



THEME 05

소듐냉각고속로의 고유 계통 특성

이재한 | 한국원자력연구원, 책임연구원 | e-mail : jhlee@kaeri.re.kr

이 글에서는 제4세대 원자로로 다시 부각되고 있는 소듐냉각고속로(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor)의 활용성, 계통설계 구성 및 공학적 안전설비에 대하여 가압경수로(PWR: Pressurized Water Reactor)와의 차이점을 위주로 소개한다.

소듐냉각고속로 활용성

소듐냉각고속로는 핵분열에 고속중성자를 이용하는 방식으로 핵연료 증식 특성이 있어서 원자력발전의 초창기부터 우리나라 자원의 효율적 활용이라는 측면에서 개발되었다. 그동안의 연구개발을 통해 기술적 타당성은 입증되었지만 경수로 대비 불리한 경제성과 일련의 사고발생으로 안전성에 대한 논란이 제기되어 상용화가 이루어지지 못하고 있었다. 그러나 최근에 와서 다음과 같은 두 가지 이유로 제 4세대 원자로로 다시 부각되고 있다. 첫째 그림 1, 2와 같이 우리나라 자원의 활용 측면이다.

경수로 사용후핵연료를 재순환하는 개념은 화수분

과도 같이 사용한 연료보다 더 많은 연료를 생산하면서 운전하는 고속로 특성에서 나온다. 둘째, 그림 3과 같이 경수로 사용후핵연료의 관리 기간을 대폭 줄여주는 독성감소 및 폐기물량 감축 특성에 있다.

소듐냉각고속로 특성

소듐냉각고속로의 고유한 계통 특성으로는 가압경수로와 확연히 차이는 다음과 같은 몇 가지를 들 수 있다.

노심의 열을 받아내는 일차계통 냉각재로 표 1의 특성을 갖는 액체 상태의 소듐을 사용하며, 받아들인 열을 다시 증기발생기로 전달하는 중간열전달계통을 갖고 있다. 냉각재는 대기압 상태이며, 운전온도는 500℃ 전

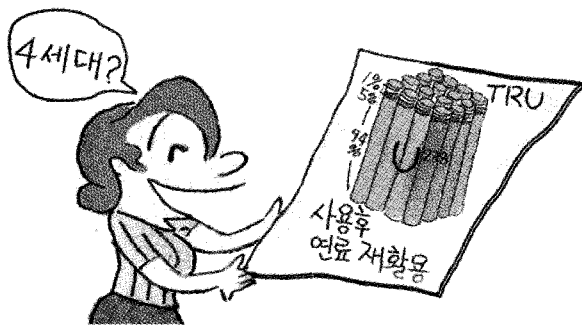


그림 1 경수로 사용후핵연료 성분

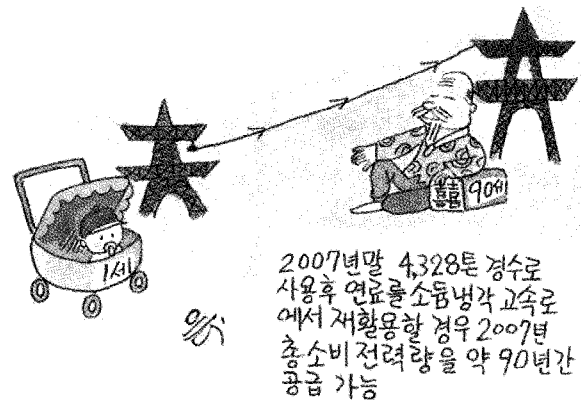


그림 2 경수로 사용후핵연료 활용성

2007년말 4,328톤 경수로 사용후 연료를 소듐냉각고속로에서 재활용할 경우 2007년 총 소비 전력량을 약 90년간 공급 가능

후이다. 사용후핵연료에 대한 재순환공정에 의해 만들어진 신규 핵연료를 노심에 재장전 한다. 이것은 냉각재로 고압의 물을 사용하고, 초기 방사선을 띠지 않는 우라늄 연료를 사용하는 가압경수로와는 가장 다른 특성이다. 또한 대기압 운전으로 가압경수로에 존재하는 가압기가 없다.

