

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.495

CANDU형 원전 계속운전 평가지침서 개발[§]

최영환^{**} · 김흥기^{*}
* 한국원자력안전기술원 공학연구실

Development of the Regulatory Guidelines for Continued Operation of CANDU Reactor in Korea

Young Hwan Choi^{**} and Hong Key Kim^{*}

* Engineering Research Department, Korea Institute of Nuclear Safety

(Received August 13, 2009 ; Revised January 20, 2010 ; Accepted January 20, 2010)

Key Words: CANDU Reactor(가압중수형 원전), Continued Operation(계속운전)

초록: 이 연구에서는 우리나라 CANDU형 원전의 계속운전 규제지침을 개발하였다. CANDU 600 로형인 월성 1호기는 2012년에 30년 설계수명에 도달한다. 설계수명이후에 계속운전을 원하는 원전 사업자는 11개 인자를 포함하는 주기적안전성 평가 보고서를 제출해야 하며, 추가로 다음 사항에 대한 보고서를 제출해야 한다. (1) 경년열화 관리에 대한 범위 및 사전 검토 결과 (2) 경년열화 관리 프로그램 (3) 계속 운전기간을 포함하는 시간제한 경년열화 수명평가, (4) 운전경험 및 주요 연구결과의 반영. 이 연구에서는 상기 항목에 대한 54개의 규제지침이 개발되었다.

Abstract: In this paper, the regulatory guidelines for the continued operation of the CANDU reactor in Korea were introduced. Wolsong Unit 1, which is a CANDU 600 reactor in Korea, will reach its design life of 30 years in 2012. A licensee who wants to operate a nuclear power plant beyond its design life should submit reports of periodic safety reviews (PSRs) conducted on the basis of 11 safety factors. In addition, the licensee should provide the following: (1) scoping and screening results for aging management, (2) aging management program, (3) TLAA, including the continued operation term, (4) operation-experience feedback, and (5) important safety-research results. In this study, 54 regulatory guidelines for the five above-mentioned items for the CANDU reactor in Korea were developed.

1. 서론

우리나라 원자력법에서는 설계수명을 초과한 원자력발전소에 대해 평가를 거쳐 매 10년단위로 계속운전(Continued Operation)을 할 수 있도록 허용하고 있다.⁽¹⁾ 이를 근거로 가압중수형(PWR) 원전인 고리 1호기는 2007년6월, 30년 설계수명 이후, 10년간의 계속운전이 허용된 바 있다. 가압중수형 원전(또는 CANDU형 원전)인 월성 1호기는 2012년에 30년 설계수명에 도달하기 때문에 이에 대한 규제 차원의 대비가 요구된다.

이전 과기부고시(2005-31호)는 PWR형 원전에 대한 계속운전만을 고려하고 있어, CANDU형 원전의 계속운전에 적용할 수 없는 문제가 있었다. 이에 따라 CANDU형 원전의 설계 및 운전 특성을 고려하여 총 54개 평가사항을 추가하여 관련 과기부고시 “원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침”을 개정하였다.⁽²⁾(교과부고시 제2009-37호)

본 연구의 목적은 이들 54개 평가사항에 대한 세부 규제지침인 ‘가압중수로 원전 계속운전 평가지침서’를 개발하는 데 있다.

2. 계속운전평가지침서 구성

가압중수형 원전 계속운전 평가지침서는 전체

§ 이 논문은 2009년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, young@kins.re.kr

2장으로 구성되어 있다. 평가지침서 제1장에서는 계속운전 심사의 일반적인 사항을 기술하고 있으며, 제2장에서는 계속운전을 위한 안전성평가의 항목별 세부내용이 기술되어 있다.

