

방사선의 생물학적 작용 및 영향

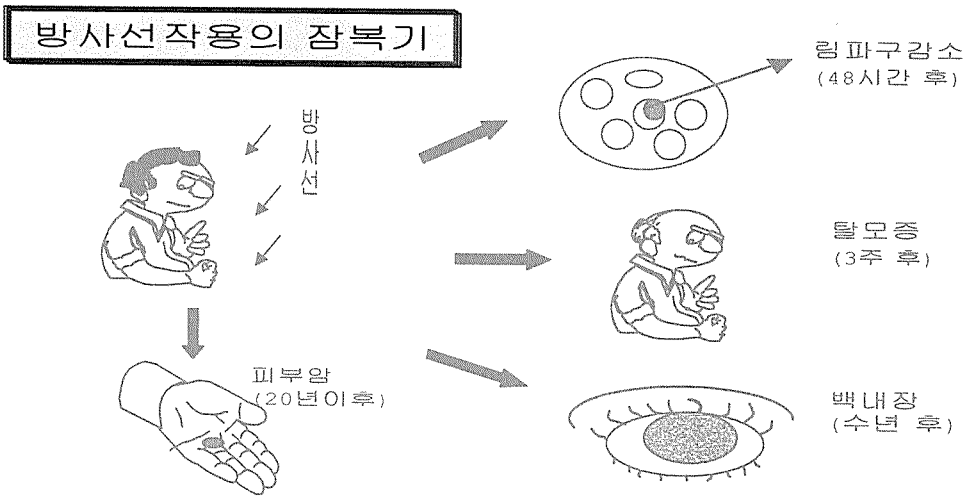
허 승 재

삼성서울병원 치료방사선과

1. 방사선의 생물학적 작용기전

방사선이 인체를 포함한 생물체에 조사된 경우 방사선의 작용은 물리학적 단계 (physi-

cal stage), 화학적 단계 (chemical stage)와 세포 및 조직 단계 (cellular and tissue stage)로 나누어 생각할 수 있다.



방사선 생물학적 작용과 시간적, 공간적 경과

물리적 과정 → 화학적 과정 → 생화학적과정 → 생물학적 과정
 10^{-15}초 10^{-6}초 10^{-3}초 시간~년

원자 · 분자 → 생물분자 → 세포 → 조직, 장기 → 개인, 집단

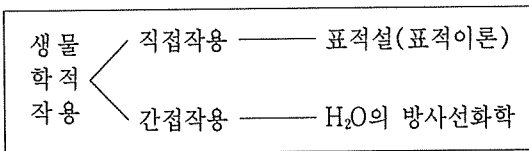
1.1 물리학적 단계

- 방사선이 생체를 구성하고 있는 원자에 전리 혹은 여기에 의해 에너지 부여
- 에너지의 크기, 방사선의 종류에 대응한 이온이 발생

1.2 화학적 단계

- 에너지의 부여에 따라 생기는 전자 및 전리된 원자는 극히 불안정
- 연쇄반응의 결과로서 이온기 (ion radical) 및 유리기 (free radical) 생성
- DNA 손상

1) 직접작용과 간접작용



- ① 직접작용 : 방사선의 이온화과정에서 나온 전자가 직접 DNA에 작용하거나 조사된 방사선이 직접 DNA에 작용
예) 고 LET 방사선 : 중성자선 등
- ② 간접작용 : 유리기 형성과정을 거쳐 방사선이 DNA에 작용
예) 저 LET 방사선 : X-선, γ -선 등

2) 종류 : strand break, base 변화, sugar의 파괴, cross-link 및 dimer 형성이 있으며 이중 strand break가 가장 흔하고 중요한 것으로 알려짐

- ① single strand break : 1Gy 조사시 세포당 약 1000개 발생, 수분 혹은 수시간 내에 99% 이상 완전히 정상 상태로 회복
- ② double strand break : 1Gy 조사시 세포당 약 40~100개 발생, 90% 정도에서만 정상상태로 회복

• 염색체 이상

- 염색체는 DNA의 집합체이며 따라서 DNA 손상은 염색체 이상으로 관찰된다.
- 염색체의 변화는 세포주기의 어느 시기에서도 일어날 가능성 있지만 염색체 이상으로서 실제로 관찰되는 것은 세포분열기 (M기)이다.
- 종류 : dicentric, acentric fragments, ring, translocation, deletion 등.
- 사람의 경우 말초혈중 림프구의 염색체 이상은 방사선 피폭선량과 양적관계가 있다. ; 방사선 과잉피폭의 경우 방사선생물학적 선량추정법으로 염색체 이상빈도가 이용됨

1.3 세포 및 조직 단계

- 물리학적 혹은 화학적 단계에 비하여 훨씬 긴 시간을 필요로 함
- 세포의 기능상실 혹은 세포사멸 등은 사회의 세포주기를 거쳐야 하므로 상당기간이 소요
예) 위장 : 2주일, 폐 : 3~4개월
발암 : 백혈병 2~7년,
기타 고형암 : 10~25년 소요

