

**PWR 예상방사선원항과 2900MWth급 원전 냉각재 핵종농도 비교**  
**The Comparison of Radioactive Source Term(ANSI N18.1) and 2900MW NPP's**  
**Reactor Coolant Activity**

성기방, 안용수, 김성환, 박춘서\*, 이상학\* 김주택

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원  
한국수력원자력(주) 고리원자력본부 \*

**요 약**

원자력발전소의 예상방사선원항은 발전소로부터 환경으로의 연간 평균방출을 적합성 확인을 위한 기초자료로서 사용되는데, 발전소 배기장치로부터의 방출, 방사성 물질의 액체유출 등은 예상방사선원항을 이용한 것들이다.

본 논문은 현재 진행중인 가동 원전에 대한 주기적안전성평가(PSR)과정에서 파악한 예상방사선원항의 표준값 변천과정과, 설계당시의 예상방사선원항값, 그리고 과거 10년간 운전중에 측정되었던 국내 특정원전의 냉각재 핵종 실측값과 비교하여 예상선원항값과 실제측정값간의 여유도가 어느 정도인지 살펴보았다. 검토결과는 최근 10년간 냉각재평균값이 최근의 완화된 선원항(ANSI.N18.1-1999) 보다도 1/5~1/10 수준으로 상당히 보수적인 값을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

**Abstract**

There are several radioactive source terms in nuclear power plant's design and construction. The radioactivity source in systems and components is derived from the reactor coolant activity and provide the parameters used to determine secondary system equilibrium activities and annually releasing amounts to environment. The reactor coolant activity standard(ANSI-N18.1) had been periodically revised. In Korea, The utility should do the PSR for NPP's. The objective of PSR is to determine by means of a comprehensive assessment of an existing nuclear power plant to what extent the plant meets current internationally accepted safety standards and practices. So, Kori 3 NPP's reactor coolant activity is reviewing with the anticipated source terms. The comparative results of RCS average activity is lower one fifth(1/5) ~ one tenth(1/10) than ANSI/ANS N18.1-1999.

## 1. 서론

방사선원항은 이용목적에 따라 설계기준 방사선원항, 예상 방사선원항, 차폐방사선원항 및 사고방사선원항으로 구분된다. 예상방사선원항, 즉 운전기준 방사선원항은 발전소로부터 환경으로의 연간 평균방출을 기술하는데 이용되며, 발전소 배기장치로부터의 방출, 액체방사성물질 유출, 부지경계의 방사선량은 설계기준 방사선원항을 이용한 것들이다. 그 외 방사선방호 설계를 위한 차폐방사선원항, 사고해석에 적용되는 사고방사선원항이 있다.

이들중 설계 및 사고에 관련된 선원항들은 국내에 건설되는 원전수에 비례하여 연구와 평가가 수행되었지만 예상 방사선원항은 상대적으로 보수적인 입장에서 법적 기준 및 설계기준을 만족하는 범위에서 최대한의 여유도를 확인하는 방법을 채택해 왔다. 본 논문에서는 현재 진행중인 가동원전에 대한 주기적 안전성평가 과정에서 파악한 예상방사선원항의 표준값 변천과정과, 설계당시의 예상방사선원항값, 그리고 최근 10년간 운전중에 측정되었던 국내 특정호기(2900MWh) 원전의 실측값을 비교하여 선원항의 안전여유도가 어느 정도인지 살펴보았다.

## 2. 예상방사선원항

경수로 운전시 예상방사선원항의 기준은 미국 원자력회 및 표준(American Nuclear Society/American National Standard)의 발행자료“Radioactive Source Term for normal Operation of Light Water Reactors”[1]를 근거로 한다. 원자력건설의 부흥기였던 1970~80년에 적용되었던 선원항은 대부분 ANSI-N237-1976 의 기준값에다 해당 원전의 설계 특성인자를 반영하여 얻어진 값을 예상선원항으로 사용하였다. 초기의 ANSI-1976은 실제원전의 운전후 얻어진 분석값이 부족했기에, U 과 Pu 핵분열 생성물의 분율에 핵분열 생성물의 누설율 등을 가정하여 얻어진 것을 주로 사용하였다. 이후 경수로발전소의 운전경험 축적과 정밀한 냉각재핵종 분석기의 분석능력 향상으로 감마핵종의 에너지 피크분해능이 향상되고 검출한도 등이 낮아져서 이전의 예상선원항중에서 검출되지 않거나 미약한 핵종은 제외되고, 부식생성물의 방사화된 몇몇 핵종은 추가되었다. 이것이 표준원전부터 국내 원전에 대부분 사용중인 ANSI/ANS 18.1-1984이다. ANSI/ANS는 이후 1999년에 보다 정확한 예상핵종 농도값을 계통설계에 반영할 수 있고, 방출되는 핵종농도에 대한 영향에 대해 대중의 이해를 돕고자, 일부 예상선원항을 교정한 것이 최근의 ANSI/ANS18.1-1999 이다.

