

## 地下深部におけるウラン、トリウム、ランタノイド等微量元素を用いた ナチュラルアナログ研究

本多照幸\*・永田 寛\*・岩月輝希\*\*・水野崇\*\*

### A natural analogue study using trace elements such as uranium, thorium and lanthanoids in depths of the rock mass

Teruyuki Honda\*, Hiroshi Nagata\*, Teruki Iwatsuki\*\*, Takashi Mizuno\*\*

\* 武蔵工業大学大学院工学研究科, Research Division in Engineering, Musashi Institute of Technology

\*\* 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

#### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物 (HLW) の地層処分では、数万年以上にわたって天然バリア (地層) によって、HLW中に含まれる放射性物質を保持することを想定している。しかし、実際の天然の地層中には、多数の割れ目が存在しており、また、その割れ目には様々な変質を受けている場合がある。HLWから移行した放射性物質が、割れ目や岩石粒子間中を移行した際、このような変質帯の存在が、放射性物質の移行にどのような影響をもたらすかは、明確にはわかっていない。そこで、本研究では、天然の地層中に存在する変質帯等の様々な岩石を採取し、HLWに含まれる放射性核種 (マイナーアクチノイド: MA) と化学的性質が類似している天然類似元素 (ナチュラルアナログ元素) の存在形態を解明し、長期間、このような環境において、どのような挙動を示してきたかを理解することによって、HLWに含まれるMA (主にAmやCm) が将来どのような挙動を示すか評価することを本研究の目的とする。

#### 2. 採取試料と分析方法

試料は、日本原子力研究開発機構の東濃地科学センター (岐阜県瑞浪市) と幌延深地層研究センター (北海道幌延町) の各ボーリング孔から採取した。試料のプロファイルを表1に示す。試料は粉碎後、100メッシュ以下にし、東濃地科学センターにあるX線回折分析 (XRD) および蛍光X線分析 (XRF) により鉱物の同定と主成分の定量を、中性子放射化分析 (NAA) により主に微量元素の定量を行った。また、一部の炭酸塩鉱物充填部 (未変質部を含む) は酢酸による抽出を行い、抽出した溶液と残った残渣をそれぞれ分析した。

#### 3. 結果と考察

変質による天然類似元素の分布の変化を評価するには、同一の岩石において変質前後を比較するのが理想であるが、実際には困難である。そのため、未変質の岩石を変質前の岩石と想定し、変質した岩石との比較を行った。未変質部に対する変質部での元素の濃集・減少は、式(1)により評価を行う。

$$\text{元素濃度率 (\%)} = ((C_{E-a}/C_{E-u}) - 1) \times 100 \quad \dots (1)$$

ここで、 $C_E$ はある元素Eの濃度を、aは変質部を、uは未変質部を各々に表している。式(1)の元素濃度率が、プラスを示せば元素の増加を、マイナスであれば減少を示す。しかし、炭酸塩鉱物が空隙を充填する箇所においては、この式(1)を適用すると、炭酸塩鉱物の沈殿に伴う天然類似元素の共沈により見かけ上の減少を示すことから、炭酸塩鉱物充填部においては次の式(2)を適用する。

$$\text{元素変動率(\%)} = \left( \frac{(C_{E-a}/C_{Si-a})}{(C_{E-u}/C_{Si-u})} - 1 \right) \times 100 \quad \dots (2)$$

この元素変動率は炭酸塩鉱物充填による影響を受けないと考えられるSiで規格化している。また、未変質部に対する変質部での主要鉱物の評価は、XRDによるX線ピークの強度を用いて、次の式(3)により行う。

$$\text{X線強度率(\%)} = \left( \frac{(X_{M-a}/X_{Qz-a})}{(X_{M-u}/X_{Qz-u})} - 1 \right) \times 100 \quad \dots (3)$$

