

우라늄의 체내오염 일상감시에 대한 유도조사준위 설정

Establishment of the Derived Investigation Level in Routine Monitoring for Internal Contamination of Uranium

이종일, 이태영, 장시영
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

우라늄을 취급하는 작업자에 대한 내부피폭 개인감시는 폐 방사능 측정에 의해 성취될 수 있으며, 유도조사준위는 이러한 개인감시 프로그램에서 측정값에 대한 관리기준값으로 이용된다. 그러나 유도조사준위는 감시주기에 따라 달라지며, 특히 우라늄의 경우에는 ^{235}U 존재비에 따라서도 달라진다. 그러므로 우라늄 취급 작업자에 대한 일상감시에 있어서 감시주기 및 ^{235}U 존재비에 따른 폐 방사능의 유도조사준위를 계산하여 설정하였다.

Abstract

Individual monitoring for intakes by inhalation of uranium may be achieved by a lung activity measurement. The derived investigation level is used as a control criterion value for a measured activity in a routine individual monitoring programme. But this derived investigation level is different in the routine monitoring interval and the abundance of ^{235}U . Therefore the derived investigation level based on the monitoring interval and the abundance of ^{235}U was established for the routine monitoring by the lung activity measurement.

1. 서 론

우라늄 채광으로부터 핵연료 가공까지의 과정에서 여러 종류의 우라늄화합물이 발생하며, 이 과정에서 공기오염이 발생하여 흡입으로 인한 체내오염 및 내부피폭이 유발될 수 있다. 자연계에 존재하는 우라늄에는 ^{234}U , ^{235}U 및 ^{238}U 이 혼합되어 있는데 대부분이 ^{238}U 이고, 소량의 ^{235}U (0.72 %)와 ^{234}U (0.0058 %)를 포함하고 있으며, 이중 ^{235}U 만이 천연적인 핵분열성 핵종이다. 기타 ^{232}U , ^{233}U , ^{236}U , ^{237}U 및 ^{239}U 등은 핵변환에 의해 인공적으로 만들어지는 우라늄 동위원소이다. 자연계에 존재하는 우라늄(천연 우라늄)은 선행 핵연료주기 과정을 거쳐 중수로용 핵연료물질로 사용되나, 가압경수로용으로 사용하기 위해서는 천연 우라늄내 ^{235}U 의 존재비(우라늄 100 g 당 각 동위원소의 g)가 낮아 ^{235}U 의 존재비를 높이는 과정이 필요하다. ^{235}U 의 존재비를 높이는 과정을 농축이라 하는데, ^{235}U 의 농축은 우라늄내 각 동위원소의 존재비에 영향을 주며, 이로 인해 농축도에 따라 비방사능이 달라진다. 그러므로 우라늄을 섭취했을 경우 농축도 즉 ^{235}U 의 존재비에 따라 내부피폭선량이 달라진다. 이러한 사항은 내부피폭관리의 관점에서 볼 때 아주 중요한 대목이다.

우라늄을 흡입 섭취하였을 경우 폐에 존재하고 있는 ^{235}U 의 방사능을 측정하여 우라늄의 섭취량을 평가할 수 있고, 이로부터 내부피폭선량 즉 예탁유효선량을 평가할 수 있다. 우라늄을 취급하는 작업자에 대해서는 우라늄의 체내 오염을 감시하기 위하여 주기적으로 폐 방사능을 측정한다. 이러한 일상감시에 의해 개인에 대한 최적의 내부피폭선량 관리가 이루어질 수 있다. 일상감시에서 측정된 방사능은 참고준위의 일종인 유도조사준위와 비교되며, 측정 방사능이 유도조사준위를 초과하였을 경우에는 국부적인 조사가 필요하다. 그런데 우라늄 섭취와 관련된 ^{235}U 의 폐 방사능 측정값에 대한 유도조사준위는 감시주기뿐만 아니라 ^{235}U 의 존재비에 따라 달라지므로 타 핵종에 비해서 설정 과정이 복잡하다.

따라서 본 연구에서는 우라늄 취급 작업자의 폐 방사능 측정을 통한 일상감시에 있어서의 유도조사준위를 감시주기 및 ^{235}U 의 존재비에 따라 설정하였다.

2. 방법 및 재료

가. ^{235}U 의 존재비별 방사능 분율 및 연간섭취한도

우라늄내 ^{235}U 의 존재비(질량 퍼센트)에 따라 ^{234}U 및 ^{238}U 의 존재비는 달라지며, ^{235}U 의 존재비에 따른 우라늄 전 방사능에 대한 ^{234}U , ^{235}U 및 ^{238}U 의 방사능 분율 f_{234} , f_{235} , f_{238} 은 표 1¹⁾과 같다.

