

## 지하수 중 자연방사성물질의 위해성 관리에 대한 고찰

신동천\*, \*\*, 김예신, 문지영, 박화성, 김진용, 박선구\*\*

연세대학교 환경공해연구소, \*연세대학교 의과대학 예방의학교실,  
\*\*국립환경연구원 물환경연구부

### International Trends in Risk Management of Groundwater Radionuclides

Dong-chun Shin\*, \*\*, Ye-shin Kim, Ji-young Moon, Hoa-sung Park,  
Jin-yong Kim and Sun-ku Park\*\*

*Institute for environmental research, Yonsei university, Seoul 120-752, Korea*

*\*Dept. of preventive medicine, College of medicine, Yonsei university, Seoul 120-752, Korea*

*\*\*Water Quality Research Dept., National Institute of Environmental Research,  
Incheon 404-170, Korea*

#### ABSTRACT

At present, the health risks associated with the natural radionuclides of ground water have become a concern as potential social problems. However, there are no regulatory actions or control strategies for such risks. Therefore, we have investigated and discussed the risks and associated management strategies for radionuclides in other countries. US EPA has proposed MCL (300 pCi/L) and AMCL (4,000 pCi/L) for radon, and 30 ppb for uranium, 15 pCi/L for gross-alpha and 5 pCi/L for radium as final MCLs. Also, Canada, WHO and European countries have their inherent management levels. Finally, we suggested several criteria for setting guidelines in our countries including exposure related criteria such as geological distribution, occurrence, exposure probability distribution, exposure population and multimedia exposure assessment, acceptable risk, and cost-benefit analysis. The national-scale exposure and risk assessment, and economic analysis should be conducted for producing and aggregating the representative information on these criteria.

**Key words :** Radon, Uranium, Ground water, Regulatory limit, Risk

#### 서 론

먹는 물의 수원을 대부분 지표수에 의존하고 있는 우리나라의 환경특성으로 인해 방사성물질에 관한 문제는 그동안 다른 화학물질에 비해 상대적

으로 관심의 대상에서 떨어져 있었던 것이 사실이다. 최근 지표수의 오염과 수돗물에 대한 불신, 생수 시판, 지하수 자원의 이용문제가 제기되고, 우리나라의 일부지역 지하수 등에서 외국의 제안치 또는 기준치를 초과하는 방사성물질이 검출되어 지하수에 함유되어 있는 방사능 문제가 새로운 환경문제로 이슈화되고 있다.

그러나 방사능 문제는 우리의 관심영역에서 제

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-2-361-5361, E-mail: dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

외되어 있었던 물질이지 어느 날 갑자기 사고로 오염된 문제는 아니라는 관점에서 이 문제는 다루어져야 할 필요가 있다. 즉, 우리가 원치 않아도 노출될 수밖에 없는 자연 발생적 환경문제인 만큼 이를 최소화하고 국민의 건강과 안전을 고려한 수질관리체계 내에서 방사성물질이 관리될 수 있는 방안이 모색되어야 한다.

이에 따라 방사성물질에 대한 수질기준 설정을 비롯하여 최종대책이 마련되기까지는 국민의 건강 보호를 위하여 잠정적인 관리조치의 필요성이 있다. 다른 수질오염물질과는 달리 방사성물질에 대해서는 관리기준이 세계적으로도 보편화되어 있지 않고, 일부 선진국에서만 기준치가 설정되어 있거나 제안치로서 제시되고 있는 실정이다. 따라서 이 논문에서는 외국에 있어서의 먹는물 중 방사성물질의 관리동향을 검토해 봄으로써 우리나라 실정에 적합한 관리대안을 도출하기 위한 기본 자료로서 활용하고자 한다. 또한 관리 기준이나 권고치를 마련하기 위해 고려해야되는 다양한 지표들을 제안하고자 한다.

## 방사성물질의 종류 및 위험성

### 1. 라돈 (Radon)

라돈은 방사성 핵종 Uranium-238 붕괴 계열의 한 구성물로서 전리 방사선 (ionizing radiation)을 방출하는 방사성 기체로 알려져 있다. 라돈은 흡입하는 경우 발암력이 가장 커서 인체에 폐암을 일으킨다고 알려져 있고, NAS (1999)에 따르면 이로 인하여 미국에서 연간 20,000명이 폐암으로 사망한다고 추정하였다. 또한 음용수 중 라돈의 섭취에 의해 위암 발생 위험이 있으나, 실제 음용수 중 라돈이 공기 중으로 방출되어 폐암을 발생시킬 위험성과 비교한다면 훨씬 낮은 수준으로서, 이들의 비율이 각각 11%, 89%를 차지한다 (NAS, 1999).

### 2. 우라늄 (Uranium)

우라늄은 은색 빛의 중금속으로, 자연적으로 흔히 분포되어 있는 방사능을 지닌 물질이다. 또한 암석이나 토양 그리고 천연 물질 등에 주로 존재하며, 모든 사람들이 매일 접하고 있는 공기나 물,

음식 등에서 소량으로 발견된다 (US DOE, 2001). 천연 우라늄의 방사능 동위원소별 농도는  $^{238}\text{U}$ 가 99% 이상으로 (Lederer and Shirley, 1981), 선량적인 영향 역시 우세한 것으로 알려져 있다 (UNSCEAR, 1982).

우라늄으로 인한 건강 영향은 단지 체내에 유입되었을 경우에만 발생할 수 있으며 외부적인 감마선으로 인한 영향은 없는 것으로 알려져 있다. 주된 건강 영향은 용해성 우라늄 화합물의 화학적 독성 (비발암 영향)으로 인한 신장의 손상이며, 둘째로 뼈에 침적된 우라늄의 방사성 붕괴산물과 연관된 영향으로써 골격계에 암을 유발할 수도 있다. 또한 동물실험 결과에 따르면 생식 및 발육 이상이 나타나는 것으로 보고된 바 있으나, 인체에서도 이와 같은 영향이 나타나는지는 아직 확인된 바 없다 (US DOE, 2001).

### 3. 그 외 방사성물질 (Other radionuclides)

각 국가에서 규제하고 있는 방사성물질로는 앞서 설명한 라돈과 우라늄을 제외하고, 라듐 (radium), 전알파 (gross alpha) 등을 들 수 있다.

라듐은 여러 가지 동위원소 (isotopes) 형태 -  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  - 로 존재하며 자연적으로 발생하는 방사성 금속으로, 보통 환경 중에서 저농도 (보통  $1 \text{ pg} \cdot \text{Ra}/1 \text{ g} \cdot \text{soil}$ ) 로 발견되며, 주로 호흡이나 물을 통해 인체로 유입되는 것으로 알려져 있다. 호흡을 통해 폐로 흡수되면 몇 개월 잔류하며 혈류를 통해 서서히 확산되어 다양한 인체 조직 내로 이동하는데, 칼슘과 같은 2가 양이온과 유사하게 행동하기 때문에 특히 뼈로 이동하여 유해영향을 유발하고, 몇 개월 후 매우 소량이 대변과 소변으로 배출된다. 물과 같은 섭취를 통해 노출되는 경우에는 대부분 (약 80%) 이 바로 배출되며, 나머지 약 20%는 혈류로 확산되어 인체, 특히 뼈로 이동하고, 대변이나 소변을 통해 배출된다. 장기간 고농도로 라듐에 노출되면, 빈혈, 백내장, 치아손상, 골수암, 사망 등과 같은 유해한 영향이 유발되기도 한다 (US EPA, 2000b).

