

측정된 뇨시료의 삼중수소농도로부터 체내 피폭량 산정 방법의 평가

An Evaluation of Internal Dosimetric Methods from Measured Tritium Concentrations in Urine

이경진, 이강욱

조선대학교

광주광역시 동구 서석동 375번지

김희근

한국전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

삼중수소에 의한 작업자의 내부 피폭 산정을 위한 방법으로는 주기적인 뇨시료의 측정 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 뇨시료 측정치로부터 피폭선량을 산정하기 위해서 여러 가지 방법이 제안되어 있다. 본 논문에서는 여러 가지 측정 방법에 대한 오차 분석을 수행하여, 기술기준에 적합한 방법을 제시하였다. 평가 결과 현재 사용되고 있는 모델들을 30일 측정주기에 그대로 적용하는 경우에 오차가 허용범위를 벗어나는 것으로 평가되었다. 이를 보완하기 위한 방안을 제시하였다. 아울러 만성 피폭에 대한 평가 방법으로 일정섭취 모델을 제안하였다. 제시된 일정섭취모델은 기존의 선형 모델에 비해 우수한 특성을 지닌 것으로 나타났다.

Abstract

The periodic measurement of tritium concentration in urine is generally used for internal dosimetry of workers. Several procedures and methods were used for the internal dosimetry from the tritium concentrations in urine. Here, a quantitative error analysis is made to evaluate that the state of arts models are satisfying the required error limits. Analyzed results show that the existing models can not meet the required limits if 30days measurement period is used. New procedure is proposed to meet the

required error limit. Also, a constant intake model for chronic exposure is proposed. The proposed constant intake model shows the better performance than the linear interpolation model.

1. 서 론

삼중수소에 의한 작업자의 내부 피폭 산정을 위한 방법으로는 주기적인 뇨시료의 측정 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 뇨시료의 측정은 연속적으로 하는 것이 매우 어렵고, 비용도 많이 들기 때문에 7일, 14일, 30일등의 주기에 의해 측정을 수행한다. 측정 주기의 시작인 $t=0$ 에서의 뇨시료의 삼중수소 농도 측정치 C_0 와 측정 주기의 끝인 $t=T$ 에서의 뇨시료의 삼중수소 농도 측정치 C_T 를 사용하여 측정주기 동안의 체내에서의 삼중수소 농도 변화를 추정하여야 한다. 측정주기의 시작과 끝에서 측정한 뇨시료의 삼중수소 농도 측정치 C_0 와 C_T 로부터 측정주기동안의 평균체내 삼중수소 농도를 예측하는 모델로 여러 가지 모델이 제시되어 있다. 그 동안 만성피폭에 대해서는 캐나다에서 제안한 선형모델 (Linear Interpolation Model)^[1]이 주로 사용되었고, 급성피폭에 대해서는 ANSI에서 제안한 ANSI Model^[2]과 확률적으로 급성 섭취 시점이 측정 주기동안에 균등하다는 Uniform Distribution Model^{[2], [3]}이 사용되었다. 한편 피폭선량 평가를 위한 정확도 기준으로는 NRC^[4], Canada^[1], IAEA^[5]에서 요건을 제시하고 있다. 본 논문에서는 기존에 제안된 여러 가지의 예측모델에 대해서 측정주기, C_T/C_0 에 따른 오차분석을 수행하고, 요구되는 정확도 요건의 만족 여부를 평가하였고, 만성 피폭에 대한 새로운 모델을 제시하였다.

2. 선량평가 결과의 정확도 요건

정규환^[6]의 논문에서는 선량평가 결과의 정확도 요건으로 다음을 제시하고 있다.

“규제기관에서는 규제지침 설정 시에 선량평가에 따른 기준을 이상적인 모델에 따른 선량 평가 모델과 비교해 적어도 95%의 신뢰 구간에서 50% 이상의 정확도를 유지하도록 제시하여야 하고, 이에 따른 시료채취 주기와 기록준위 등을 선량평가 프로그램과 동시에 연계하여 검토하여야 한다”라고 기술하고 있다.

