

우리나라 주요 밭작물에 대한 ⁹⁹Tc의 토양-작물체 전이계수

최용호, 임광목, 전인, 금동권
한국원자력연구원

2011년 4월 20일 접수 / 2011년 9월 30일 1차 수정 / 2011년 10월 4일 채택

우리나라 주요 밭작물(콩, 무, 배추)에 대한 ⁹⁹Tc의 토양-작물체 전이계수(TF)를 조사하기 위하여 온실 내에서 포트실험을 수행하였다. 토양은 경주 방폐장 주변 네 곳(콩 두 곳, 무 및 배추 두 곳)의 밭에서 채취하였다. 파종 3-4 주 전에 건조 토양을 ⁹⁹Tc 용액과 혼합한 다음 포트에 담고 관개하였다. TF 값은 건조 토양 중 ⁹⁹Tc 농도(Bq kg⁻¹-dry)에 대한 작물체 내 농도(Bq kg⁻¹-dry or fresh)의 비로 나타내었다. TF 값은 토양 간에 큰 차이가 없었다. 콩알의 TF 값은 경엽부에 비해 극히 낮아 ⁹⁹Tc의 종실로의 이동성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 콩알, 무 뿌리, 무 잎 및 배추 잎에 대한 ⁹⁹Tc 전이계수의 대표치가 각각 두 토양에 대한 산술평균치인 1.8×10⁻¹, 1.2×10¹, 3.2×10², 1.3×10²(건조 작물체 기준)로 제안되었다. 채소류의 경우 신선 작물체에 대한 대표치도 제안되었다. 본 제안치는 대표성이 충분치 못하므로 지속적으로 최신화 할 필요가 있다.

중심어: ⁹⁹Tc, 콩, 무, 배추, 전이계수

1. 서론

테크네튬-99(technetium-99, ⁹⁹Tc)는 반감기(2.1×10⁵년)가 매우 길므로 중저준위 방사성 폐기물 처분 시 주요 관심 핵종으로 되어 있다[1,2]. 또한 ⁹⁹Tc는 사용후 핵연료에 비교적 많이 함유되어 있으므로 재처리나 고준위폐기물 처분에 대한 환경영향 평가에 있어서도 중요한 핵종이다[3,4].

Tc는 밭과 같이 산소가 풍부한 유기조건의 토양에서는 주로 TcO₄와 같은 산화형으로 존재하고[5] 논과 같이 산소가 소진된 무기조건의 토양에서는 주로 TcO₂와 같은 환원형으로 존재한다[6]. 전자는 후자와 달리 토양 내에서 점토나 유기물과 같은 기질에 흡착하지 않고 토양 용액 속에 녹아 있어 작물체의 뿌리를 통하여 매우 잘 흡수되는 것으로 알려져 있다[5,7].

토양으로부터 방사성 핵종의 뿌리흡수는 통상 토양 중 핵종 농도(Bq kg⁻¹)에 대한 작물체 내 농도(Bq kg⁻¹)의 비로 정의되는 토양-작물체 전이계수(transfer factor, TF)로 평가되고 있다[8,9]. 농경지에 침적된 방사성 핵종은 밭갈이에 의해 상층토와 섞이게 된다. 따라서 TF 값은 방사성 핵종이 대체로 밭갈이 정도의 깊이로 잘 혼합된 토양에서 작물을 재배하여 측정한다[9-11]. 이렇게 구한 TF 값을 밭갈이 깊이의 토양 내에 균일하게 분포하고 있는 것으로 가정하고 계산한 토양 중 방사성 핵종의 농도에 곱해 줌으로써 작물체 내 농도를 산정할 수 있다.

밭작물에 대한 ⁹⁹Tc의 토양-작물체 전이계수는 구미나 일본과 같은 원자력 선진국을 중심으로 조사되어 세계적으로 적지 않은 자료가 생산되어 있다[7,9,10,12]. 그러나 TF 값은 재배 환경이나 작물 종에 따라 크게 다를 수 있으므로 평가의 신뢰도 향상을 위해서는 국내 또는 부지 고유의 자료를 생산, 사용할 필요가 있다. 우리나라에서는 ⁹⁹Tc의 경우 며 전이계수에 대해서는 조사, 발표된 것[11]이 있으나 밭작물에 대해서는 조사가 전무한 실정이다.

