

연구로 2호기 (TRIGA Mark-III) 해체 계획 Decommissioning Plan for the TRIGA Mark-III

박승국, 정운수, 정경환, 백삼태, 정기정,
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로 2호기는 1969년 건설을 시작하여, 1972년 첫 임계에 도달한 우리나라 두 번째의 연구용 원자로이다. 그러나 하나로로 정상가동으로 인하여 1995년 12월 30일 운전을 정지하고, 1996년 제염·해체(폐로)하기로 결정하였다. 제염·해체공사는 국내 법규 및 국제 규제요건에 따라 수행될 예정이다. 제안된 해체방법은 작업자 피폭선량과 기체상 방사성물질의 방출을 ALARA 원칙에 따라 최소화함으로써, 작업자 환경을 보호하고, 나아가 방사성 폐기물 발생량을 가능한 한 최소화하도록 하였다. 시설내의 방사능이나 오염도는 일부 높은 지역을 제외하고는 상대적으로 낮기 때문에 해체공사는 대부분 일반적인 산업장비들을 이용하여 안전하게 수행될 수 있을 것으로 판단하였다. 또한 가능한 한 기존 원자로실 크레인이나 환기설비 같은 시설들을 최대한 활용하고 필요시 보완하여 운영함으로써, 시설내에 새로운 장비의 설치는 최대한 배제할 계획이다. 특히, 원자로 구조의 방사화된 콘크리트 철거 시에는 임시격납시설과 별도의 환기장치를 설치하여 오염확산을 방지 할 예정으로 있다. 본 고에서는 연구로 2호기 구조에 대해 개괄적으로 설명하고, 주요 단계별로 검토되고 있는 제염·해체 방법에 대하여 논하였다.

Abstract

TRIGA Mark-III(KRR-2) is the second research reactor in Korea. Construction of KRR-2 was started in 1969 and first criticality was achieved in 1972. After 24 years operation, KRR-2 has stopped its operation at the end of 1995 due to normal operation of HANARO. KRR-2 was then decided to decommission in 1996 by government. Decontamination and decommissioning (D&D) will be conducted in accordance with domestic laws and international regulations. Selected method of D&D will be devoted to protect workers and environment and to minimize radioactive wastes produced. The major D&D work will be conducted safely by using conventional industrial equipment because of relatively low radioactivity and contamination in the facility. When removing activated concrete from reactor pool, it will be installed a temporary containment and ventilation system. In this paper, structure of KRR-2 and method of D&D in each step are presented and discussed.

1. 서 론

연구로 2호기는 1호기의 운영상 불편함과 향후 장래성을 고려한 대응량의 것으로 계획

하였으나, 예산 및 현실적인 문제 등을 감안 2 MW급으로 결정되었고, 종합적인 검토 끝에 1호기와 같은 TRIGA 형 연구로로 결정하였다. 1968년과 1969년 2차에 걸친 GA사와의 구매 계약 끝에 건물 설계 및 건물 기공식을 가졌고, 1970년에 3차 계약으로 원자로 본체 건조에 착공하였다. 1971년 원자로 본체 및 건물이 준공되어, 그 이듬해인 1972년 3월 19일 임계에도달하였다. 그 후 1995년 12월 31일 운전이 정지되기까지 약 24년 동안 총 55,000 시간 운전되었으며, 발생한 총 열출력은 약 69,000 MWh 이었다.

본 연구로 2호기도 1호기와 마찬가지로 대전의 하나로 정상가동으로 인하여 그 효율성을 상실, 가동을 정지하였고 1997년부터 정부의 기관고유사업으로 TRIGA 연구로 폐로사업이 추진되고 있다. 현재 해체설계를 종료하여 인허가 신청 중으로 금년 10월경에는 해체공사 허가를 받아, 금년 말부터는 본격적인 해체 철거 공사에 착수 할 계획으로 있다.

2. 시설내용

2.1 원자로 노심

알루미늄재질의 원통형 Shroud로 구성된 노심은 Movable Bridge에 연결된 2개의 알루미늄 채널에 의해 원자로 수조 바닥으로부터 94cm 떨어진 위치에서 Exposure Room, 수조 중앙의 회전시료조사대 조사위치 및 빔 포트 조사위치 등의 3곳으로 이동할 수 있게 되어 있다. 노심은 원통형구조로, Shroud에 고정된 상부 및 하부 지지판에 의해 핵연료봉, Central Thimble 및 Fission Chamber 등이 위치해 있다. 원자로 수조 차폐벽체 내에는 4개의 원형 빔포트, 2개의 관통형 빔포트 및 4개의 열중성자 조사용 빔포트가 설치되어 있다.

2.2 원자로 차폐구조 및 원자로 탱크

연구로 2호기의 원자로 수조는 <그림 1>에 나타난 바와 같이 콘크리트 차폐구조로 되어 있으며, 크기는 폭 9.7m, 길이 17.4m, 높이 8.0m 이다. 콘크리트 차폐체는 일반콘크리트이며, 벽체 두께는 약 180~330cm이고 바닥두께는 150cm 이다. 수조내부에는 알루미늄 재질로 라이닝이 되어있고, 수조 상부의 끝단부위는 5cm x 5cm 규격의 알루미늄 Channel이 핵연료저장랙(Fuel Storage Rack) 및 각종 조사장치들을 고정시키기 위해 설치되어 있다.

