

삼중수소 농도 예측모델을 통한
월성 TRF 용량 평가 및 기초설계변수 해석

Capacity Evaluation and Design Parameter Analysis of Wolsong TRF
Using a Tritium Concentration Prediction Model

송규민, 손순환, 김광신, 이숙경

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

월성원자력발전소의 삼중수소를 제거하기 위한 TRF(Tritium Removal Facility)의 용량 평가와 기초설계변수 해석을 수행하였다. TRF 가동 전후의 계통내 삼중수소 농도 변화를 예측하기 위한 모델을 제시하고 지배방정식의 해를 구하였다. TRF 조업방식과 처리용량 및 삼중수소 제거율에 따른 삼중수소 농도추이를 평가하였다. 감속재 삼중수소 농도는 TRF 처리용량에 따라 민감하게 변화한 반면, 탈 삼중수소율 변화에는 덜 민감함을 보였다. 4개 호기 기준으로 감속재 삼중수소 농도를 $10\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 로 유지시키는 경우, 월성 TRF 처리용량은 80kg/hr , TRF의 탈 삼중수소율은 35 정도가 적절하였다.

Abstract

The capacity evaluation and design parameter analysis of Wolsong-TRF were performed. A model for the prediction of tritium concentration in moderator and PHT before and after TRF operation was proposed and the governing equations were solved. The tritium concentration, which is dependent on the operating method, the treatment capacity and the detritiation factor of TRF, was calculated using the model. Tritium concentration in moderator was sensitive to the TRF capacity but less sensitive to the detritiation factor. TRF capacity of $80\text{kg-D}_2\text{O/hr}$ and detritiation factor of 35 were appropriate to maintain tritium concentration at 10Ci in moderator.

1. 서론

중수로는 감속재 및 냉각재로 중수를 사용하고 있어 타 경수로형 원전에 비해 삼중수소 생성량이 상대적으로 크다. 대부분의 삼중수소는 중수중의 중수소와 중성자와의 반응에 의해 생성되고, 자연 붕괴 및 중수 손실로 인해 일부 없어지지만, 생성속도가 제거속도에 비해 상대적으로 크므로 중수중의 삼중수소 농도는 발전소 운전에 따라 증가하게 된다.

삼중수소는 중수로형 원전에서 작업자의 방사선 피폭 및 방사성 물질의 환경 방출량 증가에 주요 원인이 되고 있으므로 작업자 및 환경보호를 위해 중수중의 삼중수소를 제거하여 계통내 삼중수소 축적량을 저감화할 필요가 있다. 이를 위한 장기 대책으로 Tritium Removal Facility(TRF)을 적용하는 방안을 고려할 수 있다.

TRF 적용시 우선적으로 고려하여야 할 중요한 사항이 적절한 TRF의 용량을 정하는 것이다. 이는 초기 시설 투자비를 결정하는 경제적인 측면 뿐만 아니라, TRF 가동시 운전모드(연속/불연속 운전)에 영향을 미치기 때문이다. TRF 운전모드는 설비 및 시스템의 신뢰도, 재료의 피로, 운전상 편리, 설비 이용율, 에너지 효율 등에 크게 영향을 미치므로 적절한 TRF 용량을 결정하는 것은 매우 중요하다. 즉 TRF를 적절한 용량으로 설계하여 TRF의 연속운전을 가능하게 하므로써 시설 및 운전의 신뢰도와 경제성을 향상시킬 수 있다.

따라서 여기서는 TRF 용량에 영향을 미치는 인자로서 삼중수소 농도 목표치, TRF의 탈 삼중수소율 및 TRF 운전방법을 선정하고, 각 인자들이 TRF 용량에 미치는 영향을 분석하고자 하며

각 인자들의 적절한 범위를 결정하여 향후 최적화 방향을 제시하고자 한다.

