

PWR-GALE 코드를 이용한 영광원자력발전소 3&4 호기
기체 및 액체 방사성 유출물 평가

Evaluation of Gaseous and Liquid Effluents from Yonggwang
Nuclear Power Plant Unit 3&4 using PWR-GALE Code

정제호, 김주연, 신창호, 김종경, 이재기
김순영*

한양대학교 원자시스템공학과
방사선안전신기술연구센터*

서울특별시 성동구 행당동 산17번지

요 약

ANSI 권고값을 바탕으로 PWR-GALE 코드를 이용하여 영광원자력발전소 3 & 4호기의 FSAR Amendment 110 및 실제 운전조건을 반영한 inventory 평가를 수행하였다. 기체 선원항의 경우 실제 운전조건을 반영한 입력변수를 활용한 결과는 FSAR Amendment 110의 입력변수를 반영한 결과와 비교할 때 훨씬 낮았지만 액체 선원항의 경우에는 해당 계통에 대한 운전조건을 충분히 반영하지 못한 제약으로 인해 반대의 결과를 초래하였으며 이에 대한 재검토가 필요하다. 한편, 대상 원전의 1차 및 2차 계통내의 실제 방사성 핵종의 농도를 반영한 액체 선원항에 대한 평가 결과는 연보에서 제공하는 실제 값보다 매우 높게 나타났다. 이러한 사실은 PWR-GALE 코드 평가체계에 커다란 보수성이 존재함을 의미하며 또한 원전의 안전성이 매우 높음을 의미한다.

Abstract

Based on the ANSI recommendations, an evaluation of the inventory for Yonggwang nuclear power plants 3 & 4 reflecting FSAR Amendment 110 and actual operational conditions has been performed using PWR-GALE code. In case of the gaseous source term, the results based on the inputs reflecting actual operational conditions were much lower than the results based on the inputs reflecting FSAR Amendment 110. In case of the liquid source term, the results were conversely when compared with the results for the gaseous source term, because we could not reflect

the operational conditions for the liquid radwaste management system in this evaluation. It is necessary to review the results for the liquid source term. The results for the liquid source term reflecting the actual activities for the radionuclides in the first and second systems for Yonggwang nuclear power plant 3 & 4 were much higher than the actual results provided in the annual report for the radiation management. It is conclusively noted that there is a considerable conservativeness in the evaluation structure of PWR-GALE code and the safety on nuclear power plant is very reliable.

1. 서 론

원자력발전소 설계시 많은 인자에 대한 평가가 이루어지고 있지만 그 중 최소발생을 지향하는 방사선량 평가는 매우 중요하기 때문에 FSAR(Final Safety Analysis Report)¹⁾ 제11장에서는 방사성폐기물에 대한 inventory를 평가하고 있다. 그러나, 실제로 발전소를 가동해 보기 전까지 inventory를 정확히 평가한다는 것은 거의 불가능에 가깝다고 할 수 있다.

현재 FSAR에 제시된 방사성폐기물계통내 inventory 값은 PWR-GALE code²⁾에 의거하여 평가된 결과로서 운영허가를 위한 기술적 근거로 활용되고 있다. 이러한 설계기준은 발전소 설계 당시에 정상운전 및 예기치 못한 사고를 고려하여 평가되므로 상당한 보수성을 반영하고 있다. 따라서, 평가 대상 원전의 그간의 운영에 의거하여 개정된 사항 및 실제 운전조건을 반영한 사항 등을 고려한 inventory 평가가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 평가 대상 원전인 영광 원자력 제 2 발전소의 운영에 따른 운전조건의 변화를 도출하였으며 PWR-GALE 코드를 활용하여 액체 및 기체 방사성폐기물 계통에 대한 inventory 결과를 평가한 뒤 FSAR이 작성될 당시의 inventory 결과와 비교 분석하였다.

이러한 연구는 방사성폐기물 계통내의 방사능의 준위에 관한 정보, 원전내의 방사선 안전성 평가 및 원전 주변 환경 방사선 평가에도 중요한 정보를 제공할 것이다.