2. 방사선영향의 분류

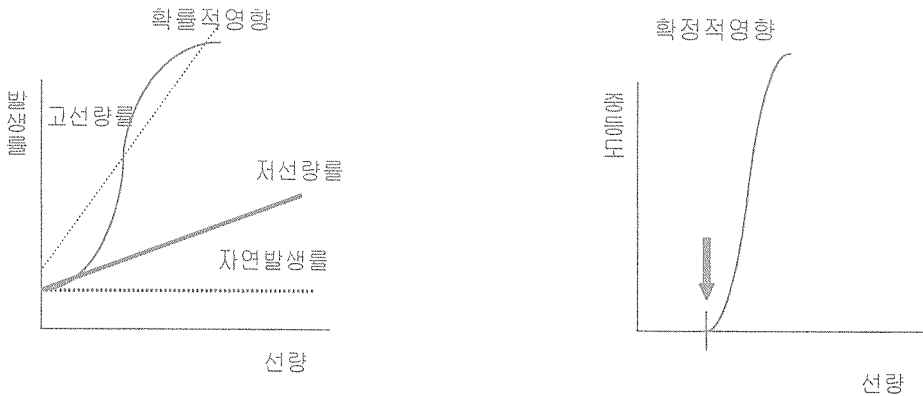
2.1 신체적영향(somatic effects)과 유전적 영향(hereditary effects)

- 신체적 영향 : 방사선을 받는 본인에게 나타나는 영향
잠복기간에 따라 급성효과(early effect)와 만성효과(late effect), 급성효과는 방사선피폭 후 수시간 혹은 수주간이내에 발생
만성효과는 방사선피폭 후 수개월이상 경과 후 나타남
예) 백내장, 암

표 1. 확정적영향과 확률적영향의 비교

	확정적 영향 (deterministic effects)	확률적 영향 (stochastic effects)
예	백내장, 기관위축, 섬유화	발암, 유전적 영향
발단선량 (threshold dose)	있음(어느 수준이상의 선량이면 발생)	없음
피폭시 증상의 심각도	선량에 비례	선량과 무관
발생률	어느 발단선량' 이상에서 발생(피폭과 영향의 인과관계가 분명)	선량이 증가하면 확률적으로 증가
기타	-	all or none phenomenon
방사선방어의 목표	발단선량이하로 제한	피폭선량 감소

확률적 영향과 확정적 영향



- 유전적 영향 : 방사선을 받은 사람의 자손에게 나타나는 영향
자손에게 전해지는 유전자에서 일어나는 변화-돌연변이 (생식세포)

2.2 확정적영향(deterministic effects)과 확률적영향(stochastic effects)

3. 방사선의 급성효과

3.1 급성 방사선증후군(early lethal effect)

전신적으로 단시간내에 다량의 방사선에 피폭된 경우 수시간 또는 수주일 이내에 사망하는 것을 말하며 실제로는 핵폭탄의 폭발 또는 사고에 의한 다량피폭의 경우에만 일어날수 있다. (표 2)

1) 급성방사선증후군의 전구증상(prodromal radiation syndrome)

- 다량의 방사선에 피폭된 후 급성방사선증후군이 나타나기 전 일시적으로 나타나는 증상
- 수천 cGy의 방사선에 피폭된 후에는

표 2. 급성 방사선증후군

급성전신피폭	사망의 원인	사망까지의 기간	증상	치료
3~8 Gy	골수 증후군	수주일 이내	출혈, 감염	골수이식
>10 Gy	위장계 증후군 및 폐 장해	3~10일	방사선 속취, 설사, 위출혈	없음
>100 Gy	중추신경계 증후군	수십시간 이내	의식장애, 마비, 경련, 혈압저하	없음

수분 내에 나타나기 시작하여 수시간 내지 수일간 지속

- 소화기 계통의 증상 : 식욕감퇴, 메스꺼움, 구토, 설사, 복통, 침분비증가, 탈수, 체중감소
- 신경근육계통의 증상 : 피로감, 무력증, 발한, 체온상승, 두통, 혈압강하

2) 중추신경계 증후군(cerebrovascular syndrome)

전신이 수천 cGy 또는 그 이상의 방사선에 피폭된 경우 사람은 수십 시간 내에 사망한다. 이때의 증상으로는 심한 오심 및 구토가 방사선 피폭 후 수분내에 나타나며 이어서 방향감각 상실(disorientation), 근육운동의 조화(coordination)상실, 호흡곤란, 설사, 경련을 일으키고 혼수상태에 빠져 사망하게 된다. 이러한 중추신경계 증후군은 뇌혈관벽의 손상에 의하여 뇌 속의 작은 혈관으로부터 체액이 뇌실질로 빠져나감으로써 뇌압이 상승되어 일어나는 것으로 이해되고 있다.

