



방사선 방호를 위한 현재의 선량 한도 시급한 변화 필요

“방사선 방호 지침의 적절한 개정은 공중 보건과 경제에 상당한 이득”

Jerry Cuttler, William Hannum¹⁾

〈Nuclear News〉 September 2017

미국 도널드 트럼프 대통령이 행정명령 제13777호 「규제 개혁 의제 시행」을 2월 24일 서명하자 미국 환경보호청(EPA)의 E. Scott Pruitt 청장은 3월 24일 EPA 직원에게 이와 관련된 집행 지시서를 하달하였다. 이로 인해 EPA는 규제의 폐지, 교체 또는 개정에 적합한 규정에 대해 의견을 수렴할 것으로 4월 11일 발표했다. EPA는 5월 15일까지 의견을 접수할 수 있도록 관련 고시(Docket ID:EPA-HQ-OA-2017-0190)를 4월 13일 연방 관보에 게시하였고, 총 98,543건의 의견이 5월 20일까지 접수되었으며, 그 중 31,378건은 수용 기준을 충족하지 못하여 걸러졌다. 본 논문 저자들은 EPA의 방사선 방호 규정에 대한 의견을 5월 12일 제출하였으며, 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

현재의 EPA 규정은 문턱 없는 선형(LNT, linear no-threshold) 가설의 선량-반응 모델을 기반으로 하고 있다. 이 규정은 오랫동안 보수적인 것으로 간주되어 왔으며, 지나치게 제한적인 것으로 널리 알려져 있다.

그러나 중저준위 이온화 방사선의 효과가 실제로는 유익하다는 근거가 새로 나타나고 있다. 연구자들은 현재 저준위 방사선은 세포를 손상시키는 단순한 원인이 되기보다는 암세포에 투항하는 신체의 자연 방어 메커니즘을 활성화하는 주요 효과를 가진다고 가정하고 있다.

치명적이지 않은 수준의 고선량을 받은 많은 생물은 일반적인 자연 방사선의 선량만 받는 생물체와 유사한 수준의 기대 수명을 가지고 있는 것처럼 보인다.

다. 오히려 정상보다 높은 자연 방사선은 수명을 증가시키는 것처럼 보인다.

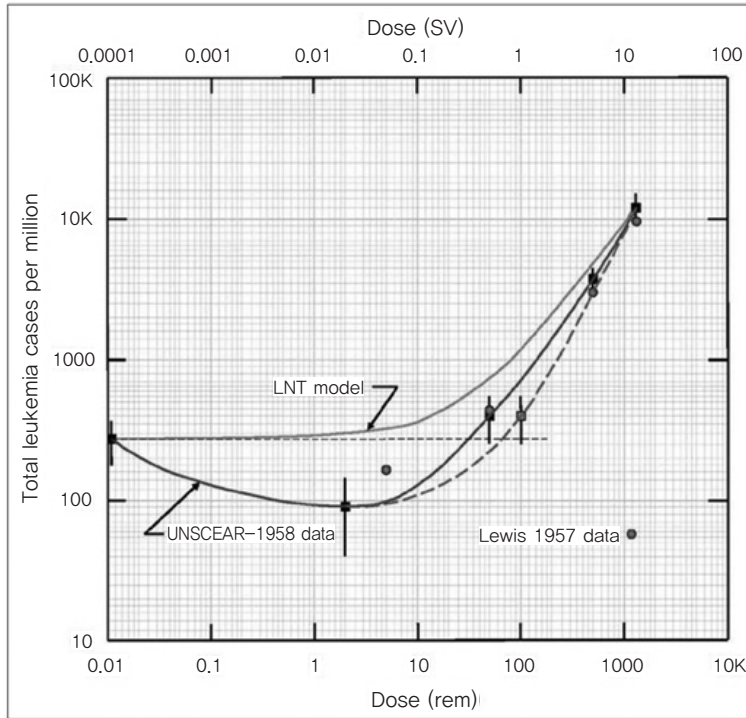
히로시마 생존자에 대한 자료에서 비글을 이용한 실험실 연구(1960년대에서 1990년대까지 실시)에 이르기까지 다양한 자료들은 호르메시스(hormetic) 선량-반응 모델과 일관적으로 일치성을 보이며, 유익한 영향과 유해한 영향 간 경계에 해당하는 문턱값 또한 상당히 높다.

