2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

농축 가돌리니아 가연성 독봉의 핵특성에 관한 연구

A Study on the Nuclear Characteristics of Enriched Gadolinia Burnable Absorber Rods

이정찬, 지성균, 김강석, 송재승

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가돌리니움 원소 중 중성자 흡수 단면적이 매우 큰 Gd-155와 Gd-157 두 원소를 농축하여 사용하면 가돌리니아 가연성 독봉의 가돌리니아 함량을 낮추어 Gd_2O_3-UO_2의 열적 특성 저하를 억제할 수 있으며, 가돌리니아 잔존 반응도도 감소시킬 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 천연 가돌리니아 가연성 독봉을 사용한 주기길이 2년의 평형 노심에서 농축 가돌리니아 가연성 독봉으로 대체한 경우 임계 붕소 농도, MTC, 첨두 출력, 주기길이 등 핵적 특성을 비교하였다. 비교 결과, Gd-155와 Gd-157을 70wt%로 농축하여 사용하면 주기 길이가 8일 증가된 것을 제외하면 핵적 특성의 차이는 거의 없는 것으로 판명되었다. 또한, 가돌리니아 함량 감소에 따라 증가하는 열전도도와 용융점을 고려하면 가돌리니아 봉의 출력 제한치를 높일 수 있고, 결과적으로 높은 농축도의 U-235를 사용하여 주기 길이를 더욱 증가시킬 수 있다.

Abstract

Among Gd isotopes, Gd-155 and Gd-157 can be enriched to reduce gadolinia contents in gadolinia burnable absorber rods. With less gadolinia contents, thermal characteristics of Gd_2O_3-UO_2 become less deteriorated and residual gadolinia reactivity penalties become less. In this study therefore nuclear characteristic parameters such as critical boron concentrations, MTC, power peaking factors and cycle lengths of a reactor in which enriched gadolinia burnable absorber rods substitute natural gadolinia rods are compared. With 70wt% enriched Gd, most parameters are almost identical for both cases but cycle length increases by 8 days from the two-year cycle length. Moreover, increased thermal conductivity and melting temperature allow higher enrichment of U-235 in gadolinia rod resulting in increased cycle length.

1. 서론

원자력 발전소의 경제성을 높이기 위하여 널리 사용하는 방법에는 장주기 운전을 채택하는 것이다. 장주기 운전을 하면 핵연료 총 비용은 증가하지만 운전 및 보수 비용과 대체 전원 비용이 감소하여 결과적으로 발전 원가가 낮아지게 된다. 장주기 운전에 필요한 충분한 잉여 반응도를 제공하기 위하여 U-235 농축도 4% 이상의 연료를 사용하고 있으며, 이러한 높은 초기 농축도와 많은 신연료는 지나치게 높은 붕소 농도와 첨두 출력을 초래할 수 있으므로 초기 잉여 반응도를 제어하기 위하여 가연성 독봉을 사용하고 있다. 여러 가지 가연성 독봉 중에서 Gd_2O_3-UO_2와 같은 일체형 가연성 독봉이 분리형에 비하여 장주기 운전에 경제적이므로 국내외 원자력 발전소에서도 가연성 독봉을 사용 중에 있다.

