

체르노빌 사고의 건강 영향

정미선 · 진영우[†]

한국수력원자력(주) 방사선보건연구원 방사선영향연구팀

Health Effects of the Chernobyl Accident

Meeseon Jeong and Young-Woo Jin[†]

Radiation Health Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Seoul, Korea

ABSTRACT

The Chernobyl accident was a terrible catastrophe for humanity. Scientists are in concurrence about an increase of thyroid cancer incidence among children, but not among adults, because even areas less contaminated by radiation have also reported an increase in the incidence of thyroid cancer. In this case, the rise might be due to a screening effect. There is no convincing evidence that the incidence of leukemia and solid cancer has increased among the exposed populations, but it still remains a controversial issue. Additionally, apparent evidence of decreased fertility and increased hereditary effects have not been observed in the general population. WHO suggested 4,000 people could have died or may die in the future among emergency workers and residents of the most contaminated areas, while Greenpeace insists there will be 93,080 victims around the world. The radiation dose due to Chernobyl was mainly low, so if its health effects are to be found, more long-term and well-designed research will be needed.

Key words: Chernobyl accident, Health effect, Cancer

I. 서 론

2011년 3월 11일 규모 9.0의 대지진과 이은 지진 해일의 충격으로 일본 후쿠시마 제 1 발전소의 원자로 4기가 연속적으로 폭발하는 사고가 발생했다. 실제 현장 복구를 위한 방사선작업 노출자의 선량은 잘 관리되고 있지만, 많은 사람들이 방사선 노출과 그로 인한 장기적 건강영향에 대한 우려를 나타내었다. 이런 우려의 배경중 가장 중요한 것이 체르노빌 사고 및 그 장기적 건강영향 결과다.¹⁾

1986년 4월 26일 체르노빌의 원전 4호기가 폭발하였다. 그로인해 러시아, 벨로루시, 우크라이나 3개국의 국민 중 일부가 자연배경선량의 수배에 이르는 방사선에 피폭되었으며, 실제로 어린이들의 갑상선

암이 폭발적으로 증가된 것이 확인되었다. 많은 연구 결과 그 외의 암발생의 증가에 대해서는 학문적으로 확인된 바는 없지만 사람들의 불안이 점차 가중되었으며 유엔에서는 이를 확인하기 위해 전문가들로 포럼을 구성하였다. 그 결과 현재까지는 명확한 이상을 발견할 수 없으며 향후 계속적인 추적이 필요하다는 의견을 제시한 바가 있다.

방사선이 인체에 미치는 영향에 대해 많은 사람들이 과연 진실은 무엇인가에 대한 의문을 가지고 있다. 어떻게 하여야 정확한 정보를 통해 합리적 판단을 내릴 수 있을 것인가? 이를 위한 과학적 방법론 중 하나가 위험도 평가이다. 이것은 위험 요인에 대한 정확한 인식, 그 위험요인의 노출 평가, 위험요인의 양적 증가에 따른 반응의 평가 그리고 이를 중

[†]**Corresponding author:** Radiation Health Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Seoul 132-703, Korea, Tel: +82-2-3499-6660, Fax: +82-2-3499-6669, E-mail: ywjn@khnp.co.kr
Received: 17 August 2011, Revised: 21 August 2011, Accepted: 22 August 2011

합한 위험 특성의 결정을 말한다.

이런 과정을 통해 우리는 “특정 위험요소가 우리의 건강에 문제를 일으킬 수 있을 것인가?” 라는 인과관계에 대한 결정을 하게 된다. 이런 인과관계의 결정은 대개 과학적 문헌의 검토를 통해 이루어지게 되는데 일반적인 과정은 다음과 같다. 먼저 시간적 선후관계이다. 일단 모든 원인은 결과에 선행한다. 또한 특정 위험이 특정 이상을 일으킨다면 그 결과는 많은 연구에서 확인되어야 하며, 그 관련성 정도가 일정 수준 이상이어야 하고 양의 증가에 따른 위험의 증가가 확인되어야 한다. 이런 모든 가정은 생물학적으로 타당한 이유가 제시될 때 보다 강화된다. 이렇게 정리된 위험은 향후 위험의 관리와 사회적 정보교환으로 이어진다. 일반적으로 사회적 정보교환 시에는 위험과 관련한 내용에 대한 충분한 정보를 숙지해야 하며, 정직하고 성실한 자세가 요구된다. 따라서 이 글의 목적은 일본 사고의 영향을 예측하기 위하여 과학계와 일반인에게 체르노빌 사고가 건강에 미친 영향관련 정보를 제공하는 것이다.

여기서는 갑상선, 백혈병 등의 방사선 유발암, 백내장, 심혈관 질환 등의 암외질환, 그리고 사망에 대한 체르노빌 연구 결과를 고찰하고자 한다. 이를 위해 문헌 고찰 및 전문가 평가가 시행되었다.

II. 갑상선암

체르노빌 사고로 인한 방사성 요오드의 낙진은 피해 지역의 환경을 오염시켰고 이 지역에 거주하던 주민들은 공기 호흡과 오염된 음식물(특히 우유)의 섭취를 통해 갑상선이 상당한 양의 방사선에 노출되는 결과를 초래했다. 갑상선은 방사선에 의한 암 발생에 가장 민감한 장기(腸器) 조직으로 알려져 있으며, 특히 소아들은 가장 저항력이 약한 것으로 밝혀졌다. 체르노빌 사고 이후 진행된 여러 연구 결과들에서 사고 당시 방사선에 노출된 소아들에게 갑상선암이 상당한 수준으로 증가된 것으로 보고되었다.

2005년 발표된 유엔 체르노빌 포럼 전문가 그룹의 보고서에 의하면, 1992년-2000년 동안 벨로루시, 러시아 및 우크라이나에서 사고당시 18세 미만 연령의 소아와 청소년에게서 약 4,000건의 갑상선암이 진단되었으며,³⁾ 그 중 벨로루시에서 8명, 러시아에서 1명이 사망한 것으로 나타났다. 하지만 체르노빌

포럼 전문가 그룹은 소아와 청소년에게서 갑상선암 발생이 증가하였다는 데에 의견 일치를 보였으나, 체르노빌 주변 오염지역의 성인 거주자 및 이주자와 사고 직후 발전소 정화작업자들에 대해서는 갑상선암 증가에 대해 의견 차이를 보이고 있다.

체르노빌 사고로 오염된 지역의 소아와 청소년 및 성인 거주자, 이주자 그리고 정화작업자에 대해 실시된 갑상선암 역학연구 결과들을 고찰하기 위해 의학전문 검색 웹사이트 PubMed를 통해 연구사례들을 조사하였다. 검색어로는 ‘체르노빌’, ‘갑상선암 위험’이 이용되었다.

먼저, 우크라이나, 벨로루시, 러시아의 인구집단을 대상으로 갑상선암에 대해 실시된 역학연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. Heidenreich 등(2000)은 우크라이나 소아의 갑상선암에 대한 연구에서 방사선 노출 후 시간이 경과함에 따라 절대초과위험도(Excess Absolute Risk, EAR)가 증가함을 보였다.³⁾ Jacob 등(2000)은 벨로루시 소아에게 발생한 갑상선암 연구를 실시하였으며,⁴⁾ 단위선량당 EAR 추정치 크기가 Ron 등(1995)의 통합자료 분석에 의한 외부노출 후 위험도의 절반 정도임을 보였지만 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다.⁵⁾ Shibata 등(2001)은 벨로루시의 고멜지역 학생 21,601명에 대한 연구에서,⁶⁾ 1986년 이후에 출생한 소아에 대한 1986년 이전에 출생한 소아의 상대위험도를 교차비(Odds Ratio, OR) 121(95% 신뢰구간: 9, 3100)로 추정하였다. 비록 교차비가 높게 추정되기는 하였지만 그 신뢰구간을 살펴보면 이 추정치에 대한 불확실성이 상당한 수준임을 알 수 있다. 한편, Shakhhtarín 등(2002, 2003)은 러시아 브란스크 지역의 젊은이들을 대상으로 요오드 결핍현상과 갑상선 선량 및 갑상선암 위험의 상관관계에 대한 연구를 실시하였으며,^{7,8)} 갑상선 선량이 증가함에 따라 상대초과위험도(Excess relative risk, ERR)가 통계적으로 유의하게 증가함을 보였다. 또한 다른 지역에 비해 심각한 요오드 결핍증을 가진 지역 사람들의 ERR이 정상적인 요오드 섭취를 하는 지역에 비해 거의 두 배에 가까운 수준으로 나타나 방사선량과 요오드 결핍의 교호작용 효과가 있음을 확인하였다. Tronko 등(2002)은 우크라이나 소아들에서 1986년-2000년 동안 진단된 1876건의 갑상선암에 대한 사례보고를 통해,⁹⁾ 0-4세 연령 그룹에서 가장 높은 갑상선암 증가가 있었음을 보였다.

