

## PWR의 계통내 Tritium 농도와 DAC(유도공기중농도)와의 관계 분석

성기방, 강기두

원자력환경기술원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

kbsung@khnp.co.kr

환경에 존재하는 삼중수소(<sup>3</sup>H)는 1934년에 물리학자 Ernest Rutherford 등이 중수소(Deuterium)원자에 고에너지 중수소핵(Deuteron)을 충돌시켜 발견하였으며, 대기권 상층 공기중의 질수원소에 우주선(Cosmic ray)이 충돌할 때나, 핵무기 실험, 원자력발전소의 부산물로서 생성된다. 본 논문에서는 원전의 계통내 삼중수소의 생성, 그리고 계통내 예상 설계값을 비교하였고, 기체분압의 법칙을 이용하여 원전 운전시 사용후연료저장조(Spent Fuel Pool :SFP)계통 농도와 SFP 표면에서의 삼중수소포화농도를 구해 유도공기중농도(DAC)와 비교하여 보았다.

### - 삼중수소 생성

가압경수로에서의 삼중수소의 주요 생성원은 삼중핵분열과 냉각재와 제어봉내에 있는 B, Li, <sup>2</sup>H와 중성자의 반응이다. 냉각재내에서 생성된 삼중수소는 냉각재내 삼중수소 농도에 직접 기여하지만 핵연료 펠릿에서 핵분열에 의해 생성된 삼중수소와 제어봉내에서 중성자와의 반응에 의해 생성된 삼중수소는 피복재를 통해 냉각재로 방출되어 냉각재내의 삼중수소 농도에 기여한다. 삼중수소를 생성하는 방사화반응이 표 1에 제시되어 있으며, 3중핵분열과 붕소 방사화반응이 삼중수소 생성원이다. 방사화반응에 의한 삼중수소의 생성은 다음 식에 의해 결정된다.

$$\text{Activity (Bq)} = V \lambda N = \sum_a \phi (1 - e^{-\lambda t}) V$$

여기에서,  $\sum_a \phi$  = 생성반응률, atoms/cm<sup>3</sup>-sec, t= 원자로 운전기간, V= 노심내 냉각재의 부피, cm<sup>3</sup>

표 1 삼중수소 생성의 방사화 반응

반응	문턱에너지 (MeV)	반응단면적 (cm <sup>2</sup> )
<sup>10</sup> B(n,2α)T	1.4	1.20E-26
<sup>7</sup> Li(n,nα)T	3.9	9.50E-27
<sup>6</sup> Li(n,α)T	열중성자	9.44E-22
<sup>2</sup> H(n,γ)T	열중성자	5.50E-28
<sup>11</sup> B(n,T) <sup>9</sup> Be	10.4	7.30E-30
<sup>14</sup> N(n,T) <sup>12</sup> C	4.3	3.00E-28

표 2. WH형 원전 삼중수소 생성 설계값

생성원	총생성량 (Ci/cycle)	냉각재 방출량 (Ci/cycle)	분율 (%)
<sup>2</sup> H(n,γ)T	-	-	-
<sup>6</sup> Li(n,α)T	83	83	6.7
<sup>10</sup> B(n,2α)T	240	240	19.3
핵분열생성물	8500	850	68.4
제어봉	70	70	5.6
합계	8,893	1,243	100

### - 1차계통내 삼중수소 농도

운전주기말 계통내 삼중수소농도는 방사능붕괴, 소외배출, 증발 등의 줄어듬에 의존하며, 작업자 활동구역인 SFP에서의 삼중수소 농도 경우는 다음식과 같다[1].

$$M_{SFP} \frac{dN_{SFP}}{dt} = S_{RWST} N_{RWST} - (\lambda M_{SFP} + T_{SFP} + E_{SFP}) N_{SFP}$$

여기서, M = Pool 용수질량, N = 삼중수소농도, S = SFP로 용수유입율, T = RWST로 용수이동율, E= 증발 용수 손실률

### - 사용후연료저장조(SFP)의 증발률

SFP에서의 증발률 계산식은 평균기압과 Pool 표면의 평균공기속도, 물표면의 포화수증기압과 이슬점온도에서 Pool 표면 수증기압에 관계되는 다음 식으로부터 구해진다[2].

