

## 삼중수소 농도 예측평가 모델 비교평가

### Intercomparison of the tritium concentration prediction models

송영일 · 이명찬 · 이갑복

전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

원전에서 대기로 방출되는 삼중수소는 대부분이 수증기 형태인 HTO로 방출되고, 공기중에서는 HTO 형태로 존재한다. 그러나 식물과 동물에 흡수 또는 섭취되면 대부분 조직자유수(TFWT) 형태로 존재하며 일부가 생물 조직에 결합된 형태(OBT)로 바뀌어 거동한다. 삼중수소는 호흡과 음식물 섭취를 통해 인체에 피폭을 주게되며, 섭취시 OBT의 영향을 고려하여 평가하고 있다. 섭취선량 평가의 출발점이 되는 여러 음식물에서 TFWT와 OBT 농도를 현재 사용중인 여러 가지 모델에 의해 평가하였다. 쌀, 채소, 목초와 같은 식물과 소고기, 돼지고기, 닭고기, 우유와 같은 동물성식품에 대해 각각의 농도와 총 삼중수소 농도를 평가하여 모델간 평가결과를 비교하였다. 평가결과 총 삼중수소 농도는 USNRC 1.109 모델에 의한 평가결과가 가장 낮게 나타났고, 비방사능 모델에 의한 평가결과가 가장 높게 나타났다. 그리고 OBT/TFWT 농도비는 곡류가 가장 높게 나타나 OBT가 TFWT에 비해 높게 나타났고, 채소류는 TFWT 농도가 월등히 높게 나타나고 있다. 모델별 농도 평가결과를 모델 전체 평균 농도와 대비하여 비교한 결과, 식물은 평균의 0.6배~1.5배 까지 저평가 되거나 과대 평가 될 수 있고, 동물성 식품은 돼지고기에서 평균의 0.2배~1.9배로 모델간 평가 편차가 크게 나타나고 있다.

#### ABSTRACT

The most of tritium released from the nuclear power plants to environment is HTO as a vapour, which is entered to the plants by primarily photosynthesis. Some of the HTO entered plants can be incorporated into organic compounds and tritium atoms exchange with labile hydrogen atoms attached to oxygen, nitrogen, sulphur compounds to form OBT. However, most of tritium entered plants is tissue free water tritium(TFWT), which is easily removable from the live stocks. To assess the ingestion dose contributed from tritium, TFWT and OBT concentration in plants and animal should be evaluated. In this study, tritium concentrations predicted by several models are compared and OBT/TFWT ratio is calculated for each plants and animals. As the result of evaluation, rice has more OBT than TFWT, however, lettuce has less OBT than TFWT. Comparison with several models shows that USNRC 1.109 has the least concentration and specific activity model has the greatest. The predicted tritium concentration is ranged from 0.6 times to 1.5 times of average concentration in plants and from 0.2 times to 1.9 times of average concentration in porks.

## 1. 서론

우리나라에서 원전 가동에 따라 환경으로 방출하는 방사성물질중 90% 가량을 삼중수소가 차지하고 있으며, 방사성물질 방출에 따른 주민의 개인 최대 피폭선량 평가결과 역시 삼중수소에 의한 선량이 전체 선량의 90%이상을 차지하고 있다[1]. 특히 중수로 원전에서는 경수로에 비해 상대적으로 많은 양의 삼중수소를 방출하여, 삼중수소에 의한 선량평가의 중요성이 매우 크다 할수 있다. 식물과 동물의 섭취에 따른 삼중수소 기여 선량을 평가할 때 보통 비방사능 농도에 의해 총 삼중수소 농도에 의한 선량을 평가하는 경우와 조직자유수(Tissue Free Water Tritium, TFWT)와 조직 결합삼중수소(Organically Bound Tritium, OBT)를 분리하여 평가하는 경우가 있다. 특히 OBT가 TFWT 보다 훨씬 체내 잔류시간이 길고 OBT에 의한 선량이 TFWT에 의한 선량 보다 독성이 더 크기[2] 때문에 OBT 선량 평가의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 삼중수소는 방출시 대부분이 HTO형태로 방출되며, HTO는 식물이나 동물체내로 흡수되거나 섭취되고 난 후 대부분 조직자유수(TFWT)형태로 존재하나 일부가 OBT로 변환돼[3] 다른 원소와 치환이 어려운 상태로 존재하여 체내 잔류시간이 길어지며 오랫동안 체내피폭을 유발한다[4]. 최근에는 TFWT와 OBT 삼중수소를 구하여 피폭선량도 각각 구하고 있다. 본 논문에서는 방출된 삼중수소의 인체 피폭경로 중 식물과 동물에서 삼중수소의 농도를 구하는 여러 가지 모델의 방법론을 검토하고, 모델별 삼중수소 농도 평가결과와의 편차를 비교하고자 한다.

