

방사선 장해방어

0. Warming-Up

0-1. 방사선의 발견

- 1789년 마틴 클라프로트(Martin Klaproth)는 우라늄을 발견. 그 이름은 Uranus (천왕성)에서 이름을 따옴.
- 작명의 배경은 태양을 중심으로 행성이 주기적으로 도는 것처럼 원소의 원자번호별 배열도 주기성을 띠는 것이라는 것에 착안
- 이후 많은 연구자들에 의해 여러 가지 원소들이 추가적으로 발견
- 1895년 뢰트겐(W. C. Röntgen)이 최초로 X선 발견
- 1896년 베크렐(Becquerel)은 우라늄 광석에서 최초로 방사능(radioactivity) 확인
- 1898년 퀴리 부부(Marie & Pierre Curie) 자연방사성 핵종인 라듐(Ra)과 폴로늄(Po)을 발견
- 그 후 러드퍼드는 3가지 종류의 방사선(α , β , γ)을 발견

주요 방사선관련 역사(略史)

1789	Martin Klaproth	우라늄 발견
1895	W.C. Röntgen	X-선 발견
1896	H. Becquerel	우라늄 광석에서 방사선 발견
1897	J.J. Thomson	전자 발견
1898	G. Schmidt	토륨에서 방사선 발견
1898	Marie & Pierre Curie	라듐과 폴로늄 발견
1911	E. Rutherford	원자핵 발견
1932	J. Chadwick	중성자 발견
1934	Irene & Joliot Curie	인공방사성물질 발견
1934	E. Fermi	중성자로 우라늄 충돌
1938	O. Hahn and F. Strassman	핵분열 발견
1940	E.M. McMillan and P.H. Abelson	넵티늄(Np) 발견
1941	G.T. Seaborg, J.W. Kennedy, E.M. McMillan and A.C. Wohl	플루토늄(Pu) 발견
1942.12	E. Fermi	인류최초 핵분열 연쇄반응 성공
1945.8		히로시마 및 나가사키 원폭투하
1945	G.T. Seaborg, R.A. James, L.O. Morgan and A. Ghiorso	아메리슘 발견
1953	D.D Eisenhower	유엔총회에서 "Atoms for Peace" 제안
1966	WHO?	

0-2. 보건물리학

- 방사선 발견 초기에는, 방사선이 인체에 보건상 위해를 주는지를 잘 인지하지 못함.
- 따라서 방사선으로부터 장해를 입은 초기의 사람들은 주로 방사선 관련 물리학자들
- 예를 들어 퀴리 부인은 1902년 다량의 방사선으로 인해 현기증과 구토 증세를 일으켰으며, 1934년 7월 4일 골수가 허약해져 기관지염과 빈혈 합병증으로 사망하였는 바, 이는 라듐 방사능에 과다하게 노출되었기 때문이라 추측.
- 특히 X선과 라듐 방사선에 과다하게 노출된 경우 방사선 장해를 유발할 수 있다는 사실이 밝혀지면서 국제적으로 “국제 X선 및 라듐 방호위원회(International Commission on X ray and Radium Protection; ICXRP)”가 1928년 설립
- 이와 발맞추어, 전리방사선의 유해한 영향으로부터 개인 및 집단을 보호하는 보건공학(health engineering)의 한 분야가 출현하였는 바, 이를 보건물리학(health physics) 또는 방사선물리학(radiation physics)이라 함.
- 보건물리학이 취급하는 분야는
 - 1) 다양한 방사선 및 방사성 물질의 물리적 측정;
 - 2) 방사선량과 생물학적 영향과의 정량적 관계(quantitative relationship)의 설정;
 - 3) 환경으로의 방사능 이동;
 - 4) 방사선학적으로 안전한 장비, 절차 및 환경의 고안 등

0-3. 국제방사선방호기준 관련 기관

1) 국제방사선방호위원회 (ICRP)

- 1928년에 발족된 국제 X선 및 라듐 방호위원회(ICXRP)는 1950년 국제방사선방호위원회 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)로 명칭을 변경
- ICRP는 주로 방사선 영향에 관한 최신 지식을 조사하여, 방사선방호 원칙으로서 정리한 사항을 간행물(Publication)로 발간.
- 간행물은 크게 두 가지로 구분. 그 중 하나는 특정한 사항에 대한 과학적 지식을 정리한 간행물로서 다수를 이루며, 한 예로 ICRP 간행물 No.94는 “비밀봉 방사성핵종으로 치료받은 환자의 퇴원(Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides)”
- 이와 달리 인간에 대한 방사선방호체계 전체를 권고 및 개편하는 간행물이 있음
- 이들 권고로 ICRP No.1(1958년, 최대허용집적선량 및 최대허용선량),
ICRP No.6(1967년),
ICRP No.9(1956년, 최대허용선량),
ICRP No.26(1977년, 선량당량 및 유효선량당량한도),
ICRP No.60 (1990년, 등가선량, 유효선량 및 선량제약치 도입, 선량한도 감소)
ICRP No.103 (2007년, 피폭상황 재분류, 방사선가중치 및 조직가중치 변화)

2) 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU; International Commission on Radiation Units and Measurements)

- ICRU는 방사선의 단위와 측정에 관한 국제적인 검토의 필요성이 논의되어 1925년 설치
- ICRU Report로 발간
- www.icru.org
- ICRU 구(球, Sphere), 실용량(operational quantity) 등이 주 관심

3) 국제연합 방사선의 영향에 관한 과학위원회(UNSCEAR; United Nations' Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation)

- 국제 연합 총회 중의 제10회 본회의 (1955년)에서 설립이 결정.
- UN이 요청하는 인간의 건강과 환경에 대한 방사선의 영향 및 피폭관련 각종 데이터를 약 4년의 간격으로 보고서로 발간.
- www.unscear.org

4) 국제원자력기구(IAEA; International Atomic Energy Agency)

- 1956년에 설립, 국제연합의 후원으로 1957년 활동을 개시
- 활동의 주목적은 원자력에너지의 인류 평화, 건강, 번영으로의 이용에 기여 촉진과 증대
- 특히 IAEA는 ICRP가 권고(Recommendations)한 사항들을 규범(Requirements)적 성격으로 변환

- 안전시리즈(Safety Series) 발간.
- 이중에서 특히 안전시리즈 No.115 "방사선기본안전기준(International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources: 약칭 BSS)"는 ICRP No.60을 강제적 규범 형태로 정리한 안전시리즈로 각국의 방사선방호 법령 제정 및 개정에서 지대한 영향력을 끼침.

1. 방사선의 생물학적 영향

1.1 인체의 구성

물 : 70~85%,

단백질 : 10~20%

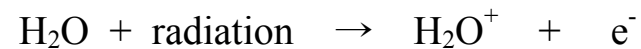
탄수화물(carbohydrates) : less than 10%

지질(lipid) : 2-3%

1.2 방사선과 인체의 반응

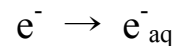
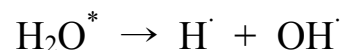
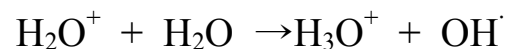
① 물리적 단계 ($< 10^{-15}$ sec) :

- 인체내 물분자와 반응하여 전리 및 여기를 통해 방사선은 에너지를 잃음
- 양이온 물분자 H_2O^+ , H_2O^* (excited), free subexcitation e^- 형성



② 물리화학적 단계 (Physico-Chemical Stage, $10^{-15} \sim 10^{-12}$ sec)

- 또는 前화학 단계(prechemical stage) 라고도 함
- 초기의 대표적 3형태는 H_3O^+ , OH^\cdot , H^\cdot , e^-_{aq} , H_2 로 대체
- H_2 는 더 이상 반응하지 않음
- 여기서 OH^\cdot , H^\cdot 는 라디칼(radical)을 의미
- e^-_{aq} 는 수화전자(hydrated electron)을 의미



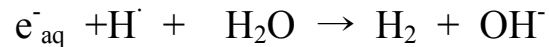
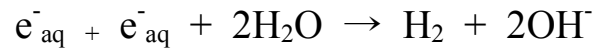
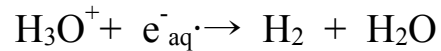
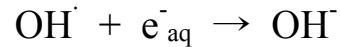
* **라디칼**: 전자각의 최외각에 쌍을 이루지 않은 전자가 있는 원자나 분자, 반응성이 큼

* **수화전자**: 외부와 열적평형인 자유전자(거의 정지상태)로서 물분자의 전기적 극성으로 인해 물분자들이 에워싼 형태

Thermalized electrons orient the permanent dipole movements of neighboring water molecules forming cluster, called a hydrated electron.

③ 화학적 단계 (10^{-12} sec ~ 10^{-6} sec) :

- 전단계에서 생성된 H_3O^+ , 라디칼(OH^\cdot , H^\cdot), e^-_{aq} 에 의해 다양한 화학적 반응이 일어나고 그 결과 다양한 New products 들이 생성



④ 생물학적 단계 :

< 10^{-3} sec: 라디칼들이 생체 물질과 반응

< 1 sec : 생화학적 변화

minutes : 세포 분화가 영향을 받음

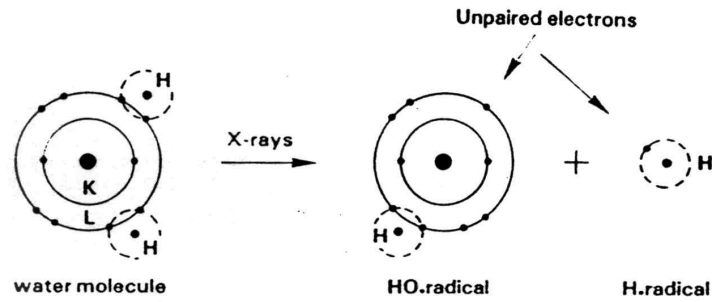
days : 위장관 및 중추 신경계 영향 (급성 피폭의 경우)

Weeks : 폐섬유(lung fibrosis) 시발

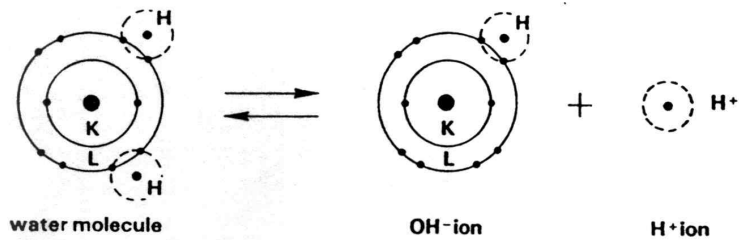
Years : 백내장(cataract) 및 암 발현; 자손에 대한 유전적 영향

참고

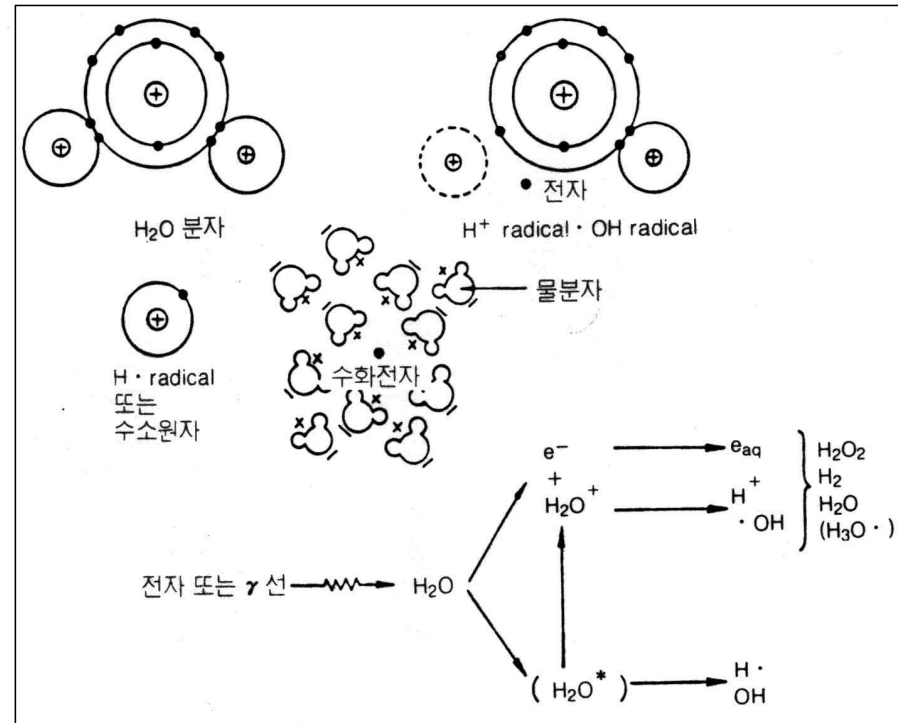
방사선과 인체(그중 주로 물)와의 반응관련 그림



(a) Decomposition of water into radicals due to the action of ionizing radiation.

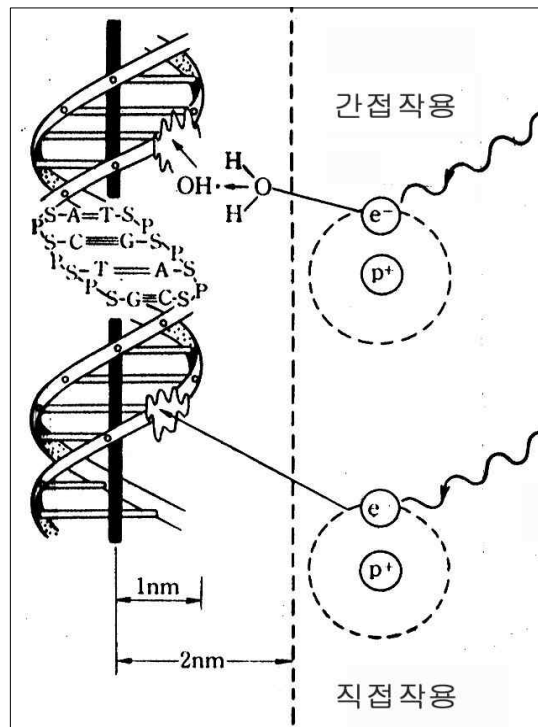


(b) Spontaneous ionic dissociation of water.



1.3 방사선의 DNA 공격 및 복구 메카니즘

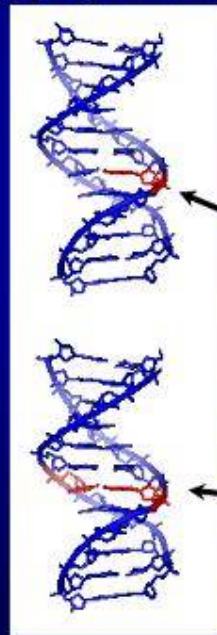
- 방사선에 의해 수화전자(e^-_{aq}), 수소기(H), 수산화기(OH), 수소가스(H_2), H_3O^+ 등의 기단 형성
- 생성된 기단들은 이동하며 DNA분자와 화학반응을 일으킬 수 있음
- 방사선에 의해 생성된 화학적 부산물이 DNA를 공격하여 손상을 입히는 경우를 간접작용
- 방사선이 원자물리적 작용에 의해 DNA를 직접 공격하고 손상시키는 것을 직접작용



DNA 손상(Damage)

Direct Action

(alpha, neutron)



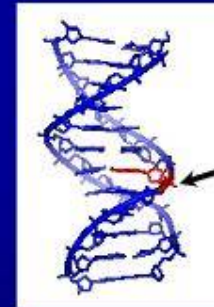
Single DNA break

Double DNA break

High Linear
Energy Transfer
(LET)

Indirect Action

(x-rays, gamma)



Photon

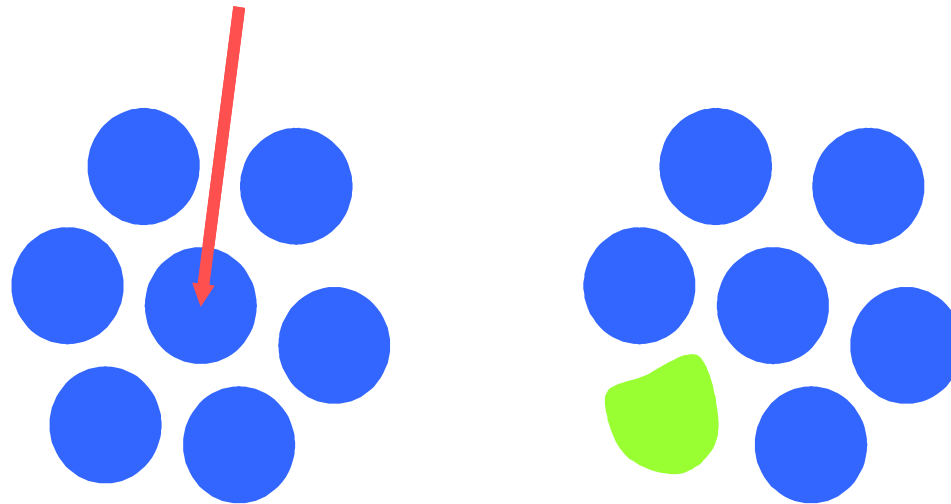
Free
Radicals

Single DNA break

Low Linear
Energy Transfer
(LET)

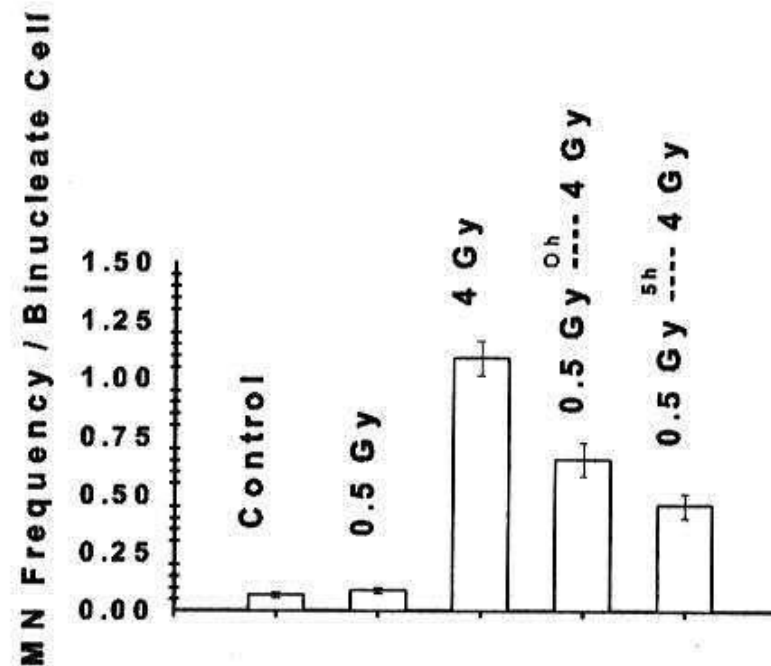
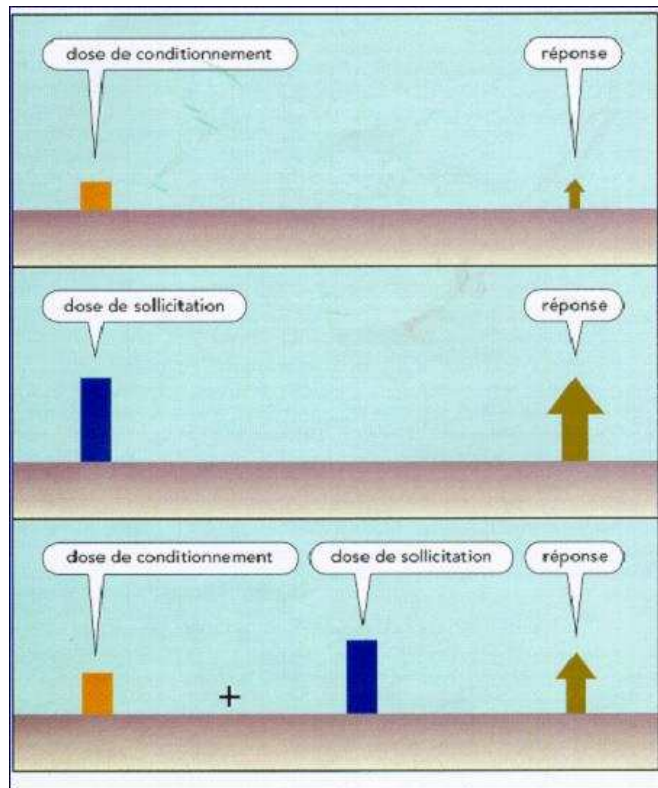
참고 1: 구경꾼 효과(By-stander effect)

- 특정 세포가 방사선에 조사될 때 피폭을 받는 세포가 아니라 인근의 다른 세포에서 그 영향이 나타나는 현상을 **구경꾼 효과**라 부름
- 동 효과가 사실이고 유의한 수준이라면, 비교적 소수의 세포만 피폭하는 낮은 선량에서의 효과가, 높은 선량에 비해 상대적으로 발생빈도가 높은 것으로 알려짐
- 이 이론에 따르면 저선량에서의 선량 반응곡선(Dose Response Curve)는 선형무문턱모델(Linear No Threshold; LNT Model),이 아니라 낮은 선량에서 초선형(Super linear response)의 반응을 보인다는 주장이 제기될 수 있음.



참고2 : Adaptive Response(적응반응)

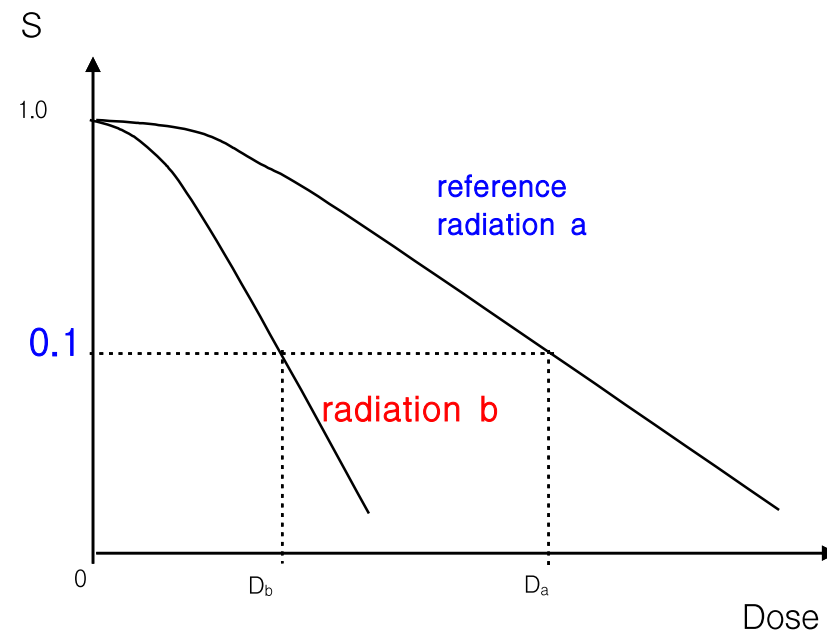
방사선피폭이라는 하나의 자극에 의해 세포생물학적 활성화가 유도되고 이에 따라 유해한 작용으로부터 방어 능력이 향상. 따라서 피폭(D_1)이 있고 일정한 시간이 흐른 후 강도가 더 센 피폭(D_2)이 발생하더라도, 그 조건상 위해는 D_2 만 피폭했을 때 보다 감소한다는 이론



3. RBE

- 생물학적효과비(Relative Biological Effectiveness, RBE)는 기준방사선이 주어진 생물학적 효과(다양한 영향에 대한 endpoint)를 일으키는 선량(D_a)과 동등한 효과를 일으키는 비교방사선의 선량의 비(D_b)의 역수로 정의

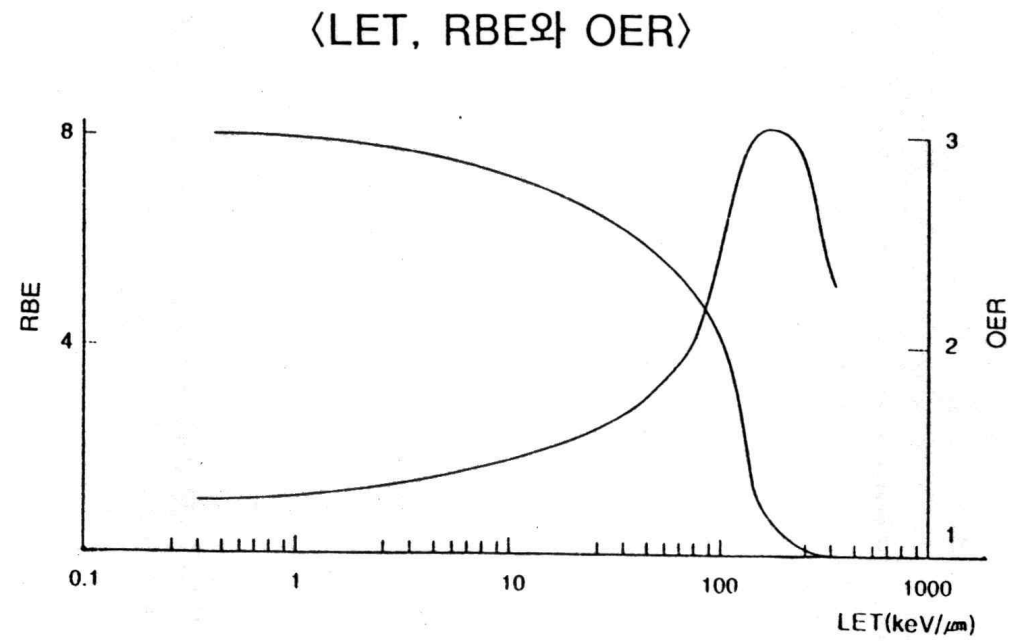
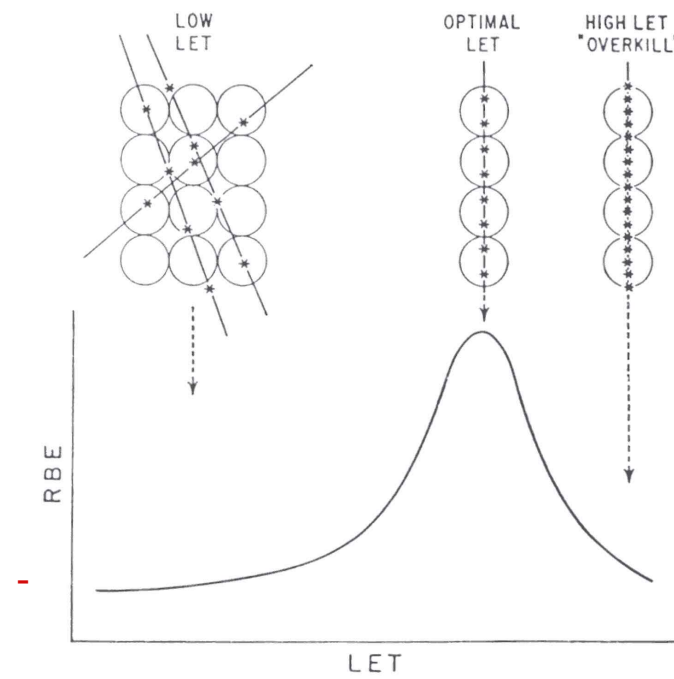
$$RBE_{b/a, S=0.1} = \left[\frac{D_b}{D_a} \right]^{-1} = \frac{D_a}{D_b}$$



세포사에 대한 RBE를 나타내는 방식. 10% 생존에 대해 기준방사선 a에 대한 방사선 b의 $RBE = D_a/D_b$ 가 됨.

- 생물학적효과비(Relative Biological Effectiveness, RBE)를 구할 때 **기준방사선**으로는 250 kVp X선을 많이 사용하지만 ^{60}Co 감마선이 사용되기도 함
- RBE값은 **LET의 함수**
- RBE는 산소의 존재여부, 선량률, 온도 등의 환경에 따라 달라질 수 있음
- RBE는 관심 영향에 따라 차이가 있다.
- **OER은 간접효과가 많은 방사선에서 주로 영향을 준다**

- RBE vs. LET vs. OER



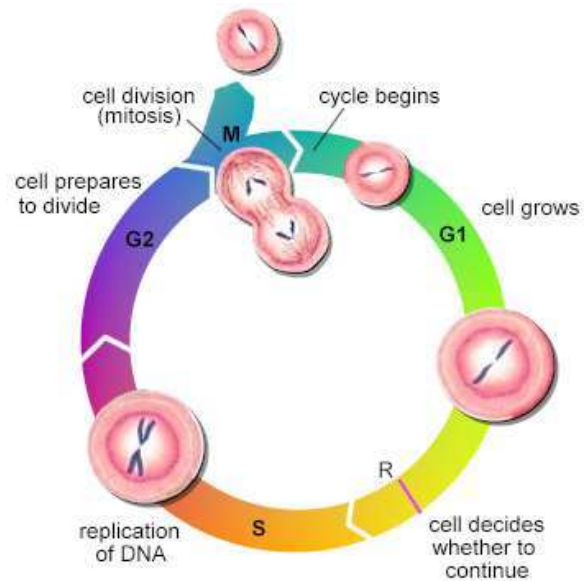
예제 ▶ 다음에 대한 설명으로 잘못된 것은?

- 1) 생물학적효과비(RBE)는 산소효과비(OER) 값이 클수록 크다
- 2) 산소효과비에 대한 방사선감수성은 고 LET 방사선이 저 LET 방사선에 비해 산소존재에 의한 방사선 효과 크지 않다.
- 3) 생물학적효과비(RBE)는 선형에너지전달(LET) 값이 클수록 크다.
- 4) 산소를 포함하는 공기환경과 산소가 없는 질소 환경에서 일정한 생존율에 이르는데 필요한 선량이 차이가 있는데 이를 산소효과비(OER)라 한다.

[풀이] 3

LET 값이 크면 RBE 커지다가 매우 크면 오히려 작아짐

참고4: 세포분열 주기와 방사선 감수성



- 정상적인 세포는 임의로 분열하는 것이 아니라 초기에는 정지기(G_0 기)에 대기
- 분열이 필요하다는 1차 증식인자가 전달되면 G_0 기에서 G_1 기로 변화함
- G_1 에서 S를 거쳐 G_2 까지의 시기를 간기(interphase)라 부름
 - ① 간기
 - G_1 기 : DNA복제 준비기, 세포성장(단백질 합성)

- S기 : DNA복제기, 염색체가 1가닥씩 더 만들어짐, 방사선감수성이 가장 둔감.

- G2기 : 세포생장 및 복제 완료, 분열 준비기

② 분열기(M기) : 각각의 세포로 분열하는 시기, 방사선감수성이 가장 민감

- M기는 세분하면 핵막이 사라지기 전까지의 전기(prophase), 방추사의 분리작용이 이루어지는 중기(metaphase), 염색체들이 분리되는 후기(anaphase), 분리된 핵막과 세포막이 형성되는 말기(telophase)로 구분

- M기에서 분열이 완료되면 다시 다음 분열을 준비하는 G1기로 넘어감

- 대선량에 조사된 세포중 팽윤하여 핵농축(pyknosis)등을 일으키며, 조사후 한번도 분열하지 않고 죽는 세포사를 간기사(interphase death)라고 함

37% 생존선량

- 세포의 생존률은 선량 D의 지수감소함수.

$$S(D) = e^{-\alpha D}$$

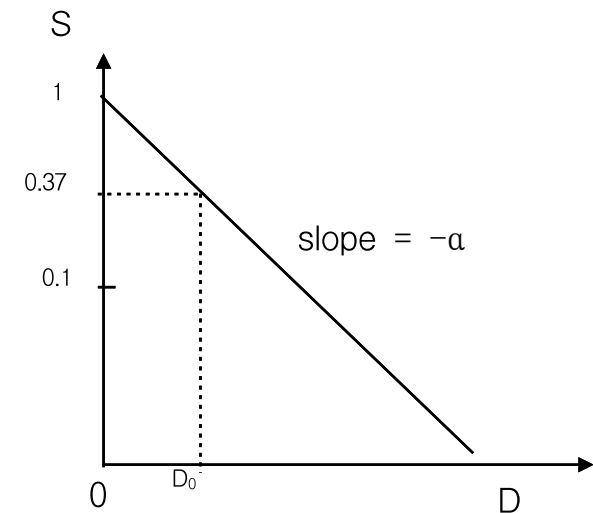
- 위식은 그림과 같이 반대수 그래프(Y축은 로그, X축은 일반)에서 기울기가 $-\alpha$ 인 직선으로 나타남
- 지수항의 $\alpha D = 1$ 이 되어 $S(D) = e^{-1} = 0.37$ 이 되는 선량을 **37% 생존선량**이라고 부름

즉 37% 생존선량 $D_0 = \frac{1}{\alpha}$

- 37% 생존선량을 알면 위 식을 다음과 같이 쓸 수 있다

$$S(D) = e^{-\alpha D} \Rightarrow S(D) = e^{-D/D_0}$$

- LET가 낮은 방사선에 의한 세포의 37% 생존선량은 바이러스 1000 Gy, 박테리아 10 Gy, 포유동물 세포가 1~1.5 Gy 수준



예제 37% survival dose 가 1.5Gy인 배양세포 1000개에 3Gy를 부여한 후 예상되는 사멸세포의 수는 얼마인가?

[풀이]

- $S(D) = e^{-\alpha D}$
- $D_0 = \frac{1}{\alpha}$ 를 37% 생존선량이라도 부름
- $S = e^{-(D/D_0)} = e^{-(3 / 1.5)} = \mathbf{0.135}$
- 사멸 세포 수 = $1000(1 - 0.135) = 865$ 개

□ Bergoni-Tribondeau의 법칙

- DNA 복제가 빈번한 경우에는 그만큼 DNA가 손상을 입을 위험이 큼
- 분열빈도가 큰 세포가 방사선에 취약
- 분열 중에 있는 세포는 분열이 구체화되는 M기에 방사선에 대한 감수성이 증가
- 1906년 Bergoni와 Tribondeau는 "세포의 방사선 감수성이 세포의 증식활동에 비례하며 세포의 분화 정도에 반비례한다"라는 법칙을 제시
 - o 대사율이 높은 세포가 방사선에 더 민감
 - o 세포가 성숙할수록 방사선에 강해지며 일반적으로 성숙한 세포는 대사율이 낮음
 - o 어린 세포나 조직이 방사선에 더 민감
 - o 세포분열이 빈번하거나 성장이 빠른 조직은 방사선에 민감
 - o 줄기세포 또는 간세포(幹細胞, stem cell)는 방사선에 민감

□ 조직 장기의 방사선 감수성 순위

- | | |
|-----------------|---------------|
| 1. 림프조직 | 2. 골수 |
| 3. 생식선 | 4. 소장 및 대장 상피 |
| 5. 피부상피 | 6. 모세혈관 |
| 7. 수정체 | 8. 모낭 |
| 9. 신장 간장 | 10. 폐 |
| 11. 타액선 | 12. 피지선 |
| 13. 모든 피부층 | 14. 췌장 |
| 15. 갑상선 | 16. 근육 |
| 17. 연골 | 18. 골 |
| 19. 신경세포 및 신경섬유 | |

2. 방사선관련 물리량

2.1 방사능 등

1) 방사능(activity) A:

- 방사성핵종을 함유한 물질, 즉 방사성물질의 양을 단순히 체적이나 질량으로 나타내는 것은 그것이 낼 수 있는 방사선의 세기와 정비례 관계에 있지 않으므로 좋은 방법이 되지 못한다. 따라서 방사성물질의 양을 나타내는 척도로서 특별히 방사능이라는 양을 사용.
- 방사능이란 주어진 방사성물질 내부에서 단위시간당 방사성물질이 붕괴되는 개수(핵변환의 수)를 말하며 수학적으로는 다음과 같음.

