

중수로원전의 기체 유출물에 대한 유도방출기준 예비 계산
Preliminary Calculation Results of Derived Release Limits for Gaseous Effluent in PHWR NPPs

이형석, 김희근, 김은주, 양양희, 김위수

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

ICRP-60 법제화와 따라 일반인 선량한도가 연간 5mSv에서 1mSv로 하향 조정됨에 따라 원전으로부터 환경으로 배출되는 기체 및 액체 방사성 유출물은 일반인에 대한 법적 선량한도를 초과하지 않는 범위에서 배출 및 관리되어야한다. 중수로 원전의 경우 경수로에 비해 방사성유출물을 연속 방출하고 그 방출량 또한 상대적으로 경수로에 비해 많기 때문에 방사성물질의 감시나 관리가 더욱 중요하다. 본 연구에서는 ICRP-60 권고사항 및 국내 과기부고시 제2002-1호에 따라서 월성원전의 기체유출물에 대한 유도방출기준을 예비적으로 계산하였다. 그 결과, 삼중수소의 경우 과기부고시 제2002-1호의 배출관리기준에 따를 경우 새로운 유도방출기준 계산값은 기존 유도방출기준 대비 약 30 % 수준으로 낮은 결과를 보였다. 또한, K-DOSE60 전산 코드를 이용한 시스템 분석법을 적용할 경우에는 기존대비 약 20 % 수준으로 낮아지는 결과를 보였다.

Abstract

According as the annual public dose limit was adjusted 5mSv to 1mSv based on ICRP-60, the radioactive materials for the gaseous and liquid released from nuclear power plant to environment should be controlled properly under public dose limit. The surveillance of the radiological effluent in PHWR NPPs is more important than PWR. Since the gaseous effluent has been released continuously and the amount of radiological effluent is relatively more than that of PWR. In this study, DRLs(Derived Release Limits) for gaseous effluent were preliminarily calculated using the ECL(Effluent Concentration Limit) and the system method based on ICRP-60 recommendation and Notification No. 2002-1 of Ministry Of Science & Technology. As a result, the calculated

DRL of the gaseous tritium using the ECL and system method was reduced within approximate 30 % and 20 % of existing limit, respectively.

1. 서 론

원전으로부터 환경으로 배출되는 기체 및 액체 방사성 유출물은 호흡과 음식물의 섭취등을 통해 원전 주변주민에 방사성 피폭을 유발 시킬 수 있다. 따라서 원전에서 배출되는 방사성 유출물은 일반인에 대한 법적 선량한도를 초과하지 않는 범위에서 배출 및 관리되어야한다. 중수로 원전의 경우 경수로에 비해 방사성유출물을 연속 방출하고 그 방출량 또한 상대적으로 경수로에 비해 많기 때문에 방사성물질의 감시나 관리가 더욱 중요하다. 따라서 중수로원전에서는 기체 및 액체 유출물 방출시 예상되는 방사성 핵종 대한 방출량을 제한하고 있다. 이런 유출물 방출 제한치는 일반적으로 일반인 선량한도에 근거하여 유도되는데, 이를 유도방출기준(Derived Release Limits)이라 정의한다. 이 때 핵종별 설정된 유도방출기준은 일반적으로 일반인에 대한 법적 선량한도에 이르게 할 수 있는 단일 핵종에 대한 연간 최대 방출량을 의미한다. 그런데 원전에서 방출되는 방사성 핵종은 단일 핵종만이 아니므로 일반인 선량한도를 초과하지 않기 위해서는 별도의 운전 목표치(Operating Targets; 통상적으로 DRLs의 1%)를 설정하여 운영하고 있다. 본 논문에서는 ICRP-60 권고사항 및 국내 과기부 고시 제2002-1호에 따라서 월성원전에서 요구되는 기체유출물에 대한 유도방출기준을 예비적으로 계산하였다.