본 연구에서는 경주 방사성 폐기물 처분장(이하 방폐장이라 함) 주변 밭 토양에서의 주요 작물들에 대한 ⁹⁹Tc의 전이계수를 조사코자 실험온실 내에서 포트재배를 통하여 무, 배추, 콩에 대한 ⁹⁹Tc 흡수실험을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 토양 채취

2010년 4월에 방폐장 주변 반경 5 km 이내 지역에 분포하는 네 곳의 밭에서 실험에 사용할 토양을 채취하였다. 콩 재배용 토양은 구길리(Gookil-ri)와 상라리(Sangra-ri)의 밭에서, 배추와 무 재배용 토양은 대본리(Daebon-ri)와 읍천리(Eupcheon-ri)의 밭에서 채취하였다(그림 1). 콩의 경우 수 년에 걸쳐 콩을 재배하던 밭이었고 배추와 무의 경우에도 동일 작물을 재배한 적이 있는 밭이었다. 토양의 채취 및 처리 방법은 최 등[11]이 기 보고한 바와 같다. 표 1은 실험 토양의 물리·화학적 특성을 나타내고 있다.

교신저자 : 최용호, yhchoi1@kaeri.re.kr
대전시 유성구 대덕대로 1045 한국원자력연구원 원자력환경안전연구부

Table 1. Physicochemical Properties of the Experimental Soils.

Soil	pH (1:5)	OM* (%)	CEC [†] (cmol kg ⁻¹)	EC [‡] (cmol kg ⁻¹)			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture [§]
				Ca	Mg	K				
Gookil	6.7	5.2	24.1	12.6	7.9	2.3	30.1	55.9	14.0	SiL
Sangra	6.1	5.6	22.1	7.3	4.3	2.4	57.1	30.5	12.4	SL
Daebon	4.7	2.3	15.9	1.9	1.3	1.2	31.7	41.8	26.5	CL
Eupcheon	7.2	2.6	30.2	13.6	9.9	1.8	19.5	47.6	32.9	CL

*Organic matter

[†] Cation exchange capacity

[‡] Exchangeable cation

[§]CL: Clay loam, SiL: Silt loam, SL: Sandy loam.

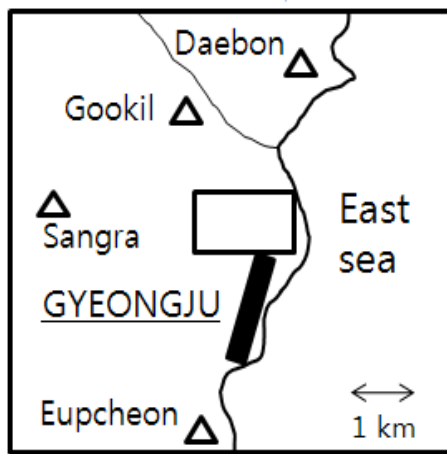


Fig. 1. Map of four sampling sites (△) around Gyeongju radioactive waste disposal facilities (□) and Wolsung nuclear power plants (■). Distances and locations may not be exact due to approximation.

2.2. 작물 재배

실험 작물을 육성하기 위하여 오염 토양(⁹⁹Tc와 혼합된 토양)이 담긴 플라스틱 포트(윗내경 31 cm, 아래내경 27 cm, 높이 30 cm)를 실험온실 내에 3 반복으로 배치하고 파종하였다. 대조용 작물은 동일한 포트에 비오염 토양을 담고 파종, 육성하였다. 포트의 개수는 총 24 개로 작물 별로 오염 토양이 여섯 포트, 비오염 토양이 두 포트였다. 파종하기 3-4 주 전에 건조 상태의 오염토 또는 비오염토를 포트 당 20 kg씩 담고 급수하여 토양의 수분이 파종에 적당한 상태가 되도록 하였다. 급수에 의해 토양의 높이는 다소 하강하여 25 cm 내외로 되었다. 파종일은 콩의 경우 6월 16일, 무와 배추의 경우 8월 26일이었다. 상자 당 콩은 세 구멍, 무와 배추는 한 구멍에 각각 수 립씩 파종하고 생육 초기에 적절히 솎아 내어 구멍 당 콩은 두 개체(상자 당 여섯 개체), 무와 배추는 한 개체를 육성하였다.

시비는 콩의 경우 전량 기비로 파종 5 일 전에 포트 당 부숙퇴비 70 g, 소석회 14 g, 콩재배용 복합비료 3.5 g(질소 8%, 인산 8%, 가리 9%, 고토 1%, 붕소 0.2%, 규산 7%, 석회 11%)을 상층부 토양과 잘 섞어 주었다. 무와 배

추의 경우 기비로는 파종 6 일 전에 포트 당 부숙퇴비 70 g, 소석회 14 g, 원예용 복합비료 3 g(질소 10%, 인산 6%, 가리 7%, 고토 1%, 붕소 0.2%, 규산 5%, 석회 10%)을 위와 같이 섞어 주었고 추비로는 파종 후 36 일 및 70 일에 같은 복합비료 2.5 g을 지표에 뿌려 주었다. 세 작물 모두 지표와 작물체의 상태에 따라 1-3 일 정도에 한 번씩 충분히 급수하였고 전 생육기간에 걸쳐 살균제와 살충제를 서너 차례 작물체에 살포하였다. 또한 유리 재배실의 모든 창문은 떼어 내고 상부에 3 대의 전기 환풍기를 작동함으로써 환기를 꾀하고 온도 상승을 억제하였다.