이러한 저준위 방사선의 잠재적 이익에 대한 확인과 인식은 의료 및 원자력 분야의 방사선 방호 지침에 대해 철저한 검토 및 개정을 필요로 할 것이다.

방사선 방호 지침의 적절한 개정은 공중 보건 및 경제적으로 상당한 이득을 가져올 것이다.

¹⁾ Jerry Cuttler : AEC(Atomic Energy of Canada)에서 CANDU 원자로 제어 및 안전 시스템 계측 설계 및 조달 총괄 책임.

William Hannum : 미국 에너지부에서 원자력 및 안전 연구 개발을 총괄하였으며 Argonne National Laboratory에서 사용후핵연료 재활용 기술 연구 담당 책임.



〈그림 1〉 히로시마 원자 폭탄 생존자 중 1950년에서 1957년까지 선량에 따른 백혈병의 발생 비율 [1]

배경

대부분의 일반인들은 방사선에 노출될 것에 대한 두려움에 사로잡혀 있다. 매우 높은 선량으로 수 일에서 수 주 이내 사망할 수 있으며 급성 방사선 질환의 생존자는 암 발생 위험의 증가를 보이고 있다.

2차 세계대전을 종식시키기 위해 일본에서 사용된 원자폭탄 사상자의 대부분은 폭발이나 열로 인해 사망했지만, 다수의 사람들은 매우 많은 양의 이온화 방사선에 피폭되었다. 일부는 장기 기능 부전으로 사망했으며, 다른 일부는 수년 후 발병한 암으로 사망했다. 체르노빌 재해를 수습했던 많은 비상 대응 작업자들 중 134명이 심하게 피폭되었다. 이들 중 28명이 수 주 이내에 사망했고 106명이 생존했다.

높은 선량에 피폭되었지만 살아남은 사람들은 어떻게 되었나? 방사선에 가장 민감한 조직은 골수의 조혈 세포이며, 백혈병은 일본의 원자폭탄 생존자들에게 피폭 약 5년 이후부터 가장 많이 발생할 수 있는 암이다.

〈그림 1〉은 히로시마 생존자 중 선량이 약 500 mSv(50 rem) 미만인 경우 백혈병이 부가적으로 발병하지 않았음을 보여준다. 이것은 다른 유형의 암 또는 기타 건강 위험을 유발하는 기준이 500 mSv보다 높을 가능성이 있음을 암시한다. [1]

심하게 피폭되었으나 생존한 체르노빌 수습 작업반 106명 중 22명은 그 후 19년에 걸쳐 사망했으며 사망률은 연간 1.09%였다. 이 비율은 2000년 지역 평균 사망률인 약 1.4 %보다 낮은 수치이다. 2001년 이 그



롭의 사망률 구조는 모든 사망 원인 중 26%가 암으로 사망한 것으로 중부 유럽의 정상적인 비율과 크게 다르지 않다. [2]

그렇다면 얼마나 많은 방사선이 문제가 될까? X-선과 핵 방사선은 120년 전에 발견되었다. 항생제 및 다른 현대 요법이 발견되기 전인 1900년대 중반까지 의료 종사자들은 다양한 질병으로 고통받는 환자들을 치료하기 위해 방사선을 광범위하게 사용했다.

1900년대 초, 유전학자들은 방사선으로 인한 초과 리 성 유전자의 돌연변이 발생률을 연구하기 시작했다. 매우 높은 선량률에서 매우 높은 선량을 사용하여 실험한 결과, 그들은 돌연변이 비율이 선량에 대략적으로 비례한다는 것을 발견했다.

1920년대까지 과학자들은 모든 방사선 학자들에게 안전한 방사선 준위를 하루 0.2 R(뢴트겐) 또는 매년 약 700 mSv 로 결정했다. 이 한도는 통계적으로 인식할 수 있는 건강상 부작용의 발현에 기반하여 설정되었으며, 이러한 부작용은 이 방사선 준위보다 상당히 높은 수준에서 발생한다. [3]

이는 매우 많은 양의 방사선에 대해 합리적인 기반을 형성하지만, 사실 높은 선량률로 매우 높은 방사선량의 전신 피폭을 받게 되는 경우는 매우 드물게 발생한다. 훨씬 더 일반적인 상황은 광범위한 오염이나 배경 방사선을 증가시키는 다른 사건들과 같이 장기간의 방사선 준위를 다루는 것이다.

