

Parametric Analysis of Design Capacity for Tritium Removal Facility

손순환, 정양근, 이철언

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

중수로형(PHWR) 원자력발전소는 감속재와 냉각재로 중수를 사용하고 있어 방사성 수소동위원소인 삼중수소 생성량이 경수로에 비해 크며 계통내 삼중수소 축적량은 운전년수에 따라 증가하게 된다. 중수로형 원전에서 삼중수소 저감화를 위한 장기 대책으로 Tritium Removal Facility를 적용하는 경우, 우선적으로 고려하여야 할 사항은 적절한 TRF의 용량을 결정하는 것이다. 이는 초기 시설 투자비 뿐만 아니라 설비 및 운전의 신뢰도와 이용율에도 영향을 미치므로 연속운전이 가능하도록 용량을 결정하는 것이 중요하다. 이를 위해 감속재를 대상으로 삼중수소 농도 목표치, 삼중수소 농도 목표치 도달기간, 탈 삼중수소율, TRF 적용시점이 TRF 처리량과 축매담 높이에 미치는 영향을 분석하였다. 삼중수소 농도 목표치는 5~15Ci/kg, 도달기간은 3~8년, 탈 삼중수소율은 0.05 ~ 0.4, TRF 적용시점은 가동 후 10~20년이 적절한 것으로 확인되었다.

1. 서 론

현재 월성 원전 부지에는 월성 1호기가 1983년부터 가동중이며, 월성 2,3,4호기가 시운전 및 건설중에 있어 1999년 이후에는 총 4기의 중수로가 가동될 것이다. 중수로는 감속재 및 냉각재로 중수를 사용하고 있어 대부분의 삼중수소는 중수중의 중수소와 중성자와의 반응에 의해 생성되고 (2,400 Ci/MWe·a), 자연 붕괴 및 중수 손실로 인해 의해 일부 없어지지만, 중수중의 삼중수소 농도는 운전 년수에 따라 증가하게 된다. 월성 원전 부지에 4기의 중수로가 가동되면 삼중수소 축적 속도는 더욱 커지게 될 것이다.

삼중수소는 중수로형 원전에서 작업자의 방사선 피폭과 방사성 물질의 환경 방출량 증가의 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)를 적용하는 방안을 고려할 수 있다⁽²⁾.

TRF 적용시 우선적으로 고려하여야 할 중요한 사항이 적절한 TRF의 용량을 정하는 것이다. 이는 초기 시설 투자비의 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, 목표치에 도달하는데 필요한 기간, TRF에서의 탈 삼중수소율, TRF 적용시점을 선정하고, 각 인자들이 TRF 용량에 미치는 영향을 분석하고자 하며 각 인자들의 적절한 범위를 결정하여 향후 최적화 방향을 제시하고자 한다. 그림 1에 TRF 용량에 따른 월성 1,2,3,4호기의 감속재 삼중수소 농도 변화 추이를 보여주고 있는데 삼중수소 제거 시나리오에 따라 각 호기별 삼중수소 농도가 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있다.

2. 삼중수소 농도 및 촉매탑 해석 모델

그림 2에 중수로형 원전에서 삼중수소의 생성 및 제거 흐름을 나타냈다. 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 중수중 회수되지 않고 손실되는 중수에 포함되어 없어진다. 만약 TRF가 적용되는 경우 TRF에서 삼중수소가 제거되고 중수는 되돌아오는 과정이 포함된다.

삼중수소 축적량은 발전소 출력(중성자 선속), 가동율, 중성자 선속하의 중수량, 자연붕괴 및 중수손실, TRF 처리량, TRF에서의 탈 삼중수소율 등에 의해 결정된다. 삼중수소의 생성, 제거 및 축적 추이를 알아보기 위해 삼중수소 농도 예측식을 유도하였다.

