

일체형원자로 핵연료 저장 및 취급계통의 개념설계를 위한 기술현황분석

State of the Art for Conceptual Design of Fuel Storage and Handling
System of Integral Reactor

김민환, 이재선, 유제용, 김종인, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소에서 개발 중인 일체형원자로 SMART의 핵연료저장 및 취급계통의 개념설계를 위하여 현재 가동 중이거나 설계가 진행 중인 국내외 원자로의 핵연료 저장 및 취급계통의 기술 현황을 분석하였다. 국내에서는 현재 가동 중인 가압경수로, 가압중수로와 설계개발이 진행 중인 고속증식로인 KALIMER의 기술현황을 조사하였다. 국외 기술현황으로 가압경수형 일체형원자로인 IRIS, KLT-40, CAREM과 러시아 상용발전로인 VVER의 핵연료취급계통이 검토되었다. 국외 고속증식로에서는 일본의 MONJU, 인도의 PFBR이 포함되었다. 기술현황분석 결과에 따르면 핵연료재장전 계통을 신연료 저장 및 취급계통, 원자로 내에서 핵연료취급계통, 사용후연료 저장 및 취급 계통으로 분리되는 점은 모든 원자로가 유사하지만 이들 계통의 구성은 각각의 원자로 특성에 맞도록 독특한 설계 개념을 채택하여 최대한 효율적으로 핵연료 재장전이 가능하도록 되어 있음을 알 수 있었다.

Abstract

The state of the art for domestic and international reactors which are in operation or under development was reviewed for the purpose of conceptual design of fuel storage and handling system for the integral reactor SMART. For domestic reactors, pressurized light water reactor and pressurized heavy water reactor in operation, and fast breeder reactor under development called KALIMER, were investigated. The fuel handling systems of IRIS, KLT-40, and CAREM were reviewed for the state of the art for international integral reactors. Russian pressurized-water reactor, VVER was also investigated. The systems of Monju in Japan and PFBR in India was selected for international fast breed reactor. According to the results of the state of the art, all reactors are composed of similar subsystems which are new fuel storage and handling system, spent fuel storage and handling system, and refueling system. However, those subsystems have particular designs suitable for each reactor characteristics so that the refueling process could be performed effectively.

1. 서론

한국원자력연구소에서는 일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)의 기본설계를 통하여 원자로집합체 및 내부구조물, 증기발생기, 냉각재순환펌프, 제어봉구동장치, 연료 및 노심 등 원자로 계통에 대한 설계 기술을 확보하였으며 기본설계 및 최적화를 진행 중에 있다. 비록 일체형원자로 주요 계통들에 대한 설계가 이루어 졌지만 핵연료 교체에 필요한 핵연료 취급계통에 대한 설계 개발은 개념조차 정립되지 않은 실정이다. 핵연료 취급을 위해서는 원자로 압력용기 상부에 설치되어 핵연료의 취출/장전에 운용되는 재장전기계, 원자로 건물과 연료건물 사이의 핵연료 이송 절차 및 기구, 핵연료 저장 및 보관 시설 등이 필요하다. 또한 핵연료 취급계통의 설계에서 고려되어야 할 사항으로는 원자로의 구조적 특성뿐만 아니라 사용될 연료와 플랜트의 건설 위치도 중요하다. 따라서 설계특성이 다른 원자로에 동일한 핵연료 취급계통을 적용하는 것은 사용 편의성과 효율성, 그리고 비용 측면에서 바람직하지 못하다.

국내에서 핵연료 저장 및 취급계통에 대한 설계는 단순히 제작기술도입 자체에 의존하고 있는 상태이며 개념설계, 기본설계 및 상세설계를 통한 완전한 설계기술개발 경험이 전혀 없는 상태이다. 따라서 일체형원자로에 대한 핵연료 저장 및 취급계통의 설계기술개발은 이 분야에서 국내 최초로 시도된다고 할 수이다. 본 논문에서는 일체형원자로 SMART의 핵연료 저장 및 취급계통의 설계 개발에 앞서 국내외의 원자로에 적용되고 있거나 설계가 진행 중인 핵연료 저장 및 취급계통의 설계개념을 분석하였다.

2. 국내 현황

가. 가압경수로

국내 상용로의 대부분이 가압경수형(pressurized water reactor; PWR) 원자로이다. 그림 1은 상용 가압경수형 원자로인 울진 3, 4호기^[1]의 핵연료취급계통의 배치도를 나타내고 있다. 그림에 보인 바와 같이 핵연료 이송은 원자로 상부에 물을 채우는 수중 재장전 형태(pool type)를 취하고 있다. 원자로 건물 옆에 신연료 저장시설과 사용후연료 저장시설을 갖추고 있는 보조건물이 있다. 건물 간의 핵연료 이동은 핵연료 이송관을 통과하는 이송운반기와 직립기에 의해 수행된다. 원자로 건물 내에는 재장전기가 수조 위에서 운행되어 핵연료 삽입과 취출 작업을 수행한다.

신연료는 신연료 저장대(rack)에 건식으로 보관된다. 신연료 저장대는 개별 저장 셀(cell) 들의 집합체(12x12형)로 구성되며, 미임계 유지를 위한 신연료 집합체의 최소 간격은 저장대의 셀간 간격으로 유지된다. 저장대의 재질은 핵연료에 물리화학적 영향을 미치지 않는 스테인레스강으로 되어 있다. 저장셀의 최하단에는 배수구가 마련되어 있으며 저장셀의 상부 입구에는 핵연료의 삽입이 용이하도록 인입 안내구가 설치된다. 용량은 최소 72개(노심용량의 1/3, 1회 재장전량)의 핵연료 집합체를 저장할 수 있다.

사용후연료는 핵연료건물의 일부인 저장조에 보관된다. 저장조는 스테인레스강 덧판이 씌워진 콘크리트 벽으로 되어 있다. 저장조는 봉산수로 채워지며 사용후연료의 붕괴열은 자연대류순환으로 제거된다. 저장조에는 신연료 저장대와 구조와 재질이 같은 10x12형 저장대가 9개가 설치된다. 사용후연료 저장조는 두 영역으로 구분된다. 제 1영역에는 전 노심 해체량에다 최대 1회분의 재장전량과 예비저장용량을 합한 총 252개의 저장용량이 있으며 제 2영역에는 75%의 저장밀도로 총 426개의 저장셀을 제공한다. 붕괴열이 충분히 제거된 사용후연료 집합체는 사용후 연료 취급기에 의해 저장대에서 사용후연료 캐스크로 이송된다. 캐스크 이송을 위하여 캐스크 하역조를 냉각수로 먼저 채우고 사용후연료 저장조와 하역조 사이의 수문을 연다. 사용후연료 집합체를 사용후연료

캐스크에 담은 후 다시 수문을 닫고 용기를 밀봉하고 냉각수를 배수한 다음, 사용후연료 캐스크 취급인양기를 사용하여 사용후연료 캐스크를 제염소로 이송시킨다. 제염 후에 사용후연료 캐스크는 핵연료건물 출입구를 통해 중간 저장시설이나 영구 저장시설로 운반된다.

