

원자력 발전소

설계와 주기적건전성평가(PSR)

2017. 2.

한전기술 진태은 (jinte@kepcO-enc.com)



Contents



- 1 원자력 산업 현황
- 2 원전 설계 및 건전성 평가
- 3 원전 주기적안전성평가(PSR) 및 계속운전

[원자력 산업 현황]

국내외 원전 현황

□ 운영 원전 : 총 437기 (31개국)

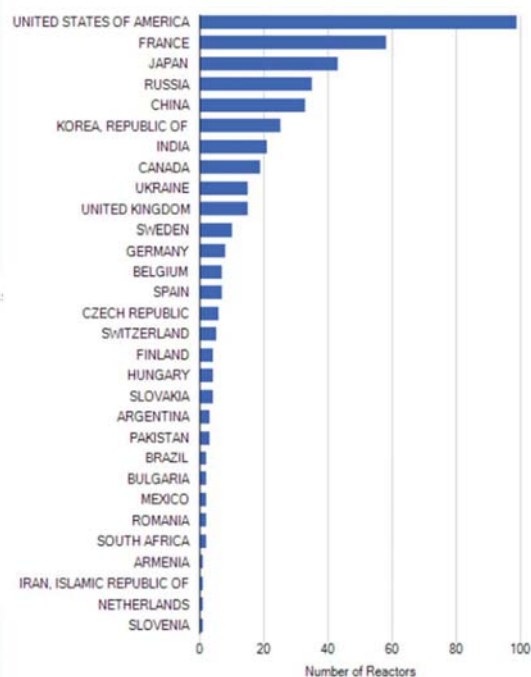
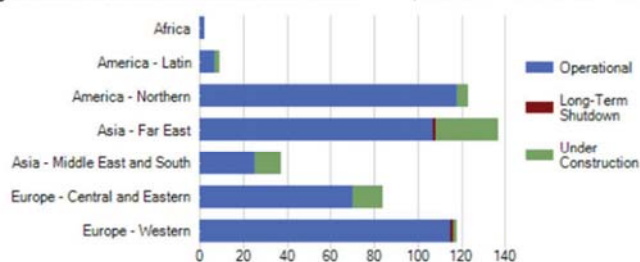
□ 건설 원전 : 총 66기 (31개국)

신규 계획 중 322기 (34개국)

by 원전정책핸드북 15.9

Regional Distribution of Nuclear Power Plants

(Click on the chart for more statistic:

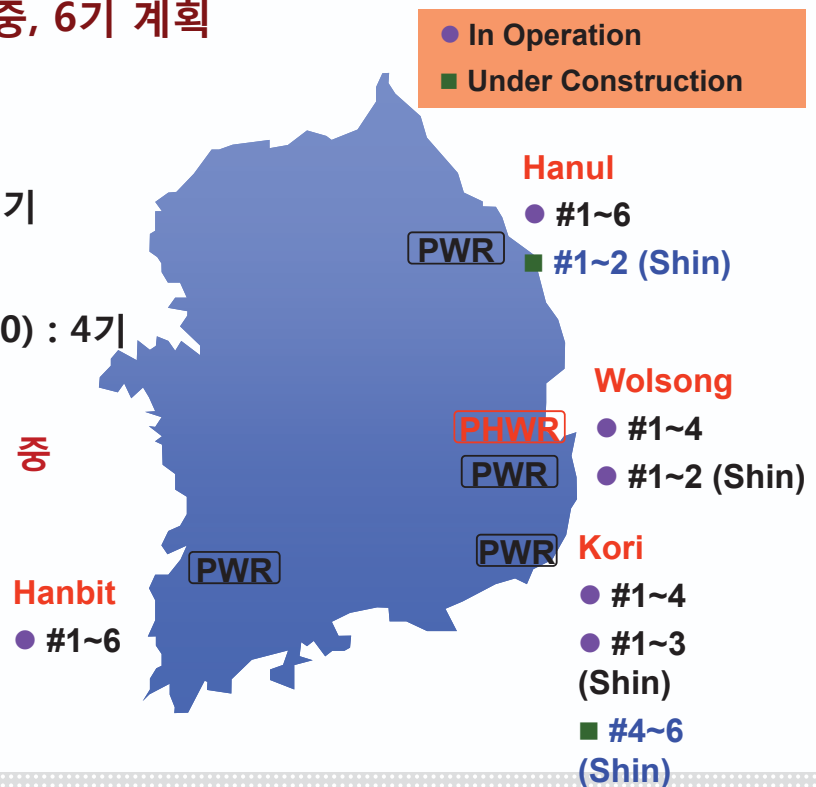


국내 원전 현황

□ 25기 운영, 5기 건설중, 6기 계획

- 미국 WEC형 : 6기
- 캐나다 AECL형 : 4기
- 프랑스 AREVA형 : 2기
- 미국 CE형 : 8기
- 한국표준형(OPR1000) : 4기
- APR1400 : 1기
- **APR1400 : 3기 건설 중**

👉 UAE 수출형



국내 원자력산업 (계속)

- 한국전력공사 (KEPCO) : 나주
 - 임무 : 송전/배전, 영업, 전력자원개발
 - 인원 : 약 20,000명
- 한국수력원자력 (KHNP) : 경주
 - 임무 : 원자력, 수력발전소 운영
 - 인원 : 약 10,000명
- 한국전력기술 (KEPCO E&C) : 김천
 - 임무 : 원자력, 화력발전소 설계 및 엔지니어링
 - 인원 : 약 2,200명
- 한전 KPS(5,300) 및 KNF(1,000)



국내 원자력산업의 전망

□ 제7차 전력수급 기본계획 (2015년, 산업부)

