Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 3, pp. 373-387, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.3.373

Technical article

경수로 사용후핵연료 재포장시설의 캐니스터 뚜껑 절단 설비에 대한 연구

신창민[1,*] · 강현구[1] · 이상환[1] · 문태철[1]

[1]한국원자력환경공단 고준위기술개발원

A Study on Canister Lid Cutting Equipment of Repackaging Facility for PWR Spent Nuclear Fuel

Chang-Min Shin[1,*], Hyun-Goo Kang[1], Sang-Hwan Lee[1], and Tae-Chul Moon[1]

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

ABSTRACT Spent nuclear fuel (SNF) is stored in an interim storage facility for a long period of time, and when sufficiently cooled, it is placed in a disposal canister and disposed of in deep geological repository. Since the capacity of a general disposal canister is smaller than that of an interim storage cask, a repackaging process is required. During the repackaging process, if a canister-type cask is considered for interim storage, as in the U.S. or Korea, the storage canister lid must be opened to extract the SNF. In order to open the canister lid, a sealed environment is required to prevent the leakage of radioactive materials, and a cutting equipment that can minimize contamination inside and outside the canister is also required. In this study, research cases related to canister cutting are reviewed and considerations for canister cutting equipment in a dry environment are discussed. In addition, an effective canister lid cutting method and processes are proposed.

Key words: Spent nuclear fuel, Repackaging, Canister Lid, Cutting equipment, Conceptual Design

1. 서 론

현재 원자력발전을 하는 국가들은 사용후핵연료를 중간저장을 거쳐 최종적으로 심층 처분하는 관리 방식을 주로 고려하고 있다. 일반적으로 저장 또는 처분 단계에서 사용되는 사용후핵연료 용기는 서로 다르며, 이는 처분 단계에서 요구되는 용기의 성능 요건과 저장 단계에서 요구되는 용기의 성능 요건에 큰 차이가 있기 때문이다. 대표적으로 처분용기는 수만 년 동안 건전성을 유지하기 위해 높은 내부식성이 요구되며, 처분용기 주변 완충재의 온도 제한치(약 100°C)로 인해 처분용기 표면의 온도 제한 또한 저장 조건보다 보수적이다[1,2,3]. 이러한 이유로 중간저장을 마친 사용후핵연료는 최종 처분되기 전에 전용 처분용기로 포장을 교체해야 할 필요성이 발생한다. 사용후핵연료의 재포장(Repackaging)이라 함은, 사용후핵연료가 운반 또는 저장을 목적으로 용기에 포장·밀봉된 상태에서 필요나 목적에 따라 사용후핵연료를 다시 꺼낸 다음 다른 용기로 포장 및 밀봉하는 일련의 작업을 지칭한다.

국외 선도국의 재포장 기술개발 현황을 살펴보면, 현재 처분시설 건설 인허가를 받은 국가인 핀란드와 스웨덴은 재포장 시설의 상세 설계를 마친 상황[4,5,6,7]이며, 그 외에 미국[8,9,10]과 캐나다[11] 등이 재포장 시설의 개념설계를 수행한 바 있다. 국내에서는 한국원자력연구원에서 재포장 시설에 대한 초기 개념 연구를 수행한 바 있으며[12,13], 한국원자력환경공단에서는 재포장 시설과 내부 설비에 대한 개념 도출 연구를 수행 중이다[14]. '24년 정부에 의해 발표된 고준위방폐물 R&D 로드맵[15]에서는 사용후핵연료 포장기술 개발이 필수 확보 요소기술로 선정되어 있으며, 해외기술 도입을 통해 확보하는 계획으로 세워져 있다. 해당 기술을 핀란드나 스웨덴과 같은 선도국으로부터 도입하려면 먼저 국내의 사용후핵연료 관리 여건에 맞는 재포장 개념 도출이 선행되어야 하며, 해외에서 도입할 부분과 자체적으로 확보해야 하는 부분에 대한 분류가 필요하다. 예를 들어 우리나라처럼 캐니스터 기반의 용기를 활용한 건식 중간저장 방식이 예상되는 경우 핀란드나 스웨덴처럼 습식 중간저장시설을 운영하는 국가와는 관리 방식에

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2025 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 5 August 2025 Revised 5 August 2025 Accepted 11 August 2025

차이가 있어, 사용후핵연료 재포장도 공정상에 차이가 발생할 수 밖에 없다.

선도국의 재포장 개념과 국내에서 발표된 선행 연구에서 공정상 가장 큰 차이점은 사용후핵연료 인출 전 캐니스터의 개봉이다. 핀란드나 스웨덴은 사용후핵연료를 중간저장 후 재포장 시설로 반입 시 습식 운반용기를 사용하며, 이러한 용기는 바스켓형 용기 또는 Bare-fuel형 용기로 알려진 일체형 용기 방식이다[5,8]. 이에 반해 국내에서는 중간저장 방식이 확정되지는 않았으나, 현재 원전 부지 내 경수로 사용후핵연료의 건식저장 방식으로 캐니스터형 용기 도입이 추진되고 있어 중간저장도 이와 유사한 관리 방식이 적용될 가능성이 높다. 캐니스터 방식 용기는 사용후핵연료를 캐니스터 안에 장입한 후 뚜껑을 용접하여 밀봉한 뒤 관리하므로, 향후 처분을 위해 재포장 시설에 반입되면 캐니스터 뚜껑부를 절단해야만 사용후핵연료 인출이 가능하다. 국외에서는 원전 부지 내 사용후핵연료 저장 수조와 같은 환경에서 캐니스터 뚜껑 절단 계획을 세워두기도 하였으나[16], 뚜껑 절단 과정에서 발생하는 절단 부산물의 처리와 캐니스터 내부 오염 우려, 사용후핵연료 건조 등 재포장 공정을 복잡하게 만드는 요인들이 많다.

본 연구는 선행 연구에서 도출된 건식환경의 경수로 사용후핵연료 재포장 개념을 기반으로 캐니스터 뚜껑 절단 공정과 필요 설비의 제안에 초점을 맞추어 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 국내에서는 사용후핵연료가 캐니스터형 용기로 관리될 가능성이 매우 높아, 사용후핵연료를 처분용기로 재포장하기 위해서는 캐니스터 뚜껑 절단 작업이 요구된다. 현재까지 조사된 바로는 사용후핵연료를 처분하기 위해 건식환경에서 캐니스터 뚜껑을 절단하는 재포장 공정 연구는 국내외에서 수행된 바가 없어, 재포장시설에서 캐니스터형 용기를 개봉하는 수단과 절차에 대한 연구가 반드시 필요하다. 이를 위해, 먼저 건식환경에서 캐니스터 뚜껑을 절단하기 위해 해당 작업이 수행되는 구역의 구성과 요구되는 기능들을 정리하였다. 그리고, 이러한 기능들을 수행할 수 있는 캐니스터 뚜껑 절단구역 설비 설계 방안을 제시하고, 이 가운데 적합한 대안을 선정하여 개념설계(안)을 제안하고자 한다.

2. 재포장 시설 내 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 기능

2.1. 재포장 시설 구성 개요

사용후핵연료가 중간저장시설에서부터 재포장시설로 반입되는 시나리오는 사용되는 용기의 관점에서 다음과 같은 것들을 고려할 수 있다.

① 운반-저장 겸용 캐니스터에 밀봉되어 중간저장된 후 전용 운반용기에 캐니스터를 담아 재포장시설로 운반

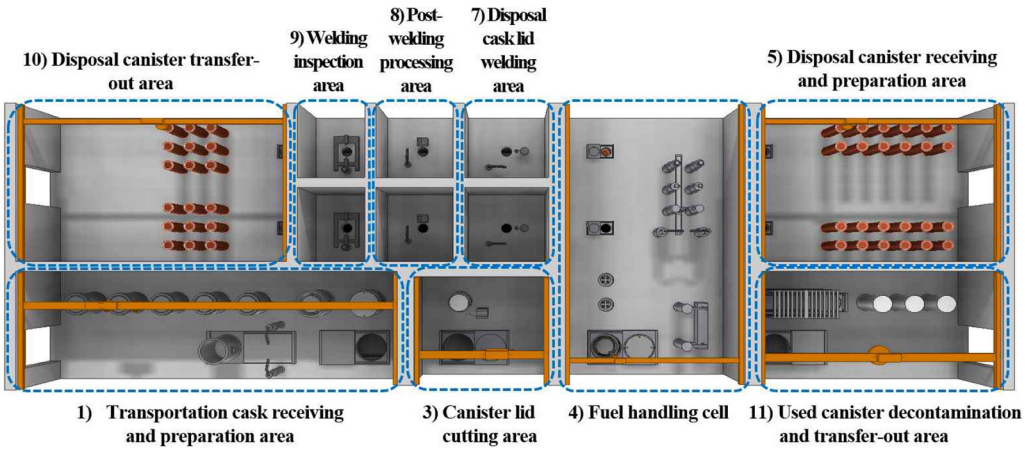
② 중간저장시설에서 Bare-fuel 형 운반-저장 겸용용기로 중간저장된 후 재포장시설로 운반