ここで、 $X_M$ 及び $X_{Qz}$ はある鉱物M及び石英

表1 試料のプロファイル

試料名	岩相	ボーリング孔	地質	深度	試料名	岩相	ボーリング孔	地質	深度
tsp1-1	p	MSB-2	Ak	8.67	tgw8-1	w	DH-15	Tg	244.35
tsp1-2	p	MSB-2	Ak	8.75	tgw8-2	w	DH-15	Tg	244.35
tsw1-3	w	MSB-2	Ak	8.78	tgw8-3	w	DH-15	Tg	244.35
tsw1-4	w	MSB-2	Ak	8.95	tgw8-4	w	DH-15	Tg	244.35
tsp2-1	p	MSB-2	Ak	19.25	tgw8-5	w	DH-15	Tg	244.35
tsp2-2	w	MSB-2	Ak	19.75	tep9-1	p	DH-15	Tg	330
tsp2-3	p	MSB-2	Ak	19.93	tep9-8	p	DH-15	Tg	944
tsp2-4	p	MSB-2	Ak	20	hsp1-1	p	HDB-8	Wn	197.5
tsp3-1	p	MSB-2	Tk	98.3	hsc1-2	c	HDB-8	Wn	197.5
tsp3-2	p	MSB-2	Tk	98.45	hsp2-1	p	HDB-9	Wn	321.44
tsc3-3	c	MSB-2	Tk	98.45	hsc2-2	c	HDB-9	Wn	321.44
tsc3-4	c	MSB-2	Tk	98.45	hsp3-1	p	HDB-1	Wn	633.05
tsc3-5	c	MSB-2	Tk	98.45	hsc3-2	c	HDB-1	Wn	633.05
tsp4-1	p	MSB-2	Tk	119.1	hsp4-1	p	HDB-1	Wn	401
tsp4-2	p	MSB-2	Tk	119.3	hsp4-2	p	HDB-1	Wn	422
tsc4-3	c	MSB-2	Tk	119.42	hsp4-3	f	HDB-1	Wn	432.5
tsc4-4	c	MSB-2	Tk	119.52	hsp4-4	f	HDB-1	Wn	432.98
tsp5-1	p	MSB-4	Tk	85.15	hsp4-5	p	HDB-1	Wn	436.1
tsp5-2	p	MSB-4	Tk	88	hsp4-6	p	HDB-1	Wn	440.05
tsc5-3	c	MSB-4	Tk	88	hsp5-1	p	HDB-6	Kt	77.7
tsc6-2	c	MSB-4	Tk	93.2	hsp5-2	p	HDB-6	Kt	134.25
tsc6-3	c	MSB-4	Tk	93.2	hsp5-3	f	HDB-6	Kt	104.5
tsp6-6	p	MSB-4	Tk	93.2	hsp5-4	p	HDB-6	Kt	211.97
tgw7-1	w	DH-15	Tg	231.85	hsp6-1	p	HDB-6	Wn	278.96
tgw7-2	w	DH-15	Tg	231.85	hsp6-2	f	HDB-6	Wn	328.7
tgw7-3	w	DH-15	Tg	231.85	hsp6-3	p	HDB-6	Wn	397
tgw7-4	w	DH-15	Tg	231.85	hsp6-4	f	HDB-6	Wn	412.9
					hsp6-5	p	HDB-6	Wn	492
					hsp6-6	f	HDB-6	Wn	591.5
					hsp6-7	p	HDB-6	Wn	610.4

(岩相のp、w、c、fは各々健岩部、風化部、炭酸塩充填部、断層部を、試料名のt、hは各々東濃、幌延を、s、gは各々堆積岩、花崗岩を、地質のAk、Tk、Tg、Wn、Ktは各々明世累層、土岐炭灰累層、土岐花崗岩、稚内層、声間層を表す)

(Qz)のX線強度を、aは変質部を、uは未変質部を各々に表している。また、Ce異常度を次の式(4)に示す。Ceは、酸化環境下において4価(Ce(IV))を取り、水溶液に溶けにくくなるため、Ce異常度が酸化還元状態の指標となる。算出した値が2以上(未変質部に比べて2倍高い)の場合をCeの正の異常と定義した。

$$Ce異常度 = \frac{\{\text{Log}(Ce^*) - (2 \times \text{Log}(La^*) + \text{Log}(Sm^*)) / 3\}_{\text{変質部}}}{\{\text{Log}(Ce^*) - (2 \times \text{Log}(La^*) + \text{Log}(Sm^*)) / 3\}_{\text{未変質部}}}$$

\*はエクロライトで風化したことを表す

・・・(4)

各変質部における主要元素の元素濃度率(炭酸塩鉱物充填部においては元素変動率)及び各変質部における主要鉱物のX線強度率を、表2に示す。そして、各変質部における天然類似元素の元素濃度率(炭酸塩鉱物充填部においては元素変動率)とCe異常度を、表3に示す。

