



# 주기적 안전성 평가에서의 경년 열화 평가 방법론

**박홍배 · 진태은**

한국전력기술(주)

**문호림 · 박준현 · 정일석**

한전 전력연구원

## 서론

주기적 안전성 평가란 가동 원전에 대해 경년 열화, 시설 변경, 운전 경험, 기술 발전 등의 누적 영향을 고려하여 수명 기간 동안 안전 수준 유지를 보증하기 위하여 10년 주기로 수행되는 체계적 안전성 평가를 말하며 원자력법 시행규칙 제 19의 2에 기술된 바와 같이 11개의 안전 인자에 대해 평가한다.

이 중 경년 열화는 「실제 물리적 조건」, 「경년 열화」 그리고 「원전 운전 경험 및 연구 결과의 활용」의 3개 안전 인자를 대상으로, 발전소의 현재 물리적 상태를 파악하여 주요 설비의 경년 열화 및 잔존 수명

을 평가하고 적절한 경년 열화 관리 방안을 수립함으로써 가동 원전의 안전성을 확보하는 것이다. 이를 위해 경년 열화 평가는 아래와 같이 세 업무 영역으로 구분되어지며 이를 개략적으로 나타내면 <그림 1>과 같다.

- 발전소 현재 물리적 상태 확인 : 주요 계통 · 기기 · 구조물의 설계 요건 및 특성, 발전소 운전 및 시험, 검사, 정비 이력 등을 조사하여 발전소의 현재 물리적 상태를 확인한다.

- 수명 평가 및 경년 열화 관리 평가 : 주요 계통 · 기기 · 구조물을 중심으로 원전의 안전성 향상 및 건전성 확보를 위해 가동 연수 증가에 따른 경년 열화 및 잔존 수명을 평가하고 경년 열화 관리 방안을 수립한다.

- 경년 열화 관리 프로그램 이행 및 기록 관리 평가 : 종합적인 경년 열화 관리 프로그램 이행 절차를 수립하고 데이터 베이스를 구축하여

차기 주기적 안전성 평가에 활용토록 한다.

## 평가 범위/방법

발전소 현재 물리적 상태 및 경년 열화 평가 대상 계통 · 기기 · 구조물을 최종 안전성 분석 보고서 (FSAR) 및 PUMAS/N-Ⅲ (Power Unit Maintenance System for Nuclear Ver.Ⅲ)와 현재 유효한 기술 기준을 근거로 도출하였다.

### 1. 평가 범위

해당 호기 계통 · 기기 · 구조물 중 경년 열화 평가 대상 계통 · 기기 · 구조물과 관련하여 다음 사항을 도출하였다.

- 전체 계통 및 평가 계통 목록
  - 평가 구조물 목록
  - 평가 계통별 평가 기기 목록
- 가. 선정 기준

- 선정 기준은 원자력법 시행령 제42조의 제1항, 제42조의4 제4

호, 원자력법 시행규칙 제19조, 제19조의 3(주기적 안전성 평가의 기준)을 근거로 원자력발전소의 종합적인 안전성과 향후 안전 운전의 확보와 관련 있는 기기를 선정하였다.

• 원자로 시설 등의 기술 기준에 관한 규칙 제12조에서 49조에 명시된 원자로 시설의 구조·설비 및 성능에 관한 기술 기준

• 선정 기준

-안전성 등급 품목 : 품질 등급

Q

-안전성 영향 등급 품목 : 품질 등급 T

-기타 안전성 관련 품목 : 화재 방호, 기기 검증, 가압 열충격, 원자로 정지 불능 사고, 소내 정전 사고 관련 품목

-규제 기관 요구 관련 품목 : 과학기술부 지적 사항, 권고 사항 관련 품목

• 계통·기기·구조물의 안전 등급과 품질 등급의 관계를 <표 1>에 정리하였다. 신뢰성 품목은 발전소 안전과 무관하므로 평가에서 제외되나 상기의 성전 기준에 해당되는 것은 평가 대상에 포함하였다.

