

KNS(P)-003-2021 춘계학술발표회 워크숍 발표자료집
KINS/PR-183

한국원자력학회 2021년 춘계학술발표회 워크숍

## 국내의 최신 방사선 환경

2021. 05. 12. (수) 14:00 ~ 18:00

한국원자력학회  
방사선방호 연구부회

한국원자력안전기술원



# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 프로그램

일시 : 2021년 5월 12일(수) 14:00 ~ 18:00

장소 : 온라인 (ZOOM live 및 유튜브 동시송출)

주최 : 한국원자력학회 방사선방호 연구부회, 한국원자력안전기술원

일정	내용, 발표자 (소속)
14:00~14:10	연구부회장 환영사, 이희석 (포항가속기연구소)
14:10~14:20	‘우리나라 국민의 자연 및 인공 방사선 피폭량 조사’ 연구 소개 및 인사말, 정규환 (한국원자력안전기술원)
<b>Session I</b> <span style="float: right;">좌장 : 정규환 (한국원자력안전기술원)</span>	
14:20~14:50	라돈 피폭 현황 및 관리방안, 이재기 (KARP 방사선안전문화연구소)
14:50~15:20	항공승무원 우주방사선 피폭 관련 연구현황 및 전망, 이재진 (한국천문연구원)
15:20~15:50	삼중수소 피폭의 이해, 강건욱 (서울대학교 의과대학)
15:50~16:10	Coffee Break (사진촬영)
<b>Session II</b> <span style="float: right;">좌장 : 최원철 (한국원자력안전기술원)</span>	
16:10~16:40	국민의 자연방사선 피폭량 조사 최신 현황, 김용재 (한국원자력안전기술원)
16:40~17:10	국민의 인공방사선 피폭량 조사 최신 현황, 김광표 (경희대학교)
17:10~17:40	생활주변 방사선 안전규제 현황 및 추진방향, 최원철 (한국원자력안전기술원)
17:40~18:00	종합 질의응답

문의처 : 한기영/한국원자력안전기술원/042-603-3029/[k732hgy@kins.re.kr](mailto:k732hgy@kins.re.kr)

# 목 차

## ① 라돈 피폭 현황 및 관리방안

발표자 : 이재기 (대한방사선방어학회 방사선안전문화연구소) ..... 1

## ② 항공승무원 우주방사선 피폭 관련 연구현황 및 전망

발표자 : 이재진 (한국천문연구원) ..... 19

## ③ 삼중수소 피폭의 이해

발표자 : 강건욱 (서울대학교 의과대학) ..... 33

## ④ 국민의 자연방사선 피폭량 조사 최신 현황

발표자 : 김용재 (한국원자력안전기술원) ..... 51

## ⑤ 국민의 인공방사선 피폭량 조사 최신 현황

발표자 : 김광표 (경희대학교) ..... 71

## ⑥ 생활주변 방사선 안전규제 현황 및 추진방향

발표자 : 최원철 (한국원자력안전기술원) ..... 75



# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 발표자료집

한국원자력학회 2021 춘계학술발표회 방사선방호 연구부회 워크숍 발표자료집

## < Session I >

### ① 라돈 피폭 현황 및 관리방안

발표자 : 이재기 소장 (소속 : 대한방사선방어학회 방사선안전문화연구소)

연락처 : [jakilee@hanyang.ac.kr](mailto:jakilee@hanyang.ac.kr)

(공백)

2021 춘계 KNS 방사선방호 연구부회 워크숍

## 라돈 피폭현황 및 관리대책

2021.5.

방사선안전문화연구소, KARP

이재기

[jakigoog@gmail.com](mailto:jakigoog@gmail.com)



2019 KNS/KARP 공동편찬

## 왜 라돈?

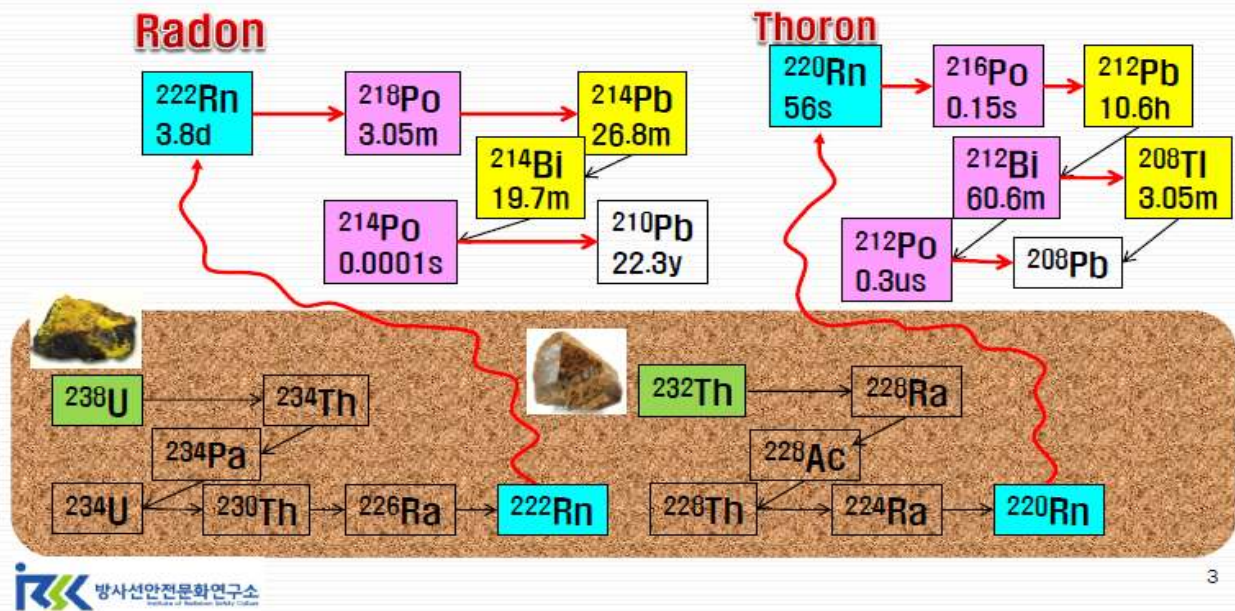


UNEP: 2016

인류 방사선피폭의 42%

# 라돈/토론

라돈/토론 자손  
(단수명 알파방출 자손)



토론도 라돈의 일종이고  
2018년 침대 매트리스 사건의 주범이지만

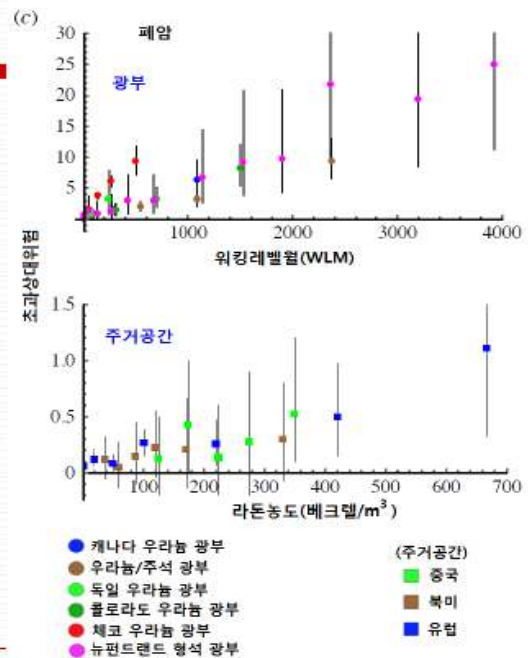
여기서는 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )만 논의

# 역사

- 1950년대 체계적 광부 역학연구
  - 광산 라돈(고농도)의 폐암 인과성 확정
- 1970년대 후반-80년대 주택 역학연구
  - 수 Bq/m<sup>3</sup>~100 kBq/m<sup>3</sup>
  - 자연방사선피폭의 50% 이상 라돈 기여
  - 주거공간 라돈 - 폐암 관계 일관성 미흡
- 2000년대
  - 역학자료 확장, 국제 병합연구로 주거공간 라돈과 폐암 인과성 확인

## 라돈 역학연구 종합

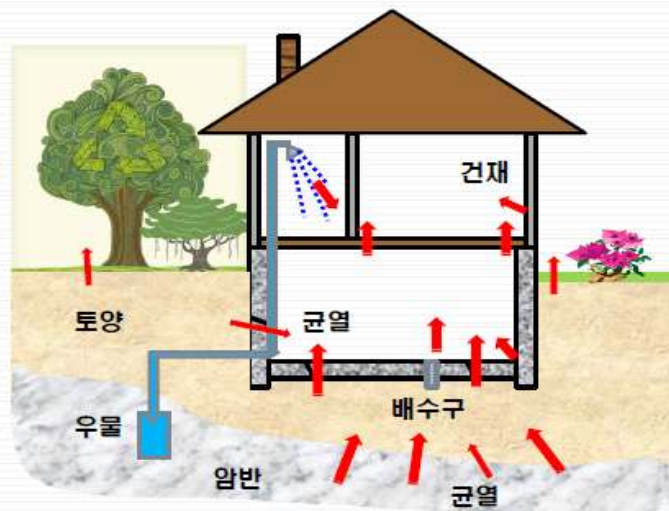
- 노출량 비례 폐암위험 증가
  - 100 Bq/m<sup>3</sup>(생애 피폭) 당 초과 상대위험: ~0.1
  - 우리국민 폐암 사망 기저위험: ~5%
- 다른 질환(백혈병 등) 증가: 미확인
- 흡연자 기저위험: 비흡연자의 25배
  - 라돈피폭으로 추가 위험도 이에 비례 가정



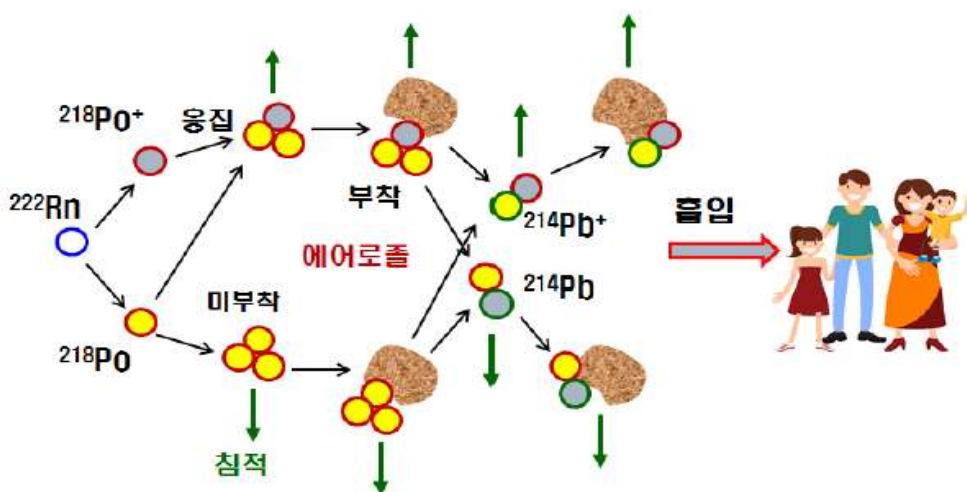


## 주거환경 라돈 경로

- 원천 다양하나(지반, 용수, 건재, 가스, 옥외 공기) **지반기여** 중요
  - 지반 라돈 침입경로 차단 수준이 결정
- 최신 건물: 창호 개선으로 **건축재 방출**도 관심 대상
- 환기 vs. 에너지 절약



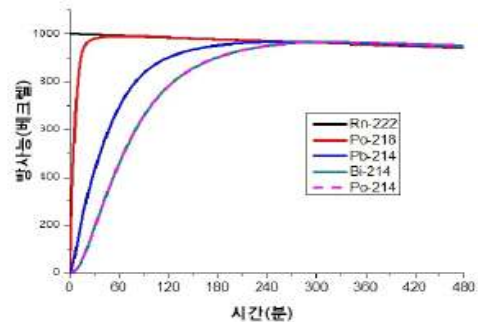
## 공기 중 라돈자손 거동



## 라돈과 자손의 방사능

### □ 반감기

- 라돈: 3.8일
- 자손: <30분



### □ 닫힌 계에서는 라돈가스 방사능 = 각 자손 핵종 방사능[방사평형]

### □ 실제 주거환경: 입자인 라돈자손의 침적, 부착 등으로 공기 중 농도 감소

- 감소 정도: 환기율, 분진 농도, 습도 등 조건에 따라 차이

## 평형등가농도와 평형인자

유효농도

### □ 평형등가라돈농도( $EEC_{Rn}$ ): 어떤 조합의 자손농도와 같은 효과를 갖는 평형상태 라돈농도

- 예(라돈의 경우)  $C$ : Bq/m<sup>3</sup>

$$EEC_{Rn} = \frac{5.79C_{Po18} + 28.6C_{Pb14} + 21.2C_{Bi14}}{55.6}$$

### □ 평형인자(F): 임의 조합 자손농도를 갖는 라돈 농도에 대한 평형등가라돈농도의 비

$$F = \frac{EEC_{Rn}}{C_{Rn}}$$

또는

$$EEC_{Rn} = F C_{Rn}$$

라돈가스농도

유효농도

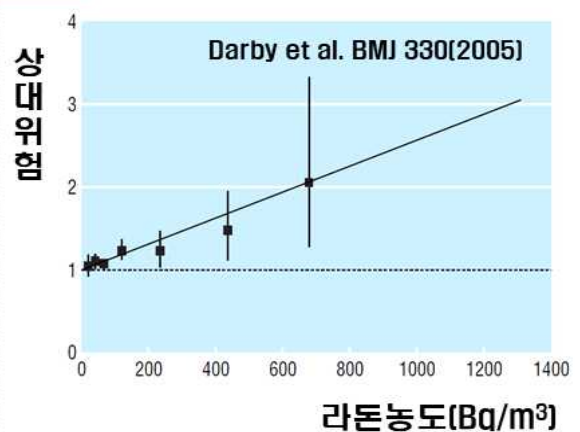
명목치: 0.4

## 워킹레벨 (working level; WL)

- 종사자(특히 광부) 피폭에 사용하는 자손 농도
- 공기 1 L에  $1.3 \times 10^5$  MeV PAE를 내는 임의조합의 라돈자손 농도
  - $1 \text{ WL} = 1.3 \times 10^5 \text{ MeV/m}^3 = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J/m}^3$   
[1L 공기에 평형상태의 Rn-222 100 pCi]
- 노출량
  - 워킹레벨월(WLM): 1WL 농도 공기를 1개월(기준 작업시간 170 시간) 동안 흡입
  - 1WLM(라돈) =  $6.37 \times 10^5 \text{ Bqh/m}^3$  [ $\text{EEC}_{\text{Rn}}$ ]

## 라돈 위험 재조명

- 2000년대 국제 데이터 통합분석(유럽-북미-중국): 주거공간 라돈과 폐암 인과성 확인
- 폐암 위험계수: 과거 평가치의 2배
  - $100 \text{ Bq/m}^3$  당 상대위험 1.09



2009년 11월 ICRP **Porto**성명을 통해 위험계수를 높임



## 라돈 새 선량계수(ICRP 137)

피폭/장소	미부착 분율	평형인자 F	유효선량계수	
			mSv/WLM	mSv/Bqhm <sup>-3</sup>
라돈가스+자손				[라돈가스 농도 당]
주택,실내 작업장,광산	0.08	0.4	20	1.3x10 <sup>-5</sup>
[방호목적]			10	6.7x10 <sup>-6</sup>
관광동굴, 중노동	0.15	0.4	24	1.5x10 <sup>-5</sup>
[방호목적]			20	1.3x10 <sup>-5</sup>
토론 자손				[평형동기농도 당]
주택,실내 작업장	0.02	—	5.6	1.2x10 <sup>-4</sup>
광산	0.005	—	4.8	1.0x10 <sup>-4</sup>
[방호목적]			5.0	1.1x10 <sup>-4</sup>

· 방호목적 값: 연환결과 고려하고, 실용 목적으로 단순화한 권고 값

· 방호목적 값: 역학결과 고려하고 실용 목적으로 단순화한 권고 값

## 노출시간 고려한 농도 당 연간선량

### □ 기준 노출시간[연간 시간]

- 직장: 2000
- 가정: 7000

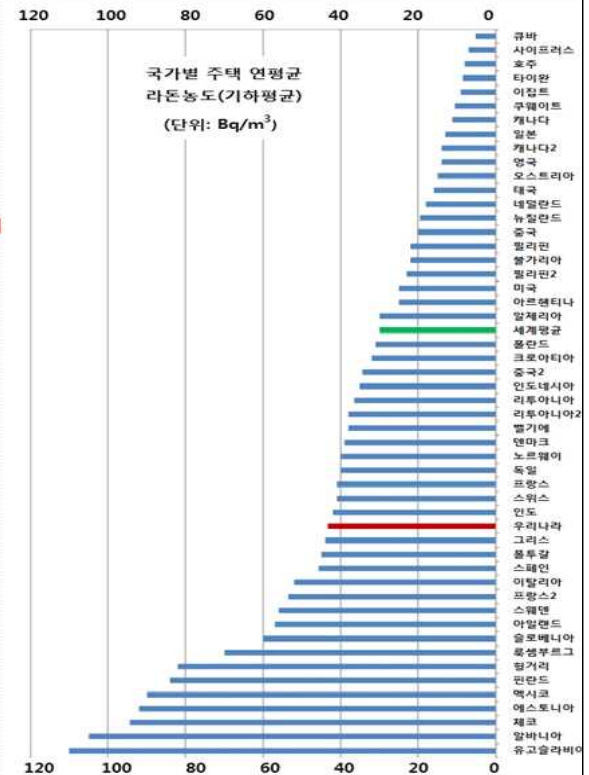
### □ 배제농도 초과 100 Bq/m<sup>3</sup> 당 연간 선량선량 (mSv) [명목 평형인자 0.4 반영]

장소	라돈 가스	토론자손
가정	4.7	77
실내작업장, 광산	1.34	22

· 중노동(예: 관광동굴 안내원) 경우는 2배

**배제농도:** 국내 라돈수준 고려하면 80 Bq/m<sup>3</sup> 무방(합의 필요)

# 국내 라돈 현황



## 국내 라돈실태 조사

### □ KINS(1990년대부터)

- 2010년대 추가 조사
- 누적형 고체비적검출기로 계절별 측정
- **라돈맵** 작성, 라돈유역지역 정밀조사
- 광산, 지하시설 등 특수 환경 조사

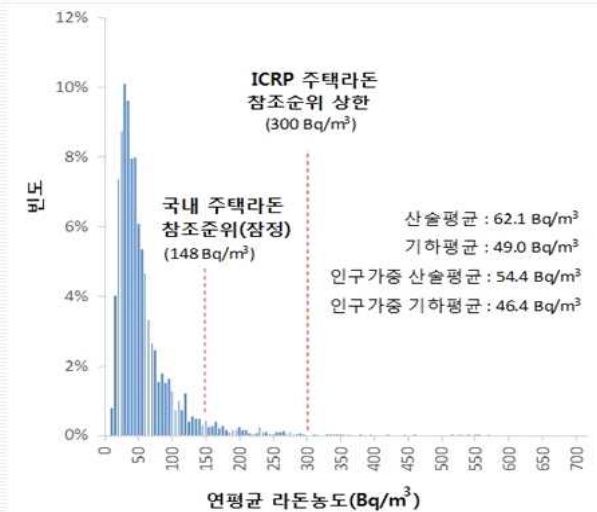


### □ 환경부(2006년부터)

- 주택 및 다중이용시설
- 겨울철 측정(스크리닝 위주): **대표성 의문**

\*자료: 장병욱 등, 생활환경 중의 방사선영향평가, KINS/RR-937(2012)

## KINS 조사 결과(보완조사 결과 반영)



### □ 인구가중 평균 농도

- 전국 5600 가옥
- 산술평균:  
 $54.4 \pm 50.3 \text{ Bq/m}^3$   
**[2.6 mSv]**
- 기하평균: 46.4  
 $\text{Bq/m}^3$ (편차 1.8)

## 시도별 인구가중 라돈 준위(연평균 라돈 가스 농도)

지역	라돈농도 (Bq/m³)			지역	라돈농도 (Bq/m³)		
	산술평균	기하평균/ 편차	최고		산술평균	기하평균/ 편차	최고
서울	48 ± 58	40/1.7	1,055	경기	56 ± 48	49/1.8	552
부산	38 ± 22	34/1.6	165	경남	51 ± 39	43/1.7	315
대구	44 ± 30	39/1.7	208	경북	58 ± 97	48/2.1	921
인천	46 ± 46	39/1.8	198	전남	70 ± 61	59/1.9	556
광주	61 ± 33	52/1.7	202	전북	62 ± 68	54/1.8	857
대전	56 ± 66	47/1.8	231	제주	50 ± 48	41/1.9	280
울산	45 ± 41	37/1.8	270	충남	67 ± 74	57/1.8	573
강원	87 ± 151	73/2.0	1,004	충북	73 ± 130	61/2.0	1,350

※ ICRP 참조준위 상한(300 Bq/m³) 초과 가옥 비율: 0.8%

자료: 한국원자력안전기술원, 2020. 최고농도는 KINS 2005 자료.