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

- 방사능의 단위는 베크렐(becquerel, Bq)을
- 1 Bq은 매초 하나의 핵변환이 있는 것을 말하며 다음과 같다.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

- dps: disintegration per second
- 미국 등지에서는 disintegration 대신에 transformation을 사용: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ tps}$
- 이것과 병행하여 dpm 또는 tpm이란 단위도 사용

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} = 60 \text{ dpm} = 60 \text{ tpm}$$

- 전통적 단위: 라듐을 발견한 퀴리부인의 이름을 딴 큐리(curie, Ci)를 사용, 1 Ci 란 라듐 1g의 방사능으로

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 37 \text{ GBq}$$

2) 붕괴상수(decay constant) λ :

- $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$ 에서 붕괴상수 λ 는 단위시간당 핵변환할 확률
- 단위는 sec^{-1} 이다.
- $T_{1/2}$ 은 해당 방사성핵종의 반감기

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

3) 비방사능(比放射能: specific activity), SA :

- 방사성핵종의 단위질량당 방사능 값
- 단위는 Bq/g 또는 Ci/g 등
- 핵종의 붕괴상수 또는 반감기($T_{1/2}$) 그리고 원자량에 의해 결정

- 각 핵종마다 고유한 값을 가지게 되며, 반감기와 원자량에 반비례
- 먼저 방사능은 $A = \lambda N$ 이며 여기서 λ 는 상수이므로 1g 일때의 방사성핵종의 개수($N(N=1g)$)만 알면 알면 됨. 원자량이 M인 핵종은 1 mol(M gram)일 때 원자의 개수가 아브가도르 숫자와 같으므로 비례식에 의해

$$M \text{ gram} : 6.023 \times 10^{23} \text{ 개} = 1 \text{ gram} : X \text{ 개}$$

$$X = \frac{6.023 \times 10^{23}}{M} .$$

따라서 비방사능은

$$SA = \lambda N(N=1g) = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} N(N=1g) = \frac{(0.693)(6.023 \times 10^{23})}{T_{\frac{1}{2}} M}$$

여기서 λ : 붕괴상수 [s⁻¹], 아보가드로(Avogadro) 수 : 6.023×10^{23} /mole
 $T_{\frac{1}{2}}$: 반감기 [s], M : 원자량

예제 ▶ 원자량이 M인 어떤 물질 W g의 방사능은? (단 T는 반감기이다)

$$1\text{g일 때의 비방사능이 } SA = \lambda N(N=1\text{g}) = \frac{(0.693)}{T_{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\text{Avo. No.}}{M}$$

$$\text{따라서 } W \text{ g일 때 방사능 } A = \lambda N(N=W \text{ g}) = \frac{(0.693)}{T_{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\text{Avo. No.}}{M} \cdot W$$

예제 ▶ 표준상태에서 1cc의 ^{85}Kr (반감기 : 10.7년)의 방사능은?

[풀이]

- $A = \lambda N$ 에서 1cc일 때 방사성핵종의 개수($N=1\text{cc}$)만 알면 된다.
- 표준상태에서 기체 1mol의 부피는 22.4 liter 이므로 1cc ($= 10^{-3}$ liter)일 때 방사성핵종의 개수는 다음의 비례식에서 구할 수 있다.

$$22.4 \text{ liter} : 6.023 \times 10^{23} \text{ 개} = 10^{-3} : X \text{ 개}$$

이 결과와 반감기를 이용하면 비방사능은 1.49 Ci/cc

2.2 방사선량

- 방사선이 인체에 주는 영향은
 - 방사선이 인체의 단위 질량당 전달하는 에너지
 - 방사선의 종류
 - 방사선 피폭을 받는 인체 부위등에 의해 결정
- 위와 같은 사항을 고려한 방사선량(radiation dose; 간략히는 선량 dose이라 함)을 계량

1) 부여 에너지(energy imparted) ε : 어느 체적내의 물질에 전리방사선에 의하여 부여된 에너지

$$\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \Sigma Q$$

여기에서, R_{in} = 체적속으로 들어온 모든 하전입자와 비하전전리입자들의 에너지의 합

R_{out} = 그 체적을 떠난 모든 하전입자와 비하전전리입자들의 에너지의 합

ΣQ = 그 체적내에서 발생한 핵변환과정에서 핵자와 소립자들의 정지 질량에너지 등 모든 변화량의 합. 합이(+)부호이면 감소를 나타내고, (-)부호이면 증가를 의미. [단위 : J]

2) 흡수선량(absorbed dose) D : 피폭하는 물체에 흡수되는 방사선 에너지의 양,

- 질량이 $dm(\text{kg})$ 인 매질 내에서 흡수되는 방사선의 평균 에너지를 $d\bar{E}(\text{J})$ 일 때

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

- 단위 1 Gy = 1 J/kg

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

- 흡수선량은 모든 종류의 방사선, 모든 물질에 대해 적용.

예제 ▶ 어떤 물체 0.1 kg에 2 J이 흡수된 경우 흡수선량은?

[풀이] $2 \text{ J} / 0.1 \text{ kg} = 20 \text{ J/kg} = 20 \text{ Gy}$ 가 된다.

잠깐 커머(kerma): 흡수선량과 함께 알아두어야 할 중요한 개념

- 엑스선, 감마선 및 중성자 등과 같은 간접 전리방사선에 의한 선량에만 적용
- 정의: 커마(Kinetic Energy Released in Matter)는 그 방사선에 의해 “단위질량당 생성된 모든 하전입자들의 최초 운동에너지의 합(the sum of the initial kinetic energies per unit mass of all charged particles)”
- 커마의 단위: 흡수선량과 동일한 차원 즉, J/kg.

예제 10 MeV의 광자가 100 gram의 물질에 입사하여 각각 4.5 MeV의 양전자와 음전자를 생성하였다. 이 두 하전입자는 100 gram의 물질내에서 전리 및 제동방사선의 방출을 통해 그 에너지를 모두 소모했다. 이 때 1.4, 1.6 그리고 2 MeV의 제동복사선이 방출되었는데 이 세 제동방사선은 물질내에서 상호작용 없이 빠져나왔다. 양전자는 운동에너지를 모두 소실한 후 주변의 전자와 반응하여 0.51 MeV의 두 광자를 생성하고 쌍소멸하였다. 이때 Kerma와 흡수선량을 계산하라.

[풀이]

a) Kerma: 입사한 방사선에 의해 발생한 하전입자들의 운동에너지의 합이므로

$$K = \frac{2 \times 4.5 \text{ MeV} \times 1.6 \times 10^{-13} (\text{J/MeV})}{0.1 \text{ kg}} = 1.44 \times 10^{-11} \text{ J/kg} = 1.44 \times 10^{-11} \text{ Gy}$$

b) 흡수선량: 해당 물질에 흡수된 에너지만을 고려하는 것. 제동복사선으로 사라진 에너지 제외

$$K = \frac{(2 \times 4.5) \text{ MeV} - (1.4 + 1.6 + 2) \text{ MeV}}{0.1 \text{ kg}} (1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) = \\ = 6.4 \times 10^{-12} \text{ J/kg} = 6.4 \times 10^{-12} \text{ Gy}$$

* 여기서 양전자가 나중에 쌍소멸로 생성한 0.51 MeV의 두 개의 감마선은 입사한 방사선과 관련이 없는 전자의 정지질량 에너지가 변환된 값이므로 고려하지 않는다.

3) 흡수선량율(absorbed dose rate) \dot{D} : 흡수선량율이란 흡수선량을 시간으로 나눈 값으로 다시 말해 dD 를 dt 로 나눈 몫이고, 미소시간 동안에 흡수선량의 변화량이다.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} ; \quad [\text{단위 : J/kg} \cdot \text{sec} = \text{Gy/sec}]$$

4) 조사선량(exposure dose) X :

- 어느 공간에 존재하는 방사능으로부터 어느 정도 피폭 가능한가의 준위를 나타내기 위한 양
- 방사선장내의 공기 체적 내에 생성되는 이온쌍의 전하량 크기로 정의.

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

여기서 dQ = 공기체적내에 생성되는 이온쌍 전하량의 변화,

dm =은 공기의 미소 질량

- 표준단위계에서는 공기 1 kg 내에 몇 쿨롱(coulomb)의 전하가 생성되는가로 표시
- 단위는 룬트겐(roentgen)을 사용.
- 1R은 1 cm³ 에 1 정전단위(esu; electrostatic unit)의 전하를 생성하는 방사선량

$$1 \text{ R} = 1 \text{ esu} / 1 \text{ cm}^3 \text{ in air}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg in air}$$

음미

조사선량의 정의에 따라 1 R의 의미 확인

- 공기의 질량 0.001293 g(표준 상태에서 공기의 밀도가 0.001293 g/cm³)에서
- 광자 (X선 또는 감마선)들에 의하여 자유롭게된 모든 전자들의 공기중에서 완전히 정지하였을 때
- 공기중에 생성된 한쪽 부호의 이온들의 총전하의 절대값이 1 esu(electrostatic unit, 정전하 단위 = 3.303×10^{-10} C)이면 그 광자의 조사선량은 1 R이라고 정의.

예제 공기의 밀도는 $1.293 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$ 일 때 $1 \text{ R} = 1 \text{ esu} / 1 \text{ cm}^3$ 의 공기가 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ 임을 증명하시오.

[풀이] 하나의 이온쌍(ion pair) 전하량은 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 이므로

$1 \text{ R} = 1 \text{ esu} / 1 \text{ cm}^3$ 의 공기

$$= \frac{1 \text{ esu}}{1.293 \times 10^{-6} \text{ kg}} \cdot \frac{3.303 \times 10^{-10} \text{ C}}{\text{esu}}$$

$$= 1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

예제 1 R 이 조사되었을 때 공기 1 cm^3 에 생성되는 이온쌍의 수

[풀이] $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ 의 정의에서

$$1 \text{ R} = \frac{2.58 \times 10^{-4} \text{ C}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{i.p.}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \cdot \frac{1.293 \times 10^{-3} \text{ kg}}{\text{cm}^3} = 2.08 \times 10^9 \text{ i.p/cm}^3$$

또는 하나의 이온쌍에 해당하는 정전하량은 $4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}$ 이므로

$$1 \text{ R} = 1 \text{ esu/cm}^3 = \frac{1 \text{ esu}}{\text{cm}^3} = \frac{1 \text{ esu}}{\text{cm}^3} \times \frac{\text{i.p.}}{4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}}$$

$$= 2.08 \times 10^9 \text{ i.p/cm}^3$$

예제 조사선량 1R은 공기에 대한 흡수선량으로는 얼마가 되는가?

- 조사선량을 공기가 받은 에너지로 변환하려면 공기중에서 한 개의 + 및 - 이온쌍을 생성하는데 필요한 방사선의 평균에너지가 중요
- 이것을 W값이라 함. 공기 중에서 약 34 eV

[풀이] 1 R = $2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ 의 정의에서

$$1 \text{ R} = \frac{2.58 \times 10^{-4} \text{ C}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{i.p.}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \cdot \frac{W (= 34 \text{ eV})}{\text{i.p.}} \cdot \frac{1.6 \times 10^{-12} \text{ erg}}{1 \text{ eV}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \text{ i.p/cm}^3$$

$$= 87.7 \text{ erg/g} = 0.877 \text{ rad}$$

- 조사선량은 X선과 감마선의 방사선장에 대해서만 사용
- 조사선량률 (exposure dose rate)은 단위시간당 조사선량으로서 단위는 R/h, mR/h, $\mu\text{R/h}$ 등
- 예를 들어 조사선량률이 25 mR/h인 작업장에서 일정한 시간 작업할 경우 예상되는 피폭의 양이 어느 정도 되리라는 것을 판단하는 데에 활용한다.

- 조사선량의 SI 단위로는 X가 있으며 이것과 R와의 관계

$$1 \text{ X} = \frac{1 \text{ C}}{\text{kg}} = 3,881 \text{ R}$$

확인

- $1 \text{ R} = 1 \text{ esu/cm}^3$ 을 이용하여 $1 \text{ R} = 0.877 \text{ rad}$ 임을 확인할 것
- 같은 방식으로 $1 \text{ X} = 34 \text{ Gy}$ 임을 확인해볼 것

5) 등가선량(equivalent dose) H_T :

- 조직 또는 장기의 평균흡수선량 D 에 방사선가중치(계수)(radiation weighting factor) W_R 의 곱.

$$H_T = D_T \times W_{T,R}$$

- 차원이 없는 단순한 수치인 방사선가중치만을 곱했기 때문에 단위는 흡수선량과 같은 J/kg
- 단 명칭은 D 가 Gy일 때는 시버트(Sv), D 가 rad일 때는 렘(rem)이다.

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

- 아래의 표는 다양한 방사선의 가중치를 표시
- 방사선가중치란 서로 다른 생물학적 영향력을 갖는 방사선에 의한 선량을 공통된 척도로 표현하기 위한 것
- 즉 같은 1 Gy라도 전자나 감마선에 의한 선량보다는 알파선에 의한 내부피폭의 경우 그 영향이 더 크므로 알파의 가중치는 전자나 감마선의 가중치에 비해 20배가 된다.
- 방사선은 에너지와 종류에 따라 생물학적으로 미치는 영향의 정도가 제각각 다름. 방사선가중치는 저선량에서의 확률적 영향의 생물학적 효과계수(RBE : Relative Biological Effectiveness)를 고려하여 선택. 저 LET에 대하여서는 모두 1로 설정하고 그 밖의 방사선에 대하여는 RBE에 관한 지식을 기본으로 하여 결정된 값.
- 방사선가중치가 저선량에서의 확률적 영향의 비이므로 등가선량은 확률적 영향의 선량평가

에 사용함이 원칙. 고선량에 의한 급성피폭의 경우, 이에 따른 결정적 영향의 평가는 방사선가중치를 고려하지 않은 흡수선량 그레이(Gy)로 평가함이 타당.

방사선 및 에너지 범위 ¹⁾	W_R (ICRP-60)
· 광자(전에너지 범위)	1
· 전자, 뮤온(전에너지 범위) ²⁾	1
· 중성자 ³⁾ 에너지 < 10 keV	5
10 keV ~ 100 keV	10
> 100 keV ~ 2 MeV	20
> 2 MeV ~ 20 MeV	10
> 20 MeV	5
· 양자(반조양성자제외) 에너지 > 2 MeV	5
· 알파입자, 핵분열생성물, 중 원자핵	20
· 중성자, 양성자 ; 미지의 에너지	-
· 열중성자 ; 0.025 eV	-

¹⁾ 이표에 제시되지 않은 방사선과 에너지에 대한 W_R 값은 국제방사선단위 및 측정위원회(ICRU) 구(Sphere)의 10 mm 깊이에서 유효선질인자 Q 를 계산하여 구함.

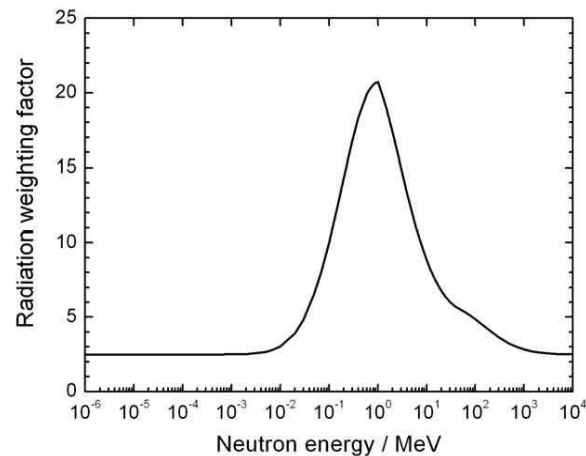
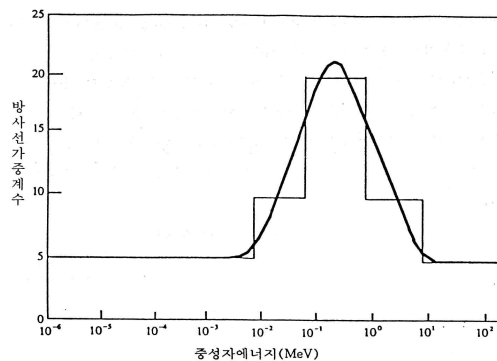
방사선가중치(W_R) ²⁾ DNA 결합핵에서 방출되는 오제(Auger) 전자는 제외. R)

³⁾ 에너지의 함수로 W_R 값의 이론적 근사계산식

$$W_R = 5 + 17 \exp [-\{\ell n(2E)\}^2/6], E[\text{MeV}].$$

참고

- ICRP No.103의 2007년 일반 권고에서 다시 방사선가중치를 변경
- 주된 변경은 i) 양성자의 방사선가중치가 5에서 2로 감소된 것이다. 이는 양성자에 의한 방사선 위험도가 기존에 평가치보다 감소함을 의미.
- 또한 ii) 중성자에 대한 방사선가중치도 다시 변경하였다. 이 또한 1 MeV이하의 중성자의 경우 그 가중치가 절반으로 감소한 것이다.
- 이러한 변경은 ICRP No.60 이후에 축적된 과학적 지식을 반영. 따라서 앞으로 각국은 이 권고를 평가하여 새로운 방사선가중치를 자국의 법령 및 기준에 반영할 것으로 예상. 현재(2008년) 까지 우리나라 원자력법 시행령의 방사선가중치는 ICRP No.60을 따름.
- 중성자에 대한 방사선가중계수(좌; ICRP 60, 우 ICRP 103)



참고

- 선량당량(dose equivalent) H:
- ICRP No.60 (1990)에서 등가선량이란 용어를 사용하기 전에는, 흡수선량에 방사선의 선질, 흡수선량 전달률 등의 인자를 고려한 선량당량(dose equivalent)이 사용
- 이는 ICRP No.26(1977)의 권고에 근거한 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$H=D \times Q \times N$$

- 여기서 H는 Sv(Sievert)단위의 선량당량,
D는 Gy단위의 흡수선량, Q는 선질계수(quality factor),
N는 다른 모든 요인을 보정하기 위한 인자(Modifying Factor).
특정한 경우를 제외하고 ICRP가 권고하고 있는 N값은 1이므로 $H = D \times Q$ 가 됨.
- 선질계수는 서로 다른 방사선의 상대적 위험도를 나타내는 인자로서 X(γ)선 또는 베타입자의 선질계수 값을 1.0으로 가정할 때 여타 방사선의 상대적 위험도를 나타내는 무차원의 숫자
- 아래 표는 상이한 방사선에 대한 선질계수를 방사선의 선에너지 전달(linear energy transfer, LET) 값의 함수로 보였다.

- ICRP No. 26에 근거한 선량당량(dose equivalent) 및 유효선량당량(effective dose equivalent)라는 용어는 모두 폐지
- ICRP 60권고를 통해 등가선량(dose equivalent, H)과 유효선량(effective dose, E) 용어의 확립
- 선량당량이란 용어 자체는 ICRU에서 방사선장을 측정하기 위한 방사선량 측정의 실용량 (Operational quantity) 정의에는 여전히 사용.

물속에서의 LET값(keV/μm)	Q
3.5 이하	1
7	2
23	5
53	10
175 이상	20

6) 유효선량 (effective dose) H_E

- 방사선피폭의 영향은 피폭된 조직(tissue, 또는 장기라 함)의 조직적 감수성에 의존.
- 이를 위해 각 장기의 등가선량에 조직의 상대적인 감수성을 나타내는 조직가중치를 부여
- 다시 말해, 같은 1 Sv의 등가선량을 받더라도 피폭부위가 유방이나 피부냐에 따라 영향차
- 조직의 상대적 감수성을 고려하여 등가선량에 곱해주는 계수를 조직가중치(계수)(W_T)
- 가중된 등가선량(다시 말해 이중으로 가중된 흡수선량)을 유효선량(H_E)

$$H_E = \sum_T W_T \times \sum_R W_R \times D_{T,R} = \sum_T W_T \times H_T$$

- 여기서 H_T 는 조직 · 장기의 등가선량이고, W_T 는 조직가중치.
- 조직가중치는 전신이 균등히 조사된 결과로 생기는 손해의 총합계에 대해서 그 조직의 상대적 분율. 따라서 조직 가중치의 전체 합은 1
- 조직가중계수는 남녀 포함해서 넓은 영역의 구성원 집단을 기초로 계산했으므로 직업인 및 일반에게 동일한 값으로 적용
- 방사선가중치 및 조직가중치는 방사선 생물학에 관한 우리의 현 지식수준에 의존하므로 시간이 지나면 변화할 수 있음.

예제 ^{32}P 방사성핵종을 취급하는 방사선 작업장에서 베타선에 의한 피폭으로 피부의 장기가 받은 피폭선량이 3 Gy라 가정하면 인체의 유효선량은 몇 mSv인가? 단, 인체의 다른 부위의 피폭은 발생하지 않았다.

- 가) 3 mSv 나) 30 mSv 다) 300 mSv 라) 3 Sv

[풀이] 나. 베타선을 취급하는 작업장에서 베타선에 의한 피폭으로 인체의 다른 부위의 피폭은 발생하지 않고 피부의 장기가 받은 흡수선량이 3 Gy라 가정하면 피부의 등가선량(베타선 방사선 가중치는 1)은 3 Sv가 되며 인체의 유효선량(피부의 조직가중치가 0.01)은 30 mSv가 됨

조직가중치 (W_T)

조직, 장기	W_T	
	ICRP-60	ICRP-26
생식선	0.20	0.25
적골수	0.12	0.12
폐	0.12	0.12
직 장	0.12	-
위	0.12	-
갑상선	0.05	0.03
유 방	0.05	0.15
방 광	0.05	-
간	0.05	-
기타조직	0.05 ¹⁾	0.30 ²⁾
식 도	0.01	-
뼈표면	0.01	0.03

¹⁾ 신장계통, 뇌, 상부대장, 하부대장, 근육, 비장, 흉선, 자궁 및 기타 분류 가능장기. 위의 기타장기중의 하나가 최대선량 이상으로 피폭되었을 경우 동 장기에는 W_T 값으로 0.025, 나머지 기타 장기는 0.025를 적용.

²⁾ 식도, 위, 소장, 대장상부, 대장하부, 각 장기에 대하여 0.05 를 적용.

예제 ICRP 60에서 조직가중치(w_T)가 주어지지 않은 장기는?

- | | |
|-------------------|--------------|
| 가) 신장(Kidney) | 나) 심장(Heart) |
| 다) 식도(Oesophagus) | 라) 결장(Colon) |

[풀이] 나. ICRP No.60에서 심장은 조직가중치가 주어지지 않음. 단 ICRP 2007 권고에서는 기타 조직에 심장도 포함됨.

참고

- ICRP No.103의 2007년 권고에서 조직가중치가 다시 변경
- 주된 변화로는 그동안 세계보건기구(WHO)등의 광범위한 연구 등으로 인해 유전적 결함의 자연발생율이 과소평가됨을 확인. 따라서 방사선에 의한 추가 위해도는 감소하여 유전적 영향과 관련된 생식선의 조직가중치가 0.20에서 0.08로 감소
- 추가적인 역학적 자료에 의해 유방의 조직가중치가 0.05에서 0.12로 증가
- 방사선가중치와 마찬가지로 앞으로 각국은 이 권고를 평가하여 새로운 조직가중치를 자국의 법령 및 기준에 반영할 것으로 예상

ICRP 2007년 권고의 새로운 조직 가중치

장기	W_T	ΣW_T
적색골수, 결장, 폐, 위, 유방, 기타 조직*	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선	0.04	0.16
골표면, 뇌, 침샘, 피부	0.01	0.04
합계		1.00

* 기타 조직: 신장, 흉곽 외(ET) 부위, 쓸개, 심장, 신장, 림프 결절, 근육, 구강점막, 이자, 전립샘(남), 소장, 비장, 흉선, 자궁/자궁경관(여).

추가: ICRP 103의 피폭 상황 분류

- i) 계획 피폭상황(planned exposure situations): 선원을 의도적으로 도입하고 운용하는 것과 관련 있는 상황이다. 계획 피폭상황에서는 발생할 것으로 예상되는 피폭 (정상 피폭)과 발생할 것으로 예상되지 않는 피폭 (잠재피폭)이 모두 일어날 가능성이 있음.
- ii) 비상 피폭상황(emergency exposure situations): 계획 상황이 운영 중, 악의적 행위나 기타 예상하지 못한 상황으로 발생할 수 있는 상황으로, 바람직하지 않은 결과를 피하거나 감소시키기 위한 긴급조치가 요구되는 상황.
- iii) 기존 피폭상황(existing exposure situations): 제어 결정이 이루어지는 시점에 이미 존재하는 피폭상황으로 비상상황 후 장기적 피폭상황을 포함.

7) 기타 선량

(1) 예탁 등가선량 (committed equivalent dose, $H_T(\tau)$)

- 체내에 침입된 방사성핵종으로부터 피폭(내부피폭)은 체내섭취후의 시간에 따른 적분값으로 계산.
- 시간 적분치는 방사성핵종의 종류, 그 형태, 섭취방법 및 핵종침투 조직에 의존
- 예탁등가선량($H_T(\tau)$)은 신체의 어느 조직이 방사성핵종으로부터 받는 방사선의 총 적분선량을 체내섭취시점에서 피폭된 것으로 한 등가선량.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} H_T(t) dt$$

- 적분기간(τ)는 성인은 섭취시점(t_0)으로부터 50년간, 아이들은 섭취해서 70세까지

(2) 예탁 유효선량 (committed effective dose, $E(\tau)$)

- 등가선량을 유효선량으로 평가한 때에는 예탁유효선량, $E(\tau)$ (committed effective dose).
- 각 조직별 예탁등가선량에 각각의 조직에 해당되는 조직가중치를 곱한 값이다.

$$E(\tau) = \sum w_T H_T(\tau)$$

(3) 집단등가선량 (collective equivalent dose, S_T)

- 방사선에 피폭된 **집단**에 관련한 등가선량을 사용하는 경우.
- 방사선에 피폭된 집단의 평균등가선량에 그 집단의 사람수를 곱해서 선량평가

$$S_T = \sum_i \overline{H_{T,i}} \cdot N_i$$

여기서 N_i 은 전체집단에서 평균 등가선량 $\overline{H_{T,i}}$ 를 피폭하는 subgroup i의 인구수

(4) 집단유효선량 (collective effective dose, S)

- 전체의 조직·장기를 대상으로 한 경우. 단위는 맨-시버트(man-sievert or person-Sv).

$$S = \sum_i \overline{E_i} \cdot N_i$$

2.2 방사선장의 계량

- 방사선장(radiation field)이란 방사선원(radiation source; 방사성동위원소 또는 방사선발생장치)에서 방출된 방사선이 영향을 미치는 영역
- 전기장 또는 자기장과 마찬가지로 방사선장의 특성을 파악하려면, 어떤 지점에서 일정한 면적을 지나는 방사선의 개수 또는 에너지를 파악하는 것이 필요
- “입자플루언스(flucence: 선속)” = 공간상의 단위 면적(dS)에 입사하는 입자의 수(dN)

$$\Phi = \frac{dN}{ds} \quad ; \quad [\text{단위} \quad \#/\text{cm}^2]$$

- “에너지플루언스”= 공간상의 단위 면적(dS)에 입사하는 입자의 에너지

$$\psi = E \cdot \Phi \quad ; \quad [\text{단위} : \text{MeV}/\text{cm}^2]$$

여기서 E : 입사한 입자당 에너지 크기 (MeV)

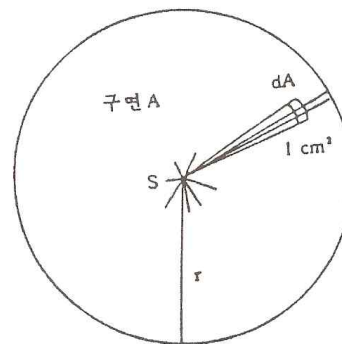
- 단위 면적을 단위 시간(dt)에 흐르는 입자 수 또는 에너지를 각각 “입자플루언스율” 또는 에너지 플루언스율” 또는 입자 선속밀도 또는 에너지 선속밀도” 라고 함. 단위는 각각 $\#/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 및 $\text{MeV}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$

- “입자플루언스율” $\phi = \frac{d^2 N}{ds \cdot dt}$; [단위 : #/cm²·sec]

- “에너지 플루언스율” $\psi = \frac{d\psi}{dt}$; [단위 : MeV/cm²·sec¹]

- 입자플루언스율 또는 에너지 플루언스율은 방사선피폭의 조사선량과 흡수선량 등의 계산과 평가를 위한 기본량.

예제 1MBq의 점등방선원(isotropic point source)으로부터 2m 지점에서의 입자 플루언스율은 얼마인가?



[풀이] 그림에서 미소면적 dA 에 입사하는 입자플루언스율 Φ 라고 하면 구의 표면적은 $4\pi r^2$ 이고, 1 cm^2 을 지나는 플루언스는

$$\Phi = \text{구면 } A \text{ 상의 } dA \text{ 에서의 입자플루언스율} = S \cdot \frac{dA}{4\pi r^2} = \frac{S}{4\pi r^2}$$

여기서 S : 방사선원의 세기, [Bq, #/sec]

r : 방사선원과 피폭대상물체간의 거리, [cm]

Φ : 입자플루언스율, [방사선의 개수/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$]

$$\text{따라서 } \Phi = \frac{1\text{MBq}}{4 \times 3.14 \times (200\text{cm})^2} = \frac{10^6 \text{ dis./sec}}{16 \times 3.14 \times 10^4 \text{ cm}^2} = 2 \#/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$$

- 위 식에서 볼 수 있듯이, 방사선의 입자플루언스율은 선원의 세기(S)에 비례하고 떨어진 거리 (r)의 제곱에 반비례
- 따라서 선원의 세기가 동일할 경우 거리가 2배, 3배로 멀어지면 입자플루언스율 또는 공간 방사선량률은 1/4배, 1/9배로 감소
- 이를 역자승의 법칙(inverse square law)라 함.
- 거리 r_1 에서의 방사선량률을 D_1 이고 거리 r_2 에서의 선량률을 D_2 라 하면 다음 비례식이 성립.

$$\frac{1}{r_1^2} : D_1 = \frac{1}{r_2^2} : D_2$$

$$\text{즉 } \frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \quad \text{또는} \quad D_2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 D_1$$

- 외부피폭의 방어를 위해 선원과의 거리를 증가시키기 위하여 가능한 범위 내에서 각종 핀셋 및 집게 또는 통(tongs) 등을 사용하며 핫셀에서는 telemanipulator(TM)와 같은 원격조작기구도 사용

예제 ▶ 점등방 선원으로부터 1 m 떨어진 곳에서의 방사선량률이 18 mSv/h였다고 한다. 이때 3 m 떨어진 곳에서의 선량률은 얼마인가?

[풀이] 비례식을 이용하여 D_2 를 계산하면

$$\frac{1}{r_1^2} : D_1 = \frac{1}{r_2^2} : D_2$$

$$D_2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 D_1 = \left(\frac{1}{3}\right)^2 \times 18 = 2 \text{ (mSv/h)}$$

2.3 상호작용계수 (interaction coefficients)

- 상호작용(interaction)이라는 용어는 입사 입자의 에너지나 운동방향이 변하는 과정
- 이와 같은 상호작용이 일어나면 뒤따라서 한 개 또는 여러 개의 2차 입자를 방출
- 여기서는 특히 방사선과 물질이 상호작용할 확률을 나타내는 양으로 다음과 같은 것들을 기술

1) 반응단면적(cross section) σ :

- 어느 표적핵과 입사하는 하전입자나 비하전입자와 상호작용을 일으킬 수 있는 확률을 나타내는 양을 의미.
- 특별한 단위로 b (barn)을 사용하고 $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, $P = \sigma\Phi \Rightarrow \sigma = P/\Phi$
P : 한 개의 표적핵이 입사하는 방사선과 상호작용할 확률
 Φ : 입자플루언스

2) 저지능 (stopping power) S: 하전입자가 물질내에서 단위거리를 이동하는 동안 잃는 에너지. 서

$S = -dE/dx$ 이고 단위는 MeV/cm 또는 keV/cm

예를 들어 베타입자의 경우 저지능은 충돌저지능(전리및 여기)과 방사저지능 (제동방사선)의 합

3) 질량저지능(mass stopping power) S/ρ :

- 저지능(S)을 밀도(ρ)로 나누어준 값.
- 즉 밀도가 ρ 인 물질중에서 하전입자가 물질 속을 통과할 때 단위길이당 잃는 에너지.
- 단위는 $(\text{keV}/\text{cm})/(\text{g}/\text{cm}^3)$ 에 의해 $\text{keV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$.

4) 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient) μ :

- 방사선이 물질내에서 단위거리당 진행하면서 상호작용할 확률.
- 즉 μ 값이 0.1 cm^{-1} 이라는 것은 방사선이 1 cm 거리를 진행할때 진행방향의 물질과 상호 작용할 확률이 0.1 즉 10 %라는 의미.
- 선형감쇠계수는 방사선의 에너지와 물질의 종류에 따라 달라진다.

5) 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient) μ_m :

- 같은 에너지의 방사선이라도 밀도가 큰 물체를 통과하는 방사선은 밀도가 낮은 물체를 통과하는 방사선보다 상호작용할 확률이 더 큼.
- 따라서 밀도에 관계없는 감쇠계수를 도입하였는데 이를 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient).
- 질량감쇠계수는 선형감쇠계수를 밀도로 나눈 값이다.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{단위 cm}^2/\text{g}]$$

6) 질량에너지전달계수(mass energy transfer coefficient) μ_{tr}/ρ :

- 비하전방사선이 어떤 물질속에서 상호작용에 의해 입사에너지를 물질에 전달할 분율
- 질량에너지전달계수 μ_{tr}/ρ 는 dE_{tr}/EN 을 ρ/dl 로 나눈 몫
- 이때 E는 정지질량에너지를 제외한 한개 입자의 에너지이고, N은 입자수.
- 그래서 dE_{tr}/EN 은 밀도가 ρ 인 물질에서 거리 dl 만큼 횡단하면서 상호작용에 의하여 하전입자의 운동에너지로 전달된 입사입자에너지의 분율이다.

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \cdot \frac{dE_{tr}}{dl} \quad ; \quad [\text{단위 : cm}^2/\text{g}]$$

7) 질량에너지흡수계수(mass energy absorption coefficient) μ_{en}/ρ :

- 질량에너지전달계수에서 제동복사선으로 손실된 에너지를 제외한 값.
- 따라서 어느 물질의 질량에너지 흡수계수는 질량에너지 전달계수 μ_{tr}/ρ 와 (1-g)와의 곱으로 표시
- 이때 g는 이차 하전입자의 에너지 중 그 물질내에서 제동복사선으로 손실되는 분율.
- μ_{en}/ρ 와 μ_{tr}/ρ 는 이차 하전입자의 운동에너지가 그들의 정지질량 에너지와 비슷하거나 클 때,

특히 원자번호가 큰 물질과 상호 작용하는 경우 그 차이가 아주 클 수 있다.

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} \cdot (1 - g) \quad ; \quad [\text{단위 : cm}^2/\text{g}]$$

예제 어떤 방사선 차폐물의 질량이 M, 부피가 V, 선감쇠계수가 μ 일 때 할 때 질량감쇠계수는 어떻게 표현되는가?

