

'96 춘계학술회 논문집

한국 원자력 학회

건식 가공에 따른 DUPIC 핵연료 주기 특성.

김윤구, 김희문

박광현, 황주호

경희 대학교 원자력공학과

요약

건식가공(Dry Process)이 사용전,후 DUPIC 핵연료의 붕괴열(Decay Heat), Hazard Index, 조사선량률(Dose Rate) 등에 미치는 영향을 계산하고, 그 원인을 분석하였다. DUPIC 사용방안으로 표준 연소도(35,000 MWD/MTU)의 경우와 장주기 연소도(50,000 MWD/MTU)의 경우를 고려 하여 계산하였으며, DUPIC핵연료는 20년 냉각후 가공하는 것을 기준으로 하였다. 또한 DUPIC핵연료 장전시 고려할 수 있도록 사용전 DUPIC 핵연료에 대한 계산을 핵연료 집합체(Bundle) 단위로 하였다. 조사선량과 붕괴열은 건식가공에 상당히 민감한 반응을 보였고 이는 주로 Cs의 제거에 의한 것이다.

I 서론

국토가 좁은 우리나라에서 자원의 효과적 이용과 방사능 폐기물양의 감소를 위해서 경·중수로 핵연료 연계 사용방안(이하 DUPIC ; Direct Use of PWR spent Fuel in CANDU)이 적극 검토되고 있다. DUPIC핵연료 주기는 사용후 경수로 핵연료를 가공하여 중수로에 사용하는 방안으로 전력생산량당 폐기물 발생량을 크게 줄일 수 있고 전량 수입되는 핵연료를 효율적으로 사용할 수 있다는 장점이 있으며, 또한 국제적으로 예민한 문제인 핵확산 금지 조약을 위반하지 않는다. DUPIC 핵연료 제조에는 건식가공이 사용되고 있는데, 건식 가공 중에 제거되는 주요 원소들에 따라 DUPIC 핵연료 주기 특성에 차이가 생길 수 있다. 본 연구에선 DUPIC 핵연료의 주기 특성을 가공된 사용전 DUPIC 핵연료의 조사선량, 붕괴열 등에 대한 문제와 사용후 DUPIC핵연료의 조사선량, 붕괴열, Hazard Index로 검토하였고, 그 의미를 분석하였다.

II 본론

1 건식가공(Dry Process).

PWR 사용후 핵연료를 CANDU 핵연료 집합체의 형태로 가공하는 과정 중에 고온에서 산화 및 환원 반응을 반복적으로 사용하여 사용후 핵연료를 분말화하여 핵연료를 제조하는 건식 가공이라 한다. 건식가공에서 제거되는 원소는 가공중의 온도에 매우 민감하다. 다음은 AECL에서 수

행한 온도에 따른 주요 핵종의 건식가공(OREOX) 중의 제거율을 나타낸 것이다[1].

핵종	400℃ 산화	1400℃ 산화
Cs	1% 이하	98%
Kr	3.5 ~ 30%	100 %
Ru	1% 이하	100 %
Eu	0 %	0 %

표 1. 산화 온도에 따른 주요 원소의 건식가공 중 제거율[1].

본 연구에선 건식가공 후 DUPIC핵연료내 주요 원소의 변화량을 2개의 극단으로 고려하였다. 즉, PWR 사용후 핵연료를 건식가공을 거치지 않고 직접 CANDU 핵연료로 사용한 경우(Direct DUPIC)와 고온의 건식가공을 거쳐 DUPIC핵연료로 사용한 경우(Processed DUPIC)로 나누어 분석하였다. 여기서 Direct DUPIC은 저온 건식가공을 보수적으로 묘사하는 것으로 볼 수 있다. 표 1에 나타난 결과와 열역학적으로 성격이 비슷한 원소를 고려하여 표 2와 같이 고온 건식가공 후 processed DUPIC 핵연료의 성분을 가정하였다.

원소	Xe, Kr	I, Br	Cs, Rb	High Tm* Metal			Low Tm* Metal					
				Ru	Rh	Mo	Tc	Ag	Cd	In	Sn	Sb
제거율(%)	100	100	98	100	100	50	50	80	100	80	80	80

표 2. 본 연구에서 가정한 고온 건식가공시 주요 원소의 제거율. * melting temperature.

