

「환경 모니터링」의 최근동향

山本峯澄

Hozumu Yamamoto 일본원자력연구소
보건물리부 방사선관리 제1과장

1. 환경방사선 모니터링의 추이

환경방사선 모니터링의 뿌리를 추적하면 우주선의 측정, 지하수, 온천수 안의 라돈 측정까지 이르게 된다. 이것들은 오늘날에 말하는 환경방사선 모니터링을 목적으로 하는 것은 아니었고 오로지 학문적 흥미를 위주로 한 측정이었다. 그러나 이 측정기술은 훗날의 환경방사선 모니터링 측정의 기초가 되고 있다.

제2차 세계대전 후에 미국, 소련의 수폭실험이 자주 실시되어 1954년의 제5 福龍丸 被災時에는 각 어항에 인양된 다랑이의 방사능이 GM 카운터를 사용하여 측정되었다. 오늘날의 환경試料 모니터링의 효시이다. 그 후 핵실험에 의한 전국각지의 방사성 낙진 측정이 정력적으로 실시되었다. 방사능조사 전문부회는 이 측정의 획일화를 기하기 위해 「방사능 측정법」의 메뉴얼을 작성했다. 현재의 과학기술청 방사능 측정 시리즈 제1권이다. 방사성 낙진 조사는 그후 관련연구 기관 및 지방공공단체에 위탁되어 핵실험 등에 의한 낙진의 상승이 예측될 경우에는 방사능 대책본부(소관, 防災 환경대책실)의 지령 밑에 天水, 우유 등의 방사능이 측정되고 조사될 체제에 있다. 중국의 핵실험이나 최근의 체르노빌 사고 등이 발생되었을 때는 이것에 의거하여 환경방사능 조사가 실시되고 있다.

1965년대에는 원자력발전소의 가동과 더불어 원자력발전소가 있는 지방 공공단체는 주민의 건강과 안전을 확보하는 입장에서 환경방사선 모니터링을 실시하게 되었다. 또한 사업자측도 시설에서 방출되는 방사성 물질의 주변환경 감시를 목적으로 하여 같은 모니터링을 실시하고 있다.

1975년에는 원자력위원회가 발전용 경수형 원자로시설의 통상운전시에 있어서의 방사성물질의 방출량을 오늘날에 말하는 「합리적으로 달성할 수 있는 최저(ALARA)라는 사고에 입각하여 低減하도록 하여, 원자로 시설에서 방출되는 방사성 희가스, 방사성 옥소 및 방사성 액체폐기물에 의한 주변공중의 전신선량을 5mrem/년 이하, 갑산선선량을 15mrem/년 이하로 하는 방출 저감의 「선량 목표치」를 설정하였다. 이것을 계기로 방출원 정보에 의한 환경선량 평가가 이루어지게 되었다. 시설기여의 선량평가 精度향상을 위해 환경試料가 核種分析되겠끔 되어, 방사선량을 이 보다 감도가 높은 측정을 하는 방향으로 되었다. 더욱이 1988년 3월에는 법령개정에 따라 선량목표치는 실효 선량당량 50 μ Sv/년으로 개정되었다.

원자력위원회 안에 환경방사선 모니터링 중앙평가 전문부회가 1978년에 설치되어 「환경방사선 모니터링 지침」이 작성되었다. 지방공공단체, 사업자가 실시하는 환경방사선 모니터링의 기본방침, 계획 및 결과의 평

가 방법이 제시되었다. 모니터링 기술의 수준향상, 획일화가 도모되어, 현재 이 지침에 따라 환경방사선 모니터링이 실시되고 있다. 환경방사선 모니터링의 목적은 ① 공중의 선량당량을 추정, 평가하고 ② 환경에 있어서의 방사성물질 축적상황을 파악하며 ③ 시설에서 예기치 아니한 방사성물질의 방출에 의한 주위환경에의 영향에 이바지하고, 평상시의 환경 모니터링을 강화할 것인지의 판단에 도움을 주기 위함이다. 이 지침에 나타난 모니터링 항목 및 내용을 Table 1과 같다.