1990년 이후에도 이들 가장 어린 연령층에서 지속적인 갑상선암 발생의 증가가 관측되었다. 한편 Tronko 등(2003)은 갑상선암으로 수술을 받은 우크라이나 소아들에 대한 연구에서 가장 심각하게 오염된 6개 지역에서 암발생률이 0.5 Gy 이상의 높은 갑상선 선량과 관련이 있음을 보고하였다.¹⁰⁾ Davis 등(2004)은 러시아 브란스크 지역의 소아와 청소년에게 발생한 갑상선암의 환자-대조군 연구를 통해 방사선량이 증가함에 따라 갑상선암 위험도가 통계적으로 유의하게 증가함($p = 0.009$)을 보였다.¹¹⁾ Ivanov 등(2002)은 러시아의 정화작업자들에 대한 갑상선암 위험이 통계적으로 유의하게 증가하였음을 보였다(SIR = 4.33, 95% 신뢰구간: 3.29, 5.60).¹²⁾ 하지만 단위선량당 ERR은 -2.23 (95% 신뢰구간: $-4.67, 0.22$)으로 방사선량과 위험도의 선량-반응 관계는 관측되지 않았다. Ivanov 등(2003)은 러시아 브란스크 지역의 청소년과 성인 거주자의 갑상선암 연구에서 남성과 여성 모두 갑상선암의 잠재기간 이전과 이후에 대한 표준화발생비(SIR)가 증가하였음을 보였다.¹³⁾ 하지만 단위선량당 ERR의 증가는 관측되지 않았다. 한편, Cardis 등(2005)은 러시아와 벨로루시의 사고 당시 15세 미만의 소아에서 I-131에 노출 후 갑상선암 위험을 연구하였으며 방사선량과 위험과의 강한 선량-반응관계를 확인하였다.¹⁴⁾ 또한 방사선 유발 갑상선암 위험은 요오드 결핍지역에서 약 3배가 더 높으며(RR = 3.2, 95% 신뢰구간: 1.9, 5.5), 칼륨 요오드의 보충이 위험도를 3배 정도 낮추는 것으로 나타났다(RR = 0.34, 95% 신뢰구간: 0.1, 0.9). Jacob 등(2006)은 체르노빌 사고로 영향을 받은 우크라이나와 벨로루시의 거주자 1034명에 대한 갑상선암 연구에서 초과위험도 추정치¹⁵⁾가 Ron 등(1995)의 외부노출에 의한 갑상선암 위험도⁹⁾와 비슷함을 보였다. 한편 Rahu 등(2006)은 에스토니아와 라트비아의 체르노빌 정화작업자에 대한 연구에서 갑상선암과 뇌종양에서 통계적으로 유의한 초과발생을 보고하였다.¹⁶⁾ 하지만 이들 부위에서 방사선량과 암위험도의 선량-반응 관계는 관측되지 않았다. Hatch 등(2009)은 최근 자궁내 태아 피폭에 대한 단면적 연구결과 통계적으로 유의하지는 않지만($p = 0.12$) Gy 당 11.66의 갑상선암 초과 비차비를 보여주었다.¹⁷⁾

한편, 체르노빌 사고로 인한 소아의 건강 영향을 규명하기 위하여 구 소비에트 연방 정부의 요청에

의해 1991년 Sasakawa 프로젝트가 시작되었다. 체르노빌 사고로 오염된 우크라이나, 벨로루시, 러시아의 5개 지역 소아 약 16만명에 대해 방사선량 측정, 갑상선 검진 및 혈액검사가 실시되었다. 1991-1996년 동안 실시된 1단계 프로그램에서 5개 지역 중 가장 오염이 심각한 벨로루시의 고멜 지역에서 갑상선 결절과 갑상선암의 발견률이 가장 높게 나타났으며 5개 지역의 어느 곳에서도 백혈병의 증가는 관측되지 않았다.¹⁸⁾

Zablotska 등(2011)은 체르노빌 사고 당시 18세 미만이었으며, 사고당신 갑상선의 방사선량을 추정할 수 있는 벨루로시의 11,970명에 대해 연구한 결과 5 Gy 이상 노출집단에서 2.15(95% CI 0.81-5.47)의 초과비차비를 보고하였으며, 특히 미만성 갑상선종을 가진 집단에서 유의한 증가를 나타냄을 보고하였다.¹⁹⁾

우크라이나, 벨로루시, 러시아를 제외한 다른 유럽 국가들에서의 갑상선암에 대한 연구 결과를 살펴보면 Table 1과 같다. 체르노빌 사고로 직접적인 영향을 받은 3개국을 제외한 유럽 국가들에서의 갑상선암 관련 연구 문헌을 요약한 것이다.²⁰⁾

Peter(2002)는 헝가리 소아의 갑상선암 발생에서 체르노빌과 관련된 변화는 관측되지 않는다고 밝혔으며,²¹⁾ Ivan 등(2002)은 루마니아에서 체르노빌 사고 영향에 대한 여러 전문분야의 역학 연구들은 아직도 제한적이며, 따라서 전반적인 결론은 유의하지 않다고 밝혔다.²²⁾ Szybinski 등(2003)은 폴란드의 요오드 결핍지역에서의 갑상선암 발생에 관한 연구에서 인구집단에서 가장 위험도가 높은 그룹은 1980년 요오드 예방법 중지이후 요오드 결핍과 1986년 체르노빌 사고후 방사선에 노출된 20-40세 사이의 가임기 여성이라고 주장하였다.²³⁾ Gomez 등(2004)은 오스트리아의 요오드 결핍지역인 카린시아에서의 갑상선암 연구에서 갑상선암 발생에서 젊은 연령층에서 관찰된 변화는 체르노빌 방사성 낙진에 의한 오스트리아 토양의 오염과 1991년 시작된 갑상선종 예방프로그램에서 식탁용 소금의 증가된 요오드화에 관련되었을 수 있음을 보고하였다.²⁴⁾ 또한 Verger 등(2003)은 체르노빌 사고로 가장 심각하게 오염된 프랑스 동부지역의 사고 당시 15세 미만의 소아에 대한 갑상선암 연구에서 선형무문턱(linear no threshold) 가설하에 1991-2015년 동안 갑상선암의 자연발생 예

Table 1. Summary of thyroid cancer studies in other European countries, except Ukraine, Belarus, Russia after the Chernobyl accident (Jin *et al.*, 2008)

Author, Country of study	Design, (Period)	Population, Subjects	Results
Rahu <i>et al.</i> Estonia, Latvia	Cohort study (1986-1998)	Chernobyl cleanup workers Estonia (4,786 men), Latvia (5,546 men)	Cases of thyroid (SIR = 7.06, 95% CI = 2.84-14.55; n = 7), mainly based on Latvian data, there was no evidence of a dose response Excess of thyroid cancer cases observed may have been due to screening
Tondel <i>et al.</i> Sweden	Cohort study (After 1986)	Inhabitants in Sweden (n=1,137,106)	ERR per 100 nGy/hr : 0.042 (95% CI: 0.001, 0.084)
Catelinois <i>et al.</i> Eastern France	Descriptive (1991-2007)	Area of France most exposed to the fallout	Predicted excess thyroid cancer cases : 5 (90% UI: 1-15)-63 (90% UI: 12-180)
Tondel <i>et al.</i> North Sweden	Cohort study (1988-1996)	All people 0-60 years (n=1,143,182)	ERR=0.11 per 100 kBq/m ² (95%CI:0.03-0.20)
Roszkowska <i>et al.</i> Poland	Descriptive (1980-2000)		Slightly increase of incidence of thyroid cancer was observed in the population of 0-15
Murbeth <i>et al.</i> Czech Republic	Descriptive (1976-1999)	Cancer Registry	From 1990 on, the thyroid cancer incidence of 2.6% per year (95%-CI:1.2-4.1, p=0.0003)
Gomez <i>et al.</i> Austria	Descriptive (1984-2001)	Thyroid carcinoma incidence in Carinthia, a former iodine-deficient, goiter-endemic region (n=550,000)	The annual incidence rate increased by 8.05% in females and 11.6% in males Thyroid carcinoma cases younger than 40 years of age accounted for 22.6%, with a rate increase of 18% per year in young males
Niedziela <i>et al.</i> Western Poland	Descriptive (1996-2000)	Children, adolescents	Thyroid carcinoma is developing more intensively when compared, both to other parts of Poland and to previous statistics (2000 vs. 1985; P<0.002)
Verger <i>et al.</i> France	Descriptive	All people (<15 y) : living in eastern France at the time of the Chernobyl accident	Under LNT hypothesis, 1.3-22 excess thyroid cancer cases were predicted for the 1991-2000
Szybinski <i>et al.</i> Poland	Descriptive	Areas of iodine deficiency	A very specific group at risk on the population level were women aged 20-40 years in the reproductive age exposed to iodine deficiency after suspension of iodine prophylaxis in 1980 and to radiation after the Chernobyl accident in 1986.
Peter ³⁶⁾ Hungary	Descriptive	Hungarian children	Changes connected with Chernobyl has not occurred.