핵연료취급계통은 신연료 운송용기의 인수로부터 사용후연료 캐스크의 선적까지 핵연료 집합체를 재장전, 취급 및 저장하기 위한 각종 기기, 공구 및 제반절차를 포함하는 종합계통이다. 핵연료 재장전을 위하여 원자로용기 상부덮개를 열고 제어봉 구동장치와 내부안내구조물이 저장대에 보관된 후 핵연료재장전기가 원자로용기 위로 이동된다. 핵연료 재장전기는 재장전조 위에 위치한 이동용 브리지와 트롤리로 구성되고 재장전조 위의 작업층 양쪽에 평행하게 설치된 레일 위를 운행한다. 브리지와 트롤리에 설치된 모터는 원자로 내부나 연료 이송운반차 내에 있는 핵연료의 위치로 기기를 이동시킨다. 디지털 지시계통 및 폐회로 텔레비전 감시기능에 의해 인양통은 핵연료 집합체의 상단에 정확히 정렬된다. 인양기 하단에 있는 집계를 회전시켜 핵연료집합체를 인양기에 체결한다. 핵연료집합체는 모터구동력에 의해 인양통 속으로 들어간다. 노심에서 제거된 핵연료는 재장전조에서 수중 이동되어 이송운반차의 빈 삽입구 속으로 삽입된다. 그리고 직립기에 의해 사용후연료 집합체를 수평으로 회전시킨 뒤, 케이블 구동에 의해 레일 위에 있는 이송운반차를 이송관으로 통과시킨다. 이송관을 통과한 운반차는 핵연료건물 내에 있는 직립기에 의해 수직위치로 복원된다. 사용후연료 취급기는 이송운반차로부터 사용후연료를 제거하여 사용후연료 저장대로 이송한다. 원자로 노심에서 사용후연료를 인출하여 사용후연료 저장조로 옮기는 도중 또는 그 이후에 육안검사와 초음파검사를 실시하여 사용후연료 집합체를 검사한다. 사용후연료 검사에 통과된 사용후연료와 신연료집합체는 이송운반차에 재장착되어 이송관을 통해 재장전조로 이동되며, 재장전기가 이들을 적절한 노심위치에 다시 삽입하게 된다. 또한 재장전기는 핵연료 관리방침에 따라 노심 내에서 핵연료의 위치를 변경할 때에도 사용된다. 재장전이 끝나면 핵연료 이송관 밸브가 닫힌다. 상부안내구조물은 원자로용기 속에 재삽입되고 제어봉집합체들과 제어봉집합체 연결축들 역시 제 위치에 환원된다. 재장전조의 냉각수는 원자로 용기 플랜지 높이까지 낮춰진다. 그 후에 재장전조 내에 남아있는 냉각수가 제거된다.

나. 가압중수로

가압중수형(pressurized heavy water reactor; PHWR) 원자로는 값싼 천연 우라늄을 핵연료로 사용하는 대신 값비싼 중수가 감속재와 냉각재로 사용된다. 현재 가장 성공한 중수형 원자로가 국내 월성에 건설되어 운영 중인 CANDU형^{[2][3][4]}이다. CANDU 원자로의 1차계통과 2차계통은 완전히 분리되어 있으며, 열교환은 증기발생기에서 이루어진다. 2차계통은 가압경수로와 같으나 1차계통은 조금 다른 형태이다. 1차계통에는 열전달을 위한 냉각재 계통이 있다. 가압경수로와 같은 원리로 냉각재(중수)는 냉각재 펌프에 의하여 칼란드리아라고 부르는 수평형 원통 원자로 속을 관통한다. 이때 원자로에서 발생한 열은 냉각재로 옮겨지고, 다시 냉각재의 열은 2차계통으로 옮겨져서 발전에 이용하게 된다. 큰 통으로 되어있는 가압경수로와는 달리 칼란드리아는 격리된 여러 개의 채널형태의 압력관으로 구성되어 있다. 각 압력관마다 연료가 들어 있고 그 주위를 냉각재가 흐른다. 경수로는 1년에 한 번 정도 원자로를 정지시켜, 원자로 뚜껑을 열고 그 속에 있는 핵연료의 1/3정도를 바꾸어 채워야 하지만 중수로는 수백 개의 핵연료 다발이 분리된 채널 속에 각각 들어 있으므로, 채널만 정지시킨 상태에서 수시로 몇 개씩 간단히 교체할 수 있다.

CANDU 핵연료의 교체는 칼란드리아 양 쪽에 설치된 2기의 원격조종 핵연료교환기(fueling machine)에 의해 이루어진다. 연료 교환을 위하여 핵연료교환기가 선택된 연료채널 끝에 밀봉 부착된다. 핵연료교환기는 내부가 가압된 상태에서 연료채널 마개(plug)를 제거하고 신연료의 삽입 또는 사용후연료의 인출 작업을 수행한다. 핵연료교환기는 핵연료교환기용 브리지 집합체에 의해 자동으로 작업위치로 올려진다.

핵연료교환기의 앞 쪽에는 회전식 탄창 형태의 12개 매거진관(magazine chamber)이 있다. 12개의 매거진관 중 5개는 핵연료 저장용으로 사용되고, 나머지는 핵연료 교환작업시 제거되는 종단마개(closure plug), 차폐마개(shield plug) 등을 임시 저장하는데 사용된다. 한 번 작업에 8개의 신연료 다발이 매거진에 장착되어 채널에 삽입되고 반대편의 핵연료교환기의 매거진은 8개의 사용후연료를 받게 된다. 핵연료 교환시 연료를 장전하는 방향은 냉각재 흐름과 같다. 핵연료교환기에는 연료교체와 이동 중 핵연료의 냉각을 위하여 온도와 압력이 제어되는 중수로 가득 차있다. 만약 LOCA와 같은 비상사태가 발생하여 전원과 냉각수가 차단되어도 비상냉각수를 공급하여 핵연료의 건전성을 유지하도록 되어있다. 핵연료교환기의 유지보수는 원자로 운전 중 독립된 공간에서 수행될 수 있다.

CANDU 핵연료의 재장전 흐름도와 재장전 계통과 구조가 그림 2에 나타나 있다. 신연료는 건식으로 보관되며 공기차폐식 기기 출입구(equipment airlock)를 통하여 격납건물 내로 운반된다. 격납건물 내로 이동된 신연료는 최종 검사를 위해 신연료 장전실(loading room)로 옮겨지고 이송기구에 수동으로 장착된다. 이송기구에는 신연료 전달시 방사능 차폐와 중수 누설을 막기 위한 밀봉기능이 있다. 이송기구는 신연료를 핵연료교환기에 전달하고, 핵연료교환기는 인수된 신연료와 함께 원자로 측면으로 이동하고 재장전을 수행된다. 핵연료교환기에 의해 꺼내진 사용후연료는 방출포트를 통하여 공기 중의 조사후 핵연료 방출구역으로 보내진다. 이곳에서 사용후연료는 승강래들(elevating ladle)에 담겨 엘리베이터에 의해 물 속에 잠겨있는 이송수로(transfer canal)로 전달된다. 이송수로의 컨베이어는 연료 다발을 인수구역(reception bay)로 옮기고 옮겨진 연료는 트레이(tray)에 배치되고 검사된다. 손상된 연료는 밀봉캔(sealed can)에 넣어 독립된 저장실에 보관한다. 완전히 사용이 끝난 연료는 조사후 핵연료 보관구역(irradiated fuel storage bay)로 이동 적재된 후 최소 5년 이상 보관된다. 연료의 붕괴열이 충분히 감소되면 차폐용기에 옮겨져 건식저장 시설에 보관된다. 사용후연료 이송계통에서 이상 발생으로 인하여 사용후연료가 장시간 공기 중에 노출된 경우 예비냉각계통이 작동하여 사용후연료의 위치에 따라 사용후연료포트에 냉각수를 공급하거나 방출조 냉각수를 작동시켜 승강래들에 위치한 사용후연료를 냉각시킨다. 한 번의 재장전 사이클에 1채널에 해당하는 8개의 핵연료 다발을 교체하며 주당 14채널(112다발)을 교체하는데 걸리는 시간은 약 30시간이 소요된다.

