



KR9900157

KAERI/RR-1834/97

국제공동연구사업
최종보고서

지표생물을 이용한 방사선량 감시

Biological Monitoring of Radiation using Indicators

주관연구기관
한국원자력연구소

공동연구기관
폴란드원자물리연구소

과 학 기 술 부

30-48

h

KAERI/RR-1834/97

국제공동연구사업
최종보고서

지표생물을 이용한 방사선량 감시
Biological Monitoring of Radiation using Indicators

주관연구기관
한국원자력연구소

공동연구기관
폴란드원자물리연구소

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “지표생물을 이용한 방사선량 감시”과제의 최종보고서로 제출합니다.

1998. 9.

주관연구기관명 : 한국원자력연구소

주관연구책임자 : 김진규

연 구 원 : 천기정

연 구 원 : 임용택

공동연구기관명 : 폴란드원자물리연구소

공동연구책임자 : 안토니나 체불스카-바실레브스카

(Antonina Cebulska-Wasilewska)

연 구 원 : 크리스티나 레카스

(Krystina Rekas)

요 약 문

I. 제 목

지표생물을 이용한 방사선량 감시

II. 공동연구개발 목적 및 상대국과의 공동연구 역할분담 체계

폴란드원자물리연구소는 원자력선진국들과 협력체제 하에서 방사선지표생물에 관한 장기간의 연구수행 경험을 보유하고 있다. 따라서 한국원자력연구소와 폴란드원자물리연구소간의 공동연구를 통하여 선형적 연구기술을 도입하는 한편 방사선지표식물인 자주달개비에 관한 응용연구기술을 선진화함에 연구목적을 두고 있다. 두 기관이 각각 보유한 방사선 조사시설 및 연구시설과 인력을 활용한 병립적 연구를 기본으로 하였으며 중요 연구항목에 대하여는 공동연계실험을 수행하였다.

III. 공동연구기관 및 연구책임자의 연구수행능력

○ 공동 연구기관

헨리크 니보드니차인스키 원자물리연구소 (폴란드 크라쿠프)

The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics (Kraków, POLAND)

○ 공동연구 책임자

Prof. Antonina Cebulska-Wasilewska, Dr. hab.

(방사선환경생물실 실장)

○ 연구능력

INP 연구소의 방사선환경생물연구실은 상기 공동연구책임자의 주관 하에

20년 이상 방사선생물학분야의 연구기술을 축적해왔다. 방사선지표생물 연구와 관련하여서는 미국의 Brookhaven연구소, 네덜란드 Leiden 대학의 연구진 등도 INP의 연구에 직·간접적으로 참여함으로써 그 연구능력을 인정하고 있다. 또한 유럽에서 다국적과제로 수행하는 여러 가지 방사선관련 연구에 주도적으로 또는 적극적으로 참여하여 활약함으로써 INP의 연구능력을 인정받고 있다.

IV. 공동연구개발의 내용 및 범위

1. 지표생물 증식 및 특성분석
2. 저 LET 방사선 반응 수립
3. 고 LET 방사선(중성자)에 대한 TSH 반응성 규명
4. 복합선질에 의한 생물지표성 평가
5. 방사선과 환경요인의 공조작용 해석

V. 공동연구개발 결과

1. 지표생물 증식 및 특성분석

자주달개비 T-4430, T-02 및 KU9 클론을 공동연구기관인 폴란드원자물리연구소로부터 무상으로 입수하였다. 이들 stock culture를 전용온실내에서 증식시켜 보유하고 있으며 공동연구용 재료로는 공동연구기관과의 합의에 의해 연구초기에 400본 이상의 식물체가 확보된 T-4430 클론을 사용하였다. 한편 T-4430 및 KU9 클론에 대하여 수술털수(hairs per stamen), 수술털의 세포수(cells per hair), 자발돌연변이율(spontaneous mutation rate) 등의 기초 특성자료를 확보하였다.

2. 저 LET 방사선 반응 수립

한국원자력연구소 저준위 조사시설의 ^{60}Co 선원을 이용하여 0.1~6.0Gy

의 감마선을 조사후 돌연변이율을 분석한 결과 2.0Gy까지는 방사선량의 증가에 따라 돌연변이율이 선형적으로 증가하는 양상을 보였으나 2.0Gy 이상의 선량에서는 돌연변이율이 감소하는 선량포화현상을 나타냈다.

한편 X선에 대한 선량반응 실험은 두 기관간 연계실험으로 수행되었다. 한국원자력연구소의 검교정용 표준선장에서 0.0, 0.3, 0.5Gy를 조사한 후 공시재료를 폴란드원자물리연구소로 이송하여 INP 연구인력의 보조하에 TSH assay를 실시하였다.

3. 고 LET 방사선에 대한 TSH 반응성 규명

방사선 조사는 한국원자력연구소의 californium-252 중성자 선원을 이용하였다. 2회의 KAERI-INP 연계실험과 1회의 한국원자력연구소 단독실험이 수행되었다. 중성자를 조사하였을 때의 TSH 분홍돌연변이율의 증가는 0.005Gy~0.2Gy의 조사선량 범위에서 선형적 양상을 보였으며 TSH 분홍돌연변이 유발에 있어서 RBE 값이 3.1~6.8의 범위로서 지금까지 보고된 중성자의 RBE 값들의 범위에 속하고 있었다.

4. 복합선질에 의한 생물지표성 평가

선질이 다른 두가지 방사선에 의한 TSH 돌연변이 반응을 평가하기 위하여 한국원자력연구소의 저준위 조사시설의 ^{60}Co 선원과 표준선장의 ^{252}Cf 선원을 사용하여 포트에 식재된 T-4430 식물체를 조사하였다. 중성자의 조사선량은 0.00078Gy였으며 감마선은 0.1~2.0Gy의 선량으로 조사하였다. 중성자만을 조사하였을 경우의 돌연변이율은 자발돌연변이율과 유의한 차이를 나타내지 않았으나 감마선+중성자 조사군에서는 감마선 조사군에 비해 약 12%의 돌연변이율 상승효과가 나타났으며 중성자+감마선 조사군에서는 돌연변이율 상승이 25%에 달하였다.

5. 방사선과 환경요인의 공조작용 해석

기온일교차(DTD) 및 광주기(PP)가 감마선에 의한 T-4430 돌연변이에 미치는 영향을 평가하였다. 포트에서 생육된 식물체에 코발트 선원으로부터 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0Gy의 감마선을 조사하였다. 방사선 조사된 식물체는 전 실험기간에 걸쳐 각기 다른 실험환경 조건을 갖춘 성장상내에서 유지하였다. 대조군 (CT 및 DTD0)는 20℃, 상대습도 75%, 광도 15,000 lux의 명기 14시간, 암기 10시간의 조건이었으며 PP20 실험군은 명기 20시간, 암기 4시간, 그리고 PP4 실험군은 명기 4시간, 암기 20시간을 유지하였으며 나머지 실험조건은 CT 실험군과 동일하게 유지하였다. 한편, DTD20 실험군은 명기14시간 동안 28℃, 암기 10시간동안 8℃로 기타 조건은 CT와 동일하였다.

CT 실험군의 경우 돌연변이 빈도가 증가한 고조기간은 방사선조사후 7~14일 이었으며 돌연변이 빈도는 선량증가에 따라 선형적으로 증가하는 반응관계를 보였다 (회기계수=0.98). 각 실험의 선량반응식에서의 기울기(증가계수)는 5.99 (CT), 6.93 (PP20), 8.01 (DTD20) 그리고 11.74 (PP4)로 나타났다. 1.0Gy 조사 실험군을 기준으로 볼 때 최대돌연변이율은 각각 9.21 (PP20), 10.07 (CT), 11.56 (DTD20) 및 16.44 (PP4)였다. 또한 방사선조사후 최고돌연변이율을 기록한 날짜는 6일 (PP20), 11일 (CT), 13일 (DTD20) 그리고 18일 (PP4)이었다. 최대돌연변이율이 나타나는 시기는 CT 및 DTD20 실험군에서는 정상적인 7~14일 사이였다. 그러나 PP실험군의 경우는 정상적 고조기간을 벗어나 PP20에서는 6일, PP4에서는 18일째에 최대돌연변이율을 보였다. 이는 비정상적 광주기는 T-4430 식물체에서 방사선유발 돌연변이에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 세포내에 나타나는 방사선 손상을 회복하는 과정이 비정상적 환경요인에 의하여 교란되기 때문에 나타나는 현상으로 해석된다.

특히 본 연구를 통하여 방사선이 돌연변이를 유발함에 있어서의 생물학적 효용성 (biological efficacy)이 환경요인에 의하여 변화되는 것이 확인되었다. 정상적인 대조군에 비해 DTD20 실험군에서는 30%, 그리고 PP4 실험군에서는 90%가 넘는 방사선의 생물학적 효용성 증가가 기록되었다.

결론적으로 큰 폭의 기온일교차와 비정상적 광주기는 환경적인 스트레스로

작용하기 때문에 자주달개비 수술타에 있어서 방사선에 의해 유발되는 체세포 돌연변이의 부가적 증가와 함께 방사선에 의한 돌연변이의 고조기간을 지연시키는 원인이 된다.

VI. 공동연구결과의 활용계획

한국원자력연구소와 폴란드원자물리연구소간의 공동연구를 통하여 방사선 지표생물인 자주달개비를 응용한 제반 연구기법을 확립하였다. 특히 기관간 연계실험을 수행함으로써 두 기관이 보유한 연구장점을 최대로 활용할 수 있었다. 본 연구를 통해 확립된 실험기술, TSH 돌연변이 분석기술 및 자료해석 기술 등은 한국-폴란드간의 호혜적 협력관계 발전을 위한 기술근거로 활용될 것이다.

SUMMARY

I. Title of Project

Biological Monitoring of Radiation using Indicators

II. Objectives of Research and Division of Role for Cooperation

Poland Institute of Nuclear Physics (INP) has the plentiful experiences of research on radiation indicators. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) is aiming to acquire advanced technologies in *Tradescantia* application study through the cooperation between KAERI and INP. Related research facilities and personnels of the two institutes are involved in parallel research and are subject to do, if necessary, joint experiments on major topics.

III. Institute and Counterpart of Cooperation

○ Institute of cooperation

The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics (Kraków, POLAND)

○ Counterpart

Prof. Antonina Cebulska-Wasilewska, Dr. hab.

(Head, Department of Radiation and Environmental Biology)

○ Research ability

Department of Radiation and Environmental Biology of INP has experienced in radiation biology researches under the guidance of Prof.

Cebulska-Wasilewska for more than 20 years. Many researchers from Brookhaven National Laboratories and Leiden university are currently involved in INP's research programs and thus they recognize INP's high ability of research. INP is taking major part in various multinational programs and EU collaborative projects.

IV. Work Scopes of Cooperative Research

1. Culture of *Tradescantia* plants
2. Response of TSH mutation to low LET radiation
3. Response of TSH mutation to high LET radiation (neutrons)
4. Response of TSH to mixed irradiation with different radiations
5. Synergism between radiation and environmental factors

V. Results of Research

1. Culture of *Tradescantia* plants

Tradescantia T-4430, T-02 and KU9 clones from INP are maintained as stock cultures in the green house of KAERI. T-4430 has been mass-propagated for the experiments. Such biological characteristics as hairs per stamen, cells per hair and spontaneous mutation rate were carefully analyzed on T-4430 and KU9 clones.

2. Response of TSH mutation to low LET radiation

Cuttings of T-4430 were irradiated with 0.1 to 6.0Gy of gamma ray from ^{60}Co source of KAERI. Pink and colorless mutation frequencies increased with radiation dose upto 2.0Gy and reached their saturated values at higher doses.

A joint experiment was done with X-rays. Cuttings irradiated with 0.0, 0.3 and 0.5Gy of X-ray at KAERI were transported to INP, where TSH assay had been carried out by INP research personnels.

3. Response of TSH mutation to high LET radiation (neutrons)

T-4430 cuttings were irradiated with neutrons from californium-252 source at KAERI. Seperate experiments were done ; one joint experiment and one KAERI experiment. Pink mutation frequencies in TSH showed a linear increase with neutron doses of 0.005Gy to 0.2Gy. And the relative biological efficiency (RBE) of neutrons in pink mutation induction were estimated 3.1 to 6.8 which were well matched with the reported values.

4. Response of TSH to mixed irradiation with different radiations

To assess the response of TSH gene mutation to mixed irradiation, potted T-4430 plants were irradiated with gamma radiation from ^{60}Co and with neutrons from ^{252}Cf source or vice versa. Neutron dose was 0.00078Gy and gamma doses were 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 and 2.0Gy. The group irradiated only with neutrons showed similar mutation rates to those of natural plants. Mixed irradiation of gamma+neutrons increased by 12% the biological efficacy of radiation in mutation induction, compared to gamma irradiation. On the other hand, mixed irradiation of neutrons+gamma caused 25% of enhancement in the induction of TSH mutations.

5. Synergism between radiation and environmental factors

This part deals with the impact of diurnal temperature difference (DTD) and photoperiod (PP) on mutagenecity of ionizing radiation in T-4430 clone. Potted plants were irradiated with 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 and 2.0Gy of gamma radiation from ^{60}Co . During the period of experiment, the

irradiated plants were maintained in growth chambers under differently controlled environmental conditions. For control (CT), the plants were at a constant 20°C and relative humidity 75%, with 14-h day of 15,000 lux and 10-h night. In PP20, the day length was 20 hours with the other conditions the same as in CT. In PP4 set, all conditions were the same as in CT except for 4 hours of day length. In DTD20, irradiated plants were maintained at 28 degrees during 14-h day and 8 degrees during 10-h night. Scoring of mutations was done from day 1 to day 30 after irradiation. Mutation frequency was expressed in pink events/100 hairs.

In all irradiated group of CT, the mutation rates showed the highest values from 7th day to 14th day after irradiation (peak interval) then came down toward the background level. High regression coefficient (>0.98) for each dose-response curve meant that the relationship was clearly linear in the dose range. The slope of the curve was 5.99 (CT), 6.93 (PP20), 8.01 (DTD20), and 11.74 (PP4). As for the 1.0Gy irradiated group in each experiment, the highest mutation rate was 9.21 (PP20), 10.07 (CT), 11.56 (DTD20) and 16.44 (PP4), respectively. The time of maximal rate was also different; day 6 (PP20), 11 (CT), 13 (DTD20) and 18 (PP4).

The highest mutation rates in CT and DTD20 were normally seen during 7th day to 14th day, while the highest value in PP experiment far deviated from the norm. It was on day 6 in PP20 and on day 18 in PP4. Such a shift in peak time and peak interval implied that the photoperiod could change the mutagenicity of ionizing radiation in the plants. The repair processes for radiation damage in the plant were perturbed by unfavorable environmental regime. There were increases of the biological efficacy of radiation in the induction of pink mutation by 30% in DTD20 and more than 90% in PP4, respectively. PP had more crucial impacts on

Tradescantia pink mutations than DTD. In conclusion, the environmental conditions unfavorable to plants had an additive effect on radiation-induced mutations and a delaying or inhibiting effect on damage repair, as well.

VI. Plan for Use of the R & D results

KAERI and INP have established wide variety of research techniques applicable to *Tradescantia* study through the cooperative project. The joint experiment, in special, made it possible to utilize the merits of both institutes. All the skills such as TSH assay, joint experiment and data analysis technique can make the role of fundamental basis for the better relationship between Korea and Poland.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. State of the Art	7
Chapter 3. Division of Role for Cooperation	15
Chapter 4. Institute and Counterpart of Cooperation	17
Chapter 5. Work Scopes and Results of Cooperative R & D	19
Chapter 6. Achievement of Aims and Role-Playing	71
Chapter 7. Plan for Use of the R & D results	75
Chapter 8. References	77
Appendices	83

목 차

제1장 서론	1
제1절 공동연구 추진배경	1
제2절 지표생물의 의미	2
제3절 자주달개비의 특징	4
제2장 국내외 기술개발현황	7
제1절 국외 연구 현황	7
제2절 국내 연구 현황	8
제3절 연구개발사례의 분석 및 평가	9
제3장 상대국과의 공동연구 역할분담 체계	15
제4장 공동연구기관 및 연구책임자의 연구수행능력	17
제1절 공동연구기관	17
제2절 공동연구책임자의 연구수행능력	18
제5장 공동연구개발 수행 내용 및 결과	19
제1절 연구재료 및 방법	19
제2절 지표생물의 고유 특성자료	22
제3절 저 LET 방사선 반응 수립	23
제4절 고 LET 방사선(중성자)에 대한 TSH 반응성 규명	26
제5절 복합선질에 의한 생물지표성 평가	42
제6절 방사선과 환경요인의 공조작용 해석	50
제6장. 공동연구개발 목표 달성도 및 대외기여도	71
제7장. 공동연구개발결과의 활용계획	75
제8장. 참고문헌	77
부 록	83

제 1 장 서 론

제1절 공동연구 추진배경

1994년 12월 10일 한국의 과학기술처에서 열렸던 한·폴 과학기술장관회담에서는 이듬해인 1995년 5월 폴란드 바르샤바에서 제1차 한·폴 과학기술 공동위원회를 개최하기로 합의하였으며 본 연구과제를 포함한 8개 제안과제에 대하여 공동연구를 추진하기로 합의함으로써 한국과 폴란드간의 공동연구의 기틀이 마련되었다.

한국원자력연구소 (KAERI)와 폴란드원자물리연구소 (INP) 두 기관은 방사선 지표생물 연구는 물론 방사선생물학, 방사선 환경분야 및 핵의학에 이르는 폭넓은 분야에 걸쳐 공동관심 사항을 여러 가지 경로를 통하여 서로 확인할 수 있었다. 제1차 한·폴 과학기술 공동위원회 개최에 따른 후속조치로서 1995년 12월 KAERI-INP 공동연구에 관한 약정서 (MOU)를 체결하였다 [부록 1]. 특히 폴란드원자물리연구소 소장 (Prof. Andrzej Budzanowski) 및 국제협력 관련 부서에서는 한국원자력연구소와의 공동연구추진에 적극적인 자세를 경주함으로써 양 기관간 양해각서가 1995년 말을 기해 체결되었다. 이때 폴란드 원자물리연구소의 상급 정부 기관인 폴란드 원자력청 (Polish Atomic Energy Agency) 장관 Dr. Niewodniczanski도 한국과의 공동연구에 각별한 관심을 표명한 바 있다 [부록 2 참조].

체결된 합의각서에 따라 공동관심 분야에 대한 양 기관의 독립적 연구수행을 원칙으로 하며 필요에 따라 양 기관이 공동 참여하는 연계실험을 실시하는 방식으로 공동연구개발에 착수하게 되었다. 한국원자력연구소는 본 공동연구를 통해 폴란드원자물리연구소의 연구시설과 숙련된 인력을 공동 활용하는 동시에 장기간 축적된 방사선생물학 관련기술을 빠른 기간내에 습득할 수 있는 기회로 삼을 수 있었다. 연구원 교환, 공동실험 수행 등의 과정을 거쳐 습득된

기술은 한국적 실정에 맞도록 개선된 기술로 발전시켜 실용화에 접근할 수 있는 응용기술로서 자리잡을 수 있을 것으로 판단된다.

제2절 지표생물 (biological indicators)의 의미

생물체는 주변의 생물이나 무생물적 환경요인들과 상호작용을 하며 살아가는데 환경요인의 일정한 범위 내에서만 생존과 서식이 가능하다. 내성한계를 벗어나는 환경조건은 생물체에 대하여 불리한 자극요인 또는 위해요인으로 작용하게 된다. 한편 생물체는 일정한 범위 내에서라도 환경조건의 변화에 대한 반응을 나타내는데 특정한 요인의 변화에 대해 민감하게 반응하는 생물을 지표생물이라 한다. 이같이 환경질(環境質)의 변화를 역반영할 수 있는 생물리트머스의 예는 많다. 산성토양에서 잘 번식하는 식물인 수영 (*Rumex acetosa*)은 산성토양에 대한 좋은 지표가 되고 있으며 아황산가스의 농도가 높은 곳에서는 생존할 수 없는 지의류는 대기오염의 지표생물로 손꼽힌다. 또한 노간주나무 (*Juniperus utilis*)는 뿌리를 지하 깊은 곳까지 뻗는 목본식물로서 서식토양으로부터 우라늄을 흡수 농축하는 것으로 알려져 있기 때문에 이 식물 지상부의 우라늄 농도를 측정하면 지하토양의 우라늄 농도를 역추산할 수 있는 지표식물의 하나이다. 한편 일부 생물의 서식 또는 분포자체가 사회환경의 변화양상을 반영하는 경우도 있다. 개망초 (*Erigeron annuus*), 망초 (*E. canadensis*), 서양민들레 (*Taraxacum officinale*) 등의 외래식물종이 자연환경에 대한 인위적 간섭정도를 간접적으로 나타낼 수 있는 도시화지수를 산출하는 지표생물이 되기도 한다.

지표생물로서 실제 이용이 되기 위해서는 선정된 생물체가 다음과 같은 조건들을 가급적 많이 충족시킬 수 있어야 한다 [1]. 첫째, 분류학적 불확실성은 자료해석의 오류 원인이 될 수 있기 때문에 생물종에 대한 동정이 쉬운 종류

여야 하며 전문가나 특수장비의 동원없이 손쉽게 구할 수 있는 종류여야 한다. 둘째, 제한적 분포를 가지는 생물종의 경우는 생물 지표성(indicatorship)의 보편성이 결여될 가능성이 있기 때문에 광범위한 서식범위를 가지는 생물종이 좋으며 특히 개체생태학적 조사자료가 풍부한 생물종은 실험결과의 분석을 위한 기초자료가 충분하므로 지표생물로 활용될 때의 장점이 있다. 셋째, 특정물질(오염물질 등)에 대한 반응도가 뛰어난 종류일수록 양호한 지표생물이 될 수 있다. 즉, 오염물질을 체내에 많이 농축시키거나 생리학적으로 민감한 반응을 나타내는 생물종일수록 연구 또는 실제 응용이 용이하다. 넷째, 실제의 야외관찰 결과를 실험적으로 검증할 수 있어야 하므로 실험조건하에서의 배양과 증식이 손쉬운 종류여야 한다. 다섯째, 유전적 변이가 큰 생물종은 생물학적 지표반응 자체의 변이를 나타내므로 가급적 유전적 변이가 적은 종류가 지표생물로 선정되어야 한다. 여섯째, 생태계 내에서 안정성을 갖추고 있는 이른바 ecological niche가 일정한 종류여야 지표생물로 이용 가능하다.

환경내에는 생물체에 대한 여러 가지 스트레스 요인이 존재하며 일부 생물은 이러한 요인의 변화에 민감하게 반응한다. 이온화방사선도 일정 준위 이상일 경우 스트레스의 한 요인으로 작용하여 세포물질의 구조변화에서 생물체 손상에 이르기까지 다양한 생물반응을 유발한다고 하는 것은 잘 알려진 사실이다. 꽃색에 있어서 유전적 이형성을 가지고 있는 자주달개비 클론들은 이온화방사선에 의한 영향이 체세포 돌연변이에 의한 색깔변화로 나타나며 이를 손쉽게 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 Muller & Streffer (1991) [2]가 제시한 이온화방사선에 대한 생물지표로서의 조건들은 대부분 충족시키고 있다 (표 1).

표 1. 방사선에 대한 생물지표가 갖춰야할 일반기준

-
- 1) Good dose response relationship
 - 2) Specificity for radiation
 - 3) Availability in time
 - 4) Permanency of radiation effect
 - 5) Localization possibility
 - 6) Applicability to chronic or fractionated dose
 - 7) Coverage for radiation quality
 - 8) Accessibility to test materials
 - 9) Convenience in data evaluation
-

제 3 절 자주달개비의 특징

자주달개비는 분류학적으로 달개비과 (Family Commelinaceae)에 속하는 현화식물이다. *Tradescantia*속에 다양한 종들이 속해 있으며 제각기 형태학적 특징, 핵형, 성장특성 등이 다르다 [3]. 또한 동일종이라 해도 염색체 배수성, 구조적 교잡 및 부가적 B 염색체의 존재 여부에 따라 많은 변이를 나타낸다 [4]. 자주달개비 속은 잎을 따라 평행한 잎맥을 갖으며 꽃대는 대부분 두개의 가지로 갈라져 각각이 꽃차례 (취산화서)를 이룬다. 화서 (花序)내 화아 (花芽)는 가장 어린것이 바닥에 자리한 나선상의 배열을 이루며 때로는 미성숙 화아는 포엽 (包葉)에 가려서 보이지 않는 경우도 있다. 한 화서는 8~12개의 화아로 구성되며 각 화아에는 포자를 형성할 발생중인 세포를 포함한 6개의 약 (藥, anther)이 수술대 (stamen)에 달려 있다. 각각의 수술대에는 20~35개의 단세포가 일렬로 연결된 털이 있는 데 그 숫자는 50~120개이다.

