

Study on Decay Characteristics Change of Spent Fuel Materials by DUPIC Fuel Cycle

Jong-Won Choi, Won-Il Ko, Jae-Sol Lee, Hyun-Soo Park

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 21 March 1996; Accepted 19 May 1996)

DUPIC 핵연료주기에 의한 사용후 경수로 핵연료의 방사선적 특성변화 분석

최종원, 고원일, 이재설, 박현수
한국원자력연구소

Abstract—The change in spent fuel characteristics by DUPIC fuel cycle(burnup of spent PWR fuel again in CANDU) is examined with time elapse since discharge. Major characteristics examined include isotopic concentration, radioactivity, decay heat, radiotoxicity and radiation source-term of spent fuel material, which is existing in a type of spent PWR and DUPIC fuel. Behaviors of major nuclides contributing to such changes are also analyzed in terms of radionuclide concentration.

From the analysis, the change in radionuclide concentration by DUPIC shows approximately 2% decrease in actinides concentration and 20% increase in fission products concentration. Radioactivity and decay heat of spent DUPIC fuel does not depend upon radionuclides concentrations, which is a unique in sence of general characteristics of spent fuel.

In terms of gamma spectrum, spent DUPIC fuel shows lower values than that of spent PWR fuel by 40 to 50% in the range of 0.01~0.575 MeV but much higher over 3.5 MeV. Neutron intensities of both spent fuels are mainly determined by (α , n) reaction and spontaneous fission reaction of actinides. Of them, especially, the spontaneous fission reaction is a major neutron source-term, which causes that neutron intensities of spent DUPIC fuel having ~3.3 times higher Cm-244 concentration are ~4 times higher than that of spent PWR fuel.

요약—DUPIC 핵연료주기로 인해 변화되는 경수로 사용후 핵연료 물질의 핵종별 농도, 방사능, 붕괴열, 위해지수 및 방사선원항등을 시간의 함수로 그 변화특성을 분석하고, 각 인자별로 크게 영향을 미치는 주요 핵종의 거동을 물질농도 측면에서 추적 분석 평가하였다.

방사성물질 농도에 있어서 연소도 19,000 MWD/MTU의 사용후 DUPIC 핵연료에 존재하는 악티나이드 양은 연소도 35,000 MWD/MTU의 경수로 사용후 핵연료에 비해 약 2% 감소한 반면, 핵분열생성물의 양은 약 20% 증가된 것으로 나타났다. 그리고 사용후 DUPIC 핵연료의 방사능 및 붕괴열은 일반적인 사용후 핵연료 특성과는 달리, 방사성물질 농도 변화와 비례하지 않는 것으로

나타났다.

사용후 DUPIC핵연료가 갖는 감마 스펙트럼을 경수로핵연료의 경우와 비교해 볼 때, 전체적인 특징은 사용후 DUPIC핵연료의 경우가 0.01~0.575 MeV의 낮은 에너지 범위에서는 경수로핵연료보다 약 40~50% 낮은 감마선 세기를 보여주고 있으나, 3.5 MeV이상의 높은 에너지 범위에서는 사용후 DUPIC핵연료의 감마선 세기가 훨씬 크게 나타났다. 중성자 선원함은 모두 악티나이드 물질의(α, n)반응 및 자발핵분열에 의해 결정되고 있고, 특히 Cm-244의 자발 핵분열에 의한 중성자 선원이 지배적인 것으로 나타났다. 이런 이유 때문에 Cm-244의 농도가 약 3.3배 큰 사용후 DUPIC핵연료의 중성자 선원이 경수로핵연료보다 4배 이상 크게 나타났다.

서 론

경·중수로 연계핵연료주기(Direct Use of spent PWR fuel In Candu)는 사용후 경수로핵연료를 직접 재가공하여 중수로 연료로 재사용하고자 하는 새로운 후행핵연료주기 개념이다. 경수로는 약 3.5% ^{235}U 의 저농축 우라늄을 연료로 하고 경수를 냉각 및 감속재로 사용하고 있다. 그리고 중수로는 경수로와 달리 천연우라늄을 연료로 하고 중수를 냉각 및 감속재로 사용하고 있는 것이 특징이다. 경수로 사용후핵연료에는 핵분열 반응으로 생성된 핵분열생성물과 중성자포획 반응으로 생성된 악티나이드족 물질등이 존재하고 있는데, 이 중에는 연소되고 남은 ^{235}U 와 ^{239}Pu , ^{241}Pu 등의 핵분열 물질도 포함되어 있다. 이와같은 핵분열물질의 양을 중원소의 무게함량비로 환산할 경우 그 값은 핵연료의 초기 농축도 및 연소도에 따라 다르나 대체적으로 30~40 GWD/MTU의 연소 범위에서 1.1%~1.4%에 해당하는 농축도를 나타낸다. 이러한 핵분열물질의 함량은 천연우라늄의 ^{235}U 함량인 0.7% 보다 크기 때문에 경수로 사용후 핵연료를 중수로 연료로 재 사용할 수 있는 기술적 가능성은 충분한 것으로 평가되고 있다[1~3]. 이와같은 기술적 타당성에 근거하여 원자력발전국중 세계에서 유일하게 경수와 중수를 동시에 보유하고 있는 우리나라는 1990년부터 한국원자력연구소를 중심으로 캐나다, 미국과 DUPIC핵연료주기 기술 개발에 대한 공동연구를 추진중에 있다[1~2].

DUPIC핵연료주기에는 사용후 경수로핵연료의 해체에서 부터 신DUPIC연료 제조, 중수로 장전 및 사용후 DUPIC연료관리 등 일련의 모든 과정을 포함하고 있는데, 여기에는 각 단계별로 방사선적,

열적 특성이 다른 핵연료 즉, 경수로 사용후핵연료, 신 DUPIC핵연료 및 사용후 DUPIC핵연료등 이 존재한다. 이렇게 3 가지의 다른 특성을 가진 핵연료를 대상으로 하는 DUPIC핵연료주기의 기술성 및 안전성분석에는 각 단계별로 주어지는 핵연료의 특성에 따른 주요 입력인자들이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 경수로와 중수로의 연계에 따른 사용후 경수로핵연료 및 DUPIC핵연료의 핵종별 농도, 방사능, 붕괴열, 위해지수 및 방사선 원형을 시간의 함수로 그 변화특성을 분석하고, 각 인자별로 크게 영향을 미치는 주요핵종의 거동을 물질농도 측면에서 추적·분석평가 하였다.