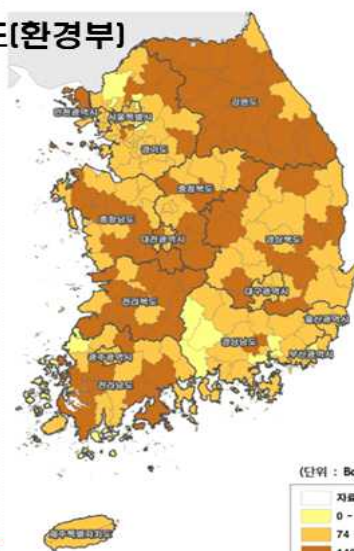


## 시도별 환산 연간 유효선량(mSv)

지역	연간선량(mSv)			지역	연간선량(mSv)		
	산술평균	편차	최고		산술평균	편차	최고
서울	2.26	2.73	49.5	경기	2.63	2.26	25.9
부산	1.79	1.03	7.7	경남	2.40	1.83	14.8
대구	2.07	1.41	9.8	경북	2.73	4.56	43.2
인천	2.16	2.16	9.3	전남	3.29	2.87	26.1
광주	2.87	1.55	9.5	전북	2.91	3.20	40.2
대전	2.63	3.10	10.8	제주	2.35	2.26	13.1
울산	2.12	1.93	12.7	충남	3.15	3.48	26.9
강원	4.09	7.10	47.1	충북	3.43	6.11	63.3
전국	2.67	2.47	63.3				

## 지역별 차이 주된 이유: 기반 지질

라돈농도(환경부)



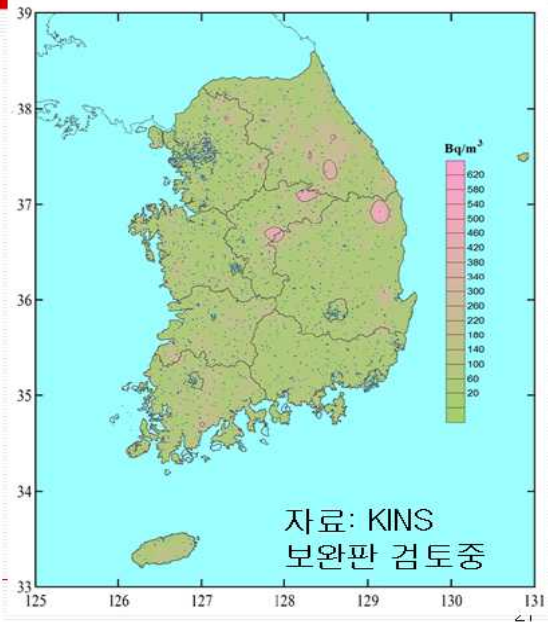
지질도



행정구역별  
데이터는  
중요하지  
않음

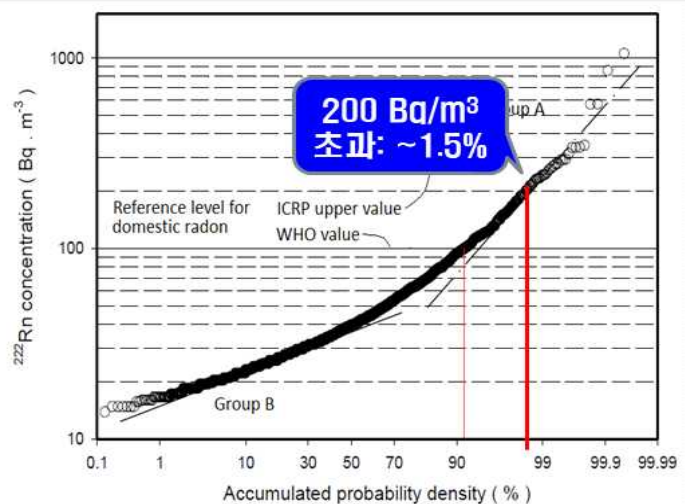
## 주목할 대상: 라돈 관심지역

- 라돈: 어디나 존재
- 주목대상: 유난히 높은 지역/건물
  - 구체적 라돈 관심지역 식별 필요
- 관심지역 가능 농도
  - 하계: 수십 Bq/m<sup>3</sup>
  - 춘추계: 수백
  - 동계: 수천

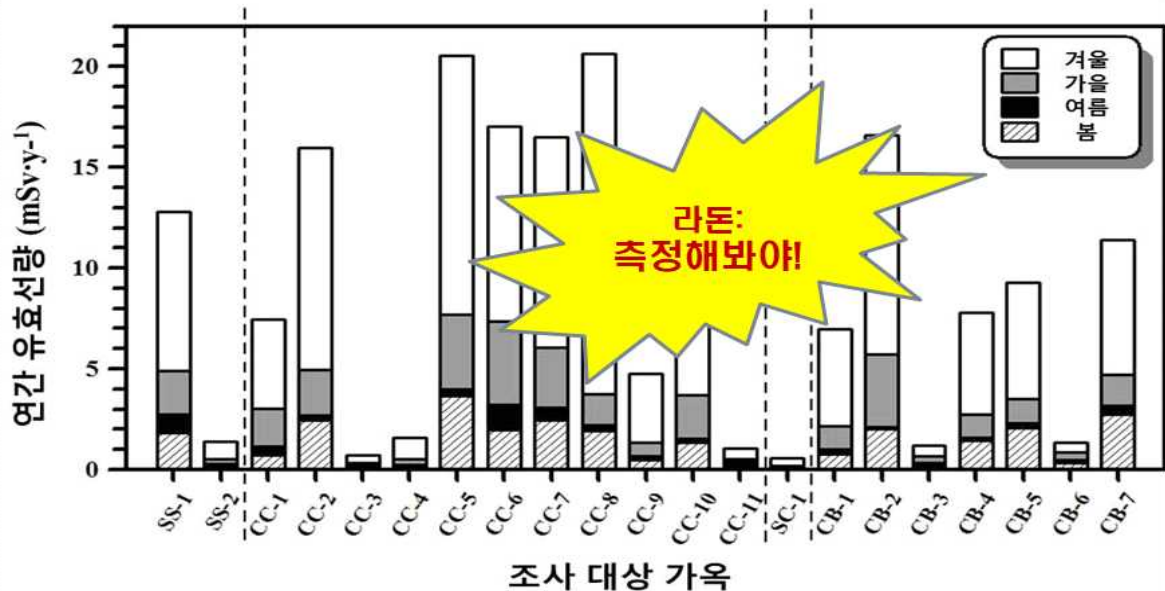


## 라돈 높은 가옥?

- 국내 조사결과 농도 분포로부터 선정
- 국내주택 표본조사 결과 약1% 주택이 200 Bq/m<sup>3</sup> 초과
- 200 Bq/m<sup>3</sup>=연간 9.4 mSv 상당
- 1800만호의 1% = 18만호(50만 명)



## 유의지역 표본가옥 라돈피폭



## 라돈 정책

- 우리나라: 라돈 준위 국제평균 이상
- 가정: 정책판단에 필요한 자료 가용
  - 밀폐도가 높은 실내(예: 신축가옥, 환기 불충분한 지하층)
- 직장
  - 직장 라돈 실태조사 보완
    - 밀폐도 높은 건물, 농업용 비닐하우스
  - 개인 체류시간이 긴 다중 이용시설(예: 병원, 학교)
- 건축재 천연방사능 관리대책 필요



## 라돈 피폭관리

### 자율피폭 [환경부]

- ☐ 주택, 관광동굴
- ☐ 참조준위 고려
  - 상대적 높은 선량
  - 자율
- ☐ 정부 책무
  - 판단근거 정보제공
    - ☐ 라돈 정체, 보건영향
    - ☐ 라돈 관심지역
    - ☐ 측정 및 감축 수단

### 직무피폭 [원안위, 노동부, 교육부]

- ☐ 직장, 학교
- ☐ 선량한도 적용
  - ☐ 합리적 용인 선량
  - ☐ 강제규범
- ☐ 행위자 책무
  - ☐ 이해동의 구하기
  - ☐ 방호대책
  - ☐ 피폭량 감시 및 통보

## 라돈 관리기준(안) 측정 라돈가스 연평균 농도

- ☐ 배제준위:  $80 \text{ Bq/m}^3$
- ☐ 주택:  $6 \text{ mSv}$ 
  - 측정농도  $200 \text{ Bq/m}^3$ 
    - ☐ 환경부:  $148 \text{ Bq/m}^3$
- ☐ 직장
  - 특별면제준위:  $230 \text{ Bq/m}^3$
  - 한도:  $3 \times 10^6 \text{ Bqh/m}^3$
  - 일반제약치:  $9 \times 10^5 \text{ Bqh/m}^3$

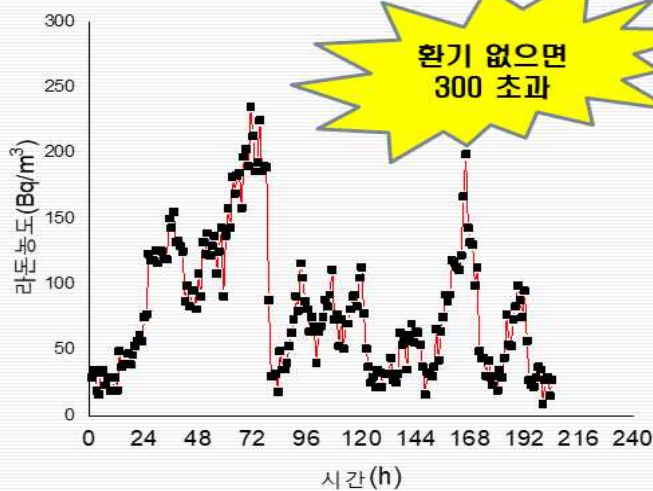
연평균 라돈가스 농도  $\text{Bq/m}^3$







## 신설 주택(건축재) 관심 필요성



- 골재 산지 확인하여 사용제한 필요
- 건축재 Ra, 소 농도 기준 적용

고층아파트(31층) 라돈 측정 예(2019)

## 라돈 공포?

### □ 라돈: 얼마나 위험?

#### ■ 폐암사망 위험

- 라돈 100 Bq ~ 미세먼지 10 ug
- 요즘 우리나라 미세먼지: 빈번히 나쁨(평균 36~75 ug)



(사진: 한겨레)

#### 5천만 명 당 연간 사망

라돈	710	2010년 세계 자료
미세먼지	23000	
흡연	45000	
침대 질식	100	2003년 미국
수영장 익사	100	
운수사고	7000	2011년 우리나라
익사	650	
자살	15000	
피살	550	
인플루엔자	50	

## 요점

---

- 우리나라 라돈: 유의 수준
- 라돈 상존, 광범성으로 문제 복잡: 유연성 요구
  - 주택만 아니라 직장도 고려
  - 라돈 위험: 관심 필요하나 과민반응 자제
- 정부 역할 중요
  - 홍보, 측정 및 감축 인프라 확충
  - 제한적 지원책
  - 공공시설에서는 정부(중앙, 지방) 책무
- 손쉬운 감축: **환기**(무난하나 번거로움)

# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 발표자료집

한국원자력학회 2021 춘계학술발표회 방사선방호 연구부회 워크숍 발표자료집

## < Session I >

### ② 항공승무원 우주방사선 피폭 관련 연구현황 및 전망

발표자 : 이재진 박사 (소속 : 한국천문연구원)

연락처 : jjlee@kasi.re.kr

(공백)

# 항공 승무원 우주방사선 피폭 관련 연구 현황 및 전망

2021. 05. 12.

한국천문연구원

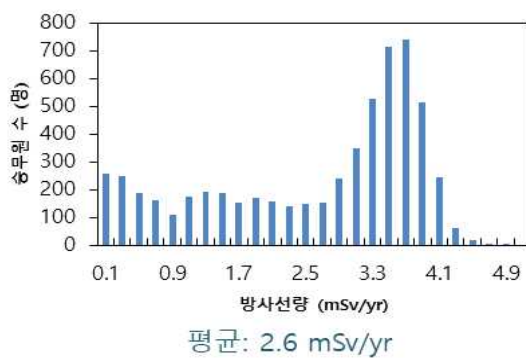
이 재 진



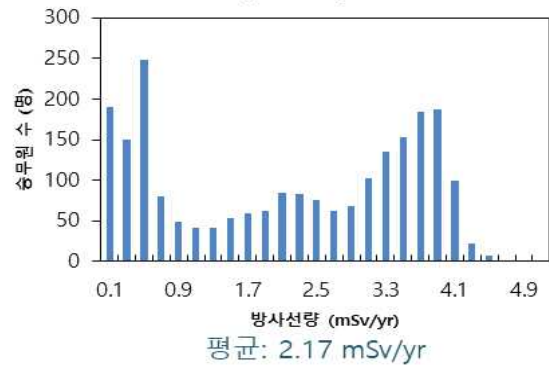
KASI 한국천문연구원  
Korea Astronomy & Space Science Institute

## 국내 항공사 승무원 방사선 노출량 (2008년)

객실승무원 (5870명)의 방사선 피폭량



운항승무원 (2244명)의 방사선 피폭량



• CARI-6M 사용 계산

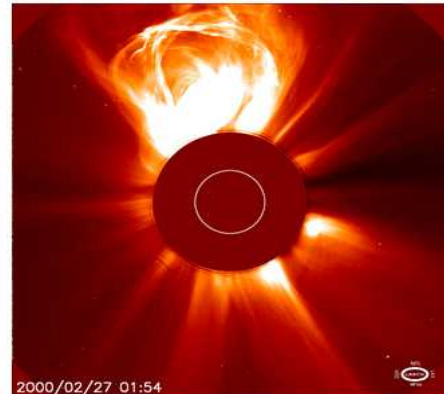
# 우주방사선의 기원

은하 우주선 (Galactic Cosmic Ray)



- 별의 진화 마지막 단계인 초신성 폭발에 의해 고에너지 입자 발생
- 비교적 일정하며, 예측 가능

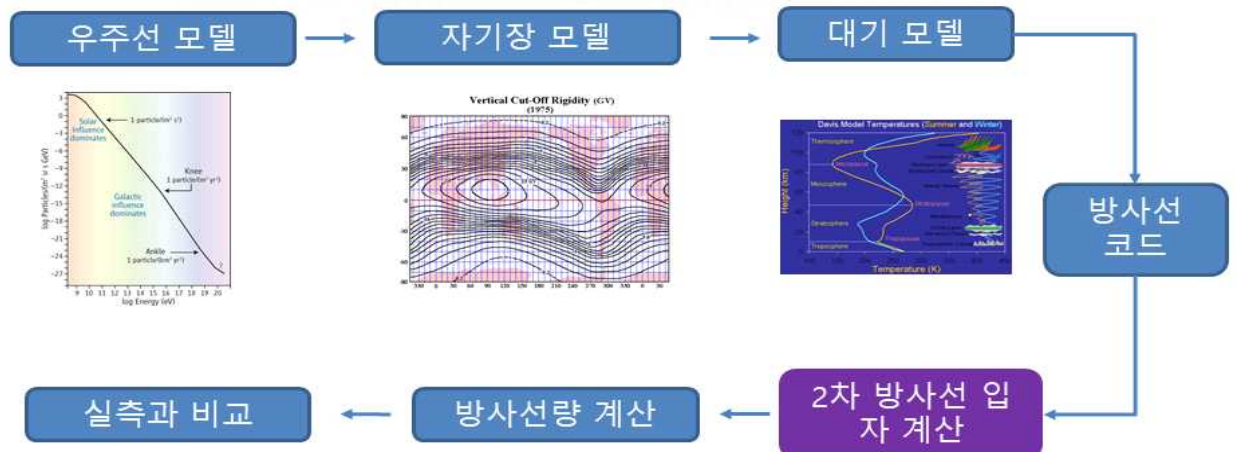
태양 우주선 (Solar Cosmic Ray)



- 태양 물질 방출에 의해 고에너지 양성자가 지구에 도달
- 태양활동 극대기에 나타나며 예측 불가능

KARI 한국천문연구원

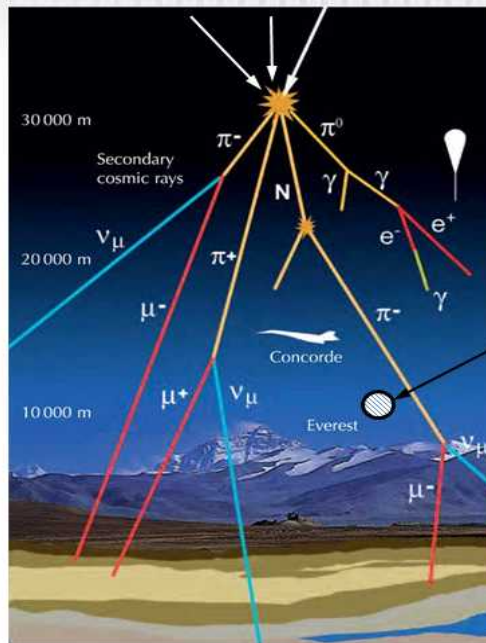
# 우주 방사선 계산 알고리즘



KARI 한국천문연구원



## EDCAR 코드의 특징



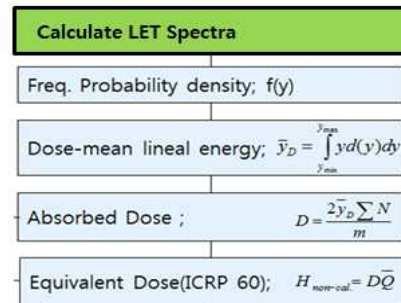
GCR: Badhwar O'Neill 모델 이용 @ 100 km

- 여러 방향의 GCR 고려
- 양성자 및 헬륨 이온 270만 개 입사

Atmosphere: NRLMSISE-00 모델 이용

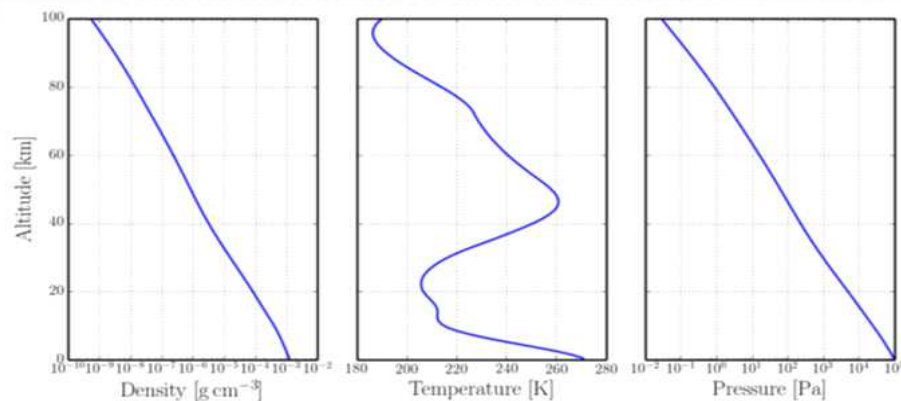
Interaction: GEANT-4 code 이용  
약 20일간 계산

독자 개발 모델의 특징: **Ambient Dose Equivalent**를 계산하기 위해 **TEPC** 적용



KARI 한국천문연구원

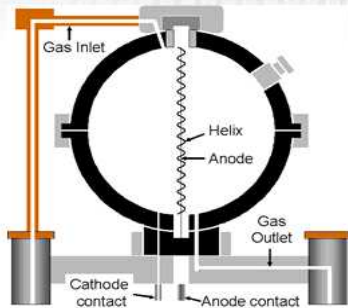
## 비행고도 대기 모델



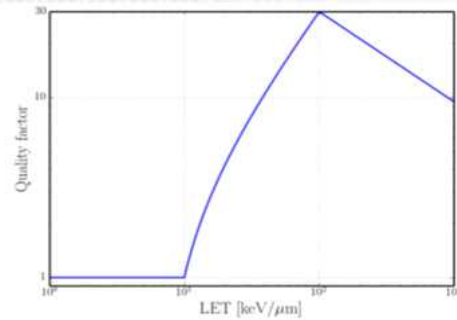
- NASA에서 개발한 MSIS-E-90 모델을 이용하여 대기 밀도 계산
- 고도 100 km에 대해 1 km의 층을 만들어 각 층에서는 동일한 대기 성분을 갖는다고 가정함
- 대기의 성분은 질소 75.5%, 산소 23.2%, 아르곤 1.3%(질량비)로, 이 성분비는 모든 고도에서 동일