2.3. ⁹⁹Tc 처리

콩의 경우 파종 전 27 일에, 무와 배추의 경우 파종 전 23 일에 포트 당 ⁹⁹Tc 수용액 30 ml(23.1 kBq ml⁻¹)과 건조토양 400 g을 반구형 혼합기로 5 분 간 잘 섞어 전혼합토(pre-mix)를 제조하였다. 다음 날, 각 포트에 대한 전혼합토와 건조 토양 19.6 kg을 V 형 토양혼합기를 이용하여 10 분 간 섞었다. 이 토양혼합기에서는 V 형 용기와 이것을 관통하는 날개 달린 축이 서로 반대 방향으로 회전함으로써 균일도 높은 혼합이 이루어지는 것으로 확인된 바 있다[11]. 혼합에 따른 토양 내 ⁹⁹Tc 농도는 34.7 kBq kg⁻¹-dry로 계산된다. 이렇게 제조된 오염 토양을 포트에 바로 옮겨 담고 위와 같이 급수하고 시비하였다.

2.4. 시료 처리 및 분석

콩은 파종 후 119일(10월 13일)에 포트의 지표로부터 약 7-8 cm 높이에서 낫으로 줄기를 베어 작물체를 채취한 다음 줄기, 잎, 콩각지, 콩알로 분리하여 온실 내에서 약 4 주 간 자연 건조하였다. 건조한 콩알은 액체질소로 급속 동결한 다음 막자사발을 이용하여 분쇄하였고 다른 부위들의 경우 믹서기로 잘게 분쇄하였다. 무는 뿌리째 뽑아 뿌리와 경엽부로 나누고 뿌리에 묻은 흙을 물 세척과 칫솔질로 깨끗이 제거하였다. 그 다음 두 부위 모두 적당한 크기로 잘라 위와 같이 자연 건조한 후 95℃의 건조기에서 재차 건조하고 가위와 막자사발을 이용하여 잘게 분쇄하였다. 배추 시료는 지상부만 취하여 하부의 흙을 깨끗이 제거하고 잎사귀들을 하나씩 분리한 다음 무와 같은 방법으로 건조, 분쇄하였다.

분쇄된 작물체 시료를 회화하여 얻은 회분 시료에 대하여 전배타 계측을 실시하였다. 회화시 ⁹⁹Tc의 산화, 증발로 인한 손실을 방지하기 위하여 적당량의 분쇄 시료를 회화용기에 담고 시료가 완전히 잠길 정도로 암모니아수(비중 0.88)를 가한 다음 파라 필름으로 봉하고 1 일 간 방치한 후 필름을 제거하고 서서히 가열하여 암모니아수를 증발시키고 건조 시료를 얻었다. 건조된 시료는 전기로에서 회화하였다. 이때 250℃에서 온도를 1 시간에 50℃씩 상승시켜 550℃에 이른 다음 2 시간 더 경과시켰다. 이상과 같은 시료 처리 및 회화법은 기 보고[11]에서 사용하였던 방법이다

회분 시료 0.1 g을 직경 5 cm의 planchet에 담고 증류수와 콜로디온 용액으로 처리하여 planchet 바닥에 골고루 펴서 건조, 침착시킨 다음 low-background alpha/beta counter (LB-5100, TENNELEC)로 30 분 간 베타선을 계측하였다. 대조용 작물체도 위와 똑 같이 처리, 계측하여 background 계수치를 확보하였다. 오염토양 작물체에 대한 계수치에서 background 계수치를 제하여 순 계수치를 얻어 ⁹⁹Tc 농도 계산에 사용하였다. 계측오차는 5% 내외였다.

2.5. 전이계수 계산

⁹⁹Tc의 토양-작물체 전이계수(TF, dimensionless) 값은 부위별로 아래와 같이 구하였다.

$$TF = \frac{\text{작물체 내 핵종 농도 (Bq/kg - dry or fresh)}}{\text{토양 내 핵종 농도 (Bq/kg - dry)}} \quad (1)$$

위 식에서 작물체 내 농도는 수확 시 농도이고 토양 내 농도는 토양과의 혼합 직후 농도를 붕괴에 대해 보정하여 작물 수확 시 농도로 환산한 것이다. 본 연구에서 ⁹⁹Tc는 반감기가 매우 길어 붕괴 보정이 사실상 필요치 않았으나 특정 방사성 원소에 대한 결과를 그것의 모든 동위원소에 그대로 적용하기 위해서는 위와 같은 붕괴 보정이 필요하다. 전이계수 값은 작물의 부위 및 토양 별로 3 반복의 산술평균과 표준편차로 나타내었다.

