

令和4年度放射線対策委託費
(自然起源放射性物質(NORM)による被ばくの包括的調査)事業

成果報告書

令和5年3月

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

本報告書は、原子力規制委員会令和4年度放射線対策委託費（自然起源放射性物質（NORM）による被ばくの包括的調査）事業による委託業務の成果を、代表機関である量子科学技術研究開発機構が、とりまとめたものである。

目 次

I. 事業の目的	1
II. 事業の実施内容と実施体制	2
III. 事業の実績	4
III. 1. 事業計画書と実績との対照	4
III. 2. 実績の付属説明	8
III. 2.1. レアアース・レアメタルに分類される物質に関する文献調査等 (付属説明 1)	8
III. 2.2. 「化石燃料由来の残渣」に関する被ばく線量評価及び必要となる 文献調査等 (付属説明 2)	46
IV. 今年度の成果の概要	59

I. 事業の目的

「自然起源放射性物質 (NORM) による被ばくの包括的調査」(以下、「NORM 調査事業」) は、令和 4 年度に放射線対策委託費事業の中で委託された事業である。主として次の調査を行う。

- 令和 3 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費(自然起源放射性物質 (NORM) による被ばくの包括的調査) 事業 (以下「令和 3 年度調査という。」) において、日本国内での使用実態が明らかになったレアアース・レアメタルに分類される物質について、物質が含有する放射能濃度に係る文献調査を実施するとともにシナリオを用いた被ばく線量推計を行う。
- 令和 3 年度調査の中で基礎情報 (放射能濃度など) を整理した「化石燃料由来の残渣」について、シナリオを用いた被ばく線量推計を実施する。

II. 事業の実施内容と実施体制

NORM 調査事業は量子科学技術研究開発機構（以下、量研）が受託し、下記に示す事項を調査することとなっている。これらの調査を事業代表者と協力者（国立大学法人弘前大学、つがる西北五広域連合）が実施した。

(1) レアアース・レアメタルに分類される物質に関する文献調査等

令和3年度調査において、日本国内での使用実態が明らかになったレアアース・レアメタルに分類される物質について、以下の事項に係る文献調査を実施した。

(a) 「令和3年度調査」の成果報告書の表7（国内使用と放射能濃度調査のデータ）に記載のある物質のうち、関連産業の項目がレアアース・レアメタルに分類される物質を中心として物質が含有する放射能濃度に関する知見について既存文献を用いて収集した上で、わかりやすく一覧に整理した。以降、必要に応じてこの項目を「濃度文献調査」と呼ぶ。

(b) (a)において、整理した放射能濃度を用いて、欧州委員会報告書 RP-122 第II部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオを参考に作業活動に対する被ばく線量の計算を行った。なお、(a)において、放射能濃度について十分な知見が存在しない場合、レアアース・レアメタルに分類される物質の放射能濃度を把握する現実的な方法を具体的に提示した。以降、必要に応じてこの前半の項目を「線量評価」、後半の項目を「現実的方法」と呼ぶ。

(c) (b)において整理した各物質からの被ばく線量のうち年間追加被ばく線量が一定の水準を超えると算定された物質があった場合、その物質について、(a)の調査文献の中で欧州委員会報告書 RP-122 第II部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオに代替できる要素があれば、当該要素に置き換えをしたうえで、被ばく線量の算

定を行った。以降、必要に応じてこの項目を「シナリオ要素の代替」と呼ぶ。

なお、一定の水準については、原子力規制庁担当官と協議して決定した。

(2) 「化石燃料由来の残渣」に関する被ばく線量評価及び必要となる文献調査等

令和3年度調査の中で基礎情報（放射能濃度など）を整理した「化石燃料由来の残渣」について、以下の事項に係る線量評価及び文献調査等を実施した。

(a) 令和3年度調査で整理された「化石燃料由来の残渣」に該当する物質についての放射能濃度を用いて、作業活動に対する被ばく線量の計算を行った。被ばく線量の計算には、欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオを参考にした。以降、必要に応じてこの項目を「線量評価」と呼ぶ。

(b) (a) において整理した各物質からの被ばく線量のうち年間追加被ばく線量が一定の水準を超えると算定された物質があった場合、その物質について、産業利用に伴う被ばくに関連する文献調査を行い、欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオに代替できる要素があれば、当該要素に置き換えをしたうえで、被ばく線量の算定を行った。以降、必要に応じてこの項目を「シナリオ要素の代替」と呼ぶ。なお、一定の水準については、原子力規制庁担当官と協議して決定した。

Ⅲ. 事業の実績

実施計画書（仕様書）の項目別に

- ・実施計画と実績との対照（表 1）
- ・実績の付属説明（個別の実施概要等）

について記載する。

Ⅲ. 1. 実施計画書と実績との対照

表 1. 令和 4 年度実施計画と実績の対象

令和 4 年度実施計画	令和 4 年度実績	付 属 説 明
<p>(1) レアアース・レアメタルに分類される物質に関する文献調査等</p> <p>令和 3 年度調査において、日本国内での使用実態が明らかになったレアアース・レアメタルに分類される物質について、以下の事項に係る文献調査を実施する。</p> <p>(a) （濃度文献調査）：</p> <p>「令和 3 年度調査」の成果報告書の表 7 (国内使用と放射能濃度調査のデータ) に記載のある物質のうち、関連産業の項目がレアアース・レアメタ</p>	<p>(a) （濃度文献調査）：</p> <p>「令和3年度調査」の成果報告書の表7のデータは、2013年まで文献を対象としているため2021年までに発刊されたものを文献調査の対象とした。「令和3年</p>	付 属 説 明 1

<p>ルに分類される物質を中心として物質が含有する放射能濃度に関する知見について既存文献を用いて収集した上で、わかりやすく一覧に整理すること。</p> <p>(b) (線量評価、現実的方法) :</p> <p>(a) において、整理した放射能濃度を用いて、欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオを参考に作業活動に対する被ばく線量の計算を行う。</p> <p>なお、(a) において、放射能濃度について十分な知見が存在しない場合、レアアース・レアメタルに分類される物質の放射能濃度を把握する現実的な方法を具体的に提示すること。</p> <p>(c) (シナリオ要素の代替) :</p> <p>(b) において整理した各物質からの</p>	<p>度調査」の成果報告書の表7の関連産業の項目「レアアース・レアメタル」に分類される物質が検索対象となるように学術論文データベースから検索し、その中で放射能濃度データを含む文献があればそれを最終的な引用文献とした。引用文献から濃度に関する情報を抽出し一覧に整理した。</p> <p>(b) (線量評価) :</p> <p>(a) で整理した放射能濃度を用いて、欧州委員会報告書RP-122 の作業活動のシナリオを参考にして被ばく線量の計算を行った。</p> <p>(現実的方法) :</p> <p>(a) の調査で十分に濃度データが存在しない物質について、国内の学術機関から、放射能濃度を把握する現実的な方法に関する情報を入手し、それらを示した。</p> <p>(c) (シナリオ要素の代替) :</p> <p>①前項 (b) において一定の線量水準を</p>
--	---

<p>被ばく線量のうち年間追加被ばく線量が一定の水準を超えると算定された物質があった場合、その物質について、(a) の調査文献の中で欧州委員会報告書 RP-122 第 II 部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオに代替できる要素があれば、当該要素に置き換えをしたうえで、被ばく線量の算定を行う。※一定の水準については、原子力規制庁担当官と協議すること。</p>	<p>超える物質について、前項 (a) の調査文献の中で、RP-122の被ばくシナリオに代替できる要素があった場合に当該要素に置き換えて被ばく線量の推算を行った。なお、原子力規制庁担当官と協議して国内法令等(ガイドラインを含む)の対象外で年間1mSvを超えるものを一定の線量水準を超えるものとした。</p>	
<p>(2)「化石燃料由来の残渣」に関する被ばく線量評価及び必要となる文献調査等</p> <p>令和3年度調査の中で基礎情報(放射能濃度など)を整理した「化石燃料由来の残渣」について、以下の事項に係る線量評価及び文献調査等を実施する。</p> <p>(a) (線量評価) :</p> <p>令和3年度調査で整理された「化石燃料由来の残渣」に該当する物質についての放射能濃度を用いて、作業</p>	<p>(a) (線量評価) :</p> <p>「令和3年度調査」の成果報告書の表7に記載のある物質のうち、関連産業の項目が化石燃料に分類される物質の放射能</p>	<p>付 属 説 明 2</p>

<p>活動に対する被ばく線量の計算を行う。被ばく線量の計算には、欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオを参考にすること。</p> <p>(b) (シナリオ要素の代替) :</p> <p>(a) において整理した各物質からの被ばく線量のうち年間追加被ばく線量が一定の水準を超えると算定された物質があった場合、その物質について、産業利用の被ばくに関連する文献調査を行い、欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部「規制免除とクリアランスの概念の自然放射線源への適用」に提示されているシナリオに代替できる要素があれば、当該要素に置き換えをしたうえで、被ばく線量の算定を行う。※一定の水準については、原子力規制庁担当官と協議すること。</p>	<p>濃度を用いて、欧州委員会報告書 RP-122 の作業活動のシナリオを参考にして被ばく線量の計算を行った。</p> <p>(b) (シナリオ要素の代替) :</p> <p>前項 (a) において一定の線量水準を超える物質について、RP-122の被ばくシナリオに代替できる要素があった場合に当該要素に置き換えて被ばく線量の推算を行った。なお、一定の線量水準については、前項 (1) と同様とした。</p> <p>RP-122の被ばくシナリオに代替できる要素については既存文献からその情報を入手した。具体的には下記のように行った。</p> <p>学術文献データベースを用いて、2013年から2021年までに発刊された該当物質の被ばく線量に関する原著文献を検索し、被ばくシナリオに代替できる要素の情報があればそれを代替要素とした。</p>
--	--

Ⅲ. 2. 実績の付属説明

Ⅲ. 2.1 レアアース・レアメタルに分類される物質に関する文献調査等（付属説明 1）

令和 3 年度調査において、日本国内での使用実態が明らかになったレアアース・レアメタルに分類される物質について、以下の事項に係る文献調査等を実施した。

(a) 濃度文献調査

(a) — ① 文献調査の対象と検索

- ・ 学術誌に掲載された原著論文、すなわち情報として科学的にオーソライズされた原著論文を文献調査の対象とした。
- ・ 原著論文の検索には、学術文献検索データベース web of science を用いた。「令和 3 年度調査」の成果報告書の表 7 のデータは、2013 年まで文献を対象としているため 2021 年までに発刊されたものを対象とした。
- ・ 「令和 3 年度調査」の成果報告書の表 7 の関連産業の項目「レアアース・レアメタル」に分類される物質名で検索した場合、検索される論文数が限定されてしまう恐れがあったため、より大きな括りであるレアメタル・レアアースの元素名で検索した。具体的には、検索条件 1 を『NORM』あるいは『Natural radionuclides』、検索条件 2 を『レアアース』あるいは『レアメタル』の元素名とし、検索条件 1 と 2 を組み合わせて検索した。なお、検索した文献ツールにより件数された文献件数を表 2 に示す。

表 2. 検索された文献の件数 (レアアース・レアメタル)

検索番号	検索条件 1	検索条件 2	検索された文献の件数
1	NORM	rare earth	44
2	NORM	rare metal	15
3	natural radionuclides	rare earth	81
4	natural radionuclides	rare metal	40
5	NORM	lithium	29
6	NORM	vanadium	11
7	NORM	gallium	6
8	NORM	zirconium	7
9	NORM	antimony	5
10	NORM	tantalum	6
11	NORM	bismuth	8
12	NORM	beryllium	3
13	NORM	chromium	29
14	NORM	germanium	47
15	NORM	niobium	7

16	NORM	tellurium	2
17	NORM	tungsten	12
18	NORM	boron	48
19	NORM	manganese	74
20	NORM	selenium	9
21	NORM	molybdenum	12
22	NORM	cesium	7
23	NORM	rhenium	1
24	NORM	cobalt	15
25	NORM	rubidium	2
26	NORM	palladium	6
27	NORM	barium	26
28	NORM	platinum	15
29	NORM	titanium	46
30	NORM	nickel	45
31	NORM	strontium	20
32	NORM	indium	3
33	NORM	hafnium	0