수술털의 선단세포는 분열능력이 있어서 발생 또는 분열과정중 방사선에 피폭되면 쉽사리 체세포 돌연변이를 일으킨다. 자주달개비는 꽃색의 표현형이

자주색 (또는 남색)으로 화서의 발생 또는 수술털 세포의 분열과정 중에 방사선을 포함한 돌연변이원이나 발암원에 노출될 경우 쉽사리 체세포 돌연변이를 일으킨다. 남색과 관련이 있는 델피니딘 좌위 (delphinidin loci)가 방사선에 의해 손상을 받으면 세포의 색이 분홍 또는 무색으로 바뀌게 된다. 이같이 수술털의 선단세포가 분열하면서 체세포돌연변이를 일으켜 색깔의 변화를 나타내는 과정을 그림 1에 나타내었다.

자주달개비는 실제로 인간집단이 접하게 되는 수준의 저선량 방사선에도 민감하게 반응하여 유전적 변이를 일으키기 때문에 '생물학적 방사선 감지기구'로서 많은 연구자들의 관심대상이 되어 왔다. 특히 자주달개비의 수술털 (TSH; *Tradescantia* stamen hair) 시스템은 방사선 지표성의 정확도 때문에 환경방사선의 실제 감시 (*in situ* monitoring)에도 적용이 가능하다.

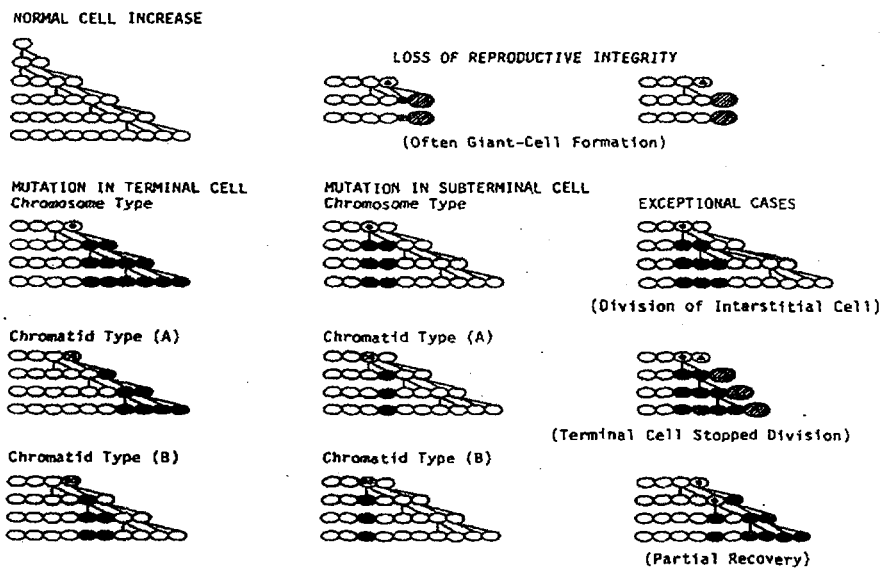


그림 1. 자주달개비 수술털에서 일어나는 각종 돌연변이

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 연구 현황

미국에서는 BNL 연구소를 중심으로 방사선 지표생물로 *Tradescantia*를 선정하고 이에 대한 연구를 활발히 수행해 왔다. BNL 연구소는 실험재료의 생물학적 변이를 배제하기 위하여 수종의 자체 클론을 만들어 사용하고 있으며 많은 나라에서 이 BNL 클론들이 이용되고 있다. 특히 TSH 돌연변이계를 이용하여 원자로 중성자의 생물학적 효과비 (RBE)를 해석하는 등 중성자포획치료법과 연관된 응용실험을 수행한 사례도 있다 [5].

일본은 교토대학교에서 개발된 KU 클론을 연구재료로 이용하고 있다. 우라와현의 사이타마대학교에서는 최근까지 지속적인 연구를 진행하고 있다. 최근의 연구는 저선량에 의한 체세포 돌연변이율 변화에 대하여 초점이 맞춰져 있으며 한편으로는 방사선 이외의 환경내 돌연변이원에 의한 자주달개비 체세포 돌연변이 반응 및 공조작용에 관한 연구도 활발하다.

유럽 각국에서도 실험용 지표생물로는 BNL 클론이 주로 이용되고 있다. 특히 폴란드원자물리연구소에서는 TSH 체세포 돌연변이를 이용한 선량감시 및 환경감시 연구가 세계에서 가장 활발하게 진행되고 있다. 러시아에서도 유사한 연구사례를 찾을 수 있으며 이들은 인공위성에서 받는 우주선 등의 영향을 연구하기 위한 수단으로서 자주달개비를 활용한 바 있다. 현재 각국에서 이용되고 있는 자주달개비 클론별 특성을 요약하면 표 2와 같다 [3,4].

표 2. 자주달개비 BNL 및 KU 클론의 특성자료

클 론	염색체수 (2n)	수술털수/수술	세포수/수술털
BNL 02	12	51	21
BNL 4430	12	53 (61)	24 (25)
BNL 2031	24	125	25
KU 7	18	61	30
KU 9	18	81 (61)	20 (20)
KU 20	18	82	25
KU 27	12	49	21
<i>T. reflexa</i>	12, 24	(75)	(28)

* Numbers in parentheses are from Kim et al. [6].

BNL 4430 = *T. hirsutiflora* x *T. subacaulis* (interspecific hybrid)

BNL 02 = *T. occidentalis* x *T. ohiensis* (interspecific hybrid)

KU 9 = triploid, blue/pink heterozygote, light color, vigorous growth

KU 27 = diploid, blue/pink heterozygote, dark colors, high sensitivity to chemicals

제 2 절 국내 연구 현황

1. 감마선장 실험연구 [7]

권 등 (1981)은 한국원자력연구소 금곡농장의 감마육종장에 선원으로부터 일정한 거리 간격별로 자주달개비를 식재하여 선량에 따른 수술털세포의 돌연변이율을 측정하였다. 방사선장 내의 선량범위는 3.6mR/day에서 182R/day였으며 105R/day 이상의 고선량율을 제외하고는 전 실험범위에 걸쳐 선량이 증가함에 따라 돌연변이율도 비례적으로 증가함을 밝힌 바 있다. 또한 3.6 mR/day의 저선량율의 조건하에서도 T-4430의 돌연변이를 감지할 수 있었으

며 이로써 과수나 관상수의 돌연변이 유발에도 감마선장을 이용할 수 있다는 결론을 얻었다. 이 연구보고가 국내에서는 처음 시도된 방사선 지표생물에 대한 연구이다.

2. 방사선 지표성 연구 [8~20]

한국원자력연구소에서는 자주달개비 식물체의 방사선 감수성에 대한 실험적 자료를 확보하기 위한 방사선 지표생물 연구노력을 기울여 왔다. 방사선 지표생물중 선진국에서 주로 연구에 이용하는 T-4430, T-02, KU 9 클론을 확보하여 증식시키고 있으며 이들을 이용한 방사선 종류별 반응관계 규명은 물론 환경요인, 농약살포 등에 의한 복합적 반응영향에 관한 실험연구가 계속적으로 수행되고 있다. 지금까지의 연구개발 실적으로는 각종 방사선의 저선량 영역에서의 TSH 변이 반응성 판별기법 확립, 자주달개비 생물지표의 감마선, X선 및 중성자에 대한 선량반응관계 수립, TSH 체세포 돌연변이에 있어서의 californium-252 중성자의 생물학적 효과비 검증, 환경인자 (일교차, 광주기 등)와 방사선의 상호작용에 의한 영향 해석 등을 들 수 있다.

제 3 절 연구개발 사례의 분석 및 평가

1. 연구개발 사례의 분석

가. 원자력발전소 주변 환경 선량감시 사례 [21]

Ichikawa와 Nakata (1975)는 하마오카 원전 주변의 9개 지점 (대조지역 1개소 포함)에 자주달개비를 식재한 후 일어난 돌연변이율을 관찰한 결과 발전소로부터 주풍하 방향에 위치한 지점의 돌연변이율이 높게 나타났으며 또한 발전소 시험가동중인 1974. 8. 13~10. 2 기간에는 원전에 가까운 지역의 돌연변이율이 높았다고 보고하였다. 특히 TSH 시스템의 돌연변이율로 역산정

한 방사선량이 물리적 선량계로 측정된 감마선량보다 월등히 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 발전소로부터 방출되는 베타입자 등에 의한 돌연변이율의 증가인 것으로 해석하였다. 따라서 자주달개비를 선량감시 기구로 이용할 경우 발전소에서 방출된 베타선원 및 알파선원의 기여분까지 포괄적으로 추산해낼 수 있는 가능성을 제시하였다.

나. 원자력 사고후 대기중 선량 감시 사례 [22]

체르노빌 원전 사고에 따른 대기오염 및 그 영향을 평가하기 위하여 T-4430을 이용하였다. 폴란드 크라쿠프 지역에서 사고이후 11일 경과 시점부터 자주달개비 수술털 세포의 돌연변이를 감지할 수 있었다. 수술털 백개당 평균 돌연변이 빈도는 1986년에 0.43, 1987년에는 0.21을 나타내어 시간 경과에 따른 공기오염 방사선 물질의 감소추세를 반영하였다. 대부분의 대형 원자력 사고시 방사능 오염의 범위가 주변에 설치된 방사능 감시망 범위를 훨씬 초과하여 나타나기 때문에 이러한 경우의 천연감시망으로서의 대안 가능성이 제시되는 경우로 볼 수 있다.

다. 방사성 물질 오염 토양의 건전성 평가 사례 [23]

1954년 수소폭탄 실험이 수행되었던 비키니 섬에서 채취한 토양에 T-02 클론을 심고 돌연변이 빈도를 측정하였다. 방사능 오염이 없는 일반토양에서 재배된 자주달개비의 경우 1,000모당 돌연변이율이 1.70 ± 0.14 인데 비해 비키니섬의 토양에서 재배된 것의 돌연변이율은 2.58 ± 0.17 로 나타나 토양의 오염도를 알 수 있었다. 오염토양에서 재배된 식물체의 외부피폭 선량은 60.8mR 으로 산정되었으며 토양에서부터 체내로 흡수한 핵종에 의한 내부피폭 선량은 accumulated effective dose로 1.25mGy 로 계산되었다. 따라서 외부피폭보다 내부피폭의 경우가 유발된 돌연변이에 대한 기여도 면에서 큰 의미를 갖는 것으로 확인되었다. 이같은 연구결과에 비추어 TSH 시스템은 오염토양의 건전성 평가에 직접적으로 활용될 수 있음이 밝혀진 것이다.

라. 우주선에서의 방사선 영향 연구 사례 [24]

우주선에 자주달개비 식물체를 탑재하여 우주여행시 받는 방사선 영향을 평가하기 위한 수단으로 사용하였다. 무중력 상태하의 우주선에 탑재된 자주달개비에서는 새로운 형태의 염색체 돌연변이인 'complex nonreciprocal translocations accompanied by spherical fragment'가 관찰되었음이 보고되었다. 따라서 무중력 상태의 우주선이 받는 방사선은 여러 가지 동적 인자들과 더불어 특이한 형태의 염색체 돌연변이를 유발한다는 사실을 알았다.

2. 연구개발 사례의 평가

가. TSH 및 포유동물 세포의 방사선 반응 비교

TSH 분석을 통해 얻어진 각종 연구결과들은 대부분 보편성을 갖고 있으며 통계적으로 매우 정확하기 때문에 자료의 신뢰도가 크다. 특히 저선량 방사선에 반응하여 돌연변이가 나타나는 것은 다른 분석방법으로는 매우 곤란한 부분이었던 저선량 방사선의 생물학적 영향에 대한 평가를 가능케 해주는 것으로 생각된다.

자주달개비의 방사선에 대한 반응이 인간 집단이 환경내에 존재하는 저준위의 돌연변이원에 피폭되었을 때 나타나는 유전적 위해를 대변할 수 있는 지시적 결과인지에 대하여는 회의적 의문이 생길 수 밖에 없다. 그러나 다음과 같은 몇가지의 사항은 자주달개비 시스템을 응용한 연구가 많은 회의적 반응에 대한 희망을 심어줄 수 있다. 첫째, 자주달개비의 자발돌연변이 빈도가 hair-cell division당 10^{-4} order인 점이다. 이 값은 포유동물 세포에 있어서의 자발돌연변이 빈도가 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ /세포세대/좌위 임을 감안할 때 상당한 유사성을 지녔다고 볼 수 있다 [25]. 둘째, Sparrow *et al.* (1967) [26]에 따르면 포유동물의 D_0 값이 100~180 R이며 T-02의 TSH 세포가 갖는 D_0 는 170이다. 이러한 D_0 값 범위의 일치는 포유동물과 자주달개비의 방사선 감수성이 거의 일치함을 뜻한다. 따라서 자주달개비 수술털 시스템의 돌연변이 반응은 방사선에 의한 인간의 위해도를 평가하는 데 직접적으로 적용될 수 있는 중요한

연구수단임이 틀림없다.

나. 방사선 지표생물 응용연구 분야

지표생물을 이용한 방사선량 감시시스템은 원자력시설 주변의 방사선 감시에 응용이 가능한 천연감시망으로서 물리적 선량계를 이용한 선량감시 초소에 비해 일반인의 친근감을 자아낼 수 있는 장점이 있다. 또한 사고시 광범위한 지역에 대한 감시체계로서도 중요한 의미를 지니고 있다. TSH 시스템은 실제로 많은 인간 집단이 여러 경로를 거쳐 피폭될 가능성이 있는 수준의 저준위 이온화방사선에도 민감하게 반응하여 체세포 돌연변이를 일으키는 생물학적 특이성을 갖고 있어서 발생 또는 분열 과정 중에 피폭되어 염색체의 결실 또는 DNA 두가닥 동시절단이 일어나면 꽃색에 있어서의 열성이었던 분홍빛이 발현된 세포가 본래의 우성 표현형인 자주색 세포에 섞여서 나타난다. 이같은 체세포의 돌연변이는 방사선량의 증가에 따라 그 발생빈도가 증가하는 양상이 뚜렷하게 나타나기 때문에 여러 원자력선진국에서 많은 연구의 관심이 집중되어 왔다. 또한 자주달개비는 방사선에 대한 외부피폭은 물론 내부피폭에 대해서도 선량에 따른 반응의 규칙성을 찾을 수 있기 때문에 다양한 분야에 응용이 가능하다. 지금까지 밝혀진 연구결과에 비추어 자주달개비 생물지표를 이용한 선량감시는 전반적으로 그 보편성, 통계적 정확성 및 신뢰성이 인정되고 있다. 또한 실제 원자력시설 주변의 선량감시에 직접적으로 응용이 가능한 손쉽고 경제적인 방법이며 특히 원자력시설에 대한 주민의 친근감 유발 및 국민이해 제고 차원에서 적극 권장해야 할 연구 분야이다.

3. 연구개발기술에 관한 평가

지표생물체가 받은 방사선에 대해 나타내는 손상 또는 변화 중에서 체세포 돌연변이를 분석하는 방법이 지금까지 주로 연구되어 왔다. 그러나 이 방법은 분석 자체에 많은 인력을 투입해야하는 단점이 있고 특히 TSH 시스템의 경우 제한된 시간 내에 분석을 완료해야하는 제약이 있다. 따라서 방사선량의

준위, 선질 등에 대한 유형별 최적 지표를 확립하고 분석 과정을 신속화하는 기술개발이 이뤄져야 할 것이다. 물리적 선량계를 이용한 기계식 방사선량 측정법은 설치운영상의 경제적 제약이 있으나 지표생물 이용기술은 경제성을 갖는 대안으로 제시될 수 있다. 유형별 방사선 최적 지표를 결정하고 고도화된 분석기술을 수립할 경우 기존 방법의 인력소요를 최소화할 수 있다.

한편 원예성 초본을 이용한 생물학적 선량감시 기술은 현장적용이 쉬울 뿐 아니라 원전 등 대형 원자력시설의 운영에 따르는 환경방사선 안전성 입증의 수단으로 활용될 수 있으므로 원자력 이용에 대한 국민의 이해폭을 넓히고 원자력 산업을 활성화시키는데 기여할 수 있을 것이다.

제 3 장 상대국과의 공동연구 역할분담 체계

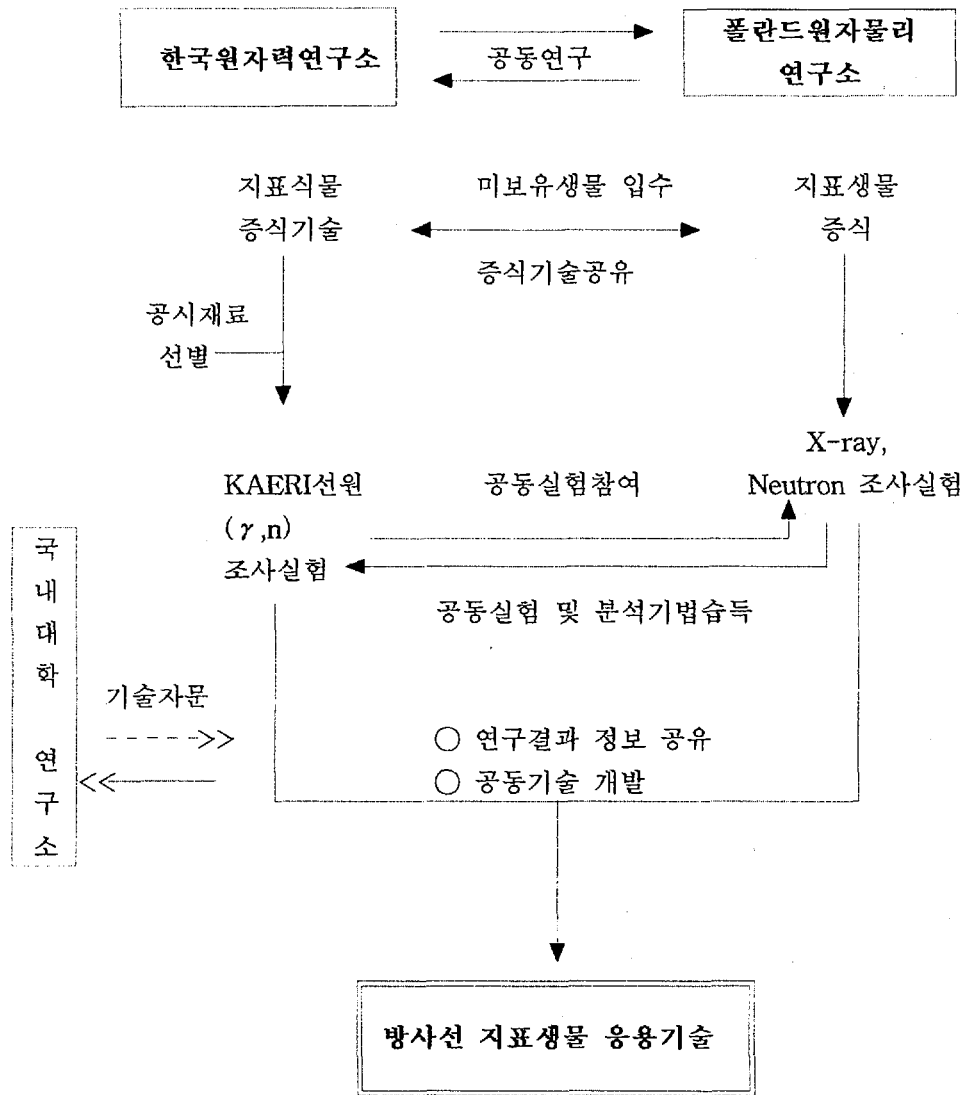
연구용 식물체의 stock culture는 폴란드원자물리연구소의 자동화 온실설비를 활용하여 유지 증식과정을 거쳤다. T-4430, T-02, KU9 3개 클론의 건전한 식물체를 무상으로 입수하여 한국원자력연구소의 자주달개비 전용온실에서 증식시켰다. 연계실험을 위한 식물체는 주로 한국원자력연구소에서 증식된 T-4430을 사용하였다.

방사선조사시설의 경우 폴란드원자물리연구소의 U-120 cyclotron과 X선 발생장치를 이용하였으며 한국원자력연구소의 보유시설인 국가 2차 표준 방사선장 시설의 X선 발생장치와 ^{252}Cf 중성자선원을 이용한 조사실험을 수행하였다. 또한 고선량과 대규모 시료조사실험에는 한국원자력연구소의 ^{60}Co 감마선원을 이용하였다.

한국원자력연구소는 자체 보유하고 있는 TSH 및 선원에 대한 실험을 수행하였으며 연계실험시에는 시료전처리, 방사선조사 및 장거리 이송처리 등을 담당하였다.

폴란드원자물리연구소는 X선과 U-120 cyclotron 중성자에 대한 제반 실험을 담당하였으며 연계실험의 TSH 돌연변이 검정분석에 5.0M/Y에 상응하는 연구인력 투입하였다. 공동실험에 소요되는 소모성 경비는 실험연구의 work scope 별로 나누어 각자 부담하였다. 공동연구 전반에 걸친 체계는 다음과 같다.

[공동 연구 체계]



제 4 장 공동연구기관 및 연구책임자의 연구수행능력

제1절 공동연구기관

- 기관명 : 헨리크 니보드니차인스키 원자물리연구소

(Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics)

- 주 소 : ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, Poland.
- 전 화 : 48-12-637-00 40
- 전 송 : 48-12-637-54 41
- 개 관

폴란드 남부지방에 위치한 고도인 크라쿠프에 위치하고 있는 원자물리 연구소는 1955년 현직 폴란드 원자력청 장관의 부친인 Prof. Henryk Niewodniczanski에 의해 설립되었으며 공식 명칭은 설립자의 이름을 따라 Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics로 불리고 있다. 연구소원은 약 500여명으로서 유럽에서는 중대형에 속하는 연구소의 하나로서 1998년 현재 연구실 (department 또는 group) 및 관련 부서 (section 또는 division/center)를 포함하여 26개에 달하는 연구 및 지원조직을 보유하고 있다.

특히 본 공동연구의 상대 부서인 방사선환경생물연구실 (Department of Radiation and Environmental Biology)은 실장인 Prof. Antonina Cebulska-Wasilewska를 비롯한 20여명의 연구인력을 보유하고 있을 뿐 아니라 방사선생물학 연구에 필요한 각종 연구시설을 갖추고 있다. 자주달개비 식물체의 유지 및 증식에 필요한 대형 자동화 유리온실은 물론 각종 환경조건의 인위적 조절이 가능한 대형 배양설비 (growth facility)는 본 연구에 있어 활용성이 높았던 시설들이다. 1997년까지 중성자 조사 및 암환자 진료에 활용되었던 U-120 cyclotron을 폐쇄하는 한편 1998년에는 새로운 X-ray 조사시설

을 완비하여 더욱 개선된 연구환경을 조성해 나아가고 있다. 그 외에 방사선 생물학적 실험을 수행하기 위한 주요시설로 실험동물 사육시설, 현미경실, 저온실 등을 갖추고 있다.

제2절 공동연구책임자의 연구수행능력

- 성 명 : Prof. Antonina Cebulska-Wasilewska, Dr. hab.
- 직 위 : 방사선환경생물실 실장
- 연구능력

방사선환경생물연구실은 Prof. Antonina Cebulska-Wasilewska의 주관 하에 20년 이상에 달하는 방사선생물학연구 수행을 통하여 습득한 다양한 연구 기술을 보유하고 있으며 특히 방사선지표생물인 자주달개비 연구에 있어서는 전세계적인 중심 역할을 수행하여 오고 있다. 따라서 미국의 BNL (Brookhaven National Laboratories), 네덜란드 Leiden 대학의 연구진들도 INP의 연구에 참여함으로써 원자력 선진 각국으로부터 그 연구능력을 인정받고 있다. 또한 유럽에서 다국적 과제 (EU projects)로 수행하는 여러 가지 방사선 관련 연구에 주도적으로 또는 적극적으로 참여하여 활약함으로써 INP의 연구능력을 인정받고 있다. 특히 미국의 Western Illinois 대학, 오스트리아 Vienna 대학의 Cancer and Tumor Research Institute, 네덜란드 Petten의 Netherlands Energy Research Foundation 등과 수행하고 있는 폭 넓은 협력 연구는 INP의 연구능력을 확인할 수 있는 객관적 증거로 볼 수 있다.