2.3 조사실(Exposure Room)

연구로 2호기에는 큰 부피의 조사물 또는 시편을 높은 에너지의 중성자와 감마선속에서 조사시키기 위한 조사실이 있다. 조사실은 가로 305cm, 세로 366cm, 높이 274cm의 내부공간을 가진 방으로서, 두께 335cm의 일반콘크리트로 차폐되어 있다. 또한, 콘크리트의 방사화를 방지하기 위해 내부벽체 및 천장은 30.5cm 두께의 Boron으로 처리되어 있다. 조사실내에는 시험기기 및 전등에 전원을 공급하기 위한 Conduit 9개, 공기공급 및 배기를 위한 6인치 배관 2개가 콘크리트 차폐체내에 묻혀있다. 공기공급라인의 조사실내 끝단에는 필터가 장착되어 있고 배기라인은 원자로실의 환기계통으로 연결되어 있다. 조사실내의 주위벽에는 원자로 냉각수 정화계통의 일부를 조사실 내부벽체의 냉각을 위한 Shield Cooling System을 두었으며, 이 계통의 배관들은 차폐콘크리트의 Boron 영역에 묻혀있다. 조사실의 출입구에는 모터구동 차폐문이 설치되어 있는데, 차폐문은 다른 벽과 마찬가지로 안쪽의 30.5cm는 Boron으로 구성되어 있다. 차폐문은 Steel Angle로 짜여져 있으나, 안쪽의 122cm는 방사화를 막기 위해 알루미늄 Angle로 구성되어 있다. 차폐문의 총중량은 약 50톤 정도이다.

2.4 빔포트(Beam Port)

연구로 2호기에는 <그림 1>과 같이 노심쪽으로 직경이 15.2cm인 원형 빔포트(Radial Beam Port) 4개와 직경이 20.3cm인 관통형 빔포트(Through Beam Port) 2개가 설치되어 있고, 2개의 Thermal Column Access Port가 Thermal Column의 Hohlräum 방향으로 설치되어 있다. 4개의 원형 빔포트의 노심쪽 부분은 알루미늄재질로 만들어져 원자로 수조 라이너와 Thermal Column에 각각 용접되어 있고, 바깥쪽 부분은 스테인레스 스틸로 구성되어 있다. 관통형 빔포트 2개는 크기만 다를 뿐, 원형 빔포트와 마찬가지로 노심 쪽과 바깥 쪽이 각각 알루미늄과 스테인레스 스틸로 구성되어 있고, 이들은 Thermal Column 끝부분에서 서로 교차되어 설치되어 있다. 원형 빔포트는 원자로심 안쪽으로부터 흑연플러그(Graphite plug), 22.9cm 길이의 스틸 플러그(Steel Plug) 3개 및 나무 플러그(Wood Plug)로 구성된 5개의 차폐 플러그로 차폐되어 있고, 관통형 빔포트는 원형 빔포트와 같은 구성이나 중간의 스틸 플러그를 2개만 사용하여 차폐되어 있다.

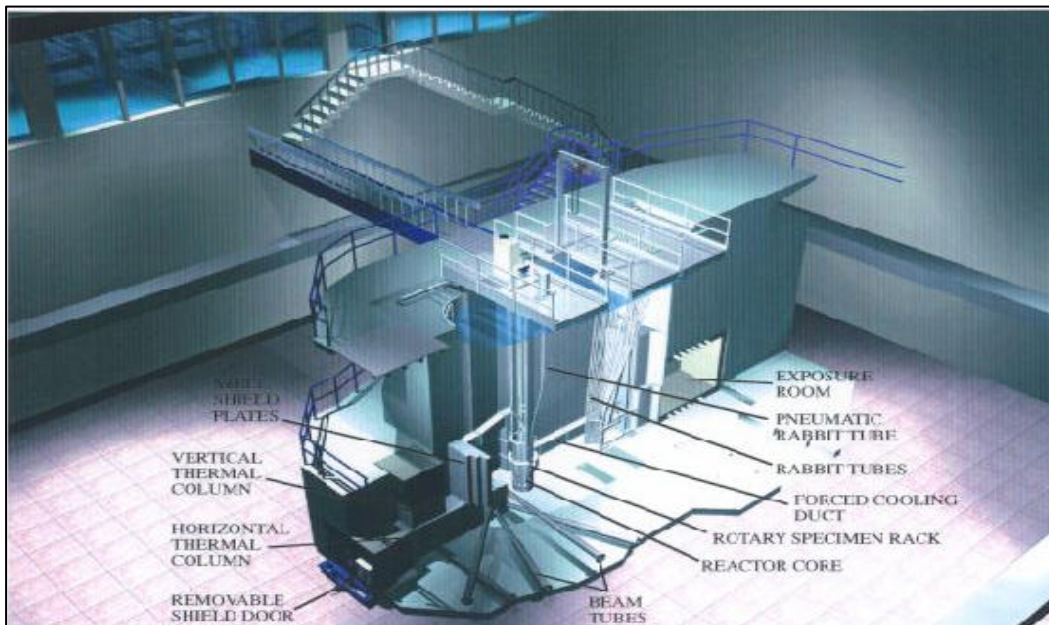


그림 1. 연구로 2호기 구조

2.5 Thermal Column

Horizontal Thermal Column은 가로 122cm, 세로 122cm, 길이 335cm의 크기로서 0.3cm 두께의 Boral 및 5cm 두께의 폴리에틸렌으로 라이닝된 알루미늄 라이너 안에 10.2cm x 10.2cm 크기의 흑연블록과 납벽돌이 채워진 형태로 콘크리트 차폐체 내에 묻혀있다. Horizontal Thermal Column내에는 열중성자 조사를 위한 가로 91.4cm, 세로 91.4cm, 길이 106.7cm 크기의 공간(Hohlräum)이 있다. Horizontal Thermal Column에는 2개의 수평 Stringer가 있는데, 왼쪽의 Stringer는 Hohlräum에서부터 Thermal Column 끝부분까지 연결되어 있고, 아래의 Stringer는 빔튜브가 교차하는 지점까지 연결되어 있다. 또한 스테인레스 스틸로 만들어진 직경 15.2cm의 빔포트 2개가 Hohlräum 쪽으로 설치되어 있다. Horizontal Thermal Column의 바깥쪽은 137cm 두께의 고밀도(3.5 g/cm³) 콘크리트로 만들어진 모터구동 차폐문(약 20톤)으로 차폐되어 있다. Hohlräum 바로 위에는 Vertical Thermal

Column이 있다. Vertical Thermal Column은 가로 91.4cm, 세로 91.4cm, 길이 86.4cm의 크기를 갖는 알루미늄 Basket에 78.7cm 길이의 Graphite Bar가 채워진 형태이다. Vertical Thermal Column의 위에는 연구로실의 천장크레인으로 들어올릴 수 있는 일반콘크리트 재질의 차폐문(4,082 kg)에 의해 차폐되어 있다.

