COLLEGE OF ENGINEERING
NUCLEAR ENGINEERING & RADIOLOGICAL SCIENCES
UNIVERSITY OF MICHIGAN

원자력기사 원자로 안전과 운전
Part II - 원자로 안전

University of Michigan
Han Gyu Lee, Ph. D.

Email: hangyl@umich.edu

MICHIGAN ENGINEERING
UNIVERSITY OF MICHIGAN

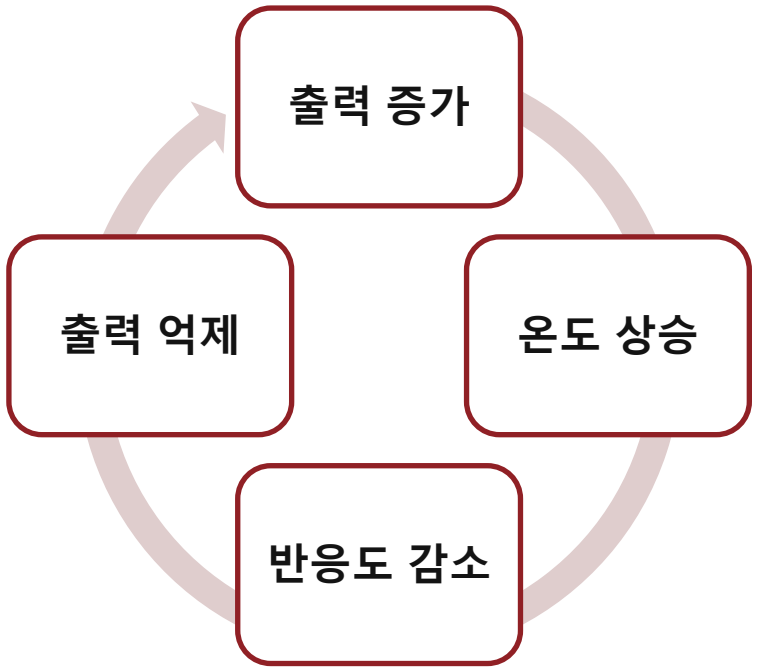
강의 개요 및 목차

1. **반응도 계수**
   - 반응도 궤환, 핵연료 및 감속재 온도 계수
2. **출력계수와 정지여유도**
3. **주요 출력밀도 안전 인자**
   - 첨두계수, 선출력밀도, 핵비등이탈(DNB)
4. **가압열충격**
   - 무연성천이온도, 조사취화, 가압열충격
5. **과냉각여유도**

반응도 계수

원자로 내재적 안정성

- 능동적인 간섭 없이 자동적으로 출력이 억제되는 궤환(feedback) 효과
- 이를 위해, 설계 시 **온도 상승에 대해 부반응도**를 제공하는 반응도 계수 요구
  - 반응도 계수: $\alpha \equiv \frac{\partial \rho}{\partial T}$

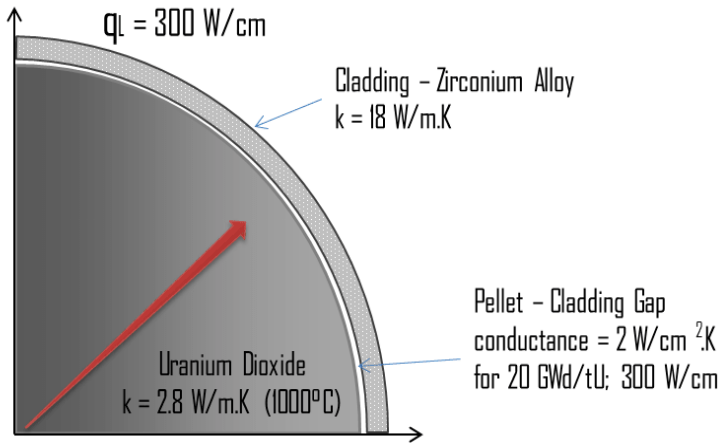


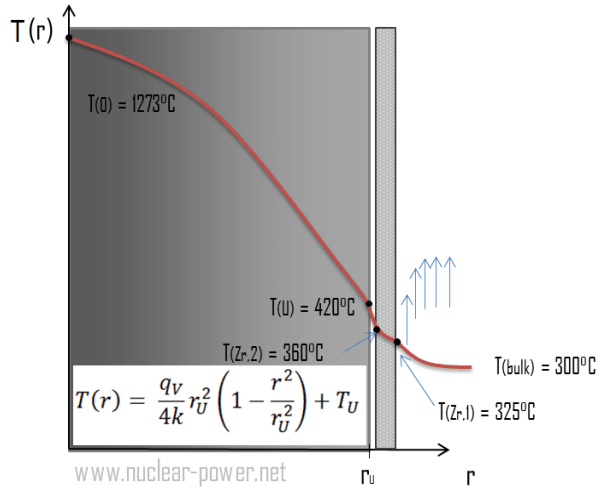
핵연료 온도 계수 (도플러계수)

- 온도 변화에 대한 반응도 변화율

$$\alpha_F = \frac{\partial \rho}{\partial T_{fuel}}$$

- **항상 음수값** 유지 → 내재적 안정성 핵심 요소
- **U-238**의 **공명 흡수** 단면적의 **도플러 확장 효과**로 인해 발생
- 출력 변화에 직접적인 연료 온도 변화로 인해 **가장 신속한 궤환 효과**

