CHAPTER 6-2

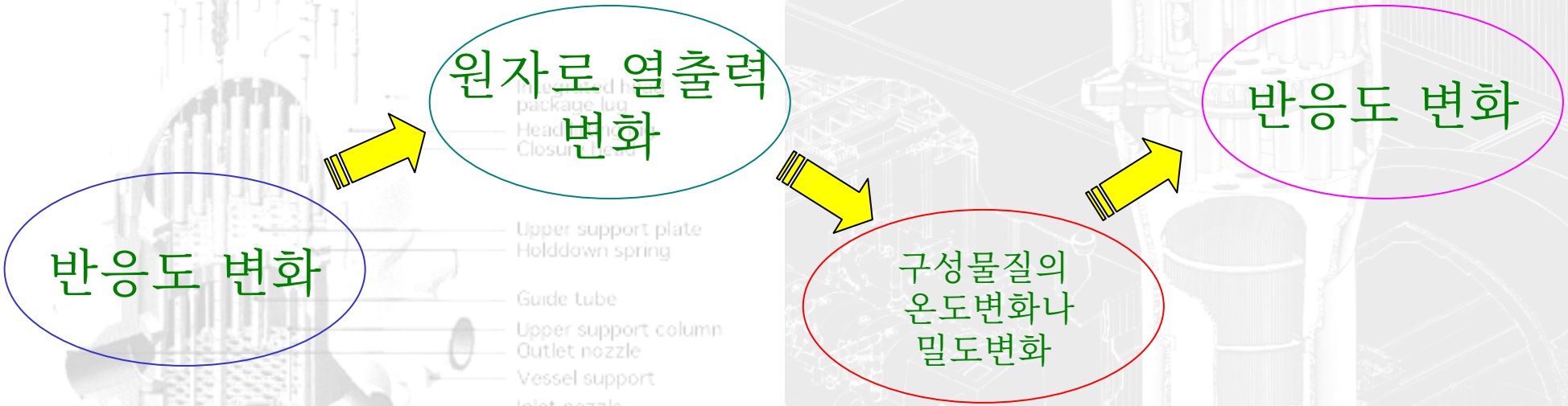
U. C . Lee

목 차

3. 궤환 효과

➢ 3.1. 궤환효과(Feedback effect)와 반응도 계수

- ❑ 실제 원자로(특히 고출력 원자로)에 궤환효과 존재



- ❑ 궤환효과에 때문에 식 (6.35)의 점운동 방정식 만으로는 실제 원자로의 출력과도 현상을 제대로 기술하기 어려움
  - 반응도에 영향을 미치는 각종 궤환기구를 고려하여 반응도를 이들 궤환기구의 함수로 나타냄과 동시에 열출력과 궤환기구와의 관계식도 동특성 방정식에 포함시켜야함

3. 궤환 효과

❑ 표 6.4 궤환기구의 시정수

궤 환 현 상	기호 X	시 정 수
1차계통압력	P	0.01~0.1 초
기 포 발 생	υ	0.05~0.1 초
핵연료 온도	T_f	0.1~10 초
감속재 온도	T_m	0.1~1000 초
Xe 과 Sm 의 독작용	X_e, S_m	10시간
핵연료 소모	B	1~10 개월

Ex) 1차계통의 압력변화, 기포발생, 핵연료의 온도변화가 생겨나면 0.01~10초간의 시간 내에 궤환효과에 의해 반응도 변화가 생긴다는 의미

❑ 궤환기구가 반응도에 미치는 영향의 정량화

- 반응도 계수를 이용

$$\alpha_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad \boxed{6.75}$$

X=궤환기구
α_x =궤환기구 X에 대한 반응도 계수

3. 궤환 효과

- 반응도 ρ는 증배계수 k 와 $\rho = (k-1)/k$ 의 관계를 갖기 때문에 계수 α_x 는,

$$\alpha_x = \frac{\partial}{\partial x}\left(1-\frac{1}{k}\right) = \frac{1}{k^2}\frac{\partial k}{\partial x} \cong \frac{1}{k}\frac{\partial k}{\partial x} \qquad 6.76$$

- 식 (6.76)의 맨 끝 근사식은 사고 상태를 제외하고 원자로는 k 가 1 부근에서 운전되기 때문
- α_x 는 궤환기구 α에 따라 여러 가지 기호로 표시

α_x = 반응도 압력계수
α_{Tf} = 반응도 연료온도계수
α_{Tm} =반응도 냉작재온도계수

3. 궤환 효과

➢ 3.2 반응도 계수의 계산

❑ 가정

- 원자로를 균질로라고 가정

❑ 균질로의 증배계수 k는 1군 근사확산이론에 의거 다음과 같이 나타냄

$$k = \frac{\varepsilon P L_f \nu \Sigma_f / \Sigma_a}{1 + L^2 B^2}$$

반응도 온도계수 α_T 정의식에 대입

$$\alpha_T = \frac{1}{k}\frac{\partial k}{\partial T} \quad 6.77$$

$$\alpha_T = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{L_f}\frac{\partial L_f}{\partial T} + \frac{1}{P}\frac{\partial P}{\partial T} + \frac{1}{\nu}\frac{\partial \nu}{\partial T} + \frac{1}{\Sigma_f}\frac{\partial \Sigma_f}{\partial T} - \frac{1}{\Sigma_a}\frac{\partial \Sigma_a}{\partial T} - \frac{1}{1+L^2B^2}\frac{\partial}{\partial T}(1+L^2B^2)$$

6.78

3. 궤환 효과

- 이 식에 의해 α_T 를 구하고자 하면 다음과 같은 양들의 온도 의존성에 대한 정보 요구
  - 속핵분열인자(ε), 속중성자 비누설확률(L_f), 공명흡수도피인자(p), 핵분열당 방출되는 중성자의 수(ν)
  - Σ_f, Σ_a
  - L^2 (= D / Σ_a)
  - B^2 (기하학적 곡률)
  - 이중 B^2 은 균질로의 크기에 역비례하기 때문에 그 온도 의존성은 균질로의 선형 팽창계수로 나타낼 수 있음
    - » Ex) 두께 a의 평판 균질로에서 B^2 은,

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$$ 이므로 온도의존성은 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$\frac{dB^2}{dT} = \frac{d}{dT}\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 = -2\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \frac{1}{a}\frac{da}{dT} = -2B^2\beta$$ (단, β 는 선형팽창계수) 6.79

  - 또한 ε ,L_f,p 등 변수는 제5장 6절에서 본 바와 같이 핵단면적의 함수이기 대문에 윗 식에서 B^2 과 ν 를 제외하면 Σ_f나 Σ_a 와 같은 단면적과 확산계수 D의 온도 의존성만 알게 되면 α_T 를 구할 수 있음

3. 궤환 효과

➢ 3.3 반응도 계수와 반응도 결손

❑ 반응도 계수와 관련, 유용하게 사용되는 다른 변수로 반응도 결손이 있음

- 반응도 결손은 궤환변수의 총 변화에 대한 궤환 반응도의 총 변화량으로 정의

  - Ex) 핵연료 온도 반응도 계수가 α_{Tf} 이고 핵연료 온도가 초기 T_i 에서 최종 T_f 로 변화되었을 경우 온도차이 (T_f - T_i) 에 의한 총 궤환 반응도는,

$$\Delta\rho(T_i \rightarrow T_f) = \int_{T_i}^{T_f} \alpha_{Tf} dT \qquad 6.80$$

  - 이를 연료온도에 의한 반응도 결손이라 함

  - 일반적으로 반응도 계수는 궤환변수 자체의 함수임
    - » 특정궤환변수의 반응도 계수는 동일하지 않고 차이가 있게 됨

핵연료 온도,
원자로의 특성에 따라 또한 다름

3. 궤환 효과

❑ 3.3.1. 핵연료 온도 계수

- 핵연료 온도계수는 핵연료의 단위온도 변화에 대한 반응도 변화량이며 다음과 같이 표기

$$\alpha_{Tf} = \frac{\partial \rho}{\partial T_f} \quad \boxed{6.81}$$

- 핵연료 온도계수는 감속재 온도계수와 절대치가 다를 뿐 아니라 부호 또한 다를 수 있음

- 핵연료 온도 변화는 반응도 변화를 빠른 시간 내에 유발하는데 비해 감속재 온도 변화는 상대적으로 서서히 반응도에 영향을 미침
  - 핵연료에서 생성된 열출력 변화가 감속재 온도를 변화시키는데 시간이 소요되기 때문
  - 이 때문에 핵연료 온도계수를 즉발계수(Prompt Coefficient), 감속재 온도계수를 지발계수(Delayed Coefficient)라고 함

3. 궤환 효과

- 중수형 원자로(천연우라늄을 원료로 사용)나 경수형 원자로(저농축우라늄)에는 핵연료내 많은 양의 핵원료성 물질이 있음
  - 따라서 이로 인하여 핵연료 온도변화는 항상 음의 반응도 궤환효과를 가져옴
  - 이는 원자로에 고유한 안전특성으로 주요한 궤환기구임
  - 일반적으로 경수로의 핵연료 온도계수는 10^{-5}/℃ 정도임
  - 핵연료가 연소되면서 음의 핵연료계수에 크게 기여하고 있는 핵원료성 물질인 U^{238} 양의 변화가 크기 않아 핵연료 온도계수는 크게 변화하지 않음
- 핵연료 온도변화로 인한 반응도 결손은 식 (6.81)을 이용하여 계산가능
  - 실제 응용에서는 핵연료 평균온도계수를 이용
  - 핵연료 평균온도계수 $<\alpha_{Tf}>$는 온도변화 ΔT_f 에 대한 반응도 결손 $\Delta\rho$ 를 이용하여 일반적으로 다음과 같이 근사 가능

$$<\alpha_{Tf}>=\frac{\Delta\rho}{\Delta T_f} \qquad 6.82$$

3. 궤환 효과

➢ 3.3.2 감속재 온도 계수

❑ 감속재 온도 계수는 감속재 단위온도 변화에 대한 반응도 변화량이며 다음과 같이 표시

$$\alpha_{Tm} = \frac{\partial \rho}{\partial T_m} \quad \boxed{6.83}$$

- α_{Tm}는 감속재 온도 T_m의 함수임
- 감속재 온도계수는 설계 특성에 따라 양 또는 음이 될 수 있음
- 안전성 측면에서 볼 때 감속재 온도계수는 항상 음의 값을 가져 반응도에의 궤환효과가 음의 효과가 되는 것이 바람직
  - 감속재 온도변화는 핵연료의 온도변화가 선행한 후 일정시간 후 서서히 진행되므로 제어에 시간적 여유가 있어 상대적으로 핵연료 온도계수에 비해 안전과 관련 크게 문제 되지 않음
- 현재 가압경수로에서는 출력변화의 용이성을 위해 약간의 양의 감속재 온도계수를 허용
  - 핵연료가 연소됨에 따라 음의 값을 가지도록 설계
- 중수로의 설계 시에는 경수로보다 세심한 주의가 요구
  - 핵연료로 천연우라늄을 이용하기 때문에 감속재 온도 증가에 따라 중성자스펙트럼이 경화되고 이로 인해 중성자증배계수의 증가 즉, 반응도 증가를 초래할 수 있기 때문

3. 궤환 효과

➢ 3.3.3 감속재 밀도계수와 기포계수

- ❑ 감속재의 온도가 변화하면 감속재의 밀도 또한 변함
- ❑ 감속재 밀도계수는 감속재 밀도의 단위량 변화에 따른 반응도에 변화로 정의

$$\alpha_{dm} = \frac{\partial \rho}{\partial d_m} \quad \boxed{6.84}$$

감속재의 밀도 : d_m

- ▪ 가압경수로(PWR)
  - 감속재 온도 변화에 따른 밀도변화가 크지 않으므로 그 궤환효과는 크지 않으나 반응도에의 궤환효과는 음의 효과로 나타남
    - » 이는 감속재 온도가 증가할 경우 감속재 밀도가 감소하므로 중성자의 감속효과가 떨어지고, 그 결과 중성자 증배계수가 감소하기 때문
- ▪ 비등수형원자로(BWR)
  - 감속재의 비등을 이용하므로 감속재 밀도계수의 궤환효과가 PWR에 비해 큰 음의 궤환효과를 유발
    - » 이는 감속재 온도가 증가하면 중성자 에너지 감속에 기여하는 액체상태의 감속재가 기포상태로 변화하는 양이 증가하여 감속재 밀도변화가 PWR에 비해 심하기 때문

3. 궤환 효과

❑ 감속재 기포 계수

- 감속재 밀도계수와 유사한 계수로 다음과 같이 정의

$$\alpha_v = \frac{\partial \rho}{\partial v} \quad \boxed{6.85}$$

감속재 내의 기포율 : v

  - 기포계수는 기포율의 단위변화량에 대한 반응도 변화량

- 가압경수형원자로(PWR)
  - 감속재의 비등을 근본적으로 허용하지 않기 때문에 기포계수의 반응도 궤환효과를 무시할 수 있음

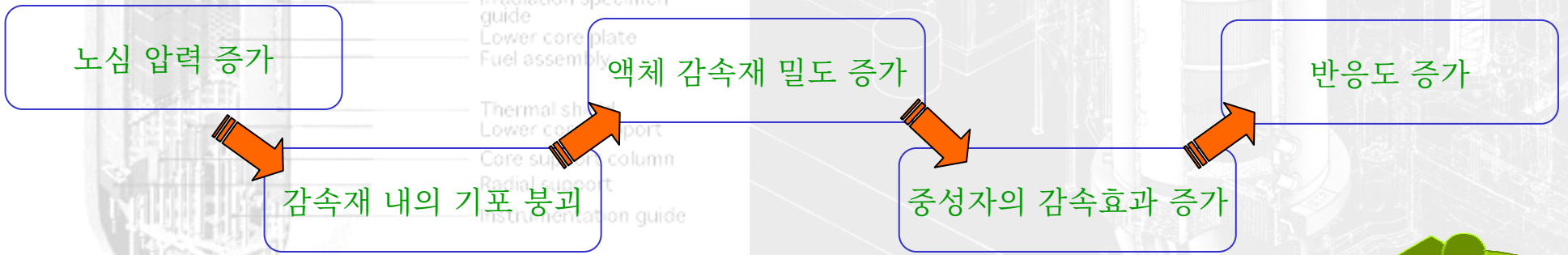
- 비등수형원자로(BWR)
  - 감속재의 비등을 이용한 열에너지 전달방법을 채택하고 있으므로 기포에 의한 반응도의 궤환효과가 중요시되어야 함