DUPIC 핵연료 주기 계산에 사용한 각 핵연료의 운영에 관련된 주요 제반사항을 표 2와 같이 정하였다. 여기서 PWR 핵연료를 연소도에 따라 표준(PWRS)과 장주기(PWRE)로 분류하였고, 표준 및 장주기 연소도를 갖는 사용후 PWR핵연료로 만들어진 DUPIC핵연료를 각각 CANDU-SD와 CANDU-ED로 분류하였다. 참조를 위한 핵연료로 천연우라늄을 사용한 CANDU 핵연료를 또한 고려하였다[2].

	PWRS*	CANDU-SD*	PWRE*	CANDU-ED*	CANDU-N*
Burn up (MWD/MTU)	35,000	15,000	50,000	13,000	7,800
Electric Power (MWe)	1000	600	1000	600	600
Spent Fuel /Yr (MT/Yr)	24.6	43.8	17.2	50.6	84.3

표 3. 주요 핵연료 운영 사항.

* : PWRS - Standard burnup PWR , CANDU-SD - use DUPIC fuel made of PWRS spent fuel
 PWRE - Extended burnup PWR , CANDU-SD - use DUPIC fuel made of PWRE spent fuel
 CANDU-N - use Natural-U

2. 붕괴열에 미치는 건식가공의 영향

2.1 사용전 DUPIC 핵연료

사용후 핵연료에서 초기 100년의 냉각시간동안 붕괴열(Decay Heat)에 주요한 영향을 미치는 핵종은 Y-90, Ba-137m, Am-241, Pu-238, Cs-137, Cm-244 등이다. 그림 1에 사용전 Direct DUPIC 핵연료 1MTU당 발생하는 붕괴열을 핵종에 따라 나타내었다. 냉각초기의 붕괴열은 거의 Y-90과 Ba-137m에 의한 것이다. Ba-137m은 Cs-137과 영년평형(Secular Equilibrium)을 이루고 있어 그 붕괴열은 Cs-137의 반감기(30.2년)를 따라 감소하고 있다. Cs를 제거함으로써 Ba-137m이 같이 제거되는 효과가 있으므로 사용전 DUPIC핵연료의 붕괴열은 건식제조시 Cs의 제거율에 민감하게는 변화한다. 그림 2는 장주기 핵연료를 직접(ED) 또는 고온 건식가공(EP)하였을 때와 표준 연소도 핵연료를 직접(SD) 또는 고온 건식가공(SP)하였을 때의 DUPIC핵연료 다발당 발생하는 붕괴열을 사용후 PWR핵연료의 냉각기간에 따라 나타낸 그림이다. Cs의 제거에 따른 Ba-137m의 제거로 인하여 붕괴열은 고온 건식제조시 사용전 DUPIC핵연료의 붕괴열을 50%(5년 냉각)에서 30%(40년냉각)정도 줄이게 된다.

2.2 사용후 DUPIC핵연료

사용후 DUPIC핵연료의 붕괴열은 경우, 장시간의 조사로인하여 보다 여러 가지 핵종이 붕괴열에 영향을 미친다. 사용후 DUPIC핵연료 (CANDU-SD)의 핵종별 붕괴열을 그림 3에 나타내었다. 여기서 사용후 PWR핵연료의 냉각기간을 20년으로 잡았다. Ba-137m이 붕괴열에 기여하는 바가 초기에는 적지만 약 5년에서 50년까지 기여도가 크다. 사용후 DUPIC핵연료의 다발당 열발생량을 그림 4에 나타내었다. 여기서도 사용후 PWR핵연료의 냉각기간을 20년으로 설정하였다. 건식가공 방법에 따른 붕괴열의 차이는 초기에는 별로 나타나지 않지만 수년이 지나서부터 그 차이가 나타나기 시작한다. 10년이 경과하였을 때, 건식가공 방법에 따라 붕괴열이 20%정도 변화하게 된다. 그러나 Ba-137m의 기여도가 낮아지게 되는 50년 이후의 사용후 DUPIC핵연료 냉각기간에는 그 차이가 점차 없어지게 된다. 비교를 위하여 사용후 CANDU핵연료의 붕괴열도 그림 4에 나타내었다. 초기 배출된 핵연료에서 붕괴열의 차이는 없지만 시간이 지날수록 그 차이가 생긴다. 1년의 냉각기간 후 사용후 DUPIC핵연료는 사용후 CANDU핵연료에 비해 3~4배의 붕괴열을 내며 20년이 경과하면 5~8배의 붕괴열을 낸다.