KARI 한국천문연구원

## 등가 선량 계산



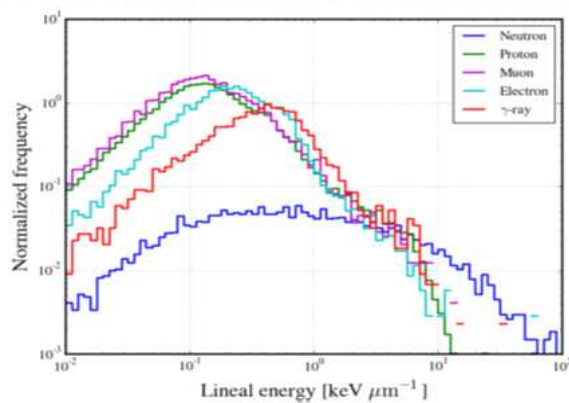
TEPC의 구조



ICRP 60에 정의되어 있는 선질 계수

- Far West Technology사의 HAWK와 같은 형태 (지름 12.7 cm)의 TEPC 가정
- 각 사건에서 쌓이는 에너지를 기체구 지름의 2/3으로 나누어 LET(linear energy transfer)를 얻음
- LET로부터 선질 계수(quality factor)를 계산
- 선질 계수를 선량에 곱한 후 곱한 값을 모든 사건에 대하여 합산

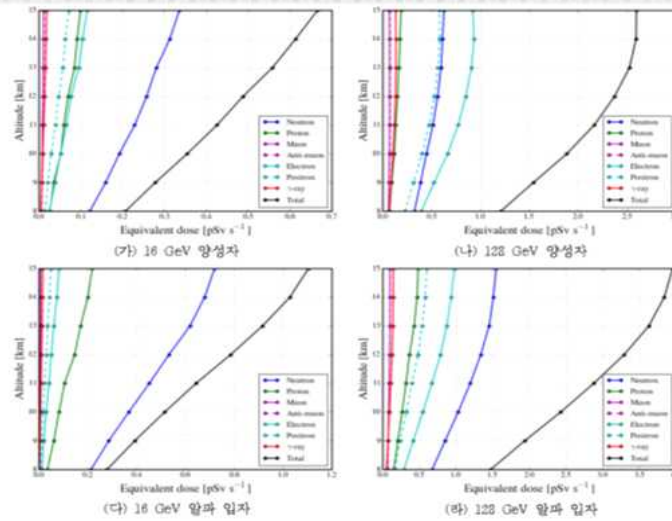
## LET 확률밀도 함수



- 에너지가 1 GeV인 입자가 TEPC에 입사하였을 때 나타나는 LET 확률밀도 함수
- 대부분의 입자들이 10 keV/μm 이하의 LET를 만드는데 비해 중성자는 높은 LET에 기여함



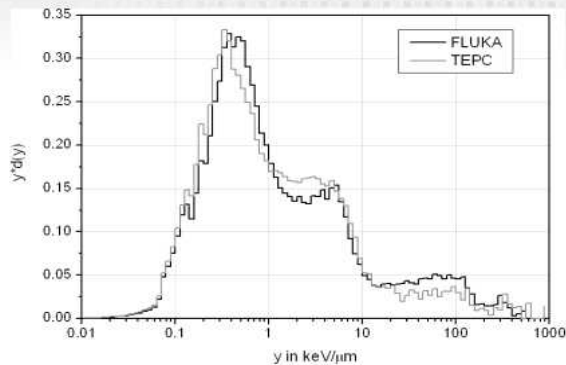
## 입자 별 등가선량



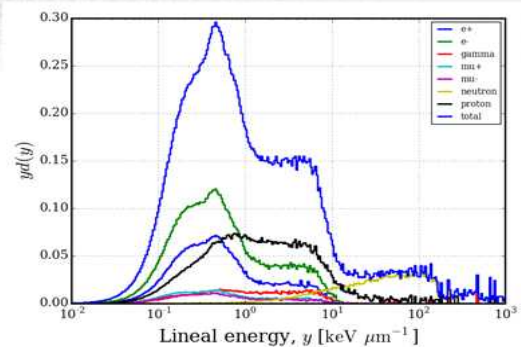
16 GeV와 128 GeV 에너지의 양성자 또는 알파 입자가 지구 대기에 초당 평방미터당 1개 씩 입사할 경우 각 고도에서의 각 딸 입자에 의한 등가선량과 총 등가선량(검은 실선)

KARI 한국천문연구원

## LET Spectra Comparison



TEPC로 관측한 LET 스펙트럼을 모델과 비교  
(Latocha et al., 2006)

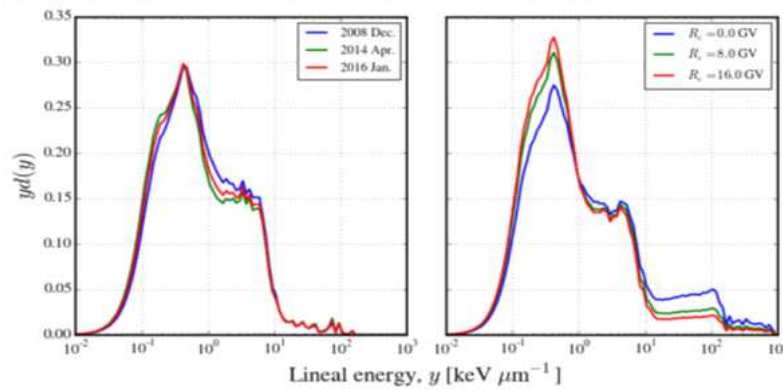


자체 모델(EDCAR)로 계산한 LET 스펙트럼

- 측정한 LET 스펙트럼과 TEPC 모델을 이용하여 계산한 결과가 잘 일치함
- 자체 개발 모델은 LET 스펙트럼을 이용하여 등가선량을 계산하므로, 실측값과의 비교가 용이함

KARI 한국천문연구원

## LET Spectrum 계산



- 태양 활동에 따른 지구 대기에 입사하는 양성자에 의한 LET 분포(고도 100 km) 변화(왼쪽)
- 2016년 1월의 입사 스펙트럼으로 계산한 cutoff rigidity에 따른 10 km 고도에서의 LET 분포 변화(오른쪽)

## Ground Level Enhancement

GLE	Date	I (%*h)	F30/F200
5	23.Feb.56	5202 ± 104	11.0 ± 2.1
42	29.Sep.89	1189 ± 60	41.5 ± 3.2
10	12.Nov.60	677 ± 25	44.7 ± 8.4
45	24.Oct.89	576 ± 27	22.9 ± 6.0
11	15.Nov.60	552 ± 106	51.0 ± 10.0

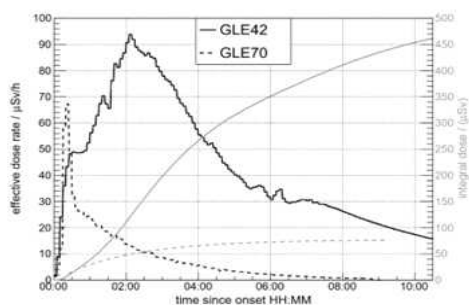
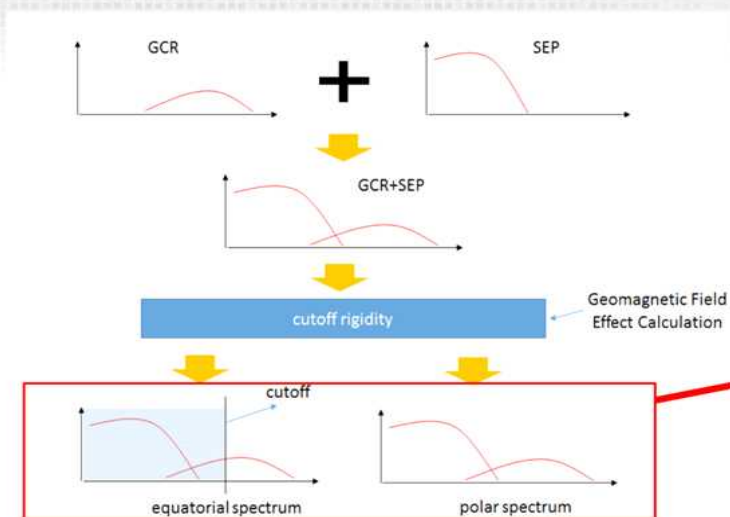


Figure 4. Dose rates and accumulated doses were calculated for the altitude of 41,000 ft. (FL410) and locations at 90° N 0° for GLE42 and 70° N 50° E for GLE70, respectively.

# Combination of SEP + GCR spectrum

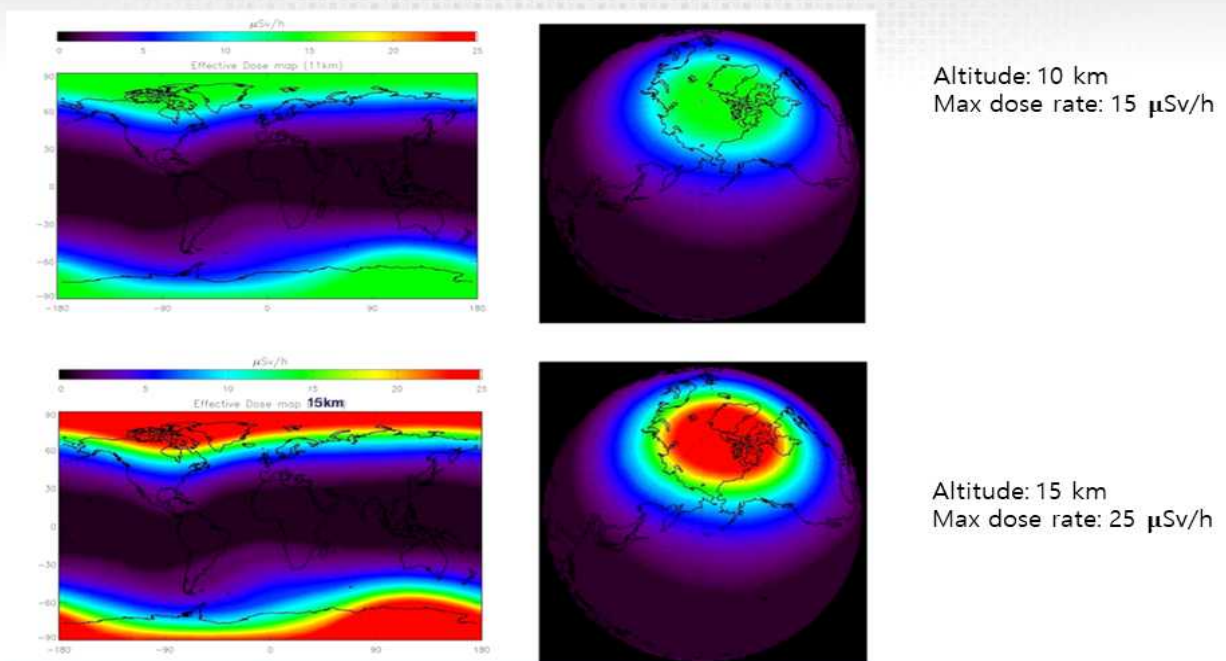


SEP spectrum : GOES 15 Observation  
GCR spectrum : BO11 model

13

KARI 한국천문연구원

# Global Dose Map (Halloween Storm, Oct 29, 2003)



14

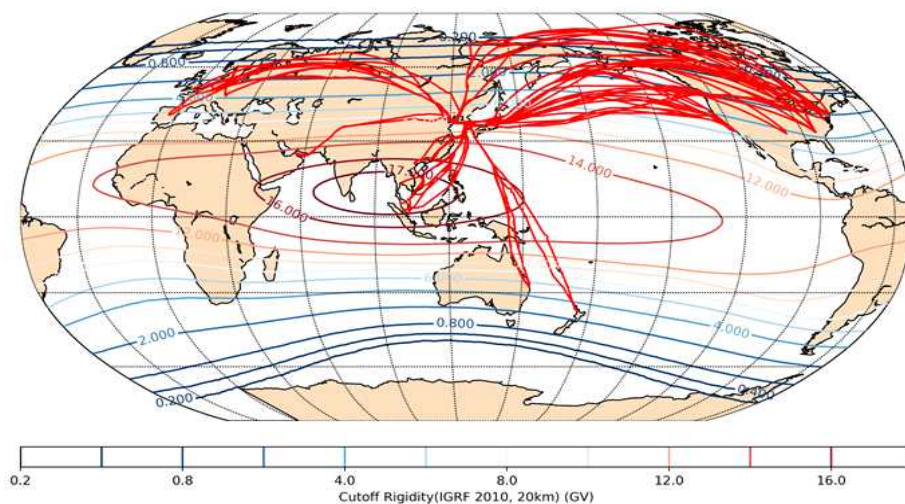
KARI 한국천문연구원

# Route Dose Calculation

**[Halloween Storm, Oct 29, 2003]**

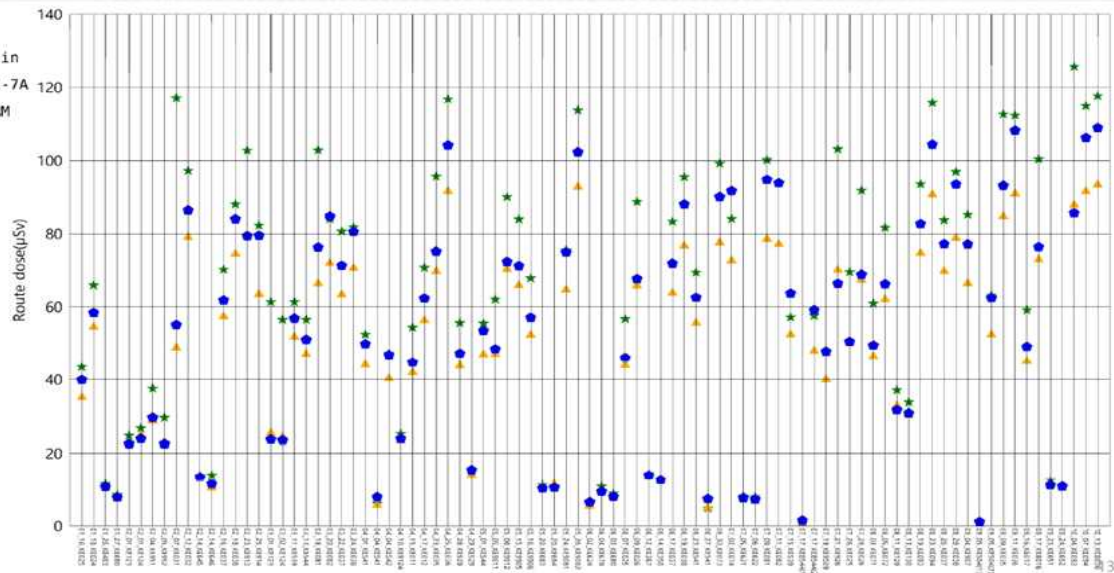
	KREAM (GCR Only)	KREAM (GCR+SEP)	CARI-6M (GCR Only)
JFK-ICN (New York – Incheon) Polar Route	47.8035 $\mu\text{Sv}$ (3.524 $\mu\text{Sv/hr}$ )	81.9073 $\mu\text{Sv}$ (6.037 $\mu\text{Sv/hr}$ )	60.6 $\mu\text{Sv}$ (4.467 $\mu\text{Sv/hr}$ )
JFK-ICN (New York – Incheon) Non Polar Route	46.0540 $\mu\text{Sv}$ (3.368 $\mu\text{Sv/hr}$ )	72.3130 $\mu\text{Sv}$ (5.283 $\mu\text{Sv/hr}$ )	62.7 $\mu\text{Sv}$ (4.582 $\mu\text{Sv/hr}$ )

# 항공기 고도 우주 방사선 관측 (2020)





## 모델 실측값 비교



17

KASI 한국천문연구원

## TEPC 개발

18

KASI 한국천문연구원

## 천문연 개발 TEPC



- Battery Status
- RED :Operation LED
- Slide Switch (Left:OFF, Right:ON)

Portable  
Easy operation  
Low power  
Low weight  
Re-chargable



Battery 충전 : USB

19

KV 한국천문연구원

## Far West Technology HAWK와 비교 사양

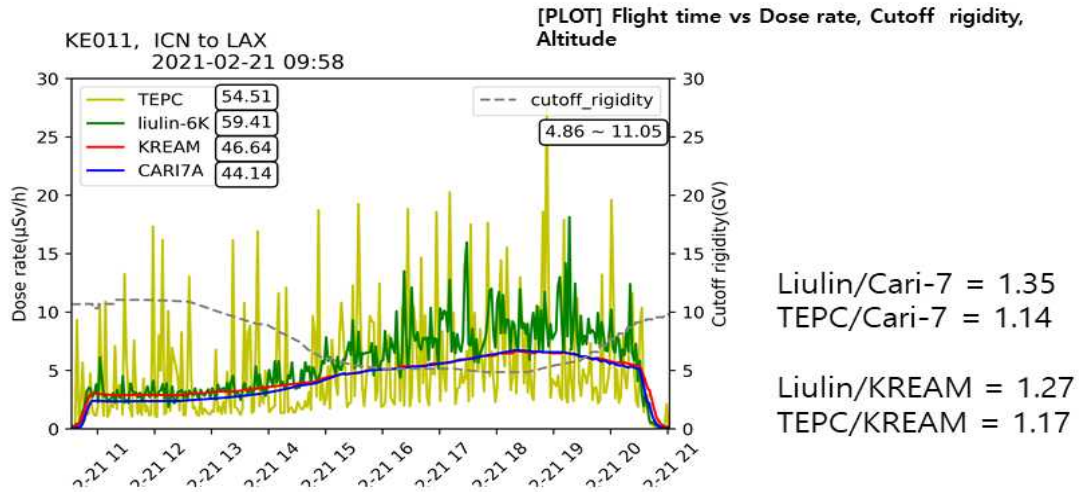
Parameters	SRDAS (current)	SRDAS-TEPC	HAWK
<b>Detector</b>			
TEPC Diameter	60 mm	60 mm	125 mm
Wall thickness	3 mm	3 mm	2.1 mm
Filling Gas	Propane, 2 $\mu$ m, 13.9 torr	Propane, 2 $\mu$ m, 13.9 torr	Propane, 2 $\mu$ m, 7 torr
<b>Operational</b>			
LET Range	0.5 ~ 500 keV/ $\mu$ m	0.5 ~ 1000 keV/ $\mu$ m	0.5 ~ 1000 keV/ $\mu$ m
MCA (2 ch)	High LET: 512 ch, Low LET : 512 ch	High LET: 1024 ch, Low LET : 512 ch	High LET: 1024 ch Low LET : 256 ch
MCA deadtime	30 $\mu$ s	30 $\mu$ s	64 ms
Communication	USB, TTL RS422	USB, TTL RS422	RS232
Memory Storage	2 GB Flash Memory 2 min data 30 day	2 GB Flash Memory 2 min data 30 day	Compact flash memory 1.2 MB/day
Battery	충전형 26 Wh (7000mAh, 3.7V) Run time : 24 h	충전형 26 Wh (7000mAh, 3.7V) Run time : 24 h	비충전형 4 D cells: Run time : 100 h
Weight	1.5 kg	1.5 kg	5 kg
Size	110mm x 110mm x 170mm,	110mm x 110mm x 170mm,	160 dia. X 340 long

20

KV 한국천문연구원

# Flight Data

			DEPARTURE		ARRIVE		Liulin(H) (uSv)	TEPC(H) (uSv)	Liulin/TEPC
			DATE	TIME	DATE	TIME			
Flight #	1	ICN LA	2021-02-21	20:14:44	2021-02-22	5:31:17	56.48	50.38	1.12
Flight #	2	LA ICN	2021-02-23	16:14:55	2021-02-24	3:59:35	80.39	70.24	1.14
Flight #	3	ICN LA	2021-02-25	22:55:33	2021-02-26	8:48:08	55.22	47.54	1.16
Flight #	4	LA ICN	2021-02-28	16:24:38	2021-03-01	4:01:18	50.40	49.00	1.03

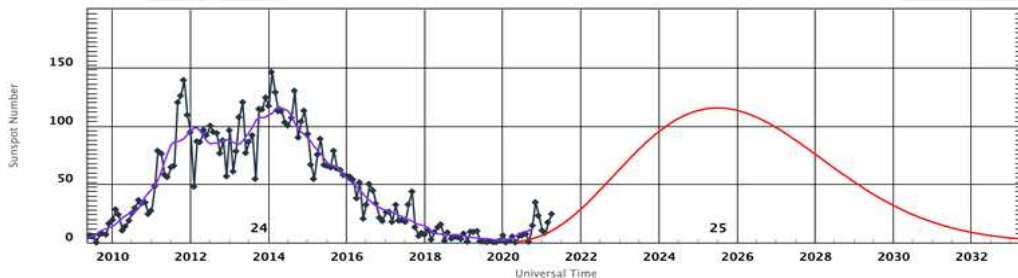


21

KARI 한국천문연구원

## 결론

- 항공기 승무원 방사선 피폭에 영향을 미치는 중요 인자는 중성자
- 우주 방사선은 은하 우주선과 태양 우주선에 의해 생성
- 태양 활동 극대기 25주기에 진입, 2025년경 태양 흑점 최대치 예상



- 국내 항공기 탑재 우주 방사선 상시 모니터링 필요
  - 우주 방사선 단기 변화 연구
  - 태양 우주선에 의한 항공기 승무원 피폭 대응 필요

22

KARI 한국천문연구원

# KASI

감사합니다





# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 발표자료집

한국원자력학회 2021 춘계학술발표회 방사선방호 연구부회 워크숍 발표자료집

## < Session I >

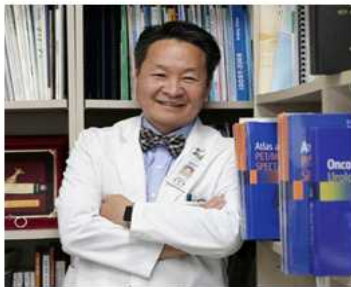
### ③ 삼중수소 피폭의 이해

발표자 : 강건욱 교수 (소속 : 서울대학교 의과대학 핵의학교실)

연락처 : kangkw@snu.ac.kr

(공백)

# 삼중수소 피폭의 이해



내과, 핵의학과 전문의  
서울의대 핵의학교실 교수  
대한방사선방어학회 부회장  
ICRP 의료분과 위원  
**강건욱**

중일일보

국제지각

한국일보

## 日, 끝내 바다에 오염수 방류키로...방사능 공포 커지는 韓

[중앙일보] 입력 2021.04.09 18:25 수정 2021.04.09 18:41



일본 정부가 후쿠시마 오염수 방류키로 결정한 후쿠시마 제1원전. 일본 정부는 후쿠시마 제1원전 오염수 방류키로 결정한 후쿠시마 제1원전. 일본 정부는 후쿠시마 제1원전 오염수 방류키로 결정한 후쿠시마 제1원전. 일본 정부는 후쿠시마 제1원전 오염수 방류키로 결정한 후쿠시마 제1원전.