측치 1342명에 대해 11.2-55.2명의 초과발생을 예측하였으며,²⁵⁾ 이러한 위험도 계산 결과는 체르노빌 낙진이 프랑스에서 갑상선암의 전반적인 증가를 설명할 수는 없으며 역학적 연구를 통해 그러한 초과를 논증하기는 불가능하다고 주장하였다. Niedziela 등(2004)은 폴란드 서부 지역의 소아와 청소년에서 갑상선암이 진행 중이거나 증가하는 현상이 나타남을 보고하고 1994년 이후 젊은 연령층에서 발생하고 있는 갑상선암에 있어서 요오드 결핍과 체르노빌 사고로 인한 방사선 노출이 가장 중요한 요인일 수

있다고 주장하였다.²⁶⁾ Murbeth 등(2004)은 체르노빌 사고로 인해 상당한 양의 방사성 낙진을 받은 체코 공화국에서 1990년부터 모든 연령층에서 일정하게 갑상선암의 기대하지 않은 증가가 있다고 보고하였다.²⁷⁾ Roszkowsk 등(2004)은 1980-2000년 동안 폴란드의 갑상선암에 대한 연구에서 0-15세 인구집단에서 갑상선암 발생이 약간 증가하였으며 이는 체르노빌 사고 후 방사선 노출에 기인되었을 수 있다고 주장하였다.²⁸⁾ 한편 Tondel 등(2004)은 체르노빌 사고 이후 스웨덴 북부지역에서 실시한 코호트 연구에

서 백혈병과 갑상선암에 대해 분명한 초과 발생은 없다고 보고하였다.²⁹⁾ Catelinois 등(2005)은 체르노빌 낙진으로 가장 심각하게 영향을 받은 프랑스 동부지역에서의 갑상선암 위험에 관한 연구에서 초과암 발생을 5(90% 신뢰구간: 1, 15)~63(90% 신뢰구간: 12, 180)으로 예측하였다. Tondel 등(2006)은 스웨덴에서 증가된 악성종양의 발생은 체르노빌 사고 낙진과 관련되었을 가능성이 있다고 보고하였다.³⁰⁾

체르노빌 사고로 발생한 갑상선암 역학연구는 현재 크게 방사선량의 문제와 암진단 과정의 문제를 가지고 있으며 그 결과 생태학적 연구밖에 진행될 수 없었다.

또한 방사선량의 문제는 분석적 역학연구의 시작이라고 할 수 있는 개인별 방사선량의 확보로 해결되어야 한다. 일본의 원폭 생존자 연구도 지속적인 선량의 보정을 통해 방사선 영향에 대한 연구가 계속 이루어져왔다. 따라서 갑상선암 뿐만 아니라 체르노빌의 기타 영향 연구를 위해서 반드시 개별 방사선량의 확보는 선결되어야 할 과제라고 생각된다.

더불어 체르노빌 사고로 갑상선암 발생률이 증가하였다는 연구결과해석에서 집단검진을 통한 잠재암의 발견 효과가 반드시 고려되어야 할 것이다. 현재까지의 연구들은 이런 부분에 제한을 가질 수밖에 없는 생태학적 디자인이 대부분이었다. 실제 체르노빌 사고 전후의 갑상선암에 대한 많은 연구들이 주요 오염지역 이외의 국가에서도 시행되어 왔으며, 흥미로운 것은 많은 연구들에서 갑상선암의 증가가 체르노빌 사고로부터 비롯되었을 수 있다는 토의를 하고 있다는 것이다. 우리가 흔히 인과성을 논할 때 그 생물학적 가능성과 기존 연구와의 일치성 여부를 따지게 되는데 위에서 언급한 연구들은 이 두 측면 모두에서 타당성이 떨어진다고 볼 수 있다.

현재까지 분석학적 연구로는 한두편 정도의 환자-대조군 연구가 있었으나, 최근 장기간 추적 연구를 할 수 있는 코호트가 구축되고 이를 통한 연구가 진행되기 시작하였으므로 이 결과를 통해 최종적인 결론을 이끌어낼 수 있을 것으로 기대한다.

III. 백혈병

방사선과 백혈병의 관련성은 너무나 잘 알려져 있

는데 이는 일본의 원자폭탄 생존자(이하 원폭생존자) 연구로부터 주로 비롯되었으며, 백혈병은 방사선에 노출에 의해 가장 민감하게 발생한다. 그러나 원폭 생존자들의 경우 일시적인 고선량 노출에 의한 결과이므로 만성적인 저선량 하에서의 결과에 대해서는 논란이 존재한다.²⁾

여기서는 체르노빌 사고의 효과에 대해 태아의 노출, 소아의 노출, 성인의 노출에 대해 살펴보고자 한다. 태아의 노출에 대해서는 몇 개의 생태학적 연구만이 존재하며 서로 상충되는 결과를 보여주고 있다. 그리스 연구그룹은 출생에 따른 코호트로 “노출”과 “비노출” 군의 백혈병 발생률을 비교하여 방사성 낙진이 높았던 지역에서 2.6배 높은 것으로 보고하였다.³¹⁾ 그러나 각 노출군의 환자 수가 너무 작았으며 독일의 소아 암 등록사업을 이용하여 오염 지역에 따라 같은 범주(<6 kBq/m², 6-10 kBq/m², >10 kBq/m²)를 적용하여 유사한 접근을 시도한 연구에서는 같은 결과가 나타나지 않았다.³²⁾ Ivanov 등(1998)은 10배 이상의 오염 수준 차이가 나는 벨로루시의 연구를 통해 그리스 연구와 유사한 결과를 보여주었으나 그 경향성이 약했기 때문에 특히 방사선의 역할에 대한 의혹이 제기되었다.³³⁾ 결국 현재까지의 문제는 개인별 선량평가와 분석적 연구가 없는 생태학적 연구의 한계가 명백하다는 것이며, 방사선량이 너무나 낮고 백혈병은 너무나 희귀한 질환이기 때문에 통계적 검정력의 한계 또한 극복하기 어렵다는 것이다.