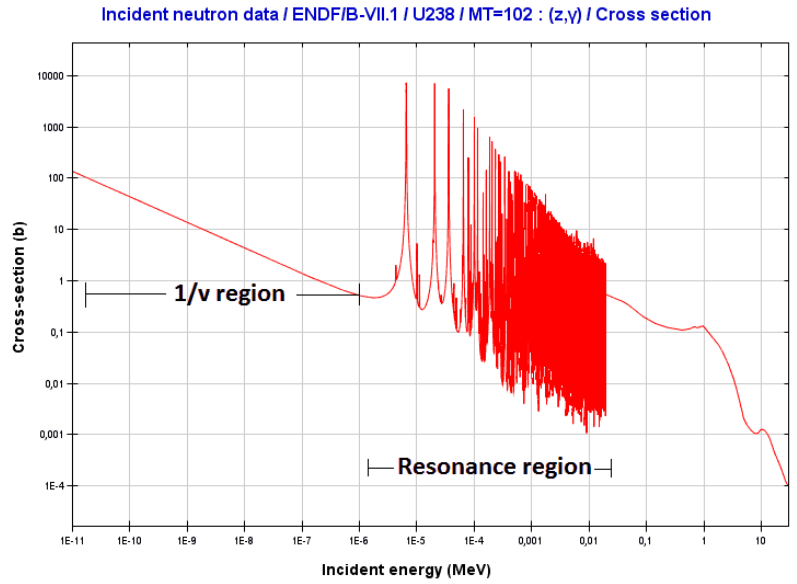




공명 흡수와 도플러 확장 효과

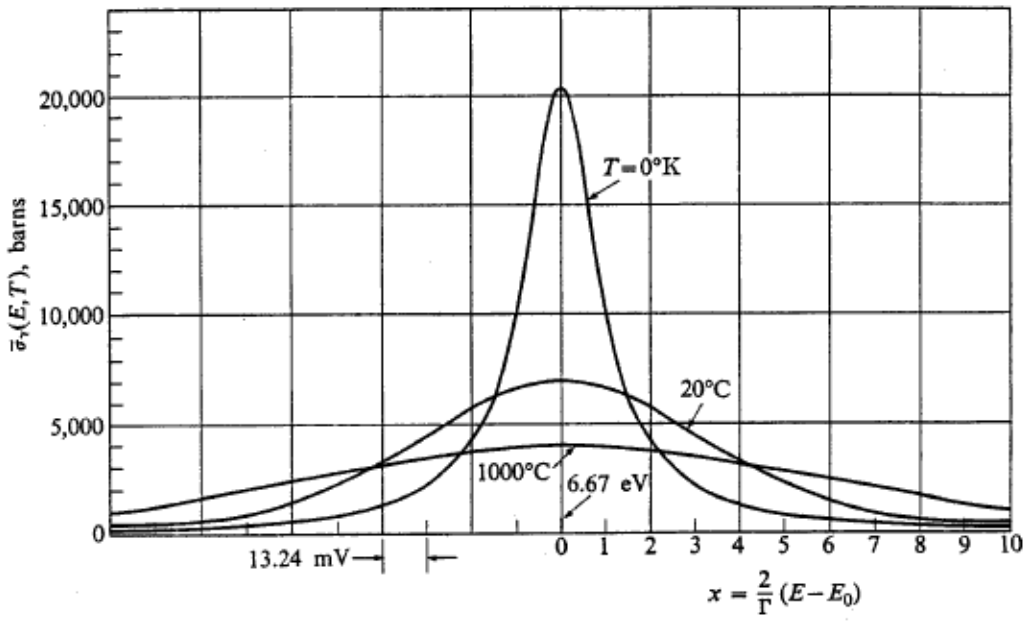
■ 공명 흡수

- **특정 에너지** 중심으로 큰 단면적 발생 → **공명**
- 공명 영역을 무사히 지나 열에너지로 감속될 확률이 **공명이탈확률 (*p*)**
- 가장 많은 중성자 손실이 **U-238 핵종의 공명 흡수**로 발생
- 주기말 Pu-240(공명 흡수원) 축적으로 더 작은 도플러 계수 가짐 (혹은 더 큰 절대값)



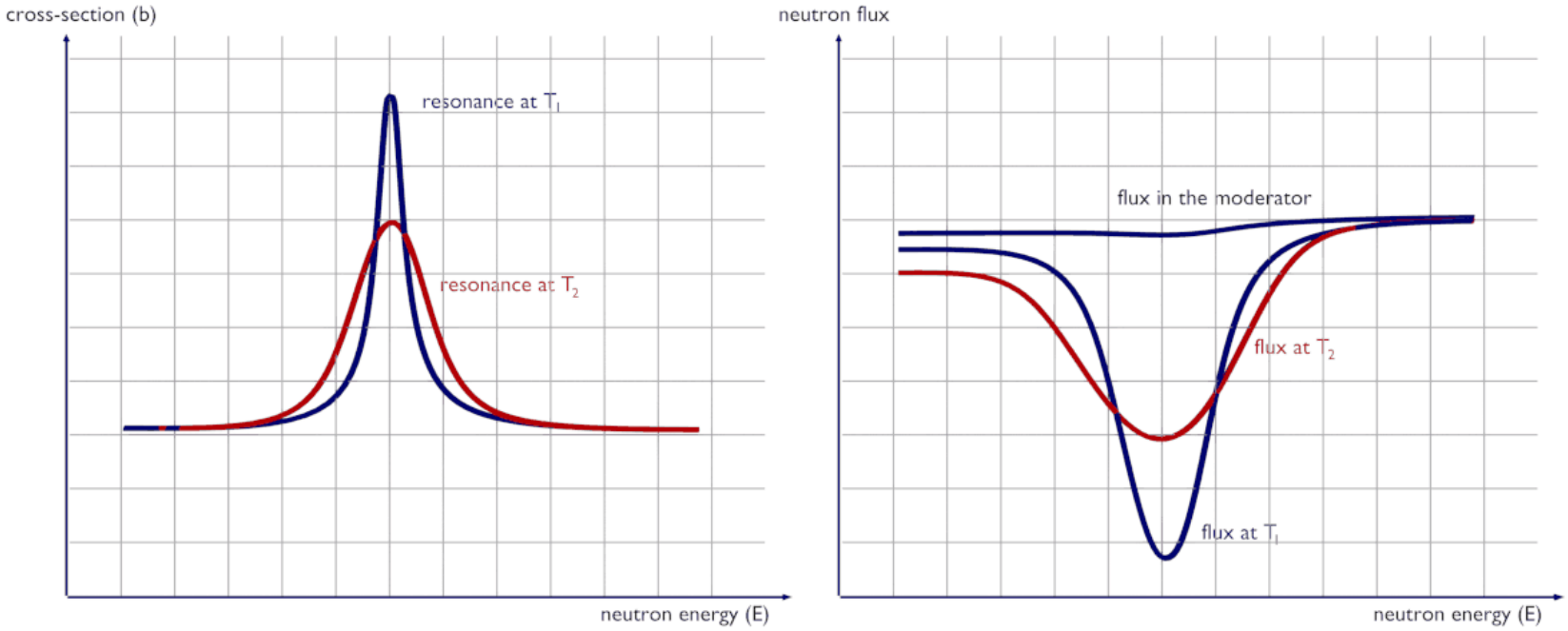
■ 도플러 효과

- 연료 온도가 상승 → **표적핵의 열운동** 활발 → 중성자와의 **상대 속도 분포가 넓어짐**
  - ➢ 공명 단면적이 **넓어지고 낮아짐**