핵연료 교환은 경수로와 달리 소듐냉각재가 공기와 접촉하면 화재가 발생하기 때문에 원자로헤드를 개방하지 않고 불활성 가스로 밀봉된 상태에서 수행된다. 핵연료를 교환하기 위해서는 노심 상단에 위치한 상부내부구조물을 피해서 핵연료 취급장치가 기구학적으로 노심집합체 상단에 수직으로 접근할 수 있도록 설계된다.

플형 소듐냉각원자로는 중간열교환기와 일차냉각재펌프가 원자로용기 내부에 위치하며, 원자로헤드에서 수직방향으로 주요 기기가 설치되어 지지된다. 원자로용기 내부에는 일차펌프에서 노심유입실로 연결된 매우 짧은 일차배관이 있다. 플형 원자로에는 원자로헤드에 모든 관통부가 있고 원자로용기에는 어떠한 관통부도 갖고 있지 않으며, 운전 중에 일차소듐이 원자로용기 외부로 나가지 않는다.

원자로헤드를 통과하는 소듐배관으로는 중간열전달 계통, 안전등급 잔열제거계통, 원자로 냉각재 소듐의 공급 및 불순물 농도 등을 조절하는 보조액체금속 공정 계통 등이 있다.

소듐냉각고속로의 계통 구성

고속로의 발전소 전체 계통은 원자로계통, 냉각재 및 연결계통, 공학적 안전설비, 감시 및 제어계통, 보조계통, 터빈계통, 방사성폐기물 관리계통, 전원계통, 방사

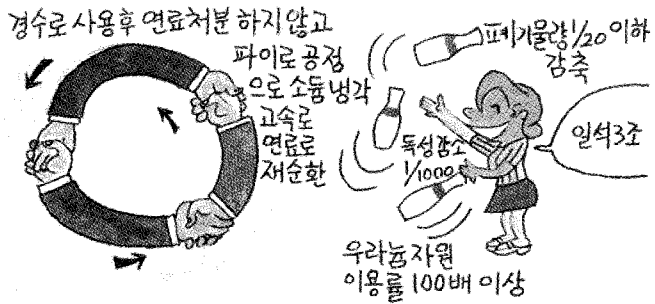


그림 3 고속로 활용의 기대효과

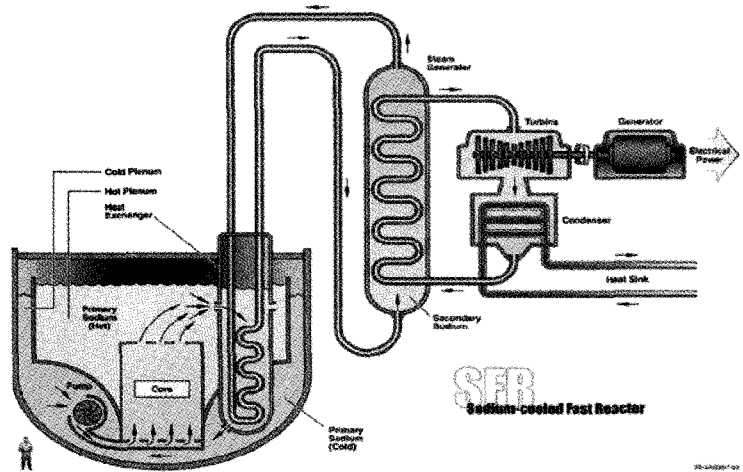


그림 4 플형 소듐냉각고속로

표 1 소듐금속과 물의 특성 비교

- 은백색의 부드러운 금속 (소듐=나트륨)
- 지구상에 6번째로 많은 원소 (지각의 2.8%)
- 열을 잘 흡수하고 전달하는 특성
- 98℃~882℃에서 액체인 금속

인간	물(H ₂ O)	소듐금속	인간
녹는점(℃)	0.00	97.83	
끓는점(℃)	100.0	882.9	대기압
열 전달 능력 (W/m·K)	0.61	96.9	100℃

선 보호계통 등으로 가압경수로와 동일한 계통으로 구성되어 있다.