34	NORM	thallium	1
35	NORM	scandium	1
36	NORM	neodymium	2
37	NORM	terbium	0
38	NORM	ytterbium	0
39	NORM	yttrium	5
40	NORM	promethium	0
41	NORM	dysprosium	0
42	NORM	lutetium	0
43	NORM	lanthanum	2
44	NORM	samarium	2
45	NORM	holmium	3
46	NORM	cerium	6
47	NORM	europium	0
48	NORM	erbium	2
49	NORM	praseodymium	0
50	NORM	gadolinium	6
51	NORM	thulium	0

52	natural radionuclides	lithium	8
53	natural radionuclides	vanadium	15
54	natural radionuclides	gallium	7
55	natural radionuclides	zirconium	22
56	natural radionuclides	antimony	11
57	natural radionuclides	tantalum	7
58	natural radionuclides	bismuth	8
59	natural radionuclides	beryllium	48
60	natural radionuclides	chromium	25
61	natural radionuclides	germanium	246
62	natural radionuclides	niobium	8
63	natural radionuclides	tellurium	5
64	natural radionuclides	tungsten	13
65	natural radionuclides	boron	8
66	natural radionuclides	manganese	54
67	natural radionuclides	selenium	22
68	natural radionuclides	molybdenum	31
69	natural radionuclides	cesium	311

70	natural radionuclides	rhenium	11
71	natural radionuclides	cobalt	50
72	natural radionuclides	rubidium	4
73	natural radionuclides	palladium	7
74	natural radionuclides	barium	30
75	natural radionuclides	platinum	7
76	natural radionuclides	titanium	44
77	natural radionuclides	nickel	54
78	natural radionuclides	strontium	118
79	natural radionuclides	indium	4
80	natural radionuclides	hafnium	3
81	natural radionuclides	thallium	39
82	natural radionuclides	scandium	14
83	natural radionuclides	neodymium	9
84	natural radionuclides	terbium	4
85	natural radionuclides	ytterbium	4
86	natural radionuclides	yttrium	8
87	natural radionuclides	promethium	0

88	natural radionuclides	dysprosium	0
89	natural radionuclides	lutetium	6
90	natural radionuclides	lanthanum	10
91	natural radionuclides	samarium	5
92	natural radionuclides	holmium	1
93	natural radionuclides	cerium	8
94	natural radionuclides	europium	44
95	natural radionuclides	erbium	5
96	natural radionuclides	praseodymium	0
97	natural radionuclides	gadolinium	7
98	natural radionuclides	thulium	3
総数			2059

(a) — ② 引用文献

検索した文献の要旨とタイトルから、産業用レアアース・レアメタルの原材料や生成物の「放射能濃度」や「作業者の被ばくデータ」の記載があった文献あるいはそれらの記載が推測できた文献を入手した。入手した文献の内容を確認して「令和3年度調査」の成果報告書の表7の関連産業の項目「レアアース・レアメタル」に分類される物質の濃度に関する

る情報があった場合に、その論文を最終的な引用文献とした。最終的に引用した文献の一覧を表 3 に示す。

表3. 引用した文献(レアアース・レアメタル)

文献番号	文献名	文献タイトル	文献著者
1	CANADIAN MINERALOGIST, 59, 813-845(2021)	GEOMETALLURGICAL ORE CHARACTERIZATION OF THE HIGH-GRADE POLYMETALLIC UNCONFORMITY-RELATED URANIUM DEPOSIT	Kaczowka, AJ; Kyser, TK; Kotzer, TG; Leybourne, MI; Layton-Matthews, D
2	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 237, 106714(2021)	NORM survey within the second census on pollution sources in China	Shang, ZR; Dang, YQ; Wang, YC; Zheng, GF
3	JOURNAL OF MINING SCIENCE, 3, 531-538(2021)	Studies of Properties and Composition of Loparite Ore Mill Tailings	Krasavtseva, EA; Makarov, DV; Maksimova, VV; Selivanova, EA; Ikkonen, PV
4	MINERALS, 11, 504(2021)	The Occurrence of Selected Radionuclides and Rare Earth Elements in Waste at the Mine Heap from the Polish Mining Group	Smolka-Danielowska, D; Walencik-Lata, A
5	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 232, 106565(2021)	Geochemical characterization of monazite sands based on rare earth elements, thorium and uranium from a natural high background radiation area in Tamil Nadu, India	Veerasamy, N; Murugan, R; Kasar, S; Inoue, K; Kavasi, N; Balakrishnan, S; Arae, H; Fukushi, M; Sahoo, SK
6	CHEMOSPHERE, 270, 128671(2021)	Natural radionuclides and assessment of radiological hazards in MuongHum, Lao Cai, Vietnam	Duong, NT; Hao, DV; Bui, VL; Duong, DT; Phan, TT; Xuan, HL
7	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES, 80, 170(2021)	Elemental composition and natural radioactivity of refractory materials	Caridi, F; Testagrossa, B; Acri, G
8	APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 168, 109525(2021)	Preparation and evaluation of new reference materials for naturally occurring radioactive materials (NORM): Zirconium silicate, bauxite, and phosphogypsum	Lee, J; Kim, YJ; Chae, JS; Oh, JS; Kwon, E; Lim, JM; Lee, H; Han, JH; Pham, MK; Nour, S; La Rosa, J; Gaca, P; Daniel, B
9	CHEMOSPHERE, 274, 129732(2021)	Radiological and chemical risks by waste scales generated in the titanium dioxide industry	Gazquez, MJ; Mantero, J; Mosqueda, F; Vioque, I; Garcia-Tenorio, R; Bolivar, JP
10	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY, 190, 331-341(2020)	EFFECT OF WORKING CONDITIONS AND NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS ON OCCUPATIONAL DOSES TO WORKERS OF AN OLD MANGANESE MINE	Monged, MHE
11	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY, 189, 114-126(2020)	BACKGROUND RADIATION LEVELS NEAR A MINERAL SAND MINING FACTORY IN SRI LANKA: CORRELATION OF RADIATION MEASUREMENTS WITH MICRONUCLEI FREQUENCY	Warnakulasuriya, T; Williams, S; Weerakkody, T; Dabarera, M; Rodrigo, K; Waduge, VA; Ediriweera, D; Siriwardena, N; Wickremasinghe, R
12	SUSTAINABILITY, 11, 5906(2019)	Radionuclide Transfer in the Zirconium Oxychloride Production Process and the Radiation Effect in a Typical Chinese Enterprise	Xu, SL; Wu, QF; Li, XG; Yuan, F; Tu, LY
13	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY, 322, 1097-1105(2019)	Malaysian monazite and its processing residue: chemical composition and radioactivity	Jaffary, NAM; Khoo, KS; Mohamed, NH; Yusof, MA; Fadzil, SM
14	EURASIAN SOIL SCIENCE, 52, 644-653(2019)	Distribution of Radioactive and Rare-Earth Elements in Soils of the Guangdong Province, China	Zlobina, AN; Rikhvanov, LP; Baranovskaya, NV; Wang, N; Farhutdinov, IM

15	MINERALS, 9, 168(2019)	Radioactivity of Five Typical General Industrial Solid Wastes and its Influence in Solid Waste Recycling	Shen, ZH; Zhang, Q; Cheng, W; Chen, QL
16	ORE GEOLOGY REVIEWS, 101, 609–628(2018)	The rare metal deposits of the El Garra El Hamra syenites, South Western Desert, Egypt	Mahmoud, SAA
17	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH, 25, 24695–24703(2018)	Recovery of ilmenite mud as an additive in commercial Portland cements	Llanes, MC; Gonzalez, MJG; Moreno, SMP; Raya, JPB
18	RADIOCHIMICA ACTA, 106, 413–425(2018)	Chemical characterization and radiation exposure from the natural radioactivity in Romanian building materials	Calin, MR; Radulescu, I; Chiper, D; Barna, C; Cimpeanu, C
19	MARINE POLLUTION BULLETIN, 127, 654–663(2018)	Elevated concentrations of naturally occurring radionuclides in heavy mineral-rich beach sands of Langkawi Island, Malaysia	Khandaker, MU; Asaduzzaman, K; Bin Sulaiman, AF; Bradley, DA; Isinkaye, MO
20	REGULATORY TOXICOLOGY AND PHARMACOLOGY, 89, 215–223(2017)	Baseline evaluation for natural radioactivity level and radiological hazardous parameters associated with processing of high grade monazite	El Afifi, EM; El-Din, AMS; Aglan, RF; Borai, EH; Abo-Aly, MM
21	HYDROMETALLURGY, 171, 236–244(2017)	Migration of natural radionuclides in the extraction process of the ion-adsorption type rare earths ore	Li, KZ; Liu, HP; Lai, FG; Xiao, YF; Hu, YM; Wang, C; Xu, HB
22	HEALTH PHYSICS, 113, 13–22(2017)	URANIUM MINING AND NORM IN NORTH AMERICA–SOME PERSPECTIVES ON OCCUPATIONAL RADIATION EXPOSURE	Brown, SH; Chambers, DB
23	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 168, 15–20(2017)	Radon exhalation study of manganese clay residue and usability in brick production	Kovacs, T; Shahrokhi, A; Sas, Z; Vigh, T; Somlai, J
24	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 162–163, 166–171(2016)	Chemical distribution of hazardous natural radionuclides during monazite mineral processing	Hamed, MM; Hilal, MA; Borai, EH
25	NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION, 31, 190–194(2016)	RADIATION HAZARD OF SOLID METALLIC TAILINGS IN SHANGLUO, CHINA	Zhuang, SK; Lu, XW; Li, JT; Li, Q
26	NUCLEAR TECHNOLOGY, 194, 136–151(2016)	Natural Thorium Resources and Recovery: Options and Impacts	Ault, T; Van Gosen, B; Krahn, S; Croff, A
27	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY, 167, 15–21(2015)	SYSTEMATIC APPROACH TO CHARACTERISATION OF NORM IN THAILAND	Chanyotha, S; Kranrod, C; Pengvanich, P
28	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY, 303, 1393–1398(2015)	The department of uranium decay chain radionuclides during processing of an Australian monazite concentrate using a caustic conversion route	Anvia, M; Brown, SA; McOrist, GD
29	RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, 107, 82–88(2015)	Natural radioactivity and radiological hazards assessment of bone-coal from a vanadium mine in central China	Huang, YJ; Chen, CF; Huang, YC; Yue, QJ; Zhong, CM; Tan, CJ
30	ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY, 32, 1443–1452(2013)	Environmental toxicity and radioactivity assessment of a titanium-processing residue with potential for environmental use	Wendling, LA; Binet, MT; Yuan, Z; Gissi, F; Koppel, DJ; Adams, MS
31	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 120, 26–32(2013)	Radioactive characterization of the main materials involved in the titanium dioxide production process and their environmental radiological impact	Mantero, J; Gazquez, MJ; Bolivar, JP; Garcia-Tenorio, R; Vaca, F
32	JOURNAL OF CENTRAL SOUTH UNIVERSITY, 28, 72–88(2021)	Separation and purification of tantalum from plumbomicrolite of amazonite deposit in Kola Peninsula by acid leaching and solvent extraction	Masloboeva, SM; Arutyunyan, LG; Palatnikov, MN; Manukovskaya, DV
33	APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 128, 224–230(2017)	Quantification of some elements of nuclear and industrial interest from zircon mineral using neutron activation analysis and passive gamma-ray spectroscopy	Attallah, MF; Hilal, MA; Moussa, SI

34	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY, 167, 255-259(2015)	FEASIBILITY STUDY FOR THE ASSESSMENT OF THE EXPOSED DOSE WITH TENORM ADDED IN CONSUMER PRODUCTS	Yoo, DH; Lee, HC; Shin, WG; Ha, WH; Yoo, JR; Yoon, SW; Lee, J; Choi, WC; Min, CH
35	APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 154, 108860(2019)	Evaluation of the annual effective dose due to the external irradiation induced by using NORM added consumer products	Yoo, H; Park, HJ; Min, CH

(a) — ③ データの一覧表

引用文献から濃度に関する情報を抽出して一覧に整理した。整理した表を表4に示す。整理したときの条件は、下記の通りである。

- 整合性の観点から、令和3年度調査と同様の条件(下記)で行った。
 - ✓ 輸入量調査の際に設定した物質名、すなわち貿易統計上の分類(HSコード分類)を基本とした品目名を、濃度調査での物質名とした。輸入量調査の際に設定した物質名に分類するのが難しい物質については、当該物質の名称を物質名とした。
 - ✓ ND等の測定上の下限値は、具体的に数値が記載されていればその値(例えば、<5と記載されていれば5)をデータに入力し、それ以外は全て0Bq/gとした。
 - ✓ 文献中の濃度データは、平均値(例えば、同種の5サンプルの平均値)、単独値(例えば、サンプル1つに対して1つのデータ)などに整理し、これらを代表値とした。
 - ✓ 放射能濃度の値は、文献ごとの代表値を集約・計算して平均値、最小値、最大値を求めた。放射能濃度の単位はBq/gに統一した。
- U-238系列、Th-232系列、K-40の放射能濃度を整理した。