### 3.1. 東濃堆積岩の化学的風化部

表2から、堆積岩の風化部において、黄鉄鉱(Py)が減少を示したが、Feの濃度は増加を示している。

このことから、風化によって黄鉄鉱が溶解するが、水酸化鉄などの二次的な鉄鉱物として再び沈殿したことが考えられる。また、多くの風化部において、斜長石(Fd)の溶解と方解石(Cal)の生成を示した。この方解石を含む炭酸塩鉱物は、酸性環境において、主要鉱物中最も溶解度が高い鉱物であるが1)、風化によって斜長石とともに一度溶解した後、酸性環境が弱まり、斜長石中のCaも含めて、再び沈殿したことが考えられる。また、一部風化部においてスメクタイト(Sme)の生成を示した。このスメクタイト等粘土鉱物の生成も、斜長石等の溶解による二次生成物と考えられる。また、風化部のtsw1-4においては、方解石及びスメクタイトの溶解を示した。これら鉱物のうち、スメクタイトにおいては、pH<4の強酸性環境において初めて溶解を示す2),3)ことから、この割れ目直上の試料は、他よりも局所的に酸性環境が強く、溶解したことが考えられる。

次に、表3から、多くの風化部において、軽Ln及びThの増加(10-30%増)を示した。これら微量元素は、長石や粘土鉱物などの1次鉱物中に

表2 各変質部における主要鉱物の元素濃度率（炭酸塩充填部においては元素変動率）と主要鉱物のX線強度率

		主要元素の元素濃度率 (%)										主要鉱物のX線強度率 (%)									
		SiO2	Al2O3	Fe2O3*	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Sme	Ch	Bt	Kl	Qz	Fd	Cal	Ak,Do	Py	Sid		
風化部	tsp1-2	0	0	8	-17	17	-5	-24	-15	15	-	-	-13	0	-73	-6	-14	19	-38		
	tsw1-3	-2	2	18	183	12	1	-10	-24	-16	-	-52	-67	0	-55	55	178	-42	-45		
	tsw1-4	-5	7	26	100	5	9	13	-30	-87	-	-	-87	0	-88	-64	-80	-83	-83		
	tsw2-2	-1	-2	11	-6	8	6	-17	-14	157	-	-	-1	0	-52	68	63	-81	-65		
	tsp2-3	-1	0	-3	6	0	3	12	2	-6	-	-	-68	0	-37	23	-77	-33	-86		
断層部	hsf4-3	-45	49	474	-66	21	109	-21	-57	1895	-	-	0	28	-	-	970	-			
	hsf4-4	-24	159	52	-94	113	30	24	-77	2982	-52	-11	40	84	-	-	210	-			
	hsf5-3	5	6	-2	50	0	67	47	7	8	3	6	-	100	39	-	0	-			
	hsf6-2	-1	24	16	60	36	-15	19	29	19	3	32	-	100	32	-	3	-			
	hsf6-4	-14	97	36	60	40	165	62	-11	59	4	30	-	100	56	-	11	-			
炭酸塩充填部	tsc3-3	0	-5	-36	1783	-56	540	5	-2	5	-	-	0	22	4701	23	25	-21			
	tsc3-4	0	-9	-11	1595	-66	868	-8	3	61	-	-	-	0	10900	55	-100	-100			
	tsc3-5	0	-2	-12	1102	-20	759	0	3	-7	-	-	-	0	68	2031	-26	-35	-45		
	tsc4-3	0	84	1467	7520	442	10948	-7	-69	1829	-	-	5106	0	-69	130584	-	29270	395		
	tsc4-4	0	21	266	3248	-54	4381	10	-15	-48	-	-	-53	0	-54	3018	-	162	-55		
	tsc5-3	0	77	215	3355	87	4174	36	-36	2924	-	-	-	0	3688	97238	389	673	1804		
	tsc6-2	0	27	937	1751	31	2167	-22	-41	-71	-	-	-	0	-54	3872	-29	1926	-65		
	hsc1-2	0	34	170	768	2298	59607	81	52	-	-	-	-	18	2	100	41	2	-		
	hsc2-2	0	-31	806	2598	1135	2900	-10	-21	-	-	-	-	73	8	-	22	9	100		
	hsp3-1	0	10	44	162	-12	13481	23	25	-	-	1	-	50	9	100	-	2	-		
hsc3-2	0	-28	679	1629	480	152878	27	-32	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-			
花崗岩	tew7-1	1	9	31	-23	67	-10	-16	8	-	-	1007	-74	893	0	-46	34	7	203		
	tew7-2	-1	3	16	-23	29	-10	-10	-6	-	-	111	-86	338	0	-66	29	-37	-54		
	tew7-3	-3	8	20	-23	25	-11	-12	9	-	-	101	-82	612	0	-46	7	-3	-86		
	tew7-4	-3	7	12	-23	29	-7	-5	4	-	-	104	-89	326	0	-26	93	-24	-84		
	tew8-1	-2	-5	27	8	33	82	-5	-10	-	-	181	-87	1960	0	-7	206	-27	-68		
	tew8-2	0	-7	20	-8	58	18	-8	-9	-	-	112	-89	1205	0	-43	25	-36	-79		
	tew8-3	-1	-1	27	8	75	27	4	-18	-	-	69	-34	1002	0	-43	-30	-52	42		
	tew8-4	-4	5	31	8	71	22	1	-1	-	-	26	-1	605	0	-46	25	-15	-9		
	tew8-5	0	-5	18	-8	58	8	-7	-14	-	-	65	-33	391	0	-65	23	-42	-21		

