

'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후핵연료 중간저장(건식형태)시설의 구조 및 설비기준 개발

김 영 상
안 동 대 학 교
이 상 국
한국원자력안전기술원

요 약

사용후핵연료 건식 중간저장시설은 설계수명기간 동안 방사능 차폐, 냉각, 보호 등과 같은 주요 기능이 확실히 보장되도록 설계 및 유지·관리되어야 한다. 이러한 주요 기능은 여러가지 설계하중 하에서 구조물의 거동을 정확히 파악한 결과를 설계에 반영함으로써 보장된다. 본 연구에서는 구조물의 건전성을 보장할 수 있는 기능적 측면과 구조적 측면에서 고려되어야 할 항목 및 내용을 국외에서 적용되고 있는 기술기준을 토대로 하고 풍하중, 홍수방호, 내진설계, 열하중해석, 철근콘크리트 및 강구조물, 기초지반과 같은 세부항목에 대한 해석 및 설계의 연구결과를 추가하여 국내 원자력법령과 시행령에 부합되는 사용후핵연료 건식중간저장시설의 구조 및 설비기준을 개발하였다.

1. 서론

1.1 배경

국내 원자력발전소에서 사용된 후 배출되는 사용후핵연료는 주로 발전소 내에 위치하고 있는 사용후핵연료 저장조에 수용되고 있다. 그러나 이러한 저장시설의 수용능력은 거의 한계에 도달하고 있어 발전소에서는 조밀저장대 방법으로 저장능력을 확충하여 저장하고 있는 실정이며, 조만간 포화상태에 이를 것이다. 또한 현재까지는 습식형태의 저장방법을 주로 적용하여 왔으나, 최근에는 유지관리가 용이한 건식저장방법을 미국, 캐나다, 독일 등에서 사용하고 있다. 우리나라에서도 사용후핵연료 중간저장시설을 건식저장형태로 취할 예정이나, 이러한 시설에 적용할 기술기준이 설정되어 있지 않은 실정이다. 따라서 사용후핵연료 건식중간저장시설의 구조해석, 설계, 제기능 유지 등과 관련한 구조 및 설비기준을 개발한 것이다.

1.2 개발범위

사용후핵연료 건식 중간저장시설은 어떠한 설계하중 하에서도 구조물의 건전성이 유지되어 방사성물질이 외부로 누출되지 않아야 한다. 개발범위는 크게 시설의 구조해석 및 설계적 측면과 제기능 유지 측면으로 분류할 수 있다. 구조해석 및 설계측면에서는 해석 및 설계에 사용될 하중 및 하중조합의 크기 결정방법 및 조합방법, 풍하중설계에서는 설계풍속의 결정과 설계속도압 계산방법, 홍수방호설계에서는 내·외부 요인에 의한 홍수로부터의 시설 방호방법, 열하중은 구조해석 모델링 및 해석방법에 대해 연구하였다. 내진설

계에서는 내진설계변수 결정방법과 해석방법, 철근콘크리트 구조 및 강구조 설계에서는 재료시험과 설계요건, 기초지반에서는 지내력, 사면의 안정성, 침하 및 액상화 등에 대하여 연구하였다. 제기능 유지 측면에서는 구조 및 설비의 방사능 차폐기능, 격납기능, 열제거기능, 유지·보수기능 등과 같은 항목을 포함하였다.

2. 국내·외 적용 기술기준 현황

사용후핵연료 건식 중간저장시설과 관련된 국내의 법령 및 기술기준은 단지 원자력 관련 시설에 대한 모법인 원자력법과 시행령뿐이며 원자력법 시행령 제 229조에서도 건식중간저장시설은 자연재해 등에도 적합하도록 규정된 기술기준에 따라야 한다고만 되어 있다. 건식중간저장시설을 운영하고 있는 국가로는 미국, 캐나다, 독일, 프랑스 등이 있으나, 동 시설과 관련된 법령 및 기술기준은 미국의 것이 가장 잘 정립되어 있다. 미국의 법령 및 기술기준으로는 시설의 인허가 관련 법령인 10 CFR 72, 규제지침인 R.G.3.48, 3.60, 기술기준으로는 ANSI 57.9 등이 있으며 대표적인 법령 및 기술기준의 주요 내용은 다음과 같다.

2.1 10 CFR 72 Subpart F : 일반설계기준

안전에 중요한 구조물의 설계, 제작, 건설, 유지·보수 및 성능에 대한 일반적인 고려사항과 자연재해, 화재 및 폭발, 공동사용, 주변시설, 해체 등에 대한 내용을 포괄적으로 규정하고 있다.

