

방사선은 해로운가?

서울대학교 의과대학

하 성 환*

I. 서 론

방사선이 발견된 이후 의학 및 산업분야에서 방사선의 이용이 증가하고 또한 방사선의 위험을 알게 된 이후 방사선의 위험에 대하여는 많은 연구와 보고가 있어 왔으며, 특히 1945년 원자탄 투하시 막대한 피해와 생존자에서 발생한 각종 암은 방사선에 대한 두려움을 일반인들에게 심어 주었고 이는 반핵운동으로까지 이어졌으며 이에 따라 원자력의 평화적 이용에 있어서도 장애요인으로까지 작용하고 있다. 그러나 방사선은 의학분야에서 없어서는 안될 진단 및 치료의 도구로 사용되고 있으며 산업분야에서는 공해가 가장 적고 경제적으로도 유리한 에너지원으로 이용되고 있다. 따라서 방사선에 대한 지식을 높이고 이를 효과적으로 그리고 안전하게 이용함으로써 우리사회의 여러 면에서 방사선이 많은 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

방사선을 구태여 정의한다면 공간을 통하여 에너지가 전달되는 것을 말한다. 그러나 이러한 생소로운 정의보다는 라디오파, 마이크로웨이브, 적외선, 가시광선, 자외선, X선, 감마선 등의 예를 들어 생각하는 편이 쉬운 일이다.

이러한 여러 가지 방사선 중 인체 또는 모든

생물체에 영향을 줄 수 있는 것으로 잘 알려져 있고 또한 그 영향이 가장 깊이 연구되어 있는 것이 X선 또는 감마선 등 소위 전리방사선(電離放射線: ionizing radiation)이다. 이는 방사선 중 비교적 에너지가 높은 경우 물질과 작용하여 이온화 현상을 일으킬 수 있는 방사선을 의미한다.

II. 방사선이 인체에 미치는 영향

전리방사선이 인체에 미치는 영향의 기전은 다음과 같다. 우선 방사선이 인체에 조사(照射)되면 인체 내의 물 분자를 이온화시켜 OH 자유유리기(free radical)를 생성하고 이는 세포핵 내의 핵산(DNA)에 작용하여 핵산의 화학결합을 파괴한다. 이러한 핵산의 손상은 일반적으로 99% 이상 원상으로 회복되나 일부는 정상적으로 회복되지 못한다. 이와 같이 회복되지 못한 핵산의 손상은 곧 염색체의 손상으로 이어지며 염색체의 손상이 비대칭이상(非對稱異狀: asymmetric aberration)인 경우 세포는 결국 사멸하게 되며, 염색체의 손상이 대칭이상(對稱異狀: symmetric aberration)인 경우 세포는 염색체의 이상을 가진 채로 생존하게 된다. 많은 수의 세포가 사멸하게 되면 결국 세포부족현상으로 인한 급성 또는 만성 방사선 부작용으로 나타나게 되며 인체의 대부분을 이루는 체세포(體細胞)가 염색체 이상을 가진 상태로 생존하는 경우 이의 일부가 돌연

* 서울대학교의과대학 치료방사선과학교실 교수
본 논문은 1996년도 대한방사선치료기술학회('96. 11. 30)의 초청강연 내용으로서 대한의학협회지 제38권 제11호에 게재된 논문임.

변이로 인한 암발생으로 나타날 가능성이 있으며 생식세포(生殖細胞)인 경우는 후손에 이르러 선천적 이상으로 나타날 수 있다. 이러한 현상이 나타날 수 있는 가능성에 대하여는 많은 체계적인 조사가 이루어져 있으며 이를 정리하면 다음과 같다.

