

고리1호기 원자로 압력용기의 폐기물 분류

Classification of Radioactive Waste arising from Kori 1 Reactor Pressure Vessel

신상화, 황주호

경희대학교(경기도 용인시 기흥읍 서천 1리)

요약

고리 1호기의 압력용기를 대상으로 방사선원항 평가체계를 구축하고, 계산에 의한 방법으로 방사선원항을 평가하였다. 방사선원항 평가체계로는 MCNP/ ORIGEN-2 체계를 구축하였으며 이의 타당성을 확인하였다. 이 체계를 이용하여 중성자속을 계산한 결과 중성자속이 가장 높은 지점에서 약 $6.09 \times 10^{11} \text{ \#}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ 정도의 값을 나타내고 있으며, 방사능량은 가동 30년 시점인 2008년을 기준으로 계산한 결과 약 $1.98 \times 10^{13} \text{ Bq/t}$ 정도의 값을 나타내고 있다. MCNP/ORIGEN을 이용한 압력용기의 방사화 재고량 계산 값에 10 CFR 61 규정을 적용한 결과 압력용기에 대한 폐기물 분류는 Class A 폐기물로 분류할 수 있었다. 또한 국내 과기부고시 02-01호를 적용한 결과 중·저준위 방사성폐기물로 분류할 수 있었다.

Abstract

From this research which it is seen evaluation objective structural material with Kori Unit 1 pressure vessel radiation source term, it is constructed the evaluation system in the object, a radiation source clause with the method due to a calculation it evaluated. With the radiation crew clause evaluation system it is confirmed the different meaning propriety to construct the MCNP/ORIGEN-2 system. It is used this system and the most high price of neutron flux degree point is shown the price about $6.09 \times 10^{11} \text{ \#}/\text{cm}^2 \text{ sec}$, the amount of activity is shown the price about $1.98 \times 10^{13} \text{ Bq/t}$ by the result which calculates in standard, the estimated 30 years operating time in 2008. The radioactive waste of reactor pressure vessel is classified Class A waste by 10 CFR 61. And the radioactive waste of reactor pressure vessel is classified low-level radioactive waste by the interior of a country regulation.

I. 서론

국제 원자력기구(IAEA)의 최근 자료에 의하면 전세계적으로 21세기 내에 수백의 원자력 시설이 가용연한을 초과하게 되며, 그 중 일부시설의 경우에는 수명연장을 통하여 계속 운영되겠지만 대부분의 시설은 운영정지 후 수 년 내에 해체될 것으로 예상하고 있다. 우리나라의 경우 1978년 고리원자력발전소 1호기 운영을 시작으로 현재 16기가 운영중이고 연구용 원자로인 TRIGA-Mark II,III는 해체작업이 시작된 상태이다. 하지만 우리나라의 경우 원자력 설비 해체에 있어 필수적인 안전성 평가에 대한 체계적 방법론이 존재하지 않는 실정이다. 따라서 해체에 대한 안전규제 제도 및 기준이 조속히 마련되어 보다 안전하게 해체를 수행할 수 있는 체계를 수립해야 할 것이다.

원자로의 폐로사업은 원자로를 새로 건설하는 것만큼 규모가 큰 사업이다. 원자로를 폐기처분하기 위해서는 각 원자로의 구성원들이 얼마만큼의 방사화가 되었는가에 대한 선원항 평가가 수행되어야 하고, 이와 더불어 각 기기들을 모두 제염하여야 하는 어려움이 있고, 또한 법적 기준을 만족시켜야 한다. 이러한 일련의 과정들은 간단하지 않으며, 기술력 및 인력이 매우 많이 투입되는 사업이다. 원자력 시설 제염, 해체사업은 건설비의 약 20%에 해당하는 막대한 비용이 소요되며, 원전가동 중 발생하는 폐기물 누적량에 상당하는 방사성 폐기물을 방출하는 대규모 방사성 폐기물 사업이다. 국내 원전 및 핵시설이 급속도로 증가됨에 따라 원자력 시설 제염, 해체 기술기준과 관리지침 수립이 국가적으로 시급히 요구되고 있다[1].

따라서 본 연구에서는 안전성, 효율성, 경제성의 기준을 충족하는 폐기물 처분계획을 수립하는데 필요한 기본적인 정보를 제시하고자 한다. 폐기물 처분계획을 수립하기 위해서는 시설물에 존재하는 폐기물의 유형과, 이미 존재하거나 해체작업으로 인해 발생할 폐기물의 크기 및 양에 대한 Inventory, 고체 또는 액체폐기물을 포장하고 취급하는데 가장 적합한 방법, 각종 폐기물의 형태에 따라 적용할 처분방법 등에 대한 지식이 필요하다[2]. 이에 국내원전 중 가장 노후화되어 2008년 경에 폐로 예정인 고리1호기를 선택하여 원자로 압력용기에 대해 MCNP/ORIGEN 체계를 적용하여 선원항을 평가하였다. 또한 고리 1호기의 수명을 30년으로 가정하고 원자로 운전 정지시점에서의 방사능을 계산하여 국내·외 폐기물 분류기준에 적용함으로써 향후 국내에서 진행될 폐로 및 해체 과정에 대한 법률적 체계를 수립하는데 참고가 되고자 한다.

