2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

토륨 핵주기를 이용하는 고전환 압력관형 경수로에 대한 핵주기 특성

Characteristics of a High-Converting LWR Core Design with Once-Through Thorium Fuel Cycle

김관희,김명현

경희대학교
경기도 용인시 기흥읍 서천리

요 약

비순환 토륨 핵주기를 적용한 고전환 압력관형 경수로(HCPLWR)**의 개념 핵설계를 이전 연구에서 수행하였고 연구결과에서 기존 상업용 원자로보다 훨씬 큰 전환율을 가졌음을 확인할 수 있었다**. **본 연구에서는 이미 검증된 핵연료 증식특성만이 아니라 핵확산 저항성**, **핵변환 특성**, **위해도 특성을 추가적으로 평가하였다**. **핵확산 저항성을 평가하는데 있어 평가지수로** BCM, TG, SNS**를 사용하였다**. PWR**과** CANDU**의** BCM**이** 14.50 kg**과** 12.78 kg**를 보인 반면** HCPLWR Seed**의** BCM**은** 11.08 kg**으로 가장 낮았다**. **그러나** Blanket**에서의** BCM**이** 13.66 kg**으로 높기 때문에** BCM **측면에서 불리하다고는 말할 수 없다**. **반면** TG**와** SNS**는** HCPLWR**의** Seed**와** Blanket **모두에서 다른 원자로에 비해 상당히 높은 값을 가졌다**. Seed**와** Blanket**에서 유효핵분열반감기는 상반된 두 값을 보였다**. Seed**의 유효핵분열반감기는** PWR**과** CANDU **보다 더 긴 반면** Blanket**의 유효핵분열반감기는 두 원자로보다 짧았다**. **위해도 측면에서도** HCPLWR**이 다른 원자로에 비해 유리함을 확인할 수 있었다**.

Abstract

A nuclear design concept for a high-converting pressure-tube type LWR (HCPLWR) core using once-through thorium fuel cycle was proposed as an advanced thermal reactor. Calculated conversion ratio in HCPLWR is much higher than PWR or CANDU. In this paper, the other fuel cycle performance indices, such as proliferation resistance, transmutation efficiency, and radiation hazard in spent fuel were evaluated for this design concept. Performance indices for the proliferation resistance were measured by BCM, TG, and SNS. BCM of seed fuel from HCPLWR was 11.08 kg which was much less than 14.50 kg of PWR and 12.78 kg of CANDU. BCM from blanket was 13.66 kg. Therefore, proliferation resistance was not favorable than the conventional LWRs in the aspects of plutonium composition. However, TG and SNS from HCPLWR spent fuels were much higher. For the evaluation of transmutation efficiency, index of effective fission half-life (EFHL) was used. EFHL in seed and blanket were different each other. EFHL in blanket region is much less than those in PWR or CANDU. Radiation hazard index from spent fuel is much less than from PWRs because production of spent fuel is much less in high-converting core.

1. 서 론

이전 연구 고전환 압력관형 신형 경수로심의 개념 설계[1]에서 플루토늄 핵연료 주기보다 높은 핵확산 저항성을 가진 토륨핵연료 주기 전략을 갖고, RTR(Radkowsky Thorium fuel Reactor)의 Seed Blanket Unit(SBU) 개념[2]을 도입하여 핵연료를 Seed와 Blanket으로 구분하여 비균질하게 장전한 압력관형 신형 노심의 설계안을 소개하였다.

본 연구에서는 HCPLWR(High-Converting Pressure-tube type LWR)[3]의 설계안을 다음과 같은 네가지 항목 핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 핵변환 특성, 방사성 위해도에 대하여 평가하였다. 비교 평가 대상으로 PWR, CANDU, RTR 그리고 토륨 핵연료 주기를 이용한 가압경수로(ATR)[4]를 선정하였다. 핵연료 증식성은 이미 이전 연구에서 U-233 전환율에 대해서만 한정적으로 수행한 바 있고 그 결과 다른 원자로에 비해 월등한 전환율을 가짐을 확인되었다.