表4. 放射能濃度データ（レアアース・レアメタル）

物質名	関連産業	物質の種類	輸入量 (トン)	国内生産量 (トン)	U-238系列 &Th232系列 &K40 放射能濃度 データ数	U-238系列			Th-232系列			K-40						
						放射能濃度 (Bq/g)			放射能濃度 (Bq/g)			放射能濃度 (Bq/g)						
						データ数	平均	最小	最大	データ数	平均	最小	最大	データ数	平均	最小	最大	
セリウム化合物	レアアース	産業製品	6996		2				2	7.8E-01	1.5E-01	1.4E+00						
希土類金属など	レアアース	産業製品	6791		4			2	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00							
その他希土類金属	レアアース	産業製品	2072		37			24	9.9E+01	4.0E-03	1.1E+03							
酸化セリウム	レアアース	産業製品	2039		6			5	1.6E+00	3.6E-02	5.2E+00			3	1.3E+00	2.7E-02	3.9E+00	
酸化セトリウム	レアアース	産業製品	1298		2			2	4.3E-01	3.3E-01	5.3E-01			1	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01	
フェロセリウム	レアアース	産業製品	794		0			0						0				
酸化ランタン	レアアース	産業製品	662		1			1	7.8E+00	7.8E+00	7.8E+00			0				
錳物(その他)	レアアース	天然資源	290703	0	17			10	3.3E+00	9.7E-02	1.2E+01			7	1.9E+01	1.3E-01	5.8E+01	
トリウム錳	レアアース	天然資源	0	0	36			18	3.1E+01	9.1E-01	5.8E+01			5	8.1E+00	5.0E-03	1.7E+01	
ウラン錳	レアアース	天然資源	0	0	5			3	5.5E+03	5.4E+00	8.8E+03			1	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	
レアアース産業に おける副産物	レアアース	副産物			9			5	1.2E+01	3.3E+00	2.3E+01			4	1.4E+02	4.9E+01	3.4E+02	
ほう酸塩	レアメタルB	産業製品	27165		0			0						0				
炭化物(ほう素、 ニオブ、タンタル)	レアメタルB、Nb、Ta	産業製品	465		0			0						0				
バリウム錳	レアメタルBa	天然資源	21030		2			1	4.1E-03	4.1E-03	4.1E-03			1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
ベリリウム及びその 製品	レアメタルBe	産業製品	0.35		0			0						0				
ベリリウムの酸化 物	レアメタルBe	産業製品	0.03		0			0						0				
ビスマス及びその 製品	レアメタルBi	産業製品	242	448	0			0						0				
コバルト及びその 製品	レアメタルCo	産業製品	8246	3669	0			0						0				
コバルトの酸化物 など	レアメタルCo	産業製品	895		0			0						0				
コバルト錳	レアメタルCo	天然資源	0	0	0			0						0				
クロム及びその製 品	レアメタルCr	産業製品	3639		0			0						0				
クロムの酸化物な ど	レアメタルCr	産業製品	3592		0			0						0				
クロム錳	レアメタルCr	天然資源	41161	0	2			1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00			1	8.3E-04	8.3E-04	8.3E-04	0.0E+00
ゲルマニウム及び その製品	レアメタルGe	産業製品	7		0			0						0				
ゲルマニウムの酸 化物、ジルコニウ ムの酸化物	レアメタルGe、Zr	産業製品	5632	10622	7			4	2.1E+00	1.0E-02	5.6E+00			3	6.1E-01	3.0E-03	1.2E+00	3.0E-02
インジウム及びそ の製品	レアメタルIn	産業製品	214	637	0			0						0				
リチウムの酸化物 など	レアメタルLi	産業製品	32516		0			0						0				
マンガン及びその 製品	レアメタルMn	産業製品	59187	331000	0			0						0				
マンガンの酸化物	レアメタルMn	産業製品	2167		0			0						0				
マンガン錳	レアメタルMn	天然資源	794574	0	7			4	9.3E-02	3.3E-03	2.1E-01			3	2.2E-02	3.6E-03	6.0E-02	3.0E-01

その他金属及びその製品 Th入りタングステ ン溶接棒	レアメタルV、Ga、 Hf、In、Nb、Re	産業製品	155		0	0			0						0			
	レアメタルW	産業製品		2	1	1.2E-02	1.2E-02	1.2E-02	1	8.6E+01	8.6E+01	8.6E+01	8.6E+01	0				
タングステン及び その製品	レアメタルW	産業製品	1554	0	0				0					0				
	レアメタルW	天然資源	0	4	2	2.4E-03	1.4E-03	3.3E-03	2	1.6E-03	8.4E-04	2.3E-03	2.3E-03	1	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
耐火物（ジルコ ン）	レアメタルZr	産業製品		22	11	3.1E+00	1.5E+00	5.8E+00	11	7.5E-01	3.4E-01	1.5E+00	1.5E+00	6	4.6E-02	8.0E-03	1.1E-01	
	ジルコニウム産業 の中間製品	産業製品		3	2	2.2E+00	2.0E+00	2.3E+00	1	3.4E+00	3.4E+00	3.4E+00	3.4E+00	0				
ジルコニウム及び その製品	レアメタルZr	産業製品	259	0	0				0					0				
	レアメタルZr	天然資源	17399	0	183	102	4.0E+00	4.1E-01	1.3E+01	8	8.6E-01	3.3E-01	3.5E+00	52	1.4E-01	0.0E+00	1.3E+00	
ジルコニウム産業 における副産物	レアメタルZr	副産物		14	9	8.5E+00	4.3E-04	4.5E+01	5	5.5E+00	2.2E-06	2.3E+01	2.3E+01	0				

(b) 線量評価、現実的方法

(b) — ① 線量評価

(b) — ① — (1) 線量評価条件

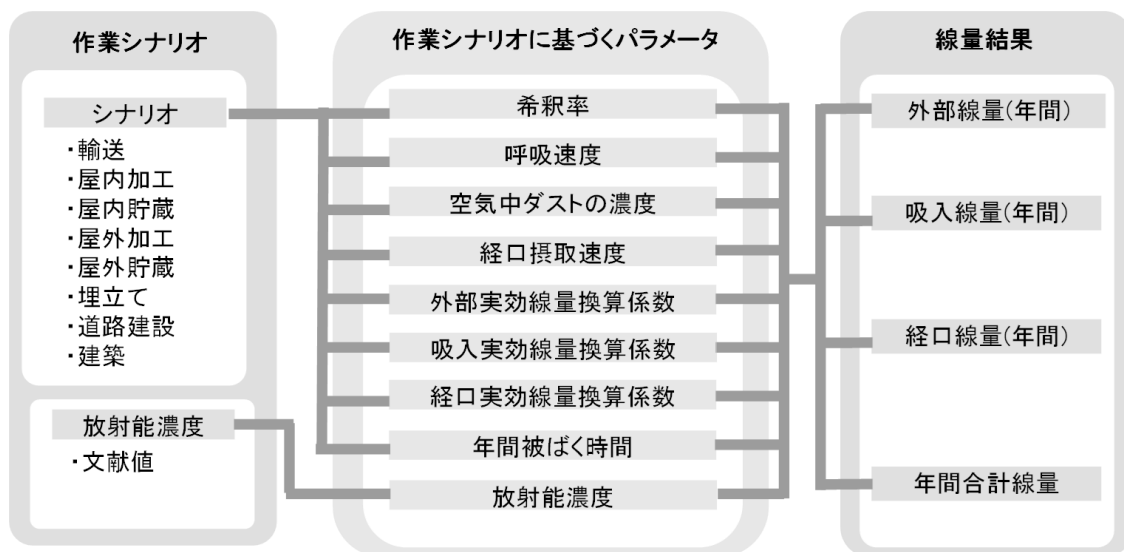
欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部 (European Commission; Radiation Protection 122 Part II -Practical use of the concepts of clearance and exemption- Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources, Directorate-General Environment (2001)) (以下、「RP-122」という。)を参考に、輸送、屋内貯蔵、屋外貯蔵、屋内加工、屋外加工、埋立て、道路建設、建築の作業活動に係る線量計算を行った。前項 (a) において整理した放射能濃度データには、国内利用がないとされる物質(輸入量と国内生産量が 0)が含まれており、それらは除いたデータを用いて線量を算出した。なお、放射能濃度データは文献値であり大きな偏りを有していると考えられるため、被ばく線量の目安を知り相対的に調査の優先度が高い物質を把握する観点から、表 4 に示されている U-238 系列、Th-232 系列、K-40 の平均値、最大値を使用した。天然資源による被ばくの懸念は主として U-238 系列、Th-232 系列であるため、K-40 の濃度が不明な場合、K-40 の濃度を 0 として線量を計算した。一方で、U-238 系列、Th-232 系列のいずれかの濃度が不明な場合、線量計算に必要な情報が不足しており適切に計算できないため、線量を「不明」とした。欧州委員会報告書 RP-122 第Ⅱ部では、各種パラメータは物質の形状等により異なった値が与えられている。なお、希釈率に関しては文献情報のみでは特定が難しいため、NORM 調査事業では安全側の値(すなわち、希釈なし、希釈率=1)を使用した。今回、参考にした RP-122 の作業活動シナリオ及び計算パラメータを表 5、線量

計算式と各パラメータの相互関係を図 1 に示す。なお、線量の値はパラメータの精度を踏まえて有効桁 1 桁とした。

表5.作業シナリオと線量計算パラメータ

パラメータ	作業シナリオ																																			
	輸送				屋内貯蔵				屋外貯蔵				屋内加工				屋外加工				埋立て				道路建設				建築							
	外部	吸入	経口	吸入	外部	吸入	経口	吸入	外部	吸入	経口	吸入	外部	吸入	経口	吸入	外部	吸入	経口	吸入	外部	吸入	経口	吸入	外部	吸入	外部	吸入	外部	吸入	外部	吸入	外部	吸入	外部	吸入
T_o (y ⁻¹)	850	100	100	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
F_d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B_r (m ³ h ⁻¹)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
C_{dust} (g m ⁻³)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
R_{veg} (g h ⁻¹)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
D_{ext} (Sv h ⁻¹ Bq g ⁻¹), D_{inh} (Sv Bq ⁻¹), and D_{veg} (Sv Bq ⁻¹) for ²³⁸ U series	7.7E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06	3.2E-08	2.9E-05	2.6E-06
D_{ext} , D_{inh} , and D_{veg} for ²³² Th series	1.2E-07	4.8E-05	1.1E-06	4.7E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.8E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.7E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.8E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.7E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.8E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.7E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.8E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.7E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.8E-08	4.8E-05	1.1E-06	4.7E-08	4.8E-05	1.1E-06
D_{ext} , D_{inh} , and D_{veg} for ⁴⁰ K	7.6E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0	2.9E-09	0	0

※輸送シナリオについては、運転作業で850時間、荷下等で100時間となる。



計算式

$$E_{\text{ext}} = D_{\text{ext}} \times T_e \times F_d \times A$$

$$E_{\text{inh}} = D_{\text{inh}} \times T_e \times F_d \times B_r \times C_{\text{dust}} \times A$$

$$E_{\text{ing}} = D_{\text{ing}} \times T_e \times F_d \times R_{\text{ing}} \times A$$

A: 放射能濃度 (Bq/g)
E: 年間線量 (Sv/y)

$$E_{\text{ext (total)}} = E_{\text{ext (U)}} + E_{\text{ext (Th)}} + E_{\text{ext (K)}}$$

$$E_{\text{inh (total)}} = E_{\text{inh (U)}} + E_{\text{inh (Th)}} + E_{\text{inh (K)}}$$

$$E_{\text{ing (total)}} = E_{\text{ing (U)}} + E_{\text{ing (Th)}} + E_{\text{ing (K)}}$$

$$E_{\text{total}} = E_{\text{ext (total)}} + E_{\text{inh (total)}} + E_{\text{ing (total)}}$$

図1. 線量計算の概念図

(b) — ① — (2) 線量計算値

濃度平均値から計算した線量値を表6-1、濃度最大値から計算した線量値を表6-2に示す。建築シナリオが最も高い線量であるが、いずれのシナリオも概ね同程度の線量値である。

