

주기적안전성평가에서의 경년열화평가 방법론
Aging Evaluation Method in Periodic Safety Review

박홍배, 진태은
한국전력기술주식회사
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

문호림, 박준현, 정일석
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

주기적안전성평가란 가동원전에 대해 경년열화, 시설변경, 운전경험, 기술발전 등의 누적영향을 고려하여 수명기간 동안 안전수준 유지를 보장하기 위하여 일정주기로 수행되는 체계적 안전성평가를 말하며 우리나라에서는 10년 주기로 수행하도록 원자력법시행령에서 제42조의2에서 제정하고 있다. 원자력법 시행규칙 제19조의2에서는 주기적안전성평가의 세부내용을 11개의 안전인자별로 기술하고 있으며 그중 가장 큰 비중을 차지하며 선진 외국에 비해 평가기술이 낙후된 분야가 경년열화 분야이다. 경년열화는 “실제 물리적 조건”, “경년열화” 그리고 “원전 운전경험 및 연구결과 등의 활용”의 3개 안전인자와 연관되며 발전소의 현재 물리적 상태를 파악하여 주요 설비의 경년열화 및 잔존수명을 평가하고 적절한 경년열화관리 방안을 수립함으로써 가동원전의 안전성을 확보하는 것이다. 본 논문에서는 국내에서 처음으로 수행되는 주기적안전성평가의 한 인자인 경년열화에 대해 평가범위에 해당되는 계통·기기·구조물의 범위, 평가방법, 기술기준 검토, 평가내용 그리고 안전성 개선방향 등 경년열화의 일반적인 평가 방법론을 기술하였다.

Abstract

Period safety review(PSR) is periodic and systematic safety review system to obtain plant safety considering aging, facilities change, operating experiences, technology development and so on. According to domestic regulations the evaluation period is 10 years and specific contents are suggested for 11 safety factors respectively. Among these "aging" is one of the most important and difficult factor. The evaluation of aging is related to "actual condition of the nuclear power plant", "management of aging", and "use of experience from other nuclear power plants and of research findings". The object of "management of aging" is to obtain plant safety through identifying actual condition and evaluating aging phenomena and residual life using operating experiences and research finding. The paper is describes the scope of aging, evaluation method, Code and Standards, evaluation of system, structure, and components, aging management program and safety issue and improving items, and etc.

1. 서론

주기적안전성평가란 가동원전에 대해 경년열화, 시설변경, 운전경험, 기술발전 등의 누적영향을 고

려하여 수명기간 동안 안전수준 유지를 보증하기 위하여 10년 주기로 수행되는 체계적 안전성평가를 말하며 원자력법 시행규칙 제19의2에 기술된 바와 같이 11개의 안전인자에 대해 평가한다. 이중 경년열화는 “실제 물리적 조건”, “경년열화” 그리고 “원전 운전경험 및 연구결과의 활용”의 3개 안전인자를 대상으로, 발전소의 현재 물리적 상태를 파악하여 주요 설비의 경년열화 및 잔존수명을 평가하고 적절한 경년열화관리 방안을 수립함으로써 가동원전의 안전성을 확보하는 것이다. 이를 위해 경년열화평가는 아래와 같이 세 업무 영역으로 구분되어지며 이를 개략적으로 나타내면 그림 1과 같다.

- 발전소 현재 물리적 상태 확인 : 주요 계통, 기기, 구조물의 설계요건 및 특성, 발전소 운전 및 시험, 검사, 정비이력 등을 조사하여 발전소의 현재 물리적 상태를 확인한다.
- 수명평가 및 경년열화 관리 평가 : 주요 계통, 기기, 구조물을 중심으로 원전의 안전성 향상 및 건전성 확보를 위해 가동연수 증가에 따른 경년열화 및 잔존수명을 평가하고 경년열화 관리방안을 수립한다.
- 경년열화 관리프로그램 이행 및 기록관리 평가 : 종합적인 경년열화 관리프로그램 이행절차를 수립하고 데이터베이스를 구축하여 차기 주기적안전성평가에 활용토록 한다.

