

## 월성원전 TRF 가동에 따른 삼중수소 저장용기 수요량 예측

### Prediction of Quantity of Tritide Storage Vessels for Wolsong TRF Operation

송규민, 이성진, 이숙경, 손순환, 김광신, 김경숙, 김위수

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

월성원전 TRF에서 제거되는 삼중수소를 저장하기 위한 저장용기 수량을 예측하였다. 이를 위하여 월성원전에 TRF를 적용할 경우 감속재 삼중수소 농도를 예측하기 위한 모델링을 하였으며, 4가지 가능한 TRF 운전 시나리오를 설정하여 각각에 대한 월간 삼중수소 저장용기 수량을 전산모사를 통해 계산하였다. TRF 운전초기에는 연간 30~40개의 저장용기가 필요하며, 2013년까지 삼중수소 저장용기 총수량은 약 180개가 필요한 것으로 나타났다. 가동율에 따라 삼중수소 저장용기 총수량은 차이가 있었으나, 삼중수소 농도에 따른 호기별 처리량 분배비율에 대해서는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

#### Abstract

The quantity of tritide storage vessels to store the tritium removed from the WTRF was predicted. The monthly quantities of the tritide storage vessels were calculated as four WTRF operation scenarios through the modeling of the tritium concentration in the moderator. At beginning of WTRF operation, 30~40 tritide storage vessels a year are needed and total 180 tritide storage vessels are requested until 2013. The total number of the tritide storage vessels are not dependent on the WTRF service allotment for each moderator according to the tritium concentration but dependent on the WTRF availability factor.

#### 1. 서론

현재 월성 원전 부지에는 중수로형 원전이 4개 호기가 있다. 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 의해 일부 없어지지만, 생성속도가 제거속도에 비해 상대적으로

크므로 중수중의 삼중수소 농도는 운전년수에 따라 증가하게 된다. 이로 인한 작업자 및 환경보호를 위해 중수중의 삼중수소를 제거하여 계통내 삼중수소 축적량을 저감화할 필요성이 있다. 이를 위한 장기 대책으로 한수원(주)은 2005년까지 TRF(Tritium Removal Facility) 준공을 목표로 하고 있으며, 지난 2003년 2월 27일에는 월성원전 TRF 착공을 시작하였으며 현재 캐나다 AECL의 TRF 설계용역이 완료 단계에 있다.

본 연구에서는 월성원전 TRF 가동에 의해 제거되는 삼중수소를 저장하기 위한 저장용기 수량을 예측하고자 한다. 이를 위하여 월성원전에 TRF를 적용할 경우 감속재 삼중수소 농도를 예측하기 위한 모델링을 하고, 4가지 가능한 TRF 운전 시나리오를 설정하여 각각의 시나리오에 따라 월간 삼중수소 저장용기 수량 변화를 전산모사를 통해 살펴보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 삼중수소 농도

<그림 1>에 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. 월성원전 TRF 서비스가 적용될 경우 월성원전 TRF에서 삼중수소가 제거되고 중수는 되돌아오는 과정이 포함된다.

#### (1) 가정

삼중수소 생성량 및 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 다음과 같은 가정을 하였으며, 이들 가정은 일반적으로 타당하다고 볼 수 있다.

#### 가 정

- 계통내 전체 중수는 균일하게 혼합된 상태이다.
- 중수보충량은 중수손실량과 같다.
- 월성 원자력 발전소 가동율은 80% 이다.

월성원전 TRF가 설치된 월성원전의 삼중수소 생성 및 제거에 대한 <그림 1>의 개념도에 따라 감속재 삼중수소 농도는 생성속도, 붕괴속도, 중수손실속도 및 TRF에 의한 삼중수소 제거속도에 의해 결정되며, 감속재의 삼중수소에 대한 물질수지 미분방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(M_m \cdot N_m)}{dt} = (\text{Generation}) + (\text{Make-up}) + (\text{Decay}) + (\text{Loss}) + (\text{Tritium Removal}) \quad (1)$$