1. $\frac{\mu M}{V}$ 2. $\frac{\mu V}{M}$ 3. $\mu M V$ 4. $\frac{\mu}{M V}$

[풀이] 질량감쇠계수 μ_m 은 선감쇠계수를 밀도로 나눈 값이다. 따라서

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\frac{M}{V}} = \frac{\mu V}{M}$$

3. 방사선의 인체영향

3.1 방사선장해의 분류

- 장해효과의 발생시기; 급성 or 지발성
- 장해가 발생하는 개체; 신체적 or 유전적
- 발생확률과 선량과의 관계; 결정적 or 확률적

가) 급성 영향(acute)와 지발성(delayed) 영향

- 장해가 피폭후 수주일 이내에 나타나는 경우를 급성 영향
- 피폭후 여러 달 내지 수십 년 후에 나타나는 경우를 지발성 영향
- 급성효과의 예

% 분자사 (1,000 Gy 이상 피폭 시) : 즉사

% 중추신경 증후군(50 Gy정도 전신피폭) : 수 분~ 수 시간 이내 사망

% 위장증후군 (10 Gy) : 수 일 ~ 일주일내 사망

% 조혈증후군 (2 Gy) : 수 주 이내 사망

전신 피폭(X선 또는 감마선)을 일시에 피폭한 경우

선 량(Gy)	증 상
~0.25	거의 무증상
0.25~0.5	백혈구, 임파구등 일시적 변화 (집단 대조로 판별 가능)
0.5~0.75	혈액 변화를 개별적으로 확인 가능
0.75~1.25	피폭자 10% 오심, 구토
1~2	20~70% 구토; 30~60% 무력증; 20~35% 혈구생산 감소, 합병증으로 사망자 발생가능(~5%)
3~5	조혈 기능 장애로 수 개월내 50% 사망(LD ₅₀₍₆₀₎)
6~8	위장계 증후군으로 수 주~수 개월내 100% 사망 (LD ₁₀₀₍₆₀₎)
8~10	객혈, 폐수종 등 발현 수주내 사망
15 이상	중추신경계 증후군 장애로 수 일~수 주에 사망

* LD₅₀₍₃₀₎ [half lethal dose; 반치사선량], 60일 이내에 50 %가 사망할 선량, 보통 감마선으로 전신일시 피폭시 4 Gy 가량)

* LD₁₀₀₍₃₀₎ [whole lethal dose:전치사선량], 보통 감마선으로 전신일시 피폭에 7 Gy 가량

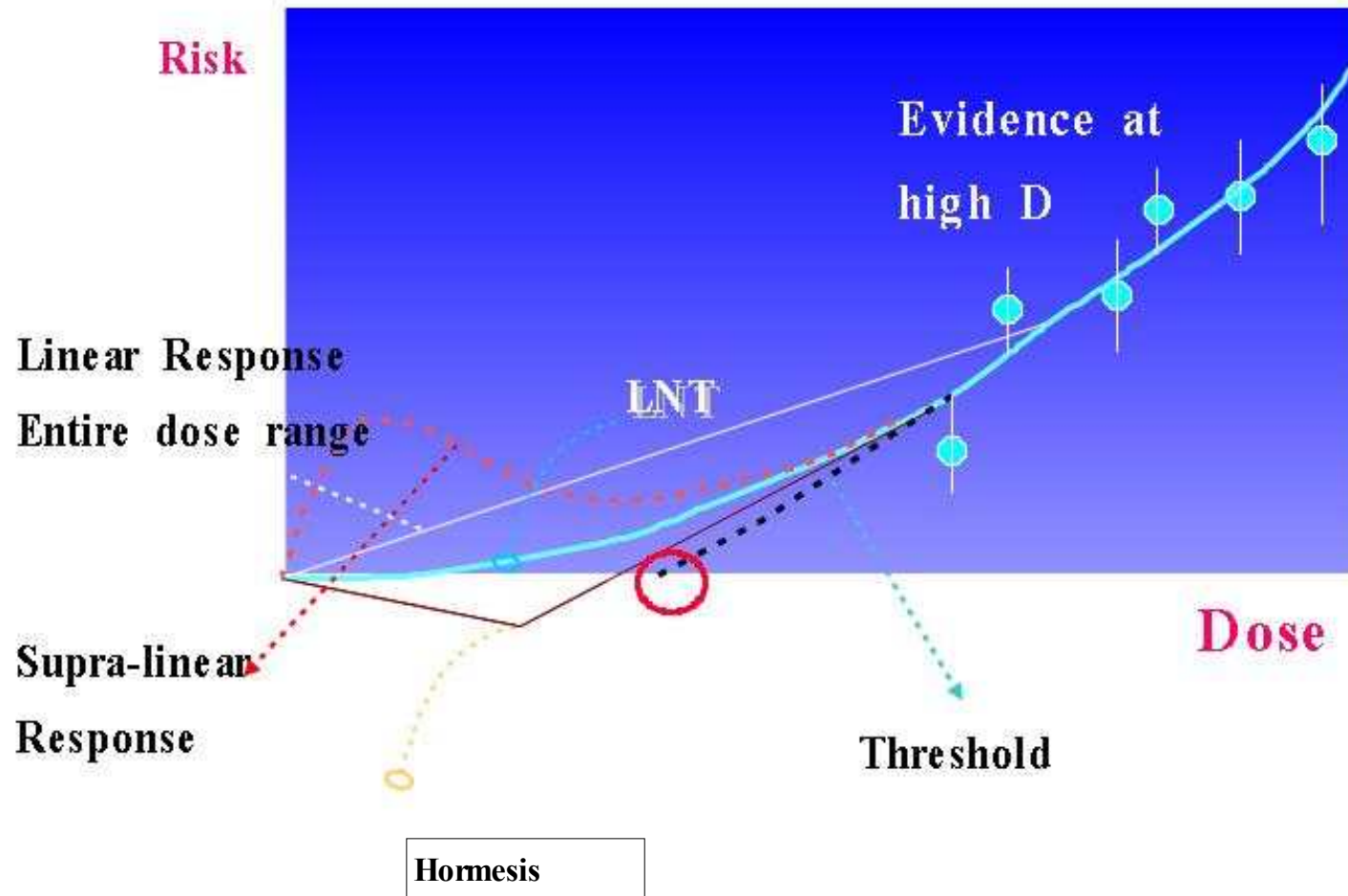
나) 신체적 영향(somatic) 와 유전적(genetic) 영향

- 장애가 피폭 받은 개체에 직접 일어나는 경우를 신체적 영향
- 후손에 나타나는 경우를 유전적 영향
- 주로 생식선(고환 또는 난소)의 피폭에 기인

다) 결정적 영향(deterministic effect)와 확률적 장애(stochastic)

- 결정적 장애:어떤 선량 이상에서 유해한 효과가 발생하는 장애 (일반적으로 고선량, 급성, 문턱값 있음)
- 확률적 장애: 작은 선량이라도 유해한 효과를 발생시킬 확률을 증가시킨다는 이론 (일반적으로 저선량, 지발성, 문턱값 없음) → 선형무문턱모델(linear no threshold; LNT Model)의 이론적 기초가 됨 (아래 그림 참고)

라) 선량 반응 곡선 (Dose Response Curve)



- 선량-영향 관계곡선에 관해 확실한 데이터는 히로시마 나가사키 원폭생존자의 피폭 데이터
- 이 데이터는 고선량-고선량률에서 얻은 데이터임.
- 저선량-저선량률에서는 증거가 확실하지 않은 관계로 고선량에서 얻은 그래프를 원점까지(문턱

값이 없음) 직선으로(선형) 확장하여 그 영향을 추정. 단 확장시 고선량-영향에서의 기울기를 1/2로 줄임(DDREF=2)

- 이러한 선량-영향 관계를 선형무문턱 모델이라고 함. (ICRP 공식 모델)
- 학자에 따라서는 문턱모델, 초선형모델, 호르메시스 등을 주장하는 사람도 있음

* 선형무문턱모델(linear no threshold; LNT Model); 방사선 피폭의 위해(Risk)의 발생확률은 선량이 증가하고, 아무리 작은 피폭선량일지라도 그것에 상응하는 위해의 발생확률이 있다는 이론.

* 문턱 모델: 어떤 값(문턱값 Threshold) 이하에서는 위해의 발생확률이 없다는 이론.

인체의 결정적 영향

- 생식선의 발단선량 : 불임과 홀몬 분비 이상

방사선에 대한 감수성은 세포의 성숙단계에 따라 다르다.

남성은 후기정원세포, 여성은 2차 난모 세포가 방사선감수성이 높다.

** 불임발단선량

(단위 : Gy)

남 성	일시불임	0.15
	영구불임	3 - 5
여 성	일시불임	0.65 - 1.5
	영구불임	7 - 8 (20~30세)
		3 (40세)

** 눈의 수정체 : 수정체혼탁, 백내장

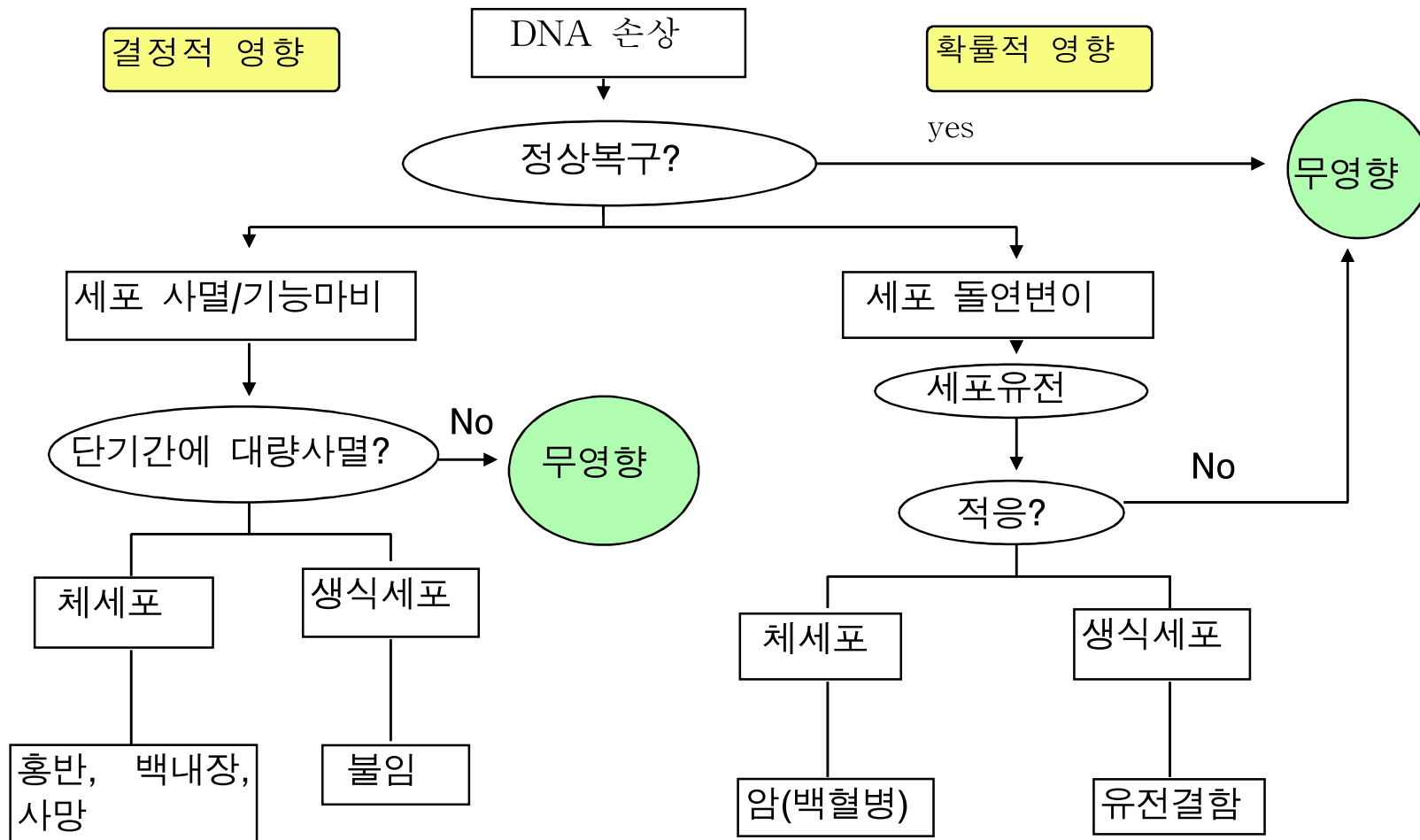
장해의 종류	급성피폭	만성피폭
수정체 혼탁	2 Gy	5 Gy
백 내 장	5 Gy	8 Gy

**** 피부**

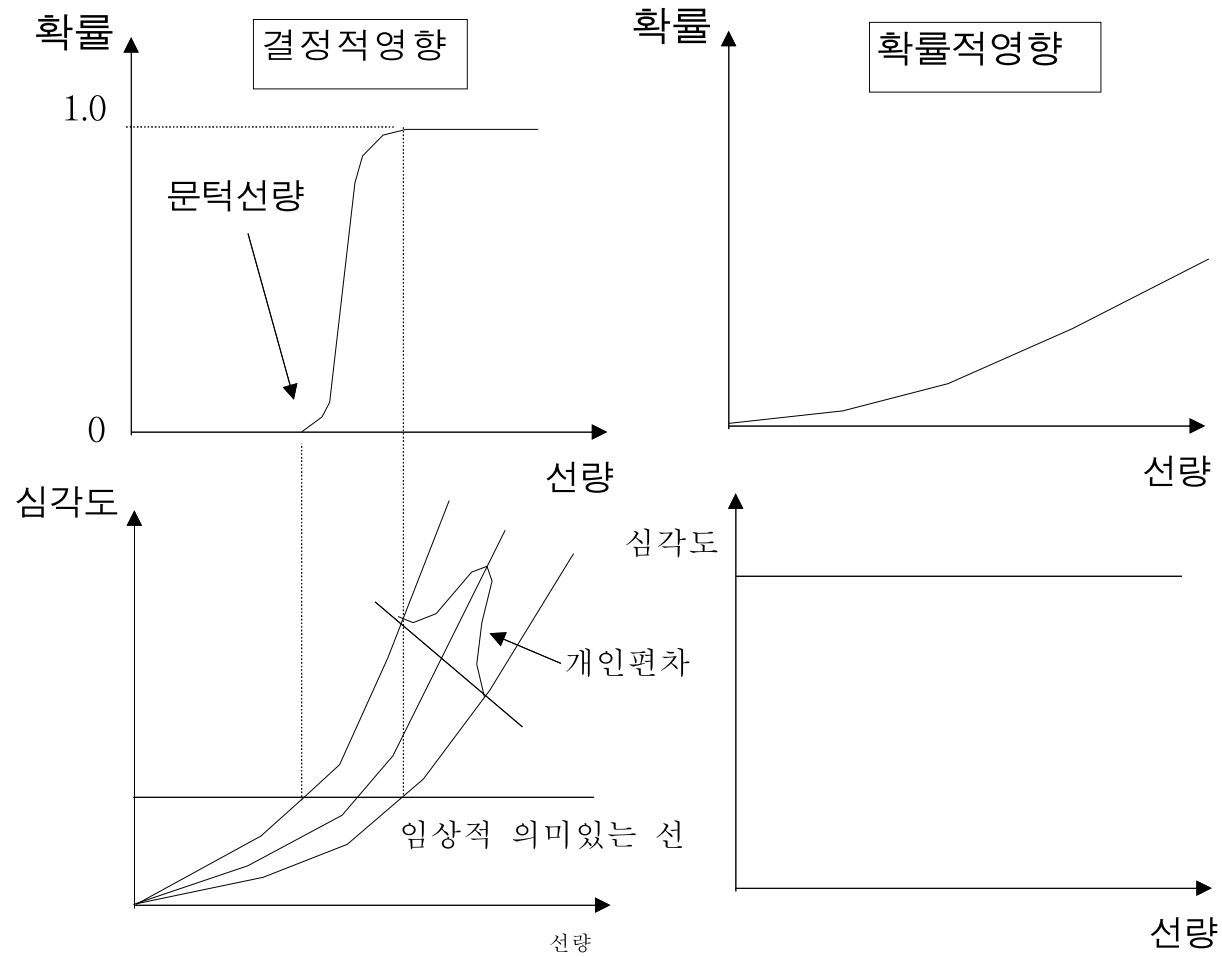
피부의 표피의 기저세포는 항상 세포분열을 반복하고 있고 방사선감수성이 높다. 기저세포는 피부표면으로부터 평균 70 μm 깊이에 존재한다. 다음은 1회 조사시 방사선량에 따른 피부의 급성 장애를 나타내었다.

	선 량 (Gy)	급 성 영 향
1 도	3	탈모 및 지문소실
2 도	5.5	홍반 및 색고침착
3 도	8.5	수포형성
4 도	10	궤양형성

□ 결정적 영향과 확률적 영향



□ 결정적 영향 Vs. 확률적영향



중요

결정적 영향과 확률적 영향의 특성비교

영향	결정적 영향(Deterministic effect)	확률적 영향(Stochastic effect)
발생기전	급성 고선량 피폭으로 인한 세포사 또는 급성반응에서 기인하는 영향	세포의 돌연변이와 세포유전의 결과로 발생 가능한 영향
인과관계	피폭과 영향 발현의 인과관계가 필연적이고 명백함	피폭과 영향 발현이 우연적이고 명백하지 않음
선량효과	증상의 심각도가 선량에 비례	영향의 발생확률이 선량에 비례, 단 증상의 심각도는 선량과 관계없음.
문턱선량 존재	영향의 정도가 임상학적으로 중요하지 않은 문턱선량 존재(1% 발현시점)	문턱선량이 없이 선량에 비례하는 위험이 있는 것으로 가정
발현시기	대체로 급성(acute)	지발성(chronic)
임상적 특성	증상의 특이성 있음(예를 들어 화상)	타원인 영향과 구분 불가
방호개념	선량을 문턱치 이하로 유지하면 방지 가능	위험을 합리적 범위에서 최소화
관심 영역	사고 피폭이나 치료 분야에서 관심영향	일상 저선량 피폭에서 관심 영향
영향의 예	홍반, 백내장, 혈액상 변화, 치사, 불임	암, 백혈병, 유전결함

3.2 장애에 영향을 미치는 인자

가) 물리적 요인 (뒤의 생물학적 요인과 크게 구분하지 않음.)

1) 흡수선량

방사선장애의 지배인자로 인체의 흡수선량에 직접적으로 비례한다.

2) 흡수선량률(선량의 시간적 분포)

세포는 회복 또는 재생능력이 있어서 단시간에 받아서 치명적일 수 있는 선량준위도 장기간 나누어 피폭되면 중대한 장애를 받지 않을 수 있다.

중요

여기서 선량및선량율효과인자(DDREF: Dose and Dose Rate Effectiveness Factor) 도입

- 고선량 및 고선량률로 피폭된 경우에는 저선량 및 저선량률로 피폭된 경우에 비해 선량-영향 관계 (Dose-effect relationships)에서 그 영향이 약 2배 가량 높게 나타남.
- 즉 고선량-고선량률에서 확인한 장애는 저선량-저선량률에 적용할 경우 단위선량당 위험도를 그 절반으로 평가하여야 함을 의미
- 즉 DDREF값은 2
- 주된 근거“ 일본의 원폭생존자에 대한 역학 조사 결과 0.5 Gy 이하의 선량을 받은 사람들에서의 단위 Sv당 백혈병 위험도가 1~2 Gy의 선량을 받은 사람들에서의 위험도가 절반으로 관찰
- 실제로 DDREF=2를 적용하는 저선량, 저선량률 구역은 0.2 Gy, 0.1 Gy/h (ICRP 60, para 74)

3) 선량의 공간적 분포

선량의 시간분포에서 알 수 있듯이 장해발생 측면에서 볼 때 선량분포가 집중 될수록 악영향을 미친다. 즉, 동일한 흡수선량을 특정 장기가 균등분배한 상태의 피폭보다 그 장기의 일부가 집중 피폭 받는 경우가 장해발생 가능성이 커진다.

4) 피폭의 범위

인체의 전신이 피폭 받는 경우가 부분적으로 피폭 받는 경우보다 장해발생 확률이 높다는 것은 말할 것도 없다. 즉 위험에 처할 조직의 피폭량이 전신피폭의 경우가 많기 때문이다.

5) 방사선의 선질

방사선의 종류와 에너지에 따라 흡수선량에 다른 등가선량이 달라지므로 장해발생의 위험도 다르다.

6) 피폭조직의 방사선 감수성

신체조직의 방사선 감수성은 세포나 조직의 종류에 따라 다르다. 일반적으로 세포분열중에 피폭 받는 경우 그 감수성이 높으므로 세포분열 빈도가 높은 조직일수록 감수성이 크다. 이것이 태아 또는 유아, 성장기에 있는 청소년의 방사선 피폭을 더욱 엄격히 제한하는 이유중의 하나이다.

7) 방사성핵종의 장기내 침착부위

동일한 장기내 침착하는 핵종이라도 구체적인 침착부위가 다르므로써 그 효과가 다를 수 있다. 예를 들면 라듐(Ra)과 플루토늄(Pu)은 다 같이 뼈를 친화성 조직으로 하고 있으나 라듐은 뼈의 무기질 부위에, 플루토늄은 내부의 다공성 조직에 침착하므로 골수내의 피폭은 플루토늄이 심하게 영향을 준다.

8) 인체내에서의 반감기

방사성핵종의 물리적 반감기와 동핵종의 인체내에서의 생물학적 반감기의 길고 짧음에 따라 피폭 영향을 받음은 물론이다.

9) 핵종의 물리적, 화학적 성질

섭취 또는 호흡하는 방사성핵종의 물리적, 화학적 특성에 따라 그것이 인체내 침착하는 특성 및 부위가 달라질 경우도 있다. 예를 들면 입자상의 핵종을 호흡할 경우 그 입자의 크기에 따라 호흡기관에 침착하는 부위가 달라진다.

3.3 물리적요인, 산소효과 및 치사선량의 관계

- 선량율이 높아지면 $LD_{50(30)}$ 이 낮아진다.
- 동일 선량일 경우 국부조사에 비해 전신조사는 $LD_{50(30)}$ 이 낮아진다.
- 온도가 높은 조건하에서 조사하면 $LD_{50(30)}$ 이 낮아진다.
- 산소효과 : 산소농도 (또는 혈중 산소 분압)가 높은 조건하에서 조사하면 $LD_{50(30)}$ 이 저하된다.

*OER (oxygen enhancement ratio)

$$OER = \frac{\text{산소가 존재하는 조건하에서의 방사선 영향}}{\text{산소가 없는 조건하에서의 방사선 영향}}$$

3.4 방사선방호제 (또는 방호물질; radioprotective agents)

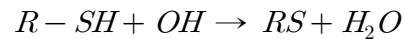
- 피폭받는 대상의 방사선장해를 감소시킬 수 있는 물질을 말한다. ($DRF > 1$) 을 말한다.
- 방사선방호제는 DRF (dose reduction factor)가 > 1 이어야 한다.

$$DRF(\text{선량감소계수}) = \frac{\text{방호물질 존재하에서 어떤 효과를 나타내는데 필요한 선량}}{\text{방호물질 없이 같은 효과를 나타내는데 필요한 선량}}$$

- 예를 들어 시스테인, 시스테인아민 등과 같이 $-SH$ 기와 NH_2 기를 함유하고 있는 화합물은 방사선 방호체로서 생체물질 대신 방사선에 피폭되어 생체への 영향을 감소시킨다.
- 방사선방호제의 작용 메커니즘은 다음 종류가 있다.

㉔ 유리기의 제거

방사선에 의하여 생성된 세포내의 유리기(OH)가 시스테아민과 반응하여 시스테아민은 산화되며 유리기는 반응력이 없는 안정된 유리기로 전환되어 간접작용 장애를 감소시킨다.



㉕ 수소공여에 의한 손상회복

단일분자(RH)가 방사선에 의하여(간접 또는 직접작용) 유리기(R)로 전환되면 $RH \rightarrow R + H$ 이 유리기(R)는 서로 반응하여 $R + R \rightarrow R-R$ $R + O_2 \rightarrow RO_2$ 등의 과산화물이 된다. 이 때 방호물질(R)은 수소를 공여함으로써 다시 원상태로 회복된다.

㉖ 세포성분과의 상호작용

방호물질 세포내에 존재하는 단백질의 $-SH$ 기와 결합하여 mixed disulfide를 형성하여 유리기의 공격으로부터 특정 단백질을 보호하는 역할을 한다.

㉗ 조직내 저산소 상태 유발

thino기는 쉽게 산화된다. 생체내에 투입된 thino기는 조직내 산소와 결합하여 산화되면서 저산소 상태를 유발함으로써 방사선으로부터 세포물질을 보호하는 효과를 나타내게 된다.

- 방사선 방호제는 생체내에 투입되었을 때 근본적으로 방사선에 의해 생성된 유리기를 제거 또는 불활성화시킴으로써 방호효과를 나타낸다. 그 메카니즘은 위에 예를 든 여러 가지가 있을 수 있으나 각 과정간의 엄격히 구분하는 것은 무의미하며 실제 방사선 방호효과는 여러 메카니즘의 복합적 작용에 의해 나타난다고 볼 수 있다.

참고

방사선 호르메시스 (Hormesis)

- 소량의 방사선피폭은 인체에 면역 기능등을 자극하여 몸에 이로운 영향을 유발한다는 가설
- 호르미시스 용어는 원래 희랍어에서 유래한 말로 원래 자극한다든가 촉진한다는 의미임
- 1980년 미국 미주리 대학의 Luckey교수는 방사선 조사에 의한 식물의 성장, 실험동물의 수명연장 등 호르미시스를 나타내는 과거의 데이터를 체계적으로 수집, 해석하여 저선량의 방사선은 해가 있기보다는 생명의 유지에 필수적이라고 주장
- ICRP는 아래와 같은 이유로 방사선 방어의 원칙 및 실무에 고려하지 않고 있음
 - ① 실험결과가 연구자마다 다르고, 객관적 입증이 어려움
 - ② 표본의 크기가 작고, 통계적인 검증력에 문제가 있음
 - ③ 적절한 통제방법의 부재와 실험결과가 하등동물 실험에 한정되어 있음
 - ④ 방사선 방어에 문제가 되고 있는 암, 유전적 영향이외의 생물학적 현상에 주목하여 이루어진 것으로 인체에 대한 입증자료가 거의 없음
 - ⑤ 방사선외의 다른 외부요인이 내재할 가능성을 배제할 수 없음

예제 ▶ LD50(30)이 5.0Gy인 동물에 A 물질을 1mg/kg 농도로 주입한 다음 방사선을 조사하였을 때 LD50(30)이 6.0 Gy로 나타났다. A 물질의 DRF는 ?

[답] 1.2 (풀이 생략)

예제 ▶ 생물체에 동일한 선량이 조사되었을 때의 생물학적 영향에 대한 설명 중 틀린 것은?

- ① 짧은 시간에 고선량률 피폭이 저선량률의 장시간 피폭보다 영향이 크다.
- ② 고온에서의 피폭이 저온에서의 피폭보다 영향이 크다.
- ③ 산소가 적은 조건에서의 피폭이 고산소 조건에서의 피폭보다 영향이 크다.
- ④ 전신피폭이 국부피폭보다 일반적으로 영향이 크다.

[풀이] ③, 방사선 피폭의 경우 고산소 조건에서 피폭의 영향이 크다. 더불어 암세포의 증식 또한 고산소 조건에서 빨라지는데 이를 “산소효과(Oxygen Effect)”라고 한다.

예제 ▶ 인체의 방사선 영향에 대한 설명으로 틀린 것은?

가) 결정적 영향은 선량을 문턱치 이하로 유지하면 방지할 수 있다.

나) 결정적 영향은 대체로 급성(acute)이며 증상의 특이성 있고 증상의 심각도가 선량에 비례한다

다) 확률적 영향의 발생확률은 선량에 비례한다.

라) 방사선방호의 목표는 목표는 사회적, 경제적 인자를 합리적으로 고려하여 확률적 영향을 방

지함을 목적으로 하고 있다.

[풀이] 라. ICRP의 방사선방호 목표는 사회적, 경제적인자 등을 고려하여 확률적 영향을 방지하는 것이 아니라 최소화하는 것을 목적으로 하고 있다.

예제 결정적영향(Deterministic Effect)에 대한 설명으로 잘못된 것은?

- 1) 대체로 급성(acute)이며 증상의 특이성 있고 증상의 심각도가 선량에 비례한다.
- 2) 선량을 문턱치 이하로 유지하면 위험을 합리적 범위에서 최소화할 수 있다.
- 3) 영향의 정도가 임상학적으로 확인 가능한 문턱선량이 존재하며 개인 간 차이가 발생할 수 있고 문턱선량 값은 통상 집단에서 1%에서 발현되는 최저선량 값이다.
- 4) 방사선피폭과 결정적 영향의 발현 현상은 인과관계가 필연적이다.

[풀이] 2. 결정적 영향에는 문턱값이 적용되면 문턱값 이하에서는 발생하지 않는다.

예제 다음의 설명으로 틀린 것은?

- 가) 피부, 수정체 등의 장기에 대하여 등가선량 한도를 두는 이유는 이들 장기의 결정적 영향을 방지하기 위함이다.
- 나) 확률적 영향은 피폭으로 인해 다수의 세포가 사멸한데 그 원인이 있는 것이 아니라 하나의

세포의 돌연변이에 기인한다.

다) 확률적 영향의 발생확률은 선량이 증가함에 따라 증가한다.

라) 선량예탁(Dose Commitment)을 평가시 성인에 대해서는 50년을 아동에 대해서는 70세를 고려하고 있다.

[풀이] 라. 선량예탁이 아니라 예탁선량(committed dose)이다. 선량예탁(Dose Commitment)은 연속되는 단위 행위의 누적 영향평가를 목적으로 정의된다.

4. 방사선량의 평가

4.1 외부 피폭선량의 평가

1) 조사선량률(\dot{X})

- 어떤 점선원(point source)에서 방사선을 방출하고 있다고 가정
- 방출되는 방사선 각각의 에너지는 E (MeV)이고,
- 공간중 어느 지점에서의 입자플루언스율은 Φ ,
- 이 방사선의 공기 중 질량에너지흡수계수를 $(\mu/\rho)_a$
- 이 지점에서의 조사선량률 \dot{X}

$$\dot{X} = \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a$$



- 이 식을 고찰해보면, 우선 입자플루언스율 Φ 는 단위시간당 단위면적을 지나는 방사선의 갯수이고 따라서 단위는 방사선의 개수/cm²·sec

- 거리 r 에서의 ϕ 는 점선원인 경우 $\phi = \frac{S}{4\pi r^2}$
- 에너지 E 를 곱한다는 것은 입자플루언스율이 에너지플루언스율로 바뀐다는 뜻
- 즉 ϕE 는 단위시간당 단위면적을 지나는 에너지의 합, 즉 $\text{MeV}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$
- 기에 공기의 질량에너지흡수계수를 $(\mu/\rho)_a$ 를 곱하면 단위시간당 단위면적을 지나는 에너지 중에서 (단위 질량의) 공기가 흡수한 에너지
- 결론적으로 어떤 입자플루언스가 지나갈 때 공기가 단위 질량당 흡수한 에너지가 조사선량
- 여기서는 단위시간당 흡수한 에너지이기 때문에 조사선량“률”이라 하고 \dot{X} 와 같이 읽점
- 단위와 같이 이해하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a \\ &= \phi (\text{photon}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}) \times E (\text{MeV}/\text{photon}) \times 1.6 \times 10^{-6} \\ &\quad (\text{erg}/\text{MeV}) \times \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a (\text{cm}^2/\text{g}) \\ &= 1.6 \times 10^{-6} \phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a \text{ erg}/\text{g} \cdot \text{sec} \text{ (or } rad/\text{sec로 바꿀 수 있음)}\end{aligned}$$

- 이것을 R/h 로 나타내면, $1R$ 은 표준상태의 건조한 공기 1 g 당 87.7 erg 의 에너지를 주는 방사선의 세기로 정의하므로

$$\dot{X} = \frac{1.6 \times 10^{-6} \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a \text{ erg/g} \cdot \text{sec}}{87.7 (\text{erg/g})/\text{R}} \simeq 1.82 \times 10^{-8} \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a \text{ R/sec}$$

예제 1Ci의 ^{137}Cs 이 점등방선원으로 존재하고 있을 때 다음 물음에 답하시오. (단 ^{137}Cs 은 매붕괴시 0.662 MeV의 γ 선을 방출하고 공기의 질량에너지흡수계수는 $0.0293 \text{ cm}^2/\text{g}$ 라고 가정)

가. 거리 1 m 지점의 입자플루언스율을 구하시오.

나. 같은 지점의 에너지플루언스율을 구하시오.

다. 같은 지점의 공기의 흡수선량률을 Gy/hour 단위로 구하시오.

[풀이]

가. 1 m 지점의 입자플루언스율

$$\phi(r=1\text{m}) = S/(4\pi r^2) = (3.7 \times 10^{10} \text{ } \gamma/\text{sec})/4\pi(100\text{cm})^2 = 2.95 \times 10^5 \text{ } \gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$$

나. 1 m 지점의 에너지플루언스율

$$\phi(r=1\text{m})E = (2.95 \times 10^5 \text{ } \gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}) \times 0.662 \text{ MeV}/\gamma = 1.95 \times 10^5 \text{ MeV}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$$

다. 공기의 흡수선량률 $\dot{D}(r=1\text{m})$

$$\begin{aligned} \dot{D}(r=1\text{m}) &= \phi(r)E (\mu_a/\rho) = (1.95 \times 10^5 \text{ MeV}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}) (0.0293 \text{ cm}^2/\text{g}) \\ &= 5714 \text{ MeV/g} \cdot \text{sec} \end{aligned}$$

단위를 변환하면

$$\begin{aligned}\dot{D}(r=1m) &= (5714 \text{ MeV}) \times (1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) \div (1g \times 10^{-3} \text{ kg/g}) \times 1\text{sec} \\ &= 9 \times 10^{-7} \text{ J/kg} \cdot \text{sec} = 9 \times 10^{-7} \text{ Gy/sec}\end{aligned}$$

$$\text{즉 } \dot{D}(r=1m) = 9 \times 10^{-7} \text{ Gy/sec} \times (3600 \text{ sec/hour}) = 3.3 \times 10^{-3} \text{ Gy/hr}$$

2) 흡수선량률(\dot{D})

- 입자플루언스율이 ϕ , 에너지 E MeV
- 어떤 물질의 질량에너지흡수계수를 $(\mu/\rho)_m$
- 특정 지점에서의 흡수선량률, \dot{D} 는

$$\dot{D} = \phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m$$

- 조사선량률과 다른 점이 있다면 해당 지점에 공기가 있지 않고 어떤 물질이 위치함으로 그 물질의 질량에너지흡수계수 $(\mu/\rho)_m$ 를 곱한다는점 뿐
- 만약 여기에 인체 조직이 있다고 가정한다면 인체조직의 질량에너지흡수계수 $(\mu/\rho)_t$ 를 대신

곱함. 아래첨자 t는 인체의 연조직(tissue)을 의미.

- 다시 단위와 함께 기술하면

$$\begin{aligned}\dot{D} &= \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m \\ &= \Phi (\text{photons/cm}^2 \cdot \text{sec}) \times E (\text{MeV/particle}) \times 1.6 \times 10^{-6} (\text{erg/MeV}) \times \\ &\quad \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m (\text{cm}^2/\text{g})\end{aligned}$$

$$= 1.60 \times 10^{-6} \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m (\text{erg/g} \cdot \text{sec})$$

$$= 1.60^{-10} \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m (\text{J/kg s})$$

$$= 1.60^{-10} \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m (\text{Gy/s})$$

3) 조사선량률 (\dot{X}) 과 흡수선량률 (\dot{D})

- 같은 조건하에서 조사선량과 흡수선량의 관계를 알아보기 위해서 흡수선량률을 조사선량률로 나누면

$$\frac{\dot{D}}{\dot{X}} = \frac{1.6 \times 10^6 \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m}{1.82 \times 10^{-6} \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a} \simeq 0.877 \frac{(\mu/\rho)_m}{(\mu/\rho)_a}$$

$$D(\text{cGy}) = 0.877 \frac{(\mu/\rho)_m}{(\mu/\rho)_a} X(\text{R}) : \text{양변에서 윗점을 공통으로 소거}$$

- 여기서 D를 Gy 단위로 그리고 X를 C/kg 단위로 쓰면 다음과 같이 쓸 수도 있다.

$$D(\text{Gy}) = 34 \frac{(\mu/\rho)_m}{(\mu/\rho)_a} X(\text{C/kg}) \quad (\because 1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-14} \text{C/kg})$$

- 방사선방어의 관심 대상인 인체 조직 (tissue)에 대해서는 감마선의 에너지가 0.1 MeV 이상인 영역에서 $(\mu/\rho)_t/(\mu/\rho)_a$ 의 값은 1.11로 거의 일정,

$$D(\text{cGy}) = 0.877 \frac{(\mu/\rho)_t}{(\mu/\rho)_a} X(\text{R}) \approx 0.877 \times 1.11 X(\text{R})$$

$$= 0.974 \times (R) \approx 1.0 \times (R)$$

- 따라서 실용적인 방사선방어의 관점에서 투과성 X선 및 γ 선에 대하여 1 렌트겐(R)은 1 cGy로 간주한다. ($1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy} = 1 \text{ rem}$)

예제 ▶ 어느 비파괴검사 전문가가 3.7 TBq의 ^{192}Ir 를 사용하여 용접부위를 촬영하고 있다. 이 위치에서 측정한 촬영중 방사선량율은 30 mR/h이다. 전문가의 연조직이 받게 되는 흡수선량율은 얼마인가? 단, ^{192}Ir 에 대한 공기와 연조직의 질량에너지흡수계수는 각각 $0.0288 \text{ cm}^2/\text{g}$ 및 $0.0317 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다.