③ 원전 수조에서 충분히 냉각된 사용후핵연료가 중간저장을 거치지 않고 Bare-fuel 형 운반-저장 겸용용기로 재포장시설로 운반

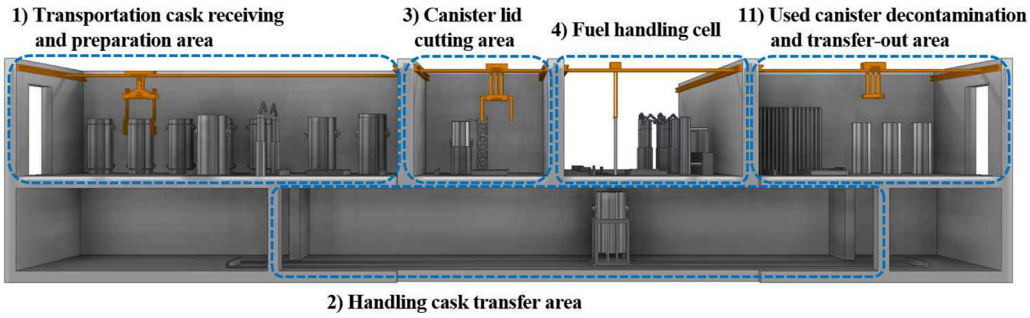
①번 시나리오는 국내에서 가장 현실적으로 고려되는 시나리오이며, 이는 발전사업자가 이미 운반-저장 겸용 캐니스터를 이용해 원전 내 건식저장 사업을 추진하고 있기 때문이다. 원전 부지 내 건식저장사업이 중간저장 시작 시점보다 많이 앞서 있기 때문에, 원전 부지 내에 별도의 재포장시설을 마련하지 않는 한 중간저장시설로 사용후핵연료를 반출하기 전 시점에 사용후핵연료 관리 방식을 다른 형태로 변경할 가능성이 매우 낮다. ②번 시나리오의 경우 유럽 등 국외에서 많이 활용되고 있는 방식으로, 국내에서 아직 부지 내 건식저장 사업이 착수되기 전 시점에서 충분히 고려할 수 있는 방식이다. 하지만 이는 발전사업자가 현재 추진중인 사용후핵연료 관리 방식에 변화를 두어야 한다는 전제가 따르므로 실현 가능성이 낮다고 볼 수 있으며, 이미 부지 내 건식저장 사업이 운반-저장 겸용 캐니스터를 활용하는 방식으로 추진된 이후에는 채택될 가능성이 낮다. ③번 시나리오는 외부적인 요인으로 인해 미처 원전 부지 내 건식저장을 거치지 않고 수조 안에서 처분 가능한 수준까지 냉각된 사용후핵연료가 다수 발생하는 경우, 운반-저장 캐니스터에 밀봉하는 과정을 거치지 않고 곧바로 처분장 재포장시설로 운반되는 경우이다. ②번과 ③번 시나리오의 경우 캐니스터 뚜껑 절단 과정이 필요하지 않게 되어, 재포장시설 내에서 처분용기로 재포장하는 공정이 더욱 단순해진다. 본 연구에서는 재포장시설을 구성할 때 상기 시나리오 가운데 가장 실현 가능성이 높고 캐니스터 절단 공정이 수반되어야 하는 ①번 시나리오를 전제로 하였다.

선행 연구에서 국내 사용후핵연료 관리 방식과 발생 예상량을 근거로 Fig. 1과 같이 재포장 시설의 개념(안)을 제시한 바 있다[14]. 선행 연구에서 제시한 재포장 개념은 핀란드나 스웨덴과 같은 건식 재포장 방식으로, 핫셀과 같이 밀폐된 공간에서 저장용기 캐니스터로부터 사용후핵연료를 꺼내어 처분용기로 옮겨 담아 재포장하는 방식이다. 재포장 시설에서 사용후핵연료를 취급하는 구역은 모두 11개로 구성되어 있는데 이들은 1) 운반용기 인수 및 준비 구역, 2) 취급용기 이송 구역, 3) 캐니스터 뚜껑 절단 구역, 4) 연료 취급 셀 구역, 5) 처분용기 인수 및 준비 구역, 6) 처분용기 이송 구역, 7) 처분용기 용접 구역, 8) 용접 후처리 구역, 9) 용접부 검사 구역, 10) 처분용기 반출 구역, 11) 폐캐니스터 제염 및 반출 구역으로 구분되어 있다.

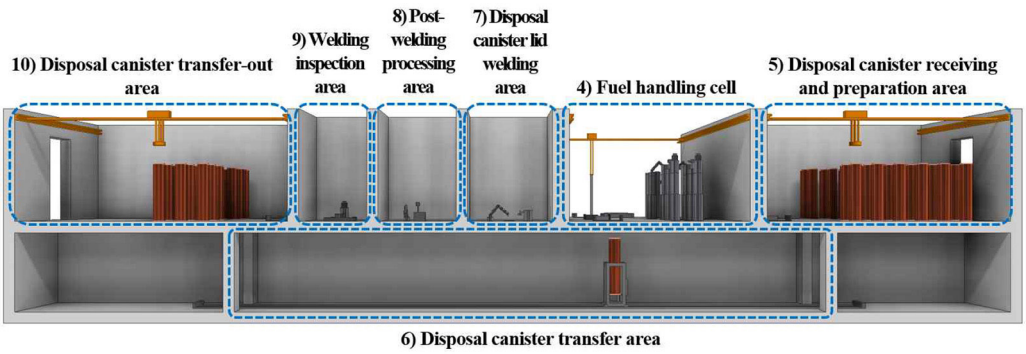
수행공정을 요약하면, 먼저 중간저장시설에서 사용후핵연료가 운반용기를 이용해 재포장 시설 1)번 구역으로 반입된다. 여기서 캐니스터는 취급용기로 옮겨지며, 취급용기는 2)번 구역인 지하 1층의 이송복도를 통해 이송되면서 각 작업 구역과 결합(docking)한다. 취급용기가 3)번 구역에 결합되면, 이곳에서 캐니스터의 뚜껑을 절단하여 사용후핵연료를 인출 가능한 상태로 준비시킨다. 이후 취급용기는 다시 4)번 구역 연료 취급 셀에 결합되어 처분용기로 사용후핵연료를 옮겨 담을 준비를 한다. 비어 있는 처분용기는 5)번 구역에서 인수된 다음 전용 이송 트롤리에 적재되어 6)번



(a) Top view



(b) Side view (Handling cask transfer line)



(c) Side view (Disposal canister transfer line)

Fig. 1. Layout concept of repackaging area

구역을 통해 각 구역으로 이송되고 결합된다. 빈 처분용기가 4)번 연료 취급 셀에 결합되면 본격적인 사용후핵연료 적재 작업이 진행되고, 사용후핵연료가 모두 적재된 이후에는 내부 뚜껑을 결합한 후 7)번 처분용기 용접 구역으로 이송된다. 7)번 구역에서 구리 처분용기 뚜껑의 용접을 완료한 후에는 8)번 구역에서 용접 표면 후처리를 하고, 9)번 구역에서 용접부 검사까지 수행하여 작업을 완료한다. 이후에는 처분용기는 처분용기 반출 구역으로 이송하여 지하 처분시설로 이동하게 되고, 사용후핵연료가 모두 인출된 캐니스터는 중저준위 폐기물로 분류되므로 11)번 구역에서 제염한 후 폐기물 운반 패키지에 담아 반출한다.

기존 핀란드나 스웨덴의 재포장 시설의 구성에서 추가된 부분으로는 캐니스터 뚜껑 절단구역과, 폐캐니스터 제염 및 반출 구역이다. 스웨덴의 경우 재포장 시설 내 수조에서 사용후핵연료를 인출하고[5], 핀란드의 경우 원전 부지 내의 사용후핵연료 저장 수조에서 중간저장 이후 비(非)-캐니스터 방식인 바스켓형 습식 운반용기로 사용후핵연료를 재포장 시설로 이송하므로[7] 별도의 뚜껑 절단이 필요하지 않기 때문이다.

2.2. 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 기능과 요구 조건

2.2.1. 절단 구역의 환경

선행 연구[14]에서 도출된 캐니스터 뚜껑 절단 공정을 보면, 재포장 시설의 지하 이송복도에서 캐니스터를 담고 있는 취급 용기가 이송되어 뚜껑 절단 구역 하부에서 결합이 된 이후 캐니스터 절단 작업에 착수하게 된다. 취급 용기는 사용후핵연료가 담긴 캐니스터의 방사선 차폐뿐만 아니라 이송 작업 시 캐니스터를 보호하기 위한 용도로 사용된다. 사용후핵연료가 담긴 캐니스터의 뚜껑이 절단되면 내부의 방사성물질이 내부 작업공간으로 확산될 수 있으므로, 캐니스터 뚜껑 절단 구역은 작업이 수행되는 동안 기밀(Leak-tight)을 유지해야 하며, 내부 공기를 주기적으로 환기할 수 있는 공기조화시스템이 요구된다. 또한, 사용후핵연료로부터 방출되는 열로 인해 내부 공기가 뜨거워지게 되며, 고온의 환경이 내부 설비에 영향을 줄 수 있으므로 내부 공기 온도를 조절할 수 있어야 한다. 핀란드 재포장 시스템의 설계 사례를 보면 사용후핵연료 재포장이 이루어지는 연료 취급 셀의 온도를 약 20℃ 아래로 유지하며, 60℃를 넘어가는 경우 사고 조건으로 간주한다[7]. 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 온도가 일정 수준으로 유지되는지를 모니터링하기 위해 온도 측정 기기 및 온도 감지 센서가 설치되어야 한다.

한편, 캐니스터 뚜껑 절단 구역은 필요에 따라 내부를 불활성(Inert) 환경으로 구성할 것이 요구될 수 있다. 이는 장기저장을 마치고 재포장 시설로 반입된 사용후핵연료 집합체에 결함이 존재하는 경우, 이러한 집합체가 공기 중에 노출되었을 때 연료봉 내부의 핵연료 소결체(Pellet)가 산화될 수 있다는 우려 때문이다[17,18]. 따라서, 결함 사용후핵연료 집합체가 공기 중에 노출되었을 때의 영향이나 예상되는 문제점에 대해 충분히 검토하여 내부 환경 조성을 결정하여야 한다.

