

# 제 7 장 원자력 에너지

## 1. 원자력의 원리

### 1) 원자핵반응

- 1919년 러더퍼드(Rutherford) : 질소원자에  $\alpha$ 입자 충돌
- 핵분열반응, 핵융합반응
- $E = mc^2$
- 중성자와 원자핵간의 반응 : 흡수반응, 산란반응
  - i) 흡수반응 구분 : 방사포획반응, 하전입자 방출반응, 중성자 방출반응, 핵분열반응
  - ii) 산란반응 구분 : 탄성산란, 비탄성산란

### 2) 원자로와 핵반응

- 원자로 : 핵분열 연쇄반응을 제어하고 지속시켜 에너지를 발생하는 장치
- 핵분열 생성물(fission products) : 핵분열 파편 + 이들의 방사성핵종
- 중성자 감속방법 : 가압 경수로, 캔드 중수로
- 공명흡수 : 특정 에너지 영역에서 핵원료성 물질과 충돌하게 되면 선택적으로 많이 흡수함
- 비균질로 : 핵연료와 감속재가 따로 분리되어 있는 원자로
  - 특징 i) 공명흡수를 줄일 수 있음
  - ii) 핵분열 연쇄반응의 지속 가능(cf. 균질로에서는 지속이 불가능)
- 중성자 누설 : 중성자가 원자로의 표면을 통해 원자로 밖으로 유출되는 현상
  - 대처방안 i) 반사체 사용
  - ii) 노심부 외곽에 저농도 핵연료를 장전함
- 증배계수 : 원자로 출력의 증감을 조절할 수 있는 원자(상태변수)
- 원자로의 증배계수를 높이는 방법
  - i) 중성자 누설을 줄임
  - ii) 중성자 공명흡수를 줄임
  - iii) 핵연료 이외의 물질에 대한 중성자 흡수를 줄임
  - iv) 중성자 재성입자를 극대화함
- 원자로 반응로의 피드백 현상(feed back effect)의 변수들
  - i) 반응도결손 : 피드백 변수의 총 변화에 대한 피드백 반응도의 총 변화량
  - ii) 핵연료 온도계수 : 핵연료의 단위온도 변화에 대한 반응도 변화량
  - iii) 감속재 온도계수 : 감속재의 단위온도 변화에 대한 반응도 변화량
  - iv) 감속재 밀도계수 : 감속재 밀도의 단위량 변화에 따른 반응도의 변화
  - v) 압력계수 : 노심압력의 단위변화에 대한 반응도 변화량
  - vi) 출력계수 : 단위출력 변화에 대한 반응도 변화량
- 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용
  - 핵연료 연소 : 원자로에 장전된 핵연료 내의 핵분열성 물질은 원자로의 운전이 계속됨에 따라 계속 감소하게 되는 현상

핵분열 생성물의 독작용 : 생성된 물질이 열중성자를 쉽게 흡수함

- 전환과 증식

증식률(breeding ratio) 또는 전환율(conversion ratio) C

$$C = \frac{\text{단위시간당 새로이 생성되는 핵분열성 원자핵의 수}}{\text{단위시간당 소모되는 핵분열성 원자핵의 수}}$$

$C > 1$  : 증식률                       $C < 1$  : 전환율

- 핵분열 생성물의 독작용 ( $Xe^{135}$ ,  $Sm^{149}$ )

- 반응도 제어방법

i) 가연성 독봉 : 가연성 독물질을 핵연료와 같이 봉의 형태로 가공하는 것  
(가연성 독물질 - 중성자를 흡수함으로써 연소되어 없어지는 독물질)

