

원전 수명 관리 연구 및 주기적 안전성 검토

정 일 석

한전 전력연구원 원전설비지원그룹 책임연구원

국 내 가동 원전의 운전 연수가 증가함에 따라 장기 사용 원전의 안전성 향상과 수명 관리 연구가 진행되고 있다.

원전 수명 관리는 발전소 운전 안전성과 성능을 유지하면서 최적 경제 시점인 최적 수명까지 발전소를 운전하기 위한 제반 기술 활동이다.

적절한 수명 관리로 원전을 최적 수명까지 운전하더라도 발전소는 노화에 의해 운전 안전성이 영향을 받거나 저하되지 않아야 한다.

발전 설비의 노화에는 실제의 기기나 구조물이 경년 열화에 의해 노화되는 물리적 노화와 설계 기술의 발달과 새로운 안전 개념의 적용으로 기존 기술이 낙후하는 비물리적 노화로 구분할 수 있다.

물리적 노화는 기기·구조물·계통의 물리적 상태 변화로 성능을 저하시키고, 비물리적 노화는 발전소 계통의 안전 개념·기준·기술이 새롭게 변화되지 않은 것이다.

본 논문에서는 물리적 노화는 수명 관리 연구, 비물리적 노화는 안전성 관리의 측면에서 검토하였고, 두 분야의 국내외 연구 현황·개념·추진 방법·상호 관계 등을 살펴보고, 상호 유기적인 관계를 보완할 수 있는 제도적 장치 도입 및 적용 방안에 대해 논하였다.

원전 수명 관리

1. 국내외 연구 동향

전력 수요가 꾸준히 증가함에도 불구하고 국내외적으로 원전의 건설 및 운영에 대한 반대와 규제가 엄격해지고 발전 운영 경비가 증가하는 추세이다.

그러나 폐로 및 신규 원전 부지 확보가 어렵고 대부분 원전의 감가상각이 완료된 상태이므로 가동중 원전의 경제성 제고를 위한 수명 관리 연구가 80년대 초부터 미국에서 시작되었다.

현재는 대부분 경제협력개발기구(OECD) 회원국들이 수명 관리 연구를 수행하고 있으며, 국제원자력기구(IAEA)에서도 안전성 및 전전성 향상의 수단으로 수명 관리 국제 협력을 추진하고 있다.

수명 관리 연구에 적극적인 국가는 미국·영국·일본·한국·캐나다·프랑스·스페인 등이며, 최근에는 러시아도 계속 운전을 위한 수명 관리 전략 수립에 착수하였다.

현재 설계 수명 이상 연장 운전하고 있는 발전소로는 56년에 상업 운전을 개시한 Calderhall 원전과 Chapelcross 원전이 있으며 50년까지의 계속 운전 인허가를 97년에 취득하였다.

미국에서는 98년 Calvert Cliffs 1·2호기와 Oconee 1·2·3호기가 40년 설계 수명 이상 60년까지의 계속 운전을 위한 인허가를 규제 기관에 신청하였으며 현재 긍정적으로 심사가 진행되고 있고 2000

년 상반기에 인·허가를 완료할 계획이다.

일본도 원전의 계속 운전이 60년까지 기술적으로 가능하다고 99년 2월 통산성에서 발표하였으며, 미하마 1호기·쓰루가 1호기·후쿠시마 다이하찌 1호기의 상세 수명 평가를 수행하고 있다.

국내에서는 경수로의 고리 1호기, 중수로의 월성 1호기를 대상으로 수명 관리 연구를 진행하고 있다.

고리 1호기는 93년부터 계속 운전의 가능성을 기술적·경제적으로 평가한 결과 타당성이 있음을 확인하여 현재 2단계 연구가 진행중이며, 월성 1호기는 2000년에 타당성 평가를 착수할 예정이다.

2. 원전 수명 관리 추진 전략

원전 수명 관리의 일차 목표는 설계 수명 동안의 안전하고 경제적인 운전이다. 설계 수명까지의 안전 운전이 가능하고 발전소의 건전성이 유지된다면 이차적으로 설계 수명 이상 최적 수명까지의 계속 운전을 위한 상세 수명 평가와 노화 관리 방안을 도출하고 설계 개선 및 기기 교체 계획을 수립한다.

