

PWR-GALE 코드를 이용한 프라마툼 원전의 삼중수소 배출량 평가

손중권*, 이영주, 공태영

한국수력원자력(주), 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*jungkwon.son@khnp.co.kr

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 삼중수소는 대표적인 장수명 저에너지 순수베타 방출체이다. 삼중수소는 연간 배출량이 크고 반감기가 길어 환경에서 오랜 기간에 걸쳐 방사선학적 영향을 미치기 때문에 원자력발전소 삼중수소 배출을 제한, 감시 및 관리하는 것은 매우 중요한 일이다. 한울원전의 경우 기체유출물에 의한 주민선량 중 삼중수소에 의한 주민선량은 약 75%, 액체유출물에 의한 주민선량 중 삼중수소 및 미립자에 의한 주민선량은 96.4%를 차지하고 있다.

한울 1,2호기의 최근 운영실적에 따르면 기체방사성유출물을 통한 연간 삼중수소 방출량이 설계방출량에 근접하게 운영되고 있다. 한울1발전소의 경우, FSAR에는 삼중수소 예상배출량 설계값에 대한 명확한 평가기준이 명시되어 있지 않았으며, 프랑스 유사 원전의 운영 경험치를 기준으로 예상배출량이 설정되었다고 판단된다. 한울1발전소의 기체 삼중수소 배출설계값은 유사 출력의 고리3,4호기, 한빛1,2호기 대비 약 40% 낮게 설정되어 있으며, 향후 기체 방사성폐기물 배출에 제한을 받을 수 있다. 따라서 원전 운영여유도 확보를 위해 FSAR의 설계기준 연간 삼중수소 예상배출량을 미국 NRC의 PWR-GALE 코드를 이용하여 재평가하였다.

2. 본론

2.1 PWR-GALE 코드를 이용한 배출량 평가

한울 1,2호기의 삼중수소 연간 예상 배출량 설계값 재평가는 미국 NRC (Nuclear Regulatory Committee)에서 개발한 PWR-GALE (NUREG-0017) 전산프로그램을 사용하여 평가하였다[1]. NUREG-0017(Rev.1) 방법론에 따르면 경수로 원전의 경우 MWth 열출력당 연간 0.4 Ci/yr(0.01 TBq/yr)의 삼중수소가 배출된다. 이는 다수의 경수로 원전 삼중수소 방출을 분석결과와 Ginna 원전의 삼중수소 인벤토리 및 방출율을 측정된 결과에 의해 산정되었다. 액체 삼중수소 배출량은 2차 계통 폐기물을 제외하고 계산된 액체 배출량에 근거하여 계산되며,

일반적으로 1차 계통 냉각재에서의 삼중수소 농도가 1.0 $\mu\text{Ci/ml}$ 일때 생성량의 최대 90%까지 액체 형태로 배출되는 것으로 계산된다. 나머지 삼중수소는 건물 환기배기계를 통해 기체의 형태로 배출된다. 핵연료교체 시설을 포함하여 보조건물 환기계를 통해 약 80%의 기체 삼중수소가 배출되며 나머지 20%는 격납건물 환기계를 통해 배출된다.

한울1발전소는 2,775 MWth를 연간 기체 및 액체 삼중수소 배출량 평가의 기본입력값으로 사용하였다. 이론적으로 계산할 수 있는 삼중수소 배출량은 다음과 같다.

$$2,775 \text{ MWth} \times \frac{0.4 \text{ Ci}}{\text{MWth} \cdot \text{yr}} = 1,110 \text{ Ci/yr}$$

현재 한울1 발전소 FSAR에 의하면 액체 및 기체 배출경로를 통해 배출되는 삼중수소 예상배출량은 각각 750 Ci/yr·unit 및 90 Ci/yr·unit이다.

열출력외 주요 입력변수는 운영 현황을 고려한 화학제어제(Shim Bleed), 기기배수(Equipment Drains), 청정폐기물(Clean Waste) 및 오염폐기물(Dirty Waste) 등이며, 재평가를 위한 입력값은 Table 1과 같다.

Table 1. Input of PWR-GALE Code

Release Pathway	Value
Shim Bleed	1.0
Equipment Drain Waste	1.0
Clean Waste	1.0
Dirty Waste	1.0

PWR-GALE 코드를 이용하여 한울1발전소의 연간 기체 및 액체 삼중수소 예상배출량 평가를 수행한 결과는 Table 2와 같다. 한울 1,2호기의 삼중수소 배출설계값 재평가 결과, 기체 및 액체 삼중수소 배출치는 각각 110 Ci/yr 및 990 Ci/yr로 평가되었다. 기체 삼중수소와 액체 삼중수소의 배출설계값은 각각 22%, 32% 증가하였으며, 총 삼중수소 배출량에서 기체 삼중수소가 차지하는 비율은 약 8%이다.

