

低線量放射線の 影響과

“Public Acceptance”의 問題 (II)

原爆被曝者の 被曝放射線の 再評價에 関하여

広島, 長崎의 原爆피폭자에 대한 疫學的 調査는 1950년부터 현재까지 계속되고 있으며, 그 결과는 직업상의 피폭 등 低線量域에서의 線量效果關係의 평가, 더 나아가서 리스크평가의 기초데이터가 되고 있다. 그 疫學적 조사에 사용되는 피폭자가 받은 선량은 1965년경까지는 York의 推定值인 T57D(1957년에 잠정적으로 결정한 선량이라는 意味)였다. 그러나 이 선량은 상당히 부정확하다고 하여 미국의 오크릿지 국립 연구소(ORNL)와 일본의 放射線醫學綜合研究所(放医研)가 독립적으로 선량推定을 행하여 1965년에 각각 그 결과를 當時의 原爆傷害調査委員會(ABCC, 現在 放射線影響研究所, RERF)에 보고하였다. ABCC는 ORNL와 放医研이 推定한 広島, 長崎에서의 空氣中の 中性子 및 伽瑪線量과 ORNL가 Ichiban計劃(BREN 실험 등)에서 算定한 原爆 방사선에 대한 日本家屋 등의 차폐 계수를 사용해서 T57D에 代替하는 새로운 線量を 결정하였다. 이것이 T65D이며 피폭자의 선량평가 기초로 사용되어 왔다.

1970年代에 大型 계산기의 사용이 가능하여짐으로서 T65D가 결정되었을 때와 비교해서 선량추정의 기초가 되는 核데이터가 정비됨과 더불어 高度의 計算코드가 개발되었다. 1976년에 로스알모스 국립 연구소(LANL)의 Preeg가 원폭으로 부터의 방사선 에너지 스펙트럼을 계산하여 無限의 공기媒質中에서의 방사선 투과에 대해 검토되었으며, 여기서 계산된 중성자線量은 原子力産業 ① ②

T65D에 비해 상당히 낮다는 것이 극히 소수의 사람들에게 발표되었다. 이 발표는 T65D에 의혹을 갖고 있던 ORNL의 Kerr 등의 그룹과 로스·리버모어 국립 연구소(LLNL)의 Loewe 등의 그룹에 용기를 鼓吹시키는 결과가 되었다.

한편 콜롬비아 대학의 Rossi 등은 Moriyama 등이 발표한 広島, 長崎의 致死白血病發生數의 데이터를 사용해서 Dual Radiation Action의 假說에 따라 中性子 및 γ 선의 리스크계수를 산출하였다. 그 결과는 現行의 放射線放禦基準에 사용되고 있는 중성자의 線質係數를 약 10배로 할 필요가 있음을 示唆하였다. 이 결론에 대해 기초된 T65D에 어떠한 잘못이 있다고 하는 그룹과 이 결론을 지지하는 그룹들이 論議를 교환하고 있을 무렵 LLNL의 Loewe와 Mendelsohn이 美国保健物理学会誌에 「広島·長崎의 線量再評價」라는 제목의 논문을 투고하고 그 写本(1980년 10월 1일)을 관계자들에게 배포하였다.

한편 ORNL의 Kerr 그룹도 1978년에 ORNL의 Pace와 과학응용단체(SAI)의 Kaul 등이 행한 계산결과를 중심으로 정리하여 극히 한정된 사람들에게 배포하였다. Loewe 등과 Kerr 등이 계산한 広島, 長崎의 地上에서의 선량은 서로 꼭 일치되지는 않았으나 두가지 전부 T65D의 중성자선량이 과대평가되고 있었다는 점에는 一致하고 있었다. 그 후 1981년에 Pace가 새로운 核데이터를 사용하여 再計算한 결과 Loewe 등의 선량과 잘 일치된 결과를 얻고 있다.

그러나, LLNL과 ORNL의 재평가선량이 과학자들 사이에서 논의도 되지 않은채 사회에 流布되어 사회적으로 문제를 야기시켰다. 미국방사선방호추진위원회(NCRP)의 Sinclair와 Wyckof는 이 문제를 중시하고 1981년 5월31일부터 6월 4일까지 미네소타주 미네아폴리스에서 열린 北美 방사선연구학회 年會 첫날에 北美晚効效果 研究 그룹과 공동주최로 「広島·長崎의 原爆선량에 관한 work shop」을 개최하였다. 이 회의에서 T65D의 기초가 되었던 Ichiban연구를 ORNL의 Auxier가 소개하고 이어서 LLNL의 Loewe, ORNL의 Kerr가 T65D재평가에 대해서 발표하였다.

