

KSNP의 보조건물 설계특성을 반영한 옥소방사능 예상배출량 평가방법의 개선

Improvement of Evaluation Method for Anticipated Radio-Iodine Release Considering Design Characteristics of KSNP's Auxiliary Building

이관희, 정재학, 박원재
한국원자력안전기술원

요 약

2개의 보조건물(PAB와 SAB)이 있는 KSNP의 경우, 단일 보조건물만을 고려하고 있는 PWR-GALE 코드를 이용하여 기체배출량을 평가하기에는 한계가 있다. 본 논문에서는 기존 PWR-GALE 코드는 그대로 이용하면서 KSNP의 설계특성을 반영하기 위하여 일부 입력변수를 수정해서 보조건물 옥소방사능 배출량을 사실적으로 평가할 수 있는 방법론을 개발했다. 울진 5,6 호기의 설계자료를 이용하여 기존 평가방법론과 개선된 평가방법론을 적용해 사례연구를 실시하였다. 기존 평가방법으로 보조건물 옥소의 유효제거효율을 산출한 결과 42%가 나왔으나 PAB와 SAB의 옥소핵종 농도가 동일하다고 가정을 만족하지 못하는 단점이 있다. 개선된 평가방법으로 옥소의 유효제거효율을 산출한 결과 88%가 나왔다.

Abstract

PWR-GALE Code is a computerized mathematical model for calculating the releases of radioactive material in gaseous and liquid effluents from PWRs. In PWR-GALE Code, Auxiliary building iodine removal efficiency, one of the code input data, did not reflect adequately the new design of KSNP which has two auxiliary buildings(PAB and SAB). In this study, we developed a revised method how to correct iodine removal efficiency in KSNP. And newly proposed methodology through case study using Ul-Jin 5,6 design data was verified.

1. 서 론

예상 방사선원항은 주어진 원자력발전소가 정상적으로 운전될 때, 해당 원자로 냉각재 및 기타계통에 존재할 것으로 예상되는 방사능과 이러한 계통들로부터 누출되어 액체 및 기체 방사성폐기물계통을 통해 처리된 후 환경으로 방출될 것으로 예상되는 방사능에 관한 자세한 정보를 말한다. 정상운전시 발전소로부터 환경으로 방출되는 방사성 기체와 액체의 예상되는 방출량은 궁극적으로 과기부고시 2002-23호 제 16조 등에서 규정된 설계목표(Design Objective)선량 만족여부를 입증하기 위한 목적으로 사용된다.

가압 경수로(Pressurized Water Reactor)형 원전의 예상 방사선원향을 평가하는 대표적인 방법은 NUREG-0017(Rev.1, 1985)[1] 및 PWR-GALE 코드를 이용하는 것이다.

NUREG-0017 방법은 정상운전시 원자로냉각재와 2차냉각재의 방사능 농도를 예측하는 데에는 ANSI/ANS-18.1[2] 방법론을 사용하고, 액체 및 기체 방사성폐기물의 환경방출에 관한 선원향을 산출하기 위한 별도의 평가모델을 포함하고 있다.

한편, PWR-GALE 코드는 NUREG-0017의 방법론에 따라 정상운전 및 예상과도운전시 PWR에서 환경으로 배출될 것으로 예상되는 방사능을 평가하기 위해서 개발된 평가도구이다. 현재 PWR-GALE 코드는 국내원전의 설계 및 인허가 과정에서 시설별 설계목표선량 만족여부를 입증하기 위해서 활용되고 있다.

그러나, 기체 방사성폐기물 예상배출량 계산에 있어서 PWR-GALE 코드는 대다수 미국 원전의 설계에 근거하여 단일 보조건물만을 고려하고 있어 보조건물을 PAB(Primary Auxiliary Building)와 SAB(Secondary Auxiliary Building)로 분리한 KSNP(Korea Standard Nuclear Power Plant)의 설계를 충분히 반영하지 못하고 있다. 이에 본 논문에서는 기존에 사용되어 왔던 평가방법과 이를 개선한 평가방법을 소개하고자 한다.