II. 국내·외 방사성폐기물 분류 기준

원자력 관계시설에서 발생하는 방사성폐기물은 화학적, 물리적 형태가 매우 다양하며 포함되어 있는 방사능량과 핵종별 농도도 매우 다르다. 그러므로 이들을 방사선 방호 측면에서 보다 안전하고 쉽게 관리할 수 있도록 하기 위하여 일정한 기준에 따라 분류가 이루어져야 하는데, 분류를 위한 원칙으로 폐기물에 함유된 핵종의 반감기뿐만 아니라 핵종별 농도, 독성, 물리적 형태 등 여러 방법이 있다. 그 중에서 처분의 관점에서는 총 방사능량과 핵종별 방사능 농도가 주로 사용되는 분류원칙이 되는데, 이러한 분류방법에 따라 발생하는 방사성폐기물은 방사성폐기물로서 더 이상의 규제 감독이 방사선 방호의 측면에서만뿐만 아니라 사회적, 경제적인 측면에서도 무시되는 극저준위 방사성폐기물과 방사능량에 따라 저준위, 중준위 및 고준위 방사성폐기물로 분류될 수 있다. 규제면제 수준의 극저준위폐기물은 일부 국가를 제외하면 현재 외국에서도 일반원칙만을 수

립하여 개별적인 사안의 신청을 규제기관의 개별적인 심사로 결정하기 때문에 총 방사능량이나 핵종별 농도 제한으로 분류되고 있지 않다. 또한 우리나라의 경우 재처리를 현재 단계에서 고려하지 않고 있기 때문에 진정한 의미에서의 고준위폐기물은 존재하지 않고 있다.[3] 미국 원자력 규제위원회(U. S NRC)의 NUREG 보고서에 따르면 가압수형원자로의 압력용기에 대한 폐기물 분류에서 압력용기의 일부분만이 Class B 폐기물로 구분되고 나머지는 Class A 폐기물로 분류된다고 보고되었다.[4] 여기서는 폐기물 분류법중 처분의 관점에 기준하여 분류하고 있는 예를 고찰하였다.

(1) 10 CFR 61[5]

10 CFR 61.55에는 저준위 폐기물을 분류함에 있어서 다음과 같은 3가지 경우로 나누어 폐기물 분류규정을 제시하고 있다.

(i) 장반감기 핵종의 경우

방사성폐기물이 표 1에 제시한 핵종만을 포함하고 있을 경우 아래의 규정에 따라 폐기물을 분류한다.

- 방사성폐기물의 농도가 표1에서 제시한 값의 0.1배를 초과하지 않을 경우 Class A 폐기물로 분류
- 방사성폐기물의 농도가 표1에서 제시한 값의 0.1배를 초과하지만, 표1의 값을 초과하지 않을 경우 Class C 폐기물로 분류
- 방사성폐기물의 농도가 표1에서 제시한 값을 초과할 경우 일반적인 천층처분에 적합하지 않는 폐기물로 분류

표 1. 장반감기 핵종을 가진 폐기물의 농도기준

Radionuclide	Concentration curies per cubic meter
C-14	8
C-14 in activated metal	80
Ni-59 in activated metal	220
Nb-94 in activated metal	0.2
Tc-99	3
I-129	0.08
Alpha emitting transuranic nuclides with half-life greater than 5 years	100 [nCi/g]
Pu-241	13,500 [nCi/g]
Cm-242	20,000 [nCi/g]

(ii) 단반감기 핵종의 경우

방사성 폐기물이 표 2에서 제시한 핵종만을 포함하고 있을 경우 아래의 규정에 따라 폐기물을 분류한다.