2. 평가대상 및 방법

1) 액체방사성폐기물 관리계통

액체방사성폐기물의 근원은 핵분열생성물과 방사화생성물을 포함하는 냉각재이다. 영광 원자력 제2발전소의 경우 액체방사성폐기물 관리계통은 일차화학제어계통, 사용후핵연료 냉각 및 저장계통, 방사성 물질 배수계통, 세탁계통 및 액체방사성폐기물 처리계통으로 구성되어 있다.¹⁾ 액체방사성폐기물 관리계통의 기능은 원전의 운영과정에서 생성되는 액체 폐기물중에 포함되거나 포함될 가능성이 있는 방사능을 처리하고 소내에서 재활용이 가능하도록 액체 폐기물을 수집하고 처리된 액체를 환경으로 방출하는 것이다.

액체방사성폐기물에는 입자나 이온형태의 방사성 물질뿐만 아니라 붕산도 다량 포함되어 있으므로 여과기 및 붕산 증발기 등의 붕산회수설비를 이용하여 붕산은 재사용하며 이 과정에서 붕산과 함께 있던 방사성 물질은 걸러진다. 이러한 처리과정을 거쳐 방사능이 대부분 제거된 액체는 소내에서 재사용하거나 방사선감시기를 통해 환경으로 방출된다.

액체방사성폐기물 방출은 과학기술부고시³⁾에 규정되어 있는 수중에서의 방사성 물질의 최대허용농도를 초과하지 않으며 이로 인한 발전소 인근 주민의 연간 피폭선량한도를 초과하지 않는 범위내에서 방출되도록 관리하고 있다.

2) 기체방사성폐기물 관리계통

일반적으로 기체방사성폐기물관리계통은 방사성폐기물 기체 및 잠재성 방사성폐기물 기체를 수집하고 처리한다. 기본적으로 수소 및 질소를 포함하고 있는 기체는 저압, 상온 활성탄 지연이온교환기에서 지연되며 체논을 77일간, 그리고 크립톤은 6일간 지연시킬 수 있다.¹⁾ 활성탄 지연이온교환기를 통과한 기체는 고효율입자 여과기를 통과하고 방사선감시기를 지나 방사성폐기물건물 배기구에서 방출되며 방사능 방출은 배기 및 대기감시기에 의해 통제되고 감시된다.

한편 격납용기내의 기체방사성폐기물 방출은 원전의 정상운전시 격납용기내의 압력조절 목적에 의한 방출과 계획예방정비시 작업자에 대한 쾌적한 작업환경 확보를 목적으로 주로 수행된다. 발전소 정지, 기동 또는 정격 열출력의 15% 초과 시 냉각재내의 ¹³¹I의 방사능이 3배 이상 증가하고 격납용기 배기감시기에 지시된 불활성기체의 방사능이 3배 이상 증가하는 경우에 대해 격납용기내 기체방사성폐기물의 시료채취 및 분석을 수행하게 된다. 기체방출은 주로 저유량 배기팬을 통해 외부로 방출되며 방출팬 전단에는 미립자와 방사성 옥소를 제거할 수 있는 공기조화설비가 설치되어 있고 방출 중에는 격납용기 배기감시기 및 대기감시기를 통해 통제 및 감시된다.

기체방사성폐기물 방출도 동일하게 과학기술부고시³⁾에 규정되어 있는 공기중 방사성 물질의 최대허용농도를 초과하지 않으며 이로 인한 발전소 인근 주민의 연간 피폭선량한도를 초과하지 않는 범위내에서 방출되도록 관리하고 있다.

3) PWR-GALE 코드 구조 및 입력변수 분석

PWR-GALE 코드는 기체 선원항을 평가하기 위한 소스코드와 액체 선원항을 평가하기 위한 소스코드로 나뉘어 있다. 평가에 앞서 기체 및 액체 선원항의 소스코드 알고리즘을 분석하였는데 각각의 알고리즘은 그림1과 그림2에 나타낸 바와 같으며, 소스코드내 1차 및 2차 계통의 핵종의 농도는 ANSI/ANS 18.1-1984⁴⁾에서 제시한 값을 사용하고 있다.