일본 정부가 방사능 물질이 포함된 후쿠시마 제1원전 오염수를 해양 방류하겠다는 방침을 굳혔다고 13일 NHK 방송 등 일본 언론이 일제히 보도했다. 일본 정부는 13일 관계자회의를 열고 후쿠시마 원전 오염수의 해양 방류를 공식 결정할 전망이다.

“日 후쿠시마 오염수 해양 방류 방침”  
13일 관계자회의에서 최종 결정  
“기준치 이하 정화” 가능할까  
“삼중수소 해양 확산 우려”

후쿠시마 제1원전에선 2011년 동일본대지진 때부터 원자로 시설에 빗물·지하수 등이 유입돼 하루 평균 140t의 오염수가 발생하고 있다. 매일 발생하는 오염수는 원전 내 저장 탱크에 보관 중인데, 지난달 중순 기준 오염수의 총량은 125만t에 달한다. 이미 저장 공간의 90% 이상이 오염수로 가득 찼고, 내년 가을쯤이면 탱크의 저장 용량이 포화 상태에 이를 것으로 예상된다.

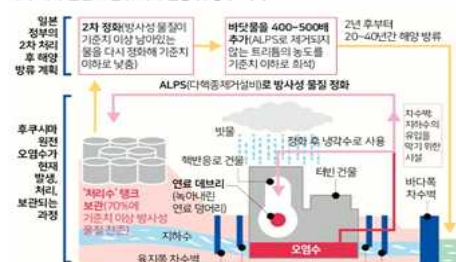
‘삼중수소’ ALPS로 정화 안 되는데...

日, 후쿠시마 오염수 방류

## 미국도 일본편, 우군없는 한국... 4년 뒤 한반도에 닥치는 후쿠시마 오염수

입력 2021.04.13 19:30 수정 2021.04.13 21:34

### 후쿠시마 원전 오염수 처리 현황 및 향후 계획



일본 정부는 13일 관계자회의를 열고 후쿠시마 제1원전에 보관된 오염수를 2년 후부터 바다에 방류하기로 결정했다. 그림은 오염수 처리 현황 및 향후 계획 개요도.

일본 정부가 후쿠시마 제1원전 부지 탱크에 보관 중인 오염수(일본 정부 명칭 ‘처리수’)를 바다에 방류하기로 결정했다. 한국과 중국 정부는 물론 일본 내 어민과 환경단체의 반발을 감수하고 방사능 오염수를 바다에 쏟아내기 시작한 것이다. 일본 정부는 오염수를 희석해 자국 기준치 이하로 만든 뒤 방출한다는 계획이지만 물리적으로 가장 가까운 한국으로선 국민 불안이 심각해질 전망이다. 중국이나 국제 환경단체 외에는 반발하는 나라가 없다는데 미국 정부가 일본을 지지하고 있어 한국에 우군이 없는 상황이다. 주변국을 개입하지 않는 일본의 일방적 행동에 한반도가 방사능 위험에 노출됐다.

일본 정부는 13일 관계 각료(장관) 회의를 열고 이 같은 계획을 담은 후쿠시마 제1원전 ‘처리수 처분에 관한 기본 방침’을 결정했다. 시점은 2년 후부터, 30~40년 동안 나눠 방류

## 민주당 "월성원전 삼중수소 자연에 없어" 학계 "의도적 왜곡...빛물에도 있어"

매일신문 | 2021-01-13 17:31:57 | 수정 2021-01-13 17:31:48



### 월성원전 삼중수소 민간조사단현안소통협의회 출범

민주당이 월성원전 삼중수소 문제를 둘러싸고 '의도적 왜곡'을 지적하며, '빛물에도 있어'는 삼중수소를 언급했다. 민주당은 월성원전 삼중수소 문제를 둘러싸고 '의도적 왜곡'을 지적하며, '빛물에도 있어'는 삼중수소를 언급했다.

### 민주당에 항의하는 경주 양남면 주민들

2021-01-13 18:20:54



18일 경주 월성원전 삼중수소 문제 관련 기자회견에서 더불어민주당 의원단 삼중수소 질을 건물 발문에 맞춰 일부 경주 양남면 주민이 방문에 항의하는 모습을 촬영했다. / 연합뉴스

## 투데이에너지

에너지 > 뉴스 > 정책/연구

### 월성원전 삼중수소 민간조사단현안소통협의회 출범

2021-01-13 18:30

김종민 기자 | 2021-01-13 18:30



월성원전 삼중수소 민간조사단현안소통협의회 출범식 모습

## 아시아경제

### '월성원전 삼중수소' 민간합동조사단 출범 한달만에 좌초 위기

2021-01-13 12:08 | 2021-01-13 12:08

사민대표 정찬열 경주환경운동연합 상임의장 "공식 사파" "피복상 열지 1g" 정황은 교수 참여가 긍정적 논란 키워

## 2020년, 오염수 해양 방류를 차단하라 후쿠시마 방사성 오염수 위기의 현실

2020.10.

GREENPEACE

### 보고서 주요 내용

#### 오염수의 지속적인 증가 상황

- 지하수 오염 문제가 미해결 상태로 계속 진행됨에 따라, 오염 문제의 골이 보이지 않고 있다. 후쿠시마의 산업지대 및 방광원에서 원전 부지로 유입되는 지하수의 양은 다소 감소했으나, 2018년 일평균 유입량 140톤 이상을 유지하고 있다. 특히 태풍 이후에는 급격하게 증가했다. 예를 들어, 2019년 10월 태풍 하기비스 발생 당시에는 일 650m³ 이상으로 늘어났다. 총 오염수 양은 2020년 말까지 137만 m³으로 늘어날 것으로 보인다.
- 방출된 연료 지하수와 냉각수에 노출되어 있는 한, 오염수 문제는 계속될 것이다. 추가적인 지하수 오염을 막지 못한다면, 2030년까지 추가적으로 축적되는 오염수 양이 50만~100만 톤에 달할 것으로 보인다.

#### 다핵종저감설비(ALPS)의 결함

- 도쿄전력은 이미 2011년에 스트론튬-90과 같은 가장 유해한 방사성 핵종 농도를 불검출 수준으로 낮추는데 성공한 미국 기업 유로라이트를 거부했던 사실이 있다. 유로라이트는 방사성 물질을 제거하는 수처리 분야에서 수십년의 경험을 보유하고 있으나, 도쿄전력은 도시바와 히타치(GE) 원자력에너지(히타치GE/이하 히타치GE)처럼 경험이 전무한 기업과 계약을 했다.
- 결함이 있는 ALPS 기술을 도입함에 따라, 도쿄전력과 일본정부는 방사성 농도를 불검출 수준으로 낮추길 포기하고 배출허용기준을 상향했다.
- ALPS의 효과에 대해서는 여전히 의문점이 존재하는 상황에서 오염수 72%에 해당하는 수십만 톤의 오염수 2차 처리를 위한 테스트가 2020년 10월 예정되어 있다.
- 일본 외무성(MOFA)은 후쿠시마 제1원전 오염수 문제를 제기한 UN인권특별보고관들에게 계속해서 해명한 정보로 소동했다. 예를 들어, 그들은 2020년 6월에 "삼중수소를 제외한 대부분의 방사성 핵종을 알프스에서 제거한 후, 탱크 내에 처리수를 안전하게 저장한다. 따라서 탱크에 저장된 처리수는 오염수에 해당하지 않는다"며 사실과 다른 정보를 전달했다.

#### 왜곡되는 탄소-14와 스트론튬-90의 유해성

- 2020년 8월, 도쿄전력은 스트론튬-90 등 유해한 고준위 방사성 핵종 외에도 1차 정화 처리를 마친 오염수에 고농도의 탄소-14가 존재한다는 사실을 처음으로 인정했다.

- 탄소-14는 장기적인 방사성 오염의 주요 원인이 될 물질이지만 알프스는 이를 제거하도록 설계되지 않았다. 오염수를 대량 방류하는 경우, 오염수 내 탄소-14 전량이 환경에 유입된다. 탄소-14의 반감기는 5,730년이며, 세계 전체 집단산량의 주요 원인이기도 하다. 환경에 유입된 탄소-14는 수 세대에 걸쳐 지방, 지방 및 세계 인구에게 전달될 것이다.

- 도쿄전력은 방사성 삼중수소에 대한 기본적인 과학적 사실을 계속해서 왜곡하고 무시하고 있다. 특히, 유전자 변이를 일으키는 유기결합삼중수소(OBT)의 생태계 악영향을 의도적으로 무시하고 있기 때문에 오염수 방류 시의 방사성 오염에 대한 정확한 분석 결과를 제시하지 않을 것이다.

#### 평가 절하된 오염수 처분의 유일한 대안, 장기 저장

- 그린피스가 경제산업성 소위원회에 오염수 보고서를 분석한 결과, 소위원회는 2022년 이후에도 오염수를 발전소 내/외에 모두 추가 저장하는 것이 가능하다는 점을 확인했으나 "상당한 조율과 시간"이 소요된다는 이유로 이를 배제했다.
- 또한, 소위원회는 오염수를 장기 보관하면 적어도 삼중수소가 야기할 방사성 오염 피해는 줄일 수 있음을 확인했다. 삼중수소의 반감기(12.5년)가 상대적으로 짧은 점과 일본 정부가 보고서를 통해 대략 제시한 삼중수소의 연간 방출량 22TBq를 기준으로 할 때, 2035년까지 방류 개시 결정을 보류하면 2020년에 방류 개시하는 것에 비해 한해 시점의 자연은 3년 정도다.

#### 일본 내부의 반대 여론과 UN 인권이사회에 문제 제기

- 위 두 가지만 보더라도, 오염수를 대량 방류하는 것은 경제산업성 소위원회의 권고에 반하는 방사성 위험에 대한 올바른 과학적 분석에 기반한 것이 아니라 일본 정부의 정치적 이해관계만 고려한 것임이 분명하다.
- 후쿠시마의 40여 개 지자체와 어린 협회, 일본 국민 중 다수가 일체의 환경 방류에 대해 강하게 반대하고 있다. 바스쿠트 툴카(Baskut Tuncak) UN 인권특별보고관은 "인간 존엄성이 확보되는 삶을 영위하고, 문화를 향유하며, 추가적인 방사성 오염으로부터 스스로 보호하는 것은 환경에 대한 그들의 권리에 해당한다. 이러한 권리는 일본 정부가 무시해서는 안 되는 것이며 적극적으로 존중받아야 한다."고 언급했다.

## 후쿠시마 오염수

구분	Cs-137(세슘)	H-3(삼중수소)	C-14(탄소)
최대값	829	2,500,000	215
최소값	0.0585	131,000	2.53
평균값	5.114	579,371	42.815
배출기준(일)	90	60,000	2,000
배출기준(한)	50	40,000	1,000

국가	식수의 삼중수소 농도 한도 (Bq / L)
EU	100
미국	740
캐나다	7,000
러시아	7,700
스위스	10,000
WHO	10,000
핀란드	30,000
호주	76,103



## “도쿄전력, 방사능 하루 600억 Bq 해양 방출”

13/09/19 10:03

【빈 교도】일본 기상청 기상연구소 아오야마 미치오(青山道夫) 주임연구원은 18일 국제원자력기구(IAEA) 과학 포럼에서 도쿄전력 후쿠시마(福島) 제1원전 오염수 문제와 관련해 원전 북쪽 배수구로 방사성 세슘 137과 스트론튬 90을 원전 항만 바깥쪽으로 하루 총 600억 베크렐(Bq) 배출하고 있다고 보고했다.

도쿄전력은 “법정 기준 이하 농도임을 확인하고 방출해 문제 없다”고 밝히고 있으며 원전 사고 이후 해양 모니터링 조사를 계속해 온 아오야마 주임도 방사능 농도가 리터당 1베크렐이어서 기준치 이하라는 견해였다. 하지만 총 방사능 배출량에 대한 법적 규제는 없다. 배수구에서 배출된 방사성 총량에 대한 도쿄전력의 자세한 설명이 요구된다.



후쿠시마(福島) 제1원전 5, 6호기 모습. 작은 화살표 2개가 5, 6호기 취수구이며 큰 화살표가 배수구 =18일 오후, 교도통신 헬기 촬영 【교도통신】  
2013/09/18

아오야마 주임의 조사에 따르면 원전 배수구로 나온 세슘 137은 원전 사고 이후 2011년 3월 26일~4월 7일에는 하루 약 100조 베크렐이었다. 이후 점차 줄어들어 2012년 초쯤부터 현재까지 약 300억 베크렐로 추산된다. 스트론튬 90도 현재 약 300억 베크렐 방출되고 있는 것으로 보고 있다.

표 3.2 2004년도 표층해수의  $^{137}\text{Cs}$  방사능농도

(단위 : mBq/kg)

구분	시료 채취 정점	$^{137}\text{Cs}$ 방사능농도 $\pm \sigma$		
		2004년도 분석결과		과거농도범위 (1994 ~ 2003)
		1차조사(2월)	2차조사(8월)	
동해	107 - 07	1.76 $\pm$ 0.15	2.10 $\pm$ 0.34	1.77 ~ 6.27
	106 - 02	2.21 $\pm$ 0.21	1.74 $\pm$ 0.31	1.67 ~ 4.68
	105 - 11	1.95 $\pm$ 0.35	2.48 $\pm$ 0.38	2.04 ~ 4.85
	104 - 04	1.71 $\pm$ 0.14	2.47 $\pm$ 0.43	2.01 ~ 5.25
	103 - 11	3.00 $\pm$ 0.26	3.07 $\pm$ 0.52	1.71 ~ 5.29
	102 - 04	2.65 $\pm$ 0.18	2.21 $\pm$ 0.32	1.82 ~ 5.38
	209 - 11	2.09 $\pm$ 0.18	2.31 $\pm$ 0.40	1.87 ~ 4.60
	208 - 01	1.94 $\pm$ 0.20	1.99 $\pm$ 0.43	1.60 ~ 5.23
남해	207 - 05	3.19 $\pm$ 0.21	1.96 $\pm$ 0.33	1.93 ~ 3.86
	206 - 01	2.08 $\pm$ 0.27	2.54 $\pm$ 0.26	1.48 ~ 7.00
	205 - 05	2.42 $\pm$ 0.16	2.48 $\pm$ 0.37	1.68 ~ 3.72
	204 - 01	2.04 $\pm$ 0.21	2.00 $\pm$ 0.35	1.71 ~ 3.93
	203 - 03	1.69 $\pm$ 0.20	2.53 $\pm$ 0.32	1.84 ~ 4.06
	314 - 00	1.99 $\pm$ 0.21	2.13 $\pm$ 0.41	1.70 ~ 5.81
	313 - 10	1.80 $\pm$ 0.21	2.07 $\pm$ 0.35	1.76 ~ 6.61
서해	312 - 02	1.60 $\pm$ 0.18	1.82 $\pm$ 0.40	1.30 ~ 4.85
	311 - 14	-	-	2.53 ~ 2.72*
	311 - 12	-	-	2.65 ~ 2.91*
	311 - 10	2.88 $\pm$ 0.18	2.07 $\pm$ 0.35	1.73 ~ 4.62
	310 - 03	1.93 $\pm$ 0.15	2.48 $\pm$ 0.32	1.63 ~ 3.71
	310 - 14	-	-	3.02 ~ 4.72*
	309 - 14	-	-	2.70 ~ 2.89*
	309 - 12	-	-	2.53 ~ 3.49*
	309 - 10	1.35 $\pm$ 0.19	2.02 $\pm$ 0.45	1.68 ~ 4.48
	308 - 01	2.63 $\pm$ 0.31	2.55 $\pm$ 0.32	1.73 ~ 4.62
	307 - 10	2.01 $\pm$ 0.14	2.38 $\pm$ 0.36	2.12 ~ 5.92

o) 계속오차

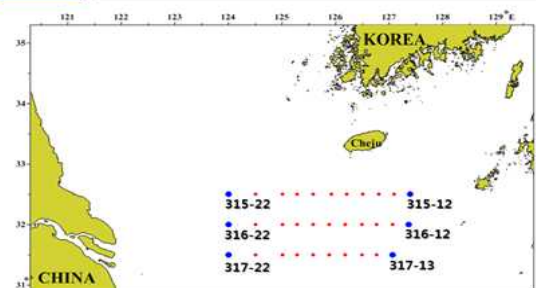
\* ) 과거 3년간의 농도범위 (1996 ~ 1998)

- ) 수산연구소의 계획변경으로 1999년부터 시료 채취 불가

## 2013.8

정점	$^{137}\text{Cs}$ (mBq/kg)	정점	$^{137}\text{Cs}$ (mBq/kg)
315-22	불검출	315-12	불검출
316-22	1.72	316-12	1.90
317-22	1.69	317-13	불검출

참고 1 2013년 8월 방사능 해수분석 해역





210 days after release

후쿠시마 오염수 바다 방류 시 확산 예상도

$10^{-2}$   $10^{-4}$   $10^{-6}$   $10^{-8}$  1  
surface concentration relative to initial values off Japan

7개월 뒤

540 days after release

$10^{-2}$   $10^{-4}$   $10^{-6}$   $10^{-8}$  1  
surface concentration relative to initial values off Japan

18개월 뒤

## 주변의 삼중수소

• 비상구 야광표시등: ~1조 베크렐



• 우주방사선 발생: 2경 베크렐/년

• 과거 핵실험 영향 합하면 현재 620경 베크렐 잔류

• 자연계 물 삼중수소 농도

- 빗물: 1~2 베크렐/L
- 강물: ~1 베크렐/L
- 대양해수: ~0.2 베크렐/L



Courtesy of Prof. Jai-Ki Lee

# 바다속의 인공방사능과 자연방사능

핵실험(미소영프)  
testing, 1950s-'60s

체르노빌

Three Mile Island  
0.00004 PBq

후쿠시마

400 peta-Bequerels  
(PBq)

85 PBq

10-30  
PBq

Atmospheric

3-30  
PBq

Direct

Fukushima released 3 to 30 petaBecquerels of radioactive cesium-137 directly into the sea and 10 to 30 PBq into the atmosphere, of which about 50% eventually ended up in the ocean.

Three Mile Island released 0.00004 PBq entirely into the air.

Chernobyl released 85PBq, mostly into the air.

Nuclear weapons tests released 400PBq over several years. The majority has eventually landed in the sea.

Though serious, these totals pale compared to the abundance of radioactive substances naturally present in seawater such as uranium-238 and potassium-40.

자연방사능  
우라늄-238  
37,000 PBq

자연방사능  
칼륨-40  
15,000,000 PBq

## 삼중수소의 인체영향에 관한 과학적 분석

2016. 07.



