

## PWR 사용후연료 수송저장체계 구성

### Establishment of the PWR Spent Fuel Transport and Storage System

백 창 열, 정 진 세, 정 성 환, 최 규 섭, 양 계 형, 이 흥 영  
한수원(주) 원자력환경기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

국내 원자력발전소의 가동연한이 증가함에 따라 일부 원전의 경우 사용후연료 저장능력이 포화되는 상황에 이르고 있으나, 사용후연료 중간저장시설 건설예정인 2016년까지는 원자력발전소 내에 사용후연료를 저장하여야하므로 저장용량에 여유가 있는 인근 호기간 수송저장의 필요가 증대되고 있다. 사용후연료 수송저장은 여러 가지 제약조건 및 특수성에 따라 국제원자력기구의 안전수송규정 및 국내 원자력법에서 엄격하게 규정하고 있는 기술기준에 따라 수행되어야 한다. 본 논문에서는 국내 원자력발전소의 사용후연료 수송저장작업을 안전하고 효율적으로 수행할 수 있도록 한수원(주) 원자력환경기술원에서 개발한 PWR 사용후연료 12다발용 수송용기 KN-12를 사용하여 수송저장시스템 및 공정체계를 확립하였고, 이를 실제 수송 및 저장작업에 활용함으로써 현장적용성을 확인하였다.

#### ABSTRACT

The capacity of spent fuel storage at the NPP is approaching saturation status as the years of operation increases. Until 2016 when the interim storage facility for spent fuel is planned to be constructed, the needs for transshipment of spent fuel between neighboring NPP has been come to the front to cope with shortage of spent fuel storage capacity. Due to the various conditions and special aspects of the spent fuel transportation, it shall be carried out in accordance with technical requirements stipulated in the domestic Atomic Energy Law and IAEA safety regulations. This study established the transportation system and operating procedures by using KN-12 transportation cask, developed by KHNP/NETEC for safe and efficient spent fuel transportation, and the site applicability of the cask has been verified through actual operation.

## 1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 사용후연료의 누적으로 인하여 저장능력 확보가 요구됨에 따라 사용후연료건물내 습식저장조의 저장능력향상과 더불어 저장능력확보방안에 대한 관심이 고조되고 있다. 발전소부지에 저장된 사용후연료는 최종적으로 방사성폐기물 관리 시설부지에 궁극적으로 이송·저장될 예정이기 때문에 국내 원자력위원회의 의결에 따라 2016년까지는 소내저장이 필요하다. 이때까지 원활한 발전소운영을 위해서 임시적으로 택할 수 있는 여러 방안중 최적의 방안은 조밀저장랙설치와 더불어 포화가 예상되는 습식저장조의 사용후연료를 저장여유가 있는 저장조로 수송하여 임시적으로 저장하는 방안이라 할 수 있다. 따라서, 일부 원전에서는 포화가 예상되는 습식저장조의 저장능력확보를 위해서 저장여유가 있는 습식저장조로 사용후연료를 소내수송 및 저장한 바 있다. 초기에는 사용후연료 4다발용 수송용기(KSC-4)를 사용하였으나, 현재는 보다 효율적인 수송작업을 위해서 개발된 12다발용 수송용기(KN-12)를 사용하고 있다. KN-12 수송용기는 PWR 사용후연료 집합체 12다발을 수송할 수 있는 운반용기로 B(U)형 핵분열성운반물에 대한 기술기준에 따라 설계/제작되었으며, 1998년부터 2002년 9월까지 약 5년간의 기술개발로 각종 성능시험과 시운전과정을 거쳐 수송시 건전성을 입증하였고 곧바로 실제 수송작업에 투입되었다.

본 논문에서는 KN-12 수송용기를 사용하여 국내 PWR 원전에서 적용할 수 있는 안전하고 효율적인 수송시스템 및 수송체계를 확립하였다. 이를 위해서 수송용기 및 부대장비를 이용하여 연료장전, 수송준비, 수송, 연료저장작업 등 단계별 작업공정으로, 원전의 현장여건 및 특성에 적합하도록 표준수송저장공정 및 작업절차를 개발하였다. 또한 사용후연료 수송용기의 격납건전성을 입증하기 위한 헬륨누설시험 및 공기압상승누설시험 방법에 대한 절차도 수립하였다. 이러한 내용을 토대로 사용후연료의 안전수송을 위한 규제기관의 운반검사, 방사선안전관리 및 비상사고시 안전조치 등 수송저장 전반에 필요한 기술기준 등을 분석하여 이에 대한 체계를 확립하였다.

