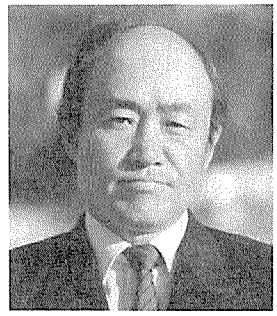
방사선 방호의 최근 동향



강 창 순
서 울 대 학 교
원자핵공학과 교수

1. 방사선의 본질

방사선(radiation)의 역사
- 1895－Roentgen이 X-선 발견
- 1896－Becquerel이 우라늄(U)으로부터 방사능 발견
- 1898－Curie가 라디움 (Ra) 원소 발견
- 1902－Rutherford가 α, β, γ선 분류

방사선 (ionizing radiation)의 정의

미국 : 10CFR20(Standards for Protection against Radiation)

한국 : 원자력법시행령 제6조

1) 하전입자(charged particles)
   - 베타입자(beta particles) : 전자(e^-), 양전자(e^+)
   - 중하전입자(heavy charged particles) : 중간자($\mu^{\pm}$, $\pi^{\pm}$), 양성자(ρ),중수소핵(d), 삼중수소핵(t), 헬리움－3 (He^3), 알파(α), 기타 원자핵

2) 중성입자 (neutral particles)
   - 광자(photons) : X-선, γ-선
   - 중성자(neutrons) : 열중성자, 고속중성자

천연방사능(natural radioactivity)
- 자연에 존재하는 340개의 동위원소 중 70개가 방사성 핵종.
- 원자번호가 납보다 큰 원소(Z>82, Pb)는 모두 방사성 핵종

1) 지각에 존재하는 방사성 핵종
   - 우라늄계열(4n+2) : U-238 ⇒…⇒ Pb-206 4.5×10^9y
   - 토륨계열(4n) : Th-232 ⇒…⇒ Pb-208 1.4×10^{10}y
   - 악티늄계열(4n+3) : U-235 ⇒…⇒ Pb-207 7.1×10^8y
   - 넵튜늄계열(4n+1) : Bi-209 ⇒…⇒ Pb-205 2.0×10^7y
   - 라돈가스 : Rn-222(radon), Rn-220(thoron), Rn-219(actinon)
   - 카륨 : K-40는 천연 카륨에 0.0119% 존재

2) 우주선과 작용하여 생성된 방사성 핵종
   - C-14, H-3, Be-7, Na-22, Na-24, Cl-36…

3) 우주선 :
   - 높은 에너지를 갖은 하전입자 : p(85%), α(14%), 기타 핵(1%)

천연방사선에 의한 연간 피폭량

1) 지각 기원 :	U-238 series	134 mrem/y
	Th-232 series	34 mrem/y
	K-40	33 mrem/y
	Rb-87 et al	1 mrem/yr
2) 우주선		36 mrem/y
3) 우주선에 의하여 생성된 방사능		2 mrem/y
합계		240 mrem/y

* UNSCEAR 1988

2. 방사선의 선량측정

선량(dose)

방사선 피폭의 크기를 나타내는 일반적으로 통용되는 용어.

흡수선량(absorbed dose; D)

방사선 피폭의 매체가 단위질량당 흡수한 에너지 양.

- 흡수선량의 단위 :
  - rad ; 1 rad = 100 ergs/g
  - Gy(gray) ; 1Gy = 1J/kg = 100rads

선량당량(dose equivalent : H_T)

임의 장기나 세포(T)가 받은 흡수선량(D)에 방사선 가중인자(WR)와 기타 보정인자를 곱한 것.

- 선량당량의 단위 :
  - rem⇐rad
  - Sv(sievert)⇐Gy : 1 Sv = 100 rems

유효선량당량(Effective dose equivalent ; H_E)

장기나 세포의 선량당량(H_T)에 그 피폭 받은 장기나 세포에 적용되는 가중인자(W_T)를 곱하여 합산한 것. ($H_E = \Sigma W_T H_T$)

위탁선량당량(Committed dose equivalent ; $H_{T,50}$)

방사성물질이 인체에 흡입된 후 인체 내 장기나 세포, T에서 완전히 없어질 때까지 (50년 동안) 받는 집적된 총 선량당량.

위탁유효선량당량(Committed effective dose equivalent ; $H_{E,50}$)

장기나 세포의 위탁선량당량($H_{T,50}$)에 그 피폭 받은 장기나 세포에 적용되는 가중인자(W_T)를 곱하여 합산한 것. ($H_{E,50} = \Sigma W_T H_{T,50}$)

전유효선량단량(Total effective dose equivalent ; TEDE)

외부피폭과 내부피폭의 유효선량당량을 합산한 것.

집단선량(Collective dose)

임의의 방사선원으로부터 주어진 시간 내에 받은 모든 개인 선량의 합.

- 집단선량의 단위 : person-Sv, person-rem, man-rem

피폭선량(Exposure)

γ선 및 X선에 의하여 공기중에 생성된 이온쌍의 수.

- 피폭선량의 단위 : Roentgen(R, r) = 표준상태의 공기 1입방센티메터 당 1 esu 상당의 이온쌍을 생성하는 γ-선 및 X-선의 양.