3장 국내·외 원자력시설 삼중수소 방사선 관리	61
3.1 절 국내 원자력발전소의 삼중수소 관리	61
1. 원전 삼중수소 배출 관리 및 현황	61
2. 삼중수소 제거설비 (TRF)	62
3. 원전 삼중수소 환경 관리	64
3.2 절 국내 연구용 원자로의 삼중수소 관리	74
1. 연구로의 삼중수소 배출관리 및 현황	74
2. 연구로의 삼중수소 환경관리	75
3.3 절 캐나다 삼중수소 방사선 관리	79
1. 삼중수소의 생산 및 배출 현황	79
2. 원자력발전소 주변 환경에서의 삼중수소 농도	83
3. 삼중수소 배출에 의한 주민선량	90
3.4 절 삼중수소관리 결과	94
3.5 절 참고문헌	95
4장 삼중수소의 인체영향	97
4.1 절 삼중수소의 위험도 평가	97
1. 생물학적효과비(RBE)	97
2. 삼중수소로 인한 건강상의 영향	108
4.2 절 국외 삼중수소 의학연구 사례	115
1. 지진량방사선에 대한 의학연구	115
2. 삼중수소의 인체영향에 대한 의학연구	116
3. 의학 연구 사례 결과	126
4.3 절 참고문헌	127
III. 결론	135
부록: 전문용어	138

## 삼중수소의 특성

### □ 삼중수소의 방사선적 독성은 다른 인공/자연 방사성 핵종에 비해 매우 약함

핵종	선량환산계수* (mSv/Bq)	H-3 대비 상대 가중치	에너지 (keV)	방사선 종류	생성기원
H-3	1.8E-08	-	18.6	베타선	인공/자연
K-40	6.2E-06	340배	1,461	감마선	자연
Cs-137	1.3E-05	720배	662	감마선	인공
Ra-226	2.8E-04	15,000배	4,784	알파선	자연

☆ 선량환산계수 : ICRP 72

### □ 인체 유입시 물과 같이 자유롭게 이동하며 짧은 시간에 전신에 분포되고, 특정장기에 축적되지 않음

### □ 땀, 소변 등으로 배출되어 약 10일이 지나면 인체 내 삼중수소가 반으로 줄어듦

#### 다. 확률적 영향

##### (1) 암 발생

현재까지 삼중수소 유도 암을 입증하는 인간 연구는 전혀 없었고, 동물에 대한 연구 또한 삼중수소 연구는 감마선과 X선 연구보다 사례가 매우 적다. Yamamoto의 연구진은 1968년 HTO에 의한 종양 유도에 대한 문헌 선량률이 약 12 mSv/d이고, <sup>60</sup>Co 감마선에 대한 문헌 선량률이 삼중수소 베타선보다 더 높다고 결론 내렸다[4.19]. 존슨 외 연구진(1965)은 각각 0.85, 1.86, 3.04 Sv의 선량에 해당하는 HTO를 단일 주입한 750마리 생쥐를 이용하여 골수성 백혈병의 발생률을 추정하였는데, 골수성 백혈병의 발생률은 0.13% (대조군)에서 6~8%(노출군)로 증가하는 것을 확인하였다[4.20].

삼중수소의 베타 방사선이 암을 발생시킬 것이라는 것은 여러 연구에서 밝혀졌지만, 어떤 수준의 선량이 암을 유발하는지는 여전히 불확실하다. 생쥐에서 암을 유발한다고 관찰된 최저 선량은 약 1 mSv/d의 범위에 있다. Straume에 의한 1993년 연구는 아마도 삼중수소 유도 발암에 대해 가장 큰 통찰력을 제공하고 ICRP(1991), BEIR(1990), UNSCEAR(1988)가 제시한 위험 인자를 입증한 것으로 판단된다[4.21]. Straume는 몬테카를로 코드를 이용하여 HTO에 대한 만성, 저준위 피폭에 따른 초과 암 사망률의 발생빈도 분포를 분석하였는데, 그 결과 90% 신뢰구간에서 mSv 당  $38 \sim 185 \times 10^{-6}$ 인 것으로 확인되었다. 이 값은 각각 mSv 당  $50 \times 10^{-6}$ ,  $79 \times 10^{-6}$ ,  $70 \sim 110 \times 10^{-6}$ 인 ICRP(1991), BEIR(1990), UNSCEAR(1988)의 방사선 위험 추정치에 맞먹는 값이다.

##### (2) 유전적 영향

난모세포 또는 정소세포의 염색체 손상이 돌연변이 발생률을 높일 수 있기 때문에 다음 세대에 전달될 수 있다는 것은 이론적으로 가능하다. 그러나 최근 ICRP 권고(ICRP 103, 2007)는 "부모의 방사선 피폭이 자손에서 초과 유전성 질병으로 이어진다는 어떠한 직접적 증거가 없다"고 주장한다. 그린 애드 불구하고, 동물 실험 결과를 바탕으로, ICRP는 최대 2세대(손자) 동안 약 1 Sv 당 0.2%의 유전적 위험을 추정한다. 저LET 방사선의 경우, 심각한 유전적 영향의 가능성에 대한 ICRP 값은 수컷 생리 데이터의 외삽법에 기초

하여 1 Sv 당 0.5%이다.

##### (3) OBT의 건강상 영향

환경으로 배출된 일부 삼중수소는 수소원자가 삼중수소 원자로 대체되는 효소 촉매반응이나 자연 치환반응을 통해 자연적으로 유기분자와 결합한다. 삼중수소 원자가 효소 촉매반응으로 탄소원자에 붙어있는 경우, 삼중수소 원자는 기본적으로 해당 분자에서 떨어져지 않는다. 일반적으로 산소, 황, 질소 또는 염 원자에 결합된 삼중수소 원자는 주변 세포질 수분의 수소 원자와 쉽게 치환되므로 치환성 삼중수소 화합물로 간주된다. Diabate와 Strack의 1993년 연구에서 미지환성 및 지환성 화합물 모두를 유기결합삼중수소(OBT: Organically Bound Tritium)라고 하였다[4.22]. OBT는 삼중수소가 다당류, 지질(지방), 단백질, DNA 전구체 등 유기 분자와 결합하는 큰 화합물 그룹에 적용하는 일반 용어이다. OBT 분자에 의한 세포 손상 정도는 세포에 결합되는 경우와 삼중수소가 분해하기에 충분히 오래 머물러 있는지 여부에 달려 있다. 3HTdR과 같은 삼중수소 DNA 전구체는 이론적으로 세포 손상을 유발하는데 더욱 효율적이다. 왜냐하면 DNA 가닥의 기본 구성요소의 일부를 형성하기 때문이다. 반면에, 구조 단백질에서 삼중수소 지방 분자나 삼중수소 아미노산 등 세포에서 DNA와 더 멀리 떨어져 있는 삼중수소 분자는 더 적은 위험을 제기할 것이다.

Lambert는 1969년 쥐의 정소세포에 대한 HTO 및 3HTdR의 영향을 연구했고 3HTdR의 RBE를 1.3, HTO의 RBE를 2.3으로 결정했다[4.23]. Straume와 Carsten은 1993년 OBT에 대한 이용 가능한 연구의 종합분석에서 아미노산과 결합할 때 삼중수소의 RBE가 HTO보다 약간 크고, 티미딘과 같은 핵기저에 결합할 때 HTO보다 약 2배 이상 높다고 결론 내렸다[4.21].

OBT로 인한 건강 영향을 살펴본 연구는 제한적이다. 이용 가능한 연구에서 대부분의 유기 화합물이 HTO와 거의 같은 RBE를 갖는다고 보여준다. 그러나 3HTdR의 결합은 핵에서 삼중수소의 농축으로 이어질 수 있고, 그 결과 평균 세포/조직 선량을 기초로 계산한 HTO의 RBE보다 RBE 값이 약 두 배가 된다. DNA 전도체를 제외하고, HTO에 비해 OBT의 영향이 큰 것은 RBE 차이가 아닌 긴 체류 시간과 생리학적 담 미배적으로 커지는 선량 때

문이라고 결론지을 수 있다.

#### 라. 핵변환에 의한 삼중수소의 영향

DNA 손상이 삼중수소의 핵변환으로 발생했다고 하더라도, 삼중수소의 베타 방사선 유도에 의한 손상평가에 이미 포함되어 있으므로 별도로 핵변환에 의한 건강영향을 논할 필요는 없다.

핵변환은 방사성붕괴를 통해 한 원소에서 다른 원소로 변환하는 것을 말한다. 삼중수소가 붕괴되면, 안정적인 불활성 기체인 헬륨-3( $^3\text{He}$ )가 된다. 삼중수소 원자가 붕괴할 때 DNA 분자에 결합되는 경우, 대부분의 운동 에너지는 핵에서 방출되면서 베타 방사선을 동반하지만 일부 에너지는 반도 에너지(recoil energy) 방출하는데, Kacena는 1967년 반도 에너지가 너무 작아서(약 3 eV) 스스로 DNA 분자의 이온화를 유발할 수 없다고 판단했다[424]. 그러나 그에 따른  $^3\text{He}$  원자는 매우 약한 결합을 가진 탄소 원자에 부착될 것이다. 이 결합은 자유 라디칼과 이온화된 DNA 분자를 만들게 된다. 이온화된 DNA 분자는 회복될 수 있거나 만약 회복할 수 없는 경우, DNA가 손상될 수도 있다.

Myers와 Johnson은 1991년 핵변환 영향을 종합적으로 검토하였는데, 라듐 생물에서 관찰된 돌연변이가 포유류 세포에서 검출될 수 있고, 포유류에서 감지될 수 있는 돌연변이의 수는 50%를 초과하지 않을 것이라고 가정하는 것이 매우 보수적이라고 분석하였다[425]. Carsten은 1979년 HTO나 OBT를 흡수한 후 DNA 수치의 단 2%만이 시토킨 고리의 5'면 자리에 위치해 있기 때문에 유해성을 제기할 만큼 위험이 크지 않다고 설명하였다[426]. Feinendegen과 Bond는 1971년 종합분석에서 "세포 내 삼중수소의 영향은 압도적으로 핵의 베타 조사에 기인하며," "핵변환 영향은 측정 가능한 영향을 미치지 않는다."고 분석하였다[427].

#### 마. 결론

삼중수소는 베타입자를 방출하는 전리방사선이기 때문에 결정론적 영향 및 확률적 영향을 유발할 수 있다. 삼중수소 베타입자는 인체에 영향을 유발하려면 0.5 Sv의 방사선량이 필요한데, 이는 감마선과 X선이 인체영향 유발

에 필요한 선량과 동일하다.

일반적으로, HTO에 비해 OBT가 더 큰 생물학적 효과를 갖는 것은 RBE의 차이보다는 더 긴 체류 시간과 관련이 있다. 또한 핵변환 등 삼중수소의 비방사성 영향이 발생할 것으로 판단되지만, 비방사성 영향과 방사선의 영향을 구별하는 것이 불가능하므로 방사선의 인체영향에 포함되어 분석되기 때문에 삼중수소의 비방사성 영향만을 특별히 고려할 필요는 없다.

지금까지 검토된 삼중수소의 인체영향은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 현재까지 인체에서 삼중수소에 의한 암의 유발을 입증하는 연구는 없었다.
- ② 동물을 이용한 실험적 연구는 삼중수소가 배아나 태아의 발달을 저해할 수 있고, 일반인 피폭수준보다 수백만 배 이상의 선량으로 판단될 경우 유전학적 영향, 생식 영향, 세포사를 유발할 수 있음을 입증했다.
- ③ 원전에서 배출되는 삼중수소에 의한 일반인 선량은 일반인 선량한도인 연간 1 mSv보다 극히 낮다. 따라서 삼중수소가 인체에 미치는 영향은 없을 것으로 판단된다.

## 삼중수소 선량계수

Radiation Protection Dosimetry Vol. 105, Nos 1-4, pp. 225-228 (2003)  
Published by Nuclear Technology Publishing  
© 2003 Nuclear Technology Publishing

### A BIKINETIC MODEL FOR PREDICTING THE RETENTION OF $^3\text{H}$ IN THE HUMAN BODY AFTER INTAKES OF TRITIATED WATER

D. M. Taylor\*  
Department of Chemistry, Cardiff University  
P.O. Box 912, Cardiff CF10 3TB, UK

Table 6.10: Parameters for the HTO Model Recommended by Taylor (2003)

Model Component	Distribution (%)	Biological Half-Life (Days)
HTO	99	10
OBT <sub>1</sub>	0.98	40
OBT <sub>2</sub>	0.02	350

<sup>1</sup> Short-term OBT compartement

<sup>2</sup> Long-term OBT compartement

**OBT포함 선량계수  $1.7 \times 10^{-8}$  mSv/Bq**  
**ICRP 선량계수  $1.8 \times 10^{-8}$  mSv/Bq**

**월성원전 주변 주민에서 가장 많이 나온 삼중수소 양 28.8Bq/L 환산  
연간 0.0006 mSv(밀리시버트)**



월성원자력본부 주변주민

## 삼중수소 영향평가 용역 최종보고서

A study for the effect of tritium among residents  
nearby wolseong nuclear power plants

동국대학교 경주캠퍼스 산학협력단  
조선대학교 산학협력단  
한국원자력의학원

2015. 9.

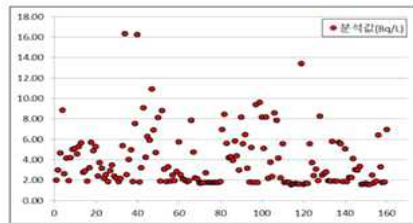
 한국수력원자력주  
월성원자력본부

## 월성원전 주변 및 대조지역 주민 삼중수소 농도 측정 용역 최종보고서

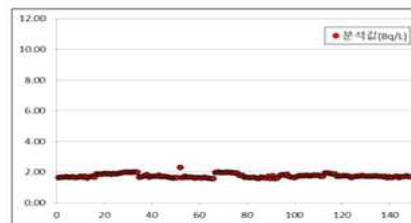
주오르비텍  
한국방사선진흥협회  
주라드솔  
(의)삼성의료재단 강북삼성병원  
경희대학교 국제캠퍼스 산학협력단

2020. 07

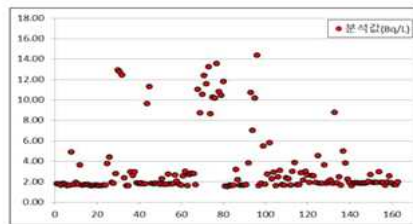
 한국수력원자력주  
KHNPP 방사선보건원



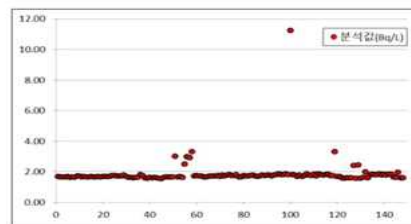
<그림 3.10> 요시료 중 삼중수소 농도 분포 (경주시 양남면)



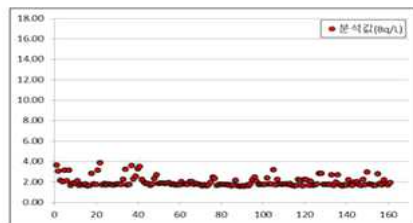
<그림 3.13> 요시료 중 삼중수소 농도 분포 (경주시내)



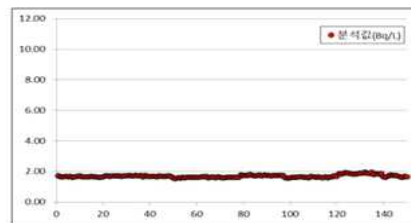
<그림 3.11> 요시료 중 삼중수소 농도 분포 (경주시 양북면)



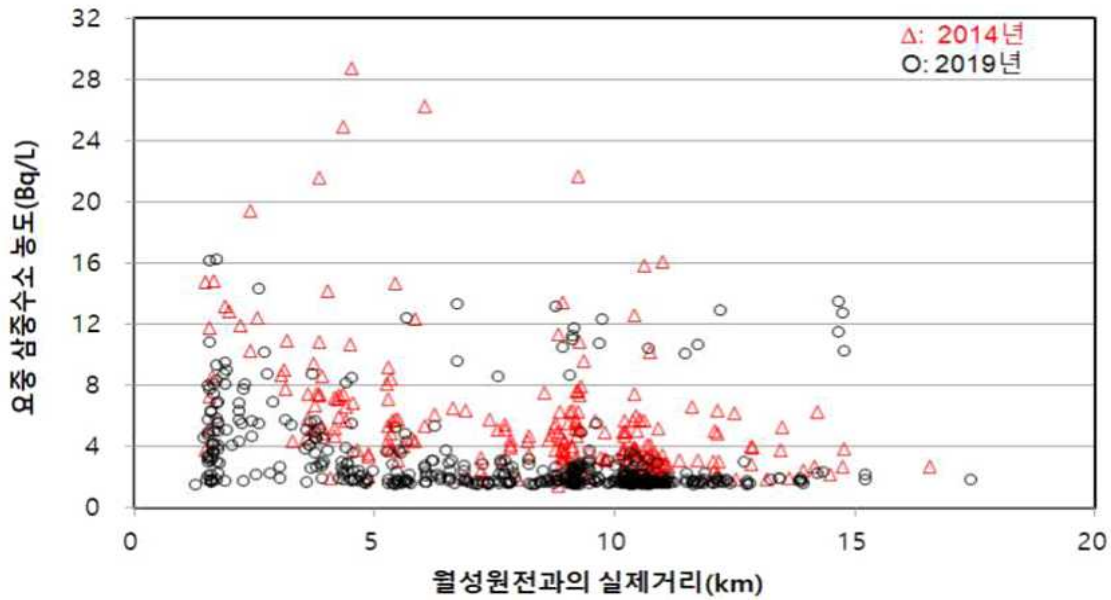
<그림 3.14> 요시료 중 삼중수소 농도 분포 (울산시 북구)



<그림 3.12> 요시료 중 삼중수소 농도 분포 (경주시 감포읍)



<그림 3.15> 요시료 중 삼중수소 농도 분포 (서울특별시)

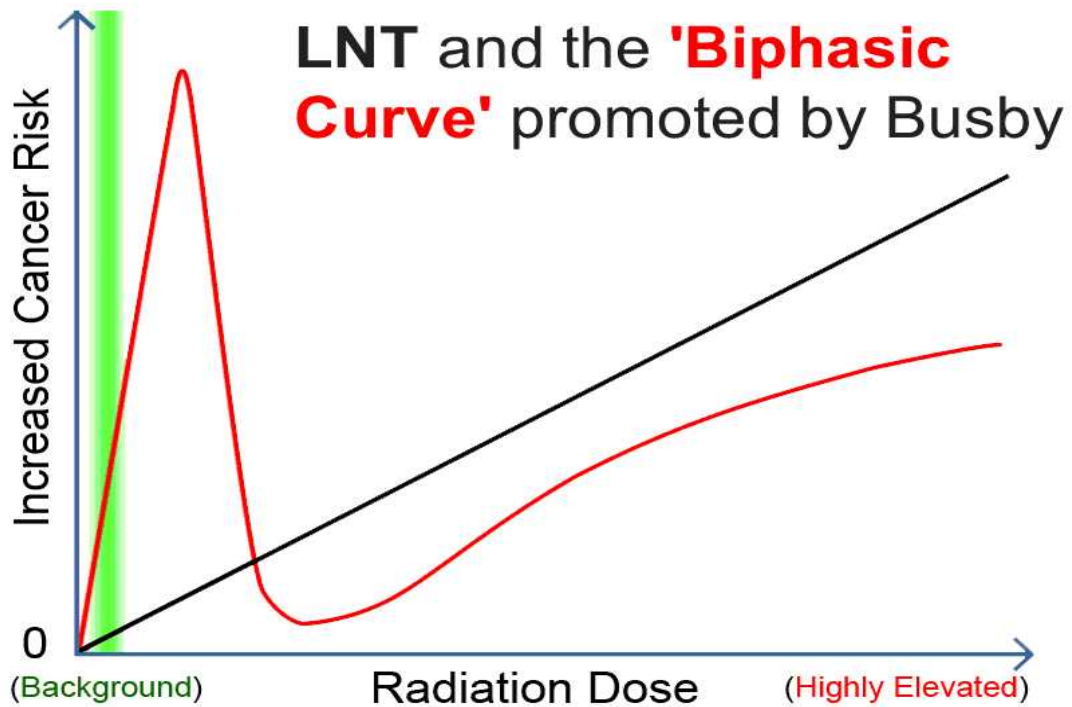


<그림 3.16> 월성원전으로부터의 거리와 요시료 중 삼중수소 농도 분포

## 5. 삼중수소에 의한 인체 영향

- 월성원전 주변주민에게서 검출된 소변 중 최대 삼중수소 농도 16.3 Bq/L를 1년간 체내 기관이나 조직에서 받게 되는 피폭선량으로 평가하면 0.00034 mSv/y로 연간 일반인의 선량한도 제한치 1 mSv/y에 크게 못 미치는 미미한 수준으로 건강 영향을 염려할 수준은 아니다 (참고문헌 7. 참조).
- 우리나라에 거주하는 사람은 연간 평균적으로 3.08 mSv의 자연방사선에 노출되고 있으며 (참고문헌 8. 참조) 최대 농도 16.3 Bq/L는 140년 넘게 노출된다 하더라도 진단목적의 흉부 X선 1회 촬영시 받게 되는 방사선량 0.05 mSv 수준이다.





