1. 핵연료 주기와 사용후핵연료

화학공학의 전통적 관점에서 원자력 발전 과정을 바라보면 일반적인 공정 단계인 “원료의 정제-반응-생산물의 분리” 과정과 크게 다르지 않다. 원자력 발전은 각 공정에 대응되는 다음의 세단계로 나누어 볼 수 있다.

- 핵연료를 마련하는 과정인 선행핵연료 주기 (front-end fuel cycle)
- 원자로안에서의 핵분열과 전력생산
- 사용후핵연료(spent fuel)와 각종 방사성 폐기물의 관리인 후행핵연료 주기 (back-end fuel cycle)

원자력 발전 과정과 일반적인 화학공정과의 차이점은 생산물이 유형의 물질 대신 에너지라는 것이다. 또 하나의 주요한 차이점은 원자로에서 배출되는 사용후핵연료는 그 자체가 고방사성 물질이며 무기로 전용 가능한 플루토늄이 포함되어 있다는 것이다. 따라서 후행핵연료 주기 기술 공정들은 일반 화학공정과 달리 기술적 요건에 더하여 국제적, 사회적 신뢰를 바탕으로 개발되어야 한다.

1.1 선행핵연료 주기 및 원자로

원자로에서는 중성자가 핵에 입사하여 핵분열을 일으킨다. 그러나 핵분열이 발생하기 위해서는 중성자가 입사하여 생성된 복합핵이 임계에너지 이상이 되어야한다. 이와 같이 중성자가 운동에너지 없이 반응에 참여해도 분열이 가능한 분열핵은 자연계에서 ^{235}U가 유일하며 ^{233}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu등은 핵변환에 의해 인공적으로 만들 수 있다. 선행핵연료 주기는 우라늄 채광에서 핵연료 가공까지의 일련의 공정들을 말하며 천연우라늄에는 ^{235}U가 평균적으로 0.7% 포함되어 있기 때문에 농축이 필요하지 않는 (천연우라늄을 사용하는) 중수로에서는 “정련→변환→가공”의 과정으로 핵연료를 생산하지만 농축이 필요한 경수로와 같은 원자로를 대상으로 하는 핵연료는 “정련→변환→농축→재변환→가공”의 공정을 거치게 된다. 정련공정은 우라늄 원석에서 불순물을 제거하여 우라늄 산화물을 얻는 공정이며 변환 공정에서는 농축이 용이한 기체 상태 UF_6로 변환시킨다. 농축 공정에서는 기체 확산법등을 이용하여 0.7% 정도인 천연우라늄의 ^{235}U 조성을 3.3% 또는 그 이상으로 농축(enrichment)시킨다.

농축되고 남은 우라늄은 약 0.3% 정도의 ^{235}U를 갖게 되며 감손(depleted) 우라늄이라 불린다. 재변환 공정과 가공 공정을 거치면서 우라늄은 핵연료로 사용되기 위하여 산화물(UO_2)로 전환되며 연료봉에 pellet 형태로 충전되어 연료집합체로 가공된다. 이와 같은 선행핵연료 주기 기술은 상업화된 공정이 확립된 상태로 새로운 공정 개발에 대한 필요가 낮은 상황이다.

원자로에서 장입된 우라늄은 가속된 중성자에 의해 그림1.1과 같이 잘 알려진 연속 핵분

열 반응을 일으킨다. 핵분열 반응에 의해 에너지가 발생하며 우라늄 보다 원자 번호가 낮은 두개의 원자가 생성된다. 이와 같은 반응에 의해 생성된 우라늄 보다 낮은 원자 번호를 갖는 새로운 원자들을 분열 생성물(fission product, FP)이라 부르게 된다. 특정 원자들만 분열 생성물로 생성되지는 않으며 그림1.2와 같이 원자번호 90과 140 근처에서 피크를 갖는 대칭적 분포를 나타내는 다양한 물질들이 발생한다. 앞서 언급한 것과 같이 핵연료에는 핵분열을 일으킬 수 있는 ^{235}U 이외에 ^{238}U이 존재한다. 이 ^{238}U에 중성자가 입사되면 ^{238}U은 중성자를 흡수(capture)하여 ^{239}Pu로 전환되거나 혹은 아무 반응 없이 중성자를 반사시킨다. 따라서 원자로에서 핵연료를 조사시키면 중성자 흡수에 의해 우라늄 보다 원자 번호가 높은 물질들인 Pu, Np, Cm등이 생성되며 이와 같은 원소들을 초우란 원소들(transuranics, TRU)이라 일컫는다.