계속 운전을 위해서는 수명 기간 동안의 발전소 안전 및 건전성을 입증하여야 하고 규제 기관의 검토를 거쳐 인·허가를 받아야 한다.

수명 관리 연구는 발전소별로 3

〈표 1〉 원전 수명 관리 단계별 기간 및 내용

단계별	연구기간	내 용
1단계	2~3년	계속 운전 타당성 평가 기술적·경제적·인허가 측면의 검토
2단계	3~4년	상세 평가 및 노화 관리 방안 수립 종합 안전성 평가 및 인허가 획득
3단계	7~8년	계속 운전을 위한 노화 관리 방안 현장 적용

〈표 2〉 수명 관리 기기·구조물의 종류

구 분	기기 종류
장수명 수동형 기기	원자로 압력 용기·원자로 압력 용기 내부 구조물·증기발생기·가압기·원자로 냉각재 배관·핵연료 채널·압력관·지지대·격납 건물·콘크리트 구조물·케이블·압력 용기·탱크·열교환기·냉각재 펌프 몸체 등
단수명 능동형 기기	제어봉·제어봉 구동 장치·펌프·송풍기·밸브·모터·2차측 배관·열교환기 세관·가열기·터빈·발전기·디젤 발전기·공기 압축기·계속 제어 기기·전기 기기·필터·습분 분리기·핵연료 취급 설비 등

단계로 나누어 수행한다.

1단계는 개별 발전소의 계속 운전 타당성을 기술적·경제적으로 평가하여 계속 운전 여부를 결정할 수 있는 경영 판단 자료를 생산한다.

1단계 결과를 바탕으로 계속 운전 방침이 정해지면 2단계 현장 진단 및 시험·노화 감시를 통한 발전소의 상세 수명을 평가하고 노화 관리 방안을 수립한다.

계속 운전의 인·허가 취득을 위해서는 발전소 안전성 평가와 상세 수명 평가 결과, 노화 관리 방안에 대한 규제 기관의 검토를 받아야 한다.

계속 운전 인·허가를 받으면 노화 관리 방안을 현장 적용하고 설

비 개선 및 노후 기기를 교체하는 3단계 계속 운전 수명 관리를 시행한다. 〈표 1〉은 단계별 연구 기간 및 내용을 요약한 것이다.

3. 수명 관리 대상 기기

발전소 수명 관리 대상 기기는 노화된 기기·구조물을 교체 및 정비하는 데 인력과 예산이 과다하게 소요되고 선행 경험이 없거나 기술적으로 문제를 해결하기 어려운 장수명 수동형 기기와 상대적으로 교체·정비가 용이한 회전 및 구동 기기들과 같은 단수명 능동형 기기가 있다.

발전소 수명 관리의 장수명 수동형 기기에 대한 노화 관리와 단수명 능동형 기기에 대한 정비 관리의 형

태로 구분할 수 있다.

노화 관리는 장수명 수동형 기기의 노화 영향을 분석하고 현재의 수명을 평가하여 수명 기간 동안의 기기 건전성과 안전성을 유지할 수 있는 노화 관리 방안을 수립한다.

단수명 능동형 기기는 정상 및 예방 정비 활동으로 기기의 건전성을 유지할 수 있으므로 노화 관리 대상 기기에서는 제외되거나 정비 관리의 대상 기기로 선정하고 최적 예방 정비 방안을 마련하여 원전 성능을 유지할 수 있어야 한다.

