

〈解說〉

醫療上放射線被曝과 線量制限體系

河 正 雨

(한국에너지연구소)

1. 序 論

핵에너지의 平和의 利用이 增加함에 따라 一般大衆과 放射線作業從事者들에 대한 放射線防禦는 그 重要性이 더욱 커가고 있다. 그 結果 放射線防禦에 대한 法的 그리고 行政的 規定이 最新의 科學技術의 發達에 步調를 맞추어 계속하여 修正補完되어 오고 있다. 그러나 우리나라는 1959年 原子力院에 의하여 一般大衆과 放射線作業從事者들의 健康保護를 위하여 放射線防禦에 대한 基本安全基準(Basic Safety Standards)이 採擇되어, 그 후 지금까지 20餘年 이상 거의 修正補完없이 使用하여 오고 있다. 이 基準은 國際放射線防禦委員會(ICRP)가 1959년에 勸告하여 1962년에 修正한 것을 根據로 하여 마련된 것으로 알고 있다.

國際放射線防禦委員會는 그 후 계속하여 1962年, 1966年, 1976年, 그리고 最近 1980년에 放射線防禦에 대한 基準을 修正——修正된 모든 基準이 法規定에 直接 反影할 수 있도록 그 自體가 반드시 適合하지는 않지만——하였으므로, 美國, 日本 歐洲共同體는 ICRP publication 26의 勸告를 全面的 내지는 部分的으로 法規定에 反影하였다. ICRP publication 26의 基本哲學(basic philosophy)은 從來의 決定臟器概念(critical organ concept)이 아닌 集合危險度概念(total risk concept), 그리고 종래에 없었던 線量制限體系(system of dose limitation)에 두고 있다.

이 새로이 導入된 線量制限體系의 主目的은 이온화 放射線에 대한 모든 被曝은 그 被曝의 利得과 關連하여 正當化되어야 하고, 어떠한 必要한 被曝도 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)이어야 하고, 그리고 被曝받은 線量當量은 어떤 特定限度를 超過하지 않도록 하는 것이다. 換言하면, 線量制限體系의 主要한 特徵은 正當化, 防禦의 最適化 그리고 線量限度이다. 正當化와 最適化의 原理는 根本的으로 放射線源과 關連하여 防禦의 適切에 두고 있으며, 線量限度는 放

射線作業從事者, 公衆의 構成員 그리고 患者와 關聯이 된다.

一般的으로 患者의 醫療上被曝도 線量制限體系를 따라야 한다고 ICRP는 勸告하고 있다. 即, 不必要한 被曝을 防止하고, 必要한 被曝이라 할지라도, 이것이 아니면 받을 수 없는 利得의 見地에서 正當化될 수 있어야 하고 實在로 賦與되는 線量은 患者個人의 醫療上 利得에 一致하는 最少量으로 制限되어야 한다. 被曝을 받은 個人은 醫療上被曝에 의한 利得을 直接받는 本人이다. 그러므로 ICRP가 勸告하는 線量當量限度의 數値를 醫療上被曝에 適用하는 것은 適當하지 못하다. 事實 어떤 醫療上被曝에서는 그로부터 發生되는 利得에 의해서 대단히 높은 危險準位가 正當化될 수도 있다. 이와같이 醫療上被曝에서 線量制限體系를 따르기 위하여는 必然的으로 醫療上被曝으로부터 얻는 實利得이 positive이어야 하고, 아울러 醫療上 모든 被曝은 經濟的 그리고 社會的 因子를 考慮하여 合理的으로 達成할 수 있는 한 단계 維持하여야만 한다.

이 報告書는 醫療上被曝으로부터 發生되는 利得이 正當化 positive가 되는 醫療上被曝의 正當化와 經濟的 및 社會的 因子를 考慮한 醫療上被曝의 ALARA를 維持하기 위한 防禦의 最適化 그리고 醫療上被曝에서의 線量制限體系를 관심있는 여러분들에게 紹介하고자 하는데 目的을 두고 있다.

