

월성원전 TRF 가동에 따른 삼중수소 방출량 예측

Prediction of Tritium Release from Wolsong Unit during the WTRF Operation

송규민, 이성진, 이숙경, 손순환, 엄희문
한전전력연구원

요 약

WTRF 가동에 따른 월성원전 삼중수소 방출량을 예측하였다. 호기별 WTRF 처리량 변화에 따른 월성원전 감속재와 냉각재 삼중수소 농도변화를 예측하였으며, 이로부터 삼중수소 방출량을 계산하였다. WTRF 가동에 의해 2013년에는 감속재 삼중수소 농도는 적어도 10 Ci/kg-D₂O 이하로 떨어지며, 이때 연간 삼중수소 방출량은 WTRF 가동초기보다 약 25% 정도로 감소하는 것으로 나타났다.

Abstract

The amount of the tritium released from Wolsong units during the WTRF operation is predicted. The profiles of tritium concentration in moderators and PHTs as variation of WTRF service allotment for each Wolsong unit are calculated, and the tritium releases are obtained from these tritium concentration profiles. The tritium concentration in moderator will be decreased down under 10 Ci/kg in 2013 and the yearly tritium release will be reduced below 25% of WTRF start year.

1. 서 론

월성원전 부지에는 중수호형 원전이 4개 호기가 있다. 중수로는 타 경수로형 원전에 비해 삼중수소 생성량이 상대적으로 크다. 대부분의 삼중수소는 중수중의 중수소와 중성자와의 반응에 의해 생성되고, 자연 붕괴 및 중수 손실로 인해 의해 일부 없어지지만, 생성속도가 제거속도에 비해 상대적으로 크므로 중수중의 삼중수소 농도는 운전년수에 따라 증가하게 된다. 이로 인한 삼중수소 환경 방출량이 증가하게 되므로 중수중의 삼중수소를 제거하여 계통내 삼중수소 축적량을 저감화할 필요성이 있다. 이를 위한 장기 대책으로 2005년까지 삼중수소 제거설비인 TRF(Tritium Removal Facility)를 준공할 예정이다. 본 연구에서는 WTRF 가동후 운전방식에 따른 감속재와 냉각재의 삼중수소 농도변화를 모델링하여 월성원전으로부터의 삼중수소 방출량을 예측하였다. 삼중수소 방출량은 월성 1호기에는 기존식을 적용하고, 후속기의 경우 AECL에서 제시한 설비개선 효과가 감안된 삼중수소 방출량 계산식을 따로 적용하여 예측하였다.

2. 본 론

2.1. 이론배경

2.1.1 WTRF 운전에 따른 삼중수소 농도변화

WTRF 가동후 월성원전 계통내 삼중수소 농도는 운전방식에 따라 다음의 두 식으로 표현할 수 있다[1,2].

운전방식 I

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

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

운전방식 II

$$A_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[g_1 e^{at} + g_2 e^{bt} + \left(\frac{c_{12}d_2 - c_{22}d_1}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}} \right) \right] \quad (3)$$

$$A_c = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_c = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[g_1 \frac{\alpha - c_{11}}{c_{12}} e^{at} + g_2 \frac{\beta - c_{11}}{c_{12}} e^{bt} + \left(\frac{c_{21}d_1 - c_{11}d_2}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 운전방식 I은 WTRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도에 상관없이 중수의 흐름이 「감속재 → TRF → 감속재」인 경우이며, 운전방식 II는 운전방식 I의 시나리오를 따르다가 WTRF에서 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재의 삼중수소 농도보다 낮아지는 시점에 중수의 흐름이 「감속재 → TRF → 냉각재 → 감속재」으로 전환하는 경우이다.