Parkin 등(1993)은 1987년-1988년과 1980년-1985년의 벨로루시와 우크라이나를 포함한 유럽의 자료를 비교하여 체르노빌과 관련하여 가장 큰 영향을 받은 지역에서 백혈병의 증가가 없었다는 보고를 한 바 있으며,³⁴⁾ 이들은 또한 유럽소아 백혈병-임파암 발생률 연구(The European Childhood Leukemia Lymphoma Incidence Study, ECLIS) 자료의 5년 추적 연구자료로 유사한 분석을 시행하였다. ECLIS는 12개국의 36개 암 등록사업으로부터 15세 이하의 소아 발생자료를 유지하고 있으며 오늘날 가장 크고 통합적인 사업의 하나이다. 이 연구에서는 환경오염 추정치와 오염 식품의 섭취량을 근거로 하여 평균 방사선량이 계산되었다. 그밖에 사고 발생전후 유럽 및 기타 관련국(벨로루시, 우크라이나, 러시아, 핀란드, 스웨덴, 그리스 등)의 소아백혈병 발생률에 대한

조사 결과 체르노빌 사고 발생 후 소아백혈병의 발생률이 높아졌다는 증거는 거의 나타나지 않았으며, 또한 이들 국가의 오염정도와 발생률 증가 사이에는 어떤 상관관계도 나타나지 않았다. 현재까지 분석학적 연구로는 단 한 건의 환자대조군 연구가 있으며 1987년부터 1997년 사이에 우크라이나 일부 지방에서 진단된 272건중 98건에 대하여 분석을 실시하였으며,³⁵⁾ 이들의 골수 방사선량의 평균값은 4.5 mSv였다. 연구결과 10 mSv 이상의 누적 방사선량에 노출된 남아에게서 백혈병의 발생이 통계적으로 유의하게 증가되었다고 보고하였으나 이 결과는 발생사례의 1/3에 대해서만 분석하였으며, 대조군의 비율도 낮았고 또한 선량 측정을 위해 발생자와 대조군을 선택할 때 편차없이 선택하였는지의 여부도 분명하지 않았다. 최근 Noshchenko 등(2010)은 체르노빌 사고시 우크라이나의 방사선 오염지역에 있던 0-5세군중 1987-1997년 동안 발생한 백혈병 환자에 대한 환자대조군 연구를 통해 10 mGy 이상 피폭자에서 백혈병 발생이 2.4배(95% CI 1.4-4.0) 유의하게 증가함을 보고하였다.³⁶⁾

결론적으로 지금까지의 증거들로 볼 때 체르노빌 사고로 인한 방사선 노출로 인해 소아 백혈병 발생률이 증가했다는 결론을 내릴 수는 없다.

성인의 노출 정도는 정화작업자와 그 외 이주민, 주민이 서로 다르므로 각각에 대한 연구가 이루어졌다. Ivanov 등(1996)은 러시아의 정화작업자 143,032명을 9년간 추적하여 분석한 최초의 결과를 발표하였는데 1986-1989년 추적에서 표준화 발생률 113(95% 신뢰구간: 62, 190), 1990-1993년 추적에서 177(95% 신뢰구간: 122, 247) 상대초과 위험도가 Gy 당 4.30이었다.³⁷⁾ Shantyr 등(1997)은 1986-1990년까지 정화작업에 참여한 8,745명을 대상으로 연구를 하였는데 이들의 선량은 0-250 mSv였다.³⁸⁾ 특히 4-10년 사이에 암 발생의 증가가 있는 것으로 나타났으나 이들에서 방사선량과 백혈병 발생률 사이의 관련성은 나타나지 않았으며, 유사한 결과가 정화작업자와 원전산업 종사자 연구에서 나타났는데 이들은 연구군에서 백혈병을 포함한 어떤 혈액 질병의 발생률도 증가하는 현상을 관찰하지 못하였다고 보고하였다.³⁹⁾ 한편 Ivanov 등(2002, 2003)은 총 노출 방사선량이 150-300 mGy인 정화작업자 연구에서 약 두 배의 백혈병 발생률을 보고하였다.^{40,41)} Buzunov 등(1996)은

1986년과 1987년의 우크라이나 정화작업자 174,812명에 대해 연구를 하였으며 1986년 작업자들에서 시간과 발생률의 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않았다.⁴²⁾ 러시아 국립 의학 및 선량 측정 기록사업에 등록된 사람을 대상으로 한 환자대조군 연구 결과 1986년과 1993년 사이에 백혈병(만성 임파구성 백혈병 제외)으로 진단받은 34명을 대상으로 하였는데 노출선량에 많았던 작업자들의 상대위험도가 3.70(95% 신뢰구간: 0.70, 19.66)으로 높게 나타났으나 통계적으로 유의하지 않았다.⁴³⁾ Romanenko 등(2008)은 사고당시 정화작업자를 대상으로 우크라이나에서 nested 환자대조군 연구⁴⁴⁾를 시행하였다. 평균 피폭선량은 76.4(sd 213.4) mGy였으며, Gy 당 3.44(95% CI 0.47-9.78)의 초과상대위험도를 보여 주었다. 만성 및 비만성 임파구성 백혈병의 상대위험도는 각각 Gy당 4.09(95%CI <0-14.41), 2.73(95%CI <0-13.50)이었다. 또한 Kesminiene 등(2008)은 당시 정화작업자를 대상으로 한 환자대조군 연구⁴⁵⁾에서 200 mGy 이상 노출자에게서 전체 혈액암과 백혈병 초과상대위험도가 각각 100 mGy 당 0.6(90%CI-0.02-2.35) 및 0.50(90% CI -0.38-5.7)로 나타남을 보고하였다.

오염정도가 높았던 지역에 거주했던 일반 주민들을 대상으로 한 몇건의 연구가 진행되었는데, Osechinsky 등(1995)은 1979-1993년 사이의 러시아 브란스크 지역중 가장 많이 오염된 여섯 개 지역의 백혈병과 임파암 발생률에 대한 연구를 시행한 결과 사고 전후(1979-1985년과 1986-1993년)의 보통 발생률이 통계적으로 유의하게 증가하였음을 보고⁴⁶⁾하였는데 그 이유로는 농촌지역의 노령인구의 증가가 주요요인으로 나타났으며 소아의 경우에도 오염지역과 기타지역의 차이가 나타나지 않았으며 Ivanov 등(1997)이 칼루가의 오염지역에 대해 시행한 연구⁴⁷⁾와 Bebesheko 등(1997)과 Prisyazhniuk 등(1995)이 우크라이나 지역의 오염지역에서 시행한 연구^{48,49)}에서도 같은 결과가 나타났다.

현재까지 체르노빌 사고로 인한 노출이 백혈병 발생 위험을 증가시켰다는 증가가 있는지에 대한 결론은 그 대상이 정화작업자인지 일반 시민인지에 따라 달라진다. 결론적으로 현재까지 일반 성인에서 노출로 인한 백혈병의 증가는 나타나지 않았다. 향후 정밀한 선량 추정, 진단결과에 대한 확인 과정, 선량

반응에 대한 정밀한 추정 등의 방법론적 개선이 필요하다.

IV. 갑상선암을 제외한 고형암

암은 그 발생률과 치사율의 측면에서 볼 때 가장 흔한 질병 가운데 하나이며, 2000년 한 해 동안 전 세계적으로 1,000만명의 새로운 암 환자가 발생했고 600만 명이 암으로 사망했다.⁵⁰⁾ 한편 고형암은 일반적으로 백혈병과 분리하여 검토되고 있는데 그 이유는 이 둘의 방사선 민감도가 현저히 다르며 최소 잠복기, 방사선량 반응 관계 모델 등이 차이를 보여 주기 때문이다. 아직까지 고형암에 대해서는 갑상선암을 제외하고 특별한 증가 양상을 보여주지 않고 있지만, 잠복기가 일반적으로 10-15년 정도로 알려져 있기 때문에 만약 발생의 증가가 있다면 지금부터 나타나기 시작할 가능성이 있으므로 향후 추적연구가 필요하다.²⁾

유방암은 방사선에 의한 민감한 암종의 하나로 알려져 있으나 아직 학술적 논문을 통해 발표된 결과는 없다. 다만 Prsyazhnyuk(2002)가 우크라이나 등록자료를 바탕으로 분석한 단행본이 있는데,⁵¹⁾ 그는 150,000명의 오염지역 주민에 대한 1993-1997까지의 추적을 통해 표준화 발생비가 1.50(95% 신뢰구간: 1.27, 1.73); 1986년(평균 선량 100-200 mSv)과 1987년(평균 선량 50-100 mSv)의 경우 1990-1997의 표준화 발생비가 1.51(95% 신뢰구간: 1.06, 1.96) 50,000명의 이주자(평균 선량 10-12 mSv)와 30 km 지역주민(평균 선량 20-30 mSv)에서 1990-1997년 추적 결과 1.38의 표준화 발생비(95% 신뢰구간: 1.06, 1.70)를 보여주었다. 이 때 대조군은 우크라이나의 일반 여성을 이용하였는데, 진단의 정확성 문제와 집단 검진의 시행 여부에 따른 보정 등에서 해석시 주의를 요한다.

