

월성원전의 삼중수소제거공정 최적화

안도희, 이한수, 정홍석
한국원자력연구소

송명재, 손순환
전력연구원

요 약

월성원전에서 삼중수소에 의한 작업자 피폭 및 환경방출량을 가능한 한 낮게 유지하기 위해서는 계통중수중에 축적되는 삼중수소를 근원적으로 제거할 수 있는 삼중수소제거시설이 필수적이다. 삼중수소제거공정은 방사선 안전성과 에너지 효율 측면에서 액상촉매교환과 초저온증류공정의 복합공정이 가장 효과적인 것으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 월성원전의 후속기를 고려하여 용량이 연간 8MCi의 삼중수소제거시설에 대한 최적설계를 수행하였다. 액상촉매교환공정에 대해서는 NTU-HTU법 그리고 초저온증류공정에는 Fenske-Underwood-Gilliland법을 이용하여 공정을 해석하였고 공정내 삼중수소의 재고량이 최소가 되는 최적의 설계변수들을 제시하였다.

1. 삼중수소제거 공정도

월성의 중수로에서 발생되는 삼중수소의 제거를 위하여 1개의 액상촉매교환탑과 3개의 초저온 증류탑으로 이루어진 TRF 공정도를 Fig. 1과 같이 설정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 원자로 감속계통에서 10Ci/kg-D₂O의 오염된 중수가 촉매탑 상부로 들어가고, 촉매탑내에서 촉매반응과 기액교환반응에 의해 중수중의 삼중수소가 중수소쪽으로 전이되어 탑하부에서 나오는 0.28 Ci/kg-D₂O의 중수는 원자로의 냉각계통으로 순환된다. 그리고 촉매탑 상부에서는 삼중수소가 포함된 중수가 나오는 데 이는 액화된 후 초저온증류탑 3개를 통하여 농축되어 최종적으로 제3탑 하부의 생성물은 삼중수소 농도가 99%이상으로 저장된다.

공정의 설계계산에 필요한 설계조건 및 물성치는 Table 1과 같다. TRF의 용량 Q는 촉매탑 상하부의 중수 유량과 농도로부터 구할 수 있는 데 유량은 삼중수소의 전이에 관계없이 일정하다고 할 수 있으므로

$$\begin{aligned} Q &= \text{Feed} (X_a - X_b) \\ &= 5760 \text{mole/hr} \times 0.02 \text{kg/mole} \times (10 - 0.28) \text{Ci/kg} \times 24 \text{hr/day} \times 300 \text{day/yr} \\ &= 8 \times 10^6 \text{Ci/yr} = 8 \text{MCi/yr} \end{aligned}$$

임을 알 수 있다.

공정의 근사적인 설계를 위하여 다음과 같은 가정들을 도입하였다.

- 경수소의 화합물은 무시할 수 있을 정도로 낮으므로 촉매탑의 액상은 D₂O와 DTO의 2성분계이고 촉매탑의 기상과 증류탑은 D₂, DT, T₂ 의 3성분계로 가정하였다.
- 촉매탑의 물질전달계수와 증류탑의 분리계수는 일정하다.
- 각 탑에서의 기액 유량은 일정하다.
- 모든 중수소호름의 D₂, DT, T₂ 성분들은 화학평형 상태이다.
- 제1과 제2 증류탑의 하부 생성물은 각각 제2와 제3의 상부 생성물과 reboiler에서 혼합된 후 유출된다.

2. 수학적모델

각 탑과 최종생성물을 경계로 한 총괄 및 성분 물질수지식을 수립하였으며 3성분 D₂, DT, T₂의 조성계산을 위해 화학반응 (D₂ + T₂ = DT)의 평형관계를 고려하였다. 탑의 주요 설계변수인 직경과 높이를 결정하기 위하여 촉매탑에는 NTU-HTU법을, 증류탑에는 Fenske-Underwood-Gilliland (FUG) 법을 적용하였다.

탑내 삼중수소의 재고량 (inventory, T_{hold})는 탑의 부피에 비례하므로 다음 식과 같이 탑의 부피와 탑내 평균 삼중수소농도의 곱으로 표시할 수 있다.

$$T_{\text{hold}} \propto \sum V_i (A_{Di} + A_{Bi})/2$$

여기서 V_i, A_{Di}, A_{Bi}는 i번째 탑의 부피 및 탑상하부의 삼중수소농도이다. 이 때 탑상하부의 삼중수소농도가 주어질 경우 탑의 부피가 최소가 될 때 삼중수소 재고량도 최소가 됨을 알 수 있다.