#### (2) TRF 가동 후 감속재 삼중수소 농도

월성원전 TRF에서 삼중수소가 제거된 중수는 계통으로 다시 장입되는데 중수의 삼중수소 농도는 월성원전 TRF의 탈 삼중수소율에 의해 결정되며 지배방정식은 다음과 같

다.

$$\frac{d(M_m \cdot N_m)}{dt} = \phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0} - \lambda M_m N_m - L_m N_m + TFa_T \left( \frac{1}{DF} - 1 \right) N_m \quad (2)$$

삼중수소 농도 초기값을  $N_m^0$ 라고 경제조건을 이용하여 식 (2)를 풀면 다음의 해를 구할 수 있다.

$$N_m = \left( N_m^0 + \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \right) e^{\frac{g_{2m}}{M_m} t} - \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} g_{1m} &= \phi_m \sigma_m N_D m_m a + F_m N_{m0} \\ g_{2m} &= -\lambda M_m - L_m + TFa_T \left( \frac{1}{DF} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

이를 방사능 단위로 나타내면 다음과 같다.

$$A_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot N_m = \frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \cdot \left[ \left( N_m^0 + \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \right) e^{\frac{g_{2m}}{M_m} t} - \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \right] \quad (5)$$

위 식은 월성원전 TRF 가동후 감속재 삼중수소 농도추이를 시간의 함수로 나타내고 있다. 감속재의 삼중수소 농도는 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보이며, 최종적으로 도달되는 평형농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_m^\infty = -\frac{\lambda}{3.7 \times 10^{10}} \frac{g_{1m}}{g_{2m}} \quad (6)$$

## 2.2 삼중수소 저장용기 수량

### (1) 운전시나리오

앞에서 월성원전 TRF 가동에 각 호기별 계통내 삼중수소 농도를 모델링하였다. 모델 식에서 볼 수 있듯이 월성원전 TRF에서 제거되는 삼중수소량은 운전 시나리오에 따라 달라질 수 있다. 예를 들면, 월성원전 TRF 처리량 100 kg/hr를 각 호기별로 동일하게 할당하여 호기별로 25 kg/hr 처리하는 경우와 초기 삼중수소 농도가 높은 1호기를 100 kg/hr로 처리하다가 다른 호기와 비슷해진 후 호기별로 동일하게 할당하여 처리하는 경우 삼중수소 제거량은 다를 것이다. 따라서 삼중수소 저장용기 수요량을 예측하기 위해서는 우선 이러한 운전 시나리오를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 삼중수소 농도가 높은 1호기를 대상으로 100 kg/hr로 처리하다가 2호기와 삼중수소 농도와 같거나 낮아지는 시점에서 4개 호기에 대해 동일하게 25 kg/hr로 처리하는 시나리오를 선정하여 계산하였다. 또한 TRF에 유입되는 중수는 모두 감속재로 가정하였다.

### (2) 모델식

삼중수소 제거율은 월성원전 TRF로 유입되는 중수내 삼중수소 농도의 변화량에 TRF 처리량에 의해 결정된다. 즉 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$R_T = a_T TF \times \Delta C_{TRF} = TF \times (C_{in} - C_{out})$$

$$= a_T TF \times (1 - 1/DF) C_{in} \quad (7)$$

일정기간 동안의 삼중수소 제거량은 삼중수소 제거율을 적분하면 되며, 따라서 일정기간 동안의 삼중수소 저장용기 수량은 삼중수소 제거율을 그 기간동안 적분하여 구할 수 있다. 또한 현재 삼중수소 용기의 용량은 용기당 0.5 MCi이므로 월성원전 TRF 가동에 의한 삼중수소 저장용기 수량은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$N_V = \frac{1}{500,000} \int_{t_1}^{t_2} a_T TF \left(1 - \frac{1}{DF}\right) C(t) dt \quad (8)$$

식 (8)에 시간에 따른 삼중수소 농도를 나타낸 식 (5)를 대입하면 다음의 각 호기별 삼중수소 저장용기 수량 예측식을 얻을 수 있다.