2. 기존 유도방출기준 방법론

2.1 핵종 농도법(환경오염준위 관점)

이 방법은 통상 MPC(Maximum Permissible Concentration) 분석법으로 잘 알려져 있으며 피폭대상에 대해 법적인 선량한도를 초과하지 않도록 허용농도 관점에서 방사성물질의 방출을 제어하는 것이다. 일반적으로 배기/배수중 배출허용 농도값은 특정 환경조건을 세밀히 고찰하여 얻는 것이 아니라 광범위한 피폭경로를 일반화하여 도출하는 것이다. 따라서 식수나 공기와 같은 비교적 단순한 성질과 단일한 유형의 피폭경로에 관해서는 매우 적절한 방법이나 먹이사슬(Food chain)나 외부 피폭 경로에 관한 상황을 유효하게 고려하기에는 부적절한 면이 있다. 따라서 이 방식을 이용할 경우 여유도를 크게 잡는 것이 일반적이다.

핵종 농도법에 의한 유도방출기준 설정방법은 공기중 및 수중에 대한 법적 규제농도에 근거하여 다음과 같은 과정으로 산정한다.

$$DRL_a^i = \frac{ECL_a^i(\text{or } MPC_a^i)}{X/Q} \quad (1)$$

$$DRL_w^i = ECL_w^i(\text{or } MPC_w^i) \times Q \quad (2)$$

여기서,

ECL_i, MPC_i = 공기/수중에서 핵종 i 의 법적 규제농도(ECL; Effluent Concentration Limit) 혹은 최대허용농도(Bq/m^3)

X/Q = 대기확산계수(sec/m^3)

Q = 방출유량(희석수량)

위 식 (1)과 (2)는 각각 기체 및 액체 유출물중 핵종 i 에 대한 유도방출기준을 핵종농도법에 의해 계산하는 식이다. 위 식에서 보듯이 기체유출물의 경우 유도방출기준은 부지경계선에서의 대기확산계수, 액체의 경우 평균 방출유량(즉, 희석수량)에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

현재 월성 원전의 유도방출기준은 핵종 농도법에 근거하여 설정된 값을 사용하고 있다. 이 때 사용되는 핵종의 규제농도는 구 개념의 최대허용농도로서 이를 근거로 유도방출기준을 계산하여 적용하고 있다.

2.2 시스템 분석법(방출률 관점)

시스템 분석법은 방사성 물질이 선원(발전소)으로부터 방출되어 인체에게 피폭을 주는 모든 경로를 고려하는 방법이다. 즉 그림 1에서 보듯이, 방사성핵종이 방출된 후 공기중 방사성 핵종의 호흡, 토양침적에 따른 외부피폭, 동식물들에 전이 농축되어 최종 섭취까지 아주 복잡한 경로(Pathway)를 고려하는 것이다. 이러한 과정에는 많은 사회환경인자들이 요구되며, 또한 모든 피폭경로를 평가하는데 내재된 복잡한 문제를 적절히 처리할 수 있는 전산프로그램이 필요하다. 하지만 이러한 복잡한 경로를 적절히 모사함으로써 각 경로별 피폭선량을 모두 계산할 수 있으며 또한 결정경로(Critical pathway)에 대한 해석까지 가능하게 할 수가 있다.

원전에서 방출되는 핵종 i 에 대한 연평균(g)의 선량(H_g^i)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$H_g^i = D_g^i Q_i \quad (3)$$

여기서, D_g^i = 핵종 i 의 단위 방출당 연평균 g 가 받는 선량(Sv/Bq)

(즉, 외부피폭, 섭취 및 흡입이 모두 고려)

$$Q_i = \text{핵종 } i \text{의 방출양}(Bq)$$

이때, 핵종 i 의 단위 방출당 연평균 g 에서의 최대선량을 D_{\max}^i 이라 정의하고 일반인에 대한 연간선량한도를 ADL 라 할 때 핵종 i 에 대한 연간 유도방출기준(DRL_i)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$DRL_i = \frac{ADL}{D_{\max}^i} \quad (4)$$

위 식 (4)에 따르면, 핵종 i 을 유도방출기준 만큼 환경으로 방출하면 발전소 부지경계선에서 거주하는 일반인은 연간 법적선량한도에 도달하게 됨을 의미한다. 결과적으로 다른 핵종을 방출할 수 없게 된다. 그러므로 원전의 유출물 관리시 방출 예상핵종의 실제 방출량 대 유도방출기준의 총 분율이 1을 넘지 않도록 관리되어야 한다.

