

일체형원자로 재장전 계통 개념 설계

이재선, 김종인, 김민환, 유제용, 김동욱, 김금구  
 한국원자력연구소, leejs@kaeri.re.kr

1. 서론

핵연료취급계통은 신연료운송용기를 이용하여 신연료를 인수한 후부터, 사용후연료를 사용후연료캐스크에 담아 장기저장시설로 운반하기 위해 선적시키기까지 핵연료집합체를 재장전, 취급 및 저장하기 위한 각종 기기, 공구 및 제반절차를 포함하는 종합계통을 의미한다. 국내에 널리 보급되어 있는 가압경수로형 원자로의 경우에는 사용후연료를 노심에서 인출하여 사용후연료저장조에 저장하고, 신연료를 보조건물에서 원자로건물로 이송하여 노심에 삽입하는 과정을 수중에서 일관되게 작업하도록 재장전수조를 이용한 핵연료취급계통을 구성하고 있다. 재장전수조를 이용한 핵연료취급은 물을 차폐체로 사용하여 원자로재장전 작업 중에 작업자의 안전 및 방사성물질의 유출을 방지하기에 유리하기 때문에 많은 원자로에서 적용되고 있는 기술이다. 그러나 신개념 원자로를 개발할 경우에는 원자로의 특성을 고려하여 원자로 고유의 안전하고 효율적인 핵연료 재장전 방법이 적용되어야 한다. 예를 들어 가압경수로형과 가압중수로형은 핵연료의 농축도와 연소특성 등 핵연료자체 특성, 핵연료 교체주기, 교체 방법 등의 운전 특성, 그리고 핵연료의 형상 등이 서로 다르기 때문에 핵연료의 취급계통, 특히 원자로 재장전계통은 매우 다르게 구성이 되고 있다.

현재 국내에서 개발 중인 일체형원자로에 적용될 핵연료 재장전계통은 원자로가 갖는 각각의 고유 특성을 고려하여 설계, 개발되어야 한다. 현재 여러 원자력 선진국 들이 고유한 형태의 일체형원자로를 개발하고 있거나 운영하고 있으며, 특히 일체형원자로는 중소형원자로로 개발이 가능하여 그 활용성이 다양함에 따라 일체형원자로의 개발은 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 하지만 일체형원자로의 설계 경형이 없는 국내에서는 원자로 자체의 설계 개발뿐 아니라 핵연료취급계통 설계 개발에 있어서도 참고할 수 있는 일반화된 기술이 없기 때문에 이의 설계 개념 설정 자체가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 현재 개발 중인 일체형원자로의 원자로 재장전계통 설계에 있어서 고유한 설계 인자를 검토보고, 일체형원자로의 핵연료 재장전계통 설계 개념을 제안하였다.

2. 일체형원자로용 핵연료취급계통의 특성

현재 국내에서 개발 중인 일체형원자로는 원자로용기, 증기발생기, 가압기 및 주냉각재펌프 등의 주기가 하나의 압력용기에 설치되는 일체형으로 구성되며, 핵연료재장전을 위해서는 Figure 1 과 같이 가압기 및 원자로 상부 구조물 전체가 원자로에서 분리되도록 하는 구성을 갖는다. 이때 증기발생기와 주냉각재펌프는 원자로에 장착된 상태를 유지한다.

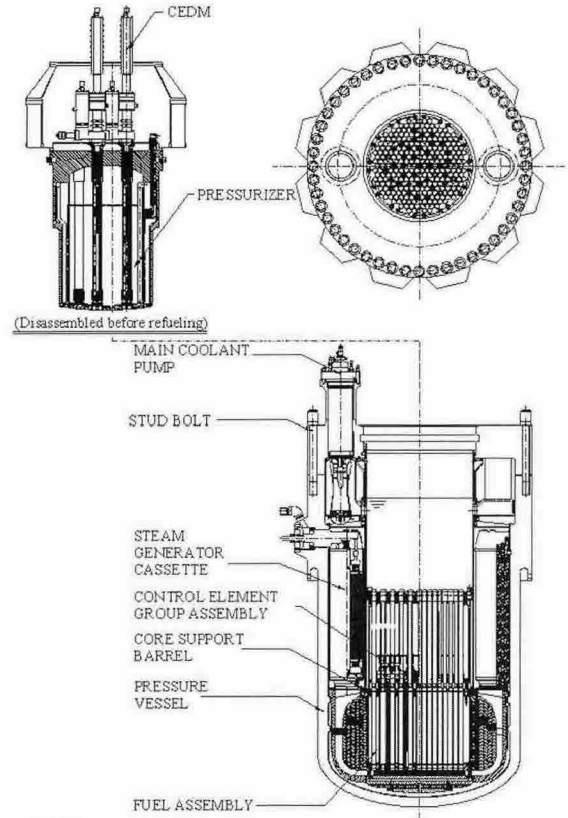


Figure 1. Reactor vessel assembly ready for refueling

일체형원자로와 기존 상용원자로의 설계 차이를 살펴보면 다음과 같다. 일체형원자로는 중소형원자로로 개발되어 원자로심은 상용원자로에 비해 매우 작은 반면에 다수의 핵연료집합체가 원자로심에 설치되어 있다. 따라서 원자로재장전계통도 상용원자로의 재장전계통에 비해 정밀한 위치 제어와 인출/삽입하중 제어가 가능하여야 한다. 또한 상용원자로와 달리 재장전시에 주냉각재펌프가 원자로 상부에 설치되어 있어야 하므로 재장전 중에 원자로 전체가 재장전수조에 잠기도록 하는 일반적인 재장전계통을 구성할 수 없기 때문에 수중 재장전 이외의 방법이 강구되어야 한다. 이에 적용 가능한 재장전계통 구성은 일부 소형원자로에 적용되고 있는 바와 같이 재장전기가 원자로에 바로 장착이 되는 방법이 적절하다. 이러한 구성에서는 재장전수조가 제공하던 방사선 차폐 기능을 재장전캐스크가 대신 수행하여야 한다. 원자로건물 내에서 공기중으로 이동하여야 하는 재장전캐스크는 핵연료의 발열 특성을 고려하여 사용후연료의 효율적인 냉각 방식을 적용하여야 하며, 원자로건물과 보조건물 간에 핵연료를 이송하기 위한 핵연료이송계통에 효율적이고 안전하게 핵연료를 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 무봉산 노심으로 설계되는 일체형원자로의 냉각수와 동일하게 사용후연료저장조에도 동등한 냉각수