3) 위장계 증후군(gastrointestinal syndrome)

전신에 약 1,000cGy 이상의 방사선이 조사된 경우 보통 3일내지 10일 이내에 위장계 증후군으로 사망한다. 특징적인 증상으로는 오심, 구토 및 지속적인 설사가 있으며 식욕이 감퇴되고 행동이 느려진다. 수 일 내에 탈수, 체중감소, emaciation, 탈진(complete exhaustion) 이 나타나 사망하게 된다. 위장계

증후군의 기전은 방사선에 의하여 위장관내의 상피세포가 사멸되기 때문이며 미세혈관의 손상도 이에 기여하는 것으로 인정되고 있다. 수분 손실에 의한 설사 및 탈수 그리고 위장관벽을 통한 박테리아의 침입에 의한 패혈증으로 사망한다. 체르노빌 사고시 소방수 중 수명이 위장계 증후군으로 사망하였다.

4) 골수 증후군(hematopoietic syndrome)

300 내지 800cGy 의 방사선을 전신에 받으면 수 주후 골수 증후군으로 사망한다. 오심 및 구토 등의 전구증상이 나타난 후 아무 증상이 없다가 3주일 정도 지나면 오한, 피로감, 반점형 피하출혈, 구강내 궤양, 탈모가 나타나며 차차 조혈기능장애에 의하여 감염, 발열, 출혈 등이 나타나 사망하게 된다. 골수에는 적혈구, 백혈구 및 혈소판 등 혈액의 각종 세포를 생성하는 간세포(stem cell)가 있으며, 방사선에 의하여 이러한 간세포가 죽게 되므로 혈액 내에 이미 순환되고 있는 세포가 수명이 다하면 혈액내의 백혈구 감소에 따른 감염, 혈소판 감소에 따른 출혈 등이 나타나는 것이다.

5) 급성방사선 증후군의 치료

사람의 경우에는 전신조사량이 500 cGy가 넘을 경우에는 골수부전에 의하여 사망하는 것으로 알려져 있다. 전신조사량이 이보다 적은 경우 특별한 치료방법은 없으며 단지 증상에 대한 대증요법을 시행하여야 한다. 전신조사량이 500 cGy 이상인 경우는 골수 부전

이 올 수 있으므로 환자를 격리하고 소독액으로 목욕하며 다량의 항생제를 투여한다. 면역능력이 회복될 때까지 병원체와 접촉되지 않도록 하며 필요한 경우 수혈을 한다. 800 내지 1,000 cGy 인 경우 골수 이식이 유일한 치료방법이며, 1,000 cGy 이상인 경우에 나타나는 위장계 증후군 및 중추신경계 증후군에 대한 치료법은 현재로서는 없다.

4. 각 조직별 방사선의 영향

방사선 장해에 영향을 주는 요인

1. 선량(dose)	2. 선량률(dose rate)
3. 선질(LET)	4. 조직의 종류
5. 조직의 양	6. 개체차
7. 화학물질	

1) 조혈조직(적색골수), 임파선 및 혈액

혈 구	발단선량(Gy)	증 상
백혈구	0.5	초기에는 다소 불안정하며 대체로 감소현상 발현(심하면 면역기능 장애)
적혈구	1.0	
혈소판	1.0	

※ 일반적으로 림프구가 가장 민감한 반응을 보임

2) 생식선(불임 발단선량)

영 향		1회 급성 피폭	만성피폭
남성	일시적불임	0.15 Gy	0.4 Gy/yr
	영구불임	3.5~6 Gy	2.0 Gy/yr
여성	일시적불임	0.6~1.5 Gy	0.2 Gy/yr 이상
	영구불임	2.5~6 Gy	

※ 여성은 연령에 따른 차이가 있음

3) 피부

선량(Gy)	초기 영향(증상)	만성 영향
0.5	염색체 변화	없음
5	일시적 탈모, 홍반	변화·인지되지 않음
25	일시적 궤양, 수종	위축, 혈관확장, 색소침착(흉터)
50	영구적 궤양	만성궤양
500	괴사	영구적 조직파괴

4) 수정체

증 상	1회 급성조사	여러번 분할 조사
수정체 혼탁	0.5~2 Gy	5 Gy
백내장	5 Gy	8 Gy 이상

5) 갑상선

증상	발단선량(Gy)	발생까지의 기간
기능저하	성인 25~30 소아 1~10	-
급성갑상선염	200	수주이내 발생
만성갑상선염	10	수년후 발생가능

5. 방사선의 발암효과(carcinogenesis)

