

한국원자력학회 춘계학술대회 워크숍 [F]

# 원전주변주민과 갑상선암에 관한 과학적 분석

- 일시: 2015년 5월 6일(수) 13:30 ~ 19:00
- 장소: 제주 국제컨벤션센터, 2층 201(A+B)
- 주최: 한국원자력학회 이슈위원회  
한국원자력학회 방사선이용 및 방호연구부회  
대한방사선방어학회 의학위원회

# 원전주변주민과 갑상선암에 관한 과학적 분석

- 일시 : 2015년 5월 6일(수) 13:30 ~ 19:00
- 장소 : 제주 국제컨벤션센터, 2층 201(A+B)
- 주최 : 한국원자력학회 이슈위원회/방사선이용 및 방호연구부회  
대한방사선방어학회 의학위원회

일정	내 용	
13:30~14:00	등록	
	사회: 김교윤(KNS 방사선이용 및 방호 연구부회장)	
14:00~14:05	인사말: 장문희(한국원자력학회장)	
14:05~14:10	인사말: 김일한(대한방사선방어학회장)	
제 1부	좌장: 김교윤(KNS 방사선이용 및 방호 연구부회장)	
14:10~14:20	원전주변 갑상선암 과학적 분석 현황	김교윤(KAERI)
14:20~14:40	저선량방사선이 인체에 미치는 영향	김광표(경희대)
14:40~15:00	일반인 선량한도	김봉환(KAERI)
15:00~15:20	원전 주변주민에 대한 방사선영향	금동권(KAERI)
15:20~15:40	방사성요오드의 생리역동학적 모델	정규환(KINS)
	Coffee Break	
제 2부	좌장: 박우윤(KARP 의학위원장)	
16:00~16:20	역학조사 국·내외 사례	진영우(KIRAMS)
16:20~16:40	갑상선암의 특성 및 발생원인	김병일(KIRAMS)
16:40~17:00	갑상선암 발생과 검진과의 관계	김현정(고려대)
17:00~17:20	인과관계론	김수근(성균관대)
17:20~17:40	원전 주변주민 갑상선암발생에 관한 기술적 종합분석	강건욱(서울대)
17:40~17:50	원전과 갑상선암 발생의 의학적 관점	박우윤(충북대)
	Coffee Break	
종합토의	좌장: 황주호(KNS 부회장/이슈위원장)	
18:00~19:00	패널: 이재기(한양대 교수), 유근영(서울대 교수), 김종순((전)원자력의학원장), 안병정(의학신문 편집주간)	

## 목차

1	원전주변 갑상선암 과학적 분석 현황	김교윤(KAERI)	1
2	저선량방사선이 인체에 미치는 영향	김광표(경희대)	6
3	일반인 선량한도	김봉환(KAERI)	28
4	원전 주변주민에 대한 방사선영향	금동권(KAERI)	41
5	방사성요오드의 생리역동학적 모델	정규환(KINS)	53
6	역학조사 국·내외 사례	진영우(KIRAMS)	68
7	갑상선암의 특성 및 발생원인	김병일(KIRAMS)	89
8	갑상선암 발생과 검진과의 관계	김현정(고려대)	105
9	인과관계론	김수근(성균관대)	126
10	원전 주변주민 갑상선암발생에 관한 기술적 종합분석	강건욱(서울대)	137
11	원전과 갑상선암 발생의 의학적 관점	박우윤(충북대)	147

# 1. 원전주변 갑상선암 과학적 분석 현황

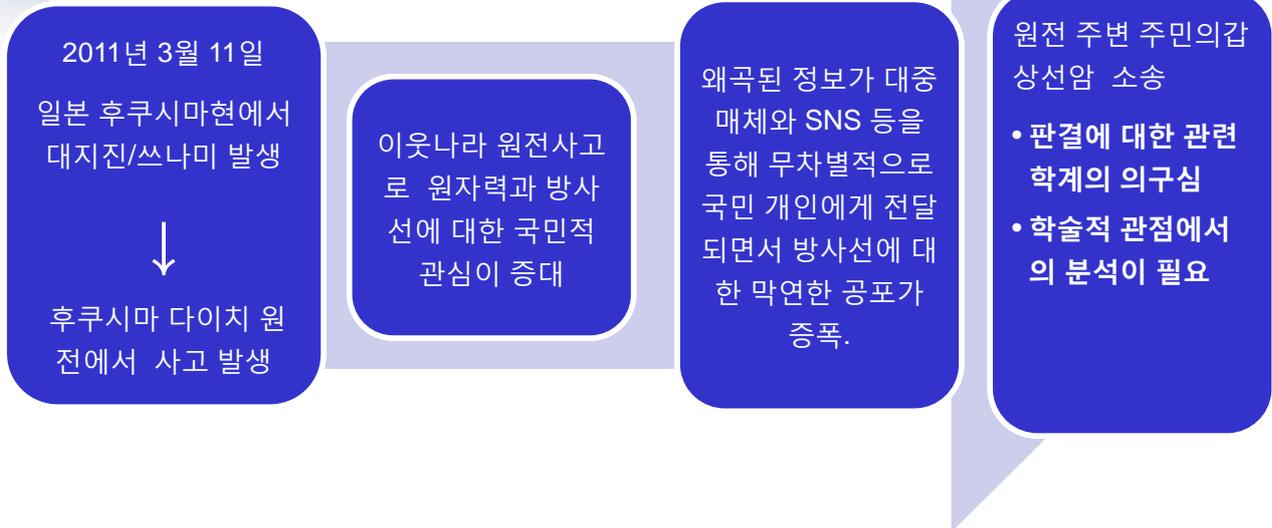
김교윤(KAERI)

# 원전주변 갑상선암에 대한 과학적 분석 배경

김교윤  
KAERI

- 
- 
- 배경
  - 국내 원전에서의 방사선 관리
  - 고리주민 갑상선암 소송 개요
    - 재판부의 판결 근거

# 배경



# 국내 원전의 방사선 관리

- 국내 원자력발전소에서 정상 운전 중 방사성물질의 환경배출은 불가피하게 수반되는 일상적인 행위이며, 법과 규정에 의해 엄격하게 관리하고 있어 배출되는 방사성 물질의 양은 매우 미미하여 무시할 만한 수준.
- 이는 국내 원자력안전법과 국제원자력기구(IAEA), 국제방사선방호위원회(ICRP)에 서 권고하는 수준보다 훨씬 적은 양임.

# 고리 주민 갑상선암 소송 개요

‘12.7.4. 고리원전 인근주민(이○○ 외 2명)이 한수원을 상대로 손해배상 소송 제기

‘14.10.17. 부산지법 동부지원 1심 선고

성명	나이	관계	손해배상청구액	질병	선고
이○○	48	본인	5천만원	직장암	청구기각
박○○	48	배우자	2억원	갑상선암	1,500만원 배상
이○○	22	아들	5천만원	선천성 자폐증	청구기각

(판결요지)

“박씨가 원전 부근에 상당한 기간 거주하면서 발전소에서 내보낸 방사선에 노출되었고, 그로 인해 암진단을 받았다고 봄이 상당하여 피고에게 손해배상 책임이 있다.” ⇒ 원고 일부 승소

‘14.10.20. 한수원(피고) 항소

‘14.11.3. 이○○외 2(원고) 항소

‘15.7~8월. 항소심 선고 예정

## 재판부가 인용한 판결 근거 (1)

- 원전 방사선에 장기간 노출
  - 원고가 10km 이내 지역에서 20년 가까이 거주
  - 원고의 갑상선암 발병에 원전 방사선 외에 뚜렷한 다른 원인이 없음
  - 발전소에서 방출된 연간 방사선량이 연간 유효선량 한도에 미치지 못하지만, 법령에서 정한 연간유효선량이 절대적으로 안전을 담보할 수 있는 수치라고 단정할 수 없음
- 대한직업환경의학회 감정촉탁 회신서
  - 갑상선암의 가장 중요한 위험요인 : 치료적 방사선 노출과 환경
  - 재해로 인한 방사선 노출
    - ⇒ 이를 ‘갑상선암 발병의 결정적 요인이 방사선 노출로 해석
  - 체르노빌 사고 이후 여성들에서 갑상선암 증가
  - 방사선노출과 갑상선암이 용량-반응관계가 있음

## 재판부가 인용한 판결 근거 (2)

- 서울대 원전역학조사 연구보고서
  - 원전으로부터의 거리에 따른 갑상선암 발생률 경향 존재
  - 근거리 대조지역(5-30km)의 갑상선암 발병률이 원거리 대조지 역에 비해 1.8배 높음
  
- 동남권원자력의학원 기장군민 건강검진 결과
  - 암검진자 3,031명중 41명 갑상선암 진단(1.3%)
  - 기장군 주민의 암 진단율이 수도권 대형병원 보다 높음

7

## 보고서 발간위원 선정 “(가칭) 원전주변주민과 갑상선암에 관한 과학적 분석 ”

	성명	소속	직위	역할
1	김교운	한국원자력연구원	동력로개발부장	공동위원장
2	박우윤	충북대의대	방사선종양학과 교수	공동위원장
3	강건욱	서울대의대	핵의학과 교수	위원
4	김병일	원자력의학원	핵의학과 주임과장	위원
5	김현정	고려대의대	근거중심의학연구소 교수	위원
6	김선욱	삼성서울병원	내분비대사내과 교수	위원
7	진영우	원자력의학원	예방의학(부장)	위원
8	김수근	강북삼성병원	산업의학과 교수	위원
9	조건우	한국원자력안전기술원	보건물리(수석)	위원
10	정규환	한국원자력안전기술원	보건물리(책임)	위원
11	김광표	경희대	원자력공학과 교수	위원
12	금동권	한국원자력연구원	방사선환경(책임)	위원
13	김봉환	한국원자력연구원	방사선안전관리부장	위원

8

1 원전주변 갑상선암 과학적 분석 현황	김교운(KAERI)
2 저선량방사선이 인체에 미치는 영향	김광표(경희대)
3 일반인 선량한도	김봉환(KAERI)
4 원전 주변주민에 대한 방사선영향	금동권(KAERI)
5 방사성요오드의 생리역동학적 모델	정규환(KINS)
6 역학조사 국내외 사례	진영우(KIRAMS)
7 갑상선암의 특성 및 발생원인	김병일(KIRAMS)
8 갑상선암 발생과 검진과의 관계	김현정(고려대)
9 인과관계론	김수근(성균관대)
10 원전 주변주민 갑상선암발생에 관한 기술적 종합분석	강건욱(서울대)
11 원전과 갑상선암 발생의 의학적 관점	박우윤(충북대)



- 암 및 방사선학 전문가들이 고리 원자력발전소 인근 주민의 갑상선암 발병에 대해 의학적으로 원전 인과 관계를 인정하기 힘들다는 견해를 내놓았다. 지난해 법원이 원전에 책임 있다고 인정한 판결과 반대되는 내용이다. 따라서 유사 소송을 준비 중인 다른 원전 지역 주민들이나 환경단체의 반발 등 사회적 갈등이 예상된다.
- 한국원자력학회와 대한방사선방어학회는 6일 제주 컨벤션센터에서 ‘원전 주변 주민과 갑상선암에 관한 과학적 분석’을 주제로 워크숍을 연다. 본보가 사전 입수한 자료에 따르면 연사로 참석하는 의학자들은 대부분 “원전 주변 지역의 갑상선암 발견 건수가 통계적으로 높지만 원전의 방사선 피폭 때문이라고 볼 수 있는 근거는 없다”는 의견이다.
- 강건욱 서울대병원 핵의학과 과장은 “원전의 방사선이 암에 영향을 미쳤다면 남녀 모든 부위에서 일관된 발병 위험 경향이 관찰돼야 한다”며 “국가암등록사업 보고서에 따르면 1993~2008년 원전 주변 여성 갑상선암 발생률은 10만명 당 61.4명으로 서울(102.5명)이나 대전(109.4명)보다 낮다”고 말했다. 한국원자력학회 국가방사선비상진료센터의 진영우 연구기획부장은 “원전 주변이라는 특수성 때문에 주민들이 건강검진을 꼼꼼히 받아 갑상선암이 더 많이 발견됐을 수 있다”며 “갑상선암 검진을 많이 받는 우리나라 여성의 갑상선암 발견률이 외국보다 평균 15배 많다”고 설명했다.
- 이는 지난해 재판 결과를 뒤집는 내용으로 향후 재판에 영향을 미칠 가능성이 있다. 지난해 고리 원전 인근에 사는 한 여성은 원전 때문에 갑상선암이 발병했다며 원전 운영사인 한국수력원자력을 상대로 손해배상청구소송을 제기했다. 지난해 10월 부산지법 동부지원 민사2부는 한수원이 위자료 1,500만원을 지급하라며 원고 일부 승소 판결을 내렸다. 판결 직후 한수원은 항소했다.
- 당시 법원은 2012년 서울대 의학연구원의 역학조사 결과를 판결 근거로 들었다. 조사 내용은 고리, 영광, 울진, 월성 등 원전 4곳의 인근에 사는 암이 없던 성인 3만6,000여명을 20년간 추적 관찰해 암의 발병 추이를 다뤘다. 이 가운데 여성 갑상선암만 원전에 가까이 살 수록 발병률이 높은 것으로 나타났다.
- 이에 대해 의학자들은 “의학적으로 명백한 오류”라고 반박했다. 의학자들은 “갑상선암으로 진단받은 원전 인근 주민들의 방사선 피폭 수준이 일반 환경과 크게 다르지 않다”며 “일반 환경을 뛰어넘는 고선량에 피폭돼야 발병 위험이 증가한다고 볼 수 있다”고 설명했다.
- 한편 일각에선 원전관련학회들이 워크숍을 통해 한수원 옹호에 나선 것 아니냐는 비판도 나온다. 특히 한수원이 원자력학회 특별회원으로서, 학회 사업에 각종 기여를 한 것으로 알려졌다. 10

## 2. 저선량방사선이 인체에 미치는 영향

김광표(경희대)

# 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향

김 광 표  
경희대학교 원자력 공학과  
2015-05-06

## 목 차

1. 자연방사선과 인공방사선
2. 우리국민의 방사선 피폭수준
3. 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향
4. 피폭 선량한도의 의미
5. 요약

# 자연방사선과 인공방사선

3

## 자연방사선과 인공방사선

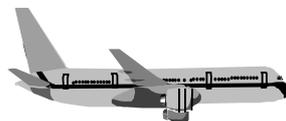
### □ 자연방사선

- 우주에서 방출되는 방사선 + 지구로 들어오는 방사선



### □ 인공방사선

- 인위적으로 만들어 내는 방사선
- 사용 용도에 따라 방사선의 종류와 세기 조절
- 자연방사선과 물리적으로 동일한 성질



# 자연방사선

## □ 자연방사선

- 우리 주위의 자연계에 존재하는 방사선을 총칭하는 용어
- 자연방사선을 방출하는 자연방사성물질은 지구의 토양이나 암석, 해수, 지표수, 지하수, 공기와 같은 일상 자연환경 어디든 존재함

## □ 자연방사선의 종류

- 우주방사선
- 지각방사선
- 인체 내 방사성핵종
- 해수, 지표수, 지하수 내 방사성핵종

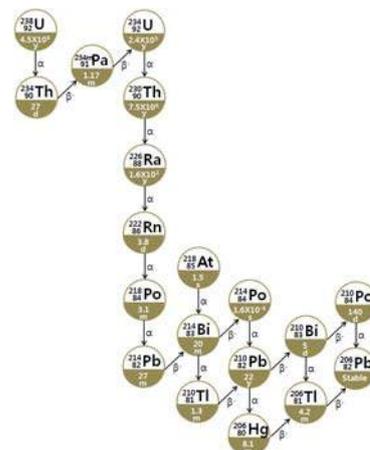
# 지각방사선

## □ 지각방사선

- 지구의 지각에 존재하는 방사성 핵종으로부터 방출되는 방사선
- 약 45억년 전 지구가 생성될 시점에 생성된 수많은 종류의 방사성원소들 중 반감기가 대략 1억년 이상인 장반감기 자연방사성 핵종들은 현재까지도 끊임없이 방사선을 방출하고 있음

## □ 대표적 천연방사성 핵종

- 우라늄 계열 (U-238)
- 토륨 계열 (Th-232)
- 악티늄 계열 (U-235)
- 넵튠 계열 (Pu-241)
- 칼륨-40 (K-40) 등



## □ 라돈 가스의 기원 및 특성

- 지각방사선의 일종이며, 자연방사선 피폭의 50% 이상을 차지하는 주요한 자연방사선 핵종임
- 우라늄과 토륨계열 핵종의 붕괴과정에서 발생함
- 밀폐된 공간이나 실내로 라돈 가스가 유입되는 것은 문제가 될 수 있음

## □ 실내 라돈 가스

- 유입된 라돈 가스의 약 90% 가량은 해당 건물 아래를 받치는 지반의 토양이나 암석으로부터 기인한 것임
- 상대적으로 압력이 낮은 건물 내부, 밀폐된 공간에 점차 높은 농도로 축적이 이루어짐
- 실제로 건물이 지어진 지역의 토양이 화감암 성분을 많이 함유하는 곳이라면, 내부에서의 라돈 가스의 농도가 높게 측정됨

# 우주방사선

## □ 우주방사선

- 지구 밖의 우주공간에서 지구로 입사하는 자연방사선

## □ 우주방사선의 종류

- 1차 우주선: 고 에너지의 양성자, 헬륨이온
- 2차 우주선: 양성자, 헬륨이온 등이 지구로 입사하여 질소, 산소 등의 원자들과의 반응을 통해 생성된 방사성 핵종 (예: 뮤온, 감마선, 중성자, 전자)

## □ 우주방사선과 대기의 반응으로 생성되는 방사성 핵종

- 우주방사선에 존재하는 고 에너지의 양성자와 대기 중에 존재하는 원소와의 반응으로 중성자가 생성됨 → 이는 다시 대기에 존재하는 원소들과 다시 반응하여 자연방사성 핵종을 생성함
- (예) H-3, C-14, Be-7, Be-10 등

# 인체 내 방사성 핵종

## □ 인체 내 방사성 핵종

- 인체를 구성하는 핵종들 중 미량이지만 방사성을 띠는 천연방사성 핵종이 존재하며, 이러한 핵종들도 자연방사선을 방출함
- 음식물 등에 존재하는 미량의 방사성물질이 인체 내로 유입됨
- (예) K-40, C-14, Rb-87, Po-210, Ra-226, U-238 등

# 해수, 지표수, 지하수 내 방사성 핵종

- 수용성의 방사성 핵종들은 지표수나 지하수에 녹아 먼 거리를 이동할 수 있게 되며, 지각의 표면과 지하수의 분포에 따라 다양한 분포형태를 가짐
- 해수에 녹아있는 방사성 핵종들은 (1) 해수에서 기원한 염분이 함유된 대기를 인간의 호흡을 통하여 체내로 흡수되거나 (2) 바다에서 성장하는 생선 및 해조류 등의 섭취로 인하여 체내로 유입될 수 있음

# 인공방사선

## □ 인공방사선

- 원자력시설 등에서 발생하는 인공방사성 핵종에서 방출되는 방사선, 의료 또는 산업목적에 위해 인위적으로 발생시킨 방사선

## □ 인공방사성 핵종

- 방사성 핵종의 이용분야가 다양해지면서 인공적으로 방사성 핵종을 생산하는 방법들이 개발됨
- 초기의 방사성동위원소 취득 방법은 자연에 존재하는 반감기가 긴 천연방사성동위원소를 분리 정제 하는 것이었음
- 현재는 원자로, 가속기, 핵분열생성물 등에서 인공방사선 동위원소를 대량으로 생산

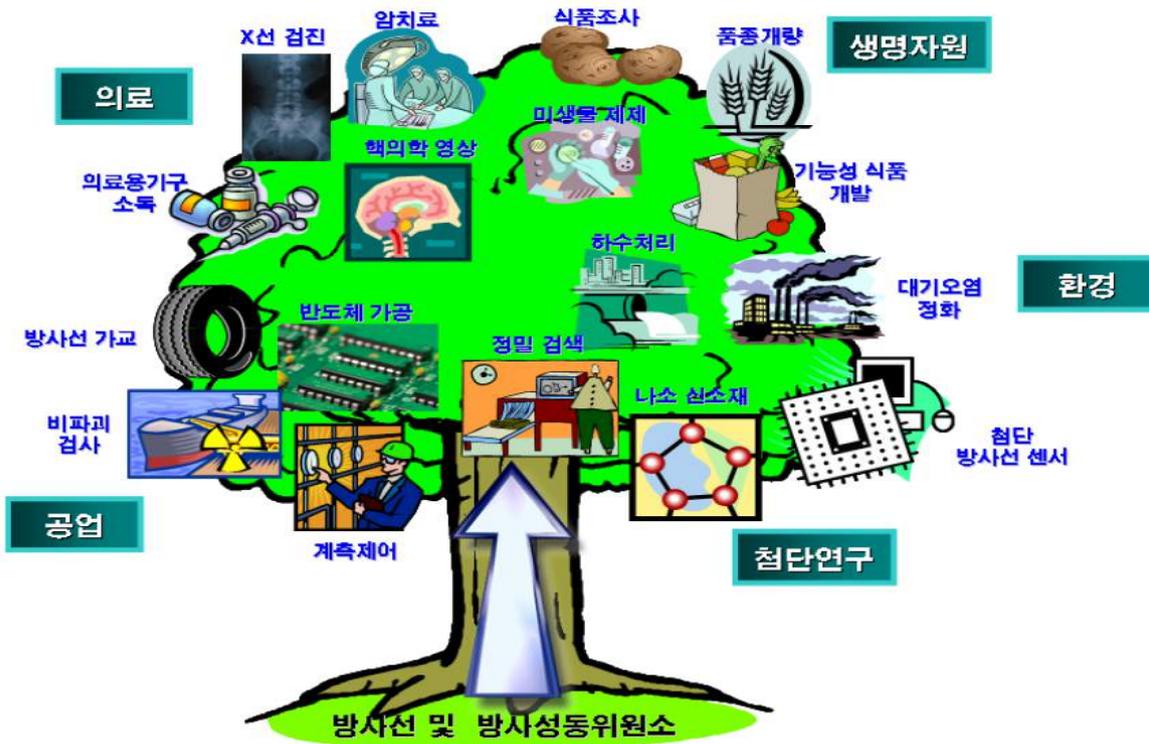
# 인공방사선의 이용

## □ 인공방사선의 이용

- 인공방사선은 원자력시설뿐만 아니라, 의료, 공업, 환경, 생명자원, 첨단연구 등 매우 다양한 분야에 활용되고 있으며, 인간활동의 한 부분이 되었음
- 인공방사선은 사용분야가 다양해지고 있으며, 국내 이용 기관수도 매년 증가 추세 → 국내 인·허가 받은 방사선발생장치 및 방사성동위원소 이용기관은 5,000 기관 이상이며, 10년 전과 비교하여 약 3배 정도 증가

## □ 인공방사선의 이용분야

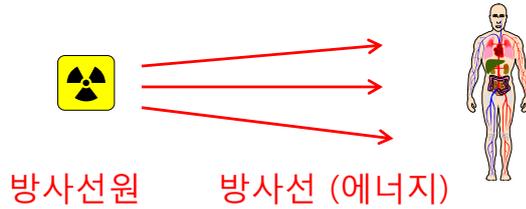
이용분야	사용 예
원자력시설	• 연구용 및 발전용 원자로, 핵연료주기시설, 방사성폐기물의 저장, 처리, 처분시설
의료분야	• 진단방사선, 치료방사선
산업분야	• 방사선계이지, 산업용 방사선촬영, 방사선 가공, 환경기술 이용, 방사선발생장치의 이용, 방사선조사 식품, 의약품, 화장품, 건강식품 등의 멸균



# 우리국민의 방사선 피폭수준

# 방사선 피폭이란?

□ 방사선피폭: 물체가 방사선 에너지를 흡수하는 것



□ 방사선량: 방사선 피폭량을 나타내는 척도

- 흡수선량 (D): 단위질량당 흡수된 에너지
- 표준단위: Gy (그레이), 1 Gy = 1 J/kg
- 구단위: rad (라드), 1 Gy = 100 rad



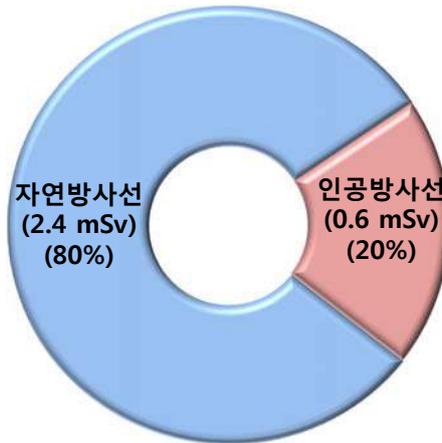
# 자연방사선 및 인공방사선에 의한 피폭

구 분	방사선원	비 고
자연방사선 피폭	우주선	• 은하계 혹은 태양으로부터 오는 고에너지 양성자 및 2차 우주선
	천연 방사성 핵종	• 지각방사선, 라돈, 인체 내 방사성물질
인공방사선 피폭	의료방사선	• 진단방사선, 치료방사선
	핵실험 낙진	• 핵실험 낙진
	건축자재	• 건축자재 내의 자연방사성핵종
	항공기 탑승	• 높은 고도에 의해 증가된 우주방사선
	기타	• 담배, 음이온 건강제품, 전구, 카메라렌즈

# 전세계 국민의 방사선 피폭 수준

## □ 전세계 국민 일인당 평균 연간 피폭선량

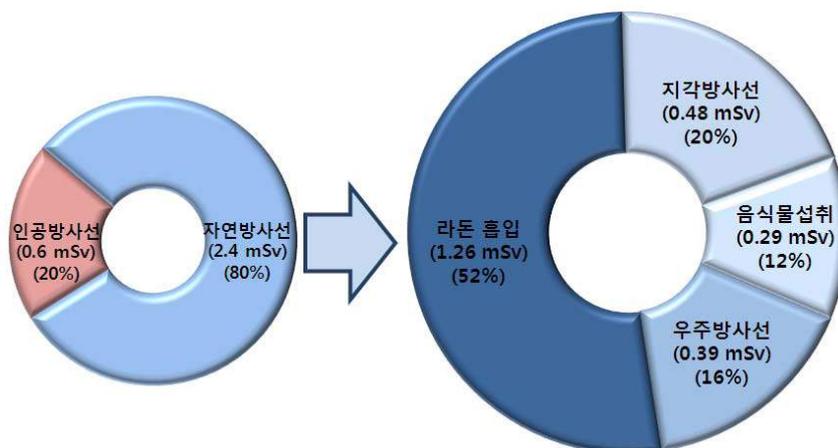
- 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서 주기적으로 전세계에서 자료를 수집하여 보고함
- 3 mSv/year: 자연방사선 (2.4 mSv/year) + 인공방사선 (0.6 mSv/year)



# 자연방사선에 의한 피폭

## □ 피폭원별 자연방사선피복

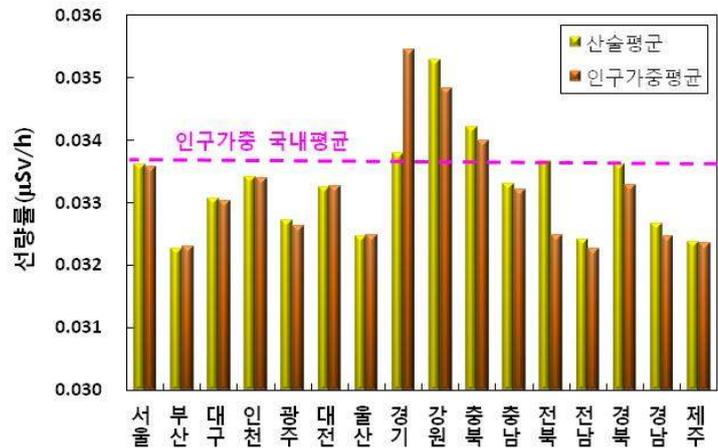
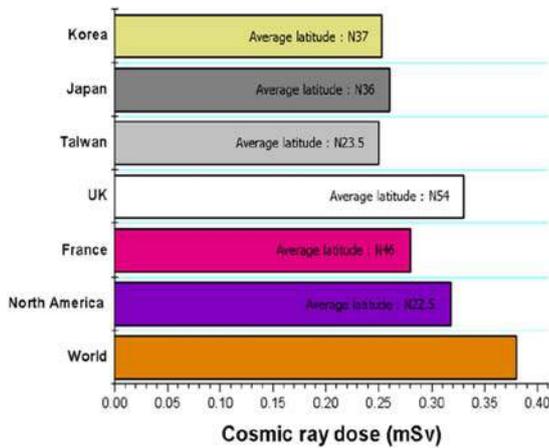
- 우주방사선에 의한 피폭
- 지각방사선에 의한 외부피폭
- 음식물 섭취에 의한 피폭
- 라돈에 의한 피폭



# 우주방사선에 의한 피폭

## □ 국내 피폭 수준

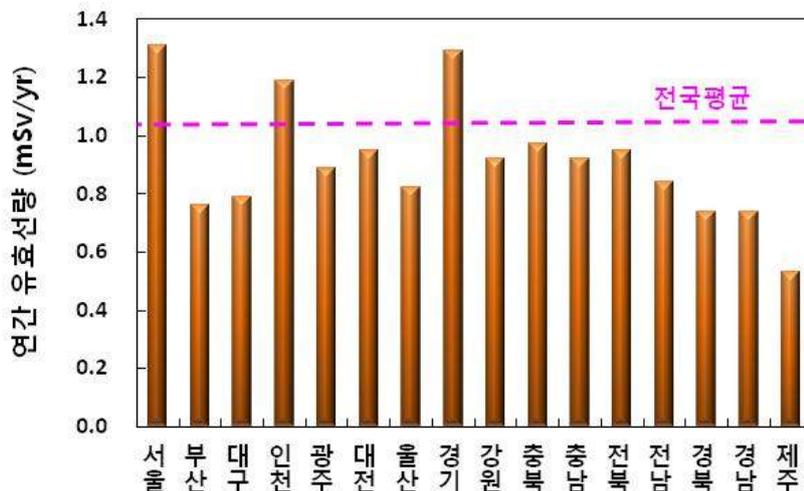
- 위도, 고도, 태양활동에 따라 우주방사선의 양이 조절됨
- 국내 평균 선량율: 0.0334  $\mu\text{Sv/h}$  (0.0327~0.0342  $\mu\text{Sv/h}$ )
- 연간 피폭선량: 0.248 mSv/year



# 지각방사선에 의한 외부피폭

## □ 국내 피폭 수준

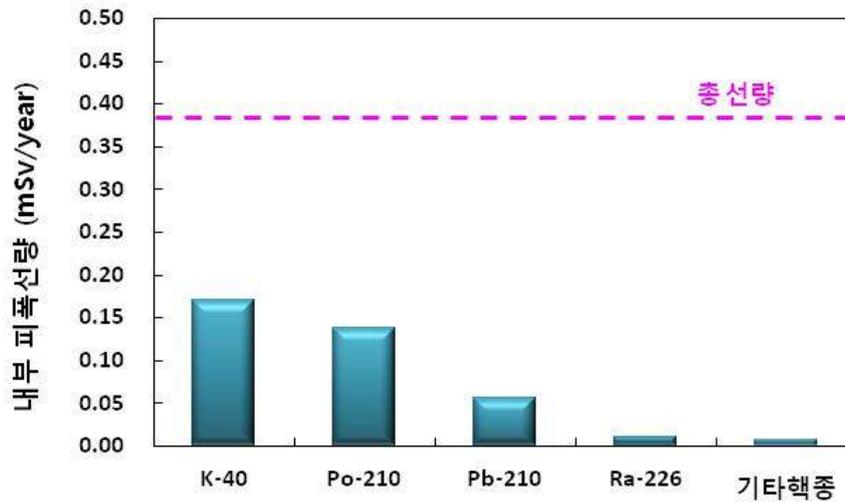
- 실외 평균: 0.108  $\mu\text{Gy/h}$  (0.02~0.5  $\mu\text{Gy/h}$ )
- 실내 평균: 0.214  $\mu\text{Gy/h}$  (0.126~0.347  $\mu\text{Gy/h}$ )
- 연간 피폭선량: 1.04 mSv/year



# 음식물 섭취에 의한 피폭

## □ 국내 피폭 수준

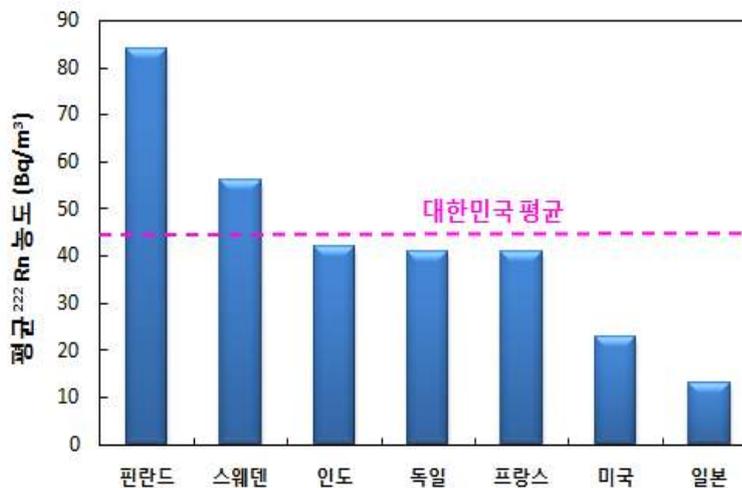
- 방사선원: 인체 내 방사능 물질 + 식품에 존재하는 방사능 물질
- 연간 방사선량: 0.38 mSv/year



# 라돈에 의한 피폭

## □ 국내 피폭 수준

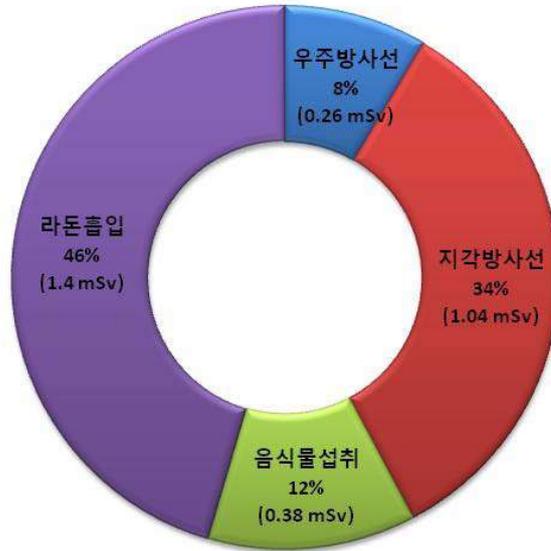
- 국내 평균 실내 라돈 농도: 45 Bq/m<sup>3</sup>
- 연간 피폭선량: 1.40 mSv/year



# 우리국민의 자연방사선 피폭 수준

## □ 우리국민의 연간 평균 자연방사선 피폭선량

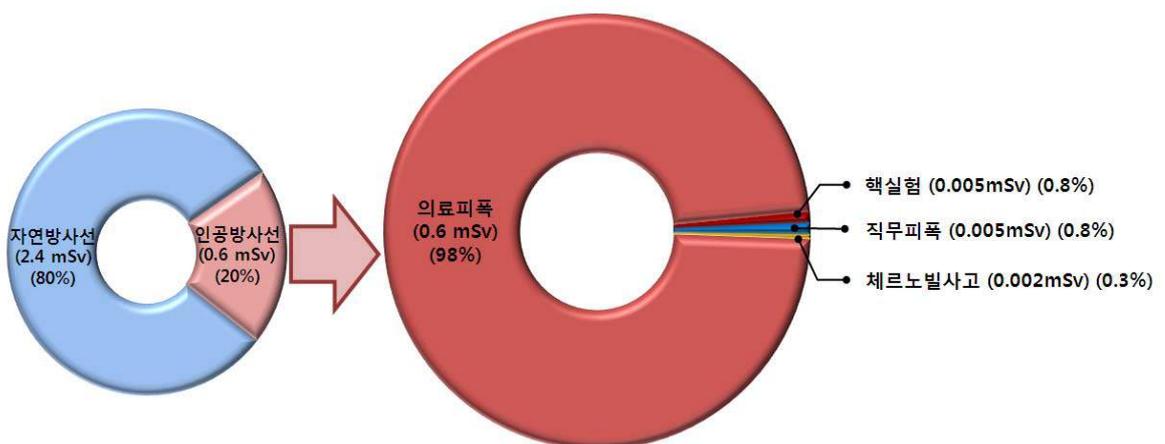
■ 국내 평균: 3.08 mSv/year



# 인공방사선 피폭

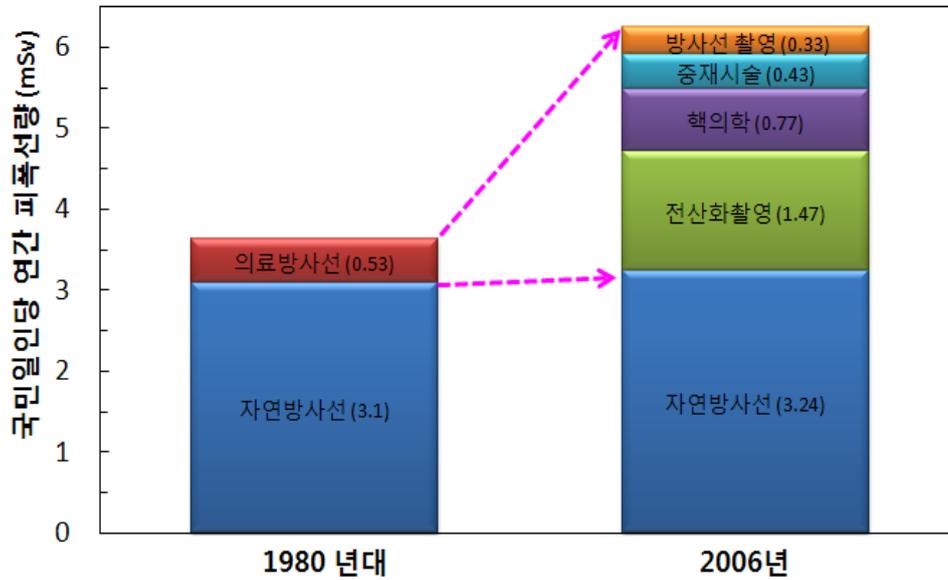
## □ 피폭원별 인공방사선피폭

- 의료방사선 피폭
- 방사성 낙진에 의한 피폭
- 원자력발전 시설로부터의 피폭



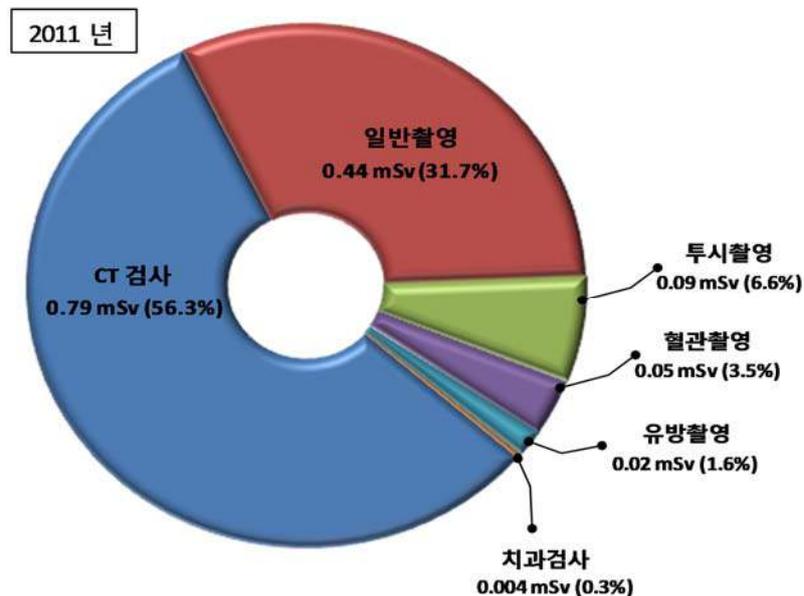
# 의료방사선 피폭

## 방사선원별 연간피폭 선량 (미국)



## 국내 진단용 방사선에 의한 피폭 수준

■ 연간 피폭선량: 0.93 mSv/year (2007년) → 1.4 mSv/year (2011년)



## □ 방사성 낙진에 의한 피폭

- 1960년대와 비교하여 1/100 수준
- 극히 미미 (0.0005 mSv/year ← 음식물 내 Cs-137에 의한 방사선량)

## □ 원자력발전 시설로부터의 피폭

- 인근주민 방사선량: < 0.01 mSv

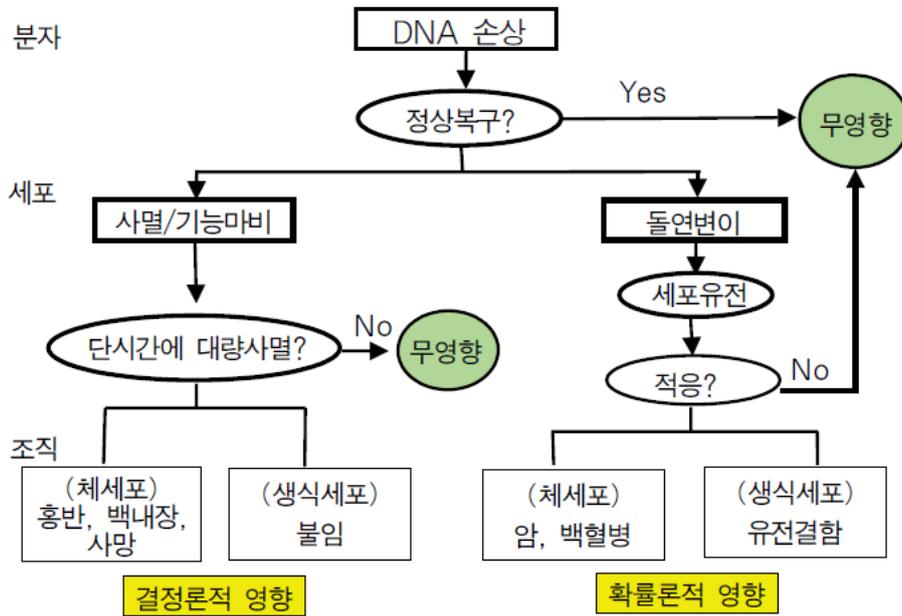
## □ 직무로 인한 피폭

- 원자력분야, 의료분야, 산업분야 등
- 평균: 1.48 mSv/year (비파괴검사: 2.6 mSv/y, 항공승무원: 2.6 mSv/y, 원자력분야: 1.0 mSv/y)
- 국민 일인당 선량: 0.002 mSv/year

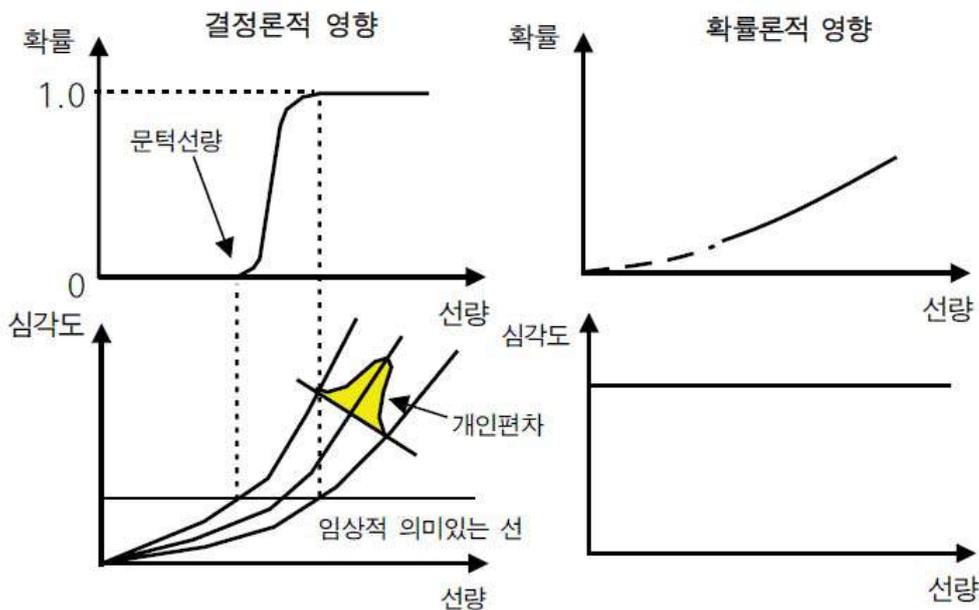
저선량 방사선이  
인체에 미치는 영향

# 결정론적 영향 및 확률론적 영향

## □ 결정론적 영향 및 확률론적 영향의 발현 개념



## □ 방사선량에 따른 발생 확률 및 심각도



# 결정적론 영향의 문턱선량

피폭조직	방사선 영향		문턱선량 (Gy)	비고
조혈조직 (적색골수)	혈액상 변화	백혈구	0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수가 감소</li> <li>• 피폭 후 30일까지 감소한 후 점차 회복</li> </ul>
		적혈구	1.0	
		혈소판	1.0	
생식선	불임	임시불임 (남성)	0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1회 급성피폭의 경우</li> </ul>
		임시불임 (여성)	6	
		영구불임 (남성)	0.6~1.5	
		영구불임 (여성)	3	
피부	방사선화상	일시적 탈모, 홍반	5	
		일시적 피부염, 수종	10	
		궤양, 궤사	25	
수정체	백내장	수정체흔탁	0.5~1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1회 급성피폭의 경우</li> <li>• 분할 피폭의 경우 문턱선량은 더 높음</li> </ul>
		백내장	1.5	
갑상선	갑상선 기능저하	성인	25~30	
		아동	1~10	