하지만, 이상적인 모델이라고 제시한 Uniform Distribution Model이 실제적인 피폭상황을 정확하게 모사할 수 없기 때문에 본 논문에서는 IAEA^[7]의 허용한계 및 오차의 정의를 사용하여 다음과 같은 정확도 유지 요건을 사용하였다.

예측 모델에 의한 선량은 실제의 참선량과 비교해 적어도 95%의 신뢰 구간에서 50% 이상의 정확도를 유지하여야 한다.

여기서 실제의 선량이라는 것은 섭취 시점과 섭취 패턴을 정확히 안다고 가정할 때, 이론적으로 구할 수 있는 선량을 의미한다.

3. 선량 예측 모델

삼중수소에 의한 체내 피폭선량은 측정된 뇨시료 삼중수소 농도 C_0 와 C_T 로부터 측정주기 동안의 평균 체내 삼중수소 농도를 예측한 후, 그 값에 선량환산인자를 곱해 줌으로서 구할 수 있다. 평균체내 삼중수소를 예측하는 모델은 섭취 패턴에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 삼중수소 섭취 패턴에는 무수히 많은 경우가 존재할 수 있는데, 측정주기 동안에 시간에 따른 삼중수소 섭취량을 정확히 아는 것은 불가능하다.

따라서 삼중수소 섭취 패턴에 대한 가정을 하는데, 두 가지의 극단적인 경우가 ① 섭취율이 측정주기 동안 일정한 경우, 즉 만성 피폭의 경우와 ② 섭취율이 극단적으로 불균등한 경우, 즉 단일 급성 피폭의 경우이다.

가. 만성피폭 모델

선형 모델(Linear Interpolation Model)^[1]

이 방식은 측정 주기 동안의 평균 삼중 수소 농도를 단순히 t=0에서의 농도 C_0 와 t=T에서의 농도 C_T 의 산술 평균으로 구하는 방식이다.

$$\bar{C} = \frac{C_0 + C_T}{2} \quad (1)$$

이 방식은 삼중수소 흡입이 측정주기 동안에 고르게 이루어지는 경우(Chronic Exposure)에 비교적 적합한 모델이다. 하지만 본 논문에서 수행한 분석결과, 측정 주기의 끝인 t=T에서의 뇨시료의 삼중수소 농도 측정치 C_T 가 측정 주기의 시작인 t=0에서의 뇨시료의 삼중수소 농도 측정치 C_0 에 비해 낮은 경우에는 오차가 커지는 단점이 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 이 모델이 생체적감쇄에 대한 어떠한 정보도 사용하지 않기 때문이다.

일정섭취모델(Constant Intake Model)

본 논문에서는 앞에서 언급한 선형모델의 단점을 극복하기 위해서 측정주기동안 삼중수소의 섭취율이 일정하다는 가정을 사용한 일정섭취모델(Constant Intake Model)을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{dC}{dT} = -\lambda_{ref} \cdot C + B' \quad (2)$$

여기서 C , λ_{ref} , B' 는 각각 시간에 따른 체내 삼중수소 농도, 생체적반감기, 삼중수소 섭취율을 나타낸다.

$C(0) = C_0$, $C(T) = C_T$ 로 주어지는 초기 조건 및 말기 조건을 사용하여 (2)식의 해를 구함으로써, 시간에 따른 삼중수소 농도를 구한다.

$$C(t) = \frac{C_T - C_0}{e^{-\lambda_{eff}T} - 1} \cdot e^{-\lambda_{eff}t} + \frac{C_0 \cdot e^{-\lambda_{eff}T} - C_T}{e^{-\lambda_{eff}T} - 1} \quad (3)$$

(3)식을 시간에 대해서 평균하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{C} = \frac{C_0 - C_T}{\lambda_{eff}T} + \frac{C_0 \cdot e^{-\lambda_{eff}T} - C_T}{e^{-\lambda_{eff}T} - 1} \quad (4)$$

나. 단일 급성 모델

최대 한계치 모델(Maximum Model)

최대 한계치는 삼중수소 흡입이 측정주기의 시작에서 한꺼번에 이루어졌다고 가정하여 구할 수 있다. 이 때의 삼중수소 농도 추정치 $C(t)$ 는 주기의 끝인 $t=T$ 에서의 측정치 C_T 로부터 역산할 수 있다.

$$C(t) = C_T \cdot e^{-\lambda_{ref}(t-T)} \quad (5)$$

여기서, λ_{ref} 는 표준인에 대한 생체적붕괴상수로서 0.0693 day^{-1} 의 값이다.