3. Hazard Index에 미치는 건식가공의 영향

Hazard Index에는 Ingestion Hazard와 Inhalation Hazard 두 가지가 있다. 본 연구에서는 대상이 폐기 처분할 사용후 핵연료이므로 보다 중요하리라 생각되는 Ingestion Hazard Index에 대하여 고려하였다. 그림 5에 사용후 DUPIC핵연료 1MTU당 핵종별 Hazard Index를 나타내었다. 사용후 핵연료에서 Ingestion Hazard Index에 가장 큰 영향을 미치는 핵종은 시간에 따라 Sr-90,

Am-241, Pu-240, Pu-239, Ra-226 으로 변화하게 된다. 이들 원소는 건식 가공에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 그림 6은 DUPIC핵연료 다발당 Hazard Index를 나타낸 것이다. Hazard Index는 건식가공 방법에 영향이 없다. 사용후 CANDU핵연료는 연소도가 낮아 Hazard Index에 영향을 미치는 중요 핵종의 양이 적으므로 Hazard Index값이 상대적으로 작다.

4 조사선량률(Dose Rate)에 미치는 건식가공의 영향

핵연료의 조사선량은 핵연료의 주위 요건 및 위치에 따라 변화한다. 본 연구에선 편의상 차폐물이 없는 상태로 DUPIC핵연료 다발 1개에서 수직으로 1m 떨어진 지점에서 조사선량을 기준으로 하였다. 사용후 핵연료의 조사선량에 주요 인자로 작용하는 핵종은 Ba-137m, Eu-154, Cs-134, Co-60, Sb-125, Kr-85 등이다. 그림 7에 사용후 DUPIC핵연료에서 냉각시간에 따른 핵종별 방사능량을 나타내었다. Cs-137과 Ba-137m이 가장 방사능량이 높은 핵종임을 알 수 있다. 이들은 건식 가공을 통하여 대량 제거될 수 있으므로 조사선량은 건식가공에 민감하게 반응한다. 그림 8은 건식가공에 따른 사용후 DUPIC핵연료의 조사선량률을 나타내고 있다. 사용후 DUPIC핵연료의 경우 건식가공을 거쳐 Cs를 제거한 경우 장주기 PWR 핵연료를 사용한 경우 대략 50%의 조사선량률의 감소와 표준 연소도 PWR을 사용한 경우에는 약 40%의 감소가 생긴다. 사용후 DUPIC핵연료의 조사선량률은 CANDU핵연료에 비해 월등히 높다.

III 결론

- 1) 붕괴열의 경우 건식 가공법을 사용할 경우, 가공하지 않은 경우에 비해 사용전 DUPIC 핵연료가 30-50%정도, 사용후 DUPIC핵연료가 5-20%정도의 감소를 보인다.
- 2) Hazard Index는 건식 가공에 영향을 받지 않는다.
- 3) 조사선량률은 사용전 DUPIC 핵연료가 1/6로, 사용후 DUPIC핵연료가 1/2로 감소하였다.
- 4) 건식가공에서 가장 중요한 조건은 Cs의 제거이며 Cs-137과 Ba-137m이 붕괴열과 조사선량에서 중요하게 작용한다.

참고문헌

1. J.D.Sullivan, 'AECL's Progress in Developing the DUPIC Fuel Fabrication Process,' 10th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, April 1995.
2. J.W.Choi, K.S.Chun, J.S.Lee and H.S.Park, 'Environmental Benefits of Burning Spent PWR Fuel Again in CANDU,' 5th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Berlin (1995)

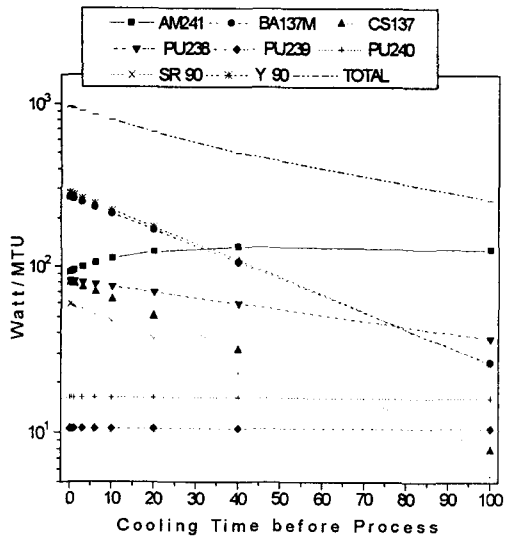


그림 1 사용전 DUPIC 핵연료의 핵종별 붕괴열 (Standard Burnup DUPIC cycle)