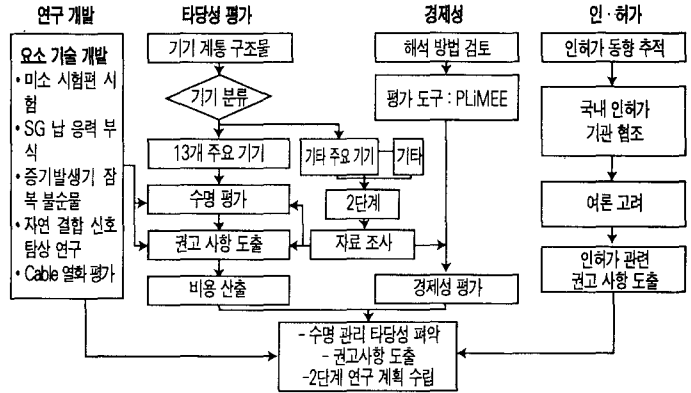
비록 단수명 능동형 기기라 할지라도 전력 생산에 중요한 역할을 하고 현장 담당 부서의 기기 관리 중요도에 따라 필요한 경우에는 노화 관리 대상 기기에 포함시키기도 한다.

그러나 발전소 안전성 관리 및 향상 측면에서는 능동·수동·장수명·단수명을 불문하고 안전성 관련 기기와 구조물·계통 모두를 대상으로 해야 한다.

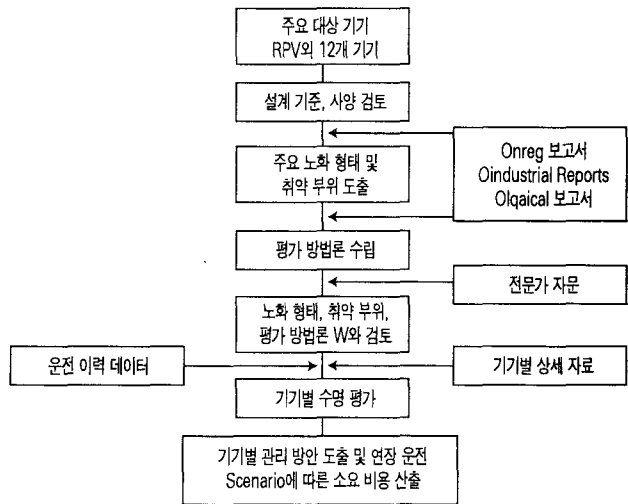
<표 2>에는 장수명 수동형과 단수명 능동형 기기, 구조물의 예를 들었다.

4. 계속 운전 타당성 평가

원전 수명 관리의 궁극적인 목적은 가동중 원전의 기기·구조물·계통의 노화 및 정비 관리를 적절히 수행하여 건전성과 안전성을 유지하고 최적 목표 수명까지 계속 운전하여



<그림 1> 계속 운전 타당성 평가 절차



<그림 2> 주요 기기 1단계 수명 평가

원전의 경제성을 제고하는 것이다.

그러나 발전소를 계속 운전하기 위해서는 발전소 수명을 평가하여 노화된 기기를 교체하거나 설비 개선·설계 변경 등을 수행하고 비물리적 노화 현상에 대한 안전성 평가를 수행해야 하므로 막대한 기술 검

토 및 설비 투자 비용이 수반된다.

원전 사업자는 비용이 수반되는 설계 수명 이후의 계속 운전 여부를 결정하기 이전에 그 기술적·경제적 타당성을 검토하고 인허가 및 제도상의 문제점은 없는지를 사전에 확인하여야 한다(그림 1).

기술적인 타당성을 평가하기 위해서는 주요 노화 관리 대상 기기에 대해 문서상의 1차 수명을 평가하여 목표 수명까지 사용 가능성을 확인하여야 한다.

기기 건전성을 확인하고 나면 물리적·비물리적 노화 현상에 대처하기 위한 계속 운전 투자 비용을 추정하고 계속 운전에 의한 경제적 이득과 비교하여 투자 가치를 판단하여야 한다.