계속운전의 안전성평가를 위한 세부내용은 일반지침, 경년열화관리 대상선정 평가에 관한 사항, 경년열화관리계획(Aging Management Program : AMP) 평가에 관한 사항, 계속운전을 위한 수명평가(Time Limited Aging Analysis : TLAA)에 관한 사항, 운전경험 및 연구결과 반영 필요사항 등 전체 5개 분야로 구분되어 있으며 부록을 제외하고 총 54개의 평가지침으로 구성되어 있다. 본 지침은 미국 및 캐나다의 관련 지침과 국내 연구 결과 등에 근거하여 개발되었다.^(3~7)

3. CANDU형 원전 계속운전 평가지침

3.1. 일반 지침

본 지침서의 적용범위에 속하는 계통, 기기, 구조물들은 다음과 같다. (1) 원자로 냉각재 압력경계의 건전성, 원자로 정지 및 그 이후의 안전 정지조건 유지 능력, 소외피폭에 상응하는 잠재적인 소외 피폭을 초래할 수 있는 사고에 대한 예방 또는 완화능력 등의 기능을 보장하기 위하여 설계기준사건 동안 및 그 이후에 그 본연의 기능이 유지되어야 하는 안전 관련 계통, 기기, 구조물, (2) 고장 시 상기 (1)에 명시된 기능 중 어느 하나라도 만족스럽게 수행하는 데 방해가 될 수 있는 모든 비안전 관련 계통, 기기, 구조물, (3) 화재방호, 내환경검증 등에 대한 소급적용 요건을 만족함을 입증해 주는 안전해석이나 발전소 평가와 관련되는 모든 계통, 기기, 구조물 등이다.

본 심사지침서에서 사용되는 현행 인·허가 기반(Current Licensing Basis, 이하 CLB라 함)의 정의는 다음과 같다. (1) CLB는 특정발전소에 적용하는 규제 요건과 발전용 원자로운영자의 서면 서약서(commitments)로 구성되어 있다. (2) 발전용 원자로운영자의 서면 서약서는 해당 규제 요건과 발전소의 특정 설계기준을 준수하면서 운전하는 것을 보장하기 위한 것이다. (3) 발전소의 특정 설계기준은 허가기간동안의 모든 개선과 추가를 포함하며 인·허가문서로 등록되어 유효한 설계기준을 의미한다. (4) 현행 허가의 기술적 근거는 원자력법 및 관련 법령, 행정명령, 허가조건, 면

제사항 및 운영기술지침서를 포함한다. (5) CLB는 개별 발전소의 설계기준 정보를 포함한다. 이 설계기준 정보에는 최종안전성분석보고서의 최신판에 정의되어 있는 개별발전소 설계기준정보와 발전용 원자로운영자의 서면 서약서가 있다. 발전용 원자로운영자의 서약서에는 행정조치에 대한 발전용 원자로운영자의 조치공문뿐만 아니라 규제기관의 안전성평가 혹은 발전용 원자로운영자 사건보고서에서 기술되어 있는 발전용 원자로운영자의 서면 서약서가 있다.

계통, 구조물, 기기에 대해 경년열화관리 심사의 대상이 되는 구조물 및 기기가 도출되어야 한다. 경년열화 평가 대상으로 다음과 같은 구조물과 기기를 포함하여야 한다. (1) 이동부분(Moving Parts)이 없거나 형상이나 특성의 변화를 주지 않고 의도된 기능을 수행하는 구조물 및 기기. 이러한 구조물, 기기에는 압력관, 원자로냉각재압력경계, 증기발생기, 가압기, 배관, 펌프케이싱, 밸브 몸체, 기기지지구조물, 압력보유경계, 열교환기, 배기관, 격납용기, 전기 및 기계 관통부, 설비반출입구, 내진1등급 구조물, 전기케이블 및 연결부, 케이블선반 등이 포함된다. 펌프(케이싱 제외), 밸브(몸체 제외), 모터, 디젤발전기, 공기압축기, 방진기, 제어봉구동장치, 배기댐퍼, 압력전달기, 압력지시기, 수위지시기, 스위치기어, 냉각팬, 트랜지스터 배터리, 브레이크, 릴레이 스위치, 전원변환기, 회로판, 배터리 충전기, 전원공급기 등은 제외된다. (2) 보증된 수명기간 또는 특정 기간동안 교체하지 않는 구조물 및 기기 등이다.