[풀이] $\dot{D} (\text{cGy/h}) = 0.877 \times \frac{0.0317}{0.0288} \times (30 \times 10^{-3}) (\text{R/h}) = 0.02896 \text{ cGy/h} = 290 \mu\text{Gy/h}$

4) 감마상수 (Γ)

- 조사선량을 $\dot{X} = \Phi E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a$
- 점등방선원일 때 거리 r 에서의 입자플루언스율은 $\Phi = \frac{S}{4\pi r^2}$ 이므로
- $\dot{X} = \left(\frac{S}{4\pi r^2} \right) E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a$
- 이때 거리 $r = 1 \text{ m}$ 이고, 선원의 세기 S 가 1 GBq (또는 1 Ci)일 때의 조사선량률을
- 감마상수 (Γ ; Specific Gamma Constant, 비감마상수)라고 정의하면

$$\Gamma = \left(\frac{1}{4\pi} \right) E \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_a \cdot \left(\frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}} \right).$$

- 따라서 조사선량률은 $\dot{X} = \frac{\Gamma S}{r^2}$

음미

- 이 감마상수의 단위 ($\frac{R \cdot m^2}{GBq \cdot h}$) 를 살펴보면,
- 1 GBq 의 선원으로부터 1 m 거리 떨어진 곳에서 시간당 받는 조사선량률을 의미(따라서 감마 상수를 ‘조사선량률 상수’라고도 함)
- 따라서 주요 감마선 핵종별로 감마상수(Γ)를 미리 구해놓으면, 다음부터는 거리와 선원의 세기 만 알면 복잡한 계산 없이 다른 조사선량률은 비례적으로 알 수 있음.
- 감마상수(Γ)는 이런 편리함을 위해 도입
- 예를 들어 아래 표를 보면 알 수 있듯이

$$^{137}\text{Cs의 감마상수}(\Gamma) \text{는 } 0.009 \left(\frac{R \cdot m^2}{GBq \cdot h} \right)$$

- 이것은 ^{137}Cs 선원 1 GBq로부터 1 m 떨어진 곳에 위치하고 있으면 시간당 0.009 렌트겐(0.009 R/h)의 조사선량률이 된다는 뜻.
- 그렇다면 185 GBq의 Cs-137로부터 2 m 떨어진 곳의 조사선량률은 얼마인가를 알아보면, 선량률이 선원의 세기 S에 비례하고 거리의 제곱에 반비례하므로 $(0.009 \text{ R/h}) \times (185 \text{ GBq}) / (2 \text{ m})^2$ 이므로 0.41 R/h.

- 결론적으로, 감마상수(Γ)가 주어진다면 조사선량률 \dot{X} 는 다음과 같이 간단히 구할 수 있음.
- 단 감마상수 (Γ)는 MBq 또는 TBq 단위로 주어지는 경우도 있으므로 단위 맞춤에 주의.

$$\dot{X} = \frac{\Gamma S}{r^2}$$

예제 ^{192}Ir 의 감마상수는 $0.013 \text{ R} \cdot \text{m}^2/\text{GBq} \cdot \text{h}$ 이다. 2 TBq의 ^{192}Ir 으로 부터 2 m거리에서 10분 간 피폭 받은 선량은 몇 mSv인가?

[풀이] 선원의 세기는 $2\text{TBq} = (2000 \text{ GBq})$ 이다.

$$\text{조사선량률 } \dot{X} = \frac{\Gamma S}{r^2} = \frac{0.013 \times 2000}{2^2} = 6.48 \text{ R/h 이므로,}$$

10분간 피폭 받은 선량은 $6.48 \text{ R/h} \times (1/6)$ 인 1.08 R 이며 10.8 mSv 가 된다.

확인문제

비감마상수(Specific Gamma Constant)가 $3.7 \text{ (R}\cdot\text{m}^2/\text{GBq}\cdot\text{h)}$ 인 방사성핵종의 경우, 이 핵종 1 mCi로 부터 10 cm 떨어진 곳에서 3시간 동안 받는 선량은 얼마인가. 단 1R/h 선량률에서 1시간 피폭시 1cSv 로 가정하고 선원의 반감기는 충분히 길다고 가정한다.

[풀이] $1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq} = 3.7 \times 10^{-2} \text{ GBq}$ 이며

선량률은 선원의 세기에 비례하고, 거리의 제곱에 반비례함으로

$$\dot{X} = \Gamma \frac{S}{r^2} = 3.7 \left(\frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}} \right) \frac{3.7 \times 0.01 \text{ GBq}}{(0.1 \text{ m})^2} \approx 13.7 \text{ R/h}$$

3시간 동안 받은 선량은 $13.7 \text{ R/h} \times 3 \text{ h} = 41.1 \text{ R for 3 hr} = 411 \text{ mSv}$

예제

점선원인 ^{60}Co 으로부터 20 m거리에서 조사선량률이 6 R/min이었다. 점선원의 방사능은 몇 PBq인가?

[풀이]

^{60}Co 의 감마상수는 $1.32 \text{ Rm}^2/\text{Ci}\cdot\text{h}$ 이므로 문제에 적합하게 환산을 하면

$$\Gamma = 1.32 \frac{\text{Rm}^2}{\text{Ci}\cdot\text{h}} = 1.32 \frac{\text{Rm}^2}{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \cdot 60 \text{ min}} = 5.946 \times 10^{-13} \text{ Rm}^2/(\text{Bq}\cdot\text{min})$$

$$X = \Gamma \frac{C}{r^2} R/h$$

$$6R/\text{min} = 5.946 \times 10^{-13} \frac{S(\text{Bq})}{(20\text{m})^2}$$

$$\begin{aligned} S &= 4.03 \times 10^{15} \text{ Bq} \\ &= 4.03 \text{ PBq} \end{aligned}$$

예제 1 MBq의 ^{131}I 점선원으로부터 30 cm 위치에서의 선량률은 0.086 mSv/h라고 할 때 ^{131}I 의 감마상수를 ($\text{mSv} \cdot \text{m}^2/\text{h} \cdot \text{GBq}$) 단위로 산출하시오.

[풀이] $\dot{X} = \Gamma \frac{S}{r^2} = 0.086 \text{ mSv/h}$

$$= \Gamma (\text{mSv} \cdot \text{m}^2/\text{GBq} \cdot \text{h}) \times \frac{10^{-3} \text{ GBq}}{(0.3 \text{ m})^2}$$

따라서 감마상수 $\Gamma = 7.74 \text{ mSv} \cdot \text{m}^2/\text{h} \cdot \text{GBq}$

주요 감마선 방출핵종의 감마상수

핵 종	$r(\frac{R \cdot m^2}{Ci \cdot h})$	핵 종	$r(\frac{R \cdot m^2}{Ci \cdot h})$
Sb-122	0.24	Ir-192	0.48
Cs-137	0.33	Hg-203	0.13
Cr-51	0.016	K-42	0.14
Co-60	1.32	Ra-226	0.825
Au-198	0.23	Na-22	1.20
I-125	0.07	Na-24	1.84
I-131	0.22	Zn-65	0.27

잠깐

감마상수가 주어지지 않는다면

- 감마상수를 모르는 핵종의 경우, Ci 단위의 감마상수의 값이 한 붕괴당 방출하는 감마선 에너지의 약 절반(0.5 E) 정도임을 기억하면 유용하다.
- 따라서 다음 근사식이 가능

$$\Gamma = 0.5 E$$

$$X = 0.5 E \frac{S}{r^2} R/h$$

단 여기서 E = MeV로 주어져야 함. 그리고 이 때 감마상수는 $Rm^2/Ci \cdot h$ 로 나타남

실례: 핵종 Cs-137 실제값: $0.34(R \text{ m}^2/Ci \text{ h})$

 근사값: $0.331(0.662\text{MeV} \times 0.5)$

 핵종 Co-60 실제값: $1.30(R \text{ m}^2/Ci \text{ h})$

 근사값: $1.25(2.5\text{MeV} \times 0.5)$

예제 방사선의 에너지가 2 MeV이고 방사능이 50 Ci(비파괴 검사용 선원 방사능)인 점선원으로 부터 2 m거리에서 작업자가 방사선원의 존재를 인식하지 못한 상태에서 1시간 동안 체류하였을 때 받을 수 있는 흡수선량(Gy)을 근사적으로 평가하시오? 단, 1 R은 1 rad로 가정한다.

[풀이]

- 감마상수는 근사식은 $\Gamma = 0.5 E(\text{MeV})$ 임.
- 에너지가 2 MeV이므로 감마상수(Γ)는 $1 \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}}$
- 따라서,

$$X = \Gamma \frac{S}{r^2} (R/h) = 1 \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}} \frac{50\text{Ci}}{(2\text{m})^2} = 12.5 \text{ R/h}$$

한 시간 동안 12.5 rad 만큼의 피폭 ($\because 1 \text{ R} = 1 \text{ rad}$ 로 가정).

흡수선량 = 0.125 Gy

5) 유효선량 (E)의 계산

- 조사선량률 (\dot{X})로부터 방사선장에서 작업할 때 작업자의 유효선량을 최종적으로 구하는 문제는 다음과 같이 풀이한다.

(가) 먼저 감마상수 (Γ)를 이용하여 조사선량률을 구한다. 조사선량률 $\dot{X} = \frac{\Gamma S}{r^2}$

(나) 조사선량률을 흡수선량률로 바꾼다. 흡수선량률은, $\dot{D} = 0.877 \times \frac{(\mu/\rho)_m}{(\mu/\rho)_a} \dot{X}$ 로 정밀하게 바뀌어도 되고, 1 R은 거의 1 rad 이므로 조사선량률 = 흡수선량률로 두어도 된다.

(다) 흡수선량률(같다고 두면 조사선량률)을 시간에 대해 적분하여 흡수선량을 구한다. Co-선원 같이 반감기가 5년이 넘는 선원 옆에서의 몇시간 작업할 때는 적분이 필요없다. 그러나 반감기가 짧은 경우는 반드시 적분해야 한다. 방사능이 감소하는 경우에는

$\int_0^t \exp(-\lambda t') dt' = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t)]$ 의 적분이 나오는데 이 적분공식은 반드시 알아야만 문제를 풀 수 있다. 즉

$$D = \dot{D}_0 \int_0^t \exp(-\lambda t') dt' = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t)]$$

(라) 흡수선량에 방사선가중계수를 곱해서 등가선량으로 바꾼다. 등가선량은 $H_t = \sum_R D_{T,R} W_R$

식으로 주어지는데 외부피폭의 경우 감마선이나 엑스선의 방사선가중계수가 1이기 때문에 흡수선량이 바로 등가선량이 된다.

(마) 등가선량에 조직가중계수를 가중하여 유효선량을 구한다. 유효선량은 $E = \sum_T H_T W_T$ 방법

으로 구한다.

결론적으로 감마선을 전신에 피폭 받는 경우 R단위 조사선량 \approx cGy단위 흡수선량 \approx cSv 단위 등가선량이 되므로 초기의 조사선량률 \dot{x} 를 작업시간 동안 적분만 하면 흡수선량과 등가선량을 쉽게 구할 수 있다. 중성자의 경우는 방사선가중치에 주의한다.

예제 20 Ci ^{192}Ir 점 등방선원으로부터 2 m 떨어진 곳에서 8시간 작업한다고 할 때 이 사람

이 받게 될 유효선량은 얼마인가. 단, ^{192}Ir 의 감마상수는 $0.48(\frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}})$ 이다.

[풀이] 조사선량률 $\dot{X} = \Gamma \frac{S}{r^2} = (0.48 \times 20)/2^2 = 2.4 \text{ (R/h)}$

흡수선량률 $\dot{D}_0 = 0.877 \times 1.1 \times \dot{X}$
 $= 0.877 \times 1.1 \times 2.4 \approx 2.33 \text{ (cGy/h)}$

흡수선량(D)를 구하면

$D = \dot{D}_0 \times t = 2.33 \text{ cGy/h} \times 8 \text{ h}$
 $\approx 18.6 \text{ (cGy)}$

$H = \sum W_r D_{8h} = 18.6 \times 1 = 18.6 \text{ (cSv)}$

전신피폭을 의미하므로 $\sum W_t = 1$

$E = \sum W_t H = 18.6 \times 1 = 18.6 \text{ (cSv)}$

예제 질량이 1000 g인 인체 장기가 ^3H (반감기 12.3년)핵종 10 μCi 에 의해 오염되었다. 동 장기의 초기 증가선량률은?

[풀이]

장기의 흡수선량률은 $\text{J/kg} \cdot \text{sec} = \text{Gy/sec}$ (또는 hour) 이고 베타선의 에너지가 낮아 모두 해당 장기에 축적되므로

$$\dot{D} = (1 \times 10^{-5} \text{Ci} \times 3.7 \times 10^{10} \frac{\text{Bq}}{\text{Ci}}) (\frac{\text{sec}^{-1}}{\text{Bq}}) \times (5.6 \text{keV} \times 1.6 \times 10^{-16} \frac{\text{J}}{\text{keV}}) \div 1 \text{kg}$$

$$= 3.32 \times 10^{-10} \text{ J/kg} \cdot \text{sec} = 3.32 \times 10^{-10} \text{ J/kg} \cdot \text{sec}$$

등가선량률 = $W_t \times$ 흡수선량률 에서 베타의 방사선 가중치는 1이므로

$$= 3.32 \times 10^{-10} \text{ Gy/sec} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ Sv/hr}$$

잠깐

* 이 핵종의 반감기가 12.3년으로 비교적 길므로 초기 이틀(48시간)의 등가선량을 구하라고 물으면 $1.2 \times 10^{-6} \text{ Gy/hr} \times 48 = 2.88 \times 10^{-5} \text{ Sv}$ 로 O.K. [48시간내에 방사선의 세기가 거의 같으므로]

* 반감기가 짧거나, 구하는 시간이 길어(예를 들어 50년) 방사선장이 변하면 적분을 해야 함.

위 문제에서 50년간의 예탁 등가선량을 구하면

I) 우선 50년간의 흡수선량을 구함.

$$D = \dot{D}_0 \int_0^t \exp(-\lambda t') dt' = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t)]$$

$$D = \dot{D}_0 \int_0^{50\text{yr}} \exp(-\lambda t') dt' = -\frac{\dot{D}_0}{\lambda} [\exp(-\lambda t)]_0^{50\text{yr}}$$

$$= \frac{1.2 \times 10^{-6} \text{ Gy/hr} \times \left(\frac{1\text{yr}}{365 \times 24\text{hr}} \right)}{0.693/12.3\text{yr}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{12.3\text{yr}} \times 50\text{yr}} \right)$$

= 계산은 알아서

특정 조직의 예탁등가선량 = $H_t = \sum_R D_{T,R} W_R$ 이므로 베타선 = 1이므로 위의 값이 바로 예탁등가선량

마지막으로 여기에 해당 조직의 조직가중치만 곱하면 예탁유효선량이 된다.

예제 ▶ 갑상선 치료목적으로 ^{131}I 방사성핵종 30 mCi를 투여한 외래 환자가 있다. 환자 옆 1 m 지점에 환자의 가족이 간호를 위하여 24시간 있었다고 가정하면 이 사람이 받는 피폭선량은 몇 mSv 인가? 단, 환자를 점선원(point source)으로 가정하고 ^{131}I 의 물리적 반감기는 8일이며 생물학적 반감기는 무시한다. ^{131}I 감마상수는 $2.2 \text{ R cm}^2/\text{mCi h}$ 이고, 1 R/h 선량에서 1시간 피폭 시 1 cSv로 가정한다.

$$[\text{풀이}] \quad \dot{X} = \Gamma \frac{S}{r^2} = (2.2 \text{ Rcm}^2/\text{mCi h} \times 30 \text{ mCi}) / (100 \text{ cm})^2$$

$$= 6.6 \times 10^{-3} \text{ R/h}$$

초기 1시간 동안의 피폭량은 $6.6 \times 10^{-3} \text{ R/h}$ 이므로 24시간 동안의 피폭량을 계산하면

$$\begin{aligned} E &= E_0 \int_0^{24} \exp(-\lambda t) dt = X_0 \int_0^{24} \exp(-\lambda t) dt = X_0 [-\exp(-\lambda t)]_0^{24} = \\ &= \frac{\dot{X}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda \cdot 24}) \\ &= \frac{6.6 \times 10^{-3} \text{ R/h} \times 8 \times 24}{0.693} \left(1 - e^{-\frac{0.693 \times 24}{8 \times 24}}\right) = 0.15 \text{ R for 24hr} = 1.5 \text{ mSv} \end{aligned}$$

예제 붕괴상수가 λ 인 방사성핵종에 의해 흡수선량률이 \dot{D}_0 인 작업지점에서 작업자가 무한시간 동안 작업할 경우 받게되는 흡수선량(D)는 ?

$$\begin{aligned} [\text{풀이}] \quad D &= \dot{D}_0 \int_0^t \exp(-\lambda t') dt' = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} [-\exp(-\lambda t)]_0^\infty = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} [\exp(-\lambda \cdot \infty) - \exp(-\lambda \cdot 0)] \\ &= \frac{\dot{D}_0}{\lambda}, \quad t = \infty \end{aligned}$$

* [무한시간의 의미] 반감기에 비해 적분하는 기간이 충분히 길면, 바로 이 결과를 사용 가능

4.2 내부 피폭선량의 평가

1) 체내 방사성물질의 잔류량 기준

- 인체내에 방사성 핵종이 들어온 경우에는 핵종의 물리·화학적 특성에 따라 전신에 균등 분포하거나 특정 장기에 집중 분포.
- 이러한 경우 섭취한 사람의 조직이 받는 선량의 계산은 방사성 핵종의 대사, 신체 조직의 기하학적 복잡성 등으로 매우 어려운 문제가 되며 수계산으로 불가능한 경우가 대부분.
- 따라서 주어질 수 있는 문제는, α 입자나 β 입자와 같은 투과력이 약한 방사선이 전신에 고루 퍼져있거나 특정장기에 모여 있을 때 유효반감기와 적분만으로 해를 구할 수 있는 문제들이다. 내부피폭에 의한 예탁유효선량(E_{50})를 구하는 방식은 다음 순서의 단계를 거친다.

(가) 내부피폭 선량률은 체내 잔류방사능에 비례하므로 어떤 장기·조직의 초기 등가선량률 \dot{H}_0 을 문제에 주어진 조건을 이용하여 구한다.

(나) 유효반감기 T_{eff} 를 구하고, 이를 통해 유효제거계수 λ_{eff} 를 구한다. 이 수치들은 값들은

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b} \text{ 와 } \lambda_{\text{eff}} = \frac{0.693}{T_{\text{eff}}} \text{ 의 관계를 통해서 구한다.}$$

(다) 초기 등가선량률 H_0 는 시간에 따라 지수함수적으로 감소함으로, 다음과 같이 시간에 따른 등가선량률 $\dot{H}(t)$ 에 대한 식을 세운다.

$$\dot{H}(t) = H_0 \exp(-\lambda_{\text{eff}} t)$$

(라) 마지막으로 $\dot{H}(t)$ 를 적분하여 예탁등가선량 H_{50} 을 구한다. 적분기간은 50년이다.

$$H_{50} = \int_{t_0}^{t_0 + 50y} \dot{H}(t) dt$$

(마) 조직가중계수를 이용하여 예탁등가선량 H_{50} 을 예탁유효선량 E_{50} 으로 바꾼다. 핵종이 전신에 골고루 퍼져있으면 이 두 값은 같다.

아래는 체내 방사성 물질에 의한 예탁유효선량을 구하는 대표적인 예이다.

예제 ▶ 사고로 인하여 유효반감기가 10일인 ^3H 를 섭취한 후 작업자에 대한 초기등가선량률이 0.1 mSv/hr였다면 예탁선량은?

[풀이] 초기등가선량률 $\dot{H}_0 = 0.1 \text{ mSv/hr}$

등가선량률 $\dot{H}(t) = H_0 \exp(-\lambda_{\text{eff}} t)$,

따라서 예탁등가선량은 $H_{50} = \int_{t_0}^{t_0 + 50\text{y}} \dot{H}(t) dt$

$$= H_0 \int_0^{50} \exp(-\lambda_{\text{eff}} t) dt = 0.1 [\text{mSv/hr}] \int_0^{50} e^{\frac{-0.693}{10[\text{day}] \times \frac{1[\text{yr}]}{365[\text{day}]}} t} dt = 36.6 [\text{mSv}]$$

[생각해 봅시다] 이 문제를 풀 수 있는 다른 방식은 없을까요?

2) 섭취량으로부터 평가

- 연간섭취한도 (ALI)와 유도공기중농도 (DAC)를 이용한 계산
- ALI(Annual Limit on Intake)는 정의: 일년 동안 섭취하여 예탁유효선량이 20 mSv(연평균 선량 한도)에 이르게 되는 방사성핵종의 양(방사능)이며 단위는 Bq 또는 Ci;
- 1 ALI는 그 자체가 20 mSv 이므로 ALI가 30 Bq인 핵종을 절반인 15 Bq만큼 섭취하면 $\frac{30\text{Bq}/\text{ALI}}{15\text{Bq}} \times 20\text{mSv}/\text{ALI}$ 이므로 10 mSv에 해당한다.
- DAC(Derived Air Concentration)는 ALI에서 유도되는 값으로 그 정의는 다음과 같다.

$$\text{DAC} = \frac{\text{ALI}}{50 \text{ weeks/year} \cdot 40 \text{ hrs/week} \cdot 1.2\text{m}^3/\text{hr}} \text{ (Bq/m}^3\text{)}$$

여기서 50 weeks/year : 연간 작업주 수

40 hrs/week : 주당 작업시간

1.2 m³/hr : 성인의 시간당 호흡량

- 1DAC 작업조건에서 2000 시간 동안 작업하면, 이는 2000 DAC-hrs에 해당하며, 이것이 예탁 유효선량 20 mSv에 해당. 아래의 두 예제로 이해를 돕는다.

예제 ^{137}Cs 의 농도가 $18 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/ml}$ 인 구역에서 어떤 작업자가 2시간 30분 동안 일했다. ^{137}Cs 의 DAC가 $6 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/ml}$ 인 경우, 이 작업자의 예탁유효선량은?

[풀이] 우선 작업장의 공기농도는
$$\frac{18 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/ml}}{6 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/ml}} = 3 \text{ DAC}$$

여기서 2.5시간 근무하였으므로 호흡에 의한 피폭은 $3 \text{ DAC} \times 2.5 \text{ hr} = 8 \text{ DAC-hr}$
 2000 DAC-hr가 20 mSv에 해당하므로 0.08 mSv 에 해당

예제 작업자의 DAC가 $1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/cc}$ 인 구역에서 4시간 동안 작업하려고 한다. 이 작업자가 40 DAC-hrs를 초과하지 않고 이 구역에서 작업할 수 있는 공기 중 최대 방사능 농도는 ?

[풀이]
$$\frac{\text{공기중 농도}}{\text{DAC}} \times \text{시간} = \text{DAC-hrs}$$

$$\frac{\text{공기중 농도}}{1 \times 10^{-8}} \times 4 = 40$$

따라서, 공기중 농도 $= \frac{1 \times 10^{-8} \times 40}{4} = 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$

예제

단일 핵종을 사용하는 작업장에서 방사성핵종에 의해 $2 \times 10^3 \text{ Bq m}^{-3}$ 로 공기가 오염되었고, 아울러 작업장 내 평균 외부 방사선량률이 0.6 mSv h^{-1} 라 한다. 이 공기 오염은 동 핵종의 유도공기농도 (DAC) 4배에 해당한다. 방호인자 10인 반면마스크를 사용하여 작업자가 1.2 h 시간동안 작업하였다. 작업자의 총 피폭선량(mSv)은 얼마인가?

[풀이]

- 내부피폭 = $4 \text{ DAC} \times 1.2 \text{ h} \times 0.1 \text{ (방호인자)} = 0.48 \text{ DAC-hr} = 0.48 \text{ mrem} = 0.0048 \text{ mSv}$
 - 외부피폭 = $0.6 \text{ mSv/h} \times 1.2 \text{ h} = 0.72 \text{ mSv}$
- 따라서 총 피폭선량은 = $0.7248 \text{ mSv} \approx 0.72 \text{ mSv}$

5. 차폐 계산

5.1 차폐의 기본식

- 차폐(shielding)란 방사선원과 작업자 사이의 공간에 적절한 장해물을 설치함으로써 작업자에게 도달하는 방사선을 줄이는 것
- 방사선은 어떤 매질을 통과하는 동안 그 매질의 구성원자와 반응하여 방사선의 세기가 감소한다. 이런 효과를 ‘감쇠(attenuation)’
- 방사선 차폐는 방사선의 이러한 감쇠 현상을 이용하는 것으로 이때의 장해물을 차폐체(shielding material)라고 한다.
- 방사선의 세기(입자플루언스율, 에너지 플루언스율, 또는 공간방사선량률)는 두께 x cm의 차폐체가 있을 때, 차폐체를 통과하며 거리 x 에 따라 지수함수적으로 감소. 이는 방사능 A 가 시간 t 에 따라 지수함수적으로 감소하는 것과 같음.
- 그림에서처럼 초기 방사선의 세기가 ϕ_0 이고 x 방향으로 진행할 때 거리에 따른 방사선의 세기는 다음과 같다.

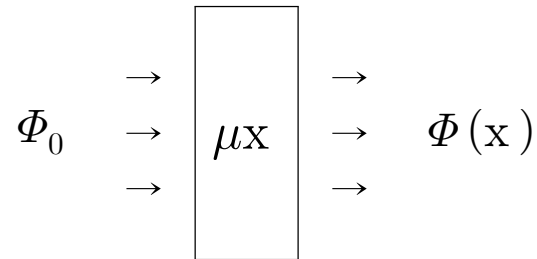
$$\Phi(x) = \phi_0 \exp(-\mu x)$$

여기서

Φ_0 : 초기 방사선세기(입자플루언스율), 방사선의 개수

μ : 차폐재에서의 선형감쇠계수, $[\text{cm}^{-1}]$

X : 차폐체의 두께, $[\text{cm}]$



음미

- 초기 방사선 세기인 초기 입자플루언스율 Φ_0 는 $x = 0$ 에서의 값
- 차폐체가 없을 때는 공기와의 충돌을 무시하므로 x 방향으로 아무리 진행을 해도 Φ_0 는 변하지 않음 따라서 $\Phi_0 = \text{초기 방사선의 세기} = \text{차폐체가 없을 때의 방사선의 세기}$
- 그러나 여기서 Φ_0 가 x 방향으로 진행하는 방사선 세기의 초기값이라면 차폐체가 없을 경우 x

의 값에 따라 변하지 않지만 점등방선원이 $x = 0$ 인 지점에 있다면 이 값은 거리 x 에서 $S/4\pi x^2$ 으로 감소

- 선형감쇠계수(linear attenuation coefficient) μ 의 단위는 $\frac{1}{x}$, cm^{-1} .
- μ 값이 0.1 cm^{-1} 이라는 것은 방사선이 1 cm 거리를 진행하면서 차폐체와 상호작용하지 않을 확률이 e^{-1}
- 선형감쇠계수는 방사선의 에너지와 물질의 종류에 따라 달라짐(물질의 종류에 따라 밀도가 서로 다르기 때문)
- 밀도가 조밀한 차폐체를 통과하는 방사선은 밀도가 낮은 차폐체를 통과하는 방사선보다 더 감쇠된다. 따라서 밀도에 관계없는 감쇠계수를 고안하였는데 이를 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient)
- 질량감쇠계수는 선형감쇠계수를 밀도로 나눈 값이며 $\frac{\mu}{\rho} \equiv \mu_m$
- 질량감쇠계수는 물리학적으로 보면(수학적으로는 나누기지만), 선형감쇠계수의 방사선이 진행한 거리 x 에 밀도를 곱한 값- 즉 질량감쇠계수 μ/ρ 는 $\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\rho}$ 이 되며 [cm^2/g],
- 이때 분모는 ρx (=이를 밀도두께라 함)인데 이는 밀도와 거리의 곱
- 즉 질량감쇠계수는 밀도가 ρ 인 물질을 x 거리만큼 방사선이 진행할 때 차폐체와 상호작용하여

에너지를 잃을 확률

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\mu x) = \Phi_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x\right]$$

여기서 $\frac{\mu}{\rho} \equiv \mu_m$: 차폐재의 질량감쇠계수, [cm²/g]

ρ : 차폐체의 밀도, [g/cm³]

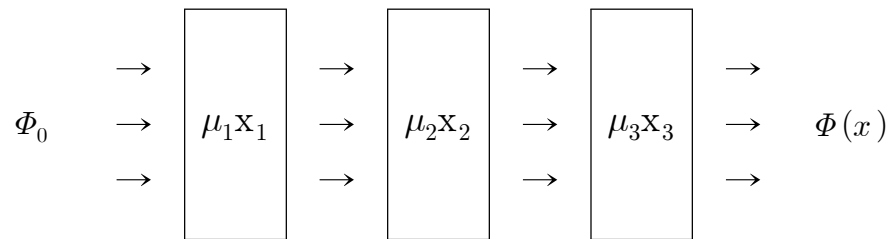
$\rho x \equiv x_m$: 밀도두께, [g/cm²]

- 이러한 간단한 차폐식을 풀 때 필요한 것은, 초기 방사선세기 Φ_0 , 선형감쇠계수 μ 및 진행한 거리 x 뿐.
- μ 가 주어지지 않을 때는 반드시 질량감쇠계수와 밀도가 주어짐 $\mu_m = \mu/\rho$

참고

그림에서 보듯이 다른 물질로 구성된 차폐체가 중첩되어 있을 때 전체적인 차폐효과는

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp - (\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)$$

**예제**

차폐체가 없는 조건에서 어떤 방사선원으로부터 5 m 떨어진 작업공간에서의 공간선량률이 40 mR/h였다. 이때 방사선원과 작업공간 사이에 1 cm의 납차폐체를 설치하였다면 작업공간에서의 공간선량률은 얼마인가? 이 작업공간의 방사선에 대한 납(밀도 11.3g/cm³)의 질량감쇠계수는 0.703 cm²/g이다.

[풀이] 초기 방사선의 세기 $\Phi_0 = 40$ mR/h

질량감쇠계수 $\mu/\rho = 0.703$ cm²/g 이므로

$$\begin{aligned}
\Phi(x) &= \Phi_0 \exp(-\mu x) \\
&= \Phi_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x\right] \\
&= 40 \exp(-0.703 \times 11.3 \times 1.0) \\
&= 0.01419 \text{ mR/h}
\end{aligned}$$

따라서, 1 cm 납차폐체를 설치할 때의 공간선량률은 0.01419 mR/h 이다.

5.2 반가층과 1/10가층

- 반가층과 1/10가층은 차폐에서 실무적으로 사용되는 용어.
- 반가층 (Half Value Layer, HVL)이란 방사선의 세기를 절반으로 줄이는데 필요한 차폐체의 두께를 말하며 $x_{1/2}$ 로 나타낸다.
- 이는 반감기 $t_{1/2}$ 와 논리적으로 동일. 따라서 반가층은

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\mu x) \quad \text{에서} \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{1}{2} = \exp(-\mu x_{1/2})$$

$$\exp(-\mu x_{1/2}) = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{1}{2}, \quad -\mu x_{1/2} = \ln \frac{1}{2}, \quad \mu x_{1/2} = \ln 2$$

$$\text{따라서 } x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \text{ cm}$$

- 같은 방식으로 방사선의 세기를 1/10로 감쇠시키는 차폐체의 두께를 뜻하는 1/10가층 (TVL-tenth value layer, $x_{1/10}$)은 다음과 같음.

$$x_{1/10} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu} [\text{cm}]$$

- 방사능의 붕괴 문제에서 붕괴상수 λ 대신 반감기 $t_{1/2}$ 를 주듯
- 많은 경우, 차폐에서도 반가층 및 1/10가층으로부터 선형감쇠계수를 유도하여 문제를 풀이
- 아래표는 대표적인 γ 선원의 반가층과 1/10가층.

차폐체 핵종	납(cm)		철(cm)		밀도 2.35g/cm ³ 의 일반콘크리트(cm)	
	반가층	1/10가층	반가층	1/10가층	반가층	1/10가층
Co-60	1.2	4.0	2.0	6.7	6.1	20.3
Sb-124	1.4	4.5	—	—	7.0	23.0
I-131	0.7	2.4	—	—	4.6	15.3
Cs-137	0.7	2.2	1.5	5.0	4.9	16.3
Ir-192	0.6	1.9	1.3	4.3	4.1	13.5
Ra-226	1.3	4.4	2.1	7.1	7.0	23.3

예제 ▶ 각각 40 Ci와 4 Ci의 Co-60 선원이 있다. 이들 선원의 세기를 절반으로 줄이는 납의 반가층의 비는?

가) 10:1 나) 100:1 다) $\sqrt{10}:1$ 라) 1:1

예제 ▶ ¹³⁷Cs 감마선원을 차폐하기 위하여 납을 사용하고자 한다. ¹³⁷Cs에 대한 납의 반가층이 0.56 cm일 때 납의 선형감쇠계수와 납의 1/10가층을 구하시오.

[풀이] Cs-137의 납에 대한 선형감쇠계수는 다음과 같다.

$$\mu = \frac{0.693}{\text{HVL}} = \frac{0.693}{0.56} = 1.238 \text{ cm}^{-1}$$

그러므로, 납의 1/10가층(TVL)은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{1.238} = 1.86 \text{ cm}$$

예제 납에서 감마선의 선형감쇠계수(μ)는 0.43 cm^{-1} 라 할 때 방사선의 세기를 1/8로 감소시키는데 필요한 납의 두께를 계산하라.

[풀이]

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{1}{8} = \exp(-\mu x), \quad -\mu x = \ln \frac{1}{8}$$

$$x = \frac{\ln 8}{0.43}, \quad x = 4.84 \text{ (cm)}$$

예제 4 cm 두께의 납 차폐용기속에 방사선원이 들어 있는데 이 선원으로부터 1 m 떨어진 곳에서 방사선량률을 측정하였더니 $60 \mu\text{Sv/h}$ 였고 차폐용기와 측정지점 사이에 1 cm 두께의 납을 삽입하였더니 방사선량률이 $30 \mu\text{Sv/h}$ 였다. 이때 방사선원을 공기중에 노출시켰을 때 1 m 떨어진 곳에서의 방사선량률은 얼마인가?

[풀이] 1 cm 두께의 납으로 방사선량률이 반으로 줄었다면 납의 반가층($x_{1/2}$)은 1 cm일 것이므

로 따라서 선형감쇠계수 $\mu = \frac{\ln 2}{x_{1/2}} = \frac{0.693}{x_{1/2}} [\text{cm}^{-1}]$ 이다. 이 문제는 차폐되지 않았을 때의 ϕ_0 를 구하라는 것이므로, 납차폐용기에만 방사선원이 있을 때의 차폐 기본식을 사용하면 풀이하면 다음과 같다.