1980년에 있었던 미국 스리마일 아일랜드(TMI) 원자력발전소의 사고는 원자력 방재 대책 재검토의 계기가 되어 원자력 안전위원회 방재대책 전문분과는 「원자력발전소 주변의 방재대책에 관하여」라는 지침을 책

정하여 환경방사선 모니터링 중앙평가 전문분과는 「근급시 환경방사선 모니터링 지침」을 작성하여 방재시의 모니터링을 명확하게 밝혔다. 긴급시의 공중 선량평가를 용이하게 할 수 있는 선량예측 시스템이 개발되어 현재 모니터링 지원체제의 확립이 진행중이다.

1988년 4월 ICRP 신권고(1977년)을 전면적으로 수용한 관련법령이 시행되어 국제단위계(SI) 단위인 시버트(Sv), 그레이(Gy), 베크렐(Bq)의 사용이 법적으로 의무지어졌다. 환경방사선 모니터링에 있어서도 이것에 따라 「환경방사선 모니터링에 관한 지침」이 변경되었다.

2. 공간방사선의 측정

원자력시설에서 방출되는 방사성 희가스

Table. 1. 대표적인 환경 모니터링 항목 및 내용

구 분	조사대상	측정빈도	측정방법 ⁽¹⁾	비 고
공간 방사선	선량을 적산선량	연속 4반기마다	Nal(Tl) 신치레이션 검출기 電離箱, TLD	
陸 上 試 料	대기부유진	1~3개월마다	核種分析	
	육수(음료수)	4반기마다	〃	
	우 유	필요에 따라	¹³¹ I 분석	
	토 양	반년마다	核種分析	表層土
	농산식품(葉菜) 根菜, 쌀 등)	수확기	〃	
	指標생물	4반기마다	〃	썩, 솔잎 등
	陸下物, 降水	매 월	〃	水盤法 등
海 洋 試 料	해 수	반년마다		표면수
	해 저 로 해산식품	반년마다 漁 期		표층토
	지표생물	4반기마다		모자반
기 상 요 소	풍 향 풍 속 강 수 량 기 온 등	원칙적으로 계 속		

注) 핵종분석은 원칙적으로 機器分析으로 한다.

(放射性雲) 및 地表面에 沈着한 방사성물질에서의 방사선은 시설주변에 설치된 모니터링 포스트, 모니터링 스테이션의 방사선 모니터에 의해 감시되고, 적산선량은 모니터링 포인트 등에 설치된 熱루미네스스 선량계(TLD)에 의해 측정되고 있다.

모니터링 포스트는 방사선량을 연속 측정하는 방사선 모니터만 구비하고 있는 것에 대해 모니터링 스테이션은 연속방사선 모니터, 다스트샘플러를 갖추어 기상요소의 측정機器까지 구비하고 있는 것도 있다. 모니터링 포인트는 TLD의 적산선량계를 수납한 巢箱狀이다. 모니터링 포스트, 모니터링 스테이션의 지시치는 전화회선 내지 무선을 통하여 중앙에 보내져 집중감시되어 있다.

방사선량을 감시하는 방사선 모니터는 당초 GM管式이었으나 감도의 점에서 NaI(TI) 신티레이션式으로 바꾸어, 다음으로 조사선량율에 대응한 계수가 얻어지는 DBM방식(波高弁別 바이아스 變調방식)의 회로가 개발되어 조사선량율이 直讀될 수 있게 되었다. 또한 NaI(TI) 신티레이션式은 광자 에너지의 정보를 얻을 수 있고, 雨中の 라돈·트론 娘核種에 의한 영향정보를 알 수 있으며 시설기여의 방사선과 식별하는 장점이 있다. 조사선량율을 고감도, 高精度로 측정할 수 있는 고압 아르곤 電離箱式도 사용하게 되었다.