공동연구책임자의 연구수행능력을 확인할 수 있는 또다른 척도로서의 연구 실적물 목록은 [부록 1]에 수록된 이력사항에 포함되어 있다.

제 5 장 공동연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구재료 및 방법

1. 공시재료 (公試材料)

연구에 사용된 식물체는 T-4430클론이며 KAERI와 INP 모두 온실조건하에서 증식하였다. 연구용 식물체의 분주·증식에는 상업용 상토와 육묘용 부숙토를 혼합하여 사용하였다. 400본의 T-4430 식물체를 시작으로 지속적 증식과정을 거치면서 실험에 필요한 식물체를 조달하였다. Stock culture로서 T-02, KU9 클론도 동시 증식하여 각 클론별로 1,000본 이상의 식물체를 보유 기준으로 하고 있다. 일반 관리는 Underbrink *et al.* [27]에 의해 제시된 절차에 따라 이뤄졌으며 동절기 관리를 위해 필요에 따라 부가적 보온과 조광을 실시하였다. 춘계 증식기 이후 자발돌연변이율 (background mutation rate) 분석을 통해 유전적 속성에 변화가 있는 것으로 의심되는 개체는 선별·폐기함으로써 개체간 속성 차이에 의한 변수를 배제시켰다.

'고 LET 및 저LET 방사선에 대한 선량반응 연구'에는 절화를 사용하였다. 건전하게 생육된 식물체로부터 10개 이상의 화아를 가지고 있는 화서를 절취하여 공시재료로 사용하였으며 storage effect를 배제시키기 위하여 방사선 조사전 24시간 동안 실험실 조건에 순치시켰다 [28]. 화서의 절취작업은 이른 아침에 실시하였으며 절취직후 이미 개화한 꽃봉오리를 포함하여 2~4개의 늙은 화아를 제거하고 실험군내의 화서 길이도 균일하도록 재정리하여 양액 흡수차이에 기인한 개체간 변이가능성을 배제하였다. 재정리된 화서는 10~13개씩 묶어 두 조씩 동일 실험군으로 삼았다.

'복합선질에 의한 생물지표성 평가'와 '방사선과 환경요인의 공조작용 해석' 실험의 공시재료는 육묘용 상토와 부숙퇴비를 혼합한 토양을 사용하여 포트에서 생육된 T-4430 식물체를 사용하였다. 식물체를 포트채로 24시간 동안 실

협실 조건에 순치시킨 다음 조사군별로 20개 이상의 포트 (>200화기)를 사용하였다.

2. 방사선 조사

감마선 조사는 한국원자력연구소의 저준위 조사시설 (Cobalt-60, 약 400 Ci 용량, Panoramic irradiator, Atomic Energy of Canada Ltd.)를 이용하여 상온, 공기중에서 시료를 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 6.0Gy의 선량으로 방사선 조사하였다. Fricke dosimeter로 측정된 조사선량률은 0.44Gy/h였다 [29].

중성자 조사를 위해서 한국원자력연구소 검교정용 표준선장 ^{252}Cf 중성자 선원을 사용하였으며 X선 조사는 한국원자력연구소 표준선장의 X선 발생장치 (150kvp, 10mA)를 사용하였다. 1997년 중성자 선량률은 선원으로부터 2미터 이격 거리에서 0.483mGy/h였으며 X선의 선량율은 2미터 거리에서 12.69 mGy/h였다. 중성자 조사는 선원으로부터 일정한 거리를 두고 시료를 공기중에서 0.005(0.007), 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1 및 0.2Gy의 선량으로 동시 조사하였고 X선의 경우는 0.1, 0.3 및 0.5Gy를 실험군별로 각각 조사하였다.

한편, 복합선질에 의한 영향을 평가하기 위한 시료조사시의 중성자 조사는 ^{252}Cf 선원으로 339cm 이격된 거리에 동심원상으로 포트를 배열하여 조사하였다. 이때의 조사선량은 0.00078Gy였으며 중성자 방출율 (emission rate)은 3.9933×10^8 neutrons/sec.였다.

3. 식물체 배양

방사선을 조사한 화서군은 Hougland No. 2 solution 6배 희석액 [30]에 침지하여 성장상 내에서 배양하였다. 배양액은 매일 일정량을 보충하였으며 3일에 한번씩 새 배양액으로 교체하였으며 전 배양기간 동안 기포발생기를 이용하여 폭기를 실시하였다. 포트에 담긴 식물체의 경우 화서군 배양시와 동일한 배양액을 3일에 한번씩 공급하면서 성장상내에서 배양하였다.

화서 및 포트 식물체 공히 배양조건은 명기 14시간 동안은 20℃, 습도 80%,

광도 15,000 lux를 암기는 10시간, 18℃, 상대습도 85%를 유지하였다.

4. 돌연변이분석

실체현미경을 이용하여 배율 25배 하에서 돌연변이를 계수하였다. TSH 돌연변이에 대한 분석은 표준화된 절차를 따랐다. 화기는 검경의 용이성을 고려하여 반드시 만개상태인 것을 채화하였다. 채화된 꽃은 일련번호가 적혀 있는 페트리디시에 물 적신 습지를 깔고 4℃로 검경시까지 냉장보관 하였다. 검경용 프레파라트는 제작 직후 검경하였으며 검경시 어린 색조의 분홍돌연변이에 대한 판별이 용이하도록 노란 배경 위에 프레파라트를 놓고 검경하는 것이 좋다. 프레파라트 제작과 검경절차는 다음과 같다.

- ① 슬라이드 유리에 파라핀유를 적하하여 넓게 편다
- ② 핀셋을 이용하여 수술대 6개를 모두 조심스럽게 떼어낸다.
- ③ 수술털이 모두 파라핀유에 의해 퍼질 수 있도록 슬라이드에 배열한다.
- ④ 실체현미경 25배 하에서 검경계수 한다.
- ⑤ 검경계수 결과는 행렬식 도표로 작성한다.

돌연변이는 단일분홍세포, 연속분홍세포 그리고 분열이 중단된 세포로 구분하여 계수하였다. 돌연변이를 분석함에 있어서 다음과 같은 판정기준을 적용하였다.

- 유전자돌연변이 : 한 개 또는 다수의 연속된 분홍세포군 각각을 하나의 돌연변이 건수로 계수하며 한 개의 정상세포로 분리되어 있는 분홍세포군의 경우 정상세포 양쪽을 각각 건수로 계수하였다. 한 수술털 전체가 분홍세포로 이뤄진 경우이거나 수술 전부 또는 꽃 전체가 분홍세포로 이뤄진 경우도 한 건씩의 분홍돌연변이로 계수하였다. 이러한 기준은 무색돌연변이에 대해서도 동일하게 적용되었다.
- 치사돌연변이(분열능력상실) : 수술을 구성하고 있는 세포수가 일정수보다 적을 때 즉, 수술털당 평균 세포수보다 두배의 표준편차 이상이 적은 수술

털을 치사돌연변이로 간주하며 T-4430 클론의 경우는 수술털이 17세포 미만인 것을 치사돌연변이로 계수하였다.

- 세포주기인자(세포분열교란) : 연속된 분홍세포군 수에 대한 단독 분홍세포 수의 비율을 구하여 사용한다. 단독 분홍세포의 출현은 세포주기중 DNA 합성기 (S-phase) 이후에 유발된 돌연변이의 결과이기 때문에 세포주기인자는 방사선조사에 의한 세포분열의 교란 정도를 알 수 있는 척도가 된다 [31].

돌연변이 세포의 계수는 방사선조사후 4주 이상 지속적으로 실시되었으며 특히 방사선조사후 돌연변이율 증가가 두드러진 고조기간 (peak interval)의 검경 결과를 통합한 자료 (pooled data)로부터 화기당 또는 100모당 돌연변이 건수로서 돌연변이빈도를 산정하였다.

제2절 지표생물의 고유 특성자료

1. 지표생물의 고유 특성자료

보유하고 있는 식물체에 대한 고유특성자료를 분석하여 후속실험의 기초자료로 활용하였다 (표 3). 또한 온실내 증식조건하에서 나타나는 T-4430 수술털의 자발돌연변이율을 지속적으로 분석하였으며 증식중 유전적 속성이 변화하였거나 자발돌연변이율이 비정상적으로 높게 나타나는 식물체는 선별하여 제거하였다. 본 연구에 사용한 T-4430의 특성값을 보면 평균 수술털수는 75로서 도입초기의 분석값 [6]인 61, 외국문헌 [3,4] 보고치인 53보다 훨씬 높은 것으로 나타났으며 모당 세포수에 있어서는 별다른 차이를 나타내지 않았다. 이같은 결과는 한국원자력연구소의 T-4430 식물체가 최적증식조건하에서 관리되고 있기 때문인 것으로 평가된다.

표 3. T-4430 및 KU 9 클론의 자발돌연변이율 및 특성자료

클론	특성	평균	표준편차	표준오차	분석화기수	비 고
T-4430	수술털수	75.02	13.08	1.34	95	
	모당세포수	23.7	3.51	0.21	288	
	분홍변이	1.16	1.15	1.10	128	
	무색변이	0.54	0.98	0.09	128	
KU 9	수술털수	96.14	12.87	1.15	125	
	모당세포수	19.9	2.77	0.14	375	
	분홍변이	0.55	0.83	0.07	133	
	무색변이	0.59	1.58	0.14	133	

제3절 저 LET 방사선 반응 수립

저 LET 방사선 반응관계를 수립하기 위한 실험에는 생육 상태가 양호하며 비교적 어린 화서를 실험에 사용하였다. T-4430 절취화서를 20개씩 선량군별로 묶어 ^{60}Co 선원으로 0.1~6.0Gy 감마선을 조사한후 7~15일간 돌연변이를 분석하였다. 표 4에서 보는 바와 같이 화기당 분홍돌연변이는 2.0Gy의 선량까지는 선량증가에 따라 선형적으로 증가하였으나 그 이상의 선량영역에서는 오히려 돌연변이율이 감소하는 선량포화 양상을 분명하게 나타내었다. 이같은 선량포화는 기존의 보고결과 [32]와도 잘 일치하는 결과이다. 한편 무색돌연변이의 경우 선량반응관계에 있어서의 변이폭이 분홍돌연변이에 비해 상대적으로 크다.

표 4. T-4430 클론에 있어서 감마선에 대한 TSH 돌연변이 반응

선량 (Gy)	화기당 분홍돌연변이				화기당 무색돌연변이			
	실험군 1		실험군 2		실험군 1		실험군 2	
	평균	SE	평균	SE	평균	SE	평균	SE
0.1	0.900	0.285	1.424	0.411	1.500	0.474	0.583	0.168
0.2	1.357	0.486	1.125	0.398	0.250	0.088	0.375	0.133
0.3	2.625	0.928	0.900	0.285	1.500	0.530	1.000	0.316
0.5	1.333	0.544	1.000	0.354	0.333	0.136	1.750	0.619
0.7	1.475	0.521	1.167	0.476	0.950	0.336	0.333	0.136
1.0	6.725	2.378	0.667	0.272	2.950	1.043	0.500	0.204
2.0	8.300	2.625	1.000	0.500	7.600	2.403	0.250	0.125
3.0	3.800	1.202	4.700	1.486	3.800	1.202	4.300	1.360
6.0	5.167	1.491	2.500	1.768	8.333	2.406	0.000	0.000

한국원자력연구소 표준선장에서 X선을 조사한 후 공시재료를 폴란드INP로 이송하여 INP 연구인력의 보조하에 TSH assay를 실시하였으며 그 결과를 표 5, 그림 2에 나타내었으며 X선 선량반응관계는 제3절의 그림 3에 나타내었다.

표 5. X선 조사후 7~19일의 100모당 돌연변이 ('96 KAERI-INP 실험)

X선 (Gy)	총분홍변이율 (평균±SE)	단독분홍변이율 (평균±SE)	치사변이율 (평균±SE)	세포주기인자
0.3	1.69 ± 0.66	0.81 ± 0.42	4.76 ± 1.63	0.53
0.5	2.41 ± 0.80	0.95 ± 0.45	3.21 ± 1.43	0.46

X-rays

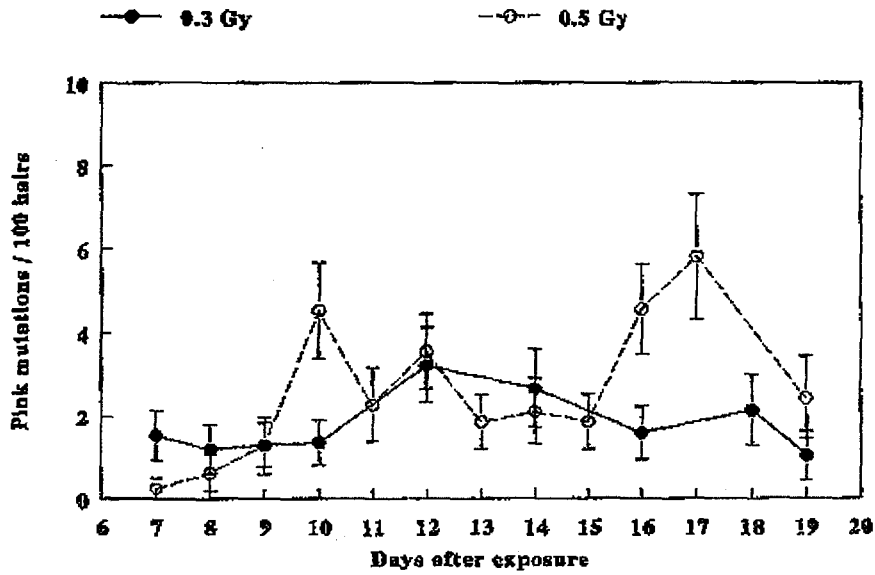


그림 2. X선 조사후 분홍돌연변이율의 일정 변화

X선 조사에 따른 분홍돌연변이율이 선량증가에 대해 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 돌연변이율의 일정변화가 다소 큰폭의 변이를 나타낸 것으로 볼 수 있다. 본 실험은 최초로 실시된 한국-폴란드간 연계실험으로서 방사선 조사후 실험식물체를 장거리 이송하였을 때의 문제점은 무엇이며 장시간의 포장이송 조건이 식물생육에 지장을 초래하는지를 파악하여 차후의 실험조건을 적립하기 위한 pilot experiment였다. 실험결과는 매우 고무적이었으나 이송시간 단축과 포장조건의 개선이 필요한 것으로 판단되었다.

제4절 고 LET 방사선(중성자)에 대한 TSH 반응성 규명

1. 분홍돌연변이율의 일정변화

방사선에 의하여 자주달개비 수술털 세포에 유발되는 각종 돌연변이는 방사선 조사후 날짜가 경과함에 따라 점차 증가하여 최대값에 이르렀다가 다시 줄어들어 자발돌연변이율까지 낮아지는 양상을 나타낸다. 통상적으로 돌연변이율이 최대값에 이르는 날짜를 중심으로 일정한 기간을 고조기간으로 설정하여 이때의 돌연변이율 검경결과를 통합하여 데이터로 활용한다. 1996년의 공동실험의 경우 고조기간은 방사선 조사후 7일째에서 20일째 사이였으며 1997년 공동실험의 경우는 조사후 10~20일이였다. 1997년 원자력연구소 단독실험의 경우 중간선량인 0.05Gy 조사군을 기준으로 했을 때 방사선에 의한 분홍돌연변이율의 증가가 조사후 3일 경부터 나타나기 시작하여 방사선 조사 10일후 최대 분홍돌연변이율을 보였다. 따라서 돌연변이율이 확연하게 증가한 고조기간은 조사후 6일째부터 13일까지로 다른 두 실험의 경우와는 다소간의 차이를 나타내었다 (표 6).

표 6. 각 실험별로 나타난 돌연변이율 고조기간

번호	돌연변이 고조기간 (조사후 경과일자)	실험구분	비고
1	7~20	KAERI-INP '96 공동실험.	
2	10~20	KAERI-INP '97 공동실험.	
3	6~13	KAERI '97 단독실험.	

돌연변이율 고조기간은 통상 방사선 조사후 6일에서 20일 사이에 나타나지만 공시식물체의 생육상태 및 실험처리시의 손상정도 등에 따라 약간 다르게 나타날 수 있음을 의미하는 것이기도 하다. Cebulska-Wasilewska *et al.* [33]은 돌연변이가 최고조에 달한 3일간의 평균값 (three day-maximum value)을 고조기간 전체에 걸친 평균값과 비교하였으나 이들 두 값이 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 시간과 분석인력의 제약이 있는 경우는 3일 최대값 만을 사용하여도 무방할 것으로 생각된다.

2. 돌연변이 빈도

각 실험별로 돌연변이 고조기간에 나타난 분홍돌연변이율, 치사돌연변이율 및 세포주기인자의 값을 요약하여 표 7, 8에 수록하였다.

표 7에 나타난 바와 같이 1996년 공동실험 결과 X선 조사에 따른 반응은 뚜렷한 선형증가양상을 보인 반면 중성자 조사에 따른 반응에 있어서는 0.01Gy 실험군과 0.02Gy 실험군의 분홍돌연변이율에 거의 차이가 없었다. 이와 같은 결과는 KAERI에서 방사선 조사한 식물체를 INP로 항공 이송하는 데 지나치게 장시간이 소요되었고 이로 인하여 식물체의 생육상태가 저하된 데 따른 결과로 볼 수 있다. 중성자 0.1Gy 실험군에 대하여 계수된 총 수술털 숫자가 1,107개에 불과한 것은 장거리 수송에 따라 식물상태가 약화되었으며 따라서 분석할 수 있는 화기의 수가 지극히 제한적이었음을 나타내는 하나의 증거이다. 그러나 1996년 공동실험을 통해 최초로 「한국照射-시료移送-폴란드分析」을 시도하였으며 그 결과 이와 같은 마라톤 방식의 국가간 연계공동실험의 가능성이 확인되었고 [32], 표 8에서 볼 수 있듯이 방사선 조사의 정확도와 식물체 장거리 운송과 관련된 이송조건을 개선시킬 경우 다국간 연계실험을 통해 특성화된 연구결과를 획득할 수 있음을 알 수 있었다.

표 7. 돌연변이 고조기간중 생물학적 효과 ('96 KAERI-INP실험)

번호	방사선	선량[Gy]	수술털수	분홍변이빈도	치사변이빈도	세포주기인자
1	X선	0.30	4494	1.7±0.7	4.8±1.6	0.53
2	X선	0.50	6638	2.4±0.8	3.2±1.4	0.46
3	중성자	0.007	4170	0.3±0.2	1.7±1.2	0.83
4	중성자	0.011	1107	0.8±0.5	-	0.38
5	중성자	0.024	3822	0.8±0.4	0.5±0.4	0.57

표 8. 돌연변이 고조기간중 생물학적 효과 ('97 KAERI-INP실험)

번호	방사선	선량[Gy]	수술털수	분홍변이빈도	치사변이빈도	세포주기인자
1	X선	0.10	3258	1.1±0.5	2.5±1.2	0.32
2	X선	0.30	6816	5.4±0.2	6.9±2.2	0.41
3	X선	0.50	3762	8.1±0.5	12.1±3.0	0.43
4	중성자	0.00	4812	0.2±0.1	0.5±0.4	0.50
5	중성자	0.01	7280	1.4±0.6	3.6±1.6	0.68
6	중성자	0.03	10276	2.8±0.8	4.6±1.7	0.45
7	중성자	0.06	738	4.8±1.1	12.2±3.1	0.45
8	중성자	0.10	4065	7.6±1.5	10.5±2.9	0.44

1996년 공동실험의 결과에서 나타난 실험상의 문제점을 보완하여 실시된 1997년 공동실험에서는 상당히 개선된 결과를 획득하였다. 표 8에서 볼 수 있는 바와 같이 데이터 평균값에 대한 분산도 안정적으로 적기 때문에 실험결과에 대한 신뢰도가 그만큼 높아진 결과를 얻은 것이다. X선 및 중성자 조사 실험군에 있어서 방사선량의 증가에 따른 분홍돌연변이율의 증가는 뚜렷한 선형적 양상을 나타내었다 (그림 3, 4).

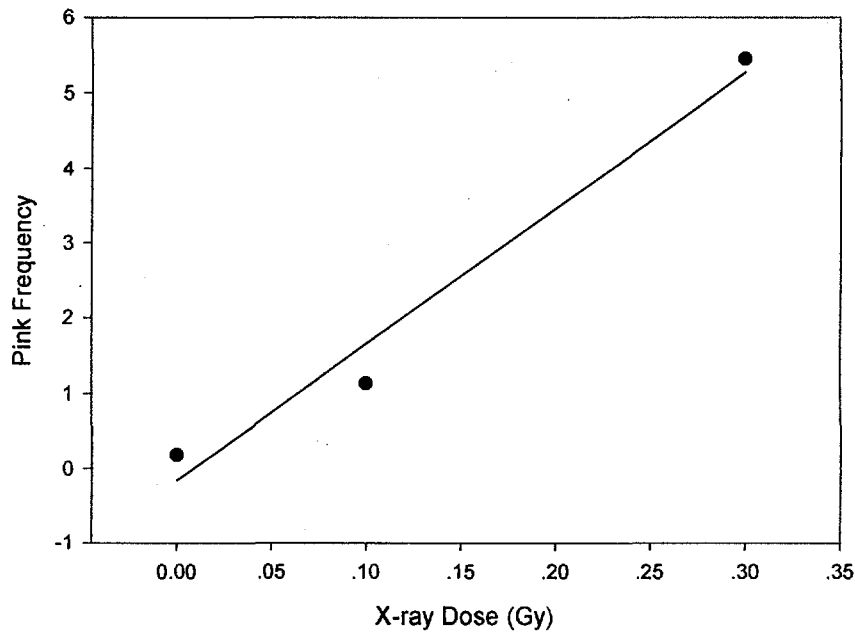


그림 3. X선 조사에 따른 선량반응 관계 ('97년 공동실험)
 데이터 값은 100毛당 평균 분홍돌연변이율이며
 기저돌연변이율을 차감하지 않은 것임.

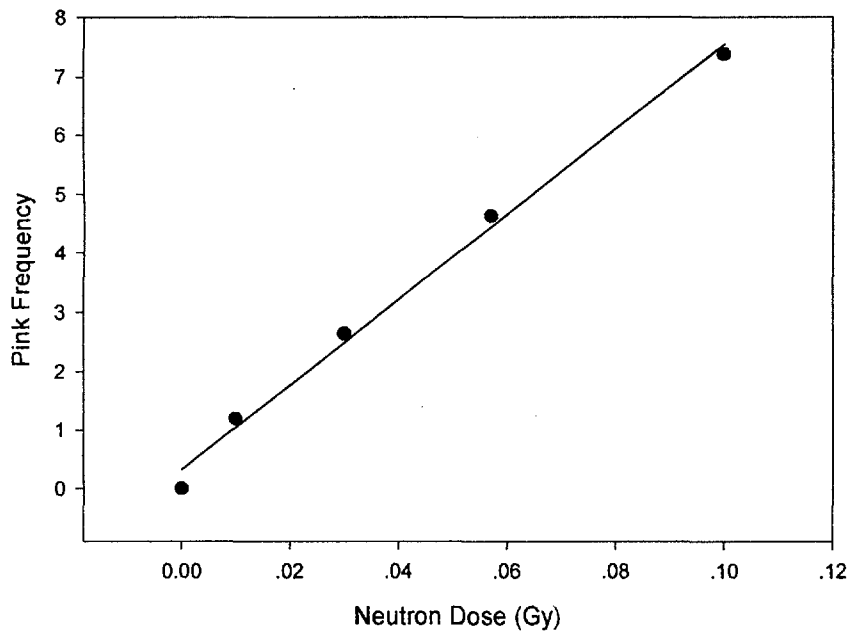


그림 4. 중성자 조사에 따른 선량반응 관계 ('97년 공동실험)
 데이터 값은 100毛당 평균 분홍돌연변이율이며
 기저돌연변이율을 차감하지 않은 것임.

표 9. T-4430 클론의 돌연변이 고조기간중 생물학적 효과 ('97 KAERI 실험)

번호	방사선	선량[Gy]	수술털수	분홍변이빈도	치사변이빈도	세포주기인자
1	중성자	0.00	11379	1.43±0.27	NA	NA
2	중성자	0.005	8534	2.19±0.48	"	"
3	중성자	0.01	14630	4.44±0.74	"	"
4	중성자	0.03	8941	3.64±0.78	"	"
5	중성자	0.05	7722	7.00±1.61	"	"
6	중성자	0.10	6909	7.88±1.91	"	"
7	중성자	0.20	3251	12.63±4.46	"	"

1997년 KAERI 단독실험군의 경우 표 9에서 보는 바와 같이 선량별 분홍돌연변이율은 1997년 공동실험과 유사한 결과를 보여 주고 있다. 화기당 분홍돌연변이율이 0.01Gy 조사군에서 다소간의 돌출적 돌연변이율 증가를 보인 것을 제외하고는 전반적으로 선량증가에 따른 뚜렷한 분홍돌연변이율 증가양상을 보였다 (그림. 5). 1997년 KAERI 단독실험은 오랜 기간에 걸친 차주달개비 연구경험을 보유한 INP의 분석기술과 KAERI의 분석기술의 수준을 비교하기 위한 것으로서 KAERI의 분석기술 수준이 INP와 동등한 수준에 있음을 비교 실험을 통해 확인할 수 있었다.