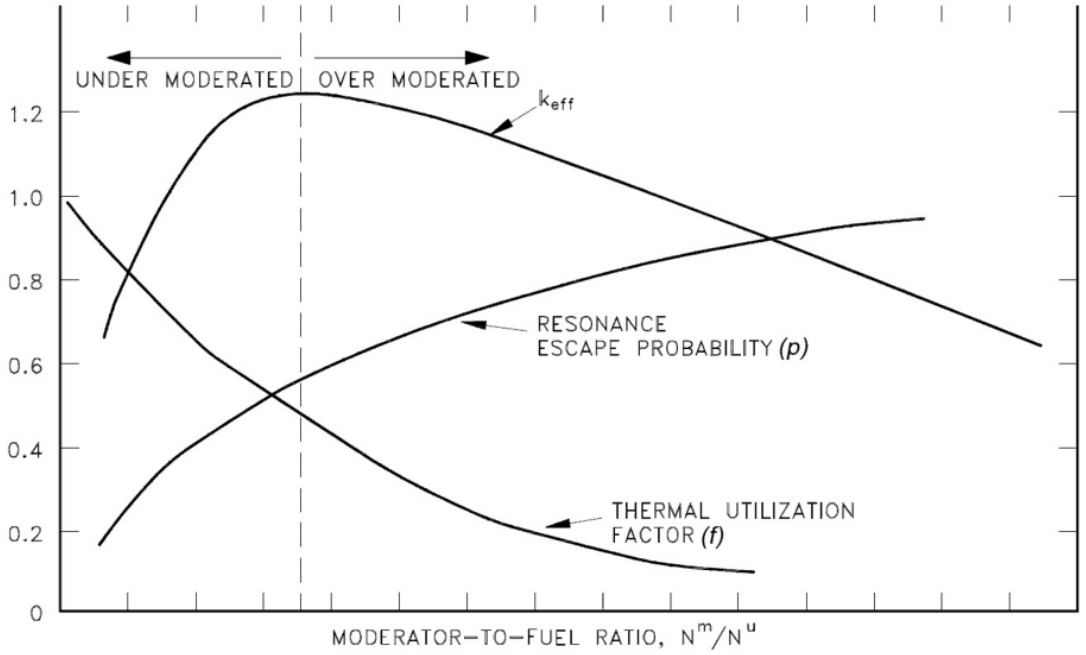
중성자 자기차폐 효과

- 피크가 강한 공명에선 중성자가 크게 소모되어 오히려 흡수(반응)량이 줄어듦 → **자기차폐**
- 온도 상승으로 공명 영역이 넓어지면 중성자속 감소 효과가 완화
- 결과적으로 총 **공명 흡수량 증가**, 공명이탈확률 감소, 그리고 **부반응도**로 이어짐
- 고온일수록 같은 도플러 계수 크기는 감소 → 같은 온도 상승에 둔감한 부반응도 발생



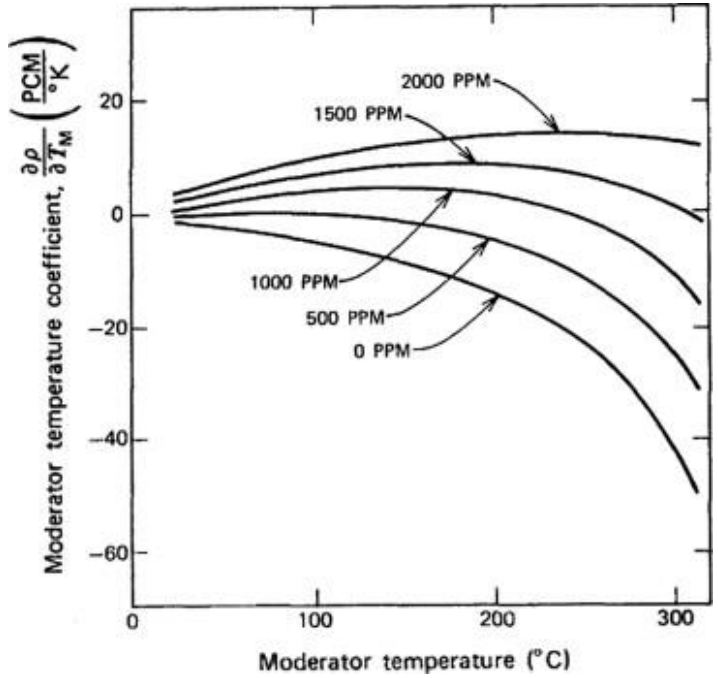
감속재온도계수(MTC)

- **감속재(냉각재) 연료 비율**에 따라 최적의 증배계수를 갖는 변화를 가짐
- **과소감속 영역**에서 온도가 증가(밀도 감소)로 인해 증배계수가 감소 → **음의 감속재온도계수**
- **과대감소 영역**은 오히려 **증배계수가 증가**함
- 실제 원자로 설계 시 과소감속을 위해 **최적값에 비해 약간 작게** 설정
- 감속재 온도 궤환 역시 **공명이탈확률 (*p*)**에 주요 작용



운전 중 감속재온도계수 변화

- 활발한 감속은 핵분열을 촉진시키고, 중성자 흡수는 핵분열을 억제함
- 냉각재에 녹인 **붕소**는 **반대의 반응도 궤환** 효과를 발생
- 붕소 농도가 높은 **주기초**에 **가장 작은 크기**의 부반응도 계수 값
  - 운전 동안 붕소가 희석될수록 부반응도 계수 크기 증가
- 냉각재 온도가 감소하면 오히려 정반응도 삽입 효과 (반응도 상승)
  - 예, 1차측 유량 증가, 2차측 파단



기타 반응도 계수

- **기포계수**(Void coefficient): 기포율 1% 변화당 반응도 변화량
  - 가압경수로 및 비등경수로의 경우 음의 반응도 계수값 가짐
  - 체르노빌의 흑연감속재 사용 경수로의 경우 양의 반응도 계수 가짐
- 압력계수: 압력 변화에 대한 반응도 변화량
  - 압력 상승 → 밀도 상승 → 감속 효과 향상
  - 보통 작은 양의 값을 가짐
- **등온온도계수**(ITC; Isothermal temperature coefficient): 연료온도계수 + 감속재온도계수
  - 연료 및 감속재에 동일한 온도 변화 가정

예제

- **2021년 5월 61번,** 도플러 효과에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) U-238의 열외중성자 공명흡수 변화량에 의한 효과 (2) 연료온도 증가 시 공명흡수 에너지 범위 증가 (3) 연료온도 증가 시 공명흡수되는 열외중성자의 총량은 감소 (4) 원자로 고유안전성 유지에 필요
  - **정답 (3):** 자기차폐 완화로 총 공명흡수량은 증가. 자기차폐 슬라이드의 핵심
- **2025년 79번,** 반응도 계수에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 연료온도계수는 EOL로 갈수록 적은 부(-)값 (2) 도플러 온도계수는 연료온도 변화에 따른 반응도 변화 (3) 과소감속 영역에서 기포계수는 부(-) (4) 감속재 온도 변화 시 가장 영향 받는 인자는 공명이탈확률과 열중성자 이용률
  - **정답 (1):** Pu-240 축적으로 EOL로 갈수록 더 큰 부(-)값(절대값 증가)