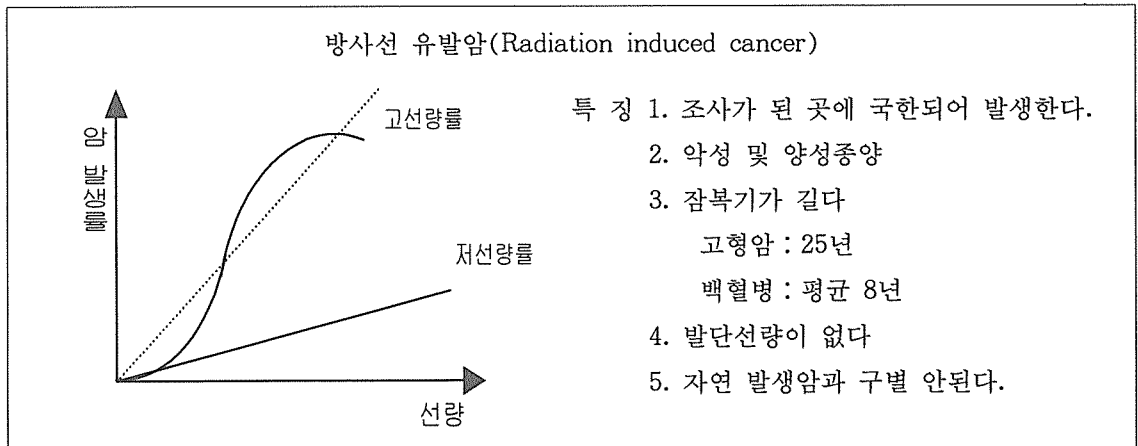
인체를 구성하는 세포는 크게 체세포(somatic cell)와 생식세포(germ cell)로 나뉘어 지는데 세포핵의 손상이 체세포에 일어난 경우 일부에서 백혈병 또는 기타 암이 발생할 수 있으며 생식세포에 일어난 경우에는 그 자손에서 유전적 변이로 나타날 수 있다.

발암현상은 방사선에 의한 영향 중 가장 중요한 것으로 관심을 끌고 있다. 방사선에 의한 발암효과는 동물실험을 통하여 증명되어 있다. 이러한 동물실험은 비교적 많은 양의 방사선을 조사한 경우이며, 장기간에 걸친 미량의 방사선에 의한 영향을 실험적으로 확인하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 발생 가능성이 있고 따라서 중요한 부분인 소량의 방사선 피폭에 의한 발암효과에 대하여는 과거로부터 사람에서 어느 정도의 경험치 축적되어 있다.

다음의 몇 가지 경우에는 피폭된 방사선의

양을 추정할 수 있어 방사선과 발암의 관계 구명에 어느 정도 도움이 되고 있다.

- 일본 히로시마 및 나가사키 원폭피해자들에서의 백혈병을 비롯한 각종 암 : 약 28만명이 살아 남았으며 이들 중 약 8만명이 원폭 피해에 대한 연구를 위해 추적되고 있다.
- 1935년에서 1944년 사이 영국에서 약 14,000명이 경직성 척추염(ankylosing spondylitis) 으로 방사선 치료를 받으며 이들 중 소수에서 백혈병이 발견되었다. 그러나 이들 중 일부는 질병치료에 동시에 사용한 약물에 의한 발암일 가능성이 최근 제시되고 있다.
- 과거 캐나다 및 미국에서 x선 필름이 구하기 어려웠던 시기에 폐결핵으로 수백회의 흉부 투시를 받았던 환자에서의 유방암.
- 산욕기 유방염으로 방사선치료를 받았던 환자에서의 유방암.



- 흉선비대로 방사선 치료를 받았던 소아에서의 갑상선암.

5.1 발암기전

인체에 발생하는 암의 원인 및 그 기전은 아직 확실히 알려져 있지 않으며 방사선에 의한 발암에 있어서도 마찬가지로 다음의 몇 가지 가능성이 제시되고 있다.

1) 변이에 의한 발암

방사선은 핵산(유전자) 변이를 잘 일으킬 수 있으므로 정상세포에 변이를 일으켜 이것이 암으로 진행한다는 이론이다. 그러나 일반적으로 암의 발생은 몇 단계를 거쳐 이루어지는 것으로 알려져 있으므로 단 하나의 변이로부터 암이 발생한다고 단정하기 어려우며 또한 방사선에 의하여 상당수의 변이가 일어날 수 있는 것이 실험적으로 알려져 있으므로 이러한 변이가 모두 암으로 진행된다면 실제로 진단되고 있는 것보다 훨씬 암 발생의 빈도가 높아야 할 것이다.

2) 발암의 단계에 일부기여

암이 발생하는 과정을 3단계로 나누며 제1 단계를 initiation, 제2단계를 promotion, 제3 단계를 progression 이라고 한다. 제1단계는 충분한 양의 발암 물질에 노출되어 세포핵 내에 형태학적으로 또는 기능적으로 감지할 수 없는 변화가 일어난 것을 말하며 제2단계로 이러한 잠복기 형태의 암에 다른 자극이 가해져 세포핵내의 변화가 세포의 형태학적 및 기능적 변화로 나타나는 것을 말한다. 즉 암세포가 생성되는 것을 말한다. 제3단계는 암세포가 증식되고 결과적으로 암의 종괴를 형성하고 주변조직침윤 및 원격전이를 일으킬 수 있는 상태로 되는 것을 말한다. 방사선은 이중 제1단계 및 제2단계에 각각 initiator 및 promoter로 작용할 수 있는 것으로

알려져 있다.

