

On-Site Transport and Storage of Spent Nuclear Fuel at Kori NPP by KN-12 Transport Cask

KN-12 운반용기를 이용한 고리 사용후핵연료 소내수송 · 저장

Sung-Hwan Chung, Chang-yeal Baeg, Byung-Il Choi, Ke-Hyung Yang and Dae-Ki Lee

Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd, P.O Box 149 Yuseong, Daejeon, Korea

shchung@khnp.co.kr

정성환, 백창열, 최병일, 양계형, 이대기

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 대전광역시 유성우체국사서함 149호

(Received April 7, 2005 / Approved August 1, 2005)

Abstract

Since 2002, more than 400 PWR spent nuclear fuel assemblies have been transported and stored on-site using transport casks in order to secure the storage capacity of PWR spent nuclear fuel of Kori nuclear power plant. The complete on-site transport system, which includes KN-12 transport casks, the related equipment and transport vehicles, had been developed and provided. KN-12 transport casks were designed, fabricated and licensed in accordance with Korean and IAEA's transport regulations, and the related equipment was also provided in accordance with the related regulations. The on-site transport and storage operation using two KN-12 casks and the related equipment has been conducted, and the strict Quality Control and Radiation Safety Management through the whole process has been carried out so as to achieve the required safety and reliability of the on-site transport of spent nuclear fuel.

Key words: Spent nuclear fuel, Transport system, Transport cask, On-site transport and storage, Transport regulations

요 약

고리 원전 사용후핵연료 저장조의 저장용량을 확보하기 위하여 2002 년부터 사용후핵연료 운반용기를 이용하여 400 다발 이상의 PWR 사용후핵연료 집합체를 원전부지 내에 수송, 저장하였다. 이를 위하여 KN-12 운반용기, 관련장비 및 수송차량으로 구성되는 수송시스템을 구성하였다. KN-12 운반용기는 국내 원자력법 및 IAEA의 수송규정에 따라 설계, 제작되고, 정부로부터

인허가를 획득하였으며, 취급장비 역시 관련규정에 따라 구비하였다. 수송·저장작업은 2 대의 운반용기를 동시에 투입하여 수행하였으며, 모든 작업공정에 대하여 엄격한 품질관리 및 방사선 안전관리를 수행하여 수송 안전성을 확보하고 신뢰도를 제고하였다.

중심단어 : 사용후핵연료, 수송시스템, 운반용기, 소내수송·저장, 수송규정

I. 서론

고리 원전의 사용후핵연료 저장조의 저장용량을 확보하기 위하여 사용후핵연료 운반용기를 이용하여 PWR 사용후핵연료 집합체를 저장용량이 한계에 도달한 고리 1, 2 호기에서 동일부지 내의 저장여유가 있는 인근의 고리 3, 4 호기로 소내수송·저장하였다. 이를 위하여 KN-12 운반용기 2 대, 관련장비 1 식 및 수송차량 2 대로 구성되는 수송시스템을 구성하였으며, 원전 내의 기존설비를 일부 보완하여, 2002 년부터 지금까지 약 400 다발 이상의 사용후핵연료 집합체를 안전하게 수송·저장하였다.

연료장전 및 연료저장작업으로 이루어지는 수송·저장작업은 2 대의 운반용기를 동시에 투입하여 수행하였으며, 소내 수송·저장작업의 경우 단기간 수송이고 수송 효율성을 고려하여 작업시간을 절감하고 전체 수송일정을 단축하기 위하여 습식수송을 수행하였다. 관련규정에 따라 품질보증 및 방사선안전관리체계를 구축하여 엄격하게 관리하고, 모든 단위공정을 철차화하여 안전하게 작업을 수행하였다. 매 수송 전에 운반신고를 하고 매 수송 시 마다 규제기관으로부터 운반검사를 받아 수송작업을 수행함으로써 사용후핵연료의 수송·저장에 대한 안전성을 확보하고 대내외적 신뢰도를 제고하였다.