IAEA[9]가 최근에 발간한 핸드북에서는 건조 작물체 기준의 전이계수 값만을 제시하고 있으나 엽채류의 경우 신선 작물체에 대한 전이계수 값이 보다 실용적일 것으로 판단되어 본 연구에서는 두 가지 값을 모두 제시하였고 콩의 경우에는 거의 건조 상태로 수확되므로 건조 작물체 기준의 값만을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ⁹⁹Tc의 콩 전이계수

농작물을 파종하기 전에 발갈이에 의해 방사성 핵종이 상부 토양과 섞이는 것을 모사하기 위하여 ⁹⁹Tc 용액을 토양과 잘 혼합하고 콩을 파종한 다음 작물체를 재배, 수확하여 구한 ⁹⁹Tc의 TF 값은 표 2와 같다. 구길리 토양에서는 수확 전에 잎이 모두 탈락하여 잎에 대한 TF 값을 구할 수 없었다. 상라리 토양에서도 수확 시 세 포트 중 한 포트에서만 잎 시료의 확보가 가능하여 단일치로만 나타낼 수 있었다.

Table 2. TF (Transfer Factor) Values of ⁹⁹Tc for Different Parts of Soybean Plants.

Soil	TF values of ⁹⁹ Tc for soybean*			
	Seeds	Shells	Stems	Leaves†
Gookil	1.6×10 ⁻¹ ± 1.5×10 ⁻²	6.7×10 ⁰ ± 9.1×10 ⁻¹	1.3×10 ¹ ± 1.8×10 ⁰	-
Sangra	2.0×10 ⁻¹ ± 3.1×10 ⁻²	9.5×10 ⁰ ± 1.0×10 ⁰	2.1×10 ¹ ± 3.2×10 ⁰	1.2×10 ²
AM / GM‡	1.8×10 ⁻¹ / 1.8×10 ⁻¹	8.1×10 ⁰ / 7.9×10 ⁰	1.7×10 ¹ / 1.6×10 ¹	-

* Bq kg⁻¹-dry plant per Bq kg⁻¹-dry soil

† The values for each soil are the arithmetic means and standard deviations of three replicated results except for leaves.

‡ Severe defoliation at maturity led to a total or partial failure in data production.

‡ AM: arithmetic mean, GM: geometric mean.

Table 3. TF (Transfer Factor) Values of ⁹⁹Tc for Different Parts of Radish Plants.

Soil	TF values of ⁹⁹ Tc for radish*			
	Fresh plants		Dry plants	
	Roots	Leaves	Roots	Leaves
Daebon	8.0×10 ⁻¹ ± 5.6×10 ⁻²	3.1×10 ¹ ± 1.1×10 ⁰	1.1×10 ¹ ± 1.4×10 ⁰	3.5×10 ² ± 2.7×10 ¹
Eupcheon	1.0×10 ⁰ ± 1.2×10 ⁻¹	2.6×10 ¹ ± 5.5×10 ⁻¹	1.3×10 ¹ ± 2.9×10 ⁰	3.0×10 ² ± 1.4×10 ¹
AM / GM†	9.0×10 ⁻¹ / 9.0×10 ⁻¹	2.8×10 ¹ / 2.8×10 ¹	1.2×10 ¹ / 1.2×10 ¹	3.2×10 ² / 3.2×10 ²

* Bq kg⁻¹-fresh or dry plant per Bq kg⁻¹-dry soil

† The values for each soil are the arithmetic means and standard deviations of three replicated results.

† AM: arithmetic mean, GM: geometric mean.

Table 4. TF (Transfer Factor) Values of ⁹⁹Tc for Different Parts of Chinese Cabbage Plants.

Soil	TF values of ⁹⁹ Tc for Chinese cabbage*	
	Fresh leaves	Dry leaves
Daebon	1.1×10 ¹ ± 8.4×10 ⁻¹	1.4×10 ² ± 1.2×10 ¹
Eupcheon	8.8×10 ⁰ ± 8.1×10 ⁻¹	1.2×10 ² ± 9.7×10 ⁰
AM / GM [†]	9.6×10 ⁰ / 9.5×10 ⁰	1.3×10 ² / 1.3×10 ²

* Bq kg⁻¹-fresh or dry plant per Bq kg⁻¹-dry soil

* The values for each soil are the arithmetic means and standard deviations of three replicated results.

† AM: arithmetic mean, GM: geometric mean.