원자가 안정한 상태로 되기 위해 붕괴하는 과정에서 알파 입자, 베타 입자, 감마선 형태로 방사능이 발생하는데 이 중에서 알파입자가 방출하면서 발생하는 총 방사능을 전알파 (gross alpha)라 한다.

알파입자는 방사선 중 가장 혼한 형태이지만 무거워서 투과성이 매우 낮기 때문에 피부 표면을 통과하지는 못한다. 반면 흡입되거나 섭취되어 내부 장기와 접촉하는 경우에는 유해할 수 있다(US EPA, 2000b). 알파입자는 비교적 단거리를 이동하여 멈추게 되기 때문에, 단거리 내에 에너지가 침적되고 결과적으로 단위 체적당 손상정도가 커지게 되며, DNA와 같은 중요한 부분에 손상을 입혀 유전정보나 기본적인 생체과정에 변형을 유도할 수 있고, 이로 인해 결국에는 암이 유발되거나 노출된 개체 뿐만 아니라 후대에까지 유전적 영향을 미치게 된다(NAS, 1999).

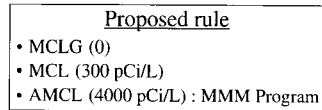
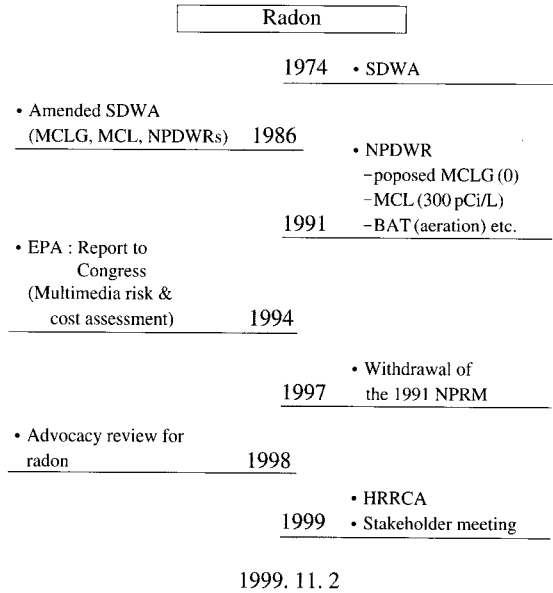
### 방사성물질에 대한 위해성 관리 동향

#### 1. 미국 (US Environmental Protection Agency)

##### 1) 라돈

1974년 미국의 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act; 이하 SDWA)에 방사성물질에 관한 규제가 추가되면서 이들에 대한 관리가 시작되었다. 그후 1986년 개정안의 내용을 반영하여 EPA (Environmental Protection Agency)는 방사성물질에 대한 분석방법, 처리 기술, 물질들의 발생현황, 건강 영향, 위해도에 관한 내용을 정리하였고, 이를 기초로 1991년 7월 18일 라돈과 기타 방사성물질에 관한 NPDWRs (National Primary Drinking Water Regulations)을 제안하게 되었다(US EPA, 1999b). 이 고시안은 공공수계에서의 라돈에 대한 proposed MCLG (Maximum Contaminant Level Goals), 최대 오염허용수준(Maximum Contaminant Level; 이하 MCL), 최적처리기술(Best Available Technology; 이하 BAT), 모니터링, 보고 등의 내용에 대한 자료로 구성되어 있다. 여기서의 proposed MCLG는 “0” 이고, proposed MCL은 300 pCi/L, proposed BAT는 폭기법(aeration)으로 제시하고 있다(US EPA, 1999b).

그러나 1996년 SDWA가 재차 개정되면서, 1997년 8월 6일, EPA는 1991년 제안 내용을 모두 철회하였다. 라돈의 경우 제안된 MCL은 300 pCi/L였으나, 30% 이상의 지역에서 이보다 높은 수준으로 정기적으로 검출되어, 현실적으로 문제가 제기되면서 부적합한 MCL이라 결론짓고, 최종 규정으로 공포



- AMCL : Alternative MCL
- EPA : Environmental Protection Agency
- MCL : Maximum Contaminant Level
- MMM program : Multi-media Mitigation program
- NPDWRs : National Primary Drinking Water Regulations
- BAT : Best Available Technology
- HRRCA : Health Risk Reduction and Cost Analysis
- MCLG : Maximum Contaminant Level Goal
- NPRM : Notice of Proposed Rulemaking
- SDWA : Safe Drinking Water Act

Fig. 1. Regulatory history on radon of drinking water in US EPA.

되지 못하였으며, 결국 전면적인 재검토가 수행되었다. 또한 1999년 2월에 EPA는 건강 위해도 감소 및 비용분석(Health Risk Reduction and Cost Analysis; 이하 HRRCA) 결과를 발표하였고, 같은 해 3월, HRRCA와 MMM (multimedia mitigation) framework에 관한 설명회와 stakeholder meeting을 가졌다(US EPA, 1999b).

이후 EPA는 라돈 노출로부터 국민들의 건강을 보호하면서, 보다 효과적으로 건강 위해도를 저감시키기 위해서 궁극적으로 음용수에 의한 위해성을 감소시킴과 동시에, 상대적으로 기여율이 높은 실내공기에 의한 노출을 감소시키고자 하여 MMM

framework을 적극 도입하였고, 이로 인해 정부의 라돈관리는 탄력적으로 운영 가능해졌다. 따라서, 상기와 같은 개념으로 EPA는 1999년 11월, 음용수 중 라돈에 관한 법률(Proposed radon in drinking water rule)을 제안하게 되었다(US EPA, 1999b; Fig. 1).

제안된 라돈 규정에 새로 포함된 MMM 프로그램이란 음용수 섭취에 의하여 노출되는 라돈 뿐만 아니라, 토양으로부터 실내공기를 통하여 인간에게 노출되는 라돈을 함께 고려하고자 하는 방법이다. 즉 기본 개념은 인체 위해성 관리방법에 기초를 두어, 기존의 MCL과 이보다 높은 기준치를 가지는 AMCL (Alternative MCL, 4,000 pCi/L)을 동시에 인정하고, 만약 실내공기 중의 라돈의 위해성에 역점을 두고 다루는 MMM 프로그램을 수행한다면, 완화된 음용수 중 기준치인 AMCL을 적용할 수 있도록 한 것이다. 여기서 AMCL이란 자연적으로 존재하는 실외공기 중의 라돈농도보다 높지 않게 실내공기 중의 라돈농도를 증가시킬 수 있는 물 속 라돈의 농도를 일컫는다. 4,000 pCi/L는 전 국가적인 조사 결과 평균 실외공기 중 라돈 농도는 0.4 pCi/L 수준이었으며, 연구 결과 라돈의 음용수 중에서 실내공기로의 전이비율은 10,000:1이라는 사실에 근거하여 도출된 값이다(NAS, 1999). 이와 같은 관리방법은 라돈의 독특한 특성을 반영한 것으로서, 주요 노출원이 토양에서부터 실내공기로 방출되는 매커니즘을 가지며, 음용수에서 비롯되는 것은 상대적으로 매우 적다는 것이다. 따라서 음용수 중 라돈에 대한 위해성을 감소시키는 것보다는 실내공기로부터 노출된 라돈에 의한 위해성을 감소시키는 것이 비용-효과면에서 보다 효율적이다(US EPA, 1999b).

