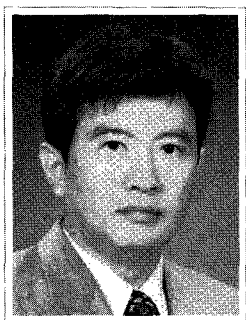




세계 각국의 원전 노화 관리

진 태 은

한국전력기술(주) 재료기술처장



최 근 한국을 비롯한 동북 아시아 몇몇 국가를 제외하고는 전세계적으로 신규 원전 건설이 거의 이루어지지 않고 있다. 이러한 상황에서 기존 가동중 원전들을 효과적으로 관리하여 최대한의 투자 이익을 얻고자 하는 것이 원전 산업계의 최대 이슈로 부각되고 있다.

이는 원전들의 가동년수 증가에 따라 노후화되는 계통·기기 및 구조물들을 원전 수명 기간은 물론 계속 운전을 고려하여 충분한 안전성을 가지고 경제적인 운전이 되도록 함으로써

달성될 수 있으며 미국·일본 및 유럽 국가들을 중심으로 국내외에서 활발히 수행중이다.

가동중 원전의 계속 운전을 포함한 지속적인 안전성 확보의 수단으로는 국내에 잘 알려진 미국 중심의 인허가 갱신 제도(License Renewal) 외에, 가동 원전에 대해 경년 열화, 시설 변경, 운전 경험 등과 같은 누적된 영향을 다루고 원전 운전 기간 동안 안전성을 보증하기 위해 일정 주기로 수행되는 주기 안전성 재평가(PSR : Periodic Safety Review) 연구가 영국을 중심으로 한 유럽 국가에서 수행중에 있으며, 이는 국제 원자력기구(IAEA)가 한국을 포함한 모든 회원국에게 원전 안전성을 보장하기 위해 이 제도를 채택할 것을 적극 권장하고 있는 사항이다.

이러한 국내외의 상황하에서 IAEA는 「원전 노화 관리를 위한 기술 위원회의 : Technical Committee Meeting on Managing Safety Aspects of NPP Aging」를 99년 5월 3일부터 7일까지

5일간 개최하였다.

이번 회의는 인허가 갱신 또는 주기 안전성 재평가의 기본이 되는 노화 관리에 대해 주제 발표 세션과 각 회원국간의 Open Discussion으로 진행되었다.

주제 발표는 원전의 노화 현상에 대한 안전성 확보 측면에서 최근 IAEA의 활동 등을 포함한 각국의 규제 현황과 노화 관리에 대한 전력 회사의 경험, 노화 관리 프로그램 등에 대한 내용이 주류를 이루었다.

여기서는 한국전력기술(주)의 가동 원전 수명 평가 절차 및 방법 그리고 과거 수명 관리 수행 경험 사례를 포함한 세계 19개국에서 참가한 전문가 32편의 주제 발표와 토론이 있었으며, 본고에서는 이 중 주요 국가의 발표 내용을 간단히 소개하고자 한다.

IAEA의 노화 관리 관련 현황

IAEA는 원전 노화 관리를 위한 규범 및 표준 절차를 준비하는 작업을

활발히 진행중에 있는데, 이번 회의에서는 노후 원전의 안전성 측면에서 IAEA 사업 계획과 효과적인 노화 관리를 위한 발표가 PSR을 중심으로 이루어졌다.

지난 10여년 동안 IAEA는 노후 원전의 안전성과 관련하여 많은 업무를 수행하여 왔으며 그 결과는 각종 보고서로 발간되어 있다.