2. 삼중수소 농도 예측모델

계통내 삼중수소 농도는 발전소 출력(중성자 선속), 가동율, 중성자 선속하의 중수량, 자연붕괴 및 중수손실, TRF 처리량 및 TRF 탈 삼중수소율 등에 의해 결정된다. 삼중수소의 생성, 제거 및 축적 추이를 알아보기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 계통내 전체 중수는 균일하게 혼합된 상태이다.
- ② 중수보충량은 중수손실량과 같다.
- ③ 감속재에서 누설되어 회수된 중수는 감속재로만 사용된다.
- ④ 냉각재에서 누설되어 회수된 중수는 냉각재로만 사용된다.
- ⑤ 감속재와 냉각재는 완전히 분리되어 있으나, TRF 가동에 의해 삼중수소 농도가 낮은 냉각 재가 감속재로 보충될 수 있다.
- ⑥ TRF에 의해 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재보다 높은 경우 감속재로 재순환된다.

그림 1은 계통내 삼중수소의 생성 및 제거 개략도를 나타낸 것이다. 삼중수소는 중성자 선속하에 있는 중수중에서 생성되며, 손실된 중수를 보충하기 위해 장입되는 중수에 포함되어 계통내로 들어올 수 있다. 또한 삼중수소는 자연 붕괴에 의해 없어지고 계통에서 누설된 중수 중 회수되지 않고 손실되는 중수에 포함되어 없어진다. 여기에 TRF가 운전되는 경우 TRF에서 삼중수소가 제거되고 중수는 되돌아오는 과정이 포함되어 계통내 삼중수소 농도가 결정된다. 이를 바탕으로 다음의 각 경우에 대한 삼중수소 물질수지 미분방정식을 세울 수 있다.

가. TRF 가동 전 계통내 삼중수소 농도

TRF가 가동되기 이전의 계통내 삼중수소 농도는 생성속도, 붕괴속도 및 중수손실속도에 의해 결정된다. TRF 가동전의 삼중수소 농도는 삼중수소에 대한 물질수지식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{d(M_i \cdot N_i)}{dt} &= (\text{generation}) + (\text{make-up}) + (\text{decay}) + (\text{loss}) \\ &= \phi_i \sigma_i N_D m_i a + F_i N_0 - \lambda M_i N_i - L_i N_i\end{aligned}\quad (1)$$

초기값을 N_0 라고 했을 때 식 (1)의 해는 다음과 같다.

$$N_i = \left(N^0 + \frac{g_{1i}}{g_{2i}} \right) e^{\frac{g_{1i}}{M_i} t} - \frac{g_{1i}}{g_{2i}} \quad (2)$$

식 (2)를 삼중수소 방사능으로 나타내면 다음과 같다.

$$A_i = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_i = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[\left(N^0 + \frac{g_{1i}}{g_{2i}} \right) e^{\frac{g_{1i}}{M_i} t} - \frac{g_{1i}}{g_{2i}} \right] \quad (3)$$

나. TRF 가동 후 계통내 삼중수소 농도

TRF에서 삼중수소가 제거된 중수는 계통으로 되돌아오는데 중수의 삼중수소 농도는 TRF의 탈 삼중수소율에 의해 결정된다. 즉 식 (1)에 탈 삼중수소율항이 추가되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{d(M_m \cdot N_m)}{dt} &= \phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_0 - \lambda M_m N_m - L_m N_m \\ &\quad + TFA_T \left[\left(\frac{1}{DF} - 1 \right) N_m + \left(N_c - \frac{1}{DF} \right) H(t - t_{sw}) \right]\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\frac{d(M_c \cdot N_c)}{dt} &= \phi_c \sigma_c N_D m_c a + F_c N_0 - \lambda M_c N_c - L_c N_c \\ &\quad + TFA_T \left(\frac{N_m}{DF} - N_c \right) H(t - t_{sw})\end{aligned}\quad (5)$$

여기서 H-함수(heaviside function or unit step function)는 TRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재의 삼중수소 농도보다 높을 경우, 냉각재로 사용할 수 없기 때문에 감속재로 공급

하는 운전방식의 전환을 표현하기 위한 것이다. 즉 TRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재보다 높은 t_{sw} 이전에는 중수의 흐름이 「감속재 → TRF → 감속재」이고, TRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재보다 낮아지는 시점 t_{sw} 이후에는 중수흐름이 「감속재 → TRF → 냉각재 → 감속재」로 변경된다. 이를 각각 운전방식 I, 운전방식 II로 구분하여 각 계통의 삼중수소 농도 변화를 예측할 수 있다.