2.1 TRF 적용전 삼중수소 농도

중수 보충량과 중수 손실량은 같으며, 초기 장전 중수의 삼중수소 농도는 0 으로 가정하고 TRF 적용전의 삼중수소 농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁾.

$$\frac{dN}{dt} + \lambda_e \cdot N = S \quad (1)$$

$$S = \frac{\psi \cdot \sigma \cdot N_D \cdot m \cdot a + F_1 \cdot N_1}{M} \quad (2)$$

$$\lambda_e = \frac{\lambda \cdot M + L + IS}{M} \quad (3)$$

$$A = \lambda \cdot N = \frac{\lambda \cdot S}{\lambda_e} (1 - e^{-\lambda_e \cdot t}) \quad (4)$$

2.2 TRF 적용 후 삼중수소 농도 예측

2.1의 가정과 동일하며 TRF에서 삼중수소가 제거된 중수는 계통으로 되돌아오는데 중수의 삼중수소 농도는 촉매탑의 탈 삼중수소율에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(M \cdot N) = & \psi \cdot \sigma_D \cdot N_D \cdot m \cdot a + F_1 \cdot N_1 + F_2 \cdot N_2 + R \cdot N_R \\ & - \lambda \cdot M \cdot N - L \cdot N - IS \cdot N - TF \cdot N \end{aligned} \quad (5)$$

$$R = TF \quad (6)$$

$$N_R = DF \cdot N \quad (7)$$

$$\lambda_e = \frac{\lambda \cdot M + L + IS + TF - TF \cdot DF}{M} \quad (8)$$

$$S = \frac{\psi \cdot \sigma \cdot N_D \cdot m \cdot a + F_1 \cdot N_1 + F_2 \cdot N_2}{M} \quad (9)$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda_e \cdot t} + \frac{\lambda \cdot S}{\lambda_e} (1 - e^{-\lambda_e \cdot t}) \quad (10)$$

2.3 촉매탑의 높이

촉매탑내의 기체 및 액체 유량이 일정하고 dilute gases를 가정하면 HTU-NTU 방법을 이용하여 촉매탑의 높이를 다음과 같이 구할 수 있다⁽³⁾.

$$h_T = (H_{OL})_{av} \cdot N_{OL} \quad (11)$$

$$H_{OL} = \frac{L_M}{K_{OL} \cdot \rho \cdot X_{BM}^* \cdot a_v} \quad (12)$$

$$N_{OL} = \int_{X_1}^{X_2} \frac{X_{BM}^* \cdot dX}{(1-X) \cdot (X^* - X)} \approx \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{X^* - X} \quad (13)$$

$$N_{OL} = \frac{1}{(1 - L_M/mG_M)} \ln \left[\left(1 - \frac{L_M}{mG_M}\right) \left(\frac{X_1 - Y_2/m}{X_2 - Y_2/m}\right) + \frac{L_M}{mG_M} \right] \quad (14)$$

3. 입력자료 및 인자

표 1에는 TRF 용량에 영향을 미치는 인자 및 범위가 나타나 있다. 위 식들에 사용된 각 상수들의 정의 및 값은 표 2에 나타나 있다.

4. 결과 및 분석

감속재를 대상으로 식(4)를 이용하여 TRF 적용시점에서의 삼중수소 농도를 계산하고 식(10)를 이용하여 각 인자들의 변화에 따른 TRF 처리량을 계산하였다. 또한 식(12)와 (14)를 이용하여 촉매탑의 높이를 평가하였다.

4.1 삼중수소 농도 목표치가 미치는 영향

TRF 적용시점을 가동 후 20년(65.4Ci/kg)으로, 탈 삼중수소율을 0.1로 가정했을 때, 삼중수소 농도 목표치에 도달하는데 필요한 기간을 변화시키면서 삼중수소 농도 목표치에 따른 TRF 처리량의 변화를 그림 3에 나타냈다. 삼중수소 농도 목표치가 4Ci/kg 이하에서는 TRF 처리량이 급격히 증가함을 볼 수 있으며, 도달기간이 3년 이상에서는 도달기간이 미치는 영향은 크지 않았다. 도달기간에 상관없이 비슷한 결과를 보여주고 있으며 적절한 삼중수소 농도 목표치는 5~15Ci/kg 범위이다.

식(12)에서 볼수 있듯이 TRF 처리량은 촉매탑의 HTU에 직접 영향을 미치며 촉매탑의 HTU와 처리량은 선형관계에 있으므로, 삼중수소 농도 목표치가 촉매탑 높이에 미치는 영향은 TRF 처리량에 미치는 영향과 같다.