출력계수와 정지여유도

출력계수(Power Coefficient)와 출력결손(Power Defect)

- **출력계수**: 출력 1% 변화당 반응도 변화
  - **핵연료온도계수**, **감속재온도계수**, **기포계수**, 그리고 출력에 대한 온도 및 기포율 변화율로 구성

$$\alpha_P \equiv \frac{d\rho}{dP} = \alpha_F \cdot \frac{dT_F}{dP} + \alpha_M \cdot \frac{dT_M}{dP} + \alpha_V \cdot \frac{dV}{dP} \ [\text{pcm/\%-power}]$$

  - 안정적인 자기제어를 위해 **부의 계수 유지** (-20 ~ -30 pcm/%-power)
- **출력결손**: 영출력에서 전출력으로 변화 시 삽입되는 총 부반응도

$$\text{Power deficit} \equiv \int_{0\%}^{100\%} \alpha_P dP$$

  - 초기 기동 시 대략 2,500 pcm 가량 감소하며 **붕소 희석 또는 제어봉 인출**
  - 원자로 **정지 시** 출력결손만큼 **정반응도** 삽입 → **정지여유도**에 반영

정지여유도(Shutdown Margin, SDM)

- **출력 시**, 현재 상태에서 **가장 큰 제어봉가의 군을 제외**한 모든 제어봉이 완전 삽입됐을 때 미임계 정도
- **정지된 상태의 미임계 정도**를 나타내기도 함
- 정지 직후 발생하는 **정반응도 효과들도 고려**
  - 냉각재 및 핵연료 온도 감소로 인한 **출력결손**만큼의 정반응도
  - **제논 방사 붕괴**로 인한 재고 소멸
- 정지 후 10시간가량 제논 재고 축적으로 정지여유도 증가, 그 후 72시간가량 지속적으로 감소
  - 정지 직후와 비교해 정반응도 제공

정지여유도 영향 요인과 확보 수단

- **변화 요인**
  - 연료 및 냉각재 온도
  - 붕소 농도
  - 제논 등 핵분열 생성물 재고 변동
  - 핵연료 및 가연성 독물질 연소
- **확보 수단**
  - 정지제어봉집합체의 인출 상태 유지
  - 제어봉 삽입한계조건
  - 붕산 주입

예제

- **2022년 72번,** 출력결손을 구성하고 있는 인자 중 틀린 것은?
  - (1) 감속재 온도변화에 따른 결손 (2) 핵연료 온도변화에 따른 결손 (3) 기포생성에 따른 결손 (4) 중성자 누설에 따른 결손
  - **정답 (4):** 출력결손 = 온도·기포 궤환의 합. 중성자 누설은 무관
- **2021년 5월 73번,** 정지여유도(SDM)에 관한 설명으로 틀린 것은?
  - (1) 정지 시 제논 영향은 고려하지 않음 (2) 최대 제어봉가 1개 인출 고착 가정에서 전 제어봉 삽입 시 순간 부가되는 반응도 (3) 점검 시 최근 B-10 동위원소비 측정값 적용 (4) 출력운전 중 정지 시 SDM은 증가 후 감소
  - **정답 (1):** Xe 재고 변동은 SDM 계산의 핵심 입력. 정지 후 증가·감소 거동의 원인
- **2025년 73번,** 정지여유도 요건을 만족시키는 데 가장 제한적인 사고는?
  - (1) 하나의 제어봉 인출사고 (2) BOL 주증기 배관 파단사고 (3) EOL 주증기 배관 파단사고 (4) 원자로냉각재 배관 파단사고
  - **정답 (3):** EOL은 감속재온도계수가 가장 큰 부(-) → 과냉각 시 삽입되는 정(+)반응도 최대

주요 출력밀도 안전 인자

첨두계수(Peaking Factor)

- 첨두계수 정의
  - 총첨두계수: 노심 평균출력 대비 최대 국부출력

$$F_q = F_{xy} \cdot F_z$$

  - F_{xy}: 반경 방향 첨두계수 & F_z: 축방향 첨두계수
- 첨두계수가 클수록 **열적 한계 조건**(DNBR, 연료 용융점 등)에 더 쉽게 도달 → 잦은 원자로 보호 작동
- 평탄한 출력 분포를 위해 여러 수단을 통해 노심 설계 최적화 필요
  - 가연성 독물질 장전 (반경 방향)
  - 제어봉 인출 (축방향)
  - 저누설 장전모형 (반경 방향)
  - ASI(Axial Shape Index) 제한 (축방향)

선출력밀도(Linear Power Density)

- 정의: 연료봉 단위 길이당 발생 열량
  - 노심 전체 열출력 / (연료봉 수 × 유효연료길이) [W/cm]