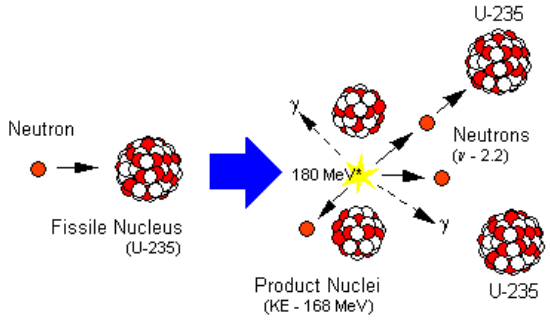

그림 1.1 핵분열 반응

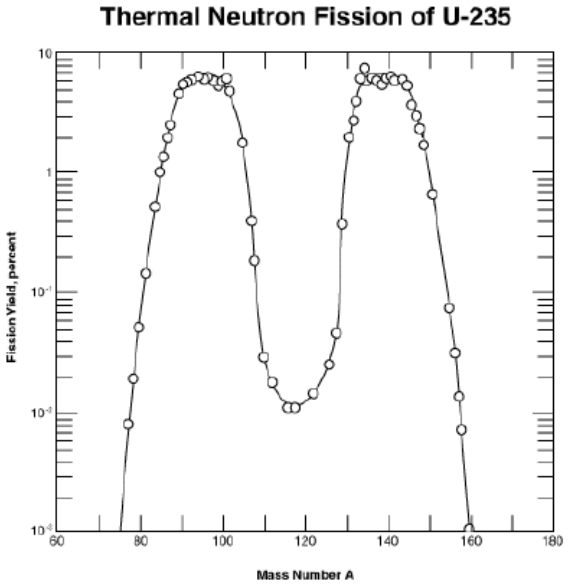

그림 1.2 핵분열 생성물 분포

이와 같은 원자로 내에서의 반응들은 다음과 같이 요약된다.

^{235}U (핵연료) + n = FP (사용후핵연료)

^{238}U (핵연료) + n = TRU (사용후핵연료)

^{238}U (핵연료) + n = ^{238}U (사용후핵연료) + n

따라서, 순수한 우라늄(^{235}U+ ^{238}U)으로 제조된 핵연료를 원자로에서 조사시켜 발전에 이용하면 발생되는 사용후핵연료(spent fuel, SF)는 U과 TRU, FP로 구성된다.

사용후핵연료의 형태는 핵연료의 형태에 따라 결정된다. 핵연료는 원자로의 종류에 따라 다양하지만 상업적으로 운전되고 있는 원자로에서는 현재 산화물 (UO_2) 형태가 일반적이다. 세계적으로 운전되고 있는 상업 원자로의 종류는 표 1.1에 제시되었다.

표 1.1. 상업운전 원자로

Reactor type	Main Countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurised Water Reactor (PWR)	US, France, Japan, Russia	260	243	enriched UO_2	water	water
Boiling Water Reactor (BWR)	US, Japan, Sweden	92	83	enriched UO_2	water	water
Pressurised Heavy Water Reactor "CANDU" (PHWR)	Canada	34	18	natural UO_2	heavy water	heavy water
Gas-cooled Reactor (Magnox & AGR)	UK	32	12	natural U (metal), enriched UO_2	CO_2	graphite
Light Water Graphite Reactor (RBMK)	Russia	13	14	enriched UO_2	water	graphite
Fast Neutron Reactor (FBR)	Japan, France, Russia	4	1.3	PuO_2 and UO_2	liquid sodium	none
other	Russia, Japan	5	0.2			
	TOTAL	440	371			

Source: *Nuclear Engineering International handbook 2002.*

1.2 사용후핵연료와 후행핵연료 주기

사용후핵연료의 조성은 농축도, 연소도, 냉각기간에 따라 조금씩 차이가 난다. 대표적인 상용 가압 경수로(pressurized light water reactor, PWR)의 연료인 3.3% 농축, 33,000 MWd/MT 연소도, 150일간의 냉각기간을 갖는 사용후핵연료에는 우라늄, 플루토늄, 분열생성물들이 각각 약 95.4%, 0.9%, 3.1% 존재한다. 이중 미반응한 ^{235}U는 0.8% 정도로 자연계의 동위원소 함량보다 다소 높다. 사용후핵연료 구성비의 대부분을 차지하는 우라늄은 순수하게 분리되었을 경우 자연계에 존재하는 우라늄과 방사능이 비슷하기 때문에 저준위 폐기물(low level waste, LLW)로 처리될 수 있으며 고속로(fast reactor, FR)가 상용화될 경우 ^{238}U 역시 에너지원으로 사용될 수 있다. 또한 사용후핵연료에 존재하는 플루토늄 역시 핵분열을 일으킬 수 있는 물질이기 때문에 사용후핵연료는 이제 더 이상 폐기물이 아니라

에너지자원으로 인식되고 있다.

사용후핵연료를 다루는 후행핵연료 주기 정책은 다음 네가지의 옵션으로 나눌 수 있다.