계산방법

계산 및 분석에 사용한 코드는 방사선원항 평가 코드로 잘 알려진 ORIGEN2[4]이며, 가정된 기준 연료의 조건 및 입력자료는 표 1에 제시된 바와 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이, ORIGEN2계산에서 모사된 경수로 핵연료의 연소조건은 연간 이용률 80%를 기준으로 각 주기당 293일 동안 38 MW/MTU의 비출력 100%로 가정하였으며, 전체 3주기동안에 2번의 핵연료 교체기간을 각 100일로 가정하여 이 기간동안에는 자연붕괴 상태로 유지시켰다. 또한, 경수로핵연료의 집합체중 유효 연료봉부분(active fuel length)과 이 범주에 속하는 안내관, 계수관 및 지지격자등은 원자로내 중성자속의 100%로 조사되도록 하였으며, 연료봉 끝부분(plenum spring과 end cap)은 약 4%의 중성자속에 그리고 집합체의 bottom/end plate는 약 1%의 중성자속에 조사되도록 설정하였다. 상기조건하에서 연소된 사용후 경수로핵연료의 평균 배출연소도는

35,000 MWD/MTU이며 사용후경수로핵연료는 소내저장시설에서 10년간의 저장기간을 거친후에 DUPIC핵연료 제조시설로 이송되는 것으로 가정하였다.

DUPIC핵연료의 제조과정 특성상 사용후 경수로핵연료 펠렛은 약 400~1200°C 온도범위에서 반복적인 산화/환원과정($UO_2 \leftrightarrow U_3O_8$)을 거치는 동안 UO_2 분말형태로 변화되고, 이때 핵연료물질 내에 존재하고 있던 휘발성 및 준휘발성 핵분열 생성물들은 표 2에 가정된 누출율에 따라 핵연료 분말로부터 제거되기 때문에 신 DUPIC핵연료물질에는 U-235, Pu-239/241 등의 핵분열물질 1.43 wt%를 포함하는악티나이드계 물질 20여종과 휘발되지 않은 잔여 핵분열생성물 132여종을 핵연료물질의 불순물로 구성하였다.

신 DUPIC핵연료의 중수로내 연소 모사는 표 1에 주어진바와 같이 기존의 CANDU-6원자로에서 비출력 25.5 MW/MTU으로 745일 동안 평균 19,000 MWD/MTU의 배출연소도를 갖도록 설정하였다.

Table 1. Irradiation conditions of spent PWR and DUPIC fuel.

Parameter	Spent PWR fuel	Spent DUPIC fuel
Enrichment(wt% of fissile)	3.5(U-235)	1.43(Fissile content ^c)
Discharge burnup(MWD/MTU)	35,000	19,000
Cooling time(year)	10	10
Specific power(MW/MTU)	38	25.5
Capacity factor	0.8	0.9
EFPP ^a per cycle(days)	293	745
Others	Natural Decay ^b	-

^a Effective Full Power Rate

^b Natural decay time per refueling : 100 days/refueling

^c U-235 + U-239 + Pu-241

계산 결과 및 토의

방사성물질 농도

표 2는 연소도 35,000 MWD/MTU을 가진 사용후 경수로핵연료가 10년 냉각된 후 DUPIC연료로 제조된 신 DUPIC핵연료와 19,000 MWD/MTU의 연

소도와 10년의 냉각기간을 가진 사용후 DUPIC핵연료의 방사성물질의 농도를 보여주는 것이다.

사용후 경수로핵연료에 존재하고 있는 악티나이드계 물질들은 DUPIC핵연료 제조과정에서 휘발되는 것이 없기 때문에 신 DUPIC핵연료내의 악티나이드계 물질의 양과 같지만, 사용후 DUPIC핵연료에 존재하는 악티나이드 양은 위 두가지 핵연료와 비교해 볼때, U-236은 17.4%, Np-237은 4%, Pu-238은 143%, Pu-240은 31%, Pu-242은 182%, Am-243은 165% 그리고 Cm-244은 약 330% 증가된 것으로 나타났다. 반면, 핵분열물질(fissile)인 U-235, Pu-239, Pu-241등은 약 34~85% 감소되어 나타났다. 이러한 경향은 경수로에서 중수로에 이르는 동안 동일 핵연료물질의 누적연소 효과에 기인된 것으로 핵분열물질들은 핵분열생성물로 전환되었고, 그외의 악티나이드계 물질들은 중성자 흡수반응, 알파붕괴등의 각 원소별 고유의 붕괴특성에 따른 핵변환에 의한 것으로 해석된다. 따라서 전체적인 악티나이드계 물질의 양적인 측면에서는 재활용목적의 DUPIC핵연료주기가 직접 처분 경우의 사용후 경수로핵연료에 비해 약 2.1%의 소멸효과를 가져다 준 것으로 평가될 수 있지만, 사용후 DUPIC핵연료에 경수로핵연료보다 많이 존재하고 있는 Pu-238 및 Cm-244등은 다음 장에서 논의될 방사능의 장기적 붕괴특성 거동 및 방사선 선원항 평가에 큰 변수로 작용하고 있다.

핵분열생성물의 경우에는 사용후 DUPIC핵연료에 존재하는 핵분열생성물중 몇원소를 제외하고는 대체로 사용후 경수로핵연료에 비해 약 20% 크게 나타나고 있다. DUPIC핵연료의 제조과정에서 제거되었던 휘발성(H-3, Kr, I, Xe등)/준휘발생물질(Ru, Cs, Zr, Sb, Ba, La등)의 양이 이미 경수로의 연소과정에서 생성되었던 핵분열생성물 총량의 33%에 해당된다는 것을 고려하면, 사용후 DUPIC핵연료에 존재하는 핵분열생성물의 양은 경수로 사용후핵연료에 존재하는 것들 보다는 약 52% 증가된 것으로 평가된다. 이와같은 실제적 증가율은 경수로의 연소도(35,000 MWD/MTU)와 중수로의 연소도(19,000 MWD/MTU)의 비와 일치하고 있는데, 이것은 방사성물질의 농도변화가 경수로와 중수로의 연계과정에서의 누적 연소효과에 기인된

Table 2. Radionuclide Concentration of Spent PWR Fuel, and Fresh and Spent DUPIC Fuel.

(unit : g/MTHM)

