

‘95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

혼합핵연료 경수로 전노심에서의 플루토늄 소모량 검토

주형국, 김영진, 정형국, 김영일, 손동성
한국원자력연구소

요 약

벨기에, 독일 및 프랑스를 비롯한 유럽의 여러나라와 일본은 플루토늄을 혼합핵연료로 만들어 경수로에 부분적으로 장전하여 재순환시키는 방법에 대한 연구를 오래전부터 계속하여 현재는 이를 상용화하는 단계까지 왔다. 이전의 혼합핵연료의 경수로에의 이용이 핵연료 자원을 효과적으로 이용하는 측면이 중시되었으나, 최근에는 잉여 플루토늄 처리 및 혼합핵연료의 사용을 일부 원자로에 국한하는 목적으로 혼합핵연료를 노심 전체에 장전하여 사용하는 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 혼합핵연료를 가압경수로 노심 전체에 장전하는 개념에 대하여 플루토늄의 소모 및 노심의 핵특성 관점에서 검토하였다. 그 결과 기존의 가압경수로에 혼합핵연료로 전노심을 구성하여 연소시킬 경우 fissile 플루토늄 원소의 초기 장전량이 방출시에는 약 60% 수준으로, 플루토늄의 총량은 약 70% 수준으로 감소하고 있다. 기존의 경수로에 혼합핵연료를 전체적으로 장전하면 900 MW급 원자로 1기당 연간 약 1톤가량의 플루토늄이 소요되며, 이를 실현하기 위해서는 제어봉 계통의 추가 설치 및 봉산계통의 고봉산화 등의 설비의 변경과 핵특성 변화에 따른 안전성 분석등이 필요할 것이다.

1. 개 요

벨기에, 독일 및 프랑스를 비롯한 유럽의 여러나라와 일본은 플루토늄을 혼합핵연료 형태로 경수로에 재순환시키는 방법에 대한 연구를 오래전부터 계속하여 왔으며 현재는 상용화 단계까지 왔다[1-4]. 우라늄 자원을 최대한 활용할 수 있는 고속로 개발이 지연됨에 따라 혼합핵연료의 경수로에의 이용이 그 중간 단계로서 자원을 효과적으로 이용하는 측면에서 중시되었다. 최근에는 잉여 플루토늄 처리나[5] 혼합핵연료의 사용을 일부 원자로에만 사용할 경우 혼합핵연료 사용에 관련된 추가 업무를 소수의 원자로에만 국한시킬 수 있는 이유로 혼합핵연료를 노심 전체에 장전하여 사용하는 연구가 진행되고 있다[6]. 이에따라 앞으로의 원자로는 혼합핵연료를 노심 전체에 장

전할 수 있는 기능이 요구될 것으로 판단된다. 물론 기존의 원자로가 혼합핵연료를 부분적으로, 일반적으로 노심의 1/3가량, 장전하여도 원자로 계통에 별 문제를 주지 않고 있다는 것이 실증적으로 입증은 되었지만, 혼합핵연료를 전노심에 장전하는 개념에 대하여 플루토늄의 소모 및 노심의 핵특성 관점에서 검토가 필요하다.

2. 혼합핵연료 장전 전노심 분석

2.1 혼합핵연료 집합체 설계

혼합핵연료가 노심에 부분적으로 장전되는 경우에는 인접한 우라늄 핵연료로부터 열중성자가 유입됨에 따라 혼합핵연료 집합체 주변의 연료봉의 출력이 높아지게 된다. 따라서 이를 줄이기 위하여 혼합핵연료 집합체 주변 연료봉의 플루토늄 함량을 내부 연료봉 보다 낮추는 설계가 일반적이다[1-4]. 그러나 노심 전체에 혼합핵연료가 장전되는 경우에는 집합체내의 플루토늄 함량을 달리 하지 않는다[6]. 그림1은 혼합핵연료 전노심 분석에 사용되었던 fissile 플루토늄의 함량이 4w/o인 혼합핵연료 집합체내의 출력 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 안내관 주변 연료봉의 출력이 높기 때문에 혼합핵연료 전 노심에 사용되는 혼합핵연료라 하더라도 집합체내의 플루토늄의 함량을 달리 설계하는 것이 바람직하다. 혼합핵연료에도 노심내의 출력을 제한치 이내로 낮추기 위해서 가돌리니아봉의 사용이 불가피한데, 혼합핵연료에서의 가돌리니아의 중성자 흡수효과는 약 반정도로 감소하는 것으로 평가되었다.

