KAERI/TR-1993/2001

한국인의 섭취 피폭선량 평가를 위한 농작물 핵종 이동인자

Parameters on the Radionuclide Transfer in Crop Plants for Korean Food Chain Dose Assessment

KAERI

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2001년도 “한국인의 섭취 피폭선량 평가를 위한 농작물 핵종 이동 인자”에 대한 기술보고서로 제출합니다.

2001년 12월

주 저 자 : 최 용 호
공 저 자 : 임 광 묵
조 영 현
이 명 호
최 근 식
정 근 호
박 효 국
이 원 윤
박 두 원
최 상 도
강 희 석
최 희 주
이 한 수
이 창 우
(원자력환경연구팀)

요 약 문

원자력 시설의 가동에 따른 한국인의 식품섭취 피폭선량을 보다 현실적으로 평가하기 위해서는 농작물에서의 방사성 핵종 이동계수에 대해 국내 생산 자료를 사용할 필요가 있다. 본 보고서에서는 과거 약 15 년간 한국원자력연구소에서 수행된 우리나라 주요 농작물의 핵종 이동인자에 관한 연구결과를 종합·정리하였다. 뿌리흡수를 평가하기 위한 인자로서 토양-작물체 전이계수를 온실실험과 야외조사를 통하여 측정하였다. 토양 단위 무게 당 핵종 농도 기준의 전통적인 전이계수 외에 단위 지표면적 당 핵종의 처리량 기준의 전이계수도 조사하였다. 작물체의 직접오염과 관련된 인자로서 차단계수, 전류계수, 환경제거반감기 등을 온실실험을 통하여 조사하였다. HTO 및 I_2 증기에 대해서는 작물체의 초기 오염도를 흡수계수로 표시하였다. 특히 HTO 증기에 대해서는 TFWT(조직자유수 ^3H) 감쇄계수와 OBT(유기결합형 ^3H) 생산계수로 수확시 ^3H 준위를 나타내었다. 상기와 같은 핵종의 이동인자는 토양, 작물 그리고 핵종의 종류 및 처리시기에 따라 변이가 대체로 컸다. 연구결과를 바탕으로 섭취경로 선량평가 모델의 개선 방향을 정상가동시와 사고시로 나누어 제안하였다.

Abstract

For more realistic assessment of Korean food chain radiation doses due to the operation of nuclear facilities, it is required to use domestically produced data for radionuclide transfer parameters in crop plants. In this report, results of last about 15 years' studies on radionuclide transfer parameters in major crop plants by the Korea Atomic Energy Research Institute, were summarized and put together. Soil-to-plant transfer factors, parameters quantifying the root uptake of radionuclides, were measured through greenhouse experiments and field studies. In addition to traditional transfer factors, which are based on the activity in unit weight of soil, those based on the activity applied to unit area of soil surface were also investigated. Interception factors, translocation factors and weathering half lives, parameters in relation to direct plant contamination, were investigated through greenhouse experiments. The levels of initial plant contamination with HTO and I_2 vapor were described with absorption factors. Especially for HTO vapor, ^3H levels in crop plants at harvest were expressed with TFWT (tissue free water tritium) reduction factors and OBT (organically bound tritium) production factors. The above-mentioned parameters generally showed great variations with soils, crops and radionuclide species and application times. On the basis of summarized results, the points to be amended or improved in food chain dose assessment models were discussed both for normal operation and for accidental release.

목 차

1. 서 론 ····· 1

2. 재료 및 방법 ····· 3
2.1. 뿌리흡수 경로 조사 ····· 3
2.1.1. TF_{mix} 조사 ····· 4
2.1.1.1. 포트 실험 ····· 4
2.1.1.2. 현장 조사 ····· 5
2.1.2. TF_{area} 조사 ····· 5
2.1.2.1 포트 실험 (iodine) ····· 5
2.1.2.2. Lysimeter 실험 ····· 6
2.1.2.2.1. 대형 Lysimeter (혼합핵종 및 HTO) ····· 6
2.1.2.2.2 소형 Lysimeter (^{90}Sr 및 ^{137}Cs) ····· 6
2.2. 직접오염 경로 조사 ····· 8
2.2.1. 혼합핵종 용액 분사실험 ····· 8
2.2.2. HTO 피폭실험 ····· 10
2.2.3. Iodine 증기 피폭 실험 ····· 12

3. 결과 및 고찰 ····· 13
3.1. 토양-작물체 전이계수 ····· 13
3.1.1. TF_{mix} ····· 13
3.1.2. TF_{area} ····· 14
3.1.3. 전이계수의 년차변화 ····· 15
3.2. 직접오염 모델인자 ····· 16
3.2.1. 차단계수 ····· 16
3.2.2. 흡수계수 ····· 16
3.2.3. 전류계수 ····· 17
3.2.4. 환경제거반감기 ····· 18
3.2.5. TFWT 감쇄계수 ····· 18
3.2.6. OBT 생산계수 ····· 18

3.3. 평가모델의 개선 방향 ····· 19
3.3.1. 정상가동시 평가 ····· 19
3.3.2. 사고시 평가 ····· 21

4. 문제점 및 건의사항 ····· 22
4.1. 실험가능 핵종 범위 확대 ····· 22
4.2. 야외실험의 수행 ····· 22
4.3. 기상조절 온실 건립 ····· 22

5. 결 론 ····· 23

참고문헌 ····· 24

부록 1. 관련 발표 논문 ····· 45

그 림 목 차

Fig. 1. Schematic diagram showing radionuclide transfer pathways from atmosphere to plant. ····· 2

사 진 목 차

사진 1. 동위원소 실험 온실 전경 ····· 3
사진 2. 대형 lysimeter에서의 전이계수(TF_{area}) 실험 장면 ····· 7
사진 3. 소형 lysimeter에서의 전이계수(TF_{area}) 실험 장면 ····· 7
사진 4. 작물체에 대한 혼합핵종 용액 분사 피폭 장면 ····· 8
사진 5. 작물체에 대한 HTO 증기 피폭 장면 ····· 11
사진 6. 작물체에 대한 I_2 증기 피폭 장면 ····· 11

표 목 차

Table 1. Physico-chemical properties of the soils used in the TF_{mix} experiment. ····· 28
Table 2. Dates of sowing and harvest of crop plants in the pot experiment for TF_{mix}. ····· 28
Table 3. Physico-chemical properties of the soils in the field study on the ^{137}Cs TF_{mix} for rice. ····· 29
Table 4. Physico-chemical properties of the soils in the field study on the ^{137}Cs TF_{mix} for Chinese cabbage. ····· 29
Table 5. Physico-chemical properties of the soils used in the iodine TF_{area} experiment for Chinese cabbage. ····· 30
Table 6. Physico-chemical properties of the soils in 3 consecutive layers in the bigger lysimeter for the TF_{area} experiment. ····· 30
Table 7. Dates of sowing and harvest of crop plants in the TF_{area} experiment for mixed RIs. ····· 30
Table 8. Physico-chemical properties of the paddy soils collected around NPP sites for the TF_{area} experiment. ····· 31
Table 9. Physico-chemical properties of the top 15 cm soil in the lysimeters for the direct plant contamination experiment. ····· 31
Table 10. Dates of sowing and harvest of crop plants directly contaminated with mixed RIs. ····· 31
Table 11. Physico-chemical properties of the soil in the experiment of the rice exposure to HTO vapor. ····· 32
Table 12. Dates of sowing and harvest of crop plants directly exposed to HTO vapor. ····· 32
Table 13. Dates of sowing and harvest of crop plants directly exposed to I_2 vapor. ····· 32
Table 14. Transfer factors (TF_{mix}) of radionuclides for edible parts of various food crops in different soils. ····· 33
Table 15. TF_{mix} of fallout ^{137}Cs for rice and Chinese cabbage in agricultural fields of Korea. ····· 34

Table 16. Transfer factors (TF_{area}) of important radionuclides applied at different growth stages of various food crops. ····· 35
Table 17. Transfer factors (TF_{area}) for OBT from HTO applied at different growth stages of rice. ····· 36
Table 18. Transfer factors (TF_{area}) of HTO and iodine applied at different growth stages of Chinese cabbage. ····· 36
Table 19. Transfer factors (TF_{area}) of ^{90}Sr and ^{137}Cs applied to various paddy soils at different growth stages of rice. ····· 37
Table 20. Yearly variations in transfer factors of radionuclides for various food crops. ····· 38
Table 21. Transfer factors for the 2nd year's culture in the Yongkwang paddy soils. ····· 38
Table 22. Interception factors of radionuclides applied at different growth stages of major food crops. ····· 39
Table 23. Parameter values concerning HTO vapor applied at different growth stages of major food crops. ····· 40
Table 24. Absorption factors (AFs) and weathering half lives (T_ws) of elemental iodine vapor applied at different growth stages of rice and radish plants. ····· 41
Table 25. Translocation factors of radionuclides applied at different growth stages of major food crops. ····· 42
Table 26. Translocation factors of elemental iodine vapor applied at different growth stages of rice and radish. ····· 43
Table 27. Weathering half lives of radionuclides applied at different growth stages of major food crops. ····· 44

1. 서 론

원자력 시설로부터 대기로 방출된 방사성 핵종은 작물체의 지상부 표면에 침적하는 직접오염 경로와 지표에 침적된 후 뿌리를 통하여 흡수되는 간접오염 경로를 따라 농작물을 오염시키고 궁극적으로 인체에까지 흡수되어 방사선 내부피폭을 초래한다 (그림 1). 1986년 구 소련에서 발생한 Chernobyl 사고에 있어서 오염된 농산물 섭취가 중요한 피폭경로의 하나였다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다[1].

원자력 시설의 가동에 따른 주민의 섭취 피폭선량을 평가하기 위해서는 섭취경로 예측모델이 필요하다. 예측모델의 신뢰도는 모델의 수리적 구조와 각종 인자들이 현실을 얼마나 잘 반영하고 있는가에 달려 있다. 섭취경로 모델과 관련된 인자들은 자연 및 사회·경제적 환경에 따라 큰 변이를 보이고 있으므로 현실적인 평가를 위해서는 국내 또는 평가 지역의 환경 특성을 충분히 반영하고 있는 인자값을 도입하는 것이 중요하다.

농작물에서의 핵종 이동에 관련된 모델인자를 설정하려는 노력은 초창기 섭취경로 모델[2-4]이 발표되면서 본격화하기 시작하였고 Chernobyl 사고 후에는 오염 지역에서의 장기적인 관찰을 통하여 보다 현실적인 인자값을 얻으려는 시도가 계속되고 있다[5-7]. Ng 등[8]은 여러 연구자들의 연구결과에 입각하여 수 십가지 핵종에 대해 작물 및 토양별로 토양-작물체 전이계수를 발표한 바 있고 IAEA[9]는 1994 년에 주로 IUR (International Union of Radioecologists)의 조사결과를 바탕으로 농작물의 뿌리흡수 및 직접오염과 관련된 각종 인자들의 값을 제안한 바 있다.

위와 같은 일들은 구미 각국을 중심으로 진행된 것이므로 상기의 인자값을 우리나라에서 그대로 사용하면 비현실적인 평가 결과를 얻을 가능성이 크고 또한 대부분이 자국의 주요 농작물을 대상으로 한 것이므로 우리나라의 주요 작물에 대한 자료는 매우 제한적이다. 이러한 인식 하에 한국원자력연구소에서는 1987 년부터 3 년간 수행된 한전 수탁연구[10], 1988 년부터 3 년간 수행된 특정연구[11] 및 1992 년부터 현재까지 수행되고 있는 원자력중장기연구[12,13]를 통하여 우리나라의 주요 농작물에 대한 핵종의 이동인자들을 조사하였다. 지금까지의 연구결과들을 종합적으로 정리하여 보다 편리하고 적절하게 이용할 수 있도록 하기 위해서 이 보고서를 작성하였다.

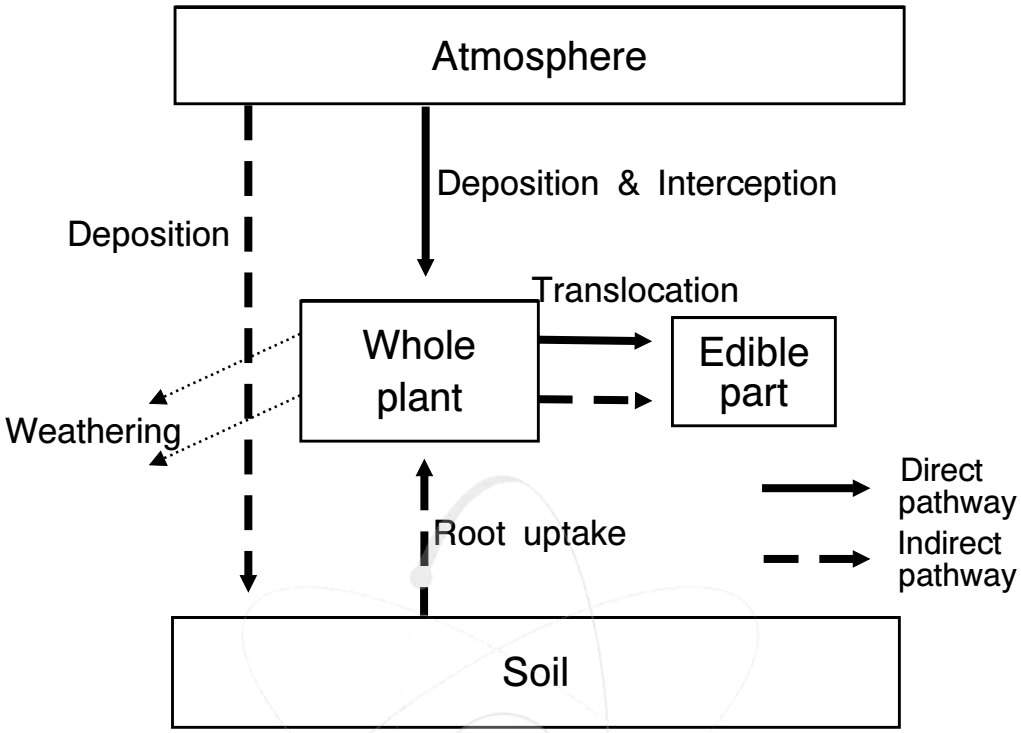

Fig. 1. Schematic diagram showing radionuclide transfer pathways from atmosphere to plant

2. 재료 및 방법

농작물의 핵종 이동인자는 재배 현장에 적용될 목적으로 조사되는 것이므로 실제 경작지에서 실험을 수행하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 이것은 방사성 동위원소를 사용해야 하는 실험의 특성상 현실적으로 거의 불가능한 일이므로 대부분의 실험은 온실과 같은 한정된 공간에서 이루어지고 있다. 본 연구에서도 모든 실험은 한국원자력연구소 내 방사성 동위원소 실험온실에서 수행하였다(사진 1). 한편, 핵실험으로 인한 방사성 낙진 ^{137}Cs의 뿌리흡수에 대한 현장조사도 실시하였다.

