

少量의 放射線은 人體에 有益

放射線이라고 하면 一般大衆은 대개의 경우 두렵고 무서운 것으로 인식하고 있다. 그러나 오스트레일리아 原子力委員會의 Keith Brown氏는 ATOM誌 4月號에 少量의 放射線量은 우리 人體에 유익할지도 모른다는 몇가지 증거를 제시하였다.

少量의 방사선량이 인체에 유익할 수 있다는 주장은 놀랄만한 사실임에 틀림없다. 低單位放射線이 인체에 미치는 영향—주로 해로운 면을 조사, 연구하는 과정에서 오히려 유익할지도 모른다는 가능성이 도출되고 있다. 과학자들은 이 새로운 개념을 Radiation Hormesis—放射線의 刺戟補強效果라는 이름을 붙이고 있다.

일반적으로 Hormesis란 말은 1940년대에 藥理學에서 사용되던 용어인데, 致死量에 못미치는 극히 적은 毒劇物은 生物體를 자극하여 生命力을 복돋운다는 현상을 설명하기 위해 사용되었다.

本稿에서는 방사선의 Hormesis효과, 즉 적은線量의 방사선은 우리에게 利로울 수도 있다는 論理에 대하여 論하고자 한다.

序 論

放射線 防護目的으로는 아무리 적은 방사선량이라 할지라도 人體에 害가 되므로 되도록 방사선에 노출되지 않는 것이 최선이라는 사실

은 이미 오래전부터 알려져 왔으며, 大量의 방사선被曝은 癌을 유발시킨다는 사실도 의심의 여지가 없다. 이러한 사실은 인체에 관한 연구와 여러 종류의 동물실험에서 이미 확인된 바이다. 그렇지만 高放射線에 대한 위험을 정량적으로 정확히 규정하기는 매우 어려운 실정이다.

방사선의 피폭으로 인한 암의 발병률에 대한 개략적인 분석은 주로 日本의 原爆生存者 8,000여명과 영국에서 수십년에 걸쳐 X線 치료를 받은 14,000여명의 환자를 근거로 하여 수행되어 왔는데, 이들은 대개 대량의 방사선에 짧은 시간동안 피폭된 경우이다. 이런 경우는 매우 긴 세월에 걸쳐 아주 적은線量의 방사선에 노출되는 우리의 일상생활과는 비교가 되지 않음은 물론이다.

우리가 매우 낮은 放射線量의 被曝下에서 작업을 할때 우리 人體에 미치는 効果는 매우 不確實하다. 실제로 低放射線에 의한 効果는 다른 종류의 요인과 혼합되므로 그 단독으로 인한 效果를 별도로 설명키는 매우 어려운 실정이다.

예를 들면 自然放射能(Background)에 일생 동안 노출됨으로써 암으로 사망할 확률은 1,000분의 1인데 반해, 다른 종류의 원인으로 인해 암으로 사망할 확률은 4분의 1이나 된다.

방사선효과에 관한 UN과학위원회는 수년동안 방사선의 위험도는 아무리 적은 양이라 할 지라도 피폭된 방사선량에 비례하여 건강에 惡 영향을 미친다고 강조해 왔으며, 대부분의 과학자들도 이 주장에 동조하였다 그러나 많은 과학자들은 이렇게 말하는 가운데에서도 소량의 방사선에 대한 위험도는 지나치게 과장되어 왔다고 믿고 있고, 오직 소수의 과학자들만이 소량의 방사선도 피폭된 양에 비례하여 위험하다고 주장하고 있는 실정이다. 다른 한편 어떤 과학자들은 이런 유해론과는 전혀 반대로 소량의 방사선은 오히려 피폭자에게 利로울 수 있다는 의견을 제기하였다. 과연 어느 쪽의 주장이 옳은가?

Hormesis

Hormesis란 살아있는 유기체의 생물이 微量의 물리적 또는 화학적 毒物質에 노출되었을 때 생리적인 자연방어기능을 자극하여 건강이나 生存에 利로운 方向으로 反應하는 현상을 말한다. 다시 말하면 致死量에 못미치는 少量의 毒劇物이 生體를 오히려 자극하여 강하게 하는 현상이다.

구리, 카드뮴, 아연, 셀레늄과 같은 금속원소는 소량이나마 인체에 꼭 필요한 필수적인 원소로 알려져 있지만, 다량을 복용할시는 독성을 나타낸다. 대부분의 독극물은 이와 같은 특성을 갖고 있다. 예를 들면 디지털리스(Digitalis)라는 식물은 소량으로는 強心劑로 이용되지만, 다량 投與時는 發作을 일으키거나 致死하게 된다. 세력을 약화시킨 병균을 투입함으로써 면역계에 抗體를 생성케하여 병균의 실제 침입시 이겨낼 수 있도록 하는 예방주사도 일례가

될 수 있다.

소량의 방사선이 이러한 Hormesis효과를 갖는다는 보고서가 현재까지 1,000여편 이상이 발표된 바 있다. 가장 잘 알려진 예는 소량의 放射線照射로 씨앗의 發芽를 촉진시키고, 식물의 성장을 촉진시킨다는 것이다.

또 다른 이로운 효과는 動植物 공히 번식과 生殖能力을 향상시키며, 수명을 증가시키고, 악성 종양을 방지하며, 전염병에 대한 내성을 증가시킨다는 것이다.

Radiation Hormesis의 出現

이 지구상의 모든 生物體는 수억년 동안 방사선에 끊임없이 被曝되어 왔다. 오늘날도 우리는 삶든 죽든간에 방사선 속에서 살 수 밖에 없다. 이러한 방사선피폭은 다음과 같은 두가지 형태로 나타난다.

- 외계로 부터 오고있는 우주선이나 우리 주변의 地表上에 존재하는 방사성물질로 부터의 피폭, 즉 體外被曝.

- 우리가 섭취하는 음식물과 물, 흡입하는 공기 속에도 방사성물질이 포함되어 있다. 따라서 우리 몸을 구성하는 물질로 부터의 방사선피폭, 즉 體內被曝.

이러한 피폭은 치료목적으로 이용되는 X선에 의한 피폭과 구분하여 自然放射能에 의한 피폭이라고 한다.

動物의 細胞가 그 진화과정에서 살아남기 위해 여러가지 危害要素에 대해 자신을 적응토록 변천되어 왔듯이 이러한 소량의 방사선에도 적응할 수 있는 능력을 길러 온 것은 그다지 놀라운 사실이 아니다. 세포들이 소량의 방사선에 의한 損傷을 제거하고 치유될 수 있다면, 이러한 기능을 좀 더 효과적으로 발휘하여 방사선을 자신에게 유리한 방향으로 이용할 수도 있을 것이다. 이와 같이 인간의 몸을 구성하는 세포는 방사선의 이온화작용으로 일어나는 크고

작은 손상의 약 90%를 數시간내에 치유할 수 있다.