3. 결과 및 검토

수학적 모델에 근거한 전산코드를 작성하였고 이를 이용하여 탑내 삼중수소 재고량을 최소로

하는 최적공정의 설계를 수행하였는 데 그 결과는 다음과 같다.

3.1. 촉매탑과 제1종류탑의 부피

촉매탑 하부로 들어가는 중수소흐름은 제1종류탑의 상부 생성물이므로 이의 삼중수소 농도 (Y_b)에 따라 두 탑의 설계변수가 좌우된다. Y_b 는 촉매탑 하부의 액상중수소흐름과 평형상태의 기상 삼중수소농도 (Y_b^*)보다 작은 값을 가지는 데 이에 따른 각 탑의 부피변화를 Fig. 2에 나타내었다. Y_b 가 증가함에 따라 촉매탑의 부피는 증가하나 제1종류탑의 부피는 감소하고 Y_b/Y_b^* 가 0.3일 때 두 탑의 부피의 합이 최소가 됨을 알 수 있다.

3.2. 삼중수소 재고량

제1종류탑의 삼중수소 농축도 (Af_2/Af_1)는 방사선 안전성 측면에서 25이하로 제한되고 있는 데 [2], 이 때 제3종류탑의 급수중의 삼중수소 농도 (Af_3)에 따른 각 탑의 삼중수소 재고량을 Fig. 3에 나타내었다. Af_3 의 증가에 따라 제3탑의 삼중수소 재고량은 감소하고 제2탑의 그것은 증가하며 제1탑의 그것은 일정하므로 총 재고량은 Af_3 가 0.026에서 최소가 됨을 알 수 있다.

3.3. 월성 TRF의 최적설계

월성 TRF의 용량이 8MCi/yr일 때 탑내 삼중수소의 재고량을 최소로 하는 액상촉매교환탑과 초저온종류탑의 크기 및 공정조건을 Table 2에 나타내었다.

참고 문헌

1. 배재흠 등, "월성발전소의 삼중수소제거를 위한 촉매복합공정 해석", J. of the Kor. Nucl. Soc., Vol. 27, pp. 121-132 (1995)
2. T.S. Drolet, "Canadian Tritium Experience", CFFTP, Ontario Hydro (1984)

Table 1. Design conditions of the Wolsong TRF

	Process variables	Notation	Value
LPCE	Temp., Pressure		60 °C, 1 atm
	Feed concentration	Xa	10 Ci/kgD ₂ O
	Return stream concentration	Xb	0.28 Ci/kgD ₂ O
	Mass transfer coefficient	Kya	2.4 m ³ /s m ²
	Superficial velocity	F	1 m/s
	Separation factor	α	1.538
	Feed rate	Feed	5760 mole/hr
CD	Temp., Pressure		24 K, 1 atm
	Product concentration	Ap	99 %
	Vapour pressure	P _{T2}	554.8 mmHg
		P _{D1}	680.6 mmHg
		P _{D2}	838.4 mmHg
HETP	HETP	0.3 m	

Table 2. Optimum design data for the Wolsong TRF

1. LPCE column

- o Diameter: 29.7 cm
- o Height: 12.1 m
- o Volume: 839 liters
- o Y_b/Y_b*: 0.3

2. CD columns

- o Tritium enrichment factor in the first column : 25
- o Size and reflux ratio

	<u>1st</u>	<u>2nd</u>	<u>3rd</u>
Diameter(cm)	16.0	3.24	0.430
Height(m)	18.1	20.5	18.7
Reflux ratio(-)	3.0	3.0	0.58

- o Material balance

<u>Stream</u>	<u>kmole/hr</u>	<u>Tritium atomic fraction</u>
F1	9144.8932	2.151E-6
C1	9144.8735	1.902E-8
F2	416.9455	5.378E-5
C2	416.9258	7.016E-6
F3	16.7872	0.0260
C3	16.7675	0.0249
P	0.0197	0.99