최근 국제암연구기구와 핀란드 암 등록자료의 협조를 받아 벨로루시와 우크라이나에서 시행된 기술적 연구의 예비결과에 의하면 45세 이전에 노출(평균 누적노출 40 mSv 이상)된 집단에서 비오염지역에 비해 폐경전 유방암 발생율이 유의하게 높게 나타났다. 이 연구는 증상여부에 관계없이 모든 유방암에서 비슷한 결과가 나왔고 국소암과 전신암 모두에서 비슷한 결과가 나왔으므로 표본 추출의 오류로

인한 가능성은 적은 것으로 나타났다.⁵⁰⁾

결론적으로 정화작업자에서의 백혈병 발생과 고선량 노출 주민에서의 폐경전 유방암의 증가 이외에 고형암의 증가에 대한 보고는 없었다. 그러나 잠재기간의 문제 통계적 검정력의 문제 등을 현재도 가지고 있으므로 향후 개별 선량, 충분한 연구집단, 그리고 역학연구의 오류를 극복할 수 있는 분석적 역학 연구를 통해 풀어야 할 것이다.

V. 암 이외의 질환

삶의 질과 관련하여 다양한 암 이외의 질병에 대한 연구들이 진행되어 왔으며, 그 중에 중요하게 다루어지는 부분은 백내장, 심혈관계 질환, 생식 영향과 소아의 건강 문제, 정신적, 심리적 문제와 중추신경계 효과에 대한 것이다.

수정체는 안과 영역 중에서 방사선에 대해 가장 민감한 기관이다. 방사선은 수정체에 혼탁 또는 백내장을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 방사선 백내장은 수정체 피하막 백내장으로 불리는데 선량에 반비례하는 잠재기간을 가지고 있으며, 통상 2 Gy 이상의 노출이 있어야 하는 것으로 알려져 있다.²⁾ 최근 체르노빌과 관련한 아이들에게서 피막하 백내장의 수정체 변화를 보인 연구가 보고 되었다.^{52,53)}

급성방사선에 의해 장기적으로 심혈관계 질병이 생길 수 있음이 알려져 있으며, 조직학적으로 혈관벽에서 방사선에 의한 손상은 동맥경화증과 유사하게 나타난다.²⁾ 일본의 원폭 생존자 연구를 통해 Gy 당 14%의 심혈관 질병의 발생 증가가 있다는 보고가 있으며,⁵⁴⁾ 40세 이전에 노출된 집단에서 심근경색의 초과 상대 위험이 Sv 당 0.17(95% 신뢰구간: 0.08, 0.26)이라는 보고도 있다.⁵⁵⁾ Ivanov 등(2006)은 러시아 국립 의료 및 피폭 기록 시스템을 이용하여 체르노빌 응급작업자를 대상으로 순환기계 질환을 1986-2000년까지 추적한 결과 Gy 당 상대초과위험도가 허혈성 심질환은 0.41(95% CI 0.05-0.78), 일차 고혈압은 0.36(95% CI 0.005-0.71) 그리고 뇌혈관 질환은 0.45(95% CI 0.11-0.80)으로 나타남을 보고한 바 있으며, 뇌혈관질환의 경우 1996-2000 추적 결과는 0.22(95% CI -0.15-0.58)이었다.⁵⁶⁾

한편 Buzunov 등(2001)이 1992-2003년 우크라이나의 임상역학 자료를 분석한 결과 관상동맥질환과

방사선량 사이의 관련성을 발견할 수 없었음을 보고한 바 있는데,⁵⁷⁾ 이 연구에서 전통적 위험 요소들 즉 연령, 흡연, 고혈압, 고콜레스테롤혈증 등은 유의한 결과를 보여주었다.

현재까지의 결과는 러시아의 Ivanov를 제외한 다른 연구자들에서 심혈관계 질환의 증가는 보고되고 있지 않으며, 이 역시 정확한 선량과 질병의 진단이 선결과제로 이루어져야 향후 정확한 분석이 가능할 것으로 생각된다.

UNSCEAR(2001)는 방사선에 의한 생식 영향의 광범위한 검토 연구를 통해 인간에게서 방사선으로 인한 선천적 결손증이나 유전적 질병을 일으킨다는 것이 입증되지 않았다고 결론지었다.⁵⁸⁾ 앞서 Little(1993)은 선천적 기형과 이상 출생 결과와 관련된 체르노빌 연구 전체에 대한 종합적인 검토⁵⁾를 통해 다음 사항을 지적하였다: a) 좀 더 규모가 큰 유럽 연구에서는 다운 증후군에 대한 별도 보고가 확인되지 않았으며 b) 우크라이나와 벨로루시에서 선천성 기형에 대한 변화가 명백하지 않았고 c) 다른 측정 가능한 이상 임신 결과(유산, 주산기 사망, 신생아 체중미달, 성비 전환)에 대해 일관성 있는 증거가 없었으며 d) 불안 때문에 임신중절이나 낮은 출생률과 같은 비간접적 영향의 증가는 있었고 e) 30 km 지역으로부터 대피할 당시 임신 중이었던 여자와 관련된 임신 결과에 대한 데이터는 없다.

Lazjuk 등(1999, 2003)은 무뇌아 등 8개의 범주를 이용한 선천성 기형의 분석을 통해 오염 여부에 관계없이 선천성 기형의 완만한 증가를 보고하였으며,^{60,61)} 선량 반응 경향 또한 나타나지 않았다고 보고하였다. 1983-1999년 사이 선천성 기형으로 등록된 아동은 12,167명이었으며 상대위험도가 0.88(95% 신뢰구간: 0.84, 0.91)로서 오염지역의 선천성 기형이 유의하게 적은 것으로 나타났다. 임신 이전이나 임신 중에 과반수가 훨씬 넘는 부모들에 의한 흡수 선량 범위에서의 체르노빌 연구는 이전의 과학 논문에서 제시한 증거들과 일치하고 있다. 이들은 방사선 노출의 직접적 결과로서 기형이나 유아 사망률의 방사선 관련 증가를 나타내고 있지 않다. 1986년 이래로 오염 지역과 비교 지역 양쪽에서 보고된 자연 기형 정도는 크진 않으나 꾸준히 증가해 왔다. 이는 방사선과 관련되어 보이지 않고 관찰이나 보고가 증가된 결과로 보인다. 급성방사선중후

군 생존자를 제외한 체르노빌 사고로부터 방사선을 받은 작업자에서 수정능력과 관련한 어떤 영향도 없는 것으로 보인다. 오염 지역과 비오염 지역 모두 유아 사망률이 높으며 몇 개의 선택된 지역에서는 매우 높다. 이에 대한 이유는 명확하지 않은데, 사고 시점으로부터의 자료를 고려하면 높은 유아 사망률의 직접적 원인으로 방사선을 지목할 명확한 경향이 보이지 않는다.²⁾ 그러나 이 시점에서 확실한 결론을 내리는 것은 가능하지 않다.

사고와 관련한 정신질환의 주요 관심영역은 스트레스성 질환, 두뇌발달상의 이상, 기질성 뇌질환, 정화작업자들의 자살률이다. 스트레스성 질환의 경우, 근심, 우울증(외상후 스트레스성 증후군 포함)의 심화, 그리고 의학적으로 해명되지 않은 신체적 증상들은 체르노빌 사고 주민들에서 일반인에 비해 많이 나타난다.^{62,63)} 노출지역 주민들에게서 불안 증상이 2배 이상 많이 나타나고, 원인불명의 다양한 신체증상과 주관적인 쇠약증상이 3-4배 많이 나타난다.⁶³⁻⁶⁵⁾ 이러한 증상은 어느 정도는 그들의 건강이 사고의 영향을 받았다는 믿음과 자신의 증상에 대해 의사로부터 체르노빌 관련 건강 문제로 진단받은 사실에 기인한다.^{66,67)}

세계보건기구는 태아 상태에서의 뇌 손상에 관한 국제적인 시범 연구를 했지만, 비오염지역 소아보다 체르노빌 소아들의 정신지체 비율이 높게 나타난다는 단서를 찾지 못했다. 또한 최근에 행해진 일련의 신경심리학 연구에서 태아상태에서 방사선에 노출된 소아의 일반적인 차이점을 밝혀내지 못했다. 흥미롭게도 Litcher와 연구자들의 연구(2000)에서,^{68,69)} 정상 지역 어머니의 7%에 비해, 31%의 피난지역 소아 어머니들은 자식들이 신경심리학 실험에서 별 문제가 없었고, 학업 성적에서 별 이상이 없는데도 불구하고, 자식들의 기억력 손상을 염려한다는 사실을 밝혀냈다. 이는 인지 위험이 정신건강 상태 연구 보고에 중요한 역할을 한다는 사실을 말해준다. Rahu 등(1997)은 자살이 에스토니아 정화작업자들의 주요 사망 원인이 된다는 사실을 보고⁷⁰⁾했으나 다른 나라들의 정화작업자 연구 보고서에서 아직 나타나고 있지 않다.