Qz；石英、Fd；斜長石、Cal；方解石、Ak,Do；アンケライト、ドロマイト、Py；黄鉄鉱、Sid；菱鉄鉱

含まれていたことが考えられ、これら鉱物の溶解に伴い一時的に溶出するが、水酸化鉄等鉄鉱物や粘土鉱物、炭酸塩鉱物などの二次鉱物の生成に伴い再沈殿したことが考えられる。それとは逆に、風化部のtsw1-4において、特に重Ln及びUの減少を示した。この試料においては、Ceの正の異常を示しており、また、スメクタイトや方解石の溶解も示していたことから、二次的に生成した鉄鉱物に取り込まれることなく、岩石から溶出したと考えられる。

### 3.2. 幌延堆積岩の断層部

表2から、多くの断層部において顕著なスメクタイトの増加を示した。断層部では、断層の形成に伴い、熱水変質を伴って粘土鉱物を生じていることが知られているが4)、この試料においても粘土鉱物が生成していることが示唆された。また、この断層部においては、Feの顕著な増加と黄鉄鉱の生成を示した。この黄鉄鉱は、還元環境において生成する鉱物であり、表3から顕著なCeの正の異常を示していないことから、二次的に黄鉄鉱が生成した可能性が考えられる。

次に、表3から、多くの断層部において、特に軽Ln及びThが増加を示した。この断層部においては、スメクタイトや黄鉄鉱の二次的な生成を示したが、黄鉄鉱の顕著な生成を示したhsf4-3と微量元素の増加はあまり一致してないため、この微量元素の増加は粘土鉱物による影響が強いことがわかる。また、Uにおいても、一部断層部にお

いて増加を示した。このUについても、黄鉄鉱より粘土鉱物の生成と対応しており、粘土鉱物の生成の影響が強いことが示唆される。

### 3.3. 東濃花崗岩の風化部

表2より、多くの花崗岩の風化部において、斜長石と黒雲母（Bt）の溶解と、カオリナイト（Kl）と緑泥石（Ch）及び方解石の生成を示した。これは、風化及び熱水変質により、黒雲母が緑泥石化し、また、斜長石からカオリナイトと方解石が生成したと考えられる。また、風化部のtgw7-1においては、顕著な黄鉄鉱の増加を示した。この試料においては、表3からCeの正の異常を示しており、酸化環境にあることが示唆されたが、同じTG7グループにおいて最もCe異常値が低いことから、酸化的な環境の後、還元環境に変わり、黄鉄鉱が生成した可能性がある。

次に、表3から、花崗岩の風化部のTG8グループにおいて、軽LnとThの増加を示した。このグループにおいては、緑泥石やカオリナイトなどの粘土鉱物や炭酸塩鉱物の生成が示されていることから、これら二次鉱物の生成に伴い、軽LnとThが沈殿したと考えられる。しかし、同じように二次鉱物の生成を示した他の風化部においては、多くの試料においてLnの減少を示した。このLnの減少を示した試料において共通していることは、顕著なCeの正の異常を示していることである。このCeの正の異常を示すには、酸化的な地下水が関与したとき異常を生ずるといわれている。こ