- 방사성폐기물의 농도가 표2의 Column 1에서 제시한 값을 초과하지 않을 경우 Class A 폐기물로 분류
- 방사성폐기물의 농도가 표2의 Column 1에서 제시한 값을 초과하지만, Column 2의 값을 초과하지 않을 경우 Class B 폐기물로 분류
- 방사성폐기물의 농도가 표2의 Column 2에서 제시한 값을 초과하지만, Column 3의 값을 초과하지 않을 경우 Class C 폐기물로 분류
- 방사성 폐기물의 농도가 표2의 Column 3에서 제시한 값을 초과할 경우 일반적인 천층처분에 적합하지 않는 폐기물로 분류

표 2. 단반감기 핵종을 가진 폐기물의 농도기준

Radionuclide	Concentration, curies per cubic meter		
	Col. 1	Col. 2	Col. 3
Total of all nuclides with less than 5 year half-life	700	(1)	(1)
H-3	40	(1)	(1)
Co-60	700	(1)	(1)
Ni-63	3.5	70	700
Ni-63 in activated metal	35	700	7000
Sr-90	0.04	150	7000
Cs-137	1	44	4600

(iii) 장반감기 핵종과 단반감기 핵종이 섞여 있을 경우

방사성폐기물이 표1에서 제시한 핵종과 표2에서 제시한 핵종을 포함하고 있을 경우 아래의 규정에 따라 폐기물을 분류한다.

- 표1 핵종의 경우 핵종의 농도가 표1에서 제시한 값의 0.1배를 초과하지 않을 경우 폐기물 분류는 표2에서 제시한 핵종의 농도로 결정
- 표1 핵종의 경우 핵종의 농도가 표1에서 제시한 값의 0.1배를 초과하지만 표1의 값을 초과하지 않을 경우 Class C 폐기물로 분류

(2) 국내 방사성고체폐기물의 분류기준

국내 원자력법규의 방사성폐기물 분류기준(과기부고시 제 02-01호)에 따르면, 방사성폐기물은 중·저준위폐기물과 고준위폐기물로 구분된다[6]. 그러나 국내 원자력 법규에 나타난 바와 같이 α -방출 핵종농도에 대해서는 규정을 두고 있으나 β, γ -선 방출 핵종에 대해서는 명확하게 규정된 것이 없다. 따라서 국내 연구용 원자로 해체 사업에서는 방사성 고체폐기물의 분리, 포장, 저장 및 향후 운반 등 일련의 작업을 효율적으로 수행하기 위하여, IAEA에서 권고하는 사항(IAEA Safety Standard Series ST-1/Safe Transport of Radioactive Material)과 연구소내 규정(방사성폐기물 관리규정)에 따라 중준위폐기물과 저준위폐기물로 구분하고 있다[7]. 현재 국내에서는 중·저준위 방사성폐기물 처분장의 개념 및 부지가 확정되지 않아 처분관점에서의 폐기물분류의 요건이 제공될 수 없는 현실로서 원자력법상으로는 고준위 및 중·저준위 폐기물로만 분류되어 있어, 연구로 폐로사업에는 과학기술부의 고시 제 98-12호 및 제 96-38호를 혼용하여 아래와 같은 기준

을 적용하여 폐로공사에 반영하였다.

- 고준위폐기물 : 반감기 20년 이상의 α 선 방출 핵종농도가 4,000 Bq/g 이상이거나 열발생율이 2 kW/m²인 방사성폐기물 및 사용후핵연료[6]

- 중준위폐기물 : 고준위폐기물과 저준위폐기물이 아닌 모든 방사성폐기물

- 저준위폐기물 :

- 방사성물질이 균일하게 분포되어 있고 1g당 평균 방사능농도가 A_2 값이 0.05 Ci 이하인 핵종은 3.7 kBq(0.0001 mCi), 0.05 Ci보다 크나 1 Ci 이하인 핵종은 185 kBq(0.005 mCi), A_2 값이 1 Ci 이상인 핵종은 11.1 MBq(0.3 mCi)을 초과하지 않는 방사성폐기물[8]

- 표면이 방사성물질에 의하여 오염도된 물건으로서 과학기술부 장관이 정하는 제거성 표면오염이 기준치의 10배를 초과하지 아니하고 정상적인 수송 중 체적의 극소화가 일어나더라도 오염된 물건의 방사능이 위의 농도를 넘지 아니하는 방사성폐기물[9]

- 방사성물질에 의하여 오염된 경우 그 오염이 용이하게 확산되지 아니하고 1 제곱미터당 평균오염도가 A_2 값이 0.05 Ci 이하인 핵종의 경우 3.7 kBq/cm², 기타 핵종의 경우 37 kBq/cm² 을 초과하지 아니하는 방사성폐기물[8]

결론적으로 국내 연구용 원자로의 폐로사업에서 해체 시 발생하는 방사성 고체폐기물은 다음과 같은 방사성폐기물분류기준 및 해체폐기물 분류기준을 적용하였고, 본 연구에서도 이 분류기준을 적용해보기로 하였다.

