

신형 액체금속로 반응도제어 설계개념 평가

Evaluation of Reactivity Control Design Concepts in Advanced LMRs

정애주, 윤영길, 안형준, 신안동, 이재훈

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

현재 세계에서 개발되고 있는 신형 액체금속로 중에서 우리나라의 KALIMER, 미국의 PRISM, 일본의 DFBR, 그리고 유럽의 EFR 등은 반응도제어수단의 신뢰성을 향상시키기 위하여 별도의 피동형 보조정지계통을 설치하거나 기존의 능동형 반응도제어계통에 피동형 보조장치를 결합시키는 경향을 보이고 있다. 이들 신형 액체금속로에서 채택하고 있는 반응도제어수단에는 능동형 반응도제어계통, 능동형/피동형 보조정지계통, 기타 피동형 보조설비인 GEM, ETEM, ATHENA, CREED 등이 있다. 이 논문에서는 이들 각 계통에 대한 설계개념을 조사 및 평가하여 장단점 및 문제점을 파악하였으며, KALIMER 설계안전성 평가시 고려해야 할 사항들을 제시하였다.

Abstract

Reactivity control design concepts of advanced LMRs (Liquid Metal Reactors), such as KALIMER of Korea, PRISM of the U.S.A., DFBR of Japan, EFR of Europe, show a tendency to introduce an individual passive backup shutdown system or to install passive device in the conventional active reactivity control system in order to assure the reliability of reactivity control function. As reactivity control means, the aforementioned advanced reactors use the following facilities: an active reactivity control system, an active/passive backup shutdown system, and passive devices such as GEM, ETEM, ATHENA, and CREED. Design concepts of each facility were compared and analyzed to evaluate the safety of reactivity control design concepts of KALIMER. Suggestions to assure the reliability of reactivity control design of KALIMER were also provided.

1. 서론

최근에 개발되고 있는 액체금속로들은 반응도제어수단으로서 별도의 피동형 계통을 두거나 기존의 능동형 계통에 피동형 장치를 결합시키는 경향을 보이고 있다. 인도의 PFBR과 우리나라의 KALIMER는 전자의 경우로 두 가지 독립적인 피동형 계통, 즉 개스팽창모듈(Gas Expansion Module : GEM)과 큐리점 전자석(Curie Point Electromagnet : CPEM)을 채택하고 있다. 유럽의 EFR, 러시아의 BN-800은 후자의 경우로, EFR은 열팽창을 이용한 장치를 고려하고 있으며 BN-800에서는 냉각재 유동을 이용하는 장치를 고려하고 있다. 한편, 일본의 DFBR은 전자와 후자를 조합한 경우로, 상기의 두 가지 독립적인 피동형 계통도 채택하고, 추가적으로 열팽창을 이용한 장치

를 능동형 및 피동형 계통에 결합시키고 있다. 반응도제어수단의 다중성과 다양성을 충족시키기 위해서 이런 피동형 반응도제어수단을 도입함으로써 액체금속로의 안전성이 더욱 향상될 것으로 기대된다.

이 논문에서 다루고 있는 액체금속로는 KALIMER, PRISM, DFBR, EFR이다. 이들을 비교대상으로 선택한 이유는 이들이 최근에 설계된 신형 원자로라는 점, 작은 출력의 KALIMER에서부터 큰 출력의 EFR까지 다양한 출력을 가진다는 점, 그리고 이들의 반응도제어수단의 구성이 유사하다는 점이다. 이 반응도제어수단에는 반응도제어 및 정지계통, 보조정지계통 및 피동형 보조장치 등이 포함된다.

2. 국내 액체금속로의 설계개념 [1]

국내에서 개발중인 액체금속로인 KALIMER의 반응도제어는 그림 1과 같이 6개의 제어봉으로 구성된 반응도제어 및 정지계통 (Reactivity Control and Shutdown System: RCSS), 1개의 제어봉으로 구성된 최종정지계통(Ultimate Shutdown System: USS), 6개의 GEM에 의해 수행된다. 이들 중 RCSS는 능동형 계통으로 정상운전시의 출력제어, 핵연료 연소에 따른 반응도의 보상 및 원자로 정지를 포함한 모든 반응도제어 기능을 담당하며, USS는 피동형 보조정지계통으로서 사고시 RCSS와 함께 원자로를 정지시킬 수 있는 능력을 가지고 있으며, GEM은 피동형 보조장치로서 냉각재 유량상실 사고시 원자로 정지를 도와주는 기능을 갖고 있다.