2. 핵연료 증식성

원자로에서 U-233, Pu-239, Pu-241등의 핵분열성 물질은 Th-232, U-238, Pu-240등과 같은 핵원료성 물질이 중성자를 포획함으로써 생성된다. 핵분열성 물질의 생성율과 소멸율을 나타내는 척도로서 전환율(Conversion Ratio, CR)을 주로 사용하였다. 그러나 CR은 주기 길이가 길고 핵적 변환이 큰 원자로의 경우 시간에 대해 크게 변하기 때문에 경우에 따라 원자로의 증식성 혹은 전환성의 설계특성을 적절히 대변할 수 없다. 그러므로 증식 지수로서 핵분열성 물질 총량 변화 비율(overall Fissile Inventory Ratio, FIR)과 핵분열성 물질 이득(Fissile Gain)을 사용하는데, 이 값들은 정해진 기간의 처음과 마지막에서의 총 Fissile양을 비교한 것이다. 또한 Seed와 Blanket이 비균질하게 장전된 RTR과 HCPLWR의 경우 Seed와 Blanket에서 일어나는 증식을 구별하여 계산하였다. Fissile Gain은 다음과 같이 정의된다

$$\text{Fissile Gain} \equiv \frac{\text{Discharged fissile amount} - \text{Feed fissile amount}}{\text{Feed fissile amount}}$$

RTR Blanket과 HCPLWR Blanket 핵연료에서 FIR이 1.0을 넘는 1.37과 1.96의 값을 보였는데 이는 Th-232가 중성자를 포획하여 U-233으로 변환되었기 때문이다. 특히 HCPLWR Blanket의 FIR이 매우 높은 값을 갖는데 이는 초기 U-235의 장전량이 다른 원자로보다 월등히 작기 때문이다. 또한 표 2에서 보는 것처럼 Fissile Gain에서도 RTR Blanket과 HCPLWR Blanket를 제외한 핵연료가 모두 음의 Fissile Gain 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 앞서 FIR 값으로 평가한 바와 같이 HCPLWR Blanket에서 증식이 일어남을 나타낸다.

표 1에서 보는 것과 같이 HCPLWR Blanket에서 방출된 사용후 핵연료의 핵분열성 물질 구성을 보면 주기초에 장전된 U-235보다 생성된 U-233의 양이 약 1.5배 많다. 이는 Blanket에 첨가하는 Fertile material로서 토륨을 사용하였기 때문에 U-235의 분열과 함께 중성자 흡수에 의해 U-233이 생성되었기 때문이다. RTR Blanket의 경우 초기 핵분열성 물질 장전량의 0.37배가 추가로 생성되었고 HCPLWR Blanket의 경우 0.96배가 추가로 생성되었다.

3. 핵확산 저항성

핵확산저항성 문제에 있어 사용후 핵연료에서의 플루토늄의 누적량, 조성형태, 조성비율 등은 큰 관심의 대상이 되고 있다. 다시 말해 사용후 핵연료에 있는 플루토늄으로 얼마나 효과적으로

또는 효율적으로 폭탄을 만들 수 있느냐가 문제이다. 본 연구에서는 LANL의 Dr.Beller연구팀에 의해 제안된 BCM, SNS, TG 지수[5]를 사용하여 핵확산저항성을 평가하였다.

세가지 지수에 대한 정의는 다음과 같다.

- BCM (Bare Critical Mass) : 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄의 조성비로 Bare critical assembly 제조에 필요한 플루토늄의 최소질량.
- SNS (Spontaneous Neutron Source) : 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄 조성비를 갖는 플루토늄의 단위 질량당 방출되는 중성자 방출율.
- TG (Thermal Generation) : 사용후 핵연료에서 추출된 플루토늄 조성비를 갖는 플루토늄의 단위 질량당 발생하는 열량.

표 3은 각 핵연료별 플루토늄 조성비에 따른 BCM, SNS, TG의 지수값을 나타낸 것이다. 위의 세 가지 지수에 대하여 참고문헌에서는 SCALE 코드를 사용하여 계산하였으나 본 연구에서는 MCNP와 ORIGEN 코드를 사용하여 계산하였다. 검증계산을 통하여 두 계산방법의 오차는 BCM, SNS, TG에서 최대 5 %, 25 %, 3 %로 BCM과 TG는 신뢰할 수 있는 계산결과를 얻었다. SNS도 최대 25 %의 오차를 보였으나 계산한 각 Case 마다 같은 경향으로 변하였기 때문에 비교평가에는 문제가 되지 않았다. 즉, SCALE 코드보다 ORIGEN 코드를 이용한 SNS가 하향 평가되었다.

