



KR0101219

KAERI/AR-595/2001

기술현황 분석 보고서

저선량 방사선과 식물 생육

Low Dose Radiation and Plant Growth

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 원자력증장기사업의 “방사선 이용 생물활성 증진효과 연구” 과제와 관련한 기술현황분석보고서로 제출합니다.

제목: 저선량 방사선과 식물생육

2001. 4.

작성자 : 책임연구원 김 제 성

연 수 생 이 혜 연
" 박 홍 숙

요 약

이온화 방사선은 다양한 에너지를 가진 여러 가지 유형으로 구성되어 있는데 그 중에는 총 이온화 방사선의 약 12%를 구성하고 있는 우주 방사선과 공기, 토양, 건물, 길, 음식 그리고 생물종으로부터 나오는 자연 방사선 및 진단이나 치료 목적으로 사용되는 방사성 핵종 그리고 핵 산업 혹은 방사선 낙진 등으로부터 방출되고 있다. 즉, 평균적으로 우리는 연간 약 2 mGy 정도의 방사선에 노출되어 있다.

한편, 다양한 방사선(이온화 방사선, 입자 방사선, 혼합 방사선, 자외선 등)을 종자나 유식물체에 적당한 저선량으로 쬐어주었을 때 대조구에 비해 발아율과, 호흡율의 증가로 개체 발달의 증가 그리고 생식, 개화시기의 연장등 더욱 유익한 효과를 볼 수 있었다.

고선량에서는 유해한 방사선도 적당한 저선량에서는 유익한 효과를 나타낸다는 방사선 hormesis에 대해 많은 연구가 진행되었는데 포유동물의 경우 저선량 방사선 조사에 의해 면역력의 증가, 암발생율의 억제, 수명 연장 등이 관찰되었다. 또한 식물의 경우 방사선 조사는 세포의 신진대사 및 막의 투과성 증대 등의 물리·화학적 상태에도 영향을 미치는 것으로 나타났으며 대상 식물, 환경 조건, 생리적 상태에 따라 반응 정도는 다르지만 저선량 조사 후 발아, 출아, 생장, 발육, 개화, 질병 저항력 증가 등이 나타났다.

SUMMARY

Ionizing radiation includes many types of radiation with various energies, that is, cosmic radiation which is *ca.* 12% of total ionizing radiation, earth radiation from air, soil, buildings, roads, food, biological organisms, radionuclides for the medical purpose and nuclear industry, fallout radiation, etc. We could be expected to be exposed at the average of about 2 mGy annually. From the experimental results of various radiation (ionizing, corpuscular and mixed radiation, ultra violet, etc) effects on seeds or seedlings, it was found that germination rate, development, respiration rate, reproduction and blooming were accelerated compared with the control. The positive effect of low dose ionizing radiation, radiation hormesis, on various species has been investigated. In mammal, hormesis phenomenon manifested itself in increased disease resistance, lifespan, and decreased rate of tumor incidence. In plants, many metabolic reactions in cells and permeability of the membrane were affected by irradiation. Even though the hormesis varies with species, environmental and physiological conditions, it was found that germination, sprouting, growth, development, blooming and resistance to disease were accelerated by low dose ionizing radiation in plants.

목 차

제 출 문	1
요 약	2
Summary	3
1. 서 론	5
2. 본 론	7
가. 자연 방사능	7
나. 입자 방사선에 의한 hormesis	14
1) 전자선	14
2) Beta 선	14
3) 중성자	15
4) 그 외의 입자 방사선	16
다. 혼합 방사선에 의한 hormesis	17
1) 라듐 및 생성물	17
2) 우라늄	18
3) 세슘	19
4) 다른 종류의 선원	19
라. 자외선	20
마. Hormesis 와 Mechanism	22
1) Hormesis의 개념	22
2) Hormesis의 작용 및 기작	25
3. 결론	30
참고문헌	32

1. 서 론

인간의 생활 형태는 많은 환경적인 요인뿐만 아니라 방사선에 의해서도 그 기틀이 마련되어져 왔으며 우리가 인지하지 못하는 사이에 방사선은 생활 도처에 편재해 있다. 즉 우리는 대기, 지구 그리고 의학상 사용되는 방사성 핵종 등으로부터 나오는 방사선에 항상 노출되어 있는 것이다. 따라서 두려움의 대상이 되어왔던 방사선에 대한 여러 가지 효과가 동·식물 등을 대상으로 오랜 기간 연구되어 왔는데 고선량일 경우 예상한 대로 유해한 효과를 볼 수 있었으나 흥미롭게도 저선량에서는 동물의 경우 숫쥐의 공격 행동이 억제되고, 신경계, 면역력등이 증가되었으며 또한 암 발생율이 억제되는 것으로 나타났다 (151). 또한 식물의 경우에도 종자나 혹은 유식물체에 저선량의 방사선을 쬐어주었을 경우 대조구에 비해 발아율, 생장율, 장기 개화 유도, 발근력 증진, 수량증가 등을 관찰할 수 있었다 (64, 108, 117). 이러한 저선량 방사선에 의한 생물의 유익한 효과는 일반적인 hormesis 개념과 일치되어 방사선 hormesis에 관해 많은 연구자들이 이론을 확립시키기 위해 다양한 연구들을 수행하고 있다 (125). 하지만 살아있는 생물체의 복잡성으로 인해 전체 구조에 대한 물리적 혹은 화학적 효과를 실험하는 것은 많은 어려움이 따르고 있다.

본 보고서에서는 우리의 방사선 환경을 구성하고 있는 많은 방사선의 출처(우주, 지구, 의학, 산업, 낙진등)를 자세히 되짚어보고 이러한 source들이 얼마나 많은 방사선을 우리에게 주는가를 살펴보았으며 저선량 방사선에 의한 피폭은 인간에게 유익할 수 있다라는 자료를 제시

하고자 하였다. 따라서 우리 주변의 방사선 환경과 방사선의 생물학적인 유익한 효과에 대한 지식은 저선량 방사선에 대한 무지, 두려움, 장해작용의 인식을 바꿔놓을 수 있을 것이다.

2. 본 론

가. 자연 방사능

인간은 평소 잘 느낄 수 없는 방사선의 바다에서 살고 있다고 할 수 있다. 환경 방사선은 4백만년 전 최초로 인간이 출현한 이래로 지금까지 거의 변화되지 않았고 인간의 생활은 지구방사선이 지금의 약 10배 이상일 때부터 시작되었다. 일찍이 인간의 생활형태는 다른 환경적 요인 뿐 아니라 이온화방사선에 의해서도 그 기틀이 마련되어왔는데 원시 미생물이 이온화방사선에 의해 생성된 free radical을 그들의 혐기적 작용에 유용하게 이용한 이래로 포유류에서도 이온화방사선을 생물학적으로 유익하게 활용하여왔다는 사실은 진화론적 견해에서 타당하다는 입장이다. 전신피폭으로 수행한 대부분의 연구들은 저선량의 방사선이 생물학적으로 유익한 효과를 나타낸다고 보고하고 있으며 이들 연구결과에서 특정조직 즉 허파, 골격, 생식선 등에 대한 국부조사선량은 대체로 무시되고, 주로 전신피폭에 대한 연구가 강조되고 있다. 또한 이온화방사선의 고·저선량은 질적으로 정반대 효과를 보여주었다 (10, 24, 46, 69, 90, 98, 121, 137)

방사선은 α -선인 헬륨핵과 전자인 β -와 δ -선, 고에너지의 x와 γ -선 그리고 중성자, 양성자와 다른 원자핵으로 구성되어 있다 (115, 140). 서로 다른 방사선 유형의 일반적 판단기준은 이온화방사선이 원자나 분자에 충격을 줬을 때 발생하는 이온이나 free radical의 생성정도를 의미하며, 방사에너지는 중요한 몇 개의 인자 중 하나이다. γ -선,

x-선, β -선, δ -선은 낮은 LET(Linear Energy Transfer) 방사선으로써 외부적 선원으로는 x-선과 γ -선이 강조되고 있는데 그 이유는 이들 방사선의 대부분이 피부와 그 외 부드러운 조직을 관통하기 때문이다. 대부분의 생물학적 실험결과에서는 x-, β -, γ -선에 대한 연구가 많으며 낮은 LET 방사선에 대한 일반적인 변환 (common conversion) 은 다음과 같다.

1 Gy = 1 Sv 즉, 1 rad = 1 rem in the nomenclature (100 rad = 1 Gy, 100 rem = 1 Sv)이며, 이것은 1 cGy = 1 rad, 1 cSv = 1 rem과 똑같이 사용될 수 있다. 방사선 생물학의 단위와 변환인자로서 Bq(Bequeral)은 이해하기 쉬운 단위인 반면(1Bq=1disintegration/s) 오래된 단위인 Curie(Ci)는 복잡하다 (1Ci=3.7 \times 10¹⁰disintegration/s). 이것의 변환 식은 다음과 같다. : 1 Bq=27.0 pCi이고, 1 GBq=37.0 GBq다. Gray(Gy)는 생물체가 접하는 방사선 형태에서 에너지의 총량으로 표현한다 (1 Gy=10,000 ergs/g). 방사선량은 선량을 및 시간과 관련이 있는데 대부분의 과도한 선량은 특별응급측정법이 요구된다. 사고, 의약, 전쟁으로부터 받는 과중한 피폭은 우리가 주위방사선에 의해 받는 만성적 피폭과는 공통점이 거의 없지만 명백하게 선량율은 매우 중요하다 (91, 92, 133). 보통 과도하고 만성적인 피폭은 효과적인 방사선에 수반되는 시간에 기인하는 또 다른 효과를 보여준다. 주변 환경에 존재하는 이온화방사선의 수준은 모든 사람들에게 자극이 될 수 있으며 만성적 피폭의 대부분의 자극은 homeostatic response가 작은 변화를 보상할 수 있는 물리적 범위 내에서 일어난다. Hormetic 수준은 주위방사선 수준에서부터 주위방사선 수준의 1000배에 이르기까지 다양하다.