3. 방사선의 생물학적 영향

방사선의 생물학적 영향

- 체세포(somatic) 혹은 유전적(hereditary) 영향 : 피폭 당사자 혹은 후손
- 급성(acute) 혹은 만성(delayed) 영향 : 즉발적 혹은 잠재적
- 결정적(deterministic) 혹은 확률적(stochastic) 영향 : 문턱값(threshold) 혹은 비문턱값 가정

선량과 영향의 관계식 : 선형 혹은 비선형

- 해로운(detrimental) 혹은 이로운(hormesis) 영향 : 저선량 방사선 피폭의 경우

고선량 피폭의 경우(많은 양을 짧은 기간에 피폭되는 경우)

(1) 조혈 증후군－혈액의 변화
(2) 소화 증후군－구토, 설사
(3) 중추신경계통 증후군－졸도, 어지러움, 피곤, 체온상승 등
(4) 기관 및 조직의 기능장애
- 침샘 혹은 내분비선의 분비물 감소
- 뇌하수체 리듬 혹은 눈의 검영 기능 변화
- 혈관의 반응 (피부 홍반, 피하 수종)
- 면역계통의 기능저하

EFFECTS	single brief exposure	annual dose rate
Testes : − temporary sterility	0.15 Sv	0.4 Sv/yr
− permanent sterility	3.5−6.0 Sv	2.0 Sv/yr
Ovaries : − sterility	2.5−6.0 Sv	>0.2 Sv/yr
Lens : − detectable opacities	0.5−2.4 Sv	>0.1 Sv/yr
− visual impairment(cataract)	5.0 Sv	>0.15 Sv/yr
bone marrow : depression of hematopoiesis	0.5 Sv	>0.4 Sv/yr
Skin : − erythema and dry desquamation	3−5 Gy (symptoms after 3 wks)	
− moist desquamation	20 Gy (blistering after 4 wks)	
− tissue necrosis	50 Gy (local cell deaths in the epidermal and dermal layers after 3 weeks)	

확률적 영향 : (LNT;linear no-threshold)

organs or tissue, T	risk factor, Sv^{-1}	biological effects	W_T
gonads	1.0×10^{-2}	severe genetic effects	0.20
red bone marrow	0.6×10^{-2}	leukemia	0.12
colon	0.6×10^{-2}	fatal cancer	0.12
lung	0.6×10^{-2}	fatal cancer	0.12
stomach	0.6×10^{-2}	fatal cancer	0.12
bladder	0.25×10^{-2}	fatal cancer	0.05
liver	0.25×10^{-2}	fatal cancer	0.05
bladder	0.25×10^{-2}	fatal cancer	0.05
oesophagus	0.25×10^{-2}	fatal cancer	0.05
thyroid	0.25×10^{-2}	fatal cancer	0.05
skin	0.05×10^{-2}	fatal cancer	0.01
bone surfaces	0.05×10^{-2}	osteosarcoma	0.01
remailder*	0.25×10^{-2}	fatal cancer	0.05

* remainder organs=adrenals, brain, upper large intestine, small intestine, kidney, muscle, pancreas, spleen, thymus, uterus

1) 발암 효과 : 치명적 암을 발생할 위해도 $=4.0\times10^{-2}$/Sv

2) 유전적 효과 : 유전적 영향을 발생할 위해도 $=1.0\times10^{-2}$/Sv

dose limits recommended by ICRP-26 (1977)

	workers	public
effective dose equivalent	5rem/year	0.5rem/year
any organs except lens	50rem/year	
lens	30rem/year	

dose limits recommended by ICRP-60 (1990)

	workers	public
annual acceptable risk	8×10^{-4}/year	5×10^{-5}/year
radiation risk factor	4×10^{-2}/Sv	5×10^{-2}/Sv
effective dose-equivalent	20mSv/year (2rem/year)	1mSv/year (0.1rem/year)

dose limits set forth in 10CFR20 (1991)

	workers	public
TEDE	5rem/year	0.1rem/year
any organs except lens	50rem/year	
lens	15rem/year	

10CFR50, Appendix I

— Numerical Guides for Design Objectives and Limiting Conditions for Operation to Meet the Criterion "ALARA":

LIMITS IN UNRESTRICTED AREA	
liquid effluents — total body dose	3mrem/year per unit
— doses to any organ	10mrem/year per unit
EXTERNAL DOSE LIMIT IN UNRESTRICTED AREA	
gaseous effluents — total body dose	5mrem/year per unit
— skin dose	15mrem/year per unit

4. 방사선 방호의 최근 동향

FEAR OF RADIATION IS KILLING PEOPLE AND ENDANGERING THE PLANET TOO : Theodore Rockwell, MPR Associates Inc.

1. 방사선 방호 기준의 결정은 대부분 일본 원자폭탄 생존자들의 결과와 같이 매우 높은 선량율에 근거를 두고 있다. 이러한 높은 선량율에 기인하여 발생하는 생물학적 손상이 만성적 낮은 선량의 피폭과 정량적으로 같다는 것은 믿기가 어렵다. 다시 말해서 "linear

no threshold-LNT" 접근 방법의 타당성은 의심을 갖지 않을 수 없다. 이러한 논리는, 예를 들어서, 한 사람이 100주에 걸쳐서 1주에 한 알씩 아스피린을 먹는 것과 한 사람이 한꺼번에 100알의 아스피린을 먹는 것은 그 영향이 같다는 것과 다를 바가 없다. 여기서 우리는 LNT 가정의 모순점을 즉시 알 수 있다. 낮은 선량율의 피폭에서는 손상된 세포는 교정하고 치료할 수 있는 기회가 있는 것이다.

