

일체형원자로 핵연료취급계통의 설계요건

Design Requirement for Fuel Handling System of Integral Reactor

이재선, 김민환, 유제용, 김종인, 지성균

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로는 원자로심이 상용원자로에 비해 매우 작은 반면에 다수의 핵연료집합체가 장착되고, 핵연료의 특성도 상이하기 때문에 핵연료취급계통도 이에 상응하는 고유의 설계 방안이 모색되어야 한다. 세계적으로 개발이 진행되고 있는 중소형 원자로에는 각각 고유한 원자로 설계특성과 이에 따른 고유한 핵연료취급계통이 적용되고 있으나, 국내에서는 핵연료취급계통의 독자개발 경험이 없기 때문에 원자로의 개발과 함께 핵연료취급계통의 기술기준 설정이 먼저 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 핵연료취급계통의 구체설계에 앞서 적용되어야 하는 설계요건을 검토하였다.

Abstract

The prototype integral reactor has many fuel channels in a relatively small reactor core with different channel characteristics. The fuel handling system for the integral reactor should be designed as specific system considering reactor specification. Each nuclear reactor has its own fuel handling system design. Therefore the design requirements and bases for the integral reactor should be settled simultaneously with reactor development. In this paper, design requirements for the fuel handling system of the integral reactor are developed.

1. 서 론

핵연료취급계통은 신연료 운송용기 인수로부터 사용후연료 캐스크를 선적하기까지 핵연료 집합체를 재장전, 취급 및 저장하기 위한 각종 기기, 공구 및 제반절차를 포함하는 종합계통을 의미한다. 국내에 가장 널리 보급되어 있는 가압경수로형 원자로를 기준으로 신연료를 원자로에 장전하고, 운전 후 사용후연료를 인출하는 과정에 대해 핵연료의 취급계통은 대략 다음과 같은 순서에 의해 구성된다(Figure 1)[1].

1) 신연료 이송 및 저장

- 신연료 운송용기를 이용하여 원자로 보조건물로 이송
- 인수검사
- 신연료 저장대에 건식 보관

2) 핵연료 취급 및 이송

- 수중 재장전을 수행하며, 원자로용기 상부덮개를 제거하여 장전 준비

- 핵연료 이송계통을 이용하여 신연료를 격납건물로 이송
 - 핵연료 재장전기를 이용, 원자로에 신연료 장전
 - 재장전 절차 완료
- 3) 사용후연료 이송 및 저장
- 핵연료 재장전기를 이용, 원자로에서 사용후연료 인출
 - 핵연료 이송계통을 이용하여 사용후연료를 보조건물로 이송, 사용후연료저장조에 저장
 - 사용후연료캐스크로 이송 저장, 제염소로 이송 후 제염
 - 중간 저장시설 또는 영구 저장시설로 이송

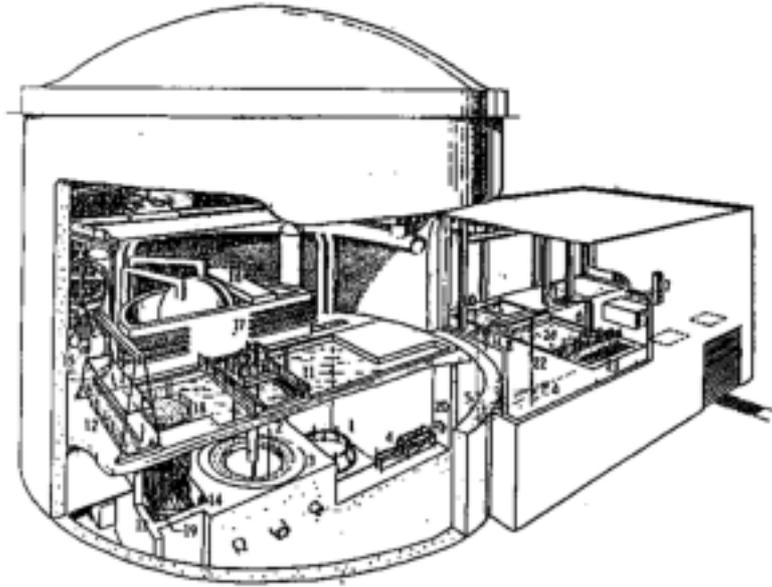


Figure 1. Fuel handling system for commercial PWR

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

국내의 상용원자로는 가압경수로형이 대부분이며, 4기의 가압중수로형이 운전되고 있다. 일반적인 가압경수로 핵연료취급계통은 기능에 따라 신연료 및 사용후연료 저장설비를 제외하고 5종의 하부계통으로 구분되며, 각각 취급기기(handling equipment), 취급공구(handling tool), 검사기기 (inspection equipment), 임시저장기기(temporary storage equipment) 및 연료이송기(the transfer tube assembly)로 구성된다[2].