사용목적 a) 원자로 운전초기에 삽입되어 잉여반응도를 제어함

b) 노심 내 출력분포를 평탄하게 하기 위한

ii) 화학적 독물질 : 감속재 또는 냉각재 내에 중성자에 대한 독작용을 하는 독물질을 첨가함

※갓추어야 할 성질

a) 반응도 제어 및 조절이 용이하도록 중성자에 대한 흡수단면적이 커야함

b) 냉각재 내에 용해될 수 있어야 함

c) 냉각재와 함께 노심 전체에 균일하게 분포되어 순환되므로 금속재료에 대한 부식성이 없어야 함

d) 노심을 구성하는 구조물에 부착되는 성질이 없어야 함

iii) 제어봉 : 짧은 시간 내에 반응도를 조절할 수 있음

iv) 기타 반응도 제어방법

: 냉각재 유량률의 조절

- 원자로의 구성성분 : 핵연료, 감속재, 냉각재, 구조재, 제어재, 생체차폐재 등

i) 핵연료

a) 천연에서 얻을 수 있는 유일한 물질 : U-235

(전환핵분열성 물질 : U-233 → Th-232, Pu-239 → U-238)

b) 대개 고체상태

※금속우라늄, 탄화우라늄, 산화우라늄 등

ii) 감속재 : 고속중성자를 효율적으로 열중성자로 감속하기 위해서 가벼운 원소로 구성됨

iii) 냉각재 : 열전달 특성이 좋은 물질

iv) 제어재 : 핵분열 연쇄반응을 제어하거나 중성자의 배율을 변화시킴

중성자 흡수가 커야함(예 : 카드뮴, 붕소, 하프늄 등)

v) 반사체 : 노심 주위에 설치

중성자 산란에 의해서 반사되도록 하여 중성자의 누설을 방지함

(예 : 물, 중수, 흑연, 베릴륨 등)

vi) 구조재 : 압력을 높이기 위하여 압력용기를 만들어야 함

내부식성 우수(예 : 인코넬, 지르코늄 합금, 스테인리스강)

vii) 생체차폐 : 방사선에서 인체를 보호하기 위해 설계하는 것  
(예 : 콘크리트, 물, 철 등)

- 원자로 분류 기준
  - i) 중성자에너지에 따라
  - ii) 원자로를 구성하고 있는 물질에 따라서
  - iii) 감속재나 핵연료 배치모양에 따라서
  - iv) 반사체 유무에 따라서
  - v) 사용목적에 따라서

### 3) 원자력발전

- 초기의 문제점
  - a) 원자로의 소형화를 위한 노심출력 밀도의 증가
  - b) 열효율 향상을 위한 냉각재 온도의 상승
  - c) 연료비 절감을 위한 연소로의 향상
- 경수로, 가스냉각로, 중수로, 고속증식로
- 가압경수로
  - a) 우리나라의 주력 원자로
  - b) 냉각재로서 경수를 사용함
  - c) 약 320℃에서 비등이 일어나지 않도록 약 160기압의 고압으로 유지
- 비등경수로
  - a) 핵반응이 일어나는 원자로용기 속에서 냉각수가 비등하여 직접 증기가 생산되는 개념(화력발전과 증기를 발생시키는 방법이 같음)
  - b) 원자로 압력용기, 노심구조물, 축판 및 축판덮개, 증기분리기, 증기건조기, 구조물, 분사펌프로 구성됨
- 중수로
  - a) 천연우라늄을 핵연료로 쓰는 방안으로 개발된 원자로
  - b) 천연우라늄을 핵연료로 감속재와 냉각재는 중수 사용
    - ※ 천연우라늄으로 구성되는 노심에서 경수를 사용 못하는 이유
    - : 생성된 중성자의 원자로구조물에 의한 흡수 가능성이 높음, 흡수단면적이 중수에 비하여 경수는 수백 배 높기 때문에 원자로 임계 유지가 어려움
  - c) 원자로에 부여되는 잉여반응도가 적어 핵연료를 자주 교체 필요, 설계시 핵연료 교체가 가능하게 설계됨
- 가스로
  - a) 가스를 냉각재로 사용하는 원자로
  - b) 천연 또는 93% 고농축우라늄을 핵연료로 사용
  - c) 냉각재로서는 탄산가스 혹은 헬륨을 사용, 감속재로 흑연 사용
  - d) 탄산가스나 헬륨가스를 냉각재로 사용하면 취급이 쉽고 방사선에 비교적 안전함, 열중성자 흡수단면적이 적어 노심에서 중성자 손실이 최소화
  - e) 가스 냉각재는 저압에서도 고온상태의 냉각재를 유지할 수 있음
  - f) 원자로용기 및 열교환기들이 크고 가스펌프의 용량도 크다는 단점 존재