2.1. 뿌리흡수 경로 조사

뿌리흡수 경로를 통한 작물체내 방사성 핵종의 농도는 토양-작물체 전이계수(TF, transfer factor)로 평가한다. 토양-작물체 전이계수는 통상적으로 식 (1)과 같이 구한다[8,9].

$$TF_{mix} = \frac{\text{작물체내 핵종 농도 (Bq kg}^{-1}\text{-drv or fersh)}}{\text{토양중 핵종 농도 (Bq kg}^{-1}\text{-dry)}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

사진 1. 동위원소 실험 온실 전경

여기서 기본적인 가정은 방사성 핵종이 작물의 생육 전에 경작지의 지표에서부터 일정 깊이, 즉 흙갈이의 깊이(구미의 경우 20 cm, 우리나라의 경우 15 cm 정도로 봄)까지 균일한 농도로 분포하고 있다는 것이다. 따라서 토양중 핵종 농도는 지표로부터 일정 깊이 내의 건조 토양중 농도가 된다. 이때 토양중 농도는 작물의 생육 시점, 즉 파종이나 이식시 농도로 하거나 또는 작물의 수확시 농도로 하고 있다. 한편, 재배기간 중 평균 농도를 사용하기도 한다[14]. 본 연구에서는 수확시 농도 기준으로 TF_{mix}를 구하였다.

생육 시점에서의 토양중 핵종의 농도는 핵종의 처리량으로부터 계산하거나 토양시료를 측정하여 구할 수 있는데 반드시 작물의 수확시로 방사능 붕괴에 대하여 보정해야 한다. 작물의 수확시 토양중 핵종의 농도를 알기 위해서는 작물 수확 직후 토양 시료를 채취하여 측정해야 한다. 작물의 수확시 토양중 핵종 농도는 작물의 흡수 및 핵종의 지하 이동으로 인하여 생육 시점에 비해 다소 낮다. 그러나 대부분의 경우 핵종의 지하이동은 매우 느리게 진행되고 작물체의 핵종 흡수량은 토양내 존재량의 수 % 이하이므로[12,15,16] 단기적으로는 큰 차이가 없게 된다.

식 (1)과 같은 전이계수 외에 작물의 생육중 사고침적시 유용한 자료인 단위면적당 핵종 처리량 기준의 전이계수(TF_{area}, m^2-soil kg^{-1}-plant)를 다음 식과 같이 구하였다.

$$TF_{area} = \frac{\text{수확시 작물체내 핵종 농도(Bq kg}^{-1}\text{-drv or fresh)}}{\text{수확시로 보정한 단위면적당 핵종 처리량 (Bq m}^{-2}\text{)}} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

2.1.1. TF_{mix} 조사

2.1.1.1. 포트 실험

우리나라의 주요 작물에 대한 TF_{mix}를 구하기 위하여 포트재배 실험을 수행하였다. 사용된 포트는 배수공이 없는 합성수지제로서 직경 및 높이가 26~30 cm 정도였다. 실험 작물은 벼, 보리, 콩, 땅콩, 참깨, 배추, 상치, 무, 당근, 호박 등이었고 조사 핵종은 ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{65}Zn 등이었다. 재배 토양은 도합 여덟 가지로 그 물리·화학적 특성은 표 1과 같다. F와 G 토양은 유 등[17]이 실험한 것이다.

방사성 핵종은 모두 무담체의 chloride 형으로서 핵종 및 작물에 따라 건토 kg당 수~수 십 kBq의 농도로 처리하였다. 토양에 대한 방사성 핵종의 처리는 전

층(20~25 cm) 또는 15 cm 깊이까지 균일한 농도로 처리하였다. 전자의 경우 후자에 비해 TF_{mix}가 다소 과대평가될 가능성이 있으나 농작물의 뿌리는 대부분 지하 15 cm 이내에 분포하므로 두 방법 간에 큰 차이는 없을 것으로 본다. ^{90}Sr은 단일 핵종으로 처리하였고 나머지는 혼합하여 처리하였다.

토양에 위와 같이 핵종을 처리한 후 수 일 경과한 다음 작물을 파종 또는 이식하였다. 각 작물들은 우리나라의 표준 재배작기에 따라 파종 또는 이식 및 수확하였고 관행에 준하여 재배·관리하였다. 표 2는 각 작물의 파종(이식)기 및 수확기를 나타내고 있다. 실험은 3 반복으로 수행되었다.

시료내 핵종의 농도는 ^{90}Sr의 경우 건조·회화후 전β 계수법으로 측정하였고 기타 핵종들은 건조후 γ-spectrometry 법으로 측정하였다. 이러한 농도 측정법은 아래의 실험에서도 동일하다.

2.1.1.2. 현장 조사

전국의 33 지역에 분포하는 논과 밭에서 벼와 배추의 수확기에 작물과 토양을 채취하였다. 벼는 2~3 m × 3 m 이내의 것을 전부 예취하였고 배추는 3 m × 3 m 이내의 것 중 5~6 포기를 취하였다. 토양은 작물을 채취한 곳에서 지표에서 지하 15 cm까지 세 번 채취한 후 합하였다. 토양과 작물체 시료를 실험실로 운반하여 전처리한 후 γ-spectrometry 법으로 ^{137}Cs 농도를 측정하였다. 벼, 배추 각각 12 개 지점에서만 전이계수를 구할 수 있었다. 이들 24 가지 토양의 물리·화학적 특성은 표 3 및 4와 같다.

2.1.2. TF_{area} 조사

아래에서 파종(이식)전 처리의 경우 작물을 파종 또는 이식하기 전에 모종용 삽으로 방사성 핵종을 표층토와 섞어 주었고 생육중 처리의 경우에는 그대로 두었다.

2.1.2.1 포트 실험 (iodine)

배추에 대한 방사성 iodine의 TF_{area}를 조사하기 위하여 포트 재배로 CsI 흡수 실험을 수행하였다. 포트내 토양의 물리·화학적 특성은 표 5와 같다. CsI 용액을 포트당 0.39g-I(m^2당 8.5g-I) 수준으로 배추의 파종 하루 전과 파종 후 네 차례에 걸쳐 마이크로 피펫을 이용하여 지표면에 균일하게 처리하였다. 파종 전 처리에 있어서는 지표에 가해진 용액을 모종용 삽으로 약 15 cm 깊이까지 섞어 주었다. 시료를 건조·분쇄한 후 방사화분석법으로 iodine 농도를 분석하였다.

2.1.2.2. Lysimeter 실험

Lysimeter는 경작지의 토양조건을 실제와 유사하게 재현하기 위한 것으로 크기가 비교적 크고 다양하다. 또한 단순한 배수장치만 갖춘 것에서부터 정교한 토양수분 조절 장치를 갖춘 것까지 여러 종류가 있다. 본 연구에서 사용한 lysimeter는 재배면적 60 cm × 60 cm (대형) 및 30 cm × 30 cm (소형)의 두 가지로 모두 바닥에 배수장치를 갖추고 있다. 벼의 경우 대형과 소형 lysimeter 실험에서 모두 우리나라에서 벼 재배기간 동안 평균 약 550 mm의 관개수가 지하로 침투[18]하는 것을 모사하기 위하여 주기적으로 일정량의 물을 lysimeter로부터 배출시켰다.

2.1.2.2.1. 대형 Lysimeter (혼합핵종 및 HTO)

대형 lysimeter에서는 벼, 콩, 배추, 무, 감자, 고추, 오이 등에 대한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs 및 벼에 대한 HTO의 TF_{area}를 조사하였다(사진 2). Lysimeter 내 토양의 층위별 물리·화학적 특성은 표 6과 같다. ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs (carrier free, chloride form)의 원액을 모두 혼합하여 적정 농도(각 핵종 40~50 kBq ml^{-1})로 희석한 다음 작물의 파종 또는 이식 2 일 전 및 이후 생육중 3~5 차례에 걸쳐 lysimeter 당 64 ml을 마이크로피펫을 이용하여 지표(벼의 경우 담수의 표면)에 고루 살포하였다. 혼합핵종 실험에서 작물별 파종(이식)기 및 수확기는 표 7과 같다. HTO 실험에 있어서는 lysimeter당 2.2×10^{6} Bq의 수용액을 벼의 이식 하루 전 및 생육중 다섯 차례에 걸쳐 위와 같은 방법으로 담수의 표면에 살포하였다.

2.1.2.2.2 소형 Lysimeter (^{90}Sr 및 ^{137}Cs)

소형 lysimeter에서는 원자력발전소 주변 논토양에 대해서 ^{90}Sr과 ^{137}Cs의 TF_{area}를 조사하였다. 고리 및 영광 원전 주변 반경 5 km 내에 분포하는 11 곳의 논에서 가로 30 cm, 세로 30 cm, 높이 30 cm의 토양블록을 원형대로 lysimeter에 채취하여 온실로 운반한 다음 수돗물로 관개하여 논 상태로 유지하였다(사진 3). 각 지점에서 채취된 토양의 물리·화학적 특성은 표 8과 같다.

벼의 이식 17~18 일 전, 이식후 12 일(분얼초기) 그리고 이식후 83~84 일(수잉기~출수초기)에 lysimeter의 수표면 상에 균등하게 분포하는 25 개의 점을 향해 마이크로 피펫을 이용하여 1 ml씩의 방사성 용액(^{90}Sr : 37 kBq ml^{-1}, ^{137}Cs : 74 kBq ml^{-1}, carrier free in chloride form)을 처리하였다. ^{90}Sr과 ^{137}Cs는 각기 다른 lysimeter에 처리되었다. 실험은 지역 및 처리시기에 따라 2~3 반복으로 수행되었다.

사진 2. 대형 lysimeter에서의 전이계수(TF_{area}) 실험장면

사진 3. 소형 lysimeter에서의 전이계수(TF_{area}) 실험장면

2.2. 직접오염 경로 조사

농작물의 직접오염 경로와 관련된 모델인자를 구하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

2.2.1. 혼합핵종 용액 분사실험

대형 lysimeter에 벼, 배추, 무, 콩을 재배하면서 ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 다섯 가지 핵종에 대한 작물체 지상부의 피폭실험을 실시하였다. 이를 위해 무담체의 각 핵종(chloride form) 원액을 모두 합해 적정 농도(작물의 수확일 기준으로 각 핵종 약 5~70 kBq ml^{-1})로 희석하고 수동식 분무기로 각 작물의 생육단계에 따라 5~6 차례에 걸쳐 분사처리하였다(사진 4). 재배토양의 물리·화학적 특성은 표 9와 같고 실험작물들의 파종(이식)기 및 수확기는 표 10과 같다.

방사성 용액의 분사는 lysimeter 위에 설치된 가로, 세로 높이가 각각 90 cm, 90 cm, 130 cm인 피폭상자 내에서 수행되었다. 분사시 지표면 오염을 방지하고 지표 침적량을 측정하기 위하여 흡습지로 지표면을 피복하였다. 분사 높이는 작물체 최상부로부터 50~80 cm였고 상자당 분사횟수는 31 회, 총분사량은 14~16 ml, 소요 시간은 15~16 초였다. 벼와 콩은 매회 하나의 lysimeter만 처리하였고 배추와 무는 두 개씩을 처리하여 한 lysimeter에서는 차단계수를, 다른 lysimeter에서는 환경제거반감기 및 전류계수를 조사하였다.

사진 4. 작물체에 대한 혼합핵종 용액 분사·피폭장면

분사처리후 3 시간 경과시 흡습지 수거와 함께 벼와 콩의 경우 처리된 작물체의 반수를, 배추와 무의 경우 차단계수 조사용 lysimeter의 작물체 모두를 채취하였다. 나머지 작물체들은 모두 통상적인 수확기에 채취하였다. 처리된 작물체에 대해서는 강우를 모사하기 위하여 3일 경과시부터 작물의 생육기에 따라 3~5 일 간격으로 lysimeter당 1.0~6.0 ℓ의 수돗물을 약 30 cm 위에서 물뿌리개를 이용하여 뿌려주었다. 온실의 창문은 모두 제거하여 통풍을 최대한 유도하였다.

위와 같이 수행된 실험 결과를 이용하여 아래와 같이 모델인자를 계산하였다.

핵종의 총침적량에 대한 작물체 침적량의 비로 정의되는 차단계수(IF, interception factor)는 다음 식과 같다.

$$IF = \frac{\text{초기 작물체 침적량 (Bq m}^{-2}\text{)}}{\text{초기 작물체 침적량과 흡습지 침적량의 합 (Bq m}^{-2}\text{)}} \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

핵종의 작물체 침적량중 수확시 특정 부위에 존재하는 핵종량의 분율로 정의되는 전류계수(TLF, translocation factor)는 다음 식과 같다.

$$TLF_a = \frac{\text{수확시 작물체 특정 부위내 핵종 존재량 (Bq m}^{-2}\text{)}}{\text{수확시로 붕괴보정한 핵종의 초기 작물체 침적량 (Bq m}^{-2}\text{)}} \quad \cdots\cdots (4)$$

전류계수는 다음과 같이 계산될 수도 있다.

$$TLF_b = \frac{\text{수확시 작물체 특정 부위내 핵종 존재량 (Bq m}^{-2}\text{)}}{\text{수확시 작물체내 핵종의 총량 (Bq m}^{-2}\text{)}} \quad \cdots\cdots\cdots (5)$$

볏짚, 무청, 배추, 콩잎 등과 같은 경엽부는 핵종의 침적시 직접적으로 오염되는 주 부위이기 때문에 전류계수라는 용어가 적절치 않으나 편의상 위와 같이 구한 계수값을 이용하면 편리할 것이다.

방사성 핵종이 작물체 표면에 침적한 후 비나 바람 등에 의해 제거되는 속도를 나타내는 환경제거반감기(T_w, d)는 다음 식으로부터 도출하였다.

$$A = A_0 \, e^{-[(0.693/Tw)t]} \quad \cdots\cdots\cdots (6)$$

여기서,

A : 수확시 작물체내 핵종의 총량 (Bq m^{-2})

A_0 : 수확시로 붕괴보정한 핵종의 초기 작물체 침적량 (Bq m^{-2})

t : 핵종의 처리에서 작물 수확까지의 기간 (d)

2.2.2. HTO 피폭실험

벼, 배추 및 무를 포트에 재배하고 생육단계에 따라 수회에 걸쳐 HTO 증기에 피폭시켰다(사진 5). 매회 피폭시 벼의 경우 하나의 포트(가로 41 cm, 세로 33 cm, 높이 25 cm)를 58 cm (L) × 48 cm (W) × 120 cm (H)의 피폭상자에, 배추와 무의 경우 두 개의 포트(직경 30 cm, 높이 30 cm)를 92 cm (L) × 92 cm (W) × 125 cm (H)의 피폭상자에 집어 넣고 피폭시켰다. 재배토양의 물리·화학적 특성은 벼의 경우 표 11과 같고 채소류의 경우 표 9와 같다. 실험작물들의 파종(이식)기 및 수확기는 표 12와 같다.