RCSS의 6개 제어봉은 그림 1에서 보이는 바와 같이 농축도가 다른 두 핵연료집합체 경계에 위치해 있으며, 동일한 형태의 클러스터 2개에 연결되어 있다. 이 클러스터들은 정상운전시에는 동시에 작동되며, 제어봉 낙하 신호시에는 개별적으로 제어봉을 노심에 삽입시킨다. 한편, 하나의 제어봉은 다음과 같은 요소들로 구성되어 있다.

- B₄C 펠렛으로 채워진 튜브들의 다발인 흡수재집합체,
- 제어봉의 삽입, 인출 및 분리시키는 역할을 하는 구동장치 (drive mechanism),
- 구동장치와 흡수재집합체를 연결시키는 구동축 (driveline).

USS는 RCSS만으로 원자로를 정지시킬 수 없는 사고시를 대비하여 설치하는 피동형 보조정지계통으로 노심 중앙에 위치하고 있다. USS는 CPEM을 이용한 자기작동형 정지계통(Self-Actuated Shutdown System: SASS)으로 1개의 제어봉과 CPEM으로 구성되어 있다 (그림 8 참조). 이 CPEM은 온도가 큐리점에 도달하면 포화자율이 변화하여 전자력이 급격히 약화되는 특성을 가지고 있다. 정상운전시에는 CPEM의 전자력에 의해 제어봉이 노심상부에 고정되어 있지만, 사고시 원자로 정지가 이루어지지 않아 소듐의 온도가 상승하게 되면 소듐에 잠겨있는 CPEM의 온도가 큐리점 이상으로 상승하게 되고, CPEM은 전자력을 상실하여 제어봉이 노심으로 자유낙하된다.

GEM은 핵연료와 반사체 사이에 위치하며, 노심의 다른 집합체와 동일한 크기, 형태를 갖고 있다. 그 상부는 밀봉되어 카버게스로 충전되어 있고 하부는 소듐의 유동에 개방되어 있다 (그림 9 참조). 정상운전시와 같이 일차냉각재펌프가 가동되는 경우에는 소듐의 유동압력에 의해 GEM 내부의 카버게스가 압축되어 소듐 레벨은 유효노심 상부로 올라가게 되어 유효노심 부분에 해당되는 GEM의 내부에는 소듐만이 존재하게 된다. 반면에, 일차냉각재펌프가 정지되어 냉각재 유량상실 사고시에는 소듐의 유동압력이 감소하여 카버게스가 팽창되므로 소듐의 레벨이 유효노심 아래

로 하강되어 유효노심 부분에 해당되는 GEM 내부는 카버게스만으로 채워지게 된다. 이 카버게스는 유효노심 외부로 중성자 누설을 증가시켜 노심에 상당한 음의 반응도를 유발시킨다.

3. 국외 액체금속로의 설계개념

1) PRISM

PRISM의 반응도제어는 그림 2와 같이 10개의 제어봉으로 구성된 능동형 반응도제어 및 정지계통 (Reactivity Control and Shutdown System: RCSS), 3개의 제어봉으로 구성된 능동형 최종정지계통 (Ultimate Shutdown System: USS), 6개의 GEM에 의하여 수행된다. [2]

RCSS의 제어봉은 저농축 핵연료 영역 내에 분포되어 있다. 각각의 제어봉은 그림 5에 제시된 바와 같이 구동장치, 구동축, 흡수재집합체로 구성되어 있으며, 흡수재집합체는 B_4C 가 들어있는 튜브 다발로 이루어져 있다. 제어봉의 위치는 정상운전시에는 stepping 모터(shim 모터)에 의해 제어되며, 발전소제어계통에 신호에 의해서 개별적으로 작동된다. 비상정지시에는 원자로보호계통에 의해 제어봉 구동장치의 전원을 차단하여 자유낙하로 노심에 삽입시키는 방법 또는 비가역적인 고속구동모터에 의해 삽입시키는 방법에 의해 작동된다. [3]

