

## 심지층 처분을 위한 사용후핵연료 포장공정 장비개념 설정

이종열\*(원자력연구소), 최희주("), 조동건("), 김성기("), 최종원("), 한필수(")

### Concept of the Encapsulation Process and Equipment for the Spent Fuel Disposal

J. Y. Lee (KAERI), H. J. Choi ("), D. K. Cho ("), S. K. Kim ("), J. W. Choi ("), P. S. Hahn(")

#### ABSTRACT

Spent nuclear fuels are regarded as a high level radioactive waste and they will be disposed in a deep geological repository. To maintain the safety of the repository for hundreds of thousands of years, the spent fuels are encapsulated in a disposal canister and the canister containing spent fuels should have the structural integrity and the corrosion resistance below the several hundreds meters from the ground surface.

In this study, the concept of the spent fuel encapsulation process and the process equipment for deep geological disposal were established. To do this, the design requirements, such as the functions and the spent fuel accumulations, were reviewed. Also, the design principles and the bases were established. Based on the requirements and the bases, the encapsulation process and the equipment from spent fuel receiving process to transferring canister into the underground repository including hot cell processes was established. The established concept of the spent fuel encapsulation process and the process equipment will be improved continuously with the future studies. And this concept can be effectively used in implementing the reference repository system of our own case.

**Key Words** : Spent fuel (사용후핵연료), HLW radioactive waste (고준위폐기물), Deep geologic disposal (심지층 처분), Encapsulation process (포장공정), Disposal canister (처분용기), Process equipment(공정장비)

#### 1. 서 론

현재 우리나라는 원자력에 의한 전력량이 전체 용량의 40%에 이르고 있으며, 장기전력 수급계획에 의하면, 2015년까지 28기의 원자력발전소를 운영할 예정이다. 사용후핵연료는 이렇게 원자력 연료를 이용하여 전기를 생산한 후에 배출되는 것으로서 지속적으로 발생량이 증가하여 누적되고 있다. 1978년 우리나라 최초의 상업용 원자로인 고리 1호기 원자력발전소 운전 이후 운영 중인 18기의 원자력발전소에서 발생하여 2004년말 까지 누적된 사용후핵연료의 양은 약 7,000 tHM이며, 장기 전원계획에 의한 원자력발전소 28기의 운전이 완료되는 시점까지 발생하여 누적될 것으로 예상되는 사용후핵연료는 총 36,000 tHM (PWR 20,000tHM + CANDU 16,000tHM)에 이를 것으로 전망된다. 이들 사용후핵연료는 고준위 폐기물로 분류되며, 지하 수백 미터에 위치한 암반에의 처분이 고려되고 있다.

이러한, 심지층 처분을 위한 사용후핵연료 포장은 지하 수백 미터의 환경조건에서 사용후핵연료가 수십만 년 이상 안전성을 유지하는데 필수적인 구조적 건전성과 부식 저항성을 갖는 처분용기에 사용후핵연료를 포장하는 공정으로서, 일반적으로 심지층 지하시설이 위치한 지표의 지상시설에서 공정을 수행한다. 우리나라의 경우 2가지 형태의 사용후핵연료인 PWR형 사용후핵연료와 CANDU형 사용후핵연료가 발생하므로, 각 노형별 사용후핵연료의 특성을 고려한 다양한 분석을 통하여 가장 효율적인 처분 시나리오를 설정하고, 이에 따른 사용후핵연료 포장이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 심지층 처분을 위하여 처분용기에 사용후핵연료 포장시 고려해야 할 주요 기능, 발생량 추이 등의 공정 설계요건을 검토하였다. 또한, 포장공정의 효율성을 높이기 위한 설계원칙을 설정하고, 그에 따른 사용후핵연료 포장공정 개념과 각 공정에 필요한 장비개념을 도출하였다.