# 저선량 방사선에 의한 인체영향 모델

## □ 저선량의 정의

- 100 mSv 이하의 방사선량

## □ 100 mSv 이하의 저선량 방사선에 의한 인체영향

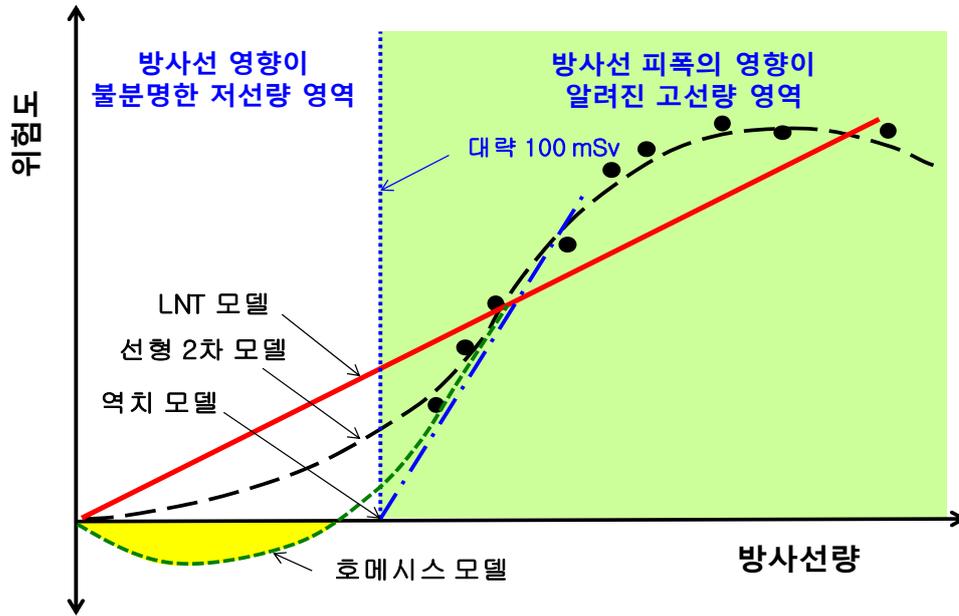
- 현재까지 진행된 대부분의 역학연구 결과에서는 100 mSv 이하에서는 방사선 피폭에 따른 직접적인 암 발생을 증명하지 못함

## □ 저선량 방사선에 의한 인체영향 모델

- BEIR: 문턱 없는 선형(LNT: linear- non-threshold) 모델
- 프랑스 과학아카데미: LNT 모델 지지할 수 없음
- ICRP: LNT 모델은 방사선 방호의 최적화에 필요, 저선량을 큰 인구 집단에 적용하여 암 발생율을 예측하는 것은 안 된다고 권고

→ LNT모델은 방사선 방호목적으로 가정한 것임을 인식하는 것이 중요

□ 선량반응 모델



# 피폭선량 한도의 의미

# 피폭 선량한도

## □ 피폭 선량한도

- 선량한도는 보편적 판단에서 용인 가능한 피폭 수준이며, 한도를 초과하면 위험하고 초과하지 않으면 안전하다는 경계선을 의미하는 것은 아님

## □ 선량한도 권고치의 변화

- 1928년: 1,000 mSv/year
- 1934년: 500 mSv/year
- 1951년: 150 mSv/year
- 1956년: 50 mSv/year
- 1991년: 20 mSv/year

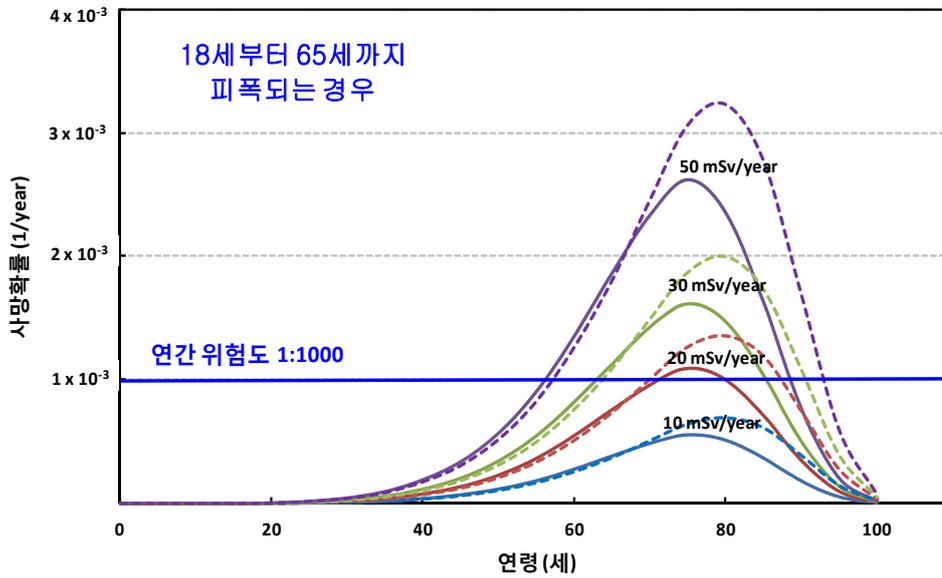
# 국제 방사선방호위원회 선량한도 권고치

구분		선량한도 (mSv/year)	
		작업자	일반인
유효 선량		20	1
등가선량	수정체	150	15
	피부	500	50
	손, 발	500	50

# 선량한도 설정방법

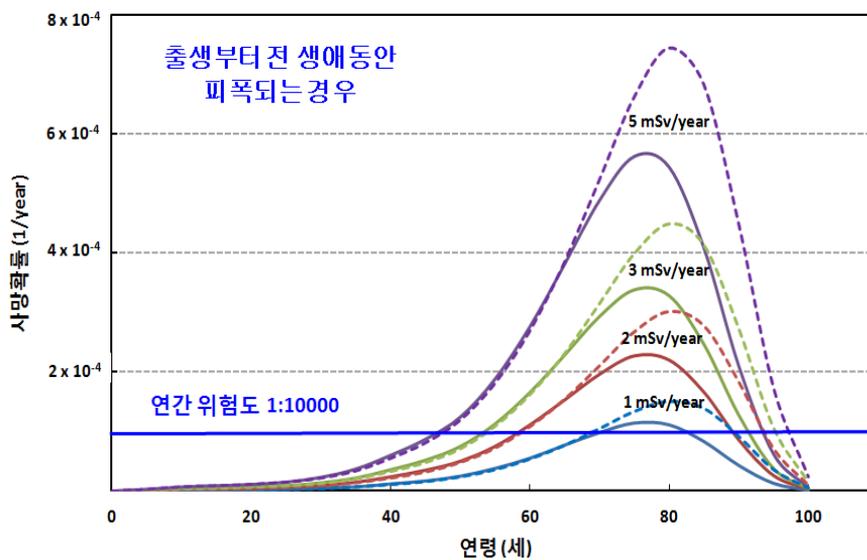
## □ 직업상 피폭 선량한도 설정

- 18세부터 퇴직까지 계속 피폭된다고 가정



## □ 일반인에 대한 피폭 선량한도 설정

- 0세부터 일생 동안 피폭된다고 가정



# 국내 선량한도

## □ 국내 원자력안전법에서 제시하는 선량한도

구분		방사선작업종사자	수시출입자 및 운반종사자	일반인
유효선량한도		연간 50 mS를 넘지 않는 범위에서 5년간 100 mSv	연간 12 mSv	연간 1 mSv
등가선량 한도	수정체	연간 150 mSv	연간 15 mSv	연간 15 mSv
	손·발 및 피부	연간 500 mSv	연간 50 mSv	연간 50 mSv

# 요 약

## 요 약

- 방사선은 지구, 우주, 인체 내 등 모든 곳에 존재하며, 우리는 일상에서 매일 방사선에 노출되고, 방사성물질을 흡입, 섭취하고 살아가고 있음
- 우리국민은 연간 대략 4.48 mSv 정도를 받고 있음
- 100 mSv 이하에서는 현재까지의 역학연구에서 직접적인 암 발생을 증명하지 못함
- 저선량에 대해 다양한 반응모델이 제시되어 왔는데, LNT모델은 방사선 방호목적으로 가정한 것임을 인식하는 것이 중요
- 선량한도는 보편적 판단에서 용인 가능한 피폭 수준이며, 위험과 안전의 경계선을 의미하지 않음
- 국내의 경우 국제기구 등에서 제시한 선량한도에 조화를 맞추어 선량한도 제시

**우리는 방사선의 바다에 살고 있다!**  
**감사합니다.**

### 3. 일반인 선량한도

김봉환(KAERI)

# 일반인 선량한도

김 봉 환



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

들어 가며,

## 방사선방호원칙

정당화 : 피폭상황의 변화는 이득이 커야 함

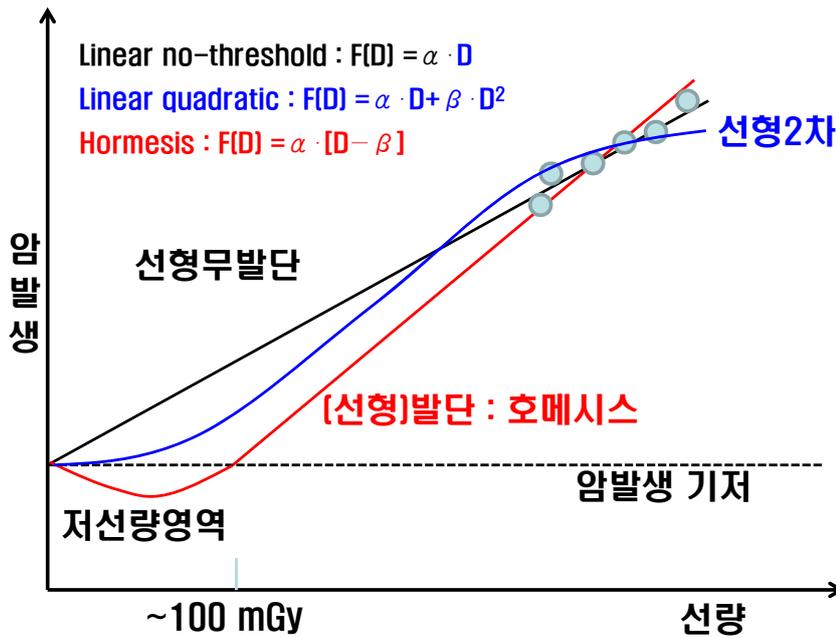
최적화 : 피폭가능성 및 피폭자 수와 크기의 최소화, 피폭선량의 불균형 해소 → 위해와 개인 방호자원간의 균형

선량한도 : 의료피폭과 자연방사선 피폭상황 혹은 비상피폭상황이 아닌 계획피폭상황에서의 개인피폭선량 제한

## 방사선방호기반

방사선위험은 선량에 비례 : Linear Non Threshold

# 선량 vs. 위험



"The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) take account of the latest biological and physical information and consolidate the additional guidance provided by ICRP since 1990. The changes to the scientific data are not substantial. ICRP has retained its fundamental hypothesis for the induction of stochastic effects of linearity of dose and effect without threshold and a dose and dose-rate effectiveness factor (DDREF) of 2 to derive nominal risk coefficients for low doses and low dose rates."

# ICRP 권고 선량한도의 변화

년도 (보고서)	1928	1934	1950	1954 1958 (ICRP1) 1962 (ICRP6)	1965 (ICRP9)	1977 (ICRP26)	1990 (ICRP90)	2007 (ICRP103)
용어	-	감내 선량	최대 허용선량	최대 허용선량	최대 허용선량	선량(당량) 한도	선량한도	선량한도
일반인	-	-	-	종사자의 1/10 (5 mSv/y)	종사자의 1/10 (5 mSv/y)	종사자의 1/10 (5 mSv/y)	종사자의 1/20 (1 mSv/y)	종사자의 1/20 (1 mSv/y)
종사자	-	~500 (mSv/y) 0.2 R/d	~150 (mSv/y) 0.3 R/w	~120 (mSv/y) 3 rem/13w	50 (mSv/y) 5 rem/y	50 (mSv/y) 5 rem/y	50 (mSv/y) & 100 mSv/5년 → 20 mSv/y	50 (mSv/y) & 100 mSv/5년 → 20 mSv/y

# 선량한도 적용의 오해

← 규제에 따른 법적 구속력

- 안전과 위험의 경계
- 선량저감화의 척도(수단)
- 방사선방호체계의 전체(목표)

→ 개인의 누적 선량 제한목적, 시설 설계목표, 작업제한 등

## 선량한도(계획피폭상황에 대한 권고)

한도 유형	종사자	일반인
[전신] 유효선량	20 mSv <sup>1)</sup> (5년 평균)	1 mSv <sup>4)</sup> (5년 평균)
[등가선량] 눈 수정체 <sup>2)</sup> 피부 <sup>3)</sup> 손, 발	150 mSv(20 mSv) <sup>2)</sup> 500 mSv 500 mSv	15 mSv(2 mSv) <sup>2)</sup> 50 mSv -

1) 어느 한 해 50 mSv 를 초과하면 안 됨

2) 2011년 변경

3) 1 cm<sup>2</sup> 평균

4) 5년 평균이 1 mSv를 초과하지 않고, 특수한 경우 어느 한 해 이를 초과할 수 있음

# 계획피폭상황의 선량한도 및 선량제약치(ICRP103)

	선량한도(연간)	선량제약치(연간)
<b>직무 피폭</b> -전신 -눈 수정체(등가선량) -피부 -손, 발 -임신여성	20 mSv 150 mSv(20 mSv) 500 mSv 500 mSv 1 mSv	≤ 20 mSv ≤ 150 mSv(≤ 20 mSv) ≤ 500 mSv ≤ 500 mSv ≤ 1 mSv
<b>일반인 피폭</b> -전신 -눈 수정체(등가선량) -피부	1 mSv 15 mSv 50 mSv	< 1 mSv
-방사성 폐기물 처분 -장수명 폐기물 처분 -장기간 피폭 -장수명핵종 장기 지속	-	≤ 0.3 mSv ≤ 0.3 mSv <~1 & ≤ ~0.3 mSv ≤ 0.1 mSv

# 선량한도 설정 배경/기준(ICRP)

- 산업사회에서 수용가능한 수준에서의 위험 : 수용불가능 vs. 감내가능
- 방사선방호
- 위험하지 않은 사회(생활)는 없음 : 생애사망률(미국, 2003)
  - .자동차사고(1/100), 익사사고(1/1000), 자전거사고(1/5000), 낙뢰사고(1/80000)
  - .연간 CT 촬영 : 62,000,000(미국, An increasing source of radiation exposure, NFIJ 357, 2299(2007) 의료영상 선량으로 인한 암발생 기여분 : 1 ~ 3 %  
(Risk of cancer for diagnostic X-rays : estimates for the UK and other 14 countries, Lancet 2004, 363, 345)
- 방사선을 사용하지 않는 비교적 안전한 산업사회에서의 평균 위험( $10^{-4}$ )의 10배를 수용할 수 있는 수준의 한계 (고위험군, 1977, ICRP26 : 선량한도 설정을 위한 참조위험) : **현재 산업사회의 위험은?**
- ▶ 위험도 산정을 위한 접근(방사선위험의 평가)
  - 1) 직무방사선피폭으로 유발되는 치명적 악성질병(암)의 발생위험이 높은 수준의 안전함이 있다고 여겨지는 타 산업분야의 직무상 치사율보다 낮아야 함
  - 2) 절대위험과 상대위험 ← 기저위험
  - 3) 수명손실 및 생활장애
  - 4) 다수기인(Multi-attributable) 생애사망위험 : 단일 위험요인 구별의 불가능

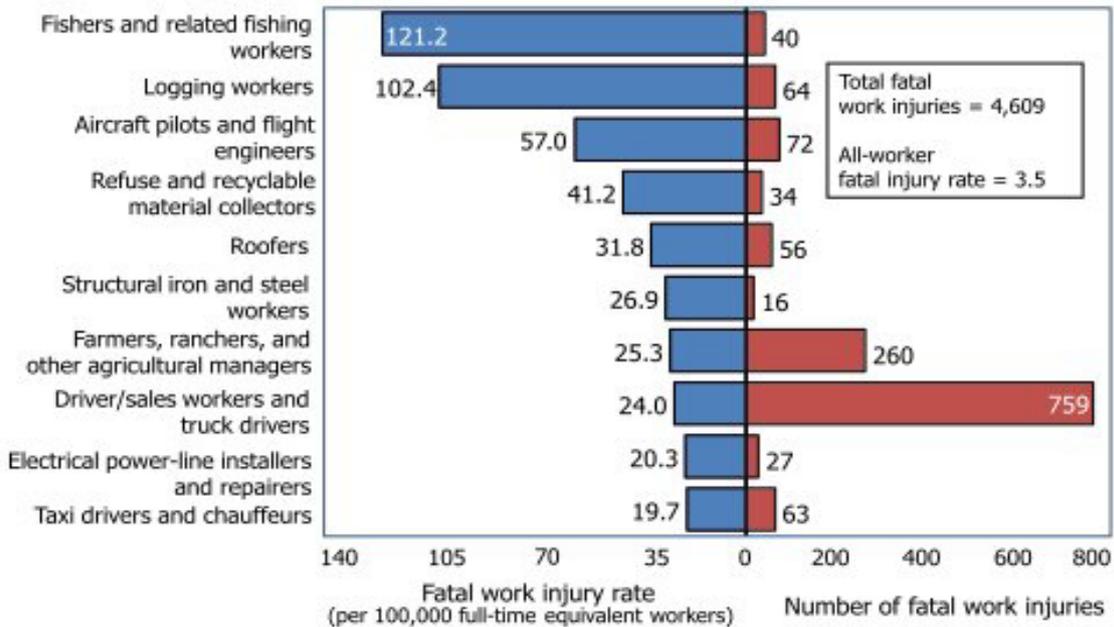
# 생애 사망위험(미국, 2003)

Disease and Accidental Causes of Deaths	Annual Deaths	Death Risk During One's Lifetime
Heart disease	652,486	1/5
<b>Cancer</b>	553,888	<b>1/7</b>
Stroke	150,074	1/24
Hospital Infections	99,000	1/38
Flu	59,664	1/63
<b>Car accidents</b>	44,757	<b>1/84</b>
Suicide	31,484	1/119
Accidental poisoning	19,456	1/193
MRSA (resistant bacteria)	19,000	1/197
Falls	17,229	1/218
<b>Drowning</b>	3,306	<b>1/1,134</b>
<b>Bike accident</b>	762	<b>1/4,919</b>
Air/space accident	742	1/5,051
Excessive cold	620	1/6,045
Sun/heat exposure	273	1/13,729
<b>Lightning</b>	47	<b>1/79,746</b>
Train crash	24	1/156,169
Fireworks	11	1/340,733

Sources: All accidental death information from National Safety Council. Disease death information from Centers for Disease Control and Prevention. Lifetime risk is calculated by dividing 2003 population (290,850,005) by the number of deaths, divided by 77.6, the life expectancy of a person born in 2003.(From Florida Museum of Natural History, University of Florida)

# 고위험 직업군 연간사망위험(미국, 2011)

Occupations with high fatal work injury rates, 2011\*



\*Data for 2011 are preliminary.  
NOTE: Fatal injury rates exclude workers under the age of 16 years, volunteers, and resident military. The number of fatal work injuries represents total published fatal injuries before the exclusions. For additional information on the fatal work injury rate methodology changes please see <http://www.bls.gov/iif/osh/ntrc/10.htm>.  
SOURCE: U.S. Bureau of Labor Statistics, U.S. Department of Labor, 2012.

## 선량한도 설정을 위한 방법/자료/도구 개요

	ICRP26(1977)	ICRP60(1990)	ICRP103(2007)
결정론적 영향	임상의학, 생물학 자료	임상의학, 생물학 자료	임상의학, 생물학 자료
확률적 영향	위험(Risk)개념 도입 : 절대위험 모델 타 산업(비교적 안전한) 평균위험과의 균형(1/1000)  역학자료(DS65외)	위험(Risk)개념 : 손해 (detriment), 상대위험 모델, 암사망 확률 : 증가 (치사성 암위험에 비치사성 암 가중, 치사암에 상대수명 손실 가중, 비치사암 생활장애 가중 치사암 확률 유전적 영향 :전세대),  역학자료(DS86외) : 2~3배 상승	위험(Risk)개념 :손해 (detriment), 상대/절대 위험모델 : 암발생 확률 : 증가 (상대수명손실 조정 암발생률에 치사율 및 생활장애 가중 확률, 유전적 영향 : 2세대 )  역학자료(DS02외) : 선량값 약간 높음(위험 10% 미만)
치사암 위험계수 (성인)	1%/Sv	4.8%/Sv (~5%/Sv)	4.1%/Sv (~4%/Sv)
총위험 계수(성인)	1.8%/Sv	5.6%/Sv	4.2%/Sv

# 위험도 [용어]

절대위험(AR) : 피폭군의 발생률  $\rightarrow 13/1000$

상대위험(RR) : 대조군 발생률과 피폭군 발생률과의 비율  $\rightarrow 13/10 = 1.3$

초과절대위험(EAR) : 대조군 발생률과의 차이  $\rightarrow 13/1000 - 10/1000 = 3/1000$

초과상대위험(ERR) : 피폭군 발생률과 대조군 발생률간의 차이의 비율

$$ERR = EAR / (\text{대조군 발생률}) = (3/1000) / (10/1000) = 0.3$$

$$ERR = RR - 1 = 1.3 - 1 = 0.3$$

단위선량당(초과 절대/상대)위험(EAR or ERR per Sv or Gy) :

EAR/Sv or EAR/Gy

ERR/Sv, or ERR/Gy

명목위험 : 대표집단 피폭연령, 성별  
평균 위험(위해조정)

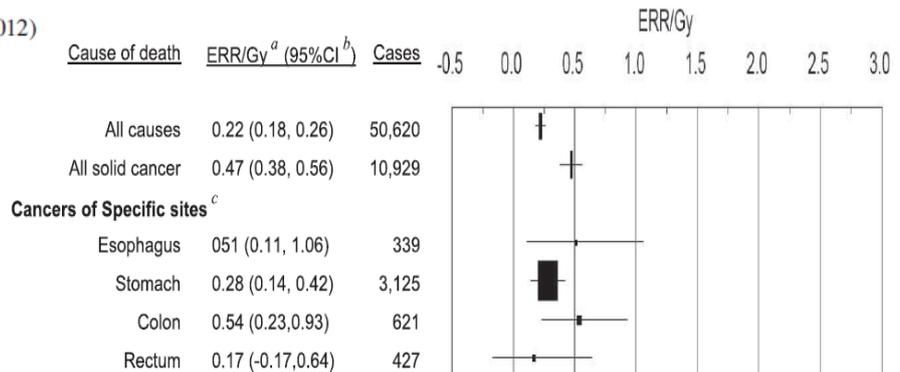
피폭군 : 1000인중 13인

대조군 : 1000인중 10인



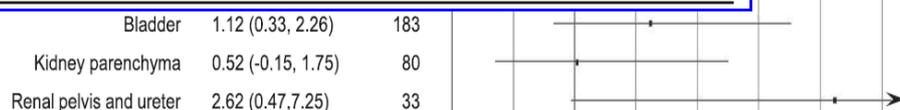
## Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950~2003 : An Overview of Cancer and Non Cancer Disease by K. Ozasa et al.

RADIATION RESEARCH 177, 229-243 (2012)



Observed Person-Years and Number of Deaths in the LSS Cohort Members with Known DS02 Doses, as of January 1, 2004, by Age at Exposure

Age at exposure (years)	Number of subjects	Observed person-years	Number of deaths <sup>a</sup>	Alive
0-9	17,833	910,347	2,200	88%
10-19	17,563	848,826	4,887	72%
20-29	10,891	494,021	5,178	52%
30-39	12,270	462,694	10,410	15%
40-49	13,504	365,240	13,397	1%
50+	14,550	213,079	14,548	0%
Total	86,611	3,294,210	50,620	42%



조직	계산방법	명목위험계수 (Sv당 10,000명당 증례)			치사를 맞을 삶의 질을 조정할 명목위험	위해	상대위해
		합계	치사	비치사			
식도	ICRP103 발생률	15.1	14.0	1.1	15.1	13.1	0.023
	ICRP103 사망률	29.1	27.0	2.1	29.0	2.25	0.037
	BEIR VII	14.1	13.1	1	14.1	12.2	0.019
	현재 ICRP60	26.7	24.8	1.9	26.6	23.2	0.032
	ICRP60 실제	31.6	30.0	1.6	31.5	24.3	0.033
위	ICRP103 발생률	79.1	65.5	13.5	77	67.7	0.118
	ICRP103 사망률	72	59.7	12.3	70.1	61.7	0.091
	BEIR VII	96.3	79.8	16.5	93.8	82.5	0.129
	현재 ICRP60	56.2	46.6	9.6	54.7	48.1	0.067
	ICRP60 실제	122.2	110.0	12.2	121	100.8	0.139
결장	ICRP103 발생률	65.4	31.3	34.2	49.4	47.9	0.083
	ICRP103 사망률	71.8	34.3	37.5	54.2	52.6	0.078
	BEIR VII	74.5	35.6	38.9	56.2	54.5	0.085
	현재 ICRP60	245.3	117.2	128.1	185.1	179.5	0.249
	ICRP60 실제	154.5	85.0	69.5	123.3	102.7	0.142
생식선 (유전적)	ICRP103 발생률	20.0	16	4	19.3	25.4	0.044
	ICRP103 사망률	20.0	16	4	19.3	25.4	0.038
	BEIR VII	20.0	16	4	19.3	25.4	0.04
	현재 ICRP60	20.0	16	4	19.3	25.4	0.035
	ICRP60 실제	100.0	100	0	100.0	133	0.183
합계	ICRP103 발생률	1715.4	414	1301	564.8	574.3	1
	ICRP103 사망률	1831.4	503	1328	675.4	675.8	1
	BEIR VII	1801.2	474	1327	639.6	640.4	1
	현재 ICRP60	1976.3	479	1497	709.2	719.9	1
	ICRP60 실제	1835.8	600	1236	709.3	725.3	1

## 명목위험계수와 조직가중치

### 암과 유전적 영향에 대한 위해조정 명목 위험계수(%/Sv)

피폭 집단	암		유전적 영향		계	
	ICRP103	ICRP60	ICRP103	ICRP60	ICRP103	ICRP60
전체	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
성인	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

치명적 위험 근사값 유지 : 5%/Sv

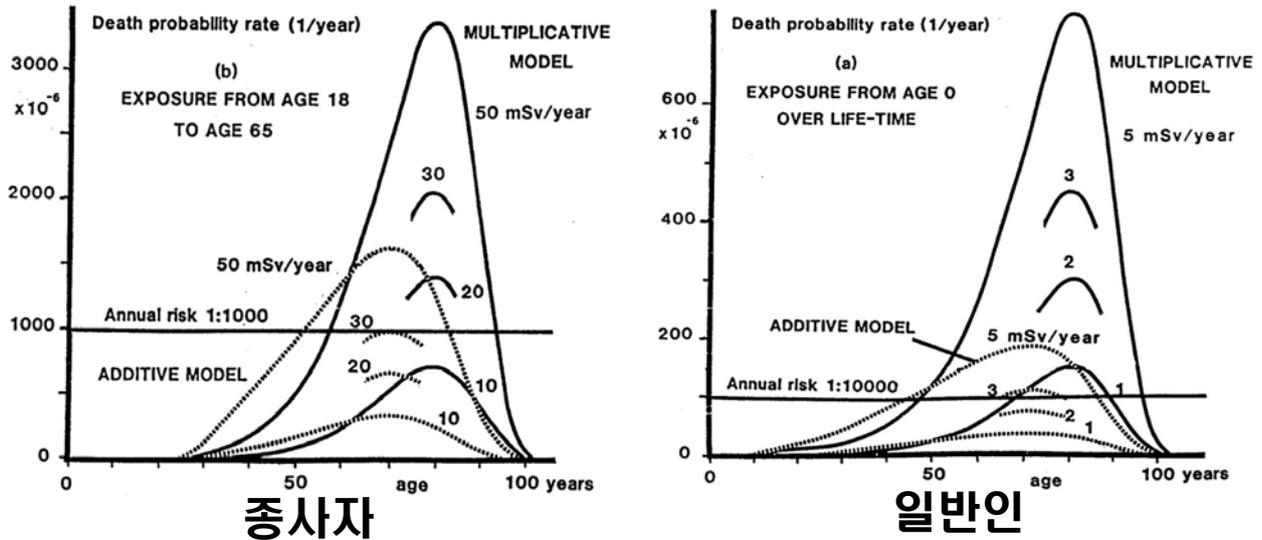
### 조직가중치

	$W_T$	$\sum W_T$
적색골수, 결장, 폐, 위, 유방, 잔여조직 <sup>1)</sup> (13개 조직의 평균선량에 명목 $W_T$ 적용)	0.12	0.72
생식선	0.08	0.08
방광, 식도, 간, 갑상선	0.04	0.16
뼈 표면, 뇌, 침샘, 피부	0.01	0.04

<sup>1)</sup> 잔여조직(14개 : 부신, 흉외기도 부위, 쓸개, 심장, 신장, 림프절, 근육, 구강점막, 췌장, 전립선, 소장, 비장, 흉선, 자궁/자궁경부)

# 선량한도 결정(ICRP60)

## 1. 위험도 접근 : 방사선유발 연당 암사망확률 분포



## 2. 현상적 접근 : 일반인 선량한도 → 자연방사선량 변동폭 (~1 mSv/y)

### 일반인 선량한도(1 mSv)의 특징

- 의도하지 않은 피폭 : 동의 필요(사회적 수용성, 원자력시설 운영에 따른 추가 피폭 [기준 : < 0.3 mSv/y], 원전, 가속기, 저장고 등)
- 이득이 없음
- 불특정 다수 : 관리대상에서 제외(피폭선량 관리, 건강검진) 대표인 개념(집단내 비교적/상대적 고피폭집단)
- 유아, 소아 포함 : 방사선위험 민감도
- 비상피폭상황 제외 : 비상 시 동의 하에 종사자 전환 가능
- 라돈 등 자연방사선피폭 제외 : ~ 3 mSv
- 의료 선량(진단, 치료) 제외
- 연령 폭이 넓음(피폭기간이 김)
- 선원향 관리가 거의 유일한 관리방법

▶ 종사자 선량한도의 1/20

# NCRP의 피폭선량 제한 권고

- NCRP statement No.10, Dec., 2004 (to NCRP116, Limitation of Exposure to Ionizing Radiation, 1993)

## 1) 선량한도 권고

- 계속 혹은 잦은 피폭 : 1 mSv/y
- 일시 피폭이 1 mSv/y를 초과할 경우 5 mSv/y 까지 허용(정당화, 독립적)

## 2) 선량한도 예외

- 드물게 발생하는 피폭(전제 : 개인, 사회에 명백한 이익)
- 사업장내 방사성치료를 받는 환자 동료로 인한 피폭 : 1 ~ 5 mSv/y
- 임신하지 않은 성인으로, 방사성치료를 받은 가족으로 인한 피폭 : 5(→50) mSv/y  
(종사자에 준하는 방사선안전교육 및 피폭관리 필요)
- 밀항자 검색 화물컨테이너 검색기, 국경 보안검색시스템 : < 5 mSv (최대)

## 3) 선원관리

- 단일 선원 혹은 그 조합에 의한 피폭이 0.25 mSv/y을 초과할 우려 : 1 mSv/y
- 시설차폐 기준 : 비관리구역에서 일반인의 접근에 의한 피폭(병원, 치과, 동물병원 등의 방사선원 차폐설계 기준 → 1 mSv/y)
- 엑스선 보안검색기 : < 0.25 mSv/y  
.단일 조사(scan) : 0.1 μSv, 제한적으로 10 μSv

# 연간 선량한도 : 독일(from European Nuclear Society)

	(mSv)	
Tissue or Organ	종사자	일반인
Effective Dose	20	1
Organ Dose :		
Bone marrow (red), gonads, uterus	50	
Adrenals, bladder, brain, breast, lens of the eye, small intestine, upper large intestine, kidney, liver, lung, muscle, oesophagus, pancreas, spleen, stomach, thymus	150	15
Bone surface, thyroid	300	-
Ankles, feet, forearms, hands, skin	500	50

## 원전 방출물에 따른 연간 선량기준 : 독일

	(mSv)
Effective dose and dose for gonads, uterus, bone marrow (red)	0.4
Dose for adrenals, bladder, brain, breast, small intestine, upper large intestine, kidney, liver, lung, muscle, oesophagus, pancreas, spleen, stomach, thymus, thyroid	0.9
Dose for bone surface, skin	1.8

## 연간 선량한도 등: 미국(규제기준, WEB page of Health Physics Society)

Annual Radiation Dose Limits (or Regulatory Level)	Agency
Radiation Worker : 50 mSv	(NRC, "occupationally" exposed)
General Public : 1 mSv	(NRC, member of the public)
General Public : 0.25 mSv	(NRC, decommissioning and decontamination all pathways)
General Public : 0.10 mSv	(EPA, air pathway)
General Public : 0.04 mSv	(EPA, drinking water pathway)

### 국내 원자력시설 연간 선량기준 (원안위고시 2014-34호 제16조)

구분	형태	유효선량 (mSv)	피부 등가선량 (mSv)	장기 등가선량 (mSv)
시설 설계기준	기체	0.05	0.15	-
	액체	0.03	-	0.1
	입자등*	-	-	0.15
부지경계 (다수)	-	0.25	-	0.75

\*방사성입자, <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, 방사성옥소

## 국내 원전 방사성유출물에 의한 주민선량평가

(2012년 감시결과 : 한국원자력안전기술원 보고서)

	유효선량 기준(mSv/y)	평가결과 <sup>1)</sup> (mSv/y)	비율 (%)	갑상선선량 기준(mSv/y)	평가결과 <sup>1)</sup> (mSv/y)	비율 (%)
고리	0.25	4.18x10 <sup>-3</sup>	1.7	0.75	4.01x10 <sup>-3</sup>	0.5
월성		2.24x10 <sup>-2</sup>	8.9		2.27x10 <sup>-2</sup>	3.0
영광		1.61x10 <sup>-2</sup>	6.4		1.61x10 <sup>-2</sup>	2.2
울진		1.57x10 <sup>-2</sup>	6.3		1.61x10 <sup>-2</sup>	2.2

<sup>1)</sup> 가상의 대표주민이 최대 피폭하는 조건을 가정하여 보수적으로 평가함

## 선량한도 설정의 문제(어려움) : 작업종사자, ICRP60

- 목적 : 방호최적화에 의해 평균피폭선량을 낮게 유지 → 집단선량 최소화가 이루어져도 고선량피폭 작업자와 무관(개인적)
- 타 산업과의 위험도비교
  - . 위험도는 평균값, 사고치사율 비교(산업안전사고), 직업질환위험, 수명손실차이 [산업계 평균 손실 35세, ICRP45(1985) vs. 방사선위험에 따른 손실 15년]
  - . 방사선위험의 발현시기(기타 요인에 의한 상승효과 혹은 기여분)
- 적절하지 않은 일반인 선량한도
  - . 위험원의 다양성 : 방사선 외적 요인(기저위험)
  - . 총 위험에 대한 방사선위험 기여분의 임의적 배분 문제 : 미국 발암화학물질규제 [ $>4 \times 10^{-3}$ ] → 비용불문하고 규제 (ICRP26:1977), 이하 위험은 규제 불필요
  - . 선량한도는 개인중심적 vs. 규제는 선원중심적
    - 상대모델(multiplicative model), 1 mSv/y, DDREF=2 사용할 경우, 기인성(attributable)생애치사율 :  $4 \times 10^{-3}$ (과대평가)
    - 1 mSv 선량한도는 모든 규제대상의 행위에서 발생하는 총 선량
  - . 자연방사선피폭(background radiation) 위험(연간 유효선량의 비로 평가)과 비교
    - 그 크기가 작아서 정당화되는 것이 아니라, 피폭자 개인의 위험이 뚜렷하지 않음을 의미(자연방사선량에 의한 위험은 없음 : UNSCEAR 보고서)

## 선량한도 피폭자 위험도 추정, 역학조사 분별력

### 생애 명목위험계수를 이용한 연간 일반인 선량한도의 위험도 (ICRP103)

- 명목위험계수 : 574.3/10,000인 per Sv (5.7%/Sv)
- 1 mSv/y 피폭에 의한 위험 :  $5.7 \times 10^{-5}$
- 1 mSv/y 생애피폭에 의한 위험 :  $(5.7 \times 10^{-5})/y \times 80y = 0.4\%$  ( $4.56 \times 10^{-3}$ )
- 생애 자연방사선피폭선량에 의한 위험
  - . 생애선량 : 약 3 mSv/y x 80y = 240 mSv
  - . 생애위험 : 0.24 Sv x 5%/Sv = 1.2%

자연 암 치사율 : 20%

### 역학조사 기반 방사선유발 암위험도 평가의 어려움

- 10 mSv 피폭자 위험계수 유도 근거 : 약 6인/10,000인 (5.7%/Sv)
- 자연 암 치사자 : 2,000인/10,000인 (20%)
- 자연 암치사자 불확도 분포(>1%) 가정 시 : 분별추적 불가 → < 0.3% (6/2,000)



1. 명목위험계수가 실재가 아니라면, 왜 방사선방호표준이 필요?
  2. 명목위험계수가 실재라면,  
왜 방사선피폭에 따른 기인성 치사율로 판단하지 않는가?
- ▶ 방사선방호목적으로 보건영향의 위험은 계획된 피폭상황에 대해 전망적으로 추론될 수 있을 뿐임
  - ▶ 실제 보건영향은 단지 위해도 기반 값에 의한 피폭상황에 기인될 수 없음(확률적 속성 : **현실[실재]이 아님**)

## 마치면서,



선량한도 설정은 과학적 근거로 유도할 수 없으며,  
주관적으로 결정될 수 밖에 없음  
(사회적 수용성, 목적지향성 : 방호방법의 보완)

→일반인 선량한도 : 근거 취약

→선량한도 적용은 적극적 방사선방호 기법

## 4. 원전 주변주민에 대한 방사선영향

금동권(KAERI)

# 원전 주변 주민에 대한 방사선 영향

금 동 권

한국원자력연구원

## 목 차

- 원자력 발전소 방사성 물질 배출관리
- 원자력 발전소 주변 방사선/능 환경 감시
- 원자력 발전소 주변 주민 방사선 영향
- 종합 결론

## 원자력발전소 방사성 물질 배출관리

### □ 배 출

방사성물질 또는 그로 인하여 오염된 물질로서 원자력이용 시설에서 정상운영 중에 발생한 액체 또는 기체 상태의 방사성물질 등을 원자력안전위원회가 정하는 제한값 이내에서 배수시설 또는 배기시설을 통하여 계획적이고 통제된 상태에서 외부로 내보는 것.

☞ 국민의 건강 및 환경상의 위해 방지가 목적

## 원자력발전소 방사성 물질 배출관리

### □ 배출관리의 기본 요소

- 환경배출량의 최소화 및 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)
- 환경배출량에 대한 정확한 평가
- 감시·통제된 상태에서 계획적으로 배출
- 배출경로 (배수구 및 배기구) 이외의 유출경로 통제
- 관련 요건에 대한 부합성의 입증 (선원감시 및 환경감시)
- 배출특성 및 환경조건 변화 여부 재검토

# 원자력발전소 방사성 물질 배출관리

## □ 배출관리 관련 법 및 규칙

종류	내용
원자력안전법	제11조(건설허가기준), 제21조(운영허가기준) 3. 발전용 원자로 및 관계시설의 건설/운영으로 인하여 발생하는 방사성물질로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령령으로 정하는 기준에 적합할 것
원자력안전법 시행령	제35조(경기검사) 제174조(환경상의 위해방지) 1. 법 21조 제1호부터 제3호까지의 규정에 따른 기술기준에 맞게 운영되고 있을 것 1. 시설에서 배출되는 액체 및 기체 상태의 방사성물질의 농도가 위원회가 정하는 기준에 맞을 것 2. 그 밖에 방사선 위해 방지를 위하여 위원회가 정하는 기준에 맞을 것
방사선안전관리 등의 기술 기준에 관한 규칙	제10조(처리 및 배출) 3. 핵연료물질 등을 처리 및 배출함에 있어 기체상의 방사성폐기물은... 4. 핵연료물질 등을 처리 및 배출함에 있어 액체상의 방사성폐기물은...
	제20조(계측 및 제어장치) ① 계측장치 설치 7. 배기통의 출구 또는 이에 근접하는 곳에서의 배기중 방사성물질의 농도 8. 배수구 또는 이에 근접하는 곳에서의 배기중 방사성물질의 농도
	제32조(방사성폐기물의 처리 및 저장시설) 1. 기체 및 액체 방사성폐기물 처리 시설은 다음 각목의 기준에 적합할 것. 라. 원자로시설에서 발생하는 액체 또는 기체 방사성폐기물은 배기구 또는 배기구외의 곳에서 방사성폐기물이 배출되지 않도록 할 것.
	제38조(경보장치 등) ① 원자로 시설에는 .... 운전예 현저한 지장을 미칠 우려가 발생한 때 ... 방사선량들이 현저하게 상승할 때 이들을 검출하여 자동적으로 경보하는 장치를 설치하여야 한다.
제66조(방사성폐기물관리계획)	① 방사성폐기물관리계획을 수립하여 방사성폐기물 및 유출물의 발생을 최소화, 환경에 미치는 영향을 가능한 낮게 유지 ④ 방사성폐기물의 배출에 관한 요건을 방사선안전규칙 제10조에 위임
원자력안전위원회 고시 제2014-34호	제6조(배출관리기준) ① .... 원자력안전위원회가 정하는 제한값이란 다음과 같다. 1. ~ 5. ② 배출관리 기준을 적용함에 있어 배기중 또는 배수중 방사성핵종의 허용농도는 1주간의 평균치로 한다. 다만, 부득이한 경우에는 3개월간의 평균치로 같음할 수 있다. ①영 제174조제1호로서 원자력안전위원회가 정하는 기준이란 기체 및 액체상태의 방사성물질의 제한구역 경계에서의 농도로서 별표3의 제1란의 방사성핵종에 대한 제5란 및 8란에서 정하는 농도를 말한다. ②영제174조제2호에서 그 밖의 방사선위해 방지를 위하여 원자력안전위원회가 정하는 기준이란 다음 각 호와 같다. 1. 해당 시설의 설계에 적용할 기준 2. 동일부지 내에 다수의 원자력관계시설을 운영하는 경우

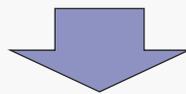
# 원자력발전소 방사성 물질 배출관리

## □ 국내 원전의 방사성물질 배출현황

최근 10년간 국내원전 방사성물질 연도별 배출량 (TBq)

구 분	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
액체배출물	182.9	168.4	192.9	262.0	272.0	316.1	295.1	257.0	307.5	176.6
기체배출물	489.5	443.7	470.7	452.6	433.4	329.5	252.3	229.7	210.2	203.0

10년 동안 액체방사능: 2,431 TBq  
기체방사능: 3,515 TBq



10년간 방출량이 삼중수소 형태로 한해 동안 일시적으로 방출되었다고 가정하여도 원전 주변 주민이 1년 동안 받는 최대 방사선량은 유아기준으로 약 0.016mSv 수준

# 원자력발전소 방사성 물질 배출관리

## □ 주요 국가별 액체 방사성물질 배출량 비교

국가	연간 배출방사능(TBq)	운영호기	호기당 배출방사능(TBq)
한국	177	23	7.7
영국	2,600	16	162.5
캐나다	1,250	19	65.8
아르헨티나	950	2	475.0
프랑스	850	58	14.7
일본	400	50	8.0
스페인	200	7	28.6
독일	210	9	23.2
미국	1,400	100	14.0

자료 출처 : UNSCEAR(2008)

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 환경감시 목적

- 발전소 운영으로 인해 주민들이 받게 되는 **방사선량이 연간 선량한도 이내로 충분히 낮게 유지되는지 확인**
- **장기적 방사능 축적 여부 확인**
- 예기치 않은 고장 또는 오작동으로 인해 원전으로부터 방사선(능)이 주변 환경으로 **방출되는 사고를 조기에 감지함**으로써 주민의 건강과 환경 안전을 확보

## □ 법적 근거

- 원자력안전위원회고시 제2014호-12호: 원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향 평가에 관한 규정

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 조사 대상 및 방법

조사 대상	빈도 (회/년)	시료채취 지점수					측정수단/항목	조사 목적
		고리	한빛	월성	한울	계		
집 적 선량	4	41	26	37	35	139	열형광선량계	외부피폭평가
감마 선량률	연속	16	10	16	13	55	환경방사선감시기	환경방사선의 단기적 변동파악, 외부피폭
미립자(공기)	52	10	10	10	10	40	전베타, 감마	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
육소(공기)	52	10	10	10	10	40	<sup>131</sup> I	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
수분(공기)	24	0	0	10	0	10	<sup>3</sup> H	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
이산화탄소(공기)	12	0	0	3	0	3	<sup>14</sup> C	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
식수	4	4	2	4	3	13	감마, <sup>3</sup> H	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
지하수	4	3	2	4	3	12	감마, <sup>3</sup> H	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
지표수	12	4	2	5	3	14	감마, <sup>3</sup> H	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
빗물	12	5	4	8	5	22	감마, <sup>3</sup> H, 전베타	방사능 준위 파악, 내부피폭평가
표층토양	2	5	5	4	6	20	감마, <sup>90</sup> Sr	방사능 축적 경향 파악
하천토양	4	5	2	3	3	13	감마	방사능 축적 경향 파악
곡류	1	3	4	6	4	17	감마, <sup>90</sup> Sr, ( <sup>14</sup> C, <sup>3</sup> H)	내부피폭평가
채소·과일	1~2	8	8	5	4	25	감마, <sup>90</sup> Sr, ( <sup>14</sup> C, <sup>3</sup> H)	내부피폭평가
우유	12	2	2	2	1	7	감마, <sup>90</sup> Sr, ( <sup>14</sup> C, <sup>3</sup> H)	내부피폭평가
육류	2	2	2	2	2	8	감마, ( <sup>14</sup> C, <sup>3</sup> H)	내부피폭평가
술·음	2	5	5	5	4	18	감마, <sup>90</sup> Sr	방사능 축적 경향 파악
숙	2	2	3	3	2	9	감마	방사능 축적 경향 파악
해수	12	13	4	6	4	27	감마, <sup>3</sup> H, 전베타, <sup>90</sup> Sr	방사능 준위 파악
해저퇴적물	2	11	4	8	3	26	감마, <sup>90</sup> Sr	방사능 축적 경향 파악
어류	2	6	5	8	3	22	감마, <sup>90</sup> Sr	내부피폭평가
패류	2	6	4	7	3	20	감마, <sup>90</sup> Sr	내부피폭평가
해조류	2	8	4	7	3	22	감마, <sup>90</sup> Sr	내부피폭평가
저서생물	2	7	3	5	3	18	감마	방사능 축적 경향 파악

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 국내 원전 소외 환경 방사선/능 조사 지점



# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 조사 결과 (방사선)

최근 10년간(2004~2013년) 공간감마선량율 ( $\mu\text{R/h}$ )

구분 \ 원 전	고 리	한 빛	월 성	한 울
부지내부	9.5~11.9	9.6~11.1	8.8~11.9	10.5~13.3
부지외부 (비교지역 포함)	8.7~12.7	8.8~14.5	8.3~12.0	10.5~13.9

최근 10년간(2004~2013년) 공간집적선량 ( $\mu\text{Gy/분기}$ )

구분 \ 원 전	고 리	한 빛	월 성	한 울
부지내부	99~214	152~208	104~192	147~254
부지외부 (비교지역 포함)	97~233	167~298	103~189	155~270

비교 지역과 유의할 만 차이 없음!