반면, UO_2 연료에 가돌리니아를 혼합할 경우, 가돌리니아 함량이 증가함에 따라 열전도도가 감소되는 등 열적 특성이 악화되는 것으로 알려져 있다.[1,2] 핵연료봉의 열적 특성 변화는 핵연료 건전성에 직접적인 영향을 미치므로 국내 상용 원전에서는 가돌리니아와 혼합되는 U-235의 농축도를 1.8 wt.%로 제한하였다. 또한, SMART[3]와 같은 초장주기 무붕산 노심에서는 주기길이동안 핵연료 잉여 반응도를 가연성 독봉만으로 가능한 일정한 수준으로 유지하여야 하는데, 천연 가돌리니아 가연성 독봉 만으로는 연소가 급격하여 초장주기 주기 길이 동안 잉여 반응도 제어가 어려우므로 다량의 Al_2O_3-UO_2의 분리형 가연성 독봉을 혼합 사용하였다. 그러나, 가돌리니움 동위원소 중 중성자 흡수 단면적이 큰 Gd-155와 Gd-157을 농축하면 독봉 내 가돌리니아 함량을 낮출 수 있고 이에 따라 보다 높은 농축도의 우라늄 사용이 가능하여 주기길이를 증가시킬 수 있다. 또한, 동일한 가돌리니아 함량을 사용하는 경우 Gd-155나 Gd-157의 농축도를 높이면 가돌리니아 연소 시기가 지연되므로 초장주기 주기 길이동안 적절한 반응도 제어가 가능해지는 이점이 있다 .

본 연구에서는 영광 3호기와 같은 상용로를 대상으로 천연 가돌리니아 가연성 독봉을 이용하여 주기 길이 2 년의 평형 노심을 구성하고, 가연성 독봉을 중성자 흡수 단면적이 큰 Gd-155와 Gd-157이 농축된 가돌리니아 가연성 독봉으로 대체한 노심의 핵적 특성을 비교하여 농축 가돌리니아를 가연성 독봉으로 사용할 때의 효용성을 검토하였다.

2. 핵설계 특성

2.1 농축 가돌리니움

원자 번호 64의 가돌리니움(Gd) 동위 원소 중 Gd-155와 Gd-157의 열중성자 흡수 단면적은 대단히 커서, 원자력 발전소에서는 Gd_2O_3의 산화물 형태로 UO_2와 혼합하여 일체형 가연성 독봉으로 사용하고 있다. 천연 Gd에서 Gd-155와 Gd-157의 자연계 존재 비율은 각각 14.80%와 15.65%로 전체 Gd 원소의 30.45%에 해당된다.[4] 따라서, 가돌리니아의 70%는 반응도 제어에 기여하지 않으며 가돌리니아 봉의 열적 특성만 악화시키게 된다. 만약 Gd-155나 Gd-157만 선택적으로 사용 가능하다면 가돌리니아 함량을 줄일 수 있으므로 가돌리니아 봉의 열적 특성 악화를 최소화할 수 있고 결과적으로 가돌리니아가 혼합될 우라늄의 농축도를 높일 수 있다. 높은 우라늄 농축도는 핵연료 집합체

내에서 가돌리니아 봉의 출력 비중을 높여 결과적으로 그림 1과 같이 핵연료 집합체의 첨두 출력을 감소시켜주는 효과가 있다. 또한, U-235 농축도의 증가는 주기 길이 증가에도 기여할 것이다.

그림 2는 U-235 농축도 4 wt%인 17x17 핵연료 집합체를 대상으로 Gd-155와 Gd-157을 각각 70% 농축하는 경우와 혼합해서 농축하는 경우의 연소도에 따른 무한 증배 계수를 나타낸 것이다. Gd-157의 2200m/sec 중성자 흡수 단면적은 255,000b으로 Gd-155의 61,000b보다 커서[5], Gd-157이 많을수록 초기 반응도 억제 효과가 크고 가돌리니아가 상대적으로 빨리 연소되는 현상을 보인다. 그러나, Gd-155 및 Gd-157 모두 대단히 큰 중성자 흡수 단면적을 갖고 있으므로, 두 핵종 모두 농축을 할 때와 어느 한 핵종만 농축할 때 집합체 무한 증배 계수 차이가 1% 이내로 유사한 연소 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 가돌리니움 원소를 농축할 때에는 Gd-155와 Gd-157 모두 농축하여 사용하는 것이 효율적인 방안으로 판단된다.

