

세슘-137의 내부피폭선량 연구의 30년

內山正史

Masahumi Uchiyama

일본방사선의학종합연구소 인간환경연구부장

일본 방사선의학종합연구소는 체내에 있는 방사성핵종의 외부계측을 선구적으로 개시한 1963년 이래, 성인남자에 대한 세슘137의 체내량을 대기권내 핵실험과 체르노빌 사고 기간을 거쳐 현재까지 계속 계측하고 있다. 그 성과와 시대적 요청에 부응하여 다각적으로 진행된 일본인의 세슘137 피폭에 관한 연구 개요를 기술한다. 또한 체르노빌 사고의 건강 영향에 관하여 실시하고 있는 구소련과의 연구협력에 대해서도 언급하였다.

1. 머리말

세슘137(^{137}Cs)은 우란의 핵분열에 의해 발생하며, 베타선과 감마선(정확히는 붕괴생성 핵종인 ^{137}Ba 의 붕괴로 생긴다)을 방출하여 30년의 물리적 반감기로 안정된 바륨으로 변화한다.

이 방사성핵종을 체내에 섭취하면 베타선과 감마선에 의한 피폭이 발생한다. 또한 몸 밖에 이 핵종이 있으면 방출한 감마선에 의한 외부피폭이 발생한다. 의학이나 생물학 분

야에서는 감마선을 방출하는 성질을 적극적으로 이용하여, 치료나 연구를 위한 방사선으로 이용하고 있다. 과거 동서대립의 냉전 때문에 수없이 많은 핵병기 실험으로 ^{137}Cs 가 방출되었다. 그 역사적 유물로써 이 핵종에 의한 피폭이 계속되어 왔다.

또한 원자로 운전중에도 발생하기 때문에 핵분열을 이용하는 원자력에너지 발전이용이 계속되는 동안은, 폐기물 형태의 피폭영향이 지속된다. 이와같이 우리가 ^{137}Cs 와 조우하는 기회는 비교적 많다.

이 방사성핵종은 체내에 존재하는 양(체내량)을 체외에 설치한 방사선계측기로 계측할 수가 있다.

2. 바이오어세이

영양학에서는 어떤 물질의 독성을 동물의 성장저해 등으로 검정하는 수가 있다. 이 시험방법을 바이오어세이라 한다. 보건물리분야에서는 이 용어를 약간 다른 의미로 사용한다. 즉 체내에 섭취된 방사성 핵종의 양에서

추정하는 것을 바이오어세이라 한다. 넓은 뜻에서는 홀바디카운터(WBC)에 의한 체내량의 측정도 이 낱말로 부를 수 있다.

WBC에 의한 체내량 측정은 시버트 등의 노력에 의하여 라듐 측정 등으로 1930년대에 실용화되고, 이후 검출기의 개량이 계속되어 NaI(Tl) 검출기와 플라스틱검출기가 개발되었다. 1950년대에 접어들어 핵병기 실험이 계속되자 방사성장하물에 의한 인류의 건강영향이 심각해졌다. 이 시기에 WBC의 체내 ^{137}Cs 측정의 적용이 시도되어, 그 유용성은 확고한 평가를 받게 되었다.

일본에서 WBC가 실용화된 것은 1960년대 초이며, 그 때까지는 바이오어세이가 내부피폭선량을 추정하는 오직 하나의 수법이였다. 전국규모로 방사성장하물 상황을 파악하여 그 건강영향을 추정하기 위해 과학기술청이 방사능측정의 네트워크를 펴던 것도 이 시기이다. 전국의 몇 지역에서 중학생의 뇨를 모아 ^{137}Cs 의 오염상황을 모니터하는 것도 편입되었다. 린모리브텐酸 암모늄에 ^{137}Cs 을 농축하여 이온교환수지로 정제한 다음, ^{137}Cs 을 백금산염으로 분리하는 방사화학분석이 주류였다. ^{137}Cs 은 베타선을 계측하여 양이 정해졌다. 이 모니터링은 1964년까지 실시되었으나 체내량의 추정까지는 발전하지 않았다. 생물학적 반감기, 뇨의 배설, 잔류관수(關數) 등 일본인에 대해 연구되지 않았던 것이 크나큰 장애가 되었다.

