

## TFWT and OBT Concentrations in Rice Plants Exposed to HTO Vapor during Daytime and Nighttime at Different Seed-Developing Stages

Yong-Ho Choi · Kwang-Muk Lim · Won-Yun Lee · Hee-Suk Kang ·  
Heui-Joo Choi · Han-Soo Lee · Silvia Diabaté<sup>1</sup> and Siegfried Strack<sup>1</sup>

Korea Atomic Energy Research Institute

<sup>1</sup>Forschungszentrum Karlsruhe

### 벼의 종실 발육단계에 따른 주간 및 야간 HTO 증기 피폭시 TFWT 및 OBT 농도

최용호 · 임광목 · 이원윤 · 강희석 · 최희주 · 이한수 · 실비아디아바테<sup>1</sup> ·  
지그프리드슈트락<sup>1</sup>

한국원자력연구소

<sup>1</sup>칼스루헤연구소

(2002년 3월 16일 접수, 2003년 1월 6일 채택)

**Abstract** - Rice plants at different seed-developing stages were exposed to HTO vapor in an exposure box for 1 h during daytime and nighttime to investigate the levels of tissue free water <sup>3</sup>H (TFWT) and organically bound <sup>3</sup>H (OBT) in different plant parts. In the daytime experiment, TFWT concentrations in leaves at the end of exposure ( $h_0$ ) were around 100% of the 1 hour mean HTO concentrations in air moisture whereas in the nighttime experiment, they were as low as 30~40% of the air concentration. TFWT concentrations in both experiments decreased very rapidly in the beginning but much more slowly later and those at harvest were hundreds to hundred thousands times lower than those at  $h_0$ . OBT concentrations varied with time in different manners depending on plant parts and exposure times and differed between at  $h_0$  and at harvest by factors of less than 10 on the whole. Even during nighttime exposures, OBT was produced at about a third the rate for daytime exposures. The degree of the conversion of airborne HTO into OBT in mature rice seeds, being several times higher in the daytime experiment than in the nighttime experiment, was highest after the exposure performed at the most actively seed-developing stage for both experiments. It is estimated that OBT would contribute much more to the ingestion radiation dose than TFWT if rice plants are exposed to HTO vapor for the seed-developing period.

**Key words** : rice plant, HTO vapor, exposure, daytime, nighttime, TFWT, OBT

**요약** - 벼를 쌀알의 발육단계별로 주간 및 야간에 1 시간 동안 HTO 증기에 피폭시키고 작물체 부위별로 조직자유수 <sup>3</sup>H (TFWT) 및 유기결합형 <sup>3</sup>H (OBT) 농도를 조사하였다. 피폭종료 직후 ( $h_0$ ) 잎의 TFWT 농도는 주간실험에서는 공기수분중 1 시간 평균 HTO 농도의 100% 내외였으나 야간실험에서는 30~40%에 불과하였다. 주·야간 피폭 모두 TFWT 농도는 초기에는 급히 감소하다가 나중에는 훨씬 천천히 감소하였고 수확시에는  $h_0$ 에 비해 수백~수만 배 낮았다. OBT 농도는 부위 및 피폭시기에 따라 변화양상이 달랐고  $h_0$ 와 수확시 간 차이는 대체로 10 배 이내였다. 야간피폭 중에도 주간피폭의 약 1/3 수준으로 OBT가 생성되었다. 공기중 HTO의 수확시 쌀알내 OBT로의 전환 정도는 주간피폭시 야간피폭보다 수 배 높았고 주·야간 피폭 모두 쌀알의 발육 최성기 피폭시에 가장 높았다. 벼가 쌀알의 발육기에 HTO에 피폭되면 OBT에 의한 섭취피폭선량이 TFWT보다 훨씬 클 것으로 추정되었다.

**중심어** : 벼, HTO 증기, 피폭, 주간, 야간, 조직자유수 <sup>3</sup>H, 유기결합형 <sup>3</sup>H

## 서 론

트리티움( $^3\text{H}$ , T)은 원자로, 재처리 시설 및 미래의 핵융합로 등의 가동 시에 환경으로의 방출이 크게 우려되는 핵종[1-3]이다. 원자력시설로부터 대기로 방출되는  $^3\text{H}$ 의 형태는 크게 HT (tritiated hydrogen gas)와 HTO(tritiated water)의 두 가지이다[2,4,5].

대기중에서 HTO는 수증기 상태로 기공을 통하여 작물체에 용이하게 흡수된다[6]. HT는 주로 토양에 침적한 후 토양 미생물에 의해 HTO로 전환된 다음 뿌리를 통하여 흡수되거나 대기중으로 재방출되어 작물체에 흡수된다[2,7].

작물체에 흡수된 HTO중 일부는 작물체의 대사 작용에 의해 OBТ(organically bound tritium, 유기 결합형 tritium)로 되어 체내에 축적되고 나머지는 외기로 방출되거나 TFWT(tissue free-water tritium, 조직자유수중 tritium)로 작물체 내에 존재하게 된다[5,6,8,9]. 따라서  $^3\text{H}$  방출로 인한 섭취피폭선량을 평가하기 위해서는 HTO의 흡수에 따른 작물체내 TFWT와 OBТ 농도를 예측하는 것이 중요하다.

위와 같은 예측은 원자력 시설의 정상가동시에는 일반적으로 평형모델인 비방사능 모델을 이용하여 수행하고 있다[10,11]. 그러나 단기적인 급성 방출을 수반하는 사고시에는 동적모델을 사용하여 한다[6,9,10]. 이러한 동적 모델을 수립하기 위해서는 작물체의 생육중 HTO 피폭 시기별 및 피폭후 시간경과에 따른  $^3\text{H}$  농도 변화에 대한 많은 실험 자료가 필요하다.

작물체의 지상부 체표면으로부터의 수증기 흡수는 기공의 운동과 밀접한 관련이 있고 기공의 개폐에는 광이 매우 중요한 작용을 하는 것으로 알려져 있다[6,12]. 즉, 낮에는 광의 작용으로 기공이 열리고 밤에는 다시 닫히게 된다. 따라서 작물체의 HTO 흡수도 광도에 크게 좌우될 것이고 무광 상태에서는 현저하게 억제될 것이다. Diabaté와 Strack[8]도 밑에서 이러한 현상을 확인하였다.

