

원자력학회 춘계학술대회 방사선방호부회 워크숍
2025년 5월 21일 14:00-18:00 제주 중문ICC

저선량·초저선량·극미량 방사선 피폭:
쟁점과 합의점

안도현 (Ph.D.) dohyun@socialbrain.kr

우리가 알고 있는 것은....



후회 아닌



관견

실제



관견

실제

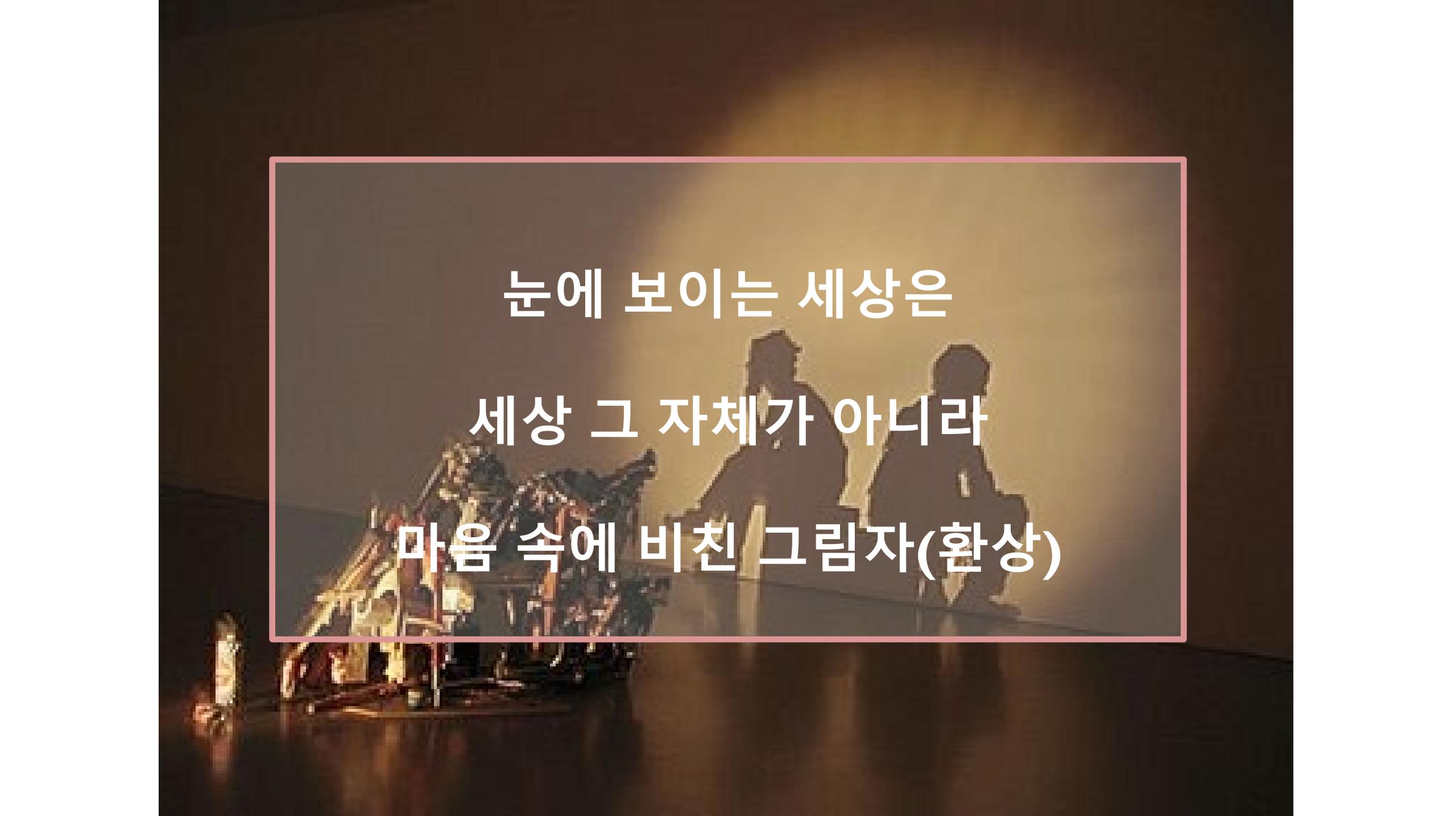






Real life is rubbish, 2002
by Tim Noble & Sue Webster

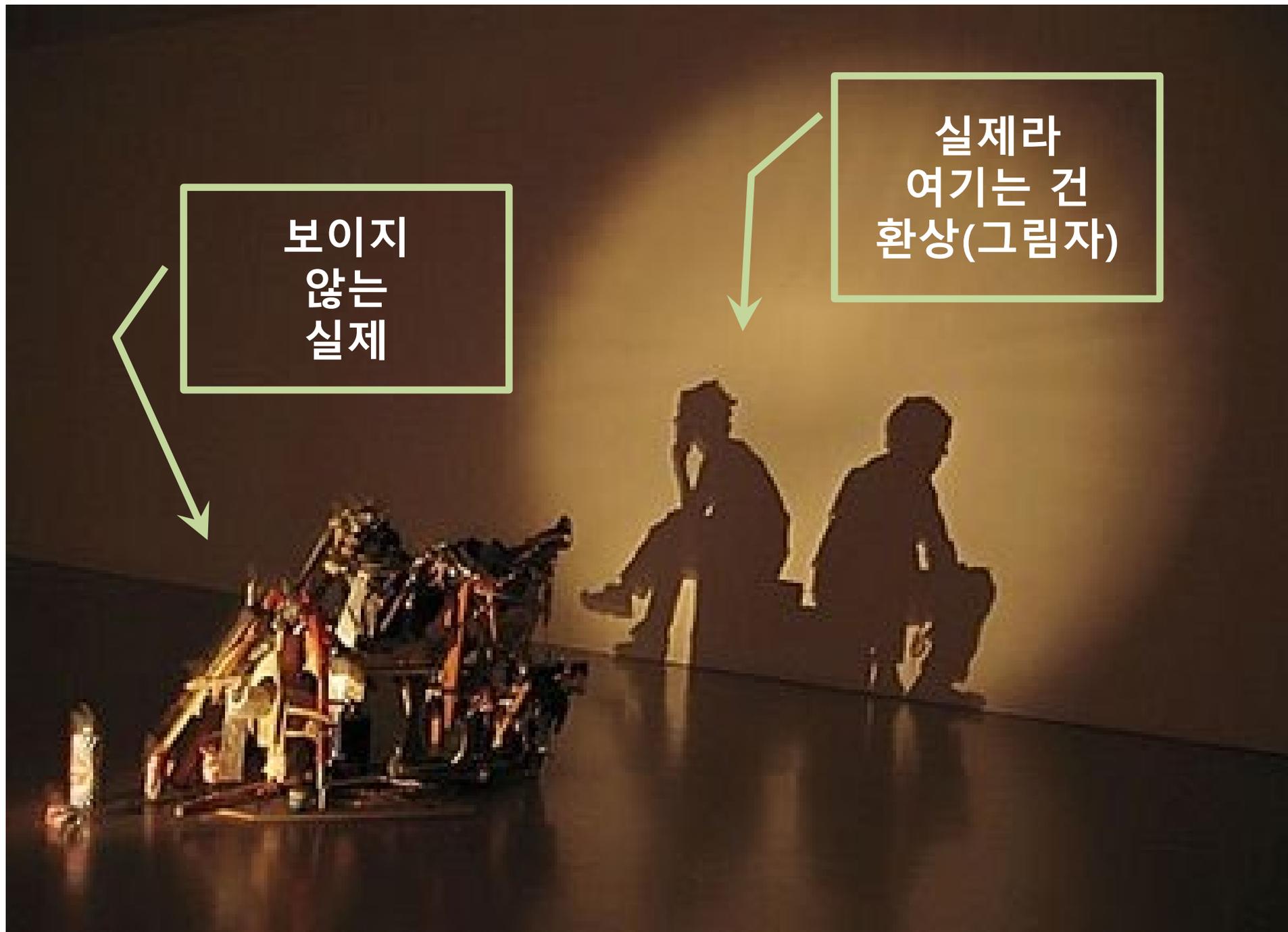


The background image is a dark, atmospheric scene. In the foreground, two silhouettes of people are sitting on a ledge, looking towards the right. In the background, there is a large, ornate structure, possibly a traditional Korean building or a stage set, illuminated with warm, golden light. The overall mood is contemplative and somewhat somber.

눈에 보이는 세상은
세상 그 자체가 아니라
마음 속에 비친 그림자(환상)

보이지
않는
실제

실제라
여기는 건
환상(그림자)



사람 형상 그림자의 실체가
사람인지, 쓰레기 더미인지
어떻게 알 수 있을까?

우리는 방사선이라는 '보이지 않는 그림자'를 통해
그 실제(영향)를 파악하려 합니다.

특히 극히 미량의 방사선은 마치 '희미한