○ 2029년까지 원자력 확대

- 기존 계획 : 11기 신설
- 추가 계획 : +2기 신설



| 구 분 | 원 전 | 석 탄 | LNG | 신재생·집단 | 계 |
|----------------------------|--|---|--|-------------------------|--------------------|
| 기 계 획 설 비 | 신고리3 (16.4 1400) #4 (17.2 1400) #5 (21.3 1400) #6 (22.3 1400) 한 지 #1 (25.12 1500) #2 (27.12 1500) 신한울#1 (17.4 1400) #2 (18.4 1400) #3 (22.12 1400) #4 (23.12 1400) 신월성#2 (15.7 1000) | 당 전 #9 (15.12 1020) #10 (16.6 1020) 삼척그린 #1 (16.6 1020) #2 (16.10 1020) 북 평 #1 (16.2 595) #2 (16.6 595) 대 안 #1 (16.6 1020) #2 (16.12 1020) 신 보령 #1 (16.6 1000) #2 (17.6 1000) 에 수 #1 (16.8 330) #2 (22.3 590) 당진메르 #1 (13.9 1020) 고성하이 #1 (20.10 1040) #2 (21.4 1040) 강원안민 #1 (18.12 1040) #2 (20.6 1040) 삼척하이 #1 (21.6 1020) #2 (21.12 1020) | 포스코에너지 (15.1 306) 동부전력발전 (15.3 858) #2 (15.1 858) 서울북평 #1 (17.12 400) #2 (17.12 400) 장문북평 #1 (17.3 300) #2 (17.7 300) 3호원북평 #1 (17.7 300) #2 (17.10 400) 대우북평 #1 (17.2 990) #2 (20.6 1000) 신원에너지 (19.11 990) 동원에너지 #1 (18.12 990) 대우신규 (18.6 220) | 신재생 26,649 집 단 4,276 | 계치 -6,760 |
| | 15,200 (11기) | 18,144 (20기) | 10,143 (14기) | 30,925 | 74,412 (67,652) |
| | 반영 제외 | 영 동 #1 (23.1 800) #2 (23.6 800) 동부하이 #1 (21.6 1000) #2 (21.12 1000) | | | |
| | | 3,740 (4기) | | | 3,740 |
| 신 규 의 향 설 비 | 신규발전#1 (28.12 1500) #2 (29.12 1500) | | | | |
| | 3,000 (2기) | | | | 3,000 |

[원전 설계 및 건전성평가]

설계(Design)란 ?



설계(Design)의 범위 ?

용어해설

설계

출처 | 도해 기계용어사전 | 설계

기계 · 기구 · 장치 등을 생산할 때, 사용목적에 만족하도록 기구, 구조, 각 부의 재료, 형상, 크기, 그 밖에 제작에 관한 일체의 것을 계획하고 결정하는 것.

외국어 표기 | design(영어), 設計(한자), 設計(일본어)

독의어 | 디자인

원자력 발전소 설계 개념

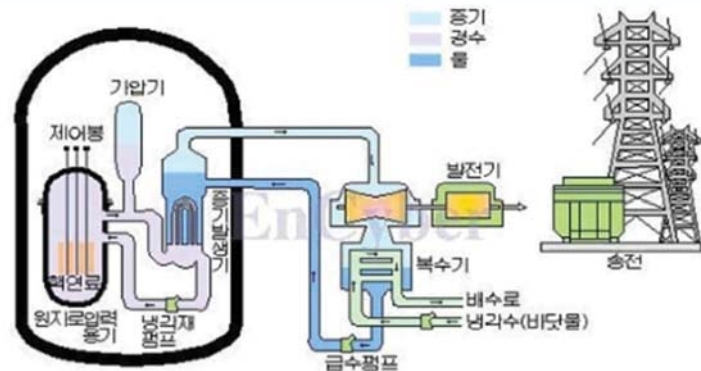
□ 설비 분류

○ 1차계통

- 원자로에서 발생한 열을 이용 증기를 생산하는 설비
- 방사성 물질 함유

○ 2차계통

- 증기를 이용 터빈/발전기를 돌려 전기를 생산하는 설비
- 방사성 물질 미함유



원자력 발전소 설계 개념 (계속)

□ 기본 개념 (구조역학적 설계 등)

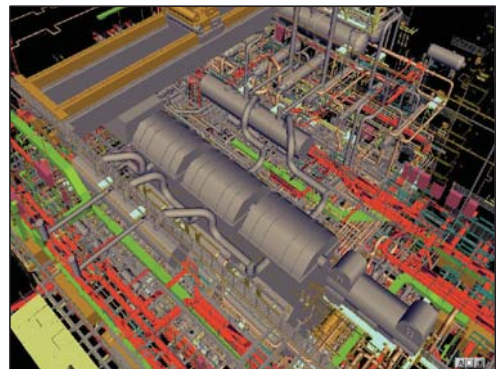
- 코드 요건에 따라 **Safety Factor**를 고려, 보수적 설계
- 방사능 유출을 방지하고 전기생산 성능을 구현

□ 기타 개념 (추가 설계 고려사항)

- 화재/침수 : 건물 내부 방호/격리 및 소화/배수설비 구비
- 항공기 충돌 : 건물의 안전성 확보를 위한 설계 및 제작
- 지진 : 부지 선정시 활성 단층 제외, 내진해석 수행 및 제작
- 정전 : 기기/제어기 구동 전원의 다양화 (ex. AC/DC, 발전기 등)
- 기기 고장 : 다중성 및 독립성 확보 (병렬 연결)
- 방사선 방호 : 다중 방호벽 채택
- 인적 오류 : 심리학적 분석 수행 및 기기 배치 최적화

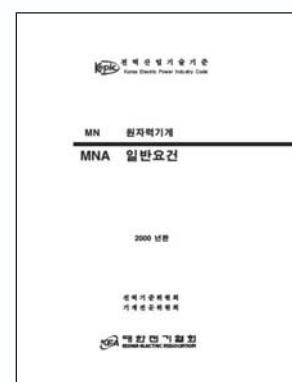
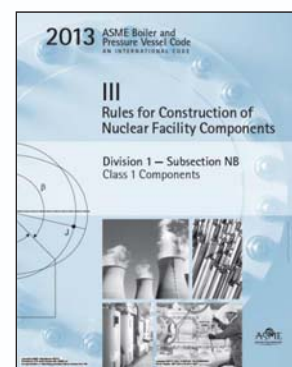
원자력 발전소 설계 절차

- 발전소의 용량 결정 : 발전량
- 기기/배관의 크기와 용량 결정
- 기기/배관의 재질 결정
 - 국내외 손상사례 등 참조
- 기기/배관의 배치
- 응력해석 수행
 - ASME 코드요건 기준
 - ANSYS, ABAQUS, FLUENT 등 이용
- 허용기준 만족여부 확인



설계 및 평가기준

- 미국 : ASME 코드
- 프랑스 : RCC-M 코드
- 캐나다 : CSA 코드
 - 세부적으로 ASME 코드 준용
- 대한민국 : KEPIC, ASME, CSA, RCC-M 코드
 - 발전소별 상이