2.2 대상 노심

영광 3호기 장주기 노심으로부터[6] 24 개월주기 평형 노심을 대상으로 하였다. 그림 3과 같은 대상 노심은 그림 4와 같은 16x16 형태의 집합체 177개로 구성되며 장주기 운전을 위하여 4.95 wt%, 4.45 wt% 농축도의 UO_2 와 0, 12, 16 가돌리니아 가연성 독봉을 포함한 집합체들로 구성되어 있다. 가연성 독봉은 UO_2에 가돌리니아 8wt%를 혼합한 것을 사용하였으며, 우라늄은 천연 우라늄을 사용하였다. 노심해석체계로는 군정수 생산에 CASMO-3, 노심 연소 계산 및 해석에 MASTER를 이용하였다.[7,8,9] 88개의 신연료를 사용하는 평형 노심에서 주기 길이(연소도)는 606일(22.5MWD/KgU), 봉 및 집합체 최대 연소도는 63.1MWD/KgU 및 54.6MWD/KgU이며, 최대 반경 방향 첨두 출력(Fr)은 1.49 이하다. 현재 한국 표준형 원전에 사용하는 핵연료봉의 허용 최대 연소도는 58MWD/KgU으로 이 연구에서 적용한 63.1은 허용 기준을 벗어나나, 최대 연소도를 나타내는 집합체는 노심 중앙에 위치한 3주기 연소된 핵연료로 연소도가 낮은 핵연료를 사용하거나 핵연료 성능 향상을 통해 해결 가능한 문제이므로 이 연구에서는 고려하지 않았다.(그림 5) 주기초 고온 전출력 및 영출력 임계 붕소 농도는 1,679ppm 및 2,215ppm 이며, 감속재 온도 계수(MTC)는 -11.49pcm/°C 와 5.11pcm/°C로 현재 설계 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

이와 같은 장주기 노심은 가돌리니아 가연성 독봉이 장전되는 양이 많기 때문에 가돌리니아 독봉에 사용되는 우라늄 농축도에 따라 주기 길이가 변화한다. 그림 6에는 가돌리니아 독봉에 사용되는 우라늄 농축도에 따른 주기 길이 변화를 표시하였다. 우라늄 농축도 1wt% 증가에 7일의 주기길이 증가율을 보인다. 그림 7과 8에서 보이는 바와 같이 반경 방향 첨두 출력 Fr은 우라늄 농축도 1wt% 증가에 주기초에는 -0.00422, 가돌리니아가 연소된 주기중에는 -0.00786씩 감소하는 것으로 나타났다. 반면 U-235의 증가로 주기초 전출력 임계붕소농도는 우라늄 농축도 1wt% 당 25ppm씩 증가하는 것으로 나타났다.

2.3 농축 가돌리니아를 이용한 노심

가연성 독봉에 사용할 가돌리니움은 Gd-155와 Gd-157을 70wt%로 농축한다고 가정하였다. 두 핵종을 같은 비율로 농축한다고 가정하고 그림 9와 같이 8wt% 천연 가돌리니아와 집합체 반응도를

유사하게 하기 위하여 3.6wt% 가돌리니아를 사용하였다. 그림 10에는 이와 같은 농축 가돌리니아 가연성 독봉에 사용된 U-235 농축도에 따른 평형 주기의 주기 길이 변화를 나타내었다. 주기 길이는 선형적으로 증가하며, 그림 6의 동일한 U-235 농축도에서 천연 가돌리니아를 사용할 때와 비교하여 8일 이상의 주기 길이 증가를 나타내고 있다.