TMI의 사고후 고선량율(R/h 오더) 감시의 중요성이 지적되어 「사고시의 방사선 계측의 지침」이 정해졌다. 발전용 원자로 시설에는 이 지침을 만족시키는 방사선 모니터가 설치되어 있다.

1988년 4월부터 SI단위의 사용에 따라 조사선량율($\mu\text{R/h}$)의 측정으로 옮겨져 공기흡수선량율($\mu\text{Gy/h}$)에 의한 측정이 이루어지게 되었다. 지금까지의 측정과의 整合性 때문에 조사선량율(C/kg)의 사용이 바람직하지만, $1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C/kg}$ 라는 환산수치에 익숙하기 어렵다는 점, 실효선량 당량율($\mu\text{Sv/h}$)는 동일 방사선장일지라도 入射방향, 인체의 크기에 따라 다르다는 점, 또한

1cm 선량당량율과의 구별이 어렵다는 점 등의 이유에서 공기흡수 선량율을 사용하게 되었다. 공기흡수 선량율과 지금까지의 조사선량율과의 관계는 $1\text{R/h}=8.7\times 10^{-3}\text{Gy/h}$ 이며 대략 1/100이라 볼 수 있다.

3개월간의 적산선량의 측정에는 감도와 안전성의 점에서 TLD가 사용되고 있다. TLD는 재차 독해가 불가능한 점, 素子間에 감도의 혼선에 있는 결점도 있어, 최근 측정기간의 중간에 측정이 가능하고 또한 감도도 TLD와 손색이 없는 유리선량계의 사용이 검토되고 있다.

3. 환경 試料 방사능의 측정

공중 선량당량의 추정, 평가, 시설에서 방출된 방사선 물질의 축적상황의 파악 및 핵폭발 실험 등에 의한 자료파악을 위해 야채, 우유, 샘플, 물고기, 해초, 대기, 토양, 해수, 해저토 등의 환경시료의 방사능 및 大型水盤에 의한 방사성 降下物의 방사능이 감시되고 있다(Table 1 참조). 이와같은 측정대상물에는 사람에게 피폭을 초래시키는 経路上에 있는 것으로, 이를테면 茶 등 토지특유의 산물도 포함된다. 또한 사람의 피폭에 직접 관계가 없다 할지라도 방사성 물질의 분포, 축적상황의 파악에 도움이 되는 솔잎, 모자반 등의 지표생물의 방사능도 측정되고 있다.

채취한 試料는 일반적으로 건조, 灰化 또는 응집침전 등의 사전처리를 실시한 후 방사능이 측정된다. 방사능 측정은 1975년 이전에는 NaI(TI) 신티레이터에 의한 機器分析과 모든 베타 방사능의 계측이 주로 이루어졌지만, 1975년대부터 Ge 반도체 검출기가 널리 사용되게 되었다. 다시말해 에너지分解能이 좋다는 점, 컴퓨터에 의한 核種의 확인과 定量 결정이 용이한 이유에서 γ 선 방출핵종의 機器分析에는 전적으로 Ge의 반도체 검출기가 사용되고 있다. 또한 β 선 에너지가 낮은 트리티움은 低백그라운드의 액체 신티레이션 카운터에 의해 측정된다. 그

러나 모든 β 에 의한 방사능 측정의 뜻이 약화되어, 그 취급은 금후의 과제이다. ^{90}Sr , ^{239}Pu 등은 γ 선 계측이 불가능하기 때문에 방사화학적 분석이 실시되고 있다.

한편 핵연료 사이클에 따르는 시설설치 등과 관련하여 ^{14}C , ^{64}Ni , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{239}Pu 등의 長半減期 핵종의 환경시료 모니터링이 주목을 받고 있는 중이다. 금후 이러한 분석법의 확립 및 장기적 관측의 실시가 중요하게 될 전망이다.