$$N_{Vi}(t) = a_T TF \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \frac{\lambda}{1.85 \times 10^{16}} \cdot \int_{t_0}^t \left(N_{mi}^0 + \frac{g_{1mi}}{g_{2mi}}\right) e^{\frac{g_{2mi}}{M_{se}} t} - \frac{g_{1mi}}{g_{2mi}} dt \quad (9)$$

그러나 각 호기별로 처리량이 달라질 경우, 호기별 처리량을 다르게 적용하여야 하며 또한 처리량이 시간에 따라 달라질 경우 적분구간을 나누어 계산하여야 한다. 따라서 삼중수소 저장용기 총수량은 다음의 식으로 표현된다.

$$N_V(t) = \sum_{i=1}^4 N_{Vi}(t) \quad (10)$$

### (3) 저장용기 수량 전산모사 가정

월성원전 TRF 가동 후 감속재 삼중수소 농도와 저장용기 수량 예측식을 통해 유도된 지배식을 이용하여 다음의 기준을 가지고 월성원전 TRF 가동에 따른 삼중수소 저장용기 수량 예측을 다음의 경우에 따라 수행하였다.

- 월성원전 TRF 가동은 2005년 7월 1일에 시작한다.
- 이 시점에서 감속재 삼중수소 초기농도는 1호기 62 Ci, 2호기 38 Ci, 3호기 1 Ci, 4호기 30 Ci로 가정한다(Ref. 3)
- 월성원전 TRF 처리량(TF)은 100 kg/hr, 탈 삼중수소율(DF)은 35로 한다.
- 운전 시나리오에 따라 각 호기에 대한 처리량과 가동율이 달라질 수 있다(<표 1>).

월성원전 TRF 운전 시나리오는 <표 1>에서 볼 수 있듯이 4가지 경우에 대해서 전산모사를 적용하였다. 시나리오 1, 3, 4는 현재 월성원전 TRF의 설계시 적용된 설계요건을 그대로 적용한 경우로 가동율을 고려한 TRF 처리량 80 kg/hr이며, 시나리오 2는 여유분을 고려하지 않은 초기 설계요건 개발시 적용된 TRF 처리량을 기준으로 한 것으로 가동율을 고려한 TRF 처리량은 64 kg/hr이다. 시나리오 1, 2는 호기별 처리량을 TRF 가동초기부터 동일하게 배분하여 적용하였다. 즉 호기별 처리량은 감속재 농도와 운전시점과 상관없이 모두 25 kg/hr이다. 시나리오 3, 4는 월성 1호기의 감속재 삼중수소 농도에 따라

서 호기별 처리량을 다르게 배분한 경우이다. 시나리오 3은 TRF 가동 초기에는 월성 1호기를 대상으로 100% 삼중수소 제거를 수행하며(월성 1호기 처리량 = 100 kg/hr), 월성 1호기 감속재 삼중수소 농도가 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 같아지는 시점에서 모든 호기에 동일하게 배분하여 호기별로 25 kg/hr를 적용한 경우이다. 시나리오 4의 경우는 시나리오 3과 같이 TRF 처리량을 다르게 적용하였지만, 운전초기 월성 1호기에 적용한 처리량을 40 kg/hr로 적용한 경우이다. 이후 월성 1호기 감속재 삼중수소 농도가 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 같아지는 시점에서 모든 호기를 대상으로 동일하게 배분하여 호기별로 25 kg/hr를 적용하였다.

#### (4) 저장용기 수요량

월성 1, 2, 3, 4호기를 대상으로 식 (5), (9), (10)를 이용하여 TRF 가동 후 연도별 감속재 삼중수소 농도, 월별 삼중수소 저장용기 수요량 및 연간 삼중수소 저장용기 수요량을 계산하였다.