한편 식물은 태양으로 부터 자외선을 받아 光合成이라는 과정을 통해 식물의 성장에 필수적인 많은 물질을 합성하고 있음은 주지의 사실이다. 만약 식물이 이러한 방법을 개발하지 못하였다면 살아 남을 수 없었을 것이다. 따라서 생물체의 세포들은 자연방사능으로 부터 얻은 에너지를 자신들에게 유익한 방향으로 이용해 왔다고 말할 수 있지 않을까?

Radiation Hormesis 효과와 成長촉진

짚신벌레는 원시적인 단세포동물로서 주로 물속에서 서생한다. 최근 20여년에 걸쳐 세계 각국에서는 짚신벌레의 세포분열에 대하여 여러종류의 실험을 수행하였다. 실험의 결과는 자연방사선이나, 매우 저선량의 X선 또는 γ 선은 짚신벌레의 세포분열을 촉진시킨다는 사실을 알아냈다. 그 결과는 매우 고무적인 것으로서 몇몇 과학자는 저선량의 방사선은 이런 미생물체의 성장에 필수적인 요소라고 까지 말하고 있다.

더욱 놀라운 사실은 자연방사선량의 양을 증가시키거나, 감소시킬때 세포분열의 속도도 비례한다는 사실이다. 이와 같은 실험에 의해서 자연방사선이 생물체에 리롭게 작용한다는 확신을 갖기에 충분하다.

짚신벌레의 정상적인 세포분열 속도와 지극히 적은 방사선량하에서의 세포분열 속도를 비교키 위해 두꺼운 납용기속에서 배양실험을 수행했다. 방사선량 외에 빛, 환기상태, 온도, 습도 등의 기타 배양조건은 동일하게 하였으며, 단지 여러가지 두께의 납용기를 사용함으로써 자연방사선의 통과를 조절하여 여러가지 방사선량하에서의 성장을 비교하였다. 90여일이 경과된 후에 차폐용기속의 짚신벌레의 세포분열 속도는 줄어들었으며, 용기의 두께가 두꺼울수

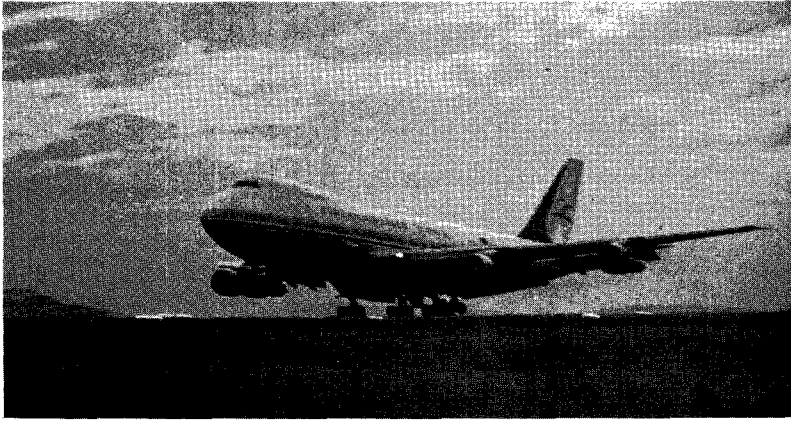
록 세포분열 속도의 둔화는 현저하였다. 한편 방사선의 존재 여부에 따른 세포분열 속도의 영향을 확인하기 위해 매우 적은 양의 γ 선을 방출하는 방사성물질을 차폐용기 속에 넣은 결과, 세포분열 속도는 차폐없이 배양한 경우와 같은 속도로 회복되었다.

이 실험은 차폐용기를 사용하여 방사선량을 조절한 시험이다. 이번에는 자연방사선량이 다른 지역에서의 배양실험을 예로 들어보자. 우주선의 강도가 海面 보다 5배가 되는 고도 3,800m의 산정상, 3배가 되는 고도 1,000m, 海面과 높이가 같은 지역, 그리고 우주선의 강도가 상당히 감소된 지하 200m 지점에서 각각 배양실험을 수행했다. 물론 高度 이외의 다른 배양조건은 같게 했으며, 특히 공기의 압력도 동일하게 유지하였다. 결과는 고도가 높을 수록 세포분열 속도가 빨랐으며, 낮을 수록 세포분열 속도가 느린 것으로 나타났다. 지하배양의 경우 자연방사능과 같은 정도의 방사성물질을 배양용기에 넣었을 때 세포분열의 속도는 지상(海面)에서의 배양과 같은 속도로 회복되었다.

Radiation Hormesis 효과와 癌

자연방사능의 강도는 그 지방의 토양속에 함유된 방사성물질의 함량과 그 지방의 고도에 따라 좌우된다. 평균 자연방사능 보다 20배가 넘는 고방사능지대가 지구상에 여러군데 있으며, 이런 지역에 사는 사람들은 수세대에 걸쳐 높은 자연방사능하에서 살아왔다. 토양속에 함유된 고방사성물질로 인해 자연방사능의 강도가 높은 지역은 브라질, 중국과 인도에 주로 분포되어 있다. 고지대의 자연방사능은 우주선으로 인해 고도에 따라 증가한다.

만약 소량의 방사선피폭이 우리가 예상한 것보다 위험하다고 하면 자연방사능이 높은 지역에 사는 주민의 건강 상태가 좋지 않다던가, 특



◀비행기를 타고 高空을 여행하는 사람이나 높은 高地帶에 살고있는 사람들은 저지대에 살고있는 사람에 비해 우주선에 의한 방사선피폭량이 많다. 그러나 건강을 해친다는 증거는 없다.

히 암의 발병률이 높아진다면가 하는 뚜렷한 증거를 찾아야 할 것이다. 하지만 높은 자연방사선이 해로운 결과를 초래한다는 뚜렷한 증거는 없다. 단지, 인도의 Kerala지역은 높은 자연방사능으로 인해 Down's Syndrome이라고 불리는 선천적 백치의 일종인 몽고병 환자가 타 지역보다 많다고 보고된 바 있다. 후에 이 연구 결과가 통계적으로 신빙성이 없다고 밝혀지긴 했지만 일반대중은 이것의 眞僞보다는 처음 주장에 더 관심을 갖고 있다.

어떤 다른 조사에서는 높은 자연방사능지역에서 암의 발병률이 증가하기는 커녕 놀랍게도 자연방사능의 증가에 따라 발병률이 점차 감소된다는 결과를 얻어냈다. 예를 들면 미국내의 고도가 높은 7개 주에서의 암으로 인한 사망률이 방사능 강도가 반박에 되지않는 동부 해안에 위치한 주의 사망률 보다 적다는 사실이다. 일부 과학자들은 이 사실을 놓고 우주선에 의한 방사선량의 증가에 따른 Hormesis효과로 설명하고 있다.

그러나 많은 변수가 작용하는 경우에 대한 통계적 해석에서 어떤 확고한 결론을 얻어내기 가 어려운 것과 같이 이 경우도 전 미국의 인구를 근거로 연구한 결과이지만 저준위 방사선의 효과에 대하여 확고한 결론으로 제시하기는 어려운 실정이다. 어쨌든 간에 높은 자연방사능

지역이라고 하여 인체의 건강에 악영향의 정도가 증가된다는 확실한 예는 발견되지 않았다고 말할 수 있다.