HCPLWR Seed의 BCM이 11.08 kg으로 비교 대상 사용후 핵연료 중 가장 적은 양을 보였다. 그 이유는 Pu-239의 조성비율이 다른 사용후 핵연료에 비해 상대적으로 높고 Pu-240과 Pu-242의 조성비율이 낮기 때문이다. 반면 HCPLWR Blanket의 BCM은 13.66 kg으로 Seed의 11.08 kg보다 2.58 kg의 플루토늄이 임계 질량을 위해 더 필요하였다. Seed 단독으로 BCM에 대해 평가한다면 매우 불리한 입장을 보이나 Seed의 사용후 핵연료 방출량이 다른 핵연료에 비해 작고 또 Blanket과 같이 평가된다면 단점을 충분히 보완할 수 있다.

열방출율(TG)은 임계질량 당 α-붕괴열을 나타낸 지수로 물질 내에서 발생하는 열량을 표시한다. TG가 높은 물질로 만약 폭탄을 제조할 경우 제조공정에서 잔열처리공정이 필요하므로 제조상 어려움을 가중시킨다. HCPLWR Blanket 사용후 핵연료의 플루토늄의 TG는 69.58 W/kg으로 CANDU 사용후 핵연료의 플루토늄의 임계질량에서 발생하는 열의 약 20배이고 다른 사용후 핵연료에서 발생하는 열보다 높다. TG는 Pu-238의 α-붕괴에 의해 좌우되는데 HCPLWR Blanket 사용후 핵연료의 Pu-238의 조성비율이 상대적으로 높기 때문이다.

SNS는 플루토늄의 단위 질량당 방출되는 중성자 방출율을 나타내므로 폭탄제조 후 순도를 유지하기 위해서는 자발중성자 방출이 작아야 유리하다. 그런 측면에서 볼 때 HCPLWR Blanket 사용후 핵연료와 RTR Blanket 사용후 핵연료가 0.45 MBq/kg의 높은 SNS 가지므로 비핵확산 측면에서 PWR과 CANDU에 비해 유리한 입장에 있다.

4. 핵변환 특성

장수명 핵종의 핵변환에 있어 핵변환 성능을 정량화할 수 있는 지표로 유효핵분열반감기(EFHL, Effective Fission Half-Life)를 핵변환 지수로 사용하였다. 유효핵분열반감기의 정의에 따라 식을 유도하여 보면 다음과 같다.

$$T_{EFH} = \frac{\ln 2}{\sigma_f^i \Phi + \sum_j f_j \sigma_\gamma^i \frac{\sigma_f^j}{\sigma_t^j} \Phi + \sum_k \lambda_i^{i \to k} \frac{\sigma_f^k}{\sigma_t^k}}$$

여기서 i = 모핵종

j = 중성자흡수에 의해 생성된 딸핵종

k = 자연붕괴에 의해 생성된 딸핵종

f_i = 중성자흡수에 의해서 모핵종에서 딸핵종으로 변환될 때
각각의 딸핵종으로 변환될 확율

σ_f^i = 모핵종의 fission cross-section

σ_γ^i = 모핵종의 capture cross-section

σ_f^j = 중성자흡수에 의해 생성된 딸핵종의 fission cross-section

σ_t^j = 중성자흡수에 의해 생성된 딸핵종의 total cross-section

σ_f^k = 자연붕괴에 의해 생성된 딸핵종의 fission cross-section

σ_f^k = 자연붕괴에 의해 생성된 딸핵종의 total cross-section

$\lambda_i^{i \to k}$ = 모핵종에서 딸핵종으로의 붕괴상수

희귀 엑티나이드 핵종은 원자로 내에서 직접 분열되지 않고 중성자 포획에 의하여 핵분열성 핵종으로 핵변환된 후 핵분열한다. 그림 1은 원자로내에서 Np-237, Am-241, Am-243의 주요 반응을 보여준다. 이 그림에서 보여지는 것처럼 Np-237은 중성자 포획으로 인해 핵분열성 물질인 Pu-239로 변화된 후 핵분열한다. 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 Am-241은 3가지 경우의 유형을 갖는다. 첫째로 Am-241 중성자 포획으로 핵분열성 물질인 Am-242로 변환한다. α-붕괴로 인해 주로 Pu-239로 변환되고 약간은 중성자포획으로 Cm-243이 되고 Cm-242의 매우 작은 포획단면적 때문에 분열된다. Am-243의 주요 반응은 Cm-245의 핵분열로 인해 끝난다.