감속재 온도 증가 → 기포율 증가 → 감속재에 의한 중성자 감속효과 감소 → 음의 궤환효과

3. 궤환 효과

➢ 3.3.4 압력계수

- ❑ 원자로에서는 냉각재의 비등을 억제하면서 높은 온도를 유지하기 위해서 노심내의 상당한 압력이 가해짐
  - Ex) PWR: 약 2250psi, BWR: 약 1020psi, Candu: 약 1500psi
    - PWR과 BWR의 노심압력 차이는 냉각재의 비등 허용 여부 때문
- ❑ 압력계수는 노심압력의 단위변화에 대한 반응도 변화량을 나타냄
  - 가압경수로(PWR)
    - 노심압력의 변화에 대한 반응도 궤환효과는 음이 궤환효과로 그 값이 매우 작아서 일반적으로 무시하고 있음
  - 비등수형원자로(BWR)
    - 압력변화에 따라 감속재의 기포율이 변화되면서 직접적으로 중성자에너지 감속에 매우 중요한 영향을 미침



3. 궤환 효과

➢ 3.3.5 출력계수

❑ 노심의 열출력을 P (MWt) 라고 하면 출력계수 α_p 는 다음과 같이 정의

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P} \qquad 6.86$$

- 출력계수는 단위출력 변화에 대한 반응도 변화량임
- 출력계수에서 사용되는 출력 P는 열출력의 절대량 대신 일반적으로 총열출력에 대한 실제 출력의 비율로 나타나게 되므로 그 계산은 매우 복잡함
  - 따라서 실제상 출력변화에 따라 핵연료 온도의 변화와 감속재 온도의 변화 효과가 반응도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 가정하면,

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{\partial \rho}{\partial T_f}\frac{\partial T_f}{\partial P} + \frac{\partial \rho}{\partial T_m}\frac{\partial T_m}{\partial P} = \alpha_{Tf}\frac{\partial T_m}{\partial P} + \partial T_m \frac{\partial T_m}{\partial P} \qquad 6.87$$

$\partial T_f / \partial P$: 출력변화에 따른 핵연료 온도 변화율

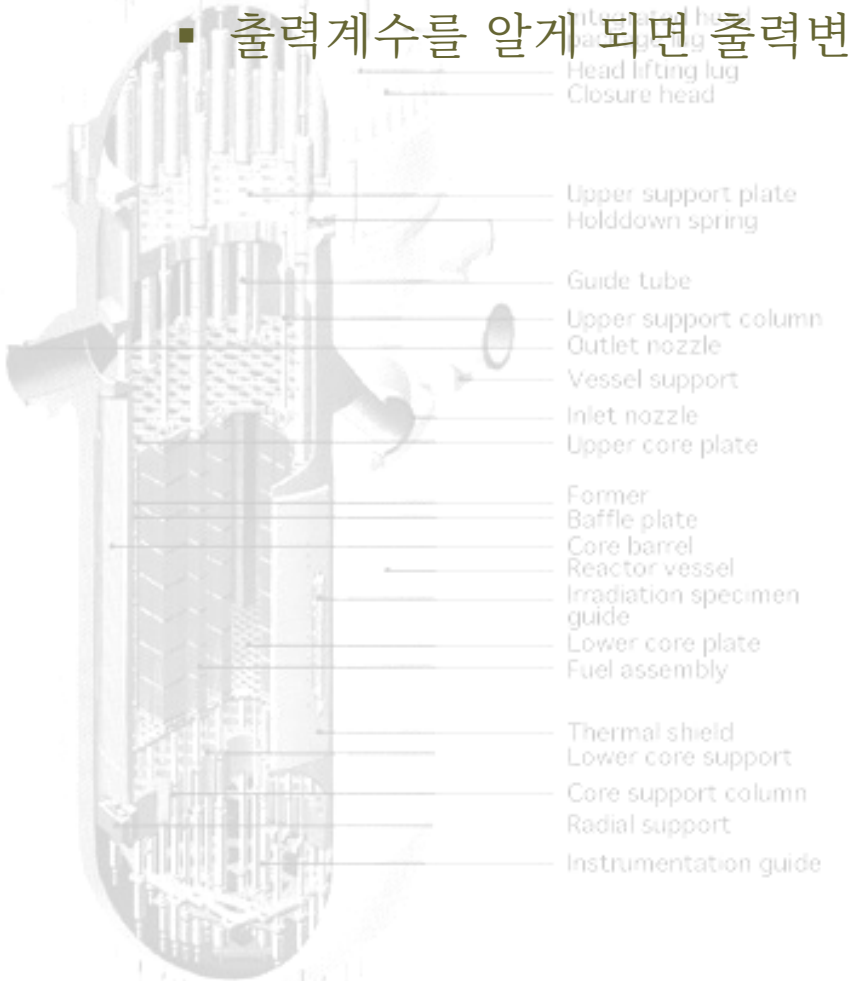
$\partial T_m / \partial P$: 출력변화에 따른 감속재 온도 변화율

SNUSAL Safety Analysis Lab

3. 궤환 효과

- 식 (6.87)에서는 두개 만의 온도 궤환효과를 고려하여 출력계수를 각각의 온도계수로 표현하였으나 이를 확장하여 모든 궤환변수에 대한 반응도계수의 합성하여 구할 수 있음

- 출력계수를 알게 되면 출력변화에 따른 반응도 결손 또한 구할 수 있음



3. 궤환 효과

➢ 3.4 동력로의 동특성

❑ 점운동방정식은 흔히 영출력 동특성 방정식으로 불림

- 반응도 ρ(t) 가 시간만의 함수로 궤환효과가 고려되어 있지 않기 때문에 영출력에 있는 원자로에만 적용 가능
  - 따라서 점운동방정식은 궤환효과를 무시될 수 있는 저출력 원자로의 과도특성을 해석하는데에 근사적으로 적용 가능함

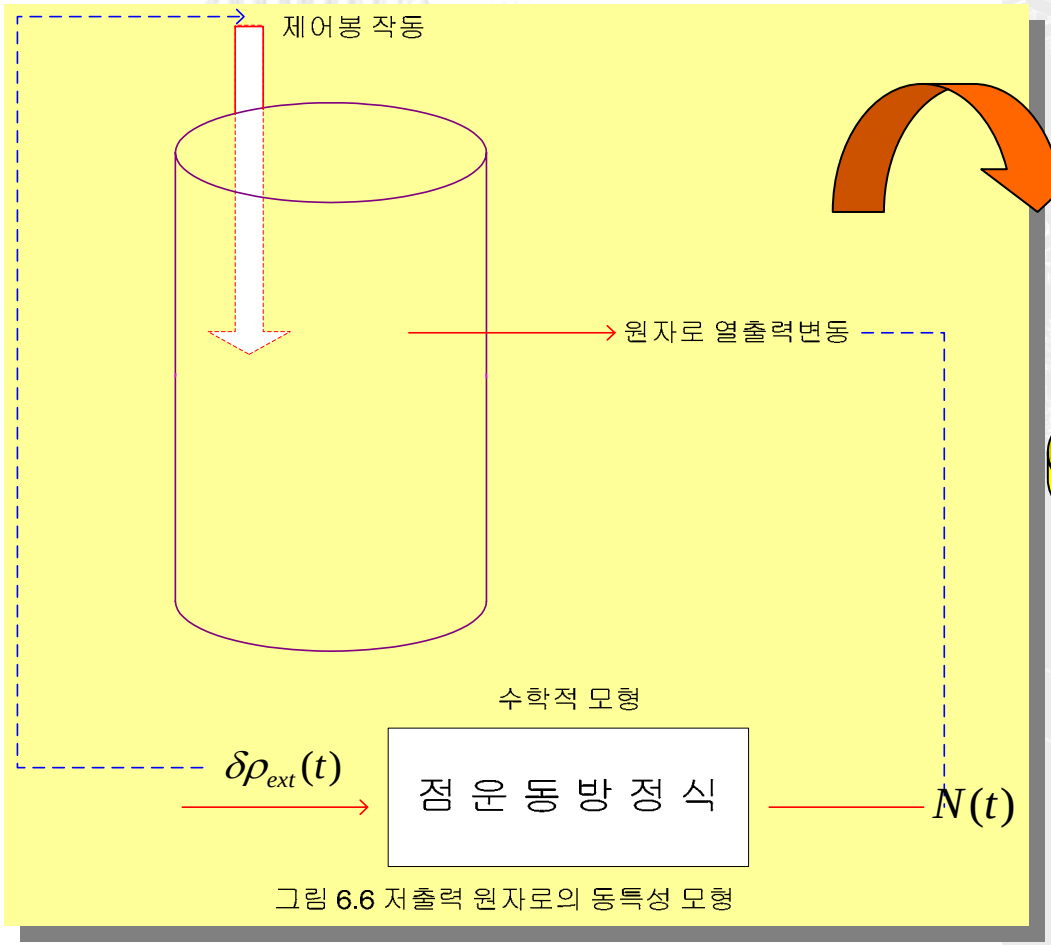


그림 6.6 저출력 원자로의 동특성 모형

1) 그림 6.6는 점운동방정식에 의한 동특성 모형에서 입력과 출력과의 관계를 나타냄
2) 이 모형에서는 외란(제어봉의 위치이동)은 반응도 $\delta\rho_{ext}(t)$ 로 표현되며 그 결과는 원자로의 열 출력의 변화로 나타남

이는 점운동방정식에서 $\rho(t) = \delta\rho_{ext}(t)$ 로 놓고 N(t) 를 구함으로서 알 수 있게 됨

3. 궤환 효과

- 원자로가 고출력 상태에 이르면 궤환효과를 고려해야 함으로 반응도 입력과 원자로 열출력 관계가 그림 6.6처럼 간단하지 않음

  - 궤환효과를 고려하면 원자로에 입력되는 반응도 $\rho(t)$ 는 제어봉 작동과 같은 초기 외란에 의한 반응도 $\delta\rho_{ext}(t)$ 와 궤환효과에 의한 반응도 $\delta\rho_f(t)$ 의 합, 즉

$$\rho(t) = \delta\rho_{ext}(t) \qquad 6.88$$

  - 여기서 $\delta\rho_f(t)$ 는 궤환기구에 따라 반응도 계수를 써서 나타낼 수 있음
    - » 가령, 온도에 의한 궤환효과를 고려한다면

$$\delta\rho_f(t) = \alpha_T(T(t) - T_0) \qquad 6.89$$

T_0 : 초기 정상상태의 노심온도

$T(t)$: 과도상태의 노심온도

3. 궤환 효과

- 식 (6.89)에서 궤환 반응도 $\delta\rho_f(t)$ 를 노심온도, 즉 T(t) 로 나타내었기 때문에 궤환반응도를 구하려면 과도기간 중 노심온도 변화를 알아야 하며 이는 노심 열출력 변화와 노심 온도간의 관계식으로부터 구할 수 있음

노심 열출력 변화와 노심 온도간의 관계

- 원자로심의 열 수력학적 특성에 의존함
  - » 정확한 $\delta\rho_f(t)$ 를 기술하려면 노심의 열수력 모형에 의거해야 함
- 점운동방정식과 같은 근사적 동특성 방정식에서는 다음과 같은 간단한 모형 적용가능