1. 다량의 방사선에 의한 급성 증후군

일상적으로는 발생할 수 없으나 원자탄 폭발 또는 체르노빌 사고와 같은 경우 일시에 전신이 다량의 방사선에 피폭되는 경우에는 인체 내에 많은 세포가 사멸하게 되며 이로 인한 각종 장애가 나타난다. 10,000 rem의 방사선에 전신적으로 피폭되면 뇌 및 심혈관계의 장애로 인하여 수시간 내에 사망한다. 1,000 rem의 방사선을 받으면 위장관계의 상피세포가 사멸하여 10일 이내에 탈수 및 패혈증으로 사망한다. 300 내지 800 rem의 방사선에 피폭될 경우에는 골수의 조혈세포가 사멸하여 이로 인한 출혈 및 패혈증으로 30일 정도 후에 사망하게 된다. 1,000 rem 이상의 방사선에 피폭된 경우에는 치료방법이 전혀 없으나 그 이하인 경우에는 골수이식으로 치료할 수 있다.

2. 소량의 방사선에 의한 만성적 효과

급성 증후군이 나타나지 않을 정도의 소량의 방사선에 피폭되는 경우 또는 직업상 극소량의 방사선에 만성적으로 피폭되는 경우에 나타날 수 있다고 생각되는 것에는 다음의 세 가지가 있다. 즉 방사선에 의한 수명단축, 암발생, 후손에서의 유전적 영향 등이다. 그러나 이러한 영향은 비교적 많은 양의 방사선에 피폭된 경우에 나타난 현상으로부터 유추한 것이다.

1) 방사선에 의한 수명단축

방사선에 의하여 수명이 단축되는지의 여부는 확실하지 않다. 1961년 Rotblat는 마우스를 이용한 실험에서 100 rem당 수명이 5.4 %씩

짧아지는 것을 관찰하였다. 그러나 사고에 의한 전선피폭의 경우 이외에는 이러한 다량 피폭의 가능성은 거의 없다.

반대로 1969년 Mole은 주당 1 rem의 방사선에 피폭된 마우스나 guinea pig에서는 수명이 상당기간 연장되었다고 보고하였다. 원폭피해자에 대한 조사에서는 방사선에 의하여 발생한 암에 의한 사망을 제외하면 다른 원인에 의한 사망률의 증가나 수명단축은 관찰되지 않았다.

따라서 현재로는 소량의 방사선에 의한 수명단축 여부는 확실하지 않은 상태이다.

2) 방사선에 의한 암 발생

방사선 피폭에 의한 암발생은 방사선이 발견된 이후 X선과 방사선 동위원소를 이용하여 각종 연구를 시행하였던 물리학자들과 의사들 중 일부가 백혈병, 피부암 또는 골암에 걸렸으며 원폭 생존자들에서도 암 발생이 증가하였다. 현재로서는 방사선 피폭에 의한 각종 피해 중 가장 중요한 것으로 관심을 끌고 있다. 방사선에 의한 암의 발생은 주로 비교적 다량의 방사선에 피폭된 사람들, 특히 원폭 생존자들에서의 암 발생 데이터가 인용되고 있다. 원자탄 폭발시 받은 방사선의 양과 암의 추가발생 빈도(피폭자의 발생빈도와 일본인 전체의 발생빈도의 차이)로부터 계산한 방사선에 의한 암으로 인한 사망률은 1 rem 피폭시 1만분의 5에 해당한다. 그러나 이러한 수치는 비교적 다량(20 rem 이상)의 방사선에 피폭된 경우의 빈도로부터 계산한 수치이며 실제 소량의 피폭에서의 빈도로부터 직접 구한 수치는 아니다.

한편으로 위의 수치를 인정할 경우 이의 중요성은 다음과 같이 표현할 수 있다. 미국의 통계에 의하면 인구 100만명 중 암으로 사망하는 수는 163,800명에 달한다. 따라서 모든 사람이 1 rem의 방사선에 피폭될 경우 인구 100만명당 방사선에 의한 암사망률이 500명이므로 암으로 인한 사망률은 164,300명으로 증가하게 된다. 즉 암사망 가능성은 1 rem의 방사선에 의하여 16.38 %에서 16.43 %로 0.05 %

증가하게 되는 것이다. 흉부 X선 촬영시 환자가 받는 X선의 양이 10 mrem(1 mrem은 1/1000 rem)이므로 암사망 가능성은 0.0005 % 증가한다고 말할 수 있다.