피폭실험은 오전 8시 40분에서 10시 사이에 시작하였다. 피폭상자는 투명 합성수지제로서 내벽에 HTO 용액 가열장치, fan(가열장치 바로 밑에) 및 온·습도 센서를 부착하였다. 포트를 피폭상자 안에 집어넣은 후 2 ml(ml 당 벼의 경우 9.25 MBq, 배추의 경우 18.5 MBq, 무의 경우 12.3 MBq)의 HTO 용액이 담긴 유리병을 가열장치에 올려놓고 60 분간 전기로 가열하였다. 가열과 동시에 fan을 작동시켜 증발된 HTO가 상자 내에 고루 퍼지게 하였다. 가열이 끝난 직후에는 외부로부터 brower를 5 분간 작동시켜 신선한 공기를 주입하고 환기를 꾀하였다. 피폭 중에는 매 5 분 동안 공기중 수분을 20 ml vial에 포집하였고 온도와 습도를 5 분 간격으로 조사하였다. 조도(또는 일사량)는 연구소내 관측자료를 이용하거나 피폭상자 내부와 비슷한 조건하에서 조도계로 측정하였다.

시료의 조직자유수내 ^{3}H (TFWT, tissue free water tritium) 농도는 동결건조법으로 수분을 추출하여 측정하였고 유기결합형 ^{3}H(OBT, organically bound tritium) 농도는 건조 시료의 산화연소에 의해 발생한 연소수를 채집하여 측정하였다. ^{3}H 농도 측정은 액체섬광계수법으로 실시하였다.

각 시료내 ^{3}H 농도 측정 결과로부터 아래와 같이 모델인자 값을 도출하였다.

$$\text{HTO 흡수계수(AF)} = \frac{\text{피폭 직후 작물체 부위별 TFWT 농도 (Bq ml}^{-1})}{\text{피폭중 공기 수분내 HTO 평균농도 (Bq ml}^{-1})} \quad \cdots (7)$$

$$\text{TFWT 감소계수(DF)} = \frac{\text{피폭 직후 작물체 부위별 TFWT 농도 (Bq ml}^{-1})}{\text{수확시 작물체 부위별 TFWT 농도 (Bq ml}^{-1})} \quad \cdots (8)$$

$$\text{OBT 생산계수(PF)} = \frac{\text{수확시 부위별 OBT 연소수내 HTO 농도 (Bq ml}^{-1})}{\text{피폭 직후 잎내 HTO 농도 (Bq ml}^{-1})} \quad \cdots (9)$$

사진 5. 작물체에 대한 HTO 증기 피폭장면

사진 6. 작물체에 대한 I_2 증기 피폭장면

2.2.3. Iodine 증기 피폭 실험

벼와 무를 HTO 피폭실험에서와 같은 방법으로 재배하고 생육단계에 따라 수회에 걸쳐 매회 각각 하나 및 두 개의 포트를 118 cm (L) × 92 cm (W) × 150 cm (H)의 투명한 피폭상자 내에서 80 분간 I_2 증기에 피폭시켰다(사진 6). 재배토양의 물리·화학적 특성은 벼와 무 모두 표 9와 같고 작물별 파종(이식)기 및 수확기는 표 13과 같다.

Iodine 증기 발생을 위하여 35~60 mg의 I_2 크리스탈을 피폭상자에 집어넣고 승화시켰다. 피폭 중에는 분당 0.5 ℓ의 내부 공기를 8 분 단위로 활성탄 필터에 통과시켜 공기중 I_2 가스를 채취하였고 매 8 분마다 상자내 온·습도와 조도를 측정하였다. 벼 시료는 온실내에서 건조한 후 iodine을 화학적으로 분리한 다음 ICP-mass spectrometry 법으로 농도를 측정하였고 무 시료는 생체 상태에서 방사화분석법으로 iodine 농도를 측정하였다. 이 실험에서 구해진 모델인자는 다음과 같다.

$$\text{흡수계수(AF, } \ell\,g^{-1}) = \frac{\text{피폭 직후 작물체 부위별 iodine 농도 (g } g^{-1})}{\text{피폭중 공기내 iodine 평균농도 (g } \ell^{-1})} \quad \cdots\cdots (10)$$

또한 전류계수 TLF_a와 TLF_b를 각각 식 (4) 및 (5)와 같은 방법으로 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양-작물체 전이계수

3.1.1. TF_{mix}

우리나라의 주요 작물에 있어서 원자력발전소의 가동과 관련하여 육상 섭취 피폭경로에서 중요시되고 있는 핵종들의 TF_{mix}를 여러 가지 토양에 대해서 포트실험으로 조사한 결과는 표 14에 요약되어 있다[10,11,17,19,20]. 이 TF_{mix} 값을 평가모델에서 이용코자 할 때는 다음과 같은 점을 주의해야 한다.

방사성 핵종은 일반적으로 토양내에서 점토 입자 등에 의한 고정 작용으로 시간이 지날수록 작물의 뿌리흡수에 대한 가급도가 낮아진다. 본 연구에서 구한 TF_{mix}는 처리후 수일 이내에 표층토와 혼합하고 작물을 재배하여 조사한 것이다. 따라서 이것들을 수년 이상 가동되었거나 앞으로 수십년간 가동될 원자력발전소의 영향평가에 적용하면 선량 과대평가를 초래할 가능성이 크다. 특히 토양내에서 고정이 잘 되는 방사성 Cs의 경우에는 상당한 과대평가가 우려된다.

IUR[21]은 TF_{mix}를 구할 때 방사성 핵종을 토양과 혼합한 후 충분한 기간 동안 안치하여 핵종이 토양의 구성요소와 평형을 이룬 후에 작물을 파종 또는 이식하기를 권하고 있다. 그러나 실제로 방사성 핵종의 침적은 작물을 파종 또는 이식하기 전 어느 때나 일어날 수 있으므로 위의 권고는 경우에 따라서는 합당하지 못한 것으로 판단된다. 이처럼 어느 경우에나 다 들어맞는 TF_{mix} 값을 갖는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 본 연구에서는 안치 기간이 수일에 불과하므로 경과기간이 1년 미만인 경우에도 다소간 과대평가가 예상된다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 안치기간에 따른 TF_{mix}의 변화에 관해서 조사해 볼 필요가 있다. 한편 포트재배에서는 뿌리가 지하 깊이 뻗지 못하고 표층 부위에 밀집하게 되므로 TF_{mix}가 실제보다 다소 높게 측정된다는 점에도 유의할 필요가 있다.

표 15는 우리나라 전역에 분포하는 논과 밭에서 벼와 배추에 대한 ^{137}Cs의 TF_{mix}를 조사한 것이다[12]. 경작지에서의 ^{137}Cs는 거의 전부가 핵실험에 의한 것으로 침적후 적어도 20 년 이상 경과하여 고정이 상당히 진행된 것이다. 따라서 표 15의 값들은 표 14에 비해 대체로 10 배 정도 낮다. 경작지에 침적한 핵종의 장기적인 영향 평가를 위해서는 이와 같은 전이계수의 감소경향이 적절히 고려되어야 할 것이다.

3.1.2. TF_{area}

TF_{mix}는 작물의 생육전에 방사성 핵종과 토양이 일정 깊이로 섞여 있는 경우에 적합한 것으로서 생육중 사고로 인한 방사성 핵종의 침적에 대하여 이를 사용하는 것은 다음과 같은 이유로 불합리하다. 첫째, 작물의 생육중에 침적한 방사성 핵종은 당년도 재배에서는 흙갈이 과정을 거치지 않기 때문에 표층토와 섞이지 않고 대부분 지표 부근에 머물러 있다. 둘째, 작물은 생육단계에 따라 부위별 발육정도 및 생리활동이 다르므로 침적 시기의 영향이 클 것으로 판단되나 TF_{mix}에는 그러한 영향이 반영되어 있지 않다. 이에 대한 해결방안으로 주요 작물들에 대하여 핵종의 처리 시기별로 $TF_{area}(m^2\ kg^{-1})$를 측정한 결과는 표 16~18과 같다[12].

TF_{area}는 일회성 사고침적시 뿌리흡수 농도를 평가하는 데 매우 적합하다. 현존하는 대부분의 동적 섭취경로 모델에서는 이와 같은 자료의 부족으로 작물의 생육중에 발생하는 일회성 사고침적시 뿌리흡수 농도를 평가하기 위해서 TF_{mix}를 전생육기간에 걸쳐 균등분배한 속도계수를 이용하고 있다. 이렇게 하면 수확기가 같을 경우 침적이 이를수록 뿌리흡수 농도가 높게 나타난다. 표 16~18에 나타나 있는 핵종의 침적시기에 따른 TF_{area}의 변화양상은 대부분 이와 다르다. 특히 벼알과 콩의 종실에 있어서는 종실의 발육 개시 전후~발육초기에 처리했을 때 TF_{area} 값이 매우 높았다. 이로써 TF_{mix}를 이용하여 위와 같이 사고침적을 평가하면 작물의 발육단계에 따른 침적시기의 영향을 반영하지 못하고 또한 핵종의 지표침적에 대하여 일정 깊이의 토양과 혼합된 상태에서 구한 자료를 사용하는 것이므로 실제와 거리가 먼 평가를 할 가능성이 높다고 하겠다.

상기의 TF_{area} 값은 한 가지 토양에서만 조사한 것이므로 토양간 차이를 반영하지 못하고 있다. 이와 같은 점을 보완하고 원전 주변 논토양에서의 ^{90}Sr 및 ^{137}Cs의 TF_{area}에 대한 보다 현실적인 자료를 얻기 위하여 원전 주변에서 여러가지 논토양을 원상대로 채취하여 벼 재배실험을 수행한 결과는 표 19에 나타나 있다[13]. 벼에서 ^{90}Sr의 TF_{area}는 핵종의 처리시기에 따라 큰 변화가 없었으나 ^{137}Cs의 경우에는 처리시기에 따라 수십 배의 변이가 나타났다. 두 핵종의 TF_{area}는 모두 표 16에서와 유사하게 벼의 수잉기~출수초기에 처리되었을 때 가장 높았다. 이와 같은 처리시기에 따른 전이계수의 변이 양상은 토양 간에 큰 차이가 없었다. 처리시기가 같을 경우 두 핵종 모두 토양에 따라 수 배 정도의 변이를 보였다. 고리와 영광 두 지역간 TF_{area}의 특이적인 차이는 발견되지 않았다.

3.1.3. 전이계수의 년차변화

주요 작물의 파종 또는 이식 2 일 전 대형 lysimeter에 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 혼합용액을 처리하고 표층토와 섞어 준 다음 수년 간 계속하여 작물 재배 실험을 수행하고 조사한 전이계수의 년차변화 경향은 표 20에 나타나 있다[12]. 여기서 년차별 전이계수는 1차 년도에서의 단위면적당 핵종 처리량을 기준으로 한 것이므로 년차에 따른 전이계수의 감소는 토양에 의한 핵종의 고정뿐만 아니라 작물체의 뿌리흡수 및 지하이동에 따른 토양중 농도 감소에 의한 것도 포함하고 있다. 방사성 Cs의 경우 전자의 영향이 크고 방사성 Sr의 경우 후자의 영향이 비교적 큰 것으로 알려져 있다. 방사성 Cs의 고정은 대체로 침적후 3~4 년 만에 거의 다 이루어지는 것으로 보고되어 있다[22,23].

표 20과 같은 년차에 따른 ^{137}Cs 전이계수의 감소 정도는 대체로 여러 연구자들이 보고한 범위 내에 속한다고 볼 수 있으나 ^{85}Sr의 경우에는 감자, 배추, 무, 오이에 있어서 2 차년도에 30~60% 정도 감소함으로써 년차에 따른 ^{90}Sr의 흡수 감소를 관찰하지 못했다는 Noordijk 등[24]의 보고나 약간의 감소를 관찰하였다는 Haak[25]의 보고에 비해 다소 크게 감소하였다. 이러한 차이는 작물의 종류, 재배방법, 토양이나 기상 조건 그리고 1차 년도 핵종 처리후 안치기간 등과 같은 실험 조건의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 한편 고추에서는 방사성 Cs의 전이계수가 년차에 따라 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 예상 밖의 결과이므로 재실험을 수행하여 확인할 필요가 있다고 본다.

영광 원전 주변 논토양을 소형 lysimeter에 채취하여 1차 년도 벼를 이식하기 17~18 일 전에 ^{90}Sr과 ^{137}Cs를 처리하고 1차 년도와 2차 년도의 전이계수를 조사·비교한 것은 표 21과 같다. 2차 년도 전이계수는 1차 년도에 비해 토양에 따라 ^{90}Sr의 경우 10~25%, ^{137}Cs의 경우 10~40% 감소하였다. 이러한 감소 정도는 표 20에 비해 낮은 것이다. 이와 같은 차이는 주로 토양 및 기상과 같은 재배조건의 차이와 1차 년도에서의 안치 기간의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 표 20에서는 안치기간이 이틀에 불과하였지만 표 21에서는 17~18일이었으므로 1차 년도에서의 전이계수가 상대적으로 낮게 측정되었을 가능성이 높다.

3.2. 직접오염 모델인자

3.2.1. 차단계수

표 22는 우리나라의 주요 작물 및 육상 섭취경로 상의 주요 핵종들에 대한 침적시기별 차단계수(IF)를 보여 주고 있다[13]. 차단계수는 콩을 제외하고는 침적시기가 수확기에 가까울수록 생육밀도의 증가로 인해서 점점 증가하는 경향이었다. 콩의 경우에는 생육중기에 최고점에 도달한 후 생육후기에는 탈엽으로 인하여 수확기에 가까울수록 점점 감소하였다. 콩은 생육조건에 따라서는 생육후기까지 잎이 많이 달려 있는 경우도 있으므로 주의할 필요가 있다. 차단계수의 핵종간 차이는 없었다.

Chamberlain[26]은 차단계수를 작물체 생육밀도의 함수로 보고 건침적시 목초지에 대하여 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$IF = 1 - \exp(-\mu B_d) \quad \cdots\cdots (11)$$

여기서,

μ : 보유계수 ($m^2\ kg^{-1}$-dry) (2.3~3.3)

B_d : 건생육밀도 (kg-dry m^{-2})

이 식은 특히 광엽성 작물 등에는 잘 맞지 않는다는 지적[27]이 있다. 본 실험결과도 Chamberlain 식에 의한 차단계수 예측 결과와 잘 맞지 않는 부분이 많으므로 주의를 요한다.

3.2.2. 흡수계수

주요 작물에 대하여 HTO 및 I_2 증기(elemental iodine)의 침적시기별 흡수계수(AF)를 조사한 것은 각각 표 23 및 24에 나타나 있다[13]. HTO와 I_2 증기는 입자상 방사성 물질과 달리 작물체의 기공을 통한 체내로의 흡수가 작물체의 초기 오염도를 결정하는 중요한 요인[28,29]이므로 위와 같은 흡수계수라는 파라메타를 도입하였다.

흡수계수는 기공의 운동과 관련이 있는 것이므로 피폭시의 기상조건에 따라 다르고 또한 피폭시간에 따라 달라지는 불편함이 있다. 이러한 불편은 I_2 증기의 경우 피폭 종료시 단위면적당 작물체 함유량(g m^{-2})을 피폭시 공기중 시간적분

농도(g sec m^{-3})로 나누어 구한 작물체 침적속도(Vg, m sec^{-1})를 사용함으로써 해소할 수 있다. 그러나, HTO 증기의 경우 피폭시간이 경과할수록 흡수속도가 점점 낮아져 일정 시간 경과후에는 평형상태에 도달하므로[30] 위와 같이 구한 침적속도를 사용하면 피폭시간이 짧을 경우에는 과소평가, 길 경우에는 과대평가의 가능성이 높다. 따라서 시간 경과에 따른 작물체의 HTO 증기 흡수량 변화에 관한 연구가 필요하고 또한 위와 같은 침적속도를 사용하여 계산한 초기 작물체 내 TFWT 농도가 이론적으로 가능한 평형농도[28]보다 높지 않도록 해야 할 것이다.