주기 길이 증가의 이유는 장전된 우라늄의 증가와 Gd-155와 Gd-157을 제외한 기타 핵종의 감소로 인한 잔존 독작용 감소에 기인한다. 대상 장전 모형에 사용된 가돌리니아 독봉 수는 2,252개이며 농축 가돌리니아를 사용함으로써 감소된 가돌리니아 양만큼 추가 장전되는 우라늄 양은 노심 총 장전 우라늄 양의 0.24%에 해당하나 우라늄 농축도가 낮아 이로 인한 주기 길이 증가 효과는 미미하다. 따라서, 잔존 독작용을 비교하기 위하여 16 Gd 집합체에 대하여 가돌리니아 봉에 포함되는 우라늄 농축도와 장전량까지 일치시킨 후 집합체 반응도를 그림 11에 비교하였다. 농축 가돌리니아 봉에 장전된 Gd 양이 천연 Gd 독봉에 비하여 반응도로 100pcm에 해당하는 만큼 적게 장전되었으며, Gd 완전 연소 후 약 450pcm 이상 높은 반응도를 나타내고 있다. 가돌리니아가 포함되지 않은 집합체와 비교한 결과를 보면, 천연 Gd를 사용한 경우 약 560pcm에 해당하는 잔존 독물질이 남아있는 반면, 70wt% 농축 Gd를 사용한 경우 110pcm에 불과한 것을 알 수 있다. 따라서, 농축 가돌리니아를 사용함으로써 2년 주기 노심의 경우 주기말 반응도 이익은 가돌리니아 봉수에 따라 약 300pcm 이상이므로 이로 인한 주기 길이 증가가 대부분임을 확인할 수 있다.

주기초 고온 전출력 및 영출력 임계 붕소 농도는 1676ppm 및 2213ppm 이며, 이 때의 감속재 온도계수 (MTC)는 -11.61pcm/°C 와 5.05pcm/°C로 천연 가돌리니아를 사용하였을 때와 3ppm 및 0.1pcm/°C 이내로 동일하게 나타났다. 즉, 농축 가돌리니아를 사용하더라도 천연 가돌리니아를 사용할 때와 노심 반응도 특성은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

농축 가돌리니아를 사용하더라도 천연 Gd를 사용할 때와 반응도 제어량이 유사하도록 조절하였으므로, 첨두 출력도 천연 Gd를 사용할 때와 차이가 없다. 그림 12를 보면 농축 가돌리니아를 사용한 경우 Fr은 주기초 0.001 낮은 반면 주기중 (300EFPD)에는 0.004 높게 나타났으나, 이는 70wt% 농축 가돌리니아 3.6wt%를 사용한 경우 천연 Gd를 적용한 집합체보다 Gd 연소 속도가 약간 빠르기 때문이다. 노심 안전성에 중요한 첨두 출력은 일반 연료봉에서 나타나지만, 가돌리니아 가연성 독봉도 연료봉이므로, 가돌리니아 봉의 건전성 확보 또한 중요하다. 따라서, 천연 가돌리니아를 사용할 때와 농축 가돌리니아를 사용할 때 가돌리니아 봉의 출력을 비교하여 보았다. 각 경우 연소도가 높은 집합체에서 가장 높은 연소도를 갖는 가돌리니아 봉의 출력 이력을 그림 13~16에 나타내었다. 첫번째 주기에서 가돌리니아 봉의 상대 출력은 가돌리니아 봉의 우라늄 농축도에 따라 0.2~0.4부터 시작하여 0.7~1.1까지 증가한 후 이 수준을 유지하고, 두번째 장전 주기에서는 이미 가돌리니아가 완전 연소된 상태이므로 일정 수준을 계속 유지하고 있다. 2번째 주기는 재장전된 집합체의 출력이 낮아 가돌리니아 봉의 출력도 상대적으로 낮게 나타났다. 이러한 현상은 Gd 농축도와 관계없이 동일한 형태를 나타낸다. 가돌리니아 봉 성능에 중요한 출력 이력에서 가돌리니아 가연성 독봉의 우라늄 농축도에 따른 최대 상대 출력을 그림 17에 나타내었다. 70wt% 농축 Gd를 사용한 3.6wt% 가돌리니아 가연성 독봉의 최대 출력이 동일한 U-235 농축도의 천연 가돌리니아 독봉 노심에 비하여 약 0.5 높게 나타난 것은 농축 가돌리니아의 잔존 독작용이 상대적으로 적기 때

