

원자로시설의 경년열화 종합관리에 관한 규정개발 방향

신호상[†] · 홍진기^{*} · 김진수^{*} · 정연기^{*} · 정명조^{*} · 정해동^{*} · 최영환^{*}

Development of Regulation on the Integrated Materials Aging Management for Nuclear Facilities

H.S. Shin[†], J.K. Hong^{*}, J.S. Kim^{*}, Y.K. Chung^{*}, M.J. Jhung^{*}, H.D. Chung^{*} and Y.H. Choi^{*}

(Received 5 OCT 2011, Accepted 4 NOV 2011)

ABSTRACT

The renewed global interest in nuclear power has arisen from the need to reduce greenhouse gas emissions and to provide sufficient electricity for a growing global population. Many countries with nuclear power plants (NPPs) are still implementing license extensions of 10~20 years, and even consideration is being given to the concept of life-beyond-60, a further period of license extension from 60 to 80 years. To solve the materials aging problem is integral to its success. A foundation for effective aging management of nuclear power plants is that aging is properly taken into account at each stage of a plant's lifetime, i.e. in design, manufacture, construction and operation including long term operation and decommissioning. To evaluate the plant aging phenomena, a lot of background information such as materials and environment of the parts of the reactor and plant systems is needed by the experts. Information on degradation mechanisms is also used. In this paper, a regulation on the integrated materials aging management for nuclear facilities is proposed. The proposed regulation identifies key elements of effective aging management for nuclear power plants and provides the requirements on aging management for nuclear facilities throughout all stages of the lifetime of the plant.

Key Words : Materials aging(재료 경년열화), Long term operation(장기 운전), Aging management(경년열화 관리)

1. 서론

전세계적으로 원자력발전소의 가동연수가 증가함에 따라, 점차 발전소의 기기 및 배관 재료의 열화가 진행되고 있으며, 손상발생 빈도도 증가하고 있는 실정이다.

이러한 손상의 대부분은 기기의 경년열화에 의해 발생하고 있다. 원자력발전소의 수명연장이 확대되어 가고 있는 현재의 추세에서, 경년열화에 의한 재료손

상이 중요기기에 심각한 손상으로 전개될 경우, 노후된 원자력발전소의 활용에 큰 걸림돌로 작용할 것이다.

현재 국내 원자력발전소의 절반이상이 20년 이상 운전중으로 향후 발전설비의 노후화에 대비하여, 기존 규정을 재검토하여, 보다 체계적이고, 통합적인 경년열화관리에 관한 규정을 마련할 필요가 있다.

본 논문에서는 원자력안전기술원에서 지금까지 수행한 규제연구결과로 도출된 경년열화 데이터베이스, 관리프로그램, 규제검증코드 및 지침/고시 경험을 바탕으로, 원자력발전소 설계, 운전, 계속운전 및 폐로 단계에 이르기까지 전 수명주기에 걸쳐 심층적인 방법으로 경년열화 규제현안에 대처할 종합관리 규정 개발결과에 대해 소개하고자 하였다.

† 책임저자, 회원, 원자력안전기술원 공학연구실
E-mail : hsshin@kins.re.kr
TEL : (042)868-0580 FAX : (042)868-0168

* 한국원자력안전기술원

2. 현행 경년열화관리 규제요건

국내 원자력발전소의 현행 경년열화 관리 규정은 주로 주기적 안전성 평가에서 요구되는 경년열화 평가에 관한 사항과 설계수명 이후 계속운전 평가시 요구되는 추가적인 수명평가 요건, 원자로시설의 가동중검사 및 감시 등의 교육과학기술부 고시 규정 등을 포함한다.

발전용원자로운영자는 해당 원자로시설의 운영허가를 받은날부터 10년마다 안전성을 종합적으로 평가하고, 그 평가보고서를 작성하여 제출하여야 하는데, 주기적 안전성평가의 내용은 경년열화(시간 경과 또는 사용에 따라 원자력발전소의 계통·구조물·기기의 손상을 초래하는 물리적 또는 화학적 과정을 말함)에 관한 사항을 포함하여야 한다^{1,2)}.