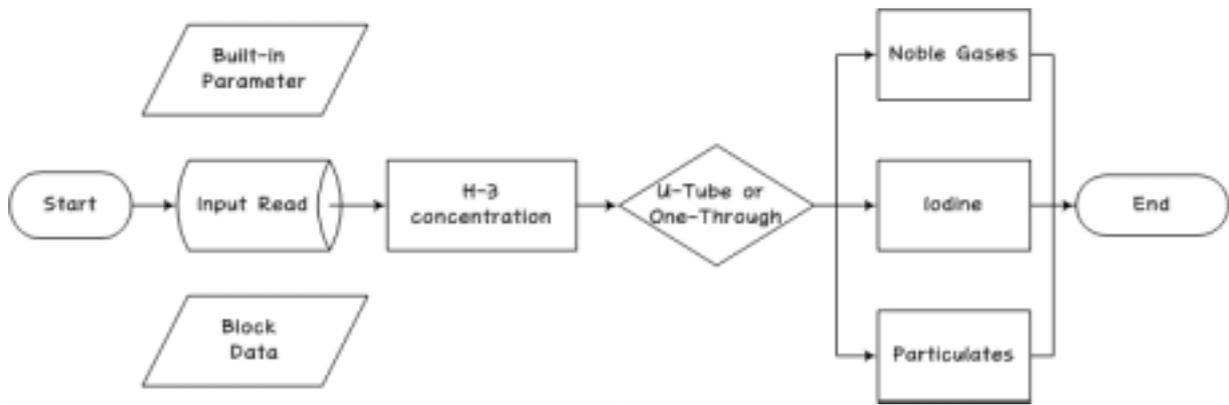


그림 1. 기체 선원항의 소스코드 알고리즘

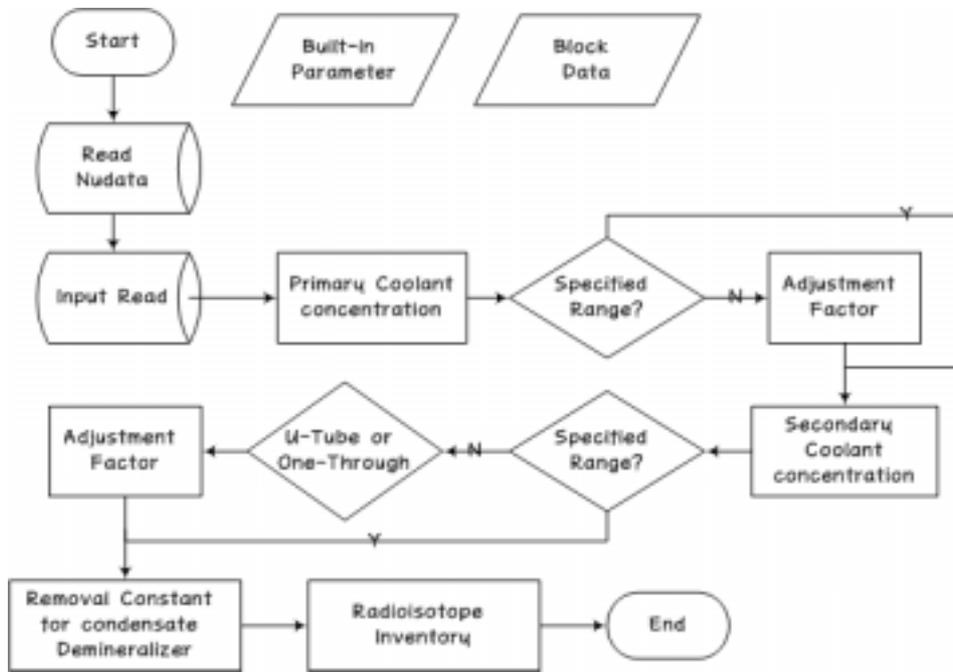


그림 2. 액체 선원항 소스코드의 알고리즘

4) Inventory 평가를 위한 자료 수집

운전이력을 반영한 inventory 평가를 위해서는 평가 대상 원전에 대한 최신 정보를 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 1999년에 개정된 FSAR Amendment 110⁵⁾에서 제시한 입력변수와 1999년에 개정된 ANSI/ANS 18.1-1999⁶⁾에서 제시한 1차 및 2차 계통의 방사성 핵종 농도를 확보하여 본 연구에 사용하였다. 또한 대상원전 담당 부서의 자문하에 실제 운전특성을 반영한 입력변수를 도출하였고, 대상원전 1차 계통의 실제 방

사성 핵종의 농도를 수집하여 2차 계통의 농도계산을 수행하였다. 이러한 평가 대상 원전의 정보에 대한 결과를 선별하여 표1 및 2에 제시하였다.