(1) 운전방식 I

$t \leq t_{sw}$ 일 때, 삼중수소 제거를 위한 중수의 흐름은 다음과 같다.

$$\text{감속재} \rightarrow \text{TRF} \rightarrow \text{감속재} \quad \text{if } N_m/DF \geq N_c$$

따라서 식 (4)와 (5)로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d(M_m \cdot N_m)}{dt} = \phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0} + \left[-\lambda M_m - L_m + T F a_T \left(\frac{1}{DF} - 1 \right) \right] N_m \quad (6)$$

$$\frac{d(M_c \cdot N_c)}{dt} = \phi_c \sigma_c N_D m_c a + F_c N_{c0} - (\lambda M_c + L_c) N_c \quad (7)$$

총 중수량 M_m, M_c 은 일정하다고 가정하면, 식 (6)과 (7)의 해는 다음과 같다.

$$N_m = \left(N_m^0 + \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \right) e^{\frac{g_{2m}}{M_m} t} - \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \quad (8)$$

$$N_c = \left(N_c^0 + \frac{g_{1c}}{g_{2c}} \right) e^{\frac{g_{2c}}{M_c} t} - \frac{g_{1c}}{g_{2c}} \quad (9)$$

이를 방사능 단위로 나타내면 다음과 같다.

$$A_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[\left(N_m^0 + \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \right) e^{\frac{g_{2m}}{M_m} t} - \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \right] \quad (10)$$

$$A_c = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_c = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[\left(N_c^0 + \frac{g_{1c}}{g_{2c}} \right) e^{\frac{g_{2c}}{M_c} t} - \frac{g_{1c}}{g_{2c}} \right] \quad (11)$$

(2) 운전방식 II

N_m/DF 가 N_c 보다 낮아지는 시점 즉 $t > t_{sw}$ 일 때, 삼중수소 제거를 위한 중수의 흐름은 다음과 같이 전환된다.

$$\text{감속재} \rightarrow \text{TRF} \rightarrow \text{냉각재} \rightarrow \text{감속재} \quad \text{if } N_m/DF < N_c$$

따라서 식 (4)와 (5)로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d(M_m \cdot N_m)}{dt} = \phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0} - \lambda M_m N_m - L_m N_m + T F (N_c - N_m) a_T \quad (12)$$

$$\frac{d(M_c \cdot N_c)}{dt} = \phi_c \sigma_c N_D m_c a + F_c N_{c0} - \lambda M_c N_c - L_c N_c + T F \left(\frac{N_m}{DF} - N_c \right) a_T \quad (13)$$

식 (12)와 (13)의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$N_m = g_1 e^{\alpha t} + g_2 e^{\beta t} + \left(\frac{c_{12} d_2 - c_{22} d_1}{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}} \right) \quad (14)$$

$$N_c = g_1 \frac{\alpha - c_{11}}{c_{12}} e^{\alpha t} + g_2 \frac{\beta - c_{11}}{c_{12}} e^{\beta t} + \left(\frac{c_{21} d_1 - c_{11} d_2}{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}} \right) \quad (15)$$

식 (14), (15)를 방사능 단위로 나타내면 다음과 같다.

$$A_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[g_1 e^{\alpha t} + g_2 e^{\beta t} + \left(\frac{c_{12} d_2 - c_{22} d_1}{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}} \right) \right] \quad (16)$$

$$A_c = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_c \\ = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \left[g_1 \frac{c - c_{11}}{c_{12}} e^{\alpha t} + g_2 \frac{\beta - c_{11}}{c_{12}} e^{\beta t} + \left(\frac{c_{21}d_1 - c_{11}d_2}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}} \right) \right] \quad (17)$$

윗 식은 TRF 가동후 감속재와 냉각재의 삼중수소 농도변화를 나타내고 있으며, 시간이 지남에 따라 삼중수소 농도의 감소속도는 줄어든다. 즉 정상상태에 도달했을 때의 감속재와 냉각재 삼중수소 포화농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_m^\infty = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \left(\frac{c_{12}d_2 - c_{22}d_1}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}} \right) \quad (18)$$

$$A_c^\infty = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \left(\frac{c_{21}d_1 - c_{11}d_2}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}} \right) \quad (19)$$

이때 TRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도는 냉각재보다 낮아야 하며, 식 (18)과 식 (19)의 감속재와 냉각재의 삼중수소 농도가 TRF 가동에 따른 최종 목표치의 하한값이 된다.