또한, 발전용원자로운영자는 원자로시설의 설계수명기간이 만료된 후에 그 시설을 계속하여 운전하고자 할 때에는 설계수명기간 만료일로부터 5년 내지 2년 이전에 최신 운전경험 및 연구결과 등을 반영한 기술기준을 활용하여, 계속운전기간을 고려한 주요 기기에 대한 수명평가결과를 포함한 평가보고서를 제출하여야 한다^{3,4)}.

경년열화 평가에 관한 상세사항은 원자력시설에서 요구되는 안전여유도를 유지하기 위하여 원자로시설의 계통·구조물·기기의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지의 여부와 향후 원자력발전소 안전운전을 위하여 적절한 경년열화관리계획이 확립되어 있는지를 확인하는 것으로 다음 사항을 포함하여야 한다⁵⁾.

- 평가대상 계통·구조물·기기의 분류 및 선정
- 평가대상 계통·구조물·기기별 경년열화현상분석
- 경년열화현상에 따른 계통·구조물·기기의 기능 및 안전여유도
- 계통·구조물·기기의 성능미달시점 및 미래상태 예측

특히, 발전용원자로 및 관계시설에 대한 운영허가일부터 20년이 경과한 후에는 계통·구조물·기기의 경년열화 완화대책 및 관리계획이 포함되어야 한다.

설계수명기간 만료이후 계속 운전되는 원자로시설에 요구되는 주요기기 수명평가 사항은 계속운전기간 동안 주요 계통·구조물·기기의 기능이 확보되어 있는지를 확인하는 것으로서 다음사항을 포함하여야 한다.

- 수명평가 대상인 계통·구조물·기기의 분류 및 선정
- 계통·구조물·기기의 수명에 대한 영향분석
- 계속운전기간동안의 주변 영향을 고려한 해당 계통·구조물·기기의 수명평가
 - 경년열화 평가시 원자로시설의 시간 경과에 따른 안전도 및 안전조치가 다음 기준을 충족하여야 한다⁶⁻⁸⁾.
- 원자로시설은 시간 경과에 따라 나타날 수 있는 경년열화현상에 대하여 안전기능을 유지할 수 있어야 하며, 평가기준일로부터 10년 후까지의 기간동안 안전성을 보장 할 수 있는 안전여유도가 확보되어야 한다.
- 발전용원자로운영자는 원자로시설의 경년열화관리계획을 수립·시행하여 계통·구조물·기기의 안전기능과 안전여유도가 보증되도록 하여야 한다. 계속운전을 하고자 하는 원자로시설은 계통·기계·구조물에 대한 안전성 향상을 위하여 경년열화관리대상선정 및 경년열화 관리계획에 대한 평가를 수행하여 한다.
 - 경년열화관리 대상선정과 관련하여 대상 계통·기기·구조물 선정방법을 제시하고 그 타당성을 입증하여야 하며, 대상이 되는 계통·기기·구조물의 목록을 제시하고 각 사항에 대해 해당되는 경년열화 관리계획을 제시하여야 한다.
 - 경년열화 관리계획 평가에 관련하여서는 경년열화 관리계획에 적용범위, 예방조치, 감시 및 검사 변수, 경년열화영향 탐지, 감시 및 경향분석, 허용기준, 시정조치, 확인절차, 행정적 통제, 운전경험 등에 대한 내용을 포함하여야 하며, 해당 원자로의 설계 및 운전특성과 운전경험을 고려하여, 계속운전을 위해 검토해야 할 사항, 계속운전 이전에 조치되어야 할 사항, 계속운전 이후 추가로 조치되어야 할 사항 등을 포함하여야 한다.
 - 이와 함께 원자로시설의 경년열화관리와 관련된 교육과학기술부 고시 제 2009-37호는 다음의 규정을 포함한다⁹⁻¹¹⁾.
- 원자로압력용기 감시시험 기준(과기.원자로.014)
- 원자로시설의 가동중검사에 관한 규정(과기.원자로.016)
- 안전관련 펌프 및 밸브의 가동중 시험에 관한 규정 고시(과기.원자로.033)

