



수중라돈에 기인하는 건강리스트

1. 머리말

지하수에는 종종 고농도의 라돈이 녹아들어 있을 때가 있다. 이와 같은 지하수 유래의 물을 욕내에서 목욕, 취사, 화장실 등에 사용한 경우 라돈은 수중에서 옥내공기중으로 방출된다. 따라서 수중라돈은 옥내라돈의 농도를 높이는 요인의 하나이다. 또 지하수를 음료수로 이용한 경우, 그것을 마심으로써 라돈 및 그 딸핵종이 체내로 섭취된다. 섭취된 라돈 및 딸핵종은 위로 비롯하여 각 장기·조직에 피폭을 준다. 이와 같이 두가지 경로로부터 인체에 피폭을 주는 수중의 라돈은 공기중의 라돈과 마찬가지로 잠재적인 리스크를 사람에게 주게 된다.

미국 연구 심의회(National Research Council, NRC)로 음료수중의 라돈(²²²Ru)에 기인하는 리스크를 평가한 결과를 "Risk assessment of radon in drinking water"라는 한권의 책으로 정리하여 1999년에 출판하였다. 이 책에 수중라돈에 관한 암사망수에 대하여 다음과 같이 기술되어 있다. 「1998년 미국에는 약 16만명이

폐암으로 사망하였다. 그중에서 1만9천명은 주거내에서 라돈을 흡수하였기 때문에 생긴 것이라고 추정하고 있다. 또, 이들 사망자의 대부분은 흡연자였다. 1만 9천명의 사망자 중 160명의 사망은 주거내에서 사용한 물에서 방출된 라돈을 흡입하였기 때문에 생긴 것이라고 추정하고 있다.

또 라돈을 함유한 음료수의 섭취로 인한 위암은 매우 적어서 약 20명으로 보고 있다. 이에 대하여 다른 원인으로 생긴 위암은 1만 3천명이다.

미국에서도 이와 같이 수중라돈에 기인하는 리스크가 평가되고 그결과가 공표되고 있는데, 일본에서도 이와 같은 검토를 별로 하고 있지 않은 현상이다.

일본에서도 수중라돈농도의 측정은 많이 하고 있지만, 이견들은 지진예지나 수리학 등 지구과학적인 관점에서의 연구, 또는 농도레벨의 조사라는 종류의 연구가 많고 수중라돈에 기인하는 피폭이라는 관점에서의 연구는 적다. 따라서 본보고에는 "Risk assessment of radon in drinking water"의 요약을 해석하는 동시에, 「수중라돈에 기인하는 피폭」이라는 관점에서 일본에서

해의소식



의 연구현황 및 과제를 문제로 삼았다.

2. 미국에서의 음료수중 라돈의 리스크평가

이 장의 내용은, “Risk assessment of radon in drinking water”를 요약한다.

2.1 음료수중 라돈농도의 기준화 및 그 배경

미국에서 수질의 기준은 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에 의하여 규제되고 있다. 규제가 되는 법률은 음료수 안전법(Safe Drinking Water Act, SDWA)이라는 법률이며, 근본은 1974년에 의회를 통과한 것이다. 그 법률이 1986년에 개정되었을 때, 음료수에 대하여 규제해야 할 방사성물질의 하나로써 라돈이 채택되었다. 따라서 EPA는 라돈농도에 관한 기준을 공표해야한다.

그래서 1991년에 EPA는 수중의 방사성물질에 관한 기준을 제안하였다. 라돈은 발암을 야기할 물질이기 때문에 최대오염준위의 목표치(Maximum Contaminant Level Goal, MCLG)는 자동적으로 ‘0’으로 결정하였다. 또 11Bq/L라는 최대오염준위(MCL)는 코스트를 고려한 실행가능하고 또 ‘0’에 가까운 준위라는 점에서 제안되었다. 제안된 기준을 일반시민에게 공개하여 코멘트를 구하였더니 MCL은 1Bq/L이하로 해야한다는 의견에서 740Bq/L이면 된다는 의견까지 갖가지였다. 그러나 대다수는 MCL을 11Bq/L이상의 값으로 하는 것을 희망하였다.