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 조사 결과 (공기시료)

최근 10년간(2004~2013년) 공기 미립자 전베타 방사능 농도 ( $\text{mBq/m}^3$ )

구분 \ 원 전	고 리	한 빛	월 성	한 울
부지내부	0.76~1.0	0.98~1.51	0.67~1.14	0.53~1.17
부지외부 (비교지역 포함)	0.65~1.13	1.01~1.66	0.65~1.13	0.26~1.12

핵종	공기 중 연평균	최대방사선량
$^3\text{H}$	소내: $0.405\sim 15.2\text{Bq/m}^3$ (최대: 폐기물 저장고 $15.2\text{Bq/m}^3$ ) 소외: $0.02\sim 2.77\text{Bq/m}^3$	$0.002\text{mSv}$ (작업자)
$^{14}\text{C}$	$0.23\sim 0.34\text{Bq/g-C}$ (최대: 상봉지점 $0.34\text{Bq/g-C}$ )	$0.0000034\text{mSv}$ (주민)

공기 중 인공 감마동위원소는 일반적으로 검출 되지 않음 (간헐적으로 검출하한치 수준의 방사성요오드 검출 기록 있음)

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 조사 결과 (육상 물시료)

최근 10년간(2004~2013년) 육상 물시료 중 삼중수소 방사능 농도 (Bq/L)

구분	원 전	고 리	한 빛	월 성	한 울
빗물	부지내부	5.42~57.9	6.66~45.8	16.2~ <b>490</b>	1.73~19.4
	부지외부 (비교지역 포함)	<1.74~3.76	<1.99~3.65	1.18~143	<0.98~2.61
지표수	부지외부 (비교지역 포함)	<1.83~3.33	<1.26~3.46	<1.03~15.6	<1.19
식수	부지외부 (비교지역 포함)	<1.84	<2.48	<1.01~16.9	<1.86
지하수	부지외부 (비교지역 포함)	<1.79	<2.49	<1.03~ <b>17.0</b>	<1.89

식수 사용시 연간 0.00022mSv

지표수에서 방사성요오드(<sup>131</sup>I) 간헐적으로 검출됨: 치료용 방사성요오드 복용 환자의 배설물이 기원으로 추정

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 조사 결과 (토양시료)

대기 핵실험 잔유물

표층토양 중 <sup>137</sup>Cs 농도 (Bq/kg-dry)

KINS(2013): <0.69~19.0Bq/kg-dry

시기 지역	'09년	'10년	'11년	'12년	'13년
고리주변	<0.139~8.43	<0.149~6.62	<0.166~7.97	<0.300~4.30	<0.311~3.39
한빛주변	<0.387~13.0	<0.206~10.0	<0.600~4.26	0.388~4.28	0.267~5.89
월성주변	<0.278~3.32	<0.289~3.11	<0.334~4.85	<0.333~4.18	<0.327~2.51
한울주변	<0.234~7.42	<0.266~ <b>14.7</b>	<0.389~8.63	<0.293~1.72	<0.369~5.36

표층토양 중 <sup>90</sup>Sr 농도 (Bq/kg-dry)

시기 지역	'09년	'10년	'11년	'12년	'13년
고리주변	0.151~1.65	0.721~2.36	0.966~2.11	0.145~0.275	0.112~0.163
한빛주변	<0.0954~0.351	<0.0893~0.479	0.143~0.198	0.217~0.963	0.127~0.573
월성주변	0.519~1.82	<0.180~0.969	0.809~ <b>2.37</b>	0.702~1.96	0.651~1.51
한울주변	0.211~1.07	0.714~1.09	0.397~1.89	0.230~0.885	0.262~0.683

하천 토양 중 <sup>131</sup>I 검출 (최대 2.11Bq/kg, 광주): 치료용 <sup>131</sup>I 으로 추정

# 원자력발전소 주변 방사선/능 환경감시

## □ 조사 결과 (해양시료)

최근 10년간(2004~2013년) 해수 중  $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  및  $^{131}\text{I}$  방사능 농도

	고 리	한 빛	월 성	한 울
$^3\text{H}$ (비교지점)	<1.28 ~ 3.52Bq/L (송정: <2.11)	2.19~ 14.4Bq/L (함평: <2.08~4.63)	1.11~90.0Bq/L (참조: 배출관리기준 40,000) (구룡포: <1.03~1.45)	<0.928~5.85Bq/L (광진: <1.17)

$^{137}\text{Cs}$	최대값: 3.35mBq/L 한빛 원전 취수구 (2004) 비교: 우리나라 주변해역 22개 지점 표층수 내 농도 범위: <1.16~2.07 (KINS, 2013)			
-------------------	--	--	--	--

$^{90}\text{Sr}$	최대값: 2.03mBq/L (한빛 원전 주변 함평)(2013) 비교: 우리나라 주변해역 16개 지점 표층수 내 농도 범위: 0.61~0.97 (KINS, 2013)			
------------------	--	--	--	--

$^{131}\text{I}$	해조류의 농도: 고리 원전 내부에서 최대 2.06Bq/kg-fresh, 원거리인 송정에서 8.97Bq/kg-fresh, 더 원거리인 수영만 해역 감태에서 43.9Bq/kg-fresh: <b>원전에서 멀수록 크다는 것은 기원이 원전이 아니라는 반증</b> 가상계산: 수영만 감태 연간 지속 섭취시 방사선량 0.0036mSv (일반인의 연간 한도 0.36% 수준)			
------------------	--	--	--	--

# 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향

## □ 소외 주민 방사선량 평가 목적

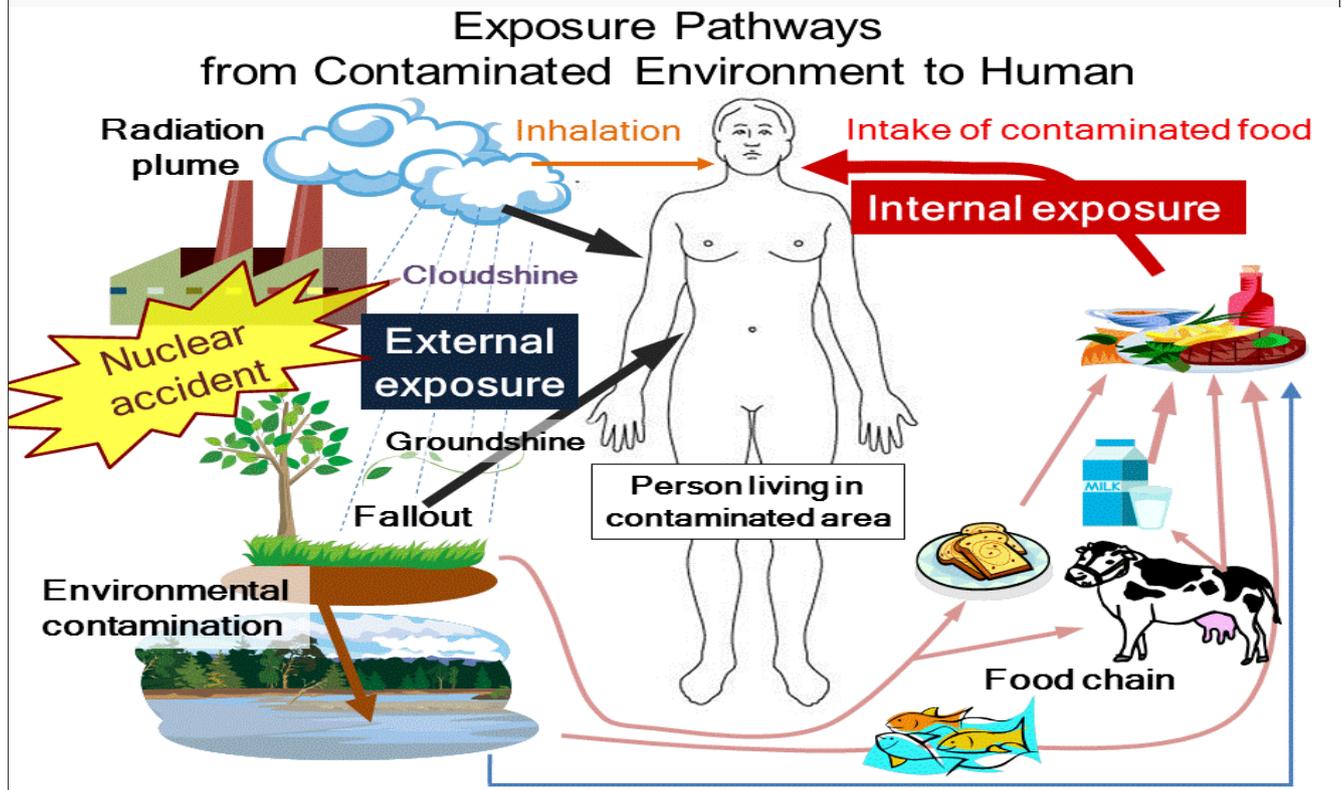
- 발전소 운영으로 인해 주민들이 받게 되는 방사선량이 연간 선량한도 이내로 충분히 낮게 유지되는지 확인
- 순수한 원전의 영향 평가 필요 (방사능 배출량 기준으로 평가): 환경감시로 인한 선량 평가 보완

## □ 소외 주민 방사선량 평가 법적 근거

- 원자력안전위원회고시 제2014호-12호: 원자력이용시설 주변의 방사선환경조사 및 방사선환경영향 평가에 관한 규정

# 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향

## □ 주민 방사선량 평가 방법-피폭 경로



# 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향

## □ 주민 방사선량 평가 - 운영 기준치

국내원전의 주민선량 기준치, 원전 적용 피폭경로 및 핵종

항목	소항목	기준치	원전적용 피폭경로 및 핵종
호기별 설계 목표치	기체 배출물		
	감마선에 의한 공기의 흡수선량	0.1 mGy/yr	- 방사능운 (불활성기체)
	베타선에 의한 공기의 흡수선량	0.2 mGy/yr	- 방사능운(불활성기체)
	외부피폭에 의한 유효선량	0.05 mSv/yr	- 방사능운 (불활성기체) - 지표면 침적(입자성)
	외부피폭에 의한 피부등가선량	0.15 mSv/yr	- 방사능운 (불활성기체) - 지표면 침적(입자성)
액체 배출물	입자성 방사성물질, H-3, C-14 및 방사성 옥소에 의한 인체장기 등가선량	0.15 mSv/yr	- 지표면 침적(입자성) - 호흡, 섭취 : 불활성기체를 제외한 전핵종
	유효선량	0.03 mSv/yr	- 전체경로 및 전체핵종
부지당 운영기준치	인체 장기 등가선량	0.1 mSv/yr	- 전체경로 및 전체핵종
	유효선량	0.25 mSv/yr	- 전체경로 및 전체핵종
	갑상선 등가선량	0.75 mSv/yr	- 전체경로 및 전체핵종

원자력안전위원회 고시 제2014-34호 제16조(환경상의 위해 방지)

# 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향

## □ 주민 방사선량 평가 - 평가 대상 및 지점

### 최대개인

- 음식물 섭취량, 활동시간 등이 일반 인구집단의 평균적인 값에 비해 합리적 편차를 가지는 최대 개인
- 실제 거주 여부와 상관없이 **부지 제한구역경계**에서 365일 거주 가정
- 경로별로 최대오염이 발생할 가능성이 있는 **지점에서** 생산된 음식물을 섭취한다고 가정.



# 원자력발전소 주변 주민 방사선 영향

## □ 주민 방사선량 평가 결과 (단위: mSv)

년도	고리	월성	한빛	한울
2004	0.00520	0.00460	0.00600	0.00240
2005	0.00512	0.00285	0.00301	0.00338
2006	0.00664	0.00348	0.00485	0.00165
2007	0.01510	0.00579	0.00604	0.00209
2008	0.00460	0.00831	0.00957	0.00190
2009	0.00226	0.00154	0.00432	0.00207
2010	0.00152	0.00520	0.00273	0.00333
2011	0.00171	0.00481	0.00271	0.00330
2012	0.00418	0.02231	0.01612	0.01568
2013	0.00455	0.02859	0.01584	0.01205

원전 운영에 의한 **10년 누적: 0.05~0.09mSv**

- 연간 일반인 선량한도(1mSv)의 5~9%
- 연간 자연방사선량(3.08mSv) 의 1.6~2.9%
- 연간 국내 의료방사선량(1.4mSv)의 3.6~6.5%

원전 운영에 의한 원전 주변 주민의 방사선 영향은 무시할 수 있는 수준

## 종합 결론

- 원자력발전소 주변의 공간방사선량은 일반 지역과 비교하여 **유의할 만한 차이 없고 자연방사선 수준으로 유지되고 있음**
- $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  일부 장반감기 핵종 검출: **지역편차 없음(대기권 핵실험 잔유물)**
- $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  등이 원전에서 배출되고 있으나 이로 인한 원전 주변 주민 **피폭선량은 일반인 연간 선량한도의 수% 이내**
- 일부 환경시료에서  $^{131}\text{I}$  검출: 치료용 동위원소가 갑상선암 환자의 배설물을 통해 일반 환경으로 유입

## 종합 결론

- 결론적으로 원전 운영으로 인한 시설 주변 주민의 방사선 영향은 무시할 수 있는 수준으로 판단

감사합니다

## 5. 방사성요오드의 생리역동학적 모델

정규환(KINS)

원전주변주민과 갑상선암에 관한 과학적 분석 워크숍  
원자력학회 2015. 5. 6. (수) 15:20~15:40 / 제주 국제컨벤션센터 2층 201호

# 방사성요오드의 생리역동학 모델 Bio-Kinetic Model of Radio-iodine



2015. 5. 6. (수)

정 규환, 방사선안전연구소

[jkhwan@klns.re.kr](mailto:jkhwan@klns.re.kr)

 한국원자력안전기술원  
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

## 순서

1. 방사성물질의 일반적인 체내거동 모사를 위한  
Compartment Model
2. ICRP Model of Radio-iodine
3. MIRD Model of Radio-iodine
4. Non-linear Bio-Kinetic Model to describe  
Thyroid blocking

## Radiation Dose Concepts

- Internal Dosimetry in both the MIRD and the ICRP methods is based on **source-to-target radiation transport**
- **ICRP model** : Specific organs and tissues are considered instead of compartments.
- **MIRD method** : Tie between compartments and anatomical regions is made through the use of *identification coefficients* (Berman 1977)

## 내부피폭의 특징

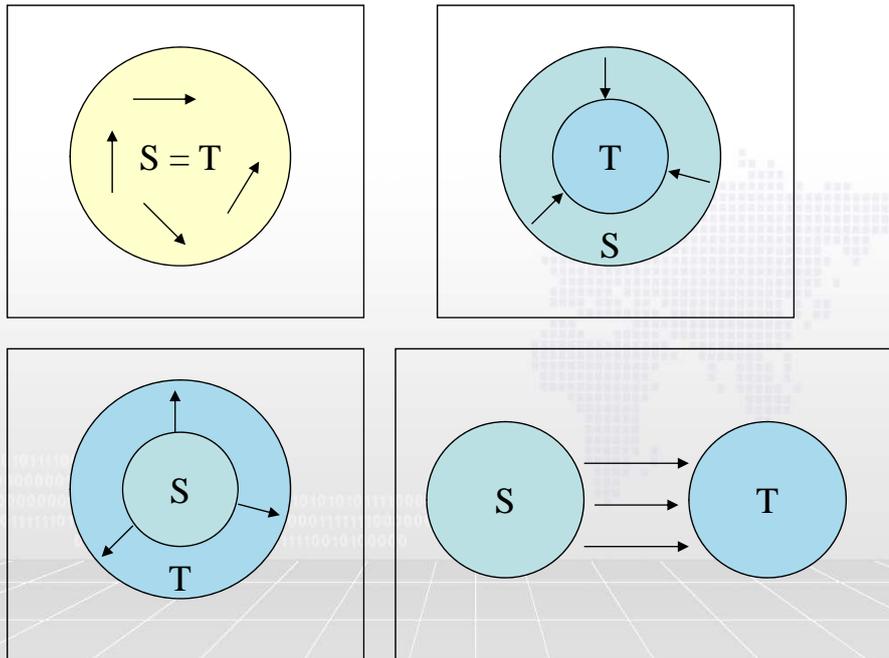
- 선원의 인체 내부에서의 역할

**Source – Target Model**

- 선원이 신진대사에 따라 이동

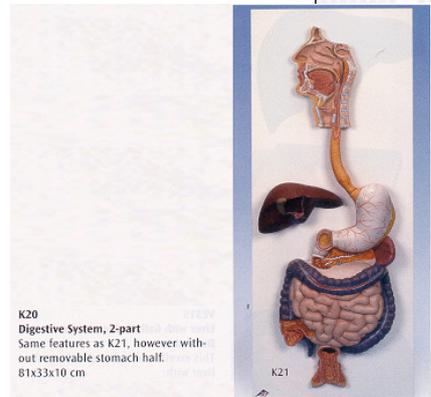
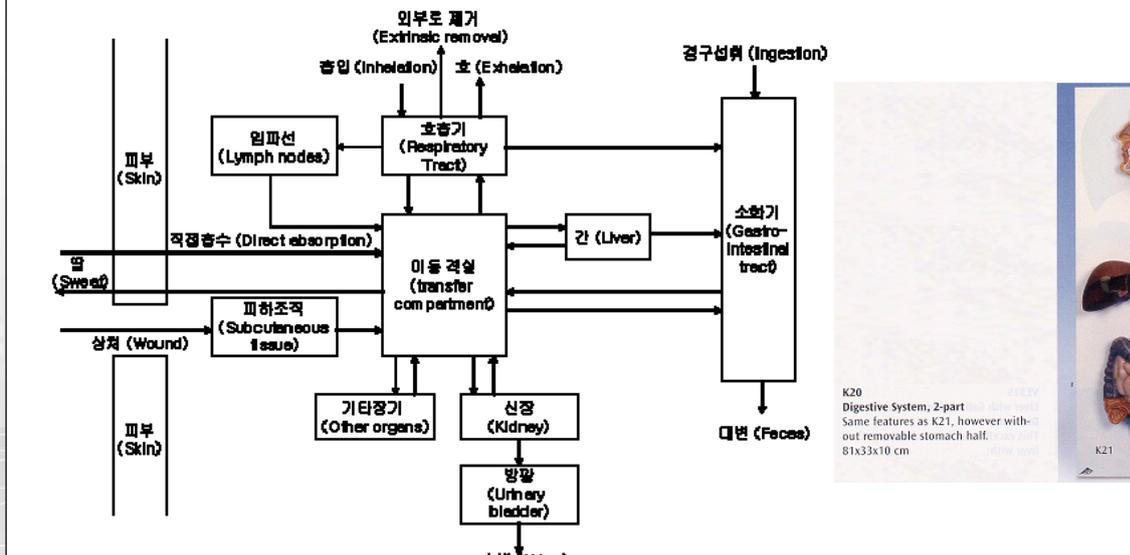
**Compartment Model**

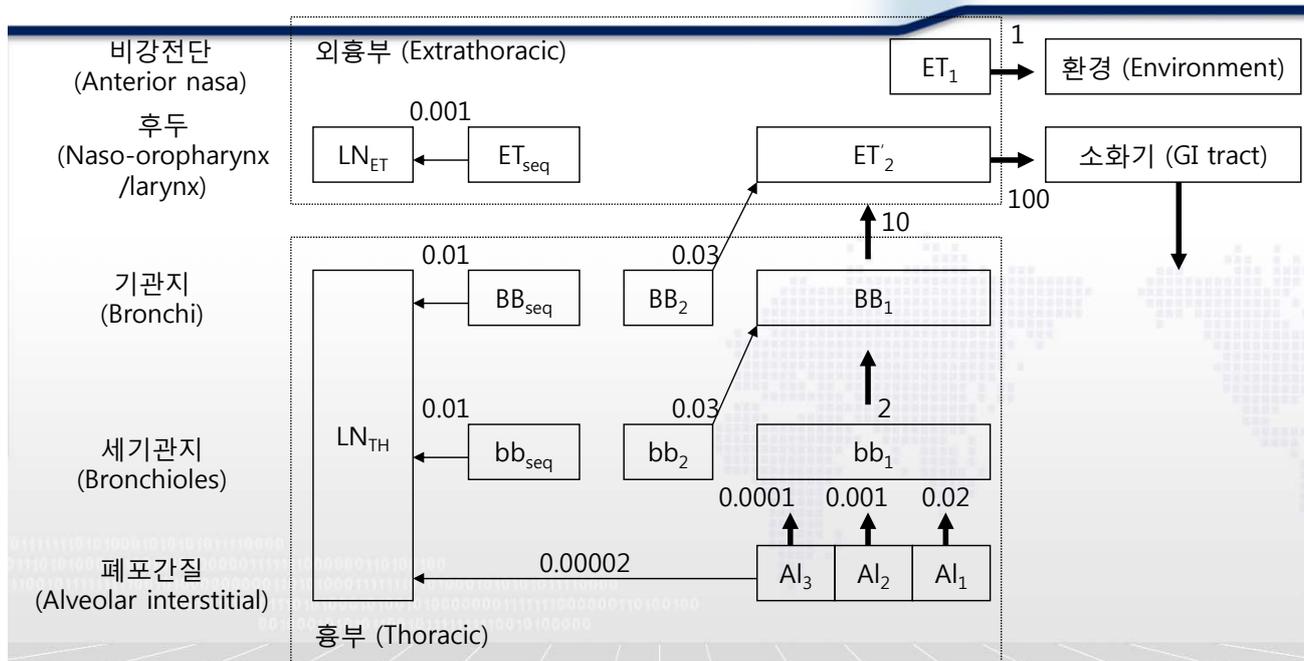
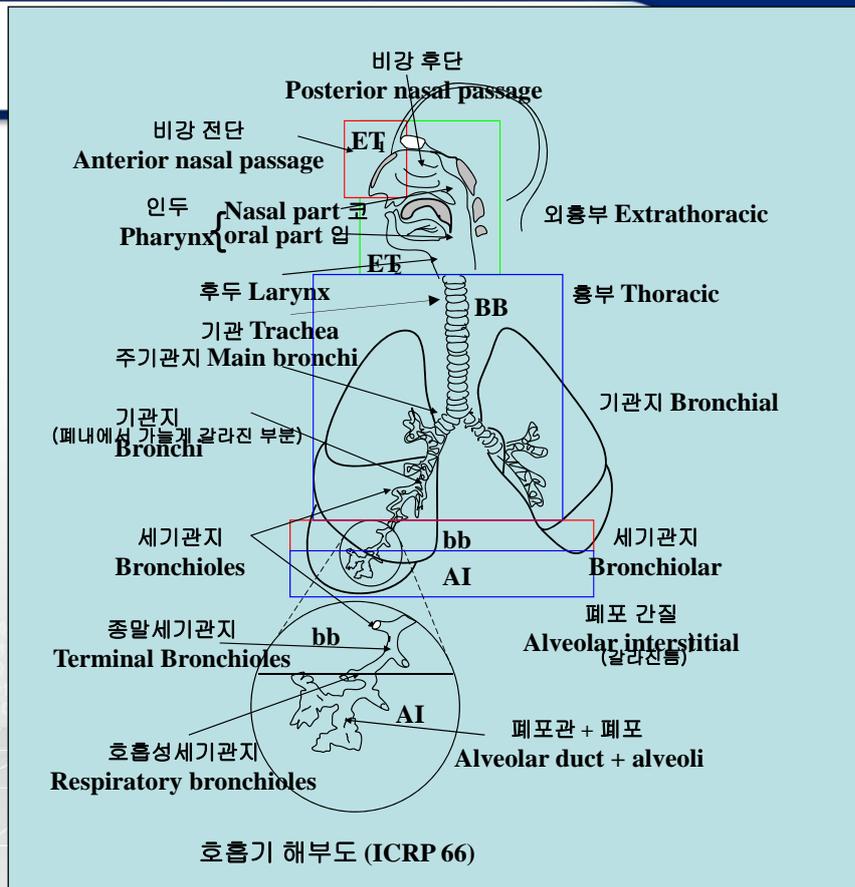
# Source – Target Model concept



# 방사성물질의 체내거동

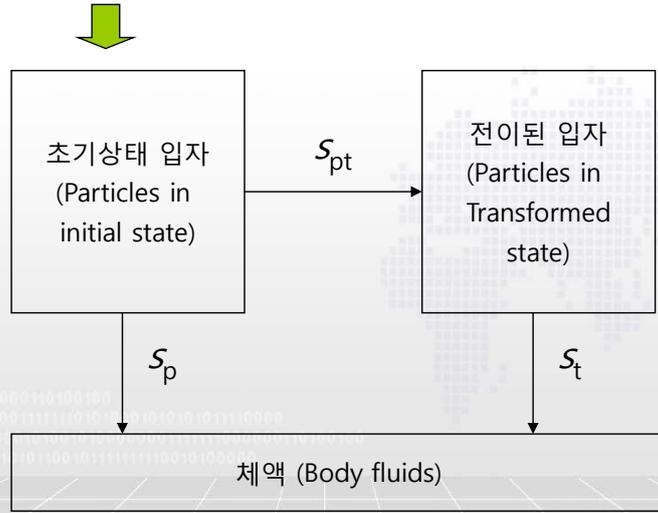
방사성물질의 인체내 거동을 수학적으로 모사하기 위하여 격실 (Compartment) Model 사용



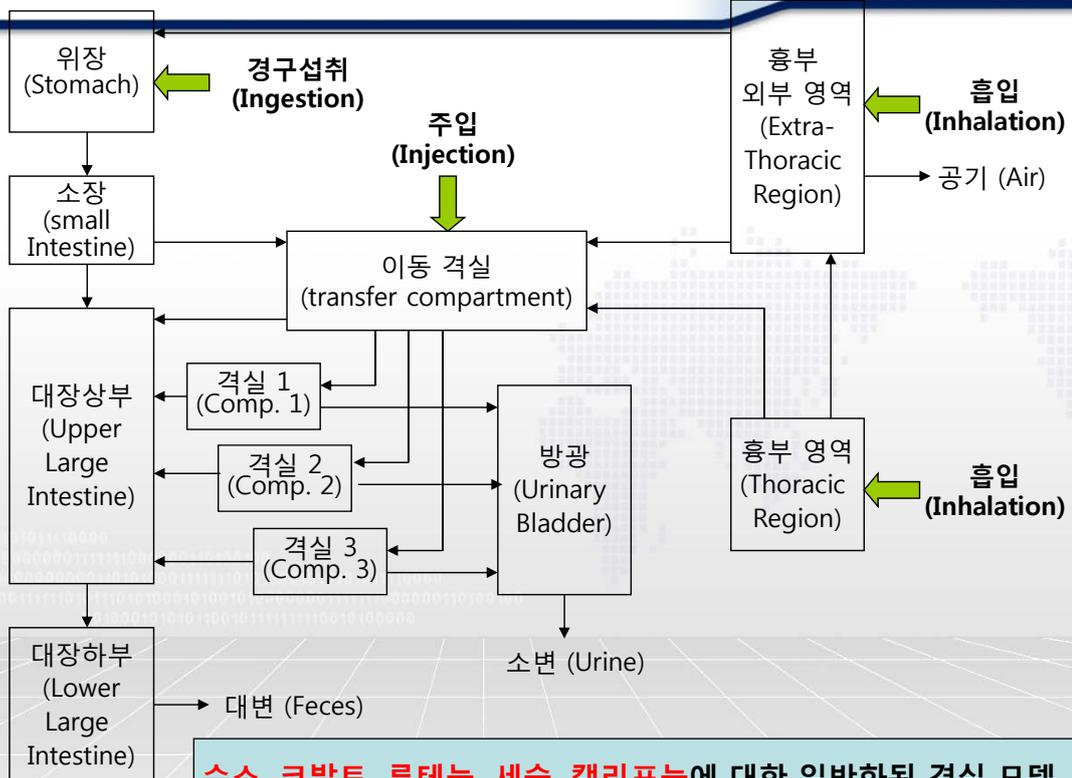


**호흡기의 각 영역으로부터 시간에 따른 입자 이동을 나타내는 격실 모델.**  
화살표에 동반된 비율의 단위는  $d^{-1}$  (ICRP, 1994a).

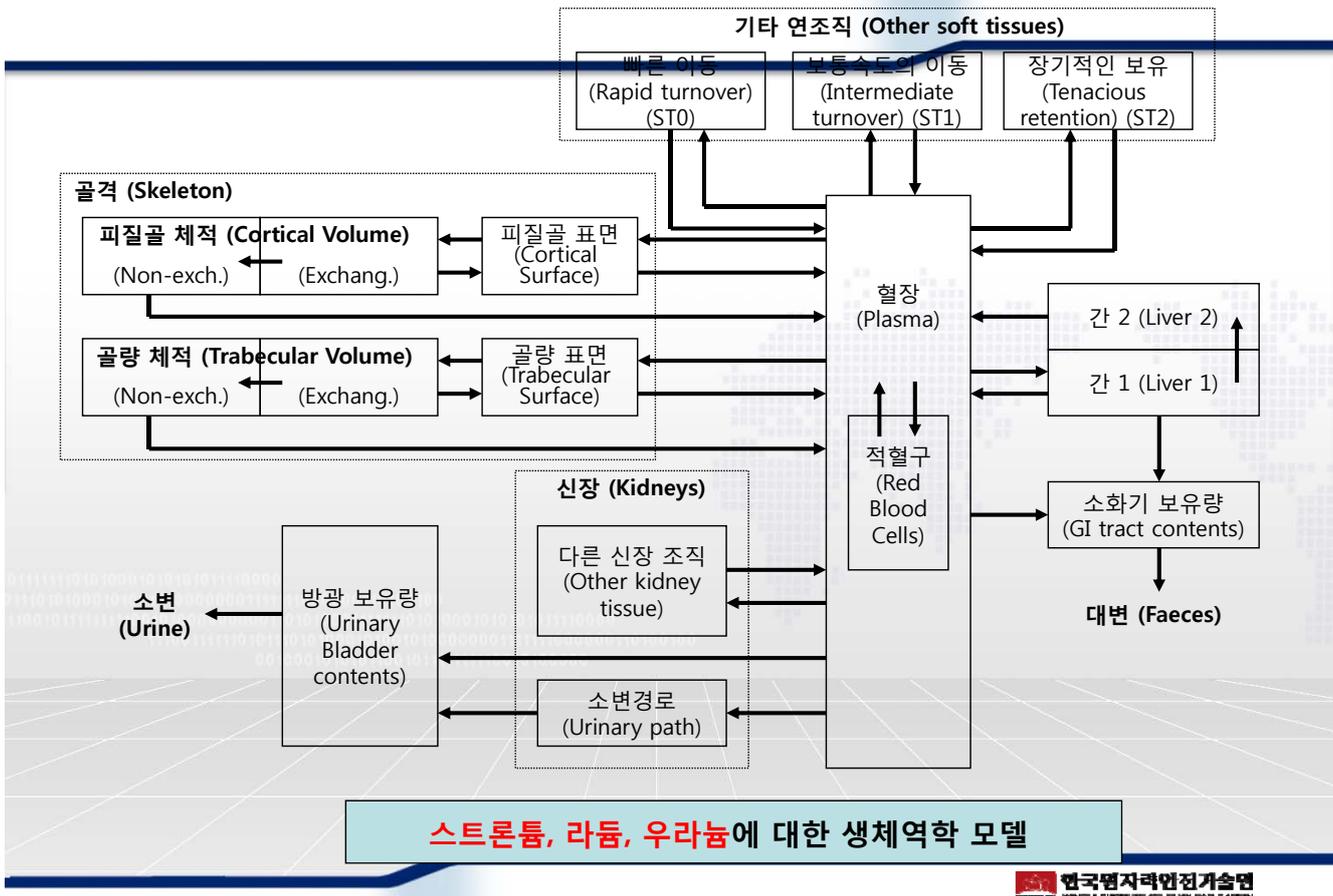
침착  
(Deposition)



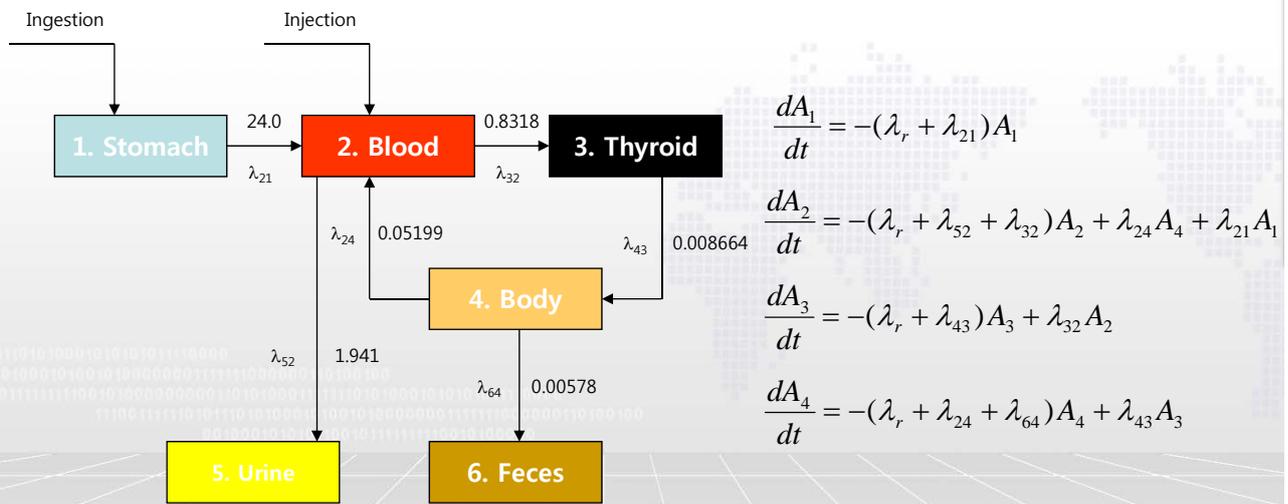
호흡기 내에서의 시간에 따른 용해도와 혈액흡수를 나타내기 위한 격실모델 (ICRP, 1994a).



수소, 코발트, 루테튬, 세슘, 캘리포늄에 대한 일반화된 격실 모델



## The ICRP model for the bio-kinetics of radioiodine



## 격실에서의 총방사능 계산

- 단위방사능 섭취 후 격실  $i$  에서 방사능  $A_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = f_i(A_1, A_2, \dots, A_n)$$

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = -A_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n A_j(t) \lambda_{ij}$$

해는 다음과 같다.

$$A_i(t) = A_0 e^{-\lambda_r t} \sum_{m=1}^n B_{mi} e^{-C_m t}$$

따라서 총 방사능은

$$U_i = \sum_{m=1}^n \frac{B_{mi}}{(\lambda_r + C_m)} (1 - e^{-(\lambda_r + C_m)\eta})$$

## 비유효에너지 (SEE)

$$\hat{H}_T = \sum_S \hat{H}(T \leftarrow S) = k \sum_S U_S SEE(T \leftarrow S)$$

- Specific Effective Energy, SEE (T←S)

$$SEE(T \leftarrow S) = \frac{1}{M_T} \sum_i Y_i \cdot E_i \cdot AF(T \leftarrow S)_i \cdot Q_i$$

- Y: yield of radiations per transformation
- E: average or unique energy of radiation
- AF(T←S): average fraction of energy absorbed in T from S; MIRD notation  $\phi(T \leftarrow S)$
- Q: quality factor of radiation
- M: mass of the target organ

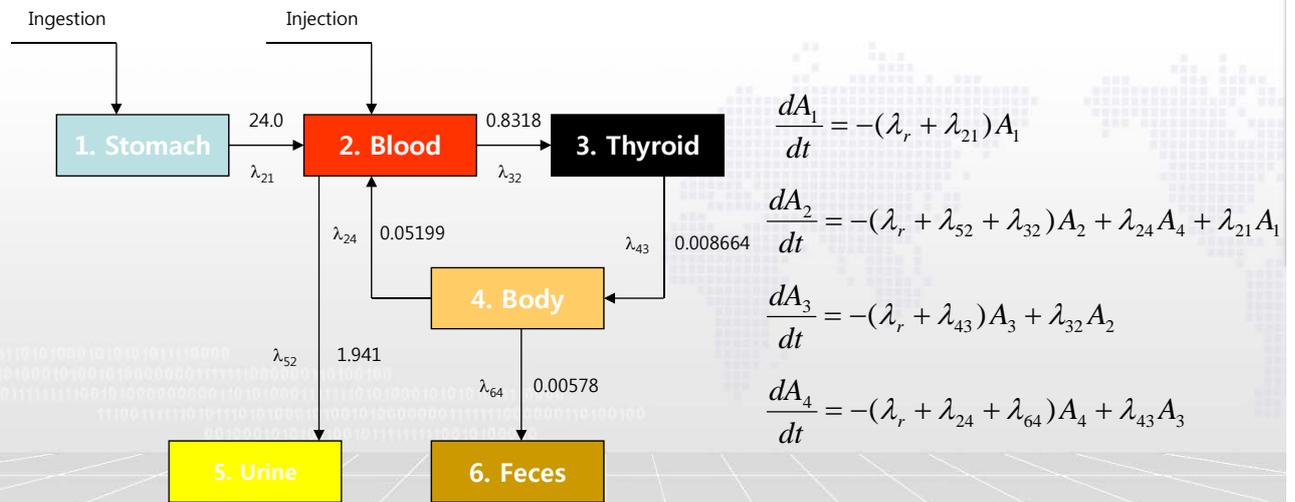
## Effective and Committed Dose Equivalent

- The effective dose equivalent is a weighted-average dose equivalent with target-organ weighting factors representative of the fraction of the total **stochastic risk** resulting from irradiation of those organs

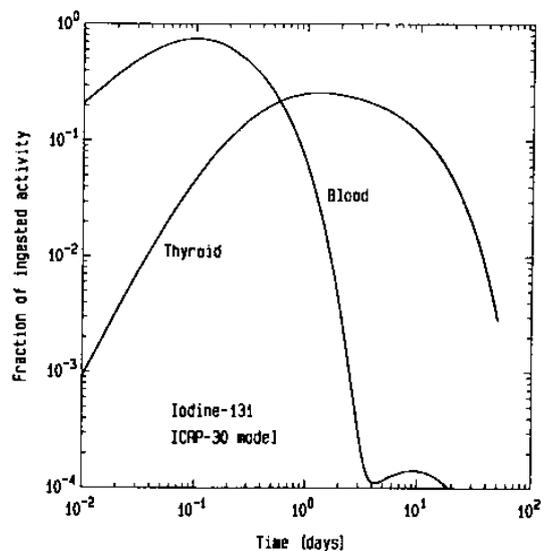
$$H_E = \sum_T w_T H_T$$

- Committed dose; delivered in the course of time – ICRP method places cutoff time, **50 years on the commitment period for workers, 70 years for lifetime exposure of the general public**

# The ICRP model for the bio-kinetics of radioiodine



## The ICRP model for the bio-kinetics of radioiodine (3)



**Figure 8.2** Activity of  $^{131}\text{I}$  in the thyroid as a function of time after ingestion. Calculations are based on the ICRP model.