## 2. 사용후연료 수송저장시스템개요

### 2.1 KN-12 사용후연료 수송용기

KN-12 수송용기는 PWR 사용후연료 집합체 12다발을 수송할 수 있는 운반용기로 원자력법 및 국제규정에 규정된 B(U)형 핵분열성운반물에 대한 기술기준에 따라 설계되었다.[1], [2], [3], [4] 수송용기는 원자력법에 따라 정부로부터 설계승인 및 제작검사를 받아 건전성을 입증하였으며, ASME B&PV Code Section III Division 3에 따라 제작되었다. 수송용기는 관련규정에 따른 B형 운반용기의 운반사고조건에 대한

사용후연료의 격납, 방사선차폐, 구조적 건전성, 임계제어 및 무동력 열제거 기능을 갖추고 있다. 수송용기의 최대정상운전압력(MNOP)은 0.7MPa이며, 습식수송 시 화재사고조건에 대한 최대내부압력을 만족시킨다. 수송용기의 내용물에 대한 최대방사능량은  $1.39 \times 10^{17}$ Bq이며, 수송용기는 전용으로 운반되고, 책임계안전지수(CSI)는 0(영)이다. 수송용기는 수송차량의 트레일러위에 설치된 결속장치(tie-down)에 수평으로 위치하여 운반되는 원통형 압력용기(pressure vessel)로 그림 1에 KN-12 수송용기의 개요도를 나타내었다.

- 수송용기 전체외경: 2450mm(충격완충체 포함)
- 수송용기본체 내경: 1192mm
- 수송용기본체 외경: 1942mm
- 수송용기 전체길이: 5744mm(충격완충체 포함)
- 수송용기 취급중량: 72.565톤(습식, 연료장전시)  
70.365톤(건식, 연료장전시)

수송용기는 용기본체 및 용기하부(cask bottom)가 완벽하게 용접되는 단조탄소강의 원통형 용기로 스테인리스강의 용기뚜껑으로 밀봉된다. 용기뚜껑은 37개의 캡너트를 가진 스테드볼트 및 3개의 캡나사로 용기본체와 체결되며, 탄성중합체(elastomer)의 이중 O-ring에 의하여 기밀을 유지한다. 뚜껑의 배기/배수용 개방구는 탄성중합체 O-ring을 갖는 기밀마개(closure plug)로 완벽하게 막혀지며, O-ring으로 기밀을 유지하는 볼트 체결식 밀봉뚜껑(closure lid)이 설치된다. 수송용기 내부의 자유공간은 건식수송의 경우 헬륨, 습식수송의 경우 물이 채워진다. 내부공간의 내부표면, O-ring 설치자리의 표면, 용기뚜껑의 외부 및 수송용기하부는 부식방지를 위하여 스테인리스강으로 피복되어있다. 탄소강의 벽 및 스테인리스강의 용기뚜껑은 중성자차폐체와 함께 허용방사선량률을 만족시킨다. 원주방향의 중성자차폐는 용기본체의 벽에 직경 91mm 및 95mm인 두 종류 동심열의 축방향 구멍 속에 PE 봉을 배열시키는데, 각 동심열은 36개로 총 72개의 원형구멍이 있다. 두 동심열의 원형구멍은 내부공간으로부터 방사선에 대하여 중성자차폐의 단절을 막기 위하여 엇갈리게 배치하였다. 연료바스켓은 연료집합체의 지지, 임계제어 및 연료로부터 용기본체로 열을 발산시킨다. 연료장전통(fuel receptacle)은 연료집합체를 고정하고 장전하기 위한 4각형 튜브를 이루도록 스테인리스강관을 용접하여 제작되었다. 장전통은 격자형으로 구성되며, 각 스테인리스강의 장전통은 바스켓 격자형의 보론이 함유된 알루미늄판으로 완전히 둘러싸인다. 바스켓 그리드형의 보론이 함유된 알루미늄판은 열제거를 충분하게 하며, 보론 함유량은 정상운반조건 및 운반사고조건에 대하여 책임계 안전을 보증한다. 수송용기의 회전 및 인양을 위하여 용기본체에 4개의 트러니온이 부착되어있다. 상부트러니온은 수직 및 수평위치 사이에 수송용기의 회전 및 수직방향으로 수송용기를 인양하기 위한 부착점으로 사용되며, 하부트러니온은 수평과 수직위치 사이에서 수송용기가 회전할 때 지지점으로 사용된다. 용기뚜껑에는 용기내부의 배수, 배기 및 건조를 위하