II. 수송시스템

사용후핵연료의 소내수송·저장을 위한 수송시스템은 Fig. 1에 나타난 것처럼 운반용기 2 대, 용기인양장치 2 식, 크레인연결장치 2 식, 용기뚜껑취급장치 2 식, 진공건조 및 헬륨충진장치 1 식, 용기냉각장치 1 식, 헬륨누설시험장비 1 식, 작업구조물 2 식 및

전용트레일러 2 대 등으로 구성되며, 상세내용은 다음과 같다.

가. KN-12 운반용기

KN-12 운반용기는 경수로형 사용후핵연료 집합체 12 다발을 습식 및 건식조건으로 수송할 수 있도록 개발된 것으로, 국내 원자력법, 과기부 고시 제2001-23호[1], IAEA의 안전수송규정[2]에 따라 B(U)형 핵분열성물질 운반용기의 정상운반 및 운반사고조건에 대한 기술기준을 만족시키도록 설계되고, 안전성 해석 및 축소모델을 이용한 안전성 시험을 통하여 임계, 차폐, 격납, 열 및 구조적 건전성이 평가되었다. 운반용기는 최대초기농축도 5 wt.%, 최대연소도 50,000 MWD/MTU 및 최소냉각기간 7 년인 PWR 사용후연료를 연속적으로 장전하여 수송할 수 있다[3].

운반용기 격납경계의 설계 및 제작에 대한 ASME B&PV code Sec.III Div.3[4]의 요건에 따라 2 대의 운반용기를 제작하여, 정부로부터 설계승인 및 제작검사에 대한 인허가를 획득하였다.

운반용기는 Fig. 2에 나타난 것처럼 두꺼운 벽두께의 단조 탄소강(SA350 Gr.LF3) 재질의 셸구조물과 바닥이 견고하게 용접된 용기본체, 뚜껑볼트로서 용

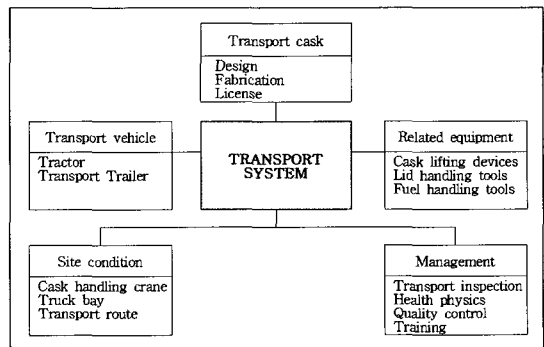


Fig. 1 Transport system.

기본체와 체결되는 단조 스테인리스강(SA182 Gr.F6NM) 재질의 용기뚜껑, 중성자차폐를 위한 용기본체 셀 내부에 축 방향으로 배치된 중성자차폐체(PE rod 및 plate), 상하부의 충격완충체 등으로 구성되는데, 용기본체, 용기뚜껑볼트의 체결과 이중의 Viton O-ring에 의하여 용기의 격납경계를 형성하고 있다. 사용후핵연료를 장전하는 바스켓은 12 다발의 연료집합체를 지지하고 보론이 함유된 알루미늄판을 사용하여 핵적 미임계를 유지하고 연료집합체로부터의 열전달이 용이한 구조이다. 용기본체의 상하부에 부착된 4 개의 트러니온은 용기의 수직과 수평취급 및 이동 시 이용된다. 충격완충체는 내부에 나무(beech and spruce woods)가 채워져 운반사고조건인 9 m 자유낙하충격 등으로부터 충격을 흡수하기 위한 구조이다. 운반용기의 전체 길이는 4,809 mm, 본체의 벽두께는 375 mm, 용기뚜껑의 두께는 290 mm, 연료가 장전되는 내부공간의 길이는 1,192 mm, 충격완충체의 외경은 2,450 mm이다. 고리 1호