표 1. 국내원전 예상방사선원항 적용현황

예상 선원항 \ 적용 원전	특 징	적용원전
ANSI-N237-1976	실제검출핵종 및 준위와 차이남 (Kr-83m, Br-83등은 RCS 불검출)	고리 1,2, 고리 3,4 영광 1,2, 울진 1,2
ANSI/ANS 18.1-1984	Na-24, Ag-110m 등 Crud 부식생성핵종 추가	영광 3,4, 울진 3,4 영광 5,6, 울진 5,6 신고리 1,2 이후
ANSI/ANS 18.1-1999	방사능준위 현실화(설계 ODCM감소)	국내원전 미적용

### 3. 국내 특정 원전 호기 냉각재 예상방사능 농도계산

운전중 냉각재내 예상방사능농도는 참조발전소 방사능값과 설계인자에 해당 발전소의 설계 인자값을 조정하여 계산한다. 먼저 참조 발전소의 핵분열생성물 방사능 농도는 다음과정을 통해서 구해진다.

#### 가. 참조 원전의 핵분열 생성물 방사능 농도 계산방법

핵분열 생성물은 U와 Th 이 핵분열시 일부 누출되거나 누출된후 붕괴된 탈핵종 들이다. 대표적인 핵종들로서는 불활성기체, 할로겐, Cs와 Rb 및 기타핵분열 생성물로 구분되며, 각각 다음의 방법으로 계산한다.

##### 1) 핵분열 생성물

원자로 냉각재내 핵분열 생성물의 생성률은 다음과 같다.

$$PF_i = \nu_i \times \eta_i \times A_i$$

여기서,

$$\begin{aligned} PF_i &= & i & & (Ci/sec) \\ \nu_i &= & i & & (sec^{-1}) \\ \eta_i &= & & & \\ A_i &= & i & & (Ci) \end{aligned}$$

냉각재내 방사성 핵종 i의 농도변화율은 생성률과 함께 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{PF_i}{WP} - (R_i + \lambda_i + \sum_a \Phi) \times C_i(t) - \frac{L_i}{WP} C_i(t)$$

여기서,

$$\begin{aligned} C_i &= & i & & (\mu Ci/cc) \\ R_i &= & & & (vol/cc) \\ L_i &= & & & (cc/sec) \\ WP &= & & & (cc) \end{aligned}$$

식에서 일반적으로, 냉각재 유출량은 매우 작으므로 무시한다. 또한, 중성자 흡수율이 매우 큰 Xe-135를 제외한 경우, 포화상태에서 핵반응물질 및 핵분열생성물의 원자로 냉각재 평형농도는 아래와 같다.

$$C_i = \frac{PF_i}{(R_i + \lambda_i) \times WP} = \frac{\nu_i \times \eta_i \times A_i}{(R_i + \lambda_i) \times WP}$$

따라서, 핵분열물의 냉각재내 핵종농도는 핵연료 영역에서의 핵종 발생량, 핵연료 결합율, 핵종 이탈계수, 반감기, 1차측 냉각재량, 냉각재 정화계통의 제거 계수에 대한 함수로 주어진다. 이 중, 핵연료 영역에서의 핵분열 생성핵종의 발생량은 코드(예, ORIGEN 2)를 이용하여 구하며, 핵종 이탈계수는 실험치를 통하여 얻어진다.

##### 2) 방사화 부식생성물(핵반응물질)

핵분열생성물은 피복재를 통한 확산이나, Tramp U, 결합 등에 의해 냉각재로 누출되나, 핵반응물질은 시간에 따라 변화가 심하고 열수력학적 운전모드에 따라서 발생량이 결정되므로 그 양을 예측하기가 어렵다. 이러한 이유로, 냉각재내 부식생성물의 농도는 실측

치를 이용하거나, 수화학 조건을 고려한 코드 결과를 이용하고 있다.

이러한 방사화 부식생성물 평가코드로는 CRUD-SHIM 등이 있으며, 이러한 코드들은 경수로 1차 계통을 다수 노드로 나누어, 각각의 평균온도, 유량, 배관 규격, 표면물질의 구성, 중성자속, 그리고 다른 물리-화학적 변수들로 각 지역을 나타낸다. 그리고, 출력, 화학 변화 및 냉각재 정화 효과등의 발전소 운전 이력을 고려한다. 주요 변수는 계통을 구성하는 물질의 용해도이며, 부식 생성물의 생성, 침식, 입자의 침전과 용해, 그리고 입자의 이동과 같은 현상들도 고려된다. 고려되는 핵종들은 Fe, Ni, Cr, Mn 및 Co 이고 이들의 방사화 핵종은 Fe-59, Co-58, Cr-51, Mn-54 및 Co-60 이다.