2.2 가상 노심 구성

본 논문에서는 혼합핵연료 전 노심을 가상적으로 초기노심부터 구성하였다. 따라서 초기 노심에는 노심내의 출력분포를 평탄하게 하기위해서 fissile 플루토늄의 함량이 1.6, 2.4, 4.0 w/o로 서로 다른 세 종류의 핵연료집합체를 사용을 가정하였다. 초기노심 이후에 장전되는 신핵연료는 fissile 플루토늄의 함량이 4w/o인 혼합핵연료이다. 또한 혼합핵연료 노심의 특성이 주기 길이에 의한 영향을 살펴보기 위하여 14개월 주기의 단주기 및 18개월 주기의 장주기 전략에 대한 분석을 수행하였다. 단주기 노심에서는 신핵연료가 매 주기 마다 52개씩, 장주기 노심에는 64개씩 장전되는 것으로 가정하였다. 노심에 처음으로 장전되는 혼합핵연료의 플루토늄의 조성비는 Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242 원소 각각 1.8/59.0/23.0/12.2/4.0 w/o이며 매트릭스 물질로는 농축도가 0.225w/o인 감손우라늄을 사용하였다. 초기노심에서도 노심의 출력 침투치를 낮추기 위해서 플루토늄 함량이 서로 다른 핵연료의 사용뿐 아니라 일부 핵연료에는 가돌리니아봉을 사용하는 것으로 가정하였다. 즉 초기 초기노심에서 사용된 2.4 w/o fissile 플루토늄 함량의 혼합핵연료 중 일부에는 4개

의 가돌리니아붕이 포함되어 있다. 후속주기에서도 신연료중 일부는 가돌리니아붕이 4개 내지 8개를 장전하였다.

3. 혼합핵연료 장전 전노심 핵특성

3.1 플루토늄 동위 원소량 변화

기존의 경수로가 플루토늄 조각로의 기능이 있는 지를 판단하기 위하여 노심연소에 따른 플루토늄 원소의 양 변화를 분석하였다. 혼합핵연료 전노심에서 플루토늄 양의 변화가 부분노심의 경우와 표1에 비교되어 있다. 이 표에서 혼합핵연료를 통상적으로 사용하는 비율대로 부분적으로 사용하는 경우에는 플루토늄의 양이 거의 그대로 유지되어 플루토늄의 소모용으로는 효과가 없는 것으로 나타났다. 그러나 혼합핵연료를 전노심에 사용할 경우에는 표에서 보듯이 플루토늄의 소모 현상이 뚜렷이 나타나고 있으며, 각 배취별로는 fissile 플루토늄 원소의 초기 장전량이 방출시에는 약 60% 수준으로, 플루토늄의 총량은 약 70% 수준으로 감소하고 있다. 따라서 혼합핵연료 전노심을 활용할 경우 연간 900MW급 경수로1기에 약 1톤 가량의 플루토늄이 소요된다.

3.2 노심 핵특성 인자

혼합핵연료 전노심의 반경방향이나 축방향의 출력 분포는 우라늄 노심과 비교할때 커다란 차이가 없다. 반경방향 출력분포의 경우 노심의 장전 모형과 직접적인 관계에 있기 때문에 출력분포가 혼합핵연료 이용에 대한 제한적인 요소로는 작용하지 않는다. 다만 노심의 출력침두치를 낮추기 위해서는 혼합핵연료에도 가돌리니아와 같은 독봉의 사용이 불가피하다. 축방향의 출력분포에 있어서는 우라늄 노심 보다는 노심하부로 약간 치우치는 경향을 보이고 있는데 이 이유는 혼합핵연료노심의 감속재온도계수가 더 음의 값을 갖기 때문에 상대적으로 온도가 낮은 노심 하부에서 출력이 증가하고 있다.

