JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical article

17(4) : 519-532 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.519

경수로 사용후핵연료 재포장 개념(안) 수립

이상환[1], 신창민[1,*], 강현구[1], 조천형[1], 정해룡[1]

[1]한국원자력환경공단 고준위기술개발원

Conceptual Design for Repackaging of PWR Spent Nuclear Fuel

Sang-Hwan Lee[1], Chang-Min Shin[1,*], HyunGoo Kang[1], Chun-Hyung Cho[1] and HaeRyong Jung[1]

[1]HLW Technology Development Institue, Korean Radioactive Waste Agency, 174, Gajeong-ro, Yuseong, Daejeon 34129, Republic of Korea

Abstract Spent nuclear fuel (SNF) is stored in nuclear power plants for a certain period of time and then transported to an interim storage facility. After that, SNF is finally repackaged in a disposal canister at an encapsulation plant for final disposal. Finland and Sweden, leading countries in SNF disposal technology, have already completed designing of spent fuel encapsulation plant. In particular, the encapsulation plant construction in Finland is near completion. When it comes to South Korea, as the amount of SNF production and disposal plan is different from those in Finland and Sweden, it is difficult to apply the concepts of these contries as is. Therefore, it is necessary to establish the spent fuel repackaging concept and to derive each operating and repackaging procedures by considering annual disposal plan of South Korea. The results of this study is expected to be used to establish the concept of optimized encapsulation plant through further research.

Key words: Spent nuclear fuel, Storage, Disposal, Repackaging, Encapsulation plant

1. 서 론

폐기하기로 결정된 사용후핵연료는 원자로에 장전되어 핵분열시킨 물질로서 높은 수준의 열과 방사선을 방출하는 고준위 방사성폐기물이다. 이러한 사용후핵연료는 일반적으로 원전 부지 내에서 임시 보관된 후 중간저장시설로 운반하여 일정 기간을 보내게 된다. 중간저장시설에서 사용후핵연료의 열과 방사선이 일정량 감소되면 모니터링이나 유지 보수에 의존하지 않고 장기간 사용후핵연료를 격리함에 있어 안전성을 보장받을 수 있는 처분시설에 영구적으로 정치하게 된다.

사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위해 중간저장시설에서 사용되는 용기와 심층처분시설에서 사용되는 용기는 일반적으로 상이하다. 이는 처분 단계에서 요구되는 용기의 성능요건과 저장 단계에서 요구되는 용기의 성능요건이 큰 차이가 있기 때문이다. 대표적으로 처분 환경에서의 캐니스터는 수천 년 동안 건전성을 유지하기 위해선 구조물의 높은 내부식성이 요구된다[1,2]. 그 외에도 처분용기 주변 완충재의 온도 제한치(약 100°C)로 인해 캐니스터의 온도 제한 또한 저장 조건보다 보수적이며, 구조적 건전성을 확인하기 위해 부여되는 하중 조건도 상이하다는 점에서 일반적으로 저장 단계와 처분 단계에서 겸용의 용기를 활용하기는 어렵다.

Fig. 1 [3-8]은 국외의 사용후핵연료 관리 현황을 나타낸

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. Chang-Min Shin
Tel. +82-42-601-5344 Fax. +82-42-601-5389 E-mail. auver97@korad.or.kr

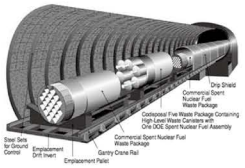
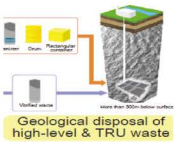
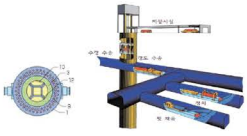
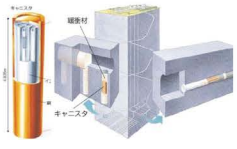
Received 28 November 2023 Revised 5 December 2023 Accepted 8 December 2023

것이다. 사용후핵연료를 안전하게 관리함에 있어 저장 단계와 처분 단계를 거치는 것은 필연적이다. 위에서 언급한 바와 같이, 저장 단계와 처분 단계에서 활용되는 용기는 겸용으로 사용하기에는 어려움이 있어, 대부분의 국외 선도국에서는 재포장을 고려하고 있다. 재포장은 각 관리 단계의 기술적 요건을 만족하도록 개발된 용기에 포장하는 것을 의미한다. 미국의 경우에는 운반, 저장, 처분을 겸용할 수 있는 용기 시스템 개념을 개발[9,10]하였으나, 실제로 상용화되진 않았다.

국외 선도국의 재포장 기술 개발 현황을 살펴보면, 현재 처분시설의 건설 인허가를 받은 국가인 핀란드와 스웨덴은 재포장 시설의 상세 설계를 마친 상황[11]이며, 특히 핀란드는 2024년에 재포장 시설의 완공을 앞두고 있다. 그 외에 미국과 캐나다 등이 재포장 시설의 설계를 수행한 바 있다[6].

국내에서는 아직까지 경수로 사용후핵연료의 재포장 관련 연구가 진행된 경험이 없다. 이는 재포장 개념 도출에 있어 주요 인자인 저장용기의 방식, 각 관리시설의 운영시점, 사용후핵연료 발생량 등에 대한 불확실성이 높아 관련 연구가 미흡했던 것이라 판단된다. 본 연구에서는 국가 정책 방향과 현재까지 진행 중인 사용후핵연료 관리 사업을 고려하여, 기본적인 재포장 시설의 구역 배치 개념(안)과 운영 절차(안)을 설정하고, 연간 처분 물량을 산정할 수 있

Table 1. Current status of spent nuclear fuel management in foreign countries [3-8]

Country	Intermediate storage method (Location)	Possibility of repackaging spent nuclear fuel	Final management method of SNF	
			Disposal method	Disposal system
USA	Dry (On-site)	• SNF needs to be repackaged from on-site storage to disposal canister - Storage cask owned by private companies require repackaging.	Deep geological disposal	
Japan	Dry (On-site, off-site), Wet (Off-site)	• Reprocessed SNF needs to be repackaged into disposal canister - SNF is stored for a long period of time in a dry intermediate storage facility and then transported to a reprocessing facility	Deep geological disposal	
Canada	Dry (On-site)	• SNF needs to be repackaged from on-site storage to disposal canister - (Plan 1) SNF stored on site is repackaged in a module-type disposal canister - (Plan 2) The basket currently loaded with SNF is repackaged in a module-type disposal canister	Deep geological disposal	
Germany	Dry (Off-site)	• SNF needs to be repackaged from storage cask to disposal canister - It has been confirmed that dry storage facilities will be managed by the government, and research on repackaging technology is in progress	Deep geological disposal	
Sweden	Wet (Off-site)	• SNF needs to be repackaged from storage cask to disposal canister - The research on the repackaging of SNF has been completed	Deep geological disposal	
Finland	Wet (On-site)			

는 재포장 세부 운영 공정(안)을 수립하고자 한다.