2.6 공기이송장치(Pneumatic Transfer System)

연구로 2호기에는 방사화분석을 위해 원자로 노심으로부터 빠른 시간에 시편을 이송하기 위한 공기이송장치가 설치되어 있다. 공기이송장치는 알루미늄관(직경 3.18cm)으로 되어있는데 노심 내의 Terminus Assembly와 지하 피트에 설치된 Blower-and-filter (현재 필터는 제거되었음) 및 화학실험실에 위치한 후드의 Receiver Assembly까지 지하 피트를 통하여 연결되어 있다.

2.7 Central Thimble

외부직경이 3.81cm, 두께가 2.1cm인 알루미늄 튜브로 구성된 Central Thimble은 최대 중성자 속에서 시편을 조사시키기 위해 원자로 상부의 이동가능 브릿지로부터 노심의 중앙지점까지 연결되어 있다.

2.8 회전시료 조사대(Rotary Specimen Rack)

회전시료조사대는 조사기간 동안 시편을 고정시키기 위한 41개의 알루미늄랙 (직경 3.2cm, 길이 27.4cm)으로 구성되어 있으며, 반지모양으로 노심 Shroud의 바깥쪽에 설치되어 있다. 회전시료조사대의 상부에는 2개의 알루미늄 탱크가 설치되어 부력작용으로 회전시료조사대를 상하로 움직일 수 있게 되어 있다. 회전시료조사대에는 시편의 삽입과 제거를 위해 내부직경이 3.4cm인 튜브가 설치되어있는데, 각 41개소의 회전시료조사대내의 조사공 위치를 지정하기 위한 Drive -and-Indicator 집합체와, 조사용기를 회전시료조사대에 삽입 및 제거하기 위한 Reel형식의 Specimen-Lifting 집합체가 이동가능 브릿지에 설치되어 있다.

2.9 원자로 수조수 냉각계통 및 정화계통

원자로 수조수 냉각계통은 펌프와 열교환기로 구성되어 있으며, 수조수 정화계통은 펌프, 스키머(Skimmer), 필터, 탈염기, 전도도계 등으로 구성되어 있다. 수조수 냉각 계통 및 정화계통은 알루미늄 배관 및 밸브 등으로 연결되어 있으며, 원자로 수조 차폐벽체 외부에 설치되어 있다. 또한, 수조수 정화계통은 연구로 2호기 조사실(Exposure Room) 차폐벽의 냉각을 위한 Shield Cooling System과 연결되어 있다.

2.10 지하 피트 및 증류수 탱크실

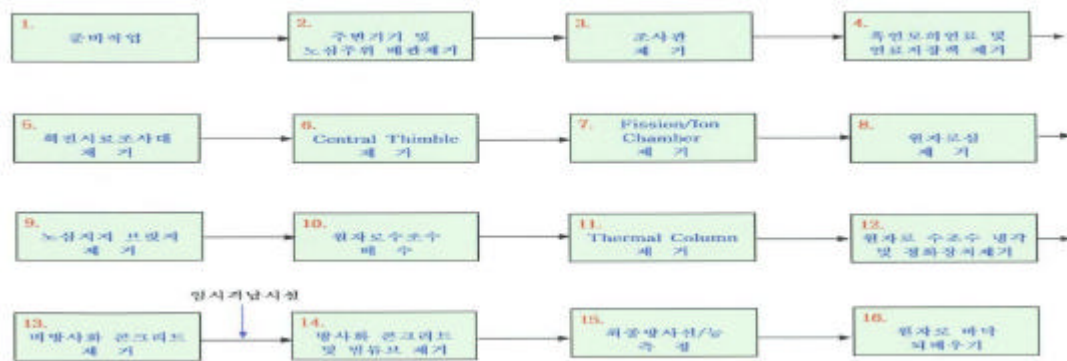
연구로 2호기 건물 지하에는 피트가 설치되어 원자로실의 환기 덕트와 각종 배관라인의 통로역할을 한다. 또한 사용후 핵연료의 저장을 위하여 연구로 2호기 동쪽 지하층에는 지하 피트와 연결되어 있는 증류수 탱크실이 있다. 증류수 탱크실에는 사용후핵연료 Cask 운반용 레일과 5톤 호이스트 및 4.9m x 4.2m의 면적에 깊이 4.9m의 콘크리트 구조로 된 증류수 탱크가 설치되어 있다.

2.11 핵연료 저장공 및 빔포트 플러그 저장랙

원자로 차폐벽 북쪽의 원자로실 바닥에는 핵연료저장랙(Fuel Storage Rack)을 보관하기 위한 핵연료 저장공(Fuel Storage Pit) 6개가 설치되어 있다. 저장공은 직경 0.25m, 깊이 3.67m인 원통형구조로 되어 있으며, 내부는 두께 3mm의 스테인레스 스틸로 판벽이 되어 있고, 그 외부는 콘크리트벽과의 사이에 아스팔트가 채워져 있다. 한편 원자로실의 동쪽끝 벽에는 빔포트 플러그를 저장하기 위한 직경 250mm와 200mm, 길이 1.8m의 Storage Vault가 각각 12개 설치되어 있다. Storage Vault는 스테인레스 스틸 배관을 콘크리트속에 매입한 형태로 설치되어 있으며, 일부 저장랙에는 원자로에서 조사되었던 모의연료가 보관되어 있다.

3. 연구로 2호기 해체 계획

연구로 2호기의 개략적 해체 순서는 다음과 같다.



3.1 준비작업

원자로상부로의 접근을 통제하기 위해 분리대를 설치하고 작업화를 갈아 신을 수 있는 설비를 설치한다. 원자로 수조 상부에는 안전벨트를 걸 수 있는 고리를 설치한다. 원자로 수조 상부와 원자로실 바닥에는 원자로 수조로부터 제거된 배관자재 또는 기기들 내부에 남아 있을 수 있는 수조수를 배수 및 건조시키는 한편 방사선/능 측정 및 분류를 위한 기기 임시저장 장소를 각각 확보한다. 기기 임시저장장소의 드립트레이(Drip Tray)에 플라스틱 커버를 씌워 오염을 방지한다.