토양 간에 콩의 TF 값은 상라리 토양에서 구길리 토양에 비해 약간 높았다. 그러나 두 토양 간 TF 값의 차이가 크지 않아서 두 토양에 대한 산술평균값과 기하평균값이 거의 같았다. 발토양에서 ⁹⁹Tc의 흡착은 대체로 토양의 유기물 함량이 높고 pH가 낮을수록 증가하고[7,13] 또한 모래 함량이 낮고 점토 함량이 높을수록 증가하는 것으로 [14] 알려져 있다. 토양의 유기물 함량과 pH로 보면 본 실험 결과는 이와 반대이고 모래와 점토 함량으로 보면 이와 일치하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 두 토양 간 유기물 함량 및 pH의 차이는 ⁹⁹Tc의 실질적인 흡수 차이를 야기할 정도는 아니었을 가능성이 있다. 한편, 토양의 모래 함량이 높으면 상대적으로 나머지 구성 성분인 점토나 미사 함량이 높다. 이 세 가지 구성 성분 중 음이온의 주요 흡착부위인 점토의 경우 두 토양 간 함량 차이가 미미했던 것으로 미루어 볼 때 우점하는 점토 광물의 종류가 달랐을 것으로 추정해 볼 수 있다. 즉, 상라리 토양은 illite와 같이 음이온치환용량이 낮은 광물이 많았고 반대로 구길리 토양은 kaolinite와 같이 음이온치환용량이 높은 광물이 많았을 가능성이 있다[15].

작물체 부위별 TF 값은 잎 > 줄기 > 깍지 > 콩알의 순으로 줄기와 잎은 콩알보다 각각 100 배 및 600 배 정도나 높았다. 이와 유사한 경향이 여러 다른 작물에 대해서도 보고된 바 있다[7,12]. 따라서 ⁹⁹Tc는 작물체 내에서 종실로의 이동성이 매우 낮은 핵종으로 볼 수 있다. 뿌리흡수 정도는 비교적 높지만 작물체 내에서 종실로의 이동성은 비교적 낮은 것으로 알려져 있는 ⁹⁰Sr[16,17]에 대하여 최 등[18]이 pH 6.4의 사질양토에서 조사한 콩알 전이계수는 본 측정치보다 5 배 정도 높았으나 잎 전이계수는 본 측정치에 비해 14 배 정도나 낮았고 또한 줄기나 깍지의 경우에도 본 측정치에 비해 수 배 정도 낮았다. 이로써 ⁹⁹Tc는 ⁹⁰Sr보다도 작물체 내에서 종실로의 이동성은 훨씬 낮으나 토양으로부터의 흡수도는 높은 것으로 추정된다. ⁹⁹Tc의 흡수도가 이처럼 높은 것은 발 토양과 같은 산화조건(aerobic condition)의 토양에서는 ⁹⁹Tc가 주로 토양 기질에 잘 흡착되지 않는 TcO₄의 형태로 존재하여 가급도(availability)가 높기 때문이다[5,7].

3.2. ⁹⁹Tc의 무와 배추 전이계수

표 3과 4는 각각 무와 배추에 대하여 두 가지 토양에서의 ⁹⁹Tc 전이계수를 조사한 결과이다[19]. 두 작물 모두

TF 값이 토양 간에 큰 차이가 없었다. 이것은 토양의 pH, 유기물 함량 및 점토 함량 등의 차이가 상호 보완적으로 작용한 결과인 것으로 판단된다. 여기서도 두 토양에 대한 산술평균값과 기하평균값이 거의 똑 같았다.

무의 경우 잎의 TF 값이 뿌리에 비해 수 십 배 높았다. 이것은 뿌리를 통해 흡수된 ⁹⁹Tc가 뿌리로부터 지상부의 영양기관으로 매우 활발히 이동한다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 여러 작물에 대하여 보고되어 있다[7,20-22]. 이에 대해 Bennett와 Willey[7]는 식물의 수분 통로인 목질부(xylem)의 벽면은 음전하를 띠고 있어 음이온이 흡착하지 못한다는 사실로 설명될 수 있을 것으로 보였다. ⁹⁹Tc의 뿌리로부터 잎으로의 높은 이동성은 콩에서 나타난 경엽부로부터 종실로의 매우 낮은 이동성과는 정반대이다. 이는 ⁹⁹TcO₄이 잎에 도달하면 며칠 내로 환원이 되고 환원형 ⁹⁹Tc는 재이동이 원활하지 못하다는 사실과 관련이 있을 것[7,23]으로 판단된다.