세포에서 모든 이온화방사선은 물로부터 free radical을 생산하는데

(109, 110) 이러한 free radical 생성으로부터 연속되는 이온화개시는 DNA를 포함한 다른 많은 분자들에 영향을 미치는 화학적 반응의 결과로서 일어나는 넓은 범위의 변화를 가져온다. 그리고 free radical 반응에 의해 형성되어진 많은 특이 화합물은 안정화되고 신체를 통과한 후에는 곧고루 흩어진다. Yalow (144) 는 저선량 이온화방사선에 의한 사회적 이익의 인식이 현재 생활하는 동물과 인간들에게 이온화방사선의 미래의 보충자원임을 제안하였고, 방사선의 저선량 효과(radiation hormesis)는 미래의 연구, 교육, 일상생활과 응용 모두에게 엄청난 영향을 미친다. 즉 우리는 자연선원으로부터 나오는 방사선에 연간 약 2 mGy에 노출되어 있고 진단 받을 때 노출되는 정도는 성인의 평균치에 약 0.5 mGy/year를 더한다.

우주 방사선은 폭 넓게 다양한 에너지를 가진 방사선의 많은 유형을 포함하고 있다 (56, 132). 우주 방사선은 광자와 고에너지양성자, 중성자, 핵의 금속광, γ -선 및 subatomic 입자의 종류 즉, meson과 pion을 모두 포함하고 있다. 은하 방사선입자는 85%의 양성자와 10~14%의 α -선 그리고 1~3%의 보다 큰 원자핵으로 구성된다. 태양폭풍(solar storm)은 우주선보다 백만배 많고, 0.7~10 MeV 에너지를 가진 proton의 85%에 해당하며 그 나머지는 그들 선량에서 불균형한 생물학적 효과를 가지는 고에너지 핵과 α 입자다 (22). 우주와 태양의 전자 및 양성자는 지구의 전자기적 운동에 의해 대기로부터 제거되나 광자, 중성자와 다른 입자들은 대기 중에서 이온화방사선의 주생성원인 cosmogenic 방사선을 형성하는 대기분자에 충격을 가한다. 우주선의 강도는 고도에 따라 증가하기 때문에 빈번히 고공을 비행하는 비행사와 비행기 승무원들은 매년 50~100%의 방사선에 노출되어 있다 (75). 고에너지 우주 방

사선은 지구를 쉽게 통과할 수 있어 성인이 평균적으로 받는 총이온화 방사선의 약 12%를 구성한다.

지구상의 자연 방사선은 공기, 토양, 건물, 길, 음식, 음료수 그리고 생물종으로부터 나오는 방사선이 혼합되어 있다. 대기로부터 나오는 방사선은 먼지와 연기에 몇몇 가스를 더한 방사성핵종을 수반하며 그 중 매우 적은 cosmic 양성자나 중성자들은 대기를 관통한다. 바다에서 주를 이루는 방사선은 70~80%의 meson(중간자)과 20~30%의 전자이고 (31, 145) cosmogenic 방사성핵종은 대기를 비교적 쉽게 관통할 수 있는 작은 원소인 우주 선에 의해 대기 중에서 생산된다. 이들의 에너지는 거의 피부를 관통치 못할 정도로 충분히 낮으나 음식물 섭취와 호흡에 의해 신체내부로 들어가기도 한다. 주요 방사성핵종을 이루는 것은 chlorine, beryllium, tritium, carbon으로 tritium과 carbon의 대부분은 인간 활동으로부터 나오며 특히 tritium(^3H)은 N_2 와 O_2 에서 유래한 cosmic 중성자의 활성화에 의해 생성되고 인간에게 연간 약 10^{-8} Sv를 제공한다. ^{14}C 는 ^{14}N 의 cosmic 중성자 활성화에 의해 생성되어지고 식물에게는 CO_2 형태로 먹이사슬로 유입되며 방사선 환경에 약 0.01 mSv/year를 제공한다 (93). 대기 중에는 석탄과 나무가 연소되면서 방출되는 방사선이 우리가 받는 총피폭량의 약 5%를 차지하고 있다. Rn은 인간이 대기로부터 받는 피폭량의 약 절반가량의 원인이 되며 Rn으로부터 나오는 생식유한선량은 단지 연간 0.1 mSv로 추정된다 (93).

지구 환경중 자연 방사선은 미국의 경우 연평균 약 0.4 mGy이다. 이 평균치는 다른 많은 국가에 비해 다소 높으며, 몇몇 지역의 소수 민족은 자연 피폭량이 10~100배 더 높은 곳에서 살고 있기도하다 (25, 27, 26, 39, 47, 99). 건물과 도로도 자연 방사선을 대기중에서보다는 적

으나 자연방사선을 제공하고 우리가 섭취하는 음식물에서도 소량의 방사선은 방출된다.

현대 병원에 있는 환자의 약 1/3은 진단이나 치료 때문에 방사성핵종에 노출되어 있고 그 총수는 1982년에 약 8백만에 이르렀다 (95). 매년 천만에서 천 2백만 정도로 추정되는 방사선 핵종이 미국의 만명이 넘는 의사들에 의해 사용되는데(2), 1980년 한해에 의료계에서 사용되는 방사성핵종의 사용빈도는 100 명당 미국은 32, 오스트리아는 18, 덴마크는 14, 스웨덴은 14 였다. 사용총량은 진단을 위해 0.22~1.1 GBq, 암치료를 위해 7.4 GBq 정도였다 (2). 최근 논문에 의하면 상당량 방사성핵종의 사용이 허용되었는데(2, 82) 그 예로 6시간 반감기를 가진 ^{99m}Tc 는 모든 치료용 방사성 의약품계열의 85%를 차지하고 있다 (82). 평균 선량은 성인에서는 4.3 mSv이고, 어린이에서는 약 1.5 mSv이며 이것은 진단용 x-선에서 예상되는 것보다 약 3배정도 많은 방사선량이다 (16). 짧은 생물학적 반감기를 가지는 Na, I, K, Tl과 같은 많은 가용성 방사성 핵종은 3일 후에도 상당한 양이 남아있는데 생물학적 반감기가 대부분 비교적 짧다 해도 이것들은 종종 병원 문밖으로 걸어나가는 병원 내부의 환자에 묻어 나가기도 한다 (51). 대부분은 37 MBq 미만의 저선량에서 주어지는데 고선량에서 주어지는 것들은 ^{59}Fe , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{197}Hg , ^{198}Au , $^{201/203}\text{Tl}$, ^{203}Hg 등을 들 수 있다 (2). ^{131}I 은 갑상선 치료를 위해 광범위하게 사용되는데 암을 위해서는 0.7~1.1 GBq, 갑상선 기능 항진증 치료를 위해서는 190~370 MBq, 그리고 진단 목적으로는 3.7 MBq가 사용된다.

45세 이상인 미국 인구의 4분의 1 이상이 해마다 x-선 진단을 받고 있는데(94) 이들 대부분이 여러 번 촬영을 하기 때문에 x-선 촬영총량

은 거의 미국 인구전체와 맞먹는다. 1인당 평균 노출량은 미국에서는 연간 1.65 mGy, 유럽에서는 연간 0.3 mGy 그리고 일본에서는 연간 1.3 mGy였다 (54). 이들 자료가 전신 피폭을 반영하지 않았다 할지라도 한 기관에 대한 총피폭량은 환자에게 매년 자연환경으로부터 나오는 양과 동량일 것이다 (83, 82). 특별하게 염려가 되는 것은 기관이 형성되는 동안의 배(embryo)와 CT(Computed Tomography : 컴퓨터 단층촬영법) 촬영이나 조영 촬영과 같은 반복되는 피폭을 받는 환자이다 (9, 35, 42, 53). CT촬영으로부터의 신체적 그리고 유전적 위험이 실제로 나타나고 있는데(35), 조영진단 촬영은 혈관이나 소화관을 연구하기 위해 사용되는 것보다 1000배 이상의 x-선이 요구된다. 하지만 이것은 digital subtraction angiography : DSAC를 사용하여 촬영 시간을 단축시킴으로써 방사선의 피폭량을 줄일 수 있게 되었다 (120). 다른 예로 Positron emission tomography(PET)는 10분의 반감기를 가지는 ^{13}N 과 같은 극양성 전자 방출체의 사용을 요구한다. 11분의 반감기는 유기화합물 내로 결합되고 빠르게 사용되는 ^{11}C 가 된다. 110분의 반감기는 더욱 천천히 사용되는 ^{18}F 가 된다. 이와 같이 짧은 반감기를 가지는 방사성핵종은 중성자 활성화나 이온가속장치(cyclotron)에 의한 이들의 통합된 생산물과 화학적 공정에 의한 이들의 통합된 조제품을 요구한다. 의학에서의 진단상 x-선과 방사성핵종의 사용은 우리의 방사선 환경에 중요한 source를 제공하며 방사선학자들과 그들의 보조자들은 직업상 연평균 2~5 mGy를 받게된다 (93, 94).

원자력 산업에서 일하는 근로자들 역시 우리의 평균 주위방사선에 상당하는 추가선량을 받게 된다. 그러나 원자력 발전소의 산발적 사고에 의한 인접지역 부근내에서 재해가 발생한다해도 원자력으로부터의

민간인 사망은 공장에서 일어나는 일반적 재해로 인한 사망보다 훨씬 낮다 (21, 141, 142). 연간 사망률은 핵, 1 ; 석탄, 67 ; 기름과 가스, 149 ; 물, 520 이다. 공장 생산품으로부터의 피폭량은 담배연기도 포함시킨 것으로서 연간 0.1 mGy로 공기로부터 받는 방사선과 동량에 해당한다.

방사선 낙진으로부터 나오는 피폭량은 공기 중 핵 폭발실험과 원자력발전소에서의 화학적 폭발 수에 따라 다양하다 (113). 어떠한 핵폭발도 일어나지 않았기 때문에(31) 종래의 원자력 발전소 내에서는 위험할 정도의 방사선 피폭은 없다고 볼 수 있다. 인접지역 부근을 제외하면 이것들은 지구에 정착하였거나 먹이사슬, 폐, 조직에 들어온 풍매성 방사성핵종을 반영시킨다. 또한 바람을 제외하면 대부분의 방사성핵종은 1년내에 사라져버리나 미비한 정도의 잔유량은 10년후에도 남아있다 (20). 강도 높은 핵폭발 실험동안과 그 10년후의 낙진에 대한 극단적인 예언에도 불구하고 미국에서의 유아사망율은 계속적으로 감소하고 있으며 평균수명 증가도 계속되고 있다.

우리의 비의학적 피폭량의 총량인 연간 약 2 mGy는 우리가 피폭되어있는 방사선 환경이며 우리의 방사선 환경의 배경은 동·식물에서 방사선 hormesis를 이해하는데 기초를 제공할 것이다.

