

납-비스무스 냉각제를 이용한 칼리머노심 핵설계의 타당성 연구

A Neutronic Feasibility Study on the Use of the Pb-Bi Coolant in the KALIMER Core

박건우, 홍서기, 김영균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

칼리머 breakeven 평형노심을 기본으로 하여, 냉각제로 사용되는 소듐을 납-비스무스로 교체할 경우의 노심 핵특성을 파악하였다. 납-비스무스 냉각제는 소듐에 비하여 무겁기 때문에 좀 더 큰 펌프용량이 필요하며 열전도도와 비열이 작아 핵연료의 적절한 냉각을 위해서 노심내 냉각제 체적비를 증가시켜야 한다. 반면 소듐에 비해 경화된 스펙트럼의 영향으로 증식비와 연소결손반응도, 냉각제 기화계수 등에서 유리한 측면을 보인다. 본 연구에서는 납-비스무스 냉각제를 칼리머 평형노심에 적용시키고, p/d 분율과 유효노심높이를 100cm, 110cm, 120cm 세 가지로 변화시켜 본 결과 설계제한치를 만족하고, 증식비 1.0~1.13, 음의 냉각제기화반응도를 가지는 원자로의 설계가 가능함을 보였다.

Abstract

A neutronic feasibility study based on the breakeven KALIMER core has been performed for the replacement of sodium coolant with Pb-Bi coolant. Larger pumping power and coolant-to-fuel ratio are needed because of its heavy weight, small conductivity and specific heat owing to the harder neutron spectrum. However, Pb-Bi coolant have good characteristics in aspects of breeding ratio, burnup reactivity swing and coolant void reactivity in comparison with those of Na coolant. In this study, we analyzed the neutronic characteristics of the Pb-Bi cooled breakeven KALIMER core by changing the core height (100cm, 110cm, 120cm) and the lattice pitch-to-diameter ratio. The result shows that the reactor cores have the breeding ratio of 1.0~1.13 and negative coolant void reactivity for 100% voiding in the deriver fuel and satisfy the design limits.

1.0 서 론

액체금속로의 냉각제로는 열 물리적 특성이 우수한 액체 소듐이 채택되어 왔다[1]. 그러나 소듐이 냉각제 순환계를 벗어나 공기 또는 물과 고온에서 접촉하면 화학적 활성으로 인한 화재의 위험성이 상존한다. 이에 대한 대안으로서 납-비스무스나 납을 냉각제로 사용하는 신 개념의 원자로 개발이

제안되고 있다[2, 3, 4]. 이 냉각재들은 낮은 화학적 활성으로 인하여 공기, 물, 증기와 화학적 활성이 극히 낮고, 비등점이 높으며, 장치설계 및 건조를 단순화시킬 수 있으며, 자연대류에 의한 열전달 특성이 좋고, 핵연료 작업환경을 크게 단순화시키는 등의 장점으로 인해 유망한 열전달 유체로써 고려되고 일부 사용되어 왔다[5]. 그러나 납-비스무스 냉각재는 점도가 크고, 소듐에 비해 열전달 특성이 좋지 못하며, 구조재의 부식 방지를 위해 유속의 제한을 받는다.

본 연구에서는 칼리머 평형노심의 냉각재를 소듐에서 납-비스무스로 교체할 경우 냉각재의 특성상 고려해야 하는 인자들을 변화시켰을 경우에 대하여 노심 핵특성면에서 얻을 수 있는 이점을 살펴 보았다.

2.0 연구방향 및 계산방법론

고속로 냉각재를 소듐에서 납-비스무스로 변경하는 연구는 칼리머 증식특성노심에서 이루어진 바 있다[6]. 다른 설계인자는 변화시키지 않고 납-비스무스 냉각재를 사용하여, 기존의 소듐 냉각재를 사용한 칼리머 증식특성노심과 비교한 결과 증식비의 증가와, 냉각재 기화계수에서 음의 반응도가를 얻는 이점을 얻는 것으로 나타났다.