2.1.2. 삼중수소 방출량

월성원전의 연간 삼중수소 방출량은 다음의 두 가지 식으로 나타낼 수 있다[3].

$$\text{방출량 I :} \quad 1\text{호기 방출량} = 3,720 C_{\text{PHT}} + 250 C_{\text{MOD}} \quad (5)$$

$$2,3,4\text{호기 방출량} = 3,720 C_{\text{PHT}} + 125 C_{\text{MOD}}$$

$$\text{방출량 II :} \quad 1\text{호기 방출량} = 3,720 C_{\text{PHT}} + 250 C_{\text{MOD}} \quad (6)$$

$$2,3,4\text{호기 방출량} = 75 C_{\text{MOD}}$$

위에서 방출량 I은 월성 2,3,4호기의 설비개선효과로 후속기 감속재 방출량이 월성 1호기의 1/2로 줄어드는 것으로 평가한 것이며, 방출량 II는 캐나다 AECL에서 평가한 월성 2,3,4호기 설비개선효과를 기준으로 평가한 후속기의 삼중수소 방출량이다.

2.2. WTRF 운전 시나리오

본 연구에서의 WTRF 운전 시나리오는 호기별로 할당되는 처리량의 변화측면을 고려하였다. 모든 시나리오의 운전범위는 운전방식 I과 II가 모두 가능한 상태이다. 즉 감속재를 처리한 중수의 삼중수소 농도가 냉각재 삼중수소 농도보다 낮을 경우 WTRF에서 생산되는 중수를 냉각재로 사용할 수 있다.

초기별 할당되는 처리량 변화의 경우 가동률에 의한 실제 WTRF의 처리량 변화부분이 있으며, 이를 각 호기별로 분배하여 할당되는 처리량 변화부분이 있을 수 있다. 호기별 분배되는 처

리량 변화의 경우는 1호기 감속재의 삼중수소 농도가 다른 호기에 비해 높기 때문에 고려한 것으로, WTRF를 가동하면서 1호기와 다른 호기의 감속재 삼중수소 농도변화에 따라 결정된다. WTRF의 가동률의 경우는 원전가동률을 고려하였다. 처리량 배분의 경우 감속재 삼중수소가 높은 1호기를 별도로 취급하였으며, 2~4호기는 동일하게 취급하였다. 즉, WTRF 운전초기부터 4개 호기에 대해 동일한 처리량인 25 kg/hr를 적용한 시나리오와 삼중수소 농도가 높은 1호기를 대상으로 100 kg/hr, 70 kg/hr, 40 kg/hr로 처리하다가 2호기와 삼중수소 농도와 같거나 낮아지는 시점에서 전호기에 대해 동일하게 25 kg/hr로 처리하는 시나리오를 선정하였다.

<표 1>은 본 연구에서 적용한 WTRF의 운전시나리오를 정리한 것이다.

<표 1> WTRF 운전시나리오

변수 \ 시나리오	C-I	C-II		C-III		C-IV		D-I	D-II		D-III		D-IV	
		- 1	- 2	- 1	- 2	- 1	- 2		- 1	- 2	- 1	- 2		
처리량 변화 유무 ¹⁾	없음	있음		있음		있음		없음	있음		있음		있음	
호기별 처리량(kg/hr)														
1호기	25	100	25	70	25	40	25	25	100	25	70	25	40	25
2호기	25	0	25	10	25	20	25	25	0	25	10	25	20	25
3호기	25	0	25	10	25	20	25	25	0	25	10	25	20	25
4호기	25	0	25	10	25	20	25	25	0	25	10	25	20	25
가동률(%)	80	80	80	80	80	80	80	64	64	64	64	64	64	64
가동률을 고려한 실제 처리량 합계(kg/hr)	80	80	80	80	80	80	80	64	64	64	64	64	64	64

¹⁾ 시나리오중 -1은 WTRF 운전초기에 1호기를 대상으로 하고, -2는 2호기의 감속재 농도가 1호기의 감속재 농도와 같아지는 시점에 처리량을 변화시키는 경우이다.

2.3. 전산모사 가정

WTRF 가동 후 감속재 삼중수소 농도계산과 삼중수소 방출량 예측을 위해 다음의 가정을 적용하였다.