본 연구에서는 우리나라의 주식작물인 벼에 대하여 HTO 피폭 시기별 및 피폭후 시간경과에 따른 작물체내  $^3\text{H}$  농도 변화를 관찰하고 광의 유무가 작물체의 대기중 HTO 흡수 및 OBТ 생산 등에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2 년에 걸쳐 주간과 야간에 HTO 증기 피폭실험을 쌀알의 발육기간 중 두세 차례 실시하고 TFWT 및 OBТ 농도를 조사, 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 실험작물 육성

장안벼를 가로 41 cm, 세로 33 cm, 높이 25 cm인 플라스틱 포트에 육성하였다. 포트내 토양은 pH 5.2, 유기물 함량 4.5%인 사질 양토였다. 재배포트들은 야외에 배치되었으며 벼의 이식일자는 주간 피폭실험의 경우 1997년 5월 26일, 야간 피폭실험의 경우 1998년 5월 22일 이었다. 재식밀도는 1주 4본식으로 포트당 6 주였다.

이식 2 일전에 포트당 수도용 복합비료(N : P : K=21% : 17% : 17%) 6.1 g, 소석회 15 g, 부숙퇴비 50 g을 살포하여 표층토와 섞어 주었다. 이식 후에는 생육단계에 따라 3 회에 걸쳐 복합비료를 추비하였다. 이식 수 일전부터 수도물로 관개하여 9월 하순까지 담수 상태를 유지하였다. 벼의 생육 시기에 따라 살균제와 살충제를 두세 차례 살포하였다.

### 작물체 HTO피폭

매회 피폭시 하나의 재배상자를 58 cm (L) × 48 cm (W) × 120 cm (H)의 피폭상자에 집어넣고 피폭시켰다. 피폭일자는 주간피폭은 8월 25일, 9월 1일, 9월 10일, 야간피폭은 8월 25일과 9월 1일이었다. 벼의 출수는 주간피폭 해에는 8월 14일, 야간피폭 해에는 8월 13일에 시작하였다.

피폭상자는 투명 합성수지체로서 하부 바닥상부의 직육면체 통으로 되어 있다. 상부의 내벽에 HTO 용액 가열장치, fan(가열장치 바로 밑에) 및 온도 센서를 부착하였다. 상부의 윗면은 개폐가 가능한 뚜껑으로 되어 있다. 피폭상자의 틈새기는 모두 실리콘 라버로 라이닝하여 공기의 출입을 최대한 억제하였다.

재배상자를 피폭상자의 바닥 위에 올려놓고 그 위에 상부의 통을 덮어씌운 후 2 ml(ml당 9.25 MBq)의 HTO 용액이 담긴 유리병을 가열장치에 올려놓고 60분간 15 volt, 1 amp.의 전력을 공급하여 가열하였다. 가열과 동시에 fan을 작동시켜 증발된 HTO가 상자 내에 고루 퍼지게 하였다. 가열이 끝난 직후에는 상부의 뚜껑을 열고 외부에 있는 blower를 5 분간 작동시켜 신선한 공기를 주입하고 환기를 피하였다.

피폭실험은 주간의 경우 오전 9 시경에 시작하였고 야간의 경우 21 시에 시작하였다. 피폭 중에는 펌프를 이용하여 매 5 분 동안 피폭상자 내부의 공기 1.5 l를 증류수가 담긴 20 ml의 vial에 통과시켜 공기중 수분을 포집하였고 상자 내부의

온도와 습도를 5 분 간격으로 측정, 기록하였다. 일사량은 한국원자력연구소내 관측자료를 이용하였다.

### 시료 채취 및 방사능 분석

피폭종료 직후부터 최종 수확시(주간피폭 실험에서는 10월 10일, 야간피폭 실험에서는 10월 12일)까지 시간경과별로 10여 회에 걸쳐 매회 3 줄기씩 지표로부터 7 cm 정도만 남기고 채취하였다. 단 최종 수확시에는 3 줄기씩 3 반복으로 도합 9 줄기를 채취하였다. 채취한 시료는 부위별로 나누어 -20 °C로 냉동·보관한 후 동결건조법으로 조직자유수를 추출하여 TFWT 농도를 측정하였다.

동결 건조된 작물체 시료(이삭 시료는 이삭 줄기와 종실로 구분한 다음 이삭 줄기는 줄기 시료에 포함시키고 종실은 발육이 충분한 경우 쌀알과 왕겨로 분리하였음)는 믹서기를 이용하여 분쇄한 후 H<sub>2</sub>O에 의한 교환과정을 거쳐 잔류 TFWT와 치환성 OBT를 제거하였다. 이렇게 처리된 시료들을 강력한 흡수제인 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 위에 놓고 수일 간 건조시킨 후 압축기를 이용하여 0.2~0.5 g의 펠릿으로 만들었다. 펠릿 시료를 산화연소장치(Oxidizer 306, Canberra-Packard)를 이용하여 연소시키고 이때 발생한 연소수를 20 ml vial에 채집하였다.

조직자유수내 TFWT 농도와 연소수내 <sup>3</sup>H 농도는 액체섬광계수기(Winspectral 1414, Walac)로 측정하였다. 측정시간은 30~60 분이었고 측정오차는 1 시그마로 8% 이내였다. OBT 농도는 TFWT 농도와 같은 종류의 물질내 농도로 비교될 수 있도록 식물체 건물 1 g 연소시 0.6 ml의 연소수가 생성된다는 가정 하에 ml 당으로 환산하였다[8].

## 결과 및 고찰

### 피폭상자내 기상조건 및 공기중 HTO 농도

피폭상자 내에서 작물체를 HTO에 피폭시키는 동안 피폭상자 내의 기상조건과 공기수분 중 농도를 조사한 결과는 표 1과 같이 요약될 수 있다.