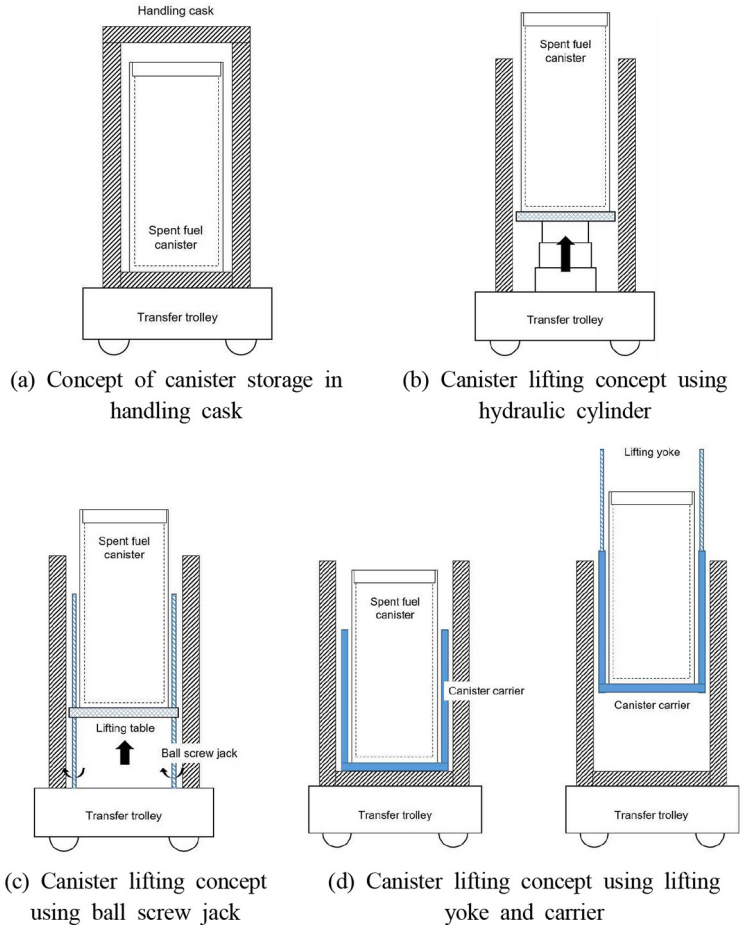
캐니스터 뚜껑 절단 구역에서는 사용후핵연료를 용기로부터 인출하지 않으나 뚜껑 개봉에 따라 공기 중에 노출될 수 있으므로, 이를 고려해서 요구되는 수준의 차폐가 가능한 콘크리트 벽 두께를 가져야 한다. 핀란드의 재포장 시설 설계 사례[19]를 보면 사용후핵연료의 인출과 재포장이 이루어지는 연료 취급 셀 구역의 차폐벽 두께는 1.3 m로, 기타 구역은 0.9 m 이하로 설정하고 있다. 절단 작업은 모니터링시스템을 활용한 원격 작업으로 이루어지나, 필요시에 내부 공간을 정비하기 위해 작업자가 출입할 수 있는 작업자 출입문이 설치되어야 한다. 작업자 출입문 개폐 시 재포장 시설 내부 작업자의 이동 복도에 공간이 직접적으로 노출되지 않도록 다중 출입구를 가지도록 설계해야 한다. 또한, 작업공간 내부에 설비를 최초로 설치하거나 유지보수 과정에서 교체가 필요한 경우, 설비를 반출입할 수 있는 통로가 필요하다. 이는 작업자 출입 구역과 별개로 존재해야 하며, 설비를 바닥 또는 천장을 통해 인양하여 반출 할 수 있도록 충분한 크기로 구성되어야 한다. 설비를 유지보수 하는 공간은 작업자 출입이 상시로 이루어질 수 있으므로, 유지보수 공간과 캐니스터 뚜껑 절단 구역 간에는 오염된 공기를 차단할 수 있는 이중 해치 구조가 필요하다.

캐니스터 뚜껑 절단 구역에 작업자가 들어오거나, 외부로 설비를 반출할 때는 내부 제염 작업이 선행되어야 한다. 제염 작업을 위해 내부 공간에 물을 분사할 수 있는 설비가 필요하며, 이러한 작업은 원격으로 수행될 수 있어야 한다. 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 바닥에는 내부 공간을 물로 세척하는 과정에서 발생하는 오염수를 배출할 수 있는 배수 시스템이 구비되어야 한다.

2.2.2. 캐니스터의 인양

사용후핵연료 저장 캐니스터는 절단 작업 구역에 결합된 후 취급 용기 안에 담겨 있는 상태이므로 캐니스터 뚜껑부를 절단하기 위해서는 절단에 필요한 높이만큼 캐니스터를 취급 용기로부터 꺼내야 한다. 이때 캐니스터가 인양되는 높이는 캐니스터 뚜껑부 표면에 절단 공구를 접촉시켜 원활한 절단 작업이 수행될 수 있는 만큼 확보되어야 한다. 캐니스터의 인양 작업을 수행하기 전에 먼저 취급용기의 뚜껑을 인양하여 절단 구역 내부의 적절한 위치에 보관하여 캐니스터를 인양 가능 상태로 준비시킨다.

캐니스터의 뚜껑 절단 작업은 캐니스터를 완전하게 꺼내지 않고 부분적으로만 꺼내어 절단하는 방법을 고려할 수 있다. 일반적으로 건식저장에 사용되는 사용후핵연료 캐니스터는 별도의 인양 러그가 부착되어 있지 않으며, 캐니스터 상부 뚜껑 면에 있는 나사 체결구에 인양 어댑터를 조립한 다음 여기에 크레인 요크를 걸어 인양하게 된다. 이는 주로 부지 내 건식저장 또는 중간저장시설에서 운반용기에 적재된 캐니스터를 인양하여 저장용기나 저장모듈로 옮길 때 크레인으로 인양하기 위한 수단으로 활용된다. 하지만 재포장시설에서 캐니스터 절단 작업을 위해 인양하는 경우 뚜껑 절단 후에 캐니스터 인양 어댑터가 부착되는 부분이 캐니스터 본체에서 이탈하기 때문에 인양 상태를 유지한 채로는 절단 작업을 수행할 수 없다. 또한, 정교한 절단 작업을 위해서는 절단 작업 중 캐니스터의 움직임이 없도록 고정할 필요가 있으며, 특히 바닥면이 안정되게 지지될 필요가 있다. 따라서 사용후핵연료 캐니스터를 부분적으로 꺼내는 방식을 적용할 때는 뚜껑면에 어댑터를 부착하여 인양하는 방식이 아닌 캐니스터 바닥면 자체를 상승시켜 꺼내는 방법이 적합할 것이다. Fig. 2(a)는 사용후핵연료 캐니스터가 이송 트롤리 위에서 취급용기로 차폐된 상태를 보여주며, Fig. 2(b)와 (c)는 사용후핵연료 캐니스터를 취급용기로부터 부분적으로 꺼내기 위한 방식의 개념도를 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 이송 트롤리에 유압 실린더를 탑재하여, 유압 실린더의 확장을 통해 사용후핵연료 캐니스터가 올려진 패드를 상승시켜 부분적으로 인출하는 방식을 설명한 것이다. 이 방법은 유압 실린더의 강한 지지력을 이용해 비교적 빠르게 캐니스터를 상승시킬 수 있는 장점이 있으나, 이송 설비의 규모가 커지고 높이 조절 시 정교한 조작이 어려울 수 있다. Fig. 2(c)는 볼 스크류 잭(Ball screw jack)을 활용한 방식으로, 볼 스크류가 제자리에서 회전하면 나사산을



(a) Concept of canister storage in handling cask

(b) Canister lifting concept using hydraulic cylinder

(c) Canister lifting concept using ball screw jack

(d) Canister lifting concept using lifting yoke and carrier

Fig. 2. Canister withdrawal method prior to lid cutting process

따라 인양 테이블이 조금씩 상승하여 캐니스터를 인양시킨다. 이러한 방식은 핀란드에서 처분용기 및 운반용기 이송 트롤리에 이미 적용하여 검증을 마친 방식으로, 다소 느리지만 정교한 조작이 가능하며 안정성을 가진다[6,7]. 단 핀란드에서는 용기 절단 작업 등에 활용할 목적으로 설계하지는 않았으므로, 인양 상태에서 절단 작업 수행 시 발생하는 진동 등이 인양 시스템에 가해지는 영향에 대한 분석은 필요하다.

사용후핵연료 캐니스터 뚜껑 절단 작업을 위해 캐니스터를 부분적으로 꺼내는 방식 외에 사용후핵연료 캐니스터를 취급 용기로부터 완전하게 꺼내어 전용 절단 작업 위치에 안착시켜 절단 작업을 수행하는 방식도 고려할 수 있다. 이러한 방식은 사용후핵연료 캐니스터 뚜껑 절단 작업을 바닥면 지지나 표면 고정 등 외부적 요소에 대한 고려를 최소화하는 최적의 환경에서 안전하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 앞서 언급하였듯이 캐니스터 뚜껑 상단 면에 어댑터를 부착하여 인양하는 방식은 최초 캐니스터를 취급 용기로부터 인출 시에는 가능하나, 이후 캐니스터 뚜껑이 절단되면 다시 캐니스터를 인양하여 취급용기 안에 넣을 방법이 없게 된다. 따라서 Fig. 2(d)와 같이 사용후핵연료 캐니스터를 인양하는 보조 용기인 캐니스터 운반 보조 설비(Canister carrier)를 사용하는 방안을 고려할 수 있다. 따라서 캐니스터 운반 보조 설비에 인양 요크를 걸어 캐니스터와 운반 보조 설비를 완전히 꺼내고, 이를 함께 절단 작업 위치에 안착시킨 후 절단 작업을 수행할 수 있다. 캐니스터를 완전히 꺼내어 절단하는 방식을 취할 경우, 작업 위치에 따라 취급용기가 결합되는 구역 입구를 닫아줄 필요가 있다. 이는 절단 작업 중 발생하는 절삭칩과 같은 불순물이 취급용기 내부로 유입되는 것을 막아주기 위한 것이다.