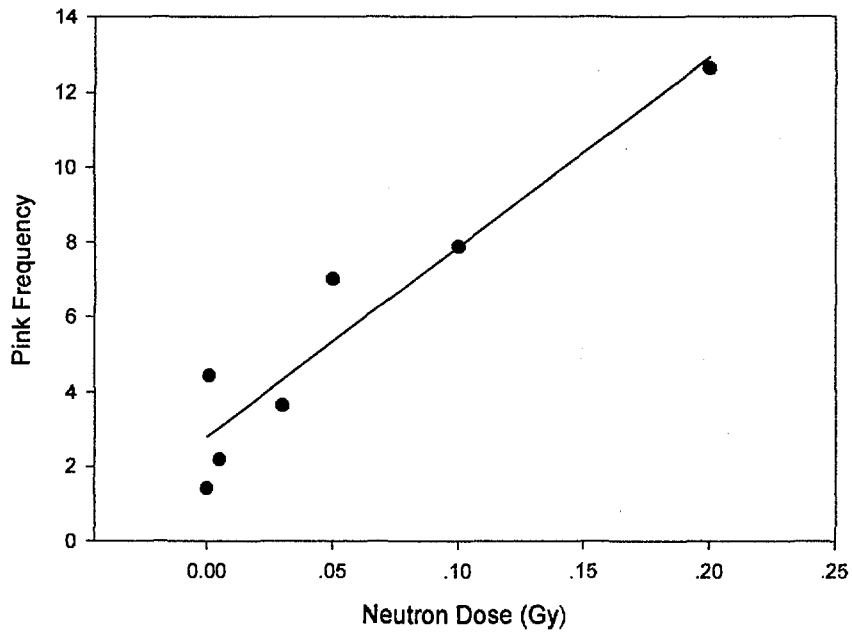


그림 5. 중성자 조사에 따른 선량반응 관계 ('97년 KAERI 실험)
 데이터 값은 화기당 평균 분홍들연변이율이며
 기저들연변이율을 차감하지 않은 것임.

자주달개비 수술털 시스템을 이용하여 방사선을 감시하는 경우 일반적 방사능 계측이론이 그대로 적용된다고 볼 수 있다. 즉, 방사선을 조사하는 공시재료의 양을 무한하게 증가시킨다면 통계적 유의성 또한 증가하게 되므로 아주 작은 선량까지도 감지가 가능하다. 그러나 여러 가지 현실적인 문제점 및 제약으로 인하여 통상적 분석이 가능한 규모로 실험을 수행하게 되며 이같은 통상 규모 하에서의 감지 가능한 최저선량은 얼마인지가 관심의 초점이 되기에 충분하다. 본 연구에서 한 실험군은 10~12 화서로 구성되므로 실험기간 중 실험군당 약 100개 이상의 화기가 분석가능하며 따라서 충분한 통계적 유의성을 가질 수 있다고 본다. 화기당 분홍돌연변이율을 비교해 볼 때 방사선을 조사하지 않은 대조실험군은 1.43 ± 0.27 , 실험 최저선량인 0.005Gy 조사군에서의 2.19 ± 0.48 을 나타내어 0.005Gy의 방사선 조사에 의해서도 돌연변이율이 뚜렷이 증가한다는 것을 알 수 있다. 0.005Gy 조사시료에서 나타난 분홍돌연변이율이 대조시료에 비해 통계적으로 유의한 차이를 보이는 지를 확인하기 위해 실시한 통계검정(t-test) 결과는 평균차이 0.762, $t=1.85$, 자유도=47로서 두 실험군에서의 분홍돌연변이율은 매우 유의한 차이($p=0.035$)를 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 실험결과를 통해 자주달개비 수술털 시스템을 이용한 저선량 중성자 감시가 가능하다는 확인할 수 있었다.

3. 선량반응 관계

방사선에 의한 생물학적 효과중 특히 유전자에 유발되는 돌연변이에 관해서 획득된 데이터의 양이 풍부한 경우 다음과 같이 정교한 선량반응식을 사용하여 돌연변이가 유발되는 데 있어서의 각종 기여분이 갖는 의미를 설명할 수 있다. Chadwick과 Leenhouts [34]의 방사선 작용에 관한 분자이론에 따르면 자주달개비의 체세포 돌연변이 유발에 대한 선량반응 관계는 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$M = \{1 - \exp[-q(\alpha D + \beta D^2)]\} \exp[-(s+p)(\alpha D + \beta D^2)] \text{ ----- (1)}$$

여기서,

M = 돌연변이 빈도

D = 방사선량 (Gy)

α = 단위선량당 에너지축적에 의해 DNA두가닥절단(dsb) 일어날 확률

β = 단위선량 제공당 에너지 축적에 의해 DNA dsb가 일어날 확률

q = 유발된 DNA dsb에 의해 특정한 돌연변이가 나타날 확률

s = 유발된 DNA dsb에 의해 특정한 돌연변이 출현이 억제될 확률

p = 유발된 DNA dsb에 의해 세포분열능력 상실이 나타날 확률

(1)식에 따르면 특정한 돌연변이 유발의 억제나 세포분열능력 상실에 의해 돌연변이가 억제되는 확률을 나타내는 상수항 $[s+p]$ 값이 일정할 경우 선량반응을 나타내는 곡선의 높이 (돌연변이율 최대값)는 $[q]$ 값에 의해서 결정된다. 이때 나타나는 선량반응을 보면 일정한 선량까지는 돌연변이율이 상승하다가 선량이 더욱 증가되면 오히려 돌연변이율이 감소하기 시작하여 어느 선량에 이르러서는 사망에 의해서 돌연변이가 더 이상 나타나지 않는 점에 이른다. $[q]$ 값에 의해 peak의 높이가 다르게 나타날 뿐 세포사멸에 의해 돌연변이율이 더 이상 나타나지 않는 사멸선량의 값이 거의 같은 특징을 갖는다 (그림 6). 반면에 $[q]$ 값이 일정할 경우는 $[s+p]$ 값이 적어짐에 따라 반응곡선상의 최대값이 상승하고 동시에 전체 곡선의 편향성(skewness)이 증가하기 때문에 세포사멸에 이르는 선량 값이 증가한다 (그림 7).

저선량 영역에서는 s , p , β 값이 영(zero)에 가깝고 상대적 생물학적 효과비 (RBE)가 최대 값에 이르는 구간이므로 $RBE = \alpha_n/\alpha_x$ 이 된다. 특히 고 LET 방사선인 중성자의 경우 저선량 영역에서는 방사선량의 증가에 따른 생물학적 반응이 거의 선형적으로 증가할 뿐 아니라 (1)식으로 표현되는 증가양상 또한 일반적 일차함수와 거의 같은 양상으로 나타난다.

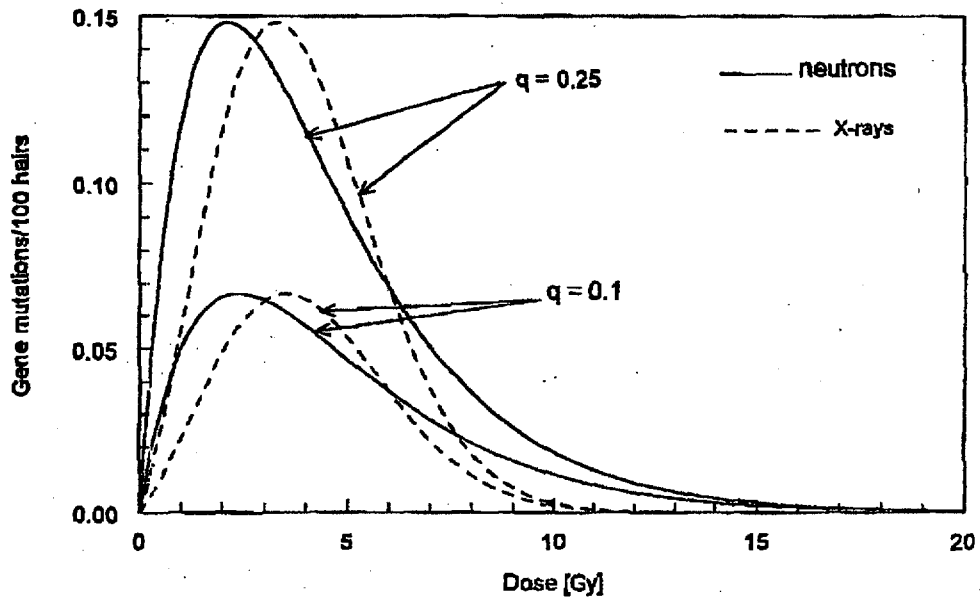


그림 6. Chadwick-Leenhouts의 분자이론에 따른 선량반응곡선
 Y축의 값은 $s+p=0.5$, $\alpha_n=0.91$, $\alpha_x=0.17$, $\beta_x=0.1$ 로 가정하여
 계산된 돌연변이 빈도를 나타냄.

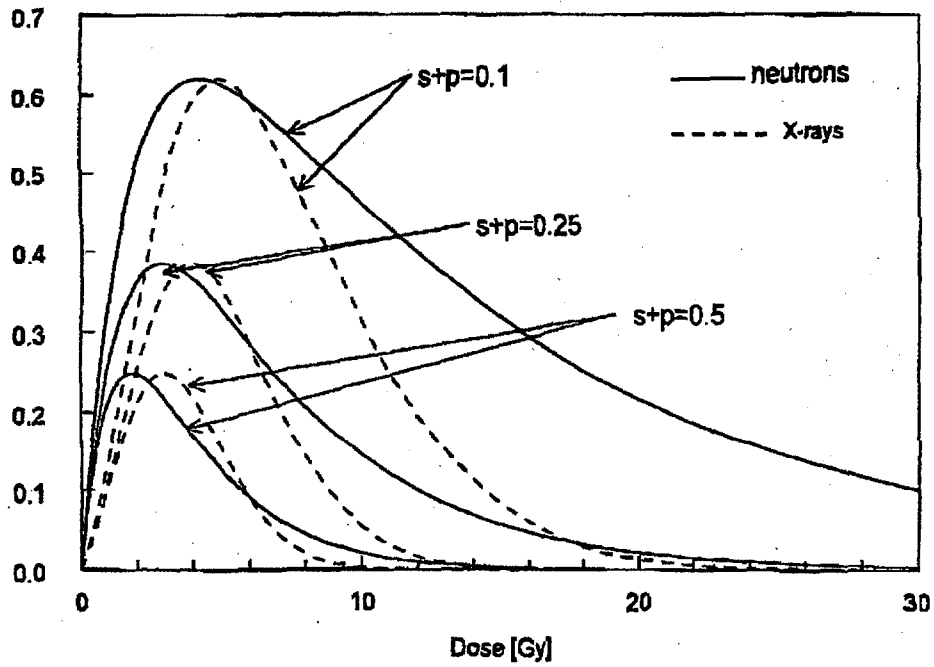


그림 7. Chadwick-Leenhouts의 분자이론에 따른 선량반응곡선
 Y축의 값은 $q=0.5$, $\alpha_n=0.77$, $\alpha_x=0.17$, $\beta_x=0.1$ 로 가정하여
 계산된 돌연변이 빈도를 나타냄.

일반적으로는 방사선에 의한 생물학적 효과(돌연변이, 염색체 이상 또는 종양유발 등)를 다소 단순화된 선형적-이차함수적 선량반응 관계로 표현한다 [35].

$$M = \alpha D + \beta D^2 \text{ ----- (2)}$$

여기서,

M = 돌연변이 빈도

D = 방사선량 (Gy)

α = 단위선량당 나타나는 돌연변이 빈도

β = 단위선량 제곱당 나타나는 돌연변이 빈도

(2)식에 제시된 linear-quadratic dose-response의 경우도 선량포화가 나타나지 않는 저선량 영역에서는 βD^2 로 표현되는 이차함수항의 기여분이 무시할 수 있는 수준이므로 다음과 같이 단순한 일차함수를 이용하여 저선량 영역에 있어서의 반응 관계를 표현할 수 있다 [36].

$$M = \alpha D + b_0 \text{ ----- (3)}$$

여기서,

M = 돌연변이 빈도

α = 단위선량당 나타나는 돌연변이 빈도

D = 방사선량 (Gy)

b_0 = 자발돌연변이 빈도

위 (3)식은 단순화된 선량반응관계식에 실험결과를 적용하는 경우 데이터의 양이 풍부하지 않을 경우 자료의 자유도 (degree of freedom) 감소 등 통계처리에서 따른 문제점을 배제시킬 수 있다. 또한 본 연구가 저선량 영역의 방사

선에 국한되었다는 점을 감안할 때 일차함수를 이용한 선량반응 관계식의 정립이 정당화될 수 있을 것이다. 1997년 KAERI 단독실험의 결과를 (3)식에 맞춰 회귀분석을 실시한 결과(표 10) 선량증가에 따른 TSH 돌연변이 발생 빈도의 일차함수적 증가가 통계적으로도 타당함이 확인되었다.

표 10 . 최소자승법으로 구한 선량반응관계식의 계수 및 상수값 ('97 KAERI)

방사선	α 계수 (기울기)	b_0 상수 (기저돌연변이율)	r^2 (회귀계수)	비 고
^{252}Cf 중성자	51.74	1.25	0.92	
X선 (150kVp)	16.68	0.50	0.94	

4. 생물학적 효과비

기준 공시재료를 이용한 X선 조사실험 결과와 중성자 조사실험 결과로부터 선량반응식을 결정하고 두 선량반응식 기울기의 비(α_n/α_x)로부터 RBE 값을 구하였다 (그림 8). 특히 동일한 방식으로 수행된 3번의 실험결과를 통합적으로 분석하여 자주달개비 수술털 세포의 분홍돌연변이를 유발함에 있어서의 중성자 RBE를 산출한 결과는 표 11에 제시하였다. 실험연구 결과 ^{252}Cf 중성자가 자주달개비 수술털 세포의 분홍돌연변이를 유발함에 있어서의 RBE 값은 3.1~6.8의 범위를 보이는 것으로 평가되었다. 동일한 공시재료인 T-4430을 이용하여 동일한 선원으로 방사선 조사를 실시하고 같은 방식으로 수행된 실험이었으나 실험실시 시기에 따라서 RBE 값에 차이를 나타내었다. 각각의 실험

에서 들연변이의 고조기간이 약간씩 차이를 보이고 있는 것은 공시식물체의 생리적 상태가 실험별로 차이가 있음을 의미하며 이러한 점이 RBE 값에 차이를 나타내는 하나의 원인이 될 수 있을 것이라는 판단을 가능케 한다.

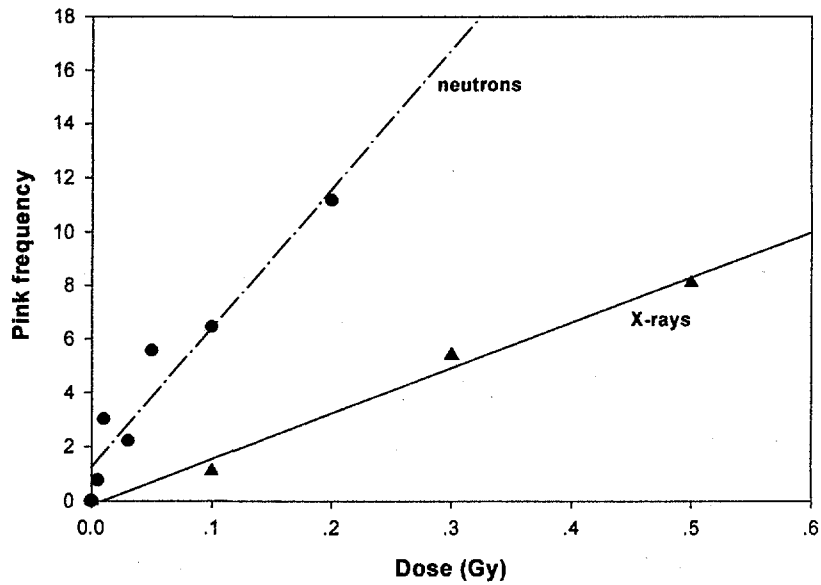


그림 8. T-4430 분홍들연변이의 중성자 및 X선 선량반응.
X선 반응식 기울기 16.7, 중성자 반응식 기울기 51.7.
(1997년 KAERI 단독실험 결과)

표. 11. T-4430 분홍돌연변이 유발에 있어서 ^{252}Cf 중성자의 RBE 산정값

실험구분	방사선	선량반응관계식기울기 (α_{PF} coefficient)	RBE 산정값	비 고
1997년 KAERI실험	중성자	51.74	3.1	
	X선	16.68		
1997년 공동실험	중성자	76.7	4.1	
	X선	16.6		
1996년 공동실험	중성자	33.4	6.8	
	X선	4.9		

Cebulska-Wasilewska *et al.* [37]에 따르면 방사선의 RBE는 생물학적 말단점 (biological end-point)에 따라서 각기 다르게 나타나고 있어서 자주달개비의 경우 클론의 종류는 물론 동일 클론을 이용한 경우라도 유발된 돌연변이 종류에 따라서 중성자의 RBE가 다르게 평가되어 3~20의 넓은 범위에 걸친 값을 나타내었다고 보고하였다.

식물체를 이용한 중성자 조사연구에서는 대부분 높은 RBE 값이 보고되었다. Underbrink *et al.* [38]은 fission neutron에 의한 자주달개비 분홍돌연변이의 경우 ^{60}Co 감마선과 비교했을 때 RBE가 100이고 200keV X선과 비교했을 때 50인 것을 보고하였다. 동물을 이용한 실험에서도 중성자의 RBE 값은 매우 넓은 범위를 나타내고 있다. Grahn *et al.* [39]은 생쥐 정원세포에서의 우성 치사돌연변이, 염색체의 전좌 및 기타 비정상성 등 여러 가지 효과들을 연구하였다. 그들은 생물학적 기준에 입각하여 fission neutrons과 X선을 비교했을 때 RBE 값은 10~45로 밝혀졌다. 높은 RBE 값은 정원세포에 있어서의

염색체 전좌에서 나타나고 또 중성자 조사시는 낮은 조사선량에서 감마선과 비교하여 1주일에 한번 중성자선을 조사할 때 나타났다. Sinclair[40]에 따르면 중성자의 RBE는 주어진 기준 또는 각각의 연구에 따라서 3부터 200에 이르는 넓은 차이를 보이고 있다. 예를 들면 종양유발의 경우 3~200, 포유동물의 유전적 효과 10~45, 백내장 25~200, 미세핵 생성 6~60 등으로 RBE 값의 범위가 다양하게 나타나고 있다.

본 연구결과에서 나타난 ^{252}Cf 중성자의 TSH 분홍돌연변이 유발에 있어서의 RBE 값이 3.1~6.8의 범위를 보인 것은 전술한 연구결과들과 비교해 볼 때 일반적인 중성자의 RBE 범위 내에 속하는 값이었다. 또한 이같은 결과는 통상적으로 사용하고 있는 RBE 값인 10에 비해 낮은 값이었으나 실험조건과 생물학적 말단점에 따라서 RBE가 다르다는 점을 분명히 밝힌 것이다. 따라서 특정한 값을 RBE로 고정하여 사용하는 것은 생물학적으로 타당하지 않다고 생각된다. 또한 중성자의 선질계수 (quality factor)를 그대로 RBE로 사용하는 일반적 관례에 대한 재고의 필요성과 함께 RBE 값을 제시할 때에 있어서의 명확한 서술기준이 필요함을 시사하는 것으로 RBE와 관련된 내용을 평가 또는 인용할 경우 방사선의 특성은 물론 생물학적 효과를 평가하기 위해서 사용된 생물학적 말단점이 무엇이었던 지도 명시되어야 할 것이다.

5. 중성자에 대한 TSH 반응성 결론 및 고찰

한국과 폴란드 양국간의 과학기술협력협정 및 한국원자력연구소 (KAERI) 와 폴란드원자물리연구소 (INP)간에 체결된 공동연구 합의각서 (MOU)에 따라서 본 연구를 수행하였다. 1996년 및 1997년 2회에 걸친 양국간 연계실험과 1회의 KAERI 단독 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Cf-252 중성자를 조사하였을 때 자주달개비 체세포에 유발되는 돌연변이는 선량이 증가함에 따라서 선형적으로 증가하는 선량-반응 관계를 보였다. 한편 자주달개비 수술털 생물지표를 이용하여 0.005Gy의 중성자까지 구분해 낼 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

- 2) 선원특성 및 실험설계와 관련된 개선의 필요성이 부분적으로 인정되었으며 양 기관간 연계실험을 위한 공시재료 이송중 나타나는 난점을 해소하기 위해서 이송시간을 단축시킬 수 있는 방안이 필요한 것으로 평가되었다.
- 3) KAERI 단독으로 분석한 결과를 자주달개비 연구의 오랜 경험을 가진 INP 연구진이 수행한 분석결과와 비교하였으며 그 결과 KAERI의 분석기술 수준이 INP의 기술수준과 동등함을 알 수 있었다.
- 4) Cf-252 중성자가 자주달개비 체세포 돌연변이를 유발함에 있어서의 상대적 생물학적 효과비 (RBE)는 3.1~6.8의 범위로 분석되었다.
- 5) 본 연구의 결과는 중성자의 의학적, 생물학적 이용과 관련된 기초자료로 활용가능하며 공동연구를 통해 확립된 KAERI-INP간의 협력경험은 향후 한·폴간 과학기술분야의 협력관계 발전에 이바지 할 수 있을 것이다.

제5절 복합선질에 의한 생물지표성 평가

1. 실험조건의 설정

저 LET 방사선인 감마선과 고 LET 방사선인 중성자의 복합조사에 의한 생체 영향에 대한 연구보고는 지금까지 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 감마선조사 후 중성자조사 또는 중성자조사 후 감마선조사가 자주달개비 수술털세포 돌연변이에 어떤 영향을 미칠지를 평가하기 위한 시도로 설계되었다. 두가지 조사 조건 모두에 대하여 선조사와 후조사는 자주달개비 개화간격인 24시간의 간격을 두고 이뤄졌다. 육묘용 상토와 부숙퇴비를 혼합한 토양이 담긴 포트에서 생육한 식물체를 선량별로 10포트 이상씩 동일군으로 하였으며 감마선 조사의 경우 ^{60}Co 선원을 이용하여 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 및 2.0Gy의 선량을 조사하였다. 중성자의 경우는 한국원자력연구소 표준선장의 ^{252}Cf 선원으로 부터 339cm 이격거리에 동심원적으로 포트를 배열하여 조사하였으며 이때의

조사선량은 0.00078Gy였으며 중성자 방출율은 3.9933×10^8 neutrons/sec.였다.

두가지 방사선 조사가 모두 이뤄진 식물체는 온도를 20℃, 명기 14시간, 암기 10시간, 상대습도 75%, 광도는 15,000 lux를 성장상내에 유지하였다. 식물체의 영양분 공급을 위하여 전 실험기간 동안 Hoagland No.2 용액 1/6 희석액을 3일 간격으로 포트에 주었다.

2. 감마선과 중성자 복합조사에 의한 영향

감마선을 선량별로 조사한 다음 중성자를 조사하였을 때 나타나는 선량별 분홍돌연변이 일정변화를 그림 9에 나타내었다. 분홍돌연변이율의 고조기간은 복합 조사후 6~13일에 나타났다. 감마선 0.1Gy, 0.5Gy, 1.0Gy 조사군에서는 복합 조사후 9일째에 최대돌연변이율을 보였으며 0.3Gy 및 2.0Gy 조사군에서는 10일째 최대값을 보임으로써 감마선만을 조사하였을 때 나타나는 일반적 일정변화의 양상을 그대로 나타내었으나 돌연변이율의 값은 훨씬 높았다.

분홍돌연변이와 무색돌연변이를 합친 유전자돌연변이의 일정변화도 분홍돌연변이의 일정변화와 동일한 양상을 보였으며 감마선 2.0Gy 조사군에서 최대값은 50 gene mutation events/100hair 이상을 기록하였다 (그림 10). 감마선과 중성자 복합조사에 의한 영향은 감마선만을 조사한 경우에 비해 돌연변이율의 상승폭이 크다는 것이 확인된 결과이며 이같은 복합조사는 유전자 돌연변이 고조기간에 대한 지연이나 단축효과는 전혀 없었다.