4. 선량당량의 추정과 평가

공중의 선량당량은 두가지 면에서 평가된다. 그 하나는 원자력 시설에서 방출되는 방사성 물질에 의한 주변 공중의 선량이 선량목표치를 만족시키는가 아닌가 하는 평가이다. 이 평가는 원자로 시설의 설치시 내지 시설가동시에 행하여지는 것으로, 방사성 물질의 방출량에 의거 선량목표치를 만족시키고 있는지를 확인하는 것이다. 또 하나는 환경 모니터링에 의한 공간선량 내지 환경시료중의 방사능 농도의 측정치에 의거한 선량평가이다. 통상 TLD 등의 환경 모니터링의 결과 야채, 어패류등의 주요방사성 핵종의 농도와 섭취량 등에 의거 1년간의 실효 선량당량의 필요에 따라 算定된다.

1988년 4월의 법령개정 이전에는 전신피폭선량, 갑상선 등 장기선량이 평가되어 있었지만, 법령개정 후는 공중의 선량한도는 실효 선량당량(1mSv/년), 피부 및 눈의 수정체 조직선량당량(50mSv/년) 만으로 되어 이런 선량당량이 평가되게 되었다. 그러나 피부, 수정체의 선량당량이 문제가 되는 것은 ^{85}Kr 등의 β 선 방출핵종이 방출된 경우이며, 통상은 실효 선량당량의 평가가 주된 작업이다.

방출원 정보에서의 선량당량의 산정은 ① 방사성물질 확산의 평가, ② 방사성물질섭취량의 평가, ③ 체내섭취에 따른 선량당량의 평가 순으로 실시되어, 대기중에 있어서의 방사성 물질의 확산에 대해서는 기상관측

데이터에 의거하여 「기상설계」에 따라 산정한다.

일반적으로 光子의 에너지가 2MeV이하야 한다는 점과 等方照射여야 한다는 점 때문에 조사선량 (R)에 대한 실효 선량당량 (Sv)은 Fig. 1과 같이 $0.7 \times 10^{-2}(\text{Sv/R})$ 이하가 되어, 공기흡수선량(Gy)에서 실효 선량당량(Sv)에의 환산계수는 $0.7 \times 10^{-2} \div 0.87 \times 10^{-2} = 0.8(\text{Sv/Gy})$ 이 된다.

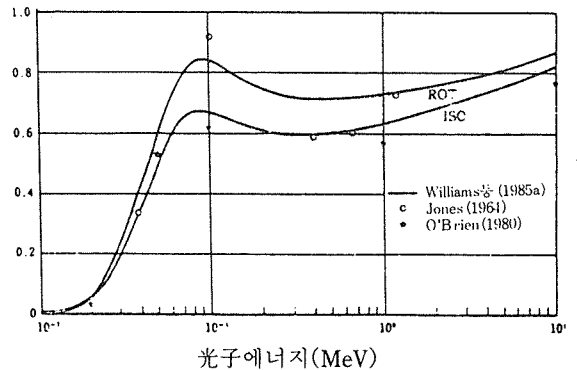


Fig. 1. 단위 조사선량당량에 대한 실효선량당량(10^{-2}SvR^{-1})

내부피폭에 따른 연간 선량당량 H(mSv)는 다음 식에서 산정된다.

인체형상 팬텀에 여러가지 결합구조로 入射하는 光子의 자유공간중에 있어서의 단위조사선량에 대한 실효선량당량

(ROT : 회전조사, ISO : 等方조사)

$$H = A \times DF \times F_n$$

여기서 A는 연간의 핵종섭취량 (Bq)이며, DF는 선량당량 환산계수 (mSv/Bq)이다. 주요 핵종의 선량당량 환산계수를 Table 2에 밝힌다. 또한 F_n 는 연령 補正係數이며 방사성 옥소 섭취에는 Table 3의 값이 주어진다.