HTO 증기에 1 시간 피폭시 흡수계수는 대체로 벼 잎에서 가장 높았고 다음으로 벼 이삭, 배추와 무의 지상부, 벼 줄기, 무 뿌리의 순이었다. 벼의 잎과 이삭에서 관찰된 HTO 흡수계수 중에는 이론적으로 가능한 값보다 높은 것이 몇 개 있었다. 이것은 피폭시간 동안의 공기습기중 HTO 농도의 변화양상 및 계측오차 등과 관련이 있을 것으로 판단된다.

벼의 경우 I_2 증기 흡수계수는 이삭이 잎보다 수 배 정도 높았다. 벼의 이삭에서는 피폭시기가 수확에 가까울수록 흡수계수가 조금씩 감소하는 경향이었으나 벼의 잎에서는 이러한 경향이 없었다. 무 지상부의 I_2 증기 흡수계수는 벼보다 대체로 수~수십 배 높았다.

3.2.3. 전류계수

표 25 및 26은 주요 작물 및 핵종들에 대하여 침적시기별 전류계수(TLF)를 조사한 결과이다[13]. 여기서 TLF_a는 초기 핵종의 작물체 총침적량을 기준으로 한 것이므로 수확시 핵종의 작물체 총잔류량을 기준으로 한 TLF_b보다 항상 작은 값을 갖고 있다.

TLF_a와 TLF_b 모두 종실이나 뿌리에서는 핵종의 종류 및 처리시기에 따라 비교적 차이가 크고 대체로 1.0보다 훨씬 작으나 볏짚이나 무와 배추의 지상부와 같이 핵종이 직접 침적되는 부위에서는 핵종이나 처리시기에 따른 차이가 비교적 작고 또한 1.0에 가까운 경우가 많다. 따라서 이러한 부위들에서는 앞에서도 언급한 바와 같이 전류계수보다는 잔류계수라는 용어가 의미상으로는 보다 적절할 것으로 보인다.

벼와 콩의 종실이나 무의 근부에 있어서의 전류계수는 핵종 간에는 대체로 $^{134}Cs > {}^{57}Co > {}^{85}Sr > {}^{54}Mn > {}^{103}Ru \geq I_2$ 증기의 순으로 높았고 처리시기에 따라서는 대체로 종실의 발육초기 처리시 및 무의 생육초기 처리시 가장 높았다.

3.2.4. 환경제거반감기

TLF_a는 초기 작물체 침적량을 기준으로 계산한 것이므로 환경제거(weathering)에 의한 핵종의 농도 감소가 묵시적으로 고려되어진 것이나 TLF_b는 그렇지 않다. 따라서 TLF_b를 이용하여 특정 부위내 핵종의 농도를 평가하기 위해서는 식 (6)과 같이 환경제거반감기(T_w, d)로 수확시 작물체 총잔류량을 예측해야 한다.

본 실험의 결과로 계산한 작물별, 핵종별, 처리시기별 T_w는 표 27과 같다(벼에 대한 I_2 증기의 반감기는 표 24 참조). 대부분의 평가 모델에서는 T_w로 침적시기나 핵종에 관계없이 14~15 일을 사용하고 있다. 본 연구 결과로 볼 때, 이렇게 하면 대체로 생육 전반기 침적시에는 핵종의 잔류량을 과소평가 하게 되고 후반기 침적시에는 과대평가하게 될 가능성이 높을 것으로 보인다. 한편, 방사성 Cs의 Tw가 타 핵종에 비해 대체로 길었다는 점에도 유의할 필요가 있다.

3.2.5. TFWT 감쇄계수

주요 작물에 대하여 HTO 증기 피폭 시기별로 조사한 TFWT 감쇄계수(RF)는 표 23에서 보는 바와 같다[13]. 감쇄계수는 작물의 종류, 부위 및 피폭시기에 따라 약 10^2~10^6 범위의 값을 보이고 있다.

작물 및 부위 간에는 배추와 무의 지상부의 감쇄계수가 가장 큰 편이었고 다음으로는 대체로 무의 잎과 이삭, 무 근부의 순이었다. 무와 배추에 있어서는 피폭시기가 수확기에 가까울수록 감쇄계수가 점점 작아지는 경향이 뚜렷하였으나 벼에서는 그렇지 못하였다.

TFWT 농도의 감소는 외기와의 수분교환 및 뿌리의 수분흡수에 따른 희석 현상으로 볼 수 있다. 이러한 과정은 습도, 기온, 광 등의 기상조건과 토양의 수분상태 및 작물체의 생리적 활력 등과 관련이 있을 것으로 판단된다.

3.2.6. OBT 생산계수

주요 작물에 대한 HTO 증기 피폭 시기별 OBT 생산계수(PF)도 표 23에 나타나 있다[13]. 쌀알에서의 생산계수는 출수전(60 DBH)에서부터 등숙초기까지 피폭시기가 늦어질수록 점점 증가하여 수확 39일전 피폭시 최고였다가 그 이후에는 피폭시기가 수확기에 가까울수록 점점 감소하였다. 벼의 출수 전(60 DBH) 및 출수초기(53 DBH) 피폭시에는 쌀알 생산계수가 경엽부보다 작았으나 그 이

후 피폭에서는 반대로 나타났다.

배추 지상부에서는 피폭시기가 수확기에 가까울수록 생산계수가 점점 증가하였으나 무 지상부에서는 피폭시기에 따른 경향성이 관찰되지 않았다. 무 뿌리의 경우 생육초기 피폭시 비교적 낮은 값을 보였을 뿐 그 이후 피폭에서는 피폭시기에 따른 차이가 크지 않았다. 무의 지상부와 뿌리 간에 생산계수는 생육초기 피폭시에는 지상부가 뿌리에 비해 2 배 가량 높았으나 그 이후 피폭에서는 대체로 뿌리가 다소 높은 경향이었다.

벼, 배추 무 중에서 최고로 높은 생산계수는 생육후기에 피폭된 배추의 지상부에서 관찰되었다. 이것은 배추의 지상부는 직접적인 피폭부위인 동시에 대사산물의 주요 저장부위이기 때문인 것으로 판단된다.

식물체의 동화작용이나 호흡 및 물질의 전류·축적 등은 광이나 기온과 같은 기상요인에 의해 크게 좌우되므로 OBT 생산계수는 작물체 및 피폭일자가 동일하더라도 피폭시와 피폭후 상당기간(주로 초기) 동안의 기상상태에 따라 달라지게 될 것이다.

3.3. 평가모델의 개선 방향

이상의 연구결과에 입각하여 섭취경로 선량평가 모델의 개선 방향을 아래와 같이 정상가동시 평가와 사고시 평가로 나누어 제안코자 한다.

3.3.1. 정상가동시 평가

원자력 시설의 정상가동에 대해서는 평형모델 (equilibrium model or steady-state model)[31,32]을 사용하여 섭취경로 영향을 평가하고 있다. 여기서는 년중 균일방출을 가정하여 년 평균 기상조건에 따라 구한 공기중 농도로부터 각 작물별로 통상적 수확기 때의 핵종 농도를 예측하게 된다.

원자력시설의 정상가동시에는 방출연도가 서로 다른 핵종들이 토양 속에 혼재한다. 하지만 현재의 평가모델에서는 특정 기간 동안의 총침적량에 대하여 방출연도와 관계없이 하나의 TF_{mix} 값을 적용하여 작물체내 핵종의 농도를 예측하고 있다. 이때 TF_{mix}의 연차적 감소경향을 고려하지 않으면 불필요한 과대평가를 초래하게 된다. TF_{mix}의 연차적 감소경향을 고려하기 위해서는 토양내 핵종의 축적량을 년도별로 구분해야 하나 현 모델에서는 가동전 평가나 가동중 평가를 불문하고 특정 기간 즉 핵종의 토양내 축적 기간은 대체로 원자력발전소 수명의 반

(15 년[31]) 또는 수명[32]으로 하고 source term은 이 기간 동안 일정한 것으로 하여 총축적량을 구하고 있다.

핵종의 축적기간 전체에 대하여 source term을 일정한 것으로 하는 것은 가동전 허가단계의 경우에는 장래의 가동 기간에 대하여 다소 보수적으로 결정한 하나의 source term을 적용하여 평가할 필요가 있으므로 합당한 것으로 보이나 이미 서로 다른 source term에 의한 년도별 방출이력을 갖고 있는 가동중 평가의 경우에는 매우 비현실적이다. 따라서 가동중 평가에서는 토양내 핵종의 축적 기간(build-up time)을 가동 시작 년도에서부터 평가년도의 작물 파종전까지로 하고 이 기간 동안 매년의 방출에 의한 축적분을 따로따로 고려하여 토양에서의 경과년수에 따라 적절한 TF_{mix} 값을 적용하는 것이 바람직하다. 이때 작물의 파종에서 수확기 사이에 침적된 핵종에 대해서는 별도로 TF_{area}를 사용하여 평가할 수 있도록 해야 할 것이다. 가동전 평가에 있어서도 위와 같이 하는 것이 좋을 것이나 계산의 간편성을 위하여 총축적량에 대하여 년차변화를 고려한 하나의 전이계수를 적용하는 방법도 생각해볼 수 있다.

미국의 NRC[31]가 제시한 평가모델에서는 차단계수(IF)로 일반핵종에는 0.2, iodine에는 1.0을 사용하고 있다. 일반핵종의 경우 표 22와 비교해 볼 때 과소평가의 가능성이 크다고 할 수 있다. 한편, iodine의 경우 입자상과 기체상 간에 거동의 차이가 크므로 source term을 구분할 필요가 있다. 즉, 입자상의 경우 일반핵종과 같은 값을 적용하면 될 것이고 기체상의 경우 작물체 침적속도(Vg)를 이용하여 공기중 농도로부터 초기 작물체 침적량을 직접 구하는 것이 좋을 것이다. 어떠한 형태의 iodine이라도 차단계수를 1.0으로 하는 것은 지나치게 보수적이다. IAEA[32]에서는 차단계수로 핵종 및 작물에 따라 0.2 또는 0.5를 권고하고 있다.

NRC나 IAEA 모델에서는 작물체 지상부에 침적한 방사능이 종실, 열매, 뿌리 등의 가식부위로 이동하는 분율, 즉 전류계수라는 파라메타를 도입하지 않고 있다. 이것은 수확시에 작물체에 남아있는 핵종의 전부가 위와 같은 특정부위에 들어 있다는 것과 같다. 그러나 본 연구에서 특정부위에서의 전류계수는 핵종 및 처리시기에 따라 최저 1.6×10^{-4}(TLF_b)로 대체로 1보다 훨씬 작은 값을 보였다. 따라서 전류계수를 모델에 도입함으로써 불필요한 과대평가를 크게 해소토록 해야 할 것이다.

상기의 TF_{area}, 차단계수, 전류계수 등은 작물체의 생육중 침적시기에 따라 값이 비교적 크게 변하므로 전 생육기간에 걸친 침적의 영향을 평가해야 되는 정상가동시의 경우에는 전 생육기간을 대표할 수 있는 하나의 값을 결정할 필요가

있다. 그러나 이것은 년중 균일방출을 가정할 때에만 타당하다. 실제로 purge시 등 원전의 가동상태에 따라 방출량의 peak가 발생하는 경우 현재의 모델로는 영향을 정확히 평가할 수 없다. 따라서 이러한 경우에는 정상가동시라 하더라도 방출시기의 영향을 고려할 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

3.3.2. 사고시 평가

원자력 시설의 사고시에는 다량의 방사성 물질이 년중 특정 시기에 일시적으로 방출하게 된다. 이때에는 사고 발생 시기를 고려하여 농산물내 핵종 농도의 장기적인 변화를 예측해야 하므로 동적모델을 적용해야 한다.

현존하는 대부분의 동적 섭취경로 모델[33-36]은 각 구획(compartment) 즉, 작물체 전체, 작물체 가식부위 및 토양 간 물질 이동에 관한 연립 미분방정식을 수립하여 해를 구하는 방식으로 되어 있다. 이 방식의 문제점은 크게 다음의 두 가지로 볼 수 있다. 첫째로 모델의 구조에 부합하는 실험 데이타가 부족하여 이론적으로는 거의 완벽해 보이는 물질수지식의 현실성 추구에 어려움이 많다는 것과 둘째로 구획간 이동속도상수에 대하여 전생육기간에 걸쳐 단일한 값을 사용함으로써 작물의 발육단계에 따른 생리활동의 변화가 고려되어 있지 않다는 것이다.

이에 반해 Müller와 Pröhl[37]은 핵종의 침적시기별 가식부위 전류계수와 같은 준평형상태에서의 이동계수에 관한 많은 실험 데이타를 이용하여 각 구획 및 경로 별로 사고 발생시기 및 사고후 시간경과에 따른 농도 예측식을 수립하여 ECOSYS-87 모델에 이용하고 있다. ECOSYS-87 모델은 국제적으로 타당성을 인정받아 유럽의 사고 영향평가 및 대응 체제인 RODOS[38]의 모듈로 채택되어 있다.

우리나라에서도 그 동안의 많은 실험을 통하여 ECOSYS-87과 같은 개념의 동적 섭취경로 모델을 수립하기 위한 기본적 토대가 마련되었으므로 이와 같은 개념의 모델 수립에 힘쓸 필요가 있다고 본다.

4. 문제점 및 건의사항

농업생태계에서의 핵종 이동인자에 관한 연구의 품질을 향상시키고 연구의 영역을 확대할 수 있도록 다음과 같은 점을 건의하는 바이다.

4.1. 실험가능 핵종 범위 확대

이동인자 실험을 위해서는 기본적으로 방사성 동위원소(RI)의 사용이 요구된다. RI의 사용은 정부의 허가 사항으로서 민감한 핵종, 즉 U 붕괴계열에 대해서는 사용허가를 받기가 사실상 불가능하다. 실험에 사용되는 낮은 준위의 U 붕괴계열에 대해서는 규제가 완화되어 사용허가를 받을 수 있기를 희망한다.

사용허가를 받은 핵종이라 하더라도 분석 능력이 없으면 실험할 수 없다. 일반적으로 실험준위는 환경준위보다 훨씬 높기 때문에 환경시료 분석시설을 이용하는 것이 곤란하고 분석절차도 서로 달리 해야 하는 경우가 많다. RI 실험 시료의 분석시설 확충을 위한 예산상의 지원과 방사능 분석 전문가 그룹의 기술적 협조가 필요하다.