$$E = (1.465 - 0.0186B)(0.44 - 0.118W)(e_s - e_d)$$

표 3. 1000MW WH형 원전계통내 <sup>3</sup>H 존재량 및 <sup>3</sup>H 평형농도

생성원	Ci	μCi/g
RCS	396	2.3
SFP	283	0.16
RMWT	987	2.1
RWST	355	0.19

표 4. SFP <sup>3</sup>H 농도 및 온도와 포화 <sup>3</sup>H와의 관계

온도(°C) \ 농도	0.10uCi	0.16uCi	0.20uCi	0.30uCi	0.50uCi
20	6.4E+04	1.0E+05	1.3E+05	1.9E+05	3.2E+05
25	8.5E+04	1.4E+05	1.7E+05	2.6E+05	4.3E+05
30	1.1E+05	1.8E+05	2.2E+05	3.4E+05	5.6E+05
35	1.5E+05	2.3E+05	2.9E+05	4.4E+05	7.3E+05
40	1.9E+05	3.0E+05	3.8E+05	5.7E+05	9.5E+05
45	2.4E+05	3.9E+05	4.8E+05	7.3E+05	1.2E+06
50	3.1E+05	4.9E+05	6.1E+05	9.2E+05	1.5E+06

- Pool 지역의 공기중 <sup>3</sup>H 포화농도

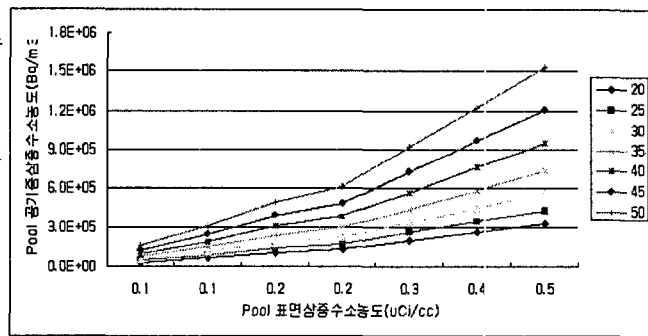
삼중수소는 PWR원전에서 HTO형태로 존재하는 혼한 핵종이며, 호흡시 방사선적으로 내부피폭에 관련된다. 원전 Pool 표면에서 삼중수소 포화농도는 공기분압 및 이상기체상태방정식으로부터 다음식이 유도된다[3].

$$C_{a_s} = 4.86 \times 10^{-6} \times 10^{\frac{6.9t}{230+t}} \times A_{TW} \quad \text{여기서, } C_{a_s} = \text{공기의 포화삼중수소농도,}$$

$$A_{TW} = \text{물의 삼중수소 농도, } t = \text{온도(°C)}$$

그림 1 SFP <sup>3</sup>H 농도 및 온도와 포화<sup>3</sup>H와의 관계그래프

위 식에 관계상수를 대입하여 구한 결과 표 4와 그림 1의 결과를 얻을 수 있었다. 표의 포화 <sup>3</sup>H농도는 SFP의 평형농도인 0.16uCi/cc인 경우 과기부고시의 유도공기중농도(DAC)인  $3 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$  을 준수하기 위해서는 계통온도의 한계값이 40°C로 나타났고, 계통온도 제한치인 50°C에서 운전하기 위해서는 SFP의 <sup>3</sup>H농도가 0.1uCi/cc 아래로 되어야 할 것이다.



- 결론

가압경수로에서의 삼중수소 방출메커니즘은 SFP에서 증발되어 대기중으로 배출되는 것이 대부분이다. 그러나 원전가동연수가 증가하면서 삼중수소의 배출량도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 배출량을 줄이면 필연적으로 계통내 삼중수소의 농도는 증가하게 될 것이다. 이에 따른 유도공기중농도(<sup>3</sup>H DAC =  $3 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$ ) 영향을 평가하기 위하여 SFP의 <sup>3</sup>H 농도, 운전온도와 <sup>3</sup>H 포화농도를 구한 결과, 계통의 평형 <sup>3</sup>H농도가 0.16uCi/cc 인 경우 운전상한온도는 40°C, 평형 <sup>3</sup>H농도가 0.1uCi/cc 인 경우 운전가능온도는 50°C 정도로 계산되었다.

References

1. Final Safety Analysis Report of Kori Nuclear 3,4 Chapter 11.1
2. Salisbury, J.K, Kent's Mechanical Eng. Handbook-Power, 12th Ed. JW&S NY
3. Yang maochun, "Radiation Risk Analysis of Tritium in PWR NPP