$$\frac{dT(t)}{dt} = \kappa(N(t) - N_0) - \gamma(T(t) - T_0) \qquad 6.90$$

κ : Heat capacity의 역수

γ : 열전달 계수

3. 궤환 효과

- 식 (6.90) ⇒ Newton의 냉각법칙

식 6.90 + 식 6.88 ⇒ 온도 궤환에 의한 반응도 기술

- 그림 6.7은 궤환효과가 있는 경우 고출력 원자로 동특성 모형을 묘사

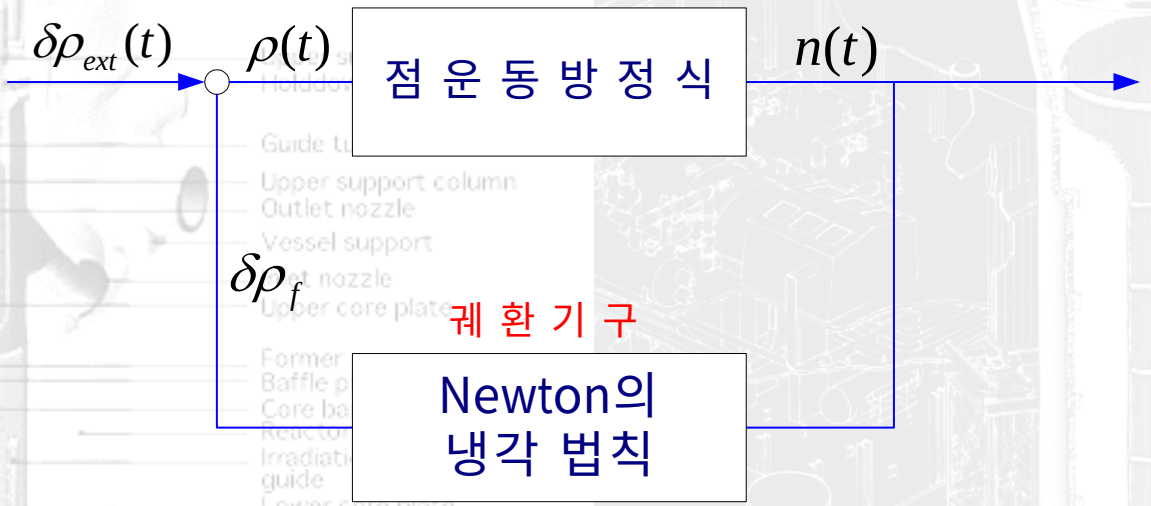


그림 6.7 고출력 원자로 동특성 모형

해석해 산출 어려움 ⇒ 전산기를 이용한 동특성 코드로 수치해를 구함

3. 궤환 효과

❑ 온도 궤환효과 여부에 따른 원자로 출력 과도특성의 정성적 비교

- 온도변화에 따른 과도출력 거동은 반응도 온도계수 α_T 의 부호에 크게 의존
  - Ⅰ) $\alpha_T > 0$ 인 경우

➡ 식(6.77)에서 $\partial k / \partial T$ 의 부호 양

➡ 온도가 증가에 따라 중성자의 증배계수 증가

중성자 증배계수 증가 → 핵분열 반응 증가 → 원자로 출력 증가 → 원자로 구성 요소 온도 증가

➡ 따라서 원자로 출력의 인위적 제동 필요

➡ 노심 용해 (Core meltdown)초래 가능

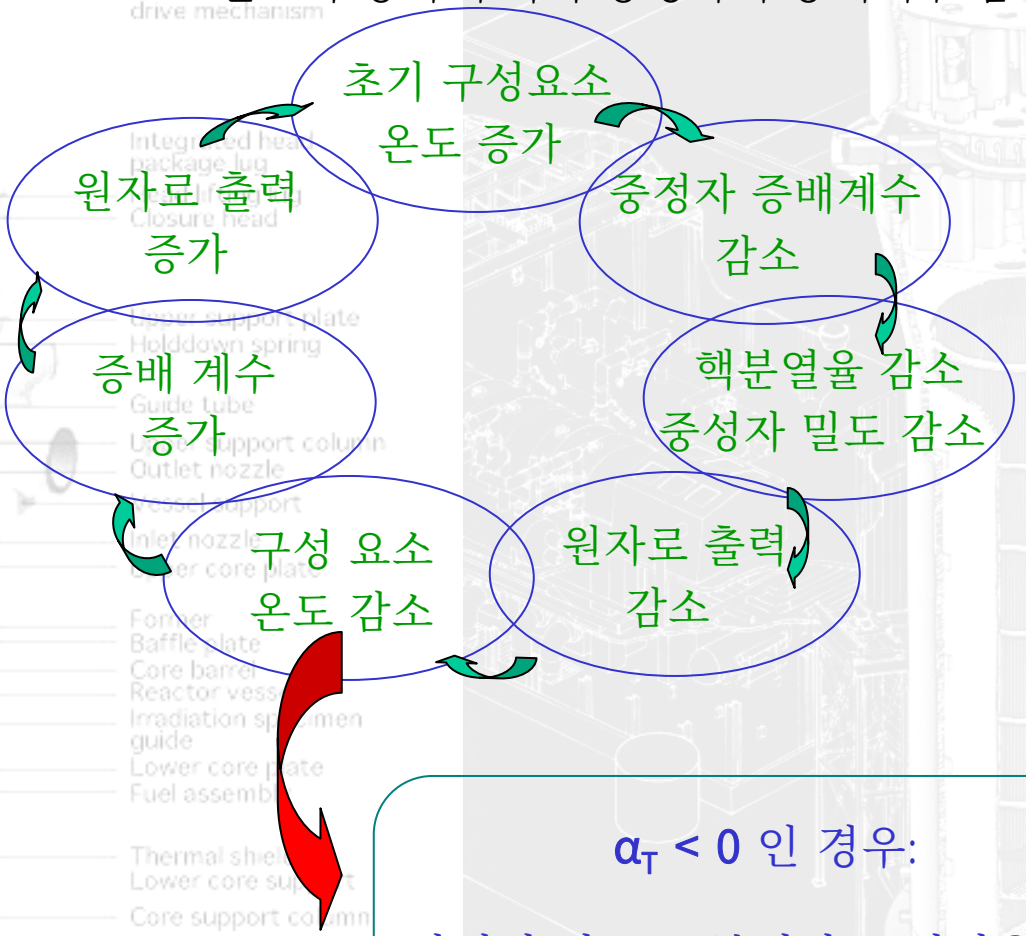
➡ 반응도 온도계수가 양의 값을 가지는 것은 원자로 자체가 온도변화에 불안정한 상태가 되므로 바람직하지 않음

3. 궤환 효과

- Ⅱ) $\alpha_T < 0$ 인 경우

  ➡ 식 (6.77)에서 $\partial k/\partial T$ 의 부호 음

  ➡ 온도가 증가에 따라 중성자의 증배계수 감소



$\alpha_T < 0$ 인 경우:

원래의 값으로 복귀하는 성질을 가짐

➡ 안전성에서 유리

3. 궤환 효과

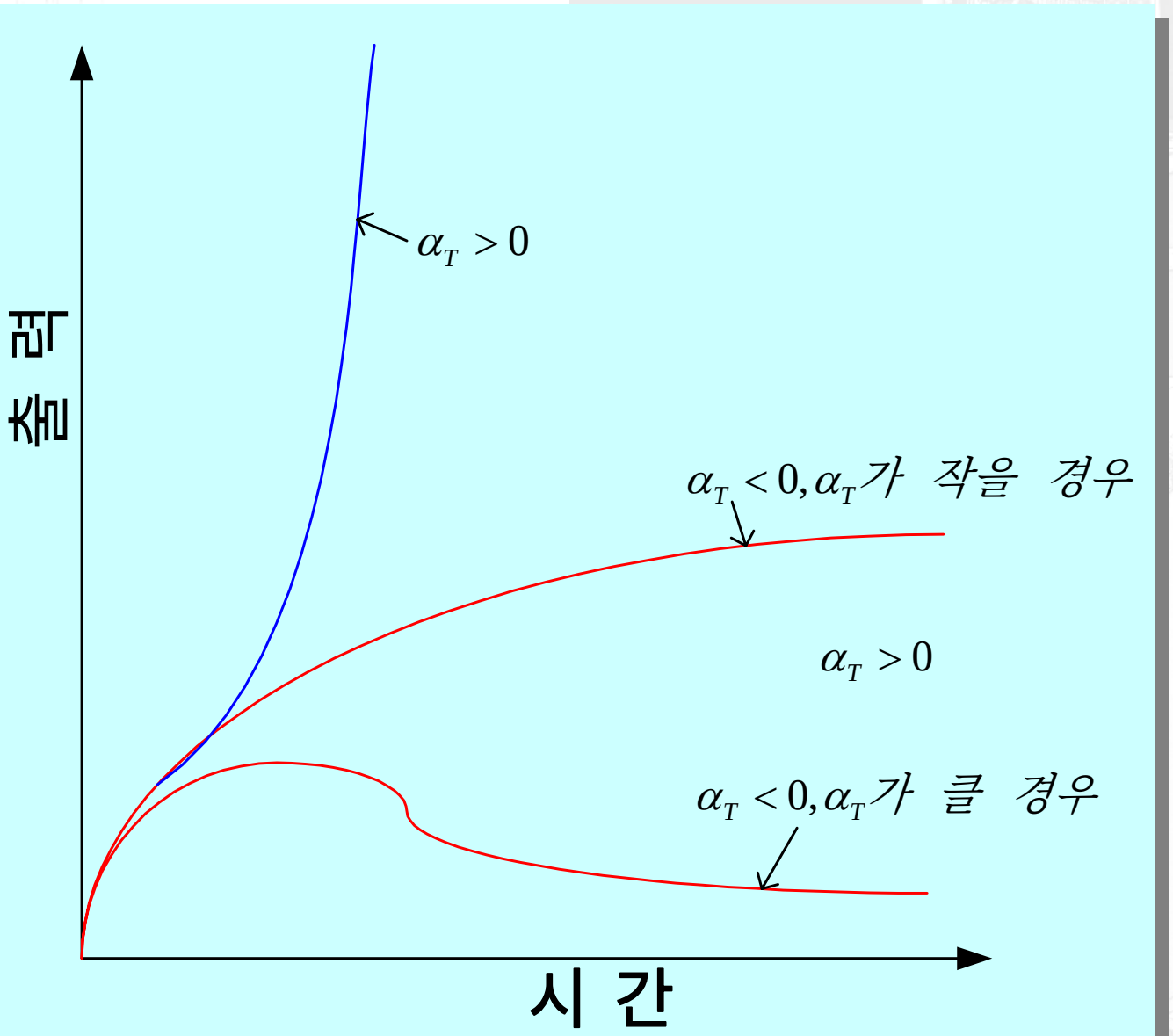


그림 6.8 α_T의 부호에 따른 원자로 열출력 거동

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

➢ 핵연료 연소(Fuel depletion or Fuel burnup)

❑ 핵연료 연소란?

- 핵연료내의 핵분열성 물질과 중성자와의 흡수반응(방사포획 및 분열반응)에 의해 원자핵이 감속하고 운전이 계속됨에 따라 초기의 원자수밀도가 계속 감소하게 되는 현상
- 핵연료 연소에 의해 초기의 반응도보다 계속해서 감소가 이루어짐
  - 운전의 일정기간 지속과 출력을 생산을 위해 반응도 감소에 대한 보상 조치 필요

➢ 핵분열 생성물의 독작용(Poisoning)

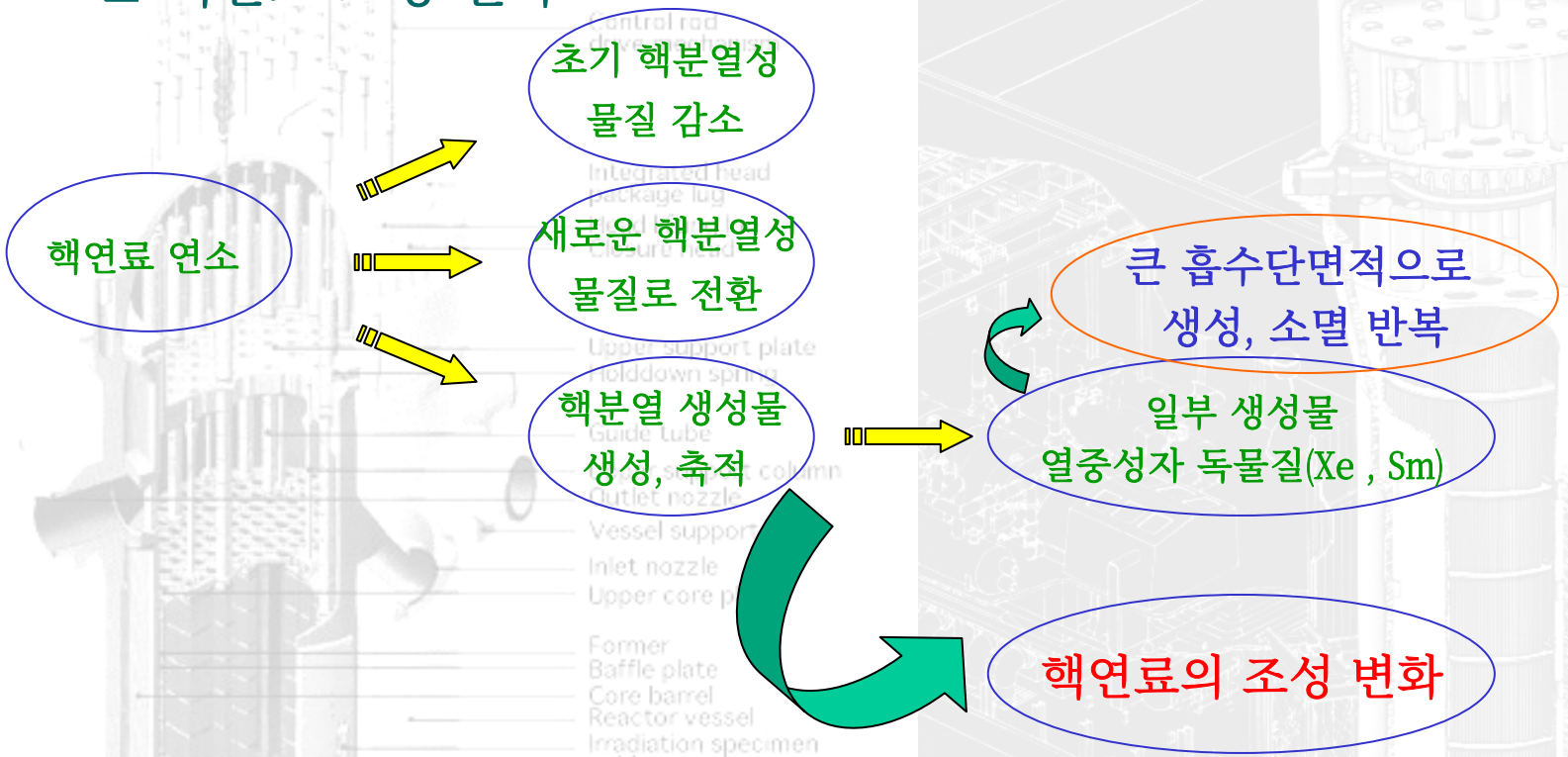
❑ 독작용이란?