2. 이온화放射線의 物理學的 및 生物學의 一般原理

2-1. 物理的 概念(physical concepts)

診斷用 X線撮影으로부터 個人이나 全人口에 줄 수 있는 有害한 影響을 評價하기 위하여는 人體內 線量과 그 線量分布에 대한 知識이 있어야만 된다. 그 이외에도 人口에 미치는 影響은 放射線學的 檢査의 頻度에 따라 좌우될 것이다. 서로 다른 人口集團에 대한 있을

Table 1. An example of typical tissue doses and of the age-averaged radiation risk for x-ray chest examinations of adult females

| Organ, tissue | Mean absorbed dose(mGy) (from Table A-1) | Risk coefficient (10 ⁻⁴ Sv ⁻¹) | Radiation risk(deaths per 10 ⁶ individuals) |
|---------------|---|--|---|
| Lung | 0.20 | 20 | 0.40 |
| Breast | 0.14 | 50 | 0.70 |
| Bone marrow | 0.03 | 20 | 0.06 |
| Thyroid | 0.07 | 5 | 0.04 |

Doses to other organs are negligible.

수 있는 危險을 比較하는데 있어서 重要한 因子는 個人別 平均檢査回數와 檢査種類別 頻度이다. 그래서 診斷用 X線檢査와 관련하여 있을 수 있는 危險을 減少시키기 위하여는 直接照射받는 組織線량을 減少시키거나, 照射되는 人體組織의 體積을 限定시키거나 혹은 檢査頻도를 줄이어야 한다. 이와같은 減少는 患者에 대한 利得과 妥協하지 않아도 되는 경우에만 顯著하다.

X線診斷檢査와 관련된 個個患者에 대한 放射線 risk는 放射線防禦目的으로 ICRP가 勸告한 risk因子로부터 正確하게 評價가 되지는 않으나 致死 risk의 程度는 近似的으로 推定이 된다. 表 1은 胸部X線檢査結果 招來되는 成人의 身體의 代表的인 線量分布에 대하여 risk評價한 例이다. 이와같은 照射條件下에서 遺傳的 risk는 身體의 risk와 比較하여 작다. 身體의 risk는 X線內(beam) 內에있는 器官이나 組織(肺, 女子가슴, 骨髓)에 주로 起因된다.

이러한 種類의 risk解析은 X線診斷節次로부터 招來되는 患者에 대한 risk와 利得을 比較하는 指針을 提示하는 데 使用될 수가 있다.

放射線診斷檢査에서 받는 線량은 人體內 部位에 따라 크게 다르며, 最高는 放射線 1次빔에 있는 皮膚이다. 組織線량도 放射線透過檢査(radiography)와 螢光透視檢査(fluoroscopy)에서 使用되는 技術的 因子, 裝置의 特性, 攝影핀름數, 檢査當 螢光透視檢査時間에 따라 크게 다르다. 따라서 어느 特定檢査種類에서 주는 線량은 國家마다 다르고, 한 國家內에서도 機關마다 다르고, 심지어는 어느 한 機關內에서 X線機器와 技術에 따라 다르기도 한다. 線量測定하는 物理的 方法이 約 ±10%의 正確度를 가지고 日常的으로 遂行될 수 있다고 하더라도 어느 한 檢査로부터 患者가 받는 線량은 病院들 사이에 2~10倍만큼 差異가 있을 수 있다. 生殖腺照射線량에 대한 差異範圍는 3倍程度만큼이나 된다.

2-2. 生物學的 概念(Biological concept)

生體組織에 吸收된 에너지는 物理的 및 化學的 反應

을 일으키어, 그 結果 生物學的 變化를 招來한다. 診斷用 X線裝置, 특히 螢光透視檢査裝置는 不適當하게 作動하였을때 急性放射線反應이나 傷害라고 明白하게 말할 수 있는 細胞質의 反應을 일으키는데 충분한 放射線량을 줄수가 있다. 그러나 適當하게 實施되는 診斷用 X線檢査에서 이와같은 急性放射線效果는 放射線量이 그와같은 效果에 대한 發端值 훨씬 이하이기 때문에 일어나지 않는다. 그럼에도 불구하고 어느정도 有害한 生物學的 變化를 일으키는데 필요한 線量下限值도 存在하지 않는다. 심지어 적은 放射線량도 腫瘍誘發 risk를 增加시킬 수 있으며 生殖腺에 吸收된 적은 放射線량도 遺傳的影響을 가져오는 突然變異나 染色體變化를 誘發시킬 수 있다. 이러한 種類의 作用을 推計統計的(stochastic), 即 그러한 影響의 發生確率이 吸收된 線량에 따라 決定되고, 反面에 影響의 重症度(severity)는 線량에 無關하다.