기 설계된 칼리머 평형노심은 노심의 높이가 100cm이고 소듐을 냉각재로 사용하며, 핵연료봉의 pitch/diameter(p/d) 비율이 1.203이다. 납-비스무스 냉각재의 경우 특성상 펌프의 용량이 커야 하고, 핵연료봉 내에서 냉각재의 부피비가 기존의 소듐 냉각재에 비해서 커야 한다. 본 연구에서는 핵연료봉의 p/d 비율을 1.3, 1.4, 1.5로 세분화하여 각각의 경우에 있어서 노심특성을 살펴보았다. 원자로의 유효노심높이 또한 기존의 100cm를 포함하여 110, 120cm로 세분화하여 각각의 경우에 대하여 핵적특성을 조사하였다.

본 연구에서는 액체금속로 노심설계 종합계산체제인 K-CORE 시스템을 사용하여 위에 열거된 분석을 수행하였다. 단면적 라이브러리는 JEF2.2로부터 NJOY 코드의 처리과정을 거쳐 생산한 KAFAX-F22[7] 라이브러리를 사용하였다. 이 라이브러리는 중성자 80군으로 구성되어 있으며 노심의 각 영역별 9군 유효 미시단면적 계산을 위하여 TRANSX[8] 코드와 TWODANT[9] 코드가 사용되었으며, 노심의 중성자속 분포 및 연소계산은 DIF3D[10] 코드와 REBUS[11] 코드를 통해 이루어졌다. 중성자속 및 연소에 대한 반복 계산을 통한 평형주기분석에서 중성자속 계산은 9군 단면적 세트를 기본으로 3차원 모델에 대한 노달확산이론 계산을 수행하였으며, 연소계산에서는 핵연료재 장전을 비롯한 일체의 핵연료관리전략을 일정한 양식으로 수행하는 평형노심을 대상으로 연소특성을 분석하였다.

3.0 설계인자변경 결과 및 논의

납-비스무스를 이용한 칼리머 설계는, 이미 설계되어 있는 소듐 평형(Breakeven)노심을 기반으로 하였다. 칼리머 이차원 모델과 R-Z 구성내역이 각각 그림 1과 2에 제시되어 있다. 계산에 사용된 연소사슬은 그림 3에 표시되어 있다. 현재 설계된 평형노심은 유효노심높이가 100cm로 설계되어 있으나, 납-비스무스 냉각재 칼리머에서는 이를 100cm, 110cm, 120cm로 세분화하여 각각의 노심에 대한 계산을 수행하여 그 결과를 서로 비교하였다. 냉각재의 특성을 고려하여 Driver Fuel 핵연료봉의 p/d 비율을 다양화하여(소듐의 경우 1.203) 1.3, 1.4, 1.5에 대하여 각각 계산을 수행하여 서로 비교하였다. 납-비스무스는 소듐에 비하여 무겁기 때문에 좀 더 큰 펌프용량이 필요하며 열전도도

와 비열이 작아 핵연료의 적절한 냉각을 위해서 부피비를 증가시켜야 하기 때문이다. 계산된 결과의 정리를 위하여 노심을 각각 1.3-100에서 1.5-120(p/d분율-노심높이)으로 명명하였다. 계산이 수행된 납-비스무스 노심의 개략적인 특성과 결과를 표 1에 정리하였다. 노심설계시 고려된 주요 변수는 평형노심인 소듐 액금로와 같다.

증식비의 경우 1.00~1.13으로, 소듐을 이용한 평형노심인 1.05에서 크게 벗어나지 않은 값들을 보여주고 있음을 알 수 있다. p/d 분율이 작을수록, 노심의 높이가 높을수록 증식비가 커지는 것으로 나타났다. 1.5-120노심의 경우 증식비가 1.05로 소듐 평형노심과 같게 나타났다.

연소결손반응도의 경우 356~1647ppm 사이의 값을 보여주고 있다. 같은 p/d와 유효노심높이를 가지고 있는 경우, 납-비스무스 냉각재가 소듐 냉각재보다 연소결손반응도에서 더 이점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 연소결손반응도를 낮추려면 p/d분율을 되도록 작게, 노심의 높이는 높여야 하는 것으로 나타났다. 소듐 평형노심의 경우 연소결손반응도가 896.4pcm으로 1.3-100노심의 955pcm보다 낮은데, 이는 p/d 분율의 차이 때문인 것으로 판단된다. 1.5-100노심에서의 연소결손반응도는 1647pcm으로 설계제한치인 1500pcm을 넘는 것으로 나타났다.