2.2.3. 캐니스터의 뚜껑 절단 위치

사용후핵연료 캐니스터는 제작사마다 사양이 다르겠지만 외부 쉘의 두께가 대체로 1~2.5 cm 사이에 분포하고 있다. 캐니스터 뚜껑은 주로 외부 쉘 상단에 용접으로 접합되므로 캐니스터 뚜껑부를 절단하기 위해서는 뚜껑 용접부 깊이를 고려하여 그보다 아래 위치에서 절단하는 것이 적절하다. 캐니스터마다 차이가 있지만 Fig. 3과 같이 뚜껑 인근 캐니스터 쉘 내부에 인양 러그가 용접으로 접합된 경우도 있다. 이 인양 러그는 캐니스터에 사용후핵연료를 적재하기 전 비어 있는 상태에서 캐니스터를 외부 용기

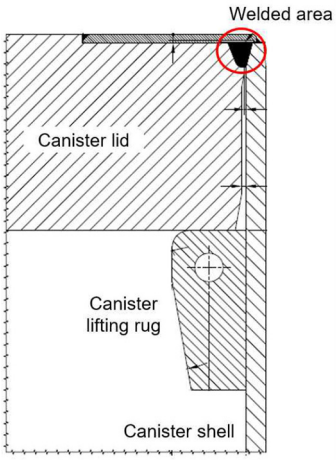


Fig. 3. Example of cross section of canister lid

(Overpack) 안에 안착시키기 위해 인양하는 용도로 사용된다. 이 인양 러그는 캐니스터 자체 하중만 버틸 수 있도록 설계되었기 때문에 사용후핵연료가 적재된 상태에서는 여기에 요크를 걸어 인양할 수 없다. 만약 캐니스터 뚜껑을 절단할 때 캐니스터 인양 러그가 용접되어 부착된 위치까지 내려와서 절단한다면, 절단된 뚜껑을 완벽하게 분리하기 위해서 내부 인양 러그 폭 전체를 완전하게 절단해야 한다. 이는 뚜껑 절단 시간이 더 소요되며, 절단 공구에 의해 내부에 적재된 사용후핵연료 집합체에도 손상을 줄 우려가 있다. 따라서 내부에 인양 러그가 부착된 캐니스터라면 상단 용접부 아래에서부터 인양 러그 위쪽까지 범위 안에서 절단 작업을 수행해야 할 것이다.

2.2.4. 캐니스터 뚜껑 절단 방법

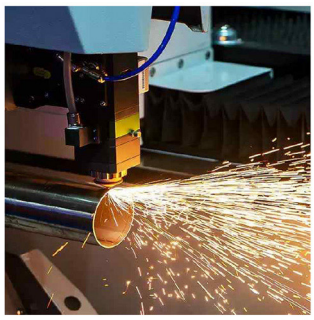
절단 방법에는 작업 환경 온도에 따라 냉간 절단과 열간 절단으로 크게 분류된다. 냉간 절단은 상온 환경에서 날카로운 공구를 이용해 표면을 깎아 내거나 워터젯 등을 활용하는 방법이며, 열간 절단은 고온 환경에서 화염이나 플라즈마 아크, 레이저 등을 활용하는 방법이다. 또한, 절단 수단에 따라 분류한다면, 기계적 절단, 열 절단, 워터젯 절단, 화학적 절단 등으로 분류될 수 있다.

열간 절단에서 플라즈마 절단이나 레이저 절단이 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 이러한 수단들은 절단 작업 중 대상물에 대한 충격을 덜 주며, 비교적 표면부 손상을 줄이면서 정밀하게 절단할 수 있다. 하지만 본 연구에서 절단 대상물이 사용후핵연료가 적재된 상태의 캐니스터임을 고려한다면 플라즈마나 레이저와 같은 수단이 사용후핵연료 집합체에 주는 영향도 살펴봐야 한다. 뚜껑 절단 위치를 사용후핵연료 집합체가 적재된 위치보다 충분히 높이 설정한다면 플라즈마나 레이저가 집합체에 직접 닿는 문제는 예방할 수 있으나, 고에너지로부터 유발되는 열과 작업 중 발생하는 가스에 의한 영향을 고려해야 한다. 또한, Fig. 4(a)와 같이 레이저나 플라즈마를 이용한 절단 작업 중에는 절단 불순물이 작업 구역 주변으로 강하게 분사되며, 충분히 절단된 이후에는 캐니스터 내부로 불순물이 분사될 가능성도 있어 사용후핵연료 집합체에 주는 영향도 검토해야 할 필요가 있다.

냉간 절단 방식에서는 전통적으로 선반이나 밀링커터 등을 활용한 기계적 절단과 워터젯을 이용한 방법이 많이 사용된다. Fig. 4(b)와 같이 워터젯은 물을 절단 대상물에 빠른 속도로 분사하여 기계적인 힘으로 표면을 깎아 낸다. 이 방법은 열을 발생시키지 않으므로 열에 의한 변형을 줄일 수 있고 절삭물의 손상을 줄여 깨끗하게 절단할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 워터젯 절단 작업을 캐니스터 절단에 도입하는 경우 고방사선 환경에서 수행됨에 따라 액체 방사성 폐기물 처리 문제가 생기며, 캐니스터 내부에 물이 고이게 되어 이에 대한 배수 문제가 발생한다. 특히 캐니스터 내부 배수 장치는 캐니스터 뚜껑과 연결되어 있으므로 별도의 배수 장치를 삽입하여 물을 배출해야 하며, 사용후핵연료를 건조하는 작업도 필요하게 된다.

냉간 절단 방식에서 기계적 절단 방식은 다양한 종류가 있으나 고속으로 회전하는 공구를 이용한 방식은 캐니스터 내외부에 절삭 분사물을 발생시키고 캐니스터에 진동과 충격을 가할 수 있다. 기계적 절단 방식 가운데 Fig. 4(c)와 같이 띠톱(Bandsaw)을 활용한 저속 절단 방식은 국외에서 원자력 발전소 해체 시에 구조물 절단 수단으로 활용되기도 하였다. 이러한 방식을 캐니스터에 적용한다면 절단 위치 선정이 중요한데, 내부 사용후핵연료 집합체에 공구가 닿는 것을 원천적으로 막기 위해 공구 또는 캐니스터의 위치와 방향을 조정시키며 부분적으로 필요한 깊이만큼 절단하는 방안이 적절할 것이다. 이 방법 또한 여전히 캐니스터 내부 절삭칩 유입 가능성이 있어 강력한 진공 흡입 장치를 공구 주변에 함께 설치하는 방안도 고려할 수 있다.

국외 연구에서는 사용후핵연료 캐니스터의 절단 개봉 방안에 대해 검토한 바 있는데 이 가운데 클램쉘(Clamshell) 절단 방법을 유력한 수단으로 제안하고 있다[20]. 클램쉘 절단 방법은 Fig. 4(d)와 같이 원통형 구조물의 절단에 사용되는 설비이다. 먼저 구조물 외부에 고리 형태의 설비를 결합하여 고정하고, 이 고리 위에서 절삭 공구가 원주 방향을 따라 저속으로 회전하며 구조물 표면을 깎아나가는 방식이다. 이 방법은 절단 시간이 오래 걸리나 구조물에 큰 충격이나 열을 발생시키지 않고 안정적으로 절단할 수 있다. 또한, 절삭칩이 나선형으로 길게 말려서 구조물 바깥으로 떨어져 나가므로 절삭 분사물이 캐니스터 내부를 오염시킬 가능성이 매우 낮다. 클램쉘 절단 방식은 원통형 구조물의 축을 세로로 둔 수평형 절단과 축을 가로로 두고 절단하는 수직형 절단이 모두 가능하다. 사용후핵연료 캐니스터의 경우 내부에 구조물을 포함하고 있고 인양과 취급이 원활한 편은 아니므로 수평형 절단이 적합하다. 한가지 고려해야 할 사항으로는 캐니스터에 클램쉘 절단 방식을 도입하는 경우 캐니스터 주변의 절삭칩을 제거하는 방안이다. 일반적인 산업 현장에서 클램쉘 절단 시에는 작업자가 상주하며 긴 나선형 절삭칩들을 수시로 제거해 주면 된다.



(a) Laser cutting method
(Image source: www.zpglaser.com)

(b) waterjet cutting method
(Image source: www.jwmwaterjet.com)

(c) bandsaw cutting method
(Image source: www.eldallmfg.com)

(d) Clamshell cutting method
(Image source: maucotools.com)

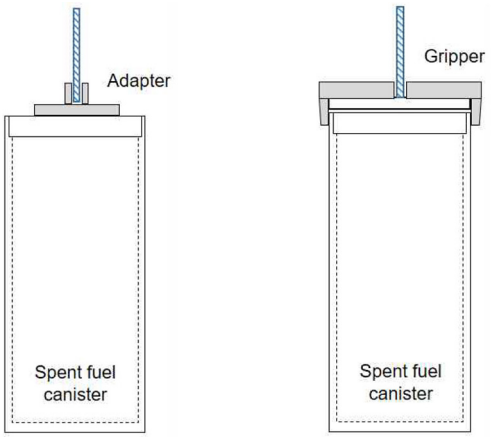
Fig. 4. Example of cutting method of cylindrical structure

하지만 사용후핵연료 캐니스터 뚜껑 절단은 고방사선 환경으로 인해 모든 공정이 원격으로 진행되어야 하므로, 나선형 칩들이 공구 주변에 뒤엉키거나 떨어졌을 때 수월한 제거가 어렵다. 절삭 작업에서 발생하는 칩들을 수거하기 위해 강한 흡입력을 가진 진공 흡입 설비를 이용한다면, 클램쉘 절삭 후 캐니스터 주변에 떨어지는 긴 나선형 절삭칩을 적절한 수단을 이용해 한 곳으로 모으고 잘게 부순 다음 수집해야 할 것이다.

2.2.5. 절단된 캐니스터 뚜껑의 지지 및 회수

재포장시설에서 캐니스터의 뚜껑 절단 작업을 마치면 캐니스터 뚜껑이 본체로부터 이탈하게 된다. 캐니스터 뚜껑은 수 톤의 무게를 가지는 중량물이므로 절단 작업 중에 적절한 방법으로 고정하여 절단 직후 안정적인 인양 상태를 유지하고 있어야만 이탈 후 낙하와 같은 문제를 예방할 수 있다.