기온은 주간피폭의 경우 대체로 피폭이 진행될수록 상승하여 피폭 종료시에는 시작에 비해 5~7 °C 정도 높았으나 야간피폭의 경우 변화가 거의 없었다. 피폭시간 동안의 평균기온은 주간피폭의 경우 약 30 °C, 야간피폭의 경우 약 22 °C였다. 상대습도는 주간피폭의 경우 대체로 처음에는 증가하다가 어느 정도 경과한 다음부터는 서서히 감소하였고 야간피폭의 경우 처음부터 계속하여 매우 서서히 증가하였다. 상대습도의 평균은 주간피폭의 경우 80~90%였고, 야간피폭의 경우 92% 내외였다. 주간피폭시 일사량은 구름이 많은 날을

Table. 1. Meteorological conditions and HTO concentration in the exposure box during each exposure of rice plants to HTO vapor

Code of exposure	Time of exposure		Temperature (°C)		Rel. humidity (%)		Radiation (W m <sup>-2</sup> )		HTO in air moisture (Bq ml <sup>-1</sup> )	
	Date	Stage <sup>b</sup>	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
D1	Aug. 25	MR	27.6-34.7	30.7	76.5-90.9	89.5	248-549	441	10182-77690	55634
D2	Sep. 1	EDR	27.7-32.6	30.2	88.3-92.5	91.7	267-384	326	21193-105764	63361
D3	Sep. 10	LDR	28.7-38.5	33.1	70.5-85.3	78.5	402-585	473	43056-89991	62972
N1	Aug. 25	MR	22.1-22.2	22.1	88.1-93.5	91.9	ND	ND	2246-252194	142324
N2	Sep. 1	EDR	21.1-21.8	21.6	91.4-92.9	92.6	ND	ND	13301-231110	136423

<sup>a</sup> 'D' symbolizes the daytime experiment and 'N' symbolizes the nighttime experiment.

<sup>b</sup> MR : Milky ripe, EDR : Early dough ripe, LDR : Late dough ripe.

제외하고는 피폭이 진행됨에 따라 점점 증가하는 경향이였으며 피폭시간 동안의 평균은 구름의 양에 따라 330~470 W m<sup>-2</sup>의 범위였다

피폭상자내 공기수분 중 HTO 농도는 대체로 피폭시작 후 10~20 분 동안 급히 증가하다가 그

이후에는 서서히 감소하는 경향이였다. 피폭시간 동안의 공기수분 중 HTO 평균농도는 HTO 용액의 증발속도, 상자 내부의 절대습도, 수분의 벽면 응결정도, 외부로의 HTO 누출량, 작물체의 HTO 흡수량 등에 의해 결정되는 것으로 야간피폭에서 주간피폭에 비해 두세 배 높았다.

**작물체내 TFWT 농도**

**주간피폭**

우리나라의 주곡작물인 벼의 출수후 쌀알의 발육단계에 따라 세 차례에 걸쳐 주간에 HTO 증기 피폭실험을 실시하고 시간경과에 따라 작물체 부위별 TFWT 농도를 조사한 것은 그림 1과 같다. TFWT 농도는 상대농도로서 피폭상자내 공기 수분중 HTO의 평균농도(표 1)에 대한 백분율로 나타내었다. 주간피폭 종료 직후(h<sub>0</sub>)에서의 상대농도는 100% 내외였다.

Belot 등[13] 및 Amano와 Garten Jr.[14]에 의하면 작물체 앞에서 TFWT의 평형농도는 토양수중 HTO 농도가 무시할 수 있을 정도일 경우 다음 식과 같이 결정된다.

$$C_{leaf} = A R C_{aw}$$

여기서,

C<sub>leaf</sub> : 평형상태에서의 잎내 TFWT 농도 (Bq ml<sup>-1</sup>)

A : 평형상태에서 수증기중 T/H에 대한 물중 T/H의 비, 약 1.1

R : 상대습도

C<sub>aw</sub> : 공기수분중 HTO 농도 (Bq ml<sup>-1</sup>)

이상으로 볼 때 공기 수분중 HTO 농도와 벼의 잎내 TFWT 농도는 일광이 충분할 경우 대체로 1시간 이내에 평형에 도달한다고 할 수 있겠다. Belot 등[13] 및 Guenot와 Belot[15]의 실험에서도 포도와 감자 잎내 TFWT 농도가 HTO 피폭 시작후 30-45 분만에 거의 평형에 도달한 것으로 나타났다. 세 시기 피폭중 D2에서 상대습도가 가장 높았음에도 불구하고 피폭종료 직후 잎의 TFWT 상대농도가 가장 낮은 것은 일사량이 가장 적었기 때문인 것으로 보인다.

피폭종료 직후 부위별 TFWT 농도는 D2와 D3에서는 잎 > 이삭 > 줄기의 순이었으나 D1에서는 잎과 이삭 간에 차이가 없었다. D1 피폭시에는 출수후 종실의 발육초기로서 왕겨의 생리활동이 왕성하고 왕겨내 내용물도 거의 없어서 이삭

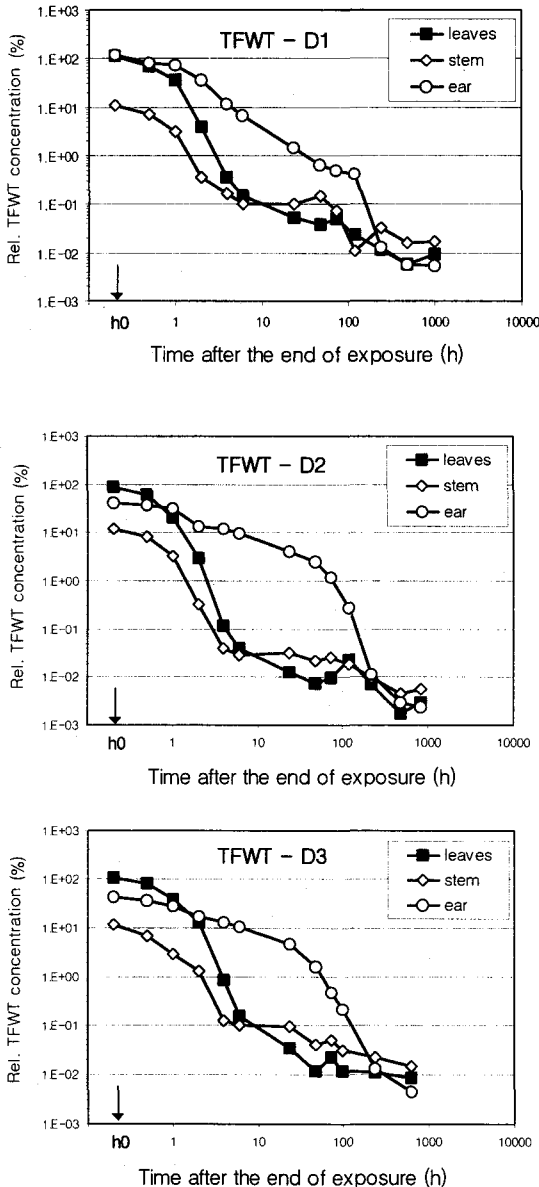


Fig. 1. TFWT concentrations in different parts of rice plants as a function of time after daytime exposures to HTO vapor on Aug. 25 (D1), Sep. 1 (D2) and Sep. 10 (D3). Data are relative values as the percent ratio of the TFWT concentration (Bq ml<sup>-1</sup>) to the mean HTO concentration in the air moisture during exposure (Bq ml<sup>-1</sup>).