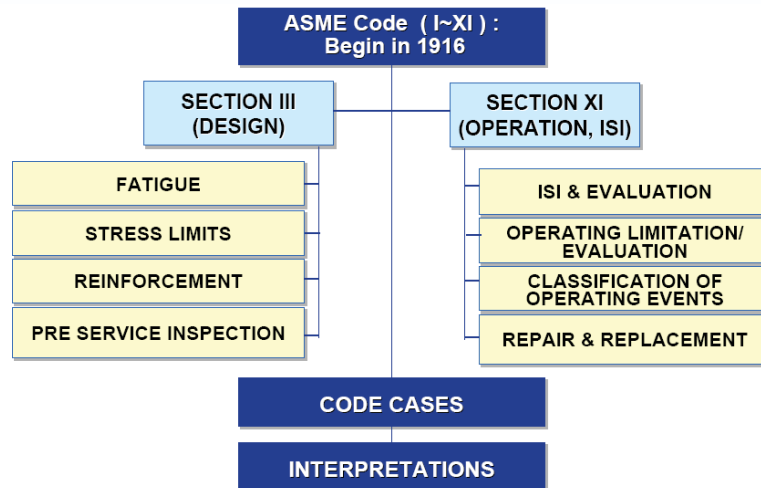
설계 및 평가기준 (계속)

□ ASME (American Society of Mechanical Engineers)

○ 1880년 설립된 비영리 조직, 140여개국 약 120,000명의 회원

○ 각종 Code 발간

➤ Boiler & Pressure Vessel Code : 원전 설계 및 운영에 이용



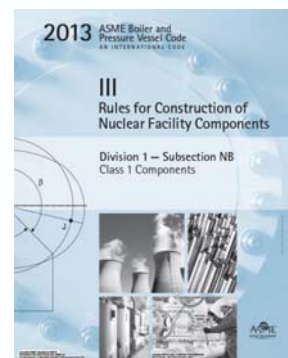
설계 및 평가기준 (계속)

□ ASME B&PV Code Sec. III

○ 1963년 초판 발행

○ 고품질 및 보수적 설계를 통해 원전의 안전 운전을 보장

➤ 급격한 파손 방지

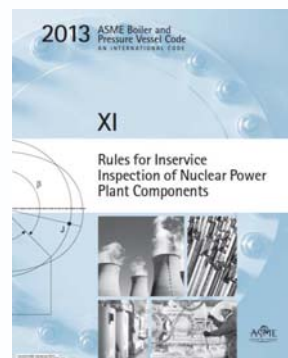


□ ASME B&PV Code Sec. XI

○ Sec. III에 따라 설계/제작/건설시 ISI 불필요 예상

○ 또한 방사선으로 인해 ISI 불가능 예상

○ 1966년 개발 착수, 원전 상업운전 이후인 1970년 초판 발행



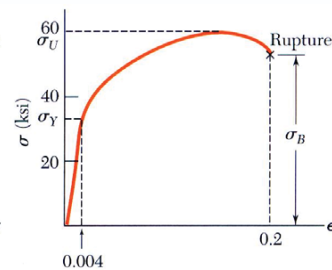
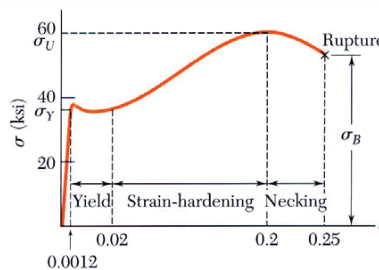
설계 방법

□ 설계 원칙

○ 최대응력 기준

- 운전기간 동안 작용하는 **최대 응력(σ_{max})**이 재료가 버틸 수 있는 **허용응력(S)**을 초과하면 안됨
- 이 때 적절한 **안전계수(n)** 고려

$$\sigma_{max} < \frac{S}{n}$$



설계 방법 (계속)

□ 설계 원칙 (계속)

○ 피로 기준

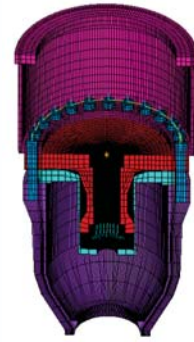
- 피로란 **항복강도 이하의 작은 하중이라도 반복적으로 작용할 때 구조물이 파손되는 현상**
- 운전기간 동안 반복적으로 작용하는 응력의 횟수가 재료가 버틸 수 있는 횟수를 초과하면 안됨



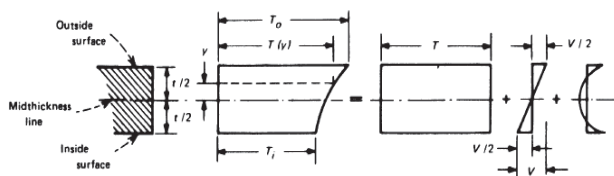
설계 방법 (계속)

□ 최대응력 기준 설계 절차

- 재료 선정 및 설비 배치
- 응력 해석 (ANSYS/ABAQUS 등 이용)
- 응력 선형화 (Stress Linearization)
 - Membrane Stress : 압력에 의한 응력 등
 - Bending Stress : 모멘트에 의한 응력 등
 - Secondary Stress : 열응력 등



○ 허용기준 만족여부 확인



| Stress Intensity | Allowable Design Stress Intensity | Yield Strength | Ultimate Tensile Strength |
|--|-----------------------------------|----------------|---------------------------|
| General Primary Membrane (P_m) | S_m | $\leq 2/3 S_y$ | $\leq 1/3 S_u$ |
| Local Primary Membrane (P_L) | $1.5 S_m$ | $\leq S_y$ | $\leq 1/2 S_u$ |
| Primary Membrane + Bending ($P_L + P_b$) | $1.5 S_m$ | $\leq S_y$ | $\leq 1/2 S_u$ |
| Primary + Secondary ($P_L + P_b + Q$) | $3 S_m$ | $\leq 2 S_y$ | $\leq S_u$ |

설계 방법 (계속)

□ 피로 기준 설계 절차

- 응력 해석 (ANSYS/ABAQUS 등 이용)
- 교번응력 및 허용 반복횟수 도출

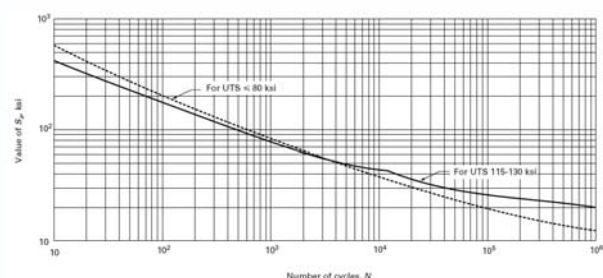
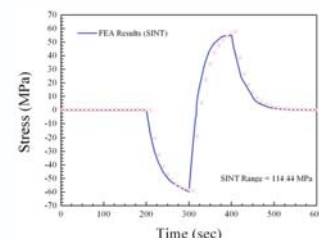
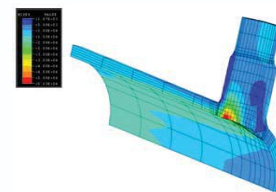
$$S_{alt} = K_e \frac{S_p}{2}$$