4.2 삼중수소 농도 목표치 도달시간이 미치는 영향

그림 4(a)는 TRF 적용시점을 가동 후 20년으로, 감속재의 삼중수소 농도 목표치를 10Ci/kg으로 가정하고 탈 삼중수소율을 변화시키면서 도달기간에 따른 TRF 처리량의 변화를 보여주고 있다. 도달기간이 4년 미만에서는 TRF 처리량이 급격히 증가함을 알 수 있으며, 탈 삼중수소율이 0.2 이상에서는 탈 삼중수소율에 상관없이 비슷한 결과를 보여주고 있다.

그림 4(b)는 TRF 적용시점을 가동 후 20년으로, 탈 삼중수소율을 0.1로 가정하고, 감속재의 삼중수소 농도 목표치를 변화시키면서 도달기간에 따른 TRF 처리량의 변화를 보여주고 있다. 그림 4(a)와는 다르게 삼중수소 농도 목표치에 대한 의존도가 크지만 전체적인 변화 추이는 유사하다. 즉 두 경우에서 적절한 도달기간은 5~8년이다.

촉매탑의 높이에 미치는 영향은 4.1에서와 마찬가지로 HTU에 영향을 미치므로 TRF 처리량에 미치는 영향과 같다.

4.3 TRF의 탈 삼중수소율이 미치는 영향

그림 5는 TRF 적용시점을 가동 후 20년으로, 감속재의 삼중수소 농도 목표치를 10Ci/kg으로 가정하고, 도달기간을 변화시키면서 탈 삼중수소율에 따른 TRF 처리량 변화를 나타냈다. 탈 삼중수소율의 영향은 위의 두 경우에 비해 크지 않으나 탈 삼중수소율이 0.6 이상에서는 TRF 처리량

이 급격히 증가함을 알 수 있다. 도달기간이 3년 이상인 경우 도달기간의 영향은 크지 않았다.

식(14)에서 볼수 있듯이 탈 삼중수소율에 의해 탑 하부의 농도가 결정되므로 다른 변수와는 다르게 탈 삼중수소율은 촉매탑의 NTU에 영향을 미친다. 즉 탈 삼중수소율의 증가에 따라 촉매탑 높이가 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

4.4 TRF 적용시점(초기농도)이 미치는 영향

삼중수소 농도 목표치를 10Ci/kg으로, 탈 삼중수소율을 0.1로 가정하고, 도달기간을 변화시키면서 TRF 적용시점에 따른 TRF 처리량의 변화를 그림 6에 나타냈다. TRF 적용시점이 TRF 처리량에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 다른 인자와는 다르게 도달기간의 변화에 대한 의존도가 매우 큼을 알 수 있다.

5. 결 론

중수로형 원전에서 삼중수소 저감화를 위한 장기 대책으로 TRF를 적용하는 경우, 초기 시설 투자비 뿐만 아니라 설비 및 운전의 신뢰도와 이용을 관점에서 TRF의 연속 운전은 필수적이므로 적절한 TRF 용량을 결정하기 위해 TRF 용량에 미치는 인자들의 영향을 분석하였다. 삼중수소 농도 목표치, 삼중수소 농도 목표치 도달기간, 탈 삼중수소율, TRF 적용시점을 대상 인자로 정하고 TRF 처리량과 촉매탑의 높이에 미치는 영향을 분석하였다.

각 인자들이 TRF 처리량 및 촉매탑의 높이에 크게 영향을 미침을 알 수 있었으며, 각 인자들의 적절한 범위를 사전에 결정할 수 있었다. 또한 TRF 설계 요건을 개발하기 위해서는 TRF 설계용량에 영향을 미치는 각 인자들의 최적 값을 결정하는 것이 중요함을 확인할 수 있었다.

여기서는 각 인자들이 개별적으로 미치는 영향을 분석하였는데 향후 최적화 기법을 이용하여 각 인자들의 영향을 종합적으로 분석하여 최적의 변수를 결정하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 송명재 등, "삼중수소 분리용 고분자 촉매 및 교환공정 개발", KEPRI-93N-J02, 1995
2. 손순환 등, "월성 원전 삼중수소 저감화 방안 연구", 1993
3. Sherwood, Pigford, Wilke, "Mass Transfer", 1975

표 1. 사용된 인자 및 범위

인 자	범 위
감속재 삼중수소 농도 목표치	5.0 ~ 30.0 Ci/kg
TRF의 탈 삼중수소율	0.01 ~ 0.8
목표치에 도달하는데 필요한 기간	3 ~ 10 년
TRF 적용시점	10 ~ 20 년