## 2) 우라늄 및 기타 방사성물질

미국의 음용수 중 방사성물질에 대한 규정들은 1974년에 만들어진 SDWA에 근거하여 잠정적인 일차적 국가 음용수 규제안(National Interim Primary Drinking Water Regulation)이 1976년에 최초로 공포되었다. 이때의 기준들은 주로 전알파, 라듐(radium-226, radium-228), beta & photon emitters 등 3개 그룹으로 구성되어 있었으며, 1977년 발효되었다. 그 후, 1986년 개정된 SDWA의 요구에 따라 미국환경보호청은 방사성물질에 대해서 국민의 건강문제를 기본으로 하는 수질목표치인 MCLGs

와 NPDWRs를 설정하였으며, 비용을 감안한 기술이 허용하는 범위에서 가능한 목표치에 가까운 MCL을 설정하여 1991년 새로운 규정을 제안하였다(US EPA, 2000a).

그 내용으로는, 모든 방사성물질의 발암영향에 기초하여 MCLG를 0 pCi/L로 설정하였고, 우라늄에 대한 MCL은 동물실험 결과를 통해 도출된 모든 구강섭취로 인한 신장독성의 참고치(Reference Dose, RfD)인 0.6 µg/kg/day (Gilman 등, 1998)를 이용하여 20 µg/L을 제시하였다. 이때, 고려되는 인자는 사람의 체중, 음용수 섭취율, 오염원 상대 기여도(Relative Source Contribution, RSC)로 각각 70 kg, 2 L/day, 0.8을 이용하였다. 제안된 우라늄의 MCL은 EPA가 주장하는 BAT를 이용하여 저감 가능한 농도 수준이다. 그리고 combined 라듐-226과 라듐-228에 대해서 5 pCi/L이었던 것을 분리하여 각각에 대해 20 pCi/L로 설정하였다. Gross alpha의 MCL은 라듐-226, 라돈, 우라늄을 제외시킨 대신에 15 pCi/L로 유지하였으며, 한편으로는 주정부의 판단 하에 오염 가능성이 존재하거나 이미 오염되었다고 생각하는 공동수계에 대한 beta & photon emitters의 모니터링 강화 등 모니터링 주기 및 모니터링 대상 시스템을 보완하였다(US EPA, 2000a).

1996년 SDWA가 다시 개정됨에 따라, 이를 근거로 미국환경보호청은 2000년 11월까지 우라늄에 대한 규정을 최종 결정하기로 하였다. 이에 앞서 2000년 4월 21일에는 음용수 중 방사성물질의 위해도 추정에 사용되어진 모델과 관련된 정보를 NODA (Notice Of Data Availability)로서 공포하였다. 이어서, 음용수 중 우라늄과 기타 방사성물질에 대한 규정들은 2000년 12월 7일에 최종 확정되어 Final Rule로서 공포되었다(US EPA, 2000a; Fig. 2).

확정된 final rule은 combined Ra-226과 Ra-228, Gross α, β입자와 photon 방사능에 대한 1976년의 MCLs을 유지하고, 우라늄에 대해서는 새로운 기준을 공포한 것을 주내용으로 한다(Table 1). 1991년도에 제안되었던 combined Ra-226과 Ra-228에 대한 MCL의 개정은 라듐 감소와 라돈 감소 사이의 cost-effectiveness에 관한 논쟁으로, 각각에 대해 20 pCi/L로서 MCL을 두었던 것을 combined Ra-226, Ra-228에 대해서 5 pCi/L의 MCL 제안치를 설정하게 되었다. 이때, Federal Guidance Report-13 (이하 FGR-13)에 기초하여 위해도를 분석한 결과,

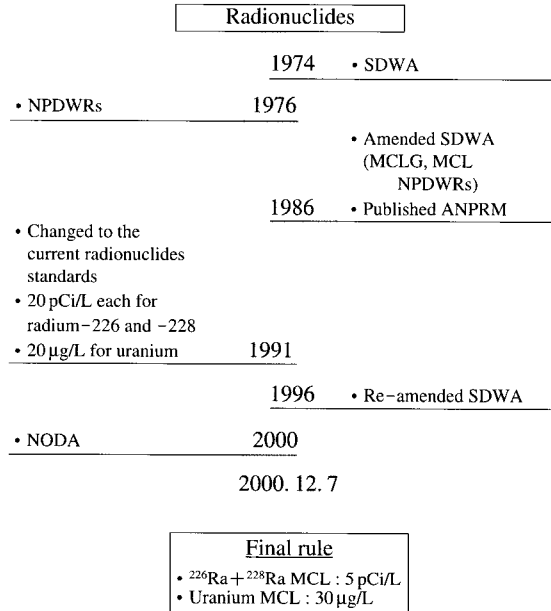
원래 1976년 규정에서 예측했던 위해도 범위 ( $10^{-6}$  ~  $10^{-4}$ )보다 1991년 변경되어 제안된 규제치의 위해도(1991년 제안된 MCL에서의 평생 발암 위해도는  $10^{-3}$ )가 더 높은 것으로 밝혀졌다. 따라서, EPA는 combined Ra-226, Ra-228의 MCL로서 1976년의 규정을 유지하여 5 pCi/L로 결정하였다 (US EPA, 2000a; US EPA, 1999a).

또한 EPA는 우라늄 20 µg/L와 30 µg/L의 인체 노출시 야기되는 신장독성에 유의한 차이가 없다는 연구결과와 비용 측면을 고려하여 우라늄의 최종 MCL로서 30 µg/L를 제시하였다. 이는 SDWA에서 제시한 바에 따라 유용한 기술 및 소요비용을 고려하여, EPA가 각각의 오염물질에 대해서 MCLG에 최대한 근접하게 시행가능한 수준의 MCL을 설정하도록 한다는 것과, 또한 HRRCA에 기반을 두고 MCL로 인한 발생 편익이 소요 비용을 정의하는지의 여부를 관리자가 검토하여 결정한다는 내용에 기초한다. 그 결과, 만약 실행가능한 수준에서 정해진 MCL의 이익이 비용을 정당화할 수 없다면, 실행가능 수준보다는 좀 더 완화된 MCL을 설정하도록 권고하고 있으며, 우라늄의 MCL 30 µg/L가 첫 실례이다. 이러한 방법을 수행함과 동시에, EPA는 비용-편익 뿐만 아니라 결과 해석에 따른 여러 가지 불확실성, 즉 우라늄의 건강영향과 관계된 모든 이용가능한 과학적 정보들을 고려해야 한다고 명시하고 있다. 또한 final rule이 효력을 가지는 것은 이로부터 3년 이후인 2003년 12월 8일부터이다 (US EPA, 2000a).

## 2. 캐나다 (Health Canada)

### 1) 라돈

현재 라돈의 인체건강 위해성 평가에 필요한 라



ANPRM : Advanced Notice of Proposed Rulemaking  
 MCL : Maximum Contaminant Level  
 NPDWRs : National Primary Drinking Water Regulations  
 EPA : Environmental Protection Agency  
 MCLG : Maximum Contaminant Level Goal  
 SDWA : Safe Drinking Water Act

Fig. 2. Regulatory history on radionuclides in drinking water in US EPA.