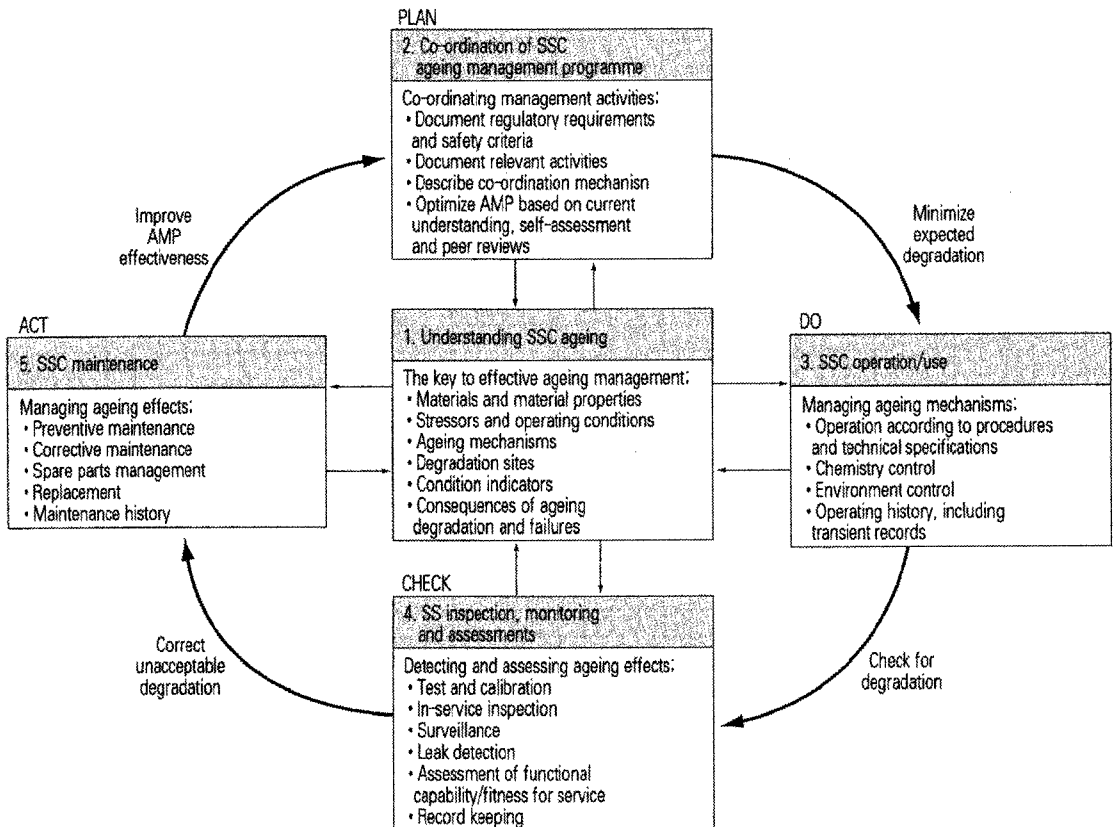
IAEA 보고서 종류로는 Safety Standards와 기타 안전성 관련 지침서들로 구분되며, Safety Standards

에서는 기본 목적과 개념 및 원칙을 정의한 「Safety Fundamentals」와 안전을 보충하기 위해 만족해야 하는 요건을 기술한 「Safety Requirements」, 그리고 이행을 위한 권고 사항과 절차 등을 제시한 「Safety Guides」가 있으며 이러한 IAEA의 주요 지침서의 분류는 다음과 같다.

- Safety Standards
 - 기본 목적과 개념 및 원칙을 정의한 「Safety Fundamentals」
 - 안전을 보충하기 위해 만족해야

하는 요건을 기술한 「Sa Requirements」

- 이행을 위한 권고 사항과 그 절차를 제시한 「Safety Guides」
- 기타 안전성 관련 간행물
 - Safety Report Series
 - Technical Report Series
 - INSAG Series
 - TECDOC Series
 - Provisional Safety Standard Series
 - Service Series



〈그림 1〉 원전 주요 기기 노화 관리 절차

특히 IAEA에서는 그간의 연구 결과를 바탕으로 장기간의 안전성과 신뢰성 있는 발전소 운전을 위해서는 체계적인 노화 관리 프로그램(AMP)이 필요하다는 것을 강조하고 있으며, Safety Report Series No.15에 따른 주요 기기의 노화 관리 절차를 <그림 1>과 같이 Plan, Do, Act, Check 의 형태로 체계적으로 수행할 것을 권고하고 있다.

이러한 노화 관리 절차는 인허가 갱신을 위한 주요 기기 노화 관리와 PSR 수행을 위한 노화 관리에 공통적으로 적용할 수 있는 특성을 가지고 있다.