- 원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침 고시(과기.원자로.035)

스웨덴 및 헝가리 등 해외 원전보유국에서도 원자로시설의 적절한 경년열화관리 또는 주기적 안전성평가를 통한 수명연장 노력이 시도되고 있는데, 이를 뒷받침할 상세규정은 IAEA Safety Series에 반영되어 있으며, 특히 관리하고 점검해야 할 안전인자에 대해서는 IAEA 회원각국의 운전경험을 반영하여 확대하고 세분화하고 있는 추세이다¹²⁾.

3. 경년열화 종합관리 규정개발

3.1 경년열화 종합관리 규정체계

효과적인 경년열화 관리를 위해서는 발전소 전수명기간중 설계단계, 건설단계, 운전단계, 계속운전단계, 폐로단계 등 단계별 경년열화 관리조치가 중요하다. 따라서 금번 개발되는 경년열화 종합관리 규정은 원자력법, 시행령, 시행규칙의 주기적 안전성평가 요건, 경년열화 관리 관련 교육과학기술부 고시 및 국제기준을 참고하고, 지금까지 수행한 원자력안전규제연구 결과물(경년열화 데이터베이스, 경년열화 관리프로그램, 규제검증 코드 및 규제지침)을 바탕으로 원자력발전소 설계단계부터 폐로단계까지 전수명기간 단계별 경년열화 관리요건을 포함하고 있다¹³⁾.

3.2 설계단계 경년열화 평가

원자로시설의 계통·기기·구조물의 설계시 다음의 경년열화에 관한 사항을 포함하여야 한다.

- 경년열화 관리계획 및 이행에 필요한 선행조건
- 다른 유사 원자로시설의 계통·기기·구조물의 경년열화현상 분석 및 반영
- 경년열화현상에 따른 계통·기기·구조물의 재질 적합성 평가
- 검사, 보수·교체활동 접근성 및 방사선 피폭을 고려한 계통·기기·구조물 설계 및 배치
- 계통·기기·구조물 변경 및 교체 설계시 경년열화 평가

3.3 제작 및 건설단계 경년열화 감시 및 조치에 관한 사항

원자로시설의 계통·기기·구조물의 제작 및 건설시 다음의 경년열화에 관한 사항을 포함하여야 한다.

- 원자로시설의 계통·기기·구조물 제작 및 건설시 경년열화 기구, 영향 및 손상, 손상완화 조치인자 고려
- 경년열화 확인을 위한 기준데이터 수집
- 원자로 설계 및 운전 특성과 관련 원자로 운전 경험을 반영한 경년열화 감시시험편 설치

3.4 운전단계 경년열화 감시 및 조치에 관한사항

발전용원자로운영자는 주기적으로 경년열화에 관한 사항을 평가하여야 한다.

(경년열화 평가 내용)경년열화 평가는 원자로시설에서 요구되는 안전여유도를 유지하기 위하여 원자로시설의 계통·기기·구조물의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지 여부와 향후 원자력발전소 안전운전을 위하여 적절한 경년열화관리계획이 확립되어 있는지를 확인하는 것으로 다음 사항을 포함하여야 한다.

- 평가대상 계통·구조물·기기 목록
- 평가대상 선정방법의 타당성 입증
- 평가대상 계통·구조물·기기별 경년열화현상분석
- 경년열화현상에 따른 계통·구조물·기기의 기능 및 안전여유도
- 계통·구조물·기기의 성능미달시점 및 미래상태 예측
- 운영허가일부터 시간의 경과에 따른 발전용원자로 및 관계시설의 계통·구조물·기기에 대한 경년열화 관리계획 및 완화대책
- (경년열화 관리계획 및 완화대책 평가)운영허가일로부터 20년이 경과한 원자로시설의 경년열화 관리계획 및 완화대책 평가는 다음 사항을 만족하여야 한다.