2. 사용후핵연료 재포장 개념(안) 수립 시 고려사항

일반적으로 재포장 방식은 건식과 습식 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. 핀란드와 스웨덴의 재포장 방식은 건식 방식이며, 건식 방식은 차폐된 연료 취급 셀이라는 공간에서 사용후핵연료 집합체를 인출하여 처분용기로 재포장하는 방식[11]이다. 이에 반해 미국의 Yucca 처분장의 재포장 개념은 습식 방식이며, 원전 부지 내 습식 저장조와 유사한 환경에서 운반용기 내의 사용후핵연료 집합체를 처분용기로 옮겨 담는 방식이다[12]. 건식 및 습식 재포장 방식의 특징은 아래 Table 2와 같다. 본 연구에서는 시설을 운영함에 있어 상대적으로 안전하고 건설, 운영비용이 보다 합리적인 건식 방식의 재포장 개념을 활용하였다.

재포장 시설로 들어오는 운반용기의 용량과 방식은 재포장 개념(안)을 선정하는 데 있어 중요한 요소 중 하나이다. Barefuel 방식의 운반·저장 겸용용기는 운반용기 뚜껑을 제거 후에 연료 취급 셀에서 별도의 작업 없이 집합체 인출이 가능하다. 하지만 캐니스터 방식의 운반·저장 겸용용기를 사용하는 경우, 연료 취급 셀 내에서 사용후핵연료를 인출하기 위해서는 연료 취급 셀에 운반용기가 도킹되기 전에 캐니스터 용접부의 절단이 필요하다는 점에서 재포장 운영절차가 비교적 복잡하여 Barefuel 방식의 용기보다 불리하다. 하지만 사용후핵연료 관리 사업의 유연성 측면에서는 이야기가 다르다. 만약 중간저장이 장기화된다면 수명이 다한 Barefuel 방식의 용기는 재포장을 피할 수 없으나, 캐니스터 방식의 용기의 경우 캐니스터는 그대로 활용하고 오버팩만 교체하면 재포장을 피할 수 있다는 큰 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 진행 중인 운반·저장 관련 사업의 불확실성을 줄이고 사업 일정의 유연성을 고려하여 캐니스터 방식의 운반용기로 결정하였다. 운반용기의 용량은 방폐물사업자가 수행하는 관리사업에서는 아직 정해진 바가 없으나, 현재 진행 중인 원전 부지 내 건식저장용기 도입사업이 최소 32다발 이상 용량의 용기를 고려한다는 점을 반영하여 본 연구에서의 운반용기 용량은 32다발로 결정하였다.

처분용기는 높은 내부식성을 가지고 주변 완충재에 열적 영향을 미치지 않아야 하며, 완충재의 팽창으로 인한 외압에 구조적으로 만족되도록 설계되어야 한다. 또한 처분용기의 용량을 결정하는 데 있어서 처분시설과의 연계성 또한 고려해야 한다. 처분용기의 용량이 변화한다면 열적 안전성의 보장을 위해 처분공 및 처분터널의 간격을 고려해야 하며, 그 외에도 처분터널의 직경, 작업 효율성, 건설 적합성, 경제성, 제작성 등 처분시설 건설 및 운영적 측면을 다방면으로 고려되어야 한다. 위와 같은 사안을 고려하여 처분 선도국인 스웨덴과 핀란드는 최적화된 사용후핵연료 4다발 용량의 KBS-3 개념의 처분용기를 개발하였다[15]. 본 연구에서 재포장 개념 수립에 있어 국내의 처분환경 여건을 고려하여 4다발 용량의 처분용기를 고려하였다.

연간 재포장할 수 있는 사용후핵연료 수는 전반적인 사용후핵연료 관리 일정에 영향을 미친다. 만약 연간 재포장할 수 있는 사용후핵연료 수가 적다면, 그만큼 중간저장시설에서 연간 방출되는 사용후핵연료의 수가 적어지므로 중간저장시설의 용량과 면적이 넓어져야 하며, 필요한 저장용기의 수가 증가하고 시설 운영기간이 길어질 것이다. 또한 심층처분시설의 운영기간도 늘어남에 따라 경제성 및 작업 안전성이 저하되는 상황이 초래된다. 따라서 국내 사용후핵연료 관리 정책[13]과 처분 가능한 최소 사용후핵연료 보관 기한을 반영하여, 연간 최소 사용후핵연료 1,056개, 즉 4다발 용량의 처분용기 264개를 재포장할 수 있도록 운영공정 수립 시 고려하였다.

Table 2. Characteristics of dry and wet repackagaing methods

Method of wet repackaging	Method of dry repackaging
• Construction and operating cost are more expensive than dry reapackaging. • Additional treatment of waste material (contaminated water) is required. • Shielding and cooling functions are provided, and maintenance is easy. • The dry system is required to remove residual moisture.	• It is necessary to create an inert environment to prevent oxidation of SNF. • Radiation shielding system should be additionally considered. • The system for removing material separated or released from SNF is needed. • Detailed remote control is required inside the SNF handling cell.

3. 사용후핵연료 재포장 개념(안) 도출 결과

3.1. 재포장 구역 배치(안)

재포장 시설 내부는 크게 재포장 설비들이 운영되는 작업 구역과 전체적인 작업을 모니터링하고 제어하는 중앙 제어실을 포함한 운영 구역으로 구분된다. 재포장 주요 작업들은 작업자들의 방사선 피폭을 최소화하기 위하여 일반 운영 구역을 제외하고 모니터링을 이용한 원격 작업으로 수행된다. 재포장 설비들이 운영되는 작업 구역에서 작업자의 접근이 허용되는 곳은 운반용기 인수 및 준비 구역과 처분용기 인수 및 준비 구역이다.

