

# 원자로내부구조물 주기적 안전성평가 심사지침 개발 배경

이기형<sup>†</sup> · 박정순<sup>\*</sup> · 고한옥<sup>\*</sup> · 정명조<sup>\*</sup>

## Development of Safety Review Guide for Periodic Safety Review of Reactor Vessel Internals

Ki Hyoung Lee<sup>†</sup>, Jeong Soon Park<sup>\*</sup>, Han Ok Ko<sup>\*</sup> and Myung Jo Jhung<sup>\*</sup>

(Received 19 July 2013, Revised 10 August 2013, Accepted 20 August 2013)

### ABSTRACT

Reactor Vessel Internals(RVIs), which are installed within the reactor pressure vessel and support the fuel assembly, take responsibility for safety of reactor core. In operating Nuclear Power Plants(NPPs), the RVIs have been exposed to severe conditions such as neutron irradiation, high temperature, high pressure, and high velocity of coolant flow and have degraded by materials aging with long-term operation. Therefore, the effective aging management plan and the appropriate regulatory requirements are necessary to maintain the integrity of RVIs. The purpose of this paper is to provide a review guide for Periodic Safety Review(PSR) of RVIs in pressurized water reactor. The review guide is developed based on the revised review guides and reports established from IAEA and USNRC, and the analysis results of design characteristics, aging mechanisms, and operating experiences of RVIs in domestic and international NPPs. Consequently, the developed review guide for PSR of RVIs is expected to contribute an overall strategy and standard for the PSR of RVIs.

**Key Words** : Reactor vessel internals(원자로내부구조물), Aging(경년열화), Aging management(경년열화관리), Periodic Safety Review(주기적 안전성평가), PSR

## 1. 서론

원자로내부구조물은 핵연료집합체, 제어봉집합체 및 노내중성자속 감시 설비들을 지지하고, 노심을 통과하는 냉각재의 유로를 제공하는 동시에 CEA의 동적 하중을 비롯한 각종 정적 및 동적 하중을 원자로용기의 플랜지로 전달하는 등 노심의 안전을 책임지는 핵심 역할을 담당하고 있다. 이러한 원자로내부구조물은 원자로용기 내에 위치함으로써 중성자 조사, 고온, 고압 및 고속의 냉각재 유동과 같이 가혹한 환경에 상시 노출되어 있으며, 이로 인한 구조물의 손상과 기

능 상실 시에는 원전의 건전성이 크게 저하될 수 있다.

현재 전 세계적으로 원자력발전소의 가동연수가 증가함에 따라, 점차 발전소의 기기 및 배관뿐 아니라 원자로내부구조물 역시 재질의 열화가 진행되고 있으며, 손상발생 빈도도 증가하고 있는 실정이다<sup>1)</sup>. 1980년대 이후 프랑스, 미국 등 해외원전에서 발생한 각종 원자로내부구조물의 손상 및 그에 따른 부품교체 사례가 다수 보고되고 있으며, 일본은 현재까지 3기의 가압경수로 원전에 대해 원자로내부구조물의 완전 교체를 시행하였다<sup>2,3)</sup>. 국내의 경우 고리 1호기 제어봉 안내관 손상으로 인한 부품 교체와 영광 1, 2호기 안내관 지지 부위에서 발생한 균열 검출 등에서 알 수 있듯, 총 23기의 가동원전 중 9기의 원전이 가동연수가 20년을 초과한 현시점에 원자로내부구조물의 경년열화 문제로부터 예외일 수 없다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력안전기술원 연구총괄실