① 안전성 등급 품목

안전성 등급 품목은 품질 등급 'Q'에 해당하며 이는 설계 기준 사고의 진행 또는 사고 후 아래의 세 가지 기능을 보장하기 위한 것이다 (10CFR100 Appendix AVI (a)(1), 10CFR21.3 (a)(1), 10CFR50.49

발전소  
현재 물리적  
상태 확인

FSAR, PUMAS, P&ID 등을 중심으로 일반 사항, 기기 구성/기능, 설계/운전 특성, 시험/검사/정비 이력, 관리 프로그램, 자료 관리 체계 등 관련된 모든 자료를 참조하여 평가

수명 평가  
및 경년 열화  
관리 평가

FSAR, PUMAS 등을 중심으로 대상 계통·구조물 및 기기를 선정하고 운전/정비 이력, 경년 열화 진단을 통하여 수명을 평가하고 주요 경년 열화 기구에 대한 관리 방안 수립

경년 열화  
관리 프로그램  
이행 및  
기록 관리 평가

경년 열화 관리 프로그램 이행 절차를 수립하고 경년 열화 관리 DB를 구축하여 기기들에 대한 경년 열화 관련 데이터를 구축함  
-대상 계통 및 기기별 운전/정비, 경년 열화 관리 사례  
-경년 열화 관리 프로그램 목록 및 이행 방안

⇒ 이대 원전 운전 경험 및 연구 결과의 활용을 반영하여 수행함

<그림 1> 경년 열화 평가 업무 범위

(b)(1).

• 원자로냉각재 압력 경계의 건전성 유지

• 원자로의 정지 능력과 안전 정지 상태를 유지하는 기능

• 10CFR Part 100 지침과 비교할 만한 잠재 소의 노출을 초래할 수 있는 사고의 결과를 방지하거나 완화하는 기능

② 안전성 영향 등급 품목

안전성 영향 등급 품목은 품질 등급 'T'에 해당하며 ANS 51.1, 3.3.1.4에 따라 아래의 기능을 수행하는 기기를 말한다. 과기부고시 제94-10호에서 이를 비안전 등급으로 부르고 있으나 일반적으로 국내 원전에서는 안전성 영향 등급 품목으로 분류하고 있으며, 이를 주기적 안전성 평가에 포함시켰다[3~6].

이외의 신뢰성 품목, 즉 과기부고시 제94-10호에서 안전 등급과 비안전 등급으로 언급된 이외의 품

목은 발전소 안전과 무관하므로 평가에서 제외하였다.

• 방사성 폐기물의 공정·추출·밀봉·저장

• 원자로 냉각재 계통과 연료 저장 계통의 방사성 물질 세정

• 중성자 흡수체의 재사용을 위한 방사성 폐기물의 추출

• 방사성 유출물의 감시

• 기기 고장이 안전 관련 기기의 기능을 방해

• ANS 51.1, 3.3.1.4의 기능을 수행하는 기기의 지지

• 안전 관련 기기 또는 운전원 보호

• 방사성 물질과 관련한 운전·보수·사고후 회복

• 안전 정지 또는 유지와 관련된 안전 관련 기기의 환경 조성

• 사용 후 핵연료 취급

• 저장 연료의 방사능 제어

• 화재 후 안전 정지와 관련한 안

전 등급 2, 3 기기의 보호

• 아래의 변수 감시

-기술 지침서의 운전 조건(재장전 용수 저장 탱크 수위, 안전 관련 냉각수 온도)

-보호 계통의 상황 지시

-안전 관련 기기의 상황 지시

-사고 후 조사 관련 원인 또는 결과 결정 관련 변수

③ 기타 안전성 관련 품목

미국의 소급 적용 규정(back fitting rule)은 가동중인 원전의 안전성 향상을 위해 초기 인허가 연도에 관계없이 의무적으로 적용해야 하는 규정으로 세부 항목은 다음과 같다.