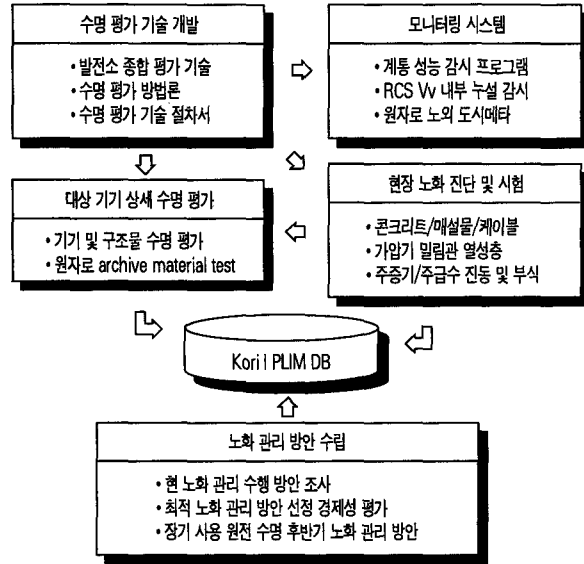
〈그림 2〉는 기술적 타당성 평가를 위한 주요 기기 수명 평가 절차로서 대상 기기의 노화 원인과 기구, 건전성에 미치는 영향을 조사하고 현재의 잔존 수명을 정량적·정서적으로 분석한다.

기기별 노화 기구는 선행 연구에서 밝혀진 주요 노화 기구에 대한 대상 기기의 건전성을 그 동안의 기기 운전 및 정비 이력, 가동전·중검사, 시험 결과 평가를 바탕으로 평가한다.

수명 평가 결과 시험이나 현장 점검, 추가 조치가 필요한 경우에는 2단계 권고 사항으로 도출한다.

일반적으로 중요하지 않다고 보고되어진 노화 기구에 대한 기기 건전성 규명은 계속 운전 추진이 결정되고 난 이후의 2단계 상세 수명 평가에서 수행한다.

타당성 평가 단계에서는 현장 노화 진단 및 시험을 수행하지 않고 문서상의 정보를 바탕으로 기기·



〈그림 3〉 노화 관리 방안 수립 연구 수행 절차

구조물의 수명을 평가하지만 관련 기기의 설계·제작·운전·정비·교체·개선 사항에 대한 자료 조사 및 보전이 매우 중요하다.

그 외에도 가동 연수가 오래된 발전소의 비물리적 노화를 평가하기 위해 소급 규제 적용 사항과 국내외 원전 고장 및 안전성 향상 사례를 조사하고 적용 여부 및 가능성, 현장 적용 소요 경비를 추정하여 계속 운전 투자비에 포함시킨다.

계속 운전의 경제성을 평가하기 위해서는 계속 운전에 의해 발전 운영자에게 회수되는 이득과 투자비를 비교하고 이득 비용비(benefit/cost ratio)를 산출한다.

대부분의 이득은 가동 원전을 계

속 사용함으로 인해 신규 원전 건설 투자비와 폐로 비용을 계속 운전 기간 동안 집행 보류함에 따른 이차 소득이다.

계속 운전 대상 발전소의 평균 이용률이 신규 원전의 이용률보다 높은 경우에는 전력 판매 이득의 증가로 계속 운전의 이득이 증가하고 이득 비용비가 높게 산출될 수도 있다.

5. 상세 수명 평가 및 노화 관리 방안 수립

타당성 평가 결과를 기초로 하여 계속 운전의 정책이 결정되면 발전소 상세 수명 평가 및 노화 관리 방안을 수립하고 종합 안전성 평가를 수행하게 된다.

〈그림 3〉은 국내 가동중 원전에서 수행하고 2단계 연구의 세부 분야별 연구 내용과 분야간의 연관성을 설명한다.

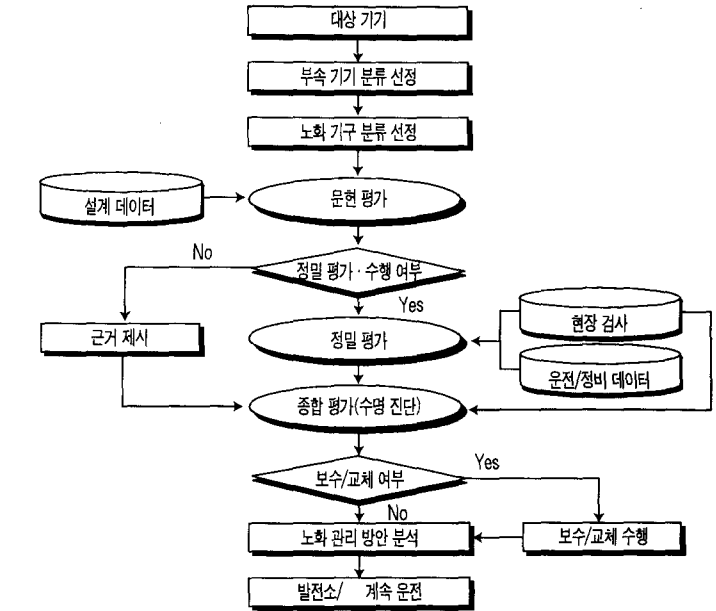
개발된 상세 수명 평가 기술을 현장 기기 및 구조물에 적용하여 수명 기간 동안의 주요 기기 건전성을 평가하고 현장 진단 및 시험으로 실제의 상태를 파악하며 계속 운전 기간 중에도 발전소의 성능을 감시할 수 있는 모니터링 시스템을 개발한다.