Radiation Hormesis 効果와 壽命

곤충, 쥐, 돼지 등과 같은 동물들에게 저준위 방사선을 일생동안 照射하는 실험이 수행되었다. 기대한 바와 같이 거의 모든 경우에 수명은 방사선피폭의 영향으로 단축되었다. 그러나 어떤 경우는 어느 정도의 저방사능 照射를 받은 쪽이 피폭을 받지 않는 경우보다 20% 정도 더 오래 산 경우도 있었다.

이와 같은 실험을 통해 많은 종류의 동물들에서 수명이 증가한다는 사실을 발견했지만, 인체에 대해서는 아직 의문사항으로 남아있다. 현재까지의 동물실험에 의해서 평균 자연방사능 보다 높은 어떤 방사능지역에서 인간의 수명은 증가될 수도 있다는 가능성을 제시할 수 있을 것이다.

結 論

방사선의 효과는 언제나 해로운 것으로만 나타나지는 않는다. 특정범위의 저방사선량의 장기피폭으로 수명의 연장, 성장률의 증가, 세포

분열의 촉진, 발병률의 감소와 같은 유익한 효과를 얻을 수 있다는 사실을 생물체에 대한 수많은 실험이 뒷받침해 주고 있다. 이와 같이 저선량 방사선의 유익한 효과가 인체에서도 일어

날 수 있는가를 생각하는 것은 매우 흥미로운 일이다. 하지만 인체에 대해서는 그 가능성이 제시되었을 뿐 확고한 증명은 아직 없다.

被曝線量低減을 위한 NSSS設計

프랑스와 벨기에에서의 900MWe 및 1,300MWe 급 原電 運轉經驗에 따르면 발전소 운전 및 보수기간중의 平均集積線량이 미국을 포함한 다른 나라들보다 적은 것으로 나타났는데, 이는 Framatome의 設計技術과 프랑스전력공사(EDF)의 運轉節次 改善이 작업원의 放射線被曝을 최소화할 수 있었기 때문이었다.

그림1에 나타나 있듯이 1986년중에 프랑스 PWR에서의 年間被曝線량은 TWh當 35맨렘(man-rem)이었는데 반해 미국의 PWR경우는 90맨렘, BWR에 대해서는 170맨렘으로 집계되었다. 또한 프랑스 PWR 및 Framatome이 설계한 벨기에와 남아프리카공화국의 발전소(총 44基)의 平均被曝線량은 225맨렘이었음에 비하여 미국은 48基의 PWR경우 410맨렘, 29基의 BWR에 대해서는 600맨렘으로 나타났다.

1. 原因 및 解決策

작업중 방사선피폭의 80%는 1次冷却系統내에 존재하는 放射化된 腐蝕生成物 때문인데 PWR의 경우 이들 부식생성물은 高温의 환경조건하에서 생성되는 마그네타이트(Fe_3O_4), 니켈, 크롬화철 등이 주종을 이루며 半減期가 긴 核種 즉, Co-60(5.2년), Co-58(71일), Mn-54(303일), Cr-51(27일) 등을 함유하고 있다. 原子爐 주변의 放射線은 1次冷却水가 통과하는 機器 및 配管 內表面에 눌러붙은 酸化沈積物層中의 이들 核種에서 발생된다.

작업원들의 방사선피폭을 줄이기 위해서는 먼저 부식생성물의 發生源과 그 量을 減少시켜야 하며, 두번째로는 訓練과 補修裝備의 改善, 그리고 로봇의 사용 등을 통해 작업원의 被曝時間을 줄이는 것이 필수적이다.

첫번째 방안의 일환으로서 부식생성물의 沈積과 移動過程을 파악하기 위해 여러가지 實驗들과 발전소 現場에서의 線量측정 등이 수행되고 있다.

CEA(프랑스원자력청)가 개발한 전산프로그램 PACTOLE는 여러번의 實驗을 통해 방사선 피폭선량을 상당히 정확하게 豫測할 수 있는 것으로 檢證되었다.

1979年以後 계속되는 週期的인 線量率 測定은 발전소정지 24시간후 지정된 7개 지점에 대해 측정을 하는데 측정위치는 1차계통, 체적제어계통, 열제거계통 근처이다.

上記 實驗 및 測定의 결과 운전중인 원자로에 대한 부식생성물의 沈積을 減少시키는 방안으로서 수산화리튬을 줄이는 방법이 권고되어 현재 시행중인데, 수산화리튬을 줄이면 1차냉각수의 鐵溶解度를 最小로 할 수 있는 pH의 유지가 가능하여 결과적으로 부식생성물의 表面沈積을 방지한다.

放射化가 가능한 材質의 量을 줄이기 위해서는 두종류의 재질 즉, 핵연료 및 노심구조물 등 爐心內 재료와 증기발생기의 인코넬튜브, 밸브와 제어봉구동장치 그리고 센터링키 등에 사용되는 1차 계통의 재질을 고찰해야 한다.

原子爐속에서 中性子에 노출되는 스테인레스강과 인코넬은 약간의 코발트를 함유하고 있는데, 製作任樣의 制限值인 0.08%에 비해 실제 함유량은 表1에서 보듯이 대부분의 경우 이 값보다 작은 것으로 나타나 있다.

핵연료에서는 인코넬그리드의 放射化로 Co-58이 생성되는데, Framatome이 개발한 改良型核燃料(AFA : Advanced Fuel Assembly)는 이를 인코넬클립스프링이 부착된 지르칼로이그리드로 교체하여 同 연료를 사용하게 되면 5년후에는 30%정도까지 방사선피폭량을 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다(PACTOLE 계산결과에 의한 예측임).

中性子에 직접 노출되지 않는 재질중 放射化腐蝕生成物의 주된 生成源은 증기발생기의 인코넬튜브로서 PWR의 경우 이들은 1차냉각수 접촉면적의 75%를 차지한다. 프랑스에서는 1차 및 2차측의 化學的條件下에서도 耐蝕性이 뛰어난 인코넬 600을 튜브재질로 선정, 사용함으로써 부식의 정도를 줄이고 또한, 제작시의 튜브다발에 대한 熱處理와 튜브관구역에 있는 튜브다발을 現場에서 Shot-Peening함으로써 耐蝕性을 높이고 있다. 새로 건설되고 있는 발전소의 증기발생기에는 인코넬690을 사용하고 있는데, 인코넬690은 니켈철의 방출정도가 작으며 코발트의 함량이 훨씬 적다.

코발트는 제어봉구동장치 및 밸브 등의 코팅

〈表1〉 코발트 함유량 제한치

1차측 기기	제한치	평균 함유율
1. 원자로 용기		
1) 노심셀	≦ 0.03%	
2) 피복재	≦ 0.2%	0.03%
3) 원자로내부구조물	≦ 0.10%	0.08~0.05
2. 증기 발생기		
1) 튜브다발		
- 인코넬 600	≦ 0.10%	0.010~0.045
- 인코넬 690	0.05%	
2) 1500MWe 증기발생기		
- 인코넬 690	≦ 0.035%	

재질에도 함유되어 있는데, Framatome은 PWR 모의설비를 이용하여 CRDM에 대해 광범위한 耐性試驗을 수행한 결과 Latch Arm의 마모율을 상당량 줄임으로써 코발트의 1차냉각수내 유출을 획기적으로 감소시켰다.