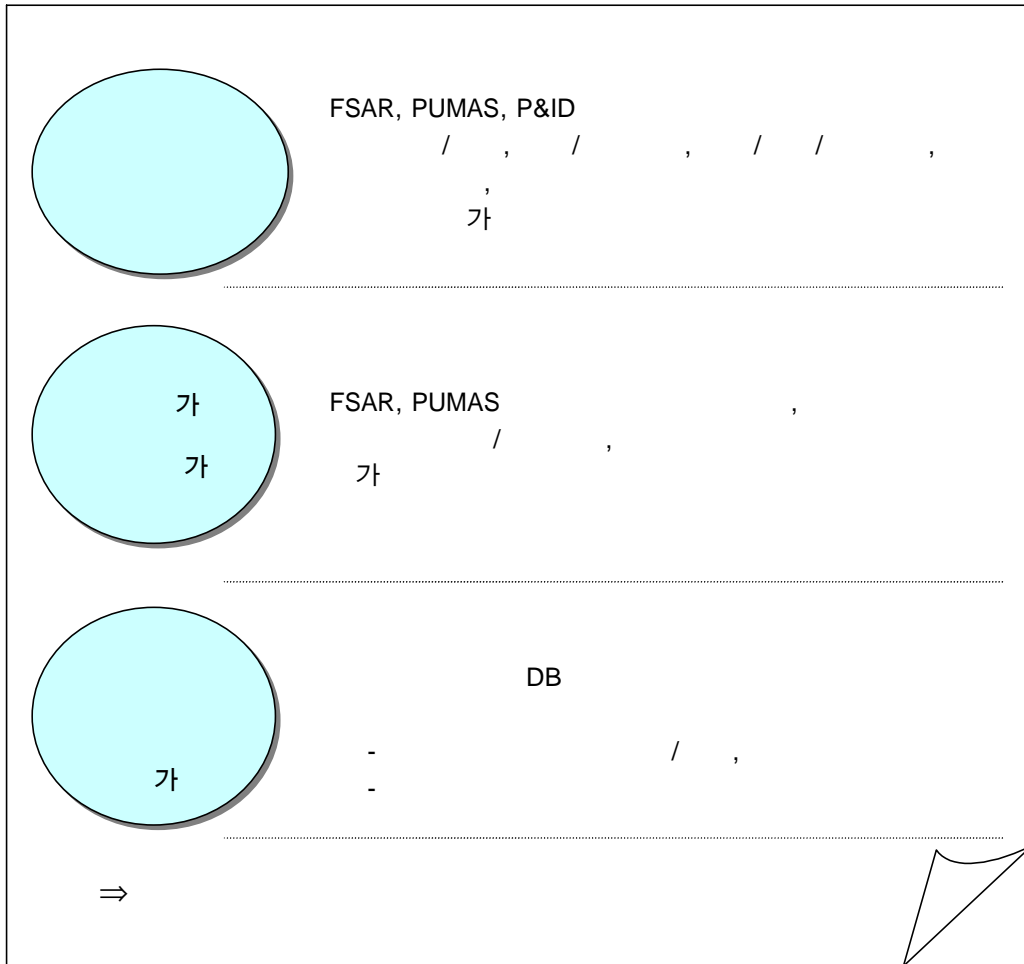


그림 1 경년열화평가 업무 범위

2. 평가범위/방법

발전소 현재 물리적 상태 및 경년열화평가 대상 계통·기기·구조물을 최종안전성분석보고서(FSAR) 및 PUMAS/N-III (Power Unit Maintenance System for Nuclear Ver. III)와 현재 유효한 기술기

준을 근거로 도출하였다[1,2].

2.1 평가범위

해당 호기 계통·기기·구조물 중 경년열화평가 대상 계통·기기·구조물과 관련하여 다음 사항을 도출하였다.