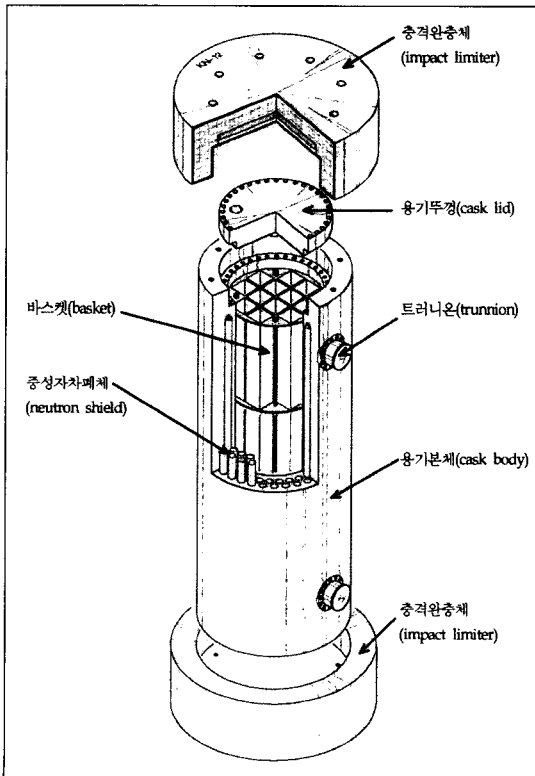


Fig. 2 Overview of KN-12 cask.

기 연료건물의 용기취급크레인 정격용량인 83 톤을 고려하여 연료가 장전된 용기의 취급중량은 약 75 톤이며, 충격완충체를 포함한 전체 수송중량은 약 85 톤에 이른다. 수송 도중 운반용기의 충격, 진도 및 전락을 방지하기 위하여 운반트레일러의 상단에 관련 규정에 따라 특수하게 설계된 결속장치가 설치되어 Fig. 3에 나타난 것처럼 운반용기는 수평상태로 수송한다.

나. 운반트레일러

연료가 장전된 운반용기는 총 중량 약 85 톤의 중량물이기 때문에 Fig. 4에 나타난 것처럼 특수하게 설계, 제작된 8 축으로 된 전용트레일러를 이용하여 수송된다. 트레일러는 운반용기의 중량뿐만 아니라 운반용기를 적재하고 하역할 때의 동하중에 대하여 견딜 수 있도록 하였으며, 운반용기, 트레일러 및 트랙터를 포함한 약 110 톤에 이르는 전체 수송중량을 분포시키기 위하여 8 축이며 축 당 바퀴 수가 4 개로서 총 32 개의 바퀴를 구비하고 있으며, 회전반경을 최대한 줄이기 위하여 각 축은 각각 구동이 가능하다. 트레일러의 전장은 15 m, 폭은 2.5 m, 자체중량

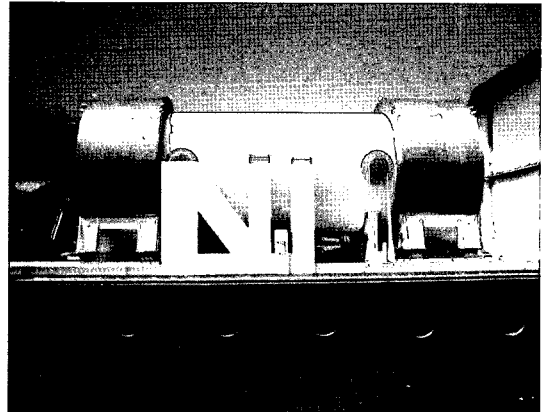


Fig. 3 Transport cask and tie-down.

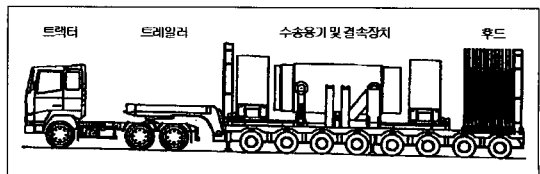


Fig. 4 Transport mode.

