



生物과 放射線

—影響과 效果—

1. 生物에 미치는 放射線影響

放射線만이 유발시키고 방사선이외의 것은 유발시키지 않는 放射線 固有의 障害란 존재하지 않는다. 방사선이 일으키는 장애와 동일한 것이 物理的 또는 化學的인 原因에 의하여서도 발생된다.

(1) 放射線의 生物에 대한 影響의 發現順序

그림1에 방사선影響의 發現順序를 나타내었는데 生物에 대한 방사선의 最初작용은 物理的이라고 할 수 있다. 방사선은 生物을 구성하고 있는 原子나 分子에 物理的으로 작용하여 에너지를 준다. 이때 원자나 분자가 生物의 조직중에 어떻게 배열되어 있는가, 그 方法은 문제가 되지 않는다. 이에 대해 보통의 光이나 적외선은 物質을 구성하는 化合物의 구조에 의해 그 反應이 다르고 物質을 통과할 때 특정한 光만이 흡수된다.

방사선이 原子 또는 分子와 상호작용한 결과, 分子가 분열하여 斷片이 되어 遊離基(反應하기 쉬운 상태의 原子나 分子)나 이온이 된다. 이 斷片(基, 이온)은 먼저의 化學的 安定性이 없어졌기 때문에 서로 反應하거나 또는 다른 변화하지 않은 分子와 반응하여 새로운 化合物을 만들어 세포의 化學的인 평형을 파괴한다.

특히 물은 세포의 70%를 구성하고 있기 때문에 물은 방사선에 의해 物理的 및 化學的 變化를 일으킨다고 생각된다. 물의 分子는 방사선에 의해 電離되어 ($H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-$), 反應性이 강한 遊離基($H\cdot$ 와 $HO\cdot$ 基)가 생성되어 이들 基가

각각 結合하여 H_2O_2 와 H_2 가 된다. 이들 基나 分子는 어느것이나 세포의 중요한 구성분자(核酸과 단백질)에 작용하여 영향을 준다. 이와같은 作用을 間接作用이라고 한다.

그러나 세포의 중요한 구성분자가 물에서 생성된 遊離基의 介在없이 방사선에 의해 직접 전리되어 傷害를 받을 때도 있다. 이것을 直接作用이라고 한다. 세포의 傷害에서 직접작용과 간접작용이 각각 어떤 역할을 하고 있는지 명확하게 알지는 못하지만 많은 경우에 兩者가 같이 作用하고 있는 것으로 생각되고 있다.

방사선량에도 의존되지만 방사선에 의해 중요한 세포구성분자의 生化學的인 合成作用이 억제되어 때로는 완전히 정지하고 만다. 이와같은 억제작용은 核酸의 合成에서 증명되고 있다. 合成作用이 잘 이루어지지 않으면 세포내의 구조물이 유지할 수 없게 되어, 성장이나 세포분열이 진행되지 못하게 된다. 실제로 세포분열의 정지가 확실히 눈으로 볼 수 있는 방사선의 효과이다. 아마 세포의 대부분의 機能도 구조의 유지와 같이 다소간 방사선으로 損傷된다고 볼 수 있다. 이와같은 방사선의 全體效果가 종합되어 세포가 죽어버린다.

세포의 죽음은 여러가지 機構에 의해 일어날 수 있다. 어떤 경우에는 염색체가 切斷되는 형태로 세포핵이 損傷을 받음으로서 세포가 죽을 때도 있다. 염색체의 切斷은 간혹 회복되기도 한다. 이것은 切斷面이 재결합하기 때문이다. 그러나 어떤 때에는 어떤 비율로 일부는 회복되

지 않는다. 세포분열시 염색체의 斷片이 없어 질때도 있다. 이와같은 경우에는 損傷은 영구히 고쳐지지 않는다. 염색체의 切斷面이 결합할 때 그 결합은 방법에 따라서 새로운 염색체 부족상태가 되어 그로 인해 세포분열시 세포가 죽는 경우도 있다.

細胞質을 照射했을 때와 細胞核을 照射할 때를 비교하면 세포핵을 조사한 쪽에 중요한 결과가 생긴다. 그 이유는 세포핵에는 염색체가 있고 각각의 염색체는 세포핵당 1개나 2개밖에 없기 때문이다. 이것에 대해서 세포질에 있는 구조체는 보통 그 수가 많아서 그중 1개나 수가 없어져도 중대한 결과가 되지 않는다.

그러나 細胞質의 損傷을 무시해서는 안된다. 代謝過程의 대부분은 세포질내에서 일어나고 있기 때문에 단백질합성과 같은 대사과정이 방사선에 의해 늘 영향을 받게 되면 세포질의 損傷은 상상 이상으로 중요한 것이 된다.

放射線效果中の 하나는 유전적인장해이다. 이것은 2개의 다른 돌연변이기구, 즉 염색체와 유전자의 돌연변이로 발생한다. 방사선에 의한 염색체의 돌연변이는 염색체절단의 결과로 생긴다. 2개 이상의 切斷이 동일한 또는 다른 염색체상에 생기면 再結合(融合)할 때 유전자의 원래의 배열순서가 바뀔때가 있다. 유전자의 배열순서가 바뀌던지 염색체의 일부 또는 1개의

염색체가 없어지면 대부분의 경우에 細胞는 死滅하지만 때로는 염색체의 損傷이 子細胞에 전달될 때도 있다.

유전자 돌연변이의 성질은 세균이나 바이러스의 研究로 대단히 명확해졌다. 核酸(DNA)의 塩基配列의 어떤 형태가 유전자라고 생각되고 있지만 이 塩基의 순서, 組合이 바뀌면 돌연변이가 일어나게 된다.

그러나 돌연변이의 機構는 아직 잘 알려져 있지 않다. 下等生物의 연구에 의하면 돌연변이는 복잡한 과정을 거쳐서 일어나고 이 과정의 제1단계에선 損傷이 어느정도 회복가능하며 어떤 시간후에 不可逆의이 된다.

다른 방사선효과와 같이 돌연변이의 유발도 선량에 의존하는데 低線量에서도 線量에 비례하나 이 비례상수는 線量率과 더불어 변한다.