<그림 2>는 호기별 삼중수소 농도변화 추이를 시나리오에 따라 나타낸 그림이다. 시나리오 1, 2에서는 삼중수소 농도가 서서히 감소하여 2013년에 약 10 Ci 까지 도달하는 것을 볼 수 있다. 가동율이 감소할수록 삼중수소 농도의 감소속도가 떨어지고 최종 평형값은 증가하는 것으로 나타났다. 시나리오 3, 4의 경우 TRF 운전초기 월성 1호기에 대한 삼중수소 농도가 급격히 감소하면서 일정 기간내에 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 비슷해진다. 초기 처리량 100 kg/hr의 경우 2005년 12월 초에 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 비슷해졌으며, 40 kg/hg의 경우 2006년 11월 초에 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 비슷해졌다. 이후 감속재 삼중수소 농도 평형값은 동일한 값으로 접근하였다.

<그림 3>은 월별 삼중수소 저장용기 수요량을 예측한 그림이다. 시나리오 III의 경우 월성 1호기에 의한 삼중수소 저장용기 수요량이 첫 번째 달에는 약 6.5개로 크지만 급격히 감소하면서 월성 2호기 감속재 삼중수소 농도와 같아지는 시점부터는 처리량이 다른 호기와 같아지면서 저장용기 수요량이 일정한 값으로 수렴해 간다. 최종적으로는 월성원전 TRF 전체적으로 월간 약 1개의 저장용기가 필요하게 된다.

<그림 4>에서는 호기별 연간 삼중수소 저장용기 수요량을 비교할 수 있는데, 여기서 2005년 수량은 하반기 6개월간에 필요한 수량을 나타낸다. 삼중수소 농도가 떨어지면서 저장용기 수량은 감소하는 전형적인 유형을 보이고 있으며 시나리오 III의 경우, 월성원전 TRF 운전초기 월성 1호기에 대한 저장용기 수요량이 크게 요구되며, 월성 2호기 삼중수소 농도와 비슷해진 이후 2006년도부터는 다른 호기와 큰 차이가 없다. <표 2>는 월성원전 TRF 전체적으로 요구되는 연간 삼중수소 저장용기 수량을 나타낸 것이다. 가동율 80% 상에서는 TRF 운전초기에 연간 수요량이 약간씩 다를 뿐, 시나리오와 상관없이 2013년까지 약 180개의 저장용기가 필요하다. 가동율에 의한 영향은 처리량 배분에 의한 영향보다는 비교적 커서, 가동율 64%의 경우 80% 가동율을 적용했을 때보다 2013년까지 약 10개 정도가 적게 필요한 것으로 나타났다.

### 3. 결론 및 제언

월성원전 TRF에서 제거되는 삼중수소양을 결정하는 주요변수로 TRF 처리용량(TF), 가동율( $a_T$ ), 탈 삼중수소율(DF)등을 들 수 있다. 또한 이들 변수와 월성원전 계통내 조건

에 의해 결정되는 삼중수소 농도도 큰 영향을 미친다. 아울러 TRF의 운전 방식에 따라 서로 삼중수소 제거량의 변화가 예상된다.

월성원전 TRF에 대한 4가지 운전 시나리오를 적용하여 월별 삼중수소 저장용기 수요량을 계산한 결과, 호기별 처리량 변화에 대한 영향 보다는 가동율에 의한 저장용기 수요량 변화가 더 컸으며, 최종적으로는 연간 약 12개의 저장용기가 필요하며 운전초기에는 연간 약 30~40개의 저장용기가 필요한 것으로 나타났다.

월성원전 TRF의 운전 시나리오에 대해 아직 확정된 것은 없지만, 월성원전의 운전 제한성을 고려한 운전비용 최소화 및 삼중수소 재고량 최소화를 목적함수로 시나리오를 적용할 것으로 본다. 그러나 감속재를 대상으로 한 본 연구의 결과로 보듯이 운전 시나리오에 따른 저장용기 수요량의 차이는 크지 않을 수도 있다. 향후 이에 대한 시나리오 분석을 통해 저장용기 수요량을 좀 더 정확하게 예측할 필요성은 있다.

