

# 한국토양 내 천연 방사성핵종에 의한 거주민의 방사선피폭평가

## — Evaluation of Radiation Exposure to Residents by Naturally Residing Radionuclides in the Soil of Korea —

부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과 · 경희대학교 원자력공학과<sup>1)</sup>

김정훈 · 김아름<sup>1)</sup> · 고성진 · 황주호<sup>1)</sup>

### — 국문초록 —

한국 토양내 천연방사성핵종 중  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  농도를 분석하여 거주민의 방사선피폭을 평가하였다. 분석결과  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ 은 각각  $15.77 \pm 7.27$ ,  $290.05 \pm 73.92$ ,  $750.30 \pm 165.38$  Bq/kg 값을 나타냈다. 천연방사성핵종 농도를 바탕으로 산출한 흡수선량률은  $213.76 \pm 46.37$  nGy/hr이며, 동일 지역에서 측정한 공간감마흡수선량률은  $123.90 \pm 19.18$  nGy/hr이었다. 천연방사성핵종( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ )을 대상으로 거주민의 유효선량률은  $0.26$  mSv/yr로 나타나 UNSCEAR에서 제시한 세계 평균유효선량률인  $0.07$  mSv/yr보다 높은 값을 나타냈다.

**중심 단어:**  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , 흡수선량률, 유효선량률

## I. 서 론

지각을 구성하는 천연방사성핵종은  $^{238}\text{U}$  series,  $^{232}\text{Th}$  series,  $^{40}\text{K}$ 이며, 그 지역의 토양, 모암 등의 분포에 따라 천연방사성핵종의 농도는 달라진다. 이러한 지각방사선은 우주선과 함께 거주민의 방사선피폭에 영향을 미치는 주된 요인이 된다<sup>1-4)</sup>.

UN 방사선영향과학위원회(이하 UNSCEAR)는 유럽, 아시아, 아메리카 등 각 지역에서 토양, 대기, 식품류 내의 방사성 핵종 준위를 파악하여 보고서를 발간하고 있다. 특히 토양에 대해서는 지각방사성 핵종인  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ 의 농도를 파악·분석하여 선량평가를 수행한다<sup>5)</sup>.

한편, 한국에서는 방사능 비상사고 발생을 대비하고,

인접국으로 인한 대형 방사능 사고에 대처하고자 한국원자력안전기술원을 감독기관으로 하여 12개의 주요도시에 환경방사선/능 측정소를 운영하고 있으며, 각 지방환경방사선/능 측정소에서는 낙진, 강수, 공기, 식품류, 토양 등의 시료에서 방사성 핵종 농도를 분석하고 감시한다<sup>6)</sup>. 그러나, 시료에 따라 분석하는 방사성 핵종은 주로  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ , 전알파, 전베타로 한정되어 있다. 또한, 발전소 부지 내 핵종 감시를 목적으로  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ 를 분석한 사례와 식품류 및 토양에서 Th 분석을 수행한 이력은 있으나 일반 토양 중  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ 을 분석한 사례는 미비한 실정이다<sup>7,8)</sup>.

토양 내 지각방사선을 분석하면 그 지역의 방사성핵종 준위를 파악할 수 있다. 또한, 인체에 미치는 유효선량률을 산출할 수 있으며, 이를 통해 토양에 의한 거주민의 정량적인 선량평가가 가능하다.

이에 본 연구는 한국의 일반토양을 대상으로 천연방사성핵종인  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ 을 분석하였다. 분석 결과값을 바탕으로 흡수선량률과 유효선량률을 파악하여 일반토양에 의한 거주민의 방사선피폭을 평가하였다.

\*접수일(2009년 3월 30일), 1차심사(2009년 5월 23일), 확정일(2009년 5월 28일)

책임저자: 김정훈, (609-757) 부산시 금정구 부곡 3동 9번지  
부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과  
TEL: 051-510-0583, FAX: 051-510-0588  
E-mail: donald@cup.ac.kr

## II. 연구 방법

### 1. 토양시료 채취 및 샘플링 방법

시료 채취는 지방환경방사선/능 측정소 소재지 10곳으로 그 위치는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1. Soil Sampling Sites

일반적인 시료채취는 채취구역을 설정하는 작업부터 시작한다. 시료채취 구역은 지형 특성에 따라 정사각형이나 원을 기준으로 한다. 설정된 채취구역을 일정한 크기로 구분하고, 구분된 위치 중 3~10개 구역을 선택하여 시료를 채취한다. 채취한 시료를 고루 섞어 한 개의 샘플로 제작 한다. 구체적인 시료 채취방법은 3가지로 요약할 수 있다.