노심의 높이가 낮아지면 핵연료의 장전량이 줄어들어서 상대적으로 같은 출력 하에서 첨두연소도가 증가하고 있음을 보여주고 있으며, 이 경우 p/d분율변화에 따른 변화는 거의 나타나지 않았다.

납-비스무스 냉각재 칼리머의 경우 구동연료부분(100% 기화)의 냉각재 기화계수가 모두 음의 값을 보여주고 있다. p/d분율이 클수록, 노심의 높이가 낮을수록 더 음의 값으로 보낼 수 있음을 보여준다. 노심의 높이가 낮아지면 중성자 누출율이 높아져서 더 음의 값으로 가기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 핵연료온도계수의 경우에는 소듐냉각재의 경우보다 덜 음인 값으로 나타났다.

표 3에서는 각각의 노심에 대해서 물질 장전량을 보여주고 있다. U235의 경우 주기초에 비하여 주기말에 그 양이 줄어들고 있으나, Pu239의 경우는 반대로 주기말에 장전량이 늘어나고 있음을 알 수 있다. 노심의 높이가 높아지면 상대적으로 연료의 양이 늘어나게 되어 우라늄/플루토늄의 장전량이 많아지고 있다. 표 4에서는 주기초/주기말에서의 장전량 변화를 나타내고 있다. U235, U238, Pu241, Cm242, Cm244를 제외하고는 모두 장전량이 늘어나고 있음을 보여준다. 표 5에서는 각각의 노심에 대한 노심의 중요한 동특성 인자인 지발중성자분율을 보여주고 있다. 지발중성자분율의 경우 소듐냉각재의 사용시 보다 약간 작은 값이었다.

4.0 결 론

기존의 소듐 냉각재를 납-비스무스로 바꾸려면, 냉각재의 특성상 노심내 냉각재의 부피비가 늘어나야 하며 이에 따라 핵연료의 노심내 부피비 감소는 필연적이다. 노심의 높이를 100~120으로 다양화하고, 노심의 pitch/diameter의 분율을 1.3~1.5로 나누어서 각각의 노심핵특성을 분석해 본 결과, 전 노심이 대체적으로 설계제한치를 만족하고 있음을 알 수 있다. 냉각재기화계수의 경우 기존의 소듐 냉각재와는 달리 큰 음의 값을 보이고 있어서 상대적으로 더 안전한 원자로심을 구성할 수 있음을 보여준다. 납-비스무스 냉각재의 실제적인 이용을 위하여 더욱 세밀한 안전해석과 열수력적 해석이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김영인 외, "Nuclear and Thermal-Hydraulic Design and Analysis of KALIMER Breakeven Equilibrium Core," LMR/CD120-ER-01 Rev.0/00, KAERI (2000).
- [2] E. Greenspan *et al.*, "The Encapsulated Nuclear Heat Source Reactor Concept," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **85**, p.71 (2001).
- [3] S. G. Hong, E. Greenspan, and Y. I. Kim, "Once-for-Life Core for the Encapsulated Nuclear Heat Source (ENHS) Reactor," *to be presented at ANS 2002 Annual Meeting, 2002, June 9, Hollywood, Florida, USA.*
- [4] E. Greenspan with ENHS Team (UCB, ANL, LLNL, KAERI, Westinghouse, INEEL), "The Long-Life Core Encapsulated Nuclear Heat Source (ENHS) Generation IV Reactor," *to be presented at Int. Con. on Advanced Power Plants (ICAPP), June 9, Hollywood, Florida, 2002, USA.*
- [5] 정지영 외, "대체 냉각재 특성연구," KAERI/AR579/2000, (2000).
- [6] 유재운 외, "냉각재에 따른 칼리머 증식특성노심의 노심 핵특성 비교 분석," 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, (2000).
- [7] 김정도, 길충섭, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다균 단면적 라이브러리생산 및 검증," KAERI/TR842/97, KAERI (1997).
- [8] R. E. MacFarlane, "TRANSX2 : A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, LANL (1993).
- [9] R. E. Alcouffe *et al.*, "User's Guide for TWODANT : A Code Package Two-Dimensional Diffusion -Accelerated Neutron Transport," LA-10049-M, LANL (1990).
- [10] K. L. Derstine, "DIF3D : A Code to solve One-, Two-, and Three Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems," ANL-82-64, ANL (1984).
- [11] B. J. Toppel, "A User's Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability," ANL-83-2, ANL (1983).