Table 2. Comparison between FSAR and Calculated Tritium Release (Ci/yr)

Type	FSAR	Calculated
Gas	90	110
Liquid	750	990

2.2 부지경계농도 평가

한울 1,2호기의 삼중수소 연간 예상 배출량 재평가 결과를 바탕으로 변제한구역경계에서의 기체 및 액체 배출물의 방출농도를 재평가하였다. 제한구역경계에서의 기체 및 액체배출물의 방출농도는 원자력안전위원회고시 2014-34호의 제6조 '배출관리기준(별표3의 제1란의 당해 방사성핵종에 대한 제5란과 제8란의 농도)'에서 제시하는 방사성핵종별 기체 및 액체 방출 농도제한치를 만족하여야 한다[2]. 이 기준은 일반인에 대한 선량 제한치로부터 도출된 것이다.

제한구역경계에서 기체방출물의 설계기준 방출농도는 식 (1)로 구한다.

$$C_i = \frac{N_{WD}}{N_{WE}} Q_i (\chi/Q) \quad (1)$$

여기서, C_i = 제한구역경계에서 기체 방출물의 방출농도 (Bq/m^3)

Q_i = 기체 방사성물질의 핵종별 예상방출량, (Bq/sec)

(χ/Q) = 제한구역경계에서의 대기확산인자, (sec/m^3)

N_{WD} = 1차 냉각재의 설계기준 비방사능, (Bq/g)

N_{WE} = 1차 냉각재의 예상 비방사능, (Bq/g)

제한구역경계에서 액체방출물의 설계기준 방출농도는 식 (2)로 구한다.

$$C_D = \frac{N_{WD}}{N_{WE}} \frac{Q_i}{W_P} DF \quad (2)$$

여기서, C_D = 제한구역경계에서 액체 방출물의 방출농도, (Bq/m^3)

Q_i = 액체 방사성물질의 핵종별 예상방출량, (Bq/sec)

W_P = 배수로를 통한 냉각수 방출량 (m^3/sec)

N_{WD} = 1차 냉각재의 설계기준 비방사능, (Bq/g)

N_{WE} = 1차 냉각재의 예상 비방사능, (Bq/g)

DF = 해수에 의한 희석인자 (=2)

평가된 삼중수소 배출설계값과 원자력안전위원회 고시의 배출관리기준 제한치와의 비율은 기체의 경우 $2.15E-04$, 액체의 경우 $4.84E-04$ 로 법적 제한치를 충분히 만족한다.

2.3 주민선량 평가

선량평가 선원항에는 GALE 코드로 재평가된 방출량을 사용하였으며, ICRP-60의 유효선량 평가방식을 적용하는 K-DOSE 60 전산 프로그램을 사용하여 개인 및 주민선량을 평가하였다.

Table 3 및 4는 정상운전시 기체유출물과 액체유출물에 의한 최대 개인선량을 보여주고 있으며, 원자력안전위원회고시 제2014-3호의 연간선량 제한치를 만족함을 보여주고 있다.

Table 3. Maximum Offsite Individual Dose Resulting from Normal Plant Gaseous Releases (1 unit)

Description	Results	Dose Constraints
Air Absorbed Beta Dose (mGy/yr)	6.80E-02	2.00E-01
Air Absorbed Gamma Dose (mGy/yr)	2.91E-02	1.00E-01
External Skin Equivalent Dose (mSv/yr)	6.72E-02	1.50E-01
External Effective Dose (mSv/yr)	1.92E-02	5.00E-02
Internal Max. Equivalent Dose (mSv/yr)	7.15E-02	1.50E-01

Table 4. Maximum Offsite Individual Dose Resulting from Normal Plant Liquid Releases (1 unit)

Description	Results	Dose Constraints
Total Effective Dose(mSv/yr)	3.975E-3	0.03
Maximum Organ Dose (mSv/yr)	5.912E-2	0.10

3. 결론

미국 NRC의 PWR-GALE 코드를 이용하여 한울 1,2호기의 삼중수소 배출설계값을 재평가하였다. 이에 따른 제한구역경계에서의 부지경계농도 및 주민선량을 재평가하였으며 원자력안전위원회 고시의 배출제한치 및 주민선량 제한치를 충분히 만족하는 것으로 평가되었다.

4. 참고문헌

- [1] US NRC, NUREG-0017, Calculation of Release of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors, 1985.
- [2] 원자력안전위원회고시 제2014-34호, 방사선방호 등에 관한 기준, 2014.