절단 작업 중 캐니스터 뚜껑부를 고정하는 방법으로는 Fig. 5와 같이 캐니스터 뚜껑에 어댑터를 체결하는 방법과 집게(Gripper)를 이용하는 방법이 있다. 전자의 경우 캐니스터를 인양하기 위한 목적으로 체결하는 어댑터를 그대로 활용하기 때문에 안정적 지지가 가능하나, 캐니스터 절단 작업 환경이 원격 시스템으로 작동되는 점을 고려하여 어댑터 체결을 자동화해야 하는 부담이 있다. 후자인 집게를 활용한 방식은 상대적으로 간편하게 뚜껑부를 지지할 수 있겠지만, 캐니스터 표면은 홈이 없는 매끈한 면이므로



(a) Concept of canister lid supporting using adapter

(b) Concept of canister lid supporting using gripper

Fig. 5. Example of canister lid supporting during cutting operation

취급 부주의로 인한 낙하 사고 등의 위험이 있다. 또한, 후자 방식에서는 비교적 캐니스터 절단 위치가 뚜껑부 근처이므로 절단 작업을 방해하지 않는 상태로 집게를 이용해 뚜껑부를 고정하기가 쉽지 않을 것이다. 따라서 캐니스터 뚜껑 절단 작업 중 뚜껑지지 방식은 어댑터를 이용하는 방식이 사고예방 차원에서 더 안전할 것이다.

캐니스터 뚜껑부에 어댑터를 체결하는 작업은 캐니스터 절단 구역이 아닌 Fig. 1의 운반용기 인수 및 준비구역에서 사전에 행해질 수도 있다. 이는 운반용기 인수 및 준비구역에서 오버팩의 뚜껑이 개봉된 후 캐니스터를 이송용기를 통해 최종적으로 취급용기에 삽입할 때 어댑터가 체결된 상태의 캐니스터를 그대로 뚜껑 절단 구역까지 이송하는 방안이다. 이 경우 캐니스터 뚜껑 절단 작업 중 어댑터에 크레인을 이용해 미리 요크를 걸어두고 절단 작업을 마친 후 절단된 캐니스터 뚜껑부를 그대로 인양하면 된다. 이 방법을 사용하지 않고 뚜껑 절단 구역에서 어댑터 또는 그와 유사한 뚜껑부 지지 설비를 체결한다면 나사 체결과 해체를 수행할 수 있는 자동화 설비를 이용해야 할 것이다. 캐니스터 뚜껑의 어댑터 체결용 나사구의 위치를 감지하기 위해 원격 카메라를 활용해야 할 것이며, 체결 및 해제 위치를 정밀하게 조절할 수 있는 기능을 가져야 할 것이다.

최종적으로 절단된 뚜껑은 뚜껑 절단 구역 외부로 반출되어야 한다. 반출은 캐니스터 취급용기의 결합(Docking) 입구를 통해 다시 반출하면 되며, 결합 입구 아래에 별도의 이송설비가 대기하고 있어야 한다. 절단된 뚜껑은 절단된 본체와 함께 최종적으로 폐캐니스터 제염 및 반출 구역으로 이송되며, 이 구역에서 제염을 거쳐 중저준위 폐기물로 처분되거나 재활용된다.

캐니스터 뚜껑 절단 구역에서 요구되는 기능과 이에 대한 설계 방안을 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Summary of required function and design plan for canister lid cutting area

Category	Required function	Design plan
Environmental Conditions of the Cutting Area	① Maintaining zone temperature based on the operational requirements of internal systems and equipment ② Ensuring leak-tightness to prevent the release of radioactive materials ③ Establishing an inert atmosphere, if required ④ Designing walls with sufficient thickness to provide adequate radiation shielding ⑤ Providing dedicated access routes for personnel and separate pathways for equipment maintenance and transfer ⑥ Implementing decontamination measures within internal areas prior to personnel access or equipment removal for maintenance	① Ambient temperature is maintained using an HVAC system, and continuous monitoring is conducted through the installation of temperature sensors ② An air-tight sealing system is installed at the cask connection interface to ensure containment integrity ③ The working area is filled with inert gases such as argon or helium to prevent unwanted chemical reactions ④ The thickness of shielding walls is determined based on radiation shielding analysis results ⑤ Personnel access points are equipped with multiple side-entry doors, and equipment transfer hatches are installed on the ceiling or floor to facilitate safe handling ⑥ Decontamination systems are installed within the working area, and a drainage system is provided on the floor to discharge contaminated liquids
Lifting of the Canister	① Provision of a lifting mechanism capable of positioning the canister at an optimal location for stable cutting operations without external interference	①-1 Direct lifting using a canister-lifting can ①-2 Partial lifting using a hydraulic cylinder mounted on a trolley
Cutting of the Canister	① Selection of the cutting location to minimize potential impact on the spent nuclear fuel assemblies inside the canister ② Adoption of a cutting method that does not compromise the integrity of the internal spent fuel assemblies during canister cutting operations, by avoiding thermal effects or ingress of foreign materials ③ Ensuring ease of removal of foreign materials (e.g., metal chips) generated after cutting the canister lid section	① Determination of the cutting location between the lid weld zone and the top of the internal lifting rug ② Application of a cold, low-speed mechanical cutting method ③ Installation of a vacuum suction system for efficient removal of chips
Support and Removal of the Canister Lid Section	① Provision of a support mechanism to prevent displacement or accidental drop of the severed canister lid section after cutting ② Provision of a safe lifting and transfer mechanism for removal of the severed canister lid section	① Securing the canister lid during cutting by attaching an adapter or other fixture to the threaded connection points on the lid ②-1 Utilizing a crane for lifting after attaching the adapter to the threaded connection points on the canister lid ②-2 Attaching alternative lifting and transfer-compatible devices to facilitate removal

3. 캐니스터 뚜껑 절단 설비 개념(안)

3.1. 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 설비 구성

본 절에서는 앞에서 요약한 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 요구 기능을 토대로 캐니스터 뚜껑 절단 설비의 개념을 제시하고자 한다. 캐니스터 뚜껑 절단 구역에는 유지보수를 위한 작업자 출입을 제외하고는 접근이 제한되므로, 설비의 원격 작업이 용이하도록 구성과 배치가 이루어져야 한다. Table 2에는 캐니스터 뚜껑 절단 구역에서 필요한 설비의 목록과 각 설비가 수행하는 기능을 나열하였다. 본 절에서 제시하는 절단 구역 설비는 Table 1의 캐니스터 인양 수단을 캐니스터 인양 캔을 활용하는 방법으로, 캐니스터의 절단 수단은 냉간 저속 기계적 절단 방식 가운데 클램쉘 방식을, 그리고 캐니스터 뚜껑부 지지는 캐니스터 뚜껑에 자동으로 체결될 수 있는 기계적 장치를 포함한 이송 및 인양 기능을 가지는 설비를 적용하였다. Table 2에 포함된 설비는 캐니스터 뚜껑 절단 공정에 직접 활용되는 설비 위주이며, 내부 온도 측정이나 제염, 절단 칩 진공흡입기 등 부수적인 기능 수행을 위해 필요한 설비나 설비가 출입하는 곳의 해치 설비 등은 포함하지 않았다. 포함되지 않은 설비들의 설계 사례는 국외 자료에서 충분히 참고할 수 있을 것이다[21].

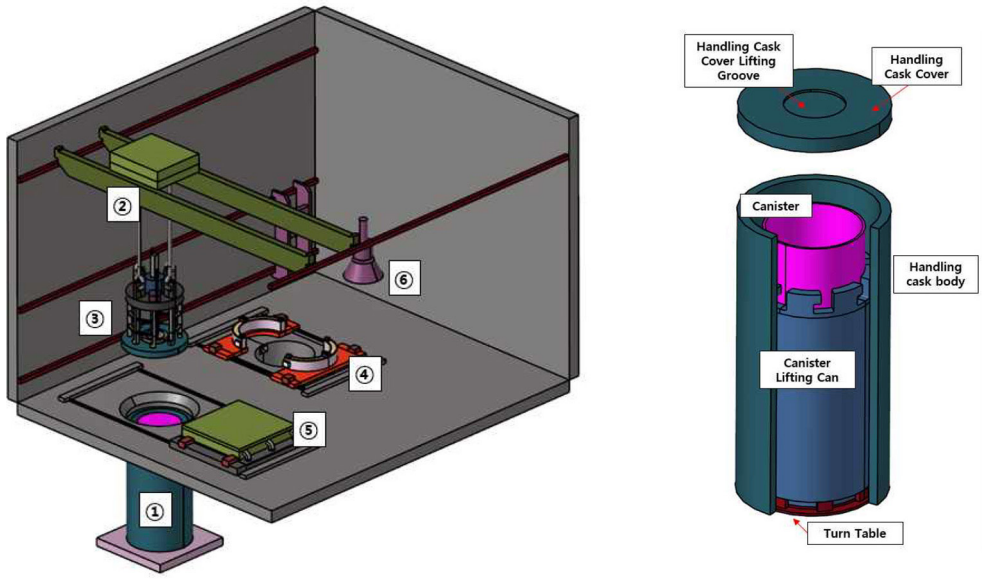
3.2. 캐니스터 뚜껑 절단 구역 설비의 개념설계(안)

Fig. 6(a)는 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 설비 구성과 배치를 나타낸다. 캐니스터 절단 구역에는 바닥면에 취급용기(①)와의 결합과 기밀 상태 유지를 수행하는 결합 스테이션(Docking station)이 위치하며, 결합 스테이션은 다중 밀폐 기능이 있어 취급용기가 결합된 후 기밀이 유지되도록 하는 기능을 수행한다. 결합 스테이션 위에는 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 슬라이드(⑤)가 가이드 레일을 따라 운행하며, 절단 작업 중 결합 스테이션 상단 부를 보호하게 된다. 상단에는 인양 크레인(②)이 설치되어 있으며, 인양 크레인에는 취급용기 뚜껑과 캐니스터 인양 캔을 모두 인양할 수 있는 어댑터/요크 설비(③)가 결합되어 있는 상태이다. 이 인양 설비를 이용해 취급용기의 뚜껑을 먼저 인양하여 뚜껑 보관 설비 안에 안착시키고, 이후 캐니스터 인양 캔을 인양하여 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션(④)으로 옮긴다. 절단 구역의 측면 부에는 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비(⑥)가 위치하며, 측면부에 설치된 가이드 레일을 따라 왕복 이송이 가능하다. 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비는 자체적으로 승하강이 가능하여 캐니스터 절단 스테이션에 안착된 상태의 사용후핵연료 캐니스터 뚜껑에 결합된다.

