原子力関係 資格試験의 傾向과 対策 (V)

生物学

1. 確率的 影響과 非確率的 影響

生体에 대한 방사선의 영향은, 線量-効果曲線(그림 1 참조)에서 확율적영향과 非확율적영향으로 나누어진다. 前者는 선량의 大小에 의해 장해의 중독도가 변하는 것은 아니고 장해가 발생하는 비율(발생확율)이 변화하는 것으로 이 발생확율은 문턱値(threshold value)가 없고선량의 函数라고 보여진다. 여기에는 유전적영향, 発癌 및 발생과정에 있는 胚으로의 영향이 포함된다. 後者는 장해의 중독도가 선량의 크기와 함께 변하는 것으로 문턱値가 있다. 여기에는 방사선에 의한 白内障, 피부萎縮, 再生不良性貧血, 不妊등 많은 신체적 영향이 포함된다. 확율적영향의 risk係数를 表 1에, 버확율적영향의 문턱値을 表 2에 표시하였다. 表 1의 荷重係数W_T란 全身에 균등히 照射되었을 때 조직(T)에 있에서 照射에 의한 확율적영향의 risk를risk전체에 대한 비율로 나타낸 것이다. W_T의合計는 물론 1이다. 나머지 조직의 w_T는 0.30이 되고 있다. 나머지조직에 대해서는 피폭이 큰 5개의 器官 또는 조직에 각각 w_T=0.06의 값을 적용하며 이들 5개 器官 또는 조직 이외의 모든 나머지조직의 피폭은 무시하고 있다.

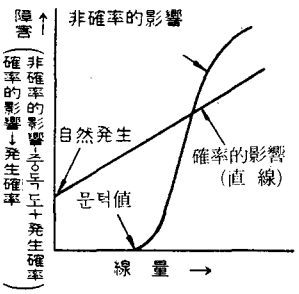

그림 1
確率的影響과非確率的影響

表 1 確率的影響의 risk係数

器官・組織	risk係数		荷重係数	影響
	S^{v-1}	rem^{-1}		
生殖腺	4×10^{-3}	4×10^{-5}	0.25	最初의 2世代(子와係)에나타나는遺伝的影響
赤色骨髄	2×10^{-3}	2×10^{-5}	0.12	致死白血病의誘発
骨	5×10^{-4}	5×10^{-6}	0.03	〃骨癌 〃
肺	2×10^{-3}	2×10^{-5}	0.12	〃肺癌 〃
甲状腺	5×10^{-3}	5×10^{-6}	0.03	〃甲状腺癌 〃
乳房	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-5}	0.15	〃乳癌 〃
나머지組織	5×10^{-3}	5×10^{-5}	0.30	〃悪性腫瘍 〃
全身	1×10^{-2}	1×10^{-4}	-	〃全癌 〃
			1.00	

表 2 非確率的影響의 문턱値

器官・組織	影響	문턱値		條件
		Gy	rad	
生殖腺	受胎能力의 永久的 停止	3	300	低LET, 一時的停止, 40歳女性
	精子의一時的減少	0.25	25	低LET, 高線量率
赤色骨髄	造血機能의 損傷	20	2000	動物実験, 低LET遷延照射
水晶体	水晶体混濁	15	1500	高LET, 低LET遷延照射
皮膚	美容上 나쁜皮膚變化	20	2000	局部照射, 数週~数個月 被曝

2. 急性効果와 遅發効果

방사선의 신체적영향에는 급성효과(장해)와

지발효과(장해)가 있다. 前者는 피폭후 수주일 이내에 관찰되는 것이고,後者는 잠복기를 거쳐

表 3 各器官 또는 組織의 急性障害와 遲発障害

	急 性 障 害	遲 発 障 害
造血臟器	임파球・顆粒球減少, 血小板減少,赤血球減少, 免疫力低下, 出血傾向	白血病, 眞性多血症, 免疫障害, 再生不良性貧血
皮 膚	紅斑, 脫毛, 糜爛, 潰瘍	色素沈着또는脫失, 皮膚萎縮, 毛細血管拡張, 皮下硬結, 潰瘍, 皮膚癌
生 殖 腺	精子減少, 月經停止	性器萎縮 不妊
中枢神經系	腦浮腫	腦炎, 脊椎炎
眼	睫毛脫落, 結膜炎, 角膜炎	白內障, 緑內障
肺	肺臟炎	肺線椎症
消 化 器	嘔吐, 下痢, 下血, 裏急後重	狹窄, 閉塞, 穿孔
膀 胱	頻尿, 排尿困難	膀胱萎縮
腎 臟	腎炎	高血圧, 腎不生
骨	—	発育障害, 骨壞死, 骨腫瘍

피폭후 수년 또는 몇 달후에 나타나며 급성효과와 반드시 뚜렷한 관계를 갖고 있다고 볼 수는 없다. 각 器官 또는 조직의 급성효과와 지발효과의 症狀 및 환자를 정리해서 表3에 나타내었다.

