COLLEGE OF ENGINEERING
NUCLEAR ENGINEERING & RADIOLOGICAL SCIENCES
UNIVERSITY OF MICHIGAN

원자력기사 원자로 안전과 운전
Part I - 원자로 제어

University of Michigan
Han Gyu Lee, Ph. D.

E-mail: hangyl@umich.edu

MICHIGAN ENGINEERING
UNIVERSITY OF MICHIGAN

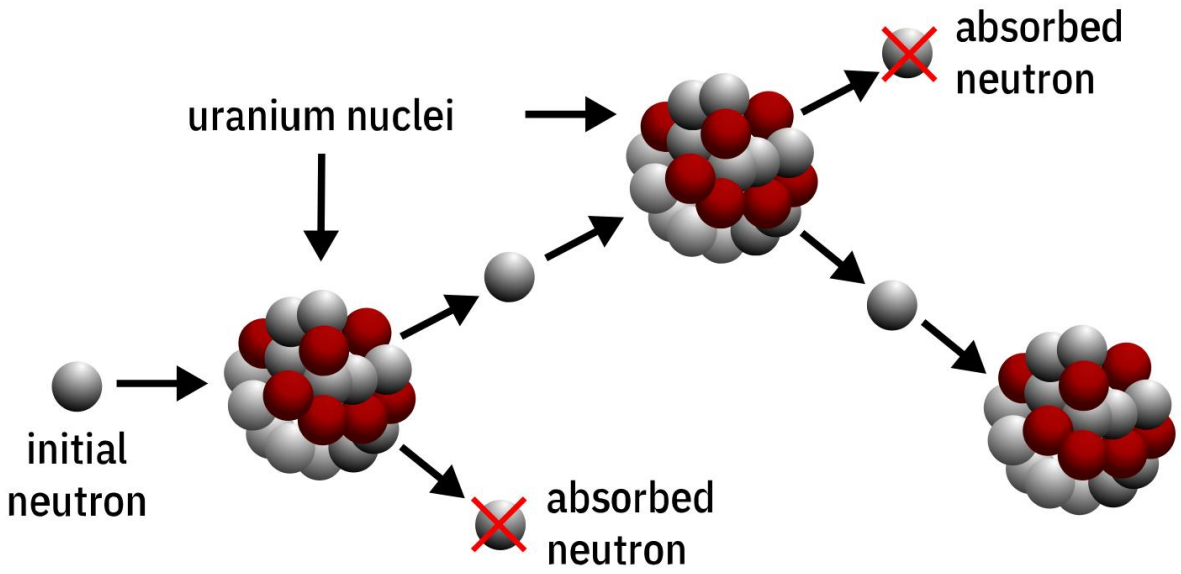
강의 개요 및 목차

1. **원자로 제어 기초**
   - 원자로 제어 개념
   - 증배계수 및 반응도 정의, 지발 중성자
2. **노심 반응도 제어**
   - 잉여반응도 개념 및 반응도 제어 방법
3. **제어봉 제어**
4. **화학적 제어 & 붕소농도곡선**
5. **가연성 독물질**
6. **핵분열 생성 독물질**
   - Xe-135와 Sm-149 특성

원자로 제어 기초

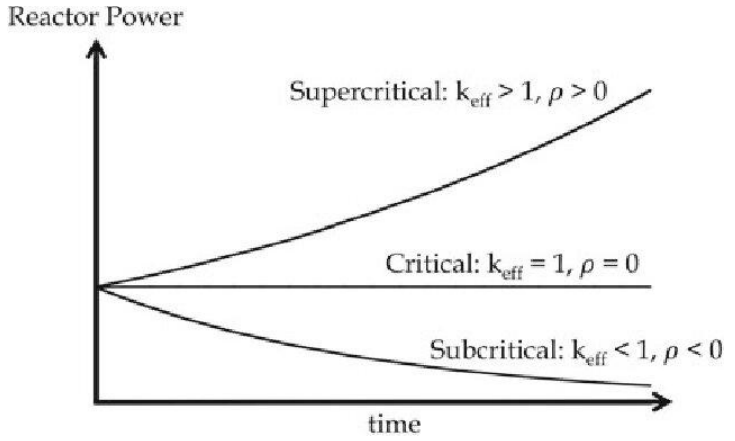
원자로 제어란?

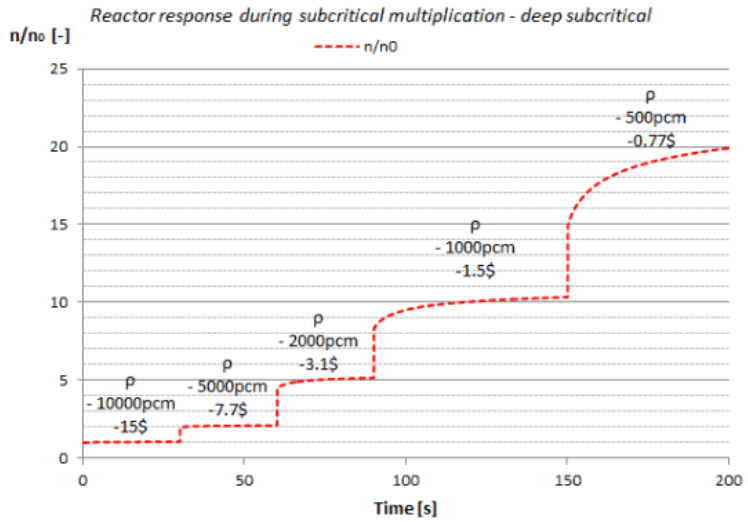
- 핵분열당 **2~3개의 중성자**가 방출되며, 일부가 다시 핵분열 발생 (연쇄반응)
- 일정한 출력 유지를 위해 다음 세대에 **동일한 중성자 수가 유지**되어야 함
- 1개의 중성자만 다음 핵분열을 일으켜야 **임계 상태** 유지
- 남는 중성자는 **흡수체(독물질)**가 흡수하거나 노심 밖으로 탈출해야 함(누설)
- **원자로 제어는 무엇으로 얼만큼 남는 중성자를 조절할 것인가를 결정**

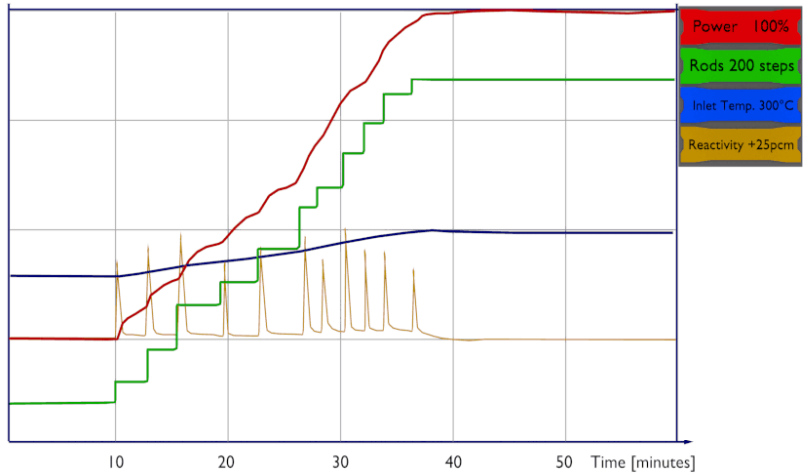


증배계수

- **증배계수** $k = \frac{(\text{다음 세대 중성자 수})}{(\text{전 세대 중성자 수})}$
  - 임계상태 (k=1): 출력 일정 (정상 운전)
  - 초임계상태 (k>1): 출력 증가 (기동 시 출력 상승)
  - 미임계상태 (k<1): 출력 감소 (임계 발달, 정지)
- 출력 크기가 아닌 **변화 여부**가 임계도 결정 (2016년 63번)







반응도 정의 및 단위

- **반응도**(Reactivity): 임계 상태로부터 얼마나 벗어났는지 나타내는 수

$$\rho \equiv 1 - \frac{1}{k_{eff}}$$

- **0을 기준**으로 임계 상태 판별: 초임계 (ρ>0), 임계 (ρ=0), 미임계 (ρ<0)
- 여러 단위 표기 활용
  - Δk/k, pcm(=10^{-5} Δk/k), **달러**($), **센트**(¢=0.01 $)
- 달러 및 센트는 **지발중성자분율 대비 분율**을 나타냄 (1 $ = 100 ¢ = ρ/β_{eff})

- **(예제) 반응도 단위 환산**
  - 2021년 16번, 핵연료가 U-235인 원자로의 증배계수가 1에서 1.002로 변경되었을 때 반응도는? (β =0.0065)