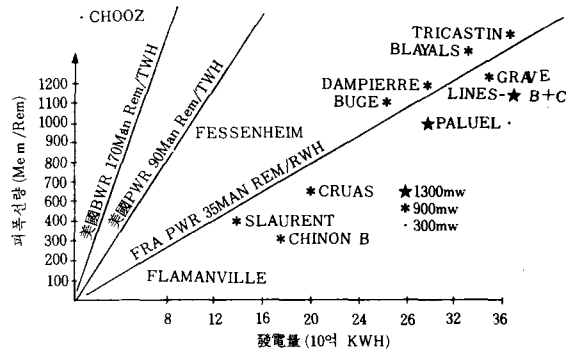
2. 週期的인 除染

보수 및 대규모 수리시의 방사선피폭 감소방안으로는 증기발생기 채널헤드에 대한 週期的인 除染이 현재 고려되고 있다. 이동형 제염장비를 제작하여 AECL이 특허권을 갖고 있는 工程을 사용하여 제염을 하는데, 同 工程은 희석된 제염용 화학용액(1% 이하)을 주입하여 機器의 內表面에 붙어있는 오염물질들을 제거시켜 이온교환수지로 걸러내는 工程이다.

3. 遠隔裝備

Framatome은 原子爐機器들의 보수에는 필수적인 원격제어장비를 개발하여 보수요원들이 高放射能區域에 거주치 않도록 함으로써 방사선피폭을 줄였다.

증기발생기는 1, 2차측 모두 정기적으로 검사 및 보수를 해야 하는데, 2차측에 대해 Framatome은 발전소 운전중 증기발생기 튜브관에 쌓이는 마그네타이트 침적물을 제거하는 이동형 장비를 개발하였다. 침적물 제거방법은



〈그림 1〉 發電量和 작업중사자의 피폭선량 (1986년도, 미국과 프랑스의 비교)

튜브판위에 있는 Eyehole을 통해 噴射機를 집어 넣고 高壓(200기압)의 水流를 噴射하는 것인데, 이 장치는 Eyehole 부위에 장착되는 분사기 자동구동장치, 원자로 건물밖에 위치하는 主트레일러 및 보조트레일러 그리고 이들을 연결하는 배관과 케이블로 구성된다.

1차측에 대해서는 다음과 같은 몇개의 장비가 튜브다발의 정기적인 검사를 위해 제작되었다.

○증기발생기채널헤드를 원자로의 냉각수유입구 및 유출구로부터 분리, 결합시키는 회전장비. 이 장비는 채널헤드속에 있는 Folding Cover 를 작업자가 원격으로 조정, 감시하면서 정확히 원자로 냉각수 유출구 및 유입구에 결합시키기 위한 장비이다.

○完全自動인 보수용 스파이더와 증기발생기 밖에서 튜브판위에 고정이 가능한 스파이더구동장비.

스파이더는 튜브판위에서 작업위치로 이동

을 하며 밀링머신, 용접토치, 와류봉(Eddy Current Probe), 카메라 등의 다양한 공구들을 장착할 수가 있다.

○튜브플러깅, 튜브양단의 수리 및 밀링, 튜브제거 및 결합 등과 같은 채널헤드내부를 수리할 수 있는 몇가지 종류의 로보트팔(ROTETA, ROMEO, TAM).

큰 하중(최대 100KN)을 취급할 수 있는 이들 多目的用 로보트팔은 복합작업을 수행할 수 있는 여러가지 장치를 포용할 수가 있으며, 事前에 작업내용을 프로그램하여 집어 넣을 수 있고 혹은 방사선 구역에서 멀리 떨어진 원격 제어실에서도 조작할 수 있다.

마지막으로 EDF와 Framatome이 공동설립하여 운영중인 CETIC 研修院에는 각 기기들의 실제규격과 동일한 모의기기들이 갖추어져 있다. 보수요원들의 훌륭한 훈련장소로서 보수기간중의 放射線被曝을 줄이는데 있어서 중요한 역할을 수행하고 있다.

個人被曝線量減少 經驗과 進步

放射線防護란 大衆의 한사람 혹은 직업상 방사선에 노출되는 개개인들을 방사선으로부터 보호함을 뜻하였었다. 이보다 늦게 原子力設備의 안전도를 나타내는 한가지 지수로서 사용되기 시작한 集積線量(Cumulative Dose : man Sv 단위로 표시됨. 개인이 어느 기간동안 맞은 피폭선량을 뜻하는 集積線量과는 다른 의미이며 어느 특정그룹의 피폭총량을 의미함)은 설비의 위험정도를 평가하는데 있어서 相異한 發電所型이나 에너지 생산방법 또는 여러 발전소들을 서로 비교할 수 있는 훌륭한 척도가 되고 있다.

그런데 개인피폭에 대한 규제치는 정해져 있지만 어떤 그룹 즉, 발전소직원전체에 대한 集

積線量 같은 경우 단지 몇몇의 예외(스위스에서는 4man Sv / yr로 규정하고 있음)를 제외하고는 制限値가 주어지지 않다. 年間個人被曝線量은 여러가지 많은 요소들과 연관되어 있고 작업요원들이 예기치 않았던 상황에 부닥칠 수도 있기 때문에 그 制限値를 관리하기란 쉽지 않으며, 따라서 最小限이란 단서가 불치만 융통성있는 관리가 필요할 수도 있게 된다. 그러나 ALARA관점에서는 將來를 위해서 어떤 目標를 정해두는 것이 유익하다. 이에 대한 분석은 電力會社職員 뿐 아니라 발전소를 출입하는 여러 업체의 직원들도 대상으로 해야 하는데, 그 이유는 방사선피폭이 發電所의 狀況과 동일부지내의 原子爐 基數 등에 밀접하게 연관

되어 있기 때문이다.

다음에 記述하는 내용은 原子爐型과는 무관하나 LWR, 특히 PWR에서의 경험이 대부분이기 때문에 이를 例로 하여 記述하였다.

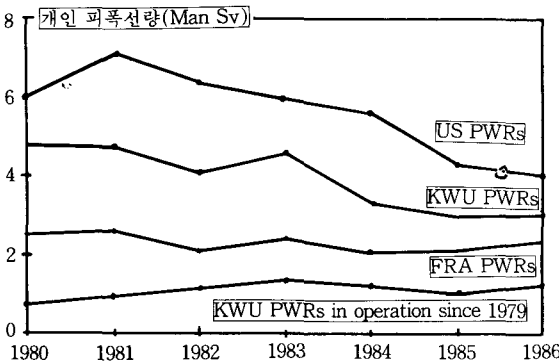
1. 方法 및 措置

放射線防護란 設計에서 부터 시작이 되는데 原電을 설계하는 기술자들은 그 모두가 지난 몇십년사이에 설계기술을 익히는 과정에서 그 設計를 改善시켜 왔다. 그러므로 被曝線량을 고찰할 때에는 반드시 發電所의 나이를 알거나 혹은 특정그룹 즉, 한 나라의 발전소 전체에 대해 나이의 분포상태를 알아야만 한다. 만약 오래된 발전소들이 平均線量値를 밀들게 되면 새로운 발전소에서의 改善效果란 인정하기가 힘들게 된다.