높은 자연 암 발병률과 암 발생 위험에 영향을 미칠 수 있는 여러 요인 때문에 저준위 방사선과 암 발병률의 상승에 대한 통계적 관계를 확립하는 것은 불가능하다.

최근 몇 년 동안, 방사선 스트레스를 포함하여 세포 및 DNA 손상을 일으키는 스트레스에 대한 신체 반응에 대해 많은 것을 알게 되었다. [4]

우리의 신체는 감마선과 매초 약 15,000개의 입자들로부터 소위 얻어맞아 매일 수 백만 번의 에너지 흡수가 발생한다. 이들 방사선 중 3분의 1은 신체 내 자연 방사성동위원소에서, 나머지는 외부 우주 및 자연 환경에서 기인한다. 인간은 지금까지 이렇게 살아왔다.

우리 몸에는 손상을 방지하고 손상된 세포를 수리하며 치료되지 않은 세포를 제거 및 교체하는 매우 강력한 보호 시스템이 있다. 또한 이 시스템은 체내의 독소와 질병에 잘 대처하여 우리가 평균 연령 70세까지 생존할 수 있도록 한다. [4]

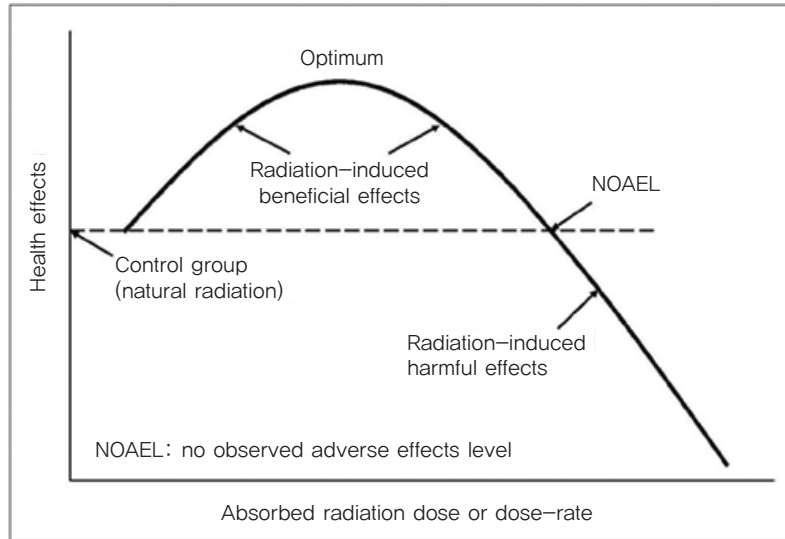
우리 세포의 가장 큰 손상은 호흡에 의해 야기된다. 우리는 산소가 음식 분자와 결합하여 우리를 살아있게 하는 에너지를 생산하는 것을 알고 있지만, 1980년대 과학자들은 산소가 세포를 공격하고 손상시키기도 한다는 것을 발견했다.

우리 몸에 항산화물질 생산이 없었다면 매일 우리 몸의 모든 세포가 10억 개의 '자유 라디칼' 분자, 주로 활성산소(ROS)에 의해 손상을 입었을 것이다.

우리 신체의 자연 손상 방지 시스템은 하루에 세포당 백만 건의 DNA 변형이 일어날 수 있는 잠재적 손상률을 낮춘다. 이들 대부분은 무해하지만, 관찰된 데이터에 근거하면 약 10개의 세포 중 1개에서 단일 세포 마다 하루에 한 번 꼴로 이중 가닥 끊김 현상이 일어난다. 우리의 회복 시스템은 이 손상률을 하루에 세포당 약 1개의 돌연변이가 발생하도록 낮추고 있다.

돌연변이의 대부분은 상대적으로 무해하지만 일부는 정상 세포를 암세포로 변화시킨다. 이러한 위험을 해결하기 위해 우리 몸은 암세포를 이물로 인식하고 파괴하는 면역 체계와 신호-유도 세포 사멸과 같은 추가 방어 기제를 가지고 있다. [4,5,6]

그렇다면 방사선이 어떻게 적용될까? 고선량의 전반적인 효과는 잘 알려져 있지만, 고선량와 저선량 모



〈그림 2〉 방사선에 의해 발생된 신호로 인한 신체 영향

두에 대한 상세한 세포 반응 메커니즘은 복잡하며 모든 수준의 생물학적 조직과 관련되어 있을 가능성이 높다.