Work shop 직전에 미국의 『Science』誌가 「새로운 原爆연구는 방사선의 평가를 변경시킨다」라는 제목으로 現在까지의 放射線放禦基準이 잘못되어 있었던것 같은 인상을 주는 기사를 게재하였다. 이 기사에서는, 앞에서의 Rossi의 연구를 포함해서 BEIR(電離방사선의 생물효과에 관한 위원회) 보고서작성시 논쟁의 축소판이 전개되었다. 그로인해 work shop에서 상당한 격론이 예상되었으나 실제로는 너무 평온했는데, 이 워크숍에서는 演士의 연구발표만 들었을뿐 아무런 결론도 내지않고 산회했다.

6월11일자 『Science』誌는, work shop이 広島의 재평가선량의 필요성에 대한 인상은 주었으나 그 선량이 리스크의 평가値를 매우 크게 변경하는 것은 아니다라는 기사를 게재하였다. 또한 同誌 7월 3일, 8월7일자의 Letter란에 몇사람의 코멘트가 提示되었다.

work shop으로 부터 3개월반이 경과한 9월15, 16일, 메리랜드주 자만타운에 있는 에너지省에서 「広島, 長崎에서의 線量因子 재평가에 관한 심포지움」이 개최되었다. 이 심포지움의 목적은, 広島·長崎의 원폭선량평가를 위해 행해졌던 과거, 현재 및 프로젝트연구의 성과를 평가하는데 있었다. 미네아폴리스의 work shop으로 부터 100余日의 냉각기간을 가진 후 행해진 회의이며 크게 기대되지는 않았으나, 선량평가의 現實情分析과 금후의 방침을 결정하는데 의미가 있었다.

本稿에서는 이들 두 모임에서의 정보에 따라 원폭선량평가의 문제점을 알아보기로 한다.

1. 1965年 暫定 線量 - T65D -

현재까지 원폭피폭자의 선량평가의 기초가 되고 있던것은 T65D이다. 広島에 원폭이 투하된 2일후에 日本의 仁科등의 물리학자에 의한 조사가 행해져 지상의 잔류방사능, 電柱 硝子 등의 방사능이 측정되었고, 미국에서는 1945년 7월16일에 최초의 핵실험이 행해진후 尤황의 放射化에 의한 速中性子 fluence가 측정되었다. 그후 비기니에서 핵실험이 행해졌으며 1953년에는 네바다에서의 연속된 핵실험에서 선량推定을 위한 측정이 되풀이 되었고 York등에 의해 T57D가 추정되었다. 그러나 이 선량은 오차가 대단히 커서 당시의 ABCC는 精度가 높은 선량 추정을 요청하였고 미국의 ORNL 및 일본의 放医研이 독립적으로 선량추정을 시작하였다.

(1) 放医研

일본에서는 원폭투하 직후부터 잔류방사능 조사는 물론 의학적조사도 행하였으므로 막대한 데이터가 축적되어 있었다. 그러나, 이들 데이터에서 선량을 추정하는 것은 곤란하였다.

1960년경 부터 放医研의 橋詰등은 鉄中에 ^{60}Co 가 미량 포함되어 있으며, ^{60}Co 는 낮은 中性子에 의해서 방사化되어 ^{60}Co 이 된다는 것과 콘크리트는 중성자의 감속재로 유효하다는 점에 착안하여 원폭피폭조건이 명확한 철근콘크리트 구조물의 鉄中 ^{60}Co 으로부터 중성자선량을 推定하였다.

또, γ 선에 대해서는 당시 岩石学에서 연대추정에 응용되고 있던 熱luminescence에 착안하여 원폭에 피폭된 기와, 벽돌, 타일등의 熱luminescence로 부터 선량을 추정했다.

모든 試料는 爆央을 향해 직접 원폭으로 부터 방사선을 받은 구조물에서 채취되었다. 철은 화학적처리후 同時計數型 β 線 spectrometer로 β 計測하였고, 기와, 벽돌등은 분말로 만들어서 手製의 熱luminescence 선량계로 発光量을 측정하였다.