- ① 시료 채취 지점을  $25\text{ cm}^2$ 가 되도록 설정하고, 면적당 총 5개의 시료 샘플을 얻어 한 가지 시료로 만드는 방법<sup>9)</sup>
- ② 시료채취 기구를 사용하는 방법으로 시료채취면적을 반경 5m로 설정하고, 내경이 5cm 이고 깊이가 10 cm인 soil collector를 이용하여 면적당 3군데에서 시료를 채취하여 샘플링을 수행하는 방법<sup>10)</sup>
- ③ 시료채취면적을  $1\text{ m}^2$ 로 하고 직경이 5 cm이고 깊이가 3 cm인 core sampler를 이용하여 시료를 채취하는 방법 등이 있다<sup>11)</sup>.

본 연구에서 토양시료는 한국원자력안전기술원에서 지정한 평균토양 채취법 순서를 사용하였다<sup>12)</sup>. 채취지역을  $1 \times 1\text{ m}$ 로 선정하고, 10 cm 간격으로 나누어 총 100여 곳이 되도록 지역을 구분하였다. 깊이가 5 cm인 sampling ring을 이용하여 100곳 중에서 10여 곳을 임의대로 선택하여 시료를 채취하였다. 10개 지점 시료를 섞어서 평균 토양을 만들고  $105^\circ\text{C}$  오븐에서 24시간 건조하여 수분을 증발시켜 시료를 준비하였다<sup>12)</sup>. 준비된 시료는 ASTM C-1000-05 순서를 인용하여 전처리 하여 다음과 같이 계측하였다<sup>13)</sup>.

- ① 동일 지역 토양을 5g씩 Tall 비커 3개에 따로 담고, 무게를 측정한다.
- ② 회수율을 파악하기 위해  $^{185}\text{Re}$  용액을 첨가하여 토양에 점착시킨다.
- ③ 비커에 10 mol 농도의 염산과 질산을 각 25 ml씩 첨가하여 유리덮개를 덮고 4시간 동안 교반시키면서 가열하여 토양시료가 산용액으로 용출되도록 한다.
- ④ 토양시료와 산용액을 분리하기 위해 2,500 RPM으로 5분간 원심분리 하는 것을 1회로 하여 3회 수행한다. 원심분리시에는 3 mol 농도의 질산을 이용한다.
- ⑤ 원심분리한 용액을 모두 회수하고 가열하여 25 ml로 농축시킨다.
- ⑥ 농축된 용액에서 불순물을 제거하기 위해  $450\ \mu\text{m}$  필터로 filtering하여 ICP-MS 로 계측 하였다.

### 2. 핵종분석

토양 중  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ 을 분석하기 위해서는 일반적으로 alpha spectrometry를 이용하여 분석하나, 시료가 환경 시료로 그 안에 존재하는 천연방사성핵종이 미량일 경우 극미량의 원소까지 분석이 가능한 유도결합플라즈마 질량 분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrum : 이하 ICP-MS)가 이용된다.

본 연구 또한 ICP-MS(모델명 : CCTX-10)을 이용하였다. 또한 시료의 정량분석을 위해 한 개의 시료를 3개로 분리하여 분석한 다음 평균을 내어 한 지역의 천연방사성 핵종의 결과 값으로 사용하였다.

### 3. 흡수선량을 및 유효선량을 평가

천연방사성핵종으로부터 인체에 미치는 유효선량을 평가하기 위해서는 1m 높이에서 흡수선량을 평가해야 한다<sup>5)</sup>. UNSCEAR 2000 보고서에는 Table 1과 같이 토

양 중 천연방사성핵종 농도를 1 m 높이에서 흡수선량률로 환산가능한 인자를 제시하였다.

**Table 1.** Absorbed dose conversion factors

Radionuclide	Dose coefficient (nGy/hr per Bq/kg)
<sup>40</sup> K	0.0417
<sup>238</sup> U series	0.462
<sup>232</sup> Th series	0.604

위의 환산인자를 적용하여 1 m 높이에서의 흡수선량률을 산출하는 식은 아래 식 1과 같다.

$$\text{Absorbed dose rate in air(nGy/hr)} = 0.0417S_K + 0.462S_U + 0.604S_{Th} \dots\dots\dots (1)$$

- S<sub>K</sub> : 토양 중 <sup>40</sup>K 농도
- S<sub>U</sub> : 토양 중 <sup>238</sup>U 농도
- S<sub>Th</sub> : 토양 중 <sup>232</sup>Th 농도