가압경수로형과 가압중수로형은 핵연료의 농축도와 연소특성 등 핵연료자체 특성, 핵연료 교체 주기, 교체 방법 등의 운전 특성, 그리고 핵연료의 형상 등이 서로 다르기 때문에 핵연료의 취급계통은 매우 다르게 구성이 된다. 이와 같이 핵연료의 취급계통은 원자로가 갖는 각각의 특성에 따라 적합하게 설계되어야 하며, 따라서 현재 국내에서 개발 중인 일체형원자로에 적용될 핵연료 취급계통 또한 고유한 자체 특성을 고려하여 설계, 개발되어야 한다. 현재 여러 원자력선진국은 고유한 형태의 일체형원자로를 개발 또는 운영하고 있으며, 중소형원자로로 개발이 가능한 일체형원자로의 활용성이 다양해짐에 따라 일체형원자로의 개발은 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 하지만 일체형원자로의 설계 경험이 없는 국내에서는 원자로 자체의 설계 개발 뿐 아니라 핵연료 취급계통 설계 개발에 있어서도 참고할 수 있는 일반화된 기술이 없어 이의 개념 설정 및 설계요건의 검토가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 현재 개발중인 일체형원자로의 핵연료취급계통 설계에 있어서 고유한 설계 인자를 살펴보고, 설계에 적용하여야 하는 설계요건을 검토하고자 한다.

2. 일체형원자로용 핵연료취급계통의 특성

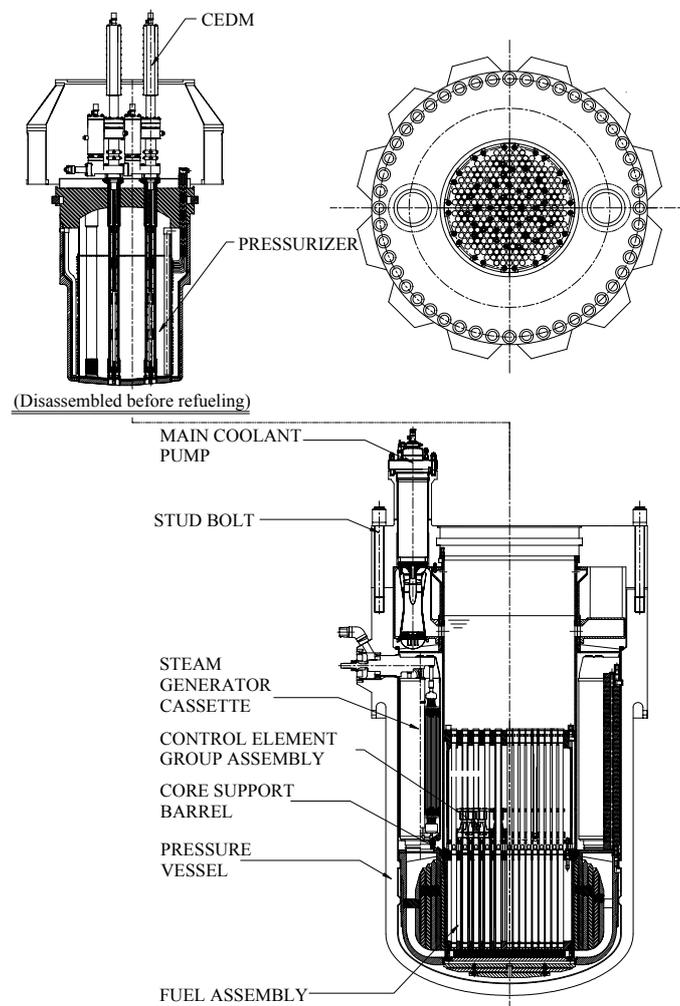


Figure 2 Reactor Vessel Assembly Ready for Refueling

현재 개발중인 일체형원자로는 원자로용기, 증기발생기, 가압기 및 주냉각재펌프 등의 주기가 일체형으로 구성되며, 핵연료재장전을 위해 Figure 2와 같이 가압기 및 원자로 상부 구조물 전체

가 원자로에서 분리된다. 재장전 기간 중 증기발생기와 주냉각재펌프는 원자로에 장착되어 있으며, 주냉각재펌프의 경우에는 수리를 위해 해체도 가능하다.