Nuclide	$T_{1/2}(y)$	S-PWR	F-DUPIC	S-DUPIC	release,%	Nuclide	$T_{1/2}(y)$	S-PWR	F-DUPIC	S-DUPIC	release,%
U-234	2.47E+05	2.00E+0.2	2.00E+0.2	1.72E+02		Mo-94	-	-	-	3.21E+02	
U-235	7.10E+08	8.19E+03	8.19E+03	1.23E+03		Zr-94	-	7.95E+02	7.15E+02	1.00E+03	10
U-236	2.39E+07	4.36E+03	4.36E+03	5.12E+03		Nb-94	2.00E+04	7.48E-04	7.48E-04	6.57E-04	
U-238	4.51E+09	9.41E+05	9.41E+05	9.29E+05		Mo-95	-	8.06E+02	8.06E+02	8.91E+02	
Np-237	2.14E+06	5.23E+02	5.23E+02	5.43E+02		Zr-96	3.60E+17	8.52E+02	7.67E+02	5.27E+02	10
Np-239	2.35d	7.84E-05	7.84E-05	2.08E-04		Mo-96	-	3.90E+01	3.90E+01	6.57E+02	
Pu-238	8.64E+01	1.54E+02	1.54E+02	3.74E+02		Mo-97	-	8.40E+02	8.40E+02	7.78E+02	
Pu-239	2.44E+04	5.33E+03	5.33E+03	3.11E+03		Mo-98	-	8.63E+02	8.63E+02	1.34E+03	
Pu-240	6.58E+03	2.20E+03	2.20E+03	2.88E+03		Tc-99	2.12E+05	8.22E+02	8.22E+02	4.49E+02	
Pu-241	1.32E+01	7.52E+02	7.52E+02	4.94E+02		Ru-101	-	8.12E+02	0.00E+00	4.64E+02	100
Pu-242	3.79E+05	4.57E+02	4.57E+02	1.29E+03		Ru-102	-	8.09E+02	0.00E+00	4.72E+02	100
Am-241	4.58E+02	4.97E+02	4.97E+02	3.68E+02		Ru-104	-	5.55E+02	0.00E+00	4.15E+02	100
Am-243	7.95E+03	9.13E+01	9.13E+01	2.41E+02		Mo-100	3.00E+17	9.84E+02	9.84E+02	8.92E+02	
Cm-243	3.20E+01	2.94E-01	2.94E-01	2.02E+00		Rh-103	-	4.66E+02	4.66E+02	4.36E+02	
Cm-244	1.76E+01	1.85E+01	1.85E+01	7.94E+01		Pd-104	-	2.44E+02	2.44E+02	6.56E+02	
Cm-245	9.30E+03	9.50E-01	9.50E-01	1.38E+00		Pd-105	-	3.83E+02	3.83E+02	5.49E+02	
Cm-246	5.50E+03	1.10E-01	1.10E-01	1.64E+00		Rh-102	2.9	6.95E-05	6.95E-05	4.49E-06	
Total	-	9.64E+05	9.64E+05	9.44E+05		Pd-106	-	3.61E+02	3.61E+02	7.88E+02	
H-3	1.23E+01	3.35E-02	0.00E+00	2.08E-02	100	Pd-107	7.00E+06	2.18E+02	2.18E+02	2.16E+02	
Kr-85	1.08E+01	1.33E+01	0.00E+00	6.83E+00	100	Ag-107	-	2.59E-04	2.59E-04	3.01E+01	
Rb-85	-	1.18E+02	1.18E+02	3.20E+02		Pd-108	-	1.50E+02	1.50E+02	1.58E+02	
Rb-87	4.80E+10	2.64E+02	2.64E+02	2.12E+02		Cd-108	-	2.86E-04	2.86E-04	3.38E+02	
Sr-88	-	3.79E+02	3.79E+02	8.45E+02		Ag-109	-	7.49E+01	7.49E+01	1.18E+02	
Y-89	-	4.95E+02	4.95E+02	6.83E+02		Pd-110	-	4.90E+01	4.90E+01	2.19E+02	
Sr-90	27.7	4.54E+02	4.54E+02	1.79E+02		Cd-110	-	3.47E+01	3.47E+01	8.14E+01	
Zr-90	-	1.47E+02	1.32E+02	1.84E+03	10	Cd-111	-	2.73E+01	2.73E+01	3.74E+01	
Zr-91	-	6.38E+02	5.74E+02	6.47E+02	10	Cd-112	-	1.63E+01	1.63E+01	3.99E+01	
Zr-92	-	6.89E+02	6.20E+02	8.98E+02	10	Cd-113	1.30E+15	1.50E-01	1.50E-01	4.44E-02	
Zr-93	1.50E+06	7.72E+02	6.95E+02	3.47E+02	10	In-113	-	1.10E-01	1.10E-01	6.07E-02	
Mo-92	4.00E+18	-	-	5.01E+02		Cd-114	-	2.19E+01	2.19E+01	5.81E+01	

*1.00E+02=1.00×10²

*Note : S-PWR=Spent PWR Fuel, F-DUPIC=Fresh DUPIC Fuel, S-DUPIC=Spent DUPIC Fuel

Table 2. Continued

(unit : g/MTHM)

Nuclide	$T_{1/2}(y)$	S-PWR	F-DUPIC	S-DUPIC	release,%	Nuclide	$T_{1/2}(y)$	S-PWR	F-DUPIC	S-DUPIC	release,%
Sn-114	-	1.42E-03	1.42E-03	4.02E-04		Cs-137	30	1.00E+03	-	5.57E+02	100
In-115	6.00E+14	2.33E+00	2.33E+00	1.28E+00		Ba-134	-	1.71E+02	1.54E+02	1.09E+02	10
Sn-115	-	3.10E-01	3.10E-01	1.30E-01		Ba-135	-	3.20E-01	2.90E-01	1.03E+02	10
Cd-116	1.00E+17	8.05E+00	8.05E+00	3.69E+00		Ba-136	-	2.00E+01	1.80E+01	1.45E+02	10
Sn-116	-	7.07E+00	7.07E+00	1.82E+01		Ba-137	-	3.05E+02	2.75E+02	3.42E+02	10
Sn-117	-	8.11E+00	8.11E+00	1.05E+01		Ba-138	-	1.36E+03	1.22E+03	1.91E+03	10
Sn-118	-	8.24E+00	8.24E+00	2.54E+01		La-138	1.12E+11	6.25E-03	5.60E-03	2.02E-03	10
Sn-119	-	8.19E+00	8.19E+00	3.69E+00		La-139	-	1.29E+03	1.17E+03	1.77E+03	10
Sn-120	-	8.36E+00	8.36E+00	3.32E+01		Ce-140	-	1.32E+03	1.32E+03	2.98E+03	
Sb-121	-	8.13E+00	7.21E+00	3.76E+00	11	Pr-141	2.00E+16	1.19E+03	1.19E+03	1.69E+03	
Sn-122	-	9.20E+00	9.20E+00	8.35E+00		Ce-142	5.00E+16	1.20E+03	1.20E+03	8.96E+02	
Te-122	-	5.65E-01	5.65E-01	1.24E+01		Nd-142	-	2.77E+01	2.77E+01	1.15E+03	
Sb-123	1.30E+16	1.01E+01	8.92E+00	4.59E+00	11	Nd-143	-	8.33E+02	8.33E+02	3.87E+02	
Sn-124	2.00E+17	1.25E+01	1.25E+01	5.75E+00		Nd-144	2.40E+15	1.41E+03	1.41E+03	2.35E+03	
Te-124	-	4.24E-01	4.24E-01	2.66E+01		Nd-145	6.00E+16	7.15E+02	7.15E+02	6.42E+02	
Sb-125	2.71	1.12E+00	9.92E-01	6.70E-01	11	Nd-146	-	7.30E+02	7.30E+02	1.22E+03	
Te-125	-	1.77E+01	1.77E+01	4.46E+01		Sm-147	1.05E+11	2.07E+02	2.07E+02	1.92E+02	
Sn-126	1.00E+05	2.77E+01	2.77E+01	1.57E+01		Nd-148	-	3.91E+02	3.91E+02	4.57E+02	
Te-126	-	7.70E-01	7.70E-01	9.28E+01		Sm-148	2.00E+14	1.82E+02	1.82E+02	2.49E+02	
Te-128	-	1.14E+02	1.14E+02	2.27E+02		Nd-150	1.00E+16	1.84E+02	1.84E+02	3.60E+02	
Te-130	8.00E+20	3.70E+02	3.70E+02	3.95E+02		Sm-150	-	3.26E+02	3.26E+02	2.65E+02	
I-129	1.70E+07	1.85E+02	-	1.07E+02	100	Sm-152	-	1.36E+02	1.36E+02	1.83E+02	
Xe-128	-	3.15E+00	-	1.23E+01	100	En-153	-	1.26E+02	1.26E+02	1.46E+02	
Xe-130	-	1.24E+01	-	1.47E+01	100	Sm-154	-	3.81E+01	3.81E+01	2.34E+02	
Xe-131	-	4.46E+02	-	2.55E+02	100	Eu-154	16	1.60E+01	1.60E+01	2.32E+01	
Xe-132	-	1.14E+03	-	6.38E+02	100	Gd-154	-	2.23E+01	2.23E+01	3.57E+01	
Xe-134	-	1.56E+03	-	8.40E+02	100	Gd-156	-	5.98E+01	5.98E+01	3.79E+02	
Xe-136	-	2.44E+03	-	1.48E+03	100	Gd-158	-	1.82E+01	1.82E+01	7.18E+01	
Cs-133	-	1.19E+03	-	6.46E+02	100	Tb-159	5.00E+16	2.57E+00	2.57E+00	2.54E+00	
Cs-134	2.05	4.53E+00	-	2.04E+00	100	FP Total	-	3.61E+04	2.39E+04	4.29E+04	
Cs-135	3.00E+06	3.46E+02	-	8.56E+01	100	Total	-	1.00E+06	9.88E+05	9.87E+05	