3.2 경년열화관리 대상선정 평가

경년열화관리 대상 선정은 Table 1에 나타난 바와 같이 기계계통, 구조물, 전기 및 계측제어계통 등에 대해 적용된다. 대표적인 기계계통은 다음과 같이 구성되어 있다. (1) 원자로냉각계통(원자로, 냉각재 압력경계 부분을 구성하는 기기, 냉각재 파이프계통 및 연결 라인, 증기발생기), (2) 안전계통

Table 1 The Evaluation scope for aging management

- | |
|--|
| 1. Scoping and identification of a mechanical system |
| 2. Scoping and identification of components |
| 3. Scoping and identification of electricity and measurements/control system |

(격납용기 살수 및 격리계통, 비상노심 냉각계통, 원자로건물 공기냉각계통), (3) 보조 및 일반서비스계통(신규 및 사용후핵연료 저장시설, 사용후핵연료 냉각 및 정화계통, 하중 취급계통, 개방 및 폐쇄 사이클 냉각수 계통, 최종 열제거원, 압축공기계통, 환형기체 계통, 환기계통, 디젤발전기 계통, 화재방호계통), (4) 증기 및 동력 변환계통(터빈, 주증기 및 추출증기, 급수, 응축, 증기발생기 취출, 보조급수) 등이다. 이들은 계속운전 범위 내에 있는 “수동형”이며 “장주기”인 구조물 및 기기들이다.

계속운전의 안전성평가를 위한 구조물은 다음과 같다. (1) 격납건물, (2) 건물 구조물(보조건물, 핵연료건물, 디젤발전기 건물, 터빈 건물, 냉각해수취수구 구조물 등), (3) 각종 지지구조물(케이블 트레이, 배관지지대 및 행거, 기기의 구조적 지지대, 공기조화 덕트 지지물 등), (4) 비안전관련이나 그것의 고장이 안전관련 설비의 안전기능을 수행하는데 영향을 줄 수 있는 비안전관련 구조물 등이다. 이들 범위에 포함되는 대표적인 구조요소에는 벽체, 슬래브(바닥, 층, 지붕), 기초, 보, 기둥, 뼈대 및 철골구조물 등이 포함된다. 계속운전의 안전성평가를 위한 전기 및 계측제어 계통에는 전기케이블 및 연결부가 포함된다.

3.3 경년열화관리계획(AMP) 평가

CANDU형 원전의 경년열화관리계획(AMP)은 Table 2에 제시된 38건에 대해 수행되어야 한다. AMP는 계속운전을 위한 기기, 계통, 구조물의 경년열화 관리계획을 다루고 있으며 내용은 평가분야, 평가지침, 특별 고려사항 및 참고문헌으로 되어 있다. 평가지침은 AMP의 범위, 예방조치, 감시/검사 변수, 경년열화영향 탐지, 감시 및 경향분석, 허용기준, 시정조치, 확인 절차, 행정적 통제, 운전경험으로 세분화 되어 있다.

3.3.1 AMP의 범위

AMP 범위에는 프로그램이 경년열화를 관리하는 특정구조물과 기기를 포함하여야 한다. 본 AMP이 적용되는 기기, 계통, 구조물의 목록이 Table로 제시되어야 한다. Table에는 AMP의 대상이 되는 부분에 대한 정보(예를 들어, 배관의 경우 배관 위치, 배관 재질, 배관 크기 등)가 가능한 한 자세히 표시되어야 한다.

Table 2 Lists for aging management program

1. Inservice inspection for safety class components
2. Inservice inspection for safety class supports
3. One-time inspection
4. Reactor core assembly
5. Fuel channel
6. Fuelling machine
7. Water chemistry
8. Feeder piping
9. 손상연료 위치감시계통
10. Flow-accelerated corrosion
11. Selective leaching of materials
12. Annulus gas system
13. Ni-alloy weld
14. Bolting integrity
15. Steam generator tube integrity
16. Cranes
17. Buried piping and tanks inspection
18. Aboveground carbon steel tanks
19. Fuel oil chemistry
20. 중수관리
21. Open-cycle cooling water system
22. Closed-cycle cooling water system
23. Compressed air system
24. Fire protection
25. Fire water system
26. Containment non-metallic liners
27. Containment
28. Containment leak rate test
29. Masonry wall
30. Structures
31. 원전 수리 구조물
32. 원자력 방호도장
33. Electrical cables and non-metallic connections not subject to environmental qualification
34. Electrical cables and connections not subject to environmental qualification
35. Inaccessible medium-voltage cables not subject to environmental qualification
36. 금속 밀폐형 모선
37. Fuse holder
38. Electrical cables and metallic connections not subject to environmental qualification

3.3.2 예방조치

예방 및 완화 프로그램을 위한 조치를 기술하여야 한다. 이러한 조치를 통해 경년열화를 예방 또는 완화할 수 있어야 한다. 조건 또는 성능감

시 프로그램의 경우 예방조치에 의존하지 않기 때문에 이러한 정보는 제공할 필요가 없다. 경년열화영향의 관리를 입증하기 위하여 한 가지 유형 이상의 AMP를 실시하여야 한다.