1996년의 음료수 안전법 개정에서 EPA는 국립과학아카데미(National Academy of Science, NAS)와 계약하여 음료수중의 라돈에 관한 리스크 평가를 실행하도록 요구하였다. 따

라서 ①음료수중의 라돈농도와 음료수를 사용함으로써 옥내라돈농도의 증가분과의 관련을 평가할 것, ②그 관련을 근거로 옥내라돈농도의 증가분이 옥외 평균 라돈농도와 같아지는 음료수중 라돈농도를 평가할 것, ③그리하여 ②에서 평가된 수중라돈농도에 비하여 제안된 MCL (11Bq/L)이 작으면 ②에서 평가된 수중라돈농도를 최대오염준위의 대체치(Alternative MCL, AMCL)로서 공표할 것이 요구되었다.

그래서 음료수중 라돈의 리스크 평가에 관한 위원회(The committee on risk assessment of radon in drinking water)가 NRC내에 만들어졌다 (이하 위원회로 약칭). 위원회는 1997년 5월에 발족하여 1997년 7월 14일~15일에 제1회 회합을 가졌다. 그리고 9개월 사이에 6번의 회합을 가졌다. 그 검토결과가 1999년에 “Risk assessment of radon in drinking water”라는 책으로 출판되었다. EPA는 이책에 정리된 결과를 근거로 새로운 MCL을 설정할 것을 요구하였다.

이 책에서 AMCL은 150Bq/L(약 4,000pCi/L)라는 값이 제안되었다. 이것은 미국의 옥외라돈 준위의 산술평균을 $15 \pm 0.3\text{Bq/m}^3$ 으로하여 수중 라돈에서 옥내라돈으로의 기여(수중라돈농도와 물의 사용에 따른 옥내라돈농도 증가분과의 비)를 1×10^{-4} 로 어렵잡았을 때 옥외라돈준위에 의하여 야기되는 리스크보다 큰 리스크를 주지않는 수중라돈준위로서 제안된 값이다.

2.2 기준치가 적용되는 수원

상기의 기준치(MCL, AMCL)를 적용할 대상의 수원에 관해서도 상기 책속에 다음과 같이 기술하고 있다.

「음료수안전법은 개인이 소유하고 있는 우물을 규제하는 것은 아니다. 따라서 법률적으로는 개



인이 소유하고 있는 우물에 대해서 어떤 행위를 할 의무는 없다. 그러나 리스크를 감소시키고 싶다고 생각하고 있는 사람은 우물물을 검사해야 한다. 그 결과, 만약 라돈농도가 AMCL을 상회하고 있으면 라돈을 감소시키는 행동을 취해야 할 것이다. 또, 옥외라돈농도도 측정하여 EPA의 행동준위를 초과하고 있으면 옥내라돈의 저감대책을 고려해야 할 것이다. 그러나 이전의 NRC보고서가 결론 짓고 있는 것처럼 폐암의 리스크 및 라돈에 부수하는 리스크를 감소시키기 위해서는 담배를 끊는 것이 제일 효과적인 방법이다.

25명 이상의 사람이 마시고, 또는 15명 이상의

사람에게 공급하는 우물은 공공수도로 간주되어 규제대상으로 된다. 또, 학교와 같은 특별한 경우에도 수도의 수원을 지하수에 의존하고 있으면 라돈규제의 대상으로 된다.

2.3 수중라돈에 기인하는 리스크의 평가

수중라돈에 기인하는 리스크는 크게 나눠 음료수의 섭취에 의한 리스크와 수중에서 공기중으로 방출된 라돈을 흡입한 리스크로 나뉜다. 위원회는 이들 리스크를 그림1와 같은 흐름으로 평가하고 있다.