3.2 주변기기 및 배관의 제거

원자로 수조내의 모든 느슨한 배관을 한데 묶어, 배관 절단 중에 원자로 수조에 떨어지지 않도록 하고 방사선 조사를 수행한 후 원자로 수조로부터 꺼내면서 유압전단기를 이용하여 취급하기에 적당한 길이로 절단한다. 절단된 배관은 원자로실 크레인을 이용하여 원자로실 바닥으로 내린 후 임시저장장소에서 다시 한 번 방사선조사를 수행하여 폐기물 준위를 확인하고, 유압압축기를 이용하여 감용을 시키고, 형태별, 준위별 특성에 따라 적절한 저장용기에 넣어 포장한다.

3.3 조사관의 제거

방사선조사용 시료를 노심 주위에 고정시키는 데 사용되었던 조사관을 제거하기 전에 모든 방사선원이 제거되었는지를 우선 확인하기 위해 방사선 조사를 실시할 뿐만 아니라, 원자로 운전기록을 조사하여 잠재적인 위험의 존재여부를 판단하고 필요시 내시경을 사용하여 조사관 내부를 조사한다. 만일 조사관 내에서 시료가 발견되면 분석하여 그에 상응하는 조치를 취한 후 후속 작업을 실시한다. 조사관은 브릿지에 연결되어 있으므로 이들을 한데 묶은 후 브릿지에서 떼어낸다. 그런 다음 실내 크레인을 이용하여 조사관을 들어올리면서 적당한 길이로 유압절단기로 절단한다. 이때 조사관내에 수조수가 들어 있지 않음을 확인해야 한다. 이 작업은 모든 조사관이 제거될 때까지 반복한다. 절단된 조사관은 비닐로 포장한 다음 크레인을 이용하여 원자로실 바닥으로 내리고 방사선/능 측정을 위한 시료를 채취한 후 포장용기에 수납한다.

3.4 흑연모의연료(Graphite Dummy Fuel) 및 연료저장랙의 제거

원자로 수조 내벽의 연료저장랙에는 14개의 흑연모의연료가 저장되어 있다. 모의연료를 제거하기 전에 각 연료에 대해 육안관찰 및 방사선조사를 실시하여 핵연료가 아님을 확인한다. 또한 노심 내에는 제거가 곤란한 4개의 모의핵연료가 장전된 상태에 있으므로 이들에 대해서도 동일한 검사를 실시하여 실제로 모의핵연료임을 확인해야 한다. 각 모의핵연료는 기존의 연료취급장비를 이용하여 제거하며 수조수로부터 꺼내기 전에 방사선량을 확인하여 선량이 과도할 경우에는 다시 수조수로 집어넣어야 한다. 모의연료는 비닐로 포장한 다음 원자로바닥으로 하역하여 방사성폐기물 포장용기에 수납한다. 모의연료를 모두 제거한 후에 원자로수조 상부에 매달려있는 연료저장랙을 제거하여 원자로 상부에서 필요시 절단/검사한 후 원자로실 바닥의 방사성폐기물 포장용기에 수납한다. 모의연료의 방사선/능이 과도할 경우에는 수조수내부에 차폐용기를 집어넣고 수중에서 모의연료를 넣은 다음 밀폐하여 수조 밖으로 꺼낸다. 원자로수조의 중앙 브릿지는 원자로 크레인을 이용하여 원자로실 바닥으로 하역후 적절한 크기로 절단하여 폐기한다. 폐기전 방사선조사를 수행하여 일반 폐기물 또는 방사성폐기물로 폐기할지를 결정한다.

3.5 회전시료조사대(RSR)의 제거

RSR을 제거하기 전에 RSR의 위치를 "Down"에 놓아야 하며 모든 전기공급을 차단해야 한다. 브릿지를 수동으로 수조의 중앙위치로 옮겨 빔튜브와 떨어지게 하고 브릿지 인터록 계통의 파손을 방지한다. 인양작업을 시작하기 전에 빔튜브를 밀봉후 밀봉시험을 수행하여 파손시 원자로수조수의 누출위험을 최소화해야 한다(<그림 2>). 원자로실 크레인을 이용하여 브릿지를 들어올린 후 미리 제작되어 적절한 위치에 놓여져 있는 브릿지 지지대위에 브릿지를 올려놓는다(0.76m 높이). 이는 원자로 수조바닥과 원자로실 하부 사이에 RSR 제거를 위한 공간을 확보하기 위함이다. 원자로 크레인의 슬링은 원자로심을 너무 높이 인양하지 않도록 충분한 길이를 가져야 한다. 브릿지를 지지대에 놓은 후 슬링을 풀고 브릿지를 지지대에 고정시킨다. RSR을 내리기 전에 브릿지 바로 아래의 호스의 볼트를 풀어 압축공기 공급관을 분리한다. 이때 동력전달축 및 시료투입관이 분리되어 있고 전원공급이 차단되었는지를 다시 한 번 확인해야 한다. 수중카메라를 이용하여 RSR의 3개의 인양 러그 상태를 확인한 후 인양 케이블을 러그에 체결한다. RSR을 25mm 정도 들어올린 상태에서 기존의 소켓렌치를 이용하여 부력탱크의 2개의 핀에 각각 체결되어 있는 Captive Centre