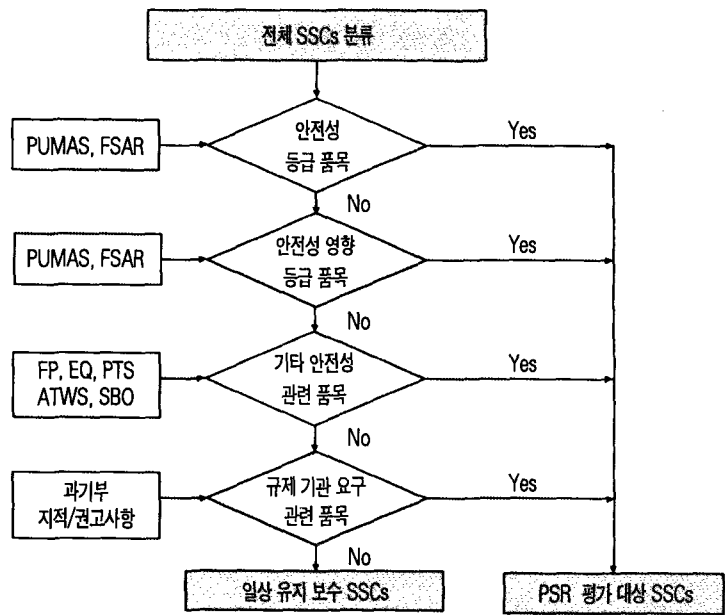
현재 고리 1호기의 경우에는 가압 열충격 평가를 완료하였고 화재 방호, 기기 검증, 원자로 정지 불능 사고, 소내 정전 사고 등은 현재 설비 개선을 계획하고 있거나 진행중이므로 향후 수년 이내에 소급 적용 규정을 모두 만족할 것으로 예상된다. 따라서 소급 적용 규정을 적용 받는 설비는 안전성 향상과 관련된 설비이므로 경년 열화 평가 대상에 포함되었다.

- 화재 방호(10CFR50.48)
- 기기 검증(10CFR50.49)
- 가압 열충격 평가(10CFR50.61)
- 원자로 정지 불능 사고(10CFR 50.62)
- 소내 정전 사고(10CFR50.63)

④ 규제 기관 요구 관련 품목

〈표 1〉 안전 등급 및 품질 등급 분류 체계

구분	안전성등급 품목			신뢰성 품목	분류 기준
안전 등급 (적용 코드)	Class 1 (ASME Code Section III NB)	Class 2 (ASME Code Section III NC)	Class 3 (ASME Code Section III ND)	Non-Class (ASME Sec. VIII ANSI API 제작사 규격)	ASME Code
지진 등급	I			I/I	Reg. Guide 1.29
호청 등급	Q Class			R Class	-
품질 등급	A	B	C	D	Reg. Guide 1.26



〈그림 2〉 평가 대상 계통·기기·구조물 선정 절차

신뢰성 품목인 품질 등급 'R'에 해당하는 기기 중 발전소의 안전성 향상을 위해 과학기술부가 지적 사항 또는 권고 사항으로 발급한 계통·기기·구조물 대상 기기에 포함하였다.

나. 선정 방법 및 결과

•〈그림 2〉는 선정 방법을 도시한 것으로서, 먼저 해당 호기 최종 안전성 분석 보고서(FSAR) 4~11장과 관련한 계통·기기·구조물 중 PUMAS/N-Ⅲ(Power Unit Maintenance System for Nuclear Ver.Ⅲ)를 이용하여 대상

계통·기기·구조물을 도출하였다.

• 품질 등급 Q, T에 해당하는 기기와 R에 해당하는 기기 중 기타 안전성 관련 품목과 발전소의 안전성 향상을 위해 과학기술부가 지적 또는 권고 사항으로 발급한 기기를 대상 기기에 포함하였다.

• 고리 1호기의 경우 FSAR 및 PUMAS 목록에 따라 108개 계통이 분류되었고 이중 73개 계통의 8,270개 기기를 평가 대상 기기로 선정하였다.

**다. 평가 내용**

경년 열화 평가에는 원자력법 시행규칙 제19조의2(주기적 안전성 평가의 세부 내용)의 1, 4, 6호인 '물리적 상태', '경년 열화', '운전 경험 및 연구 결과'를 다루고 있으며 세부 내용은 다음과 같다.

