

What's hot?

# 의료인의 직업적 방사선 노출과 건강 영향

고려대학교 의과대학 <sup>1</sup>예방의학교실, <sup>2</sup>보건대학원 역학 및 보건정보학과

이 원 진<sup>1,2</sup>

## Occupational Radiation Exposure and Health Effects among Medical Workers

Won Jin Lee<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Preventive Medicine, Korea University College of Medicine, Seoul;

<sup>2</sup>Department of Epidemiology and Health Informatics, Korea University Graduate School of Public Health, Seoul, Korea

Medical radiation workers occupy the largest group of radiation workers and is rapidly increasing worldwide. They expose to protracted low-dose radiation and include a large proportion of women. The purpose of this article is to provide an overview of occupational radiation exposure and health effects among medical radiation workers through literature review and from the findings of Korean medical radiation workers' studies. Occupational radiation exposure increases the risk of many chronic diseases including cancer, cataract, cardiovascular diseases, thyroid diseases, and others. Although Korean medical radiation workers had a more favorable mortality than in general population, male workers experienced higher mortality from all cancers, leukemia, cancers of the stomach and the colon, and diseases of circulatory system after adjusting for the lower overall mortality. The potential adverse health risks from occupational radiation exposure are not negligible in medical radiation workers if current working level remains. Therefore, effective prevention efforts are needed to reduce the risks of diseases from occupational radiation exposures. (Korean J Med 2018;93:237-246)

**Keywords:** Hospital; Neoplasms; Occupational exposure; Radiation; Workers

### 의료인의 규모와 방사선 노출

다양하고 많은 의료인들이 방사선 작업에 관여하고 있으며 그 규모가 빠르게 증가하고 있다. 질병관리본부에서는 영상의학 전문의, 의사, 치과의사, 방사선사, 간호사, 치과위생사, 간호조무사, 업무보조원 및 기타 직종 등을 방사선 관계 종사자라는 이름으로, 방사선안전재단에서는 치료방사선 분야 및 핵의학 분야 의료인을 방사선작업종사자로 구분하여

직업적 선량을 정기적으로 모니터링 하고 있다(Table 1) [1,2]. 그 외에도 일시적으로 방사선에 노출되거나 상시적으로 방사선 작업에 종사하더라도 등록되어 있지 않는 의료인들도 있다. 방사선을 직업적으로 다루는 의료인 수는 급격히 증가되어 왔고 이러한 추세는 의료 이용 및 의료용 방사선 기기 활용의 증가로 앞으로도 지속될 것으로 예상된다.

우리나라에서는 직업적 방사선량에 대해 1984년(방사선 작업종사자)과 1996년(방사선 관계종사자)부터 체계적으로

Correspondence to Won Jin Lee, M.D., M.P.H., Ph.D.

Department of Preventive Medicine, Korea University College of Medicine, 73 Incheon-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea  
Tel: +82-2-2286-1413, Fax: +82-2-927-7220, E-mail: leewj@korea.ac.kr

Copyright © 2018 The Korean Association of Internal Medicine

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

모니터링을 시작하였다. 방사선 관계종사자의 경우 1996년 평균 연간 선량이 1.75 mSv에서 2016년 0.44 mSv로 지속적으로 감소되어 왔으나 아직도 주요 선진국들에 비해서는 여전히 높은 수준이다(<http://www.unscear.org>). 그리고 2016년도에 방사선 관계종사자들 중에서 분기당 5 mSv를 초과하여 주의 통보를 받은 의료인이 703명, 연간 20 mSv 초과자도 83명이나 되어 방사선 안전관리를 지속적으로 강화하는 것이 중요하다. 또한 실제로 개인선량계를 의도 및 비의도적으로 착용하지 않은 경우들도 있어 연보의 피폭량이 과소평가되었을 것을 고려하면 의료종사자들에서의 직업적 방사선 노출은 무시할 수준이 아니다. 한편 일부 의료인들은 방사성물질을 호흡기나 소화기를 통해 내부 피폭될 수 있다. 이러한 물질들은 체내 잔류하여 반감기에 따라 일정기간 존재하여 의료 장비의 전원이 꺼지는 순간 없어지는 외부피폭과 달리 방사선 노출이 오래 지속될 수 있다.

개인선량계의 선량값이 정확한 것이냐에 대한 논란은 아직 체계적으로 조사되지 못하고 있다. 보고된 선량이 여러 가지 이유들(의도적으로 착용하지 않는 경우부터 올바르게 착용하지 못한 경우 혹은 선량계의 보관 장소가 적절하지 않은 경우 등)로 정확하지 않을 가능성도 있다. 이러한 잠재적인 선량값의 오분류를 극복하기 위해서는 개인선량계를 항상 착용하는 경우에만 실제 노출 선량으로 파악하고 이러한 값에 근거한 단위 선량당 위험도를 산출하는 것이 필요하다. 따라서 방사선 노출 오류를 극복하기 위해서는 단지 물리적인 선량 측정값 외에 작업 특성에 대한 정보가 함께 파악되어야 한다. 또한 방사선 노출에 의한 건강영향 평가에는 단지 노출량만이 아니라 그 노출량이 얼마동안 몇 번에 걸쳐서

언제 노출되었는지 그리고 방사선원의 에너지 크기와 속도 등의 정보들이 중요하다. 이러한 정보들을 얻기 위해서는 작업력에 대한 병원내 기록과 개인별 설문 정보를 함께 파악하는 것이 필수적이다.

의료인들의 방사선 노출은 각 직종 및 인구학적 특성별로 많은 차이를 보인다. 2016년도 국내 방사선사의 개인 피폭선량 연간 평균값은 0.93 mSv로 가장 높았고 치과위생사가 0.13 mSv로 가장 낮았다. 각 직종 내에서도 인구학적 및 작업 특성에 따라 노출 선량에 차이가 있으며, 특히 중재시술에 참여하는 의료인들 중 중재시술 의사의 연간 평균 유효선량은 간호사나 방사선사에 비해 높았다. 그리고 방사선사의 경우 남자, 30세 미만, 대형병원 근무자, CT, X-ray 등의 작업을 자주하는 경우, 환자를 붙잡고 작업하는 경우일수록 선량값이 높았다[3]. 이는 업무 특성상 남성이 여성보다 C-arm이나 중재시술에 더 많이 관여하고 환자를 잡고 있어야 하는 경우가 많고, 젊은 층에서 작업 미숙 및 상대적으로 많은 업무가 부과되는 것으로 해석된다. 그러나 의사와 간호사의 경우는 연령이 증가할수록 연간 노출 선량이 높아 방사선사와는 다른 노출 특성을 보였다.