은 약 25 톤이다. 트레일러의 최대 축 하중은 약 14 톤으로 관련규정의 요건을 초과하지만 자동차관리법의 트레일러규정에 따라 원전부지 내 운반이 가능하도록 하였다.

또한, 트레일러의 상단에는 Fig. 5에 나타난 것처럼 운반용기로의 접근을 방지하고 기상악화 등으로부터 보호하기 위하여 후드(hood) 구조물을 설치하였으며, 후드의 상하부에는 운반용기에 대한 원활한 열전달을 위하여 공기 유입구와 유출구를 설치하였다.

다. 용기인양장치

용기인양장치는 약 75 톤(충격완충계 제외)의 운반용기를 안전하고 쉽게 인양, 이동 및 취급하기 위한 것으로, 그림 6에 나타난 것처럼 운반용기의 상부 트러니온에 2 개의 인양팔과 인양고리로 구성되어 있으며 전기모터로 구동되는 실린더에 의하여 원격으로 작업이 가능하도록 되어 있다. 인양장치는 크레인연결장치를 통하여 연료건물의 용기취급크레인의 후크와의 원활한 연결을 도모하였다.

용기인양장치 및 크레인연결장치는 과기부 고시 제2001-23호 및 ANSI N14.6(5)의 기술기준에 따라 용기중량의 3 배에 해당하는 하중을 견딜 수 있도록 설계되고 시험되었다.

라. 뚜껑취급장치

뚜껑취급장치는 약 3 톤의 운반용기 뚜껑을 안전하고 쉽게 인양, 이동 및 취급하기 위한 것으로 Fig. 7에 나타난 것처럼 용기뚜껑의 상부의 인양부와 연

결하여 연료 장전조 수중에서 원격으로 작업이 가능하도록 되어 있다. 뚜껑취급장치는 과기부 고시 제 2001-23호 및 ANSI N14.6의 기술기준에 따라 뚜껑중량의 3 배에 해당하는 하중을 견딜 수 있도록 설계되고 시험되었다.

Ⅲ. 소내수송·저장공정

KN-12 운반용기 2 대 및 관련장비를 이용하여 고리 1, 2호기의 사용후핵연료를 3, 4호기로 수송·저장하는 각 단위공정에 대한 절차를 나타내었다(6). 장전작업 및 저장작업에 대하여 각각의 호기에서 단위공정은 동시에 일어난다. 즉, 2 대의 운반용기를 투입하여 1, 2호기에서 연료장전작업을 하는 동안에 동시에 3, 4호기에서는 연료저장작업을 수행하여 수송·저장작업의 효율을 제고하였다. 고리 소내수송·저장작업의 경우, 1 회 수송·저장 사이클에 대하여 각

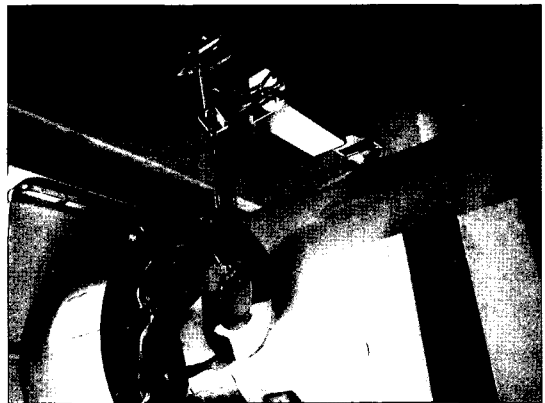


Fig. 6 Cask lifting device.