열중성자 원자로에서 위와 같은 반응을 하는 주된 원인은 Np-237과 Am-241이 열중성자 영역에서 포획단면적이 큰 반면 생성된 Pu-239와 Am-242m이 열중성자 영역에서 분열단면적이 크기 때문이다.

표 4는 0.2%의 MA를 핵연료에 첨가하여 연소시킬 때 각 원자로별, 핵종별 유효핵분열반감기를 구한 것이다. HCPLWR Blanket에서 Np-237, Am-241의 EFHL이 2.83년, 0.77년으로 비교 대상 원자로 중 가장 짧은 값을 보이고 Cm-244도 9.04년으로 ATR Seed와 Blanket 다음으로 우수한 핵변환 성능을 보였다.

5. 방사성 위해도

PWR 사용후 핵연료는 사용전 핵연료 성분의 95%이상을 그대로 유지하며 약 3%의 핵분열 생성물, 1%의 플루토늄, 0.1-0.3%의 장주기 엑티나이드를 포함하고 있다. 핵분열 물질이 핵분열하여 생기는 핵분열 생성물은 비교적 반감기가 짧은 반면에 중성자를 흡수하여 핵분열을 일으키지 않고 방사붕괴를 하는 과정에서 발생하는 엑티나이드 계열 원소들은 긴 반감기로 인하여 폐기물 처분에 중요한 장애가 되고 있다. 먼저 장주기 엑티나이드로 분류되는 원소를 보면 표 5와 같다.

초기 U-238의 장전량이 없거나 적은 핵연료에서는 플루토늄과 상위 엑티나이드의 생성이 작다. 그러므로 fertile material로서 토륨의 사용은 장주기 엑티나이드 폐기물의 감소를 위한 좋은 해법이다. 토륨은 우라늄에 비하여 원자번호가 2 적으므로 토륨 핵연료 증식주기는 우라늄 증식주기보다 엑티나이드 생성이 자연적으로 감소한다.(동일한 엑티나이드 핵종으로 변환하기 위해서는 2회의 중성자 흡수가 더 필요함.) 플루토늄의 경우는 더 많은 양의 엑티나이드를 생성하게 된다.

6. 결론

고전환 압력관형 신형 경수로심의 핵주기 특성을 핵연료 증식성, 핵확산 저항성, 핵변환 특성,

방사성 위해도 측면에 대하여 평가한 결과 다음과 같은 특징을 얻었다. 첫째, 핵연료 증식성에 있어 토륨 핵연료 주기를 사용하는 Blanket에서 FIR과 Fissile Gain(%)값이 1.96와 96.05로 일반 상업로는 물론 토륨을 사용한 다른 원자로보다도 높은 전환율을 가졌다. 둘째, 핵확산 저항성에서는 평가 지수마다 우월의 차이를 보인다. BCM 측면에서는 Seed와 Blanket에서 1.08 kg과 13.66 kg으로 Seed의 경우 비교 대상 원자로중 가장 낮다. 그러나 Seed의 사용후 핵연료 방출량이 상대적으로 작기 때문에 절대적으로 핵확산 저항성에 불리한 것은 아니다. Blanket의 TG와 SNS는 69.58 W/kg과 0.4505 MBq/kg으로 높은 값을 갖는다. 이것은 핵확산 저항성 측면에 있어 매우 유리한 점이다. 셋째, 핵변환 특성을 평가하기 위해 각 핵종에 대한 EFHL를 사용하였는데 HCPLWR Blanket에서 Np-237, Am-241의 EFHL이 가장 짧았고 Cm-244도 9.04년으로 다른 원자로에 비해 우수하였다. 마지막으로 방사성 위해도 측면에서는 Blanket의 fertile material로서 토륨을 사용하여기 때문에 장주기 엑티나이드 폐기물의 생성을 잠재적으로 감소시킬 수 있고 사용후 핵연료 발생량도 작아 폐기물 처리에 있어서의 방사성 위해도를 감소시킬 수 있었다.