表3 各変質部における天然類似元素の元素濃度率(炭酸塩充填部においては元素変動率)とCe異常度

		元素濃度率(変動率)(%)								Ce異常度	
		La	Ce	Sm	Dy	Yb	Lu	Th	U		
堆積岩	風化部	tsp1-2	11	10	23	-2	-8	17	3	-13	0.59
		tsp1-3	11	5	21	1	2	-1	10	-7	0.15
		tsw1-4	-15	7	-9	-36	-31	-30	1	-27	3.03
		tsw2-2	26	27	14	7	11	5	21	-3	1.49
		tsp2-3	6	3	-4	-2	-8	-5	11	3	0.99
	断層部	hsf4-3	33	39	25	11	-22	-26	62	0	1.42
		hsf4-4	89	108	83	52	-18	-34	171	32	1.70
		hsf5-3	11	7	20	-5	-6	-16	-15	-28	0.71
		hsf6-2	11	24	21	-2	-8	29	-9	-16	1.57
		hsf6-4	39	59	76	11	-11	8	28	11	1.41
	炭酸塩充填部	tsc3-3	-11	-29	-49	10	-50	-46	10	-42	1.36
		tsc3-4	74	47	-20	-35	-33	-26	8	-15	0.26
		tsc3-5	92	73	-17	-48	-49	-42	58	-19	-0.49
		tsc4-3	755	869	701	326	350	343	42	110	1.65
		tsc4-4	140	126	102	231	62	54	19	80	1.00
tsc5-3		317	288	229	474	454	473	40	2900	1.02	
tsc6-2		154	146	229	181	55	137	21	581	0.74	
hsc1-2		44	42	60	72	105	146	39	188	0.77	
hsc2-2		74	77	202	517	1267	1349	44	264	0.24	
hsp3-1		-	41	-	15	-	-	31	-	-	
hsc3-2	-72	-80	-69	-	-	-	-	1155	-0.78		
花崗岩	風化部	tgw7-1	-43	2	-55	-42	-36	-65	2	185	6.40
		tgw7-2	-51	18	-69	-55	-46	-65	4	21	9.38
		tgw7-3	-48	5	-70	-42	-39	-62	-5	26	8.18
		tgw7-4	-46	3	-67	4	-38	-64	-7	-19	7.55
		tgw8-1	51	39	8	21	2	2	24	-19	1.25
	tgw8-2	56	53	26	16	8	6	36	25	1.41	
	tgw8-3	35	30	7	3	-16	-1	37	-11	1.29	
	tgw8-4	56	45	21	13	-11	-5	49	-7	1.07	
	tgw8-5	27	20	-5	-1	-3	-7	2	-9	1.31	

\*：花崗岩の断層部

太字：元素濃度率(変動率)の場合、10%以上のプラスを示した値

Ce異常の場合、2倍以上の値

ことから、Lnの減少を示した試料においては、他よりも酸化的な地下水の影響により、岩石中からLnが溶出した可能性が考えられる。また、黄鉄鉱の顕著な生成を示したtgw7-1において、顕著なUの増加を示した。このUは、黄鉄鉱とともに濃集していることが報告されていることから5)、この試料においても、一時的に溶出されるが、二次的な黄鉄鉱の生成に伴い、再び沈殿したと考えられる。

### 3.4. 東濃及び幌延堆積岩の炭酸塩充填部

表2から、炭酸塩鉱物充填部において、Ca及びMnの顕著な増加を示した。これは、岩石中に方解石や菱マンガン鉱が充填したことを表してい

る。しかし、TS3以外の他のグループにおいては、FeやAl、Mgの増加も示した。これら主要元素の増加は、Feにおいては黄鉄鉱や菱鉄鉱、AlやMgにおいては粘土鉱物等が考えられる。このように、多くの炭酸塩鉱物充填部においては、炭酸塩鉱物の充填の他に、様々な二次鉱物の生成も示した。

次に、表3から、多くの炭酸塩鉱物充填部においてはLn及びTh、Uの増加を示した。これは、炭酸塩鉱物の充填に伴う濃集を示したか、または他の二次鉱物や有機物などとともに濃集を示した可能性があるが、何によって強く影響を受けているか明確ではないので、挙動の要因を判断するために、酢酸による炭酸塩の抽出を行った。得られた酢酸抽出部分と残った残渣部分におけるそれぞれの元素濃度率を表4に示す。

表4より、炭酸塩鉱物充填部に共通して、酢酸抽出側にMnやCaなど、炭酸塩鉱物に含有すると考えられる元素の濃度が増加を示しているが、残渣においても同じように増加を示した。このことは、充填部には大量の炭酸塩鉱物が存在していたため、この抽出作業においては、すべてを抽出することができなかったことを表していると思われる。このグループにおいては、Ln及びThにおいて顕著な増加を示していることから、これら元素は炭酸塩鉱物とともに濃集したことを表していると考えられる。また、tsc4-3においては、酢酸抽出側において、Caの他に、Mgの増加を示した(表4参照)。この試料においては、表2において、粘土鉱物の顕著な増加を示したことから、酢酸抽出側には、炭酸塩以外に、粘土鉱物も抽出されていることがうかがえる。次に、表4のtsc4-4においては、酢酸抽出側にCaのみ増加を示したことから、酢酸抽出部分のLnの増加は、ほぼ炭