(납차폐용기와 사이에 있는 1 m 거리는, 공기와의 충돌을 무시하므로 고려하지 않음)

$$\Phi = \Phi_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{x_{1/2}} x\right)$$

$$60 = \phi_0 \exp(-\ln 2 \times 4) = \Phi_0 \cdot \frac{1}{16}$$

$$\phi_0 = 60 \times 16 = 960 (\mu\text{Sv/h})$$

예제 방사선원의 강도가 S인 점등방선원 주위를 반경 R인 구형의 차폐물질이 둘러싸고 있으며 차폐물질에서의 선감쇠계수는 μ 이다. 구형 차폐체의 표면에서 a 만큼 떨어진 거리에서의 방사선량률은 얼마인가? 단, 축적계수는 무시한다.

$$1. \frac{S \exp(-\mu[R+a])}{4\pi(R+a)^2}, \quad 2. \frac{S \exp(-\mu a)}{4\pi[R+a]^2} \quad 3. \frac{S \exp(-\mu[R+a])}{4\pi R^2} \quad 4. \frac{S \exp(-\mu R)}{4\pi(R+a)^2}$$

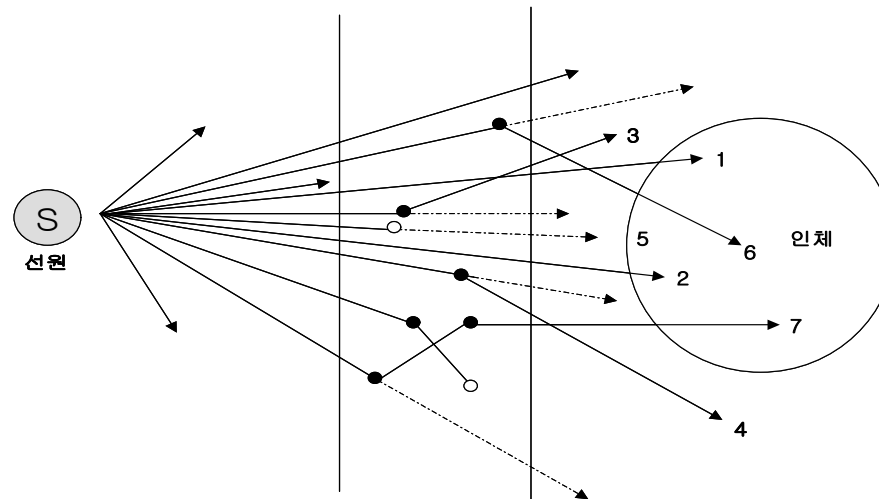
[풀이]

- 점등방선원이고 거리가 $R+a$ 이므로 방사선량률은 $4\pi r^2$ 에 반비례하여 감소한다.
- 차폐물질 내에서 차폐물질과의 반응으로 지수함수적으로 감소. 단 이 선원은 R 만큼만 차폐되어 있다.
- 따라서

$$S'(R + a) = \frac{S \exp(-\mu R)}{4\pi (R + a)^2}$$

5.3 축적인자(build-up factor)

- 방사선차폐에서 다음으로 고려해야 할 것은, 다른 방향으로 산란된 방사선이 다시 작업자에게 피폭을 주는 경우
- 방사선차폐에서는 이러한 산란 기여분을 고려하여야 하는데 아래 그림에서 방사선 6, 7이 여기에 해당.
- 지금까지 설명한 차폐는 다른 방향으로 진행되어 갔다가 산란되어 돌아오는 이런 방사선을 고려하지 않음; 이런 경우를 협역빔 또는 좁은 빔(narrow beam).



- 이러한 산란기여분에 의한 효과를 축적인자(build-up factor)라 하며 B 또는 $B(\mu_x)$ 로 나타냄.

- $B(\mu x)$; 축적인자가 차폐체의 두께 및 차폐체에서의 선형감쇠계수에 따라 달라진다는 것을 의미
- 축적인자는 $B(\mu x)$ 로 다음과 같이 정의된다.

$$B(\mu x) = \frac{\text{참입자플루언스율 } \Phi}{\text{비충돌입자플루언스율 } \Phi_u}$$

- 참입자플루언스율 Φ 는 그림에서 방사선 1, 2, 6, 7을 모두 고려한 실제 입자플루언스율
- 이 값은 컴퓨터를 이용하여 수송방정식을 정밀하게 계산해야 가능
- 여기에 반해 비충돌 입자플루언스율 Φ_u ($u = \text{uncollided}$)는 방사선 1, 2만 고려한 값이며 협역빔에서의 입자플루언스율 (즉 $\Phi_u = \Phi_0 \exp(-\mu x)$)에 해당.
- 참입자플루언스율 Φ 는 비충돌 입자플루언스율 Φ_u 과 산란기여분을 합한 값이므로 항상 1보다 크다.

$$\begin{aligned} B(\mu x) &= \frac{\text{참입자플루언스율 } \Phi}{\text{비충돌입자플루언스율 } \Phi_u} = \frac{\text{비충돌입자플루언스율 } \Phi_u + \text{산란기여분}}{\text{비충돌입자플루언스율 } \Phi_u} \\ &= 1 + \frac{\text{산란기여분}}{\text{비충돌입자플루언스율 } \Phi_u} \geq 1 \end{aligned}$$

따라서 산란기여분, 즉 축적인자를 고려한 거리 x 에서의 방사선의 세기 Φ 는 다음과 같다. 축

적인자 $B(\mu x)$ 를 고려한 계산의 경우, 축적인자가 문제에 제시되거나 표에서 찾을 수 있다.

$$\Phi(x) = \Phi_0 B(\mu x) \exp(-\mu x)$$

- 산란기여분을 고려하였을 때를 광역빔, 넓은 빔(broad beam) 이라 한다.

예제 방사선의 세기가 4.26 R/h인 것을 10 mR/h로 줄일려고 한다. 이 방사선의 평균 에너지가 0.5 MeV이고, 이 때 질량감쇠계수가 $0.14 \text{ cm}^2/\text{g}$, 밀도가 11.34 g/cm^3 이다. 차폐체의 두께를 계산하시오. 단, 축적인자(build-up factor)는 3이다.

[풀이] $I = I_0 B e^{-\mu x}$ 의 식을 이용한다.

$$\frac{I}{I_0 B} = e^{-\mu x}, \text{ 양변에 } \ln \text{을 취하면, } \ln \frac{I}{I_0 B} = -\mu x$$

$$\ln \frac{I_0 B}{I} = \mu x, \quad x \text{에 대하여 다시 쓰면,}$$

$$x = \frac{\ln \frac{I_0 B}{I}}{\mu}$$

여기서, $\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho = 0.14\text{cm}^2/\text{g} \times 11.34\text{g}/\text{cm}^3 = 1.588\text{cm}^{-1}$

$$I = 10 \text{ mR/h}, I_0 = 4.26 \text{ R/h} = 4260 \text{ mR/h}, B = 3$$

따라서, 차폐체의 두께 x 는

$$x = \frac{\ln \frac{4260 \cdot 3}{10}}{1.588\text{cm}^{-1}} = 4.50\text{cm} \text{ 가 된다}$$

예제 ^{60}Co 점선원이 밀도가 $11.3\text{g}/\text{cm}^3$ 인 납 5 cm로 차폐되어 있다. 납의 질량감쇠계수(μ/ρ)는 $0.06\text{cm}^2/\text{g}$ 이고 재생인자(Buildup factor)는 $B(u) = 1 + 0.3u$ 로 주어졌다. 점선원의 방사능이 1Ci인 경우 1m거리에서의 조사선량률은 몇 mR/h인가?

[풀이] 차폐체가 있는 점선원으로부터의 선량률은

$$X = X_0 B e^{-\mu x} \text{ 에서 이 경우 } X_0 = \Gamma \frac{S}{r^2}$$

$$I = \Gamma \frac{S}{r^2} B(u) e^{-ux} \text{ R/h}$$

따라서 $u = (u/\rho) \times \rho = 0.06 \times 11.3 = 0.687 \text{ cm}^{-1}$

$ux = 0.687 \text{ cm}^{-1} \times 5\text{cm} = 3.39$ (5cm만 차폐되어 있으니까)

$\Gamma = 1.32, S = 1 \text{ Ci}, r = 1 \text{ m}$

$$X = 1.32 \left[\frac{Rm^2}{Ci h} \right] \frac{1Ci}{(1m)^2} (1 + 0.3 \times 3.39) e^{-3.39} = 0.0898 R/h = 89.8 \text{ mR/h}$$

5.4 차폐체의 선택

가) 투과성 X-선 및 γ 선

- 일반적으로 투과력이 강한 γ 선이나 X선의 차폐에는 원자번호가 크고 밀도가 높은 물질 사용
- 왜냐하면 방사선의 감쇠가 커지므로
- 밀도가 큰 우라늄, 납, 텅스텐, 철 등이 쓰임.
- 또한 콘크리트는 건물의 구조물로도 사용되고 경제적이므로 차폐체로 널리 이용

나) 베타선

- 베타선 차폐에는 원자번호가 낮은 물질(예: 플라스틱, 알루미늄등)을 사용.
- 베타선이 원자번호가 큰 물질과 작용하여 제동 X선(Bremsstrahlung, Braking Radiation)을 방출하기 때문에 이를 방지
- 베타선의 에너지가 제동 X선 또는 제동복사선으로 전환되는 비율 (f)은 아래 식과 같이 차폐체 구성물질의 원자번호(Z) 및 베타선 최대에너지(E)의 곱에 비례. 따라서 전환율을 감소시키기 위하여 원자번호가 낮은 물질을 베타선 차폐재로 선택.
- 베타선의 에너지가 제동복사선으로 변할 비율

$$f = 3.5 \times 10^{-4} Z E_{\beta}^{\max}$$

- 결론적으로 베타선의 경우에는 제동 X선으로의 전환율을 낮추기 위해 원자번호가 낮은 물질로 1차 차폐하고, 이후 발생하는 제동 X선을 차폐하기 위하여 납이나 철, 콘크리트 등의 원자번호가 높은 물질로 2차 차폐.

다) 중성자

- 중성자선은 전하를 갖지 않으므로 원자핵의 쿨롱장에서 휘지 않음,
- 원자핵과 충돌해서 에너지를 잃으며 이 경우 원자번호가 작을수록 에너지를 잘 잃기 때문에, 수소 원자나 탄소 원자를 많이 포함한 물이나, 파라핀, 폴리에틸렌 등이 차폐체로 사용
- 경제적 이점 때문에 콘크리트도 널리 사용.

참고

몇가지 대표적인 중성자 차폐체

- 파라핀(paraffin): 중성자와 반응 단면적은 좋으나 화재(flame)의 위험이 있음
- 물(water): 효과적인 중성자 차폐체이나 보수유지(maintenance), evaporation과 수실(loss)의 문제점이 있음
- 카드뮴(Cd): 열중성자 단면적은 좋으나 감마선의 차폐부담(n, γ)
감마(558keV) 방출, toxic metal, high cost
- 붕소(^{10}B): 열중성자에 대한 단면적이 좋으나 알파선 방출(n, α)
- 리튬(^6Li): 열중성자에 대한 단면적이 좋으나 알파선 방출(n, α)

6. 방사선방호

6.1 방사선방호 체계(System of Radiological Protection)

1) 방사선방호의 목표

- 방사선피폭을 수반하는 유익한 행위들을 부당하게 제한하지 않으면서 방사선에 대한 방호의 적절한 기준을 제공
- 피폭선량을 문턱선량 이하로 유지함으로써 결정적 영향(deterministic effects)의 발생을 방지
- 확률적 영향(stochastic effects)의 발생을 감소시키기 위한 모든 합리적 조치(all reasonable steps)를 취함.

참고 이와 달리 ICRP No.26(1977년 권고)에 의하면 방사선방호의 목표는 “비확률적 영향(non-stochastic effects)을 방지하고 확률적 영향(stochastic effects)의 발생확률을 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮게 유지한다.” 이전의 권고는 정상작업시 선량의 제한에 초점을 두었기 때문에 ICRP No. 26의 체계를 “선량제한체계”라 부른다. 이와 달리 ICRP 60부터는 방사선방호의 목표 및 원칙을 만성피폭(특히 라돈) 및 사고시 개입(intervention)에도 확대하였으므로 이를 “방사선방호체계”라 부른다.

2) 방사선방호의 원칙

- 행위의 정당화(justification of a practice) : 방사선피폭을 수반하는 행위로부터 얻는 이득이 수반되는 피폭의 위해에 비해 순이득을 가져오지 않으면 그 행위는 인정되지 않는다.
- 방호의 최적화(optimization of protection) : 정당화된 행위도 그 피폭자의 수, 피폭선량 및 잠재적 피폭 가능성에 있어서 방사선피폭을 경제적, 사회적 인자를 고려하여 ALARA를 지향하여야 한다.
- 선량한도(dose limits) : 어떠한 개인도 피폭이 제어되는 행위로부터 위원회가 권고하는 선량한도를 초과해서 피폭되어서는 안된다.

3) 행위, 최적화, 개입

- ICRP는 인간이 방사선을 피폭하는 과정을 사건과 상황들을 하나의 네트워크(network)으로 설정
- 네트워크의 출발점은 방사선원(radiation source)
- 예를 들어 작업장의 경우에는 매우 간단한 경로(예를 들면, 선원 주변에서의 피폭 또는 공기중 방사성 물질의 흡입)로 피폭을 유발할 수 있고 또는 외부 환경의 경우에는 매우 복잡한 (예를 들면, 지표면 누적 → 식물 → 동물 → 육류 섭취) 환경 경로를 거쳐 피폭을 유발.
- 궁극적으로 사람은 한가지 또는 다수의 많은 종류의 방사선원에 의해 피폭.
- 인간의 어떠한 활동은 새로운 선원, 피폭경로 그리고 피폭하는 대상 개인을 만들거나 또는 기존의 인간과 선원간의 네트워크에 변화를 일으켜서 인간의 방사선에 대한 전반적인 피폭을

증가시키게 된다. 이러한 방사선피폭 또는 위험도를 증가시키는 활동을 “행위(practices)”

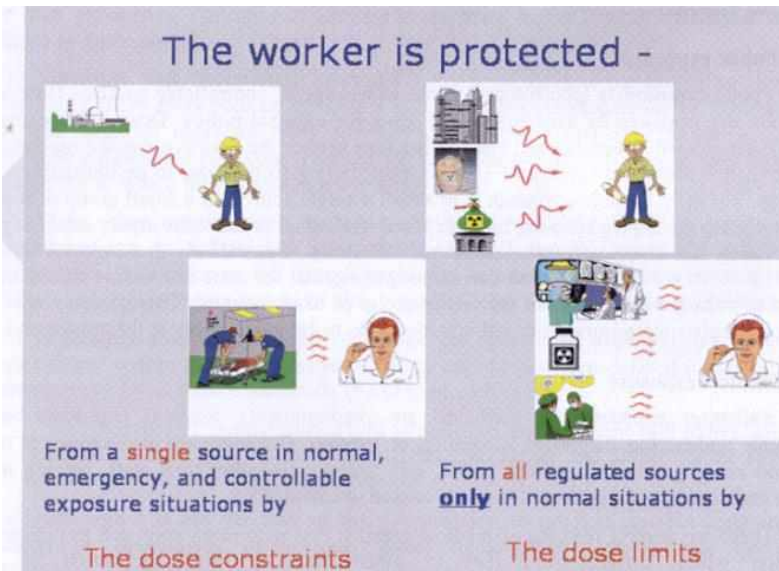
- 방사선방호의 유효성 평가는 개인 선량을 야기하는 선원을 중심으로 볼 수도 있고(선원중심) 또는 모든 관련된 선원으로부터 어떤 개인이 받은 개인선량을 중심으로 볼 수도 있음(개인중심)

- 선량한도 및 선량제약치 (아래 그림 참조)

선량한도(dose limit): 다양한 선원으로 인해 한 개인이 받는 총선량에 적용.

개인중심평가, 소급적 개념이며 반드시 지켜야 하는 강제규범임.

선량제약치(dose constraint): 특정한 하나의 선원으로부터 개인이 받는 선량에 적용. 선원중심평가 계획적개념으로 하나의 선원으로부터 받는 피폭을 최적화하는 기준. 강제규범 아님.

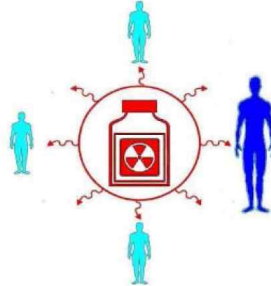
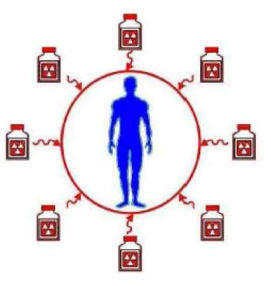


선원중심(선량 제약치/참조준위)	개인중심(선량한도)
개인 종사자를 직무피폭으로부터 방호, 대표인을 일반피폭으로부터 방호	개인 종사자를 직무피폭으로부터 방호, 대표인을 일반피폭으로부터 방호
모든 피폭상황에서 단일 선원으로부터 방호	계획피폭의 모든 규제선원으로부터 방호

예제 ▶ 선량제약치에 대한 설명중 틀린 것을 찾으시오?

- 가) 최적화의 정량적 표현이다.
- 나) 일반대중의 경우 일반적으로 하나의 선원에 대하여 설정한다.
- 다) 선량한도와는 무관한 값이다.
- 라) 경험에 의해 그 값이 결정될 수도 있다.

[풀이] 다. 선량제약치는 선량한도 이내에서 결정된다.

선원중심(선량 제약치/참조준위)	개인중심(선량한도)
개인 종사자를 직무피폭으로부터 방호, 대표인을 일반피폭으로부터 방호	개인 종사자를 직무피폭으로부터 방호, 대표인을 일반피폭으로부터 방호
모든 피폭상황에서 단일 선원으로 부터 방호	계획피폭의 모든 규제선원으로 부터 방호
	

선량제약치 : 한 선원으로 부터 개인선량에 대한 전망적이고 선원중심적 제한. 어떤 선원으로부터 가장 높게 피폭하는 개인에 대한 방호의 기본 수준을 제공하며, 그 선원에 대한 방호최적화에 상한 선량 역할을 한다. 계획피폭상황에만 적용(의료피폭에서는 진단참조준위 적용)

참조준위 : 특정 피폭원에 대해 방호를 최적화할 때 선량에 대한 제약조건으로 설정하는 최대 개인선량 준위. 제어 가능한 비상상황이나 기존피폭상황에서 참조준위는

이를 초과하는 피폭이 일어나게 하는 계획은 적합하지 않은 것으로 판단되며, 그 미만일 경우 방호최적화를 이행해야 하는 선량이나 위험 준위를 의미한다. 비상피폭과 기존피폭상황에 적용

선량한도 정의 : 계획피폭상황에서 초과해서는 안 되는 개인유효선량이나 등가선량 값

□계획상황에서 직무피폭과 일반인피폭에 적용

- 지정 5년에 대해 적용(일반인도 마찬가지로 해석)
- 외부피폭과 내부피폭 합산 적용
- 내부피폭을 섭취 발생년에 적용하나 필요하다면 5년간 평균하여 적용가능
- 오염이나 국부피폭으로 피부가 특별히 높게 피폭한 경우 0.01H_{skin} 추가. 0.01H_{skin}은 오염면적에 관계없이 높이 피폭한 1cm²에 평균
- 간병인, 위안자는 의료피폭으로 간주하여 선량한도 적용 않음 : 선량제약치 적용

참고

무엇이 합리적으로 달성 가능한 최소인가?

방사선시설에 100만원을 투자하여 집단선량을 2 man-Sv 줄일 수 있다고 가정. 이 투자는 100만원 이상의 보건적 가치 - ALARA 만족

1억원을 들여 같은 효과 - 차라리 그 비용을 작업자들의 임금 인상이나 다른 작업환경 개선에 활용하는 것이 나음

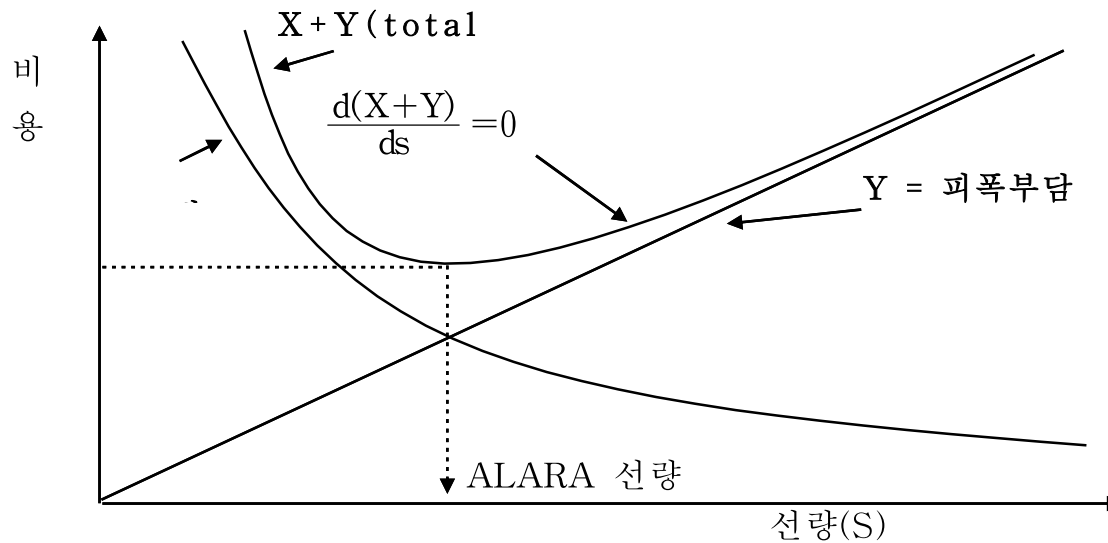
- 따라서 최적화(ALARA; As low as reasonably achievable taking into account of social and economic factors)는 사회적, 경제적, 심리적 효과 및 비용도 고려해야 함.
- 최적화 과정의 정량적으로 수행 - 규제기관이 단위선량 감축당 이득을 금액으로 설정 제시해 주면 도움.
- 이를 피폭의 금전가(monetary value of an unit exposure)라고 한다. 미국의 경우 원자력발전소의 비용 - 이득분석비용으로 1975년 US달러 기준 1,000달러/man-rem를 지정

* 방호최적화에 고려해야 할 방사선 관련 주요 인자

- 집단선량, 방호수단, 개인선량분포, 방호 수단에 수반되는 부수 요인(불쾌감, 안도감 등)

- 무엇이 합리적인 범위인가?

합리적: 대단히 추상적 개념, 사회 가치관 반영



- 최적화 의사결정기법(Decision making methodology) ICRP 37, ICRP 55
- 비용 편익 분석(cost benefit analysis), - 비용 효과분석(cost effectiveness analysis)
- 다속성 효용분석multi attribute utility analysis, 다범주 우위분석multi-criteria outranking analysis

4) 개입(intervention):

일상적인 경우는 아니지만 인간의 활동은 기존의 피폭원에 대해 선원을 제거하거나 피폭경로를 변경시키거나 또는 피폭하는 사람의 수를 감소시켜서 방사선피폭을 감소
(만성 피폭, 사고시에 적용)

- 예: 라돈 농도가 높은 건축물의 경우 지하실 건축을 불허 또는 환기를 강화,
사고시 사고대책반을 긴급히 투입하여 전체적 피폭선량을 줄이는 것

- 개입의 원칙

- (1) 개입의 정당화(justification of intervention) : 어떠한 개입도 해보다는 이로움이 많아야 한다. 따라서 방사선위해의 감소는 개입이 초래할 해로움과 사회적 비용을 반드시 초과해야 한다.
- (2) 개입의 규모와 기간은 선량의 감소에서 개입의 비용을 뺀 순이익이 합리적으로 달성 가능한 한 크게 되어야 한다.

- 회피선량(Averted Dose) : 개입에 의해 절감된 선량

- ICRP는 방사선량 측면만 고려시 개입이 항상 정당화될 수 있을 것으로 보이는 선량절감은 100mSv 수준이며 선량절감이 10 mSv 미만이라면 대체로 개입이 정당화되기 어렵다고 권고

6.2 방사선피폭의 구분

- 피폭원에 의한 구분: 자연방사선원 Vs 인공방사선원에 의한 피폭
- 원인행위 및 피폭집단: 직업상 피폭, 의료상 피폭, 일반인의 피폭 및 사고시 피폭

1) 자연방사선(natural radiation)에 의한 피폭

- 우주에서 오는 우주선
- 지각 또는 공기 중에 존재하는 천연 방사성동위원소로부터 나오는 방사선
- 우주선에 의하여 대기중의 원소가 반응하여 생성된 방사성동위원소로부터의 방사선
- 지구상의 지역에 따라 큰 차이
- 2000년 UNSCEAR 보고서에 의하면 자연방사선에 의한 일반인의 방사선 연간 피폭선량은 평균 2.4 mSv/y(240 mrem/y)로 평가
- 이중 50% 정도(1.15 mSv/year)는 라돈에 의한 영향

[지역별 차이]

- 미국 콜로라도 주의 덴버(Denver)시, 1600 m에 위치하고 있으며, 고도가 100 m 올라감에 따라 우주선에 의한 방사선 피폭 증가분은 0.03 mSv로 평가되므로 지역주민은 연간 0.53 mSv의 피폭의 추가 피폭
- 브라질의 에스피리토산토(Espirito Santo) 지역은 지형상 천연방사성동위원소인 토륨을 다량 함

유한 모나자이트 모래가 많은 지역으로서 이로 인한 추가 피폭이 연간 11.5 mSv

자연방사선원별 세계 평균 유효선량

방사선원		연평균 유효선량 (mSv/y) World Average
우주선	우주선에 의한 직접 피폭	0.28
	중성자	0.10
	우주선에 의해 2차적으로 생성된 방사선	0.01
	Sub-Total	0.39
외부 지질에 의한 피폭	실외 피폭	0.07
	실내 피폭	0.41
	Sub-Total	0.48
흡입에 의한 피폭	우라늄 및 토륨 계열	0.006
	라돈 (^{222}Rn)	1.15
	토론 (^{220}Rn)	0.10
	Sub-Total	1.26
음식물 섭취에 의한 피폭	^{40}K	0.17
	우라늄 및 토륨 계열	0.12
	Sub-Total	0.29
합계		2.4

- 방사선방호에서는 자연방사선에 의한 피폭은 대부분 방호대상으로 삼지 않음.
- 이는 자연 방사선의 위험이 인공방사선의 그것에 비해 낮아서가 아니라 이 피폭을 제어하는 것이 불가능한 경우가 많기 때문: 규제제외(exclusion)

- 비슷하게 방사성농도가 지극히 낮거나 그 위험도가 낮아 규제의 대상에서 제외시키는 것이 오히려 이득이라고 판단하는 경우: 규제면제(exemption) (인공선원에 해당)
 - * 기준: IAEA BSS 115 에 아래 기준을 적용
 - * 개인선량: $10\mu\text{Sv/y}$ 및 집단선량: 1man-Sv 이하의 피폭을 야기할 것으로 평가되는 물질의 농도 또는 양

- 자연방사선도 규제 대상이 될 수 있음. 피폭제어가 가능하거나 유의한 수준으로 인간이 그 농도를 변경한 TENORM(Technical Enhanced Natural Occurred Radioactive Material)의 경우
 - 예) % 자연 라돈의 농도가 높아 주의를 요하는 장소에서의 작업(광산 및 지하 작업등)
 - % 유의한 량의 자연방사성물질 취급 또는 저장(인산비료, 인산석고 등)
 - % 제트기의 승무 (8 km 상공 $3\mu\text{Sv/h}$, ICRP 75)
 - % 우주 비행
 - % 우라늄 채광
 - % 천연 토륨사용 공장 등

- 현재 세계적인 추세는 일부 자연방사선원은, 비록 자연방사선이라 할지라도 그 피폭선량이 유의한 수준(예를 들어 방사능이 높은 특정 국가의 건축용 모래 등)이면 방사선 관리에 포함시키려는 추세
- 인공적인 것도 피폭제어가 비현실적인 경우에는 방호의 대상에서 제외- 지난 20~30년간 행하여진 대기권내 핵실험에 의한 방사능은 인위적인 것이지만 이미 제어할 수 있는 상태가 아니므로 자연방사선에 준하여 취급.
- 원래는 규제대상이나 사용중 그 농도나 수량이 점차 감쇠되어 더 이상 규제가 의미가 없는 상황을 규제해제(Clearance)라 함. 그 기준치는 규제면제와 같음. 면제와 해제의 다른 점은 면제 방사선원은 애초부터 규제대상이 아니었다는 점.

2) 인공방사선에 의한 피폭

가) 직업상 피폭(occupational exposure)

- 당사자가 방사선피폭을 수반하는 직업에 종사하기 때문에 발생하는 피폭
- 직업상 피폭은 대부분 방사선방호목표 및 원칙 하에서 방사선관리조직에 의하여 적절하게 관리되며 개인의 보건안전성이 확보
- 피폭자 집단이 특정한 소규모 집단이다
- 직업상 피폭을 수반하는 행위를 함으로써 발생하는 이득의 일부를 피폭자가 돌려 받는다.

직업상 피폭에서 작업자 및 사업자의 책임.

- 직업상 피폭을 야기하는 방사선 작업 수행시 방사선방어의 일차적인 책임은 방사선작업종사자 자신에게 있음.
- 방사선작업종사자는 자신 및 타 작업자의 안전을 위해 방사선방어 절차에 따라 안전하게 작업을 수행할 의무가 있다.
- 방사선작업종사자를 고용한 사업자는 방사선방어에 관한 조언과 관련규정의 집행을 수행할 방사선안전관리조직 및 인력을 구비하여야 한다.

여기서 사업자가 방사선방어를 위해 구체적으로 준비할 사항은 다음과 같다.

- 방사선안전관리 조직, 인력 및 기능
 - 방사선안전관리프로그램
 - 방사성물질의 사용, 분배, 보관, 운반, 처리에 따른 방사선방어 및 관리활동에 필요한 기록의 유지
 - 방사선작업종사자의 피폭선량 평가
 - 방사선작업자 및 수시출입자의 방사선장해발생 방지를 위한 교육훈련
 - 적절한 방호장비 및 용구의 제공
 - 방사선장해발생 여부를 발견하기 위한 주기적인 건강진단
 - 위험 또는 사고시의 조치사항
-
- 적극적으로 관리되는 직업상 피폭에 대해서 법적으로 “연간 50 mSv를 초과하지 않는 범위내에서 5년간 100 mSv”의 선량한도가 적용
 - 임신이 확인된 여성 방사선작업종사자에 대해서는 잔여 임신기간동안에 그 여성의 하복부 표면에서 연간 2 mSv의 보완적 등가선량 한도를 적용

나) 의료상 피폭(medical exposure)

- 방사선에 의한 진단이나 치료등 의료상의 목적으로 인해 받는 피폭
- 심장맥동기와 같이 피폭을 주는 방사선이 직접적인 의료상 혜택과는 무관한 경우에도 포함
- 의료상 피폭의 주목적

% 질병과 직결된 진단이나 치료

% 의학적 연구

% 정기 건강진단 또는 검사목적의 집단검진

% 작업자에 대한 의학적 검사

- 법의학 또는 보험목적의 검사

- 의료상 피폭의 가장 큰 특징: 선량한도의 적용 대상에서 제외

% 이때 방사선피폭은 관리가 가능하지만 의료상의 목적으로 방사선의 사용이 최선이라는 판단이 이러한 의료상 피폭을 정당화하고 있으며, 피폭으로 인한 모든 이득의 수혜자가 환자 자신이기 때문에 의료상 피폭을 일반 피폭과 분리한다.

- 의료상 피폭에 선량한도가 적용되지 않는다고 해서, 의료 피폭이 방사선방호 체계의 대상이 아니라는 의미는 결코 아님. 즉, 환자의 피폭이 진료목적상 필요로 하는 준위를 초과하지 않도록 하여야 하며 불필요한 피폭을 억제하여야만 한다. 또한 방사선을 사용하지 않고 동일한 진료목적 달성을 달성할 수 있는 가능성에 대해서도 면밀한 검토가 선행되어야 하고 각각의 선택에 대한 비용-이득 분석의 관점에서 피폭이 정당화 될 수 있어야 한다. 즉 정당화와 최적화의 원칙이

적용

- 의료 피폭시 의학수준을 고려한 치료 및 진단의 선량제약치(의료에서는 특별히 이를 참고준위 reference level라 함)를 국제기구에서 권고

3) 일반인 피폭(public exposure)

- 방사선작업종사자가 아닌 일반인이 방사선의 사회적 이용으로 인해 받는 피폭
- 정상 상황에서 일반인의 피폭에 대해서는 피폭원(예를 들어 원자력발전소, 또는 대규모 방사선 조사시설)을 관리(선원 중심).
- 어떤 단일 피폭원으로부터 가장 많이 피폭을 받을 것이라 예상되는 집단을 “결정 집단(또는 임계집단, critical group)”
- 일반인에 대한 피폭 최적화는 결정집단의 피폭을 최적화
- 결정집단의 피폭에 가장 큰 영향을 주는 핵종을 ‘결정 핵종’
- 결정집단에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 방사성핵종의 이동경로를 ‘결정 경로’
- 일반인 피폭한도가 연간 1 mSv의 선량한도를 적용받는 이유
 - % 직업상 피폭과는 위험을 감수하는 수준이 다르다(약 1/10수준).
 - % 일반인은 직업상 피폭과 같은 적극적인 방사선관리 아래 놓여 있지 않다.
 - % 일반인에게는 피폭에 따른 직접적인 이익이 없음. 직업상 피폭의 경우 방사선을 취급하는 일에 종사함에 따라 급여와 같은 형태의 직접적인 이익을 받지만 일반인은 그러하지 않음

% 직업상 피폭은 특정한 소규모 집단을 대상으로 하나 일반인 피폭은 그 대상이 불특정 다수이다. 저선량 피폭에서 문제가 되는 확률적 영향은 개개인의 선량보다 집단전체의 피폭량인 집단선량에 비례할 경우가 많음. 따라서 집단 구성원의 숫자가 많으면 집단선량도 증가.

% 일반인의 구성원에는 어린이도 포함한다. 방사선작업을 하는 작업자들은 모두 법적으로 만 18세 이상의 성인이지만, 일반인 중에는 방사선에 대한 감수성이 높아 방사선방호의 관점에서 보다 더욱 주목해야 할 어린이가 포함.

% 일반인은 피폭에 대한 선택의 자유가 없다. 직업상 피폭은 당사자가 방사선작업에 종사할 것인가 아닌가에 대해 어떤 식으로든 판단하여 선택할 수 있는 자유를 가지고 있으나 일반인은 원칙적으로 선택의 자유가 없음. 달리 말하면 일반인 피폭은 자신의 의사에 반하는 피폭.

% 일반인은 대다수가 자기 자신의 직업과 연관된 위험에도 노출되어 있다. 직업에는 크기는 다르나 모두 위험이 뒤따르며 일반인의 대부분은 자기 자신의 직업에 종사하고 있다. 따라서 일반인 피폭은 각 개인의 직업에 따르는 위험에 방사선 피폭으로 인한 위험이 추가되므로 직업상 피폭과 같은 한도를 설정하는 것은 불합리.

라) 사고시 피폭과 긴급작업시 피폭

- 사고 피폭이라 함은 방사선원의 이상 또는 방사선방호 시스템의 실패로 인하여 작업종사자 및 일반인이 높은 피폭을 받는 경우.
- 사고시의 피폭 정도는 사고의 정도 및 대응체계에 따라 달라지며 여러 선례에서 보듯이 사망

에까지 이름.

