

## 방사선사고의 역사 및 유형

서울대학교병원 핵의학과

### 강 권 옥

방사선사고는 인류가 방사선을 발견할 때부터 시작되었다. 첫 사고는 1986년 쉐르노빌 원자로에서 X선을 발견한 지 한 달만에 나타났고 1~2년 후부터 방사선화상 등 방사선장애에 대해 알려지면서 작업자들은 방사선 방어에 대해 권고를 하였다. 그러나 장애가 즉각 나타나지 않는 특성으로 인하여 일부 종사자들은 권고사항을 무시하였고 1905년에 방사선과 피폭이 암을 일으킨다는 것을 알게 되었다.

최초의 대량 방사선 피폭은 1945년 일본의 원자폭탄 투하였는데 인체에 대한 방사선 영향의 기초가 되었다. 피폭량과 방사선장애의 연관성이 잘 알려지게 되었고 이후 50년이 지난 지금 인체에 대한 방사선사고의 후기 영향에 대한 연구가 계속되고 있다.

1985년 체르노빌 원자력발전소의 화재 사건은 세계적으로 점점 늘어나고 있던 원전에 대한 경각심과 국제적인 협력체제의 필요성을 부가시켰다. 의학적으로도 급성 피폭에 대한 새로운 정보와 특히 새로 개발된 치료법인 골수이식을 적용하는 사례가 되었다.

1987년 브라질에서 일어난 <sup>137</sup>Cs 오염 사고는 원전사고 이외에도 많은 수의 대중이 피폭 받을 수 있는 경우를 보여주며 전신피폭, 국소피폭, 외부오염, 체내오염, 환경오염 등 다양한 방사선사고 양상을 보여주어 방사선 사고 처리에 많은 교훈과 실례를 보여 주었다.

### 핵무기 관련 사고 및 실험

핵무기 관련 사고 및 실험은 일본의 원폭투하 및 50년대 미국이 비키니 환초에서 실행한 60여 회의 핵실험이 대표적이다. 그 중 1945년 일본 히로시마 및 나가사키의 원자폭탄 투하는 사람들에게 방사선

의 공포를 떠올리게 하는 사건으로 현재까지 방사선사고의 지식의 근간이 되는 자료를 제공하였다.

히로시마 상공에 투하된 원자폭탄은 공중에서 폭발하여 섬광과 열폭풍을 일으키고 순식간에 시를 잿더미로 만들었다. 폭풍은 초속 3,200 m로 태풍의 100배였다. 폭발중심 반경 1 km 이내의 사람들은 흔적도 없이 사라지고 1.6 km 이내에서는 고도의 화상으로 즉사하였으며 4 km 이내의 사람들도 중화상으로 얼마 뒤 사망했다. 곧이어 나가사키에 제 2의 원폭이 투하되어 히로시마 6만명, 나가사키에 3만9천명의 사망자가 발생했다.

이후 체르노빌사고가 발생하기 전까지 급만성 방사선 장애와 유전적 이상 등 현재 알려져 있는 대부분의 지식이 여기에서 조사된 통계적 자료를 근거로 하고 있다.

### 1. 피폭자에 대한 초기 영향(원폭 투하 후, 수개월부터 수년 사이)

급성 방사선 증후군은 저 선량피폭에서는 보이지 않아 역치라는 개념이 생겼다. 이것은 선형선량반응 관계로서 알려진 이론과 대조적이다. 이 선형선량반응 관계는 방사선의 후기영향 중에서도 가장 잘 확립된 것으로 악성 질환이 한 예이다.

원폭 투하 후 수일에서 수주 사이에 과피폭된 생존자들은 발열, 구역, 구토, 식욕부진, 혈변, 탈모, 자반 및 점상출혈, 구강과 인후의 따끔거림(비인두 궤양), 잇몸의 위축 및 궤양(괴사성 치은염)을 경험하였다. 증상의 발현 시기는 다양하였으나, 대체로 피폭량이 많을수록 빨리 나타났다. 이들 증상이 일어나는 것은 구토를 제외하고 세포 분열과 깊은 관계가 있다. 분열하지 않는 세포(근육이나 신경)와 비교하면, 분열을 반복하고 있는 세포(골수나 장포피 세포)는 방사선에 매우 약하다. 방사선의 피폭량

이 많으면 1~2개월 후에 골수 부전에 의한 증상으로 사망하고 피폭량이 아주 많으면 10~20일 후에 장관증상으로 사망한다. 유엔과학위원회(UN's Scientific Committee)의 보고에서는 주로 원폭 피폭 생존자, 방사선 사고피폭자 및 방사선 치료 등의 정보에 기초를 두어, 60일 이내에 50%의 사람이 사망하는 방사선 피폭량(LD<sub>50</sub>/60일)을 추정하였다. 이에 따르면 치료를 하지 않은 경우는 골수선량으로 약 2.5 Gy 이상, 만약 충분한 의료가 가능한 경우에는 5 Gy정도이다.

방사선에 의한 백내장은 원폭피폭으로 인해 잘 알려진 급성장해 중 하나이다. 방사선 피폭 후 수개월 이상(평균 2~3년) 잠복기가 지난 뒤에 증상이 나타나고, 노인성 백내장과는 다르게 대부분 진행하지 않고 시력 장애를 일으키는 것도 적다. 또, 방사선의 양이 적은 경우에는 영향이 없어 역치가 있다는 점이 암 발생과는 다른 점이다.