表6-1. 線量計算値（レアース・レアメタル）濃度平均値を用いた場合

物質名	作業シナリオ																							
	輸送			屋内貯蔵			屋外貯蔵			屋内加工			屋外加工			埋立て			道路建設			建設		
	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計
セリウム化合物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
希土類金属など	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00
その他希土類金属の化合物	1.E+01	6.E-01	1.E+01	9.E+00	1.E+01	3.E+01	9.E+00	1.E+01	3.E+01	9.E+00	1.E+01	3.E+01	9.E+00	1.E+01	3.E+01	9.E+01	1.E+02	1.E+02	2.E+02	6.E+00	3.E+00	2.E+02	6.E+00	3.E+00
酸化セリウム	2.E+01	9.E-03	2.E+01	1.E-01	2.E+01	3.E+01	1.E-01	2.E+01	3.E+01	1.E-01	2.E+01	3.E+01	1.E-01	2.E+01	3.E+01	1.E+01	1.E+01	1.E+01	2.E+00	8.E-02	3.E-02	2.E+00	8.E-02	3.E-02
酸化イットリウム	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
酸化セリウム	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
酸化ランタン	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
鉱物（その他）	2.E+00	1.E-01	3.E+00	2.E+00	2.E+00	5.E-01	4.E+00	2.E+00	5.E-01	4.E+00	2.E+00	5.E-01	4.E+00	2.E+00	5.E-01	2.E+01	2.E+00	5.E-01	3.E+01	1.E+00	5.E-01	3.E+01	1.E+00	5.E-01
レアース産業における副産物	2.E+01	9.E-01	2.E+01	1.E+01	2.E+01	3.E+01	1.E+01	2.E+01	3.E+01	1.E+01	2.E+01	3.E+01	1.E+01	2.E+01	3.E+01	1.E+01	2.E+01	3.E+01	1.E+02	2.E+02	1.E+02	2.E+02	8.E+00	3.E+00
ほう酸塩	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
炭化物（ほう素、ニオブ、タンタル）	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
バリウム及びその化合物	3.E-04	1.E-05	3.E-04	2.E-04	3.E-04	7.E-04	2.E-04	1.E-04	2.E-04	2.E-04	1.E-04	2.E-04	2.E-04	1.E-04	2.E-04	3.E-04	3.E-04	3.E-04	3.E-04	4.E-03	3.E-03	4.E-03	1.E-04	2.E-04
バリウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
バリウムの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ピスマス及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
コバルト及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
コバルトの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
クロム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
クロムの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
クロム酸	9.E-05	5.E-06	9.E-07	1.E-04	7.E-05	2.E-04	7.E-05	2.E-04	2.E-05	1.E-04	7.E-05	2.E-05	7.E-05	9.E-05	2.E-04	9.E-05	9.E-05	2.E-05	9.E-05	8.E-04	8.E-04	1.E-03	4.E-05	2.E-05
ゲルマニウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ゲルマニウムの酸化物、シリコンウムの酸化物	2.E-01	1.E-02	6.E-03	2.E-01	2.E-01	5.E-01	2.E-01	1.E-01	1.E-01	4.E-01	2.E-01	1.E-01	2.E-01	7.E-01	7.E-01	2.E-01	2.E+00	2.E-01	1.E-01	3.E+00	3.E+00	3.E+00	1.E-01	1.E-01
インジウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
リチウムの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
マンガン及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
マンガンの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
マンガン酸	1.E-02	5.E-04	3.E-04	1.E-02	8.E-03	5.E-03	2.E-02	8.E-03	5.E-03	2.E-02	8.E-03	5.E-03	2.E-02	8.E-03	5.E-03	1.E-01	8.E-03	5.E-03	1.E-01	8.E-03	5.E-03	1.E-01	4.E-03	5.E-03
マンガン産業における副産物	9.E-03	3.E-04	1.E-04	9.E-03	7.E-03	2.E-03	1.E-02	5.E-03	2.E-03	1.E-02	5.E-03	2.E-03	1.E-02	5.E-03	2.E-03	9.E-02	5.E-03	2.E-03	7.E-02	1.E-01	3.E-03	7.E-02	1.E-01	3.E-03
モリブデン及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
モリブデンの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
モリブデン及びその製品	6.E-02	3.E-03	2.E-03	7.E-02	5.E-02	4.E-02	1.E-01	5.E-02	4.E-02	1.E-01	5.E-02	4.E-02	1.E-01	5.E-02	4.E-02	6.E-01	5.E-02	4.E-02	7.E-01	5.E-02	4.E-02	9.E-01	3.E-02	4.E-02

モリブデン産業における副産物	7.E-02	3.E-03	2.E-03	7.E-02	5.E-02	5.E-02	4.E-02	1.E-01	5.E-02	1.E-01	4.E-02	2.E-01	5.E-02	4.E-02	1.E-01	4.E-02	1.E-01	7.E-01	5.E-02	4.E-02	6.E-01	5.E-02	4.E-02	6.E-01	9.E-01	3.E-02	4.E-02	1.E+00		
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	1.E+00	6.E-02	4.E-02	1.E+00	1.E+00	6.E-01	6.E-01	3.E+00	1.E+00	2.E+00	6.E-01	4.E+00	1.E+00	1.E+00	6.E-01	1.E+00	1.E+00	3.E+00	1.E+00	1.E+00	6.E-01	1.E+00	6.E-01	1.E+00	2.E+01	2.E+01	6.E-01	6.E-01	2.E+01	
ニオブ、タンタル、バナジウム産業における副産物	7.E+01	3.E+00	2.E+00	8.E+01	6.E+01	6.E+01	4.E+01	2.E+02	6.E+01	1.E+02	4.E+01	2.E+02	6.E+01	4.E+01	6.E+01	4.E+01	8.E+02	5.E+02	6.E+01	4.E+01	6.E+02	6.E+01	4.E+01	6.E+02	1.E+03	3.E+01	3.E+01	4.E+01	1.E+03	
ニオブ・チタン合金	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ニッケルメタルハロイド水素吸蔵合金蓄電池	3.E-03	1.E-04	7.E-05	3.E-03	2.E-03	2.E-03	1.E-03	6.E-03	2.E-03	1.E-03	1.E-03	8.E-03	2.E-03	2.E-03	2.E-03	1.E-03	3.E-02	1.E-03	2.E-02	2.E-03	2.E-03	2.E-03	2.E-03	2.E-02	4.E-02	4.E-02	1.E-03	1.E-03	4.E-02	
ニッケル及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ニッケルの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ニッケル鉱	2.E-02	9.E-04	7.E-04	2.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	4.E-02	2.E-02	4.E-02	1.E-02	6.E-02	2.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	1.E-02	2.E-02	2.E-02	2.E-02	2.E-01	2.E-02	1.E-02	2.E-01	3.E-01	8.E-03	1.E-02	3.E-01	3.E-01	
ニッケル産業における副産物	8.E-02	4.E-03	3.E-03	8.E-02	6.E-02	6.E-02	7.E-02	5.E-02	2.E-01	6.E-02	3.E-02	5.E-02	2.E-01	6.E-02	7.E-02	5.E-02	5.E-02	9.E-01	6.E-01	7.E-02	5.E-02	7.E-02	5.E-02	7.E-01	1.E+00	3.E-02	3.E-02	5.E-02	1.E+00	
貴金属	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
貴金属鉱	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
アンチモン及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
アンチモンの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
アンチモン鉱	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ストロンチウム、バリウム酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
タンタル及びその製品	2.E-04	8.E-06	6.E-06	2.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	4.E-04	1.E-04	3.E-04	1.E-04	5.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	2.E-03	1.E-04	2.E-03	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-03	2.E-03	2.E-03	7.E-05	1.E-04	2.E-03	
酸化チタンを含む顔料	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
チタンの酸化物	2.E-02	8.E-04	2.E-04	2.E-02	1.E-02	1.E-02	4.E-03	3.E-02	2.E-02	1.E-02	4.E-03	4.E-02	1.E-02	1.E-02	4.E-03	3.E-02	2.E-01	1.E-02	4.E-03	2.E-01	1.E-02	4.E-03	1.E-01	1.E-02	4.E-03	1.E-01	2.E-01	7.E-03	4.E-03	2.E-01
チタン及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
チタン鉱	9.E-02	5.E-03	2.E-03	1.E-01	7.E-02	8.E-02	3.E-02	2.E-01	7.E-02	4.E-02	3.E-02	3.E-01	3.E-02	3.E-02	3.E-02	3.E-02	8.E-02	1.E+00	9.E-01	8.E-02	3.E-02	8.E-02	8.E-02	8.E-01	1.E+00	1.E+00	4.E-02	3.E-02	1.E+00	
チタン産業における副産物	1.E+01	7.E-01	3.E-01	1.E+01	1.E+01	1.E+01	5.E+00	3.E+01	1.E+01	3.E+01	5.E+00	4.E+01	1.E+01	1.E+01	1.E+01	5.E+00	1.E+01	5.E+00	2.E+02	1.E+02	1.E+01	5.E+00	1.E+02	1.E+02	2.E+02	2.E+02	6.E+00	5.E+00	2.E+02	
タリウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
バナジウムの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
バナジウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
その他金属及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
Th入りタンクステン溶接棒	1.E+01	5.E-01	9.E-02	1.E+01	7.E+00	9.E+00	2.E+00	2.E+01	7.E+00	1.E+01	2.E+00	3.E+01	7.E+00	9.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+01	1.E+02	9.E+00	2.E+00	1.E+02	9.E+00	8.E+01	1.E+02	4.E+00	2.E+00	4.E+00	1.E+02	
タンクステン及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
耐火物(ジルコニウム)	3.E-01	2.E-02	9.E-03	3.E-01	2.E-01	2.E-01	1.E-01	7.E-01	3.E-01	2.E-01	2.E-01	9.E-01	2.E-01	2.E-01	3.E-01	2.E-01	2.E-01	4.E+00	3.E-01	3.E+00	3.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E-01	4.E+00	4.E+00	1.E-01	2.E-01	5.E+00	
ジルコニウム産業の中間製品	5.E-01	3.E-02	9.E-03	6.E-01	4.E-01	5.E-01	2.E-01	2.E-01	4.E-01	8.E-01	2.E-01	2.E+00	2.E+00	4.E-01	5.E-01	2.E-01	2.E-01	6.E+00	4.E+00	5.E-01	5.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E-01	5.E+00	7.E+00	2.E-01	2.E-01	8.E+00	
ジルコニウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明

ジルコニウム鉱	4.E-01	2.E-02	1.E-02	1.E-02	4.E-01	3.E-01	3.E-01	3.E-01	2.E-01	2.E-01	7.E-01	3.E-01	3.E-01	2.E-01	8.E-01	4.E+00	3.E+00	3.E+00	5.E+00	3.E+00	2.E-01	2.E-01	3.E+00	5.E+00	2.E-01	2.E-01	6.F+00
ジルコニウム産業における副産物	1.E+00	6.E-02	3.E-02	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	6.E-01	5.E-01	2.E+00	2.E+00	1.E+00	1.E+00	3.E+00	4.E+00	9.E+00	1.E+00	1.E+01	1.E+01	5.E-01	5.E-01	1.E+01	2.E+01	6.E-01	5.E-01	2.E+01