⁶⁰Co의 비방사능으로부터 중성자선량을 추정하기 위해 원폭과 等価의 스펙트럼을 가지는 중성자線源에 의한 콘크리트中の 철의 방사화가 필요하였다. 広島의 건축물과 同一조성을 가지는 콘크리트 블록과 철재를 ORNL에 보내서 원폭 等価中性子線源에 의한 照射를 의뢰했다. γ 선에 대해서는 주로 ⁶⁰Co γ 선에 의한 照射로 発光량을 線量으로 變換했다.

(2) Ichiban

ORNL이 중심이 된 미국의 선량추정은, 1957년경부터 시작하였다. 네바다의 실험장에서 長崎型 원폭을 사용한 연속적인 3종류의 실험에서 12개 이상의 원폭을 사용했다고 한다. 중성자 측정에는 thresholdvalue檢出器(²³⁹Pu, ²³⁷Np, ²³⁸U, ³²S, ¹⁹⁷Au 등)를 사용하였고, γ 선 측정에는 film badge, 化学線量計등이 사용되었다. Plumbob series에서는 水collimator와 水·鉛collimator를 사용해서 角度分布를 측정함과 동시에 일본가옥을 세워놓고 建材의 차폐효과 등을 측정하였다. Hard-tack series에서는 여러가지의 실내구조에 대한 일본가옥에서의 屋内선량분포를 측정하였다.

그러나 실험장에서의 측정은 원폭으로 부터의 熱線과 폭풍등의 영향으로 인해 실험실과 같이 작은곳까지 측정을 할 수 없었으므로 長崎型 원폭에 의한 放射線場을 模擬하기 위해 보 건물리연구용 원자로(HPRR, 차폐가 없는 Bare Reactor)를 만들고 이커를 네바다실험장에 설치된 높이 460m의 鉄塔에 올려놓고 실험을 하였다. 이것이 BREN(Bare Reactor Experiment Nevada) Series이다. 원자로에서는 원폭에서와 같이 핵분열생성물에 의한 原子雲을 발생시킬 수 없기때문에 ⁶⁰Co ¹²⁰⁰Ci를 철탐에 매달아서 γ 선의 영향을 관찰하였다. BREN series에서는 thresholdvalue 검출기와 film등 외에 하스트펠비레계수관, ⁶Li Sandwich spectrometer, 蛍光유리線量計 등이 사용되었다.

広島型 원폭은 広島에 투하된것 1個였기 때문에 전혀 실험을 할 수 없었다. LANL은 広島型 원폭을 模擬하기 위해 臨界集合體를 만들어 실험실에서 中性子 spectrum과 선량측정을 하였다.

이러한 실험을 總稱하여 Ichiban이라고 한다. ORNL의 Auxier등은, Ichiban에 의한 데이터에 따라 다음式에서 広島, 長崎의 선량을 측정하였다.

$$D(R) = \frac{G_0 \exp(-R/L)}{R^2} \dots\dots\dots (1)$$

D(R)는 爆央(원폭의 炸裂点, 広島에서는 地上 570m, 長崎에서는 500m)으로부터 地上에서 문제가 되는 地点까지의 거리 Rm에서의 선량을 rad단위로 표시한것, L은 緩和거리(m), G₀는 원폭의 型, 出力 및 방사선의 型에 따라 定해지는 定数로서 rad·m²로 주어진다. 원폭의 출력은 T NT화약으로 환산하여 広島에서는 12.5kt, 長崎에서는 22kt으로 하였다. 1kt 당 核分裂數는 1.45 × 10²³, 핵분열당 중성자線量은 1m의 거리에서 6.91 × 10⁻¹⁵ rad·m이였다. BREN series에서의 중성자선량의 再生係數는 6.96이였으므로 廣島の 중성자에 대한 G₀=8.7 × 10¹⁰ rad·m²로 했다. γ 선에 대한 G₀는 広島에서 3.45 × 10¹⁰, 長崎에서는 2.75 × 10¹⁰이였다. 兩市の 공기 밀도를 1.133 g/l로 하고 중성자의 공기중에서의 緩和거리를 兩市 다같이 198m로 했다. 그러나, γ 선에 대해서는 폭탄의 구조로 보아 長崎에 투하된 것이 高에너지 成分이 많았으므로 広島에서는 250m, 長崎에서는 350m로 했다.