문이다. 그러나, 가돌리니아 가연성 독봉의 출력을 일반 연료봉보다 제한하는 이유는 가돌리니아 함량이 증가함에 따라 낮아지는 융점과 열전도도 때문이다. 따라서, 8wt%를 사용해야 하는 천연 Gd 독봉에 비해, 3.6wt%를 사용한 농축 Gd 독봉의 첨두 출력 제한치는 봉 출력 관점에서 증가가 가능하다. 예를 들어 상대 출력 제한치가 0.2 증가하면 가돌리니아 독봉의 U-235 농축도를 1wt% 올릴 수 있으며(그림 17), 이는 주기 길이 약 8일에 해당함을 알 수 있다.(그림 6)

3. 결론

Gd 원소 중 중성자 흡수 단면적이 대단히 큰 Gd-155와 Gd-157을 농축하여 가돌리니아 가연성 독봉으로 원자로에 적용할 때 핵적 특성을 살펴 보았다. 대상 노심으로 주기길이 2년의 영광 3호기 평형 노심을 가정하였다. 대상 노심과 같이 다량의 가돌리니아 가연성 독봉을 필요로 하는 노심에서 Gd-155와 Gd-157을 70wt%로 농축하여 사용함으로써 임계 붕소 농도, MTC, 노심 첨두 출력 등을 유사하게 유지하면서 가돌리니아의 함량을 8wt%에서 3.6wt%로 감소시킬 수 있었다. 2년 운전 주기의 영광 3호기 노심의 경우, 70wt% 농축 Gd를 사용하면 잔존 독작용의 감소로 인한 주기 길이 8일 증가의 직접적인 효과 외에도, 가돌리니아 함량 감소에 따라 증가하는 열전도도와 용융점을 고려하면 가돌리니아 봉의 출력 제한치를 높일 수 있으므로, 혼합되는 U-235 농축도를 높일 수 있어 주기 길이를 더욱 증가시킬 수 있다.

참고 문헌

[1] Ishimoto. S., et al.,:J. Nucl. Sci. Technol., 31[8] (1994).

[2] R. Eberle, et al., "Gadolinia Fuel Rods: Material Properties and Thermal Analysis," Enlarged Halden Programme Group Meeting, Sonderstolen (Norway), March 2-7, 1986.

[3] 이정찬 외, "제어봉 이탈사고 완화를 위한 무붕산 원자로 노심설계연구," '99추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1999년.

[4] http://atom.kaeri.re.kr/ton/nuc9.html

[5] Chart of the Nuclides, GE, 1977.

[6] 이상희, 지성균 외, "영광 3,4호기 장주기 운전 타당성 연구," KEPRI-95Z-J05, 한국전력공사, 1996.6.

[7] M. Edenius et. al., "CASMO-3: A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4," STUDSVIK/NFA-89/2 Rev.1, January 1991.

[8] M. Edenius, MICBURN-3 Users Manual Version 1.5, STUDSVIK/NFA-89/12.

[9] 조병오 외, "MASTER 2.1 User's Manual," KAERI/UM-06/2000, KAERI, 2000.9.