3) 발암 유전자(oncogene)

발암유전자의 발견으로 방사선에 의한 발암기전을 쉽게 설명할 수 있게 되었다. 방사선은 핵산 곧 염색체(chromosome)의 결합을 끊는 역할이 있으므로 끊어진 염색체가 비정상적으로 재결합될 경우 유전자의 위치가 변동되므로 정상적으로 억압(suppress) 되는 위치에 존재하고 있던 발암 유전자가 발현(express)되는 위치에 옮겨질 수 있다. 이 경우 발암유전자가 활성화되면서 암으로 진행된다. 실제로 인체에 발생하는 암중 일부에서는 발암유전자의 존재가 확인되었다. 그러나 방사선에 의한 발암이 이와 같은 발암유전자에 의한 것이라는 확실한 증거는 아직 없다.

5.2 방사선피폭에서 발암까지의 기간(latency period)

방사선 피폭후 암으로 진단되기까지는 항상 상당히 긴 시간이 필요하며 실제로 방사선에 피폭된 사람에서는 피폭후 수십 년간에 걸쳐 암이 발견되고 있다. 백혈병은 방사선에 의하여 유발되는 각종 암 중 시기적으로 가장 빨리 발현되는 것으로 알려져 있으나, 일본 히로시마와 나가사키의 생존자에서는 피폭후 수년이 지난 후에야 나타나기 시작했으며 피폭후 7년 내지 12년 사이에 발생 빈도가 최고치에 도달하였고 피폭후 20년후에 진단된 경우도 있으며 그 이후에는 나타나지 않고 있다. 백혈병 이외의 암의 발생까지의 평균 기간은 암 종류에 따라 다소 차이는 있으나 20년 내지 25년으로 알려져 있다.

5.3 방사선에 의한 암 발생빈도

1990년에 ICRP 60에서 권고한 방사선의 피폭에 의한 발암치사위험도(risks of cancer lethality by radiation)는 표 3에 나타낸 바

표 3. ICRP Summary of Risks of Cancer Lethality by Radiation

	High dose High dose rate	Low dose Low dose rate
Working population	8×10^{-2} per Sv	4×10^{-2} per Sv
Whole population	10×10^{-2} per Sv	5×10^{-2} per Sv

와 같다. 표의 수치는 1Sv의 피폭선량당 자연사망률을 제외한 암에 의한 추가 사망 위험도를 나타내며 방사선 작업종사자의 경우 일생동안 1Sv의 고선량을 방사선피폭을 받은 10만명 중 0.08명이 방사선에 의한 발암으로 인하여 사망하는 것을 의미한다. 현실적으로는 1rem의 피폭이 있을 때 10만명 당 800명 정도가 방사선에 기인한 발암으로 사망하는 것으로 환산된다.

5.4 출생전 방사선 피폭에 의한 출생 후 암 발생

출생 전 즉, 임신시의 방사선 피폭과 태아의 출생 후 암 발현과의 연관성은 아직 확실히 정립되어 있지 않다. 영국에서의 조사에 의하면 임신중 여러 가지 진단적 목적으로 임신부의 골반부위에 X선 검사를 받았던 경우 출생한 자녀들 즉, 태아기에 방사선을 받았던 경우 소아기의 각종 암 발생이 증가되었으며 대부분 10세 이전에 발생하였고 그 빈도는 출생전 방사선 조사를 받지 않았던 경우에 비하여 약 2배로 증가되었다고 보고되었다. 또한 미국의 동북부지역에서 조사한 결과는 약 1.5배로 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 일본의 히로시마 및 나가사키의 원자탄 폭발시 임신 중이었다가 후에 출생한 소아는 총 1,250 명으로서 이들은 상당량(평균 14cGy)의 방사선을 받았음에도 불구하고 일반인과 동일한 소아암 발생 빈도를 나타낸 것으로 조사 보고되었다.

따라서 태아의 경우 발암인자에 대한 감수

성이 성인에 비하여 높을 가능성이 있는 것으로 추측되므로 주의하는 것이 필요하나 방사선에 의한 영향이 있다는 것은 아직 명확히 증명된 바 없다.

5.5 비특이적 수명단축

사람에서는 수명단축을 일으킨다는 증거는 없으나 개나 마우스에서는 잘 알려져 있는 현상이다.

- 미국의 Oak Ridge & Argonne National Laboratories
- 저선량 및 중증도 정도의 선량 피폭시 방사선에 의한 수명단축은 전적으로 발암에 기인한다는 것을 밝힘
- 고선량의 방사선 피폭시 살아남은 개체는 병리조직학적으로 노화과정을 거침 : 실질세포(parenchymal cell) 수의 감소, 미세혈관 수의 감소, 결합조직 밀도의 증가

6. 방사선의 유전적 영향

지상의 모든 생물은 지구상에 생성된 이후 계속적으로 자연에 존재하는 전리방사선의 영향하에 있어 왔으므로, 인간이 만든 방사선에 의한 변이는 전혀 새로운 종류의 변이를 만드는 것은 아니며, 자연적으로 발생하는 변이의 빈도를 증가시키는 것으로 이해되고 있다 (표 4).