3. 대기권내 핵실험의 영향

일본원자력연구소(원연)보다 좀 늦게 방사선의학종합연구소(방의연)에서도 1963년에 2대의 WBC가 실용에 옮겨지게 되었다. 그 후 주로 방의연의 연구자 집단에 대해 체내량의 측정을 실시해왔다. 1960년대초에 실시된 대기권내 핵실험의 영향에 의한 ^{137}Cs 의

체내량은 1964년에 최대 약 520Bq에 달했다. 그 후 지속적으로 1970년초까지 크게 감소하였다. 중국은 일본에 가까운 실험장에서 대기권 핵실험을 계속하였기 때문에 체내량의 감소율에 영향을 미쳤다. 그러나 1980년을 끝으로 대기권내 핵실험이 중지되었기 때문에 체내량은 계속 감소하여 1985년에는 방의연에서 체내량 측정을 시작한 이래 최소가 되었다.

4. 생물학적 파라미터

이 파라미터 측정에 대해서는 원연 보건물리부 팀이 한 걸음 앞서 수명의 성인남자에 대한 Cs의 생물학적 반감기를 보고하고 있었다. 방의연도 WBC에 의한 성인남자군의 ^{137}Cs 체내량을 계속적으로 계측함과 동시에 그 피험자 각자의 하루 뇨 안의 ^{137}Cs 의 양을 방사화학으로 측정하였다. 평형시에는 체내량이 뇨중배설량의 약 120배임이 밝혀졌다(그림 1). 다음으로 10명에서 배설물 모두를 채공받아 ^{137}Cs 의 배설경로비를 측정하였다. 평균 88%가 뇨에서 배설되며 개인차는 극히 적었다($\pm 3\%$). 원연 그룹과 일치하는 결과였다.

체내량과 뇨중배설량 및 배설경로비를 이용하여 생물학적 반감기가 산정되었다. 생물학적 반감기는 ^{137}Cs 을 1회 섭취하여 WBC로 잔류량을 계측함으로써 용이하게 구할 수 있다. 그러나 이런 기회는 적으며, 강하물로 평형상태에 있는 시기를 생물학적 반감기의 산정에 이용한다. 즉 평형상태에 있는 체내량Q는 뇨중배설량 Eu와 뇨에서의 배설비 fu와는 (1)식의 관계에 있다.

$$Q = Eu \cdot T / (fu \cdot \ln 2) \dots\dots\dots (1)$$

이 식의 T는 생물학적 반감기이다.

그리고 1회 섭취후의 ^{137}Cs 는 (2)식에서 기술되는 전신잔류를 나타낸다.

$$R = \exp(-\ln 2/T_s) + (1-a)\exp(-\ln 2/T_L) \dots\dots (2)$$

여기서 $a/(1-a) = 1/9$ 이며, 연속섭취에서 평형상태에 있을 때 제1항의 기여는 무시할 수 있다. 통상 Cs의 생물학적 반감기는 T_L 를 말한다. 상세한 설명은 생략하지만, (1)식의 T에서 (2)식의 T_L 를 구하기 위해서는 $T/0.9$ 를 계산하면 된다. 이와같이 하여 일본 성인 남자 Cs의 반감기는 85일이며, 당시의 ICRP 표준인의 반감기보다 적다는 것이 분명하게 되었다. 그런데 약 20년 후에 체르노빌 사고가 발생하여, 뜻밖에도 또다시 Cs의 생물학적 반감기를 측정할 기회를 얻게 되었다. 마침 일본이 상대적으로 오염되어 있지 않은 것을 이용하여 오염지역에서 생활하고 귀국한 사람을 WBC로 계속 측정하여 반감기를 구하였다. 22명을 대상으로 생물학적 반감기가 얻어지고, 극히 긴 2명을 제외하여 약 20년 전의 결론을 뒷받침하는 결과가 얻어졌다. 그중 4명은 그 이전에도 생물학적 반감기의 측정대상자였다. 나이가 들에 따라 20년 동안 체격이나 생리적으로 변화가 있었고, 전신의 칼륨의 양은 정도의 차는 있어도 전원 감소하고 있었다. 그러나 생물학적 반감기가 단축된 예는 없었다. 2회의 연구결과를 합쳐 일본인의 성인남자에 적용하는 생물학적 반감기는 90일임을 제창한다. 현재 Reference Man은 110일이다. 이 수치는 거주지역, 식생활 습관, 경제상태의 차이에서 넓은 분포를 가진 것이다. 따라서 현재의 일본인에 대해서는 Reference Man의 수치를 적용해도 문제가 없다.