USS는 PRISM의 능동형 보조정지계통으로서 원자로보호계통 instrument vault 또는 원격제어반(remote shutdown facility)에서 수동으로 작동되며, 그림 6과 같이 원자로 상부에 위치하는 용기, 그 내부에 담겨있는 다량의 B_4C 볼(ball), 구동모터로 구성되어 있다. 운전원의 조치에 의해 구동모터가 작동되면 B_4C 구슬이 노심에 삽입되어 원자로 저온정지를 달성할 만큼의 충분한 음의 반응도를 제공해 준다. [3]

GEM은 노심의 저농축 핵연료와 고농축 핵연료 경계에 위치하고 있으며, KALIMER의 GEM과 동일한 원리에 의해 작동되며 동일한 역할을 담당한다. 즉, 일차냉각재펌프가 작동하지 않을 때 노심에 상당한 음의 반응도를 삽입하여 유량상실사고 동안에 도달할 수 있는 최대 온도를 제한시켜 준다. GEM은 전출력 상태에서의 ATWS (Anticipated Transient Without Scram) 시에도 중간 열전달계통에 의한 냉각능력 상실을 포함하는 과냉각 (undercooling) 사고를 수용할 수 있게 해준다 [3].

2) DFBR [4]

DFBR은 반응도제어수단의 공동원인고장을 감소시키고 신뢰성을 증가시키기 위해 그림 7과 같이 능동형 일차원자로정지계통 (Primary Reactor Shutdown System: PRSS), 피동형 보조원자로정지계통 (Backup Reactor Shutdown System: BRSS), 피동형 보조장치인 GEM, PRSS 및 BRSS 작동 실패시 이를 피동적으로 보완해주는 보조장치인 ETEM (Enhanced Thermal Elongation Mechanism) 등 2개의 독립적인 정지계통과 2개의 보조장치를 가지고 있다.

PRSS는 24개의 제어봉으로 구성되어 있는 능동형 정지계통으로서, 정상운전 출력제어 및 원자로정지 시에 사용되며, MONJU에서 입증된 기계가속삽입타입의 고체 제어봉을 채택하고 있다.

BRSS는 6개의 제어봉으로 구성된 피동형 보조정지계통으로서, 비상정지기능을 담당하며,

KALIMER의 USS와 같이 중력낙하타입의 제어봉을 채택하고 있다. 그림 8에서와 같이 제어봉 주위의 냉각재가 TSA (Temperature Sensitive Alloy)로 유입되도록 설치된 유로가 있으며, 이 유로는 출구에서부터 TSA까지의 소동유동 전달시간을 줄일 수 있는 최적화된 flow hole을 가지고 있다.

GEM은 피동형 보조장치로서 총 66개가 그림 3에서와 같이 노심 외곽을 이중으로 둘러싸고 있으며, GEM만으로 비보호유량상실(Unprotected Loss Of Flow: ULOF)시 소동의 비동을 방지할 수 있는 능력을 보유하고 있다. 그러나 전출력 및 부분출력 운전시 GEM 입구 플레넘 유동압력의 변동으로 야기될 수 있는 GEM의 반응도 변화를 허용 범위 이내로 제한하기 위해서 GEM 내의 소동수위가 축방향으로 블랭킷 높이 이상으로 유지되어야 한다는 제한이 부여된다. 따라서 정상운전 중에 GEM에 의한 반응도 변화를 제한하기 위해서는 일차계통의 유량이 항상 100%를 유지해야 한다.

EEM은 PRSS 및 BRSS의 제어봉 상부에는 설치되어 있으며, 제어봉의 삽입이 이루어지지 않는 경우에도 냉각재 온도의 증가에 따른 열팽창에 의해 피동적으로 중성자 제어봉을 노심으로 삽입시켜 주는 장치이다. EEM에는 그림 10에 제시된 바와 같이 2가지 타입이 있다. 즉, 액체금속의 부피팽창을 선형으로 변환시켜 제어봉을 삽입시켜 주는 LHED (Linear Hydraulic Expansion Device) 타입과, temperature-sensitive cylinder와 low-expansion rod 간의 열팽창 차이를 증폭시켜 제어봉을 삽입시켜 주는 ADED (Amplification of Differential Expansion Device) 타입이 있다.