표 2. 삼중수소 농도 계산시 사용된 상수의 정의 및 값

상 수	정 의	냉 각 재	감 속 재
a	가동율	0.844	0.844
L	중수손실(kg/sec)	1.18×10^{-4}	1.18×10^{-4}
F	중수 보충 유량(kg/sec)	1.18×10^{-4}	1.18×10^{-4}
M	총 중수량(kg)	1.32×10^9	2.57×10^9
m	중성자 선속하의 중수량(kg)	6.03×10^3	1.902×10^9
N_D	단위 kg · D ₂ O당 중수소 수	6.01×10^{20}	6.01×10^{20}
λ	삼중수소 붕괴상수(sec ⁻¹)	1.78×10^{-9}	1.78×10^{-9}
σ	중수소의 중성자 흡수단면적(cm ²)	3.64×10^{28}	4.18×10^{-28}
ψ	열중성자 선속(#/cm ² -sec)	1.235×10^{14}	2.30×10^{14}

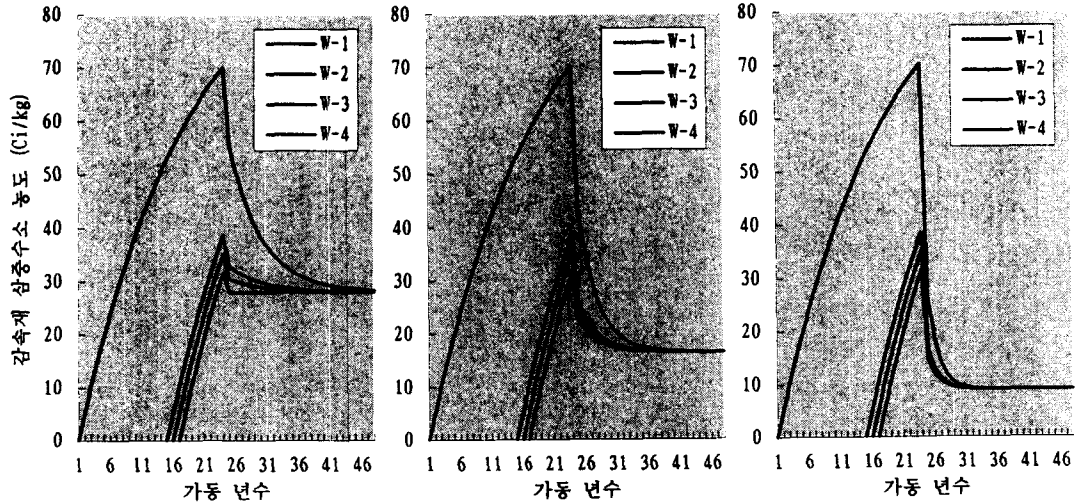


