

원전설비 등급분류 방법론 분석

제상윤[†]·장윤석^{†*}·오창식^{**}·최영환^{**}

Analysis of classification standards of nuclear facilities

Sangyun Je^{*}, Yoon-Suk Chang^{*†}, Chang-Sik Oh^{**} and Young Hwan Choi^{**}

(Received 26 April 2018, Revised 16 May 2018, Accepted 24 May 2018)

ABSTRACT

Configuration management (CM) is the process of identifying and documenting characteristics of plant structures, systems and components (SSCs), and of ensuring that changes to these characteristics are properly assessed, approved, implemented, verified and recorded. The purpose of this study is to examine regulation and technical standards developed under different concepts and level of depth for classification of nuclear SSCs as an essential prerequisite of the CM. In this context, main contents of currently adopted NSSC Notice 2016-10 are reviewed and compared with those in recently published ANSI/ANS 58.14 and IAEA SSG-30. The technical standards were prototypically used for classification of O-rings in two nuclear systems. It is found that ANSI/ANS 58.14 results in different categories taking into account specific features while IAEA SSG-30 leads to same categorization of the O-rings. Key findings will be summarized for Korean regulatory amendment in the future.

Key Words : ANSI/ANS-58.14, IAEA-SSG-30, O-ring, Safety classification, SSCs

1. 서 론

원전설비의 등급분류 방법은 오랜 기간에 걸쳐 지속적으로 변경되어 왔으며, 각 국가 또는 문서 및 기준별로 다르게 적용되고 있다. 1960년대 말 ASME B&PV Code Section III⁽¹⁾에서는 시스템의 중요도에 따라 Code Class A, B, C로 정의하고 각각의 설계요건을 제시하였으며, ANS는 ANSI/N18.2를 발간하여 안전등급기준 1, 2a, 2b, 3을 정의하였다. 1971년 ANSI/N212를 발간하여 등급분류 기준을 안전등급 분류기준으로부터 압력건전성 등급기준과 내진/전기/품질등급 기준까지 확장하였으나, 일부 비안전항목에 대해 ASME Section III의 요건과 불일치 문제가 있었

다. 또한 USNRC는 RG 1.26⁽²⁾ 및 RG 1.29⁽³⁾를 발행하였으며, IAEA는 자체 기준을 설정하여 안전등급을 정의하였다. 1976년 이후에는 PWR과 BWR의 안전등급 차이점을 감안하여 PWR기준인 ANSI/ANS-51.1⁽⁴⁾과 BWR기준인 ANSI/ANS-52.1을 발행하였다. 우리나라의 경우 ANSI/ANS-51.1의 기준을 바탕으로 원자력안전위원회고시 제2016-10호⁽⁵⁾로 명시하고 있다.

2012년 품질검증서류 위조사건 이후 원전 내 부품의 등급분류를 비롯한 설계변경 관리기술의 중요성이 부각되고 있다. 특히 국내 원전설비 등급분류 기술기준은 설계 및 관리 측면에서 구조물-계통-기기로 국한되어 있으며, 하위 개념인 부품에 대한 기술기준은 정립되어 있지 않은 실정이다. 부품의 경우 수량이 상당히 많은 반면 이력의 문서화 및 등급분류가 되어있지 않아 주의 깊은 관리가 요구된다. 원전설비에 부여된 등급은 발전소 건설 및 운영기간 동안 해당 설계·제작·설치·시험·검사 기준

† 책임저자, 회원, 경희대학교 원자력공학과

E-mail : yschang@khu.ac.kr

TEL : (031)201-3323 FAX : (031)204-8114

* 경희대학교 원자력공학과

** 한국원자력안전기술원 기계재료평가실

에 영향을 미치므로, 등급분류 기술기준은 건설허가 및 운영허가 심사 또는 설계변경 심사 시 면밀히 검토되어야 한다. 따라서 구조물·계통·기기뿐만 아니라 이를 구성하는 부품에 대한 등급분류 기술기준의 적절성이 확인되어야 한다.

본 연구는 원전설비 등급분류 기술기준의 현황을 분석하고, 새로운 국외 기술기준의 적용성 또는 국내 기술기준 수립방안을 확인하기 위한 것이다. 이를 위해 국내·외 등급분류 기술기준을 정리하고, ANSI/ANS-58.14 및 IAEA SSG-30과 현행 국내 기술기준을 비교하였으며, 국외 최신 기술기준을 국내 2개 계통 O-ring에 시범적용하였다.

2. 원전설비 등급분류 기술기준

2.1 국내 기술기준 현황

2.1.1 안전등급

국내 원전설비의 등급분류에 관한 기준은 원자력안전위원회고시 제2016-10호에 따라 “안전등급과 등급별 규격”을 규정하고 있으며, 세부내용은 아래와 같다.