주요 재포장 구역은 Fig. 1과 같이, 1) 운반용기 인수 및 준비 구역, 2) 운반용기 이송 구역, 3) 운반용기 뚜껑 분리 준비 구역, 4) 캐니스터 뚜껑 절단 구역, 5) 연료 취급 셀 구역, 6) 처분용기 인수 및 준비 구역, 7) 처분용기 이송 구역, 8) 처분용기 용접 구역, 9) 처분용기 용접부 가공/검사 구역, 10) 처분용기 반출 구역으로 구분된다.

3.1.1. 운반용기 인수 및 준비 구역

운반용기 인수 및 준비 구역에서는 운반용기가 트레일러를 통해 재포장 시설에 반입되면, 이를 보관 구역에 안착시켜 보관하고 재포장 공정이 시작될 때 운반용기 이송 구역으로 보내는 작업이 이루어지는 구역이다.

3.1.2. 운반용기 이송 구역

운반용기 이송 구역은 재포장 시설 지하 구역에 위치하며, 운반용기의 이송 및 인양을 하는 이송 트롤리가 작동하는 구역이다. 운반용기 이송 트롤리는 이송 구역의 가이드 레일을 따라 원격 제어를 통해 이동하며, 작업이 이루어지는 구역에 정차한 후 트롤리에 설치된 베드를 인양하여 운반용기의 작업이 이루어진다.

3.1.3. 운반용기 뚜껑 분리 준비 구역

운반용기 뚜껑 분리 구역은 운반용기 이송 구역 내에 위치하며, 운반용기에서 캐니스터가 인출되기 위한 사전 준비로 운반용기 뚜껑의 볼트를 해체하고 운반용기 뚜껑 인양을 위한 어댑터를 설치한다. 운반용기의 뚜껑 분리 구역의 모든 작업은 원격으로 이루어진다.

3.1.4. 캐니스터 뚜껑 절단 구역

캐니스터 뚜껑 절단 구역은 재포장 과정 중에 구역 밖으로 방사성 물질이 확산되지 않기 위해 주변의 다른 구역과 비교해 음압이 유지되어야 하며, 필터링된 환기 시스템과 모니터링 시스템으로 관리되어야 한다. 또한 구조물은 구역 외부에서 선량률 제한치를 넘지 않도록 사용후핵연료로부터 직접적인 조사에 의한 효과를 낮출 수 있도록 설계되어야 하고, 사용후핵연료의 붕괴열을 효과적으로 관리하여 일정 온도를 유지할 수 있도록 냉각 및 환기 시스템을 갖추어야 한다.

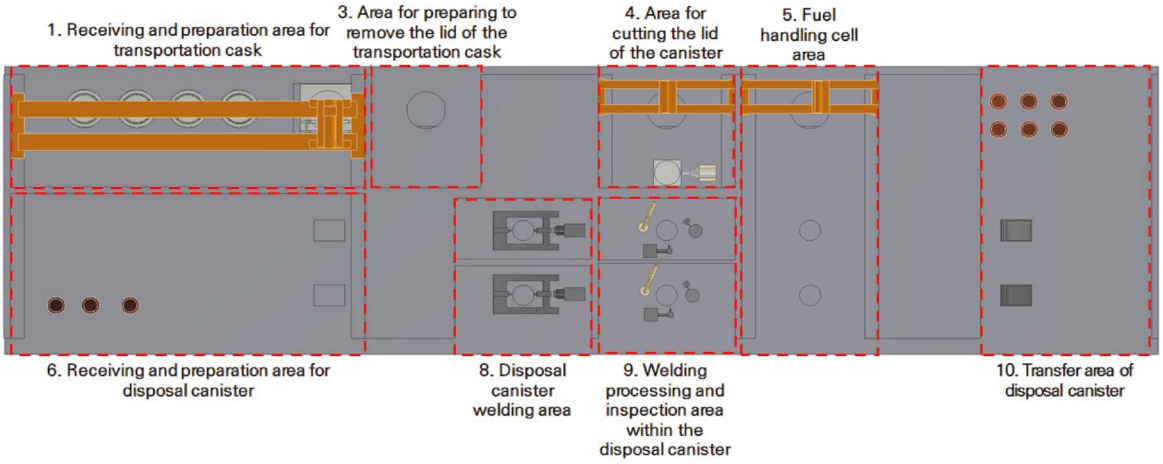
캐니스터 뚜껑 절단 구역이 운영 중에는 외부와 완벽히 차단된 기밀 상태가 유지되어야 한다. 재포장 공정 중에 작업자 출입구, 관련 설비를 유지보수 및 보관에 사용되는 서비스 해치와 재료 해치는 완전히 차단되어야 하며, 오로지 운반용기가 도킹되는 구역만 기밀 유지 장치와 함께 운영 중 개폐될 수 있다. 캐니스터 뚜껑 절단 구역 내부 공기와 내부 표면은 운영 중에 오염될 수 있으므로, 필요 시 공기 여과가 이루어진다. 뚜껑 절단 구역의 정비 시, 내부 정비 시스템을 이용해 필요 시 내부를 제염하고, 제염 과정에서 발생한 오염수들은 바닥에 위치한 배수 시스템으로 배출된다. 작업자나 설비 출입이 가능한 상태가 갖추어지면 작업자 출입구와 재료 해치는 개방될 수 있고, 내부 기밀 상태와 음압은 더 이상 유지되지 않는다.

3.1.5. 연료 취급 셀 구역

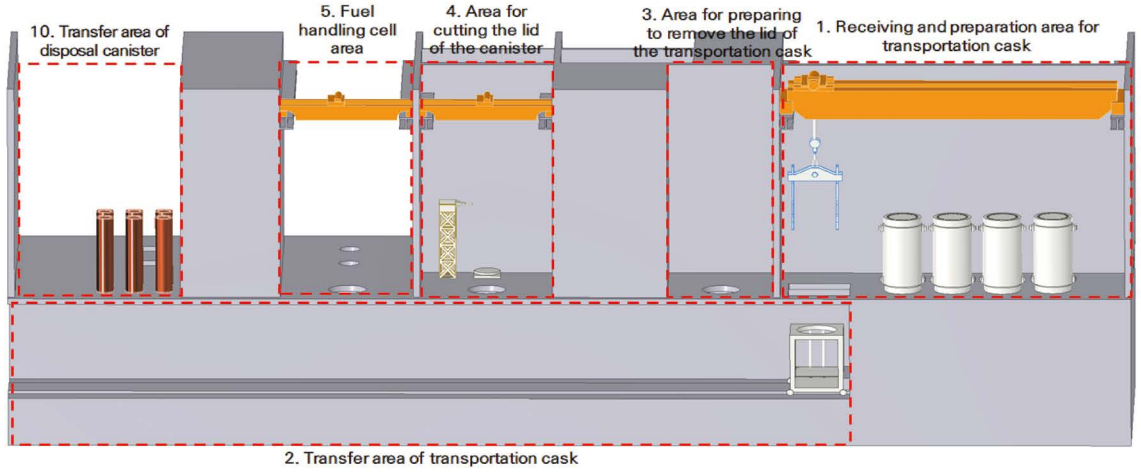
연료 취급 셀은 재포장 시설에서 사용후핵연료 인출과 장입 등 재포장의 주요 공정이 이루어지는 핵심 구역이며, 방사성 물질이 공기 중에 유출될 수 있어 차폐와 기밀이 요구되는 구역이다. 방사성 물질의 확산을 방지하기 위해서 높은 원자력 안전 등급을 요구하며, 지진이나 화재, 침수 등의 사고로부터 안전하도록 설계되어야 한다.