2.2 Reg. Guide 3.48 : 안전성분석보고서 표준양식 및 내용

이 규제지침에서는 사업자가 인허가 신청시 작성해야 할 안전성분석보고서의 표준양식 및 포함되어야 할 항목과 내용을 기술하고 있으며, 구조적 안전성기준, 방호계통, 해체시 고려사항과 같은 설계기준 및 시설의 배치, 구조물의 사양 등에 대한 설계기준 등도 규정하고 있다.

2.3 ANSI 57.9 : 설계기준

핵연료의 이송, 취급, 저장 등과 관련된 구조물의 기능 및 설계요건을 상세하게 규정하고 있다. 기능적 측면에서는 방사성물질이 주변환경으로의 누출을 방지하기 위한 차폐계통의 건전성 유지와 관련된 항목을 포함한다. 설계요건의 주요 항목으로는 하중 및 하중조합, 감시되지 않는 방사성폐기물의 누출방지계통, 건물의 배치 등이다.

3. 구조해석 및 설계방법

여러가지 설계하중조건에서 구조물의 거동특성을 정확히 파악하여 설계에 반영함으로써 구조물의 건전성은 보장된다. 사용후핵연료 건식중간저장시설에 대한 구조해석 및 설계적인 측면에서의 설계요건 및 절차, 설계하중 및 하중조합, 설계한계 등에 대한 기술기준을 도출한다.

3.1 설계요건

사용후핵연료 건식중간저장시설의 주요 기능은 사용후핵연료를 안전하게 저장하는데 필요한 조건을 유지하여 주변 환경으로 방사성 물질의 누출을 방지하는 것이다. 이러한 기능을 유지하도록 사용후핵연료의 취급 및 저장구역에서는 사용후핵연료가 손상되지 않도록 설계되어야 하며, 사용후핵연료의 수납, 취

급, 저장 및 회수할 수 있는 적합한 품질보증절차가 규정되어야 한다. 건물의 배치와 구조는 각 구역이 정상상태 및 비정상사고시 즉, 설비 가동시, 환경조건시, 자연재해 및 인위적 사건유발시에 예상되고 요구되는 기기작동, 종사자 및 유지보수 활동에 부합되도록 설계되어야 한다.

3.2 설계절차

사용후핵연료 중간저장시설이 주어진 설계조건 하에서 구조물의 제기능을 유지하기 위해서는 설계하중에 대한 정확한 구조해석, 설계, 시공 및 유지관리 등이 종합적으로 수행되어야 한다. 구조물의 해석에서 실제 복잡한 구조물을 해석하기는 매우 어려우며 어떤 경우에는 거의 불가능하므로 구조물을 해석 가능한 형태로 단순화하여야 한다. 이때 구조물의 특성을 적절하게 나타내는 것은 매우 중요하며, 구조물의 크기, 형태, 해석의 목적 등에 따라 가정사항을 적절히 결정하여야 한다. 정상상태, 비정상사고, 자연재해 등의 여러 가지 설계하중에 대하여 적합한 해석방법 및 절차에 따라 해석한 결과를 설계거동한계와 비교하여 구조물의 안전성과 제기능이 유지될 수 있도록 요건에 맞게 설계하여야 한다.

3.3 설계하중

사용후핵연료 중간저장시설은 정상상태, 비정상사고, 자연재해 등이 적절히 고려된 설계하중 작용시에도 제기능을 충분히 발휘하여 구조적 건전성이 유지되어야 한다. 이들 하중은 정상상태하중, 비정상사고하중 및 자연현상하중으로 분류될 수 있으며 각 범주에 속하는 주요 하중은 다음과 같다.

1) 정상상태하중

ISFSI의 정상운전시에 존재하거나 발생하는 모든 영구하중과 과도하중을 포함한다. 특히 사하중, 활하중, 운전중의 열하중, 횡토압하중이 포함된다.

2) 비정상사고하중 : 과도 열하중, 무거운 기기의 낙하에 의한 하중

3) 자연현상하중 : 설계지진에 의해 발생하는 하중, 설계풍에 의해 발생하는 풍하중

3.4 하중조합

앞에서 기술한 여러가지 설계하중 중에서 고려되는 하중에 적절한 하중계수를 곱하고 하중크기와 방향의 변동성을 고려하여 최악의 하중조건이 부재설계에 반영되도록 하중을 조합하여야 한다.