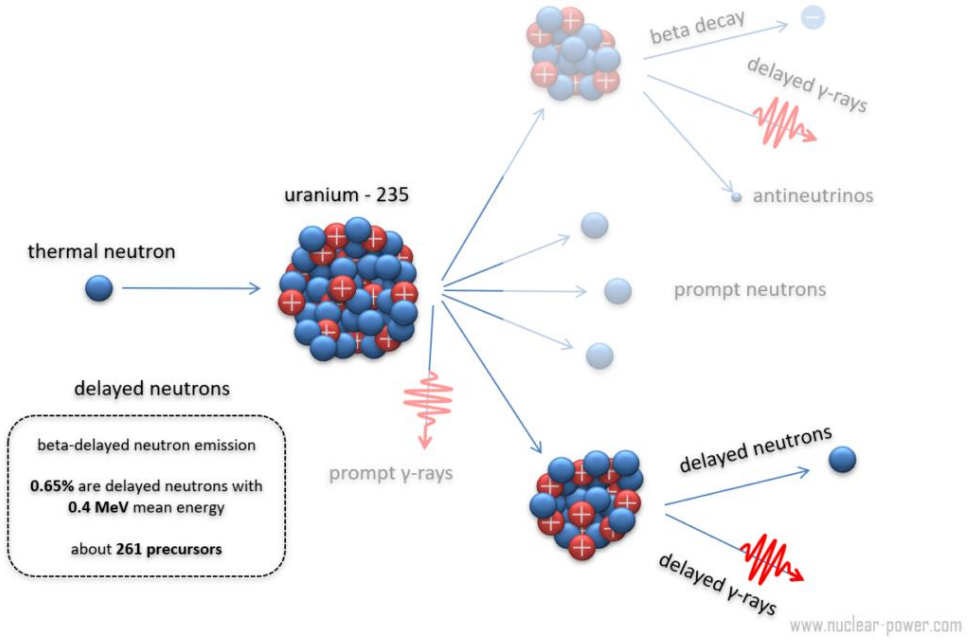
$$\rho = \frac{1.002 - 1}{1.002} = 1.996 \times 10^{-3} \frac{\Delta k}{k} = \frac{1.996 \times 10^{-3}}{0.0065} \$ = 0.307 \$$$

  - 2016년 9번, 유효증배계수가 1.002일 때 반응도는?

$$\rho = 1 - \frac{1}{1.002} = 0.00199$$

지발중성자 발생 원리 및 중요성

- 핵분열 중성자의 대부분 핵분열 반응 직후 (**100 μs** 이내) 발생 (**즉발중성자**)
- **약 0.7%**는 핵분열 생성물이 붕괴하며 핵분열 **후 수초~수십 초가량** 후 방출 (**지발중성자**)
  - **U-235**의 경우 **0.65%**의 지발중성자 발생 분율
- 소수의 지발중성자가 반응 시간을 늦춰 **출력 변화에 대응할 수 있는 속도가 확보**
- **지발임계** 영역(즉발 미임계, $\rho < 1$ \$) 내에서만 반응도 삽입
  - $\rho > 1$ \$이면 **즉발초임계** → 제어 불능



노심 반응도 제어

잉여반응도의 필요성

- 장기간 운전을 위해 **임계 유지**에 필요한 양보다 **초과 장전된 여분의 반응도**
- 운전 중 발생하는 부(-) 반응도를 보상하기 위함
  - 출력증가 과정의 **출력결손** (온도 궤환 효과)
  - **핵연료 연소**로 인한 반응도 감소
  - 핵분열생성 **독물질**(Xe-135, Sm-149)
- 잉여반응도가 클수록 발전 효율이 좋아지지만 **반응도 제어의 부담 증가**
  - 한 번의 핵연료 장전으로 더 오래 운전 가능 (주기 길이 증가)

❖ (빈출 오개념) Pu-239 생성은 정(+) 반응도 기여

❑ 2019년 64번, 가압경수로형 원자력발전소에 장전되는 잉여반응도에 대한 설명으로 틀린 것은?
(1) 노심말기 ^{239}Pu 생성에 의한 부반응도 보상 (2) 출력증가 과정의 부반응도 보상
(3) 핵분열 생성 독물질 축적에 의한 부반응도 보상 (4) 연료 연소에 의한 부반응도 보상

❑ 2016년 11번, 잉여반응도를 장전하는 이유 중 틀린 것은?
(1) 제논과 같은 독물질 생성 (2) 핵연료 연소
(3) 플루토늄의 생성 (4) 출력결손

반응도 제어 방법 비교

- **제어봉**
  - 기동 및 정지 등 출력 조절, 긴급 정지 시에 사용 → 제어봉가 및 정지여유도 핵심
  - 수초 이내 빠른 삽입 가능
  - 출력 분포 왜곡 효과 (특히 축 방향으로)

- **수용성 붕산** (액체제어제, 화학적제어 Chemical shim)
  - 연소 및 독물질 생성에 의한 장기 반응도 변화 보상
  - 노심 내 균일한 부반응도 제공 → 균일한 분포 보장
  - 상대적으로 변화가 더디며, 화학체적제어계통(CVCS)을 필요

- **가연성 독물질**
  - 초기 잉여반응도를 억제하여 능동적 제어 방식 부담 완화
  - 초기 노심에 연료와 함께 장전되어 서서히 연소되어 부반응도 기여 감소
  - 반경 방향 출력 분포 평탄화 효과 → 설계 최적화 활용

4인자, 6인자 공식 및 반응도 제어 원리

- 4인자 공식 (무한증배계수)

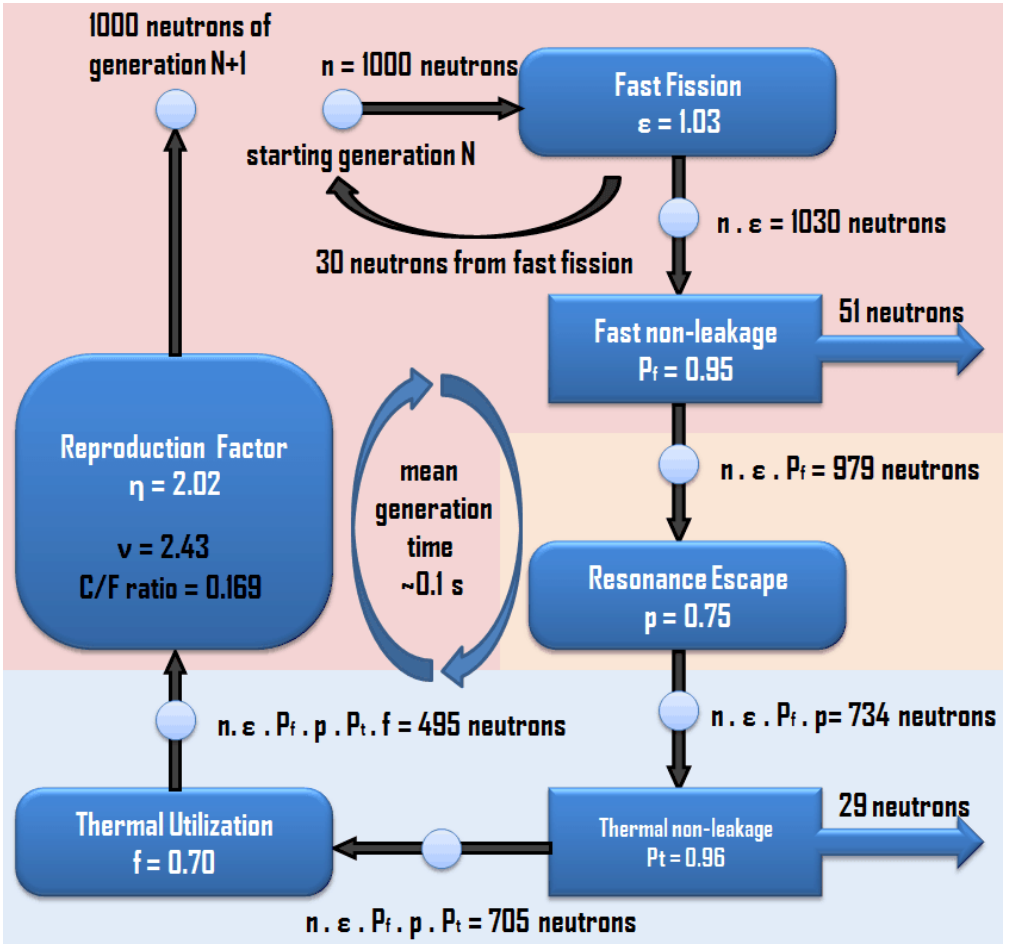
$$k_\infty = \eta \varepsilon p f$$

  - η: 열중성자 재생계수 (연료 흡수 중성자 1개당 방출되는 핵분열 중성자 수)
  - ε: 속분열인자 (열 핵분열 중성자 대비 전체 핵분열 중성자 수)
  - P: 공명이탈확률 (공명 에너지 영역 탈출 비율)
  - f: 열중성자 이용률 (전체 흡수 대비 연료 흡수 비율)

- 6인자 공식 $k_{eff} = k_\infty \cdot P_f \cdot P_t = \eta \varepsilon p f \cdot P_f \cdot P_t$