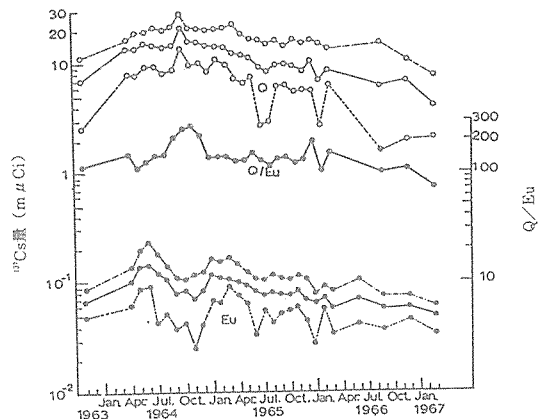
5. 유학과 MIRD법과의 만남

1960년대말~70년대초는 방의연에서 세슘을 비롯한 알칼리 금속의 대사에 관계되는 연구가 정력적으로 실시되어, 공통의 과제인 내부 피폭선량에 대한 연구회가 결성되었다.

여기에의 참가가 계기가 되어 선량계산에 흥미를 갖게 되었다. 1972년말부터 환경연구에 관한 전신계측연구를 미국 바테르노스웨스트 연구소의 Honstead 박사 지도하에 할 예정이었으나 박사의 급사로 트리튬의 생물영향을 연구하였다. 그동안 네바다에서 개최된 미국 보건물리학회에서 당시 미국에 보급하기 시작한 내부피폭선량 계산법인 MIRD법을 접하였다. 그 실용적인 수법은 매력적이어서, 귀국후 MIRD를 적용하여 종래에 계측되어 왔던 ^{137}Cs 체내량을 바탕으로 내부피폭선량을 계산하는 프로그램의 작성에 착수하였다.

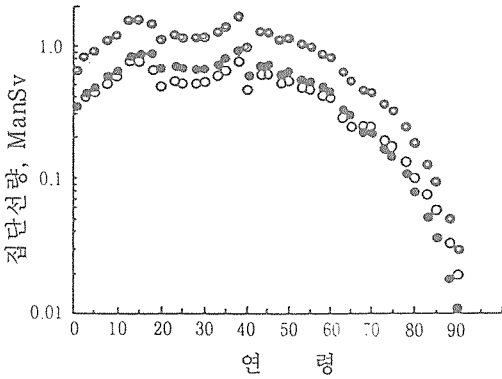
6. 피폭선량의 추정

체내의 ^{137}Cs 에서 입는 선량에 대한 일본인의 평균치를 구하는 경우 많은 인원에 대한 내부피폭선량을 추정하지 않으면 안된다. WBC는 설비투자가 고액이므로 설치된 시설은 한정되어 있다. 그러므로 WBC에 의한 측정으로 일본인의 평균치를 얻는데는 면밀한 준비가 필요하다. 추정치의 정확성이 어느