각국의 노화 관리 현황

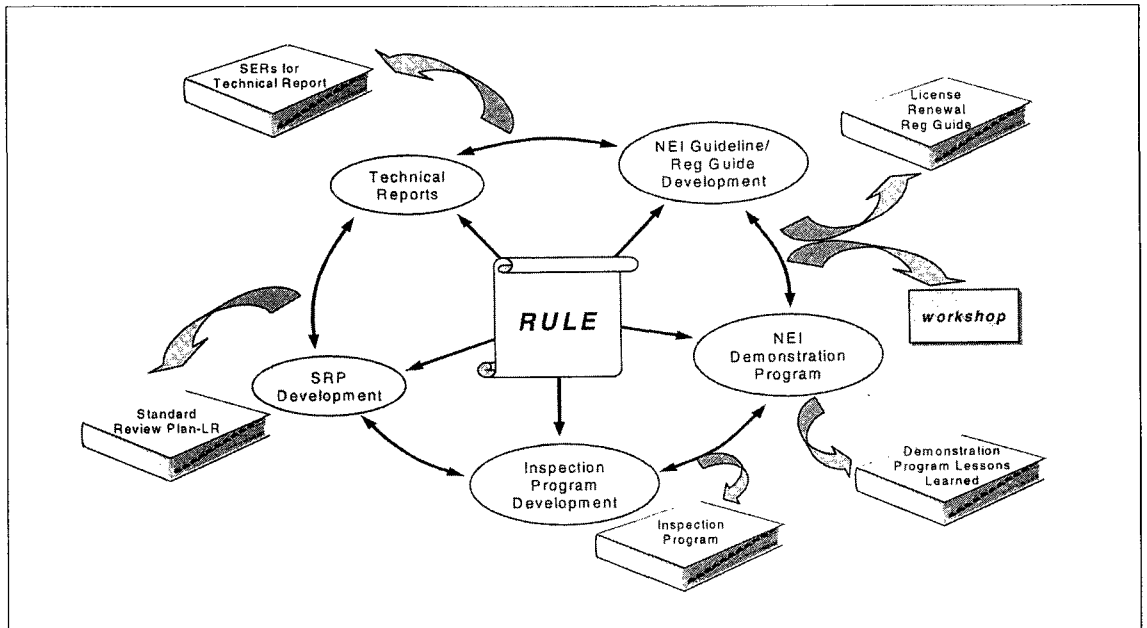
1. 미국 원자력규제위원회 노화 관리 현황

미국 내 원전에 대한 수명 관리 관련 안전성 확보 활동은 미국 원자력규제위원회(NRC)가 주도하고 있다. 본 회의에서는 수명 연장을 위한 인허가 갱신 절차와 노화 관리 관련 문제들, 그리고 최근 주목받고 있는 가동 원전의 검사 주기를 확률론적 방법으로 접근하는 위험도 정보 검사(Risk Informed Inspection) 등 다양한 정보를 발표하였다.

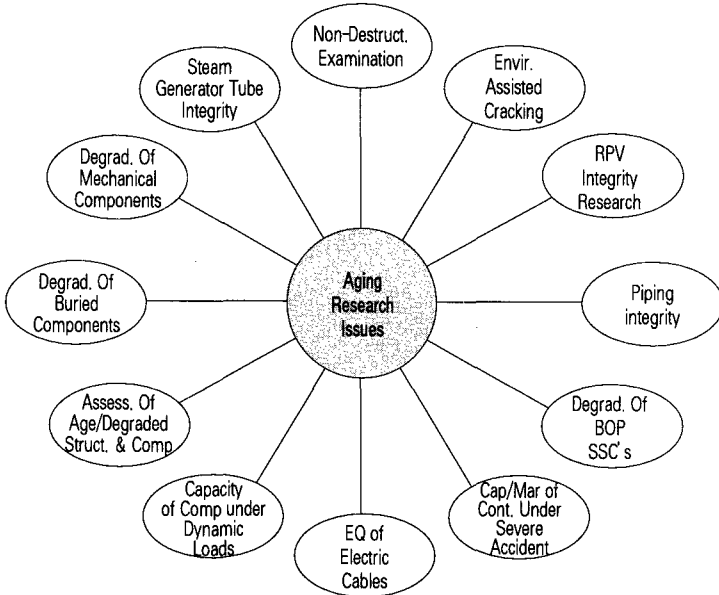
NRC의 인허가 갱신 규정에 의하면 수명연장을 위해서는 10CFR54.21(a)(1)(I)에 제시된 바와 같이 수

동형 장수명 기기를 대상으로 노화 관리를 하도록 권고하고 있으며, 이들은 주로 원자로 냉각재 압력 경계 건전성 유지, 원전 안전 정지 능력 보장, 그리고 방사선 소의 노출 완화 및 예방과 관련된 기능을 갖는 계통·기기 및 구조물들이다.