인체의 약 75%가 물로 구성되어 있기 때문에 방사선에 의해 생성되는 ROS가 매우 중요한 영향을 미친다. ROS와 직접 노출은 양날의 검이다. 그것들은 분자를 손상시키지만, 영향을 받는 세포의 일부는 신호를 보내서 유전자를 자극하거나 억제한다. [4,5]

위험에 대해 평가하기 위해서는 방사선에 의한 DNA 손상 비율을 자생적인 ROS에 의한 DNA 손상 비율과 비교해야 한다. 자연 방사선(1 mGy/year)은 세포 당 하루 약 0.01개의 DNA 변형을 유발하며(1%는 이중 가닥 절단), 이는 호흡하는 공기로 인해 발생하는 것으로 추정되는 세포 당 하루 100만 건의 DNA 변형보다 1억 배 작다.

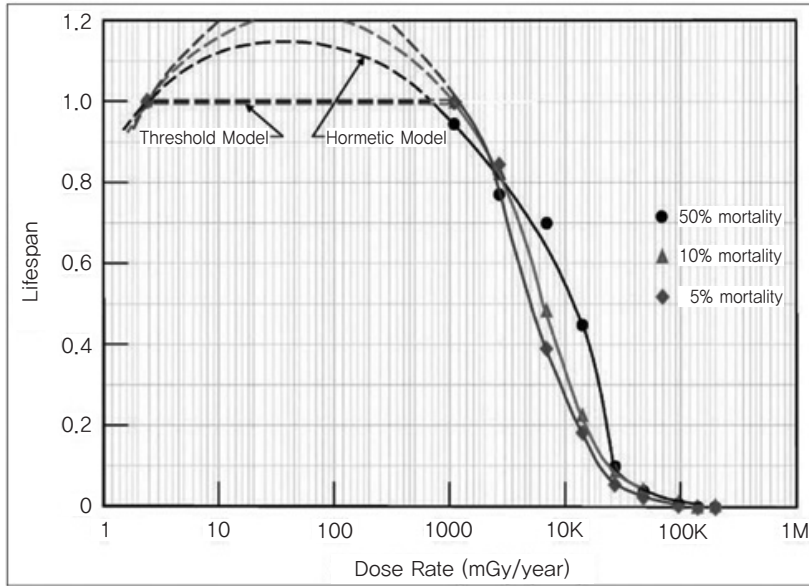
자발적인 DNA 손상률과 동일한 손상률을 유도하기 위해서는 방사선 레벨이 상당히 높아야 한다. 이것은 저선량 또는 저준위 피폭에 대한 신체 영향은 주로

방사선에 의해 유도된 세포 신호 때문이라는 것을 의미한다. [6]

〈그림 2〉에 표현된 선량-반응 특성은 이러한 세포 신호의 특성을 보여주고 있다. 방사선량 또는 선량률 수준이 주변 수준 이상으로 증가함에 따라 보호 시스템의 자극이 시작되고 유의한 신체 영향이 관찰되기 시작한다. 선량이나 선량률 레벨이 추가로 점차 증가함에 따라 최적의 수준에 도달할 때까지 그 유의한 혜택이 증가한다. 최적 수준을 초과하는 피폭은 이익을 감소시키며, 이는 자극이 감소하고 억제가 증가함을 의미한다.

관찰된 부작용이 없는 수준(NOAEL)에서 건강 상 효과는 방사선에 노출되지 않은 개인과 동일하다. 방사선량 또는 선량률이 NOAEL을 초과하면 보호 시스템의 억제 작용이 자극 작용을 초과하고 건강상의 위해가 관찰된다. NOAEL 지점은 해로운 영향의 시작에 대한 선량 또는 선량률의 문턱값인 것이다 [7].

1950년대부터 미국 에너지부(Department of



〈그림 3〉 감마선의 선량률과 개 집단 수명과 상관관계 곡선 [5]

Energy)와 그의 전신 기관 (United Agency of Energy)들은 인간에 대한 방사선의 영향을 규명하기 위해 많은 연구를 진행하였다.

비글은 인간을 잘 모델링한 것으로 간주되어 많은 연구에서 선호되는 실험 대상으로 사용되어 왔다. 두 개의 초기 연구 결과에 대한 최근 분석은 방사선에 민감한 개체와 평균적인 개체에 대한 지속적인 방사선 피폭이 그들의 수명에 미치는 영향을 평가하고자 하였다 [5].