$$\bar{q}' = \frac{Q}{N_{\text{fuel}} \cdot L_{\text{fuel}}}$$

- 최대 선출력밀도는 총 첨두계수를 곱하여 계산

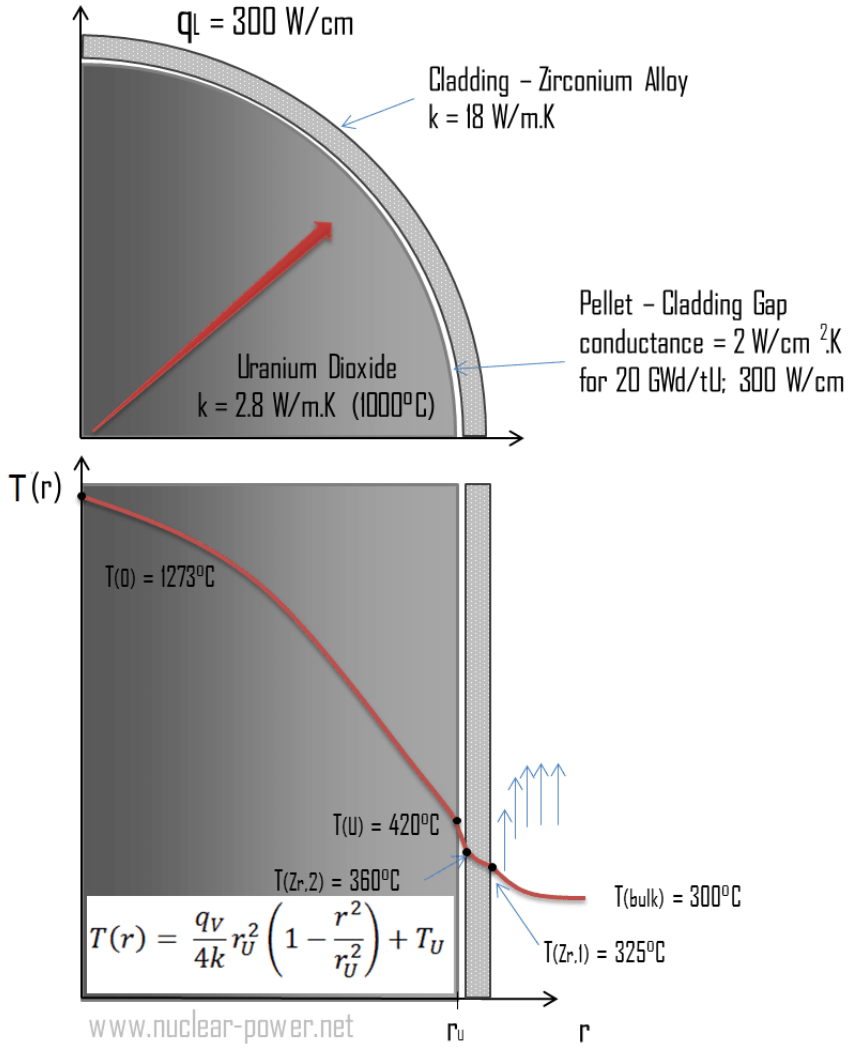
$$q'_{peak} = \bar{q}' \cdot F_q$$

- 열수로계수(Hot channel factor, HCF): 최대 LPD / 평균 LPD
- 안전 지표 환산에 편리함
  - 연료 중심 온도

$$T_0 = T_{bulk} + \frac{q'''}{4k} R^2 = T_{bulk} + \frac{q'}{4k\pi}$$

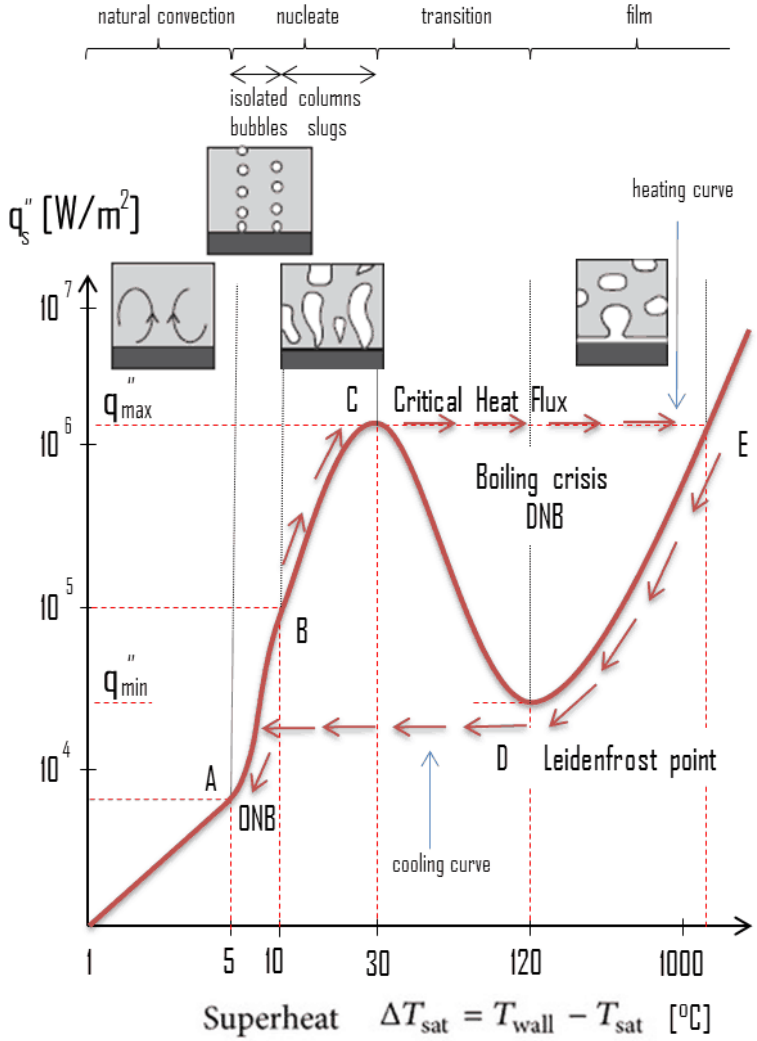
  - 피복관 표면 열속 (DNBR 추산에 활용)

$$q''_{wall} = \frac{q'}{2\pi R_{wall}}$$



풀비등곡선(Pool Boiling Curve)과 임계열유속

- 낮은 열속 구간, 자연 대류를 통해 유체에 열을 고르게 전달
- 이후 국부적으로 기포를 형성하는 **핵비등**(Nucleate boiling) 발생
  - 가장 **좋은 열전달 효율**
- 특정 지점 이후, 기포가 합쳐져 표면에 **증기막을** 형성하며 열전달 효율 급감 → **핵비등이탈**(Departure from nucleate boiling, DNB)
  - 천이비등 및 막비등으로 발달
- 이때의 열유속을 **임계열유속**(Critical heat flux, CHF)이라 함
  - 냉각재 온도, 압력, 유량 등에 따라 가변적