E-mail : shirimp@kins.re.kr

TEL : (042)868-0976 FAX : (042)868-0168

<sup>\*</sup> 한국원자력안전기술원 연구총괄실

현행 규정 하에서 원전의 안전여유도 유지를 위한 계통·기기·구조물의 경년열화관리는 원자력안전법 시행규칙 제24조 및 제25조에 따른 주기적 안전성평가(Periodic Safety Review; PSR)와 계속운전 심사 단계에서 이뤄진다<sup>4,5)</sup>. 우리나라는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)가 발간한 주기적 안전성평가에 관한 안전지침(50-SG-O12)을 대부분 수용하고 있다<sup>6)</sup>. 이에 따라 원자력발전소 운영자는 해당 원자로시설의 운영허가일로부터 10년마다 안전성을 종합적으로 평가하고, 평가보고서를 작성하여 원자력안전위원회에 제출해야 한다. 한편 한국원자력안전기술원은 2006년, 계속운전에 대한 심사 지침을 발간하였으며<sup>7)</sup>, 지침 상의 제2장 III.2.15 및 부록 2.0.1에 원자로내부구조물의 경년열화에 관한 검토 항목을 포함시켰다. 그러나 주기적 안전성평가에 관해서는 가압중수로형 원전에 대한 심사지침만이 발간되었으며<sup>8)</sup>, 가압경수로형 원전의 주기적 안전성평가에 대해서는 2002년에 발간된 연구보고서 형태로만 존재할 뿐이다<sup>9)</sup>. 더군다나 동 연구보고서 상의 경년열화에 관한 심사절차 및 기준은 대부분 원전의 수명연장을 위해 실시되는 계속운전 심사지침을 그대로 따르고 있어, 10년마다 실시되는 주기적 안전성평가에 특화된 경년열화 관리 및 건전성 평가에 관한 체계적인 규정이 반드시 필요한 상황이다.

본 연구에서는 가압경수로형 원전의 원자로내부구조물에 대한 주기적 안전성평가 심사에 적용되어 경년열화 규제현안에 대처하고 원전의 건전성을 확보하기 위한 심사지침을 개발하였다.

## 2. 심사지침 구성

가압경수로형 원전의 원자로내부구조물에 대한 주기적 안전성평가 심사지침은 기본적으로 2007년에 발간된 가압중수로형 주기적 안전성평가 심사지침<sup>8)</sup>과 기존에 수행된 국내 가동원전의 주기적 안전성평가 결과를 바탕으로 구성하였다. 본 주기적 안전성평가 지침에서는 계속운전에도 해당되는 경년열화 평가 및 검토 과정과 관련해 서로 차별을 두어, 계속운전에 대한 사항은 계속운전 심사지침을 따르도록 하였다.

본 심사지침은 총 6개의 장과 1개의 부록으로 구성된다. 1항-검토범위 및 3항-검토절차의 경우, 원자력안전법 시행규칙 제24조-주기적 안전성평가의 세부사항<sup>4)</sup> 중에서 원자로내부구조물에 적용 가능한 다음 항

목들이 세부 검토 사항에 포함되도록 하였다.

- 원자로시설의 평가 당시 물리적 상태에 관한 사항 - ‘물리적 상태’
- 경년열화에 관한 사항 - ‘경년열화’
- 원자력발전소 운전경험 및 연구결과의 활용에 관한 사항 - ‘운전경험 및 연구결과 활용’

## 3. 심사지침의 세부 내용

### 3.1 평가 대상

심사자는 사업자가 주기적 안전성평가 대상을 선정하는데 사용한 방법 및 기준, 그리고 선정 결과에 대한 타당성을 검토해야 한다. 주기적 안전성평가는 가동원전이 현재의 안전기준과 관행의 관점에서 안전한지와 안전을 유지하기 위해 적절한 대책이 이행되고 있는지를 종합적으로 평가하는 것이 목적이므로<sup>10)</sup>, 주기적 안전성평가 대상에는 안전 관련 기능을 수행하거나 손상 시 건전성을 저해할 수 있는 원자로내부구조물 및 그 부속기기가 반드시 포함되어야 한다. 원자로내부구조물이 수행해야 할 주요 안전기능은 다음과 같다.