(5)식의 적용 조건은 $C_T/C_0 > e^{-\lambda_{ref}T}$ 이다.

(5)식을 측정 주기($t=0 \sim T$)동안 적분하여 다음과 같은 주기평균 농도를 구할 수 있다.

$$\bar{C} = \frac{C_T}{\lambda_{ref}T} (e^{\lambda_{ref}T} - 1) \quad (6)$$

최소 한계치 모델(Minimum Model)

최소 한계치는 삼중수소 흡입이 측정주기의 끝에서 한꺼번에 이루어졌다고 가정하여 구할 수 있다. 이 때의 삼중수소 농도 추정치 $C(t)$ 는 주기의 시작인 $t=0$ 에서의 측정치 C_0 로

부터 역산할 수 있다.

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-\lambda_{ref} t} \quad (7)$$

(7)식의 적용 조건은 $C_T/C_0 > e^{-\lambda_{ref} T}$ 이다.

(7)식을 측정 주기($t=0 \sim T$)동안 적분하여 다음과 같은 주기평균 농도를 구할 수 있다.

$$\bar{C} = \frac{C_0}{\lambda_{ref} T} (1 - e^{-\lambda_{ref} T}) \quad (8)$$

ANSI Model^[2]

미국에서 사용하는 방식으로서, 삼중수소 흡입이 측정주기의 중간인 $t=T/2$ 에서 한차례 이루어졌다고 가정한다. 이 방식은 (5)식으로 주어지는 최대 한계치와, (7)식으로 주어지는 최소 한계치를 혼용한 방식이라고 할 수 있다.

$$0 < t < T/2 \text{ 일 때, } C(t) = C_0 \cdot e^{-\lambda_{ref} t}, \quad (9a)$$

$$T/2 < t < T \text{ 일 때, } C(t) = C_T \cdot e^{-\lambda_{ref}(t-T)} \quad (9b)$$

(9)식의 적용 조건은 $C_T/C_0 > e^{-\lambda_{ref} T}$ 이다.

(9)식을 측정 주기($t=0 \sim T$)동안 적분하여 다음과 같은 주기평균 농도를 구할 수 있다.

$$\bar{C} = \frac{1}{\lambda_{ref} T} [C_0(1 - e^{-\lambda_{ref} T/2}) + C_T(e^{\lambda_{ref} T/2} - 1)] \quad (10)$$

확률적 모델(Uniform Distribution Model)^{[2], [3]}

실제 측정주기동안의 삼중수소 흡입 시점을 모르는 경우에는 이를 통계적으로 처리하는 것이 합리적일 수가 있다. 이 모델에서는 단일 섭취 시점이 $t=0 \sim T$ 사이에 균등하게 분포한다고 가정한다.

흡입 시점을 t' 라고 할 때, 체내의 삼중수소는 다음과 같다.

$$0 < t < t' \text{ 일 때, } C(t) = C_0 \cdot e^{-\lambda_{ref} t}, \quad (11a)$$

$$t' < t < T \text{ 일 때, } C(t) = C_T \cdot e^{-\lambda_{ref}(t-T)} \quad (11b)$$

(11)식을 측정 주기($t=0\sim T$)동안 적분하여 다음과 같은 주기평균 농도를 구할 수 있다.

$$\overline{C}(t') = \frac{1}{\lambda_{ref}T} [C_0(1 - e^{-\lambda_{ref}t'}) + C_T(e^{\lambda_{ref}(t'-T)} - 1)] \quad (12)$$

(12)식에서 t' 가 주기 기간동안에 균등한 확률을 갖기 때문에, 적분하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\overline{C} = \frac{1}{\lambda_{ref}T} (C_0 - C_T) + \frac{C_0}{(\lambda_{ref}T)^2} (e^{-\lambda_{ref}T} - 1) + \frac{C_T}{(\lambda_{ref}T)^2} (e^{\lambda_{ref}T} - 1) \quad (13)$$

섭취 시점을 아는 경우^[8]

실제 단일 섭취시점 t' 를 아는 경우에는 (12)식을 이용하여 주기평균 농도를 구한다.