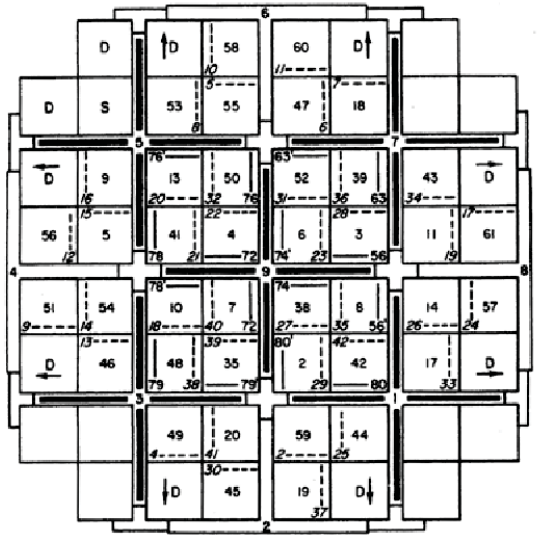
  - P_f: 속중성자 비누설확률
  - P_t: 열중성자 비누설확률

- 운전 중 반응도 제어 수단은 **열중성자 이용률**(f)에 주요 작용



반응도 제어계통 설계 요건

- **서로 다른 설계 원리를** 가진 2개의 **독립적인 반응도 제어 계통** 요구
  - 이 중 **하나는 제어봉을 사용**하고 나머지 하나는 정상 출력 변경에 따른 반응도 변화율을 제어해야 함
    - ❖ *2021년 03월 62번, 반드시 액체제어제(붕산)가 필요하지 않음*
  - 하나는 저온 조건에서 원자로를 **미임계로 유지**할 수 있어야 함(정지여유도 확보)
- **Stuck Rod** 기준: 어떠한 **하나의 제어봉이 고착**(삽입 실패)되어도 충분한 부반응도 제공 가능
  - 정지여유도 계산에 주요 가정
  - 바꾸어 말하면, 하나의 제어봉 인출이 초임계로 이르지 않도록 함 (e.g., SL-1 원자로 사고)



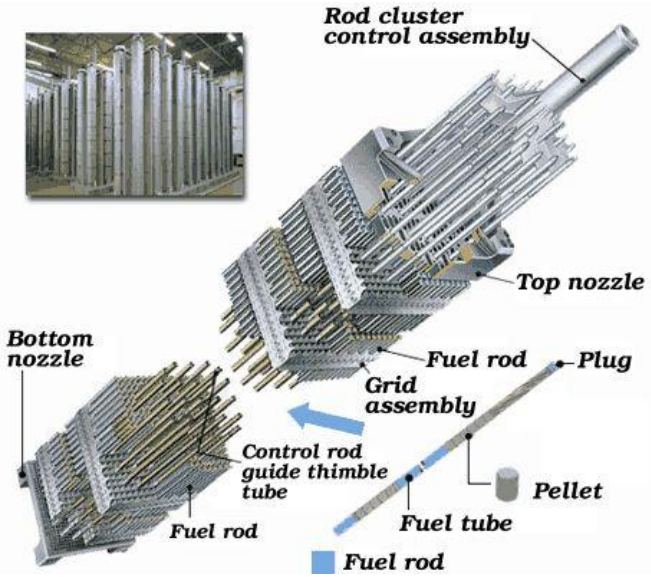
예제

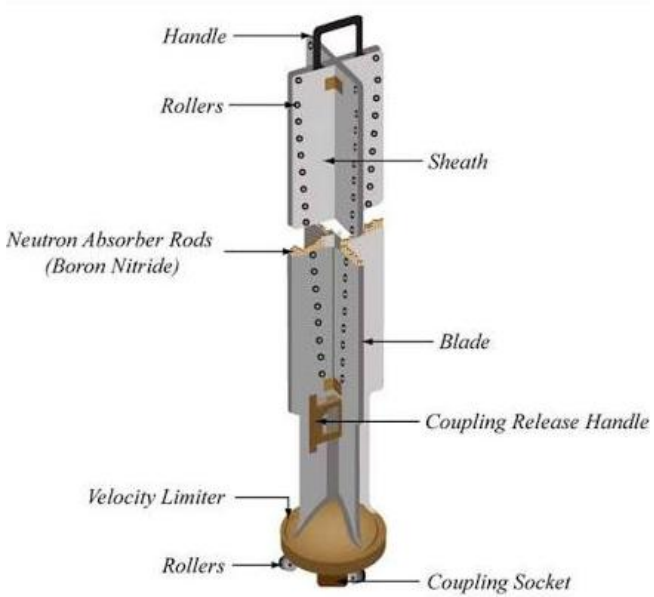
- **2021년 5월 65번,** 노심 반응도 제어와 관련된 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 정격출력 운전 지속을 위해 잉여반응도를 갖도록 장전 (2) 잉여반응도는 핵연료 연소·핵분열생성물 축적으로 감소 (3) 제어 수단: 수용성 독물질, 가연성 독물질, 제어봉 (4) 제어봉 삽입/인출은 노심 내 국부 출력변화를 유발하지 않음
  - **정답 (4):** 제어봉은 삽입 위치의 중성자속을 왜곡 → 국부 출력변화 유발 (출력분포 왜곡 효과)
- **2024년 61번,** 단기 반응도에 영향을 미치는 인자가 아닌 것은?
  - (1) 핵연료 온도 변화 (2) 감속재 온도 변화 (3) 압력 변화 (4) 가연성독물질 소멸
  - **정답 (4):** 온도·압력 궤환은 초~분 단위의 단기 인자, 가연성 독물질 소멸은 주기 전체의 장기 인자

제어봉 제어

제어봉 제어 시스템 특징 및 요건

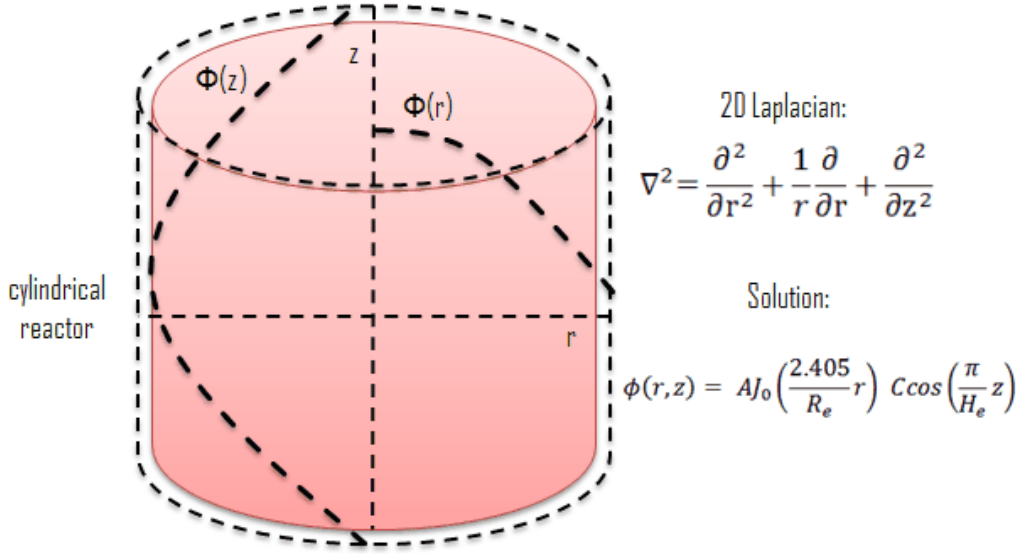
- 대표적으로, B4C, Ag-In-Cd(AIC), Hf, Cd 등 **열중성자 흡수단면적이 큰 물질** 사용
  - 단면적: 어떠한 핵이 중성자를 포획할 확률 크기 (barn = 10^{-24} cm^2)
- 수초 내 **신속히 원자로를 정지**할 수 있는 충분한 **정지여유도 확보**
  - **긴급정지**(SCRAM)를 위한 유일한 제어 수단
- **긴급정지** 시 전원이 끊기면 자동으로 전체 길이 삽입(Fail-safe 설계)
  - **가압경수로**(PWR)의 경우 노심 **상부에서 자유낙하**로, **비등경수로**(BWR)의 경우 **하부에서 수압**으로 삽입





제어봉가(Control Rod Worth) 정의와 변동성

- 제어봉이 노심에 가할 수 있는 반응도의 크기
- 삽입 위치의 **중성자속에 의존**하여 제어봉가 크기가 변화
- 연소도, 붕소 농도, 인접 제어봉의 **그림자 효과** 다양한 영향 인자가 발생
  - 연소도 증가 → 붕소 농도 감소 → 붕소와의 흡수 경쟁 완화 → 제어봉가 증가 (BOL→EOL)
  - 인접 제어봉과 흡수 경쟁 (공간적 자기차폐) → 제어봉가 감소
- 정지여유도 계산 시 **가장 큰 제어봉가의 집합체 1개 고착** 상황 가정