2. 방사선의 유전적 영향을 고려하면서, 우리는 집단선량 "collective dose"이라는 개념을 도입하였다. 집단선량의 논리는, 예를 들어서, 마치 1억명의 사람이 각각 아스피린 한 알씩을 먹었다고 할 때, 만약 아스피린 치사량을 한꺼번에 먹었을 때 100알 이라고 하면, 이중 1백만명이 죽는다는 것과 같다. 이러한 계산 방법으로 체르노빌 사고로부터 생성된 별로 해롭지도 않은 낙진으로부터 30,000명이 죽을 것이라는 우스꽝스러운 예측 결과를 만들어 내고 있는 것이다.

3. LNT 와 집단선량 정책은 다음과 같은 모순성을 어떻게 설명할 것인가?

- 천연에 존재하는 우라늄, 토륨 그리고 라돈은 위험하게 생각하여야 하고, 따라서 규제가 필요하다.
- 의학적 X-선의 일상적 이용 때문에, 계산에 의하면 연간 100,000명이 사망한다.
- 천연 방사선으로 인해 연간 650,000명이 사망한다고 주장할 수 있다.
- 비행기 여행으로 인한 추가 방사선 피폭 때문에 510명이 사망한다.
- 전 세계의 인구가 모두 브라질 콩 한 개를 먹는다면, 브라질 콩이 포함하고 있는 천연 방사능은 250명의 죽음을 야기한다.

4. 우리 인간의 육체는 초당 약 15,000개의 천연방사선 입자에 의하여 충돌 당하고 있다. 그럼에도 불구하고, 우리의 체온, 정상적 식사 및 호흡과 같은 신진대사 작용은 천연방사선보다 수백만 배의 돌연변이를 유발한다. 그리고 현재 정책적으로 규제하고 있는 방사선 피폭의 허용 기준은 천연방사선 선량의 1 % 크기에 지나지 않는다.(표 1)

5. T.D. Luckey는 1997년 저선량 방사선에 피폭된 인간에 대한 많은 자료를 잘 통계 처리하여 그 결과를 제출하였다. 이 자료는 1천 3백만 인간-년에 해당되는 저선량 피폭 자료를 근거로 하였다. 이 자료에 의하면, 방사선에 피폭된 사람들이 더 낮은 암 치사율을 보이는 것으로 나타났다. 그 결과를 간추리면 다음과 같다.

표 1. Number of Events Occurring Daily in Each Cell of the Body

	Metabolism	Radiation (100 mrad/yr)
Free redicals created near DNA	100,000,000	
DNA alternations	1,000,000(1 in 100)	0.005
Un/misrepaired DNA alternations	100(1 in 10,000)	0.000,01(1 in 500)
Mutations : Persistent un/misrepaired	1(1 in 100)	0.000,000,1(1 in 100)

Ratio of mutations, metabolism to radiation : 1 in 10,000,000

- 미국의 육군 폭탄 시험 관람자 : 77.4%
- 캐나다의 폭탄 시험 관람자 및 Chalk River 정화에 참가한 집단 : 87.5%
- 미국의 핵폭탄 공장의 작업자 : 59.8%
- 미국의 핵선박 조선소 작업종사자 : 65%
- 영국의 에너지 및 폭탄 작업 종사자 : 28.3%
- 캐나다의 원자력 작업종사자 : 85.7%
- Los Alamos 연구소의 직원 : 77%
- Crossroads작전의 관람자(Bikini 폭탄 시험) : 65.9%

6. 방사선에 대한 공포는 실제로 우리 인간을 죽이고 지구를 망칠 수 있다. 그리고 이러한 공포는 방사선 기술의 여러 가지 유익한 이용을 막고 있다. 그 예로서 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 수없이 많은 사람들이 근거 없는 두려움으로 인하여, 유방촬영, X-선 및 방사선 치료와 같은 생명을 구할 수 있는 의료 절차를 피하고 있다.
- 세상을 놀라게 한 체르노빌 사고 이후 유럽에서는 100,000번의 추가적 인공유산을 시술하였다. 이들 인공유산은 아마도 돌연변이체(nuclear mutant)를 생산한다는 근거 없는 공포에 기인 한 것이라 하겠다.
- 식품조사를 통해 쉽게 죽일 수 있는 병균 및 기생충으로 오염된 음식물로 인하여 연간 3천3백만 명의 미국인이 병들고 9,000명이 사망한다.
- 화력발전소에서 방출하는 공해물질로 인하여 수 만 명의 미국인이 호흡기 질환으로 사망한다. 원자력발전은 공해물질을 거의 생성하지 않는다. 사실 석탄발전소가 원자력발전소 보다 더 많은 방사능을 방출하고 있다.
- 지구는 발전소와 자동차에서 방출하는 지구온난화 가스, 산성비, 공해물질, 및 기타 방출물로 인하여 몸살을 앓고 있다. 원자력발전소 그리고 여기서 생산된 전기로 충전한 배터리를 사용하는 전기자동차는 이러한 문제점들을 대부분 해결할 수 있는 것이다.

7. 원자력계에 종사하는 우리들은 원자력에 대한 공포를 종종 언론, 대중, 규제자 그리고 정치가들의 원자력에 대한 무지의 소치 때문이라고 비난하고 있다. 그러나 China Syndrome, LNT 모델, 집단선량 개념, 그리고 방사성폐기물로부터 백만년 동안 안전을 보장하겠다고 하는 발상은 Green peace 혹은 Ralph Nader 가 만들어 낸 것이 아니고 바로 우리가 창조한 것이다. 반감기가 무한대인 수은, 납, 캐드뮴, 비소, 세레늄 등과 같은 독극물은 자연환경에 아무 생각없이 방치 처분하고 있다는 것을 상기할 필요가 있다. 이제는 이러한 어리석은 짓을 그만할 때가 되었다. 우리 말고는 아무도 할 수 없다는 것을 명심하여야 한다.