1) 콘크리트 구조물

정의된 하중에 하중계수를 곱하고 하중 크기와 방향의 변동성을 고려하여 가장 최악의 하중조건이 설계에 반영되도록 조합한다.

2) 강구조물

정의된 하중은 하중 크기와 방향의 변동성을 고려하여 가장 최악의 하중조건이 설계에 반영되도록 조합한다.

3.5 설계한계

1) 콘크리트 구조물

일반적으로 안전성 관련 철근콘크리트 구조물의 부재설계는 설계강도가 소요강도보다 크게 하는 극한강

도설계방법으로 이루어지며, 이 때 소요강도는 앞에서 기술한 하중조합으로 부터 구한다. 철근콘크리트 구조물의 부재설계에서는 설계강도는 물론 변위, 변형, 균열한계 및 안정성을 규정하는 것이 매우 중요하다.

2) 강구조물 : 강도, 재료, 변형

4. 기술기준 주요내용

사용후핵연료 건식중간저장시설은 정상조건은 물론 사고조건하에서도 본래의 제 기능을 충분히 발휘하여 방사성물질의 누출을 방지하므로써 인근 주민은 물론 자연환경을 보호하도록 설계, 시공, 유지·보수되어야 한다. 따라서 안전성 관련 구조물은 설계하중 작용시 방사능 차폐기능, 격납기능, 열제거 기능, 유지·보수 기능 등과 같은 시설의 제기능이 유지되어야 한다.

사용후핵연료 건식중간저장시설의 구조 및 설비기준(안)

제 1 조 (목 적)

이 기준은 원자력법 시행령 제 229 조의 2 제 2 항의 규정에 의한 사용후핵연료 중간저장시설의 구조 및 설비에 대한 기술기준을 규정함을 목적으로 한다.

제 2 조 (적용범위)

이 기준은 사용후핵연료 중간저장시설 중 건식저장시설(이하 "저장시설"이라 한다.)의 안전성 확보를 위해 설계, 건설, 운영 및 해체시 고려하여야 할 최소 요건을 규정한다.

제 3 조 (일반사항)

저장시설의 설계, 건설, 유지·보수 방법은 실증된 공학적 관행에 기초를 두어야 하며, 새로운 방법이 적용될 경우에는 타당한 근거가 제시되어 그 안전성이 입증되어야 한다. 또한 이 기준에 언급되지 않은 기술적 사항이라도 시설의 기능에 관련된 경우에는 원자력시설에 일반적으로 사용되는 공학적 방법에 따라야 한다.

제 4 조 (시설의 기능)

저장시설은 자연재해, 정상상태 또는 비정상사고, 인위적사고 등 설계기준 사고에서도 다음의 기능을 만족하게 유지하여야 한다.

1. 사용후핵연료를 안전하게 저장할 수 있는 상태의 유지
2. 사용후핵연료의 인수, 저장 및 이송시 손상방지
3. 방사성물질이 주변환경으로의 누출을 기준치 이하로 낮게 유지
4. 방사성폐기물 발생량을 최소화할 수 있는 조건의 유지

제 5 조 (자연재해)

저장시설은 지진, 회오리바람, 낙뢰, 태풍, 홍수, 해일 및 산 사태 등과 같은 자연현상과 그로 인한 비산물에 의한 손괴로 인하여 방사성 물질을 허용기준치 이상 외부로 누출하지 않아야 하며, 그 크기는 자연재해 중에서 최대의 영향을 고려하되 기록된 자료 및 기간 등의 제한성을 감안하여 적절한 여유도

를 갖도록 하여야 한다.

제 6 조 (화재 및 폭발)

시설의 내부 또는 외부의 화재 및 폭발사고 시에도 저장시설의 기능은 효과적으로 수행될 수 있어야 하며 화재방호계통은 사고시 피해를 최소화시킬 수 있어야 한다.

제 7 조 (인위적 사고)

저장시설은 항공기의 추락, 위험물의 생산 및 취급, 운전원의 기기조작 실수 등으로 인한 인위적 사고가 발생한 경우에도 허용한계 이상의 방사성물질 누출이 없어야 한다.

제 8 조 (시설의 구조 및 배치)

저장시설의 구조 및 배치에는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

1. 오염구역방사능구역 작업자의 통제 관리
2. 운전원에 대한 방사선 방호
3. 주기적인 검사 및 유지보수 작업
4. 이송용기의 이동시간 최소화
5. 방사성물질의 탐지 및 회수

제 9 조 (적용 규격 및 기술기준)

저장시설은 일반적으로 원자력시설에 사용되고 있는 공인된 규격과 기술기준을 이용하여 설계·건설되어야 하며, 공인된 규격과 기술기준이 없는 경우에는 사용목적에 적절하게 부합되어 입증된 경우에 한하여 일반 공업규격 및 기술기준을 준용할 수 있다.