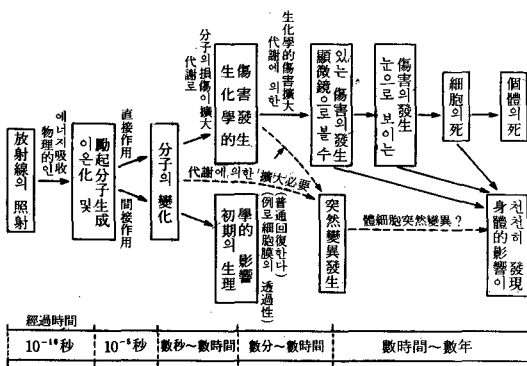
(2) 放射線의 照射狀況과 生物學의 效果와의 關係

(a) 放射線量과 效果와의 關係

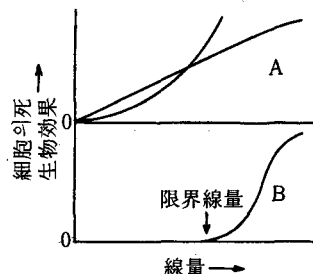
방사선의 생물에 대한 효과는 방사선의 선량에 따라 달라진다.

세포의 죽음빈도와 선량과의 관계에 대해서 많은 定量的인 研究가 수행되고 있다. 세포의 어떤 집단이 放射線照射를 받으면 일부분의 세포만이 죽는다. 이 사망하는 세포수(또는 전체에 대한 占有率)는 선량에 의존한다(그림2 참조). 선량과 細胞死의 비율이 비례할때가 있다. 그러나 대부분의 경우 간단한 비례관계가 아니고 복잡한 관계가 있다. 어쨌든 사망하는 세포의 비율은 선량의 증가와 더불어 증가한다.

〈그림 1〉 放射線影響의 發現順序



〈그림 2〉 線量—效果曲線



선량과 생물효과의 관계는 일반적으로 그림2에 표시한 바와 같이 두종류이다. 어떤 효과에선 그림의 A와 같이 효과가 어떤 선량범위내에서 선량에 정비례한다. 이때에는 아무리 작은 선량이라도 그 선량에 따른 효과가 나타난다. 그 代表的인 것으로서 유전자의 돌연변이 발생이 있다. 또 방사선에 의한 人體의 백혈병 발생에 대해서도 이와같은 비례관계를 想定할 수 있다.

또 어떤 효과에선 그림의 B에 보는 바와 같이 어떤 線量以下에선 효과가 나타나지 않는다. 이 효과가 나타나지 않는 境界線量을 限界線量(threshold dose)이라고 한다. 哺乳動物에 대한 致死效果가 이 예에 해당된다.

線量-效果關係는 많은 효과를 대상으로 低線量에서 연구되어 왔다. 효과의 빈도 또는 정도는 선량과 직접관계가 있지만, 極低線量에서의 효과는 極히 작고 세포수와 動物의 수가 많아져야만 그 효과가 증명된다. 低線量에선 영향을 검출하려고 하여도 실제적인 면에서 제한이 있다. 영향을 발견하기 위해 필요한 실험의 규모가 너무 커지기 때문이다. 특히 極低線量에서는 영향의 크기가 아주 적어져서 처리할 수 없을 정도의 많은 수의 생물이나 세포가 필요하게 된다.

(b) 線量率과 效果와의 關係

방사선량이 동일하여도 방사선조사기간이 길고 짧음에 따라, 또 1회조사인가, 분할조사인가 또는 연속조사인가 등의 조사시간경과에 따라서 영향의 정도는 현저하게 달라진다. 동일량의 선량을 1회 조사했을 때의 영향이 數回로 분할하여 조사했을 때의 영향보다 일반적으로 크다. 조금씩 방사선조사를 받으면 많은 경우 회복되어 영향이 적어진다.

예를들면 人體는 300rad를 1회 단시간에 조사하면 50%의 사람이 사망하지만, 30rad를 매년 10년간 조사하면 한사람도 사망하지 않는다. 시간이 경과하는 동안에 방사선효과가 消失되기

때문이다. 단, 精子에 대한 유전자 돌연변이 유발의 효과는 회복되지 않는다. 또 암유발에 대해서는 회복되는지 안되는지 不分明하다.

(c) 放射線의 種類, 에너지와 효과와의 關係
방사선량이나 선량율이 동일하여도 방사선에 의해 생기는 個個의 전리가 生體內에서 서로 공간적으로 근접하여 일어나고 있는지, 떨어져서 일어나고 있는지에 따라 방사선의 영향은 대단히 다르다.

예를들면 廣島의 원폭에서 방사된 中性子線은 통과하는 경로에 따라서 생기는 전리의 밀도(水中 1 μ m당의 전리수로 나타낸다)가 크고, 백혈병유발에 대해서 전리의 밀도가 작은 γ 線에 비해 효과가 수배나 컸다.

다른 종류의 방사선에 대해서 나타나는 生物學的 效果의 大小를 나타내기 위해서 生物學的 效果比(RBE, Relative Biological Effectiveness)라는 비율이 사용되고 있다. 어떤 방사선의 RBE는 ^{60}Co 선원에서 나오는 γ 선을 기준으로 다음과 같이 정의된다.

$$RBE = \frac{\text{문제로 하는 방사선의 생물학적 효과}}{^{60}\text{Co선원의 } \gamma\text{선의 생물학적 효과}}$$

이것을 수량적으로 表示하기 위해서 동일한 생물효과에 대해서

$$RBE = \frac{\text{효과를 나타내는데 필요한 문제방사선 선량의역수}}{\text{효과를 나타내는데 필요한 } ^{60}\text{Co } \gamma\text{선 선량의역수}}$$

$$RBE = \frac{^{60}\text{Co } \gamma\text{선의 선량(rad)}}{\text{문제 방사선의 선량(rad)}}$$

예를들면 1회 조사조건에서 생쥐의 50%를 사망시키는데 필요한 선량이 어떤 中性子線으로 80rad, γ 線으로 800rad이면 그 中性子線의 RBE는 10이 된다.

일반적으로 방사선의 생물학적 효과는 방사선의 조사상황(선량, 선량율, 전신조사, 국부조사), 생물의 상태, 주목되는 효과에 따라 다르고 모든 경우에 적용되는 RBE는 존재하지 않는다.

(3) 生體의 因子와 放射線의 效果

放射線의 生物學的 效果에 미치는 因子로서 照射하는 放射線側의 因子가 있지만 放射線照射를 받는 生體側에도 放射線의 效果發現에 關여하는 因子가 있다.

(a) 細胞의 種類

細胞의 種類를 여러가지로 바꾸어 그들 細胞에 放射線을 照射하고 일정한 影響을 주는데 必要한 線量의 크기를 調査해보면, 細胞의 種類에 따라서 必要한 線量의 크기는 상당히 달라진다. 이것은 放射線에 대한 細胞의 感受性 또는 抵抗性이 다르기 때문이다. 問題로 하고 있는 效果가 細胞의 죽음이면 細胞의 性質(例를 들면 細菌은 哺乳動物의 細胞보다 抵抗性이 있다), 細胞核의 크기(植物細胞에선 細胞核의 크기에 細胞의 感受性이 거의 比例하고 있다) 및 倍數性(半數體細胞는 倍數體細胞보다 敏感)이 특히 感受性和 關係가 있다.