가. 안전등급 1: 원자로 냉각재 압력경계를 구성하는 설비의 내압부분과 그 지지구조물

나. 안전등급 2: 원자로 격납건물의 내압부분 및 그 지지구조물, 그리고 안전등급 1에 속하지 아니하면서 다음 각 호의 어느 하나의 안전기능을 수행하는 설비의 내압부분 및 그 지지구조물

- (1) 핵분열생성물의 유출을 방지하는 역할을 하거나 방사성물질을 원자로 격납건물 내에 억류 또는 격리하는 기능
- (2) 비상 시 원자로 격납건물 내에서 발생한 열 또는 방사성물질을 제거하는 기능
- (3) 비상 시 원자로를 미입계 상태로 만들기 위하여 부반응도를 증가시키거나 또는 압력경계설비를 통한 정반응도의 증가를 억제하는 기능
- (4) 비상 시 노심에 직접 냉각재를 공급하여 노심냉각을 보장하는 기능
- (5) 비상 시 노심의 냉각에 충분한 원자로 냉각재를 공급하거나 유지하는 기능

다. 안전등급 3: 원자력안전위원회고시 제2016-10호 제5조 및 제6조에 규정된 안전등급 1 또는 안전등급 2에 속하지 아니하며, 어느 하나의 안전기능을 수행하는 설비에 대하여 부여한다.

2.1.2 비안전등급

원자력안전위원회고시 제2016-10호 제5조, 제6조 및 제7조에서 규정된 안전등급 1, 2 또는 3에 속하지 아니하며, 제 2016-10호 제 8조에 제시된 기능을 수행하는 설비에 대하여 부여한다.

2.1.3 내진, 전기, 품질 등급

한국 표준형 원전에 적용하고 있는 원전설비의 등급은 안전등급 외에도 USNRC RG 1.29 등에 따른 내진범주, IEEE 279⁽⁶⁾, 308⁽⁷⁾ 및 603⁽⁸⁾ 등에 따른 전기등급, 품질보증 요건에 따른 품질등급에 의해 분류되고 있으며, 해당되는 구체적 내용은 다음과 같다.

가. 내진범주 I급: 안전에 중요하고 안전정지조건 하에서 기능이 유지되도록 설계되어야 하는 구조물·계통·기기

나. 내진범주 II급: 안전기능이나 연속적인 기능은 요구되지 않지만, 그것들의 구조적인 손상이나 상호작용이 내진범주 I급 구조물, 계통 또는 기기의 안전관련 기능을 허용할 수 없는 수준으로 저하시키거나, 주제어실의 근무자들에게 해를 입힐 수 있는 구조물·계통·기기

다. 전기 1E 등급: 긴급 원자로 정지, 격납건물 격리, 노심 냉각 및 격납건물과 원자로 열 제거에 필수적이거나 방사성 물질의 유출을 예방하기 위해 필수적인 전기적 구조물·계통·기기

라. 전기 Non-1E 등급: 1E 등급에 해당되지 않는 전기적 구조물·계통·기기

마. 품질등급 Q: 10CFR50.55a⁽⁹⁾ 및 USNRC RG 1.26에 따른 안전성관련 품목 -원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 및 10CFR50, 부록 B⁽¹⁰⁾의 품질보증 요건이 적용되는 품목

바. 품질등급 A: 안전성관련 구조물·계통·기기는 아니나 다음의 각 호에 해당하여 설계·구매·시공 및 운전을 위해 지정되어 있는 적절한 품질보증 요건이 적용되는 안전성영향 품목

사. 품질등급 S: 품질등급 Q 및 품질등급 A가 아닌 비안전관련 품목

2.2 국외 기술기준 현황

2.2.1 EPRI NP-6895

EPRI NP-6895⁽¹¹⁾에 제시된 구조물·계통·기기 및 부품의 안전등급 분류기준은 다음과 같다.

가. 안전등급 분류기준

안전관련 등급(Safety Related; SR)과 비안전관련 등급(Non-Safety Related; NSR) 두 가지를 제시하고 있다.

(1) 안전관련 등급(SR)

안전관련 구조물·계통·기기 및 부품은 다음 사항을 보장하기 위하여 설계기준사고 또는 과도상태 도중 또는 이후에 요구되는 품목이다.

- ① 원자로 냉각재 압력경계의 건전성 유지
- ② 사고 제한치(accident limits) 내에서 원자로를 정지시키고 안전정지 상태로 유지하는 능력
- ③ 잠재적인 소외 피폭을 초래할 수 있는 사건의 결과를 예방하거나 완화시키는 능력

(2) 비안전관련 등급(NSR)

비안전관련 등급은 안전관련 등급분류 기술기준에 해당하지 않는 모든 품목이다. 강화된 품질등급은 비안전관련 등급분류의 선택적인 요소이다. 이 분류는 안전관련 등급이 아닌 품목에 적용되지만, 규제기관이나 사업기관에 의해 부과되는 요건을 적용받는다.

나. 안전등급 분류 방법론

과거 원전설비 등급분류 기술기준은 설계 및 시공 측면에서 계통 및 기기에 국한되어 있었다. 최근 원전 가동 및 유지보수 관점에서 상세 분류의 필요성이 제기되어 이 보고서는 하향식(top-down) 방식으로 표본 선정 및 분석하였다. 등급분류 절차는 발전소 인허가 기준문서(licensing basis document)의 식별 후, 설계기준사고 및 과도상태를 확인한다. 이후 구조물·계통·기기 및 부품의 순서로 기능에 따른 등급을 분류한다.

(1) 구조물의 등급분류

EPRI NP-6895에서 구조물이라는 용어는 1차 격납건물이나 보조건물, 연료, 터빈 등 거시적인 개념과 문, 석조, 벽, 빔, 통로 등 미시적인 개념을 모두 의미한다.