8. 원자력분야에 종사하는 과학자, 기술자들은 우선 분자생물학 및 방사선 손상이 유기체에 미치는 미시 선량계량(micro-dosimetry)에 대하여 숙지하여야 한다. 그 다음에는 우리는 다른 과학자 및 기술자 그리고 우리 자신의 관리층과 토론을 가져야 한다. 우리 관리층 및 기관도 설득하지 못하고, 언론이나 대중을 납득시키려고 애를 쓰는 것은 무의미하다고 하겠다.

9. 결론적으로 말하면, 한번도 발생한 적도 없는 가상사고로부터 가상적인 위험이 있다고 걱정하고 있는 일부 사람들 때문에, 우리는 매년 수만 명의 실제 인간들을 불필요하게 죽게 하고 있다. 이에 추가로, 지구는 지

구온난화, 산성비, 공해, 독극물의 유출, 음료수의 부족으로부터 위협을 받고 있다. 원자력의 이용은 이러한 모든 문제점들을 개선할 수 있다. 그러나 우리는 아주 작은 양의 방사선 일지라도 무조건 위험을 준다고 언급해 왔기 때문에 많은 사람들이 공포에 떨고 있는 것이다. 우리는 이것이 전혀 사실이 아니라는 것을 알고 있다. 그리고 우리는 그렇다고 강력히 말을 시작할 단계가 되었다.

MOLECULAR BIOLOGY, EPIDEMIOLOGY, AND THE DEMISE OF THE LINEAR NO-THRESHOLD HYPOTHESIS : Myron Pollycove, U.S. Nuclear Regulatory Commission

1. 지난 십년 동안 분자 생물학(molecular biology) 및 세포 기능에 대한 우리의 지식에 급속한 진전이 있으면서, 저준위 선량 및 선량율이 건강에 부정할 수 없는 유익한 효과를 주고 있는 이유를 이해할 수 있게 되었다.

2. 1998년 Pollycove과 Feinendegen은 복잡한 DNA 손상통제 생체계통(DNA damage-control biosystem)을 잘 설명하고 있다. (그림 1) 모든 신진대사 작용에서 산소의 2~3%는 유리기(free radical)로 전환된다. 유리기 생성율은 하루에 세포당 1010이다. 이중 108이 DNA를 둘러 싸게 되고, 산화방지제(antioxidant)가 이 유리기의 99% 가량을 처리하게 되어 결국 산화에 의한 부수 생성물인 DNA 변질은 하루에 세포당 106이 된다. 이 106 DNA 변질은 효소 교정(enzymatic repair)에 의하여 현격히 감소되어 약 102 개의 치유불능 DNA 변질 만이 남게 된다. 그리고 이들 치유불능 DNA변질의 약 99%는 세포궤멸(apoptosis), 차별분화(differentiation), 회저(necrosis) 및 면역계통(immune system)이 제거하게 된다. 따라서 하루에 평균 세포당 1개 가량의 돌연변이가 생성 축적되어 간세포(stem cell)의 생애 동안 노화 및 악성 종양과 관련된 DNA 손상통제 능력을 감소시키게 되는 것이다. 이러한 월등히 효율적인 생체계통은 유전적 결함에 의하여 장애를 받거나, 고선량 방사선이나 혹은 기타 독소에 의하여 손상되지 않는 한 조숙한 노화 및 악성 종양의 발생을 막게 되는 것이다. 이에 비하면, 1cGy의 저 에너지(LET) 방사선은 겨우 세포당 20개의 DNA 변질 (평균 세포당 0.4 이중 고리단절(double strand breaks) 포함)을 생성할 뿐이다.

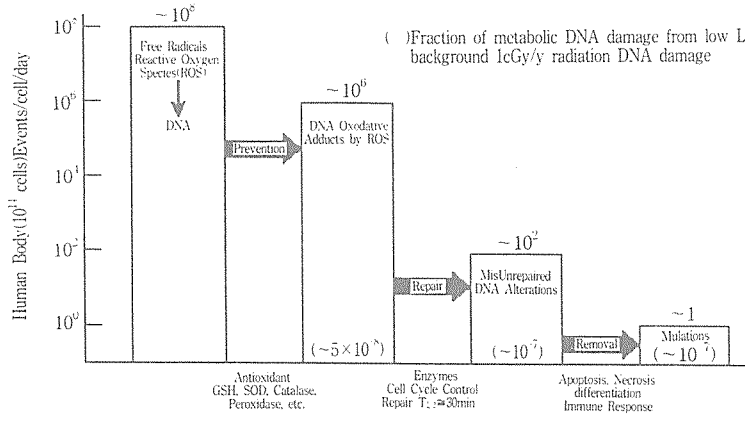


Figure 1. The DNA damage-control biosystem, Estimates based on data in literature, Pollycove M and Feinendegen LE.

3. 방사선은 신진대사 작용보다 DNA 변질에서 훨씬 많은 이중고리단절을 발생한다. (2×10^{-2} 대 5×10^{-7}). 이들 이중고리단절들의 치유불능 비율은 타 신진대사 작용에 의한 DNA 변질의 치유불능 비율 보다 또한 훨씬 크다. ($\sim10^{-1}$ 대 $\sim10^{-4}$). 그렇지만 신진대사 작용에 의한 DNA 변질의 수($\sim10^{6}$/cell/d)는, 연간 0.1cGy 저 에너지 방사선 피폭에 의한 변질의 수 (5×10^{-3}/cell/d) 보다 엄청나게 크기 때문에, 신진대사 작용에 의한 돌연변이 수인 하루에 세포당 ~1인 반면에 방사선 피폭에 의한 돌연변이 수는 겨우 평균 하루에 세포당 10^{-7} 지나지 않는다(그림 1).