어떤 시간에 노심내 표면 CRUD 막에 있는 방사성핵종( $N_f$ )의 원자수는 다음과 같다.

$$N_f = \frac{\sum_i \Phi}{\lambda_i} [1 - \exp(-\lambda_i t_{res})], \text{ atoms/g}$$

여기서,

$$\begin{array}{lll} \sum_i \Phi & i & (d/g - \text{sec}) \\ \lambda_i & i & (\text{sec}^{-1}) \\ t_{res} & & (\text{sec}) \end{array} .$$

또한, 어떤 시간에 있어 원자로 냉각재로 방출된 방사성핵종( $N_c$ )의 원자수는 다음과 같다.

$$N_c = \frac{N_A [ER] A_c}{\alpha + \beta + \lambda_i} [1 - \exp(-(\alpha + \beta + \lambda_i) t_{res})], \text{ atoms/g}$$

여기서,

$$\begin{array}{ll} [ER] & (g/cm^2 - \text{sec}), \\ A_c & (cm^2), \\ \alpha & (\text{sec}^{-1}), \\ \beta & (\text{sec}^{-1}), \\ \lambda_i & (\text{sec}^{-1}) \end{array}$$

어떤 시간에 원자로 냉각재로 방출된 CRUD의 총량( $M_c$ )은 다음과 같다.

$$M_c = \frac{[ER] A_t}{(\alpha + \beta)} \{1 - \exp[-(\alpha + \beta)t]\}, \text{ grams}$$

여기서,

$$\begin{array}{ll} [ER] & (g/cm^2 - \text{sec}) \\ A_t & (cm^2) \\ \alpha & (\text{sec}^{-1}) \\ \beta & (\text{sec}^{-1}) \end{array}$$

원자로 냉각재로 누출된 CRUD의 방사능( $A_i$ )은 다음과 같이 계산된다.

$$A_i = \frac{\lambda_i N_c}{M_c}, \text{ dps/grams - crud}$$

위식에  $N_c$ 와  $M_c$ 를 대입하고,  $\alpha$ ,  $\beta$ 와 비교하여  $\lambda_i$ 가 작다고 가정하면 CRUD의 방사능은 다음과 같다.

$$A_i = \Sigma_i \Phi [1 - \exp(-\lambda_i t_{res})] \frac{A_e}{A_i} (0.06), \text{ dpm/mg-crud}$$

여기서, 0.06은 dps/g-crud를 dpm/mg-crud로 변환하는 상수

실측값이 존재한다면 위의 식을 바탕으로 보정식을 구할수 있다.

즉 운전중인 원자로의 원자로 냉각재내 CRUD의 평균 농도(75ppb)와 계산된 CRUD의 방사능(dpm/mg-crud)을 이용해 1차 냉각재내 핵종의 평균 방사능을 다음식으로 결정한다.

$$A = \frac{A_i}{60} (75 \times 10^{-9}) \rho (2.7 \times 10^{-5}) (1.0 \times 10^3), \mu\text{Ci/cm}^3$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도( $\text{g/cm}^3$ )이고 1000은  $\text{mg/g}$ 이다.

#### 나. 국내 특정 원전 예상 방사성핵종 농도 계산

핵분열 생성물과 핵반응생성물의 농도 구하는 방법론을 위에서 언급하였다. 여기서는 ANSI-N18.1에서 제시하는 방법론으로 국내 특정원전의 냉각재 핵종농도를 구해보았고, 국내 해당원전 FSAR의 값과 비교한 결과, Xe-133은 실제값보다 너무 높게 계산되었다. 이는 참조발전소의 기준값이 원래 높고, 보정계수에서도 기체의 Striping 효과를 무시했기 때문으로 보인다. 실제 원전에서 불활성기체는 VCT에서 Striping 되기 때문에 냉각재의 농도는 예상값보다 낮다. 어쨌든 국내 특정 원전 의 냉각재내 불활성기체의 예상농도와 보정 계수식을 아래 표 2와 같이 정리하였다.

표 2. 참조 원전(PWR) 및 국내 특정 원전 의 RCS 설계 Parameters

Parameters	부호	단위	참조원전(ANSI)	국내 특정 원전
열출력	$P$	$MW$	3400	2900
냉각재 질량	$W_P$	$lbm$	$5.5 \times 10^5$	$3.92 \times 10^5$
냉각재 정화율량	$F_D$	$lb/hr$	$3.7 \times 10^4$	$2.78 \times 10^4$
붕소농도조절용 정화유량	$F_B$	$lb/hr$	$5.0 \times 10^2$	$2.5 \times 10^2$
양이온탈염기 유량	$F_A$	$lb/hr$	$3.7 \times 10^3$	$2.78 \times 10^3$
불활성기체 정화율	$Y$	Striping Fraction	-	FSAR 표 11.1-1
정화용 탈염기 제거율	$N_B$	-	NUREG-0017 표 2-6	
양이온 탈염기 제거율	$N_A$	-	NUREG-0017 표 2-6	

#### 1) 불활성 기체 방사능 농도

$$= \frac{162 \times P}{W_P} \times \frac{0.009 + \lambda_i}{R + \lambda_i} = \frac{162 \times 2900}{2.86 \times 10^5} \times \frac{0.0009 + \lambda_i}{R + \lambda_i} = 1.020 \times \frac{0.0009 + \lambda_i}{R + \lambda_i}$$

그리고,  $R = \frac{F_B + (F_D - F_B)Y}{W_P} = \frac{1000 + (1.48 \times 10^4 - 1000)Y}{2.86 \times 10^5}$