表4 炭酸塩充填部の酢酸抽出及び残渣における主要・微量元素の元素濃度率(%)

酢酸	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	La	Sm	Yb	Lu	Th	U
tsc3-3	-96	-	-98	-77	2247	-33	649	-90	-87	-17	-78	-73	-72	-82	-88
tsc3-4	-96	-	-99	-26	1588	-51	752	-92	-83	-10	-70	-68	-65	-90	-84
tsc3-5	-95	-	-98	-75	1945	-46	798	-86	-79	16	-64	-69	-70	-73	-86
tsc4-3	-90	-83	-	-73	-	22	1430	-93	-87	518	108	49	320	-	-66
tsc4-4	-91	-83	-102	-8	-	-7	1312	-94	-76	367	34	3	205	-83	-55
tsc5-3	-81	-	-	-97	-	-38	1889	-78	-66	132	-10	183	-	-	185
残渣	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	La	Sm	Yb	Lu	Th	U
tsc3-3	-	-	-10	-34	574	-	189	3	12	57	2	20	31	44	-8
tsc3-4	-	-	-14	-11	621	-	300	-11	26	172	99	17	24	33	9
tsc3-5	-	-	-1	-8	288	-	129	4	7	39	4	7	18	74	-26
tsc4-3	-	-55	-64	404	1701	-	1786	-88	-100	128	103	4	-1	-53	3
tsc4-4	-	-33	-46	95	1454	-	1426	-56	-46	14	-6	-37	-28	-38	9
tsc5-3	-	64	-26	83	1253	-	1191	-50	-	133	150	198	237	-21	1444

太字：10%以上のプラスを示した値

酸塩鉱物による影響と断定できる。残渣においては、Ca以外にFeの増加も示すことから、炭酸塩鉱物や二次的な含Fe鉱物の影響が考えられるが、Lnの増加は、酢酸抽出側よりも小さいため、その影響は小さいと思われる。続いて、tsc5-3においては、酢酸抽出側ではCaのみ増加を示した(表4参照)。このことから、酢酸抽出側で増加を示したLn及びUは、炭酸塩鉱物の影響とほぼ断定できる。残渣においては、抽出できずに残った炭酸塩鉱物以外にFeやTiの増加も示した。このことから、残渣において増加を示したLn及びその他の微量元素は、炭酸塩鉱物の他、二次的な鉱物の影響が考えられる。ただ、Uの増加の要因には有機物の影響も考えられる5)。

#### 4. 結論

本研究では、HLWに含まれる放射性核種と化学的性質が類似している天然類似元素が、天然地層中に存在する各種変質帯においてどのような挙動を示すか検討した。

その結果、多くの変質帯において、天然類似元素の濃集を示した。その濃集の要因としては、変質帯に二次的に生成または充填した含Fe鉱物、炭酸塩鉱物及び粘土鉱物等の存在が、これら天

然類似元素の保持に貢献していることが判明した。これらの変質帯は、天然の地層中の割れ目や岩石粒子間中に広く存在している。地下水等に伴いHLWから人工バリアを経て移行した放射性核種(MA等)が天然の地層中に拡散するが、このような変質帯との相互作用によって、変質帯中に取り込まれ、地層中に保持され、生活環境圏へ到達するまでの遅延効果が期待できるものと思われる。

#### 参考文献

- 鹿園直建, 化学的風化作用による大気からのCO<sub>2</sub>の除去フラックス推定上の問題点, 地学雑誌, 111(3), 360-373(2002)
- 疋田定良, 鈴木哲也, 化学的風化に伴う岩石の性状の変化とその予測, 開発土木研究所月報, 527, 17-25(1997)
- 鹿園直建, 木村進一, 岩井修平, 化学的風化作用に伴う石膏の生成と源岩鉱物組成との関係—秋田県男鹿半島女川層堆積岩の例—, 応用地質, 43(3), 134-142(2002)
- 地学団体研究会編, 地学事典, 平凡社, 791(2003)
- 吉田英一, 地下環境機能—廃棄物処分の最前線に学ぶ—, 近未来社, 127-149(2003)