**Table 1:** DNA Impairment/Damage.

Rate of DNA Damage Per Human Cell Per Day	
Single strand break	50,000
Depurination	10,000
Deamination	600
Oxidative base damage	2000
Alkylated bases	5000
Intra-strand crosslinks	10
DNA double strand break	10
Total DNA damaging events per cell per day	50,000
Total DNA damaging events per cell per hour	2500
Estimation $10^{13}$ - $10^{14}$ cells in human body~ $3 \times 10^{17}$ DNA damaging event per hour	

Ambekar et al. *Glob J Pharmaceu Sci* 2017

## Group 1 carcinogen by IARC

Asbestos  
Aflatoxins  
Etoposide  
Benzene  
Cadmium  
Helicobacter pylori  
Alcoholic beverages  
Engine exhaust, diesel  
Estrogen therapy, postmenopausal  
Hepatitis B, C virus  
Human papillomavirus  
Ionizing radiation  
Outdoor air pollution  
Processed meat  
Solar radiation  
Tobacco smoking

**121 agents**

IARC가 발표한 고기·담배·술·  
대기오염으로 인한 연간 사망자 수  
단위: 명



조선일보 2015.10.30

## 방사능 피하려다 건강에 되레 해로울 수도

기고



강 전 옥

서울대학교병원  
방사선안전관리실장·  
국제방사선방호위원회  
(ICRP) 의료분과위원

요즘을 수산물이면 무조건 기피하는 분들이 많다. 후쿠시마 원전 오염수 유출이 통제되지 않고 있다는 뉴스를 접하면 태평양이 온통 방사능에 오염된 것 같고, 국내산 수산물을 봐도 암팡이 싹 달아난다. 더군다나 방사성 세슘 기준치를 낮춘다는 것이 kg당 100베크렐이라니 너무 높은 숫자 아닌가? 소량이라도 있으면 위험하지 않을까? 걱정이 꼬리에 꼬리를 문다. 방사능 환경에서 살아남으려면 이 수치가 갖는 의미를 알아야 한다.

방사선이 두려운 이유는 미량이라도 암을 발생시킬 우려가 있기 때문이다. 일본 원폭 피해자를 장기 추적한 결과 100밀리시버트 이상의 방사선량에 노출되면 피폭되지 않은 사람에 비해 암 발생이 증가하고 100밀리시버트에선 그 가능성이 0.5% 정도다. 그러나 100밀리시버트 이하의 방

사선량에서는 암 발생 가능성이 너무 낮아져 그 영향이 얼마나 되는지 알 수가 없다. 이에 암 발생 확률은 그냥 비례해 줄어든다고 가정했다. 예를 들면 1밀리시버트면 0.005%로 계산하여 가정하는 것이다. 이는 만에 하나도 안 일어나는 수치다.

국제기구(식품기준위원회)는 식품을 통해 인공적 방사능에 노출되는 것을 연간 1밀리시버트를 넘지 않도록 정했다. 우리나라도 이에 따라 식품 중 방사능 기준치를 정해 관리하고 있다.

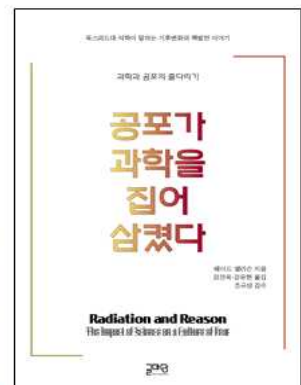
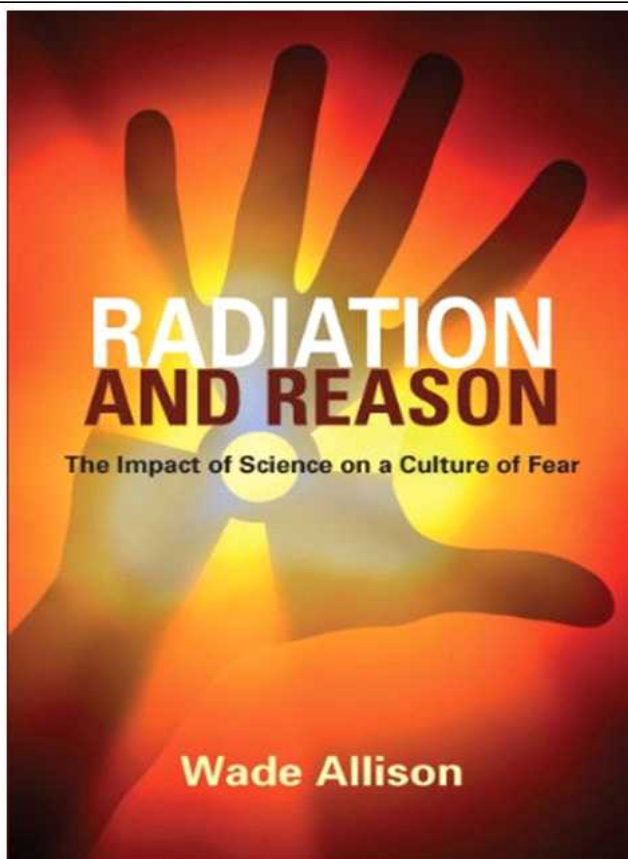
이는 어느 정도 되는 양인가. 매일 기준치 kg당 100베크렐의 수산물을 지속적으로 섭취해도 1밀리시버트를 넘지 않는다. 발암 확률로 보면 0.005% 이하다. 그렇다면 방사성 세슘이 없다고 밝혀진 음식에는 방사능이 없을까? 아니다. 모든 음식에는 방사성 칼륨, 방사성 세슘 등이 미량 들어 있다. 후쿠시마 원전 사고 이전인 2004년 한국원자력안전기술원에서 환경방사능을 보고한 결과에 따르면 쌀·유유·육류·녹차·커피 등 검사한 모든 음식에서 방사성 칼륨이 kg당 50~1000베크렐 수준이었고, 방사성 세슘은 그보다 1000분의 1 수준에서 검출되었다. 후쿠시마 원전 사고 이전에도 이렇게 많은 방사능이 음식에 있었다니 당

황하는 분이 있을지도 모르겠다.

방사성 칼륨은 반감기가 12억년으로 태곳적부터 토양과 동식물, 인체에 존재하는 자연방사성물질이고, 방사성 세슘은 체르노빌 원전사고 이후 전 세계에 미량이 퍼졌다. 우리는 우리도 모르는 사이 kg당 100 베크렐이 넘는 자연방사성물질을 늘 섭취하고 있었고, 다른 자연 방사능을 포함하면 연평균 3밀리시버트를 받고 살고 있다. 북유럽의 경우 자연방사능이 높아 연평균 7밀리시버트를 받는다. 그러나 암 발생률은 우리나라보다 높지 않다. 이 정도 수치에서는 모든 생명이 적응하고 살아왔다.

최근 일본산 수산물뿐만 아니라 국산 수산물도 기피하여 육류 섭취가 늘어났다고 한다. 육류 섭취는 대장암을 비롯해 암 발생 확률을 20% 정도 높인다고 한다. 극미량의 방사능이 무서워 육류 섭취를 늘린다면 0.005%의 위험이 무서워 20%의 위험을 택하는, 하나는 알고 둘은 모르는 셈이다.

건강은 균형이다. 과도한 공포나 몸에 좋다는 음식에 대한 지나친 집착은 건강에 해를 끼친다. 건강 정보를 아는 것은 중요하다. 그러나 휘둘릴 필요는 없다. 제대로 알고 지혜롭게 이 시대를 살아가야 한다.





# ALARA

as low as **reasonably** achievable,  
economic and social factors being  
taken into account.

*ICRP Pub 26, 1977*

# AHARS

as high as relatively safe

*Wade Allison 2009*



비온뒤

의학신간



# 공포가 과학을 집어삼켰다



서울대학교병원 핵의학과 강건욱/강유현  
애니운서 신재연

29



(공백)

# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 발표자료집

한국원자력학회 2021 춘계학술발표회 방사선방호 연구부회 워크숍 발표자료집

## < Session II >

### ④ 국민의 자연방사선 피폭량 조사 최신 현황

발표자 : 김용재 본부장 (소속 : 한국원자력안전기술원)

연락처 : k337kyj@kins.re.kr

(공백)

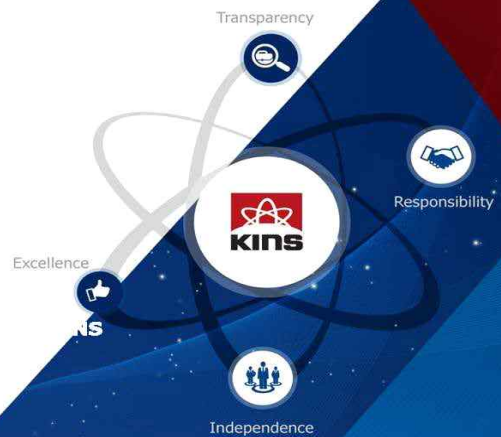
# 자연방사선 피폭량 조사 최신 현황

원자력학회

2021.05.12 (수)

김용재

 한국원자력안전기술원  
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY



## 목 차

- 개요
- 선원별 연구 현황 및 결과
  - 흡입 (라돈, 토론 등)
  - 섭취
  - 지각방사선
  - 우주방사선
- 결론

# 개요

3

## 자연방사선 특징

- Ubiquitous

- 종류

- 우주 방사선

- 1차 우주 방사선 – 은하 우주방사선(GCR), 태양 우주방사선
    - 2차 우주 방사선 – n, p, e, 뮤온, 파이온 등

- 지각(유래) 방사선

- **지각방사선** – 토양, 암석, 건축자재 등의  $\gamma$ -ray → **외부피폭**
    - **라돈 및 그 자핵종 흡입** → **내부피폭**
    - 기타 : NORM, 화석연료 사용에 따른 자연방사선량 증가 등

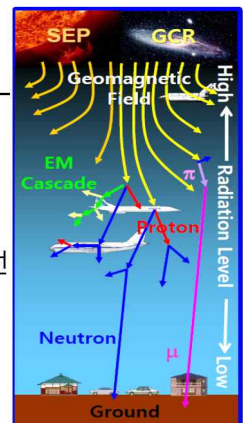
- 체내 방사선

- 인체 내  $^{40}\text{K}$
    - 상호간 피폭

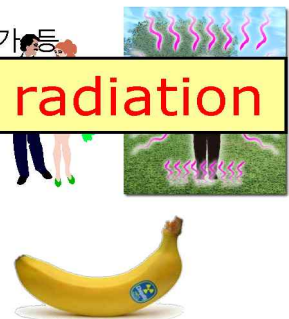
- 식품 방사선

- 식품 섭취 ( $^{40}\text{K}$ , U/Th-series,  $^{87}\text{Rb}$  등)

- 기타 (산업원료(NORM), 생활용품, 건강용품 등)



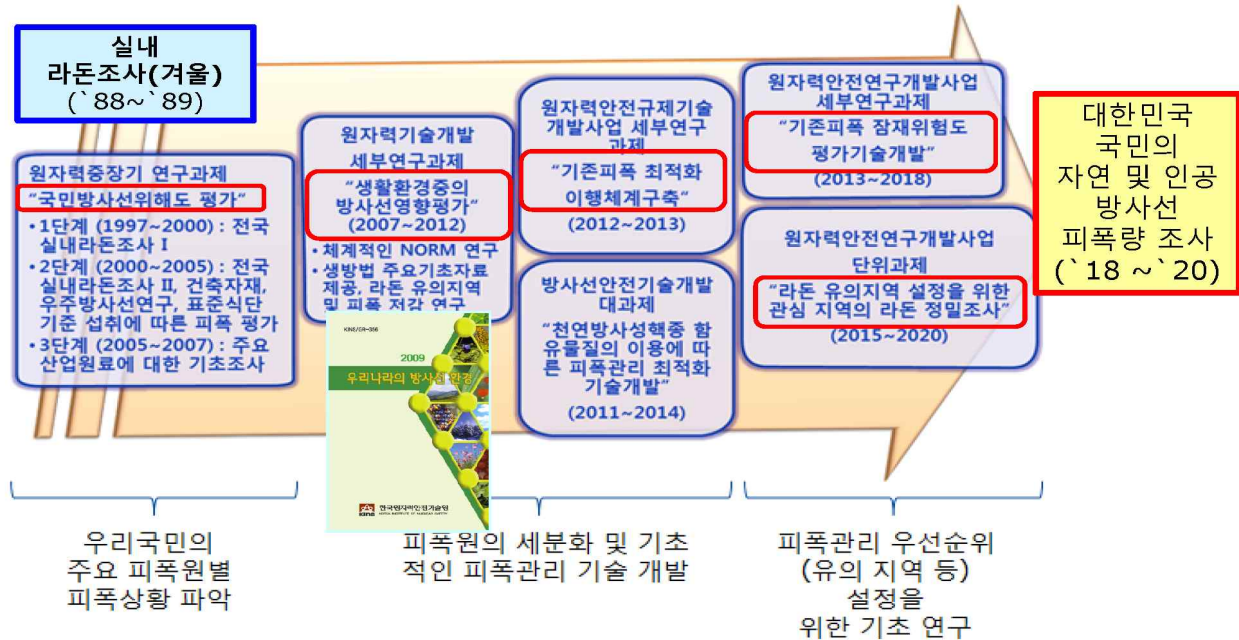
**We live in a sea of radiation**



4

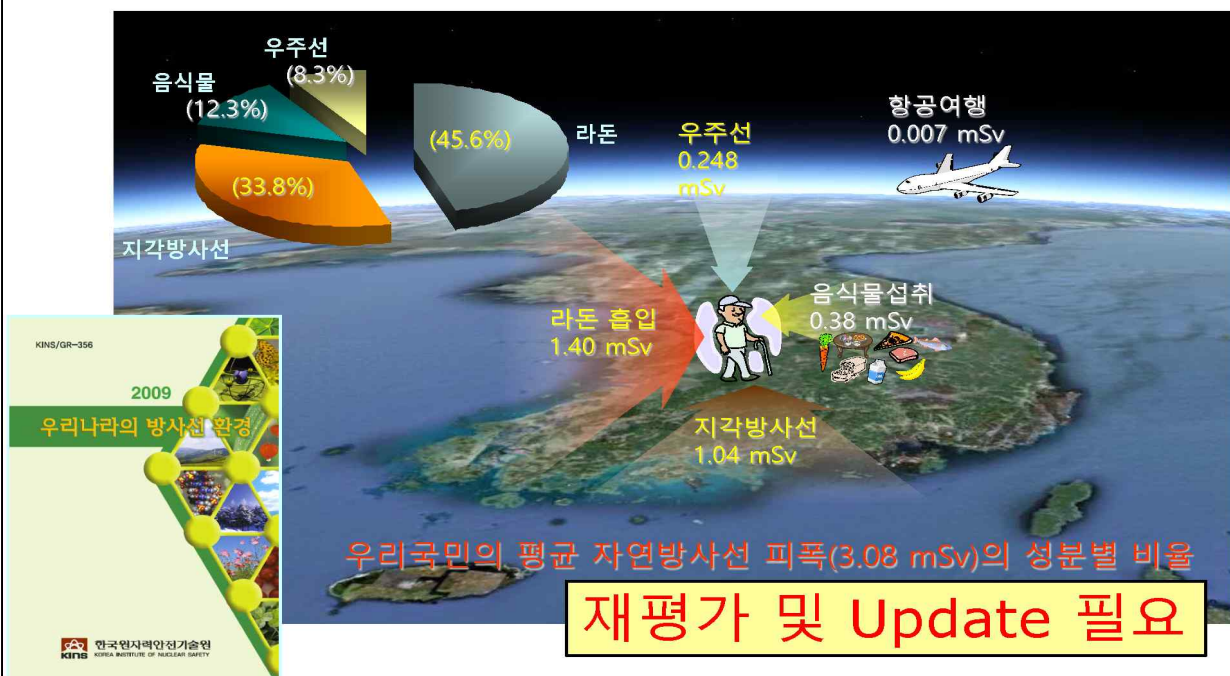


## KINS의 자연방사선 관련 연구 현황



5

## 자연방사선 피폭원별 기여도 (~'09)



6

# 선원별 상세 연구 현황 및 결과

7

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 전국 라돈조사 현황

차수	조사 기간	표본수	라돈 농도 (Bq/m <sup>3</sup> )		
			산술평균	기하평균/편차	최고값
1차*	1988~1989	530	103.9±59.0	92.2/1.6	496
2차	1999~2000	2953	52.5±57.7	42.1/1.8	1350
3차	2002~2005	1070	66.3±59.7	55.7/1.7	1186
4차	2008~2009	1100	79.3±85.1	60.5/1.9	1004
인구가중평균			54.4	46.4/1.8	-

\* 겨울철을 중심으로 수행하였으므로 이후 조사에 비해 농도가 높음.

### ○ 전국 라돈 조사 현황 (300 Bq/m<sup>3</sup> 초과 비율 : 약 0.9%)

Ref. : Kim, et al., National radon survey in Korea, Radiation Protection Dosimetry (2011) 146, 6-10.

8

## 내부피폭 - 라돈

### ○ Log-normal distribution

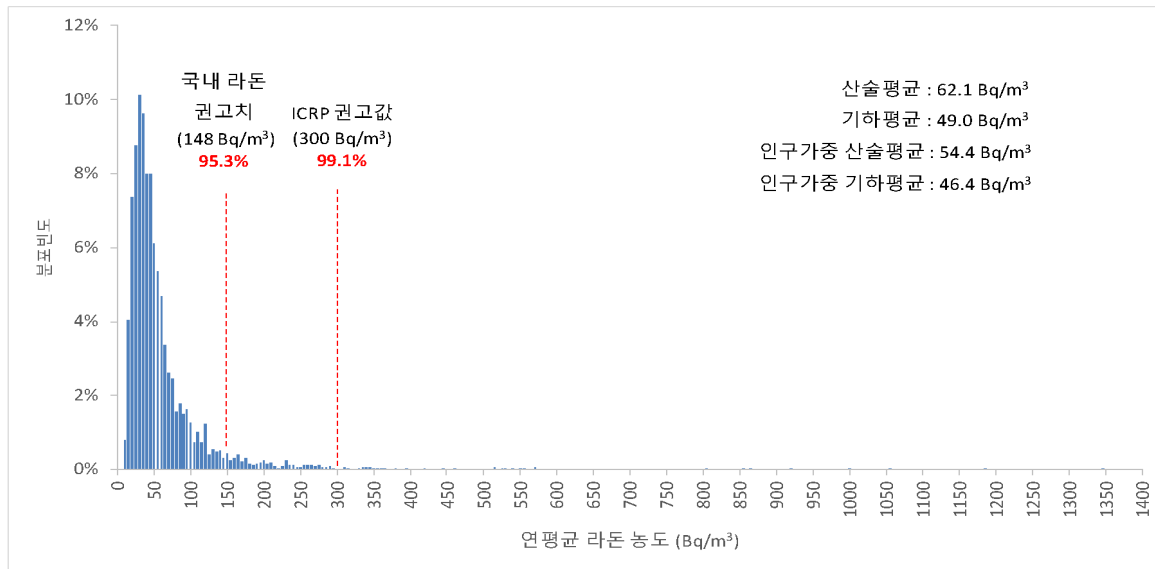


Fig. Frequency distribution of indoor radon concentration

9

## 내부피폭 - 라돈

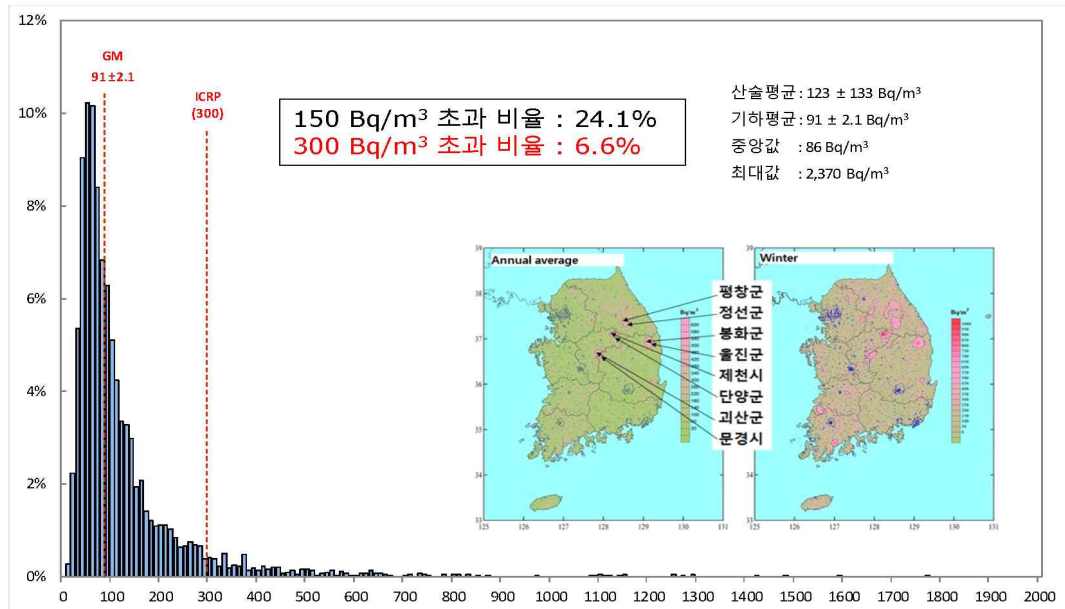
### ○ 관심(or 우선)지역 라돈조사 ('15 ~ '20) - 총 4,665 개 가옥