방사성물질의 연간섭취량 A는 経口섭취의 경우 평균적 일본인의 농축산물, 해산물의 섭취량(Table 4)과 농작물 등의 재배기간, 시장회석, 세척에 의한 제거 등을 고려

Table. 2. 1Bq를 経口 또는 흡수된 경우의
 成人예탁 실효선량당량 환산계수
 (mSv/Bq)

核種	經口摂取	吸收摂取
H-3	1.7×10^{-8}	1.7×10^{-8}
C-14	5.6×10^{-7}	5.6×10^{-7}
Cr-51	3.6×10^{-8}	7.1×10^{-8}
Mn-54	7.3×10^{-7}	1.7×10^{-6}
Fe-59	1.8×10^{-6}	4.0×10^{-6}
Co-58	9.4×10^{-7}	1.9×10^{-6}
Co-60	7.0×10^{-6}	4.1×10^{-5}
Zn-65	3.9×10^{-6}	5.6×10^{-6}
Sr-89	2.3×10^{-6}	1.0×10^{-5}
Sr-90	3.6×10^{-5}	3.4×10^{-4}
Zr-95	9.2×10^{-7}	5.2×10^{-6}
Nb-95	6.0×10^{-7}	1.2×10^{-6}
Ru-106	5.8×10^{-6}	1.2×10^{-4}
I-129	4.0×10^{-5}	2.5×10^{-5}
I-131	8.7×10^{-6}	5.3×10^{-6}
I-133	1.7×10^{-6}	9.8×10^{-7}
Cs-134	2.0×10^{-5}	1.3×10^{-5}
Cs-137	1.4×10^{-5}	8.7×10^{-6}
Ba-140	2.1×10^{-6}	9.6×10^{-7}
La-140	2.1×10^{-6}	1.2×10^{-6}
Ce-144	5.3×10^{-6}	9.5×10^{-5}
Ra-226	3.0×10^{-4}	2.1×10^{-3}
Th-232	7.4×10^{-4}	4.4×10^{-1}
U-235	6.8×10^{-5}	3.3×10^{-2}
U-238	6.3×10^{-5}	3.2×10^{-2}
Pu-238	8.7×10^{-4}	1.1×10^{-1}
Pu-239	9.7×10^{-4}	1.2×10^{-1}

Table. 3. 예탁 선량당량 산정을 위한 방사
 성 옥소에 대한 연령 補正係數

核種	經口 섭취			흡입 섭취		
	성인	幼兒	乳兒	성인	幼兒	乳兒
¹³¹ I	1.0	4.2	8.5	1.0	4.3	8.1
¹³³ I	1.0	4.6	8.8	1.0	4.4	9.3

하여 다음 式에서 산정된다.

$$A = C \times M \times T \times f$$

여기서 C는 음식물 중의 방사능 농도(Bq/g)이며, M는 그 음식물의 매일 섭취량(g/d)이다. T는 음식물의 연간 섭취일수이다. 보존할 수 없는 먹을 것의 섭취일수는 수확 기간이다. f는 시장희석계수 등의 補正係數이다. 통상 시장희석계수는 乳兒의 우유섭취에 대해 0.5가 취해지고 葉菜의 除染係數는 0.5이다.

Table. 4. 일본의 음식물 섭취량

음식물	성인	소아	유아	단위
葉菜	100	50	20	g/d
우유	200	500	600	ml/d
생선	200	100	40	g/d
무척추동물	20	10	4	g/d
해조류	40	20	8	g/d

흡수섭취의 경우 前式의 C는 연평균 공기 중 농도 (Bq/cm³)이며, M는 호흡율(cm³/d)이다. 호흡율은 연령에 따라 Table.5와 같이 각각 다르다. T는 연간일수 365일이며 f는 1이다.

Table. 5. 호흡율

	성인	소아	유아
호흡율	2.3×10^7	8×10^6	4×10^6

5. 맺는 말

평상시의 환경방사선 모니터링의 동향을 해설했다. 일부 표현부족으로 엄밀성이 결여된 부분이 있을 것이라 사료된다. 또한 긴급시의 환경 모니터링에 대해 언급할 필요가 있었지만, 防災관계의 지침이 검토중에 있으므로 이번에는 할애했음을 밝혀둔다.