제 10 조 (시설의 공동사용)

저장시설은 사고 발생시 안전상태로 환원시킬 수 있는 능력을 포함하여 시설의 기능 수행상 공동사용에 따른 능력저하가 발생되지 않음이 입증된 경우를 제외하고는 다른 시설과 공동으로 사용되어서는 안된다.

제 11 조 (주변시설)

저장시설이 다른 시설 인근에 위치할 경우 다른 시설에 영향을 받지 않아야 하며, 이들 시설의 동시 가동에 따른 누적영향이 공중의 보건과 안전에 위협을 초래하지 않도록 설계 및 운영되어야 한다.

제 12 조 (물리적 방호)

저장시설 부지내에 통신시설, 물리적 방벽, 침입감지장치, 보안조명, 경보계통 등 접근통제시설과 비상시 시설운영에 필요한 비상전원이 확보되어야 하며, 또한 부지 밖의 소외통신시설도 갖추어야 한다.

제 13 조 (구조설계)

저장시설의 구조설계는 시설의 기능을 유지하기 위하여 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

1. 저장시설은 정상상태, 비정상사고, 자연재해 및 인위적사고 발생시 작용하는 하중에 대하여 구조적 건전성 및 기밀성과 방사선 차폐성능이 보장될 수 있도록 설계되어야 한다.
2. 저장용기는 이송용기를 포함한 중량물의 낙하에 의하여 저장기능의 상실이 있어서는 안된다.
3. 저장용기 및 이송용기는 사고시 사용후핵연료를 안전하게 회수할 수 있어야 한다.
4. 크레인 및 지지구조물은 설계지진에 대하여 구조적 건전성이 유지될 수 있도록 내진검증되어야 한다.

5. 통제되지 않거나 감시되지 않은 방사성폐기물의 누출을 방지하기 위하여 집수정과 배수시설을 설치하여야 한다.

제 14 조 (계측 및 감시)

저장시설은 사용후핵연료의 인수, 저장, 이송단계 및 시설의 해체단계에서 방사선물질 취급하는 구역 및 설비의 방사선준위를 계측 및 감시함으로써 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있어야 한다.

제 15 조 (시험, 검사 및 유지보수)

저장시설의 구조물 및 설비가 수명기간 동안 안전여유를 갖고 계속 사용 가능하다는 것을 확인하기 위하여 주요 구조물 및 설비의 건전성이 정기적으로 시험, 검사 및 유지·보수되어야 한다.

제 16 조 (시설의 확장 및 변경)

저장시설의 확장이나 변경이 필요한 경우 그로 인해 저장시설에 미치는 구조적 및 기능적 영향이 평가되어 안전성이 확보되어야 한다.

제 17 조 (시설의 해체)

저장시설은 해체를 고려하여 설계되어야 하며, 해체할 경우 구조물 및 설비의 제염이 용이하고, 방사성 폐기물 및 오염된 기기의 발생량을 최소화할 수 있도록 설계되어야 한다.

5. 결론

사용후핵연료 건식 중간저장시설의 구조 및 설비기준은 방사능 차폐, 격납기능, 열제거기능, 유지·보수기능 등과 같은 기능적인 사항과 구조해석 및 설계시 고려하여야 할 설계요건, 절차, 설계하중 및 하중조합, 설계한계 등 구조적인 사항에 대한 최소 요건을 고려하여 개발되었다. 개발된 구조기술기준은 구조물 설계시 기본지침이 될 것이며, 또한 안전성 평가시 활용될 것이다.

6. 참고문헌

- 10 CFR 72. (1992). "Licensing Requirements for the Storage of Spent Fuel in an ISFSI", August.
- ACI 349. (1985). "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structure".
- AISC N690. (1984). "Nuclear Facilities-Steel Safety-Related Structures for Design Fabrication and Erection".
- ANSI/ANS-2.19-1981, "Guidelines for Establishing Site-Related Parameters for Site Selection and Design of an Independent Spent Fuel Storage Installation (Water Pool Type)".
- ANSI/ANS-57.9-1984, "Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation (Dry Storage Type)".
- ANSI/ASCE-7, 1993, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures".
- 한국원자력안전기술원. (1994). "방사성폐기물 관련 기술기준 설정을 위한 연구", KINS/GR-094.