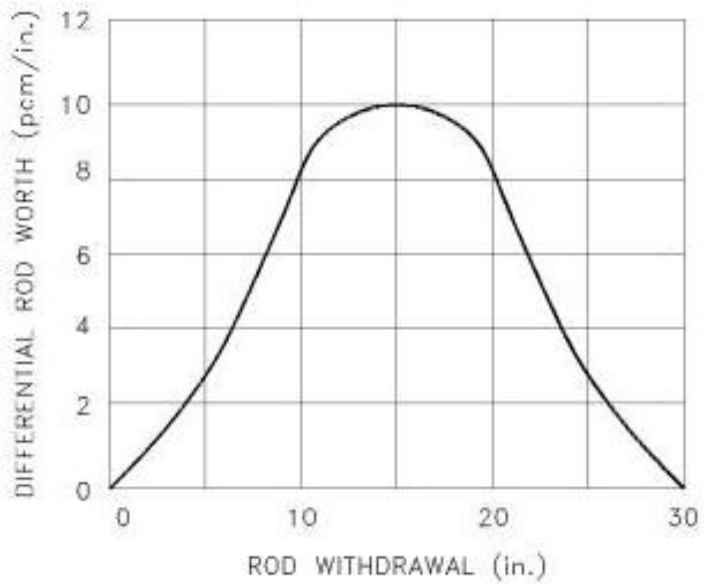


2D Laplacian:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

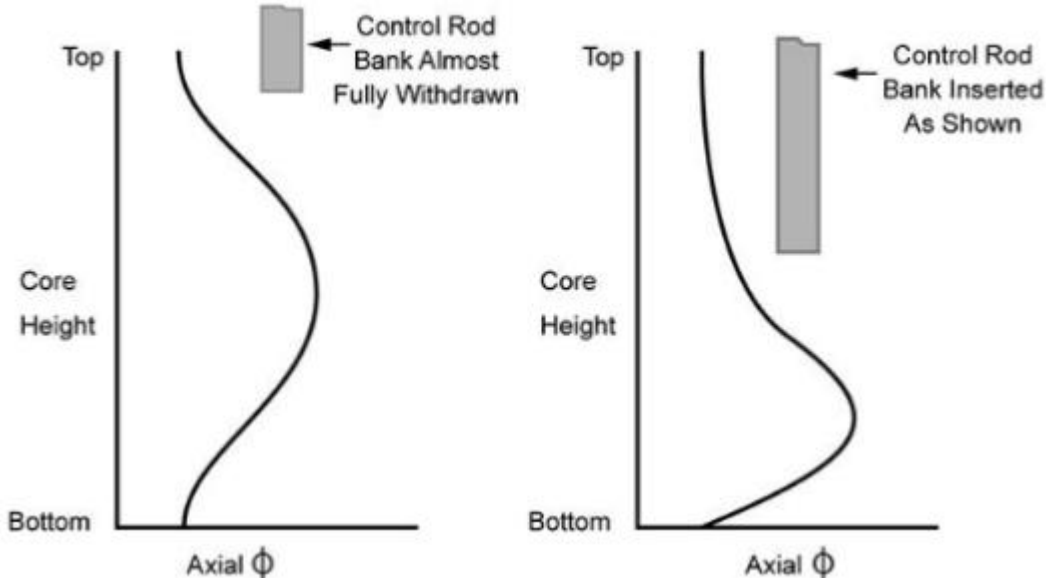
Solution:

$$\phi(r,z) = AJ_0\left(\frac{2.405}{R_e}r\right) Ccos\left(\frac{\pi}{H_e}z\right)$$



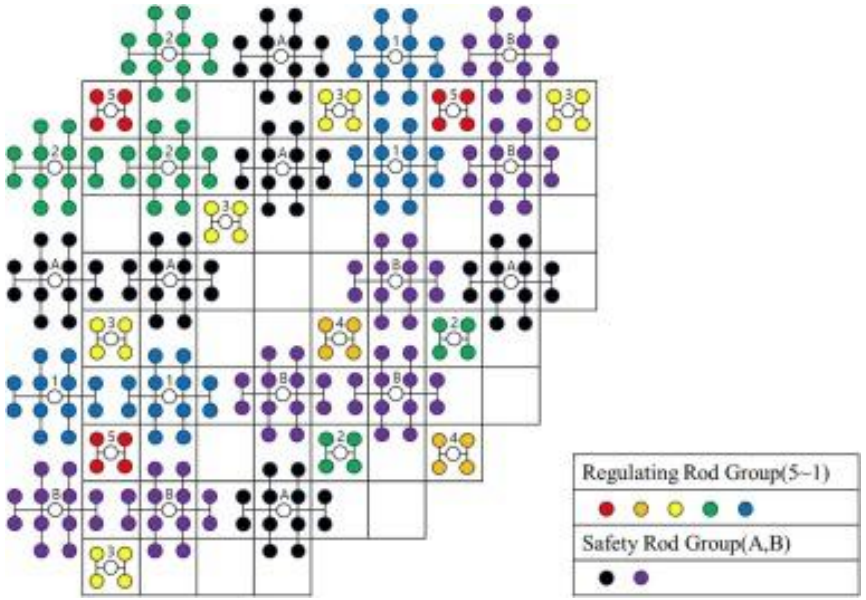
제어봉과 출력분포

- 제어봉이 삽입되며 **해당 위치 중성자를 상당량 흡수**하여 중성자속 분포에 영향
- **축방향으로 하부로 쏠린** 중성자속 및 출력 분포를 형성
  - 반경 방향으로도 물론 삽입 위치에 집중된 제어 효과 나타남
- 장기간 균일한 출력 분포를 위해, **단기적인 출력 및 반응도 제어**에만 제어봉 활용



제어봉군 구동 요건(중첩과 삽입한계)

- 출력 조절을 위한 조절봉군(regulating bank)과 정지 시 삽입되는 정지봉군(shutdown bank)으로 분류
  - 정지봉군의 경우 출력 상황 시 항상 완전 인출
- **제어봉군 중첩**(overlap)은 여러 군의 이동 구간이 겹치도록 삽입 및 인출
  - 삽입 위치별 **반응도 변화 완화** 및 축방향 출력분포 평탄화
- **삽입한계**(insertion limit)는 출력운전 중 제어봉군 삽입 깊이에 제한
  - 인출·이탈 시 정반응도 최소화로 **정지여유도 확보** 및 축방향 출력분포 평탄화



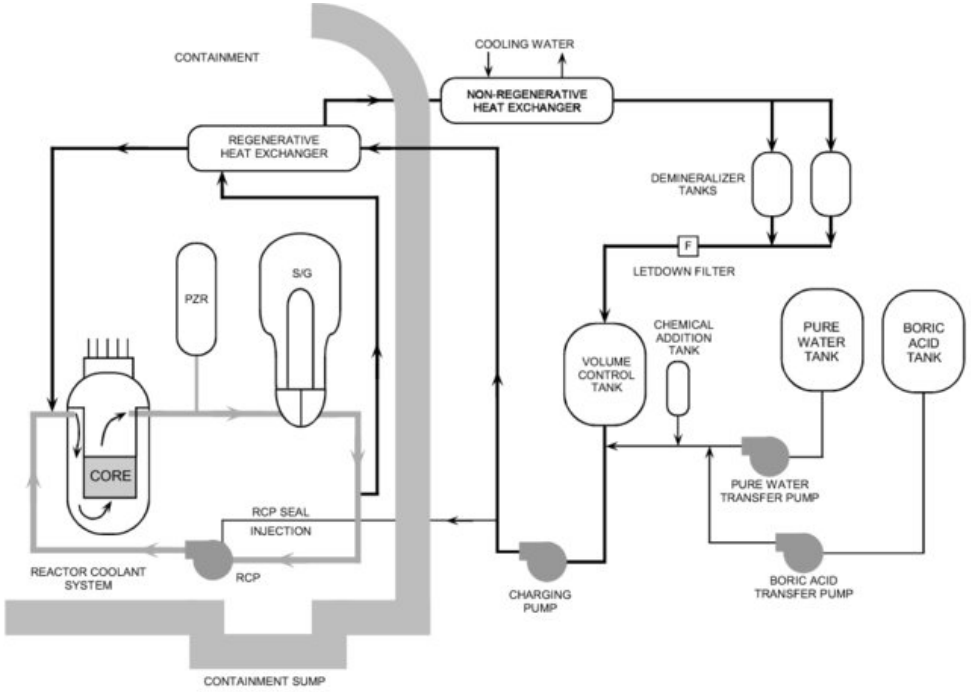
예제

- **2025년 70번,** 제어봉 제어능에 영향을 미치는 인자에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 그림자 효과는 제어능을 증가시킴 (2) 감속재 밀도 감소 시 제어능 증가 (3) 수용성 독물질 농도 증가 시 제어능 감소 (4) BOL에서 EOL로 갈수록 제어능 증가
  - **정답 (1):** 그림자 효과 = 인접 제어봉과의 흡수 경쟁 → 제어능 감소 / 나머지 보기는 모두 옳음
- **2024년 67번,** 제어봉에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 원자로 기동, 정지, 출력변화 시 신속한 대응과 큰 반응도 제어 (2) 제어봉은 첨두계수에 영향 (3) 미분 제어봉 제어능 단위는 step/pcm 사용 (4) 반경방향 및 축방향 분포를 제어
  - **정답 (3):** 미분 제어봉 제어능은 단위 이동당 반응도 변화 → 단위는 pcm/step (Step/pcm은 역수 함정)
- **2022년 67번,** 제어봉 삽입 시 유효증배계수에 가장 크게 영향을 주는 인자는?
  - (1) 중성자 생성율 (2) 공명이탈확률 (3) 속분열계수 (4) 열중성자 이용률
  - **정답 (4):** 흡수체 추가는 열중성자 이용률(f)에 작용. 반응도 제어 원리와 동일 논리