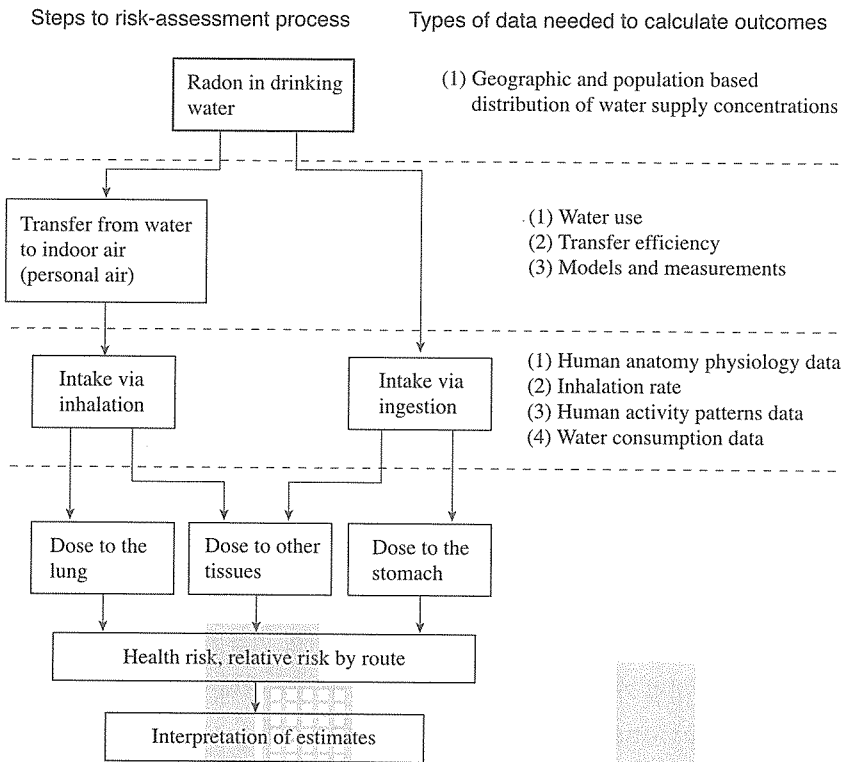


Fig. 1 Steps of risk-assessment process for human exposure due to radon in drinking water, with types of data needed to calculate outcomes.



2.3.1 음료수 섭취에 의한 리스크

라돈, 또는 기타 불활성가스에 관한 체내동태 연구에 의하여 지금까지 다음과 같은 결과를 얻고있다. 섭취로 체내에 들어간 라돈 (또는 불활성가스)은 위장관에서 혈중으로 흡수된다. 라돈이 일단 혈중에 들어가면 혈액의 흐름과 라돈의 용해성의 정도에 따라 라돈은 각 장기로 운반된다.

혈중의 라돈은 폐에서의 가스교환을 통해서 곧 체외로 배설된다.

이와 같은 일련의 경로중에서 위는 섭취한 라돈의 입구기 때문에 특히 주의해야 한다. 라돈 및 그 딸핵종이 위속에서 방출하는 α선의 비중은 위벽의 어느 길이에 존재하는 표적세포에 도달할 만큼 길지 않다. 따라서 위벽으로서의 선량은 위의 내용물에서 위벽으로의 라돈 확산정도에 크게 의존한다.

위와 같은 결과를 기초로 한 위원회에서는 ①위속에서의 라돈확산에 관한 모델 및 라돈의 섭취에서 배출까지의 체내동태모델을 개발하였다. 위속에서의 라돈확산에 관한 모델에는, 위벽의 어느 길이에 존재하는 표적세포의 라돈시간적분농도를 평가하였다. 확산계수를 $5 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 한 경우, 표적세포에 대한 적분농도는 위내용물의 적분농도의 약30%임이 표시되었다. 또 라돈의 섭취에서 배설까지의 체내동태에 관해서는, 조직중의 혈류에 관한 정보 및 혈액과 조직에 대한 라돈의 용해도에 관한 정보를 받아들인 모델이 개발되었다.

이 모델에서는 라돈 딸핵종과 어미핵종의 라돈과에 침탁, 배설에 관한 거동은 별도로 생각하고 있으며, 이 점이 종래의 모델과 다른 점이다.

이들 모델에 의하여 위원회는 라돈농도 $1\text{Bq}/\text{m}^3$ 의 음료수를 일평생 섭취한 경우의 암사망리스크(연령, 성별에 대하여 평균)를 0.2×10^{-8} 로 평가하였다.

2.3.2 흡입에 의한 리스크

라돈의 흡입에 의한 폐암의 리스크는 주로 광산노동자의 연구를 기초로 평가되고 있다. 예를 들면, NRC, NIH (National Institutes of Health) 등의 보고서에서는 7개국에 대한 4에서 11개의 집단에 관한 데이터를 사용하여 리스크를 평가하고 있다. 이들 모델중에서 위원회는 $1.6 \times 10^{-4} \text{Bq}/\text{m}^3$ 의 평가치를 채용하였다. 라돈의 수중에서 공기중으로의 이행계수로써 1×10^{-4} 를 이용하면, 수중라돈 $1\text{Bq}/\text{m}^3$ 당의 리스크는 1.6×10^{-8} 로 평가된다.

2.3.3. 리스크 평가의 정리

위원회에서는 상술한 바와 같이 수중라돈에 의하여 생기는 피폭(흡수 및 음수)에 기인하는 리스크를 평가하였다. 수중라돈 $1\text{Bq}/\text{m}^3$ 에 의하여 생기는 일평생리스크의 수치는 표1과 같다. 이들 수치에서 알수 있듯이 음수에 의한 리스크 보다도 흡입에 의한 리스크 쪽이 훨씬 크다고 평가하고 있다.