(b) 細胞分裂의 時期

分裂期의 細胞는 休止期의 細胞에 비해 敏感하다. 癌細胞는 分裂中인 것이 많고 正常細胞보다 放射線에 敏感하기 때문에 癌의 放射線治療가 可能해진다.

(c) 細胞가 位置하고 있는 生理的 條件

細胞의 感受性은 溫度나 細胞의 水分含有量에 따라 變化한다. 또 有名한 것으로서 酸素의 濃度가 있다(酸素效果라고 한다). 細胞에로의 酸素의 공급이 적으면 細胞의 感受性이 저하하고 같은 影響을 주기 爲해 높은 線量이 必要하게 되는데 그 理由는 잘 알려져 있지 않다.

또 어떤 種類의 藥劑(化學防禦劑, 例로 Cystamin 등)를 放射線照射前 또는 照射中에 投與하면 어느정도까지 細胞를 保護하여 放射線의 傷害가 작아진다. 이들 化學藥品은 細胞가 利用하는 酸素量을 減少시키던가 또는 照射로 생긴 遊離基와 反應하기 때문에 影響을 작게 하는 것일 것이다. 이 機構는 잘 모른다. 放射線照射後

〈表 1〉 動物의 半致死線量의 比較

動物	X線 또는 γ線에 對한 半致死線量 LD ₅₀
염 소	205 (rad)
당 나 귀	230~310
배 지	190~310
양	240
개	240~320
사 람	~300
모 모 로 트	380~490
원 송 이	520~550
생 귀	520~670
토 끼	680~910
흰 귀	800~820

LD₅₀은 體軸 中心에서의 吸收線量(rad)으로 表示하였다.

LD₅₀의 값은 X線, γ線의 에너지, 動物의 系統에 따라 약간의 差가 있다.

投與하여 効力이 있는 藥劑는 現在 發見되고 있지 않다.

(d) 年 令

일반적으로 젊은(發育期의) 生體는 感受性이 높다. 胎兒, 幼兒의 白血病 發生率은 成人보다 높다.

(e) 種類가 다른 것

動物의 種類(種子라고 한다)가 다르면 放射線에 대한 感受性이 다르다. 100마리의 動物을 照射하여 그중의 50마리(50%)가 死亡하는 線量을 半致死線量(LD₅₀이라 쓴다)이라 부르는데 表1에 표시한바와 같이 哺乳動物들도 放射線感受性이 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. 一般的으로 半致死線量에서 본 放射線感受性의 順序는 哺乳動物>鳥類, 魚類, 개구리>파충류>細菌>아메바이다.

2. 放射線의 人體에 對한 影響

放射線의 人體에 대한 影響은 그 特徵에 따라 몇 가지로 區分된다.

(1) 放射線의 人體에 대한 影響의 區分

脫毛 등 放射線의 영향이 放射線을 被曝한 個人에 限定되는 경우와 영향(병의 發生)이 子女나 孫子 등 子孫에 나타나는 경우가 있다. 放射線을 쫓인 個人에 限定되는 影響을 身體的 影響, 子孫에 나타나는 影響을 遺傳的 影響이라고 부른다 (表2 參照).

身體的 影響에는 白血球의 減少와 같이 放射線 被曝後 비교적 빨리 約 1週間以內에 나타나는 早期影響과 白血病과 같이 때로는 10年, 20年이라는 긴 潛伏期後에 나타나는 影響(晚發性 影響이라 부른다)이 있다.

遺傳的 影響으로는 遺傳子가 變化하여 元來의 性質과 다른 것이 되는 遺傳子突然變異에 의해 생기는 影響과 染色體 自體가 切斷되던가, 癒着되던가 또는 數가 적던가, 많던가 하는 染色體 異常에 의한 影響이 있다. 染色體異常에 의한 影響쪽이 대개 影響이 크다.

(2) 放射線의 身體的 影響

(a) 全身이 放射線被曝을 받았을 경우.

全身이 放射線에 被曝되면 線量의 크기에 따라 影響이 나타나는 方式이나 症狀이 다르다. 例를들면 그림3에서 보는바와 같이 5~25rad에서 血液中的의 白血球의 一種인 淋巴球에서 染色體異常이 보이지만 臨床的으로 問題될만한 影響은 나타나지 않는다. 그러나 100rad前後에서 吐氣나 명백한 血液變化가 나타난다.

全身(또는 身體의 大部分)이 비교적 短期間에 放射線에 被曝되면 表3에 나타낸 것과 같이 一群의 症狀이 나타난다. 이것을 急性放射線症이라 부른다. 그 臨床的 經過는 被曝線量의 크기에 따라 다르지만 (i) 初期, (ii) 潛伏期, (iii)

〈表 2〉 放射線影響의 區分

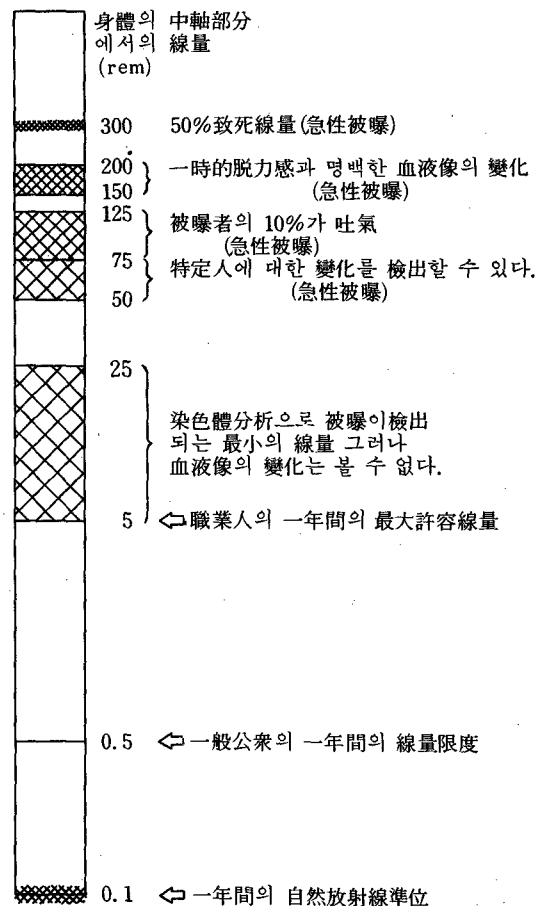
放射線의 影響	身體的 影響	早期影響
		晚發性影響
遺傳的 影響	遺傳子突然變異	染色體異常