- 사고 피폭은 통제되지 않는 것이므로 선량한도는 적용되지 않음.
- 따라서 사고의 가능성이 있는 방사선원이나 행위에 대해서는 평소 사고에 대비한 방사선비상 계획이 수립되어 있어야 하고, 이 계획은 규제당국의 검토 및 승인을 받아야 함. 이 방사선비상계획서에는 예측할 수 있는 모든 비정상 또는 사고 상황에 대한 비상대응 및 수행절차가 기술되어 있어야 한다.
- 사고시 방사선긴급작업시의 선량한도는 우리나라의 경우 교육과학기술부고시 “방사선방호등에 관한 기준” 제14조에 규정.
- 유효선량 0.5 Sv, 피부 등가선량 5 Sv까지 허용. 단 “인명의 구조”를 목적으로 하는 긴급작업 시에는 선량한도를 적용하지 않는다.
- 긴급 작업을 수행하기 위해서는 몇 가지 조건이 법적으로 규정
 - ① 방사선 긴급작업으로 인해 예상되는 피폭을 피할 수 있는 대안이 없거나 현실적으로 불가능한 극히 예외적인 상황에서만 승인되어야 하며
 - ② 긴급작업 시작 전에 원자력관계사업자의 승인을 서면으로 취득하여야 하고
 - ③ 원자력관계사업자는 긴급작업에 참여하는 자의 피폭선량을 최소화하기 위한 방사선방호 조치를 취하여야 한다.

- 또한 작업 승인 전에 작업에 참여하는 자에게

- ① 계획된 긴급작업의 목적,
- ② 작업 수행으로 받게 되는 예상 피폭방사선량, 부수적인 잠재적 위험도, 구체적인 방사선 준위 또는 기타 작업 조건과
- ③ ALARA를 위한 방사선방호 조치에 관한 구체적 지침을 통보하여야 한다.

[예제] 사고의 확대 방지 등 불가피한 개입에 대해 ICRP 60에서 권고하고 있는 선량한도는?

가) 유효선량 200 mSv, 피부등가선량 2 Sv

나) 유효선량 200 mSv, 피부등가선량 5 Sv

다) 유효선량 500 mSv, 피부등가선량 2 Sv

라) 유효선량 500 mSv, 피부등가선량 5 Sv

[풀이] 라. 라번이 ICRP 60의 권고값이다. 단, 인명구조시는 선량한도가 적용하지 아니함.

6.3 선량한도

가) 선량한도의 결정

- ICRP는 방사선방호체계의 일환으로 선량한도를 제시
- 선량한도는 직업상 피폭과 일반인 피폭에만 적용
- ICRP No.60은 피폭선량의 수준을 “수용 가능한(acceptable)”, “감내할 수 있는(tolerable)” 및 “수용 불가능한(unacceptable)”으로 구분.
- 선량한도(dose limit)는 “감내할 수 있는(tolerable)” 및 “수용 불가능한(unacceptable)”의 경계선
- 따라서 선량한도보다 약간 낮은 수치로 계속 피폭하는 것은 받아들일 수 있는 “수용가능한” 피폭이 아님. 단지 “참을 수 있을 뿐”, “수용 가능한” 선량은 선량한도보다 훨씬 낮은 값
- ICRP No. 60은 선량한도를 결정하기 위하여, 18세부터 65세까지 즉, 47년 동안 각각 연간 선량 10, 20, 30 그리고 50 mSv를 피폭하는 경우에 대한 위험도(risk)를 계산
- 이 평가에는 치사암 사망률 뿐만 아니라 유전적 결함 또는 비치사함으로 인한 위험도 포함
- 이와 같은 평가 결과에 근거하여 ICRP는 5년간의 기간에 걸쳐 평균하여 연평균 20 mSv 다만, 동 기간중 어느 단일 일년 동안에는 50 mSv의 선량이 “수용 불가능”한 수준의 경계에 해당하는 바, 이를 선량한도로 결정.
- ICRP No. 60은 일반인에 대해서도 전 수명기간동안 연간 1, 2, 3, 그리고 5 mSv를 피폭하는 경우에 대한 위험도 수준을 계산하고 타 과학적 판단을 추가(라돈을 제외한 자연 백그라운드 방

사선의 변동폭을 감안, 피폭 시점의 중요성 고려)하여 연간 1 mSv로 결정

방사선량 한도 (mSv/yr)

구 분	선 량 한 도	
	방사선작업종사자	일 반 인
유효선량	5년간 100 mSv를 초과하지 않는 범위에서 어느 단일연도에 50 mSv	년간 1 mSv
등가선량(년간)		
눈의 수정체	150 mSv	15 mSv
피부	500 mSv	50 mSv
손, 발	500 mSv	—

임신한 방사선작업종사자의 선량한도

구 분	선량한도	비 고
외 부 피 폭	하복부 표면선량 2 mSv	태아에게는 실제 1 mSv 이하에 해당
내 부 피 폭	(1/20) ALI	태아에는 1 mSv에 해당

중요

ICRP 60 : 연간 선량한도 50 mSv → 20 mSv (5년평균)로 하향조정한 근거

① 히로시마, 나가사키의 원폭피해자 피폭선량의 재평가

→ TD 65(1965년 평가, 미국 네바다사막에서 시행한 핵폭발실험에 적용된 평가방식 및 환경 적용)

→ DS 86 (1986년 평가, 히로시마와 나가사키의 여름 습기의 영향; 습기에 의한 차폐)

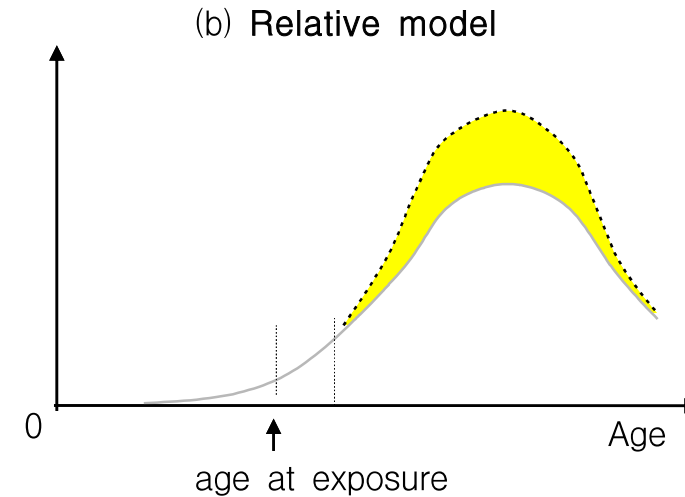
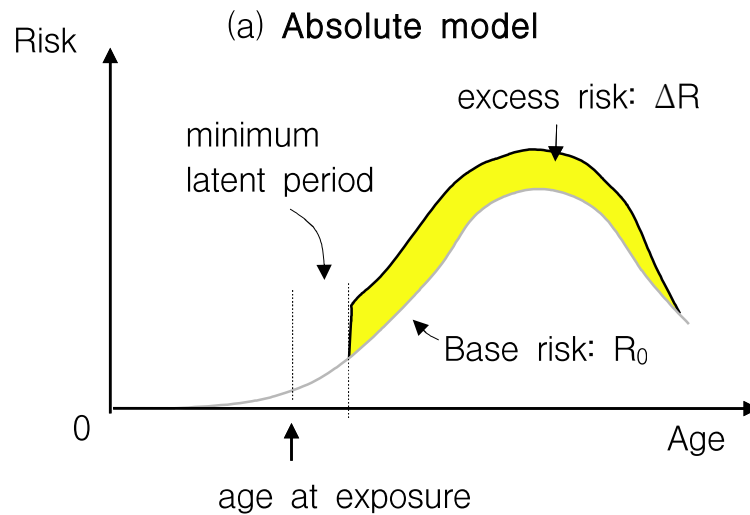
→ DS 86의 평가 결과 일본 원폭 생존자는 이전 평가보다 훨씬 적은 양의 방사선을 피폭

→ 다시 말해 동일한 결과에 대해서는 단위피폭당 위험도 (주로 암사망확률)이 3배 정도 증가

② 역학조사 기간 증가(11년 정도) → 고형암의 절대 발생건수가 초기 예측치를 초과

③ 이들을 근거로 리스크예측을 가산(더하기)모델 → 승산(곱하기)모델

개 념	용 어	
	ICRP No.60('90)	ICRP No.26('77)
선량관계	등가선량(equivalent dose) 유효선량(effective dose) 방사선가중치 W_R 조직가중치 W_T	선량당량 유효선량당량 선질계수 Q 조직가중계수 W_T
영향관계	결정적 영향 비치사암 등을 가중한 risk coefficient	비확률적 영향 치사암에 기반한 risk factor
방사선방호관계	방사선방호체계 행위와 개입 잠재피폭 선량제약치 선량한도의 설정근거 규제면제 여성작업자의 선량한도 폐지 임신부의 선량한도	선량제한체계 - - - - - 여성작업자의 선량한도 -



(a) 절대위험 모델: 초과위험 ΔR 이 선량에 따라 **일정** (b) 상대위험 모델: 초과위험이 기저위험 R_0 에 **비례**

잠깐

확률론적 영향 평가 모델

- 역학연구 대상인 원폭피해 생존자의 획득된 데이터의 경향분석을 통해 아직은 건강한 집단에 대해 미래의 암 증가를 예측하는 과정을 위험의 투사(projection)라 함
- 절대위험 모델(absolute risk model)과 상대위험 모델(relative risk model)로 분류
- 절대위험 모델이란 방사선 피폭으로 인한 암 위험이 선량 크기에 따라 일정량이 되고 이것이 자연 암 위험에 더해진다고 간주하는 것으로서 더하기 모델(additive model)이라고도 부름
- 상대위험 모델은 방사선으로 인한 암 위험이 자연 암 위험에 비례할 것으로 보는 것으로 곱하기 모델(multiplicative model)이라 함.

■ T65D와 DS86

- (Dosimetry System 86; DS86)에서 과거의 평가인 T65D(Tentative 65 Dose)와 상당한 차이가 발생
- 선량값이 차이가 나게된 이유는 두 원폭의 위력에 대한 평가의 오차뿐만 아니라 T65D가 평가된 60년대 초반에 비해 80년대 중반의 전산능력이 현격히 발전함으로써 원폭 방사선의 수송현상을 보다 정확히 계산할 수 있었던 것도 이유
- 가장 큰 차이는 T65D에서 중성자 수송을 네바다 원폭시험장에서 얻은 결과를 직접 비교하여 처리함으로써 8월의 일본 대기와 사막기후인 네바다의 대기 중의 습도의 차이를 간과한 것이다. 대기 중 습도의 차이는 감마선 수송에는 중요하지 않으나 중성자 수송에는 무시 못할 영향을 미쳐 피폭자의 중성자 선량이 상당히 줄어들었다.
- DS86의 선량감소와 더불어 원폭피해생존자의 고령화에 따른 암사망의 증가는 방사선 역학 데이터 베이스에 유의한 변화를 가져옴
- 방사선 피폭 후 시간 경과에 따른 암발생의 예측에서 과거의 절대적 증가(더하기 모델)보다 기저발암에 비례하는 상대적 증가(곱하기 모델)을 선호하게 됨
- 이 변화는 종합적으로 방사선에 의한 암사망 위험계수의 크기를 과거 Sv당 1.25%에서 Sv당 5% 수준으로 약 4배나 증가

피폭 집단 Exposed Population	치사암 Fatal cancer	비치사암 Non-fatal cancer	심각한 유전적영향 Severe hereditary effect	합계 Total
성인작업자 Adult workers	$4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$0.8 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$0.8 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$5.6 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$
전체 인구 Whole Population	$5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$1.3 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$	$7.3 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

ICRP 명목 위험 계수(nominal risk coefficients)

확률론적 영향에 대한 위해조정 명목위험계수(10^{-2}Sv^{-1})

피폭 집단	암		유전영향		계	
	현행	ICRP60	현행	ICRP60	현행	ICRP60
전체 집단	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
성인	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

예제 ▶ ICRP 60의 선량한도가 ICRP26에 비하여 크게 낮아진 이유에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- 가) 원폭생존자의 고령화에 따른 역학 자료의 누적량 증가
- 나) 선량한도 설정개념 수정
- 다) 위험 투사모델에서 더하기 모델(additive model) 채택
- 라) 비치사성 위해의 반영

[풀이] 다. 이전 ICRP 26에서 더하기 모델로 예측한 추가 암발생자보다 더 많은 암환자가 발생하자 ICRP 60에서는 위험 투사모델을 곱하기 모델로 변경하였다.

예제 ▶ 다음의 설명으로 틀린 것은?

- 가) 의료상 피폭에도 선량한도가 적용된다.
- 나) 흡수선량과 커마(Kerma)의 단위는 Gy(J/kg)로 동일하다.
- 다) 커마(Kerma)의 적용이 가능한 방사선으로는 광자와 중성자가 있다.
- 라) 방사선 호르메시스(Hormesis)의 가설이 사실이라면 확률적 영향도 발단선량이 있다.

[풀이] 가. 의료상 피폭에 대해 선량한도를 두지 않음. 방사선피폭에 기인한 이득이 전적으로 환

자 본인에게 있고 선량한도 설정시 의사의 치료 목적 달성에 어려움이 발생할 수 있기 때문이다. 방사선 호르메시스 가설은 저선량 방사선을 받으면 오히려 인체에 유익한 효과가 발생한다는 가설이며 이 것이 사실일 경우 확률적 영향도 발단선량이 설정되어야 한다.

나. 선량한도의 활용

- 실제 선량한도는 다양한 형태로 활용
- 가장 기본적인 한도는 여기서 다룬 유효선량 및 등가선량한도로서 “1차한도” 또는 “기본한도(basic limit)”
- 기본한도를 적용함에 있어서 용이하도록 도출된 “2차한도(secondary limit)”
- 방사선방호 실무에 편리하도록 1차 또는 2차한도로부터 유도된 “유도한도(derived limit)”
- 규제당국이나 운영자가 상위 한도내에서 자체적으로 재설정하는 “인정한도(authorized limit)”
- 2차한도의 예:
 - 내부 피폭방어를 위한 연간섭취한도(Annual Limit of Intake, ALI)
 - 외부피폭관리를 위한 선량당량지수(Dose Equivalent Index)

- 유도한도 :

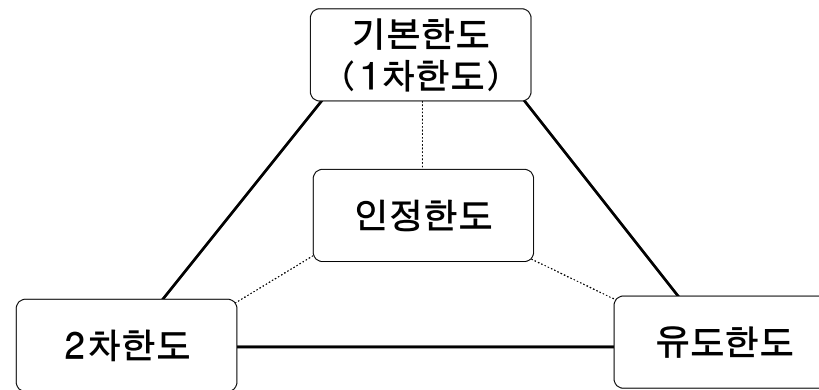
유도공기중농도(Derived Air Concentration,DAC)

유도방출한도(Derived Release Limit)

- 인정한도 : 가령 갑이라는 회사에서 취급하는 방사선작업의 정도에 비해 5년간 선량한도 100 mSv가 불필요하게 높다고 인정하여 사내 안전관리규정로서 이보다 낮은 60 mSv를 자체의 관리 목표로 설정하였다면 이것이 인정한도의 예

- 2차한도나 유도한도는 기본한도에 직결되는 것으로서 동등 또는 증가

- 인정한도는 상위 한도량의 범위내에서 재설정



* 유도공기중농도(DAC)

- 공기중 오염이 있는 곳에서 종사하는 경우 방사선관리를 직접 기본한도 또는 2차한도(ALI)에 연관시켜 평가하는 것은 대단히 번잡
- 유도공기중농도(DAC)는 편의를 위해 2차한도인 ALI로부터 유도된 유도한도
- ALI로부터 DAC를 유도하는 것은 비교적 간단 (앞에서 기수행)
- 한편 불활성기체나 삼중수소 gas와 같은 경우는 ALI 값이 없지만 (화학적으로 안전하여 체내섭취가 되지 않으므로) 오염된 공기중에 체류함으로써 외부방사선 피폭을 받게 됨.
- 따라서 이들 핵종에 대해서도 DAC는 외부피폭을 근거로 하여 산출.
- ALI나 DAC를 적용할 때 섭취핵종의 자핵종(daughter product)이 역시 방사성 핵종이라 하더라도

도 섭취하는 핵종이 모핵종뿐인 경우에는 자핵종에 대한 효과는 별도로 고려하지 않음. 왜냐하면 ALI를 계산할 때 자핵종의 효과도 함께 고려되었기 때문.

- 그러나 모핵종과 자핵종을 동시에 섭취하는 경우에는 자핵종의 영향을 별도로 계산.
- DAC 또는 ALI를 유도하는 과정에서 피폭대상을 “표준인(성인)”으로 간주하였기 때문에 방호의 대상이 표준인과 심하게 차이가 있는 경우에는 ALI와 DAC를 직접 적용할 수 없음. 따라서 유아, 어린이 등과 같은 집단의 구성원에 대해서는 별도의 배려가 필요.

예제 ▶ 어떤 핵종을 10^6 Bq 섭취(ingestion)한 결과 예탁유효선량의 값이 2 mSv로 평가 되었다.

위 핵종의 연간섭취한도(ALI)와 유도공기중농도(DAC)는 얼마인가?

[풀이] $ALI = 10^6 \text{Bq} \times 20/2 = 1 \times 10^7 \text{Bq}$

$$DAC = \frac{ALI}{2400m^3}$$

$$= 1 \times 10^7 \text{ Bq}/2400m^3 = 4.2 \times 10^3 \text{ Bq}/m^3$$

다. 표면오염도

- 방사성 표면오염도는 어떤 의미에서는 방호의 기준이라기보다는 관리의 기준.
- 표면오염도는 그 특성상 기본한도에 직접 관련시키기 어려움.
- 왜냐하면 오염의 성질에 따라 그것이 인체에 피폭을 줄 가능성이 크게 차이나기 때문이다.
- 동일한 밀도의 표면오염이라 할지라도 오염된 물체의 표면특성, 오염자체의 특성(분진, 다른 화합물과 혼합된 형태, 고착성등)에 따라 인체의 수족 또는 의복을 통하여 체내오염을 일으킬 가능성의 정도가 다르며, 표면오염의 부상으로 공기중 오염을 유발하는 정도도 다양.
- 그렇더라도 피폭의 원인이 되는 것은 부인할 수 없는 사실이므로 표면오염도도 적절한 기준을 설정하여 그 기준에 의거하여 관리 - 법적으로는 허용표면오염도.
- 허용표면 오염도는 α 선을 방출하는 핵종이 있는 경우는 4 kBq/m^2 ,
그렇지 않을 경우는 40 kBq/m^2 ($= 4\text{Bq/cm}^2$)

예제

어떤 구역의 표면 오염도를 측정하기 위하여 간접법인 스메어 용지로 100 cm^2 를 문질러 효율 10 %인 β - γ 오염측정기로 계수한 결과 100 cpm이 나왔다. 스메어 용지의 전이율을 20 %로 가정했을 때, 그 구역의 오염도를 Bq/cm^2 로 나타내어라.

$$[\text{풀이}] \quad \frac{\frac{1}{0.2} \cdot \frac{100(\text{cpm})}{0.1}}{100(\text{cm}^2)} = 50(\text{dpm}/\text{cm}^2) = 50\left(\left[\frac{1}{60}\text{Bq}\right]/\text{cm}^2\right) = 0.834 \text{ Bq}/\text{cm}^2$$

예제 ▶ 표면이 평활한 바닥의 ^{60}Co 오염을 100cm^2 을 스메어하여 측정하였더니 순계수율은 650cps 이었다. 표면오염도는 얼마인가?

단, 오염선원의 효율은 0.25, 기기효율은 0.32, 스메어효율은 0.5이다.

$$[\text{풀이}] \quad A_s = (N - N_b)/(\text{기기효율} \times \text{스메어면적} \times \text{스메어효율} \times \text{오염선원효율})$$

$$= 650/(0.32 \times 100 \times 0.5 \times 0.25)$$

$$= 160\text{Bq}/\text{cm}^2$$

예제 ▶ ^{32}P 방사성핵종을 사용하는 과정에서 부주의로 시설 내 넓은 면적이 균일하게 오염되었다. 오염측정기(frisker)를 사용하여 측정하였더니 1860 cpm의 계수값을 얻었다. 바닥의 표면 오염도는 몇 Bq/cm^2 이며 원자력법에서 정하고 있는 허용표면오염도를 초과하였는지 판단하시오? 단, 측정기의 반경은 2.52 cm, 계측효율은 25 %이며 자연계수율은 60 cpm이다.

- 1) $3 \text{ Bq}/\text{cm}^2$, 허용오염도 초과 2) $3 \text{ Bq}/\text{cm}^2$, 허용오염도 초과하지 않음
- 3) $6 \text{ Bq}/\text{cm}^2$, 허용오염도 초과 4) $6 \text{ Bq}/\text{cm}^2$, 허용오염도 초과하지 않음

[풀이]

자연계수율을 뺀 순 방사선계수율은 1800 cpm

$$1800 \text{ cpm} = 30 \text{ cps}$$

$$\text{방사능} = \text{계수값} / \text{측정효율} = 30 \text{ cps} / 0.25 = 120 \text{ dps} = 120 \text{ Bq}$$

$$\text{표면오염측정기의 단면적} = 3.141592 \times 2.52^2 = \text{약 } 20 \text{ cm}^2$$

$$\text{따라서 바닥의 표면오염도} = 120 \text{ Bq} / 20 \text{ cm}^2 = 6 \text{ Bq/cm}^2$$

원자력법 허용표면오염도 4 Bq/cm^2 (베타/감마방사성 핵종에 적용됨) 초과

라. 참고준위

- 참고준위는 한도량은 아님.
- 해당 준위에 따라 사전에 계획된 일정한 절차를 취하기 위하여 설정하는 기준

1) 기록준위

- 선량이나 다른 감시결과의 각각에 대해 일정한 값을 설정하고 그 설정치를 초과하였을 때에만 기록하고 장부를 유지하는 것이 편리

2) 조사준위

- 값을 초과하였을 경우에는 그 원인의 규명 등 필요한 조사를 할 충분한 이유가 있다고 판단되는 정도의 준위

3) 개입준위

- 개입준위는 일반적으로는 도달하지 않을 것으로 판단되는 비교적 높은 준위에 설정. 즉, 개입준위에의 도달은 시설이나 행위가 비정상적임을 시사하는 것이 됨.
- 근본적으로 심각한 비정상상태가 발생하였을 때에 도달할 수 있는 선
- 일반적으로 개입준위를 초과하는 상태가 전개되면 시설의 가동을 중지하거나 해당 작업자의 작업을 불허하고(개인감시 결과가 개입준위 초과시)필요한 검사(피폭자의 경우에는 의학적 검사), 보수등을 수행하여 안전한 상태로 회복된 다음 운전을 재개

6.4 외부피폭의 방호원리

- 피폭 구분: 외부피폭
- 방사선원이 외부에 존재하면 그 주위에는 방사선장(radiation field)이 형성- 이 방사선장에서 작업자가 작업을 할 경우 외부 방사선장에 의해 피폭을 받게 됨
- 외부피폭이 문제가 되려면 우리의 피부나 의복을 뚫을 수 있는 투과력을 가진 방사선만이 관심의 대상
- 이와 달리 내부피폭은 방사성물질이 구강, 비강 등 어떤 경로를 통해서라도 인체내에 흡수되었을 때, 인체내부에 체류하면서 내부 조직에 방사선피폭을 주는 것
- 이 경우 비전리능력이 α 선, β 선 및 중하전입자를 방출하는 방사성핵종이 관심 핵종

가) 외부피폭 방어의 3대 원칙

- 시간: 총 피폭선량은 피폭시간에 비례한다. 따라서 방사선에 피폭되는 시간을 짧게 한다.
- 거리: 방사선장의 세기는 방사선원과 작업자간의 거리의 제곱에 반비례한다. 따라서 가능한 방사선원과 먼 곳에서 작업을 한다.
- 차폐: 방사선원과 작업자 사이에 차폐물 설치가 가능할 경우, 차폐하여 방사선의 세기를 감소시킨다.

* 시간 단축:

- 사전에 면밀한 작업계획을 수립
- 방사선장에 불필요하게 체류하는 시간을 없앴
- 가능할 경우 모의 훈련(mock-up training) 및 반복훈련을 통한 기능 숙달
- 작업대기장소는 가능한 방사선량률이 낮은 장소로 선정

예제 ▶ 다음 중 외부피폭 방어원칙중 시간의 원칙과 관계가 없는 것은?

- ① 면밀한 ALARA 작업계획을 수립한다.
- ② 모의훈련을 강화한다
- ③ 호흡방호장구의 착용시간을 줄인다
- ④ 작업대기장소를 저선량률 지역에 배치한다

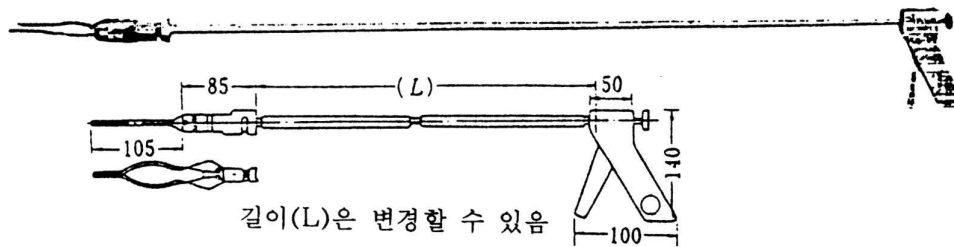
정답) ③

* 거리 - 역자승 감소법칙

- 적절한 공간이 없을 때에는 핀셋, 집게, Tong을 통해 인위적으로 거리를 늘림



각종 핀셋 및 집게



원격조작기구

* 차폐 - 방사선원의 특성에 맞는 차폐체 선택 (앞에서 기술)

6.5 내부피폭의 방어원칙

- 내부피폭의 정의: 방사성 물질을 섭취 또는 흡입하여 신체내에 침착하였을 때 그 물질의 방사선이 물리적으로 감쇠하든가 또는 체외로 누설되어 버릴때까지 체내의 각 기관이 방사선에 피폭되는 것
- 고시적 정의: “내부피폭”이라 함은 섭취 등으로 인하여 체내에 존재하는 방사성핵종이 방출하는 방사선에 의하여 섭취한 사람이 피폭하는 것을 말한다.
- 체내에 일단 들어오면 이것이 제거되는 물리적 메커니즘과 생물학적 메커니즘이 동시 작용
- 물리적 제거 메커니즘: 방사성핵종이 자체 붕괴. 이것을 지배하는 요소는 반감기(Physical half-life, T_p)
- 생물학적 제거 메커니즘은 인체의 신진대사 작용, 체외로 배출되는 것, 이를 지배하는 요소를 전자의 반감기와 구분하여 생물학적 반감기(Biological half-life, T_b)
- 두 반감기의 효과를 합친 것, 유효반감기(Effective half-life, T_{eff})

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda_{eff}t), \text{ 여기서 } \lambda_{eff} = \frac{0.693}{T_{eff}}$$

$$\lambda_e = \lambda_p + \lambda_b$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

$$T_{eff} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b}$$

예제 Cs-137의 물리적반감기는 30.2 년이고, 생물학적반감기는 70일이다. 유효반감기는 얼마인가? 이 경우 인체에 1 kBq의 Cs-137이 흡수되었을 때 1년 경과 후 Cs-137의 방사능은 얼마인가?

[풀이] 유효반감기는 $\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} = \frac{1}{(30.2 \times 365)} + \frac{1}{70}$ 에 의하여,

$$T_{eff} = 69.56 \text{ (일) 이다.}$$

※ 이 문제에서 하나는 70일만에 절반이 줄어들고 또 하나는 30.2년 만에 절반이 줄어들므로 유효반감기는 거의 70일이라는 것을 짐작할 수 있다

가) 체내 이동 경로 및 내부피폭의 특징

a) 내부 피폭을 야기하는 방사성물질은 체내로 침투하는 경로는 다음의 세가지

- 호흡기를 통한 흡입 (inhalation)
- 입 및 소화기를 통한 음식물 및 음료수의 섭취 (ingestion)
- 피부 및 피부상처: 기공 및 상처 부위 혈관을 통한 침투

- 세가지 경로중 통상적으로 문제가 되는 것은 호흡기를 통한 흡입
- 흡입은 주로 작업환경중의 공기가 방사능을 띤 미세입자, 에어로졸 또는 기체 방사성물질로 오염되었을 때 발생
- 공기오염이 존재하는 장소에서 작업할 때는 마스크나 필터가 달린 방독면을 착용
- 삼중수소 H^3 인 경우에는 피부를 통해서도 침투하는데 상처 부위가 없더라도 기공을 통해 침투할 수 있으므로 H^3 핵종을 다룰 때에는 2중 고무장갑 또는 플라스틱 장갑을 끼는 것이 좋음.
- 방사선방호 측면에서는 같은 선량의 피폭일 경우 내부 피폭을 외부 피폭보다 더 위험하다고 일반적으로 판단 그것은 내부 피폭의 다음과 같은 특징 때문

% 외부피폭시 문제가 되지 않았던 α 선, β 선이 비전리도가 커 위험한 피폭원이 됨
 % 차폐의 설정이 불가능하고 거리의 효과가 없어 전 방사능에 모두 피폭됨
 % 제염이 원칙적으로 불가능하고 특별한 핵종은 장기간 체내에 잔류하며 피폭을 야기
 % 인체에 흡수된 양을 결정하기가 어려우므로 피폭 받은 선량을 정확히 측정하기가 어려움
 % 신체 장기와의 친화력에 따라 특정 핵종은 특정장기에 축적되어 해당 장기에 집중적인 피폭을 야기할 수 있음.

- 언급된 특정 장기를 결정장기(critical organ)라고 함.
- 그 중 특히 뼈를 찾아가 침착되는 핵종을 향골성핵종(向骨性核種, bone seeker)라고 함.
- 대표적인 핵종으로는 ^{32}P , ^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{239}Pu 등
- 이들 핵종을 살펴보면 원래 뼈를 구성하는 인이나 칼슘과 핵원료물질인 우라늄과 플루토늄, 방사선장해방어의 주된 핵종인 스트론튬과 세슘 등이 포함되어 있음
- 골친화적인 핵종이 중요시되는 이유는 이들 핵종이 대체적으로 반감기가 길고, 뼈의 성장이 왕성한 부분에 침착되어 골성장을 방해하며, 골수를 피폭하여 조혈기관(Blood forming organs) 장해를 발생시키기 때문



결정 장기 (Critical Organ)의 결정

- 결정장기란 주어진 피폭 조건하에서 인체에 있어서 가장 큰 해를 주는 장기로 다음과 같이 규정하고 있다.

1) 외부 피폭으로 전신이 균일하게 조사될 경우

- 전신이 균등하게 조사된 경우, 최대의 장해는 조혈기관(적색골수)과 생식선의 피폭에서 발생되므로 조혈기관과 생식선은 전신 균등 조사시의 결정장기이다.

2) 불균등 조사의 경우

- 신체가 불균등하게 조사받는 경우에는 (특히, 내부피폭의 경우) 피폭을 받는 신체 각부의 장기중 다음사항을 만족하는 장기가 결정장기이다.

- ① 방사성 물질이 잘 축적되는 그리고 가장 많이 축적하는 장기
- ② 전신의 건강에 불가결한 장기
- ③ 방사선 감수성이 높은 장기

3) 결정장기의 예

- 골(골수) ; ^{32}P , ^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{239}Pu
- 갑상선 ; ^{131}I , ^{211}At
- 적혈구 : ^{59}Fe , ^{56}Fe
- 근육 ; ^{137}Cs (또는 전신이라는 문헌도 있음)
- 전신(체내에 비교적 균등분포); ^{24}Na , ^3H
- 폐 ; ^{210}Po , ^{63}Ni , Th
- 신장 ; ^{238}U
- Co의 경우 Co-58은 전신, Co-60은 전신 및 소화관으로 봄
- 방사성물질이 일단 체내에 흡취(흡입과 섭취)하면 인체의 신진대사작용 및 방사성물질의 물리적 붕괴작용을 통해 시간에 따라 감소는 하지만 장기간 인체내에 잔류하면서 영향을 주는 방사선 피폭원이 됨
- 때로는 의약품을 복용하여 방사성물질의 체외배설을 촉진시킬 수 있지만 배설촉진제의 화학적 해독 때문에 그 사용을 늘 권장하지 않음.
- 맥주를 마시게 하거나 우유 소화능력이 약한 경우 우유를 마시게 하여 방사성물질의 체외배설을 촉진시키기도 하지만 이것도 경구섭취의 경우에만 제한적임.
- 따라서 내부방사선 피폭의 방호수단은 방사성 오염을 방지하는 것이 중심.

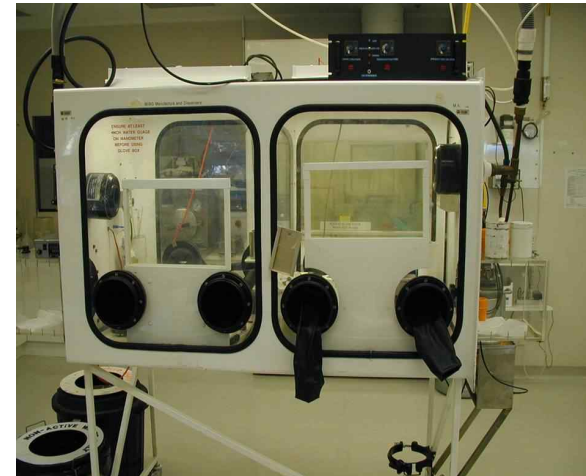
나) 내부피폭 방어의 3대 원칙

- 격리: 방사성물질을 격리하여 외부누출을 방지한다.
- 희석: 작업자가 접촉하는 작업환경의 방사성물질의 농도를 낮게 유지한다.
- 차단: 방사성물질의 인체 침투 경로를 차단한다.

(1) 격리

방사성물질을 작업자의 작업환경과 격리시킴으로써 인체내 흡취를 방지하는 방법

- 밀봉이 가능할 경우 개봉선원을 밀봉.
- 글러브 박스(glove box), 후드(hood) 등을 사용.
- 특수 콘크리트 또는 납으로 된 장치인 핫셀, 납셀내에 방사성물질을 격리하고 원격조작기구로 작업
- 원자력발전소의 경우는 원자로용기(reactor vessel), 1차 폐쇄 계통, 격납건물(containment vessel) 등의 다중 방벽으로 방사성물질의 누출을 방지



(2) 희석

- 개봉선원을 다루는 작업장은 항상 누출과 확산으로 인한 공기오염과 표면오염의 가능성이

있음. 따라서 오염을 방지하거나 오염농도를 최소로 유지하기 위한 2차적인 방어수단으로서 공기정화설비나 배기 및 배수 설비를 설치

- 또한 유리성 표면오염과 공기오염 간에는 밀접한 상관관계를 갖고 있어 호흡에 의한 체내 오염원이 될 뿐만 아니라 오염표면과의 접촉으로 체내 오염이 발생할 수 있으므로 작업장내에서의 표면오염도를 허용기준치 이하로 유지하도록 수시로 제염. 법적인 표면오염의 허용기준치는 α 선을 방출하는 핵종이 있는 경우는 4 kBq/m^2 , 그렇지 않을 경우는 40 kBq/m^2

(3) 차단(경로의 차단)

- 작업환경의 청결한 오염방지가 어려울 경우, 또는 오염방지 노력과 병행하여 방사성물질이 체내에 흡취되는 경로를 차단하는 방법
- 대표적인 예로 공기오염이 있는 지역에서 작업할 때 마스크 또는 방독면을 착용하여 호흡기를 통한 체내 오염을 방지
- 구강을 통한 방사성물질의 침투를 막기위해 음식물 및 음료수 섭취를 금지
- 방사선구역에서 흡연을 금지하며 화장을 고치지 아니함
- 입으로 피펫을 사용할 경우는 안전피펫을 사용
- 피부를 통한 오염을 방지하기 위해 방호복, 방호장갑 등을 착용하며 작업후에는 샤워를 함.
- 피부에 상처가 있을 경우 원칙적으로 작업을 해서는 안되며 부득이한 경우에는 상처부위를 테이핑한후 작업

(4) 기타 - 화학적(의학적) 방법 및 차단법(blocking)

- 사고 등의 원인에 따라 이미 체내에 다량의 방사성 물질이 흡취되었을 경우에는, 적절한 약품을 투여하여 체내의 방사성물질을 외부로 배설
- 킬레이트제(chelating agent) EDTA, TTHA, DTPA 등
- 1987년 브라질 고이오니아시에서 발생한 방사선사고의 경우, Cs^{137} 분말에 의해 야기된 내부 오염 제거제로 prussian blue라는 안료가 효과적임이 밝혀진 바 있음
- 차단법: 불가피하게 오염된 환경에 노출될 경우, 사전에 적절한 물질을 다량 섭취하여 체내 섭취량을 줄이는 방법
- 예를 들어 원자력발전소에서 중대사고가 발생한다면 인근 지역으로 다량의 방사성 요오드가 방출되므로 근 주민들이 방사능을 띄지 않은 정상 요오드를 먼저 섭취하여 인체내 필요한 요오드의 양을 미리 포화시킨다면, 이후에 흡입하는 방사성 요오드가 체내에 흡입되는 것을 최대한 방지
- 요오드화칼륨(KI) 정제가 비치

다. 내부피폭의 평가

- 내부피폭의 평가는 i) 체외에서 계측기로 직접 측정하는 체외계측법(전신계수법), ii) 생체시료를 분석하여 간접적으로 체내피폭량을 평가하는 생체시료 분석법(Bioassay), iii) 공기오염도와 체류시간을 측정하여 간접적으로 평가하는 계산법이 있다.