3) 방사선에 의한 유전적 영향

방사선이 후손에 미치는 유전적 영향에 대하여는 과거에 매우 문제시 되었으나 이의 실제 빈도가 매우 낮아 근래에는 중요시되고 있지 않다. 근래의 UN 통계에 의하면 신생아 100만 명 중 105,900명이 각종 유전적 이상을 가지고 태어나는 것으로 알려져 있다. 모든 사람이 임신 이전에 1 rem의 방사선에 피폭될 경우 이로 인하여 다음 세대인 신생아가 이상을 가질 가능성은 22명이 증가할 것으로 추정되고 있다.

즉 선천적 이상의 가능성이 10.590 %에서 10.592 %로 증가하는 것이며 지속적으로 여러 세대에 걸쳐 1 rem의 방사선에 피폭된다면 149명이 증가하여 10.605 %로 증가할 것으로 추정된다.

따라서 1회의 흉부 X선의 영향은 제1세대에는 0.00002 %, 지속적인 경우는 0.00015 %로 표현할 수 있다.

III. 미량의 방사선이 인체에 미치는 영향

이상에서 기술한 방사선이 인체에 미칠 수 있는 위해 사실이 알려지면서 한편으로는 “방사선이 인체에 해롭기만 하고 인체에 유익한 면이 없는가?” 또는 “미량의 방사선도 해로운가?”하는 의문이 끊임없이 제기되어 왔다. 미량의 방사선은 인체에 해가 되지 않으며 더 나아가 미량의 방사선은 인체에 이롭고 방사선은 하나의 필수적인 환경요소라는 주장이 있다.

이러한 주장은 나름대로의 이론적, 실험적 근거를 가지고 있으며 최근 방사선작업 종사자에서의 건강실태조사를 통하여 일부 확인이 되고 있다.

일상 생활에서 또는 병원에서의 진료과정에서 환자 또는 의료진이 받게 되는 방사선은 매우 적은 양이며 실제로 서울대학교 병원에서

조사한 바에 의하면 진단방사선과, 치료방사선과 및 핵의학과에 근무하는 방사선작업 종사자가 받는 방사선량은 대부분 월간 10 rem에 미치지 못한다. “이러한 미량의 방사선인 경우 방사선이 인체에 미치는 영향은 어떠한 것인가?” 이에 대한 해답을 찾기 위하여 소위 “radiation hormesis” 이론, 즉 미량의 방사선이 인류를 포함한 생물체에 미치는 위해가 없으며 오히려 유익하다는 주장을 검토하고자 한다.

Hormesis는 그리스어의 hormaen(to excite, rapid motion)에서 유래된 단어로써 독물학(toxicology)에서는 다량인 경우 생물학적 process를 억제하는 물질도 미량인 경우 process를 촉진할 수 있다는 의미로 사용되며 homeopathy의 약리학적 원칙으로서 낮은 농도의 독소에 노출되면 이에 대한 반응으로 해독작용 및 회복작용이 증진되어 다음에 독소에 노출되더라도 이의 위해를 최소화함으로써 세포나 생체 더 나아가 종(species)에 유익한 방향으로 그 영향이 나타난다는 의미로 사용된다. 방사선에 있어서도 소량(1~50 rem)인 경우 세포 또는 인체에 유익하다는 이론이 radiation hormesis이다.

진화론적 시각에서 보면 모든 생물체는 처음 생겨나서부터 주위로부터 강도가 다양한 여러 종류의 환경인자(environmental agent)의 영향을 받아 왔으며 인자의 강도가 높은 경우 일부가 사멸하였고 낮은 강도인 경우 이에 적응하여 살아왔다. 방사선도 이러한 환경인자의 하나로서 소량의 방사선은 이에 대한 적응을 유도하였을 가능성이 충분히 있다.