그림자'처럼 그 실체를 파악하기 어렵습니다.

과연 이 희미한 그림자는 해로운 것일까요,

아니면 우리가 간과하고 있는 중요한 실체와
현실은 무엇일까요?

과학 & 문제해결 여부

체계적 논리 and 타당한 근거

손실 회피 or 편익 발생

학계 합의

당대의 과학자들이 합의했다면
그림자가 실제를 상당 부분 반영 가능

문제 제기

- ▶ 방사선의 저선량 피폭이 인체에 미치는 영향은 역학적으로 불확실성이 크다
 - ▶ 이러한 불확실성은 공중 보건 정책과 방사선 방호 기준에 직접적인 영향
 - ▶ 과학은 체계적 논리와 근거를 통해 문제를 해결하지만, 역학연구로는 자료 부족과 교란 변수로 인해 명확한 답을 내리기 어렵다.
 - ▶ 초저선량(10 mGy 미만)과 극미량(1 mGy 미만) 영역의 세포 수준 연구는 이러한 불확실성 해소에 기여 가능

개념 정의

- ▶ 실체(잠재력)
 - ▶ 실재 영역. 현상을 생성하는 내재적 속성과 인과적 힘으로서 위해·편익원으로 작용할 잠재력
 - ▶ 예: 전리방사선의 이온화 능력
- ▶ 위해·편익원(작용하는 사건)
 - ▶ 현실 영역. 실체의 잠재력이 시공간 맥락 속에서 손실·편익이 발생하도록 작용하는 사건
 - ▶ 예: 특정 용량의 의료방사선
- ▶ 위험·기회(경험되는 사건)
 - ▶ 경험 영역. 위해·편익원이 실제로 관찰되거나 경험되는 사건. 빈도, 강도, 범위로 측정
 - ▶ 예: 방사선 진단
- ▶ 위험인식·기회인식(경험되는 사건의 평가와 행위)
 - ▶ 인식 영역. 위험·기회에 대한 주관적 평가와 행위주체의 참여적 의미 생성
 - ▶ 예: 방사선 공포와 이로 인한 의료영상 회피
- ▶ 손실·안전·편익
 - ▶ 결과 영역. 위험과 기회의 회피 혹은 실현
 - ▶ 예: 진단 지연으로 인한 질병 악화