표 3-1 국내 특정 원전 냉각재내 불활성기체 예상 방사능농도

핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴 상수 (hr-1)	Y	R	보정 계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴 상수 (hr-1)	Y	R	보정 계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )
Kr-83m	2.1E-02	0.379	7.3E-01	5.2E-02	1.079	2.3E-02	Xe-131m	1.1E-01	0.002	1.0E-02	1.3E-03	3.648	4.0E-01
Kr-85m	1.1E-01	0.155	2.3E-05	6.4E-04	1.263	1.4E-01	Xe-133m	2.2E-01	0.013	1.6E-02	1.8E-03	1.788	3.9E-01
Kr-85	1.5E-01	0.000	2.7E-01	2.0E-02	0.551	8.3E-02	Xe-133	1.8E+01	0.005	3.7E-02	3.2E-03	1.992	3.6E+01
Kr-87	6.0E-02	0.547	6.0E-01	4.3E-02	1.130	6.8E-02	Xe-135m	1.3E-02	2.718	1.8E-01	1.3E-02	1.196	1.6E-02
Kr-88	2.0E-01	0.248	4.3E-01	3.1E-02	1.105	2.2E-01	Xe-135	3.5E-01	0.076	8.0E-01	5.7E-02	0.766	2.7E-01
Kr-89	5.0E-03	13.161	9.9E-01	7.0E-02	1.193	6.0E-03	Xe-137	9.0E-03	0.076	8.0E-01	5.7E-02	0.766	6.9E-03
							Xe-138	4.4E-02	2.930	1.0E+00	7.1E-02	1.174	5.2E-02
계	-	-	-	-	-	3.8E+01							

2) 할로젠

$$= \frac{162 \times P}{W_p} \times \frac{0.067 + \lambda_i}{R + \lambda_i}$$

윗 식에서

$$R = \frac{F_D \times N_B + (1 - N_B) \times (F_B + F_A \times N_A)}{W_p}$$

$$R = \frac{2.78 \times 10^4 \times 0.99 + (1 - 0.99) \times (1000 + 2.78 \times 10^3 \times 0.0)}{3.92 \times 10^5} = 0.070$$

표 3-2 국내 특정 원전 냉각재내 예상 할로젠 방사능농도

핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴상수 (hr-1)	보정계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴상수 (hr-1)	보정계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )
Br-83	4.8E-03	0.290	1.188	5.7E-03	I-131	2.7E-01	0.004	1.148	3.1E-01
Br-84	2.6E-03	1.310	1.196	3.1E-03	I-132	1.0E-01	0.301	1.188	1.2E-01
Br-85	3.0E-04	14.508	1.198	3.6E-04	I-133	3.8E-01	0.033	1.163	4.4E-01
I-130	2.1E-03	0.056	1.169	2.5E-03	I-134	4.7E-02	0.791	1.194	5.6E-02
					I-135	1.9E-01	0.105	1.177	2.2E-01

3) Cs, Rb

$$= \frac{162 \times P}{W_p} \times \frac{0.037 + \lambda_i}{R + \lambda_i}$$

여기서,

$$R = \frac{F_D \times N_B + (1 - N_B) \times (F_B + F_A \times N_A)}{W_p}$$

$$R = \frac{2.78 \times 10^4 \times 0.5 + (1 - 0.5) \times (1000 + 2.78 \times 10^3 \times 0.9)}{3.92 \times 10^5} = 0.039$$

표 3-3 국내 특정 원전 냉각재내 예상 Cs 및 Rb 방사능농도

핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴상수 (hr-1)	보정 계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴상수 (hr-1)	보정 계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )
Rb-86	8.5E-05	0.037	1.168	9.9E-05	Cs-134	2.5E-02	0.000	1.140	2.8E-02
Rb-88	2.0E-01	2.337	1.197	2.4E-01	Cs-136	1.3E-02	0.002	1.143	1.5E-02
Rb-89	-	2.340	1.197		Cs-137	1.8E-02	0.000	1.140	2.1E-02
계									3.0E-01

4) 기타 핵종

$$= \frac{162 \times P}{W_P} \times \frac{0.066 + \lambda_i}{R + \lambda_i}$$

여기서,

$$R = \frac{F_D \times N_B + (1 - N_B) \times (F_B + F_A \times N_A)}{W_P}$$

$$R = \frac{2.78 \times 10^4 \times 0.98 + (1 - 0.98) \times (1000 + 2.78 \times 10^3 \times 0.9)}{3.92 \times 10^5} = 0.070$$