- 전체 계통 및 평가계통 목록
- 평가 구조물 목록
- 평가계통별 평가기기 목록

2.1.1 선정기준

- 선정기준은 원자력법 시행령 제42조의 제1항, 제42조의4 제4호, 원자력법 시행규칙 제19조, 제19조의 3(주기적안전성평가의 기준)을 근거로 원자력발전소의 종합적인 안전성과 향후 안전운전의 확보와 관련 있는 기기를 선정하였다.
- 원자로시설등의 기술기준에 관한규칙 제12조에서 49조에 명시된 원자로시설의 구조·설비 및 성능에 관한 기술기준
- 선정기준
 - 안전성등급 품목 : 품질등급 Q
 - 안전성영향등급 품목 : 품질등급 T
 - 기타 안전성 관련 품목 : 화재방호, 기기검증, 가압열충격, 원자로정지불능사고, 소내정전사고 관련 품목
 - 규제기관 요구관련 품목 : 과학기술부 지적사항, 권고사항 관련 품목
- 계통·기기·구조물의 안전등급과 품질등급의 관계를 표 1에 정리하였다. 신뢰성 품목은 발전소 안전과 무관하므로 평가에서 제외되거나 상기의 선정기준에 해당되는 것은 평가 대상에 포함하였다.

2.1.1.1 안전성등급 품목

안전성등급 품목은 품질등급 “Q”에 해당하며 이는 설계기준사고의 진행 또는 사고후 아래의 세 가지 기능을 보장하기 위한 것이다(10CFR100 Appendix A VI (a)(1), 10CFR21.3 (a)(1), 10CFR50.49 (b)(1)).

- 원자로냉각재 압력경계의 건전성 유지
- 원자로의 정지능력과 안전정지 상태를 유지하는 기능
- 10CFR Part 100 지침에 비교할 만한 잠재 소외노출을 초래할 수 있는 사고의 결과를 방지하거나 완화하는 기능

2.1.1.2 안전성영향등급 품목

안전성영향등급 품목은 품질등급 “T”에 해당하며 ANS 51.1, 3.3.1.4에 따라 아래의 기능을 수행하는 기기를 말한다. 과기부고시 제94-10호에서 이를 비안전등급으로 부르고 있으나 일반적으로 국내 원전에서는 안전성영향등급 품목으로 분류하고 있으며 이를 주기적안전성평가에 포함시켰다[3~6]. 이외의 신뢰성 품목 즉, 과기부고시 제94-10호에서 안전등급과 비안전등급으로 언급된 이외의 품목은 발전소 안전과 무관하므로 평가에서 제외하였다.

- 방사성폐기물의 공정, 추출, 밀봉, 저장
- 원자로냉각재계통과 연료저장계통의 방사성 물질 세정
- 중성자 흡수제의 재사용을 위한 방사성폐기물의 추출
- 방사성 유출물의 감시
- 기기 고장이 안전관련 기기의 기능을 방해
- ANS 51.1, 3.3.1.4의 기능을 수행하는 기기의 지지
- 안전관련 기기 또는 운전원 보호
- 방사성 물질과 관련한 운전, 보수, 사고후 회복
- 안전정지 또는 유지와 관련 안전관련 기기의 환경 조성
- 사용후 핵연료 취급
- 저장 연료의 방사능 제어
- 화재후 안전정지와 관련한 안전등급 2, 3 기기의 보호
- 아래의 변수 감시
 - 기술지침서의 운전조건(재발전 용수 저장탱크 수위, 안전관련 냉각수 온도)
 - 보호계통의 상황 지시
 - 안전관련 기기의 상황 지시
 - 사고후 조사관련 원인 또는 결과 결정관련 변수

2.1.1.3 기타 안전성 관련 품목

미국의 소급적용 규정(backfitting rule)은 가동중인 원전의 안전성 향상을 위해 초기 인허가 연도에 관계없이 의무적으로 적용해야 하는 규정으로 세부항목은 다음과 같다. 현재 고리 1호기의 경우에는 가압열충격평가를 완료하였고 화재방호, 기기검증, 원자로정지불능사고, 소내정전사고 등은 현재 설비개선을 계획하고 있거나 진행중이므로 향후 수년이내에 소급적용 규정을 모두 만족할 것으로 예상된다. 따라서 소급적용 규정을 적용받는 설비는 발전소 안전성 향상과 관련된 설비이므로 경년열화평가 대상에 포함하였다.