한편 방사선 복합조사 식물체의 생육전전성에 대한 간접지표로서의 모당세포수의 변화를 보면 감마선 2.0Gy 조사군을 제외하고는 평균값인 24를 기준으로 정상적 변동폭을 보여 복합조사가 식물체의 생육 자체에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 평가되었다 (그림 11). 또한 세포분열의 교란정도를 나타내는 세포주기인자의 변화양상도 일반적 감마선 조사시와 동일한 양상을 보였다 (그림 12). 감마선 2.0Gy 조사군에 있어서 수술털당 세포수가 평균값에 비해 훨씬 낮게 나타난 것은 감마선 2.0Gy 및 중성자 0.00078Gy 복합조사는 T-4430 식물체의 생육을 저해하는 유해수준인 때문으로 해석될 수 있다.

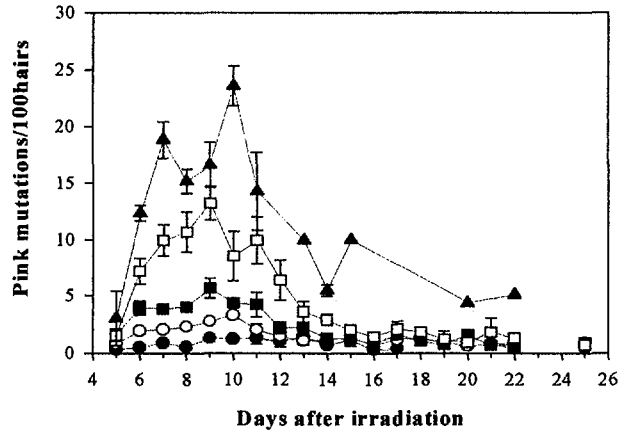


그림 9. 감마선+중성자 조사군의 감마선량별 분홍돌연변이 빈도 변화
(감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

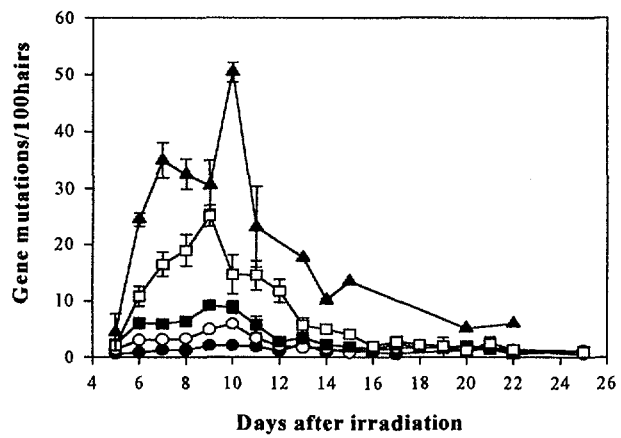


그림 10. 감마선+중성자 조사군의 감마선량별 유전자돌연변이 빈도 변화
(감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

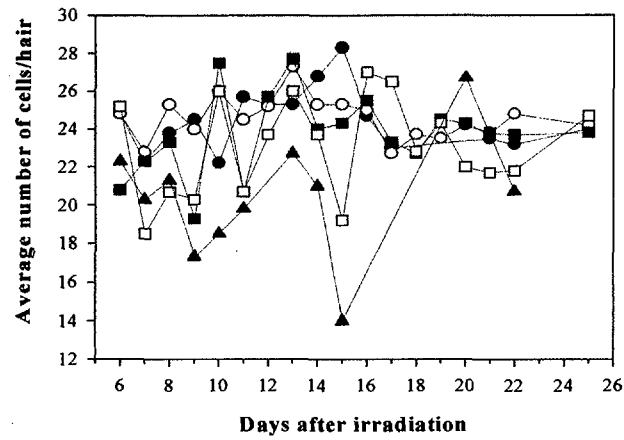


그림 11. 감마선+중성자 조사군의 감마선량별 평균 모당세포수 변화
 (감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

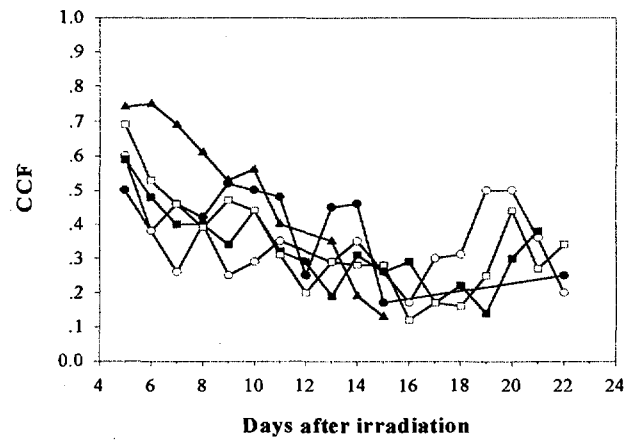


그림 12. 감마선+중성자 조사군의 감마선량별 세포주기인자 변화
 (감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

3. 중성자와 감마선 복합조사에 의한 영향

^{252}Cf 중성자선원으로부터 동일한 이격거리에 동심원상으로 포트를 배열하여 0.00078Gy의 중성자를 조사하고 24시간이 지난 다음 감마선을 조사하였다. 방사선 복합조사후 나타나는 선량별 분홍돌연변이 일정변화를 보면 분홍돌연변이율의 고조기간은 복합조사 후 6~16일에 나타났으며 특징적으로 7~12일 기간중 상승값의 고대 (plateau) 분포를 보였다 (그림 13). 감마선량별 분홍돌연변이 최대값은 선량별로 복합조사 후 9일 또는 10일에 나타남으로써 감마선+중성자 조사 실험의 결과와 유사하였다.

분홍돌연변이와 무색돌연변이를 합친 유전자돌연변이의 일정변화도 분홍돌연변이의 일정변화에 의하여 주도되어 분홍돌연변이 빈도의 변화양상과 유사하였다. 다만 최대 유전자돌연변이율 값은 감마선+중성자 복합조사군의 값이 50인데 비해 훨씬 낮은 35건/100모를 기록하였으나 상승값의 분포가 고조기간 중 고대를 형성하고 있기 때문에 pooled data에 대한 선량별 평균값은 감마선+중성자 복합조사군의 경우보다 높았다 (그림 14). 감마선만을 조사했을 경우에 비하여 유전자돌연변이의 고조기간 폭이 넓었으며 상승값이 수일간에 걸쳐 고대를 이루는 것이 특징적인 결과이다.

식물체의 수술털당 세포수는 방사선조사 후 생육건전성에 대한 간접지표로서의 의미를 가지고 있다. 모당세포수의 변화를 볼 때 0.1~0.5Gy 감마선량 범위에서는 생육에 지장이 전혀 없었으나 감마선 1.0Gy조사군에서 약간의 세포수 감소가 나타나기 시작하였으며 감마선 2.0Gy 조사군에서는 16세포 이하까지의 감소를 보임으로써 중성자+2.0Gy감마선 복합조사에 따라 식물체의 생육이 저해되고 있음을 알 수 있었다 (그림 15). 이러한 생육저해는 수술털세포가 분열능력을 잃어버림으로써 나타나는 치사돌연변이(lethal mutation)로 이어지기 때문에 실험상의 중요한 변수로 나타나게 된다. 이러한 결과는 2.0Gy 이상의 감마선량에서 분홍돌연변이가 포화를 나타내는 저 LET방사선 반응 실험의 결과와도 직접적으로 관련이 있다.

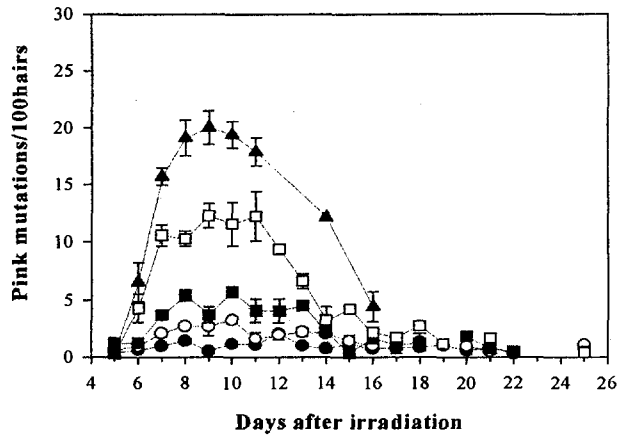


그림 13. 중성자+감마선 조사군의 감마선량별 분홍돌연변이 빈도 변화
(감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

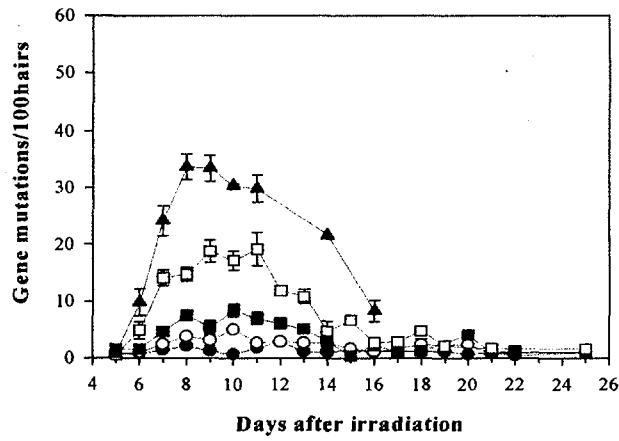


그림 14. 중성자+감마선 조사군의 감마선량별 유전자돌연변이 빈도 변화
(감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

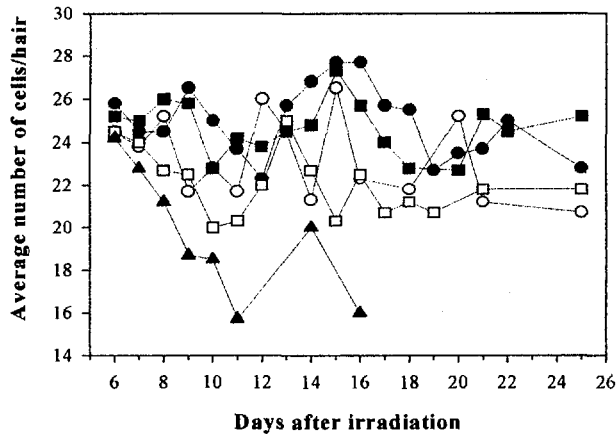


그림 15. 중성자+감마선 조사군의 감마선량별 평균 모당세포수 변화
(감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

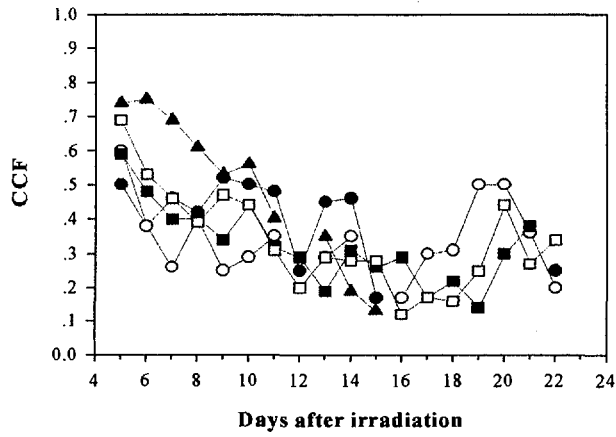


그림 16. 중성자+감마선 조사군의 감마선량별 세포주기인자 변화
(감마선 ●=0.1Gy, ○=0.3Gy, ■=0.5Gy, □=1.0Gy, ▲=2.0Gy).

세포주기인자의 일정변화는 일반적 감마선량에 따른 변화와 유사한 양상을 보였으며 감마선량 2.0Gy 조사군에서 특히 세포주기인자의 감소가 두드러지게 나타났다 (그림 16).

4. 복합조사된 TSH 분홍돌연변이의 감마선량-반응

0.1Gy에서 2.0Gy의 선량 범위에서 감마선에 의해 유발되는 TSH 분홍돌연변이의 선량반응식의 기울기 (증가계수)는 5.98이다. 감마선을 선량별로 조사한 후 중성자 0.00078Gy를 조사한 TSH 분홍돌연변이 감마선량-반응의 증가계수는 6.17, 중성자를 먼저 조사한 다음 감마선을 조사한 경우의 선량-반응 증가계수는 7.48이다. 감마선만 조사한 경우에 감마선+중성자 조사시 12%, 중성자+감마선 조사시 25%의 방사선생물효율 (biological efficacy of radiation) 증대가 나타났다 (그림 17).

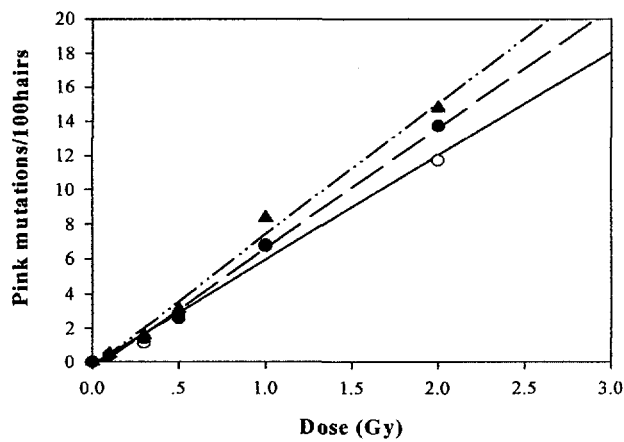


그림 17. 복합조사에 의한 TSH분홍돌연변이 감마선량-반응
(○=감마선, ●=감마선+중성자, ▲=중성자+감마선).

제6절 방사선과 환경요인의 공조작용 해석

1. 감마선과 기온일교차에 의한 공조작용

가. 실험조건의 설정

기온일교차가 없는 실험군 (이하 DTD0)의 전 실험기간에 걸쳐서 온도 20℃, 명기(明期) 14시간, 습도 80%, 광도 15,000 lux, 암기(暗期)는 10시간, 상대습도 85%의 생육조건을 유지하였다. 기온일교차를 20℃로 설정한 실험군 (이하 DTD20)의 생육조건은 명기 14시간, 28℃, 습도 80%, 광도 15,000 lux, 암기는 10시간, 8℃, 상대습도 85%를 유지하였다.

나. 자발돌연변이 빈도

DTD0 대조군과 DTD20 대조군에 있어서의 자발적인 분홍돌연변이율과 무색돌연변이율을 포함한 전체적인 유전자돌연변이율은 DTD0 실험군의 경우 커다란 변화를 보이지 않았지만, DTD20 실험군의 경우에 있어서는 자발적인 유전자돌연변이율이 10일경부터 점진적 증가를 나타내었다. 기온일교차가 없이 일정한 온도가 유지되는 조건에서는 자발돌연변이율이 전 기간중 거의 일정하였다. 반면에, 20℃의 기온일교차가 존재하는 조건하에서는 시간경과에 따라 자발돌연변이 빈도가 점진적으로 증가하는 양상을 나타내었다 (그림 18). 이같은 결과로부터 환경요인중 온도조건은 생물체의 정상적 생육에 매우 중요한 인자인 동시에 악조건으로 작용할 때는 돌연변이유발요인이 된다는 사실을 알수 있었다.

다. 유전자돌연변이 빈도

DTD0 실험군의 경우 중간조사선량인 0.5Gy 조사군을 기준으로 했을 때 방사선에 의한 분홍돌연변이율의 증가는 조사 후 6일 경부터 나타나기 시작하여 조사 10일후 4.76 ± 0.34 으로 최대값을 (그림 19A) 보인 반면 DTD20인 실험군의 분홍돌연변이율은 조사 후 8일부터 증가하기 시작하여 조사 14일 후에 5.21 ± 0.53 으로 최대값을 나타내었다 (그림 19B). 조사선량이 1.0Gy 조사군

에 있어서의 분홍돌연변이율 역시 DTD0 실험군의 경우 조사후 7일경부터 급격히 증가하여 조사 후 11일 경에 최대값을 나타내었고, DTD20 실험군은 조사 후 8일부터 증가하기 시작하여 13일 후에 최대값을 나타내어 0.5Gy 조사군과 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 분홍돌연변이율이 증가하여 최대를 나타내는 시기가 DTD0 실험군이 DTD20 실험군에 비하여 최대 분홍돌연변이를 나타내는 시기가 4일정도 앞당겨 짐을 알 수 있었다. 따라서 큰폭의 기온일교차는 자주달개비 수술털에 있어서 분홍돌연변이의 고조기간을 지연시키고 있음을 알 수 있었다.

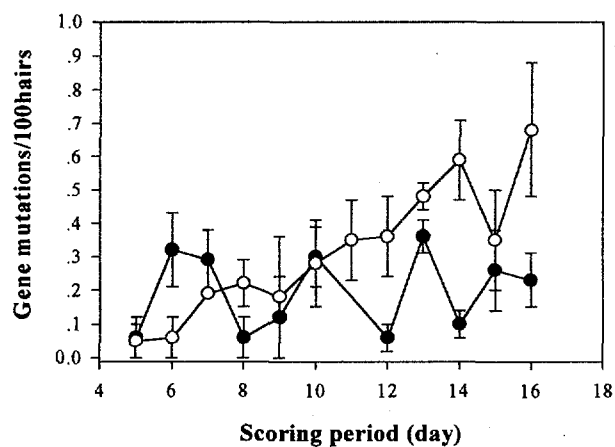


그림 18. 온도조건에 따른 자발돌연변이율의 일정변화
(●=DTD0, ○=DTD20, 평균±표준오차).

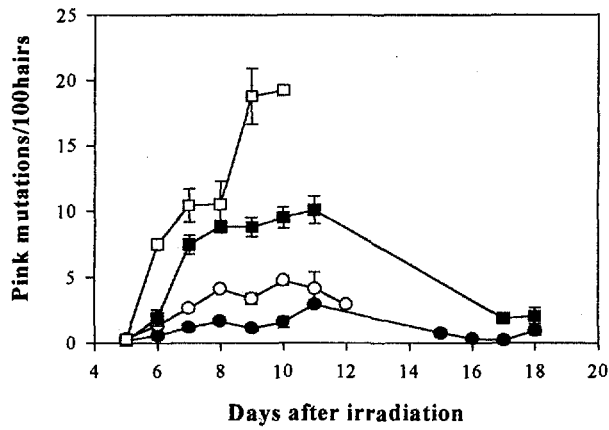


그림 19A. DTD0 실험군의 선량별 분홍돌연변이 빈도변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

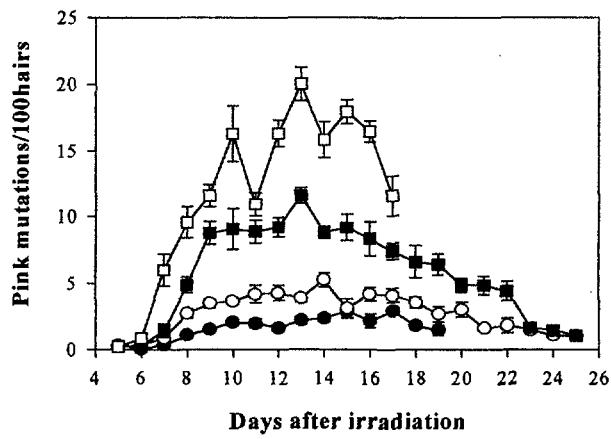


그림 19B. DTD20 실험군의 선량별 분홍돌연변이 빈도변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

DTD0 실험군의 경우 중간조사선량인 0.5Gy 조사군을 기준으로 했을 때 방사선에 의한 무색돌연변이율의 증가는 조사 후 8일 경부터 증가하기 시작하여 조사 10일후 1.88 ± 0.33 으로 최대값을 나타내었다 (그림 20A). DTD20 실험군의 무색돌연변이율은 조사 후 13일부터 증가하기 시작하여 조사 17일 후에 4.12 ± 0.39 로 최대값을 나타내었다 (그림 20B). 1.0Gy 조사군에 있어서의 무색돌연변이율은 DTD0 실험군의 경우 조사 후 7일경부터 급격히 증가하여 9일 경에 최대값을 나타내었고 (그림 20A), DTD20 실험군은 조사 후 9일부터 증가하기 시작하여 13일 후에 최대값을 나타내어 (그림 20B), 무색돌연변이율 역시 분홍돌연변이율과 마찬가지로 최대값을 나타내는 시기가 기온일교차에 의하여 지연되었다.

다. 수술털 수와 수술털 세포수의 변화

DTD0 대조군에 있어서의 화기당 평균 수술털 수와 수술털 세포수의 변화양상은 수술털 수에 있어서는 시간이 경과함에 따라 약간의 감소를 보인 반면 (그림 21A) 수술털 세포수에 있어서는 커다란 변화를 보이지 않고 거의 일정하였다 (그림 21B). 조사선량에 따른 평균 수술털 수에 있어서도 대조군과 같이 조사 후 시간이 경과함에 따라 감소하는 양상을 보였으나(그림 22A), 수술털 세포수에 있어서는 2.0Gy 조사군을 제외한 나머지 조사군에 있어서는 뚜렷한 감소를 보이지 않았다 (그림 22B). 조사선량별 수술털 수의 평균값은 $81.1 \pm 7.9 \sim 95.5 \pm 5.5$ 로 2.0Gy에서 가장 높게 나타난 반면 0.3Gy에서 가장 낮은 값을 나타내어 선량의 증가에 따른 뚜렷한 수술털 수의 감소를 보이지는 않았다. 그러나 수술털 세포수의 조사선량별 평균값은 $21.3 \pm 1.3 \sim 24.4 \pm 0.3$ 로 대조군에서 가장 높게 나타났으며 선량이 증가함에 따라 감소하기 시작하여 2.0Gy에서 가장 적은 평균값을 나타내었다. DTD20 대조군에 있어서의 꽃당 평균 수술털 수는 커다란 변화없이 일정하게 유지하다가 시간이 지남에 따라 약간 증가하는 양상을 나타낸 반면 수술털 세포수에 있어서는 큰 변화 없이 거의 일정하였다 (그림 21A,B).

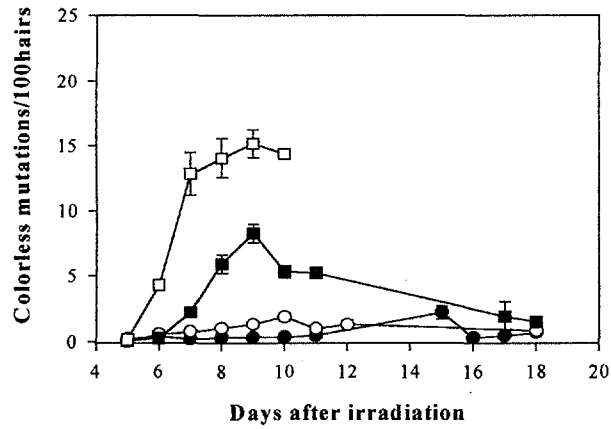


그림 20A. DTD0 실험군의 선량별 무색돌연변이 빈도변화 (●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

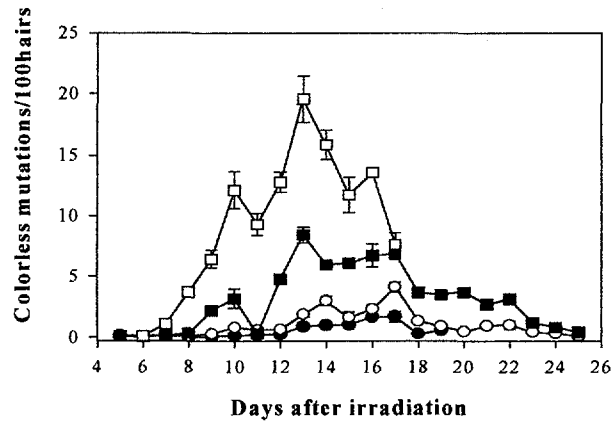


그림 20B. DTD20 실험군의 선량별 무색돌연변이 빈도변화 (●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

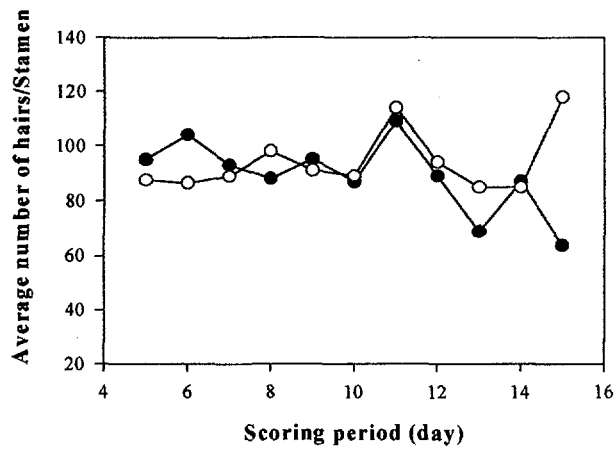


그림 21A. 일교차에 의한 수술당 평균 수술털수의 일정변화 (●=DTD0, ○=DTD20).

