

UO₂-ThO₂연료를 장입한 경수로로심의 연소계산

허일문, 서철, 김경일

토리움은 지각에 우라늄보다 3배정도 많이 매장되어있으나 오직 농축우라늄과 함께 핵연료로 리용할수 있으며 원자로에서 연소과정에 분렬성핵인 ²³³U으로 넘어간다.

현재 세계적으로 화석연료와 함께 우라늄자원이 점차 고갈되어감에 따라 토리움연료를 장입한 원자로에 대한 연구가 진행되고있다.[2-5]

우리는 자체로 개발한 가압경수로물리계산체계[1]를 리용하여 UO₂-ThO₂균질 혼합연료를 장입한 경수로로심에 대한 연소계산을 진행하고 그 결과를 분석하였다.

1. 로심의 구조와 재료조성

계산대상으로 삼은 토리움연료를 장입한 730MW_e 소형경수로의 로심구조는 그림 1과 같다.

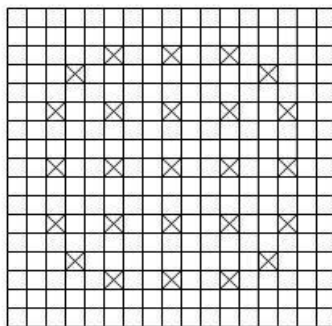
로심은 두 종류의 연료봉집합체로 구성되었는데 집합체의 총수는 69개이다. 로심의 높이는 200cm이며 직경은 180cm이다.

로심을 구성하고있는 17×17 정방형연료봉집합체 구조는 그림 2와 같다.

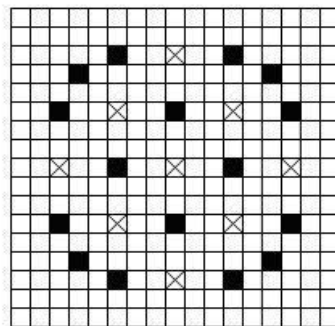
집합체는 264개의 연료봉세포와 16(또는 0)개의 가연성 흡수봉세포, 8(또는 24)개의 조종봉안내관세포, 중심의 측정관로로 이루어졌으며 세포결음은 1.26cm이다. 연료봉세포에서 연료석심의 UO₂과 ThO₂의 질량비는 1 : 1, UO₂의 농축도는 10%로 하였다.

		1	1	1	1	1		
	1	2	2	2	2	2	1	
1	2	2	2	2	2	2	2	1
1	2	2	2	2	2	2	2	1
1	2	2	2	2	2	2	2	1
1	2	2	2	2	2	2	2	1
	1	2	2	2	2	2	1	
		1	1	1	1	1		

그림 1. 토리움경수로의 로심구조



1



2

- 연료봉세포
- 가연성 흡수봉세포
- ⊗ 조종봉안내관 및 측정관로세포

그림 2. 17×17 정방형연료봉집합체의 구조

석심의 밀도는 10.4g/cm^3 , 직경은 0.819cm 이다. 외피재료는 지르칼로이-4이며 내경과 외경은 각각 0.836 , 0.950cm , 밀도는 6.55g/cm^3 이다.

가연성흡수봉세포에서 석심재료는 밀도가 9.747g/cm^3 인 천연 UO_2 과 Gd_2O_3 의 균질혼합물(Gd_2O_3 8질량%)이며 기하학적크기는 연료봉세포에서와 같다.

물봉세포의 안내관재료는 지르칼로이-4이며 내경은 1.125cm , 외경은 1.205cm 이다.

2. 로심의 연소계산결과

열매인 물의 작업압력은 15.5MPa 이며 로심입구에서 열매의 온도는 293°C 이다. 운전과정에 여유반응도보상(림계조종)은 봉산농도조절방식을 리용하였으며 로심의 비출력은 40MW/t , 연소결음은 $250\text{MW}\cdot\text{dt}$ (6.25d)로 하였다.

랭상태와 고온령출력 및 고온만출력상태에서 로심의 유효증식결수에 대한 계산값은 각각 1.220 , 1.124 , 1.089 이며 순환주기(만출력작업일수)는 475 일, 순환연소도는 $19\,000\text{MW}\cdot\text{dt}$ 이다. 이것은 표준 UO_2 연료를 장입한 로심에 비해 작은 값이지만 우의 세 상태에 해당하는 림계봉산농도는 각각 0.237 , 0.194 , 0.142% 로서 같은 여유반응도를 가진 우라늄연료를 장입한 로심보다 더 크다. 그것은 토리움연료를 장입한 로심에서 가연성흡수체의 반응도가치가 우라늄연료를 장입한 로심보다 낮기때문이다.

로심의 연소도에 따르는 림계봉산농도변화와 출력불균일결수변화는 그림 3, 4와 같다.

