선진 외국에서의 먹는물 중 방사성물질 관리동향

박선구* · 손지환**

International Trends for Radionuclides Management in Drinking water

Sunku Park* · Jihwan Son**

국문요약

선진 외국에서 먹는물 중 방사성물질의 관리동향에 대한 고찰은 다음과 같다. 미국은 1974년 안전한 음용수법에 규제안을 설정한 후, 30년 이상 개정하여 현재 우라늄 MCL은 30㎍/L, 라돈 AMCL 4,000pCi/L 또는 MCL 300pCi/L, 라듐-226과 라듐-228의 합 5pCi/L로 설정하여 관리하고 있다. 캐나다는 우라늄을 20㎍/L로 잠정적으로 설정하였다. WHO는 2004년 9월 우라늄과 라돈의 가이드라인을 각각 15㎍/L과 100Bq/L로 개정하였다.

선진 외국은 먹는물 중 방사성물질에 대하여 수십년간 연구조사결과를 토대로 수질기준을 정하였고, 지속적으로 개선 및 보완을 하여 관리하고 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 먹는물, 수질기준, 방사성물질, 라돈, 라듐, 우라늄

ABSTRACT

The radionuclides in drinking water have been regulated in many countries. In USA, the regulation has been revised for over 30 years since radionuclides have been regulated under Safe Drinking Water Act(SDWA) from 1974. Today, USEPA is finalizing maximum contaminant level goal(MCLG) of zero for radionuclides, maximum contaminant level(MCL) and alternative maximum contaminant level(AMCL) of 300pCi/L and 4,000pCi/L for radon respectively, MCLs of 30㎍/L

* 국립환경과학원 환경측정기준부 유기물질분석연구과(sunku@me.go.kr)
** 국립환경과학원 환경측징기준부 유기물질분석연구과(j02son@me.go.kr)

for uranium, and MCLs of 5pCi/L for combined radium 226 and 228. In Canada, Maximum Acceptable Concentration(MAC) value for uranium is 20μg/L. WHO revised the guideline value of uranium and radon to 15μg/L and 100Bq/L in september 2004, respectively.

On this survey, it has been found that international regulations for radionuclides in drinking water have been established and improved steadily on the knowledge basis from the past decades' studies.

Keywords : drinking water, water regulations, radionuclides, radon, radium, uranium

I. 서 론

화학산업이 발전함으로서 사용되는 유해성 유기화학물질의 종류가 다양해지고 그 사용량도 점차 증가되고 있다. 이에 따라 발생되는 수질오염물질의 종류가 무수하게 다양해지고, 상수원수로 사용되고 있는 하천수나 호소수 등의 자연정화능이 떨어지므로 수질환경은 점차 악화되고 있는 추세이다(박선구 2000). 반면 국민들은 과학문명의 발달에 따라 생활수준 향상과 함께 편안하고 안락한 생활을 추구하고 건강에 대한 관심은 크게 높아져서, 다양한 형태의 먹는물에 대한 국민들의 관심이 급격히 증대하고 있다(박선구 외 2003).

먹는물 수원에는 지표수, 지하수, 해수 등이 있으나, 우리나라는 환경특성상 먹는물의 수원을 대부분 지표수에 의존하여 왔으며, 최근에는 지표수 오염증가 추세 등에 따라 수돗물에 대한 불신으로 지하수를 먹는물로 이용하는 경향이 크게 증가하고 있다. 지하수조사연보(건설교통부 한국수자원공사 2004)에 따르면 지하수의 이용량이 1994년에는 25.7억 톤에 불과하였으나 1998년에는 30.9억 톤, 2004년에는 36.8억 톤으로 꾸준하게 증가하고 있으며, 지하수 개발·이용 시설수는 1994년에는 64만 개소, 1998년에는 97만 개소, 2004년에는 123만 개소로 지속적인 증가추세를 나타내고 있다.

이처럼 지하수 이용이 급격히 증가함에 따라 지하수 수질에 대한 국민들의 관심이 증가하기 시작하였으며, 1998년 5월에는 대전지역의 지하수에서 방사성물질인 우라늄이 검출되었다는 조사결과가 보도됨에 따라 지하수 중 방사성물질에 대하여 새로운 관심의 대상이 되기 시작하였다(국립환경과학원 1999).

지하수 중 방사성물질은 지금까지 우리들의 관심영역에서 제외되어 있었던 물질이지만, 어느날 갑자기 지하수 오염사고로 문제되었던 것이 아니라는 관점에서 다루어져야 할 필요가 있다. 즉, 지하수의 방사성물질은 인위적인 오염에 의한 것이 아니라, 태고적부터 자연적으로 발생되고 있으며, 이런 현상은 매우 중요한 사실이다. 그러나 방사성물질이 자연발생적이라 할지라도 이를 최소화하고 국민의 건강과 안전을 위해서는 지하수 수질보전 및 관리 측면에서 방사성물질을 관리할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 이의 일환으로 국립환경과학원에서는 4개년 계획(1999~2002)을 수립하여 전국지질별 지하수 중 방사성물질(라돈, 우라늄, 전알파, 라듐)에 대한 함유실태를 조사하였다(국립환경과학원 2002). 이처럼 지하수 중 방사성물질에 대한 연구가 진행이 되고 있지만, 아직까지 먹는물로 이용하는 지하수 중 방사성물질에 대한 수질기준 등의 관리는 다른 수질오염과는 달리 세계적으로 보편화되어 있지 않고, 일부 선진국에서만 기준치로 설정되어 있거나 제안치로 제시되고 있는 실정이다.

이처럼 먹는물에 대한 관심이 높아지는 시점에서 자연 발생적이고 뚜렷한 규제치가 명시

되어 있지 않은 방사성물질은 조사될 필요가 있다. 특히 국내에서 먹는물 중 방사성물질에 대한 합리적인 평가를 하기 위해서는 선진국에서의 관리동향 조사가 선행될 필요가 있다. 따라서 본고에서는 외국의 먹는물 중 방사성물질인 우라늄 및 기타 방사성물질에 대한 규제를 비교·검토하여 전반적인 관리동향을 파악하고자 한다.