기본적으로 방사선피폭선량은 作業場所의 放射線量과 작업에 필요한 滯留時間에 의해 결정되며, 이들 두 因子는 발전소의 設計 및 運轉의 영향을 받는다.

가. 放射線量の 減少

設計를 할때 방사선방호를 위한 첫번째 조치는 방사선차폐물을 설치하여 발전소 운전중에 一般作業區域의 作業자들을 보호하는 것으로서 최근 독일에서 건설한 신규 발전소 건물들은 補修期間中の 임시차폐를 위해 많은 장소들



〈그림 2〉 PWR에서의 개인피폭선량 변화

을 보장하였다.

일부 발전소에서는 증기발생기 튜브의 슬러지 제거와 같이 여러가지 작업이 필요한 機器 주변에 국부적인 차폐체를 설치하기도 하였다.

1) 線量率減少의 가장 효과적인 방법중 하나는 발전소전체의 방사선준위에 영향을 미치는 放射化腐蝕生成物의 발생을 減少, 또는 防止하는 것이다. 이 점에 있어서 가장 중요한 개선사항은 큰 하중으로 상호 맞물리는 기기들의 접촉부의 재질을 코발트합금이 아닌 다른 적절한 합금으로 바꾸는 것인데, 이렇게 함으로써 방사선피폭의 主要原因인 Co-60을 상당량 줄일 수가 있다.

Siemens / KWU가 건설한 LWR에서는 爐心區域과 1次冷却系統 全體, 그리고 보수시에 생긴 슬러지들속의 부식생성물이 1차계통으로 흘러들어 갈 수 있는 보조계통들의 밸브까지도 단계적으로 이러한 재질로 교체해 나가고 있다. 현재 코발트합금은 극히 적은 구역에만 남아있다.

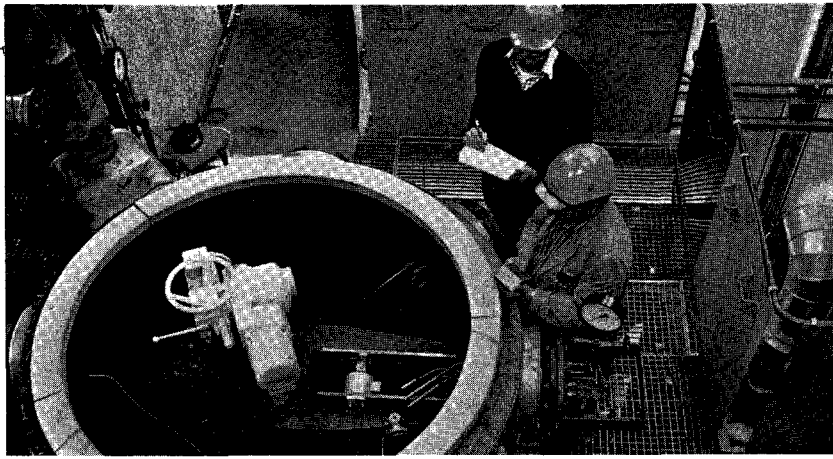
또 한가지 다른 방법은 핵연료집합체를 포함하여 爐心に 있는 오스테나이트강의 코발트함유량을 엄격히 제한하는 방법이다.

2) PWR의 水化學에는 1차계통내에서의 부식생성물 活性度가 반드시 반영되어야 한다. 리튬의 함량에 영향을 미치지 않는한 pH값이 7보다 커야한다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다.

3) 오염도가 큰 機器에 대한 작업을 위해 계통 전체 또는 일부를 제염할 수 있는 여러가지 방법들이 개발되었다. 제염 및 제염에 뒤따르는 폐기물처리하는 방사선피폭을 유발시키는 작업이기 때문에 충분한 비용-이득분석에 근거하여 각각의 경우에 대한 작업방법을 결정해야 할 것이다.

나. 放射線구역에서의 滯留時間減少

강력한 放射線源 근처에서의 滯留時間을 줄



일 수 있는 많은 改善方案들이 소개되어 왔는데, 이들은 주로 발전소 정지중과 특히 原子爐 建物내에서의 체류에 초점을 맞추어 있다.

우선 출입경로를 짧게 하고 試驗 및 補修用 플랫폼을 설치하며, 선정된 지점에 대해서는 쉽고 신속하게 제거할 수 있는 단열재를 설치함으로써 작업을 위한 사전준비를 최대한 줄이는 방안이 있다.

독일에서는 용접부에 대한 광범위한 稼動中 檢査 認許可要件 때문에 遠隔制御 및 자동초음파시험장비가 개발되었으며, 이 장비를 사용하기 위해 발전소 건설시에 1차계통과 증기발생기에 가이드레일을 장착하였다.

또 다른 한가지 개선사항은 용접길을 획기적으로 줄인 것이었다. 많은 試驗用裝備는 補修時에도 사용이 가능한데 그 實例로는 증기발생기튜브의 와류시험장비로서 同 장비는 튜브를 다루고 튜브플러그를 설치할 때에도 사용할 수 있다.

현재는 補修方法을 바꾸고 오래된 발전소의 機器들을 교체하는 것에 주력하고 있으며 이 분야에서의 전체 작업을 위해서는 많은 장비와 경험이 요구되고 있다.

결론적으로 새로운 장비와 장치들에 의한 被曝線量の 減少는 여러 곳에서 이루어지긴 했지만 아직 局部的으로 머물고 있어서 放射線量を 줄이는 것보다는 덜 효과적이라 할 수 있다. 그러나 이들 장비들은 시간의 절약, 혹은 신뢰도

가 더 높은 시험결과 등의 또 다른 이득을 가져다 주고 있다.

2. 放射線被曝

同一會社가 건설한 독일의 PWR과 BWR을 비교해 보면 수년전 BWR발전소에 대한 대대적인 보강작업이후로는 年間集積線量の 平均値가 비슷한 것으로 나타난다. 이 결과는 BWR이 PWR보다 높은 피폭선량을 보여주는 미국의 경우와는 다른데 BWR의 일반적인 경향은 발전소 運轉中에는 PWR보다 높고 核燃料交替時에는 낮은 것으로 되어 있다.

독일 PWR의 대표적인 年間線量은 수년간 운전을 계속해 온 발전소를 대상으로 한 것으로서 최근의 개발에 따른 효과가 반영된 것은 아니다.

연간 총피폭선량은 약 2배 이상 변했지만 日常作業의 경우는 평균 0.65man Sv/yr 정도만이 변하였는데 이 값은 출력운전이 15%, 핵연료교체작업이 11%, 교체작업기간중의 가동중검사와 보수작업 및 기타 일반작업(방사선방호, 청소 등)이 74%를 차지하고 있다.