- 핵연료 연소로 인한 핵분열성 물질의 감소와 핵분열 반응과 기타 반응에 의한 새로운 핵분열성 물질과 핵분열 생성물이 핵연료내에 생성 축적됨
- 이 때 일부 핵분열 생성물(열중성자 독물질)은 열중성자에 대한 큰 흡수단면적을 가짐에 따라 열중성자를 쉽게 흡수(열중성자에 대한 독작용)하여 반응도 감소가 일어남

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

➢ 4.1 핵연료 연소와 연소 방정식

❑ 핵연료 조성 변화



- 핵연료 조성이 변화하면 증배계수를 결정하는 거시적 단면적이 변하기 때문에 반응도 변화가 수반됨
- 반응도의 변화량과 변화 속도를 알기 위해 연소에 따른 핵연료 조성 변화를 구해야 함

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

❑ 핵연료의 조성 변화 II

- 조성변화를 구하기 위해서 중성자와의 흡수반응으로 핵연료를 구성하는 성분핵들의 변환 과정의 파악이 중요
- 그림 6.9와 6.10은 각각 우라늄 핵연료와 토륨 핵연료를 사용하고 있는 원자로 내에서의 주요 핵반응을 나타냄

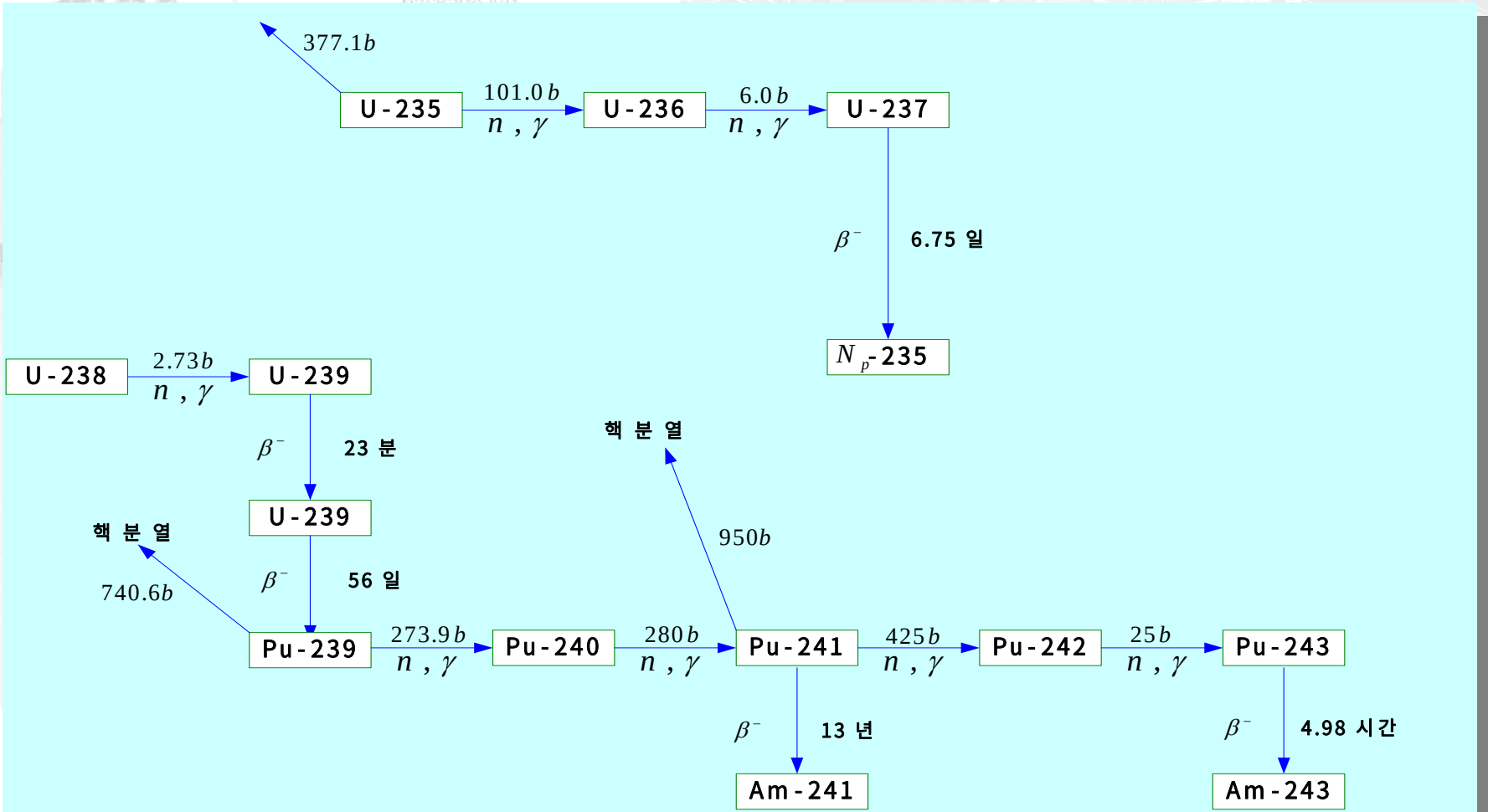


그림 6.9 우라늄 핵연료의 원자로내 주요 핵반응

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

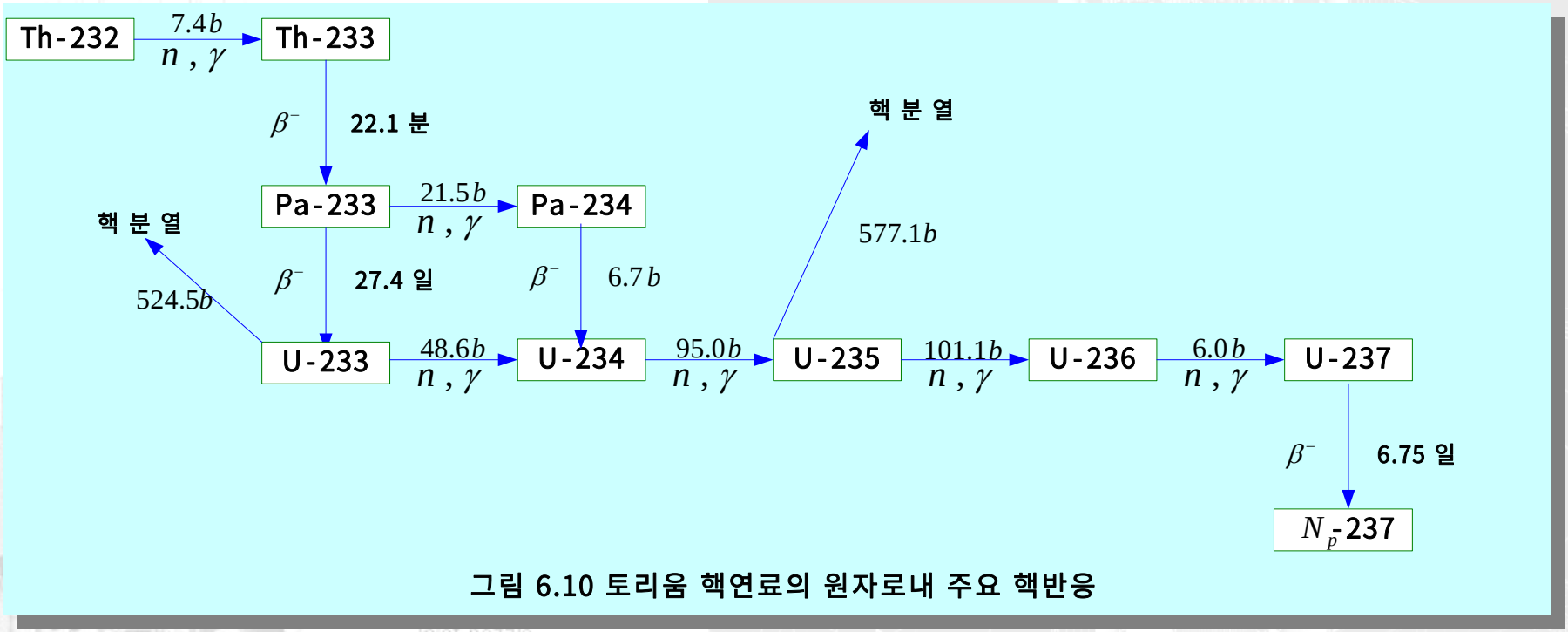


그림 6.10 토리움 핵연료의 원자로내 주요 핵반응

- 이 그림들을 참조하면 핵연료 물질들의 연소에 따른 조성병화를 연소방정식을 통해 예측할 수 있음

❑ 연소 방정식

- 연소방정식이란?
  - 노심내 핵종이 중성자와의 핵반응 혹은 방사붕괴 등을 생성 또는 소멸될 때 각 핵종별로 원자핵수의 평형관계를 수식화 한 것

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- Ex)

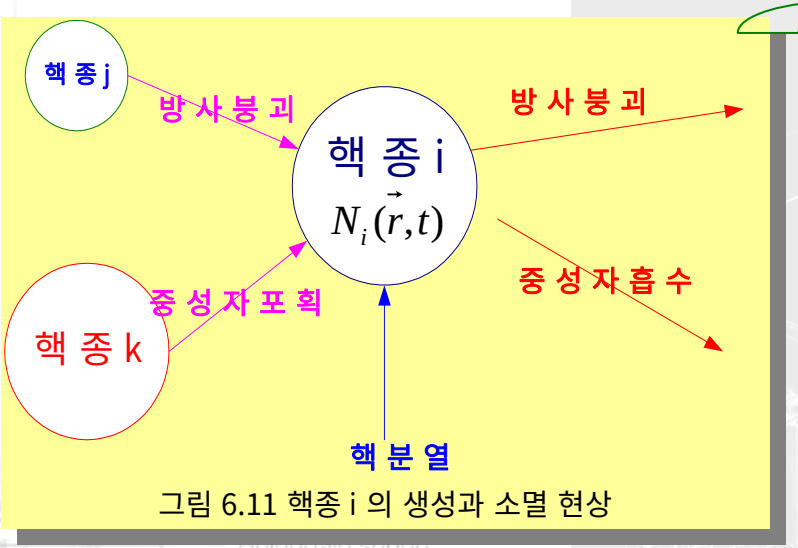


그림 6.11 핵종 i 의 생성과 소멸 현상

핵종 i의 노심내 위치 $\vec{r}$ 과 시간 t 에서의 수밀도: $N_i(\vec{r},t)$

- 그림 6.11 의 핵종 i는 다음과 같은 평형식을 만족해야함

핵종 i의 위치 $\vec{r}$ 과 시각 t 에서의 단위 체적당 변화율 = 위치 $\vec{r}$ 및 t 에서 단위 체적당 생성율 − 위치 $\vec{r}$ 및 t 에서 단위 체적당 소멸율 (6.91)

Or

$$\frac{\partial N_i(\vec{r},t)}{\partial t} = \text{핵종 j의 방사붕괴율} + \text{핵종 k의 중성자포획율} + \text{핵분열 반응에 의한 핵종 i의 생성율} - \text{핵종 i의 중성자흡수율} - \text{핵종 i의 방사붕괴율} \quad (6.92)$$

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 또한 식 (6.92)는 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$\frac{\partial N_i(\vec{r},t)}{\partial t} = \lambda_j N_j(\vec{r},t) + \sigma_c^k N_k(\vec{r},t)\phi(\vec{r},t) + \gamma_i \Sigma_f \phi(\vec{r},t) - \lambda_i N_i(\vec{r},t) - \sigma_c^i N_i(\vec{r},t)\phi(\vec{r},t) \quad 6.93$$

위치 $\vec{r}$ 과 t 에서 중성자속 : $\phi(\vec{r},t)$

핵종별 밀도수 : $N_\ell(\vec{r},t)\ (\ell = i,j,k)$

방사붕괴에 의한 생성율과 소멸율: $\lambda_\ell N_\ell$

핵종 ℓ 에 의한 중성자 포획율 : $\sigma_c^\ell N_\ell(\vec{r},t)\phi(\vec{r},t)$

σ_c^ℓ = 핵종 ℓ의 중성자 포획 단면적$(\ell = i,k)$

γ_i = 핵분열당 핵종 i의 생성율

- 식 (6.93)은 노심내 모든 핵종에 대해 적용할 수 있는 일반식임
  - ⇒ 식 (6.93)은 비선형 방정식이므로 해석적으로 풀기 어려움
    - ⇒ 근사적 방법 이용

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 근사적 방법을 통한 식 (6.93)의 풀이
  - 가정
    식 (6.93)에서 시간 t를 t_0, t_1, t_2 … 등과 같이 분할하고 t_n 에서 t_{n+1} 까지의 연속 구간 사이에서는 중성자속이 일정하다고 가정

  - 시각 t_n 에서 t_{n+1} 까지 중성자속 $\phi(\vec{r},t)$ 를 $\phi(\vec{r},t_n)$ 혹은 $\phi_n(\vec{r})$ 이라고 하고 식 (6.93)이 시간구간에 대해 적분했을 때, 핵종 i의 수밀도는,

$$N_i(r,t_{n+1}) = N_i(r,t_n)e^{-(\lambda_i+\sigma_c^i\phi_n(r))\Delta t_n+\int_{t_n}^{t_{n+1}}\{\lambda_j N_j(r,t')+\sigma_c^k N_k(r,t')\phi_n(r)+\gamma_i\Sigma_f\phi_n(r)\}e^{-(\lambda_i+\sigma_c^i\phi_n)(t'-t_n)}dt'}$$

6.95

단, $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

그림 6.12 는 저농축 UO_2 를 핵연료로하는 원자로에서 위와 같은 계산을 통하여 구해본 주요 핵연료 물질의 조성변화임

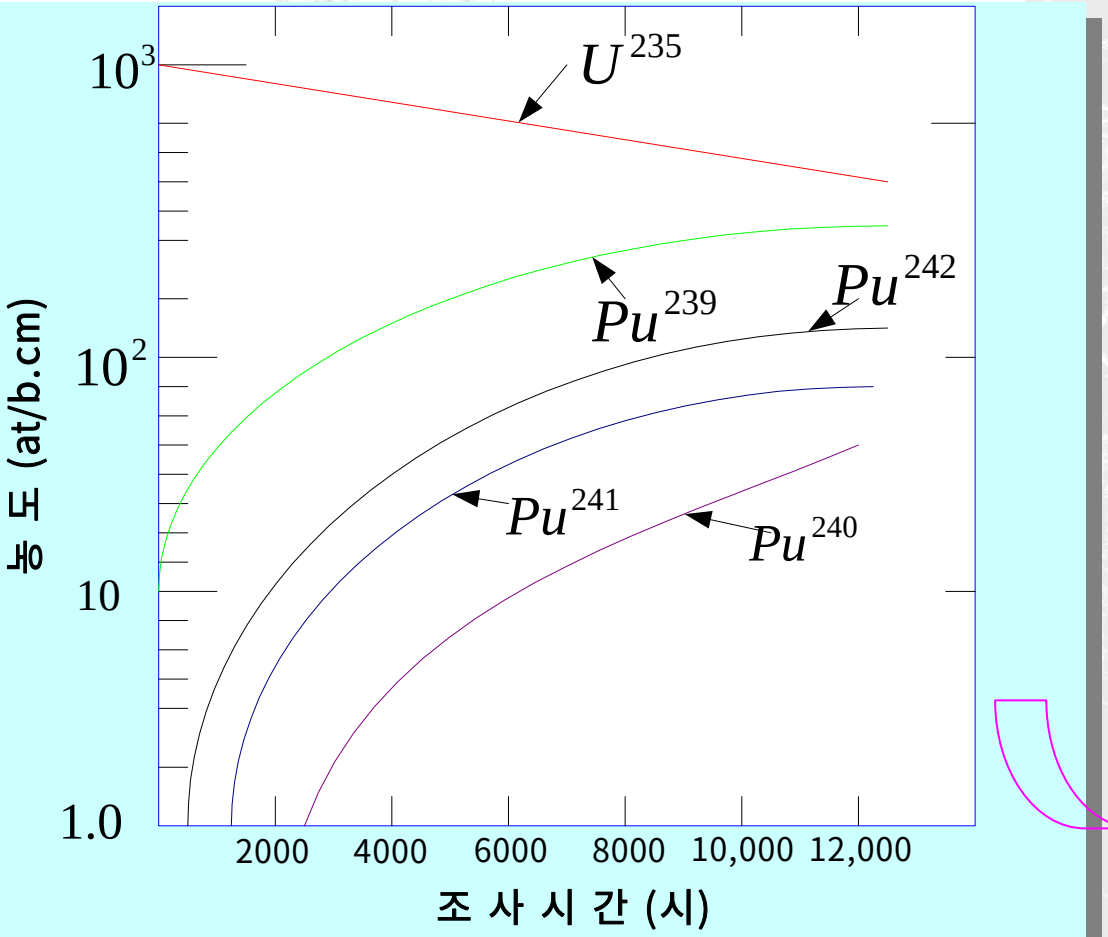


그림 6.12 핵연료연소에 따른 U 및 Pu 핵종 농도 변화

첫째, 초기 핵분열성 U^{235} 핵종은 서서히 감소

둘째, Pu^{239} 와 Pu^{241} 등 새로운 핵분열성 물질이 생겨나고 어느 시간 이상 경과 후 포화상태에 이름

셋째, Pu^{240} 및 Pu^{242} 등 중성자 포획물질이 점차 증가

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

➢ 4.2 변환과 증식

❑ 핵연료의 연소로 인해 초기의 핵분열성 물질은 중성자와의 핵반응에 의하여 변환을 거듭, 새로운 핵종들을 생성함

- 핵종의 변환과정에서 새로이 생성되는 핵분열성 물질은 중요한 의미를 가짐

⇨ 초기의 핵분열성 물질은 핵반응으로 인해 계속 감소하지만 새로이 생성되는 핵분열성 물질들이 핵분열 반응에 기여하면서 초기 물질의 감소를 보상해 줄 수 있기 때문