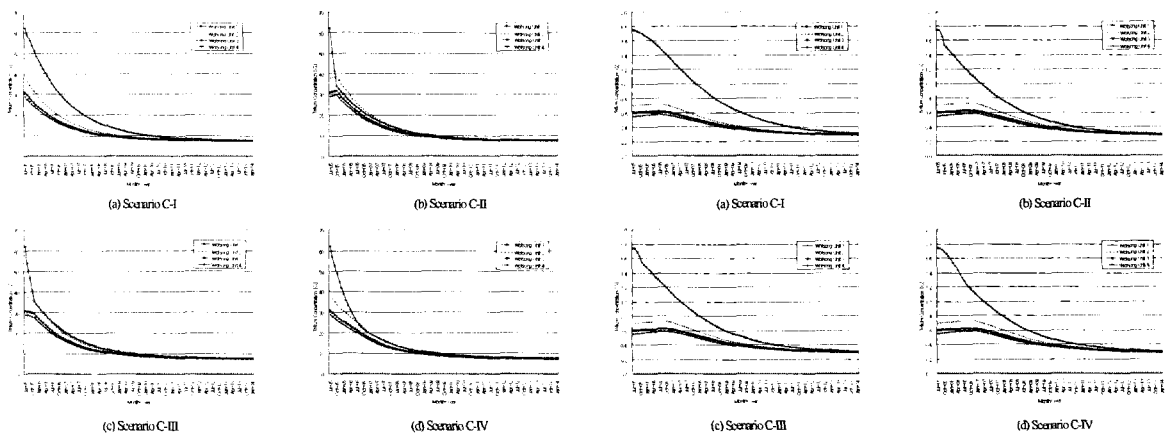
- WTRF 가동은 2005년 7월 1일에 시작한다.
- 이 시점에서 감속재 삼중수소 초기농도는 1호기 62 Ci/kg, 2호기 38 Ci/kg, 3호기 31 Ci/kg, 4호기 29 Ci/kg로 가정한다.
- 삼중수소 농도는 월의 날수를 고려한 1개월 단위로 산출하고, TRF 가동과 운전방식전환 판단여부의 기준으로 삼는다.
- WTRF 처리량(TF)은 100 kg/hr, 탈삼중수소율(DF)은 35로 한다.
- 각 호기간의 중수이동은 없다. 혹은 호기간의 중수이동은 중수의 혼합을 야기하므로 삼중수소의 농도가 일치할 경우에만 가능한 것으로 한다.
- 각 호기의 WTRF 운전방식전환은 TRF 처리후 삼중수소 농도가 그 시점의 냉각재내 삼중수소 농도보다 낮을 경우 행해진다.
- 운전 시나리오에 따라 각 호기에 대한 처리량과 가동률이 달라질 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 삼중수소 농도변화

월성 1, 2, 3, 4호기를 대상으로 WTRF 가동 후 운전시나리오에 따른 감속재 및 냉각재의 삼중수소 농도를 계산하였다. <그림 1>은 WTRF 운전 시나리오 C경우, 호기별 감속재내 삼중수소 농도변화를 나타낸 그림이다. 시나리오 C-II의 경우 WTRF 운전초기 월성 1호기만을 대상으로 처리하기 때문에 1호기 감속재 삼중수소 농도가 급격히 감소하는 반면 TRF 서비스 대상이 아닌 다른 2,3,4호기의 감속재 삼중수소 농도는 증가한다. 그러나 일정기간이 경과하여 월성 1호기 감속재 삼중수소 농도가 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 비슷해지면, 전호기를 대상으로 동일한 처리량으로 WTRF를 가동함에 따라 월성 2,3,4호기의 감속재 농도가 같이 내려간다. 2013년에는 전호기의 감속재 삼중수소 농도가 약 8 Ci/kg 이하로 떨어진다. 시나리오 C-III과 C-IV의 경우는 WTRF 운전초기에 월성 1호기를 대상으로 TRF 총 처리용량의 각각 70%와 40%에 해당되는 70 kg/hr, 40 kg/hr를 적용한 경우로, 시나리오 C-II와는 달리 전호기의 감속재 농도가 모두 떨어지지만, 여전히 처리량이 많은 월성 1호기의 감속재 농도가 급속히 떨어진다. 그리고 일정기간 경과하여 월성 1호기의 감속재 삼중수소 농도가 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 비슷해지고, 이후 2013년에는 전호기의 감속재 삼중수소 농도가 약 7.5 Ci/kg 근처까지 떨어진다.