한편 개인 선량계를 통한 선량 평가 외에 방사선량의 증가에 따라서 증가하는 말초혈액 림프구 세포에서 관찰되는 염색체 이상(이동원 염색체, 염색체 전좌 등)의 수를 선량-반응 표준곡선에 대입하여 인체의 전신 흡수선량을 추정하는 생물학적 선량 평가 방법을 통해 방사선 노출량을 산출할 수 있다. 최근 국내 인터벤션 영상의학과 전문의들을 대상으로 한 조사에 의하면 상대적으로 최근 노출을 평가하는데 사용되는 불안전형 염색체는 일반인의 경우 1,000개의 세포 당

**Table 1. Numbers and average annual doses in medical radiation workers by profession in Korea**

Occupation	Number	Effective dose (mSv)	No. of workers received doses greater than 5 mSv in a quarter
Diagnostic radiation workers (2016) [1]	80,115	0.44	703
Radiologic technologists	24,756	0.93	549
Physicians	17,292	0.33	118
Radiologists	1,643	0.21	3
Dentists	17,111	0.17	12
Dental hygienists	10,086	0.13	6
Nurses	6,819	0.19	8
Nurse's aide	1,408	0.26	5
Assistants	235	0.23	0
Others	765	0.27	2
Radiation workers involved with nuclear medicine and therapeutic department (2015) [2]	5,278	0.45	3 (greater than 20 mSv in a year)

평균 1.3개의 이동원염색체가 관찰되는데 반해 인터벤션 영상의학과 의사들의 경우 4.9개가 관찰되어 34%가 검출한계 이상을 보였으며, 평생 누적 선량을 평가하는 안정형 염색체 결과에서는 일반인의 경우 1,000개의 세포 당 평균 2.6개의 염색체 전좌가 관찰되는 반면 인터벤션 영상의학과 의사의 경우 7.3개가 관찰되었으며 41%의 의사가 검출 한계 초과를 보였다[4]. 이는 국내 중재시술 의료인의 직업적 방사선 노출이 적지 않은 수준이라는 것을 말해 준다.

### 주요 의료인 방사선 역학 연구

전 세계적으로 방사선을 직업적으로 다루는 의료인을 대상으로 한 코호트 연구들이 진행되어 왔으며(Table 2) 그중에서 가장 규모가 크고 현재까지 활발히 진행되고 있는 연구는 미국 방사선사 연구(U.S. radiologic technologists study: <http://radtechstudy.nci.nih.gov>)이다. 이 연구는 직업적 방사선 노출과 악성 종양 및 기타 건강에 미치는 영향을 규명하는 것을 목적으로 1982년도에 시작되었으며, 자격증을 취득한 이후 2년 이상된 146,022명의 방사선사를 모집하였으며 2014년까지 4번에 걸친 추적 조사가 수행되었다. 미국 방사선사 연구에서는 기반 설문 조사 및 추적 조사를 통해 방사선 노출 및 질병 발생의 변화 양상을 파악하고 있으며 방사선과 암과의 관련성에 있어서 유전적 요인을 연구하기 위해 구강 세포 및 혈액을 채취하였다. 최근에는 약 1,500명의 핵의학 방사선사들을 대상으로 한 별도의 연구(U.S. nuclear medicine technologists study)를 진행하고 있다. 또한 일부 대상자로부터 수집된 개인 선량계 노출선량을 활용하여 전체 대상자의 과거 선량 재구축 및 장기 선량을 산출하여 방사선 역학에서 중요한 방법론을 구축한 바 있다. 이를 통해 직업적 저선량 방사선 및 기타 위험 요인에 의한 전체 사망 및 암 위험도 연구, 유전자형에 따른 유방암 및 갑상선 암과 방

사선의 관련성 연구, 설문의 타당도 및 생체선량 연구 등 150편 이상의 연구 결과들이 논문으로 발표되고 있다. 이러한 의료인 대상 역학 연구들은 저선량 방사선과 건강 영향에 대한 중요한 정보를 제공하고 있다.

중재시술 의료인들은 다른 의료인들보다 방사선에 고노출되고 있어 중재시술과 관련해서 방사선 방호를 위한 긴급한 노력들이 요구되어 왔다. 방사선 중재시술자들에서 다양한 종류의 건강영향들(암, 심혈관계질환, 백내장, 피부질환, 갑상선 질환, 우울증상, DNA손상 등)이 보고되고 있으나 대부분 단면 연구들로서 다른 직종에 비해 상대적으로 연구가 활발히 진행되지 못하였다[5]. 미국에서는 중재시술을 사용하는 다양한 전문 분과들의 협의체인 Multispecialty Occupational Health Group (MOHG)과 미국 국립암연구소에서 중재시술자들의 사망 자료를 연계한 연구가 진행되고 있으며, 심혈관 조영 및 중재학회에서는 소속 학회원들에 대한 설문조사를 통해 다양한 자가보고 건강영향의 유병률을 주기적으로 보고한 바 있다. 한편 뇌종양으로 사망한 미국의 중재시술 의사가 자신의 경험담을 담은 동영상과 함께 중재시술 관련 자료를 모아둔 Organization for occupational radiation safety in interventional fluoroscopy (<http://orsif.org/>)에서도 유용한 정보를 제공하고 있다. 이탈리아에서는 Healthy cath lab study를 통해 심혈관중재 시술자를 대상으로 단면 조사를 통해 다양한 임상 및 생체 지표, 인지 기능 등의 건강 영향을 평가하고 있다. 프랑스를 비롯한 유럽 여러 나라에서는 심혈관 중재시술자들을 대상으로 한 백내장 연구들이 Occupational cataracts and lens opacities in interventional cardiology (O'CLOC), European epidemiological study on radiation-induced lens opacities among interventional cardiologists (EURALOC), Epidemiological studies of radio-induced cataracts in interventional cardiologists and radiologist (ELDO) 등의 이름으로 활발히 진행되고 있다.