- 증식로
  - 초기 핵분열성 물질이 중성자와의 흡수(포획 및 핵분열) 반응에 의해 소모되는 양 이상으로 새로운 핵 분열성 물질이 생겨나는 노형

- 전환로
  - 새로이 생성되는 핵분열성 물질이 소모되는 양보다 적은 노형

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

❑ 증식율(혹은 전환율)

- 새로운 핵분열성 물질을 생성하는 능력의 척도

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

- C > 1인 경우
  - 이를 증식율이라 함
  - C > 1인 원자로를 증식로라고 함
- C < 1인 경우
  - 이를 전환율이라 함
  - C < 1인 원자로를 전환로라 함
- (C-1) 란?
  - C > 1인 경우 (C-1) 을 증식이득이라 함

❑ 상업용 발전로의 경우

- 열중성자로
  - C가 1보다 작은 전환로에 해당
- 고속로
  - 속중성자의 핵분열을 이용
  - C가 1보다 큰 증식로에 해당

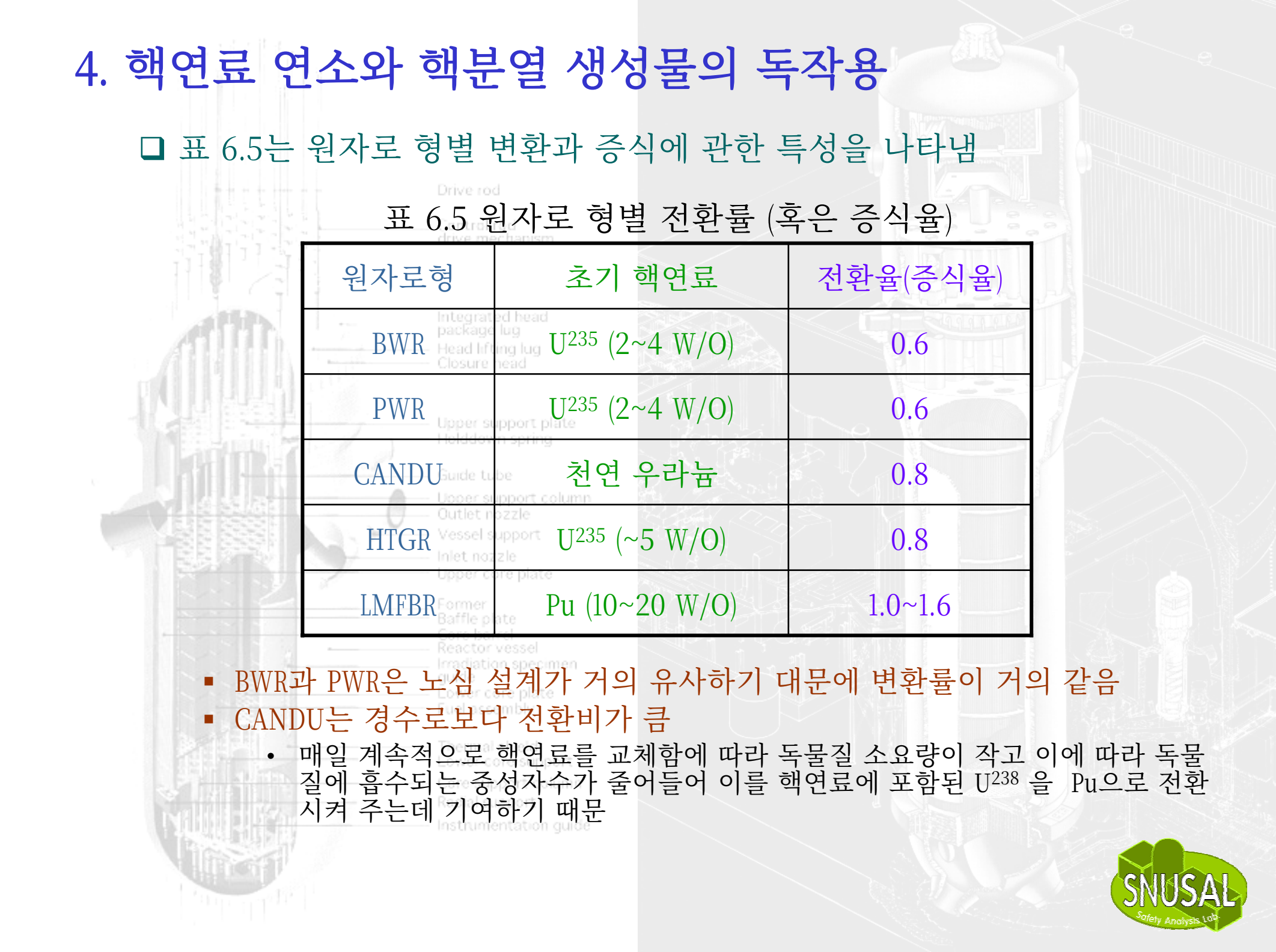
4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

❑ 표 6.5는 원자로 형별 변환과 증식에 관한 특성을 나타냄

표 6.5 원자로 형별 전환률 (혹은 증식율)

원자로형	초기 핵연료	전환율(증식율)
BWR	U^{235} (2~4 W/O)	0.6
PWR	U^{235} (2~4 W/O)	0.6
CANDU	천연 우라늄	0.8
HTGR	U^{235} (~5 W/O)	0.8
LMFBR	Pu (10~20 W/O)	1.0~1.6

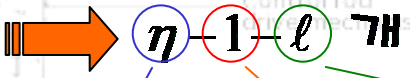
- BWR과 PWR은 노심 설계가 거의 유사하기 대문에 변환률이 거의 같음
- CANDU는 경수로보다 전환비가 큼
  - 매일 계속적으로 핵연료를 교체함에 따라 독물질 소요량이 작고 이에 따라 독물질에 흡수되는 중성자수가 줄어들어 이를 핵연료에 포함된 U^{238} 을 Pu으로 전환시켜 주는데 기여하기 때문



4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

❑ 전환율은 η 에 크게 의존함

- η 개 중성자 중 핵연료성 물질에 흡수될 수 있는 중성자수는,



ℓ = 핵연료 이외의 다른 물질(감속재, 구조재) 에 흡수되는 일부 중성자

η = 핵분열 반응에 의해 핵연료에 흡수되는 중성자 한 개당 새로이 생겨나는 중성자수

1 = 핵분열 연쇄반응을 유지하기 위해서 꼭 연쇄반응에 참여해야 하는 양

따라서 증식로가 가능하기 위해서는
적어도 η 가 2보다 커야하며
그렇지 못한 경우 (η < 2) 전환로가 됨

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

➢ 4.3 핵분열 생성물의 독작용

❑ 핵분열 생성물

- 핵분열 시 생성되는 핵분열 파편들은 불안정하여 일련의 방사붕괴를 거치면서 핵분열 생성물이 생겨남
- 핵분열 생성물은 중성자를 흡수하는 이른바 기생물질에 속함

❑ 핵분열 생성물의 독작용

- 중성자의 기생흡수로 증배계수 k 를 감소시키는 영향을 미침
- 그러나 일부 핵종을 제외한 대부분의 핵분열 생성물은 그 영향이 미비
  - 생성량이 미량이거나 중성자 흡수 단면적이 작기 때문

❑ 주요 독작용을 하는 핵분열 생성물

Xe^{135} 와 Sm^{149}

⇒ 큰 중성자 흡수 단면적을 가짐

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

➢ 4.3.1 Xe^{135} 의 독작용

❑ Xe^{135} 의 특징 및 생성 과정

- Xe^{135} 는 핵분열 생성물 중 아주 큰 열중성자 흡수 단면적을 가지고 있으며 분열당 생성되는 양도 적지 않기 때문이 독작용이 중시됨
- Xe^{135} 는 중성자 에너지 E = 0.082eV 부근에서 공명흡수가 일어나며 E = 0.082eV 에서 약 2.7 X 10^6 barn 에 해당하는 큰 흡수단면적을 가짐
- Xe^{135} 의 생성 과정

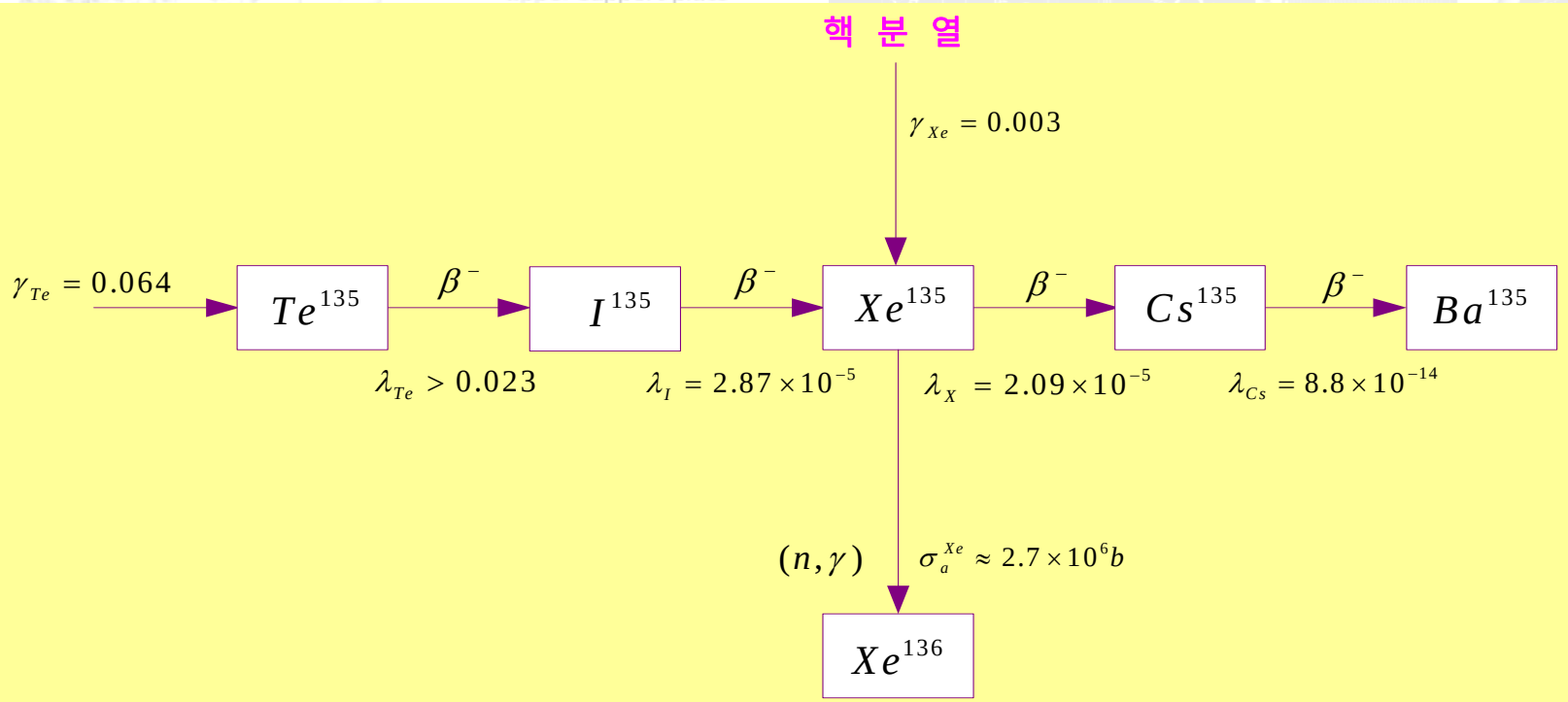


그림 6.13 Xe^{135} 의 생성과정

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 그림 6.13과 같은 생성과 붕괴 과정을 통해 Xe^{135} 핵종이 변화는 양을 식 (6.93)을 이용하여 수식화가 가능함

❑ Xe^{135} 의 평형식

▪ 가정

- Te^{135} 의 반감기 (30.1초) << I^{135} 의 반감기(6.7시간)

⟹ Te^{135} 대신에 I^{135} 가 핵분열의 결과 직접 생겨나는 것으로 가정

▪ 그림 6.13으로부터 I^{135} 및 Xe^{135} 의 수밀도 평형방정식은,

$$\frac{dI(t)}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \phi(t) - \lambda_I I(t) \qquad 6.97a$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = \gamma_x \Sigma_f \phi(t) + \lambda_I I(t) - [\sigma_{ax}\phi(t) + \lambda_x] X(t) \qquad 6.97b$$