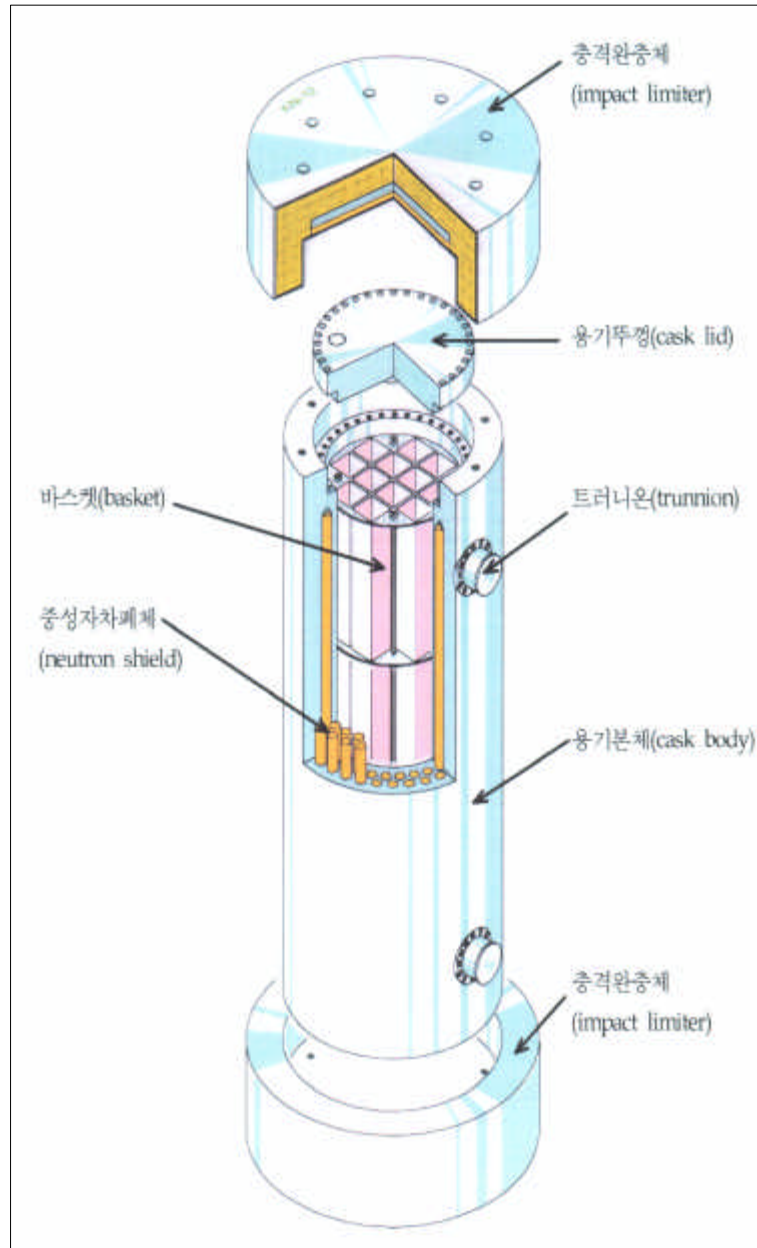


그림 1. KN-12 수송용기 개요도

여 1개의 개방구가 있는데, 이는 볼트 체결식으로 기밀이 유지되는 밀봉뚜껑에 의하여 덮이는 기밀마개로 막는다. 용기뚜껑은 37개의 M48 스테드볼트 및 캡너트, 3개의 M48 캡나사에 의하여 수송용기본체와 체결된다. 충격완충체는 수송 중 수송용기의 상부 및 하부에 설치되어 운반사고조건인 9m 자유낙하 및 1m 파열조건에 대하여 충격에너지를 흡수

한다. 충격완충체의 내부는 탄소강판, 외부는 스테인리스강판의 안에 목재(beech 및 spruce wood)로 채워 제작되는데, 외부강판은 목재의 방습을 위해 빈틈없이 용접되며, 강재 셀은 충격완충체 구성재료의 충격흡수특성을 향상하기 위하여 특수하게 설계되었다. 수송용기는 연료에서 바스켓으로, 그리고 바스켓에서 수송용기본체의 외부표면으로 붕괴열을 발산하도록 설계되었으며, 수송용기에 장전된 연료로부터 붕괴열의 발산과 제거를 위한 강제적 계통은 구비되지 않는다. 운반트레일러에 설치되는 기상보호용 덮개의 공기입출구는 수송중 수송용기의 주위에 있는 공기가 자연대류 되도록 하였다.