한편 국내에서는 2011-2012년에 방사선 관계 종사자에 대

**Table 2. Cohort studies of medical radiation workers worldwide [11]**

Cohort	Number	Years first worked	Follow-up
U.S. radiologists	6,500	1920-1969	1920-1969
UK radiologists	2,700	1897-1979	1897-1997
U.S. technologists	146,000	1926-1982	1926-1997
U.S. army technologists	6,600	Early 1940s	1946-1974
Chinese x-ray workers	27,000	Before 1950 to 1980	1950-1995
Danish radiation therapy workers	4,200	1954-1982	1968-1985
Japanese technologists	12,200	1918-1971	1969-1993
Canadian radiation workers	73,100	Before 1950 to 1983	1951-1987

한 기반 조사가 실시된 적이 있으며[6], 2017년도에는 중재 시술 의료인에 대한 역학 조사가 실시되었다[4]. 이러한 의료인을 대상으로 한 방사선 역학 연구는 다른 직업군과 구별되는 특별한 중요성을 갖고 있다. 첫째, 의료인은 국제적으로 전체 방사선 종사자 중 절반 이상을 차지하는 가장 큰 집단이며 지속적으로 증가하고 있다. 국내 방사선 관계 종사자들은 현재 총 80,115명으로서 1996년 선량 모니터링 시행 초기에 비해 약 6배나 증가되었다. 둘째, 의료인들이 노출되는 평균 선량은 저선량이지만 다른 직업군에 비해서는 상대적으로 높은 수준이다. 셋째, 다른 직업군에 비해 여성이 많아 기존에 남성 위주의 연구들에서 파악하지 못하였던 여성 고유의 건강 영향들을 살펴볼 수 있으며 성별 방사선 노출의 차이 및 감수성 차이 등의 연구를 가능하게 한다. 넷째, 직업적 노출은 장기간 저노출의 형태로서 단지 직업군만이 아니라 일반인들의 방사선 노출 형태를 반영해 줄 수 있어 연구 결과의 활용 가능성이 넓다. 이러한 특성들은 의료인들에게 발생되고 있는 직업적 방사선 노출에 따른 사고들에 대한 실무적 관리와 더불어 의료인을 대상으로 한 방사선 역학 연구의 중요성을 강조하고 있다.

### 직업적 방사선 노출에 의한 건강 영향

방사선은 발견 초기부터 의료용으로 많이 활용되었기 때문에 방사선에 의한 의료인의 건강 영향 연구는 다른 직업군보다도 오랜 역사를 갖고 있다. 영국에서는 1897년도부터 학회에 등록된 영상의학과 의사들에 대해 100년에 걸쳐 추적 조사한 역학 연구가 진행된 바 있으며 40년 이상 근무한 영상의학과 의사들의 암사망 위험도가 유의하게 증가되었지만 전체 사망률은 일반인보다 감소하였다고 보고한 바 있다[7].

미국에서도 1920년에서 1969년까지 영상의학회 회원으로 등록된 의사들을 추적 조사하여 전체 암, 백혈병, 피부암, 폐암, 심혈관계 질환 등으로 인한 사망 증가를 이미 1940년대부터 보고한 바 있다[8]. 그 동안 역학 연구들을 통해서 방사선 노출과 관련성이 제기된 주요 건강 영향들로는 악성 종양, 백내장, 갑상선 질환, 심혈관계 질환, 피부손상, 신경계 질환 등 다양하다(Table 3).

방사선 노출에 의한 건강 영향은 일반적으로 악성 종양과 유전 영향은 확률론적 영향(stochastic effect)으로, 그 외 건강 영향은 결정론적 영향(deterministic effect) 혹은 조직반응(tissue reaction)으로 나누어 설명되고 있다. 확률론적 영향은 방사선 노출량 증가에 비례하여 질병이 발생하는 반면 결정론적 영향은 일정 용량 이상(문턱선량)의 방사선에 노출될 때 거의 필연적으로 발생하는 것으로 설명된다. 따라서 악성 종양의 경우 비록 저선량에 노출된다고 하더라도 전체 인구 집단에서 암의 발생 확률이 높아지기 때문에 노출을 가능한 최소화시키는 것이 매우 중요하다. 비암성 만성 질환의 경우 국내 대부분의 의료인들이 문턱선량 이하의 저선량 방사선에 노출되고 있는 것을 고려하면 크게 우려할 수준은 아닐 것으로 판단된다. 그러나 비록 평균적인 선량은 낮다고 하더라도 선량한도 초과자들이 존재하고 있으며 개인 선량계에 기록되지 않은 선량들을 고려한다면 비암성 질환에 대한 평가 및 예방도 중요하다고 할 수 있다. 최근에는 확률적 및 결정론적 영향이 서로 엄격히 구별되어 있는 것이 아니며 비암성 질환들(심혈관계 질환 및 백내장 등)의 경우도 확률론적 특성을 함께 갖고 있다고 알려져 있다. 따라서 이러한 이분법적 구별은 방사선에 의한 건강영향을 이해하기 위한 과정이며, 향후 많은 연구들이 축적되면 보다 입체적으로 설명될 수 있을 것으로 기대된다.

**Table 3. Selected adverse health effects related with radiation exposure [9]**

Category	Diseases
Cancer	
Sufficient evidence	Salivary gland, esophagus, stomach, colon, lung, bone, basal cell of the skin, female breast, kidney, urinary bladder, brain and central nervous system, thyroid, leukemia (excluding CLL)
Positive association	Rectum, liver, pancreas, ovary, prostate, NHL, multiple myeloma
Non-cancer	
Cardiovascular system	Cerebrovascular disease, ischemia heart disease, atherosclerosis
Eye	Posterior subcapsular cataract
Thyroid	Nodules, cysts, hypothyroidism, hyperthyroidism
Others	Dermatitis, skin ulcer, hair loss, abortion, birth defects, disturbance of neurocognitive functions, mental disorders, etc

## 악성 종양

### 직접 관찰된 암 위험도

국제암연구소(International agency for research on cancer)에서는 방사선(엑스선 및 감마선)을 발암성 확인 물질(carcinogenic to humans, group 1)로서 분류한 바 있다[9]. 암종별로는 침샘암, 식도암, 위암, 대장암, 폐암, 골암, 피부기저세포암, 여성 유방암, 신장암, 방광암, 뇌종양 및 중추신경계암, 갑상선암, 백혈병(만성 림프구성 백혈병 제외) 등이 인체 발암성에 충분한 근거(sufficient evidence)가 있는 것으로 평가되었으며, 직장암, 간암, 췌장암, 난소암, 전립선암, 비호치킨림프종, 다발성 골수암 등은 인체 발암성이 양관연성(positive association)으로 관찰되었다. 현재 만성 림프구성 백혈병은 방사선 노출과 관련성이 없는 것으로 간주되고 있으나 일부 연구들에서는 관련성이 보고되기도 하며 이에 대한 논란이 지속되고 있다[10].