4.2. 야외실험의 수행

이동인자는 기상조건 및 작물의 생육에 따라 달라지므로 현실적인 자료 생산을 위해서는 야외실험이 필요하다. 이것은 방사선 안전 관리 및 규제의 입장에서는 다소 곤란할 것이나 적절한 오염확산 방지책을 강구한다면 소량의 단반감기 핵종에 대해서는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

4.3. 기상조절 온실 건립

동위원소 실험온실 내의 기상조건을 자동으로 조절하여 관심 지역의 계절별 기상상태를 재현할 수 있다면 일년 내내 현실성 높은 부지 특성자료를 생산할 수 있다. 이렇게 하면 우리 나라의 각 지역뿐만 아니라 다양한 기후대에 속하는 세계 여러 나라의 기상을 재현하여 실험할 수도 있다. 기후변화 협약 등으로 인하여 원자력에 대한 의존도가 전세계적으로 높아지면 기상조절 실험온실의 사용에 대한 수요가 국외로부터도 많이 발생될 수 있다.

5. 결 론

1980 년대 후반부터 지금까지 한국원자력연구소에서 수행된 우리 나라 주요 농작물의 방사성 핵종 이동인자에 관한 연구 결과를 종합적으로 정리하였다. 이동인자들의 값은 핵종, 작물, 토양의 종류 및 핵종의 처리시기에 따라 대체로 큰 변이를 보였다. 이러한 이동인자들은 원자력 시설의 가동전이나 정상 가동중 또는 사고시에 작물체내 방사성 핵종의 농도를 예측·평가하는 데 적절히 활용될 필요가 있다.

생산된 오염인자들은 대부분 온실실험을 통하여 얻은 것이다. 여기에서는 몇가지 불가피한 실험상의 제약으로 인해 어느 정도 보수적인 결과를 얻었을 가능성이 높다. 따라서 본 연구결과를 이용코자 할 때에는 생산된 오염인자가 갖는 의미와 한계를 충분히 파악한 후 평가의 목적이나 모델의 특성에 맞게 사용해야 한다. 이렇게 하면 외국의 모델에서 사용하는 인자값을 무비판적으로 사용하는 것보다 훨씬 현실적인 평가가 가능할 것으로 판단된다.

농작물의 물질 흡수, 전류, 축적 등은 품종이나 재배조건 따라 차이가 있으므로 한번의 실험으로 이상적인 결과를 얻은 것으로 보기는 어렵다. 따라서 주요 작물에 있어서는 몇가지 품종에 대해서 반복실험을 실시하고 그 결과에 따라 기존의 인자값을 수정·보완함으로써 보다 대표성이 높은 값을 도출할 필요가 있다. 한편 지금까지 취급하지 못한 ^{14}C, ^{99}Tc 및 위에서 언급한 U 붕괴계열 핵종에 대해서도 하루빨리 연구가 시작되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. International Advisory Committee, The International Chernobyl Project, Technical Report, IAEA, Vienna, 1991.
2. Y. C. Ng et al., Prediction of the Maximum Dosage to Man from the Fallout of Nuclear Devices, IV Handbook for Estimating the Maximum Internal Dose from Radionulides Released to the Biosphere, USAEC Report, UCRL-50163, Part IV, 1968.
3. J. F. Fletscher and W. L. Dotson, HERMES - A Digital Computer Code for Estimating Regional Radiological Effects from the Nuclear Power Industry, USAEC Report, HEDL-TME-71-168, Hanford Engineering Development Laboratory, Richland, WA., 1971.
4. D. A. Baker, G. R. Hoenes and J. K. Soldat, FOOD : An Interactive Code to Calculate Internal Radiation Doses from Contaminated Food Products, USERDA Report, BNWL-SA-5523, Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA., 1976.
5. A. Karaoglou, G. Desmet, G. N. Kelly and H. G. Menzel (Eds.), The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident, EUR 16544 EN, 1995.
6. M. Bilo, W. Steffens, F. Führ and K. H. Pfeffer, "Uptake of $^{134/137}$Cs in soil by cereals as a function of several soil parameters of three soil types in Upper Swabia and North Rhine-Westphalia (FRG), J. Environ. Radioactivity 19, 25-39, 1993.
7. IPSN, Abstracts, International Congress on the Radioecology-Ecotoxicology of Continental and Estuarine Environments, Aix-en-Provence, France, 3-7 Sept. 2001, 2001.
8. Y. C. Ng, C. S. Colsher and S. E. Thompson, Soil-to-Plant Concentration Factors for Radiological Assessments, Report NUREG/CR-2975, UCID-19463, Lawrence Livermore Lab., 1982.
9. IAEA, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Report Series No. 364, 1994.

10. 이정호, 최용호 등, 고리 주변 환경 종합평가 및 관련 모델 개발 - 환경특성 조사, 한국에너지연구소, 1989.
11. 이정호, 이창우, 최용호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 평가 코드 개발, KAERI/RR-998/90, 한국원자력연구소, 1991.
12. 이정호, 최용호, 이창우 등, 육상 방사선 환경생태 해석기술 개발, KAERI/RR-1741/96, 한국원자력연구소, 1997.
13. 최용호, 임광묵 등, 육상생태계 사고영향 평가기술 개발, KAERI/RR-2035/99, 한국원자력연구소, 2000.
14. Radioactive Waste Management Center, Transfer Factors of Radionuclides from Soils to Agricultural Products, Environmental Parameters Series 1, RWMC-88-P-11, 1988 (in Japanese).
15. P. J. Coughtrey and M. C. Thorne, Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial Ecosystem - A Critical Review of Data, Vol 1, A. A. Balkema, Rotterdam, 1983.
16. 최용호, 벼와 주요 밭작물에서 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 토양-작물계 내의 흡수, 이동 및 분포, 충남대학교 박사학위 논문, 1995.
17. 유준 등, 원자력 시설 주변의 환경영향 평가 연구 (II), KAERI/RR-386-1/82, 한국에너지연구소, 1983.
18. 이은웅 등, 사정 수도작, 향문사, 1996.
19. 이정호, 이창우, 최용호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 평가 코드 개발, KAERI/RR-820/89, 한국에너지연구소, 1989.
20. 이정호, 이창우, 최용호 등, 섭취 및 호흡에 의한 방사선 내부피폭선량 평가 코드 개발, KAERI/RR-933/89, 한국원자력연구소, 1990.
21. M. J. Frissel, An Update of the Recommended Soil-to-Plant Transfer Factors, Eighth Report of the IUR Working Group on Soil-to-Plant Transfer, IUR, Balen, Belgium, 1992.
22. H. M. Squire and L. J. Middleton, Behaviors of ^{137}Cs in soils and pastures : a long-term experiment, Radiat. Botany 6, 413-425, 1966.
23. N. A. Beresford, B. J. Howard and C. L. Barnett, The uptake by vegetation of Chernobyl and aged radiocaesium in upland West Cumbria, J. Environ. Radioactivity 16, 181-195, 1992.
24. H. K. Noordijk, K. E. van Bergeijk, J. Lembrechts and M. J. Frissel,

Impact of ageing and weather conditions on soil-to-plant transfer of radiocaesium and radiostrontium, J. Environ. Radioactivity 15, 277-286, 1992.

25. E. Haak, Long-term transfer of ^{137}Cs and ^{90}Sr from soil to barley and grass under Swedish conditions, Repot IUR Workshop on the Measurement of Soil-to-Plant Transfer Factors for Radionuclides, Part II, Wageningen, The Netherlands, pp. 38-65, 1982.
26. A. C. Chamberlain, Interception and retention of radioactive aerosol by vegetation, Atmos. Environ. 4, 57-78, 1970.
27. C. W. Miller, An analysis of measured values for the fraction of a radioactive aerosol intercepted by vegetation, Health Phys. 38, 705-712, 1980.
28. H. Amano and C. T. Garten, Jr., Uptake of tritium by plants from atmosphere and soil, Environ. Interna. 17, 23-29, 1991.
29. G. A. Sehmel, Particle and gas dry deposition : a review, Atmos. Environ. 14, 983-1011, 1980.
30. Y. Belot, D. Gauthier, H. Camus and C. Caput, Prediction of the flux of tritiated water from air to plant leaves, Health Physics 37, 575-583, 1979
31. U.S. NRC, Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR Part 50, Appendix I, Reg. Guide 1.109, Revision 1, 1977.
32. IAEA, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Safety Series No. 57, IAEA, Vienna, 1982
33. 이창우, 최용호, 황원태, 이정호, “쌀 섭취경로에서 동적모델을 사용한 장반감기 핵종의 거동해석 및 내부피폭선량 계산,” 대한방사선방어학회지, 17, 15-22, 1992.
34. M. L. Abbott and A. S. Rood, "COMIDA : a radionuclide food chain model for acute fallout deposition," Health Physics 66, 17-29, 1994.
35. F. W. Whicker and T. B. Kirchner, "PATHWAY: a dynamic food-chain model to predict radionuclide ingestion after fallout deposition," Health Physics 52, 717-737, 1987.

36. W. T. Hwang, G. Cho and M. H. Han, "Development of a dynamic food chain model DYNACON and its application to Korean agricultural conditions," J. of Nuclear Science and Technology 35, 454-461, 1998.
37. H. Müller and G. Pröhl, "ECOSYS-87: a dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents," Health Physics 64, 232-252, 1993.
38. J. Ehrhardt and A. Weis (Eds.), RODOS : Decision Support System for Off-Site Nuclear Emergency Management in Europe, EUR 19144 EN, European Commission, 2000.

Table 1. Physico-chemical properties of the soils used in the TF_{mix} experiment

Soil code	pH (1:5)	O.M. (%)	T.N. (%)	A.PT. (ppm)	Exch. Cation (cmol/kg)				C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
					K	Ca	Mg	Na					
A	6.4	0.42	0.01	440	0.36	4.5	0.29	0.14	7.5	78.9	16.4	4.7	SL
B	4.4	0.94	0.07	310	0.16	1.8	0.12	0.03	6.7	71.4	20.6	8.0	SL
C	6.1	0.68	0.05	375	0.18	3.3	0.12	0.02	4.7	81.9	15.3	2.8	LS
D	5.6	0.93	0.07	59	0.16	3.9	0.42	0.15	5.4	71.9	20.9	7.2	SL
E	4.6	2.43	0.16	208	0.11	3.2	0.25	0.11	7.2	67.3	26.7	6.0	SL
F	7.7	2.60	0.14	57	0.36	13.2	1.12	0.14	10.1	46.9	38.6	14.5	L
G	5.5	2.00	0.11	24	0.25	3.2	1.32	0.13	10.5	6.2	63.1	30.7	SiCL
H	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	SL

O.M. : Organic matter, T.N. : Total Nitrogen, A. PT. : Available phosphate,
C.E.C. : Cation exchange capacity. SL : Sandy loam, LS : Loamy sand, L : Loam
SiCL : Silty clayey loam

Table 2. Dates of sowing and harvest of crop plants in the pot experiment for TF_{mix}

Crop species	Date (dd-month-yy)		Growing period (d)
	Sowing [a]	Harvest	
Rice	02-Jun-88	12-Oct-88	132
Barley	23-Oct-87	15-Jun-88	236
Soybean	02-Jun-88	10-Oct-88	130
Peanut	11-May-88	19-Oct-88	161
Sesame	11-May-88	23-Aug-88	104
Ch. Cabbage	25-Aug-87	20-Nov-87	87
Lettuce	28-Apr-89	20-Jun-89	53
Radish	25-Aug-87	20-Nov-87	87
Carrot	28-Apr-89	31-Jul-89	94
Squash	28-Apr-89	10-Jul-89	73

Dates may not be exact for barley, Chinese cabbage and radish.
[a] : Young plants were transplanted for rice.

Table 3. Physico-chemical properties of the soils in the field study on the ^{137}Cs TF_{mix} for rice

Soil code	pH (1:5)	O.M. (%)	A. PT. (ppm)	C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
FR-A	5.5	3.74	378	11.4	58.6	27.4	14.0	SL
FR-B	5.8	3.24	149	10.2	65.0	21.0	14.0	SL
FR-C	5.5	1.69	125	12.8	52.9	30.1	17.0	SL
FR-D	5.6	2.24	153	7.5	39.3	40.7	20.0	L
FR-E	5.7	6.55	786	14.6	47.9	38.1	14.0	SL
FR-F	5.5	1.94	27	9.5	50.3	29.6	20.1	L
FR-G	4.9	3.12	31	7.3	60.2	22.3	17.5	SL
FR-H	5.8	2.14	213	8.6	59.7	19.9	20.4	SCL
FR-I	4.3	2.07	69	14.7	23.0	51.1	25.9	SiL
FR-J	5.0	1.95	230	6.5	65.6	17.1	17.3	L
FR-K	5.6	2.52	132	9.1	43.5	40.1	16.4	L
FR-L	6.4	1.83	408	9.3	42.0	36.7	21.3	L

Table 4. Physico-chemical properties of the soils in the field study on the ^{137}Cs TF_{mix} for Chinese cabbage

Soil code	pH (1:5)	O.M. (%)	A. PT. (ppm)	C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
FC-A	5.4	3.52	1052.00	9.9	69.2	22.8	8.0	SL
FC-B	5.9	3.67	1024.00	12.5	67.5	23.5	9.0	SL
FC-C	6.2	2.88	1077.00	7.5	67.6	23.4	9.0	SL
FC-D	6.1	1.96	880.00	9.9	65.3	25.7	9.0	SL
FC-E	5.5	1.66	161.00	8.7	68.9	17.1	14.0	SL
FC-F	5.1	2.36	1275.00	11.3	61.8	20.8	17.4	SL
FC-G	6.4	2.71	1515.00	8.9	73.8	13.4	12.8	LS
FC-H	6.8	4.79	832.00	14.1	72.9	11.9	15.2	SL
FC-I	5.9	2.21	1325.00	9.8	72.2	15.6	12.2	SL
FC-J	4.2	2.41	2038.00	9.7	63.4	22.3	14.3	SL
FC-K	5.8	3.17	627.00	14.0	31.3	53.3	15.4	SiL
FC-L	5.6	3.00	828.00	9.8	52.3	28.2	19.5	SL

Table 5. Physico-chemical properties of the soil used in the iodine TF_{area} experiment for Chinese cabbage

Soil code	pH (1:5)	O.M. (%)	A. PT. (ppm)	Exch. Cation (cmol/kg)			C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
				K	Ca	Mg					
I-A	5.2	0.91	87	0.12	1.84	0.69	4.2	79.0	17.0	4.0	LS

Table 6. Physico-chemical properties of the soils in 3 consecutive layers in the bigger lysimeters for the TF_{area} experiment

Depth [a] (cm)	pH (1:5)	O.M. (%)	A. PT. (ppm)	Exch. Cation (cmol/kg)			C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
				K	Ca	Mg					
0-15	5.2	0.91	87	0.12	1.84	0.69	4.2	79.0	17.0	4.0	LS
15-40	5.4	0.45	17	0.04	1.62	0.53	4.1	72.2	19.8	8.0	SL
40-65	5.8	0.40	13	0.10	2.23	1.14	5.7	66.7	19.3	12.0	SL

[a] Depths may not be exact.