화학적 제어 & 붕소농도곡선

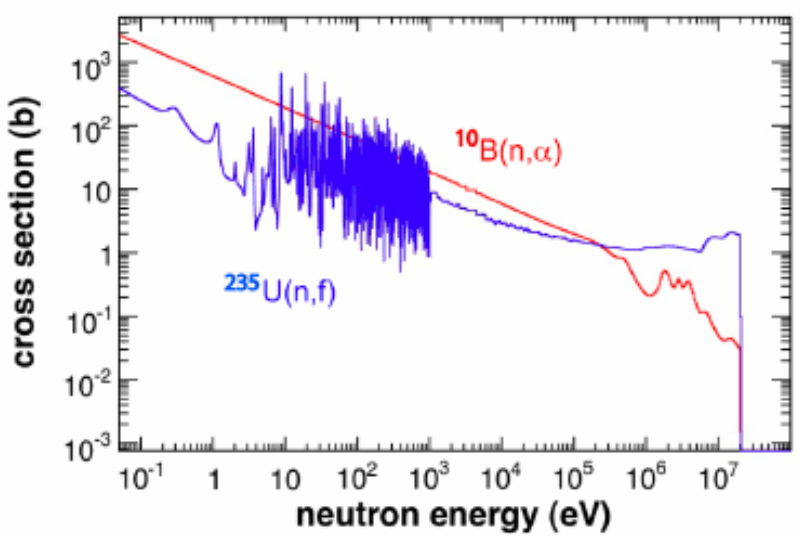
붕산 활용 반응도 제어 원리

- 가압경수로 1차 냉각수에 흡수체인 **붕산(H_3BO_3)**을 녹여 **노심 전체에 균일**하게 반응도 제어
  - 출력분포 왜곡으로부터 자유로움
- **화학 및 체적제어계통**(CVCS)을 통해 붕산 농도(단위: ppm, 백만분율) 제어
  - 붕산 주입으로 잉여반응도 억제 및 정지여유도 확보
  - 희석하여 핵연료 연소 및 독물질 축적으로 인한 반응도 결손 보상
- 전체 냉각재 농도 변화를 위한 오랜 시간 소요로 인해 **느린 제어 반응**



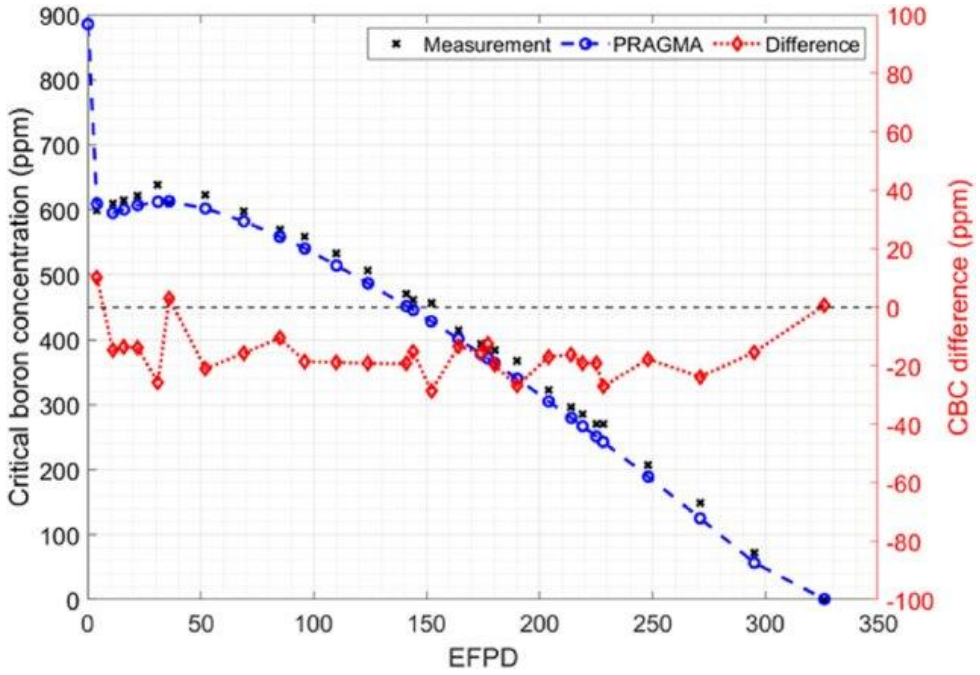
붕소 동위원소 B-10 핵특성

- 자연붕소 중 **B-10 동위원소**가 **약 20%** 차지
  - 나머지를 차지하는 B-11은 현격히 작은 반응단면적을 가짐
- 주로 **$^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$** 흡수 반응을 보이며, 약 **3,800 barn**의 강한 **열중성자 미시흡수단면적**
- **B-10 농축** 붕산 사용 시 동일 반응도 삽입에 필요한 붕소량 감소
  - B_4C와 같은 제어봉에서도 같은 효과
- 대부분 에너지 영역에서 **공명흡수 영역 없음**
  - 균일하게 1/v 법칙을 따름 → 느린 중성자일수록 높은 흡수 확률



장기 반응도 제어와 임계붕소농도곡선

- 화학적 제어는 장기 반응도 제어에 핵심 수단으로 **임계붕소농도**를 통해 원자로 주기 상태 확인
  - 임계붕소농도(CBC): 원자로의 임계 유지에 필요한 붕소 농도
- 주기초 **수일 동안 제논(Xe) 축적**으로 인해 CBC 값에 **급격한 감소** 발생
- 이후 시간에 따라 임계붕소농도값이 **일정하게 감소**
  - 가연성 독물질 연소의 정(+)반응도 효과로 임계붕소농도가 일시 증가(붕산 주입)하기도 함



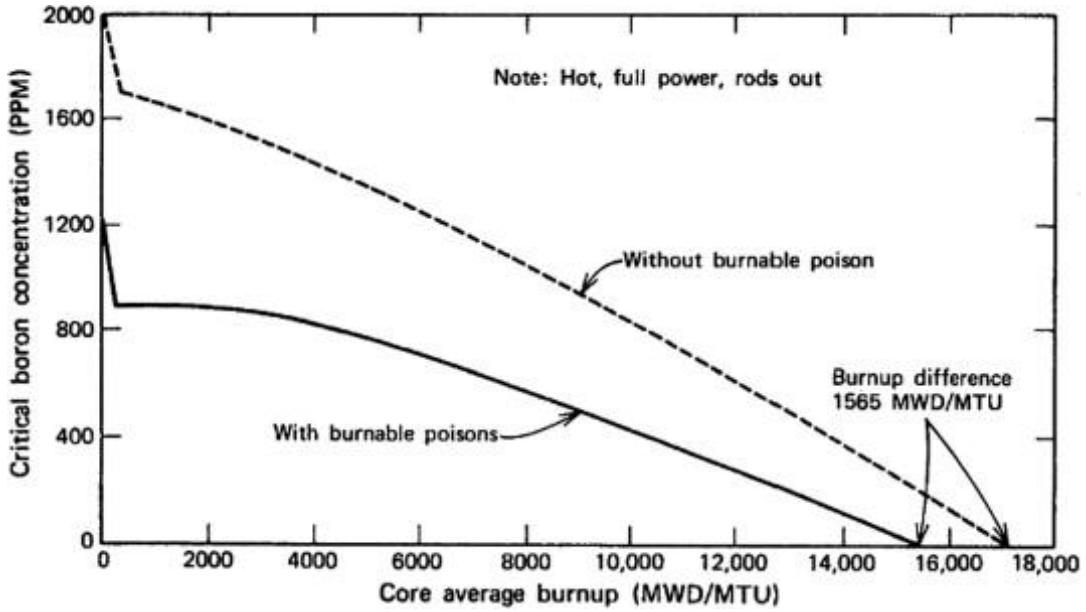
예제

- **2021년 5월 66번,** 붕소농도 제어로 출력을 100%에서 50%로 감소시키고자 한다. 필요한 붕소농도 변화량은? (Xe 등 독물질 변화 무시. 출력계수: -20 pcm/%power, 붕소계수: -8 pcm/ppm)
  - (1) −125 ppm (2) +125 ppm (3) −250 ppm (4) +250 ppm
  - **정답 (2):** 출력 감소 → 출력결손 반환(+반응도) → 붕산 주입(+)으로 상쇄 / 주어진 계수 기준 1,000 pcm ÷ 8 pcm/ppm = 125 ppm
- **2022년 74번,** 화학제어제가 주로 영향을 미치는 반응도 인자는?
  - (1) 속분열 계수 (2) 열중성자 이용률 (3) 재생계수 (4) 공명이탈확률
  - **정답 (2):** 냉각재에 균일하게 녹은 흡수체 → 열중성자 이용률(f) 감소
- **2024년 65번,** 수용성 붕산에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 제어봉 고장 시 다량의 붕산수 주입으로 큰 부(-)반응도 인가 (2) 제어봉보다 균일한 중성자속 분포 제어 (3) 주기초~주기말 반응도 보상 위해 농도 조절 (4) 정지여유도 확보 위해 제어봉을 가능한 한 삽입한 상태로 운전
  - **정답 (4):** 정지여유도 확보를 위해 제어봉은 인출 상태 유지, 반응도 조절은 붕산으로 수행 (반대 서술)