선량 범주

유엔과학위원회가 사용하는 선량 범주		
고선량	1Gy 초과	심각한 방사선 사고(예 : 체르노빌 사고 당시 소방관)
중선량	100mGy ~ 1Gy	체르노빌 사고 후 복구종사자
저선량	10mGy ~ 100mGy	다수의 CT 촬영
초저선량	10mGy 미만	일반적인 방사선 촬영(CT 촬영 제외)

□ 방사선: 영향과 선원 <유엔환경계획>

기존의 방사선 선량 범주는 고선량, 중선량,
저선량, 초저선량으로 나뉘었지만,

**1 mGy 미만의 '극미량' 영역은
기존 범주로는 설명하기 어려운 독특한 특성**

역학 연구로는 그 효과 측정 불가능

극미량 범주(1 mGy 미만) 추가 필요

▶ 자연적인 기준선과의 비교:

- ▶ 자연배경방사선은 모든 생명체가 일상적으로 노출되는 방사선 수준
 - ▶ 지역에 따라 다르지만, 연간 평균 약 2~10 mGy 수준의 방사선에 지속적으로 노출

- ▶ '1 mGy 미만' 범주를 설정함으로써, 인공적인 저선량 방사선 노출이 자연적인 기준선(배경방사선)과 비교하여 생물학적 영향을 얼마나 미치는지, 또는 미치지 않는지를 더 정확하게 평가하고 연구 가능

▶ 극미량에서의 생물학적 효과 연구의 중요성

- ▶ 기존의 초저선량 범주(< 10 mGy)의 영향은 극미량 범주와 비교해야 파악 가능
 - ▶ 1 mGy 미만의 선량은 자연배경방사선의 하루 또는 며칠간의 노출량과 비슷하거나 더 낮은 수준
 - ▶ 이러한 극히 낮은 선량에서의 생물학적 반응 (예: DNA 손상 및 복구 메커니즘, 적응 반응, 면역 반응 변화 등)은 고선량이나 중저선량과는 다를 수 있으며, 심지어 측정 가능한 유의미한 효과가 없을 수도 있다.
- ▶ 이러한 미세한 수준에서의 효과 유무를 규명하는 것은 방사선 방호 및 위험 평가에 매우 중요

▶ 선량-반응 관계의 하한선 탐색

- ▶ 방사선 방호의 핵심 모델인 선형 비역치 모델(LNT, Linear No-Threshold)은 어떤 미량의 방사선 노출도 암 발생 확률을 증가시킨다고 가정
 - ▶ 그러나 극저선량 영역, 특히 자연배경방사선 수준 이하에서의 LNT 모델의 유효성에 대해서는 논란
- ▶ '1 mGy 미만' 범주를 통해 자연배경방사선과 유사하거나 그 이하의 선량에서 실제로 유의미한 확률적 영향(암, 유전적 영향 등)이 관찰되는지, 아니면 효과가 거의 없거나 역치(threshold)가 존재하는지를 집중적으로 연구하고 과학적으로 검증 가능

▶ 정확한 위험 평가 및 규제 기준 마련

- ▶ 의료 진단(저선량 CT, X-ray 등), 환경 노출(원자력 시설 주변, 특정 산업 활동 등), 특정 직업적 노출 등 자연배경방사선 수준에 근접하거나 그 이하의 미량 방사선 노출 상황이 존재
- ▶ '1 mGy 미만' 범주를 연구함으로써 이러한 매우 낮은 수준의 추가 노출이 인체에 미치는 실제적인 위험을 보다 정밀하게 평가하고, 합리적이고 과학적인 규제 및 안전 기준을 마련하는 데 필요한 데이터를 확보 가능

극미량 범주 연구 요람: 4대 심지하 연구소

- ▶ 우주선(cosmic rays)의 영향이 극도로 배제된 심층 지하 공간은 입자물리학의 난제를 해결하는 요람
 - ▶ 역설적이게도, 이러한 '방사선 청정' 환경은 생명과학에게 또 다른 근본적인 질문
- ▶ 과연 수십억년간 모든 생명의 진화적 배경이 되어 온 자연 배경 방사선(NBR)은 단순한 배경 소음인가, 아니면 생명 유지에 필수적인 요소인가?
 - ▶ 이 질문에 답하기 위해 전 세계적으로 구축된 주요 심층 지하 연구시설 중, 특히 WIPP, CJPL, SNOLAB, LNGS는 NBR의 생물학적 역할 규명에 중요한 실험적 단서 제공

WIPP(Waste Isolation Pilot Plant, 미국)

- **주요 목적 및 위치**

- 원래 핵폐기물(초우라늄 폐기물) 처분을 위해 뉴멕시코주 지하 약 655m 깊이의 소금층에 건설된 시설

- **환경 특징**

- 비교적 깊이가 얇지만, 안정적인 지질 환경 제공

- **NBR 역할 연구**

- 자연 배경 방사선 제거(deprivation)가 생물에 미치는 영향을 연구하는 데 있어 **역사적으로 중요한 초기 연구들이 수행**

- **주요 성과**

- **Castillo와 Smith 연구팀**이 이곳에서 박테리아(*Deinococcus radiodurans*, *Shewanella oneidensis*)를 대상으로 NBR이 제거된 환경에서 **성장이 저해(최적 성장 의존성)되고 스트레스 반응과 유사한 유전자 발현 변화**가 나타남을 실험적으로 증명
- 이는 NBR이 생물 기능에 필요할 수 있다는 강력한 분자생물학적 증거를 제시한 중요한 성과

Castillo, H., Li, X., Schilkey, F., & Smith, G. B. (2018). Transcriptome analysis **reveals a stress response** of *Shewanella oneidensis* deprived of background levels of ionizing radiation. *PloS one*, 13(5), e0196472.