## 2. 삼중수소 농도 평가방법

삼중수소의 농도를 평가할 때 삼중수소의 생물간 전이를 고려하여 평가하는 방법과 생물체중 수분의 농도와 공기중 수분의 농도가 평형상태로 존재한다는 비 방사능 모델(specific activity model)을 적용하는 방법이 있다. 비 방사능 모델은 다시 1:1 평형 모델과 생물체의 농도가 조금 낮은 상태로 평형을 이루는 감손 평형 모델이 있다. 생물간 전이정도를 적용하는 모델은 수차례의 실험과 실측을 통하여 생물간 전이정도를 경험적으로 확정한 방법으로 주변환경의 여러 가지 특성에 따라 편차가 나타날 소지가 많은데 비해 환경의 특성을 합리적으로 반영하면 가장 적합한 자료를 구할 수 있다. 반면 비 방사능 모델은 삼중수소가 환경매질의 수분을 통하여 매우 빨리 동화돼 주변 환경과 평형을 이루는 거동특성을 고려하여 공기중 수분의 삼중수소와 생물체 수분의 삼중수소 농도가 1:1 또는 감손평형을 이루는 것으로 보고 생물체의 삼중수소의 농도를 구하는 방법이다. 또 OBT 농도를 생물체의 조직수소와 공기중 수소원자 중에 있는 삼중수소 간의 평형을 가정하여 생물체의 OBT농도를 구한다.

본 연구에서는 삼중수소에 의한 피폭선량 평가결과와의 오차를 평가하기 위해 전세계적으로 주로 활용되고 있는 몇가지 모델에 대해 삼중수소의 농도를 구하고 농도에 의한 피폭선량을 평가하여 그 결과를 비교하였다. 비교대상 모델은 CSA, USNRC, 비 방사능 모델(1:1, 감손평형)로 최종 삼중수소의 농도를 구하였다. 삼중수소에 의한 피폭선량 평가결과와의 오차를 평가하기 위해서는 평가요소를 각각의 입력변수에 대한 오차와 이들을 사용하여 평가한 결과의 조합 오차를 평가할 필요가 있다. 우선 이들 모델의 평가방법과 특성을 간단히 비교하여 본다.

첫째, CSA N288.1모델은 대기와 식물체간의 삼중수소 평형상태를 평형상수화하고 식물체의 수분율을 곱해 식물의 삼중수소 농도를 구한다. 대기중 수분의 삼중수소 대비 식물체 수분의 삼중수소 농도 비는 0.5로 대기중의 삼중수소의 반이 식물체 삼중수소로 전이돼 평형을 이루는 것으로 평가하고 있다. 그리고 수분에 포함된 삼중수소 농도를 구해야 하므로 식물체의 수분율을 고려하는데 보수적 평가를 위해 수분율을 100%로 정하여 평가하고 있다. 이에따라

식물체의 수분중 삼중수소 농도는 식1.과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$C_p = C_{am} \cdot R \cdot \alpha \dots\dots\dots(1)$$

여기서, R = 대기 식물체간 평형상수 (0.5)

$\alpha$  = 식물체 의 수분율(1.0)

둘째, USNRC 1.109는 CSA와 같은 방법을 사용하나 식물체 수분의 삼중수소와 공기중 수분의 삼중수소 농도 평형비는 0.5를 식물체의 수분은 75%를 적용하여 평가하고 있다[6].

$$C_p = C_{am} \cdot R \cdot \alpha \dots\dots\dots(2)$$

여기서, R = 대기 식물체간 평형상수 (0.5)

$\alpha$  = 식물체 의 수분율(0.75)

USNRC와 CSA모델은 삼중수소 농도를 TFWT와 OBT 구별없이 총 삼중수소의 평형농도를 구하여 사용하고 있다. 반면 비방사능 모델에서는 TFWT와 OBT를 구별하여 평가할 수 있다.