표 1. ^{235}U 의 존재비에 따른 우라늄 전 방사능에 대한 ^{234}U , ^{235}U 및 ^{238}U 의 방사능 분율 f_{234} , f_{235} , f_{238}

^{235}U 의 존재비(%)	f_{234}	f_{235}	f_{238}
0.2	0.1848	0.0102	0.8050
0.72	0.4680	0.0234	0.5085
1.28	0.6142	0.0293	0.3565
3.0	0.7862	0.0351	0.1787
3.5	0.8094	0.0357	0.1549
3.7	0.8172	0.0359	0.1470
3.8	0.8208	0.0359	0.1433
20.0	0.9412	0.0361	0.0227
93.0	0.9669	0.0328	0.0003

또한, 우라늄의 연간섭취한도 ALI [Bq]는 식 (1)과 같이 연간허용선량 0.02 Sv를 우라늄 흡입섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수 $e_{inh}(U)$ [Sv/Bq]나누어 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$ALI = \frac{0.02}{e_{inh}(U)} \quad (1)$$

그런데 우라늄 섭취의 경우에는 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 의 세 핵종을 모두 고려해야 하므로 우라늄에 대한 예탁유효선량 환산계수 $e_{inh}(U)$ 는 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 각 핵종에 대한 예탁유효선량 환산계수에 ^{235}U 의 존재비(질량 퍼센트)에 따른 우라늄 전 방사능에 대한 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 의 방사능 분율 f_{234} , f_{235} , f_{238} 을 각각 곱하여 모두 더한 것과 같으며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{inh}(U) = e_{inh}(^{234}\text{U}) \times f_{234} + e_{inh}(^{235}\text{U}) \times f_{235} + e_{inh}(^{238}\text{U}) \times f_{238} \quad (2)$$

여기서 $e_{inh}(^{234}\text{U})$, $e_{inh}(^{235}\text{U})$, $e_{inh}(^{238}\text{U})$ 는 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 각 핵종의 단위 방사능 흡입섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수이며, 이것은 방사능 입자크기 및 흡수형태(Type F, M, S)²⁾에 따라 다르다. 본 연구에서는 방사능 입자크기를 국제방사선방호위원회(ICRP)의 권고치²⁾인 5 μm 로 가정하였다. 또한 흡수형태는 Type M 및 Type S만 고려하였고, 폐 방사능 축적이 거의 불가능한 Type F는 배제하였다. 따라서 $e_{inh}(^{234}\text{U})$, $e_{inh}(^{235}\text{U})$ 및 $e_{inh}(^{238}\text{U})$ 의 값은 각 핵종의 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 Type M 및 Type S에 대한 예탁유효선량 환산계수를 이용하였고, 그 값은 표 2²⁾와 같다.

표 2. ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 의 단위방사능 흡입섭취에 대한 예탁유효선량 환산계수(Sv/Bq)^{a)}

흡수형태	$e_{\text{inh}}(^{234}\text{U})$	$e_{\text{inh}}(^{235}\text{U})$	$e_{\text{inh}}(^{238}\text{U})$
Type M	2.1×10^{-6}	1.8×10^{-6}	1.6×10^{-6}
Type S	6.8×10^{-6}	6.1×10^{-6}	5.7×10^{-6}

a) 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 대한 값

나. 유도조사준위 설정

조사준위는 그 준위를 초과했을 때 그러한 결과의 원인이나 의미를 검토할 필요가 있는 섭취량 또는 예탁유효선량의 준위로 정의되며, 일상감시의 조사준위는 식 (3)³⁾과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned}
 IL_R &= \frac{3}{10} ALI \frac{1}{N} \\
 &= \frac{3}{10} ALI \frac{T}{365}
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 IL_R 는 일상감시에 있어서의 우라늄 섭취량에 대한 조사준위이며, ALI는 우라늄에 대한 연간섭취한도로서 식 (1)에 의해 구할 수 있으며, ^{235}U 의 존재비에 따라 달라진다. 그리고 N은 일정 기간에서의 감시 빈도를 뜻하며, T는 365일 기간에 대한 감시주기(일)를 뜻한다.