$$\sum_i \frac{R_i}{DRL_i} \leq 1 \quad (5)$$

여기서 R_i = 핵종 i 의 실제 방출량(Bq)

$$DRL_i = \text{핵종 } i \text{의 유도방출기준(Bq)}$$

결과적으로, 핵종농도법과 시스템 분석법의 경우 단일 핵종별로 유도방출기준이 계산 된다. 따라서 단일 핵종에 근거하여 계산된 유도방출기준은 각 핵종별 별도의 방출 목표치를 설정하여 관리할 필요가 있다. 식 (6)과 같이 유도방출기준의 1%를 운전목표치(R_{OpT}^i)로 설정하여 운영하고 있다.

$$R_{OpT}^i = 0.01 DRL_i \quad (6)$$

이는 다수 핵종의 방출 등에 따른 방사선 관리상 야기되는 불확실성을 줄이고 원전의 방사선관리를 보다 안전하게 운영하기 위함이다.

3. 기체 유출물에 대한 DRL 계산

3.1 핵종 농도법(ECL 적용)을 적용한 DRL 계산

핵종 농도법에 근거하여 중수로원전에서 대표적으로 배출되는 핵종에 대해서 예비적으로 유도방출기준을 계산하였다. 앞서 제시한 식 (1)에서 보듯이 핵종 농도법을 적용하여 기체 유출물에 대한 유도방출기준 설정시 고려되는 인자로는 배출구에서의 핵종별 법적 규제농도와 대기확산계수(χ/Q)이다. 따라서 본 계산에서는 ICRP-60이 반영된 현행 법적 규제치인 과기부고시 제 2002-1호의 배기중 핵종의 배출관리기준치와 현재 월성의 최종안전성분석보

고서(FSAR)에 제시된 대기확산계수를 적용하여 예비 계산을 수행하였다.

3.2 시스템 분석법(K-DOSE60 코드를 이용)을 적용한 DRL 계산

시스템 분석법의 개념에 부합되도록 ICRP-60이 반영된 ODCM(Off-site Dose Calculation Manual) 평가 코드를 이용하여 유도방출기준을 계산하였으며 이때 사용된 코드로는 전력연구원에서 개발한 K-DOSE60 월성 Version을 이용하였다[1]. 여기서 사용되는 대기확산계수는 월성 최종안전성분석보고서에 제시된 값을 사용하였으며 기존 원전 주변의 사회환경인자(예, 음식물 섭취량 등)를 이용하였다. 그림 2에서 보듯이 계산 절차는 우선, 기체 방사성핵종의 단일 방출당 원전 주변주민의 연평균별 피폭선량(Sv/Bq)을 계산하고 이때 최대 선량을 보이는 군을 결정군(Critical group)으로 분류한 후, 일반인에 대한 연간 법적선량한도 1 mSv에 근거한 단일핵종의 유도방출기준을 계산하였다.

3.3 핵종농도법과 시스템 분석법 결과 비교

그림 3에서 보듯이 배출관리기준(ECL)을 이용한 핵종 농도법과 주민선량계산 코드 K-DOSE60을 이용한 시스템 분석법의 계산 결과, 삼중수소의 경우 핵종 농도법이 시스템 분석법에 비해 약 2 배 정도 높은 결과를 보였으며 이 결과는 기존의 월성원전 유도방출기준 대비 약 30 % 수준으로 낮게 계산되었다. 또한 K-DOSE60을 이용한 시스템 분석법을 적용할 경우 기존 대비 약 20 % 수준으로 낮아지는 결과를 보였다. 현재 월성원전에서 부재 중인 C-14에 대한 유도방출기준을 배출관리기준을 적용한 핵종농도법과 K-DOSE60 전산 코드를 이용한 시스템 분석법간의 차이는 핵종농도법이 약 1,000배 높게 설정됨을 알 수 있었다. 이러한 이유는 핵종 농도법에서 기준으로 설정한 공기중 배출관리기준은 호흡에 의한 피폭을 고려한 반면, K-DOSE60 전산 코드를 이용한 방법은 호흡과 섭취 그리고 외부 피폭을 모두 고려하기 때문에 발생하는 차이라고 판단된다. 즉, C-14의 경우 주요 피폭경로는 식물의 탄소 동화작용에 의한 음식물 섭취이기 때문이다.

또한 삼중수소, C-14 그리고 I-131에 대한 연간 유도방출기준을 K-DOSE60 전산 코드를 이용한 시스템 분석법과 캐나다 Pickering 원전의 값과 비교하면 거의 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다[2].

