性物質の規制免除について, 平成 16 年 7 月 22 日修正 (2004).
- 38) WHO; Guidelines for Drinking-water Quality-Fourth Edition (2011).
- 39) WHO; Guidelines for Drinking-Water Quality-Second Edition (1998).
- 40) 社団法人土壌環境センター (<http://www.gepc.or.jp/>) の訳による, 閲覧 2014 年 4 月 30 日.

河田 陽介 (かわた ようすけ)

京都府舞鶴市出身。神戸大学理学部修士課程修了 (地球科学専攻)。1984 年に現三菱マテリアル (株) に入社し, 主に低レベル放射性廃棄物処分関連の業務に従事。

E-mail: kawata@mmc.co.jp