## 기호설명

A	삼중수소 방사능	[Bq/kg-D <sub>2</sub> O]
a	원전가동율	[-]
a <sub>T</sub>	TRF 가동율	[-]
DF	탈 삼중수소율, X <sub>in</sub> /X <sub>out</sub>	[-]
F	중수보충유량	[kg/sec]
g <sub>1m</sub>	상수	[#/sec]
g <sub>2m</sub>	상수	[kg/sec]
L	중수손실	[kg/sec]
M	총중수량	[kg]
m	중성자 선속하의 중수량	[kg]
N	삼중수소 농도	[#/kg-D <sub>2</sub> O]
N <sup>0</sup>	삼중수소 농도 초기값	[#/kg-D <sub>2</sub> O]
N <sub>0</sub>	보충 중수중 삼중수소 농도	[#/kg-D <sub>2</sub> O]
N <sub>D</sub>	단위 kg-D <sub>2</sub> O당 중수소 수	[#/kg-D <sub>2</sub> O]
N <sub>V</sub>	삼중수소 저장용기 수량	[개]
R <sub>T</sub>	삼중수소 제거율	[Ci/sec]
t	시간	[sec]
TF	TRF 처리량	[kg/sec]

## Greeks

λ	삼중수소 붕괴상수	[sec <sup>-1</sup> ]
σ	중수소의 중성자 흡수 단면적	[cm <sup>2</sup> ]
φ	열중성자 선속	[#/cm <sup>2</sup> sec]

## Superscripts

0	초기값
∞	포화상태

## Subscripts

i        월성원전 i호기  
m        감속재

## 참고문헌

1. 손순환, 송규민 외, "삼중수소 제거기술 개발(I) 제1단계", TR.96NJ18.J1998.45  
KEPRI, 1998
2. 송규민, 손순환 외, "Parameter Analysis를 통한 월성 삼중수소 제거시설의 설계요건  
분석", TM.96NJ18.R1998.200, KEPRI, 1998
3. 송규민, 손순환 외, "월성 TRF 주요 기초설계변수", TM.96NJ18.R1999.487, KEPRI,  
1999
4. 김위수, 손순환 외, "삼중수소 제거기술 개발(I) 제2단계(최종보고서)", 96NJ18, KHNP,  
2002
5. 송규민, 이숙경 외, "삼중수소 저장용기 설계를 위한 월성 TRF 삼중수소  
취급·저장계통 분석", TM.01NE09.P2002.041, KEPRI, 2002

표

<표 1> 월성원전 TRF 운전 시나리오

변 수 \ 시나리오	I	II	III		IV	
			- 1	- 2	- 1	- 2
처리량 변화 유무*	없음	없음	있음		있음	
호기별 처리량(kg/hr)						
1호기	25	25	100	25	40	25
2호기	25	25	0	25	20	25
3호기	25	25	0	25	20	25
4호기	25	25	0	25	20	25
가동율(%)	80	64	80	80	80	80
가동율을 고려한 실제 처리량 합계(kg/hr)	80	64	80	80	80	80