나. 입자 방사선에 의한 hormesis

1) 전자선

전자선은 이용하기가 쉽고, 제어하기 용이하지만 생물학 분야에서의 이용 연구는 거의 수행되지 않았다. 조류와 식물에서 약간의 보고가 있었지만 전자선의 영향은 γ -선과 x-선에서 보이는 효과와 유사한 것으로 나타났다. 예를 들면 종자 또는 식물에 저선량을 조사하였을 경우 식물의 발아, 성장 및 수확량이 증가하였다. 반면 고선량을 조사하였을 경우는 식물에 유해한 것으로 나타났으며 동물을 대상으로한 전자선 hormesis 효과는 아직 검토되지 않고 있다.

2) Beta 선

생물학에서 β -선 방출체로 상용되어진 방사성 핵종은 H, C, P, Ca, Rb, Sr 그리고 Y 등으로 실험과정중 주로 배지에 첨가되어진다. 이러한 β -선에 의한 연구는 식물을 대상으로 한 hormesis의 효과를 가장 잘 나타내주고 있으며, 이에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔다. Glubecht (40)는 방사선의 효과가 수세대에 걸쳐 지속하는 것을 발견하였고, β 선에 의해 조기 개화와 수확량이 증가되는 것이 보고되었으며(59, 61, 65, 85, 114, 129) 또한 Kim (61) 등은 물에 담근 종자의 방사성 인의 함유량이 발아 중에 많이 감소되지만 다음 세대에서 성장이 증가함을 관찰하였다. ^{35}S , ^{32}P , ^{45}Ca , ^{65}Zn 용액에 담근 곡물종자의 성장률과 건중량이 크게 증대하였고(135), 0.1 -0.3 kR 의 저 선량의 방사선에 의해 마늘, 토마토에서 광합성 혹은 핵배합성 등의 증가와 함께 성장이 촉진되었다 (136).

다른 예로 어린 메밀 묘목을 저선량 ^{32}P 로 조사하면 줄기 부분이 120%와 137% 신장되었으며 씨앗은 148% 증대되었다. 식물개체당의 씨앗 수는 109% 증가되었으며 종자 총중량 제 1세대에서 130%, 제 2세대에서 169% 증가되었다 (59).

저선량 ^{32}P 조사에 의해 박하의 신장은 109%가 증가, 기장의 식물중량은 112% 그리고 대두에서는 수확량 증가, 중량 증가가 120% 정도 있었으며(60) 제 2세대는 제 1세대에서의 중선량 조사에 의해 발아가 촉진되었고 총 곡물 수확량도 대조구의 190% 정도가 증가하였다 (60). ^{32}P 용액에 담긴 종자에서는 발아시기에 급속하게 인산 함량이 감소하였으며, 보리에서는 135%의 건조중량의 증가, 아마에서는 식물당 콩깍지수가 153% 증가하는 것으로 나타났다. 대두에서는 각각의 종자의 중량이 145% 증대되는 것으로 보였으며, 아마와 보리에서는 K함량이 각각 122%, 135% 증가, Ca량은 아마에서 128%, 보리에서 114%, 대두에서 125%증가, Mg함량은 아마에서 163% 보리에서 128% 대두에서 121% 증가가 있었다 (61).

3) 중성자

중성자의 생체 조직에 대한 해로운 작용의 인식 때문에 1967년 이후부터 동물에서의 저선량 방사선 연구가 진행되어졌고, 느린 중성자를 이용한 연구에 비해 대부분의 연구가 속중성자를 이용한 연구에 집중되어져 왔다. 중성자로 식물체나 종자를 조사시킬 경우 식물생육이 촉진된다는 것이 관찰된 이후 다른 많은 연구자들은 발아율의 증가, 발육, 활력과 생존력 그리고 수량의 증가를 보고하였다.

고속 중성자를 조사한 옥수수 씨앗에서는 결가지의 출현과 큰 뿌리

의 성장이 촉진되었다 (106). 감자 절편의 경우 저선량 방사선을 장기적으로 조사했을 경우 발아가 촉진되었으며(123), 방사화 한 Be에 피폭된 나무의 씨앗은 발아, 성장, 생존율 등이 상승하였다 (111).

벼이삭에 열중성자를 조사하면 1개월 일찍 개화하였으며 동일한 조사에 의해 기장 종자에서도 발아가 양호하였으며, 2-12일 일찍 개화하였다 (6). 면화 종자에서는 방사선 조사에 의해 식물의 성장이 촉진되었으며 면섬유의 질이 향상되었다(32). 완두에서는 중성자 조사에 의해 전 식물체, 성장률, 생존율 그리고 총수확량이 증가하였으며(37), 완두 한 품종의 종자에 500 R 고속 중성자 조사에 의해 수확 증가가 있었다 (134).

0.1-0.5 kR의 고속중성자 조사는 토마토의 발아와 뿌리의 성장을 증진시켰으며, *Paortulaca*에서는 고속 중성자 조사에 의해 대조보다 198% 빨리 개화가 유도되었으며 4개월에 걸친 평균 꽃의 수는 135% 증가하였다 (1). 동부 유럽에서는 토마토 종자에 0.5 kR의 중성자를 조사하여 성장이 가속되었다는 보고가 있으며(118), 배양 당근 켈러스 조직에 고속 중성자를 조사하면 저선량(270 R)에서는 성장이 촉진되었고 동일한 효과를 γ -선 조사에 의해 발생시키기 위해서는 500-800 R이 필요하였다 (86).

4) 그 외의 입자 방사선

그 외 각종 입자방사선의 효과가 다양하나 동일한 패턴이 관찰되고 있다. 폴로늄 방사선 조사에 의한 밀의 성장 자극(대조의 167%)을 보이는 Gager (36)의 초기연구는 광범위한 연구의 일부분일 뿐이다.

다. 혼합 방사선에 의한 hormesis

대부분의 방사성 핵종은 붕괴시에 혼합방사선을 방출한다. γ -선을 방출하는 경우 α - 또는 β -선을 여과하여 순수한 γ -선을 사용할 수 있도록 하는 것이 가능하다. 공기, 토양 및 물이 α -선과 β -선을 여과하기 때문에 혼합방사선 방출 핵종을 γ -선원으로서 직접사용 할 수 있으며 여과된 Co선과 Cs선이 가장 많이 사용되는 γ -선원이다. Ra, Rn, Ur 및 Pb등 (23)은 γ -선과 같은 범주로 간주되고 있다. 이러한 핵종은 화학비료로서 사용되고 있으며 토양은 양질의 필터이므로 이들 핵종의 방사선은 식물과 박테리아에는 거의 흡수되지 않지만 실험 중에는 혼합방사선이 관여하는 상태를 사용하는 경우가 있다. 따라서 이들의 방사성 핵종은 혼합방사선원으로 생각되고 있으며 실제로 혼합방사선원은 선량이 파악되어있는한 사용이 가능하다. 많은 방사성 핵종은 붕괴에 의해 한 개 이상의 방사성 생성물을 만들기 때문에 이들의 선원은 원래의 원자와 평형상태인 붕괴 생성물로부터 만들어진 혼합방사성 핵종으로 그 붕괴생성물 중에는 원래의 원자보다 방사능이 강한 높은 에너지의 방사선을 방출하는 것도 있다.

1) 라듐 및 생성물

Koernicke (62, 63), Guilleminot (45) 및 Gager (36)의 초기 연구에서 라듐이 식물의 성장을 자극한다는 것이 보고된 이후 20년 동안 수많은 연구가 진행되어져 왔다. Caraman 및 Champy (18) 는 조사한 종자에서 식물의 성장률이 5배나 증가하는 것을 밝혀냈으며 다양한 식물 중에서 발아 증가에 관한 Gager (36)의 보고도 확인되었다.

빠른 생육, 개화 및 호흡의 증가가 수많은 연구에 의해 보고되었는데 그 예로 Molish (87)는 라듐선에 대한 정의 굴광성 반응을 밝혀냈고 Stoklasa (126, 127)는 피폭된 재배식물에서 광합성이 증가하고 호흡량이 대조보다 많아지는 것을 발견했으며 곡물 수확량 또한 증대되는 것으로 나타났다 (50, 55, 97, 148, 149).

라듐 선에 의한 저선량 효과로는 토양중에 0.1 - 4 $\mu\text{g}/30\text{g}$ 의 RaBr_2 를 첨가하면 식물의 발아와 성장이 촉진되었으며(33), 세포분열이 가속화되고(33) 클로로필 함량이 증가되었다 (34). 다른 예로는 라듐은 나무의 발아와 구근의 성장을 촉진시켰다 (88). 밀의 종자에서도 소량의 Ra가 토양중에 포함되어져 있으면 발아가 증가되는 것으로 나타났다 (96).

에이커당 0.01, 0.1 또는 1 mg의 Ra을 투여한 옥수수 재배실험에서 9개 실험구역 중 8개 구역에서 수확증가가 관찰되었다 (50). 또한 비료에 Ra을 첨가하면 화분의 꽃, 야채와 농작물의 성장이 증진되었으며 (105) 식물의 크기를 증대 하였다. Ra염을 토양 중에 첨가한 경우 피폭량이 클 때에는 식물의 성장이 저해되었으나 소량일 경우에는 유익한 효과가 있었으며 중간정도의 양일 경우에는 성장이 대단히 좋았다(143). 8년에 걸친 10^{-9} RaCl_2 /kg 토양에 의한 조사는 많은 농작물에서 대조보다 평균 120% 수확증가를 유도하였다 (148).

2) 우라늄

우라늄과 그 생성물에 관한 연구는 라듐에 관한 연구보다는 적지만 결과는 거의 동일한 것으로 나타나고 있다. 예를 들면 미생물에 의한 발효가 촉진되거나 식물의 종자 발아와 성장 및 수확량이 화학 비료 또는 방사선으로서 이용된 저선량의 우라늄에 의해 증대되었다.

Ray와 Pradise (100)의 초기연구는 과실류를 다룬 몇 안되는 연구 중에 하나였으며 Cannon (17)은 일부 어떤 식물들은 고선량의 토양에도 적응을 보인다고 보고하였다. 벚꽃나무와 배나무의 묘목은 0.002% $U(NO_3)_4$ 용액의 관수에 의해 성장 촉진을 보였으며 소량의 우라늄염은 식물의 성장을 촉진 시켰다 (100).