II. 본 론

1. 방사능의 정의

방사능(radioactivity)이란, 불안정한 원소의 원자핵이 안정한 상태로 되기 위해 스스로 붕괴하면서 내부로부터 방사선(radiation)을 방출하는 현상을 말한다. 방사선이란, 높은 에너지의 전자파 또는 입자선의 총칭으로, 고속의 헬륨원자핵 흐름인 알파(α)선, 전자의 흐름인 베타(β)선, 그리고 감마(γ)선 등이 이에 속하며, 이런 방사선을 방출하는 성질을 가진 원자핵을 방사성핵종이라 한다. 또한 방사성핵종을 함유하는 물질을 방사성물질(radionuclides)이라고 하며, 자연계에서는 우라늄, 라돈 등 비교적 원자번호가 큰 40종에 이르는 원소의 원자핵이 이에 속한다(William et al. 1983). 즉, 이들 방사성핵종이 α선, β선, 혹은 γ선을 방출하는 성질이 방사능이다. 방사선은 외기 중에서는 그 위해의 크기가 γ>β>α선의 순이나, 식품 등을 통하여 인체에 침투한 경우에는 반대로 α선이 가장 큰 피해를 유발한다(RADNET 1996).

2. 방사선의 단위

방사능의 양은 보통은 단위시간에 붕괴하는 입자의 수로 표시하며, 주로 큐리(curie, Ci)로 나타낸다. 1 Ci는 1초당 37×10^{-9}개의 원자가 붕괴하는 방사성물질의 양을 말한다. 또한 방사능의 양은 베크렐(Becquerel, Bq)로도 나타낼 수 있으며, 1 Bq은 매초에 원자가 하나씩 붕괴하는 방사성물질의 양을 말한다. Bq와 Ci는 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq와 같은 관계가 있다.

방사선이 생체조직에 입히는 피해는 입자나 광자의 개수와 이들의 에너지에 비례하고, 방사에 의해 생성된 입자의 양이나 축적된 에너지량이 중요한 변수로 작용한다. 따라서 방사선이 생체조직에 미치는 정도를 수치로 나타내기 위해서는 퀴리 값은 적합하지 않기 때문에 몇 가지 다른 단위가 사용되고 있다.

흡수된 방사선량(radiation absorbed dose, Rad)은 조직 1kg당 10^{-2}J의 에너지가 축적되는 방사선량으로 정의한다. 인체조직에 주는 피해는 조직의 성질, 방사선 종류, 총 방사선량, 방

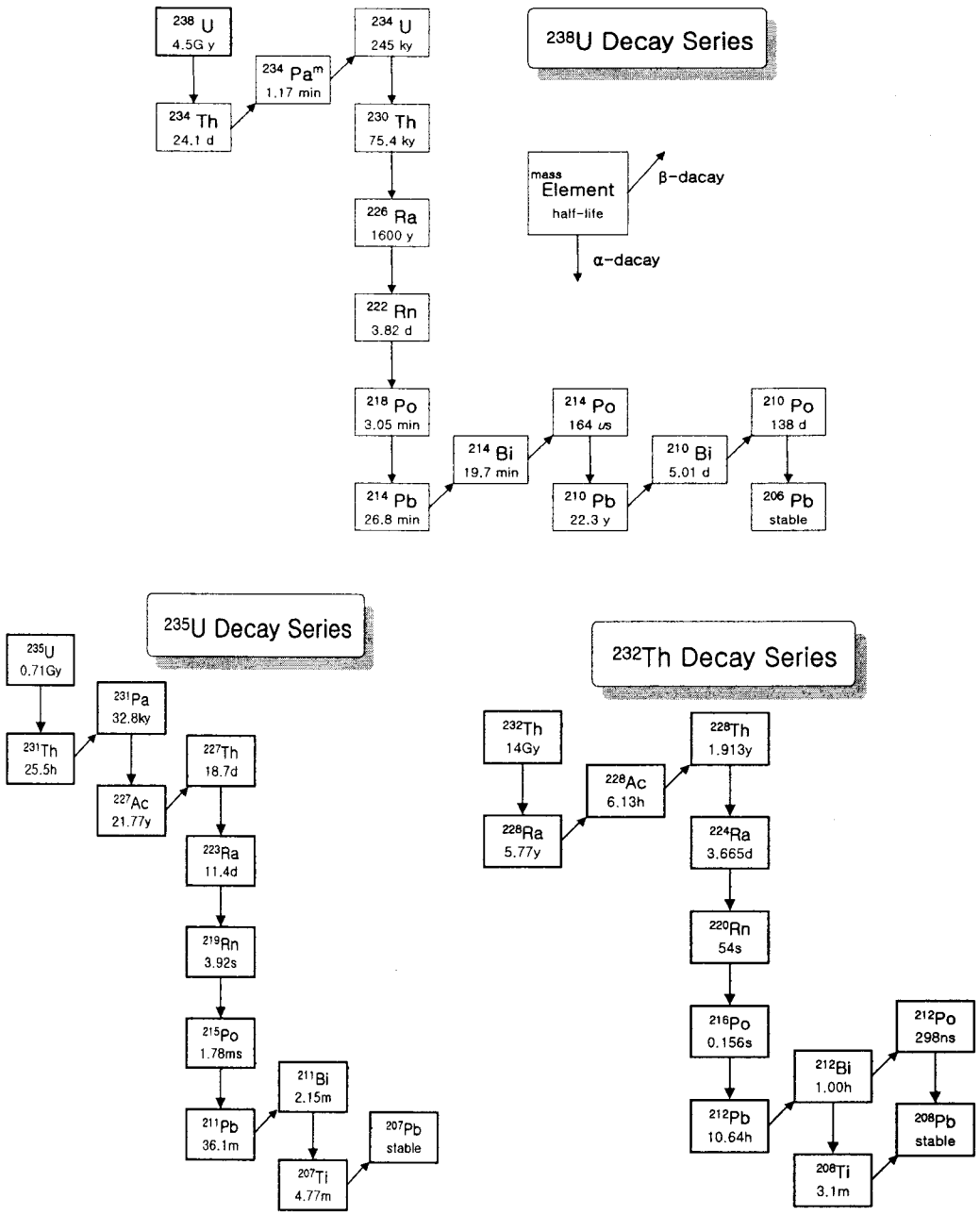
사선조사 빈도 등 여러 요인에 의존한다(David et al. 1990). 이 모든 것을 고려하여 만든 인체 뢴트겐 당량(roentgen equivalent in man, rem)은 인체에 노출되었을 때 미치는 유효 방사선량을 측정하는 것으로 정의된다. 근래에는 시버트(sievert, Sv) 단위가 많이 사용되고 있으며, 이는 약 1g의 ^{226}Ra 방사선량에 해당한다(David et al. 1990). 그리고 과거에 주로 사용되었던 뢴트겐(roentgen, R)은 방사선이 물질에 통과하면서 일어나는 현상을 측정하는 단위이다. 또한 발생원을 정량적으로 나타낼 때에는 ppm(parts per million) 또는 ppb(parts per billion)가 단위로 사용되고 있다(국립환경과학원 1999).