<그림 2>는 WTRF 운전 시나리오 C의 경우, 호기별 감속재 삼중수소 농도변화를 나타낸 그림이다. 운전방식 II로 WTRF가 운전될 경우, 감속재의 삼중수소 농도뿐만 아니라 냉각재의 삼중수소 농도도 함께 낮아진다. 그러나 WTRF의 운전 초기부터 운전방식 II에 의해 운전되는 것이 아니라, WTRF에 의해 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재의 삼중수소 농도보다 높은 경우는 운전방식 I에 의해 운전된다. 따라서 WTRF 운전 초기에는 운전방식 I에 의해 운전되지만, 감속재 삼중수소 농도가 낮아지면서 TRF에 의해 처리된 중수의 삼중수소 농도가 냉각재 농도보다 낮아지는 시점에서 운전방식 II로 바뀌게 된다. <그림 2>의 시나리오 C-I의 경우 1호기 냉각재의 삼중수소 농도는 가동후 2개월만인 2005년 9월부터 운전방식 II로 전환되며 냉각재의 삼중수소 농도도 감소하기 시작한다. 반면에 2,3,4호기의 냉각재의 경우는 약 1년만인 2006년 5~6월이 되어서 운전방식 II로 전환된다. 월성 1호기를 대상하는 운전방식이 조기에 전환되는 이유는 냉각재 삼중수소 농도가 높아 감속재를 처리하고 난 중수의 삼중수소 농도가 단기간에 낮아지기 때문이다. 월성 1~4호기 모두 최종적으로는 약 0.3 Ci/kg 근처 평형값으로 접근한다.



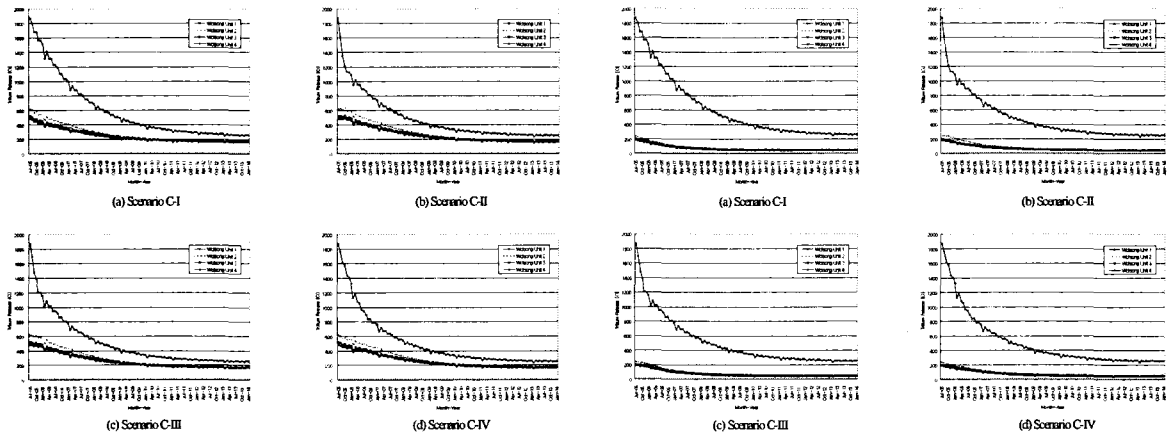
<그림 1> WTRF 운전시나리오에 따른 감속재 삼중수소 농도변화(시나리오 C)

<그림 2> WTRF 운전시나리오에 따른 냉각재 삼중수소 농도변화(시나리오 C)