4. 각 모델에 대한 오차 분석 및 평가

현재 국내 원전에서는 14일 측정주기와 30일 측정 주기가 사용되고 있다.^[8] 따라서, 측정 주기에 따른 각 모델의 오차분석을 수행하여 2절에서 제시한 선량평가의 정확도 요건의 충족여부를 평가하였다.

Fig. 1.에서는 측정주기 $T=14$ 일인 경우에 대하여 각 모델에 따른 평균삼중수소 농도예측치를 도시하였다. C_T/C_0 가 커질수록, 즉 초기농도에 비해 말기 농도가 커질수록 예측모델간의 차이가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 2.에서는 측정주기 $T=14$ 일인 경우에 대하여 확률적 모델(Uniform Distribution Model)을 기준으로 한 상대오차를 도시하였다. 본 논문에서 제시한 일정섭취모델(Constant Intake Model), ANSI 모델은 확률적 모델에 비해 과소 평가를 하며, 50%의 오차 한계 이내에 드는 것을 알 수 있다. 선형모델의 경우, C_T/C_0 가 작아지는 경우, 즉 초기에 비해 말기의 삼중수소 농도가 작아지는 경우, 지나치게 보수적으로 과대 평가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.에서는 섭취 기간 중에 단일급성섭취가 일어난 경우에 대하여, 실제 단일섭취 시점에 따른 평균삼중수소 변화를 각 모델에 의한 예측결과와 대비하여 도시하였다. 결과를 보면, 확률적 모델이 가장 보수적이고, 그 다음으로는 ANSI 모델, 일정섭취모델, 선형모델 순서로 보수성이 감소하는 것으로 나타났다.

Fig 4.에서는 실제 단일섭취 시점에 따른 평균삼중수소 변화에 대한 각 모델에 의한 예측 결과의 상대오차를 도시하였다. 실제 단일섭취가 초기에 발생한 경우에는 각 모델은 실제 선량에 비해 50%이상 과소 평가를 하며, 실제 단일섭취가 말기에 발생한 경우에는 각 모델은 실제 선량에 비해 50%이상 과대 평가를 하는 것으로 나타났다. 예를 들어 확률적 모델의 경우, 실제 단일섭취가 2~8일 사이에 발생한 경우에는 실제 피폭량에 비해 정확도가 50% 이내로 유지되지만, 실제 섭취가 1일에 이루어진 경우에는 50.6% 과소 평가를, 실제 섭취가 9일에 이루어진 경우에는 57.4% 과대 평가를 하고 있다.

Fig. 5. ~ Fig. 8.에서는 측정주기가 30일인 경우에 대하여 Fig. 1. ~ Fig. 4.와 같은 유형의 계산 결과를 제시하였다. Fig. 5. ~ Fig. 8.을 Fig. 1. ~ Fig. 4.와 비교하여 보면 측정주기가 30일인 경우가 측정주기가 14일인 경우에 비해서 분석 방법간의 오차가 커지는 것을 보여준다.

Fig. 8.에 제시한 결과를 보면, 측정주기가 30일인 경우, 확률적 모델은 실제 단일섭취가 5 ~ 16일 사이에 발생한 경우에만 정확도 제한치를 충족시키는 것을 알 수 있다.

측정주기가 30일이며, 실제 섭취시점 t 에 비해서 예측섭취시점이 ± 3 일과 ± 5 일의 오차를 갖는 경우에 대하여 (12)식을 사용한 예측선량의 오차범위는 각각 $-21.8\% \sim +26.9\%$, $-34.9\% \sim +49.4\%$ 로 나타났다.