4. DNA 손상통제 생체계통의 활동은 고준위 방사선량 (30cGy보다 큰 경우) 에서는 감소한다. 그러나 저준위 방사선량(30cGy보다 작은 경우)의 경우는 이에 적응적 활동이 활발해 진다. 이 생체계통은 저준위 선량에 적응적 대응(adaptive response)하면서 그 효율성이 증가하게 된다.(그림 2) 저선량 방사선의 경우, 방사선 피폭에 의하여 생성된 작은 수의 돌연변이를 줄이는 것 보다는, DNA 손상통제 생체계통의 적응적 대응에 의한 효율성 증진으로 신진대사 작용에 의한 돌연변이를 감소하게 하는 효과가 훨씬 결정적인 인자가 된다. 예를 들어서, 연간 방사선을 0.1cGy에서 1cGy로 10배 증가하는 경우, 이에 대응하여 생체계통 통제의 효율성 증진을 20 % 가상한다면, 방사선에 의한 돌연변이는 1×10^{-7}/cell/d 에서 8×10^{-7}/cell/d으로 증가하게 되는 반면에, 신진대사 작용에 의한 돌연변이는 ~1/cell/d(그림 1)에서 ~0.8/cell/d (그림 3)로 감소하게 된다. 따라서 방사선의 생물학적 영향은 방사선이 생성하는 DNA 돌연변이 수에 의하여 결정되는 것 보다는, 산화작용에 의한 DNA손상의 냉혹하고 엄청난 부담을 통제하는 생체계통의 효율성 증진에 주는 효과에 의하여 결정된다고 하겠다. 다시 말해서, 고선량 방사선은 이 생체계통에 손상을 주어 결과적으로 신진대사 작용에 의한 돌연변이를 상당히 증가시켜 결국 위해도를 증가하게 하는 반면에, 저선량 방사선은 DNA 손상통제 생체계통을 자극하여 신진대사 작용에 의한 돌연변이를 상당히 감소시켜 결국 위해도를 감소하게 한다.(그림 2, 3) (Azzam, et.al., 1996).

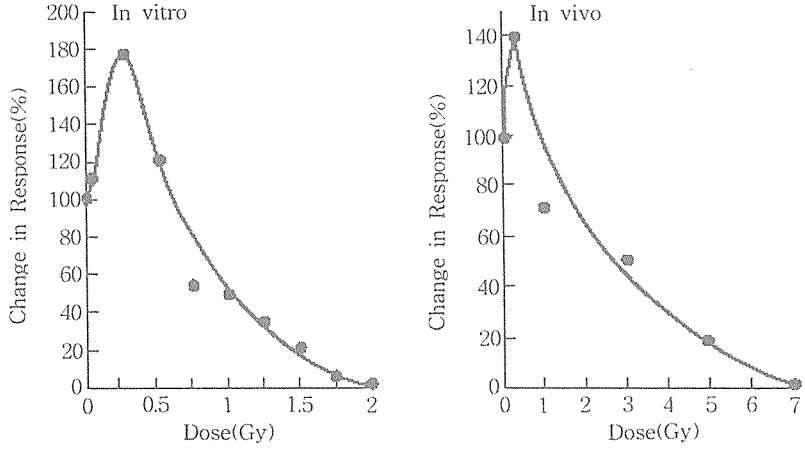


Figure 2. Immune system response to radiation. Mouse splenic cells primed with antigenic sheep red blood cells. Makinodan T, James SJ, 1990.

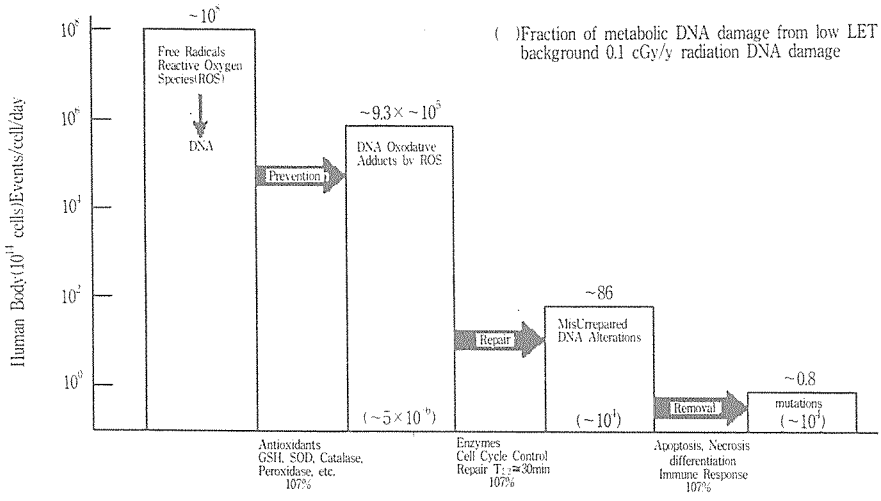


Figure 3. The DNA damage-control biosystem response to high background radiation=120%
Estimates based on data in literature. Pollycove M and Feinendegen LE.