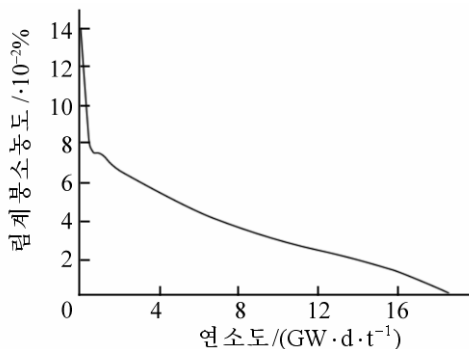


그림 3. 연소도에 따르는 림계봉산농도변화

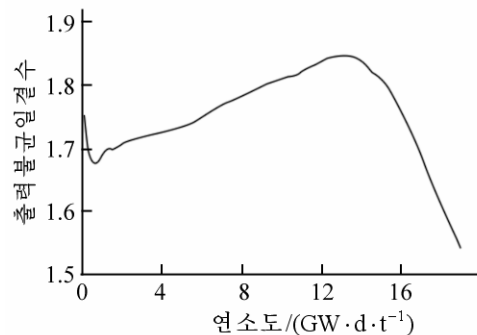


그림 4. 연소도에 따르는 출력불균일결수변화

그림 3에서 보는바와 같이 Xe평형해독이 지난 후 림계봉산농도는 서서히 감소한다.

한편 그림 4에서 보는바와 같이 Xe평형해독이 지난 후 연소도 $12\,750\text{MW}\cdot\text{dt}$ 까지는 출력불균일결수가 증가하며 그 이상에서는 비교적 빨리 감소한다. 이것은 가연성흡수체인 Gd의 연소효과와 관련된다. 즉 로심의 중심부에서는 열중성자속이 변두리에서보다 크며 따라서 강한 열중성자흡수체인 Gd가 변두리구역에 비해 상대적으로 빨리 연소되면서 일정한 기간 출력분포의 불균일성을 증가시키는 작용을 하기때문이다.

로심의 연소도에 따르는 주요핵종의 밀도변화는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 1차연료인 ^{235}U 의 핵밀도는 단조감소하지만 2차핵연료들인 ^{233}U 과 ^{239}Pu , ^{240}Pu 의 핵밀도는 증가한다. 특히 ^{233}U 의 핵밀도가 ^{239}Pu 보다 빨리 증가하는데 이것은 열중성자대역에서 ^{232}Th 의 방사포획자름면면적이 ^{238}U 보다 3배정도 크므로 비록

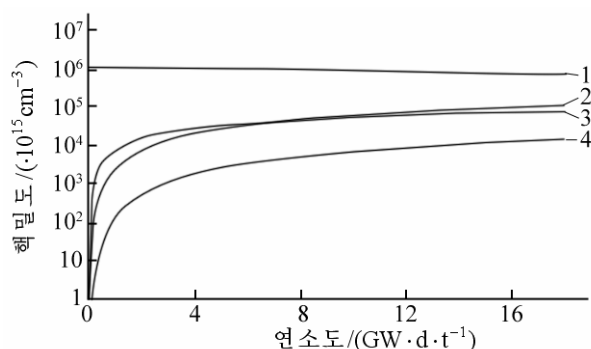


그림 5. 연소도에 따르는 로심의 핵밀도변화
1—²³⁵U, 2—²³⁹Pu, 3—²³³U, 4—²⁴⁰Pu

공명에에너지대역에서 흡수가 작지만 총체적으로 볼 때 분렬성핵형성으로 이어지는 비분렬포획속도가 크기때문이다.

맺 는 말

우리는 UO₂과 ThO₂의 질량비가 1 : 1 이고 UO₂의 농축도가 10%인 토리움연료를 장입한 열출력이 730MW인 소형가압경수로 로심의 연소계산을 하였다. 이 로심의 여유반응도와 순환길이는 우라늄연

료를 장입한 로심에 비해 작지만 가연성흡수체의 반응도가치가 보다 낮은것으로 하여 립계봉소농도는 더 높다.

참 고 문 헌

- [1] 허일문 등; 원자력, 2, 19, 주체102(2013).
- [2] M. S. Kazimi et al.; On the Use of Thorium in Light Water Reactors, MIT-NFC-TR-016, Cambridge Massachusetts, 156~160, 1999.
- [3] Yun Long; Modeling the Permonance of High Burnup of Thoria and Urania PWR Fuel, Massachusetts Institute of Technology, 23~30, 2002.
- [4] IAEA; Thorium Fuel Cycle-Potential Benefits and Challenges, IAEA-TECDOC-1450, 3~6, 2005.
- [5] Thorium as an Energy Source-Opportunities for Norway, Dieter Rohrich, 5~12, 2008.

주체105(2016)년 6월 5일 원고접수

Burn-up Calculation of LWR Core loaded with UO₂-ThO₂ Fuel

Ho Il Mun, So Chol and Kim Kyong Il

We carried out the burn-up calculation of small LWR core loaded with homogeneous mixed UO₂-ThO₂ instead of normal UO₂ fuel.

Key words: thorium fuel reactor, burn-up calculation