표 3-4 국내 특정 원전 냉각재내 예상 방사성입자 방사능농도

핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴상수 (hr-1)	보정계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	핵종	ANSI 농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )	붕괴상수 (hr-1)	보정계수	보정농도 ( $\mu\text{Ci/gm}$ )
Na-24	4.7E-02	0.046	1.162	5.5E-02	Rh-103m	4.5E-05	0.741	1.193	5.4E-05
Cr-51	1.9E-03	0.001	1.139	2.2E-03	Rh-106	1.0E-05	83.400	1.198	1.2E-05
Mn-54	3.1E-04	0.000	1.138	3.5E-04	Ag-110m	2.9E-05	0.000	1.138	3.3E-05
Fe-55	1.6E-03	0.000	1.138	1.8E-03	Te-125m	2.8E-04	0.012	1.147	3.2E-04
Fe-59	1.0E-03	0.001	1.138	1.1E-03	Te-127m	8.5E-04	0.064	1.167	9.9E-04
Co-58	1.6E-02	0.000	1.138	1.8E-02	Te-127	1.4E-03	0.074	1.169	1.6E-03
Co-60	2.0E-03	0.000	1.138	2.3E-03	Te-129m	1.6E-03	0.001	1.139	1.8E-03
Zn-65	5.1E-04	0.000	1.138	5.8E-04	Te-129	2.5E-03	0.598	1.192	3.0E-03
Sr-89	3.5E-04	0.001	1.138	4.0E-04	Te-131m	1.1E-03	0.023	1.153	1.3E-03
Sr-90	1.0E-05	0.000	1.138	1.1E-05	Te-131	2.7E-02	1.660	1.196	3.2E-02
Sr-91	6.5E-04	0.073	1.169	7.6E-04	Te-132	1.6E-02	0.009	1.145	1.8E-02
Y-90	1.2E-06	0.011	1.146	1.4E-06	Ba-140	2.2E-04	0.002	1.140	2.5E-04
Y-91m	6.4E-05	0.837	1.194	7.6E-05	La-140	1.5E-04	0.017	1.150	1.7E-04
Y-91	3.6E-04	0.000	1.138	4.1E-04	Ce-141	7.0E-05	0.001	1.139	8.0E-05
Y-93	3.4E-05	0.069	1.168	4.0E-05	Ce-143	4.0E-05	0.021	1.152	4.6E-05
Zr-95	6.0E-05	0.000	1.138	6.8E-05	Ce-144	3.3E-05	0.000	1.138	3.8E-05
Nb-95	5.0E-05	0.001	1.139	5.7E-05	Pr-143	5.0E-05	0.051	1.163	5.8E-05
Mo-99	8.4E-02	0.011	1.146	9.6E-02	Pr-144	3.3E-05	2.407	1.197	3.9E-05
Tc-99m	4.8E-02	0.115	1.176	5.6E-02	Np-239	1.2E-03	0.294	1.187	1.4E-03
Ru-103	4.5E-05	0.001	1.138	5.1E-05					
Ru-106	1.0E-05	0.001	1.139	1.1E-05	계	-	-	-	3.0E-01

#### 4. 국내 특정호기 실제 냉각재 방사능 농도

국내 특정 원전의 PSR 평가 과정에서, 국내 특정호기의 냉각재 핵종값(1993년 1월~2002년 12월 10년간)을 ANSI값, ANSI에서 제시한 방법론에 따라 구한 예상방사선원항, 그리고 FSAR 값들과 비교한 결과는 다음과 같다.

##### 1) 불활성 기체 방사능 농도

Item Class	Nuclide	Activity Coolant ANSI-1976	Activity Coolant ANSI-1984	Activity Coolant ANSI-1999	국내특정 원전 예상선원	특정 원전 FSAR	국내 특정 호기 10년 평균
Class 1  Noble Gas	Ar-41	-	-	-	-	-	4.8E-03
	Kr-83m	2.1E-02	-	-	2.3E-02	2.1E-02	ND
	Kr-85m	1.1E-01	1.6E-01	1.6E-02	1.4E-01	9.4E-02	1.7E-02
	Kr-85	1.5E-01	4.3E-01	4.3E-01	8.3E-02	3.9E-03	ND
	Kr-87	6.0E-02	1.5E-01	1.7E-02	6.8E-02	6.3E-02	2.6E-03
	Kr-88	2.0E-01	2.8E-01	1.8E-02	2.2E-01	1.9E-01	4.5E-03
	Kr-89	5.0E-03	-	-	6.0E-03	5.9E-03	ND
	Xe-131m	1.1E-01	7.3E-01	7.3E-01	4.0E-01	1.2E-02	ND
	Xe-133m	2.2E-01	7.0E-02	7.0E-02	3.9E-01	7.6E-02	4.6E-03
	Xe-133	1.8E+01	2.6E+00	2.9E-02	3.6E+01	3.5E+00	3.6E-02
	Xe-135m	1.3E-02	1.3E-01	1.3E-01	1.6E-02	1.5E-02	4.4E-03
	Xe-135	3.5E-01	8.5E-01	6.7E-02	2.7E-01	2.7E-01	1.4E-02
	Xe-137	9.0E-03	3.4E-02	3.4E-02	6.9E-03	1.1E-02	ND
	Xe-138	4.4E-02	1.2E-01	6.1E-02	5.2E-02	5.1E-02	6.3E-03
부분합	<b>19.292</b>	<b>5.554</b>	<b>1.602</b>	<b>37.6749</b>	<b>4.3128</b>	<b>1.094</b>	

**Ar-41** : 국내 특정호기에서는 Ar-41의 핵종이 발견되는데, 선원항에는 없다. Ar-41은 공기중의 Ar-40이 순수 처리과정에서 녹아 들어가는데, 냉각재 공급수를 진공탈기방식으로 처리하고, 운전초기 VCT 등으로 수소와 질소의 교체운전 때 함께 빠져나간다. 그러나 일부 잔류물이 남아서 방사화되는 것인데, 그 농도가 낮고 반감기가 짧아서 ANSI에서는 선원항으로 보지 않았다.