수송용기는 12개의 PWR 연료집합체를 습식 및 건식으로 운반하도록 설계되었다. 단, 습식운반의 경우, 정상수송 시 용기내부에 발생하는 수소량이 자유개스체적의 5%를 초과하지 않아야 하는 기간을 기준으로 전체운반시간이 90일을 초과하지 않아야 하며, 연료가 장전된 수송용기는 중량물 운송용 전용트레일러로 운반된다. 수송용기의 임계건전성은 바스켓내의 중성자흡수재를 이용하여 이루어지는데, 바스켓 배열에서 중성자증배계수( $k_{eff}$ )가 수송용기 내부공간의 보론을 함유하지 않은 물에서 0.95 미만이 되도록 한다. 바스켓내의 보론 독성으로 인하여 건식수송 중 임계제어는 불필요하다. 수송용기의 임계제어특성은 정상운반 및 운반사고조건에서 중성자증배계수(불확도 및 계산오차 포함)가 0.95 미만이 되도록 설계되었다. 수송용기는 다음의 요건을 만족한다면 W.H 14x14, W.H 16x16 또는 W.H 17x17 연료집합체를 수송용기에 장전하여 운반할 수 있다.

- 최대허용 초기  $UO_2$  농축도(enrichment) : 5.0wt.%
- 연료집합체의 연소도(burn-up) : 최대 50000MWD/MTU
- 연료의 냉각기간(cooling time) : 최소 7년

## 2.2 수송용기 부대장비

수송용기 인양장치(cask lifting yoke)는 KN-12 사용후연료 수송용기를 이동, 저장 및 수송을 위해 운반트레일러에 수직으로 하역하여 수평으로 적재하기 위한 인양장치(그림 2 참조)로 수송용기의 상부에 위치한 2개의 트러니언(trunnion)에 인양장치의 암(arm)을 원격으로 연결 및 해체할 수 있도록 제작되었다. 수송용기 취급구조물(scaffolding structure)은 사용후연료를 수송용기에 장전한 후 수송용기를 제염조로 이동하여 수송에 필요한 제반 작업공정을 수행하기 위한 취급구조물로 작업종사자가 안전하게 작업을 수행할 수 있는 구조이고, 방사성오염을 쉽게 제거할 수 있는 재질을 사용하였다. 주재료는 스테인레스강을 사용하였고, 각 단의 작업자 이동통로에는 격자판을 설치하여 작업자의 이동 및 작업안전을 고려하였다. 또한 작업구조물 하부에는 수송용기를 안착시킬 때, 수송용기의 중량으로 인한 제염조 바닥 및 수송용기 하부의 손상을 막기 위해 구조물 하단 중앙에 base plate가 설치되어 있다. 사용후연료 취급공구(spent fuel handling tool)는 사용후연료 저장조에 저장된 연료를 안전하게 인출 및 저장하는데 사용된다. 취급공구는 ANSI N14.6[5]의 기준에 따라 설계, 제작 및 시험조건을 만족하도록 하였으며, 주 재료



그림 2. 수송용기 인양장치

는 스테인레스강을 사용하여 내식성이 우수하고 방사성물질에 대한 제염이 용이하도록 외부표면을 가공처리를 하였다. 수송차량은(그림 3 참조)은 수송용기를 적재할 수 있는 트레일러와 이를 운반하는 트랙터로 구성되며 수송용기를 안전하게 운반할 수 있도록 설계제작되었다.



그림 3. 수송차량

### 3. 사용후연료 수송저장 공정

KN-12 사용후연료 수송용기 및 부대장비를 이용하여 연료장전, 수송준비, 수송, 연료 저장작업 등 각 단계에 대한 작업공정으로, 원자력발전소의 현장여건 및 특성에 적합하도록 표준수작업공정을 개발하였다. 수송저장작업시 격납건전성을 확인하기 위한 기밀시험, 포장 및 운반규정 등에 대한 요건을 준수하여야한다. 수송저장작업에 소요되는 장비는 다음과 같다.