〈그림 3〉은 감마선 피폭으로 인한 개의 수명 감소와 관련하여 연간 약 700 mGy의 선량률 역치 (NOAEL)의 근거를 제시하고 있다. 〈그림 4〉는 흡입된 플루토늄 미립자에 대한 역치(NOAEL)의 근거를 보여주고 있다.

〈그림 3〉과 〈그림 4〉는 방사선 수준이 해를 미치지 시작하는 문턱값보다 낮을 때 수명이 길어지고, 단명한 개가 평균의 개보다 방사선에 더 민감하다는 것을

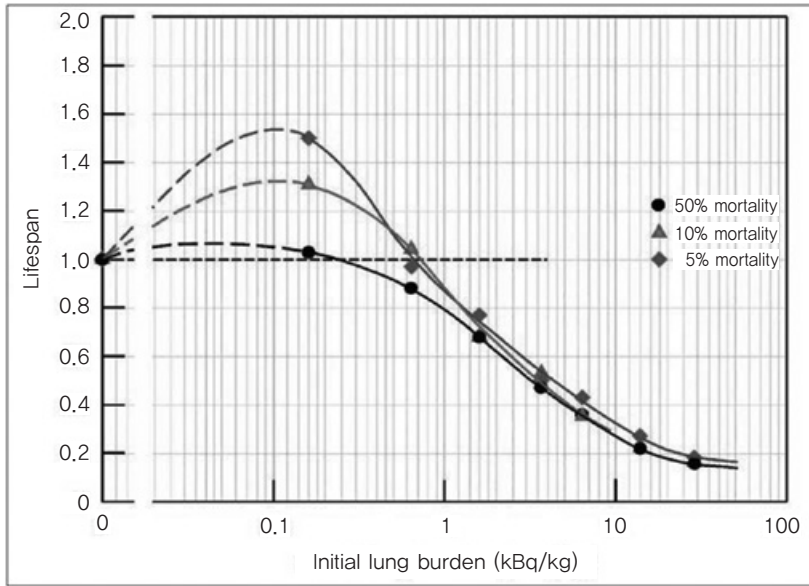
보여준다.

단명한 개는 방사선 수준이 문턱값보다 낮으면 평균 개보다 더 많은 이익을 얻으며, 방사선 수준이 문턱값을 초과하면 더 많이 고통받는다. 이 결과는 방사선에 민감한 개인조차도 저준위 방사선에 대한 특별한 보호가 필요하지 않는다는 것을 의미한다. [5]

〈그림 1〉에 나타난 히로시마 생존자의 급성 피폭 자료 또한 〈그림 2〉에 나타난 선량-반응 특성과 일치하며, 단기적인 방사선량이 백혈병을 유발하는 문턱치(NOAEL)가 약 500 mSv 임을 시사하고 있다. [1]

오늘날의 규제

2차 세계 대전 이후 많은 과학자들이 더 이상의 핵 실험을 중단하고 향상된 핵무기 개발을 막고자 노력함에 따라 방사선 방호에 대한 문제는 정치적 이슈가 되었다.



〈그림 4〉 흡입된 플루토늄 에어로졸의 초기 폐 부하와 개 집단 수명과 상관계 곡선 [5]

방사선 피폭이 인간 개체군에 유전적 영향을 일으키는 것으로 밝혀진 적은 한 번도 없지만, X 선과 핵 방사선은 세포의 돌연변이를 유발하여 암 발생 위험에 기여할 수 있는 것으로 알려져 있다.

1956년, 미국 국립과학원(National Academy of Sciences)은 명문화된 근거 없이 LNT 선량-반응 모델을 사용하여 방사선이 유발하는 유전자 돌연변이의 위험성 평가를 권고하는 보고서를 발표했다. [8]