Fig. 6(b)는 취급용기와 캐니스터 인양 캔의 형상을 보여준다. 취급용기의 상세한 개념설계는 본 연구에서는 제시하지 않으나, 취급용기와 그 뚜껑은 사용후핵연료의 인출을 위해 절단 개봉된 상태의 사용후핵연료 캐니스터를 내부에 보관하고 타 구역으로 이송 가능토록 최소한의 격납과 차폐를 수행할 수 있게 설계한다. 개봉된 상태의 캐니스터를 내부에 적재한 이후에는 취급용기 뚜

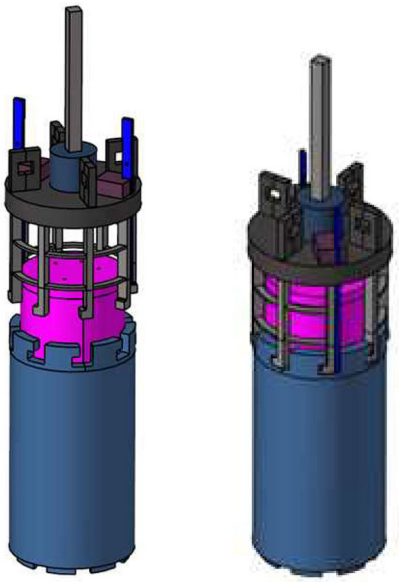
Table 2. Configuration and functions of equipment in the canister lid cutting area

Equipment	Function
① Canister Lifting Can	▪ Equipment used to lift the canister out of the handling cask for cutting operations within the canister lid cutting area ▪ Cylindrical container with an open top capable of storing the canister internally, featuring attachment points at the upper edge designed to connect with lifting equipment
② Lifting Crane	▪ Enables lifting of both the external lid of the handling cask and the internal canister lifting can, allowing horizontal and longitudinal transfer
③ Lifting Adaptor/Yoke	▪ Mounted on a lifting crane and connected to the fastening points of the handling cask external lid and the canister lifting can for lifting operations
④ Canister Cutting Station	▪ Provides a stable seating position for the canister lifting can during cutting operations, with an internally installed tilt correction device to ensure alignment ▪ The cutting equipment contacts the canister from both external directions via sliding mechanisms; the sliding pads equipped with cutting equipment adhere closely to the canister surface to prevent chips generated during cutting from entering the cutting station interior ▪ After the cutting equipment is secured and fixed automatically upon close contact with the cutting station, external surface cutting commences
⑤ Handling Cask Cover Storing and Area Sealing Device	▪ The cutting equipment transfers via sliding motion, with the handling cask lid stored internally to prevent contamination ▪ The coupling interface of the handling cask is sealed during cutting operations to prevent contamination of the cask interior by radioactive materials and cutting chips
⑥ Canister Lid Support and Lifting Device	▪ To prevent detachment and dropping of the canister lid after cutting, the lid's threaded connection is automatically engaged and supported during cutting operations ▪ Upon completion of cutting, the severed canister lid section is lifted and transferred out for removal



(a) (b)

Fig. 6. (a) Configuration of Canister Lid Cutting Area: ① Handling Cask, ② Lifting Crane, ③ Lifting Adaptor/Yoke, ④ Canister Cutting Station, ⑤ Handling Cask Cover Storing and Area Sealing Device, ⑥ Canister Lid Support and Lifting Device, (b) Configuration of Handling Cask and Canister Lifting Can



(a) Before coupling (b) After coupling

Fig. 7. Shape of Lifting Device for Canister Lifting Can

껑을 덮고 볼트로 체결한다. 캐니스터 인양 캔 상단 모서리에는 인양설비의 체결 고리(Hook)가 결합될 수 있도록 다수의 'ㄱ'자 형상의 요철을 가진다. 취급 용기 하단부에는 회전 테이블이 있으며, 회전 테이블은 인양 설비의 고리가 삽입된 후 약간의 회전을 통해 체결이 이루어지도록 하는 역할을 한다.

3.1.1. 캐니스터 인양 캔 인양 설비

Fig. 7은 캐니스터 인양 캔과 그것을 인양하는 설비가 체결되는 모습을 나타낸 것이다. 인양 설비에는 다수의 고리가 있어 이를 캐니스터 인양 캔에 위치한 'ㄱ'자 요철에 삽입시키고 바닥면의 회전 테이블을 회전시켜 결합을 완성시킨다. 이후에는 두 개의 체결 고리 이탈 방지 키를 아래로 하강·삽입하여 체결 고리를 고정한다. 인양 설비의 중앙에는 별도의 취급용기 뚜껑 인양 장치가 포함되어 있어, 취급용기 뚜껑 가운데에 위치한 인양 홈(Groove)에 결합할 수 있도록 하였다.

3.1.2. 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 슬라이드

Fig. 8은 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 슬라이드의 형상을 보여준다. 이 설비는 취급용기의 뚜껑을 안착시킬 수 있는 보관함을 포함하고 있으며, 바퀴로 구동되어 바닥의 레일을 따라 움직인다. 절단 작업 중에는 공간으로 방출되는 방사성물질로부터 취급용기의 추가적인 오염을 방지하고, 또한 절삭 칩들이 취급용기 내부로 침투하는 것을 방지하기 위해 취급용기 결합 스테이션 위에 위치하도록 한다.

3.1.3. 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션

Fig. 9는 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션의 형상을 보여준다. 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션은 캐니스터 뚜껑 절단 구역 바닥에 위치하며, 구역 바깥쪽으로 돌출되어 캐니스터 인양 캔이 삽입될 수 있도록 한다. 절단 스테이션 내부 바닥에는 회전 테이블이 설치되

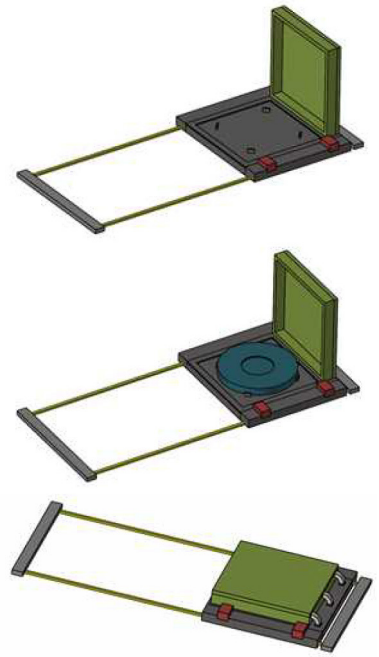


Fig. 8. Shape of Handling Cask Cover Storing and Area Sealing Device

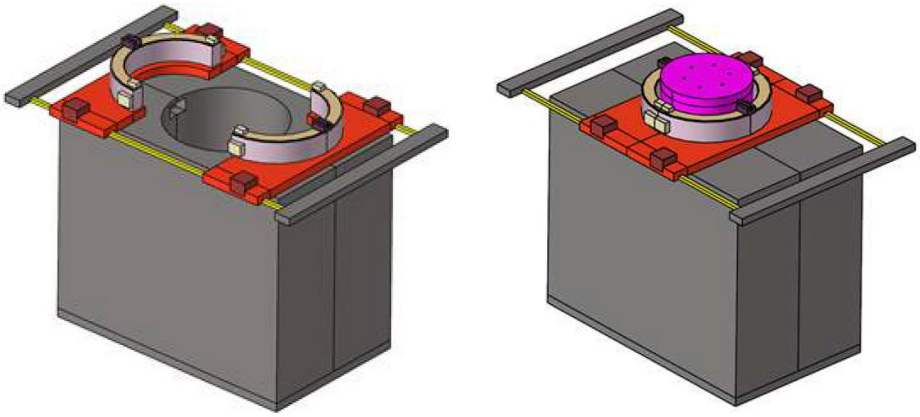
어 있으며, 인양 설비를 이용해 캐니스터 인양 캔을 안착시킨 이후에 인양 고리 이탈 방지 키가 다시 상승하고 나면 테이블이 회전하여 인양 고리가 결합 해제될 수 있도록 한다.

캐니스터 뚜껑부 절단은 클램쉘 절단 설비를 이용하며, 클램쉘은 두 개의 설비로 분리되어 있어 결합 고정된 후 절단 공구가 고리 형태의 회전 면을 따라 회전하며 절단을 수행한다. 캐니스터 뚜껑부 절단을 위해 클램쉘 절단 설비가 부착된 두 개 슬라이드 판이 캐니스터 인양 캔 삽입구 양쪽에서 가이드 레일을 따라 이동해 결합한다. 이 슬라이드 판은 캐니스터 본체에 밀착되어 절단 작업 중에 발생하는 절삭 칩들이 스테이션 내부로 침투하지 않도록 한다. 본 개념설계에는 반영되지 않았지만, 클램쉘 절단 공구 주변에 절삭 칩 흡입기를 설치하여 주변에 분사된 절삭 칩들을 제거하도록 한다.