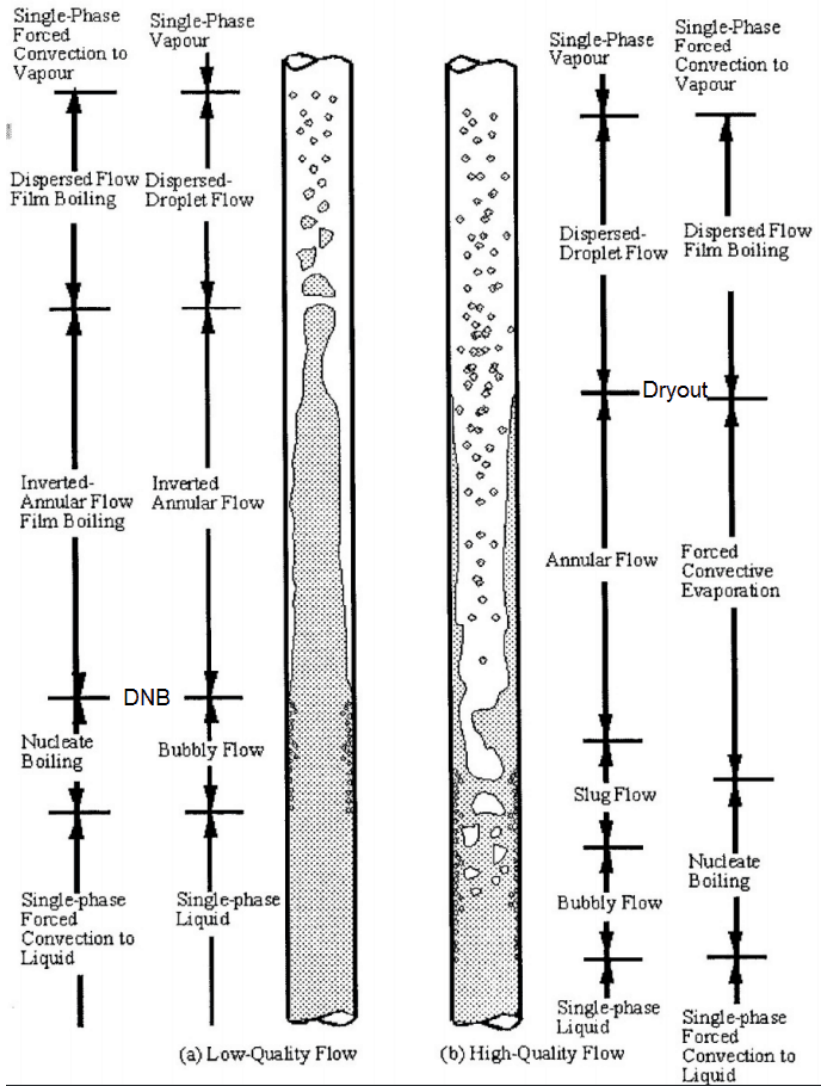


핵비등이탈률(DNBR)

- 연료봉 피복재에서 핵비등이탈이 발생하면:
  - 표면 열유속이 한계에 도달하며 핵비등이탈(임계열유속) 발생
  - 열속 급감으로 연료봉의 열 제거 성능이 급감
  - **피복재 온도가 급상승** (수초 이내 수백 도 이상)
- 이를 방지하기 위해 **핵비등이탈률**의 제한치 설정
  - 핵비등이탈률 정의: 실제 열유속 대비 임계열유속 비율

$$\mathrm{DNBR} = \frac{q''_{\mathrm{crit}}}{q''_{actual}}$$

- **최소 DNBR**(Minimum DNBR, MDNBR)에 설계제한치를 두고, 그 **이상**으로 유지해야 함



핵비등이탈률 영향 인자

변수	DNBR	비고
원자로 출력/국부열속/첨두계수 증가	감소	실제 국부 열유속 증가
냉각재 온도 증가	감소	포화에 근접, 임계열유속 저하
냉각재 압력/냉각재 유량 감소	감소	임계열유속 저하
기포율 증가	감소	임계열유속 저하
증기발생기 전열관 막힘	감소	유량 감소 → 임계열유속 저하
출력분포 평탄화	증가	실제 열유속 감소 → DNBR 여유도 증가

예제

- **2025년 74번,** 100 MWth 운전 중 최대열유속 500,000 Btu/hr·ft², 총 열전달면적 1,500 ft²일 때 열수로계수(HCF)는? (1 MWth = 3 × 10⁶ Btu/hr)
  - (1) 1.5 (2) 2.0 (3) 2.5 (4) 3.0
  - **정답 (3):** 평균열유속 = 3 × 10⁸ ÷ 1,500 = 200,000 → HCF = 500,000 ÷ 200,000 = 2.5
- **2024년 53번,** DNBR에 영향을 미치는 인자들에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 냉각재 온도 증가 시 DNBR 감소 (2) 냉각재 압력 감소 시 감소 (3) 냉각재 유량 증가 시 감소 (4) 기포함량 증가 시 감소
  - **정답 (3):** 유량 증가 → 임계열유속 상승 → DNBR 증가 (영향 인자 표와 대응)

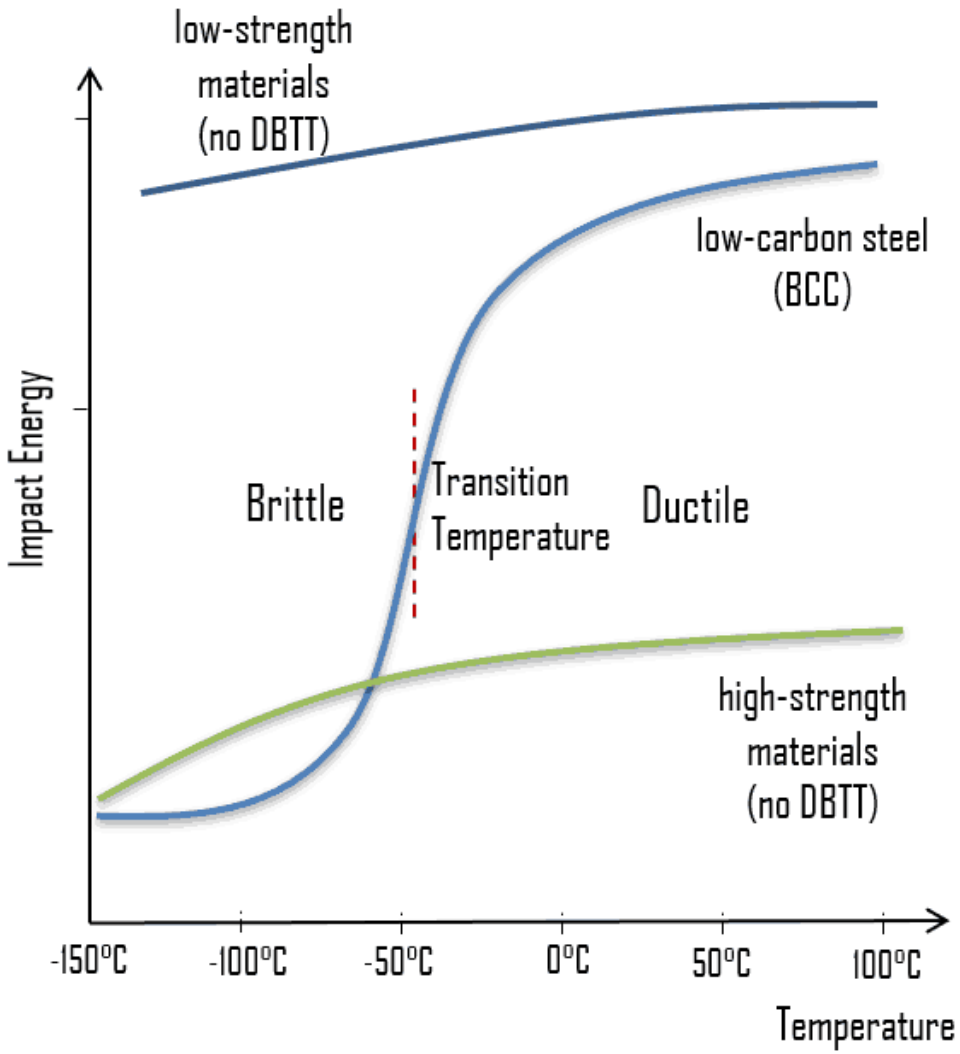
가압열충격

가압열충격(Pressurized Thermal Shock, PTS)