표 1. ANSI 18.1-1999에서 변경된 핵종의 농도

Nuclide	ANSI/ANS-18.1-1984			ANSI/ANS 18.1-1999		
	Reactor coolant	Secondary coolant		Reactor coolant	Secondary coolant	
		Water	Steam		Water	Steam
Kr-85m	1.6E-01		3.4E-08	1.6E-02		3.4E-09
Kr-87	1.5E-01		3.0E-08	1.7E-02		1.0E-08
Kr-88	2.8E-01		5.9E-08	1.8E-02		3.8E-09
Xe-133	2.6E+00		5.4E-07	2.9E-02		6.0E-09
Xe-135	8.5E-01		1.8E-07	6.7E-02		1.4E-08
Xe-138	1.2E-01		2.5E-08	6.1E-02		1.3E-08
I-131	4.5E-02	1.8E-06	1.8E-08	2.0E-03	8.1E-08	8.1E-10
I-132	2.1E-01	3.1E-06	3.1E-08	6.0E-02	8.9E-07	8.9E-09
I-133	1.4E-01	4.8E-06	4.8E-08	2.6E-02	9.0E-07	9.0E-09
I-134	3.4E-01	2.4E-06	2.4E-08	1.0E-01	7.2E-07	7.2E-09
I-135	2.6E-01	6.6E-06	6.6E-08	5.5E-02	1.4E-06	1.4E-08
Cs-134	7.1E-03	3.3E-07	1.7E-09	3.7E-05	1.7E-09	9.0E-12
Cs-137	9.4E-03	4.4E-07	2.2E-09	5.3E-05	2.5E-09	1.2E-11

표 2. 실제 운전경험을 반영한 PWR-GALE 코드 입력변수 수정값

CARD #	Description	FSAR	영광 3/4 (실제운전치)
Card 4	Primary System Letdown Rate (gal/min)	72.0	76.6
Card 7	Total Steam Flow (10 ⁶ lb/hr)	12.72	13.86
Card 9	Steam Generator Blowdown Rate	127.2	110.23
Card 11	Fraction of Feedwater through Condensate Demineralizer	0.66	0.15
Card 12	Shim Bleed Rate (gpd)	3767.0	925
Card 31	Hold Up Time for Xenon (days)	45.0	77
Card 32	Hold Up Time for Krypton (days)	2.6	6

5) 소스코드 및 입력변수의 수정 및 계산

ANSI/ANS 18.1-1999에서 제시한 1차 및 2차 계통의 방사성 핵종의 농도를 반영하여 하나의 새로운 소스코드를 생성하였고, 도출한 대상원전의 1차 및 2차 계통의 방사성 핵종의 농도를 반영하여 소스코드를 수정하여 또 하나의 새로운 코드를 생성하였다. 이러한 과정을 거쳐 생성된 소스코드를 FSAR, FSAR Amendment 110 및 실제 운전조건을 반영하여 도출한 입력변수와 조합한 뒤 표3과 같이 각 case별로 구분하여 inventory 계산을 수행하였다.

표 3. 소스코드와 입력변수의 조합에 의거한 평가 가지수

소스코드	입력변수		
	FSAR	FASR Amendment 110	영광 3 / 4
ANSI/ANS 18.1-1984 *	CASE 1	CASE 2	CASE 3
ANSI/ANS 18.1-1999	CASE 4	CASE 5	CASE 6
영광 3 / 4	CASE 7	CASE 8	CASE 9

* 수정전의 PWR-GALE 코드에서 사용하고 있는 방사성 핵종의 농도

3. 결과 및 토의

먼저 각 소스코드의 1, 2차 계통내의 방사성 핵종 농도 차이에 따른 inventory 결과를 알아보기 위해 case 2 / case 5 및 case 3 / case 6의 경우로 구분하여 비교 평가하였으며 표4 및 5에 제시하였다. ANSI/ANS 18.1-1999에서 제시하고 있는 방사성 핵종 농도는 ANSI/ANS 18.1-1984의 농도와 같거나 작기 때문에 몇몇 핵종들을 제외하고 Case 5 및 Case 6의 결과가 Case 2와 Case 3의 결과보다 작은 것으로 나타났으며 그림3 및 그림 4(b)에서 제시하고 있는 inventory의 총합의 경우에도 동일하게 적용된다. 이러한 이유는 표1에서 액체 및 기체 inventory의 주요 선원항인 ^{137}Cs , ^{133}Xe 의 농도가 기존 권고값보다 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 액체 inventory의 결과에서는 주요 부식생성물인 Co의 농도가 약간 증가하는 연유로 총 inventory 결과는 기체 inventory의 결과처럼 현저히 감소하지는 않았다.