〈그림 4〉는 2단계에서 대상 기기의 수명을 평가하는 절차로서 기술적 평가에서 1단계와 구별되는 것은, 현장 노화 진단 및 시험의 결과를 발전소 수명 평가에 반영하고 비적용 대상 노화 기구의 기술적 근거를 문서로 명확히 기술하여 추후 인허가 신청에 대비하는 점이다.

현장 노화 진단 및 시험의 대표적인 것으로 매설 설비 및 구조물의 현장 노화 진단을 들 수 있다. 지하 매설물 등은 평소 발전소 운영에서 긴급도가 낮아 관리가 미흡할 수 있으므로 상태 진단을 통해 노화 관리 방안을 제시한다.

그 외 현장 진단 항목으로는 케이블 노화 진단, 주중기/급수 배관 진동 건전성, 2차측 배관 감육, 가압기 밀림관 열성층 시험 등이 있다.

수명 기간 동안에 기기·구조물의 건전성과 계통의 안전성을 보장하더라도 장기 사용 원전의 경우에는 발전소 노화 상태를 감시할 수



〈그림 4〉 주요 기기 상세 수명 평가 절차

있는 방법이 마련되어 항상 노화 정도를 정확히 파악하여 사전에 대처할 수 있어야 한다.

원전 수명 관리에 필요한 계통 감시 시스템으로는 운전 과도 상태 발생 횟수 자동 계수 시스템, 계통 운전 성능 감시, 원자로 냉각재 계통 차단 밸브 내부 누설 탐지, 노외 중성자 조사량 측정 장치, 노내 이물질 탐지 시스템 등을 들 수 있다.

수명 평가 및 경제성 평가에 의한 최적 노화 관리 방안과 각종 수집·생산된 기술 자료들을 데이터 베이스화하여 기록 보관한다.

전 수명 기간 동안 관련 부서에서의 활용이 용이하고 지속적으로 자

료를 수정 보완할 수 있는 시스템으로 구축되어야 한다.

계속 운전 기간 동안에 새롭게 발생하는 수명 관리 관련 내용을 추가하고 발전소 상태에 대한 객관적인 설명의 근거가 되는 데이터 베이스가 필요하다.

안전성 향상 활동

원전의 안전성 향상 및 유지 활동은 어떤 수명 관리 활동보다 엄격하며 조직적인 조치를 취하고 있다.

운전 및 정비의 체계적인 수행으로 안전성을 유지하기 위해 종합적인 예방 정비 체계 수립, 운전 및

고장 이력 분석을 통한 취약 기기 개선, 사고 전 예방 조치에 역점을 둔 품질 보증 활동 등을 적용하고 있다.

가동중 원전의 안전성을 점검하기 위해 매년 품질 보증 정기 감사로 안전 품질 활동 이행 상태를 확인한다.