5. 평가 결론 및 대안 제시

평가 내용을 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

- ① 초기농도 C_0 에 비해 말기농도 C_T 가 증가하는 경우 모델간의 오차는 커지며, ANSI 모델, 일정섭취모델, 선형모델은 확률적인 모델에 비해 과소 평가하는 경향을 보인다. 그 이유는 말기 농도가 증가하는 경우에는 측정기간중 과대한 섭취가 이루어졌기 때문이다.
- ② 선형모델은 초기농도 C_0 에 비해 말기농도 C_T 에 비해 감소하는 경우, 매우 실제에 비해 과대 평가를 하게 된다. 그 이유는 선형모델에서는 생체적 반감기가 적절히 고려되지 않기 때문이다.
- ③ 실제로 단일급성섭취가 발생한 경우, 섭취 시점에 대한 정보를 활용하지 않고 확률적 모델, ANSI 모델, 일정섭취모델, 선형모델 선형모델을 사용하는 경우에는 실제 선량에 비해 오차가 50% 이상으로 될 확률이 매우 크다.
- ④ 따라서 실제로 단일 급성섭취가 발생한 경우에는 가능한 한 모든 정보를 사용하여

섭취 시점을 찾도록 해야 하며, (12)식을 이용하여 삼중수소 평균농도를 예측해야 한다.

예상섭취시점 t 가 실제 섭취시점 t' 에 비해서 ± 5 일의 오차를 갖는 경우에도, 예측 오차의 범위는 $-34.9\% \sim +49.4\%$ 로서 허용기준을 충족하게 된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소의 주관(01-지역-01)으로 수행되었음

참고문헌

- [1] Report of the Working Group on Bioassay and in vivo Monitoring Criteria, "Bioassay Guideline2. Guidelines for Tritium Bioassay," Environmental Health Directorate, Department of National Health and Welfare, Canada, Report 83-EHD-87, 1987.
- [2] ANSI HPS N13.14-1994, "Internal Dosimetry Programs for tritium Exposure- Minimum Requirements," ANSI, 1994.
- [3] ICRP, "Individual Monitoring for Intake of Radionuclides by Workers : Design and Interpretation," ICRP Publication 54, Pergamon Press, Oxford, New York, 1988.
- [4] U.S NRC, "Monitoring Criteria and Methods to Calculate Occupational Radiation Doses," Regulatory Guide 8.34, 1992.
- [5] IAEA Safety Standards Series, "Assessment of Occupational Exposures due to Intakes of Radionuclides," No. RS-G-1.2, IAEA, 1999.
- [6] 정규환, "소변시료 분석 결과를 이용한 삼중수소 내부 피폭 선량 평가 식", 제7차 방사선피폭선량 평가 Workshop, 2001.
- [7] IAEA Safety Standards Series, "Assessment of Occupational Exposures due to External Sources of Radiation," No. RS-G-1.3, IAEA, 1999.
- [8] 한국전력공사, "방0-6-105 종사자 피폭방사선량 관리 절차서", 월성원자력 제1발전소 절차서, Rev.5, 1999.

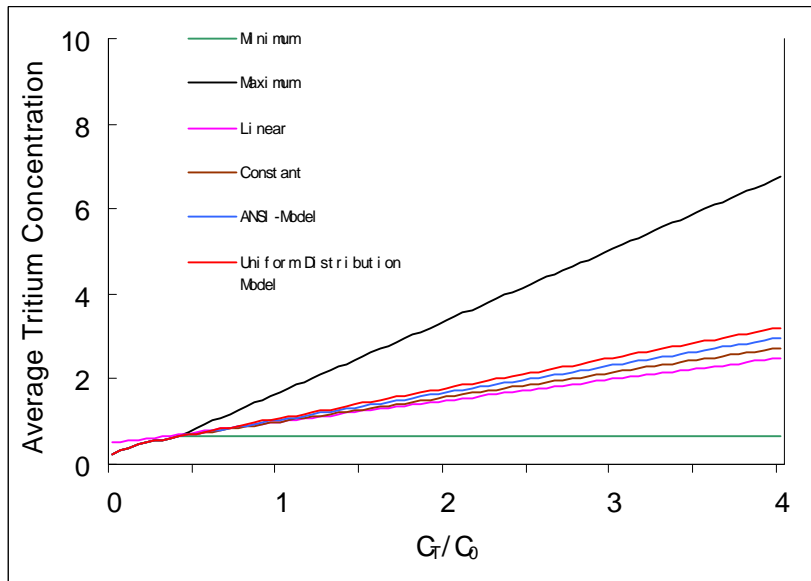


Fig. 1. Calculate Average Tritium Concentrations (Measurement Period = 14days)