방사선을 취급하는 의료인들에 대한 코호트 연구들이 미국, 캐나다, 영국, 덴마크, 중국, 일본 등에서 진행되고 있으며 악성 종양과 관련하여 많은 결과를 보고하였다[11]. 미국 영상의학과 전문의 및 방사선사에서는 전체 암 사망 및 백혈병 사망 위험도가 증가하였으며 일본 방사선사 및 중국의 의료 방사선 종사자(의사 및 방사선사)들에서도 일반인보다 높은 전체 암 및 백혈병 발생을 보고하였다. 미국 방사선사 코호트 연구에서는 백혈병, 유방암, 피부암의 발생이 방사선 직업력 및 노출과 유의한 관련성을 보였다. 한편 갑상선 암 발생은 일부 직업력과는 관련성이 유의하였으나 방사선량과의 유의한 선량-반응관계는 보이지 않았으며 폐암 및 뇌종양 위험도와는 유의한 관련성이 없었다. 백혈병 사망률의 증가는 주로 1950년도 이전에 종사한 초기 종사자인 경우, 오래 종사한 경우일수록 위험도가 증가하였다. 또한 염색체의 손상 및 전좌의 유전자 변이 빈도가 직업적 방사선 노출이 많은 미국 방사선사들에서 높게 나타났다. 최근에는 사망 자료 연계를 통해 미국 중재시술사들 중 1940년대 이전 의과대학을 졸업한 경우 백혈병 사망 상대 위험도가 정신과 의사들과 비교하였을 때 유의하게 높았음을 보고하기도 하였다[12].

한편 국내 진단방사선 관계 종사자들 중 1996-2011년 동안 피폭 선량 관리센터에 등록된 약 9만 명의 의료인들을 대상으로 암 위험도를 조사한 바 있다(Table 4). 총 1,099명의 사망자가 2015년까지 발생되었으며 이를 근거로 한 표준화

암 사망비를 산출한 결과 전체 암사망을 비롯하여 대부분의 각 개별 암종에 대한 위험도가 일반인보다 유의하게 낮았다. 그러나 전체 사망률을 보정한 이후에는 백혈병, 대장암, 위암 등의 위험도가 상대적으로 유의하게 높았다. 이러한 결과는 의료인들의 전체적인 사망 수준이 일반인에 비해 낮지만 특정 사망 원인들은 직종의 특정 요인들과 관련될 수 있다는 것을 의미한다. 이 코호트에서 2013년도까지 발생한 총 2,192명의 암발생 자료를 근거로 한 표준화 암 발생비는 남성에서 0.88로 유의하게 낮은 반면 여성에서는 1.10으로 유의하게 증가하였다. 암종별로는 남성의 경우 갑상선암, 전립선암, 신장암이 유의하게 증가하였고 위암, 간암, 폐암 등이 유의하게 감소하였으며 여성의 경우 갑상선암, 유방암, 뇌종양이 유의하게 증가하였다. 그러나 방사선에 의한 암발생에 대한 초과 상대 위험도는 남녀 모두 유의한 관련성을 보이지 않았다. 향후 많은 의료인들이 추가로 코호트에 참여하고 충분한 추적 기간을 통해서 방사선 노출과 건강에 대한 보다 분명한 국내 자료들이 제시될 수 있을 것으로 기대된다.

국내 의료인에서 갑상선 암 발생이 높게 관찰된 것이 방사선에 의한 것인지 혹은 일반인보다 검진을 많이 함으로써 과다 진단된 것인지에 대해서는 보다 심층적인 조사가 필요하다. 진단 방법의 변화가 갑상선암의 급격한 증가에 분명히 기여하는 부분이 있지만 그것만으로는 갑상선 암의 증가를 모두 설명할 수는 없다[13]. 따라서 비록 의료인이 일반인보다 더 많은 검진을 한다고 하더라도 그것이 곧 증가된 갑상선 암 위험도를 전부 설명하지는 못한다. 최근 보고된 국제 원전 종사자 연구에서는 직업적 방사선량 증가에 따라 갑상선 암으로 인한 사망이 유의하게 높았다[14]. 특히 갑상선 암 위험도는 다른 장기보다도 노출시 연령에 민감하여 어린 나이에 노출될수록 위험도가 증가하며 연령증가에 따라 감소한다. 따라서 의료인에서 증가된 갑상선암의 원인을 파악하기 위해서는 직업적 방사선 노출뿐 아니라 다른 환경요인들, 특히 어린 시절의 의료 방사선 노출력 등이 깊이 있게 조사되어야 한다.

### 예측된 암 위험도

방사선 노출에 의한 암 위험도는 생애 암 위험도(lifetime attributable risk)라는 지표를 통해 제시되기도 한다. 이것은 상대 위험도를 나타내는 용어들(odds ratio, relative risk)과는 달리 인구집단에서 위험도의 절대값에 대한 정보를 제공하는 의미에서 중요하다. 또한 기존 역학 연구에서 오랜 기

**Table 4. Standardized mortality ratio (SMR), standardized incidence ratio (SIR), and excess relative risk (ERR) for cancer by gender among diagnostic radiation workers in Korea**

	Male		Female	
	Observed	SMR (95% CI)	Observed	SMR (95% CI)
All cancers	398	0.61 (0.55-0.67)	56	0.68 (0.53-0.89)
Leukemia	17	0.98 (0.61-1.57)	4	0.80 (0.30-2.13)
	SIR		SIR	
	Observed	(95% CI)	Observed	(95% CI)
All cancers	1,320	0.88 (0.83-0.93)	776	1.10 (1.03-1.18)
Leukemia	36	1.38 (0.97-1.88)	2	0.21 (0.04-0.66)
Thyroid	249	1.84 (1.62-2.07)	415	1.24 (1.13-1.37)
	ERR		ERR	
	Observed	(95% CI)	Observed	(95% CI)
All cancers (excluding thyroid)	1,018	0.16 (-0.19-0.60)	325	0.18 (-0.95-1.31)

SMR, standardized mortality ratio; SIR, standardized incidence ratio; ERR, excess relative risk; CI, confidence interval.