以上の 현상들에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) 出力稼動中の 月間線量에 해당되는 약 10man -mSv는 향후 개선대상으로서는 별 매력 없으며 이는 核燃料交替作業의 경우도 마

찬가지이다.

2) 나머지 74%에 대해서는 세척작업용 장비의 기계화를 보다 높이는 등 보다 細部的인改善이 바람직하다.

3) 上記한 放射線量の 減少 외에도 성능을 개선하는 등의 방법을 통해 비일상적인 수리 요인을 줄이는데에 주력해야 한다. 日常作業으로 인한 피폭량은 상당부분 감소가 되었기 때문에 이러한 예상치않은 작업이 보다 근본적인 요인이 되고 있다.

4) 個人被曝은 괄목하게 減少가 되었다.

5) 모든 사실을 종합해 볼 때 최근의 PWR설계에서 集積線量を 1.0man Sv / yr로 낮춘다는 것이 不可能한 것처럼 보이지는 않는다.

6) 이미 1983년에 독일의 2-루프 발전소에서는 증기발생기 1개당 약 3.5man Sv의 線量으로 증기발생기의 교체를 완료하였으며 여러나라들에서 이와 같은 많은 경험들이 축적되고 있다.

日本 PWR原電의 放射線遮蔽

日本の 加壓水型 原子力發電所는 美浜 1호기 도입이후 玄海 3/4호, 大飯 3/4호, 伊方 3호까지 23유니트의 플랜트중 16유니트가 운전개시되었으며, 7유니트가 설계 또는 건설중이다.

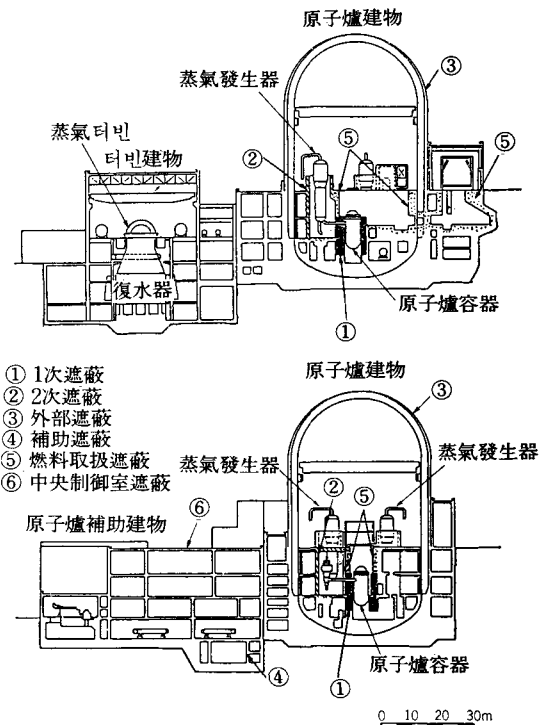
가압수형 원자력발전소는 원자로건물, 원자로보조건물 및 터빈건물 등으로 구성되어 있다 (그림1). 증기발생기를 포함하여 터빈건물은 방사능이 없는 설계로 하고 있으며 화력발전소와 같이 방사선차폐가 기본적으로 불필요한 깨끗한 건물이다. 따라서 방사선차폐설계가 필요한 건물은 주로 원자로건물, 원자로보조 건물이 대상이 된다.

원자로건물은 원자로를 포함한 1차계통 설비를 격납하는 건물이다. 원자로보조건물은 원자로건물에 인접하여 化學體積制御設備, 廢棄物 처리설비, 중앙제어실 등을 가진 건물이다.

일본 원자력발전소의 방사선차폐설계는 表 1의 법규에 준하여 이를 충족시키도록 설계되는데, 그 주된 내용은 다음과 같다.

(1) 발전소 주변의 일반대중이 받는 피폭선량이 「실용발전용 원자로의 설치, 운전 등에 관한 규정에 근거한 피폭선량 등을 규정하는 告示 (通産省 告示 665호)」에 규정된 주변감시구역

밖의 허용치보다 훨씬 적게 함과 동시에 통상 운전시의 直接線量 및 스카이사인線量이 사람이 거주할 가능성이 있는 부지경계 밖에서 年



〈그림 1〉 주요건물 및 차폐의 종류

〈表 1〉 許容被曝線量과 法規

運轉狀態	對象	許容線量	
		許容線量	法規
通常運轉時	從業者	許容集積線量	$D(\text{rem})=5(N-18)$ D: 線量, N: 年齡 通產省告示 665號第4條
		管理區域에 관한 線量	30mrem/week 通產省告示 665號第1條
	許容被曝線量	3rem/3個月 通產省告示 665號第5條	
	公衆	許容被曝線量	0.5rem/年 通產省告示 665號第2條
直接·스카이라인線量		5mR/年 ※	
事故時	從業者	緊急作業에 의한 許容被曝線量	12rem 通產省告示 665號第8條
	公衆	各種事故	全身 0.5rem 安全評價 審査指針
		重大事故 (非居住區域)	全身 25rem 立地審査 指針
		價想事故 (低人口地帶)	全身 25rem 立地審査 指針

※ 원자로 안전전문심사회 내규

間 5mR을 넘지 않도록 차폐설계를 한다.

(2) 발전소 주변의 일반대중의 받는 피폭선량이 「발전용 경수로형 원자로시설의 안전평가에 관한 심사지침」(안전평가심사지침) 및 「원자로 立地심사지침」(입지심사지침)을 충분히 만족하도록 차폐설계를 한다.

또, 사고시에 중앙제어실내의 종사자 등에 대해 과도한 방사선피폭이 없도록 고려하여 운전원이 중앙제어실내에 머물며 사고대책에 필요한 각종 조작을 할 수 있도록 차폐설계를 한다.

(3) 통상 운전시에 종사자 등이 받는 피폭선량이 通產省 告示 665호에 규정되어 있는 허용치를 초과하지 않도록 함은 물론이며, 불필요한 방사선피폭을 방지하는 차폐설계를 한다.

차폐설계에 대해서는 관련 각 장소의 출입빈도, 체재시간을 고려하여 종사자의 방사선피폭선량을 충분히 안전하게 관리할 수 있도록 방사선량률이 다음의 차폐설계기준을 만족하도록 설계한다.

