

경수로 원전의 Ar-41 환경 방출에 따른 공기 중 방사능 농도평가

강덕원, 손옥, 이의동*

한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65

* (주)하나검사, 경기도 하남시 감북동 412-5

dwkang@kepri.re.kr

1. 서론

1960년대 후반에 미국 원전에서 수차례에 걸쳐 증기발생기 튜브파단사고가 발생하였으나 이에 대한 신속한 대응이 실패하면서 증기발생기 세관의 누설을 조기에 감지할 수 있는 새로운 감시기술의 개발 필요성이 대두되었다. 국내의 경우 Framatome 원전에서 이와 유사한 증기발생기 세관 누설사고가 발생하였으나 신속한 대처가 미흡하였다. 국내 경수로 원전의 경우, 누설 감시를 위해 각 SG의 주증기 배관에 설치한 NaI 감시기로 N-16방사능을 실시간으로 감시해 오고 있다. 이 기술의 취약점으로는 20% 이하의 저출력 운전 및 고온 정지시 N-16 생성량의 급감으로 인해 N-16 감시기의 사용은 불가할 뿐 아니라 누설량에 대한 정확한 평가가 어려운 단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 이러한 누설 감시상의 취약점을 보완하기 위해 개발한 Ar 주입기술의 원전 적용시 계통 내 Ar-41의 추가 생성으로 소량의 기체방사성 물질인 Ar-41이 폐기물 처리 계통을 통해 환경으로 방출되는 Ar-41의 공기 중 방사능 농도에 대해 다루었다. SG 누설 감시를 위해 1차 계통에 Ar 기체의 주입에 의해 원자로냉각재내 Ar-41의 비방사능을 0.2μCi/g으로 유지시킬 경우, 이의 영향을 받는 계통은 2차계통 및 기체폐기물 처리계통이다. 노심에서 중성자방사화 (neutron activation)에 의해 생성된 방사성 기체인 Ar-41은 증기발생기 세관 (steam generator tubes)을 통해 2차계통으로 누설되거나 원자로배수탱크(RDT), 체적제어탱크(VCT) 및 탈기기(Gas Stripper)의 배기 (Venting)를 통해 기체방사성폐기물계통(GRS)으로 유입되어 각 계통의 방사능 준위에 영향을 미친다. 원자로냉각재 계통 내에서 생성된 Ar-41은 누설 및 처리 과정을 거쳐 최종적으로 환경으로 방출되며 이렇게 방출된 방사능은 대기확산 (atmospheric dispersion) 과정을 거쳐 제한구역경계에서의 공기 중 농도에 영향을 줄 수 있는지의 여부를 평가하기 위해 Ar-41의 방출량 및 방사능을 평가하였다.

2. 주요 계통에서의 Ar-41 비방사능 평가

가. 2차계통 내 Ar-41 비방사능 평가

1차계통내 Ar-41의 비방사능이 0.2μCi/g로 유지될 경우 2차계통내에서 Ar-41의 비방사능은 다음과 같이 계산된다.

$$C_s = \frac{75\text{lb/day} \times \text{day}/24\text{hr}}{1.272(7)\text{lb/hr}} \times 0.2\mu\text{Ci/g} = 4.914(-8)\mu\text{Ci/g} \dots\dots\dots (1)$$

* 예상 누설율 : 75lb/day, Fra형 주 증기유량 : 1.272(7)lb/hr임.

나. 기체방사성폐기물 계통 내 Ar-41 방사능 평가

기체방사성폐기물 계통의 방사능 평가에서는 활성탄 지연탑에서의 지연 및 이에 따른 방사능 붕괴만을 고려하여 4대의 활성탄지연탑의 각각에 대해 불활성기체의 누적 방사능을 계산하였으며 Ar-41의 반감기가 짧은 것은 하나, 활성탄지연탑에서의 지연시간이 매우 짧아 지연효과가 낮기 때문에 각 활성탄지연탑에 대한 누적 방사능 값도 서로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다.