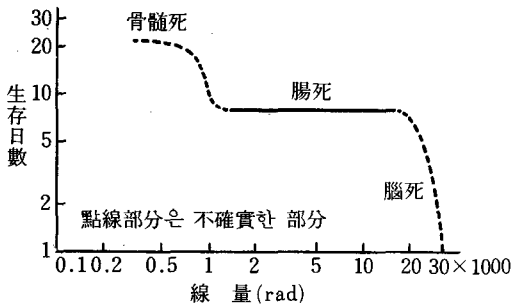
〈表 3〉 X線 또는 γ線의 全身 1回照射에 의한 急性症狀(사람)

被曝後의 時間	致死線量 (700~1,000rad)	半致死線量* (400~500rad)	致死線量以下 (100~200 rad)
第 1 週	1日 以內에 吐氣와 嘔吐		
第 2 週	吐氣, 嘔吐, 설사 發熱, 목의炎症, 脫水, 초체해져 죽음	特別한 徵候없음	特別한 徵候없음
第 3 週	一般의인 不快感, 食慾喪失, 脫毛, 出血, 蒼白, 설사		
第 4 週	食慾喪失 脫毛, 목의炎症, 蒼 白, 出血, 설사 發熱, 목의炎症, 초체해져 죽음		
	回復開始, 合併症이 없으면 死亡하지않 음		

* 이 表에서의 線量은 身體의 中軸部分의 線量이 아니고 表面에 가까운 部分의 線量이다. 空氣中線量과 거의 비슷하다.

〈그림 3〉 線量과 身體的 影響의 關係





〈그림 4〉 사람의 급성放射線死亡線량과 生存日數와의 관계

増悪期 및 (iv) 回復期로 大別할 수 있다.

또 線量範圍에 따라 症狀의 特徵이 달라진다.

100~500rem에선 造血臟器의 障害가 主症狀이다.

500~2,000rem에서는 胃腸症狀이 심해진다.

數千 rem 以上에서는 中樞神經이 損傷된다.

數量이 크면 死亡하지만 線量範圍에 따라 死因이 달라진다.

· 1,000rem 以下에선 造血臟器인 骨髓의 損傷 때문에 血液(白血球, 赤血球, 血小板)의 生産이 中止되고 白血球의 減少에 의한 細菌感染, 血小板의 減少에 의한 出血 등에 의해 20日前後에서 生命을 잃는다. 이것을 骨髓死라고 부른다.

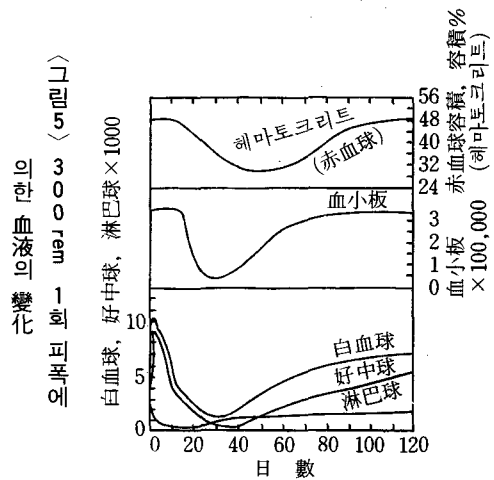
1,000~10,000rem에선 胃腸管의 内表面의 粘膜炎이 損傷되어 脱水, 營養의 補給困難, 細菌의 侵入 등으로 8日 前後에서 死亡한다. 이것을 腸死라고 부른다.

10,000rem 以上에선 中樞神經의 損傷 때문에 경련 등을 일으켜 數分~數時間에서 死亡한다. 이것을 腦死라고 한다.

線量과 生存日數와의 關係는 그림4와 같이된다.

(b) 造血臟器에 對한 影響

人體의 血管中을 흐르는 血液은 表4에 표시한바와 같은 成分으로 되어있다. 血液의 有形成分은 거의 骨髓에서 만들어지는데 淋巴球는 淋巴臟器(淋巴節, 脾臟)에서 만들어진다. 造血



〈表 4〉 血液의 成分

血液	無形成分(血漿)	血清	
		纖維素	
	有形成分	顆粒球(57%)	好中球(53.5%)
好酸球(3%)			
淋巴球(38%)		好塩基球(0.5%)	
		單球(5%)	

()内는 白血球百分率(平均值)

臟器가 放射線에 被曝되어 血液을 生産할 수 없게 되면 血管中의 血液變化로서 觀察된다. 그림 5에 그 一例를 나타내었다.

(i) 白血球

表4에 表示한 白血球의 種類에 따라 感受性과 回復의 速度가 다르다. 淋巴球는 그 自體가 感受性이 높고 빨리 減少하기 始作하지만 回復(淋巴球의 生成, 補給)도 다른 白血球보다 빠르다(그림5參照). 淋巴球가 減少되는 最小의 線量은 25rad이다. 단, 25rad가 檢出되는 것은 平常의 淋巴球數가 日常時의 檢査에 의해 미리 알고 있을 경우에 限한다. 顆粒球는 淋巴球보다 抵抗性이 있고 또 減少 및 回復의 始作이 늦다. 被曝直後에 白血球가 一時的으로 增加할 때가 있다. 이것은 初期白血球增多라고 불리고 있다. 主로 好中球의 增加 때문이다. 好中球는 淋巴球보다도 抵抗性이 있고 50~100rad 以上에서

變化한다.

(ii) 赤血球

赤血球은 放射線에 대해 抵抗性이 있고 赤血球自體를 變化시키려면 數千rad가 必要하다. 200rad 以上에서 骨髓中の 赤血球前身인 細胞(赤芽球)가 侵害되기 때문에 赤血球의 減少가 일어나지만 赤血球의 平均壽命은 120日 정도이기 때문에 血管中の 血液의 赤血球數의 變化는 늦다(더우기 淋巴球의 壽命은 1日以内~數日, 一部數個月 以上인 것도 있다. 顆粒球은 3일 정도). 長期被曝에 의해 慢性障害가 일어나면 貧血現象이 나타난다.

(iii) 血小板(또는 栓球)

時期的으로 顆粒球은 계속해서 血小板의 減少가 생긴다. 臨牀的으로 出血하기 쉬워진다.