3) EFR

EFR의 반응도제어는 그림 4에서와 같이 24개의 제어 및 정지봉 (Control and Shutdown Rods: CSD)으로 구성된 능동형 제어계통, 9개의 보조정지봉 (Diverse Shutdown Rods : DSD)으로 구성된 능동형 보조정지계통, 피동형 보조장치인 ATHENa (Shutdown by THERmal Expansion of Na), CREED (Control Rod Enhanced Expansion Device)를 사용하여 수행한다. [5] EFR에서는 KALIMER, PRISM, DFBR과는 달리 피동형 보조장치인 GEM을 채택하지 않고 있는데, 이는 냉각재 압력 상실만으로 음의 반응도를 유발하는 GEM이 대용량 노심에는 충분하지 않기 때문이다. [6]

능동형 제어계통은 정상운전시의 출력제어, 핵연료 연소에 따른 반응도 보상 및 원자로 정지기능을 담당하며, 능동형 보조정지계통은 사고시 원자로 비상정지 기능을 담당한다.

ATHENa는 그림 11에서 보이는 바와 같이 CSD의 구동축(Control Rod Drive Line : CRDL)에 설치되어 있으며, CSD의 삽입이 실패할 경우에도 열팽창을 이용하여 피동적으로 CSD를 CRDL로부터 분리시켜 낙하시키는 기능을 갖고 있다. ATHENa는 과도한 냉각재 온도 상승시 비가역적인 큰 음의 반응도를 제공하여 ULOF나 일시적인 과출력사고시 제어봉이 고착되어 있는 경우에도 원자로를 안전한 상태로 복귀시킬 수 있다. 그림 10에서와 같이 ATHENa가 설치되는 CSD에는 축방향으로 배열된 2개의 구동축이 있다. 일차 구동축은 기존의 구동축과 동일하며, 이차 구동축은 EEM (Enhanced Expansion Module)과 연결되어 있고 하부 끝 부분은 일차 구동축에 고정되어 있다. 일차 구동축과 이차 구동축은 분리장치 (Ball Release Mechanism)에 의하여 서로 연결된다. 한편, EEM은 축방향으로 팽창할 수 있는 스테인레스강 용기와, 그 용기를 채우고 있는 소동으로 구성되어 있다. 사고시 원자로 정지가 이루어지지 않아 냉각재의 온도가 상승하게 되면 EEM의 용

기와 그 내부의 소동이 가열되어 열팽창이 일어난다. 소동의 열팽창계수는 용기의 열팽창계수 보다 4배 이상 크므로 열팽창에 의해 부피가 증가된 소동은 용기를 축방향으로 더욱 팽창시켜 용기의 상부에 연결된 이차 구동축을 상부 방향으로 밀어 올리게 된다. 이차 구동축의 이동거리가 분리장치의 stroke limiter에 도달하게 되면 분리장치가 작동하여 일차 구동축과 이차 구동축이 분리되고 제어봉이 자유낙하 하게 된다. 그러나, 정상운전 조건하에서는 일차 구동축은 이차 구동축에 의하여 어떠한 간섭도 받지 않으며 기존의 CRDL과 동일하게 작동한다. [6]

CREED는 노심 출구온도 상승에 반응하여 DSD를 구동축으로부터 분리시켜 노심 내로 삽입시키는 피동형 보조장치이다 (그림 12 참조). 원자로 비상정지를 위한 DSD 구동장치의 전원차단 실패 또는 DSD의 삽입에 장애가 발생할 경우에도, CREED는 열팽창에 의하여 DSD를 피동적으로 삽입시켜 주는 기능을 한다. [7]