표 1. 납-비스무스 냉각재 칼리머 노심의 주요 특성

노심	주요 변수	연구 결과	소듐냉각재 평형노심
납-비스무스 냉각재 노심	<ul style="list-style-type: none"> • 노심 열/전기 출력: 392.2/150 MW • 반경방향 비균질노심 • 핵연료 : U-Pu(TRU)-Zr 삼원합금 • 재장전주기 : 18개월 	<ul style="list-style-type: none"> • 증식비 : 1.00~1.13 • 침투연소도 : 105~122MWD/kg • 연소결손반응도 : 356~1647pcm • 냉각재기화반응도 : -654~-30pcm 	<ul style="list-style-type: none"> 1.05 121 MWD/kg 897pcm 751pcm

표 2. pitch/diameter 비율에 따르는 납-비스무스 냉각재 칼리머 노심의 주요 핵적 성능 비교

	소듐 평형노심	1.3-100	1.4-100	1.5-100	1.3-110	1.4-110	1.5-110	1.3-120	1.4-120	1.5-120
Average Breeding ratio	1.05	1.07	1.03	1.00	1.10	1.06	1.03	1.13	1.09	1.05
Refueling Intervals(months)	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Burnup Reactivity Swing (pcm)	897	955	1341	1647	617	1001	1311	356	731	1034
Max. burnup (MWD/kg)	120.7	122.0	121.9	121.6	113.3	113.1	112.8	105.9	105.7	105.3
Peak fast fluence ($X10^{23}$ N/cm ³)	3.071	3.327	3.149	2.986	3.121	2.957	2.806	2.940	2.787	2.648
Max. Power Density (W/cm ³)	342.91	297.09	260.00	232.32	275.70	241.06	214.78	257.53	225.13	200.01
Coolant void reactivity (pcm)										
BOEC	717.9	-388.4	-527.1	-653.7	-278.6	-407.1	-526.9	-179.9	-291.3	-402.0
EOEC	751.3	-207.7	-301.9	-390.6	-116.7	-198.8	-280.2	-30.0	-98.6	-172.3
Fuel temp. coefficient (pcm/°C)										
BOEC	-0.569	-0.416	-0.390	-0.366	-0.425	-0.398	-0.372	-0.431	-0.404	-0.384
EOEC	-0.589	-0.432	-0.408	-0.386	-0.438	-0.414	-0.390	-0.443	-0.418	-0.400

표 3. 노심 물질 장전량 (Kg)