- 원자로 압력 용기
- 환기 송풍 관 (Ventilation ducts)
- 원자로 냉각재 계통 압력 경계
- 격납 용기
- 증기발생기
- 격납 용기 라이너
- 가압기
- Electrical and Mechanical Penetrations



(그림 2) 미국 NRC의 인허가 갱신 절차



〈그림 3〉 수명 연장을 위한 주요 노화 연구 대상

전소별 위험도 정보 의사 결정 접근 방법에 대한 발표가 있었다.

현재 국내에서도 위험도 정보 검사 기법에 대한 관심이 고조되고 있는 추세이며, 이러한 기술은 원전의 안전성은 물론 경제적인 운전에도 많은 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 미국 CCNPP 인허가 갱신 신청을 위한 노화 관리 프로그램 현황

CCNPP의 본래 인허가는 40년으로, 98년 4월에 20년 추가 운전을 위해 인허가 갱신 신청을 한 상태이며 현재 미국 NRC가 검토중에 있다.

본 회의에서는 CCNPP가 수명 연장을 위해 수행한 대상 기기, 인허가 갱신 신청서 준비 사항 및 프로그램에 대한 소개가 있었다.

CCNPP에서는 선정된 수동형 장수명 기기에 대해 추가된 20년 동안 노화 영향이 관리된다는 것을 입증하는 보고서를 제출하였다.

일례로 CCNPP가 인허가 갱신을 위해 NRC에 제출한 노화 관리 프로그램은 총 456개로, 이 중 기존 발전소에서 운영되고 있는 프로그램이 340개, 기존 프로그램을 Modify한 개선 프로그램이 100개, 그리고 신규 프로그램 16개가 적용된 것으로 보고되었다.

CCNPP에서 제시한 개선 및 신규 프로그램은 주로 노화 관련 손상 기구, 분전 설비, 케이블 교체, 탱크류

- 배관
- Equipment Hatches
- 펌프 케이싱
- Seismic Category I structures
- 밸브
- Electrical Cables and Connections
- Core Shroud
- Cable Trays
- 기기 지지 구조물
- 분전 설비
- 내압 보유 기기
- 열교환기류

미국 NRC에서 제시하고 있는 인허가 갱신을 위한 각종 노력들은 〈그림 2〉와 같은 형태로 규제되며, 그동안의 연구 결과 〈그림 3〉과 같은 항목

들이 이슈화되고 있음을 발표하였다.

또한 인허가 갱신을 위해서는 반드시 다음과 같은 5개 Back fitting 요건을 만족하도록 요구하고 있다.

- 화재 방호(10CFR50.48)
- 환경 검증(10CFR50.49)
- 가압열충격(10CFR50.61)
- 비정지 예상 과도 상태(10CFR 50.62)
- 발전소 정지(10CFR50.63)

이러한 인허가 갱신과 관련된 노화 문제 외에 위험도 관련 검사 내용으로서 NUREG 1661에 제시된 배관에 대한 프로그램의 중요성과 절차가 소개되었고 Reg. Guide 1.174에 제시된 위험도 정보 종합 의사 결정 원칙, 그리고 Reg. Guide 1.175의 발

검사 및 해석, 그리고 매설 배관 검사 분야에 집중되고 있다.

3. 독일의 노화 관리 현황

독일은 13기의 가압경수로형 (Pressurized Water Reactor : PWR) 원전과 6기의 비등수로형 (Boiling Water Reactor : BWR) 원전이 운전중에 있다. 본 회의에서 발표한 주요 내용은 독일 원전의 노화 관리 현황, 독일 원자력 규제 검사 관련 프로그램 및 규제 조치에 대한 것이었다.