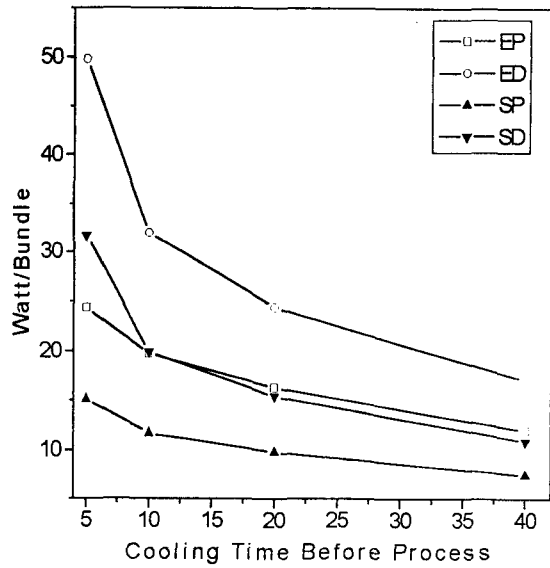


그림 2 사용전 DUPIC 핵연료의 붕괴열
 ED ; Extended Direct DUPIC cycle
 EP ; Extended Processed DUPIC cycle
 SD ; Standard Direct DUPIC cycle
 SP ; Standard Processed DUPIC cycle

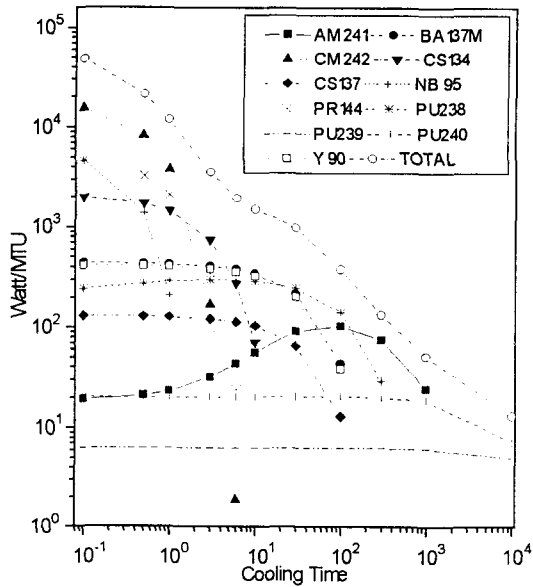


그림 3 사용후 DUPIC 핵연료의 냉각시간에 따른 핵종별 붕괴열 발생 (Standard Burnup DUPIC Cycle)

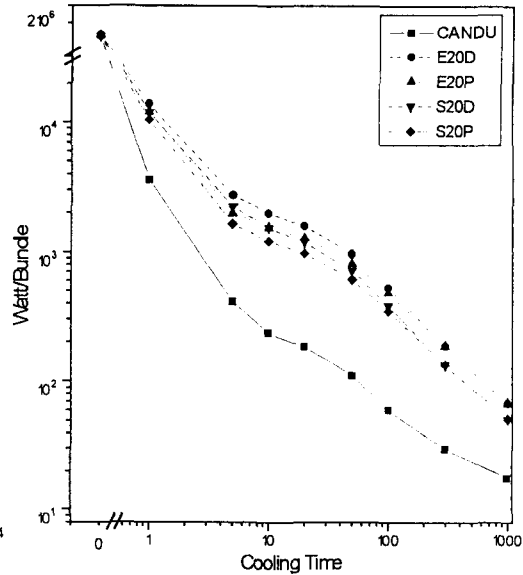


그림 4 사용후 DUPIC 핵연료의 붕괴열
 E20D ; 20y cooled Extended direct DUPIC cycle
 E20P ; 20y cooled Extended processed DUPIC cycle
 S20D ; 20y cooled Standard direct DUPIC cycle
 S20P ; 20y cooled Standard processed DUPIC cycle