다. 고속증식로

고속증식로는 고속중성자로 핵분열반응을 일으켜 에너지를 생산함과 동시에 비핵분열성 물질인 U238을 핵분열성 물질인 Pu239로 변환시켜, 처음에 연료로 사용된 U235보다 더 많은 양의 Pu239를 생산할 수 있다. 또한 원자력발전에서 발생하는 방사성 핵종을 노내에서 태워버림으로써 방사성 폐기물의 발생을 현저히 감소시킬 수 있는 특징이 있다. 고속증식로의 핵연료 교환은 노심이 투명하지 않은 액체 나트륨 속에 담겨있고 나트륨은 공기와 화학적으로 반응하기 때문에 경수로에서의 핵연료 교환작업과 같이 원자로 용기의 덮개를 벗겨 대기 중에 개방한 상태에서 수송통로를 이송하여 저장하는 방식을 취할 수 없다. 따라서 고속증식로에서는 밀폐된 분위기 속에서 원격조작으로 핵연료를 교환하지 않으면 안 된다. 원자력연구소에서 전기출력 150MWe의 금속연료 장전 소듐냉각 풀형 원자로인 KALIMER(Korea Advanced LIquid METal Reactor)^[5] 설계개발이 진행되고 있다. KALIMER의 핵연료 재장전 주기는 18개월이며 재장전을 위한 주요시설로는 노내 핵연료교환기(In-Vessel Transfer Machine; IVTM)와 운송계통 및 저장계통으로 구성되어진다. 그림 3은 KALIMER의 핵연료 재장전계통의 개념도를 보여주고 있다.

소듐으로 채워진 원자로 내에서 노심 집합체를 다루기 위하여 노내 핵연료 교환기가 설치된다. 노내 핵연료교환기의 형태는 판토포그래프식(pantograph type)으로 운전 중에는 노심 내에 고정되어 있다. 상부에는 교환기를 동작시키기 위한 전기모터, 감속기, 기어, 회전 조절클러치, 긴급 수동운

전장치와 계측 및 운전을 조절하기 위한 요소들로 구성되어 있으며 하부는 회전플러그로부터 수직 아래로 길게 뻗어 있으며 주 튜브(main tube)와 판토타그래프식 팔 등으로 구성되어 있다. 노내 핵연료교환기는 회전플러그의 중심에서 편심되어 있으며 180° 회전할 수 있어 노심 집합체 위의 필요한 위치로 판토타그래프식 팔을 이동시킬 수 있다. 원자로 헤드에 있는 핵연료 출입구에는 핵연료 재장전 동안에 게이트 밸브를 가진 어댑터가 노심 집합체의 교환을 위해 설치된다. 또한 어댑터 상부에는 게이트 밸브를 가진 캐스크가 위치하여 노심내의 핵연료를 이동시킨다. 핵연료출입구는 원자로 운전시에 플러그로 밀봉되어 있다. 재장전시 플러그는 분해되어 임시저장소에 보관된다. 회전플러그는 핵연료 재장전시에 회전운동을 하여 노내 핵연료 교환기를 이동시키는 역할을 하며 원자로 헤드 중앙에 위치하며 특별한 밀봉장치로 고정되어 있다. 회전플러그의 중심은 원자로 노심과 편심되게 설계함으로써 핵연료 교환기의 팔의 길이를 적게 유지할 수 있으며 노심집합체로의 접근이 용이하게 설계된다.

핵연료 운송을 위한 캐스크는 6개의 핵연료 집합체를 운반할 수 있으며 강구조물과 차폐로 구성된 실린더 형태의 복합 다중벽으로 구성된다. 캐스크의 운반장치는 새로운 핵연료나 사용후 핵연료를 포함하는 캐스크를 원자로 건물과 핵연료 취급 및 저장시설 사이의 지상통로를 통해 이동시킨다. 사용후 초기에 많은 열을 방출하는 핵연료는 18개월의 핵연료 교환 주기 동안 원자로 내에서 노내 저장소에 보관된다. 노내 저장소의 위치는 노심의 차폐구역 외부에 설치된다.

원자로 용기와 캐스크 사이의 노심집합체의 운반을 위하여 핵연료교환소(fuel transfer station)가 설치된다. 새로운 핵연료 집합체는 원자로 상부 덱(deck)으로 옮겨진 후 핵연료 교환소로 하나씩 이송된다. 각각의 새로운 핵연료는 노내 저장소로 옮겨진 후 노내 핵연료 교환기에 의해 노심내의 정해진 위치에 장착된다. 사용후연료는 역순으로 캐스크로 이동된다.

3. 국외현황

국외에는 다양한 종류의 원자로가 건설되어 운영되거나 개발 중에 있다. 따라서 국외현황에서는 국외에서 개발되었거나 개발이 진행 중인 중소형 원자로와 국내에서 건설되지 않은 원자로에 대한 핵연료 저장 및 취급계통에 대해 기술하였다.

가. 가압경수로

1) IRIS(미국)

미국에서 개발 중인 IRIS(International Reactor Innovative and Secure)^{[6][7]}는 가압경수형 원자로로 출력 1000MWt에 해당하는 중형 원자로이다. IRIS는 모든 원자로 냉각계통의 구성기기가 원자로 용기 내에 위치하는 일체형원자로이다. IRIS는 새로운 기술개발 없이 기존 상용로에서 입증된 설계기술을 바탕으로 한 원자로이다. 따라서 핵연료 저장 및 취급계통의 개념도 상용 가압경수로의 개념을 기본으로 한다.

IRIS의 원자로 용기는 직경 25미터인 구형 스틸재질의 격납용기 속에 담겨진다. 그림 4는 IRIS의 격납용기를 나타내고 있다. 격납용기는 상부에 볼트와 플랜지로 된 덮개(closure head)가 있어 이곳을 통하여 원자로용기의 상부덮개 플랜지와 볼트에 접근할 수 있다. 핵연료 재장전을 위해서는 먼저 격납용기 덮개를 제거하고 격납용기와 원자로용기 플랜지 사이에 밀봉칼라(sealing collar)를 설치한 후 원자로용기 덮개를 제거한다. 격납용기와 원자로용기 위의 재장전 공동(refueling cavity)이 물로 채워지고 원자로 내부 구조물을 들어내어 재장전 공동에 보관된다. 핵연료 집합체는 원자로용기 상부에 위치한 재장전기에 의해 수직으로 들어올려져 핵연료 취급 및 보관 구역으로 옮겨진다.

IRIS 플랜트의 기본적인 배치 형태는 격납용기를 제어실, 안전관련기기, 핵연료취급기기를 포함하

는 보조건물이 둘러싸고 있는 형태이다. 핵연료취급영역은 보조건물의 한쪽에 위치하며 격납용기의 일부영역과 공유되고 있다. 그 이유는 재장전 기간동안 격납용기와 원자로용기 상부덮개가 수직으로 들어올려져 핵연료취급영역에 저장될 수 있도록 하기 위함이다. 핵연료취급영역은 사용후연료저장조, 신연료 저장영역, 격납용기와 원자로용기 상부덮개 위의 재장전 공동, 사용후연료 캐스크 적재 및 세척 공간, 재장전기계, 원자로 덮개와 내부구조물을 들어올리기 위한 중형 크레인 과 레일카(rail-car) 구역을 포함한다. 트윈 유닛의 경우에 하나의 핵연료취급영역을 두 대의 원자로가 공유하고 있다. 한 대의 재장전기가 트윈 유닛의 재장전 공동을 횡단하며 작업한다. 또한 중앙에 위치한 사용후연료 저장조, 사용후연료 캐스크 적재 및 세척 공간, 중형 크레인과 공유하여 사용된다. 또한 트윈 유닛의 원자로 격납용기와 원자로용기 뚜껑을 위한 레이다온 영역도 충분히 제공한다.