個人에 대한 線量限度는 人體內 線量分布에 따라 다른 特定組織 혹은 器官에 대한 線量當量限度에 의하여 決定되는 決定器官概念(critical organ concept)을 使用하였으나 ICRP publication 26은 모든 照射된 組織에 起因된 合成 risk, 即 全 risk概念(total risk concept)을 導入하였다.

初期에는 가장 關心이 있는 放射線被曝의 危險은 몇몇 사람만이 받는 比較的 高線量에 의하여 招來되는 것만이었다. 그러나 現在는 有害한 影響이 낮은 放射線량에 많은 사람들의 被曝으로부터 豫期될 수 있는 것에 關心이 점차 높아가고 있다. 豫測되는 有害한 影響은 腫瘍發生率에서 극히 적은 增加이다. 그와같은 全人口危險(whole-population hazard)에 대한 定量的 評價가 線量-影響關係에 대하여 두가지 假定에 根據하고 있다. 그 하나는 有害한 影響의 risk는 線量에 比例한다이고, 다른 하나는 生物學的 影響이 發生하지 않는 發端值는 存在하지 않는다는 것이다. 放射線 risk에 대한 이러한 假定으로부터 競爭的인 risk와 利得의 衡平體系가 開發되었다. 이것은 放射線危險 그 自體에

Table 2. Cancer mortality risk estimates-by site

| Site of cancer | Mortality risk(10 ⁻⁴ Sv ⁻¹) | |
|------------------------|--|------------------|
| | ICRP 1977(16) | UNSCEAR 1977(U2) |
| Red bone marrow | 20 | 15~25 |
| Lung | 20 | 25 |
| Breast | 25 | ~30 |
| Bone | 5 | 2~5 |
| Gastrointestinal tract | * | 25 |
| Thyroid | 5 | 5~15 |
| Remainder | 50 | ~25 |
| Total | 125 | 120 |

대한 것 뿐만이 아니라 어떤 特定狀況에서 放射線利用 혹은 利用하지 않은 其他 다른 모든 結果에 대한 判斷을 함으로써 達成된다.

過去 20餘年에 걸쳐서 放射線影響의 risk에 대한 推算이 BEIR(1972), BEIR(1980), UNSCEAR(1972), UNSCEAR(1977), UNSCEAR(1982), ICRP(1966), ICRP(1969), ICRP(1977)에 報告되어 있다. 이들 報告書에 나타난 risk를 有效線量當量의 物理量으로 나타내었을 때 身體의 影響에 대한 過去 25年 동안에 걸쳐서 나타난 各組織과 器官들에 대한 risk推算과 遺傳的 影響에 대한 約 50年 혹은 2世代에 걸쳐 나타난 risk推算이 거의 變動이 없었다. 癌 risk推算에 이들 一部 資料가 表 2에 주어졌다.

어떤 遺傳的 變異도 高線量이나 低線量의 放射線被曝結果 人類에 나타나지 않았다는 事實에도 불구하고 遺傳的 變異가 重要한 關心事로 남아있다. 遺傳的 變異誘發이외에도 胎兒(3個月以上 및 以下)에 대한 放射線의 또다른 두가지 可能性效果에 대한 考慮가 必要하다. 그것은 發育上의 變異와 幼年期 혹은 成人期間 동안 나타날 癌이다. 이러한 效果의 種類와 頻度は 被曝이 發生한 懷妊의 段階에 따라 다르다.

3. 醫療上被曝에서의 線量制限體系

3-1. 醫療上被曝形態

醫療上被曝이란 用語는 放射線을 利用한 醫學的 檢査나 醫療를 받은 사람이 받는 被曝을 意味한다. 대부분의 醫療上被曝은 診斷이나 治療目的으로 使用하는 放射線과 關係되지만, 때로는 放射能電源을 利用하는 心臟페이스메이커(cardiac pacemaker)의 경우처럼 放射線이 有益한 役割을 하지 못하며, 이러한 被曝은 단

지 偶發的이다.