## 2. 피폭자들에 대한 후기 영향

원폭 피폭자의 백혈병 발생 위험도는 가장 빨리 인정된 방사선피폭에 의한 후기 영향이다. 피폭자들의 백혈병 위험도 증가에 관한 초기의 보고는 1950년대 전반에 발표되었고, 과거 45년 간에 발표된 방사선영향연구소 보고서 중 백혈병 위험도에 관한 것은 50건 이상이었다. 1990년 현재 유의한 방사선량에 피폭된 50,113명의 수명 조사 대상자 중 176례의 백혈병 사망례가 확인되었고 이 중 약 90례가 방사선피폭에 의한 것으로 추정된다. 전형적인 피폭생존자(평균 피폭량 약 0.2 Sv)의 평생 동안 백혈병 위험도의 증가는 약 0.001이다. 이것은 피폭되지 않았던 사람의 평생 백혈병 위험도의 약 1.2배에 해당한다. 이것은 비교적 낮은 위험도이지만 피폭 후 수년간에 집중된 것으로 매우 두드러졌다.

백혈병 이외의 모든 암을 모아 본 경우에도 장기별로 본 경우 위, 폐, 간, 결장, 방광, 유방, 난소, 갑상선, 피부 등의 암, 다발성골수종에서도 과잉 위험도가 인정되고 있다. 1990년 말 현재 유의한 방사선량에 피폭된 50,113명의 수명조사 대상자 중 백혈병 이외의 암에 의해 사망한 사람이 4,687예 있었다. 만약 이 대상 집단이 피폭되지 않았더라면 이

기간 중에 4,306예가 암에 의한 사망했을 것이라고 추정된다.

그 밖에 (1) 태내 피폭자에 대한 영향으로 신체적, 정신적 발육 성장의 장애와 암 발생, (2) 원폭피폭자의 자녀에 대한 방사선의 유전적 영향 (3) 원폭 피폭자들의 정신적 영향 등이 보고되었다.

## 원자력 발전소 사고

원자력 발전소 사고는 1979년 미국에서 일어났던 Three Mile Island 원자력발전소 사고와 1986년 체르노빌 원자력발전소 사고가 대표적인 예이다.

1979년 TMI 원자력발전소 사고는 핵반응로 냉각 장치의 펌프고장으로 우라늄이 녹아 반응로 용기 바닥에 흐르고 백만 갤런 정도의 오염된 물이 누출되어 원자로 건물 및 부속 건물의 지하실로 흘러 들어간 중대사고였다. 다행히 환경으로 누출된 가스는 화학반응이 없어 인체에 흡수되지 않는 Xenon, Krypton이 대부분이었고 방사성옥소 및 다른 방사성 물질은 소량에 불과했다. 10,000샘플의 공기, 물, 우유, 물고기, 과일, 고기, 토양, 강바닥을 채취하였으나 인체에 영향이 없는 것으로 판명이 났다.

1986년 4월 체르노빌 원자력발전소의 사고는 지금까지 방사선사고의 최악의 경우로 특수한 상황에서 원자로의 안전을 평가하는 실험으로 유발되었다. 원자로의 온도가 급상승하여 연료중기의 팽창에 의한 폭발로 원자로의 뚜껑이 날아갔고 공기가 흡입되면서 가열된 흑연제어봉이 불이 붙어 원자로에 화재가 발생했다. 140톤의 연료 중 8톤이 대기중으로 방출되었고 여기에는 플루토늄과 그 밖의 고에너지 방사성 물질(핵붕괴 산물)이 포함되어 있었다. 방사능 물질은 폭발바람을 타고 유럽을 비롯한 전 세계에 퍼져나갔다.

### 1. 체르노빌 원자력 발전소 사고에 의한 피폭자

1) 발전소직원·소방구급대원 등 499명이 경과 관찰을 위해 일시적으로 병원에 수용되었다. 사고 당초 해당한 수십 명은 수천 mSv(수 Sv)으로 말하는 치사량의 선량을 받았다. 1 Sv 이상의 피폭을 받은 사람은 255명이 있었다.

2) 출입금지 지역이라고 지정된 30 km 권내(총 면적 4,300 km<sup>2</sup>)의 주민 11만 6,000명(그중 10%의 사람이 50 mSv를, 5%의 사람이 100 mSv 이상을 피폭 받음. 피부피폭 선량은 100~200 mGy로 추정된다).

3) 사고 영향의 경감에 관련된 활동에 종사하였다고 해서 등록되어 있는 사람이 약 60~80만 명이며 특히, 동원되어 발전소의 제염과 기능회복에 노력한 사고처리작업자(평균 피폭 선량은 100 mSv, 10% 정도의 사람은 250 mSv, 5%의 사람은 500 mSv를 초과했다)의 20만 명을 포함하는 집단이다.

4) 그 후의 조사로 추가된 3공화국의 오염지구(5~40 Ci/km<sup>2</sup> 거주자 82만 5,000명의 집단.

## 2. 급성 방사선증후군

체르노빌 사고의 주된 피해는 방사성 물질의 방출이었다. 화상과 외상을 당한 사람은 한 명에 불과했다. 사고 수일 후 내부오염에 대해 조사한 것에 따르면 0.01~0.1 Gy정도인데, 이 범위에서는 급성 방사선 증후군이 나타나지 않는다. 전신 감마선 피폭선량은 림프구의 염색체 조사에 의해서만 가능했다.