간에 걸쳐 정보를 얻는 것에 반해 현재 노출량을 근거로 시의 적절하게 위험도를 평가할 수 있다는 장점이 있다. 산출된 생애 기여 암 위험도 값은 문턱없는 선형비례 모델(linear no-threshold model, LNT) 및 일정한 노출 시나리오에 근거한 개인별 위험 수준을 말해준다. 이러한 위험도 산출은 방사선량의 노출값만으로는 제시하지 못하는 건강위험도에 대해 다른 시각의 결과를 제공할 수 있다. 즉 직업적 방사선 노출량의 경우 대체로 여성이 남성보다 적게 보고되는 경우들이 많지만 여성이 남성보다 단위 방사선량에 의한 암 위험도가 크기 때문에 건강 위험도 결과는 반대로 나타나는 경우들이 많다. 이러한 경우 보건학적으로 우선 관리되어야 할 대상 집단이 남성에서 여성으로 달라질 수 있으므로 건강 위험도를 평가하는 것은 중요하다.

생애 기여 암 위험도는 BEIR VII 보고서[15]에서 미국인에게 적용하여 산출한 바 있으며 최근 세계보건기구에서는 후쿠시마 사고로 인한 암 위험도 평가 시에 적용한 바 있다 ([http://www.who.int/ionizing\\_radiation/](http://www.who.int/ionizing_radiation/)). 미국 국립암연구소에서는 방사선에 의한 생애 기여 암 위험도 산출을 위해 RadRAT이라는 프로그램을 개발하여 웹사이트에 공개하고 있으며 전 세계적으로 활용되고 있다(<https://radiationcalculators.cancer.gov/radrat/>). 한편 생애 기여 암 위험도는 수명이 길어질수록 증가하여 같은 크기의 방사선 위험도라 할지라도 개발도상국이 선진국보다 적게 나타날 수 있다는 단점이 있다. 따라서 절대값인 생애 기여 암 위험도가 기저암 발생 위험도에 비해서 방사선 노출로 인해 추가된 위험도가 얼마나 차지하는지를 살펴보는 생애 분율 위험도를 함께 살펴보는 것이 중요하다. 국내

에서도 이를 활용하여 인터벤션 영상의학과 전문의들이 현재의 직업적 방사선량에 65세까지 지속적으로 피폭된다면 남성의 생애 기여 암 위험도는 10만 명당 970명, 여성의 경우 1,560명, 남성의 생애 분율 위험도는 1.78%, 여성은 3.83%로서 산출된 바 있다[4].

#### 저선량 방사선의 암 위험도

방사선이 발암 물질이라는 것은 국제암연구소를 비롯하여 전 세계적으로 인정하고 있으며 선량 반응 관련성에 대해서도 문턱 없는 선형비례(LNT) 모델이 가장 합리적이라고 (비록 완전하지는 않지만) 동의되고 있다. 방사선 연구에서 LNT 모델을 둘러싼 많은 논쟁이 계속되고 있지만 최근 미국 방사선방호협회(NCRP)에서도 LNT 모델의 사용이 방사선 방호 목적에 가장 적합하다고 정리된 바 있다[16]. 따라서 아무리 적은 선량이라도 그 선량값에 비례하는 만큼의 위험도는 이론적으로 존재하게 된다. 즉 비록 1 mSv의 저선량이라고 해서 안전하다는 것을 의미하지 않으며 이 만큼의 위험도가 존재한다는 것이다. 다만 이렇게 낮은 피폭선량에서 생길 수 있는 암 위험도는 다른 많은 위험 요인들에 의해서 생길 수 있는 암 위험도에 비해서 매우 낮은 수준인 것이라고 이해하는 것이 바람직하다. 이때 개인별 위험도(individual risk)가 작다는 것이 인구 집단에서의 위험도(population risk)를 무시하는 것과 동일시되어서는 안 된다. 방사선 노출이 증가함에 따라 누가 암에 걸리고 걸리지 않는지는 개인적 차원의 우연(variation)에 의해서 결정될 수 있지만 인구 집단 차원에서 보면 암 발생 확률이 높아지는 것은 분명한 사실이기 때

문이다.

기존에 100 mSv 미만의 방사선 노출에 의해서는 건강 영향이 없다고 표현되는 경우가 종종 있으나 이는 잘못된 것이다. 위험이 없는 것이 아니라 아직 잘 모르거나 위험을 확인되기 어려운 것이다. 위험이 낮은 것, 아직 잘 모르는 것 그리고 위험이 없다는 것에는 큰 차이가 있어 분명히 구별하여 사용하는 것이 필요하다. 최근에는 여러 노출 형태의 낮은 선량에서도 역학적으로 암 위험도가 증가된다는 직접적인 증거(direct evidence)들이 보고되고 있어 이러한 구분은 더욱 중요하다. 작은 위험도에 대해 불필요하게 방사선에 대한 공포를 갖는 것은 바람직하지 않다. 동시에 작은 위험도라는 것이 위험도 자체가 없다는 것은 아니라는 것을 올바르게 인식하고 합리적으로 비교 판단할 수 있는 것이 중요하다.

## 암 이외의 질환

### 심혈관계 질환

고선량의 방사선에 노출되는 방사선 치료(예를 들어 유방암 환자)의 경우 심혈관계 질환을 증가시킨다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 그러나 일본 원폭 생존자 연구를 비롯해서 최근 의료 및 직업적 방사선 노출군을 대상으로 한 연구들에서 저선량 노출임에도 불구하고 심혈관계 질환 특히 뇌졸중과 허혈성 심질환 등의 위험을 높인다는 역학적 결과들이 계속 보고되고 있다[17]. 따라서 최근 저선량 방사선에 의한 건강 영향으로서 심혈관계 질환의 위험성이 많은 주목을 받고 있다. 비록 기전에 대한 논란이 계속되고 있지만 심혈관계 질환도 악성 종양과 같이 문턱선량이 없는 확률론적 영향의 특성이 있는 것으로 제기되고 있다. 비록 심혈관계 질환이 확률론적 특성이 있다고 하더라도 방사선량당 초과 위험도 값은 악성 종양의 위험도보다 낮기 때문에 현재 국내 의료인들이 받는 선량을 고려한다면 예측된 악성 종양의 위험도가 낮으면 심혈관계 질환의 위험도는 더 낮을 것으로 예상된다. 그러나 심혈관계 질환의 큰 규모를 고려하면 낮은 위험도라고 하더라도 전체 인구 집단에서 차지하는 중요성은 크다고 할 수 있다.