3. 急性障害의 類型

포유동물이 전신피폭되었을 경우, 그 중요증상은 선량의 大小에 따라 3가지의 類型이 있다. 造血장해(骨髓死), 腸管장해(腸死) 및 中枢신경장해 (腦死)이다.

mouse의 全身照射時에서의 선량과 생존기간과의 관계를 그림2에 표시하였다. 이 그림에서 최초의下降線은 骨髓死에, 그다음 橫軸에 平行한 線은 腸死에 그리고 최후의 下降線은 腦死에 해당된다. 骨髓死는 造血幹세포가, 腸死는 腸上皮幹細胞인 腸線窩세포가 궤멸적타격을 받은 결과로 前者에서는 出血, 貧血, 感染저항성의 저하등으로, 後者에서는 설사, 下血, 体液상실등으로 사망한다. 腸管장해가 일어나는 경우

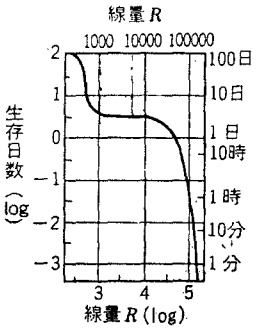

그림 2
1回照射線量과 生存期間
(mouse의 全身照射)

에 造血장해도 일어나며 조혈장해보다 腸管장해가 早期에 출현할 뿐이다. 両者의 생존일수 차이는 末梢血中의 血球와 腸上皮세포의 수명차이에 의한다. 血球의 공급이 정지하여도 末梢血球가 일하고 있는 1개월정도는 생존할 수 있으나 腸上皮의 공급이 정지하면 1주일 정도에서 体液상실을 일으켜 사망한다. 腦死는, 대선량이 피폭되었을 때 신경세포가 장해를 받은 결과로 경련등을 일으켜 数分에서 数時間内에 사망한다. 때로는 즉시 사망할때도 있는데 이것을 瞬間死라고 하는데 腦死와는 様相이 약간 다르다. 그밖에 口腔死라는 것이 있다. 이것은 동물의 口腔부분이 100rad이상의 피폭을 받았을 때 음식물의 섭취가 不能이 되어 사망하는 것으로 腸死의 일종이라도 할 수 있다.

4. LD_{50}

이것은 50%致死 線量으로 이 선량을 피폭하면 그 집단의 반수가 사망한다. 사람의 LD_{50}은 대체로 400~500rad이며 LD_{100} (100%치사선량)은 거의 700rad이다. LD_{50}은 骨髓死의 영역으로 이정도의 피폭이면 영양, 안정, 抗生物投與, 体液보충, 골수이식등의 치료를 적극적으로 행하면 救命率이 높아진다.

5. 造血器障害

방사선 장해를 민감하게 반영하고 손쉽게 검사할 수 있으므로 조혈기장해는 중요시된다. 임파球는 방사선감수성이 높고 20~50rad의 피폭으로 현저하게 감소한다. 5rad의 피폭에서도 임파球의 染色体異常이 증가하므로 그 異常을

측정하므로서 低선량피폭을 推定 할 수 있다. 그 외에 末梢血中의 각 血球는 방사선 저항성이나 그 源泉인 骨髓芽球, 巨核芽球, 赤芽球 등은 방사선감수성이 높다. 顆粒球의 수명은 평균하여 수일, 血小板은 약 1주일, 赤血球는 수개월이다. 이로 인해 방사선피폭후 末梢血中에서는 임파球가 제일 먼저, 이어서 顆粒球, 血小板이, 마지막에 赤血球가 감소한다. 회복은 顆粒球와 血小板이 비교적 빠르나 임파球와 赤血球는 늦다. 造血器장해의 症狀은 表 3을 참조할 것.

6. 皮膚障害

体外피폭의 경우, 피부는 방사선이 반드시 통과하는 곳이고 쉽게 관찰할 수 있는 部位 이므로 피부장해는 장해방지상 造血器장해와 함께 중요시된다. 장해의 症狀은 表 3을 참조할 것. 피부의 幹세포는 基底세포이며 방사선感受性이 높고 궤멸적 타격을 받으면 表皮剝離가 된다. 300rad의피폭에서 일시적脫毛와 함께 初期紅班이 일어난다. 초기홍반은피폭후 수시간내에 출현하며 그 후 수시간 내지 수일후에 消褪한다. 500rad 정도의 피폭에서는 초기홍반이 생긴 후 8～10일째에 眞正紅班이 출현한다. 600rad 이상의 피폭에서는 脫毛는 永久的이 되고 다시 高선량이 되면 초기홍반과 진정홍반의 구별이 확실해지지 않는다. 1000 rad이상에서는 홍반과 함께 浸出性皮膚炎이 나타난다. 이것은 피부의 혈관이 손상되기 때문이다.2000rad이상이 되면 皮下조직, 혈관, 나아가서는 근육이나 뼈도 侵害되어 潰瘍을 형성한다.

7. 胎内被曝

mouse의 妊娠각시기에서의 照射영향을 그림 3에 표시하였다. 여기에 따르면, 未受精卵 및 受精卵의 피폭에서는 출생전사망이 증가하며, 器官形成期의 피폭에서는 출생후사망과 奇型유발이 증가한다. mouse나 rat에서 発生早期피폭에 의한 출생전 및 출생후의 LD_{50}은 약 100 rem이라고 한다. 奇型의 유발은 5 rem 에서도

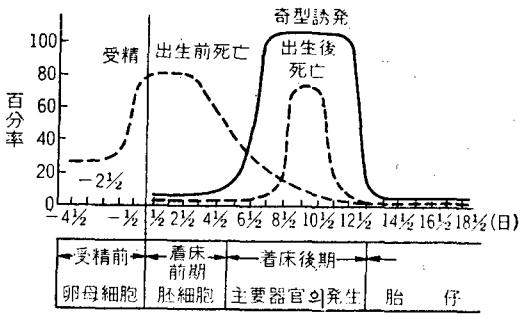

그림 3 mouse의 妊娠各時期에서의 照射의 影響
(受精前 400R, 受精後 200R照射)

증가하나 10～100rem피폭에서의 발생빈도는 10^{-}/rem이다. 低선량피폭의 경우 頻度는 더욱 저하한다. 사람의 奇型 유발에서 중요한 시기는 受胎後 약 9～40일 사이로서 小頭症을 수반하는 지진아가 발생하기 쉽다. 이것의 발생빈도는 50rem이상의 피폭에서 10^{-3}/rem이다. 妊婦의 방사선진단에서 胎兒는 수rem 정도의 피폭을 받으나 有意할만한 기형빈도의 증가는 없다고 한다. 태아기의 피폭은 体格의 倭小化와 악성腫瘍을 유발한다. 致死악성종양유발율은 2.3×10^{-4}/rem으로 推定되는데 이것은 成人의 약 2배이다.