- 사용후핵연료를 미래 에너지 자원으로 활용하기 위한 재처리 (reprocessing)
- 사용후핵연료를 처분하기 위해 몇가지 성분들로 분리하는 콘디셔닝 (conditioning)
- 중간저장 (interim storage)
- 직접처분 (direct disposal)

사용후핵연료는 미반응 우라늄과 함께 에너지원으로 사용될 수 있는 플루토늄을 포함하고 있다. 재처리는 이와 같은 에너지 자원을 회수하여 원자로에 재순환시킴으로서 한정된 자원인 우라늄의 활용을 극대화함과 동시에 무기로 전용이 가능한 플루토늄을 소비시킴으로서 궁극적으로 원자로에 의해 생산, 저장된 플루토늄의 양을 낮출 수 있는 방안이다. 그러나 공정과정에 순수한 플루토늄을 얻을 수 있기 때문에 원자로로의 재순환 이전에 핵무기로 될 수 있는 가능성 또한 존재한다. 재처리 방법으로는 습식재처리법과 건식재처리법이 있다. 습식재처리법의 기본 공정은 추출 공정이다. 습식재처리 공정에서 제일 먼저 사용후핵연료는 산에 의해 용해된다. 사용후핵연료는 다성분 물질이므로 추출단계에 따라 공제염공정, 상호분리공정, 제염공정등 다양한 공정을 거쳐 추출과 역추출을 하게 된다. PUREX와 같은 습식재처리법은 다량의 용매를 사용하여 공정 부피가 커지는 단점과 함께 공정이 복잡하다는 문제점이 있으나 현재까지 기술 수준은 습식재처리법이 가장 높으며 세계적으로 이루어지는 사용 재처리공정의 대부분은 이 습식 방법을 이용한다. 비교적 최근에 개발된 건식재처리법은 공정이 단순하며 차폐공간을 소규모화 할 수 있으며 고체 폐기물 발생량이 적다는 장점이 있다. 그러나 단점으로는 습식법만큼 기술발달이 이룩되지 못하였으며 고온 공정의 요구에 의한 운전 및 유지 보수상의 어려움, 제염성의 낙후에 의한 회수된 우라늄 및 플루토늄의 핵연료 가공상의 난점 등이 있다. 대표적인 건식재처리 방법으로는 불화물 휘발공정, 염화물 휘발공정, 고온 야금 공정 및 고온 화학공정이 있다.

콘디셔닝(conditioning) 관리 방법은 직접처분을 위해 사용후핵연료에서 연료 집합체를 해체하는 단순한 기계적인 방법에서 사용후핵연료에서 특정 원소들을 분리하여 안정적인 폐기물 형태를 만듦으로서 폐기물의 부피를 줄이는 공정까지 그 범위가 넓다. 사용후핵연료에서 원소를 분리하는 콘디셔닝 공정과 재처리공정의 근본적인 차이점은 플루토늄을 독립된 생산물로 얻지 않는데 있다. 콘디셔닝 공정에서 플루토늄은 다른 초우란 원소들(TRU) 또는 분열생성물(FP)들과 혼재되어 고준위 폐기물(high level waste, HLW) 형태로 존재하게 된다. 다양한 공정들이 콘디셔닝에 적합한 것으로 연구되고 있으나 현재까지는 hybrid PUREX와 용융염 공정이 가장 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.

사용후핵연료에 포함되어 있는 분열생성물(FP)들은 대부분이 방사성 동위원소이며 고유의 반감기에 따라 양이 줄어들며 열과 방사능을 방출한다. 중간저장은 직접처분 또는 재처리 이전 사용후핵연료의 저장기간을 늘려 처분 시설 또는 공정이 감당할 수 있는 수준으로

방사성 동위원소를 줄이는 것을 목적으로 한다. 중간저장은 커다란 수조에 사용후핵연료를 담가 놓는 습식저장과 공기에 의해 냉각 시키는 건식저장으로 나눌 수 있다. 최근에는 초기 건설비가 낮으며 국가 정책에 따른 처분 또는 재활용을 위한 이동이 편리한 건식저장이 좀 더 선호되고 있다.

직접처분 동굴, 지층, 또는 천층 처분 방법등이 있으며 사용후핵연료에 존재하는 에너지원을 사용하지 않는 것을 전재로 사용후핵연료를 사회에서 고립시키는 방법이다.

결언

화학공학을 전공한 사람들에게 원자력은 다소 생소한 분야이다. 그러나 일반적인 화학공장과 같이 원자로를 중심으로 원료와 생산물을 생각하면 원자력 발전을 보다 쉽게 이해 할 수 있다. 사용후핵연료는 원자로에서 발생하는 핵반응에 의해 다양한 원소들로 구성되어 있으며 이중 플루토늄은 무기로의 전용이 가능하기 때문에 국제적으로 민감한 물질이다. 그러나 플루토늄 역시 핵분열에 이용될 경우 에너지원으로 활용이 가능하며 적어도 무기로 전용될 수 있는 총양은 감소시킬 수 있게 된다. 따라서 세계 각국은 순수한 플루토늄 추출이 어려우며, 즉 핵확산 저항성이 높으며, 우라늄 활용을 극대화하기 위한 기술들을 관심을 갖고 개발하고 있다. 이와 같은 공정 개발은 화학공학자들의 능력을 십분 발휘할 수 있는 분야이며 창조적으로 도전할 수 있는 과제이기도 하다.