4. 결론 및 향후 계획

ICRP-60 법제화에 따른 일반인의 연간선량한도 1mSv 및 국내 과기부고시 제2002-1호를 만족하도록 기체유출물에 대한 유도방출기준을 배출관리기준을 적용한 핵종 농도법과 ODCM 코드(K-DOSE60)를 이용한 시스템 분석법을 통해 예비적으로 계산하였다. 그 결과

는 다음과 같다.

- 1) 삼중수소의 경우 과기부고시 제2002-1호의 배출관리기준에 따른 경우 새로운 유도방출 기준 계산값은 기존 유도방출기준 대비 약 30 % 수준으로 낮은 결과를 보였으며, K-DOSE60 전산 코드를 이용한 시스템 분석법을 적용할 경우에는 기존대비 약 20 % 수준으로 낮아지는 결과를 보였다.
- 2) 현재 월성원전에서 부재중인 C-14에 대한 유도방출기준을 배출관리기준을 적용한 핵종 농도법과 K-DOSE60 전산 코드를 이용한 시스템 분석법간의 차이는 핵종농도법이 약 1,000배 높게 설정됨을 알 수 있었다. 이러한 이유는 핵종 농도법에서 기준으로 설정한 공기중 배출관리기준은 호흡에 의한 피폭을 고려한 반면, K-DOSE60 전산 코드를 이용한 방법은 호흡과 섭취 그리고 외부 피폭을 모두 고려하기 때문에 발생하는 차이라고 판단되었다.
- 3) 월성원전 유도방출기준을 ICRP-60을 적용하여 예비적인 계산을 수행한 결과, 원전운전 경험치와 큰 차이가 있어, 실제 원전에 적용하기 위해서는 보다 심도 깊은 검토와 캐나다의 사례를 추가 조사할 필요가 있다.

본 유도방출기준 계산과 관련하여 원전의 방출현황을 심층 조사분석하고 각 설정방법별 장단점 등을 추가할 계획이다. 또한 캐나다에서 적용중인 유도방출기준 설정방법론과 추진현황을 심도 있게 분석하여 이를 월성원전의 유도방출기준 계산시 벤치마킹 자료로 추진할 계획이다.

5. 참고 문헌

1. 원전주변 국지기상 특성을 고려한 주민선량 평가체제 구축 (최종보고서), TR.99NJ08.J2002.283, 한전전력연구원, 2002.
2. Radioactive Release Data from Canadian Nuclear Generation Station 1990 to 1999, INFO-0210/Rev.10, Canadian Nuclear Safety Commission, 2000.

감사의 글

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기사업 “원전 방사성유출물 측정 및 평가 기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