## 2. 포장공정 요건 및 기준

PWR형 및 CANDU형 사용후핵연료 포장공정은 수송용기 수납부터 포장을 완료한 처분용기를 지하 시설로 이송하는 공정까지이다. 이러한 사용후핵연료 포장공정의 기능요건, 처분용기 생산율과 처분을 설정을 위한 국내 사용후핵연료 발생량 추이 및 포장공정 설계기준은 다음과 같다.

### 2.1 기능 요건

포장공정은 원자력발전소 저장 풀 또는 임시 저장고에서 수송되어온 사용후핵연료를 인수하여 심지층에 처분하기 위한 처리공정이다. 이 포장공정의 개괄적인 기능은 사용후핵연료 수송용기 인수, 사용후핵연료 하역 및 집합체 검사, 사용후핵연료 집합체 임시저장, 처분용기 내 사용후핵연료 포장, 처분용기 용접 및 검사, 처분용기 유지/보수, 처분용기를 지하 처분장으로의 이송 등이다.

우리나라의 경우, 사용후핵연료의 종류가 원자력 발전소 로형에 따라 PWR형과 CANDU형인 2가지 종류가 발생한다. 즉, 현재 우리나라는 가압경수로(PWR) 14기와 중수로(CANDU) 4기가 운영중이며, 2015년까지의 장기전력수급계획에 의하면 향후 10기의 원자력발전소가 추가 건설될 예정으로 있다. 따라서, 2008년과 2013년에 각각 폐로시킬 예정인 고리 1호기와 월성 1호기를 고려하면 2015년에는 총 26기의 원전이 가동될 계획에 있다. 이들 원자력발전소에서 예상되는 사용후핵연료의 발생량은 CANDU 사용후핵연료 16,000 tHM과 PWR 사용후핵연료 20,000 tHM에 이를 것으로 예상되며(Fig. 1), 처분을 위한 사용후핵연료 포장시 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.

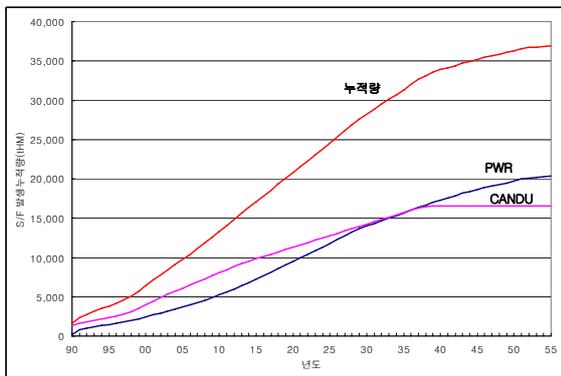


Fig. 1. 국내 사용후핵연료 예상발생량 추이

### 2.3 포장공정 설계 원칙

포장공정 개념설정을 위한 기본원칙은 다음과 같다. 사용후핵연료는 공정이 순차적으로 수행되어

효율성을 극대화할 수 있도록 직선형 포장라인에서 포장이 수행되도록 하며, 핫셀, 용접챔버 및 검사 챔버는 포장라인 상부에 위치하도록 한다. 처분용기는 케도위에 장착된 처분용기 이송차량으로 이송하도록 하고, 핫셀은 2개 사용후핵연료 형에 대해 공용으로 사용이 가능하도록 한다. 사용후핵연료 인수 공간 및 포장이 완료된 처분용기 임시저장고 또한 2개 로형에 대해 공용사용이 가능한 구조로 한다.

발전소로부터 사용후핵연료를 수송하기 위한 용기는 체원이 외경 2.451 m, 높이 5.029 m, 무게 125톤 이상이고, 32개의 사용후핵연료 PWR 연료를 수송할 수 있는 CASTOR V/32 캐스크를 사용한다. 1개 수송용기로 8개의 처분용기를 생산하게 되며, 포장시설에는 1개월의 처분용기 생산량에 대한 저장공간 확보가 필요하다. CANDU 사용후핵연료 수송용기는 지름 1.42 m, 높이 5.71 m, 연료 포함 무게는 약 50 톤으로 1개 용기당 1개 처분용기를 생산할 수 있는 것으로 하며, CANDU 연료 번들은 33개들이 바스켓으로 취급하도록 하고, CANDU 바스켓은 처분용기의 높이를 증가시키지 않도록 한다.