## The ICRP model for the bio-kinetics of radioiodine (3)

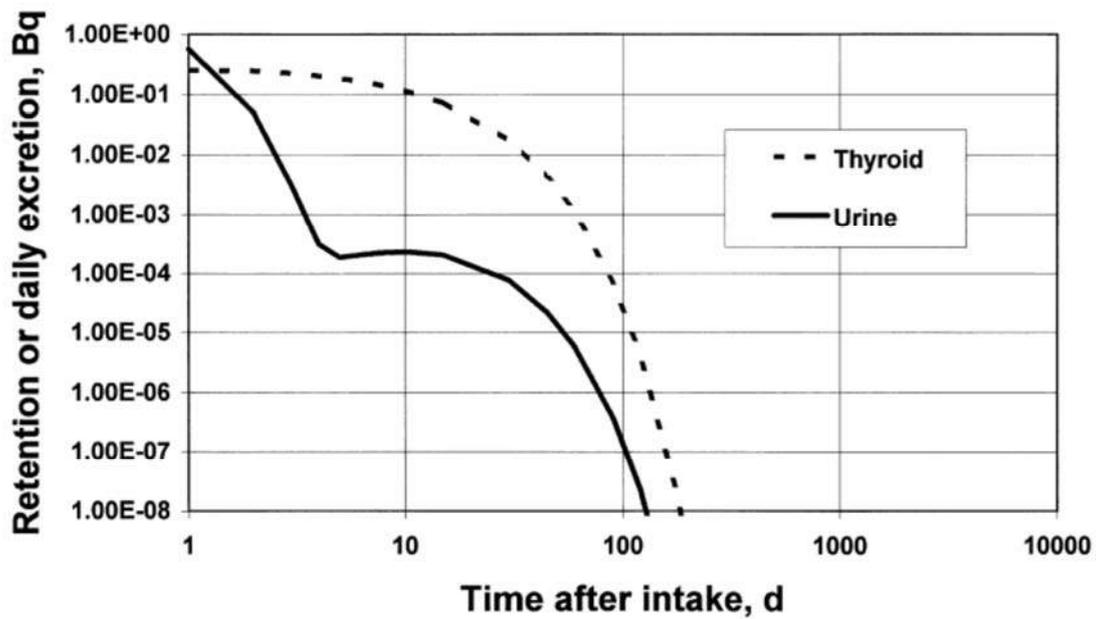


Fig. A.6.12.  $^{131}\text{I}$  Ingestion: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

## The ICRP model for the bio-kinetics of radioiodine (3)

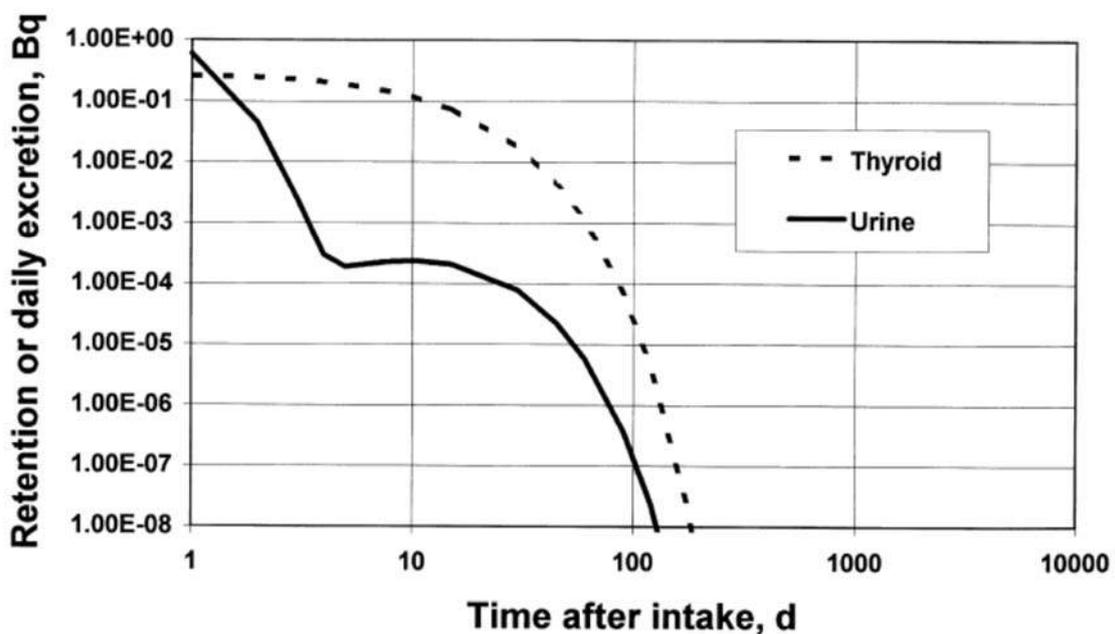
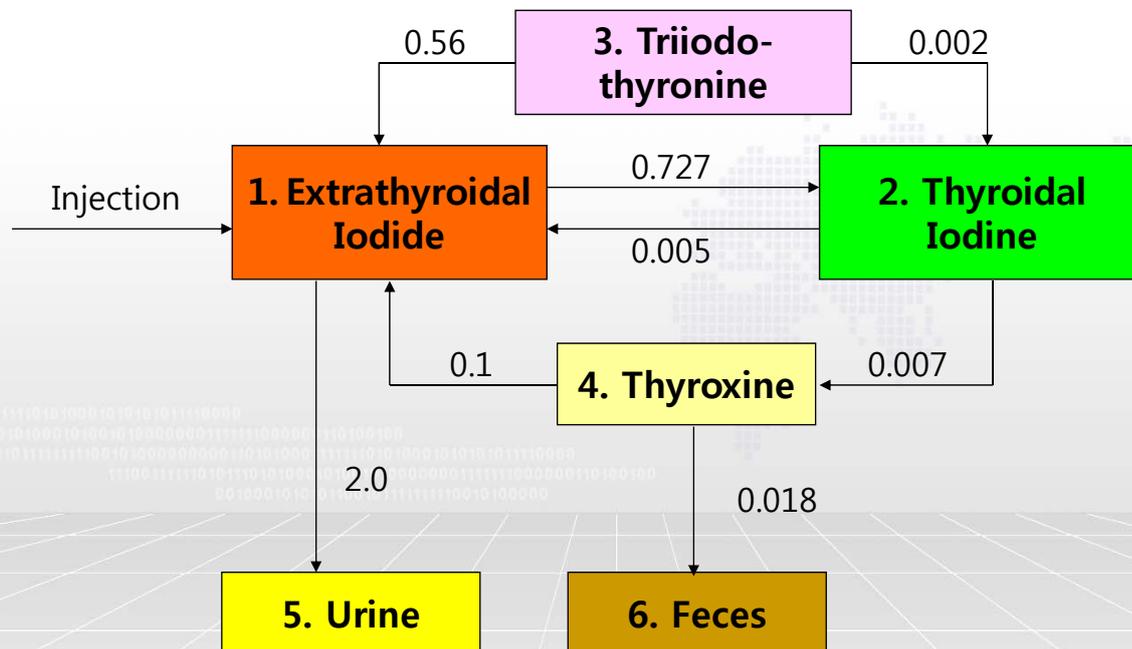


Fig. A.6.13.  $^{131}\text{I}$  Injection: predicted values (Bq per Bq intake) following acute intake.

## The MIRd-12 model for the bio-kinetics of radioiodine (1)



## The MIRd-12 model for the bio-kinetics of radioiodine (2)

Identification Coefficients

Source Organ	Compartment			
	1	2	3	4
Red blood cells	0.045		0.013	
Salivary glands	0.05			
Plasma	0.099		0.061	0.245
Stomach	0.15			
GI system	0.17			
Extracellular, extravascular	0.423		0.826	0.336
Thyroid		1.0		
Liver	0.063		0.100	0.419

## The MIRSD-12 model for the bio-kinetics of radioiodine (3)

- Differential equations describing the activities in the four compartment :

$$\frac{dA_1}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{21} + \lambda_{51})A_1 + \lambda_{12}A_2 + \lambda_{13}A_3 + \lambda_{41}A_4$$

$$\frac{dA_2}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{12} + \lambda_{32} + \lambda_{42})A_2 + \lambda_{21}A_1$$

$$\frac{dA_3}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{13})A_3 + \lambda_{32}A_2$$

$$\frac{dA_4}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{14} + \lambda_{64})A_4 + \lambda_{42}A_2$$

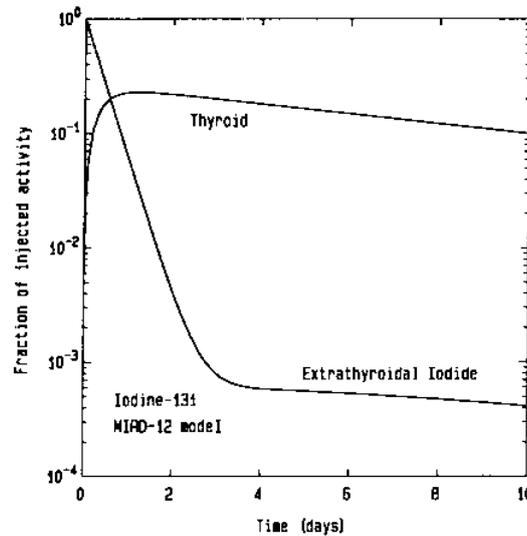
## The MIRSD-12 model for the bio-kinetics of radioiodine (4)

- Source organ transformation in Thyroid and liver; from identification coefficients

$$U_t = U_2$$

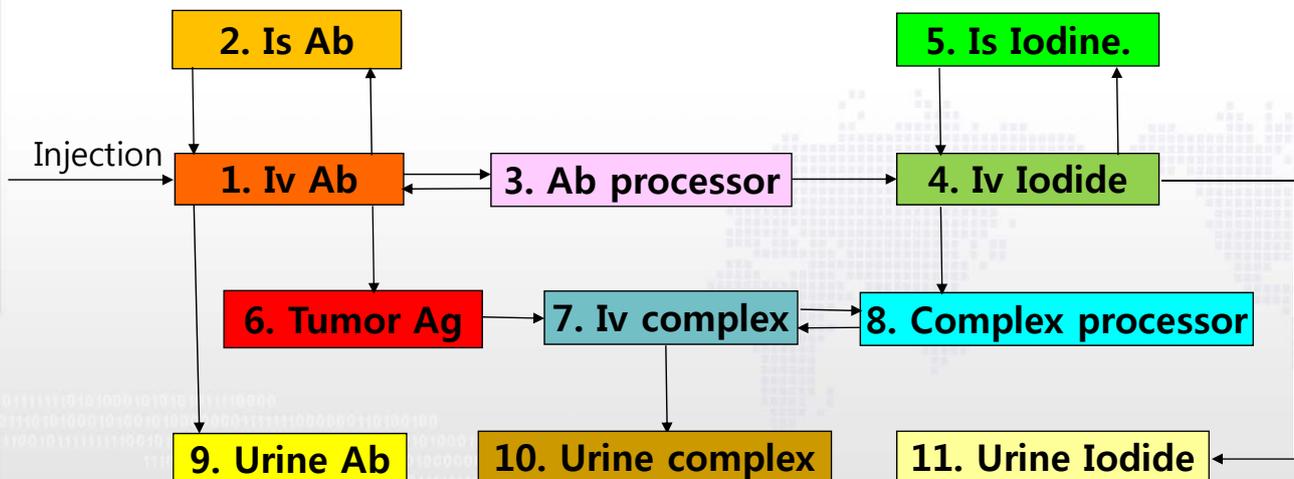
$$U_h = 0.063U_1 + 0.1U_3 + 0.419U_4$$

## The MIRD-12 model for the bio-kinetics of radioiodine (5)



**Figure 8.4** Activity of  $^{131}\text{I}$  in the thyroid as a function of time after injection. Calculations are based on the MIRD-12 (Berman 1977) model.

## A nonlinear bio-kinetic model (Koizmi et al. 1986) (1)



Ab: antibody, Ag: antigen, Iv: intravascular,  
Is: Interstitial, complex: Ab bound to Ag

## A nonlinear bio-kinetic model (Koizmi et al. 1986) (2)

- Patient-specific model for the behavior of a certain  $^{123}\text{I}$ -labeled monoclonal antibody used in radiation therapy against B-cell lymphoma.
- Antibodies (Ab) are introduced intravascularly (Iv) and act against tumor antigens (Ag)
- Ab-Ag complexes may be released intravascularly and the iodine processed to the iodide form
- Ab-iodine and iodide equilibrate rapidly between the intravascular and interstitial (Is) spaces
- The Thyroid is “blocked”, that is, that the thyroid has been saturated with iodine prior to administration of the antibodies
- The nonlinearity arises as a result of ligand-receptor equilibria in an Ab processor thought to be liver

## A nonlinear bio-kinetic model (Koizmi et al. 1986) (3)

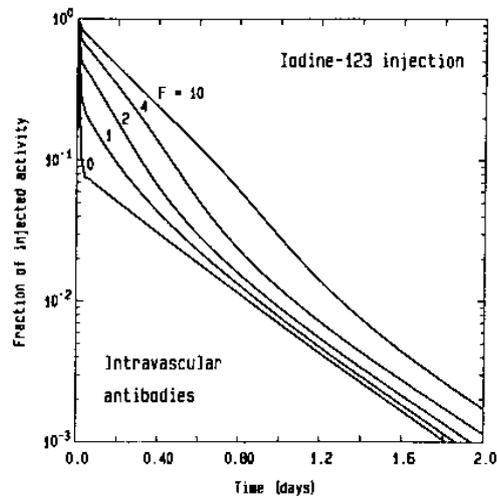
- Only a certain patient-specific number of receptor sites is available
- $F$  is the ratio of the moles of antibody injected to the moles of available receptors

$$\frac{dA_1}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{21} + \lambda_{61} + \lambda_{91})A_1 - \lambda_{31}(1 - FA_3)A_1 + \lambda_{12}A_2 + \lambda_{13}A_3$$

$$\frac{dA_3}{dt} = -(\lambda_r + \lambda_{13} + \lambda_{43})A_3 + \lambda_{31}(1 - FA_3)A_1$$

- $F$  is increased, the fraction of the injected radioiodine bound to tumor cells increases

## A nonlinear bio-kinetic model (Koizumi et al. 1986) (4)



**Figure 8.6** Activity of  $^{123}\text{I}$  labeled antibodies in the intravascular compartment as a function of time after injection. Calculations are based on the nonlinear bio-kinetics model of Koizumi et al. (1986).  $F$  is the ratio of the moles of antibodies injected to the moles of receptor in the (liver) antibody processor.

원자력 안전  
KINS가 만들어 갑니다!



감사합니다  
KINS

## 6. 역학조사 국·내외 사례

진영우(KIRAMS)

# 원전 주변주민 역학연구 국내외 사례

진 영 우

한국원자력의학원  
국가방사선비상진료센터

## - 목 차 -

- I. 사전지식 (역학연구)
- II. 국내 원전 주변주민 역학연구
- III. 국외 연구 사례
- V. 요약 및 토의

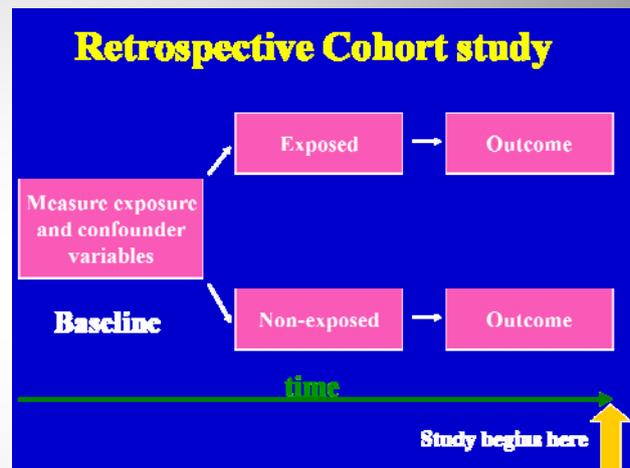
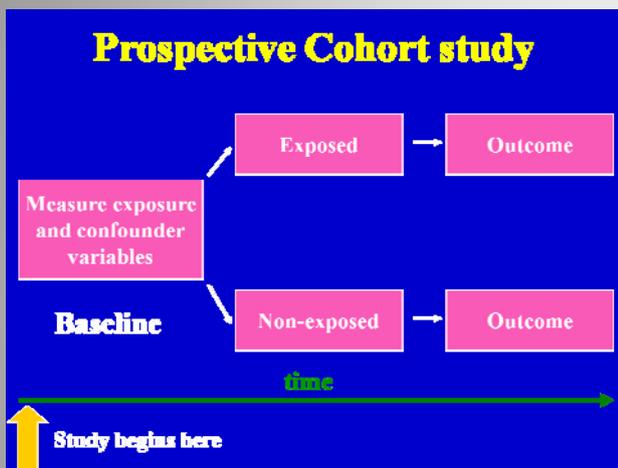
## 방사선 역학연구

▪ **목적:** 방사선 피폭 인구 집단의 다년간 추적조사를 통해 **방사선과 질병의 관련성을 조사하고 이를 정량화**하는데 있다. 이러한 연구 결과들은 방사선 방호기준의 근거 자료로 사용되어진다.

### ▪ 주요 연구 코호트

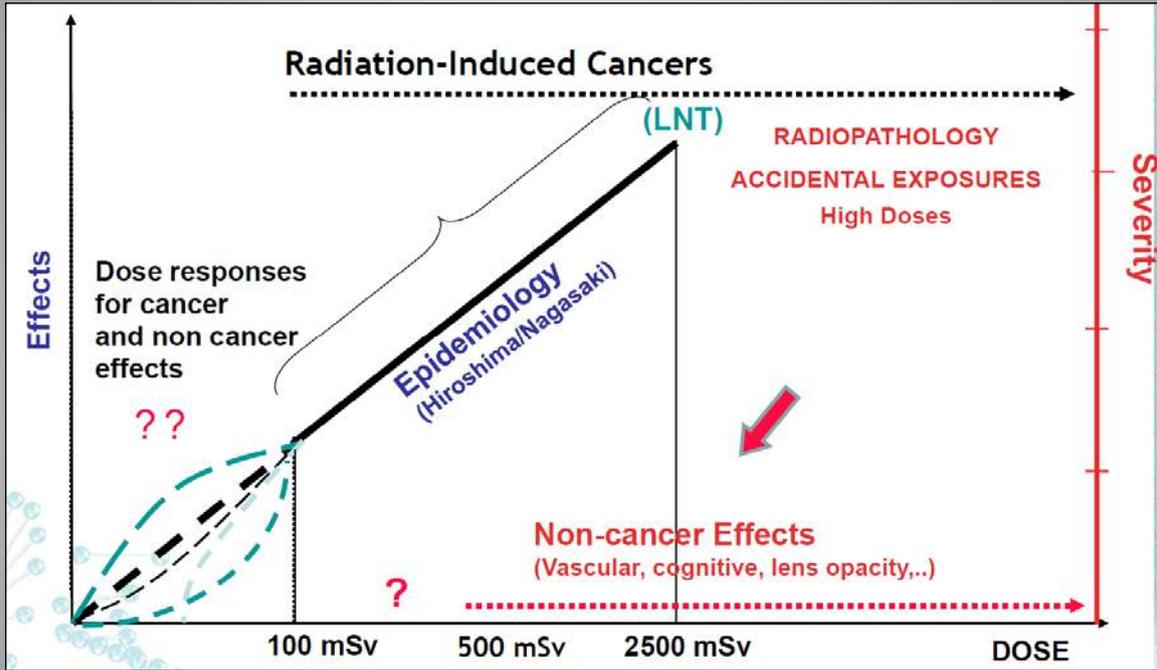
- 일본원폭생존자 (선량과 암위험의 비례적 관계 근거)
- 체르노빌 및 후쿠시마 지역주민 및 청소작업자
- 원전, 핵시설 종사자 및 주변지역 주민
- 의료방사선 종사자 및 의료 피폭 환자
- 항공승무원
- 고자연배후방사능지역

## 코호트연구 디자인



[www.pitt.edu/~super7/19011-20001/19101.ppt](http://www.pitt.edu/~super7/19011-20001/19101.ppt)

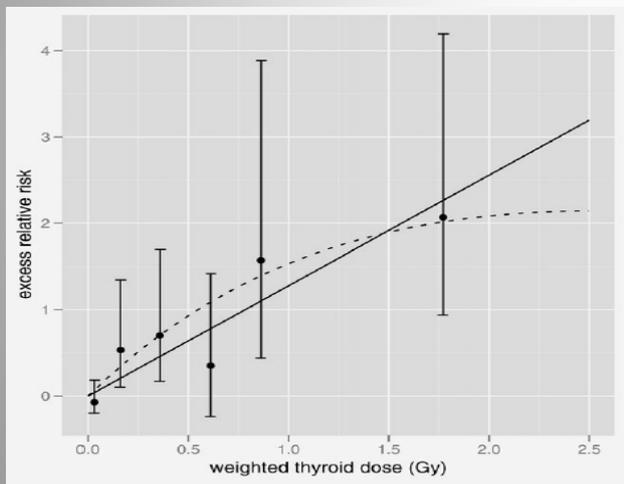
# 방사선 피폭에 의한 암 위험



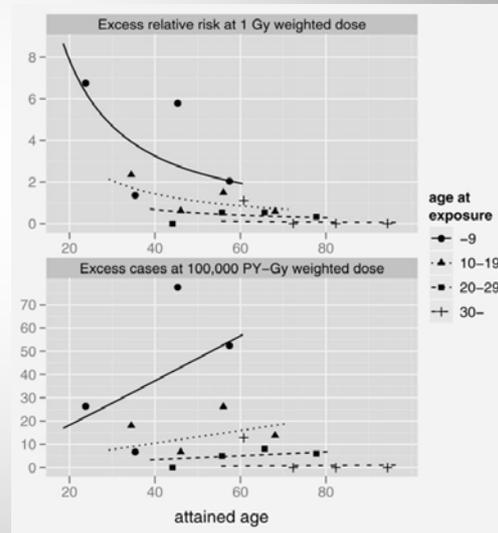
Nuclear 2013 (Melodi)

## 일본 원폭생존자의 갑상선암 위험도 (Furukawa et al., 2013)

- 원폭생존자에서 방사선 유발 갑상선암 위험도 증가는 대부분 **어린 이**와 **청소년기(20세 이전)**에 피폭된 사람들로부터 기인
  - 20세 이전 피폭자에서도 0-5mSv 구간에서 암위험도 증가 없음
- 성인시기(20세 이후)에 피폭된 원폭생존자에서 갑상선암 위험이 증가한다는 증거는 없음**



<10세 피폭, 60세 암발생시 갑상선암 선량-반응>



< 피폭시 연령, 도달 연령에 따른 위험도 변화>

# 국내 원전 주변주민 역학연구 (서울대 원전역학조사)



## 역학조사 배경 및 목적

- 역학조사 배경
  - 1989년 영광원전(현재 한빛원전) 주변주민의 무뇌아 유산
  - 원전 주변주민의 방사선 피해 여부의 사회적 이슈
- 목적: 원전 주변지역 주민(고리, 월성, 영광, 울진)과 원전종사자의 암 발병 위험도의 역학적 평가
  - 주변지역: 원전 반경 5km 이내
  - 대조지역 1) 근거리 대조지역: 원전 반경 5~30km
  - 2) 원거리 대조지역: 30km 밖의 함안, 양평, 충주

## 코호트 선정 및 연구 방법 (원전 주변지역 주민 연구)

- 코호트 입적 기준
  - 연구대상: 1) 신체검사 및 역학조사 등의 기반조사를 받은 자
  - 2) 만 20세 이상
  - 3) 암 질환 유병/기왕력 없는 자
  - 4) 역학 설문 면접조사에서 충실한 응답을 한 자
  - 5) 연구대상 코호트로 입적된 이후 최소 1년 추구관찰이 시행된 자
- 2005년까지 총 36,176명 입적 (주변지역 11,367명, 대조지역 24,809명)
- 연구기간: 1991.12~2011.2 (2008년까지 암 발병 확인)
- 전향적 코호트 연구
  - 연령표준화 암 발생률
  - 암 발병 상대위험도

## 주요 결과 (1)

지역별 주민코호트 암 발생률 및 암 발병 상대위험도 (남자)

암 부위	지표	주변지역	대조지역		
			계	근거리	원거리
모든 암	발생률*	564.7	544.1	508.5	566.9
	상대위험도 (95%CI)	1.1(0.91-1.36)	1.0	-	-
		1.2(0.94-1.57)	-	1.0	-
		1.0(0.84-1.32)	-	-	1.0
방사선 관련 암	발생률*	363.0	347.4	300.9	378.6
	상대위험도 (95%CI)	1.2(0.92-1.54)	1.0	-	-
		1.3(0.93-1.78))	-	1.0	-
		0.9(0.78-1.27)	-	-	1.0

\* 발생률은 100,000인·년 당, 연령표준화는 세계표준인구 적용함

방사선 관련암: 방사선피폭과 인과관계가 인정되는 위암, 간암, 폐암, 골암, 유방암, 갑상선암, 골수 및 백혈병 등.

주변지역과 대조지역의 암 발생률 및 상대위험도 차이에 대한  
통계적인 유의성은 발견되지 않음.

## 주요 결과 (2)

### 지역별 주민코호트 암 발생률 및 암 발병 상대위험도 (여자)

암 부위	지표	주변지역	대조지역		
			계	근거리	원거리
모든 암	발생률*	306.5	281.0	305.9	264.0
	상대위험도 (95%CI)	1.2(0.94-1.60)	1.0	-	-
		1.1(0.96-1.50)	-	1.0	-
		1.2(0.90-1.63)	-	-	1.0
방사선 관련 암	발생률*	190.5	161.9	182.3	147.0
	상대위험도 (95%CI)	1.1(0.78-1.61)	1.0	-	-
		1.1(0.79-1.43)	-	1.0	-
		1.2(0.77-1.74)	-	-	1.0

\* 발생률은 100,000인·년 당, 연령표준화는 세계표준인구 적용함

방사선 관련암: 방사선피폭과 인과관계가 인정되는 위암, 간암, 폐암, 골암, 유방암, 갑상선암, 골수 및 백혈병 등.

주변지역과 대조지역의 암 발생률 및 상대위험도 차이에 대한  
통계적인 유의성은 발견되지 않음.

## 주요 결과 (3)

### 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도 (남자)

암 부위	지표	주변지역	대조지역	
			근거리	원거리
방사선 관련 암(전체)	발생률*	363.0	300.9	378.6
	상대위험도	1.2(0.86-1.54)	0.9(0.67-1.26)	1.0
위암	발생률*	143.8	98.1	112.3
	상대위험도	1.3(0.85-1.92)	0.9(0.61-1.44)	1.0
간암	발생률*	100.0	66.6	87.2
	상대위험도	1.4(0.73-2.85)	0.9(0.36-2.08)	1.0
폐암	발생률*	93.7	110.8	107.2
	상대위험도	0.9(0.61-1.42)	1.1(0.71-1.57)	1.0

주변지역과 대조지역 사이에서 발생률 및 상대위험도 차이가 나는 암종은  
발견되지 않음

## 주요 결과 (4)

### 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도 (여자)

암 부위	지표	주변지역	대조지역	
			근거리	원거리
방사선 관련 암(전체)	발생률*	190.5	182.3	147.0
	상대위험도	1.2(0.77-1.74)	1.1(0.69-1.68)	1.0
위암	발생률*	50.1	59.4	44.9
	상대위험도	1.2(0.83-1.68)	1.3(0.89-1.79)	1.0
폐암	발생률*	13.5	26.8	20.1
	상대위험도	0.8(0.38-1.74)	1.4(0.64-2.83)	1.0
유방암	발생률*	45.2	30.6	29.2
	상대위험도	1.5(0.90-2.60)	1.1(0.60-1.99)	1.0
갑상선암	발생률*	61.4	43.6	26.6
	상대위험도	2.5(1.43-4.38)	1.8(0.98-3.24)	1.0

여자의 갑상선암 발생에서 통계적으로 유의한 차이 발견

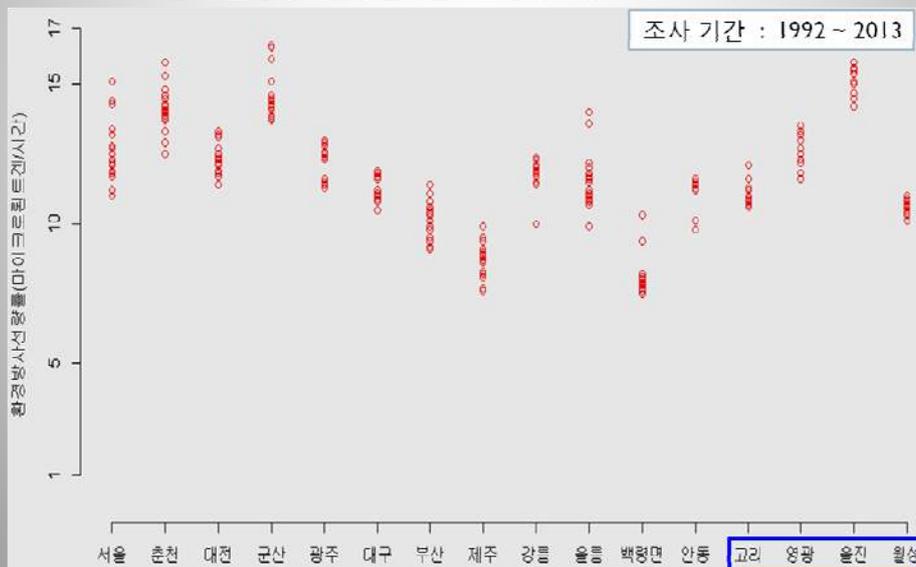
→ 원전 방사선과 갑상선암 발병 위험도와의 인과관계 성립?

## 인과성에 대한 반증

### ■ 인과성에 대한 과학적 증거 부족

1. 주변지역, 근거리, 원거리 대조지역의 환경방사선량이 차이가 없음
2. 원전주변 거주기간별 상대위험도 분석결과, 거주기간에 따른 경향성이 없음
3. 다른 방사선 관련 암에서는 거리에 따른 암발생률 차이 없음

전국 환경방사선량률 (전국환경방사능조사, KINS)



## 종합결론

- 원전 방사선과 주변지역 주민의 암발병 사이의 **인과적 관련성에 대한 과학적 증거 부족**
- 통계적으로 유의한 관련성이 나타난 여성 갑상선암의 경우는 **'방사선 이외의 요인'**으로 분석, 추론됨

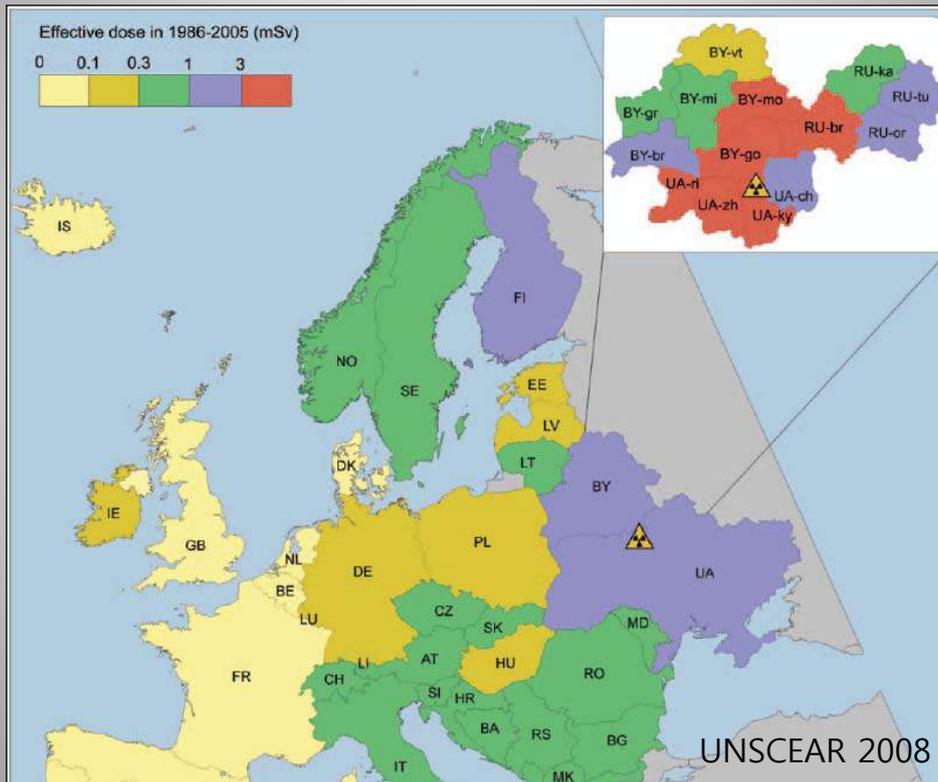
- 갑상선암의 80~90% : 그 원인을 알 수 없음
- 유전적 소인 (Czene et al, 2002; Mousavi et al., 2011)
  - 스웨덴 가족암 연구 : 갑상선암의 유전적 소인 53% (비교: 유방암 25%)
  - 스웨덴인에 비해 아시아(동, 동남) 이주자의 갑상선암 위험 : 여성 2.9배
- BRAF 유전자 변이
- 요오드 섭취 과다 혹은 결핍
- 기타 (UNSCEAR 2006)
  - 갑상선 자극 호르몬의 증가, 다출산·유산경험, 다이어트, 인위적 폐경 등
- 스크리닝 효과 (조기검진)
- 방사선 노출
  - 어린이, 청소년 시기에 고용량 피폭 시 갑상선암 발생 증가
  - 20세 이후에 피폭된 성인의 경우 갑상선암 위험의 증가 증거 없음  
[근거] 일본 원폭생존자 연구(Furukawa et al, 2013)  
체르노빌 주변 주민 연구(WHO, 2006)

## 국외 연구 사례

- 체르노빌
- 후쿠시마
- 쓰리마일 아일랜드 (TMI)
- 기타 원전 및 핵시설 주변지역

# 체르노빌 원전사고 (1986년 4 월 발생)

인근 국가들의 평균 유효선량 (1986~2005)



## 피폭유효 선량

연구집단	연구대상 수	평균 유효선량 (mSv)*
청소작업자 (1986-1987, 원전 + 30Km 구역)	240,000	100
1986년 소개된 주민	116,000	33
오염 지역 거주인		
Cs <sup>137</sup> 침착밀도 > 555 kBq/m <sup>2</sup> *	270,000	50
Cs <sup>137</sup> 침착밀도 > 37.5 kBq/m <sup>2</sup>	5,000,000	10
벨라루스, 우크라이나, 러시아의 오염지역	66,500,000	2.5
유럽 <sup>+</sup>	570,000,000	0.5

\* 엄격한 통제 구역

♣ 누적선량: 1986-2005

+ 러시아 대부분이 제외 (대부분의 오염지역을 제외하고)

Melodi (E. Cardis, 2014)

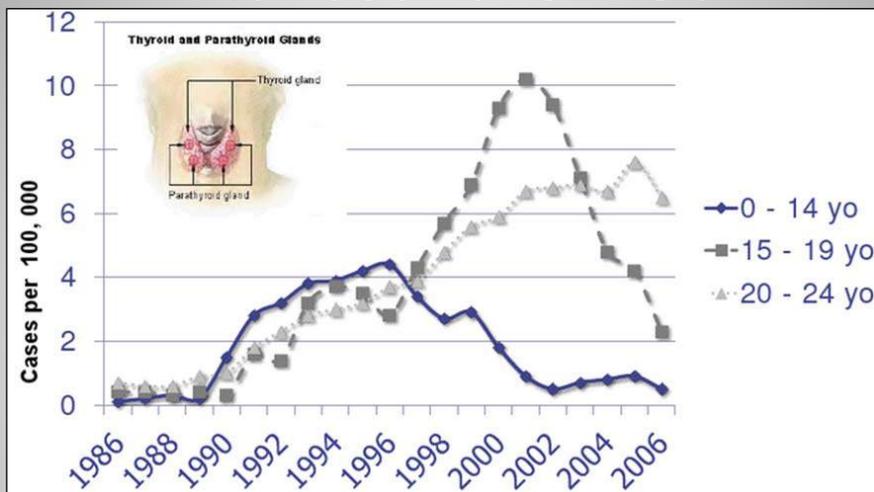
## 갑상선 평균 선량

연구집단	연구대상 수	평균 갑상선 선량 (Gy)		
		0-7세	성인	전체
<b>1986년 소개된 주민</b>	116,131	1.82	0.29	0.48
벨라루스	24,725	3.1	0.68	1.0
우크라이나	28,455	2.7	0.40	0.65
프리피야트	49,360	0.97	0.066	0.17
<b>벨라루스</b>				
전체	1,000,000	0.15	0.038	0.053
고멜 주	1,680,000	0.61	0.15	0.22
<b>우크라이나</b>				
전체	55,000,000	-	-	0.013
체르노빌 인근 지역	500,000	-	-	0.38
<b>러시아연방</b>				
전체	150,000,000	-	-	0.002
브란스크 주	1,457,500	0.14	0.026	0.041
칼루가, 오를, 툴라 주	4,000,000	-	-	0.010

Melodi (E. Cardis, 2014)

## 소아 갑상선암

### 벨라루스지역의 소아 갑상선암 증가



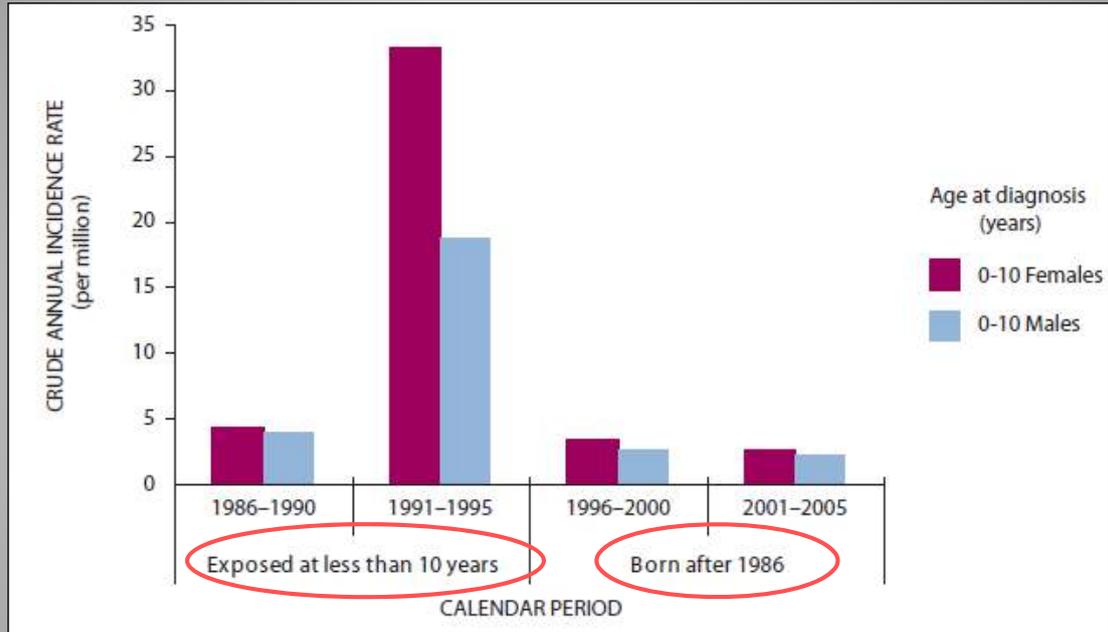
NCRP 2013 (S. Yamashita)

#### ■ 현재까지 나타난 가장 명백한 건강영향:

- 요오드 131이 갑상선에 집중됨
- 1986년에 18세 이하 소아의 갑상선 암 발생: 약 6,848명 (1991-2005년)
- 초과 상대위험도 (ERR)=8-19

#### ■ 성인에서는 명확한 관계가 보이지 않음

## 벨라루스지역의 소아 갑상선암



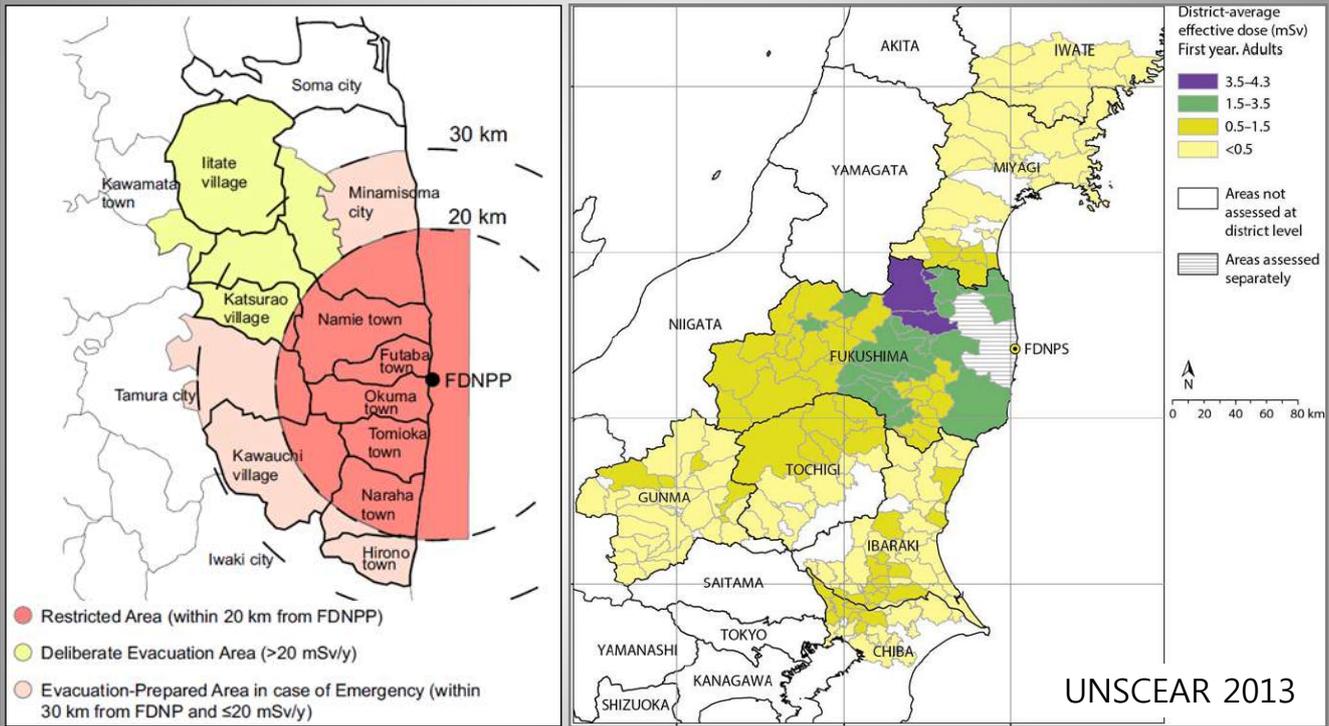
UNSCEAR 2008

## 체르노빌 지역주민의 건강영향 평가

- 지역주민의 ARS 사례는 보고되지 않음
- 소아 갑상선암 증가
- 다른 암/질병 증가에 대한 확실한 증거를 보이지 않음
- 생식능력, 기형아 또는 유아 사망에 대한 영향을 보이지 않음  
(피폭선량: 유전적 영향에 미치지 않는 수준)
- 지속적인 추적조사 필요

# 후쿠시마 원전 사고 (2011년 3월 발생)

## 후쿠시마 인근 지역의 사고 첫해 동안의 평균 유효선량

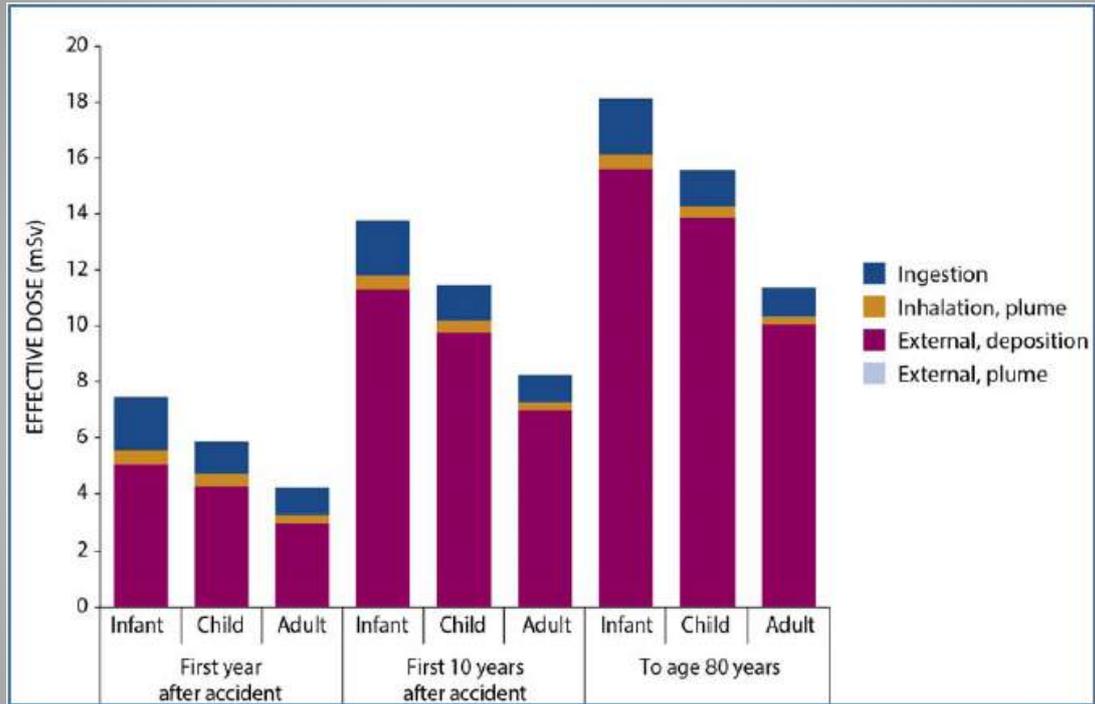


## 유효선량 및 갑상선 흡수선량

연령	Precautionary evacuated settlements			Deliberately evacuated settlements		
	소개이전과 진행 중	소개완료	초기 1년	소개이전과 진행 중	소개완료	초기 1년
<b>유효선량 (mSv)</b>						
성인	0-2.2	0.2-4.3	1.1-5.7	2.7-8.5	0.8-3.3	4.8-9.3
소아, 10세	0-1.8	0.3-5.9	1.3-7.3	3.4-9.1	1.1-4.5	5.4-10
유아, 1세	0-3.3	0.3-7.5	1.6-9.3	4.2-12	1.1-5.6	7.1-13
<b>갑상선 흡수선량 (mGy)</b>						
성인	0-23	0.8-16	7.2-34	15-28	1-8	16-35
소아, 10세	0-37	1.5-29	12-58	25-45	1.1-14	27-58
유아, 1세	0-46	3-49	15-82 <sup>c</sup>	45-63	2-27	47-83 <sup>c</sup>

UNSCAR 2013 Report

## 후쿠시마 지역의 사고 이후 유효선량 추정



UNSCEAR 2013 Report

## Fukushima Health Management Survey

### Fukushima Radiation and Health

Radiation Medical Science Center for the Fukushima Health Management Survey,  
Fukushima Medical University