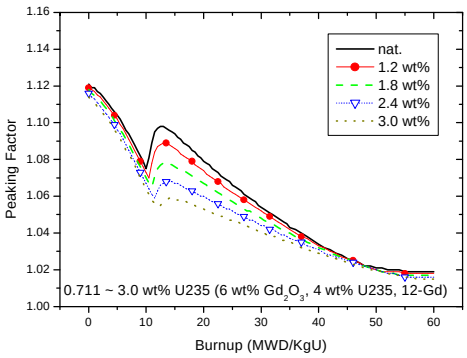

그림 1. 가돌리니아 독봉의 U-235 농축도와 첨두 출력

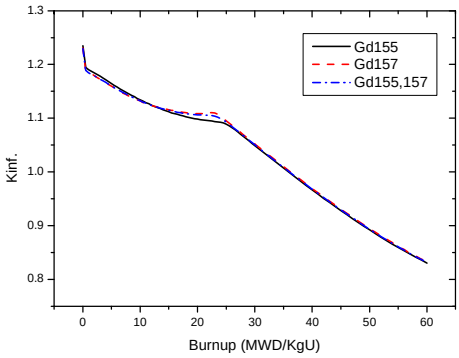

그림 2. Gd 동위원소 농축에 따른 집합체 k_∞ 비교

1	2 **F2**	3	4 **F2**	5	6 **F2**	7	8 **F0**
9 **F2**	10	11 **F2**	12	13 **F2**	14	15 **F1**	16
17	18 **F2**	19	20 **F2**	21	22 **F2**	23 **F1**	24
25 **F2**	26	27 **F2**	28	29 **F2**	30	31 **F0**	
32	33 **F2**	34	35 **F2**	36	37 **F1**	38	
39 **F2**	40	41 **F2**	42	43 **F1**	44		
45	46 **F1**	47 **F1**	48 **F0**	49			
50 **F0**	51	52					

F0: Fresh 0 Gd
F1: Fresh 12 Gd
F2: Fresh 16 Gd

그림 3. 24개월 주기 노심 신연료 장전 모형 (88 신연료)

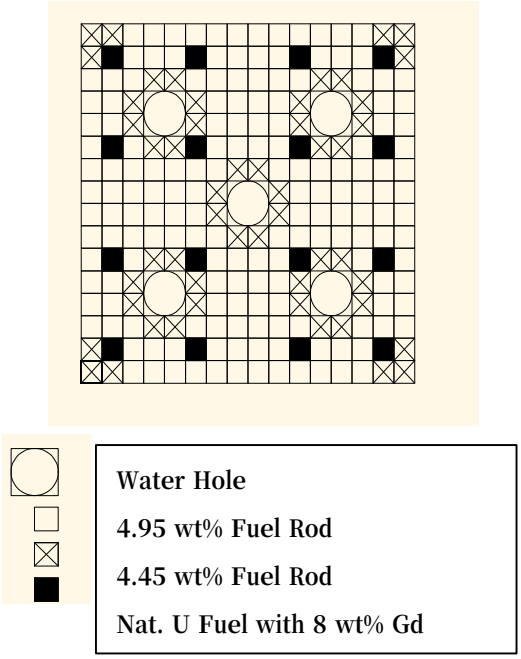

그림 4. 24개월 주기 노심에 적용될 16 가돌리니아봉을 포함한 집합체

0.946	1.201	0.983	1.21	0.996	1.228	1.042	0.837
54.589	27.891	51.298	28.203	51.088	28.091	41.582	17.951
1.201	0.982	1.207	0.985	1.221	1.004	1.16	0.639
27.891	51.146	28.21	51.809	28.22	50.906	25.537	36.923
0.983	1.207	0.987	1.222	1.004	1.235	1.106	0.496
51.298	28.212	51.784	28.689	51.601	27.941	23.82	35.21
1.21	0.985	1.222	1.071	1.236	1.039	0.922	
28.203	51.811	28.688	46.359	28.473	43.246	19.877	
0.996	1.221	1.004	1.236	1.02	1.015	0.478	
51.088	28.22	51.6	28.472	43.688	20.882	37.487	
1.228	1.004	1.235	1.039	1.015	0.519		
28.091	50.906	27.941	43.248	20.885	38.305		
1.042	1.16	1.106	0.922	0.478			
41.582	25.537	23.82	19.878	37.485			
0.837	0.639	0.496			상대 출력		
17.951	36.924	35.211			연소도 (MWD/KgU)		

그림 5. 주기말 출력 및 연소도 분포 (2년 평형주기)