소듐냉각고속로의 핵증기공급계통(NSSS)은 원자로

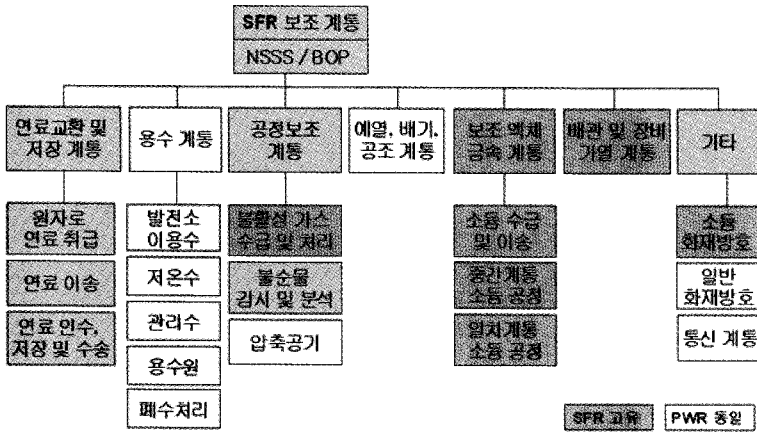


그림 5 소듐냉각고속로 핵증기공급계통과 발전계통의 보조계통 구성

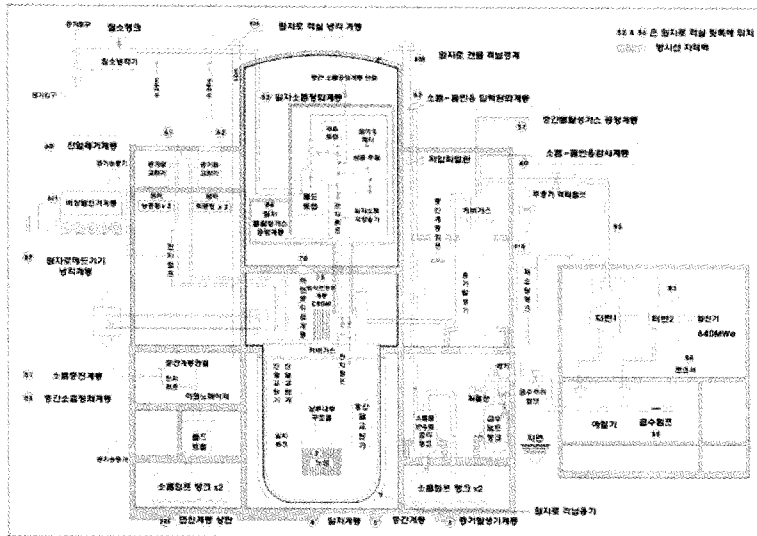


그림 6 개념설계 중인 소듐냉각고속로 핵증기공급계통과 발전계통도

노심에서 발생하는 열을 원자로 일차소듐냉각재로 흡수하고 이를 다시 중간열전달 계통을 통하여 증기발생기 튜브 내의 냉각수로 전달하여 증기를 발생시키는 계통을 뜻한다. 핵증기공급계통은 다음과 같은 주요 계통으로 구성되어 있다.

- 핵분열에 의한 열을 생산하는 원자로노심
- 원자로의 냉각재를 순환시켜 노심의 열을 증기발생기로 전달하는 원자로냉각재계통
- 플랜트 보호계통

- 플랜트 제어 및 감시계통
- 원자로 냉각재 소듐의 공급 및 불순물 농도 등을 조절하는 보조액체급속 공정계통
- 원자로와 증기발생기, 원자로펌프 등의 소듐 자유액면 공간을 채워 소듐과 공기의 접촉을 방지하는 불활성가스 공정계통
- 설계기준사고 시 원자로의 열 제거 및 사고완화 기능을 수행하는 공학적 안전설비계통
- 노심 재장전을 위한 핵연료 취급 계통
- 재장전 후 임계 전 고온대기 운전환경으로 원자로 조건을 만들어주는 원자로기동계통

소듐냉각고속로의 보조계통은 그림 5와 같고, 연료교환 및 저장 계통, 불활성가스 수급 및 처리의 공정보조계통, 소듐을 취급하는 보조액체급속 계통, 배관 및 장비 가열, 소듐화재방호 등은 가압경수로와 비교하여 고유한 차이점이 있다.