- 고속증식로
  - a) U-238을 핵분열성 물질로 변환하여 자원의 사용을 극대화함
  - b) 감속재가 필요없음, Pu-239를 20%정도 농축된 핵연료 사용함
  - c) 냉각재는 Na를 사용함

[알아보기 7-1] 우리나라는 KEDO를 통해 북한에 경수로건설사업을 진행 중에 있다. 경수로를 선택한 배경과 현재의 진행 상황을 알아보기 바랍니다.

## 2. 핵연료 주기

### 1) 핵연료 주기 특성

: 핵물질이 고차 동위원소로 변화하거나, 핵종이 전환되는 변화과정 중에서 새로운 인공핵분열성 연소를 생산함

### 2) 핵연료로서 적합한 조건

i) 밀도, ii) 미세구조, iii) 순도, iv) 결합, v)크기

### 3) 선행 핵연료 주기

- 중수로 : 우라늄 정련 → 변환 → 핵연료 가공
- 가압경수로 : 우라늄 정련 → 변환 → 동위원소 분리 → 재변환 → 핵연료 가공
  - i) 우라늄 정련 : 우라늄 원광에서 조 옐로 케이크(crude yellow cake)를 만들
    - a) 원광분쇄 → 침출 → 고액분리 → 정제 → 침전공정
    - b) 파쇄 : 조쇄(crushing), 분쇄(grinding)
    - c) 물리적 농축 : 선광농축, 부유선광, 자기/자력 선광법, 중력장선광
    - d) 침출 : 원광의 광물학적 특성, 불순물의 종류나 함량 등에 따라 다름
      - ※산침출(황산, 염산, 질산 사용), 알칼리침출(탄산나트륨, 중탄산 나트륨, 탄산 암모늄, 탄산염 등 사용)
      - ※산침출의 장점
        - ① 미분쇄가 아니라도 충분함
        - ② 묽은 산농도에서도 침출 가능
        - ③ 침출시간이 비교적 짧다
        - ④ 보통 상온에서 침출 가능(알칼리침출 : 고온, 고압)
        - ⑤ 이온교환수지법, 용매추출법이 모두 가능(알칼리침출 : 용매추출법이 불가능)
        - ⑥ 공장건설비가 적게 듦
    - e) 고-액 분리 : 침전농축기(thickener), 로터리 여과기, 벨브 여과기 등
    - f) 정제 및 농축
    - g) 침전 : 역추출방법 및 불순물함량 등에 따라 결정됨

- ii) 변환 및 재변환
  - a) 변환 : 옐로 케이크의 정제,  $UF_6$ 로의 변환
  - b) 재변환 : 경수로의 핵연료로 사용되는  $UO_2$  분말을 저농축  $UF_6$ 로부터 제조하는 과정
    - ① 습식공정(액상의 물이 우라늄과 접촉함)
    - ② 건식공정(기체인 수증기만이 우라늄과 접촉함)
- iii) 핵연료 가공 : 소결체 제조공정 → 부품가공공정 → 핵연료봉의 제조공정 → 집합체 제조공정
- iv) 재처리
  - a) 목적 : 유용한 분열성 물질 또는 분열성 물질이 될 수 있는 물질 회수  
방사성 핵분열 생성물을 제거  
사용 후 핵연료 중의 방사성 물질을 안전한 장기보관을 위한 형태로 변화시킴
  - b) 방법 : 습식법(침전법, 용매추출법, 이온교환법)  
건식법(불화물휘발법, 건식고온법)