1) 전구 증상: 가장 심한 환자들은 사고 15~30분 후에 구역과 구토를 했다. 24시간 뒤 피로, 발열, 설사, 피부와 점막의 발적, 침샘의 부종, 림프구 감소(<1,000개/mm<sup>3</sup>)가 나타났다. 상기 전구 증상들은 급성 방사선증후군을 일차 선별하는 데 충분히 예민하여 사고 36시간 후 모스크바 병원에 이송된 128명의 환자는 한 두 가지의 전구증상을 보였는데 이들 중 99명이 급성 방사선증후군으로 판명되었다. 체르노빌 사건의 경험으로 전구증상에 대한 치료의 발전은 없었으나 차와 비행기 등 수송에 의해서는 심한 환자에게 있어서도 상태를 나쁘게 하지는 않는다는 것을 보여줬다.

2) 골수 증상은 115명에서 나타났는데 0.1~0.6 Gy 피폭선량에서는 피폭 4~5주 후에 중성구, 혈소판, 적혈구 수가 정상범위의 하한 정도로 약간의 감소만 보였다. 0.6~1.5 Gy 피폭선량군은 중성구와 혈소판이 좀 더 감소하여 피폭 후 30일 정도에 하한치(nadir)를 보였다. 세 가지 혈액 세포 모두 피폭 선량이 많으면 더 빨리 더 많이 감소했고 1~7 Gy

사이에서는 선량이 많을수록 골수재생의 회복도 빨랐다. 그러나 이 이상의 선량에서는 반대로 선량이 높을수록 회복이 느렸다. 체르노빌의 경험에 의하면 9 Gy까지의 피폭은 자연회복이 가능하다.

3) 백혈구 감소에 의한 발열과 감염: 1~2 Gy의 피폭을 받은 환자 군에서는 12%에서 발열이 있었다. 발열의 빈도는 선량이 4~5 Gy로 증가하면서 70~80%로 증가하고 5~6 Gy에서는 100%에서 발열이 있었다. 발열의 시점은 모든 환자에서 중성구가 500개/mm<sup>3</sup> 이하로 떨어지는 것과 일치했다. 1~5 Gy 사이의 환자군에서 감염으로 사망한 예는 없었다. 4~5 Gy군에서 두 명이 사망했는데 1명은 사고후 21일째 anaphylactic shock으로 사망했고 다른 1명은 HLA가 다른 골수이식을 하였는데 이 식편대숙주반응으로 사망했다. 5~6 Gy군에서는 모든 환자에서 심한 발열이 있었고 항생제에 의해 호전되지 않았다.

## 3. 후기 장애

사고처리작업자 및 오염지역 주민에서 백혈병과 소아갑상선암의 증가가 있었다. 특히 소아갑상선암의 경우 그 증가가 뚜렷하여 1995년 말까지 15세 미만의 아이 약 890명에서 발생하였다. 원인이라고 생각되는 물질은 방사성옥소인 <sup>131</sup>I로 추정된다. 원자로사고 대비에 있어서 오염된 음식물의 섭취방지나 안정형 옥소의 적량의 배포 등, 사고 시에 필요한 대책에 교훈이 되었다.

방사선 이외의 영향으로 사고에 의한 심리적·사회적 영향은 과소평가 되어 왔다.

## 산업체용 방사선 사고

산업체용 방사선 사고는 주로 고선량의 방사선원에 의한 외부 피폭이며 국소 과피폭 사고는 흔히 발생하나 전신 과피폭 사고는 드물어서 경험이 많지 않다. 1982년 노르웨이에서 <sup>60</sup>Co 과피폭 사고가 전신 과피폭의 전형적인 예로 피폭 후에 급성방사선 증후군 즉, 골수부전과 장관손상에 의한 증상이 나타났다. 체르노빌 원전사고에서도 과피폭이 일어났지만 전형적인 급성방사선 증후군을 보이지 않았

는데, 방사성 물질에 의한 국소 오염이 주된 문제였기 때문이다.

사고는 감마선으로 의료용구를 소독하는 공장에서 65,000 Ci의  $^{60}\text{Co}$  소스가 노출된 상태에서 실수로 조작자가 방사선조사실 내부로 들어가서 일어났다. 그는 수분 후에 다시 나왔는데 조금 후에 공장 밖에서 쭈그리고 앉아 있는 체로 발견되었다. 입원하자마자 체온이  $38.5^{\circ}\text{C}$ 로 오르고 구역과 구토가 있었으며 얼굴에 홍조가 있었다. 하루가 지난 뒤 환자는 목이 따갑고 건조함을 느꼈고 눈이 가려웠다. 얼굴과 상체에 홍조가 있었고 결막출혈 및 각막부종이 있었다. 구강 및 인후부가 발창게 되었으나 점액이나 출혈은 없었다. 이 후 4일간 구역이 계속되었고 입속은 구내염이 심해졌다. 미생물 검사에서 *Candida*가 나와서 crystal violet과 암포테리신으로 치료를 시작하였다. 결막과 각막 증세는 사라졌다. 일주일 후 백혈구 수가 감소하여  $600\text{개}/\text{mm}^3$ 가 되었고 림프구는 이 중 20%였다. 혈소판은  $60,000\text{개}/\text{mm}^3$ 로 떨어졌다. 8일째 심박수가 증가하면서 체온이  $39.6^{\circ}\text{C}$ 로 올라갔고 다음날은  $40.0^{\circ}\text{C}$ 가 되었다. 패혈증 의심 하에 페니실린과 GM을 주사하였고 neomycin과, nalidixic acid, nystatine으로 장관 방역을 하였다. 입과 코에서 세균 배양은 *S. epidermidis*가 나왔으나 혈액배양은 음성이었다. 대변은 묽었으나 설사는 아니었다. 적극적인 항생제 치료와 백혈구 및 혈소판 수혈에도 불구하고 무뇨와 혈중 크레아티닌이 상승했고 사고 13일째 갑작스럽게 사망하였다.