이러한 조사준위는 섭취량 평가 결과로부터 개인을 감시 및 관리하기 위한 값이다. 그러나 우라늄 섭취량을 평가하기 이전에 폐 방사능 측정값을 직접 유도조사준위와 비교하여 개인을 감시하고 관리할 수 있다. 이때 유도조사준위는 작업자가 조사준위에 해당되는 양만큼 우라늄을 흡입 섭취하였을 경우에 폐에서 측정될 수 있는 양이다. 그런데 실제로 폐 방사능 측정은 ^{235}U 에 대해서 이루어지므로 ^{235}U 측정값으로부터 유도조사준위를 바로 비교하기 위해서 ^{235}U 에 대한 유도조사준위를 설정해야 한다. 즉 ^{235}U 의 폐 방사능 측정값이 ^{235}U 에 대한 유도조사준위를 초과하면 우라늄 섭취량이 조사준위를 초과한 것으로 간주할 수 있을 것이다. 따라서 우라늄에 대한 유도조사준위에 우라늄 전 방사능에 대한 ^{235}U 의 방사능분율 f_{235} 를 곱하여 ^{235}U 에 대한 유도조사준위를 구하였다. 결국 우라늄 흡입 섭취에 대한 일상감시에 있어서의 폐 방사능 측정값에 대한 유도조사준위 DIL_R 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$DIL_R = IL_R \square m(T/2) \square f_{235} \tag{4}$$

여기서 T는 감시주기이고, $m(T/2)$ 은 우라늄 섭취 후 T/2일 경과 시점에서 폐에서의 섭취량분율이다. 다시 말해서 감시주기 T일의 중간시점에서 우라늄이 섭취 되었다는 가정하에 감시시점에서 폐에서의 섭취량분율을 뜻한다. 우라늄 흡입섭취에 따른 섭취량분율은 내부피폭선량 계산 코드 BiDAS(Bioassay Data Analysis Software)⁴⁾를 이용하여 구하였으며, 이로부터 정리된 감시주기에 따른 $m(T/2)$ 을 표 3에 나타내었다.

표 3. 우라늄 흡입섭취에 대한 폐 방사능 일상감시의 경우 감시주기 및 흡수형태에 따른 섭취량분율 $m(T/2)^a$

흡수형태 감시주기 T (days)	Type M	Type S
7	5.46×10^{-2}	6.16×10^{-2}
14	5.18×10^{-2}	5.95×10^{-2}
30	4.64×10^{-2}	5.54×10^{-2}
60	3.84×10^{-2}	4.94×10^{-2}
90	3.25×10^{-2}	4.50×10^{-2}
120	2.81×10^{-2}	4.18×10^{-2}
180	2.18×10^{-2}	3.76×10^{-2}
360	1.19×10^{-2}	3.20×10^{-2}

a) 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 대한 값

3. 결과 및 고찰

방사능 입자크기가 5 μm 인 우라늄을 흡입 섭취할 경우에 대한 우라늄의 연간섭취한도 ALI를 식 (1)과 식 (2) 및 표 1을 이용하여 ^{235}U 의 존재비에 따라 구한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 우라늄 흡입섭취에 대한 ^{235}U 의 존재비 및 흡수형태별 우라늄 연간섭취한도(Bq)

흡수형태 ^{235}U 의 존재비(%)	Type M	Type S
0.2	1.18×10^4	1.18×10^4
0.72	1.09×10^4	1.09×10^4
1.28	1.05×10^4	1.05×10^4
3.0	1.00×10^4	1.00×10^4
3.5	9.94×10^3	9.94×10^3
3.7	9.92×10^3	9.92×10^3
3.8	9.91×10^3	9.91×10^3
20.0	9.63×10^3	9.63×10^3
93.0	9.57×10^3	9.57×10^3

a) 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 대한 값

우라늄 흡입섭취에 대한 일상감시에 있어서의 폐 방사능 측정값에 대한 유도조사준위를 식 (4)에 의해 계산한 결과는 표 5 ~ 표 6과 같다.

표 5. Type M 우라늄의 폐 방사능 감시주기에 따른 ^{235}U 존재비별 ^{235}U 유도조사준위(Bq)^{a)}

^{235}U 의 존재비 (%) 감시주기 T (days)	0.2	0.72	1.28	3	3.5	3.7	3.8	20	93
7	3.79E-02	7.99E-02	9.63E-02	1.10E-01	1.11E-01	1.12E-01	1.12E-01	1.09E-01	9.85E-02
14	7.21E-02	1.52E-01	1.83E-01	2.09E-01	2.11E-01	2.12E-01	2.12E-01	2.07E-01	1.87E-01
30	1.38E-01	2.91E-01	3.51E-01	4.01E-01	4.06E-01	4.07E-01	4.08E-01	3.97E-01	3.59E-01
60	2.29E-01	4.82E-01	5.81E-01	6.64E-01	6.72E-01	6.74E-01	6.75E-01	6.58E-01	5.94E-01
90	2.91E-01	6.12E-01	7.38E-01	8.44E-01	8.53E-01	8.55E-01	8.57E-01	8.35E-01	7.54E-01
120	3.35E-01	7.06E-01	8.50E-01	9.72E-01	9.83E-01	9.86E-01	9.87E-01	9.63E-01	8.70E-01
180	3.90E-01	8.21E-01	9.89E-01	1.13E+00	1.14E+00	1.15E+00	1.15E+00	1.12E+00	1.01E+00
360	4.26E-01	8.97E-01	1.08E+00	1.24E+00	1.25E+00	1.25E+00	1.25E+00	1.22E+00	1.10E+00