醫學的 放射線診療行爲의 目的은 다음과 같다.

1. 疾病과 直接關係되는 檢査나 醫療
 2. 集團適格審査目的 또는 定期的 身體檢査를 위한 組織的 檢査
 3. 作業者的 醫學的 檢査의 一環 또는 法醫學이나 保險의 目的으로 행하여지는 檢査.
 4. 醫學的 研究計劃의 一環인 檢査와 醫療
- 가. 疾病과 直接關聯된 檢査 및 醫療

어떤 放射線量의 被曝을 同伴하는 患者에 대한 檢査가 正當化되었는지에 대한 決定은 때로는 擔當醫師의 責任이고, 때로는 檢査를 實施한 實務者의 責任이다. 그러나 그 어느 경우이던 決定은 檢査結果로부터 얻은 徵候가 指示한 治療法에 대한 올바른 評價, 그 檢査로부터 기대되는 結果, 그리고 그 結果가 患者의 診斷이나 뒤따르는 醫療上 治療에 影響을 미치기 쉬운 方法에 根據를 두고 행하여져야만 한다. 또한 이 評價가 이온화放射線의 物理的 性質 및 生物學的 效果에 대한 適切한 知識을 바탕으로 하여 행하여져야만 한다는 것도 못지않게 重要하다.

治療目的의 被曝에서 器官에 대한 吸收線量은 一般的으로 대단히 높으며 그리고 被曝의 危險과 醫療的 利得 兩者 모두는 보다 定量的으로 評價가 可能하다. 그래서 이와같은 두가지 性質사이의 均衡을 根據로 決定을 할 수 있다. 또한 다른 治療方法도 考慮해서 이 治療方法의 危險度 및 效率性하고 放射線治療의 그것들과 比較하는 것도 必要하다.

放射線被曝이 同伴되는 檢査나 醫療를 계속하기 위한 決定은 그러한 被曝의 危險을 考慮하여야 하는 것이 重要한 反面에 이러한 危險들이 過大評價되어서는 않된다는 것도 마찬가지로 必要하다. 그 理由는 過大評價가 正當化된 檢査나 醫療를 拒絕할 수 있기 때문이다.

나. 組織的 檢査

現在 알고 있는 疾病에 關係없이 행한 定期的 身體檢査는 어떤 放射線學的 檢査와 관련될 수 있다. 그 正當化는 有用한 情報를 얻을 確率과 이 情報가 個人의 健康上 차지하는 重要도에 따라 좌우된다.

集團의 適格審査에서 사용되는 組織的 檢査에 대한 正當化는 檢査받은 個人 및 大衆全體에 주어지는 利點과 有害를 包含한 適格審査費用사이의 均衡을 根據로 하여야 한다. 一般的으로 利點은 適格審査節次의 產出, 發見된 病勢에 대한 效果의인 治療可能性, 그리고 어떤 疾病에 대해서는 그 疾病을 管理하는 共同社會에 주는 利點에 따라 좌우된다. 適格審査의 利得은 公衆

을 構成하는 서로 다른 모든 集團에 대해서 항상 同一하지는 않으며, 適格審査가 어느 특정한 集團에만 한정될 때에만 正當化되는 경우가 많다. 그래서 이 計劃을 계속할 必要性을 保證할 만큼 重大한 疾病을 發見할 收穫이 充分히 높은 것인가, 아닌가를 決定하는 調査計劃이 수시로 施行되어야만 한다.

다. 職業, 法醫學 혹은 保險目的의 檢査

個人的 職業에 대한 適性を 評價하거나, 法醫學目的의 情報을 提供하거나 또는 保險加入者 혹은 受惠者의 健康을 評價하기 위하여 遂行하는 身體檢査는 檢査받은 個人에게 直接的 또는 間接的인 利得을 가져다 줄 수 있으며, 또한 雇傭主나 第三者 또는 保險業者에게 利得을 가져다 줄 수도 있다. 이러한 檢査의 正當化를 評價하는에는 모든 면에 대해 考慮하지 않으면 안된다.

3-2. 正當化(Justification)

放射線被曝과 관련된 醫療行爲의 容認은 費用-利得解析에 의하여 決定되어야 한다. 各種 治療種類的 選擇은 여러가지 因子에 따라 決定될 것이며, 이중 放射線防禦와 관련된 因子는 다음과 같다.