表6-2. 線量計算値（レアアース・レアメタル）濃度最大値を用いた場合

物質名	作業シナリオ																											
	輸送				屋外貯蔵				屋内加工				屋外加工				埋立て				道路建設				建築			
	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計
セリウム化合物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
希土類金属など	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00	0.E+00
その他希土類金属の化合物	1.E+02	7.E+00	1.E+00	1.E+02	1.E+02	6.E+01	2.E+01	2.E+02	1.E+02	2.E+01	4.E+02	1.E+01	1.E+02	1.E+02	2.E+01	2.E+02	1.E+03	1.E+02	1.E+01	1.E+03	1.E+03	1.E+02	2.E+01	1.E+03	2.E+03	6.E+01	2.E+01	2.E+03
酸化セリウム	6.E-01	3.E-02	6.E-03	6.E-01	4.E-01	3.E-01	1.E-01	8.E-01	4.E-01	1.E-01	2.E+00	1.E-01	5.E-01	1.E-01	5.E-01	1.E-01	6.E+00	6.E+00	5.E-01	6.E+00	6.E+00	5.E-01	1.E-01	5.E+00	8.E+00	3.E-01	1.E-01	8.E+00
酸化イットリウム	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
フェロセリウム	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
酸化ランタン	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
鉱物（その他）	7.E+00	4.E-01	9.E-02	8.E+00	6.E+00	7.E+00	2.E+00	1.E+01	6.E+00	3.E+00	2.E+01	1.E+01	6.E+00	7.E+01	7.E+01	1.E+01	7.E+00	8.E+01	5.E+01	7.E+00	8.E+01	7.E+00	2.E+00	6.E+01	1.E+02	3.E+00	2.E+00	1.E+02
レアアース産業における副産物	4.E+01	2.E+00	4.E-01	4.E+01	3.E+01	4.E+01	8.E+00	8.E+01	3.E+01	2.E+01	1.E+02	8.E+00	3.E+01	4.E+01	4.E+01	8.E+00	4.E+02	4.E+01	4.E+02	8.E+00	4.E+02	4.E+01	8.E+00	3.E+02	5.E+02	2.E+01	8.E+00	6.E+02
ほう酸塩	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
炭化物（ほう素、ニオブ、タンタル）	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
バリウム塩	3.E+04	1.E-05	1.E-05	3.E+04	2.E-04	3.E+04	2.E-04	7.E-04	2.E-04	1.E-04	9.E-04	2.E-04	3.E-04	3.E-04	3.E-04	3.E-04	3.E-04	3.E-04	2.E-03	3.E-04	2.E-04	2.E-04	2.E-04	3.E-03	4.E-03	1.E-04	2.E-04	5.E-03
バリウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
バリウムの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ヒュスマス及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
コバルト及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
コバルトの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
クロム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
クロムの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
クロム酸	9.E-05	5.E-06	9.E-07	1.E-04	7.E-05	9.E-05	2.E-05	1.E-04	7.E-05	4.E-05	3.E-04	2.E-04	7.E-05	9.E-05	2.E-05	2.E-04	9.E-04	9.E-05	1.E-03	7.E-04	9.E-05	2.E-05	2.E-05	8.E-04	1.E-03	4.E-05	2.E-05	1.E-03
ゲルマニウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
ゲルマニウムの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
物、ジルコニウムの酸化物	5.E-01	3.E-02	2.E-02	6.E-01	4.E-01	5.E-01	3.E-01	1.E+00	4.E-01	2.E-01	2.E+00	3.E-01	5.E-01	6.E+00	5.E-01	3.E-01	6.E+00	5.E-01	4.E+00	5.E-01	3.E-01	3.E-01	3.E-01	5.E+00	7.E+00	2.E-01	3.E-01	8.E+00
インジウム及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
リチウムの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
マンガン及びその製品	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
マンガンの酸化物	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
マンガン酸	2.E-02	1.E-03	6.E-04	3.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	5.E-02	2.E-02	1.E-02	7.E-02	1.E-02	2.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	2.E-01	2.E-02	2.E-01	2.E-01	2.E-02	2.E-02	2.E-02	2.E-01	3.E-01	1.E-02	1.E-02	3.E-01
マンガン産業における副産物	1.E-02	4.E-04	2.E-04	1.E-02	1.E-02	7.E-03	3.E-03	2.E-02	1.E-02	4.E-03	3.E-02	1.E-02	3.E-03	7.E-03	1.E-01	7.E-03	3.E-03	1.E-01	9.E-02	7.E-03	3.E-03	3.E-03	3.E-03	1.E-01	2.E-01	4.E-03	3.E-03	2.E-01
モリブデンの酸化物など	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明

(b) 線量評価、現実的方法

(b) — ② 現実的方法

(b) — ② — (1) 情報の入手

(a) において、U-238系列またはTh-232系列の放射能濃度データが0件の物質は表7の通りである。

表7. U-238系列またはTh-232系列の放射能濃度データが0件の物質

物質名	関連産業	輸入量 (トン)	国内生産量 (トン)
セリウム化合物	レアアース	6996	
酸化イットリウム	レアアース	1298	
フェロセリウム	レアアース	794	
酸化ランタン	レアアース	662	
ほう酸塩	レアメタル	27165	
炭化物（ほう素、ニオブ、タンタル）	レアメタル	465	
ベリリウム及びその製品	レアメタル	0.35	
ベリリウムの酸化物	レアメタル	0.03	
ビスマス及びその製品	レアメタル	242	448
コバルト及びその製品	レアメタル	8246	3669
コバルトの酸化物など	レアメタル	895	
クロム及びその製品	レアメタル	3639	
クロムの酸化物など	レアメタル	3592	
ゲルマニウム及びその製品	レアメタル	7	
インジウム及びその製品	レアメタル	214	637
リチウムの酸化物など	レアメタル	32516	
マンガン及びその製品	レアメタル	59187	331000
マンガンの酸化物	レアメタル	2167	
モリブデンの酸化物など	レアメタル	2860	
モリブデン及びその製品	レアメタル	1223	692
ニオブ・チタン合金	レアメタル	41	
ニッケル及びその製品	レアメタル	257546	58778
ニッケルの酸化物など	レアメタル	43	
貴金属	レアメタル	168019	2426
貴金属鉱	レアメタル	14079	6
アンチモン及びその製品	レアメタル	4835	
アンチモンの酸化物	レアメタル	3535	5113
アンチモン鉱	レアメタル	676	0
ストロンチウム、バリウム酸化物など	レアメタル	3019	
酸化チタンを含む顔料	レアメタル	48385	
チタン及びその製品	レアメタル	4141	91000
タリウム及びその製品	レアメタル	0	1
バナジウムの酸化物など	レアメタル	750	
バナジウム及びその製品	レアメタル	117	
その他金属及びその製品	レアメタル	155	
タングステン及びその製品	レアメタル	1554	3904
ジルコニウム及びその製品	レアメタル	259	

これらの物質について、放射能濃度を把握する現実的な方法を探るため、天然資源に関連する地学系学術研究を行い学術研究調査等の実績のある機関を対象に情報を入手した。その内容を表8に示す。

表8. 天然資源関連機関から得られた情報

機関名	表7に示すような物質の入手について	分析手法について	その他
機関A所属者	直接的に関連するものではないが、セルビア産のレアアース鉱石であれば本事業協力者（弘前大学）へ提供可能である。		
機関B所属者	沖縄県周辺において産業利用されているような物質は採取されていない。過去に沖縄本島において銅鉱山があったが現在は閉山している。また、久米島にも金鉱山があったが現在は閉山している。		
機関C所属者	機関Cに保管されているレアメタルを含む鉱石の一部であれば、本事業協力者（弘前大学）へ提供可能である。また、民間では資源鉱物標本を販売しているなどで、これを用いることで分析プロトコルの作成などを進めることができるだろう。	ジルコニウムなどは溶解しにくいが、アルカリ溶解技術があれば溶解可能だと考えられる。	複数の先生方が残していった文献が大量に保管されているので、役に立つ情報があるかもしれない。また、（国研）産業技術総合研究所地質調査総合センターも情報を持っているかもしれない。
機関D所属者	玉川温泉を起源とするレアメタル資源に係る研究を実施しており、希土類元素分析の結果も有している。当該試料は、希土類元素分析の結果とともに本事業協力者（弘前大学）へ提供可能である。	ppmオーダー程度であれば、エネルギー分散型蛍光X線分析装置（EDXRF）でも分析は可能だろう。	
機関E所属者	表7に示されている物質の一部（例えば、コバルト酸化物、ニッケル酸化物、アンチモン鉱など）については本事業協力者（弘前大学）へ提供可能である。また、モンゴル産のレアアース鉱石もある。	誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-AES）やエネルギー分散型蛍光X線分析装置（EDXRF）で分析することも可能だが、精度よく低濃度まで測りたい場合は誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）が必要になってくるだろう。	秋田県には関連する民間企業もあることから、研究を展開していくにあたって有用かもしれない。レアアース等を含む資源に関する研究を実施している大学や研究室レベルでは秋田大学がある。分野や研究室レベルであれば他大学にもある。
機関F所属者	沖縄県では、現在もマンガンノジュール（団塊）が容易に採取可能である。産業利用されているわけではなく、表7の「マンガン及びその製品」等に該当するかはわからないが、分析手法の検討などには有用だろう。		
機関G所属者	実際のサンプルをできるだけ多く分析するしかないだろう。そのためには多くの時間と労力、関係する機関との緊密な連携が必要になるだろうが、NORMIに関する諸問題の理解に向けてぜひ取り組むべきである。	放射能分析を行う場合は、高純度Ge半導体検出器（HPGe）による測定も有用だろう。	

(b) — ② — (2) まとめ

上述の情報を整理した内容を下記に示す。

- ・ 放射能濃度を把握する現実的な方法として、サンプルの入手とその実測が考えられる。弘前大学担当者（本事業協力者）を通じて、表7に記載の一部のレアアースとレアメタルの原料（例えば、レアアース鉱石やアンチモン鉱）、副産物（例えばコバルト酸化物やニッケル酸化物等）について入手して実測できる可能性があることが判明した。
- ・ 天然資源に対して放射能分析を行う場合、複数の分析技術及び手法（例えば、アルカリ溶融技術、物理・化学分析）を駆使する必要があることが判明した。

(c) シナリオ要素の代替

(c) — ① 代替要素の検討

RP-122の線量計算の要素、すなわちパラメータは表5に示した通りである。呼吸率、線量係数は線量評価の固定要素であり、一般的に代替が困難なものである。したがって、

- ・ 希釈率
- ・ 空气中ダストの濃度
- ・ 経口摂取速度
- ・ 年間被ばく時間（年間作業時間）

が代替可能な要素として挙げられる。これらの要素のうち、例えば屋内貯蔵における年間作業時間は1800時間（1日あたり約7時間）であり、法令上の労働時間（1日あたり8時間）のほとんどをNORM作業に費やすような値となっている。

本NORM調査事業では、委託元と協議し国内ガイドライン【原子力規制委員会，ウラン又はトリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン，2009】の対象外で、同ガイドラインで示されている年間線量、あるいはICRP Publication 103の現存被ばく状況の参考レベルの下限線量である年間1mSvを超えるものを一定の水準を超えたものとした。表6-2（濃度最大値から計算した線量値）において、一定の水準（以降、年間1mSv水準とする）を超える物質は表9に示したものになる。これらの物質が現時点でのNORMからの被ばく防護上の重要な物質と考えられる。なお、『ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物』は年間1mSvを超えるが、これはジルコニウムの酸化物（ガイドライン管理対象）によるものであるため除いてある。

表9. 年間1mSv水準を超える物質（レアアース・レアメタル）

物質名
その他希土類金属の化合物
酸化セリウム
鉍物（その他）
レアアース産業における副産物
モリブデン鉍
ニオブ鉍、タンタル鉍、バナジウム鉍
ニオブ、タンタル、バナジウム産業における副産物

※鉍物（その他）には、希土類鉍石が含まれる。

これらの物質について、前項「(a) 濃度文献調査」での文献中に、

- ・ 希釈率
- ・ 空气中ダストの濃度
- ・ 経口摂取速度
- ・ 年間被ばく時間（年間作業時間）

の記載があれば、それらのデータを抽出した。なお、表9の物質以外にも、参考になり得る作業環境（代替要素）のデータがあればそれらも抽出した。

(c) — ② 代替要素の抽出と再線量評価の検討

抽出した代替要素（線量パラメータ）の一覧表を表10に示す。

表10. 抽出した代替要素（線量パラメータ）のデータ

(レアアース・レアメタル)