연구 방법

• 비교 환경:

- **대조군 (Control):** 일반적인 지상 실험실 환경 (평균 방사선량률 약 72.1 nGy/h)
- **실험군 (Treatment):** 지하 655미터 깊이의 광산 내부 실험실 (평균 방사선량률 약 0.9 nGy/h). 방사선량이 약 80배 낮은 환경.

• 실험 대상: *Shewanella oneidensis* 박테리아(다양한 환경에 적응하는 능력이 뛰어나 연구에 자주 사용)

• 세포 배양 및 시료 채취: 두 환경에서 동일한 조건으로 박테리아를 배양하고, 박테리아가 활발하게 증식하는 시기(지수 성장기 초기 및 후기)에 세포 채취.

• 유전자 발현 분석 (전사체 분석, Transcriptome Analysis):

- 세포 내의 모든 RNA 전사체(mRNA 등)를 추출하여 그 종류와 양을 분석
- RNA는 DNA의 유전 정보를 단백질로 전달하는 중간 다리 역할을 하므로, RNA를 분석하면 현재 어떤 유전자들이 활발하게 '켜져' 활동하고 있는지를 알 수 있다 (RNA 시퀀싱 기술 사용)
- 지하(저방사선) 환경의 박테리아와 지상(정상 방사선) 환경의 박테리아 간에 어떤 유전자들의 발현(활성도)량이 크게 다른지 비교
- 발현량이 달라진 유전자들이 어떤 기능을 하는지(예: 에너지 생산, 스트레스 반응, 물질 수송 등) 분석 (유전자 온톨로지 분석 등).

주요 연구 결과

- **유전자 발현 패턴의 변화**

- 저방사선 환경에서 자란 박테리아는 정상 환경에서 자란 박테리아와 비교했을 때 **수많은 유전자의 발현량 차이**

- **스트레스 반응의 증거**

- 저방사선 환경에서 변화된 유전자 발현 패턴은 박테리아가 **다른 종류의 환경 스트레스(예: 영양 부족, 독성 물질 노출 등)를 받았을 때 나타나는 반응과 유사**

- **구체적인 변화들:**

- **세포막 수송체 증가:** 세포 안팎으로 물질을 옮기는 역할을 하는 단백질(막 수송체)을 만드는 유전자들이 더 활발. 이는 세포가 환경 변화에 대응하여 물질 교환을 늘리려는 시도로 해석
- **호흡 및 에너지 대사 변화:** 세포가 에너지를 만드는 방식(호흡 관련 유전자 등)에도 변화. 세포 내부의 에너지 균형 조절에 변화 시사

결론

- **자연 방사선 제거는 스트레스**
 - *Shewanella oneidensis*에게 자연 배경 방사선을 제거하는 것이 **생리적인 스트레스**로 작용한다는 강력한 분자생물학적 증거
- **자연 방사선에 대한 적응과 의존성**
 - 박테리아가 단순히 자연 방사선을 견뎌온 것이 아니라, 오랜 진화 과정 속에서 **어느 정도 적응하고 심지어 의존하게 되었을 가능성** 시사
 - 정상적인 세포 활동과 내부 균형(항상성) 유지에 자연 방사선이 기여
- **'방사선 감소 = 무조건 좋음'은 아니다**
 - 방사선 노출을 줄이는 것이 항상 이롭지만은 않을 수 있다는 관점을 뒷받침
- **ROS의 이중적 역할 강조**
 - ROS가 단순히 손상 물질이 아니라 세포 기능 조절에 중요한 역할을 하는 신호 분자
 - 자연 방사선은 이러한 세포 내 ROS 수준을 조절하는 외부 요인 중 하나

LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 이태리)

- **주요 목적 및 위치**

- 세계 최대 규모의 지하 연구소 중 하나로, 그란사소 산맥 아래 약 1400m 깊이에 위치하며 오랜 연구 역사
 - 입자물리학 연구가 주를 이루지만, 저선량 방사선 생물학 연구도 초창기부터 꾸준히 수행 ("Cosmic Silence" 등).

- **환경 특징**

- 깊은 심도와 잘 구축된 연구 인프라

- **NBR 역할 연구**

- 이 분야에서 선구적인 역할을 했으며 현재도 관련 연구가 진행 중

- **주요 성과**

- 저방사선 환경에서 배양된 포유류 세포(V79, TK6)에서 항산화 능력 감소, 돌연변이율 증가, 방사선/화학물질에 대한 민감도 증가 등이 관찰 (Satta, Carbone/Antonelli 등).
- 초파리(*Drosophila*) 연구에서도 저방사선 환경에서 DNA 손상에 더 민감해지는 결과가 보고
- NBR 제거가 세포의 방어 및 복구 메커니즘에 부정적 영향을 미친다는 초기 이해 구축

Porrazzo, A., Esposito, G., Grifoni, D., Cenci, G., Morciano, P., & Tabocchini, M. A. (2022). Reduced environmental dose rates are responsible for the **increased susceptibility to radiation-induced DNA damage** in larval neuroblasts of drosophila grown inside the LNGS underground laboratory. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5472. <https://doi.org/10.3390/ijms23105472>