- S-N 곡선에서 허용 반복횟수 도출
- 설계 또는 실제 운전 횟수와 비교

$$U = \frac{n}{N}$$

○ 피로 만족여부 확인

- Total U = CUF = < 1.0

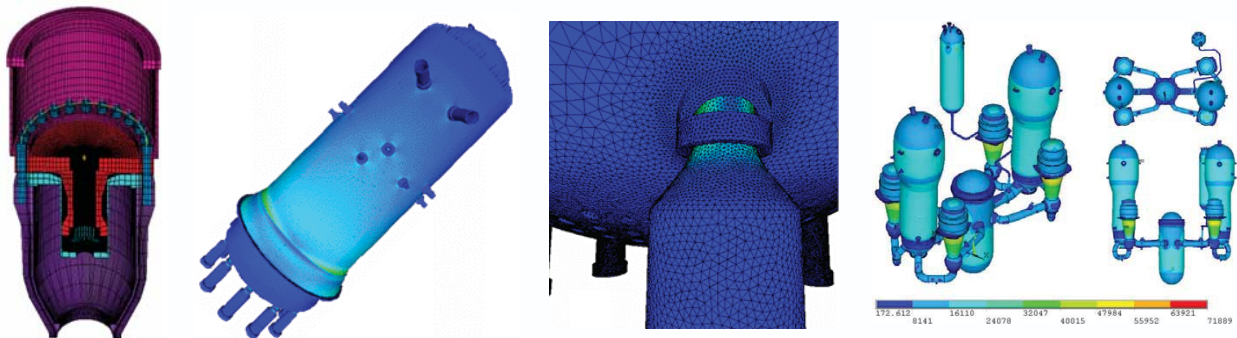


설계 방법 (계속)

□ 활용되는 수치해석의 범위

○ 유한요소해석 (FEA)

- Static Stress, Thermal Analysis
- Modal & Response Spectrum Analysis
- Implicit / Explicit Dynamic Analysis
- Non-linear Analysis (Plasticity) 등



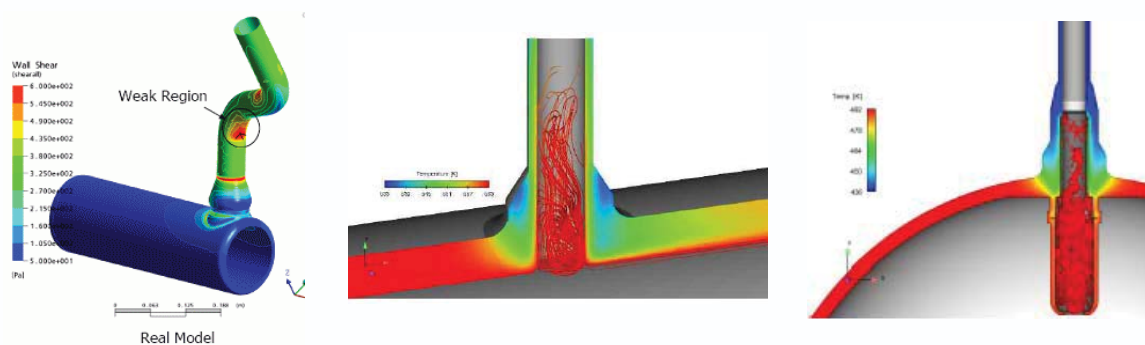
설계 방법 (계속)

□ 활용되는 수치해석의 범위

○ 전산열유체해석 (CFD)

- Single/Multi-Phase Analysis
- Phase Change Analysis

○ FSI (Fluid-Structure Analysis)



[원전 설계 및 건전성평가]

원전 기기/배관의 주요 손상사례 (계속)

□ 원전의 손상기구 : ASME Sec. III, App. W

Corrosion

1. Stress Corrosion Cracking
2. General Corrosion And Wastage
3. Pitting Corrosion
4. Crevice Corrosion and Denting
5. Intergranular Corrosion Attack
6. MIC and fouling
7. Corrosion Fatigue
8. Flow Accelerated Corrosion
9. Erosion and Erosion-Corrosion

Embrittlement

1. Irradiation Assisted SCC
2. Thermal Aging
3. Irradiation Embrittlement
4. Hydrogen Damaged Embrittlement, Delayed Cracking

Others

1. Fretting and Wear
2. Thermal Fatigue
3. Dynamic Loading
4. Creep

원전의 운영 및 정비

□ 운전

- 약 14개월 운전 후 핵연료 교체

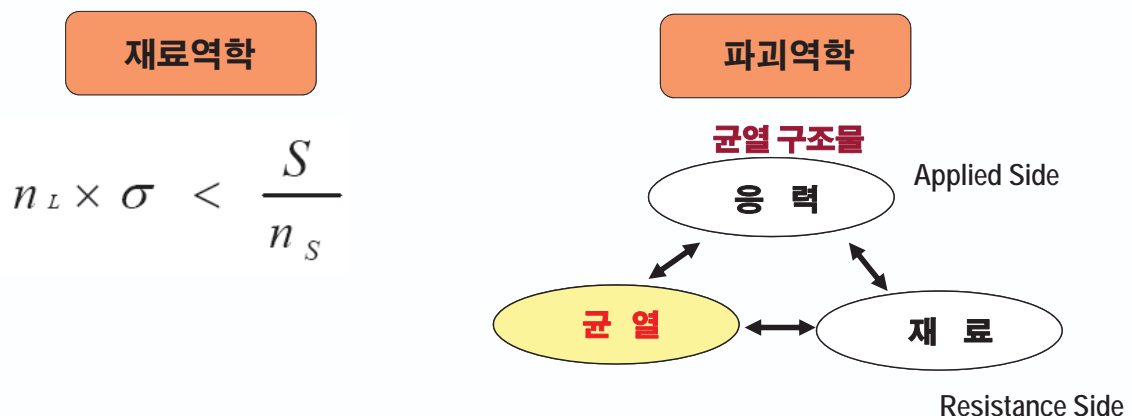
□ 시험, 검사, 정비

- 매 14개월마다 약 2개월간 발전소 정지
 - 각 기기/구조물/계통의 시험 : 성능시험 및 안전성 확인 시험
 - 검사 : NDE (VT, UT, MT, ECT, PT 등)
 - 정비 및 보수 : 소모품 교체 및 노후 기기 보수

파괴역학적 평가

□ 파괴역학의 정의

- 재료과학의 한 분야로 균열 (Crack) 또는 결함 (Flaw)이 존재하는 구조물의 변형/파손을 다루는 학문
 - 구조물의 수명평가, 파손 방지 목적



파괴역학적 평가 (계속)