γ_I, γ_X : I^{135} 와 Xe^{135} 의 생성비율

λ_I, λ_X : I^{135} 와 Xe^{135} 의 붕괴상수

표 6.6 핵분열성물질별 I^{135} , Xe^{135}, Pm^{149} 의 생성율

핵분열당 생 성 율	U^{233}	U^{235}	Pu^{239}	Pu^{241}	붕괴 상수
γ_I (%)	4.884	6.386	6.100	7.694	$\lambda_I = 0.1035\ hr^{-1}$
γ_X (%)	1.363	0.228	1.087	0.255	$\lambda_X = 0.0753\ hr^{-1}$
γ_P (%)	0.66	1.13	1.3		$\lambda_P = 0.0128\ hr^{-1}$

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 식 (6.97)의 일반해는,

$$I(t) = [I(0) + \gamma_I \int_0^t dt' \Sigma_f \phi(t') e^{\lambda_I t'}] e^{-\lambda_I t} \qquad 6.98a$$

$$X(t) = \{X(0) + \int_0^t dt' (\lambda_I I(t') + \gamma_x \Sigma_f \phi(t')\} \exp[-\int_0^{t'} dt'' (\lambda_x + \sigma_{ax} \phi(t'')] \qquad 6.98b$$

- 식 (6.98)의 일반해를 몇가지 특수한 경우에 적용해 보자

(가) 원자로의 최초 가동시

- 가정
  I(0)=0, X(0)=0, 원자로는 일정한 중성자속 ϕ_0 로 운전된다고 가정
- 식 (6.98) 에 $\phi(t) = \phi_0$ 를 대입하고 적분하면,

$$I(t) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I} (1 - e^{-\lambda_I t}) \qquad 6.99a$$

$$X(t) = \frac{(\gamma_I + \gamma_x) \Sigma_f \phi_0}{\lambda_x + \sigma_{ax} \phi_0} \{1 - e^{-(\lambda_x + \sigma_{ax} \phi_0) t}\} + \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_x - \lambda_I + \sigma_{ax} \phi_0} \{e^{-(\lambda_x + \sigma_{ax} \phi_0) t} - e^{\lambda_I t}\} \qquad 6.99b$$

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 식 (6.99) 원자로 최초가동 이후 I^{135} 와 Xe^{135} 량의 시간적 변화를 나타내는데 이를 그림으로 표시하면 그림 6.14와 같음

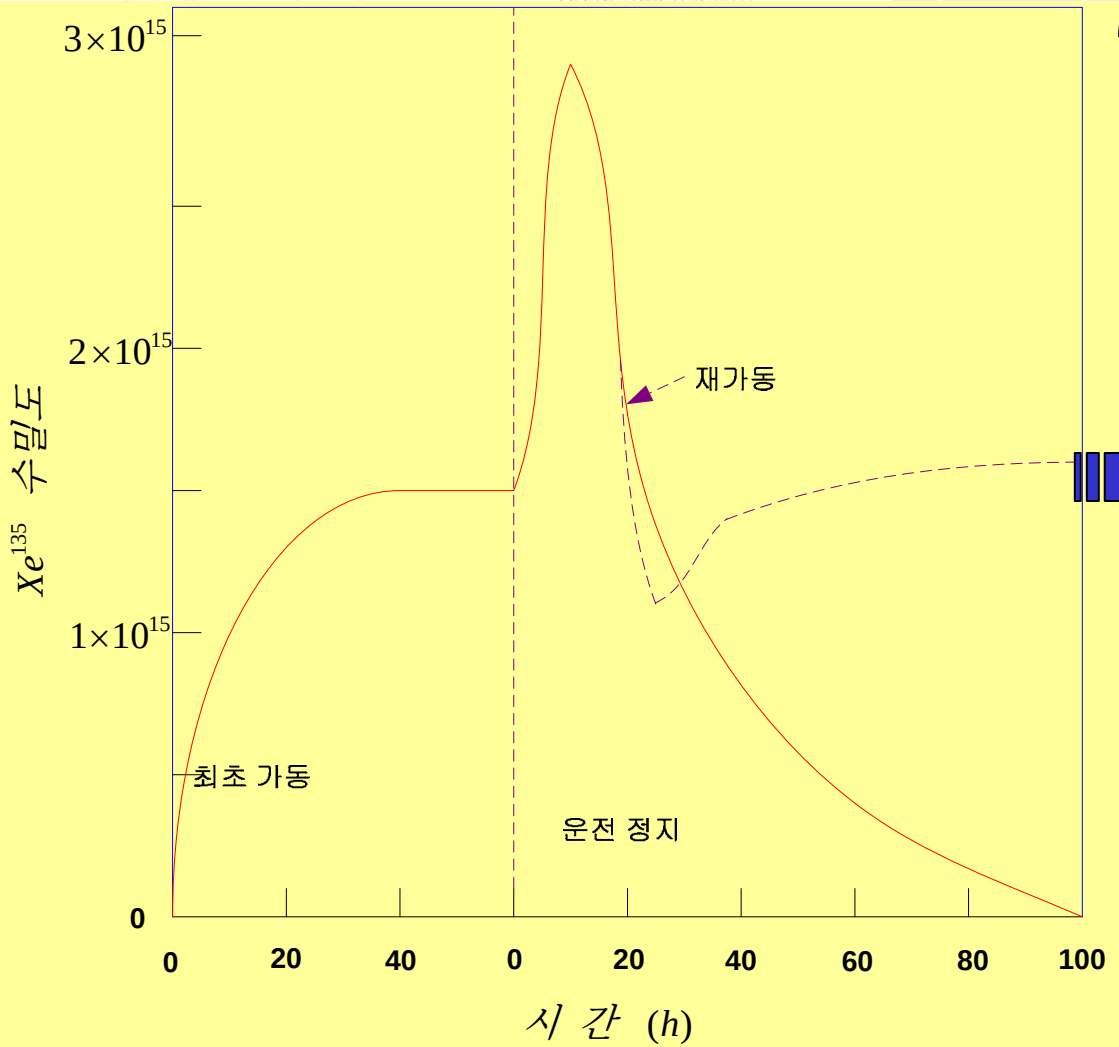


그림 **6.14** 운전조건에 따른 Xe^{135}의 수밀도 변화

I^{135} 와 Xe^{135} 는 원자로 운전과 더불어 증가하다가 일정시간 경과 후 포화상태에 이름

이들 핵종의 생성과 손실이 평형을 이루기 때문

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 이들 핵종의 생성과 손실이 평형을 이루는 것은 식 (6.97)에서 t = ∞ 로 취하거나 dL / dt = 0 및 dX / dt 로 놓고 풀면 다음과 같이 구해짐

$$I_\infty = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I} \qquad X_\infty = \frac{(\gamma_I + \gamma_x)\Sigma_f \phi_0}{\sigma_{ax}\phi_0 + \lambda_x}$$

6.100

- Xe^{135} 의 독작용

➡ 거시적 흡수단면적 $\Sigma_{ax} = \sigma_{ax} X(t)$ 로 결정

- 평형상태

➡ $\Sigma_{ax} = \sigma_{ax} X_\infty$

X_∞ 는 ϕ_0 에 비례

고출력 원자로에서 증배계수에 큰 영향을 미침

I^{135} Xe^{135}

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- (나) 원자로 정지 후
  - 원자로가 정지하면 Xe^{135} 가 핵분열에 의해 생성되지는 않으나 이미 노심에 존재하는 I^{135} 가 붕괴하여 생겨나기 때문에 Xe^{135} 가 시간에 따라 변함
  - 이에 대해 살펴보면,

➡ 식(6.97)에서 $\phi(t) = 0$ 이므로 I^{135} 와 Xe^{135} 는,

$$\frac{dI(t)}{dt} = -\lambda_I I(t) \qquad 6.101a$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = \lambda_I I(t) - \lambda_x X(t) \qquad 6.101b$$

➡ 이 식을 차례로 적분하면,

$$I(t) = I(0)e^{-\lambda_I t} \qquad 6.102a$$

$$X(t) = X(0)e^{-\lambda_x t} + \frac{\lambda_I I(0)}{\lambda_I - \lambda_x}\left[e^{-\lambda_I t} - e^{-\lambda_x t}\right] \qquad 6.102b$$

I(0), X(0) = 원자로 정지 시 I^{135} 와 Xe^{135} 의 수밀도

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 원자로 정지 후 Xe^{135}의 수밀도가 증가했다가 다시 줄어드는 거동은 정지 전 운전상태에서의 중성자속 레벨에 의존함
  - 그림 6.15는 정지 전 중성자속 레벨에 따른 Xe^{135} 의 수밀도 변화를 음의 반응도로 환산하여 나타냄 것임

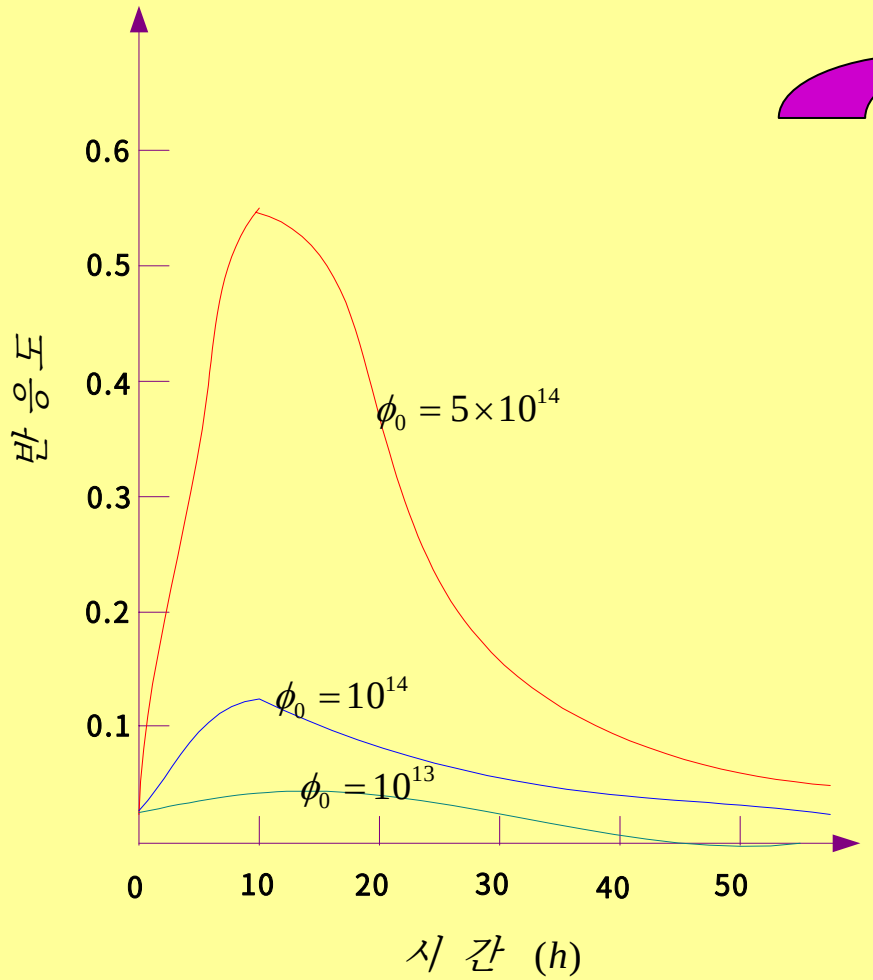


그림 6.15 원자로 정지후 Xe^{135}수밀도 변화에 따른 음의 반응도 효과

1. 정지전 중성자속이 클수록 Xe^{135}생성에 의한 음의 반응도 궤환효과가 큼

2. 경수로에서 약 10시간 지나면 음의 반응도 궤환효과가 최대치에 도달

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

❑ Xe^{135}의 출력분포에의 영향

- Xe^{135} 는 노심 반응도 이외에 노심의 출력분포에도 영향을 미침
- Xe^{135} 가 출력분포에 미치는 영향은 다음과 같이 정성적으로 설명될 수 있음
  - Xe^{135} 수밀도는 중성자속의 공간분포에 의존

(Ⅰ) 예기치 않은 운전조작(ex)제어봉을 비대칭적으로 삽입)으로 인해 비대칭적 공간 출력 분포가 생겨났을 때 원자로심내 공간위치에 따라 핵분열율이 달라지고 이에 따라 Xe^{135} 와 I^{135} 가 중성자흡수에 의해 비대칭적으로 생성
(Ⅱ) a) 중성자속이 높은 영역: Xe^{135} 이 많은 중성자를 흡수해 급속히 소모되어 독작용이 감소, 이에 따라 중성자속이 계속적으로 증가, I^{135} 의 농도 증가 b) 중성자속이 낮은 영역 : 높은 영역과 반대 현상 발생
(Ⅲ) a) I^{135} 의 농도가 증가하는 영역: Xe^{135} 농도가 충분히 증가하면 붕괴가 많아져, 의 농도가 증가하고 Xe^{135} 의 중성자흡수로 인해 중성자속이 감소함 b) I^{135} 의 농도가 감소하는 영역: Xe^{135} 의 농도가 감소하여 독작용이 줄어들어 중성자속이 증가함
(Ⅳ) 이러한 현상이 지속되면 Xe^{135} 는 공간적으로 진동하는 것과 같은 거동을 보이고 이는 출력분포의 공간 진동을 유발하게 됨(Xe^{135} 의 공간 진동은 보통 수십시간의 주기를 가지고 진행)

원자로의 온도계수가
큰 음의 반응도효과를 가질 때는
이와 같은 공간진동은 서서히 제압됨

원자로의 설계시
감속재온도계수를
음의 값을 가지도록 설계하면
공간진동을 조절할 수 있음

SNUSAL
Safety Analysis Lab

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

➢ 4.3.2 Sm^{149} 의 독작용

❑ Sm^{149} 의 특징 및 생성과정

- Sm^{149} 는 열중성자에 대한 흡수단면적이 E = 0.025eV 에서 약 4.1 X 10^3 barn 정도로 Xe^{135} 에 비해 작지만 Xe^{135} 와 마찬가지로 독작용이 강한 핵분열 생성물임
- Sm^{149} 의 생성과정