- 경년열화 관리계획 및 완화대책에는 적용범위, 예방조치, 감시 및 검사 변수, 경년열화영향 탐지, 감시 및 경향분석, 허용기준, 시정조치 및 완화대책, 확인절차, 행정적 통제, 운전경험 등에 대한 내용을 포함하여야 한다.

- 가압경수로 및 가압중수로 경년열화 관리계획은 다음 Table 1의 사항을 포함하여야 하며, 해당 원자로의 설계 및 운전 특성과 운전경험으로 인해 제시된 경년열화 관리계획이 적용되지 않는 것을 입증하는 경우에는 이를 평가에서 제외할 수 있다. 또한 Table 1에 제시된 경년열화 관리계획을 유사한 항목들끼리 통합하여 관리계획을 수립하고자 할 때는 그 타

Table 1 경년열화 관리계획 평가에 관한 사항
a) 가압경수로

세부사항	참조 기술기준
1. 안전등급 1,2,3 기기 가동중검사 2. 안전등급 지지대 가동중검사 3. 일회검사 4. 원자로용기 감시 5. 수화학 6. 봉산부식 7. 주조 오스테나이트 스테인리스강의 열취화 8. 유동가속 부식 9. 재료의 선택적 침출 10. 원자로 헤드 덮개 스티드 11. 니켈합금 기기 균열 및 원자로 냉각재 압력경계 기기의 봉산 유발부식에 의한 재료손실 12. 원자로용기 내부 구조물 13. 볼트결합 건전성 14. 증기발생기 세판 건전성 15. 천정의 대용량 및 소용량(핵연료 재장전 관련) 취급계통 16. Boraflex 및 중성자 흡수재 감시 17. 매설 배관 및 탱크 18. 지상의 탄소강 탱크 19. 연료유 화학 20. 개방형 냉각수 순환계통 21. 밀폐 화학처리수 계통 22. 압축공기계통 23. 화재방호설비 24. 소방수계통 25. 격납건물 라이너 플레이트, 강제 격납용기 26. 격납건물 27. 격납건물 누설률 시험 28. 조적벽 29. 구조물 30. 원전 수리 구조물 31. 원자력 방호도장 32. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 전기 케이블 및 연결부 절연재료 33. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 계측회로에 사용된 전기 케이블 및 연결부 절연재료 34. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 접근 곤란한 중전압 케이블 35. 금속 밀폐형 모선 36. 퓨즈 홀더 37. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 전기 케이블 금속 연결부	- 미국 NUREG-1800(운영허가 갱신 안전심사 지침) - NUREG-1801(GALL) - NUREG-1950(NUREG-1801 및 NUREG-1800 개정배경)

당성을 입증하여 통합 관리 할 수 있다^{14,22)}.
 (경년열화 평가의 기준)원자로시설 중 안전에 중요한 계통·구조물 및 기기는 안전기능의 중요도에 상응하는 안전등급 및 규격으로 분류하여, 설계·제작·설치·시험·검사되어야 하며, 시간 경과에 따른 안전도 및 안전조치는 다음 기준을 충족하여야 한다.
 - 원자로시설은 시간 경과에 따라 나타날 수 있는 경

년열화현상에 대하여 안전기능을 유지할 수 있어야 하며, 평가기준일부터 10년 후까지의 기간동안 안전성을 보장 할 수 있는 안전여유도가 확보되어야 한다.
 - 발전용원자로운영자는 원자로시설의 경년열화관리 계획을 수립·시행하여 계통·기기·구조물의 안전기능과 안전여유도가 보증되도록 하여야 한다.