의료인에서의 직업적 방사선 노출과 심혈관계 질환 연구로 대표적인 것은 미국 방사선사 코호트 연구로서 초기에 방사선 작업을 시작한 방사선사들이나 중재시술을 하는 경우 상대적으로 뇌졸중 사망 및 발생 위험이 유의하게 증가된 것을 보고된 바 있다[18], 한편 이탈리아 심혈관 중재시술자를

대상으로 한 연구에서는 중재시술자가 비중재시술 의료인보다 경동맥내중막 두께가 유의하게 증가되었다[19]. 또한 심혈관계 질환의 예측인자중 하나인 백혈구 텔로미어(telomere)의 길이가 방사선 중재시술자에서 유의하게 짧아진 것도 관찰된 바 있다.

### 백내장

수정체는 방사선에 가장 민감한 기관 중 하나로서 오래전부터 방사선 노출과 백내장(수정체 혼탁)에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 기존에는 국제 방사선 방호 위원회에서 0.5 Gy의 문턱선량을 가진 결정론적 영향으로 규정하였으나 점차 역치 선량이 감소하고 있으며 더 나아가서 확률론적 영향의 특성을 갖고 있는 것으로 알려지고 있다[20]. 수정체 혼탁의 유형 중 특히 방사선에 의한 후낭하(posterior sub-capsular) 백내장이 방사선 노출과 밀접한 관련성을 가진 것으로 보고되고 있으나 핵 백내장과는 관련성은 아직 분명하지 않다. 선량에 많이 노출될수록 잠재 기간이 짧아지는 것으로 보고되고 있으나 그 범위가 수년에서 수십 년으로 매우 넓은 것으로 알려지고 있다.

방사선과 백내장과의 관련성은 여러 직업군들에서 보고된 바 있으며 의료인의 경우는 주로 중재시술 의사 및 방사선사를 대상으로 보고되고 있다. 그중 가장 대표적인 것은 프랑스에서 40여 개 의료기관의 심혈관 중재시술 의사들을 대상으로 실시되고 있는 O'CLOC 연구로서 백내장 관련 위험 요인들을 보정한 후에도 후낭하 혼탁의 위험이 약 4배 증가된 결과를 보고하였다[21]. 백내장이 없는 약 3만 5천명의 미국 방사선사를 약 20년간 추적 관찰한 코호트 연구에서는 직업적 방사선에 의한 백내장 발생이 Gy당 약 2배의 초과 상대 위험도를 보고한 바 있다[22]. 한편 심혈관계 중재시술자를 대상으로 시술 건수에 따른 피폭 선량 예측 및 노출에 따른 백내장 발생 위험도 예측 프로그램이 웹 인터페이스에서 다양한 시나리오에 따른 위험도가 산출될 수 있도록 개발되어 있다 (InterCardioRisk 프로그램: <http://intercardiorisk.creal.cat/>).

### 갑상선 질환

갑상선의 악성 종양에 대해서는 많이 연구되었으며 분명한 선량 반응 관련성이 보고되고 있으나 비암성 질환에 대해서는 상대적으로 덜 알려져 있다. 비암성 갑상선 질환들은 악성 종양보다 유병률이 높으며 질병 자체를 정의하는 것이 상대적으로 어렵고 진단 방법에 따라 유병 및 발생률이 크게 달라질 있다. 따라서 갑상선 질환의 결과들은 각 인구집단별

로 직접 비교하기 어렵기 때문에 방사선에 의한 초과 절대 위험도보다는 초과 상대 위험도 지표로 비교하고 있다. 그동안 보고된 연구들에 의하면 갑상선결절, 갑상선기능항진증 및 저하증 등이 방사선 노출과 관련성을 보인 반면 자가 면역 갑상선 질환은 관련성이 적은 것으로 알려져 있다[23]. 방사선 노출로 인한 기전은 아직 분명하지 않으나 혈관 손상 및 면역 반응 등이 제시되고 있다. 그러나 악성 종양 이외의 질환에 대한 방사선과의 관련성 크기와 선량 반응 관련성은 아직 잘 밝혀져 있지 않다. 또한 이러한 결과들은 대부분 고 선량의 방사선에 노출된 환자, 어린이, 혹은 일본 원폭 생존자 등을 대상으로 한 것들로서 의료인을 대상으로 한 연구는 매우 적다. 최근 대만 의사들이 일반인보다 갑상선암, 갑상선기능저하증, 갑상선염 등의 위험도가 높았다고 보고된 바 있다[24].

#### 기타

그 외 방사선 노출에 의한 다양한 건강 영향들이 보고되고 있으나 의료인들을 대상으로 한 연구는 매우 제한적이다. 방사성 물질을 취급하는 의료인들의 단면 조사에서 혈액학적 소견 이상과 갑상선자극호르몬의 증가가 유의하게 관찰된 바 있으며, 중재시술을 하는 의료인들에서 피부염, 피부 궤양, 탈모를 비롯하여 갑상선 질환 및 우울증의 유병률 증가, 후각 기능과 신경인지 기능 저하, 염색체 이상, 미소핵 형성, 면역 기능 이상 등이 보고된 바 있다. 한편 일본 원폭 생존자 연구에서는 방사선에 많이 노출될수록 호흡기 질환 및 소화기 질환의 사망 위험도가 상대적으로 증가되었음을 보고하였으며 그 외 지방간, 이상지질혈증, 헤모글로빈 감소, 백혈구수 증가, 면역 기능 감소, 성장 및 지적장애 등 다양한 건강 영향과의 관련성들이 보고되었다(<http://www.rerf.or.jp/>).

#### 의료 노출로 인한 건강 영향

최근 들어 방사선을 사용한 의료 이용량이 급증하고 있어 전 국민적으로 중요한 보건학적 문제로 부각되고 있다. 의료인들에서도 직업적 방사선뿐 아니라 일반인과 같이 개인적인 의료 검사나 치료로 인해 추가적으로 방사선에 노출될 수 있다. 미국 방사선사 코호트 연구에 의하면 염색체 변이의 유의한 증가가 직업적 노출과는 별개로 개인적인 의료 방사선 노출로 인해서도 독립적으로 나타났[25]. 대체로 의료용 방사선량은 직업적 선량보다 많아 직업적 방사선 노출에 의한 효과를 올바르게 살펴보기 위해서라도 의료 방사선 노출량을 파악하여 보정할 필요가 있다. 향후 직업적, 의료적, 환

경적 방사선 노출량을 함께 평가하여 방사선에 의한 건강 영향을 종합적으로 살펴보는 것이 필요하다.