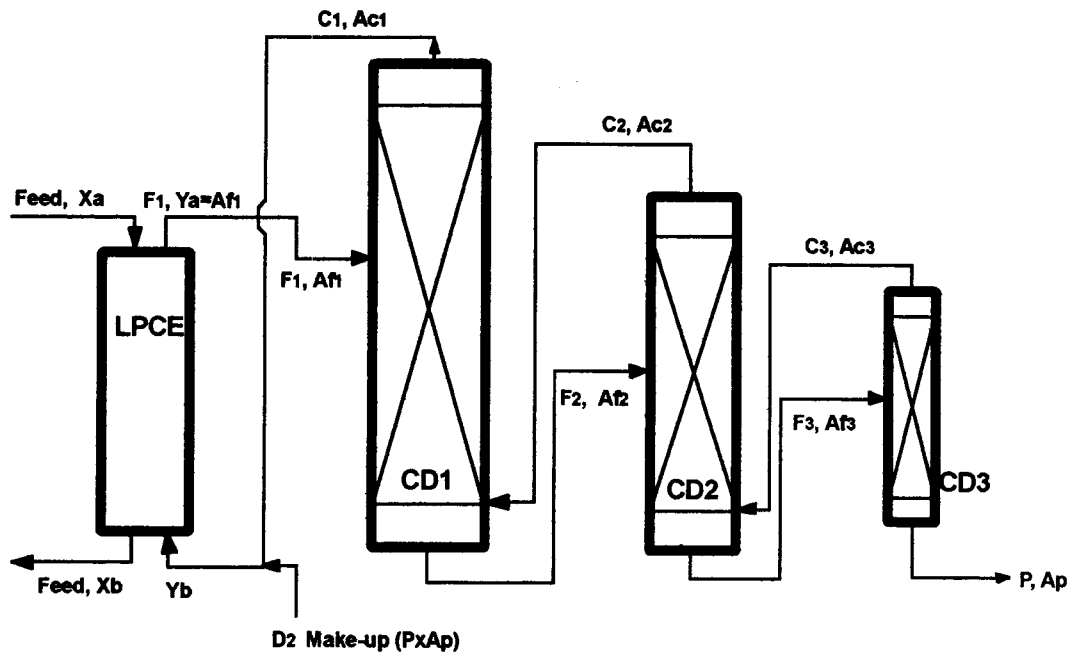


Fig. 1. A flow diagram of the Wolsong TRF

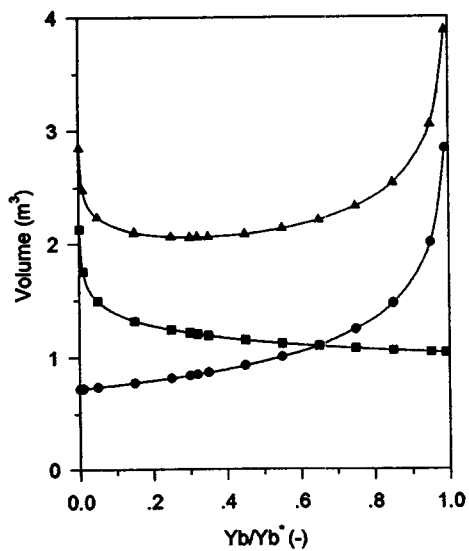


Fig. 2. Effect of Y_b on the volume of the column (LPCE: ●, the first CD: ■, total: ▲)

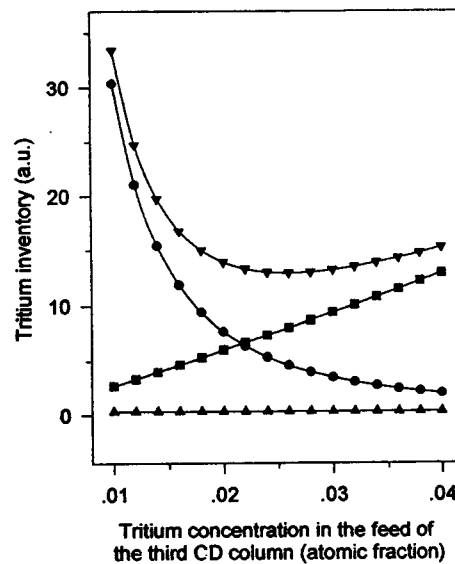


Fig. 3. Effect of A_{f3} on the tritium inventory of each CD column (first: ▲, second: ■, third: ●, total: ▼)