실제로 인류는 항시 방사선을 받으면서 살아왔고 현재도 주위로부터 방사선을 받으며 살아가고 있다. 사람이 받는 방사선은 자연계에 존재하는 자연방사선과 사람이 만들어내는 인공방사선으로 나눌 수 있다. 이 중 자연방사선이 82 %를 차지하여 연간 240 mrem에 달한다. 여기에 속하는 것으로는 공기 중의 라돈가스로부터 받는 것이 약 55 %를 차지하며 우주선(cosmic ray)에 의한 것이 약 8 %, 암석이나 흙으로부터 받는 것이 약 8 %이며 나머지는 음식

물이나 마시는 물에서부터 온다. 인공방사선은 전체의 18%를 차지하며 이 중 X선 촬영에 의한 것이 11%, 핵의학 검사에 의한 것이 4% 정도이고 나머지는 생활 주변의 각종 기기로부터 오는 것이다.

다량의 방사선이 생물체에 해로운 것은 틀림이 없으나 미량의 방사선인 경우 과연 동일하게 해로우나 그 정도가 작은 것인지 또는 전혀 다른 방향에서 작용하는 것인지에 대하여 명확하게 말하기 어렵다는 이유로 인하여 미량 방사선의 생물학적 효과를 다량 방사선의 효과로부터 외삽(外挿: extrapolation)하여 추정하여 왔으나 이에 반하는 데이터가 상당수 있으므로 이에 대하여 요약하고자 한다.

미량의 방사선인 경우 (1) 방사선에 의하여 하나의 손상이 발생한 후 또 하나의 손상이 동일 장소에 발생하기 전에 회복(repair)됨으로써 완전한(회복 불가능한) 손상에 필요한 동일 장소 2개 손상으로 진행되지 못하며, (2) 미량의 방사선인 경우 회복과정이 더 효과적이고 (3) 세포 내의 회복기전이 유도됨으로 인하여 방사선에 의한 위해가 다량의 방사선에 피폭된 경우에 비하여 상대적으로 적다는 것은 잘 알려져 있다. 더 나아가 매우 낮은 양의 방사선에 피폭되면 회복기전에 필요한 새로운 단백질을 생성하는 유전자가 유도되는 적응반응(adaptive response)을 함으로써 후에 더 높은 양의 방사선에 피폭될 경우 이의 효과를 감소시켜 세포의 손상이 감소된다는 것이 radiation hormesis의 이론적 구조이다.

1. 적응반응의 생체외(in vitro) 실험 결과

소량의 방사선에 미리 피폭된 세포인 경우 이후 방사선 피폭에 의한 염색체 이상, 미세핵 형성(micronuclei formation) 및 변이(mutation)가 감소되는 적응반응을 나타내며 새로운 protein이 생산되어 DNA 손상부위에 특이적으로 결합하며 DNA의 손상회복이 증가되었다. 이러한 적응반응은 1 내지 2rem 피폭 후 4 내

지 6시간 후부터 나타나며 40시간 정도 지속되는 것으로 밝혀졌다.

2. 실험동물에서의 적응반응

골수세포에서 염색체 이상 및 미세핵 형성이 감소되는 것이 확인되었고 마우스 등의 설치류에서 수명이 증가하거나 또는 변화가 없는 것으로 보고되었다.

3. 사람에서의 역학조사 결과

사람에서는 원폭생존자, 환경방사능이 높은 지역 거주자, 방사선 작업종사자를 대상으로 사망률 및 암사망률에 대한 많은 조사 결과가 보고되었다.

1) 원폭 생존자

20 rem 이하인 경우 전체 암사망률은 대조군과 유의한 차이가 없었으며 2 rem 이하의 방사선에 피폭된 경우 전체 암사망률, 폐암사망률, 위암사망률이 대조군에 비하여 오히려 낮았으며 20 rem 이하인 경우 백혈병 사망률이 대조군에 비하여 낮았다(그림 1, 2).