以上에서 一般的으로 다음과 같이 말할 수 있다. 1) 大量的 放射線이 아닌 限, 血流中の 血球은 成熟段階에 있고 淋巴球를 除外하고 直接 障害를 받는 일이 없다. 2) 各血球의 壽命에 따라 그 變化가 觀察될 때 까지의 時間이 다르다.

1回全身照射의 放射線量과 血液과의 關係는 表5에 나타낸 바와 같다. 造血臟器의 障害中에서 가장 注目할 것은 被曝後 몇 년 뒤에 나타나는 血液의 癌인 白血病의 發生이다.

(c) 生殖腺에 對한 影響

生殖腺이란 生殖細胞(精子, 卵子)를 만드는 臟器를 말하고 男子에선 睪丸, 女子에선 卵巢이다. 生殖腺에는 홀몬을 만드는 役割도 한다. 放射線被曝으로 生殖腺에는 身體的影響과 遺傳的影響이 나타난다.

(i) 睪丸

睪丸은 精子를 만드는 機能을 갖고 있다. 精原細胞→1次精母細胞→2次精母細胞→精子細胞→精子의 順序로 人體에서는 約 120日 걸려서 精原細胞에서 精子가 形成된다. 放射線感受性은 이 發生順序대로 未分化된 精原細胞가 가장 크고 完成된 精子가 가장 작다.

放射線被曝에 의해 精原細胞가 죽어 不妊이 된다. 不妊이 되는 生殖腺의 線量은 男女 같은 정도지만 線量과 不妊 정도와의 關係는 表6에 表示된 바와 같다. 홀몬을 만드는 睪丸의 細胞는 放射線感受性이 낮아서 홀몬의 生産은 放射線의 影響을 받기 힘들다.

(ii) 卵巢

卵巢은 卵子를 만드는 場所이다. 卵原細胞→1次卵母細胞→2次卵母細胞→卵子의 順序로 卵子가 形成된다. 특히 人間과 같은 哺乳動物에선 卵原細胞는 母親의 胎內에서 增殖을 完了하고 卵母細胞가 되고 出生後에는 精原細胞에 해당되는 卵原細胞는 存在치 않는다. 卵母細胞의 죽음에 對한 放射線感受性은 높고 卵子보다 죽기 쉽다. 照射에 의해 홀몬機能이 充足되어 月經不順이 일어날 때가 있다.

(d) 皮膚에 대한 영향

皮膚은 表皮와 眞皮로 나뉘고 眞皮下의 皮下

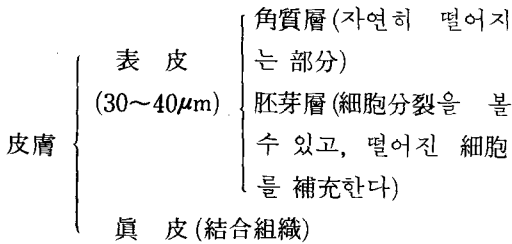
〈表 5〉1回全身被曝의 線量과 血液의 變化와의 關係

線量(rem)	主要한 變化
5~ 25	大部分은 無變化, 初期白血球增加가 나타날때가 있다.
25~ 50	初期白血球增加(好酸球增加), 白血球動搖, 淋巴球減少
50~ 100	初期白血球增加에 대해 白血球減少
100~ 200	長期白血球, 血小板減少
200~ 400	高度白血球減少, 血小板, 赤血球의 減少, 出血性傾向
400~1,000	白血球의 急激한 減少, 血小板減少, 赤血球減少, 出血, 化濃등을 發生

〈表 6〉生殖腺의 1回線量과 效果와의 關係

線量	效果
~150rad	極히 短期間의 生殖力 低下
~250rad	1~2年의 一時的 不妊
500~600rad	一部 사람에게는 相當期間의 一時的 不妊, 많은 사람에게 永久不妊
800rad 以上	永久不妊

組織이 된다. 組織學的으로 다음과 같이 된다.



皮膚의 放射線被曝에선 表面에서 30~40미크론 以下에 있고 細胞分裂을 하는 胚芽層이 받는 線量이 問題가 된다. 皮膚에는 발톱, 손톱, 毛, 皮脂腺이 包含되어 있다. 毛髮에는 壽命이 있고 脫毛하지만 계속하여 補充된다. 放射線에 의한 皮膚의 變化로는 脫毛와 紅斑이 있다. 1回照射의 경우 線量과 皮膚障害의 關係는 表 7에 나타내었다.

(e) 胃腸管에 대한 影響

胃腸管中 放射線의 影響을 받기 쉬운 곳은 小腸이다. 小腸이 1,000~2,000R 以上の 放射線을 받으면 小腸의 上皮細胞가 障害를 받는다. 또 腸의 運動, 消化液의 分泌 등 腸의 機能을 잃는다. 上皮細胞의 細胞分裂이 阻止되기 때문에 차차 上皮細胞의 數가 不足해지고 腸의 表面이 露出되는 結果로 水分, 電解質이 身體에서 없어지고 또 細菌이 血液中에 侵入하여 死亡한다. 線量이 1,000~2,000R 以下이면 抗生物質의 使用, 水分, 塩類의 補給, 營養의 補給으로 治療가 可能할 때도 있다.

上皮細胞는 數십R 以上の 線量으로 變化를 일으키지만 600~700R 以下の 線量이면 上皮細胞는 回復한다. 단 上皮細胞가 回復하여도 造

(表 7) X線, β 粒子의 1回線量과 皮膚의 急性變化와의 關係

線 量	皮膚의 急性變化
300~500rad(脫毛線量)	脫 毛
500rad	紅斑, 色素沈着
700rad	水泡形成
1,000rad	潰瘍形成

血臟器의 感受性이 높은 사람중에는 造血臟器의 障害로 死亡하는 사람도 있다.

(f) 晚發生影響

晚發性影響이란 放射線被曝後 상당한 歲月이 經過된 후에 나타나는 影響을 말한다. 放射線被曝과 症狀가 나타나는 때는 오랜 歲月이 經過된 후이고 放射線以外的 다른 原因에 의해서도 放射線에 의한 것과 같은 症狀가 일어나기 때문에 因果關係를 明確히 하기는 어렵다. 被曝狀況 등을 充分히 考慮하여 合理的인 判斷을 내려야 한다.

主要한 晚發性影響으로는 1) 惡性腫瘍(白血病을 包含), 2) 組織에 대한 部分的影響(白內障, 不妊 등), 3) 壽命의 短縮 및 4) 成長과 發生에 對한 영향(胚, 胎兒에 대한 影響)을 들 수 있다.