線量パラメータ	文献名	文献タイトル	文献著者
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源 	MINERALS, 11, 504(2021)	The Occurrence of Selected Radionuclides and Rare Earth Elements in Waste at the Mine Heap from the Polish Mining Group	Smolka-Danielowska, D; Walencik-Lata, A
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源 	CHEMOSPHERE, 270, 128671(2021)	Natural radionuclides and assessment of radiological hazards in MuongHum, Lao Cai, Vietnam	Duong, NT; Hao, DV; Bui, VL; Duong, DT; Phan, TT; Xuan, HL
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間=7日/年=168時間 ・無限平板線源 	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES, 80, 170(2021)	Elemental composition and natural radioactivity of refractory materials	Caridi, F; Testagrossa, B; Aciri, G
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間=80h(酸化チタン製造における結晶化工程のスケール除去作業業者) 	CHEMOSPHERE, 274, 129732(2021)	Radiological and chemical risks by waste scales generated in the titanium dioxide industry	Gazquez, MJ; Mantero, J; Mosqueda, F; Vioque, I; Garcia-Tenorio, R; Bolivar, JP
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=2000h 	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY, 190, 331-341(2020)	EFFECT OF WORKING CONDITIONS AND NATURAL RADIOACTIVITY LEVELS ON OCCUPATIONAL DOSES TO WORKERS OF AN OLD MANGANESE MINE	Monged, MHE
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=2080h 	SUSTAINABILITY, 11, 5906(2019)	Radionuclide Transfer in the Zirconium Oxychloride Production Process and the Radiation Effect in a Typical Chinese Enterprise	Xu, SL; Wu, QF; Li, XG; Yuan, F; Tu, LY
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源 	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY, 322, 1097-1105(2019)	Malaysian monazite and its processing residue: chemical composition and radioactivity	Jaffary, NAM; Khoo, KS; Mohamed, NH; Yusof, MA; Fadzil, SM
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・年作業時間(仮定)=0.8(屋内滞在割合) × 8760時間(年間時間)=7008h ・無限平板線源 	MINERALS, 9, 168(2019)	Radioactivity of Five Typical General Industrial Solid Wastes and its Influence in Solid Waste Recycling	Shen, ZH; Zhang, Q; Cheng, W; Chen, QL
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.8(屋内滞在割合) × 8760時間(年間時間)=7008h ・無限平板線源 	RADIOCHIMICA ACTA, 106, 413-425(2018)	Chemical characterization and radiation exposure from the natural radioactivity in Romanian building materials	Calin, MR; Radulescu, I; Chiper, D; Barna, C; Cimpeanu, C
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源 	MARINE POLLUTION BULLETIN, 127, 654-663(2018)	Elevated concentrations of naturally occurring radionuclides in heavy mineral-rich beach sands of Langkawi Island, Malaysia	Khandaker, MU; Asaduzzaman, K; Bin Sulaiman, AF; Bradley, DA; Isinkaye, MO
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・年作業時間(仮定)=0.8(屋内滞在割合) × 8760時間(年間時間)=7008h ・無限平板線源 	REGULATORY TOXICOLOGY AND PHARMACOLOGY, 89, 215-223(2017)	Baseline evaluation for natural radioactivity level and radiological hazardous parameters associated with processing of high grade monazite	El Afifi, EM; El-Din, AMS; Aglan, RF; Borai, EH; Abo-Aly, MM
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合) × 8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源 	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, 162-163, 166-171(2016)	Chemical distribution of hazardous natural radionuclides during monazite mineral processing	Hamed, MM; Hilal, MA; Borai, EH
<ul style="list-style-type: none"> ・年作業時間(仮定)=0.8(屋内滞在割合) × 8760時間(年間時間)=7008h ・建築仮定 	NUCLEAR TECHNOLOGY & RADIATION PROTECTION, 31, 190-194(2016)	RADIATION HAZARD OF SOLID METALLIC TAILINGS IN SHANGLUO, CHINA	Zhuang, SK; Lu, XW; Li, JT; Li, Q

代替要素（線量パラメータ）の一つである「作業時間」に関するデータがいくつかの文献に記載されていたが、それらのほとんどは国連科学委員会（UNSCEAR）報告書の「居住係数」（屋外滞在割合：0.2、屋内滞在割合：0.8）を基にして算出されたもの、例えば、年間約1800時間（8760時間 × 0.2）あるいは年間約7000時間（8760時間 × 0.8）といった保守的な値であった。一方、Caridiらの報告（ジルコン耐火物）、Gazquizらの報告（酸化チタン）では、作業者の実作業時間に関連した記載があり、それぞれ年間168時間、80時間であった。この値は、RP-122で示されている値（年間1800時間）よりも十分小さいものである。これらの実作業時間に関連するデータは、表9に関連する物質、すなわち対象のレアアース・レアメタル関連物質ではないため、本調査ではRP-122の代替要素として採用しない。一方、実作業時間に関連するデータからも推察されるとおりRP-122の作業時間については保守的に評価されている可能性があり、作業者の実際の線量を評価する際には注視すべき事項と考えられる。

RP-122の吸入被ばくの計算式では、防じんマスクによる粉じん低減のための係数がパラメータとして加えられていないが、我が国では「粉じん障害防止規則」で粉じんが発生する作業では国家検定規格の防塵マスクを装着することが定められており、吸入被ばくは非常に小さいことが予測される。

また、RP-122のシナリオでは経口被ばくが生じることが想定されているが、通常、作業者は作業着などを着用するほか、作業環境で飲食することはないため、経口被ばくも想定されない項目と考えられる。

したがって、

- ・ マスクの装着（吸入被ばくが低減される）

※国家検定規格の防じんマスクの粉じん除去率は種類によって異なるがいずれも80%以上であり、吸入被ばくを8割低減できるとした。

- ・ 経口被ばくしない

を仮定して線量を評価することとし、その結果を表11-1（濃度平均値から計算した線量値）、表11-2（濃度最大値から計算した線量値）に示す。

粉じんを伴う作業シナリオ、例えば屋内加工では線量は約40%に低減された。一方で、粉じんが線量にあまり寄与しないシナリオ、例えば建築ではいずれの物質も年間1mSvを超えた。これらの線量は、シナリオ計算で算出された値であり、過去の放射線審議会の報告を鑑みれば【原子力規制委員会、第153回放射線審議会、2021】、実際の作業者の被ばくは小さくなる傾向にあるかもしれない。いずれにしても、表11-1、表11-2の線量は、シナリオに基づく計算値であり、これらのデータの扱いには注意が必要である。

表11-1-1.代替要素を考慮した線量計算値（レアアース・レアメタル）濃度平均値を用いた場合

単位mSv/y

物質名	作業シナリオ																																	
	輸送			屋内貯蔵			屋外貯蔵			屋外加工			屋内加工			埋立て			道路建設			建設												
	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	合計									
その他希土類金属の化合物	1.E+01	1.E-01	0.E+00	1.E+01	9.E+00	2.E+00	0.E+00	1.E+01	9.E+00	1.E+01	9.E+00	0.E+00	1.E+01	9.E+00	2.E+00	0.E+00	1.E+02	2.E+00	0.E+00	1.E+02	9.E+01	2.E+00	0.E+00	9.E+01	2.E+02	1.E+00	0.E+00	2.E+02						
	2.E+01	2.E-03	0.E+00	2.E-01	1.E-01	3.E-02	0.E+00	2.E-01	1.E-01	7.E-02	0.E+00	2.E-01	1.E-01	3.E-02	0.E+00	2.E-01	2.E+00	3.E-02	0.E+00	2.E+00	1.E+00	3.E-02	0.E+00	1.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00						
	2.E+00	2.E-02	0.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	4.E-01	0.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	9.E-01	0.E+00	3.E+00	2.E+00	4.E-01	0.E+00	2.E+01	4.E-01	0.E+00	2.E+01	2.E+01	4.E-01	0.E+00	2.E+01	3.E+01	2.E-01	0.E+00	3.E+01					
レアアース産業における副産物	2.E+01	2.E-01	0.E+00	2.E+01	1.E+01	3.E+00	0.E+00	2.E+01	1.E+01	6.E+00	0.E+00	1.E+01	3.E+00	0.E+00	2.E+01	1.E+01	3.E+00	0.E+00	2.E+02	3.E+00	0.E+00	1.E+02	3.E+00	0.E+00	1.E+02	2.E+02	0.E+00	0.E+00	2.E+02					
	6.E-02	6.E-04	0.E+00	6.E-02	5.E-02	1.E-02	0.E+00	6.E-02	5.E-02	5.E-02	0.E+00	5.E-02	1.E-02	0.E+00	7.E-02	5.E-02	1.E-02	0.E+00	6.E-02	6.E-01	1.E-02	0.E+00	7.E-01	5.E-01	1.E-02	0.E+00	5.E-01	9.E-01	5.E-03	0.E+00	9.E-01			
	1.E+00	1.E-02	0.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E-01	0.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	0.E+00	1.E+00	2.E-01	0.E+00	1.E+00	1.E+00	0.E+00	1.E+00	1.E+00	6.E-02	6.E-01	1.E-02	0.E+00	7.E-01	5.E-01	1.E-02	0.E+00	5.E-01	9.E-01	5.E-03	0.E+00	9.E-01		
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱、ニオブ、タンタル、バナジウム産業における副産物	1.E+00	1.E-02	0.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E-01	0.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	0.E+00	1.E+00	2.E-01	0.E+00	1.E+00	1.E+00	0.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+01	2.E-01	0.E+00	1.E+01	2.E-01	0.E+00	1.E+01	0.E+00	2.E+01	1.E-01	0.E+00	2.E+01	
	7.E+01	7.E-01	0.E+00	7.E+01	6.E+01	1.E+01	0.E+00	7.E+01	6.E+01	6.E+01	0.E+00	6.E+01	1.E+01	0.E+00	6.E+01	6.E+01	0.E+00	6.E+01	6.E+01	6.E+01	6.E+01	7.E+01	7.E+02	1.E+01	0.E+00	8.E+02	5.E+02	1.E+01	0.E+00	5.E+02	1.E+03	6.E+00	0.E+00	1.E+03
	7.E+01	7.E-01	0.E+00	7.E+01	6.E+01	1.E+01	0.E+00	7.E+01	6.E+01	6.E+01	0.E+00	6.E+01	1.E+01	0.E+00	6.E+01	6.E+01	0.E+00	6.E+01	6.E+01	6.E+01	6.E+01	7.E+01	7.E+02	1.E+01	0.E+00	8.E+02	5.E+02	1.E+01	0.E+00	5.E+02	1.E+03	6.E+00	0.E+00	1.E+03

表11-2. 代替要素を考慮した線量計算値（レアアース・レアメタル）濃度最大値を用いた場合

単位mSv/y

物質名	作業シナリオ																									
	輸送			屋内貯蔵			屋外貯蔵			屋外加工			埋立て			道路建設			建築							
	外部	経口	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計	外部	吸入	合計					
その他希土類金属類の化合物	1.E+02	1.E+00	0.E+00	1.E+02	1.E+01	0.E+00	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	2.E+01	0.E+00	1.E+03	1.E+03	2.E+01	0.E+00	1.E+03	2.E+03	1.E+01	0.E+00	2.E+03		
	6.E-01	6.E-03	0.E+00	6.E-01	4.E-01	1.E-01	0.E+00	6.E-01	4.E-01	5.E-02	0.E+00	5.E-01	4.E-01	2.E-01	0.E+00	7.E-01	7.E-01	6.E-01	1.E-01	0.E+00	6.E+00	4.E+00	1.E-01	0.E+00	8.E+00	
	7.E+00	8.E-02	0.E+00	7.E+00	6.E+00	0.E+00	6.E+00	6.E+00	7.E+00	7.E+00	8.E+00	8.E+00	6.E+00	1.E+00	0.E+00	7.E+00	7.E+00	7.E+00	1.E+00	0.E+00	8.E+01	5.E+01	1.E+00	0.E+00	1.E+02	
レアアース産業における副産物	4.E+01	4.E-01	0.E+00	4.E+01	3.E+01	7.E+00	0.E+00	4.E+01	3.E+01	4.E+00	0.E+00	3.E+01	3.E+01	1.E+01	0.E+00	5.E+01	4.E+01	4.E+01	4.E+02	7.E+00	0.E+00	4.E+02	3.E+02	7.E+00	0.E+00	5.E+02
	3.E-01	2.E-03	0.E+00	3.E-01	2.E-01	4.E-02	0.E+00	2.E-01	2.E-01	2.E-02	0.E+00	2.E-01	2.E-01	9.E-02	0.E+00	3.E-01	2.E-01	2.E-01	4.E-02	4.E-02	0.E+00	3.E+00	2.E+00	4.E-02	0.E+00	4.E+00
	3.E+00	3.E-02	0.E+00	3.E+00	3.E+00	6.E-01	0.E+00	3.E+00	3.E+00	3.E+00	0.E+00	4.E+00	3.E+00	1.E+00	0.E+00	4.E+00	3.E+00	3.E+00	3.E+01	6.E-01	0.E+00	4.E+01	3.E+01	6.E-01	0.E+00	5.E+01
ニオブ、タンタル、バナジウム副産物	3.E+02	3.E+00	0.E+00	4.E+02	3.E+02	6.E+01	0.E+00	3.E+02	3.E+02	3.E+02	0.E+00	3.E+02	3.E+02	1.E+02	0.E+00	4.E+02	3.E+02	3.E+02	6.E+01	0.E+00	4.E+03	3.E+03	6.E+01	0.E+00	5.E+03	

Ⅲ. 2.2 「化石燃料由来の残渣」に関する被ばく線量評価及び必要となる文献調査等 (付属説明2)