현재의 가장 큰 문제 중 하나는 스스로를 생존자의 개념으로 보지 않고 희생자로 여김으로서 삶의 의욕 저하 등으로 인한 잘못된 생활습관이며, 이는

체계화된 보건 전략이 필요함을 말해준다.

VII. 결 론

VI. 방사선 노출로 인한 사망률

실제로 사고로 인한 정확한 사망자 수를 정확히 알기는 어렵다. 사고 당시 응급 복구에 참여했던 237명이 급성방사선증후군으로 진단되었으며, 이중 134명이 임상적 검사를 통해 확진되었고, 이들 중 28명이 1986년에 급성방사선증후군으로 사망하였으며, 1987-2004년에 19명이 기타의 이유로 사망하였다. 방사성 낙진에 영향을 받은 일반 주민들에서 급성방사선증후군으로 진단된 사례는 없었다. 0-18세 사이의 4,000여 갑상선암 진단 소아와 청소년 중에, 1% 미만의 환자는 이 질병으로 사망했고, 나머지는 치료를 받고 회복되었다.⁷¹⁾

한편 카디스 등(1996)은 국제방호기구와 UNSCEAR의 암사망 모형에 정화작업자, 이주민, 고오염지역주민의 평균선량을 적용하고 기대수명을 95세로 가정하여 방사선으로 인한 고형암과 백혈병 초과 사망이 4,000명 정도가 될 것으로 추정된 바 있으며,⁷²⁾ 680만명 이상의 오염지역 주민에서, 추정된 초과사망자는 약 5000명이었다. 이 추정치는 이들의 평균 노출 정도인 7 mSv에 근거하여 나온 것인데, 이는 자연 배후 방사선 수준(세계 평균 2.4 mSv)과 거의 차이가 없으므로, 특히 불확실하다. 그러나 그린피스는 피폭인구를 극미량 피폭자를 포함하여 사망 추정자수를 93,080으로 제시한 바 있다(Table 2).²⁰⁾ 최근 ICRP(2007)는 유효선량은 사망자 추정 등과 같은 역학적 연구에 이용될 수 없음을 강조한 바 있다.⁷³⁾ 전체적으로 체르노빌과 관련한 사망에 대해서는 제시된 모든 자료의 정밀한 검토와 지속적인 조사가 필요하다.

일본 원자력발전소 폭발 사고를 계기로 방사선 피폭에 의한 불안감이 높아지고 있는 체르노빌 사고 결과 소아에서의 갑상선암은 이미 발생이 증가한 것으로 확인되었으므로 소아의 갑상선 피폭에 대한 평가가 필요할 것이다. 그 외 성인에서의 갑상선 암 등 고형암 사망률의 전체적인 증가는 아직 나타나고 있지 않지만, 잠복기가 최소 10년에서 평균 20~25년이고, 피폭수준이 그렇게 높지 않은 것을 감안한다면, 미래에 가서야 증가여부를 확인할 수 있을 것이다. 이론적으로 만약 인구 규모가 통계적 분석이 가능한 정도로 크다면 백혈병 환자의 증가 여부를 알아낼 수 있을 것이다. 현재까지 정화작업자에서 백혈병 발생의 증가는 일부 환자대조군연구를 통해 확인되었다. 그러나 현재까지 방사선에 노출된 일반인에서 백혈병의 증가를 발견할 수 없었다. 또한 심혈관 질환 등 만성 질병, 전체 사망위험에 대해서도 현재까지는 유의한 발생증가를 보이지 않고 있다.

결론적으로 원자로 사고로 인한 방사선 피폭은 소아의 요오드 피폭을 제외하면 일반인의 피폭은 낮은 것으로 판단되나, 개별적 영향은 미미하더라도 환경에 대한 어린이, 임산부, 노약자, 그리고 민감한 인구 집단 등을 포함한 공중의 영향은 결코 간과할 수 없는 부분이므로 향후 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.⁷⁴⁾

참고문헌

1. <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11072917-e.html>

Table 2. Some estimations of mortality caused by Chernobyl Catastrophe (Jin *et al.*, 2008)

Affected populations	Estimated period (years)	Illnesses considered	Mortality	Comments
1,2,3	NA	Solid cancers, leukemia	4,000	Conclusion did not fit with the Chernobyl Forum 2005 although the same methodology was used
1,2,3,4	95 10	Solid cancers, leukemia	9,335	95 years for all solid cancers 10 years for leukemia
5	70	Thyroid cancer, other solid cancers and leucosis	93,080	For all deaths figure should be doubled but uncertainty is up to 100%

Affected populations: 1. Liquidators 1986-1987; 2. Evacuees; 3. Residents of highly contaminated areas; 4. Residents of other contaminated areas in Ukraine, Belarus and Russia; 5. Global population.

2. WHO. Report of the UN Chernobyl Forum Expert group "Health" (EGH): Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes. 2005.
3. Heidenreich WF, Bogdanova TI, Jacob P, Biryukov AG, Tronko ND. Age and time patterns in thyroid cancer after the Chernobyl accidents in the Ukraine. *Radiat Res.* 2000; 154: 731-732.
4. Jacob P, Kenigsberg Y, Goulko G, Buglova E, Gerling F, Golovneva A, Kruk J, Demidchik E. Thyroid cancer risk in Belarus after the Chernobyl accident: comparison with external exposures. *Radiat Environ Biophys.* 2000; 39: 25-31.
5. Ron E, Lubin JH, Shore RE, Mabuchi K, Modan B, Pottern LM, et al. Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat Res.* 1995; 141: 259-77.
6. Shibata Y, Yamashita S, Masyakin VB, Panasyuk GD, Nagataki S. 15 years after Chernobyl: new evidence of thyroid cancer. *Lancet.* 2001; 358: 1965-1966.
7. Shakhtarin VV, Tsyb AF, Stepanenko VF, Marchenko LF. Correlation between endemic iodine deficiency and radiation-induced thyroid cancer in children and adolescents. *Vopr Onkol.* 2002; 48: 311-317.
8. Shakhtarin VV, Tsyb AF, Stepanenko VF, Orlov MY, Kopecky KJ, Davis S. Iodine deficiency, radiation dose, and the risk of thyroid cancer among children and adolescents in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl power station accident. *Int J Epidemiol.* 2003; 32: 584-591.
9. Tronko ND, Bogdanova TI, Epstein OV, Oleynik VA, Komissarenko IV, Rybakov SI, et al. Thyroid cancer in children and adolescents of Ukraine having been exposed as a result of the Chernobyl accident (15-year expertise of investigations). *Int J Rad Med.* 2002; 4: 222-232.
10. Tronko ND, Bogdanova TI, Likhtarev IA, et al. Summary of the 15-year observation of thyroid cancer among Ukrainian children after the Chernobyl accident. In: Shibata Y, Yamashita S, Watanabe M, Tomonaga M. editors. Radiation and Humankind. Excerpta Medica. International Congress Series, Elsevier: Amsterdam; 2003. p.91-104.
11. Davis S, Kopecky K, Stepanenko V, Rivkind N, Voilleque P, Shakhtarin V, et al. Risk of thyroid cancer in the bryansk oblast of the russian federation following the chernobyl power station accident. *Radiat Res.* 2004; 162: 241-248.
12. Ivanov VK, Tsyb AF, Petrov AV, Maksoutov MA, Shilyaeva TP, Kochergina EV. Thyroid cancer incidence among liquidators of the Chernobyl accident. Absence of dependence of radiation risks on external radiation dose. *Radiat Environ Biophys.* 2002; 41: 195-198.
13. Ivanov VK, Gorski AI, Maksoutov MA, Vlasov OK, Godko AM, Tsyb AF, Tirmarche M, Valenty M, Verger P. Thyroid cancer incidence among adolescents and adults in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl accident. *Health Phys.* 2003; 84: 46-60.
14. Cardis E, Kesminiene A, Ivanov V, Malakhova I, Shibata Y, Khrouch V, Drozdovitch V, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to I-131 in childhood. *J Natl Cancer Inst.* 2005; 97: 724-732.
15. Jacob P, Bogdanova Ti, Buglova E, Chepurnyi M, Demidchik Y, Gavrilin Y, Kenigsberg J, Meckbach R, Schotola C, Shinkarev S, Tronko Md, Ulanovsky A, Vavilov S, Walsh L. Thyroid cancer risk in areas of ukraine and belarus affected by the chernobyl accident. *Radiat Res.* 2006; 165: 1-8.
16. Rahu M, Rahu K, Auvinen A, Tekkel M, Stengrevics A, Hakulinen T, Boice JD Jr, Inskip PD. 2006. Cancer risk among chernobyl cleanup workers in Estonia and Latvia, 1986-1998. *Int J Cancer.* 2006; 119(1): 162-168.
17. Hatch M, Brenner A, Bogdanova T, Derevyanko A, Kuptsova N, Likhtarev I, Bouville A, Tereshchenko V, Kovgan L, Shpak V, Ostroumova E, Greenebaum E, Zablotska L, Ron E, Tronko M. A screening study of thyroid cancer and other thyroid diseases among individuals exposed in utero to iodine-131 from Chernobyl fallout. *J Clin Endocrinol Metab.* 2009; 94(3): 899-906.
18. Yamashita S, Shibata Y, Hoshi M, Fujimura K. 2002. Chernobyl: Message for the 21st Century. Proceedings of the 6th Chernobyl Sasakawa Medical Cooperation Symposium, Moscow, Russia; 2001. p.30-31.
19. Zablotska LB, Ron E, Rozhko AV, Hatch M, Polyanskaya ON, Brenner AV, Lubin J, Romanov GN, McConnell RJ, O'Kane P, Evseenko VV, Drozdovitch VV, Luckyanov N, Minenko VF, Bouville A, Masyakin VB. Thyroid cancer risk in Belarus among children and adolescents exposed to radioiodine after the Chernobyl accident. *Br J Cancer.* 2011; 104(1): 181-187.
20. Jin YW, Jeong M, Moon K, Yang KH, Lee Bi, Back H, Lee SG, Kim CS. Health effects 20 years after the Chernobyl accident. *Int J Low Radiation.* 2008; 5(3): 263-270.