*Note : S-PWR=Spent PWR Fuel, F-DUPIC=Fresh DUPIC Fuel, S-DUPIC=Spent DUPIC Fuel

것임을 시사해 주는 것이다. 핵분열생성물의 농도 증가에 기여한 원소들은 주로 Sr-88, Zr-90, Mo-92/94/96/98, Pd-104/106, Cd-108/110/112/114, Ce-140 및 Nd-144/146등과 같은 금속원소들이며, 이들의 농도가 경수로 사용후핵연료에 비해 상당히 증가되었음을 알 수 있다. 이들은 이미 경수로 사용후핵연료물질내에 핵분열생성물로 존재하던 것들이 중수로 연소과정에서 핵변환된 것이며, 이들은 연소이후 10년의 냉각 기간동안 자연붕괴되어 대부분이 이미 방사성 동위원소가 아님을 알 수 있다.

방사능 및 붕괴열

그림 1~2는 사용후 경수로핵연료와 사용후 DUPIC핵연료의 방사능과 붕괴열이 시간에 따라 지수함수적으로 감소되고 있는 것을 보여주고 있다. 사용후핵연료의 총 방사능 및 붕괴열의 시간에 따른 변화도를 살펴보면, 약 100년까지는 핵분열 생성물에 의해 주도적으로 지배되고 있으며 그 이후 200년 부터는 악티나이드에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 일반적으로 사용후핵연료의 붕괴특성 변화도에서 보여주는 것과 유사하다. 그러나 경수로 사용후핵연료와 사

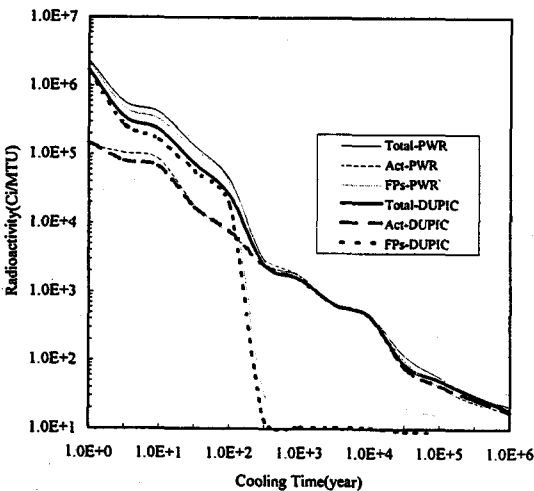


Fig. 1. Radioactivity of Spent PWR Fuel with 35,000 MWD/MTU and Spent DUPIC Fuel with 19,000 MWD/MTU.

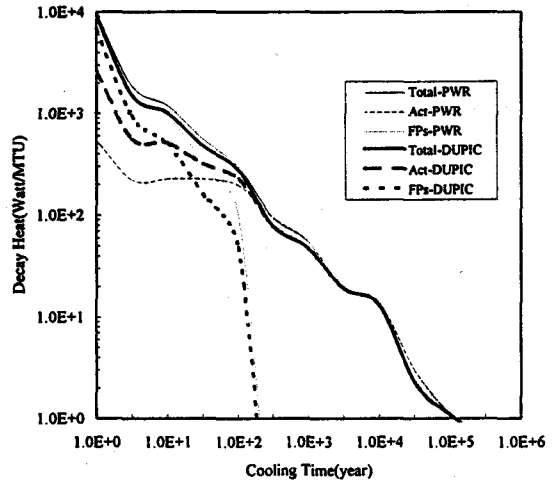


Fig. 2. Decay Heat of Spent PWR Fuel with 35,000MWD/MTU and Spent DUPIC Fuel with 19,000MWD/MTU.

용후 DUPIC핵연료의 방사능적 붕괴특성을 비교해 볼때, 방사능 및 붕괴열의 총양은 대체적으로 사용후 경수로핵연료의 경우가 크게 나타나보이지만 그에 기여하는 악티나이드의 방사능과 붕괴열은 다소 차이를 보여 주고 있다.

악티나이드 원소에 의한 방사능의 경우, 사용후 경수로핵연료가 약 30년까지는 주로 Pu-241, Am-241, Cm-244등에 의해 약 15~20%정도 크게 나타나고 있으나 100년 이후부터는 거의 같은 값을 보여주고 있다. 그리고 핵분열 생성물의 경우에는 DUPIC사용후 핵연료의 핵분열생성물의 방사능 농도가 경수로에 비해 물질농도 측면에서는 20% 크다 할지라도, 냉각시간 100년 까지는 사용후 DUPIC핵연료가 경수로핵연료 방사능의 약 50~70%에 해당하는 값을 보여주고 있다. 이에대한 이유는 증가된 물질농도의 약 12%가 비방사성 원소이며, 경수로사용후핵연료 핵분열생성물 방사능의 약 34%(비방사능이 큰 Cs경우 27%, 전체 방사능의 24%)에 해당하는 원소가 DUPIC핵연료 제조과정에서 제거되었던(휘발성 및 준휘발성생성물에 의한 방사능)것에 기인된 것으로 해석된다.

표 3은 10년 냉각된 경수로사용후핵연료와 DUPIC사용후핵연료의 주요핵종별 방사능농도를 보

Table 3. Concentration of Radionuclides Contained in Spent PWR Fuel with 35,000MWD/MTU, and DUPIC Fuel with 19,000MWD/MTU at 10 years after Discharge.