Table 1. Comparison of the 1976 rule, 1991 proposal, and 2000 final rule

Provision	1976 rule	1991 proposal	2000 final rule
MCLG	-	0 (zero)	0 (zero)
Radium MCL	Combined Ra-226 + Ra-228 MCL of 5 pCi/L	Ra-226 MCL of 20 pCi/L Ra-228 MCL of 20 pCi/L	Combined Ra-226 + Ra-228 MCL of 5 pCi/L
Beta/Photon Emitters MCL	4 mrem/y	4 mrem/y	4 mrem/y
Gross alpha MCL	15 pCi/L excluding U and Rn, but including Ra-226	"Adjusted" MCL of 15 pCi/L excluding Ra-226, Rn and U	15 pCi/L excluding U and Rn, but including Ra-226
Polonium-210 MCL	Included in gross alpha	Included in gross alpha	Included in gross alpha
Uranium MCL	-	20 µg/L (or 30 pCi/L)	30 µg/L
Ra-224 MCL	Included in gross alpha	Included in gross alpha	Included in gross alpha

Sources : US EPA (2000a)

MCLG : Maximum Contaminant Level Goal, MCL : Maximum Contaminant Level

돈 섭취와 관련된 실험 또는 역학연구에 대한 자료는 거의 없는 실정이며, 특히 섭취에 의한 위험성은 흡입에 의한 것에 비해 위험성이 적은 것으로 동물연구를 통해 결론지어졌다. 더욱이 실내공기에 존재하는 라돈 중에 물에서부터 공기 중으로 발산된 라돈은 일반적으로 단지 1~2% 정도이다. 즉, 실내공기를 통한 라돈의 노출은 음용수 중 라돈을 섭취하고 흡입하는 경로에 의한 노출을 훨씬 능가하기 때문에, 음용수 중 라돈에 대한 MAC (maximum acceptable concentration; 이하 MAC)를 설정할 필요성이 없다는 결론을 내렸다. 대신 실내 공기 중의 라돈의 초과허용 농도수준으로서 일반 주거지역의 연평균 농도를 800 Bq/m<sup>3</sup> (= 21.6 pCi/L; 1 Bq = 27 pCi)으로 설정하여, 이 허용농도를 초과하거나 높은 농도의 라돈을 함유하고 있을만한 가능성을 가진 해당 지역의 지하수에 대해서는 조사를 실시하고 있다. 따라서, 캐나다에서는 음용수 중 라돈에 대한 MAC가 아직 구체적으로 정립되어 있지 않은 상태이다 (Health Canada, 2001).

2) 우라늄 및 기타 방사성물질

앞에서 언급한 바와 같이 캐나다의 음용수 중 라돈에 관한 MAC는 아직 설정되어 있지 않은 반면에, 다른 방사성물질에 대한 MAC는 연간 음용수 소비로부터 committed effective dose가 0.1 mSv 이하일 것에 기초하여 산출되었다 (Health Canada, 2001).

음용수 중 방사성물질의 모니터링을 용이하게 하기 위해, 용량의 참고치 (reference level)는 이미

발표된 데이터들로부터 각각의 방사성물질에 대한 활성 (activity) 농도로서 표현되어졌다. 국립방사능 보호원 (National Radiological Protection Board)은 성인과 어린이들에 대한 대사 모델 (metabolic model)과 선량 측정 모델 (dosimetric model)에 기초하여 방사성물질에 대한 DCFs (dose conversion factors)를 계산하였다. 각각의 DCFs는 주어진 방사성물질 1 Bq의 1회 섭취량으로부터 나온 50년간의 committed effective dose를 추정하는 것이다 (Health Canada, 2001).

물 중의 방사성물질의 MAC는 성인의 DCFs와 연간 물 섭취량 (730 L/year, 일일 물 섭취량을 2 L로 하여 산출), 그리고 0.1 mSv의 최대 committed effective dose로부터 도출된다.

$$MAC (Bq/L) = \frac{1 \times 10^{-4} (Sv/year)}{730 (L/year) \times DCF (Sv/Bq)}$$

음용수 중에 방사성물질이 두개 이상일 경우는, 다음의 관계식이 만족되어야 한다.

$$\frac{c_1}{MAC_1} + \frac{c_2}{MAC_2} + \dots + \frac{c_i}{MAC_i} \leq 1$$

여기서, c<sub>i</sub>는 관찰되어진 농도이며, MAC<sub>i</sub>는 최대 허용농도이다. 이를 이용하여 산출된 음용수 중에 존재할 수 있는 자연방사성물질 중 반감기가 1일 이상인 물질에 대한 MAC는 Table 2와 같다. 또한, 물 중에 존재하는 방사성물질을 검출하는데 있어 일차적 스크리닝으로서 gross alpha와 gross beta의 활성을 측정하는데, gross alpha와 gross beta activity

Table 2. Maximum Acceptable Concentrations (MACs) of radionuclides in drinking water

Natural Radionuclides		Half-life (t <sub>1/2</sub> )	DCF (Sv/Bq)	MAC (Bq/L)
Lead-210	<sup>210</sup> Pb	22.3 years	1.3 × 10 <sup>-6</sup>	0.1
Radium-224	<sup>224</sup> Ra	3.66 days	8.0 × 10 <sup>-8</sup>	2
Radium-226	<sup>226</sup> Ra	1600 years	2.2 × 10 <sup>-7</sup>	0.6
Radium-228	<sup>228</sup> Ra	5.76 years	2.7 × 10 <sup>-7</sup>	0.5
Thorium-228	<sup>228</sup> Th	1.91 years	6.7 × 10 <sup>-8</sup>	2
Thorium-230	<sup>230</sup> Th	7.54 × 10 <sup>4</sup> years	3.5 × 10 <sup>-7</sup>	0.4
Thorium-232	<sup>232</sup> Th	1.40 × 10 <sup>10</sup> years	1.8 × 10 <sup>-6</sup>	0.1
Thorium-234	<sup>234</sup> Th	24.1 days	5.7 × 10 <sup>-9</sup>	20
Uranium-234	<sup>234</sup> U	2.45 × 10 <sup>5</sup> years	3.9 × 10 <sup>-8</sup>	4
Uranium-235	<sup>235</sup> U	7.04 × 10 <sup>8</sup> years	3.8 × 10 <sup>-8</sup>	4
Uranium-238	<sup>238</sup> U	4.47 × 10 <sup>9</sup> years	3.6 × 10 <sup>-8</sup>	4

Sources : Health Canada (2001)  
DCF : Dose Conversion Factor

에 대한 제안된 guideline인 0.1 Bq/L, 1 Bq/L 이하로 측정되어지면, 기타 방사성물질은 MACs 이하의 수준일 것이라 가정하였다(Health Canada, 2001).

이들 방사성 물질 중 중금속으로서의 영향을 나타내는 음용수 중 우라늄의 신장 독성에 대한 캐나다의 guideline은 1988년 1월에 MAC 100 µg/L로 제시된 바 있다. 이는 1982년 Gilman 등이 행한 rabbits을 이용한 아만성(subchronic) 독성 실험 결과로 나타난 신장 세뇨관의 병리학적 장애에 대한 NOAEL값인 1.28 µg/kg/day에, 불확실성 상수 500, 체중 70 kg, 물로 인한 우라늄의 노출 상대계수(allocation factor) 0.9, 성인 평균 음용수 섭취량 1.5 L/day을 적용한 것이다(Health Canada, 1999b).