일체형원자로에 적용되는 핵연료취급계통은 원자로의 고유 설계 특성을 고려하여 안전하고 효율적이며 경제적인 방법으로 핵연료를 취급하여야 하므로, 먼저 일체형원자로와 기존 상용원자로의 설계 차이를 살펴보면 다음과 같다.

일체형원자로는 중소형원자로로 개발되기 때문에 원자로심은 상용원자로에 비해 매우 작은 반면에 다수의 핵연료집합체가 원자로심에 설치되어야 한다. 따라서 핵연료취급계통도 소형으로 정밀 제어가 가능하도록 설계, 제작되어야 한다.

또한 상용원자로와 달리 재장전 중에 원자로 전체가 수조에 잠기는 구성을 갖기 어렵기 때문에 수중 재장전 이외의 방법이 강구되어야 할 것이며, 일부 소형원자로에 적용되고 있는 바와 같이 재장전기가 원자로에 바로 장착이 되는 구성이 검토되어야 한다. 이러한 구성에서는 원자로에서 핵연료저장조까지의 이송 개체는 핵연료집합체 자체가 아니라 방사선 누출이 방지된 사용후연료 캐스크를 이용한다. 원자로 내에서 공기 중으로 이송되는 사용후연료캐스크는 핵연료의 발열, 방사선 조사 등의 특성을 고려하여 건식 또는 습식으로 설계되어야 하며, 핵연료이송계통에 사용후 핵연료의 인출 및 장전계통이 설계되어야 한다.

또한 원자로심은 감속재온도 부반응도 효과를 극대화하기 위해 무붕산노심으로 설계되고, 원자로의 출력변동을 적절하게 제어하기 위해 미세반응도 제어능력을 갖는 제어봉구동장치를 설치하게 된다. 재장전 기간 중 핵연료 저장조에 붕산수를 사용할 경우에는 재장전되는 핵연료집합체를 세척하여야 하며, 그 이외의 경로를 통한 붕산수의 유입을 방지하는 세척계통이 불필요하게 설치되어야 하므로 재장전수는 원자로 감속재와 동일 수질을 사용하는 것이 바람직할 것이다.

핵연료의 취급 뿐 아니라 재장전을 위한 가압기 등 원자로의 해체 및 재조립 관련 기기는 일체형원자로에 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 일체형 원자로에 적용 가능한 기존 상용원자로 핵연료취급계통의 설계 기술 적용이 유리할 것으로 판단된다.

3. 핵연료취급계통에 적용되는 기술기준

신연료의 저장과 취급계통설계는 경수로의 안전심사지침[3]과 설계요건[4]을 따라 설계되어야 한다. 사용후연료의 저장과 취급계통설계는 경수로의 안전심사지침[5]과 설계요건[6]을 따라 설계되어야 한다.

핵연료취급계통은 경수로의 안전심사지침[7,8]과 설계요건[2]을 따라 설계되어야 한다. 일체형원자로 핵연료취급계통이 갖추어야 할 기능요건 및 설계요건의 주요 인자는 다음과 같다.

1) 기능요건

- 핵연료 취급계통의 기능은 신연료 및 조사된 사용후핵연료를 발전소 내에서 안전하게 이동하는 것이다.
- 핵연료 취급계통은 핵연료 취급의 임계를 방지하도록 설계되어야 한다.
- 핵연료 취급계통은 조사후 핵연료의 클래딩 파손을 방지하여야 한다.
- 핵연료 취급계통은 운전 중 작업자의 방사선 피폭을 최소화하여야 한다.