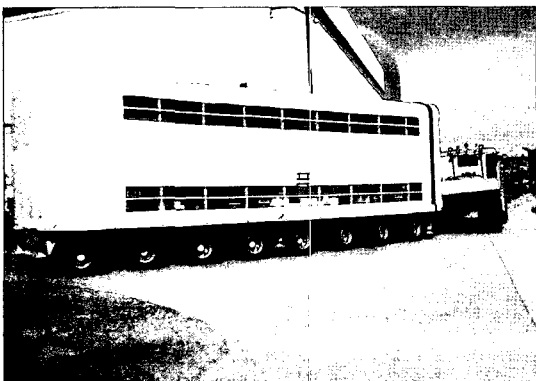


Fig. 5 Hood on trailer.

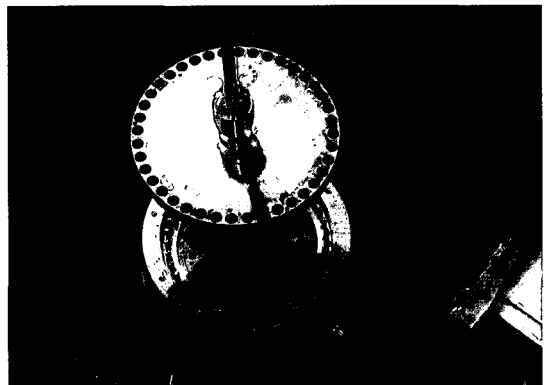


Fig. 7 Cask lid handling tool.

운반용기를 이용한 연료장전 및 연료저장작업 각각에 대하여 5일 씩, 총 10 일이 소요된다. 이러한 단위공정은 원전 내 설비, 작업공구, 발전소운영절차, 방사선안전관리절차 및 원자력법 등을 모두 고려하여 절차화시켜 각 단위작업이 끝날 때마다 작업점검표를 기록, 유지하여 안전한 작업이 되도록 하였으며, 또한, 품질보증체계를 구축하여 모든 공정에 대하여 엄격한 품질관리를 수행하였다. 이러한 작업관리, 품질관리 및 방사선안전관리는 연료장전 및 연료저장작업이 이루어지는 각 호기별로 전담요원을 배치하여 수행하였으며, 매 수송 시 수송차량에는 수송책임자와 안전관리요원이 탑승하여 수송토록 하였다.

아울러, 원자력법에 따라 수송 전 운반신고를 하고, 사용후핵연료를 장전한 운반용기를 수송할 때마다 규제기관으로부터 운반검사를 받아 소내수송·저장에 대한 수송 안전성의 확보는 물론 작업에 대한 대내외의 신뢰도를 높였다.

중량물인 운반용기 및 사용후핵연료의 취급을 포함한 수송·저장 전 공정에 걸쳐 안전한 작업이 되도록

다음 사항을 고려하였다.

- (1) 연료장전, 연료저장, 수송작업 등 전 작업에 사용되는 운반용기, 관련장비 및 작업공구는 모두 관련규정에 따라 설계, 제작, 시험을 거쳤으며, 모든 측정장비에 대하여 검교정을 받고 수송서류에 기록, 관리하였다.
- (2) 용기뚜껑볼트를 포함한 모든 볼트, 너트, 나사류는 체결 전에 사전 점검되고 사용 시 마다 수송성 유효유를 도포하였으며, 모든 체결력에 대하여 기록, 관리하였다.
- (3) 운반용기에 대한 방사선량률 및 표면오염도는 원자력법과 국제규정에 따라 적용하여, 매 수송 시 마다 엄격하게 측정하고 기록, 관리하였다.
- (4) 운반용기의 격납경계에 대한 방사성물질 누설률은 원자력법과 국제규정에 따라 보수적으로 계산되었는데(기, 정상운반조건의 허용누설률인 $10^{-6} \times A_2$ 를 기준하여 계산하면 최대허용누설률은 기준공기에 대하여 $2.7 \times 10^{-4} \text{ ref. cm}^3 \text{ s}^{-1}$, 헬륨에 대하여 $3.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 이나, 실제 수송 시 누설시험에