2. 평가방법

2.1 PWR-GALE 코드 개요

PWR-GALE 코드에서는 ANSI/ANS-18.1[2]에 의하여 냉각재 핵종 농도를 계산하고, 발전소 계통 내 방사성 물질이 기체 방사성폐기물로 방출되기까지의 유출 및 이동 메커니즘과 방사성 물질의 환경 방출량을 감소시키기 위한 원전의 설계특성, 실제 원전의 운전자료로부터 획득한 정보 등과 같은 사항을 기초로 하여 연간 기체 방사성폐기물을 평가하고 있다.

기체 유출물에 동반된 방사성 물질의 방출은 기체폐기물처리계통으로부터의 방출과 여러 환기경로들을 통한 방출을 포함한다. PWR에서 주요한 기체방사능 방출점은 기체폐기물처리계통, 증기발생기 취출계통, 복수기 공기추출기 배기, 격납건물 퍼지 배기, 보조건물/ 터빈건물/사용후 핵연료 저장지역의 환기계통 배기, 2차계통으로부터 증기 누설 등이다.

PWR-GALE 코드는 격납건물과 보조건물 대기로 불활성기체 및 방사성 옥소의 누출률을 해당 건물로의 1차냉각재 누설률에 기초하여 계산하며, 입자 누출률은 운전중인 PWR들에서 측정된 자료에 근거하여 고려한다.

2.2 미국원전과 KSNP의 설계상의 차이점

PWR-GALE 코드는 미국 원전의 설계에 따라 단일 보조건물만을 고려하고 있다. 그러나 영광3호기 이후의 KSNP는 2개의 보조건물(PAB와 SAB)에서 기체유출물이 각각 배출되며, 정상운전시 SAB 배기체는 옥소제거용 활성탄여과기(제거효율 90%)를 거쳐 배출되나, PAB 배기체는 활성탄여과기를 거치지 않고 배출된다(그림 1참조).

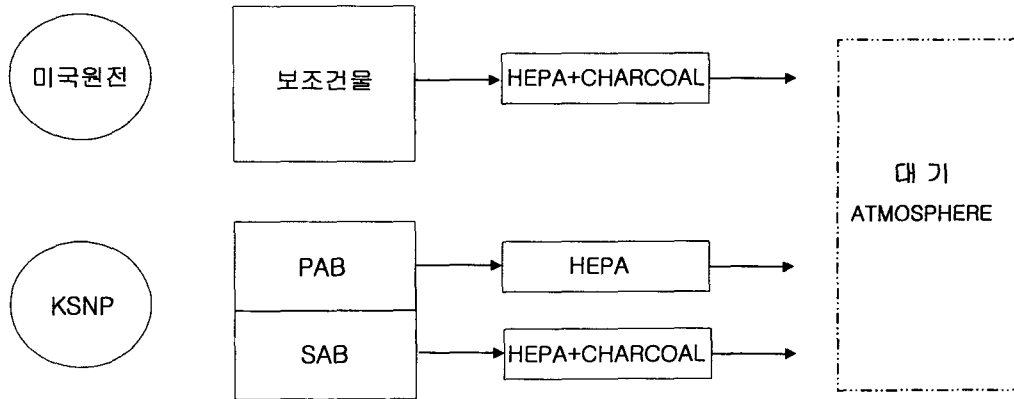


그림 1. 정상운전시 보조건물 공기조화계통을 통한 기체폐기물 배출설계

2.3 보조건물 옥소방사능 배출량의 보정

2.3.1 기존 평가방법

PAB와 SAB의 옥소핵종 농도가 동일하다고 가정하여 건물 배기유량을 가중 평균하여 보조건물 옥소의 유효제거효율을 산출하였다.