UO_2 비료는 곡물의 수확량을 현저하게 증대시키며 시판되는 방사성 비료는 Ba염 그 외의 유해한 물질을 함유하고 있다 (70). 잘 시비된 토양에서 밀의 생육이 소량의 UO_2 첨가에 의해 증진 되었으며 대조구에 비해 166%의 수확증대가 있었다 (89). 토양중 농도 $10^{-12} - 10^{-9}$ Ci/kg의 우라늄 비료는 8년에 걸쳐 118 - 166%의 수확 증가를 가져왔다 (148). 0.5 mCi의 우라늄염에 하루 담근 종자의 수확은 3 -5회에 걸쳐 대조에 비해 완두에서 113%의 수확 증대가 있었다 (65). 일반적으로 우라늄을 함유한 토양에서 생육한 식물의 종자가 보통의 토양에서 생육된 것보다 발아가 잘 되는 것을 나타냈다 (84).

3) 세습

세습은 강한 γ -선원으로 소련에서 ^{137}Cs 을 설치한 이동식 조사장치가 파종 전에 종자를 조사하는 것에 사용되었다. 식물에 관한 연구는 적지만 이 방사선에 의한 자극이 라듐과 코발트와 동등하다는 것을 보이고 있다. 그 예로 12R /분 20일 동안의 장기조사에 의해 밀의 수분 섭취, 발아, 성장, 수확이 109% 증대되었다 (128).

4) 다른 종류의 선원

Rivera (101, 102)는 방사성 납인 ^{210}Pb 이 푸른곰팡이의 포자 형성,

발육 및 성장의 증가를 가져왔다고 보고하였고 식물 자극제로써 토리눔이 사용되어져 왔다.

이러한 핵종들 대부분은 토양과 수중에 직접 투여되었으며 혼합 방사선원에 적당히 피복되었을 경우 발아, 발육, 성장과 성숙의 촉진이 나타났다.

1908년의 시베리아에서의 핵 폭발 후 나이테의 폭이 0.4 - 2 mm에서 5 - 10 mm로 나무 높이가 배 이상으로 또한 나무 둘레가 4배로 증가하였다 (4). 따라서 이러한 결과는 일본에서의 핵 폭발의 경우와 동일한 형태로 오래된 수목과의 경쟁이 감소되었기 때문에 이용 가능할 수 있는 태양열량이 증가한 것으로 설명할 수 있다.

라. 자외선

저 에너지의 자외선(UV)은 전리작용을 가지지 않고 투과력은 약하지만 높은 에너지를 가진 저선량의 자외선에 의한 자극과 높은 선량에 의한 장애를 보이는 많은 흥미로운 효과가 관찰되었다. 무엇보다 놀랄 만한 것은 자외선에 의한 바이러스의 활성화이다 (38, 48, 49). 저선량의 자외선은 박테리아의 포자 형성을 유발하며, 곰팡이의 성장, 발육 및 증식을 가속화 시켰고 효모의 성장과 발효를 증가 시켰다.

자외선에 의한 식물체 기능의 자극에 대한 연구는 그리 많지 않지만 일반적으로 γ -선 및 x-선에서 발견되었던 것과 같은 형태의 효과를 보이고 있다. 자외선 조사후 발아(28, 41, 66, 77 146), 호흡(76, 80), 증식과 수명(29), 옥수수의 부패병에 대한 저항력(44) 및 높은 선량의 x-선 조사후의 성장의 회복이 촉진되는 것으로 보고되고 있다 (147).

저온 조건에서 단시간에 자외선을 조사하였을 경우 발아(77)와 호흡(76)이 촉진되었고 계속해서 풍작을 가져다 주었다.

꽃가루에 자외선을 저선량 조사했을 때 토마토의 발아가 증가되어 polyphenol oxidase의 증대, 식물체 길이의 신장, 조기 개화가 유도되었고 포도 가지의 x-선 장애는 조사직후에 UV조사에 의해 회복되었으며 비타민 C함량과 성장률도 원래대로 회복되었다 (28).

마. Hormesis 와 Mechanism

1) Hormesis의 개념

Hormesis는 hormone과 같은 어원인 그리스어 “hormo (I excite)”에서 나온 말이다 (122). 초기문헌에서는 소량을 포함하는 oligo를 뜻하는 “hormoligosis”라는 용어를 사용하였다 (71). Hormesis 단어 자체가 비록 새로운 것이지만 개념은 오래 전부터 있었음을 알 수 있다 (122). 이 개념은 Hippocrates, Bernad, Arndt and Schultz, Weber, Richet, Cannon and Selye에 의해 표현되었다 (79, 74). 모두 선량과 관계가 있으며 -“*the dose is everything*”-, 스트레스가 공통된 특징으로 알려져 있다 -*small stresses stimulate ; excess stresses inhibit*-. 많은 생리적 변수는 저선량에서 유익효과를 초과선량에선 유해효과를 나타낸다. Luckey (72)로부터 제기되고 있는 hormesis의 개념은 그림 1의 모식적 선량 효과 곡선에서부터 단적으로 나타낼 수 있다.

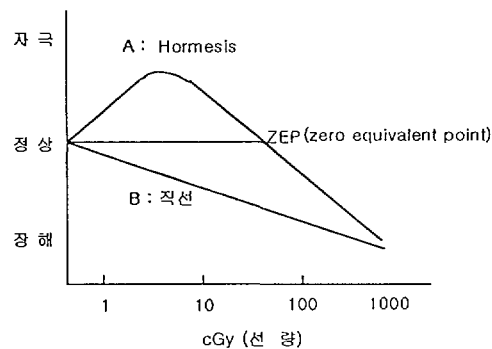


Fig. 1. Type of hormetic response and Straight line model

즉 종곡의 생물학적 효과는 횡곡에 표시된 용량을 높여가면 A곡선이 나타낸 hormesis 자극이 생긴다. 더욱 용량을 높여가면 효과가 거의 없는 Zero 상당점(ZEP: zero equivalent point의 점)에 달하고 이것을 “마지막 값”으로 하여 그점을 경계로 양이 증가함에 따라 유해한 (minus) 효과가 증가한다. 한편 B의 곡선은 어떠한 양에서도 생물학적 유해에 + (plus) 효과가 없고 유해한 효과가 양과 함께 증가하는 직선 모델을 보여준다. 종래의 방사선 영향 연구는 이 zero 설의 입장에 서있다. 위의 그림은 직선 model의 용량 - 반응 곡선관계에서 외삽해서 예측할 수 없는 반응이 hormesis에서는 저수준의 용량에서 나타나는 것을 보여주고 있다. 단, hormesis는 반드시 “정의 자극 효과”에 한정된 것은 아니다. 다양한 물리적, 화학적 및 생물학적 작용원이 높은 사용량에서 특이적으로 나타내는 독성효과와는 질적으로 다르고 소량에서 생체에 나타나는 생리적 효과 모두 적용된다. 여러 가지 작용물질 - stress-가 작용하면 생체는 각종 응답반응을 일으키며 경미한 stress에 대한 반응은 진화의 과정에서 발달되어온 생체 방어 기구의 하나라고 생각된다.

저선량 이온화 방사선의 긍정효과는 모든 방사선은 유해하다는 개념을 제거하였으며(74, 73) 촉진 작용은 유해요인의 소량존재시 초기징후라고 주장하고 있다. 그러나 촉진제 -저선량 조차- 모두가 유익한 효과가 있는 것은 아니다. 카페인이나 니코틴 같은 것은 내성이 있으며 방사선 hormesis의 데이터는 이의 한 부분에 속한다. 원생동물에 대한 실험결과는 성장률과 같은 필수 생리적인 요인이 방사선을 감소시켰을 경우 부분적으로 감소됨을 알 수 있으며 전리방사선의 내적, 외적요인 모두 성장률을 증가시켰다. 실험 결과 완전한 선량반응곡선이 무지개와 비슷하였고 극미량에선 결핍과 사망을 유도하고 초과량에선 명백히 치

명적이었다. 이 개념은 포유동물에서 실험되었고 방사선 hormesis로부터의 결과는 1) 우리가 방사선환경에서 받는 양보다 더 많은 양의 전리 방사선이 유의효과를 나타내고, 2) 대략 얼마나 많은 양이 다른 변수에 대해 최적인지를 알려주며, 3) 직접조사를 위한 방향을 매우 효과적으로 제시하고 있다. 따라서 방사선 hormesis는 대부분 인간에 더 효과적인 건강을 약속한다. 즉 더 효과적인 생산과 음식이용, 최상의 신경 발달, 증가된 면역능, 전염병과 암으로부터의 감소된 사망률, 연장된 평균 수명 등을 들 수 있다. 그러나 살아있는 생물체의 복잡성으로 인해 전체구조에 대한 단일의 물리적 혹은 화학적 효과를 시험하는 것은 어렵다. 비타민, 미량 원소, 호르몬, 그리고 몇종류의 약품을 제외하면 hormology의 예로서 분자수준에서 이해된 것은 거의 없는데 약리학과 독물학에서 hormesis는 Paracelsus, Bernard와 Arndt-Schultz의 개념과 같다고 생각된다. : “모든 것은 독약일 수 있고, 아무것도 독약인 것은 없다. ” 와 “선량이 모든 것을 의미한다.”(74) 이것은 이온화 방사선에 대한 사실이다. 이온화 방사선의 hormesis와 Selye의 일반적 적응징후는 이 개념에 기초하고 있다. 많은 Selye의 실험은 단기간인 것에 반해 대부분의 hormesis 연구가 장기간효과를 수반해왔다. Selye의 일반적 적응징후는 자극적이긴 하지만 해롭지는 않은 x-선에의 노출을 포함한다. “I could find no noxious agent that did not elicit the syndrome.” (116) Hormetine은 조건이 자극적이고 변이가 대조구에서 좋을 때 대부분 효과적이다 (71, 107). 이온화방사선에 대한 선량반응곡선이 비타민 A, 칼슘, 철과 같은 필수영양에 대한 반응곡선과 유사함을 주목해야 한다 (71, 103). 이것은 이온화방사선이 필수요건이건 아니건 간에 결정권이 우위에 있는 것이다.