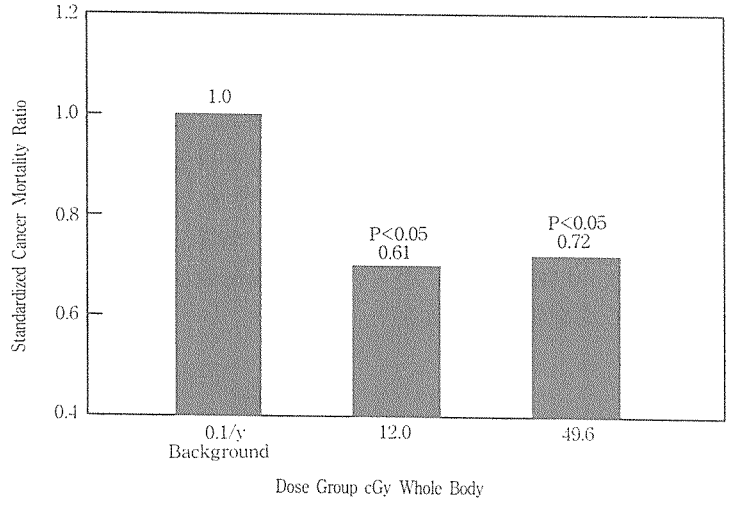


Figure 4. Standardized cancer mortality ratio in 3 exposure groups followed for 30 years after a thermal explosion. Jaworowski Z, 1995.

5. 천연방사선 준위가 높은 지역에 사는 사람들이 수명이 증가하고 암 사망자수가 감소하는 현상이 수십 년에 걸쳐서 보고되어 왔다. 근래 와서는 저선량 및 중선량 방사선에 의한 피폭이 긍정적인 건강 효과를 초래한다는 것을 실증하는 여러 가지 통계학적 의미를 갖는 방사선 피폭 역학조사(epidemiology) 연구가 보고되고 있다.

6. 1995년 Jaworowski는 구소련에서 방사선 피폭 호메시스에 대하여 검토한 후 그 결과를 발표하였다. 1957년 열폭발에 의한 고선

량 방사선 피폭 후, 동부 우랄 지방에 있는 22개 마을에 사는 7,852명을 대상으로 3개의 피폭집단으로(평균 49.6cGy, 12.0cGy, 4.0cGy) 나누어 30년 동안 추적하였다. 종양 관련 치사율은 같은 지역에 사는 보통 비피폭자들 보다 각 피폭집단에서 28%, 30%, 27% 각각 낮은 것으로 나타났다. (그림 4).

7. 1993년 Kondo가 수행한 역학조사 연구에 의하면, 원자폭탄 생존자들 중에서 저선량 방사선 피폭이 유익한 효과를 보이고 있다. (그림 5)

8. 1995년 Cohen은 미국 인구의 약 90%에서 라돈 피폭 관련 폐암 발생을 보기 위해 1,601 카운티를 선정하여 연구를 수행하였다. (그림 6) 연구에 의하면, 일반 가정의 라돈 농도의 준위가 증가하면서 폐암 발생에 의한 사망자수가 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 현상은 BEIR IV 결과와 매우 대조적인 것을 알 수 있다. BEIR IV 결과는 우라늄 광산에서 고준위 라돈 농도에 피폭된 영향 결과를 LNT 선형모델을 이용 외삽하여 유도한 경우로서 이론적으로는 사망자수가 증가하게 된다. 이에 대한 합리적인 설명은 저준위 선량 및 선량율의 경우, 자극받은 생물학적 메케니즘이 오히려 방사선의 손상을 보상하여 암으로부터 방호한다는 것이라 할 수 있다.

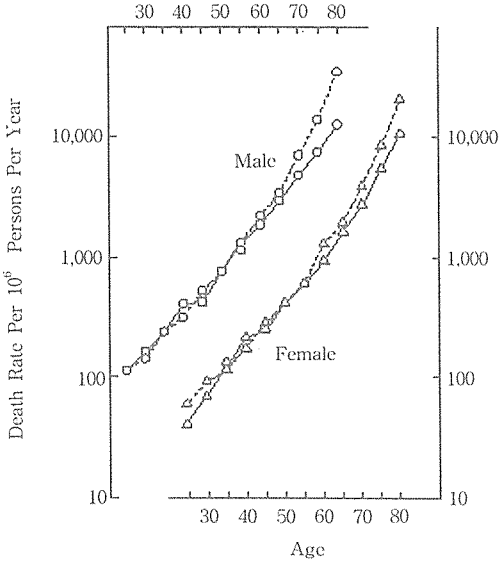


Figure 5. The higher death rate after 55 years old (dotted line) corresponds to the people living in Nagasaki, who were not exposed to A. Bomb. Lower death rate after 55 years old (solid line)
corresponds to A. Bomb survivors. Mine, et al, 1981.

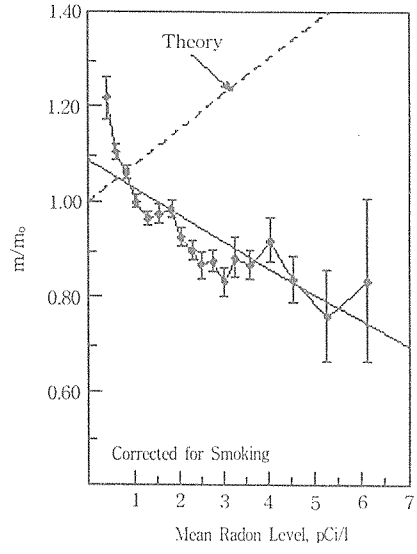


Figure 6. Lung cancer mortality rates Compared with mean home radon levels by U.S. county and comparison with linear model by BEIRIV. m/m_0=ratio of lung cancer mortality rate for residential radon levels to that at 0 level (theoretical), or to that at average residential level, 1.7 pCi/l. Cohen B, 1995.