Table 2. Reduction factors of TFWT in different parts of the rice plants exposed to HTO vapor at different seed-developing stages

Code of <sup>a</sup> exposure	Time of exposure		TFWT reduction factor <sup>c</sup>		
	Date	Stage <sup>b</sup>	Leaf	Stem <sup>d</sup>	Ear
D1	Aug. 25	MR	$1.2 \times 10^4$	$6.6 \times 10^2$	$2.3 \times 10^4$
D2	Sep. 1	EDR	$3.0 \times 10^4$	$2.1 \times 10^3$	$1.8 \times 10^4$
D3	Sep. 10	LDR	$1.2 \times 10^4$	$8.0 \times 10^2$	$9.8 \times 10^3$
N1	Aug. 25	MR	$1.1 \times 10^4$	$1.5 \times 10^3$	$3.0 \times 10^4$
N2	Sep. 1	EDR	$5.5 \times 10^3$	$5.0 \times 10^2$	$9.1 \times 10^3$

<sup>a</sup> 'D' symbolizes the daytime experiment and 'N' symbolizes the nighttime experiment.

<sup>b</sup> MR : Milky ripe, EDR : Early dough ripe, LDR : Late dough ripe.

<sup>c</sup> TFWT concentration at  $h_0$  / TFWT concentration at harvest

<sup>d</sup> Leaf sheaths are included in stem.

의 무게에 비해 표면적이 매우 컸기 때문에 초기 농도가 높았던 것으로 판단된다. 줄기의 경우 본 실험에서는 잎집(식물학적으로 잎의 기부에 해당하는 부분으로서 줄기를 둘러싸고 있음)을 포함함으로써 표면적에 비해 부피가 매우 컸기 때문에 초기 농도가 타 부위에 비해 매우 낮았던 것으로 보인다. Diabaté와 Strack[8]은 밀에서, 그리고 Kline과 Stewart[12]는 목초에서 이와 유사한 경향을 관찰한 바 있다.

피폭 후 10~20 시간 동안에는 TFWT 농도가 잎에서 가장 빠르게 감소하였고 대체로 이삭에서 가장 늦게 감소하였으나 나머지 기간 동안에는 이삭에서 가장 빨리, 줄기에서 가장 늦게 감소하였다. 따라서 피폭종료 직후부터 또는 1~2 시간 경과시부터 이삭의 TFWT 농도가 줄기와 잎에 비해 높아지기 시작하여 최고 수 백 배까지 높았다가 다시 크게 낮아져서 수확시에는 어느 경우나 이삭에서 가장 낮았고 줄기에서 가장 높았다.

TFWT 농도는 어느 부위에서나 대체로 처음 몇 시간 동안에는 매우 빨리 감소하다가 이후 감소속도가 점점 느려져 300~500시간 경과시부터는 거의 감소하지 않았다. 이러한 사실은 TFWT가 반감기가 서로 다른 두세 개의 구역에 속해 있다는 여러 연구자들의 보고[6,15]와 대체로 일치하는 것이다. 작물체내 TFWT 농도 감소는 주로 외기와 수분교환 및 증산작용에 기인하는 것으로 알려져 있다[12,15].

수확시 TFWT 농도는 피폭 직후에 비해 피폭 시기 및 부위에 따라 수백~수만 배 낮았다. 이러한 농도차를 감쇄계수로 나타낸 것은 표 2와 같다. 감쇄계수는 잎이나 이삭에서 가장 컸고 줄기에서 가장 낮았으며 이삭에서는 피폭시기가 수확기에 가까울수록 감소하였으나 경엽부에서는 이러한 경향이 없었다. 벼 이삭에서의 감쇄계수는 Strack 등[16]이 밀에 대하여 실험한 결과와 큰 차이가 없는 것이다. 수확시 작물체내 수분 함량은 습도 및 강우와 같은 기상조건에 따라 달라질 것이므로 TFWT 농도 및 TFWT 감쇄계수도 이와 함께 어느 정도 달라질 것이다.

#### 야간피폭

그림 2는 두 차례의 야간피폭 종료 직후부터 수확시까지 조사한 TFWT 상대농도를 나타내고 있다. 피폭종료 직후( $h_0$ ) TFWT 상대농도는 주간 피폭에 비해 부위에 따라 2~3 배 정도 낮았다. 이것은 야간에는 수증기의 통로인 기공이 거의 닫혀서 HTO 증기의 흡수가 크게 억제되기 때문이다[8]. 이로써 야간피폭의 경우 잎내 TFWT 농도가 평형에 도달하기 위해서는 1 시간보다 훨씬 긴 시간이 필요할 것으로 추정된다. 주간피폭에서와 유사하게 피폭종료 직후 N1의 경우 이삭에서의 TFWT 농도가 잎보다 약간 높아 이삭 > 잎 > 줄기의 순이었으나 N2의 경우에는 잎 > 이삭 > 줄기의 순이었다.