3. 우라늄 및 라돈의 붕괴

우라늄과 라돈의 붕괴계열은 <그림 1>에 나타내었으며, 우라늄은 ^{238}U 붕괴계열에서 주로 두 가지 형의 동위원소로 존재한다. 즉 대부분의 경우 동위원소는 ^{238}U와 ^{234}U로 존재하며 상대적으로 ^{235}U 붕괴계열로부터의 ^{235}U의 활동도는 낮다고 할 수 있다.

<그림 1>에 ^{222}Rn, ^{219}Rn 및 ^{220}Rn은 각각 ^{238}U, ^{235}U 및 ^{232}Th의 붕괴계열로부터 생성되는 딸 핵종(daughter nuclide)들을 제시하였다. 주어진 환경계에서는 화학적, 물리적 변화에 의해 붕괴계열의 흐트러짐이 존재하며, 이에 의해 방사평형이 유지되기 어렵다. 이러한 분리 정도는 관련 과정상의 효율뿐만 아니라 반감기를 척도로 하는 시간규모, 지질학적, 생물학적 작용에 영향을 받는다(National Council on Rdiation Protection and Measurement 1984). <그림 1>에 제시한 바와 같이 ^{222}Rn은 ^{226}Ra의 방사성 붕괴과정에서 형성되며 ^{222}Rn의 반감기는 3.82일로 짧은 반감기를 가진다. 이런 짧은 반감기로 인해 라돈의 딸원소는 라돈 모원소와 방사성 평형에 빠르게 도달되며, 토양에서 라듐으로부터 형성되는 대부분의 라돈은 그대로 지구상에 잔류하게 된다.

<그림 1> U-238, U-235 및 Th-232의 방사성 핵종 붕괴과정



출처 : National Council on Radiation Protection and Measurement 1984

4. 외국의 방사성물질 관리동향

1) 미국

1974년 안전한 음용수법(Safe Drinking Water Act, SDWA)에 우라늄과 기타 다른 방사성물질(radionuclides)들에 규제안이 만들어졌으며, 잠정적으로 일차 먹는물 규제안(National Interim Primary Drinking Water Regulations)이 1976년에 최초로 공포되었다. 그리고 1977년 전알파(gross alpha radiation), 라듐(radium-226, radium-228) 및 beta & photon emitters의 기준이 발효되었다. 그 주요내용을 살펴보면 전알파는 우라늄, 라돈을 제외하고, 라듐-226을 포함시켜 15 pCi/L로 규정하였고, 라듐-226과 라듐-228을 합하여(combined radium-226 & radium-228) 5 pCi/L로, beta & photon emitters는 4mrem/y로 규정하였다.

그 후, 1986년 SDWA의 개정에 따라 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)은 방사성물질에 대한 국민의 건강문제를 기본으로 수질목표치인 최대허용오염농도 목표(Maximum Contaminant Level Goals, MCLGs)와 일차 먹는물 규제안(National Primary Drinking Water Regulations, NPDWRs)을 설정하였고, 비용을 감안하고 기술적으로 처리가 허용가능한 목표치에 가까운 최대오염허용농도(Maximum Contaminant Level, MCL)를 설정하였으며, 이를 토대로 1991년 새로운 규정을 제안하였다(US EPA 2000).

그 내용의 주요골자는, MCLGs, MCL, 최적처리기술(Best Available Technology, BAT), 모니터링, 보고 사항과 상수도 내 라돈농도 공개 등이 제안되었다. 모든 방사성물질의 발암성 등 위해성에 기초하여 MCLG를 0pCi/L로 설정하였고, 우라늄에 대한 MCL은 동물실험 결과로 도출된 구강섭취에 의한 신장독성의 참고치(Reference Dose, RfD)인 0.6μg/kg/day (Gilman et al. 1998)를 이용하여 20μg/L 혹은 30pCi/L를 제시하였다. 이때 고려되어야 할 인자는 사람의 체중, 먹는물 섭취량, 오염원별 상대 기여도(Relative Source Contribution, RSC)로, 각각 70kg, 2L/day, 0.8과 불확실성 상수 100을 이용하였다. 제안된 우라늄의 MCL은 미국 EPA가 주장하는 BAT를 이용하여 저감 가능한 농도 수준이다. 라돈의 최대오염허용농도(MCL)는 300pCi/L이고, BAT로는 폭기(aeration)방법을 제안 하였다. 이는 모든 방사성물질을 발암물질로 보고 MCLG를 0pCi/L로 설정하였으며, 라돈의 섭취 및 호흡으로 인한 위해도 평가를 근거로 1pCi/L 노출 시 1×10^{-7}의 위해 수준을 고려하여 MCL을 제안하였다. 라듐의 경우, 라듐-226과 라듐-228을 합하여 5pCi/L로 규정하였던 것을 분리하여 각각에 대해 20pCi/L로 설정하였다. 전알파의 MCL은 라듐-226, 라돈 및 우라늄을 제외한 15pCi/L로 조정하였다(US EPA 2000).

1992년 EPA는 라돈의 노출에 의한 다매체 위해성(multimedia risk)을 제어하기 위한 비용과 라돈 제거 및 처리에 관하여 기술하였다. 따라서 EPA에서는 1994년 라돈의 위해성과 치명적인 암 증상을 피하기 위한 방법과 물이나 실내공기로 인한 위해성을 저감시키기 위하여 소요되는 비용 등을 고려한 다매체에서 라돈의 위해성 평가 및 비용 평가(Multimedia Risk and Cost Assessment of Radon)가 이루어져야 한다고 하였다.