연구 방법

- ▶ 모델 생물
 - ▶ 초파리 3령 유충(*D. melanogaster* Oregon-R 야생형(및 DDR·텔로미어 돌연변이 6종은 대조 분석용)
 - ▶ 번데기가 되기 직전에 “가장 크고 분열이 왕성한” 초파리 유충
- ▶ 실험 조건
 - ▶ 지상 연구실: 평소 환경(참조 환경, RRE)
 - ▶ 지하 연구실1: 초저선량 환경(LRE)
 - ▶ 지하 연구실2: 초저선량 환경(LRE) + γ 선 조사(지상 수준)
- ▶ 방사선 자극
 - ▶ 3령 유충에 10 Gy짜리 Cs-137 γ 선을 전신 조사 후 4h 배양
- ▶ DNA 손상 확인
 - ▶ 조사 4 시간 뒤 유충 뇌(신경모세포)를 현미경으로 관찰하고, 부서진 염색체 조각(Chromosome Breaks, CBs) 개수를 세어 방사선 민감성 비교

결과

- ▶ 지하에서 자란 초파리는 10 Gy를 맞았을 때 염색체 파손이 약 두 배 많았다.
 - ▶ 작은 일상 자극이 사라지자 DNA 복구 체계가 '방심'해 있다가 큰 공격에 더 크게 무너진 셈.
- ▶ 지하+ γ 램프에서 키운 초파리는 파손 수치가 지상 수준으로 회복됐다.
 - ▶ 중요한 건 "어느 정도의 γ 선이 꾸준히 존재하느냐"
- ▶ 내인성 손상·DDR 돌연변이에는 영향 없음
 - ▶ 자연 방사선이 거의 없는 곳에서는 스스로 생기는(자발적) 손상이나 복구 유전자 돌연변이 파리의 기본 상태에는 큰 변화가 없었다.
 - ▶ 방사선이 없는 게 당장 해롭진 않지만, '면역 운동'을 빼앗긴 것처럼 위기 대응력이 떨어진다.

해석 및 의의

• 선량률 의존성

- 자연 γ 선량률이 세포 간 신호·스트레스 방어 회로를 상시 자극해 DNA 복구 능력을 유지
 - '저선량 조건적응'(conditioning-hormesis) 모델 지지

• 선량률 '역치' 가설

- 저자들은 $20 \text{ nGy h}^{-1} \leftrightarrow 66 \text{ nGy h}^{-1}$ 사이에 DNA 복구 경로가 작동하기 위한 **최저 선량률 역치**가 존재한다고 추정.
 - 추가 γ 선 증가는 더 이상 효과를 보이지 않았다.

• 우주·반도체·심부지하 생명공학

- 극저선량 환경(우주장기비행, 고차폐 연구시설 등)에서 생체 방어계 저하 가능성 → 방호 설계 시 **최소 γ 선량률 확보** 필요 시사.

SNOLAB (Sudbury Neutrino Observatory Lab, 캐나다)

- **주요 목적 및 위치**

- 원래 SNO 중성미자 실험을 위해 온타리오주 서드베리 지하 약 2070m 깊이의 니켈 광산 내에 건설. 이후 다목적 입자물리학 연구 시설로 확장
- **생명 과학 연구 프로그램(REPAIR)이 활발히 운영**

- **환경 특징**

- 매우 깊은 심도와 Class 2000 수준의 청정 환경을 유지
- 특히 REPAIR 프로젝트를 위해 라돈 제거 및 추가 차폐 기능이 있는 특수 저방사선 생물 배양기 (STCI)를 자체 개발

- **NBR 역할 연구**

- REPAIR 프로젝트를 중심으로 NBR 역할 규명 연구가 체계적이고 활발하게 진행

- **주요 성과**

- 다양한 생물 모델을 이용한 연구 결과가 축적.
- 호수 백어 배아 발달 저해, 건조 효모의 생존율 및 대사 능력 감소
- 인간 세포에서 성장/생존은 정상이지만 암화 지표(ALP) 증가(유전체 불안정성 시사),
- 예쁜꼬마선충의 번식 및 유전자 발현 변화
- NBR이 생물 기능과 안정성 유지에 중요하다는 가설을 다각도로 뒷받침하는 증거 제시

Pirkkanen, J., Laframboise, T., Peterson, J., Labelle, A., Mahoney, F., Lapointe, M., ... & Thome, C. (2024). The Role of **Natural Background Radiation** in **Maintaining Genomic Stability** in the CGL1 Human Hybrid Model System. *Radiation Research*, 202(4), 617-625.

• 연구 방법

- **실험 대상 세포:** CGL1 인간 하이브리드 세포 사용
 - 이 세포는 원래 암세포는 아니지만, 외부 자극(방사선, 화학물질 등)에 의해 암세포처럼 변형될 수 있는 특성이 있어, 암 발생 초기 단계를 연구하는 데 유용
 - 특히 이 세포에서는 ALP (Alkaline Phosphatase, 알칼리성 인산분해효소) 효소의 활성이 증가하는 것이 **암화 진행(neoplastic progression)의 초기 지표** 중 하나
- **비교 환경:**
 - **SNOLAB 지하 실험실:** 자연 배경 방사선이 극도로 낮은 환경.
 - **지상 대조군 실험실:** 정상적인 자연 배경 방사선 환경.
- **실험 기간:** CGL1 세포를 두 환경에서 **16주 동안** 지속적으로 배양
- **측정 항목:** 4주 간격으로 세포들을 분석.
 - **기본 생존 지표:** 세포 성장 속도, 세포 생존율(클론 형성 능력).
 - **DNA 손상:** 기본적인 DNA 이중나선 절단(DSBs) 수준 측정.
 - **암화 관련 지표:** **ALP 효소 활성** 측정.