야간피폭에서는 피폭 후 수 시간 동안은 세 부

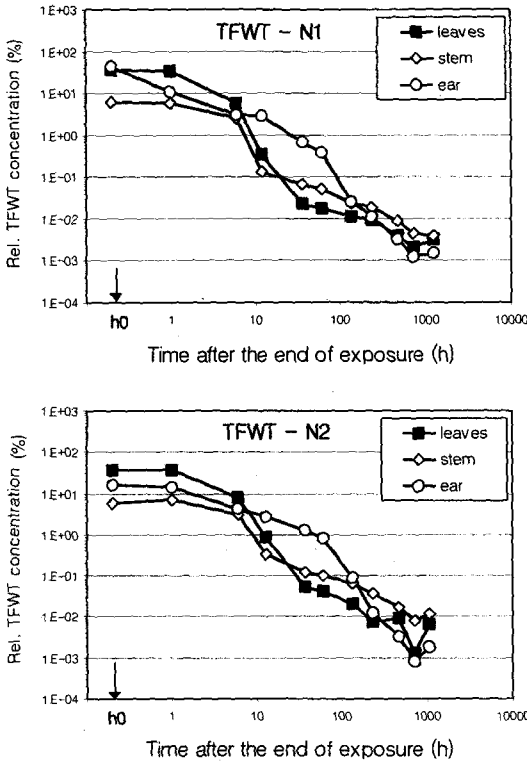


Fig. 2. TFWT concentrations in different parts of rice plants as a function of time after nighttime exposures to HTO vapor on Aug. 25 (N1) and Sep. 1 (N2). Data are relative values as the percent ratio of the TFWT concentration ( $Bq\ m^{-1}$ ) to the mean HTO concentration in the air moisture during exposure ( $Bq\ m^{-1}$ ).

위에서 모두 주간피폭에 비해 TFWT 농도가 느리게 감소하다가 그 이후 수십 시간 동안에는 특히 잎과 줄기에서 주간피폭보다 빨리 감소하였다. 이러한 차이는 피폭 후 주·야간 교체시점이 서로 다르기 때문이다. 야간에는 기공의 개도가 낮기 때문에 외기와의 수분교환 및 증산작용이 억제된다. 한편 N2에서는 피폭 종료후 이삭에서의 TFWT 농도가 잎에서보다 높아지는 데 걸리는 시간이 D2에 비해 몇 시간 길었다. 이것은 특히 잎에서 피폭 종료후 수시간 동안의 TFWT 농도 감소 속도가 주간피폭에 비해 크게 낮았기 때문이다.

수확시 TFWT 상대농도는 N1의 경우 D1에 비해 부위에 따라 3~4 배 낮았으나 N2의 경우 D2에 비해 이삭을 제외하고는 다소 높았다. 이러한 이유로 표 2에서와 같이 주간피폭과 야간피폭간 감쇄계수의 차이가 부위 및 피폭시기에 따라 달랐다. 즉 N1에서는 감쇄계수가 D1에 비해 부위에

따라 비슷하거나 다소 컸으나 N2에서는 D2에 비해 2~6 배 정도 낮았다. 부위간에 수확시 TFWT 농도는 주간피폭과 마찬가지로 줄기가 가장 높았고 이삭이 가장 낮았다.

**작물체내 OBT 농도**

**주간피폭**

벼의 주간 피폭실험 후 작물체 부위별로 조사

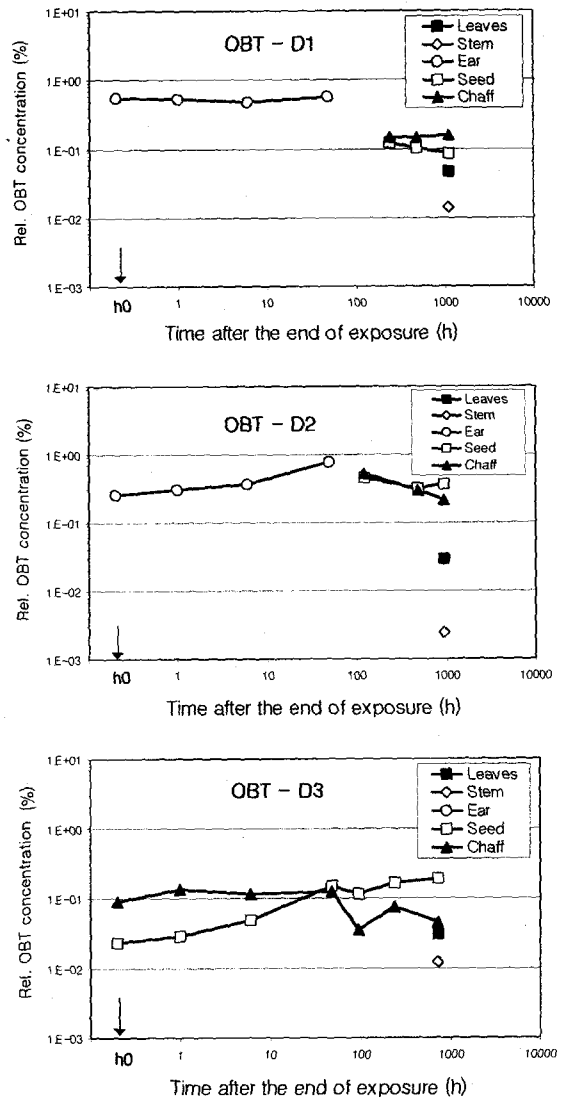


Fig. 3. OBT concentrations in different parts of rice plants as a function of time after daytime exposures to HTO vapor on Aug. 25 (D1), Sep. 1 (D2) and Sep. 10 (D3). Data are relative values as the percent ratio of the OBT concentration ( $Bq\ m^{-1}$ - combustion water) to the leaf HTO concentration at the end of exposure ( $Bq\ m^{-1}$ ).

한 OBT 농도의 변화는 그림 3에 나타나 있다. OBT 농도도 상대농도로서 피폭종료 직후 잎의 TFWT 농도( $Bq\ ml^{-1}$ )에 대한 건조시료 연소수내 OBT 농도( $Bq\ ml^{-1}$ )의 백분율로 나타내었다[8]. 이것은 잎의 광합성에 의한 TFWT의 OBT로의 전환이 작물체내 OBT의 가장 중요한 생성 기작이라는 사실[5,6]에 입각한 것이다.

피폭종료 직후 이삭(왕겨+쌀알)내 OBT 상대농도는 종실 발육초기에 피폭이 이루어진 D1에서 0.55%로 가장 높았고 D3에서 0.038%로 가장 낮았다. 이것은 D1 피폭시 왕겨내 엽록소가 가장 풍부하여 광합성이 제일 활발했을 뿐만 아니라 왕겨내 내용물도 적어 단위 건조물 당 OBT 함량이 가장 높았으나 D3에서는 이와 반대였기 때문인 것으로 판단된다[17].