8. 放射性物質의 代謝經路

体内로의 침입경로는 ① 吸入에 의해 肺로부터, ② 經口섭취로 小腸에서, ③ 정상 또는 상처가 있는 피부로 부터의 세가지가 있다. 기체형태의 산화트리튬 또는 気化한 요오드는 쉽게 肺에서 흡수된다. aerosol 형의 방사성화합물은 鼻咽腔이나 気管·기관지, 肺胞등에 沈着 하며 可搬性화합물(生体膜을 용이하게 통과하는 화합물)은 肺, 또는 気管에서 排除된 것이 腸이나 体液에 목구멍을 통해 들어간다. 非可搬性 화합물은 대부분이 胃腸管에 排出되나 일부는 肺에 오랫동안 머무른다. 不溶性 산화플루토늄은 머무르는 것중의 한가지 예이다. 經口섭취된 可搬性화합물은 대부분이 小腸통과중에 흡수된다. 非可搬性화합물은 대부분이 위장管을 통과해서 糞中에 배출된다. 상처가 없는 피부는 방사성

물질에 대한 유효한 장벽이나 기체형태의 산화트리튬 및 요오드, 액체형태의 요오드化物은 통과한다. 피부에 상처가 있으면 방사성화합물은 皮下조직에 침투하여 可搬性화합물은 급속히, 非可搬性화합물은 완만하게 体液에 들어간다. 体外排出은 呼気, 땀, 尿 및 糞의 경로에 의한다. 呼気에는 흡입한 aerosol중 沈着하지 않은 부분, 体液에서 由來하는 산화트리튬 증기, 体内에 沈着한 Th나 Ra에서 由來하는 thoron, Rn 및 $^{14}CO_2$이다. 땀은 체액중에 존재하는 모든 방사성核種을 포함한다. 산화트리튬의 경우 땀속의 농도와 体液中농도는 같다. 尿로 배설되는 방사성 핵종은 体液에서만 由來한다. 糞中의 방사성핵종은 非可搬性화합물의 經口섭취 또는 吸入에서 由來하거나, 可搬性화합물이 직접 또는 胆汁을 경유해서 위장管에 배출되는 것에서 由來한다.

9. 親骨核種

体液中에 들어간 방사성핵종은, 体液中에 거의 균등하게 분포하는 것과 특정한 臟器에 모이는 것이 있다. 前者에는, HTO ,Na ,K가 속한다. 後者의 例로 I는 甲狀腺, Cs는 근육, Fe는 赤血球등이다. 이중에서 뼈에 모이는 핵종을 親骨核種(bone seaker)이라 한다. 여기에는 P, Ca, Sr, Ra, Pu가 속하는데 이들은 骨髓를 照射하여 白血病이나 再生不良性貧血 또는 骨腫瘍의 원인이 되므로 중시된다. 여기서 주의할 것은 방사성핵종이 같더라도 핵종과 결합된 화합물이 다르면 体内에서 다른 거동을 한다는 것이다. 馬尿酸에 label된 ^{131}I는 甲狀腺에 모이지않고 腎장을 통해 빨리 尿로 배설된다. colloid狀의 ThO_2製剤인 트로트라스트는 뼈보다도 肝, 脾장에 많이 모여 肝硬變, 肝암 등의 肝장해를 야기시킨다.

10. 体内汚染의 計測

체내오염의 계측에는 두가지 방법이 있다. 하나는 배설물등의 生体시료를 분석하는 bioassay이고 다른 하나는 体外에서 全身counter로 직접측정하는 体外計測法이 있다. bioassay는 모든 核種의 同定을 할수 있고 배출량의 定量도 할 수 있으나 시료채취에서 측정까지 2～3 일이 소요된다는 것, 오염이 몸의 어느 部位에 있는가, 또 体内量의 推定이 不正確한 결점이 있다. 대개의 경우 尿의 방사성핵종함유량에서 体内量을 推定하는데 骨格中의 ^{90}Sr이나 ^{239}Pu 의 尿中배설은 그날에 따라 크게 변동하므로 체내량추정이 곤란하다. 糞分析은 非可搬性방사성 핵종의 吸入 및 經口섭취를 검출하는데 유용하다. 呼気分析으로 ^{226}Ra나 ^{232}Th, ^{3}H, ^{14}C의 체내량을 추정할 수 있고, HTO는 땀분석으로 체내량을 알 수 있다. ^{51}Cr이나 ^{59}Fe의 오염은 혈액분석으로 체내량을, 중성자피폭의 경우는 혈액과 모발의 분석(中性子放射化에 의한 ^{24}Na, ^{38}Cl, ^{35}S등) 으로 피폭선량을 알 수 있다. 체외계측은 단시간(10분전후)에 계측할 수 있으며 체내량산출도 용이하고 沈着장소도 알 수 있으나 α핵종이나 低에너지 β핵종은 측정할 수 없으며 또 시설에 많은 비용이 드는 것이 결점이다.