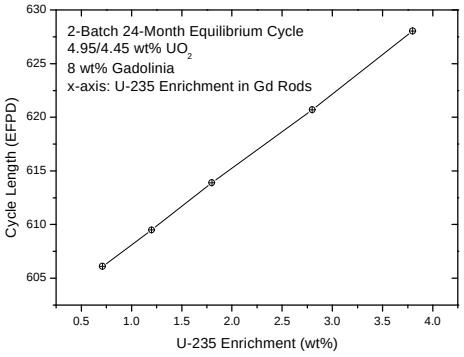

그림 6. 천연 가돌리니아 독봉에 포함된 U-235 농축도에 따른 주기 길이 변화

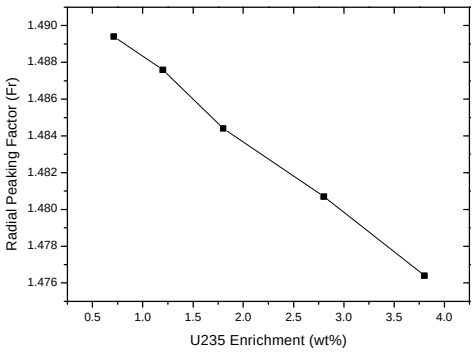

그림 7. 가돌리니아 가연성 독봉중 U-235 농축도 대 주기초 반경방향 첨두출력

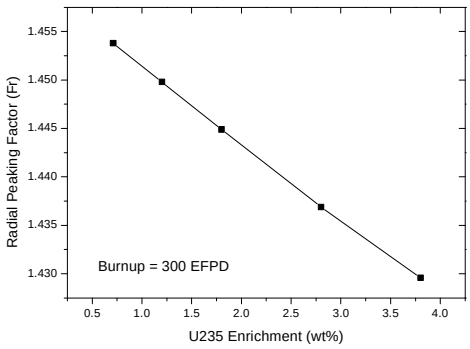

그림 8. 가돌리니아 가연성 독봉중 U-235 농축도 대 주기중 반경방향 첨두출력

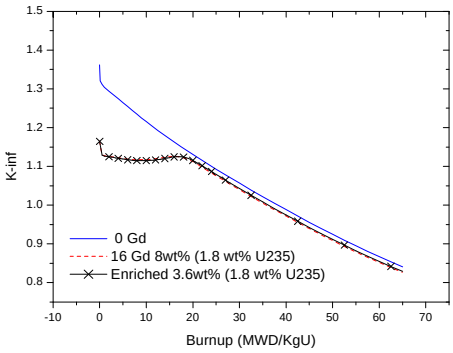

그림 9. 16 가돌리니아 집합체의 k_{∞}

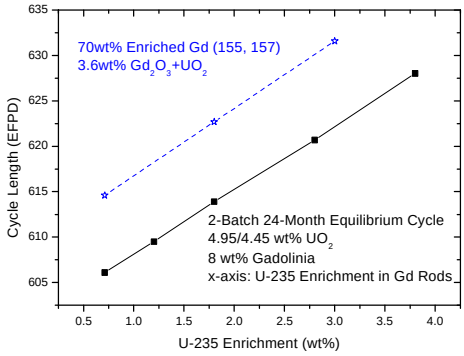

그림 10. 농축 가돌리니아 독봉에 포함된 U-235 농축도에 따른 주기 길이 변화

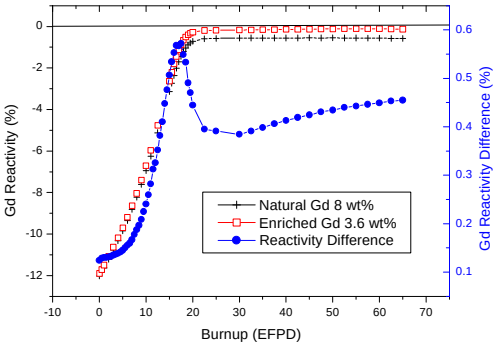

그림 11. 농축 및 천연 16 가돌리니아 집합체의 반응도 비교