배추 잎과 무 뿌리에 대하여 위와 같이 조사된 ⁹⁹Tc의 TF 값은 최 등[24]이 pH 6.0의 사질양토에서 조사한 방사성 Mn, Co, Sr 및 Cs의 TF 값에 비해 2-100 배 정도 높다. 이것은 콩에서와 마찬가지로 ⁹⁹Tc가 토양 내에서 산화형인 TcO₄의 형태로 존재하여 상기 핵종들에 비해 토양 기질에 흡착되지 않고 토양 수분 속에 녹아 있는 비율이 높았기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. IAEA의 ⁹⁹Tc TF 값과의 비교

IAEA[9]는 최근에 발간한 핸드북을 통하여 핵종별로 각 작물군에 대한 TF 값의 일반기대치를 제시함으로써 부지 특성 자료가 없을 경우에 참조할 수 있도록 하였다. IAEA의 일반기대치는 각국에서 생산된 전이계수 자료를 취합, 정리하여 특정 핵종과 작물군의 조합에 대한 전이계수 자료가 세 개 이상일 경우에는 그 기하평균치로 하였고 두 개일 경우에는 산술평균치로 하였다. 본 실험과 관련 있는 작물군(두과 채소류, 엽채류, 뿌리 작물군)에 대하여 IAEA가 제시하고 있는 ⁹⁹Tc 전이계수의 일반기대치와 본 조사치를 비교해 보면 다소 차이가 있다. 여기에서 몇 가지 유의할 점은 다음과 같다.

콩의 경우 IAEA는 채소류로 보고 주로 서양인들이 먹는 꼬투리 전체(콩알과 깍지)에 대한 값인 4.3×10⁰(기하평균)을 제시하고 있으므로 이 값을 콩알에 그대로 적용하면 콩알의 ⁹⁹Tc 농도를 지나치게 과대평가할 가능성이

Table 5. Representative Values of ⁹⁹Tc Transfer Factors for Major Upland Crops Proposed on the Basis of the Present Results.

Plant compartment	Representative TF values of ⁹⁹ Tc*	
	Dry plant	Fresh plant
Soybean seeds	1.8×10 ⁻¹	-
Radish roots	1.2×10 ¹	9.0×10 ⁻¹
Radish leaves	3.2×10 ²	2.8×10 ¹
Chinese cabbage leaves	1.3×10 ²	9.6×10 ⁰

* arithmetic means for two soils.

있으므로 주의해야 한다. 무와 같은 뿌리 작물에 대한 IAEA의 일반기대치는 4.6×10⁻¹(산술평균)으로 본 연구의 무 뿌리에 대한 TF 값보다 몇 배 높다. 이는 토양 특성의 차이와도 관련이 있겠지만 동시에 뿌리 작물에 속하는 작물종이 매우 다양하여 IAEA의 뿌리 작물군에는 본 연구의 무보다 ⁹⁹Tc의 전이계수가 높은 작물종들이 많이 포함되었기 때문일 수 있다. 배추와 같은 엽채류에 대한 IAEA의 일반기대치인 1.8×10²(기하평균)도 본 연구에 비해 약간 높다. 이에 대해서도 무에서와 같은 이유를 배제할 수 없다.

한편, IAEA의 값은 전부 건조 작물체에 대한 것이므로 이를 신선 작물체에 적용하기 위해서는 IAEA가 제시하고 있는 건조중비를 사용하여 환산해야 한다. IAEA[9]는 건조중비로 무 뿌리의 경우 0.09, 양배추(cabbage, 배추에 대한 자료가 없으므로 차선택으로 양배추에 대한 자료를 인용함)의 경우 0.12를 제시하고 있으나 표 3과 4에 의하면 무 뿌리와 배추 잎의 경우 건조중비가 0.07-0.08 정도가 된다. 따라서 본 실험에서 얻은 건조 작물체 값을 신선 작물체 값으로 환산하기 위하여 위와 같은 IAEA의 건조중비를 이용할 경우 또 다른 과대평가의 요인이 발생할 수 있으므로 주의할 필요가 있다.

상기의 유의점들은 서양과 우리나라의 기호 작물종과 섭취 방법 등이 다르다는 사실과 연관되어 있는 것이다. 따라서 한국인의 식생활을 제대로 반영할 수 있도록 국내 특성 전이계수 자료를 보다 많이 확보, 이용해야 평가의 신뢰도를 높일 수 있다.

3.4. 밭작물에 대한 ⁹⁹Tc 전이계수 대표치(안)

위에서 살펴 본 바와 같이 평가의 신뢰도 향상을 위해서는 가능한 한 부지 특성 자료에 입각하여 대표치를 설정하는 것이 바람직하다. 어느 집단의 대표치는 그 집단의 평균적인 특성을 반영하는 것이어야 하므로 IAEA의 일반기대치와 마찬가지로 가용한 자료에 대한 평균치로 하는 것이 타당할 것이다. 본 연구에서는 작물체 별로 두 가지 토양에 대한 TF 값밖에 얻지 못하였으므로 상기 IAEA의 방식에 준하여 두 값에 대한 산술평균치를 대표치(안)로 제시하였다(표 5). 제안된 대표치는 건조 작물체로 보면 무 잎 > 배추 잎 ≥ 무 뿌리 > 콩알의 순으로 작물체 간에 최대 2,000 배 가까운 차이를 보이고 있다.