(3) T65D

放医研 以外에도 일본 京都大学の 市川 등이 기와의 熱luminescence에 의해 γ 선량을 측정 하였다. ABCC는 일본에서의 데이터와 ORNL의 Auxier 등의 데이터가 잘 일치 되고 있다는 점에서 ORNL의 데이터를 T65D의 공기중에서의 선량으로 하고 Ichiban에서 얻어진 일본가옥의 차폐 데이터를 사용하여 피폭자의 선량을 정하였다.

그림1은 현재까지 사용되어 온 중성자, γ 선의 공기중에서의 선량을 爆心으로부터 거리의 函數로 표시했다. 式(1)에서도 알수있듯이 偏對數 그래프에서는 爆心에서부터 500m이상이며 선량은 거리와 함께 거의 直線으로 減弱한다.

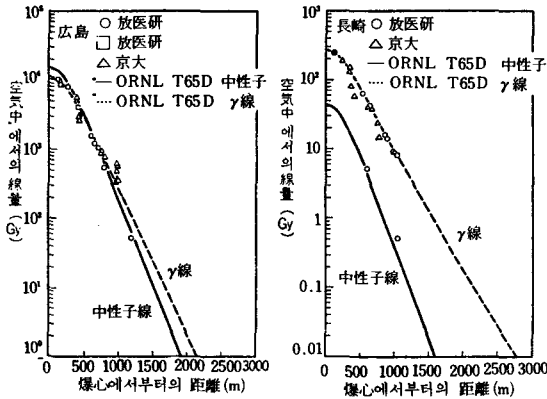


그림 1 T65D와 일본의 데이터

2. 선량再평가 - Loewe와 Kerr -

(1) 原爆의 구조와 spectrum

T65D는, 核實驗을 主体로 하여 추정된 선량이었다. 그러나 核實驗은 長崎型 원폭에 의한 것으로서 구조가 전혀 다른 廣島型 원폭에 이실 험데이터를 적용하는 것은 無理가 있다고 할 수 있다.

원폭의 구조에 대해서는 아직도 비밀이며 중요한 原爆炸裂時의 spectrum에 대해서는 不明한 부분이 많으며, workshop, symposium에서도 이 부분은 명백하게 밝혀지지 않았다. 그림 2에 이들 원폭의 구조도를 간단히 나타냈다.

廣島型은 농축우라늄을 사용하였으며 糖타입 또는 Little boy라고 부른다. 實際는 가늘고 길며 그림(a)의 좌측이 아래로 되어 낙하 되었을 것으로 생각된다. 그림에는 표시되어 있지 않으나 臨界未滿量을 화약으로 介體시켜 연쇄반응을 일으켰을 것으로 생각하면 左右에는 상당히 강력한 금속(두껍고 원자번호가 높은)이 사용되었을 것으로 생각되며, 左側方向으로 나간 방사선은 이들 금속원자와의 相互作用으로 인해 다른 방향으로 나간 방사선과 에너지·스펙트럼과 出力이 달랐을 것이다. Little boy가 어떤 각도로 낙하했으며 炸裂했는가는 不明이나 그 각도에 따라 지상에서의 방사선 선량分布는 상당히 복잡했을 것으로 예상된다.

한편 長崎型原爆은, 그림(b)처럼 거의 球型으로 臨界未滿量의 플루토늄이 둘레의 화약에 의해 內側에 압축되어 연쇄반응을 일으키는 內爆型으로 Fat man이라고 부른다. 이 타입은 Little boy에서와 같은 角度分布는 없다고 생각된다. 그러나, 核分裂에서 放出된 중성자는 화약속에 다량으로 포함되어 있는 질소원자와 相互作用하여 상당히 높은 에너지(3~10Mev)의 γ 선을 방출했을 것으로 생각된다. ORNL의 Auxier는 이 γ 선을 고려하여 長崎에서의 γ 선의 緩和 거리를 廣島보다 100m 길게 하였다.

LANL의 Preeg는, 어떤 방법으로 계산했는지는 不明이나(미국의 과학자 일부는 알고 있는것 같으나 비밀로 하고 있다) 폭탄의 구조등을 고려해서 Little boy와 Fat man 炸裂時의 에너지·스펙트럼을 계산하였다.