(2) 계통의 등급분류

등급분류를 위하여 계통의 기능과 운전 모드를 규정하는 문서의 확인이 필요하다. 안전관련 기준과 단일고장기준을 만족시키는데 필요한 기능들은 안전관련으로 분류된다. 계통에 안전관련 기능이 없다고 평가될 경우 비안전관련으로 분류된다.

(3) 기기의 등급분류

등급분류를 수행할 때, 모계통의 안전관련 기능을 확인한다. 만약 모계통이 안전관련 기능을 수행한다면 절차에 따라 분류되며, 안전관련 기능을 수행하지 않는다면 안전/비안전 연계요건(interface)이 있는지 확인하여야 한다. 기기가 안전관련 기능은 없지만, 그 고장이 계통의 안전관련 기능 수행을 저해할 수 있으면 안전관련으로 분류된다.

(4) 부품의 등급분류

부품의 등급분류를 수행할 때, 모기기의 안전등급 분류가 선행되어야 한다. 만약 모기기가 안전관련 기능을 수행한다면 절차에 따라 분류되며, 안전관련 기능을 수행하지 않는다면 비안전관련으로 분류된다. 부품의 등급을 결정하는 요소는 다음과 같다.

- ① 부품이 모기기의 안전관련 기능을 수행하는데 요구되는 경우
- ② 부품의 고장이 모기기의 안전기능에 영향을 미치는 경우

2.2.2 ANSI/ANS-58.14

가. 안전등급 분류 기준

ANSI/ANS-58.14⁽¹²⁾는 경수로형 원전의 구조물·계통·기기 및 부품을 안전관련 등급(Q), 안전영향 등급(A), 비안전관련 등급(N)으로 분류하기 위한 기준을 제공하고 있으며, 상세 내용은 Table 1과 같다.

Table 1 Safety classification by ANSI/ANS-58.14(12)

Classification	Contents
Safety-related, Q	Classification applied to an item relied upon to remain functional during or following a DBE to ensure a safety related function
Augmented requirements, A	Classification applied to an item that is not safety-related but that is relied upon during a special event or to which a licensing requirement or commitment applies
Non safety-related, N	Classification applied to an item that is not safety-related

Fig. 1은 등급분류의 과정을 나타낸 것이며, 구체적인 기준은 다음과 같다.

- (1) 일반적 기준: 품목의 안전등급 분류를 결정하는 과정은 설계기준사건의 결정과 품목의 안전관련 기능에 근거하여야 한다.

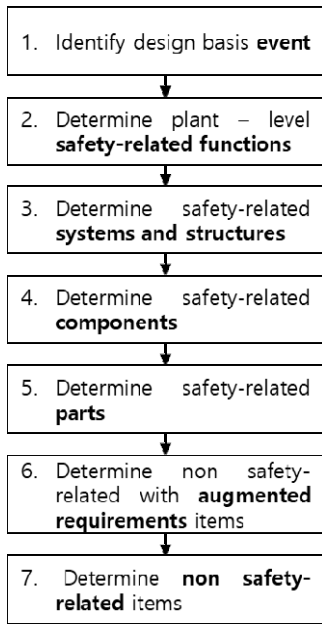


Fig. 1 Safety classification process by ANSI/ANS-58.14(12)

(2) 설계기준사건 결정: 설계기준사건은 허가기준 서류의 검토과정을 통해 결정되어야 한다. 결정된 설계기준사건은 잠재적인 소외 피폭 결과를 초래하는 사건(발전소정전사고, 화재)을 포함하여야 한다.

(3) 안전관련 기능의 결정: 안전관련 기능은 다음의 세 가지 기본 기능이 달성됨을 보장하기 위해 설계기준사건 분석에서 요구되는 기능이다. 기능의 상실이 아래에 제시된 세 가지 기본 기능 중 하나 이상의 달성을 방해하는 경우 달리 정의되지 않는다면 안전관련 등급으로 분류되어야 한다.

- ① 원자로 냉각재 압력경계의 건전성 보장
- ② 원자로의 안전한 정지 상태 유지 기능 보장
- ③ 잠재적인 소외 피폭의 결과를 초래할 수 있는 사건의 결과를 예방하거나 완화시키는 기능 보장

(4) 안전관련 구조물 및 계통의 결정: 계통은 설계 기능, 운전 모드, 인허가 등의 요소를 고려하여 분류되어야 한다.

(5) 안전관련 기기 및 부품의 결정: 각 계통의 기기 및 부품은 관련 계통 또는 상세 도면에 명시되어야 하며, 계통의 안전관련 기능이 검토되어야 한다. 이후 기기 및 부품은 관련 계통 문서, 설계기준

사건, 안전관련 기능 및 안전관련 계통을 이용하여 분류한다.

(6) 비안전관련 품목의 결정

- ① 안전영향 품목: 안전관련 등급으로 분류되지 않았거나 특정 사건에 필요하고 인허가 요건 또는 준수사항이 적용되는 품목
- ② 비안전관련 등급 품목: 안전성분류 평가 결과 안전관련이나 안전영향 등급으로 분류되지 않은 품목

나. 압력건전성 등급분류 기준

압력건전성 등급분류 기술기준은 원전의 압력유지 품목과 ASME Section. III의 요건에 따른 지지구조물의 기본적 기능 달성을 위한 기반을 제공하기 위해 수립되었다. 기능적 기준으로 원전 압력건전성 등급은 Class 1에서 Class 5까지 분류되며, 자세한 기준은 다음과 같다.