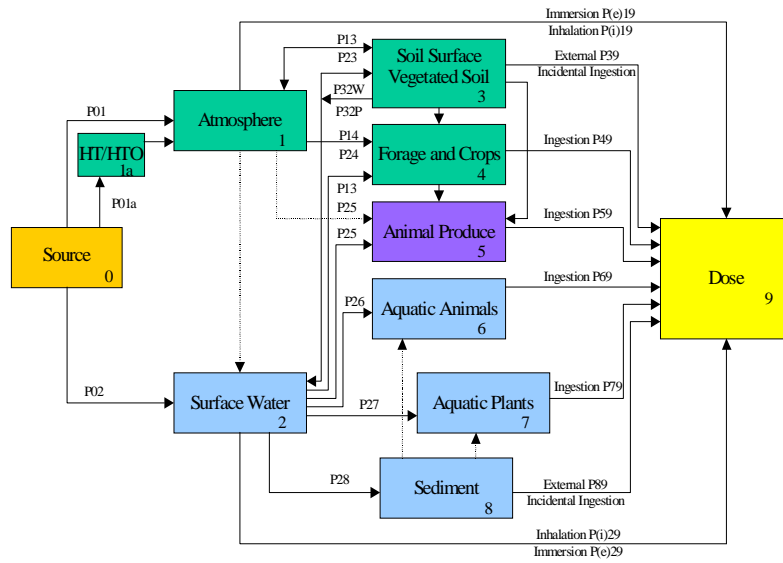


그림 1. 핵종의 환경이동 모델

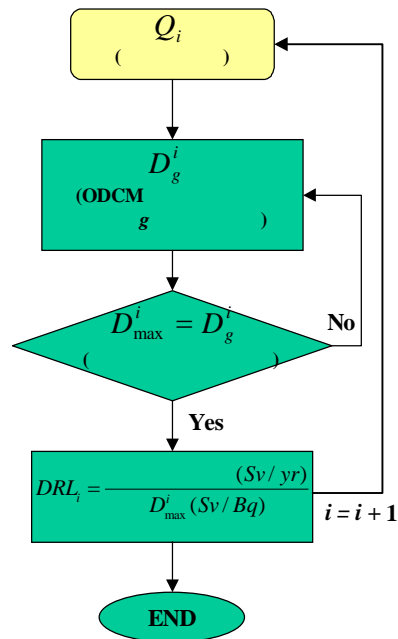


그림 2. K-DOSE60 코드를 이용한 유도방출기준 계산 Flow Chart.

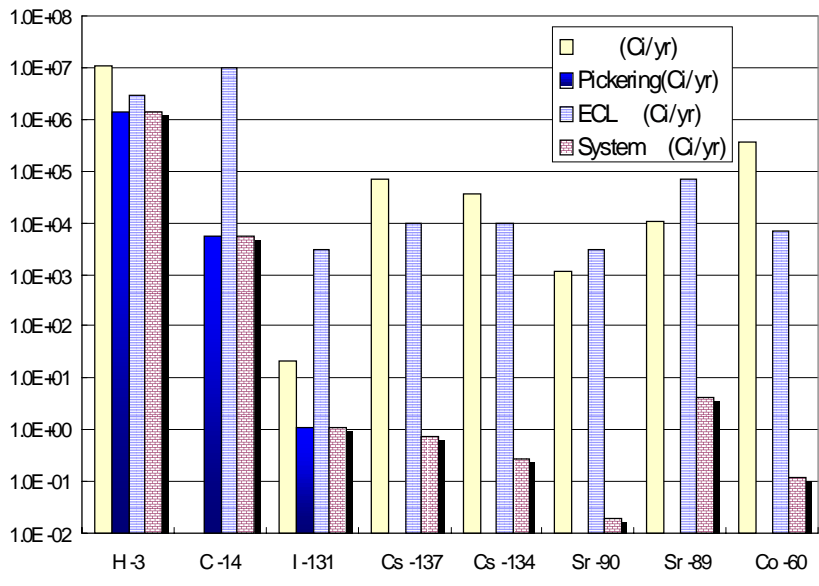


그림 3. 기체유출물의 연간 유도방출기준 예비 계산치 비교(Ci/yr)

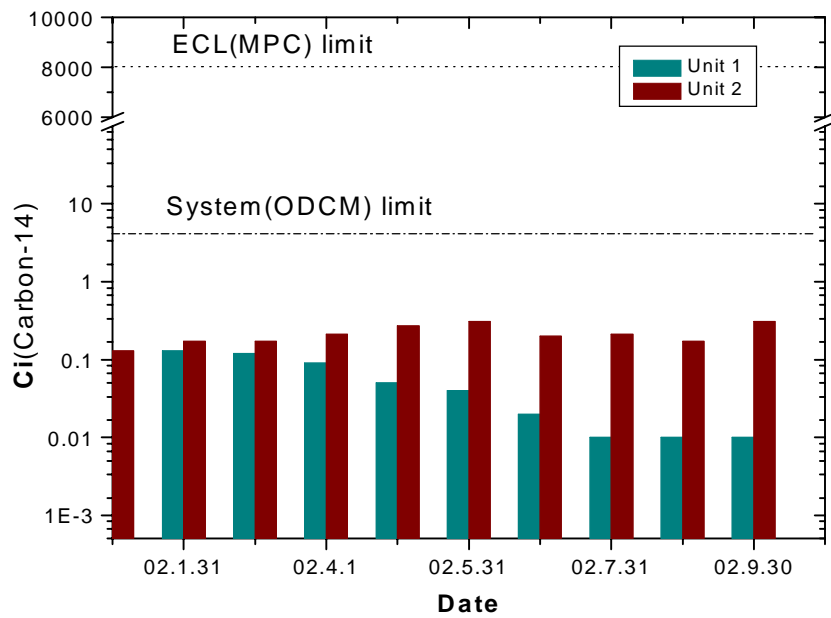


그림 4 월성 1, 2호기 C-14 월간방출량과 예비 계산된 1% DRL과 비교.