연료 취급 셀 구역은 재포장 과정 중에 구역 밖으로 방사성 물질이 확산되지 않기 위해 주변의 다른 구역과 비교해 음압이 유지되어야 하며, 필터링된 환기 시스템과 모니터링 시스템으로 관리되어야 한다. 또한 구조물은 구역 외부에서 선량률 제한치를 만족하기 위해 사용후핵연료로부터 직접적인 조사에 의한 효과를 낮출 수 있도록 설계되어야 하고, 사용후핵연료의 붕괴열을 효과적으로 관리하여 일정 온도를 유지할 수 있도록 냉각 및 환기 시스템을 갖추어야 한다.

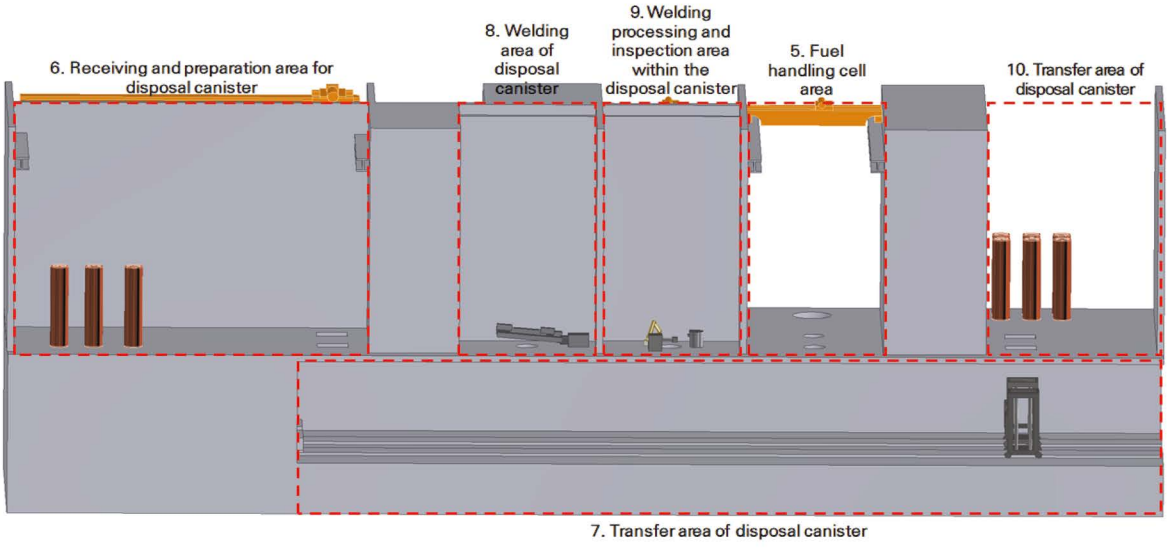
정상운전조건에서의 연료 취급 셀은 외부와 완벽히 차단된 기밀 상태가 유지되어야 한다. 작업자 출입구, 서비스 해치와 재료 해치는 완전히 차단된 상태여야 하며, 오로지



(a) Top view



(b) Side view (Transportation cask transfer line)



(c) Side view (Disposal canister transfer line)

Fig. 1. Layout concept of repackaging area.

운반용기와 처분용기가 도킹되는 구역만 기밀 유지 장치와 함께 운영 중에 개폐될 수 있다. 연료 취급 셀 내부 공기와 내부 표면은 운영 중에 오염될 수 있으므로, 필요 시 공기 여과가 이루어진다. 작업이 완료된 연료 취급 셀은 정비 시스템을 이용해 내부가 제염되고 청소되어진다. 제염 과정에서 발생한 오염수들은 바닥에 위치한 배수 시스템으로 배출된다. 제염이 모두 완료된 이후에 작업자 출입구와 재료 해치는 개방될 수 있고, 내부 기밀 상태와 음압은 더 이상 유지되지 않는다. 연료 취급 셀의 정비가 종료되면, 모든 외부와의 연결 통로가 닫히고 기밀 상태가 다시 시작된다.

3.1.6. 처분용기 인수 및 준비 구역

처분용기 인수 및 준비 구역에서는 처분용기가 이송 프레임과 함께 트레일러를 통해 재포장 시설에 반입되면, 이를 보관 구역에 안착시켜 보관하고 재포장 공정이 시작될 때 처분용기 이송 구역으로 보내는 작업이 이루어진다.

3.1.7. 처분용기 이송 구역

처분용기 이송 구역은 재포장 시설 지하 구역에 위치하며, 처분용기의 이송 및 인양을 하는 이송 트롤리가 작동하는 구역이다. 처분용기 이송 트롤리는 이송 구역의 가이드 레일을 따라 원격 제어를 통해 이동하며, 작업이 이루어지는 구역에 정차한 후 트롤리에 설치된 베드를 인양하여 각 구역에서의 처분용기의 작업이 이루어질 수 있도록 한다. 처분용기 이송 트롤리의 정차하는 지점은 처분용기 인수/준비구역 하단, 연료 취급 셀 구역 하단, 처분용기 용접 구역 하단, 처분용기 용접부 가공 및 검사 구역 하단, 처분용기 반출 구역이다.

3.1.8. 처분용기 용접 구역

처분용기 용접 구역에서는 연료 취급 셀에서 사용후핵연료가 장입된 후 내부 뚜껑만 체결된 상태의 처분용기가 반입되면, 사전에 반입된 외부 구리 뚜껑을 닫고 용접하여 밀봉시키는 작업이 수행된다.