## 3. 포장공정 개념/장비

### 3.1 사용후핵연료 포장공정 흐름

사용후핵연료 심지층 처분을 위한 포장공정 주요기능, 발생량 추이 등의 설계요건 및 기준에 따른 포장공정 흐름은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

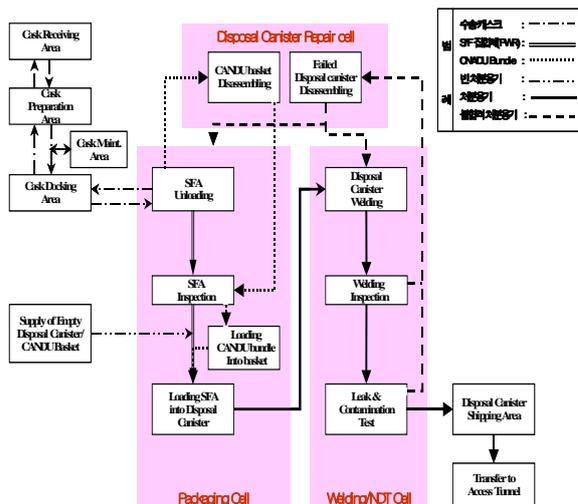
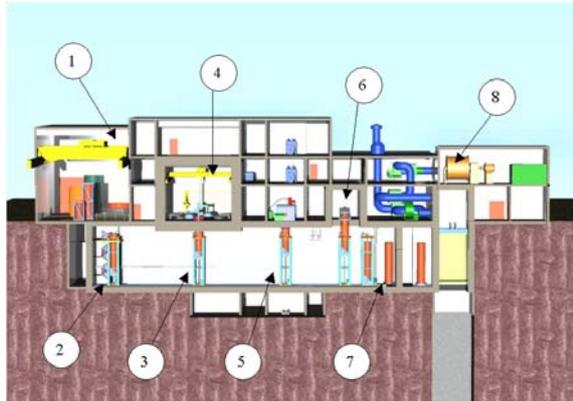


Fig. 2 사용후핵연료 포장공정 흐름

또한, 사용후핵연료 심지층 처분을 위한 지상시설에서의 포장용기에의 처분공정에 대한 개념은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같으며, 공정에 대한 상세기

술은 아래에 기술한 바와 같다.



- ① 사용후핵연료 인수    ② 처분용기 거치
- ③ 처분용기 핫셀 접합    ④ 사용후핵연료적재(핫셀)
- ⑤ 처분용기 용접    ⑥ 처분용기 용접검사
- ⑦ 처분용기 세척    ⑧ 지하 처분장으로 이송

Fig. 3. 지상시설 내 포장공정 개념

### 3.2 사용후핵연료 인수 및 저장

원자력발전소 또는 사용후핵연료 중간저장시설에서 저장되어있던 사용후핵연료는 처분을 위하여 수송용기에 적재되어 수송차량으로 최종처분장으로 이송된다. 수송 차량으로부터 수송 용기를 하역하고, 이를 검사하는데, 이때 핵물질 보장조치, 수송 중의 손상, 수송용기 외부오염 사항검사 및 서류 검사 등을 포함하게 된다. 검사가 완료된 수송용기는 크레인으로 수직 상태로 전환하여 사용후핵연료 이송복도의 이송트레일러에 적재한다. 이송복도에서는 사용후핵연료 하역을 위한 준비작업이 수행되며, 수송용기 외부뚜껑 취급용 오버헤드 크레인, 어댑터 및 기타 장비가 구비된다. Fig. 4는 핫셀라인 아래의 이송통로에서의 장비개념을 나타낸다.