2) 환경방사능

중국에서 대조지역(연간 200 mrem)에 비하여 환경방사능이 2.7배인 지역(연간 540 mrem)

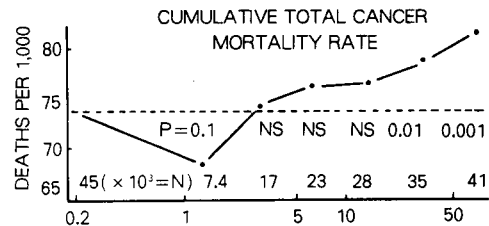


그림 1. 원폭 생존자에서의 방사선량에 따른 누적 암사망률
가로축의 수치는 방사선 피폭량이며 단위는 rem 임. 가로축 바로 위의 수치는 피폭자의 숫자임. 점선은 대조군의 암사망률임(Shimizu et al, 1992).

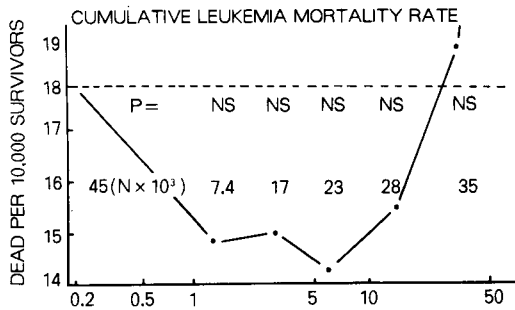


그림 2. 원폭 생존자에서의 방사선량에 따른 누적 백혈병 사망률
 가로축의 수치는 방사선 피폭량이며 단위는 rem임. 가로축 바로 위의 수치는 피폭자의 숫자임. 점선은 대조군의 백혈병 사망률임(Shimizu et al, 1992).

의 주민에서 조사결과 암사망률에 차이가 없었다(표 1). 미국에서의 조사결과는 환경방사능이 높은 지역일수록 오히려 암사망률이 낮은 것으로 나타났으며(그림 3), 또한 라돈의 농도가 높은 지역의 폐암사망률도 낮은 것으로 나타났다(그림 4).

3) 작업종사자

원자력 발전소 종사자 및 핵잠수함기지 종사자를 대상으로 한 미국, 영국 및 캐나다에서의

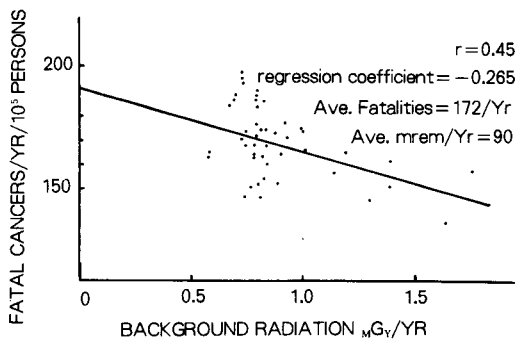


그림 3. 환경방사선 양과 암사망률의 비교
 하와이와 알래스카를 제외한 48개 주의 환경방사선 측정치와 암사망률의 비교에서 환경방사선이 높은 주의 암사망률이 낮은 경향을 보이고 있다(Cohen, 1980)

표 1. 중국의 고준위 자연방사선지역(HBRA)과 대조지역(CA)에서의 인구 10만명 당 각종 암사망률(연령보정치)

Cancer site	HBRA		CA	
	No	Adjusted Mortality	No	Adjusted Mortality
Nasopharynx	94	9.84	109	10.45
Esophagus	13	1.40	16	1.49
Stomach	53	5.60	47	4.44
Liver	115	12.05	145	13.92
Intestine	16	1.70	25	2.38
Lung	25	2.65	35	3.29
Breast	7	0.75	13	1.25
Uterine cervix	13	1.37	5	0.45
Leukemia	31	3.02	33	3.39
Osteosarcoma	5	0.52	6	0.59
Others	95	9.91	99	9.44
Total	467	48.81	533	51.09

From Wei et al(1990)

For the period of 1970-1986, 1,008,769 person-year observed in HBRA and 995,070 person-year in CA