3.1.9. 처분용기 용접부 가공/검사 구역

처분용기의 외부 뚜껑 용접을 마친 이후에는 용접부의 기계가공과 용접 품질 검사를 수행하는 구역이다.

3.1.10. 처분용기 반출 구역

처분용기의 용접 밀봉이 모두 완료된 처분용기는 심층처분을 위한 사전 준비가 종료된 상태이며, 심층처분 지하시설로 보내기 전 처분용기 반출 구역에서 보관되는 작업을 수행한다.

3.2. 재포장 운영 절차(안)

앞서 도출한 재포장 구역 배치를 바탕으로, 1) 재포장 전 운반용기 준비 과정, 2) 재포장 전 처분용기 준비 과정, 3) 재포장 과정, 4) 재포장 후 처분용기 용접/가공/검사 과정, 5) 재포장 후 처분용기와 운반용기 반출 과정으로 구분하여 운영 절차(안)을 수립하였다. Fig. 2는 재포장 운영 절차의 주요 작업에 대한 이해를 높이고자 그림으로 나타낸 것이다.

3.2.1. 재포장 전 운반용기 준비 과정

가. 운반용기 인수 및 준비 구역

① 운반용기가 트레일러를 통해 재포장 시설에 반입되면, 크레인을 이용하여 운반용기를 보관 구역에 안착시킨다. 인수와 관련된 서류와 체크리스트를 점검한다.

② 재포장 공정에 들어가는 운반용기는 이송 구역의 개폐문을 열고 운반용기 이송 트롤리에 안착시킨 다음, 이송 구역 개폐문을 닫는다.

나. 운반용기 뚜껑 분리 준비 구역

① 운반용기 이송 트롤리를 운반용기 뚜껑 분리 준비 구역으로 이동시킨 후 인양 베드를 상승시켜 뚜껑 볼트의 해제 준비를 한다.

② 운반용기 외부 뚜껑 볼트를 해체시키고 상부에 인양 어댑터를 부착한 다음 인양 베드를 하강시켜 원위치시킨다.

다. 캐니스터 뚜껑 절단 구역

① 운반용기 이송 트롤리를 캐니스터 뚜껑 절단 구역으로 이동시킨 후 인양 베드를 상승시켜 도킹시킨다.

② 절단 구역의 기밀을 유지된 것을 확인한 후 운반용기 외부 뚜껑을 인양한다.

③ 캐니스터를 절단하기 위해 먼저 캐니스터 인양 어댑터를 캐니스터 뚜껑부에 결합시키고, 이후 캐니스터

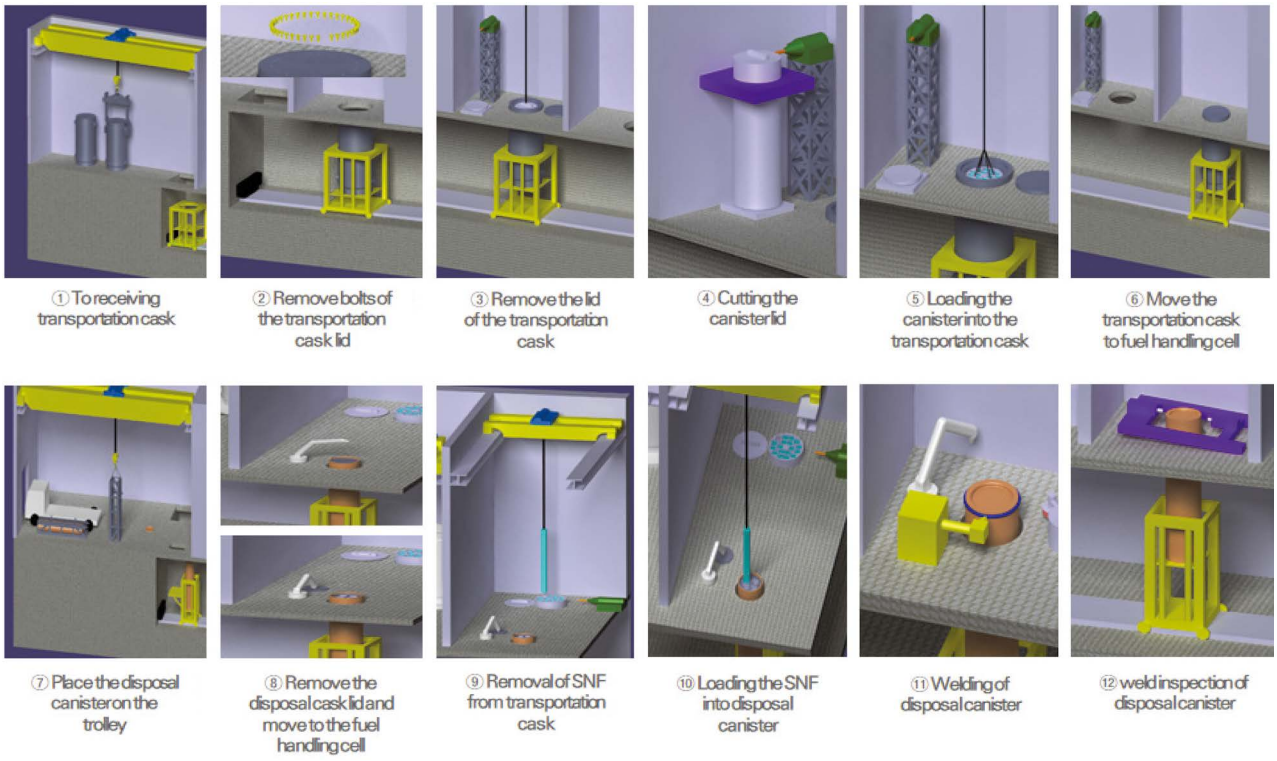


Fig. 2. Schematic diagram of spent nuclear fuel repackaging operation procedure.

를 인양하여 절단용 베드에 안착시킨다. 이때 절단용 베드에 안착한 이후에도 캐니스터 뚜껑부 인양 어댑터는 체결 상태를 유지한다.

④ 절단용 베드 내부의 회전 테이블의 기울기 조절 장치로 수평 높이를 조절하여 회전 테이블 구동 시 편심이 발생하지 않도록 한다.

⑤ 절단 시 발생하는 칩들이 절단용 베드 내에 침투하는 것을 방지하기 위한 보조 장비인 슬라이드형 침투 방지 패드를 캐니스터 외부에 결합시킨다. 운반용기 내부에 절단된 칩들이 유입되지 않도록 밀폐 뚜껑으로 용기 상부를 닫는다.