전신 피폭량을 조사실 내부의 조사선량과 노출 시간, 위치 등을 가정하여 5~6 Gy로 추정하였다. 환자가 착용한 필름 배지는 완전히 새까맣게서 필름노출 한계를 넘는다는 것 밖에 알 수가 없어서 도움이 되질 않았다. 환자가 착용하고 있던 의복의 단추, 신발의 가죽, 손목시계 안의 루비 등이 오히려 도움이 되었다. ESR (electron spin resonance), TLD (thermoluminescence dosimetry)를 노르웨이, 독일, 덴마크에서 시행하였다. 환자의 바지 앞 주머니에 들어 있던 nitroglycerin 알약에서 ESR검사를 하니 40 Gy 정도로 추정되었다. 손목시계의 루비를 TLD로 측정하니 15 Gy의 흡수선량이 나왔다. 사

고 첫 날과 5일째 환자에서 채취한 림프구의 염색체 검사에서는 너무 많은 변이가 보여 이 방법으로는 선량추정에 한계가 있었다. 신체의 위치와 앞주머니의 선량이 40 Gy인 것을 가정하여 재구성하니 평균 전신 피폭량과 평균 골수 피폭량이 20 Gy이었고 평균 두뇌 흡수선량은 14 Gy이었다. 장관의 피폭량은 15~35 Gy로 추정되었다.

방사선 투과 비파괴검사는 국내에서도 많이 사용되며 산업체 사고의 주요 원인이다. 여기서 사용되는 방사선원은 100 Ci 이상 되는 것도 있어서 수초간 노출되어도 위험할 수 있다. 1971년부터 1980년까지 10년 간 NRC(미국 원자력 규제위원회: Nuclear Regulatory Commission)에 보고된 48건의 심각한 방사선사고 중 전신 피폭선량이 25 rem, 국소 피폭선량이 375 rem을 초과하는 과피폭사고는 21건이었으며 이 중 15건은 작업종사자가 과피폭된 것이었다. 주로 국소피폭이 흔하며 방사선화상을 유발한다.

## 의료용 방사선 사고

의료용 방사선 사고의 가장 대표적이고 교훈적인 예는 1987년 브라질 Goiania에서  $^{137}\text{Cs}$  사건이다. 이 사건은 외부 전신피폭과 국소피폭 및 내부, 외부 오염의 다양한 양상을 나타냈으며 의료용 방사선사고도 대형화될 수 있다는 점과 사후 처리가 잘된 점 등 많은 교훈을 주었다.

1987년 9월 13일 브라질의 Goiania시에서 두 명의 부랑자가 버려진 병원에서 음식을 찾다가 방사선치료를 뜯고 50.8 TBq (1,300 Ci)의  $^{137}\text{Cs}$  소스를 파내 주변에 흩어지게 되었다. 9월 18일까지 현장에 방치되어 있다가 소스가 들어 있는 캡슐을 DAF라는 사람이 사서 자신의 고물집하장에 옮겨 놓았다. 그 날 밤 DAF는 캡슐에서 밝은 형광이 보이는 것을 보고 자기 집으로 가져와 친척, 친구, 이웃사람, 구경꾼들에게 자랑했다. 그들 소스 자체를 가지고 놀며, 몸에 바르기도 하고, 주머니에 넣어 각자 집에 가져가 또 다른 사람들에게 보여줬다. 9월 21일 소스를 분해하여 가루로 만들어 사람들에게 기념품으로 나누어주었다.

9월 28일 DAF의 부인이 자신과 주변사람들에게 공통적으로 구역, 구토, 설사, 식욕부진 등 위장관 증상과 기운이 없고 발열, 화상 증상이 있어 자기 남편이 구입한 빛나는 물체와 관련된 것을 의심하여 소스가 들어 있는 용기를 가지고 버스를 타서 보건과에 오게되었다. 보건과 직원이 이를 독성 물질로 파악하고 119를 불렀으며 다음날 의사와 보건물리학자가 방사성물질임을 발견하고 원자력기구에 연락하게 되었다.

환자분류(triage)를 보면 주변의 인구 112,800명이 올림픽 스타디움에서 모여 방사선 오염검사를 받았으며 129명에서는 내부와 외부오염이 있었고 120명은 의복에 오염이 되었다. 20명이 급성방사선 증후군으로 입원하여 17명이 골수억제의 소견이 있었고 그 중 8명은 심한 골수억제가 나타나 4명은 사망하였다. 또 28명에서 국소피폭으로 여러 정도의 방사선 화상이 있었는데 4명의 환자는 신체를 절단해야 했다. 내부오염이 있는 사람들은 제거를 위한 치료를 하였다.

피폭자들이 무지하고 법적 제재를 두려워하여 방사선에 노출된 상황을 재구성하기가 어려워 피폭량의 측정은 생물학적 검사에만 의존하였다.

이 사건의 특징은 (1) 원전사고가 아니라도 불특정 다수에게 방사능 피폭이 되는 사고가 있을 수 있고 (2) 인지하지 못하는 상태에서 방사선에 노출되고 이 사실이 지연 발견되며 (3) 피폭자들의 무지와 협조가 불량하여 노출상황을 재구성하기 어렵고 (4) 전신피폭, 국소피폭, 내부오염, 외부오염이 혼재되어 있다는 데 있다.

의학적 교훈으로는 모든 환자가 감염으로 죽어 골수억제환자에서 감염의 통제가 가장 중요하며  $^{137}\text{Cs}$ 의 내부오염 제거에 Prussian blue가 효과가 입증된 것이다.