$$\epsilon(\text{유효제거효율}) = \frac{(\text{PAB 유량률} \times \text{제거효율}) + (\text{SAB 유량률} \times \text{제거효율})}{\text{총 유량률}} \quad (1)$$

정상운전시 SAB 배기체는 제거효율 90%인 활성탄 여과기를 통해 환경으로 배출되고, PAB 배기체는 활성탄 여과기 없이 배출된다면 위식은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{(\text{PAB 유량률} \times 0) + (\text{SAB 유량률} \times 0.9)}{\text{총 유량률}} \quad (2)$$

2.3.2 개선된 평가방법

PAB와 SAB의 옥소 예상방사능 비율에 근거하여 보조건물 옥소의 유효제거효율을 산출한다. 각 기기의 방사능농도가 평형상태를 이루는 것으로 가정할 경우 PAB와 SAB의 HVAC(Heating, Ventilating and Air Conditioning system) 전단으로 유입되는 연간 옥소의 방사능은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_{\text{inp, PAB}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{PAB}}} [C_{\text{P},i} \cdot V_{\text{P},i} \cdot \nu_{\text{P},i}] \cdot t \quad (3a)$$

$$A_{\text{inp, SAB}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{SAB}}} [C_{\text{S},i} \cdot V_{\text{S},i} \cdot \nu_{\text{S},i}] \cdot t \quad (3b)$$

여기서,

$A_{\text{inp,PAB(SAB)}}$ = 연간 PAB(SAB) HVAC 전단으로 유입되는 옥소의 방사능 [Bq],

$N_{\text{PAB(SAB)}}$ = PAB(SAB)에 설치된 방사성기기 개수,

$C_{P(S),i}$ = PAB(SAB) 방사성기기 i의 옥소방사능 농도 [Bq/m³],
 $V_{P(S),i}$ = PAB(SAB) 방사성기기 i에 함유된 유체의 체적 [m³],
 $V_{P(S),i}$ = PAB(SAB) 방사성기기 i의 방사성옥소 누설률 [sec⁻¹],
 t = 고려기간 = 1yr.

각 기기의 옥소 방사능 누설률이 일정하다고 가정하면, PAB와 SAB에서 HVAC 전단으로 유입되는 연간 옥소 방사능의 비율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{P/S} = \frac{A_{\text{inp}, \text{PAB}}}{A_{\text{inp}, \text{SAB}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{PAB}}} [C_{P,i} \cdot V_{P,i}]}{\sum_{i=1}^{N_{\text{SAB}}} [C_{S,i} \cdot V_{S,i}]} = \frac{N_{\text{PAB}} \cdot C_{P, \text{AVG}} \cdot V_{P, \text{AVG}}}{N_{\text{SAB}} \cdot C_{S, \text{AVG}} \cdot V_{S, \text{AVG}}} \quad (4)$$

여기서,

$R_{P/S}$ = PAB와 SAB의 HVAC 전단으로 연간 유입되는 옥소 방사능의 비율,
 $C_{P(S), \text{AVG}}$ = PAB(SAB) 방사성기기들의 평균 옥소방사능 농도 [Bq/m³],
 $V_{P(S), \text{AVG}}$ = PAB(SAB) 방사성기기들에 함유된 유체의 평균 체적 [m³].

SAB 배기체의 제거효율이 90%인 활성탄 여과기를 통해 환경으로 배출되고, PAB 배기체는 활성탄 여과기 없이 배출된다면 각 건물의 HVAC 전단 및 후단의 방사능은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$A_{\text{out}, \text{PAB}} = A_{\text{inp}, \text{PAB}} \quad (5)$$

$$A_{\text{out}, \text{SAB}} = (0.1) \cdot A_{\text{inp}, \text{SAB}} \quad (6)$$