신연료의 저장은 최근의 Westinghouse 원자로 설계와 같이 고밀도랙(high density rack)을 사용한다. 저장랙은 요구 미임계도를 유지하기 위하여 중성자 흡수물질이 포함되어 있다. 신연료 저장랙은 원자로 보조건물의 연료취급 영역에 위치하며 최대설계기준 농축도가 4.95%인 우라늄 연료를 저장한다. 저장조의 랙은 여러 높이에서 상호연결 되어있는 저장셀의 배열로 이루어지며 상부와 하부에서 격자구조를 지지하는 형태이다. 신연료 보관방법은 건식이다. 신연료 저장랙은 89개의 핵연료집합체를 저장할 수 있다. 인접한 연료 사이의 최소간격은 건물이 무붕산의 물로 침수되거나 화재진압용 에어로졸 또는 어떤 사고 시에도 미임계를 유지하도록 설계된다.

사용후연료도 신연료와 같은 형태의 고밀도저장랙에 보관된다. 사용후연료는 저장조에 습식 보관되며 저장랙은 356개(18년 운전과 한번의 노심 완전제거에 해당량)의 핵연료 집합체를 보관할 수 있다. 사용후연료 저장랙 모듈은 5개의 손상연료의 보관 용기를 위한 공간도 제공한다. 저장랙은 핵연료 마다 설계 저장위치가 있어 지정위치 이외의 장소에 핵연료가 보관되는 것을 방지하도록 설계된다.

나. KLT-40(러시아)

러시아에서 원자력 쇄빙선에 사용된 KLT-40^[8] 원자로는 분리형 원자로이지만 증기발생기와 원자로 압력용기의 연결거리가 매우 짧고 연결관이 압력용기로 설계되어 일체형원자로의 특성을 많이 보유하고 있다.

KLT-40의 재장전 주기는 4년이며 재장전을 위한 원자로 격실과 임시 사용후연료 저장조 격실이 그림 5와 같이 서로 붙어 있으며 두 격실은 상부에서 각각의 해치로 통해 있고 공통의 크레인을 사용하여 재장전 작업이 수행된다. KLT-40 노심의 핵연료집합체 수는 241개이며 순수하게 핵연료 인출에 소요되는 시간은 약 1주일 정도이며 핵연료 장전 시간은 2일 정도 소요된다.

신연료 장전 시 신연료 수송용기의 중앙에 위치한 집계를 크레인으로 들어올리고 연료를 물린 후 재장전기로 이동시켜 연료 인출구에 삽입하고 최종 마무리는 작업자가 수동으로 체결여부를 확인한다. 핵연료 재장전기에는 사용후연료의 이송을 위해 약 16톤의 재장전 캐스크가 장착되며 캐스크의 내부는 물을 채우지 않는 건식(dry type)이 사용된다. 재장전기는 원자로 상부에 설치되며 두 개의 편심 회전관에 의하여 연료의 좌표를 찾는다. 안내관(guide tube) 내에서 핵연료집합체의 삽입과 인출 시의 축력을 가하기 위하여 자전거의 체인과 유사한 체인을 이용한다. 원자로에서 인출된 연료는 잔열이 충분히 제거될 때까지 임시 사용후연료 저장랙에 보관되는데 랙의 용량은 최소 2번의 노심 교체 분량을 저장할 수 있다. 임시 저장랙에서의 연료배열은 사각형과 원형(육각형)이 있다. 사각형 배열에서는 캐스크 인수 장소에 연료를 내려놓으면 수조 상부에 위치한 이송 메커니즘에 의해 물 속에서 정해진 위치로 이송된다. 따라서 사각형 배열을 사용할 때 방사선 차폐 개념에서 저장조의 높이가 연료집합체 높이의 최소 2배 이상이 되어야 한다. 원형 배열은 수조 상부에 재장전기와 같은 개념의 기기를 장착하고 여기에 연료 캐스크를 올려놓고 정해진 좌표를 찾아 연료를 내려놓는다. 원형 배열의 경우에 저장조의 수위가 사각형 랙의 경우처럼 높지 않아도

된다. 임시 저장시설에서 잔열이 제거된 연료는 영구 보관 건물로 이동되는데 이송 방법은 사용후 연료 수송 캐스크(spent fuel shipping cask)를 이용하여 레일유도 이송웨건(rail guided transport wagon)에 실어서 이송한다.

3) VVER(러시아)

VVER^[9]은 경수를 냉각재 및 감속재로 사용하는 러시아의 대표적인 가압경수형원자로이다. 노심에서 가열된 고온의 일차냉각재를 증기발생기로 유도하여 증기발생기의 2차측에서 비등을 일으켜 증기를 만드는 구성으로 원자로 계통 측면에서 서구의 가압경수로와 기본적으로 다를 것이 없다. 다만 VVER에서는 SG가 가로로 놓인 점에 특징이 있다. 제 1세대인 VVER-440/V-230과 제 2세대인 VER-440/ V-213은 6 루프이고 제 3세대 VVER-1000은 4루프이다. 연료 및 연료집합체의 형상이 정육각형인 것도 특징의 하나이다. 그림 6은 VVER-1000 원자로 플랜트의 배치를 보여주고 있다. 플랜트의 배치도에서 보듯이 VVER 원자로는 사용후연료 저장조가 원자로 건물 내에 위치하고 있다.

VVER-1000 원자로의 경우에 연료수명은 3년이고 1년에 한번 재장전을 수행하면서 노심용량(163개 핵연료집합체)의 1/3을 교환한다. 재장전 작업은 물 속에서 수행되는데 원격조종되는 재장전기계를 이용하여 원자로에서 사용후연료를 취출한다. 사용후연료를 원자로 건물 내의 사용후연료 저장조에 보관하기 전에 핵연료 피복재의 손상여부를 확인한다. 연료의 손상이 없으면 사용후연료 저장랙에 보관되고, 만약 연료가 손상되었다면 밀봉 컨테이너에 담아 원자로의 수명동안 저장조 내에 보관한다. 사용후연료 저장조에는 최대 704개의 핵연료집합체를 저장할 수 있는 랙이 설치되어 있다. 사용후연료는 저장랙에 최소 3년 이상 보관되어 반응도와 잔열발생이 허용 기준 이하로 충분히 감소되면 사용후연료 캐스크에 담겨져 재처리 시설이나 중간저장시설로 이동이 가능하다. 사용후연료저장조는 2개의 냉각재순환루프 사이의 증기발생기 구획 경계 안에 위치한 방수 공간 내에 있으며, 한번에 하나의 핵연료집합체가 이송되도록 설계된 재장전 수로에 의해 상부 콘크리트 천장과 연결된다.

4) CAREM(아르헨티나)

CAREM^[10]은 증기발생기가 자기가압식 원자로용기 내에 설치된 자연순환 냉각방식의 소형(100MWt) 일체형원자로이다. 핵연료의 재장전 주기는 330일(50%교체)이며 상용경수로와 유사한 풀형의 재장전 방식을 채택하고 있다.

CAREM의 재장전 개념이 그림 7에 나타나 있다. 원자로 뚜껑을 열고 내부구조물이 제거된 후 원자로 상부를 물로 채운 상태에서 브리지 크레인을 이용하여 핵연료를 인출하고 보조건물과 수직으로 연결하는 이송튜브에 핵연료를 삽입한다. 보조건물의 이송채널에는 운송카트가 있어 이송튜브로 전달되어온 핵연료를 인수받아 사용후연료 저장조로 이동시킨다. 저장조 풀 위에는 핵연료 취급크레인이 운송카트에서 핵연료를 인수받아 저장조의 랙에 보관한다.

나. 고속중식로

1) MONJU(일본)

고속중식로 MONJU^[11]는 일본의 고속중식로 실용화를 목적으로 개발된 전기출력 280MW의 발전 플랜트이다. MONJU의 핵연료집합체 취급설비와 저장시설의 외관이 그림 8에 나타나 있다. 노심에 장전되는 핵연료집합체의 수는 내측 108개, 외측 90개로 총 198개이다.