Bolt를 풀어 RSR을 노심의 바닥 높이로 내려놓는다. Center Bolt를 풀 수 없는 경우에는 작업을 중단하고 현장상황에 맞는 방안을 강구해야 한다. 전용마스트에 장착된 유압전단기를 원자로수조에 설치한 후 이를 이용하여 RSR에 연결된 배관을 적절한 길이로 절단한다. 절단된 배관은 방사선검사를 하여 저준위폐기물일 경우 방사성폐기물 저장용기에 수납하고 중준위폐기물일 경우 RSR과 함께 차폐용기에 수납한다. 모든 배관을 제거한 후 RSR을 원자로 수조의 바닥에 내려놓는다. 크레인에 매달려 있는 케이블을 풀어 적당한 위치에 고정시킨다. 원자로 수조수의 시료를 채취/분석하여 혹시 RSR내에 남아 있을지도 모르는 시료가 원자로 수조수를 오염시키지 않았음을 확인한다. 원자로실 크레인을 이용하여 원자로 브릿지를 들고 있는 상태에서 브릿지 지지대를 제거한 후 브릿지를 다시 원래의 위치로 내려놓는다. RSR 운반용 차폐용기를 원자로 수조로 이송하여 RSR을 수납한다(<그림 2>). 이 이송작업이 원자로 크레인을 이용한 인양 중 최대 하중에 속하므로 특별한 주의를 요한다. RSR 수납 후 뚜껑을 덮은 다음 수중카메라를 이용하여 뚜껑이 정확하게 안치되었는지를 확인한다. 수조 내에서 RSR 차폐용기 외부에서의 선량을 측정하여 차폐설계의 적정성을 확인해야 한다. RSR 제거 작업이 진행되는 동안 원자로실내에는 이 작업과 관련된 작업자 이외에는 출입이 금지된다. 원자로실 크레인을 이용하여 차폐용기를 원자로 수조로부터 들어올릴 때는 가능한 한 저속으로 크레인을 운전해야 하며 수조표면으로부터 이격되기 직전에 선량을 측정하여 선량이 기준치 이상일 경우 다시 용기를 수조로 옮긴 후 적절한 조치를 취해야 한다. 원자로 수조로부터 들어올린 차폐용기는 원자로 수조 상부의 드립트레이에서 용기내의 물을 수조로 배수시킨다. 모든 작업동안에 작업자는 가능한 한 차폐용기로부터 멀리 떨어져 있어야 한다. 원자로 크레인을 이용하여 차폐용기를 수송트럭에 적재하여 연구로 1호기로 수송한다. 수송시 트럭주위에는 모든 작업자가 소개되며 연구로 1호기 원자로실에 도착한 차폐용기는 다시 1호기 원자로실 크레인을 이용하여 실험수조로 하역한다. 실험수조내에서 차폐용기의 뚜껑을 연 후 절단된 스테인레스 스틸 배관부는 별도로 분리하고 RSR은 미리 저장되어 있는 연구로 1호기의 RSR 2개와 함께 분해되어 스테인레스 스틸 부분과 나머지 부분을 별도로 처리한다.

3.6 Central Thimble의 제거

Central Thimble의 제거는 원자로심의 제거를 위한 첫 번째 작업이다. 브릿지에 고정되어 있는 Central Thimble은 풀기 전, 작업 중에 원자로 바닥으로 떨어지지 않도록 한데 묶어 놓는다. Weatherfield Nut를 풀어 브릿지의 고정장치로부터 Central Thimble의 상단부를 제거한다(볼트가 풀리지 않으면 브릿지로부터 절단해야 한다.). 상단부를 제거할 때는 방사선량을 측정하면서 위로 끌어 올려야 한다. 제거된 상단부는 드립트레이에서 방사능을 측정하고 적당한 크기로 자른 다음 저장용기에 수납한다. Central Thimble의 나머지 부분은 기존의 Hook Tool을 이용해서 제거하며 상단부와 동일한 과정을 거쳐 저장용기에 수납한다.

3.7 Ion/Fission Chamber의 제거

원자로에는 4개의 Ion/Fission Chamber가 설치되어 있는데 저준위폐기물로서 저장용기에 포장할 수 있을 것으로 예상되나, 해체 중에 방사선량을 측정하여 확인해야 한다. 또한 해체 작업 전에 브릿지의 전원을 차단해야 한다. Ion/Fission Chamber는 절단전에 기존의 알루미늄 와이어로 묶어 두어야 하며 유압전단기를 이용하여 고정 브라켓을 절단함으로써 원자로로부터 분리한다. 고정브라켓의 위치는 수중카메라를 이용하여 확인할 수 있다.

원자로로부터 분리된 Ion/Fission Chamber는 미리 묶어둔 와이어를 이용하여 들어올릴 수 있으며 원자로수조수에서 꺼내기 전에 방사선량을 측정하여 저장용기에 포장가능한지를 확인하고 포장불가능일 경우 원자로수조수에 보관후 차폐용기에 수납한다. 알루미늄 컨테이너는 미리 묶어 놓은 후 볼트를 풀어 브릿지로부터 분리한 후 제거하며 제거시 방사선량을 확인해야 한다.