- 수송용기(Transportation Cask)
- 용기인양장비(Cask Lifting Devices)
- 뚜껑 취급장비(Cask Lid Handling Tools)
- 배수장치(Dewatering Lances)
- 진공건식장비(Vacuum Drying Equipment)
- 오염장비(Decontamination Equipment)
- 작업구조물(Scaffolding Structures)
- 수송차량(운반 트레일러 및 트랙터)

사용후연료 수송저장작업은 숙련된 기술자가 수행하여야하며, 모든 작업은 사용후연료 수송저장절차서 및 발전소 방사선안전관리절차서 등에 따라 수행되어야하며, 방사선안전관리 및 작업절차 등은 사전에 철저한 교육을 통하여 안전한 수송저장이 되도록 하여야한다. 단계별 표준수송저장 공정을 표 1에 나타내었다.

표 1. 표준수송저장 공정

구 분	1일차	2일차	3일차	4일차	5일차
Unit. 1 단위작업	연료 장전 뚜껑 설치 L/P 배수	용기 D/P 이동 용기내부 배수 용기 오염 뚜껑볼트 체결	누설시험 용기 반출준비	용기 적재 운반검사/수송 용기 인수인계 빈 용기 수송 용기 하역 용기 D/P 이동	뚜껑볼트 해체 뚜껑 제거 L/P 이동 L/P 충수
Unit. 2 단위작업	뚜껑 제거 연료 저장 뚜껑 설치 L/P 배수	용기 D/P 이동 용기내부 배수 용기 오염 뚜껑볼트 체결	용기 반출준비	용기 반입/하역 용기 D/P 이동 빈 용기 적재 빈 용기 반출	용기내부 배기 뚜껑볼트 해체 L/P 이동 L/P 충수

수송용기의 격납경계인 수송용기 뚜껑의 누설시험은 ANSI 14.5[6]의 요건에 따라 그건전성을 입증하였다. 수송용기의 누설시험방법으로 헬륨누설시험과 압력상승누설시험을 적용하여 평가할 수 있는 방법 및 절차를 개발하였다. 기밀시험은 수송용기 뚜껑부의 기밀재료인 O-ring에 대하여 기준공기누설률(reference air leakage rate)을 측정하여 수송용기 격납계통의 기밀유지요건을 확인하기 위한 것으로 적용 누설률은  $1 \times 10^{-4}$  std cc/sec이다. 헬륨누설시험은 수송용기 내부에 검사개스로 헬륨을 주입하는 반면 공기압상승누설시험은 시험공간내 공기압의 상승여부에 따라 기밀을 측정하므로 O-ring에 헬륨이 함침되어 열화되는 등의 위험요소가 없고 누설검사가 용이하며, O-ring의 사용수명이 연장되는 장점이 있다. 공기압상승누설시험계통은 그림 4와 같이 구성된다.

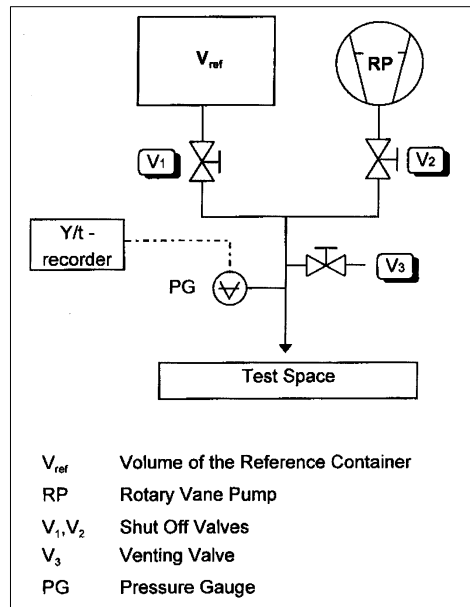


그림 4.

포장 및 운반과 관련하여 수송용기는 과기부령 제30호 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙[7] 등에 따라 다음의 기술기준을 준수하여야한다.