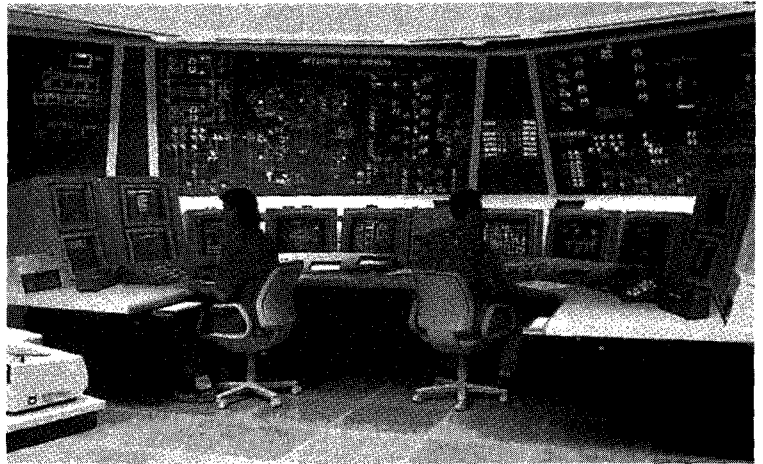
가. 독일 원전 노화 관리 현황

규제 측면에서 특별한 노화 관리 프로그램을 요구하지는 않고 있으며 다만 에너지법 및 기타 규정에 의해 발전소 품질 보증을 요구하고 있다.

원자력발전소의 노화 관리는 원전 안전 기준에 정의된 품질 보증 차원에서 수행중이며, 이는 주기적인 시험과 예방 정비가 대표적인 것으로 독일 내 발전소의 건설과 운전 분야에 공히 적용되고 있다.

계통/기기의 장기적인 거동을 평가하기 위하여 진동 감시, 누설 감시, Loose Part Monitoring 등과 같은 실시간 감시 프로그램을 이용하고 있으며, 다양한 노화에 대한 원전 안전성을 보증하기 위하여 소급 규정 적용, 안전성 평가 등을 수행중이다.

아울러 10년 간격으로 수행되는 PSR을 통하여 원전의 안전성을 확보하고 있으며, 이러한 PSR의 주요 항



최근 한국을 비롯한 동북 아시아 몇몇 국가를 제외하고는 전세계적으로 신규 원전 건설이 거의 이루어지지 않고 있다. 이러한 상황에서 기존 가동중 원전들을 효과적으로 관리하여 최대한의 투자 이익을 얻고자 하는 것이 원전 산업계의 최대 이슈로 부각되고 있다.

목 중 하나인 발전소 운전 및 이용률에 대한 노화 영향 및 운전 경험의 해석을 수행한 바 있다.

대체로 독일 원전은 효율적으로 PSR을 수행하고 있는 것으로 판단된다.

나. 독일의 원자력 규제 검사 프로그램

원자력 규제 검사 프로그램의 일환으로 수행되고 있는 독일의 대표적인 노화 관련 연구 현황은 다음과 같다.

- GKSS 연구센터의 Probe를 이용한 Warm Pre-Stress의 영향 해석
- 원자력발전소 재료의 피로 시험
- 원자력발전소 배관에서 열성층 영향 평가
- 마르텐사이트 Cr강의 장기 열취화 평가(약 350℃)
- 오스테나이트 스테인리스강에 대한 프로그램 조사
- 원자로 내부 구조물에 영향을 주는 중성자의 3차원 수송 이론
- 조사 취화로 인한 물성치 변화 연구
- 부식 과정 및 재료 건전성 프로

그램 분야 연구

- 페라이트 및 오스테나이트강의 균열 발생 및 성장 연구
- 페라이트강 부식에 대한 Round Robin 시험
- 비파괴 시험법 개발
- 전기 기기 노화 프로그램
- 사고 조건하에서 I&C 재검증
- 전기 및 컴퓨터 시스템으로 변환을 위한 타당성 평가
- 안전 요건에 대한 디지털 I&C 시스템 검증

다. 규제 활동

포괄적인 발전소별 노화 관리 프로그램을 수립하기 위하여 독일의 규제 기관에서는 원전 사업주에게 발전소의 노화 관리 조치 사항을 설명하는 보고서를 요구하고 있으며, 이러한 보고서에는 발전소의 현상태 및 노화와 관련된 분야를 다루기 위해 다음과 같은 내용을 취급하고 있다.