따라서, PAB와 SAB의 설계를 반영하여 보정된 보조건물 활성탄여과기 제거효율은 수식 (5) 및 (6)으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{\text{AD}} &= \frac{\text{유입방사능} - \text{유출방사능}}{\text{유입방사능}} \\
 &= \frac{[A_{\text{inp}, \text{PAB}} + A_{\text{inp}, \text{SAB}}] - [A_{\text{out}, \text{PAB}} + A_{\text{out}, \text{SAB}}]}{A_{\text{inp}, \text{PAB}} + A_{\text{inp}, \text{SAB}}} \\
 &= \frac{A_{\text{inp}, \text{SAB}} - A_{\text{out}, \text{SAB}}}{A_{\text{inp}, \text{PAB}} + A_{\text{inp}, \text{SAB}}} \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{A_{\text{inp}, \text{SAB}} - (0.1) \cdot A_{\text{inp}, \text{SAB}}}{R_{p/s} \cdot A_{\text{inp}, \text{SAB}} + A_{\text{inp}, \text{SAB}}} \\
 &= \frac{0.9}{1 + R_{p/s}}
 \end{aligned}$$

한편, 식 (4)에서,

$$\frac{C_{P, \text{AVG}} \cdot V_{P, \text{AVG}}}{C_{S, \text{AVG}} \cdot V_{S, \text{AVG}}} \leq 1 \quad (8)$$

이 성립한다면 보수적으로 다음식이 성립한다.

$$R_{P/S} \approx \frac{N_{PAB}}{N_{SAB}} \quad (9)$$

따라서 개별기기의 누설률이 동일하다고 가정하고, PAB의 옥소방사능 합이 SAB의 옥소방사능 합보다 작거나 같다는 가정이 성립하면, PAB와 SAB 옥소 선원량의 비율을 각 건물에 설치된 주요 방사성기기의 대수 비율로 가정할 수 있다.

3. 사례연구

KSNP의 하나인 울진 5,6호기의 설계를 바탕으로 기존 평가방법과 개선된 평가방법으로 활성탄 여과기 제거효율을 계산하면 다음과 같다.

3.1 기존 평가방법 이용

기존 평가방법에서는 PAB와 SAB의 옥소핵종 농도가 동일하다고 가정하였는데, PAB와 SAB에 설치된 주요 방사성기기의 옥소 방사선원량 설계자료를 검토한 결과, SAB 관련 기기의 옥소 방사능농도가 PAB에 비해서 높은 것으로 확인되었다(표 1 참조).

표 2에 제시되어 있는 유량률을 이용하여 활성탄여과기 제거효율을 계산하면(식 2이용) 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{(40,000 \times 0) + (35,200 \times 0.9)}{75,200} = 0.42 = 42\%$$

울진 5,6호기의 경우 기존 평가방법론은 옥소핵종농도가 동일하다는 가정을 만족하지 못하는 한계가 있다.

표 1. PAB와 SAB 주요 기기의 방사능농도 비교[5]

핵종	SAB 추출수 열교환기(A) (Bq/cc)	PAB 증진펌프(B) (Bq/cc)	비율 (A/B)	PAB 정지냉각계통 열교환기(C) (Bq/cc)	비율(A/C)
I-131	1.43E+03	1.38E+01	1.03E+02	7.25E+02	1.97E+00
I-132	7.31E+03	6.00E+01	1.22E+02	3.67E+03	1.99E+00
I-133	4.53E+03	4.44E+01	1.02E+02	2.36E+03	1.91E+00
I-134	1.18E+04	8.41E+01	1.41E+02	6.03E+03	1.96E+00
I-135	8.70E+03	8.41E+01	1.04E+02	4.48E+03	1.94E+00

표 2. 울진 5,6호기의 PAB와 SAB의 배기 유량률[5]

건물	제거효율	유량률
PAB	0 %	40,000cfm
SAB	90 %	35,200cfm

3.2 개선된 평가방법 이용

표 3은 PAB와 SAB의 주요계통내에 존재할 것으로 예상되는 옥소 동위원소의 방사능 평가결과를 나타낸 것이다. 이로부터 PAB의 HVAC 전단으로 유입되는 옥소 방사능의 비율이 SAB에 비해 0.019 수준임을 알 수 있다. 따라서 개선된 평가방법에 의한 보조건물 활성화탄여과기 제거효율은 다음과 같다(식 7이용).