- 후쿠시마 주민들의 장기 건강 상태 관찰과 주민들의 건강 증진을 위해서
- 장기 저선량 방사선 피폭으로 인한 건강 영향을 관찰하기 위해서

#### ▪ 갑상선 초음파 검사 (Thyroid Ultrasound Examination)

- 사고 당시 0-18세인 약 360,000명의 주민

#### ▪ 종합건강검진 (Comprehensive Health Check)

- 조기발견과 질병의 치료뿐만 아니라 생활양식과 관계된 질환의 예방

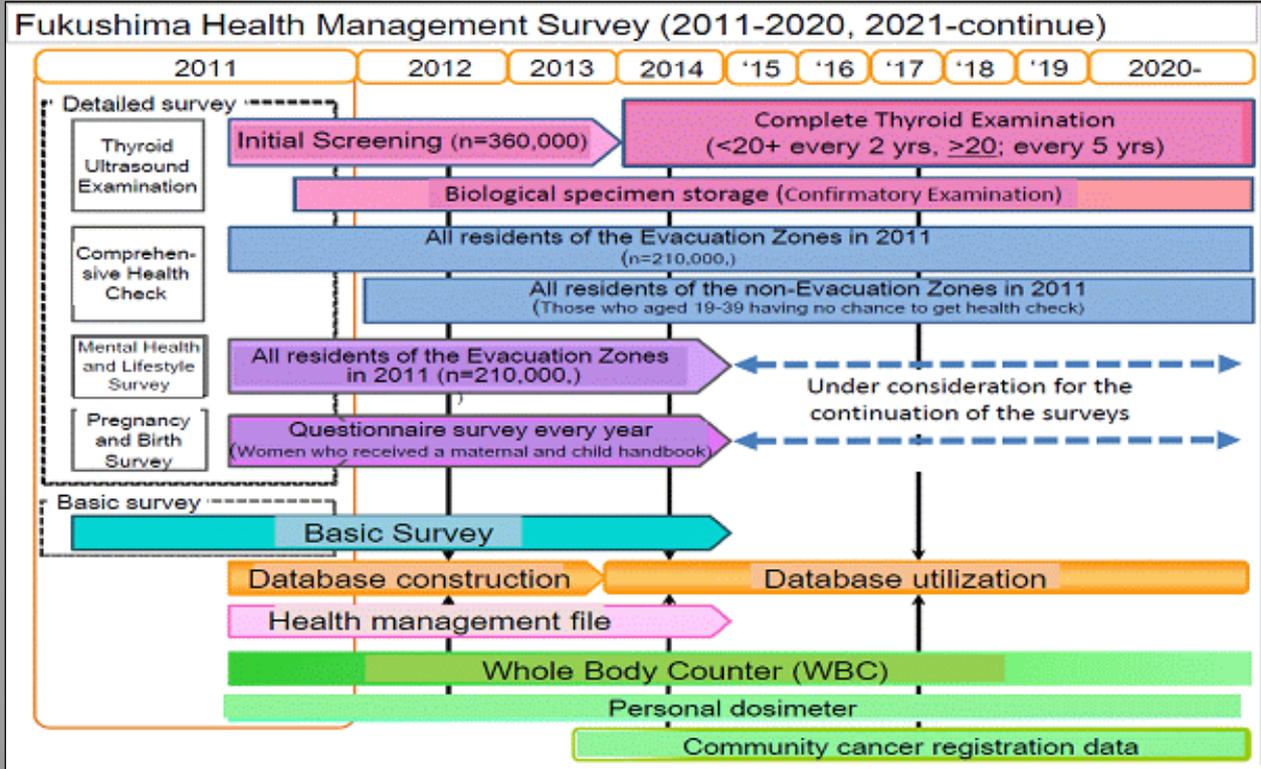
#### ▪ 정신건강과 생활양식 조사 (Mental Health and Lifestyle Survey)

- 외상 후 스트레스 장애, 불안이나 스트레스와 같은 정신건강 문제의 높은 위험을 지니는 주민들에게 적절한 치료 제공

#### ▪ 임신과 출산 조사 (Pregnancy and Birth Survey)

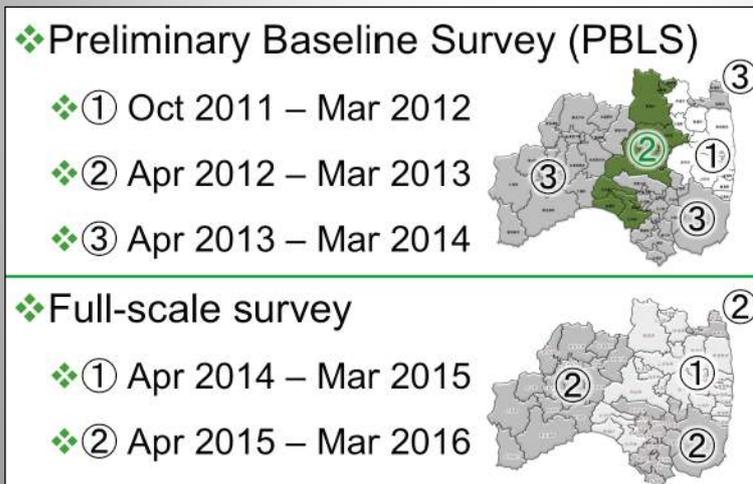
- 사고 당시 임산부 (2010년 8월-2011년 7월)를 위한 적절한 의학적 치료 및 지원

# Fukushima Health Management Survey (long-term plan)



## Thyroid Ultrasound Examination

- 사고 당시 **18세 이하인 367,707명의 주민**
- 현재 다른 지역에서 거주하는 **소개된 주민을 포함**
- Preliminary baseline survey (**PBLS**): **2014년 완료**
- PBLS이후 대규모 조사: 2016년 완료예정
  - 20세까지는 매 2년마다, 그 이후에는 5년마다 조사



## Results of preliminary baseline survey (1)

- 296,026명 (80.5%) PBLS에 참여

Judgment	Interpretation	Follow-up
<b>A</b>	<b>Within normal limits</b>	
(A1)	No nodule* or cyst	Next primary examination
(A2)**	Nodule* ≤5.0mm and/or cyst ≤20.0mm	Next primary examination
<b>B</b>	<b>Nodule* ≥5.1mm and/or cyst ≥20.1mm</b>	<b>Confirmatory examination</b>
<b>C</b>	<b>Other findings that warrant immediate follow-up</b>	<b>Urgent confirmatory examination</b>

### PBLS suspicious or malignant cases

① 14 / 41,813 = 0.033%

② 54 / 139,209 = 0.039%

③ 35 / 115,004 = 0.030%

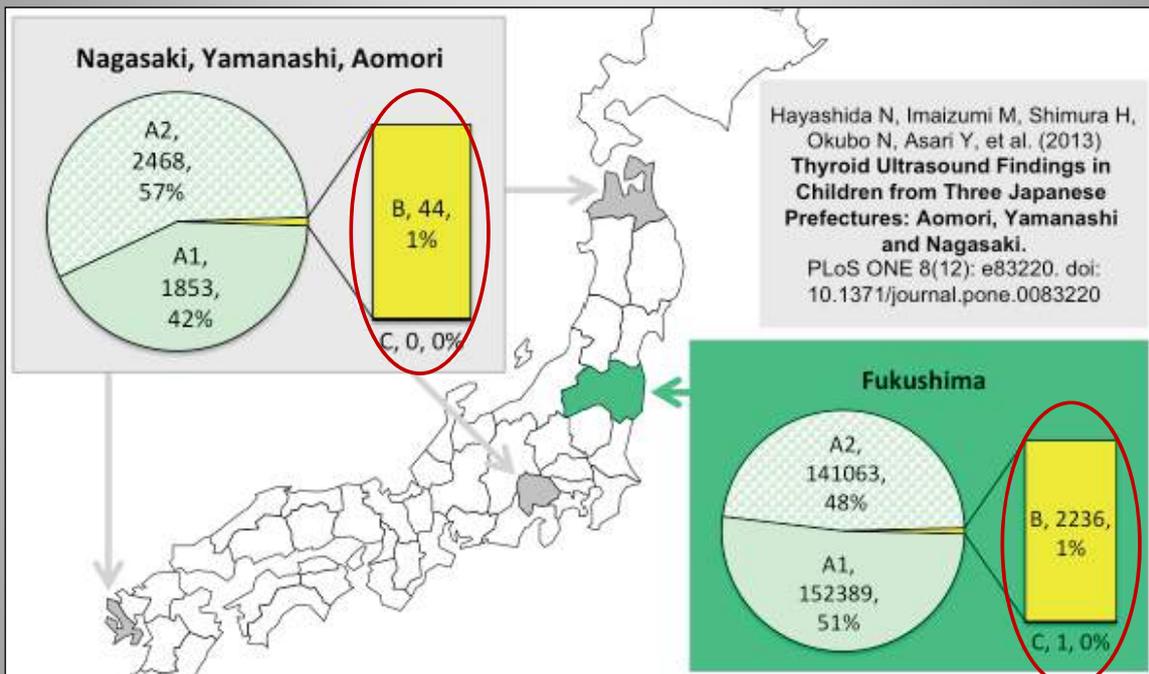
104 / 296,026 = 0.035%    36 (M)/68 (F)



Fukushima Medical University's Office of International Cooperation

## Results of preliminary baseline survey (2)

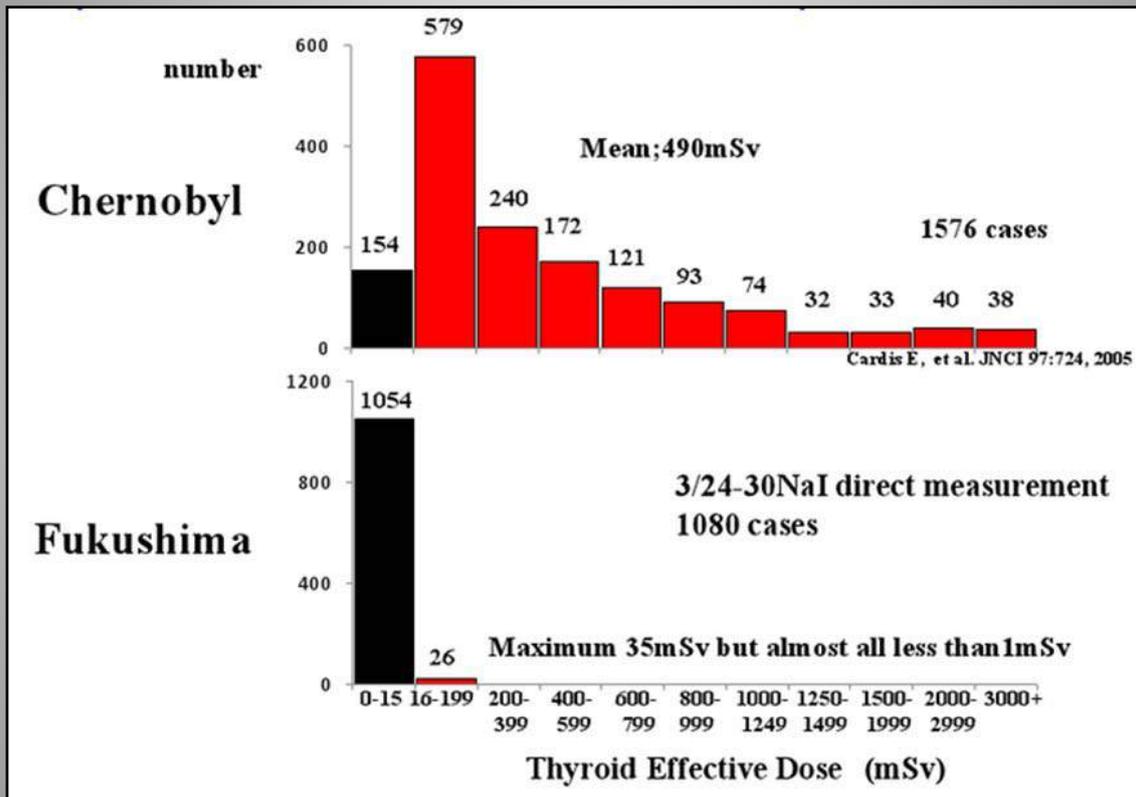
- 비슷한 검사 방법을 사용하여 다른 지역과 비교



Fukushima Medical University's Office of International Cooperation

➤ 다른 지역(나가사키, 야마나시, 아오모리)의 검사결과와 차이를 보이지 않음

## 소아의 갑상선 흡수선량 (Chernobyl vs. Fukushima)



NCRP 2013 (S. Yamashita)

## 현재까지의 후쿠시마 지역주민의 건강영향 평가

- 현재까지 **방사선에 의한 사망은 보고되지 않음**
- 방사선 피폭으로 인한 **갑상선암 증가 가능성 낮음**
- 피폭으로 인한 **건강 영향은 미미할 것으로 추정** (UNSCEAR, WHO)
- 피폭의 직접적인 영향 이외의 **다른 건강관련 이슈**  
(예, 심리적인 피해, 소아의 야외 활동의 제한으로 인한 과체중)
- WHO/UNSCEAR 보고서의 체르노빌과 유사한 결론 (소아 갑상선암 제외)
- **추적기간이 충분하지 않음**

## 쓰리마일 아일랜드 (TMI, 1979년 3월 발생)

- 사고 후 10일 동안 주변 5마일 이내 피폭선량: **0.09~0.25 mSv**
- 방사능 물질 대부분은 대기중으로 분산



<http://nuclear-energy.net/nuclear-accidents/three-mile-island.html>

## TMI 지역주민 코호트 사망 연구

- 5마일 이내 주민 32,135명에 대한 추적 연구 (Talbot et. al, 2003)
  - 수행기관: 미국 피츠버그 대학
  - 추적기간: 1979~1998
  - 9명의 갑상선암 발생 (이중 1명 사망)
  - 방사선 피폭과 갑상선암의 관련성 없음
  - 전체암 사망률은 일반인구와 차이 없음
  - 일부 요인(all lymphatic and hematopoietic tissue, breast cancer)에서 선량에 따른 사망률 증가 경향

## TMI 지역 갑상선암 발생 연구

- **인접 지역과 주변지역에 대한 갑상선암 발생 단면조사(Levin et. al, 2013)**
  - 수행기관: 미국 Pinnacle Healthy System
  - 암발생 기간: 1990~2009
  - 인접 3개 지역, 주변 7개 지역 주민
  - TMI 사고 지역 갑상선암 발생 감소 (예상치 보다 약 9.3% 낮게 관찰)
  - 남쪽에 위치한 몇몇 지역의 발생 증가 (16~23%) : 노출수준 및 사고 시 바람의 방향 (북동쪽)과 상충한 결과
  - 연구방법의 한계로 인해 명확한 결론은 내리지 못함 (인과성 근거 부족)
- 방사선 노출과 갑상선암의 관련성에 관한 **역학적인 근거는 사고 이후 30년이 지난 지금도 여전히 불확실함**

## 원전 및 핵시설 지역 갑상선암 연구

- **미국 한포드(Hanford) 갑상선질환 연구(2002)**
  - 기관 : 미국 질병예방통제센터(CDC) 주관, 프레드 허친슨 암연구센터
  - 대상 : 플루토늄을 생산하는 한포드 핵시설 주변 주민(I-131, 74만 Ci)
  - 결과 : 핵시설 방사선방출량과 주민 갑상선암의 관련성 없음
- **미국 원전지역 갑상선암 연구(2012)**
  - 기관 : 미국 오리건 보건과학대학교
  - 대상 : 미국 65개 원전주변 지역  
(거리구분: 15마일 이내, 15-30마일 이내, 30-45 마일 이내)
  - 결과 : 원전으로부터의 거리와 갑상선암 발생의 관련성 없음
- **벨기에 원전주변 갑상선암 조사(2014)**
  - 기관 : 벨기에 공중보건과학연구소, 정부원자력통제기관
  - 대상 : 벨기에 4개 원전 주변 지역,  
프랑스 원전이 소재(3km 거리)한 국경지역
  - 결과 : 원전 반경 20km 이내에서 갑상선암 발생 증가는 없음

# 요약



## 원전 주변지역 주민 방사선 영향

- 원전 주변지역 주민의 예상 **피폭선량은 매우 미미**
- 원전 방사선 피폭에 따른 질병발생의 **인과성에 대한 근거 부족** (국내외 역학연구)
- **100 mSv 이하의 저선량 방사선**에 의한 건강 영향은 현재까지 역학적으로 확인이 어려움
  - 통계적 유의성을 확보할 수 있는 연구대상수의 부족
  - 불확실한/제한된 교란변수(예, 생활 식습관, 유전적 취약성 차이 등)
  - 다양한 발암원에 따른 질병발생 위험과 구분이 쉽지 않음
- **인지된 위험(주관적) vs. 실제 위험**  
(대중이 참여하는 위험 커뮤니케이션 및 교육의 중요성)

# 함께 고민하는 사람들

한국원자력의학원  
국가방사선비상진료센터

- 이 승 숙 (센터장)
- 박 선 후 (피폭치료연구팀장)
- 조 민 수 (비상대응교육팀장)
- 하 위 호 (보건물리팀장)

## 방사선 역학

서 성 원  
이 달 님



## 방사선 생물학

김 민 정  
성 기 문  
안 효 민

감사합니다

## 7. 갑상선암의 특성 및 발생원인

김병일(KIRAMS)

# 갑상선암의 특성 및 발생위험인자

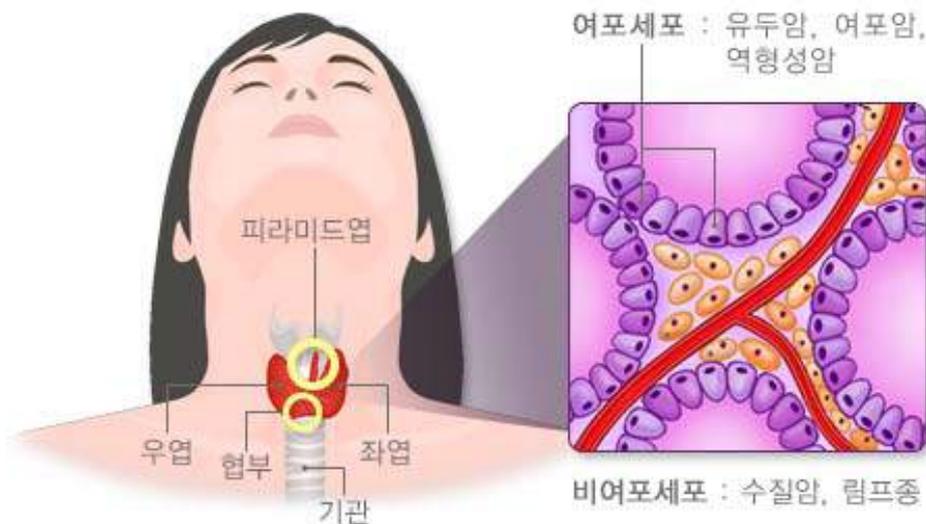
핵의학과  
김 병 일



한국원자력의학원

## 갑상선암이란 ?

〈그림. 갑상선암의 종류〉



보건복지부

국립암센터  
NATIONAL CANCER CENTER



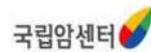
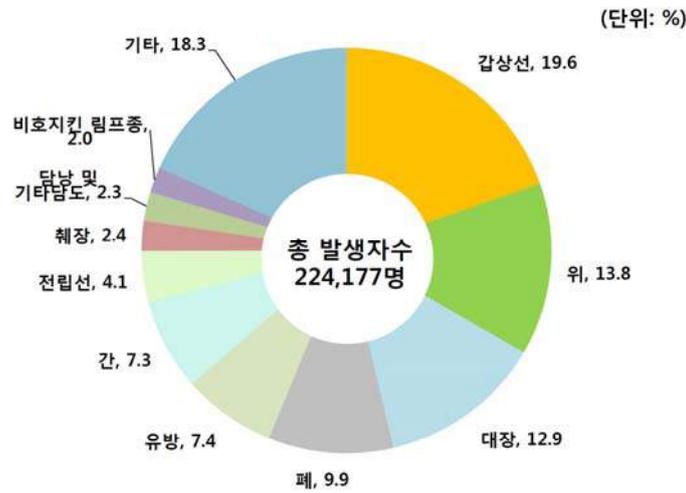
대한의학회  
Korean Academy of Medical Sciences



# 갑상선암 발생분율

2012년 암등록통계

## 주요 암종 발생분율: 남녀전체, 2012



# 갑상선암 발생분율

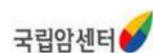
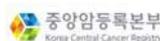
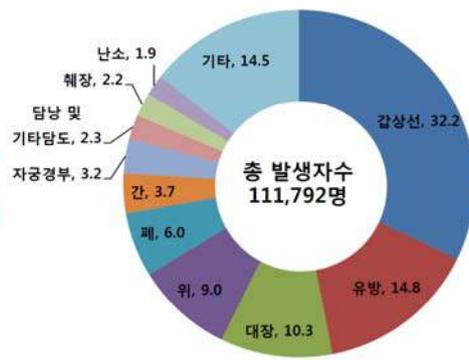
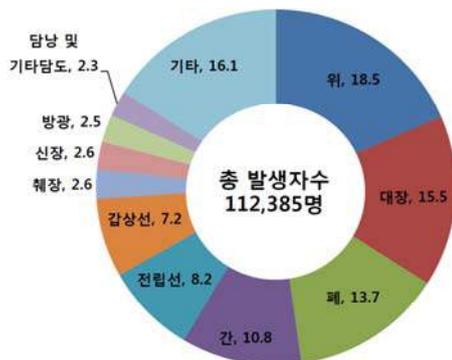
2012년 암등록통계

## 성별 주요 암종 발생분율: 2012

남자

여자

(단위: %)



# 조직학적 형태에 따른 발생빈도

〈표 갑상선암의 조직학적 형태에 따른 발생 빈도, 2009년 갑상선암 발생 건수 전체〉

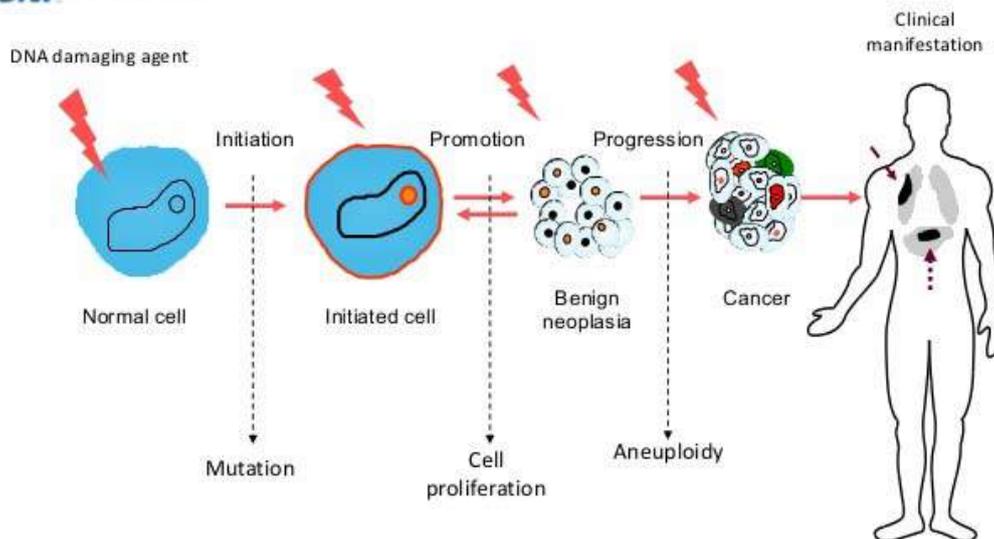
조직학적 형태 Histological group	발생 건수 cases	%
1. 암종(Carcinoma)	31,774	99.4
1.1 여포성암(Follicular carcinoma)	494	1.5
1.2 유두상암(Papillary carcinoma)	30,419	95.1
1.3 수질성암(Medullary carcinoma)	152	0.5
1.4 역형성형암(Anaplastic carcinoma)	63	0.2
1.5 기타 명시된 암(Other specified carcinoma)	618	1.9
1.6 상세불명암(Unspecified carcinoma)	28	0.1
2. 육종(Sarcoma)	1	0.0
3. 기타 명시된 악성 신생물(Other specified malignant neoplasm)	1	0.0
4. 상세 불명의 악성 신생물(Unspecified malignant neoplasm)*	201	0.6
총 계	31,977	100.0

\*14건의 DCO 포함(Death Certificate Only, DCO: 전체 암 등록 환자 중 사망진단서에서만 암으로 확인된 분율)  
(보건복지부 중앙암등록본부 2011년 12월 29일 발표자료)

# 암 발생기전 - 다단계

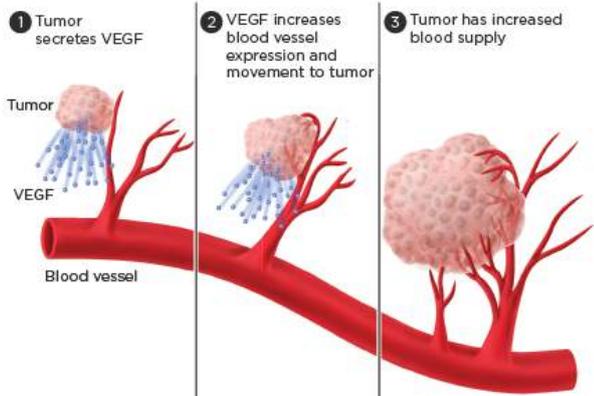


SEMINÁRIO NACIONAL DO BENZENO  
CNI 2 a 4 de dezembro de 2012

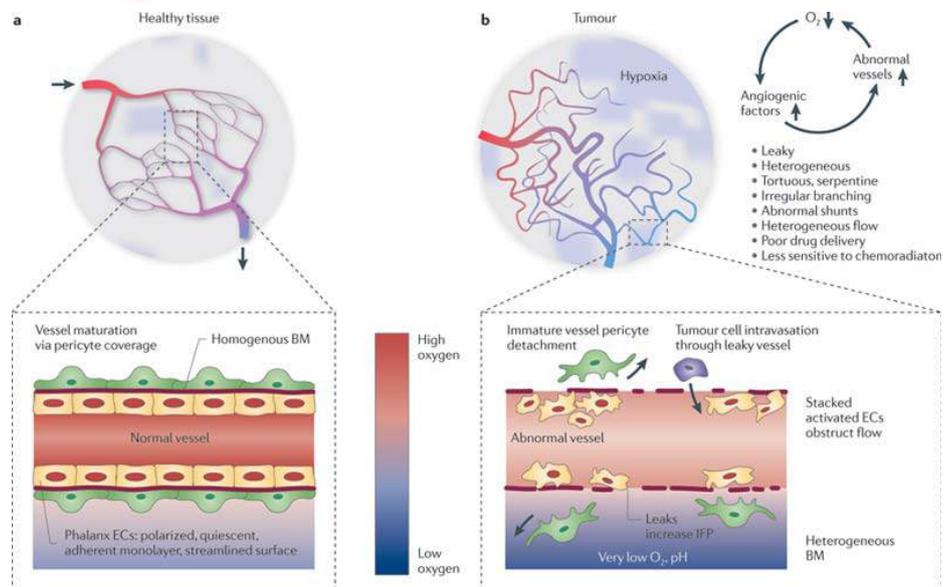


## MULTISTAGE CARCINOGENESIS

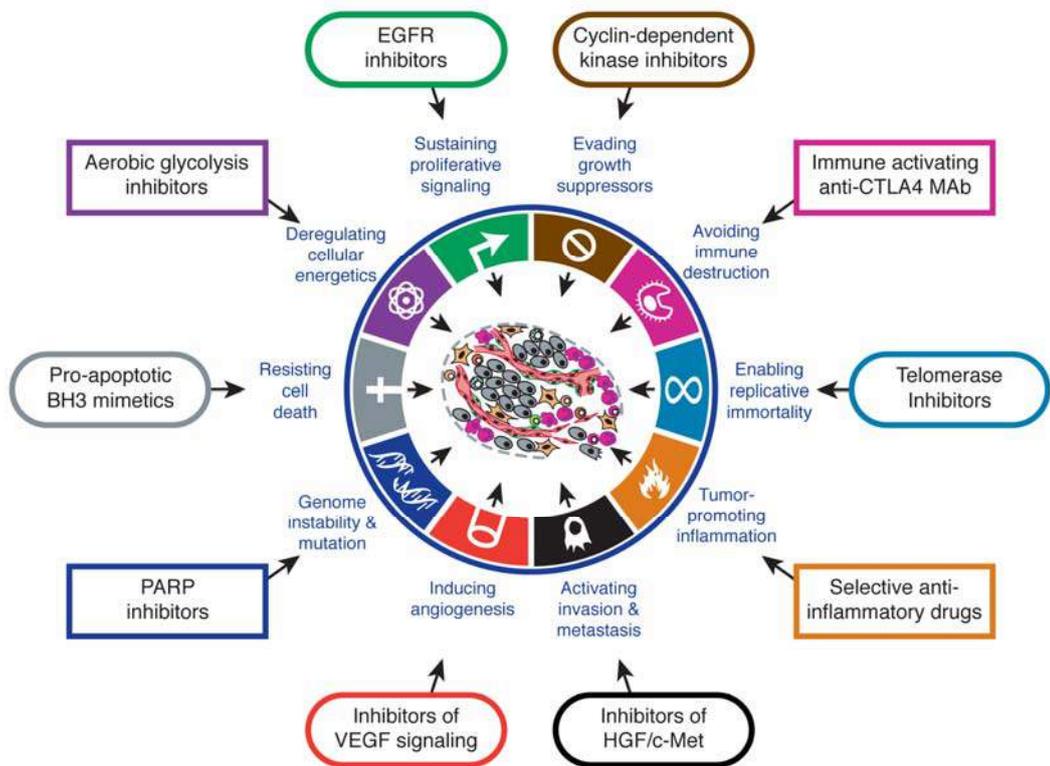
Harris CC. IN Molecular Dosimetry and Human Cancer, CRC Press, 1991



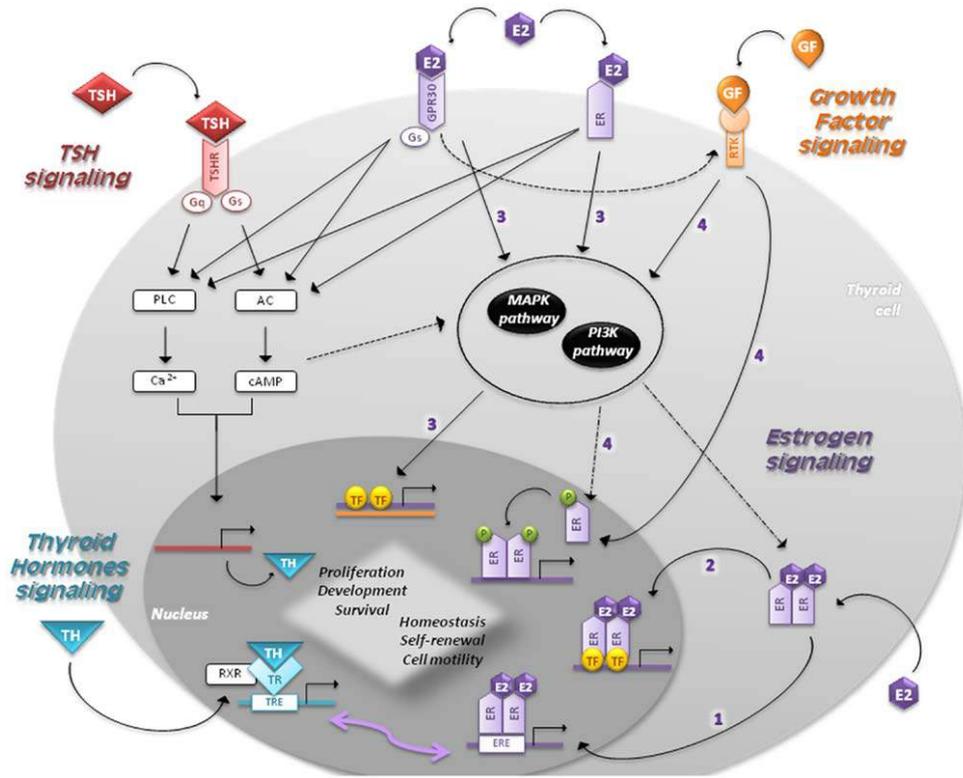
# 암 발생기전 - 주변영향



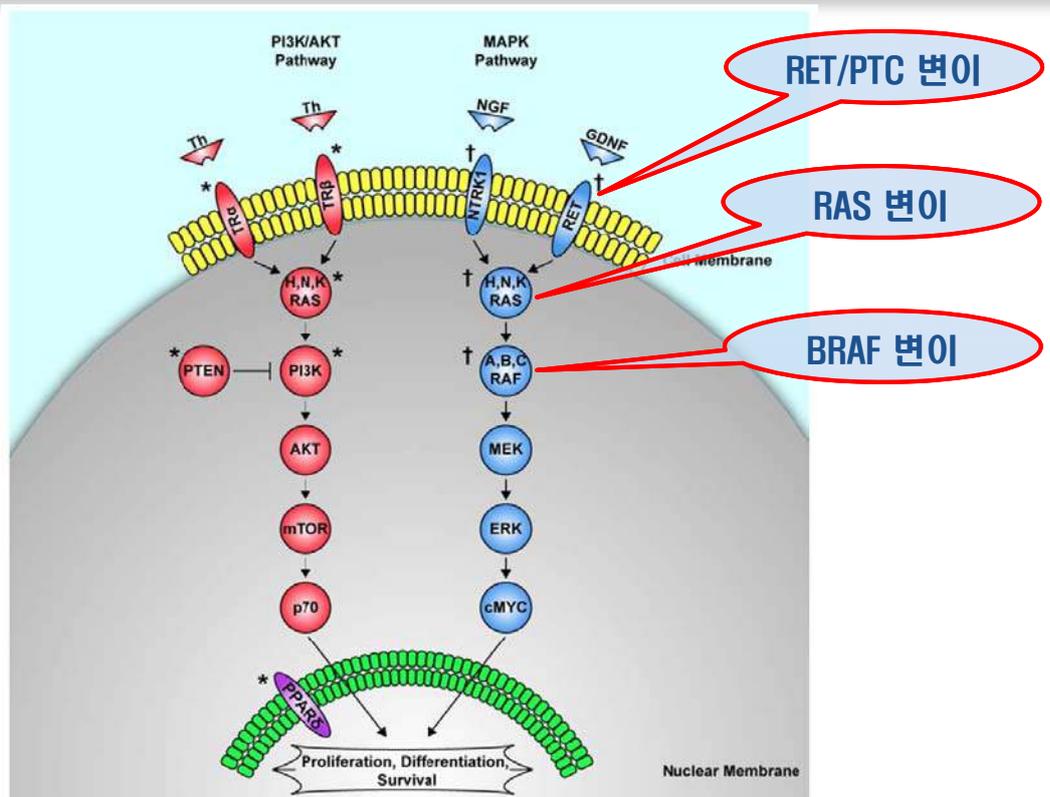
# 암 발생기전 - 다양한 인자



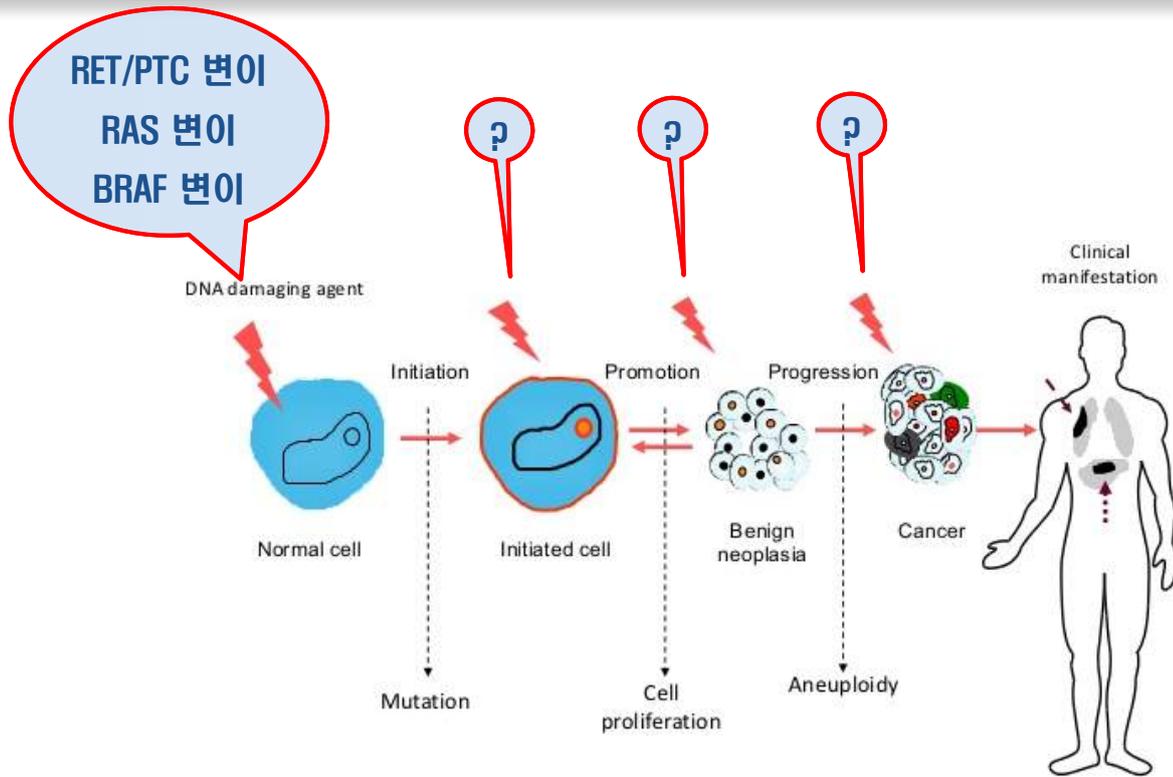
# 갑상선암 발생 주요인자



# 초기 단계 - 타이로신 키나아제 경로



## 암 발생 vs. 갑상선암 발생

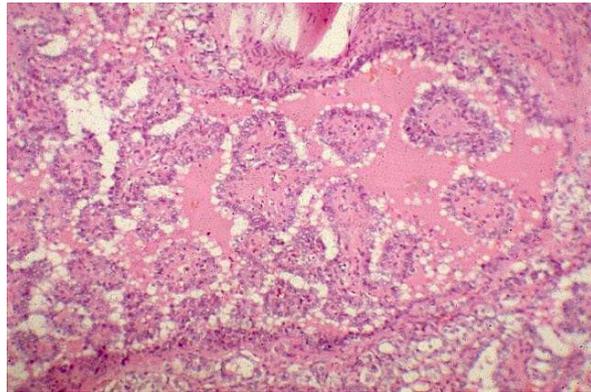
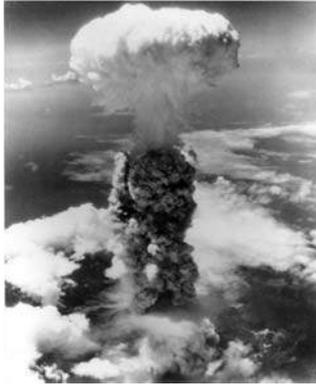


## 발생 - 원인 vs. 위험인자

- **원인**
  - 인과관계가 명확
  - 원인만을 질병 유발이 가능
  - 결핵의 원인 → 결핵 (다른 인과관계는 없음)
  
- **위험인자**
  - 인과관계가 불명확
  - 인자가 질병발생에 관련되었다고 여겨지나 인자만으로는 질병 발생을 전부 해석할 수 없음
  - 통계적인 관련성만 보임
  - 담배와 폐암 (같은 흡연량에도 발생하는 사람과 발생하지 않는 사람이 있으므로 폐암 발생에 다른 인자가 개입되어 있다고 여겨지므로 이는 위험인자에 해당)

# 갑상선암 발생 위험인자

- 방사선
  - 고선량 방사선 노출
  - 유두암 > 95%



# 방사선 → 갑상선암 BEIR VII 보고서

TABLE 12D-1 Lifetime Attributable Risk of Cancer Incidence<sup>a</sup>

Cancer Site	Age at Exposure (years)										
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
<i>Males</i>											
Stomach	76	65	55	46	40	28	27	25	20	14	7
Colon	336	285	241	204	173	125	122	113	94	65	30
Liver	61	50	43	36	30	22	21	19	14	8	3
Lung	314	261	216	180	149	105	104	101	89	65	34
Prostate	93	80	67	57	48	35	35	33	26	14	5
Bladder	209	177	150	127	108	79	79	76	66	47	23
Other	1122	672	503	394	312	198	172	148	98	57	23
Thyroid	115	76	50	33	21	9	3	1	0.3	0.1	0.0
All solid	2526	1667	1325	1076	881	602	564	507	407	270	126
Leukemia	237	149	120	105	96	84	84	84	82	73	48
All cancers	2563	1816	1445	1182	977	686	648	591	489	343	174
<i>Females</i>											
Stomach	101	85	72	61	52	36	35	32	27	19	11
Colon	220	187	158	134	114	82	79	73	62	45	23
Liver	28	23	20	16	14	10	10	9	7	5	2
Lung	733	608	504	417	346	242	240	230	201	147	77
Breast	1171	914	744	609	499	355	340	320	31	12	4
Uterus	50	42	35	29	24	17	16	15	9	5	2
Ovary	104	87	72	60	50	36	34	32	18	11	5
Bladder	212	180	153	130	108	79	78	74	64	47	24
Other	1339	719	523	409	323	207	181	148	109	68	30
Thyroid	634	419	275	178	113	41	14	4	1	0.3	0.0
All solid	4592	3265	2525	1988	1575	1002	824	678	529	358	177
Leukemia	185	112	86	76	71	63	62	62	57	51	37
All cancers	4777	3377	2611	2064	1646	1065	886	740	586	409	214

**0.1 Gy → 1/100,000**

NOTE: Number of cases per 100,000 persons exposed to a single dose of 0.1 Gy.

<sup>a</sup>These estimates are obtained as combined estimates based on relative and absolute risk transport and have been adjusted by a DDREF of 1.5, except for leukemia, which is based on a linear-quadratic model.



## 방사선 관련 유전자변이 – RET/PTC

- 일본 원폭 아동에서 발견 (Nagasaki et al., 1994)
- Marshall 섬 원폭실험 (Cronkite et al., 1995)
- 체르노빌 원전사고 (Williams, 2002; Nikiforov, 2006)
- 두경부 방사선조사 (Duffy and Fitzgerald, 1950; Winship and Rosvoll, 1970)



## RET/PTC 유전자변이 원리

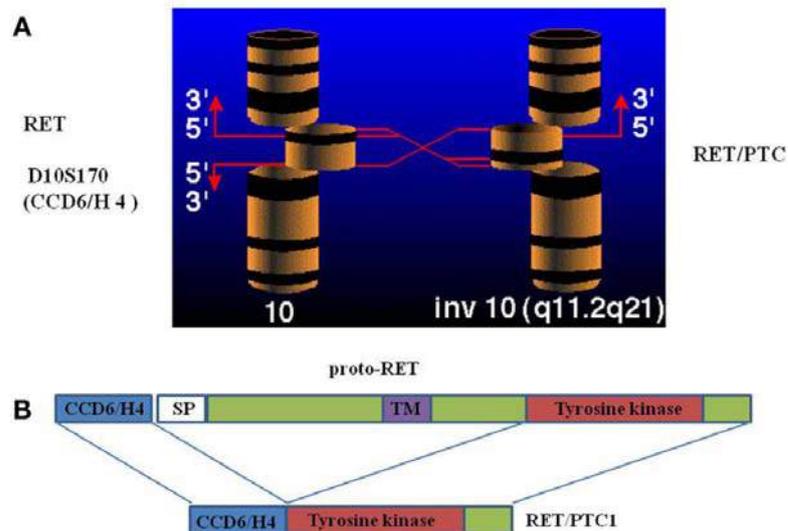
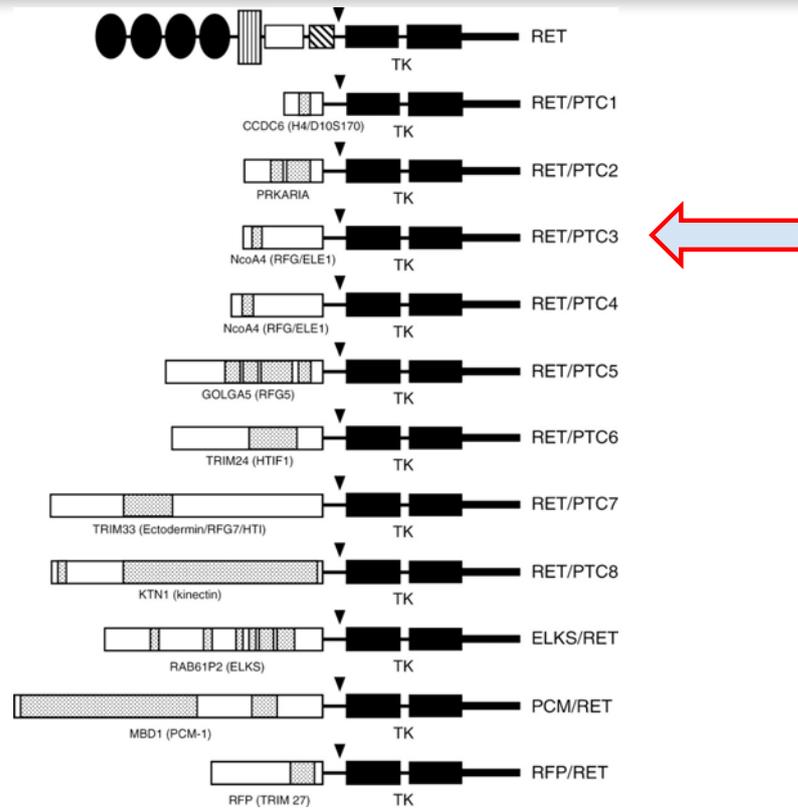


FIGURE 2 | Schematic representation of *RET/PTC1* rearrangement: a centromeric inversion of chromosome 10 (A) generates a chimeric gene through the fusion of the *RET* tyrosine-kinase domain with the 5' terminal region of a new gene denominated CCD6, formerly called H4 (B).