Table 7. Dates of sowing and harvest of crop plants in the TF_{area} experiments for mixed RIs

Crop species	Date (dd-month-yy)		Growing period (d)
	Sowing [a]	Harvest	
Rice	26-May-93	11-Oct-93	138
Soybean	26-May-93	20-Sep-93	117
Ch. Cabbage	27-Aug-92	06-Nov-92	71
Radish	27-Aug-92	10-Nov-92	75
Potato	08-Apr-94	07-Jul-94	90
Red pepper	10-May-94	07-Oct-94	150
Cucumber	10-May-95	20-Jul-95	71

[a] Young plants were transplanted for rice.

Table 8. Physico-chemical properties of the paddy soils collected around NPP sites for the TF_{area} experiment

Soil code	pH (1:2.5)	O.M. (%)	T.N. (%)	A.P.T. (ppm)	Exch. Cation (cmol/kg)				C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
					K	Ca	Mg	Na					
KA	5.0	1.82	387	-	0.19	2.6	1.42	0.49	8.4	27	55	18	SiL
KB	5.2	2.02	1423	-	0.05	2.6	1.66	2.80	9.2	54	39	7	SL
KC	4.9	1.31	1044	-	1.22	3.7	1.32	2.19	9.7	47	38	15	L
KD	4.8	2.07	1762	-	1.80	3.0	1.09	3.14	8.6	47	45	8	L
KE	6.4	2.47	1677	-	1.16	8.3	1.59	3.49	14.4	49	44	7	SL
KF	5.1	4.70	3132	-	1.70	4.2	1.26	0.82	11.2	31	56	13	L
YA	4.9	3.88	2323	94	0.43	4.5	1.91	0.37	14.5	21	54	25	SiL
YB	5.1	3.32	1811	51	0.43	4.4	1.58	0.41	11.1	36	45	19	L
YC	6.1	3.12	2015	202	0.35	8.8	3.08	0.40	13.7	23	60	17	SiL
YD	5.8	2.45	1521	387	0.75	5.1	4.02	3.86	10.7	27	64	9	SiL
YE	5.9	2.84	1702	216	0.79	2.5	2.57	1.47	11.4	18	68	14	SiL

SiL : Silty loam.

Table 9. Physico-chemical properties of the top 15 cm soil in the lysimeters for the direct plant contamination experiment

Soil code	pH (1:2.5)	O.M. (%)	T. N. (ppm)	Exch. Cation (cmol/kg)			C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
				K	Ca	Mg					
DL-A	5.1	1.56	905	0.67	1.38	0.36	3.3	73	23	4	SL

Table 10. Dates of sowing and harvest of crop plants directly contaminated with mixed RIs

Crop species	Date (dd-month-yy)		Growing period (d)
	Sowing [a]	Harvest	
Rice	16-May-98	12-Oct-98	149
Soybean	25-May-00	02-Oct-00	130
Ch. Cabbage	18-Aug-97	03-Nov-97	77
Radish	23-Aug-99	15-Nov-99	84

[a] Young plants were transplanted for rice.

Table 11. Physico-chemical properties of the soil in the experiment of the rice exposure to HTO vapor

Soil code	pH (1:2.5)	O.M. (%)	T. N. (ppm)	Exch. Cation (cmol/kg)			C.E.C (cmol/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
				K	Ca	Mg					
HP-A	5.2	4.5	3233	0.2	1.37	1.06	7.9	46	50	4	SL/SiL

Table 12. Dates of sowing and harvest of crop plants directly exposed to HTO vapor

Crop species	Date (dd-month-yy)		Growing period (d)
	Sowing [a]	Harvest	
Rice	26-May-97	10-Oct-97	137
Ch. Cabbage	24-Aug-98	13-Nov-98	81
Radish	23-Aug-99	12-Nov-99	81

[a] Young plants were transplanted for rice.

Table 13. Dates of sowing and harvest of crop plants directly exposed to I_2 vapor

Crop species	Date (dd-month-yy)		Growing period (d)
	Sowing [a]	Harvest	
Rice	21-May-99	14-Oct-99	146
Radish	24-Aug-98	13-Nov-98	81

[a] Young plants were transplanted for rice.

Table 14. Transfer factors (TF_{mix}) of radionuclides for edible parts of various food crops in different soils

Crop species	Plant part	Soil	TF_{mix} (Bq/kg-plant per Bq/kg-dry soil)				
			Mn	Co	Zn	Sr	Cs
Rice	Unpoli-	A	2.4E-01	4.5E-03	-	1.2E-01	2.1E-02
	shed	B	3.2E-01	6.0E-03	2.7E+00	-	6.1E-02
	seed d.	C	2.3E-01	-	2.3E+00	-	1.8E-02
		D	1.2E-01	2.2E-03	5.8E-01	-	3.0E-02
		E	5.2E-01	5.9E-03	2.1E+00	-	1.0E-01
		F	-	-	-	-	1.0E-02
		G	-	-	-	-	4.0E-02
Barley	"	A	6.8E-01	8.6E-03	-	4.3E-01	5.5E-02
Soybean	Seed d.	A	4.3E-01	2.9E-01	-	9.1E-01	8.8E-02
		B	2.8E+00	5.0E-01	2.3E+01	-	2.8E-01
		C	2.6E-01	1.6E-01	5.9E+00	-	1.7E-01
		D	2.0E-01	4.9E-02	2.3E+00	-	1.3E-01
		E	1.4E+00	2.5E-01	1.1E+01	-	5.0E-01
Ch. cabbage	Top f.	H	1.9E-01	1.7E-02	-	2.0E+00	1.1E-01
Lettuce	Top f.	B	2.7E+00	6.7E-02	3.4E+00	-	5.0E-02
		C	1.2E-01	6.7E-03	4.4E-01	-	4.2E-02
Radish	Root f.	H	2.8E-02	8.8E-03	-	4.2E-01	4.7E-02
Carrot	Root f.	B	5.6E-01	5.4E-02	2.1E+00	-	3.1E-02
		C	5.5E-02	7.9E-03	6.3E-01	-	1.7E-02
Squash	Fruit f.	B	7.4E-02	1.9E-02	5.4E-01	-	3.9E-02
		C	1.7E-02	4.6E-03	2.4E-01	-	2.5E-02
	Leaf f.	B	4.7E+00	2.5E-02	2.1E+00	-	1.7E-01
		C	3.2E-01	-	5.7E-01	-	8.7E-02
Garland chry-	Top f.	B	1.5E+00	3.5E-02	1.7E+00	-	1.2E-01
santhemum		C	1.6E-01	8.0E-03	3.8E-01	-	8.0E-02
Peanut	Seed d.	A	-	-	-	4.0E-01	-
Sesame	Seed d.	A	-	-	-	3.2E+00	-

d. for dry and f. for fresh.

Table 15. TF_{mix} of fallout ^{137}Cs for rice and Chinese cabbage in agricultural fields of Korea

Unpolished rice seed d.		Chinese cabbage top f.	
Soil	TF_{mix}	Soil	TF_{mix}
FR-A	2.3E-03	FC-A	1.3E-03
FR-B	7.1E-03	FC-B	6.8E-04
FR-C	1.9E-03	FC-C	6.2E-03
FR-D	6.9E-03	FC-D	1.7E-02
FR-E	2.0E-03	FC-E	1.8E-03
FR-F	1.2E-03	FC-F	5.1E-03
FR-G	1.1E-02	FC-G	3.8E-03
FR-H	9.8E-03	FC-H	1.1E-03
FR-I	8.2E-03	FC-I	2.2E-03
FR-J	6.6E-03	FC-J	2.6E-03
FR-K	3.1E-03	FC-K	1.3E-03
FR-L	7.7E-03	FC-L	7.0E-03

Table 16. Transfer factors (TF_{area}) of important radionuclides applied at different growth stages of various food crops

Crop species	Application time		Plant part	TF_{area} (m^2/kg-plant)			
	DAP (d)	DBH (d)		Mn	Co	Sr	Cs
Rice	-2	140	Unpolished seed d.	1.2E-03	1.6E-05	1.7E-04	5.9E-05
	13	125		2.9E-03	3.6E-05	3.9E-04	1.4E-04
	40	98		2.6E-03	4.9E-05	4.7E-04	2.0E-04
	67	71		2.0E-03	3.0E-05	5.5E-04	7.0E-04
	89	49		5.0E-03	4.6E-05	7.6E-04	5.4E-04
	112	26		1.2E-03	2.6E-04	1.1E-04	5.2E-05
	-2	140	Straw d.	5.7E-02	3.4E-04	6.2E-03	1.7E-04
	13	125		1.2E-01	6.4E-04	1.3E-02	3.2E-04
	40	98		8.8E-02	6.2E-04	1.2E-02	4.6E-04
	67	71		2.0E-01	1.3E-03	1.7E-02	1.4E-03
	89	49		7.6E-02	9.4E-04	9.8E-03	8.1E-04
	112	26		4.3E-02	1.1E-03	6.2E-03	2.3E-04
Chinese cabbage	-2	73	Top f.	1.2E-03	9.5E-05	8.6E-03	1.3E-04
	13	58		6.6E-04	4.8E-05	4.3E-03	3.3E-05
	27	44		6.6E-04	3.2E-05	3.6E-03	4.1E-05
	42	29		6.3E-04	4.7E-05	2.7E-03	3.5E-05
	56	15		1.1E-03	2.4E-04	2.2E-03	6.2E-05
Soybean	-2	119	Seed d.	1.9E-03	5.2E-04	6.3E-03	2.3E-04
	13	104		1.8E-03	4.7E-04	6.3E-03	1.3E-04
	40	77		4.4E-03	1.1E-03	1.0E-02	2.5E-04
	61	56		1.0E-02	3.2E-03	8.4E-03	2.7E-04
	82	35		2.1E-03	1.1E-03	1.1E-03	3.0E-05
	96	21		1.5E-03	1.4E-03	5.7E-04	3.2E-05
	-2	119	Leaf d.	8.2E-03	5.6E-04	6.7E-02	2.1E-04
	13	104		6.4E-03	4.3E-04	5.2E-02	1.4E-04
	40	77		1.8E-02	1.0E-03	5.3E-02	1.6E-04
	61	56		3.2E-02	1.8E-03	4.8E-02	1.6E-04
	82	35		8.0E-03	6.3E-04	1.4E-02	9.2E-05
	96	21		7.7E-03	2.0E-03	5.1E-03	1.9E-04
Radish	-2	77	Top f.	2.7E-03	1.2E-04	1.7E-02	4.0E-05
	13	62		5.4E-04	5.8E-05	2.8E-03	4.6E-05
	27	48		8.7E-04	4.4E-05	3.3E-03	5.1E-05
	42	33		7.9E-04	1.4E-04	2.4E-03	2.3E-04
	58	17		5.8E-04	1.8E-04	8.8E-04	1.9E-04
	-2	77	Root f.	3.0E-04	3.6E-05	2.1E-03	9.6E-06
	13	62		9.4E-05	1.1E-05	6.0E-04	7.0E-06
	27	48		1.6E-04	1.9E-05	8.4E-04	1.4E-05
	42	33		1.4E-04	4.5E-05	7.5E-04	4.3E-05
	58	17		1.8E-04	5.3E-05	4.1E-04	2.1E-05
Potato	-2	92	Tuber f.	1.9E-04	1.8E-04	4.0E-04	2.1E-04
	4	86		1.2E-04	5.1E-05	1.1E-04	6.9E-05
	31	59		1.8E-04	9.0E-05	3.1E-04	7.0E-05
	63	27		5.0E-05	1.1E-04	4.0E-05	1.1E-05
Red pepper	-2	64	Green fruit f.	4.2E-04	3.4E-04	4.6E-04	1.5E-05
		152		1.8E-04	6.7E-05	2.3E-04	1.8E-05
	2	60		5.4E-05	3.7E-05	1.5E-04	1.3E-05
		148		1.1E-04	3.1E-05	1.9E-04	1.8E-05
	44	18		1.5E-04	2.3E-04	5.0E-05	2.1E-06
		106		1.2E-04	5.1E-05	2.2E-04	2.4E-05
	91	59		8.1E-05	3.7E-05	7.9E-05	2.5E-06
	-2	110	Red fruit f.	2.4E-03	1.1E-03	3.0E-03	1.1E-04
		152		2.1E-03	6.5E-04	2.0E-03	1.3E-04
	2	106		8.4E-04	4.4E-04	1.6E-03	1.3E-04
		148		1.1E-03	4.0E-04	1.6E-03	1.5E-04
	44	64		1.4E-03	8.4E-04	1.3E-03	4.5E-05
		106		9.4E-04	4.3E-04	1.2E-03	9.7E-05
	91	17		2.6E-04	2.8E-04	6.7E-05	3.8E-06
		59		8.0E-04	5.3E-04	4.5E-04	1.4E-05
Cucumber	-2	78	Fruit f.	4.3E-04	5.6E-05	9.1E-04	6.4E-05
	13	63		3.5E-04	4.1E-05	1.1E-03	2.9E-05
	31	45		4.7E-04	6.3E-05	6.5E-04	2.2E-05
	50	26		5.3E-04	8.2E-05	7.9E-04	3.0E-05
	61	15		3.7E-04	4.9E-05	4.7E-04	1.0E-05

DAP : Days after planting, DBH : Days before harvest.

Table 17. Transfer factors (TF_{area}) for OBT from HTO applied at different growth stages of rice

Crop species	Application time		Plant part	TF_{area} (m^2/kg)
	DAP (d)	DBH (d)		
Rice	-1	138	Unpolished seed d.	2.6E-05
	5	132		1.3E-05
	57	80		3.3E-05
	79	58		1.6E-04
	98	39		3.2E-04
	113	24		2.5E-05
	-1	138	Straw d.	8.3E-05
	5	132		4.1E-05
	57	80		2.0E-04
	79	58		1.5E-04
	98	39		8.4E-05
	113	24		8.8E-05

Transplanted on May 28, '96 and harvested on Oct. 12, '96.

Table 18. Transfer factors (TF_{area}) of HTO and iodine applied at different growth stages of Chinese cabbage

Crop species	Application time		Plant part	TF_{area} (m^2/kg)		
	DAP (d)	DBH (d)		TFWT	OBT	Iodine
Chinese cabbage	-1	76	Top f.	1.3E-04	8.7E-06	3.0E-04
	8	67		1.5E-05	4.5E-06	3.1E-04
	26	49		5.9E-05	8.3E-06	1.5E-03
	44	31		4.3E-04	2.3E-05	2.2E-03
	63	12		4.8E-03	4.3E-05	1.0E-02

Sown on Aug. 30, '95 and harvested on Nov. 13, '95.