(1) Class 1(C-1): RCPB를 형성하고 ASME Sec. III의 요건이 적용되는 압력유지 품목과 지지장치, 파손 시 정상적인 원자로 냉각재 보충능력을 초과하는 원자로 냉각재 상실을 초래하는 품목

(2) Class 2(C-2): C-1은 아니지만, ASME Sec. III 요건이 적용되며 안전관련 기능 수행에 필요한 항목 중 최소한 하나 이상에 해당되는 압력유지 품목과 지지장치

(3) Class 3(C-3): 구조물·계통·기기 및 부품의 압력유지 품목과 지지장치에 적용되며, C-1, 2에 해당하지 않지만 지침서에 명시된 기술기준의 적용을 받으면서 안전관련 기능 수행에 필요한 항목에 해당하는 경우

(4) Class 4(C-4): 구조물·계통·기기 및 부품의 압력유지 품목과 지지장치에 적용되며, C-1, 2 또는 3에 해당하지 않지만 지침서에 명시된 기술기준의 적용을 받으면서 중요한 인허가 요건이나 준수사항에 해당되는 경우

(5) Class 5(C-5): C-1, 2 또는 3, 4로 지정되지 않은 압력유지에 관련된 구조물·계통·기기 및 부품

다. 전기 등급분류 기준

- (1) 1E: 일반적인 안전관련 품목
- (2) Non-1E: 1E가 아닌 품목은 Non-1E로 정의

라. 내진 등급분류 기준

- (1) Seismic Category I: 안전정지지진의 영향을

견뎌내고 기능을 유지해야 하는 품목

(2) Seismic Category II: Seismic Category I에 해당하지 않는 품목

2.2.3 IAEA SSG-30

IAEA SSG-30⁽¹³⁾은 안전에 중요한 구조물·계통·기기의 결정 및 그 안전기능과 안전중요도에 따른 등급분류에 대하여 GSR Part 4⁽¹⁴⁾ 및 NS-R-1⁽¹⁵⁾ 등을 고려하였다. 안전등급 분류의 목표는 사고를 방지하고 방사선의 영향으로부터 사람과 환경을 보호하고 사고 후의 방사성 물질의 영향을 제한하는 구조물·계통·기기를 결정하고 분류하는 것이다.

가. 안전등급 분류 기준

Fig. 2는 IAEA에서 제시하는 등급분류 체계이다. 등급분류는 발전소 설계와 안전해석 및 주요 안전기능의 달성 방법에 대한 기본적 이해로부터 시작되는 하향식 과정이다. 이 과정에 따라 주요 안전기능을 충족하기 위한 기능 및 설계규정은 모든 발전소 상태에 대하여 체계적으로 결정된다. 예상초기사건의 평가와 같은 안전해석의 정보를 토대로 중요도에 따라 분류된다. 분류된 안전기능을 수행하는 구조물·계통·기기를 결정하기 위하여 설계조항에 대한 확인이 필요하다.

모든 구조물·계통·기기를 분류하는 과정은 발전소 설계와 그에 내재된 특성 및 모든 예상초기사건을 고려해야 한다. 또한 모든 발전소 상태에 대하여 주요 안전기능을 달성하기 위해 필요한 기능과 설계규정이 결정되어야 한다. 안전기능은 안전중요도에 근거하여 제한된 수의 범주로 분류되어야 하며, 이때 아래의 요소를 고려하여야 한다.

- (1) 기능 상실에 따른 결과
 - (2) 기능 수행이 요구되는 예상초기사건의 빈도
 - (3) 안전한 상태를 유지하기 위한 기능의 기여도
- 안전에 중요한 구조물·계통·기기의 안전등급 결정시 일반적으로 결정론적 방법론들이 적용되나, 필요시 확률론적 안전성평가와 공학적 판단에 의거하여 보완되어야 한다. 가능한 한 낮은 수준으로 사고발생 빈도를 낮추고 그 결과를 허용 가능하도록 만들기 위하여, 안전기능을 수행하는데 필요한 구조물·계통·기기는 안전중요도에 근거하여 제한된 수의 등급으로 분류되어야 한다. 또한 설계규정대로 시행된 구조물·계통·기기도 같은 방법으로 분류되어야 한다.