혼합핵연료 전노심의 핵특성인자가 표2에 우라늄노심과 비교되어 있다. 주기초의 잉여 반응도를 제어하기 위한 붕산농도 요구량은 혼합핵연료 노심에서는 붕산가가 낮기 때문에 증가하고 있다. 혼합핵연료 노심에서는 중성자의 유출이 많아지기 때문에 감속재온도 계수 및 등온온도계수가 음의 방향으로 증가하고 있다. 공명흡수 단면적이 큰 Pu^{240} 원소의 양이 증가하므로써 도플러계수의 경우도 증가하고 있다. 혼합핵연료의 사용은 노심내의 중성자스펙트럼을 경화시킨다. 따라서 열중성자 흡수체인 Xenon, 붕산, 제어봉 들의 반응도가는 우라늄 노심에 비해 현저히 떨어지고 있다. 이에 따라 혼합핵연료 전노심에서는 원자로의 안전 정지를 위한 최소안전정지 여유도에 대한 현재의 조건치를 위배하는 것으로 나타났다.

4. 결론 및 논의

혼합핵연료를 가압경수로 노심 전체에 장전하는 개념에 대한 검토를 플루토늄의 소모 및 노심의 핵특성 관점에서 수행하였다.

기존의 가압경수로에 혼합핵연료로 전노심을 구성하여 연소시킬 경우, 900MW급 경수로 1기당 연간 약 1톤 가량의 플루토늄이 소요되며 fissile 플루토늄 원소의 방출량은 초기 장전량의 약 60% 수준으로, 플루토늄의 총량은 약 70% 수준으로 감소하고 있다.

또한 혼합핵연료 전노심이 갖는 핵적 특성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 감속재 및 등온온도계수, 도플러계수 등은 중성자 스펙트럼 경화에 따라 음의 방향으로 증가하고 있다.
- 붕산가, 제어봉가, 가연성 독붕봉가, 제논가 등은 현저히 감소하고 있다.

이와같은 특성에 의해 핵연료 재장전시 붕산요구량이 증가하고 있으며, 운전정지 여유도는 감소하고 있다. 따라서 기존 가압경수로 노심에 혼합핵연료를 전체적으로 장전하기 위해서는 제어봉계통의 추가장착 및 붕산계통의 고붕산화 등의 설비의 변경이 필요할 것이며 핵특성 변화에 따른 안전성 분석이 필요하다. 또한 혼합핵연료사용에 따른 핵특성 변화를 완화시키기 위하여 감속률을 높이는 격자 설계 변경에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. H. Bairiot and C. Vandenberg, " Use of MOX fuels : The Reason to Starts," IAEA Technical Report Series No.305, 65-95, Vienna, 1989.
2. F.Vincent, "Gaining Good Experience with MOX at French PWRs," Nuclear Engineering International, Dec. (1990).
3. H.J.Dibbert, J.Huber, and S.Winnik, " Plutonium Recycling in LWRs in F.R. Germany," Nuclear Europe, 1-2/1988.
4. Y.Matsuoka and S.Abeta, "Mihama MOX Trials Meet with Success," Nuclear Engineering International, Dec. 1989.
5. The Report of Expert Group on The Management of Plutonium, Committee for Technical and Economic Studies on Nuclear Energy Development and The Fuel Cycle, OECD/NEA, to be published.
6. H.Tochihara, Y.Komano, M.Ishida and H.Mukai, "Full MOX Core Design for Advanced PWR," International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems, Versailles, France, September 11-14, 1995.

표1. 플루토늄양 변화

Pu 동위원소	평형주기 노심의 Pu 양 (Kg)						Batch별 Pu 양 (Kg)			
	MOX		MOX		MOX		MOX		MOX	
	부분(1/3)노심 주기초	주기말	단주기 전노심 주기초	주기말	장주기 전노심 주기초	주기말	단주기 전노심 장전시	방출시	장주기 전노심 장전시	방출시
Pu ²³⁹	588.6	560.6	1771.2	1362.4	1845.6	1354.4	751.2	345.2	921.6	445.2
Pu ²⁴⁰	276.5	302.9	888.0	861.6	890.8	861.6	292.8	267.2	359.3	333.0
Pu ²⁴¹	160.1	183.1	513.2	530.0	507.2	530.4	155.3	171.2	190.6	212.1
Pu ²⁴²	60.0	81.1	187.2	225.2	180.8	222.0	50.9	81.1	62.5	101.8
Fissile Pu	748.7	743.7	2284.4	1892.4	2352.8	1884.8	906.5	516.4	1112.2	657.3
총 Pu	1085.2	1127.7	3359.6	2979.2	3424.4	2968.4	1250.2	864.7	1534.0	1092.1