- 개념 및 기술적 노화
- 재료 노화, 구조물/기기의 기계적 마모
- I&C 노화
- 건물의 노화



4. 영국 British Energy사의 노화 관리 방법

영국 British Energy사는 7개의 Advanced Gas-cooled Reactor와 1개의 가압경수로형 원전을 보유하고 있다. 본 회의에서 발표된 내용은 영국 British사에서 이들 원전을 대상으로 수행해온 수명 관리 활동 내용이었다.

이에 대한 주요 발표 내용은 주기적 안전성 평가 수행 경험과 수명 연장을 위한 최적 평가 연구 및 안전성 전략 수립 내용, 일반 발전소 및 원전의 최적 수명을 유지하기 위한 수명 관리 전략 수립, 수명 최적화를 위한 최신 기법 개발 내용에 대한 소개가 있었다.

5. 캐나다 CANDU형 원전의 노화 및 수명 관리 현황

초창기의 캐나다 원전은 보통 30년, 최근 원전은 40년의 설계 수명을 갖도록 설계되었으며 운영 허가 기간은 별도로 지정하지 않는 대신 매 2년마다 사업자가 규제 기관에 보고서를 제출하여 심사를 거친 후 운영 허가를 갱신하는 제도를 채택하고 있다.

현재는 기존 노후된 CANDU형 원전의 수명을 추가로 30년까지 연장하기 위해 다음과 같은 단계별 발전소 수명 관리 프로그램을 수행중에 있다.

- 1단계(1994~1998) : Scoping Study
- 2단계(1998~2008) : Detail planning evaluation and engineering

○ 3단계(2008~2012) : Refurbish, Replacement and Rehabilitation

CANDU 원전 수명 관리를 위한 주요 계통·구조물·기기 선정은 기본적으로 다음의 항목을 준수하여 수행하고 있다.

- Public Safety
- Plant Environment Goals
- Plant Availability & Reliability
- Worker Safety
- Replacement cost or repair
- Service conditions related to design limits
- Degree of knowledge of component conditions/ degradation

6. 일본 원전에 대한 수명 관리 정책 현황

일본 원전은 가압경수로형 23기, 비등수로형 28기가 현재 운전중이며 이들 중 20년 이상 운전중인 것이 17기가 있다.

일본에서의 원전 관리는 92년 이후 통상산업성(MITI)이 전력 사업자들에게 PSR을 수행하고 그 결과를 보고하도록 권고한 후 94년부터 현재까지 약 13기 정도의 원전에서 이를 수행하였다.

본 회의에서는 일본의 노후 원전 평가 계획에 대한 소개와 장주기 정비 프로그램 범주, PSR 향상 방안, 주기적 검사의 추가 향상 방안과 일

본 통상산업성에서 수행중인 기술 개발 향상을 위한 주요 분야에 대한 소개가 중점 발표되었다.

일본 노후 원전의 평가를 위한 계획은 Part 1, 2로 구분하였으며 Part 1에서는 교체하기가 어려운 기기·구조물을 선정하여 장기 전략 측면의 건전성 평가 계획을 수립한 바 있고, Part 2에서는 안전성 및 운전 측면에서 중요한 기기·구조물을 선정하였다.

실례로 미하마 1호기에서는 원자로 압력 용기·원자로 내부 구조물·케이블·가압기 등 15개 범주의 구조물 및 기기에 대해 건전성 평가를 수행한 바 있다.

PSR의 추가 향상 방안으로는 노화 손상을 위한 기술적 평가와 PSR에서 장주기 정비 계획 및 기술 평가의 재검토에 대해 제시하였다.

이외에 MITI 주도로 수행중인 기술 개발 향상을 위한 주요 분야로는 다음과 같다.