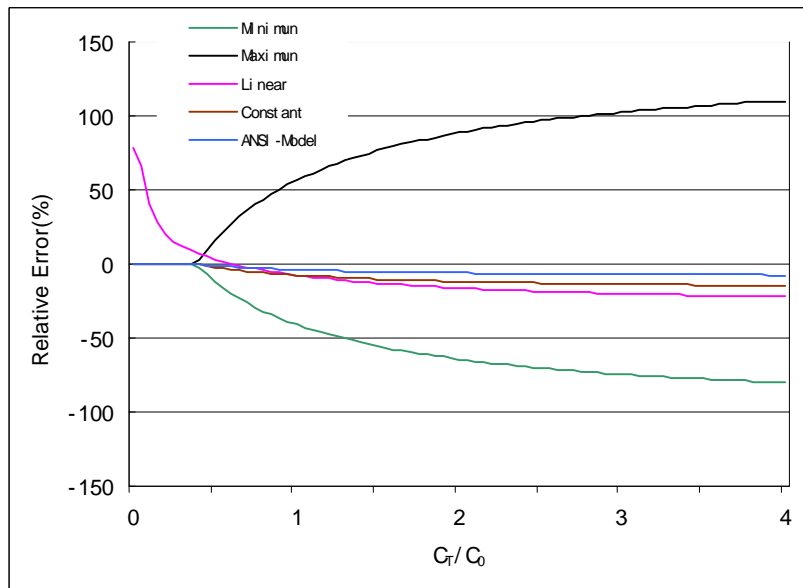


Fig. 2. Relative Percent Error to Uniform Distribution model
(Measurement Period = 14days)

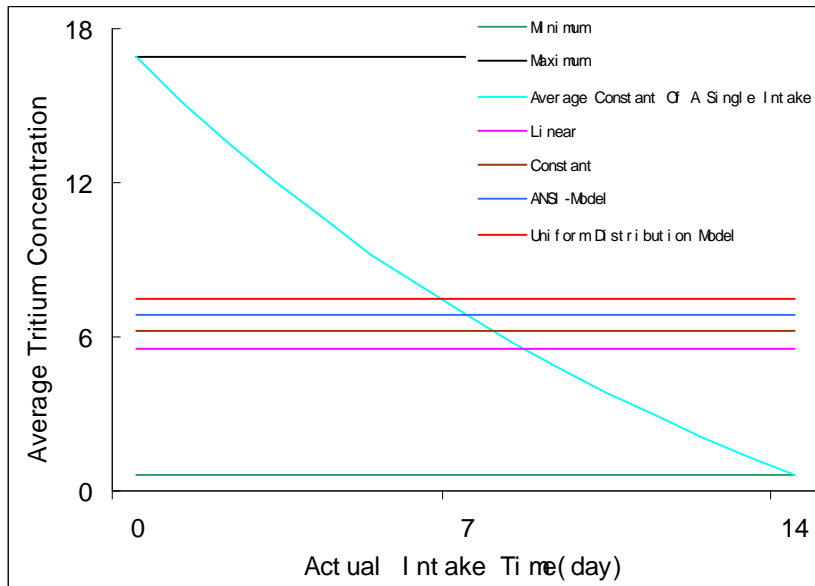


Fig. 3. Calculate Average Tritium Concentrations .vs. Actual Intake Time (Measurement Period = 14days, $C_T/C_0=10.0$)