2) Hormesis의 작용 및 기작

방사선 hormesis의 작용의 생화학적 기작에 대한 확실한 개념에 성립되지 않았으나 확실한 것은 비교적 저선량의 방사선 조사가 동식물에 유익하게 작용한다는 것이다. 방사선 조사후에 나타나는 대부분의 생리학적 반응은 많은 생화학적 변화를 반영하며 최초로 어떠한 반응이 관여하는지는 아직 결정되지 않았으나 Zelles와 Seibold (19)에 의하면 새로이 생성된 RNA가 이 반응에 관련되어 있고 어떤 종류의 아미노산의 생성이 증가하거나 quinoid 독성 물질 같은 새로운 대사 산물의 생성이 중요한 역할을 수행하는 것으로 보이며 결과적으로 방사선 조사된 생물체는 자극받지 않은 생물체에 비해서 보다 효율적으로 활동이 진행되는 쪽으로 변화가 일어나는 것이다.

방사선의 분자구조는 free radical의 활성화와 그 부산물을 수반한다. : (1) 세포 생리학과 신진대사 ; (2) 파괴된 DNA, RNA, 막, 그리고 효소의 세포 복구 ; (3) 신경학적 발육 ; (4) 면역반응 등 (52) 이들 범주는 중첩되고 상호작용을 한다. 세포에 대한 방사선의 특정효과는 증가된 막투과성, 원형질막 유동, 호흡, 효소분석, 신진대사, 생체 전기적 포텐셜, 세포 유사분열, 그리고 세포분열 등을 포함하며 이러한 반응들은 과다한 방사선조사에 의해 감소된다. 자유 radical과 그 부산물에 의한 특정 신진대사경로의 활성화와 생리학적 기능은 추측일 뿐이며 아마도 free radical, free radical scavenger(방사성 물질을 침전시켜 제거하기 위한 담체), 단일전자 등을 수반하는 수백만의 세포 반응이 손상된 각각의 DNA 분자와 복구된 DNA 각각의 유형을 위해 이동하는 것으로 생각된다 (43). 일상적인 free radical scavenging은 해로운 환경으로부터 DNA를 보호하는 이온화방사선을 생산한다 (145). 증가한 면역반응은

suppressor T cell의 방사능 감수성을 수반하며 Stebbing은 radiation hormesis가 생육조절과 homeostasis 기구를 수반한다고 언급하였다 (124).

저선량 이온화 방사선을 수행하는 반응기구에 대한 대부분의 논의는 세포핵내의 DNA 분열에 초점을 맞추고 있으며 DNA 복구에 동반되는 세포질 효소는 인간에게 유해한 방사선을 완화시키는 것으로 알려져 있다 (130). 생산되는 효소의 양은 특정한 복구를 위해 필요로 하는 양보다 훨씬 더 많은데 이는 세포가 일상적인 지속적인 노출을 받을 때보다도 더 저항성을 갖도록 만든다.

방사선 효과의 90% 이상은 미립자선의 물리적 활성을 포함하는 free radical의 형성, 특히 DNA, RNA, 단백질, 지방, 그리고 탄수화물과 이들의 복합체와 같은 거대분자를 파괴하는 중성자의 형성으로부터 시작된다. 예를 들어 “heat shock” 단백질에 의해 대량으로 생산되는(112) “alarmones” 등의 단백질 생산은 일반적인 자극에 의한 세포반응일 수 있으나 이 단백질에 의해 분화된 세포, 즉 생물체는 많은 해로운 요인으로부터 더욱 내성을 갖게된다. Alarmone의 생산은 이온화방사선과 같이 충격을 주는 몇몇 종류들이 5탄당 인산화 경로로부터 나오는 ribose와 deoxyribose의 신진대사산물을 제한시킨다는 Ehrenberg의 이론을 손쉽게 들어맞췄다 (30). 즉 ribose와 deoxyribose 합성에서의 감소는 RNA와 DNA를 충분히 생산하지 못할 것이고 alarmone 생산을 나타내는 조효소의 감소 수준을 저하시키며, 세포질내의 cAMP의 부분적 결핍이 일어날 것이다. 이 이론은 Brown과 그의 관계자들에 의한 박테리아와 쥐의 간장 효소에서의 연구로써 제공되어졌다 (11, 13, 14, 15, 12). 따라서 이들의 실험은 5탄당 인산화 경로가 물질대사작용 중

가장 방사선에 민감한 부분이라는 것을 시사하였다. 단일전자반응은 free radical 형성에 의해 개시되거나 증대된다. 이것은 미토콘드리아와 같은 세포기관내에서 제공되는 양자 수용체에 의해 산화환원 반응을 다스리기 위해 도움을 준다. Radiation hormesis는 아마도 S-S 결합인 RSSR, thiol을 소비하여 RSH의 생산을 동반할 것이다. RSH/RSSR 비율의 감소는 증가된 glutathione peroxidase를 가져오고, 6탄당 인산화 반응으로부터 5탄당과 nucleotide 생산을 감소시킨다 (150). 많은 생화학적 효과들은 저선량 방사선조사한 배와 병아리에서의 실험에서 발견된 바와 같이 각 세포 내에서의 cAMP, adenosine cyclase와 그의 cyclic nucleotides의 총량의 변화에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다 (58). 이들 연구들은 간장 효소의 활성증가는 저선량 방사선 조사한 동물들의 성장율을 증가시키는 데에 유의성있는 정도의 역할을 수행함을 지적하였다. Liu는 방사선에 노출된 동물에서 호르몬 변화의 다양성을 발견하였다. 몇몇 예들은 다음과 같다. 만성적으로 0.05~0.1 Gy/d의 x-선을 방사선 조사한 쥐는 비뇨기계통의 네스토스테론이 대조구에 비해 264% ($p < 0.05$) 이상이 증가되었다 (68). 다른 호르몬들에 대한 연구로는 hypothalamic methionine-enkephalin 함량($p < 0.05$), leucine-enkephalin 함량($p < 0.01$), 그리고 spleen catecholamines가 유의적으로 감소함을 시사하였다. 이들 변화는 저선량 방사선조사 후 강화된 면역력과 관계될 수 있다 (5, 7, 8). 면역체계는 radiation hormesis을 위한 가장 중요한 대사작용에 기여할 가능성이 있고 면역력은 포유동물에서 radiation hormesis에 중요한 열쇠가 되는 것으로 나타났다. 근래 한세기동안 연구자들은 저선량 이온화방사선에 노출된 동물들에서 순환 백혈구의 증가를 관찰하여왔다. 저선량 방사선 조사된 주민들에서 나타나는 면역력

증가는 보다 적은 감염과 암발생의 결과를 초래했고 이들은 차례대로 사망률을 감소시키고, 보다 질높은 양질의 삶과 보다 긴 평균수명을 제공하였다.

또한 식물과 식물세포의 생리학적 반응에 대한 저선량 방사선 조사 효과가 보고되었는데 방사선 조사에 따른 생육의 변화는 옥신 평형에 대한 방사선 조사의 효과로 볼 수 있다고 하였다. Gordon에 따르면 대두류의 유묘기 때에 몇 분간의 1 Gy 미만의 x-선 조사는 옥신 함량을 줄일 수 있다고 보고하였다. 이는 indole-acetaldehyde를 indoleacetic acid로 바꾸는 효소 체계가 억제됨을 증명하는 것이 가능해진 것이다. 그러나 Hagen (119)은 담배를 가지고서 이같은 IAA-수준의 감소결과를 증명하지 못했다. 따라서 x-선 조사후 옥신의 합성량이 감소된다는 가설의 일반적인 효력을 설명하기 위해서는 더 많은 연구가 필요한 것으로 보여진다.

세포의 많은 신진 대사 반응은 방사선 조사에 의해 억제되거나 촉진되는 것으로 보고되고 있다 (119). 예를 들어 방사선 조사에 의해 효소 활성이 증가되는 것으로 나타나는데 이는 proteolytic enzymes(67), desoxyribonucleases(104), ribonucleases(67), ATP-ases (78)와 같은 다수의 효소 체계에 의해서 발견되었다. 증가된 활성은 억제제의 파괴, 활성제의 방출에 의해 기인되는데 Banq와 Alexander (3)에 의하면 이는 세포 내부 구조에 연결된 것으로부터 불활성 효소의 방출에 의한 것으로 보고되고 있다.

유전적 구조에 있어서 방사선 조사의 효과와 변화간에 반복적으로 관찰되는 관련성은 방사선 조사 효과에서 DNA의 변화가 최초로 일어난다는 일반적인 견해를 유도해왔다 (119). 저선량의 방사선은 명백하게

어떤 DNA 분자의 정보 형태를 상당히 바꿀 수 있으며 이러한 시도로써 총 DNA의 합성을 조사했을 때 실제로 저선량인 방사선에 의해서 상당히 억제되었음이 발견되었다. 즉 DNA 합성을 억제하는 것으로 생각되는 동시 배양 싸이클 (synchronous-culture cycle) 동안에 방사선 조사시간에 크게 의존한다는 것이다 (81). 그러나 무엇보다도 우리가 방사선에 의해 유도되는 최종 효과를 보기 위해서는 DNA 합성을 완전히 이해하는 것이 우선시 되어야 할 것이다.

방사선 조사는 세포의 물리 화학적 상태에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (57, 138, 139, 131). Hluchovsky는 투과성의 변화를 잘 나타내는 *Allium cepa*의 표피 세포에서의 원형질 분리율의 변화를 조사한 결과 x-선이 표피 세포로의 물과 전해질 물질의 침투성을 증가시키는 것으로 나타났다. 다른 예로 광합성과 인 대사 작용에서의 방사선 영향에 관한 조사에서 *Elodea densa*의 잎을 분리하여 실험한 결과 명조건에서 방사선을 조사한 경우 잎의 다양한 파편 내로 인산의 흡수가 160% 정도 증가되는 것으로 나타났다 (119). 이 증가 곡선에서 500 Gy에서 흡수량이 대조구와 같아졌고 높은 선량일수록 흡수의 감소가 보였다. 이들 실험은 단세포인 *alga Ankistrodesmus*에서 계속되었는데 선량율에 의존하여 인의 합성이 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 실험들을 통하여 방사선에 의해 막의 투과성이 증가되는 것으로 보인다 (119).