9. (그림 7)은 라돈 온천이 있는 Misasa 지방에 사는 주민이 다른 지방 교외에 사는 주민들 보다 암에 의한 사망자수가 낮은 것을 보여주고 있다.

10. 1991년 Matanoski는 13년에 걸친 미국 원자력선박 조선소 작업자에 대한 저선량 방사선 피폭의 결과를 분석하여 건강에 미치는 영향을 평가하는 연구를 수행하였다. 그리고 그 결과는 1994년에 UNSCEAR에 보고된 바가 있다. 이 연구의 결과는 LNT 가정과 상반되는 것이었다. 일생동안 받은 방사선 피폭이 5mSv 이상(많은 사람은 50mSv를 훨씬 초과) 되는 28,542 명의 원자력 종사자, 방사선 피폭이 5mSv 이하인 10,462명의 종사자, 그리고 33,352명의 비원자력 종사자가 선택되었다. 각 집단의 사망을 그 발생 원인에 따라 (모든 원인, 백혈병, 임파선 및 조혈기관 암,

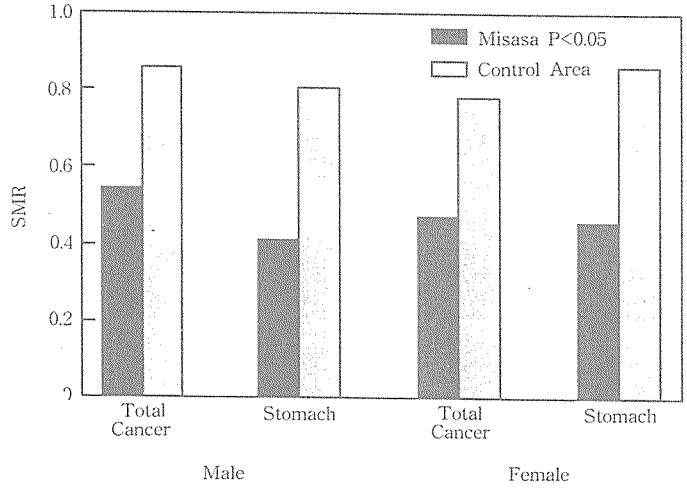


Figure 7. Standardized mortality ratios of populations continually exposed to high, Misasa radium springs, and low air concentrations of radon, Kondo S, 1993.

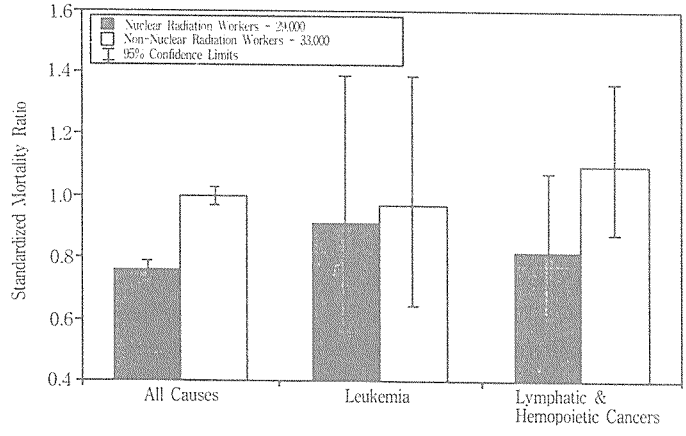


Figure 8. Standardized mortality ratios for selected causes of death among shipyard workers in the U.S. Nuclear worker cumulative dose: 0.5->40cSv (rem). Matanoski GM, 1991.

폐암 등) 분류하였다. 그 결과는 표준 치사비율(standard mortality ratio)이 2개의 원자력 종사자 집단의 경우, 모든 원인에 의한 사망에서 비원자력 종사자보다 통계적으로 상당히 낮은 것을 볼 수 있다. (그림 8). 이는 확실히 저선량의 방사선이 위해도를 감소한다는 분명한 증거라고 할 수 있다.

11. 1995년 Cardis 등이 3개의 국가(유럽, 미국, 캐나다)에 대하여 수행한 저선량 방사선과 암에 대한 연구에 의하면, 선량과 모든 원인 그리고 암에 의한 사망자수와는 관련이 있다는 증거가 없다는 것을 입증하였다. (그림 9) 만성임파백혈병(CLL;chronic, lymphocytic leukemia)을 제외한 백혈병에 의한 사망자수는 외부 피폭선량과 상당한 관련이 있었다. 95% 값 사망자수 199명으로서, (one-sided P value = 0.046 : 119 deaths) 이들 119명의 사망자수를 분석한 바에 의하면 86명이 선량분류 1,3,4,6에서 제외됨을 알 수 있었고, 여기서는 생각보다 낮은 사망자수를 보였다. 선량분류 2,5,7에서 나머지 33 사망자의 경향분석은 정상적으로 근사값을 구하는 것보다는 5,000개의 샘플을 근거로 하여 컴퓨터 씨뮤레이션을 사용하여 구하였다.

12. 1989년 Miller 등이 수행한 캐나다의 유방암 형광투시경(fluoroscopy) 연구는 1930년에서 1952년까지 형광투시경을 사용하여 검진한 일단의 31,710명 여성 중에서 유방암에 의한 사망자수를 보고하고 있다. 여기서 저자들은 다음과 같이 결론 짓고 있다. 선량-감응관계(dose-response relation)에서 가장 적절한 형태는 단순 선형 모델로서, Nova Scotia 및 기타 주에서 별도의 기울기를 보였다. 단지 별로 중요하지도 않은 자료는 포함하고 있고, 신뢰도 상한치의 자료는(그림 10) 배제하는 이 선형모델을 근거로, 저자들은 30세 연령에서 단 한번의 방사선 조사피폭 후 유방암에 의한 추가사망 위해도를 1cGy에서 백만명당 60명 혹은 15cGy에서 백만명 당 900명으로 예측하였다. 그러나 관측 자료에 의하면 15cGy에서 유방암 위해도의 상대적 감소가 0.66 (P=0.05), 그리고 25cGy에서 0.85 (P=0.32)로 나타났다. 이 연구에 의하면, 15cGy의 선량은 백만명 여성 중에서 사망자수가 7,000명 줄어든다고 예측하고 있다.