11. LET, 線質係数. RBE 및 OER

LET는 linear energy transfer의 略으로 방사선이 단위길이를 통과할 때 물에 주는 에너지로 keV/μ로 표시한다. 방사선방어에서 사용하는 선질계수(Q로 표시)는 LET에 따라 일정치로 정해진다 (그림 4 참조). 즉, X線, α線 및 電子線

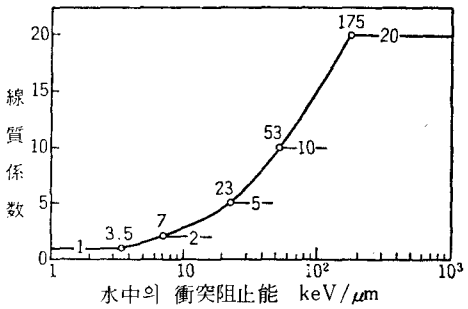

그림 4 水中의 衝突阻止能과 線質係数와의 関係

은 1, 중성자선, 양자선은 10, α線, 多重荷電粒子線은 20이다, α線등은 高LET 방사선이라 한다. RBE는 relative biological effectiven-

ess의 略으로 일정한 생물학적효과를 얻는데 기준이 되는 放射線(3.5keV/μ의 LET 방사선, 거의 200kVpX線에 相当)으로 $D_s$rad를 要하며, 어떤 방사선에서 $D_x$rad를 要한다고 하면 그 방사선의 RBE는 D_s/D_x이다. RBE는 指標로 하는 생물효과에 의해서 値가 변하며 산소등의 환경因子에 의해서도 値가 변한다. 이들의 因子가 일정할 때 LET와의 관계는 最適LET에서 RBE는 최고가 되며, 이보다 低LET나 高LET에서는 RBE가 저하한다. OER은 oxygen enhancement ratio의 略으로, 일정한 생물학적 효과를 얻는데에는 100%산소중에서 照射했을 경우 D_{ox}rad를 요하며, 無酸素中에서 照射했을 경우 D_{an}rad를 요한다고 하면 이 방사선의 OER은 D_{an}/D_{ox}이다. LET와의 관계는 高LET가 될수록 OER은 저하하며 200keV/μ 前後 以上의 LET에서 OER은 1이 된다. 低LET방사선의 OER은 거의 3, 速中性子線, π^-中間子線에서는 1.5前後, 低에너지α線에서는 거의1이다.

12. 細胞의 生存曲線

X좌표에 산수눈금으로 線量을 취하고 Y좌표에 対数눈금으로 세포의 生存率을 취한것을 세포의 생존곡선이라고 한다 (그림 5 참조). 이

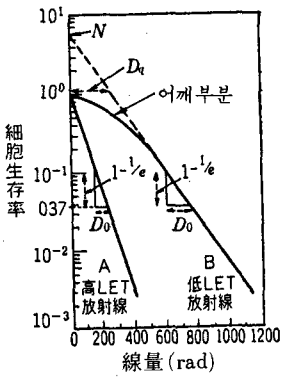

그림 5
細胞의 生存曲線

때의 생존은 세포가 무한의 增殖능력을 가질때이다. 그림5의 D_0, 또는 곡선의 직선부분의 경사가 그 세포의 방사선感受性을 나타낸다. 직선부분을 연장시켜 Y軸와 교차하는 점을 外挿値n, X軸과 교차는 점을 D_q라 하는데, n는 세포의 標的数를 표시하고 D_q는 SLD回復能을 나타낸다. 高LET방사선에서는 低LET 방사선에 比해 D_q와 D_0가 작아진다. 보통의 포유동물세포의 D_0는 100~200rad, n는 2~10, D_q는 300~600rad이다.

13. SLD回復과 PLD回復

SLD회복은, sublethal damage로 부터의 회복이다. 그림6에 分割照射의 生存曲線을 표시

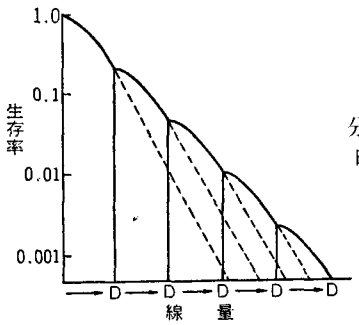

그림 6
分割照射의 生存曲線

했는데 분할照射는 1回照射에 比해 같은 효과를 얻는데에 보다 많은 선량을 요한다. 이것은, 照射와 照射사이에 SLD회복이 일어나서 생존곡선의 어깨부분이 再現하기 때문이다. SLD회복은 세포의 종류에 따라 다르나 照射後 3~12시간으로 완료한다. PLD회복은, potentially lethal damage로 부터의 회복인데 정상의 상태에서는 죽음에 도달하나 照射후 어떤 조건下에 세포를 두면 죽음에서 이들 세포가 회복해서 살아나는 것을 말한다. 예를 들면, 照射후 5℃등의 저온이라든가, hypoxic한 상태등에 세포를 두면 살아나는 것이다. 이들 두개의 회복이 전혀 異質의 것인지아닌지는 아직 결론을 내리지 못하고 있으며, 両者는 그 회복機構에는 차이가 없고 단순히 照射후에 세포가 놓여져 있는 조건에 따라 다른 현상처럼 보이는 것인지도 모른다.