## 1. 초기오염조절

### 1) 올림픽 스타디움에서의 통제

1987년 9월 3일 오염통제팀은 오염이 의심되는 사람들을 올림픽 스타디움에 모아서 텐트를 치고 방사선 검출을 신속히 진행하였다. 라디오 TV 신문 등 대중매체를 통해서 사람들에게 오염의 가능성에

대해서 알리고 스타디움에서 방사선 검사를 사용하도록 선전했다. 사고가 일어난 뒤 첫 주에 6만 명의 사람이 검사를 받았고, 12월 끝날 때까지 11만 명이상이 검사를 받았다. 방사선 오염검사는 두 개의 Geiger형의 서베이미터와 한 개의 Babyline 검출기와 나중에 cps단위로 표현되는 검출기를 사용했다.

오염통제시작 초기에는 사람들이 흥분하여 거의 공황수준에 가까워 경찰의 개입이 필요했다. 총 11만 명의 검사대상자 중 260명이 오염이 된 것으로 판명이 났고 이 중 183명은 피부오염이 되어 있었다. 이들 183명은  $^{137}\text{Cs}$ 의 흡입이 의심되어 병원으로 옮겨져 추가검사가 필요했다. 모든 경우에 오염된 의복은 벗겨졌다. 각각의 경우 등록을 하여 오염의 원천을 찾기 위해 오염 당시의 상황과 그 후의 행동에 대해 잘 기술하였다.

오염되지 않았던 사람들에게는 오염되지 않았다는 증명서를 발급하였는데, 당시 호텔과 대중교통에서 이들을 거절하는 경우가 있었기 때문이다. 실제로, Goiania에서 Manaus로 가는 비행기편은 착륙거부를 당해 모든 승객이 되돌아 왔다.

흥미 있는 것은 처음 검사한 6만명 중 8.3%라는 많은 인원이 목 주변의 피부가 붉어지고 구토와 설사를 하였는데, 나중에 밝혀진 바에 의하면 급성 스트레스 증후군에 의한 것이거나 알레르기 반응이었다.

초기 오염제거는 샤워, 식초를 이용하기도 하고 물리적 제거를 위해 산화 티타늄을 사용하기도 했다. 이 과정에서 스타디움에 토양과 하수가 오염되었다. 또한, 검사하기 위해서 모였던 사람들이 사용한 화장실과 벤치들 역시 어느 정도 오염이 된 것으로 밝혀졌다.

## 2) 오염지역의 통제

스타디움에 모였던 사람들이 제공한 정보에 따라 오염지역을 확인할 수 있었는데, 83채의 가옥, 6개의 병원, 8군데의 폐지 집하장이 포함되었다. 가장 신경 썼던 부분은 즉각 오염이 번지는 것을 막는 것이었다. 두 명의 기술자와 한 명의 운전사로 구성된 두 팀이 적절한 검사도구와 장비 오염 제거를 위한 물질을 가지고 알려진 장소로 파견되었다. 이들은 거리와 자동차에서 오염을 발견했고, 목적지

에 도착해서 오염상황을 평가했다. 가능하면 바로 오염제거를 실시했고, 너무 광범위하여 실시할 수 없는 경우에는 줄을 쳐서 사람들의 접근을 막았다. 모든 측정된 방사선량은 매일 사고대책반에 보고되었다. 몇몇 경우에는는 상황파악을 못하고 있는 건물주가 경제적 손실을 우려하여 애를 먹었다. 심지어 방사선이 전염병으로 오인하는 경우도 있었다.

### 3) 폐지의 통제

사고 당시 도시에는 낭마주인들이 많이 있었는데 이들은 폐지 거래상 들로부터 독립적이어서 오염된 폐지를 추적하기가 어려웠다. 8군데에 폐지 집하장에서 심하게 오염된 폐지가 발견되었고, 중앙폐지 집하장(COPEL)에 검사팀이 도착했을 때, 이미 오염된 폐지를 싣고, Goiania에서 100 km 떨어진 Anapolis에 있는 휴지공장으로 떠났다. 일부 팀을 보내 트럭들을 되돌려 보냈고, 일부 팀은 휴지공장에서 50톤의 오염된 휴지를 찾을 수 있었다. 시에 있는 모든 폐지 집하장을 조사하여 오염된 곳을 폐쇄 조치하였다. 폐지에 수집과정이 통제가 불가능하여 그 이후에도 계속적인 검사가 필요하였다.

스타디움에서 조사하는 과정에 두 명의 심하게 오염된 10대들이 초등학교를 다닌 것으로 알려져 그 학교들도 검사를 하였다. 그 결과 선생 1명의 지갑에 있는 돈이 오염되어 있음을 발견하였다. 결국, 은행에도 조사팀을 보내 검사를 하였고 수백 장의 오염된 돈이 이미 돌고 있음이 밝혀졌다. 대중에게 알려지면 문제가 복잡해 질 것을 우려하여 이 문제를 조용히 다루었다.

### 4) 하수와 지표수의 오염 통제

사고의 성질상  $^{137}\text{Cs}$ 이 도시하수 시스템과 지표수 및 지하수를 오염시켰을 가능성이 많아 사고대책반은 이들의 오염검사를 지시하였다. 그러나, 오직 한 개의 하수구덩이에서만 높은 양의  $^{137}\text{Cs}$ 이 발견되었다. 이 오염은 하수구덩이에 연결된 집에서  $^{137}\text{Cs}$  소스를 화장실에서 내려보냈던 것으로 알려졌다. 다행스럽게도 하수구덩이는 도시 하수 시스템과 연결되지 않았다. 소스를 제거한 후에 하수구덩이의 주의를 구멍을 파서 샘플을 채취해 본 결과

오염되지 않았음을 확인하였다.