令和3年度調査の中で基礎情報(放射能濃度など)を整理した「化石燃料由来の残渣」について、以下の事項に係る線量評価及び文献調査等を実施した。

(a) 線量評価

(a) — ① 線量評価条件

Ⅲ. 2.1 (b) — ① — (1) 線量評価条件と同様の条件で化石燃料由来の残渣に関する線量評価を行った。なお、使用した放射能濃度は令和3年度報告書表7の値をU-238系列、Th-232系列、K-40に整理した値(表12)を使用した。

表12. 放射能濃度データ（化石燃料由来の残渣）

物質名	関連産業	物質の種類	輸入量 (トン)	国内生産量 (トン)	U-238系列 &Th232系列 &K40 放射能濃度 データ数	U-238系列			Th-232系列			K-40				
						放射能濃度 (Bq/g)			放射能濃度 (Bq/g)			放射能濃度 (Bq/g)				
						データ数	平均	最小	最大	データ数	平均	最小	最大	データ数	平均	最小
フライアッシュセメント	化石燃料	産業製品		73000	4	4.1E-02	4.0E-02	4.2E-02	2	3.7E-02	3.4E-02	3.9E-02	1	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01
石炭灰	化石燃料	副産物	0	12344000	123	1.8E-01	1.1E-02	2.1E+00	56	7.5E-02	6.0E-03	2.0E-01	37	3.4E-01	8.8E-02	1.1E+00
廃油（石油汚泥な ど）	化石燃料	副産物	1008	332221	60	1.6E+01	0.0E+00	1.2E+02	21	1.3E+01	1.4E-04	1.4E+02	16	1.9E+00	4.3E-03	2.2E+01
亜炭灰	化石燃料	副産物			60	6.4E-01	1.5E-01	1.1E+00	23	4.7E-02	1.3E-03	1.0E-01	20	3.0E-01	9.0E-03	5.0E-01
精油所のスケール	化石燃料	副産物			62	3.4E+01	0.0E+00	9.0E+02	21	4.3E+01	8.0E-04	6.8E+02	5	1.4E+01	8.5E-03	6.5E+01
泥炭灰	化石燃料	副産物			6	6.9E-02	2.6E-02	1.2E-01	2	7.8E-03	4.4E-03	1.1E-02	2	8.9E-02	7.0E-02	1.1E-01
火力発電所からの副 産物	化石燃料	副産物			8	3.3E+00	7.0E-03	1.3E+01	4	1.7E+00	0.0E+00	6.9E+00	4	2.9E+00	3.0E-02	1.1E+01
精油所の製造水	化石燃料	副産物			6	9.0E-01	6.0E-01	1.5E+00	3	5.8E-01	2.5E-01	7.4E-01	0			

(a) ー ② 線量計算値

濃度平均値から計算した線量値を表13-1、濃度最大値から計算した線量値を表13-2に示す。建築シナリオが最も高い線量であるが、いずれのシナリオも概ね同程度の線量値である。

表13-1. 線量計算値（化石燃料由来の残渣）濃度平均値を用いた場合

単位nSv/y

物質名	作業シナリオ																															
	輸送				屋内貯蔵				屋外貯蔵				屋内加工				屋外加工				埋立て				道路建設				建築			
	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計
フライアッシュセメント	8.E-03	4.E-04	1.E-04	8.E-03	6.E-03	6.E-03	3.E-03	2.E-02	6.E-03	6.E-03	3.E-03	2.E-02	6.E-03	6.E-03	3.E-03	2.E-02	8.E-02	6.E-02	6.E-03	9.E-02	8.E-02	6.E-02	6.E-03	9.E-02	6.E-02	6.E-02	6.E-03	7.E-02	1.E-01	3.E-01	3.E-03	1.E-01
石炭灰	2.E-02	1.E-03	5.E-04	3.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	4.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	4.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	4.E-02	2.E-02	2.E-02	2.E-02	1.E-02	2.E-01	2.E-02	1.E-02	2.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E-01	3.E-01	3.E-01	1.E-02	3.E-01
廃油（石油汚泥など）	3.E+00	1.E-01	5.E-02	3.E+00	2.E+00	2.E+00	1.E+00	4.E+00	2.E+00	2.E+00	1.E+00	4.E+00	2.E+00	2.E+00	1.E+00	4.E+00	8.E+00	8.E+00	2.E+00	1.E+00	3.E+01	2.E+00	2.E+00	3.E+01	2.E+01	2.E+01	2.E+01	2.E+01	4.E+01	1.E+00	1.E+00	4.E+01
亜炭灰	5.E-02	3.E-03	2.E-03	6.E-02	4.E-02	4.E-02	3.E-02	1.E-01	4.E-02	4.E-02	3.E-02	1.E-01	4.E-02	4.E-02	3.E-02	1.E-01	3.E-02	3.E-02	3.E-02	1.E-01	6.E-01	5.E-02	5.E-02	6.E-01	4.E-01	4.E-01	4.E-01	4.E-01	5.E-02	5.E-02	5.E-02	5.E-01
精油所のスケール	7.E+00	4.E-01	1.E-01	8.E+00	6.E+00	7.E+00	2.E+00	1.E+01	6.E+00	7.E+00	2.E+00	1.E+01	6.E+00	7.E+00	2.E+00	1.E+01	2.E+00	2.E+01	2.E+01	8.E+01	7.E+01	7.E+01	7.E+01	8.E+01	5.E+01	5.E+01	5.E+01	6.E+01	3.E+01	3.E+01	3.E+01	3.E+01
泥炭灰	7.E-03	3.E-04	2.E-04	7.E-03	5.E-03	5.E-03	3.E-03	1.E-02	5.E-03	5.E-03	3.E-03	1.E-02	5.E-03	5.E-03	3.E-03	1.E-02	3.E-03	3.E-03	3.E-03	3.E-03	7.E-02	5.E-02	5.E-02	8.E-02	5.E-02	5.E-02	5.E-02	6.E-02	9.E-02	9.E-02	9.E-02	1.E-01
火力発電所からの副産物	5.E-01	2.E-02	1.E-02	5.E-01	3.E-01	4.E-01	2.E-01	7.E-01	4.E-01	4.E-01	2.E-01	7.E-01	4.E-01	4.E-01	2.E-01	7.E-01	1.E+00	1.E+00	4.E-01	5.E+00	5.E+00	4.E-01	4.E-01	2.E-01	3.E+00	3.E+00	3.E+00	4.E+00	6.E+00	2.E-01	2.E-01	7.E+00
精油所の製造水	1.E-01	6.E-03	3.E-03	1.E-01	1.E-01	1.E-01	5.E-02	3.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	5.E-02	4.E-01	4.E-01	4.E-01	4.E-01	5.E-02	4.E-01	5.E-02	2.E-01	1.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E+00	6.E-02	6.E-02	2.E+00

表13-2. 線量計算値（化石燃料由来の残渣）測定最大値を用いた場合

物質名	作業シナリオ																										
	輸送			屋内貯蔵			屋外貯蔵			屋内加工			屋外加工			埋立て			道路建設			建築					
	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	外部	吸入	経口	合計		
フライアッシュセメント	8.E-03	4.E-04	1.E-04	9.E-03	6.E-03	7.E-03	3.E-03	2.E-02	3.E-03	1.E-02	3.E-03	7.E-03	6.E-03	2.E-02	3.E-03	7.E-03	7.E-03	3.E-03	2.E-02	8.E-02	6.E-02	7.E-03	7.E-02	1.E-01	3.E-03	1.E-01	
石灰灰	2.E-01	9.E-03	6.E-03	2.E-01	1.E-01	2.E-01	1.E-01	4.E-01	1.E-01	3.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	6.E-01	1.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E+00	1.E+00	2.E-01	1.E-01	2.E+00	3.E+00	8.E-02	1.E-01
廃油（石油汚泥など）	2.E+01	1.E+00	5.E-01	3.E+01	2.E+01	2.E+01	8.E+00	5.E+01	2.E+01	4.E+01	2.E+01	2.E+01	2.E+01	8.E+00	7.E+01	3.E+02	2.E+01	2.E+01	2.E+01	2.E+02	2.E+02	2.E+02	2.E+02	2.E+02	3.E+02	1.E+01	8.E+00
垂灰	1.E-01	4.E-03	3.E-03	1.E-01	7.E-02	8.E-02	5.E-02	2.E-01	7.E-02	2.E-01	5.E-02	3.E-01	1.E-01	4.E-02	1.E-01	4.E-02	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01	1.E-01
精油所のスケール	1.E+02	7.E+00	3.E+00	2.E+02	1.E+02	1.E+02	5.E+01	3.E+02	1.E+02	3.E+02	5.E+01	1.E+02	1.E+02	5.E+01	3.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+02	1.E+01	5.E+01
泥炭灰	1.E-02	5.E-04	3.E-04	1.E-02	8.E-03	9.E-03	6.E-03	2.E-02	9.E-03	2.E-02	6.E-03	2.E-02	9.E-03	6.E-03	2.E-02	1.E-01	9.E-03	6.E-03	1.E-01	9.E-03	6.E-03	1.E-01	9.E-03	6.E-03	1.E-01	9.E-03	6.E-03
火力発電所からの副産物	2.E+00	8.E-02	4.E-02	2.E+00	1.E+00	2.E+00	7.E-01	4.E+00	1.E+00	3.E+00	7.E-01	1.E+00	1.E+00	7.E-01	3.E+00	7.E-01	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E+00
精油所の製造水	2.E-01	9.E-03	5.E-03	2.E-01	1.E-01	2.E-01	8.E-02	4.E-01	1.E-01	3.E-01	8.E-02	1.E-01	1.E-01	8.E-02	6.E-01	8.E-02	2.E-01	2.E-01	2.E-01	2.E+00	2.E+00	2.E-01	2.E-01	2.E+00	3.E+00	9.E-02	8.E-02

(b) シナリオ要素の代替

(b) — ① 代替要素の検討

Ⅲ. 2.1 (b) — ① 代替要素の検討と同様に、

- ・ 希釈率
- ・ 空气中ダストの濃度
- ・ 経口摂取速度
- ・ 年間被ばく時間（年間作業時間）

がRP-122の線量計算における代替要素として挙げられる。前述と同様に表13-2（濃度最大値で計算した線量値）の中で年間1mSv水準を超える物質は表14に示したものになる。

表14. 年間1mSv水準を超える物質（化石燃料由来の残渣）

物質名
廃油（石油汚泥など）
精油所のスケール
火力発電所からの副産物
精油所の製造水

なお、「火力発電所からの副産物」は、主として原油由来の燃焼灰であるため、これらのいずれも石油関連の物質である。これら石油に関連する物質について、

- ・ 希釈率
- ・ 空气中ダストの濃度
- ・ 経口摂取速度
- ・ 年間被ばく時間（年間作業時間）

のデータを文献から調査・抽出した。具体的には下記に示す方法により

行った。

(文献調査の対象と検索)

- ・ 学術誌に掲載された原著論文、すなわち情報として科学的にオーソライズされた原著論文を文献調査の対象とした。
- ・ 原著論文の検索には、学術文献検索データベースweb of science を用いた。「令和3年度調査」の成果報告書の表7のデータは、2013年まで文献を対象としているため2021年までに発刊されたものを対象とした。
- ・ 上述のとおり年間1mSvを超えるもの（表14）は石油関連の物質であるため、検索条件1を『oil』（石油に関連する物質が検索対象となるように、より大きな括りであるoilにする）、検索条件2を『dose』として、さらに検索条件3を『NORM』、あるいは『Natural radionuclides』として文献検索を実施した。なお、検索した文献ツールにより件数された文献件数を表15に示す。

表15. 検索された文献の件数（化石燃料由来の残渣）

検索番号	検索条件 1	検索条件 2	検索条件 3	検索された文献の件数
1	oil	Dose	NORM	35
2	oil	Dose	natural radionuclides	40
総数				75

(引用文献とデータの抽出)