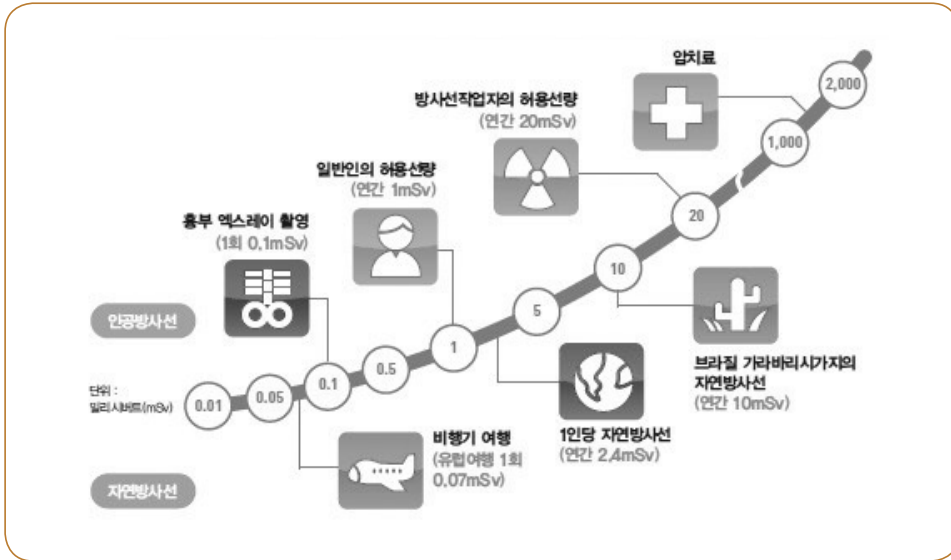
이는 생물학적 방호 기제를 전혀 고려하지 않고 시간 경과 및 인구 집단에 대한 선량 흡수에 근거하여 건강에 대한 영향을 추론하도록 한 것이다. 전 세계 정부 규제 당국은 이러한 권고를 수용하여 저선량 방사선에 대한 대중의 만연한 두려움을 야기하였다. [8]

국제방사선방호위원회(ICRP)는 안전한 문턱 선량 한도에 대한 개념을 거부하고 대신 생명의 다른 위험 요소와 비교하여 암 및 유전적 위험값을 작게 유지하기 위한 개념을 채택하였다.

ICRP에 따르면 “자연 배경보다 높은 방사선 수준은 절대적으로 안전하다고 간주될 수 없기 때문에, 현재의 지식에 비추어 무시할 수 있는 위험만을 포함하는 실질적인 수준을 선택하는 것이 문제”라고 한다. [9]

자연적으로 발생할 것으로 예상되는 수를 초과하여 발생하는 암은 방사선의 “확률론적 영향”에 기인하며, 중증도가 아닌, 발생 확률이 선량의 크기에 비례한다고 가정한다.

ICRP는 LNT 모델을 사용하여 “건강에 대한 영향”의 위험을 계산한다. 즉, 아무리 작은 방사선 피폭도 인구 집단에서 암으로 인한 사망의 위험을 증가시킬 수 있음을 가정한다. 선량률에 관계없이 암 발생 위험은 받은 누적 방사선량(또는 손상된 세포의 수)에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하고 있다. 방사선에 의해 유익한 영향(낮은 암 발생)이 관측되었던 것들은 무시된다. ICRP는 건강에 대한 긍정적인 영향을 예측하기 위해 호르메시스 (hermetic) 선량-반응 모델에



데이터를 맞추는 것을 허용하지 않고 있다.

이러한 위험 평가 방법을 사용하자는 국제적인 합의는 오늘날까지 유지되어 왔다. 1956년 이후 모든 의료 종사자들에게 이 원시적인 선량-반응 모델과 함께 전리 방사선에 피폭될 때마다 암 발생 위험이 누적되어 증가한다는 개념을 학습시켜 왔다.

방사선 종양 전문의들은 건강한 조직을 보호하면서 암세포 종양을 제거하기 위해 고선량 방사선을 국소적으로 활용하고 있다. 방사선 영상학과 의사들은 치료가 아닌 의학 영상을 위해서만 저선량 방사선을 활용하고 있으며, 가설적인 암 발생 위험을 최소화하기 위해 모든 피폭을 정당화하고 최적화하고 있다. [10]

값비싼 규제 비용

이러한 기준을 재평가해야 할 이유가 있을까? LNT 모델은 보수적인 것으로 알려져 있지만, 이는 실제 건

강 상 위험을 감소시키지 않으면서도 엄청난 고통을 초래하고 비용이 많이 드는 사전 예방 응급 조치를 야기한다.