# RET/PTC 유전자변이 종류



# RET/PTC 방사선 vs. 자연발생적

Reference	Post-Chernobyl n (%)	Spontaneous n (%)
Guerra et al. (2011)**	nd	36%
Hieber et al. (2011)	16/22 (72)	nd
Hamatani et al. (2008)	11/50 (22)*	nd
Rhoden et al. (2006)	nd	25/34 (73)
Zhu et al. (2006)	nd	26/75 (34)
Unger et al. (2006)	10/13 (77) <sup>†</sup> 9/32 (28) <sup>‡</sup>	nd
Di Cristofaro et al. (2005)	11/17 (65)	9/21 (43)
Rhoden et al. (2004)	nd	18/25 (72)
Puxeddu et al. (2003)	nd	13/48 (27)
Elisei et al. (2001)	19/25 (76)	11/47 (23)
Cinti et al. (2000)	nd	13/69 (19)
Sheils et al. (2000)	nd	12/50 (24)
Fenton et al. (2000)	nd	15/33 (45)
Chua et al. (2000)	nd	44/62 (71)
Thomas et al. (1999)	37/67 (55)	nd
Smida et al. (1999)	25/51 (49)	nd
Mayr et al. (1998)	nd	8/99 (8)
Tallini et al. (1998)	nd	81/201 (40)
Lam et al. (1998)	nd	17/40 (43)
Sugg et al. (1999)	nd	51/86 (59)
Nikiforov et al. (1997)	33/38 (87)	12/17 (70)
Klugbauer et al. (1995)	9/15 (60)	nd
Fugazzola et al. (1995)	4/6 (66)	nd
Zou et al. (1994)	nd	1/40 (2.5)
Ishizaka et al. (1991)	nd	1/11 (9)

\*Atomic bomb survivors.

<sup>†</sup>Long latency period.

<sup>‡</sup>Short latency period.

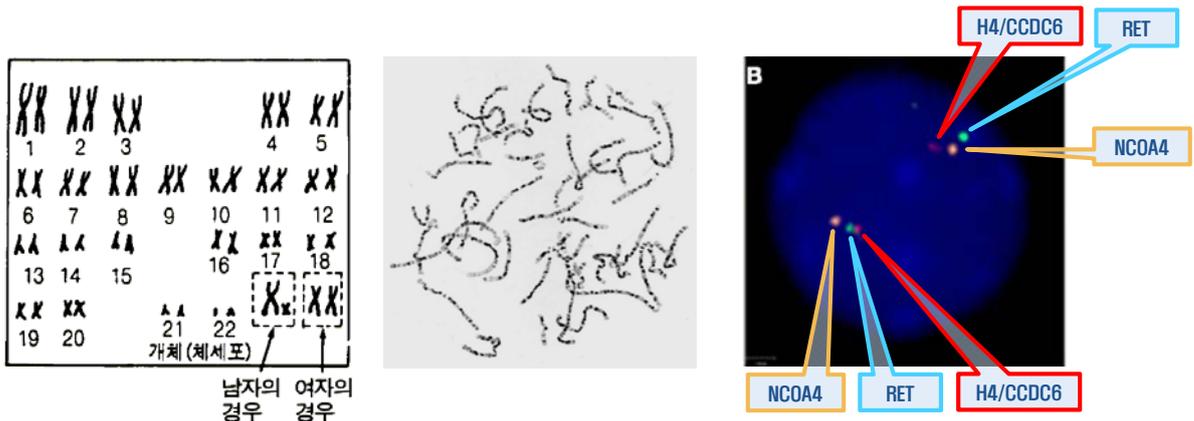
\*\*Data obtained on cytological samples.

# RET/PTC3 – 연구보고들

- 체르노빌 원전사고 RET/PTC3 > RET/PTC1
  - 잠복기가 짧은 경우에서 (Williams, 2008)
- 어린이에서 RET/PTC가 방사선조사 여부에 상관없이 더 많음 (Nikiforov et al., 1997; Elisei et al., 2001)
- Post-chernobyl thyroid cancer (Unger et al., 2006)
  - 시간이 경과함에 따라 RET/PTC (+) 감상선암 감소
  - RET/PTC (+) 중 → RET/PTC1 증가 vs. RET/PTC3 감소
  - 가설: “잠복기가 길어질수록 방사선에 의한 영향이 적어질 것이다.”
  - 잠복기에 따라 조직학적 형태가 달라진다는 보고 (Williams, 2008)

# Why RET/PTC3 ?

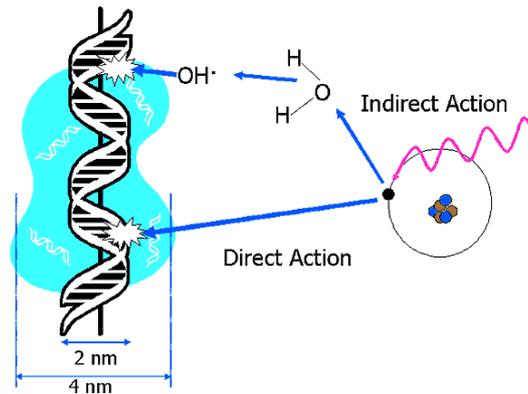
- RET Oncogene 방사선에 민감 (Volpato et al., 2008)
- 크로마틴 내에서 두 유전자의 위치가 근접해 있어 단일 방사선경로에 의해서도 DNA 두가닥 손상이 각각의 유전자에 발생 가능한 구조 (Nikiforova et al., 2000; Gandhi et al., 2006, 2010a).



(B) 2D image of three-color FISH showing positioning of *RET* (green), *NCOA4* (orange), and *H4/CCDC6* (red) in interphase nuclei of thyroid cells. The panel depicts a nucleus showing two sets of *RET*, *NCOA4*, and *H4/CCDC6* with one pair of *RET* and *H4/CCDC6* positioned close to each other.

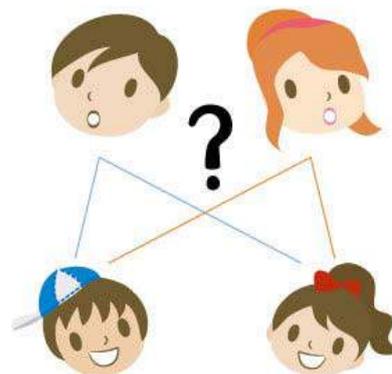
## RET/PTC3 유발 방사선 이외의 원인

- Putative carcinogens such as caffeine, ethanol, hypoxia (Gandhi et al., 2010a,b)
- 방사선 → 세포 내  $H_2O_2$  생성 → DNA 이중가닥 손상 → RET/PTC1 발생 (Ameziane-El-Hassani et al., 2010)
  - Superoxidase anions 또는  $H_2O_2$  생성가능한 어떠한 물질도 RET/PTC 생성 가능함을 시사



## 갑상선암 발생 위험인자

- 유전적 요인
  - 유두암 4%에서 가족력





## 갑상선암 발생 위험인자

- 기저 갑상선 질환
  - 아직 논란이 많음, 그러나 현재까지의 연구를 종합해보면
    - 갑상선종 → 여성 상대위험도 6
    - 양성 갑상선 결절 → 여성 상대위험도 30
    - 갑상선기능저하/기능항진 → 관련이 없음



## 갑상선암 발생 위험인자

- 기타 원인: 거론은 되나 아직 명확하지 않음
- 호르몬
  - 여성에서 많이 발생
  - 에스트론제 투여는 증거 미약
  - 최근분석에 의하면
    - 인공중절 및 첫 출산 나이 → 미약하게 증가
    - 경구피임약 → 약간 증가 → 중단시 감소
    - 폐경 이후 여성호르몬 복용 → 증가치 않음



# 갑상선암 발생 위험인자



## ● 식이 - 요오드

- 과다한 요오드 섭취 → 유두암 발생 증가
- ※ 요오드 결핍 장기간 갑상선자극호르몬(TSH) 자극 여포암 발생
- ※ 우리나라 요오드 과잉섭취 → 유두암 >> 여포암

TABLE 2. RATIO OF PAPILLARY (PAP) TO FOLLICULAR (FOLL) DIFFERENTIATED THYROID CANCER IN ISA AND AUSTRIA, DEVELOPING FROM IDA TO ISA

Country	Period	ISA/IDA	% PAP	% FOLL	PAP:FOLL
Iceland	1955-1984	ISA	85	15	5.6:1
Japan	1977-1986	ISA	82	18	4.5:1
USA	1973-1983	ISA	80	20	4.0:1
Norway	1970-1985	ISA	77	23	3.3:1
Sweden	1960-1977	ISA	76	24	3.2:1
Austria	1990-1995	ISA	80	20	4.0:1
Austria*	1970-1975	IDA	54	46	1.1:1
Austria**	1952-1959	IDA	17	83	0.2:1

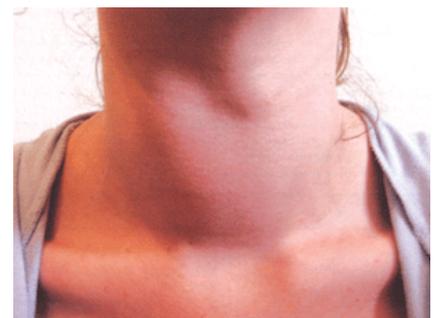
ISA, iodine sufficient area; IDA, iodine deficient area; Austria, 20 mg KI/kg salt (18); Austria\*, 10 mg KI/kg salt (27); Austria\*\*, without iodine salt prophylaxis (37).

THYROID  
Volume 8, Number 12, 1998

# 갑상선암 발생 위험인자

## ● 식이 - 십자화과 채소류 (양배추, 브로콜리)

- 갑상선종을 유발할 수 있는 물질 함유
- 암 예방 효과를 가지는 항산화제들을 같이 함유 → 갑상선암 발생 감소 보고도 있음



## 갑상선암 발생 위험인자

- 식이 - 커피
  - 일본에서 갑상선암 감소시킬 수 있다고 보고
  - 여러 연구를 종합하면 관련이 없어 보임



- 파스타, 빵, 버터, 치즈 등의 음식 및 코칼로리 식이 & 비만



## 갑상선암 발생 위험인자

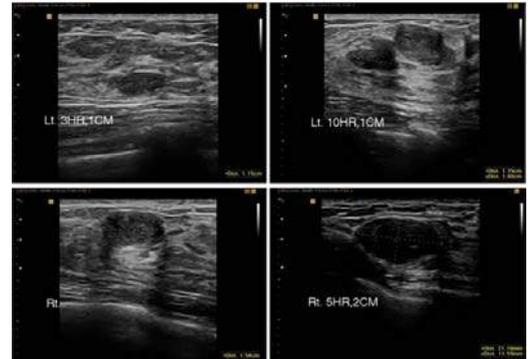
- 식이 - 담배
  - 이전 연구들은 갑상선암의 발생과 관련 없다는 보고가 많았음
  - 최근의 연구에서는 위험을 낮춘다는 보고들이 있음
  - 아마도 갑상선자극호르몬 농도를 낮추는 효과와 관련





## 갑상선암 발생 위험인자

- 유방질환
  - 유방암이나 양성 유방 질환들과의 관련성에 대한 많은 논란 있어옴
  - 최근 일부 연구에서 위험도가 증가했다는 보고
  - 확인 연구가 더 필요



감사합니다.

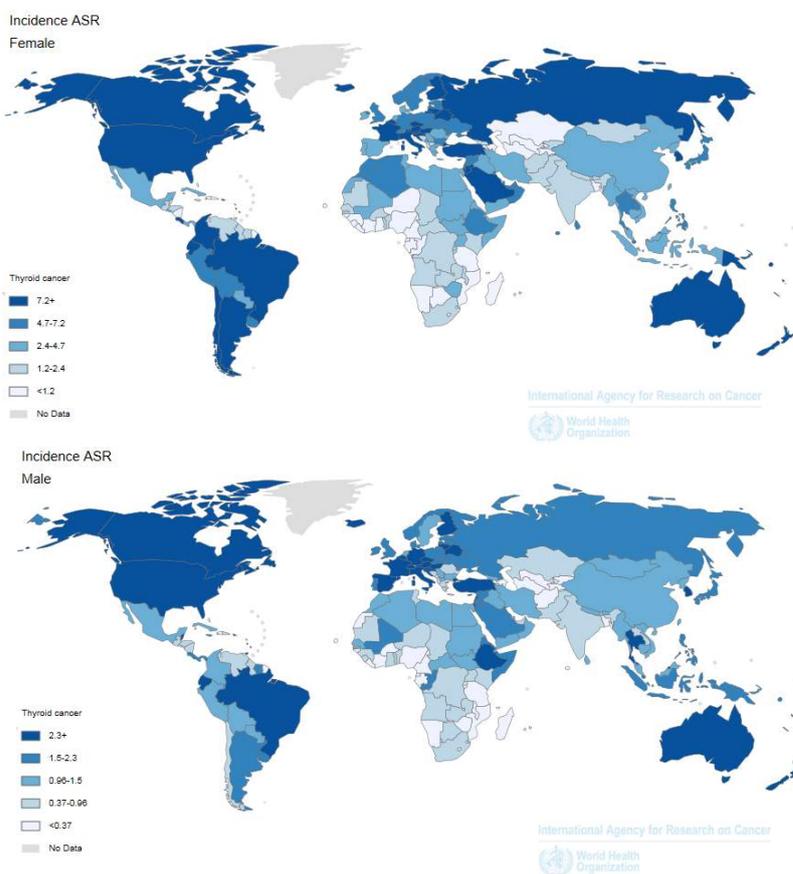
## 8. 갑상선암 발생과 검진과의 관계

안형식/김현정(고려대)

# 갑상선암 검진과 지역별 갑상선암 발생률 및 사망률의 연관성

안 형 식 / 김 현 정  
고려대학교 의과대학

## 갑상선암 발생률

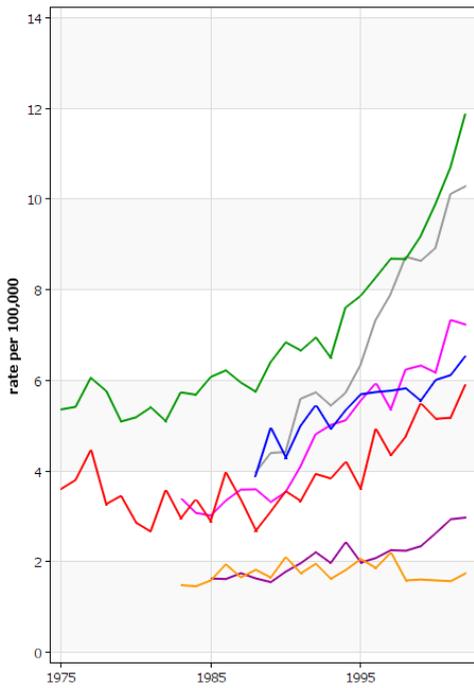


GLOBOCAN 2012

# 갑상선암 발생률

여자

남자



미국(백인)

프랑스

호주

중국

미국(흑인)

영국

인도



CI5Plus - IARC

## International patterns and trends in thyroid cancer incidence 1973-2002

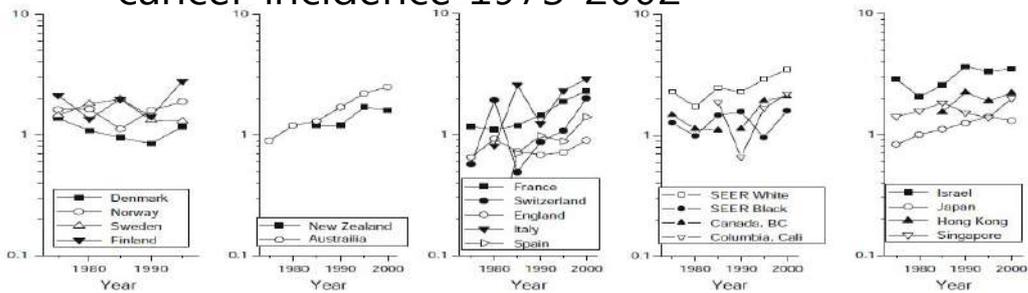


Fig. 3 Trends in age-standardized thyroid cancer rates for males by continent and area for the time periods 1973-2002

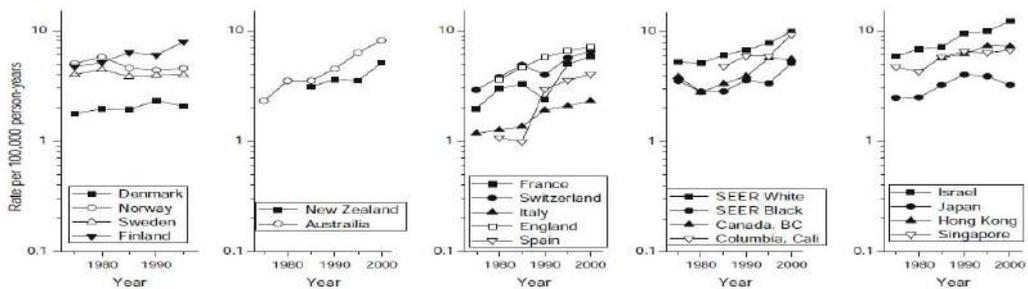
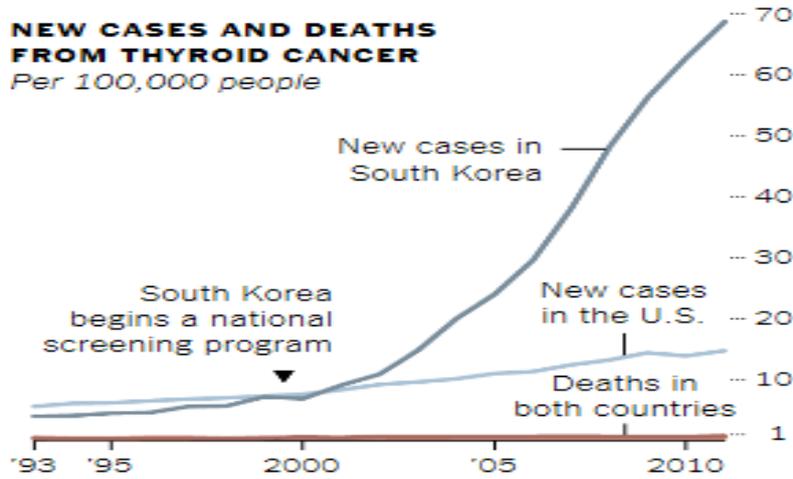


Fig. 4 Trends in age-standardized thyroid cancer rates for females by continent and area for the time periods 1973-2002

## Screening for Thyroid Cancer

Since South Korea adopted widespread cancer screening in 1999, thyroid cancer has become the most diagnosed cancer in the country. But if this early detection were saving lives, the already-low death rate from thyroid cancer should have fallen, not remained steady.

### NEW CASES AND DEATHS FROM THYROID CANCER Per 100,000 people



Sources: New England Journal of Medicine; National Cancer Institute

By The New York Times

## 발생률 변화에 영향을 미치는 요인

위험 요인의 변화:

- 위험 요인의 변화 (시간, 크기, 인구통계?)

진단과 검진의 변화:

- 진단의 향상
- 조기발견?

방법론적인 고려:

- 보고되거나 등록된 자료의 타당성, 분류의 변화?

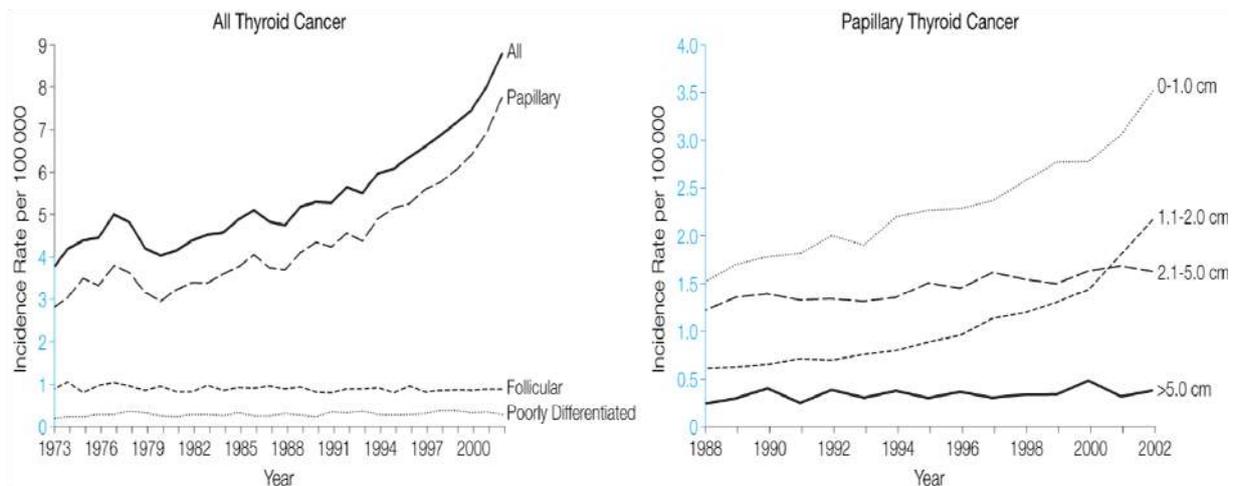
## 갑상선암의 조기발견증가

발견 증가 가능성 :

- 초음파를 사용한 작은 종양의 검출
- CT와 MRI을 사용한 작은 종양의 검출
- 작은 유두 종양 발생의 급격한 증가 < 20 mm
- 긴 잠복기간에 대한 증거
- 치료가 필요하지 않는 종양의 검출(저 위험 갑상선 유두암)
- 부검을 통한 작은 종양의 검출율

Brito JP et al, BMJ 2013

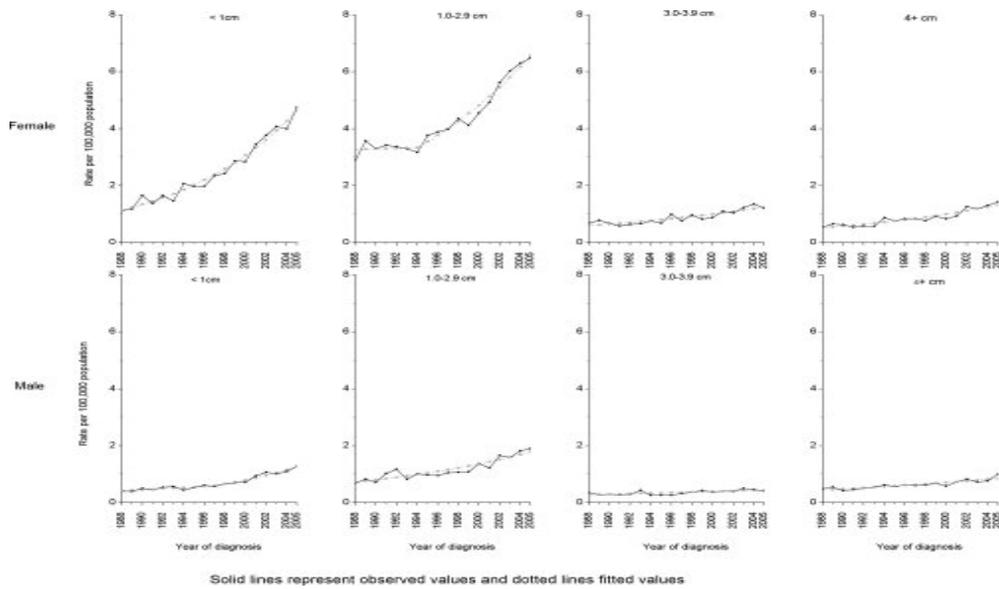
### Increasing Incidence of Thyroid Cancer in the United States, 1973-2002



Louise Davies, MD, MS; H. Gilbert Welch, MD, MPH

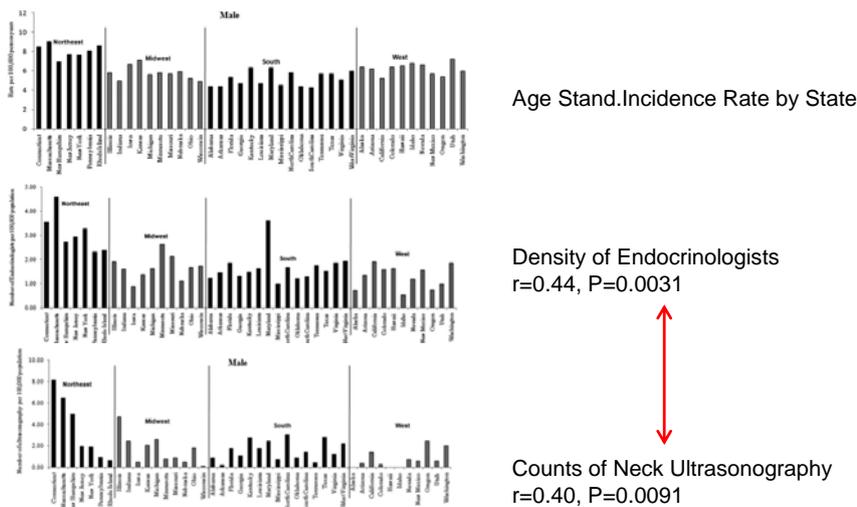
JAMA. 2006;295(18):2164-2167.  
doi:10.1001/jama.295.18.2164.

# Increasing incidence of differentiated thyroid cancer in the United States, 1988–2005



Cancer  
[Volume 115, Issue 16](#), pages 3801-3807, 13 JUL 2009 DOI: 10.1002/cncr.24416

## Epidemic of Thyroid Cancer in the US 2005-2009: Role of Endocrinologists and Ultrasound



Udelsman & Zhang Thyroid 2013

## 갑상선 검진자료-지역사회건강조사

- 추진내용
  - 도입시기 '07년 시범사업, '08년 전국
  - 조사단위 253개 보건소
  - 조사대상 만 19세 이상 성인
  - 조사형태 확률표본조사
  - 조사규모 보건소당 평균 900명(전국 227,700명)
  - 조사방법 1:1 면접조사, '10년부터 전자조사표(CAPI) 도입
  - 조사시기 매년 8월 16일~10월 31일(75일)
  - \* '08~'09년 조사시기: 9.1~11.30(90일)

## 갑상선 검진자료 - 조사항목

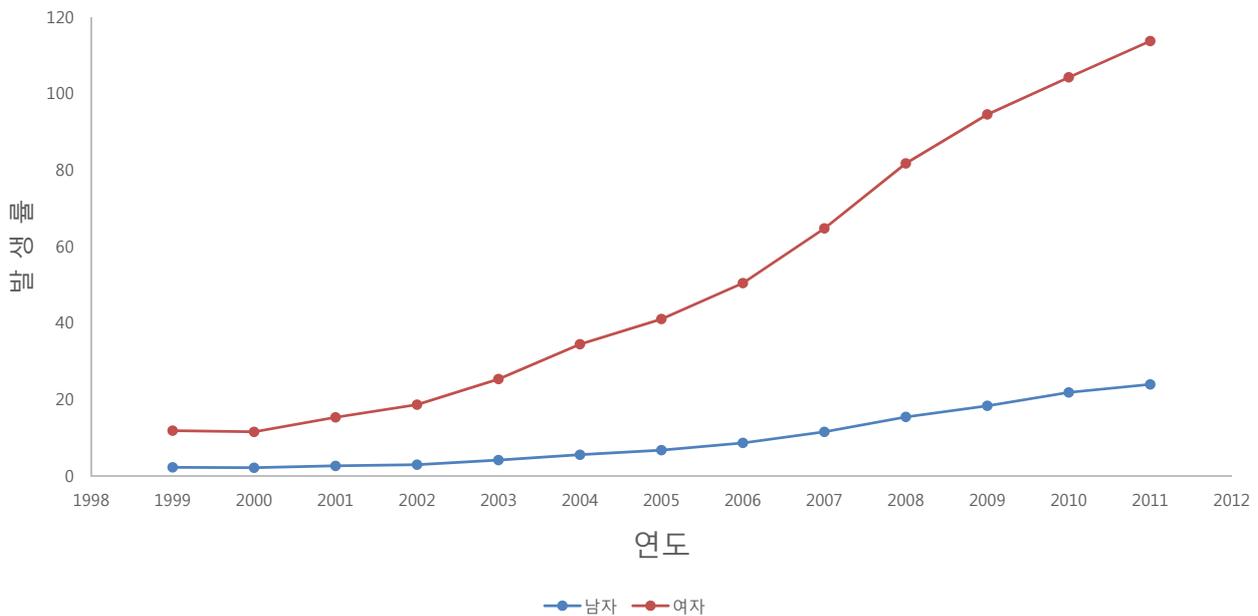
- 건강행태 관련 18개 영역, 총 250개 문항조사 (산출지표 198개 생산)

영역	조사내용	항목	지표
계			250 198
가구조사	세대유형, 주택유형, 연간소득 등	5	6
건강행태	건강수준, 흡연, 음주, 안전의식, 운동 및 신체활동, 식생활 및 영양, 비만및체중조절, 구강건강, 정신건강	84	76
예방접종	인플루엔자 예방접종여부	1	1
이환	주요질환별의사진단경험률,대사증후군및에이즈인지률등	95	74
의료이용	의료기관 이용 및 미치료 이유 등	2	2
사고 및 중독(낙상)	낙상경험및건수,사고중독경험및건수등	7	7
활동제한 및 삶의 질	활동제한일수,삶의질(EQ5D,EQ-VAS)등	12	8
보건기관 이용	보건기관 이용 여부 및 서비스 이용형태 등	20	11
사회 물리적 환경	사회적 지지망, 사회적 활동 등	14	3
교육 및 경제활동	직업, 결혼여부 및 상태, 교육수준 등	10	10

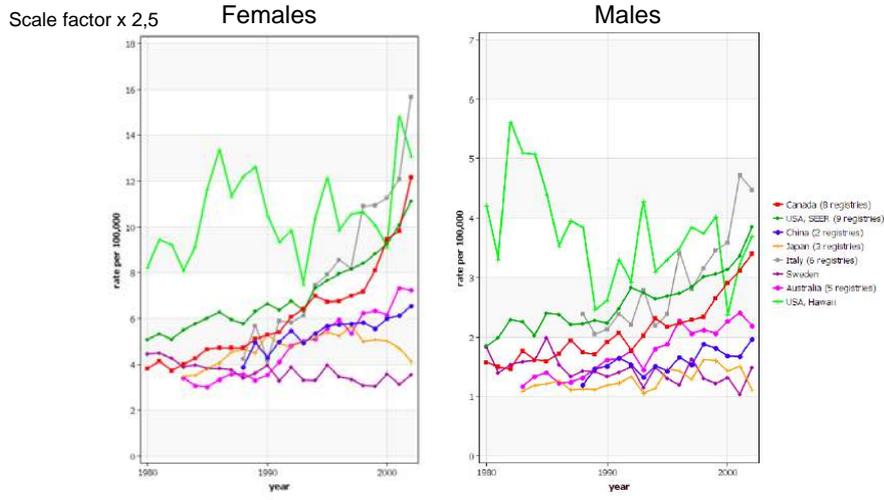
# 암 발생자료 암등록 자료원 (1)

- 1) 중앙암등록본부에서는 [국가암발생데이터베이스(DB)]를 구축하기 위하여 아래의 자료원을 이용.
- 2) 가장 주축이 되는 자료원은 1988년부터 2011년까지 우리나라의 암등록병원에서 보고된 새로 암을 진단받은 암환자의DB를 통합한 중앙암등록모(母)DB.
- 3) 이를 기본으로, 각 지역암등록사업의 등록DB, 전문 학회 및 연구회의 암종별 등록 DB, [암발생통계조사] DB를 모두 병합한 자료와 사망진단서에서만 암으로 확인 가능한 자료(DeathCertificate Only: DCO)를 포함하여 우리나라 전체 암발생자 자료로 통합된 [국가암발생DB]를 구축.
- 4) 구축된 [국가암발생DB]에서 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)의 기준에 부합하지 않는 오류자료는 등록병원에 재확인.
- 5) 정리된 암발생 자료는 국제암연구소에서 암등록 자료의 질관리 및 코드변환을 위해 개발한 IARCcrgTools 프로그램을 이용하여 최종적으로 재확인

## 성별 갑상선암 발생률 (1999~2011년)



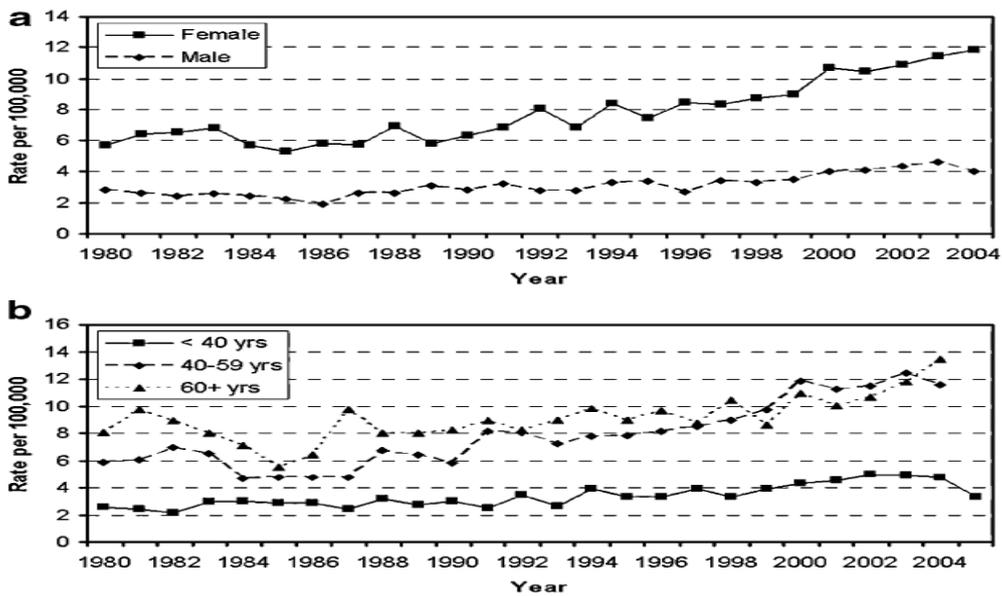
## Thyroid Cancer Epidemiology Worldwide



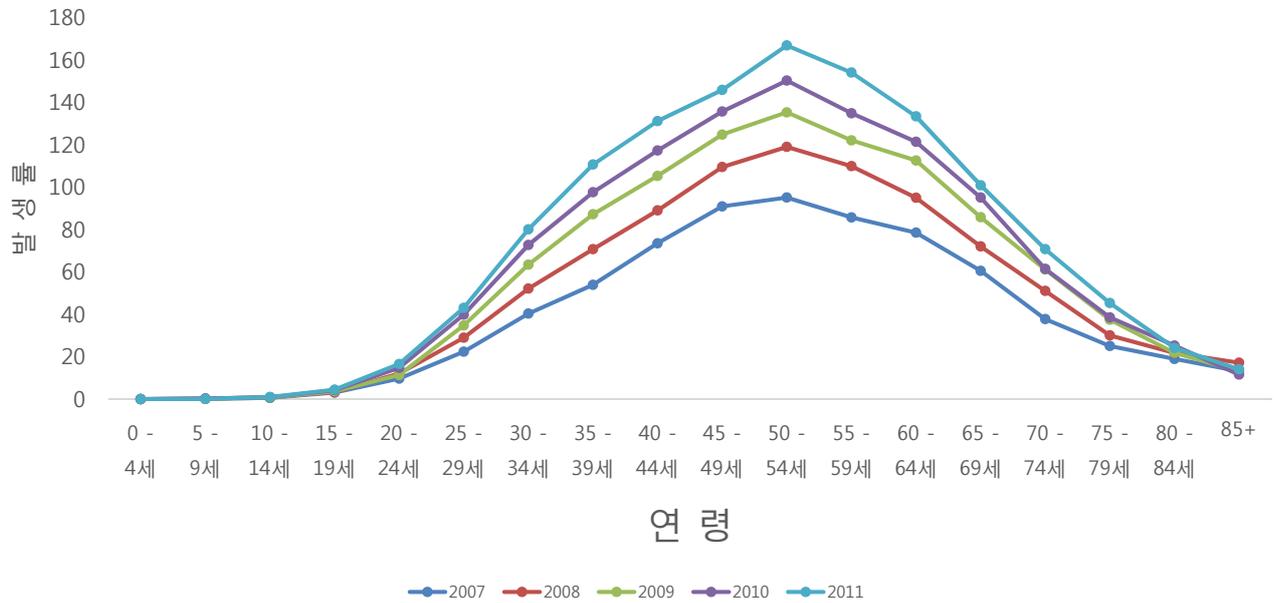
Age standardized incidence ratios 1980 - 2002

IARC Cancer in Five Continents 2010

Thyroid cancer incidence and socioeconomic indicators of health care access  
 Brian L. Sprague , Shaneda , Warren Andersen / Amy Trentham-Dietz



## 연령별 갑상선암 발생률 (2007~2011)



## A Birth Cohort Analysis of the Incidence of Papillary Thyroid Cancer in the United States, 1973-2004

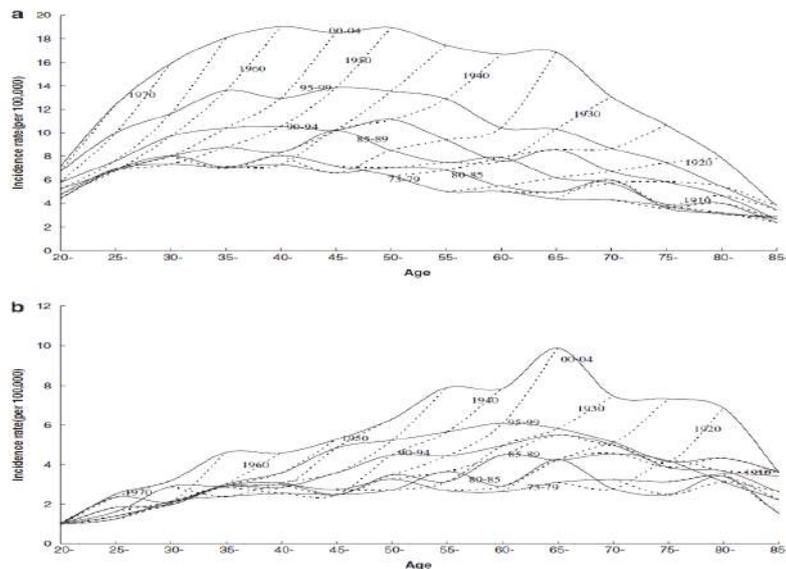
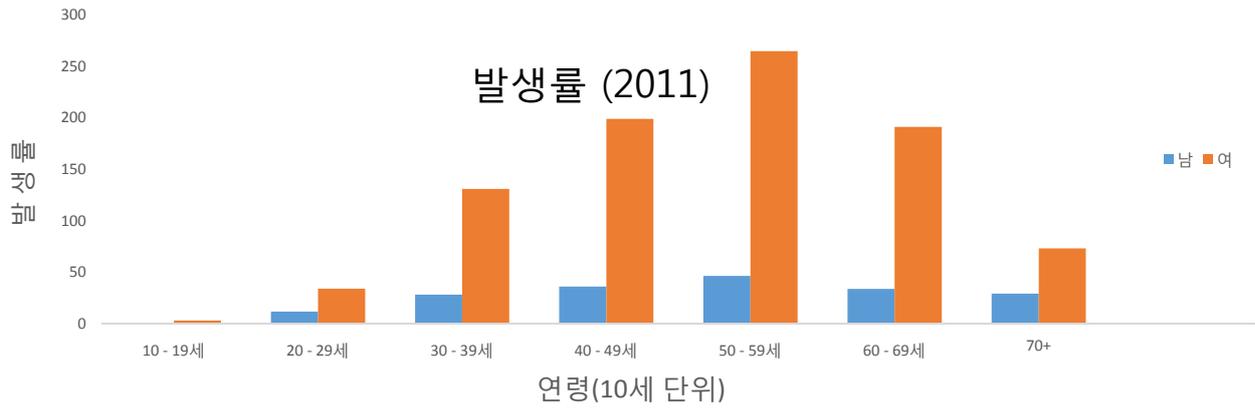
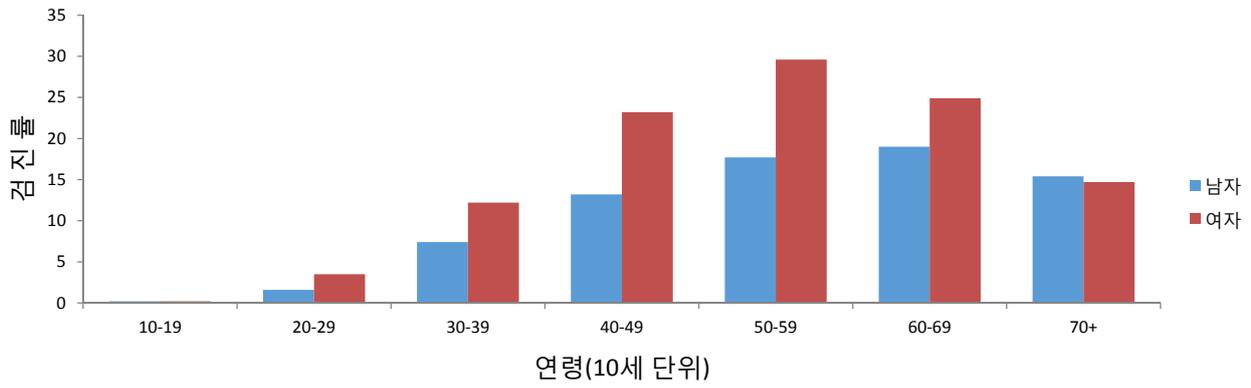
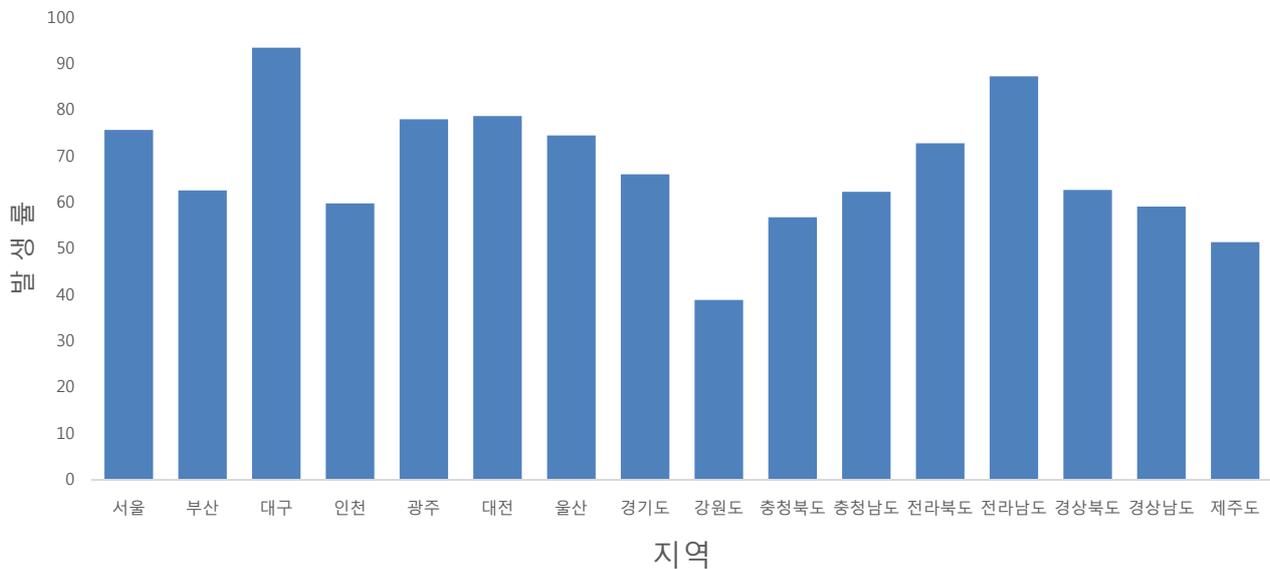


FIG. 1. (a) Papillary thyroid cancer incidence rates for the U.S. women by age. (b) Papillary thyroid cancer incidence rates for the U.S. men by age. Solid lines, cross-sectional age curve; broken lines, birth cohort age curve.