3.3.3 감시 또는 검사 변수

감시하거나 검사하는 변수를 정하고 특정 구조물이나 기기의 의도된 기능 저하와 연관시켜야 한다. 조건감시 프로그램에서는 감시 또는 검사 변수는 경년열화영향의 존재 및 범위를 감지하여야 한다. 예로서 벽두께의 측정 및 균열의 감지 및 크기 조사들이다.

3.3.4 경년열화영향의 감시

경년열화영향의 감시는 구조물과 기기의 의도된 기능 상실 이전에 시행하여야 한다. 감시 또는 검사변수는 모든 CLB의 설계조건하에서 계속운전을 위해 구조물 및 기기의 의도된 기능이 적절하게 유지됨을 입증하기에 적절하여야 한다. 이것은 방법 또는 기술(즉, 육안, 체적, 표면검사), 빈도, 샘플크기, 자료수집과 같은 관점들과 경년열화영향을 적시에 감지하기 위한 신규/일회성 검사의 시기를 포함한다.

3.3.5 감시 및 경향분석

감시 및 경향 파악 조치를 설명하고, 열화의 범위를 예측하여 시정 및 완화 조치가 적시에 수행되도록 하여야 한다. 기술과 빈도의 적절성을 평가하기 위하여 발전소별 또는 산업계 전반의 운전 경험을 고려할 수 있다. 이 프로그램 요소는 수집된 자료가 어떻게 평가되는지를 기술하고 앞으로의 예상에 대한 경향을 포함할 수도 있다.

3.3.6 허용 기준

AMP의 합격기준과 그 근거를 설명하여야 한다. 시정조치 필요성 평가의 대상이 되는 합격기준은 연장운전 기간중 현행허가 기반의 모든 설계조건하에서 구조물과 기기의 의도된 기능이 잘 유지됨을 입증하여야 한다. AMP에는 적용 합격기준에 대한 결과의 분석방법이 포함되어야 한다.

3.3.7 시정조치

합격기준을 만족하지 못할 때에는 취할 조치 사항에 대하여 설명하여야 한다. 근본원인 규명

과 재발방지를 포함하는 시정조치는 적시에 이루어져야 한다. 시정조치가 만일 보수나 교체 없이 해석을 허용한다면 해석은 구조물과 기기의 의도된 기능이 현행허가 기반에 맞도록 유지됨을 입증하여야 한다.

3.3.8 확인절차

확인절차를 설명하여야 한다. 확인절차는 예방조치가 적합하여 적절한 시정조치가 완료되었고 유효함을 입증하여야 한다. 예방 및 완화 프로그램의 효율성을 주기적으로 검증하여야 한다. 예로서, 배관의 내부부식 관리를 위하여 부식의 민감도를 최소화 하는 데에 완화 프로그램(수화학)을 활용할 수 있다. 그러나 부식이 실제로 심각하지 않음을 확인하기 위하여 조건감시 프로그램(초음파검사)도 필요할 수 있다. 시정조치가 필요할 때 시정조치의 완료, 근본원인 규명의 수행, 그리고 재발의 방지를 확인하기 위한 후속조치가 있어야 한다.

3.3.9 행정적 통제

AMP의 행정적 통제를 기술하여야 한다. 행정적 통제는 정규 심사 및 승인 절차를 제시하여야 한다. 계속운전을 위해 신뢰하는 AMP는 모두 규제 및 행정적 통제를 받아야 한다.