가. 검사/감시 기술

- RPV 감시 시험 시편의 재활용 기술

나. 예방 정비 보수 기술

- 조사 재료의 표면 개선 기술
- 조사 재료의 보수 용접 기술

다. 노화 평가 기술

- 용기/배관의 허용 결합 기준 입증
- 경수로 환경의 피로 평가 기술
- 2-상 스테인리스강의 열취화 및 RPV강의 중성자 조사 취화 평

가 기술

- IASCC의 균열 발생 및 성장 연구라. 단기적으로 개발할 기술 분야
- 고온/고농도 산소 환경하에 있는 배관 용접부의 SCC 관련 재료 데이터 수집 분석
- 저압 케이블의 NDT 노화 진단 기술
- 콘크리트의 중성자 차폐 관련 현장 구조물 조사

일본의 노화 평가 기술중 환경 피로 분야는 세계적으로 상당히 높은 수준에 있는 것으로 판단된다.

7. 스페인 원전의 노화 관리 현황

스페인 원전의 노화 관리 관련 규정은 Royal Decree 2209/95, CSN Guideline 1.10(주기적 안전성 검토 관련 규정), 운전 허가 규정이 대표적인 것들이다.

UNESA(Electric Utilities Association)에서는 발전소 노화 관리 방법론을 EPRI LCM 프로그램을 기준으로 개발하였으며, 이러한 방법론은 모든 스페인 원전들이 사용하고 있다. 관련 분야의 주요 수행 내용은 다음과 같다.

- 기기 선정
- 주요 기기 도출
- 손상 현상의 도출 및 해석
- 노화 기구에 대한 정비 수행
 - 보수 및 교체 계획
 - 정비 개선 계획
 - 주요 기기 감시 계획

향후 스페인에서는 원전 노화 관리와 관련하여 Guide NEI 95-10와 IAEA Tecdoc 338, 그리고 UNESA 방법론을 상호 비교하여 보고서를 작성할 예정이며 주기 안전성 평가의 일환으로 노화 프로그램이 지속적으로 수행될 예정임을 제시하였다.

8. 스위스 원전의 노화 관리 및 수명 연장 현황

92년 스위스에서는 원전 운전 측면에서 노화 문제를 제기하고 노화 영향과 관련하여 기기·건물·구조물의 체계적인 안전성 연구를 원전 사업주에게 요구하였다.

이에 따라 사업주는 관련 프로그램을 수립하였으며, 이를 위해 Working Group에서 수행한 주요 업무는 다음과 같다.

- 노화 관리 프로그램의 최적화
- 노화 기구 분류
- 기기 선정 지침서 개발
- 선정된 기기의 시편 제작

이러한 Working Group 프로그램에 따른 노화 관리를 통하여 안전에 관련된 모든 기기에 대한 정비, 품질 보증이 고려된 사항에 대한 증거를 제공하고 노화 관리로부터 정비를 최적화하기 위한 기술적 배경 및 기기의 신뢰성을 보장하였다. 스위스 원전별 기기 평가 절차 사례는 다음과 같다.

가. Muhleberg 원전 원자로 압력 용기
원자로 압력 용기는 많은 부품 및

재료가 포함되어 있고, 기계적 및 열적 하중 조건이 다양하기 때문에 노화 관리 측면에서 매우 중요한 기기로 선정되어 관리되고 있다.

모든 노화 기구 중에서 압력 용기와 관련된 5개의 노화 기구에 대해 중점적으로 고려하였으며 다음과 같은 상세 평가가 수행되었다.

- 결정립계 부식 균열
- 응력 부식 균열
- 부식 피로
- 운전 과도 상태에 의한 피로
- 중성자 조사 취화

나. 전기 기기

전기 기기는 케이블·변환기·모터·스위치·접속 단자 등 모두 29개 그룹으로 분류하여 수행하였으며, 기기 그룹에 적용 가능한 노화기구와 진단 방법을 도출하였다.

다. 건물 구조물에 대한 검사 프로그램

구조물의 체계적인 감시를 위해 절차서를 개발하였으며, 절차서의 주요 내용은 검사원칙, 중간 검사, 그리고 특수 검사 방법 등으로 구성되어 있다.

9. 체코 원전의 노화 관리 프로그램 현황

체코의 Dukovany 원전은 VVER형 4기가 80년대 중반부터 상업 운전을 시작하였으며 Temelín 원전은 2기로서 2000~20001년경에 상업 운전을 시작할 예정이다.

체코에서 수행중인 노화 관리의 목

적은 최소한의 추가 비용으로 원전 수명 동안 주요 기기의 안전한 운전을 보장하고 궁극적으로 원전의 수명 연장 및 인허가 갱신을 하고자 하는 것이다.