한편 실제 운전조건을 반영한 Case 3과 Case 6의 결과를 FSAR Amendment 110을 반영한 Case 2와 Case 5의 결과와 비교해 보면 기체의 경우 Case 3과 6의 결과가 Case 2와 Case 5의 결과에 비해 낮아서 평가과정에 보수성이 존재한다고 말할 수 있지만 액체의 경우 기체의 결과와는 반대 상황을 초래한다. 이는 액체 방사성폐기물 계통에 영향을 미치는 실제 운전조건을 충분히 묘사할 수 없었던 제약에 기인하므로 이에 대한 추후 추가적인 연구가 필요하다.

표 4. Case 2, Case 3, Case 5, Case 6에 해당하는 기체 선원항

Nuclide	FSARAmdendment110		영광3/4	
	Case2	Case5	Case3	Case6
Kr-85m	5.70E+01	5.00E+00	5.70E+01	5.00E+00
Kr-85	3.50E+03	3.50E+03	1.90E+03	1.90E+03
Kr-87	2.10E+01	2.00E+00	2.10E+01	2.00E+00
Kr-88	6.90E+01	4.00E+00	6.90E+01	4.00E+00
Xe-131m	1.60E+03	1.60E+03	1.30E+03	1.30E+03
Xe-133m	9.80E+01	9.80E+01	9.50E+01	9.50E+01
Xe-133	4.50E+03	5.00E+01	4.30E+03	4.60E+01
Xe-135m	7.00E+00	7.00E+00	7.00E+00	7.00E+00
Xe-135	5.10E+02	3.90E+01	5.00E+02	3.80E+01
Xe-137	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Xe-138	6.00E+00	2.00E+00	6.00E+00	2.00E+00
I-131	8.60E-02	3.80E-03	8.10E-02	3.50E-03
I-132	4.70E-01	1.40E-01	4.50E-01	1.30E-01
I-133	2.80E-01	5.20E-02	2.70E-01	5.00E-02
I-134	7.70E-01	2.30E-01	7.70E-01	2.30E-01
I-135	5.50E-01	1.20E-01	5.40E-01	1.10E-01
TOTAL	1.04E+04	5.31E+03	8.26E+03	3.40E+03

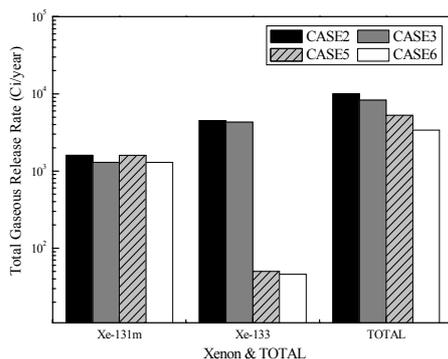
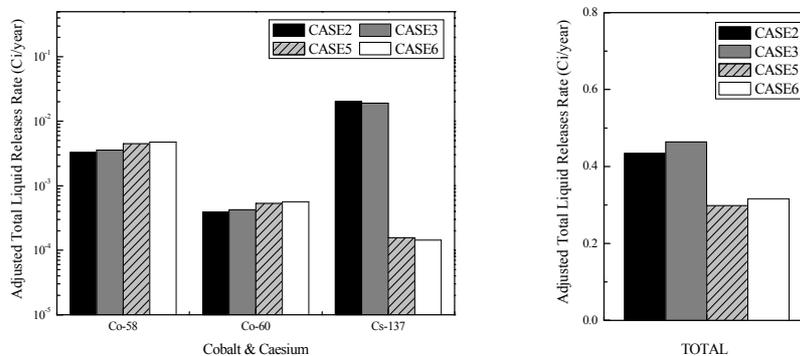