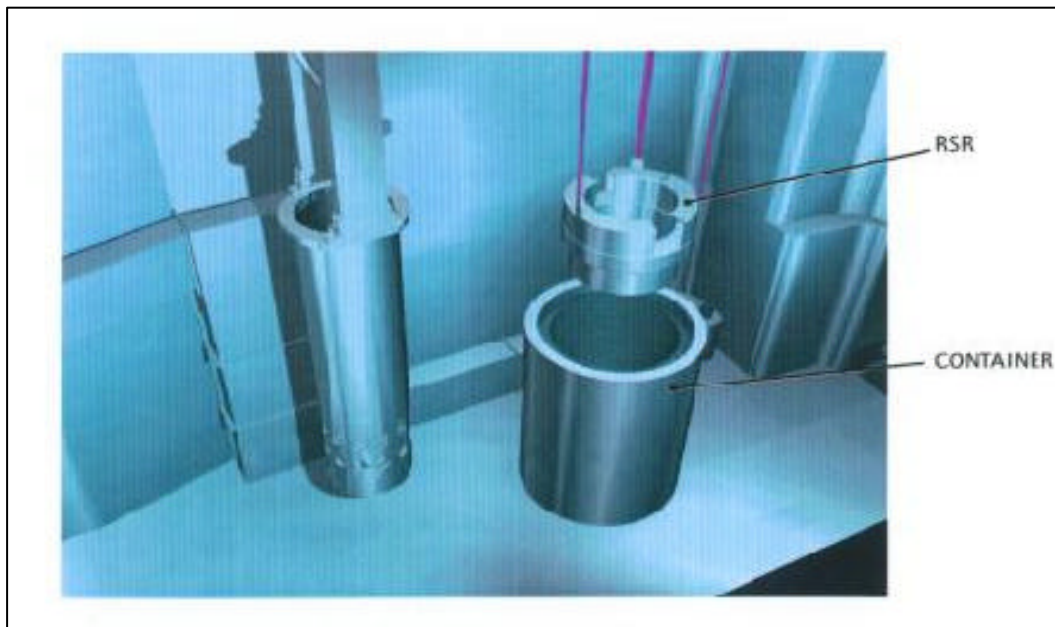
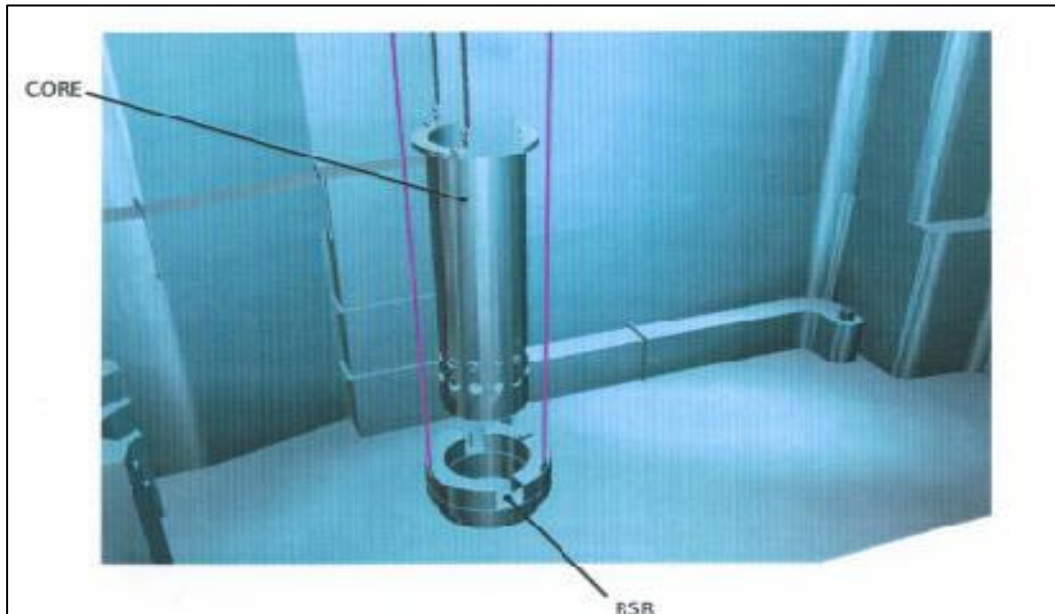


그림 2. 코어 분리 및 RSR 수납

3.8 원자로심의 제거

원자로심은 소량의 스테인레스 스틸 볼트를 제외하고는 모두 알루미늄으로 제작되어 있

으므로 저준위폐기물로서 저장용기에 포장 가능할 것으로 예상된다. 원자로심은 Cradle Support에 담겨 원자로실 크레인을 이용하여 제거한다. 원자로를 지지하고 있는 2개의 채널에 인양고리를 설치하기 위해 구멍을 뚫어야 하며 이 과정에서 발생하는 부스러기는 별도로 수거해야 한다. 원자로실의 크레인을 이용하여 인양고리를 지지하고 있는 상태에서 원자로심 지지 채널을 원자로 브릿지로부터 분리한다. 원자로심을 미리 원자로수조에 놓아둔 Cradle Support내에 넣은 후 수중카메라를 이용하여 고정 볼트를 풀어 지지채널을 원자로심으로부터 분리한다. 분리된 채널은 방사선량을 측정하면서 위로 끌어 올려 적당한 크기로 절단한다. 원자로심은 차폐 필요여부를 확인하기 위해 방사선량을 측정해야 하며, 차폐가 필요하다고 판단되면 작업자는 낫앞치마와 같은 개인차폐복을 착용한 채로 작업을 해야 한다. 원자로실의 크레인을 이용하여 Cradle을 들어 올려 미리 준비된 저장용기에 수납한다. 원자로심의 해체 전 과정을 통해 항상 방사선량을 감시하며 특히 원자로수조수로부터 빠져 나오기 직전에 방사선량을 측정하여 차폐 필요여부를 결정해야 한다.

3.9 노심지지 브릿지의 제거

노심지지 브릿지는 원자로실 크레인을 이용하여 제거한다. 원자로실 바닥에서 브릿지는 적당한 크기로 절단하며, 방사선 측정 결과에 따라 필요시 제염처리 후 일반폐기물로 처리한다.

3.10 원자로수조수의 배수

원자로수조수를 배수하기 전에 우선 원자로 수조수 바닥에 고방사능 슬러지나 부스러기 등이 존재할 경우에는 필터가 장착된 흡입 장치를 이용, 제거하고 이를 차폐용기에 수납한다. 더 이상 고방사능물질이 없음을 확인한 다음, 수조수 전체를 순환시킨 후, 냉각수시료를 채취하여 오염정도를 분석한다. 원자로수조수는 기존의 펌프를 이용하여 희석방류조로 이송한다. 수조수의 이송후 원자로수조의 내벽을 닦아낸다.

3.11 Thermal Column 제거를 위한 준비 작업

수평 Thermal Column 제거를 위한 작업자는 최소한 방호복 및 방호마스크를 착용해야 하며 작업에 필수적인 요원의 출입만을 허용한다. Thermal Column 차폐문의 개방은 반드시 위임자에 의해서만 가능하도록 해야하며 자물쇠 장치를 갖추어야 한다. 차폐문을 개방하는 즉시 방사선량을 측정해야 하며 Thermal Column을 제거하는 동안에는 갈수록 더 방사화된 Column이 노출되므로 규칙적으로 방사선량을 측정해야 한다. 방사선량의 측정결과에 따라 최대허용작업시간이 설정되고 필요시 작업장에서의 선량을 줄이기 위한 차폐설비를 설치한다. 베타 공기오염감시기는 경보장치를 갖추어야 하며 들어가기 전에 항상 공기오염감시기의 정상작동 여부를 확인해야 한다. 흑연으로부터 시료를 채취/분석하여 방사능을 확인한다.