3.3.10 운전 경험

현재 AMP의 운전경험을 논의하여야 한다. AMP는 개선 또는 추가로 나타난 과거의 시정조치를 포함하여 AMP의 운전경험을 고려하여야 한다. 과거의 실패로 AMP를 꼭 무효화할 필요가 없는데 그 이유는 운전 경험으로부터의 피드백이 적절한 프로그램 향상이나 프로그램 신설을 가져오기 때문이다. 이 정보는 현재의 프로그램이 적시에 맞게 경년열화를 차단하는데 있어서 어디에서 성공하고 어디에서 실패하였는지를 보여줄 수 있다.

3.4 계속운전을 위한 수명평가

계속운전을 위한 수명평가는 ‘시간제한 경년열화평가(Time-Limited Aging Analysis, 이하 TLAA라 함)’를 통해 수행되며, TLAA는 다음 사항을 포함하는 계산 및 분석을 말한다. (1) 허가갱신 범위 안의 계통, 기기 및 구조물, (2) 경년열화영향, (3) 현재 운전기간에 의해 정의된 시간제한 가정, (4) 안

Table 3 Lists for time limited aging assessment

1. Identification of the time limited aging assessment
2. Life time evaluation of reactor core assembly and fuel channel
3. Metallic fatigue evaluation
4. Identification for environmental qualification of components
5. Evaluation of concrete containments tendon prestress
6. Fatigue evaluation on penetrations
7. Time limited aging assessment according to reactor type

Table 4 Lists for consideration of operation experience and research results

1. Fire protection evaluation
2. Dynamic and seismic identification of components
3. Management plan of active components
4. Piping Stratification evaluation
5. Integrity evaluation for flammable gas combustion

전성에 대한 판단을 내리는데 발전용 원자로운영자에 의해 관련된다고 결정된 사항, (5) 계통, 기기 및 구조물의 의도된 기능 수행 능력과 관련된 결론 또는 결론의 근거, (6) 현행 허가의 기술적 근거에 참조물로 포함되어 있거나 인용되어 있는 발전용 원자로운영자 계산 및 분석 등이다.

시간제한 경년열화평가(TLAA)

TLAA를 입증하기 위해서는 (1) TLAA가 계속운전 기간동안 유효하다, (2) TLAA는 계속운전 기간 종료시점까지 예측되어 있다, (3) 의도된 기능에 대한 경년열화의 영향은 계속운전 기간동안 적절히 관리될 것이다 중 하나를 입증해야 한다.

계속운전을 위한 TLAA는 Table 3에 나타난 바와 같이 원자로집합체 및 핵연료채널 수명평가, 금속 피로평가, 콘크리트 격납건물 텐돈 프리스트레스 평가 등 7개 사항이 요구된다.

3.5 운전경험 및 연구결과 반영 필요사항

운전경험 및 연구결과 반영 사항으로 Table 4에 나타난 바와 같이 화재방호 평가, 기기의 동적 및 내진 검증, 능동형기기의 관리계획, 배관 열성층 평가, 가연성기체 연소에 대한 안전성평가 등이 요구되고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 월성 1호기 계속운전에 대비하여 CANDU형 원전 계속운전 평가 지침서를 개발하였다. 평가지침서는 일반지침, 경년열화관리 대상선정 평가에 관한 사항, 경년열화관리계획(AMP) 평가에 관한 사항, 계속운전을 위한 수명평가(TLAA)에 관한 사항, 운전경험 및 연구결과 반영 필요사항 등 전체 5개 분야로 구분되어 있으며 총 54개의 평가지침이 개발되었다.

참고문헌

- (1) Korea Government, 2009, "Korea's Nuclear Law," Korea Government.
- (2) Korea Government, 2009, "Guideline on an application of technical standard for the continued operation evaluation of reactor facilities," Korea's MEST Notice 2009-37.
- (3) USNRC, "Requirements for Renewal of Operating Licenses for Nuclear Power Plants," 10CFR54.
- (4) National Standard of Canada, 1995, "In service Examination and Testing Requirements for Concrete Containment Structure for CANDU NPPs", CAN/CSA N287.7
- (5) USNRC, 1981, "Standard review plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants," NUREG-0800.
- (6) USNRC, 2001, "Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report," NUREG-1801.
- (7) NEI, 2001, "Industry Guideline for Implementing the Requirements of 10 CFR Part 54-The License Renewal Rule Revision 3," NEI 95-10.