\*처리량이 바뀌는 시점은 월성1호기의 삼중수소 농도가 월성2호기의 농도와 같아지는 시점

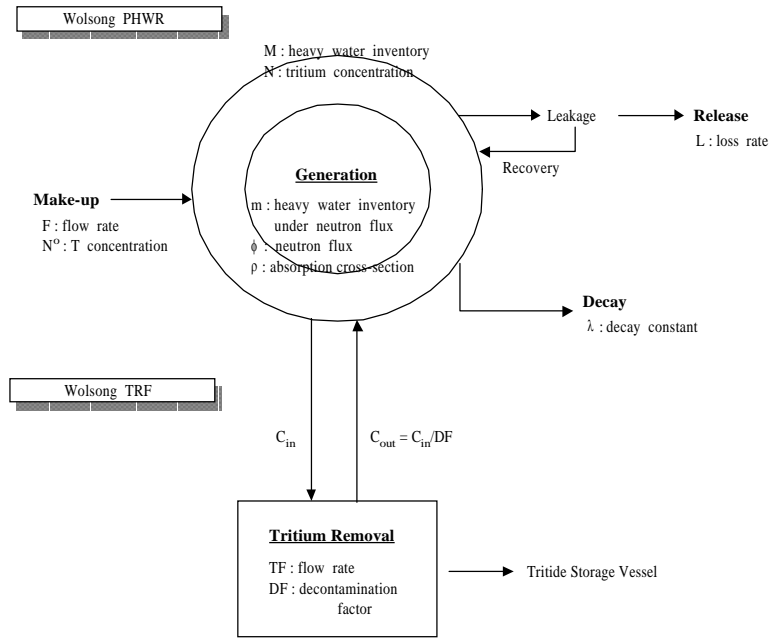
<표 2> 시나리오에 따른 연도별 삼중수소 저장용기 수요량

연도 \ 시나리오	I	II	III	IV
2005*	25	20	29	27
2006	36	32	35	37
2007	26	24	25	25
2008	20	20	20	20
2009	17	17	16	16
2010	15	15	15	15
2011	14	14	14	14
2012	13	13	13	13
2013	13	13	13	13
합 계	179	168	180	180

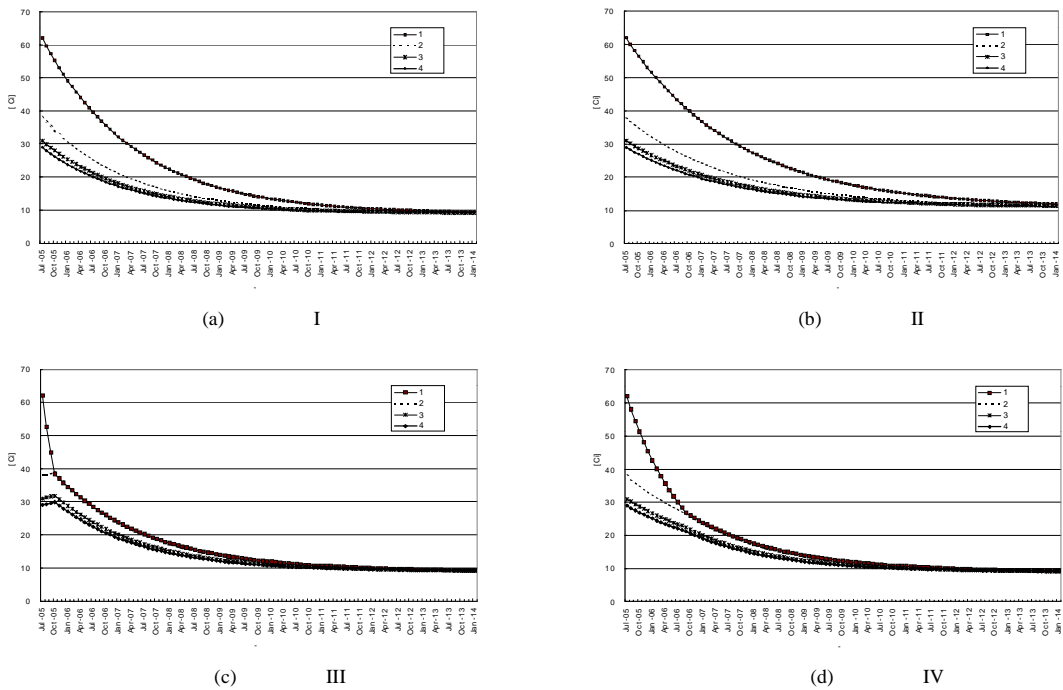
\*2005년도는 하반기 6개월간 필요한 저장용기 수요량임.