## 방사선 역학의 이해

### 건강 근로자 효과

의료인들의 사망 및 질병 수준은 일반 인구와 비교할 때 더 낮게 나타나는데 이것은 의료인뿐 아니라 대부분의 직업군에서도 비슷하게 나타나는 현상이다. 이것을 건강 근로자 효과(healthy worker effect)라고 하며 고용 단계에서 장애나 질병이 있는 사람보다 건강한 사람들이 뽑힐 확률이 더 높은 것과 건강한 사람들이 계속 직장인으로 남게 되고 건강하지 못한 사람은 일을 그만두게 되는 현상에 의해 발생하는 일반적인 현상이다. 따라서 일반인구집단과 비교한 표준화 사망비 혹은 표준화 발생비의 지표는 방사선의 건강 위험도를 직접 설명해주는 지표가 아니라는 것을 이해할 필요가 있다. 그런데 영국 영상의학과 의사들의 100년에 걸친 사망률 추적 연구에서 관찰된 낮은 사망 위험도를 마치 직업적 방사선 노출이 건강에 유익한 것처럼 잘못 해석되어 논쟁이 되기도 하였다[26].

건강 근로자 효과를 극복하기 위해서는 인구 집단을 오래 추적하거나, 일반인이 아닌 다른 의료인 집단과 건강 수준을 비교하거나, 적절한 보정 방법을 적용하는 것이 중요하다. 최근 국내 방사선 관계 종사자들에서 표준화 사망비가 일반인보다 낮은 암 위험도를 보여 주었지만 건강 근로자 효과에 의한 전체적인 낮은 사망률을 보정하게 되면 여러 악성종양들이 일반 인구 집단보다 상대적으로 높은 위험도 값을 보였다. 이러한 결과는 비록 의료인이 일반인보다 건강한 편이지만 특정 질환의 경우 의료인이 갖는 직업 및 생활적 특성들과 연관될 수 있다는 것을 말해준다.

### 교란 효과

방사선에 의한 건강 영향을 역학적으로 접근할 때 흔히 부딪치는 주제는 방사선 이외에 많은 교란 변수(confounder)들을 어떻게 통제할 수 있느냐와 관련된 내용이다. 이러한 주제는 위험도 크기가 작은 저선량 방사선 연구에서 특히 중요하다. 그러나 교란 변수가 되기 위해서는 방사선 노출뿐 아니라 건강 영향과도 동시에 관련성이 있어야 한다. 즉 흡연이 폐암의 위험 인자인 것은 분명하지만 만약 방사선 노출과 관련성이 없다면 교란 변수로 작용할 수 없다. 만약 방사



선에 노출되는 사람들이 흡연을 덜 한다면 오히려 흡연이 반대 방향의 교란 효과(negative confounding)를 보일 수도 있다 [27]. 흡연은 건강에 미치는 영향이 커서 방사선의 영향을 평가할 때 반드시 교란 효과를 평가해야 할 요인이다. 반면 의료 및 환경 방사선은 직업적 방사선 노출 영향을 파악하는데 중요한 교란 효과를 보이지는 않는 것으로 보고된 바 있다 [28]. 국내 방사선 관계 종사자 코호트 연구에서도 직업적 방사선 노출 영향을 파악하는데 있어서 CT 검사를 받은 경험을 제외하고 다른 의료방사선 노출력들은 유의하게 교란 효과를 나타내지 않았다.

역학 연구에서 교란 변수를 파악하고 통제하는 것은 쉽지 않은 과정이다. 실제로 인구 집단을 대상으로 한 역학 연구에서는 여러 변수들이 서로 연관되어 있는 경우가 많아 실험 실적 연구와 같이 각 변수들을 완벽하게 분리해서 조사할 수 없다. 따라서 역학 및 보건학에서는 이를 극복하기 위해 교란 변수를 파악하기 위한 방법 그리고 만약 교란 변수가 발견되면 이를 통제하여 보다 합리적인 결과들을 산출하기 위한 방법론들이 개발되어 적용하고 있다. 따라서 방사선과 건강 영향 간의 관찰된 연관성을 단순히 교란 효과로 간주하는 것은 과학적이지 못하고 자칫 잘못된 결론을 유도할 수도 있다.

### 불확실성

방사선의 위험도를 산출하는데 있어서 불확실성(uncertainty)이 존재하며 이러한 요인과 해결 방법을 찾아나가는 것은 방사선 연구 분야에서 중요하다. 여러 불확실성의 요인들 중 특히 인구 집단이 다르므로 인한 위험도 전이값(risk transfer)이 가장 중요하다. 따라서 보다 다양한 인구 집단별 역학 연구들을 실시하여 위험도 값을 산출하는 것이 불확실성을 줄이기 위해 중요하다. 측정된 선량값이 어떤 특정 시점만의 노출을 반영하는 것이기 때문에 그것을 근거로 실제 누적 노출량을 추정하는 과정에서도 불확실성이 존재한다. 생애 암 위험도 산출의 경우에는 오랜 기간 같은 가정을 설정하기 때문에 수십 년에 걸친 암 발생률의 변화, 인구학적 특성의 변화, 암 치료율 및 조기 진단의 변화 등 모델 설정에 영향을 주는 요인들이 변화될 수 있다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해서는 다양한 시나리오를 설정하고 여러 연구들을 종합하는 것이 필요하다. 불확실성은 모든 연구에서 필연적으로 발생하는 것으로 불확실성의 존재가 연구의 잘못됨을 의미하는 것은 아니다. 불확실성을 줄이려는 노력도 중요하지만

불확실성의 특성을 파악하고 그것이 결과에 어떠한 영향을 줄 것인지를 해석하는 것이 더욱 중요하다[29].

### 맺음말

방사선은 질병을 진단하고 치료하는데 매우 중요하게 활용되고 있다. 동시에 방사선은 의료인이 업무상 노출되는 여러 유해 인자들 중 인체 발암 유발 물질로서 확인된 인자로 방사선 노출로 인한 크고 작은 건강상의 피해들을 발생시키고 있다. 의료인들이 환자들에 대한 진단과 치료를 위해 자신이 방사선에 노출되는 것을 감수하여 보고하지 않은 피해 사례들을 고려하면 건강 문제는 알려진 규모보다 클 것으로 판단된다. 또한 의료인들은 개별 시술시 환자보다 적은 방사선에 노출되고 있지만 매일 반복적으로 평생 받는 총 누적량은 개별 환자들보다도 높을 수 있다. 의료인의 직업적 방사선 노출은 시술받는 환자들의 의료 노출과 비례하므로, 직업적 방사선 노출을 감소시키는 것은 의료인의 건강을 위해서 뿐만 아니라 궁극적으로 일반인의 방사선 노출 감소에도 기여할 수 있다. 따라서 의료 시술에서 방사선을 가능한 범위에서 최소한으로 노출시키자는 as low as reasonably achievable (ALARA) 원칙을 적용하는 것이 중요하다. 그리고 방사선의 관리에서는 불확실성이 있다고 하더라도 위험이 예측되는 경우 미리 예방하자는 사전 예방주의 원칙(precautionary principle)을 적용하는 것도 중요하다. 현재는 이미 잘 알려져 있지만 1960년대에 방사선에 의한 백혈병 유발기전이 저선량에서 불확실하여 문턱 선량의 존재가 논란이 되었을 때 국제 방사선방호위원회(ICRP)에서 아무리 적은 선량이라도 그 만큼의 직선적인 위험도를 갖는다고 간주한 것도 이러한 원칙이 적용된 사례라고 볼 수 있다[30]. 방사선 역학연구들은 다른 학문분야와 구별되는 인구집단에서의 결과를 제공한다는 특성을 갖고 있으며, 이러한 역학적 결과들은 우리 사회에서 방사선에 대한 올바른 이해와 균형 잡힌 활용에 중요한 기여를 하고 있다.