(1) 提示된 醫學的 放射線診療節次가 患者에게 實利得을 준다는 擔當醫師와 放射線科醫師의 專門的 判斷은 正當化의 構成要素가 된다.

(2) 放射線學的 檢査는 患者의 管理 혹은 全國民의 健康狀態 改善에 有用한 경우에만 實施

(3) 放射線學的 檢査의 選擇은 여러 利用할 수 있는 選擇들의 相對的 利得, 危險, 그리고 그 費用에 대한 判斷에 根據를 두어야 한다.

(4) 放射線學的 節次가 正當하다는 決定이 내려졌을 때에도 어떤 特定檢査를 實施하기 위한 決定은 費用, 患者管理에 대한 相對的 影響, 情報產出 特殊裝備의 利用性 그리고 放射線危害에 대한 하나의 저울이다.

(5) 惡性腫瘍의 放射線治療使用에 대한 正當化는 다른 方法(例: 外科手術, 化學療法 등)에 比較하여 放射線治療의 相對的 長點을 考慮한다.

(6) 惡性疾病의 誘發危險과 代案節次의 危險의 見地에서 非惡性狀態의 治療에 대한 正當化를 確立하는 것이 특별히 重要하다. 治療할 狀態의 심각도와 그 壽命 短縮效果는 治療로 인한 統計的 및 非統計的 效果의 期待에 대하여 平衡이 되어야 한다.

(7) 醫學的 研究에서 이온화放射線의 利用에 대한 正當化는 照射받은 사람이 檢査로부터 直接的인 利得을 받지 못하기 때문에 대단히 어렵다. 利得은 오직 研究結果 臨床管理가 改善되어 未來患者에게만이 주어

지게 될 것이다.

3-3. 放射線防禦의 最適化(Optimization)

線量制限體系의 基本構成要素中的의 하나가 被曝과 관련된 社會的 및 經濟的 考慮를 하여 모든 被曝은 合理的으로 達成可能한 한 낮게 維持하여야만 된다는 必要條件이다. 이 條件은 더욱 改善을 하여 達成한 被曝減縮이 改善에 要求된 追加努力보다도 덜 重要한 그러한 點까지 防禦水準을 增加시키는 것으로 되어있다. 이러한 必要條件을 放射線防禦의 最適化라고 한다.

放射線防禦와 관련된 努力은 費用으로 定量化시킨다. 만일 放射線損害가 또한 費用으로 算出될 수 있다면 最適化는 다음과 같이 表現이 될 수 있다.

$$X(w) + Y(w) = \text{最少值}$$

여기에서 $X(w)$ 는 防禦費用이고, $Y(w)$ 는 放射線損害費用이다. 이 두 費用은 w 에 의하여 表示되는 防禦水準(例: 遮蔽두께, 防禦裝備의 또다른 選擇 등)이다.

w 로 定量化된 防禦水準은 바람직한 水準까지 變할 수 있을 때 윗 式의 最少值는 微分하여 얻을 수 있다.

$$\frac{dX}{dw} = -\frac{dY}{dw}$$

X 와 Y 는 集團線量, S 와 관계되어 있으므로 最適化解 역시 다음과 같이 表現이 된다.

$$\frac{dX}{dS} = -\frac{dY}{dS}$$

最適化의 대부분의 實際的인 評價에서 防禦水準의 變化는 一定한 增加量으로 이루어지게 되며 결국 계속적이고 더욱 野心的인 選擇에 該當된다. 이러한 경우에 있어서 防禦水準 A 에서 더욱 비싼 費用이드는 水準 B 까지 進行시키는 決定은 다음과 같은 條件이 滿足되면 이루어 질수있다.

$$\frac{X_B - X_A}{w_B - w_A} \leq \frac{Y_B - Y_A}{w_B - w_A}$$

3-4. 線量限界(Dose Limit)

앞 節에서 說明한 概念의 適用이 患者에게 충분한 防禦를 提供하여준다고 하더라도, 放射線科醫師, 訪問客, 公衆人의 構成員에게도 그와같은 防禦를 항상 마련하여 주는 것은 아니다. 費用-效能(Effectiveness) 分析結果와 其他 다른 對策에 關係없이 個人線量當量限度는 尊重되어야만 한다.