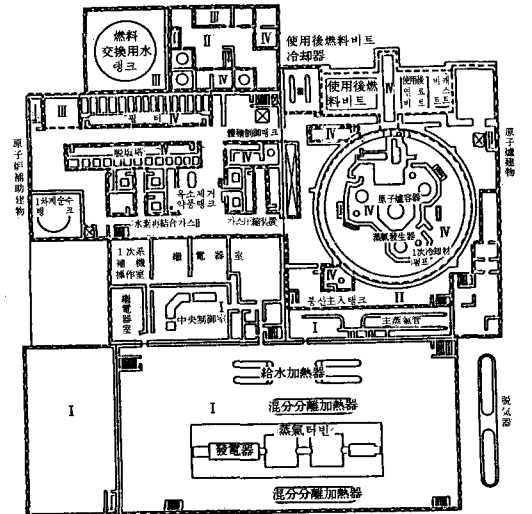
遮蔽設計基準

管理區域外 제 I 구분: 관리구역외

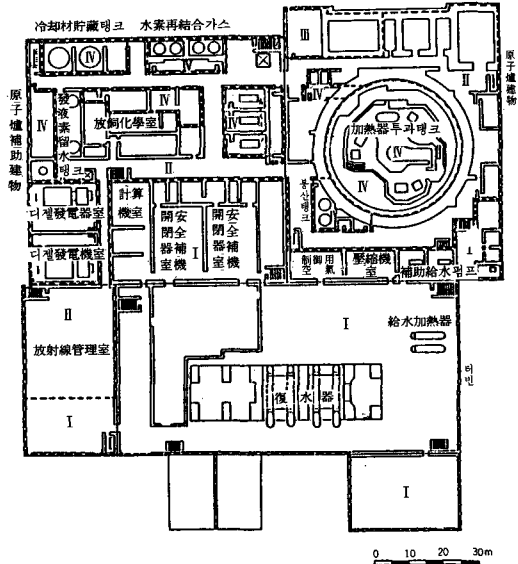
設計基準放射線量率 $\leq 0.625\text{mrem/h}$

管理區域內 제 II 구분: 週 48시간 이내 출입

設計基準放射線量率 $\leq 1\text{mrem/h}$



第 I 區分 $\leq 0.625\text{mrem/h}$
第 II 區分 $\leq 1\text{mrem/h}$
第 III 區分 $\leq 15\text{mrem/h}$
第 IV 區分 $\leq 15\text{mrem/h}$



〈그림 2〉 차폐설계구분도 (例)

제Ⅲ구분 : 週 7시간 이내 출입
放射線量率 ≤ 15mrem/h

화를 위해 상기 4區分을 세분하여 (2mrem/h) 및 (100mrem/h)의 2구분을 추가하여 6구분화하는 경향이 있다.

제Ⅳ구분 : 통상은 출입불필요
放射線量率 > 15mrem/h

遮蔽設計의 概要

이 차폐설계기준에 따른 區分圖를 그림2에 나타내었다. 최근에는 차폐설계의 합리화, 적정

방사선차폐는 일반대중, 발전소 종사자 등의 피폭선량을 저감시키는 것으로서 주된 차폐설

〈表 2〉 遮蔽의 종류 및 기능과 설계조건

종 류		기 능	설 계 조 건 또는 기 준 선 량 률		
格 納 容 器 内	1次遮蔽	1차 차폐는 원자로 용기를 직접 둘러싼 콘크리트구조물로서 爐心으로부터 中性子 및 감마線을 減衰시킨다	통상 운전시	1차 차폐에서의 투과중성자에 의한 선량률 ≤ 1차 냉각재 루프室内의 중성자에 의한 선량률	1차 냉각재 루프室内의 중성자에 의한 선량률
			통상 운전시	1차 차폐에서의 투과감마선에 의한 선량률 ≤ 1차 냉각재 루프室内의 감마선에 의한 선량률	1차 냉각재 루프室内의 중성자에 의한 선량률
			노정지시	1차 차폐에서의 투과선량률 ≤ 15mrem/h	
2次遮蔽		2차 차폐는 원자로 격납용기내의 1차 냉각설비를 둘러싼 콘크리트구조물로서 1차차폐를 투과해 나오는 방사선과 1차 냉각설비내에서 발생하는 방사선을 감쇠시킨다	통상	2차 차폐外表面선량률 ≤ 100mrem/h	
			정지시	2차 차폐外表面선량률 ≤ 15mrem/h	
燃料移送차폐		연료이송차폐는 사용후 핵연료에서 방출되는 감마선을 차폐하여 종사자를 과도한 피폭으로부터 보호한다	연료취급시	원자로 캐비티水面선량률 ≤ 2.5mrem/h 원자로 캐비티壁表面선량률 ≤ 15mrem/h 연료취급 캐널壁表面선량률 ≤ 15mrem/h	
外部차폐		통상운전시에는 1차 차폐와 2차차폐의 배합에 의해 원자로격납용기 밖에서의 방사선레벨을 감쇠시킴과 동시에, 사고시에도 발전소주변의 일반대중이 받는 피폭선량이 「원자로입지식사지침」이 목표하는 선량을 훨씬 하회함을 확인한다	통상	外部 차폐주변 ≤ 0.625mrem/h 사람이 거주할 가능성이 있는 敷地境界外 ≤ 5mR/y - site 주변감시구역의 ≤ 500mrem/y - site	
			사고시	원자로 격납용기에서의 직접 스카이스핀線量과 放射線量으로부터의 外部放射線最의 합계 ≤ 25rem	
格 納 容 器 外	燃料移送차폐	연료이송차폐는 사용후 핵연료에서 방출되는 감마선을 차폐하여 종사자를 과도한 피폭으로부터 보호한다	연료취급시	연료취급 캐널 벽표면선량률 ≤ 1mrem/h 사용후 핵연료에 의한 水面선량률 ≤ 2.5mrem/h	
	補助차폐	보조차폐는 원자로보조건물내의 각기기를 둘러싼 콘크리트구조물로서 보수점검작업 등을 위해 기기에 접근하는 종사자를 방사선피폭으로부터 보호한다	통상	사용후 핵연료 비트水面선량률 ≤ 1mrem/h (사용후 핵연료가 라크에 보관되어 있는 상태에서)	
中央制御室차폐		통상운전시에는 중앙제어실에 상주할 수 있도록, 또 사고시에는 중앙제어실에서의 전신평폭선량이 사고후 30일간 중앙제어실에 머물러도 중대사고의 경우 48mrem을 초과하지 않도록 한다.	통상	중앙제어실 공간선량률 ≤ 0.625mrem/h	
			사고	30일간 積算線量 ≤ 48mrem	

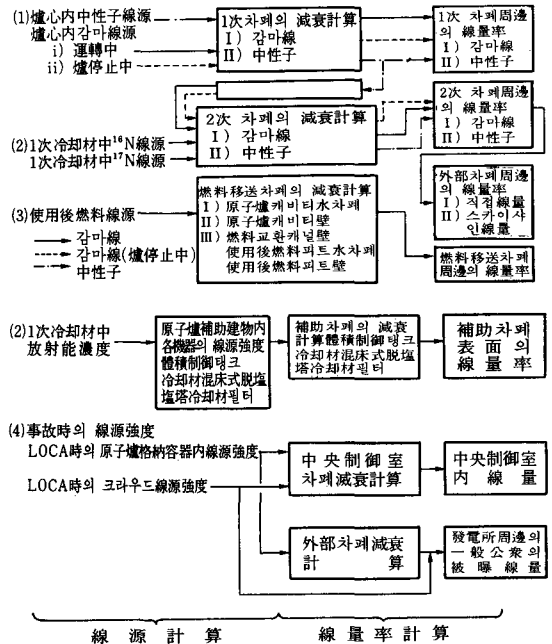
비의 건물과의 관계는 그림1과 같으며, 이러한 기능 및 설계조건은 表2와 같다.