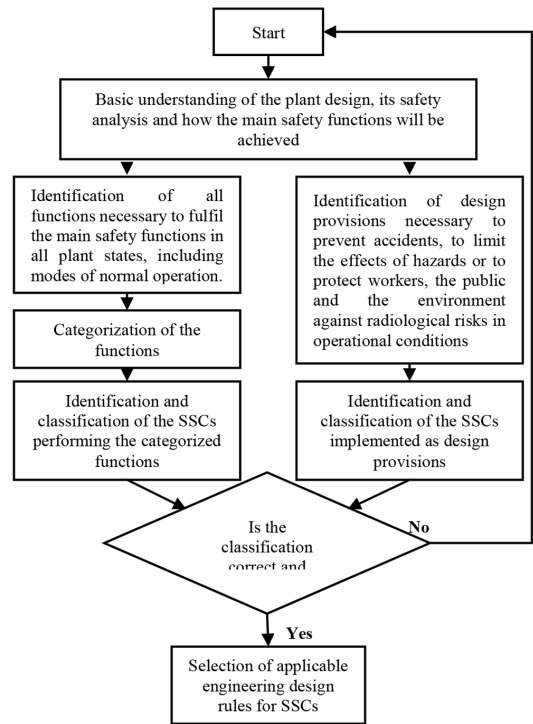


Fig. 2 Safety classification process by IAEA SSG-30(13)

나. 안전등급 분류 방법

(1) 범주화된 기능의 분류

구조물·계통·기기는 모든 정상운전 모드를 포함하는 다른 발전소의 상태에서도 주요 안전기능을 수행하여야 한다. 이 기능들은 주로 안전성분석에서 사용되는 기능(예방, 탐지, 제어, 완화)을 포함한다. 비록 모든 발전소 상태에서 만족되어야 하는 주요 안전기능이 같더라도, 범주화되어야 하는 기능들은 발전소 상태에 따라 별도로 분류되어야 한다.

(2) 설계 조항의 분류

발전소의 안전은 서로 다른 유형의 설비 및 정상운전 조건에서의 사용을 위해 설계된 설비의 안전성에 좌우된다. 이러한 역할을 하는 구조물·계통·기기들에 적용되는 설계 조항은 다음과 같다.

- ① 사고 빈도를 줄이기 위해 설계된 설비
- ② 정상운전 조건에서의 방사선의 영향으로부터 작업자와 일반인을 보호하기 위해 설계된 수동적 설계특성
- ③ 내·외부의 위협에 의해서 손상을 입는 중요한 안전기기를 보호하기 위해 설계된 수동적 설계특성

(3) 기능의 분류

정상운전 조건을 포함하는 모든 발전소 조건에서 주요 안전기능을 만족하기 위해 각 기능들은 안전중요도에 따라 분류되어야 한다. 이때 아래와 같은 요인들을 고려해야 한다.

- ① Factor 1은 기능이 수행되지 않았을 때 발생할 수 있는 최대의 결과를 바탕으로 3단계(High, Medium, Low)로 구분하고 있다.
- ㉠ High: 기능의 상실이 설계기준사고 발생 시 규제 기관에서 정하고 있는 제한치를 넘는 방사성물질의 방출을 야기하거나 설계기준사고에 대한 허용기준이 초과되는 경우
- ㉡ Medium: 기능의 상실이 과도상태에 대하여 한계치를 넘는 방사성 물질이 누출되거나 과도상태에 대한 설계 제한치 초과를 일으키는 경우
- ㉢ Low: 기능의 상실이 작업자 허용 한도를 넘는 방사선량을 초래하는 경우

이러한 정의들이 하나 이상 해당하는 경우, 더 높은 수준의 단계가 적용된다. 결과에 대한 평가는 위험 발생 시 기능들이 작동하지 않는다는 가정 하에 이루어진다.

- ② Factor 2는 기능수행이 요구되는 예상초기사건의 빈도를 반영한다. 이 빈도는 각각의 예상초기사건의 발생빈도에 따라 평가되어야 한다. Factor 1과 Factor 2를 포함한 등급분류 접근법은 가장 낮은 발생빈도를 가져야 한다는 것을 의미한다.
- ③ Factor 3은 안전한 상태를 유지하기 위한 기능의 기여도를 의미한다. 일반적으로 제어상태와 안전상태 두 가지로 구별할 수 있다. 제어상태를 달성하기 위해 수행되는 기능들은 주로 잠재적 위험을 줄이기 위한 자동제어나 단기 제어이다. 안전한 상태를 달성한 기능들은 장기적으로 수행되는 기능이며 제어상태에 도달 시 작동하게 된다. 이러한 안전지침에 권고되는 기능의 범주는 다음의 세 가지 안전범주에 기반을 두고 있으며, 기능의 분류 이후 이러한 기능을 수행하는 구조물-계통-기기들이 안전등급에 맞게 할당되어야 한다.
- ㉠ Safety Category 1(SC 1): 과도상태나 위험

발생 시 설계기준사고와 상실 이후의 제어 상태에 이르기 위해 요구되는 어떠한 기능이라도 모두 High의 심각도를 가지는 경우

- ㉡ Safety Category 2(SC 2)
 - ㉠ 과도상태나 위험 발생 시 설계기준사고 이후 제어상태에 이르기 위해 요구되는 기능의 상실이 Medium의 심각도를 가지는 경우
 - ㉢ 안전상태 도달 및 유지를 위한 기능과 그 기능의 상실이 High의 심각도를 가지는 경우
 - ㉣ SC 1의 기능 지원을 위해 설계된 기능과 노심 용융 없이 설계확장조건을 제어하기 위해 요구되는 기능
- ㉢ Safety Category 3(SC 3)
 - ㉠ 과도상태나 위험 발생 시 설계기준사고 이후 제어상태에 이르기 위해 요구되는 기능의 손상이 Low의 심각도를 유발하는 경우
 - ㉢ 안전상태에 도달하여 장시간 유지하기 위해 요구되는 기능과 위험 발생 시 그 기능의 손상이 Medium의 심각도를 일으키는 경우
 - ㉣ SC 2에 속해있지 않으며, 설계확장조건의 결과를 완화하기 위해 요구되는 기능과 위험 발생 시 그 기능의 손상이 High의 심각도가 되는 경우
 - ㉤ 주요 발전소를 정상 범위 내로 유지하기 위해 설계된 설비와 정상운전 조건 내의 공학적 안전설비가 수행하는 원자로 트립의 작동 빈도를 줄이기 위해 설계된 기능
 - ㉥ 상위의 Category에 할당되어 있지 않으며, 긴급 대응 전략의 일부분으로 발전소 직원과 소외 긴급 공급에 정보를 제공하기 위해 요구되는 감시 관련 기능