□ 파괴역학 평가를 위한 2가지 요소



외부 응력/변형에 의한 균열 진전력
(Crack Driving Force)

V or \wedge

구조물(재료)의 균열 저항력
(Material Resistance)

공학적 계산
또는 수치해석



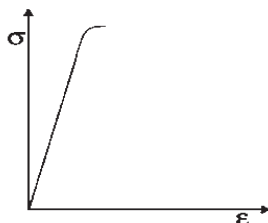
정량적 비교
(파괴역학 매개변수)

실험

파괴역학적 평가 (계속)

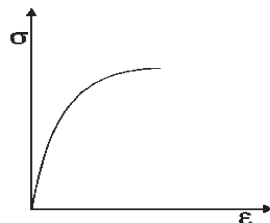
Fracture Mechanics

Linear Elastic
Fracture Mechanics
(LEFM)



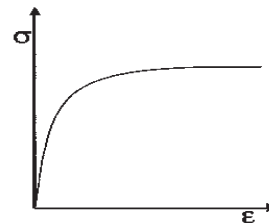
- Brittle Materials
- High Strength/
Low Toughness
- Ferritic Steel at
Low Temperature

Elastic-Plastic
Fracture Mechanics
(EPFM)



- Semi-Ductile Materials
- Moderate Toughness
- Ferritic Steel at
High Temperature
- Stainless Steels and
Weldments (SAW and
SMAW)

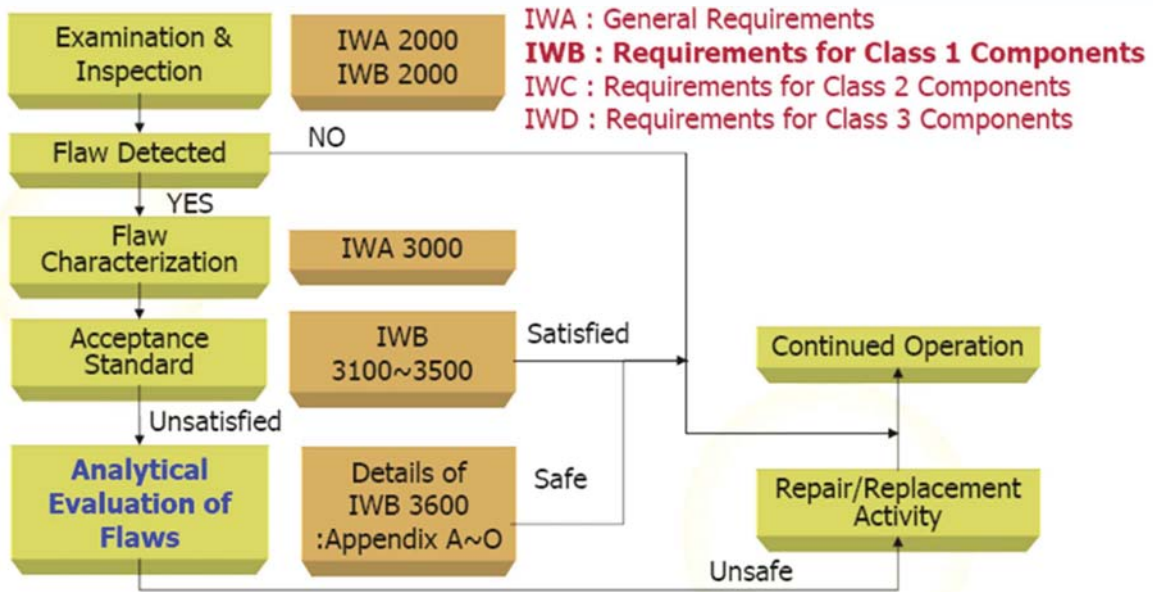
Limit Load
(Net Section
Plastic Collapse)



- Very Ductile Materials
- High Toughness
- Stainless Steel Base
Metal and GTAW
Weldments

파괴역학적 평가 (계속)

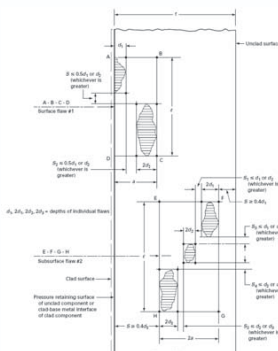
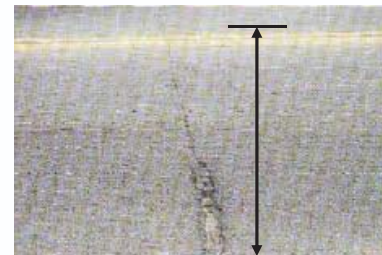
□ ASME 코드 Sec. XI에 따른 평가 절차



파괴역학적 평가 (계속)

□ ASME 코드 Sec. XI에 따른 평가 절차

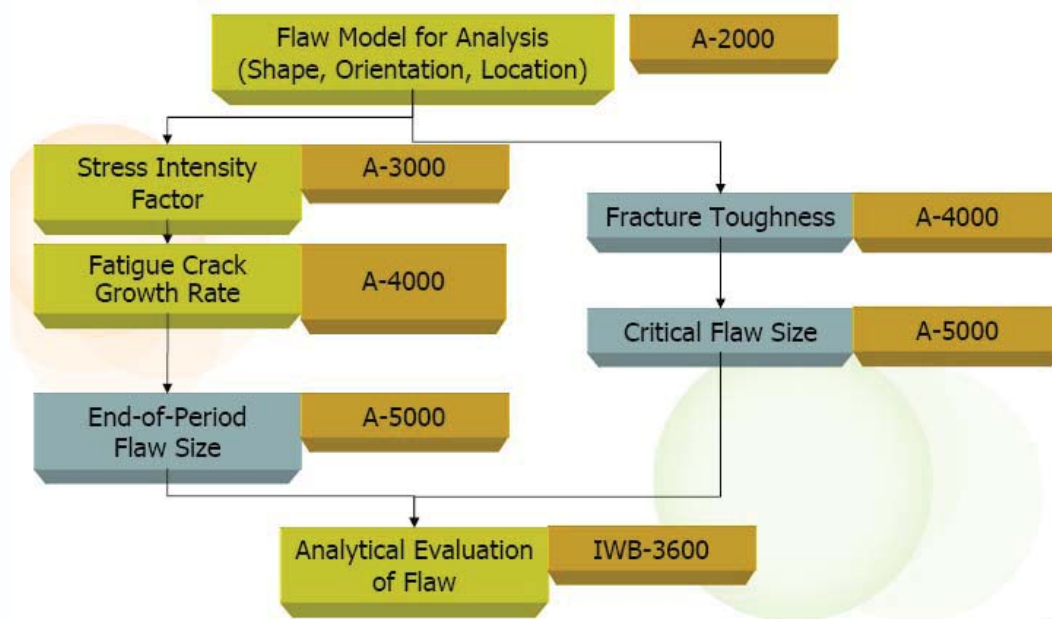
- 가동중검사(ISI)에서 결함/균열 검출
- IWA-3000 이용 결함형상 이상화
- IWB-3000 이용 허용크기와 비교
 - 요건 만족시 평가 종료
 - 불만족시 상세평가 수행