⑥ 회전 테이블을 구동과 동시에 절단 설비로 캐니스터 뚜껑부 측면을 절단한다.

⑦ 절단이 완료된 것을 확인하면, 진공 흡입기로 절단 칩 침투 방지 패드 위를 청소한 다음 패드를 좌우로 개봉한다.

⑧ 절단된 캐니스터 뚜껑을 인양하여 임시 보관 구역 안에 보관한다.

⑨ 운반용기의 밀폐뚜껑을 개봉한 후 캐니스터 내부에 있는 인양 러그에 인양 고리를 체결하여 캐니스터를 인양한 다음 운반용기 내로 이동시킨다.

⑩ 운반용기 외부 뚜껑을 인양하여 운반용기 위에 체결시킨 후 용기 상부 기밀을 유지한 상태에서 절단 스테이션에서 도킹을 해제시킨다.

라. 연료 취급 셀 구역

① 운반용기 이송 트롤리를 연료 취급 셀 하부 구역으로 이동시킨다.

② 이송 트롤리의 인양 베드를 상승시켜 운반용기를 연료 취급 셀에 도킹시키고 기밀이 유지된 다음 연료 취급 셀 내부 운반용기 차폐 슬라이드를 개봉한 후 재포장 공정 전 대기 상태를 유지한다.

3.2.2. 재포장 전 처분용기 준비 과정

가. 처분용기 준비 및 보관 구역

① 처분용기 본체가 인양 프레임에 삽입된 상태로 내부 뚜껑 및 외부 구리 뚜껑과 함께 재포장 시설에 반입되면, 인양 프레임에 고리를 걸어 인양한 뒤 보관 구역에 안착시킨다. 인수와 관련된 서류와 체크리스트를 점검한다.

② 이송 구역의 개폐문을 연 다음 비어있는 처분용기를 처분용기 이송 트롤리 위에 안착시킨다. 처분용기 내부 뚜껑을 처분용기에 올려둔다.
③ 이송 트롤리 위치를 이동하여 처분용기 뚜껑 이송 테이블을 개폐 구역 아래에 위치하도록 한 후 처분용기 뚜껑을 이송 테이블 위에 안착시킨다. 이송 구역 개폐문을 닫는다.

나. 처분용기 용접 구역

① 처분용기 이송 트롤리를 처분용기 뚜껑 용접 구역까지 이동시킨 다음, 처분 용기 외부 뚜껑 인양테이블을 들어올린다.
② 용접 구역에 있는 인양 장치를 이용해 처분용기 외부 뚜껑을 인양하여 준비 구역에 안착시킨다. 이송 트롤리의 뚜껑 인양테이블을 원위치시킨다.

다. 연료 취급 셀 구역

① 처분용기 이송 트롤리를 연료 취급 셀 하부 구역으로 이동시킨다.
② 이송 트롤리의 인양 베드를 상승시켜 연료 취급 셀에 처분용기를 도킹시킨다.
③ 구역의 기밀을 유지한 다음 처분용기 내부 뚜껑을 인양하여 대기 위치로 이동시킨다. 재포장 공정 전 대기 상태를 유지한다.

3.2.3. 재포장 과정

가. 연료 취급 셀 구역

① 운반용기 차폐 슬라이드가 개봉되면 인양장치로 운반용기 외부 뚜껑을 들어 임시 보관구역에 내려놓는다.
② 사용후핵연료 취급 설비로 사용후핵연료를 운반용기에서 인출한다.
③ 운반용기 차폐 슬라이드로 운반용기 뚜껑부를 닫는다.
④ 연료 취급 셀 내부 결함 검사장비로 사용후핵연료 집합체 외부 결함 유무를 확인한다.
⑤ 결함 확인 후 건전한 사용후핵연료를 처분용기 내로 장입한다. 만약 결함이 발견된 경우 추가 검사를 위해 결함 핵연료 보관함으로 이동시킨다.
⑥ 처분용기에 사용후핵연료 집합체가 장전되면, 처분용기 차폐 슬라이드로 처분용기 뚜껑부를 닫는다
⑦ 처분용기에 사용후핵연료 집합체가 모두 장전될 때까지 ②~⑥번 작업을 반복한다.
⑧ 처분용기 도킹 스테이션 설비를 가동하여 처분용기 내부 뚜껑을 닫고 볼트로 내부 뚜껑 체결을 수행한다.
⑨ 처분용기 내부 뚜껑 위에 아르곤 가스 주입 설비를 연결하여 내부에 가스를 채우면서 잔여 습분을 제거한다.
⑩ 도킹 스테이션 설비로 처분용기 도킹 구역의 기밀을 유지한 상태에서 처분 용기 도킹을 해제시킨 다음 이송 트롤리의 인양 베드를 하강시킨다.

3.2.4. 재포장 후 용접/가공/검사 과정

가. 처분용기 용접 구역

① 처분용기 이송 트롤리를 용접 구역으로 이동시킨 다음, 인양 베드를 상승시켜 용접 스테이션에 도킹시킨다.
② 미리 준비된 처분용기 구리 뚜껑을 처분용기 위에 얹는다.
③ 인양 베드에 설치된 회전 테이블 위 기울기 조정 장치로 수평 높이를 조절하여 처분용기 회전 시 편심이 발생되지 않도록 한다.
④ 회전 테이블을 구동시켜 처분용기를 회전시키면서 구리 뚜껑부 용접을 수행한다.
⑤ 용접 종료 후 이송 트롤리의 인양 베드를 원위치시킨다.

나. 처분용기 용접부 가공 및 검사 구역

① 처분용기 이송 트롤리를 용접부 가공 및 검사 구역으로 이동시킨 다음, 인양 베드를 상승시켜 용접부 가공 및 검사 스테이션에 도킹시킨다.
② 인양 베드에 설치된 회전 테이블 위 기울기 조정 장치로 수평 높이를 조절하여 처분용기 회전 시 편심이 발생되지 않도록 한다.
③ 절삭 과정에서 발생하는 칩들이 이송 구역 아래로 침투하는 것을 방지하기 위한 보조 장비인 슬라이드형 침투 방지 패드를 좌우에서 처분용기 외부에 결합시킨다.
④ 처분용기 용접부 절삭 가공 장비를 구리 용기 옆에 위치시킨 후, 이송 트롤리의 회전 테이블을 가동시키며 용접부 절삭 가공을 수행한다.
⑤ 절삭 가공 종료 후 절삭 가공 장비를 원위치시키고,

진공 흡입기로 절단 칩 침투 방지 패드 위를 청소한 다음 패드를 좌우로 개봉한다.