3. 결 론

우리는 자연 환경으로부터 발생하는 다양한 방사선에 의해 연간 약 2 mGy정도 피폭되고 있는데 이러한 자연 방사선의 발생원인은 대기로부터 나오는 우주 방사선(성인 평균적으로 받는 총 이온화 방사선의 약 12%를 구성)과 공기, 토양, 건물, 길, 음식, 음료수 그리고 생물종으로부터 나오는 지구의 자연 방사선 그리고 x-선 혹은 CT촬영 등 의학 목적으로 사용되는 방사성 핵종으로부터 방출되고 있다.

한편 생물은 이온화 방사선에 의한 자극 효과가 있는 것으로 관찰되었는데 적정량의 방사선에 노출되었을 때 장해 보다는 오히려 유익한 효과를 볼 수 있었으며 이러한 결과를 통하여 방사선 hormesis 개념을 도입하게 되었다. 방사선 hormesis를 유도할 수 있는 선량은 개체, 환경 조건, 생리학적 특성, 선량을 등에 따라서 다양하며 고선량은 생리학적 활성, 질병 결국에는 죽음을 초래하나 hormetic선량일 경우 개체 발달을 촉진, 질병에 대한 내성을 증진, 생식 능력의 증가, 수명의 연장 등을 들 수 있다.

방사선 hormesis는 주로 원생 동물, 식물, 무척추 혹은 척추 동물등에서 관찰되어지고 식물의 경우 발아율의 증가, 호흡율의 증가, 개체 발달의 증가, 생식, 개화시기의 연장 등이 관찰되어진다. 또한 hormesis는 개체를 변화시킬 수 있는데 hormesis 처리후 각각의 개체는 스트레스와 환경 자극에 다르게 반응하며 최적의 환경 조건이 아닐 경우에 이를 극복해 나갈 수 있는 적응력을 제공할 수 있다.

결과적으로 본 보고서에서 우리 주변에 편재해 있는 이온화 방사선

의 출처와 피폭 선량을 조사함으로써 두려움의 대상이 되었던 방사선에 대한 옳지 못한 인식을 전환시킬 수 있었으며 방사선 hormesis에 대한 연구는 우리의 과학 기술에서 유용하게 사용될 수 있는 이온화 방사선의 적절한 이용을 위한 기초 자료를 제공할 수 있으며 또한 실생활과 연관된 곡류, 채소 그리고 육류 등의 생산을 증대 그리고 자원의 효율적인 이용을 도모할 수 있다. 따라서 방사선 hormesis를 실질적으로 적용하고 개발할 수 있는 지속적인 관심과 연구지원이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Abraham, V. and Desai, B. M. Fast neutron induced increase of flowering in *Portulaca grandiflora* Linn. Stim. Newsl. 8: 1.
2. Ault, M.R. Gamma emitting isotopes of medical origin detected in sanitary waste samples, Radiat. Prot. Manage. 6, 48, 1989.
3. Bacq, Z.M. Alexander, P. Fundamentals of Radiobiology. 2nd ed., Pergamon Press, Oxford, New York, London, 1961.
4. Baxter, J. and Atkins, T. The Fire Came By, Doubleday, New York, 1976.
5. Besedovsky, H.O. and Sorkin, E. Immune-neuroendocrine interactions. J. Immunol. 135, 750, 1985.
6. Bhatt, B.Y., Bora, K.C., Gopal-Ayengar, A.R. Patil, S.H., Rao, N.S., Shama Rao, H.K., Subbaiah, K.C., and Thakare, R.G. Some aspects of irradiation of seeds with ionizing radiations, in Effects of Ionizing Radiation on Seeds. International Atomic Energy, Vienna, 591, 1961.
7. Bloom, E.T., Korn, E.L., Takasugi, M., Toji, D.S., Onari, K, and Makinodan, T. Immune function in aging atom bomb survivors residing in the United States. Radiat. Res. 96, 399, 1983.
8. Bloom, E.T., Akiyama, M., Kusunoki, Y., and Makinodan, T. Delayed effects of low-dose radiation on cellular immunity in atomic bomb survivors residing in the United States. Health Phys. 52, 585, 1987; Radiat. Res. 116, 343, 1988.
9. Boice, J.D., Rosenstein, M., and Trout, E.D., Estimation of breast doses

and breast cancer risk associated with repeated fluoroscopic chest examinations of women with tuberculosis. *Radiat. Res.* 73, 737, 1978.

10. Bond, V. Justification for the adoption of a "Below Regulatory Concern" exposure level. *Health Phys. Soc. Newsl.* 17, 3, 1989.
11. Brown, O.R., Boehme, D., and Yein, F. Fructose-1,6-diphosphate: a cellular site of hyperbaric oxygen toxicity, *Microbios.* 23, 175, 1979.
12. Brown, O.R. and Song, C. Pyridine nucleotide coenzyme biosynthesis: a cellular site of oxygen toxicity. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 93, 172, 1980.
13. Brown, O.R., Heitkamp, M. and Song, C. Niacin reduces paraquat toxicity in rats. *Science.* 212, 1510, 1981.
14. Brown, O.R. and Seither, R.L. Induction of stringency by hyperoxia in *Escherichia coli*. *Cell. Mol. Biol.* 28, 285, 1982.
15. Brown, O.R. and Seither, R.L. Oxygen and redox-reactive drugs: shared toxicity sites. *Fundam. Appl. Toxicol.* 3, 209, 1983.
16. Bushang, S.C., Glaze, D., Glaze, S. and Singleton, E. Radiation dose to children from X-ray and radioisotope examination. *Health Phys.* 35, 720, 1978.
17. Cannon, H.L. Effects of uranium-vanadium deposits on the vegetation of the Colorado plateau. *Am. J. Sci.* 250, 735, 1952.
18. Caraman, M. and Champy, C. Action of radium rays on seed germination. *C.R. Soc. Biol.* 121: 750, 1936.

19. Chameaud, J., Perraud, R., Lafuma, J.D., Maase, R., and Pradel, J. Lesions and lung cancers induced in rats by inhaled radon-222 at various equilibriums with radon daughters, in *Experimental Lung Cancer*, Karbe, K. and Park, J.F., Eds., Springer-Verlag, New York, 410, 1974.
20. Cobb, C.E. Living with radioactivity. *Nat. Geog.* 175, 402, 1989.
21. Cohen, B.L. Radiation and our society, Background. The Heritage Society, Washington, 76, 1990.
22. Conklin, J.J. and Hagan, M.P. Research issues for radiation protection for man during prolonged space flight. *Adv. Radiat. Biol.* 13, 215, 1987.
23. Cork, J.M. Gamma radiation and longevity of the flour beetle. *Radiat. Res.*, 7: 551, 1957.
24. Cowan, F.P. Everyday radiation. *Physiol. Today.* 5, 10, 1952.
25. Cullen, T.L. and Franca, E.P. Eds. Areas of High Natural Radioactivity. *Acad. Brasileira de Ciencias*, Rio de Janeiro, 1977.
26. Cullen, T.L. and Paschea, A.S. Morro de Ferro, an invitation to radioactivity. *Nota Sci.* 1, 1977.
27. Cullen, T.L., Franca, E.P. and Eisenbud, M. Two decades of research in the Brazilian areas of high natural radioactivity, in *Radiation Protection: A Systematic Approach to Safety*. Pergamon Press. Oxford, 361, 1980. .
28. Daskalov, K., Moynova, K. and Rockstein, M. Effect of UV and gamma ray irradiation of pollen on the manifestation of the heterosis effect on F α tomatoes, *Inst. Genet. Plant Breed. Sofia*, 1973, 5; NSA

- 31: 19931.
29. Dijkman, M.J., Bossm M.L., and Russell, E.R., Extension of life span of *Lemna perpusilla* clone 6746 by ultraviolet irradiation. *Radiat. Res.* 22, 662, 1964.
 30. Ehrenberg, L., Fedoresac, I., and Naslund, M. Possible biochemical mechanisms of radiostimulation of living cells. *Radiat. Newsl.* 5, 1, 1973.
 31. Eisenbud, M. *Environmental Radioactivity*, 3rd ed., Academic Press, New York, 1987; 2nd ed., 1973.
 32. Eyubor, R.E. The effects of presowing irradiation of seeds with Co rays and with neutrons on the technologic characteristics of raw cottn and the amount of fiber produced, *Izv. Akad. Nauk Az. SSR Ser. Biol. Med. Nauk.* 2, 67, 1962.
 33. Fabre, G. Action of radium on plants. *C.R. Soc. Biol.* 70, 419, 1911.
 34. Falta, W. and Schwarz, G. Growth stimulation due to raidum rays. *Berl. Klin. Wochenschr*, 14, 605, 1911.
 35. Faulkner, K. and Moores, B.M. Radiation dose and somatic risk form computed tomography. *Acta Radiol.* 28, 483, 1987.
 36. Gager, C.S. Preliminary notes on the effects of radium rays on plants. *Am. Med.* 9: 1030, 1905.
 37. Galachalova, Z.N., Shkurina, A.M., and Kalashnikove, A.I. Physiological and biochemical features of pea plants grown from irradiated seeds. *Zh. Obsch. Biol.* 1964. 17GI, BA 46: 725.

38. Garen, A. and Zinder, N.D. Radiobiological evidence for partial genetic homology between bacteriophage and host bacteria. *Virology*. 1, 347, 1955.
39. George, K.P., Sundarm, K., Minstry, K.B. and Gopal-Ayengarr, A.R. Investigations on human populations residing in high background radiation areas of Kerala and adjoining regions. *Biological and Environmental Effects of Low- Level Radiation*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 325, 1976.
40. Glubrecht, H. Advances and problems of isotopic labelling in the investigation of nutrient interaction, *in Low Level Radiation*, United Nations, London, 425, 1968.
41. Glubrecht, H. and Niemann, E.G. Stimulating Action of Low Doses of Ionizing Radiation in Plants, 4th Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, United Nations, Geneva, 1971.
42. Grazer, R.E., Meislin, H.W., Westerman, B.R. and Criss, E.A. Exposure to ionizing radiation in the emergency department from commonly performed portable radiographs. *Ann. Emerg. Med.* 16, 417, 1987.
43. Greenstock, C.L. Free-radical processes in radiation and chemical carcinogenesis, *in Advances in Radiation Biology*. Vol. II, Lett, J.T., Ehmann, U.K., and Cox, A.B., Eds., Academic Press, New York, 269, 1984.
44. Grisenko, G.V. Forms of parasitism of optional pathogens on maize. *Mikol. Fitopathol.* 5, 251, 1971; *BA* 54: 10366.
45. Guilleminot, H. Comparative effect of radium radiation and X-rays on germination. *C.R. Acad. Sci. Ser. D.* 145: 798. 1907.