14. 線量率의 影響

선량율이 저하하면 방사선의 효과가 약해 진다. 이 변동은 1~100rad/分 사이에서 현저하

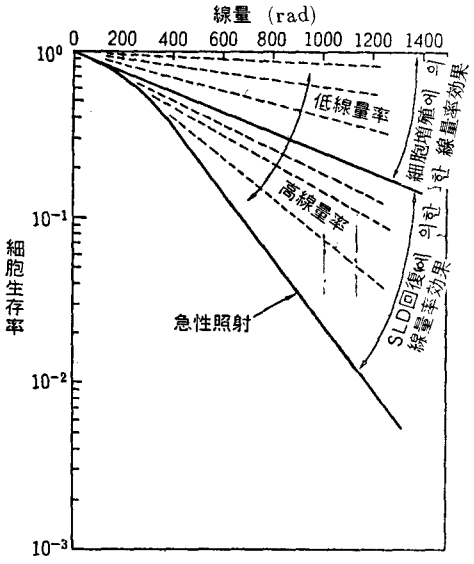

그림 7 線量率効果

며, 이 이하 또는 그 이상에서의 변동은 적다. 선량율효과를 세포의 생존곡선에서 보면그림 7에서와 같이 低선량율이 될수록 D_0는 커지고 n는 1에 가까와진다. 선량율효과에는 SLD 회복과 세포增殖이 관계된다. 0.5rad/分이하의 저선량율이 되면 照射中에도 세포분열이 일어난다고 한다.

15. 放射線增感剤와 放射線防護剤

照射前에 投與하여 방사선의 효과를 증강하는 것을 增感剤, 減弱시키는 것을 방호제라 한다. 증감제에는 그 자신 세포死를 일으킬만큼의 세포毒性을 나타내지 않는 BUdR, IUdR 등과 그 자체가 殺細胞性을 갖는 actinomycin D, 5－FU 등이 있는데 前者가 진짜 증감제이다. 또, nitroimidazol系 화합물은 低산소성세포를 특별히 증감시키므로 암치료상 주목되고 있다 (癌속에는 低산소성세포가 약 20%나 포함되며 이들은 방사선저항성이다). 이 약제는 電子親和性이 높다. 방호제로는, radical scavenger라고 하는 含硫黃物, cystine, cysteamine (MEA), AET, WR-2771등과 serotonin 등이 있다. 이들은 독성이 강해서 대부분 人体에 사용불가능이나, WR-2771은 臨床응용이 검토되고 있다. 또 이들은 高LET 방사선에는 효과가 약하다. 低LET방사선에서는 선량을 1/2로 하는 효과가 있다.

16. 細胞와 組織의 放射線感受性

방사선으로 傷害를 받기 쉬운것을 방사선감수성이 높다고 한다. 세포의 감수성에는 分裂間期染色体体積 (세포핵체적/염색체数), SH 화합물 함량, 세포의 傷害로 부터의 回復能이 관계하고 있는것 같으나 완전하게 알고 있는 것은 아니다. 세포가 방사선照射를 받으면 分裂遅延과 세포死가 일어난다. 분열지연은 세포週期의 S期와 G_2期에서 高감수성이며, S축적, G_2 block 현상이 일어난다. 한편, 세포사는 M期와 G_1期後에 감수성이 높고 이들의 期에 있는 세포는 죽기쉽다. 세포집단으로서 조직의 감수성을 표현한것에 Bergonie-Tribondeau의 法則이 있다. 이것은, ① 세포의 분열능력이 큰 것일수록, ② 세포의 분열기간이 긴 것일수록, ③ 형태적, 기능적으로 未分化의것일수록 감수성이 높다는 것이다. ①과 ②는 표현만 다를뿐 본질적으로는 같은 것이라고도 할 수 있다. 이 법칙에서 세포再生系 (造血器, 生殖腺, 腸上皮등)쪽이 세포非재생계 (신경, 근육등)보다 감수성이 높다는 설명을 할 수 있다.

17. 放射線障害의 順序와 細胞의 修復機構

방사선의 세포내표적은 DNA라고 생각된다. 방사선에 의한 DNA손상은 DNA鎖의 절단 (1重鎖切斷 및 2重鎖切斷)과 塩基손상이 있다. 세포의 致死線量当 손상생성율을 조사한 결과 一重鎖切斷이나 염기손상에서는 100개정도 모이지 않으면 세포는 죽지 않으나 二重鎖切斷에서는 약 2개로서도 죽는다. 이와같은 사실에서 세포는 손상을 받은 DNA부분만을 修復하는 것으로 알려졌다.

이 수복기구에는 다음의 두가지가 알려져있다. 하나는, 除去수복인데 이것은 상처가 있는 鎖부분을 마주보고 있는 DNA鎖로 부터 잘라낸다.

잘라낸 부분의 DNA는 원래 2本鎖였던 곳이 1本鎖가 된다. 그러나, DNA는 마주보고 있는 부분만 있으면 정확히 copy를 만들 수 있으므로 원래의 2本鎖 DNA가 만들어진다. 「틀림없는 修復」이다. 또하나는, 組換수복이라 하며 세포분열을 위한 DNA 複製後에 행해지는 수복 이다(그림 8 참조).

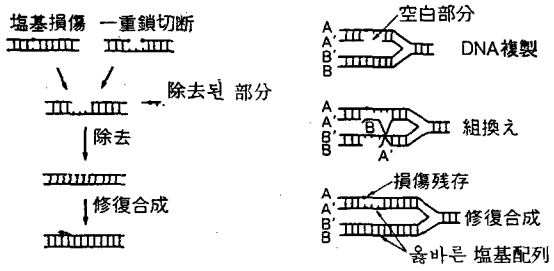

그림 8 除去修復과 組換修復의 模式圖

이것은, 제거수복되지 않은 채 2本(A, B)의 DNA鎖와 함께 複製(A′, B′)되나 A鎖의 손상부분에 대응하는 부분은 제외되고 복제(A′의空白부분)가 행해진다. B, B′鎖는 완전한 複製이다. 이때, A′鎖의 공백부분에 대응하는 곳에 B鎖와 A′鎖 사이에 組換(組바꾸기)이 일어나 B鎖의 올바른 塩基配裂로 A′의 空白이 채워진다. 組換된 B부분은 B′鎖을 거울로 해서 複製된다. A는 손상이 그대로 남아있으며 이것을 고치는 것은 除去修復이다. 組換수복은 제거수복에 비해 훨씬 복잡하여 그 메카니즘의 세부는 잘 알려져 있지 않으며 틀릴때도 많다. 「잘 틀리는 수복」이라고도 한다. 이들 2가지의 修複系에 의해, 생긴 손상의 95%이상이 수복된다.