그림 3. Case 2, Case 3, Case 5, Case 6의 기체 선원항 비교



(a) Cobalt & Caesium

(b) TOTAL

그림 4. CASE 2, CASE 3, CASE 5, CASE 6의 액체 선원항 비교

표 5. CASE 2, CASE 3, CASE 5, CASE 6에 해당하는 액체 선원항

Nuclide	FSAR Amendment110		영광3/4	
	Case2	Case5	Case3	Case6
Na-24	4.90E-03	5.37E-03	6.67E-03	7.14E-03
P-32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Cr-51	2.14E-03	2.32E-03	2.92E-03	3.09E-03
Mn-54	1.15E-03	1.25E-03	1.57E-03	1.66E-03
Fe-55	8.73E-04	9.44E-04	1.19E-03	1.25E-03
Fe-59	2.04E-04	2.21E-04	2.78E-04	2.93E-04
Co-58	3.28E-03	3.55E-03	4.47E-03	4.72E-03
Co-60	3.92E-04	4.24E-04	5.34E-04	5.64E-04
Ni-63	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Zn-65	3.71E-04	4.02E-04	5.06E-04	5.34E-04
W-187	4.15E-04	4.54E-04	5.66E-04	6.04E-04
Np-239	7.34E-04	8.00E-04	1.00E-03	1.06E-03
Br-84	6.26E-05	6.67E-05	8.52E-05	8.87E-05
Rr-88	1.10E-04	1.02E-04	1.50E-04	1.35E-04
Sr-89	9.75E-05	1.05E-04	1.33E-04	1.40E-04
Sr-90	8.75E-06	9.46E-06	1.19E-05	1.26E-05
Sr-91	6.44E-05	7.06E-05	8.77E-05	9.38E-05
Y-91m	3.92E-05	4.29E-05	5.34E-05	5.71E-05
Y-91	7.94E-06	8.63E-06	1.08E-05	1.15E-05
Y-93	3.17E-05	3.43E-05	4.32E-05	4.56E-05
Zr-95	2.76E-04	2.98E-04	3.76E-04	3.97E-04
Nb-95	2.03E-04	2.19E-04	2.76E-04	2.91E-04
Mo-99	2.40E-03	2.61E-03	3.27E-03	3.47E-03
Tc-99m	2.26E-03	2.46E-03	3.08E-03	3.27E-03
Ru-103	5.23E-03	5.66E-03	7.12E-03	7.52E-03
Rh-103m	5.23E-03	5.66E-03	7.12E-03	7.52E-03
Ru-106	6.57E-02	7.10E-02	8.94E-02	9.44E-02
Rh-106	6.57E-02	7.10E-02	8.94E-02	9.44E-02
Ag-110m	9.38E-04	1.01E-03	1.28E-03	1.35E-03
Ag-110	1.22E-04	1.32E-04	1.66E-04	1.75E-04
Sb-124	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Te-129m	1.30E-04	1.41E-04	1.78E-04	1.88E-04
Te-129	1.85E-04	1.99E-04	2.53E-04	2.64E-04
Te-131m	3.08E-04	3.37E-04	4.20E-04	4.48E-04
Te-131	6.13E-05	6.67E-05	8.35E-05	8.87E-05
I-131	7.69E-02	8.35E-02	4.84E-03	5.13E-03
Te-132	6.82E-04	7.42E-04	9.29E-04	9.87E-04
I-132	8.54E-03	9.34E-03	4.00E-03	4.27E-03
I-133	6.39E-02	7.00E-02	1.63E-02	1.75E-02
I-134	3.00E-03	3.23E-03	1.23E-03	1.29E-03
Cs-134	1.52E-02	1.43E-02	1.07E-04	9.84E-05
I-135	3.58E-02	3.95E-02	1.03E-02	1.11E-02
Cs-136	1.50E-03	1.42E-03	2.04E-03	1.89E-03
Cs-137	2.03E-02	1.91E-02	1.56E-04	1.44E-04
Ba-137m	1.89E-02	1.78E-02	1.46E-04	1.34E-04
Ba-140	7.90E-03	8.56E-03	1.08E-02	1.14E-02
La-140	1.18E-02	1.28E-02	1.60E-02	1.70E-02
Ce-141	1.02E-04	1.10E-04	1.39E-04	1.46E-04
Ce-143	6.13E-04	6.70E-04	8.35E-04	8.91E-04
Pr-143	1.22E-04	1.32E-04	1.66E-04	1.76E-04
Ce-144	2.83E-03	3.06E-03	3.86E-03	4.07E-03
Pr-144	2.83E-03	3.06E-03	3.86E-03	4.07E-03
all other	6.74E-06	7.27E-06	9.18E-06	9.66E-06
Total	4.34E-01	4.64E-01	2.98E-01	3.16E-01