46. Hall, E.J. Radiation and Life. Pergamon Press. New York. 1976;
Radiobiology for the Radiologist, J.B. Lippincott, Philadelphia, 1987.
47. Hanson, G.P. and Komarov, E. Health effects in residents of high
background radiation regions. Biological Effects of Low-Level
Radiation. International Atomic Energy Agency. Vienna, 211, 1983.
48. Hellman, K.B., KiKi, B., Lytle, C.D. and Bockstahler, L.E. Radiation
induced reactivation of herpes simplex virus: effect of caffeine. Mutat.
Res. 36, 249, 1976.
49. Holloway, B.W. and Monk, M. Influence of ultraviolet irradiation on
general transduction in *Pseudomonas aeruginosa*, in Radiobiology,
Ilberg, P.L.T., Ed., Butterworths, London, 231, 1961.
50. Hopkins, C.G. and Sachs, W.H. Radium fertilizer in field tests. Science.
41: 732, 1915.
51. Jacobson, A.P., Plato, P.A., and Toeroek, D. Contamination of the home
environment by patients treated with iodine 131, Am. J. Health Phys.
68, 225, 1978.
52. Jamison, D. Oxygen toxicity and reactive oxygen metabolites in
mammals. Free Radical Biol. Med. 7, 87, 1989.
53. Jenah, R.R. Ionizing radiation and the conceptus: necrophysiologic
effects of prenatal X-radiation on offspring. Ann. Clin. Lab. Sci. 15,
185, 1985.
54. Johnson, D.W. and Goetz, W.A. Patient exposure trends in medical and
dental radiography. Health Phys. 50, 107, 1986.
55. Kaindl, K. and Rosner, M. The accelerating effect of small radiation

- doses on plants. Bayer. Landwirtsch. Jahrb, Sonderh, 42, 11, 1965.
56. Kaler, J.B. Planetary nebulae and the death of stars. Am. Sci. 74, 244, 1986.
 57. Kamiya, N. Protoplasmatologia 8 3a 1-99, 1959.
 58. Khozhiakhmedov, G.K. Khamidov, D.K., Nishanbaev, K.N., and Dalimora, S.N. The effect of small doses of ionizing radiation on the c-AMP system in thyroid gland of chick embryos. Radiobiologia. 26, 514, 1986.
 59. Kim, K.H., Cha, J.W., Huh, J.H., Park, S.H., and Jung, K.S. Studies on the effect of P-32 incorporated into plants. I. Effects of P-32 application to buckwheat, Stim. Newsl. 7, 22, 1975.
 60. Kim, K.H., Cha, J.W., Kim, T.S., Park, B.H., and Kim, H.K., Studies on the effects of P-32 incorporated into plants. II. The influence of interally administered P-32 on the growth of soybean, millet and Salvia, Stim. Newsl. 7, 29, 1975.
 61. Kim, K.H., Son, E.Y., Cha, J.W., Chan, C.I., and Kim, J.J., Studies on the effects of P-32 incorporated into plants. III. Effects of P-32 incorporated into seeds on the growth of flax, soybean, and barley, Stim. Newsl. 7, 39, 1975.
 62. Koernicke, M. Über die Wirkung von Röntgen Strahlen auf die Keimung und das Wachstum, Ber. Dtsch. Bot. Ges. 22, 148, 1904.
 63. Koernicke, M. The effect of radium rays on germination and growth, Ber. Dtsch. Bot. Ges. 23, 155, 1904.

64. Kumuro H. Studies on the effect of Roentgen rays upon the germination of *Oryza sativa*. *Botanical Magazine (Tokyo)* 1924; 38: 1-21.
65. Kuzin, A.M. The utilization of ionizing radiation in agriculture, *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nations, Geneva*, 12, 149, 1955.
66. Kwon, O.Y. Studies on the acceleration of germination in carrot seed. II. Effects of X-ray and ultraviolet light in the germination of carrot seeds, *Korean J. Bot. (Shingmul Hakhoe Ji)*, 13, 15, 1970.
67. Laser, H., *Proc. 2nd Int. Congr. Radiation Research Harrogate*. 430-448, 1963.
68. Liu, S.Z. Effects of low dose ionizing radiation on defense and adaptive mechanisms. *Conf. High Background Area Research, Taishan, November 1988; China Med. J.* 102, 750, 1989.
69. Lockhart, L.B. *The Natural Radiation Environment*. University of Chicago Press, Chicago. 1964.
70. Loew, O. On the treatment of crops by stimulating compounds, *Bull. Coll. Agric. Tokyo Imp Univ.* 6, 161, 1913.
71. Luckey, T.D. Antibiotics in nutrition, in *Antibiotics, Their Chemistry and Non-Medical Uses*, Goldberg, H.S., Ed., D Van Nostrand, Princeton, 174, 1959.
72. Luckey, T.D. *Hormesis with Ionizing Radiation*. CRC Press Inc. Boca Raton, 1980.
73. Luckey, T.D. Physiological effects from levels of ionizing radiation.

Health Phys. 43, 771, 1982.

74. Luckey, T.D. Hormesis with Ionizing Radiation. CRC Press, Boca Raton, FL, 1980. Also in Japanese, Soft Science, Inc., Tokyo, 1990.
75. Luszczynski, K., Bargwald, J., Grimmer, D.P., Ringermacher, H. and Suttén, S. Radiation exposure of air cargo workers at St. Louis international airport. Health. Phys. 35, 523, 1978.
76. Lyon, C.J. 1936. The influence of radiation on plant respiration and fermentation, in Biological Effects of Radiation, Duggar, B.M., Ed., McGraw-Hill, New York, 1936, 1059.
77. Malhotra, R.C., The influence of ultra violet rays, X-rays and temperature on the germination of Zea mays, J. Indian Bot. Soc. 11, 1, 1932.
78. Mandel, P., Shmitt, M.L. Experientia 11, 485, 1956.
79. Martland, H.S. The occurrence of malignancy in radioactive persons. Am. J. Cancer. 18, 2435, 1931.
80. Masure, M.P., The effect of ultraviolet radiation on growth and respiration of pea seeds, with notes on statistics, Bot. Gaz (Chicago), 93, 21, 1932.
81. McGrath, R.A., Rad. Res. 19, 3, 526, 1963.
82. Mettler, F.A. and Mosely, R.D. Medical Effects of Ionizing Radiation, Grune & Stratton. Orlando, 1985.
83. Mettler, F.A., Christie, J.H., Williams, A.G., Mosely, R.D. and Kelsey,

- C.A. Population characteristics and absorbed dose to the population from nuclear medicine: United States - 1982. Health Phys. 50, 619, 1986.
84. Mewissen, D.J., Pamblon, J., and Bacq, J.M., Comparative sensitivity to radiation of seeds from a wild plant grown on uraniferous and nonuraniferous soils, Nature (London), 183, 1449, 1959 & Stratton. Orlando. 1985.
85. Miller, A., Action of β radiation on plants after soaking of seeds in solutions of P-32, Vestn. Stekh. Nauki(Moscow), 11, 141, 1959; BA 36: 61642.
86. Miske, W., Skucinska, B., Huczowski, J., and Cebulska-Wasilewska, A., The effect of low doses of gamma rays and fast neutrons on the growth of carrot callus tissue, Stim. Newsl. 10, 25, 1976.
87. Molisch, H., On the influence of radium rays on higher plants, Sitzungsber. Kais. Akad. Wiss. Wein. Math. Naturwiss., 120, 305, 1912 and 121, 883, 1912.
88. Molisch, H., Forcing of plants by means of radium, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wein, 21, 121, 1913.
89. Montet, D., Action of uranium radiation on vegetation, C.R. Seances Acad. Agric Fr., 18, 28, 1932.
90. Morgan, R.H. Radioactive materials in man and his environment, in Radiation in Man. Meneely, G.R. Ed., C.C. Thomas, Springfield, 403, 1961.
91. NCRP. Radiation Protection Philosophy. Rep. No. 43. National Council on Radiation Protection and Measurements. Washington, 1975.

92. NCRP. Influence of Dose and Its Distribution in Time on Dose-Response Relationships for Low-LET Radiation. NCRP Rep. No. 64. National Council on Radiation Protection and Measurements. Washington, 1980.
93. NCRP. Recommendations on Limits for Exposure to Ionizing Radiation. NCRP Rep. No. 91. National Research Council. Bethesda. 1987.
94. NCRP. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. No. 93. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda. 1987b.
95. NCRP. Exposure of the U.S. Population from Diagnostic Medical Radiation. Rep. No. 100. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda. 1989.
96. Petit, G. and Ancelin, R., Influence of radioactivity on germination, C.R. Acad. Sci. (Paris), 156, 903, 1913.
97. Pilz, F., Action of radium on plants in water culture, J. Chem. Soc., 112, 718, 1916.
98. Pochin, E. Nuclear Radiation: Risks and Benefit. Clarendon Press. Oxford. 1983
99. Ramu, S. Personal letter. 1983.
100. Ray, J. and Pradier, G., Uranium nitrate and manganese nitrate, their advantageous employment in culture of fruit trees, Lengrais, 24, 1029, 1903_4; CA 4: 807.
101. Rivera, V., Action of metals at a distance. Atti Pontificia Accad. Sci.

Nuovi Lincei, 86, 184, 1933; BA 10:330.