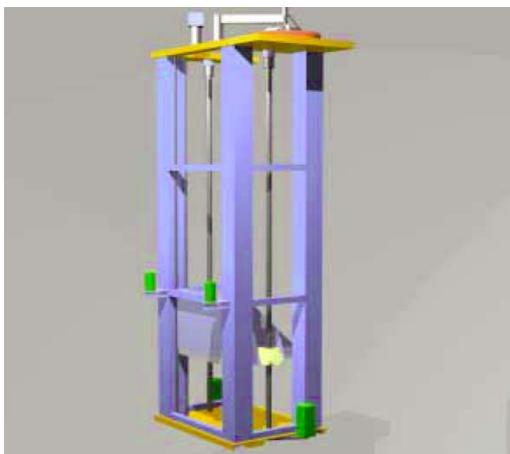


Fig. 4 핫셀 하부 이송통로 장비개념.

수송용기 내부의 불활성 가스는 공기로 교체되며 내부 뚜껑의 볼트가 제거되고 수송용기 어댑터를 설치하여 핫셀 하부의 도킹장에 이송한다. 어댑터는 수송용기와 핫셀 접속부 밀봉을 목적으로 하며, 핫셀 내에서 내부뚜껑 인양을 위한 별도의 어댑터를 사용하기도 한다. 이 어댑터는 수송용기 하역동안 핫셀내의 내부뚜껑을 오염으로부터 보호한다.

수송용기는 어댑터 설치 후 핫셀에 연결하고 사용후핵연료 하역이 완료되면 작업실로 보내 어댑터를 제거하고 뚜껑 볼트 조인 후 반출시킨다.

### 3.3 핫셀 공정

핫셀 구역에서 사용후핵연료는 수송용기로부터 하역되고 압력용기의 내부 랙에 저장하며, 여기서 PWR형은 습식으로 이송되기 때문에 포장 전에 건조된다. 처분용기도 수송용기와 같은 방법으로 핫셀에 접합되며, 처분용기는 내부 처분용기의 불활성 분위기를 위하여 특수 보호커버를 구비한다. 처분용기 외부뚜껑인 구리 뚜껑은 오염되는 것을 방지하기 위해 핫셀 내부로 들이지 않고 이송복도에서 특수 크레인으로 처분용기에 장착시킨다.

PWR 사용후핵연료 집합체는 Telescopic pole crane으로 처분용기에 적재하며, 이 크레인의 제어 장비와 계측장비는 유지보수를 용이하게 하기 위하여 핫셀 외부에 설치한다. CANDU 사용후핵연료는 건조하지 않는 것과 연료 번들은 바스켓(33개 들이)으로 취급하여 바스켓을 직접 처분용기에 적재하는 것을 제외하면 PWR형과 공정이 동일하다.

정상 운전시 핫셀로의 작업자 진입은 금지되나, 핫셀로의 진입구는 구비할 필요가 있다. 핵연료를 취급하는 셀은 오염방지 및 제염 용이성을 위하여 스텐레스강관으로 라이닝하며, 핫셀내 공정장비 개념은 Fig. 5에서 보여주는 바와 같다.

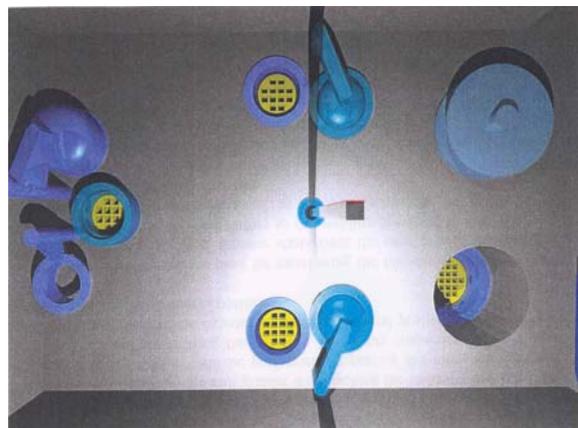


Fig. 5 핫셀내 공정장비 배치개념.