다. 삼중수소 농도 지배 방정식

삼중수소 농도추이를 설정하는 지배식들은 다음의 일반화된 형태로 정리하여 해석할 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = c N + d \quad (20)$$

즉,

$$\frac{dN_m}{dt} = c_{11}N_m + c_{12}N_c + d_1 \quad (21)$$

$$\frac{dN_c}{dt} = c_{21}N_m + c_{22}N_c + d_2 \quad (22)$$

여기서 사용된 각 인자들을 표 1에 나타냈다.

식 (20)에서 c는 삼중수소 농도 증감속도에 영향을 주는 반면, d는 삼중수소 농도 증감속도가 영(零)일 때, 즉 포화농도에 도달된 경우 포화농도에 영향을 주는 인자라고 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

가. TRF 가동에 의한 삼중수소 농도 목표치 도달 여부

식 (20)에서 c, d는 시간에 따른 감속재와 냉각재 삼중수소 농도변화를 결정하는 중요한 값이다. 파라미터중 c_{12} 와 c_{21} 은 감속재와 냉각재간의 상호 종속성을 나타내는 인자로 TRF 가동전 또는 가동후 운전방식 I의 경우에는 서로 독립적이나, TRF 가동후 운전방식 II인 경우에는 상호 종속성을 나타내 수식상 얹힌 형태로 나타난다. 따라서 감속재가 TRF와 냉각재 계통을 거쳐 감속재 계통으로 되돌아오기 때문에 운영 및 공정제어 측면에서는 복잡하다.

시간이 경과함에 따라 N_m 과 N_c 이 어떤 일정한 값으로 수렴하는가 혹은 발산하는가의 여부는 TRF의 용량설정에 매우 중요하다. 이것은 TRF의 삼중수소 제거속도와 계통내 삼중수소 생성속도에 의해 결정되며, 지배방정식의 c에 의해 결정된다. $\text{trace}(c)$ 값 즉 $(c_{11}+c_{22})$ 이 음수이고, $\det(c)$ 값 즉 $(c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21})$ 이 양수이면 어떤 일정 값으로 수렴하므로 TRF에 의한 삼중수소 농도 저감이 가능함을 의미한다. 표 1로부터 $\text{trace}(c)$ 는 음수이고, $\det(c)$ 는 DF가 1보다 작지 않으므로 양수이다. 따라서 주어진 TF, DF에서는 N_m 이나 N_c 이 발산할 가능성은 없다.

나. 삼중수소 포화농도

삼중수소 포화농도는 식 (20)으로부터 $dN/dt=0$ 일 때이므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N^\infty = -c^{-1}d \\ = -\frac{1}{\det(c)} \begin{pmatrix} c_{22} & -c_{12} \\ -c_{21} & c_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

그림 2는 식 (23)을 이용하여 TRF 처리용량과 탈 삼중수소율에 따른 월성 1호기 감속재와 냉각재의 삼중수소 포화농도를 나타낸 그림이다. 그림에서 실선은 감속재의 삼중수소 포화농도를,

점선은 냉각재의 삼중수소 포화농도를 나타낸다. 여기서 TF는 월성 1호기에 대한 처리량이 아니라 월성 1,2,3,4 호기에 대한 처리량이며, 따라서 2,3,4호기의 포화농도도 각 호기의 감속재 및 냉각재 조건에 따라 약간 다른 값을 보일 수는 있으나 비슷한 값을 갖는다. 감속재의 삼중수소 포화농도 목표치가 정해졌을 경우, 이를 만족시키기 위한 최소의 DF와 TF를 그림 2의 실선으로부터 알 수 있다. 감속재의 삼중수소 농도 목표치가 $10\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 인 경우, TF는 적어도 80kg/hr 이상이어야 한다. 즉 호기당 20kg/hr 이상은 처리하여야 한다. 그림에서 감속재의 삼중수소 포화농도는 DF에 대해 민감하지 않음을 알 수 있다. 즉 삼중수소 목표치를 만족시키기 위한 TF가 정해졌을 경우 DF에 거의 무관하게 원하는 목표치에 도달할 수 있다. 따라서 DF에 대한 설정은 냉각재의 삼중수소 목표치를 기준으로 정해야 할 것이다.