- 화재방호(10CFR50.48)
- 기기검증(10CFR50.49)
- 가압열충격평가(10CFR50.61)
- 원자로정지불능사고(10CFR50.62)
- 소내정전사고(10CFR50.63)

2.1.1.4 규제기관 요구관련 품목

신뢰성 품목인 품질등급 "R"에 해당하는 기기 중 발전소의 안전성 향상을 위해 과학기술부가 지적사항 또는 권고사항으로 발급한 계통, 기기, 구조물을 대상기기에 포함하였다.

표 1 안전등급 및 품질등급 분류체계

구 분	안전성등급 품목			신뢰성 품목	분류기준
안전등급 (적용코드)	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
지진등급	I			I/II	Reg. Guide 1.29
호칭등급	Q Class			R Class	-
품질등급	A	B	C	D	Reg. Guide 1.26

2.1.2 선정방법 및 결과

- 그림 1은 선정방법을 도시한 것으로서, 먼저 해당 호기 최종안전성분석보고서(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.
- 품질등급 Q, T에 해당하는 기기와 R에 해당하는 기기 중 기타 안전성 관련 품목과 발전소의 안전성 향상을 위해 과학기술부가 지적 또는 권고사항으로 발급한 기기를 대상기기에 포함하였다.
- 고리 1호기의 경우는 FSAR 및 PUMAS 목록에 따라 108개 계통이 분류되었고 이중 73개 계통의 8,270개 기기를 평가대상 기기로 선정하였다.

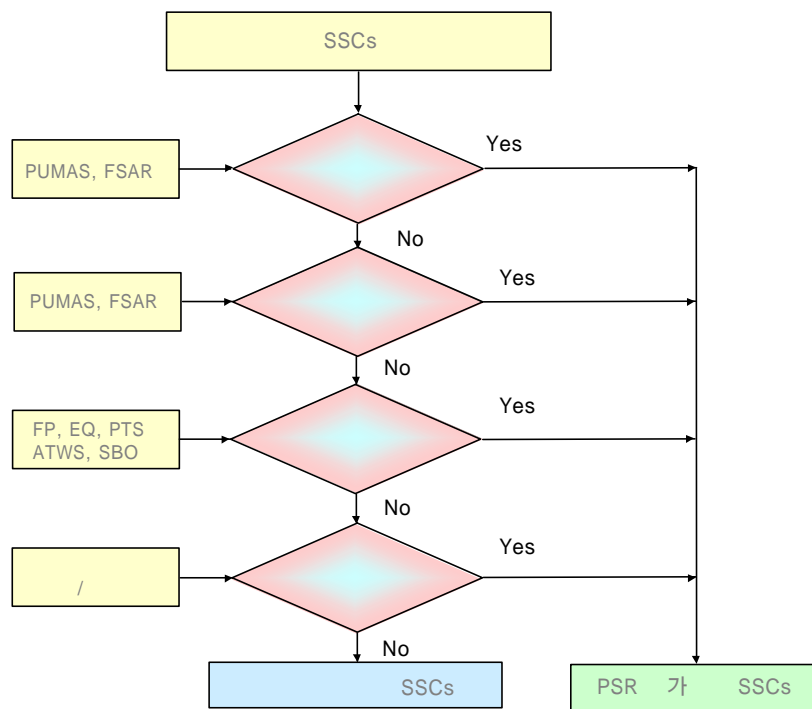


그림 2 평가대상 계통·기기·구조물 선정 절차

2.1.3 평가내용

경년열화평가에는 원자력법 시행규칙 제19조의2(주기적안전성평가의 세부내용)의 1, 4, 6호인 “물리적 상태”, “경년열화”, “운전경험 및 연구결과”를 다루고 있으며 세부 내용은 다음과 같다.