주요 연구 결과

- **겉보기엔 괜찮았다?**

- 16주 동안 SNOLAB의 저방사선 환경에서 자란 CGL1 세포는 지상에서 자란 세포와 비교했을 때, **성장 속도나 생존율, 기본적인 DNA 손상 정도에서 큰 차이 부재**
 - 즉, 당장 세포가 죽거나 심각한 DNA 손상이 눈에 띄게 증가하지는 않았다.

- **위험 신호가 증가했다!**

- **ALP 효소 활성화**

- SNOLAB에서 배양된 세포들은 지상에서 배양된 세포들보다 **ALP 활성이 유의미하게 더 높았다.**
- 이러한 ALP 활성 증가는 **지하 환경에 더 오래 노출될수록 더욱 뚜렷해지는 경향**

결론

- **숨겨진 불안정성**

- 비록 세포가 겉으로는 잘 자라고 생존하는 것처럼 보였지만, 암화 진행의 초기 지표인 ALP 활성이 증가했다는 것은 세포 내부에 **중요한 불안정성이 발생하고 있음**을 시사
- 자연 배경 방사선이 없는 환경이 세포를 미묘하게 변화시켜 암 발생 진행

- **NBR의 역할 = 유전체 안정성 유지**

- 자연 배경 방사선이 단순히 주변에 존재하는 '배경 소음'이 아니라, **세포가 유전 정보를 안정적으로 유지하고 정상적인 기능을 수행하도록 돕는 보호적인 역할**을 할 수 있다는 가설을 뒷받침
 - 즉, NBR이 부족하면 이러한 **유전체 안정성(genomic stability)**이 깨질 수 있다

- **장기적 위험 가능성**

- NBR 부족의 영향은 즉각적인 세포 사멸이나 명백한 손상이 아닐 수 있다.
 - 대신, 세포가 통제력을 잃고 암으로 발전할 수 있는 **장기적인 위험을 미묘하게 증가**

CJPL (China Jinping Underground Laboratory, 중국)

- **주요 목적 및 위치**

- 암흑 물질, 중성미자 등 입자물리학 및 핵 천체물리학 연구를 위해 쓰촨성 진핑산 지하 약 2400m 깊이에 건설된 **세계에서 가장 깊은 지하 연구소**
- 최근 생명 과학 연구 분야로도 확장 중입니다(CJPL-II / DURF).

- **환경 특징**

- 뛰어난 우주선 차폐 능력과 방사능 수치가 낮은 대리석 암반이 특징
- 확장된 CJPL-II(DURF)는 저방사능 건축 자재 사용, 환기 개선 등 더 향상된 연구 환경 제공

- **NBR 역할 연구**

- 이 분야에서는 **비교적 최근에 연구가 시작된 신흥 연구 거점.**

- **주요 NBR 관련 성과**

- CJPL의 저방사선 환경에서 배양된 **중국 햄스터 v79 세포의 증식이 억제되고 단백질체(proteome) 수준에서 스트레스 적응 반응이 나타남을 보고**
- 세계 최고 깊이의 환경을 활용한 NBR 생물학 연구의 잠재력이 매우 큰 곳

Liu, J., Ma, T., Gao, M., Liu, Y., Liu, J., Wang, S., ... & Xie, H. (2020). Proteomics provides insights into the **inhibition** of Chinese hamster V79 **cell proliferation** in the **deep underground** environment. *Scientific Reports*, 10(1), 14921.

연구 방법

• 비교 환경

- 지상 실험실 (AGL): 일반적인 지상 실험실 환경.
- 심층 지하 실험실 (DUGL): 중국 진핑 지하 연구실(CJPL) 내부.

• 실험 대상

- 중국 햄스터의 폐 섬유아세포(V79 세포)를 사용(방사선 생물학 연구에 널리 쓰이는 세포)

• 세포 배양

- 동일한 V79 세포를 지상 실험실과 지하 실험실에서 똑같은 영양 배지를 사용해 배양

• 성장 관찰

- 두 환경에서 세포가 얼마나 빨리 자라는지(증식 속도) 비교

• 단백질 분석 (프로테오믹스, Proteomics):

- 세포 성장에 차이가 나타난 이유를 알기 위해, 두 환경에서 자란 세포 안에 있는 단백질들의 종류와 양을 비교 분석. TMT, PRM 정밀 분석 기법 사용

주요 결과

- 세포 성장 속도

- 지하 실험실(DUGL)에서 배양한 V79 세포는 지상 실험실(AGL)에서 배양한 세포보다 **성장 (증식) 속도가 더 느렸다.**

- 단백질 변화:

- 지하 세포와 지상 세포 사이에는 **수많은 단백질의 양이 달랐다** (총 980개 단백질 차이 발견).
 - 지하 세포에서는 양이 증가한 단백질(576개)이 양이 감소한 단백질(404개)보다 더 많았다.
- 양이 증가한 단백질들은 주로 **단백질 합성** (세포 내 공장인 리보솜 관련 단백질 등), **에너지 생산** (ATP 합성효소 등), **산소 운반** 등에 관련된 것들
- 양이 감소한 단백질들은 단백질 가공/수송에 관여하는 소포체 관련 단백질, 에너지 생산의 다른 부분(호흡 사슬)에 관련된 것들
- **경로 분석:** 단백질들의 기능을 그룹화하여 분석해보니, 지하 세포에서는 **리보솜(단백질 공장), RNA 수송, DNA 복구(염기 절제 복구), 에너지 대사(산화적 인산화)** 등과 관련된 경로들에서 뚜렷한 변화 관찰