이를 위해 원전 주요 기기를 4개 범주로 분류하였으며 분류 기준은 다음과 같다.

- 교체 불가능 기기 : 원자로 압력 용기, 격납 용기
- 막대한 비용으로 교체 가능 기기 : 증기발생기, 1차측 배관, 내부 구조물, 케이בל
- 교체 가능한 안전에 중요한 기기 : 펌프, ECS 배관, 급수 및 증기 배관
- 기타 : 용수 배관

또한 노화 관리 프로그램(AMP) 목적은 기기 노화에 대한 이해, 기기 상태 평가, 노화 기구 평가, 기기 잔여 수명 평가, 노화 영향의 완화 및 평가, AMP의 효율성/개선 평가로 대부분 국가에서 적용하고 있는 것과 동일하다.

한편 Dukovany 원전에서 노화 관리를 위해 선정된 기기별 주요 수행 내용은 국내에서 원전 수명 관리 연구 1단계시 수행한 내용과 유사함을 보이고 있다.

10. 인도 원전의 노화 관리 현황

인도의 원전 노화 관리는 1969년에 상업 운전을 시작한 비등수로형 2기와 70년대 및 80년대 초반에 상업 운전을 시작한 가압중수로형 4기를

대상으로 하여 수행중에 있으며, 본 회의에서는 이러한 원전들의 노화 관리 경험에 초점을 두고 발표되었다.

인도에서 원전 운전을 위한 인허가는 인도 원자력에너지규제위원회(Atomic Energy Regulatory Board : AERB)에서 발급하며 인허가 기간은 5년이다.

이 기간을 초과하여 운전할 경우는 재 인증을 획득하여야 하며, 재 인증을 위해서는 자체 평가 수행 및 인허가 갱신용 안전성 평가 보고서를 규제위원회에 제출하여야 한다.

이를 위해 인도에서 수행하는 주요 내용들은 다음과 같으며, 가동 원전의 성공적인 수명 연장을 위해 지속적인 R&D 연구에 중점 투자를 하고 있음을 밝혔다.

- 발전소 계속 운영을 위한 인허가 갱신 보고서 제출 및 검토
- 원전 안전에 중요한 계통, 구조물, 기기(SSCs)의 노화 평가 및 노화 관리 수행
- SSCs의 우선 순위 부여를 위한 기준 개발 등

11. 파키스탄 KANUPP 원전 노화 관리 현황

파키스탄 KANUPP 원전은 72년 상업 운전을 시작한 가장 오래된 CANDU형 원전의 하나이다.

본 회의에서는 이 원전의 노화 및 안전성 관리 수행 내용과 발전소 안전성 재평가, 그리고 안전성 개선 내

용에 대해 중점 발표가 있었다.

상기 발전소의 안전한 노화 관리를 위해 수행한 주요 안전성 개선 내용은 기기 교체 및 개선, 가동중 점검 프로그램의 개선, 위험도 평가 기술 적용, 진동 감시 프로그램 설치 경험 등을 제시하였다.

결언 및 소감

상기에서 각 분야별로 제시한 각국의 노화 관리 현황 외에도 다수의 발표가 있었으나 대부분 발전소 특성에 따른 다소의 차이점 외에는 근본적으로 개념은 서로 유사하였다.

본 회의에 참석한 국가들은 노화 관리 수행의 우선 중요한 사항을 해결하기 위한 방법론 개발 등에 많은 노력을 기울이고 있으며, 여기서는 이해 대한 논의가 활발히 이루어졌다. 아울러 원전 노화 관리 측면에서 안전한 관리를 위해 수행하여야 할 추후 방안에 대해 토의가 있었다.

이러한 세계 각국의 전문가들이 발표하거나 논의된 내용은 추후 IAEA에서 원전 노화 관리 관련 지침서 작성시 활용하게 된다.

이러한 회의에 국내의 기술 동향 및 경험을 홍보하고 세계 각국의 동향을 파악함으로써 현재 수행하고 있는 국내의 원전 수명 관리 연구 수행은 물론, 추후 국내에서 도입할 예정인 PSR 관련 분야에서도 많은 정보를 얻는 성과를 가질 수 있었다.