다음으로는 빗물에 의한 지표수나 지하수를 조사하였는데, 전혀 오염이 되지 않았고, 이는 대부분의  $^{137}\text{Cs}$ 이 진흙과 석회애 흡착 고정되었기 때문이라 생각되었다. 사람들이 우려했던 수도는 오염이 되지 않아서 대중을 안심시키는 데 큰 도움이 되었다.

### 5) 부대시설

하루에 1,400명 정도의 많은 인원이 올림픽 스타디움에서 오염검사를 받고자 하였고, 이들 문외지화가 쇄도하여 별도의 직통전화를 설치하고, 상담원을 배치하였다.

## 2. 최종 오염제거 및 처리

건물을 철거하고 나무를 뿌리째 뽑고 땅을 파서(어떤 곳은 1미터까지 파다) 토양을 제거하고 깨끗한 토양으로 다시 메우고 시멘트를 바르고 거리를 청소하였다. 오염제거팀은 오버올, 장갑, 신발, 마스크 등 적절한 방호장비를 사용하였다. 12월말에는 시험적 목적으로 남겨둔 한 곳을 제외하고 모든 오염지역이 청소되었다. 3,000 m<sup>3</sup>의 방사선오염물이 Abadia de Goias에 임시 저장소에 여러 용기에 담겨 격리되고 주야로 접근을 통제하고 있다.

## 3. 국소 손상

가장 심하게 오염되었던 사람들은 오염 몇 시간 내에 또는 수일 내에 오염된 피부에서 통증, 열감, 화끈거림, 가려움, 저림, 감각이상을 호소하였다. 몇 명은 같은 부위에 홍조도 있었다고 한다. 수일에서 수주의 잠복기동안은 이런 증상들이 줄어들거나 완전히 없어졌고, 전형적인 화상과 마찬가지로 다시 통증 부종 이차 홍조가 나타났다. 2,3일 뒤에는 물집이 잡혔는데, 2주 이상 지속되었다. 이 물집의 경계는 분명하여 정상 부위와 손상 부위 사이에 방사선량의 차이가 컸음을 보여준다. 몇 사람에게서는 물집이 매우 통증이 있어 외과적 배기가 필요하였고, 4개월이 지나도 완전히 치유되지 않았다. 얇아진 피부에는 매우 민감해서 약간의 작용에도 통증을 느꼈다.

28명의 화상 환자를 다음과 같이 3군으로 분류했다.

1도 화상: 7명의 환자에서 오직 피부 홍조만 보였고, 이는 2주 동안 지속한 후 표피 박리가 일어났다. 피폭량은 5 Gy 이하로 추정된다.

2도 화상: 15명 환자가 이 군으로 분류되었는데, 임상증상은 초기 홍조 뒤에 10일정도 잠복기가 있었고, 2차 홍조와 물집이 생겼다. 치유과정은 느려서 얇고 위축된 피부가 되었는데, 약간의 자극에서도 매우 통증을 느꼈다. 피폭량은 12~20 Gy로 추정된다.

3도 화상: 6명의 환자에서 방사선 손상의 진행이 매우 빨라 위에서 보이는 중간과정이 잘 보이지 않았으며, 통증이 심했고, 화상부위는 괴사하여 한 환자에서는 오른팔을 잘라야 했다. 이유는 독성 물질이 흡수되기도 했고, 동시에 2차 감염이 되었기 때문이었다. 다른 환자들에서도 괴사조직을 외과적으로 절제해야 했다. 피폭량은 25 Gy로 추정된다.

의료진들은 새로운 문제에 봉착했는데, 사고당시 상황을 재구성하기가 어려워 모든 피폭량의 계산이 임상소견이나 검사 소견에 의존할 수밖에 없었다. 적외선 검사는 개방된 상처에는 별 도움을 주지 못했다. 방사성 동위원소 혈관 조영술은 방사선 손상의 각 단계마다 유용하게 쓰여졌다. 자기공명영상(MRI)의 사용은 심부근육조직(예를 들면, 허벅지) 손상정도를 파악하는데 초기 외에도 나중에 추적 검사하는데 도움을 주었다. 시기적으로 연속적으로 촬영한 칼라 사진도 매우 도움을 주었는데 상처의 범위를 쉽게 비교할 수가 있었다. 방사선손상의 국소치료를 하는데 있어서 항생제와 소염제 연고의 사용에는 약사의 도움이 필요하였다. 말초 혈액순환을 늘리기 위하여 사용한 혈관확장제의 전신 치료는 도움을 주지 못했다. 괴사한 조직과 궤양은 절제하였는데, 추후에 피부이식을 위해서였다. 방사선손상의 진행은 치료에 대한 반응정도 보다 그 부위에 피폭된 방사선량에 따라서 영향을 받는 것이 확실했다. 마지막으로 환자의 협조가 매우 중요하였는데, 소독제로 반복해서 상처부위를 씻고 2차 외상을 방지하는 것이었다.