유효선량률을 평가하기 위해서는 1 m 높이에서의 공기 중 흡수선량률을 유효선량률로 환산하는 인자와 실외인자(outdoor factor)가 필요하다. 동 보고서에서는 성인에 대해서 1 m 높이에서의 공기 중 흡수선량률을 유효선량률로 환산하는 인자를 0.7 Sv/Gy로, 실외인자(outdoor factor)는 0.2로 제시하고 있다. 또한 이를 이용한 유효선량률은 식 2와 같이 제시하였다.

$$\text{Annual Effective Dose Rate outdoor(mSv/yr)} = D(\text{nGy/hr}) \times 8,760 \text{ hr} \times 0.2 \times 0.7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-6} \dots\dots\dots (2)$$

- D : Absorbed dose in air
- 0.2 : outdoor factor
- 0.7 : 흡수선량률을 유효선량률로 환산하는 인자
- 8,760 : 시간변환(hr)
- 10<sup>-6</sup> : 단위변환

위의 식 (1)과 식 (2)를 이용하여, 천연방사성핵종으로부터 거주민이 받는 방사선피폭을 평가할 수 있다<sup>5)</sup>.

### III. 결 과

#### 1. 핵종농도

지방환경방사선/능 측정소 소재지 10곳의 천연방사성 핵종인 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 농도는 Table 2와 같다. 이를 세부적으로 살펴보면, <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 농도 범위는 각각 8.10~27.97, 194.98~374.31, 509.00~981.00 Bq/kg이며, 평균 농도는 15.77±7.27, 290.05±73.92, 750.30±165.38 Bq/kg로 나타났다.

**Table 2.** Comparison of radioactivity concentration between regions (unit : Bq/kg)

Sampling location (Direction)	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Gangneung (128° 52' 06")	27.97	361.26	881
Gunsan (126° 40' 42")	25.90	354.02	642
Seoul (127° 2' 4")	8.10	374.31	617
Chungju (127° 29' 50")	11.40	247.04	944
Chuncheon (127° 44' 36")	11.14	343.82	981
Gwangju (126° 54' 40")	11.72	357.63	590
Daegu (128° 36' 26")	9.57	198.95	692
Busan (129° 6' 19")	14.33	229.93	750
Jeju (126° 33' 58")	13.82	194.98	509
Daejeon (127° 20' 31")	23.57	238.54	897
Mean±SD	15.77±7.27	290.05±73.92	750.30±165.38

\* 2006년 전국환경방사능조사 <sup>40</sup>K 결과값 인용

측정값을 바탕으로 아시아 지역과 방사능 농도를 비교한 결과는 Table 3과 같다. 먼저 아시아 지역의 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 농도 범위를 살펴보면 각각 33~114, 28~95, 230~530 Bq/kg의 분포를 나타낸다. 본 연구와 비교해 보

있을 때  $^{238}\text{U}$  핵종은 우리나라가 평균보다 낮은 농도를 나타낸 반면  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  핵종은 높은 값을 나타냈다. 평균 농도값이 높은 결과는 한국의 지질대가 천연방사성핵종이 많이 포함되어 있는 화강암지대가 많기 때문이라 판단된다.

**Table 3.** Comparison of the concentration of naturally residing radionuclides in East Asia (unit : Bq/kg)

Region/Country	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Bangladesh	-	-	350
China	41	33	440
Hongkong SAR	84	95	530
India	29	64	400
Japan	33	28	310
Kazakstan	37	60	300
Malaysia	66	82	310
Thailand	66	82	670
This study	15.77	290.05	750.30

## 2. 흡수선량을 비교

기존 지방환경방사선/능 측정소에서는 지상 1 m 높이에 Pressurized Ion Chamber(모델명 : RSS-1013)를 설치하여 흡수선량을 파악하고 있다. Pressurized Ion Chamber를 이용하여 측정한 흡수선량은 연속적으로 자료를 얻어 시간적 변화를 추적할 수 있을 뿐만 아니라, 연속기록의 해석으로 자연방사선과 인공방사선의 판별이 가능하다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 시료를 채취한 장소의 일일 평균 흡수선량률과 식 (1)을 통해 산출한 농도를 비교하였다. 그 결과 토양 속 천연방사성핵종을 분석하여 얻은 농도에서 계산된 지상 1 m 높이의 흡수선량률은 평균 213.76 nGy/hr로 나타났으며, 같은 지역에서 측정한 흡수선량률은 123.90 nGy/hr로 나타났다. 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

흡수선량률의 차이를 파악하기 위해서 동아시아 지역 지상 1 m 높이에서 계산된 흡수선량률과 Pressurized Ion Chamber로 측정된 흡수선량률을 비교하면 Table 5와 같다. 동아시아지역은 지상 1 m 높이의 계산된 흡수선량률과 측정한 흡수선량률 비율이 0.8에서 1.2 범위이며 본 연구에서는 비율이 1.7을 나타냈다.