6.1 유전자변이(gene mutation)

인간의 세포에는 46개 염색체가 있으며

표 4. 방사선의 유전적 영향

유전적 영향	유전병의 예
유전자변이 · 상염색체 우성 · 상염색체 열성 · 성염색체성	다지증, 헌팅턴씨무도병, 망막아세포종, 골형성부전증 겸상적혈구빈혈, 낭포성섬유화증, 신생아소두증 혈우병, 색맹
염색체 이상 · 수의 이상 · 구조의 이상	다운증후군, 배아기 사망 정신지체, 배아기 사망
다인자질환	고혈압, 당뇨 등

그 속에는 약 6만개의 유전자가 있는 것으로 알려져 있다. 유전자 변이는 핵산의 배열 순서가 바뀌거나 그중 하나 또는 그 이상이 상실되거나 또는 정상보다 증가되어 나타나는 것을 말한다. 이러한 유전자변이에 의하여 나타나는 이상은 우성, 열성, 반성유전을 합하여 현재까지 총 1,300여 종이 확인되어 있고, 1,400여종의 이상이 유전자 변이에 의한 것으로 추정되고 있다. 확인된 것들 중에는 질병으로 인정되는 것뿐 아니라 누의 색깔, 혈액형 등 질병으로 인정되지 않는 것도 포함된다.

6.2 염색체 이상(chromosomal aberration)

방사선에 의하여 염색체의 핵산 연결이 분리될 수 있으므로 분리된 염색체의 일부가 다른 염색체의 결합될 수 있다. 두개 이상의 염색체에서 이러한 현상이 일어날 경우에는

염색체의 일부가 교환되기도 한다. 유전자가 손상 없이 위치변경된 경우에는 아무 문제가 없으나 그 자손이 받는 재배열된 염색체는 유전적으로 균형을 잃을 수 있다. 이러한 유전적 불균형, 즉 염색체의 불균형에 의한 영향은 매우 경미할 수도 있으나 상당히 중대할 수도 있어 심한 경우 배가 정상적으로 자라나지 못하고 임신초기에 소실될 수도 있다. 심하지 않더라도 상당수에서 지능부족과 신체적 결함의 원인이 될 수 있다.

6.3 인체에서의 유전적 영향

일본 히로시마 및 나가사키의 원폭 피해자들의 자녀들에 대하여 표 5의 항목을 약 40년간 조사한 결과 변이의 빈도를 자연발생 변이 빈도의 2배로 증가시키는 배가선량(doubling dose)은 평균 156rem으로 나타났다.

표 5. 히로시마 및 나가사키 원폭피해자들의 자녀에서의 배가선량

항 목	배가선량(rem)
· 원하지않는 임신의 결과(사산, 주산기사망, 중증의 선천적이상)	69
· 소아 사망	147
· 성염색체 변이	252
평 균	156

6.4 방사선에 의한 유전적 이상 발생 빈도
 모든 사람이 1rem(10mSv)의 방사선에 피폭될 경우 그 자손에서 이상이 나타날 가능성은 BEIR의 보고에 의하면 피폭자의 자녀에서는 출생인구 백만명당 50명, 그 자손들에서는 백만 명당 60내지 1,100명 정도로 알려지고 있다.

이는 현재 백만명의 신생아중 107,000명 정도가 유전적 이상을 가져 10.700%인 자연발생률이 피폭자의 자녀에서는 10.705%로, 자손에서는 최대 10.810%로 증가되는 것을 의미하므로 실제적인 중요성은 매우 낮은 편이다. 한편 ICRP No. 60에서는 작업자 및 일반인의 방사선피폭에 의한 유전적 영향 발생률을 각각 0.6×10^{-2} per Sv 및 1.06×10^{-2} per Sv로 제시하였다.

7. 임신중 방사선 피폭의 영향

임신중 방사선에 피폭될 경우 태아에 중대한 영향을 미칠 수 있음은 잘 알려진 사실이다. 암 발생을 제외한 방사선에 의한 전형적인 장애는 태아 혹은 신생아의 사망, 선천성 기형, 성장장애 및 신체구조와 기능에 대한 영향이 있다. 이러한 장애에 중요한 요인으로 방사선량, 임신시기 및 방사선량률(dose rate)이 있다. 즉 선량률이 낮으며 그 영향은 크게 감소된다. 그러나 임신중 방사선 장애를 고찰함에 있어 유념하여야 할 것은 인류전체

를 평균하여 고려할 때 자연적으로 신생아의 6%에서 선천성 기형이 발견되며 성장하면서 진단되는 선천성 기형을 합치며 12% 전후에서 기형이 나타난다는 사실이다. 따라서 방사선과 선천성 기형의 관계는 방사선 영향 없이 나타나는 12%의 빈도로부터 증가되는 부분만을 고려하여야 한다.

7.1 인체에서의 경험

히로시마와 나가사키에서 임신중 방사선 피폭을 받고 태어난 사람에서의 조사결과에 의하면 1,600명 중 30명중에서 심한 지능장애가 나타났으며 히로시마의 경우 발생빈도는 방사선 피폭량에 비례하여 증가되었다. 그러나 나가사키의 경우 150cGy 이하인 경우에는 소두증의 증가는 관찰되지 않았다. 히로시마와 나가사키에서의 조사결과를 합하면 방사선량의 증가에 따라 거의 직선적으로 지능 장애의 발생 빈도가 증가하였으며, 1cGy당 0.4%의 비율로 지능장애가 발생하였다.