표 3. 방사성폐기물 분류기준

방사성폐기물구분	반감기 20년 이상의 알파선 방출핵종농도	열발생률	비 고
고준위폐기물	$\geq 4,000 \text{ Bq/g}$	$\geq 2 \text{ kW/m}^3$	과기부고시 제 98-12호 (방사선량 등을 정하는 기준)
중저준위폐기물	$< 4,000 \text{ Bq/g}$	$< 2 \text{ kW/m}^3$	

표 4. 해체폐기물 분류기준

방사성폐기물 구분		방사능 농도	비 고
고 체 폐 기 물	규제면제 폐기물	$< 0.4 \text{ Bq/g } (\beta, \gamma)$ 또는, $0.4 \text{ Bq/cm}^2 (\beta, \gamma)$	A2는 IAEA Safety Standards Series No. ST-1(1996)의 Table 1에 제시된 값[10]
	저준위 고체폐기물	$< 2 \times 10^{-3} \text{ A}_2/\text{g}$	
	중준위 고체폐기물	$\geq 2 \times 10^{-3} \text{ A}_2/\text{g}$	

Ⅲ. 주요방사성핵종

앞서 제시된 핵종들은 중·저준위 방사성폐기물 평가에 고려되어야 하는 핵종을 나타내고 있다. 그중에서도 Co-60, Ni-59, Nb-94와 같은 핵종은 해체작업시, 폐기물 처분시 특히 중요시 여겨야

할 핵종으로 분류되고 있다.

Co-60은 방사능 영향이 크기 때문에 원자로 해체계획에 있어서 우선적으로 고려해야 하는 핵종이다. 원자로 용기의 탄소강, 스텐레스강 피복재 및 내부 부품으로부터 나오는 Co-60 감마 방사선의 선량준위에 따라 작업자에 대한 차폐와 원격으로 수행하여야 할 작업량 등을 결정해야만 한다.

Ni-59는 과거 원자로 해체에 중요시되지 않았다. 그것은 원자로들이 이 동위원소를 문제가 될 만큼의 양을 만들어 낼 수 있을 정도로 충분한 기간 운전되지 않았기 때문이다. 그러나 약 80%의 이용율로 40년 동안 운전된 상업용 경수로에서는 원자로 용기의 어떤 내용물에 문제가 될 만큼 현저한 양의 Ni-59가 함유되어 있을 수 있다. 그 이유는 Ni-59는 Ni-58이 (n, r) 반응에 의해 생성되는데 반응 단면적이 4.6 b으로 주요 핵종들에 비해 작기 때문에 운전기간이 길수록 많이 생성되기 때문이다. 참고로 Ni-62(n, r)Ni-63의 반응단면적은 14.2 b, Co-59(n, r)Co-60의 반응단면적은 18.7 b 이다.

중요하나 잘 정리되지 않은 것으로 현저하게 방사선 준위의 상승을 가져올 수 있는 Nb-94와 같은 미량원소의 방사화가 있는데, 이로 인하여 해체방법의 선정에 영향을 줄 수 있다. Nb-94는 약 100년 후에 방사능 준위가 두드러질 것이므로 자연 해체형식에서는 반드시 고려되어야 한다. 100년 후에 Nb-94의 방사능 준위가 두드러진다는 것은 초기에 방사능준위를 높였던 주요 핵종들 대부분이 반감기가 짧아서 100년이 지나면 거의 붕괴가 되는 반면에 반감기가 20,000년인 Nb-94는 100년이 지나도 방사능 준위가 거의 변하지 않기 때문에 100년 후에는 상대적으로 Nb-94가 전체 방사능 준위에서 차지하는 비중이 커진다는 의미이다[4].

표5는 압력용기에서 주요 핵종들에 대한 붕괴방식과 반감기를 나타낸다.

표 5. 원자로 압력용기에서의 주요 핵종

Radionuclide	Decay mode	Half-life(years)
H-3	β	1.23×10^1
C-14	β	5.73×10^3
Ni-59	β	8.00×10^4
Co-60	β, γ	5.27×10^0
Ni-63	β	9.20×10^1
Nb-94	β, γ	2.03×10^4
Tc-99	β	2.13×10^5

IV. 고리1호기 원자로 압력용기 방사화 재고량

원자로가 가동됨에 따라 중성자 조사로 인하여 압력용기를 포함한 구조재는 점차 방사화되어 해체 작업시에는 작업자에게 방사선 피폭을 일으키는 주요 선원항이 된다. 원자력 시설 해체에 관한 안전성 분석에 필수적으로 요구되는 것이 이 선원항이다. 본 연구에서는 선원항 평가 구조재로 압력용기를 설정하였으며, 대상 원전으로는 가동기간이 가장 길고 노후화되어 2008년경에 폐로 예정인 고리 1호기를 선택하였다. 압력용기에 대한 선원항 평가 방법은 직접 시료 채취를 하는 방법과 계산에 의한 방법이 있으나, 본 연구에서는 계산에 의한 방법을 모색하고자 하였다. 또한 MCNP/ORIGEN 계산체계를 구축하여 고리1호기 원자로 압력용기에 적용하였다.