신연료를 노심에 장전하는 경우나 역으로 사용후연료를 노심에서 취출할 경우에 먼저 수행될 작업은 소정의 위치에 있는 핵연료집합체에 핵연료교환기 집계의 위치를 정확히 맞추는 일이다. 이 위치결정은 회전플러그와 핵연료교환기를 함께 조작하여 행하여진다. 회전플러그 위에 탑재된

핵연료교환기의 고정 팔을 회전할 수 있도록 해 놓았기 때문에 양자의 회전 각도를 함께 조작하여 노심의 위치를 선택할 수 있다.

사용후연료집합체를 노내로부터 노외로 반출하는 경우에는 일단 노외 핵연료저장조(용량 250개)에 저장한다. MONJU에서는 사용후핵연료집합체가 이송을 위한 중계 용기에 저장된 뒤 핵연료출입기로 노외로 인양되고, 핵연료출입기가 이동하여 노외 핵연료저장조에 내리는 방식을 취한다. 노외 이송을 위해 노외 저장조에서 잔류붕괴열이 저하할 때까지 냉각된다. 사용후연료는 소정의 냉각기간을 거쳐 사용후핵연료 저장조에 이송되어 저장된다. 사용후핵연료 저장조에 저장하기 전에 핵연료에 부착된 나트륨 제거를 위한 세정작업을 수행하는데 초기 세정은 질소가스 분위기에서 질소가스로 블로다운한 뒤, 질소와 함께 물을 분부시켜 씻고 최종적으로 물로 씻는다.

2) PFBR(인도)

인도에서 건설중인 PFBR(Prototype Fast Breeder Reactor)^[12]은 출력 500MWe급의 실증로로 2010년에 첫 발전 예정이다. 대부분의 고속로와 마찬가지로 PFBR의 핵연료 취급계통도 노내취급계통과 노외취급계통으로 나누어진다. 노내에서는 핵연료 취급은 2개의 회전플러그와 노내핵연료교환기(InVessel Transfer Machine; IVTM)에 의해 이루어진다. 재장전 주기는 240일이며 하나의 핵연료집합체를 교체하는데 걸리는 시간은 110분 정도 소요된다.

신연료저장영역은 신연료 인수설비(Fresh Subassembly Receiving Facility; FSRF), 신연료저장소(Fresh Subassembly Storage; FSA), 검사설비(Inspection Facility; IF), 아르곤 충전 설비(Argon Filling Facility; AFF)를 갖추고 있다. 공장에서 운반된 신연료 운송캐스크(Shielded Shipping Cask; SSC)에서 신연료를 꺼내고 검사를 수행한다. 검사된 연료는 개별 용기에 넣어 지하에 저장한다. 재장전 준비기간에 신연료는 신연료저장소에서 꺼내져 검사설비에서 검사 후 신연료이송챔버(Fresh Subassembly Transfer Chamber; FSTC)에 실려 항상 아르곤으로 채워져 있는 연료이송방(Fuel Transfer Cell; FTC)으로 보내진다. 아르곤충전설비에서 신연료이송챔버의 공기를 제거하고 아르곤으로 채운다. 이송챔버는 이송방 하부에 위치한 포트에 밀봉 체결되고 신연료이송기가 연료를 집어 이송방 내부에 있는 임시 저장소에 보관한다. 연료 교환을 위해서는 두개의 이송챔버가 사용되는데 이송방 내부에는 똑 같은 이송기 2대가 있다. 하나는 신연료, 다른 하나는 사용후연료를 위해서 사용되지만 1대 고장시 나머지 1대가 두 가지 역할을 수행하게 된다.

사용후연료의 취급을 위한 배치도가 그림 9에 나타나 있다. 노내에는 핵연료 취급을 위하여 두개의 회전플러그와 하나 또는 두 대의 노내핵연료교환기가 설치된다. 핵연료교환기의 형태는 고정 오프셋 암(fixed offset arm) 형으로 작은 회전플러그에 위치한다. 핵연료교환기는 원자로 운전 중에는 들어올려진 상태를 유지하다가 재장전 기간 동안 노심, IVTP(In-Vessel Transfer Position)과 내부저장소 간에 핵연료를 이동시킨다. 원자로 용기 내부의 IVTM으로부터 핵연료의 인수와 방출은 경사형연료전달기구(Inclined Fuel Transfer Mechanism; IFTM)에 의해 이루어진다. IFTM은 수직평면에서 17° 기울어진 일차 램프(ramp), 램프의 끝에 달려 노내에서 핵연료를 담고 있는 나트륨으로 채워진 용기를 올리고 내리는 Rotating Shielded Leg(RSL), 그리고 RSL과 노외전달소(Ex-Vessel Transfer Position; EVTP)를 연결하는 이차 램프로 구성된다. 노외전달소에는 핵연료가 고착 또는 장기 보관 시 냉각 또는 가열이 가능하도록 되어있다.

모든 핵연료가 통과는 연료이송방은 경사형연료전달기구로 원자로용기와 연결되고, 이송챔버에 의해 신연료 저장소와 연결된다. 사용후연료 저장소와 연료이송방은 경사진 수중트롤리(Under Water Trolley; UWT)에 의해 연결되어 있다. 연료이송방에는 연료취급을 위한 두 대의 이송기, 세척 시설, 임시 저장소가 갖추어져 있다. 사용후연료의 나트륨은 질소와 함께 물을 분부시켜 세정한다. 손상된 연료는 세척하지 않고 탈염수를 채운 밀폐 용기에 보관된다. 사용후연료저장조는 탈염된 물을 채운 풀형이다. 풀의 용량은 5년 동안 방출량과 한번의 비상 노심 인출량을 포함한다.

4. 결론

일체형원자로 SMART의 핵연료 저장 및 취급계통 개념설계를 위하여 현재 가동 중이거나 설계가 진행 중인 국내외 원자로의 핵연료 저장 및 취급계통의 기술현황을 분석하였다.

원자로의 종류를 가압경수로, 가압중수로, 고속증식로와 가압비등수로로 나누고 각각을 대표할 수 있는 원자로의 핵연료 저장 및 취급계통을 조사하였다. 기술현황분석에 고려된 원자로를 각 원자로 형에 따라 나열하면 다음과 같다.

- 가압경수로 : 영광, 울진 원자로(한국), IRIS(미국), KLT-40(러시아), VVER(러시아), CAREM(아르헨티나)
- 가압중수로 : CANDU(캐나다)
- 고속증식로 : KALIMER(한국), MONJU(일본), PFBR(인도)

국내 상용 가압경수형 원자로는 보조건물에 핵연료를 저장하는데 신연료는 건식으로, 사용후연료는 물속에 저장한다. 핵연료 재장전시 원자로 헤드와 내부구조물을 제거한 상태에서 원자로 상부를 물로 채운 상태에서 사용후연료 저장조가 위치한 보조건물을 연결하는 이송관을 통하여 핵연료를 이동한다. 두 건물 사이의 핵연료 이동은 이송 운반기 및 직립기에 의해 수행된다. 일체형 원자로인 IRIS는 구형의 격납용기를 갖고 있다. 격납용기와 원자로용기의 상부에 밀봉개념을 도입하여 상용로와 같이 물속에서 핵연료 교환이 가능하도록 설계되었다. 선박용 원자로인 KLT-40은 원자로 상단에 설치된 재장전기를 이용한 건식 캐스크 이동방법을 채택하고 있다. 러시아 상용 발전로인 VVER은 원자로 건물 내에 사용후연료 저장조가 있다. CAREM은 상용로와 유사한 방법이지만 원자로건물과 보조건물을 연결하는 통로가 수직으로 배치되는 차이가 있다.