셋째, 비방사능(specific activity) 모델로 1:1 평형모델은 공기중 수분의 농도와 식물의 수분중 삼중수소 농도가 똑같은 농도로 평형을 이루고 있는 것으로 보며, 식물의 수분 함유율은 각 식물별 고유 수분율을 적용한다. 이에따라 TFWT와 OBT농도를 구하는 방법은 다음과 같다.

1. TFWT는 1:1평형비에 식물의 수분율을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{pw} = C_{am} \dots\dots\dots(3)$$

$$C_p = C_{pw} \cdot \alpha \dots\dots\dots(4)$$

여기서,  $\alpha$  = 평가대상 식물별 수분함유율

2. OBT는 공기중 수소와 생물체의 조직수소중 삼중수소 농도가 평형을 이룬다는 가정에 따라 공기중 수소에 있는 삼중수소의 농도(Tritium/Hydrogen in Air, T/H in Air)를 구하고, 이와 평형상태인 생물체 조직수소중 삼중수소농도(Tritium/Hydrogen in Organic, T/H in Organic)를 구할 수 있다. 이를 위해 생물체의 조직수소 양을 고려하여 계산한다. 생물 조직속 삼중수소 농도는 생물의 조직수소 양과 물과 수소분자의 비에 공기중 수분의 삼중수소 농도를 곱하여 식5와 같이 구할 수 있다. 이 방법은 장기적으로 공기중 삼중수소의 농도가 평형을 이룬 상태에서는 좋은 결과를 가질 수 있으나, 방출원 주변에서 삼중수소의 농도 변화가 심한 곳에서는 T/H in Air의 비가 변함에 따라 T/H in Organic의 비도 가변성이 있어 OBT 농도의 시각에 따른 가변성이 있다. 그러나 비방사능 모델 특징상 보수성을 띄고 있어 최대 농도로 평가된다[7].

$$C_{org} = C_{HP} \times C_{am} \times M_w / 2M_H \dots\dots\dots(5)$$

여기서,  $C_{org}$  = 식물체의 조직중 삼중수소 농도(OBT)

$C_{HP}$  = 식물체중 유기물의 수소함량

$C_{am}$  = 공기중 수분의 삼중수소 농도

$M_w$  = 물의 분자량

$2M_H$  = 수소의 분자량

$\lambda$  = 삼중수소의 붕괴상수

$W_H$  = 식물조직속의 수소함량

내재, 비방사능(specific activity) 모델로 감손 평형모델에서 HTO농도는 1:1평형과 같은 방법으로 평가하나, 식물의 농도는 대기농도에 비해 감손상태(1:0.8)로 평형되는 것으로 평가한다[7]. 그리고 OBT 농도는 식5와 같은 방법으로 평가한다.

### 3. 평가결과의 분포특성

위와 같은 방법에 따라 다음과 같은 임의 조건에서 각 식물의 삼중수소 농도를 평가하였다.

- 대기중 삼중수소 농도를 0.2 Bq/m<sup>3</sup>
- 공기중 절대습도를 4 g/m<sup>3</sup>

표1. 각모델 별 삼중수소 농도 비교(단위: Bq/ℓ)

		CSA	USNRC	비방사능(specific activity) 모델					
				1:1			감손 평형		
				TFWT	OBT	계	TFWT	OBT	계
식물	쌀	25	<b>18.8</b>	6	24.8	30.8	4.8	24.8	29.6
	배추	25	<b>18.8</b>	47.6	1.4	49.0	38.0	1.4	39.4
	목초	-	-	36	7.7	43.7	28.8	7.7	36.5
동물	소고기	22.5	-	28.8	12.6	41.4	18.2	12.6	30.8
	돼지고기	5.6	-	23.6	21.2	44.7	14.9	21.2	36.1
	닭고기	8.8	-	31.9	9.5	41.3	20.0	9.5	29.5
	우유	17.5	9.4	38.9	4.1	42.9	24.5	4.1	28.5
	계란	5.5	-	-	-	-	-	-	-
	육류	-	11.3	-	-	-	-	-	-