이것은 각각의 작물군 및 부위에 대해 세분화된 전이계수 값을 사용할 필요가 있음을 강하게 시사하고 있다.

무 잎의 경우 우리나라에서는 통상 건조하여 소비되다는 이유로 건조 작물체에 대한 대표치를 사용하면 약간의 불확실성이 수반된다. 이는 건조의 정도가 일정하지 않기 때문이다. 따라서 식용으로 건조되는 무 잎이 신선중 기준으로 연간 1 인 당 얼마나 되는지에 대한 통계치가 있다면 신선 작물체에 대한 대표치를 평가에 바로 사용함으로써 건조에 따른 불확실성을 해소할 수 있다.

위와 같은 밭작물에 대한 대표치는 최 등[11]이 제안한 쌀알에 대한 대표치에 비해 건조 작물체의 경우 작물체에 따라 160-300,000 배 정도 높다. 이것은 앞에서 설명한 대로 ⁹⁹Tc는 논에서는 주로 ⁹⁹TcO₂와 같은 환원형으로 존재하고 밭에서는 주로 ⁹⁹TcO₄와 같은 산화형으로 존재하기 때문이다[6,7]. 이처럼 높은 TF 값으로 볼 때 밭작물에 대한 ⁹⁹Tc 전이계수 조사와 함께 흡수억제 대책에 관한 연구도 반드시 수행될 필요가 있다.

위의 제안은 매우 한정된 자료에 의거한 것이므로 우리나라 타지는 물론 방폐장 주변에 대해서도 대표성이 충분치 못하다. 따라서 상기의 제안치는 자료가 확충될 때까지 잠정적으로 사용해야 할 것이며 차후 추가적인 조사가 이루어지는 대로 개선하여 보다 대표성이 높은 값을 도입할 필요가 있다.

4. 결론

우리나라 주요 밭작물인 콩, 무, 배추에 대하여 경주 방폐장 주변에서 채취한 두 가지 밭토양에 ⁹⁹Tc를 처리하고 작물을 재배하여 ⁹⁹Tc의 토양-작물체 전이계수를 조사하였다. 전이계수 값은 토양 간에는 큰 차이가 없었으나 작물이나 작물 부위 간에는 큰 차이가 있었다. 특히 콩의 경우 종실 전이계수가 경엽부에 비해 현저히 낮아 ⁹⁹Tc가 종실로의 이동성이 매우 낮은 핵종임이 확인되었다. 유사한 작물군에 대한 IAEA의 일반기대치와의 비교를 통해서 국내 재배종에 대한 특성 자료 확보가 평가의 신뢰도 향상을 위해 중요하다는 점이 강조되었다.

본 실험 결과에 입각하여 작물체 별로 ⁹⁹Tc 전이계수의 대표치가 제안되었다. 밭작물에 대한 대표치는 기 제안된

벼에 대한 대표치보다 훨씬 높아 발작물에 대한 조사의 중요성이 시사되었다. 건조와 관련된 불확실성의 해소책으로 건조하여 소비되는 채소 부위에 대해서도 신선 작물체에 대한 대표치를 사용하는 방안이 제시되었다. 본 제안치는 매우 한정된 자료에 입각하고 있어서 대표성이 불충분하므로 추가적인 조사를 통하여 보다 대표성이 높은 값을 도입할 필요가 있다. 이러한 일의 중요성은 고준위 폐기물 처분장 부지가 정해지면 더욱 커질 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부가 시행한 원자력중장기연구개발사업의 결과물입니다.

참고문헌

1. 성석현, 정의영, 김기홍. 국내 방사성폐기물 특성과 방사성폐기물 처분시설 폐기물 인수기준. 한국방사성폐기물학회지. 2008;6:347-356.
2. 이창우, 정근호, 조영현, 강문자, 이완로, 김희령, 최근식. 한국 토양의 ⁹⁹Tc 분석 및 방사능 농도 준위. 한국방사성폐기물학회지. 2009;7:25-31.
3. Ashworth DJ, Shaw G. Soil migration and plant uptake of technetium from a fluctuating water table. J. Environ. Radioact. 2005;81:155-171.
4. Webster S, Salt CA, Howard BJ. Sea-to-land transfer of technetium-99 through the use of contaminated seaweed as an agricultural soil conditioner. J. Environ. Radioact. 2003;70:127-137.
5. Denys S, Echevarria G, Florentin L, Leclerc-Cessac E, Morel JL. Availability of ⁹⁹Tc in undisturbed soil cores. J. Environ. Radioact. 2003;70:115-126.
6. Ishii N, Koiso H, Takeda H, Uchida S. Environmental conditions for the formation of insoluble Tc in water ponds located above paddy fields. J. Environ. Radioact. 2008;99:965-972.
7. Bennett R, Willey N. Soil availability, plant uptake and soil to plant transfer of ⁹⁹Tc - A review. J. Environ. Radioact. 2003;65:215-231.
8. Till JE, Meyer HR. Radiological Assessment. U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/ CR-3332, ORNL-5968. 1983.
9. International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. IAEA, Vienna, 2010.
10. International Atomic Energy Agency. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. IAEA, Vienna, 2009.