- 원자로 노심(핵연료집합체) 지지 및 보호
- 제어봉집합체 지지 및 보호, 반응도 제어 기능 유지
- 노심 내 냉각재 유로 제공 및 유량 분배
- 노심 계측 기기의 지지 및 보호, 이용가능성 확보

### 3.2 물리적 상태

심사자는 원자로내부구조물의 평가 당시, 실제 물리적인 상태를 파악하고, 현시점에서 유효한 기록이 상태를 정확히 나타내며 그 상태가 설계 요건을 만족하는지 확인하기 위하여 아래와 같은 세부사항을 검토해야 한다.

- 원자로내부구조물의 기기 구성, 재질 및 기능
- 원자로내부구조물의 평가 당시 유효한 기술기준
- 원자로내부구조물의 설계 및 제작 특성(설계 변경 이력 포함)
- 원자로내부구조물과 관련된 운전 이력, 검사 결과 및 유지·보수 기록
- 원자로내부구조물의 실제 상태를 파악할 수 있는 기타 자료

현재 국내 원전의 주기적 안전성평가에 관한 법적 규정은 IAEA가 제시한 주기적 안전성평가지침서 상에 명기된 11개의 안전인자에 근거하여 마련되었다<sup>6)</sup>. 그러나 IAEA는 그간 수행되어 온 주기적 안전성평가 경험을 반영하고, 현행 안전기준과 관행에 맞춰 2003년 주기적 안전성평가 지침(NS-G-2.10)을 개정하면서 안전성평가 범위를 나타내는 안전인자를 기존의 11개에서 14개로 확대하였다<sup>11,12)</sup>. Table 1에 개정된 주기적 안전성평가 안전인자를 나타내었다. 이러한 상황을 반영하여 원자력안전위원회는 제1차 원자력안전종합계획안('12~'16)에 주기적 안전성평가 항목 확대를 명시하고, 원자력안전법 시행령 제37조<sup>13)</sup> 및 원자력안전법 시행규칙 제24조<sup>4)</sup>를 개정하기 위한 작업을 진행 중이다.

변경사항 중 원자로내부구조물과 같은 기기 및 구조물과 관련된 항목은 현행 '원자로시설의 평가 당시 물리적 상태'에 관한 사항이 아래와 같이 두 가지 항목으로 세분화된 것이다.

- 원자로시설의 설계에 관한 사항(문서의 적절성 포함)
- 계통·기기·구조물의 실제 상태에 관한 사항

본 심사지침 개발 과정에서는 상기의 변경사항을 반영하였으며, 현재 법령 개정 작업이 완료되지 않았

음을 고려해 원자로시설의 설계에 관한 사항은 '물리적 상태' 항목에 포함시켜 심사하도록 하였다. 기존에 수행된 국내 가동원전의 주기적 안전성평가에서도 현행 인허가 기반 및 설계 변경 이력에 대한 검토 등을 수행한 이력이 있으므로 설계와 관련한 심사 절차의 추가가 주기적 안전성평가 절차상에서 사업자에게 부담을 가중시키지는 않을 것으로 판단된다.

본 심사지침은 설계에 관한 내용을 포함하는 원전의 '물리적 상태' 항목에 있어 다음과 같이 문서와 관련된 세부적인 심사절차를 마련하였다.

- 원전의 실제 물리적 상태를 평가할 수 있는 자료가 부족한 경우에는 추가적인 시험 또는 검사 등을 통하여 필요한 자료를 생산하도록 한다.
- 설계문서를 일부 확보하지 못한 오래된 원전의 경우, 이를 확보하기 위한 계획 또는 동등한 수준의 보완 계획이 수립되었는지를 검토한다.
- 원자로내부구조물의 설계 변경 이력을 검토하고, 이들이 설계 문서 및 최종안전성분석보고서 등을 비롯한 인허가 문서에 적절히 반영 및 관리되고 있음을 확인한다.