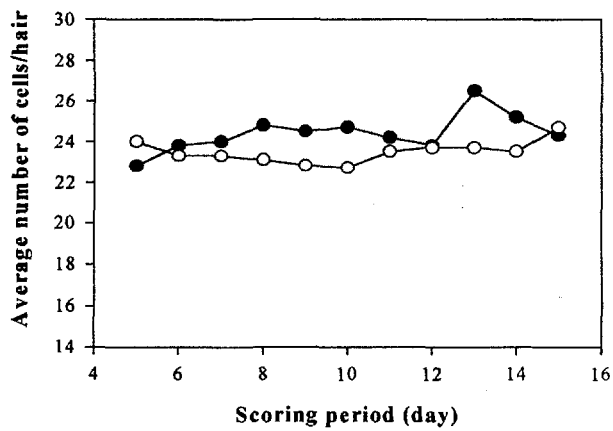


그림 21B. 일교차에 의한 수술털당 평균 세포수의 일정변화 (●=DTD0, ○=DTD20).

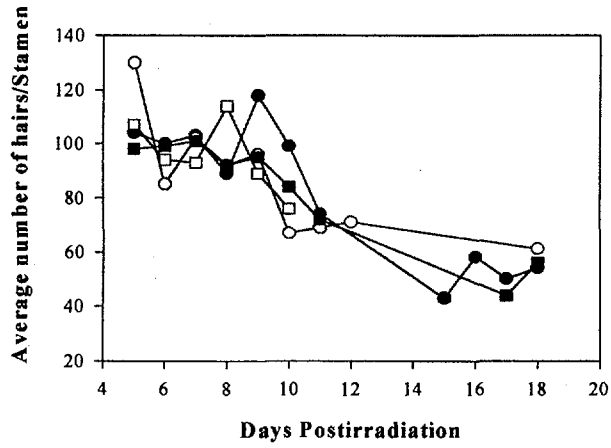


그림 22A. DTD0 실험군에 있어서 선량별 평균 수술털수 변화
 (●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

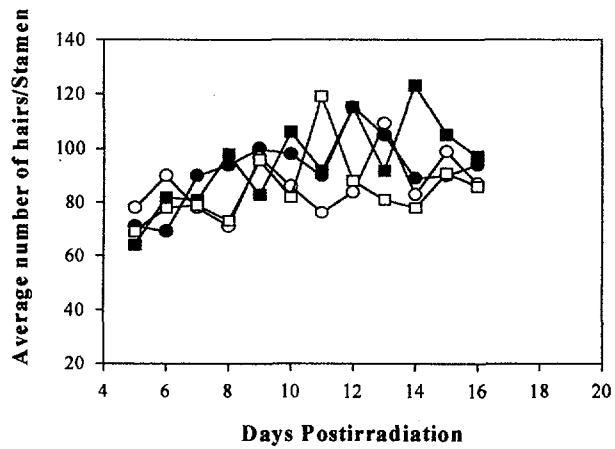


그림 22B. DTD20 실험군에 있어서 선량별 평균 수술털수 변화
 (●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

조사선량에 따른 평균 수술털 수에 있어서도 조사 후 시간 경과에 따른 뚜렷한 감소를 나타내지는 않았다 (그림 23A). 수술털 세포수에 있어서는 2.0Gy 조사군에 있어서만 조사 후 시간이 경과함에 따라 뚜렷한 세포수의 감소를 보였지만 다른 조사군에 있어서는 커다란 변화양상을 보이지 않았다 (그림 23B). 수술털 수의 평균값은 $84.9 \pm 4.1 \sim 94.7 \pm 5.1$ 로 1.0Gy에서 가장 높게 나타난 반면 2.0Gy에서 가장 낮은 값을 나타내어 선량의 증가에 따른 뚜렷한 수술털 수의 감소는 보이지 않았다. 그러나 선량별 수술털 세포수에 있어서의 평균값은 $21.8 \pm 0.7 \sim 24.3 \pm 0.3$ 로 0.5Gy군에서 가장 높은 값을 나타냈으며 선량이 증가함에 따라 감소하기 시작하여 2.0Gy에서 가장 적은 값을 나타내었다.

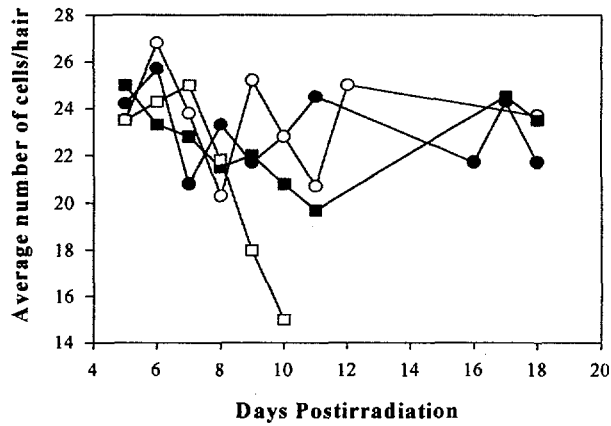


그림 23A. DTD0 실험군에 있어서 선량별 모당 평균 세포수 변화 (●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

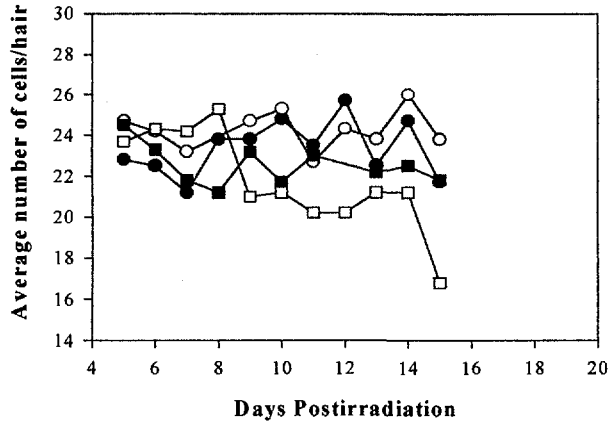


그림 23B. DTD20 실험군에 있어서 선량별 모당 평균 세포수 변화 (●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

라. 세포주기인자 (cell cycle factor)

세포주기 인자는 두 실험군에 있어서 유사한 결과를 보였는데 DTD0 실험군의 경우 조사선량중 0.3Gy를 제외한 모든 조사군이 방사선 조사후 6일째에 가장 높은 값을 (그림 24A), DTD20 실험군은 모든 조사선량에서 방사선 조사 후 7일째에 가장 높은 값을 나타내었으며 (그림 24B), 두 실험군 모두 방사선 조사 후 시간이 지남에 따라 낮아졌다. 조사선량에 대한 각각의 세포주기 인자는 DTD0 실험군이 0.51~0.75로 0.5Gy 조사군에서 가장 낮은 값을, 2.0Gy 조사군에서 가장 높은 값을 나타냈으며, DTD20 실험군은 0.37~0.68로 0.3Gy 조사군에서 가장 낮은 값을, 그리고 2.0Gy 조사군에서 가장 높은 값을 나타내었다.

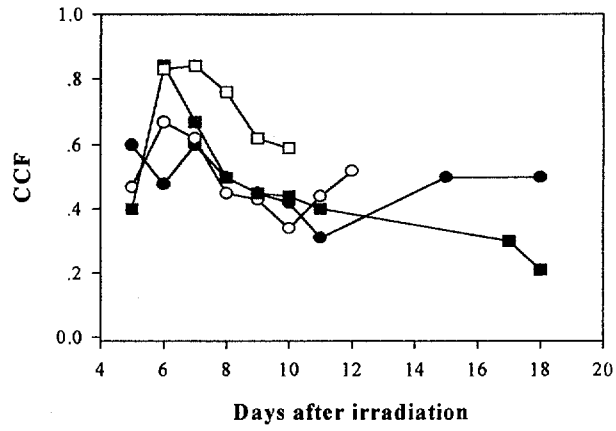


그림 24A. DTD0 실험군에 있어서 선량별 세포주기인자의 변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

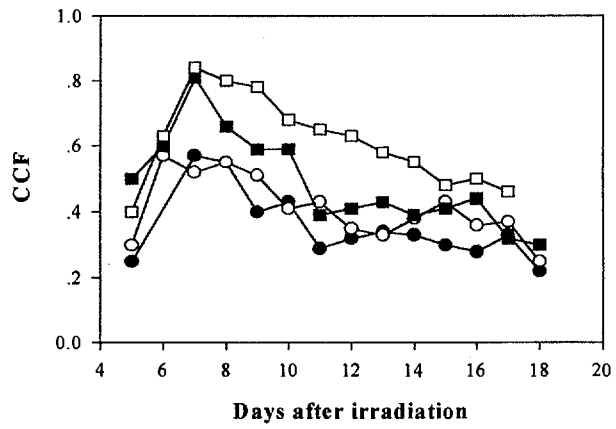


그림 24B. DTD20 실험군에 있어서 선량별 세포주기인자의 변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy, □=2.0Gy).

마. 선량-반응 관계

분홍돌연변이가 확연하게 증가한 고조기간은 DTD0 실험군은 조사 후 6일째부터 11일까지, DTD20 실험군은 조사 10일 후부터 15일까지로 설정하였다. 설정된 고조기간중의 검경 결과를 통합하여 선량별로 수술털 100모당 평균 돌연변이율을 산정하였으며 방사선을 조사하지 않은 대조시료의 분홍돌연변이율을 보정자료로 사용하였다. 두 조사 실험군에 있어서 방사선량의 증가에 따른 분홍돌연변이율의 증가는 뚜렷한 선형적 양상을 나타내었으며 (그림 25). 선량증가에 따른 DTD0 실험군의 증가계수는 5.99인 반면 DTD20 실험군의 증가계수는 8.01을 20℃의 기온일교차는 방사선에 의한 분홍돌연변이 유발에 대한 34%의 부가적 돌연변이 요인으로 작용한 것이다. 이는 감마선의 선량 증가에 따른 분홍돌연변이의 증가뿐 만 아니라 큰 폭의 기온일교차에 의해서도 분홍돌연변이의 증가가 유발됨을 알 수 있었다.

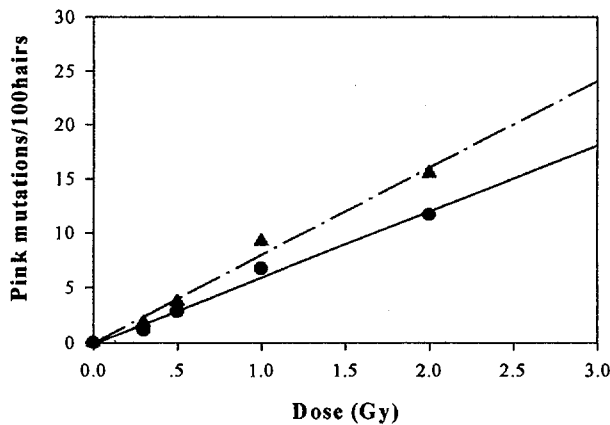


그림 25. 일교차에 따른 분홍돌연변이의 방사선량반응 비교

(●=DTD0 실험군, ▲=DTD20 실험군).

2. 감마선과 광주기에 의한 공조작용

가. 실험조건의 설정

감마선과 광주기 (PP; photoperiod)의 영향에 의한 TSH 분홍돌연변이 빈도를 연구하였다. 육묘용 상토와 부숙퇴비를 혼합한 토양이 담긴 포트에서 생육한 식물체를 사용하였다. 선량별로 10포트 이상을 동일군으로하여 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 및 1.0Gy의 감마선을 조사하였다. 방사선 조사후 대조군(CT)은 온도를 20℃, 명기 14시간, 암기 10시간, 상대습도 75%, 광도는 15,000 lux를 유지하였다. 한편, 광주기에 의한 영향을 분석하기 위해서 PP20 실험군은 명기 20시간, 암기 4시간, 그리고 PP4 실험군은 명기 4시간, 암기 20시간을 유지하였으며 나머지 실험조건은 CT 실험군과 동일하게 유지하였다.

나. 분홍돌연변이 빈도 변화

CT 실험군은 중간조사선량인 0.5Gy 조사군을 기준으로 했을 때 방사선에 의한 분홍돌연변이율은 조사 후 6일 경부터 증가하기 시작하여 조사 10일 후 4.76 ± 0.34 으로 최대값을 보였다 (그림 26).

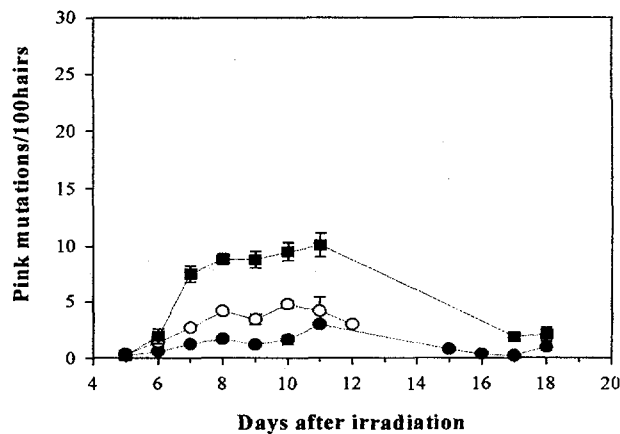


그림 26. 정상 광주기하에서의 선량별 분홍돌연변이 빈도 변화

(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy).

PP20 실험군 역시 분홍돌연변이율은 조사 후 6일부터 증가하기 시작하여 조사 9일 후에 3.87 ± 0.36 으로 최대값 (그림 27)을 나타낸 반면 PP4 실험군은 조사 후 12일부터 증가하기 시작하여 조사 23일 후에 7.31 ± 0.53 으로 최대값 (그림 28)을 나타내었다. 따라서 분홍돌연변이율이 증가하는 시기가 PP4 실험군이 다른 두 조사군에 비하여 6일 일정도 지연됨을 알 수 있었으며, 비정상적으로 짧은 광주기는 자주달개비 수술털에 있어서 분홍돌연변이의 고조기간 역시 상당기간 지연시키고 있음을 알 수 있었다. 고조기간 중에 있어서의 분홍돌연변이율은 CT 실험군에 비하여 두 실험군에서 높게 나타났으며, 특히 PP20인 실험군 보다 PP4인 실험군에서 선량 증가에 따른 수술털의 분홍돌연변이 증가 양상이 더욱 두드러졌다. 결론적으로 비정상적으로 짧은 광주기는 환경적인 스트레스의 한 요인으로서 자주달개비 수술털에 대한 이온화 방사선의 분홍돌연변이 유발효과를 증가시키는 동시에 방사선에 의한 유전자 손상의 회복을 상당기간 지연시키는 원인이 된다.

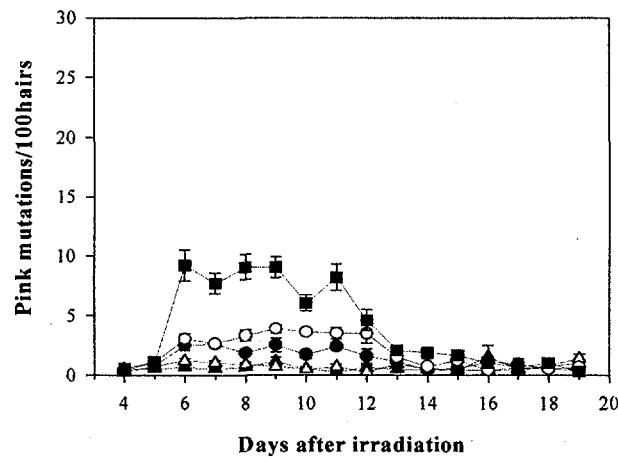


그림 27. PP20 실험군의 선량별 분홍돌연변이 빈도 변화

(▲=0.05Gy, △=0.1Gy, ●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy).

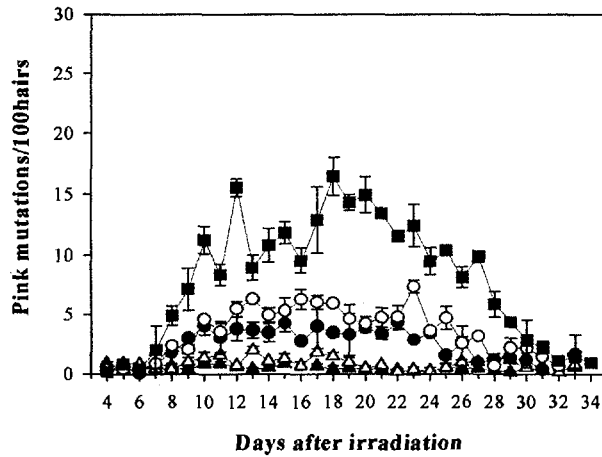


그림 28. PP4 실험군의 선량별 분홍돌연변이 빈도 변화
 (▲=0.05Gy, △=0.1Gy, ●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy).

다. 세포주기 인자

세포주기 인자는 0.3Gy, 0.5Gy 및 1.0Gy의 방사선 조사군에 있어서 CT 실험군의 경우 조사선량중 0.3Gy를 제외한 모든 조사군이 방사선 조사후 6일째에 가장 높은 값을 (그림 29), PP20 실험군은 모든 조사선량에서 방사선 조사 후 6일째에 가장 높은 값을 나타내어 유사한 결과(그림 30)를 보인 반면 PP4 실험군에 있어서는 0.3Gy 와 1.0Gy 조사군에 있어서는 방사선 조사후 9일째에 가장 높은 값을 나타내었고 0.5Gy 조사군에 있어서는 방사선 조사후 6일째에 가장 높은 값을 나타내었다(그림 31). 실험군 모두 방사선 조사 후 시간이 지남에 따라 세포주기 인자는 낮아지는 경향을 보였다. 조사선량에 대한 각각의 세포주기 인자는 CT 실험군이 0.47~0.49로 조사군에 따라 커다란 차이를 보이지 않았으며, PP20 실험군은 0.33~0.38로 0.5Gy 조사군에서 가장 낮은 값을 나타내었다. PP4 실험군은 0.36~0.40으로 0.5Gy 조사군에서 가장 높은 값을, 0.3Gy 조사군에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

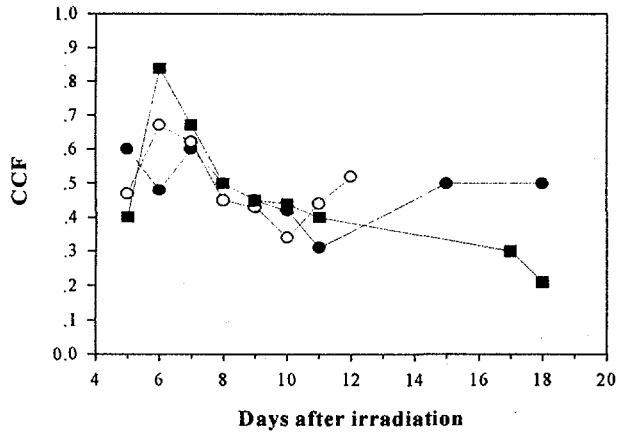


그림 29. 정상광주기하에서의 선량별 세포주기인자의 변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy).

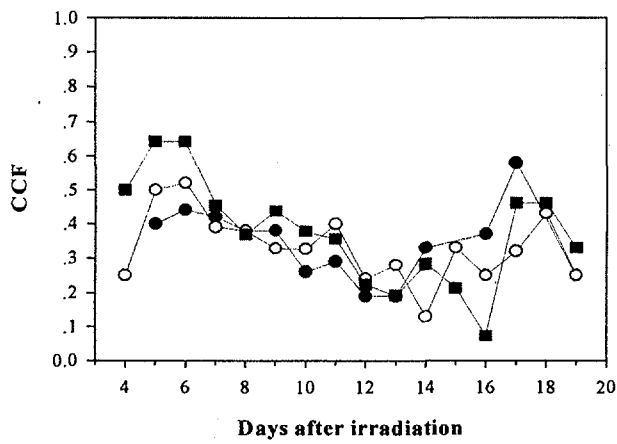


그림 30. PP20 실험군의 선량별 세포주기인자의 변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy).

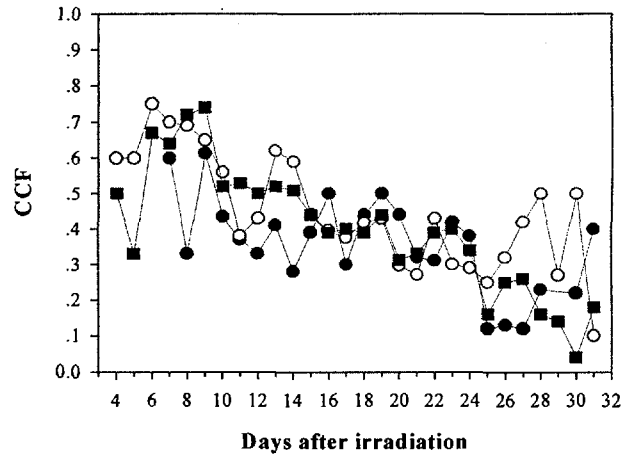


그림 31. PP4 실험군의 선량별 세포주기인자의 변화
(●=0.3Gy, ○=0.5Gy, ■=1.0Gy).

라. 선량-반응 관계

분홍돌연변이가 확연하게 증가한 고조기간은 CT 실험군은 조사 후 6 일째부터 11일까지, PP20 실험군은 조사 6일 후부터 12일까지, PP4 실험군은 조사 12일 후부터 18일로 나타났다 (표 12). 고조기간중의 검경 결과를 통합하여 선량별로 수술털 100모당 평균 돌연변이율을 산정하였으며 방사선을 조사하지 않은 대조시료의 분홍돌연변이율을 보정자료로 사용하였다. 고조기간중 통합데이터로부터 산정한 평균 분홍돌연변이 빈도는 일차함수적 선량-반응 관계를 나타내고 있다. 이같은 선형적 관계식의 회귀계수는 CT 실험군은 0.99, PP20과 PP4 실험군은 각각 0.98 및 0.99로서 높은 통계적 유의성이 인정된다. 한편 CT 실험군에 있어서 감마선 조사에 의하여 유발되는 돌연변이 빈도의 증가계수 5.99에 비해 PP20 과 PP4 실험군에 있어서의 각각의 돌연변이 빈도 증가계수는 6.93 과 11.74로 PP20 실험군에 있어서는 15.7%, PP4 실험군은

95.9%의 증가 효과를 나타내었다 (그림 32). 특히 선량이 증가함에 따라 다른 두 실험군보다 PP4 실험군에 있어서 더욱 뚜렷한 분홍돌연변이율의 증가를 나타냈는데, 이는 광주기가 짧을수록 감마선의 선량 증가에 따른 분홍돌연변이의 증가가 가속화됨을 의미하는 결과이다.

표 12. 감마선과 광주기의 공조작용에 의한 TSH 분홍돌연변이 최대값

실험군	선량 (Gy)	최대값 (평균±SE)	최고조일	고조기간
CT (14시간 조광)	0.3	2.95±0.00	11	6~11 day
	0.5	4.76±0.34	10	"
	1.0	10.07±1.04	11	"
PP20 (20시간 조광)	0.05	1.48±1.04	16	6~12 day
	0.1	1.37±0.00	19	"
	0.3	2.61±0.26	7	"
	0.5	3.87±0.36	9	"
	1.0	9.21±1.28	6	"
PP4 (4시간 조광)	0.05	0.88±0.17	4	12~18 day
	0.1	2.02±0.32	13	"
	0.3	4.36±0.68	22	"
	0.5	7.31±0.53	23	"
	1.0	16.44±1.54	18	"

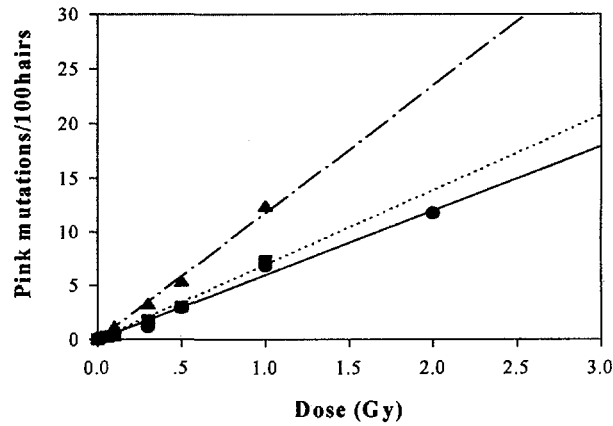


그림 32. 감마선과 광주기 공조작용에 의한 분홍돌연변이 선량반응
(●=CT 실험군, ■=PP20 실험군, ▲=PP4 실험군).