**Kr-83m, Kr-89** : U의 핵분열 수율에 근거해서 '76에는 선원항으로 들어갔으나, 이후 방사능 측정결과는 대부분 원전의 냉각재에서 검출되지 않는 핵종이다. 해당 호기에서도 10년동안 이 두 핵종은 한번도 검출된 적이 없다. 따라서, 이들 핵종은 이후의 선원항에서는 제외된 것은 적절한 것으로 사료된다.

**Kr-85, Xe-131m, Xe-137** : 이들 세 핵종은 U 분열 수율 또는 ANSI 핵종 농도값에서도 작지 않다. 그러나, 국내 특정호기에서는 10년동안 검출된 적이 없으므로, 핵종분석기 Library, 반감기, 핵종 수율 등을 조사할 필요가 있다.

국내 특정호기의 불활성기체 핵종 냉각재농도는 10년간 평균 1.094 uCi/g 인데, FSAR 값보다는 1/4 수준이며, ANSI-1999 값인 1.062 uCi/g 에 근접하고 있다.

## 2) 할로젠

Item Class	Nuclide	Activity	Activity	Activity	국내 특정 원전 예상선원	특정원전 FSAR	국내 특정 호기 10년 평균
		Coolant ANSI-1976	Coolant ANSI-1984	Coolant ANSI-1999			
Class 2 Halogen	Br-83	4.8E-03	-	-	5.7E-03	5.3E-03	ND
	Br-84	2.6E-03	1.6E-02	1.6E-02	3.1E-03	3.1E-03	ND
	Br-85	3.0E-04	-	-	3.6E-04	3.6E-04	ND
	I-130	2.1E-03	-	-	2.5E-03	2.1E-03	ND
	I-131	2.7E-01	4.5E-02	2.0E-03	3.1E-01	2.3E-01	4.8E-04
	I-132	1.0E-01	2.1E-01	6.0E-02	1.2E-01	1.1E-01	4.4E-03
	I-133	3.8E-01	1.4E-01	2.6E-02	4.4E-01	3.6E-01	1.9E-03
	I-134	4.7E-02	3.4E-01	1.0E-01	5.6E-02	5.5E-02	6.3E-03
	I-135	1.9E-01	2.6E-01	5.5E-02	2.2E-01	2.0E-01	4.7E-03
부분합	<b>0.997</b>	<b>1.011</b>	<b>0.259</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	

**Br-83, Br-85, I-130** : 불활성기체의 일부 핵종처럼 U의 핵분열 수율에 근거해서 '76에는 선원항으로 들어갔으나, 이후 방사능 측정결과는 대부분 원전의 냉각재에서 검출되지 않는 핵종이다. 국내 특정호기에서도 10년동안 이들 핵종은 한번도 검출된 적이 없으므로, 이들 핵종은 이후의 선원항에서는 제외된 것은 적절한 것으로 판단된다.

**Br-84** : Br-84는 '76년보다 '84년 ANSI에서 그 농도가 약 6배 증가한 핵종임에도 불구하고, 국내 특정호기 냉각재에선 검출된 적이 없다. 이 핵종은 핵종분석 Library 등의 검토 및 확인이 필요한 것으로 사료된다.

국내 특정 호기의 할로젠 핵종농도는 FSAR 및 ANSI-1999 값보다 약 1/10로 낮은 값을 보여주고 있으며, ANSI-1984 보다는 약 1/50 수준이다. 이들 값의 비교 결과로서, 할로젠 핵종, 특히 Iodine 핵종의 예상선원은 여전히 보수적임을 보여준다.

## 3) Cs, Rb

Item Class	Nuclide	Activity	Activity	Activity	국내 특정 원전 예상선원	특정원전 FSAR	국내 특정 호기 10년 평균
		Coolant ANSI-1976	Coolant ANSI-1984	Coolant ANSI-1999			
Class 3 Cs, Rb	Rb-86	8.5E-05	-	-	9.9E-05	7.3E-05	4.3E-04
	Rb-88	2.0E-01	1.9E-01	1.9E-01	2.4E-01	2.4E-01	3.1E-02
	Rb-89	-	-	-	-	-	3.1E-03
	Cs-134	2.5E-02	7.1E-03	3.7E-05	2.8E-02	1.1E-02	6.1E-04
	Cs-136	1.3E-02	8.7E-04	8.7E-04	1.5E-02	1.5E-02	ND
	Cs-137	1.8E-02	9.4E-03	5.3E-05	2.1E-02	1.4E-02	4.9E-04
	Cs-138	-	-	-	-	-	8.6E-03
부분합	<b>0.256</b>	<b>0.207</b>	<b>0.191</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	

**Rb-86** : 냉각재에서 이온성이며, 불활성기체인 Kr 과 Xe의 딸핵종으로서 냉각재 존재비가 높은 핵종들이다. 이중 Rb-86은 최근 ANSI 선원항에서 제외되었지만, 국내 특정호기 냉각재에서 검출되고 있으며, 그 농도값이 다른 핵종들에 비해 낮아서 제외된 것으로 사료된다.