그림 2에서 점선은 식 (23)을 이용하여 구한 냉각재의 삼중수소 포화농도를 나타내고 있다. 그림으로부터 냉각재의 삼중수소 포화농도 목표치가 정해졌을 경우, 이를 만족시키기 위한 최소의 DF와 TF 값을 알 수 있다. TF가 감속재 삼중수소 목표치로부터 80kg/hr 로 설정되었을 경우 냉각재 삼중수소 농도 목표치가 $0.6\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 이면 DF는 적어도 20 이상은 되어야 한다. 감속재 경우와는 달리 냉각재의 삼중수소 포화농도는 DF에 대해서도 민감함을 알 수 있다. 따라서 감속재와 냉각재의 삼중수소 목표치를 각각 $10\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 와 $0.6\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 로 정했을 경우, 이를 만족시키는 TF와 DF의 설정범위는 실선의 $10\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 곡선 우측 영역과 점선의 $0.6\text{Ci/kg-D}_2\text{O}$ 곡선의 우상단 영역의 공통부분이 될 것이다.

지배방정식의 c 를 TF와 DF에 대해 미분하여, 위 결과에서와 같은 TF와 DF의 종속성을 살펴볼 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial TF} = \begin{pmatrix} -\frac{a_T}{M_m} & \frac{a_T}{M_m} \\ \frac{a_T}{M_c DF} & -\frac{a_T}{M_c} \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\frac{\partial d}{\partial DF} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{TFA_T}{M_c DF^2} & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

식 (24)에서 TF 변화가 감속재와 냉각재의 삼중수소 농도에 영향을 미치지만, 식 (25)에서 DF 변화는 냉각재의 삼중수소 농도에는 영향을 미치지만 감속재에는 무관함을 알 수 있다.

다. TRF의 탈 삼중수소율이 미치는 영향

TRF의 탈 삼중수소율은 TRF에 들어오는 중수의 삼중수소 농도와 TRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도비를 말한다. TRF의 탈 삼중수소율 변화가 감속재 및 냉각재의 삼중수소 농도에 미치는 영향은 식 (25)으로부터 유추할 수 있다. 식 (25)에서 탈 삼중수소율이 감속재 삼중수소 농도에 직접적으로 영향을 미치지는 않음을 알 수 있다. 그러나 냉각재의 경우는 다르게 나타나고 있다. TRF 처리량과 탈 삼중수소율에 따라 영향의 크기가 다르게 나타나고 있는데, TRF 처리량이 증가할수록 그리고 탈 삼중수소율이 작을수록 영향을 크게 미침을 알 수 있다. 즉 그림 2에서 보듯이 감속재 삼중수소 농도를 나타내는 실선은 종축의 탈 삼중수소율 값에 거의 무관한 경향을 보이고 있지만, 냉각재의 삼중수소 농도를 나타내는 점선은 탈 삼중수소율 값과 반비례한다. 또한 탈 삼중수소율이 작아질수록 그리고 TRF 처리량이 증가할수록 그 변화 폭이 점점 증가하는 경향을 보여주고 있다.

탈 삼중수소율이 감속재 삼중수소 농도에 직접적으로 영향을 미치지 않으므로, 감속재 삼중수소 농도 목표치에 의해 TRF 탈 삼중수소율이 결정되지는 않는다. 그러나 냉각재 삼중수소 농도에는 어느 정도 영향을 미치게 되므로, 냉각재 삼중수소 농도 설계 목표치에 의해 TRF 탈 삼중수소율이 결정된다고 할 수 있다. 탈 삼중수소율이 TRF의 측매탑 높이를 결정하는 만큼 이에 대한 결정은 초기 시설 투자비에 영향을 미치게 되므로, 냉각재 삼중수소 농도 목표치 결정에 있어서 이를 감안하여야 할 것이다.