감마선 0.5Gy를 기준선량으로 평가하였을 때 CT 실험군은 방사선 조사 후 6일 경과시부터 돌연변이율이 증가하기 시작하여 조사 후 10일째에 최고값에 이르렀다. PP20 실험군에서는 방사선 조사 후 6일 경과시부터 돌연변이율이 급상승하기 시작하여 조사 후 9일째에 최고값에 이르렀다. 반면에 PP4 실험군에 있어서는 조사 후 10일째부터 돌연변이율이 점차 증가하기 시작하여 23일 경과시 최고값에 도달하였다. 고조기간 중에 있어서의 분홍돌연변이율은 CT 실험군에 비하여 두 실험군 높게 나타났으며, 특히 PP20인 실험군 보다 PP4인 실험군에서 선량 증가에 따른 수술털의 분홍돌연변이 증가 양상이 더욱 두드러졌다. 결론적으로 비정상적으로 짧은 광주기는 자주달개비 수술털에 대한 이온화 방사선의 분홍돌연변이 유발효과를 증가시키는 동시에 방사선에 의한 유전자 손상의 회복을 상당기간 지연시키는 원인이 된다.

3. 방사선과 환경요인의 공조작용에 대한 고찰

자주달개비에 있어서 자발적인 돌연변이 정도는 빛, 온도와 공기 혼합물과 같은 다양한 환경요인들에 의하여 영향을 받는데, 본 연구에서 보면 기온일교차가 없는 실험군에 있어서의 자발돌연변이율은 시간이 경과함에 따라 증가와 감소가 반복되는 양상을 보이지만, 기온일교차가 큰 경우에 있어서는 온도차에 의하여 자발돌연변이 빈도가 점진적으로 증가함을 알 수 있었다. 이는 낮은 온도에서 자발돌연변이가 높게 일어나며, 점차적인 온도 변화에 의한 일교차보다는 갑작스럽고 급격한 온도 변화에 의한 일교차에 의하여 자발돌연변이 빈도가 증가한다는 Imai *et al.*(1991) [41]의 연구 결과와도 일치한다. Mericle *et al.*(1975) [42]도 기온일교차가 자발적인 분홍돌연변이를 변화시키는 원인 중에 하나로 보았으며, T-02 클론에 있어서 자발적인 돌연변이빈도가 높게 나타나는 것은 커다란 폭의 일교차에 의한 결과라고 보고하였다.

Ichikawa(1981) [43]는 KU 20 클론에 있어서 낮은 온도에서 자발돌연변이율이 높게 나타나는 특징을 가지는 것은, 자발적으로 일어나는 DNA 손상의 회복기작이 높은 온도에서 더 효과적이기 때문이며 이는 효소 기작에 의한 것이라고 추정하였으며, Imai *et al.*(1991) [41]은 KU 20 클론의 자발적인 돌연변이는 온도에 대하여 역상관 관계를 나타내는데, 이는 자발적으로 일어나는 DNA 손상의 회복기작이 높은 온도에서 더 효과적이기 때문이며, 자발돌연변이를 일으키는데 체세포 재조합이 중요한 역할을 한다면 이는 재조합과 후복제 회복 등에 의하여 일어날 것이라고 추측하였으며, Ichikawa(1994) [44]는 자주달개비 수술털의 자발적 돌연변이의 구역분포에 관한 연구를 통하여 KU 20 클론에 있어서의 자발돌연변이의 주된 요인중의 하나는 체세포 재조합에 의한 결과일 것이라고 추정하였다. 본 연구에서도 분홍돌연변이율과 무색돌연변이율 모두 일교차가 큰 실험군에서 고조기간이 지연되는 것을 확인할 수 있었다.

자주달개비에 있어서 수술당 평균 수술털 수와 수술털의 평균 세포수는 화서가 오래된 것일수록 일반적으로 감소하며 [45], 방사선 선량의 증가에 따라

수술털의 분열세포가 분열능력을 상실하기 때문에 수술털당 세포수가 감소한다고 알려져 있다[46]. 본 연구에서도 평균 수술털 수에 있어서는 화서가 오래될수록 약간씩 감소하는 경향을 보였으나 수술털의 평균 세포수에 있어서는 커다란 변화를 보이지 않았다. 방사선을 조사한 실험군에 있어서의 수술당 평균 수술털수는 선량이 증가함에 따라 뚜렷하게 감소를 나타냈다. 또한 수술털의 평균 세포수는 대부분의 실험군에서 선량증가에 따른 감소를 보였는데 특히 선량이 높을수록 뚜렷한 감소를 보였는데 이는 수술털 세포의 분열능력 상실에 의한 치사돌연변이의 증가에 기인한 것으로 생각된다.

세포주기인자 (세포분열교란)는 연속된 분홍세포군 수에 대한 단독 분홍세포수의 비율을 나타내며, 단독 분홍세포의 출현은 세포주기중 합성기(S phase)이후에 유발된 돌연변이의 결과 [31]이기 때문에 세포주기인자는 방사선 조사에 의한 세포분열의 교란 정도를 알 수 있는 척도가 된다. 본 실험 결과에서 보면 대조군에 있어서의 세포주기인자는 환경요인에 따라 커다란 차이를 보이지는 않았으나 방사선 조사선량이 증가함에 따라 세포주기인자의 초기값도 높아짐을 알 수 있었다. 방사선을 조사한 조사군에 있어서는 방사선 조사 후 6~7일 사이에 가장 높은 값을 나타낸 것으로 보아 이시기가 세포분열교란 정도가 다른 시기보다 높음을 알 수 있었으며 이후 방사선 조사시간이 지남에 따라 낮아지는 경향을 보였다. 선량이 증가함에 따라 세포주기인자가 높은 값을 나타내는 것으로 보아 감마선의 선량 증가가 자주달개비 수술털의 체세포돌연변이에 있어서 세포분열교란을 일으키는데 중요한 요인으로 관여함을 알 수 있었다. 결론적으로 큰 폭의 기온일교차와 극단적인 광주기 체제는 환경적인 스트레스로서 자주달개비 수술털 세포가 방사선에 의한 손상회복 과정에 있어서 교란을 가져옴으로서 방사선에 의해 유발되는 체세포 돌연변이의 효과적인 증가와 함께 손상회복의 저해효과로 인한 돌연변이의 고조기간을 지연시키는 원인이 된다.

제 6 장 공동연구개발 목표 달성도 및

대외기여도

방사선 지표생물 연구의 필수 선결요소로써 연구재료인 자주달개비 클론별 확보 및 유지기술을 확립하기 위한 선행연구가 수행되었다. 폴란드원자물리연구소로부터 무상으로 입수한 3가지 자주달개비 클론에 대한 증식·유지기술을 확립하였으며 각 클론별 기본 특성자료를 획득하였다. 저 LET 방사선에 대한 지표성 검증 (선량-반응관계 확립)은 물론 방사선에 의한 TSH 돌연변이 분석기술을 확립하고 상호비교검증과정을 거쳐 이를 개선하는 등 선량반응관계식을 확립함으로써 1차년도 연구개발목표를 달성하였다.

고 LET 방사선인 중성자선을 지표생물의 반응을 이용하여 감지할 수 있는 기술을 확립하기 위하여 중성자선의 저선량 영역에 대하여 TSH 체세포변이 분석을 실시하는 한편 X선에 대한 지표생물 반응을 동시 평가하므로써 저선량 중성자선에 대한 지표성을 검증하였으며 또한 자주달개비 T-4430이 나타내는 중성자선의 상대적 생물학적 효과비 (RBE; relative biological effectiveness)를 산정하므로써 설정된 2차년도 연구개발목표를 달성하였다.

선질이 각기 다른 고 LET과 저 LET 방사선에 의한 복합반응을 평가하기 위하여 감마선 조사후 중성자 조사 또는 중성자 조사후 감마선 조사를 실시하여 복합조사에 의한 TSH 분홍돌연변이 빈도를 분석하였다. 또한 주요 환경요인인 기온 일교차 (diurnal temperature difference)와 광주기 (photoperiod)가 방사선과 함께 자주달개비에 작용하였을 때 나타나는 공조작용을 실험적으로 규명하는 연구를 수행하여 설정된 3차년도의 연구개발목표를 달성하였다.

본 공동연구개발 결과는 조선일보('96. 12. 25; "방사선 누출땀 얼굴 빨개져요"--"환경오염 경고식물 자주달개비'), 동아일보('96. 3. 9; '자주달개비는 방사능감시 꽃'), 한국일보 ('96. 2. 14; 다년생식물 자주달개비 방사능누출 감시한다') 등 주요 언론매체 보도를 통하여 홍보효과 획득에 기여하였으며 국외는

문 3편을 포함한 10여편의 학술연구논문, 8건의 연구/기술보고서 발간 및 게재를 통하여 본 특정연구개발사업 (국제공동연구사업)의 대내외적 위상제고에 크게 이바지하였다. 한편 본 공동연구에 대하여 폴란드 원자력청 장관이 각별한 관심을 표명하는 등 폴란드에서의 한국 인지도를 높이는 데에도 공헌하였으며 향후의 양국간 협력관계 구축을 위한 여건조성에도 기여한 바 크다.

본 연구개발과 관련하여 대외적으로 발표된 언론보도, 학술논문 및 연구/기술보고서 등 연구성과물은 다음과 같다.

◇ 연구/기술 보고서

- 김진규, 안토니나 체불스카바실레브스카, “과학기술협력을 위한 KAERI-INP 공동연구; 자주달개비 생물지표를 응용한 Cf-252 중성자의 생물학적 효과연구”, KAERI/TR-955/98 (1998)
- J. K. Kim and A. Cebulska-Wasilewska, “KAERI-INP Joint Research for Science and Technology Cooperation”, KAERI/TR-773/96 (1996)
- J. K. Kim, K. Rekas, A. Cebulska-Wasilewska, “Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of radiation”, INP Report No. 1786/B (1997)
- A. Cebulska-Wasilewska and J. K. Kim, “Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of radiation sources at KAERI”, Annual Report 1996, p.163, INP Report No. 1727 (1997)
- K. Rekas, A. Cebulska-Wasilewska and J. K. Kim, “Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of neutrons from ²⁵²Cf source”, Annual Report 1997, p.175, INP Report No. 1791 (1998)

◇ 학술논문

- Cebulska-Wasilewska, A., Rekas, K., Kim, J.K., Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of radiation. *Nukleonika* (1998) (in press)
- 김진규, 김원록, 이영근, 김재성, 송희섭, 정철영, 김기남, 서원선, 홍광표, 방사선지표식물 자주달개비를 이용한 환경방사선 감시, *환경생물학회지*, 16권 2호, 85-91

(1998)

- 김진규, 김원록, 김재성, 신해식, 이정주, 기온일교차와 감마선의 영향에 의한 자주 달개비 수술털의 체세포돌연변이 빈도, 환경생물학회지, 16권 3호, 253-262 (1998)
- 김진규, 김원록, 자주달개비 수술털 분홍돌연변이의 중성자 선량반응과 RBE. 대한 방사선방어학회지, 23권 1호, 17-23 (1998)
- 김진규, 김원록, 이영근, 김재성, 송희섭, 감마선과 광주기 영향에 의한 자주달개비 수술털의 분홍돌연변이, 한국환경생물학회 '98추계학술대회 초록집, p.30, 1998. 10. 16, 상명대학교 (1998)
- 김진규, 김원록, 이영근, 김재성, 송희섭, 자주달개비 체세포돌연변이에 대한 방사선과 농약의 상호작용, 한국환경생물학회 '98추계학술대회 초록집, p.29, 1998. 10. 16, 상명대학교 (1998)
- 김진규, 신해식, 김원록, 이영근, 이정주, 살충제와 감마선에 의한 자주달개비 수술털의 분홍돌연변이 빈도 변화, 대한방사선방어학회 '98추계학술발표회 논문집, pp.11-14, 1998. 11. 6, 부산 (1998)
- Kim, J.K., Song, H.S., Chae, S.K., Influence of environmental stresses on radiation-induced pink mutations in *Tradescantia* stamen hairs, Second International Symposium on Ionizing Radiation, 1999. 5. 10-14, Ottawa, Canada (1999) (submitted)
- Kim, J.K., Rekas, K., Cebulska-Wasilewska, A., Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of neutrons from californium-252 source. in Radioactivity : Risk and Hope, Book of abstract, Workshop in memory of Maria Sklodowska-Curie, Krakow, Poland, Oct. 6-7, 1997
- 김진규, 김원록, 이영근, 송희섭, 정성태, 김기남, 서원선, 정기진, 환경방사선 감시 보조수단으로서의 자주달개비 화단. 대한방사선방어학회 '97추계학술발표회 논문집, pp.41-45, 1997. 11. 7, 경주교육문화회관 (1997)
- 김진규, 김원록, 자주달개비 체세포돌연변이의 중성자 선량반응. 대한방사선방어학회 '97추계학술발표회 논문집, pp.35-40, 1997. 11. 7, 경주교육문화회관 (1997)
- 김진규, 이영근, 송희섭, 천기정, 김국찬, 방사선에 대한 지표생물로서의 자주달개비, 대한방사선방어학회 '96추계학술발표회 논문집, pp.24-28, 1996. 11. 8, 제주대학

교 (1996)

- Kim, J.K., Cebulska-Wasilewska, A., Application of Tradescantia for studying the effect of boron neutron capture, Proc. KARP Autumn Mtg., pp. 83-88, Nov. 8, 1996, Cheju, Korea (1996)

◇ 언론홍보

- 1) 조선일보 23면 (1996. 12. 25) : “방사능 누출때 얼굴 빨개져요“ -- ‘환경오염 경고 식물 자주달개비’
- 2) 조선일보 5면 (1996. 12. 26) : 「이규태 코너」 “달개비꽃“
- 3) 동아일보 29면 (1996. 3. 9) : ‘자주달개비는 방사능감시 꽃’
- 4) 한국경제신문13면 (1996. 2. 29) : ‘식물로 방사능오염 감시’
- 5) 한국일보 27면 (1996. 2. 14) : ‘다년생식물 자주달개비 방사능누출 감시한다’
- 6) 대전매일신문14면 (1996. 2. 1) : ‘자주달개비로 방사선 감시한다’
- 7) 동양일보 18면 (1996. 2. 1) : ‘자주달개비 방사능누출 감시한다; 방사능에 남색서 분홍.무색으로’
- 8) 중도일보 18면 (1996. 2. 1) : ‘자주달개비 제2의 방사선 감시자’
- 9) 대전일보 23면 (1996. 1. 31) : ‘자주달개비로 방사선 감시한다’

◇ 기타

- 1) 원우(Monthly KAERI Magazine, 1996. 1월호) : 연구노트 : 식물로 방사능오염 감시

제 7 장 공동연구개발결과의 활용계획

방사선지표생물인 자주달개비의 방사선지표성 분석기술 및 실험결과 해석기술이 본 공동연구를 통하여 확립 또는 개선되었다. 또한 저선량 영역을 포함한 방사선의 선질별 반응관계가 수립되었으며 세계적으로 많이 이용되고 있는 T-4430, T-02 및 KU-9 등의 자주달개비 클론이 확보되었다. 이같은 연구개발의 결과는 다양한 분야에 응용이 가능하기 때문에 그 활용성도 매우 높다는 평가를 받고 있다.

- 각종 방사선에 대하여 확립된 자주달개비 수술털 시스템의 돌연변이 선량 반응관계는 자주달개비를 이용한 환경방사선 위해성 감시, 방사능 오염수 및 토양에 대한 건전성 평가 등 환경감시에 활용될 것이며 이를 통하여 환경위해요인에 대한 보다 과학적인 생물학적 안전성 분석자료를 제공할 예정이다.
- 중성자에 대한 선량반응관계는 종양조직에 대한 중성자포획치료 (neutron capture therapy)와 관련하여 화학물질 전처리에 의한 방사선효율 증대를 실험하기 위한 핵심기술로서 활용될 수 있다. 이같은 연구개발결과를 활용하는 구체적 계획으로서 한국원자력연구소와 폴란드원자물리연구소간 ‘방사선과 화학물질의 상호작용에 의한 생체영향 연구’에 관한 공동연구를 수행하기로 합의하였다.
- 기관간 연계공동실험을 통하여 확립된 실험기법중 특히 이원적 연계실험의 설계 및 시료식물체의 기관간 이송과 관련된 장거리, 장시간 식물체 운송 처치기술은 향후 생물체를 이용한 다국간 공동실험을 위한 기반기술로서 활용될 수 있다.
- 본 공동연구의 수행경험 및 결과는 한국-폴란드 양국간의 상호 협력과 이해의 폭을 넓히는 역할에서의 일익을 담당하고 있으며 특히 과학기술분야의 호혜적 동반자관계 발전을 위한 선형사례로 활용가능하다.

제 8 장 참고문헌

1. Hellawell, J.M., 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management. pp.52-53, Elsevier, New York
2. Muller, W.U., and Streffer, C. 1991. Biological indicators for radiation damage. *Int. J. Radiat. Biol.* 59:863-873
3. Celarier, A. 1964. A simple liquid-culture method of growing plants. *Proceedings of Florida State Horticultural Society*, 77:3-6
4. Vosa, C.G., 1965. New chromosome numbers in *Tradescantia virginiana*. *Heredity*, 20:467-469
5. Rekas, K., Cebulska-Wasilewska, A., and Capala, J., 1997. Biological efficiency of epithermal neutrons estimated from gene mutations in TSH assay. in Radioactivity : Risk and Hope, Book of abstract, Workshop in memory of Maria Sklodowska-Curie, Krakow, Poland, Oct. 6-7, 1997
6. 김진규 등, 1994. 지표식물을 이용한 방사선량 감시 연구. KAERI/RR-1472/94
7. Kwon, S.H., Lee, Y.I., Chung, K.H., and Oh, J.H. 1981. Mutation frequency of *Tradescantia* (BNL clone 4430) stamen hairs exposed to low dose of gamma ray in KAERI gamma-field. *J. Kor. Nuc. Soc.* 13:162-167
8. Cebulska-Wasilewska, A., Rekas, and K., Kim, J.K., 1998. Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of radiation. *Nukleonika* (in press)
9. 김진규, 김원록, 김재성, 신해식, 이정주, 1998. 기온일교차와 감마선의 영향에 의한 자주달개비 수술털의 체세포돌연변이 빈도, 환경생물학회지, 16:253-262
10. 김진규, 김원록, 이영근, 송희섭 등, 1998. 방사선지표식물 자주달개비를 이

- 용한환경방사선 감시, 환경생물학회지, 16:85-91
11. 김진규, 김원록, 1998. 자주달개비 수술털 분홍돌연변이의 중성자 선량반응과 RBE. 대한방사선방어학회지, 23:17-23
 12. 김진규, 김원록, 이영근, 김재성, 송희섭, 1998. 감마선과 광주기 영향에 의한 자주달개비 수술털의 분홍돌연변이, 한국환경생물학회 '98추계학술대회, 초록집, p. 30, 1998. 10. 16, 상명대학교
 13. 김진규, 김원록, 이영근, 김재성, 송희섭, 1998. 자주달개비 체세포돌연변이에 대한 방사선과 농약의 상호작용, 한국환경생물학회 '98추계학술대회 초록집, p.29, 1998. 10. 16, 상명대학교
 14. 김진규, 신해식, 김원록, 이영근, 이정주, 1998. 살충제와 감마선에 의한 자주달개비 수술털의 분홍돌연변이 빈도 변화, 대한방사선방어학회 '98추계학술발표회 논문집, pp.11-14, 1998. 11. 6, 부산
 15. Kim, J.K., Song, H.S., and Chae, S.K., 1999. Influence of environmental stresses on radiation-induced pink mutations in *Tradescantia* stamen hairs, Second International Symposium on Ionizing Radiation, 1999. 5. 10-14, Ottawa, Canada (1999) (submitted)
 16. Kim, J.K., Rekas, K., and Cebulska-Wasilewska, A. 1997. Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of neutrons from californium-252 source. in Radioactivity : Risk and Hope, Book of abstract, Workshop in memory of Maria Sklodowska-Curie, Krakow, Poland, Oct. 6-7, 1997
 17. 김진규, 김원록, 이영근, 송희섭, 정성태, 김기남, 서원선, 정기진, 1997. 환경방사선 감시 보조수단으로서의 자주달개비 화단. 대한방사선방어학회 '97추계학술발표회 논문집, pp.41-45, 1997. 11. 7, 경주교육문화회관
 18. 김진규, 김원록, 1997. 자주달개비 체세포돌연변이의 중성자 선량반응. 대한방사선방어학회 '97추계학술발표회 논문집, pp.35-40, 1997. 11. 7, 경주교육문화회관

19. 김진규, 이영근, 송희섭, 천기정, 김국찬, 1996. 방사선에 대한 지표생물로서의 자주달개비, 대한방사선방어학회 '96추계학술발표회 논문집, pp.24-28, 1996. 11. 8, 제주대학교
20. Kim, J.K., and Cebulska-Wasilewska, A., 1996. Application of *Tradescantia* for studying the effect of boron neutron capture, Proc. KARP Autumn Mtg., pp. 83-88, Nov. 8, 1996, Cheju, Korea
21. Ichikawa, S., and Nakata, M., 1975. Increase of mutation of *Tradescantia reflexa* around the Hamaoka Atomic Power Station. *Kakaku-Tokyo*, 45:417-426 (in Japanese)
22. Cebulska-Wasilewska, A., 1992. *Tradescantia* stamen-hair mutation bioassay on the mutagenicity of radioisotope-contaminated air following the Chernobyl nuclear accident and one year later. *Mut. Res.* 270:23-29
23. Ichikawa, S., and Ishii, C., 1991. Somatic mutation frequencies in the stamen hairs of *Tradescantia* grown in soil samples from the Bikini Island Marshall Island north pacific ocean. *Jpn. J. Genet.* 66:27-40
24. Delone, N.L., Antipov, V.V., and Parfenov, G.P., 1986. New type of chromosomal aberrations in microspores of *Tradescantia paludose* in flight experiments on board of space satellites. *Doklady Akademii Nauk USSR*, 290:979-981 (in Russian)
25. Sparrow, A.H., and Sparrow, R.C., 1976. Spontaneous somatic mutation frequencies for flower color in several *Tradescantia* species and hybrids. *Environ. Exp. Bot.*, 16:23-43
26. Sparrow, A.H., Underbrink, A.G., and Sparrow, R.C., 1967. Chromosome and cellular radiosensitivity, I : the relationship of D_0 to chromosome volume and complexity in seventy-nine different organisms. *Radiat. Res.*, 32:915-945
27. Underbrink, A.G., Schairer, L.A., and Sparrow, A.H., 1973. *Chemical*

- Mutagens: Principles and Methods for their Detection*, Ed. A. Hollaender, Plenum Press, New York, 3:171-207
28. Cebulska-Wasilewska, A., Sijsma, M., Chadwick, K.H., and Leenhouts, H.P., 1982, *Int. J. Radiat. Biol.* 41:569-574
 29. Niels, W.H., and Roger, J.B., 1970. *Manual on Radiation Dosimetry*" Marcle Dekker Inc., New York
 30. Conger, A., 1964. A simple liquid-culture method of growing plants. *Proc. Florida State Horticultural Society*, 77:3-6
 31. IAEA, 1986. *Biological Dosimetry - Chromosome Aberration Analysis for Dose Assessment*. IAEA Technical Reports Series No. 260, p. 1-69. IAEA, Vienna
 32. Kim, J.K., and Cebulska-Wasilewska, A., 1996. "KAERI-INP Joint Research for Science and Technology Cooperation", KAERI/TR-773/96
 33. Cebulska-Wasilewska, A., Rekas, K., and Kim, J.K., 1997. "Application of TSH bioindicator for studying the biological efficiency of radiation." INP Report No. 1786/B
 34. Chadwick, K.H., and Leenhouts, H.P., 1980. *The Molecular Theory of Radiation Action*, pp. 92-117, Springer-Verlag, Heidelberg
 35. Tubiana, M., Dutreix, J., and Wambersie, A., 1990. *Introduction to Radiobiology*, pp.301-303, Taylor & Francis, London
 36. 김진규, 김원록, 1998. 자주달개비 수술털 분홍돌연변이의 중성자 선량반응과 RBE. *대한방사선방어학회지*, 23:17-23
 37. Cebulska-Wasilewska, A., Litwinişzyn, M., and Palka, B., 1995. "RBE of 5.6 MeV neutrons assessed for the various biological endpoints in two clones of *Tradescantia*." *Nukleonika*, 40:21-32
 38. Underbrink, A.G., Kellerer, A.M., Mills, R.E., and Sparrow, A.H., 1976. "Comparison of X-ray and gamma-ray-dose response curves for pink

- somatic mutations in *Tradescantia* clones 02." *Radiat. Environ. Biophys.*, **13**:295-303
39. Grahn, D., Carnes, B.A., Farrington, B.H., and Lee, C.H., 1984. "Genetic injury in hybrid male mice exposed to low doses of ^{60}Co γ rays or fission neutrons. I. Response to single doses." *Mut. Res.*, **129**:215-229
 40. Sinclair, W.K., 1985. "Experimental RBE values of high-LET radiations at low doses and the implications for quality factor assignment." *Radiation Protection Dosimetry*, **13**:319-326
 41. Imai, T., Ichikawa, S., and Sanda-Kamigawara, M., 1991. Variation of spontaneous somatic mutation frequency in the stamen hairs of mutable clone of *Tradescantia*, KU 20. *Jpn. J. Genet.*, **66** : 501-511
 42. Mericle, R.P., Mericle, L.W., and Nunez, B., 1975. Environmental modulation of somatic mutations. In: *Biological and environmental effects of low-level radiation. Proc. Symp. on Biological effects of low-level radiation pertinent to protection of man and his environment.* pp. 31-38. IAEA & WHO, Chicago
 43. Ichikawa, S., 1981. Responses to ionizing radiations. In: *Encyclopedia of plant Physiology*, vol. 12A. *Physiological Plant Ecology I: Responses to the Physical Environment* (eds.:O. L. Lange *et al.*), pp. 199-228. Springer-Verlag, Berlin
 44. Ichikawa, S., 1994. Sectoring patterns of spontaneous and radiation-induced somatic pink mutations in the stamen hairs of a temperature-sensitive mutable clone of *Tradescantia*. *Jpn. J. Genet.*, **69**:577-591
 45. Ichikawa, S., Shima, N., Ishii, C., Kanai, H., Sanda-Kamigawara, M., and Matsuura-Endo, C., 1996. Variation of spontaneous somatic mutation frequency in the stamen hairs of *Tradescantia* clone BNL 02. *Genes Genet. Syst.*, **71**:159-165

46. Ichikawa, S., and Takahashi, C., 1977. Somatic mutation frequencies in the stamen hairs of stable and mutable clones of *Tradescantia* after acute gamma-ray treatments with small doses. *Mut. Res.*, 45 : 195-204

[부록 1]

한국원자력연구소-폴란드원자물리연구소 합의각서

(Memorandum of Understanding between KAERI and INP)

Memorandum of Understanding
between
Institute of Nuclear Physics
and
Korea Atomic Energy Research Institute

Institute of Nuclear Physics (INP) and Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), hereinafter referred to as the Parties, recognize their mutual interest in promoting cooperation in the peaceful uses of nuclear energy. To this end, the Parties agree to undertake the activities as set forth below.