11. 최용호, 임광목, 전인, 박두원, 금동권, 한문희. 경주 방사성 폐기물 주변 논에 대한 방사성 요오드와 테크네튬의 토양-쌀알 전이계수. 방사성폐기물학회지 2010;8:329-337.
12. Yanagisawa K, Muramatsu Y, Kamada H. Tracer experiments on the transfer of technetium from soil to rice and wheat plants. Radioisotopes. 1992;41:397-402.
13. Cataldo DA, Wildung RE, Garland TR. Root absorption and transport behaviour of technetium in soybean. Plant Physiol. 1983;73:849-853.
14. Bell JN, Minski MJ, Grogan HA. Plant uptake of radionuclides. Soil Use Manag. 1988;4:76-84.
15. 조성진, 박천서, 엄대익. 토양학(삼정). 향문사. 서울. 1997.
16. Abbazov MA, Dergunov ID, Mikulin RG. Effect of soil properties on the accumulation of strontium-90 and cesium-137 in crops. Sov. Soil Sci. 1978;10:52-56.
17. Choi YH, Kang HS, Jun I, Keum DK, Park HK, Choi GS, Lee H, Lee CW. Transfer of ⁹⁰Sr to rice plants after its acute deposition onto flooded paddy soils. J. Environ. Radioact. 2007;93: 157-169.
18. Choi YH, Lee CW, Lee KS, Lee JH, Jo JS, Chung KH. Absorption and accumulation of Sr-90 by rice and soybean and its soil-to-plant transfer coefficients. J. Kor. Nucl. Soc. 1992;24:121-129.
19. 임광목, 전인, 최용호, 최상도, 금동권. 경주 처분장 주변 밭토양에 대한 채소류의 ⁹⁹Tc 전이계수 측정. 대한방사선방어학회 2011 춘계학술발표회 논문요약집 2011:152-153.
20. Mousny JM, Roucoux P, Mytennaere C. Absorption and translocation of technetium in pea plants. Environ. Exp. Bot. 1979;19:263-268.
21. Cataldo DA, Garland TR, Wildung RE, Fellows RJ. Comparative metabolic behavior and interrelationships of Tc and S in soybean plants, Health Phys. 1989;57:281-287.
22. Woodard-Blankenship B, Neel JW, Papin PJ. Localization and morphological effects of technetium-99 on higher plant cells. Water Air Soil Pollut. 1995;81:411-428.
23. Harms AV, van Elteren JT, Wolterbeek HT, de Goeij JJ. A dual radiotracer speciation technique with emphasis on probing of artefacts: a case study for technetium and spinach (*Spinacia oleracea* L.). Analyt. Chim. Acta. 1999;394:271-279.
24. 최용호, 김국찬, 이창우, 이강석, 이정호, 박찬걸, 조용우. 콩 및 채소류에 대한 Mn-54, Co-60, Zn-65, Cs-137의 토양-작물체간 전이계수. 대한방사선방어학회지 1991;16:55-65.

Soil-to-Plant Transfer Factors of ^{99}Tc for Korean Major Upland Crops

Yong-Ho Choi, Kwang-Muk Lim, In Jun, and Dong-Kwon Keum
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - In order to investigate the soil-to-plant transfer factor (TF) of ^{99}Tc for Korean major upland crops (soybean, radish and Chinese cabbage), pot experiments were performed in a greenhouse. Soils were collected from four upland fields (two for soybean and two for radish and Chinese cabbage) around Gyeongju radioactive-waste disposal site. Three to four weeks before sowing, dried soils were mixed with a ^{99}Tc solution and the mixtures were put into pots and irrigated. TF values were expressed as the ratios of the ^{99}Tc concentrations in plants (Bq kg^{-1} -dry or fresh) to those in soils (Bq kg^{-1} -dry). There was no great difference in the TF value between soils. The TF values for soybean seeds were extremely lower than those for the straws, indicating a very low mobility of ^{99}Tc to seeds. As representative TF values of ^{99}Tc , 1.8×10^{-1} , 1.2×10^1 , 3.2×10^2 and 1.3×10^2 (for dry plants), arithmetic means for two soils, were proposed for soybean seeds, radish roots, radish leaves and Chinese cabbage leaves, respectively. In the case of the vegetables, proposals for fresh plants were also made. The proposed values are not sufficiently representative so successive updates are needed.

Keywords: Soil, ^{99}Tc , Soybean, Radish, Chinese cabbage, Transfer factor