참고 문헌

1. 임재용, 김명현 “고전환 압력관형 경수로심의 최적 노심 설계,” ‘98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998
2. Alex Galperin, Paul Reichat and Alvin Radkowsky, "Thorium fuel for light water reactors-reducing proliferation potential of nuclear power fuel cycle" Science & Global security, 1997, Volume 6 pp265-290.
3. Myung-Hyun Kim, Jae Yong Lim, "Nuclear Core Design of a High-Converting LWR with Thorium Fuel" Proc. of Int'l Conf. on Math. and Comp., Rx Physics and Environmental Analysis, M&C99, Madrid, Spain, Sept. 27-30, 1999
4. Myung-Hyun Kim, Il-Tak Woo, and Hying-Kook Joo, "Advanced PWR Core Concept with Once-Through Thorium Fuel Cycle", Proc. of Int'l Conf. on Future Nuclear Systems GLOBAL'99, Jackson Hole, Wyoming, USA, 1999
5. Denis E. Beller, et al, "A Closed, Proliferation-Resistant Fuel Cycle with Th-U-O2-Fueled LWRs, Th, U, and Np Recycle, and Accelerator_driven Transmutation of Waste(ATW)" Proc. of Int'l Conf. on Future Nuclear Systems GLOBAL'99, Jackson Hole, Wyoming, USA, 1999

표 1. Reactor type에 따른 핵분열성 물질 장전량 및 방출량

		Reactor type							
		PWR	CANDU	RTR seed	RTR blanket	ATR seed	ATR blanket	HCPLWR seed	HCPLWR blanket
Burnup (GWth-d/tIHM)		45	7	300EFD	100	40	100	44	171.5
Feed fissile amount (kg)	U-233	0	0	0	0	0	0	0	0
	U-235	2245.82	631.61	710.76	578.89	1021.99	1109.60	3273.10	249.23
	Pu-239	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pu-241	0	0	0	0	0	0	0	0
Discharged fissile amount (kg)	U-233	0	0	0	635	0	689.72	0	358.73
	U-235	324.04	221.65	128.35	128.45	174.88	77.06	1978.03	50.63
	Pu-239	361.85	215.11	16.64	23.31	75.06	95.25	192.91	57.07
	Pu-241	108.98	16.87	5.55	8.97	22.28	35.57	17.17	22.19

표 2. Reactor type에 따른 FIR 및 Fissile Gain

	Reactor type							
	PWR	CANDU	RTR seed	RTR blanket	ATR seed	ATR blanket	HCPLWR seed	HCPLWR blanket
Burnup (GWth-d/tIHM)	45	7	300EFD	100	40	100	44	171.5
FIR	0.35	0.72	0.21	1.37	0.27	0.81	0.67	1.96
Fissile Gain(%)	-64.61	-28.18	-78.65	37.46	-73.36	-19.11	-33.15	96.05

표 3. Reactor type에 따른 BCM, TG, SNS 지수치

	Reactor type							
	PWR	CANDU	RTR seed	RTR blanket	ATR seed	ATR blanket	HCPLWR seed	HCPLWR blanket
Burnup (GWth-d/tn IHM)	45	7	300EFD	100	40	100	37.5	171.5
Pu-238 fration	0.01653	0.00087	0.065	0.120	0.03100	0.07696	0.01837	0.11924
Pu-239 fration	0.49616	0.67305	0.465	0.383	0.48104	0.41783	0.80445	0.44932
Pu-240 fration	0.25715	0.26116	0.225	0.150	0.26770	0.17801	0.10804	0.14679
Pu-241 fration	0.14819	0.05234	0.155	0.147	0.14161	0.15476	0.06263	0.17119
Pu-242 fration	0.08199	0.01258	0.090	0.201	0.07865	0.17244	0.00651	0.11346
BCM (kg)	14.50	12.78	14.26	15.45	14.57	15.20	11.08	13.66
TG (W/kg)	12.16	3.64	39.38	69.91	20.42	45.75	12.74	69.58
SNS (MBq/kg)	0.2781	0.2401	0.3776	0.4555	0.3261	0.3666	0.1472	0.4505
TG (W/BCM)	176.32	46.52	561.56	1080.11	297.52	695.40	141.16	950.46
SNS (MBq/BCM)	4.03	3.07	5.38	7.04	4.75	5.57	1.63	6.15