결론

- **지하 환경은 세포에 스트레스**

- 자연 방사선이 극도로 낮은 지하 환경은 v79 세포에게 일종의 **스트레스**로 작용하여 성장 속도 저하

- **세포의 적응 반응**

- 세포 내 단백질들의 양이 크게 변한 것은 세포가 이 낮은 저방사선 환경에 **적응하려는 반응**
 - 단백질 합성 기계를 늘리고 에너지 생산 방식을 조절하며 DNA 복구 시스템을 변화시키는 등, 세포 내부의 작동 방식 변경
 - 이는 단순히 성장을 멈추는 것이 아니라, 변화된 환경에서 생존하기 위해 세포의 자원을 재분배하고 방어 메커니즘을 조절하는 과정

- **NBR의 역할**

- 지구상의 생명체가 오랜 시간 동안 적응해 온 자연 방사선이 세포의 정상적인 기능 유지에 기여
 - 단순히 '방사선=해로운 것'이 아니라, 적절한 수준의 자연 방사선이 세포 활동에 필요

4대 연구소의 일관적인 연구결과

- ▶ 네 곳의 연구소 모두 우주선 차폐를 통해 극저방사선 환경을 제공하며 NBR 역할 연구에 기여
 - ▶ WIPP는 박테리아 연구를 통해 NBR 제거의 분자적 영향을 밝힌 역사적 중요성
 - ▶ CJPL은 가장 깊은 심도를 바탕으로 최근 V79 세포 연구 등 이 분야에서 새롭게 부상
 - ▶ SNOLAB과 LNGS는 각각 REPAIR 프로젝트와 Cosmic Silence 등 체계적인 프로그램을 통해 다양한 생물 모델을 이용하여 NBR의 생물학적 역할(항상성, 유전체 안정성 유지 등)에 대한 증거를 꾸준히 축적

자연배경 방사선 제거의 결과

▶ 4대 심지하 연구소의 **공통적인 성과**

▶ **자연 배경 방사선의 제거**

- ▶ 스트레스 증가, 성장 변화, 방어력 약화, 유전체 불안정성 증가 등 **측정 가능한 생물학적 변화를 유발**
- ▶ **자연 배경 방사선이 생명 유지에 필수적인 역할을 할 수 있다는 가설을 강력하게 뒷받침**

역학연구로는 확인 불가능

- ▶ 자연배경방사선의 변량보다 작은 영역
 - ▶ 10 mGy 미만의 초저선량 영역
- ▶ 저선량방사선보다 신체 영향이 훨씬 더 큰 변수의 간섭
 - ▶ 음주, 흡연, 식생활, 수면, 습관, 대기오염, 스트레스

초저선량 방사선(10 mGy 미만)의 역학 연구 불가능한 이유

1. 자연방사선 변량 대비 미미한 선량 (신호 대 잡음비 문제)

- **자연방사선의 존재 및 변동성**

- 지구상의 모든 생명체는 우주 방사선, 지각 방사선, 음식물 섭취 등으로 인해 연간 평균 약 2.4 밀리시버트(mSv)의 자연방사선에 노출. (개인 및 지역에 따라 연간 1~10 mSv 이상으로 편차가 큼).

- **미미한 추가 선량**

- 10 mGy미만 선량은 이러한 자연방사선 연간 총량의 변동폭이나 특정 고배경방사선 지역 주민들이 받는 연간 선량보다 작거나 비슷한 수준

- **측정의 한계**

- 시끄러운 시장에서 속삭이는 소리를 듣기 어려운 것처럼, 이미 존재하는 자연방사선이라는 '배경 잡음(noise)'의 변동성이 연구하고자 하는 초저선량 방사선이라는 '신호(signal)'보다 크거나 비슷하기 때문에, 그 영향을 역학적으로 분리하여 검출하는 것이 극히 어렵다.

2. 압도적인 교란 변수(Confounding Variables)의 영향

- **다양한 생활습관 및 환경 요인**

- 인체 건강에 영향을 미치는 요인은 방사선 외에도 무수히 많다.
- 음주, 흡연, 식생활(영양 불균형, 특정 음식 섭취 등), 수면 패턴, 신체 활동 습관, 대기오염(미세먼지, 유해화학물질), 스트레스 수준, 사회경제적 지위, 유전적 감수성 등 다양한 변수들이 건강 상태에 훨씬 더 큰 영향

- **영향력의 차이**

- 예를 들어, 흡연으로 인한 폐암 발생 위험 증가는 초저선량 방사선으로 인해 이론적으로 예상되는 암 발생 위험 증가보다 수십, 수백 배 이상.

- **분리 및 통제의 어려움**

- 역학 연구에서는 이러한 교란 변수들의 영향을 통계적으로 보정하려고 노력하지만, 모든 교란 변수를 완벽하게 파악하고 정량화하여 통제하는 것은 현실적으로 불가능
- 특히 초저선량 방사선의 영향이 매우 작을 것으로 예상될 경우, 이러한 교란 변수들의 미세한 영향 차이가 방사선 영향으로 잘못 해석

3. 통계적 검출력(Statistical Power)의 한계

- **대규모 연구 집단 필요**

- 매우 작은 건강상의 변화(예: 특정 질병 발생률의 미미한 증가)를 통계적으로 유의미하게 검출하기 위해서는 수백만 명에서 수천만명 이르는 대규모 연구 집단을 장기간 추적 관찰 필요

- **비용 및 시간 제약**

- 이러한 대규모 장기 추적 연구는 막대한 비용과 시간이 소요되어 현실적으로 수행하기 어렵거나, 수행되더라도 결과의 해석에 여러 제약

- **효과 크기의 미미함**

- 초저선량 방사선으로 인한 건강 영향의 크기가 매우 작을 것으로 예상되므로, 연구 결과가 통계적으로 유의미하게 나오기 어렵다.
- 즉, 관찰된 차이가 실제 효과인지 우연에 의한 것인지 구분하기 어렵다.