(unit : g/MTHM)

Actinide	Concentration		Fission Product	Concentration	
	PWR	DUPIC		PWR	DUPIC
U-234	2.00E+02	1.72E+02	Kr-85	1.33E+01	5.62E+00
U-235	8.19E+03	1.23E+03	Sr-90	4.54E+02	1.79E+02
U-236	4.36E+03	5.12E+03	Y-90	1.40E-01	4.45E-02
U-238	9.41E+05	9.29E+05	Tc-99	8.22E+02	4.49E+02
Np-237	5.23E+02	5.43E+02	Ru-106	1.60E-01	1.67E-01
Pu-238	1.54E+02	3.74E+02	Cs-134	4.53E+00	2.04E+00
Pu-239	5.33E+03	3.11E+03	Cs-137	1.00E+03	5.57E+02
Pu-240	2.20E+03	2.88E+03	Ba-137	3.05E+02	1.61E+02
Pu-241	7.52E+02	4.94E+02	Pm-147	1.04E+01	6.28E+00
Am-241	4.97E+02	3.68E+02	Sm-151	1.37E+01	2.32E+00
Am-243	9.13E+01	2.02E+00	Eu-154	1.60E+01	8.66E+00
Cm-243	2.94E-01	2.41E+02	Eu-155	3.26E+00	1.70E+00
Cm-244	1.85E+01	7.94E+01	Sub.total	3.61E+04	1.94E+04
Sub.total	9.64E+05	9.44E+05	Total	1.00E+06	9.63E+05

여주고 있다. 이표에서 알수 있듯이, 사용후 DUPIC핵연료에 존재하고 있는 악티나이드 원소중 U-236, Pu-238/240, Am-243, Cm-244등의 방사능은 경수로핵연료에 존재하는 해당 핵종들의 방사능에 비해 앞절에서 언급한 방사성물질 농도와 동일한 비율로 큰 값을 보여주고 있다. 그러나 악티나이드에 의한 총 방사능은 사용후 경수로핵연료의 경우가 약 22% 크게 나타나고 있는데 이는 주로 Pu-241 및 Am-241에 기인된 것으로 나타났다. 그리고 핵분열 생성물에 있어서는 DUPIC핵연료에 존재하는 Sm-151, Eu-154/155의 방사능이 경수로보다 크게 나타났으나 경수로핵연료에 존재하는 Cs-137/Ba-137m의 영향으로 총 방사능측면에서는 사용후DUPIC핵연료가 약 45% 작게 나타났다.

붕괴열의 경우에는 사용후 경수로핵연료와 사용후 DUPIC핵연료간에 큰 차이는 보여주지 않고 있다. 사용후 경수로핵연료의 경우, 표 2에서 언급된 방사능 붕괴특성과 같이 냉각초기 단계에서

는 핵분열생성물에 의한 영향이 지배적으로 나타나고 있지만, 사용후 DUPIC핵연료의 경우에는 냉각초기 단계에서부터 악티나이드에 의한 영향이 크게 미쳐 전체 붕괴열량에 미치는 악티나이드와 핵분열생성물의 기여도는 각각 다르게 나타나고 있다. 약 100년 이후에는 악티나이드에 의한 기여도가 사용후 경수로핵연료 경우에는 약 66% 이상, DUPIC핵연료의 경우에는 약 83% 이상인 것으로 나타났다. 이와같은 악티나이드의 기여도에 영향을 크게 미치는 원소들은 주로 Pu-238, Am-241, Cm-244등인 것으로 나타났다(표 4 참조).

섭취위해지수

그림 3은 사용후 경수로핵연료와 DUPIC핵연료가 갖고 있는 섭취위해지수를 사용후핵연료의 냉각시간에 따라 나타낸 것이다. 전체적인 시간에 따른 감소 유형은 앞에서 언급한 방사능 및 붕괴열의 붕괴특성과 유사하나 각 핵종의 방사능 독성도(ra-

Table 4. Decay Heat of Radionuclides Contained in Spent PWR Fuel with 35,000MWD/MTU, and DUPIC Fuel with 19,000MWD/MTU at 10 years after Discharge.

(unit : Watts/MTHM)

Actinides	Decay Heat		Fission Products	Decay Heat	
	PWR	DUPIC		PWR	DUPIC
U-234	3.16E-02	3.10E-02	Kr-85	7.84E+00	3.35E+00
U-235	4.64E-04	6.99E-05	Sr-90	7.20E+01	2.84E+01
U-236	7.65E-03	8.97E-03	Y-90	3.44E+02	1.36E+02
U-238	8.03E-03	7.92E-03	Tc-99	-	-
Np-237	1.13E-02	1.17E-02	Ru-106	-	-
Pu-238	8.72E+01	2.12E+02	Cs-134	5.97E+01	2.69E+01
Pu-239	1.02E+01	5.96E+00	Cs-137	9.62E+01	5.36E+01
Pu-240	1.56E+01	2.05E+01	Ba-137m	3.23E+02	1.80E+02
Pu-241	2.40E+00	1.58E+00	Pm-147	-	6.41E-02
Am-241	5.67E+01	4.19E+01	Sm-151	-	-
Am-243	5.90E-01	1.55E+00	Eu-154	3.86E+01	5.62E+01
Cm-243	5.60E-01	3.83E+00	Eu-155	1.11E+00	1.55E+00
Cm-244	5.24E+01	2.25E+02	Sub.total	9.56E+02	4.96E+02
Sub.total	2.26E+02	5.13E+02	Total	1.18E+03	1.01E+03

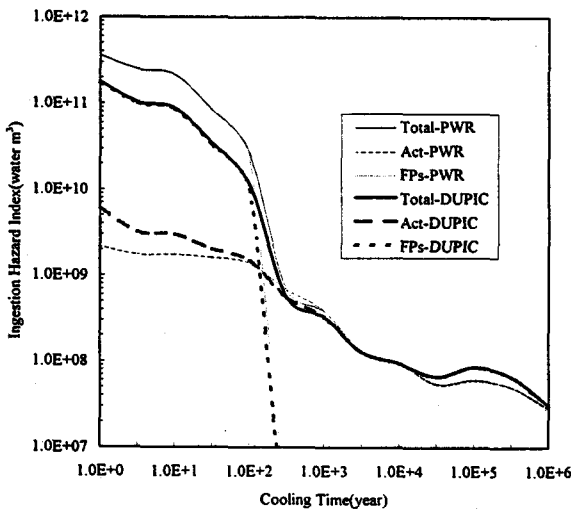


Fig. 3. Radioactive Ingestion Hazard Index of Spent PWR Fuel with 35,000MWD/MTU and Spent DUPIC Fuel with 19,000MWD/MTU

diotoxicity)가 방사능 및 물질농도와 선형적인 관계에 있지 않기 때문에 악티나이드에 의한 기여도가 다소 다르게 나타나고 있다.

경수로 사용후 핵연료의 위해지수는 대체적으로 5000년의 냉각시간까지는 DUPIC핵연료 보다 크고 그 이후부터는 Actinides의 영향으로 작은 값을 나타내고 있다.