(i) 惡性腫瘍의 發生

放射線에 의해 造血臟器, 皮膚, 鼻, 肺, 甲狀腺, 肝臟, 乳腺 등 많은 臟器와 組織에 惡性腫瘍이 發生된다고 認定되고 있다. 放射線被曝에서 惡性腫瘍出現까지의 潛伏期는 臟器, 組織에 따라 다르지만 2年에서 30年 또는 一生동안이 될 可能性이 있다. 白內障의 경우는 潛伏期는 짧고 2~25年인 것이 確認되고 있다.

惡性腫瘍은 被曝된 全員에게 發生되는 것이 아니고 그중 몇 명에게만 發生한다. 腫瘍의 發生率은 線量에 比例한다(線量-效果關係는 直線)고 假定되고 있다. 低線量의 領域에서도 線量-效果關係가 直線的인가 아닌가에 對해서는 그것을 證明하기가 대단히 어렵다. 例를 들면, 白血病의 경우 廣島, 長崎에서 많은 사람들이 原爆放射線에 被曝되었기 때문에 白血病이 增加하였다. 그 結果는 그림6에서 보는바와 같다. 高線量의 領域(100rad 以上)에선 rad 當 10萬名에 대해 每年 0.2名이 白血病이 된다는 結果였다.

日本에서는 白血病의 自然發生率이 10萬名에

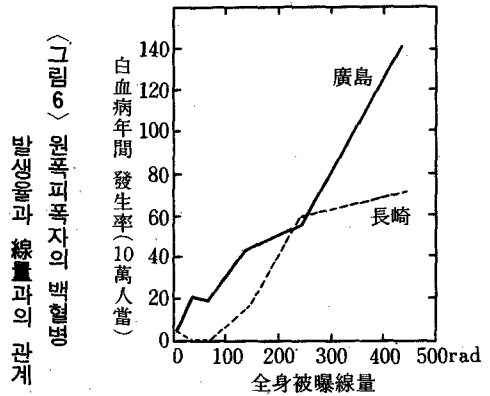
대해 每年 約4名이기 때문에 10萬名 全員이 1 rad를 쪼이면 白血病의 發生은 自然發生率에 1 rad의 放射線에 의한 增加를 合해 每年 4.2名이 된다. 發生率의 增加는 5%에 지나지 않는다. 自然發生率은 每年 약간 變動하기 때문에 5%의 增加를 檢討하는 것은 大端히 어렵다. 그래서 1rad나 10rad 程度의 被曝에서도 실제로 白血病의 發生이 增加하는지를 알기 어렵다. 事實上 中性子線보다 γ 線이 많은 長崎의 경우 100 rad 以下에선 放射線에 의한 白血病의 增加 與否를 알 수 없다.

高線量, 高線量率의 廣島, 長崎의 原爆被曝者의 發生率이 低線量, 低線量率에서도 그대로 利用할 수 있다고 하고 또 線量-效果關係가 低線量까지 直線的이라고 假定하여 1rem 當의 危險度(癌發生率)를 求해보면 表8과 같은 結果를 얻을 수 있다. 단 X線, γ 線의 低線量, 低線量率(5rem/yr 程度以下)의 被曝때는 그 危險度는 高線量, 高線量率에 기인한 危險度보다 實際로 작다고 생각하는 것이 動物實驗結果나 長崎의 原爆被曝者의 結果 등에서 볼 때 受當하다고 생각된다.

(ii) 内部被曝에 의한 肺癌과 骨癌의 發生

美國 등에서 우라늄 鑛山에서 일하는 鑛夫에게 肺癌이 發生된다고 報告되고 있다. 우라늄의 崩壞로 생기는 鑛石中の 라듐의 子核種인 氣體 라돈이나 라돈의 崩壞로 생기는 空氣中の 라듐 A, B, C를 肺에 吸收하였기 때문에 氣管支가 그들 核種의 α 粒子 照射를 받아 肺癌이 發生한 것이다.

또 夜光塗料로서 라듐-226을 時計의 文字盤에 붓을 빨면서 칠하던 美國의 工員이 潛伏期平均 10年에서 骨癌이 發生하여 死亡했다. 그러나 骨癌을 發生시키려면 骨癌의 發生部位에 數百 rad 以上の 線量이 必要하다. 라듐은 身體中에서 99%가 뼈에 集中하지만 放射能으로 表現하면 0.1 μ Ci 以上の 라듐-226이 뼈에 모였던 사



(表 8) 全身 1rad 當의 癌發生率

照射時의 年令	癌의 型	潛伏 期間 (年)	플라토 期間 (年)	危險度의 評價	
				絕對危險度모달 (死/10 ⁴ /年/rem)	絕對危險度모달 (%死亡增加/rem)
胎 兒	白 血 病	0	10	25	50
	其他 모든 癌	0	10	25	50
0~9 歲	白 血 病	2	25	2.0	5.0
	其他 모든 癌	15	(a)30 (b)一生	1.0	2.0
10歲以上	白 血 病	2	25	1.0	2.0
	其他 모든 癌	15	(a)30 (b)一生	5.0	0.2

람단이 骨癌에 걸리고 0.1 μ Ci 以下の 사람에서는 骨癌이 發生치 않았다. 라듐외에 뼈에 잘 모이는 核種(向骨性 核種)으로는 플루토늄-239, 스트론튬-90등이 있다. 어느 것이나 骨中에서의 滯留時間은 길고 骨癌發生의 염려가 있기 때문에 身體內로 吸入되지 않도록 특별히 엄격한 防禦手段을 講究할 必要가 있다.

(iii) 白內障의 發生

눈이 數百rad 以上の 線量을 받으면 結膜이나 角膜에 各各 結膜炎이나 角膜炎이 생기지만 水晶體는 晚發生影響으로 放射線에 의한 水晶體의 混濁, 즉 白內障이 생긴다. 눈의 水晶體混濁은 현미경으로 겨우 檢出되는 것부터 肉眼으로도 볼 수 있는 것까지 여러段階가 있고 視力 障害를 일으킬 때도 있다.

醫學的으로 問題가 되는 白內障은 X線의 경우 500rad 以上の 線量에서 發生한다고 한다. 線量-效果關係는 直線型이 아니고 S字型(Sigmoid型)이며, 限界值(threshold dose)가 있는

것 같다. 放射線에 의한 白內障의 潛伏期는 길고 原爆被曝後 5年後에 發生한 例가 報告되어 있다. 中性子線은 γ 線, X線에 비해 白內障을 일으키기 쉽고 5~10倍 效果가 있다(RBE=5~10).

生理的인 老化現象의 하나로서 老人性白內障이 發生될 경우가 있고 긴 潛伏期를 갖는 放射線白內障과의 區別은 어렵다.