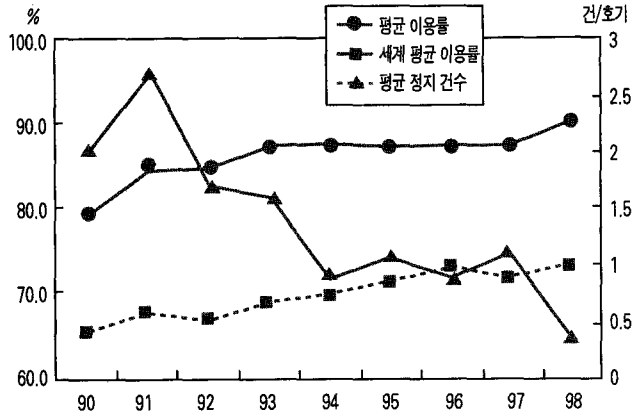
발전소 현장에서도 자체적으로 기술지침서에 따른 정기 점검, 기기 성능의 주기 점검, 중요 설비에 대한 월별 안전 점검 등을 수행하고 있다.

규제 법규상에도 원전의 안전성은 정기 검사, 수시 검사, 품질 보증 검사, 가동중 점검, 가동중/중 시험 등으로 원전 설비의 운전 안전성을 점검하도록 요구하고 있다.

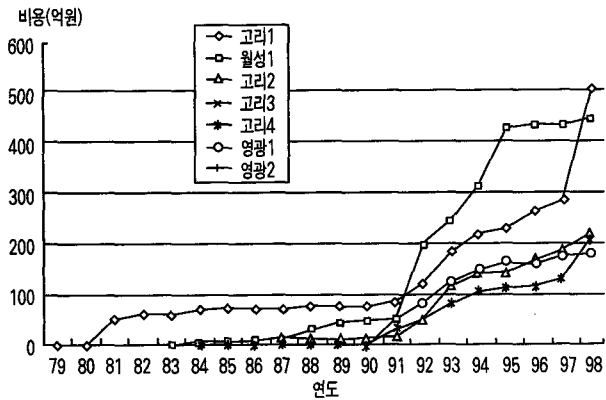
이러한 국내 기관과의 안전성 향상 활동 이외에도 해외의 국제 기구와 공동으로 가동중 원전의 안전성을 점검하여 국내 원전의 안전성을 국제적인 기술 수준과 비교하고 안전 관리의 객관성을 기하고 있다.

관련된 국제 안전 점검 기관으로는 국제원자력기구·미국원자력발전협회·세계원전사업자협회 등을 들 수 있다.

국제원자력기구는 3년에 한번씩 국내 원전의 안전 관리 실태를 점검하며, 기타 기구는 한전의 요청시 각 국의 원자력 안전 전문가들이 안전 점검을 수행하고 권고 사항을 도출한다.



〈그림 5〉 국내 원전 운전 성능



〈그림 6〉 가동 원전 안전성 향상 투자비

한전의 철저한 원전 안전성 향상 활동의 결과로 국내 가동중 원전의 평균 이용률은 약 90%에 달하고 있으며, 운전 안전성의 척도라고 할 수 있는 평균 불시 정지 횟수도 1회/년 이하를 유지하고 있다.

〈그림 5〉는 최근의 국내 원전의 평균 이용률 및 불시 정지 횟수를

비교한 것으로 세계 평균보다 양호한 실적을 보이고 있다.

〈그림 6〉은 국내 가동중 원전의 안전성 향상을 위한 호기별 투자 비용을 누적하여 비교하였다.

가장 가동 연수가 오래된 고리 1 호기와 월성 1호기의 안전성 향상 비용이 가장 높으며 고리 2호기부

터 상대적으로 최신에 건설된 발전소의 경우에는 비용이 적게 소요되었다.

〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 가동 연수가 오래된 발전소라 할지라도 평소에 수명 관리와 안전성 향상을 위한 투자를 꾸준히 하면 우수한 운전 성능을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