임신 시기별로 구분하면 임신 8주 이내에 피폭된 경우는 지능장애자가 없었고 8내지 15주인 경우 가장 높아 22명이 이 시기에 해당되었다.

7.2 인체에서의 기형 발생

현재까지 알려진 바를 종합하면 다음과 같다. (표 6 참조)

- 태아사망 : 착상전기인 임신 9일 이내에

표 6. 태아기의 방사선 피폭의 영향

영 향	피폭시기	발생율(per Sv)	발단선량 (Gy)
· 태아사망	0~9일	—	0.05~0.1
· 선천기형, 성장장애	2주 이상	—	0.1
· 지능장애	8~15주(16~25주)	$4 \times 10^{-2}(1 \times 10^{-2})$	0.12~0.2
· 발암	전기간	$1 \sim 1.5 \times 10^{-2}$	없음
· 유전적 영향	전기간	1×10^{-2}	없음

비교적 다량의 방사선을 받은 경우에 발생할 수 있으며 발단선량은 0.05~0.1Gy 정도이다.

- 선천기형, 성장장애 : 기관형성기인 임신 2주 이후에 방사선을 받을 경우 발생할 수 있으며 발단선량은 골격기형의 경우 0.05Gy, 소두증은 0.1Gy 정도이다.
- 지능장애 : 8주에서 15주까지가 가장 예민한 시기이며 16주에서 25주까지 사이에 방사선을 받은 경우에도 나타날 수 있다. 8주 이전 및 25주 이후의 방사선 피폭에서는 사람에서 보고된 바 없다. 가장 예민한 시기인 8주에서 15주 사이에 피폭된 경우 1 rem(10mSv) 당 IQ가 0.3정도 낮아진다.

8. Radiation Hormesis

소량의 방사선에 장기간에 걸쳐 피폭되는 경우 이의 영향에 대하여는 이론의 여지가 많다. 이러한 지속적 저준위피폭은 인체에 유리한 영향을 미친다는 이론을 주장하는 학자들도 많이 있다. 즉 인간을 포함한 모든 생물체는 지구상에 나타난 이후 지역에 따라 다소차이는 있으나 계속 연간 300mrem(3mSv) 전후의 자연방사능에 피폭되면서 유지되었고 따라서 지구상에 방사능이 완전히 없어질 경우 인류를 비롯한 생물체가 멸종할 지도 모른다고 주장하는 학자도 있으며, 또한 1 내지 50cGy의 소량의 방사선은 인체에 유익하다고 주장하기도 한다. 이러한 이론을 Radiation Hormesis라고 한다. Hormesis는 높은 농도로 존재할 경우 독성을 나타내는 물질이라도 소량인 경우는 오히려 자극을 일으킬 수 있다는 약리학적 용어이다. UNSC-EAR에서는 ‘자극효과(stimulating effect)’라는 용어를 사용하고 있으며 미국에서는 BELLE (biological effects of low level ex-

posure)라는 용어를 제안하고 있다.

방사선의 유익함에 대한 주장 중 실험적 혹은 통계조사 등 근거가 뚜렷한 것은 몇 가지가 있다.

- 핵산 손상 복구능력(unscheduled repair)향상
- 자유 라디칼(free radical)의 해독 및 손상복구능력 향상
- 면역기능 향상
- 필수적인 생명력으로 작용
- 대사촉진 및 생식능력 향상
- 신체기능중 기능저해작용을 불활성화
- 만성피폭시 암발생빈도 감소
- 소량피폭시 수명연장
- 종족의 진화에 기여

이중 암 발생 빈도에 관한 것의 근거로는 자연방사능이 타 지역에 비하여 상당히 높은 지역의 주민에서 암 발생빈도가 오히려 낮다는 역학조사결과에 그 근거를 두고 있다.

9. 방사선 방호 (Radiation Protection)

9.1 방사선 방호의 목표

- 선량한도를 준수함으로써
 - 1) 임상적으로 심각한 정도의 확정적 영향을 방지하고,
 - 2) 확률적 영향(발암 및 유전적 영향)을 어느 한도 이내로 제한하는 것
- 이러한 목표는 ALARA(as low as reasonably achievable)로 가능한 한 피폭을 줄이고 선량한도를 적용하여 직업상 및 일반인 피폭을 조절함으로써 달성될 수 있다.