⑥ 용접부 검사 장비를 구리 용기 옆에 위치시킨 다음, 회전 테이블을 구동시켜 처분용기를 회전시키면서 비파괴 검사 장비로 용접부 검사를 수행한다.

⑦ 결함이 발견되지 않는 경우 도킹을 해제시키고 인양 베드를 원위치시킨다. 만약 용접부 결함이 발견된 경우 결함의 정도에 따라 용접을 재수행하거나 뚜껑부를 다시 절단하고 새로운 용기로 교체할 것인지 등 적절한 조치를 취한다.

3.2.5. 재포장 후 처분용기 반출 과정

가. 처분용기 반출 구역

① 처분용기 이송 트롤리를 처분용기 반출 구역으로 이동시킨다.

② 인양장치를 처분용기 위에 체결한 후 이송 트롤리에서 처분용기를 인양한다.

③ 처분용기를 원격 이동기 위에 안착시킨 후 포장된 처분용기 보관 구역에 내려놓는다.

④ 보관 구역의 처분용기 중 심층처분 지하시설로 운반 대상인 처분용기를 인양하여, 전용 이송 트레일러 위에 안착시킨 다음 외부로 반출한다.

⑤ 처분용기 이송 트롤리를 처분용기 인수 및 준비 구역으로 원위치시킨다.

3.2.6. 재포장 후 운반용기 반출 과정

가. 캐니스터 뚜껑 절단 구역

① 운반용기 이송 트롤리를 캐니스터 뚜껑 절단 구역 아래로 이동시킨 다음, 인양 베드를 상승시켜 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션에 도킹시킨다.

② 구역의 기밀을 유지한 다음 인양장치로 운반용기 외부 뚜껑을 들어 임시 보관 구역에 내려놓는다.

③ 절단된 캐니스터 뚜껑을 운반용기 내부에 적재한 다음, 운반용기 외부 뚜껑을 인양하여 다시 운반용기 위로 원위치시킨다.

④ 절단 스테이션 도킹 구역을 밀폐한 다음 도킹을 해제하고 인양 베드를 하강시켜 원위치시킨다.

나. 운반용기 뚜껑 분리 준비 구역

① 운반용기 이송 트롤리를 운반용기 뚜껑 분리 준비 구역으로 이동시킨 후 인양 베드를 상승시켜 뚜껑 볼트 체결 준비를 한다.

② 운반용기 외부 뚜껑에 부착된 인양 어댑터 체결을 해제 후 분리시킨다.

③ 운반용기 외부 뚜껑과 용기 본체를 볼트로 체결시킨 후, 인양 베드를 하강시켜 원위치시킨다.

다. 운반용기 인수 및 준비 구역

① 운반용기 이송 트롤리를 운반용기 인수 및 준비 구역으로 이동시킨 다음, 인양 장치를 운반용기에 체결시킨다.

② 운반용기를 인양 한 다음 반출 대기 구역에 내려놓는다.

③ 운반용기 전용 이송 트레일러에 반출 대상 운반용기를 적재한 다음 외부로 반출한다.

3.3. 재포장 운영 공정(안)

핀란드의 재포장 공정은 운반 및 처분용기가 준비되는 과정, 연료 취급 셀 내부 공정, 용접 공정 등 분리된 공간에서 수행되는 작업들이 순차적으로 진행된다[14]. 핀란드의 재포장 공정에서는 주당 1개의 처분용기가 재포장되며, 연간 약 40개의 처분용기를 재포장할 계획을 가지고 있다. 하지만 국내의 경우, 사용후핵연료 관리 정책[13]과 처분 가능한 최소 사용후핵연료 보관 기한을 반영하여 연간 최소 4다발 용량의 처분용기 264개가 재포장이 되어야 할 것으로 판단된다. 계획된 연간 최소 재포장 물량을 달성하기 위해선, 2교대 작업과 동시에 처분용기 이송 라인을 두 개의 라인으로 구성하고 첫 라인의 작업이 끝난 후 추가된 라인에서 연속적으로 작업을 수행할 수 있도록 하여 재포장 작업 효율을 높일 수 있는 방안을 고려하였다. 이는 만약 하나의 이송 라인에서 문제가 발생하여 재포장 작업에 차질이 생기는 경우 다른 라인은 정상 작동함으로써 재포장 작업이 중지되지 않고 계속 수행할 수 있다는 장점도 있다. 처분용기 이송이 두 개 라인으로 운영된다면 연료 취급 셀이나 처분용기 용접/검사 구역에 개별적으로 도킹되어야 한다. 만약 하나의 라인에서 처분용기 이송 트롤리를 가동시킨다면 트롤리 간 충돌이나 이송 구역에서 간섭 발생 등 부차적인 문제가 발생할 우려가 있다. 처분용기 이송 라인이 두 개가 된다면 용접, 검사 공정에서 사용되는 설비를 별개로 각각 설치하거나, 또는 단일 설비로 위치를 바꿔가며 작업하는 방안이 있다. 처분용기의 용접이나 검사

Table 3. Operation process of spent nuclear fuel repackaging

Week	Day	Shift work	Main process	
			1st transfer line	2nd transfer line
1	1	Day	• Preparing the transporation cask and docking the canister cutting station • Cutting the canister lid	
		Night	• Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station • Docking the transprtation cask into the fuel handling cell • Docking the disposal canister into the fuel handling cell	
	2	Day	• Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
		Night	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
	3	Day	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
		Night	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
	4	Day	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
		Night	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
	5	Day	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
		Night	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station

Table 3. Continued

Week	Day	Shift work	Main process	
			1st transfer line	2nd transfer line
2	1	Day	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
		Night	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister Transfer the disposal canister to the welding station	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
	2	Day	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
		Night	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station • Loading the cut canister and lid into the transportation cask • After attching the lid to the transportation cask, tranfer it to the preparation area	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
	3	Day	• Maintenance of work areas at repackaging area • Maintenance of fuel handling cell area • Manintenance of area for cutting the lid of the canister	
		Night	• Preparing the transporation cask and docking the canister cutting station • Cutting the canister lid • Docking the transprtation cask into the fuel handling cell • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Equipment change/inspection in welding area
	4	Day	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
		Night	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
	5	Day	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
		Night	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station