**Rb-89, Cs-138** : Rb-89는 Kr-89로부터 생성될 수 있으나, Kr-89가 선원항에 있지 않고,

ANSI 선원항에도 없는 것으로 보아, 측정오차로 보인다. 그러나, Cs-138은 제법 높은 농도의 Xe-138부터 유래할 수 있다. ANSI에서는 Cs-138의 반감기가 약 32min 정도로 짧아서 제외된 것으로 보이나, 국내 특정호기에서는 1족원소중 Rb-88 다음으로 높은 준위를 보이고 있다.

**Cs-136** : ANSI에도 있고. 그 농도가 Cs-134, Cs-137 보다 높은 데도 국내 특정 호기에는 10년간 한번도 검출된 적이 없으므로, 좀더 검토가 필요하다고 사료된다.

1족 원소들인 Rb, Cs 핵종들에 대한 선원항 및 국내 특정 호기 측정값을 비교해 보았다. 국내 특정호기의 농도는 전체적으로 ANSI의 1/5 수준으로서 매우 안정적이라고 판단되며, 이들 핵종은 핵연료 손상때 증가하는 핵종들인데, 운전값이 낮다는 것은 평가 기간인 10년동안 핵연료가 건전하였다는 것의 지표가 된다고 볼 수 있다.

#### 4) N-16 , H-3

Item Class	Nuclide	Activity Coolant ANSI-1976	Activity Coolant ANSI-1984	Activity Coolant ANSI-1999	국내 특정 원전 예상선원	특정원전 FSAR	국내 특정 호기 10년 평균
Class 4	N-16	4.0E+01	4.0E+01	4.0E+01	4.0E+01	4.0E+01	-
Class 5	H-3	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.5E+00

**N-16** : 냉각재인 물의 산소가 중성자와 반응하여 짧은 시간동안 강한 감마선을 방출하는 것이 N-16이다. 운전중 N-16은 평형상태에 도달되며, 냉각재 주변의 높은 선량율에 기여한다. 국내 원전에서 경험한 바와 같이 원자로가 정지중이면, N-16의 농도도 급격히 낮아져서 증기발생기의 누설감시를 할 수 없게 되는 경우에 대비하여, 현재 증기발생기 취출계통에 설치된 방사선감시기가 누설감시 및 조기에 누설을 탐지할 수 있는 방안을 연계하여 검토할 필요가 있다.

**H-3** : 삼중수소는 냉각재중의 중수, pH 조절제인 Li의 붕괴생성물, 핵연료의 삼중분열 등으로 생성된다. 생성량이 다른 핵종에 비해 적지 않으나 다행히 붕괴시 방출하는 에너지가 상대적으로 작은 베타에너지를 방출하기 때문에 인체에 미치는 방사선학적인 영향이 적다.

#### 5) 기타 핵종들

ANSI의 핵종에 비해 국내 특정 호기 핵종 농도 준위는 약 1/5 정도로서 선원항 값이 보수적이다. 그러나, 국내 특정호기 측정값에는 Mn-56, Co-57, Sr-85, Nb-97, Sb-124, Ce-139 등이 간혹 검출되는 핵종들이다. 이들 핵종들의 농도가 적지 않으므로, ANSI 선원항에서 제외된 근본적인 이유를 파악할 필요가 있다. 또한 10년간 한번도 검출되지 않는 일부 핵종들에 대해 점다 확인해 볼 필요가 있다.