또한 본 심사지침은 원전의 실제 물리적 상태와 관련해 직접적인 검사가 불가능하거나 현재의 상태를 결정하기 어려운 구조물(접근제한영역 등)을 확인하고, 이들이 안전에 미치는 영향과 향후 안전기능을 계속적으로 유지할 수 있는지 여부를 검토하도록 하는 심사절차를 추가하였다.

### 3.3 경년열화

경년열화에 관한 사항은 주기적 안전성평가의 주요 요소 중 하나로, 운영허가일로부터 20년이 경과한 가동원전은 주기적 안전성평가에서 경년열화 완화대책 및 관리계획을 제시해야 한다. 원자력안전법 시행규칙 제24조제1항의 4호<sup>4)</sup>는 원자로시설의 안전여유도 유지를 위한 계통·기기·구조물의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지와 적절한 경년열화관리계획이 확립되어 있는지 확인하도록 요구한다. 본 심사지침에서는 원자로내부구조물의 경년열화 평가에 대한 정량적 또는 정성적 기준을 제공하고자 원자로내부구조물에서 발생할 수 있는 경년열화기구에 대한 조건별 문턱값 및 선별기준과 추가 검토 사항을 부록으로

**Table 1** Safety factors of revised PSR<sup>10)</sup>

기존 안전인자 (50-SG-O12 : 1994)	개정 안전인자 (NS-G-2.10 : 2003)
원전의 실제 물리적 상태	① 발전소 설계 ② 계통·기기·구조물의 실제 상태
기기 검증	③ 기기 검증
경년열화	④ 경년열화
안전성 분석	⑤ 결정론적 안전성 평가
	⑥ 확률론적 안전성 평가
	⑦ 위해도 분석
안전 성능	⑧ 안전 성능
운전경험/연구결과 활용	⑨ 운전경험/연구결과 활용
조직 및 행정	⑩ 조직 및 행정
절차서	⑪ 절차서
인적인자	⑫ 인적인자
비상계획	⑬ 비상계획
환경영향	⑭ 방사선 환경영향

제시하였다.

미국전력연구원(Electric Power Research Institute; EPRI)은 원자로내부구조물에서 발생가능한 각 경년열화기구에 대한 문턱값 및 선별기준을 정한 뒤, 이를 활용하여 FMECA(Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis) 및 기능성 평가(functionality assessment)를 수행하여 원자로내부구조물을 크게 네 가지 범주로 나누어 각 범주에 맞는 검사전략을 개발한 결과를 보고서(MRP-227-A) 형태로 발간하였다<sup>14)</sup>. 본 심사지침의 부록에서 제시한 각 경년열화기구의 조건별 문턱값 및 선별기준은 상기 보고서를 비롯한 산업계 및 규제기관의 최근 연구결과를 참조하여 선정하였으며<sup>15-17)</sup>, 이는 검사 방법론 자체를 따르기 위함이 아닌 안전여유도 측면에서 원자로내부구조물에 대한 주기적 안전성평가 당시의 경년열화 수준을 정확히 평가하고자 구체적인 기준으로 활용하기 위한 값이다.

부록에 수록된 원자로내부구조물의 경년열화기구는 응력부식균열, 마모, 피로, 열취화, 조사유기응력부식균열, 조사취화, 기공팽창, 중성자 조사에서 기인한 응력 이완 또는 크립의 총 8가지이다. 각 경년열화기구별 문턱값 또는 선별기준은 각각 응력, 중성자 조사량, 페라이트 함량, 누적손상계수, 온도, 발생위치 등의 값으로 제시된다. 그러나 제시된 문턱값 및 선별기준은 반드시 따라야하는 강제적 방침은 아니며, 사업자가 타당성을 입증할 수 있다는 전제하에 자체적인 기준과 평가방법을 활용할 수 있도록 하였다.