3. 원전설비 등급분류 적용성 평가

3.1 기술기준 비교·분석

3.1.1 미국기준의 특징

가. 안전기능 분류: ANSI/ANS-51.1에서 안전등급 1, 2, 3과 비안전등급으로 구분하였으나, ANSI/ANS-58.14에서는 안전등급 1, 2, 3을 구분하지 않고 안전등급(Q)로 통합하였다. EPRI NP-6895에서는 안

전관련, 비안전관련 두가지 등급을 제시하고 있으며, ANSI/ANS-58.14에서는 안전영향 등급으로 안전관련 기능을 수행하지 않지만, 중요한 허가요건 또는 수행사항을 갖는 것으로 판단되는 품목을 구분하였다.

나. 내압유지 기능: ANSI/ANS-51.1은 안전등급 분류 시 내압유지 기능을 함께 고려하지만, ANSI/ANS-58.14는 안전기능과 내압기능 각각의 중요도를 감안하여 등급분류 요건의 하나로 5단계의 압력건전성 기준을 제공하고 있다.

다. ANSI/ANS-58.14는 여러 등급기준의 주관성을 해소하기 위해 안전등급과 품질등급, 내진, 환경 등 다른 등급분류 기준과 연계하였다.

3.1.2 IAEA기준 특징

가. 기능에 따른 안전등급 분류: ANSI/ANS-58.14와 IAEA SSG-30 모두 안전기능에 따라 등급분류를 실시하는 점은 동일하다. 그러나 IAEA SSG-30은 모든 기능에 대해 등급분류를 실시한 후 구조물·계통·기기에 적용하는 방식이며, ANSI/ANS-58.14은 구조물·계통·기기 및 부품에 안전기능에 따라 하향식 방식으로 등급분류를 실시한다.

나. 설계특성에 따른 안전등급 분류: IAEA SSG-30은 운전 상태에서의 사고를 방지하고 위험요소의 제한 또는 작업자와 공공 환경의 방사선 위험으로부터의 보호를 주요 항목으로 분류한다. 정상 작동을 포함한 모든 원전 상태에서 주요 안전기능을 수행하는데 필요한 기능은 동일한 설계특성으로 분류한다.

다. 안전등급 분류의 대상: ANSI/ANS-58.14은 부품 수준까지 안전등급 분류의 대상으로 하고 있으나, IAEA SSG-30은 기기 수준까지를 안전등급 분류의 대상으로 정하고 있다. Table 2는 국내의 등급분류 기준을 비교한 것이다.

3.2 원전설비 등급분류 시범적용

원전설비 관련 기술지침인 ANSI/ANS-58.14와 IAEA SSG-30를 활용하여 국내 2개 계통 O-ring에 대한 시범적인 등급분류를 수행하였다.

3.2.1 파냉각여유도 감시계통 O-ring

가. ANSI/ANS-58.14에 따른 분류

(1) 안전관련 계통/구조물(파냉각여유도 감시계

통) 결정: 냉각재 상실사고 방지, 증기압 유지 실패 감지, 급수 시스템 손상 예방의 안전기능을 수행하므로 안전등급(Q)로 분류하였다.

(2) 안전관련 기기(가압기 압력전송기) 결정: 가압기 압력변위를 전기신호로 변환하여 전송, 10CFR50.49 환경품질요건의 고에너지배관 파단 발생가능성 감지의 안전기능을 수행하므로 안전등급(Q)로 분류하였다.

(3) 안전관련 부품(O-ring) 결정: 전기 연결부 습기 침투 및 누출 방지, 고에너지배관 파단 발생가능성이 있는 환경에서 O-ring이 없을 때 압력전송기의 적절한 기능 작동 여부가 확실하지 않으므로 안전등급(Q)로 분류하였다.