### 3. 방사성폐기물 관리

#### 1) 개론

- 방사성폐기물 : 방사성핵종으로 오염되어 있어 처리 또는 계속적인 감시가 필요한 물질
- 특성
  - i) 방사성핵종의 반감기를 인공적으로 파괴하지 못한다
  - ii) 방사선은 신체적인 장애보다 유전적인 장애가 있다
  - iii) 각 핵종마다 고유의 최대허용농도(MPC) 값을 가진다
- 분류
  - i) 기체, 액체, 고체로 분류
    - ※액체폐기물 : 수용액, 유기용매
    - 고체폐기물 : 재사용 가능한 것, 불가능한 것
    - 재사용이 불가능한 것 : 가연성, 비가연성 또는 압축성, 비압축성
  - ii) 발생원에 의한 분류 : 정련폐기물, 재처리폐기물 등
  - iii) 방사능에 의한 분류 : 기-액체는 단위용적당 방사능량, 고체는 표면선량
  - iv) 방사선에 의한 분류 :  $\alpha$ -폐기물,  $\beta$ -폐기물,  $\gamma$ -폐기물
- 처리와 처분 원칙
  - i) 재활용
  - ii) 지연 및 붕괴
  - iii) 회석 및 분산
  - iv) 부피축소와 고화 후 격리
- 환경감시 측정
  - i) 공기 중의 방사능 농도
  - ii) 수중의 방사능 농도

- iii) 토양 중의 방사능 농도
- iv) 식물체의 방사능 농도
- v) 지중에 계측기를 장입하여 방사능량을 측정

## 2) 방사성 폐기물 처리

- 기체폐기물 처리
  - i) 방출
  - ii) 처리 : 부유입자, 방사성요오드, 루테튬, 방사성탄소(C-14), 크립톤과 크세논, 산화질소 처리
- 액체폐기물 처리
  - i) 감용처리 : 증발처리, 이온교환처리, 응집침전처리, 역삼투압처리
  - ii) 고화처리 : 시멘트고화, 아스팔트고화, 하소화, 유리화
    - a) 충분한 감용
    - b) 비교적 간단한 처리과정
    - c) 모든 환경여건에 따른 고화체의 화학적 안전성
    - d) 자체열 및 방사선에 의한 내구성
    - e) 핵종의 침전률이 낮은 고화체
    - f) 원격조작 및 정비 등이 용이한 처리과정
    - g) 쉽게 운반될 수 있는 고화형태
    - h) 충격에 견딜 수 있는 충분한 강도가 있는 고화체
- 고체폐기물 처리
  - i) 소각처리
  - ii) 압축처리
  - iii) 해체처리
- 제염(decontamination)
  - i) 정의 : 방사선시설 내에 있는 장치와 부품 및 구조물의 내부 및 외부표면에 오염되어 있는 방사성물질을 제거하는 것
  - ii) 필요성
    - a) 시설 장치의 재사용
    - b) 오염확산 방지
    - c) 방사성폐기물의 물량 감소
    - d) 시설 혹은 장치의 수명 연장
  - iii) 제염시 고려 인자
    - a) 장치재질
    - b) 장치구조
    - c) 장치크기
    - d) 장치표면 형태
    - e) 오염준위
    - f) 오염성질
    - g) 오염물의 침투 정도, 오염매체 성질
    - h) 제염 후 장치에 요구되는 상태

- i) 제염 후 잔여방사능준위
- iv) 제염기술
  - a) 공구 또는 작은 장치
  - b) 이동될 수 있는 장치
  - c) 고정된 시설

**[알아보기 7-2]** 원자력은 군사용 무기로의 전환이 가능하여 이를 견제하기 위한 국제적인 노력이 계속되어 왔다. 우리나라와 관련이 있는 국제규약을 조사해 보기 바랍니다.