부록에 제시된 문턱값은 말 그대로 원자로내부구조물이 경년열화로 인해 건전성이 저하되었다고 판단할 수 있는 최소값으로, 결국 이를 초과했다면 대상 원자로내부구조물 혹은 그의 부속기기가 해당 경년열화기구에 민감하여 취약한 상태로 접어들 가능성이 높다고 판단할 수 있다. 주기적 안전성평가 심사과정에서 다음 안전성평가까지의 기간인 10년 이내에 대상 원자로내부구조물이 해당 경년열화기구에 의해 취약해질 것으로 평가된 경우, 건전성을 입증하기 위한 추가적인 평가 계획이나 감시, 완화 및 관리에 대한 이행 계획이 적절하게 제시되어야 한다. 이와 관련해 심사자는 사업자가 제출하는 경년열화 완화 대책 및 관리 계획이 다음과 같은 세부사항을 포함해 체계적이고 효과적으로 수립되었는지 여부를 검토하도록 한다.

- 경년열화 영향 및 손상을 최소화할 수 있는 운전 절차 및 방안

- 경년열화 영향 및 손상을 적기에 탐지할 수 있는 검사 및 감시 방안
- 발견 또는 예측된 경년열화 영향 및 손상에 대한 건전성 및 기능성 평가
- 허용 불가능한 손상을 예방하거나 해결하기 위한 유지·보수 방법

계속운전을 계획하고 있는 원자로시설의 경우도 원자력안전위원회 고시 제2012-25호(원자로.35)의 제6조 및 별표 2에 따라 원자로내부구조물의 경년열화 관리계획을 제출해야한다<sup>18)</sup>. 미국의 계속운전 심사지침 및 가이드라인인 NUREG-1800<sup>19)</sup> 및 NUREG-1801(GALL report)<sup>20)</sup>에서는 EPRI에서 발간한 MRP-227-A<sup>14)</sup>의 내용을 받아들여 기준에 비해 보다 강화된 원자로내부구조물의 경년열화 관리를 요구하였다. 이와 같이 강화된 계속운전 규제요건 및 기준을 가동원전의 안전성평가에 동일하게 적용하는 것은 사업자에게 불필요하고 과도한 부담을 야기할 수 있기 때문에, 주기적 안전성평가에서 이뤄지는 경년열화 관리 계획은 계속운전에서의 그것과 경계를 분명히 할 필요가 있다. 이를 위해 주기적 안전성평가 심사지침에서는 NUREG-1800<sup>19)</sup>, NUREG-1801(GALL report)<sup>20)</sup> 및 MRP-227-A<sup>14)</sup>의 내용을 기술기준과 규제요건을 명시한 '2. 검토기준' 항목이 아닌 '6. 참고문헌' 항목에 수록하였다. 더불어 계속운전을 위해서는 상기 가이드라인 및 보고서의 요건에 따라, 반드시 주기적 안전성평가에 제시된 원자로내부구조물 경년열화 관리 계획보다 더욱 강화된 계획을 제시해야함을 명시하였다.

### 3.4 운전경험 및 연구결과

원자로내부구조물과 관련해 타 발전소의 운전경험과 최근에 이뤄진 안전성 연구결과를 적기에 수집하고 분석하였는지, 또한 이를 필요한 대상에 반영하기 위한 조치와 이행계획이 적절히 수립되었는지 여부를 검토하도록 하였다<sup>21)</sup>.

## 4. 결 론

국내 원자력발전소의 가동연수가 증가하면서 노심의 안전성을 담보하는 원자로내부구조물의 경년열화 관리가 주요 현안으로 떠오르고 있는 현 시점에, 국제 원자력계의 규제방향과 검사전략에 대한 최근 추세에

발맞추되 국내 실정을 감안한 체계적이고 명료한 가이드라인이 필요함에 따라 가압경수로형 원전의 원자로내부구조물 주기적 안전성평가 심사지침을 개발하였다.

현행 관련 규정 및 지침들과 비교하여, 이번에 개발된 원자로내부구조물 주기적 안전성평가 심사지침은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 국제원자력기구가 개정한 주기적 안전성평가 지침에 따라 평가대상을 확대하여, ‘물리적 상태’ 항목에 있어 원자로내부구조물의 설계에 관한 사항이 반드시 포함되도록 하였으며 이에 대한 적절한 문서의 확보와 관련해 세부적인 심사절차를 제시하였다.