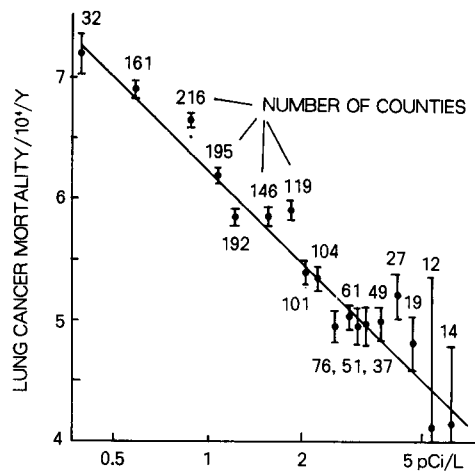


그림 4. 공기중 라돈의 농도와 폐암사망률
 미국 1730 카운티에서 측정된 라돈 농도와 폐암사망률의 비교에서 라돈 농도의 증가에 따른 폐암사망률의 급격한 감소경향을 보이고 있다(Cohen & Shah, 1991).

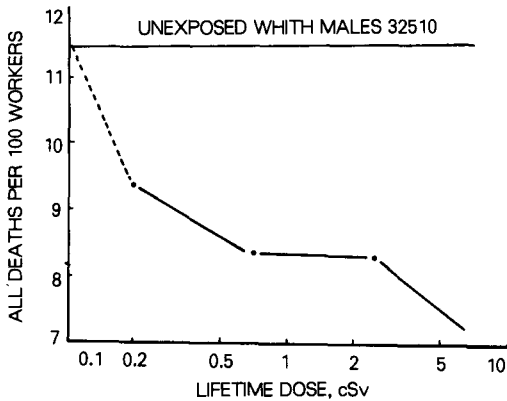


그림 5. 핵잠수함기지 종사자에서의 방사선 피폭량과 전체 사망률
1960년에서 1981년까지 미국 핵잠수함 기지에서 종사한 70,000명을 대상으로 한 조사에서 방사선 피폭량이 높을수록 전체 사망률이 뚜렷이 감소함을 나타내고 있다(cSv=rem)(Matanoski, 1991).

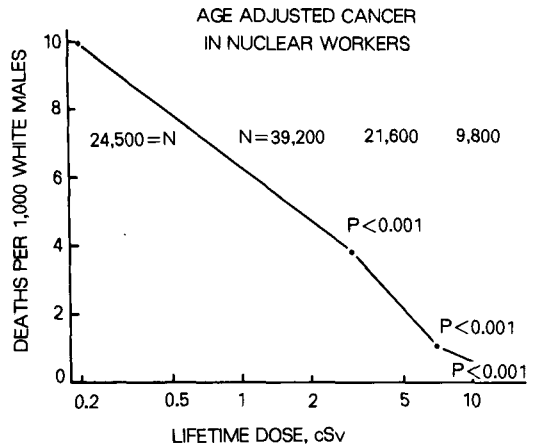


그림 7. 핵무기공장 종사자에서 방사선 피폭량과 암사망률
영국내 종사자를 대상으로 한 조사에서 피폭량의 증가에 따른 암사망률 감소경향이 뚜렷이 나타나 있다(Kendall et al, 1992).

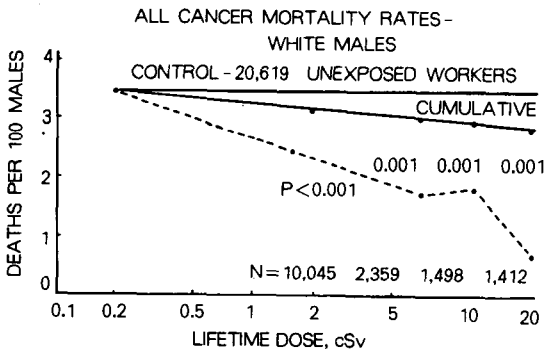


그림 6. 핵무기공장 종사자에서 방사선 피폭량과 암사망률
미국내 3개소의 종사자를 대상으로한 조사에서 피폭량의 증가에 따른 암사망률 감소 경향이 뚜렷이 나타나 있다(Gilbert et al, 1989).