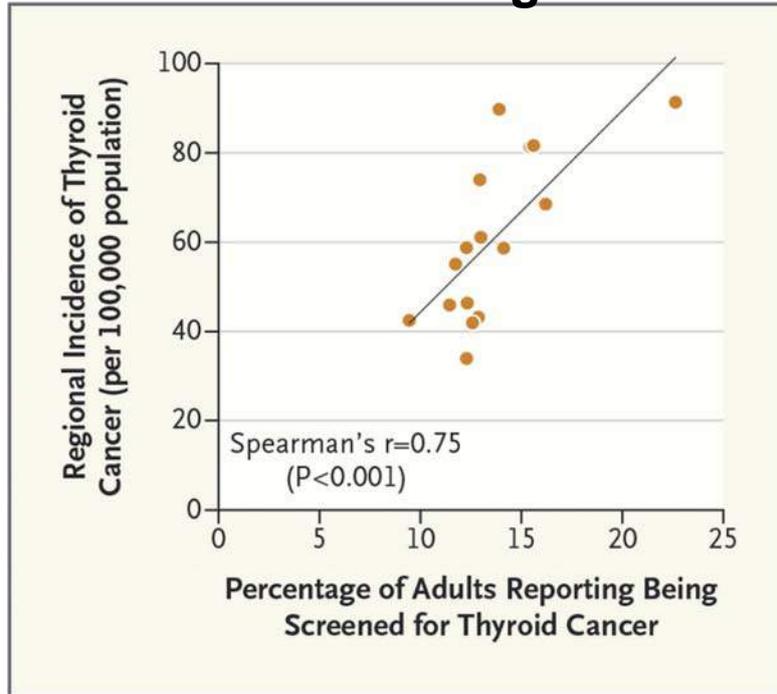
## 연령별 갑상선암 검진률 (2011)



## 지역별 갑상선암 발생률 (2011)



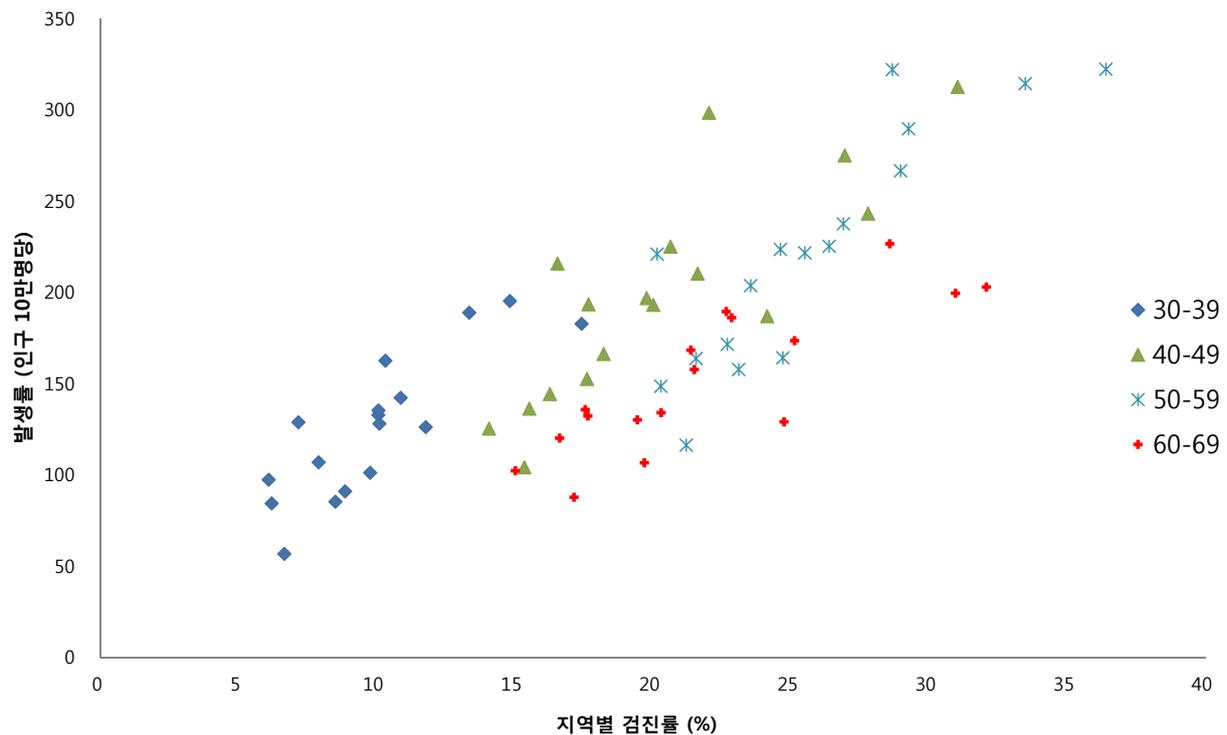
# Korea's Thyroid-Cancer “Epidemic” — Screening and Overdiagnosis



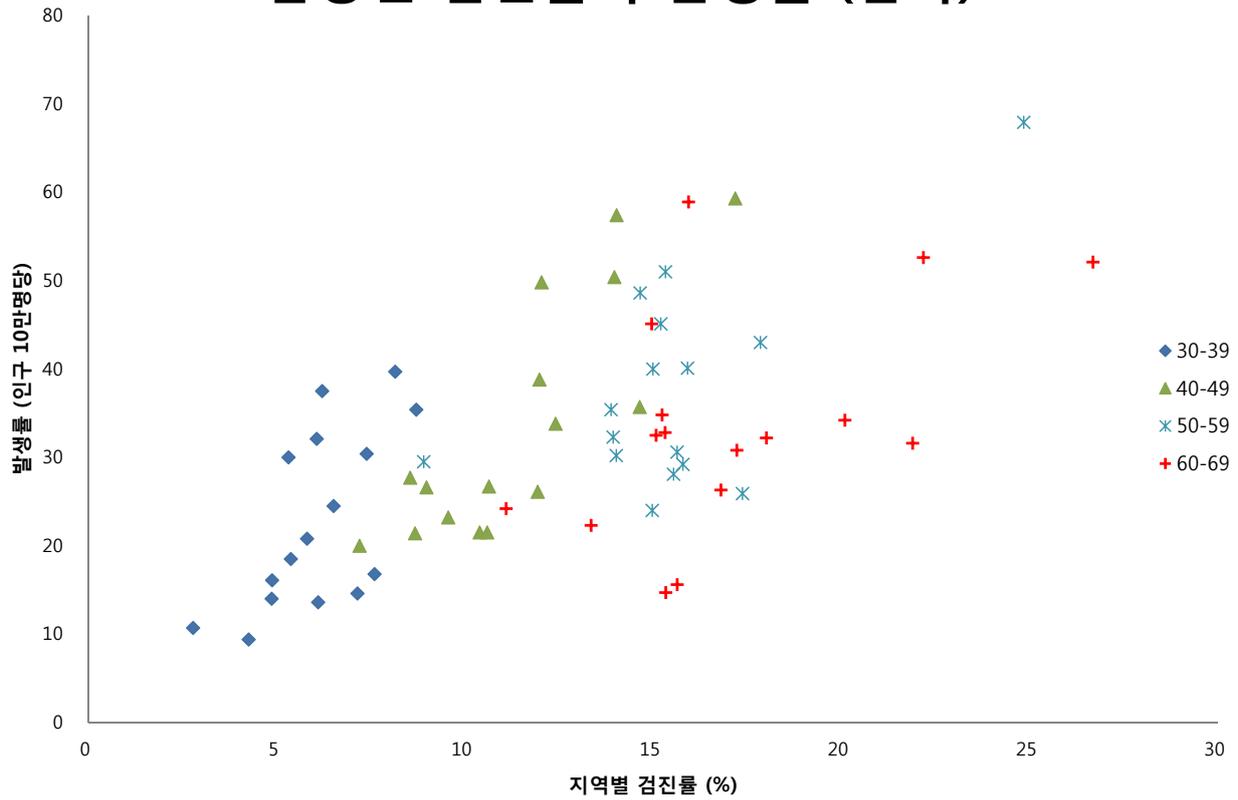
Ahn HS et al. N Engl J Med 2014;371:1765-1767.



## 갑상선 검진률과 발생률 (여자)



## 갑상선 검진률과 발생률 (남자)



## 갑상선암 발생률과 독립변수와의 관련성

- 통제 변수 : 성별, 나이, 소득, 교육수준
- 분석단위 : 개인
- 도시와 지방 등으로 구분
- 독립변수; 검진여부

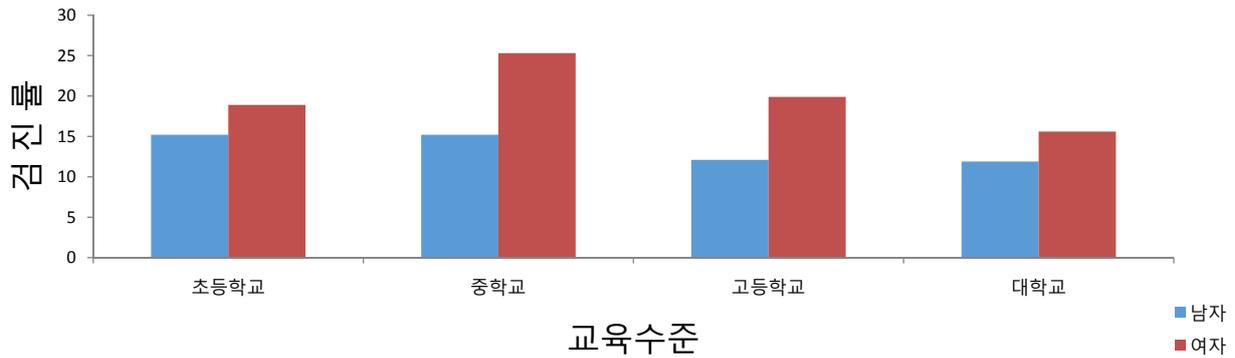
## 갑상선암 발생률과의 관련성

- 지역: 분석대상자를 16개 지역으로 구분함
- 조사대상자가 지역의 발생률과 사망률을 가지고 있는 것을 가정
- 각 연도별, 지역별 갑상선암 발생률과 사망률을 산출함 (30~65세 인구대상)

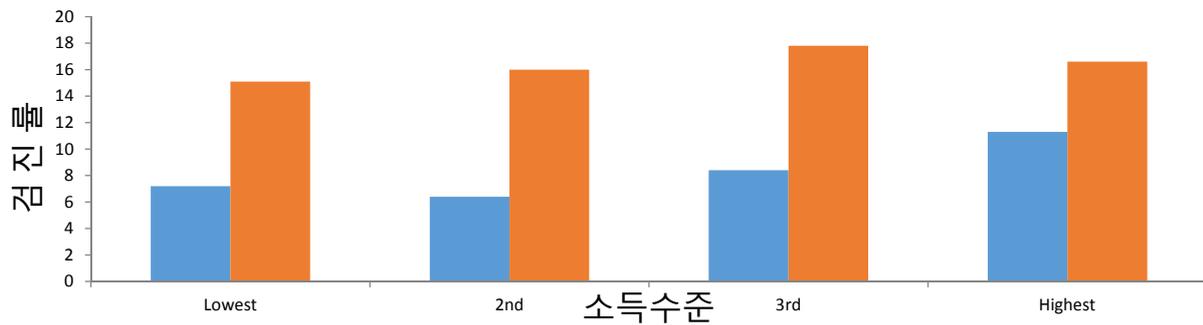
## 갑상선암 검진 별 조사대상자 특징(N=412,000)

Baseline characteristics of study subject thyroid screening group				
	남자		여자	
	검진	비 검진	검진	비 검진
<b>연령</b>				
10~19	5 (0.2)	2,164 (99.8)	6 (0.2)	2,737 (99.8)
20~29	358 (1.6)	22,115 (98.4)	916 (3.5)	25,162 (96.5)
30~39	2,633 (7.4)	32,947 (92.6)	5,009 (12.2)	35,966 (87.8)
40~49	5,744 (13.2)	37,624 (86.8)	10,990 (23.2)	36,437 (76.8)
50~59	7,186 (17.7)	33,390 (82.3)	13,962 (29.6)	33,162 (70.4)
60~69	6,141 (19.0)	26,265 (81.0)	9,756 (24.9)	29,389 (75.1)
70+	4,555 (15.4)	24,943 (84.6)	6,700 (14.7)	38,954 (85.3)
<b>결혼</b>				
예	25,634 (15.2)	142,641 (84.8)	45,946 (21.0)	172,922 (79.0)
아니오	987 (2.6)	36,750 (97.4)	1,387 (4.6)	28,847 (95.4)
<b>흡연</b>				
예	9,451 (10.5)	80,337 (89.5)	1,055 (12.9)	7,116 (87.1)
아니오	17,168 (14.8)	99,078 (85.2)	46,273 (19.2)	194,635 (80.8)
<b>음주</b>				
예	19,837 (12.3)	140,862 (87.7)	24,533 (18.3)	109,519 (81.7)
아니오	6,784 (15.0)	38,574 (85.0)	22,792 (19.8)	92,229 (80.2)
<b>민간보험</b>				
예	19,003 (13.7)	119,660 (86.3)	35,023 (21.1)	130,578 (78.9)
아니오	7,558 (11.4)	58,577 (88.6)	12,221 (14.8)	70,356 (85.2)
<b>의료기관방문</b>				
예	16,533 (11.6)	126,201 (88.4)	27,111 (18.7)	118,143 (81.3)
아니오	10,082 (15.9)	53,168 (84.1)	20,213 (19.5)	83,576 (80.5)
<b>교육수준</b>				
초등학교	5,320 (15.2)	29,618 (84.8)	16,000 (18.9)	68,846 (81.1)
중학교	3,757 (15.2)	21,030 (84.8)	7,067 (25.3)	20,859 (74.7)
고등학교	7,936 (12.1)	57,841 (87.9)	13,425 (19.9)	53,905 (80.1)
대학교	9,552 (11.9)	70,591 (88.1)	10,704 (15.6)	57,784 (84.4)
<b>직업</b>				
관리 & 전문직	5,893 (8.0)	67,971 (92.0)	6,081 (8.2)	67,908 (91.8)
서비스	2,707 (4.8)	54,038 (95.2)	7,057 (12.4)	49,722 (87.6)
기능직	10,837 (8.2)	121,720 (91.8)	10,286 (7.7)	122,565 (92.3)
무직	4,760 (2.8)	165,298 (97.2)	22,159 (13.1)	147,611 (86.9)

## 교육수준별 갑상선암의 검진률 (2011)



## 소득수준별 갑상선암의 검진률 (2011)



## Trends in Thyroid Cancer Incidence in Texas from 1995 to 2008 by Socioeconomic Status and Race/Ethnicity

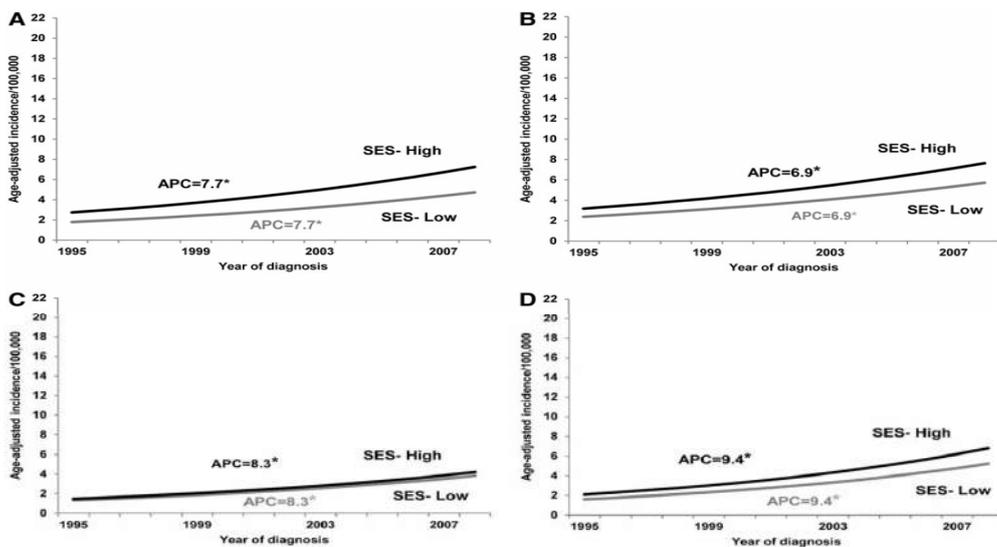
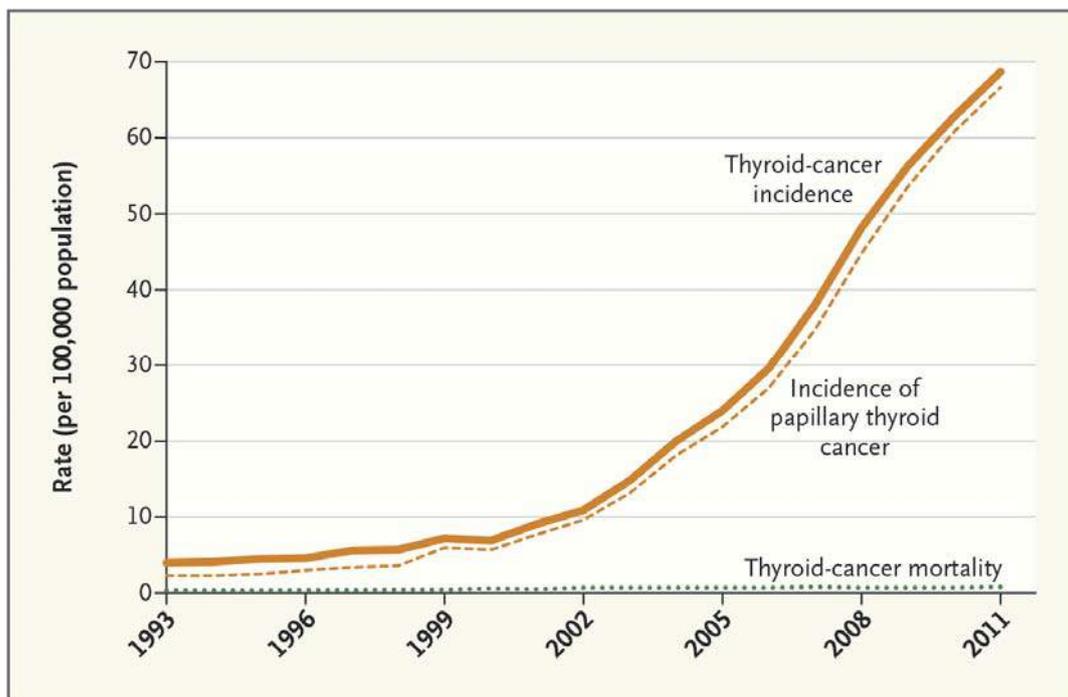


FIG. 3. Results from sex-stratified joinpoint regression models on thyroid cancer incidence trends among males in Texas, 1995–2008, by SES (high [black], low [gray]) for (A) the whole study population, and within three major racial/ethnic groups: (B) non-Hispanic white, (C) non-Hispanic black, and (D) Hispanic. \*Statistically significant APC at  $p < 0.05$  in the joinpoint regression analyses.

## 지역별 갑상선검진과 발생률의 관련요인

- 조사변수
  - 검진
    - 예
    - 아니오 :  $P < 0.001$
- 통제변수
  - 성별(남자, 여자)
  - 연령(10세단위)
  - 결혼(예, 아니오)
  - 흡연(예, 아니오)
  - 음주(예, 아니오)
  - 민간보험(예, 아니오)
  - 의료기관방문(예, 아니오)
  - 교육수준(초등학교, 중학교, 고등학교, 대학교)
  - 직업(관리&전문직, 서비스, 기능직, 무직)

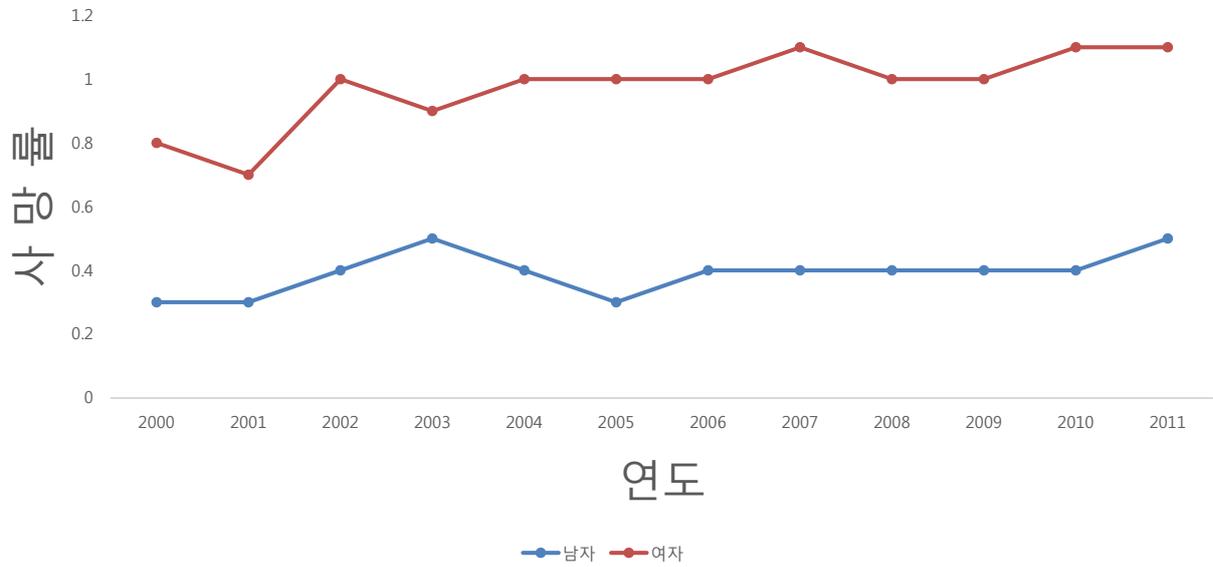
## Korea's Thyroid-Cancer “Epidemic”



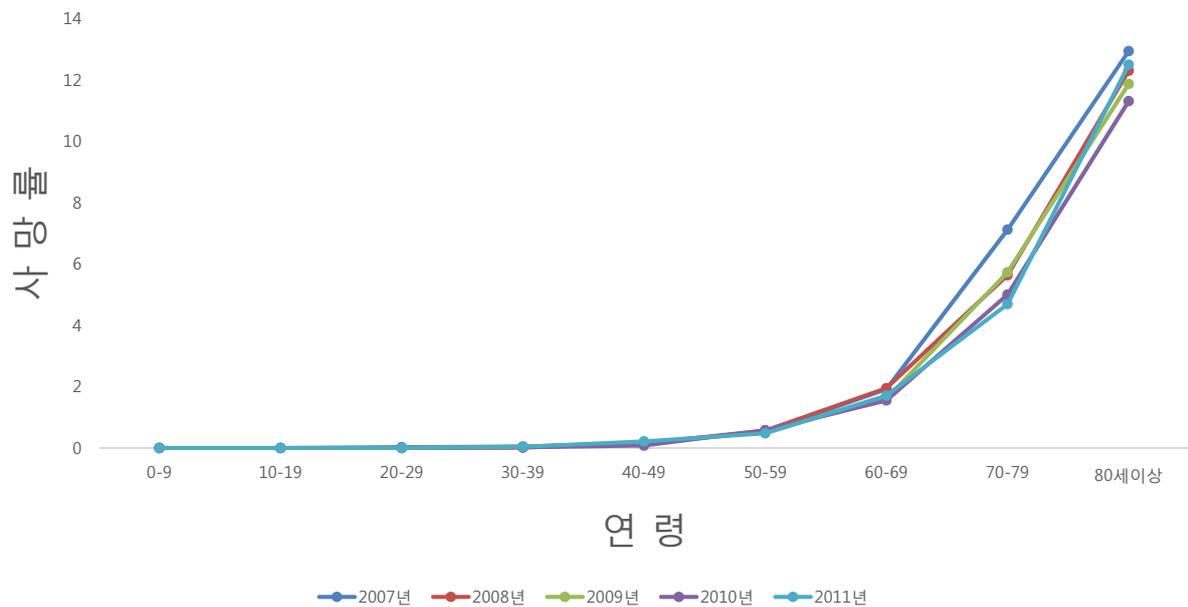
Ahn HS et al. N Engl J Med 2014;371:1765-1767.

THE NEW ENGLAND  
JOURNAL OF MEDICINE

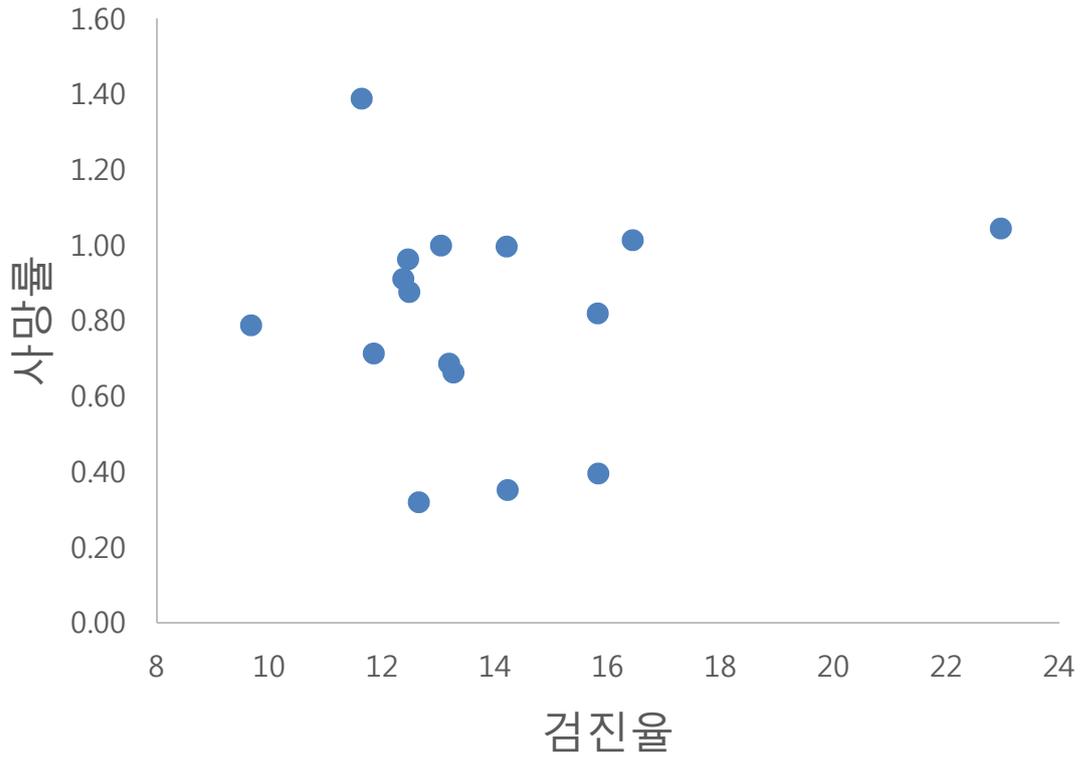
## 연도별 갑상선암 사망률(2000~2011)



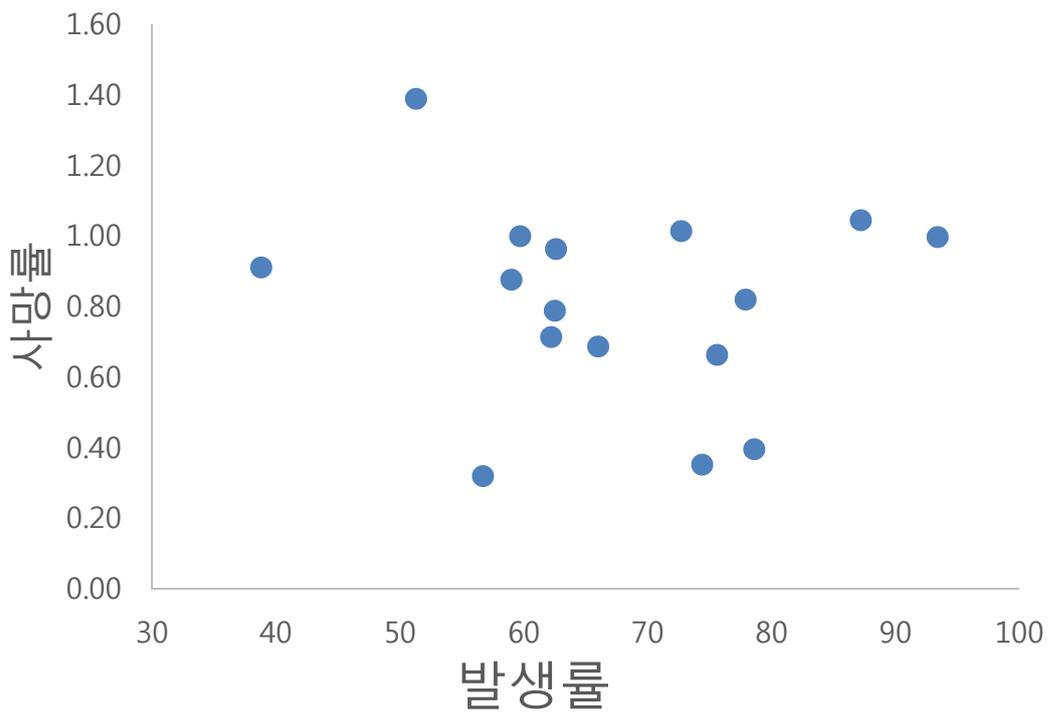
## 연령별 갑상선암 사망률 (2007~2011)



갑상선암 검진률과 사망률과의 관계 (2011)



갑상선암 발생률과 사망률 관계 (2011)



## 지역별 갑상선검진과 사망률의 관련요인

- 조사변수
  - 검진
    - 예
    - 아니오 :  $P > 0.1$
- 통제변수
  - 성별(남자, 여자)
  - 연령(10세단위)
  - 결혼(예, 아니오)
  - 흡연(예, 아니오)
  - 음주(예, 아니오)
  - 민간보험(예, 아니오)
  - 의료기관방문(예, 아니오)
  - 교육수준(초등학교,중학교,고등학교,대학교)
  - 직업(관리&전문직, 서비스, 기능직, 무직)

## 갑상선암 증가

조기 발견 증가 가능성 :

- 갑상선 암 검진과 유의한 관련성
- 사망률에 대한 영향 없음
  
- 초음파, CT, MRI를 사용한 작은 종양의 검출
- 작은 유두 종양 발생의 급격한 증가
- 긴 잠복기간에 대한 증거
- 부검을 통한 작은 종양의 검출

## 과제

- 한국인의 갑상선 암의 특성은 다른 양상인가?
- 발생률 증가에 영향을 주는 기타요인은 무엇인가?
- 사망률의 변화에 대한 장기적인 영향은 무엇인가?

## 갑상선 암의 위험 요인

- 이온화 방사선
- 양성 갑상선 병변
- 갑상선 암의 가족력
- 비만
- 요오드 부족
- 재생적 기능의 요소 / 호르몬적 요소

# 요약

- 갑상선 검진은 갑상선 암의 발생률 증가에 큰 영향을 미침.
- 한국의 갑상선 암 증가는 검진과 밀접하고 유의한 관련이 있음.
- 갑상선 검진률과 발생의 증가는 사망률과 관련성이 없어 보임.
- 갑상선 암과 조기검진 및 사망과의 관련성에 대한 ecological data의 특성에 따른 한계를 고려하여야 함.

## 9. 인과관계론

김수근(성균관대)

# 원전주변 주민의 갑상선 암 발병에 대한 인과관계

김 수 근

성균관의대 강북삼성병원  
직업환경의학교실

## 원전주변 지역주민의 갑상선 암과 원전운영과의 관계

- **전리방사선은 갑상선 암을 발생시키는가?**
  - 과학은 **원인에 의한 결과**를 관찰이나 실험을 통해서 밝혀내는 것에 관심을 두고 있음(역학연구)
- **갑상선 암은 전리방사에 의해서 발생하였는가?**
  - 법은 **결과에 대한 원인**을 추론하는 입장에서 있음.
- 과학은 원인에 의한 결과에 관심을 가지고 있기 때문에 **결과에 대한 원인의 추론**에 대한 도움을 주는 데에는 매우 제한적임.
- 환경소송 사건에서는 인과관계의 입증완화가 점차 확대 : **개연성 이론** 채택(상당인관관계)

## 원주변지역주민의 갑상선암과 원전운영의 관계

일반적으로 불법행위로 인한 손해배상청구사건에서 가해행위와 손해발생 간 인과관계의 증명책임은 청구자인 피해자가 부담하나, 대기오염이나 수질오염에 의한 공해로 인한 손해배상을 청구하는 소송에서는 기업이 배출한 원인물질이 대기나 물을 매체로 하여 간접적으로 손해를 끼치는 수가 많고 공해문제에 관하여는 현재 과학수준으로도 해명할 수 없는 분야가 있기 때문에 가해행위와 손해 발생 사이의 인과관계를 구성하는 하나하나의 고리를 자연과학적으로 증명한다는 것이 매우 곤란하거나 불가능한 경우가 많다. 그러므로 이러한 공해소송에서 피해자에게 사실적인 인과관계의 존재에 관하여 과학적으로 엄밀한 증명을 요구한다는 것은 공해로 인한 사법적 구제를 사실상 거부하는 결과가 될 수 있는 반면에, 가해기업은 기술적·경제적으로 피해자보다 훨씬 원인조사가 용이한 경우가 많을 뿐만 아니라 원인을 은폐할 염려가 있기 때문에, 가해기업이 어떠한 유해한 원인물질을 배출하고 그것이 피해자에게 도달하여 손해가 발생하였다면 가해자 측에서 그것이 무해하다는 것을 증명하지 못하는 한 책임을 면할 수 없다고 보는 것이 사회형평의 관념에 적합하다(대법원 2012. 1. 12. 선고 2009다84608, 84615, 84622, 84639 판결 등 참조). 나아가 어느 시설을 적법하게 가동하거나 공용에 제공하는 경우에도, 그로부터 발생하는 유해 배출물로 인하여 제3자가 손해를 입었고 그 유해의 정도가 사회생활상 통상의 수인한도를 넘는다면 위법하다고 평가할 수 있다

## 환경소송에서 인과관계

- 3가지 사실이 어느 정도 입증되어야 함.
  - 건강피해 유발인자의 존재
  - 유발인자의 누출
  - 유발인자가 피해자 또는 피해지역에 도달하는 경로

# 원전주변 지역주민의 갑상선 암

- 원전에서 발생하는 전리방사선의 영향 때문이라면.....
- **원자력 발전소의 운영**
  - > 전리방사선과 방사성물질의 발생
  - > **외부로 누출**
  - > 매체를 통한 확산
  - > **피해자의 신체에 도달**
  - > **갑상선 암의 발생**

## 원전 운영과 전리방사선 누출과 피폭

이 사건에서 보건대, 위 인정사실 및 위 증거들에 의하여 인정할 수 있는 다음과 같은 사정, 즉 ① 갑상선암의 발생에는 방사선 노출이 결정적 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있는 점, ② 피고는 부산 기장군 장안읍에서 총 6개 기의 원자력발전소를 운영하고 있는데 원고 박금선은 그로부터 약 10km 이내 또는 10km 남짓 떨어진 지역에서 20년 가까이 거주하여 오면서 방사선에 장기간 노출되어 온 것으로 보이는 점, ③ 원고 박금선의 갑상선암 발병에 이 사건 발전소에서 방출된 방사선 외 다른 원인이 있다고 볼 뚜렷한 자료는 없는 점, ④ 이 사건 발전소에서 방출된 연간 방사선량(제한구역 경계 기준)은 원자력안전법 시행령 제2조 제4호, 별표 1에서 규정한 연간 유효선량한도(1mSv), 원자력안전위원회 고시 제2012-29호제 16조 제2항 제2호에서 규정한 제한구역 경계에서의 연간 유효선량(0.25mSv)에 미치지 못하고, 원전 주변지역 주민

## 원전 운영과 전리방사선 누출

역학조사 결과 갑상선암과는 달리 위암, 간암, 폐암은 원자력발전소로부터의 거리와 발병률 사이에 뚜렷한 상관관계가 없는 것으로 조사되기는 하였으나, 관련 법령에서 정한 연간유효선량은 국민 건강상 위해를 방지하기 위하여 정한 최소한도의 기준으로서, 인체가 노출되었을 경우 절대적으로 안전을 담보할 수 있는 수치를 나타내는 것이라고 단정할 수는 없는 점, ⑤ 원전 주변지역 주민 역학조사결과 근거리 대조지역인 원자력

- 원전운영에 의한 전리방사선 누출과 주변 지역주민의 피폭은 상당인과관계에 합당한가?
- “누출이 있다, 없다”, “피폭이 있다, 없다”라고 하는 것은 상당인과관계가 아닌 단순 조건관계이다.

## 전리방사선은 갑상선 암을 발생시킨다

이 사건에서 보건대, 위 인정사실 및 위 증거들에 의하여 인정할 수 있는 다음과 같은 사정, 즉 ① 갑상선암의 발생에는 방사선 노출이 결정적 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있는 점, ② 피고는 부산 기장군 장안읍에서 총 6개 기의 원자력발전소

단정할 수는 없는 점, ⑤ 원전 주변지역 주민 역학조사결과 근거리 대조지역인 원자력발전소에서 5km 이상 30km 이내 떨어진 지역에서도 원거리 대조지역에 비하여 1.8배의 높은 갑상선암 발병률을 보이고 있고, 원고 박금선이 거주해온 지역이 이 사건 발전소의 방사선 유출 영향을 받지 않는 지역이라고 보기는 어려운 점, ⑥ 다른 암과는 달리 갑상선암의 경우에 원자력발전소로부터의 거리와 발병률 사이에 상과관계를 보이는 것으로 조사되었고, 기장군 주민의 갑상선암 발병률은 수도권 지역에서보다 높은 것으로 나타난 점, ⑦ 원고 박금선이 침해당한 이익은 신체의 건강과 관련된 것으로서 재산상

## 원전과 갑상선 암의 관계

- “전리방사선은 갑상선 암을 발생시킨다.”
  - 경험적 사실이며 반복된 과학적 연구의 결과들을 체계화한 결과로 성립된 인과관계임.
  - 즉, 일정하게 전리방사선에 노출된 사람들에서 그렇지 않은 사람들에 비하여 갑상선 암 발생이 증가하였다는 경험적 사실을 근거로 한 것이다.
- 그러므로 귀납적 결론의 전제에는 **일정 정도(요건) 이상**의 전리방사선에 피폭되었다는 경험적 사실이 있다.
  - 원폭 피해, 방사선 치료, 체르노빌로 피폭된 경우
  - 소아와 청소년기에 피폭된 경우

## 갑상선 암은 왜 생기는가?

- 부모가 갑상선 암인 경우 자녀에게서 갑상선 암이 발생할 가능성은 증가한다.
- 갑상선 질환(갑상선종, 양성 갑상선 결절)을 가지고 있던 사람들에게서 갑상선 암이 더 많이 생긴다.
- 과도한 요오드의 섭취는 갑상선 암 발생이 증가한다.
- 양배추와 브로콜리 같은 십자화과의 채소류를 많이 섭취했을 때 갑상선 암 발생이 증가한다.
- 파스타, 빵, 감자, 버터, 치즈 등의 음식과 고칼로리 식이는 비만과 함께 갑상선 암의 발생을 증가시킨다.
- 갑상선 암이 왜 생기는지 잘 모른다.

## 속성수준과 사건수준의 인과관계

- **과학적 인과관계: 속성수준의 인과관계**
  - 원인 속성 : 전리방사선 피폭
  - 결과 속성 : 갑상선 암 발생
- **소송의 인과관계: 사건수준의 인과관계**
  - 결과 사건 : 원전주변주민에게 갑상선 암의 발병
  - 원인 사건 : **원전의 운영**→전리방사선 누출
- 전리방사선과 갑상선 암 사이의 일반적인 인과관계는 인정하면서도
- 개별적으로 발생한 사건으로서 갑상선 암이 바로 전리방사선 때문에 발생하였다는 인과관계를 곧바로 인정하지 못한다.
- 두 사건이 우연에 의하여 일어날 수 있다는 것을 부인할 수 없기 때문이다.

## 원전과 갑상선 암의 관계에서 쟁점

- **연역적 추론**
  - **모든(O)** 사람은 죽는다.
  - 소크라테스는 사람이다
  - 그러므로 소크라테스는 죽는다
- **결과사건과 원인사건의 인과관계를 판정**
  - 전리방사선은 **모든(?)** 갑상선 암을 일으킨다.
  - 원전에서 전리방사선이 발생한다.
  - 원전에서 발생한 전리방사선이 지역으로 누출되었다.
  - 원전주변 주민에게 갑상선 암이 발생하였다.
  - 그러므로 원전 주변주민의 갑상선 암은 원전에서 발생한 전리방사선 때문이다.

# 소송에서 상당인과관계

- 경험상 **상당한 정도의** 관계
- 상당성은
  - 입증부담을 경감시키는 조치이며,
  - 동시에 조건관계를 규율하는 **규범**이다.
- 상당성은 결과귀속의 **규범적인 한정요건**이다.
- 암 발병 이전의 **모든 조건에 대하여 인과관계를 인정하는 결과를 통제**하기 위하여 상당성 판단은 환경성 발암 인자의 노출에 대한 모든 사정이 아니라, '**객관적으로 암 발병을 증가시키는 근거**'가 있는 사정만을 기초로 해야 한다.
- 객관적 근거란 해당 암의 발암요인으로 알고 있는 것에 **노출되었으며 노출정도가 암 발생을 증가시킬 만하고**, 경과기간도 암이 발생하기에 적절한 경우이다.

## 1심 판결의 오류

- **결과 사건의 오해**
  - 모든 갑상선 암은 전리방사선에 의해서 발생한다
  - 전리방사선에 노출되면 당연히 방사선에 노출된다
  - ① 갑상선암의 발생에는 방사선 노출이 결정적 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있는 점.
- **원인 사건의 오해**
  - 원전운영=당연한 전리방사선 누출=당연한 지역주민의 피폭으로 결론을 내리고 있음.

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
0.003	0.00552	0.00788	0.0069	0.00686	0.00136	0.00242	0.00208	0.00488	0.00361	0.00642
2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
0.00269	0.00207	0.00522	0.00512	0.00664	0.00512	0.00460	0.00226	0.00152	0.00171	

- 상당인과관계를 **단순조건관계로 확대**

## 1심 판례의 부수적인 오류

- **간접 사실로 인과 관계를 인정하고 있다**
  - 주변지역에 거주하였다.
  - 특정(일반적 비교지역이 아님) 비교지역 보다 높았다.
- **간접 사실과 직접사실과의 관계: 고도의 개연성**
  - 원전 주변지역은 전리 방사선 피폭이 높은가?
  - 일반적인 지역 또는 비교 타당성이 있는 지역 주민의 갑상선 발생규모와 비교하면 어떤가?
- **환경유해인자와 환경성질환의 인과관계의 입증을 완화된 개연성을 무한으로 확대하여 극단적인 조건관계만으로 인과관계를 인정하려는 것은 상당인과관계의 규범과 경험적 사실을 모두 도외시하는 것임.**

## 상당인과관계

- **환경유해인자로 인한 건강피해 소송에 있어서 인과관계의 입증**
  - 자연과학적으로 엄격한 증명을 요하지 않고 환경유해인자와 건강피해 사이의 **인과관계가 개연성이** 있으면 된다는 것임.
  - **개연성은** 법관으로 하여금 인과관계에 대한 확신내지는 이에 가까운 정도의 심증을 갖게 하는 것은 아니고, 그보다 낮은 정도의 심증 전달로도 상당인과관계가 성립한다고 할 수 있으므로 원고의 입증부담을 낮춘 것임.
  - **개념이 모호하고 자의적인 해석이 가능하여** 극단적인 조건만 있어도 개연성이 있다고 할 수 있는 문제가 있음.
  - **법관에게 이러한 경우의 판단을 준 이유**가 바로 여기에 있음

## 상당인과관계(결론)

- **상당성**은 일반적인 경험법칙상 **단순한 조건**이 아닌 상당한 조건만이 인과관계가 있다고 보는 것이다.
- 이것은 과학적 메카니즘으로 인과관계를 엄격하게 요구하는 것이 아니면서도 전리방사선과 갑상선 암 발병 사이에 단순한 조건관계만으로는 인과관계가 충분하지 않다는 것이다.

### - 조건관계---상당인과관계---발병 기전

- 전리방사선과 갑상선 암의 관계를 규명한 **경험적 관찰에서 확인할 수 있는 전리방사선의 피폭수준에 준하는 피폭이** 있어야 한다는 것이다.
- 상당성은 **경험적인 사실**뿐만 아니라 **규범적인 측면**도 함께 고려하고 있다. 이러한 규범은 존중되어야 한다.

## 10. 원전주변주민 갑상선암발생에 관한 종합분석

강건욱(서울대)

# 원전 주변주민 갑상선암 발생에 관한 기술적 종합분석

서울대학교병원 핵의학과 과장  
서울대학교 암연구소 연구부장  
내과전문의 및 핵의학전문의  
서울대학교병원 방사선안전관리센터장  
ICRP 제3분과(의료방사선) 위원  
대한방사선방호학회 국제협력이사  
**강 건 욱**

## 법원 “주민 갑상선암 발병은 원전 책임” 첫 인정

[한겨레]

“고리원전 방사선에 장기간 노출  
한수원, 위자료 1500만원 지급” 판결  
부산 등 원전 주민 손해소 줄 이을듯

법원이 원자력발전소(원전) 근처에 사는 주민에게 발병한 갑상선암에 대해 원전의 책임이 있다고 판결했다. 이번 판결은 원전과 인근 주민의 암 발병 인과관계를 처음으로 인정한 것이다. 앞으로 원전 근처에서 사는 주민들의 손해배상청구 소송이 줄을 이을 것으로 보인다.