- ・ 検索した文献の要旨とタイトルから、石油産業残渣に関する作業者の被ばくデータの記載がある文献あるいはそれらの記載が推測できる文献を入手し、

- 希釈率
- 空气中ダストの濃度
- 経口摂取速度
- 年間被ばく時間（年間作業時間）

の記載があった場合に、その論文を最終的な引用文献とし、それらの情報を抽出した。

(b) — ② 代替要素の抽出と再線量評価の検討

抽出した一覧表を表16に示す。

表16. 抽出した代替要素（線量パラメータ）のデータ（化石燃料由来の残渣）

線量パラメータ	文献名	文献タイトル	文献著者
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION,298,1267-72(2021)	Multivariate statistical study of technologically enhanced naturally occurring radioactive materials and radiation hazards in crude oil and petroleum products of Ma'rib refinery, Yemen	Ali, MMM; Zhao, HT; Yassin, N; Al-Shami, AA; Alquraishi, W; Alfassatleh, I; Alqudah, O
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION,146,451-463(2021)	Characterization of the health and environmental radiological effects of TENORM and radiation hazard indicators in petroleum waste -Yemen	Ali, MMM; Li, ZG; Zhao, HT; Rawashdeh, A; Al Hassan, M; Ado, M
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES,80,64(2021)	Natural radioactivity assessment around the petroleum-producing areas of The-Qar province, Iraq	Majeed, KF; Salama, E; Elfiki, SA; Al-Bakhat, YMZ
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN,30,12741-12748(2021)	RADIOLOGICAL CHARACTERIZATION OF OIL SHALE IN WADI ALSHALLAL-JORDAN USING GAMMA RAY SPECTROMETER	Kharisat, KM; Abdallah, MJ; Abumurad, KM; Al-Jundi, JSH; Altamimi, MH; Okoor, SA
・年作業時間(仮定)=8760時間(年間時間) ・無限平板線源	PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION,142,308-316(2020)	Radiation safety and environmental impact assessment of sludge TENORM waste produced from petroleum industry in Egypt	Attallah, MF; Abdelbary, HM; Elsofany, EA; Mohamed, YT; Abo-Aly, MM
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA,89,683-688(2017)	NORM Analysis of the Reservoir Sand Section in the Dorado Natural Gas Discovery, Mannar Basin Offshore Sri Lanka	Ratnayake, RMTS; Gamage, SSN; Senadhira, AMADM; Weerasinghe, DA; Waduge, VA
・年作業時間(仮定)=2000h	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY,309,367-371(2016)	MCNP modeling of NORM dosimetry in the oil and gas industry	Wang, SQ; Landsberger, S
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	CHEMOSPHERE,139,30-39(2015)	A century of oil and gas exploration in Albania: Assessment of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORMs)	Xhixha, G; Baldoncini, M; Callegari, I; Colonna, T; Hasani, F; Mantovani, F; Shala, F; Strati, V; Kaceli, MX
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY,136,121-126(2014)	Evaluation of radiation hazard potential of TENORM waste from oil and natural gas production	Hilal, MA; Attallah, MF; Mohamed, GY; Fayed-Hassan, M
・年作業時間(仮定)=8760時間(年間時間) ・無限平板線源	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY,158,421-426(2014)	Naturally occurring radioactive materials (NORM) in ashes from a fuel-oil power plant in Cienfuegos, Cuba, and the associated radiation hazards	Alonso-Hernandez, CM; Bernal-Castillo, J; Morera-Gomez, Y; Guillen-Arrebarrena, A; Cartas-Aguila, HA; Acosta-Milian, R
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES,70,2613-2622(2013)	Evaluation of Naturally Occurring Radioactivity Materials (NORM) of Soil and Sediments in Oil and Gas Wells in Western Niger Delta Region of Nigeria	Agbalagba, EO; Avwiri, GO; Ononugbo, CP
・年作業時間(仮定)=8760時間(年間時間) ・無限平板線源	RADIATION PROTECTION DOSIMETRY,156,481-488(2013)	Activity concentrations of Ra-224, Ra-226, Ra-228 and K-40 radionuclides in refinery products and the additional radiation dose originated from oil residues in Turkey	Parmaksiz, A; Agus, Y; Bulgurlu, F; Bulur, E; Yildiz, C; Oncu, T
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH,20,6331-6336(2013)	Considerable hazards produced by heavy fuel oil in operating thermal power plant in Assiut, Egypt	El-Gamal, H; Farid, M; Mageed, AIA; Hasab, M; Hassanien, HM
・年作業時間(仮定)=1年間=8760時間(年間時間) ・無限平板線源	JOURNAL OF RADIOANALYTICAL AND NUCLEAR CHEMISTRY,295,871-881(2013)	Geochemistry and health burden of radionuclides and trace metals in shale samples from the North-Western Niger Delta	Olise, FS; Onumojor, AC; Akinlua, A; Owoade, OK
・年作業時間(仮定)=0.2(屋外滞在割合)×8760時間(年間時間)=1752h ・無限平板線源	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY,115,107-113(2013)	Evaluation of radiological impacts of tenorm in the Tunisian petroleum industry	Hrichi, H; Baccouche, S; Belgaied, JE

代替要素（線量パラメータ）の一つである「作業時間」に関するデータのみ文献に記載されており、それらは約1800時間あるいは約7000時間といった保守的な値であった。「Ⅲ. 2.1 (c) — ② 代替要素の抽出と再線量評価の検討」と同様に、

- ・ マスクの装着（吸入被ばくが低減される）
- ・ 経口被ばくしない

を仮定して線量を評価することとし、その結果を表17-1（濃度平均値から計算した線量値）、表17-2（濃度最大値から計算した線量値）に示す。

表17-1.代替要素を考慮した線量計算値（化石燃料由来の残渣）濃度平均値を用いた場合

単位:nSv/y

物質名	作業シナリオ																															
	輸送				屋内貯蔵				屋外貯蔵				屋内加工				屋外加工				埋立て				道路建設				建築			
	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計
廃油（石油汚泥など）	3.E+00	3.E+02	0.E+00	3.E+00	2.E+00	5.E+01	0.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	6.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	6.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	6.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	6.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	6.E+00	2.E+00	2.E+00	2.E+00	6.E+00
精油所のスケール	7.E+00	7.E+02	0.E+00	7.E+00	6.E+00	1.E+00	0.E+00	7.E+00	6.E+00	6.E+00	6.E+00	18.E+00	6.E+00	6.E+00	6.E+00	18.E+00	6.E+00	6.E+00	6.E+00	18.E+00	6.E+00	6.E+00	6.E+00	18.E+00	6.E+00	6.E+00	6.E+00	18.E+00	6.E+00	6.E+00	6.E+00	18.E+00
火力発電所からの副産物	5.E-01	4.E+03	0.E+00	5.E-01	3.E+01	8.E-02	0.E+00	4.E-01	3.E-01	2.E-01	0.E+00	4.E-01	3.E-01	2.E-01	0.E+00	4.E-01	3.E-01	2.E-01	0.E+00	4.E-01	3.E-01	2.E-01	0.E+00	4.E-01	3.E-01	2.E-01	0.E+00	4.E-01	3.E-01	2.E-01	0.E+00	4.E-01
精油所の製造水	1.E-01	1.E+03	0.E+00	1.E-01	1.E-01	2.E-02	0.E+00	1.E-01	1.E-01	1.E-01	0.E+00	2.E-01	1.E-01	1.E-01	0.E+00	2.E-01	1.E-01	1.E-01	0.E+00	2.E-01	1.E-01	1.E-01	0.E+00	2.E-01	1.E-01	1.E-01	0.E+00	2.E-01	1.E-01	1.E-01	0.E+00	2.E-01

表17-2. 代替要素を考慮した線量計算値（化石燃料由来の残渣）濃度最大値を用いた場合

単位mSv/y

物質名	作業シナリオ																																							
	輸送				屋内貯蔵				屋外貯蔵				屋内加工				屋外加工				埋立て				道路建設				建築											
	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計	外部	吸入	経口	合計								
廃油（石油汚泥など）	2.E+01	2.E-01	0.E+00	2.E+01	2.E+01	4.E+00	0.E+00	2.E+00	2.E+01	2.E+01	2.E+00	0.E+00	2.E+01	2.E+01	2.E+00	0.E+00	2.E+01	2.E+01	2.E+00	0.E+00	2.E+01	2.E+01	2.E+00	0.E+00	2.E+02	4.E+00	0.E+00	0.E+00	2.E+02	3.E+02	2.E+00	0.E+00	3.E+02	2.E+00	0.E+00	3.E+02				
精油所のスケール	1.E+02	1.E+00	0.E+00	1.E+02	1.E+02	3.E+01	0.E+00	1.E+00	1.E+02	1.E+02	1.E+00	0.E+00	1.E+02	1.E+02	1.E+00	0.E+00	1.E+02	1.E+02	1.E+00	0.E+00	1.E+02	1.E+02	1.E+00	0.E+00	1.E+03	3.E+01	0.E+00	0.E+00	1.E+03	2.E+03	1.E+01	0.E+00	2.E+03	1.E+01	0.E+00	2.E+03				
火力発電所からの副産物	2.E+00	2.E-02	0.E+00	2.E+00	1.E+00	3.E-01	0.E+00	2.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E+00	0.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E+00	0.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E+00	0.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E+00	0.E+00	1.E+01	3.E-01	0.E+00	0.E+00	1.E+01	2.E+01	2.E+01	0.E+00	2.E+01	2.E+01	2.E+01	0.E+00				
精油所の製造水	2.E-01	2.E-03	0.E+00	2.E-01	1.E-01	3.E-02	0.E+00	2.E-01	1.E-01	1.E-01	2.E-01	0.E+00	1.E-01	1.E-01	2.E-01	0.E+00	1.E-01	1.E-01	2.E-01	0.E+00	1.E-01	1.E-01	2.E-01	0.E+00	1.E-01	1.E-01	2.E-01	0.E+00	1.E+00	3.E-02	0.E+00	0.E+00	1.E+00	3.E+00	1.E+00	1.E+00	2.E-02	0.E+00	0.E+00	3.E+00

粉じんを伴う作業シナリオ、例えば屋内加工では線量は約40%に低減された。その一方で、粉じんが線量にあまり寄与しないシナリオ、例えば建築ではいずれの物質も年間1mSvを超えた。

化石燃料の場合、年間1mSvを超える物質がスケール、残渣等の副産物に限定されるため、被ばくが生じるケースは限定的かもしれない。表17-1、表17-2の値は典型的なシナリオで算出されたものであり、実際の作業者の被ばくは小さくなるかもしれない。いずれにしても、表17-1、表17-2の線量は、シナリオ計算に基づく値であり、これらのデータの扱いには注意が必要である。

IV. 今年度の成果の概要

NORMからの被ばく管理の在り方について国際的に考え方の整備が進められている中、我が国においても放射線審議会において検討が進められている。このような状況の中、本調査では令和3年度調査の中で調査の優先度が高いとされた「レアアース・レアメタル」、「化石燃料由来の残渣」について、文献調査等を実施した。具体的には下記の通りである。

(1) レアアース・レアメタルに分類される物質に関する文献調査等

(a) (濃度文献調査)

レアアース・レアメタルについて、濃度調査を行い、いくつかの物質について情報を入手し、一覧表に整理した。

(b) (線量評価)

上述の成果を基に、RP-122に示される作業活動のシナリオを参考にして線量評価を行い、それらのデータを示した。

(現実的方法)

線量評価を行うに当たってデータが不足している物質について、現実的な方法、すなわち鉱石等の入手や分析の可能性を示した。

(c) (シナリオの代替)

前項(b)で年間1mSv水準を超える可能性があること示された物質について、現実的なパラメータを文献から調査し、必要に応じて代替して再評価を行い、それらのデータを示した。

(2) 「化石燃料由来の残渣」に関する被ばく線量評価及び必要となる文献調査等

(a) (線量評価)

RP-122 に示される作業活動のシナリオを参考にして線量評価を行い、それらのデータを示した。

(b) (シナリオの代替)

前項 (b) で年間 1mSv 水準を超える可能性があること示された物質について、現実的なパラメータを文献から調査し、必要に応じて代替して再評価を行い、それらのデータを示した。

NORM については様々なデータがあるため被ばくの全容がすでに明らかになっていると認識がなされる場合があるが、取扱う物質の形態や作業環境が種々であることを踏まえると被ばくの実態についてはほとんどが明らかになっていないと解釈される。

したがって、必要なときに、我が国の社会状況を踏まえながら、優先事項の検討・フォローアップを行い、NORM 利用者が NORM をどのようなものなのか知ったうえで自主的な管理等によって取り扱いに注意できるように、NORM の被ばくに関する情報を適宜アップデート・公開しておくことが重要である。NORM の放射能濃度に関する文献情報は、量子科学技術研究開発機構によって開発・運営されている自然起源放射性物質データベース (<https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/index.php>) にデータベース化されており、同 NORM データベースの収録データの更新の際に今回の調査で得られた情報が参考にされることが期待される。