	1.3-100노심		1.4-100노심		1.5-100노심		1.3-110노심		1.4-110노심	
	주기초	주기말	주기초	주기말	주기초	주기말	주기초	주기말	주기초	주기말
U-235	43.2	41.1	43.4	41.4	43.5	41.6	48.8	46.6	49.0	46.9
U-238	30021.7	29812.5	29778.2	29578.3	29508.0	29316.8	33280.4	33063.7	33037.6	32829.9
PU238	28.6	29.4	37.2	38.1	48.2	49.2	27.6	28.4	35.5	36.4
NP237	12.7	12.8	11.9	12.0	11.1	11.2	13.3	13.4	12.4	12.5
PU239	2547.1	2562.7	2618.3	2627.4	2681.7	2685.1	2750.7	2772.0	2831.3	2845.8
PU240	740.7	747.4	861.1	865.5	994.2	996.2	744.7	753.0	861.7	868.1
PU241	69.3	68.7	82.7	81.7	97.6	96.2	67.0	66.5	79.6	78.8
PU242	43.8	44.2	61.4	61.7	84.6	84.8	38.9	39.4	53.8	54.2
AM241	38.9	40.5	51.2	52.9	66.1	67.9	38.6	40.3	50.4	52.2
AM242M	3.5	3.6	4.8	4.8	6.4	6.4	3.4	3.5	4.6	4.7
AM243	9.0	9.1	13.6	13.7	20.0	20.1	7.7	7.8	11.4	11.5
CM242	1.3	0.8	1.7	1.0	2.1	1.2	1.2	0.7	1.6	0.9
CM243	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
CM244	5.2	5.1	8.1	8.0	12.4	12.2	4.1	4.1	6.4	6.4
CM245	0.9	0.9	1.4	1.4	2.2	2.2	0.7	0.7	1.1	1.1

표 5. 지발중성자 분율

	1.3-100노심		1.4-100노심		1.5-100노심		1.3-110노심		1.4-110노심	
	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
beta k/beta-eff										
Group k										
1	2.461	2.438	2.510	2.484	2.555	2.527	2.455	2.434	2.505	2.481
2	18.090	18.012	18.489	18.395	18.878	18.771	17.995	17.932	18.380	18.301
3	15.152	15.098	15.245	15.184	15.323	15.259	15.147	15.098	15.243	15.188
4	35.731	35.779	35.558	35.615	35.394	35.457	35.769	35.809	35.599	35.648
5	20.937	21.004	20.713	20.791	20.502	20.586	20.978	21.036	20.757	20.825
6	7.629	7.669	7.485	7.532	7.348	7.400	7.657	7.692	7.516	7.557
Beta-effective	0.0033824	0.0034092	0.0032936	0.0033249	0.0032140	0.0032483	0.0033976	0.0034198	0.0033085	0.0033353

표 5. 지발중성자 분율 (계속)

	1.5-110노심		1.3-120노심		1.4-120노심		1.5-120노심	
	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
beta k/beta-eff								
Group k								
1	2.551	2.525	2.450	2.431	2.500	2.479	2.546	2.522
2	18.755	18.664	17.922	17.870	18.298	18.230	18.659	18.579
3	15.328	15.268	15.142	15.097	15.241	15.190	15.327	15.273
4	35.438	35.493	35.798	35.833	35.631	35.674	35.474	35.523
5	20.548	20.623	21.009	21.060	20.791	20.852	20.586	20.654
6	7.381	7.427	7.679	7.709	7.539	7.576	7.408	7.449
Beta-effective	0.0032283	0.0032583	0.0034093	0.0034280	0.0033200	0.0033433	0.0032140	0.0032675