| Aspect Ratio, ¹ a/t | Volumetric Examination Method, Nominal Wall Thickness, ^{1,2} t, in. (mm) | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| | 2½ (65) and less | | 4 (100) to 12 (300) | | 16 (400) and greater | |
| | Surface Flaw, ⁵ a/t, % | Subsurface Flaw, ^{3,4} a/t, % | Surface Flaw, ⁵ a/t, % | Subsurface Flaw, ^{3,4} a/t, % | Surface Flaw, ⁵ a/t, % | Subsurface Flaw, ^{3,4} a/t, % |
| 0.0 | 3.1 | 3.4 y ^{4.00} | 1.9 | 2.0 y ^{1.00} | 1.4 | 1.5 y ^{4.00} |
| 0.05 | 3.3 | 3.8 y ^{0.96} | 2.0 | 2.2 y ^{0.90} | 1.5 | 1.7 y ^{0.91} |
| 0.10 | 3.6 | 4.3 y ^{0.72} | 2.2 | 2.5 y ^{0.69} | 1.7 | 1.9 y ^{0.69} |
| 0.15 | 4.1 | 4.9 y ^{0.48} | 2.5 | 2.9 y ^{0.47} | 1.9 | 2.1 y ^{0.43} |
| 0.20 | 4.7 | 5.7 y ^{0.30} | 2.8 | 3.3 y ^{0.47} | 2.1 | 2.5 y ^{0.45} |
| 0.25 | 5.5 | 6.6 y ^{0.45} | 3.3 | 3.8 y ^{0.61} | 2.5 | 2.8 y ^{0.57} |
| 0.30 | 6.4 | 7.8 y ^{0.84} | 3.8 | 4.4 y ^{0.77} | 2.9 | 3.3 y ^{0.75} |
| 0.35 | 7.4 | 9.0 y ^{0.99} | 4.4 | 5.1 y ^{0.93} | 3.3 | 3.8 y ^{0.90} |
| 0.40 | 8.3 | 10.5 y ^{4.00} | 5.0 | 5.8 y ^{1.00} | 3.8 | 4.3 y ^{4.00} |
| 0.45 | 8.5 | 12.3 y ^{4.00} | 5.1 | 6.7 y ^{1.00} | 3.9 | 4.9 y ^{4.00} |
| 0.50 | 8.7 | 14.3 y ^{4.00} | 5.2 | 7.6 y ^{1.00} | 4.0 | 5.6 y ^{4.00} |

파괴역학적 평가 (계속)

□ 상세 결함 건전성평가 절차



9

파괴역학적 평가 (계속)

□ 상세 결함 건전성평가 절차 (계속)

○ 다음 운영기간까지 결함 성장량 계산

- 각 운전 조건별 응력확대계수 차이(ΔK) 계산

$$K_I = [\sigma_m M_m + \sigma_b M_b] \sqrt{\pi a/Q}$$

- 균열성장곡선 이용 균열의 성장량 계산

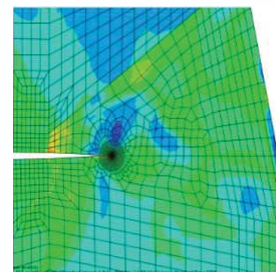
$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$$

- 최종 결함크기 (a_f) 도출

○ 허용기준과 비교

○ 요건 만족시 평가 종료

- 불만족시 보수 또는 교체



[PSR 및 계속운전]

PSR/계속운전 필요성

- 가동원전의 건전성 확인 필요
 - 10년 주기의 주기적안전성평가
 - 설계수명 이상 계속운전
 - *Continued Operation or LR*



Is NOT : Life Extension

Allows continued operation if:

- Plant safety is maintained,
- Environmental impacts (EQ) are addressed,
- Ageing management
- Owner decides to continuously operate based on cost and benefit analysis

세계 각국의 계속운전 제도

□ 운영허가 갱신 (License Renewal) 제도

- 운영허가 만기 전 허가내용을 갱신하여 계속운전을 허용(미국)

□ 주기적안전성평가(Periodic Safety Review) 제도

- 일정 주기(10년)로 원전의 종합안전성을 평가하여 계속운전에 적용
- 영국, 프랑스, 일본 등 대부분의 원전 운영국에서 운용
- 스페인 등 일부 국가는 PSR 결과를 반영하여 허가기간을 갱신하는 제도 운용(한국과 유사)

세계 각국의 계속운전 제도 (계속)

| 구 분 | | 주기적안전성평가(PSR) 제도 | 운영허가갱신(LR) 제도 |
|-------|----|------------------------------|---------------------------------|
| 목 적 | | 가동년수 증가에 따른 원전 안전성 종합평가 및 확인 | 운영허가기간 이후의 계속운전에 대한 안전성 평가 및 확인 |
| 실시시기 | | 매 10년 주기 | 허가기간 만료 이전(20~5년전) |
| 평가범위 | | 경년열화, 안전성분석 등 14개 안전인자 | 경년열화 및 환경영향에 초점 |
| 평가절차 | | 취약점 도출 및 우선순위 따른 개선조치 | 열화관리 평가 후 필요 시 계획 보완, 기기정비, 교체 |
| 결과조치 | | 계속운전 또는 운전정지 | 허가연장 또는 허가종료 |
| 열화 평가 | 대상 | 안전관련 기기 | 안전관련 장수명수동형기기 |
| | 방법 | 향후 10년 경년열화 관리계획 평가 | 향후 20년(연장허가기간)의 경년열화 관리 계획 평가 |

세계 각국의 계속운전 제도 (계속)