3.12 Thermal Column 차폐문의 흑연블록 제거

차폐문으로부터 흑연을 제거하기 위해서 폴리에틸렌의 상부 및 측면을 고정하고 있는 16개의 알루미늄 볼트 및 워셔를 제거하고, 흑연 취급장비를 이용하여 흑연 블록을 하나씩 꺼낸 후 방사선을 측정하고 폴리에틸렌으로 포장후 용기에 수납한다. 흑연 분진이 발생했을

경우에는 진공청소기를 이용하여 분진을 제거해야 하나 분진의 폭발가능성을 배제하기 위해 반드시 흑연 분진을 물로 적신 다음에 제거하여야 한다.

3.13 수평 Thermal Column으로 부티의 흑연 제거

Key Graphite Block은 흑연 취급장비를 이용하여 하나씩 제거한 다음, 방사선을 측정하고 폴리에틸렌으로 포장하여 용기에 수납한다. 나머지 Graphite Block은 갈퀴모양의 취급장비로 취급이 가능하도록 구멍이 있다. Graphite Block을 모두 제거한 후에는 방사선조사를 실시하여 방사화콘크리트 제거작업을 위한 추가 정보를 얻으며 잔류오염이 없음을 확인하기 위한 조사를 수행한다.

3.14 수직 Thermal Column의 제거

수직 Thermal Column은 차폐문 및 차폐 플러그를 통해 접근이 가능하다. 차폐문 및 차폐플러그는 원자로실 크레인을 이용하여 따로따로 인양할 수 있다. 무게가 4톤인 차폐문은 귀퉁이에 아이볼트 및 인양슬링을 끼울 수 있는 4개의 볼트구멍이 있고 무게가 0.12톤인 차폐 플러그는 인양용 아이볼트를 끼울 수 있는 하나의 볼트구멍이 있다. 차폐문 및 플러그를 제거하면 수직 Column이 노출되며 방사선량을 측정하여 허용작업시간을 설정한다. 바스켓의 무게를 지지하기 위해 상부에 플랜지가 용접되어 있는데 이 플랜지에는 기존의 인양프레임을 끼울 수 있도록 4개의 구멍이 나있다. 인양프레임을 끼운 후 원자로실 크레인을 이용하여 흑연이 채워진 바스켓을 제거하여 폴리에틸렌으로 포장한 후 용기에 수납한다.

3.15 원자로냉각계통 및 정화계통의 제거

원자로냉각계통의 일차계통 배관은 방사성폐기물로, 이차계통 배관은 확인 후 비방사성 폐기물로 처리된다. 열교환기는 원자로 차폐구조물의 측면에 설치되어 있다. 열교환기의 제거 작업을 착수하기 전에 관련 계통을 모두 격리시켜야 한다. 열교환기를 일차계통으로부터 기계적으로 격리시키고 연결된 배관을 제거한다. 제거작업도중이나 인양 시 열교환기는 원자로실 크레인으로 지지되며 원자로실 바닥의 정해진 위치에 놓은 후 적당한 크기로 절단하고 내부의 물기를 제거한 후 용기에 수납한다. 정화계통의 이온교환수지 탱크는 계통으로부터 제거 후 모든 개구부를 밀봉하여 별도로 포장한다. 정화계통의 나머지 부품은 방사선/능 측정후 방사성 폐기물 또는 규제면제 폐기물로 처리한다.

3.16 이끔관의 제거

이끔관은 일부의 스테인레스 스틸 볼트를 제외하고는 모두 알루미늄 덕트로 제작되어 원자로 수조내에 설치되어 있다. 따라서 제거작업 착수 전에 방사선량을 측정하여 필요시 차폐설비를 갖추어야 한다. 이끔관은 적당한 크기로 절단한 후 모두 저장용기에 포장한다.

3.17 비방사성 콘크리트의 제거

원자로 수조의 내부를 조사하여 국부적인 고방사선량을 지역이 있는지를 확인하여 필요시 국부차폐설비를 설치한다. 콘크리트를 제거하기 전에 방사화의 범위를 결정하기 위해

콘크리트 코아 시료를 채취하여 분석한다. 시료채취지점 및 깊이를 기록하고 분석결과 추가 조사가 필요할 경우 이를 기초로 추가 위치를 결정한다. 코아시료는 드릴링기법을 이용하는데 작업시 분진의 발생을 최소화해야 하며 작업자는 방호마스크를 착용하고 경보장치를 갖춘 베타 공기 오염감시기를 설치해야 한다. 시료 채취 및 분석은 제거된 Thermal Column 주위도 실시한다. 시료분석에 의해 비방사성 콘크리트의 범위가 결정되면 방사성 콘크리트가 비방사성 콘크리트로 제거되는 위험성을 없애기 위해 안전여유를 고려하여 비방사성 콘크리트 제거범위를 설정한다. 이때 규제면제 폐기물의 범위도 결정한다. 콘크리트 표면에 절단될 단면을 표시하고 각 부분에 인양용 아이볼트를 설치한다. 절단된 콘크리트 부분은 원자로실 크레인에 의해 취급된다. 특히 상부의 콘크리트 돌출부의 제거 시에는 절단전에 미리 크레인에 의해 지지되고 있어야 한다. 콘크리트는 드릴링 및 버스팅 방법으로 절단되며 콘크리트 내의 철근은 적당한 방법으로 절단된다. 분리된 각 블록은 제거 전에 비방사성임을 확인한다. 제거된 콘크리트 블록은 원자로실 크레인을 이용하여 원자로실 바닥으로 내려놓은 후 무게를 측정하고 이송용 카트에 실려 원자로실 밖으로 내보낸다. 나머지 콘크리트도 같은 방법으로 상부부터 차례로 제거된다. 비방사성 콘크리트는 최종적으로 산업폐기물규정에 맞도록 처리한 다음 산업폐기물 매립장으로 수송한다.