부산지법 동부지원 민사2부(재판장 최호식)는 17일 이진섭(48)·이균도(22)씨 부자와 아내 박아무개(48)씨가 원전 운영 공기업인 한국수력원자력(한수원)을 상대로 낸 손해배상청구 소송에서 “박씨에게 위자료 1500만원을 지급하라”며 원고 일부 승소 판결했다. 박씨 가족은 2012년 7월 “고리원전 때문에 가족 3명이 암과 장애에 걸렸다”며 손해배상 청구 소송을 냈다.

재판부는 판결문에서 “(갑상선암이 발병한) 박씨는 원전 6기가 있는 부산 기장군의 고리원전에서부터 7.6km가량 떨어진 곳에서 20년간 살면서 고리원전에서 나오는 방사선에 장기간 노출된 것으로 보인다. 한수원은 손해를 배상할 책임이 있다”고 밝혔다.

재판부는 “고리원전에서 나오는 방사선량이 원자력안전법에 규정한 연간 유효선량 한도(0.25mSv~1mSv·밀리시버트)에 미치지 못하는 등 이유가 있지만 방사선 연간 유효선량은 국민 건강의 최소한도 기준이다. 국민의 건강은 재산상 이익보다 중요하고 공공의 필요에 의해 희생되면 안 된다”고 설명했다.

하지만 재판부는 한수원이 방사선량을 기준치 이하로 방출하려고 노력한 점을 고려해 박씨가 청구한 위자료 2억원 가운데 1500만원을 인정했다. 재판부는 직장암과 발달장애 1급의 책임이 원전 때문이라며 박씨와 함께 소송을 제기한 이씨 부자의 주장은 인과관계가 인정되지 않는다며 사건을 기각했다.

### (1) 갑상선암의 특징

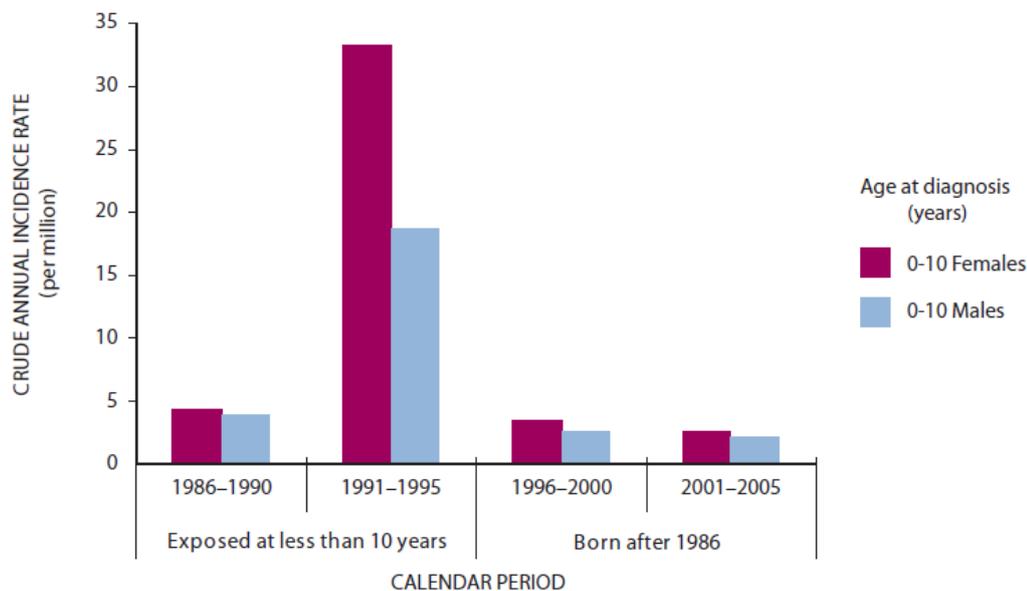
- 갑상선암의 가장 중요한 위험요인은 치료적 방사선 노출과 환경재해로 인한 방사선 노출이며, 노출된 방사선 용량에 비례하여 위험도가 증가하는 것으로 알려져 있다.
- 가족성 증후군이 있는 경우에도 갑상선암 발생 확률이 높다.
- 체르노빌 원전사고에 관한 여러 보고서에 따르면, 사고 이후 여성들에게서 갑상선암이 유의미하게 증가한 것으로 조사되었고, 방사선 노출과 갑상선암이 용량-반응관계가 있는 것으로 나타났다.

대한직업환경의학회

## 갑상선암의 원인

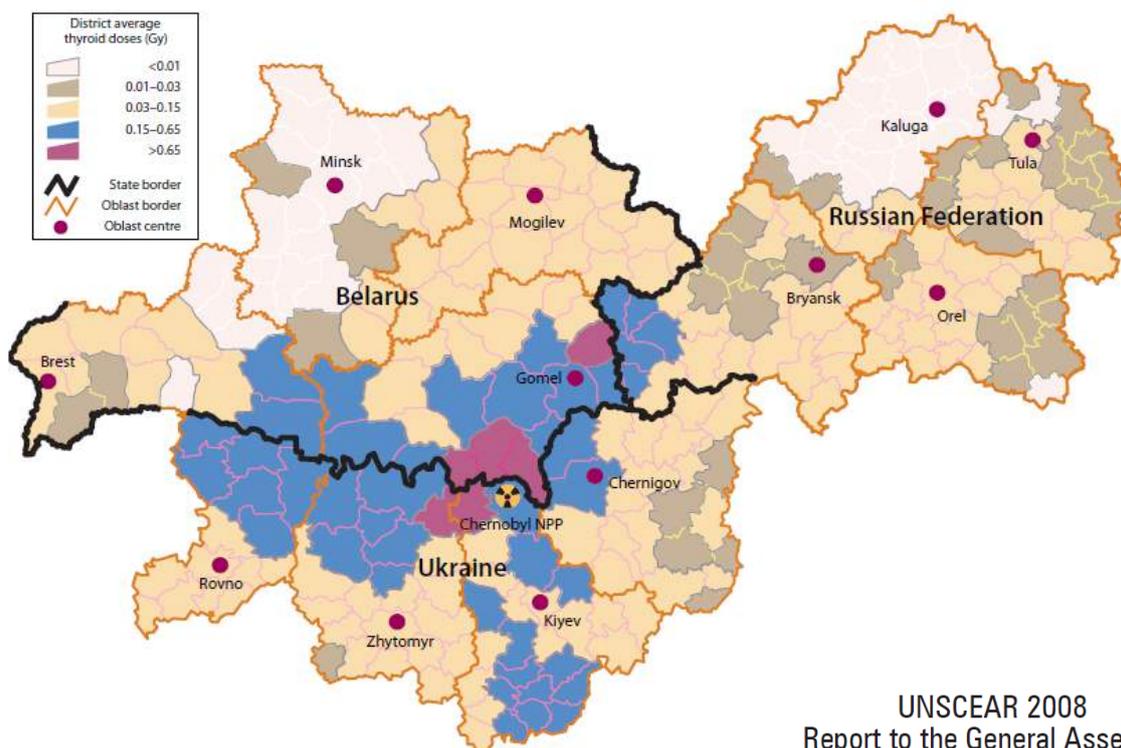
- 방사선
  - 갑상선암의 위험인자 가운데 현재까지 가장 잘 입증된 것은 방사선 노출입니다. 그리고 방사선으로 인한 갑상선암의 95% 이상이 유두암입니다.
- 유전적 요인
  - 몇몇 가족성 질환이나 증후군이 있을 경우 갑상선암 발생이 증가합니다.
- 기타 원인
  - 대부분의 갑상선암 환자는 발병 원인이 명확히 드러나지 않습니다. 여러 요인이 제시되고 있으나 위에서 설명한 정도 외에 확실히 밝혀진 것은 없습니다.

Figure VIII. Thyroid cancer incidence rate in Belarus for children under 10 years old at diagnosis



UNSCEAR 2008  
Report to the General Assembly  
with Scientific Annexes

Figure B-I. Spatial distribution of the estimated thyroid doses to children and adolescents living at the time of the accident in the most affected regions of Belarus, the Russian Federation and Ukraine [K8, L4, R6, Z4]



UNSCEAR 2008  
Report to the General Assembly  
with Scientific Annexes

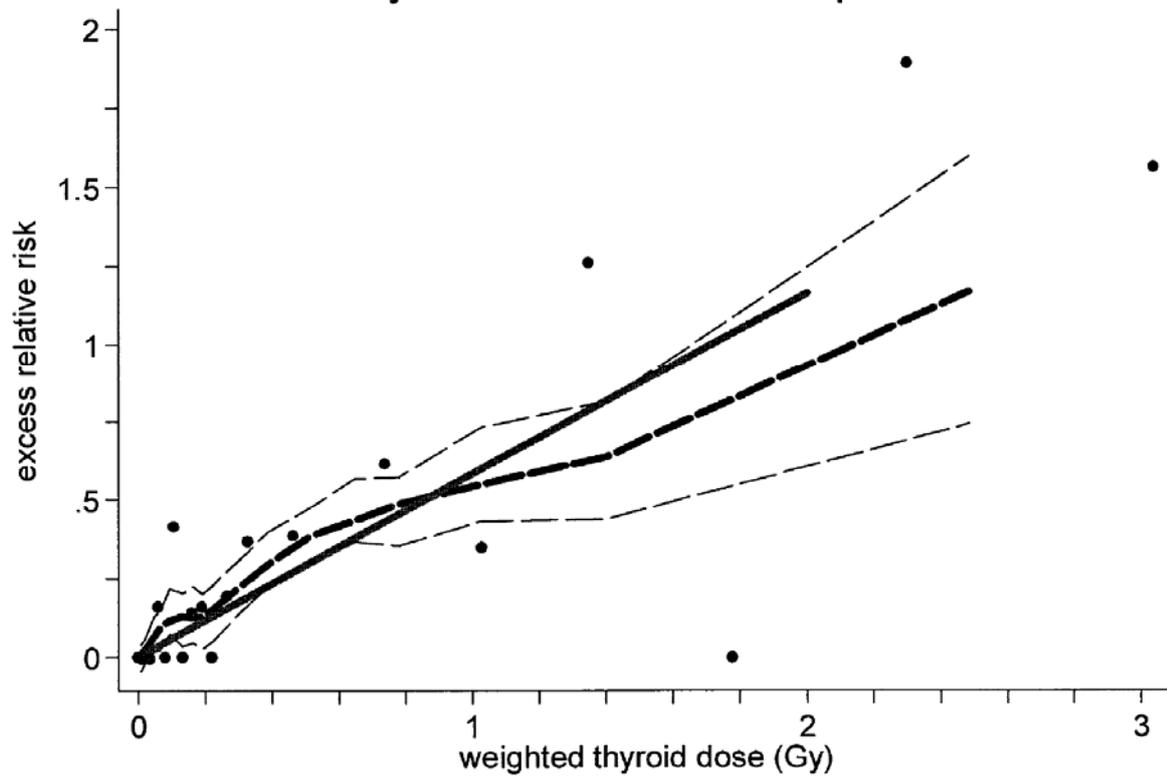
**Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998**

Author(s): D. L. Preston, E. Ron, S. Tokuoka, S. Funamoto, N. Nishi, M. Soda, K. Mabuchi, and K.

Kodama

Source: Radiation Research, 168(1):1-64. 2007.

### Thyroid Cancer Dose Response



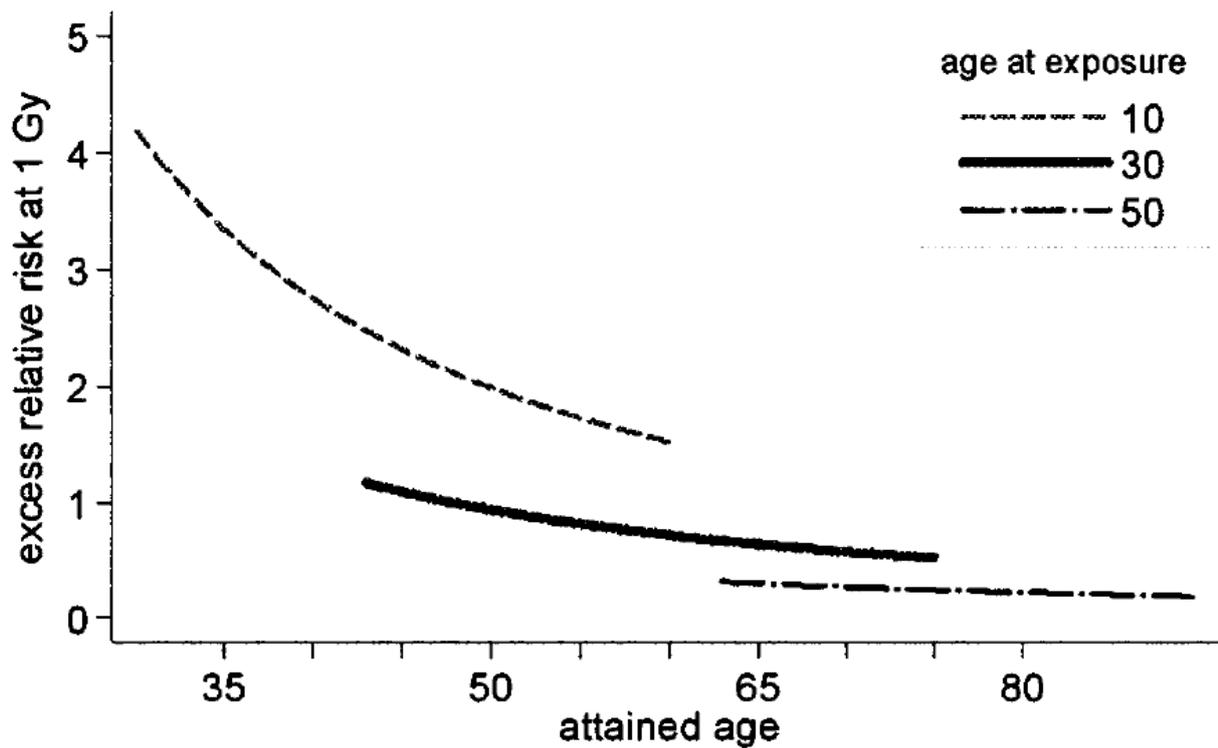
**Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958–1998**

Author(s): D. L. Preston, E. Ron, S. Tokuoka, S. Funamoto, N. Nishi, M. Soda, K. Mabuchi, and K.

Kodama

Source: Radiation Research, 168(1):1-64. 2007.

### ERR



(2) 역학조사 결과

서울대학교 의학연구원 원자력영향·역학연구소에서 2011. 4. 교육과학기술부에 제출한 ‘원전 종사자 및 주변지역 주민 역학조사 연구’ 결과에 따르면, 원자력발전소에서 거리가 멀수록 갑상선암 발생률은 감소하였으며, 원자력발전소 주변지역(원자력발전소에서 5km 이내) 여자 주민의 갑상선암 발생률은 원거리 대조지역(원자력발전소에서 30km 이상 떨어진 지역) 여자 주민의 2.5배에 이르는 것으로 나타났다.

표 3-4-31 지역별 방사선 관련 암 발생률 및 상대위험도(여자)

암 부위	지표	주변지역	대조지역	
			근거리	원거리
방사선 관련 암(전체)	발생률*	190.5	182.3	147.0
	상대위험도	1.2(0.77-1.74)	1.1(0.69-1.68)	1.0
위암	발생률*	50.1	59.4	44.9
	상대위험도	1.2(0.83-1.68)	1.3(0.89-1.79)	1.0
폐암	발생률*	13.5	26.8	20.1
	상대위험도	0.8(0.38-1.74)	1.4(0.64-2.83)	1.0
유방암	발생률*	45.2	30.6	29.2
	상대위험도	1.5(0.90-2.60)	1.1(0.60-1.99)	1.0
갑상선암	발생률*	61.4	43.6	26.6
	상대위험도	2.5(1.43-4.38)	1.8(0.98-3.24)	1.0

\* 세계인구 연령표준화 발생률임

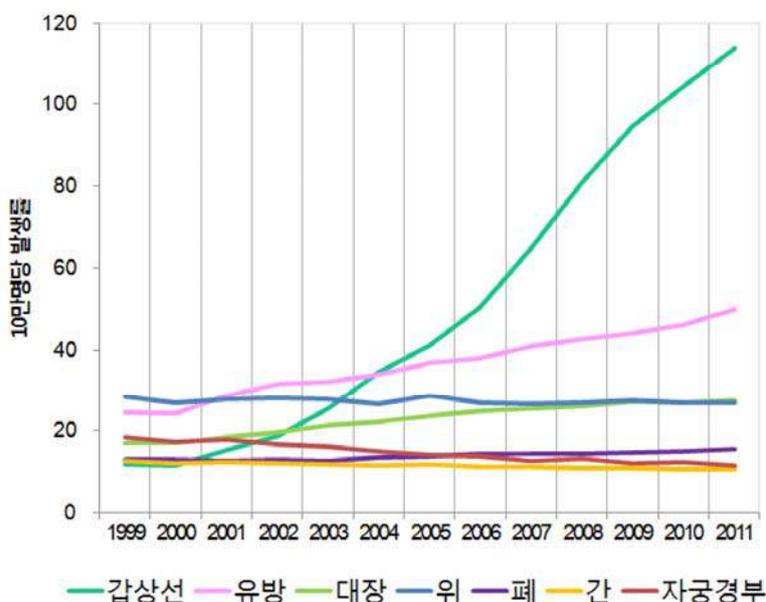
표3-4-30에서와 같이 남자의 경우 주요 방사선 관련 부위 암(위암, 간암, 폐암)의 발병 상대위험도는 원거리 대조지역 → 근거리 대조지역 → 주변지역으로 이동하면서 일정한 공통된 경향이나 통계적으로 유의한 경향 등을 보이지 않았다. 특히 폐암의 지역에 따른 발병 상대위험도가 위암, 간암, 그리고 전체 방사선 관련 암의 경향과 달랐다. 여자의 경우 통계적으로 유의한 경향을 보인 것은 갑상선암이었고 다른 부위 암은 유의한 경향을 보이지 않았다(표3-4-31 참조). 그러나 갑상선암의 발병위험도 경향은 위암 및 폐암의 그것과 달랐으며, 남자에서의 경향과도 달랐다. 주변지역에서 원전 방사선이 암 발병 위험인자로 영향을 미쳤다면, 남녀 모든 부위에서 공통되는 일관된 경향이 관찰되어야 할 것이다. 예를 들어 방사선 관련 암의 모든 부위별 발병 위험도가 남녀 모두 주변지역에서 높은 일관된 경향을 보이는 것이다.

이상의 연구수행 실적과 분석결과를 근거로 다음과 같은 최종 결론을 얻었다.

1. 원전 주변지역의 '모든 부위 암' 발병 위험도는 대조지역에 비하여 남, 여 모두에서 통계적으로 유의한 차이는 없었다.
2. 원전 주변지역의 '방사선 관련 암' 발병 위험도도 대조지역에 비하여 남, 여 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 없었다.
3. 원전 방사선과 주변지역 주민의 암 발병 위험도간에 인과적인 관련이 있음을 시사하는 증거는 찾을 수 없었다.

2011년 암등록통계

## 주요 암종 연령표준화발생률 추이 여자, 1999-2011

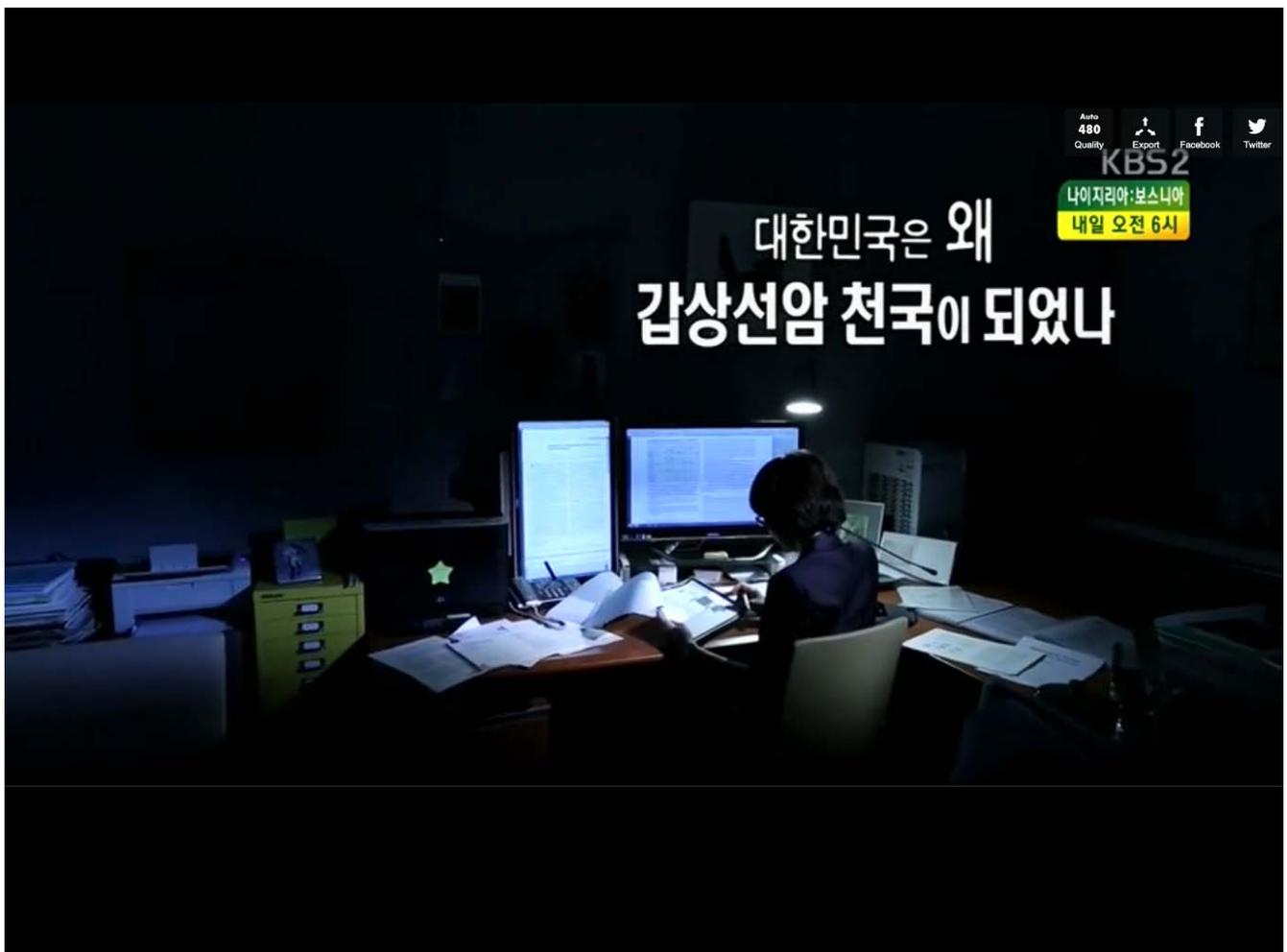


암종	발생연도		연간 변화율 (%)
	1999	2011	
갑상선	11.9	113.8	23.5*
유방	24.5	50.0	6.1*
대장	17.1	27.6	4.5*
위	28.3	26.9	-0.3
폐	12.9	15.5	1.7*
자궁경부	18.6	11.7	-3.9*
간	12.6	10.5	-1.5*

\*  $P < .05$

# 지역별 여성 갑상선암 발생률

※ 출처 : 서울대 의학조사 보고서, 2011 국가암등록사업 연례보고서  
※ 단위 : 명/10만 명



다. 이 사건 발전소에서의 방사선 방출

이 사건 발전소의 제한구역(방사선관리구역 및 보전구역의 주변 구역으로서 그 구역 경계에서의 피폭방사선량이 원자력위원회가 정하는 값을 초과할 우려가 있는 장소)를 말한다. 원자력안전법 시행령 제2조 제7호) 경계에서의 연간 방사선 피폭량은 다음과 같다.

<고리 원자력발전소 주변지역 주민 연간 피폭선량 (경계지역 기준)>

단위 : mSv/년

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
0.003	0.00552	0.00788	0.0069	0.00686	0.00136	0.00242	0.00208	0.00488	0.00361	0.00642
2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
0.00269	0.00207	0.00522	0.00512	0.00664	0.00512	0.00460	0.00226	0.00152	0.00171	

① 갑상선암의 발생에는 방사선 노출이 결정적 요인으로 작용하는 것으로 알려져 있는 점, ② 피고는 부산 기장군 장안읍에서 총 6개 기의 원자력발전소를 운영하고 있는데 원고 박금선은 그로부터 약 10km 이내 또는 10km 남짓 떨어진 지역에서 20년 가까이 거주하여 오면서 방사선에 장기간 노출되어 온 것으로 보이는 점, ③ 원고 박금선의 갑상선암 발병에 이 사건 발전소에서 방출된 방사선 외 다른 원인이 있다고 볼 뚜렷한 자료는 없는 점, ④ 이 사건 발전소에서 방출된 연간 방사선량(제한구역 경계 기준)은 원자력안전법 시행령 제2조 제4호, 별표 1에서 규정한 연간 유효선량한도(1mSv), 원자력안전위원회 고시 제2012-29호제 16조 제2항 제2호에서 규정한 제한구역 경계에서의 연간 유효선량(0.25mSv)에 미치지 못하고, 원전 주변지역 주민 역학조사 결과 갑상선암과는 달리 위암, 간암, 폐암은 원자력발전소로부터의 거리와 발병률 사이에 뚜렷한 상관관계가 없는 것으로 조사되기는 하였으나, 관련 법령에서 정한 연간유효선량은 국민 건강상 위해를 방지하기 위하여 정한 최소한도의 기준으로서, 인체가 노출되었을 경우 절대적으로 안전을 담보할 수 있는 수치를 나타내는 것이라고 단정할 수는 없는 점, ⑤ 원전 주변지역 주민 역학조사결과 근거리 대조지역인 원자력발전소에서 5km 이상 30km 이내 떨어진 지역에서도 원거리 대조 지역에 비하여 1.8배의 높은 갑상선암 발병률을 보이고 있고, 원고 박금선이 거주해온 지역이 이 사건 발전소의 방사선 유출 영향을 받지 않는 지역이라고 보기는 어려운 점, ⑥ 다른 암과는 달리 갑상선암의 경우에 원자력발전소로부터의 거리와 발병률 사이에 상관관계를 보이는 것으로 조사되었고, 기장군 주민의 갑상선암 발병률은 수도권 지역에서보다 높은 것으로 나타난 점,

# 원전과의 불편한 동거

오늘 밤 10시 25분 KBS2

추적60분  
0100000000 예고

# ICRP 2015

## 3rd International Symposium on the System of Radiological Protection

October 22-24, 2015  
Mayfield, Seoul, Korea

ICRP 2015

3rd International  
Symposium  
on the System of  
Radiological  
Protection  
Seoul, Korea



ICRP  
KARP

Korean Association for Radiation Protection

ICRP 2015 조직위원회 | Secretariat

Tel: +82-2-765-7996

Fax: +82-303-3441-7996

E-mail: [icrp2015.korea@gmail.com](mailto:icrp2015.korea@gmail.com)

# 11. 원전과 갑상선암 발생의 의학적 관점

박우윤(충북대)

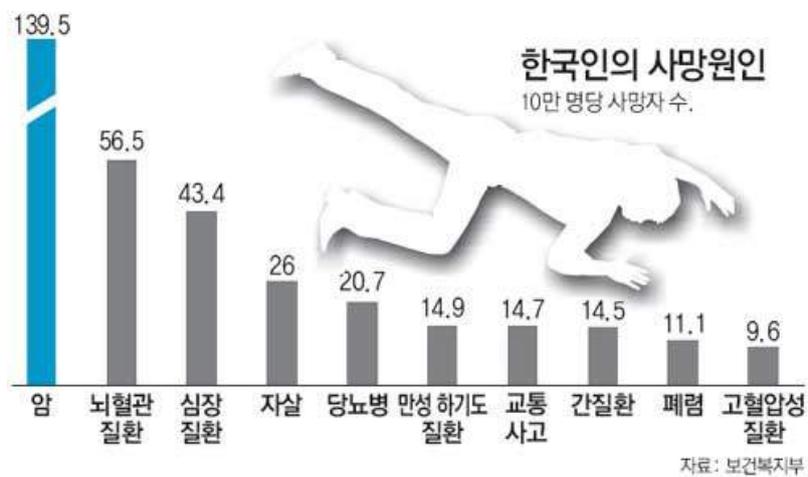
# 원전 주변 주민 갑상선 암의 의학적 관점

2015. 05. 06.

충북대학교 의과대학  
대한방사선방어학회 의학위원장

박 우윤

186 (2013)



# 암의 원인

Factor or class of factors	% of all cancer deaths
Tobacco	30
Alcohol	3
Diet	35
Food additives	<1
Reproductive and sexual behaviour	7
Occupation	4
Pollution	2
Industrial products	<1
Medicines and medical procedures	1
Geophysical factors (Ionizing radiations, UV)	3
Infection	10?
Unknown	?

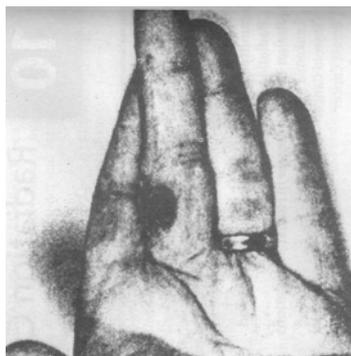
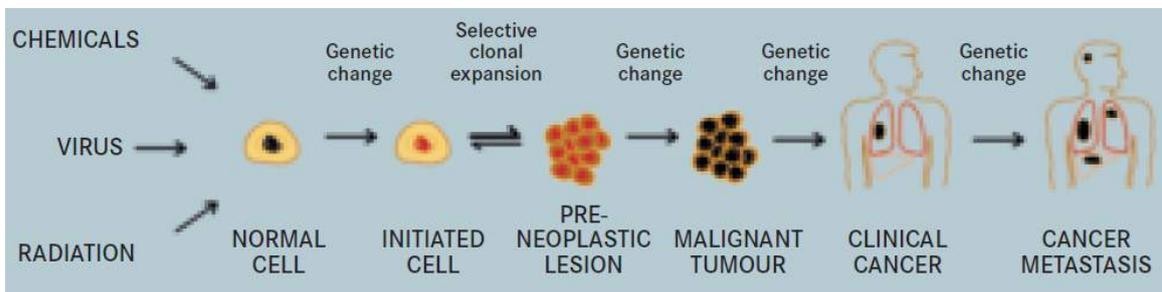
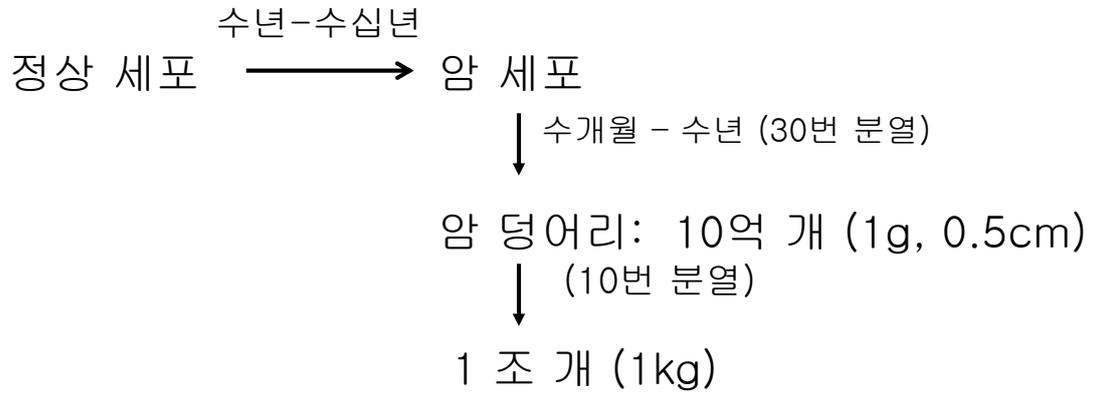
Doll R, Peto R. JNCI 1981

## 암을 유발할 수 있는 방사선의 종류

Agent or substance	Cancer site/cancer
<b>IARC Group 1: Carcinogenic to humans</b>	
X-rays and gamma-radiation	Various – all sites
Solar radiation	Skin
Radon-222 and its decay products	Lung
Radium-224, -226, -228 and their decay products	Bone
Thorium-232 and its decay products	Liver, including haemangiosarcoma; leukaemia
Radioiodines (including iodine-131)	Thyroid
Plutonium-239 and its decay products (aerosols)	Lung, liver, bone
Phosphorus-32	Leukaemia
Neutrons	Various
Alpha ( $\alpha$ ) particle-emitting radionuclides	Various
Beta ( $\beta$ ) particle-emitting radionuclides	Various
<b>IARC Group 2A: Probably carcinogenic to humans</b>	
Sunlamps and sun beds, use of	Skin
Ultraviolet radiation	Skin

World Cancer Report 2003

# 암의 발생과 성장



# 사람에서 암 발생 예

## - 방사선 발견 후 초창기-

1. 피부암, 백혈병: 초기 방사선 종사자
2. 폐암: 역청우라늄석 (pitchblende) 이나 우라늄 광부 (흡입한 라돈 또는 그 딸 핵종에서 나오는 알파선에 피폭)
3. 뼈(골) 암: 라듐 문자반 도장공 (radium dial painters), 결핵이나 강직성 척추염의 치료를 위해 라듐 염 주사를 맞은 환자
4. 간암: 토륨 (thorium)이 들어있는 조영제 (thorotrast)를 맞은 환자 (알파선)

## 사람에서의 경험

1. 일본 원폭 피폭자 → 백혈병, 각종 고형 종양
2. 강직성 척추염으로 방사선조사를 받은 환자 → 백혈병
3. 방사선 의사 또는 종사자 → 백혈병
4. 흉선 비대나 머릿이의 치료를 위해 방사선을 받은 어린이 → 갑상선암
5. 출산 후 유방염의 치료를 위해 방사선조사를 받거나 결핵 치료를 위해 많은 투시 검사를 받은 환자 → 유방암

## 방사선 유발 암 ( Radiation-induced cancer)의 특징

1. 방사선 조사에 의해 발생
2. 악성 및 양성종양
3. 잠복기가 길다.  
백혈병 : 5-7년 (peak)  
고형암 : 10년- (life long)
4. 자연 발생암과 구별 안된다.

## 방사선 발암에 영향을 주는 요인

1. 선량 (Dose)
2. 선량률 (Dose rate) (DDREF: 2(ICRP), 1.5(BEIRVII))
3. 선질 (LET)
4. 조직의 종류
5. 조직의 양
6. 개인 차 (유전적 요인)
7. 나이 (갑상선암, 유방암)
8. 성별
9. 화학물질

## D<sub>37</sub>에서 생성되는 DNA 구조의 변화 수

Agent	D <sub>37</sub>	DNA Lesion	Number of Lesions per Cell per D <sub>37</sub>
X-rays	100 rad	SSB	1,000
		DSB	40
Bleomycin	5.5 μg × 1 h	SSB	150
		DSB	30
Ultraviolet light	10 J/m <sup>2</sup>	TT dimer	1,000,000
		SSB	100
Benzopyrene	—	Adduct	100,000

**TABLE 1-22**

*Distribution and Relative Risk of Acute or Nonlymphocytic Leukemia According to Overall Treatment Category*

TREATMENT	NO. OF PATIENTS	NO. OF CONTROLS	RELATIVE RISK*	P VALUE
Radiation therapy only	11	158	1.0	—
Chemotherapy only	30	48	9.0 (4.1-20)	<0.001
Radiation therapy and chemotherapy	108	203	7.7 (3.9-15)	<0.001
Total	149	411†	—	—

\* Values in parentheses are 95% confidence intervals.

† Two controls were reported to have been treated with neither radiation therapy nor chemotherapy. (Kaldor JM, Day NE, Clarke EA, et al: *N Engl J Med* 322:7-13, 1990)

## 방사선 발암 추정 및 모델의 문제점

1. 고선량, 고 선량률 → 저선량, 저선량률
2. 동양인 ↔ 서양인: 암 발생 패턴이 다름.
3. 짧은 추적 기간 → life long

## 위험도 산출에서 고려해야할 사항

1. 정확한 피폭 선량, 선량률의 산출 (측정, 계산)
2. 적절한 대조군: 자연적인 암 발생률이 같아야함.
3. 충분한 추적 기간

측정할 수 있어야 관리할 수 있고,  
관리할 수 있어야 개선할 수 있다.  
-피터 드러커

## Standard Mortality Ratios for All Causes of Death in British Radiologists, 1897-1997

Years	Standard Mortality Ratio
1897-1920	1.75
1921-1935	1.24
1936-1954	1.12
1955-1979	0.71
All post 1920	1.04

패널토론

김종순 (전)원자력의학원장)

# 갑상선암 소송 개요

## 고리 원전 주민 48F 갑상선암

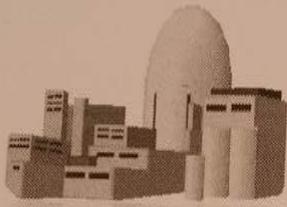
- 1심선고('14.10.17)-1,500만원 배상
- 원전 부근에 상당한 기간 거주하면서 발전소에서 내보낸 방사선에 노출되  
 그로 인해 암 진단을 받았다고 봄이 상당하여 피고에게 손해배상 책임이

## 환경단체 갑상선암 피해자 집단소송 원고 모집

- 원고자격 : 비상계획구역(8~10km)내 5년 이상 거주한 자 중 갑상선암 발
- 피해자 원고 301명 +배우자와 직계가족1,035명=1,336명

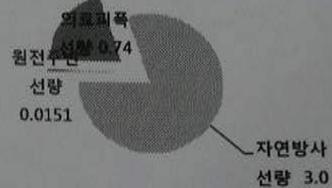
## 원전주변 주민 예상피폭선량

고리원전 주변지역 560m 지점  
 연간 예상피폭선량(전신)



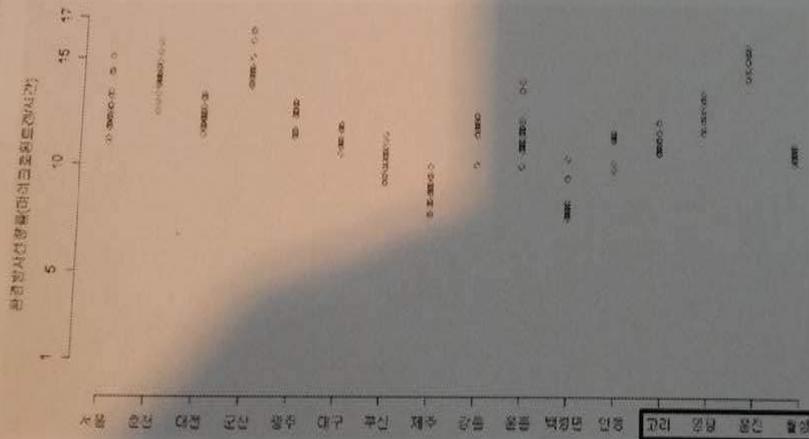
560 m(제한구역경계)

최소	0.00136 mSv (1996년)
최대	0.01510 mSv (2007년)



구분	선량(mSv)
원전주변선량	0.0151
의료피폭선량*	0.74
자연방사선량	3.0

\* 의료피폭 : 우리나라의 방사선 환경(KINS, 2009)



## 법적 판단 VS 과학적판단 (1)

### 1. 원전 방사선에 장기간 노출

- 원고가 10km 이내 지역에서 20년 가까이 거주
- 원고의 갑상선암 발병에 원전 방사선 외에 뚜렷한 다른 원인이 없음

- 주요 암 및 갑상선암의 발생률이 원전주변 거리 및 거주기간별 남녀 모두 발생위험도 차이가 없음
- 성인(20세 이후)에 방사선 노출된 경우 갑상선암 위험의 증가 증거 없음  
[근거] 일본 원폭생존자 연구(Furukawa et al, 2013), 체르노빌 주변 주민 연구(WHO, 2006)
- 갑상선암은 방사선요오드의 환경 오염 후 채소 우유등을 섭취하여 주로 발생되므로 오염 지역 소아에서 집단적으로 관찰되는 양상을 보여야 한다.
- 갑상선암 발생률 증가원인 : 조기검진  
조기검진 비율이 높은 지역일수록 갑상선암 발병률이 높다(고려대 안형식 교수 연구진, NEJM 2014)

### 2. 방사선에 대한 안전 기준치

- 발전소에서 방출된 연간 방사선량이 연간 유효선량 한도에 미치지 못하나, 관련 법령에서 정한 연간유효선량은 국민 건강상 위해를 방지하기 위하여 정한 최소한도의 기준으로서, 인체가 노출되었을 경우 절대적으로 안전을 담보할 수 있는 수치를 나타내는 것이라고 단정할 수는 없는 점
- 주변지역과 근거리, 원거리 대조지역의 환경방사선량이 차이가 없음
- 우리나라는 미국과 같은 선진국보다 먼저 국제방사선방호위원회의 가장 엄격한 기준(ICRP-60)을 적용하고 있음

## 법적 판단 VS 과학적판단(2)

### 3. 서울대 원전역학조사 연구보고서

- 원전주변지역(5km 이내) 여성 갑상선암 발생률이 원거리 지역(30km 밖) 대비 2.5배, 근거리 지역(5~30km) 1.8배 ⇒ 거리에 따른 갑상선암 발생률 경향 존재
- 주요 암 전체 분석에서도 남, 여 모두 거리에 따른 발생위험도 차이가 없음  
- 종사자(0.5km이내) 상대위험도는 1.06으로 오히려 주민보다 낮음
- 전체적으로 일관성 없는 결과를 보이고, 방사선으로 인한 경우 원전주변 거주 남, 여 모두에서 갑상선암이 높은 경향을 보여야하므로 여성 갑상선암의 경우는 '방사선 이외의 요인'으로 분석, 추론됨

### 4. 대한직업환경의학회 감정축탁 회신서

- 갑상선암의 가장 중요한 위험요인 : 치료적 방사선 노출과 환경재해로 인한 방사선 노출
- 방사선노출과 갑상선암이 용량-반응관계가 있음
- 체르노빌 사고이후 여성들에게서 갑상선암이 유의하게 증가
- 100mSV 이하의 저선량 노출에는 갑상선암이 발생이 관찰되지 않는다  
- 거주자의 선량은 갑상선암 유발 노출량의 1/10,000이 되지 않는 양이다.

## 법적 판단 VS 과학적판단(3)

### 5.기장군 건강검진 결과

- 동남권 원자력의학원 수행 기장군민 종합건강검진
- 암 검진자 3,031명 중 41명 갑상선암 진단(1.3%)으로 타지역보다 높다.

초음파검사에 의해 발견된 한국 성인의 갑상선암 유병률(2.5%) 으로 타지역보다 높지 않다

(출처: Oh et al., 2010)

### 6. 재판부에서는 '공해 탓인 손해는 가해자가 해가 없다는 것을 입증해야한다'고 적시 하였다.

방사선작업 종사자가 암에 걸렸을 때 방사선과 암의 인과관계를 노출량, 연령, 성별, 자연발생을 등 여 자료를 입력하여 인과확율을 계산한다. 인과확율이 30-50%가 넘을 때 산재신청시 인과성이 인정 된다. 이 소송의 경우 원전 울타리 경계에 21년간 살았다고 가정하여 최대한 노출량을 올려 잡아 계산해도 인과확율이 0%가 나온다. 이것이 현재 가장 과학적으로 입증된 인과관계가 없음의 증거이다.

## 방사선에 의한 암발생 인과확률

### 인과확률 (Probability of Causation, PC)

- 방사선노출 후 발생한 암의 방사선 기여도를 평가하는 통계 척도  

$$PC = \frac{\text{RadRisk}}{\text{RadRisk} + \text{BaseRisk}} \times 100$$

RadRisk : 방사선 노출로 인해 증가된 암 위험

BaseRisk : 기저 암위험

- IAEA, ILO, WHO 공동 국제권고(2010)-업무상 방사선피폭에 의한 암 발생의 보상기준으로 인과확률 적용 권고
- 원안위 고시 제2014-78호 (과기부 고시 제2001-35호)-인정기준 : 고형암 PC>50%, 백혈병 PC> 33%
- 한국인의 인과확률평가 프로그램 (RHRI-PEPC)

### ■ 암발생 정보

-성별 : 여성, 암종류 : 갑상선암, 암진단시 연령 : 46세(2012년)

- 방사선 노출 정보

1991~2011년 동안 연간 예상피폭선량 (고리원전경계지역 기준)-총누적선량 : 0.09786 mSv

-갑상선암 인과확률 : 0%

해당 당사자가 21년간 고리원전부지 경계지역(울타리)에 살았다 하더라도 2012년 발생한 갑상선암의 인과확률은 0% 이므로, 당사자의 암이 원전 방사선에 기인되었다고 볼 수 없음

Category	Value
RadRisk	0.000000
BaseRisk	0.000000
PC (%)	0.00