#### 4. 내부 오염

내부오염을 확인하기 위하여 오염이 의심되는 사

람들에게서 체외 검체(대변과 소변)와 체내검사(전신 감마선 검출)가 사용되었다. 연령별 대상 모델이 흡입과 조사량의 평가를 위해 사용되었는데, 실험적 데이터와 좋은 관련이 있었다. 초기 검사는 소변의 방사선량을 측정하였는데, 방사선량이 매우 높아 휴대 방사선검출기로도 측정이 되었다. 개인 흡수량과 평생 예탁선량 피폭량 등을 추정하기 위하여 수학적 모델을 사용하였다. Prussian blue란 약이 내부오염제도를 위해서 투여되었는데, 이는  $^{137}\text{Cs}$ 을 대량으로 배설시킨다. 소변과 대변의 검체는 모아져서 이 약의 효과를 평가하기 위해서 검사되었다. 전신 감마선 검사를 위해 NaI 검출기를 설치하였는데, 95% 확률로 9.1 kBq (247 mCi)이 나왔다. 600명 이상의 사람이 이 검사를 받았다.

체외검체의 검사는 내부 오염을 걸러내는데 도움을 주고 오염제거 치료의 효과관정에도 도움을 준다. 이동 가능한 전신 감마선 검출기는 치료에 효과를 판정하는데 훌륭한 구실을 하였다. 연령별 대사 모델은 흡수량과 피폭량을 추정하는데 도움이 되었고 이는 가상검사에서 나오는 것과 실제 환자에서 나온 값이 잘 일치함을 보여주었다. 3 g/day 이하의 Prussian blue는 치료효과가 없었다. Prussian blue의 치료효과는 추후에 확인해야 할 것이다.

#### 방사성물질 운반 사고

운반사고의 중대사고에 대한 보고사례는 없으나 산업체 또는 의료용 방사성동위원소의 운송을 하는 국내에서도 충분히 일어날 수 있는 사고로 개연성이 높아 대책을 요한다.

운반사고의 특징은 교통사고가 방사선구역이 아닌 곳에서 일어날 수 있다는 것과 운송담당자가 사고를 당하여 조치가 불가능할 때 사고의 처리가 지연되며 사고의 상황판단이 어렵고 119 구급대 등 비전문가에 의해 처리가 될 수 있다는 점이 특징이다.

운반차량 내에 운반하는 방사능에 대한 운송물내역서 및 유관기관의 연락처를 비치하게 되어 있다. 방사성물질 전문 운반 차량인 경우 운전자가 다치지 않았다면 응급구조함, 휴대폰, 알파선 검출기(훈련받은 사람만 사용가능), 운송물내역서 같은 것을

제공받을 수 있다.

경미한 사고로 치료가 필요 없는 경상, 화재가 발생할 우려가 없고 운반차량이나 운반 용기에 손상이 없는 경우는 별 문제가 없으나 중상 또는 사망자를 동반한 사고, 운반 용기의 파손, 화재 또는 화재가 발생할 우려가 있거나 위험물질의 누출이나 운반용기의 상태 불명확한 경우 대책이 필요하다. 119 구급대 및 119 교환원에 대한 교육이 필요하다.

사고를 접수받은 119 교환원은 유관기관(원자력안전연구원, 과학기술처 원자력안전실, 원자력병원 방사선사고 응급치료팀, 한일병원 방사선사고 응급치료팀, 경찰 등)에 연락하여 전문가들의 도움을 요청한다.

119 구급대 등 일차 구호 자는 주의를 하며 현장을 접근한다. 가능하면 바람이 부는 반대 방향이나 높은 곳에서 낮은 곳으로 접근한다. 위험물질이 무엇인지 확인한다. 운송물내역서 같은 것이 도움이 된다. 현장을 고립시키고 사람들과 환경의 안전을 확보한다.

## 국내 방사선 사고

### 1. 원폭 피해자

국내는 일본 원폭 투하 시 피폭환자가 다수 있다. 대한적십자사 산하 원폭복지사업소의 등록현황에 의하면 1993년 7월 1세대가 2,159명 2세대가 5,633명으로 되어있다. 1991년부터 일본에서 치료를 하고있고 국내에서는 1986년부터 국고지원으로(연간 1억2천만원) 경희대 부속병원, 영남대 부속병원, 적십자 병원 등 14개의 지정병원에서 진료 및 치료, 건강 검진(2년에 1회)을 실시하고 있다.

### 2. 산업체 과피폭 사고

해방 이후 50~60년대에 발생한 방사능 피폭에 대한 자료는 파악이 안되고 원자력안전기술원에 따르면 70년대 이후에 발생한 방사선 과피폭 사례는 총 11건으로 모두 비파괴 전문업체에서 발생되었다. 원전에서 일어난 사고는 잘 알려져 있지 않다.

1978년 5월 고리원전부근에서 비파괴 전문업체가 취급부주의로 실제선원을 모의선원으로 착각하

고 서울로 이송하였으나 별다른 사고는 없었다. 1983년 7월 현대중공업에서 종사자 1명이  $^{192}\text{Ir}$  선원이 유도관 내에 남아 있는 것을 모르고 작업하다가 과피폭되어 우측 허복부를 2 cm 정도 절제한 경우가 있었다. 그 외에 다른 경우도 대부분 선원이 유도관 내에 남아 있는 것을 모르고 작업하다가 과피폭되어 국소적 장해를 입은 경우였다.

### 3. 1998년 11월 원자력병원 $^{137}\text{Cs}$ 등 도난사건

#### 1) 사건 개요

1998년 11월 9일 오전 9시 55분 원자력병원 방사선종양학과 방사성동위원소 저장실의 자물쇠가 파손되고 치료용 밀봉 방사성동위원소  $^{137}\text{Cs}$ 과  $^{192}\text{Ir}$  이 도난된 것을 발견하였다. 도난된 양은 자궁암 치료용  $^{137}\text{Cs}$  튜브 17개 22.14 GBq, 경부, 구강암 치료용  $^{192}\text{Ir}$  알갱이 12개 621.6 MBq과 보관폐기선원 280개였다(그림 1).