遮蔽設計法

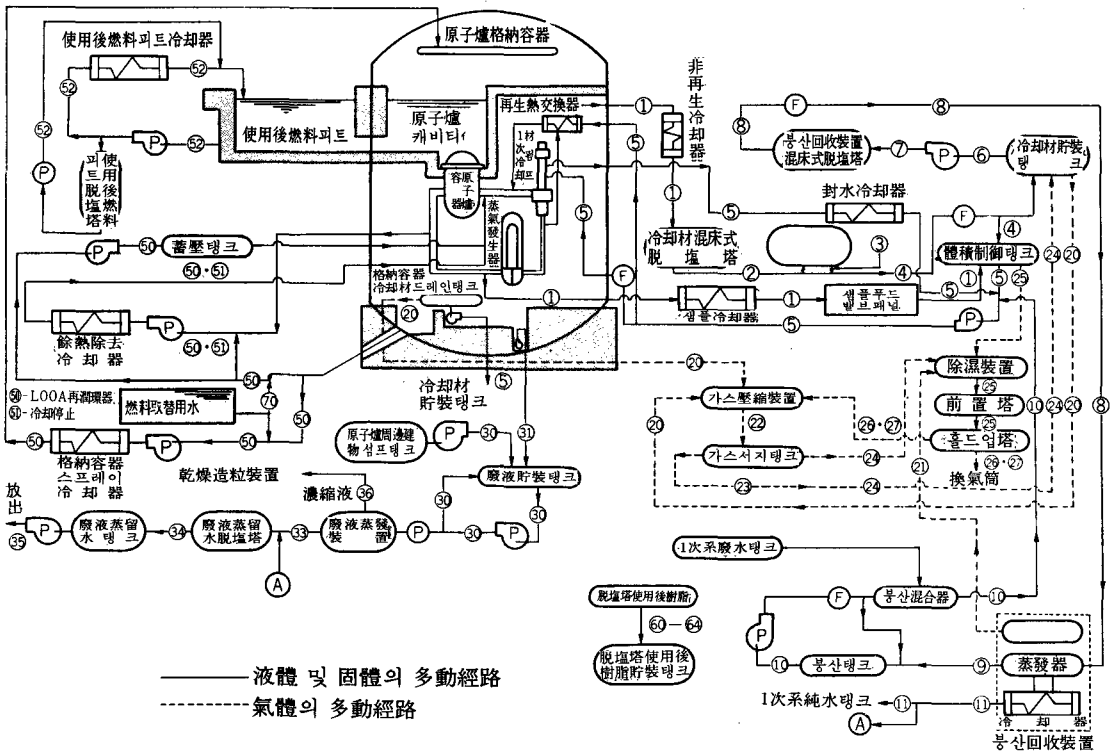
각 기기가 함유하는 방사성물질의 양을 산정하여 그 방사선원의 강도를 산출한다. 이 선원強度, 선원形狀 및 遮蔽形狀에서 차폐에 의한 방사선의 감쇠계산을 하고, 차폐설계기준 및 각 차폐기능을 만족하도록 설계평가한다. 이 관계를 그림3에 나타냈다.

線源強度

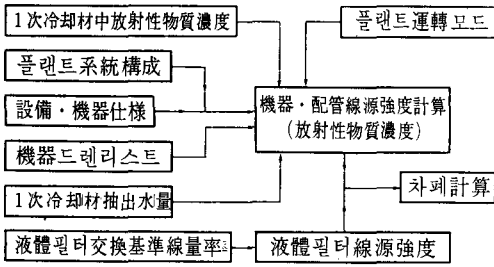
차폐설계의 선원은 (1) 노심내선원, (2) 1차냉각재중 선원, (3) 사용후핵연료선원, (4) 사고시 선원, (5) 보조건물내 기기선원으로 대별된다. (4) 까지의 선원은 비교적 단순히 계산되지만,



〈그림 3〉 차폐계산의 관계



〈그림 4〉 방사능의 이동경로



(그림 5) 선원강도계산

(5)는 기기수가 50 이상이나 되고 시스템이 복잡한 흐름을 따라 계산된다. 이 계통의 흐름은 그림4와 같으며, 算定法은 그림5에 나타내는 방법으로 실시한다.

減衰計算

구해진 각 기기의 線源에서 대표에너지에 대한 線源強度를 算定한다.

예를 들면, (5)線源의 경우 伽馬線源 強度는 表3의 대표에너지에 의해 구해지며, 算定된 線源強度에 따라 遮蔽內의 遮蔽계산을 방사선의 종류에 따라 表4의 해석코드를 사용해 실시한

다. 그 결과 遮蔽두께는 설계기준 및 조건을 만족하도록 결정된다.

〈表 3〉 代表에너지의 범위

代表에너지 (MeV)	에너지범위 (MeV)
0.4	$E \leq 0.4$
0.8	$0.4 < E \leq 0.9$
1.3	$0.9 < E \leq 1.35$
1.7	$1.35 < E \leq 1.8$
2.2	$1.8 < E \leq 2.2$
2.5	$2.2 < E \leq 2.5$
3.5	$2.5 < E$

〈表 4〉 遮蔽解析 使用 코드

線 源	코 드	解 析 法
伽 馬 線	SPAN SPAN-SLAB SCATTERING } (3次元)	點減衰核積分法
中性子線 및 伽馬線	ANISN (1次元) DOT (2次元)	輸送方程式의 Discrete-Ordinates SN法
스카이사인선 (散亂線)	SCATTERING } (3次元) SKYSHINE	點減衰核積分法을 사용한 1回散亂法

科學常識

宇宙旅行과 放射線

지구 위를 항공기로 여행하는 것은 이미 널리 일반화되어 있으며, 인류의 앞으로의 꿈은 우주여행이다. 그때 문제가 되는 것이 宇宙放射線이다. 우주는 방사선으로 꽉 차 있다. 지구부근, 즉 인간이 살고 있는 장소는 지구를 덮은 공기층이 이 宇宙放射線에 대해 어느 정도 방벽이 되어 있는 점, 또 지구를 둘러싼 磁場(磁力線이 있는 곳)이 역시 宇宙放射線의 침입을 방해하고 있기 때문에 보통의 장소에서는 연간 30밀리렘 정도의 피폭선량을 주고 있다.

이에 대해 高空으로 올라가면 宇宙放射線이 강하기 때문에 1만미터고도의 국제선을 타고 해외여행을 할 때는 약간이지만 피폭선

량이 가산됨이 알려져 있다.

우주여행을 하면 방사선피폭선량은 보통 비행기의 경우와는 비교할 수 없을 정도로 커진다. 미국의 유인우주비행지에 방사선 측정결과를 보면 비행시간 192시간의 아폴로 10호가 480밀리래드, 비행시간 28일간의 스카이라브 2호는 1,600밀리래드(1.6래드)였다고 한다.

高空에서 우주방사선의 주성분은 高에너지의 粒子이므로 1밀리래드는 10밀리렘 정도에 상당한다고 생각된다. 그러므로 장래의 우주여행에는 여행자의 방사선방호도 고려할 필요가 있으며 우주방사선을 차단할 수 있는 우주선을 설계하게 될 것이다.