활성탄지연탑에 의한 Ar-41의 지연시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T = 0.011 \frac{MK}{F} \dots\dots\dots (2)$$

$$T = 0.011 \times (42 \times 0.239) / 2 = 0.055 \text{ day} (= 1.32 \text{ hour})$$

여기서, T : 지연시간(day), F : 평균 유입유량(scfm), M : 활성탄량(klb), K : 동적흡착계수(cc/g)

3. 주요 원전 건물별 연간 방출 방사능량 평가

연간 환경방출량은 NUREG-0017에 제시된 입력자료/가정사항에 근거 (원자로 특성자료는 올진 3호

기 자료 인용)하여 PWR-GALE 코드의 계산식을 적용하여 계산하였다. 방출원으로서는 건물 배기/환기 계통(원자로건물, 보조건물 및 터빈건물)으로부터의 방출, 2차계통(복수기 배기)으로부터의 방출, 그리고 탈기(gas stripping)에 의한 기체방사성폐기물 계통으로부터의 방출을 고려하였다. 정상 운전시 탈기에 의한 기체방사성 폐기물계통으로부터 Ar-41의 연간 방출량은 다음과 같이 계산하였다.

$$ASHIMC = PE \frac{C_p \cdot SRB}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda T_f)) \cdot \exp(-\lambda \tau) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, ASHIMC : 정상운전 시 탈기에 의한 Ar-41의 연간 방출량

이상과 같은 방법을 사용하여 계산한 각 방출원별 Ar-41의 연간 방출량은 각각 다음과 같다.

CBL(원자로건물)= 62Ci/yr, AXBL(보조건물)= 4Ci/yr, EJT(복수기)= 2Ci/yr,
ASHIMS(정지시 탈기기 운전)= 54Ci/yr, ASHIMC(정상운전 탈기기 운전) = 96Ci/yr

모든 방출원으로부터 Ar-41의 연간 방출량은 220Ci/yr로서 이는 원자로냉각재에 Ar 기체를 주입하지 않는 경우의 연간 방출량인 34Ci/yr의 647%에 해당하는 값임.

4. 제한구역 경계에서의 공기 중 방사능농도 평가

제한구역경계에서의 공기 중 농도는 대기확산인자(atmospheric dispersion factor)를 사용하여 다음 식으로 계산된다.

$$C = Q \times \chi/Q \dots\dots\dots (4)$$

여기서, C : 제한구역경계에서 Ar-41의 공기중 농도, Q : Ar-41의 연간 방출량(220Ci/yr)
χ/Q : 제한구역경계에서의 최대방향 연평균 대기확산인자 (7.716E-6 sec/m³)

위와 같이 계산된 제한구역경계에서 Ar-41의 농도는 5.38E-11 μCi/cc이며 이 값은 Ar-41에 대한 최대허용농도 (maximum permissible concentration)인 4.0E-8 μCi/cc의 0.13% 수준이다. 울진 4호기도 3호기와 같이 Ar 기체를 주입할 경우, 울진 3호기 및 4호기로부터의 Ar-41의 연간 방출량은 440Ci/yr이며 울진 1호기 및 2호기로부터의 방출량까지 더할 경우 이들 4개 호기로부터 Ar-41의 연간 방출량은 490Ci/yr이다. 이에 따른 제한구역경계에서 Ar-41의 농도는 1.20E-10μCi/cc이다. 이 값은 Ar-41에 대한 최대허용농도의 0.3% 수준이다.

3. 결 론

원전 주요 방출지점에서 Ar-41의 연간 방출 방사능을 계산한 결과, 기체방출 계통을 통한 방출량이 150Ci/yr로 제일 많았고 그다음으로는 격납건물을 통한 방출량이 62Ci/yr로 나타났으며 모든 방출 지점으로부터의 총 방출량은 220Ci/yr로 계통 내에 Ar 주입 전에 비해 약 650% 정도 높게 나타났다. 이 값을 근거로 제한구역(EEZ)에서의 Ar-41의 공기중 농도는 5.38E-11 uCi/cc로 Ar-41의 최대허용농도(MPC)의 0.13%에 상응한 것으로 계산되어졌다.