1. 원자로시설의 평가당시의 물리적 상태에 관한 사항
 - 가. 계통·기기·구조물의 기능을 확인하기 위한 시험결과
 - 나. 계통·기기·구조물의 검사 결과 및 보수기록
 - 다. 계통·기기·구조물에 대한 현재의 물리적 상태

4. 경년열화에 관한 사항
 - 가. 평가대상 계통·기기·구조물의 분류 및 선정
 - 나. 평가대상 계통·기기·구조물별 경년열화현상 분석
 - 다. 경년열화현상에 따른 계통·기기·구조물의 기능 및 안전여유도
 - 라. 계통·기기·구조물의 성능미달시점 및 미래상태 예측
 - 마. 계통·기기·구조물의 경년열화 완화대책 및 관리계획

6. 원자력발전소 운전경험 및 연구결과의 활용에 관한 사항
 - 나. 원자로시설의 운전경험·연구결과의 반영 및 조치방안

원자력법 시행규칙 제19조의2의1호 중 ‘라’, ‘마’목과 6호의 ‘가’목은 본 경년열화평가의 대상이 아니므로 제외한다.

2.2 평가방법

경년열화평가 대상 계통·기기·구조물의 설계, 제작 자료와 최초임계일 이후부터 시험, 운전, 정비 등 운영 자료를 참조하고 유효한 기술기준을 근거로 하여 현재의 물리적 상태 및 경년열화를 평가한다. 이를 위해 사용된 평가방법은 다음과 같다.

- 해당 호기에 적용된 국내법을 포함한 관련 규제요건과 기술기준의 검토
- 국내외 운전경험 및 연구결과 등의 분석을 통해 현 상태, 경년열화평가 및 관리계획에 반영 필요사항 확인
- 평가대상 부속 계통·기기·구조물의 분류 및 선정
- 설계, 제작, 설계변경, 시험, 검사 및 보수관련 자료분석과 현장점검을 통한 현재 물리적 상태 확인
- 유효한 기록이 설비의 상태를 정확히 나타내는 지를 확인
- 경년열화현상 분석 및 평가
- 평가시점부터 10년간 설비의 고유기능 및 안전운전을 유지하기 위한 안전여유도 확인 및 미래상태 예측
- 발전소에 적용중인 경년열화 완화대책 및 관리계획이 안전여유도를 보증하기에 적절한 지 여부 검토
- 발전소 안전성 향상을 위한 개선방안 도출