다음 그림1은 MCNP/ORIGEN-2 체계의 흐름도를 도식화한 것이다.

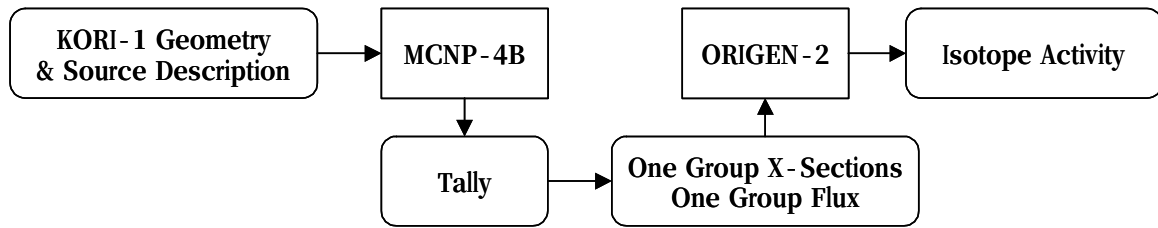


그림 1. MCNP/ORIGEN-2 계산 수행 절차

(1) 고리 1호기 초기 노심의 MCNP 모델링 검증

앞서 묘사된 MCNP 모델링의 타당성을 검증하기 위해 고리 1호기 1주기 노심에 대한 주기초 (BOL)에 대한 노심계산을 수행하여 노심 평면 출력분포를 산정한 후 이를 FSAR의 값과 비교하였다.

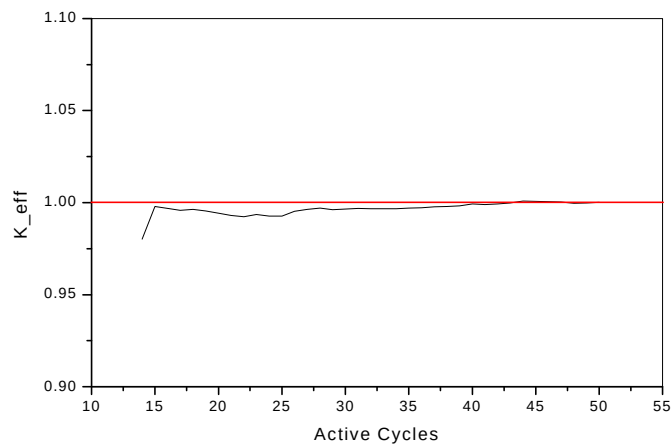


그림 2. K_eff Value in MCNP Calculation

FSAR MCNP % Error						
				0.722 0.669 -7.40		
				1.120 1.043 -7.18	0.608 0.565 -7.12	
				1.146 1.179 -1.70	0.778 0.730 -6.14	
				1.127 1.157 -1.84	1.000 1.062 -5.83	
				1.094 1.144 3.16	1.132 1.151 0.17	0.662 0.637 -3.78
				1.127 1.156 3.16	1.107 1.153 0.17	0.637 0.637 -3.78
				2.98 4.20 5.11	-2.21 -1.35 -4.91	
				1.081 1.136 5.11	0.986 1.008 2.21	0.821 0.781 -4.91
				1.105 1.146 3.73	1.105 1.146 3.73	
				1.096 1.155 5.35	1.096 1.155 5.35	
				1.145 1.168 2.01	1.145 1.168 2.01	

Root Mean Square Error = 4.377 %

그림 3. Assembly Relative Power Distribution[BOL]

그림2는 선원의 분포를 산출하기 위해 KCODE를 실행시켰을 때의 MCNP Active Cycle에서의 임계도 계산 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 K-eff 값은 임계 값인 1.0에 근접하고 있어 모델링의 적절함을 보여준다.

그림3은 MCNP로부터 산출된 노심 평면 출력분포 및 FSAR에서 제시하는 고리 1호기 초기노심(BOL)의 평면출력 분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 상호간의 오차는 RMSE(Root Mean Square Error) 값이 4.377 % 이내로서 일치하여 본 연구에서 모델링된 MCNP의 모델링은 매우 타당함을 볼 수 있다.

(2) MCNP를 이용한 압력용기 중성자속 분포 계산 결과

압력용기 각위치에서의 중성자속 및 각 핵종에 대한 핵반응 단면적을 산출하였다. 그림 2는 중성자속이 산출된 영역의 표시를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 압력용기는 반경(radial)방향으로 10개의 Cell로 나누어져 있으며, 방위각(azimuthal angle)을 따라 5°씩 나누어져 9개의 Cell로 나누어져 있으며, 축방향으로 4개의 Cell로 나누어져 있다. 따라서 MCNP의 결과 값은 $10 \times 9 \times 4 = 360$ 개의 Cell에 대해 중성자속 및 ORIGEN2에 사용될 단일그룹으로 축약된 핵종별 중성자 포획단면적(one-group collapsed capture cross section)이 산출된다.