Table 1 Lifetime risk posed by exposure to radon in drinking water at 1 Bq m⁻³

Exposure Pathway	Lifetime risk		
	Male	Female	U.S.Population
Inhalation(ever-smokers)	3.1×10^{-8}	2.0×10^{-8}	2.6×10^{-8}
Inhalation(never-smokers)	0.59×10^{-8}	0.4×10^{-8}	0.5×10^{-8}
Inhalation(population)	2.1×10^{-8}	1.2×10^{-8}	1.6×10^{-8}
Ingestion	0.15×10^{-8}	0.23×10^{-8}	0.19×10^{-8}
Total Risk(inhalation and ingestion)	2.2×10^{-8}	1.4×10^{-8}	1.8×10^{-8}



2.4 리스크 저감

수증라돈에 기인하는 리스크를 저감시키기 위하여 다음과 같은 방법이 제안되고 있다. 저감대상으로 되는 수증라돈농도와 MCL 및 AMCL과의 관계에서 세가지 경우를 생각할수 있다. ①수증라돈이 이미 MCL이하인 경우는 아무것도 할 필요가 없다. 1991년에 제안된 MCL(11Bq/L)을 적용하면 미국에 있어서 대다수의 사람이 이 경우에 해당된다. (약 14명에서 1명만이 MCL이상의 농도 물을 일상적으로 소비하고 있다.) ②수증라돈농도가 AMCL(150Bq/L)이상인 경우는 수증라돈을 적어도 AMCL까지 감소 시켜야 한다는 것이 법률적으로 요구된다. ③수증라돈농도가 MCL과 AMCL과의 사이에 있는 경우에는 수증라돈농도를 MCL이하로 감소시키지 않으면 안된다. 또는 EPA에 의하여 승인된 플랜이 있으면, 그 플랜에 따라서 공기중 (또는 수증)라돈농도를 감소시킬 대책을 수립하는 것으로 수증라돈에 기인하는 리스크를 감소시킬 방법을 취할수도 있다.

음료수 안전법에는 MCL과 AMCL과의 사이의 농도를 함유한 공공수도를 가진 자치체에 대하여 공기중이라도 저감을 위한 대책을 맡기고 있다. 각 자치체(주)로 공기중라돈을 저감시키기 위한 프로그램 (Multi Media Approach)을 개발하여 EPA에 제출해도 된다. 여기서 말하는 프로그램의 예로서는 공기중 라돈저감을 위한 일반공중에 대한 교육, 가옥의 라돈농도조사, 교육훈련, 기술적지원, 저감을 위한 예산 등을 들수있다. 이와같은 프로그램으로 달성이 기대되는 리스크의 감소가 각 공공수도를 MCL하나로 정리하였을 때 달성될 리스크의 감소에 비하면 동등하거나 클 때 EPA의 관리라는 프로그램을 승인해야 할 것이다.

1996년의 음료수 안전법의 개정에서 EPA는

이와 같은 프로그램에 관한 가이드라인을 책정하여 그건을 공표할 것이 요구되었다. EPA로 현재 가이드라인을 개발중이다.

3. 일본에서의 수증라돈농도 및 기준치

상술한 바와 같이 미국에서의 수증라돈에 기인하는 리스크가 평가되고 라돈농도기준이 제안·검토되고 있다. 한편, 일본에서의 기준 및 농도준위에 관하여 그 현상을 정리해보면 다음과 같다.

3.1 일본에서의 기준

일본에서도 온천의 한 성분으로서 라돈을 살펴보면 온천법에 따라 온천인지 아닌지, 또 광천분석법지침(환경청)에 따라 의치효과가 기대되는 「요양천」인지 아닌지에 관한 기준은 정해져 있다. 그건을 요약하면 다음과 같다.

①1kg 중에 라돈이 5.5마체(Mache)이상 함유되어 있으면 (수온에 무관) 「온천」이라 정의된다. 또, 라돈 13.3Bq이 1마체에 상당하므로 1Kg중에 라돈이 74Bq이상 함유되어 있는 지하수라면 「온천」인 것이다. ②온천중에도 수온, 질, 성분상 약리학적으로 의치효과가 기대되는 온천을 「요양천」이라 한다. 1kg중에 라돈이 8.25마체(111Bq) 이상 함유되어 있는 것은 「방사능천」(요양천의 일종)에 해당한다. ③「방사능천」은 1978년의 광천분석법지침의 개정에 따라 「미방사능천」(8.25마체이상, 50마체이하) 및 「방사능천」(50마체이상)으로 호칭이 변했다.