21. Peter F. Incidence of thyroid disorders in children in Hungary. *Orv Hetil.* 2002; 143: 2867-2873.
22. Ivan A, Azoicai D. Epidemiological aspects and methodological difficulties in establishing the causal relationship of Chernobyl nuclear accident with cancer. *Rev Med Chir Soc Med Nat Iasi.* 2002; 106: 659-664.
23. Szybinski Z, Huszno B, Zemla B, Bandurska-Stankiewicz E, Przybylik-Mazurek E, Nowak W, Cichon S, Buziak-Bereza M, Trofimiuk M, Szybinski P. Incidence of thyroid cancer in the selected areas of iodine deficiency in Poland. *J Endocrinol Invest.* 2003; 26: 63-70.
24. Gomez Segovia I, Gallowitsch HJ, Kresnik E, Kumnig G, Igerc I, Matschnig S, Stronegger WJ, Lind P. Descriptive epidemiology of thyroid carcinoma in Carinthia, Austria: 1984-2001. *Thyroid.* 2004; 14: 277-286.
25. Verger P, Catelinois O, Tirmarche M, Cherie-Challine L, Pirard P, Colonna M, Hubert P. Thyroid cancers in France and the Chernobyl accident: risk assessment and recommendations for improving epidemiological knowledge. *Health Phys.* 2003; 85: 323-329.
26. Niedziela M, Korman E, Breborowicz D, Trejster E, Harasymczuk J, Warzywoda M, Rolski M, Breborowicz J. A prospective study of thyroid nodular disease in children and adolescents in western Poland from 1996 to 2000 and the incidence of thyroid carcinoma relative to iodine deficiency and the Chernobyl disaster. *Pediatr Blood Cancer.* 2004; 42: 84-92.
27. Murbeth S, Rousarova M, Scherb H, Lengfelder E. Thyroid cancer has increased in the adult populations of countries moderately affected by Chernobyl fallout. *Med Sci Monit.* 2004; 10: 300-306.
28. Roszkowska H, Gorynski P. Thyroid cancer in Poland in 1980-2000. *Przegl Epidemiol.* 2004; 58: 369-76.
29. Tondel M, Hjalmarsson P, Hardell L, Carlsson G, Axelson O. Increase of regional total cancer incidence in north Sweden due to the Chernobyl accident? *J Epidemiol Community Health.* 2004; 58: 1011-1016.
30. Catelinois O, Laurier D, Verger P, Rogel A, Colonna M, Ignasiak M, Hemon D, Tirmarche M. Uncertainty and sensitivity analysis in assessment of the thyroid cancer risk related to Chernobyl fallout in Eastern France. *Risk Anal.* 2005; 25: 243-252.
31. Petridou E, Trichopoulos D, Dessypris N, Flytzani V, Haidas S, Kalmanti M, et al. Infant leukaemia after in utero exposure to radiation from Chernobyl. *Nature.* 1996; 382: 352-353.
32. Steiner M, Burkart W, Grosche B, Kaletsch U, Michaelis J. Trends in infant leukaemia in West Germany in relation to in utero exposure due to Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys.* 1998; 37: 87-93.
33. Ivanov EP, Tolochko GV, Shuvaeva LP, Ivanov VE, Iaroshevich RF, Becker S, Nekolla E, Kellerer AM. Infant leukemia in Belarus after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys.* 1998; 37: 53-55.
34. Parkin DM, Cardis E, Masuyer E, et al. Childhood leukaemia following the Chernobyl accident: the European Childhood Leukaemia-Lymphoma Incidence Study (ECLIS). *Eur J Cancer.* 1993; 29: 87-95.
35. Noshchenko AG, Zamostyan PV, Bondar OY, Drozdova VD. Radiation-induced leukemia risk among those aged 0-20 at the time of the Chernobyl accident: a case-control study in the Ukraine. *Int J Cancer.* 2002; 99: 609-618.
36. Noshchenko AG, Bondar OY, Drozdova VD. Radiation-induced leukemia among children aged 0-5 years at the time of the Chernobyl accident. *Int J Cancer.* 2010; 127(2): 412-426.
37. Ivanov V. Health status and follow-up of the liquidators in Russia. In: *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference, Minsk, Belarus; 1996.* p.861-870.
38. Shantyr I, Makarova NV, Saigina EB. Cancer morbidity among the emergency workers of the Chernobyl accident. In: *Low Dose of Ionizing Radiation: Biological Effect and Regulatory Control, IAEA-TECDOC-976, IAEA-CN-67/115; 1997.* p.366-336.
39. Tukov A, Dzagoeva LG. Morbidity of atomic industry workers of Russia who participated in the work of liquidating the consequences of the Chernobyl accident. In: *Medical Aspects of Eliminating the Consequences of the Chernobyl Accident. Moscow, SSSR, Central Scientific Research Institute; 1993;* p.97-99.
40. Ivanov VK, Gorski AI, Tsyb AF, Khait SE. Radiation risks of leukemia incidence among Russian emergency workers, 1986-1997. In: *Radiation and Risk Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry. Obninsk. Moscow. Chapter 4: <http://phys4.harvard.edu/~wilson/radiation/Si2002/TITLE/html>. 2002.*
41. Ivanov VK, Gorski AI, Tsyb AF, Khait SE. Post-Chernobyl leukemia and thyroid cancer incidence in