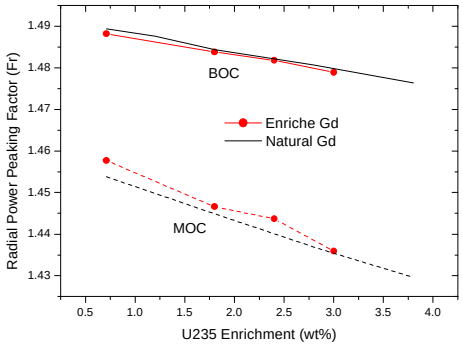

그림 12. 농축 및 천연 가돌리니아 적용 노심의 가돌리니아봉 U-235 농축도에 따른 Fr

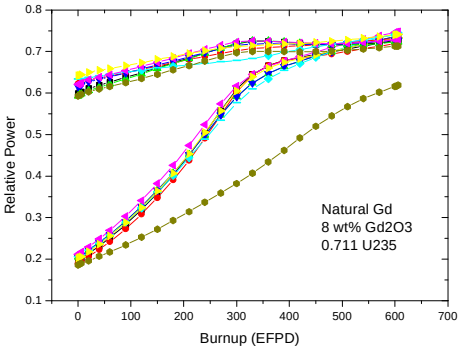

그림 13. 가돌리니아 봉의 출력 이력 (천연 Gd, 천연 U)

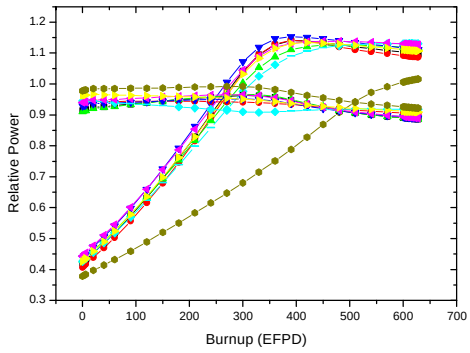

그림 14. 가돌리니아 봉의 출력 이력
(천연 Gd, 3.8wt% U235)

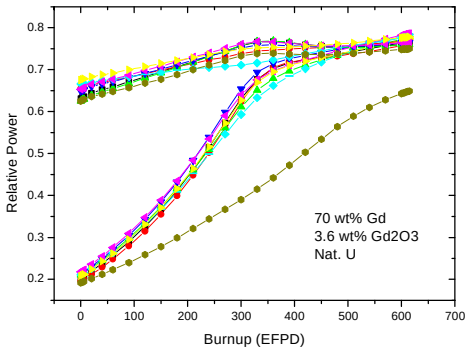

그림 15. 가돌리니아 봉의 출력 이력
(농축 Gd, 천연 U)

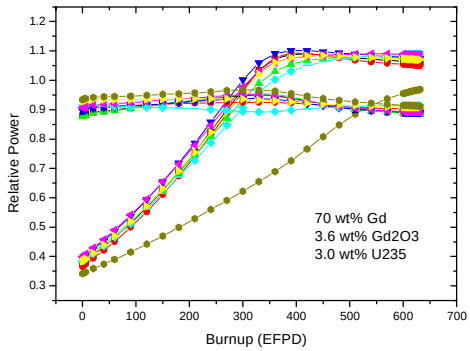

그림 16. 가돌리니아 봉의 출력 이력
(농축 Gd, 3.0 wt% U235)

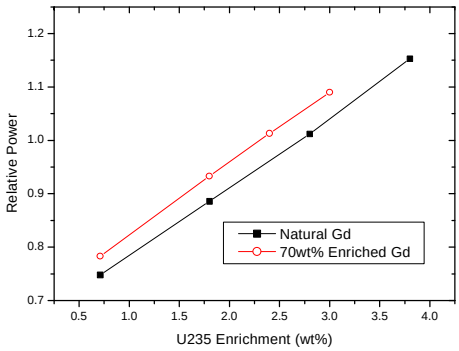

그림 17. 가돌리니아 봉의 U-235 농축도와
가돌리니아 봉 최대 출력