그러나 이는 1998년 4월에 열린 Federal-Provincial Subcommittee on Drinking Water를 통해 개정되었다. 이때 음용수 중 우라늄 MAC의 개정안으로 10 µg/L을 제시하였으며, 이는 90일간 rats를 대상으로 한 독성실험을 바탕으로 한 것이다. 독성 실험결과인 0.6 µg/kg/day (Gilman 등, 1998)의 내성 섭취용량(Tolerated Dose Intake, TDI)과 체중 70 kg, 성인 평균 음용수 섭취량 1.5 L/day, 상대계수 0.35를 적용하여 10 µg/L의 RMAC (Recommended Maximum Acceptable Concentration)을 산출하였다. 이러한 결과를 바탕으로 1998년 12월, 우라늄에 대한 MAC로서 10 µg/L를 최종 공포하였다(Health Canada, 1999b).

그러나 이에 관한 대중들의 의견 및 처리조건에 대한 비용-편익 분석 결과에 입각하여 제안된 MAC은 다시 재검토되었다. 1999년 10월에 열린 Federal-Provincial Subcommittee meeting에서 제기된 의견들에 대한 최종 검토를 거쳐, 음용수 중 우라늄의 guideline을 20 µg/L로 다시 합의하였다. 또한 이 농도치는 우라늄의 특성상 자연적으로 침적되어 농도가 증가 노출될 수 있다는 점까지 고려하여 상대계수를 0.7로 적용하였을 때 산출되는 농도로 좀더 완화된 수준의 농도라 할 수 있다.

산출된 화학적 영향에 기초한 기준치는 방사성 물질로서의 영향에 기초한 기준치보다 질량농도로 비교하였을 때 훨씬 더 낮은 수준으로서 방사성물질로서의 영향에 대해서도 보호적인 수준이 될 수 있다. 이에 2001년 3월 현재, Health Canada에서는 음용수 중 우라늄의 guideline을 IMAC (interim MAC) 20 µg/L으로 설정하였다(Health Canada,

Uranium	
1988	• MAC 100 µg/L
1998	• MAC 10 µg/L (Amended by Federal-Provincial Subcommittee on Drinking Water)
1999	• IMAC 20 µg/L (Review by public comment and cost-benefit analysis)
2000	• Final consensus with Federal-Provincial Subcommittee & Committee on Environmental and Occupational Health
2001. 3.	

IMAC 20 µg/L

IMAC : Interim Maximum Acceptable Concentration  
MAC : Maximum Acceptable Concentration

**Fig. 3.** Regulatory history on uranium of drinking water in Canada.

1999b; Fig. 3).

### 3. WHO (World Health Organization)

#### 1) 라돈

WHO에서는 라돈에 대해서는 다른 방사성물질과는 달리 유효선량(effective dose)을 제시하는데 어려움을 호소하고 있다. 이는 라돈의 특성 때문인데 라돈이 가스상 물질로서 물 중에 함유되어 있다 하더라도 공기 중으로 확산되기 때문에 라돈의 문제는 실내공기와의 연계선상에서 해석되어야 하며 물을 섭취하더라도 소비되는 형태(예, 물을 끓일 경우 공기 중으로 배출) 등을 고려하여야 한다고 하고 있다. 또한, 라돈의 노출은 생활형태, 집의 구조 및 종류 등과 밀접한 관련이 있고, 나라마다 다양하기 때문에 WHO에서 권고수준을 제시하는 것은 거의 불가능한 것으로 보고 있다. 다만 모든 오염원으로부터 발생하는 라돈의 호흡을 통한 노출량은 약 0.1 mSv로서 이것은 자연적 총 방사능 노출량의 약 반을 차지하는 수준으로 보고 있다(WHO, 1998). 이러한 노출량의 0.1 mSv 참고농도 수준을 만족하기 위한 이러한 모든 요인들이 국지적으로, 국가적으로 적절하게 평가되어야 하며, 이

를 위해서는 통합적인 접근방법을 통해 적절한 조치를 취하도록 하고 있다.

2) 우라늄 및 기타 방사성물질

인체의 방사능 노출은 대부분 자연적인 것으로 평균 노출량이 2.4 mSv/year으로 이 중 물에 의해 노출되는 양은 매우 적다고 할 수 있다. 주로 우라늄과 토륨의 붕괴과정에서 자연적으로 발생하는 물질에 의해 노출되는데, WHO에서 추천하는 참고수준은 연평균 노출량으로 0.1 mSv이며 이 수준은 자연계 환경의 기초방사능에 매년 기여하는 평균 effective dose의 5%에도 못 미치는 수준이다 (WHO, 1993b). 0.1 mSv는  $5 \times 10^{-6}$ 에 해당하는 암이 발생할 위해의 노출 수준이라 할 수 있으므로 (WHO, 1998), WHO에서는 그 이하에서는 음용수로서 적합하며 저감 노력이 필요치 않다고 하고 있으며, 실제적으로 총 알파입자에 대해 0.1 Bq/L, 총 베타입자에 대해서는 1 Bq/L의 권장치를 추천하고 있다 (Fig. 4). 농도 산출결과, 베타입자가 1 Bq/L 이상이라 해도, 그 원인의 대부분이 <sup>40</sup>K핵종에 의한 것으로 우리가 음식으로 섭취하는 양에 비한다면 매우 적은 양이며 체내 항상성에 의해 유지되는 수준이기 때문에 별 문제가 없을 것이라고 한다 (WHO, 1998).

특히, WHO에서도 우라늄의 신장 독성영향에 대해 1997년 기준치를 개정하였는데, 기준치 설정에 필요한 주요 연구결과가 부족하고 기술적 달성에 대한 한계 등 현실적 문제를 감안하여 잠정적 기준치를 2 µg/L로 정하였다. 이 수치는 인체와 실험동물에서의 우라늄에 의한 발암성 관련 데이터가 부족하다는 내용 및 우라늄의 화학적 독성에 대한 기준치를 TDI (tolerable daily intake)를 통한 접근을 이용하여 이끌어내었으나, 기준치를 정하는데 있어서 충분한 결과로서 생각하지는 않았다. 여기서 TDI인 0.6 µg/kg/day는 60 µg/kg/day의 LOAEL (Gilman 등, 1998)에 불확실성 계수 (intra-와 interspecies variation)인 100을 적용하여 도출한 것이다. 이는 조직의 기능 및 손상의 정도가 극미하다고 보고되어졌기 때문에 WHO는 NOAEL 대신에 LOAEL을 사용하여 계산하는데 있어 추가적인 불확실성 계수를 적용하지 않았다. 그리고, 신장에서의 우라늄 반감기가 15일이며, 지속적인 노출에 의하여 신장 손상이 악화되어질 수 있는 징후가 없

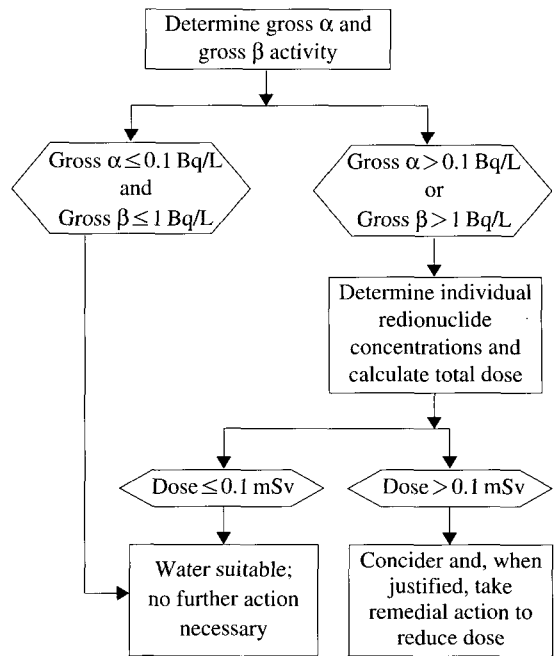


Fig. 4. Management strategy for gross alpha and beta in drinking water (Sources : WHO, 1996).