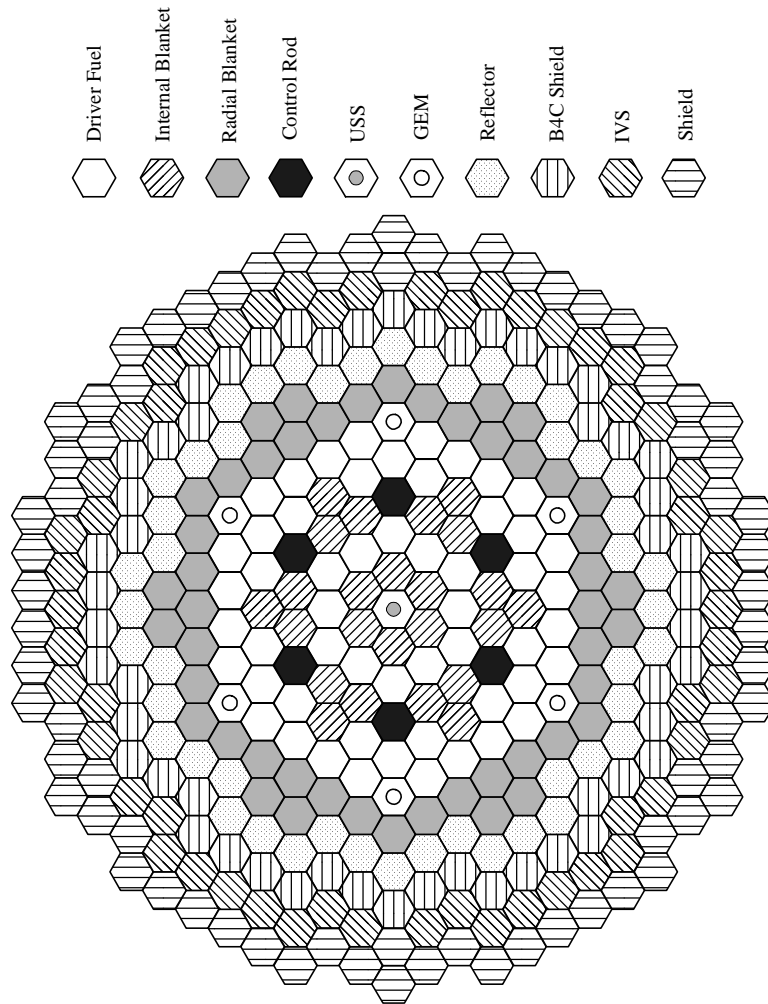


그림 1. 납-비스무스 냉각재 KALIMER 노심의 개요

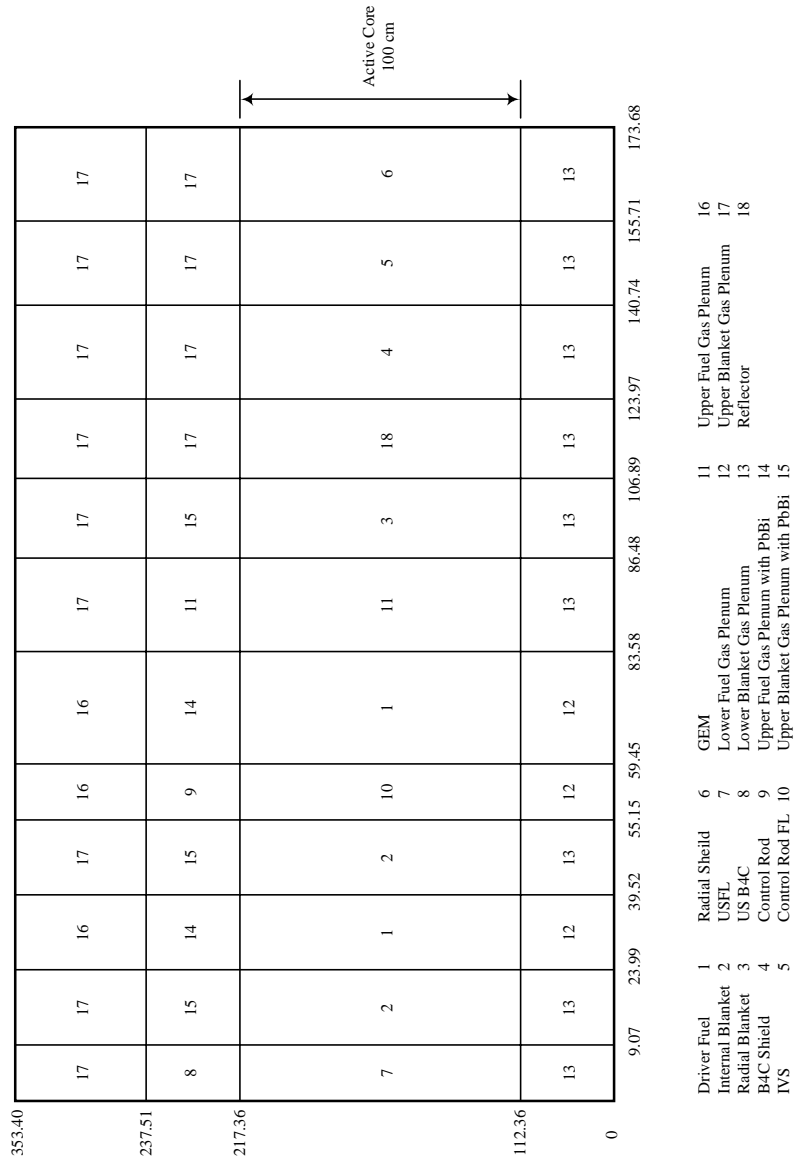


그림 2. R-Z 노심구성 내역(p/d 1.3, 유효노심높이 100cm의 경우)