Item Class	Nuclide	Activity Coolant ANSI-1976	Activity Coolant ANSI-1984	Activity Coolant ANSI-1999	국내 특정 원전 예상선원	특정원전 FSAR	국내 특정 호기 평균
Class 6  Other Nuclides	Na-24	-	4.7E-02	4.7E-02	5.5E-02	-	2.2E-03
	Cr-51	1.9E-03	3.1E-03	3.1E-03	2.2E-03	1.6E-03	3.6E-04
	Mn-54	3.1E-04	1.6E-03	1.6E-03	3.5E-04	2.6E-04	3.1E-04
	Mn-56	-	-	-	-	-	4.0E-03
	Fe-55	1.6E-03	1.2E-03	1.2E-03	1.8E-03	1.3E-03	ND
	Fe-59	1.0E-03	3.0E-04	3.0E-04	1.1E-03	8.3E-04	1.5E-04
	Co-57	-	-	-	-	-	1.5E-04
	Co-58	1.6E-02	4.6E-03	4.6E-03	1.8E-02	1.3E-02	5.5E-03
	Co-60	2.0E-03	5.3E-04	5.3E-04	2.3E-03	1.7E-03	3.7E-04
	Zn-65	-	5.1E-04	5.1E-04	5.8E-04	-	6.7E-05
	Sr-85	-	-	-	-	-	6.2E-3
	Sr-89	3.5E-04	1.4E-05	1.4E-04	4.0E-04	2.9E-04	ND
	Sr-90	1.0E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.1E-05	8.3E-06	ND
	Sr-91	6.5E-04	9.6E-04	9.6E-04	7.6E-04	6.5E-04	ND
	Y-90	1.2E-06	-	-	1.4E-06	1.0E-06	ND
	Y-91m	6.4E-05	5.2E-06	4.6E-04	7.6E-05	4.2E-04	ND
	Y-91	3.6E-04	4.6E-04	5.2E-06	4.1E-04	5.3E-05	ND
	Y-93	3.4E-05	4.2E-03	4.2E-03	4.0E-05	3.4E-05	ND
	Zr-95	6.0E-05	3.9E-04	3.9E-04	6.8E-05	5.0E-05	5.3E-05
	Nb-95	5.0E-05	2.8E-04	2.8E-04	5.7E-05	4.1E-05	2.0E-04
	Nb-97	-	-	-	-	-	2.8E-04
	Mo-99	8.4E-02	6.4E-03	6.4E-03	9.6E-02	7.3E-02	2.4E-03
	Tc-99m	4.8E-02	4.7E-03	4.7E-03	5.6E-02	5.0E-02	1.0E-03
	Ru-103	4.5E-05	7.5E-03	7.5E-03	5.1E-05	3.7E-05	ND
	Ru-106	1.0E-05	9.0E-02	9.0E-02	1.1E-05	8.3E-06	5.4E-03
	Rh-103m	4.5E-05	-	-	5.4E-05	5.2E-05	ND
	Rh-106	1.0E-05	-	-	1.2E-05	1.2E-05	ND
	Ag-110m	-	1.3E-03	1.3E-03	3.3E-05	-	2.0E-04
	Sb-124	-	-	-	-	-	8.6E-06
	Te-125m	2.9E-05	-	-	3.2E-04	2.4E-05	ND
	Te-127m	2.8E-04	-	-	9.9E-04	2.3E-04	ND
	Te-127	8.5E-04	-	-	1.6E-03	8.5E-04	1.4E-02
	Te-129m	1.4E-03	1.9E-04	1.9E-04	1.8E-03	1.2E-03	ND
	Te-129	1.6E-03	2.4E-02	2.4E-02	3.0E-03	1.8E-03	ND
	Te-131m	2.5E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.3E-03	2.3E-03	6.3E-04
	Te-131	1.1E-03	7.7E-03	7.7E-03	3.2E-02	1.3E-03	ND
	Te-132	2.7E-02	1.7E-03	1.7E-03	1.8E-02	2.3E-02	8.3E-04
	Ba-137m	1.6E-02	-	-	-	1.4E-02	ND
	Ba-140	2.2E-04	1.3E-02	1.3E-02	2.5E-04	1.8E-04	1.8E-04
	La-140	1.5E-04	2.5E-02	2.5E-02	1.7E-04	1.3E-04	5.7E-04
	Ce-139	-	-	-	-	-	5.7E-04
	Ce-141	7.0E-05	1.5E-04	1.5E-04	8.0E-05	5.8E-05	4.9E-04
	Ce-143	4.0E-05	2.8E-03	2.8E-03	4.6E-05	3.6E-05	1.2E-03
	Ce-144	3.3E-05	4.0E-03	4.0E-03	3.8E-05	2.7E-05	ND
	Pr-143	5.0E-05	-	-	5.8E-05	4.2E-05	ND
Pr-144	3.3E-05	-	-	3.9E-05	3.9E-05	ND	
W-187	-	2.5E-03	2.5E-03	-	-	ND	
Np-239	1.2E-03	2.2E-03	2.2E-03	1.4E-03	1.0E-03	ND	
부분합		<b>0.209054</b>	<b>0.259801</b>	<b>0.259927</b>	<b>0.296405</b>	<b>0.189563</b>	<b>0.047396</b>

## 5. 결론 및 의견

원자력발전소의 설계선원항중 운전시 방사성물질 방출량 평가에 이용되는 예상방사선원에 대해 운전중인 발전소의 과거 10년간 분석값으로 비교해 보았다. 그 결과, 해당 원전의 냉각재 핵종의 평균 농도는 핵분열성 핵종은 1/5 정도였고, 소외방출이 엄격히 규제되는 Iodine 핵종은 약 1/10로 선원항값보다 매우 낮게 운영되고 있는 것으로 파악되었다.

그리고, 각 핵종의 특성 그룹으로 비교한 결과 선원항(ANSI/ANS-1976) 에는 나와 있으나, 국내 해당호기의 10년 운전기간 동안 한번도 검출되지 않는 핵종들이 많은데, 이후 발간된 ANSI/ANS N18.1-1984 와 기술방향이 유사한 것으로 판단된다. 따라서, 국내 원전 운영에 활용되는 핵종의 Library 는 가능한 한 최신의 선원항을 사용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

### 참고 자료

1. ANSI/ANS-18.1 “Radioactive Source Term for normal Operation of Light Water Reactors”  
-1976, 1984, 1999
2. 차세대원자로안전기술개발 “차세대원자로 선원항 평가를 위한 방법론개발”  
한국원자력안전기술원.