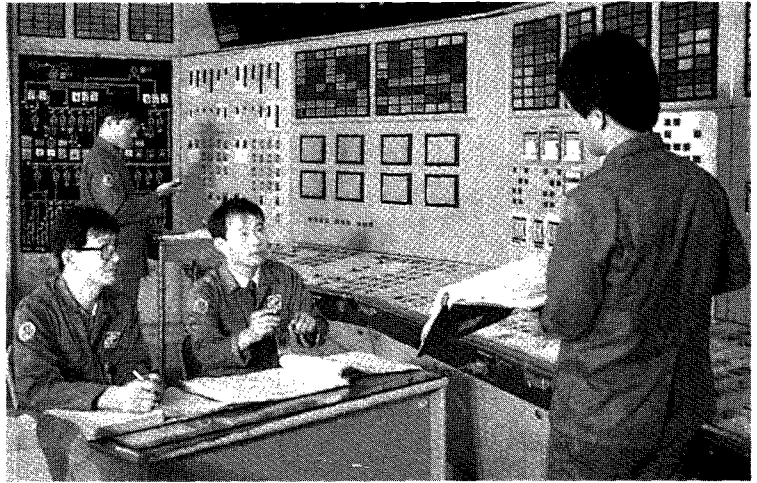
원전과 같은 산업 설비는 사람의 노화와는 달리 가동중에 적절한 수명 관리와 안전성 향상 투자를 지속하면 기기·구조물의 건전성과 계통 안전성을 확보하고 계속 운전의 가능성을 높일 수 있다.

주기적 안전성 검토

원전의 안전성을 확인하기 위한 제도로 국제원자력기구는 주기적 안전성 검토(PSR, periodic safety review) 지침을 마련하고 회원국들의 가동중 원전에 적용하도록 권고하고 있다.

한국도 국제원자력기구의 원자력 안전협약의 회원국으로 가입하였으며 주기적 안전성 검토를 적용하기로 하였다.

주기적 안전성 검토는 이탈리아에서 처음 시작하였으며 영국에서는 설계 수명 이상의 계속 운전의 안전성 평가에 활용하였고, 최근에는 많은 국가들이 안전성 점검과 계속 운전의 규제 도구로 활용하고 있다.



원전 중앙제어실. 원전의 설비 이용 효과와 경제성을 향상시키기 위한 수명 관리 및 계속 운전은 발전소 운전 안전성을 확보한 바탕 위에서 추진되어야 한다. 정비 및 노화 관리를 포함한 수명 관리는 개인의 건강 관리에 비유할 수 있고 발전소 주기적 안전 점검은 정기적인 종합 건강 진단과 같다.

주기적 안전성 평가는 대개 10년마다 물리적·비물리적 노화 현상을 포함하여 발전소의 안전성을 종합 검토하고, 안전성 개선 및 추가 보완 사항이 도출되면 가장 경제적이면서 효과적인 방법으로 현장 적용하며 현실적으로 어려운 경우에는 대안을 수립하여야 한다.

주기적 안전성 검토의 주요 착안 사항은 국내와 상업용 원전에서 발생한 고장 및 사고 원인과 안전성 향상 사례를 조사하고 대상 원전의 안전 활동과 비교한다.

주요 안전 확인 요소는 실제 물리적 조건, 안전성 분석, 기기 검증, 경년 열화, 안전 성능, 운전 경험/연구 결과 활용, 절차서, 조직 및 행정, 인적 인자, 비상 계획, 환경 영향의 11개 안전 인자이다.

일본의 경우에는 발전소 개요, 포괄적 운영 경험, 최신 기술 반영

분야로 나누어 검토하였으며, 포괄적 운전 경험에는 운전 실적, 운전 관리, 정비 관리, 연료 관리, 방사선 관리, 방사성 폐기물 관리, 비상시 조치, 장애 경험의 반영 사항을 검토하였다.

최신 기술 반영 분야는 원자로 시설 전반, 원자로 및 원자로 노심, 1차 냉각 설비 등 10개 발전소 계통별로 안전성 향상 활동을 종합 검토하였다.

이처럼 주기적 안전성 평가는 전세계 원전의 운전 경험과 최신 기술을 바탕으로 대상 원전의 현재 안전성 상태를 점검하고, 향후 10년간의 계속 운전 가능성을 발전 운영자가 자발적으로 안전성 측면에서 검토하는 것이므로 수명 관리의 효과적인 안전 규제 제도로 활용하는 나라들이 많다.

수명 관리와 안전성

전술한 바와 같이 원전의 설비 이용 효과와 경제성을 향상시키기 위한 수명 관리 및 계속 운전은 발전소 운전 안전성을 확보한 바탕 위에서 추진되어야 한다.