이 후 1997년 방사선으로부터 건강을 보호하고, 물과 실내공기 중의 라돈을 제거하는 데 소요되는 비용에 관하여 평가를 실시하였다. 이를 토대로 1996년 SDWA를 개정하였으며, 1997년에는 91년에 제안되었던 규제안을 모두 철회하였다. 그 주된 이유는 조사 지역 중 39% 이상에서 1991년에 제안되었던 MCL 300pCi/L를 초과한 라돈농도가 검출되어 현실적인 문제로 봉착되었기 때문이다. 따라서 MCL 300pCi/L은 부적합하다는 결론을 내렸고, 결국은 전면적인 재검토를 하게 되었다.

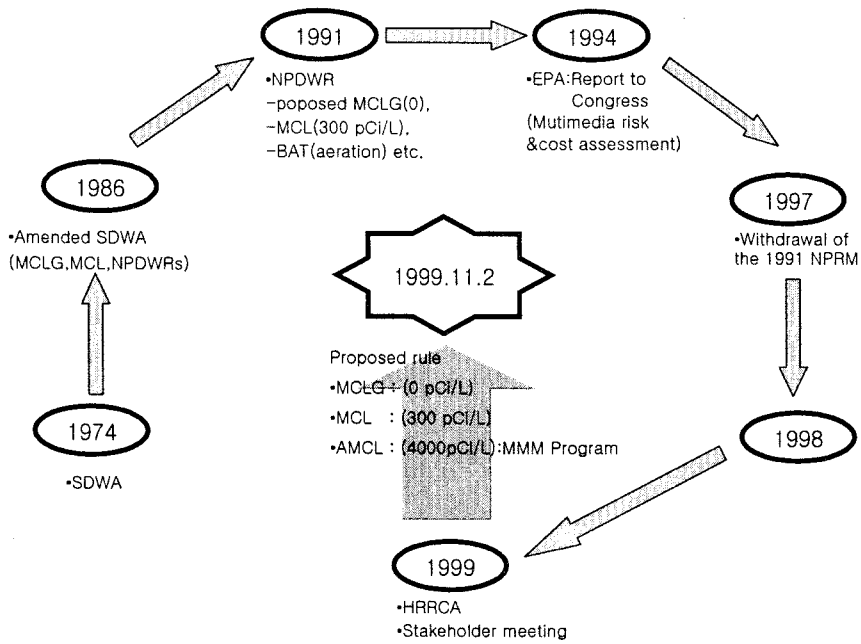
따라서 미국 EPA는 1998년 소규모 실체(entity)에 미치는 영향을 최소화하면서 환경 목표치(environmental goal)를 만족시킬 수 있는 적절한 권고치 도출에 대한 집중적인 논의와 토의를 하게 되었다. 이 후 1999년 2월에는 SDWA 개정안에 따라 인체 위해성 감소 및 비용·분석(Health Risk Reduction and Cost Analysis, HRRCA)에 대한 내용을 발표하였고, 같은 해 3월 HRRCA와 다매체완화체제(Multi-Media Mitigation framework, MMM framework)에 대한 설명회를 개최하였다. 또한 국민 건강을 보호하면서 보다 효과적으로 인체 위해도를 저감시키고, 궁극적으로 음용수에 의한 위해성을 감소시킴과 동시에 상대적으로 위해도 기여율이 높은 실내공기에 의한 노출을 감소시키고자 MMM framework을 적극 도입하였고, 이로 인해 정부의 라돈 관리는 탄력적인 운영을 가능하게 하였다. 위와 같은 내용들을 적극 반영하여 라돈으로부터 국민의 건강 위해성을 감소시키기 위해서 1999년 11월에 새로 제안된 규정을 공포하였다. 이의 내용을 살펴보면 라돈으로 인한 인체 위해도 및 비용·편익 분석 결과를 고려하여 MCL을 300 pCi/L로 제안하였고, MCLGs를 0으로 제안하였다. 또한 자연 발생적인 실외공기 중의 라돈농도보다 높지 않은 수준으로 실내공기 중의 라돈농도를 증가시키지 않는 물 중의 라돈농도를 고려하여 AMCL(Alternative Maximum Contaminant Level)을 4,000 pCi/L로 제안하였다.

1996년 SDWA가 다시 개정됨에 따라 EPA는 2000년 4월 21일에는 먹는물 중 방사성물질의 위해도 추정에 사용된 모델과 관련된 정보를 NODA(Notice Of Data Availability)로서 공포하였다. 이어서, 2000년 12월 7일 먹는물 중 우라늄과 기타 방사성물질(radionuclides)에 대한 규정들을 최종 확정하여 공포하였다(US EPA 2000).

미국 EPA는 우라늄 20㎍/L와 30㎍/L의 인체 노출 시 야기되는 신장독성에 유의한 차이가

없다는 연구 결과와 비용 측면을 고려하여 우라늄의 최종 MCL로서 30㎍/L를 제시하였다. 이는 SDWA에서 제시한 유용한 기술 및 소요비용을 고려하여, EPA가 각각의 오염물질에 대해서 MCLG에 최대한 근접하게 시행가능한 수준의 MCL을 설정하도록 한다는 것과, 또한 미국 EPA의 HRRCA에 기반을 두고 MCL로 인하여 발생되는 편익이 소요 비용을 정의하는지의 여부를 관리자가 검토하여 결정한다는 것이다. 그 결과, 만약 실행가능한 수준에서 정해진 MCL의 이익이 비용을 정당화할 수 없다면, 실행가능 수준보다는 좀 더 완화된 MCL을 설정하도록 권고하고 있으며, 이러한 내용을 근거로 한 최초의 예가 우라늄 MCL 30㎍/L이다. 이 방법을 수행함과 동시에, EPA는 비용-편익뿐만 아니라 결과 해석에 따른 여러 가지 불확실성, 즉 우라늄의 건강영향과 관계된 모든 이용가능한 과학적 정보들을 고려해야 한다고 명시하고 있다. 우라늄 30㎍/L에 대한 final rule의 실제적인 효력은 2003년 12월 8일부터 시행되었다(US EPA 2002).