Table 19. Transfer factors (TF_{area}) of ^{90}Sr and ^{137}Cs applied to various paddy soils at different growth stages of rice

Application time		Soil	Plant part	TF_{area} (m^2/kg)	
DAP (d)	DBH (d)			Sr	Cs
-17~-18	161~163	KA	Unpolished seed d.	2.6E-04	4.4E-05
		KB		5.5E-04	1.1E-04
		KC		1.1E-04	3.8E-05
		KD		6.5E-04	1.4E-04
		KE		9.5E-05	5.6E-05
		KF		3.9E-04	2.0E-04
		YA		2.1E-04	1.6E-04
		YB		2.5E-04	1.5E-04
		YC		1.7E-04	1.9E-04
		YD		3.2E-04	6.0E-05
		YE		1.8E-04	2.4E-05
		KA	Straw d.	1.5E-02	1.3E-04
		KB		2.6E-02	3.5E-04
		KC		4.5E-03	1.0E-04
		KD		2.9E-02	4.0E-04
		KE		4.9E-03	1.6E-04
		KF		2.2E-02	4.3E-04
		YA		1.1E-02	3.8E-04
		YB		1.5E-02	3.5E-04
		YC		9.5E-03	4.3E-04
		YD		1.4E-02	1.3E-04
		YE		1.0E-02	5.9E-05
12	133	KA	Unpolished seed d.	2.5E-04	1.3E-04
		KB		7.0E-04	2.7E-04
		KD		7.1E-04	4.5E-04
		KA	Straw d.	1.2E-02	2.4E-04
		KB		2.5E-02	5.7E-04
		KD		2.6E-02	1.0E-03
83~84	61	KA	Unpolished seed d.	5.5E-04	1.0E-03
		KB		1.3E-03	2.7E-03
		KD		1.8E-03	4.2E-03
		YA		4.1E-04	2.5E-03
		YD		7.8E-04	4.2E-03
		KA	Straw d.	1.5E-02	1.8E-03
		KB		3.3E-02	5.9E-03
		KD		3.6E-02	6.9E-03
		YA		1.4E-02	4.3E-03
		YD		1.6E-02	6.3E-03

In Kori soils, transplanted on May 20, '98 and harvested on Oct. 12, '98.
in Yongkwang soils, on May 21, '99 and Oct. 12, '99, respectively.

Table 20. Yearly variations in transfer factors of radionuclides for various food crops

Crop species	Plant part	Year of culture	% of the 1st year's transfer factor			
			Mn	Co	Sr	Cs
Rice	Unpolished seed	2nd	36.7	55.6	-	52.5
		3rd	35.0	68.8	-	23.7
		4th	22.5	62.5	-	11.9
	Straw	2nd	54.4	44.1	-	56.5
		3rd	28.1	38.2	-	20.6
		4th	17.0	41.2	-	8.8
Soybean	Seed	2nd	73.7	94.2	120.6	65.2
		3rd	51.6	76.9	-	47.8
		4th	52.6	75.0	-	34.3
Potato	Tuber	2nd	41.6	51.7	67.5	71.4
		3rd	24.7	25.0	-	66.7
Chinese cabbage	Top	2nd	76.7	50.5	57.0	45.4
		4th	38.3	47.4	-	12.3
Radish	Root	2nd	75.9	87.9	34.0	38.5
		4th	37.9	75.8	-	17.6
Red pepper	Fruit	2nd	42.4	53.8	-	138.5
		3rd	30.0	40.0	-	200.0
Cucumber	Fruit	2nd	58.7	66.7	56.0	67.2

Table 21. Transfer factors for the 2nd year's culture in the Yongkwang paddy soils

Crop species	Plant part	Soil	% of the 1st year's	
			^{90}Sr	^{137}Cs
Rice	Unpolished seed	YA	90	88
		YC	88	79
		YD	75	80
		YE	83	75
	Straw	YA	89	74
		YC	82	58
		YD	78	75
		YE	77	58

Table 22. Interception factors of radionuclides applied at different growth stages of major food crops

Crop species	Application time		Interception factor				
	DAP (d)	DBH (d)	Mn	Co	Sr	Ru	Cs
Rice	37	112	0.48	0.47	0.48	0.47	0.48
	65	84	0.79	0.79	0.80	0.79	0.80
	87	62	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
	100	49	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88
	114	35	0.94	0.93	0.94	0.93	0.94
	132	17	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Soybean	25	105	0.35	0.37	0.34	0.34	0.32
	46	84	0.84	0.82	0.83	0.83	0.83
	64	66	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92
	81	49	0.88	0.87	0.88	0.88	0.87
	96	34	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83
	113	17	0.46	0.46	0.44	0.44	0.43
Chinese cabbage	26	51	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	38	39	0.59	0.60	0.58	0.58	0.59
	49	28	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
	60	17	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	70	7	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
Radish	29	55	0.18	0.19	0.18	0.18	0.17
	42	42	0.67	0.69	0.67	0.67	0.67
	53	31	0.82	0.83	0.82	0.82	0.82
	64	20	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
	72	12	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86

Table 23. Parameter values concerning HTO vapor applied at different growth stages of major food crops

Crop species	Application time		Plant part	AF (ml/ml)	RF (ml/ml)	PF (ml/ml)
	DAP (d)	DBH(d)				
Rice	77	60	Leaf	-	9.5E+04	3.6E-04
	84	53		-	8.4E+04	4.7E-04
	87	50		6.9E-01	1.9E+04	3.7E-04
	91	46		1.1E+00	1.2E+04	4.6E-04
	94	43		6.0E-01	1.8E+04	5.6E-04
	98	39		8.8E-01	3.0E+04	2.9E-04
	102	35		-	4.7E+04	-
	107	30		1.0E+00	1.2E+04	3.1E-04
	116	21		8.3E-01	1.1E+04	2.9E-04
	77	60	Stem	-	1.6E+03	6.4E-04
	84	53		-	3.4E+03	2.3E-04
	87	50		7.7E-02	8.3E+02	7.3E-04
	91	46		1.1E-01	6.6E+02	1.4E-04
	94	43		7.5E-02	1.3E+03	4.1E-04
	98	39		1.2E-01	2.1E+03	2.5E-05
	102	35		-	2.8E+03	7.9E-05
	107	30		1.2E-01	8.0E+02	1.2E-04
	116	21		7.9E-02	5.8E+02	1.8E-04
	77	60	Ear	-	-	-
	84	53		-	1.1E+04	-
	87	50		8.6E-01	4.1E+04	-
	91	46		1.2E+00	2.3E+04	-
	94	43		8.1E-01	3.4E+04	-
	98	39		4.2E-01	1.8E+04	-
	102	35		-	1.8E+04	-
	107	30		4.3E-01	9.8E+03	-
	116	21		3.0E-01	5.9E+03	-
	77	60	Unpolished seed	-	-	4.9E-05
	84	53		-	-	9.4E-05
	87	50		-	-	4.2E-04
	91	46		-	-	8.6E-04
	94	43		-	-	3.2E-03
	98	39		-	-	3.7E-03
	102	35		-	-	2.3E-03
	107	30		-	-	1.9E-03
	116	21		-	-	3.2E-04
	77	60	Chaff	-	-	8.5E-04
	84	53		-	-	2.2E-03
	87	50		-	-	1.5E-03
	91	46		-	-	1.6E-03
	94	43		-	-	2.4E-03
	98	39		-	-	2.2E-03
	102	35		-	-	9.4E-04
	107	30		-	-	4.6E-04
	116	21		-	-	2.6E-04
Chinese cabbage	30	51	Top	4.8E-01	1.1E+06	4.1E-04
	39	42		6.2E-01	2.3E+05	1.8E-03
	52	29		2.8E-01	2.2E+04	4.4E-03
	64	17		9.2E-02	4.0E+03	7.7E-03
Radish	36	45	Top	4.7E-01	1.1E+06	2.6E-03
	46	35		3.9E-01	3.3E+05	2.3E-03
	54	27		2.2E-01	1.6E+05	1.3E-03
	66	15		3.3E-01	5.4E+04	2.4E-03
	74	7		4.4E-01	9.2E+03	2.6E-03
	36	45	Root	1.2E-02	1.3E+04	1.2E-03
	46	35		1.1E-02	4.7E+03	3.0E-03
	54	27		8.4E-04	4.2E+02	2.7E-03
	66	15		4.9E-03	5.5E+02	2.2E-03
	74	7		4.3E-03	7.4E+01	3.5E-03

AF : Absorption factor, RF : Reduction factor, PF : Production factor.

Table 24. Absorption factors(AFs) and weathering half lives(T_ws) of elemental iodine vapor applied at different growth stages of rice and radish plants

Crop species	Application time		Plant part	AF (L/g-fresh)	T_w (d)
	DAP(d)	DBH(d)			
Rice	47	99	Straw	1.1E-01	-
	61	85		5.5E-02	-
	82	64		1.1E-01	-
	89	57		2.1E-01	-
	94	52		5.1E-02	-
	103	43		6.7E-02	-
	106	40		8.2E-02	-
	117	29		2.0E-01	-
	137	9		1.0E-01	-
	89	57	Ear	8.5E-01	-
	94	52		3.1E-01	-
	103	43		4.5E-01	-
	106	40		2.4E-01	-
	117	29		3.5E-01	-
	137	9		2.5E-01	-
	47	99	Top	1.1E-01	45.3
	61	85	(starw + ear)	5.5E-02	38.3
	82	64		1.1E-01	17.2
	89	57		2.7E-01	12.1
	94	52		8.4E-02	13.1
	103	43		1.4E-01	10.8
	106	40		1.2E-01	7.8
	117	29		2.5E-01	6.4
	137	9		1.4E-01	2.4
Radish [a]	29	52	Top	6.6E+00	-
	31	50		1.6E+00	-
	44	37		8.0E-01	-
	53	28		1.1E+00	-

[a] Plants exposed at 29 DAP were a little damaged by iodine toxicity.

Table 25. Translocation factors of radionuclides applied at different growth stages of major food crops

Crop species	Application time		Plant part	Translocation factor (TLF_a)					Translocation factor (TLF_b)				
	DAP (d)	DBH (d)		Mn	Co	Sr	Ru	Cs	Mn	Co	Sr	Ru	Cs
Rice	37	112	Unpolished seed	5.2E-04	5.9E-04	2.4E-04	5.5E-05	1.2E-02	2.7E-03	3.6E-03	1.2E-03	2.4E-04	1.1E-01
	65	84		3.9E-04	2.0E-03	2.1E-04	4.9E-05	3.4E-02	1.5E-03	1.1E-02	8.7E-04	1.6E-04	1.3E-01
	87	62		2.5E-04	1.6E-02	2.0E-04	2.1E-04	4.3E-02	6.9E-04	4.8E-02	5.8E-04	6.1E-04	1.2E-01
	100	49		5.7E-03	4.0E-02	5.6E-03	1.2E-03	8.4E-02	1.6E-02	1.2E-01	1.6E-02	2.4E-03	1.7E-01
	114	35		1.6E-02	6.6E-02	1.3E-02	3.8E-03	1.1E-01	3.8E-02	1.6E-01	3.2E-02	7.6E-03	2.0E-01
	132	17		7.2E-03	8.2E-03	9.7E-03	3.5E-03	2.2E-02	1.5E-02	1.9E-02	2.3E-02	5.6E-03	3.2E-02
	37	112	Chaff	1.0E-03	4.1E-04	6.8E-04	6.4E-04	4.9E-03	5.2E-03	2.5E-03	3.4E-03	2.8E-03	4.5E-02
	65	84		6.2E-04	7.5E-04	4.1E-04	1.5E-04	1.3E-02	2.4E-03	4.1E-03	1.7E-03	5.0E-04	5.0E-02
	87	62		9.1E-04	6.7E-03	6.6E-04	4.5E-04	1.6E-02	2.5E-03	2.0E-02	1.9E-03	1.3E-03	4.5E-02
	100	49		2.5E-02	1.6E-02	2.5E-02	1.7E-02	3.1E-02	7.1E-02	4.8E-02	7.2E-02	3.3E-02	6.2E-02
	114	35		7.6E-02	4.5E-02	7.7E-02	5.5E-02	5.5E-02	1.8E-01	1.1E-01	1.9E-01	1.1E-01	1.0E-01
	132	17		7.2E-02	5.2E-02	7.6E-02	4.5E-02	8.9E-02	1.5E-01	1.2E-01	1.8E-01	7.2E-02	1.3E-01
	37	112	Straw	1.9E-01	1.6E-01	2.0E-01	2.3E-01	9.2E-02	9.9E-01	9.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	8.5E-01
	65	84		2.6E-01	1.8E-01	2.4E-01	3.1E-01	2.1E-01	1.0E+00	9.8E-01	1.0E+00	1.0E+00	8.2E-01
	87	62		3.6E-01	3.1E-01	3.4E-01	3.4E-01	3.0E-01	1.0E+00	9.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	8.4E-01
	100	49		3.3E-01	2.8E-01	3.2E-01	4.8E-01	3.8E-01	9.1E-01	8.3E-01	9.1E-01	9.6E-01	7.7E-01
	114	35		3.3E-01	3.0E-01	3.2E-01	4.4E-01	3.9E-01	7.8E-01	7.3E-01	7.8E-01	8.8E-01	7.0E-01
	132	17		4.0E-01	3.7E-01	3.4E-01	5.8E-01	5.8E-01	8.4E-01	8.6E-01	8.0E-01	9.2E-01	8.4E-01
Soybean [a]	25	105	Seed	6.6E-04	5.2E-03	6.0E-04	5.7E-05	6.4E-02	4.8E-01	7.3E-01	2.0E-01	4.2E-02	6.5E-01
	46	84		1.1E-02	6.8E-02	1.2E-03	2.3E-04	2.6E-01	6.1E-01	7.9E-01	2.0E-01	2.6E-02	7.0E-01
	64	66		3.0E-02	1.3E-01	2.5E-03	6.8E-05	3.0E-01	6.5E-01	8.6E-01	2.8E-01	7.7E-03	7.2E-01
	81	49		8.2E-03	9.6E-02	6.3E-04	1.0E-04	1.9E-01	3.3E-01	8.2E-01	1.2E-01	9.0E-03	6.4E-01
	96	34		1.3E-03	5.1E-02	5.4E-05	6.0E-05	1.1E-01	4.2E-02	6.3E-01	4.5E-03	2.2E-03	5.6E-01
	113	17		8.3E-05	3.3E-03	4.5E-05	7.1E-05	4.5E-03	7.3E-04	2.8E-02	6.5E-04	4.9E-04	3.0E-02
	25	105	Pod	3.4E-04	9.5E-04	1.0E-03	1.3E-04	2.4E-02	2.5E-01	1.3E-01	3.3E-01	9.6E-02	2.4E-01
	46	84		4.3E-03	1.3E-02	2.4E-03	8.6E-04	1.0E-01	2.4E-01	1.5E-01	4.0E-01	9.7E-02	2.7E-01
	64	66		1.2E-02	1.8E-02	4.1E-03	3.0E-03	9.3E-02	2.6E-01	1.2E-01	4.6E-01	3.4E-01	2.2E-01
	81	49		1.4E-02	1.5E-02	2.8E-03	3.9E-03	7.3E-02	5.6E-01	1.3E-01	5.3E-01	3.5E-01	2.4E-01
	96	34		2.4E-02	2.1E-02	6.7E-03	1.4E-02	4.3E-02	7.7E-01	2.6E-01	5.6E-01	5.0E-01	2.2E-01
	113	17		8.5E-02	7.6E-02	3.6E-02	7.5E-02	5.2E-02	7.5E-01	6.5E-01	5.2E-01	5.2E-01	3.5E-01
Radish	29	55	Top	1.5E-01	8.5E-02	1.5E-01	2.5E-01	2.6E-01	9.8E-01	5.3E-01	9.8E-01	9.7E-01	7.4E-01
	42	42		3.2E-01	1.5E-01	2.5E-01	3.1E-01	3.0E-01	9.9E-01	6.2E-01	9.9E-01	9.9E-01	6.9E-01
	53	31		3.3E-01	1.8E-01	3.9E-01	2.8E-01	3.2E-01	9.9E-01	7.3E-01	9.9E-01	1.0E+00	7.6E-01
	64	20		3.9E-01	2.2E-01	5.3E-01	3.3E-01	4.3E-01	9.9E-01	8.2E-01	9.9E-01	1.0E+00	8.2E-01
	72	12		4.8E-01	3.3E-01	7.3E-01	4.1E-01	5.1E-01	9.9E-01	8.8E-01	9.9E-01	1.0E+00	8.6E-01
	29	55	Root	2.6E-03	1.2E-01	3.6E-03	4.2E-03	9.2E-02	1.7E-02	4.7E-01	2.2E-02	2.8E-02	2.6E-01
	42	42		1.9E-03	1.2E-01	2.9E-03	1.3E-03	1.3E-01	6.2E-03	3.8E-01	1.2E-02	5.3E-03	3.1E-01
	53	31		2.0E-03	7.8E-02	3.0E-03	1.2E-03	1.0E-01	6.1E-03	2.7E-01	1.2E-02	3.1E-03	2.4E-01
	64	20		2.4E-03	6.0E-02	2.1E-03	1.3E-03	9.3E-02	6.0E-03	1.8E-01	7.9E-03	2.4E-03	1.8E-01
	72	12		3.6E-03	4.9E-02	2.0E-03	9.0E-04	8.6E-02	7.5E-03	1.2E-01	5.4E-03	1.2E-03	1.4E-01
Chinese cabbage	26	51	Top	1.2E-01	1.0E-01	1.6E-01	1.5E-01	3.3E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
	38	39		2.6E-01	1.7E-01	2.9E-01	4.0E-01	4.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
	49	28		3.6E-01	2.7E-01	3.1E-01	5.4E-01	5.4E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
	60	17		4.6E-01	4.0E-01	4.4E-01	6.3E-01	5.9E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
	70	7		5.9E-01	6.2E-01	5.8E-01	7.5E-01	6.6E-01	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00

[a] TLF_b was determined under the condition of complete defoliation.