18. 突然變異

遺伝情報는 DNA의 塩基배열에 존재하므로 자손에 돌연이 나타나는 變異세포는 DNA의 염기배열에 변화가 일어났다는 것을 뜻한다. 염기배열의 변화는 ① 塩基置換, ② frame shift, ③ 欠失, 重複, 逆位, 転座에 의해서 생긴다. 이들 변화는 DNA손상의 修複과정에서 틀린것이 固定된 결과라고 생각된다. 방사선에 의해서 생식세포에 돌연변이가 일어났을 때에 유전적 영향이 일어난다. 이 돌연변이의 발생은 단순히 선량에 비례하는 확율적영향인데 線量率依存性이 있다. mouse의 精原세포나 卵母세포에 대한 돌연변이 발생율은 高線量率照射(90rad/分)가 低선량율照射(0.009rad/分)의 약 4배이다. 그러나, 저선량율照射에서도 선량에 비례해서 돌연변이가 증가하는 관계는 변하지 않으며 그 比例常数만이 변한다. 따라서, 여러가지 遺伝子座에 대해서 1rad당 돌연변이誘発率을 구할 수 있다.

유전적영향을 조사할 때, 倍加線量(doubling dose)이라는 개념이 있다. 이것은, 人工피폭이 없는 자연상태에서 유전장해의 量과 같은 양의 손상을 유발시키는데 필요한 방사선선량이다. 즉, 倍加線量=自然突然變異率/放射線突然變異誘発率이다. 현재, 사람의 배가선량은 100rem으로 되어 있다. 돌연변이에 의해 優性遺伝子가 생겼을 경우, 그 영향은 곧 次代에 나타나나 劣性유전자가 생겼을 경우에는 孫子代이후에 그 영향이 나타난다. 방사선돌연변이의 압도적대다수는 劣性의 것이다.

19. 染色体異常

염색체이상은 방사선의 생체작용중에서 구체적으로 파악할 수 있는 장해의 하나로서 유전물질에 일어나는 不可逆변화이기 때문에 중시된다. 염색체이상에는 数의 이상과 구조의 이상이 있다. 前者에는 trysomy(통상 2개가 짝을 이루는데 3개가 짝이 되는 것)가 유명하며, 특정의 trysomy로서 Down症이라든가 Klinefelter症등 많은 疾患이 알려져 있다. 구조 이상은 염색체의 切斷에서 시작되는데 대부분은 원래의 切斷端과 再결합해서 수복되나 원래와 다른 切斷端과 결합해서 구조이상이 생긴다. 이것을 交換型異常이라 하며 環, 2動原体, 逆位, 転座가 있다. 이와 같이 잘못된 치유방법을 하는것은 전체의 1%에도 미치지 못하나 유전적으로는 중대한

變位이다. 재결합하지 않은 單純切斷型도 형성되어 이것을 欠失이라 한다. 이들 이상은 피폭시에 세포가 세포週期의 어느期에 있는가에 따라서 染色体型異常(DNA複製前)과染色分体型異常(복제 후)이 된다. 이들의 명세를 그림 9에 표시하였다.

그림중에서, 주변 경계선이 밀폐된 것(欠失, 環, 2動原体)는 致死로 되는 것이고 열려있는 것은 생존가능(逆位, 転座)이다. 유전적으로는 생존가능한 염색체異常이 중요하다. 交換型異常은 염색체上에 생긴 두개의 상처로 형성되기 때문에 일반적으로 그 収量(Y)과 선량(D)과의 관계는 $Y=aD+bD^2$로 표시된다. 즉, 2개의 상처가 다같이 1개의 荷電粒子의 통과로서 주어질때(1飛跡事象)와 각각 독립한 2개의 하전입자에 의해서 주어지는 경우(2飛跡事象)의 合으로서 주어진다. 高LET방사선에서는 1비적사상이 占하는 비율이 높다.

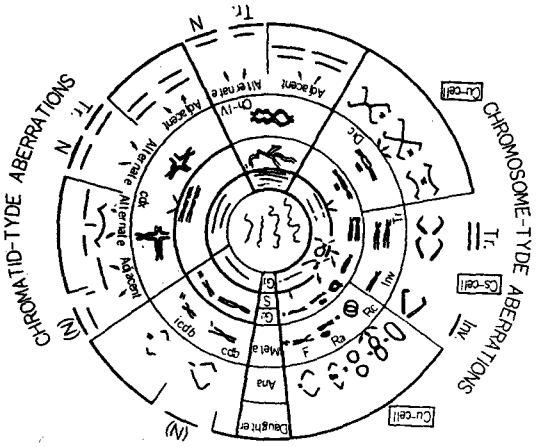

그림 9 放射線照射에 의해서 形成되는 染色体異常의 型과 細胞分裂에 따르는 異常染色体의 運命

Cu-cll : 不安定型의 染色体異常을 가진細胞, Cs-cell : 安定型의 染色体異常을 가진細胞. Dic : 2動原体染色体, R : 環状染色体. F : 切斷. Inv : 逆位. Tr : (相互) 転座. cdb : 染色分体切斷. icdb : 同位染色分体切斷. cdx : 染色分体交換. N : 正常

20. 遺伝有意線量과 白血病有意線量

유전적영향은 확율적영향이므로 少선량 피폭에 있어서는 대상이 多数가 되어 영향이 나타난다. 돌연변이의 대부분은 劣性이므로 나타나지않은채 몇 世代 전해져서 집단내에 확산하여 점차 奇形 또는 기타의 장해를 집단內 여러곳에서 산발적으로 표현하게 된다. 따라서, 자손에 대한 유전적영향은 피폭을 받은 개인만을 생각하는 것은 무의미하며 집단전체 선량의 總合을 생각해야만 한다.