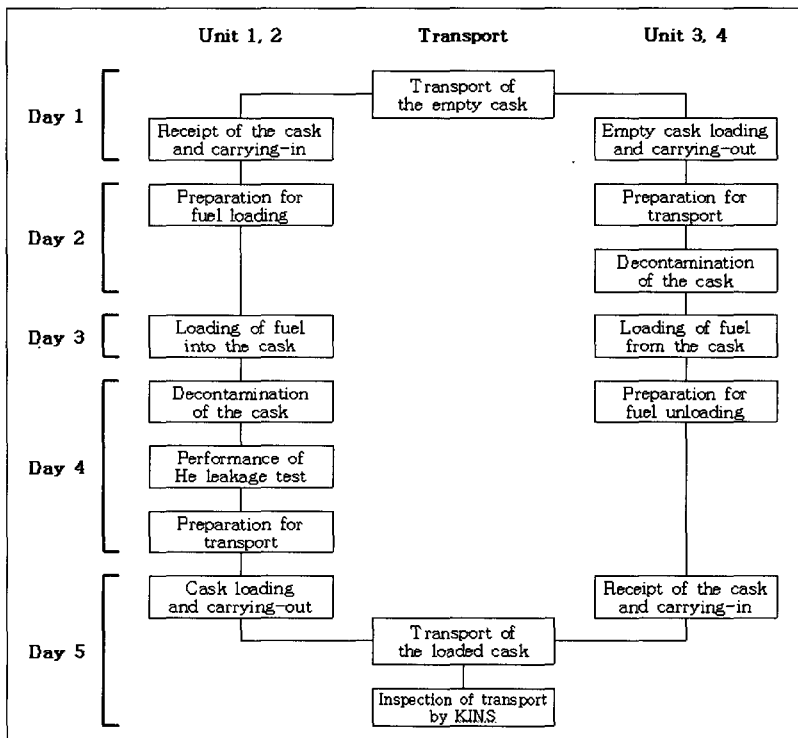


Fig. 8 Stepwise procedures of on-site transport and storage process.

적용하는 허용누설률은 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$ 을 적용하여 보다 보수적이 되게 하였다. 매 수송 시 마다 ANSI N14.5(8)의 요건을 만족시키는 헬륨누설시험 절차에 따라 철저히 수행되고 기록, 관리하였다.

가. 연료장전작업

소내수송·저장작업은 고리 1, 2호기에서 빈 용기를 인수하는 것으로부터 시작된다. 차량의 후드와 충격완충체를 제거하고 용기인양장치를 이용하여 결속장치에서 분리한 운반용기를 하역하여 Fig. 9와 같이 연료건물 내부의 제염조로 이동시킨다(1 일차).

용기뚜껑의 볼트를 해체하고 뚜껑을 제거한 후 운반용기는 배수가 되어 있는 사용후핵연료 저장수조의 장전조로 이동하여 안착시킨 후 장전조를 충수시킨다(2 일차). 이때, 장전조의 충배수는 연료건물 내에 설치한 임시 충배수장비를 이용한다.

장전조가 충수되면 Fig. 10과 같이 저장수조의 브리크레인에 연결된 특수하게 제작된 연료취급장치를 이용하여 저장수조의 연료 탱크로부터 12 다발의 연료집합체를 인출하고 연료번호를 일일이 확인한 후 순서대로 운반용기의 내부바스켓에 안전하게 장전하고, 뚜껑취급장치를 이용하여 용기뚜껑을 용기의 상부에 조심스럽게 안착시킨다(3 일차).