3.1.4. 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비

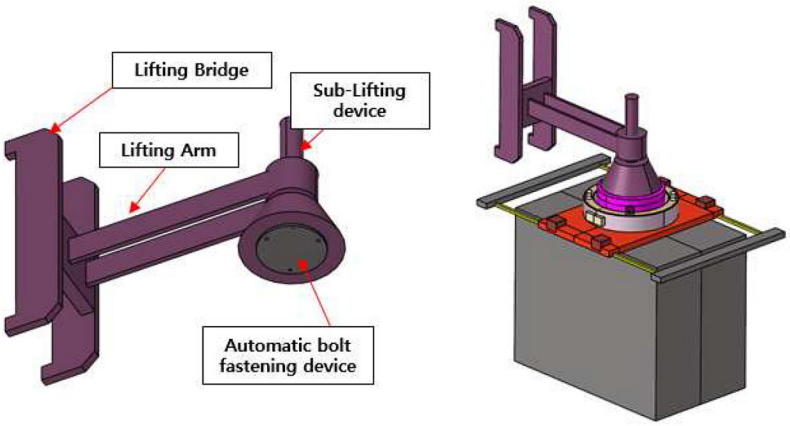
Fig. 10(a)는 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비를 나타낸다. 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 한 측면에 설치된 가이드 레일을 따라 브릿지(Bridge)가 좌우로 이송되며, 이 브릿지 위에서 상하 운동을 하는 암(Arm)이 달려 있다. 암의 끝에는 다시 보조 승하강 운동을 할 수 있는 인양 장치가 매달려 있으며, 이 인양 장치 아래에는 캐니스터 뚜껑 상단면의 볼트 체결 구와 자동으로 결합할 수 있는 자동 볼트 체결 장치가 있다.

먼저 캐니스터 인양 캔이 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션 안에 안착이 되면, 클램쉘 절단 설비가 좌우에서 결합되어 캐니스터를 고정시킨다. 이후에 캐니스터 뚜껑지지 및 인양 설비가 캐니스터 상단 면 위로 이동한 다음, 암을 하강시켜 자동 볼트 체결 장치를 캐니스터 뚜껑과 밀착시킨다. 이후에 자동 볼트 체결 장치를 이용해 설비와 캐니스터 뚜껑부를 완전히 체결시키게 된다. 절단 작업이 진행되는 동안에는 체결 상태를 계속해서 유지하고 있으며, 캐니스터 뚜껑부가 완전히 절단되면 본 설비가 절단된 뚜껑을 지지하고 인양 상태를 유지한다. 이후 캐니스터의 절단된 뚜껑을 매단 상태로 설비가 한쪽 켠으로 비켜난 다음 절단된 캐니스터를 담고 있는 캐니스터 인양 캔을 다시 구역 외부로 반출하고, 마지막으로 절단된 캐니스터 절단 뚜껑을 구역 외부로 반출한다. 이때는 보조 승하강 설비(Sub-lifting device)를 이용해 절단 뚜껑을 추가적으로 하강시켜 구역 외부 반출 설비 위에 안정적으로 안착시킬 수 있도록 한다. 절단된 뚜껑이 안착된 후에는 자동 볼트 체결 장치를 해제시켜 뚜껑과 완전히 분리되도록 한다.



(a) Before cutting operation (b) During cutting operation

Fig. 9. Shape of Canister Cutting Station



(a) (b)

Fig. 10. Shape of Canister Lid Support and Lifting Device

4. 캐니스터 뚜껑 절단 공정

Table 2에 제시된 설비들을 활용한 캐니스터 뚜껑 절단 구역에서의 작업 공정을 순차적으로 정리하면 아래와 같으며, Fig. 11은 캐니스터 뚜껑 절단 공정을 그림으로 요약해서 나타낸 것이다.

① 취급용기 이송 트롤리를 캐니스터 뚜껑 절단 구역으로 이동시킨 후 인양 베드(Bed)를 상승시켜 취급용기를 캐니스터 뚜껑 절단 구역에 결합한다(Fig. 11(a)-①).

② 절단 구역의 기밀 유지 장치를 작동시켜 기밀이 유지된 것을 확인한다. 인양설비를 이용해 먼저 취급용기 외부 뚜껑을 인양한 다음 취급용기 뚜껑 보관 설비의 보관함에 안착시킨다. 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비의 보관함을 닫는다(Fig. 11(a)-②).

③ 인양설비를 이용해 취급용기 안의 캐니스터 인양 캔의 'ㄱ'자 요철에 체결 고리를 삽입한다. 취급용기 하단부 회전베드를 회전시켜 고리를 체결시키고, 고리 이탈 방지 키를 삽입한다.

④ 캐니스터 인양 캔을 인양하고 이를 캐니스터 뚜껑 절단 스테이션 내부의 베드에 안착시킨다. 안착이 완료되면 체결 고리 이탈 방지 키를 빼고 베드 위의 회전 테이블을 회전시켜 인양설비의 체결을 해제시킨다(Fig. 11(a)-③, (b)-①).

⑤ 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비를 이동시켜 취급용기 결합 입구를 막는다(Fig. 11(b)-②).

⑥ 절단용 베드 내부의 회전 테이블의 기울기 조절 장치로 캐니스터의 수평 높이를 보정한다.

⑦ 절단 스테이션의 클렘쉘 절단 설비 부착 패드를 이동시켜 캐니스터에 밀착되도록 한다. 클램쉘 절단 설비의 결합 고정 설비를 작동시켜 설비가 단단히 고정되도록 한다.

⑧ 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비를 캐니스터 위로 이동시킨 다음 암을 하강시켜, 자동 볼트 체결 설비가 캐니스터 뚜껑부에 밀착되도록 한다. 회전 베드를 이용해 볼트 체결구 위치를 맞춘 다음 자동 볼트 체결 설비를 가동시켜 설비와 캐니스터 뚜껑을 결합한다(Fig. 11(c)-①).

⑨ 클램쉘 공구를 회전시키면서 캐니스터 뚜껑부 측면을 절단한다. 절단 과정에서 발생된 칩은 진공 흡입기로 제거한다(Fig. 11(c)-②).

⑩ 절단이 완료되면 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비의 암을 들어올려 절단된 캐니스터 뚜껑을 분리하고 원래 위치로 이동하여 대기한다(Fig. 11(d)-①).

⑪ 클램쉘 절단 설비 주변의 절삭 칩들을 청소하고 절단 칩 침투 방지 패드 위가 깨끗한 것을 확인한 다음, 클램쉘 결합 고정 설비를 해제하고 절단 설비 패드를 좌우로 개봉한다.

⑫ 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비를 이동시켜 취급용기 결합 입구를 개봉한다.

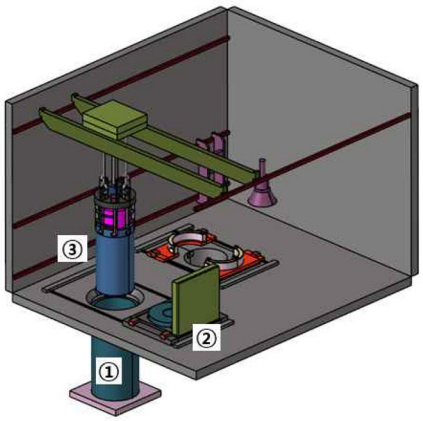
⑬ 인양 설비를 이동시켜 캐니스터 인양 캔을 들어 올린 다음, 취급용기 결합 입구로 이송하여 취급용기 내부에 안착시킨다. 인양 설비의 체결을 해제한다(Fig. 11(d)-②).

⑭ 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비의 보관함을 열고 인양 설비를 그 위로 이동시켜, 취급용기 뚜껑을 들어 올린다. 취급용기 뚜껑을 취급용기 위에 덮고 볼트 체결을 통해 격납 상태로 만든다(Fig. 11(e)-①).

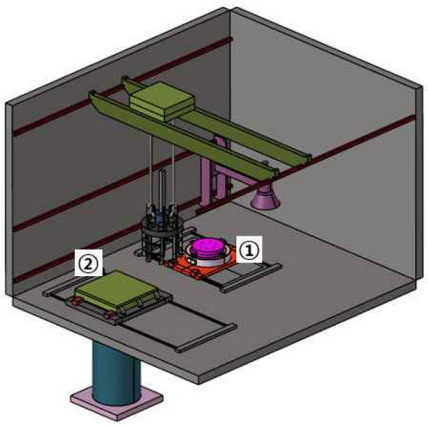
⑮ 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비를 이동시켜 취급용기 결합 입구를 밀폐하고 결합 입구 기밀 유지 설비를 가동하여 밀폐상태로 만든다.

⑯ 취급용기 이송 트롤리의 인양 베드를 하강시켜 취급용기 결합을 해제시키고 캐니스터 절단 뚜껑 보관 설비를 상승시켜 구역에 결합한다. 기밀 유지 설비를 가동하여 구역의 기밀이 유지됨을 확인한다(Fig. 11(e)-②).

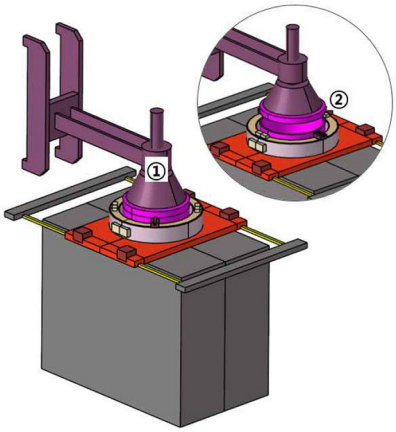
⑰ 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비를 이동시켜 취급용기 결합 입구를 개봉한다. 절단된 캐니스터 뚜껑을 인양하고 있는 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비를 취급용기 결합 입구



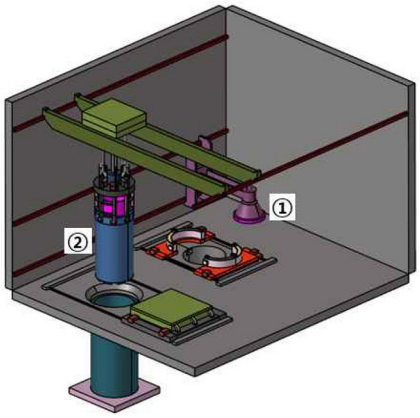
(a) ① After the handling cask is docked to the zone, ② Storing the handling cask cover and ③ lifting the canister lifting can after docking the handling cask