둘째, 운영허가일로부터 20년이 경과한 원전 내 원자로내부구조물의 경년열화 평가에 필요한 정량적, 정성적 기준을 제공하고자 8가지 경년열화기구별 문턱값 및 선별기준을 부록으로 제시하였으며, 주기적 안전성평가에서 이뤄지는 경년열화 관리 계획과 계속 운전 단계의 관리 계획은 분명히 차별화할 것을 명기하였다.

현재 제1차 원자력안전종합계획의 일환으로 주기적 안전성평가 관련 시행령 및 시행규칙에 대한 개정 작업이 진행 중이며, 이에 따라 가압경수로형 원전의 심사지침이 개정될 것으로 예상되는 바, 향후 원자로 시설 주기적 안전성평가 심사지침의 일환으로 본 심사지침이 사용될 예정이다.

## 참고문헌

1. Shin, H. S., Hong, J. K., Kim, J. S., Chung, Y. K., Jung, M. J., Chung, H. D. and Choi, Y. H., 2011, "Development of Regulation on the Integrated Materials Aging Management for Nuclear Facilities," *Trans. of the KPVP*, Vol. 7, No. 4, pp. 12-18.
2. IAEA, 2007, "Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Vessel Internals 2007 Update," IAEA-TECDOC-1557.
3. EPRI, 2012, "Materials Reliability Program: Pressurized Water Reactor Internals Aging Management Program Development Template," MRP-342.
4. 원자력안전법 시행규칙 제24조, 2012, "주기적 안전성평가의 세부사항".
5. 원자력안전법 시행규칙 제25조, 2012, "주기적 안전성평가의 기준".
6. IAEA, 1994, "Periodic Nuclear Safety Review of Operational NPPs," IAEA Nuclear Safety Series No. 50-SG-O12.
7. 한국원자력안전기술원, 2006, "가압경수로형 원전 계속운전심사지침서," KINS/GE-N8.
8. 한국원자력안전기술원, 2007, "가압중수로형 원자력발전소 주기적 안전성평가 심사지침서," KINS/GE-N9.
9. 한국원자력안전기술원, 2002, "주기적 안전성평가 검토지침서 개발," KINS/RR-139.
10. 김효정, 2012, "원자력 안전과 규제," 한스하우스, pp. 382-390.
11. IAEA, 2003, "Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants," IAEA Safety Standard Series No. NS-G-2.10.
12. IAEA, 2010, "Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants," IAEA Safety Standards, Draft Safety Guide DS426.
13. 원자력안전법 시행령 제37조, 2012, "주기적 안전성평가의 내용".
14. EPRI, 2011, "Materials Reliability Program: Pressurized Water Reactor Internals Inspection and Evaluation Guidelines," MRP-227-A.
15. EPRI, 2005, "PWR Internals Material Aging Degradation Mechanism Screening and Threshold Values," MRP-175, Non-proprietary version for NRC.
16. Chorpa, O. K., 2010, "Degradation of LWR Core Internal Materials due to Neutron Irradiation," NUREG/CR-7027.
17. 한국원자력안전기술원, 2013, "원자로내부구조물 경년열화 및 운전경험," KINS/RR-1009.
18. 원자력안전위원회 고시 제2012-25호 (원자로.35), 2012, "원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술 기준 적용에 관한 지침".
19. USNRC, 2010, "Standard Review Plan for Review of License Renewal Application for Nuclear Power Plants," NUREG-1800, Revision 2.
20. USNRC, 2010, "Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report," NUREG-1801, Revision 2.
21. 장윤석, 정명조, 이봉상, 김현수, 허남수, 2013, "원전기기 건전성 - 이론 및 실무," 한스하우스, pp. 264-295.