□ 국가별 운영현황

| 구분 | 국가 | 특징 |
|----------|------|---|
| PSR | 프랑스 | <ul style="list-style-type: none"> 원자력시설 운영허가에 대한 기간 제한 없음 10년 주기의 안전성재평가(PSR) 수행 |
| | 일본 | <ul style="list-style-type: none"> 주기적안전성평가 제도를 활용하여 계속운전 허용여부 결정 ➢ 13개월 주기의 정기검사 병행 |
| | 영국 | <ul style="list-style-type: none"> 규제기관에 원전 허가발급 및 허가조건 부과 권한 부여 ➢ 10년 주기의 PSR 수행결과 안전성이 입증되면 보완사항의 준수를 전제로 계속운전 허용 |
| | 캐나다 | <ul style="list-style-type: none"> 6개월 ~ 5년 주기(통상 2년)로 운영허가 갱신 운영허가기간은 별도로 지정 않고 규제기관에서 원전의 안전수준과 운영 성적 등을 종합적으로 평가하여 갱신 허가를 발급 |
| LR | 미국 | <ul style="list-style-type: none"> 운영허가갱신 법규 : 10CFR54 (License Renewal Rule) 운영허가 갱신 절차 및 기술적 요건 규정 장수명 피동형 구조물 및 기기의 열화관리를 중심으로 심사 ➢ 범위선정(Scoping), 종합원전평가(IPA), 시간제한경년열화분석(TLAA) |
| PSR + LR | 우리나라 | <ul style="list-style-type: none"> PSR의 14개 안전인자 LR의 수명평가, 방사선환경영향 평가 |

주기적안전성평가(경년열화)

□ 경년열화 관련 분야 (원안법 시행규칙 제20조)

- 원자로시설의 설계에 관한 사항
- 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기의 실제 상태에 관한 사항
- 경년열화에 관한 사항
- 원자력발전소 운전경험 및 연구결과의 활용에 관한 사항

주기적안전성평가(경년열화)

□ 경년열화에 관한 사항

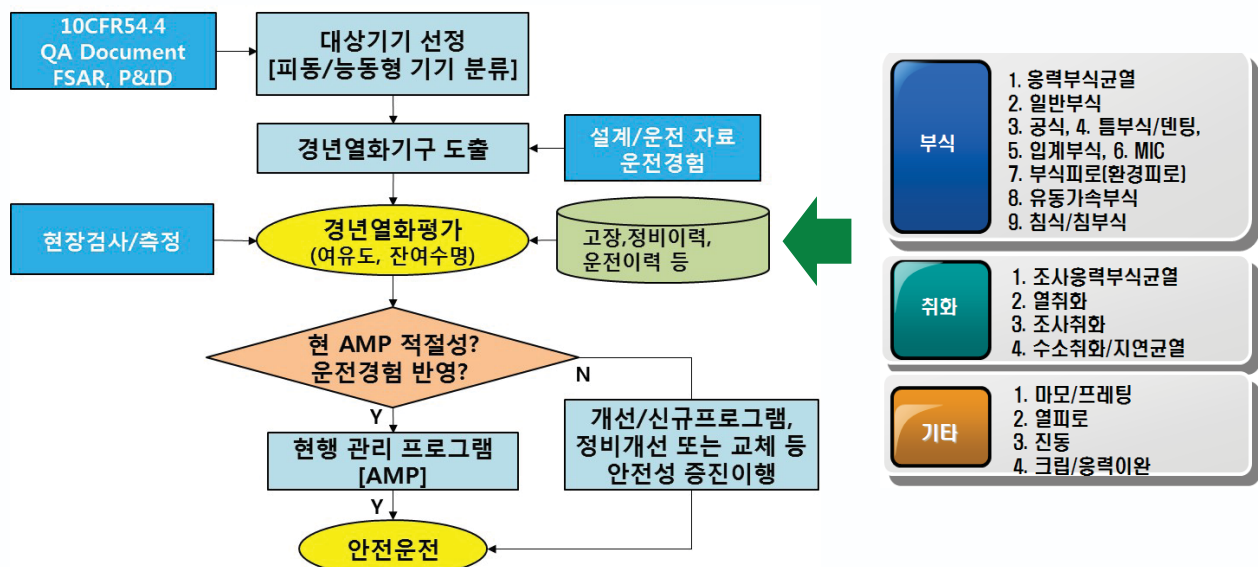
- 평가대상 구조물·계통 및 기기의 분류 및 선정
- 평가대상 구조물·계통 및 기기별 경년열화현상 분석
- 경년열화현상에 따른 구조물·계통 및 기기의 기능 및 안전 여유도
- 구조물·계통 및 기기의 성능미달시점 및 미래상태 예측
- 구조물·계통 및 기기의 경년열화 완화대책 및 관리계획

□ 원자력발전소 운전경험 및 연구결과의 활용에 관한 사항

- 원자로시설의 운전경험·연구 결과의 반영을 위한 계획 및 체제의 적절성
- 원자로시설의 운전경험·연구 결과의 반영 및 조치방안

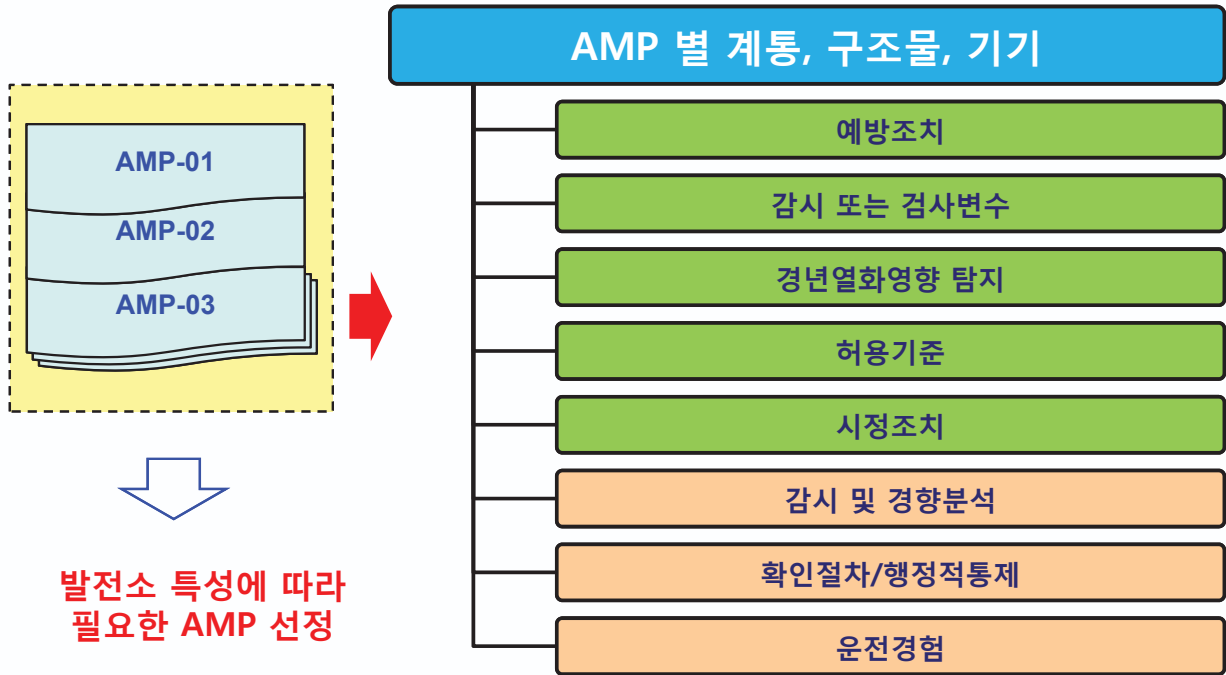
주기적안전성평가(경년열화)