102. Rivera, V., Further notes on the biological action of metals at a distance, Atti pont. Accad. Sci. Nuovi Lincei, 86, 240, 1933.
103. Rosenberg, I.H., Beisel, W.B., Gordon, J.F., Katz, M., Keusch, G.T., Luckey, T.D., and Mata, L.J. Infant and child enteritis-malabsorption-malnutrition; the potential of limited studies with low dose antibiotic feeding. Am. J. Clin. Nutr. 27, 304, 1974.
104. Roth, I.S. Hilton, S., Rad Res. 19, 1, 42, 1963.
105. Rusby, H.H., The influence of radioactive earth on plant growth and crop production, N.Y. Bot. Gard. Ann. Rep.,16, 1, 1915; CA 10:1247.
106. Russell, M.A. and Garner, J.M.J., Effects of neutrons on early root development of *Zea mays*, in Neutron Effects on Animals, McDonald, G., Ed., Williams & Wilkins, Baltimore, 1947, 58.
107. Sacher, G.A. Life table modification and life prolongation. *Handbook of the Biology of Aging*. Finch. C.E. and Hayflick, L., Eds. Van Nostrand-Reinhold, New York, 582, 1977.
108. Saeki H. Studies on the effects of X-ray radiation upon germination, growth and yield of rice plants. Journal of the Society of Tropical Agriculture [Taiwan] 1936; 8: 28-38.
109. Samuni, A., Chevion, M., Hapern, Y.S. Ilan, Y.A., and Gopski, G. Radiation-induced damage to T4 bactriophage; the effect of superoxide radicals and molecular oxygen. Radiat. Res. 75, 489, 1978a.
110. Samuni, A and Gopski, G. Radiation induced damage in *Escherichia*

- coli B; the effect of superoxide and molecular oxygen. *Radiat. Res.* 76, 624, 1978.
111. Sato, K. and Yoshio, N. Effects of fast neutrons upon forest tree seeds. II. Relation between intensity of irradiations and the germination of seeds and the growth of seedlings of *Pinus densiflora*, *Sci. Bull. Fac. Agr. Kyushu Univ.* 13, 238, 1951; *NSA* 6: 6253.
112. Schlesinger, M.J., Ashburnes, M., and Tissieres, J. *Heat Shock: From Bacteria to Man*. Cold Spring Harbor Laboratory. Cold Spring Harbor. 1982.
113. Schmitz-Feuerhake, I. and Carbonell, P. Evaluation of low level effects in the Japanese A-bomb survivors after current dose revisions and estimation of fallout contribution. *Biological Effects of Low-Level Radiation*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 45, 983.
114. Schulz, R.K., Survival and yield of crop plants following beta radiation in *Survival of Food Crops and Livestock in the Event of Nuclear War*, Bensen, D.W. and Sparrow, A.H., Eds., U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tenn., 370, 1971
115. Selman, J. *The Fundamentals of X-ray and Radium Physics*, C.C. Thomas, Springfield. 1977.
116. Selye, H. *The stress of Life*, McGraw Book Co. New York. 1956.
117. Shull C, Mitchell J. Stimulative effects of X-rays on plant growth. *Plant Physiology* 1933; 8: 287-296.
118. Simon, J. and Pasztor, M., Short review of tomato radiostimulation experiments in the eastern European countries, *Stim. Newsl.* 7, 47, 1975.

119. W. Simonis. Physiological problems related to the effects of small doses of radiation on plants. Institute of Botany, University of Würzburg, Federal Republic of Germany
120. Sochurek, H. Medicine's New Vision. *Nat. Geo.* 171, 2, 1989.
121. Solon, L.R. Investigations of natural environmental radiation. *Science.* 131. 903, 1960.
122. Southam, C.M. and Ehrlich, J. Effects of extract of western red-cedar heartwood on certain wood decaying fungi in culture. *Phytopathology.* 33, 517, 1943.
123. Sparrow, A.H. and Christensen, E. Effects of X-ray, neutron, and chronic gamma irradiation on growth and yield of potatoes. *Am. J. Bot.* 37, 667. 1950.
124. Stebbing, A.R.D. Growth Hormesis: a by-product of control. *Health Phys.* 52, 543, 1987.
125. Stebbing, A.R.D. Hormesis: Interpreting the β -curve Using Control Theory. *J. Appl. Toxicol.* 20, 93-101, 2000.
126. Stoklasa, J. Effect of radioactivity in physiology, *Zentralbl. Bakt. Parasitenkd. Infektionskr. Hyg. Abt. 2.* 40, 266, 1914.
127. Stoklasa, J., Ueber die verwendung der Radioaktivitat in Gartenbau, *Gartenbauwissenschaft*, I, 141, 1928.
128. Suess, A., Effects of small radiation doses in seed grain irradiation, *Bayer. Landwirtsch. Jahrb.*, 42, 42, 1965.
129. Thaug, M.M., Stimulating effects of nuclear radiation on development

- and productivity of rice plants. *Nature*(London), 186, 982, 1960.
130. Tuschi, H., Altmann, H., Kovac, R., Topalogou, A., Egg, D., and Gunther, R. Effects of low dose radiation on repair processes in human lymphocytes. *Radiat. Res.* 81, 1, 1980.
 131. University of Würzburg, Institute of Botany, unpublished work.
 132. UNSCLEAR. Cosmic Rays. United Nations. New York, 1982.
 133. UNSCLEAR. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. United Nations. New York, 1982.
 134. Vassileva-Dryanovska, O., and Izvorska, N. Radiostimulation and inhibition of peas by ionizing irradiation, *C.R. Acad. Bulg. Sci.*, 18. 565. 1965; NSA 20: 45387.
 135. Vlasyuk, P.A., The effect of nuclear radiations on plants, *Cont. Acad. Sci. USSR Peaceful Uses of Atomic Energy. Enrg. Trans. of Sessions of Div. of Biol. Sci.* 2:89__99.
 136. Vlasyuk, P.A., Effect of ionizing radiation on the physiological-biochemical properties and metabolism of agricultural plants, *Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR*, 1964: 24__31. NSA 20:45453.
 137. Wagenr, H.N. and Ketchum, L.E. *Living with Radiation: the Risk, the Promise*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1989.
 138. Wanner, H. *Schweiz. Z. allg. Path. Bakt.* 8 (Suppl.) 1-64, 1945.
 139. Wassiljew, I.M. Einfluss von ionisierenden Strahlen auf Pflanzen *Radiophysiolog. Mitt. (russ).* Moskow (1962).

140. Weast, R.C., Astle, M.J., and Beyer, W.H. CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press Boca Raton, FL. 1988.
141. Wilkinsn, G.S., Tietjen, G.L. Wiggs, L.D., Galko, W.A., Acquarella, J.F., Reyes, M. Voelz, G.L., and Waxweiler, R.J. Mortality among plutonium and other radiation workers at a plutonium weapons facility. Am. J. Epidemiol. 125, 231, 1987.
142. Wilkinson, G.S., Voelz, G., Wiggs, L.D. Galke, W.A., Tietjen, G.L. and Acquavella, J.F. The authors reply. J. Am. Med. Assoc. 127, 1323, 1988.
143. Wohlbold, H., The influence of radium on vegetation. Dtsch. Landwirtschaftl. Presse, 63, 615, 1936.
144. Yallow, R.S. Reappraisal of potential risks associated with low-level radiation. Comments Molec. Cell.. Biophys. 1, 149, 1981.
145. Yallow, R.S. The contributions of medical physicists to radiation phobia. Med. Phys. 16, 159, 1989.
146. Zelles, L., A model for the UV stimulation of pollen tube growth in *Pinus Silvestris*, Biophysik, 9, 142, 1973.
147. Zelles, L., Effects of low dose radiation on the tube growth of *Pinus silvestris*, in press.
148. Zhezhel, N.G., Effect of natural radioactive substances on the yield of agricultural crops, Conf. Acad. Sci. U.S.S.R. Peaceful Uses of Atomic Energy. Session Div. Biol. Sci., Moscow, 2, 101, 1955.
149. Zhezhel, N.G., Studies on the mechanism of the biological effect of small doses of ionizing radiation in plants, Vestsel'Skokhoz Nauk, 8,

123, 1958; BA 45: 88387.

150. Zykova, I.A., Sokolova, N.B., and Iaskova, V.Z. Characteristics of peripheral blood lymphocytes in persons working with ionizing radiation sources. Med. Radiol. (Mosk.), 29. 58. 1984.
151. 大由ハルミ, 由田. 底線量放射線の健康影響 -- 放射線ホルミツス. Radioisotopes. 46. 360. 370. 1997.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/ - /			
제목 / 부제	저선량 방사선과 식물 생육		
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	김 제 성 (동위원소·방사선응용연구팀)		
연구자 및 부서명	이혜연 (동위원소·방사선응용연구팀) 박홍숙 (동위원소·방사선응용연구팀)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	48	도표	있음(○), 없음()
발행년	2001.		
크기	Cm.		
참고사항			
비밀여부	공개(○), 대외비(), 급비밀	보고서종류	기술분석보고서
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>이온화 방사선은 우주 방사선과 자연 방사선 및 의학 목적으로 사용되는 방사성 핵종, 그리고 핵 산업 혹은 방사선 낙진등으로부터 방출된다. 이러한 방사선을 종자나 유식물에 적당한 저선량으로 쬐어주었을 때 대조구에 비해 발아율과 호흡율의 증가, 개체 발달의 증가 그리고 개화시기의 연장 등 더욱 유익한 효과를 볼 수 있다. 고선량에서는 유해한 효과를 보이지만 적당한 저선량에서는 유익한 효과를 나타낸다는 hormesis효과를 포유 동물의 경우 면역력의 증가, 암 발생율의 억제, 수명연장 등을 통해 관찰할 수 있고 식물의 경우에는 발아, 출아, 생장, 발육, 개화, 질병 저항력 증가 등을 들 수 있다</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	이온화 방사선, hormesis, 발아, 호흡, 개체발달의 증가, 수명증가, 질병 저항력증가		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/							
Title / Subtitle		Low Dose Radiation and Plant Growth					
Project Manager and Department (or Main Author)		Jae-Sung Kim (RI and Radiation Application Team)					
Researcher and Department		Hae-Youn Lee (RI and Radiation Application Team) Hong-Sook Park(RI and Radiation Application Team)					
Publication Place	Taejon	Publisher		Publication Date	2001. 3.		
Page	48	Fig. and Tab.	Yes(O), No ()	Size	Cm.		
Note							
Classified	Open(O), Restricted(), Class Document		Report Type	State of Art Report			
Sponsoring Org.			Contract No.				
Abstract (15-20 Lines)	<p>Ionizing radiation includes cosmic radiation, earth radiation, radionuclides for the medical purpose and nuclear industry, fallout radiation. From the experimental results of various radiation effects on seeds or seedlings, it was found that germination rate, development, respiration rate, reproduction and blooming were accelerated compared with the control.</p> <p>In mammal, hormesis phenomenon manifested itself in increased disease resistance, lifespan, and decreased rate of tumor incidence. In plants, it was shown that germination, sprouting, growth, development, blooming and resistance to disease were accelerated.</p>						
Subject Keywords (About 10 words)	<p>Ionizing radiation, hormesis, germination, respiration, development, increased lifespan, resistance to disease</p>						