시간 경과에 따른 이삭내 OBT 농도의 변화 양상은 피폭시기에 따라 다소 달랐다. D1에서 피폭종료후 약 50 시간 경과시부터 약 100 시간 경과시까지의 사이에 이삭내 OBT 농도가 크게 감소한 것과 D2에서 피폭 종료후 약 50 시간 경과 이후부터 서서히 감소한 것은 새로이 생성된 동화물질이 쌀알로 전류·축적되어 OBT 농도가 희석되었기 때문인 것으로 판단된다. D3에서는 쌀알내 OBT 농도가 왕겨와 달리 수확시까지 계속 증가하는 경향이었고 이에 따라 수확시에는 피폭종료 직후와 반대로 쌀알내 OBT 농도가 왕겨보다 4 배 정도 높았다. 이것은 D3 피폭시는 쌀알 무게의 증가가 크게 둔화된 시기였으므로 이후 동화물질의 축적에 의한 희석작용도 크게 완화되었기 때문이다. 이와 같은 농도변화 양상의 차이에 따라 수확시 이삭(왕겨+쌀알)의 OBT 농도가 D1에서는 피폭 종료 직후에 비해 크게 낮았으나 D2와 D3에서는 비슷하거나 다소 높았다.

부위 간에 수확시 OBT 농도는 어느 경우이나 이삭(왕겨+쌀알) > 잎 > 줄기의 순이었다. 피폭시기별 수확시 쌀알내 OBT 상대농도는 D1에서는 0.086%에 불과하였으나 D2에서는 0.37%로 최고였고 D3에서는 0.19%로 감소하였다. D2에서 가장 높은 값을 보인 것은 D2 피폭일인 9월 1일은 쌀알의 발육이 가장 왕성한 시기로서 잎내 OBT 농도가 가장 높은 시기인 피폭 종료후 수일 동안 잎으로부터 쌀알로의 OBT 전류가 세 시기 피폭중 가장 활발하였기 때문인 것으로 보인다. D2에서 수확시 경엽부과 쌀알 간에 OBT 농도차가 가장 컸던 것은 이러한 사실을 뒷받침하고 있다. Diabaté와 Strack[8]도 밀의 수확시 OBT 상대농도가 HTO 피폭시기에 따라 큰 차이

가 있으며 밀알의 발육 최성기 피폭시 최고였다고 보고하였다.

### 야간피폭

두 차례에 걸친 야간피폭 후 시간경과에 따라 벼의 부위별로 OBT의 상대농도를 조사한 것은 그림 4에 나타나 있다. 피폭종료 직후 이삭내 OBT 상대농도는 주간피폭의 1/3 정도에 불과하였지만 암흑하에서도 OBT가 생성된다는 사실이 확인되었다. 이것은 광합성 이외의 작물체 대사작용에 의해서도 OBT가 생성될 수 있다[8,18]는 것을 말해준다.

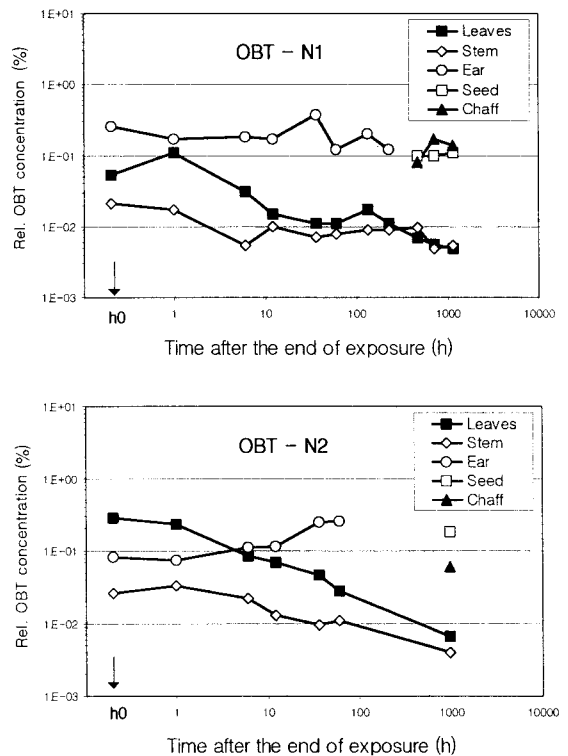


Fig. 4. OBT concentrations in different parts of rice plants as a function of time after nighttime exposures to HTO vapor on Aug. 25 (N1) and Sep. 1 (N2). Data are relative values as the percent ratio of the OBT concentration ( $Bq\ ml^{-1}$ - combustion water) to the leaf HTO concentration at the end of exposure ( $Bq\ ml^{-1}$ ).

OBT 농도는 8월 25일 피폭(N1)에서는 전 기간에 걸쳐 대체로 이삭 > 잎 > 줄기의 순으로 높았고 9월 1일 피폭(N2)에서는 피폭종료 후 초기에는 잎 > 이삭 > 줄기의 순이었다가 5 시간 정도 경과시부터는 계속하여 이삭 > 잎 > 줄기의

순이었다. 수확시에는 N1과 N2에서 모두 이삭(왕겨+쌀알)내 OBT 농도가 벳짚(잎+줄기)보다 10 배 이상 높았다.

피폭종료 직후 이삭내 OBT 농도는 주간피폭 (D1과 D2)에서와 비슷하게 N1에서 N2보다 3 배 정도 높았다. N1과 N2에서 모두 이삭내 OBT 농도는 피폭종료후 13 시간 경과시부터 며칠간 비교적 빨리 증가하다가 이후 수확기까지 서서히 감소하는 경향이었고 경엽부내 OBT 농도는 대체로 처음부터 수확기까지 서서히 감소하는 경향이 있었다. 수확기 때 쌀알의 OBT 농도는 N2가 N1보다 두 배 정도 높았으나 경엽부내 OBT 농도는 N1과 N2 간에 큰 차이가 없었다.