\* 공기중 수분 삼중수소 농도 : 50 Bq/ℓ

평가결과에 따라 식물과 동물의 비방사능 모델에 의해 구한 TFWT와 OBT의 비율을 구하여 비교하였다. 평형상태에서 조직에서 쉽게 유리될 수 있는 형태의 TFWT와 조직에 결합돼 쉽게 유리되지 않는 형태의 삼중수소인 OBT의 존재형태 비율을 OBT/TFWT로 표2에 나타냈다. 이 비율은 생물체로 이동된 삼중수소가 어떤형태로 존재하는지를 보여주며 생물별로 특성적 분포비율을 나타내고 있다. 즉 흡수된 삼중수소중 OBT 변환정도를 나타내는 척도가 된다. 본 연구를 통하여 삼중수소의 생물체내 존재 형태별 OBT/TFWT의 비는 채소류가 낮게 나타난 반면 곡류에서는 OBT의 점유율이 매우 높게 평가되고 있다. 이는 삼중수소 농도가 동일한 쌀과 채소류를 섭취했을 경우 상대적으로 OBT 농도가 높은 쌀을 섭취했을 경우 체내피폭선량은 더크게 나타날 수 있음을 보여준다.

표2. 주요 생물의 조직결합 삼중수소대 조직자유 삼중수소(OBT/TFWT)의 비율

생물분류		OBT/TFWT	
		1:1	1:0.8
식물	쌀	4.1	5.2
	배추	0.03	0.04
	목초	0.2	0.3
동물	소고기	0.4	0.7
	돼지고기	0.9	1.4
	닭	0.3	0.5
	우유	0.1	0.2

동물에서는 돼지고기의 OBT점유율이 높게 나타나고 있으며, 우유가 낮게 나타나고 있다. 원자력연구소에서 곡류와 잔디에 삼중수소를 조사하여 24시간 경과후 TFWT/OBT비율을 연구한 결과에 의하면 곡류는 0.5, 목초가 0.48 수준으로 나타났고[8], 원자력안전기술원에서 여러시료에 대해 TFWT와 OBT를 조사분석한 결과에 따르면 OBT/TFWT 비율이 곡류가 0.7~1.7, 배추가 0.7~2.8의 분포를 나타내고 있다[9]. 평가결과가 보수적이지만 실험 및 실측결과간의 편차가 편차가 크고 채소류의 OBT농도 비율이 곡류에 비해 높게 나타난 것은 지속적 관찰이 필요하다.

그리고 각 모델에 따라 평가한 총 삼중수소의 농도와 각 시료별 TFWT와 OBT 농도 비율 평가결과등을 그림1 부터 그림4 까지 도시하였다.