압력용기를 구성하고 있는 각 핵종별 단일군으로 축약된 중성자 흡수 단면적(one-group capture cross section)은 최종적으로 ORIGEN2의 중성자속 입력 값 및 반응 단면적 라이브러리 정보로 이용되며, 이를 통해 압력용기에서의 각 핵종별 방사능 및 총 방사능 양이 현재까지의 고리 원자력 1호기 운전이력에 따라 산출된다. 표4에는 각 압력용기 위치별 중성자속이 기재되어 있다.

그림5는 압력용기를 구성하고 있는 각 핵종에 대한 방위각, 축방향, 압력용기 위치에서의 반경방향 중성자속 분포를 나타낸다. 예상했던 바와 같이, 압력용기 바깥쪽으로 갈수록 단일군 중성자속(one-group neutron flux)은 급격히 감소함을 볼 수 있으며, 중성자 흡수 반응단면적은 증가함을 볼 수 있다.

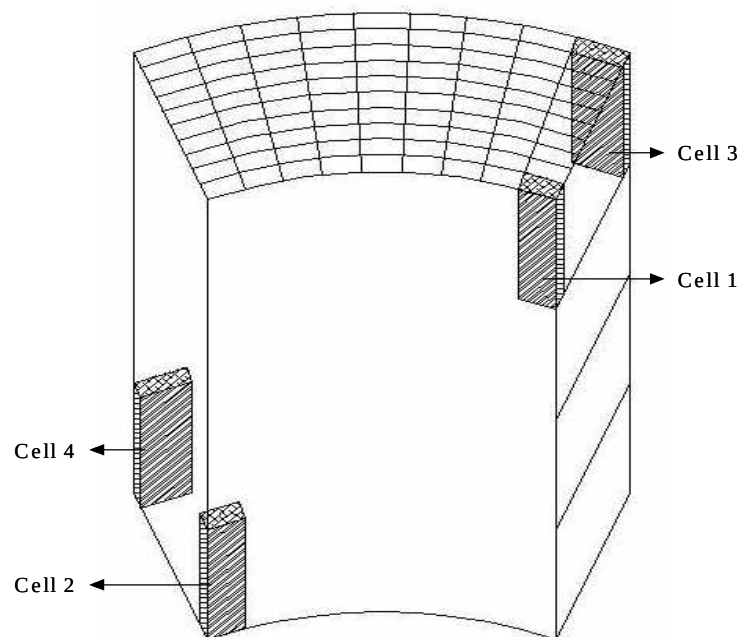


그림 4. 중성자속 산출영역

표 6. 압력용기 위치별 중성자속

위 치				총중성자속 (#/cm ² sec)
Cell	radius	longitudinal	angle	
1	1st	1st	0° ~ 5°	6.09×10^{11}
2	1st	4th	40° ~ 45°	4.79×10^{10}
3	10th	1st	0° ~ 5°	5.42×10^{10}
4	10th	4th	40° ~ 45°	5.11×10^9

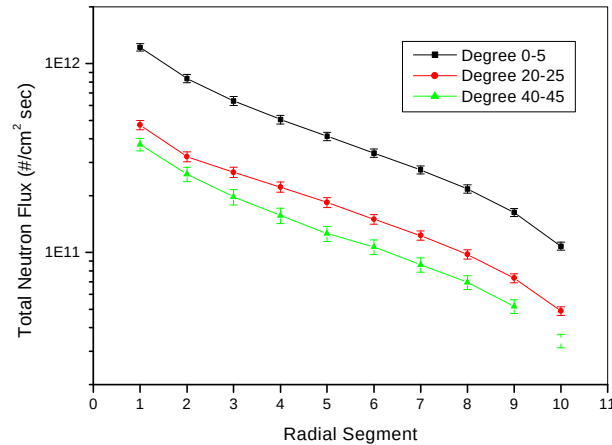


그림 5. 압력용기 반경방향 중성자속 분포

(2) ORIGIN-2 코드를 이용한 압력용기 방사화 재고량계산

앞서 MCNP 코드를 통해 산출된 중성자속 및 핵반응 단면적을 이용하여 고리 1호기 실제 운전 이력을 따라 19주기의 연소이력을 계산하고, 그 이후의 주기는 현재 고리 1호기가 19주기 운전중에 있으므로 고리 1호기의 수명을 30년으로 가정하여 연소이력을 추정하였다.