가연성 독물질

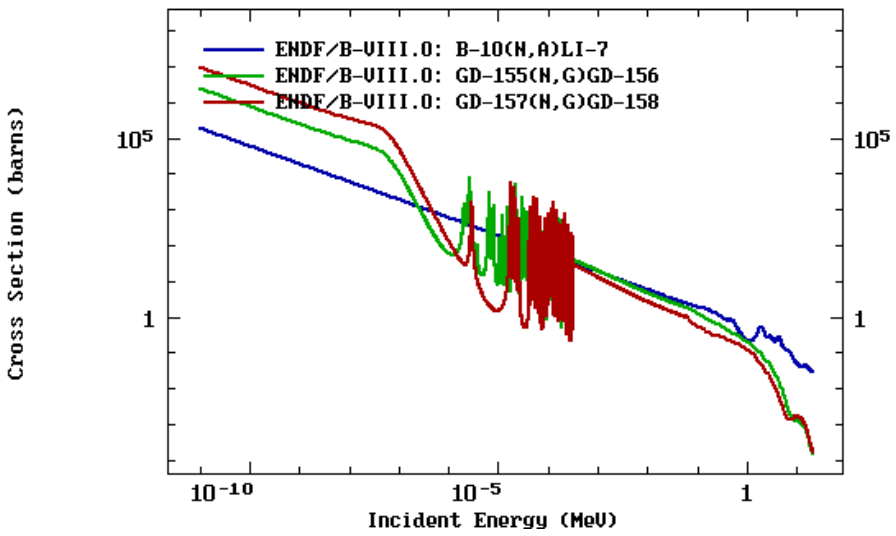
가연성 독물질의 필요성

- 초기 노심은 장기간 운전을 위해 가장 높은 잉여반응도를 가짐
- 화학적 제어만으론 **필요 붕산 농도**가 **과도**하게 높아짐
  - **양의 감속재 온도 계수**(MTC, moderator temperature coefficient) 발생
- 초기 잉여반응도를 낮추기 위해 **소모(가연성)되는 흡수체(독물질)** 사용
  - 연료가 고갈될수록 독물질도 함께 연소 → 자연스러운 잉여반응도 제어



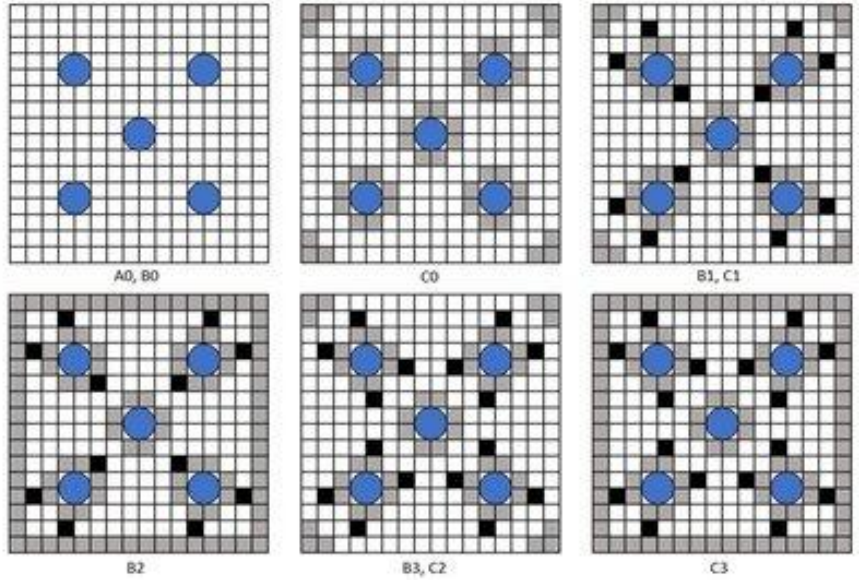
가연성 독물질의 대표 구성 및 출력 평탄화 효과

- 대표적으로 **붕소** 또는 **가돌리늄** 기반 화합물 사용 (Gd_2O_3, B_4C-Al_2O_3, ZrB_2 등)
  - 공통적으로 열중성자 흡수단면적이 매우 큼
- 설계 최적화 과정에서 **반경 방향 출력분포 평탄화**를 위해 활용되기도 함



Assembly Type	UO_2 Enrichment (w/o)	No. of UO_2 Rods Per Assembly	No. of Gd_2O_3 Rods Per Assembly
A0	77	236	-
B0	12	236	-
B1	28	172/52	12
B2	8	124/100	12
B3	40	168/52	16
C0	36	184/52	-
C1	8	172/52	12
C2	12	168/52	16
C3	20	120/100	16





예제

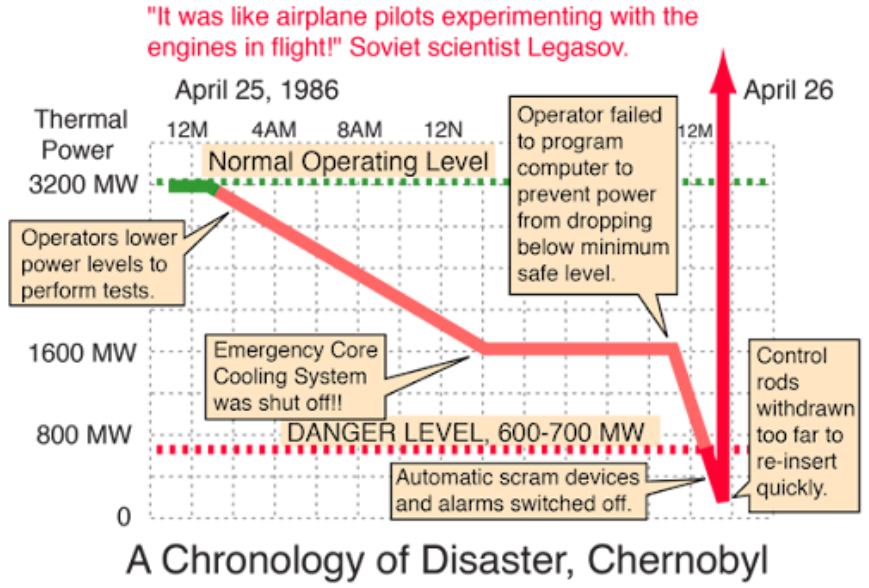
- **2025년 76번,** 가연성 독물질봉에 대한 설명 중 가장 적절하지 않은 것은?
  - (1) SiO2-B2O3, Al2O3-B4C, Gd2O3 등 사용 (2) EOL로 갈수록 흡수단면적이 커짐 (3) 운전에 필요한 붕소농도를 줄여 줌 (4) BOL의 감속재온도계수가 정(+)이 되는 것을 방지
  - **정답 (2):** 서서히 연소되어 소모 → EOL로 갈수록 흡수 효과 감소
- **2023년 75번,** 가연성 독물질에 대한 설명 중 옳지 않은 것은?
  - (1) 노심의 축방향 출력분포를 균일하게 함 (2) 노심수명 연장 효과 (3) 붕소·가돌리늄 화합물로 제작 (4) 수용성 붕소농도가 과도해지지 않도록 함
  - **정답 (1):** 평탄화 효과는 반경방향 — 축방향 제어는 제어봉과 ASI 감시의 몫
- **2022년 69번,** 가연성 독물질봉의 사용 목적에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 독물질량 변화를 이용한 신속한 반응도 제어 (2) 잉여반응도 억제 (3) 붕소농도 감소로 감속재온도계수 부(-)값 유지 (4) 반경방향 출력분포 평형 유지
  - **정답 (1):** 서서히 연소되는 수동적 수단 — 신속한 반응도 제어는 제어봉의 역할

핵분열생성성 독물질

핵분열생성성 독물질의 중요성

- 핵분열생성물은 불가피하게 발생하여 노심 내에 잔류
- 그중 **Xe-135**와 **Sm-149**는 상당한 음의 반응도에 기여할 만큼 중성자 흡수 단면적이 매우 큼
  - 2.7×10^6 barn & 4.2×10^4 barn
- 운전 이력에 따라 그 농도가 변화하며 수시간~수일 단위의 시차를 가짐
- ➢ 중단기 출력 변화 및 운전 전략에 주요한 영향 (e.g., 체르노빌 원자력 사고)

Isotope	absorption cross-section - [barns]	yield as fission product and by product decay [%]	half-life
Xe-135	2,700,000	6.4	9.1 hours
Gd-157	250,000	0.01	stable
Gd-155	61,000	0.08	stable
Sm-149	42,000	1.1	stable
Cd-113	20,000	0.01	nearly stable
Sm-151	10,000	0.6	90 years
Eu-151	7,700	0.6	nearly stable
B-10	3,800	< 0.0001	stable



A Chronology of Disaster, Chernobyl

Xe-135의 생성과 소멸

- 생성항
  1. 핵분열 생성 (0.25%)
  2. **I-135 생성** (핵분열+Te-135 붕괴) 후, β- 붕괴 (반감기: 6.6 h)
- 소멸항
  1. β- 붕괴 (반감기: 9.2 h)
  2. Xe-136으로 **중성자 포획**
- I-135 및 Xe-135 평형 농도
  - **I-135의 경우**, 출력(중성자속)에 **비례**
  - **Xe-135의 경우**, 출력에 대해 **포화**하는 형태 (비례 X)