이들을 고려하여 유전적영향을 평가하는 것이 遺伝有意線量(genetically significant dose)이다. 이것은, $\Sigma_j \Sigma_k N_{jk} W_{jk} D_{jk} / \Sigma_k N_k W_k$로서 주어진다. N_{jk}는 피폭j를 받은 年令階層 k의 사람수, N_k는 연령계층 k의 總人数, W_{jk}는 피폭j를 받은 연령계층 k의 한사람에 대한 아이期待値, W_k는 연령계층k의 한사람에 대한 아이의 기대치, D_{jk}는 연령계층k의 한사람이 받은 j의 生殖腺피폭선량이다.

21. 自然放射線으로부터의 被曝

자연방사선의 線源으로는 우주선, 地殻으로부터의 방사선, ^{40}K, ^{87}Rb 등의 体內섭취에 의한 것 등이 있다. 그 영향의 크기는 지각과 우주선은 같은 정도이며, 体內피폭은 지각으로 부터의 体外피폭의 약 1/2이다. 정상지역의 자연방사선에 의한 年線量은 대체로 100 mrad이나 특정 지역에서는 1 rad나 되는곳도 있다. 人体의 생식선, 肺, 骨內膜세포, 赤色骨髓의 4가지에 대해 자연방사선에 의한 피폭선량이 따로 산출되고 있다. 이들 4가지의 피폭선량의 차이는 체내섭취에 의한 피폭선량의 차이에 따른 것인데 肺의 피폭이 가장 높으며 이는 주로 ^{222}Rn의 吸入에 따른것이다.

管理技術

1. 主要한 放射性物質

방사성물질은 tracer的응용(非密封線源의 이용), 비파괴검사나 계측기술로의 응용 (밀봉선

원의 이용)에 사용되는 것이 중요하다. 따라서, 이들 선원의 물리적, 화학적성질, 붕괴형식, 生成法의 개요는 물론 그 외에 γ線源은 半價層(half-value layer, HVL)이나 1/10價層, 照射線量率常数, 선원의 사용방법이나 오염이 생겼을 때의 特異性(환경으로의 확산속도, 다른물질과의 化學結合, 檢出의 容易性)등에 대해서도 정리해두면 좋다.

排気排水나 內部被曝의 대상에는 ^{3}H, ^{14}C, ^{32}P, ^{35}S, ^{90}Sr, ^{125}I, ^{131}I, α線源. 차폐, 空間線量率 및 외부피폭의 대상에는 ^{60}Co, ^{90}Sr, ^{129}Ir, ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{241}Am, ^{252}Cf, 中性子源이 있다.

2. 放射線防禦의 原則

ICRP 1977년권고(puble-26)에서는 다음과 같은 線量制限体系를 권고하고 있다.

(a) **正当性-Justification**— 어떤 行爲도 그 導入이 이익을 가져오는 것이 아니면 채택해서는 않된다.

(b) **最適化-Optimization**— 모든 피폭은 경제적 및 사회적인 요인을 고려하여 合理的으로 달성할 수 있는 한 낮게(as low as reasonably achievable) 유지되어야 한다.

(c) **線量限度-Limitation**—개인에 대한 선량당량은, 위원회가 각각의 狀況에 따라서 권고하는 한도를 넘어서는 안된다(5 rem/年).

(a)～(b)～(c)의 순으로 검토하는 것이 원칙이다. 그리고 선량한도는 피폭에 기인하는 risk를 고려한다.

3. 放射線防禦를 위한 여러 量

吸収線量(absorbed does) D : gray ; Gy, rad 단위. $1\,Gy = 1\,J \cdot kg^{-1} = 100\,rad = 100\,erg \cdot g^{-1}$

線量当量(dose equivalent) H : $H = DQN$

D는 吸収線量, Q는 線質係数, N는 기타 補正係数의 積(현재 N는 1로 하고 있다). H의 단위는 sievert(Sv, D가 Gy 단위일 때), 또는 rem(D가 rad 단위일때)를 사용한다. 1 Sv=100 rem

Q는 D가 같더라도 線質이 다르면 방사선照射는 생물학적효과가 다르다는 것을 고려하는 係数로 문제가 되는 곳에서의 水中衝突阻止能 $L\infty$의 연속함수로 정하며 表 1의 관계가 있으나 실제로는 신체내에서의 충돌저지능(collision stopping power) 분포를 알 수 없을때 実効的인 値 Q를 사용한다. 이 외에 実効線量当量 (effective does equivalent) H_E, 線量当量指標 H_I, 予託線量当量 H_{50}, 年摂取限度 I_L, 集団線量当量 S, 線量当量予託등의 용어에 대해서도 알아두어야 한다.

表 1 (a) $L\infty$와 Q와의 관계

水中의 $L\infty$(KeV/μm)	Q
3.5 이하	1
7	2
23	5
53	10
175 이상	20

(b) $L\infty$의 분포가 不明일때 사용해도 좋은 $\bar{Q}$의 近似値

一次放射線	$\bar{Q}$
X(γ)선, 電子	1
에너지不明의 n, p 및 1(u) 보다 큰 電荷 1의 粒子	10
에너지不明의 α입자와 多量電荷粒子	20

4. 体外被曝의 防禦策

(1) **時間** 방사선下에서의 작업전에 충분한 준비와 연습을 하여 작업시간을 짧게 하여 피폭의 감소화를 도모한다.