왜선: 최대치 실선: 평균치 점선: 최소치
○: 체내량, Q ●: 일일노증배설량, Eu ⊕: Q/Eu

그림 1. ^{137}Cs 체내량 및 1일노증배설량의 추이



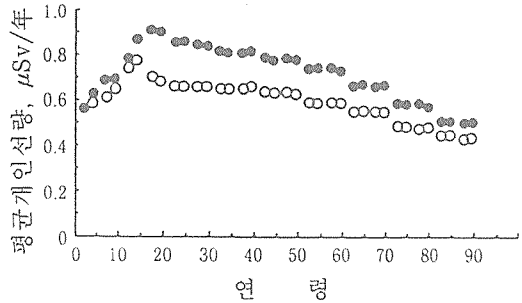
남자 : ● 여자 : ○ 양성 : ◎

그림 2. 체르노빌 사고에 의한 ^{137}Cs 의 연령별 단체선량

정도 보증되는 대체법으로, 앞에 말한 노의 바이오어세이와 섭취량에서 추정하는 방법이 있다. 전국 평균치를 얻기 위해서는 행정구단위로 통합된 데이터가 필요함과 동시에 적어도 연령층 및 성별의 생물학적 반감기와 식사섭취량이 추정되어야만 한다. 성인여성의 Cs의 생물학적 반감기는 성인남성의 70% 정도이지만, 이 성별차는 젊을수록 적고 유아에는 볼 수가 없다. 생물학적 반감기는 체중과 상관성이 있다. 또한 섭취량에 대해서는 소요열량의 관계에서 연령층에 대한 추정치를 설정한다. 체르노빌 사고의 영향에 대해 이 모델을 사용하여 선량의 추정이 이루어졌다.

7. 체르노빌 사고의 영향

1986년 4월 26일 소련방의 우크라이나국 체르노빌 원자력발전소에서 발생한 사고는, 그 영향이 일본에도 확실히 미쳐 방의연의 피험자군에 대해 1986년 5월에 시작된 체내량의 증가는 1987년에 최대치 약60Bq에 이르렀다. 과학기술청의 네트워크로 얻어진 1일 섭취량의 데이터를 바탕으로 모델을 사용하여 사고후 1년간의 내부피폭선량을 그림 2, 3

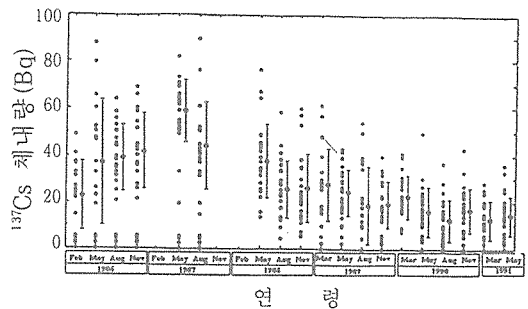


남자 : ● 여자 : ○

그림 3. 체르노빌 사고후 1년간의 연령별평균 개인선량

에 밝힌다.

그림 4에 나타난 사고에서 5년이 지나는데 동안 체내량에의 영향은 대충 종식되었다. 사고후의 체내량 감소의 프로파일은 대기권내 핵실험의 영향이 최대였던 시기에서의 경과와 지극히 유사하므로, 일본에서는 인체영향의 관점에서 1960년대초 대기권 핵실험을 하나의 현상으로 취급할 수 있다(그림 5). 1978년의 시점에서 2000년까지의 선량예탁은 대기권내 핵실험으로 85 μGy 였다. 사고에 의한 전신내부선량은 5년간에 5.6 μGy 로서 약 1/15에