Table 26. Translocation factors of elemental iodine vapor applied at different growth stages of rice and radish

Crop species	Application time		Plant part	Translocation factor	
	DAP (d)	DBH (d)		TLF_a	TLF_b
Rice	47	99	Unpolished seed	5.06E-04	2.30E-03
	61	85		6.88E-04	3.20E-03
	82	64		4.33E-04	5.70E-03
	89	57		3.69E-04	9.70E-03
	94	52		4.74E-04	7.40E-03
	103	43		2.56E-04	4.00E-03
	106	40		1.46E-04	4.70E-03
	117	29		3.34E-05	7.60E-04
	137	9		6.39E-05	9.00E-04
	47	99	Chaff	-	-
	61	85		1.66E-04	7.70E-04
	82	64		6.84E-06	9.00E-05
	89	57		-	-
	94	52		1.09E-05	1.70E-04
	103	43		1.54E-05	2.40E-04
	106	40		2.51E-05	8.10E-04
	117	29		5.28E-05	1.20E-03
	137	9		1.78E-04	2.50E-03
	47	99	Straw	2.20E-01	9.98E-01
	61	85		2.14E-01	9.96E-01
	82	64		7.55E-02	9.94E-01
	89	57		3.76E-02	9.90E-01
	94	52		6.36E-02	9.93E-01
	103	43		6.37E-02	9.96E-01
	106	40		3.08E-02	9.95E-01
	117	29		4.39E-02	9.98E-01
	137	9		7.08E-02	9.97E-01
Radish	29	52	Top	-	-
	31	50		-	-
	44	37		-	-
	53	28		-	-
	29	52	Root	8.60E-04	-
	31	50		-	-
	44	37		-	-
	53	28		6.50E-03	-

Table 27. Weathering half lives of radionuclides applied at different growth stsges of major food crops

Crop species	Application time		Weathering half life (T_w, d)				
	DAP (d)	DBH (d)	Mn	Co	Sr	Ru	Cs
Rice	37	112	47.2	43.2	46.9	52.7	35.6
	65	84	44.5	33.7	40.2	49.7	44.1
	87	62	42.3	40.5	39.6	40.9	42.1
	100	49	32.8	31.5	31.8	46.4	49.4
	114	35	27.9	27.3	27.1	35.0	39.2
	132	17	15.8	14.1	13.7	24.4	32.1
Soybean [a]	25	105	11.1	14.7	12.5	11.0	31.5
	46	84	14.5	23.7	11.4	12.3	58.9
	64	66	14.9	24.3	9.7	9.7	52.6
	81	49	9.2	15.8	6.5	7.5	28.0
	96	34	6.8	9.4	5.3	6.6	14.5
	113	17	5.4	5.5	4.4	6.1	6.2
Radish	29	55	19.9	28.7	21.0	20.1	36.7
	42	42	25.2	25.0	20.4	20.7	34.3
	53	31	19.2	17.1	15.6	22.8	25.1
	64	20	14.9	12.6	10.6	21.6	21.1
	72	12	11.2	9.4	8.6	26.1	16.0
Chinese cabbage	26	51	16.5	15.6	19.0	18.8	32.0
	38	39	19.9	15.3	22.1	29.3	34.5
	49	28	18.9	14.9	16.7	31.6	31.1
	60	17	15.0	12.9	14.4	25.8	22.4
	70	7	9.3	10.0	9.0	16.7	11.5

[a] Weathering half life was determined under the condition of complete defoliation.

부록 1. 관련 발표 논문

- 최용호, 정규회, 김진규, 이정호, FOOD III 코드를 이용한 섭식경로 내부피폭 비교해석, 대한방사선방어학회지, 제 13 권 제 2 호, 41-51, 1988.
- 최용호, 정규회, 천기정, 김삼랑, 이정호, 보리의 토양 Sr-90 흡수 및 토양-작물체 전이계수, 대한방사선방어학회지, 제 16 권 제 1 호, 33-42, 1991.
- 최용호, 김국찬, 이창우, 이강석, 이정호, 박찬걸, 조용우, 벼, 콩 및 채소류에 대한 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 토양-작물체간 전이계수, 대한방사선방어학회지, 제 16 권 제 2 호, 55-65, 1991.
- 이창우, 최용호, 천기정, 이정호, 육상식품 섭취경로에 의한 선량계산 모델에서 파라메타의 불확실성 및 민감도 분석, 대한방사선방어학회지, 제 16 권 제 2 호, 67-73, 1991
- Y. H. Choi, C. W. Lee, K. S. Lee, J. H. lee, J. S. Jo and K. H. Chung, Absorption and accumulation of Sr-90 by rice and soybean and its soil-to-plant transfer coefficients, J. Kor. Nucl. Soc. 24(2), 121-129, 1992.
- Y. H. Choi, C. W. Lee, J. K. Kim, M. H. Lee and J. H. Lee, Improvement on the KFOOD code for more realistic assessment of the annual food chain radiation dose due to operating nuclear facilities, J. Kor. Nucl. Soc. 25(3), 437-446, 1993.
- 최용호, 조재성, 이명호, 최근식, 이정호, 염화칼리와 석회의 동시살포가 주요작물의 생육중에 침적한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 뿌리흡수에 미치는 영향, 대한방사선방어학회지, 제 20 권 제 4 호, 245-253, 1995.
- 최용호, 조재성, 이창우, 이명호, 최근식, 이정호, 벼 재배기간중 침적시기에 따른 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 뿌리흡수, 대한방사선방어학회지, 제 20 권 제 4 호, 255-263, 1995.
- 최용호, 조재성, 이창우, 이명호, 김상복, 홍광희, 최근식, 이정호, 주요 작물의 생육중에 침적한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 지하이동, 대한방사선방어학회지, 제 21 권 제 1 호, 51-58, 1996.
- 최용호, 조재성, 이창우, 정규회, 이정호, 벼 재배기간중 논토양에 처리한 ^{54}Mn, ^{60}Co, ^{85}Sr, ^{137}Cs의 용탈, 한국환경농학회지, 제 15 권 제 2 호, 198-206, 1996.
- 최용호, 이원윤, 임광묵, 박두원, 이명호, 이창우, 이현덕, 이정호, 고추 재배시 방사성 핵종의 처리 및 열매수확 시기에 따른 토양-작물체간 전이계수의 변이, 대한방사선방어학회지, 제 22 권 제 3 호, 171-181, 1997.

- 최용호, 박효국, 김상복, 최근식, 이정호, 오이의 재배기간중 처리한 방사성 핵종의 토양-작물체간 전이계수 및 지하이동, 한국환경농학회지, 제 16 권 제 4 호, 304-310, 1997.
- Y. H. Choi, C. W. Lee, S. R. Kim, J. H. Lee and J. S. Jo, Effect of application time of radionuclides on their root uptake by Chines cabbage and radish, J. Environ. Radioactivity 39(2), 183-198, 1998.
- 최용호, 임광묵, 박효국, 이원윤, 이창우, ^{85}Sr, ^{103}Ru, ^{134}Cs의 엽면처리 시기에 따른 배추의 방사능 오염, 대한방사선방어학회지, 제 23 권 제 4 호, 219-227, 1998.
- 최용호, 임광묵, 이명호, 박효국, 이원윤, 우리나라 경작지 토양중 ^{137}Cs 농도, 대한방사선방어학회지, 제 24 권 제 2 호, 55-63, 1999.
- 최용호, 임광묵, 이명호, 최근식, 정규회, 한국의 논과 밭에서 ^{137}Cs의 토양-작물체 전이계수, 한국환경농학회지, 제 18 권 제 2 호, 164-168, 1999.
- Y. H. Choi, K. M. Lim, H. G. Park, W. Y. Lee and C. M. Lee, Experimental studies for analyzing direct contamination pathway of ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{85}Sr, ^{103}Ru and ^{134}Cs in Rice, J. Korean Asso. Radiat. Prot. 25(1), 21-30, 2000.
- Y. H. Choi, S. B. Kim, K. M. Lim, H. K. Park and W. Y. Lee, Incorporation into organically bound tritium and the underground distribution of HTO applied to a simulated rice field, J. Environ. Radioactivity 47(3), 279-290, 2000.
- Y. H. Choi, K. M. Lim, W. Y. Lee, S. Diabaté and S. Strack, Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions, J. Environ. Radioactivity 58(1), 67-85, 2002.
- Y. H. Choi, K. M. Lim, D. Yu, H. G. Park, Y. G. Choi, C. M. Lee, Transfer pathways of ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{85}Sr, ^{103}Ru and ^{134}Cs in rice and radish plants directly contaminated at different growth stages, Annals of Nuclear Energy 29, 429-446, 2002.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-1993/2001			

제목 / 부제
한국인의 섭취 피폭선량 평가를 위한 농작물 핵종 이동인자

연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	최용호 (원자력환경연구팀)
연 구 자 및 부 서 명	임광묵, 조영현, 이명호, 최근식, 정근호, 박효국, 이원윤, 박두원, 최상도, 강희석 최희주, 이한수, 이창우 (원자력환경연구팀)

출 판 지		발행기관	한국원자력연구소	발행년	2001
페 이 지	55 p.	도 표	있음(○), 없음( )	크 기	210×297cm
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비( ), __ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		

초록 (15-20줄내외)

원자력 시설의 가동에 따른 한국인의 식품섭취 피폭선량을 보다 현실적으로 평가하기 위해서는 농작물에서의 방사성 핵종 이동계수에 대해 국내 생산 자료를 사용할 필요가 있다. 본 보고서에서는 과거 약 15 년간 한국원자력연구소에서 수행된 우리나라 주요 농작물의 핵종 이동인자에 관한 연구결과를 종합·정리하였다. 뿌리흡수를 평가하기 위한 인자로서 토양-작물체 전이계수를 온실실험과 야외조사를 통하여 측정하였다. 토양 단위 무게 당 핵종 농도 기준의 전통적인 전이계수 외에 단위 지표면적 당 핵종의 처리량 기준의 전이계수도 조사하였다. 작물체의 직접오염과 관련된 인자로서 차단계수, 전류계수, 환경제거반감기 등을 온실실험을 통하여 조사하였다. HTO 및 I_2 증기에 대해서는 작물체의 초기 오염도를 흡수계수로 표시하였다. 특히 HTO 증기에 대해서는 TFWT(조직자유수 ^3H) 감쇄계수와 OBT(유기결합형 ^3H) 생산계수로 수확시 ^3H 준위를 나타내었다. 상기와 같은 핵종의 이동인자는 토양, 작물 그리고 핵종의 종류 및 처리시기에 따라 변이가 대체로 컸다. 연구결과를 바탕으로 섭취경로 선량평가 모델의 개선방향을 정상가동시와 사고시로 나누어 제안하였다.

주제명키워드 (10단어내외)	농작물, 방사성핵종, 섭취경로, 전이계수, 차단계수, 전류계수, 환경제거반감기, 흡수계수, 감쇄계수

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Stamdard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-1993/2001			

Title / Subtitle

Parameters on the Radionuclide Transfer in Crop Plants for Korean Food Chain Dose Assessment

Project Manager and Department (or Main Author)	Yong Ho, Choi (Nuclear Environment Research Div.)
Researcher and Department	K. M. Lim, Y. H. Cho, M. H. Lee, K. S. Choi, K. H. Jung, H. K. Park, W. Y. Lee, D. W. Park, S. D. Choi, H. S. Kang, H. J. Choi, H. S. Lee, C. W. Lee (Nuclear Environment Research Div.)

Publication Place		Publisher	KAERI	Publication Date	2001
Page	55 p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ( )	Size	210×297 Cm.
Note					
Classified	Open(○), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	TR	
Sponsoring Org.			Contract No.		

Abstract (15-20 Lines)

For more realistic assessment of Korean food chain radiation doses due to the operation of nuclear facilities, it is required to use domestically produced data for radionuclide transfer parameters in crop plants. In this report, results of last about 15 years' studies on radionuclide transfer parameters in major crop plants by the Korea Atomic Energy Research Institute, were summarized and put together. Soil-to-plant transfer factors, parameters quantifying the root uptake of radionuclides, were measured through greenhouse experiments and field studies. In addition to traditional transfer factors, which are based on the activity in unit weight of soil, those based on the activity applied to unit area of soil surface were also investigated. Interception factors, translocation factors and weathering half lives, parameters in relation to direct plant contamination, were investigated through greenhouse experiments. The levels of initial plant contamination with HTO and I_2 vapor were described with absorption factors. Especially for HTO vapor, ^3H levels in crop plants at harvest were expressed with TFWT (tissue free water tritium) reduction factors and OBT (organically bound tritium) production factors. The above-mentioned parameters generally showed great variations with soils, crops and radionuclide species and application times. On the basis of summarized results, the points to be amended or improved in food chain dose assessment models were discussed both for normal operation and for accidental release.

Subject Keywords (About 10 words): crop plants, radionuclide, food chain, transfer factors, interception factor, translocation factor, weathering half lives, absorption factor, reduction factor