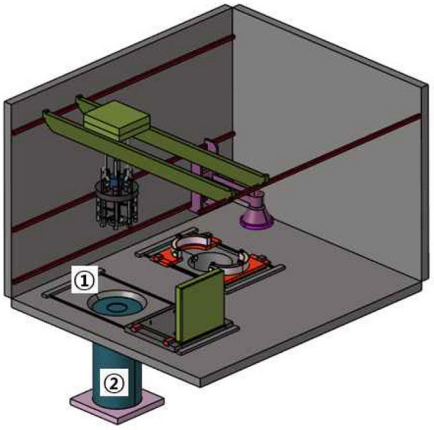
(b) ① Seating the canister lifting can at canister cutting station, and ② sealing the docking station by the handling cask cover storing and area sealing device



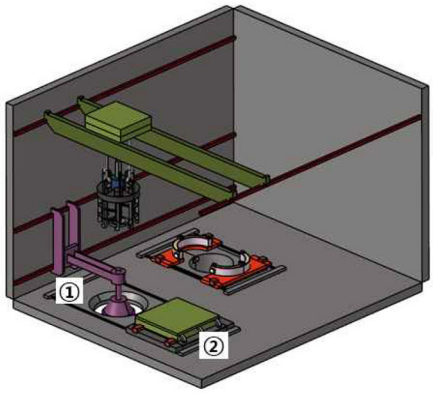
(c) ① Combining the canister lid support and lifting device with the canister lid, and then ② cutting the canister lid section



(d) ① Move the canister lid support and lifting device to one side, and ② transferring the canister lifting can into the handling cask after cutting the canister lid



(e) After ① installing the handling cask cover, ② undocking the handling cask



(f) ① Transferring and taking out the cutted canister lid, and then ② sealing the docking station by the handling cask cover storing and area sealing device

Fig. 11. Work process in canister lid cutting area

위로 이동시킨다.

⑱ 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비의 암을 최대한 하강시킨 다음, 보조 승하강 설비를 하강시켜 절단된 캐니스터 뚜껑을 절단 뚜껑 보관 설비 위에 안착시킨다. 자동 볼트 체결 설비를 가동하여 캐니스터 뚜껑에 결합된 볼트의 결합을 해제시킨다(Fig. 11(f)-①).

⑲ 절단된 캐니스터 뚜껑과 분리가 완료되면, 캐니스터 뚜껑 지지 및 인양 설비의 암을 상승시킨 다음, 원래 위치로 복귀시킨다. 취급용기 뚜껑 보관 및 구역 밀폐 설비를 이동시켜 취급용기 결합 입구를 밀폐하고 결합 입구 기밀 유지 설비를 가동하여 밀폐상태로 만든다(Fig. 11(f)-②).

⑳ 취급용기 이송 트롤리의 결합을 해제하고 절단된 캐니스터를 보관한 취급용기를 다음 구역으로 이송한다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 경수로 사용후핵연료 재포장 시설에서 사용후핵연료가 적재된 저장 캐니스터의 뚜껑부를 절단하는 구역의 설비 구성과 요구되는 기능에 대해 제시하였다. 사용후핵연료 캐니스터 뚜껑 절단 작업의 목적을 달성하기 위해 고려해야 하는 사항을 절단 구역의 환경, 캐니스터의 인양과 절단 방법, 절단된 캐니스터 뚜껑의 인양 및 반출 방법 등으로 분류한 다음, 여기에 요구되는 기능을 나열하고 이에 대한 분석과 설계 대안을 서술하였다. 이와 더불어 설계 대안을 반영하여 캐니스터 뚜껑 절단 설비 구성을 제안하고, 기능 수행에 적합한 설비들의 형상적 개념과 전반적인 구역의 운영절차를 제시하였다.

캐니스터 뚜껑 절단 구역에는 방사선 환경으로 인해 작업자 출입이 제한되므로, 설비의 개념은 다소 효율이 떨어지더라도 안전성을 고려하고 원격 작업이 가능한 방향으로 도출하였다. 예를 들어 인양 설비의 경우 돌출된 인양부(Trunnion)에 고리를 걸어 인양하는 방법을 적용하면 원격 작업이 어렵거나 고리 체결을 위해 취급용기의 공간이 커지는 등의 문제점이 예상되어, 최대한 인양 설비의 움직임을 최소화하고 회전 테이블이라는 보조 수단을 활용하는 방식을 채택하였다. 절단 수단의 경우 절삭물의 분사 최소화에 가장 초점을 두었는데, 그 이유는 절단 구역이 고방사선 구역이므로 구역 내 오염을 최소화하거나 절삭물 제거 작업을 용이하게 하는 것이 구역 정비를 위한 작업자의 출입 가능성을 줄여 피폭 위험도를 줄일 수 있는 최선의 방법이기 때문이다.

본 연구에서는 캐니스터 절단 구역에서 핵심 기능을 수행하는 설비의 개념 제안에 초점을 두었으나, 구역의 유지보수를 수행하는 보조설비에 대한 연구도 필요하다. 예를 들어 클램쉘 절단 설비는 자동화하여 절단 작업을 수행하기 용이하고 절삭물 발생 양상이 단순하여 구역 오염 가능성이 낮지만, 절삭 칩 형태가 긴 나선형이므로 단순히 진공 흡입기만으로는 제거하기 어려울 수 있다. 절삭 칩들을 사전에 잘 제거하지 않으면 자동화 설비의 운영 시 여러 문제점을 일으킬 수 있는 요인이 될 수 있으므로 이러한 부분도 세심하게 설계해야 할 것이다. 한편으로는 사용후핵연료 캐니스터 뚜껑을 절단함으로써 상온의 공기 중에 결함을 가진 사용후핵연료가 노출될 경우 발생하는 문제점에 대해서도 제기될 수 있다. 따라서 캐니스터 뚜껑 절단 구역의 공기 환경을 불활성 기체로 채울 것인지, 그리고 캐니스터 뚜껑 절단 구역 안에 결함핵연료를 캐닝(Canning)하는 보수 설비도 갖추어야 할 것인지에 대해서도 향후 추가 연구를 통해 고려해 볼 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내의 사용후핵연료 관리 여건상 불가피하게 수행하게 될 것으로 예상되는 캐니스터 뚜껑 절단 과정을 체계적으로 수행할 수 있는 시스템을 고안하고 제안하였다. 캐니스터 뚜껑 절단 구역과 같이 사용후핵연료에 직접 노출되는 고방사선 환경은 무엇보다 작업자의 안전을 위해 최대한 접근 필요성이 없도록 자동화된 설비들만이 기능하는 구역으로 설계되는 것이 중요하다. 본 연구는 이러한 점을 고려하여 아직 국내외에서 시도되지 않은 건식환경에서의 캐니스터 절단 구역 설비의 개념을 도출함으로써, 미래의 국내 고준위방폐물관리사업에 필요한 기술을 선제적으로 확보하는데 기여할 수 있다.

비록 건식환경에서 사용후핵연료가 적재된 캐니스터의 뚜껑부 절단과 관련된 기존 연구 사례를 찾아보기 힘들어 본 연구에서 제안된 방법의 효율성이나 기술적 실용성을 비교하는데 한계가 있으나, 이는 향후 직접 개발을 통한 실증연구를 착수하는 시점에서 상세 분석과 보완이 이루어져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술평가원 기술개발과제 (No. RS-2021-KP002663)의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2001. RD&D-Programme 2001: Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, SKB TR-03-30.
2. Raikko H. 2005. Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report, POSIVA 2005-02.
3. Raikko H. 2012. Canister Design 2012, POSIVA 2012-13.
4. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2002. Deep repository and encapsulation plant for spent nuclear fuel, SKB Rapport R-02-48.
5. Nyström A, Svensk Kärnbränslehantering AB. 2007. Encapsulation plant at Forsmark, SKB Rapport R-07-36.
6. Kukkola T. 2006. Encapsulation Plant Preliminary Design, Phase 2, Posiva Working Report 2006-95.
7. Kukkola T. 2012. Encapsulation Plant Design 2012, Posiva Working Report 2012-49.

8. US DOE. 1998. Preliminary Design Concept for the Repository and Waste Package, DOE/RW-0508/V2.
9. US DOE. 2008. Yucca Mountain Repository License Application – Safety Analysis Report, DOE/RW-0573.
10. US DOE. 1996. Dry Transfer System – Topical Safety Analysis Report, DOE-DTS-TSAR.
11. Naserifard N, Lee A, Birch K, Chiu A and Zhang X. 2021. Deep Geological Repository Conceptu\-al Design Report – Crystalline/Sedimentary Rock Environment, NWMO APM-REP-00440-0211-R000.
12. Lee JY, Choi HJ, Choi JW, Kim SK and Cho DG. 2007. Korean Reference HLW Disposal System – The concept of above ground facility and the analyses of the factor for the cost estimation, KAERI/TR-3455/2007.
13. Choi HJ, Lee JY, Cho DG, Kim SK, Kim SS, Kim KY, Jeong JT, Lee MS, Choi JW, Lee JW, Jeon GS and Kim PO. 2008. Korean Reference HLW Disposal System, KAERI/TR-3563/2008.
14. Lee SH, Shin CM, Kang HG, Kim SH and Moon TC. 2023. Study on Concept of Encapsulation Plant for PWR Spent Nuclear Fuel, *Journal of Radiation Industry*, **17**(4):519-532.
15. Atomic Energy Promotion Committee Deliberation No. 2. 2024. R&D roadmap for high-level radioactive waste.
16. US NRC. 2019. Special Inspection Activities Regarding Cask Loading Misalignment – Frequently asked Questions, Document No. ML20118D074.
17. Einziger RE. 1986. Oxidation of spent fuel at between 250 and 360ºC, EPRI-NP-4524.
18. EPRI. 1998. TMI-1 Cycle 10 Fuel Rod Failures, Volume 2: Hot Cell Examinations, EPRI Report TR-108784-V2.
19. Ranta-aho A. 2008. Review of the Radiation Protection Calculations for the Encapsulation Plant, Posiva Working Report 2008-63.
20. Bader S. 2020. Optimization of Dry Storage Canister Cutting Operations, WM2020 Conference.
21. Suikki M. 2013. Fuel Handling Machine and Auxiliary Systems for a Fuel Handling Cell, Posiva Working Report 2012-54.