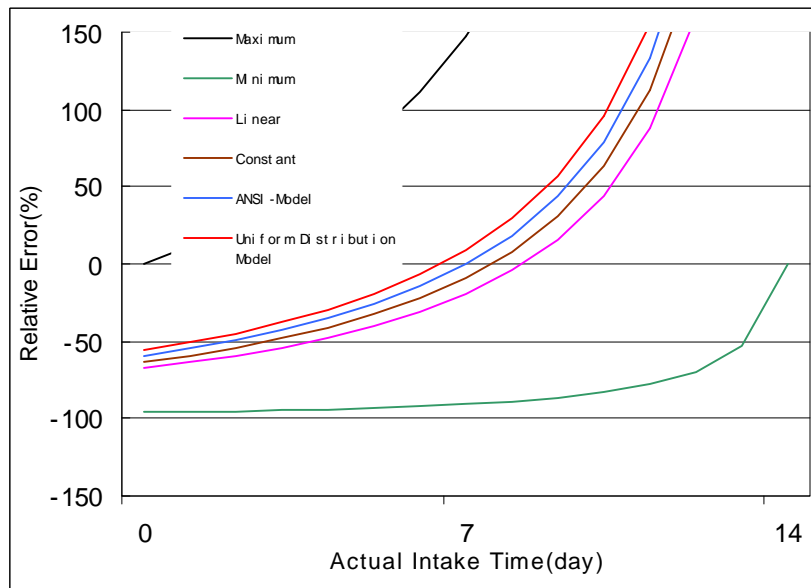


Fig. 4. Relative Percent Error to Exact Model .vs. Actual Intake Time (Measurement Period = 14days, $C_T/C_0=10.0$)

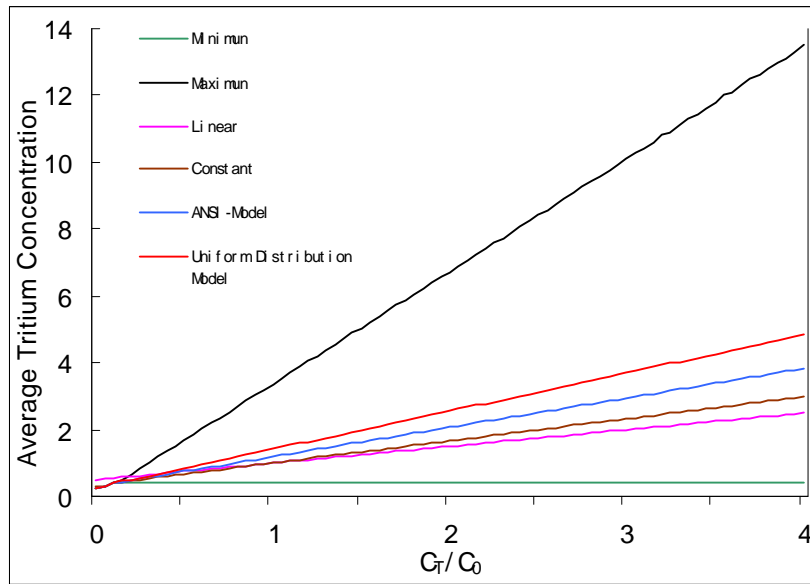


Fig. 5. Calculate Average Tritium Concentrations (Measurement Period = 30days)

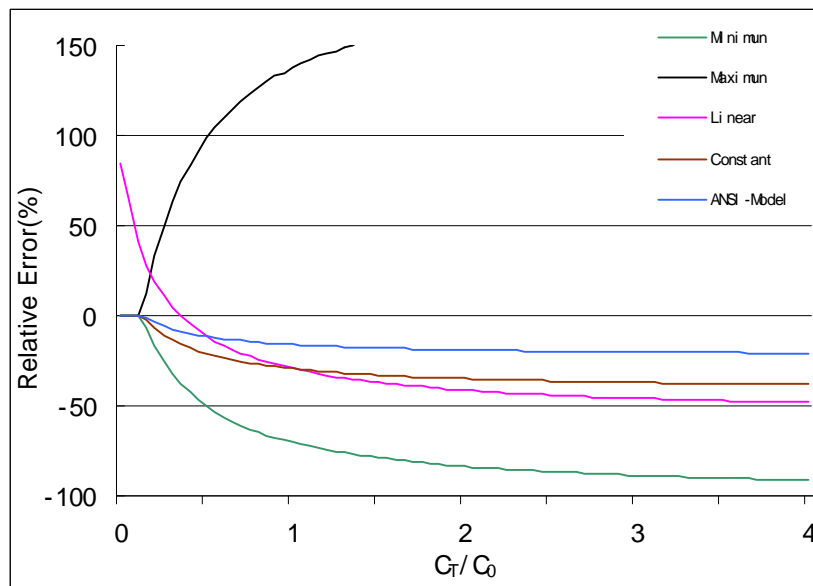


Fig. 6. Relative Percent Error to Uniform Distribution model
(Measurement Period = 30days)