Table 2 Comparison of safety classification

	ANSI/ANS -51.1	ANSI/ANS -58.14	IAEA SSG-30
Safety	Safety Class 1	Safety Related (Q)	Safety Class 1
	Safety Class 2		Safety Class 2
	Safety Class 3		Safety Class 3
	NNS	Non-Safety Related (N)	-
Pressure integrity	Safety Class 1	C-1, C-2, C-3	Safety Class 1 (High pressure)
	Safety Class 2		
	Safety Class 3	C-4, C-5	Safety Class 2,3 (low pressure)
	NNS		
Electrical	IE	IE	-
	Non-IE	Non-IE	
Seismic	Seismic Category I	Seismic Category 1	Safety Class 1, 2
	Seismic Category II	Seismic Category 2	
	Seismic Category III	-	Safety Class 3

한편 설계요건에 따른 압력건전성, 전기, 내진범주 분류 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 O-ring safety classification at sub-cooled margin monitoring system

Safety	Pressure integrity	Electrical	Seismic
Q	C-3	-	Seismic category I

나. IAEA SSG-30에 따른 분류

(1) 기능의 확인

- ① 압력전송기는 원자로 냉각재 배관, 원자로 압력용기 상부구조물, 핵연료 집합체에 사용되며 원자로냉각재계통 재고량 제어 및 압력제어, 노심 열 제거 등의 확인을 위한 정보 제공 기능을 수행한다.
- ② 과냉각여유도 감시 계통 내의 압력전송기는 원자로 냉각재 배관 내의 과냉각여유도를 감시하기 위해 고온관 및 저온관의 가압기 압력신호와 비교하는 기능을 수행한다.

(2) 기능의 범주화

- ① 과냉각여유도 감시기능은 필수 안전기능에 해당한다.
- ② 가압기 압력변위를 전기신호로 변환하여 전송하는 기능을 수행한다.

(3) 해당기기의 등급분류는 기능범주화의 결과에 따라 구분된다. Table 4와 같이 기능수행 실패의 심각도를 고려하여 SC를 부여한다.

- ① 과냉각여유도 감시 계통은 SC 1로 분류하였다.
- ② 압력전송기는 SC 3으로 분류하였다.

Table 4 Analysis of postulated initiating events and safety categories at sub-cooled margin monitoring system

Functions credited in the safety assessment	Severity of the consequences		
	High	Mid	Low
Functions to reach a controlled state after anticipated operational occurrences	SC 1	SC 2	SC 3
Functions to reach a controlled state after design basis accidents	SC 1	SC 2	SC 3
Functions to reach and maintain a safe state	SC 2	SC 3	SC 3
Functions for the mitigation of consequences of design extension conditions	SC 2 or 3	N/C	N/C

*N/C: Not Categorized

3.2.2 정화계통 배관 압력전송기 O-ring⁽¹⁶⁾

가. ANSI/ANS-58.14에 따른 분류

(1) 안전관련 계통/구조물(사용후연료 저장소 냉각 및 정화계통) 결정: 사용후연료 붕괴열 제거 및 물 온도 유지, 냉각재 상실로 인한 사용후연료 손

상 방지, 사용후연료 파손 감지, 부유물 제거의 안전기능에 따라 안전등급(Q)으로 분류한다.

(2) 안전관련 기기(정화계통 배관 압력전송기) 결정: 정화계통 배관 압력변위를 전기신호로 변환하여 전송, 정화계통 배관 압력 수위 조절의 안전기능 수행에 따라 안전등급(Q)으로 분류한다.

(3) 안전관련 부품(O-ring) 결정: 전기 연결부 습기 침투 및 누출 방지, Mild zone에 위치한 압력전송기들에 대해서는 압력에 따른 분사, 침수, 높은 습도가 상정되지 않았고 O-ring이 필요하지 않으므로 비안전등급으로 분류한다.

한편 설계요건에 따른 압력건전성, 전기, 내진범주 분류 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 O-ring safety classification at spent fuel cooling and clean-up system

Safety	Pressure integrity	Electrical	Seismic
N	C-5	-	-

나. IAEA SSG-30에 따른 분류

(1) 기능의 확인

① 사용후연료 정화기능은 냉각재 상실로 인한 사용후연료 손상 방지 및 파손 감지 부유물 제거 등의 기능을 수행한다.

② 과냉각여유도 감시 계통 내의 압력전송기는 원자로 냉각재 배관 내의 과냉각여유도를 감시하기 위해 고온관 및 저온관의 가압기 압력신호와 비교 기능을 수행한다.

(2) 기능의 범주화

① 사용후연료 정화기능은 안전기능에 해당한다.
 ② 가압기 압력변위를 전기신호로 변환하여 전송하는 기능 수행한다.

(3) 해당기기의 등급분류는 기능범주화의 결과에 따라 구분되며, 기능수행 실패의 심각도를 고려하여 Table 6과 같이 SC를 부여한다.

① 사용후연료 저장소 정화계통은 SC 3으로 분류하였다.

② 압력전송기는 SC 3으로 분류하였다.

3.2.3 타당성 검토 결과

원전에 설치되는 계통·기기·부품이 안전기능에 따라 적절히 분류되어 관리됨을 확인하기 위해 원

Table 6 Analysis of postulated initiating events and safety categories spent fuel cooling and clean-up system

Functions credited in the safety assessment	Severity of the consequences		
	High	Mid	Low
Functions to reach a controlled state after anticipated operational occurrences	SC 1	SC 2	SC 3
Functions to reach a controlled state after design basis accidents	SC 1	SC 2	SC 3
Functions to reach and maintain a safe state	SC 2	SC 3	SC 3
Functions credited in the safety assessment	SC 2 or 3	N/C	N/C

전설비의 상세 등급분류 타당성 검토를 실시하였다. 관련 보고서들을 분석한 결과 NP-6895 및 ANSI/ANS-58.14에서 제시하고 있는 등급분류 방식은 구조물·계통·기기 및 부품까지의 구체적인 등급분류가 가능하였다. 또한 상위 개념에서 하위 개념으로의 순차적인 등급분류를 수행하기 때문에 안전기능 및 설치위치, 설치된 모기기의 안전기능에 미치는 영향 등을 파악함으로써 더 정확한 등급분류가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 그 만큼 시간과 노력이 많이 소요되고 방대한 데이터베이스가 요구된다는 단점이 있다.