4. 국내의 액체금속로 설계기법 평가

앞에서 언급한 국내의 액체금속로의 반응도제어수단을 요약하면 다음과 같다. 먼저 KALIMER에서는 출력변동을 제어하고 핵연료 연소에 따른 반응도를 보상하며 원자로 정지를 위한 설비로서 능동형 제어계통인 RCSS를 채택하고 있다. 그리고 원자로정지 기능의 다양성 확보를 위해 CPEM을 이용한 피동형 보조정지계통인 USS, 일차 냉각계 유량상실사고 시의 안전여유도 확보를 위해 피동형 보조장치인 GEM을 채택하고 있다. 한편, PRISM에서는 능동형 제어계통인 RCSS와 능동형 보조정지계통인 USS, 그리고 GEM을 채택하고 있다. DFBR에서는 능동형 제어계통인 PRSS와 CPEM을 이용한 피동형 보조정지계통인 BRSS, 피동형 보조장치인 GEM, 제어봉 삽입이 실패할 경우에 대비하여 열팽창에 의하여 제어봉을 피동적으로 삽입시키는 보조장치인 ETEM을 채택하고 있다. EFR에서는 능동형 제어계통, 능동형 보조정지계통, 그리고 원자로정지의 보장을 위해 제어계통 및 보조정지계통의 제어봉을 피동적으로 낙하시키는 ATHENA 및 CREED를 채택하고 있다.

표 1에 상기 액체금속로의 반응도제어수단이 비교되어 있다.

표 1. 국내의 액체금속로 반응도제어수단 비교

제어수단 원자로(출력)	능동형 제어계통	보조정지계통	피동형 보조장치
KALIMER (150MWe)	• RCSS 제어봉집합체 - 6개	• USS (피동형) 제어봉 집합체 - 1개	• GEM : 6개
PRISM (303MWe)	• RCSS 제어봉집합체 - 10개	• USS (능동형) 제어봉 집합체 - 3개	• GEM : 6개
DFBR (660MWe)	• PRSS 제어봉집합체 - 24개	• BRSS (피동형) 제어봉 집합체 - 6개	• GEM : 66개 • ETEM : PRSS & BRSS에 설치
EFR (1500MWe)	• CSD - 24개	• DSD (능동형) - 9개	• ATHENA : CSD에 설치 • CREED : DSD에 설치

여기에서는 표 1에 제시된 각 액체금속로 반응도제어수단의 특성을 KALIMER를 중심으로 비교·평가하였다.

KALIMER와 DFBR에서는 보조정지계통으로서 CPEM을 이용한 피동형 보조정지계통을 채택하고 있는데 이러한 설계개념은 아직까지 운전중인 발전소에서 채택된 바가 없기 때문에 고온의 소동, 소동 에어로졸 및 방사성 환경 하에서 CPEM이 신뢰성있게 작동할 수 있는지의 여부와 수명기간 동안 그 성능을 유지할 수 있는지에 대한 입증의 필요가 있다. 그리고 이러한 피동계통의 가동중 시험방법에 대해서도 설계시 고려해야 할 것이다.

DFBR은 피동형 보조정지계통인 BRSS의 제어봉에도 피동형 보조장치인 ETEM을 설치하고 있다. 이는 BRSS 제어봉이 피동적으로 작동되지만 그럼에도 불구하고 삽입에 실패할 경우를 대비하여 제어봉의 삽입을 보장하기 위해서 설치하는 것이다. KALIMER는 DFBR의 BRSS와 동일한 원리에 의해서 피동적으로 작동되는 USS를 채택하고 있는데 1개의 제어봉으로 구성되어 있다. 이는 1개의 제어봉 삽입이 실패할 경우 보조정지계통 전체의 기능이 상실되는 문제점을 갖고 있다. 이러한 설계는 다중성 측면에서 결코 바람직하지 못한 것이므로 개선되어야 한다. 그리고 DFBR에서와 같이 RCSS 및 USS의 제어봉 삽입을 보장하기 위한 피동형 보조장치를 고려하는 것이 원자로정지능력의 보장을 위해 바람직할 것으로 판단된다.