(1) 전신계수법(체외계측법)

- 전신계수기(Whole Body Counter) 등을 사용하여 체내의 방사선을 체외에서 직접 측정하는 방법
- 체내에 침착한 방사성물질이 방출하는 방사선을 검출기를 통하여 검출
- 이 경우 인체의 차폐효과 때문에 투과력이 강한 감마선 핵종만을 측정할 수 있음.
- 알파선을 방출하는 핵종은 측정이 불가능하며, 베타선의 경우 ^{90}Sr - ^{90}Y 이나 ^{32}P 와 같이 고에너지 베타선이며 제동복사선으로 변환되는 효율이 높은 핵종만 검출할 수 있음
- 이 목적으로 사용되는 검출장치를 전신계수기(whole body counter), 혹은 인체 계수기(Human counter)라 하며 NaI(Tl) 섬광체, 플라스틱 섬광체 또는 반도체검출기 등이 사용
- 체내에 침착한 방사능을 직접 계측하여 체내 흡취량을 환산할 수 있어서 생체분석법에 비하여 간단하고 정확도도 뛰어나며 핵종의 침착 부위도 어느 정도 찾을 수 있는 장점.
- 계측상 주의점: 피검자의 체외오염과 체내오염을 구별하기 어렵기 때문에 측정 전에 샤워 등으로 체외오염을 제거하는 것이 필요. 또한 장치가 고가이며 정확한 교정이 필요.

(2) 생체시료분석법(Bioassay법)

- 인체의 배설물을 통한 간접 평가
- 체내에서 배출되는 대·소변 등의 배설물과 호흡 등으로 방출하는 공기를 채취하여 이들속에 포함된 방사능을 측정한 후 흡취량을 간접적으로 추정
- 알파선, 베타선, 감마선 등의 어떤 방사선에도 적용이 가능하며, 일반적으로 실험실 수준의 규모에서 소변, 대변의 시료를 전처리하여 저백그라운드형의 검출기로 방사능을 측정하고 그 결과로부터 흡취량을 추정
- 흡취된 방사성핵종이 명확하고 체내에서의 거동을 잘 알고 있을 때 특히 유용
- 단점으로, 복잡한 시료처리·분석 절차를 필요로 하고 정확한 침작위치를 알 수 없으며 개인에 따른 배설 신진대사의 편차가 심하므로 추정치의 오차가 많음.

(3) 섭취량으로부터 평가(계산법)

- 대부분 공기오염도(DAC로 나타냄)와 체류시간을 통한 계산
- 공기중 방사성핵종의 농도를 공기시료 채집기(air sampler) 및 공기감시기(air monitor)로 측정
- 섭취량 평가는 관련 변수도 많을 뿐만 아니라 정확도도 떨어짐.
- 연간섭취한도(ALI)의 1/10을 넘을 경우에는, 체외 계측법이나 간접생체분석법을 사용하는 것이 바람직하다.

예제 ▶ 체내피폭방어 방법으로 틀린 것은?

- ① 환경관리 ② 작업숙달 ③ 오염방지 ④ 차폐물 선택

정답) ④

예제 ▶ 다음중 체내섭취 방지 방법으로 틀린 것은?

- ① 피펫 등은 반드시 입으로 조작한다.
② 금연 및 금식을 한다.
③ 파손의 우려가 있는 용기는 후드 등에 보관한다.
④ 분말상의 핵종은 글로브박스 내에서 작업을 한다.

정답) ①

7. 방사선 안전관리

7.1. 선원의 안전관리

1) 밀봉선원과 엑스선발생장치의 취급

- ① 선원 소재 파악 → 분실·도난시 → 통보, 보고
- ② 외부피폭 ALARA → 거리, 시간, 차폐
- ③ 안전수칙, 주의사항 게시, 울타리, 시건장치, 방사능표지
- ④ 3000 Ci이상의 밀봉선원 : 자동표시판, 인터록장치
- ⑤ 선원 취급 : 적절한 도구 사용
- ⑥ 작업전 계획수립, 모의훈련, 반복훈련
- ⑦ 개인피폭선량계 착용, 공간방사선량을 측정
- ⑧ 한 사람의 책임자 선정 : 지시 및 감독
- ⑨ 사용일지/점검일지 기록

2) 고에너지의 가속기 취급시 주의하여야 할 사항

- ① 표적(target), 가속관 등에서 발생하는 방사선
- ② 시설내에서 발생하는 공기오염

③ 잔류방사선

④ 조사시료

3) 비밀봉선원(개봉선원)의 취급 방법

① 체내섭취 방지 - 경로차단(소화기, 호흡기, 피부·상처)

② 인체표면오염의 방지 - barrier cream, 손톱깎기, 피부외상시 작업 X, 고무장갑, 도구 사용, 오염된 손 스위치 조작 X, 손씻기, 샤워

③ 시설오염 방지 - 오염제거 용이한 재료(평활, 침투 X)사용, 물품무단방출 X, 작업자 이동 X, 물품구분 (오염/비오염), 오염점검, 제염

4) 방사성오염의 제거원칙

① 계측기 : 오염의 규모(위치, 오염정도, 범위) 확인

② 조기제염 실시(고착화/오염확대 방지)

③ 오염 확대 방지

④ 폐기물 처리방안 강구

⑤ 가능한 습식법

⑥ 평상시 제염제/장비 구비

⑦ 경제성 평가

⑧ 제염후 확인

⑨ 원인 파악 → 재발방지 대책수립 → 교육

7.2 방사선사고와 대책

1) 방사선사고의 정의 * 사고 (accident : 이상사태)

① 이상의 정도, 영향의 크기등에 따라 어느 수준 이상의 사태

② IAEA의 정의 : 생명, 건강 및 재산에 직접 또는 간접적으로 피해를 초래하는 것과 같이 방사선원의 제어실패에 의한 이상사태

③ 국제방사선방어위원회(ICRP)의 정의

- radiation incident(사건) : 잠재적 또는 실제피폭이 해당작업의 정상수준을 초과한 상황

- accident(사고) : 잠재적 또는 실제피폭이 선량한도를 초과한 상황

④ 일반적으로 방사선사고의 범주에 속하는 것 : “피오누일화도분”

- 피폭, 오염, 선원의 누설 • 일탈, 화재, 선원의 도난 • 분실

2). 방사선사고 발생시 조치하여야 할 기본원칙

(1) 인체안전보호의 원칙 - 인명/신체 안전 제 1의 원칙

(2) 통보의 원칙

가장 가까이 있는 자 → 방사선안전관리자 → 시설관리자(6 하 원칙)

(3) 오염확대 방지의 원칙 : 오염확산 X

(4) 과대평가의 원칙 : 과소평가 X

3). 사고시 조치사항과 대책 및 취급시 주의사항

(1) 사고시 조치사항

(예) “방사성 핵종이 엇질러졌을 경우 조치사항을 써라”

“방사선시설이 지진으로 인하여 밀봉선원이 이탈하였다. 방사선안전관리자로서 조치할 사항을 써라”

(풀이) 방사선사고 발생시 조치하여야 할 기본원칙

+

방사성오염제거의 원칙과 비밀봉 및 밀봉선원의 취급

(2) 화재대책

- ① 화재에 의한 비산성 확인
- ② 화재의 진압제(약품, 물)에 의한 이상 유무확인
- ③ 보관시 : 인화성물질/발화성물질 X
- ④ 비상 연락망/주기적 소방훈련
- ⑤ 시설의 설계시 : 불연재료/내화구조

⑥ 소화기 비치

(3) 취급시 주의사항

1) α 선원, 저에너지 β 선원

① 비밀봉선원의 취급방법과 동일함.

② α 선의 경우

- α 선원 → 얇은 유리용기의 경우 : 파손

- (α , n) 반응에 의한 중성자 발생

③ 저에너지 β 선원의 경우

- 저에너지 β 선용 서베이미터 사용

- 피부 노출 X (방호복, 장갑, 양말, 신발)

- 동위원소교환반응 방지

- C-H 화합물(유기화합물)에 의한 오염 :적합한 제염법

2) 인체투여/동물실험

① 움직이는 방사선원

② 사체, 배설물 → 방사성폐기물

③ 의복, 시트, 기타 → 오염물

④ 동물에게 할퀴거나 물리지 않도록 주의해야 함.

7.3 방사선 감시 및 폐기물 처리

7.3.1, 인간, 지역, 환경 방사선 모니터링

가. 감시란 ?

1) 개인 감시: 1차 및 2차 한도

o 외부피폭감시 : 심부선량당량, 표층선량당량

- 기본(법적)선량계 : TLD, Film Badge
- 보조선량계 : 직독식 포켓선량계, 포켓경보선량계

o 내부피폭감시 : ALI

- bioassay법 (생체시료분석법)
- 전신계수법 (WBC: Whole Body Counter)
- 공기오염도와 체류시간의 계산에 의한 방법

※ 개인피폭선량을 측정하는 이유

- ① 개인 선량한도 감시
- ② 작업환경의 정상적인 상태 확인
- ③ 작업방법/시설개선 활용
- ④ 법적 기록/보존

2) 환경 감시 : 유도한도 - 외부피폭감시 : 유도방출한도

- 내부피폭감시 : DAC

① 공간방사선량을 측정

② 표면오염도 측정

③ 공기중 및 수중 오염의 측정

※ 참고준위(reference level) : 기록준위, 조사준위, 개입준위

나. 작업환경 감시

1) 방사선 및 방사성물질의 농도의 측정

2) 외부 방사선 감시

* 공간선량을 감시법 : 서베이메타

(1) 방사선 준위가 1.0 mR/h 이상되리라 예상되는 모든 접근 가능한 구역을 감시한다.

(2) ALARA 목적을 달성하기 위해, 주당 40시간 이상 작업하는 구역은 0.5 mR/h 이하로 유지될 수 있도록 하여야한다.

(3) 선원 보관 장소 근처의 모든 옆방을 감시한다. 특히, 선원 보관을 위해 납 차폐체를 사용하는 경우에는 더욱 그렇다.

- 또한 보관 장소 위 및 아래의 방들도 감시한다.

(4) 고착오염 감시를 위해, 지형적으로 스메어하기가 어려운 작업실 근처 모든 표면 (천장

포함)을 감시한다.

(5) 표면오염 감시와 공간선량을 감시가 종료되면 반드시 모든 결과의 기록을 유지하고, 감시 결과를 해당 실험실의 사용자에게 통보한다.

※ 서베이메타

① 감도가 좋은 순서 : 섬광계수관식 > GM관식 > 전리함식

② 에너지의존성이 좋은 순서 : 전리함식 > GM관식 > 섬광계수관식

3) 공기 오염 감시

① 공기모니터(air monitor) 사용하는 방법

② 공기시료 채집기(air sampler)로 시료를 채집하여 방사능 측정하는 방법

- 입자성 기체 : 여과지(필터)에 의한 여과포집법
- 휘발성 기체(^{131}I) : 활성탄필터에 의한 고체포집법
- 불활성 기체 : 포집용기, 포집전리함에 의한 직접포집법
- 수증기(3H) : 콜드트랩에 의한 냉각응축포집법
- 수증기, 안개 (3H, 14C) : 버블러에 의한 액체포집법

※ Isokinetic sampling : Duct 유속 = sampler 유속

→ 채취되는 공기 시료속의 입자의 크기 분포가 duct 속의 입자의 크기 분포와 같도록 유지하기 위함.

예제 1) 굴뚝의 직경이 5 ft이고, 굴뚝내의 유속은 43,000 cfm이다. 시료채취관의 직경이 0.325 in인 경우, isokinetic 조건을 유지하기 위해서는 시료 유속을 얼마로 하여야 하는가 ?

답) $V1/V2 = (D1/D2)^2$

$$43,000 \text{ cfm} \times (0.325 \text{ in})^2 = V2 \times (5 \text{ ft} \times 12 \text{ in/ft})^2$$

$$V2 = 1.26 \text{ cfm}$$

예제 다음 중 대표적 기체와 그 포집방법이 잘못 짝지어진 것은?

가) 입자성기체 - 여과지를 이용 나) 삼중수소 - 물버블러

다) 방사성옥소 - 직접포집법 라) 불활성기체 - 포집용기 또는 포집 전리함.

4) 표면 오염 감시

▷ 표면오염 감시법

(1) 먼저 일반 접근 구역을 스메어한다.

(2) 그리고, 선원 보관 장소 및 사용 지역을 스메어한다.

(3) 이는 예상되는 오염이 낮은 곳에서 높은 곳으로 이동하면서 해야함을 의미한다.

- (4) 만약 결과가 예상과 다르면 오염의 확산 가능성을 검토하여야 한다.
- (5) 이미 오염된 구역으로 확인되어 지정된 구역은 특별한 경우가 아닌 때에는 스메어할 필요가 없다.
- (6) 주요 서베이 지점 :
구 바닥, 입구문 손잡이, 작업구역 또는 후드 전면 바닥, 실험실 배수구 주변, 배기구 덕트 주변, 작업구역 주변 서랍 및 캐비닛 손잡이
- (7) 저에너지 베타 (H-3, C-14) 및 pure 감마선 방출체 다루는 실험실은 계측에 특별 주의

▷ 표면오염 감시 종류

- ① 고착성 오염 : 서베이법(probing method), 직접법
 - 갈라진 틈의 오염 측정
 - 백그라운드가 높은 지역은 불가
- ② 유리성오염 : 스메어법(smear method), 간접법
 - 백그라운드가 높은 지역도 가능
 - 지름이 2 내지 2.5 cm의 원형용지에 의한 문지름시험
 - 문지름 용지(smear paper)에 전이된 방사성물질을 측정
 - 특징 : 개인오차 大, 전이율 변화 大

- 방사성포장물의 표면오염도 측정

- 5) 피부 오염 감시
- 6) 방출 방사성물질 감시
- 7) 개인 감시
- 8) 시설주변 환경감시
 - o 결정핵종, 결정경로, 결정그룹
- 9) 긴급시 환경감시

7.3.4 방사성폐기물의 처리, 처분

가. 방사성폐기물의 관리목적

- ① 환경오염의 방지
- ② 주변주민의 방사선피폭 저감
- ③ 방사성폐기물의 격리, 저장

나. 방사성폐기물의 정의

- (1) 방사성폐기물 : 방사성물질 또는 그에 의하여 오염된 것으로서 폐기의 대상이 되는 물질
(사용후핵연료를 포함한다)
- (2) 방사성폐기물 분류 : 고준위방사성폐기물, 중·저준위방사성폐기물

방사능농도(비방사능)	열발생률
반감기 20년 이상의 알파선을 방출하는 핵종 4,000 Bq/g	2 kW/m ³

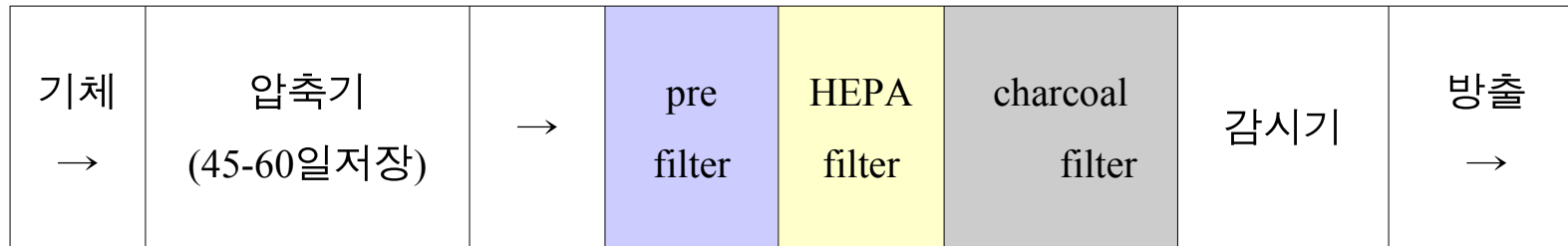
(3) 처분과 처리

- ① 처분(disposal) : 회수할 의도없이 영구적으로 방사성폐기물을 방출 또는 방치해 두는 것
- ② 처리(treatment) : 처분을 위하여 가해지는 수단

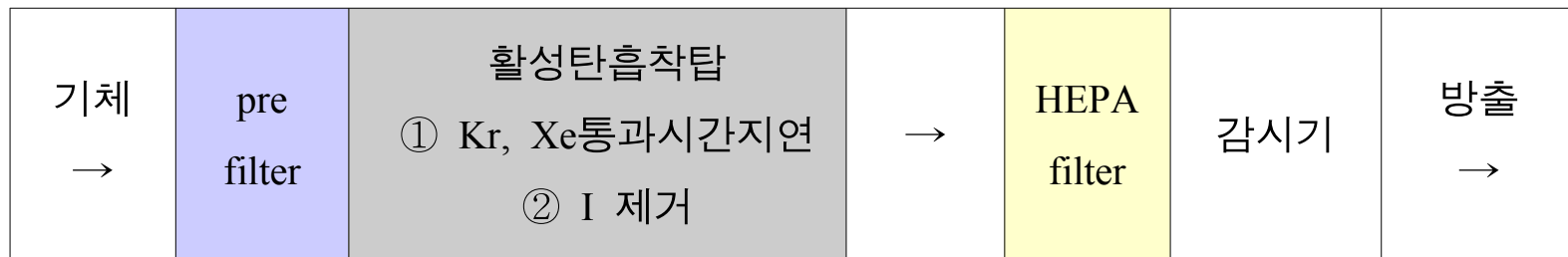
다. 방사성폐기물의 처리 방법

(1) 기체폐기물 처리 방법

① gas decay tank 저장에 의한 방법



② 활성탄 지연 계통에 의한 방법



(2) 액체폐기물의 처리방법

① 희석법 : 저준위의 방사성폐액 + 대량의 물(희석수)

수도원, 농수산물에 직접 관계있는 수역 : 방류 X

② 농축법 : 응집침전법, 이온교환법, 증발처리법

→ 증발처리법 : 감용효과 ↑, 제염계수 大

시설비/운전경비 高

승화성물질(131I)의 경우 제염효율 ↓

(3) 고체폐기물의 처리 - 부피감용

- ① 소각처리 : 가연성폐기물
- ② 압축처리 : 압축기
- ③ 해체처리

(4) 방사성폐기물의 고화처리

- ① 고화처리 : 증발농축폐액/응집침전 슬러지 + 고화재충전
- ② 고화처리방법 : 시멘트화, 아스팔트화, 유리화, 폴리머화
- ③ 고화재가 갖추어야 할 조건
 - 물의 침투성이 낮을 것
 - 열 전도도가 높을 것
 - 화학적으로 안정할 것
 - 방사선에 저항력이 있을 것
 - 드럼 재질에 부식의 원인이 되지 않을 것
 - 용기가 적을 것
 - 가격이 저렴할 것

라. 방사성폐기물의 처분

(1) 영구처분 : “방사성물질을 지층에 천층처분 또는 심층처분(동굴처분을 포함한다.)의 방법으로 생활권 밖으로 영구히 격리시키는 것”

(2) 방사성폐기물의 처분방법 : 육지처분, 해양처분

① 중·저준위방사성폐기물의 처분방법

- 천층매몰처분, 동굴처분, 공학적 시설내 처분, 해양투기(X)

② 고준위방사성폐기물의 처분방법

- 지층처분, 심해저 퇴적층처분

[문제 - 핵심확인용]

1. 유효반감기(T_e)를 물리적 붕괴상수(λ_p)와 생물학적 제거계수(λ_b)로 바르게 표시한 것은?

1. $T_e = \frac{\lambda_p + \lambda_b}{\lambda_p \times \lambda_b}$ 2. $T_e = \frac{\lambda_p \lambda_b}{\lambda_p + \lambda_b}$ 3. $T_e = \frac{0.693}{\lambda_p + \lambda_b}$ 4. $T_e = \frac{\lambda_p + \lambda_b}{0.693}$

답) 3

(해설)

$$\begin{aligned} \text{이 문제는 } T_e &= \frac{T_p \times T_b}{T_p + T_b} = \frac{\frac{0.693}{\lambda_p} \times \frac{0.693}{\lambda_b}}{\frac{0.693}{\lambda_p} + \frac{0.693}{\lambda_b}} = \frac{\frac{(0.693)^2}{\lambda_p \lambda_b}}{\frac{0.693\lambda_p + 0.693\lambda_b}{\lambda_p \lambda_b}} \\ &= \frac{(0.693)^2}{0.693\lambda_p + 0.693\lambda_b} = \frac{0.693}{\lambda_p + \lambda_b} \end{aligned}$$

를 계산해야 하는 시간이 소요되는 계산 문제로 보이나

$\lambda_e = \lambda_p + \lambda_b$ 가 기본식이라는 것만 알고 있으면

$$\frac{0.693}{T_e} = \lambda_p + \lambda_b, \text{ 즉 } T_e = \frac{0.693}{\lambda_p + \lambda_b} \text{ 으로 간단히 암산도 가능}$$

2. 다음중 ICRP 간행물 103 권고에서 조직가중치가 가장 작은 것은?

1. 생식선 2. 유방 3. 폐, 4. 기타조직

답) 1

(해설)

- 생식선의 조직가중치가 ICRP 103에서는 기존의 0.20에서 0.08로 감소하였다
- 유방의 조직가중치는 ICRP 103에서 기존의 0.05에서 0.12로 증가하였다.
- 폐의 가중치는 0.12로 변경이 없다.
- 기타조직은 심장 등을 새롭게 포함하며 0.05에서 0.12로 증가하였다

3. 어떤 핵종의 연간섭취한도(ALI)가 2.4×10^6 Bq이다. 동 핵종의 공기오염농도가 4000 Bq/m^3 인 작업환경에서 1년 동안 주당 2시간씩 25주 작업 시 작업자가 받게되는 연간 내부피폭선량은?

1. 1mSv 2. 2mSv 3. 2.4mSv 4. 3.4 mSv

정답: 2

문제에 따라 $\text{DAC} = 2.4 \times 10^6 \text{ Bq} / 2400 = 1000 \text{ Bq/m}^3$. 따라서 4DAC 농도의 작업장에서 주당 2시간 25주 근무하였으므로 200 DAC-hours에 해당하며 2000 DAC가 20mSv이므로 2 mSv에 해당

4. 다음중 잘못 짝지어 진 것은?

1. 구경꾼 효과 - 단위 선량당 위해도 증가
2. 오버킬링(Overkilling) - 생물학적상대효과비(RBE) 증가
3. 적응반응(Adaptive Response) - 반치사선량(LD₅₀) 증가
4. 확률적 영향 - 고형암

(답) 2.

(해설) 오버킬링(Overkilling)의 경우 피폭선량의 낭비를 불러오므로 단위선량당 위해도는 감소하기 때문에 RBE가 감소: 대표적으로 에너지에 따른 중성자의 방사선가중치

5. ^{60}Co 에서 방출되는 감마선을 납으로 차폐하려고 한다. ^{60}Co 이 1GBq일 때와 10 GBq일 때 반가층의 비는?

1. 1:1 2. $1:\sqrt{10}$ 3. 1:10 4. $1:\ln 10$

(해설): 반가층은 방사선의 에너지와 차폐물질에 의해서만 결정되므로 동일한 감마선을 내는 코발트에 동일한 납인 경우 반가층의 비는 1:1이다. 즉 1 GBq일 때 방사선량이 2 mR/h, 10 GBq일 때 20 mR/h일지라도 동일한 반가층을 지나 1mR/h 및 10mR/h로 절반으로 감소하므로 반가층은 같다

6. ICRP 간행물 103에서 분류하는 세 유형의 피폭 상황(exposure situations)이 아닌 것은?

1. 계획 피폭상황(planned exposure situation)
2. 비상 피폭상황(emergency exposure situation)
3. 기존 피폭상황(existing exposure situation)
4. 잠재 피폭 상황(potential exposure situation)

(답) 4. 잠재피폭은 계획피폭상황의 한 범주이다.

7. 중수형 원자력발전소에서 호흡방호장구에 호스에 각얼음(ice cube)통을 연결시켰다. 이는 어떤 방사성기체를 회수하기 위함인가?

1. 제논의 동위원소 2. 크립톤의 동위원소, 3. 방사성옥소, 4. 삼중수소

(해설) 제논 크립톤은 감쇄 및 활성탄 흡착법을 통한 지연법을 이용하며 방사성옥소는 활성탄필터를 주로 사용한다. 삼중수소는 얼음 등을 이용한 Cold trap으로 회수한다.

8. ^{137}Cs 의 γ 선원의 차폐를 위해 Pb를 사용하고자 한다. 이 때 반가층은 0.56cm 이다. 납의 1/10가층을 구하시오.

(해설) Pb의 선형감쇠계수는 μ 는

$$\mu = \frac{0.693}{t_{1/2}} \text{ 에서 } \mu = \frac{0.693}{0.56\text{cm}} = 1.238\text{cm}^{-1}$$

따라서 납의 1/10가층 $t_{1/10}$ 은

$$t_{1/10} = \frac{2.303}{\mu} \text{ 에서 } t_{1/10} = \frac{2.303}{1.238\text{cm}^{-1}} = 1.86\text{cm}$$

9. 전신에 5Gy의 급성피폭을 받았을 때 몸무게가 70kg인 표준인의 체온 상승은 얼마이겠는가?
단 표준인의 신체조직의 비열은 물과 같다고 가정한다

1cal는 물 1g을 1°C 높이는데 필요한 열량으로 4.2 J에 해당한다.

$$\text{따라서 흡수선량 } 5 \text{ Gy} = 5 \text{ J/kg} = \frac{5\text{J} \cdot (1\text{cal}/4.2\text{J})}{1\text{kg} \cdot (1000\text{g}/\text{kg})} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ cal/g}$$

온도 상승(T)은 cal의 정의에 따라 $T = 1.2 \times 10^{-3} \text{ cal/g} \times \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{cal/g}} = 1.2 \times 10^{-3} ^{\circ}\text{C}$

[참고: 전신피폭이므로 표준인, 체중 등은 계산에 관계없는 함정에 해당한다.]

10. 200 Bq의 어떤 방사성핵종(물리적반감기 $T_p = 6 \text{ hour}$)이 체내에 들어와서 24시간이 지난후 체내에 잔류하고 있는 방사능을 측정하였더니 2 Bq이 측정되었다. 이 핵종의 생물학적 반감기는?

1. 8.48 시간 2. 8.58 시간 3. 9.06 시간 4. 9.29 시간

정답: 3.

24시간 지난후 전체 유효반감기 T_{eff} 를 구할 수 있다.

$$A = A_0 \exp (-\lambda_{\text{eff}} \cdot t)$$

$$A/A_0 = 1/100 = \exp (-\lambda_{\text{eff}} \cdot t) = \exp [(-0.693/T_{\text{eff}}) \times 24]$$

$$\text{양변에 } \ln \text{를 취하면 } \ln (1/100) = [(-0.693/T_{\text{eff}}) \times 24]$$

$$T_{\text{eff}} = - \frac{0.693 \times 24}{\ln \left(\frac{1}{100} \right)} \cong 3.61 (\text{hour})$$

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b} = \frac{6T_b}{T_b + 6} = 3.61$$

따라서 $T_b = 9.06 \text{ hour}$

11. 다음중 방사선피폭의 확률적 영향과 관계가 없는 것은?

1. 모든 합리적인 조치를 통해 영향을 감소시켜야 한다
2. 문턱선량이 없음을 가정한다
3. 선량한도의 설정으로 방지가 불가능하다.
4. 영향의 심각도는 선량에 비례한다.

(해설)

1. ICRP 60 paragraph 100; to ensure all reasonable steps are taken to reduce the induction of stochastic effect
2. LNT Model
3. 선량한도로는 확률적 영향을 방지할 수 없다.
4. 확률적 영향에서는 영향의 심각도가 선량에 비례하는 것이 아니라 영향의 발생확률이 선량에 비례한다.

12. 다음중 그 값이 가장 작은 것은?

1. 포화계수(Saturation Factor)
2. 선량감소계수(Dose Reduction Factor)

3. 산소증강비(Oxygen Enhancement Ratio)

4. 축적인자 (Build-up Factor)

(답)1

(해설) $(1-e^{-\lambda t})$ 이므로 0보다 크거나 같고 1보다 작거나 같다.

13. 각각 3 Ci 인 ^{60}Co 와 ^{24}Na 이 혼합된 점선원(point source)에서 3 m 거리에서의 선량률은 얼마인가? 단 ^{60}Co 과 ^{24}Na 의 비감마상수(Specific Gamma Constant)는 각각 $1.3 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$, $1.84 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$ 이다.

1. 약 0.88 R/h 2. 약 1.05 R/h 3. 약 1.27 R/h 4. 약 1.54 R/h

(정답) 3m 떨어진 곳에서의 선량률은 각 핵종으로부터 기인하는 선량률의 합이므로

$$\begin{aligned}\dot{X}(3\text{m}) &= \dot{X}(\text{Co-60}) + \dot{X}(\text{Na-24}) \\ &= (3 \text{ Ci})(1.3 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}) / (3.0 \text{ m})^2 + (3 \text{ Ci})(1.84 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}) / (3.0 \text{ m})^2 \\ &= 0.433 \text{ R/h} + 0.613 \text{ R/h} = 1.046 \text{ R/h}\end{aligned}$$

14. 다음의 설명으로 옳지 않은 것은?

1. 방사선 호르메시스(Hormesis)가 존재할 경우 확률적 영향도 발단선량이 있다
2. 선량및선량율효과인자(DDREF)의 값이 클 경우 방사선에 대한 위해계수 값은 증가한다
3. 인위적으로 증가한 자연방사선으로 인한 피폭을 제어하는 것을 개입(Intervention)이라고 하며

선량한도가 없다

4. 연간섭취한도(ALI)는 방사성물질의 화학적 형태에 따라 다르다.

(정답) 2

(해설) DDREF는 $\frac{\text{고선량에서의 영향}}{\text{저선량에서의 영향}}$ 이고 밝혀진 고선량의 영향을 외삽하기 때문에 DDREF가 커지면 저선량에서의 방사선 위해 계수가 작아진다.

15. 선량한도에 근접하나 선량한도 이하의 피폭은 손해의 수용정도에서 어떠한 수준인가?

1. 용인할 수 있는(acceptable) 수준
2. 감내할 수 있는(tolerable) 수준
3. 용인과 감내의 경계
4. 감내와 용인할 수 없는(unacceptable) 수준의 경계

(정답) 4.

(해설) 원문참조 : A dose limit represents a selected boundary in the region between "unacceptable" and "tolerable"... 따라서 직업상 피폭의 평균 선량은 선량한도 훨씬 이하로 유지하여야 해야 acceptable 하다.

16. 10 MV의 광자로 암치료를 하는 선형가속기실을 차폐하려고 한다. 차폐벽의 두께를 결정하는 주된 인자가 아닌 것은?

1. 작업부하(Workload)
2. 이용도(Use Factor)

3. 점유도(Occupancy Factor) 4. 치료선량(Therapy Dose)

(정답) 4.

(해설)

$B = \frac{Pd^2}{WUT}$ 로 아래의 W가 Workload(주당 최대치료선량 + 품질보증 시험선량에 해당)에 , U가

이용도(빔이 그쪽 벽면을 향하는 비율), T가 점유도(그곳에 8시간중 사람이 체류하는 시간의 비율)이다. 이러한 것은 선형가속기뿐만 아니라 모든 방사선발생장치 차폐의 기본 개념이다.

4. 틀림. 차폐벽의 두께의 한 환자에게 주는 최대 치료선량 및 주당 최대 환자수와 빔점검 선량 등을 포함하여 가정한 Workload에 의해 결정되고 Workload가 일단 결정되면 그 이상의 환자를 치료할 수 없다. 따라서 종속변수이다.

17. 방사선과 인체의 영향에서 물리화학적(또는 전(前)화학적) 단계에서 특징적으로 발생하는 것이 아닌 것은

1. H_3O^+ 2. 라디칼 3. H_2O^+ 4. 수화전자

(정답) 3.

(해설)

1. 물리화학적 단계에서 발생 $H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH^\cdot$

2. 물리화학적 단계에서 발생 $H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH^\cdot$ (라디칼형태)

3. $H_2O + \text{radiation} \rightarrow H_2O^+ + e^-$ 는 물리적 단계에서의 주된 생성물

4. 물리화학적 단계에서 발생 $e^- \rightarrow e^-_{aq}$ subtracted electron이 에너지를 잃고 물분자에 포위되어

hydrated electron이 된 형태

18. 기체방사성폐기물중 방사성요오드를 처리하는 방법이 아닌 것은?

1. 세정법(liquid scrubbing) 2. 활성탄 흡착법 3. 질산은법 4. 열확산법

(정답) 4.

(해설) 1번은 KOH, LiOH 등으로 세정하여 비휘발성요오드 화합물로 전환하여 제거하는 방법

2번은 활성탄층내에 요오드를 흡착시키는 방법

3번은 은과 요오드의 반응을 이용하여 AgNO_3 와 I를 반응시켜 AgI의 형태로 요오드를 제거하는 방법

4번은 온도차가 있는 용기에 방사성기체를 통과시켜 기체의 열확산 계수차를 이용해서 제거하는 방법으로 Xe, Kr 등의 방사성희가스 처리에 사용한다.

19. 어떤 구역의 표면 오염도를 측정하기 위하여 간접법인 스메어용지로 100 cm^2 를 문질러 효율 10 %인 α 선 오염측정기로 계수한 결과 50 cpm이 나왔다. 스메어용지의 전이율을 20 %로 가정했을 때, 그 구역의 오염도를 Bq/cm^2 로 나타내고 허용표면오염도를 초과하였는지를 판단하라

1. 약 0.04 Bq/cm^2 , 허용표면오염도 만족 2. 약 0.42 Bq/cm^2 , 허용표면오염도 만족

3. 약 2.5 Bq/cm^2 , 허용표면오염도 만족 4. 약 25 Bq/cm^2 , 허용표면오염도 초과

(정답) 2

$$(해설) \frac{\frac{1}{0.2} \cdot \frac{50(\text{cpm})}{0.1}}{100(\text{cm}^2)} = 25(\text{dpm}/\text{cm}^2) = 50\left(\left[\frac{1\text{ min}}{60\text{ sec}}\right]/\text{cm}^2\right) = 0.42 \text{ Bq}/\text{cm}^2$$

알파선의 경우 허용표면오염도가 $0.4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$, 허용표면오염도 초과

20. 다음 ()에 들어갈 말로 옳은 것은

“개입에 의해 저감된 선량을 ()이라 하고, 애초에는 규제대상이나 방사능이 약해져 규제의 대상에서 벗어나는 것을 ()라 한다.

