

사용후핵연료의 노심연소후 경과시간이 핵연료 저장시설 반응도에 미치는 영향

안준기, 김형현

한국전력기술주식회사, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 113

igahn@kepco-enc.com

1. 서론

연소도를 고려하는 사용후핵연료에 대한 임계 해석에서는 노심에서의 핵분열로 인한 핵분열성 물질의 감소, 액티나이드 핵종의 생성과 붕괴, 그리고 핵분열생성물의 생성과 붕괴를 반영해 핵연료 구성물질을 적용한다. 그런데, 사용후핵연료의 구성물질은 노심연소후 방출된 후에도 해당 핵종과 선행핵종의 핵적 특성에 따른 방사성붕괴로 그 생성, 감소가 계속 진행된다. 본 연구에서는 연소도고려 임계해석에서 노심연소후 경과시간이 반응도에 미치는 영향을 사용후핵연료의 초기농축도, 방출연소도, 임계해석에 고려한 핵연료 핵종 등의 인자에 대해서 분석하였다.

2. 본론

2.1 연소계산 및 임계해석 대상

본 임계해석 영향 평가는 APR+ 원전의 연소된 HIPER 연료가 저장된 사용후핵연료 영역 II 저장대를 대상으로 하였다. APR+ 원전 사용후핵연료 영역 II 저장대는 중성자흡수재 겸 구조재로 Borated Stainless Steel을 사용하며, 저장되는 사용후핵연료의 연소도를 고려한다.

2.2 사용후핵연료 연소계산

연소된 HIPER 연료의 사용후핵연료 구성 물질은 SCALE6 전산코드[1]의 ORIGEN-ARP 모듈로 계산했으며 ORIGEN-ARP 연소계산에는 PLUS7 연료의 핵단면적 자료[2]를 사용하였다. HIPER 연료의 주요 설계 인자를 임계해석 측면에서 비교하면 기존 표준원전과 APR1400 원전에 장전되는 PLUS7 연료와 동일하다.

연소계산은 사용후핵연료 영역 II 저장대에 저장 가능한 사용후핵연료의 초기농축도와 연소도와 연관하여 4가지 조건을 고려하였으며, 노심연소후 경과시간은 40년까지 고려하였다. 노심연소로 인해 연소되거나 생성, 붕괴되는 수많은 액티나이드 핵종과 핵분열생성물 핵종 중 연소도고려

임계해석에서 고려한 핵종은 액티나이드 핵종 12종, 핵분열생성물 핵종 15종이다.

2.3 사용후핵연료 저장대 임계해석

HIPER 연료가 저장되어 있는 APR+ 원전 사용후핵연료 영역 II 저장대에 대한 반응도 계산은 SCALE6 전산코드의 CSAS5 모듈을 이용하여 계산하였다. 임계계산에 적용된 핵단면적 자료는 ENDF/B-VII Release 0에 기반한 238군 핵자료집(V7-238)이다.

사용후핵연료 영역 II 저장대에 대한 임계해석은 액티나이드 핵종과 핵분열생성물 핵종 모두의 생성, 붕괴를 고려하는 경우와 액티나이드 핵종의 연소 및 생성, 붕괴만을 고려하는 경우(Actinide Only)의 두 조건에 대해서 수행하였다. 임계해석에 적용한 사용후핵연료의 초기농축도와 방출연소도, 노심연소후 경과 시간은 각각 표 1에 제시된 것과 같다.

HIPER 연료를 저장한 APR+ 원전 영역 II 저장대에 대한 임계해석을 위한 기하학적 모델은 그림 1과 같다.

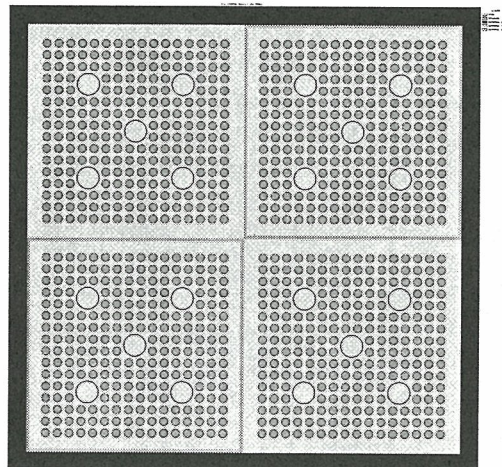


Fig. 1. Geometry Model of Region II Spent Fuel Storage Rack of APR+.