야간피폭시 수확기 쌀알의 OBT 상대농도는 8 월 25일 피폭의 경우 주간피폭과 큰 차이가 없었으나 9월 1일 피폭의 경우 주간피폭의 반 정도에 불과하였다. 이와 같은 사실은 쌀알의 급성장기에 벳가 HTO에 피폭될 경우 피폭 후 수 시간 동안의 광합성 정도에 따라 쌀알내 OBT 축적 정도가 비교적 크게 달라질 수 있음을 보여주고 있다. 수

확기 쌀알내 OBT 농도(Bq ml<sup>-1</sup>)를 피폭시 공기 수분중 평균 HTO 농도(Bq ml<sup>-1</sup>)에 대한 백분율로 표시하면 야간피폭의 경우 8월 25일 피폭에서는 0.038%, 9월 1일 피폭에서는 0.068%로서 각각 0.095% 및 0.32%를 기록한 주간피폭에 비해 수 배 낮았다. 이것은 야간피폭이 주간피폭에 비해 OBT에 의한 쌀알 소비자의 방사선 피폭 측면에서 영향이 훨씬 작다는 것을 말하고 있다.

**TFWT와 OBT의 선량 기여도**

표 3은 주간 및 야간 피폭에 있어서 피폭종료 직후 및 수확시 OBT와 TFWT 간 비방사능 비를 부위별로 조사한 것이다. 단 TFWT 분석시 이삭은 OBT 분석시와는 달리 이삭 줄기까지 포함하고 있었으므로 이삭(왕겨+쌀알)의 비방사능 비는 표 3에 나타난 것과는 약간 차이가 있을 것이다.

피폭종료 직후에는 OBT 농도(Bq ml<sup>-1</sup>)가 TFWT 농도(Bq ml<sup>-1</sup>)보다 부위 및 피폭시기에 따라 200~2000 배 정도 낮았으나 수확시에는

Table 3. Specific activity ratios between OBT and TFWT in different parts of rice plants at the end of their exposure to HTO vapor (hour 0) and at harvest.

Code of exposure <sup>a</sup>	Time of exposure		Sampling time	Specific activity ratio (OBT/TFWT) <sup>c</sup>		
	Date	Stage <sup>b</sup>		Leaf	Stem <sup>d</sup>	Ear <sup>e</sup>
D1	Aug. 25	MR	hour 0	-	-	5.0×10 <sup>-3</sup>
			harvest	5.5×10 <sup>0</sup>	9.4×10 <sup>-1</sup>	2.1×10 <sup>1</sup>
D2	Sep. 1	EDR	hour 0	-	-	5.4×10 <sup>-3</sup>
			harvest	8.8×10 <sup>0</sup>	3.8×10 <sup>-1</sup>	5.9×10 <sup>1</sup>
D3	Sep. 10	LDR	hour 0	-	-	8.7×10 <sup>-4</sup>
			harvest	3.8×10 <sup>0</sup>	8.5×10 <sup>-1</sup>	3.7×10 <sup>1</sup>
N1	Aug. 25	MR	hour 0	5.3×10 <sup>-4</sup>	1.2×10 <sup>-3</sup>	2.0×10 <sup>-3</sup>
			harvest	5.4×10 <sup>-1</sup>	4.9×10 <sup>-1</sup>	3.3×10 <sup>1</sup>
N2	Sep. 1	EDR	hour 0	2.9×10 <sup>-3</sup>	1.6×10 <sup>-3</sup>	1.8×10 <sup>-3</sup>
			harvest	3.6×10 <sup>-1</sup>	1.3×10 <sup>-1</sup>	3.2×10 <sup>1</sup>

<sup>a</sup> 'D' symbolizes the daytime experiment and 'N' symbolizes the nighttime experiment.  
<sup>b</sup> MR : Milky ripe, EDR : Early dough ripe, LDR : Late dough ripe.  
<sup>c</sup> OBT concentration (Bq ml<sup>-1</sup>-combustion water) / TFWT concentration (Bq ml<sup>-1</sup>)  
<sup>d</sup> Leaf sheathes are included in stem.  
<sup>e</sup> When necessary, ear OBT concentrations were described in the weighted mean for seed and chaff OBT concentrations.



OBT 농도가 이삭의 경우 오히려 전체적으로 20~60 배 가량 높았고 잎의 경우에도 주간 피폭에서는 대체로 수 배 높았으나 야간 피폭에서는 이와 반대였고 줄기의 경우에는 전반적으로 OBT 농도가 TFWT 농도보다 낮았다. 수확시 잎에서의 비방사능 비가 주간피폭에서 야간피폭에 비해 훨씬 큰 것은 잎의 광합성이 OBT 생산의 가장 중요한 기작이라는 사실과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

인체는 쌀알의 직접 소비와 가축의 경엽부 이용에 따른 간접 소비를 통하여 벼에 함유된  $^3\text{H}$ 를 섭취하게 된다. 수확시에는 이삭 무게의 대부분이 쌀알이고 또한 쌀알내 OBT 농도는 왕겨와 대체로 비슷하거나 다소 높았으므로 쌀알의 OBT와 TFWT 간 비방사능 비는 이삭보다 적어도 크게 낮지는 않을 것으로 추정된다. 또한 수확시 쌀알의 수분 함량은 대체로 20% 미만이고 선량환산인자는 OBT가 TFWT보다 2~3 배 정도 큰 것 [6,19]으로 알려져 있으므로 쌀알 소비에 따른 내부피폭은 거의 전부 OBT에 기인하는 것으로 볼 수 있겠다. 벼의 수확후 건조 및 저장이나 쌀알의 조리에 따른 TFWT 농도의 감소까지 고려하면 OBT의 기여도는 더욱 높아질 것이다.

한편 가축이 수확한 벼의 경엽부를 섭취하면 경엽부 TFWT의 대부분은 가축의 TFWT pool에 속하게 되고 일부만이 동물 OBT로 전환되며 경엽부 OBT는 HTO로 산화되거나 동물 OBT로 전환된다. 이 때 경엽부 OBT가 TFWT보다 더 효과적으로 동물 OBT로 전환되고 동물체내에서의 생물학적 반감기는 OBT가 TFWT보다 훨씬 긴 것으로 알려져 있다[6]. 이런 점들과 다른 벼짚의 낮은 수분 함량 및 저장 기간, OBT와 TFWT 간 선량환산인자의 차이 등을 고려할 때 간접 소비에 있어서도 OBT의 선량 기여도가 TFWT보다 클 것으로 보인다.