3.18 방사성 콘크리트의 제거

방사성 콘크리트를 제거하기 전에 주위에 임시격납설비를 세우고 HEPA 필터를 갖춘 이동식 환기설비를 설치한다. 또한 베타 공기오염감시기를 격납설비내에 설치하여 심각한 공기오염 발생 시 경보를 울리도록 한다. 필요한 조명 및 비상조명도 갖춘다. 방사성 콘크리트의 제거방법은 비방사성 콘크리트 제거방법과 동일하며 저준위폐기물과 규제면제 폐기물로 구분하여 제거한다. 주된 차이점은 임시격납설비의 설치이다. 격납설비의 천정에는 도어를 설치함으로써 원자로실 크레인을 이용, 콘크리트 블록을 인양할 수 있다.

천정도어는 다음과 같은 요건을 만족할 때 개방될 수 있다.

- 임시격납설비의 환기설비가 정상적인 기능을 발휘할 것
- 건물의 환기설비가 정상적인 기능을 발휘할 것
- 포장된 콘크리트에 비정상적인 오염이 없을 것
- 원자로실로의 출입도어가 닫혀 있을 것
- 격납설비내에서 모든 드릴링 또는 버스팅 작업이 중단될 것
- 공기오염도를 측정하여 격납설비내의 오염수준이 제한치 이내 임을 확인할 것

위와 같은 사항을 확인한 후이나 천정도어를 개방하여 제거된 콘크리트를 원자로실 크레인으로 인양할 수 있다. 콘크리트 블록을 격납설비 밖으로 옮기고 천정도어를 닫은 후 드릴링 및 버스팅 작업을 재개한다. 콘크리트 제거작업 중에는 항상 콘크리트 표면 가까이에 서 선량율을 감시하며, 특히 차폐판에 접근할수록 더욱 주의해야 하며, 필요시에는 국부 차폐설비를 사용한다. 차폐판은 상부의 콘크리트를 먼저 제거한다. 차폐판의 상부가 노출되면 차폐판의 상부에 구멍을 뚫어 아이볼트를 끼우고 적당한 방법으로 차폐판을 지지한다. 차폐판 주위의 콘크리트를 부수고 3개의 차폐판을 서로 묶어놓은 볼트를 제거한 후 원자로실 크레인을 이용하여 차폐판을 따로따로 제거한다. 제거된 차폐판은 플라스틱으로 포장하고 오염 및 방사능을 검사한 후 격납설비의 천정도어를 통해 저장용기에 수납한다. 콘크리트 부스러기는 봉지에 담아 저장용기에 수납한다. 방사성 콘크리트가 제거됨에 따라 빔튜브가 노출되면 이를 제거하여 적당한 크기로 절단한 후 저장용기에 수납한다. 작업자는 전신방호복, 글러브 및 방호마스크를 착용해야 한다. 원자로수조의 벽체 제거가 완료되면 바닥의 콘크리트 제거를 수행한다. 먼저 코아 시료를 채취/분석하여 방사화 범위 및 오염의 침투여부를 확인한다. 가능하면 방사화 혹은 오염 콘크리트를 실측치보다 깊게 제거하여

잔여 방사화물질이 남지 않도록 한다. 콘크리트의 제거가 완료되면 격납설비, 환기계통 및 임시출입구 등을 제염한 다음 오염확인 후 제거한다.

4. 결 론

연구로 1,2호기 제염·해체는 우리나라에서 수행되는 최초의 원자력시설 제염·해체 사업으로서, 해체계획을 수립하는 동안 최우선적으로 고려한 점은 작업자와 환경을 방사선 위험으로부터 최대한 보호한다는 것이었다. 또한 해체 작업을 안전하면서도, 경제적이고 또 일반적으로 응용될 수 있는 기술을 도입하였다는 점이다. 즉 극히 제한적인 부분을 제외하고는 대부분 국내의 일반산업 장비들로 본 사업을 완료하도록 수립하였다. 한편 일부의 특수해체장비는 가능한 한 자체개발을 함으로서 기술자립과 경비절감에 기여하도록 하였다. 본 사업은 2002년에 종료하는 것으로 계획되어 있으나, 선진국의 사례를 보면, 해체작업 중 예기치 못한 오염 문제 등으로 사업기간이 연장되는 경우가 많다. 따라서 본 사업에서도 기간 자체에도 중요성은 두겠지만, 본 사업기간 내내 작업자와 환경보호에 최우선을 두고자 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

5. 참고문헌

- [1] SamTae PAIK외, Decontamination and Decommissioning Project Status of the TRIGA Mark II&III in Korea, ASRR-VI, Japan, March, 1999
- [2] 박승국외, TRIGA 연구로 폐로를 위한 시설현황 및 방사선/능 조사 보고서, KAERI/TR-1153/98, 1998, 한국원자력연구소
- [3] Decommissioning Plan KRR-1/KRR-2, TRD-470-B-001, BNFL, 1998
- [4] Preliminary Decommissioning Design KRR-1/KRR-2, TRD-210-B001, BNFL, 1998
- [5] 정기정외, 연구용 원자로 폐로사업, KAERI/RR-1878/98, 한국원자력연구소, 1998
- [6] TRIGA연구로해체사업관련 해외(미국)유사현장방문 및 폐로기술조사, KAERI/OT-354/97, 한국원자력연구소, 1997
- [7] 이지복외, 연구용 원자로 폐로사업, KAERI/RR-1798/97, 한국원자력연구소, 1997
- [8] Nuclear Decommissioning Recycling and Reuse of Scrap Metals, OECD/NEA, Paris, 1996
- [9] The NEA Co-operative Programme on Decommissioning The First Ten Years, OECD/NEA, Paris, 1996
- [10] A study on the decommissioning of research reactor, KAERI/RR-1286/93, 1993
- [11] General Atomic, Triga Mark III Reactor, Mechanical Maintenance and Operating Manual, E-112-160, April, 1972,
- [12] Decommissioning study for KAERI TRIGA Mark II reactor, Bechtel Inc, March 1987.