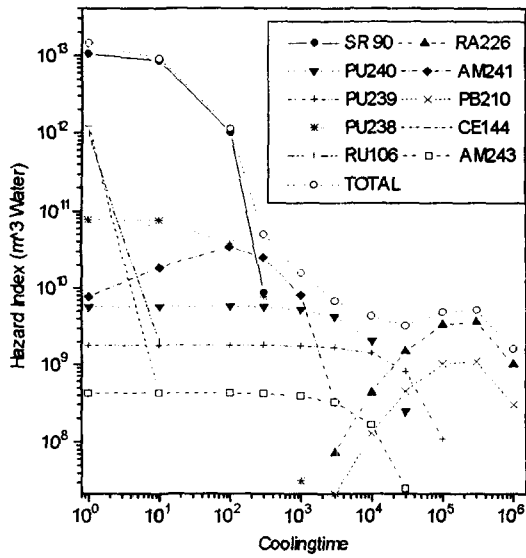


그림 5 사용후 DUPIC 핵연료의 Hazard Index (Standard DUPIC Cycle)

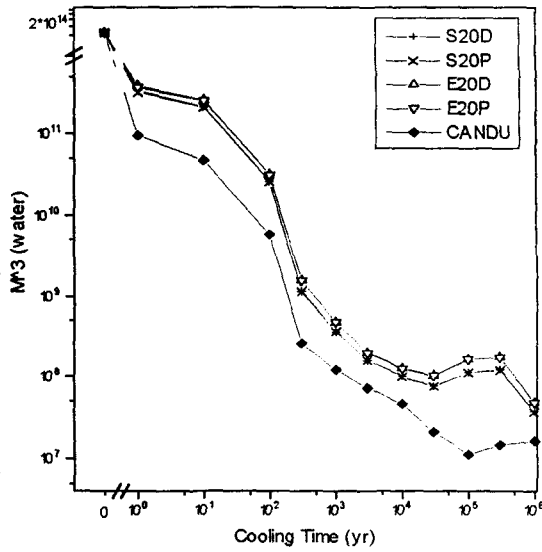


그림 6 냉각시간에 따른 사용후 DUPIC 핵연료의 Hazard Index

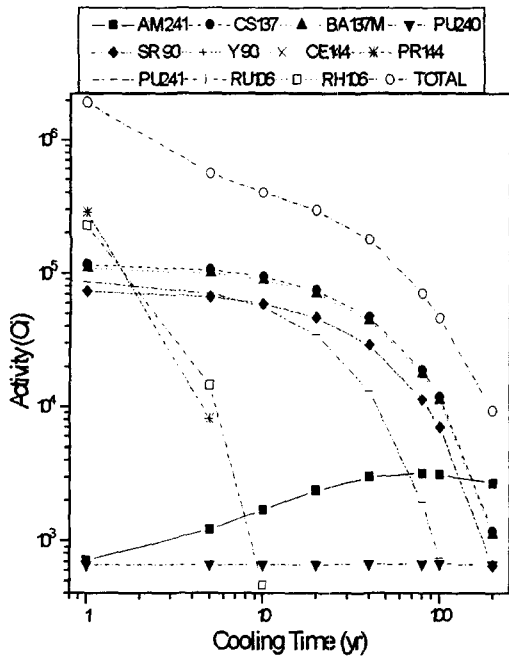


그림 7 사용후 DUPIC 핵연료의 냉각시간에 따른 핵종별 방사능

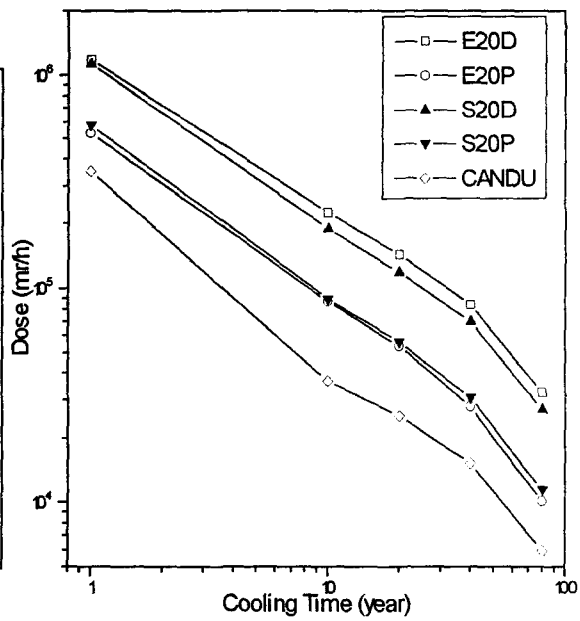


그림 8. 사용후 핵연료의 핵연료 집합체당 조사선량을
 E20D ; 20y cooled Extended direct DUPIC cycle
 E20P ; 20y cooled Extended processed DUPIC cycle
 S20D ; 20y cooled Standard direct DUPIC cycle
 S20P ; 20y cooled Standard processed DUPIC cycle