### 3.4 처분용기 용접 및 검사

핫셀 공정을 마친 처분용기 외부 실린더의 구리 뚜껑은 연료가 적재된 처분용기가 용접실로 이송되기 전에 장착하고, 전자빔 용접방법을 적용하여 밀봉시킨다. 진공 챔버는 방사선 방호 장비가 준비되어야 하며, 전자빔 용접기는 수직 위치로 장착되어 고정식이고 처분용기를 회전시키며 용접을 수행한다. 용접결함 발생시 결함부위 보수를 위한 재용접을 수행하고 재용접이 불가능한 경우 가공하여 전체뚜껑을 제거한 후 연료집합체를 제거하여 새로운 처분용기에 적재한다.

용접 검사를 위한 비파괴 검사는 초음파 검사 및 X-ray 검사 장비로 수행한다. 초음파 검사는 검사부를 처분용기 검사 부위에 위치시킨 후 처분용기를 회전하여 검사하며, X-ray 검사는 특수 챔버에서 수행하는데 X-ray 검사는 고정시키고 회전판 위의 처분용기를 회전하며 검사를 수행한다.

### 3.5 지하 처분장으로 처분용기 이송

일반적으로 포장시설에서 공정이 완료된 처분용기는 임시저장고를 거치지 않고 직접 처분장으로 이송하게 되는데, 이는 절차를 축소하며 이에 따른 오류를 감소시키는 장점이 있다.

처분용기 임시저장장의 경우 그 목적은 처분장으로부터 포장시설까지 미치는 운전 장애 방지 및 반대의 장애도 방지하기 위한 것으로서, 보통 1개월 처분량의 처분용기 저장용량이 적당하다.

지하 처분장으로의 사용후핵연료 처분용기 이송은 자동안내 차량에 의하여 이송 복도로부터 임시 저장고까지 이송하거나, 더 나아가 연장된 통로를 통하여 처분용기 이송을 위한 지하 승강기까지 이송한 후, 지하로 연결된 처분용기 승강기로 최종 지하 처분장까지 이송하게 된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고준위 방사성폐기물로 분류되는 사용후핵연료를 지하 수백 미터의 심지층에 처분하기 위하여 전단계에서 수행하게 되는 사용후핵연료 포장 공정 개념 및 공정장비 개념을 설정하였다. 우리나라의 경우 2가지 형태의 사용후핵연료인 PWR형 사용후핵연료와 CANDU형 사용후핵연료가 발생하므로, 심지층 처분에 필요한 이들 사용후핵연료 포장시 고려하여야 할 주요기능, 발생량 추이 등에 따른 공정 설계요건을 검토하고, 공정/장비설계 원칙을 설정하였으며, 설정된 요건 및 기준을 바탕으로 처분을 위한 사용후핵연료 포장공정 개념과 각 세부공정별 장비개념을 도출하였다. 이 결과는 지하시설에 대한 개념과의 연계에 따른 지속적인 보

완을 통하여, 우리나라 환경에 적합한 사용후핵연료 심지층 처분시스템 개념을 확립하는데 기여할 것으로 사료된다.

## 후기

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기 계획사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

1. KAERI 2002. Progress Report on the R&D Program for the Disposal of HLW in Korea. Korea Atomic Energy Research Institute. August 20, 2002.
2. 강철형 등, "심지층 처분시스템 개발," 한국원자력연구소, KAERI/RR-2336/2002, 2003
3. 최종원, "Reference S/FI and Its Characteristics for DGR Concept Development," J. KNS, Vol.31, No.6 (Dec. 1999).
4. Choi, J., Kang, C., Kukkola, T., Saanio T., 2003., "KAERI's S/F repository. Design evaluation and cost estimation." R&D Report 2003-02. Posiva Oy, Olkiluoto.
5. Kukkola, T. 2002., "Encapsulation plant description." Working Report 2002-03. Posiva Oy, Helsinki