$$\epsilon_{AD} = \frac{0.9}{1 + R_{p/s}} = \frac{0.9}{1 + 0.019} = 0.88 = 88\%$$

한편, 표 3의 자료에서 알 수 있듯이 PAB의 HVAC 전단으로 유입되는 옥소 방사능의 비율이 SAB에 비해 매우 낮은 수준이므로 식 (8)의 가정이 충족된다. 따라서 보수적으로 다음식이 성립한다(표 4참조).

$$R_{P/S} \approx \frac{N_{PAB}}{N_{SAB}} = \frac{8}{27} = 0.296$$

위의 값을 이용하여 제거효율을 계산하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{AD} = \frac{0.9}{1 + R_{p/s}} = \frac{0.9}{1 + 0.296} = 0.69 = 69\%$$

표 3. PAB와 SAB 옥소방사능 재고량 비교

건 물	I-131	I-132	I-133	I-134	I-135	옥소방사능 합계
PAB	1.78E+10	9.01E+10	5.81E+10	1.48E+11	1.10E+11	4.24E+11
SAB	1.34E+13	8.07E+11	4.62E+12	5.07E+11	2.82E+12	2.22E+13

표 4. 방사성 기기의 건물별 배치 현황[5]

계 통	기 기	PAB(대수)	SAB(대수)
화학 및 체적 제어계통	Tank	-	2
	Package	-	11
	Ion Exchanger	-	5
	Filter	-	5
	Pump	3	2
	Heat Exchanger	1	2
정지냉각계통	Pump	2	-
	Heat Exchanger	2	-
합 계		8	27

4. 결 론

2개의 보조건물(PAB와 SAB)이 있는 KSNP의 경우, 단일 보조건물만을 고려하고 있는 PWR-GALE 코드를 이용하여 기체배출량을 평가하기에는 한계가 있다. 본 논문에서는 기존 PWR-GALE 코드는 그대로 이용하면서 KSNP의 설계특성을 반영하여 일부입력변수를 수정해서

보조건물 옥소방사능 배출량을 사실적으로 평가할 수 있는 방법론을 개발했다. 중장기적으로는 국내 원전특성을 고려한 평가도구의 개발이 필요하다.

울진 5,6호기의 설계자료를 이용하여 기존 평가방법론과 개선된 평가방법론을 적용해 사례연구를 실시하였다. 기존 평가방법으로 보조건물 옥소의 유효제거효율을 산출한 결과 42%가 나왔으나 PAB와 SAB의 옥소핵종 농도가 동일하다고 가정을 만족하지 못하는 단점이 있다. 개선된 평가방법으로 옥소의 유효제거효율을 산출한 결과 88%가 나왔다. 그러나 개선된 평가방법은 옥소의 유효제거효율을 사실적으로 평가한다는 장점이 있으나 주요기기별로 옥소의 방사능을 계산해야 하므로 많은 계산이 필요하다는 단점이 있다. 계산을 단순화하기 위하여 PAB와 SAB 옥소 선원항의 비율을 각 건물에 설치된 주요 방사성기기의 대수 비율로 가정하여 평가한 결과 제거효율은 69%로 사실적으로 평가한 결과보다 낮게 나왔다.

감사의 글

본 연구의 수행에 사용된 울진 5,6호기 설계자료를 제공해 주신 한국전력기술(주) 담당자분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. NUREG-0017, Rev.1, Calculation of Release of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors, 1985
2. ANSI/ANS-18.1, American National Standard : Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors, 1984
3. 한국원자력안전기술원/한반도에너지개발기구, 방사선 및 폐기물 안전성 평가, 개정1판, 2002.
4. 한국원자력안전기술원, 방사선방호 및 폐기물 전문과정, 2001.
5. 울진 5,6호기 설계자료