표 5는 경수로사용후핵연료와 DUPIC핵연료에 존재하고있는 악티나이드의 섭취위해지수를 시간에 따라 비교한 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이, 냉각초기에는 사용후 DUPIC핵연료에 존재하는 악티나이드의 위해지수 값이 약 8~72%의 비교적 큰 범위로 크게 나타나고 있지만, 약 150년 이후부터는 반대로 경수로핵연료에 존재하는 악티나이드의 위해지수가 DUPIC의 경우 보다 약 16~23% 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 냉각초기 약 150년 까지는 사용후 DUPIC핵연료에 존재하고 있는 악티나이드중 Pu-238, Pu-240, Cm-

Table 5. Radioactive Ingestion Hazard Index of Actinides Contained in Spent PWR and DUPIC Fuel.

Nuclide	Time	(unit : m ³ ·water/MTHM)											
		10	50	100	300	500	1000	5000	10000	50000	100000	500000	1000000
Pb-210	PWR	5.01E-01	2.62E+01	1.56E+02	2.84E+03	7.26E+03	3.37E+04	5.64E+05	1.45E+06	7.51E+06	1.15E+07	9.51E+06	4.78E+06
	DUPIC	2.98E-01	2.18E+01	1.50E+02	3.53E+03	9.66E+03	4.83E+04	8.55E+05	2.21E+06	1.15E+07	1.75E+07	1.35E+07	5.75E+06
Po-210	PWR	6.30E-02	3.74E+00	2.22E+01	4.06E+02	1.04E+03	4.81E+03	8.06E+04	2.07E+05	1.07E+06	1.65E+06	1.36E+06	6.83E+06
	DUPIC	3.70E-02	3.12E+00	2.14E+01	5.04E+02	1.38E+03	6.90E+03	1.22E+05	3.16E+05	1.64E+06	2.50E+06	1.92E+06	8.21E+05
Ra-226	PWR	1.32E+01	2.33E+02	9.42E+02	9.48E+03	2.77E+04	1.12E+05	1.88E+06	4.84E+06	2.51E+07	3.85E+07	3.17E+07	1.60E+07
	DUPIC	8.83E+00	2.03E+02	9.41E+02	1.18E+04	3.71E+04	1.61E+05	2.85E+06	7.38E+06	3.82E+07	5.84E+07	4.48E+07	1.92E+07
Th-229	PWR	3.61E-01	9.52E-01	2.65E+00	2.39E+01	7.35E+01	3.55E+02	1.19E+04	4.45E+04	4.90E+05	1.00E+06	2.53E+06	2.44E+06
	DUPIC	7.30E-02	5.83E-01	2.18E+00	2.18E+01	6.60E+01	3.07E+02	9.59E+03	3.55E+04	3.88E+05	7.92E+05	2.00E+06	1.93E+06
Np-239	PWR	1.82E+05	1.81E+05	1.81E+05	1.77E+05	1.74E+05	1.66E+05	1.14E+05	1.12E+04	1.66E+03	1.52E+01		
	DUPIC	4.82E+05	4.80E+05	4.77E+05	4.69E+05	4.60E+05	4.39E+05	3.01E+05	1.88E+05	4.40E+03	4.02E+01		
Pu-238	PWR	5.26E+08	3.84E+08	2.60E+08	5.42E+07	1.15E+07	2.72E+05						
	DUPIC	1.28E+09	9.35E+08	6.30E+08	1.30E+08	2.68E+07	5.29E+05						
Pu-239	PWR	6.63E+07	6.62E+07	6.61E+07	6.58E+07	6.54E+07	6.45E+07	5.78E+07	5.03E+07	1.61E+07	3.81E+06	3.78E+01	
	DUPIC	3.87E+07	3.87E+07	3.86E+07	3.85E+07	3.83E+07	3.79E+07	3.46E+07	3.06E+07	1.02E+07	2.41E+06	2.42E+01	
Pu-240	PWR	1.00E+08	1.01E+08	1.00E+08	9.82E+07	9.61E+07	9.12E+07	5.97E+07	3.51E+07	5.05E+05	2.52E+03	9.10E-02	
	DUPIC	1.31E+08	1.34E+08	1.34E+08	1.31E+08	1.28E+08	1.22E+08	7.95E+07	4.68E+07	6.73E+05	3.36E+03	3.70E-01	
Am-241	PWR	4.27E+08	9.29E+08	9.38E+08	6.87E+08	4.99E+08	2.24E+08	3.95E+05	1.82E+04	6.93E+02	1.17E+01		
	DUPIC	3.16E+08	6.43E+08	6.47E+08	4.74E+08	3.44E+08	1.54E+08	2.94E+05	2.64E+04	1.01E+03	1.71E+01		
Am-243	PWR	4.55E+06	4.53E+06	4.51E+06	4.43E+06	4.35E+06	4.15E+06	2.85E+06	1.78E+06	4.16E+04	3.80E+02	2.29E-02	
	DUPIC	1.20E+07	1.20E+07	1.19E+07	1.17E+07	1.15E+07	1.10E+07	7.53E+06	4.71E+06	1.10E+05	1.01E+03	3.38E-01	
Cm-244	PWR	2.14E+08	4.63E+07	6.83E+06	3.24E+03	1.53E+00							
	DUPIC	9.18E+08	1.99E+08	2.93E+07	1.39E+04	6.58E+00							
Total	PWR	1.73E+09	1.59E+09	1.39E+09	9.12E+08	6.78E+08	3.85E+08	1.24E+08	9.50E+07	5.30E+07	5.96E+07	4.95E+07	2.78E+07
	DUPIC	2.98E+09	2.01E+09	1.50E+09	7.87E+08	5.51E+08	3.27E+08	1.28E+08	9.40E+07	6.51E+07	8.48E+07	6.58E+07	3.05E+07

244가 물질농도 측면에서 경수로핵연료의 경우보다 각각 143, 31, 328%의 비율로 많이 존재하고 있기 때문인 것으로 해석된다. 그리고 그 이후의 반대현상은 사용후 경수로핵연료에 존재하고 있는 Am-241의 큰 위해지수가 300년 이후까지 지속적으로 높게 유지되고 있는 반면, DUPIC핵연료의 위해지수를 지배하던 Pu-238, Cm-244의 위해지수가 상대적으로 짧은 반감기에 의해 비교적 빠른 감소효과를 나타내고 있기 때문인 것으로 해석된다. 그리고 10,000년 이후부터는 다시 사용후 DUPIC핵연료의 위해지수가 다시 경수로핵연료보다 약 10~30% 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 사용후 DUPIC핵연료에 비교적 많이 존재하고 있던 핵분열성물질(fertile) 및 악티나이드 원소의 붕괴생성물인 Pb-210, Po-210 및 Ra-226에 의한 것임을 알 수 있다.

방사선원형

표 6은 사용후 경수로핵연료, 신 DUPIC핵연료 및 사용후 DUPIC핵연료의 감마선에너지 스펙트럼을 평균에너지별 단위시간당 photon수(gamma intensity)로 나타낸 것이다. 감마선원형은 표에서 분류한 바와 같이 크게 조사생성물, 악티나이드, 핵분열생성물로 구성되어 있는데, 이중 핵연료물질내에 존재하던 불순물들이 원자로에서 조사되어 감마선원으로 변한 것을 "Activation-F"로 그리고 핵연료의 구조재(핵연료 피복관, 안내관, 지지격자 등)가 조사되어 감마선원으로 분류된 것을 "Activation-S"로 분류하였다.