4. 결론

TRF 가동후의 월성 원전 계통내 삼중수소 농도를 예측하는 식을 개발하고 이를 전산모사화하여 TRF 처리용량과 탈 삼중수소율에 따른 삼중수소 농도 변화를 살펴보았다. TRF 설계요건을 결정하는 가장 중요한 인자로 처리용량과 탈 삼중수소율을 들 수 있는데, 이들은 감속재와 냉각재의 삼중수소 농도 목표치에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 월성 1호기 감속재 삼중수소 농도를

2013년까지 10Ci/kg-D₂O 이하로 저감하기 위해서는, 월성 1,2,3,4 호기를 대상으로 하는 경우 TRF 처리용량은 80kg/hr, 단일호기(월성1호기)를 대상으로 하는 경우 TRF 처리용량은 20kg/hr 으로 평가되었다. 촉매탑 높이를 결정하는 탈 삼중수소율은 감속재 농도에 크게 영향을 미치지 않지만 약 35 정도면 충분했다. 이들 값들은 TRF 설계를 위한 하나의 기준이 되며, 위에서 제시한 예측식과 전산모사코드는 경제성 및 안전성을 고려한 월성 TRF 기초설계변수 검토 과정에서 활용될 수 있다.

참고문헌

- 송명재, 손순환외, “삼중수소 분리용 고분자 촉매 및 교환공정 개발”, KEPRI-93N-J02, 1995
- 성기웅, 김용익외, “삼중수소 제거를 위한 초저온 수소동위원소 종류공정 기술개발”, KAERI, 1995
- 손순환 등, “월성 원전 삼중수소 저감화 방안 연구”, 1993
- 송규민 등, “Parameter Analysis를 통한 월성 삼중수소 제거시설 설계요건 분석”, KEPRI, 1998
- D. H. Ahn et al., J. Korean Nuclear Society, 28(4) 415-423 (1996)

기호설명

A	삼중수소 방사능	[Ci/kg-D ₂ O]
a	원전가동율	[-]
a _T	TRF 가동율	[-]
DF	탈 삼중수소율, x _{in} /x _{out}	[-]
F	중수보충유량	[kg/sec]
g	상수	
H	heaviside function	[-]
L	중수손실	[kg/sec]
M	총중수량	[kg]
m	중성자 선속하의 중수량	[kg]
N	삼중수소 농도	[#/kg-D ₂ O]
N ⁰	삼중수소 농도 초기값	[#/kg-D ₂ O]
N ₀	보충 중수증 삼중수소 농도	[#/kg-D ₂ O]
N _D	단위 kg-D ₂ O당 중수소 수	[#/kg-D ₂ O]
t	시간	[sec]
TF	TRF 처리량	[kg/sec]
α	삼중수소 농도예측식의 근	[sec ⁻¹]
β	삼중수소 농도예측식의 근	[sec ⁻¹]
λ	삼중수소 붕괴상수	[sec ⁻¹]
σ	중수소의 중성자 흡수 단면적	[cm ²]
φ	열중성자 선속	[#/cm ² sec]

Superscripts

0	초기값
∞	포화상태

Subscripts

c	냉각재
m	감속재
sw	운전방식 전환

표 1. TRF 가동 여부에 따른 각 지배식의 파라미터

	TRF 가동 전	TRF 가동 후	
		운전방식 I	운전방식 II
C ₁₁	$-\frac{\lambda M_m + L_m}{M_m}$	$-\frac{\lambda M_m + L_m + TFa_T \left(1 - \frac{1}{DF}\right)}{M_m}$	$-\frac{\lambda M_m + L_m + TFa_T}{M_m}$
C ₁₂	0	0	$\frac{TFa_T}{M_m}$
d ₁	$\frac{\phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0}}{M_m}$	$\frac{\phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0}}{M_m}$	$\frac{\phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0}}{M_m}$
C ₂₁	0	0	$\frac{TFa_T}{DFM_c}$
C ₂₂	$-\frac{\lambda M_c + L_c}{M_c}$	$-\frac{\lambda M_c + L_c}{M_c}$	$-\frac{\lambda M_c + L_c + TFa_T}{M_c}$
d ₂	$\frac{\phi_c \sigma_c N_D m_c a + F_c N_{c0}}{M_c}$	$\frac{\phi_c \sigma_c N_D m_c a + F_c N_{c0}}{M_c}$	$\frac{\phi_c \sigma_c N_D m_c a + F_c N_{c0}}{M_c}$

표 2. 월성 원전 관련인자의 정의와 값 (출처:월성원자력 2, 3, 4호기 최종안전성 분석보고서)