**Table 4.** Comparison of the absorbed dose rate in Korea (unit : nGy/hr)

Sampling location	Calculated D <sup>**</sup> (nGy/hr)	Measure D (nGy/hr)	Ratio Calculated D/Measure D
Gangneung	267.86	121.00	2.21
Gunsan	252.57	148.00	1.71
Seoul	255.55	133.00	1.92
Chungju	193.84	131.00	1.48
Chuncheon	253.72	148.00	1.71
Gwangju	246.03	124.00	1.98
Daegu	153.44	108.00	1.42
Busan	176.77	108.00	1.64
Jeju	145.38	86.00	1.69
Daejeon	192.46	132.00	1.46
Mean±SD	213.76±46.37	123.90±19.18	1.72±0.25

\*\* 본 연구에서 계산한 흡수선량률(Absorbed dose in air)임

**Table 5.** Comparison of the absorbed dose rate in East Asia

Region/Country	Calculated D (nGy/hr)	Measure D (nGy/hr)	Ratio Calculated D/Measure D
China	58	62	0.9
Hongkong SAR	107	87	1.2
India	69	56	1.2
Japan	45	53	0.8
Kazakstan	65	63	1.0
Malaysia	93	92	1.0
Thailand	62	77	0.8
This study	213.76	123.90	1.7

## 3. 유효선량을 평가

식 (2)를 이용하여 흡수선량률로부터 유효선량률을 평가한 결과, 평균 0.26 mSv/yr를 나타냈다. 본 연구 결과는 UNSCEAR 2000 보고서에서 제시한 전세계 지역의 유효선량률 0.07 mSv/yr보다 약 3.7배 높은 수치를 나타낸다.

**Table 6.** Comparison of the effective dose rate found in each region

Sampling location	Effective Dose rate (mSv/yr)
Gangneung	0.33
Gunsan	0.31
Seoul	0.31
Chungju	0.24
Chuncheon	0.31
Gwangju	0.30
Daegu	0.19
Busan	0.22
Jeju	0.18
Daejeon	0.24
Mean±SD	0.26±0.06

#### IV. 고찰

한국은 유라시아 대륙판 주변에 위치하며 중국대륙 및 일본 도호의 지체구조와 밀접하게 연관되어 있다. 또한 전체적으로 고생대 이전에 생성된 오래된 지층이며 화성암 중 화강암이 넓게 분포되어 있고 경상분지, 영남육괴, 옥천습곡대, 경기육괴의 네 지역으로 구분할 수 있다<sup>14)</sup>.

서울, 강릉, 춘천 지역은 경기육괴이며, 석영, 장석, 백운모 및 각섬석으로 이루어진 심성암이 주로 분포한다. 경상분지 지역은 중생대에 생성된 것으로 주로 퇴적암이며 점토 등의 미립질이 고결된 암석으로 주로 대구 지방에 분포한다. 옥천습곡대는 청주, 대전이 속해 있으며 변성암의 일종인 천매암, 흑운모편암 및 흑색점판암으로 구성되어 있다<sup>14)</sup>.

NCRP report No. 94에 따르면, 지질구조가 화강암으로 한국과 유사한 미국 내 콜로라도 지역은 다른 지질구조 지역보다 <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U, <sup>40</sup>K 농도가 비교적 높게 나타난다. Table 7은 콜로라도 지역 내 암석 중 천연 방사성핵종 분포를 나타낸 것이다<sup>15)</sup>. 또한 화강암은 마그마가 천천히 식으면서 결정구조가 크고 단단해지기 때문에 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th이 충분히 농축되어 다른 지질 구조와 비교하여 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th의 농도가 높게 나타난다<sup>16)</sup>. 생성시기가 오래된 화강암 지질대가 많은 한국의 경우 천연방사성핵종의 농도가 다른 지질대 보다 높을 것으로 예상하였으며, 본 연구 결과 또한 타 지역에 비해 높게 나타났다. 향후 후

속연구를 통해 보다 더 정량적인 자료의 확보가 필요할 것으로 판단된다.