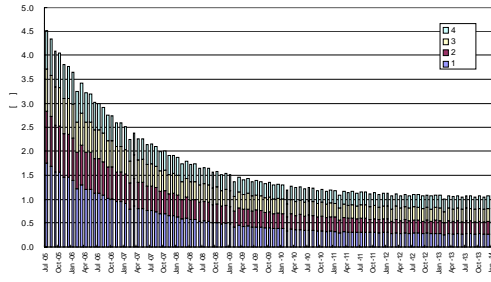
# 그림



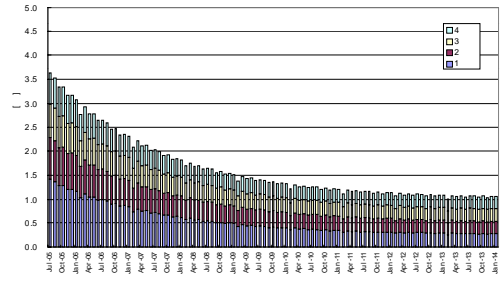
<그림 1> 월성 원전의 삼중수소 생성 및 제거 개략도



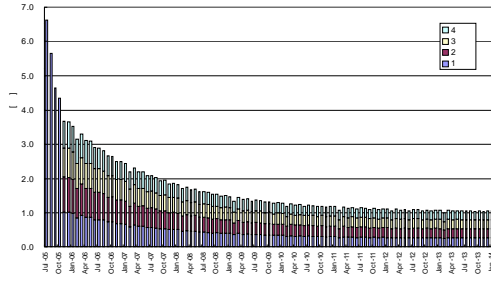
<그림 2> 월성원전 TRF 운전 시나리오에 따른 감속재 삼중수소 농도변화 추이



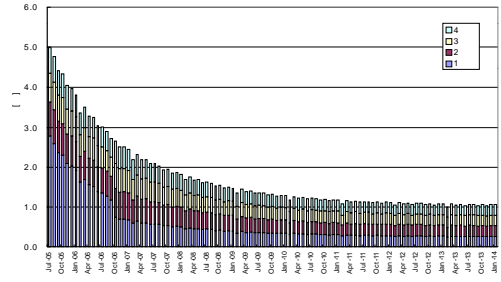
(a) I



(b) II

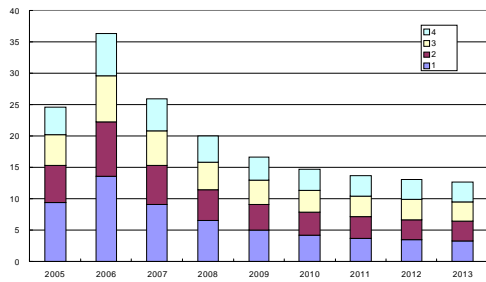


(c) III

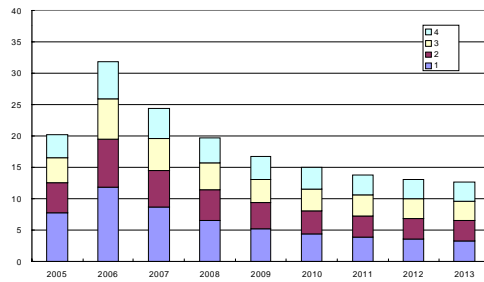


(d) IV

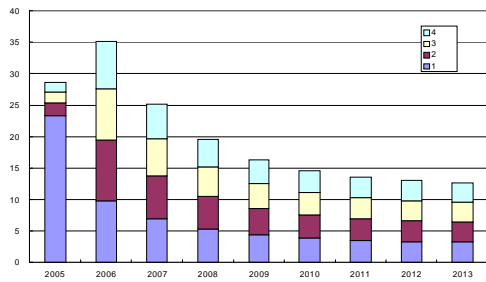
<그림 3> 월성원전 TRF 운전 시나리오에 따른 호기별 월간 저장용기 수요량 변화



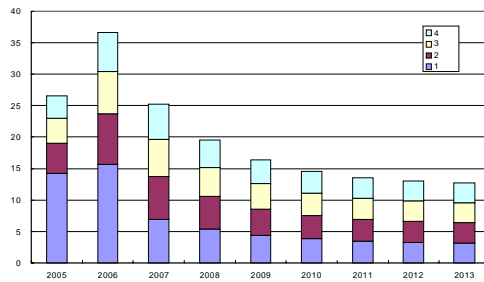
(a) I



(b) II



(c) III



(d) IV

<그림 4> 월성원전 TRF 운전 시나리오에 따른 호기별 연간 저장용기 수요량 변화  
(단, 2005년도는 하반기 6개월에 대한 예측값임)