인자	정의	감속재	냉각재	단위
a	가동율	0.8	0.8	-
L	중수 손실	5.57×10^{-3}	1.67×10^{-4}	kg/sec
F	중수 보충 유량 ⁽¹⁾	5.57×10^{-3}	1.67×10^{-4}	kg/sec
N ₀	보충 중수증 삼중수소 ⁽²⁾	냉각재 평형값	0	
M	총 중수량	2.62×10^3	9.57×10^4	kg
m	중성자 선속하의 중수량	2.3868×10^3	6.02×10^3	kg
N _D	단위 kg-D ₂ O당 중수소 ⁽³⁾	6.01×10^{25}	6.01×10^{25}	#/kg-D ₂ O
λ	삼중수소 봉괴상수	1.78×10^{-9}	1.78×10^{-9}	sec ⁻¹
σ	중수소의 중성자 흡수 단면적	$4.18 \times 10^{-28(4)}$	$3.64 \times 10^{-28(5)}$	cm ²
φ	열중성자 선속	1.89×10^{14}	1.235×10^{14}	#/cm ² sec

(1) 중수손실율과 동일

(2) 냉각재 보충은 새중수, 감속재 보충은 냉각재내 중수를 이용

(3) $2 \times D\text{-atom}/D_2O \times N_A/20g\text{-D}_2O \times 10^{-3} g/kg \times 0.9975 \text{ kg-D}_2O/kg = 6.01 \times 10^{25} \text{ D/kg}$

(4) $\sigma_0 (5.1 \times 10^{-4} \text{ barn}) \times (\pi/4)^{0.5} \times (298.6/341)^{0.5} = 3.64 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$

(5) $\sigma_0 (5.1 \times 10^{-4} \text{ barn}) \times (\pi/4)^{0.5} \times (298.6/563)^{0.5} = 4.18 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$

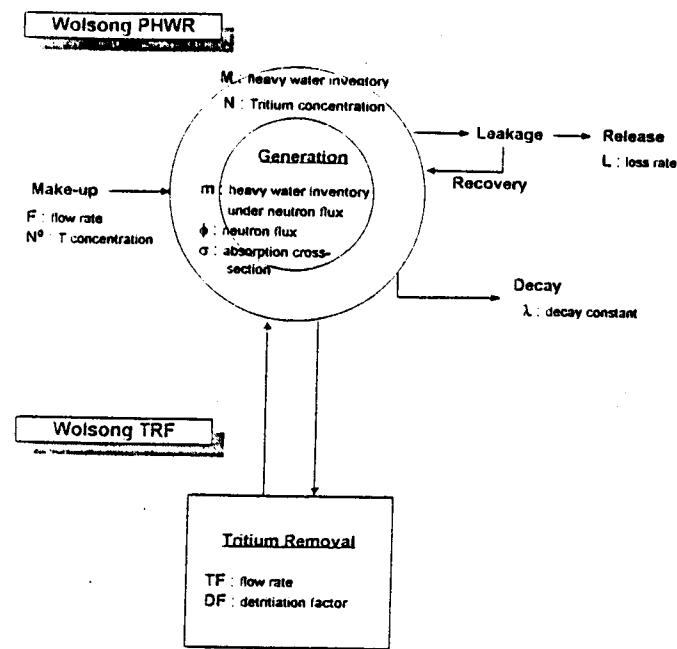


그림 1. 월성 원전의 삼중수소 생성 및 제거 개략도.

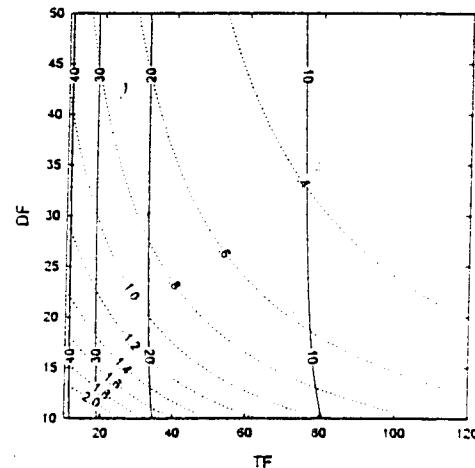


그림 2. TRF 가동 후 TF와 DF에 의한 월성 1호기 감속재(실선)
및 냉각재(점선) 삼중수소 포화농도값. (TRF 가동율 80%)