2.4 사용후핵연료 저장대 유효증배계수

사용후핵연료의 초기농축도, 방출연소도, 고려하는 핵종, 노심연소후 경과시간 별로 계산된 APR+ 원전 사용후핵연료 영역 II 저장대의 유효증배계수는 표 1과 같다.

Table 1. k-eff of Region II Spent Fuel Storage Rack of APR+.

(Actinides + Fission Products)					
Decay time	Enrichment(wt%) & Burnup(GWD/MTU)				
	(2.5, 12)	(3.5, 24)	(4.5, 36)	(5.0, 45)	
0	d	0.92687	0.92401	0.92050	0.89800
7	d	0.92357	0.92116	0.91737	0.89557
1	y	0.91883	0.91489	0.91002	0.88675
5	y	0.91236	0.90200	0.89187	0.86513
15	y	0.90118	0.88281	0.86574	0.83413
40	y	0.89158	0.86432	0.84190	0.80560

(Actinides Only)					
Decay time	Enrichment(wt%) & Burnup(GWD/MTU)				
	(2.5, 12)	(3.5, 24)	(4.5, 36)	(5.0, 45)	
0	d	0.96045	0.97737	0.98862	0.97606
7	d	0.96194	0.97900	0.98951	0.97775
1	y	0.96131	0.97607	0.98544	0.97381
5	y	0.95562	0.96665	0.97331	0.95837
15	y	0.94632	0.94968	0.95111	0.93185
40	y	0.93540	0.93129	0.92637	0.90179

2.5 냉각기간에 따른 반응도 변화

사용후핵연료의 초기농축도, 방출연소도, 고려하는 핵종 별로 사용후핵연료 영역 II 저장대의 유효증배계수가 노심연소후 경과시간에 따라 감소하는 정도(노심연소후 경과 시간이 없는 경우에 대한)는 표 2와 같다.

Table 2. Decrease of k-eff according to Decay Time.

(Actinides + Fission Products)					
Decay time	Enrichment(wt%) & Burnup(GWD/MTU)				
	(2.5, 12)	(3.5, 24)	(4.5, 36)	(5.0, 45)	
7	d	0.330	0.285	0.313	0.243
1	y	0.804	0.912	1.048	1.125
5	y	1.451	2.201	2.863	3.287
15	y	2.569	4.120	5.476	6.387
40	y	3.529	5.969	7.860	9.240

(Actinides Only)					
Decay time	Enrichment(wt%) & Burnup(GWD/MTU)				
	(2.5, 12)	(3.5, 24)	(4.5, 36)	(5.0, 45)	
7	d	-0.149	-0.163	-0.089	-0.169
1	y	-0.086	0.130	0.318	0.225
5	y	0.483	1.072	1.531	1.769
15	y	1.413	2.769	3.751	4.421
40	y	2.505	4.608	6.225	7.427

노심에서 연소된 이후 상당한 정도의 냉각기간

이 경과하면 모든 경우에서 유효증배계수는 전반적으로 감소한다. 액티나이드 핵종만을 고려하는 임계해석의 경우에는 원자로 정지후 수일정도의 짧은 시간이 경과할 때는 오히려 반응도가 미세한 정도로 증가하기도 한다. 그러나, 수년이 경과한 이후부터는 경과기간에 따라 반응도가 감소하는데 그 정도는 연소도에 거의 비례하는 경향을 보인다. 노심연소후 수일에서 1년 정도의 경과 시간에 의한 반응도 변화는 노심연소에 의한 반응도 감소의 % 정도에 불과한 작은 값이지만 노심연소후 40년이 경과하면 그 비율이 30% 정도로 증가함을 볼 수 있다. 시간 경과에 따른 전체 반응도 감소에서 핵분열생성물이 기여하는 정도는 1/3 정도이며 이는 노심연소에 의한 반응도 감소에서 핵분열생성물이 기여하는 정도와 유사한 정도이다.

3. 결론

노심연소후 수년의 시간이 경과하면 이에 따른 추가적인 반응도 감소가 유의할 정도인 것으로 확인되었다. 이에 따라 사용후핵연료에 대한 임계해석시 노심연소후 시간 경과를 고려할 수 있는 조건이라면 이를 반영하여 사용후핵연료 저장대 추가 설치, 수송, 중간저장 등에 대한 설계에 대한 최적화를 이루는 것이 가능할 것이다.

4. 참고문헌

- [1] ORNL/TM-2005/39, Version 6, SCALE: Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- [2] KOPEC/09-TN-9A9, 방사선해석코드 UPDATE 및 설계방법론 재정립, 한국전력기술주식회사, 2009.