1. 회피선량(averted dose), 규제해제(clearance)
2. 회피선량(averted dose), 규제면제(exemption)
3. 저감선량(saved dose), 규제해제(clearance)
4. 저감선량(saved dose), 규제면제(exemption)

(정답) 1.

(해설)

- 개입에 의해 저감된 선량을 회피선량(averted dose), 애초에는 규제대상이나 방사능이 약해져 규제의 대상에서 벗어나는 규제해제(clearance)라 함
- 애초부터 규제대상이 아닌 것을 규제면제라 함

21. 어떤 핵종의 연간섭취한도 (ALI)가 $6 \times 10^6 \text{ Bq}$ 일 때 동 핵종의 유도공기중 농도(DAC)는 얼마인가. 단 근무중 평균호흡률은 $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 이다.

1. 250 Bq/m³ 2. 500 Bq/m³ 3. 2,500 Bq/m³ 4. 5,000 Bq/m³

$$DAC = \frac{ALI (Bq/y)}{\text{년간근무시간 (h/y)} \cdot \text{시간당호흡률 (m}^3/\text{h)}} \text{에서 방사선방호 관점에서 연간 작업시간}$$

은 2,000시간이며 주어진 호흡률과 ALI를 대입하면

$$DAC = 2,500 \text{ Bq /m}^3$$

22. 다음중 ICRP의 이전 권고에 비해 ICRP 60의 특징이 아닌 것은?

1. 최적화의 조건으로 선량제약치(dose constraint) 제시
2. 조직가중치에 비치사성암에 대한 인자 고려
3. 참고준위에 대한 수치 예시
4. 직업상 피폭에 인위적으로 증가된 자연방사능을 고려

ICRP 60은 참고준위에 대한 수치를 제시하지 않았다.

23. 어떤 방사선 차폐물의 질량이 M, 부피가 V, 선감쇄계수가 μ 일 때 할 때 질량감쇄계수는 어떻게 표현되는가?

1. $\frac{\mu M}{V}$ 2. $\frac{\mu V}{M}$ 3. $\mu M V$ 4. $\frac{\mu}{M V}$

질량감쇄계수 μ_m 은 선감쇄계수를 밀도로 나눈 값이다. 따라서

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\frac{M}{V}} = \frac{\mu V}{M}$$

24. 방사선원의 강도가 S인 점등방선원 주위를 반경 R인 구형의 차폐물질이 둘러싸고 있으며 차폐물질에서의 선감쇄계수는 μ 이다. 구형 차폐체의 표면에서 a 만큼 떨어진 거리에서의 방사선량률은 얼마인가? 단, 축적계수는 무시한다.

1. $\frac{S \exp(-\mu[R+a])}{4\pi(R+a)^2}$ 2. $\frac{S \exp(-\mu a)}{4\pi[R+a]^2}$ 3. $\frac{S \exp(-\mu[R+a])}{4\pi R^2}$ 4. $\frac{S \exp(-\mu R)}{4\pi(R+a)^2}$

- 점등방선원이고 거리가 R+a 이므로 방사선량률은 $4\pi r^2$ 에 반비례하여 감소한다.
- 차폐물질 내에서 차폐물질과의 반응으로 지수함수적으로 감소. 단 이 선원은 R 만큼만 차폐되어 있다.
- 따라서

$$S'(R + a) = \frac{S \exp(-\mu R)}{4\pi(R+a)^2}$$

25. ^{192}Ir 의 비감마상수(specific gamma constant)는 $0.013 \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}}$ 이다. 5 TBq의 ^{192}Ir 으로부터 3m 거리에서 30분간 머물렀을 때 피폭받는 선량은 얼마인가?

1. 18 mSv 2. 36.1 mSv 3. 72.2 mSv 4. 105.5 mSv

방사선량은 방사선원의 세기에 비례하고, 거리의 제곱에 반비례함으로

$$\dot{X} = \Gamma \frac{S}{r^2} = 0.013 (\text{R} \cdot \text{m}^2 / \text{GBq} \cdot \text{h}) \frac{5000 \text{GBq}}{(3\text{m})^2} = 7.22 \text{R/h}$$

$$7.22 \text{R/h} \times \frac{1}{2} \text{h} = 3.61 \text{R}$$

감마선의 방사선가중치는 1이므로 3.61 R의 피폭은 3.61 rem이며,
따라서 36.1 mSv

26. 어떤 방사선작업종사자가 작업중 0.1 R 의 γ -선, 0.4 rad의 β -선, 0.2 rad의 열중성자선, 0.1 rad의 속중성자선을 받았을 때, 이 작업자가 받게되는 총 등가선량은 얼마인가. 단, 열중성자 및 속중성자에 대한 방사선가중치를 각각 5 및 20으로 한다.

1. 0.8 Sv 2. 0.8 mSv 3. 3.5 mSv 4. 35 mSv

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} = (1 \times 0.1) + (1 \times 0.4) + (5 \times 0.2) + (20 \times 0.1) = 3.5(\text{rem}) = 35 \text{mSv}$$

27. 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정하는 심부선량 (H_d)는 인체의 피부표면 아래 얼마

깊이에서의 선량을 측정한 값인가?

1. 0.07 mm 2. 0.7 mm 3. 1 mm 4. 10 mm

o 표층선량 : 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정하는 $H_s(0.07)$ 으로서 인체의 피부 표면아래 0.07mm 깊이에서의 선량을 선량계로 판독한 것을 말한다.

o 심부선량 : 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정하는 $H_d(10)$ 으로서 인체의 몸통 표면아래 10mm 깊이에서의 선량을 선량계로 판독한 것을 말한다.

28. 다음중에서 축적인자(Build-up Factor; $B(\mu x)$)를 바르게 나타낸 것은? 단 여기서 ϕ 는 실제측정된 참선속, ϕ_u 는 비충돌선속 ϕ_s 는 산란기여분을 나타낸다.

1. $B(\mu x) = \frac{\phi_u + \phi_s}{\phi}$ 2. $B(\mu x) = \frac{\phi + \phi_s}{\phi_u}$ 3. $B(\mu x) = \frac{\phi_u + \phi_s}{\phi_s}$ 4. $B(\mu x) = 1 + \frac{\phi_s}{\phi_u}$

축적인자의 정의에 의해 $B(\mu x) = \frac{\text{참선속 } \phi}{\text{비충돌선속 } \phi_u}$

따라서 $B(\mu x) = \frac{\text{참선속 } \phi}{\text{비충돌선속 } \phi_u} = \frac{\text{비충돌선속 } \phi_u + \text{산란기여분 } \phi_c}{\text{비충돌선속 } \phi_u}$

$$= 1 + \frac{\phi_c}{\phi_u}$$

29. 다음의 선량 용어중에서 Sv를 단위로 사용하지 않는 선량은?

1. 흡수선량 2. 등가선량 3. 유효선량 4. 예탁선량

답. 가 흡수선량의 단위는 Gy

30. 고에너지 β 선을 차폐하기 위해 플라스틱과 납을 이중으로 사용하였다. 그 주된 이유는 무엇인가?

1. β 선 비정을 감소
2. 제동방사를 회피
3. 이중 차폐시 선감쇄계수 상승효과
4. 베르고니-트리본도 이론(Bergonie-Tribondeau Theory)

31. 생물학적 반감기 T_b 가 9시간인 방사성핵종 100 Bq이 인체에 흡수된지 24시간이 지난후 체내 잔류 방사능을 측정하였더니 2 Bq이 측정되었다. 이 핵종의 물리적 반감기 T_p 는 얼마인가?.

1. 약 6시간 2. 약 7시간 3. 약 8시간 4. 약 9시간

(해설) 24시간이 지난후 초기 방사능의 1/50로 감소하였으므로 유효반감기 T_{eff} 를 먼저 구하면

$$A = A_0 \exp (-\lambda_{eff} t)$$

$$A/A_0 = 1/50 = \exp (-\lambda_{eff} t) = \exp [(-0.693/T_{eff}) \times 24 \}$$

T_{eff} 에 대해 정리하면

$$T_{\text{eff}} = \frac{0.693 \times 24}{\ln(50)} \cong 4.25 \text{ (hour)}$$

$$\text{따라서 } T_{\text{eff}} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b} = \frac{9T_p}{T_p + 9} = 4.25 \text{ (hour) 이므로}$$

$$T_p \cong 8.053 \text{ hour}$$

32 태아의 방사선피폭에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

1. 방사선피폭에 따른 지능저하가 가장 크게 벌어지는 시기는 임신 8~15주이다.
2. 태아의 지능저하는 결정론적 영향이다.
3. 태아의 보호를 위해 임신부 하복부에 일반인 선량한도의 2배 값이 적용된다.
4. 태아에 대한 선량한도는 임신 전기간에 걸쳐 적용된다.

(해설) 태아에 대한 선량한도는 임신이 확인된 후 임신 잔여 기간에 적용된다.

33 다음 중에서 방사선가중치(W_R)가 큰 순서로 나열 된 것은?

- | | |
|---------------|---------------|
| A. 무거운 원자핵 | B. 3 MeV의 양성자 |
| C. 3 MeV의 중성자 | D. 전자 |

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{16} = \exp(-\mu X) = \exp \left[-\left(\frac{0.693}{x_{1/2}} \right) X \right]$$

$$= 1/16 = \left(\frac{1}{2} \right)^{x/x_{1/2}}$$

$$X = X_{1/2} \times 4 = 1.61 \times 4 = 6.44(\text{cm})$$

36. 방사선의 급성영향을 표현하는 LD₅₀₍₆₀₎ 의미를 가장 바르게 설명한 것은 ?

1. 방사선피폭을 받은지 60일 이내에 결정적 영향이 일어날 확률이 50% 이상인 선량을 의미.
2. 방사선피폭을 받은지 60일 이내에 사망할 확률이 50% 이상인 선량을 의미한다.
3. 60Gy의 선량은 50% 이상이 피폭자를 즉시 사망하는 치사선량(Lethal Dose)라는 것을 의미한다. .
4. 60Gy의 선량은 잠재적으로 50%이상의 피폭자를 암으로 사망시킬 수 있는 잠재선량(Latent Dose)라는 의미이다.

답. 2. (LD는 lethal dose 의 약자이다)

37 거주공간의 라돈과 같이 선원을 제어할 수 없으나 피폭제어는 가능한 상황에서 피폭을 감소시키는 행위를 무엇이라 하는가?

1. 조치 2. 개선 3. 개입 4. 간섭

긴급시 피폭 및 인위적으로 증가한 자연방사선으로 인한 피폭을 제어하는 것을 개입(Intervention) 이라 한다.

38 다음 중 방사성물질이 인체내로 흡수되어 잘 배출되지 않고 신체조직에 머무르면서 오랜 시간 피폭을 초래할 때의 피폭선량을 평가하는 가장 적절한 것은 ?

1. 흡수선량 2. 등가선량 3. 조사선량 4. 예탁선량

39. ^{32}P 방사성핵종을 취급하는 방사선 작업장에서 베타선에 의한 피폭으로 피부의 장기가 받은 피폭선량이 3 Gy라 가정하면 인체의 유효선량은 몇 mSv인가? 단, 인체의 다른 부위의 피폭은 발생하지 않았다.

- 1) 3 mSv 2) 30 mSv 3) 300 mSv 4) 3 Sv

<답> 2

베타선을 취급하는 작업장에서 베타선에 의한 피폭으로 인체의 다른 부위의 피폭은 발생하지 않고 피부의 장기가 받은 흡수선량이 3 Gy라 가정하면 피부의 등가선량(베타선 방사선가중치는 1)은 3 Sv가 되며 인체의 유효선량(피부의 조직가중치가 0.01)은 30 mSv가 됨

40. 다음의 설명으로 틀린 것은?

- 1) LET는 δ -ray(델타선)의 에너지를 배제하고 있는 반면에 저지능은 δ -ray의 에너지를 포함하고 있다.
- 2) 예탁선량을 당해연도의 선량으로 간주하는 것은 연속된 행위의 경우에는 정당하다.
- 3) 선량선량률효과인자(DDREF)의 값이 클 경우 방사선에 대한 위해계수 값도 증가할 것이다.
- 4) 태아의 방사선피폭에 따른 지능저하는 결정론적 영향이다.

<정답> 3

ICRP는 DDREF 값으로 2를 채택함

고선량률 집단에 대한 치사암 위험도는 일반인 $10 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 로 알려짐

동 값을 저선량 영역으로 추정하기 위해 DDREF 값으로 2를 적용 시

일반인의 치사암 위험도는 $5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ 로 명목상의 위해 값을 가짐.

따라서 DDREF 값이 커질 경우 명목상의 위해계수값은 감소

고급계산문제

문제) 사이클로트론의 차폐체 밖의 선량율이 $5 \mu\text{Gy/h}$ γ 선, $2 \mu\text{Gy/h}$ 열중성자, 그리고 $1 \mu\text{Gy/h}$ 속중성자($E > 2 \text{ MeV}$)였다. ICRP에서 주어진 W_R 으로 복합방사선에 의한 등가선량률을 구하시오.

풀이) $H = (5 \mu\text{Gy/h} \times 1) + (2 \mu\text{Gy/h} \times 5) + (1 \mu\text{Gy/h} \times 10) = 25 \mu\text{Gy/h}$ (좋은 문제라 할 수 있을 까요)

문제) γ 선 (2 MeV, 플루언스율 $10^8/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)과 속중성자선 (1 MeV, 플루언스율 $10^6/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)과의 혼합 방사선장이 있다. 이 방사선장에 물을 두었다. 물의 표면 부근에서의 등가선량율(Sv/h)을 계산하라. γ 선과 속중성자선의 경우에 대해 계산과정을 제시하여 기술하라. 다만 산란선의 기여는 고려하지 않는다. 물에 대한 γ 선의 질량에너지 흡수계수를 $3.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}$, 속중성자선의 커마계수를 $2.4 \times 10^{-15} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2$ 로 한다. $1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ 로 하고 속중성자선의 방사선가중치는 10으로 한다.

풀이) ① γ 선 : $(2 \text{ MeV} \times 10^8)/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \times 3.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 3600 \text{ s/h}$
 $= 357 \times 10^{-6} \text{ Gy/h} = 357 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$

② 중성자 : $10^6 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \times 2.4 \times 10^{-15} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \times 3600 \text{ s/h}$
 $= 8.64 \times 10^{-6} \text{ Gy/h} = 8.64 \times 10^{-6} \text{ Gy/h} \times 10$
 $= 86.4 \times 10^{-6} \text{ Sv/h}$

③ ① + ② = $4.44 \times 10^{-4} [\text{Sv/h}] = 0.44 \text{ mSv/h}$

문제) 어떤 방사선장의 측정결과는 다음과 같다. 물음에 답하시오.

γ 선 : 0.2 mGy/h
 β 선 : 0.3 mGy/h
 α 선 : 1 mGy/h
 열중성자선 : 0.04 mGy/h ($w_R = 5$)
 속중성자선 : 0.1 mGy/h ($w_R = 10$)

- (1) 이 작업장에서 작업하는 사람이 받을 수 있는 전신선량을(mSv/h)은 얼마인가?
 (2) 이 작업장에서 작업하는 사람이 받을 수 있는 피부선량을(mSv/h)은 얼마인가?

(solve)

- (1) 전신선량을 : $0.2 + (0.04 \times 5) + (0.1 \times 10) = 1.4 \text{ mSv/h}$ (왜 베타선이 빠졌을까요)
 (2) 피부선량을 : $0.2 + 0.3 + (0.04 \times 5) + (0.1 \times 10) = 1.7 \text{ mSv/h}$

문제) Ir-192의 감마상수는 $0.46 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{Ci}\cdot\text{h}$ 이다. 2 TBq의 Ir-192으로 부터 2 m거리에서 10분간 피폭한 선량은 몇 mSv인가?

풀이)

1 Ci	1 m	0.46 R/h
$2 \times 10^{12} \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}}$	2 m	X

$$X = 6.21 \text{ R/h (10분간 피폭선량 } 1.03 \text{ R} \rightarrow 10.3 \text{ mSv)}$$

문제) 실험실에서 3.7 GBq의 ^{60}Co 밀봉선원을 사용하고 있던 중 대지진이 발생하여, 실험자의 한 사람이 실험실에 갇혀 버렸다. 다행히 화재는 발생하지 않았고 지진 발생한 후 30분 뒤에 이 실험자를 구출할 수 있었다.

실험시에 ^{60}Co 밀봉선원은 마루바닥에서 30cm 높이의 실험대 위에 고정된 납블록(한변의 길이 10cm인 입방체)의 중심에 넣어 있었고, 거기서 가느다란 선속의 γ 선을 고집어내어 실험하고 있었다. 이 지진으로 실험대가 넘어지고, 납블록이 마루바닥으로 떨어졌다. 이때 ^{60}Co 밀봉선원이 이 납블록 근방에 굴러 나왔다. 구출된 실험자는, 직후의 상황으로 보아 ^{60}Co 밀봉선원에서 약 2m 정도 떨어진 곳에 갇혀 있었다고 추정된다. 단, ^{60}Co 의 방사선량률정수는 $0.347 \mu\text{Sv m}^2 \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 이며, 계산과정을 명기한다.

(1) 이 실험자가 피폭한 방사선의 종류와 실험자를 구출할 때에 구출현장에서 휴대할 서베이미터로서 어떤 종류의 것이 적당한가? 그리고 그 이유를 쓰시오.

(2) 구출된 실험자는 갇혀 있었던 30분 동안에 어느 정도의 선량을 피폭하였다고 보는가? 예상피폭선량 (μSv)을 구하시오.

(1) γ 선, 에너지의존성이 좋으므로 전리함식 서베이미터를 사용한다.

$$(2) \frac{1.284 \times 10^3 \mu\text{Sv}/h}{2^2} \times \frac{1}{2} h = 160.4 \mu\text{Sv}$$

문제) 엑스선발생장치로 0.05 MeV로 단일에너지로 가진 엑스선 빔을 발생시켜 어떤 환자에게 조사시켰다. 엑스선 빔의 직경이 7.62 cm, 발생된 빔은 총 10^{10} 개의 광자였다면 조사된 시점에서 환자의 피폭된 선량을 mrad로 표시하여라. 단, 0.05 MeV의 광자에 대한 조직의 질량에너지흡수계수는 $0.043 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다.

광자의 총에너지 : $0.05 \text{ MeV}/\text{개} \times 10^{10} \text{ 개}$

조사면적 : πr^2

조직의 질량에너지흡수계수 : $0.043 \text{ cm}^2/\text{g}$

피폭선량의 계산

$$= \frac{0.05 \text{ MeV/개} \times 10^{10} \text{ 개} \times 0.043 \text{ cm}^2/\text{g}}{\pi \times 3.81^2 \text{ cm}^2} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 1000 \text{ g/kg} = 0.0000754 \text{ J/kg} = 7.54 \text{ mrad}$$

문제) 일본 JCO 사에서 핵물질을 부주의하게 취급하다가 핵임계 사고가 발생하였다. 이 핵임계에서 10^{17} 개의 핵분열이 있었고, 핵분열당 방출되는 2.3개의 중성자중 1개가 용기밖으로 방출되었다고 한다.

- (1) 핵물질을 점선원으로 가정하여 1 m 거리에 있는 작업자의 골수 흡수선량을 계산하시오. 단, 분열 중성자의 흡수선량 환산계수는 $6.8 \text{ pGy}\cdot\text{cm}^2$ 이라 한다.
- (2) 이 작업자에게 예상되는 보건상의 영향에 대하여 설명하시오. (SRI 1999)

풀이)

$$(1) D = \frac{10^{17}[\text{개}]}{(100\text{cm})^2} \times 6.8[\text{pGy}\cdot\text{cm}^2] = 68\text{Gy} \quad (\text{이 풀이가 맞을까요?})$$

- (2) 방사선가중치는 10을 적용시키면 680 Sv에 해당하므로 이 사람은 중추신경장해로 수분에서 수시간내에 사망한다고 할 수 있다. 그러나 방사선가중치는 확률적 영향을 일으키는 데 있어서 여러 종류의 에너지에 의한 RBE를 반영하기 위해 선정되었기 때문에 고LET의 중성자에 대해 결정적 영향을 예측하는 데 등가선량을 적용하게 되면 과대 평가하게 된다.

문제) ICRP 30의 삼중수소수(^3HHO)에 대한 ALI는 $3 \times 10^9 \text{ Bq}$ 이다. 어떤 작업자의 ^3HHO 섭취량이 1 MBq이면 예탁선량은 얼마인가?

풀이)

$$10^6[\text{Bq}] \times \frac{50[\text{mSv}]}{3 \times 10^9[\text{Bq}]} = 1.67 \times 10^{-2} \text{ mSv} \quad (\text{지금의 ALI 개념이라면 이 풀이가 맞을까요})$$

문제) 어떤 사람의 고환에 S-35가 침착되어 있는데 이 사람의 고환무게는 18 g이라고 한다. S-35는 순수한 β 방출체로서 붕괴당 0.0488 MeV 의 평균에너지를 방출한다. 이 사람의 고환에 대한 비유효에너지를 구하여라.

풀이)

붕괴시마다 매질의 단위 질량당 흡수된 에너지의 양을 비유효에너지(SEE)라고 한다. 따라서 SEE는 다음과 계산되어진다.

$$SEE = \frac{4.88 \times 10^{-2} \text{MeV/t}}{1.8 \times 10^{-2} \text{kg}} = 2.71 [\text{MeV/t} \cdot \text{kg}]$$

문제) ^3H 는 최대에너지 0.018 MeV인 β 선을 매 붕괴당 하나씩 방출한다. 체중 70 kg인 사람이 1 MBq의 ^3H 가 섭취되어 전신에 균등하게 분포한다면 이 사람이 받을 수 있는 예탁선량을 평가하시오. 단, ^3H 의 생물학적 반감기는 10일이다.

풀이)

초기등가선량률

$$\begin{aligned} & \frac{0.018}{3} \text{MeV/decay} \times 10^6 \\ &= \frac{70 \text{ kg}}{1.6 \times 10^{-13} \text{J/MeV} \times 3600 \text{ s/h}} \\ &= 4.93 \times 10^{-8} \text{Gy/h} = 4.93 \times 10^{-8} \text{Sv/h} (\beta \text{선 } W_R = 1) \end{aligned}$$

유효반감기

$$\begin{aligned} T_{\text{eff}} &= \frac{T_p \times T_b}{T_p + T_b} = \frac{(12.3 \times 365) \times 10}{(12.3 \times 365) + 10} = 9.98 \text{ 일} = 0.027 \text{ 년} \\ &= 239.47 \text{ 시간} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{예탁선량} &= 4.93 \times 10^{-8} \text{Sv/h} \times \int_0^{50} e^{-\frac{0.693}{T_{\text{eff}}}t} dt \\ &= 4.93 \times 10^{-8} \text{Sv/h} \times \frac{239.47}{0.693} \times (1 - e^{-\frac{0.693}{0.0273} \times 50}) \\ &= 1.7 \times 10^{-5} \text{Sv/h} = 1.7 \times 10^{-2} \text{mSv} \text{ (객관식이라면 반드시 이렇게 풀어야 할까요?)} \end{aligned}$$

문제) 어떤 인체내 250 g의 조직에 ^3H 의 농도가 2 μCi 가 균일하게 분포되어 있을 때 흡수선량률은? (단, ^3H 의 평균 β 에너지 = 5.7 keV)

풀이)

$$2 \times 10^{-6}(\text{Ci}) \times 3.7 \times 10^{10} \left(\frac{\text{dps}}{\text{Ci}} \right) \times 5.7 \times 10^3 \left(\frac{\text{eV}}{\text{d}} \right) \times 3600 \left(\frac{\text{sec}}{\text{hr}} \right) \times 1.6 \times 10^{-19} \left(\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right) \times \frac{1}{0.25} \left(\frac{1}{\text{kg}} \right)$$

$$= 9.72 \times 10^{-7} \left(\frac{\text{J}}{\text{hr} \cdot \text{kg}} \right) = 9.72 \times 10^{-7} (\text{Gy/hr})$$

문제) 사고로 인하여 유효반감기가 10일인 ^3H 섭취한 후 작업자에 대한 초기등가선량율이 0.1 mSv/hr 였다면 예탁선량은?

풀이)

예탁선량

$$= H_0 \int_0^{50} e^{\lambda_{\text{eff}} t} dt = 0.1 [\text{mSv/hr}] \int_0^{50} e^{\frac{0.693}{10[\text{day}] \times \frac{1[\text{yr}]}{365[\text{day}]}} t} dt = 36.6 [\text{mSv}]$$

(참고) $0.1 \text{ mSv/hr} \times \frac{1}{\lambda_{\text{eff}}}$

문제) 실험실사고로 인하여 ^{131}I 이 방사선작업종사자에게 185 kBq가 섭취되었다. 갑상선에 37 kBq, 그리고 나머지 148 kBq가 몸에 균일하게 침착 되었다. Bioassay법과 전신계수법을 이용하여 의학물리사가가 계산하였더니 갑상선 선량이 6.15mSv, 전신선량이 0.13mSv이란 결과가 나왔다. (단, 갑상선에 대한 조직가중치는 0.05이다.)

(1) 방사선작업종사자의 유효선량을 계산하라.

(2) 방사선작업종사자 ICRP 60의 선량한도를 넘었는가?

풀이) (1) $H_E = \sum_T W_T H_T (61.5 \text{ mSv} \times 0.05) + (0.13 \text{ mSv} \times 0.95) = 3.2 \text{ mSv}$

(2) 단순히 현재 유효선량이 50mSv를 넘지 않았으므로, ICRP 60의 선량한도를 넘지 않았고 할 수 있지만, ICRP 60에 의한 선량한도는 방사선작업종사자의 이전 년도의 피폭선량을 고려해야 할 것이다.

문제) 1MBq의 ^{131}I 점선원으로부터 30cm 위치에서 선량률은 0.086mSv/h라고 한다.

(1) ^{131}I 의 감마상수 (mSv·m²/h·GBq)를 산출하시오.

(2) 하루 6시간동안 약 1m거리에서 환자를 간병할 가족이 받는 피폭선량이 5mSv를 넘지 않도록 퇴원 당시 환자의 갑상선에 허용되는 ^{131}I 의 방사능은 얼마인가? (단, 갑상선에 존재하는 방사능은 고려하지 않으며, 방사성옥소의 유효반감기는 8일이다) (SRI 1998)

풀이)

(1) 감마상수

$$X = \Gamma \frac{A}{r^2} = 0.086 \text{ mSv/h} = \Gamma (\text{mSv} \cdot \text{m}^2 / \text{GBq} \cdot \text{h}) \times \frac{10^{-3} \text{ GBq}}{(0.3 \text{ m})^2}$$

$$\Gamma = 7.74 \text{ mSv} \cdot \text{m}^2 / \text{h} \cdot \text{GBq}$$

$$(2) 7.74 \text{ mSv} \cdot \text{m}^2 / \text{h} \cdot \text{GBq} \frac{A \text{ GBq}}{1^2} \times \int_0^6 e^{-(0.693/8 \times 24)t} dt \leq 5 \text{ mSv}$$

$$A = 0.108 \text{ GBq} \text{ (퇴원하자마자 간병한다는 보수적 가정이 깔려있다)}$$

문제) 갑상선 치료 목적으로 ^{131}I 100 mCi를 투여한 환자가 있다. 환자를 점선원으로 가정하고 ^{131}I 의 물리적 반감기는 8.05일, 생물학적 반감기는 무시한다.

$\Gamma = 2.2 \text{ R/mCi} \cdot \text{h}$ at 1 cm 이고, 1R/h 선량에서 1시간 피폭일때 1cSv로 가정한다. 다음 물음에 답하여라. (SRI 1999)

(1) 환자옆 1 m 지점에 환자의 가족이 간호를 위하여 하루종일 있었다고 가정한다면 이 사람이 받는 피폭선량은 몇 mSv인가?

(2) 환자의 퇴원기준이 환자로부터 1 m 거리에서 0.05 mSv/h 미만이라고 하면 퇴원하기까지 필요한 시간은?

풀이)

$$(1) X = \Gamma \frac{A}{r^2} = 2.2 \text{ R} \cdot \text{cm}^2 / \text{mCi} \cdot \text{h} \times \frac{100 \text{ mCi}}{(100 \text{ cm})^2}$$

$$= 2.2 \times 10^{-2} \text{ R/h}$$

즉, 1시간동안의 피폭량은 $2.2 \times 10^{-2} \text{ R/h}$ 이므로 하루 24시간을 가정하여 풀면 다음과 같다.

$$2.2 \times 10^{-2} \text{ R/h} \int_0^{24} e^{-\frac{0.693}{8 \times 24} t} dt = 0.506 \text{ R} = 5.06 \text{ mSv} \text{ (여기서 이상한 것은)}$$

(2) ^{131}I 선원 100 mCi, 1 m 거리에서 받는 선량을

$$= 2.2 \text{ R} \cdot \text{cm}^2 / \text{mCi} \cdot \text{h} \times \frac{100 \text{ mCi}}{(100 \text{ cm})^2} = 0.022 \text{ R/h} = 0.22 \text{ mR/h}$$

$$\text{따라서 따라서 } 0.22 \text{ mSv/h} \times e^{-\frac{0.693}{8.05} t} = 0.05 \text{ mSv/h} \text{ 에서}$$

$t = 17.21 \text{ 일} = 413 \text{ 시간이다. (실제 생물학적 반감기를 고려하면 이런 경우는 거의 없다.)}$

문제) 키가 160 cm이고 몸무게가 70 kg인 사람에게 100 μCi , ^{24}Na 의 정맥주사를 주입시킬 때 다음을 계산하여라. 단, ^{24}Na 의 반감기는 15시간, 에너지는 베타선 1.39 MeV (100%, 평균에너지 0.55 MeV), γ 선 2.75 MeV (100%), 1.37 MeV (100%)이고 감마상수는 $15.4 \text{ R} \cdot \text{cm}^2 / \text{mCi} \cdot \text{h}$ 이며, 기하학적 인자는 129 cm 이다. 또한 $1 \text{ R} = 1 \text{ rad}$ 로 본다. (SRI 2000)

(1) 초기에 흡수된 총 흡수선량은?

(2) 7일 동안 받은 총 등가선량은?

(풀이)

(1) γ 선에 의한 내부피폭은 다음의 식으로 주어진다.

$$D_{\gamma} = CIG$$

(C : 체내평균농도, Γ : 감마상수, G : 기하학적 인자)

인체밀도를 1 g/cm^3 으로 보고 인체의 체적을 계산한 후 이것으로 방사능을 나누면 체내평균농도가 계산된다.

$$\frac{70 \times 10^3 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} = 70000 \text{ cm}^3, C = \frac{0.1 \text{ mCi}}{7 \times 10^4 \text{ cm}^3}$$

$$D_\gamma = C I G = \frac{0.1 \text{ mCi}}{7 \times 10^4 \text{ cm}^3} \times 15.4 \text{ rad} \cdot \text{cm}^2/\text{mCi} \cdot \text{h} \times 129 \text{ cm}$$

$$= 2.84 \times 10^{-3} \text{ rad/h}$$

$$D_\beta = \frac{100 \mu\text{Ci} \times 3.7 \times 10^4 \text{ dps}/\mu\text{Ci}}{7 \times 10^4 \text{ g}} \times 0.55 \text{ MeV/d} \times 1.6 \times 10^{-6} \text{ erg/MeV} \times 3600 \text{ s/h} \times 100 \text{ erg/g/rad}$$

$$= 1.67 \times 10^{-3} \text{ rad/h}$$

따라서 $D_\beta + D_\gamma = 4.51 \times 10^{-3} \text{ rad/h}$ 이다.

(2) 7일동안 받은 총등가선량

$$\int_0^t D_0 e^{-\lambda t} dt = -\frac{D_0}{\lambda} [e^{-\lambda t}]_0^t = \frac{D_0}{\lambda} (1 - \exp^{-\lambda t})$$

$$= 4.51 \text{ mrad/h} \times \frac{15}{0.693} (1 - \exp^{-\frac{0.693}{15} \times 7 \times 24})$$

$$= 97.55 \text{ mrad} = 97.55 \text{ mrem}$$

문제) 개인선량계로 측정한 값이 베타에 대해 1.2 mSv, 중성자에 대해서는 1.5 mSv였다. 그런데 방호마스크에 필터가 없는 것을 확인하여 내부피폭을 측정한 결과 전신에 1 mSv, 갑상선에 0.5 mSv였다면 피폭받은 총유효선량은? (갑상선에 대한 조직가중계수는 0.05 이다.) (SRI2002)

풀이)

$$\text{총유효선량} = \text{외부피폭선량} (1.2 + 1.5) + \text{내부피폭선량} (1 \times 0.95 + 0.5 \times 0.05) = 3.675 \text{ mSv}$$

문제) ^{137}Cs 점선원 10 mCi라면 100 cm거리에서 에너지 플루언스율을 구하여라. (단, ^{137}Cs 은 0.662 MeV의 γ 선을 85%방출한다. 참고로 ^{137}Cs 의 공기예 대한 질량에너지흡수계수는 $0.0293 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다.)

풀이)

$$\frac{A(\text{dps})}{4\pi r^2} \times E(\text{MeV}) \times f = \frac{3.7 \times 10^7}{4\pi (100\text{cm})^2} \times 0.662(\text{MeV}) \times 0.85 = 1676.3 \text{ MeV/cm}^2 \text{ sec}$$

문제) 2 MeV γ 선의 물에 대한 질량흡수계수와 선흡수계수를 구하여라. (단, 2 MeV의 γ 선에 대한 수소와 산소에 대한 질량흡수계수는 각각 $0.0876 \text{ cm}^2/\text{g}$, $0.0444 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다.)

풀이) $\left(\frac{2}{18} \times 0.0876\right) + \left(\frac{16}{18} \times 0.0444\right) = 0.0492 \text{ cm}^2/\text{g}$

물의 밀도 : 1 g/cm^3

$$\mu = \mu_m \times \rho = 0.0492 \times 1 = 0.0492 \text{ cm}^{-1}$$

문제) 어떤 배액에서 시료부피를 1 ℓ 채취하여 이것을 효율 10 %의 GM 계수장치로 측정하였더니 30 cpm 이었다. 이 배액 중에 함유되어 있는 RI의 농도는 ($\mu\text{Ci/cm}^3$)는 얼마인가?

풀이)
$$\frac{30 \text{ cpm} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{\frac{0.1}{1000 \text{ cc}}} \times \frac{1 \mu\text{Ci}}{3.7 \times 10^4 \text{ Bq}} = 1.35 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$$

문제) 1 Ci의 ^{60}Co 을 장전한 라디오그래피장치가 있다. 조사실 바깥에서 이 장치를 사용하여 작업을 하고자 한다. 1주일간의 노출시간을 20시간으로 한다면 선원으로 부터 몇 m 거리를 방사선관리구역으로 설정하여야 하는가? (단, Co-60의 감마상수는 $1.32 \text{ Rm}^2/\text{Ci}\cdot\text{h}$ 이고 방사선관리구역의 기준은 40 mR/week 이다.)

풀이)

1 Ci	1 m	26.4 R/w	1주일간의 선량 (1 Ci x 1.32 x 20시간)
1 Ci	X	40×10^{-3} R/w	방사선관리구역의 기준

$$\frac{26.4 \text{ R/w}}{x^2} = 40 \times 10^{-3} \text{ R/w} \quad (x \approx 26 \text{ m})$$

$$1.32 \left(\frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}} \right) (1 \text{ Ci}) \times (24 \text{ h/week}) \frac{1}{(x \text{ m})^2} = 40 \times 10^{-3} \text{ R/week}$$