표 4. Reactor type에 따른 유효핵분열반감기

	Reactor type							
	PWR	CANDU	RTR seed	RTR blanket	ATR seed	ATR blanket	HCPLWR seed	HCPLWR blanket
Np-237 (year)	4.59	3.14	5.82	5.35	3.68	3.37	6.24	2.83
Am-241 (year)	1.38	0.85	1.77	1.59	1.15	1.03	2.80	0.77
Cm-244 (year)	9.69	15.8	10.6	10.1	6.76	6.16	9.24	9.04

MA 0.2 % Np-237/Am-241Am-243/Cm-244 = 56/26/12/5

표 5. 장주기 엑티나이드와 반감기

Isotopes	Pa-231	Np-237	Pu-239	Pu-240	Am-241	Am-243	Cm-245
$T_{1/2}$ (year)	3.2×10^{4}	2.1×10^{6}	24,000	6,000	458	7,900	9,000

표 6. **같은 에너지 생산을 위해 필요한 핵연료 수요량** (for 8,037 GWD)

	PWR	CANDU	HCPLWR
Effective operation year (year)	9.7773**	11.2435*	11.2435*
Consumption of Thorium (ton)	0	0	14.017
Consumption of Uranium (ton)	588.773	1071.567	149.216
Consumption of U-235 (ton)	13.718	7.619	22.007
U-235 Mass in spent fuel (ton)	2.6834	2.523	16.271
Actual consumed U-235 Mass (ton)	11.034	5.096	5.736

* : Availability factor 0.95 ** : Availability factor 0.8

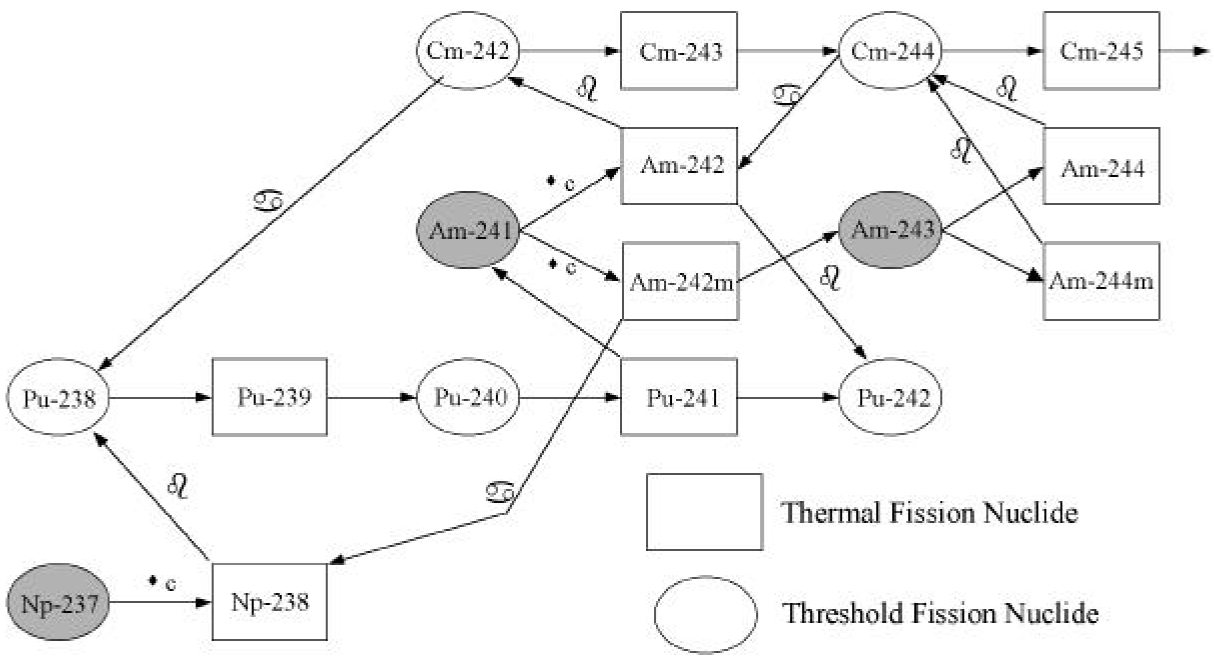

그림 1. Buildup and decay of minor actinide