한국원자력연구원에서 개념설계를 진행하는 소듐냉각고속로 실증로의 핵증기공급계통과 보조설비계통의 구성 개념도를 그림 6에 나타냈다. 실증로는 600MWe 전기용량의 풀형 원자로로 두 개의 증기발생기를 갖는 2루프 시스템으로 원자로를 중심으로 일차기 및 중간열전달계통이 대칭구조이다. 그림 6의 개념도는 원자로 격실 좌우에는 공간 편의상 증기발생기 계통, 보조계통과 잔열제거 계통을 양쪽에 나누어서 나타내었다. 또한 원자로 내부의 주요 기기도 대칭구조로 공간 편의상 양쪽에 다르게 표현하였다.

공학적 안전설비

원자로의 공학적 안전설비계통은 원자로시설의 파손, 고장 등으로 원자로내의 핵연료 파손 등에 의한 다량의 방사성물질이 방출될 가능성이 있을 경우, 이를 억제 또는 방지하기 위한 기능을 갖추도록 설계된 시설을 말한다. 경수로의 경우 공학적 안전설비계통으로 비상노심냉각계통 및 원자로격납시설 등이 있다.

첫째, 경수로 개념의 비상노심냉각계통은 고속로에는 다음과 같은 이유로 존재하지 않는다.

- (1) 냉각재 소듐은 비등점이 높기(대기압에서 약 883℃) 때문에 시스템이 고온 저압계통이 되어 만일의 경우 배관 등이 파손하여 감압되어도 냉각재가 증발되는 일은 없다.
- (2) 냉각재 소듐은 금속이기 때문에 열전도성이 높아 노심을 쉽게 냉각한다.
- (3) 냉각재 소듐의 열팽창률이 크기 때문에 가열되었을 때 부력이 커져서 자연순환력이 크다.

따라서 고속로의 공학적 안전설비로는 원자로용기 소듐 액면의 확보와 잔열제거 개념이 채택되어 있다. 액면의 확보는 원자로용기에 균열이 발생하는 사고 시에도 원자로용기 외부에 격납용기를 설치하여 소듐 누설량을 일정량으로 제한하여 노심이 공기 중에 노출되지 않도록 하는 것이다. 이런 이유로 경수로와 같이 냉각재를 추가 주입할 필요는 없다. 노심 잔열제거는 액면이 확보되어 있고 냉각재가 자연 순환되는 회로와 열

제거원을 유지하면 가능하기 때문에 기기배치를 자연순환이 용이하도록 설계하고 있다.

둘째, 원자로격납시설로 고속로의 경우에도 원자로 격납구역과 관련 설비를 의미하며 기본적으로는 경수로와 같다. 소듐냉각고속로는 원자로와 증기발생기 사이에 중간열전달계통이 존재하여 노심을 지나는 냉각재가 증기발생기로 직접 가지 않아 격납 범위에 증기발생기를 포함하지 않는다. 고속로의 냉각재 소듐은 강한 환원성을 갖고 있어 방사성물질의 하나인 요오드와 잘 반응하고 그것의 대부분은 소듐에서 흡수하기 때문에 격납구역 내부 공간 속으로의 방출은 비교적 적다. 또한 냉각재 소듐은 비등점 이하에서 사용되고 있기 때문에 사고의 경우에도 격납구역 내부 압력은 그다지 상승하지 않는다.

고속로에서는 원자로용기 내의 소듐 냉각재 액면 상부에 불활성가스인 커버가스가 주입되어 있다. 불활성가스로서 보통 아르곤(AR) 가스가 사용되나 운전 중에 방사화되어 반감기가 약 14시간인 Ar-41을 생성하는 등 방사능 농도가 높다. 따라서 이 커버가스계통도 격납시설 내에 설치하는 것이 보통이다.

그 외에 안전 확보를 위한 설비로서는 증기발생기의 증기개방계통과 증기발생기의 전열관이 파손되어 직접 소듐-물 반응이 발생한 경우 반응생성물을 수납하는 용기가 설치되어 심각한 사태를 불러일으키지 않도록 한다.



기계 용어해설

천이온도(Transition Temperature)

연성에서 취성으로 또는 그 반대로 옮겨갈 때의 온도. 강재의 충격 테스트를 온도를 낮추면서 반복하면, 일정 온도를 경계로 하여 갑자기 작은 에너지로 파단하게 되는 온도.

봉수(封水: Sealing Water)

스터핑 박스부에서 축을 따라 내부로부터 유체가 흘러 나오는 것 또는 외기의 침입을 방지하기 위하여 외부로부터 스테핑 박스 속의 랜턴 링에 주수하는 물.