정비 및 노화 관리를 포함한 수명 관리는 개인의 건강 관리에 비유할 수 있고 발전소 주기적 안전 점검은 정기적인 종합 건강 진단과 같다.

예방 정비는 평소의 건강 관리를 위한 영양 및 체력 관리에 해당할 것이며 노화 관리는 나이에 따른 체계적인 건강 관리 프로그램과 같다.

장기 사용 원전의 노화 관리 프로그램은 중년층의 성인병 관리 프로그램처럼 다양한 방법이 있으므로 개별 발전소에 기술적으로 적합하고 경제적인 방법을 택해야 한다.

건강 관리도 개인의 형편을 무시하고 도가 지나치면 해가 될 수 있으므로 유의해야 한다. 영양 식단은 영양 실조의 하한선과 비만의 상한선 사이에서 적절한 에너지와 고른 영양소를 공급할 수 있도록 조화로운 식단을 마련해야 한다. 체력 관리도 나이와 숙련도에 맞게 운동의 종류와 강도를 조절하여 신체에 부작용이나 손상을 주지 않도록 해야 한다.

이처럼 원전의 운전 안전 지침은 개인 건강 관리에서 지켜야 하는 유의 사항들과 같다. 국내 가동중 원전에서도 각종 규제 지침과 요건을

철저히 준수하고 안전성 향상을 위한 기술 분석과 설비 개선에 적극적으로 투자하고 있다.

국내에는 아직 원전 수명 관리 및 계속 운전을 위한 규제 제도가 확립되어 있지 않지만 정부에서 제도 마련을 위하여 노력하고 있다.

수명 관리와 계속 운전, 주기적 안전성 검토를 종합적으로 연계하고 원전 운영의 경제성을 제고하면서 최고의 안전성을 유지할 수 있는 방향으로 규제 제도를 검토하고 있다.

체력 관리를 위한 지나친 운동이 도리어 신체에 해를 주듯이 수명 관리 안전 규제도 원전의 경제성을 저하시키지 않는 범위 내에서 마련되어야 한다.

주기적 안전성 검토는 가동 원전 수명 관리의 안전 수준을 주기적으로 종합 검토하고 안전성 향상 계획을 수립하여 수명 기간 동안의 발전소 안전성을 확보할 수 있는 적합한 제도이다.

주기적 안전성 검토는 기존의 안전성 활동을 대체하지 않고 현재 수행중인 안전성 향상 및 규제 요건 이행 활동들을 체계적으로 점검하는 제도이다.

특히 전세계 원전에서 발생하였던 고장 또는 안전성 향상 사례를 수집하고 도출된 수명 관리 교훈의 적용 여부를 검토하므로 현행 안전성 활동을 보완할 수 있다.

국내에서도 주기적 안전성 검토

제도의 시행 방안에 대한 의견을 수렴하고 있는 중이지만 수명과 건강 관리의 기본 정신에 유념한다면 국내 실정에 가장 적합한 제도를 창출할 수 있을 것으로 생각한다.

결론

가동중인 원자력발전소의 적절한 수명 관리로 계속 운전을 시행하면 증가하는 전력 수요에 대비하고 발전 설비 운용의 경제성을 제고할 수 있다.

수행중인 원전 수명 관리 연구의 개념과 추진 전략, 현황을 소개하고 수명 기간 동안의 안전성 확보를 개인의 건강 관리와 비교하였다.

원전 수명 관리 프로그램은 수명 기간 동안에 안전성을 확보할 수 있는 범위 내에서 적용되어야 한다.

그러나 지나친 체력 관리가 건강을 해치듯이 수명 관리의 안전 기준이 과도하면 원자력 발전의 원래 목적인 경제성을 저하시킬 수 있다.

현행 기술 수준을 감안하고 적절한 안전 수준을 유지하기 위한 방법으로 주기적 안전성 검토 방법이 적합하다. 그러나 세부 수행 지침과 적용 방안은 원전 안전성과 수명 관리 경제성 요건을 충족시킬 수 있도록 충분한 검토와 시범 적용, 의견 수렴 과정을 거쳐서 제도화해야 할 것이다.