이러한 연료장전작업은 약 9m의 장전조 수중에서 원격으로 이루어지며, 장전작업이 완료되면 용기의 상부에서 2m 아래로 떨어진 트러니온 하부 위치까지

장전조를 배수시킨다. 용기인양장치를 이용하여 운반용기를 장전조 상부로 서서히 들어올리는데, 이때, 용기표면의 오염물질을 일차적으로 제거하기 위하여 고압수제염장비로서 고압의 탈염수를 용기표면에 분사시킨다. 용기가 장전조 상부에 이르면 용기뚜껑의 안착을 일차적으로 확인하기 위하여 뚜껑볼트 4 개를 손으로 체결하고, 제염조로 운반용기를 서서히 이동하여 안착시킨다. 용기의 노출된 전 표면을 제염하고, 뚜껑볼트를 순서대로 체결하고, 용기내부의 물을 약 200 리터 정도 배수시킨 후 용기뚜껑 아래의 이중 O-ring 사이와 배수구에 대하여 헬륨누설시험을 수행하여 누설률을 구하고 이 누설률이 허용누설률($1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$) 미만인 지를 확인한다. 누설시험에 합격하면 용기의 전체 외부에 대한 표면오염도와 표면방사선량을 측정하고 반출준비를 한다(4 일차).

반출요건을 만족시키고 반출승인이 나면 용기인양장치를 이용하여 수송트레일러의 상단에 있는 결속장치 위에 운반용기를 안착시키고 결속한 후, 충격완충체를 운반용기의 상하부에 체결한다. 방사선량을, 표면오염도 및 용기의 표면온도가 관련규정의 허용치 미만임을 확인한 후 운반용기와 수송차량에 방사선표지를 부착하고 수송차량을 반출시킨다. 원자력법에 따라 규제기관으로부터 운반검사를 받은 후 운반용기는 인근의 3, 4호기로 수송하게 된다(5 일차).

나. 연료저장작업

사용후핵연료가 장전된 운반용기를 적재한 차량

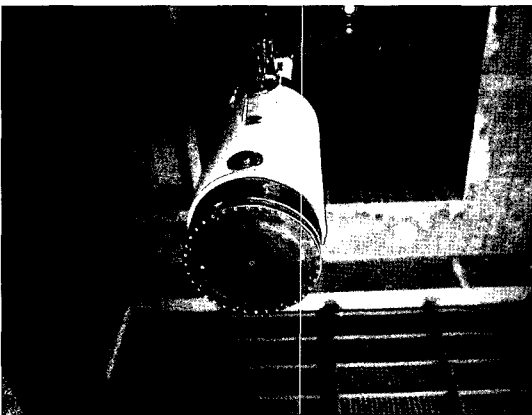


Fig. 9 Cask carrying into the fuel building.

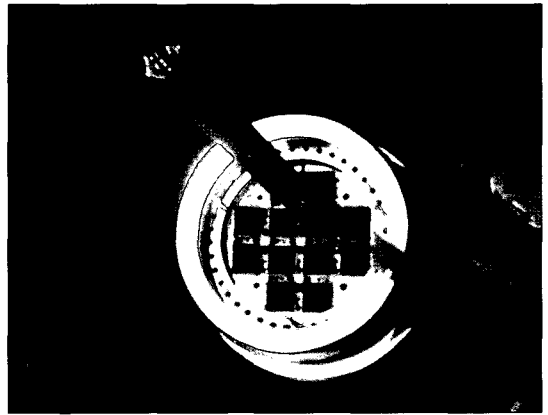


Fig. 10 Fuel loading into the cask.

은 3, 4호기 연료건물에 도착하면 용기인수검사가 이루어지고 건물 내부로 진입한다. 후드와 충격완충체를 제거하고 용기인양장치를 이용하여 운반용기를 차량으로부터 분리하여 제염조로 이동한다(1 일차).

용기뚜껑볼트를 제거하고 운반용기를 배수가 이루어진 장전조 내부에 안착시킨다. 장전조를 충수시킨 후 뚜껑취급장치를 이용하여 용기뚜껑을 제거하고 연료저장작업에 대한 준비를 한다(2 일차). 저장수조의 브리크레인에 연결된 특수하게 제작된 연료취급장치를 이용하여 운반용기의 내부바스켓으로부터 12 다발의 연료를 인출하고 순서대로 저장수조의 연료 랙에 저장한 후, 뚜껑취급장치를 이용하여 용기뚜껑을 용기의 상부에 조심스럽게 안착시킨다(3 일차).