□ 경년열화 평가절차



경년열화관리

□ 경년열화관리 계획



[주요 실적]

주기적안전성평가(PSR)

기술개요

- 원전 계통 및 기기의 시간경과에 따른 현 상태와 경년열화상태 및 관리 프로그램의 적절성을 평가하여 안전성 증진방안을 도출하고 이를 이행
- 대상기기 선정, 경년열화현상 분석, 경년열화평가 및 경년열화관리
- 관련근거 : 원자력안전법 제23조

주요실적



| | |
|------------------|------------------------|
| Westinghouse형 원전 | 고리 1,2,3,4, & 한빛 1,2호기 |
| CANDU 형 원전 | 월성 1,2,3,4호기 |
| CE형 원전 | 한빛 3,4호기 |
| OPR-1000 원전 | 한울 3,4,5,6 및 한빛 5,6호기 |
| Framatome 형 원전 | 한울 1,2호기 |

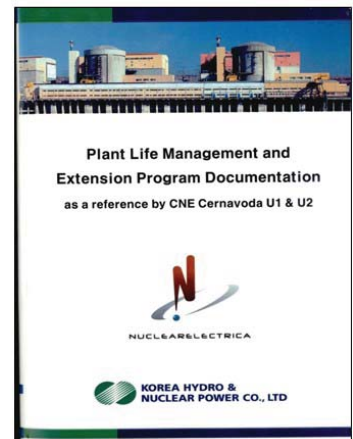
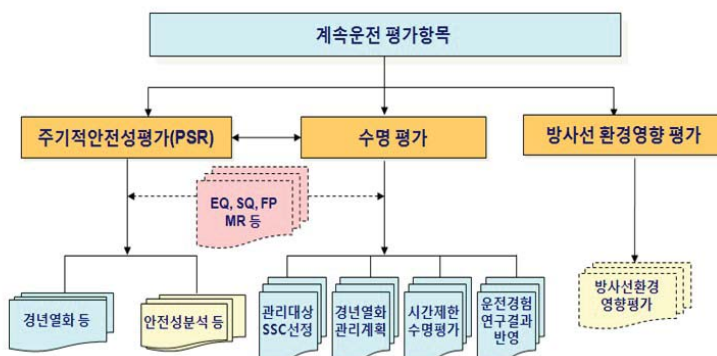
계속운전 안전성평가

기술개요

- 설계수명 이후 계속운전을 위한 안전성 평가
- 관련근거 : 원자력안전법 시행규칙 제21조

주요실적

- 고리 1, 월성 1호기 계속운전 안전성 평가
- 계속운전 관련 기술보고서 해외수출



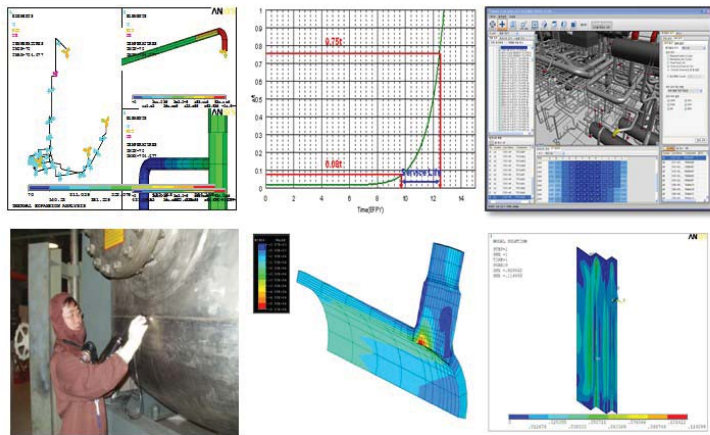
기기 건전성 평가

I 기술개요

- 원전 주요설비의 경년열화로 인한 건전성 확보가능 여부 평가

I 평가범위

- 피로평가 및 감시
- 환경피로
- 조사응력부식균열
- 유동가속부식
- 일차수응력부식균열
- 열취화
- 일반부식
- 조사취화
- 열풀림



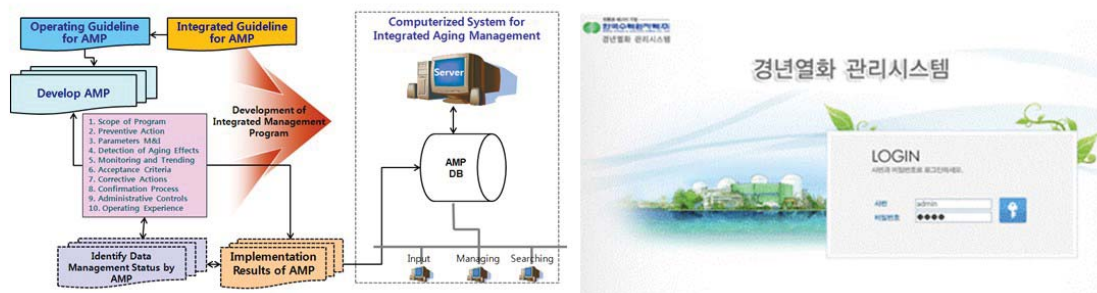
경년열화관리 프로그램 개발

I 기술개요

- 계속운전 대상 원전을 포함한 20년 이상 가동원전에 대해 경년열화 관리를 위한 관리시스템 구축 및 운영

I 주요실적

- 고리 1호기(34종) 및 월성 1호기(40종)
- 20년 이상 가동원전
 - 고리 2,3,4 / 한빛 1,2 / 한울 1,2



5. 방재 및 비상대응 능력

맺음말

□ 안전성 강화

- 가동원전의 안전성 강화활동 중요
- PSR, 계속운전 절차 관련 원자력안전법은 국제 기준에 부합
- 후쿠시마 후속조치로 계속운전 원전 수준의 경년열화관리 수행

□ 경제성 확보

- 계속운전은 미래 전력수요 충당을 위한 현실적 해결방안(특히, 국내)
- 국내 기술로 고리 및 월성1호기 계속운전 인허가 획득 및 해외수출
(루마니아 원자력공사)



THANK
YOU.