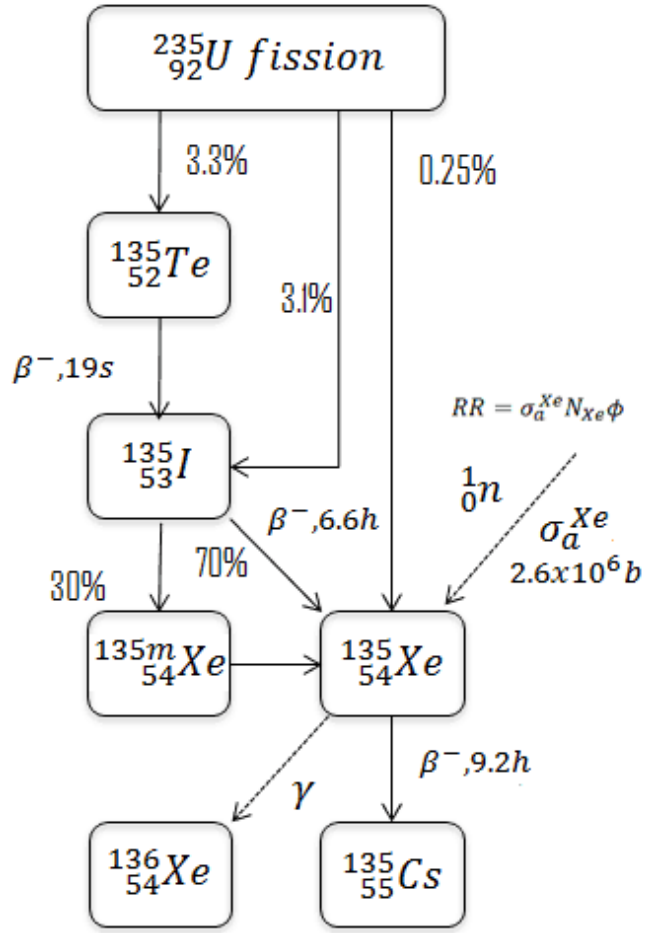
Iodine Equilibrium

$$N_I(eq) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi}{\lambda_I}$$

Xenon Equilibrium

$$N_{Xe}(eq) = \frac{\gamma_{Xe}\Sigma_f\phi + \lambda_I N_I}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe}\phi} \quad (1)$$

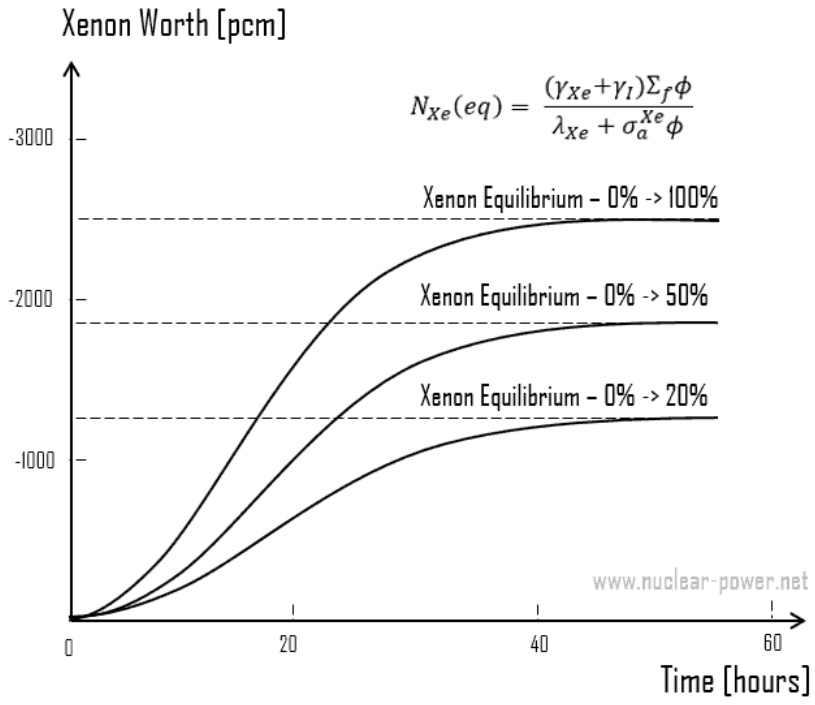
$$N_{Xe}(eq) = \frac{(\gamma_{Xe}+\gamma_I)\Sigma_f\phi}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe}\phi} \quad (2)$$

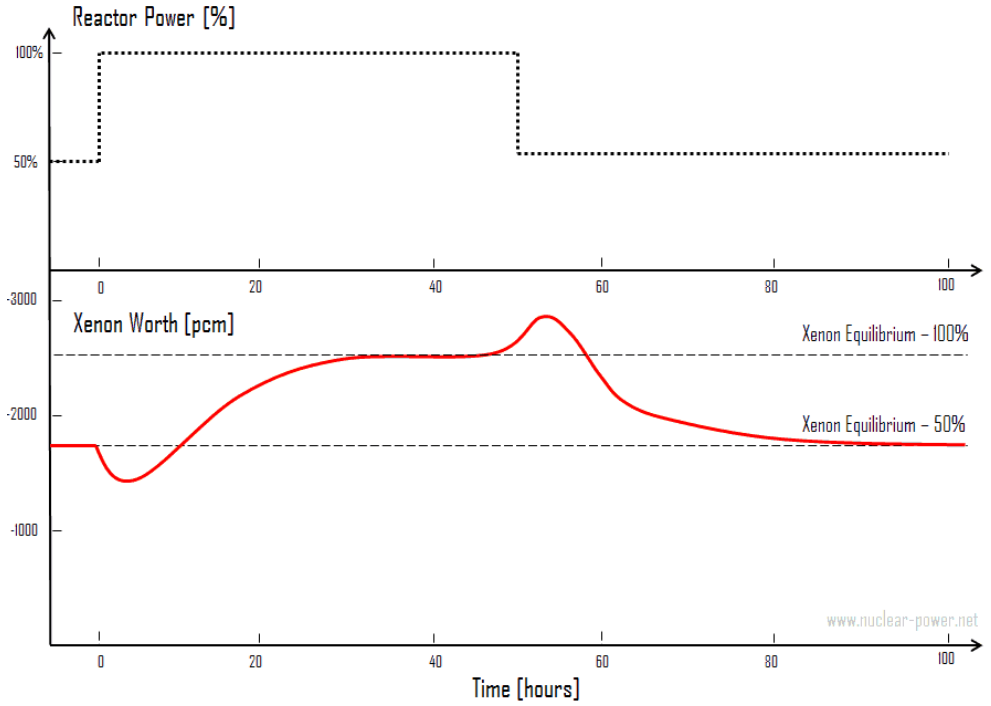


Source: www.nuclear-power.net
Data: JANIS 4.0 / NEA

기동 및 출력 변화에 따른 제논 거동

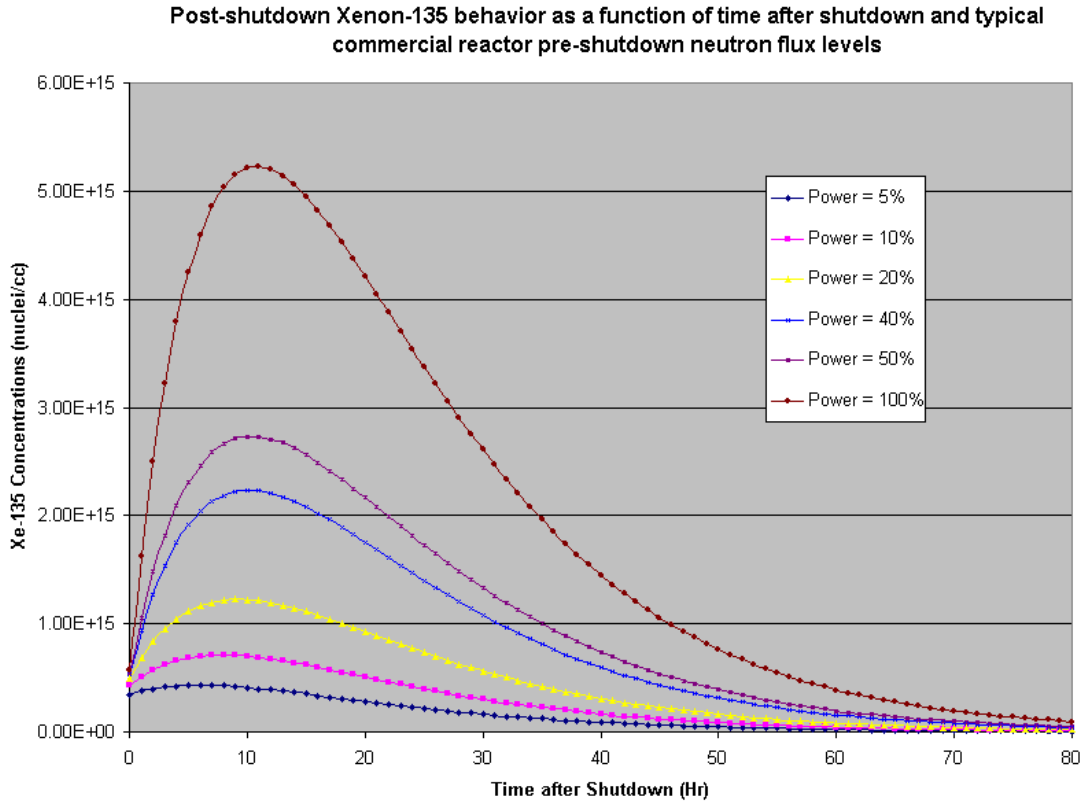
- 전출력 도달 후 **약 40~50시간에 걸쳐 평형 상태**로 점근
- 같은 기간 반응도 급감 → **초기 임계붕소농도 급감 원인**
- 일시적 출력 상승/감소 후, 제논 농도가 일시적으로 감소/상승한 뒤 평형 도달
  - **일시적 변화는 출력 변화 방향과 반대** (비축된 I-135 평형 농도가 원인)
  - 평형 농도는 출력 변화와 일관됨