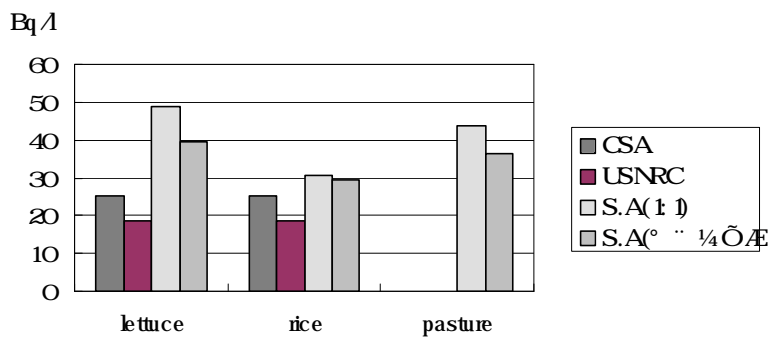


그림 1. 여러 가지 모델에 의한 식물체 중 총삼중수소 농도

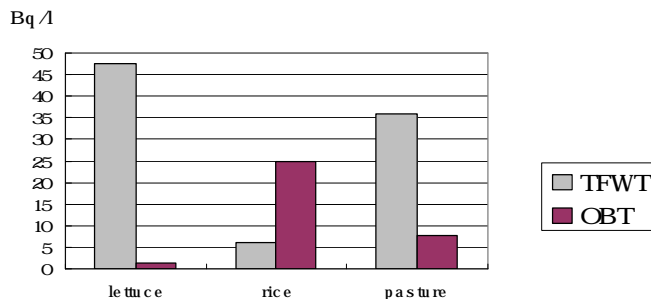


그림 2. 식물의 TFWT와 OBT 농도

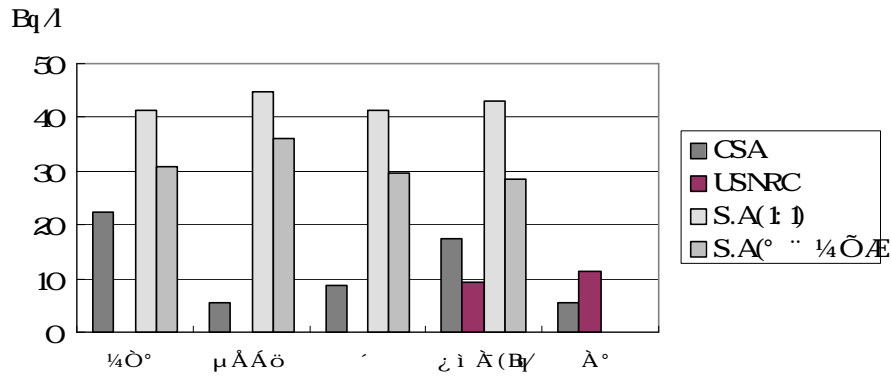


그림 3. 동물성 식품의 모델별 삼중수소 농도 평가비교

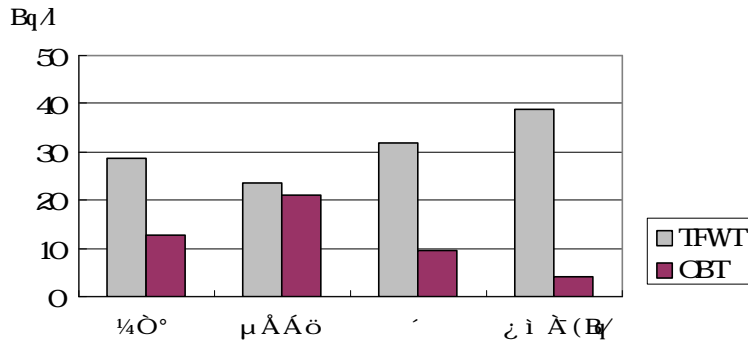


그림 4. 동물성 식품의 TFWT와 CBT 농도

그리고 각 모델 간의 삼중수소 농도 평가 편차를 평가하기 위해 표3 을 작성하여 비교하였다. 생물별로 전체 모델 평가결과의 평균을 1.0으로 기준하여 각 모델의 평균대비 비율을 도시하였다. 상기 결과에 따라 모델간 평가 농도는 1:1 비 방사능 모델이 가장 높게 나타나고 있으며, USNRC 모델에 의해 평가한 농도가 가장 낮게 나타나고 있다. 식물과 동물의 농도를 평균 농도를 기준으로 쌀의 농도가 모델간 평가 편차가 가장 낮게 나타나고 있으며, 돼지고기의 경우는 모델 간 평가결과 편차가 매우 높게 나타나고 있다. 돼지고기의 경우 1:1 비방사능 평가모델이 평균에 비해 최대 1.88배 가량 높게 평가되고 있으며, CSA모델은 최소 0.23배 만큼 낮게 평가 될 수도 있다. 그리고 식물의 경우 모델간 평가결과의 편차가 비교적 크지 않은 편이지만 동물성식품의 농도 편차가 비교적 크게 나타나고 있다. 선원의 농도는 사람에게 미치는 피폭선량 평가시 피폭경로로 고려되고 있는 수 많은 경로중 하나이다. 피폭경로를 실제상황과 유사하게 모사하기 위해 방사성 물질의 전이경로별로 세분하여 평가한 Hybrid 모델도 있다. 그러나 경로가 세분될수록 평가시 입력변수가 많아지고 변수 개개의 오차를 고려하면 최종평가결과는 더욱 크게 나타난다. 적합한 방법은 가능한 변수를 줄이고 보수적인 변수를 사용하는 것이다.