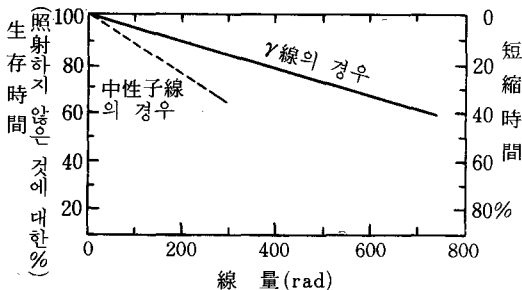
(iv) 壽命의 短縮

쥐나 마우스와 같은 動物에 全身照射를 하면 線量에 따라 어떤것은 死亡하고 어떤 것은 生存한다는 事實은 前述하였지만, 死亡하지 않은 것은 回復하여 겉보기에 正常인것 같이 보인다. 그러나 그후 正常인것 보다 빨리 死亡한다. 即, 壽命이 짧다. 癌 등 惡性腫瘍에 의한 死亡을 除外하여도 照射되지 않은 正常인 것보다 빨리 死亡한다. 照射動物의 生存時間과 線量과의 關係는 그림7과 같고 動物에선 放射線에 의해 非照射의 것보다 平均壽命이 短縮한다는 것은 거의 確實하다.

人類에게서 統計에 나타나는 各 年令에서의 死亡率의 對數를 取해 이것과 年令과의 關係를 調査하면 어느 年令 以上에선 直線的으로 死亡率이 上昇한다는 것이 오래전부터 알려져 있다 (그림8 參照).

年令A에서 放射線을 쬐이면 그림8에 표시된 것과 같이 그 人들의 死亡率은 急히 C에서 D로 上昇하고 그 후에는 死亡率은 年令과 더불어

〈그림 7〉 마우스에 1回 照射하였을 때의 生存時間과 線量과의 관계



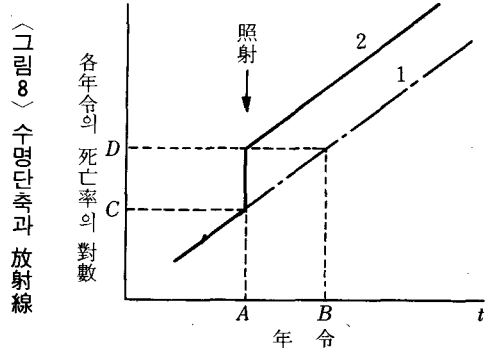
非照射의 경우인 直線1에 平行한 直線2와 같이 上昇한다. 放射線은 壽命을 (B-A) 만큼 短縮한 것이 된다. 또는 (B-A) 만큼 老化가 進行되었다고 하여도 좋다.

人間에 對해서는 壽命의 短縮을 確認하는 것은 困難하지만 다음과 같은 調査結果가 있다. 즉, 美國의 調査에선 放射線을 無防備로 取扱할 기회가 많았던 옛 放射線科 의사는 다른과의 醫師보다 壽命이 約 5年 短縮되어 있었다. 그러나 美國의 同一한 調査에 의하면 放射線科의사의 壽命短縮에 對해선 確實한 影響을 認定할 수 없었다.

어떤 學者는 1rem의 線量은 壽命을 約1週間 短縮한다고 假定하고 있기 때문에, 30年 被曝하여도 最大 15rem이 되어 最大로 15週의 壽命短縮에 지나지 않는다. 放射線에 의한 壽命의 短縮은 線量限度值라도 다른 原因 例로 喫煙에 의한 壽命의 短縮(每日 1갑으로 7年 短縮한다고 한다)에 비해 크지 않기 때문에 특히 問題삼을 必要가 없다고 생각된다.

(v) 胎兒에 對한 影響

胎兒는 身體의 臟器가 아직 充分히 成立되어 있지 않다. 胎兒組織은 發育, 新陳代謝가 왕성하다. 이같은 組織은 放射線에 대한 感受性이 높다. 放射線量이 높으면 放射線에 의한 奇形兒가 生産된다는 事實이 알려져 있고, 廣島, 長崎의 原爆被曝者의 妊婦間에는 知能이 낮은 小頭兒가 生産되었다 (그러나 日本의 現在 奇形發生



原因의 80%는 母親이 服用한 홀몬劑, 感氣藥 등 藥劑라고 한다). 또 母親의 胎內에서 X線診斷을 爲해 放射線을 쬐인 兒童間에 出生後 白血病의 罹病率이 높다고 調査가 있다.

3. 放射線의 遺傳的影響

(1) 遺傳이란 무엇인가

아버이의 特徵은 자식에게 傳達되고, 자식은 아버지와 비슷한 性質을 갖고 있다. 이것은 자식의 身體가 되는 最初의 細胞(受精卵)가 아버지의 精子和 卵子가 合體된 것이고, 精子和 卵子에는 子女의 性質을 決定하는 아버지의 遺傳子가 들어 있기 때문이다.

遺傳的 性質을 決定하는 이 遺傳子는 人間에 總約 3,000個였다고 알려져 있고 細胞分裂時 細胞核內에서 觀察되는 染色되기 쉬운 끈모양의 物質인 染色體上에 遺傳子가 일렬로 나열되어 있다. 染色體數는 生物의 種類에 따라 各各 일정하고, 人間의 身體細胞에선 23쌍(46個)이다. 원숭이는 24쌍(48個), 옥과는 8쌍(16個)이다.

人間의 精子和 卵子는 各各 身體細胞의 染色體의 半數인 23個의 染色體를 갖고 있고 兩者가 合體하여 46個의 染色體를 갖는 受精卵이 생기고 이 細胞가 分裂, 增殖하여 身體의 細胞(體細胞)가 만들어져간다. 身體의 一部는 生殖腺이 되지만 거기서 精子 또는 卵子가 만들어질 때, 染色體數가 半(23個)이 된다.

體細胞에서는 兩親에서 各 1個씩 同形의 染色體(相同染色體라 한다)를 받는다. 相同染色體上에는 많은 쌍이되는 遺傳子가 存在한다. 形質은 1쌍의 遺傳子만으로 決定될때도 있고 많은 數의 遺傳子의 綜合效果로 決定될때도 있다. A, B, O의 血液型은 兩親의 1쌍의 遺傳子로 決定되는 例이고, 身長, 知能 등은 많은 遺傳子의 綜合效果로 決定되는 例이다. 이 後의 性質은 量的 形質이라 불리워진다. 量的 形質의 경우 個個 遺傳子의 影響力과 環境의 影響力을 區別하기는 어

렵고 環境의 影響力은 자세히 알려져 있지 않다.