○ : 개인체내량 ● : 체내량평균치

그림 4. ^{137}Cs 체내량의 개인별 및 평균의 경시 변화

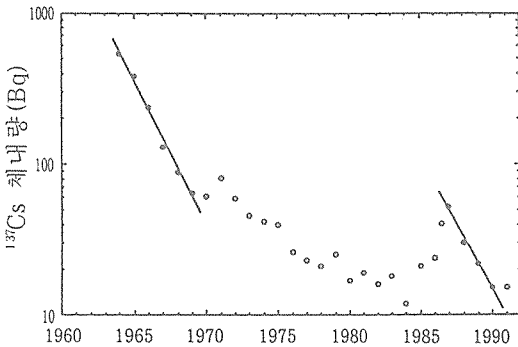
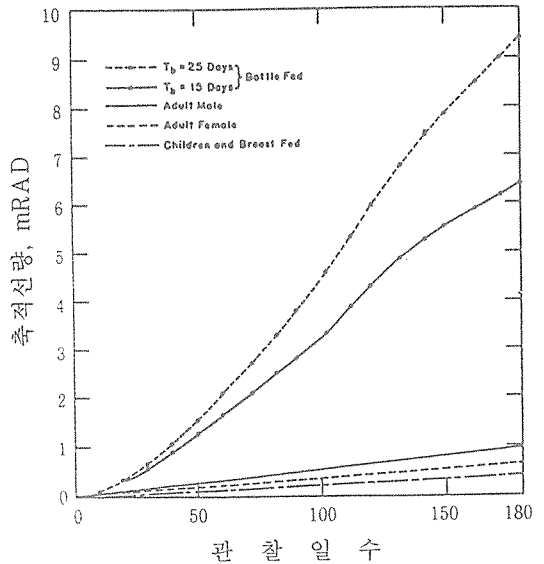


그림 5. 체르노빌 사고와 대기권내 핵실험의 연평균 ^{137}Cs 체내량 경향의 비교

상당하였다. 구소련 오염지구나 유럽의 방사성강하물이 많았던 여러나라에서 대기권 핵실험에 의한 영향을 상회하는 경우도 보고된 것과 비교해보면 영향이 극히 적다고 할 수 있다. 그와 반대로 대기권 핵실험에 의한 영향은 1960년대에서 1980년까지 17년간에 걸쳐 수없이 실시된 실험의 총화(總和)이므로 1회당의 실험과 비교하면 원격의 땅에서 발생한 원자력발전소 사고는 영향이 크다는 것이 상징적으로 실감된다.

8. 유아의 피폭선량

유아는 다른 연령층과 섭취하는 식품이 매우 다르므로 피폭선량의 추정에도 별도의 모델을 설정하지 않으면 안된다. 밀크에 의해 생후 약 반년까지 영양을 섭취하는데, 이것도 모유영양, 인공영양 및 혼합영양으로 분류된다. 일본에선 인공영양의 비율이 전국 평균으로는 대기권내 핵실험의 방사성강하물이 많았던 1960년대 전반까지 증가했다. WHO(세계보건기구)의 모유영양촉진운동에 의하여 그후 모유영양의 비율이 거꾸로 증가



심볼 : 위에서 인공영양아(생물학적반감기 25일, 15일), 성인남자, 성인여자, 소아와 모유영양아

그림 6. 인공영양아와 모유영양아, 5~6세아, 성인남자, 성인여자 축적선량의 비교 (1965年北海道)

하였다. 영양형의 비율은 지역마다 다르며, 동일 행정구역내에서도 도시쪽과 농촌쪽이 다르다. 또한 모유보육에 열심인 시설에서 출산하면 모유영양의 비율이 높게 된다. 그밖에 모친의 교육수준이나 가정의 노동유무 등에 의해서도 비율이 달라진다. 또한 유아의 발육 단계가 진행됨에 따라 인공영양의 비율이 크게 된다. 이러한 섭취상황의 복잡함을 반영하는 모델의 개발이 급후의 한 과제이다.

핵실험에 의한 ^{137}Cs 의 강하량은 1963년에 최대에 이르렀고, 목초나 사료에서 우유에의 ^{137}Cs 이행도 최대가 되었다. 일반적으로 저연령일수록 방사선에 대한 감수성이 높기 때문에 유아기의 피폭에 의한 보건영향은 중요한 과제이다. 방의연에서 임신부와 유아의 체내량 계측이 실시되었다. 태반과 육아용 분유의 ^{137}Cs 농도에 대해서도 측정되었다. 태반은 ^{137}Cs

Cs의 태아내에의 침입을 저지하는 기능을 갖지 않는다는 것, 유아의 Cs의 생물학적 반감기가 구미의 유아와 차이가 없다는 것 및 완전인공 영양아가 임계집단이라는 것 등의 식견이 일본인에 대해 처음으로 얻어졌다(그림 6).