3.2. 삼중수소 방출량

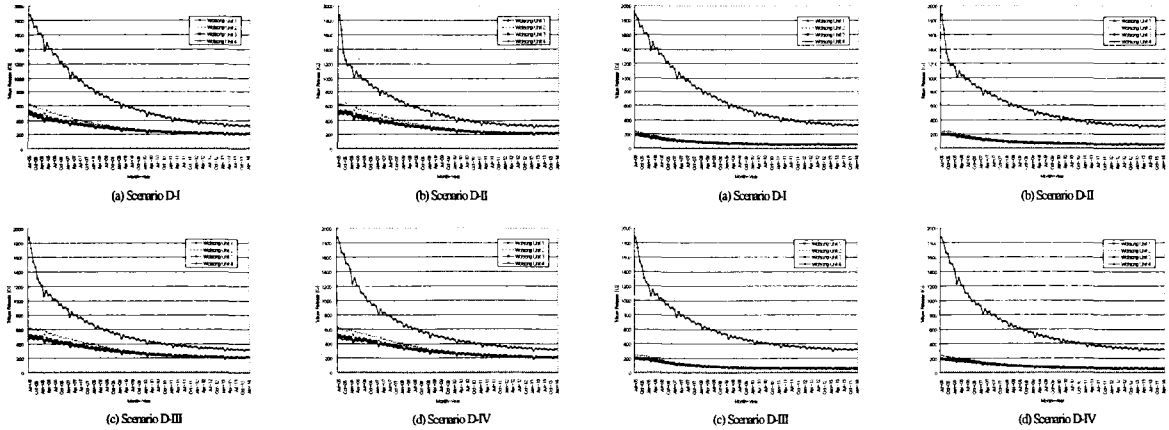
<그림 3~6>에서 WTRF 가동시점인 2005년도 7월부터 2013년 12월까지의 월간 삼중수소 방출

량을 운전시나리오에 따라 호기별로 볼 수 있다. 월성 1호기의 경우 감속재 및 냉각재의 삼중수소 농도가 높아 WTRF 가동초기에는 삼중수소 방출량이 상당히 높은 상태이다. 그러나 월성 2,3,4호기의 경우 삼중수소 농도가 1호기의 절반수준일 뿐만 아니라 AECL의 설비개선효과에 의해 방출량이 상대적으로 적다. 월성 2,3,4호기의 설비개선효과는 월성 1호기의 약 1/2로 평가하고 있다. 캐나다 AECL의 방출량 평가식인 식 (5)를 적용할 경우(<그림 4, 6>) 2,3,4호기의 삼중수소 방출량은 훨씬 떨어진다. WTRF 가동시점인 2005년에는 1호기가 월간 약 1,900 Ci 정도이지만, 2,3,4호기는 200 Ci 정도이다. 그러나 WTRF 가동후 8년이 경과한 2013년에는 1호기가 월간 약 250 Ci 정도이며, 2,3,4호기는 월간 약 50 Ci 정도가 된다. WTRF 가동에 의해 전호기 모두 감속재 삼중수소 농도가 10 Ci/kg-D₂O 이하로 감소하지만, 1호기의 방출량이 여전히 후속기 보다 높은 이유는 설비개선효과 때문이다.



<그림 3> 식 (4)를 적용한 WTRF 운전 시나리오 C에 따른 호기별 월간 삼중수소 방출량

<그림 4> 식 (5)를 적용한 WTRF 운전 시나리오 C에 따른 호기별 월간 삼중수소 방출량



<그림 5> 식 (4)를 적용한 WTRF 운전 시나리오 D에 따른 호기별 월간 삼중수소 방출량

<그림 6> 식 (5)를 적용한 WTRF 운전 시나리오 D에 따른 호기별 월간 삼중수소 방출량

<표 2, 3>에서 WTRF를 가동 시점인 2005년도와 월성 1호기 폐로 예정시점인 2013년의 연간 삼중수소 방출량을 비교할 수 있다. WTRF 가동을 80%의 경우 방출량 I식을 적용하면 1/4 정도로 감소하는 것으로 나타났으면, AECL의 평가방법인 방출량 II식을 적용할 경우 1/5 이상 감소하

는 것으로 나타났다. WTRF 가동을 64%의 경우는, 각각 약 30%와 약 23%까지 감소하는 것으로 나타났다.