<그림 2> 미국에서 라돈의 먹는물 수질기준 변천과정

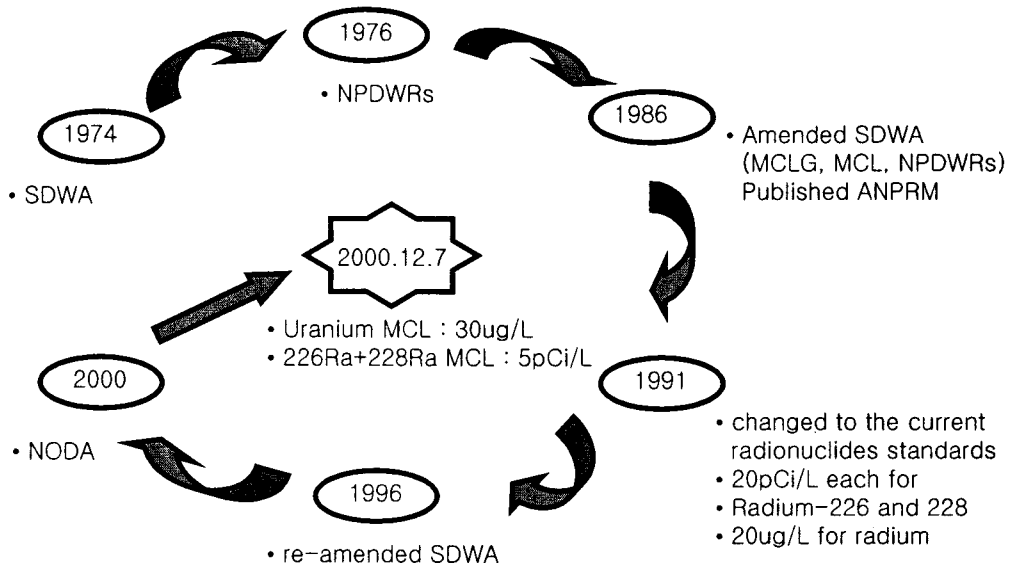


AMCL : Alternative MCL
EPA : Environmental Protection Agency
MCL : Maximum Contaminant Level
MMM program : Multi-media Mitigation program
NPDWRs : National Primary Drinking Water Regulations
BAT : Best Available Technology
HRRCA : Health Risk Reduction and Cost Analysis
MCLG : Maximum Contaminant Level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

출처 : US EPA 1999. Federal Register 40CFR Part 9, 141 and 142 Vol. 64, No. 211.

라듐의 경우 <그림 3>에 제시한 바와 같이 'combined radium-226 & radium-228', Gross α, β입자와 photon 방사능에 대해서는 1976년의 MCL을 유지한다는 것을 주내용으로 한다. 1991년에 제안되었던 'combined radium-226 & radium-228'에 대한 MCL을 각각 20pCi/L로서 개정되었지만, 라듐 감소와 라돈 감소 사이의 비용-효과에 관한 논쟁으로 2000년 'combined radium-226 & radium-228'의 MCL를 5pCi/L로 제안치를 설정하게 되었다(US EPA 1999, 2000).

<그림 3> 미국에서 우라늄 및 라듐의 먹는물 수질기준 변천과정



ANPRM : Advanced Notice of Proposed Rulemaking MCL : Maximum Contaminant Level
MCLG : Maximum Contaminant Level Goal NODA : Notice of Data Availability
NPDWRs : National Primary Drinking Water Regulations SDWA : Safe Drinking Water Act

출처 : US EPA 2000. Federal Resister 40CFR Part 141 and 142 Vol. 65, No. 236

2) 캐나다

방사성물질 중 중금속으로서의 신장독성을 나타내는 우라늄의 가이드라인은 1988년 1월에 최대허용농도 (Maximum Acceptable Concentration, MAC) 100㎍/L로 제시된 바 있다. 이는 실험용 토끼를 이용하여 아만성(subchronic) 독성 실험을 한 결과 신장 세뇨관의 병리학적 장애에 대한 NOAEL값 1.28㎎/㎏/*day*(Gilman et al. 1982)에, 불확실성 상수 500, 체중 70㎏,

물로 인한 우라늄의 노출 상대계수(allocation factor) 0.9, 성인 평균 음용수 섭취량 1.5L/*day*을 적용한 결과이다(Health Canada 1999).

그러나 1998년 4월에 열린 먹는물에 대한 주연방정부 소위원회(Federal-Provincial Subcommittee on Drinking Water)를 통해 이 가이드라인은 개정되었다. 음용수 중 우라늄 MAC 10μg/L가 개정안으로 제시되었으며, 이는 90일간 실험용 쥐를 대상으로 독성실험에 근거한 것이었다. 권장 MAC 10μg/L 산출은 독성실험 결과인 내성섭취용량(Tolerated Dose Intake, TDI) 0.6μg/kg/*day*(Gilman et al. 1998)과 체중 70kg, 성인 평균 먹는물 섭취량 1.5L/*day*, 상대계수 0.35를 적용한 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 1998년 12월, 우라늄에 대한 MAC를 10μg/L로 최종 공포하였다(Health Canada 1999).

하지만 대중들의 의견과 처리조건에 대한 비용-편익 분석 결과를 토대로 제안된 MAC는 다시 재검토되었다. 1999년 10월에 열린 주연방정부 소위원회 회의(Federal-Provincial Subcommittee meeting)에서 제기된 의견들을 최종적으로 검토하여 먹는물 중 우라늄의 가이드라인을 20μg/L로 결정하는 데 다시 합의하였다. 이 농도치는 우라늄이 자연적인 침적(deposit)에 의해서 증가 노출될 수 있는 점을 고려하여 상대계수를 0.7로 적용하여 산출한 값으로 좀 더 완화된 수준의 농도라 할 수 있다. 이 후 2001년 3월에 음용수 중 우라늄의 가이드라인을 잠정적 최대허용농도(Interim Maximum Acceptable Concentration, IMAC) 20μg/L로 설정하였다(Health Canada 1999).