다고 추정되기 때문에, 91일 간의 장기연구에 대한 추가적 불확실성 계수 또한 불필요하다고 판단하였다. WHO는 60 kg의 성인이 섭취하는 음용수 양을 2 L/day라 가정하고 음용수에 TDI의 10%를 할당하여 기준치인 2 µg/L를 계산하였다. 이것은 처리기술에 도달하는 데에는 어려움이 따르고, 용량-반응 관계에 대한 실험자료의 부족과 병리학적 평가에 대한 정보의 불충분으로 인해 WHO가 잠정적 기준으로서 제시한 것이다 (WHO, 1993b).

4. 유럽 일부 지역

1) 스웨덴 (Sweden)

스웨덴의 경우 약 25%가 지하수를 음용수로 사용하고 있는데, 그 농도가 토양 대수층 내 지하수의 평균 라돈 농도는 270 ~ 8,100 pCi/L 정도이며, 암반을 뚫어서 만든 우물의 경우는 1,350 ~ 13,500 pCi/L 정도 (최대농도 2,403,000 pCi/L)로 조사된 바 있다. 이러한 음용수 중 라돈 관리를 위해 National Food Administration에서는 규제치 (Action Level)로써 2,700 pCi/L로 설정하였다. 이에 따라 2,700 pCi



/L 이하의 지하수만이 사용 가능하나, 2,700~27,000 pCi/L의 라돈이 검출된 음용수의 경우 사용 유보를 권고하고 있고, 27,000 pCi/L 이상 검출시에는 사용을 금지하고 있는 실정이다(SSI, 2000; SSI, 1999). 또한 이에 더불어 가정 주택에서의 실내 라돈 문제를 해결하기 위한 관리를 더욱 엄격하게 실행하고 있는데, 이것은 물 중의 라돈은 자연적으로 급수시설 내 공기나 가정의 실내 공기로 방출되며, 실제 인체에 미치는 영향은 섭취를 통한 라돈 노출에 비해 공기 중 라돈을 흡입할 때 더욱 크기 때문이다(SSI, 2000).

이와 같이 현재 스웨덴에서는 실내공기와 음용수 모두에서 라돈을 저감하기 위한 노력을 동시에 기울이고 있으며, 저감 처리를 진행함에 있어 스웨덴 정부 당국에서 재정적 지원을 하고 있다. 구체적으로 단독주택의 경우 실내공기 중 라돈의 농도가 10.8 pCi/L (= 400 Bq/m<sup>3</sup>)를 초과하면 저감 비용의 약 절반(최대 15,000SEK, 한화 약 1,870,000원)을 보조해주고 있으며, 음용수의 경우 공공 급수시설에서 라돈 농도가 2,700 pCi/L 초과할 때는 처리 비용 전액을, 개인 우물의 경우 27,000 pCi/L 초과할 때는 처리 비용의 절반(최대 5,000SEK, 한화 약 605,000원)을 지원하고 있다(SSI, 2000).

## 2) 노르웨이 (Norway)

스웨덴과 인접한 북유럽 국가 중 하나인 노르웨이의 경우 현재 대부분의 가정에서 지표수를 수원으로 사용하고 있으며, 약 10% 이하의 가정만이 지하수를 사용하고 있다. 하지만 유럽에서 가장 음용수질이 좋지 않아, 노르웨이인의 약 25% 정도가 기준 미달인 물을 마시고, 수인성 질병으로 인해 매년 100,000일 정도의 작업 시간이 손실되고 있다는 문제가 지적되어, 이를 해결하기 위해서 노르웨이 정부는 지표수보다 값이 저렴하고, 원수의 질이 상대적으로 좋은 지하수를 사용할 것을 권장하고 있는 추세이다(David 등, 1998).

따라서 노르웨이에서도 지질대에 따라 지하수에 대하여 광범위한 실태 조사 연구가 수행 중에 있으며, 그 결과 특히 선캄브리아기 화강암 지질대(Precambrian granite)에서 높은 농도로 라돈이 나타난 바 있다. 이러한 실태 조사와 외국의 관리 실태를 바탕으로 규제치(action level)를 13,500 pCi/L (= 500 Bq/L)로 설정하여 권고하고 있다(David 등,

1998).

## 3) 기타 국가

Swedish Radiation Protection Institute (SSI, 1999)의 연구 결과에 따르면, 1997년 말 전세계 42개국을 대상으로 라돈에 대한 관리 실태를 조사한 결과, 먹는물 중 라돈에 대해 관리 기준을 갖고 있는 나라는 앞선 국가들을 비롯하여 조사 유럽국가 32개국 중 체코, 핀란드, 루마니아, 슬로바키아 등이 추가되었다. 이들 국가에서는 대부분 우라늄 함량이 높은 화강암이 모암(bedrock)으로, 여기에 우물을 파고 물을 사용하고 있으며, 이를 관리하기 위한 목적으로 참고치(reference level)를 적용하고 있다(SSI, 1999).

체코의 경우 공공수계에 대해서는 8,100 pCi/L의 enforced level, 1,350 pCi/L의 advisory level로 구분 적용하고 있으며, 개인 수계에 대해서는 저감 조치 여부에 따라 5,400 pCi/L 또는 27,000 pCi/L, 2개의 advisory level을 적용하고 있다. 핀란드는 공공수계에 대해 8,100 pCi/L의 enforced level을, 노르웨이는 13,500 pCi/L의 advisory level을, 러시아는 이용 형태 구분없이 모든 음용수계에 대해 3,240 pCi/L를 참고치로 설정하고 있다. 또한 슬로바키아는 모든 수계에 대해서 1,350 pCi/L의 advisory level과 27,000의 enforced level을 제시하고 있다(SSI, 1999).

## 5. 각국의 방사성물질에 대한 기준치 비교

앞서 설명한 미국, 캐나다, WHO, 스웨덴을 비롯한 유럽국가 등에서의 지하수 중 방사성물질의 기준치를 정리하면 다음 그림과 같다(Fig. 5).