아울러 대상 원전의 1차 및 2차 계통내의 실제 방사성 핵종의 농도를 반영한 PWR-GALE 코드를 각각의 입력변수 (Case 7, Case 8, Case 9)에 대해 평가하였으며 그 결과를 방사선 관리연보⁷⁾에서 제시하고 있는 실제 inventory 결과와 비교하였다. 기체의 경우 PWR-GALE 코드에서는 1.0 Ci/yr 미만의 불활성 기체, 0.0001 Ci/yr 미만의 방사성 옥소 inventory의 값을 0으로 간주하기 때문에 연보와의 비교가 불가능하므로 액체의 경우만 국한하여 비교하였다. 이에 대한 결과는 그림5에 제시하였다. 액체의 경우 평가된 inventory의 총합은 연보에서 제시하고 있는 실제값에 비해 과대평가되고 있는 것으로 나타났으며 이는 Co 및 Cs과 같은 주요 핵종의 경우에도 동일하게 적용된다. 이는 PWR-GALE 코드상의 액체의 결과는 인적실수, 시스템 오류 등으로 인해 방출될 가능성이 있는 방사능의 양을 추가로 포함하므로 일정 하한치 이하로는 떨어지지 않기 때문이며 이는 PWR-GALE 코드 평가체계에 존재하는 보수성을 나타낸다.

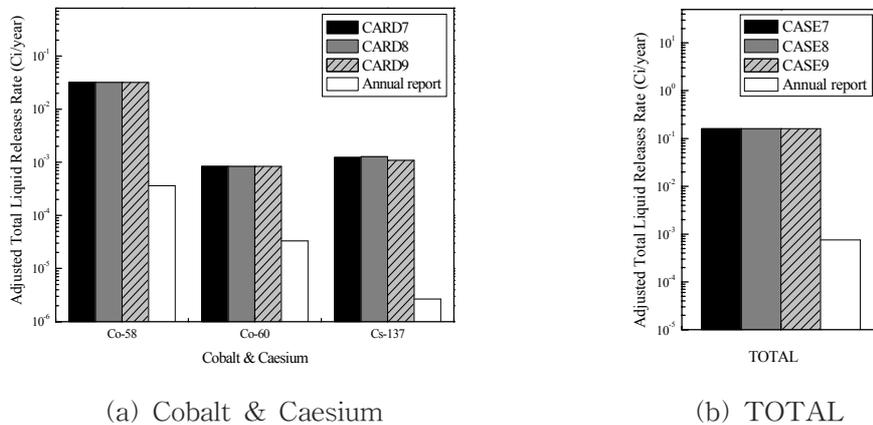


그림 5. CASE 7, CASE 8, CASE 9와 방사선관리 연보의 액체 선원량 비교

4. 결론

방사성폐기물 계통내의 inventory 평가는 원전 및 주변 지역에 대한 방사선 건전성 확보 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 inventory 평가 코드인 PWR-GALE 코드를 활용하여 ANSI 권고값을 바탕으로 평가 대상 원전의 FSAR Amendment 110 및 실제 운전조건을 반영한 다양한 입력변수에 대한 inventory 평가를 수행하였다. 기체의 경우 실제 운전조건을 반영한 입력변수를 활용한 결과는 기타 결과와 비교할 때 훨씬 낮았지만 액체의 경우에는 해당 계통에 대한 운전조건을 충분히 반영하지 못한 제약으로 인해 반대의 결과를 초래하였으며 이에 대한 재검토가 필요하다. 아울러 1차 및 2차 계통내의 실제 방사성 핵종의 농도를 반영한 액체에 대한 평가 결과를 연보에서 제공하는 실제 값과 비교할 경우 연보에 제시된 값이 훨씬 낮았다. 이러한 사실은 PWR-GALE 코드 평가 체계에 보수성이 존재함을 확인 하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 개발사업의 일환으로 수행되었으며 방사선안전신기술연구센터 및 한국수력원자력(주)의 도움으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Electric Power Corporation, "Yonggwang Units 3 & 4 Final Safety Analysis Report,".
2. US NRC, "Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors, Rev.1," NUREG-0017, 1985.
3. 과학기술부, "방사선방호 등에 관한 기준," 과학기술부고시 제2002-23호, 2003.
4. Working Group ANS-18.1, American National Standard: Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors, ANSI/ANS-18.1-1984, USA, 1985.
5. Korea Electric Power Corporation, "Yonggwang Units 3 & 4 Final Safety Analysis Report Amendment 110", 1999.
6. Working Group ANS-18.1, American National Standard: Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors, ANSI/ANS-18.1-1999, USA, 2000.
7. 한국수력원자력(주), "원자력발전소 방사선관리 연보," 1996-2002.