a) 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 대한 값

표 6. Type S 우라늄의 폐 방사능 감시주기에 따른 ^{235}U 존재비별 ^{235}U 유도조사준위(Bq)^{a)}

^{235}U 의 존재비 (%) 감시주기 T (days)	0.2	0.72	1.28	3	3.5	3.7	3.8	20	93
7	1.23E-02	2.67E-02	3.26E-02	3.78E-02	3.83E-02	3.84E-02	3.85E-02	3.79E-02	3.43E-02
14	2.38E-02	5.15E-02	6.29E-02	7.31E-02	7.40E-02	7.43E-02	7.44E-02	7.33E-02	6.63E-02
30	4.73E-02	1.03E-01	1.25E-01	1.46E-01	1.48E-01	1.48E-01	1.48E-01	1.46E-01	1.32E-01
60	8.44E-02	1.83E-01	2.24E-01	2.60E-01	2.63E-01	2.64E-01	2.64E-01	2.60E-01	2.36E-01
90	1.15E-01	2.51E-01	3.06E-01	3.55E-01	3.60E-01	3.61E-01	3.62E-01	3.56E-01	3.22E-01
120	1.43E-01	3.10E-01	3.79E-01	4.40E-01	4.46E-01	4.48E-01	4.48E-01	4.41E-01	3.99E-01
180	1.93E-01	4.19E-01	5.12E-01	5.94E-01	6.02E-01	6.04E-01	6.05E-01	5.96E-01	5.39E-01
360	3.28E-01	7.12E-01	8.69E-01	1.01E+00	1.02E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.01E+00	9.15E-01

a) 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 대한 값

표 5 ~ 표 6에서 볼 수 있듯이 우라늄 흡입섭취에 대한 폐 방사능 일상감시에 있어서의 ^{235}U 측정값에 대한 유도조사준위는 0.012 ~ 1.250 Bq의 분포를 보인다. 이 값들은 일반적인 폐 방사능 검출한도(약 3 Bq)보다 작기 때문에 실제로 폐 방사능이 처음 검출된 경우에는 검출된 것 그 자체만으로도 유도조사준위를 초과한 것으로 보아야 할 것이다. 그러나 해당 감시기간 이전의 감시기간에서의 폐 방사능 측정에서 ^{235}U 가 검출된 적이 있는 경우에는 해당 감시기간의 ^{235}U 방사능 측정값에서 이전에 측정된 ^{235}U 방사능의 잔류 기여분을 제외한 값을 유도조사준위와 비교하여 평가해야 할 것이다.

4. 결론

우라늄을 흡입 섭취하는 작업자에 대한 일상감시에 있어서 ^{235}U 의 폐 방사능 측정값에 대한 유도조사준위 설정 방법을 보여 주었으며, 실제로 방사능 입자크기가 5 μm 인 경우에 대해서 감시주기 (7, 14, 30, 60, 90, 120, 180, 360일) 및 ^{235}U 의 존재비 (0.2, 0.72, 1.28, 3, 3.5, 3.7, 3.8, 20, 93%)에 따른 유도조사준위를 설정하였다. 그 결과 우라늄 흡입 섭취에 대한 폐 방사능 일상감시에 있어서의 ^{235}U 측정값에 대한 유도조사준위는 0.012 ~ 1.250 Bq의 분포로 일반적인 폐 방사능 검출한도보다 낮은 값을 보였다. 따라서 우라늄을 흡입 섭취하는 작업자에 대해 폐 방사능 측정에 의한 일상감시를 할 경우 조사준위에 의한 개인감시가 어려운 것으로 나타났다.

감사의 말씀

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이태영, 장시영, 이종일, 송민영, 내부피폭선량 측정 및 평가, KAERI/CR-148/2002, 한국원자력연구소(2003).
2. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers Replacement of ICRP Publication 54, Publication No. 78, Elsevier Science, Oxford and New York(1997).
3. International Commission on Radiological Protection, Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers: Design and Interpretation, ICRP Publication No. 54(1987).
4. 이종일, 이태영, 장시영, "내부피폭선량 계산 전산코드 개발", 방사선방어학회 2003 춘계학술발표회 논문집(2003).