4. 특정 생체지표(Biomarker)의 부재

- **저선량 특이적 지표 없음**

- 현재까지 10 mGy 정도의 초저선량 방사선 노출만을 특정하여 그 영향을 직접적으로 나타내는 신뢰할 만한 생체지표가 확립되어 있지 않다.

- **일반적 손상과의 혼재**

- 세포 손상이나 DNA 변이 등은 방사선뿐만 아니라 정상적인 대사 과정, 다른 화학물질 노출, 염증 반응 등 다양한 원인으로 발생할 수 있어, 초저선량 방사선에 의한 특이적 영향을 구분해내기 어렵다

5. 긴 잠복기(Latency Period) 및 다단계 발암 과정

- **장기간의 잠복기**

- 방사선 노출로 인한 암과 같은 만성 질환은 수년에서 수십 년의 긴 잠복기.

- **추적의 어려움**

- 이렇게 긴 시간 동안 연구 대상자들의 생활 습관 변화, 추가적인 의료 피폭, 환경 변화 등을 모두 정확히 추적하고 기록하는 것은 매우 어렵다.
- 교란 변수 통제를 더욱 복잡하게 만든다

극미량에 역학 연구는 더욱 불가능

- ▶ 극미량(1 mGy 미만)의 영향은 역학연구의 대상이 될수 없다.
 - ▶ 역학연구로는 자연배경 방사선(약 2-10 mGy/년)에 노출된 인구와 0 mGy에 가까운 환경을 비교할 수 있는 방법 부재
 - ▶ 부재 증명의 오류
 - ▶ 역학 연구 대상자는 모두 자연배경방사선 피폭이 기본값인데, 자연배경방사선의 변량은 1 mGy보다 훨씬 크다.
 - ▶ 식품에 의한 피폭 변량 한가지 요인만으로도 0.1 mGy보다 크다
- ▶ 실제로 방사선 역학 연구는 NBR을 통제하지 않고 있다.
 - ▶ 흡연, 음주, BMI, SES, 화학물질 등을 실질적으로 교란 변수로 여기고 자연배경 방사선은 기저값으로 간주

Schubauer-Berigan, M. K., Berrington de Gonzalez, A., Cardis, E., Laurier, D., Lubin, J. H., Hauptmann, M., & Richardson, D. B. (2020). Evaluation of confounding and selection bias in epidemiological studies of populations exposed to low-dose, high-energy photon radiation. *JNCI Monographs*, 2020(56), 133-153.

쟁점과 합의

▶ 합의

- ▶ 고선량과 중선량 범주의 선형 관계
- ▶ 편익원으로서의 NBR
- ▶ 극미량에서의 편익원 역치의 존재

▶ 쟁점

- ▶ 저선량 범주의 선형성
- ▶ 저선량 범주의 역치의 존재 여부

두 버전의 LNT

▶ 과학 LNT

- ▶ 역학으로 측정 가능한 범주(10 mGy 이상 저선량 범주)에서 문턱값 없이 직선 관계
 - ▶ "측정 가능한 범위 내에서 위해의 역치가 없다"로 정의하면 자연배경방사선 수준을 기준점(Natural Background Radiation, NBR)으로 잡고, 측정 가능한 저선량 범위(10~100 mGy)로 LNT여부에 대해 과학적 논쟁 가능

▶ 통속 LNT

- ▶ 측정 불가능한 영역에도 직선 관계 외삽

지적 겸손

지적 겸손의 핵심: 열린 마음과 수정 의지

- 자신의 지식이나 믿음이 불완전하거나 틀릴 수 있음을 인정하는 것.
 - 새로운 증거나 다른 관점에 대해 열린 마음을 갖는 것.
- 자신의 생각과 반대되는 증거를 접했을 때, 이를 무시하거나 방어적으로 대하기보다는 기꺼이 자신의 믿음을 수정하거나 발전시킬 의향이 있는 것.
 - 자신의 주장에 대해 절대적인 확신을 갖기보다는, 잠정적인 것으로 간주하고 지속적인 검증과 개선의 대상으로 삼는 것.

결론

- ▶ 우리는 고선량부터 극미량까지 방사선 피폭의 다양한 스펙트럼을 이해하기 위해 끊임없는 노력 필요
 - ▶ 특히 극미량 방사선 영역은 기존 역학 연구의 한계를 넘어선 새로운 접근 방식과 심도 깊은 생물학적 연구가 필수적
- ▶ 자연 배경 방사선이 생명 유지에 중요한 역할을 한다는 심층 지하 연구소의 일관된 결과는 우리에게 **방사선에 대한 새로운 관점**을 제시
- ▶ '지적 겸손'의 자세로 이 미지의 영역을 탐구하며, 우리는 **방사선 안전에 대한 보다 정확하고 포괄적인 이해**를 바탕으로 미래 세대를 위한 합리적인 방사선 방호 기준 마련 필요