가압중수로는 CANDU가 대표적이다. CANDU는 천연우라늄 핵연료 다발들이 장착되는 칼란드리아 압력관으로 구성된 원통형의 원자로를 갖고 있다. CANDU는 천연우라늄 핵연료를 사용하기 때문에 농축우라늄을 사용하는 원자로보다 핵연료를 교체주기가 짧다. 핵연료 교체 때마다 원자로를 정지시키면 원자로 가동률이 낮아지기 때문에 운전 중 핵연료 교체 개념이 사용된다. 운전 중 핵연료 교환을 위해 자동 제어되는 로봇인 핵연료교환기가 운용된다. 사용후연료 이동시 핵연료 냉각을 위하여 핵연료교환기 뿐만 아니라 핵연료교환기가 사용후연료를 방출하는 포트에도 냉각장치가 있으며 사용후연료를 방출수조로 옮기는 이송엘리베이터를 위한 살수기능이 있다.

고속증식로는 국내의 칼리머, 일본의 몬주, 인도의 PFBR이 조사되었다. 고속증식로는 사용되는 냉각재인 액체금속의 특성 때문에 대기 중에서 핵연료 교환이 불가능하다. 따라서 밀폐된 환경에서 핵연료 교환이 이루어지며 이를 위해 노내 핵연료교환을 위한 위치설정장치가 추가로 필요하다. 또한 원자로에서 꺼낸 핵연료집합체에는 액체금속이 남아있기 때문에 연료를 저장소에 보내기 전에 냉각재의 세척을 위한 설비가 필요하다. KALIMER, MONJU와 PFBR 모두가 유사한 핵연료 저장 및 취급계통을 갖고 있지만 내부 핵연료교환기 형태와 핵연료를 노외로 전달하는 방식에서 약간의 차이를 갖는다.

기술현황분석 결과에 따르면 핵연료 취급계통은 설계기준을 만족하는 범위 내에서 각 원자로의 구조와 특성에 따라 경제적이고 효율적인 개념을 채택하는 것이 최선의 방법이다. 따라서 SMART-P를 위한 핵연료 취급계통도 SMART-P가 갖고 있는 고유한 원자로 특성에 적합할 뿐만 아니라 경제성과 효율성을 함께 갖는 설계개념을 개발하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 울진원자력 3, 4호기 최종안전성분석보고서, 9.1 핵연료 저장 및 취급
- [2] Final Safety Analysis Report: Wolsong NPP units no. 2/3/4, 9.1 Fuel Storage and Handling, KEPCO, 1995.
- [3] CANDU6 원자력발전소의 핵연료교환 제어시스템의 고찰, KAERI/AR-398 /94, 1994
- [4] CANDU System Description Part 1, "http://canteach.candu.org/library/ 19980102.pdf"
- [5] 액체금속로 설계기술개발: 기계설계기술개발 최종보고서, KAERI/RR-2026 /99, 1999.
- [6] IRIS Plant Overview, "<http://www.nrc.gov/reactors/new-licensing/new-licensing-files/ml030780815.pdf>"
- [7] J. Robertson, J. Love, R. Morgan, L.E. Conway, "IRIS General Plant Arrangement", Proceedings of ICONE10, Arlington, VA, April 14-18, 2002.
- [8] 김종인 외 1인, 국외출장 귀국보고서: KAERI/OKBM SMART-P 핵연료 저장 및 취급시스템 개념설계 기술협력 계약 협의
- [9] VVER Reactor, "<http://www.nucleartourist.com/type/vver.htm>"
- [10] CAREM : A Safe Innovative Small Nuclear Power Plant, Brochure, CNEA and INVAP, Argentina, 1994.
- [11] MONJU Web Site, "<http://www.jnc.go.jp/zmonju/mjweb/index.htm>"
- [12] Conceptual Designs of Advanced Fast Reactors, Technical Committee Meeting, Kalpakkam, India, 3-6 Oct 1995, IAEA-TECDOC-907, pp. 133-146.
- [13] 원자력지식정보관문국, 원자력백과사전, "www.atomic.or.kr"

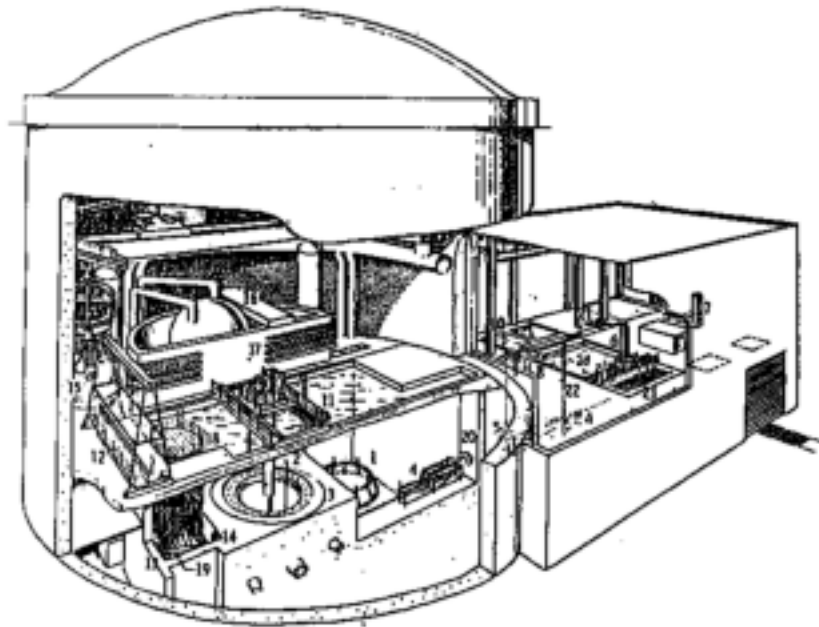


그림 1 상용 PWR에 적용 중인 핵연료취급시스템 배치도

- 1. 노심지시배럴 저장대, 2. 정렬용 안내핀, 3. 수조 밀봉체, 4. 직립기, 5. 핵연료이송관 밸브, 6. 사용후핵연료 취급기, 7. 신연료운반용기, 8. 이송계통 제어콘솔, 9. 수력공급기, 10. 사용후연료 수송용기 선적조, 11. 핵연료 재장전기, 12. 제어봉집합체 교체대, 13. 제어봉집합체 승강기, 14. 제어봉집합체 및 노내계측기 이송용기, 15. 원자로 헤드 집합체, 16. 비산물 방호구조물, 17. 제어봉구동장치 케이블 트레이, 18. 상부안내 구조물 인양장치, 19. 상부안내 구조물, 20. 핵연료이송관, 21. 이송계통 원치, 22. 신연료승강기, 23. 신연료 저장조, 24. 사용후연료 저장조