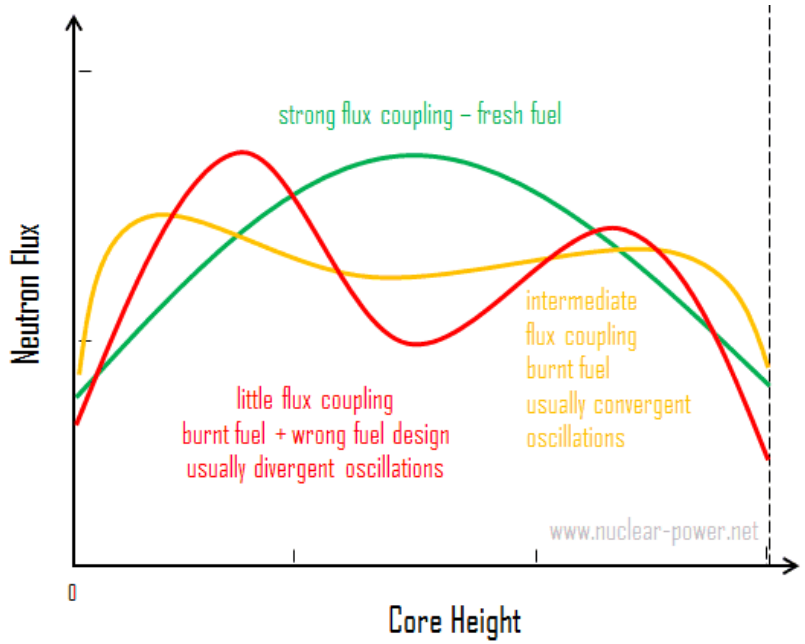
운전 정지 후 제논 거동과 기동불능시간

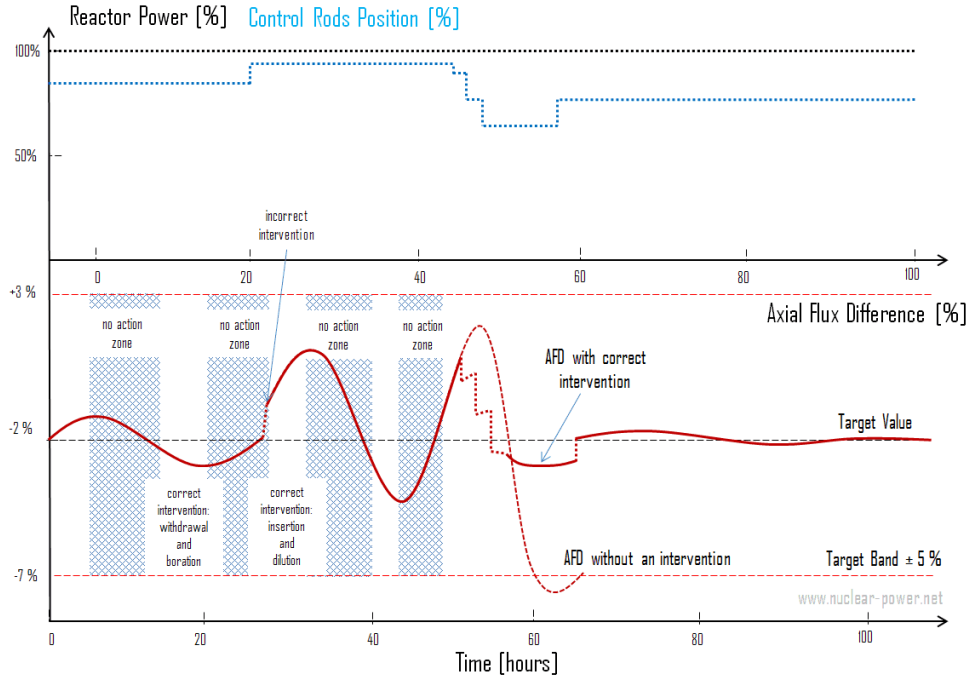
- **원자로 정지 직후** 잔류 I-135 재고가 붕괴하여 **Xe-135 농도 급증 (**중성자 포획 소멸 효과 X)
- **약 10시간 후 최대값**에 도달 후 서서히 줄어듦
  - 정지전 **출력이 클수록 큰 피크** 크기
- 과도한 제논 농도로 인해 재기동에 필요한 반응도 제어가 불가한 **원자로 기동불능시간**(dead time) 발생



공간적 제논 진동

- 국부적 출력 분포 변화가 **공간적인 제논 농도 진동**, 나아가 출력 분포가 진동하는 현상
  - 하부 출력 증가 → 하부 제논 농도 증가 → 하부 출력 감소 & 상부 출력 증가 → 상부 제논 농도 증가 …
- 약 **15~30시간의 주기**를 가지며, 대개 **축방향 진동 효과**를 발생
- **축방향출력편차**(ASI = $(P_{bot} - P_{top})/(P_{bot} + P_{top})$)로 감시하며, **제어봉의 미세조정**(능동적) 및 **부 온도궤환 효과**(수동적)으로 억제됨.



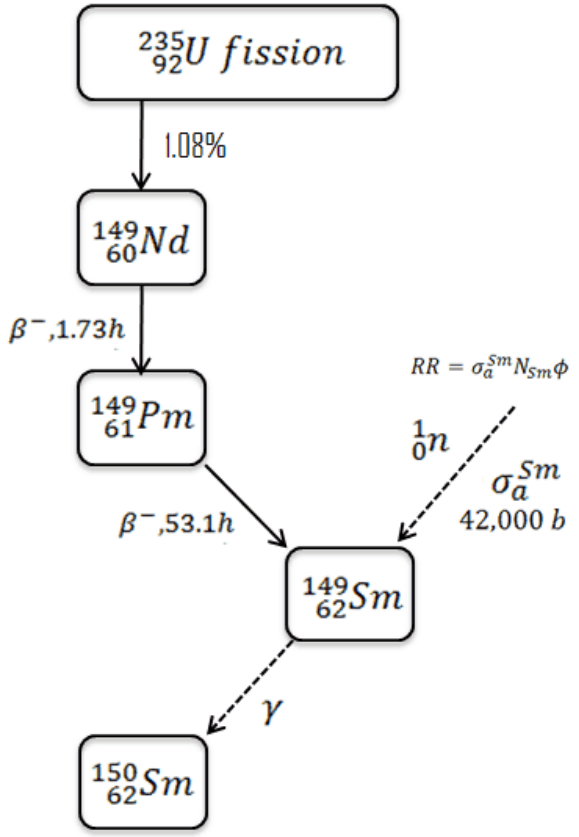


Sm-149의 생성과 소멸

- 직접 핵분열 생성 분율 없이, **Pm-149의 붕괴**로만 생성
- **중성자 포획**(흡수)로만 소멸 (붕괴 X)
- **원자로 정지** 후, 더 이상 소멸되지 않고 Pm-149 재고 붕괴로 **일정 시간 증가 후 일정하게 유지**
- **재기동** 후 다시 중성자 포획으로 인해 **평형농도까지 서서히 감소**
- 평형 농도는 **출력과 무관**하고, 약 **600 pcm** 가량 부반응도 발생

Samarium Equilibrium

$$N_{Sm}(eq) = \frac{\gamma_{Pm}\Sigma_f}{\sigma_a^{Sm}}$$



Source: www.nuclear-power.net
Data: JANIS 4.0 / NEA

Xe-135와 Sm-149 비교

독물질	Xe-135	Sm-149
생성	소량 직접 핵분열 & I-135 붕괴	오로지 Pm-149 붕괴
소멸	β^- 붕괴 & 중성자 포획	오로지 중성자 포획
흡수단면적	2.7×10^6 barn	4.2×10^4 barn
평형농도	출력에 대해 포화 (비례 X)	출력과 무관
정지 후 거동	10시간 후 피크, 이후 소멸	일정 시간 증가 후 유지
운전 고려사항	기동불능시간, 제논 진동	재기동 시 연소 효과

예제

- **2023년 62번,** 100% 출력 운전 중 불시 정지 시 핵분열생성물의 부(-)반응도 영향이 가장 큰 시점은?
  - (1) 정지 직후 (2) 정지 후 1시간 (3) 정지 후 10시간 (4) 정지 후 24시간
  - **정답 (3):** 잔류 I-135 재고의 붕괴로 Xe-135 축적 → 약 10시간 후 피크
- **2024년 68번,** 원자로의 독물질에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) Xe-135는 I-135의 β붕괴에 의해서만 생성 (2) 재기동 불능시간(Dead Time)은 Xe와 밀접 (3) Sm-149는 Xe-135에 비해 출력변화에 덜 민감 (4) 불시 정지 시 부(-)반응도 영향은 정지 후 10시간이 가장 큼
  - **정답 (1):** 핵분열 직접 생성분(약 0.25%)도 존재 — "에 의해서만"이 함정
- **2022년 70번,** 중수형 원자로가 출력운전 중 정지 시 재기동 불능시간과 가장 관련이 있는 독물질은?
  - (1) Sm (2) Xe (3) Iodine (4) Boron
  - **정답 (2):** 노형과 무관하게 기동불능시간의 원인은 Xe-135 피크