그림 1. TRF 적용시 삼중수소 제거 시나리오에 따른 삼중수소 농도 변화 추이

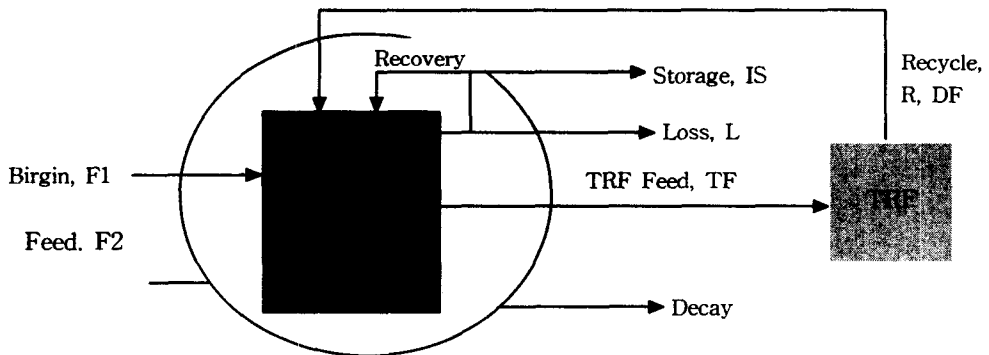
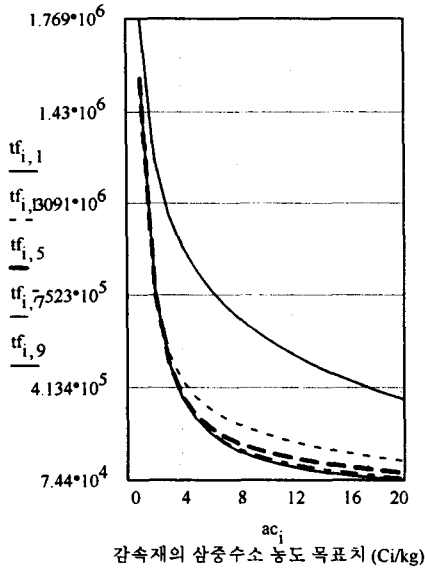
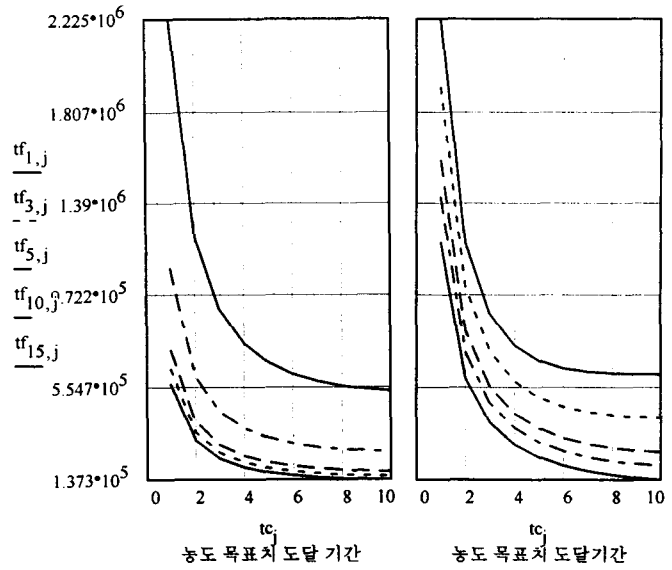


그림 2. 삼중수소 생성 및 제거 흐름도



감속재의 삼중수소 농도 목표치 (Ci/kg)



농도 목표치 도달 시간

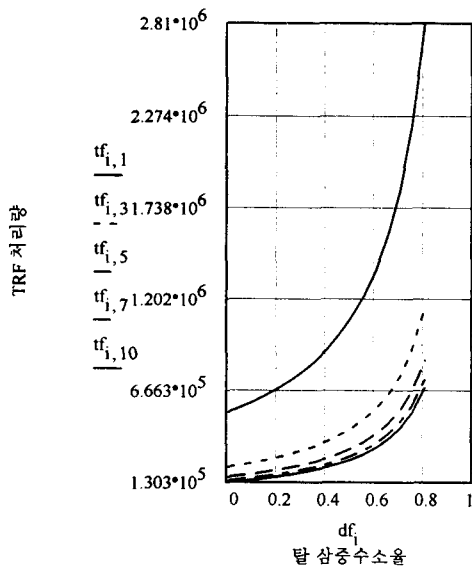
농도 목표치 도달 시간

(a)

(b)

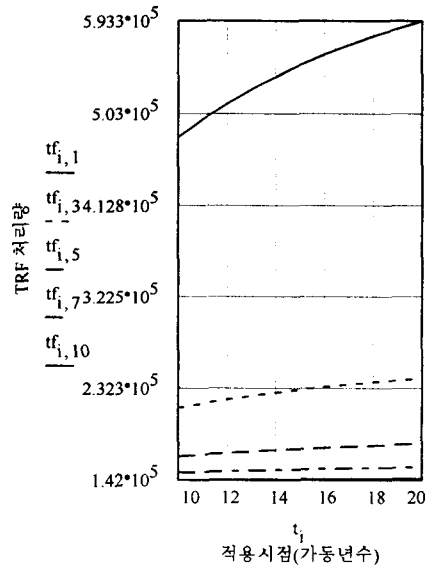
그림 3. 삼중수소 농도 목표치의 영향

그림 4. 삼중수소 농도 목표치 도달기간의 영향



TRF 처리량

탈 삼중수소율



TRF 처리량

적용시점(가동년수)

그림 5. TRF의 탈 삼중수소율의 영향

그림 6. TRF 적용시점(초기농도)의 영향