가상의 암 발생 위험에 대한 우려로 규제 기관은 선량 최소화 원칙에 근거하여 피폭 선량 기준을 설정하였다. [11] 이러한 기준은 의료 진단 및 치료를 위한 저선량 방사선 활용에 대한 장벽이 된다[12]. 엄격한 규제와 사회적 두려움은 신뢰성 있고 안정적인 전기를 생산할 수 있는 원자력발전소 건설 프로젝트들의 진행을 방해하고 있다. [10]

지난 35년 동안의 방사선 생물학의 과학적 진보는 엄청났다. 구체적인 세포 반응 메커니즘은 복잡하며 모든 수준의 생물학적 조직과 관련되어 있다. [4] 그럼에도 불구하고, <그림 2>에서 제시된 선량-반응 관계의 기초가 되는 생물학에 대한 충분한 이해가 존재한다.

불행히도, 우리는 오늘날까지도 거의 모든 의사들

에게 1956년의 권고를 가르치며, 암 발생 위험에 대한 잘못된 두려움을 지속시키고 있다. <그림 1>, <그림 3, 4>에서 나타난 과학적 근거와 과거 발생한 과학적 잘못은 무시되고 있다. [8] 이러한 정보는 대중에게 적절하게 전달되지 못하기 때문에 낮은 수준의 (인공) 방사선 피폭에 대한 극단적인 사회적 두려움은 계속되고 있다.

인체의 면역 체계는 일반적으로 암세포를 탐지하고 파괴하여 암의 발생과 확산을 예방한다. 약화되거나 손상된 면역 체계는 대개 암 사망률의 전제 조건이 된다. 저선량 방사선으로 인한 DNA 손상률은 자발적인 손상률과 비교할 때 무시할 수 있는 것으로 나타났으며, 자발적 손상률은 면역 시스템을 포함한 보호 시스템(150 개 이상의 유전자)으로 관리되고 있다. [6]

또한, 낮은 방사선량은 보호 시스템을 자극하여 유기체가 기대 수명 이상 생존할 수 있게 한다. 연구에 따르면 저선량 또는 저준위의 방사선은 동물과 사람의 수명을 연장시킨다. [5,10] 높은 자연적 배경 방사선이 존재하는 지역에 사는 사람들은 수명이 짧지 않고 더 길어지는 경향이 있다.

비인두(鼻咽頭) 라듐 조사(nasopharyngeal radium irradiation)와 같은, 저선량 방사선을 이용한 진단 영상 및 치료에 대한 지난 120년 간의 의학적 경험은 암 또는 다른 질병의 유의미한 위험을 초래하지 않았음을 보여주고 있다. [10] 그리고 저선량 방사선은 전신 또는 반신 치료를 통해 수백 명의 암 환자 치료에 사용되었다. [10,12]

연간 260 mSv의 자연 배경 방사능 수준을 가지는 인구 약 3만 5천명의 이란의 람사르 같은 곳에서 일년에 1 mSv의 안전 한도를 설정하며 “합리적으로 달성 가능한 최저 수준(ALARA)”의 방사선 방호 정책을 시행한다는 것은 비합리적인 것이다.

과도하게 보수적인 규제 한도는 정상적인 발전소 운영이나 X-선, 핵물질 및 원자력의 모든 유익한 응용 프로그램의 잠재적 사고로부터 생길 수 있는 극미량의 방사성 물질 방출이나 저선량 방사능에 의한 피폭을 방지하기 위해 상당히 값비싼 대책들을 필요로 하고 있다. 이는 의학 분야에서 방사선의 생산적인 사용도 불가능하게 하거나 제한하고 있다. [10,12]

일본의 2011년 후쿠시마 다이이치 원전 사고 이후 예방적 긴급 조치의 가장 어처구니 없는 결과 중 하나는 거주자의 건강에 미치는 영향(대피자 중 약 1,500 명의 조기 사망)과 방사선 공포가 경제에 미치는 영향이다.

저준위 방사선에 대한 대중의 두려움 때문에 사회가 매우 높은 비용을 부담하고 있음이 분명해졌다. 1986년 우크라이나의 체르노빌 사고에 대해서도 마찬가지이다. 제염 활동의 비용은 훨씬 낮을 수 있었다.

후쿠시마 및 체르노빌 발전소 인근의 광대한 지역이 거주 또는 농업에 적합하지 않은 것으로 간주됨으로 인해 사고 완화 비용이 상당히 커졌다.

핵무기 개발 프로그램으로 인한 핵시설이 많이 존재하며, 이는 불필요하게 방사능을 가진 환경 물질로부터 격리시키기 위해 완화 조치를 요구한다. 과도하게 엄격한 요구 사항 적용은 이러한 완화 조치 비용을 천문학적으로 증가시키고, 그래서 실제 위험 및 핵 폐기물에 대한 효과적인 처리를 오히려 저해하고 있다.