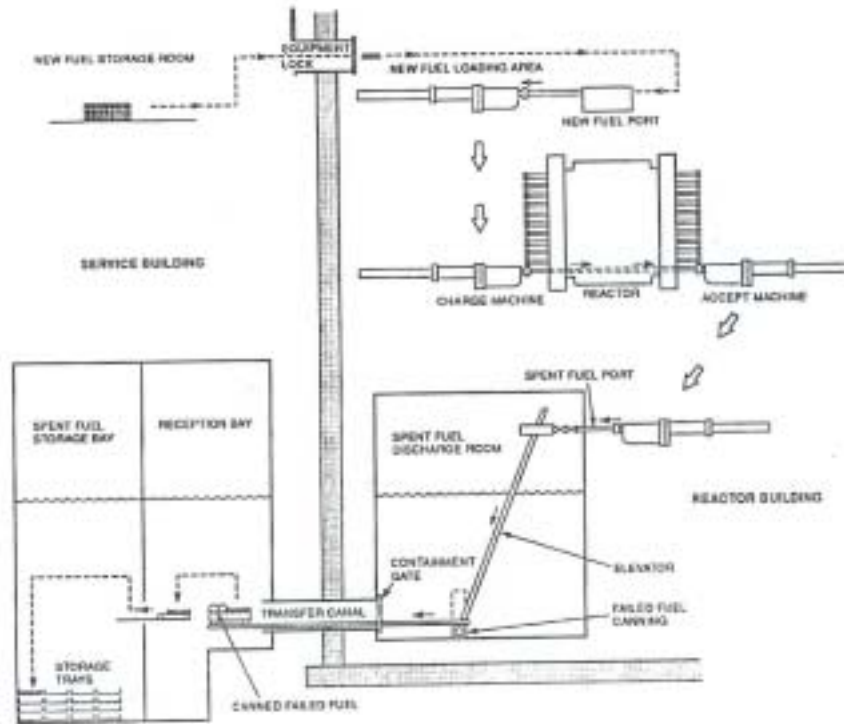


그림 2 CANDU형 원자로의 핵연료 재장전 흐름도

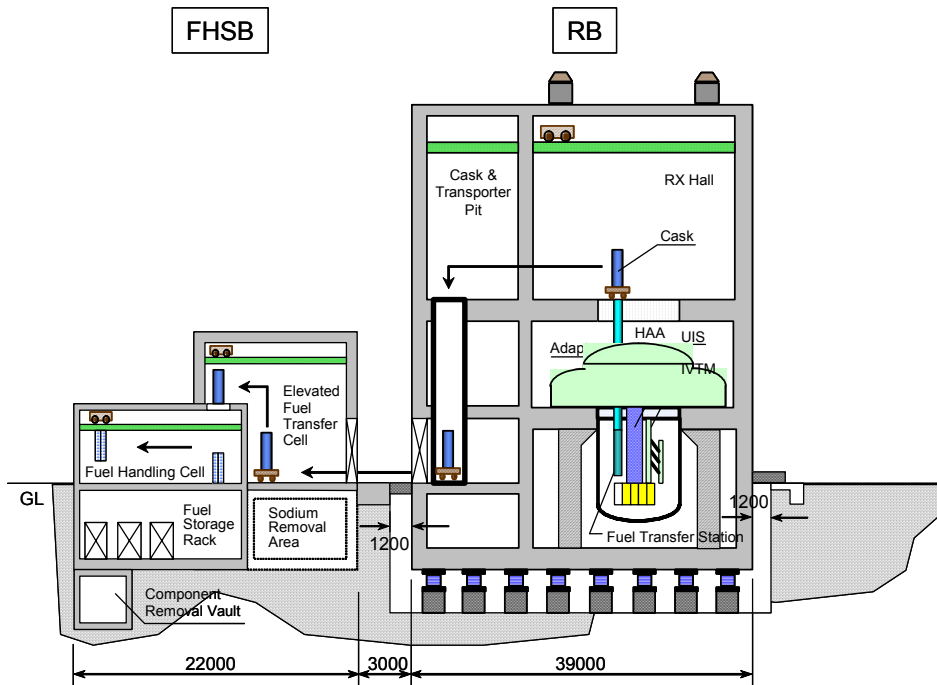


그림 3 칼리머 핵연료 재장전 계통 개념도

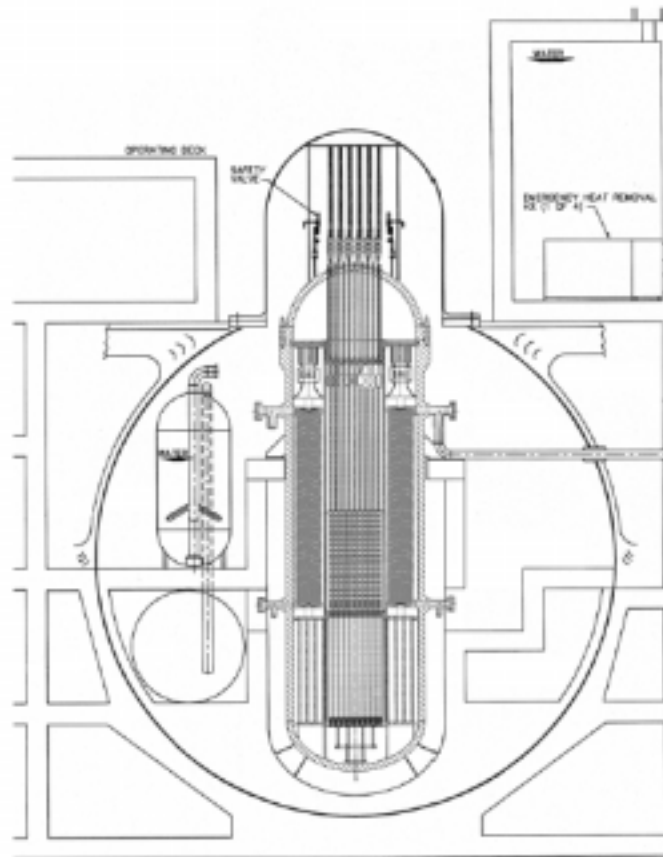


그림 4 IRIS Spherical Steel Containment

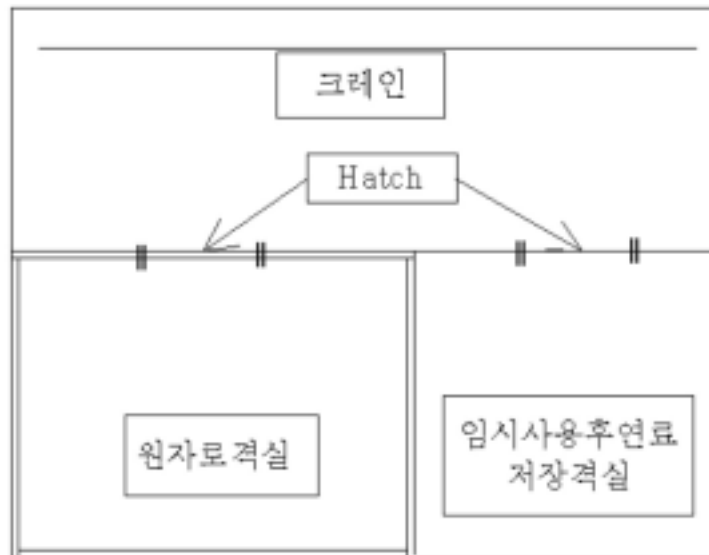


그림 5 KLT-40 원자로 격실 및 사용후연료 저장조 격실 배치

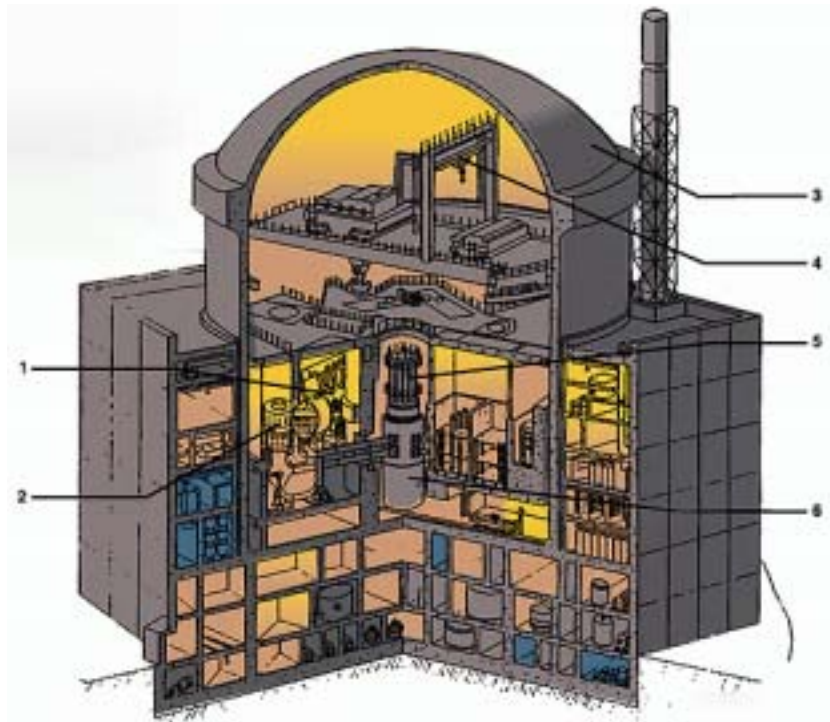


그림 6 VVER-1000 원자로 플랜트의 배치도

1.Horizontal steam generator, 2.Reactor coolant pump, 3.Containment building, 4. Refueling crane, 5.Control rod assemblies, 6.Reactor vessel