시/군	라돈 농도 (Bq/m³)			권고치 초과비율 (%)	
	연평균 (산술)	연평균 (기하)	최대값	환경부 (148 Bq/m³)	ICRP RL (300 Bq/m³)
<b>강원</b>	147±159	111±2.0	2,370	28.9%	8.7%
영월	150±135	120±1.8	1,277	29.5%	8.2%
정선	143±196	101±2.1	2,370	24.9%	8.1%
평창	149±137	113±2.0	1,293	32.5%	9.7%
<b>경북</b>	101±108	74±2.0	1,142	18.7%	6.1%
문경	102±102	74±2.1	812	17.1%	5.6%
영양	66±55	53±1.9	365	7.5%	1.3%
울진	105±122	80±1.9	1,142	14.5%	3.7%
<b>충북</b>	124±123	96±1.9	1,487	21.4%	6.4%
괴산	107±100	85±1.9	974	16.3%	3.9%
단양	140±162	96±2.2	1,487	26.9%	9.7%
제천	136±127	105±1.9	1,257	26.1%	7.4%
충주	117±105	96±1.8	1,299	17.3%	5.2%
<b>전체</b>	126±133	94±2.0	2,370	24.1%	6.6%

10

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 관심지역의 라돈 분포도 (log-normal distribution)



11

## 내부피폭 - 라돈

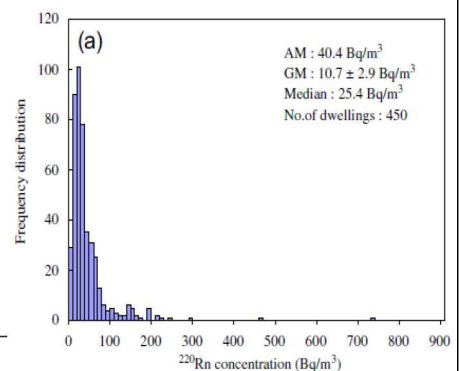
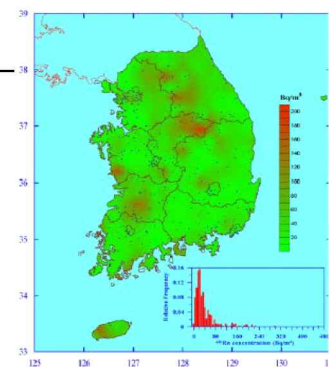
### ○ 토론 조사 ('02~'05년, 전국조사)

<sup>220</sup>Rn and its progeny concentrations in dwellings of Korea

Area	No. of houses	<sup>220</sup> Rn (Bq m <sup>-3</sup> )			
		AM	GM	Median	Max.
Gangweon	41	46.4 ± 44.9	12.6 ± 3.1	30.5	193
Gyeonggi	78	34.0 ± 30.7	10.3 ± 3.0	27.3	160
Gyeongnam	33	30.8 ± 38.8	8.6 ± 2.9	20.8	46
Gyeongbuk	35	29.3 ± 33.8	8.6 ± 2.7	17.1	138
Gwangju	8	23.8 ± 7.1	12.7 ± 1.9	23.7	33
Daegu	11	23.2 ± 21.3	7.30 ± 3.0	13.0	64
Daejeon	16	32.1 ± 16.5	11.5 ± 2.1	33.9	56
Busan	18	26.8 ± 20.5	8.30 ± 2.6	19.6	73
Seoul	51	50.2 ± 104.7	10.7 ± 3.3	28.8	731
Ulsan	6	20.0 ± 5.3	8.10 ± 1.5	19.9	26
Incheon	21	31.2 ± 30.9	9.20 ± 2.5	22.5	141
Jeonnam	33	38.9 ± 48.9	10.4 ± 2.6	23.7	214
Jeonbuk	35	53.6 ± 46.7	17.0 ± 3.0	41.5	223
Jeju	6	65.2 ± 82.8	10.6 ± 4.1	19.4	192
Chungnam	31	49.3 ± 64.5	11.8 ± 2.7	23.8	295
Chungbuk	27	64.5 ± 91.1	12.6 ± 2.8	31.3	461
Total	450	40.4 ± 56.0	10.7 ± 2.9	25.4	731

AM is the arithmetic mean and GM the geometric mean.

Ref. : Kim, et al., <sup>220</sup>Rn and its progeny in dwellings of Korea, Radiation Measurement 42 (2007) 1409-1414



12

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 토론 조사 ('15~'20년, 관심지역 조사)

시/군	가옥수	토론 농도 (Bq/m <sup>3</sup> )		
		연평균 (산술)	연평균 (기하)	최대값
강원	1296	52±121	27±2.6	1,955
영월	437	52±135	27±2.5	1,569
정선	438	44±76	27±2.4	1,053
평창	421	59±141	29±2.8	1,955
경북	1012	84±126	46±2.9	1,308
문경	564	91±130	51±2.8	1,308
영양	49	48±164	20±2.6	1,174
울진	399	79±114	45±2.8	1,071
충북	1997	64±108	37±2.7	1,583
괴산	474	83±134	50±2.6	1,538
단양	344	61±134	32±2.7	1,583
제천	612	64±96	36±2.8	842
충주	567	51±67	32±2.5	925
전체	4,305	65±117	36±2.8	1,955

13

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 재평가 방법

- 라돈(토론) 조사 통합 (전국조사 + 관심지역 + 일부 지역별 조사)



- 지역별 인구주택 조사와 결합 ('15년 11월 기준)



- 인구가중 실내 연평균 라돈(토론) 농도 산출 (전국 및 지역별)

### ♣ 실외 라돈 농도

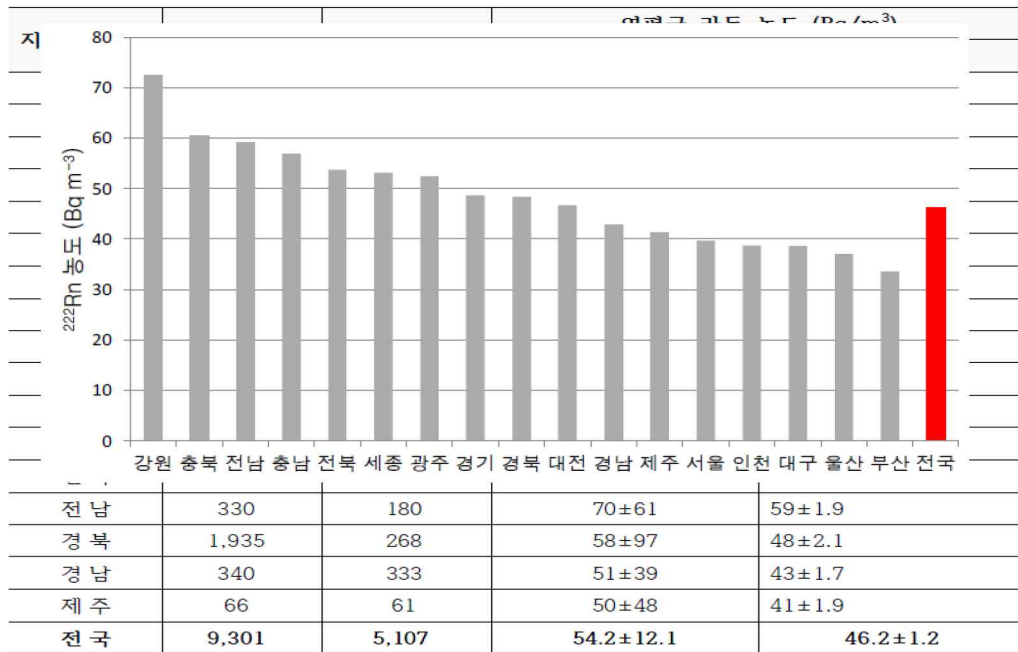
- 측정자료 부족으로 2007년 이전의 10개 지방방사능측정소 측정 자료 활용
- 전국 평균 : 22 Bq/m<sup>3</sup>
- (참고) 실외 라돈 및 토론 세계 평균 농도 : 10 Bq/m<sup>3</sup> (UNSCEAR 2000)

14



## 내부피폭 - 라돈

### ○ 인구가중 실내 라돈 농도



15

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 선량평가

- ICRP 등 최근 간행물의 평가 방법 및 선량계수 적용
- 국내 자료 부족한 경우, UNSCEAR 값 참조

### ○ 유효선량 산출방법

$$E(mSv/y) = C_{Rn} \times F_{eq} \times T \times K$$

E : 피폭방사선량(유효선량, mSv/y)

C : 라돈 농도(Bq/m³)

F : 평형인자(Equilibrium factor, 무차원수)

T : 총 거주시간(h)

K : 선량환산계수(mSv/Bq·h/m³)

주요인자	실내	실외
라돈 & 토론 농도 (C)	KINS 조사 결과	KINS 조사결과 UNSCEAR 값
평형인자(F)	라돈 : 0.4 토론 : 0.02	라돈 : 0.6 토론 : 0.003
거주시간 (T)	7,000 h	1,760 h
선량환산계수	<b>라돈</b> : 13 mSv/WLM $2.0 \times 10^{-5} \text{ mSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$  <b>토론</b> : 5.6 mSv/WLM $1.2 \times 10^{-4} \text{ mSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$	

16

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 선량환산 인자의 변화

출처	라돈		토론	
	mSv/WLM	mSv/(Bqh/m³)	mSv/WLM	mSv/(Bqh/m³)
ICRP 65	5.06 (작업자) 3.88 (일반인)	7.9E-06 6.1E-06	-	
UNSCEAR 2000	5.74	9.0E-06	1.87	4.0E-05
ICRP 115	13	2.04E-05	-	-
ICRP 137	10 (권고) 20 (최대)	1.6E-05 3.1E-05	5.6	1.2E-04

17

## 내부피폭 - 라돈

### ○ 선량평가 결과

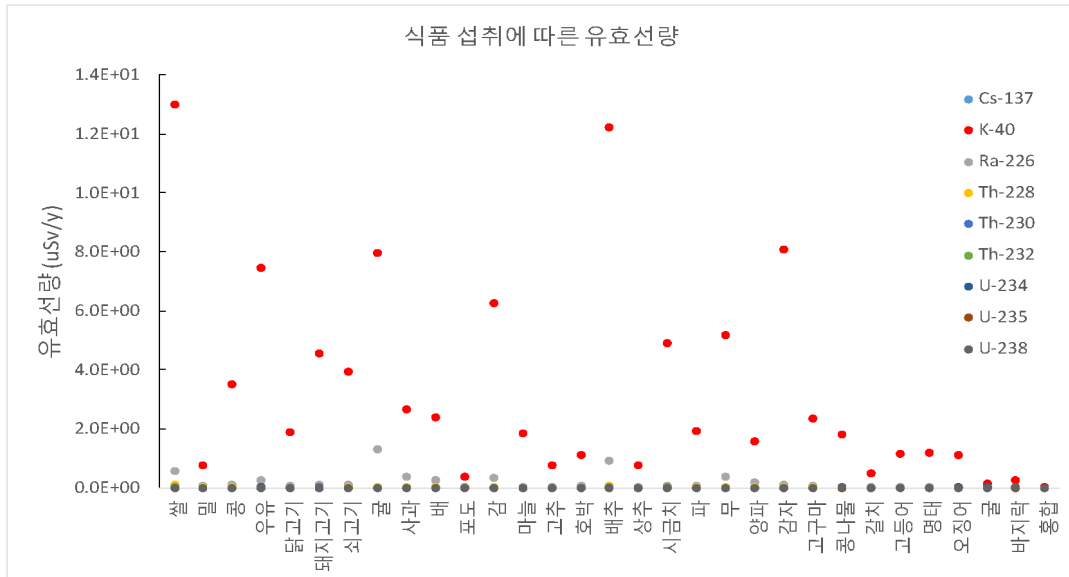
피폭원	유효선량(2007) [mSv/y]	유효선량(2020) [mSv/y]	증가 비율
라돈, 실내	1.06	2.64	2.5
라돈, 실외	0.21	0.47	2.2
토론, 실내	0.12	0.50	4.2
토론, 실외	0.007	0.006	0.9
합계	1.4	3.62	2.6

18

## 내부피폭 - 식품

### ○ 과거 연구 (`02 ~ `05)

- 주요 식품 중 천연 방사성 핵종 분석 ( $^{40}\text{K}$ , U 계열, Th 계열 등)
- $^{40}\text{K}$ 가 선량의 대부분 차지 (93.4%)



19

## 내부피폭 - 식품

### ○ 최근 연구(`18 ~ `20) - 재평가

- UNSCEAR 분류 체계에 따른 국내 섭취량 통계를 적용
  - 섭취량 : 국민건강영양조사(질병관리본부, `16년), 식품군/연령 비율차이 고려
- 유효선량 환산계수 : ICRP 72 연령별 식품섭취 계수
- 식품 중 방사능 농도 :  $^{40}\text{K}$ , U 계열, Th 계열 및  $^{210}\text{Po}$  (총 9개 핵종)
- 어패류 내  $^{210}\text{Po}$  선량평가 추가**
  - 국내 어패류 중  $^{210}\text{Po}$  농도 조사 연구 결과 참조
  - IAEA 공동연구프로그램 (전세계 해양 생물중  $^{210}\text{Po}$  농도 조사) 참조

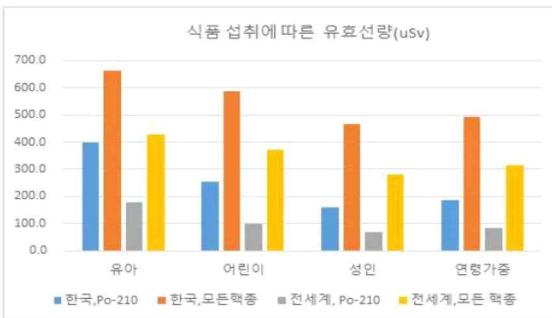
평균 농도(mBq/kg, 단, <sup>40</sup> K는 Bq/kg)										
식품군	<sup>238</sup> U	<sup>230</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>228</sup> Th	<sup>235</sup> U	<sup>234</sup> U	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Po	<sup>40</sup> K
곡류	1.2	1.8	37	1.3	24.7	0.23	1.4	139.2	167	34.1
육류	4.7	4.2	96.7	1.7	9.7	0.38	5.3	226.7	170	82.4
엽채류	13.5	1.6	64.1	1.6	20.1	0.68	16.4	172.8	216	76.9
과일 및 근채류	1.7	1.3	26.9	1	18.2	0.12	1.9	120.0	160	59.1
어패류	63.7	8.7	68.4	13.2	22.6	2.3	71.9	370	3,700	79
우유	5.6	0.7	24.7	0.2	4.2	0.3	6.1	15	15	46.7
음용수	1.0	0.1	1.4	0.1	0.1	0.04	-	10	5	-

20

## 내부피폭 - 식품

### ○ 유효선량 평가 결과

- $^{210}\text{Po}$ 에 의한 선량이 **0.19 mSv/y** (세계 평균은 0.085 mSv/y)
  - (원인) 어패류 식습관이 원인
- **식품섭취**로 인한 유효선량 **0.49 mSv/y** (과거에 비해 1.3 배 증가)



핵종	유효선량(μSv)				
	유아	어린이	성인	연령가중	UNSCEAR
$^{238}\text{U}$	0.19	0.19	0.17	0.18	0.25
$^{230}\text{Th}$	0.18	0.19	0.20	0.20	0.58
$^{226}\text{Ra}$	9.9	14.9	7.7	7.7	8
$^{232}\text{Th}$	0.14	0.17	0.17	0.17	0.36
$^{228}\text{Th}$	1.5	1.0	0.6	0.7	0.3
$^{235}\text{U}$	0.0	0.01	0.00	0.00	0.01
$^{234}\text{U}$	0.20	0.22	0.20	0.20	0.28
$^{210}\text{Pb}$	109.6	105.1	48.2	59.8	28
$^{210}\text{Po}$	398.4	252.9	161.0	186.7	85
총합(우라늄 및 토륨 계열)	520.1	374.7	218.2	255.7	140*
$^{40}\text{K}$	142.1	211.9	247.6	237	170
전체 총합	662.2	586.6	465.8	492.7	310

\* UNSCEAR 2008 table.18의 식품 섭취로 인한 선량 평가 결과이며, 체내 기온농도로 조직에 존재하는 유효선량은 120μSv으로 전체 총합은 290μSv으로 제시함.

21

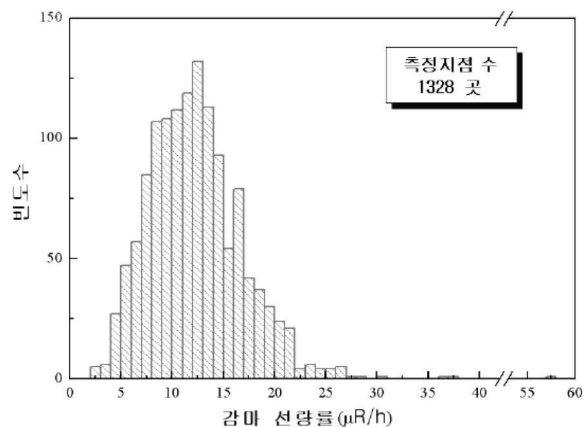
## 외부피폭 - 지각 방사선 (실외)

### ○ 지각방사선 피폭

- 정의 : 암석, 토양 등에 함유된 천연 방사성핵종에 기인하는 일반인 방사선 피폭
- 핵종 예 : U & Th 및 progenies,  $^{40}\text{K}$  등

### ○ 실외 지각 방사선 측정 및 평가 ('93 ~ '96)

- 측정방법
  - 전국 개활지 약 1,328 개 지점 (HPIC로 측정)
  - 우주선 기여분 보정
- 결과
  - 20 - 500 nGy/h
  - 인구가중평균 : **92.6 nGy/h**



## 외부피폭 – 지각 방사선 (실외)

### ○ 실외 지각 방사선 측정 및 평가 ('13 ~ '18)

#### ● 측정 방법

- 전국 주요도로 (차량용 HPIC 및 대형 NaI(Tl))
- 탐사 차량 (HPIC 및 대형 NaI(Tl))
- 약 77만 개의  $\gamma$ -spectrum 획득 및 평가

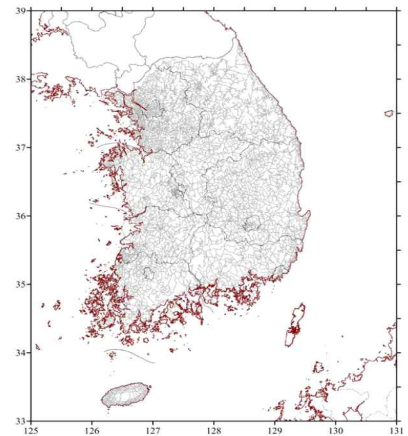


Fig. 탐사 루트

23

## 외부피폭 – 지각 방사선 (실외)

### ○ 실외 지각 방사선 측정 및 평가 ('13 ~ '18)

#### ● 평가 방법

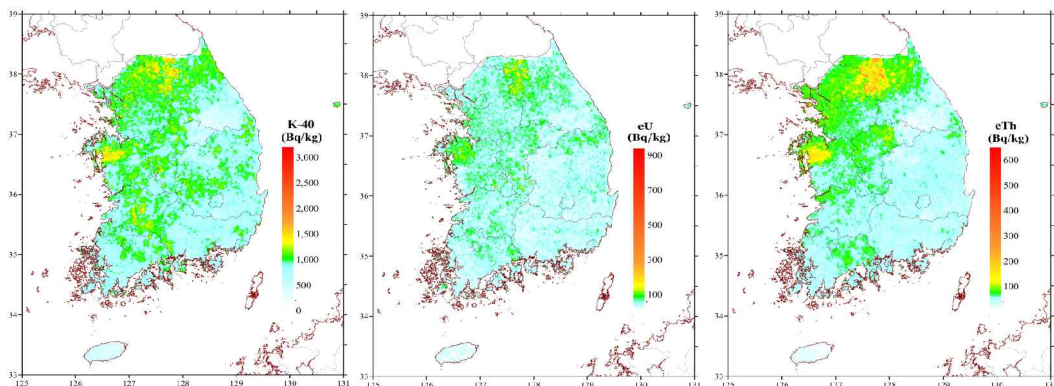
- (보정) 차량 차폐, 우주선 기여분, 각 핵종별( $^{40}\text{K}$ , U, Th) 별 농도 산출
- Outlier 제거 (총 722,348 개 데이터 확보) → 전국 분포지도 작성
- 지역별 흡수선량 및 유효선량 계산 (UNSCEAR 2008)

$$D \text{ (nGy/h)} = 0.427C_{\text{Ra}} + 0.662C_{\text{Th}} + 0.0432C_{\text{K}}$$

$$E \text{ (mSv/y)} = D \cdot CF \cdot T_{\text{ex}} \times 8,760 \text{ h} \times 10^{-6}$$