이러한 연료저장작업은 약 9 m의 수중에서 연료장전작업의 역순으로 이루어진다. 저장작업이 완료되면 용기의 상부에서 2 m 아래로 떨어진 트리니온 하부 위치까지 장전조를 배수시킨다. 용기인양장치를 이용하여 운반용기를 장전조 상부로 서서히 들어 올리는데, 이때, 용기표면의 오염물질을 일차적으로 제거하기 위하여 고압수제염장비로서 고압의 탈염수를 용기표면에 분사시키며, 제염조로 이동하여 안착시킨다. 용기내부의 물을 모두 배수시킨 후 뚜껑볼트를 순서대로 체결하고, 용기의 노출된 전 표면을 제염한 후 용기의 전체 외부에 대한 표면오염도와 표면방사선량률을 측정하고 반출준비를 한다(4 일차).

반출요건을 만족시키고 반출승인이 나면 용기인양장치를 이용하여 수송트레일러의 상단에 있는 결속장치 위에 빈 용기를 안착시키고 결속한 후, 충격완충체를 운반용기의 상하부에 체결한다. 방사선량률과 표면오염도가 관련규정의 허용치 미만임을 확인한 후 빈 용기와 수송차량에 방사선표지를 부착하고 수송차량을 반출시키고, 다음 작업을 위하여 1, 2호기의 연료건물로 수송한다(5 일차).

IV. 결 론

고리 원전의 사용후핵연료 저장조의 저장용량을 확보하기 위하여 사용후핵연료 집합체를 고리 1, 2호

기로부터 인근의 3, 4호기로 소내수송·저장하였다. 이를 위하여 KN-12 운반용기를 이용한 수송시스템을 구성하였으며, 원전 내의 기존설비를 일부 보완하여, 2002년부터 지금까지 약 400 다발 이상의 사용후핵연료 집합체를 안전하게 수송·저장하였다.

소내수송·저장작업의 전 공정에 걸쳐 품질보증체계 및 방사선안전관리체계를 구축하여 엄격한 품질관리 및 방사선안전관리를 하며, 모든 단위공정을 절차화하여 안전하게 작업을 수행하고 있으며, 원자력법에 따라 운반신고를 하고 매 수송 시 마다 규제기관으로부터 운반검사를 받아 수송작업을 수행함으로써 소내수송·저장에 대한 안전성을 확보하고 신뢰도를 제고시키고 있다. 여태까지 단 한 건의 방사성물질 누출사고나 안전사고도 없이 안전하게 사용후핵연료를 수송·저장하였다.

참고문헌

- [1]과학기술부 고시 제2001-23호, 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정(2001).
- [2]INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Standards Series No.TS-R-1(2002).
- [3]한국수력원자력(주), KN-12 Spent Nuclear Fuel Transport Cask Safety Analysis Report, PT-361-G-A-R-002-REV-0(2002).
- [4]AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, Containment Systems and Transport Packagings for Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 3(1998).
- [5]AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, Special Lifting Devices for Shipping Container Weighing 10,000lbs(4,500kg) or More, ANSI N14.6(1993).
- [6]한국수력원자력(주), KN-12 Spent Nuclear Fuel Transport Cask Operating Procedure, PT-371-G-

T-P-002-REV-0(2002).

[7]Sung-Hwan Chung, Byung-Il Choi, Heung-Young Lee and Myung-Jae Song, "Containment Evaluation of the KN-12 Transport Cask", *Journal of the Korean Association for Radiation Protection*, Vol.28, No.4, pp.291-298(2003).

[8]AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, *Leakage Test on Packages for Shipment of Radioactive Material*, ANSI 14.5(1997).