표 7. 압력용기 위치별 총방사능

위 치				총방사능 [Bq/t]
Cell	radius	longitudinal	angle	
1	1st	1st	0° ~ 5°	1.98×10^{13}
2	1st	4th	40° ~ 45°	1.63×10^{12}
3	10th	1st	0° ~ 5°	1.88×10^{11}
4	10th	4th	40° ~ 45°	1.61×10^{10}

표5에는 압력용기 각 위치에서의 총 방사능 양이 기재되어 있다. 표에서 보듯이 최대 방사화 지역은 Cell 1의 위치임을 알 수 있으며, 총 방사능양은 폐로 예정 시점인 2008년을 기준으로 약 1.98×10^{13} Bq/t 인 것으로 평가되었다.

표6은 압력용기 각 위치에서의 각 핵종별 방사능 양을 나타내고 있다.

표 8. 압력용기 위치에서 각 핵종별 방사능

Cell	Radionuclide [Bq/g]							총 방사능 [Bq/g]
	H-3	C-14	Ni-59	Co-60	Ni-63	Nb-94	Tc-99	
1	3.98E-04	2.83E-02	8.03E+02	2.93E+03	9.90E+04	2.80E-02	8.35E-01	1.98E+07
2	1.93E-07	2.22E-03	6.66E+01	7.63E+01	8.34E+03	2.20E-03	4.37E-02	1.63E+06
3	2.79E-07	2.52E-03	3.76E+00	6.97E+01	2.77E+02	2.49E-03	4.11E-02	1.88E+05
4	2.34E-10	2.37E-04	2.97E-01	6.53E+00	1.98E+01	5.35E-02	4.43E-03	1.61E+04

IV. 방사화 재고량의 국내·외 기준 적용

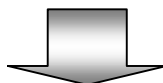
(1) 10 CFR 61.55 기준에 적용

원자로 압력용기에 대한 각 핵종별 방사화 재고량의 계산 결과 장반감기 핵종과 단반감기 핵종이 모두 섞여 있음을 알 수 있다. 따라서 10 CFR 61.55 (5)의 규정을 적용하여 폐기물 분류작업을 수행해야 한다. 적용 대상 부분은 계산된 부분중 가장 방사화가 높은 Cell 1부분을 우선적으로 적용해 보았다. 장반감기 핵종(C-14, Ni-59, Nb-94, Tc-99)의 경우 표1에서 제시한 값의 0.1배를 초과하지 않으므로 압력용기에 대한 폐기물 분류는 표2에서 제시한 핵종의 농도로서 결정해야 한다. 표2에서 제시한 핵종(H-3, Co-60, Ni-63)에 적용해본 결과 압력용기의 방사화 재고량이 표2의 Column 1의 값을 초과하지 않음을 알 수 있다. 따라서 고리1호기 원자로 압력용기에 대한 폐기물분류는 Class A 폐기물로 분류 할 수 있을 것이다.

[Ci/m³]

Radionuclide	Cell 1	농도기준1	농도기준1의 0.1배	비 고
C-14	5.98E-06	80	8	표1에서 제시한 값의 0.1배를 초과하지 않을 경우 폐기물 분류는 표2에서 제시한 핵종의 농도로 결정
Ni-59	1.70E-01	220	22	
Nb-94	5.91E-06	0.2	0.02	
Tc-99	1.76E-04	3	0.3	

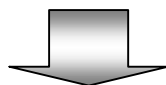
※ 농도기준1 : 장반감기 핵종을 가진 폐기물의 농도기준



[Ci/m³]

Radionuclide	Cell 1	농도기준2	비 고
H-3	8.42E-08	40	표2의 Column (1)에서 제시한 값을 초과하지 않을 경우 Class A 폐기물로 분류
Co-60	6.19E-01	700	
Ni-63	2.09E+01	35	

※ 농도기준2 : 단반감기 핵종을 가진 폐기물의 농도기준



Class A 폐기물

그림 6. 10 CFR 61에 기준한 압력용기 Cell 1에서의 폐기물 분류

(2) 국내 방사성폐기물분류기준에 적용

우선 국내 연구용 원자로의 폐로사업에 사용된 방사성폐기물 분류기준(표3)을 적용해보았다. 고준위 폐기물과 중저준위 폐기물을 구분하는 기준은 ‘반감기 20년 이상의 알파선 방출 핵종 농도가 4,000 Bq/g’이다. MCNP/ORIGEN 계산결과에서 나타나는 주요 핵종들은 모두 β 혹은 γ 방출 핵종들이다. 따라서 원자로 압력용기에 대한 폐기물 분류는 중·저준위 폐기물로 분류할 수 있을 것이다.