벼의 수확시 쌀알과 경엽부 간 OBT 농도의 차이 (그림 3 및 4) 및 간접소비시 가축 경로를 통한  $^3\text{H}$  농도 회석효과, 쌀알과 축산물의 섭취량 차이 등을 고려할 때 간접소비를 통한 피폭선량은 직접소비에 비해 크게 낮을 것으로 예상된다. 따라서 직접소비와 간접소비를 합칠 경우에도 OBT의 영향이 TFWT보다 훨씬 클 것으로 판단된다. 단 OBT와 TFWT의 상대적 중요도는 피폭 시기가 생육초기이거나 수확기에 가까울 때에는 본 연구결과와 다르게 나타날 수도 있으므로 유의해야 할 것이다.

## 결 론

벼의 지상부가 사고로 방출된 HTO 증기에 노출될 때 쌀알의 발육단계 및 일광 조건이 작물체의 HTO 흡수와 TFWT 및 OBT 준위에 미치는 영향을 조사하기 위하여 야외에서 포트에 기른 벼를 주간 및 야간에 쌀알의 발육단계별로 피폭 상자 안에서 1 시간 동안 HTO 증기에 피폭시켰다.

작물체의 HTO 흡수는 부위간 및 피폭시간에 차이가 있었고 야간피폭에서는 주간피폭의 약 1/3 수준으로 일광에 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 주간피폭에서 일광이 충분할 경우 벼의 잎내 TFWT 농도는 피폭 개시후 대체로 1시간 이내에 평형에 도달하는 것으로 추정되었다. 주·야간 피폭에서 모두 피폭 종료후 TFWT 농도의 감소속도는 시간 경과에 따라 점점 늦어져 TFWT가 반감기가 서로 다른 두세 개의 구역에 속해 있다는 것을 보여 주었다. 수확시 TFWT 농도는 주·야간 피폭 모두 줄기 > 잎 > 이삭의 순이었고 피폭 종료 직후에 비해 피폭시기 및 부위에 따라 수백~수만 배 낮았다. 이와 같은 TFWT 감쇄 정도는 특히 수확시의 강우 또는 습도에 따라 다소 달라질 수 있을 것이다.

야간 피폭중에도 OBT가 생성된다는 것이 관찰됨으로써 광합성 이외의 기작에 의해서도 TFWT가 OBT로 합성된다는 사실이 확인되었다. OBT 농도는 수확시까지 부위 및 피폭시기에 따라 수~수십 배 감소하거나 다소 증가하는 양상을 보였다. 수확시 쌀알내 OBT 농도는 경엽부에 비해 피폭시기에 따라 수~수십 배 높았다. 공기중 HTO로부터 수확시 쌀알내 OBT로의 전환 정도는 주간피폭에서 야간피폭보다 수 배 높았고 주·야간 피폭 모두 쌀알의 발육 최성기 피폭시에 가장 높았다. 쌀알의 발육기에 공기중 HTO에 노출된 벼의 소비를 통한 인체의 섭취피폭선량은 대부분 OBT에서 비롯되며 TFWT의 영향은 아주 작을 것으로 예상되었다.

본 실험에서는 사고현장의 재현에 있어서 다소 비현실적인 부분이 있었으나 피폭 당시의 제 조건을 비교적 상세히 조사하고 수확시까지 시간경과에 따라 수많은 시료들을 채취·분석함으로써 사고시 작물체내  $^3\text{H}$  예측 모델의 수립에 유용한 기초자료를 생산할 수 있었다. 또한 이 자료들은 이미 수립된 모델의 검증에도 활용될 수 있을 것으로 본다.

## 감사의 글

이 연구는 과학기술부가 시행한 원자력증장기 연구개발사업의 결과입니다.

## 참고문헌

1. NCRP, Tritium in the environment. NCRP Report No. 62, Washington, D. C. (1979).
2. S. Okada and N. Momoshima, Overview of tritium: characteristics, sources, and problems. *Health Physics* 65, 595-609 (1993).
3. C. E. Murphy Jr., Tritium transport and cycling in the environment, *Health Physics* 65(6), 683-697 (1993).
4. J. A. Garland and L. C. Cox, The absorption of tritium gas by English soils, plants and the sea, *Water, Air and Soil Pollution* 14, 103-114 (1980).
5. S. Diabaté and S. Strack, Organically bound tritium. *Health Physics* 65, 698-712 (1993).
6. S. Diabaté and S. Strack, Doses due to Tritium Releases by NET- Data Base and Relevant Parameters on Biological Tritium Behaviour. KfK 4713, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990).
7. H. Amano, M. Atarashi, H. Noguchi, S. Yokoyama, Y. Ichimasa and M. Ichimasa, Formation of organically bound tritium in plants during the 1994 chronic HT release experiment at Chalk River, *Fusion Technology*, 28, 803-808 (1995)
8. S. Diabaté and S. Strack, Organically bound tritium in wheat after short-term exposure to atmospheric tritium under laboratory conditions, *J. environ. Radioactivity* 36, 157-175 (1997).
9. 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. of Environmental Radioactivity*, 58, 67-85 (2002).
10. N. A. Higgins, P. V. Shaw, S. M. Haywood and J. A. Jones, TRIF a Dynamic Model for Predicting the Transfer of Tritium through the Terrestrial Foodchain, NRPB-R278, NRPB (1996).
11. S-R. Peterson and P. A. Davis, Modelled concentrations in rice and ingestion doses from chronic atmospheric releases of tritium, *Health Physics*, 78, 533-541 (2000)
12. J. R. Kline and M. L. Stewart, Tritium uptake and loss in grass vegetation which has been exposed to an atmospheric source of tritiated water, *Health Physics*, 26, 567-573 (1974).
13. 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).
14. H. Amano and C. T. Garten Jr., Uptake of tritium by plants from atmosphere and soil, *Environmental International*, 17, 23-29 (1991).
15. J. Guenot and Y. Belot, Assimilation of  $^3\text{H}$  in photosynthesizing leaves exposed to HTO, *Health Physics*, 47, 849-855 (1984).
16. S. Strack, S. Diabaté, J. Mueller and W. Raskob, Organically bound tritium formation and translocation in crop plants - modelling and experimental results, *Fusion Technology*, 28, 951-956 (1995).
17. S. Yoshida, Fundamentals of Rice Crop Science, *The International Rice Research Institute, Laguna, Philippines* (1981).
18. V. Moses and M. Calvin, Photosynthesis studies with tritiated water. *Biochim. Biophys. Acta*, 33, 297-312 (1959).
19. International Atomic Energy Agency, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).