인 무봉산수를 사용하여 원자로 냉각재와 동일 수질을 사용하는 것이 바람직하다.

핵연료의 저장 및 취급뿐 아니라 원자로의 해체 및 조립 관련 기기는 일체형원자로 고유설계에 적합하도록 설계되어야 하며, 작업자의 안전을 위한 방사선 조사 영향이 재검토되어야 한다.

이와 같은 일체형원자로의 고유 설계 특성에 따른 핵연료취급계통의 설계기술 개발 부분을 제외하고는 신개발되는 일체형원자로의 인허가의 용이성과 기술검증 과정의 단축을 위해서는 일체형원자로에 적용 가능한 기존 상용원자로 핵연료취급계통의 설계 기술 적용이 유리할 것으로 판단된다.

**3. 일체형원자로의 재장전계통 설계개념**

일체형원자로의 설계 특성을 고려하여 설계되고 있는 재장전기를 포함한 원자로재장전계통의 구성 개략도는 Figure 2 와 같다.

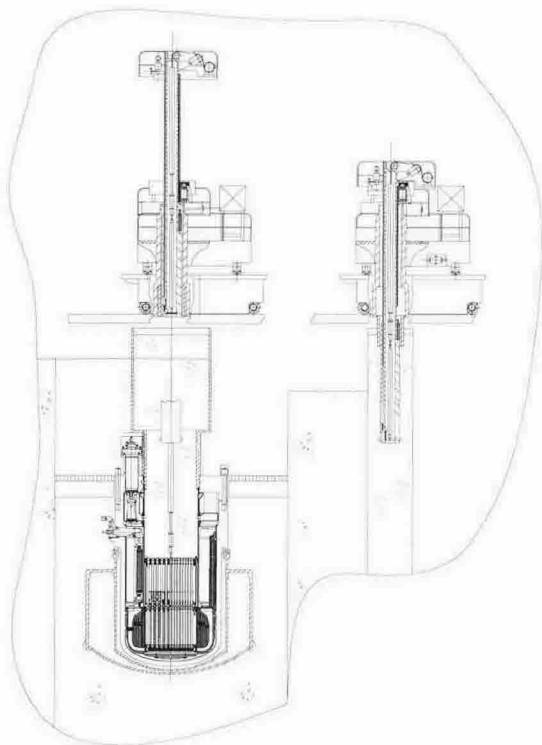


Figure 2) Reactor refueling system

재장전기는 방사선 차폐를 위하여 원자로 상부에 설치되는 재장전차폐수조와, 원자로건물 측 핵연료이송계통 사이에서 레일 위를 이동할 수 있도록 구성되며,

노심에서 핵연료이송계통 수조로 이송되기까지 사용후연료의 방사선 차폐 및 냉각은 재장전기 내의 재장전캐스크에서 이루어진다. 이동 중 재장전캐스크는 밀봉되어 내부 냉각수의 유출은 방지되나, 설계요건에 따라 물받이를 보조 구성한다. 재장전차폐수조에 공급되는 냉각수는 원자로 냉각수와 동일하며 따라서 봉산을 포함하지 않는다. 재장전캐스크 내에서 사용후핵연료는 습식으로 저장되어 일정시간 동안 사용후연료의 냉각을 보장하지만, 재장전캐스크 내에 사용후연료가 이동되는 도중 사고 또는 정전에 의해 재장전기의 이동이 불가능하여 재장전캐스크가 과열이 되는 경우 재장전기 자체에 설치되어 있는 냉각수 탱크의 보충수를 사용하여 사용후연료를 추가 냉각하게 하며, 냉각수 여분이 부족할 경우 외부 충수를 재장전캐스크와 파이프로 연결하여 핵연료 냉각을 보장할 수 있도록 설계된다. 사고 시 재장전기는 수동으로 구동하여 핵연료를 안전 구역으로 이송토록 한다.

핵연료이송계통은 연료이송관으로 연결된 원자로건물 내 핵연료이송수조 및 보조건물 내 수조 사이에서 사용후연료를 이송한다. 신연료는 보조건물에서 원자로건물로 건식 이송되므로 비상재장전으로 인해 사용후연료를 재장전하는 경우를 제외하고는 핵연료이송계통으로 이동하지 않는다. 일체형원자로에 적합한 연료이송관의 형태로 경사이송관 및 상용원자로 형태의 수평이송관이 검토되었으며, 원자로건물의 관통부를 최소화할 수 있도록 수평이송관을 적용하도록 하였다.

**결론**

일체형원자로의 설계특성을 고려한 원자로재장전계통의 설계 인자를 검토하였으며, 이에 적절한 설계개념을 도출하였다.

**후기**

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 두산중공업의 지원으로 수행되었습니다.

**REFERENCES**

[1] Design Requirements for Light Water Reactor Fuel Handling Systems, ANSI/ANS 57.1-1992  
 [2] 경수로형 원전 안전심사지침, 제 9.1.4 절 경하중 취급계통, 한국원자력안전기술원