표3. 각 모델의 평균농도 대비 비율

		기준	CSA	USNRC	비방사능모델 (1:1)	비방사능모델 (1:0.8)
식물	쌀	1.0	0.95	0.72	1.18	1.13
	배추	1.0	0.76	0.57	1.48	1.19
	목초	1.0	0.81	0.61	1.41	1.18
동물	소고기	1.0	0.71	0.36	1.31	0.97
	돼지고기	1.0	0.23	0.47	1.88	1.52
	닭고기	1.0	0.71	0.43	1.56	1.11
	우유	1.0	0.38	0.38	1.74	1.16

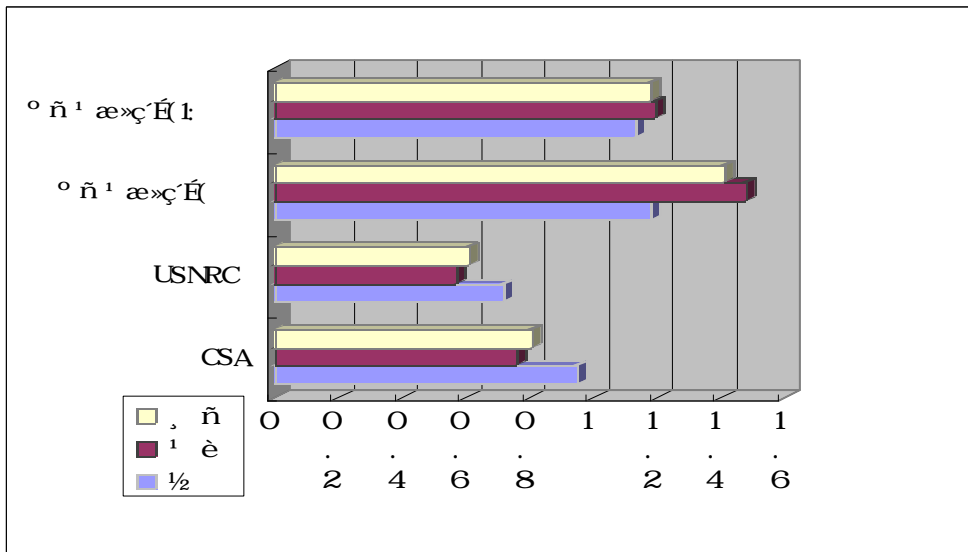


그림5. 모델간 농도 평가 편차

#### 4. 토의 및 결론

방사성물질에 의한 주변주민의 피폭선량을 평가하기 위해 여러 가지 예측모델에 의해 해당지역의 농도를 예측하고 해당 농도에 의한 선량을 평가하고 있다. 그중 삼중수소는 해당지역의 공기 중 농도를 대기확산모델에 의하여 구하나, 사람의 호흡과 음식물 섭취에 의한 선량을 구하기 위해 섭취대상 음식물의 농도는 가장 적합한 모델을 사용하여 평가해야 한다. 그러나 모델은 여러 가지 가정하에 농도를 평가하므로 오차의 가능성이 매우 크다 할 수 있다. USNRC와 CSA, 그리고 비방사능 모델에 의한 삼중수소 농도 평가결과를 비교한 결과 생물의 평균농도를 1.0 기준으로 할 때 곡류는 0.7~1.2, 채소류는 0.6~1.5, 목초는 0.6~1.4, 소고기는 0.4~1.3, 돼지고기는 0.2~1.9, 닭고기는 0.4~1.6, 우유는 0.4~1.7 분포특성을 보이고 있다. 농도 예측 분포가 식물에서는 좁은 범위에 분포하고 있으나, 동물의 경우 비교적 분포 범위가 넓게 나타나고 있다. 이는 여러모델의 예측 평가 오차를 고려하여 해석해야 한다는 것을 의미한다.

평가결과의 신뢰성을 향상하기 위해서는 향후 평가결과와 실측결과를 비교검토하여 예측결과를 지속적으로 보완할 필요성이 있다.

#### 참고문헌

1. 한국전력공사, 월성원전주변 환경방사능 조사보고서, 1997
2. Straume, T. Ed. Health Physics, The Radiation Protection Journal, Tritium Dosimetry, Health Risks and Environmental Fate. Vol 65. No 6., 1993.
3. Strack, S., et. al., Tritium behaviour in the soil-plant-atmosphere continuum. 1990.
4. van den Hoek. Dynamic environmental cycling of HTO/HT/OBT. Experimental studies and

and modelling. 1988.

5. U.S.Nuclear Regulatory Commission. Calculation of Annual dose to man from routine releases of Reactor Effluents for the purpose of Evaluating compliance with 10 CFR Part 50. APP. I. Reg.guide.1.109., 1977.
6. Canadian Standard Association, Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal operations of Nuclear Facilities, CAN/CSA-N288.1M87, 1987.
7. Evans, A.G. New Dose Estimates from Chronic Tritium Exposures, Health Physics 16, 1969.