- **고압** 환경에서 **급격한 냉각**으로 인한 열충격이 **취화 용기** 벽면에 가해지는 현상
  - 깨지기 쉬운 환경 + 급냉으로 인한 열충격 → 기존 미세 균열 발달 위험
- 주로 안전주입수, 2차측 과냉 현상 등의 이유로 **낮은 온도의 냉각수**가 압력용기에 주입 시 발생
  - 냉각재 상실사고(LOCA)
  - 증기발생기 전열관 파단(SGTR)
  - 주증기관 파단(MSLB) → 2차측 과냉
  - 안전주입계통·보조급수계통 동작 → 안전주입수
- 사고 후 재가압 구간(안전주입 + 압력 회복)이 가장 위험

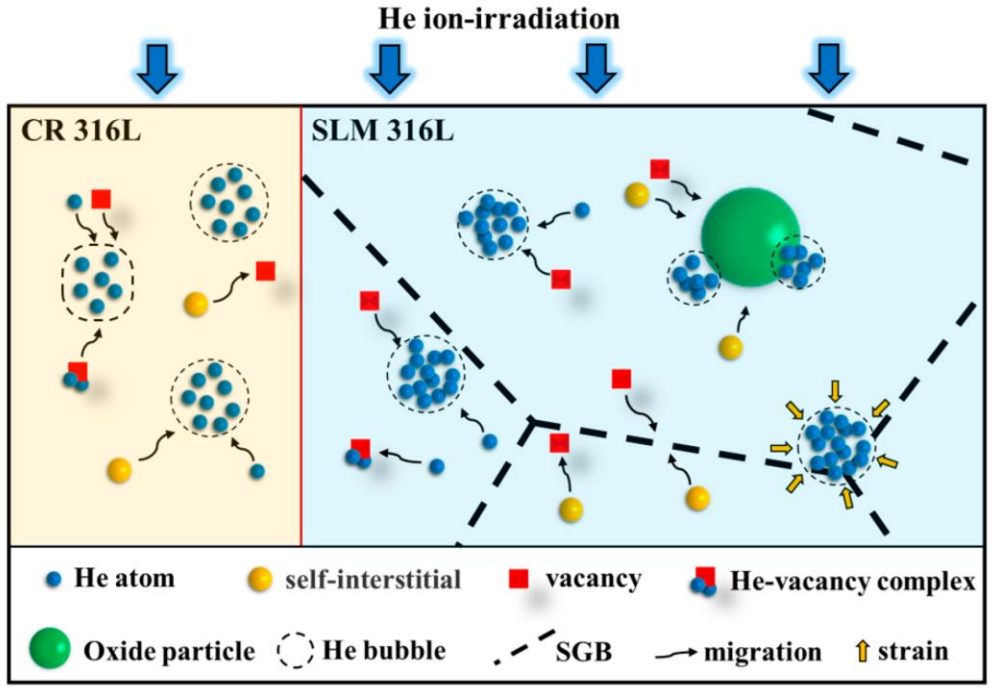
무연성천이온도(Nil-Ductility Transition Temperature)

- **연성**(Ductility): **늘어나거나 휘어지는 성질**
- **취성**(Brittleness): 변형 없이 **깨지는 성질**을 의미함
- 특정 온도에서 취성에서 연성으로 변하는 천이곡선을 그리며, 그때의 온도를 **무연성천이온도(NDTT)**라 부름
  - 가압용기(Reactor pressure vessel, RPV)는 전형적인 천이구간을 갖는 저합금강으로 이뤄짐
- 낮은 온도에서 취성을, 높은 온도에서 연성을 띔 → **급격한 냉각**에 **깨지기 쉬운** 상태로 전이



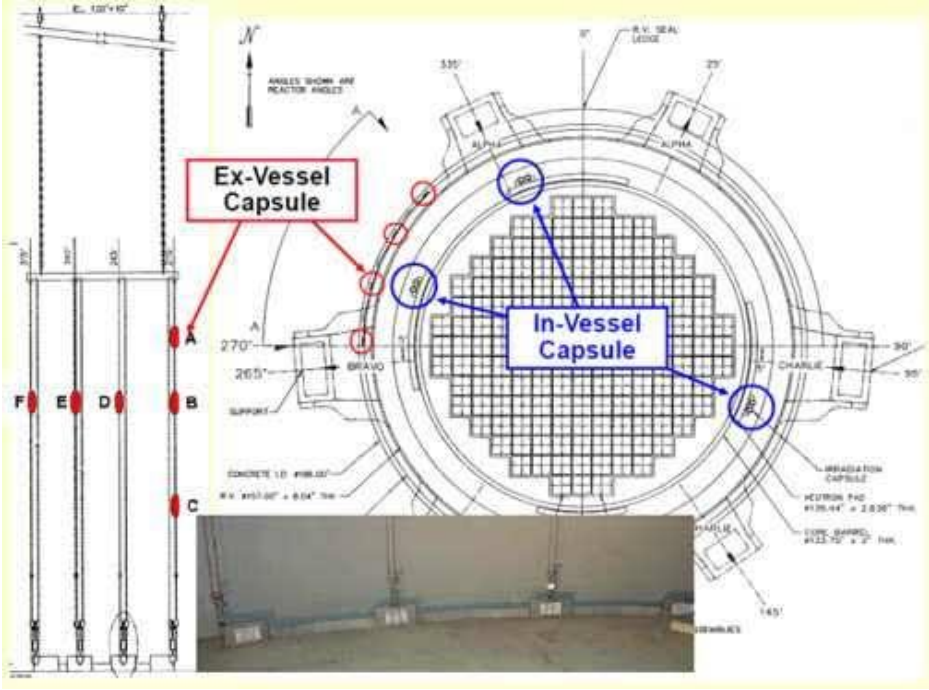
조사취화(Irradiation Embrittlement)

- 원자로용기는 수십 년간 **속중성자 조사**를 받음
- 원자 격자 내부에 결함이 쌓이며 **경도·인장강도**는 **향상**, **연성·파괴인성**은 **저하**됨 → **조사취화**
  - 단단해지지만 부러지기 쉬움
- 운전 년수에 따라(조사량 증가), **무연성천이온도 상승**