實際에 있어서 危險과 利得은 똑같이 配分되지 않는다. 어떤 醫療惠澤을 받은 사람만이 唯一하게 危險에 露出된 것은 아니다. 그래서 正當化되고 最適化된 醫療業務가 다른 사람들이 받게될 利得을 위하여 몇몇 사람에게 容認할 수 없는 높은 危險을 招來하지 않는

Table 3. Optimization of the shielding for a radiographic room

| | Design limit(mSv wk ⁻¹) | | |
|---|-------------------------------------|----------|----------|
| | From 1.0 | to 0.1 | to 0.01 |
| Cost of shielding ^a | \$ 3,200 | \$ 4,000 | \$ 5,600 |
| Incremental cost increase | | \$ 800 | \$ 1,600 |
| Reduction in collective dose(man-Sv) ^b | | 3.6 | 0.36 |
| Cost per man-Sv averted | | \$ 220 | \$ 4,400 |

^a Based on Braestrup and Wyckoff(1973) corrected for inflation.

^b Assuming a useful life of 20 years for the installation and four full-time equivalent workers to be protected.

Table 4. Optimization of the shielding for a 4MV radiation therapy installation

| | Design limit(mSv wk ⁻¹) | | |
|---|-------------------------------------|-----------|-----------|
| | From 1.0 | to 0.1 | to 0.01 |
| Cost of shielding ^a | \$ 44,000 | \$ 53,000 | \$ 65,500 |
| Incremental cost increase | | \$ 9,000 | \$ 12,500 |
| Reduction in collective dose(man-Sv) ^b | | 3.6 | 0.36 |
| Cost per man-Sv averted | | \$ 2,500 | \$ 35,000 |

^a Based on Braestrup and Wyckoff (1973) corrected for inflation.

^b Assuming a useful life of 20 years for the installation and four full-time equivalent workers to be protected.

다는 것을 保證하기 위한 境界限度가 必要하다.

放射線作業従事者들에 대한 線量當量限度는 境界條件으로 생각하여야 되고 最適化, 認定限度의 設定과 같다. 다른 節次가 없으면 許容準位로서 생각하여서는 않된다. 왜냐하면 그들은 오직 線量制限體系의 一部分만을 構成하고 있기 때문에 線量當量限度는 計劃과 設

計에 대한 1次基準으로서 더이상 使用할 수 없다. 放射線管理 혹은 設計限度는 最適化를 바탕으로하여 國家 혹은 地域의 適切한 機關에 의하여 決定되어야 할 것이다. 放射線防禦의 最適化의 實際的 適用實例는 表 3 및 表 4와 같다.

學 術 發 表 內 容

특별강연

1. 한국의 방사성동위원소·표지화합물 합성제조·이용현황과 전망
김재록(한국에너지연구소)
2. 의료상피폭과 선량제한 체계
하경우(한국에너지연구소)

학술강연

- (1. S-2-(ω -aminoalkylamino) ethyl 및 S2, ω -diaminoalkyl 유도체의 특성 연구
김석원, 김유선(한국에너지연구소)
2. Al_2O_3 의 열형광특성과 임상응용
추성실, 박창운(연세대학교 의과대학)
3. Study for Radon Isotopes Separation
강영호, 김도성, 박장식(경북대학교)
4. 모세관흡착법 및 원심분리법에 의한 방사성물질의 극미량 상태에 관한 연구
제원목, 정세원(한양대학교)
5. 감마선 조사에 의한 윤활유의 점성변화
정운혁(부산대학교)
6. 방사선의 유전적 영향
 1. 수명연장과 생식능력 회복에 관하여
김영진, 천기정, 이강식(한국에너지연구소)
7. Assessment of Natural Radiation Exposure and Dose
전재식(충남대학교)
8. Calculation of Internal Exposure Dose in Korean Man resulting from single and chronic intake of tritium.
육종철(한양대학교), 하경우, 김장렬(한국에너지연구소)
9. Paper Electrophoretic Separation of some Long-Lived Fission Products
이병현(한양대학교), 이종두(한국에너지연구소)