子女에게 나타나는 形質이 1쌍의 遺傳子로 決定되는 경우에 對해서는 比較的 解析이 되고 있고, 이같은 形質에 대해서는 影響力이 강한 遺傳子(A라 大文字로 쓴다)와 弱한 遺傳子(a)의 두가지 種類가 있다. A는 優性遺傳子, a는 劣性遺傳子라 불린다. 遺傳子가 Aa라는 쌍(hetero接合子라 한다)을 이룰 때, A쪽이 a보다 影響力이 크기 때문에 A의 性質이 자식에게 나타난다.

AA(homo 接合子라 한다) 때에는 물론 A의 性質이 나타난다. aa의 性質이 出現하는 것은 aa(home 接合子)라는 組合때 만이다. 例를들면 白子, 즉 全身의 皮膚나 毛髮에 메라닌이란 色素가 없는 異常은 하나의 劣性遺傳子 a와 關係 있고, 正常遺傳子는 A이나 Aa때에는 正常子女가 出産되고 aa때 만이 白子가 된다.

그러나 遺傳的인 病은 唯一의 劣性遺傳子에 의해 決定되는 單純한 경우는 적다. 오히려 多數遺傳子의 複雜한 綜合效果로서 遺傳的인 病이 發生할 경우가 많다고 생각되고 있다.

(2) 突然變異

一般的으로 生殖細胞(精子, 卵子)가 생길 때 個個의 遺傳子는 아버지의 遺傳子和 同一한 것이 複製되어 個個의 遺傳子를 組合한것만이 各精子, 卵子에 의해 달라질 따름이다. 그러나 極히 드물게는 遺傳子가 잘못 複製되어 아버지가 갖고 있는 遺傳子和 다른것이 생길때가 있다. 이 때문에 子女가 兩親을 닮지 않을 때가 있다. 이것이 遺傳子突然變異라 불리는 것이다.

遺傳子複製時에 잘못 만들어져 自然界에서의 物理的 또는 化學的인 여러가지 環境要因 때문에 自然히 일어나고 있는 突然變異는 遺傳病的 경우 특히 注目되어, 그 發生 頻度の 調査가 잘 되어 있고 表9와 같은 結果가 얻어지고 있다. 表9의 값은 눈에 띄기쉬운 病에 대한 調査結果이기 때문에 눈에 띄지 않는 많은 自然히 생기

〈表 9〉 人間の 自然突然變異率 (1世代, 遺傳子 100萬當)

	形 質	突然變異率	調 查 地
常染色體優性突然變異	軟骨異榮養症	13~68	北아일랜드, 北歐
	無彩症	5~9	덴마크, 美國
	部分白子, 難聽	4	네덜란드
	小眼 球	4	스웨덴
	網膜膠腫	4~29	西獨, 英國, 美國, 아일랜드
	多發性太陽폴립症	13	美國
	神經線維腫	70	美國
劣伴然性變隨突異	血友病	10~32	英國, 덴마크, 스위스
	筋異榮養症	39~95	美國, 아일랜드, 英國
常染色體劣性突然變異	黑內障性癩果(幼年性)	11	日本
	" (若年性)	38	스웨덴
	白 子	28	日本
	魚 鱗 症	11	日本
	全 色 盲	28	日本
	小 頭	49	日本
	先天性筋無力症	23	스웨덴
	헤널케르尿症	23~25	日本, 英國
	表皮水泡症	45	스웨덴

는 遺傳子突然變異의 頻度는 小數點하나 程度 작고, 遺傳子 100萬에 대해 1回程度라고 생각 된다.

또 染色體가 正常狀態에서 벗어날때가 있다. 이것에 의해 생기는 病의 有名한 例는 蒙古症이라고 불리우는 知能이 낮은 病이다. 이 蒙古症에서는 染色體中 제 21번째의 染色體가 正常的인 경우에 2個인데 대해 어떤 잘못으로 3個 (3染色體性)가 되어있다. 또 染色體의 一部가 切斷되어 없어지던가(欠失), 어떤것은 一部가 餘分으로 重複되어 構造가 變化할 때도 있다. 어떤것이던 심한 障害를 나타내고 子女를 낳기가 어렵다. 染色體異常의 自然發生率을 表10에 나타내었다.

(3) 放射線에 의한 遺傳子突然變異와 染色體異常의 誘發

遺傳子의 突然變異나 染色體의 異常은 自然히 發生되고 있지만 放射線이 生殖腺을 照射하였을 때도 遺傳子突然變異나 染色體異常이 誘發된다. 이것은 多數의 쥐파리나 마우스를 使用

〈表 10〉 人間の 染色體異常頻度

染 色 體 異 常	頻 度 / 100名
1. 살아서 난 兒童中의 染色體異常個數	
第21染色體의 3染色體性(蒙古症)	1.5名
第13 " "	0.2
第18 " "	0.3
고양이 울음症	>0.2
구리네펠타症候群	1.7
穩和한 精神欠陷(X染色體, 3個)	1.2
터-너症候群(XO)	0.29
2. 自然流産全體에 占有頻度	220
3. 成人集團中의 染色體構造變化頻度	5

한 實驗으로 確認되었다. 放射線에 의해 自然發生의 突然變異나 染色體異常의 頻度가 增加한다.

그래서 放射線에 의한 突然變異誘發效果를 나타내는데 自然狀態에서 1世代에 생기는 突然變異頻度(率이라고도 한다)를 基準으로 그 몇 %가 放射線(의 線量)으로 增加하는가라는 表現方法(相對的表現)이 採用되는 때가 많다. 특히 1世代에 생기는 自然突然變異率이 倍가 되는 線量を 倍加線量이라 부르고 있다. 人間の 경우 倍加線量은 20~200rad라고 알려져 있다.

(4) 放射線誘發突然變異, 染色體異常에 의한 疾病의 增加

人間疾病의 相當部分이 遺傳과 關係가 있다. 外國(北아일랜드)의 調査에 의하면 入院患者의 25%, 醫師의 도움을 받은 病者의 6~8%는 遺傳과 關係가 있는 病을 가진 사람들 이라고 한다. 그러나 이같은 病을 가진 사람들 數는 가령 放射線에 의해 突然變異數가 增加해도 곧 上昇되는 것은 아니다. 複雜한 遺傳病의 경우에 病의 出現率과 突然變異의 發生率과의 關係는 거이 알려져 있지 않다. 그래서 放射線에 의한 突然變異를 基礎로 病의 出現率을 推算하는데는 어떤 假定을 하지 않으면 안될 경우가 많다.