2) 설계요건

- 핵연료의 손상을 방지하고, 방사선 위험을 내포하고 있거나 작업자에 대한 불의의 방사선 조사 위험을 초래할 수 있는 조건을 방지하기 위해서 기계적 또는 전기적 안전장치가 시스템 내에 설계되어야 한다.
- 신연료 또는 사용후연료를 취급하는 모든 기기는 핵연료취급 중에 불의의 임계상태가 발생하지 않도록 설계하여야 한다.
- 핵연료를 그래플링, 래칭, 운송, 회전, 지지 또는 호이스팅하는 것과 관련된 기기의 설계용력은 기기의 어떤 부분에서도 핵연료의 낙하 또는 손상을 발생시킬 수 있는 구조적 손상이 발생되지 않도록 설정되어야 한다.
- 핵연료취급계통은 고신뢰도를 갖고 효율적인 방법으로 작동될 수 있도록 설계되어야 한다. 고 효율성을 얻기 위해 단순하고 직접적인 작동을 사용하는 시스템을 설계한다.
- 설계 수명, 방사선 손상 저항, 유지보수성 및 제염 편의성이 검증되어야 한다.
- 기기 부품은 시험과 유지보수가 가능하도록 설계되고 설치되어야 한다.
- 기기의 설계와 배치는 정상운전, 비정상운전, 유지보수 및 시험을 위해 안전성, 방사선 조사, 인간공학이 고려되어야 한다.
- 원자로 격납건물 부분으로 분류되는 연료이송계통의 일부분(상용원자로의 경우 차단 플랜지, 일체형원자로 설계의 경우 차단 플랜지 또는 해치)은 안전등급 2등급으로 설정되며, ANSI/ANS 56.2-1984(R1989)의 요건을 만족하여야 한다. 그 이외의 모든 구성은 비안전등급으로 설정된다.
핵연료취급계통 중 연료이송계통의 일부분(상용원자로의 경우 차단 플랜지, 일체형원자로의 경우 차단 플랜지 또는 해치)는 내진범주 1등급으로 구분되며, 그 이외의 구성은 비내진범주로 구분된다.
- 핵연료취급을 위한 이송 용기는 그 표면의 방사선량율이 시간당 1000 mRem/hr 이하로, 그 표면으로부터 1미터 거리의 방사선량율이 시간당 10 mRem/hr 이하이어야 한다[9].

3) 상용원자로 설계요건의 재검토 필요항목

일부 상용원자로에 적용 가능한 설계 기준은 일부 항목에 있어 상용원자로에 현재 가장 널리 사용되고 있는 산화우라늄타입의 핵연료에 대해 설정되어 있다. 따라서 일체형원자로가 다른 형식 또는 설계의 핵연료를 사용할 경우 인허가를 위한 별도의 기준 설정이 필요하다.

4. 결 론

- 1) 기존 상용원자로의 설계 요건 및 기준을 바탕으로 일체형원자로의 핵연료 취급계통의 설계 요건을 검토하였다.
- 2) 상용원자로에 적용되고 있는 핵연료취급계통의 설계 기준 및 구성은 일체형원자로에 재장전 방법 및 순서, 방사선 조사 영향, 재장전 수조의 수질 등에 있어서의 상이점으로 인해 직접적인 적용이 어려운 것으로 판단되므로, 원자로 개발과 함께 병행하여 일체형원자로에 적합한 핵연료취급계통의 설계가 수행되어야 한다.
- 3) 일체형원자로의 핵연료 취급계통 설계는 설계 안정성 및 인허가 요건 충족을 위해 기존 상용원자로의 설계를 바탕으로 이루어질 것으로 판단되나, 일체형원자로 고유 설계 특성이 고려된 고유의 핵연료취급계통의 개발이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 울진원자력 3,4호기 최종안전성분석보고서, 9.1 핵연료저장 및 취급
- [2] Design Requirements for Light Water Reactor Fuel Handling Systems, ANSI/ANS 57.1-1992
- [3] 경수로형 원전 안전심사지침, 제 9.1.1절 신핵연료 저장, 한국원자력안전기술원
- [4] Design Requirements for New Fuel Storage Facilities at Light Water Reactor Plants, ANSI/ANS 57.3-1933
- [5] 경수로형 원전 안전심사지침, 제 9.1.2절 사용후핵연료 저장, 한국원자력안전기술원
- [6] Design Requirements for Light Water Reactor Spent Fuel Storage Facilities at Nuclear Power Plants, ANSI/ANS 57.2-1983
- [7] 경수로형 원전 안전심사지침, 제 9.1.4절 경하중취급계통, 한국원자력안전기술원
- [8] 경수로형 원전 안전심사지침, 제 9.1.4절 중하중취급계통, 한국원자력안전기술원
- [9] 과학기술부고시 제2001-23호, 방사선물질의 포장 및 운반에 관한 규정 제 15조