<표 2> 식 (4)를 적용한 월성원전 TRF 운전시나리오 C와 D의 연도별 삼중수소 방출량(단위 [Ci])

연도 \ 시나리오	C				D			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2005*	19,206	17,963	18,280	18,841	19,526	18,183	18,705	19,397
2006	29,491	26,743	27,165	27,443	31,711	28,541	29,094	30,599
2007	21,362	19,842	20,067	19,999	24,797	22,772	23,123	24,057
2008	16,132	15,276	15,397	15,361	19,871	18,599	18,826	19,496
2009	12,992	12,497	12,566	12,534	16,551	15,742	15,887	16,337
2010	11,182	10,892	10,932	10,902	14,395	13,877	13,969	14,260
2011	10,160	9,990	10,013	9,986	13,024	12,692	12,750	12,933
2012	9,591	9,491	9,505	9,481	12,165	11,952	11,988	12,102
2013	9,277	9,220	9,228	9,205	11,632	11,497	11,519	11,589
2005년도 대비 2013년 방출량(%)	24.2	25.7	25.2	24.4	29.8	31.6	30.8	29.9

*2005년도는 하반기 6개월간 삼중수소 환경 방출량임.

<표 3> 식 (5)를 적용한 월성원전 TRF 운전시나리오 C와 D의 연도별 삼중수소 방출량(단위 [Ci])

연도 \ 시나리오	C				D			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2005*	13,485	12,000	12,394	13,063	13,748	12,207	12,781	13,533
2006	19,360	16,044	16,573	16,882	21,114	17,504	18,052	19,423
2007	13,021	10,913	11,250	11,080	15,398	12,901	13,247	13,883
2008	9,385	8,096	8,302	8,184	11,776	10,095	10,319	10,717
2009	7,268	6,505	6,628	6,548	9,430	8,328	8,470	8,716
2010	6,086	5,641	5,713	5,659	7,975	7,261	7,351	7,504
2011	5,421	5,165	5,206	5,169	7,065	6,607	6,663	6,758
2012	5,062	4,916	4,940	4,913	6,514	6,223	6,258	6,317
2013	4,841	4,758	4,771	4,752	6,143	5,960	5,982	6,018
2005년도 대비 2013년 방출량(%)	17.9	19.8	19.2	18.2	22.3	24.4	23.4	22.3

*2005년도는 하반기 6개월간 삼중수소 환경 방출량임.

4. 결론 및 제언

WTRF 가동후 월성원전의 삼중수소 방출량 변화를 계산하였다. 방출량 계산은 감속재와 냉각재의 삼중수소 농도함수식을 이용하여 수행하였으며, 월성 1호기와 설비개선을 적용한 월성 2,3,4호기를 구분하여 수행하였다. 월성 1호기 폐로예정시점인 2013년경에는 감속재 삼중수소 농도가 10 Ci/kg-D₂O 이하로 떨어지며, AECL의 평가방법에 의한 삼중수소 방출량 감소효과는 WTRF 가동초기보다 약 1/5 수준인 연간 약 4,800 Ci 정도인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 송규민, 손순환, 김광신, 이숙경, "월성 TRF 주요 기초설계변수", TM.96NJ18.R1999. 487, KEPRI, 1999
- [2] 송규민, 이성진, 이숙경, 손순환 "WTRF 가동에 따른 월성원전 계통내 삼중수소 농도변화 및 제거량", 대한방사선방어학회 2003년도 추계학술발표회, 11/6~7 (2003).
- [3] 손순환, 김광신, 송규민, 이숙경, 최훈, "삼중수소 제거기술 개발(I) 제1단계 최종보고서", TR.96NJ18.J1998.45, KEPRI, 1998