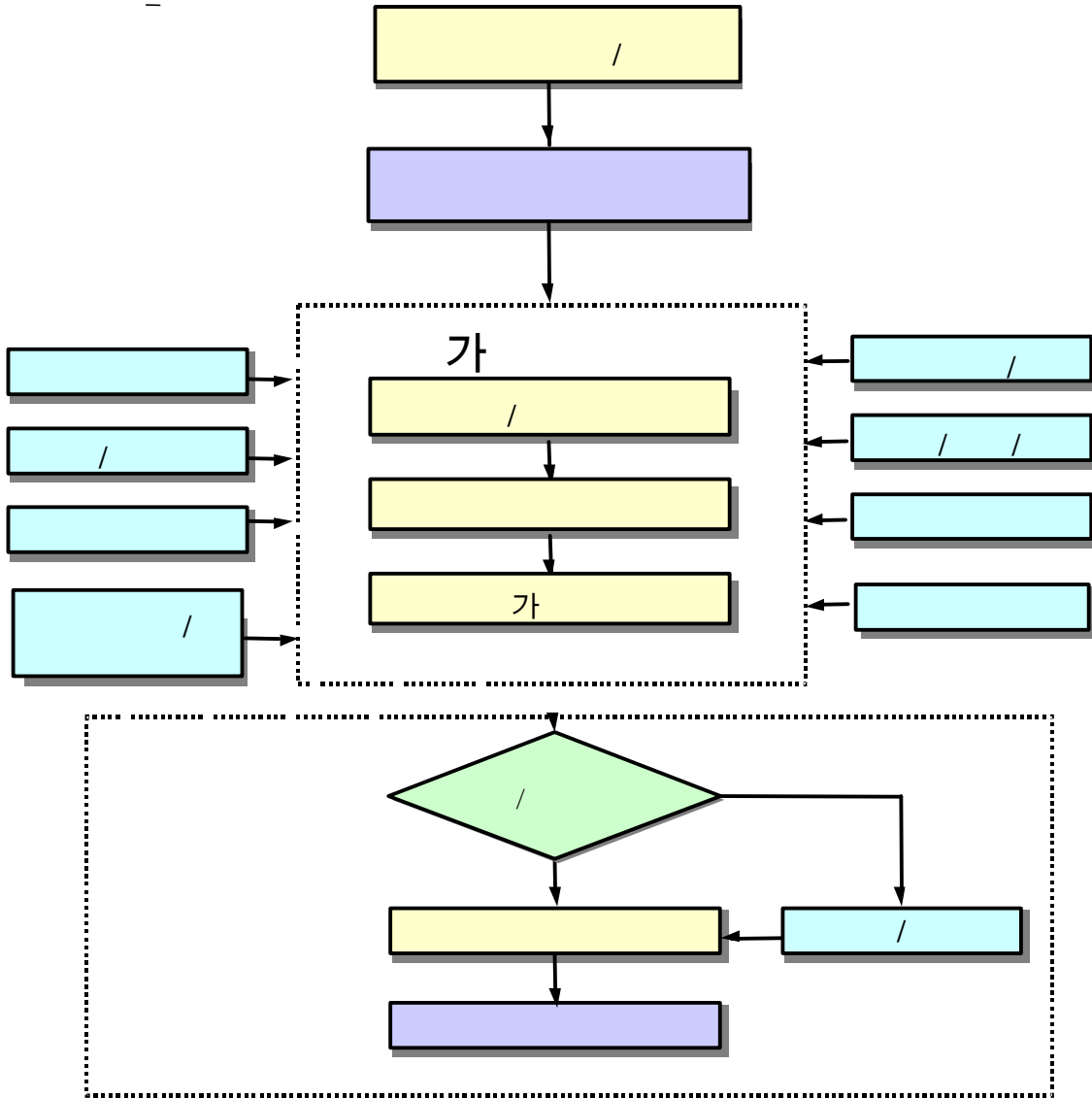


그림 3 경년열화 평가절차

3. 기술기준 검토

기술기준의 검토 목적은 안전성평가 당시 해당 원자로시설에 유효한 기술기준을 활용하여 현 상태 확인 및 경년열화를 평가하는 것으로 기술기준 자체를 검토하는 것은 주기적안전성평가 본래의 취지에 맞지 않는다. 기술기준에서는 법적 사항, FSAR 사항, 행정조치, 규제조치, 약속사항, 기타 참고 기술기준의 6개 항목으로 나누어 검토하였다.

- 법적 사항 : 원자력법, 동법 시행령, 동법 시행규칙 및 기술기준, 과기부 고시에서의 내용을 기본으로 검토한다. 경년열화에 있어 법적 사항은 원자로시설의 설계단계에 적용되는 것이 대부분이며 주기적안전성평가 관련 법적 사항들이 현 상태 및 경년열화평가와 관련된다.
- FSAR 사항 : FSAR 상에 언급되어 있는 제반 Code 및 Standard 등을 검토한다.
- 행정조치 : 발전소 운영과 관련한 행정지시, 운영허가조건, 예외조항 등을 검토한다.
- 규제조치 : 규제기관 또는 규제 위임기관의 점검검사, 수시검사 및 품질보증검사의 지적 및 권고사항 등을 검토한다.
- 약속사항 : FSAR 개정사항, Tech. Spec. 개정사항 등을 검토한다.