시급한 변화의 필요성

과학은 “문턱 없음”에 기초한 방사선 규제가 잘못되었음을 보여준다. [11] 안전한 한도를 설정하기 위한 건설적인 토론은 필요하지만 현재의 지식을 바탕으로 선량 및 선량률에 대해 합리적인 문턱값을 적용해야



하며, 모든 방사선 방호 기준은 그러한 문턱값을 반영하여 개정되어야 한다. [10]

일정 선량 또는 선량률에서 다양한 종류의 전리 방사선 피폭에 의한 유익한 자극 효과가 상당히 있다는 확실한 증거가 있기 때문에 이러한 영향을 정량화하고 최적화하는 연구 또한 장려되어야 한다. [12]

과학적·의학적 근거에 기초한 책임 있는 규제는 원자력의 안전성과 저선량 방사선의 의료 분야 응용 효과성에 대한 대중의 신뢰를 회복하고 엄청난 금액의 불필요한 지출을 피할 수 있도록 할 것이다. [13]

* 번역 : 정만희 박사 / 美 미시간대

<참고 문헌>

[1] Cuttler, J. M., and J. S. Welsh, "Leukemia and Ionizing Radiation Revisited, *Leukemia*,2015; 3(4):1-2. <www.esciencecentral.org/journals/leukemia-and-ionizing-radiation-revisited-2329-6917-1000202.php?aid=65327>

[2] Jaworowski, Z., Comments on "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts,"The Chernobyl Forum Report, January 5, 2006. In: T. Rockwell and J. M.Cuttler, eds., President's Special Session: Low-level Radiation and Its Implications for Fukushima Recovery. Am Nucl Soc. Annual Meeting, June 25,2012, pp. 131 - 142.

[3] Inkret, W. C., C. B. Meinhold, and J. C.Taschner, "Radiation and Risk—A Hard Look at the Data,"*Los Alamos Science*. 1995; 23:116 - 123(<<https://fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00326631.pdf>>)

[4] Feinendegen, L. E., M. Pollycove, and R. C.Neumann, "Hormesis by Low Dose Radiation Effects: Low-Dose Cancer Risk Modeling Must Recognize Up-Regulation of Protection."in: R. P. Baum, ed., *Therapeutic Nuclear Medicine*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2012; 789 - 805.

[5] Cuttler, J. M., L. E. Feinendegen, and Y. Socol, "Evidence that Lifelong Low Dose Rates of Ionizing Radiation Increase Lifespan in Long-and Short-Lived Dogs,"*Dose-Response*. 2017;15(1):1 - 6. <www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5347275/>

[6] Pollycove, M., and L. E. Feinendegen, "Radiation Induced Versus Endogenous DNA Damage: Possible Effect of Inducible Protective Responses in Mitigating Endogenous Damage,"*Hum Exp Toxicol*. 2003; 22:290 - 306. <www.belleonline.com/newsletters/volume11/vol11-2.pdf>

[7] Calabrese, E. J., "Hormesis is Central to Toxicology, Pharmacology and Risk Assessment,"*Hum Exp Toxicol*. 2010; 29(4):249 - 261.

[8] Calabrese, E. J., "LNT gate: The Ideological History of Cancer Risk Assessment,"*Toxicology Research and Application*. 2017; 1-3. <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2397847317694998>>

[9] Clarke, R. H., and J. Valentin, *The History of ICRP and the Evolution of Its Policies*. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 109, 2008; 75 - 110.

[10] Cuttler, J. M., "Urgent Change Needed to Radiation Protection Policy,"*Health Phys*. 2016;110(3):267 - 270.

[11] Mitchel, R. E. J., "Cancer and Low Dose Responses In Vivo: Implications for Radiation Protection,"*Dose-Response*. 2007; 5:284 - 291. <www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2477713/>

[12] Pollycove, M., "Radiobiological Basis of Low-Dose Irradiation in Prevention and Therapy of Cancer,"*Dose-Response*. 2007; 5:26 - 38. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2477707/

[13] Jaworowski, Z., "Radiation Risk and Ethics,"*Physics Today*. 1999; 59(9):24 - 29. In: T. Rockwell and J. M. Cuttler, eds., President's Special Session: Low-level Radiation and Its Implications for Fukushima Recovery. Am Nucl Soc. Annual Meeting, June 25, 2012, pp. 112 - 117.