신 DUPIC핵연료의 경우는 앞서도 설명된 바와 같이 DUPIC핵연료 제조과정에서 휘발된 핵종 중 감마선원인 Kr-85, Cs-134, Cs-137, Sb-125, Ba-137m 등의 감마 스펙트럼이 제외된 것이다. 이를 사용후 경수로핵연료의 스펙트럼과 비교해 볼 때, DUPIC연료의 경우가 감마선의 평균에너지 0.01~0.085 MeV 범위에서 약 10~20% 감소되었고, 0.125~0.375 MeV에서는 약 6%, 그리고 0.575~0.85 MeV에서는 50~70%로 비교적 크게 감소된 것으로 나타나고 있다. 이러한 감소현상에 기인한 휘발성물질(Kr-85, Cs-134, Cs-137, Sb-125, Cs-137m)의 감마선 스펙트럼은 표 7에 정리되어 있는 바와

같다. DUPIC핵연료 제조시설에서 발생하는 또 다른 고체폐기물의 선원형은 사용후 경수로핵연료의 구조재로서 그의 감마 스펙트럼은 표 6의 5번째줄(Activation-S)에 제시되어 있다.

사용후 DUPIC핵연료가 갖는 감마 스펙트럼을 경수로핵연료의 경우와 비교해 볼 때, 전체적인 특징은 사용후 DUPIC핵연료의 경우가 0.01~0.575 MeV의 낮은 에너지 범위에서는 경수로핵연료보다 약 40~50% 낮은 감마선 세기를 보여주고 있으나, 0.85~2.75 MeV 범위에서는 큰 차이를 보이지는 않는다. 그리고 3.5 MeV 이상의 높은 에너지 범위에서는 사용후 DUPIC핵연료의 감마선 세기가 크게 나타났는데, 이는 사용후 DUPIC핵연료에 상대적으로 많이 존재하고 있던 악티나이드의 Cm-244와 Rh-106에 의한 것으로 해석되었다.

표 8은 사용후 경수로핵연료와 DUPIC핵연료의 중성자 선원형을 요약한 것이다. 이 표에서 보여주는 바와 같이 중성자 선원형은 모두 악티나이드 물질의 (α, n)반응 및 자발핵분열에 의해 결정되고 있음을 알 수 있으나, 특히 Cm-244의 자발 핵분열에 의한 중성자 선원이 지배적인 것으로 나타났다. 이런 이유 때문에 Cm-244의 농도가 약 3.3배 큰 사용후 DUPIC핵연료의 중성자 선원이 경수로핵연료보다 4배 이상 크게 나타났다.

결론

DUPIC핵연료주기로 인해 경수로 사용후핵연료 물질의 핵종별 농도, 방사능, 붕괴열, 위해지수 및 방사선원형등을 시간의 함수로 그 변화특성을 분석하고, 각 인자별로 크게 영향을 미치는 주요핵종의 거동을 물질농도 측면에서 추적.분석평가한 결과는 다음과 같이 요약된다.

방사성물질 농도에 있어서 사용후 DUPIC핵연료에 존재하는 악티나이드 양은 경수로핵연료에 비해 약 2% 감소한 반면, 핵분열생성물의 양은 약 20% 증가된 것으로 나타났다. 그러나 핵분열생성물에 의한 방사능 및 붕괴열은 단기적 관점(200년 이하)에서 사용후 경수로핵연료의 경우가 큰 것으로 나타났고, 악티나이드에 의한 방사능은 다소 사용후 경수로핵연료가 크게 그리고 악티나이드에

Table 6. Photon Spectrum of Spent PWR Fuel with 35,000MWD/MTU, Fresh DUPIC Fuel, and Spent DUPIC Fuel with 19,000MWD/MTU at 10 years after Discharge.

Mean Energy (MeV)	Spent PWR Fuel					Fresh DUPIC Fuel					Spent DUPIC Fuel				
	Activation-F	Actinides	FPs	Activation-S	Total	Actinides	Actinides	FPs	Activation-S	Total	Activation-F	Actinides	FPs	Activation-S	Total
	(unit : photons/sec-MTHM)														
0.010	8.81E+10	4.42E+13	2.00E+15	2.62E+12	2.05E+15	8.81E+10	4.42E+13	1.63E+15	0	1.67E+15	3.05E+13	8.66E+14	2.80E+11	9.90E+14	
0.025	1.87E+10	1.17E+12	4.37E+14	4.76E+12	4.43E+14	1.87E+10	1.17E+12	3.68E+14	0	3.69E+14	4.59E+12	1.92E+14	8.70E+11	2.10E+14	
0.038	9.50E+09	2.49E+11	5.21E+14	1.34E+12	5.22E+14	9.50E+09	2.49E+11	4.60E+14	0	4.60E+14	4.71E+13	4.13E+11	2.40E+11	3.03E+14	
0.058	9.53E+09	2.36E+13	3.85E+14	2.66E+11	4.09E+14	9.53E+09	2.36E+13	3.31E+14	0	3.55E+14	1.29E+13	1.75E+13	2.70E+10	1.95E+14	
0.085	3.84E+09	6.71E+11	2.39E+14	1.07E+11	2.40E+14	3.84E+09	6.71E+11	2.12E+14	0	2.13E+14	1.76E+13	2.04E+12	1.10E+10	1.23E+14	
0.125	1.78E+09	5.76E+11	2.16E+14	6.72E+10	2.16E+14	1.78E+09	5.76E+11	2.03E+14	0	2.04E+14	6.77E+13	2.04E+12	9.20E+09	1.69E+14	
0.225	8.43E+08	4.26E+11	1.98E+14	4.08E+11	1.99E+14	8.43E+08	4.26E+11	1.89E+14	0	1.89E+14	1.23E+13	1.85E+12	7.70E+10	9.81E+13	
0.375	2.44E+09	3.03E+10	9.48E+13	2.36E+12	9.72E+13	2.44E+09	3.03E+10	9.17E+13	0	9.17E+13	2.67E+12	6.66E+10	4.50E+11	4.51E+13	
0.575	2.88E+09	1.10E+09	3.49E+15	3.03E+12	3.50E+15	2.88E+09	1.10E+09	2.88E+15	0	2.88E+15	1.43E+13	8.36E+08	5.80E+11	1.92E+15	
0.850	8.12E+08	1.67E+09	2.80E+14	3.47E+10	2.80E+14	8.12E+08	1.67E+09	8.86E+13	0	8.86E+13	6.97E+13	1.90E+09	2.77E+08	2.03E+14	
1.250	3.19E+12	8.00E+08	1.02E+14	7.78E+13	1.82E+14	3.19E+12	8.00E+08	8.94E+13	0	9.26E+13	7.68E+13	8.39E+08	6.73E+12	1.37E+14	
1.750	1.16E+07	1.13E+08	2.94E+12	1.12E+04	2.94E+12	1.16E+07	1.13E+08	2.94E+12	0	2.94E+12	2.30E+12	3.24E+08	1.59E+12	3.89E+12	
2.250	1.69E+07	4.16E+07	7.29E+10	4.12E+08	7.34E+10	1.69E+07	4.16E+07	7.29E+10	0	7.30E+10	5.39E+04	1.78E+08	5.89E+10	5.91E+10	
2.750	5.23E+04	3.28E+08	4.36E+09	1.28E+06	4.69E+09	5.23E+04	3.28E+08	4.36E+09	0	4.69E+09	7.88E+01	1.55E+08	4.48E+09	4.64E+09	
3.500	2.14E-07	2.17E+07	5.65E+08	0	5.87E+08	2.14E-07	2.17E+07	5.65E+08	0	5.87E+08	1.05E-02	9.29E+07	5.82E+08	6.75E+08	
5.000	3.00E-08	9.27E+06	0	0	9.27E+06	3.00E-08	9.27E+06	0	0	9.27E+06	1.75E-05	3.97E+07	3.34E-05	3.97E+07	
7.000	2.00E-09	1.07E+06	0	0	1.07E+06	2.00E-09	1.07E+06	0	0	1.07E+06	1.14E-06	4.58E+06	2.17E-06	4.58E+06	
9.000	1.00E-10	1.23E+05	0	0	1.23E+05	1.00E-10	1.23E+05	0	0	1.23E+05	7.19E-08	5.26E+05	1.37E-07	5.26E+05	
Total	3.33E+12	7.13E+13	7.97E+15	9.28E+13	8.14E+15	3.33E+12	7.13E+13	6.55E+15	0	6.62E+15	3.59E+14	1.19E+14	3.91E+15	4.40E+15	