○ 참고 기술기준 : 해당 호기와 국내·외 타호기에 적용된 기술기준을 비교 검토한다.

4. 기기평가 및 관리

기기평가에서는 앞에서 검토한 기술기준들을 활용하여 경년열화평가를 수행하고 이를 바탕으로 기기평가는 물론 안전성 개선 방향 도출에 이르기까지 일관성이 유지되도록 하는 것이 가장 중요하다. 기기평가의 주요 단계별 내용을 정리하면 아래와 같으며 이를 도식적으로 나타내면 그림 4와 같다.

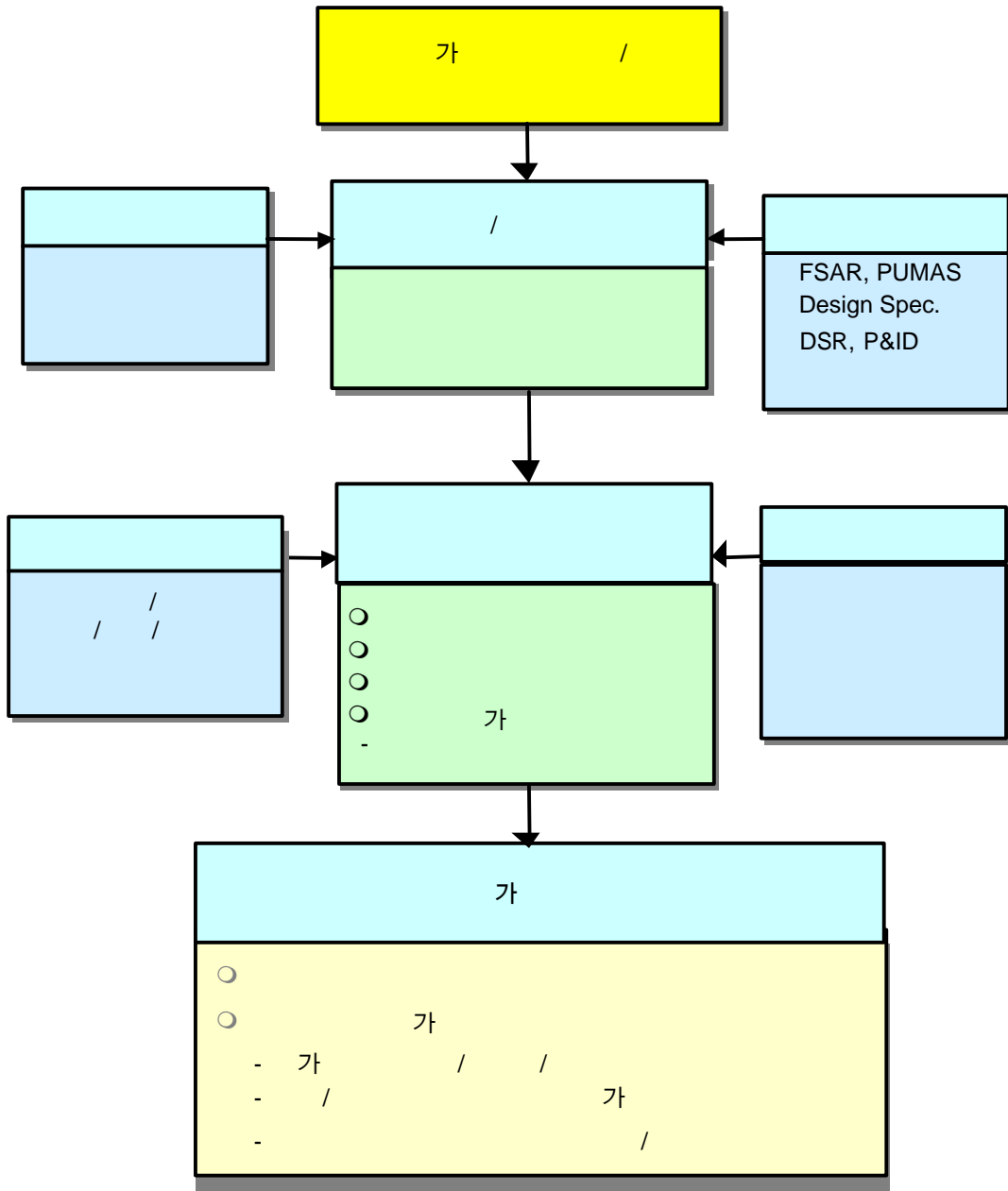


그림 4 기기평가 및 관리 절차

○ 운전경험 및 연구결과 반영 : 국내의 발전소의 손상사례, 운전경험, 연구결과 등을 조사 검토하여 해당 호기에 반영되었거나 안전성 개선을 위하여 반영될 필요성이 있는 사항들을 검토하여 기술한

- 다.
- 현재 물리적 상태 확인 : 평가 대상 계통, 기기 및 구조물의 구성 및 기능을 확인하고 설계 및 운전특성을 검토하고, 시험·검사·정비 등 운전이력을 검토하며, 관리프로그램 검토, 자료 관리체계 등을 검토하여 현재 유효한 기록이 평가대상 계통, 기기 및 구조물의 상태를 정확히 나타내고 있는 지를 확인한다.
 - 기기평가 및 관리 : 평가 대상 계통, 기기 및 구조물의 경년열화현상을 분석하여 고유기능 및 안전운전을 유지하기 위한 안전여유도 확인 그리고 성능미달시점 및 미래상태를 예측하여 안전여유도가 부족할 시 안전성 확보를 위한 경년열화 완화대책 및 관리계획을 수립하여 안전여유도가 보증되는 지를 검토한다.

5. 안전성 개선방향