1. 원자로 시설의 평가 당시의 물리적 상태에 관한 사항

가. 계통·기기·구조물의 기능을 확인하기 위한 시험 결과

나. 계통·기기·구조물의 검사 결과 및 보수 기록

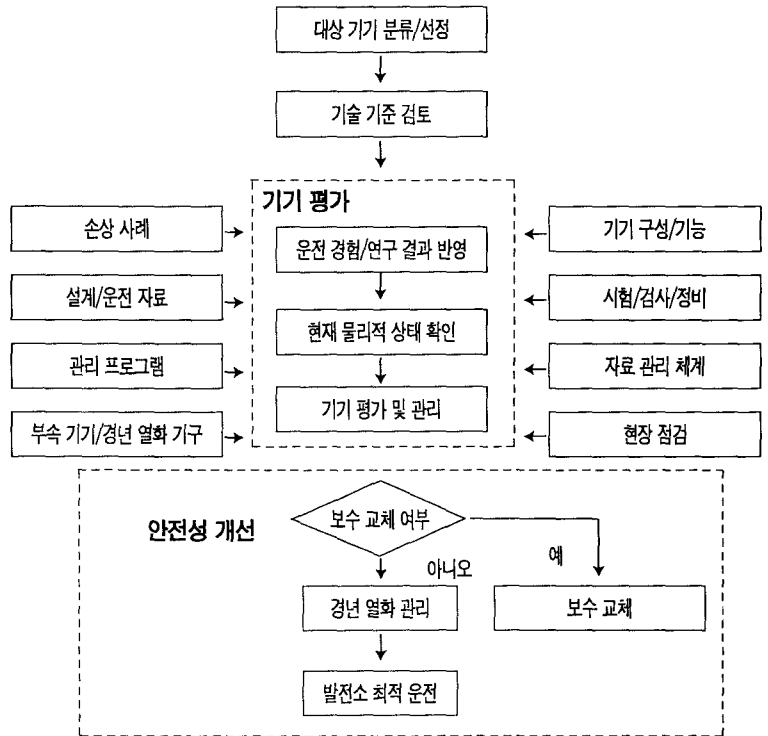
다. 계통·기기·구조물에 대한 현재의 물리적 상태

**4. 경년 열화에 관한 사항**

가. 평가 대상 계통·기기·구조물의 분류 및 선정

나. 평가 대상 계통 기기 구조물 별 경년 열화 현상 분석

다. 경년 열화 현상에 따른 계통·기기·구조물의 기능 및 안전



(그림 3) 경년 열화 평가 절차

여유도

라. 계통·기기·구조물의 성능 미달 시점 및 미래 상태 예측

마. 계통·기기·구조물의 경년 열화 완화 대책 및 관리 계획

6. 원자력 발전소 운전 경험 및 연구 결과의 활용에 관한 사항

나. 원자로 시설의 운전 경험·연구 결과의 반영 및 조치 방안

원자력법 시행규칙 제19조의2의 1호 중 '라', '마' 목과 6호의 '가' 목은 본 경년 열화 평가의 대상이 아니므로 제외한다.