표2. 혼합핵연료 노심 핵특성 인자

핵특성 인자	노심 주기 우라늄 노심	혼합핵연료 전노심	
		단주기	장주기
Boron Concentration			
Refueling CB,ARI(k < 0.95)	>2066	>3969	>4144
Shutdown (k = 0.98) with ARI, HZP	1313	1506	1843
Shutdown (k = 0.98) with ARI, HFP	2374	3079	3392
To control at HZP, ARO, (k =1.0)	2100	2531	2830
To control at HZP, ARI, (k =1.0)	1056	992	1313
To control at HFP, ARO, (k =1.0)			
0 MWD/MtM, No Xenon	1907	1920	2234
240 MWD/MtM, Equilibrium Xenon	1541	1453	1754
Moderator Temperature Coefficient at HFP (pcm/°C)			
BOC / EOC	-10/-56	-43/-67	-37/-67
Isothermal Temperature Coefficient at HZP at BOC (pcm/°C)	1.54	-29.46	-24.44
Doppler Temperature Coefficient at near EOC (pcm/°C)	-3.96	-4.14	-4.17
Boron Worth at HFP (pcm/ppm)			
BOC / EOC	-7.2/-8.8	-3.6/-4.5	-3.5/-4.5
Xenon Worth (pcm)			
BOC / EOC	2721/2848	1816/2133	1813/2196
Total Control Rod Worth (pcm)			
BOC / EOC	8004/8350	5840/6250	5560/6100
Shutdown Margin (% Δρ)			
BOC / EOC	4.26/2.85	1.81/1.31	1.77/1.14

0.933	0.922	0.924	0.934	0.945	0.953	0.951	0.951	0.955	0.951	0.951	0.953	0.945	0.934	0.924	0.922	0.933
0.922	0.916	0.925	0.944	0.980	1.030	0.984	0.983	1.028	0.983	0.984	1.030	0.980	0.944	0.925	0.916	0.922
0.924	0.925	0.967	1.036	1.073	×	1.045	1.042	×	1.042	1.045	×	1.073	1.036	0.967	0.925	0.924
0.934	0.944	1.036	×	1.091	1.065	1.005	1.001	1.048	1.001	1.005	1.065	1.091	×	1.036	0.944	0.934
0.945	0.980	1.073	1.091	1.049	1.065	1.007	1.004	1.051	1.004	1.007	1.065	1.049	1.091	1.073	0.980	0.945
0.953	1.030	×	1.065	1.065	×	1.054	1.052	×	1.052	1.054	×	1.065	1.065	×	1.030	0.953
0.951	0.984	1.045	1.005	1.007	1.054	1.005	1.004	1.052	1.004	1.005	1.054	1.007	1.005	1.045	0.984	0.951
0.951	0.983	1.042	1.001	1.004	1.052	1.004	1.004	1.051	1.004	1.004	1.052	1.004	1.001	1.042	0.983	0.951
0.955	1.028	×	1.048	1.051	×	1.052	1.051	×	1.051	1.052	×	1.051	1.048	×	1.028	0.955
0.951	0.983	1.042	1.001	1.004	1.052	1.004	1.004	1.051	1.004	1.004	1.052	1.004	1.001	1.042	0.983	0.951
0.951	0.984	1.045	1.005	1.007	1.054	1.005	1.004	1.052	1.004	1.005	1.054	1.007	1.005	1.045	0.984	0.951
0.953	1.030	×	1.065	1.065	×	1.054	1.052	×	1.052	1.054	×	1.065	1.065	×	1.030	0.953
0.945	0.980	1.073	1.091	1.049	1.065	1.007	1.004	1.051	1.004	1.007	1.065	1.049	1.091	1.073	0.980	0.945
0.934	0.944	1.036	×	1.091	1.065	1.005	1.001	1.048	1.001	1.005	1.065	1.091	×	1.036	0.944	0.934
0.924	0.925	0.967	1.036	1.073	×	1.045	1.042	×	1.042	1.045	×	1.073	1.036	0.967	0.925	0.924
0.922	0.916	0.925	0.944	0.980	1.030	0.984	0.983	1.028	0.983	0.984	1.030	0.980	0.944	0.925	0.916	0.922
0.933	0.922	0.924	0.934	0.945	0.953	0.951	0.951	0.955	0.951	0.951	0.953	0.945	0.934	0.924	0.922	0.933

그림 1. 혼합핵연료 집합체내 출력분포 (Single Zone)