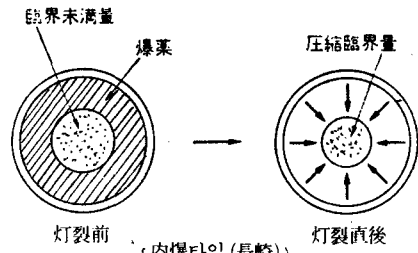
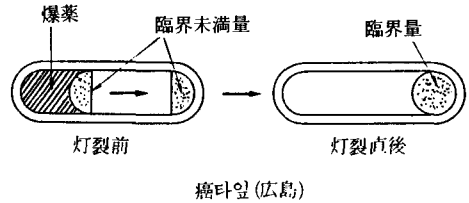


그림 2 原爆의 구조

그림 3은 Preeg가 계산한 中性子의 spectrum을 Ichiban에서 사용한 HPRR과 臨界集介體의 中性子spectrum을 비교하여 표시하였다. 그러나 모두 0.6MeV를 겹치게 하고있다. 이 Preeg의 spectrum을 출발점으로 하여 LLNL의 Loewe등과 ORNL의 Kerr 등이 廣島, 長崎의 지상에서의 공기중 선량을 계산한 것으로 대단히 중요한 데이터이다.

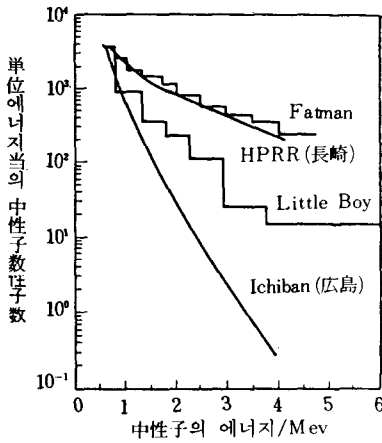


그림 3 原爆灯裂時의 中性子の 에너지·스펙트럼 (Loewe)

(2) LLNL의 再評價線量

Loewe와 Mendelsohn은 Preeg가 계산한 스펙트럼을 線源스펙트럼으로 하고 広島의 湿度를 80%, 長崎의 湿度를 71%, 広島의 炸裂点 高度를 570m, 長崎를 503m, 원폭의 出力을 広島는 T NT 화약 15±3 kt, 長崎는 22±2 kt으로 하여 兩市의 地上에서의 線량을 爆心(炸裂点直下の点)으로부터 2km까지의 거리에 대해 계산하였다. 계산은 Discrete Ordinates(Sn) Code ANISN(一次元)과 Discrete Ordinates (DOT) (二次元) 으로 행하고 계산의 일부를 Monte Carlo Method Code TARTNP(三次元)과 비교하였다. 어느것이나 방사선 輸送方程式의 近似解法으로 사용되고 있는 특별한 Code는 아니나 대형계산기로 상당히 장시간에 걸쳐 계산하였다고 한다.

核데이터는 ENDL/B-IV를 따랐다. 상세한 계산법에 대해서 언젠가는 발표되겠지만 현재는 不明이며 계산결과를 그림 4에 나타내었다.

미네아폴리스에서의 Loewe의 報告는, 広島의 경우 2km 지점에서 γ 선은 T65D의 4배, 중성자는 T65D의 1/9이었다고 결론짓고 있다. 그러나 Loewe는 이 선량推定에 대한 불확실성을 factor 2 이하라고 말하며 앞으로 이 불확실성을 축소 하도록 노력하겠다고 하였다.

Loewe 등은 계산에만 의존하였는데 이들의 방법으로 Nevada에서의 실험을 模擬한 결과, 실험치와 잘 일치되는 値를 얻고 있다. 또, 포트랜드 콘크리트의 組成을 사용해서 鉄中の ^{60}Co 의 比방사능을 계산한 결과, 広島의 경우 爆心으로부터 1,180m에서 0.014~0.015 cpm/mg을 얻었다. 이 値는, 放医研의 実測値 0.0124cpm/mg과도 잘 일치하고 있다. γ 선에 대해서도 放医研과 일본 京大그룹의 실험치와 잘 일치되고 있으므로 상당히 자신을 갖고 있는것 같다.