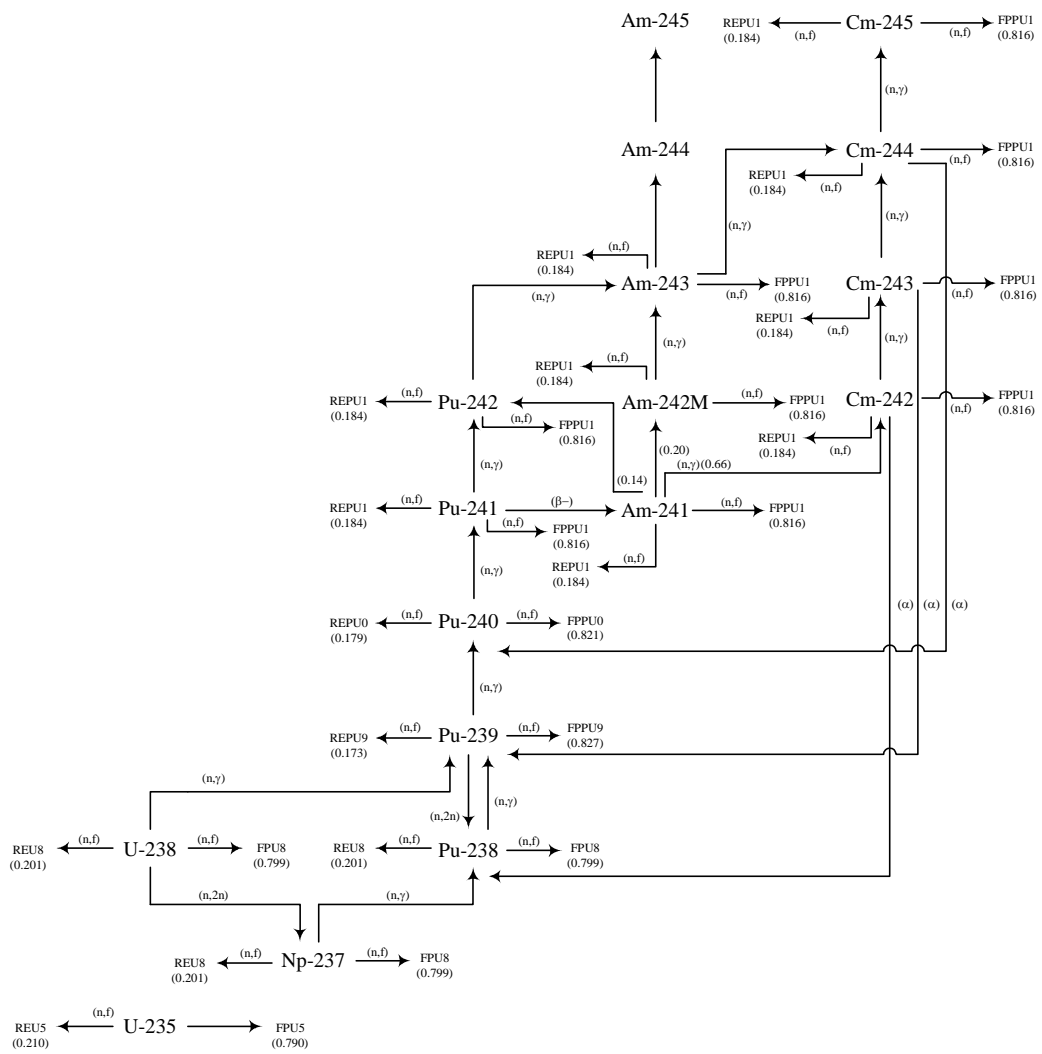


그림 3. 노심계산시 사용된 연소사슬