## 6. 국내 방사성 물질의 위해도 관리 방안 제안

현재 우리나라에는 자연 방사성물질에 대한 정의, 관리 목록 및 규제 기준 또는 권고치에 대한 규정이 없었으며, 최근 들어 지하수 중의 방사성물질에 대한 전국 규모의 조사가 시행되고 있다(국립환경연구원, 2002). 그러나 방사성물질의 특성상 지역간, 동일 지역 내 지점간 변이가 크기 때문에 대표성 있는 통계치를 얻기는 쉽지가 않다. 따라서 위해성 평가 결과에 가장 민감한 영향을 주는 오염 농도와 노출 인구에 대한 지속적이고 장기적인

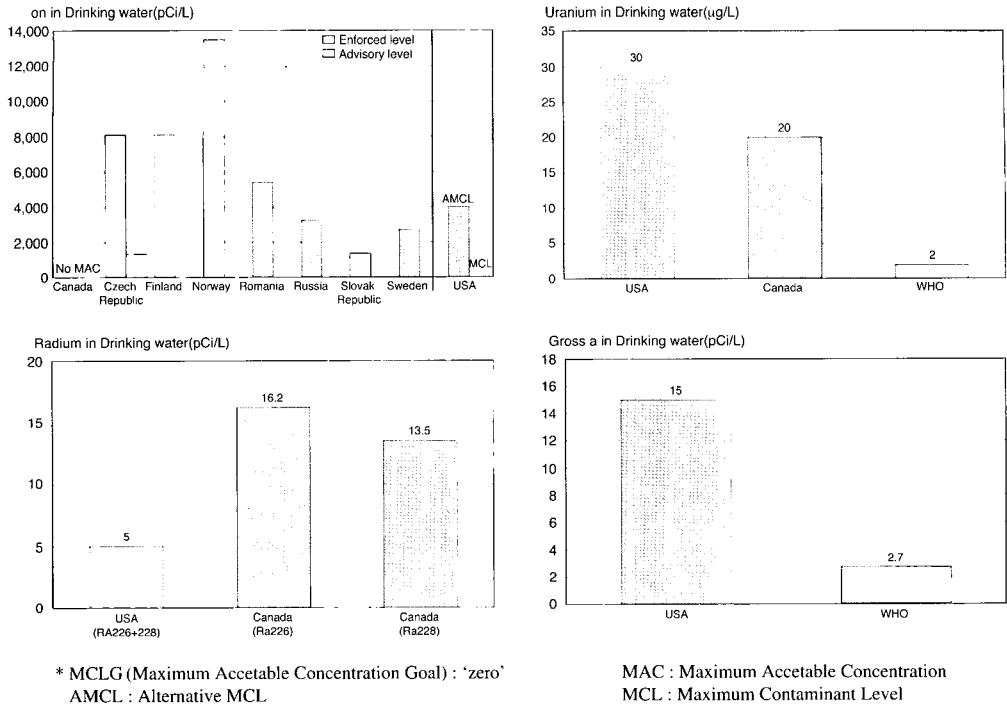


Fig. 5. Comparison of MCLs or recommendation values for radionuclides in various countries.

노출평가가 필요할 것으로 판단된다.

위와 같이 장기간의 대표성 있는 노출 자료가 축적이 되면, 방사성 물질에 대한 위해성 평가를 통해 우선적으로 문제가 되는 물질을 선별하고, 위해성이 높은 물질부터 위해도 감소를 위한 관리 전략(risk reduction strategy)을 수행해야 할 것이다. 관리 전략 중 중요한 일차적 단계로서 방사성물질에 대해 우리나라에 적절한 기준 또는 권고치를 마련하는 작업이 필요하다.

선진국의 경우는 기준 또는 권고치를 마련하는데에 장기간의 연구나 조사를 통해 수차례에 걸쳐 수정·보완하거나 확정하여 공표하고 있다(국립환경연구원, 2002). 이러한 장기간의 역사적 배경에 비하면 우리나라의 경우는 노출 양상을 파악하고 위해성 자료를 수집·분석하는 초보적인 단계에 있으므로, 단기간에 방사성물질 관리를 위한 일차적 목표를 달성하기 위해서는 현 상황에서 가능한 정보를 집약하고 분석하여 논리적인 전개를 통해 국내에 적합한 기준이나 권고치를 제안할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해 노출, 위해도 및 비용을 포함하는 몇 가지 논리적인 판단 지표를 제안

하고자 한다.

방사성 물질의 발생과 노출(occurrence and exposure)과 관련된 지표로서, 첫 번째 지표는 해당 지역의 지질학적인 분포(geological distribution)이다. 자연적으로 특정 방사성물질의 함유량이 많은 지질대의 경우는 인위적인 감소 조치에는 한계가 있으므로 현실적으로 이러한 지역의 관리수준은 자연 함유량이 적은 지역보다 높은 수준으로 결정될 수 있다. 따라서 지역의 지질학적 특성을 면밀히 조사하여야 한다.

두번째 판단 지표는 해당 환경 매질 내 농도 분포를 분석한 자료이다. 해당 방사성 물질의 오염도에 대한 누적 확률분포에서 임의 농도에서의 초과율을 고려하여 현실적으로 행정적, 공학 처리 및 분석 기술 수준을 감안한 관리 가능한 수준이어야 한다. 예를 들면, 전국 조사에서 라돈이 1,000 pCi/L에 대한 초과율이 50%라고 하면 현실적으로 기준 제한치를 1,000 pCi/L 이하로 설정하는 것은 행정적으로 달성하기 힘든 목표 수준이다. 따라서 최대한 자료를 수집하여 농도 분포를 분석하는 것은 기준 설정을 위한 중요한 정보를 제공한다.

세 번째 지표는 노출 인구 집단의 특성이다. 즉 지하수를 사용하는 노출인구수를 고려하여야 한다. 노출 인구수, 즉 급수 인구수가 많은 경우는 일정 처리 후 공급하거나, 지표수를 혼합·희석하여 방사성 물질을 상당량 감소시켜 지역 또는 공공 급수체계 (community or public water system)를 통해 많은 사람에게 보급하는 형태로 (US EPA, 1999b), 이 경우에는 특정 처리가 가해지기 때문에 관리 기준을 완화할 수 있다. 그러나 우리나라의 경우는 대부분의 경우 개인 또는 소규모의 공동 우물이나 지하수 직수의 형태로 정형화된 처리없이 바로 식수로 이용하는 경우가 많다 (국립환경연구원, 2002). 이러한 경우는 전자보다 방사성 함량이 높을 수밖에 없으므로, 기준이나 권고치 설정시 지하수 이용행태나 노출인구수를 고려해야만 한다. 일부 국가에서는 라돈의 경우 공공 수계와 개인 수계를 구별하여 기준을 적용하거나, 공공수계의 경우는 강제적 규제를 가하는 반면 개인 수계는 권고하는 형태를 지닌다 (SSI, 1999).

다매체 노출과 관련한 네 번째 지표는 매체별 노출 및 기여도에 대한 분석이다. 즉 라돈의 경우 실내공기로서 인한 흡입 노출시의 위해도가 음용수 섭취로 인한 위해도보다 약 10,000배 크고, 이로 인해 실내 공기 중 라돈의 위해도가 라돈으로 인한 전체 위해도의 90% 수준에 달하는 것으로 알려져 있다 (NAS, 1999). 따라서 지하수 중 라돈을 잘 관리하여도 실내 공기 중 라돈을 동시에 관리하지 않는다면 인체 위해도 측면에서 효과적이지 못하다. 또한 우리나라의 경우는 식품을 통한 노출이 전체의 약 77%를 차지하는 것으로 알려져 있어 (Health Canada, 1999b), 기준을 설정하는 과정에서 위해성이 높은 매체 중 방사성 물질은 기준을 엄격하게 하고, 위해성이 낮은 매체 중 방사성 물질은 기준을 다소 완화할 수 있도록, 다매체에 대한 노출 조사 및 기여도에 분석에 대한 정보가 반드시 필요하다.