(2) **차폐** 不必要한 방사선은 되도록 밀폐한다. 선원과 사람사이에 차폐물을 설치한다. 방사선의 종류, 에너지에 의해 透過力이 다르므로 적절한 대책을 필요로 한다.

β선원 2.3MeV의 ^{90}Y는 Al로 약 $1.1\,g \cdot 1cm^{-2}$ (4.1mm)의 飛程(range)이 있다. 그래서 대개의 β선원은 두께 1～2 cm의 투명 plastic판으로

차폐효과가 있다. 制動放射를 수반하는 것을 고려할것. 최대에너지 E_o(MeV)인 β선의 制動X선은, W(MeV)$=3.5\times10^{-4}ZE_o$의 式으로 近似시킬 수 있다. Z는 차폐재등의 원자번호. β^+선원은 陽電子 消滅방사선(511keV)을 고려할 것.

γ線源은, 대단히 투과력이 크므로 鉄, 鉛의 차폐재를 사용한다. 가는 線束과 넓은 線束에서는 減弱(減衰)의 모양이 다르다. 넓은 線束의 경우는 散乱방사선의 영향을 build-up계수 B를 사용해서 보정한다.

減弱은, $I=I_oBe^{-\mu x}$로 표시한다. I_o는 차폐체에 入射되는 γ線束, I는 누설되는 γ線束, μ는 감약계수, x는 차폐체의 두께이다. B는 실험적으로 정하나 대체로 $\mu x<1$일 때 $B\fallingdotseq1$, $\mu x>1$일때 $B\fallingdotseq\mu x$라 해도 좋다.

μ대신에 線束의 1/2 또는 1/10이 되는 차폐체의 두께로 표시할때가 많다. 이것을 半価層, 1/10価層이라 한다. ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{192}Ir, ^{226}Ra 線源과 콘크리이트, 鉄, 鉛과의 1/10価層의 概略値를 알아두어야 한다.

中性子線源은 수소를 많이 포함하는 재료(파라핀, 물, 콘크리이트)와 무거운 재료를 組合시킨다. 熱중성자에는 硼素含有材를 사용한다.

(3) **距離** 点状線源은 거리의 逆自乘으로 선량율이 감소된다. 線源으로부터 되도록 떨어져서 작업(遠隔操作)하는 것이 중요하다.

시간, 차폐, 거리를 3원칙이라 한다.

5. 体内被曝의 防禦策

非密封線源의 취급은 항상 ① 吸入, ② 經口, ③ 피부나 상처로 부터의 侵入에 의해서 체내에 섭취될 위험이 있다. 이것을 방지하기 위해서는 ①汚染의 방지(선원의 밀폐, hood나 glove box내에서의 취급), ② 환경의 관리 (작업환경중에 飛散된 방사성물질이 재빨리 발견될 수 있도록 항상 모니터링을 한다),③ 작업에 익숙해진다 (cold run, mock-up test가 不可欠). 시설에 대해서는 ① 稀釋, ② 分散, ③ 除去의 3원칙이 해당된다. 배기, 배수시설에서의 환기, filter에 의한 제거, 貯留槽에서의 減衰나 稀釋水 處理등. 작업자에 대한 주의로서는 ① 經口섭취방지를 위한 음식, 흡연의 금지, 피펫트류 口吸引금지, ② 표면오염, 피부오염 방지를 위해 실험복, 신발, 고무장갑을 착용한다. 상처가 있으면 침입의 위험성이 현저하게 높아지므로 주사침이나 유리기구의 파편에 충분히 주의할 것. 경우에 따라서는 마스크, 모자의 착용, 気密服등 위험도에 따라서 처리를 한다.

6. 放射線의 모니터링

방사선, 방사성물질에 의한 피폭의 평가, 관리에 관한 측정을 monitoring이라 한다. 管理区域내와 그 경계(거주구역, 사업소), 배수구나 배기구에서 방출되는 것을 포함해 관리하는 작업환경의 모니터링, 관리구역내에 출입하는 각 개인을 관리하는 개인모니터링으로 나누어진다

작업환경은 ① 공간선량율, ② 공기중 방사성물질의 농도(기체, 먼지), ③ 水中방사성물질의 농도, ④ 물건의 표면오염밀도등의 측정이 있다 천연에 존재하는 라돈(^{222}Rn), 토론(^{220}Rn) 계열도 포집한다.

표면오염측정에는 survey法(직접)과 smear法(간접)이 있다. 각각의 特質을 정리해두는 것이 좋다. 표면오염에는 ① 제거되기 쉬운 오염(loose), ② 제거되기 어려운 오염(fixed)이 있으며, ①은 오염 확대화와 体内오염의 위험성이 있다.

개인모니터링에는 体外피폭의 측정(FB, TLD, PD등의 착용), 체내피폭의 측정(bioassay, body counter)이 있다. 측정방법, 신체기관의 피폭선량과 감수성에 대해서 정리해 둘 것.

7. 放射線管理上의 基準

관리구역의 설정조건, 사용시설에서의 선량, 사업소등의 경계에서의 선량, 최대허용공기(水)中농도나 배기, 배수의 허용농도, 최대허용 표면밀도나 외부로 반출하는 물건의 허용밀도, 개인의 관리기준에는 최대허용선량, 최대허용集積総量, 수시출입자에 관한 허용피폭선량, 일시출입자의 허용피폭선량, 및 女性에 관한 피폭선량.