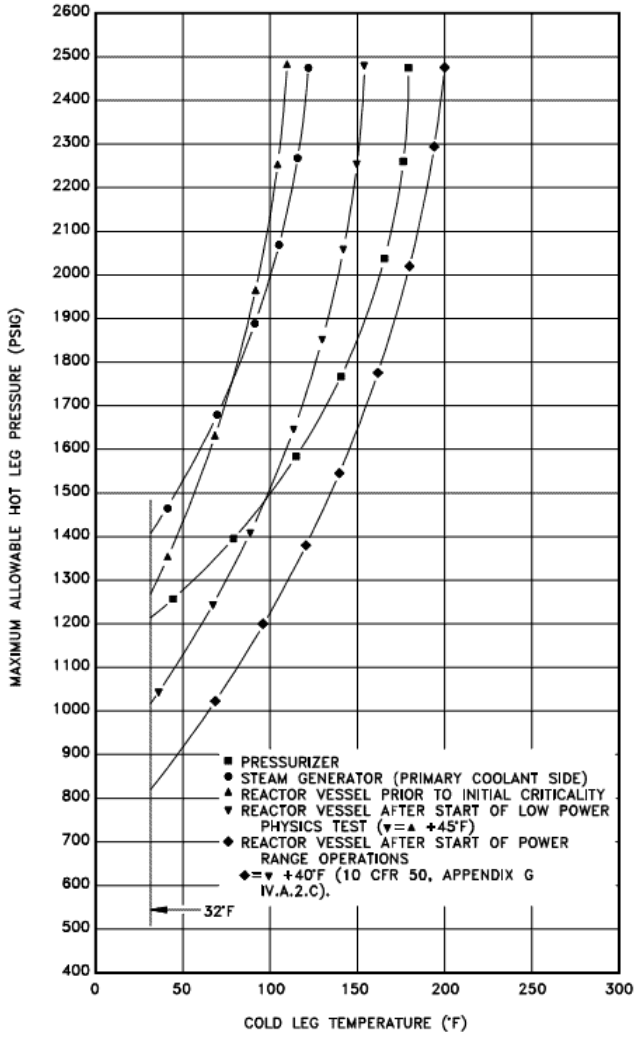
기준무연성천이온도와 감시시편

- **기준무연성천이온도**(RT_{NDT}): 압력용기에 대해 취성파괴, 연성파괴가 나뉘는 **기준 온도**
- **감시시편**(Surveillance capsule) 프로그램:
  - 원자로용기와 같은 재료 시편을 이용해 **운전 중 조사 효과**를 확인
  - 보다 극한의 환경을 위해 **용기 내부 벽면, 노심 중간 높이**에 위치
  - 연료 재장전 주기에 맞춰 꺼내 시험



가압열충격 방지 및 완화 수단

- 설계 측면
  - **저누설 장전모형** 탐색: 용기에 가해지는 **속중성자 조사량 저감**
  - Cu 및 Ni 저함량 합금 사용(조사 시 취성 증가), 용접부 품질 향상
- 운전 대책
  - 가열 및 냉각 시 **P-T 곡선** 준수 및 갱신 (시편 활용)
  - 저온 상태에 저압 환경 유지
  - 저온과압보호(Low-temperature over-pressurization) 설비
  - 사고 시 증기발생기 냉각률 제한



예제

- **2024년 70번,** 가압열충격(PTS)에 대한 설명 중 틀린 것은?
  - (1) 고압 상태에서 급격한 냉각 시 발생 (2) 2차 열제거원 상실사고는 PTS 유발 가능 (3) 운전 년수 증가 시 무연성천이온도(NDTT)는 계속 감소 (4) 방지를 위해 최대 냉각률 제한치 준수
  - **정답 (3):** 조사취화로 NDTT는 상승, 조사취화의 핵심 방향
- **2023년 79번,** PTS를 유발할 수 있는 주요 사고가 아닌 것은?
  - (1) 원자로 냉각재 상실사고 (2) 증기발생기 전열관 파단사고 (3) 증기관 파단사고 (4) 제어봉 낙하 사고
  - **정답 (4):** 급랭 + 압력 유지 조합이 아님, 출력 감소일 뿐
- **2025년 72번,** PTS를 완화하기 위한 조치사항으로 적절하지 않은 것은?
  - (1) 과도한 냉각을 유발하는 요소의 정지·감소 (2) 안전주입 정지조건 도달 시 신속한 안전주입 종료 (3) 과도한 증기 방출·급수 주입의 정지·조절 (4) 과냉각 상태 유지 시 계통 가압 병행
  - **정답 (4):** 급랭 + 고압의 결합이 PTS의 핵심

과냉각여유도

과냉각여유도(Sub-Cooling Margin, SCM)

- 현재 냉각수 온도로부터 포화온도까지의 차이 → 얼마나 포화에서 멀어져 있는가

$$\mathrm{SCM} = T_{sat}(P) - T$$

  - 포화온도(T_{sat})는 압력에 의해 결정 (345 ℃ @ 15.5 MPa)
- 항상 1차측은 과냉각 상태여야 하므로 **과냉각여유도는 0 초과(양수) 유지**
  - 가압기만 포화 상태 유지
- 과냉각여유도 변화 방향
  - **출력** 및 **온도** 증가 → 과냉각여유도 감소
  - **압력** 하강 → **포화 온도** 감소 → 과냉각여유도 감소

과냉각여유도의 계통 진단 활용

- 원자로 냉각재계통 압력, 고온관 온도, 노심 출구 열전대(Core exit thermocouple, CET) 온도로 감시
  - 가압기 압력을 통해 포화 온도 추정
- 과냉각여유도 감소 시 대응
  - 압력 강하로 포화 온도 감소 시 **가압**
  - 냉각재 온도 증가 시 **유량 증가** 및 **출력 감소**
- **냉각재상실사고**(Loss of coolant accident, LOCA)
  - 냉각재계통 **압력이 감소**하고 온도가 소폭 감소
  - 포화 온도 감소분이 크므로 **과냉각여유도 감소**
- **주증기관파단**(Main steam line break, MSLB)
  - 증기발생기 통해 과도한 열 제거 발생
  - 냉각재 온도 감소로 **과냉각여유도 증가**

예제

- **2025년 62번,** 냉각재 압력 15.0 MPa(포화온도 345℃), 온도 315℃ 유지. 냉각재가 열전달면을 통과하며 25℃ 상승했을 때 과냉각여유도는?
  - **정답 (2):** 출구온도 = 315 + 25 = 340℃ → SCM = 345 − 340 = 5℃ (상승 후 온도로 계산하는 것이 포인트)
- **2024년 75번,** 전출력 운전 중 고온관·저온관의 과냉각여유도는? (가압기 347℃, RCS 평균온도 312℃, ΔT = 32℃)
  - (1) 19℃, 19℃ (2) 19℃, 32℃ (3) 19℃, 51℃ (4) 19℃, 64℃
  - **정답 (3):** 고온관 = 312+16 = 328℃ → 347−328 = 19℃ / 저온관 = 312−16 = 296℃ → 347−296 = 51℃