9.2 기본 단위

- 방사선가중치 WR(radiation weighting factor)

W_T	Tissue or organ
0.01	skin, bone surface
0.05	bladder, breast, liver, esophagus, thyroid
0.12	bone marrow (red), colon, lung, stomach
0.20	gonads

* ICRP No. 60

표 7. 방사선 방호에서 사용되는 단위

Quantity	우리말	정 의	단 위	
			현재	과거
· Absorbed dose	흡수선량	단위질량당 흡수한 에너지	Gray	rad
For individuals				
· Equivalent dose	등가선량	흡수선량 $\times W_R$	Sv	rem
· Effective dose	유효선량	$\sum(\text{흡수선량} \times W_R \times W_T)$	Sv	rem
· Committed equivalent dose	예탁등가선량	방사핵 (radionuclide)에 노출시 50년간 적산등가선량	Sv	rem
· Committed effective dose	예탁유효선량	방사핵 (radionuclide)에 노출시 50년간 적산유효선량	Sv	rem
For populations				
· Collective effective dose	집단유효선량	특정 집단 개인의 평균 유효선량 \times 사람수	person-Sv	man-rem
· Collective effective dose committed	집단예탁유효선량	특정 집단 개인의 50년간 평균 적산유효선량 \times 사람수	person-Sv	man-rem

- photon 1, 전자선 1, 중성자선은 에너지에 따라 5~20, 양성자 5
- 조직가중치 W_T (tissue weighting factor)

9.3 선량한도(Dose limits, 표 8)

- 직업상 피폭과 일반인의 피폭으로 구분하여 설정함
- 의료상 피폭에는 선량한도를 적용하지 않음

9.4 방사선 방호의 기본원칙

- 외부피폭 및 내부피폭의 정의

- 1) 외부피폭 : 방사선원이 인체 외부에 있고 여기서 방출되는 방사선에 의하여 인체가 받는 피폭
 - 2) 내부피폭 : 방사성동위원소가 체내에 섭취되어 장기가 오염되었을 때 여기서 방출되는 방사선에 의한 피폭
- 기본원칙
- 1) 외부피폭 : 거리, 시간, 차폐
 - 선원과의 거리를 가능한 한 멀리함
 - 작업 시간을 최소한으로 단축함
 - 차폐를 활용함
 - 2) 내부피폭 : 격리, 희석, 차단
 - 방사성물질을 작업자 환경과 격리 시킴

표 8. 선 량 한 도

	NCRP No 116,1993	ICRP No 60, 1991
<ul style="list-style-type: none"> • 확률적영향 <ul style="list-style-type: none"> · 유효선량한도(누적) · 유효선량한도(연간) 	$10 \text{ mSv} \times \text{age}$ 50 mSv y^{-1}	5년간 평균 20 mSv y^{-1}
<ul style="list-style-type: none"> • 확정적영향 <ul style="list-style-type: none"> · 수정체의 연간 등가선량한도 · 피부, 손, 발의 연간 등가선량한도 	150 mSv y^{-1} 500 mSv y^{-1}	—
<ul style="list-style-type: none"> • 배아, 태아 <ul style="list-style-type: none"> · 유효선량한도 	$0.5 \text{ mSv month}^{-1}$	복부 표면에 총 2 mSv
<ul style="list-style-type: none"> • 일반인 피폭(연간) <ul style="list-style-type: none"> · 연속 혹은 빈번한 피폭시 유효선량한도 · 빈번하지 않은 피폭시 유효선량한도 · 눈, 피부, 사지의 등가선량한도 	1 mSv y^{-1} 5 mSv y^{-1} 50 mSv y^{-1}	5년간 평균 1 mSv y^{-1}
<ul style="list-style-type: none"> • 교육, 훈련 목적 피폭(연간) <ul style="list-style-type: none"> · 유효선량한도 · 눈, 피부, 사지의 등가선량한도 	1 mSv y^{-1} 50 mSv y^{-1}	— —
<ul style="list-style-type: none"> • 무시개인선량(Negligible individual dose) (연간) 	0.01 mSv y^{-1}	—

10Day rule : 생식 연령의 여성 X-선 검사시 월경 시작후 10일 이내에 한다.

Hammer-Jacobsen 권고(1959) 임신시 방사선 피폭

0.01 Gy 이하	인공유산 불필요
0.01~0.1 Gy	상황에 따라 판단
0.1 Gy 이상	인공유산 적응

- 작업환경의 방사성 오염농도를 희석 시킴
- 섭취 경로를 차단함

9.5 개인피폭관리

- 외부피폭감시
 - 필름벤티지, TLD, 전자식선량계 등을 이용하여 개인의 피폭선량을 측정
 - 감시비용이 큰 문제가 되지 않음으로 전 작업자의 개별감시
 - 감시주기는 사업소의 특성에 따라 조정이 가능하나 통상 1개월을 채택
 - 단기(일일)피폭 확인을 위한 보조선

량계(포켓도시미터 등)이 필요, 특히 고선량률 지역 혹은 불의의 피폭우려가 있는 작업장에서는 필수적이다.

- 내부피폭감시 : 내부피폭선량의 측정, 평가는 외부피폭과는 달리 기술이나 비용의 측면에서 전작업자를 대상으로 하기는 어렵다.
 - 내부섭취 가능성이 크고 섭취량이 상당한 경우 : 개인감시
 - 보편적인 경우 : 작업환경 감시에 역점을 두고 확인목적으로 대표적 소수 작업자를 개인 감시
 - 경미한 경우 : 작업환경 감시로 같음함.