Article 1 - Objectives of Cooperation

The general objectives of cooperation are to provide opportunities to exchange ideas, information, technology, personnel and to collaborate on subject matters of mutual interest.

Article 2 - Fields of Cooperation

The Parties will cooperate in the fields of nuclear energy for peaceful purposes. The collaborative activities under this Memorandum of Understanding (MOU), hereinafter referred to as the Collaborative Program, will be outlined in the Annexes to this MOU by mutual agreement of the Parties. The contents of the Collaborative Program will be subject to modifications or supplements from time to time as agreed upon by the Parties.

Article 3 - Methods of Cooperation

The principal methods of cooperation include the transfer of information from one party to the other, meetings organized to discuss specific and agreed topics, visits of or attachments by teams or individuals representing one party to facilities of the other party, the implementation of joint research projects or specific projects sponsored by either party, and using one party's facilities, built or to be built, to do R&D work desired by the other party.

Article 4 - Coordination

A coordinator will be designated by each party to provide a central point of contact in each organization, and through whom all communications and arrangements for cooperation will be made. The Parties may establish a joint meeting for the effective coordination of cooperative activities under this MOU, composed of representatives designated by each party. The meeting will

conduct a joint review and formulation of the Collaborative Program and take place alternately in the Republic of Poland and the Republic of Korea. Within the framework of the Collaborative Program, coordinators of the Parties may agree to carry out specific projects by concluding separate arrangements between them, if necessary.

Article 5 - Sources of Finance

The cooperative activities under this MOU will be, in principle, based on financial support available to each Party. Such financial conditions will be specified in the Annexes to this MOU which outline the details of the Collaborative Program pursuant to Article 2 above. The Parties may depart from this general principle in financial sources by mutual agreement, when necessary. Prior to being involved in any specific projects according to Article 4 above, the Parties will determine the detailed terms and conditions including financial sources to be set out in separate arrangements.

Article 6 - Transfer of Information

All proprietary information transferred under or arising from the use of information transferred under this MOU may be made available for non-commercial programs of either party, but shall not be disseminated or published or transferred to third parties without mutual written agreement of the Parties.

Article 7 - Intellectual Property Rights

Prior to carrying out any cooperative activities which may create or furnish an intellectual property, the Parties will agree on the terms and conditions applicable to it on an equitable basis in the form of the Intellectual Property Addendum to this MOU.

Article 8 - Amendments

Any amendments and supplements to this MOU are subject to mutual written agreement of the Parties.

Article 9 - Term & Termination

This MOU will be in effect for an initial period of five(5) years from the date of final signature of the Parties and will be extended automatically for additional periods of two(2) years, unless it is terminated at any time at the discretion of either party upon ninety(90) days advance notification in writing by the party seeking to terminate the MOU.

IN WITNESS WHEREOF, the Parties hereto have executed this MOU.

On behalf of INP

On behalf of KAERI

A. Budzanowski
.....
Signature

Andrzej Budzanowski
.....
Name

Professor
.....
Title

28 November 1995
.....
Date

M. Shin
.....
Signature

Jae-In Shin
.....
Name

President
.....
Title

Dec. 18, 1995
.....
Date

Annex I
to
Memorandum of Understanding
between
Institute of Nuclear Physics
and
Korea Atomic Energy Research Institute

The Parties have agreed to carry out the following project(s) within the framework of the Collaborative Program:

(1) Biological Monitoring of Radiation Using Indicator Plants

as outlined in the Attachments.

For INP

Signature: *A Cebulska-Wasilewska*

Name: Antonina Cebulska-Wasilewska

Title: Phd. Assoc. Prof.

Date: 28 November 1995

For KAERI

Signature: *Jin Kyu Kim*

Name: Jin Kyu Kim

Title: Project manager

Date: Dec. 22, 1995

Project I:

Biological Monitoring of Radiation Using Indicator Plants.

1. Counterparts:

- a/ Radiation and Environmental Biology Department, Institute of Nuclear Physics, Cracow, POLAND,
- b/ Radiobiology Group, KAERI, South Korea

2. Objectives:

The purpose of collaborative project are:

- a/ to determine an effectiveness of different types of high LET radiation sources in the induction of various biological endpoints at a cellular level.
- b/ to obtain the dose response curves for different genetic endpoints that could be compared with data from single cell systems of other organisms.
- c/ to study repair processes of subdamage caused in DNA by radiation.

3. Project Period:

At least three years from the beginning of collaborative studies.

4. Scope of Collaboration

The collaborative research proposed can be divided as following:

- a/ introduction of TSH-assay to Radiobiology Group in KAERI,
- b/ determination of dose response relationship for the induction in TSH by X-rays and various energy neutrons and charged particles,
- c/ determination of RBE for different end points measured in TSH-assay for radiation sources under the studies

5. Implementation Plan:

The hybrid clones of *Tradescantia* will be applied as a biological plant test system. This is the most radiosensitive plant system known. The significant features of *Tradescantia* that make it useful for radiation studies, particularly at low doses region, are its extreme sensitivity to radiation and relative ease with which the various genetic points (gene, lethal mutations and cell cycle alteration) in somatic cells can be reliably scored. The flower buds are sufficiently small to permit irradiation which is uniform with respect to both dose and energy. The objective of project will be achieved through mutual and parallel experiments and exchange of scientists and graduate students.

6. Financial Condition

Basic research on biological efficiency of X-rays and neutrons from U-120 Cyclotron will be covered by Institute of Nuclear Physics (INP will cover the costs of labor work of five persons from REBL, plants cultivation, laboratory preparations, experimental exposures, screening of cell killing and mutations in TSH). KAERI will cover costs of basic research on KAERI radiation sources. Both Counterparts are supposed to apply for financial support to their National Science Committees and to International Atomic Energy Agency in Vienna.

KAERI-INP 양해각서(안) 주요내용(요약)

(전문)

원자력의 평화적 이용에 관한 협력을 증진하며 제반활동을 수행키로 함

(제1조) 협력목적

상호관심분야에 대한 정보, 기술, 인력, 아이디어를 교류하며 공동연구를 수행함

(제2조) 협력분야

원자력의 평화적 이용분야에 대한 협력을 수행하며, 협력활동은 동 양해각서의 부속서에 기술함

(제3조) 협력방법

정보이전, 전문분야별 회의, 인력상호방문 및 파견, 공동연구 프로젝트 수행 등임

(제4조) 조정

각 기관은 상호연락책임자로서 조정자 1명을 지명, 협력활동에 관한 제반협의를 수행함

양 기관은 협력활동조정을 위한 공동회의를 개설할 수 있음

양 조정자는 별도약정으로 특별프로젝트를 수행키로 합의할 수 있음

(제5조) 자원

각 기관은 자체 가용자원을 바탕으로 협력을 수행하며, 재정 부담조건은 동 양해각서의 부속서에 상술함

특수프로젝트를 수행하기 전에 양 기관은 별도약정에 명시될 재원을 포함하여 상세조건을 결정함

(제6조) 정보이전

동 양해각서하에서 이전되거나 이전된 정보의 이용으로 발생한 모든 독점정보는 비상업적프로그램에 이용할 수 있으나, 쌍방의 서면합의없이 제3자에게 배포, 공개, 이전할 수 없음.

(제7조) 지적재산권

지적재산을 생산 또는 제공할 수 있는 협력활동을 실행하기 이전, 쌍방은 타당한 조건에 합의하여야 함.

(제8조) 개정

동 양해각서의 개정과 보완은 양 기관간의 상호서면합의로 함.

(제9조) 기한 및 종료

동 양해각서는 서명일로부터 최초 5년간 유효하며, 일방기관이 90일 이전 서면통지로 종료시키지 않는 한, 그후 추가로 2년씩 자동연장됨

[부록 2]

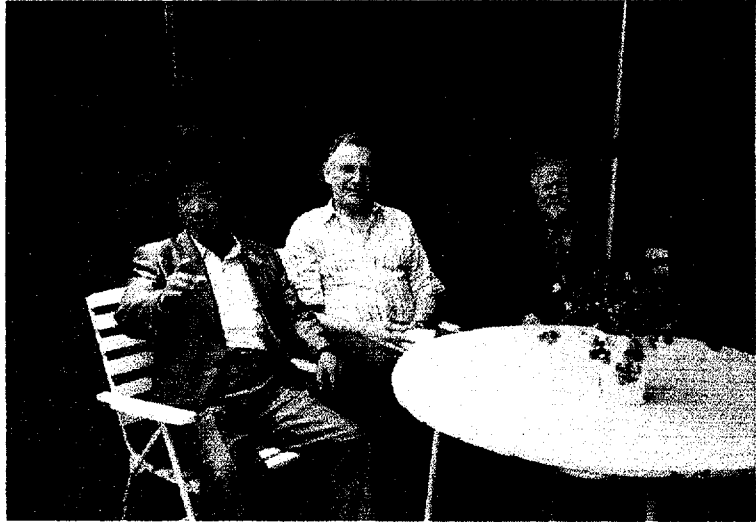


사진 1. 폴란드원자물리연구소 방문 기념사진 (사진 중앙:
폴란드원자력청 장관 Dr. Jerzy Niewodniczanski).

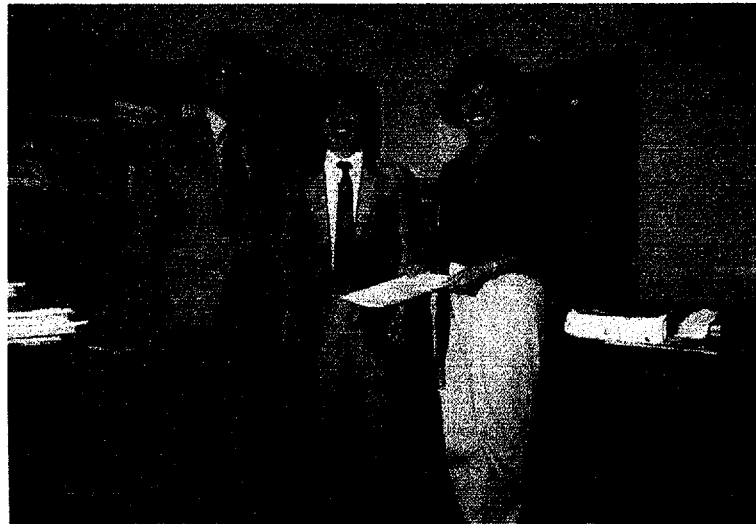


사진 2. 공동연구 추진 (좌측: INP소장 Dr. Andrzej Budzanowski,
중앙: KAERI 연구책임자 김진규, 우측: INP 공동연구책임자
Dr. Antonina Cebulska-Wasilewska).

[부록 3]

공동연구책임자 이력사항

Head of Radiation and Environmental Biology Department.

Project leader ; Prof. Antonina Cebulska-Wasilewska

Surname: CEBULSKA-WASILEWSKA Forename(s) Antonina

Graduated at Jagiellonian University, Cracow, Poland

Associate Professor,

Head of the Radiation and Environmental Biology Department,

Institute of Nuclear Physics, ul.Radzikowskiego 152, 31-342 Cracow, Poland.

Degrees:

Ph.D.- 1974 degree in Chemistry

Radiochemistry and Physical Chemistry,

Chemistry Department, Academy of Mining and Metallurgy, Cracow,

D.Sc. Dr hab 1991 degree in Biology, Genetics,

Biology and Environmental Protection Department, University, Katowice

Posts held; Since 1974

1975-1980

Research Associate; Head of the Radiation Botany Group, Radiation

Biology Department, Institute of Nuclear Physics, Cracow

1980-1988

Research Associate, Head of the Synergistic Effects Research Group,

Radiation Biology Department, Institute of Nuclear Physics in Cracow

9/88-9/89

Visiting Fellow Research Associate, Stanford University School of

Medicine, Radiobiology Division, Stanford, California, USA

9/89-11/92

Research Associate, Head of Radiation and Environmental Mutagenesis
Laboratory, Radiobiolog Department, Institute of Nuclear Physics,

12/92-now

Associate Professor, Head of Radiation and Environmental Biology
Department, INP, Cracow

Experience in foreign scientific organization(s)

a/ country b/ institution c/ kind of stay d/ duration

a/ The Netherlands

b/ Institute of Atomic Science in Agriculture,

c/ International Agricultural Center Fellowship,

d/ 6 months 1979

a/ The Netherlands

b/ Research Institute ITAL, Wageningen,

c/ International Atomic Energy Agency Fellowship

d/ 14 months 1981/1982

a/ USA,

b/ Stanford University, School of Medicine - Radiobiology Division,

c/ Visiting Fellow Research Associate,

d/ academic year 1988/89

a/ Brazil

b/ Radiation Protection Institute, Rio de Janeiro,

c/ IAEA Vienna Fellowship, Interregional Course of Radiation Cytogenetics,

d/ 1 month 1990

- a/ Great Britain
- b/ Cancer Research Campaign, Gray Laboratory, Mount Vernon Hospital,
Northwood, London
- c/ The Radiobiological Basis of Modern Radiotherapy Innovations, Course:
ESTRO, ESTRO Fellowship, UK
- d/ 1 month 1993

- a/ Great Britain
- b/ National Radiological Protection Board, Didcot Chilton
- c/ Commission European Community in Brussels Fellowship,
- d/ 2 month 1993

- a/ Great Britain
- b/ Industrial Biology Research Association, BIBRA, Carshalton
- c/ Commission European Community in Brussels Fellowship,
- d/ 1 month 1994

- a/ the Netherlands
- b/ Leiden University, Radiation Genetics and Chemical Mutagenesis Department,
- c/ Commission European Community in Brussels Fellowship,
- d/ 3 month 1994

Report on previous research work carried out by a head of project over the past four years

- 1/ title of investigation
- 2/ place, starting and finishing date

3/ source of funding

4/ scientific papers directly resulting from this work

1. "Studies on Mutagenic Effects of Plant Protection Agents used in Agriculture"

2. PAN, Warszawa, 1986-1991

3. Problem W wy

4. A. Cebulska-Wasilewska, S. Macugowski, H. Pluciennik, R. Smolinski. Investigation on mutagenic efficiency of agrochemicals. (in polish) in: Are Chemicals more Hazardous to Environment than Radiation? Ed.: A. Cebulska-Wasilewska Report IFJ No. 1511/B,7-27,1990.

A. Cebulska-Wasilewska, J. Smagala. Synergism in induction of mutations in Tradescantia after combined treatments by agrochemicals and radiation. (in polish) in: Are Chemicals more Hazardous to Environment than Radiation? Ed.: A. Cebulska-Wasilewska. Raport IFJ No. 1511/B, 53-63, 1990.

W. Wajda, A. Cebulska-Wasilewska. Influence of "Decis" and deltamethrin on mutation level in Tradescantia - Automatization of the data collection.(in polish) in: Are Chemicals more Hazardous to Environment than Radiation? Ed.: A.Cebulska-Wasilewska. Raport IFJ No. 1511/B, 63-81, 1990.

A. Cebulska-Wasilewska, J. Huczowski H. Pluciennik. Evaluation of genotoxic effects of agrochemicals (in polish) in: Are Chemicals more Hazardous to Environment than Radiation? Ed.: A. Cebulska-Wasilewska. Raport IFJ No. 1511/B, 93-98, 1990.

1. "Genotoxicity of Chemical Mutagens with Plant Bio-Assays (TSH-assay)"

2. International Programme on Chemical Safety; sponsored by WHO, UNEP and LWO, and coordinated by EPA, 1987 -1991

3. WHO supply in chemicals, and financial support for participation in Workshops and Meetings
4. T.-H. Ma, G.L. Cabrera, A. Cebulska-Wasilewska, R. Chen, F. Loarca, A.L. Vandenberg, M.F. Salamone, Tradescantia Stamen Hair Mutation Bioassay, Mutation Research, 310 (1994) 211-220.

1. "Biological Monitoring with Total Consideration of Genotoxicity of Benzene Related Compounds".
2. IFJ Krak , Environmental and Radiation Biology Department, March 1993 - April 1995
3. PECO 10964 CIPDCT 925100 (Joint Research CEC Project).
4. A. Cebulska-Wasilewska, A. Wierzevska, E. Kasper, B. Palka, L. Koziara, Biomonitoring of Human Population Exposed to Petroleum Fuel with Total Consideration of Benzene Genotoxic Component, Book of Abstracts. WHO Workshop "Monitoring of Exposure to Genotoxic Substances", Sosnowiec, 1994, Proc. (1995) 82-95.

D. Anderson, A. Cebulska-Wasilewska, B. Graca, J.A. Hughes, E.Kasper ,E. Nizankowska, A. Wierzevska, Factors Affecting Various Biomarkers in Lung Cancer Patients, Proc. of Host Factors in Environmental Epidemiology, Krak, (1995) 85-89.

D. Anderson, A. Cebulska-Wasilewska, J. Hughes, E. Kasper, A.Wierzevska, Biological Monitoring of Workers exposed to Emission from Petroleum Plants, Envir. Health Persp. Vol. 104, 3 (1996) 609-613

A.Cebulska-Wasilewska, A.Wierzevska. Numerical Chromosome Aberrations in Human Blood Lymphocytes after Exposures to Benzene Related Compounds, Proc. of Host Factors in Environmental Epidemiology, Krak , (1995) 129-137.

1. "Biological Efficiency of High LET Radiation"
2. IFJ Krak , Environmental and Radiation Biology Department, March 1993 - April 1995
3. PECO 2992 CIPDCT 925008 (Joint Research CEC Project),
4. A. Cebulska-Wasilewska, A. Wierzevska, E. Kasper, Chromosomal Aberrations in Human Lymphocytes Induced In Vitro by Different Doses of X-rays and Neutrons, (paper submitted in 1996 to Nukleonika)

A. Cebulska-Wasilewska, A. Wierzevska, E. Kasper, B.Krzykwa, Adaptive Response after Combined Treatment of Human Lymphocytes with Deltamethrin and Radiation, Raport IFJ Krak No1703/B (1995) 26-25; in Nukleonika Vol. 41 No 2 (1996) 61-69.

1. "Comparison Between Biological Efficiency of 5,6 MeV Neutrons and Fission Neutrons from NRC Petten Reactor
2. IFJ Krak , Environmental and Radiation Biology Department, March 1994 - April 1996
3. PECO93 CIPDCT 930110 (Joint Research CEC Project)
4. A. Cebulska-Wasilewska, Contribution of Poland to the European Collaboration on BNCT, BNCT Newsletter 18, p.11, 1994.

A.Cebulska-Wasilewska, M.Litwiniszyn, B.Palka, RBE of 5.6 MeV Neutrons Assessed for the Various Biological Endpoints in Two Mutable Clones of Tradescantia, Nukleonika Vol.40 (1995) 21-32.

A. Cebulska-Wasilewska, D. Nowak, W. Nied ied R. Pawli iski, Application of "Comet Assay" for Study of DNA Damage Induced by Radiation, Raport IFJ Krak, No 1703/B (1995) 16-25; in Nukleonika Vol. 41 No 2 (1996) 31-40.

서지정보양식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드		
KAERI/RR-1834/97					
제목/부제	지표생물을 이용한 방사선량 감시				
연구책임자 및 부서명	김진규 (하나로센터)				
연구자 및 부서명	천기정(하나로센터) 임용택(하나로센터)				
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행일	1998. 9.
페이지	110면	도표	유(○), 무()	크기	26cm
참고사항	특정연구개발사업 (국제공동연구사업)				
비밀여부	공개(○), 대외비(),	급비밀	보고서종류	연구보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록(300단어 내외)	<p>한국원자력연구소와 폴란드원자물리연구소간에 체결된 공동연구협약에 따라 양 기관 병립적 공동연구를 수행하였으며 주요내용에 대해서는 공동실험을 실시하였다. 공동연구의 실험재료는 T-4430클론을 사용하였으며 저 LET방사선에 대한 수술털세포 돌연변이의 반응, 고 LET방사선에 대한 수술털세포 돌연변이의 반응, 중성자 및 감마선 복합조사에 따른 지표생물의 반응성 분석 그리고 광주기와 기온일교차 등의 환경요인과 방사선에 의한 돌연변이 유발 공조작용을 연구하였다. 본 연구를 통하여 자주달개비 응용연구와 관련된 각종 기술을 확립할 수 있었으며 이같은 공동연구의 결과는 향후 한국과 폴란드간의 호혜적 협력관계 발전을 위한 기술기반이 될 것으로 기대된다.</p>				
주제명키워드(10단어내외)	방사선, LET, 자주달개비, 돌연변이, 선량반응, 환경요인				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-1834/97					
Title/Subtitle	Biological Monitoring of Radiation using Indicators				
Project Manager and Dept.		Kim, Jin Kyu (HANARO Center)			
Researcher and Dept.		Chun, Ki Jung (HANARO Center) Lim, Yong Tak(HANARO Center)			
Pub. Place	Taejon	Pub. Org.	KAERI	Pub. Date	Sept. 1998
Page	110pp.	Ill. and Tab.	Yes(○), No()	Size	26cm
Note	National Project (International Cooperation Project)				
Classified	Open(○), Outside()	Class	Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(about 300 words)	<p>KAERI and INP (Poland) have been carried out parallel study and joint experiments on the major topics according to MOU about their cooperative project. The experimental materials were T-4430 clones. Main results of the cooperative project were made on "Response of TSH mutation to low LET radiation, Response of TSH mutation to neutrons, Response of TSH to mixed irradiation with different radiations and Synergism between radiation and environmental factors such as photoperiod and diurnal temperature difference. Both institutes have established wide variety of research techniques applicable to <i>Tradescantia</i> study through the cooperation. These result of research can make the role of fundamental basis for the better relationship between Korea and Poland.</p>				
Subject Keywords (about 10 words)	<p>Radiation, LET, <i>Tradescantia</i>, mutation, dose-response, environmental factor</p>				

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.