**중심 단어:** 방사선; 병원; 의료인; 악성종양; 직업적 노출

### REFERENCES

1. Centers for Disease Control & Prevention. 2016 Report Occupational Radiation Exposure in Diagnostic Radiology in Korea [internet]. Osong (KR): Centers for Disease Control

- & Prevention, c2017 [cited 2018 May 10]. Available from: <http://www.cdc.gov>.
- Nuclear Safety And Security Commission. 2016 NUCLEAR SAFETY YEARBOOK [internet]. Seoul (KR): Nuclear Safety And Security Commission, c2017 [cited 2018 May 10]. Available from: <http://www.nssc.go.kr/>.
  - Kim J, Cha ES, Choi Y, Lee WJ. Work procedures and radiation exposure among radiologic technologists in Sout Korea. *Radiat Prot Dosimetry* 2018;178:345-353.
  - Lee WJ. A cohort enrollment of medical interventional radiation workers. Osong: Centers for Disease Control & Prevention, 2018.
  - Ko S, Kang S, Ha M, et al. Health effects from occupational radiation exposure among fluoroscopy-guided interventional medical workers: a systematic review. *J Vasc Interv Radiol* 2018;29:353-366.
  - Lee WJ. Occupational radiation exposure and health effects in a cohort of diagnostic radiation workers in Korea. Osong: Ministry of Food and Drug Safety, 2013.
  - Berrington A, Darby SC, Weiss HA, Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997. *Br J Radiol* 2001;74:507-519.
  - Ulrich H. The incidence of leukemia in radiologists. *N Engl J Med* 1946;234:45.
  - International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans Volume 100D. 1st ed. Lyon: WHO, 2012.
  - Hamblin TJ. Have we been wrong about ionizing radiation and chronic lymphocytic leukemia? *Leuk Res* 2008;32:523-525.
  - Yoshinaga S, Mabuchi K, Sigurdson AJ, Doody MM, Ron E. Cancer risks among radiologists and radiologic technologists: review of epidemiologic studies. *Radiology* 2004;233:313-321.
  - Linet MS, Kitahara CM, Ntowe E, et al. Mortality in U.S. physicians likely to perform fluoroscopy-guided interventional procedures compared with psychiatrists, 1979 to 2008. *Radiology* 2017;284:482-494.
  - Ward EM, Jemal A, Chen A. Increasing incidence of thyroid cancer: is diagnostic scrutiny the sole explanation? *Future Oncol* 2010;6:185-188.
  - Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, et al. Site-specific solid cancer mortality after exposure to ionizing radiation: a cohort study of workers (INWORKS). *Epidemiology* 2018;29:31-40.
  - National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII phase 2. 1st ed. Vol. 7. Washington D.C: National Academies Press, 2006.
  - Boice JD Jr. The linear nonthreshold (LNT) model as used in radiation protection: an NCRP update. *Int J Radiat Biol* 2017;93:1079-1092.
  - Little MP. Radiation and circulatory disease. *Mutat Res* 2016;770(Pt B):229-318.
  - Rajaraman P, Doody MM, Yu CL, et al. Incidence and mortality risks for circulatory diseases in US radiologic technologists who worked with fluoroscopically guided interventional procedures, 1994-2008. *Occup Environ Med* 2016;73:21-27.
  - Andreassi MG, Piccaluga E, Gargani L, et al. Subclinical carotid atherosclerosis and early vascular aging from long-term low-dose ionizing radiation exposure: a genetic, telomere, and vascular ultrasound study in cardiac catheterization laboratory staff. *JACC Cardiovasc Interv* 2015;8:616-627.
  - Seals KF, Lee EW, Cagnon CH, Al-Hakim RA, Kee ST. Radiation-induced cataractogenesis: a critical literature review for the interventional radiologist. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2016;39:151-160.
  - Jacob S, Boveda S, Bar O, et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multi-center observational study. *Int J Cardiol* 2013;167:1843-1847.
  - Chodick G, Bekiroglu N, Hauptmann M, et al. Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists. *Am J Epidemiol* 2008;168:620-631.
  - Ron E, Brenner A. Non-malignant thyroid diseases after a wide range of radiation exposures. *Radiat Res* 2010;174:877-888.
  - Chen TY, Hsu CC, Feng IJ, et al. Higher risk for thyroid diseases in physicians than in the general population: a Taiwan nationwide population-based secondary analysis study. *QJM* 2017;110:163-168.
  - Little MP, Kwon D, Doi K, et al. Association of chromosome translocation rate with low dose occupational radiation exposures in U.S. radiologic technologists. *Radiat Res* 2014;182:1-17.
  - Doll R, Berrington A, Darby SC. Low mortality of British radiologists. *Br J Radiol* 2005;78:1057-1058.
  - Richardson DB, Wing S. Evidence of confounding by smoking of associations between radiation and lung cancer mortality among workers at the Savannah River Site. *Am J Ind Med* 2011;54:421-427.
  - Fournier L, Cléro E, Samson E, Caër-Lorho S, Laurier D, Leuraud K. Impact of considering non-occupational radiation exposure on the association between occupational dose and solid cancer among French nuclear workers. *Occup Environ Med* 2018;75:199-204.
  - National Council on Radiation Protection and Measurements. Uncertainties in the Estimation of Radiation Risks and Probability of Disease Causation. Bethesda: Natl Council on Radiation, 2012.
  - International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the ICRP. Oxford: Pergamon Press, 1966.