Table 7. Photon Spectrum of Volatile and Semi-volatile Radionuclides Removed from the OREOX Process.

(unit : photons/sec-MTHM)

Mean Energy(MeV)	Kr-85	Cs-134	Cs-137	Sb-125	Ba-137m	Total
0.010	2.863E+13	1.970E+13	3.182E+14	—	—	3.665E+14
0.025	5.611E+12	3.732E+12	6.016E+13	—	—	6.950E+13
0.038	—	3.710E+12	3.670E+13	5.440E+11	1.980E+13	6.075E+13
0.058	4.860E+12	2.973E+12	4.665E+13	—	—	1.847E+14
0.085	2.496E+12	1.532E+12	2.326E+13	—	—	2.729E+13
0.125	—	8.354E+11	1.219E+13	—	—	1.303E+13
0.225	—	1.426E+11	8.630E+12	2.850E+11	—	9.058E+12
0.375	—	—	1.450E+12	1.690E+12	—	3.140E+12
0.575	—	2.756E+14	—	2.180E+13	3.135E+14	6.109E+14
0.850	—	1.914E+14	—	—	—	1.914E+14
1.250	—	1.265E+13	—	—	—	1.265E+13
1.750	—	—	—	—	—	—
2.250	—	—	—	—	—	—
2.750	—	—	—	—	—	—
3.500	—	—	—	—	—	—
5.000	—	—	—	—	—	—
7.000	—	—	—	—	—	—
9.000	—	—	—	—	—	—
Total	5.631E+13	5.123E+14	5.072E+14	2.432E+13	3.333E+14	1.549E+15

의한 붕괴열은 사용후 DUPIC핵연료가 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이는 DUPIC핵연료주기에서는 방사성물질 농도 변화가 그 물질의 방사능 및 붕괴열량과 비례하지 않는 것을 시사해 주고 있다. 섭취위해지수의 시간에 따른 변화양상은 전체적으로 방사능/붕괴열의 붕괴특성과 유사하나 각 핵종의 방사능 독성도(radiotoxicity)가 방사능 및 물질농도와 선형적인 관계에 있지 않기 때문에 악티나이드에 의한 기여도가 다소 다르게 나타나고 있다. 특히 장기적인 관점에서 사용후DUPIC핵연료의 위해지수가 크게 나타났는데, 이는 사용후 DUPIC핵연료에 비교적 많이 존재하고 있던 핵분열성물질(fertile) 및 악티나이드 원소의 붕괴생성물인 Pb-210, Po-210 및 Ra-226에 의한 것으로 해석되었다.

사용후 DUPIC핵연료가 갖는 감마 스펙트럼을

경수로핵연료의 경우와 비교해 볼 때, 전체적인 특징은 사용후 DUPIC핵연료의 경우가 0.01~0.575 MeV의 낮은 에너지 범위에서는 경수로핵연료 보다 약 40~50% 낮은 감마선 세기를 보여주고 있으나, 3.5 MeV 이상의 높은 에너지 범위에서는 사용후 DUPIC핵연료의 감마선 세기가 훨씬 크게 나타났다. 이는 사용후 DUPIC핵연료에 상대적으로 많이 존재하고 있던 악티나이드 물질중 Cm-244와 Rh-106에 기인된 것으로 해석되었다. 중성자 선원량은 모두 악티나이드 물질의 (α , n)반응 및 자발핵분열에 의해 결정되고 있음을 알 수 있으나, 특히 Cm-244의 자발 핵분열에 의한 중성자 선원이 지배적인 것으로 나타났다. 이런 이유 때문에 Cm-244의 농도가 약 3.3배 큰 사용후 DUPIC핵연료의 중성자 선원이 경수로핵연료보다 4배 이상 크게 나타났다.

Table 8. Comparison of Neutron Sources between Spent PWR and DUPIC Fuel.

(unit : neutrons/sec-MTHM)

Neutron Source	Spent PWR Fuel		Spent DUPIC Fuel	
	(α, n)reaction	Spontaneous	(α, n)reaction	Spontaneous
U-234	-	1.19E+04	-	-
Pu-238	2.50E+06	4.08E+05	6.10E+06	9.94E+05
Pu-239	2.40E+05	-	1.41E+05	-
Pu-240	3.81E+05	2.01E+06	4.98E+05	2.62E+06
Pu-242	-	7.70E+05	-	2.17E+06
Am-241	1.64E+06	-	1.21E+06	-
Am-243	1.55E+04	-	4.11E+04	-
Cm-242	1.63E+04	7.90E+04	3.84E+03	1.86E+04
Cm-243	2.02E+04	-	1.39E+05	-
Cm-244	1.71E+06	2.06E+08	7.34E+06	8.83E+08
Cm-246	-	9.83E+05	-	-
Cm-248	-	-	-	1.05E+05
Cf-252	-	-	-	1.02E+06
Sub-total	6.53E+06	2.10E+08	1.55E+07	8.90E+08
Total	2.17E+08		9.05E+08	

이상의 결과는 DUPIC핵연료주기로 인한 사용후 경수로핵연료의 특성변화 이해에 많은 도움을 줄 수 있으며, 향후 계속되는 DUPIC계통의 기술성 및 안전성분석 입력자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. J.S.Lee, et al., Burn Again and Bury Less, Proc. '93 KAIF meeting.
2. R. Doust, Recycling PWR Fuel : CANDU can do, Nucl. Eng. Int'l, pp.39-40(1993).
3. Hangbok Choi et al., Parametric Analysis of the DUPIC Fuel Cycle, Proc. of the 1994 Nucl. Simul. Symp., Pembroke, Canada, 19954. A.G. Croff, ORIGEN2-A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-5621 (1980).