- children and adolescents in Bryansk region: an evaluation of risks. *Voprosy onkologii* (in Russian). 2003; 49(4): 445-449.
42. Buzunov VN, Omelyanetz N, Strapko et al. Chernobyl NPP accident consequences cleaning up participants in Ukraine - health status epidemiologic study - main results. 1996. p.871-878 In: *The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference*, Minsk, Belarus; 1996.
 43. Konogorov AP, Ivanov VK, Chekin SY, Khait SE. A case-control analysis of leukemia in accident emergency workers of Chernobyl. *J Environ Pathol Toxicol Oncol*. 2000; 19: 143-151.
 44. Romanenko AY, Finch SC, Hatch M, Lubin JH, Bebesko VG, Bazyka DA, Gudzenko N, Dyagil IS, Reiss RF, Bouville A, Chumak VV, Trotsiuk NK, Babkina NG, Belyayev Y, Masnyk I, Ron E, Howe GR, Zablotska LB. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks. *Radiat Res*. 2008; 170(6): 711-720.
 45. Kesminiene A, Evrard AS, Ivanov VK, Malakhova IV, Kurtinaitis J, Stengrevics A, Tekkel M, Anspaugh LR, Bouville A, Chekin S, Chumak VV, Drozdovitch V, Gapanovich V, Golovanov I, Hubert P, Illichev SV, Khait SE, Kryuchkov VP, Maceika E, Maksyoutov M, Mirkhaidarov AK, Polyakov S, Shchukina N, Tenet V, Tserakhovich TI, Tsykalo A, Tukov AR, Cardis E. Risk of hematological malignancies among Chernobyl liquidators. *Radiat Res*. 2008; 170(6): 721-735.
 46. Osechinsky IV, Martirsov AR, Zingerman BV, et al. Leukemia and lymphomas in population of Bryansk oblast after the Chernobyl accident. in: *Health Consequences of the Chernobyl and other Radiological Accidents. Materials of the International Conference*, WHO, Geneva, 1995.
 47. Ivanov VK, Tsyb AF, Nilova EV, Efendiev VF, Gorsky AI, Pitkevich VA, Leshakov SY, Shiryayev VI. Cancer risks in the Kaluga oblast of the Russian Federation 10 years after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys*. 1997; 36: 161-167.
 48. Bebesko VG, Bruslova EM, Klimentenko VI, Dyagil IS, Drodova VD, et al. Leukemias and lymphomas in Ukraine population exposed to chronic low dose irradiation. In: *Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control. Contributed papers. International Conference held in Seville, Spain, November 1997 IAEA-TECDOC-976*; 1997. p.337-338.
 49. Prisyazhniuk A, Gristchenko V, Zakordonets V, Fouzik N, Slipeniuk Y, Ryzhak I. The time trends of cancer incidence in the most contaminated regions of the Ukraine before and after the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys*. 1995; 34: 3-6.
 48. IARC. International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. In: *Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma (γ) Radiation, and Neutrons* Lyon, France. 2002.
 49. Prisyazhnyuk A, et al. Cancer incidence in Ukraine after the Chernobyl accident. In *Chernobyl: Message for the 21st Century. Proceedings of the Sixth Chernobyl Sasakawa Medical Cooperation Symposium*. New York: Elsevier; 2002.
 50. IARC Final Technical Report. CONTRACT N : FIGH-CT-2002-00215 (under the 5th Framework Euratom Programme) GENE-RAD-INTERACT Generadiation interactions: Their Influence on Pre-menopausal Breast Cancer Risk after Chernobyl. 2005.
 51. Prisyazhnyuk A, et al. Cancer incidence in Ukraine after the Chernobyl accident. In *Chernobyl: Message for the 21st Century. Proceedings of the Sixth Chernobyl Sasakawa Medical Cooperation Symposium*. New York: Elsevier; 2002.
 52. Day R, Gorin MB, Eller AW. Prevalence of lens changes in Ukrainian children residing around Chernobyl. *Health Phys*. 1995; 68: 632-642.
 53. Fedirko PA, Khilinska V. YU. The state of the lens in children residing in the zone of radioactive contamination. Analysis of results of a long-term observation. *Oftalmol Zh*. 1998; 2: 155-158.
 54. Wong FL, Yamada M, Sasaki H, Kodama K, Hosoda Y. Effects of radiation on the longitudinal trends of total serum cholesterol levels in the atomic bomb survivors. *Radiat Res*. 1999; 151: 736-746.
 55. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res*. 2003; 160: 381-407.
 56. Ivanov VK, Maksyoutov MA, Chekin SY, Petrov AV, Biryukov AP, Kravchenko JS. The risk of radiation-induced cerebrovascular disease in Chernobyl emergency workers. *Health Phys*. 2006; 90(3): 199-207.
 57. Buzunov VA, Strapko NP, Pirogova YEA, Krasnikova LL, Kartushin GI, Voychulene YUS, Doma-

- shevskaya TYE. Epidemiology of non-cancer diseases among Chernobyl accident recovery operation workers. *Journal of Radiation Medicine. Russian*. 2001; 3: 9-25.
58. UNSCEAR. Hereditary Effects of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2001 Report to the General Assembly, with scientific annex. United Nations sales publication E.01.IX.2. United Nations, New York; 2001.
 59. Little J. The Chernobyl accident, congenital anomalies and other reproductive outcomes. *Pediat. Perinatal. Epidemiol.* 1993; 7: 121-151.
 60. Lazjuk GI, Nikolayev DL, Novikova IV, Polityko AD, Khmel RD. Belarusian population radiation exposure after Chernobyl accident and congenital malformations dynamics. *Int. J. Rad. Med.* 1999; 1: 63-70.
 61. Lazjuk G, Verger P, Gagnire B, Kravchuk ZH, Zatselin I, Robert E. The congenital anomalies registry in Belarus: a tool for assessing the public health impact of the Chernobyl accident. *Reprod. Toxic.* 2003; 17: 666.
 62. Viinamaki H, Kumpusalo E, Myllykangas M, et al. The Chernobyl accident and mental wellbeing - a population study. *Acta Psychiatr Scand.* 1995; 91: 396-401.
 63. Bromet EJ, Goldgaber D, Carlson G, Panina N, Golovakha E, Gluzman Sf, Gilbert T, Gluzman D, Lyubsky S, Schwartz JE. Children's well-being 11 years after the Chornobyl catastrophe. *Arch Gen Psychiatry.* 2000; 57: 563-571.
 64. Havenaar J, Rummyantseva G, Kasyanenko A, Kaasjager K, Westermann A, Van Den Brink W, Van Den Bout J, Savelkoul J. Health effects of the Chernobyl disaster: illness or illness behavior? A comparative eneral health survey in two former Soviet regions. *Environ Health Perspect.* 1997; 105(6): 1533-1537.
 65. Allen PT, Rummyantseva G. The contribution of social and psychological factors to relative radiation ingestion dose in two Russian towns affected by the Chernobyl NPP accident. Society for Risk Analysis (Europe); 1995.
 66. Bromet EJ, Gluzmans, Schwartz JE, Goldgaber D. Somatic symptoms in women 11 years after the Chornobyl accident: prevalence and risk factors. *Environ Health Perspect.* 2002; 110(4): 625-629.
 67. Havenaar JM, De Wilde EJ, Van Den Bout J, Drottz-Sjoberg BM, Van Den Brink W. Perception of risk and subjective health among victims of the Chernobyl disaster. *Soc Sci Med.* 2003; 56: 569-572.
 68. Litcher L, Bromet EJ, Carlson G, Squires N, Goldgaber D, Panina N, Golovakha E, Gluzman S. School and neuropsychological performance of evacuated children in Kyiv 11 years after the Chornobyl disaster. *J Child Psychol Psychiatry.* 2000; 41: 291-299.
 69. Bar Joseph N, Reisfel DD, Tirosh E, Silman Z, Rennert G. Neurobehavioral and cognitive performances of children exposed to low-dose radiation in the Chernobyl accident: the Israeli Chernobyl Health Effects Study. *Am J Epidemiol.* 2004; 160: 453-459.
 70. Rahu M, Tekkel M, Veidebaum T, Pukkala E, Hakulinen T, Auvinen A, Rytomaa T, Inskip PD, Boice JD JR. The Estonian study of Chernobyl cleanup workers: II. Incidence of cancer and mortality. *Radiat. Res.* 1997; 147: 653-657.
 71. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume II: Effects... New York, United Nations. 2000.
 72. Cardis E, Anspaugh L, Ivanov VK, Likhtarev IA, Mabuchi K, Okeanov AE, Prisyazhniuk AE. Estimated long term health effects of the Chernobyl accident. in: One Decade After Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident. Proceedings of an International Conference, Vienna, 1996. STI/PUB/1001. IAEA, Vienna; 1996. p.241-279.
 73. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Korean Version; 2007. p.59-61.
 74. Cardis E, Hatch M. The Chernobyl accident--an epidemiological perspective. *Clin Oncol (R Coll Radiol).* 2011; 23(4): 251-260.