주연방정부 소위원회(Federal-Provincial Subcommittee on Drinking Water)는 현재 라돈의 인체건강 위해성 평가에 필요한 관련 실험데이터 또는 역학연구에 대한 자료가 거의 없는 실정이며, 특히 동물 연구 결과를 통하여 섭취에 의한 위해성은 흡입에 의한 것에 비해 위험성이 적은 것으로 결론지어 졌다. 더욱이 실내공기에 존재하는 라돈농도는 물로부터 공기 중으로 발산되는 농도의 1~2% 정도 수준으로, 실내공기를 통한 라돈의 노출은 먹는물 중 라돈을 섭취하고 흡입하는 경로에 의한 노출을 훨씬 능가하기 때문에, 캐나다는 먹는물 중 라돈에 대한 MAC를 설정할 필요성이 없다는 결론을 내렸다. 대신 실내공기 중의 라돈의 초과허용 농도는 일반 주거지역의 경우 연평균 농도를 800Bq/m^3 (=21.6pCi/L; 1Bq=27pCi)으로 설정하였고, 이 기준치를 초과하거나 높은 농도로 라돈을 함유하고 있을만한 가능성을 가진 해당 지역의 지하수에 대해서는 조사를 실시하고 있다. 따라서, 캐나다에서는 먹는물 중 라돈에 대한 MAC가 아직 구체적으로 정립되어 있지 않는 상태이다(Health Canada, 2001).

3) WHO

WHO는 우라늄의 신장독성 영향에 대해 기준치 설정은 연구 결과에 따른 과학적 자료가 부족하고 기술적 달성에 대한 한계 등 현실적 문제를 감안하여 잠정적으로 2㎍/L로 정하였다. 이 기준치는 인체와 동물실험에서 우라늄에 의한 발암성과 관련된 데이터가 부족하다는 사실과 우라늄의 화학적 독성에 대한 일일섭취한계농도(Tolerable Daily Intake)를 이용한 접근법으로 기준치를 도출하였으나, 기준치를 정하는 데 충분한 결과라고는 생각하지 않았다고 기술하고 있다. 여기서 TDI인 0.6㎍/kg/*day*는 60㎍/kg/*day*(National Council on Radiation Protection and Measurement 1984)의 최저독성량(Lowest Observed Adverse Effect Level, LOAEL)에 불확실성 계수(intra-와 interspecies variation)인 100을 적용하여 도출하였다(WHO 1993). 이는 신장 조직 및 기능상의 손상 정도가 극미하다고 보고되었기 때문에 WHO는 무독성량(No Observed Adverse Effect Level, NOAEL) 대신에 LOAEL을 사용하여 계산하였고, 추가적인 불확실성 계수를 적용하지 않았다. 이 기준치가 미국이나 캐나다에 비해 낮은 이유는 기준치 산출 시 고려되어야 할 인자 중 오염원별 상대 기여도(Relative Source Contribution, RSC)를 미국이나 캐나다의 80%(0.8)와 90%(0.9) 적용보다 약 10배 낮은 0.1를 적용하였기 때문이다(WHO 1996). 하지만 최근 2004년 9월 이후부터는 우라늄의 가이드라인을 15㎍/L로 개정하였다(WHO 2004).

라돈은 다른 방사성물질과는 달리 유효선량(effective dose)을 제시하는 데 어려움이 있다. 이는 라돈이 가스상 물질로서 물 중에 함유되어 있다 하더라도 공기 중으로 확산되는 특성을 가지고 있기 때문이다(WHO 1996). 그러므로 라돈의 문제는 실내공기와의 연계선 상에서 해석되어야 하며, 물에 의한 섭취량 산출 시 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(WHO 1998). 다만 모든 오염원으로부터 발생되는 라돈의 호흡을 통한 노출량은 약 0.1mSv로서 이것은 자연적인 총 방사능 노출량의 약 반을 차지하는 수준으로 보고 있다. 이러한 노출량의 0.1mSv 참고농도 수준을 만족하기 위한 이러한 모든 요인들이 국지적으로 혹은 국가적으로 적절하게 평가되어야 하며, 이를 위해서는 통합적인 접근방법을 통해 적절한 조치를 취하도록 하고 있다. 최근 2004년 9월 이후부터는 라돈의 가이드라인을 100Bq/L로 개정하였다(WHO 2004).

4) 오스트레일리아

우라늄의 주된 노출 원인은 음식물로, 식품을 통한 섭취량은 보통 0.0014mg/day이고, 먹는물의 기여율은 이의 1/10 미만인 것으로 알려져 있다. 우라늄의 위해성은 중금속으로서의 화학적 독성 영향과 방사선으로 인한 영향으로 나누어 평가하고 있다. 우선 화학적 독성 영향으로 인한 기준치 도출 근거를 살펴보면, 식품을 통해 섭취된 우라늄의 1% 미만이 위장관계로 흡수되어, 신장과 골격에서 발견되며, 단기간 고농도로 우라늄에 노출되면 신장 염증이 나타난다(William et al 1983). 이러한 영향에 근거하여 도출된 우라늄의 화학적 독성 영향에 대한 기준치는 20μg/L이다(NHMRC & ARMC 2001).

오스트레일리아에서는 먹는물 급수시설에 대한 라돈 조사 자료가 미흡하여 현재 발생수준을 정확히 파악하고 있지 못한 실정이다. 그러나 먹는물로부터 실내공기로의 전이에 따른 건강영향까지 고려하여 먹는물 중 라돈에 대한 기준을 2,700pCi/L로 제안하였다(NHMRC & ARMC 2001). 제안농도는 상수원의 물이 저장 및 처리, 이동 과정에서 자연붕괴로 인한 농도가 저감되는 것을 반영하여 먹는물 이용 지점의 농도에 대해서 적용한다고 명시하고 있다.

이런 라돈에 대한 기준치는 먹는물 중 라돈이 인체에 막대한 영향을 미칠 만큼 위해하지 않다는 사실과 실내공기 중 라돈의 주원인이 지표면과 건축자재이므로 대부분의 경우 물 중 라돈은 그 기여도가 매우 낮다는 점을 고려하여 도출되었다.

라듐의 경우 라듐-226과 라듐-228은 전알파 또는 ^{40}K의 농도를 제외한 전베타의 농도가 13.5pCi/L 이상인 경우 측정하도록 하며, 해당 적용 기준치는 각각 13.5pCi/L으로 설정되어 있다. 다만 전베타의 농도가 13.5pCi/L를 초과하는 경우에는 특정한 베타 및 감마선 방출 방사성물질을 조사한다(NHMRC & ARMC 2001).