한편 IAEA SSG-30에서 제시하고 있는 등급분류 방식은 기능의 분류를 먼저 수행하고 해당 기능을 수행하는 구조물·계통·기기를 파악하여 안전관련 및 비안전관련 여부를 결정한다. 이는 분류 대상의 기능만 파악하면 되기 때문에 EPRI NP-6895 및 ANSI/ANS-58.14 보고서에 비하여 시간과 노력을 절약할 수 있다고 판단된다. 압력전송기 O-ring의 예와 같이 안전관련 기능을 수행하는 부품이라 할지라도 다른 기술기준을 적용한 결과 IAEA SSG-30에서는 동일한 등급분류 결과가 나타났으나, ANSI/ANS-58.14에서는 설치위치에 따라 대상의 등급분류가 다르게 평가되었다. 또한 대상 부품의 안전기능 및 모기기의 안전등급 분류가 선행되어야 부품의 정확한 등급분류를 수행할 수 있었다. 따라서 최종적으로 보다 정확한 상세분류를 위해서 ANSI/ANS-58.14의 규정에 따라 분류하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

본 연구는 원전설비 등급분류 기술기준의 현황을 분석하고, 새로운 국외 기술기준의 적용성 또는 국내 기술기준 수립방안을 확인하기 위한 것으로서, 주요 결과는 다음과 같다.

1) 현행 ANSI/ANS-51.1에서는 안전등급 1, 2, 3과 비안전등급으로 구분하였으나, ANSI/ANS-58.14에서는 안전등급을 구분하지 않고 안전등급(Q)으로 통합하였다. 또한 안전기능과 내압기능 각각의 중요도를 감안하여 등급분류 요건의 하나로 5단계의 압력건전성 기준을 제시하였으며, 안전등급과 품질등급, 내진, 환경 등 타 등급분류 기준과 연계하였다.

2) ANSI/ANS-58.14에서 제시하고 있는 등급분류 방식은 구조물·계통·기기 및 부품까지의 구체적인 등급분류가 가능하였다. 그러나 정확한 등급분류를 위한 시간과 노력이 많이 소요되고 방대한 데이터 확인이 요구되는 단점이 있다. IAEA SSG-30의 등급분류 방식은 기능을 파악하고 해당 기능의 수행여부를 확인하여 안전관련 및 비안전관련 등급을 결정하면 되기 때문에 시간과 노력을 절약할 수 있는 장점이 있다.

3) 압력전송기 O-ring의 예와 같이 안전관련 기능을 수행하는 부품이라 할지라도 타 기술기준과 연계시 IAEA SSG-30에서는 동일한 등급분류 결과가 나타난 반면 ANSI/ANS-58.14에서는 설치위치에 따라 다른 등급으로 평가되었다. 또한 대상 부품의 안전기능 및 모기기의 안전등급 분류가 선행되어야 부품의 정확한 등급분류를 수행할 수 있었다. 따라서 보다 정확한 상세분류를 위해서는 ANSI/ANS-58.14의 규정에 따라 분류하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," American Society of Mechanical Engineers.
- (2) Regulatory Guide 1.26, "Quality Group Classifications and Standards for Water-, Steam-, and Radioactive-Waste-Containing Components of

- Nuclear Power Plants,” USNRC.
- (3) Regulatory Guide 1.29, “Seismic Design Classification,” USNRC.
- (4) ANSI/ANS-51.1, 1983, “Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactor Plants,” American Nuclear Society.
- (5) 원자력안전위원회고시 제201-10호 “원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정,” 2016, 원자력안전위원회.
- (6) IEEE 279, 1971, “IEEE Standard Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Stations,” IEEE.
- (7) IEEE 308, 2012, “IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations,” IEEE.
- (8) IEEE 603, 2009, “IEEE Standard Criteria for Safety Systems for Nuclear Power Generating Stations,” IEEE.
- (9) 10CFR50.55a, 2014, “Codes and Standards,” USNRC.
- (10) 10CFR50 Appendix B, 2014, “Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants,” USNRC.
- (11) EPRI NP-6895, 1991, “Guidelines for the Safety Classification of Systems, Components and Parts Used in Nuclear Power Plant Applications,” Electric Power Research Institute.
- (12) ANSI/ANS-58.14, 2011, “Safety and Pressure Integrity Classification Criteria for Light Water Reactors,” American Nuclear Society.
- (13) IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-30, 2014, “Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants,” International Atomic Energy Agency.
- (14) IAEA Safety Standards, General Safety Requirements Part 4, No. GSR Part 4, 2009, “Safety Assessment for Facilities and Activities,” International Atomic Energy Agency.
- (15) IAEA Safety Standards Series, Requirements No. NS-R-1, 2000, “Safety of Nuclear Power Plants: Design,” International Atomic Energy Agency.
- (16) KINS, Internal communication, 2015.