두 번째로 국내 연구용 원자로의 폐로사업에 사용된 해체폐기물 분류기준(표4)을 적용해보았다.

압력용기에서의 주요 방사성핵종 농도[Bq/g]		IAEA에서 제시하는 A ₂ 값 [Bq]
C-14 : 2.83E-02	<	C-14 : 3.00E+12
Co-60 : 2.93E+03		Co-60 : 4.00E+11
Ni-63 : 9.90E+04		Ni-63 : 3.00E+13
Nb-94 : 2.80E+02		Nb-94 : 7.00E+11
Tc-99 : 8.35E-01		Tc-99 : 9.00E+11
	2.00E-03	×

그림 7. 국내 해체폐기물 분류기준에 의한 Cell 1에서의 폐기물 분류

그림7에 나타나듯이 좌변의 압력용기에서의 주요 방사성핵종 농도 값이 우변의 계산 값보다 작음을 알 수 있다. 이 결과로 원자로 압력용기 자체가 저준위 폐기물로 분류된다고 판단할 수는 없다. 하지만 각 핵종별로 고려할 때는 저준위 방사성폐기물로의 분류해도 무방할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 원자로 압력용기의 방사화 재고량을 계산하기 위해서 MCNP/ORIGEN 체계를 구축하였다. 본 체계의 타당성을 검증하기 위해 고리 1호기 1주기 노심의 주기초(BOL)에 대한 노심계산을 수행하여 노심 평면 출력분포를 산정한 후 이를 FSAR 값과 비교하였다. 선원의 분포를 산출하기 위해 KCODE를 실행시켰을 때 K_{eff}값은 임계 값인 1.0에 근접하고 있어 모델링이 적절하다는 것을 입증할 수 있다. 또한 MCNP로부터 산출된 노심 평면 출력분포와 FSAR에서 제시하는 고리 1호기 초기노심(BOL)의 평면출력 분포에서 상호간의 오차는 RMSE(Root Mean Square Error)값이 4.377 % 이내로서 본 연구에 적용된 MCNP의 모델링이 매우 타당함을 알 수 있다.

본 연구에서 압력용기의 폐기물 구분을 10 CFR 61과 국내 규정에 적용해 보았다. 10 CFR 61에 적용한 결과 압력용기의 방사능이 가장 높은 지점에서 10 CFR 61의 기준을 초과하지 않으므로 Class A 폐기물로 분류할 수 있다. 국내 과기부고시 02-01에 적용한 결과 압력용기에서의 주요 핵종들은 β 혹은 γ 방출 핵종이므로 중·저준위 방사성폐기물로 분류할 수 있을 것이다.

향후 계산결과에 대한 정확도를 검증하기 위해서는 시료채취분석을 통한 측정농도와 전산코드에 의한 계산된 핵종농도를 비교 분석해야 할 것으로 판단된다.

10 CFR 61의 규정에는 폐기물 분류 방법에 대해 상세하게 기술되어 있으나 국내 규정에는 단

지 고준위와 중·저준위 폐기물에 대한 구분밖에 기술되어 있지 않다. 국내 연구용 원자로를 해체하는 과정에서 IAEA 보고서를 바탕으로 방사성폐기물 분류기준을 제시하였지만, 앞으로 발생할 수많은 방사성폐기물을 처리·처분하기 위해서는 좀더 확실하고 상세한 법률적 체계가 마련되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 박광현 외, “원자력시설 해체 사고해석에 관한 연구,” KINS/HR-385, 한국원자력안전기술원(2001).
- [2] 박광현 외, “원자력시설 해체 사고해석에 관한 연구,” KINS/HR-445, 한국원자력안전기술원(2002).
- [3] 황주호 외, “TRIGA연구로 폐로 선원항 평가 및 폐기물 처리 요건 연구”, KINS/HR-278, 한국원자력안전기술원, 경희대학교(1999).
- [4] “Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants, Edwin I. Hatch Nuclear Plant, Units 1 and 2”, http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1437/supplement4/index.html#_1_1 NUREG-1437(2001).
- [5] 10CFR61, “Licensing Requirement for Land Disposal of Radioactive Waste”, Code of Federal Regulation(CFR), Office of Federal Register(1982).
- [6] 과학기술부고시 제 02-01호, “방사선 방호등에 관한 기준”,(2002).
- [7] 박승국 외, “연구로 1,2호기(TRIGA Mark-II&III)의 해체 방사성 고체폐기물 처리방안”, KAERI/TR-1341/99, 한국원자력연구소(1996).
- [8] 과학기술부고시 제 96-38호, “방사성물질등의 포장및운반에관한규정”(1996).
- [9] 과학기술부고시 제 98-12호, “방사선량 등을 정하는 기준”(1998).
- [10] IAEA, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. ST-1(1996).