Table 3. Continued

Week	Day	Shift work	Main process	
			1st transfer line	2nd transfer line
3	1	Day	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
		Night	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
	2	Day	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
		Night	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
	3	Day	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
		Night	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
	4	Day	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area	• Docking the disposal canister into the fuel handling cell • Loading SNF from transportation cask into disposal canister • Injecting argon gas into the disposal canister • Transfer the disposal canister to the welding station
		Night	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station	• Welding disposal canister • Processing of welded zone on disposal canister • Non-destructive inspection of welded zone on disposal canister • Transfer the disposal canister to temporary storage area
	5	Day	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station • Loading the cut canister and lid into the transportation cask • After attching the lid to the transportation cask, tranfer it to the preparation area	• Equipment change/inspection in welding area • Preparation of disposal canister and transfer to copper lid welding station
		Night	• Maintenance of work areas at repackaging area • Maintenance of fuel handling cell area • Manintenance of area for cutting the lid of the canister	

등은 정밀한 작업이 요구되므로 설비의 위치를 이동시켜가며 라인별 작업을 하는 것은 품질에 문제를 야기할 수 있어 각 라인별로 설비는 별개로 구축하는 것으로 고려하였다.

국내에서 최소 연간 264개의 처분용기 재포장을 수행하려면 주당 5, 6개의 처분용기 재포장이 필요하다. 용접 설비는 용접 품질을 일정하게 유지하기 위해 처분용기 1개의 용접이 완료될 때마다 공구를 교체하며, 용접이 끝난 후 표면 처리를 위해 절삭 가공을 하고 나서 구역 정비가 필요하다. Table 3은 연간 최대 272개의 처분용기 재포장 일정을 고려한 처분용기 이송라인별로 재포장 공정을 순차적으로 나열한 것이다. 사용후핵연료 집합체가 연료 취급 셀 내부에서 처분용기에 장입된 이후에 용접으로 완전히 밀봉되는 공정은 하루 안에 처리가 되도록 작업을 배치하였다. 첫째 주 첫날에 운반용기의 준비 및 캐니스터 절단 작업이 이루어지며, 이후 남은 4일간 순차적으로 처분용기가 재포장되어 모두 5개가 완료된다. 둘째 주에는 처분용기 3개가 첫 날부터 둘째 날까지 재포장되며, 운반용기에 적재된 사용후핵연료 집합체 32다발이 모두 재포장된 이후 운반용기가 회수되고 둘째 주 세 번째 날 오전에 시설의 각 구역 정비가 이루어진다. 다시 세 번째 날 오후부터는 이와 동일하게 일정이 진행되어 따라서 32다발 사용후핵연료 집합체가 담긴 운반용기 2개가 3주에 걸쳐 처분용기 16개로 모두 재포장되며, 연간 약 272개의 처분용기를 재포장할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 사용후핵연료 재포장 구역 설정, 운영 절차 및 공정(안)을 수립하여 전반적인 재포장에 대한 개념(안)을 수립하였다. 국내 사용후핵연료 발생량이나 연간 처분계획에 따른 처분물량 그리고 재포장 시설에 반입되는 운반용기의 성격 등 국내 환경을 고려하여 재포장 개념을 설정하였다. 재포장 방식은 비교적 안전하고 경제적인 건식 방식을 채택하였고, 캐니스터 방식의 운반용기를 취급 가능하도록 고려하여 총 10개의 구역을 설정하였다. 본 구역 설정을 기반으로 1) 재포장 전 운반용기 준비 과정, 2) 재포장 전 처분용기 준비 과정, 3) 재포장 과정, 4) 재포장 후 용접/가공/검사 과정, 5) 재포장 후 처분용기 반출 과정, 6) 재포장 후 운반용기 반출 과정으로 총 6단계로 구분하여 재포장 운영절차를 수립하였다. 또한 기 도출한 운영절차를 바탕으로 현재 국내 고준위방폐물 사업 일정을 고려하여 연간 최대 272개의 처분용기를 재포장할 수 있는 세부 운영 공정(안)을 도출하였다. 추후 추가적인 연구를 수행하여, 재포장 구역별 주요 설비를 선정하고 각 설비에 대한 기능 정의, 세부 부품 및 성능요건을 도출할 예정이다. 최종적으로 전반적인 경수로 사용후핵연료 재포장에 대한 개념설계(안)을 수립하여 향후 사용후핵연료 재포장 시설 설계 시 주요하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술평가원 기술개발과제(No. 20211710200010A)의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Raiko H. 2005. Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel - Design Report, Posiva 2005-p2.
2. Lennart B. 1988. Modelling of Buffer Material Behavior. Some Examples of Material Models and Performance Calculations, SKB Technical Report.
3. Korea Radioactive Waste Agency. 2018. Report on the Status of Operation of HLW Management Facilities in Foreign Countries.
4. Japan Nuclear Cycle Development Institute. 1999. H12 Project to Establish Technical Basis for HLW disposal in Japan. Supporting Report 2 - Repository Design & Engineering Technology.
5. IAEA. 2018. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NWT-1.14.
6. Congressional Research Service. 2021. Civilian Nuclear Waste Disposal.
7. Ministry of the Environment Sweden. 2017. Sweden's sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management. Sweden's implementation of the obligations of the Joint Convention.
8. Na HJ, Kim HJ, Kim KH, Nam HW and Kim KP. 2021. Analysis of Domestic and Foreign Spent Fuel Storage and Final Management Policies. *J. Radiat. Ind.* **15**(4):301-309. https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.301.
9. Energysolutions, NAC international. 2015. Task Order 18: Generic Design for Small Standardized Transportation. Aging and Disposal Canister Systems - Updated Final Report.
10. Energy Solutions. 2013. Task Order 12: Standardized Transporta-

tion, Aging and Disposal Canister Feasibility Study.
11. Posiva. 2021. Operation Licence Application Spent Nuclear Fuel Encapsulation Plant and Disposal Facility.
12. U.S.NRC. 2008. Yucca Mountain Repository License Application: Safety Analysys Report, Section 1.2.1 Surface Operations Overview.
13. Ministry of Trade, Industry and Energy. 2021. The 2nd High-level Radioactive Waste Management Basic Plan.
14. Palomaeki J and Linnea R. 2012. Facility Description Summary report of the encapsulation plant and disposal facility designs. No. POSIVA-WR-12-66. Posiva Oy.
15. Korea Atomic Energy Research Institute. 1998. Several Countries' Geological Disposal Concepts and Technical Criteria. KAERI/AR-499/98.