안전성 개선은 앞 절의 평가결과에서 도출된 미진사항 또는 개선사항을 정리한다. 이때 사항의 중요도에 따라 아래와 같이 안전현안 사항, 완화 및 관리대책 그리고 권고사항으로 구분한다. 개선사항은 항목의 기술적 배경과 중요성, 국내외 유사 사례, 필요 시기 및 소요기간, 소요 예산, 제반 환경요건, 타 분야와의 기술 연계사항, 기대효과 등을 가능한 구체적으로 제시한다.

- 안전현안 사항 : 기기평가에서 도출된 개선사항 중에서 설비의 교체 등 차기 주기적안전성평가 시기 이전에 긴급을 요하는 사항을 도출하여 제시한다.
- 완화 및 관리대책 : 기기평가에서 도출된 개선사항 중에서 발전소의 안전성을 더욱 향상시키기 위해 기존 관리프로그램의 개선이나 추가로 도입해야 할 필요성이 있는 프로그램 등을 장기(4~10년)·중기(2~3년)·단기(~1년)로 구분하여 제시한다.
- 권고사항 : 운전경험/연구결과 반영, 현 상태 확인 그리고 기기평가 관점에서 현재에도 수행되고는 있으나 지속적인 관심 또는 보다 철저한 수행이 필요한 사항등을 기술한다.

6. 결론

본 논문에서는 국내에서 처음으로 수행되는 주기적안전성평가의 한 인자인 경년열화에 대해 평가범위에 해당되는 계통·기기·구조물의 범위, 평가방법, 기술기준 검토, 기기평가 및 관리 그리고 안전성 개선방향 등 경년열화의 일반적인 평가 방법론을 기술하였다. 주기적안전성평가가 국내에서는 처음으로 수행되는 관계로 관련 법체의 정비, 평가범위 및 방법, 기술기준에 대한 해석, 평가의 내용 및 기술 등 여러 분야에 걸쳐 많은 개선 및 토론이 있어야 될 것으로 생각한다.

참고문헌

1. 한수원(주), "고리 1호기 최종안전성분석보고서", 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.