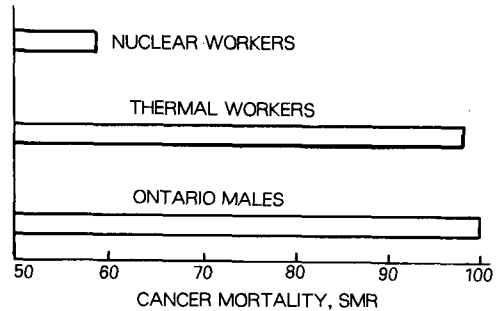


그림 8. 발전소내 종사자와 대조군의 암 표준 사망률 비교
캐나다의 발전소 지역에 근무하는 종사자 중 방사선작업 종사자의 경우 비방사선작업 종사자 및 일반 주민에 비하여 암사망률이 낮음을 나타내고 있다(Abbatt et al, 1983).

연구들에서 사망률 및 암사망률이 낮은 것으로 나타났다(그림 5~8). 이는 미량의 방사선 피폭에 의하여 인체 내의 면역기전이 활성화되어 여러 가지 질환에 대한 저항력이 증가된 것으로 추정된다.

IV. 요약

다량의 방사선에 피폭되는 경우 인체에 해로운 영향을 미치는 것은 틀림이 없으나 미량의 방사선인 경우에는 다량의 방사선인 경우와 다

른 효과를 나타내며 심지어 정반대의 영향을 나타내기도 한다고 볼 수 있으며 여러 역학조사에서 이러한 사실이 증명되고 있다. 1991년의 국제방사선방어기구(ICRP) 보고서 및 1994년의 UNSCEAR 보고서는 미량의 방사선에 대한 적응반응을 인정하고 있다.

일부 학자들은 소량의 방사선에 지속적으로 피폭(연간 1 rem)됨으로써 암사망률을 감소시킬 수 있다고 주장하면서 현재의 개념을 수정하여 피폭한계 및 법적 제한 등을 변경하여 환경방사능을 증가시킴으로써 향후 인류의 생활의 질을 향상시켜야 한다고 주장하고 있다.

참 고 문 헌

1. Shimizu Y, Kayo H, Schull WJ, Mabuchi K : Dose-response analysis among atomic-bomb survivors exposed to low-level radiation. In Low-Dose Irradiation and Biological Defense Mechanisms(Sugahara T, Sagan L, Aoyama T, eds) Excerpta Medica, Tokyo, 1991 ; 71-74
2. Wei L, Zha Y, Tao Z, He W, Chen D, Yuan Y : Epidemiological investigation of radiological effects in high background radiation areas of Yanfjiang, China. J Radiat Res 1990 ; 31, 119-136
3. Cohen J : Natural background as an indicator of radiation induced cancer. Proceeding of 5th IRPA, Jerusalem, 1980 ; 53
4. Cohen BL, Shah R : Mean radon levels in U. S. homes by states and counties. Health Phys 1991 ; 69, 243-254
5. Matanoski GM : Health effect of low-level radiation in shipyard workers DOE, Washington, 1991
6. Gilbert ES, Fry SA, Wiggs LD, Voelz GL, Cragle DL, Petersen GR : Analysis of combined mortality data on workers at th Hanford site, Oak Ridge National Laboratory, and Rocky Flats Weapons Plants. Radiat Res 1989 ; 120, 19-35
7. Kendall GM, Muirhead CR, MacGibbon BH, O'Hagan JA, Conquest AJ, et al : Mortality and occupational exposure to radiation : first analysis of the National Registry for Radiation Workers. Br Med J 1992 ; 304, 220-225
8. Abbatt JD, Hamilton TR, Weeks JL : Epidemiological studies in three corporations covering the nuclear fuel cycle. In Biological effects of low-level radiation. IAEA, Vienna, 1983 ; 351-361
9. Luckey TD. Radiation hormesis in cancer mortality. Int J occup Med Toxicol 1994 ; 3, 175-193