위해도와 관련된 다섯 번째 지표는 방사성 물질에 대한 현실성 있는 허용 위해 수준을 설정하는 것이다. 현재 US EPA나 WHO 등에서는 화학물질에 의한 위해도 관리 수준을  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$  (십만명에서 백만명당 1명) 수준으로 정하고 있으며,  $1 \times 10^{-6}$ 을 용인 가능한 위해 수준 (acceptable risk)이라고 제안하고 있다. 그러나 방사성 물질의 경우는 자연적으로 발생하기 때문에 기본적으로 자연 중

background level이 높고 인위적인 조치를 통해 감소시키는 데에는 한계가 있으며, 화학물질과는 달리 단위 노출 용량당 발암력이 크기 때문에, 허용 가능한 위해 수준 (acceptable risk)도 화학물질과는 달리 비교적 높게 제안하여 방사성 물질에 대해서는  $1 \times 10^{-3}$ 으로 제안하고 있다 (Nga 등, 2000). 다시 말하면 인위적으로 합성하여 생산하는 화학물질의 경우는 법적규제 조치를 통해 허용 가능한 합리적 위해 수준, 즉  $1 \times 10^{-6}$  수준으로 달성하고자 하지만, 방사성 물질의 경우는 인위적인 행위에 의한 오염보다는 자연 발생원에 의한 오염이기 때문에 어느 정도의 위해는 감수해야 한다는 것이다. 따라서 화학물질의 관리는 Bottom-up 접근법 (가능한 낮은 수준에서 높은 수준으로 이행)으로, 방사성 물질의 관리 수준은 Top-down 접근법 (높은 수준에서 가능한 낮은 수준으로 이행)이 적용되고 있다 (Nga 등, 2000). 따라서 허용 위해도 수준을 결정하기 위해서는 여러 이해당사자간의 합의가 필요하고, 합의된 수준에서 기준이나 권고치를 제안할 수 있다.

여섯번째, 허용 위해 수준이 설정되고 이를 달성하기 위한 조치로서 다양한 관리 전략을 선택할 때, 비용-편익 분석을 통해 가장 비용 효과적인 관리 수준을 선택해야 한다. 즉 너무 강화된 기준으로 방사성물질을 감소시키기 위해 드는 비용이 편익보다 크다면, 현실적인 대안이 될 수 없으므로, 비용-편익 분석을 통해 효율적인 매체 관리, 감소 대책이나 관리 기준을 선택할 수 있다. 마지막으로 앞에서 언급한 지표들에 대한 국내외 정보들을 수집·분석하여, 우리나라 상황과 가장 유사한 조건에서의 기준치를 참고치로 삼아 관리 수준을 제안할 수 있다.

## 맺 음 말

이 논문에서는 방사성 물질 관리의 국제적 동향에 대해 고찰하고 국내 관리 방안 중 기준이나 권고치 설정을 위한 몇 가지 논리적 판단 지표를 제안하였다. 이들 지표에 해당하는 종합적인 자료를 수집·분석하기 위해서는 국제적 동향에 대한 지속적인 관찰, 국내 방사성 물질에 대한 주기적인 감시 자료 (monitoring data) 확보, 방사성 물질의 다

매체 노출평가(multimedia exposure assessment) 자료와 감소 처리 전략에 대한 비용-편익 분석(cost-benefit analysis) 등에 대한 조사 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다. 이를 통해 잠정 기준이나 권고치가 제안된다면, 이를 검증하는 과정에서 다학제간 및 일반 대중의 의견을 반영하는 절차를 밟아야 할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- 국립환경연구원. 지하수 중 방사성 물질 함유실태에 관한 조사연구 1999.
- 국립환경연구원. 지하수 중 방사성 물질 함유실태에 관한 조사연구 2002.
- 환경부. G7 수질오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 1995.
- 환경부. 세계보건기구(WHO) 먹는 물 수질관리 지침서 1998.
- David banks *et al.* Is pure groundwater safe to drink? : natural 'contamination' of groundwater in Norway, *Geology today* 1998; May-June: 104-113.
- Frederick W Pontius. Crafting a Regulation for Radon in Drinking Water, *Journal AWWA* 1999; 91: 24-38.
- Frederick W Pontius. Defining a Guideline for Uranium, *Journal AWWA* 2000; 92: 18-24.
- Gilman AP. Uranyl study 82-02 (personal communication). Environmental Health Directorate, Health Protection Branch, Department of National Health and Welfare, Ottawa 1982.
- Gilman AP *et al.* Uranyl Nitrate: 28-day and 91-day Toxicity Studies in the Sprague-Dawley Rat, *Toxicol. Sci.* 1998; 41: 117-128.
- Health Canada. Radiological Characteristics. edited April, February 1995.
- Health Canada. Assessment and Management of cancer risk from radiological and chemical hazards 1998.
- Health Canada. Canadian Drinking Water Guidelines Development Process 1999a.
- Health Canada. Uranium in drinking water 1999b.
- Health Canada. Summary of Guidelines for Canadian Drinking Water Quality 2001.
- Lederer CM and Shirley VS. Table of Isotopes, 7th ed. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York 1981.
- NAS. Risk assessment of radon in drinking water. National Academy Press. Washington, D.C. 1999.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. Uranium: Radiation protection guidelines 1999.
- Nga L Tran, Paul A Locke, and Thomas A Burke. Chemical and Radiation Environmental Risk Management: Differences, Commonalities, and Challenges, *Risk Analysis* 2000; 20(2): 163-172.
- SSI. Radon legislation and national guidelines 1999.
- SSI. The radon situation in Sweden, Paper printed at the 13. Statusgespräch des BMU "Forschung zum Problemkreis Radon" in Berlin, am 24/25 Oktober 2000.
- UNSCEAR. Ionizing radiation : Sources and Biological effects. UN Report. New York 1982.
- US DOE. CERCLA baseline risk assessment; Reference manual for toxicity & exposure assessment and risk characterization 1995.
- US DOE. Depleted Uranium. Human Health Fact Sheet. ANL 2001.
- US EPA. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Federal Guidance Report-13 1999a.
- US EPA. NPDWRs; Radon-222; Proposed Rule. Federal Register 1999b; 64, 211.
- US EPA. HRRCA for Radon in Drinking Water, 1999c.
- US EPA. Proposed Radon in Drinking Water Rule-Technical Fact sheet. October 1999d.
- US EPA. NPDWRs; Radionuclides; Final Rule. Federal Register 2000a; 65, 236.
- US EPA. NPDWRs; Radionuclides; NODA; Proposed Rule. Federal Register 2000b; 65, 78.
- US EPA. Preliminary HRRCA; Revised national primary drinking water standards for radionuclides; Review draft 2000c.
- US EPA. Radionuclides Notice of Data Availability Technical Support Document 2000d.
- WHO. Guidelines for Drinking Water Quality. 2nd, Vol 1. Recommendations, Geneva 1993a.
- WHO. Guideline for Uranium in Drinking Water 1993b.
- WHO. Guidelines for Drinking Water Quality. 2nd, Vol. 2. Health criteria & other supporting information, Geneva 1996.
- WHO. Guidelines for Drinking Water Quality. Addendum to Volume 2. Geneva 1998.