13. 결론적으로, LNT 가정은 모든 선량은, 영에 가까운 값이라도, 위험하다고 가상한다. 즉, 선량의 크기에 비례하여 인체에 해를 주는 돌연변이, 즉 치유불능의 DNA 변질을 야기한다. LNT 이론을 이용하여 집단선량 계산을 수행하며, 이에 의하면 천연방사선 보다도 아주 작은 선량에도 사망자가 발생하게 되는 것이다. 최근의 분자 생물학에 의하면, 신진대사 작용에 의하여 생성된 산화유리기가 엄청난 양의 치유불능의 DNA 변질을 야기하는 것을 밝히고 있다. 반면에 천연방사선에 의하여 생성되는 치유불능의 DNA 변질은 거의 무시할 수 있을 정도로 작다.

14. 이들 DNA 변질은 DNA 손상통제 생체계통(DNA damage-control biosystem)의 산화방지제 저지(antioxidant prevention), 효소 교정(enzymatic repair), 그리고 돌연변이 제거(mutation removal) 작용을 통하여 효과적으로 처리하고 있다.

15. 고준위 선량은 이 DNA 손상통제 생체계통에 손상을 가해서 치사율을 올리게 된다. 그러나 저준위 선량은 이 DNA 손상통제 생체계통을 자극하여 치사율을 낮추는, 즉 호메시스 작용을 관측할 수 있다.

16. "무시무시한 방사선으로 인한 사망"에

대하여 우리의 지속적인 언급은 대중의 공포를 증가시키고 있다. 이에 따라 의료, 연구, 에너지, 처분, 처리와 같이 원자력 기술을 적용하는 과정에서 대중을 방사선의 위험으로부터 과도히 방호하여야 한다는 요건 때문에 엄청난 경제적 손실을 야기하고 있다. 불행히도 정부의 기금은 그들이 지지하는 연구과제에 한하여, 지정된 위원회, 그리고 복잡한 환경 및 규제 기관에 할당되고 있다. LNT 이론 및 수억 달러의 방사선 방호를 위한 활동은 정치 및 경제 권력층이 모두 자기 영역을 늘리기 위해 강력한 공생관계를 유지하는데 사용하고 있다.

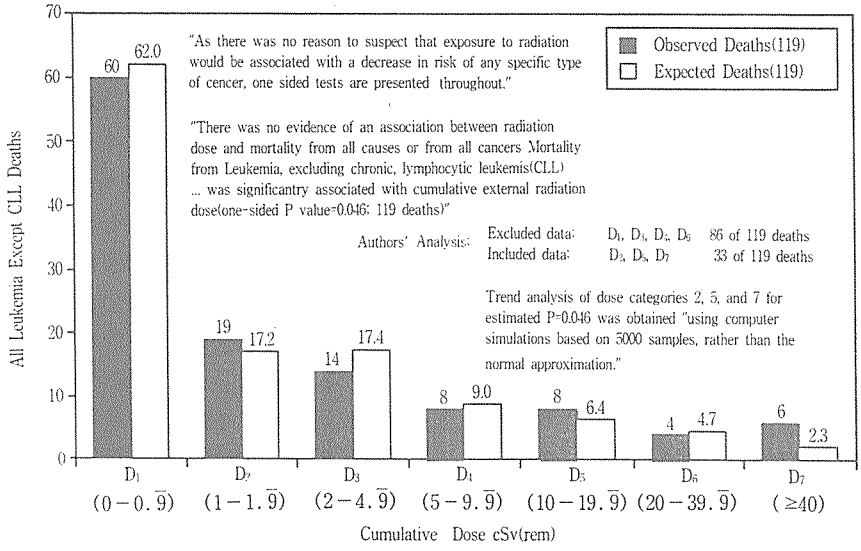


Figure 9. Cancer mortality among nuclear industry workers in three countries. Cardis E, et al 1995.

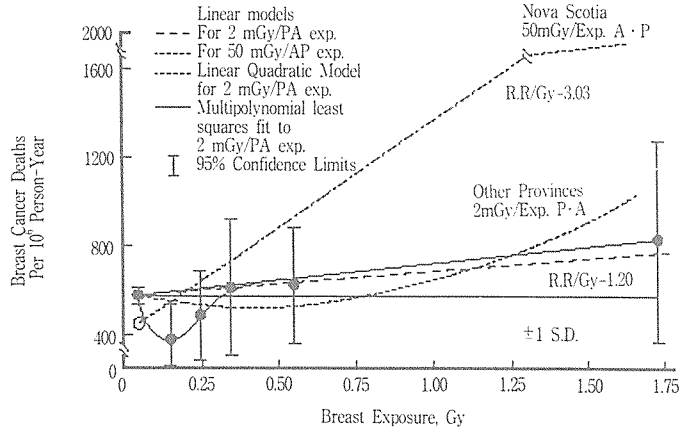


Figure 10. Canadian breast fluoroscopy study. Miller AB, et al 1989.