10시 15분에 발견자는 병원 방사선안전관리 책임자에게 보고하고 11시까지 동 사실을 과기부 방사선방어과, 원자력정책과, 원자력안전기술원 방사성물질규제실, 노원 공릉파출소에 전화로 신고하였다. 11시부터 도난선원을 찾기 위한 탐색활동을 개시하고 대책반을 편성하여 야간대기조를 포함하여 사후대책을 논의하고 조직적이고 체계적인 선원탐색을 시작하였다. 동위원소 탐색은 방사선치료실부터 방사선종양학과 진입경로, 쓰레기 하치장, 병원 건물 전체(1~8층)를 하였고 발견된 것이 없음을 확인 후 환자들을 안심시켰다. 12시부터 방사선종양학과 내에 상황실을 설치 긴급전화를 가동하였다. 대책반은 대외창구를 일원화하여 오후 2시에 기자회견을 통하여 경위를 설명하고 보도자료를 배부하였다.

다음날 오전 8시 45분 의정부로부터 전간호사가 자기 차량에 도난 당한 선원이 있다고 병원에 신고하여 병원회수팀과 원자력안전기술원 직원, 경찰이 신고인 남편 차량 의자 뒷주머니와 근처 풀숲에서 전량 회수하였다.



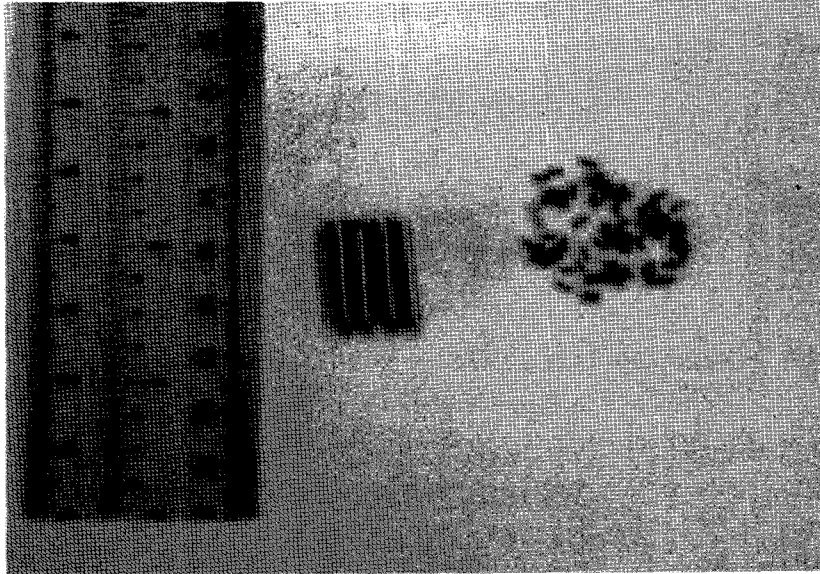


그림 1. 도난된 Cs-137 튜브와 Ir-192 알갱이.

### 2) 물리적, 생물학적 선량 측정

관련자들의 피폭량을 물리적, 생물학적으로 추정하였다. 동위원소의 회수에 급급하여 동위원소 각각의 위치, 방사능 양이 불충분하여 물리적 선량추적이 어려웠으며 도난선원 전량이 한곳에 모여 있고 30 cm 거리에서 진진조사를 받았다고 가정하면 시간당 2.2 rem으로 추정되고 1 m 거리라면 220 mrem/시간으로 계산된다. 관련자들 모두 1시간 이내에 피폭되었을 것으로 추정되어 2.2 rem 이하로 추정되었다. 생물학적 선량측정으로 전혈검사나 염색체 이상은 발견되지 않았고 아포토시스 분석과 미세핵 분석으로 환산한 피폭량은 22~35 rem이었다. 모두 증상 발현보다 상당히 낮은 값이다.

### 3) 사고에 관한 고찰

과기부 및 원자력안전기술원에서 점검한 결과 원자력법을 위반한 사실은 없었으며 출입문 보강과 감시 카메라의 설치를 고려하였다. 문제로는 동위원소 회수시 각각의 위치와 방사능량의 기록이 불충분한 점, 피폭 가능성이 있는 관련자의 조기검진에 수사팀의 협조가 안된 것이 있는 데, 이런 문제는 유관기관의 협조하여 평시 훈련을 하면 해결될

수 있다.

### 결 론

방사선사고의 역사는 사고에 대한 해석과 피해양상 및 대처에 중요한 교훈을 주며 그 유형을 분석함으로써 구체적인 대책을 개발할 수 있다.

상기 사고 유형들로 보아 원자력발전소 뿐만 아니라 국내에서도 많이 취급하고 있는 산업용, 의료용 방사성 물질에 의한 사고도 크고 작게 피폭, 오염 등 다양한 형태로 일어날 수 있고 불특정 다수의 인체에 영향을 끼칠 수 있으므로 각 상황에 따른 조직적인 대책이 필요하다.

1944~1998년까지 중대 방사선 사고로 직접 사망한 예는 113명에 지나지 않는다. 이는 상어에 물려죽는 수보다도 적은 수로 방사선사고가 원폭이나 체르노빌 사고에 의해 과장되어 인식된 점도 있다. 그러나 간접적인 영향 및 후기 영향은 아직 정확한 보고가 되지 않아 대중에게는 더욱 공포를 일으킨다. 이러한 심리적, 사회적 영향 역시 간과해서는 안 되는 부분이다.