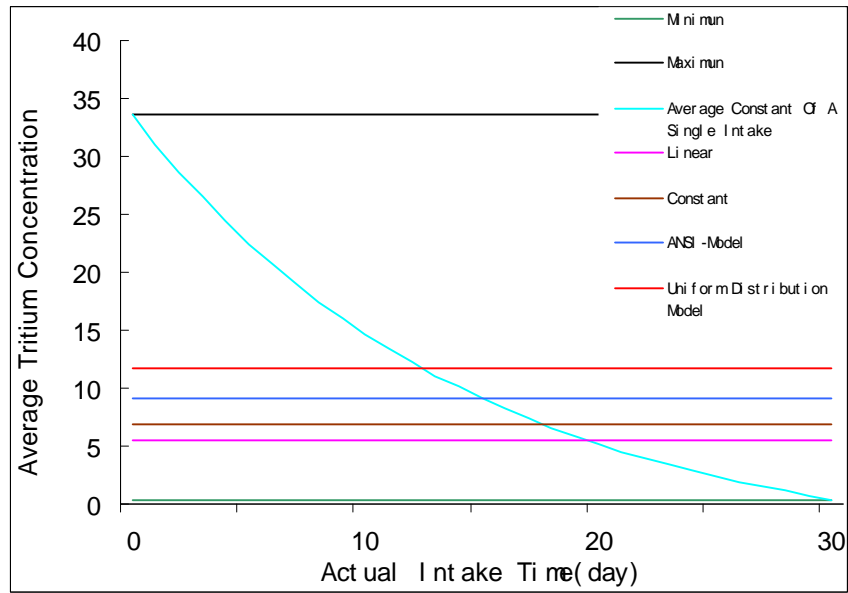


Fig. 7. Calculate Average Tritium Concentrations .vs. Actual Intake Time (Measurement Period = 30days, $C_T/C_0=10.0$)

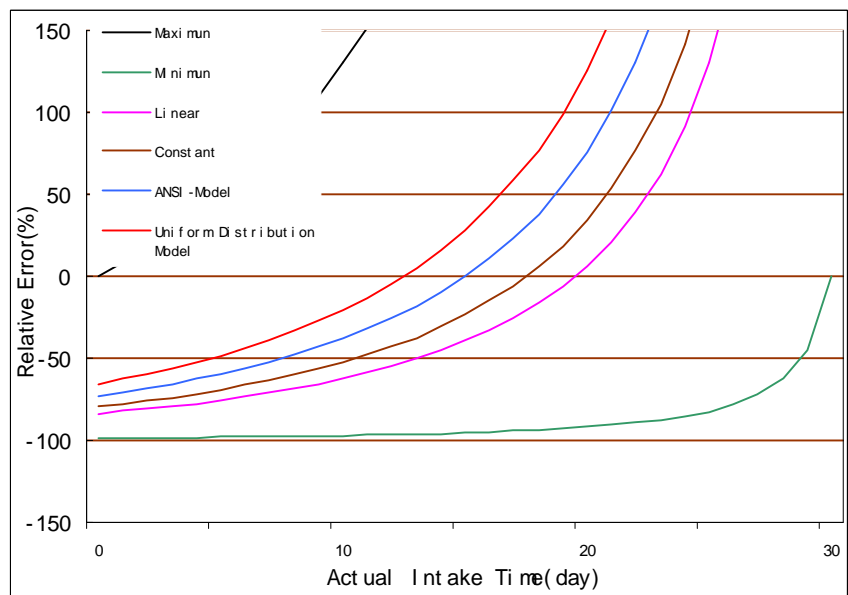


Fig. 8. Relative Percent Error to Exact Model .vs. Actual Intake Time (Measurement Period = 30days, $C_T/C_0=10.0$)