**Table 7.** Distribution of naturally residing radionuclides found in typical base rock in Colorado, U.S.A.

(Unit : Bq/kg)

	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U
Basalt	300	10-15	7-10
Granite	> 1,000	70	40
Shale	800	50	40
Sandy coast	600-900	< 8	10-25
Carbonate rock	70	8	25

#### V. 결론

방사선 방호의 기초는 천연방사성 핵종 분석과 같은 자연방사선에 대한 자료 확보가 필수적이다. 본 연구는 한국 토양 내 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 핵종을 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 흡수선량률을 산출하고, 유효선량률을 평가하였다. 한국토양에서 측정한 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 핵종 농도는 15.77, 290.05, 750.30 Bq/kg로 나타났다. 이를 통해 산출한 흡수선량률은 213.76 nGy/hr이며, 유효선량률은 0.26 mSv/yr이다. 유효선량률 결과는 세계평균 보다 높은 값을 나타냈다. 이러한 결과는 한국의 지질구조가 고생대나 그 이전의 화강암으로 이루어져 상대적으로 <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 농도가 높기 때문이라고 판단된다.

#### 참고 문헌

1. Dragovic S, Jankovic Lj, Onjia A and Bacis G : Distribution of primordial radionuclides in surface soils from serbia and montenegro, Radiation Measurements, 41, 611-616, 2006
2. Florou H, Trabidou G, Nicolaou G : An assessment of the external radiological impact in areas of Greece with elevated natural radioactivity, Journal of Environmental Radioactivity, 93, 74-83, 2007
3. Narayana Y, Somashkarappa HM, Radhakrishna AP, Balakrishna KM, Siddappa K : External gamma radiation dose rates on coastal Karnataka,

- Journal of radiological protection, 14, 257-264, 1994
4. Bolca M, Sac MM, Cokuysal B, Karali T and Ekdal E : Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey, Radiation Measurements, 42, 263-270, 2007
  5. UNSCEAR, 2000. Source and Effects of Ionizing Radiation, 2000
  6. 전국환경방사능조사, 2006, KINS/ER-028, Vol. 38, 2006
  7. 원자력이용시설 주변 방사선 환경 조사 및 평가보고서, KINS/AR-140 Vol. 17
  8. 임수경 : 식품류의 토륨 방사능 농도와 내부피폭선량, 경북대학교 박사학위 논문, 2004
  9. Akhtr N, Tufall M, Choudhry MA, Orfi SD, and Waqas M : Radiation dose from natural and manmade radionuclides in the soil of niab, faisalabad, Pakistan, The Nucleus 41(1-4), 27-34, 2004
  10. Kohshi Dhikasawa, Takao Ishii and Hideo sugiyama : Terrestrial Gamma Radiation in kochi Prefecture Japan, Journal of health Science, 47(4), 362-372, 2001
  11. Diana A, Christopher R, Asa M, Jon B, Mohamad Z, Gediminas A, Goran S, Kristina S and Soren M : Assessment of the environmental contamination with long-lived radionuclides around an operating RBMK reactor station, Journal of Environmental Radioactivity, 90, 68-77, 2006
  12. 전국 지방환경 방사선/능 측정요원 교육자료, KINS, 2006
  13. ASTM C-1000-05, Standard Test Method for Radiochemical Determination of Uranium Isotopes in Soil by Alpha Spectrometry
  14. 신영홍 : 한반도 남부의 중력이상과 화강암의 분포, 지질학회지, 42(3), 383-396, 2006
  15. NCRP report No. 94, Exposure of the population in the United States and Canada from Natural Background Radiation, 1987
  16. El-Arabi AM :  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications, Radiation measurement, 42, 94-100, 2007

---

• Abstract

## Evaluation of Radiation Exposure to Residents by Naturally Residing Radionuclides in the Soil of Korea

Jung-Hoon Kim · Ah-Reum Kim<sup>1)</sup> · Seong-Jin Ko · Joo-Ho Whang<sup>1)</sup>

*Dept. of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, Republic of Korea*

<sup>1)</sup>*Dept. of Nuclear Engineering, College of Advanced Technology, Kyung Hee University*

We investigated the amounts of radiation exposure from  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  which are three major radionuclides naturally residing in soil of the Korean peninsula. The experimental results showed that the concentrations of the radionuclides were  $15.77 \pm 7.27$ ,  $290.05 \pm 73.92$  and  $750.30 \pm 165.38$  Bq/kg respectively. The absorbed dose rate based on the measured concentrations was  $213.76 \pm 46.37$  nGy/hr, while the spatial gamma absorbed dose rate measured in the same region was  $123.90 \pm 19.18$  nGy/hr. The effective dose rate was 0.26 mSv/yr, which is significantly higher than the world average effective dose rate 0.07 mSv/yr provided by the UNSCEAR.

---

**Key Words :**  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , absorbed dose rate, effective dose rate