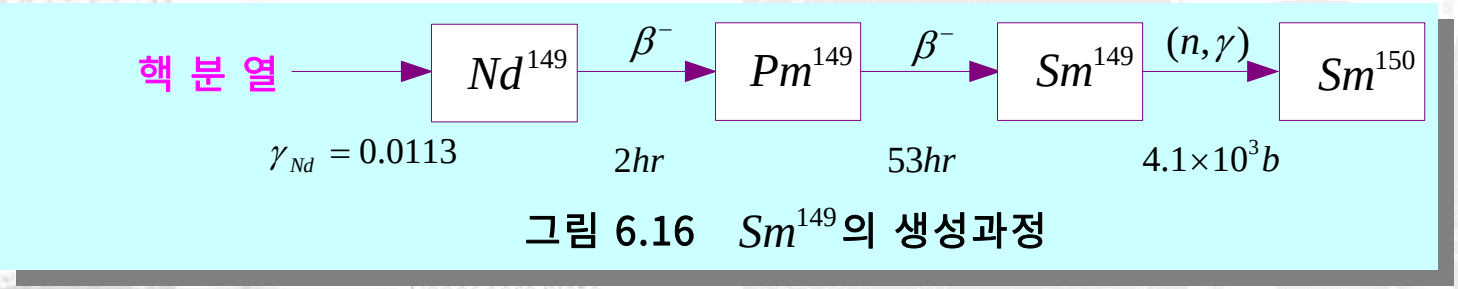


그림 6.16 Sm^{149}의 생성과정

❑ Sm^{149} 의 평형식

- 가정
  - Nd^{149} 의 반감기(2시간) << Pm^{149} 의 반감기(53시간)

    ⟹ Nd^{149} 대신에 Pm^{149} 가 직접 핵분열로부터 생성된다고 가정

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 식 (6.93)을 이용하면 Pm^{149} 과 Sm^{149} 의 수밀도 평형방정식은,

$$\frac{dP(t)}{dt} = \gamma_{Nd}\Sigma_f\phi(t) - \lambda_p P(t) \qquad 6.103a$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \lambda_p P(t) - \sigma_{as} S(t)\phi(t) \qquad 6.103b$$

P(t), S(t) : Pm^{149} 와 Sm^{149} 의 수밀도
γ_{Nd} : Nd^{149} 의 핵분열당 생성비율

참조 표 6.6

- 식 (6.103)의 일반해는,
  - $\phi(t)$ 를 일정한 중성자속 ϕ_0 로 가정하고 식 (6.103)을 적분하면,

$$P(t) = \frac{\gamma_p\Sigma_f\phi_0}{\lambda_p}(1 - e^{-\lambda_p t}) + P(0)e^{-\lambda_p t}$$

$$S(t) = S(0)e^{-\sigma_{as}\phi_0 t} + \frac{\gamma_p\Sigma_f}{\sigma_{as}}(1 - e^{\sigma_{as}\phi_0 t}) - \frac{\gamma_p\Sigma_f\phi_0 - \lambda_p P(0)}{\lambda_P - \sigma_{as}\phi_0}(e^{-\sigma_{as}\phi_0 t} - e^{-\lambda_p t}) \qquad 6.104$$

P(0), S(0): 시간 t=0 에서의 Pm^{146} 과 Sm^{149} 의 수밀도

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- (가) 원자로 최초 가동시
  - 원자로 최초 가동시는 윗 식에서 P(0)=0 , S(0)=0 이라 놓으면 P(t)와 S(t)의 시간에 따른 농도변화를 알 수 있음
  - Pm^{149} 과 Sm^{149} 역시 일정시간 운전 후 평형상태에 도달함
  - 이들 핵종의 평형상태에서의 수밀도는,

$$P_\infty = \frac{\gamma_{Nd}\Sigma_f\phi_0}{\lambda_p} \qquad 6.105a$$

$$S_\infty = \frac{\gamma_{Nd}\Sigma_f}{\sigma_{as}} \qquad 6.106a$$

  - (나) 운전 정지 수
  - 일정한 중성자속 ϕ_0 로 장기간 운전한 후 원자로를 정지시켰을 경우 수밀도 변화는 식 (6.104)로부터 다음과 같이 됨을 알 수 있음

$$P(t) = P_\infty e^{-\lambda_p t} \qquad 6.106a$$

$$S(t) = S_\infty + P_\infty(1-e^{-\lambda_p t}) \qquad 6.106b$$

4. 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용

- 원자로 운전을 정지하였을 경우 Sm^{149} 농도변화는 Xe^{149} 의 농도변화와 다소 다른 거동을 보임

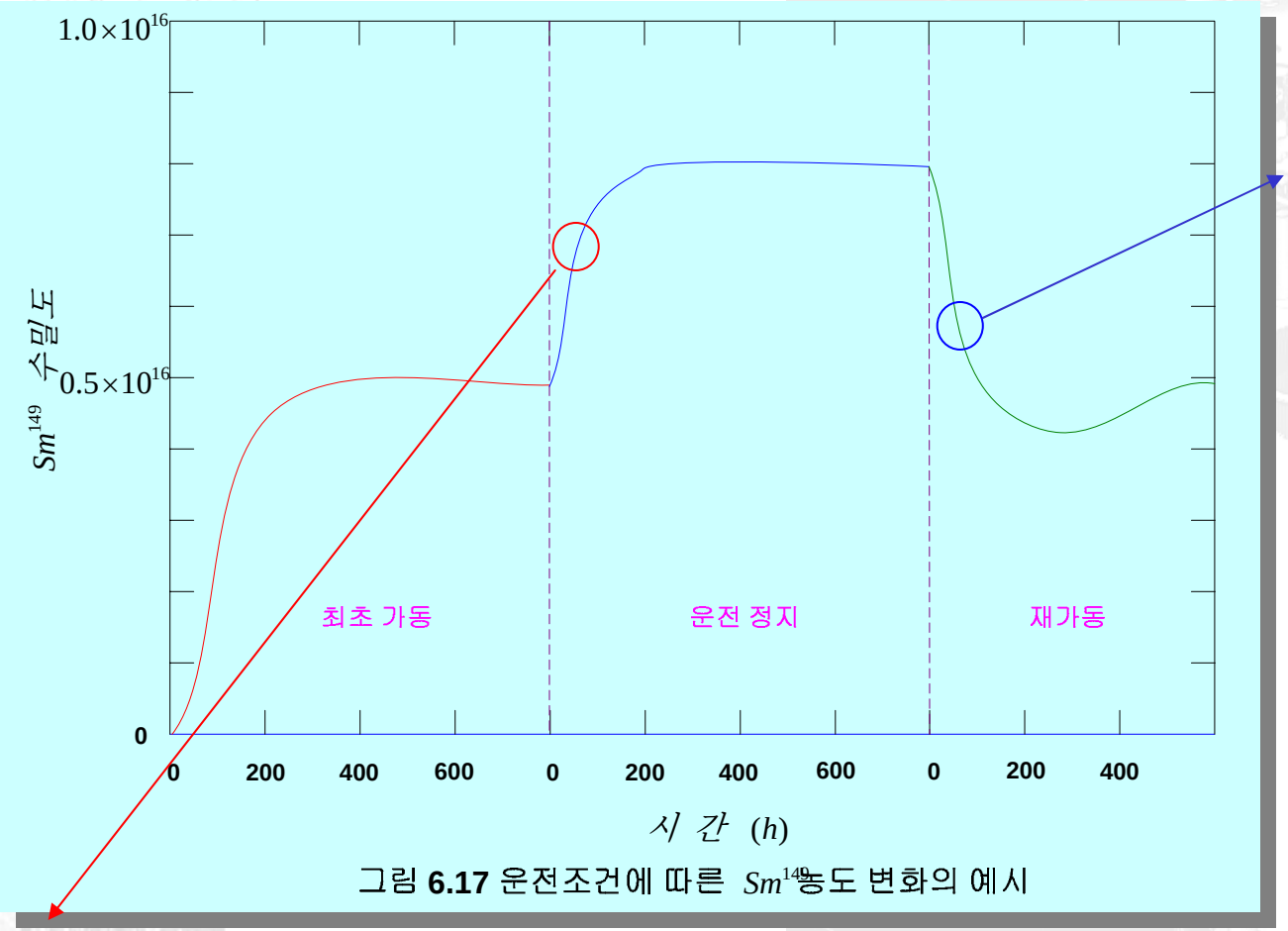


그림 **6.17** 운전조건에 따른 Sm^{149} 농도 변화의 예시

운전이 재개되면 Pm^{149} 의 생성과 이의 베타방사붕괴에는 시간적 지연이 있기 때문에 Sm^{149} 는 중성자흡수로 그 수밀도가 초기의 평형상태 농도까지 감소함

Sm^{149} 는 안정핵이므로 농도 감소는 중성자 흡수에 의해서만 가능
따라서 원자로가 정지되면 Sm^{149} 의 농도를 감소시켜줄 중성자가 없으므로 이미 생성되어 포화농도에 이르렀던 Pm^{149} 가 계속해서 베타붕괴하여 Sm^{149} 를 생산, Sm^{149} 의 농도가 방사붕괴가 끝날때까지 증가한 후 일정한 양을 유지함

5. 반응도 제어

➢ 정상임계 상태의 유지

❑ 초기임계상태의 유지를 방해하는 요인

- 핵연료 연소와 핵분열 생성물의 독작용으로 인한 반응도의 자연감소
- 궤환효과와 같은 반응도 결손

➡ 따라서 만약 원자로가 초기 임계상태로 설계되면 반응도 감소 효과로 인해 미임계상태가 되고 출력이 감소, 정격출력운전이 불가능해짐

❑ 원자로의 임계유지

- 원자로의 임계 유지에 필요한 이상의 여분의 반응도를 잉여 반응도라함
- 정상상태에서 원자로는 항상 임계상태에 있어야 하므로 정상운전을 위해서는 잉여반응도를 제어가 필요함

❑ 잉여 반응도의 제어 및 조절

- 독물질 사용
  - 고정가연성 독봉
  - 화학적독물질
  - 제어봉

5. 반응도 제어

➢ 5.1 가연성 독봉

❑ 가연성 독봉

- 가연성 독물질을 핵연료와 같이 봉의 형태로 가공한 것
  - 가연성 독물질은 중성자를 흡수함으로써 연소되어 없어지는 독물질
  - 독물질은 중성자를 흡수하여 독작용이 없어지는 다른 핵종으로 변하기 때문에 그 원자핵 수는 연소와 더불어 계속 감소함
- 가연성 독봉의 위치
  - 핵연료봉과 더불어 핵연료내 정해진 위치에 고정
    - » 핵연료 집합체를 노심 밖으로 인출 시 까지 핵연료와 더불어 노심내에서 연소

❑ 가연성 독봉의 목적

1) 원자로 운전 초기에 잉여반응도를 제어하기 위함

2) 노심내 출력분포를 평탄하게 하기 위함

- 이를 위해 가연성 독봉은 열중성자 흡수단면적이 큰 물질로 제조
  - » 경수로의 경우 주로 보론(B^{10})이 함유된 $B_4C-Al_2O_3$ 또는 Gadolinium등이 사용

5. 반응도 제어

❑ 가연성 독봉의 잉여 반응도 제어

- 독봉의 독물질의 핵연료의 연소속도 보다 빠른 속도로 연소되도록 함
  - 독물질이 핵연료보다 빨리 연소됨으로써 운전주기의 후반에 독물질의 농도가 낮아져서 이들에 의한 반응도 손실이 작아지므로 의도한 기간동안 핵연료가 연소하면서 열을 생산하게 할 수 있도록 함

❑ 독물질의 연소 속도

- 독물질의 연소속도는 독물질양이 증가함에 따라 감소함
  - 독물질의 양은 제어되어야 할 잉여 반응도(핵연료의 양)에 따라 결정

❑ 노심내 출력분포의 평탄화

- 가연성 독봉의 노심내 위치와 관련
  - 노심 내 중성자밀도 분포가 높은 위치에 독봉 사용
  - 중성자 밀도가 낮은 영역(가장자리)에는 독봉을 사용하지 않음
- 가연성 독봉의 위치는 높은 중성자속을 가능한한 억제하여 공간출력분포를 전반적으로 평탄화시킬 수 있도록 선정

5. 반응도 제어

- 그림 6.18은 가압 경수형원자로 노심에서 사용되는 가연성 독봉의 배치모형의 예시임

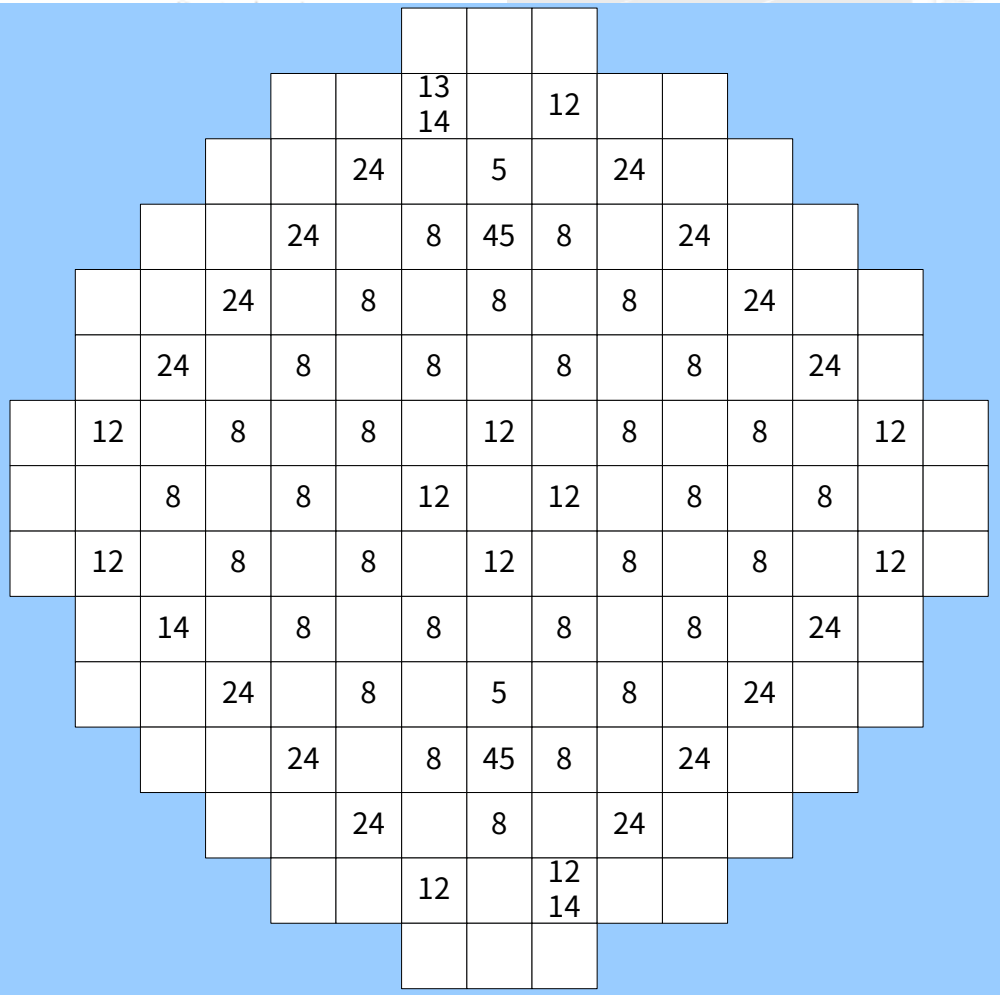


그림 6.18 가압경수형 노심에서의 가연성 독봉봉 배치 모형
(수치는 핵연료 집합체별 독봉봉수)