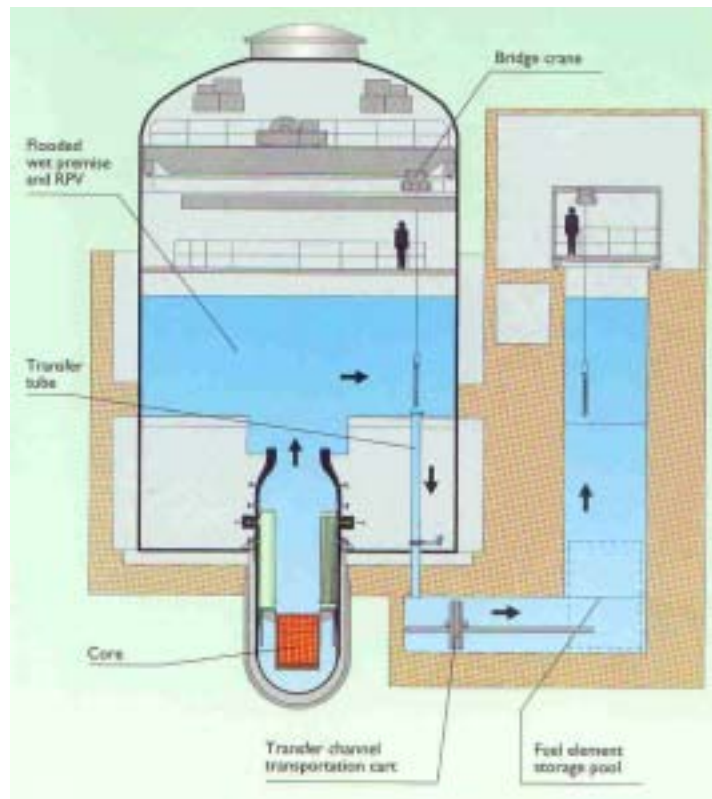


그림 7 CAREM의 핵연료 이송 개념

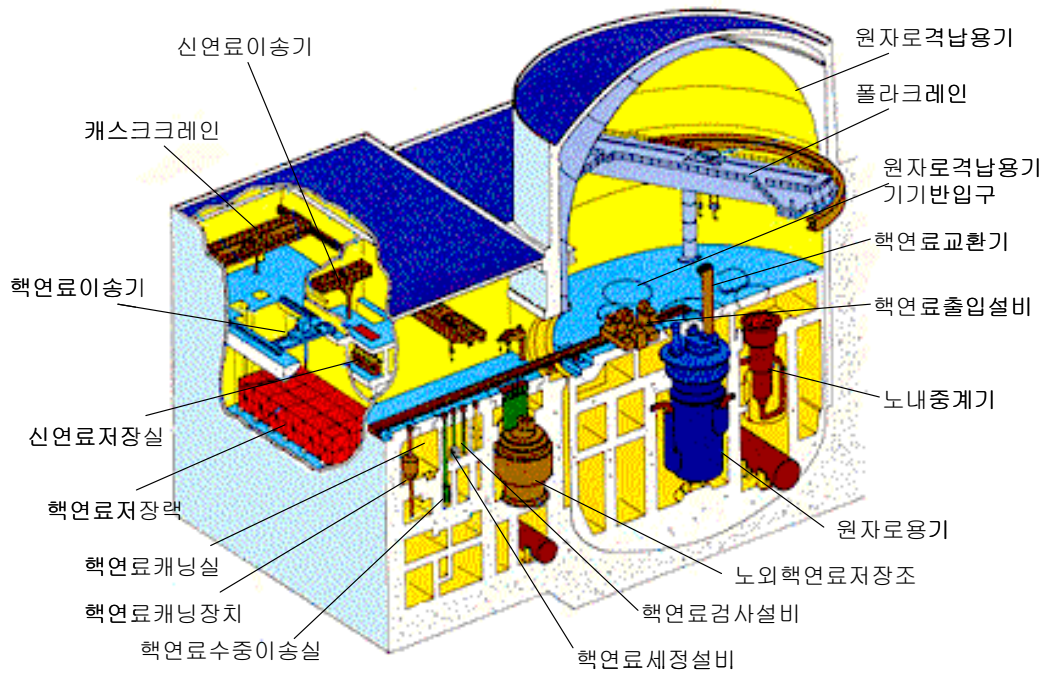


그림 8 MONJU의 핵연료 취급과 저장 설비도

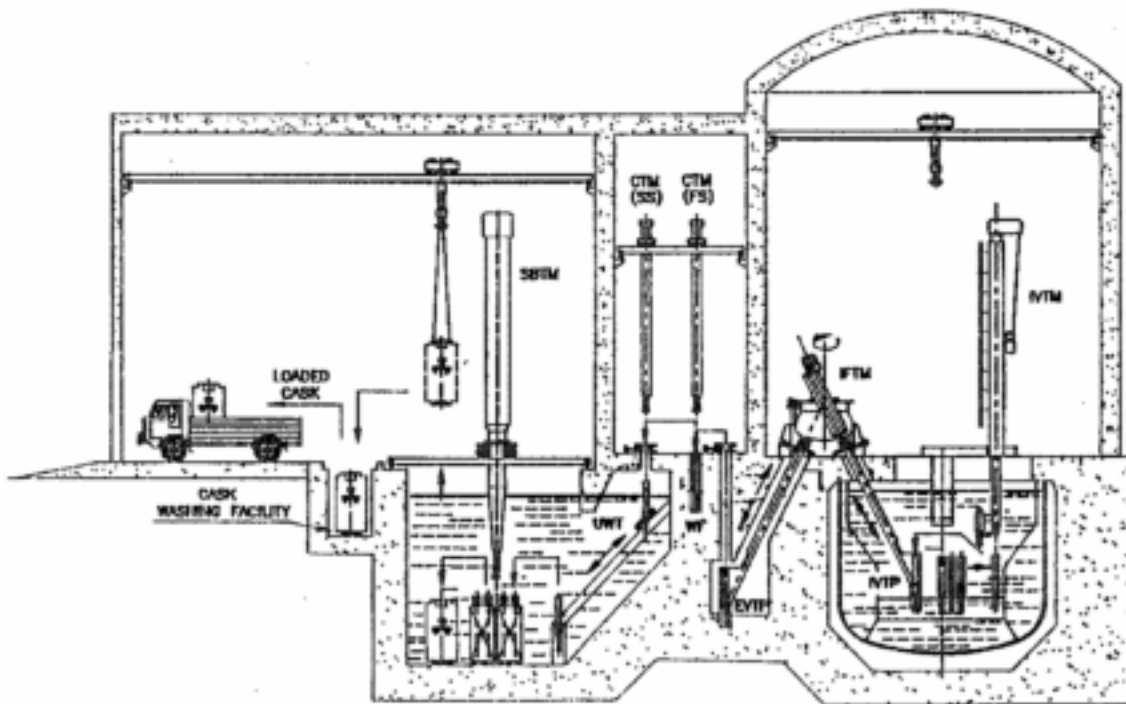


그림 9 PFBR의 사용후연료 취급 배치도

원자로	형태	출력(MWt)	재장전주기	재장전형식	신연료저장	사용후연료
UCN 5, 6	가압경수형	2,815	1년, 노심 1/3 교체	수조형, 재장전기계(브리지와 트롤리), 수평이송관	건식(보조 건물)	습식(보조 건물)
CANDU	가압중수형	700				