또, 온천을 공공적으로 이용하기 위해서는 등록된 분석기관(각시도군의 보건소, 위생연구소 등)에서 온천성분을 분석하여 그 결과를 기록한 신청서를 시도지사에게 제출하여 허가를 받도록 되어 있다. 이 분석방법의 지침이 「광천분석법지침」

해외소식



이다. 이 지침에 따르면 라돈농도로 액체신틸레이션 카운터 또는 IM천효계(泉効計)를 사용하여 측정하도록 되어있다.

위와 같이 온천 또는 요양천이라고 플러스측면에서 본 라돈농도에 관해서는 기준은 있지만, 피폭에 의한 리스크라는 관점에서 본 기준은 없다는 것이 일본의 현상이다.

3.2 일본에서의 수중라돈 농도 준위

일본에서는 많은 연구자가 우물물, 샘물 등을 대상으로 수중라돈농도를 측정하고 있다. 측정방법으로는 액체신틸레이션카운터를 이용하고 있는 예가 많다.

많은 조사연구에서, EPA의 기준을 참조하면 우물물, 샘물 중에서 MCL(11Bq/L)을 초과한 지점은 일본에 많이 존재하고 있으며, 그중에는 AMCL(150Bq/L)을 초과하는 지점도 있다.

4. 맺음

수중의 라돈에 관하여 미국에서의 리스크 평가 결과의 요약과 일본에서의 농도기준 및 농도준위의 개요를 정리하였다. 미국의 농도기준을 그대로 적용하면 일본에서는 그 기준을 웃도는 농도의 음료수, 생활용수가 있는 현상을 생각해 보면, '앞으로 피폭이라는 관점에서 어떠한 검토가 있어야 할 것인가'에 그 구체적인 예를 몇가지 들어 본다.

농도준위의 조사에 관해서도 많은 연구자가 측정결과를 발표하고 있는데 이들 연구보고를 보면, 수중라돈농도의 측정에는 액체신틸레이션카운터가 많이 사용되고 있고 기타 몇가지 방법이 사용되고 있다. 예를 들면, 광천분석법지침에 지정되고 있는 IM천효계나, 공기중 라돈측정용 모니터와 버

블링장치를 조합한 것 등이다. 그 중에서 IM천효계는 광천분석법지침에서 분석기기로서 지정되어 있는 장치인데도 불구하고, IM천효계에 의한 측정치도 다른 장치에 비하면 통계적으로 높은 경향이 보고되어 있다. 따라서 IM천효계를 그대로 사용해도 좋은지의 여부를 검토할 필요가 있다.

라돈농도의 측정방법뿐만 아니라, 피폭선량평가의 관점에서도 과제는 많다. 예를 들면, 라돈의 수중에서 공기중으로의 이행계수 또한 그 장소에 있는 사람에 대한 흡입피폭의 평가이다. 문헌에 의하면, 수중에서 공기중으로의 이행계수는 1/10,000이 표준치로 되어있다. 이 계수를 사용하면 100Bq/L의 라돈을 함유한 물은 공기중 라돈을 10Bq/m³높이게 된다. 그러나 우물물을 목욕에 사용하고 있는 가옥에서 실제로 측정한 예에 의하면, 욕조에 우물물을 놓은 직후의 공기중 라돈농도는 매우 높은 값을 나타냈다. 이것은 수중에서 공기중으로의 이행계수가 물의 사용상황에 따라 크게 달라지는 가능성이 있음을 나타내고 있다. 따라서 피폭 평가를 위해서도 물의 사용상황, 사람의 체재장소 등도 고려해야 할 필요가 있을지도 모른다.

또 하나의 예를 들면, 음수에 의한 피폭선량평가이다. EPA의 평가에 따르면, 라돈섭취(음수)에 의한 리스크는 흡입에 의한 리스크에 비하면 약 8분의 1정도로 평가하고 있다. 그러나 음수에 의한 피폭선량(특히 위에 대한 선량)은 라돈이 체내에서의 반감기에 의존하여 수배정도로 변화할 가능성이 있다. 이 반감기에 관해서는 종래에 생각하였던 반감기 보다 수배 큰 반감기가 관찰된 예도 있다. 이와 같은 라돈의 체내동태, 선량평가에 관해서도 종래의 파라미터를 재검토해야 할지도 모른다. **KRIA**

〈日本 放射線 醫學 總合研究所. T. ISHIKAWA의 :
 RADIOISOTOPES Vol.52, No.4 (2003)〉