Table 1 경년열화 관리계획 평가에 관한 사항
b) 가압중수로

세부사항	참조 기술기준
1. 안전등급 1,2,3 기기 가동중검사 2. 안전등급 지지대 가동중검사 3. 일회검사 4. 원자로집합체 5. 핵연료채널 6. 핵연료 교환기 7. 수화학 8. 공급자관 9. 손상연료 위치감시계통 10. 유동가속부식 11. 재료의 선택적 침출 12. 환형기계계통 13. 니켈합금 용접부 14. 볼트결합 건전성 15. 증기발생기 세관 건전성 16. 크레인 17. 매설 배관 및 탱크 18. 지상의 탄소강 탱크 19. 연료유 화학 20. 중수관리 21. 개방형 냉각수 순환계통 22. 밀폐형 화학처리수 계통 23. 압축공기계통 24. 화재방호설비 25. 소방수계통 26. 원자로건물 비금속 라이너 27. 원자로건물 28. 원자로건물 누설률 시험 29. 조적벽 30. 구조물 31. 원전 수리 구조물 32. 원자력 방호도장 33. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 전기 케이블 및 비금속 연결부 절연재료 34. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 계측회로에 사용된 전기 케이블 및 연결부 절연재료 35. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 접근 곤란한 중전압 케이블 36. 금속 밀폐형 모선 37. 휴즈 홀더 38. 내환경검증 요건을 적용받지 않는 전기 케이블 금속 연결부	- CNSC Reg. Guide G-360 - IAEA Safety Series No.50-P-3 - IAEA Technical Report Series No.338 - IAEA Safety Report Series No.15 - NUREG-1800(운영허가 갱신 안전심사 지침) 및 NUREG-1801(GALL)중 가압중수로에 적용이 가능한 분야

3.5 계속운전 경년열화 평가

원자로시설의 설계수명기간이 만료된 후에 그 설비를 계속하여 운전하고자 할 때에는 최신 운전경험 및 연구결과를 반영한 기술기준을 활용하여, 계속운전 경년열화 평가를 수행하여야 한다.

(계속운전 경년열화관리 대상선정 평가)계속운전 경년열화관리 대상선정과 관련하여 대상이 되는 계통·기기·구조물을 선정하는데 사용한 방법을 제시하고

그 타당성을 입증하여야 하며, 대상 계통·기기·구조물의 목록을 제시하고 각 사항에 대해 해당되는 경년열화 관리계획을 제시하여야 한다.

(계속운전 경년열화 관리계획 평가) 계속운전 경년열화 관리계획 평가와 관련하여 경년열화 관리계획에는 적용범위, 예방조치, 감시 및 검사 변수, 경년열화 영향 탐지, 감시 및 경향분석, 허용기준, 시정조치 및 완화대책, 확인절차, 행정적 통제, 운전경험 등에 대한

내용을 포함하여야 하고, 해당 원자로의 설계 및 운전 특성과 운전경험을 고려하여, 계속운전을 위한 검토사항, 계속운전 이전과 이후 조치되어야 할 사항 등을 포함하여야 하며, 해당 원자로의 설계 및 운전 특성과 운전 경험을 반영하여 필요한 경우에는 이를 경년열화 관리계획에 추가하여야 한다.

(계속운전을 위한 수명평가에 관한 사항) 계속운전을 위한 시간제한 경년열화 분석은 제시된 대상에 대해 다음 세 가지 사항중 어느 하나에 해당하는 방법으로 입증하여야 한다.

- 시간제한 경년열화 분석이 계속운전 기간동안 유효하다.
- 시간제한 경년열화 분석이 계속운전 기간 종료시점까지 예측되어 있다.
- 의도된 기능에 대한 경년열화의 영향은 계속운전 기간동안 관리될 것이다.

이 때 개별 원자로에 대한 시간제한 경년열화 분석의 모든 면제 사항을 제시하여야 하며, 계속운전 기간동안 상기 면제사항들의 기술적 타당성을 입증하여야 한다.

3.6 폐로단계

폐로 활동에 필요한 장비, 구조물, 계통 및 기기(격납계통, 냉각장비, 인양장비 및 상대감시 장비)는 적절히 확보되고 배치되어, 적시에 활용가능하고, 기능을 발휘해야 한다.