9. 구소련과의 연구협력

대규모의 원자력시설 사고를 경험하지 않은 일본에게 체르노빌 사고에 관한 여러 문제는 매우 참고가 된다. 사고에의 대응이나 영향의 평가 등의 문제도 진지하게 다루어야 할 연구과제이다. 구소련의 오염지구에서는 체르노빌 사고의 건강영향 파악을 위해 WBC가 활약하였다. 그러나 다른 성능의 장치가 사용되었다는 것과 피험자의 연령층이 매우 광범위했다는 것 등, 개인선량을 확정하기 위해서는 문제점이 많다. 사실 이러한 것들은 대기권내 핵실험의 영향평가에 있어서도 지적된 바 있는 국제적인 문제점이기도 하다. 방의연은 WBC 및 그것에 의한 측정치 검증의 공동연구를 포함한 체르노빌 사고영향의 역학적 연구에 있어, 구소련과 1989년부터 실질적인 연구협력을 시작하여 오늘에 이르고 있다.

방사성 세슘은 거시적으로는 체내에 균일 분배하기 때문에 WBC에 의해 비교적 용이하게 계측할 수 있다. 정량을 결정하기 위해서는 적절한 팬텀을 사용하여 교정한다. 이 팬텀은 되도록이면 인체를 충실히 반영하는 것이 바람직하다. 그러나 인체계측학적으로 정확한 물리팬텀을 작성하는 것은 어려운 과제이다.

우크라이나의 방사선의학과학연구소(현재는 방사선의학센터)는 선량의 파악과 급후의 건강영향평가를 위해 높은 방사능으로 오염된 지역에서 수확된 콩을 건조시킨 후, 같

은 농도의 콩을 선별하여 방사선원으로 하는 물리팬텀을 개발하고 있었다. 인체형으로 입체재단한 천으로 된 자루 속에 이 선원을 넣어 팬텀을 작성한다. 최대의 중량을 가진 팬텀을 작성하는데 충분한 선원을 준비함으로써 다양한 팬텀을 현장에서 작성할 수 있다는 것이 이 팬텀의 큰 특징이다. 체격의 모든 영역에 걸쳐 방의연이 실시한 팬텀의 측정결과와 일치성을 보였다. 다음으로 「다른 성능을 가진 장치의 사용」에 관하여, 우크라이나와 벨라루시에 설치되어 현재까지도 사용되고 있는 WBC에 대해, 인체계측학적으로 정확한 물리팬텀과 여러시설에서 사용하고 있는 팬텀과의 교정계수 비교를 실시하였다. 이와같은 연구협력의 결과를 바탕으로 방사선의학센터는 차폐실이 달린 스캐닝형 WBC를 완성시켜 晩發영향의 파악을 위해 체내량의 계측을 광범위하게 전개하고 있다.

이 연구협력으로 일본을 방문한 사람에 대해 체내량의 계측을 실시해왔다. 당초 키에프 주민에 대해 약 600Bq이 관찰되었다. 10년 이상 경과한 현재, 키에프나 모스크바와 같은 대도시에서는 사고당시 일본인에게 관찰된 수십 Bq의 체내량이 관찰되고 있다. 사고후의 복구대응은 크나큰 경제적 피해를 초래했고, 소연방 붕괴에 의한 중앙정부의 원조중지에 따라 더욱 상황은 악화되어 원활한 식품 유통도 기대할 수가 없고 섭취제한도 실효를 거두기 어려운 상태가 발생하고 있다. 오염된 지역에서의 자가생산의 식품이나 자연의 산물을 섭취하는 기회가 증가하여, 체내량의 감소가 둔화하고 있다. 방의연은 러시아의 방사선위생연구소와 연구협력을 하고 있으나, 약 5KBq에 이르는 체내량이 1997년에도 측정되었다. 건강영향의 예측에는 섭취량의 특이성을 배려하여 피험자 집단을 면밀하게 계층별로 나누어, 대표성을 고려한 체내량 계측을 계속하는 것이 필요할 것이다.