5. 반응도 제어

➢ 5.2 화학적 독물질

❑ 화학적 독물질

- 감속재 또는 냉각재내에 중성자에 대한 독작용을 하는 독물질 섞어 놓은 것

❑ 화학적 독물질의 성질

- 중성자에 대한 흡수단면적 커야함
- 냉각재에 용해될 수 있어야 함
- 금속재료에 대한 부식성이 없어야 함
  - 냉각재와 함께 노심전체에 균일하게 분포되어 순환하므로
- 이러한 요구조건을 만족시키면서 현재 가장 널리 이용하고 있는 화학적 독물질은 붕산임

❑ 화학적 독물질의 제어

- 화학적 독물질의 인위적인 농도조절은 원자로 냉각재 계통에 연결되어 있는 화학적체적조절계통에서 이루어짐
  - 농도 감소시 : 냉각재의 첨가로 노심내의 붕산농도를 감소시킴
  - 농도 증가시 : 붕산을 첨가하여 원자로내 붕산농도를 증가시킴

SNUSAL
Safety Analysis Lab

5. 반응도 제어

❑ 핵연료의 연소도와 임계붕산농도와의 관계

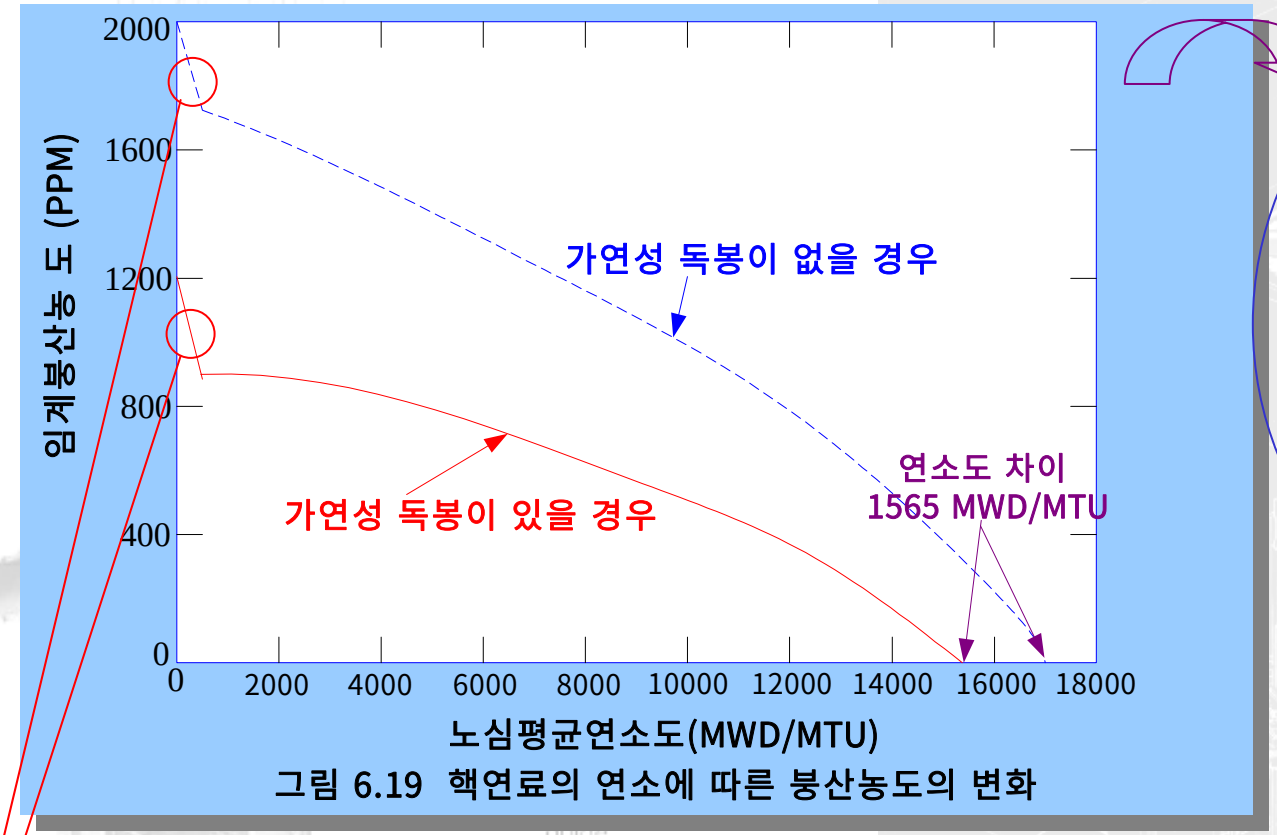


그림 6.19 핵연료의 연소에 따른 붕산농도의 변화

그림에서 보듯 가연성 독봉을 사용하지 않을 경우가 가연성독봉을 사용할 경우와 비교하여 잉여반응도 제어에 훨씬 많은 양의 붕산이 필요함을 알 수 있음

원자로가 운전이 시작된 후 수 시간 내에 평형농도에 도달하는 Xe^{135} 와 Sm^{149} 의 독작용 때문

SNUSAL Safety Analysis Lab

5. 반응도 제어

❑ 화학적 독물질 붕산의 장점 및 단점

- 장점
  - 국부적인 출력의 변화를 유발시키지 않음
  - 소요되는 제어봉수를 감소시켜줌

- 단점
  - 붕산농도는 원자로내에 균질하게 분포되므로 가연성 독봉처럼 국부적인 중성자속 또는 출력분포 조절 능력이 없음
  - 붕산농도조절에 필요한 화학적 처리계통이 추가로 필요
  - 인위적으로 붕산농도를 첨가 또는 감소시킬 수 있는 율이 낮으므로 반응도 인출 및 삽입율이 작음

➡ 화학적 독물질 완만하게 이루어지는 반응도 변화 (핵연료의 연소, 핵분열 생성물의 독작용, 감속재 온도 변화에 따른 반응도 변화 등) 의 보상시에만 효과적

5. 반응도 제어

❑ 화학적 독물질과 감속재온도 계수의 관계

- 독물질 농도의 제한
  - 적정량 이상의 붕산농도는 감속재온도 계수를 양이 되게 할 수 있기 때문에 음의 감속재 온도계수를 위한 독물질 최대 농도에의 제한이 필요
- 그림 6.20은 가압경수형 원자로에 대한 붕산농도와 감속재온도 계수의 상관관계를 보여줌

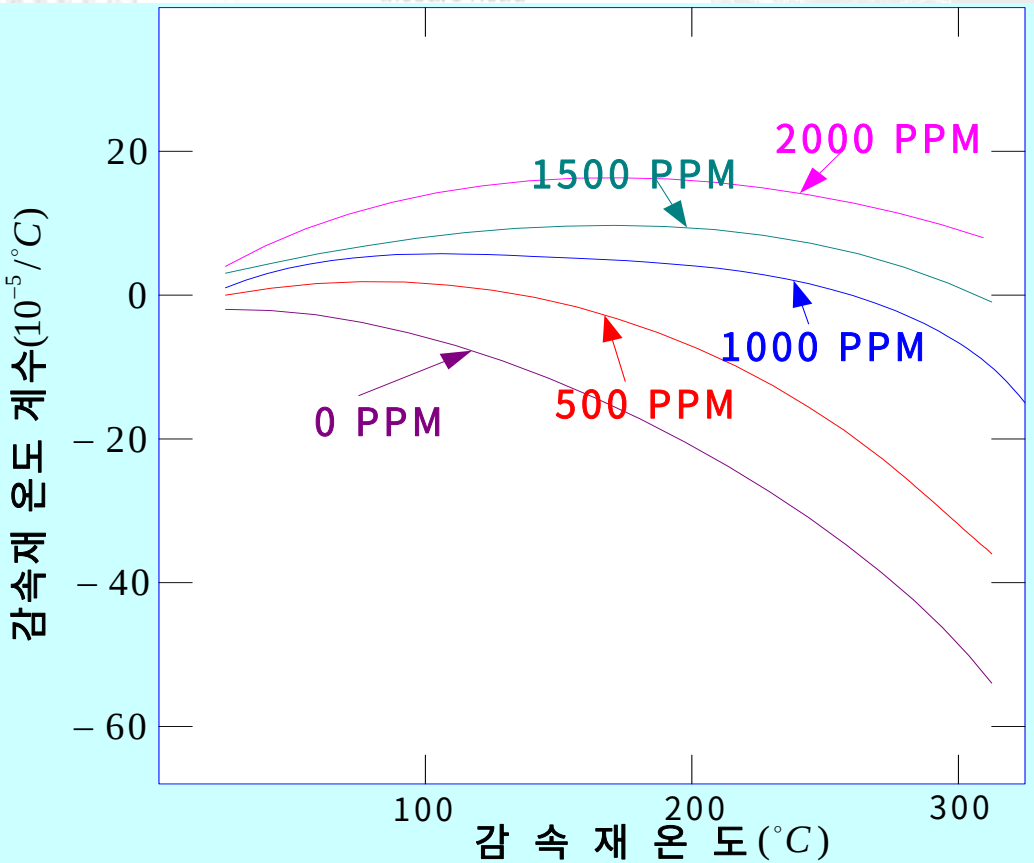


그림 6.20 가압경수형원자로에서 붕산농도가 감속재 온도 계수에 미치는 영향

5. 반응도 제어

❑ 원자로별 화학적 독물질의 사용

- 비등수형 원자로
  - 화학적 독물질 사용안함
    - » 화학적 독물질을 사용할 경우 냉각재가 비등하면서 붕산밀도의 급격한 감소로 감속재 온도 계수 또는 밀도계수가 급격하게 양이 되어 양의 반응도 궤환효과를 유발할 수 있기 때문

- 속중성자로
  - 원자로의 특성때문에 상기 두 가지의 형태의 반응도 제어물질을 사용하지 않음

5. 반응도 제어

➢ 5.3 제어봉

❑ 제어봉의 특징 및 구성물질

- 가연성 독봉 및 화학적 독물질과 제어봉의 차이
  - 가연성 독봉 및 화학적 독물질의 경우 : 운전 주기 전반에 걸쳐 장기적으로 완만하게 변화하는 잉여반응도와 원자로 운전에 따른 반응도 변화를 조절 및 제어
  - 제어봉 : 짧은 시간 내에 반응도를 조절하고 제어할 필요성이 있을 때 주로 사용 (출력준위의 변화, 원자로의 운전정지 등)
- 제어봉 구성물질
  - 상기와 마찬가지로 중성자 흡수단면적이 큰 물질이어야 하므로 현재 널리 사용되고 있는 제어봉 물질로는 B_4C. H_f, Cd 또는 Ag-In-Cd과 같은 합금 등이 사용됨

❑ 제어봉의 설계 특성

- 표면적 대 체적의 비가 크도록 설계
  - 짧은 시간 내에 반응도를 조절할 수 있어야 하므로 중성자 흡수물질이 중성자에 많이 노출될 수 있도록 하기 위함
- 제어봉의 형태
  - 가압경수로형용 제어봉다발 형태 : 핵연료집합체내에 제어봉다발이 동시에 삽입되는 형태
  - 비등수형용 십자형제어봉 : 집합체와 집합체 사이의 공간에 삽입되는 형태

5. 반응도 제어

- 제어봉의 삽입 형태
  - 가압경수로 : 모든 제어봉이 노심 상단부에서 삽입됨
  - 비등수형원자로 : 반응도가 노심 하단부에서 높으므로 제어봉은 노심 하단부에서 삽입되도록 되어 있음

❑ 제어봉의 문제점

- 국부적 출력밀도의 불균형 초래
  - 제어봉 삽입시 : 출력은 감소되지만 제어봉이 삽입된 부근지역에서 중성자속이 급격히 감소하고 상대적으로 제어봉에서 먼 위치에서는 중성자속이 증가하여 중성자속 분포의 불균형을 일으켜 출력분포 조절에 문제점을 야기
  - 제어봉 인출시 : 삽입되었던 공간이 물로 채워져 중성자의 감속효과가 커져 중성자속을 증가시키게 되며 이에 따라 출력밀도가 커지게 됨

❑ 제어봉의 삽입과 인출시 제한 조건

- 제어봉의 삽입 또는 인출 길이 제한
  - 한번에 삽입, 또는 인출될 수 있는 길이를 제한
- 반응도 변화량을 조절
  - 출력 준위에 따란 반응도 변화량을 조절

5. 반응도 제어

➢ 5.4 기타 반응도 제어방법

❑ 냉각재 유량 조절 방법

- 비등수형 원자로에서 이용
- 유량율을 조절하면 핵연료로부터 냉가재로의 열전달에 영향을 줄 뿐만 아니라 핵연료의 온도변화를 유발시켜 도플러 효과를 일으키게 됨
  - Ex) 유량율의 감소시 : 냉각재내의 기포율이 증가하고 기포온도계수는 반응도에 음의 궤환효과를 가져옴으로 결과적으로 반응도 감소를 유도함

❑ 중성자 흡수단면적이 큰 경수를 이용

- 천연우라늄을 사용하는 CANDU 원자로에서 이용
- CANDU원자로의 냉각재인 중수보다 중성자 흡수단면적이 큰 경수를 삽입하여 반응도를 줄여주거나 냉각재양을 조절하여 미세한 반응도 조절을 함