표 2. 허용방사선량률(전용운반 기준)

측 정 위 치	허용치(mSv/hr)
수송용기 외부표면	10
운반트레일러 외부표면	2
운반트레일러 외부표면에서 2m 거리	0.1
운전석	0.02



표 3. 허용표면오염도

방 사 능	허용치(Bq/cm <sup>2</sup> )
β-v 방출체 및 저독성 α방출체	4
그 외의 모든 α방출체	0.4

표면오염도는 임의의 표면 300제곱센티미터 이상에 대하여 측정된 평균값

또한, 사용후연료 수송저장 후 빈 용기의 수송은 다음 기준에 적합한 경우 L형 운반 용기로 운반할 수 있다.

- 운반용기가 양호하게 유지된 상태이고 안전하게 밀폐되어 있을 것
- 운반용기 외부의 표면오염도가 허용오염도를 초과하지 않을 것
- 운반용기 내부의 표면오염도가 허용오염도의 100배를 초과하지 않을 것
- 외부표면의 방사선량률이 5μSv/hr를 초과하지 않을 것

#### 4. 인허가

원자력관계사업자가 과학기술부령이 정하는 수량의 방사성물질등을 당해사업소 외의 장소나 외국으로부터 국내의 당해 사업소로 운반하고자 할 때에는 대통령이 정하는 바에 의하여 과학기술부장관에게 신고하여야 한다고 규정하고 있으므로, 사용후연료를 수송 저장하기 위해서는 원자력법 제86조의 운반신고 및 시행규칙 제90조에 따른 운반검사를 받아야한다.

#### 5. 방사선안전관리 및 비상조치

사용후연료를 수송저장하는데 따른 수송용기 인수, 연료장전, 연료인출, 수송용기 적재 및 하역, 제염, 누설시험, O-ring 교체 등의 작업시 필요한 방사선안전관리에 대한 사항을 기술하여, 사용후연료의 수송저장작업 전 공정에 걸쳐 방사성물질의 오염 확산방지 및 작업종사자의 방사선피폭을 최소화하도록 하여야한다. 방사선안전관리조는 방사선사고 발생시 그 사고의 성질 및 규모에 따라 처리방안을 달리하고 사고에 따른 구체적인 임무등을 부여함으로써 실질적인 비상대책조를 형성하도록 한다. 비상대책조 중 방사선안전관리조는 방사선사고로부터 야기되는 위험조치를 강구하고 사고의 결과를 최소화하기 위하여 기술적인 조치를 취하여야한다. 발전소의 안전성과 관련하여 사고의 규모에 따라 백색비상(Alert), 청색비상(Site Area Emergency) 및 적색비상(General Emergency)으로 구분되며, 사용후연료 수송작업과 관련한 사고 발생시 비상구분에 따라 보고 및 비상조치를 취한다.[8]

## 5. 결론

본 논문에서는 원자력발전소 동일부지내 호기간 사용후연료를 수송저장하기 위해 제작된 KN-12 수송용기에 대하여 사용후연료 수송저장을 위한 표준작업공정, 수송저장절차(서) 및 격납건전성평가를 위한 누설시험방법 및 절차를 개발하였다. 이와 더불어 사용후연료 수송저장작업시 안전수송을 위한 규제기관의 운반검사, 방사선안전관리 및 비상사고시 안전조치 등 수송저장 전반에 대한 체계도 확립하였다. 본 논문에서 제시한 수송체계는 실제로 2003년도 고리 원자력발전소의 사용후연료 수송저장작업에 적용하여 소내수송작업에 반영하였으며, 예정된 기간내에 안전하게 수송 및 저장작업을 완료함으로써 본 수송저장시스템 및 공정절차의 타당성과 현장적용성을 확인하였다. 이를 토대로 국내의 모든 원전에서 확보된 수송저장시스템 및 공정절차를 활용할 수 있으며, 차후 중간저장시설(또는 부지내 독립저장시설)로 사용후연료를 수송저장 할 경우 활용이 가능할 것이다.

## 참고문헌

1. PT-361-G-A-R-002-REV-0, KN-12 사용후연료 수송용기 안전성분석보고서, 2002
2. 과기부 고시 제2001-23호, 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정, 2001
3. IAEA Safety Standards Series No. ST-1, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 1996
4. 미국 10 CFR 71, Packaging & Transportation of Radioactive Material, 1997
5. ANSI N14.6 Special Lifting Devices for Shipping Container Weighing 10000 pounds (4500kg) or More, 1993
6. ANSI 14.5 Leakage Tests on Packages for Shipment, 1997
7. 과기부령 제30호 방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙, 2001
8. 원자력발전소 방사선비상계획서 및 절차서