5) 스웨덴

스웨덴의 방사선보호연구소(Swedish Radiation Protection Institute, SSI)는 물에서의 라돈으로 인한 발암 위해도를 평가하는 기초로서 미국 NAS의 연구 결과가 가장 적당하다고 하였다. 스웨덴 자체에서 물 중 라돈으로 인한 위해도를 평가하기 위한 자료는 실내공기 중 라돈을 평가하는 경우보다 자료가 현저히 부족하므로, 좀 더 신뢰성 있는 위해성 평가 결과를 얻기 위해서는 많은 연구가 필요할 것이라 하였다(SSI 2002).

먹는물 중 평균 라돈농도는 약 1,000pCi/L 수준이며, 토양 대수층 내 지하수 중의 평균농도는 270~8,100pCi/L 정도, 암반을 뚫어서 만든 우물의 경우는 1,350~13,500pCi/L 정도(최대

농도 2,403,000pCi/L)로 조사된 바 있다.

이러한 먹는물 중 라돈 관리를 위해서 1997년 국립식품행정당국(National Food Administration)은 라돈농도를 2,700pCi/L의 규제치(Action Level)로 설정하였다. 이는 공공급수시설에 대해서는 규제력을 갖지만, 개인 급수시설에 대해서는 권고수준(advisory level)으로서 적용된다. 이에 따라 라돈농도 2,700pCi/L이하의 지하수는 사용 가능하나 2,700~27,000pCi/L로 라돈이 검출된 물의 경우 먹는물로서의 사용 유보를 권고하고 있다. 또한 27,000pCi/L 이상 라돈이 검출될 시에는 먹는물로서 사용을 금지하고 있는 실정이다. 이와 더불어 가정 주택에서의 실내 라돈 문제를 해결하기 위한 관리를 더욱 엄격하게 실행하고 있는데, 이것은 물 중의 라돈은 자연적으로 급수시설 내 공기나 가정의 실내공기로 방출되며 실제로 인체에 미치는 영향은 섭취를 통한 라돈 노출에 비해 공기 중 라돈을 흡입할 때 더욱 크기 때문이다.

III. 방사성물질 관리

미국 EPA는 공공 급수시설에 대하여 방사성물질인 우라늄 함량이 높은 급수시설은 모니터링 횟수를 자주하도록 하고, 방사성물질의 함량이 낮은 급수시설에 대해서는 모니터링의 빈도를 줄이도록 하고 있다. 2000년 방사성물질에 대한 최종적인 법률이 개정되기 전까지는 MCL의 50%를 넘는 급수시설의 경우 매 4년마다 4개의 시료를 채취하도록 하였고, MCL의 50% 미만인 급수시설은 주정부의 판단 여하에 따라서 매 4년마다 하나의 시료를 채취하도록 하였다. 그러나 현행 개정된 규칙에서는 MCL의 50%를 넘는 급수시설은 매 3년마다 하나의 시료를 채취하도록 하고, 검출한계 이상에서 MCL의 50% 미만인 급수시설은 매 6년에 1개의 시료를 채취하고, 검출한계 미만은 9년에 한번씩 시료 채취를 하도록 하고 있다. 이때의 시료 채취 지점은 가정으로 배급되기 전의 저수조의 시료를 채취한다.

공공 급수시설에서 방사성물질이 초과하였을 때 가장 권장하고 있는 조치방법은 방사성물질 처분 등에 의한 2차 오염물질이 발생하였을 때, 우라늄이 초과한 지하수원과 초과되지 않는 지하수원을 혼합하여 최종적으로는 MCL를 초과하지 않도록 하는 혼합방식을 사용하거나 대체수원을 개발하는 것 등이다. 또한 기준치를 초과한 지점에 대해서는 국민들에게 알려야 하며, 개인급수의 경우는 소유자 자신이 지하수 수질의 안전성에 대해 책임을 져야 한다고 제시하고 있다(US EPA 2000).

라돈의 경우 미국 EPA는 공공 급수시설(public water systems)의 먹는물에 대하여 라돈농도를 규제할 것을 제안하고 있으며, 개인 급수시설(private well)에 대해서는 규제하지 않

고 있다. 그러나 정부에서는 개인 급수시설에서도 물 중 라돈농도를 측정할 것을 권장하고 있다(US EPA 1999).

또한 급수시설(Water systems)에서의 라돈 측정농도가 제안된 기준치에 부합하지 못한다면 사업자는 그 결과를 소비자들에게 측정농도뿐만 아니라 이로 인해 발생할 수 있는 영향요인, 사용 가능한 물의 소비형태, 즉 먹는물이나 목욕물, 또한 어떤 조치 후 사용 가능한지(예를 들면, 끓인 후 마시면 안전하다든지, 저장한 후 사용하면 괜찮다든지) 등에 대해서 알려야 한다. 이때 보고서는 쉽게 서술되어야 하고, 우편이나 직접 통보를 통해 알릴 수도 있다(US EPA 1999).

캐나다의 공공급수에 대하여 방사성물질이 초과한 경우 미국과 같으며, 개인급수의 경우 초과지점이 발생하면 소유주가 분기별로 3회 더 분석하도록 되어 있으며, 이의 결과를 토대로 저감장치를 설치하거나 대체수원을 사용하도록 권유하고 있다(Gascoyne 1989).

스웨덴은 1997년 먹는물 중 라돈에 대한 기준치(action level)를 공포한 후 1998년과 1999년 2년 동안 공공 급수시설과 개인 급수시설 소유자에게 기준치 달성을 위한 저감조치에 대한 비용을 보상하기 위해 경제적인 지원을 하였다(SSI 2000). 이때 공공 급수시설의 경우에는 소요 비용 100% 모두 지원 받을 수 있었던 반면, 개인 소유자의 경우에는 소요 비용의 50%, 최대 5,000SEK(한화 60 만원) 정도를 지원받을 수 있었다.