**2. 평가 방법**

경년 열화 평가 대상 계통·기기·구조물의 설계 제작 자료와 최

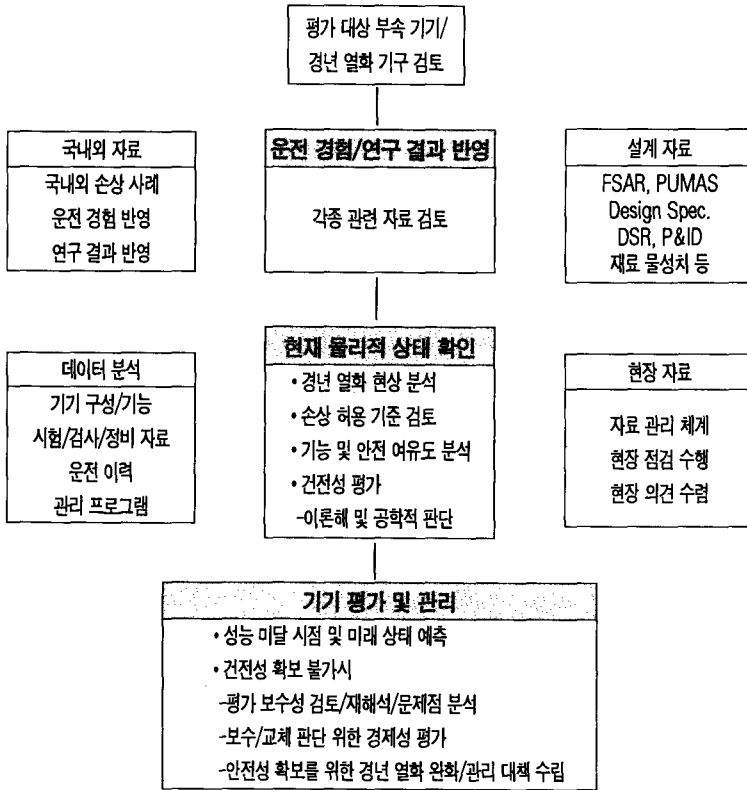
초 임계일 이후부터 시험·운전·정비 등 운영 자료를 참조하고 유효한 기술 기준을 근거로 하여 현재의 물리적 상태 및 경년 열화를 평가한다. 이를 위해 사용된 평가 방법은 다음과 같다.

• 해당 호기에 적용된 국내법을 포함한 관련 규제 요건과 기술 기준의 검토

• 국내외 운전 경험 및 연구 결과 등의 분석을 통해 현 상태, 경년 열화 평가 및 관리 계획에 반영 필요 사항 확인

• 평가 대상 부속 계통·기기·구조물의 분류 및 선정

• 설계·제작·설계 변경·시험·검사 및 보수 관련 자료 분석과



〈그림 4〉 기기 평가 및 관리 절차

현장 점검을 통한 현재 물리적 상태 확인

- 유효한 기록이 설비의 상태를 정확히 나타내는지 확인
- 경년 열화 현상 분석 및 평가
- 평가 시점부터 10년간 설비의 고유 기능 및 안전 운전을 유지하기 위한 안전 여유도 확인 및 미래 상태 예측
- 발전소에 적용중인 경년 열화 완화 대책 및 관리 계획이 안전 여유도를 보증하기에 적절한지 여부 검토
- 발전소 안전성 향상을 위한 개선 방안 도출

**기술 기준 검토**

기술 기준의 검토 목적은 안전성 평가 당시 해당 원자로 시설에 유효한 기술 기준을 활용하여 현 상태 확인 및 경년 열화를 평가하는 것으로 기술 기준 자체를 검토하는 것은 주기적 안전성 평가 본래의 취지에 맞지 않는다.

기술 기준에서는 법적 사항, FSAR 사항, 행정 조치, 규제 조치, 약속 사항, 기타 참고 기술 기준의 6개 항목으로 나누어 검토하였다.

- 법적 사항 : 원자력법, 동법 시행령, 동법 시행규칙 및 기술 기준,

과기부 고시에서의 내용을 기본으로 검토한다. 경년 열화에 있어 법적 사항은 원자로 시설의 설계 단계에 적용되는 것이 대부분이며 주기적 안전성 평가 관련 법적 사항들이 현 상태 및 경년 열화 평가와 관련된다.

- FSAR 사항 : FSAR상에 언급되어 있는 제반 Code 및 Standard 등을 검토한다.

- 규제 조치 : 규제 기관 또는 규제 위임 기관의 점검 검사, 수시 검사 및 품질 보증 검사의 지적 및 권고사항 등을 검토한다.

- 약속 사항 : FSAR 개정 사항, Tech, Spec. 개정 사항 등을 검토한다.

- 참고 기술 기준 : 해당 호기와 국내의 타호기에 적용된 기술 기준을 비교 검토한다.

**기기 평가 및 관리**

기기 평가에서는 앞에서 검토한 기술 기준들을 활용하여 경년 열화 평가를 수행하고 이를 바탕으로 기기 평가는 물론 안전성 개선 방향 도출에 이르기까지 일관성이 유지되도록 하는 것이 가장 중요하다. 기기 평가의 주요 단계별 내용을 정리하면 아래와 같으며 이를 도식적으로 나타내면 〈그림 4〉와 같다.