CF: 0.7 Sv/Gy

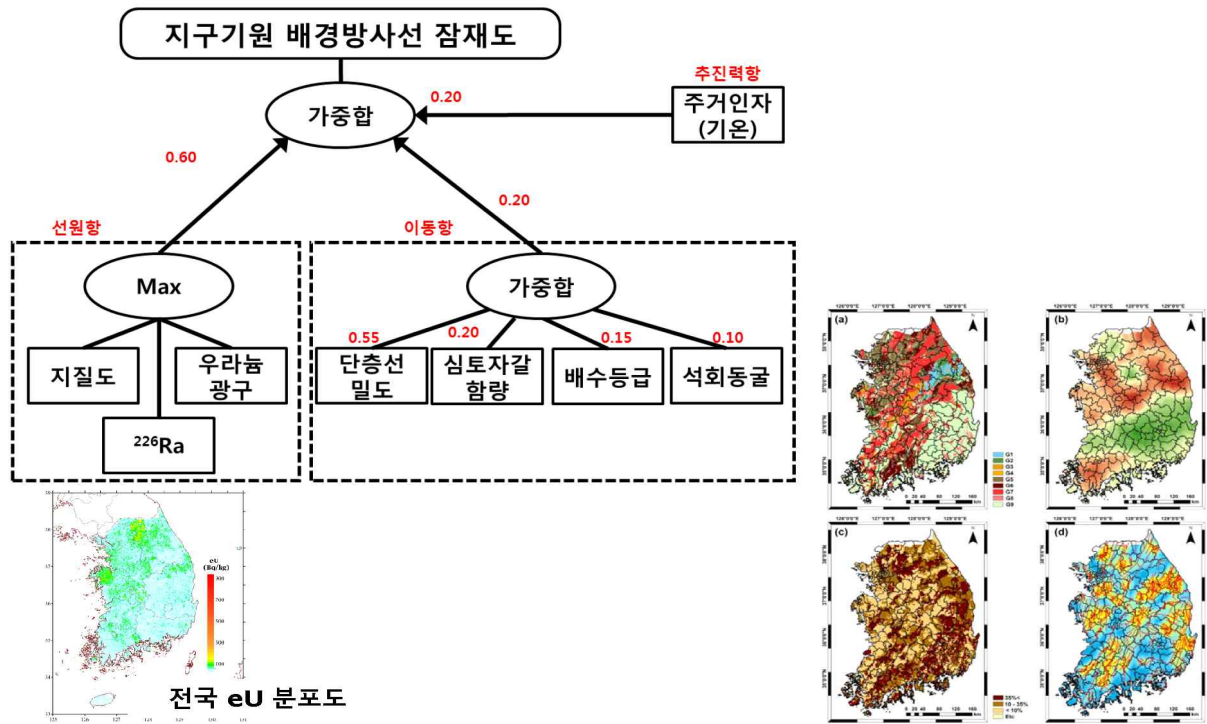
$T_{\text{ex}}$  (점유비율) : 0.2



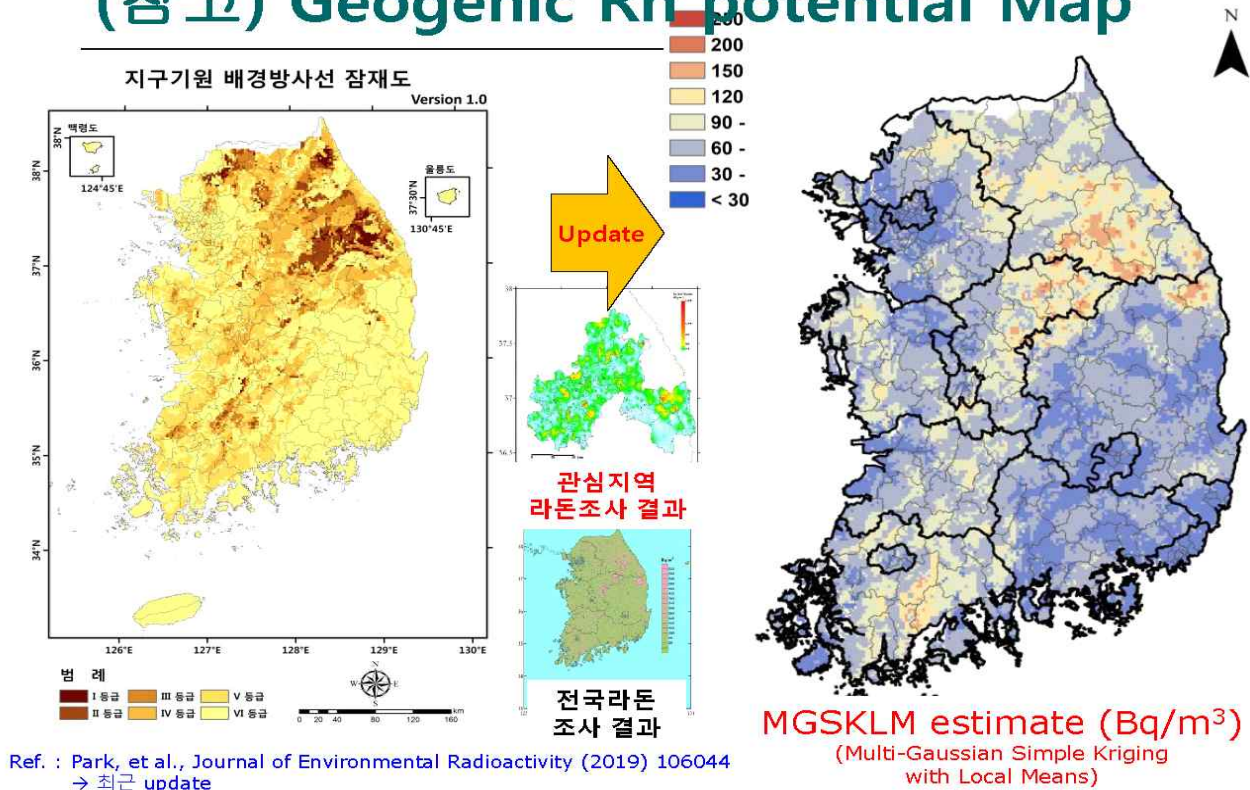
24



## (참고) Geogenic Rn potential Map



## (참고) Geogenic Rn potential Map



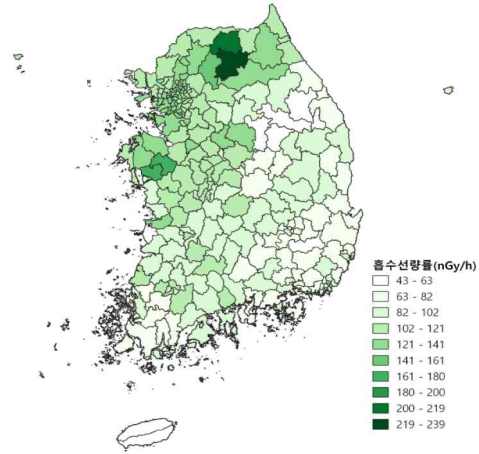
## 외부피폭 – 지각 방사선 (실외)

### ○ 실외 지각 방사선 측정 ('13 ~ '18) 및 선량 평가 ('18 ~ '20)

#### ● 최종 정리

○ 시군구/읍면동으로 세분화 → 지역별 분포도 작성 → 인구 가중 평균 도출

지 역	조 사 지점수	인구 수 <sup>1)</sup> (만명)	흡수선량률 (nGy/h)	연간 유효선량 (mSv/y)
서 울	13,593	990	128	0.16
부 산	11,511	345	82	0.10
대 구	7,582	247	80	0.10
인 천	17,063	289	119	0.15
광 주	3,523	150	104	0.13
대 전	15,644	154	106	0.13
세 종	3,405	20	105	0.13
울 산	10,608	117	84	0.10
경 기	115,009	1,248	82	0.15
강 원	120,129	152	119	0.15
충 북	37,120	159	112	0.14
충 남	46,523	211	120	0.15
전 북	52,312	183	106	0.13
전 남	69,774	180	93	0.11
경 북	125,757	268	81	0.10
경 남	49,936	333	79	0.10
제 주	22,859	61	43	0.05
전 국	722,348	5,107	108	0.13



1) 지역별 인구는 2015년 통계청 인구주택총조사 자료를 활용

27

## 외부피폭 – 지각 방사선 (실내)

### ○ 실내 지각 방사선 측정 및 평가 ('02 ~ '05)

#### ● 측정 방법

○ 전국 가옥 150 개 측정 (TLD)

#### ● 결과

- 126 – 347 nGy/h
- **평균 : 214 nGy/h**
- 적은 지점수로 인한 낮은 대표성

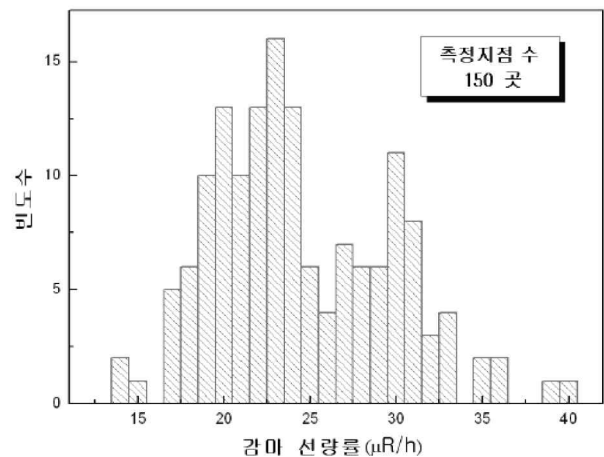


그림. 실내 공간 감마선량률의 준위별 빈도 분포 28

## 외부피폭 – 지각 방사선 (실내)

### ○ 실내 지각 방사선 재평가 ('18 ~ '20)

#### ● 평가 방법

##### ○ UNSCEAR 방법론 적용

- 인구가중 실외 지각방사선(nGy/h) x **1.4** (세계 평균 비율)

$$E \text{ (mSv/y)} = D \cdot CF \cdot T_{\text{ex}} \times 8,760 \text{ h} \times 10^{-6}$$

CF: 0.7 Sv/Gy

$T_{\text{ex}}$  (점유비율): 0.8

#### ● 결과

표 2.8. 평가 방법론에 따른 실내 지각감마선량 결과 비교

	실외		평가방법	실내		총 유효선량 mSv
	nGy/h	mSv		nGy/h	mSv	
KINS ('05)	92.6	0.11	직접측정	189	0.93	1.04
KINS ('19)	108	0.13	몬테칼로 시뮬레이션	112	0.55	0.68
			수학적 평가방법	118	0.58	0.71
			UNSCEAR 방법론	151	0.74	0.87
UNSCEAR (2000)	59	0.07		84	0.41	0.48

9

## 외부피폭 – 우주 방사선

### ○ 우주 방사선 평가 ('06 ~ '07)

#### ● 평가 방법

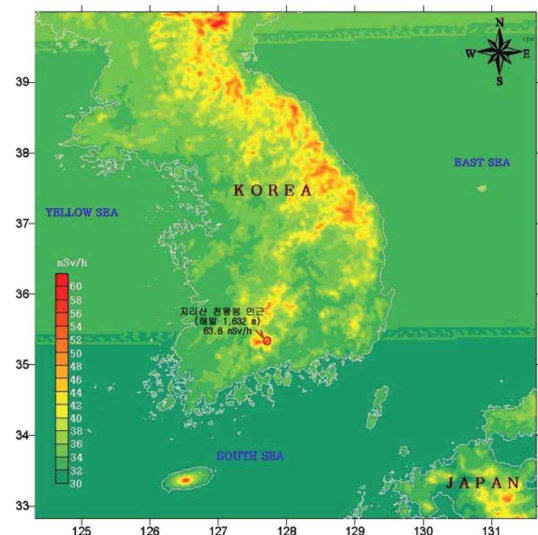
- CARI-6
- 위경도별 (2x2 km 격자) mapping
- 인구가중평균 선량률 : 33.7  $\mu\text{Sv/h}$

#### ○ (고려사항)

- 건물차폐효과 약 20% 고려
- 실/내외 체류시간 비율 = 8:2

#### ● 결과

- 인구 가중평균 피폭량 : **248  $\mu\text{Sv/y}$**  (12,000 man-Sv)



30

## 외부피폭 – 우주 방사선

### ○ 우주 방사선 재평가 ('18 ~ '20)

#### ● 평가 방법

- CARI-6, UNSCEAR 방법, EXPACS 코드 계산 적용 및 비교  
→ 방법론 별 결과는 유사
- '17.12월 국내 지역별 인구 분포 자료 적용

#### ● 결과

- 가장 정밀한 EXPACS 코드 결과(**0.240 mSv/y**)로 결정

	국내 (‘07)	국내(‘20)	
연간 선량 (mSv/y)	0.248	0.242	0.240
평가 방법	코드 (CARI-6)	UNSCEAR 방법론	코드 (EXPACS)

31

## 외부피폭 – 우주 방사선

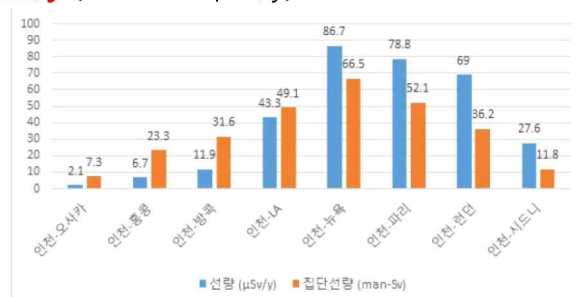
### ○ 항공여행시, 우주 방사선 평가 ('02~'05년 및 '18~'20)

#### ● 평가 방법

- '18년도 대한항공 노선별 선량 통계자료 활용
- 법무부 출입국 기록 및 지역별 출입국 통계자료 활용

#### ● 결과

- '05년도에 비해 **출국자수 4배 증가**, **태양활동지수 0.5배 감소**
- '18년도 여행 1회 왕복 시 평균 선량 29  $\mu$ Sv (집단선량: 815 person-Sv)
- 국민 1인당 선량은 **15.8  $\mu$ Sv/y** ('05년: 6.9  $\mu$ Sv/y)



< 주요 도시 노선 별 선량 및 집단선량 >

32



# 결론

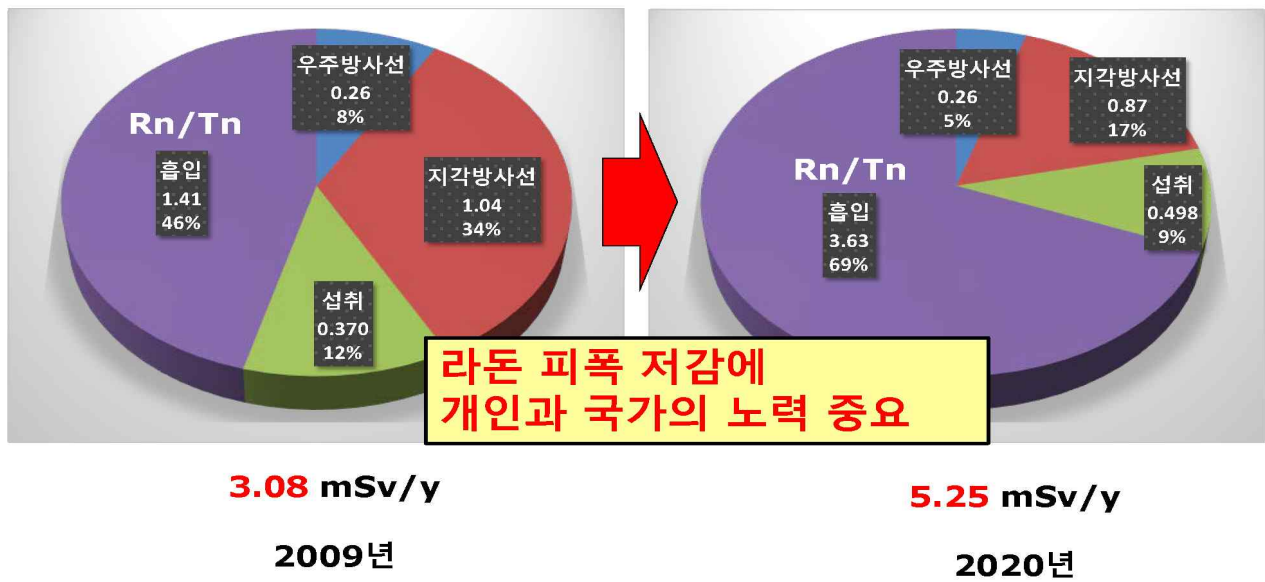
33

## 결론

Radiation Source		KOREA ('09)	KOREA ('20)	비고	World (UNSCEAR '08)	USA	JAPAN
외부 피폭	우주방사선						
	지표면	0.248	0.240				
	항공여행	0.007	→ 0.016	항공여행 ↑			
	소계	0.26	0.256		0.39	0.33	0.30
	지각방사선						
내부 피폭	실외	0.11	0.13	전국 차량탐사	0.07		
	실내	0.93	0.74	UNSCEAR방법	0.41		
	소계	1.04	0.87		0.48	0.21	0.40
	섭취						
	<sup>40</sup> K	0.170	0.237	식품분석결과 추가	0.17		
	U & Th 계열	0.198	→ 0.256	<sup>210</sup> Po 추가	0.12		
	기타	0.01	0.01				
	소계	0.370	0.498		0.29	0.28	0.40
	흡입						
	U & Th 계열	0.01	0.01		0.01		
	라돈	1.27	→ 3.11	조사추가, DCF ↑	1.15		
	토론	0.13	→ 0.51	조사추가, DCF ↑	0.10		
	소계	1.41	3.63		1.26	2.28	0.40
총계		3.08	→ 5.25		2.4	3.1	1.5

34

## 결론



35

Thank you very much!!

36

# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 발표자료집

한국원자력학회 2021 춘계학술발표회 방사선방호 연구부회 워크숍 발표자료집

## < Session II >

### ⑤ 국민의 인공방사선 피폭량 조사 최신 현황(목차만 공개)

발표자 : 김광표 교수 (소속 : 경희대학교 원자력공학과)

연락처 : [kpkim@khu.ac.kr](mailto:kpkim@khu.ac.kr)

(공백)

2021 춘계 원자력학회 워크숍

# 국민의 인공방사선 피폭량 조사 최신 현황

2021-05-12

경희대학교 원자력공학과  
김 광 표

## 목 차



경희대학교  
KYUNG HEE UNIVERSITY

1. 서 론
2. 의료상 피폭방사선량 평가
3. 직무상 피폭방사선량 평가
4. 새로운 인공피폭원에 의한 피폭방사선량 조사
5. 인공피폭원에 의한 국민의 평균 유효선량





# 『국내의 최신 방사선 환경』 워크숍 발표자료집

한국원자력학회 2021 춘계학술발표회 방사선방호 연구부회 워크숍 발표자료집

## < Session II >

### ⑥ 생활주변 방사선 안전규제 현황 및 추진방향(목차만 공개)

발표자 : 최원철 센터장 (소속 : 한국원자력안전기술원)

연락처 : [k360cwc@kins.re.kr](mailto:k360cwc@kins.re.kr)

(공백)

한국원자력학회 방사선방호 연구부회 워크숍 :  
국내의 최신 방사선 환경

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

# 생활방사선 안전규제 현황 및 추진방향

최 원 철  
2021. 5.12(수)

 한국원자력안전기술원  
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY



## Contents



I

생활방사선 안전규제

II

생활방사선 안전규제 현황

III

생활방사선 안전규제 추진방향