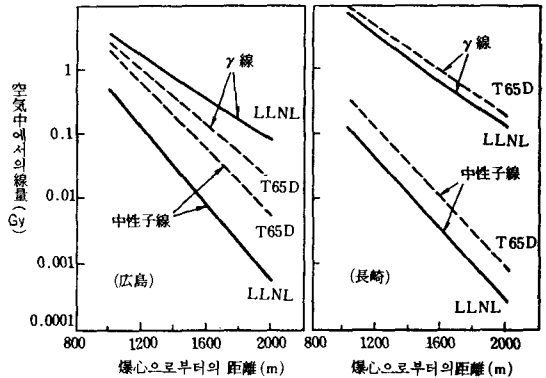


그림 4 広島, 長崎의 空氣中線量(T 65D 와 Loewe)

(3) ORNL의 再評價線量

ORNL에서는, Pace가 중심이 되어 Preeg의 스펙트럼으로부터 LLNL과 같은 계산으로 広島, 長崎의 선량을 推定하고 있다. ORNL의 선량재평가는 Kerr가 정리하고 있다. Kerr의 사고방식의 기초는, 어떠한 계산을 하더라도 일본의 과학자가 행한 残留放射能(銑을 포함해서)과 熱luminescence의 데이터를 설명할 수 없으면 가치가 없다는 것이다.

이들 계산의 출발점은, 폭발직후에 행해진 電柱 硝子の 유향 $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ 반응에서 생성된 ^{32}P 의 상대방사능과의 一致에 있다. 계산법은, Loewe 등과 같으나 도중에 들어가는 여러 가지의 假定이 Loewe와 多少 다르다는 점과 SAI의 Kaul 등과 공동으로 공기중 선량에서 일본가옥의 차폐계수와 인체의 臟器·조직선량까지 T65D를 모

두 재검토하려는 것이 Kerr와 Loewe의 차이이다.

Kerr등이 1981년에 추정한 선량을 그림 5에 나타냈다. Kerr의 선량도 Loewe와 같이 T65D의 중성자선량에 비해서 낮은 값을 나타내고 있다. γ 선에 대해서도 Loewe와 같은 결과이다.

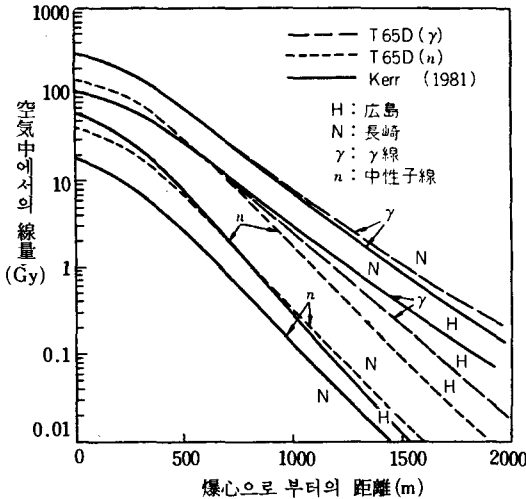


그림 5 広島, 長崎의 空氣中線量(T 65D와 Kerr)rr)

Loewe와 Kerr가 계산한 선량은 T65D와 크게 다르며, T65D에 대한 재평가의 필요성을 느낀다.

이 不一致의 원인으로는 ①原爆으로 부터의 중성자 스펙트럼의 차이 ② γ 선에 대해서는 γ 선량의 40~60%가 기여한다고 하는 核分裂生成物로 부터의 선량의 예견 ③ T65D의 뒷받침 데이터가 된 放医研의 ^{60}Co 방사능이 高에너지 성분이 많은 HPRR에 의한 近거리照射實驗에 기초를 두고 중성자선량으로 變換하였다는 것 등이 생각된다.

이와같은 선량추정에서는, 특히 線源스펙트럼이 중요한데 이번의 symposium에서도 올바른 스펙트럼을 결정하지 못하였다. 또한 선량, 공기 중에서의 선량에 대해서도 아무런 결론도 얻지 못하였다. Wvckoff는 work shop과 symposium에서 최종정리를 했는데 언제나 "Which is Which"로 끝내었다.

Loewe와 Kerr의 선량이 옳은것으로 하여 두세명의 生物学者가 原爆被曝者の 염색체 이상에 대해서 解析하고 있는데 선량이 4배가 되더라도 중성자의 RBE, 리스크係數는 2배 정도의 차이밖에 없다고 하였다. 그러나 또다른 새로운 선량으로 疫學調査의 재검토를 할 수 없는 단계이므로 선량재평가를 리스크평가에 結付시키는 것은 아직은 너무 빠른것 같다.

投稿案内

- * 內 容 : 원자력 전반에 관한 논문, 정보, 제언, 국제회의참가기, 해외 방문기, 국내의 동정, 수필, 기타
- * 原稿枚數 : 200字 원고지 30枚 内外
(採擇된 원고에는 所定の 原稿料를 드립니다)
- * 보 낼 곳 : 서울 중앙 사서함 6583호

韓國原子力産業會議 編輯室