- 운전 경험 및 연구 결과 반영 : 국내외 발전소의 손상 사례, 운전

경험, 연구 결과 등을 조사 검토하여 해당 기기에 반영되었거나 안전성 개선을 위하여 반영될 필요성이 있는 사항들을 검토하여 기술한다.

- 현재 물리적 상태 확인 : 평가 대상 계통·기기 및 구조물의 구성 및 기능을 확인하고 설계 및 운전 특성을 검토하고, 시험·검사·정비 등 운전 이력을 검토하며, 관리 프로그램 검토, 자료 관리 체계 등을 검토하여 현재 유효한 기록이 평가 대상 계통·기기 및 구조물의 상태를 정확히 나타내고 있는지를 확인한다.

- 기기 평가 및 관리 : 평가 대상 계통·기기 및 구조물의 경년 열화 현상을 분석하여 고유 기능 및 안전운전을 유지하기 위한 안전 여유도 확인, 그리고 성능 미달 시점 및 미래 상태를 예측하여 안전 여유도가 부족할 시 안전성 확보를 위한 경년 열화 완화 대책 및 관리 계획을 수립하여 안전 여유도가 보증되는지를 검토한다.

**안전성 개선 방향**

안전성 개선은 앞 절의 평가 결과에서 도출된 미진 사항 또는 개선 사항을 정리한다. 이 때 사항의 중요도에 따라 아래와 같이 안전 현안 사항, 완화 및 관리 대책, 그리고 권고 사항으로 구분한다.

개선 사항은 항목의 기술적 배경

과 중요성, 국내외 유사 사례, 필요 시기 및 소요 기간, 소요 예산, 제반 환경 요건, 타분야와의 기술 연계 사항, 기대 효과 등을 가능한 구체적으로 제시한다.

- 안전 현안 사항 : 기기 평가에서 도출된 개선 사항 중에서 설비의 교체 등 차기 주기적 안전성 평가 시기 이전에 긴급을 요하는 사항을 도출하여 제시한다.

- 완화 및 관리 대책 : 기기 평가에서 도출된 개선 사항 중에서 발전소의 안전성을 더욱 향상시키기 위해 기존 관리 프로그램의 개선이나 추가로 도입해야 할 필요성이 있는 프로그램 등을 장기(4~10년)·중기(2~3년)·단기(~1년)로 구분하여 제시한다.

- 권고 사항 : 운전 경험/연구 결과 반영, 현상태 확인, 그리고 기기 평가 관점에서 현재에도 수행되고는 있으나 지속적인 관심 또는 보다 철저한 수행이 필요한 사항 등을 기술한다.

**결론**

본 논문에서는 국내에서 처음으로 수행되는 주기적 안전성 평가의 한 인자인 경년 열화에 대해 평가 범위에 해당되는 계통·기기·구조물의 범위, 평가 방법, 기술 기준 검토, 기기 평가 및 관리, 그리고 안전성 개선 방향 등 경년 열화의

일반적인 평가 방법론을 기술하였다. 주기적 안전성 평가가 국내에서는 처음으로 수행되는 관계로 관련 법제의 정비, 평가 범위 및 방법, 기술 기준에 대한 해석, 평가의 내용 및 기술 등 여러 분야에 걸쳐 많은 개선 및 토론이 있어야 될 것으로 생각한다.

〈참고 문헌〉

1. 한수원(주). “고리 1호기 최종 안전성분석보고서”, 2000.
2. 한수원(주), “원전설비 정비관리시스템(PUMAS/N-Ⅲ, Power Unit Maintenance System for Nuclear Ver.Ⅲ)”, 2001.
3. Reg. Guide 1.26, “Quality Group Classification and Standards for Water-, Steam-, and Radioactive-Waste-Containing Components of Nuclear Power Plants”
4. Reg. Guide 1.29, “Seismic Design Classification.”
5. EPRI, Guidelines for the Safety Classification of Systems, Components, and Parts Used in Nuclear Power Plant Application, EPRI NP-6895, 1991.
6. ANS, Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants, ANS 51.1, 1983.