3.7 부가규정

안전관련 설비의 가동중 검사, 가압경수형 원자로의 압력용기 검사, 안전관련 펌프 및 밸브의 경년열화 관리, 원자로시설의 계속운전 평가 기술기준 적용 등과 관련한 세부규정은 원자력안전위원회 별도 고시에 따른다.

4. 결 론

원자력발전소의 장기운전 추세에 따라 과거의 경년열화 관리체계와는 달리, 설계단계부터 경년열화를 고려하고, 점차 노후화 되어가는 원전의 경년열화 완화 및 관리계획에 대한 보완이 중요한 현 시점에, 경년열화 기구별 현상과 기기에 미치는 영향, 이에 대한 대책과 관련된 원자력안전분야 연구결과를 전반적으로 정리하여, 경년열화 종합관리 규정 개발을 진행하

고 있다.

현행 경년열화 관리 규정과 비교하여, 금번 개발되는 경년열화 종합관리에 관한 규정은 다음의 특징을 가지고 있다.

첫째, 기존 원자로시설의 주기적 안전성평가 및 계속운전 관련 경년열화 관리 규정을 보완하여, 최신 기술 및 연구결과(재료 경년열화 데이터베이스, 평가코드 및 관리프로그램)를 반영한 현재의 기술관점에서 경년열화관리 프로그램의 유효성을 원자로시설의 설계단계, 제작 및 건설단계, 운전단계 등 원자로 전수명기간 각 단계마다 평가 및 갱신하도록 하였다.

둘째, 운영허가일로부터 20년이 경과한 원자로시설의 경년열화 관리계획 및 완화대책에 대한 상세기준을 마련하고, 계속운전 단계 경년열화 관리계획 세부사항과 함께 현재의 기술기준에 맞게 수정하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 원자력법 제23조의 3, 주기적 안전성평가, 2008
2. 원자력법 시행령 제42조의 3, 주기적 안전성평가의 내용
3. 원자력법 시행령 제42조의2, 주기적 안전성평가의 세부사항
4. 원자력법 시행령 제42조의 4, 주기적 안전성평가의 방법 및 기준
5. 원자력법 시행규칙 제19조의 2, 주기적 안전성평가의 세부사항
6. 원자력법 시행규칙 제19조의 3, 주기적 안전성평가의 기준
7. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제12조, 안전등급 및 규칙
8. 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제49조, 초기시험
9. 교육과학기술부 고시 제2009-37호, 원자로압력용기 감시시험 기준,
10. 교육과학기술부 고시 제2009-37호, 원자로시설의 가동중검사에 관한 규정,
11. 교육과학기술부 고시 제2009-37호, 원자로시설의 계속 운전평가를 위한 기술기준적용에 관한 지침
12. IAEA Safety Report Series No.15, Implementation

- and Review of NPP Ageing Management Programme.
13. IAEA Safety Guide, No. NS-G-2.12, Aging Management for Nuclear Power Plants.
 14. USNRC NUREG-1800, Standard Review Plan for the Review of License Renewal Applications for Nuclear Power.
 15. USNRC NUREG-1801, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report.
 16. USNRC NUREG-1950, Disposition of Public Comments and Technical Bases for Changes in the License Renewal Guidance Documents NUREG-1801 and NUREG-1800.
 17. CNSC Reg. Guide G-360, Life Extension of Nuclear Power Plants.
 18. IAEA Safety Series No. 50-P-3, Data Collection and Record Keeping for the Management of Nuclear Power Plant Ageing.
 19. IAEA Technical Report Series No.338, Methodology for the Management of Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety.
 20. USNRC Regulation, Title 10, Code of Federal Regulations 54, Requirements for renewal of operating licenses for nuclear power plants.
 21. USNRC Regulation, Title 10, Code of Federal Regulations 50, Appendix G, Fracture Toughness Requirements.
 22. USNRC Regulation, Title 10, Code of Federal Regulations 50.49, Environmental qualification of electric equipment important to safety for nuclear power plants.