IV. 맺음말

미국 등 선진 외국의 방사성물질에 대한 수질기준 등 관리동향을 고찰해 본 결과, 기준치 또는 권고치를 설정하는 데 수십 년 동안 장기간에 걸쳐 지속적인 조사연구 결과를 토대로 수차례에 걸쳐 수정하거나 보완하여 확정·공포하고 있음을 알 수 있었다. 특히, 방사성물질의 특성상 지역 간, 동일지역 내 지점 간 변이가 크기 때문에 대표성 있는 통계치를 얻기가 쉽지 않으며, 따라서 위해성 평가 결과에 가장 민감한 영향을 주는 오염농도와 노출인구에 대한 지속적이고 장기적인 조사연구가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

또한 수질기준 설정 시 인체 노출 위해도와 비용-편익 분석에 따라 보다 효율적인 면을 참고로 하고 있으며, 국민 의식수준을 감안한 지역 환경특성 변화에 능동적인 대처와 전문가들의 충분한 의견수렴을 통하여 수정되고 보완되어 지고 있으며, 현재에도 선진 외국에서는 상기의 사항을 고려하여 보다 국민의 건강을 보호하고 안전한 삶의 질을 향상시키기 위한 방향으로 조사연구를 수행하고 있다.

이처럼 선진 외국에서의 방사성물질에 대하여 수십년간 조사연구 결과를 토대로 수질기준

을 정하고, 지속적인 개선 및 보완을 통하여 관리하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 국민들에게 먹는물로 이용하는 지하수의 안전성과 신뢰성을 확보하고 국민들의 의식수준에 부응하기 위하여 선진 외국의 철저한 관리동향 파악과 우리의 조사연구 결과를 심도있게 비교·분석한 결과, 우라늄은 미국의 기준치인 30$\mu g/\ell$로 설정하기를 제안하고, 라돈 등 방사성물질은 좀 더 심도 있고 많은 조사연구 결과를 토대로 향후에 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 본고에서 제한된 우라늄 기준치 30$\mu g/\ell$은 국내의 여러 측정분석기관의 분석능력, 장비 등의 현실적인 사항을 고려하여 몇 년간 잠정적으로 시범 운영 후 시행하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 지하수 중 방사성물질에 대한 보다 효율적인 관리방안을 마련하기 위해서는 미국 등 환경선진국과 같이 보다 지속적이고, 체계적인 조사연구가 필요할 것으로 판단된다.

Abbreviation

ADWG : Australian Drinking Water Guidelines

AMCL : Alternative Maximum Contaminant Level

ARMC : Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand

BAT : Best Available Technology

EPA : Environmental Protection Agency

HRRCA : Health Risk Reduction and Cost Analysis

IMAC : Interim Maximum Acceptable Concentration

LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level

MAC : Maximum Acceptable Concentration

MCL : Maximum Contaminant Level

MCLGs : Maximum Contaminant Level Goals

MMM framework : Multi-Media Mitigation framework

NHMRC : National Health & Medical Research Council

NOAEL : No Observed Adverse Effect Level

NODA : Notice Of Data Availability

NPDWRs : National Primary Drinking Water Regulations

R : roentgen

Rad : radiation absorbed dose

rem : roentgen equivalent in man

RfD : Reference Dose

RSC : Relative Source Contribution

SDWA : Safe Drinking Water Act

SSI : Swedish Radiation Protection Institute

TDI : Tolerated Dose Intake

참고문헌

건설교통부 · 한국수자원공사 2004. 「지하수조사연보」

국립환경과학원 1999. 「환경자료집(Handbook of Environmental Science)」

국립환경과학원 1999. 「지하수중 방사성 물질 함유실태에 관한 조사연구」

국립환경과학원 2002. 「지하수중 방사성 물질 함유실태에 관한 조사연구」

박선구 2000. 「현대환경리포트」 현대환경연구소. 141-150.

박선구, 민병섭, 이동석, 류재근. 2003. 「정수장에서 할로초산의 생성 특성」 한국환경분석학회. 6: 68-78.

David, W.O. and H.N. Norman. 1990. *Principle of modern chemistry.* Saunder College Publishing. 2nd edition. 443-478.

Gascoyne, M. 1989. *High levels of uranium and radium in groundwaters at canada's underground research laboratory.* Lac Bonnet, Manitoba, Canada. *Appl. Geochem.* 4: 577-591.

Gilman A.P. 1982. *Uranyl study 82-02(personal communication).* Ottawa : Environmental Health Directorate, Health Protection Branch, Department of National Health and Welfare.

Gilman A.P. 1998. "Uranyl Nitrate; 28-day and 91-day Toxicity Studies in the Sparague-Dawley Rat" *Toxicol. Sci.* 41: 117-128.

Health Canada 1999. *Summary of Guidelines for Canadian Drinking Water Quality.*

Health Canada 1999. *Canadian Drinking Water Guidelines Development Process.*

Health Canada 1999. *Uranium in Drinking Water.*

Health Canada 2001. *Summary of Guidelines for Canadian Drinking Water Quality.*

National Council on Radiation Protection and Measurements 1984. *Exposures from the Uranium series with emphasis on radon and its Daughters,* NCRP report No. 77: 2.

NHMRC(National Health & Medical Research Council) & ARMC(Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealnad) 2001. *ADWG(Australian Drinking Water Guidelines).*

RADNET 1996, *Information about Source points of Anthropogenic Radioactivity*

SSI 1999 *Radon Legislation and National Guidelines*

SSI 2000 *The radon situation in Sweden*

SSI 2002. *Cancer risk from radon in indoor air and drinking water in Sweden*

US EPA 1999. Federal Register *40CFR Part 9, 141 and 142 Vol. 64, No. 211, NPDWRs; Radon-222 ; Proposed rule.*

US EPA 2000. *Federal Resister 40CFR Part 141 and 142 Vol. 65, No. 236, NPDWRs; Radionuclides;* Final Rule.

US EPA 2000. *Federal Resister Vol. 65, No. 78., NPDWRs; Radionuclides; NODA*; Proposed Rule.

US EPA 2000. *Regulatory impact analysis for the proposed groundwater rule.*

US EPA 2002. *Current Drinking Water Standards.*

WHO 1993. *Guidelines for Drinking Water Quality. 2nd, Vol. 1. Recommendations, Geneva.*

WHO 1996. *Guideline for Drinking Water Quality. 2nd, Vol 2. Health criteria & other supporting information. Geneva.*

WHO 1998. *Guideline for Drinking Water Quality. Addendum to Vol. 2. Geneva.*

WHO 2004. *Guidelines for Drinking Water Quality. 3rd, Vol. 1. Recommendations, Geneva.*

William, N.R. 1983. *Environmental and Occupational Medicine.* Boston; Little, Brown and company. 667~691.