KALIMER에서 원자로 냉각재 유동상실시의 안전여유도 확보를 위해 채택하고 있는 GEM은 PRISM과 DFBR에서도 채택하고 있다. 소형 액체금속로에서의 GEM의 능력은 1986년에 USDOE에 의해서 수행된 FFTF의 피동 안전성 평가에서 확인되었다. [4] 그러나 GEM 역시 기존의 발전소에 채택되어 가동된 적이 없기 때문에 운전경험이 없다. 또한, EFR과 같은 대형 노심에서는 GEM을 채택하지 않고 있는데, 이는 GEM의 반응도제어 능력이 출력이 큰 노심에서는 충분하지 않기 때문이다. [6] 그러므로, 향후 KALIMER의 출력을 DFBR 정도로 증가시킬 경우 DFBR의 설계를 참고하여 충분한 분석이 수행되어야 할 것이다. 한편, GEM은 일차펌프의 상실시 ATWS의 완화에 상당히 기여하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 만일 정상운전 중에 GEM 내부를 채우고 있는 불활성기체가 GEM에서 누출되어 GEM 내부가 소동으로 채워지게 된다면, 냉각재 유량상실사고 시에 GEM의 기능이 정상적으로 발휘되지 못하게 된다. 그리고 GEM 내부의 불활성 기체가 상당부분 누출된 상태에서 냉각재 유량상실 사고가 발생하여 원자로가 정지되지 못하고 임계에 도달해 있는 상태가 유지되는 경우에, 냉각재 펌프가 다시 작동하게 되면, 출력은 오히려 상당히 증가하게 된다. 이러한 위험을 줄이기 위해서는 GEM의 소동레벨 및 불활성 기체의 누출여부를 운전중에 직접 또는 간접적인 방법으로 계속하여 감시하는 것이 필요하다. [3]

표 1에 제시된 각 액체금속로에서의 반응도제어수단을 반응도제어 기능의 신뢰성 확보 차원에서 비교해 보면, 다중성 및 다양성 측면에서 DFBR의 설계가 가장 우수하다. 신형 액체금속로에서 채택하고 있는 ETEM, ATHENA, CREED 등의 피동형 보조장치들은 아직 가동중 경험을 통해서 입증된 기술이 아니므로 계속적인 연구를 통해서 그 안전성이 검증되어야 할 것이다.

b. 결론

이상에서 피동형 설계특성을 반영하고 있는 주요 신형 액체금속로의 반응도제어수단을 살펴보았다. 피동형 보조정지계통을 채택하고 있는 KALIMER의 설계는 능동형 보조정지계통을 채택하고 있는 PRISM보다 우수하지만, 피동형 보조정지계통뿐만 아니라 제어봉에 피동형 보조장치를 채택하고 있는 DFBR이 KALIMER보다 우수하다. 향후 KALIMER의 설계시 반응도제어 기능의 신뢰

성 향상을 위해 DFBR과 EFR에서 채택하고 있는 피동형 보조장치의 반영을 고려할 필요가 있을 것이다. 다만 피동형 보조정지계통이나 피동형 보조장치들은 기존의 능동형 계통과는 달리 운전경험을 통하여 그 안전성이 입증되지 않았으므로 심층적인 연구를 통하여 입증되어야 한다. 또한 가동중의 상태점검과 문제점을 탐지할 수 있는 감시방법 및 가동중 시험방법도 병행하여 개발되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Chang Kyu Park, et al., "KALIMER Design Concept Report", KAERI/TR-888/97, KAERI, July 1997
2. E. L. Glueckler, "U.S. Advanced Liquid Metal Reactor (ALMR)", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 31, No. 1/2, p43-61, 1997
3. USNRC, "Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module (PRISM) Liquid-Metal Reactor", NUREG-1368, Feb. 1994
4. K. Okada, K. Tarutani, Y. Shibata, M. Ueta, T. Inagaki, "The Design of a Backup Reactor Shutdown System of DFBR", IAEA-TECDOC-884, Proceeding of a Technical Committee meeting held in Obninsk, Russia Federation, 3-7 July 1995, p113-125
5. H. Sztark, D. Barnes, U. Wehmann, "Core Optimization of the European Fast Reactor EFR", *International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles* Kyoto, Japan, Oct. 28 - Nov. 1, 1991, p3.1-1 ~ 3.1-12
6. M. Edelmann, G. Kussemaul, W. Vath, "Development of Passive Shut-down Systems for the European Fast Reactor EFR", IAEA-TECDOC-884, Proceeding of a Technical Committee meeting held in Obninsk, Russia Federation, 3-7 July 1995, p69-79
7. D. Favet, B. Carluet, S. Dechelette, "Third Shutdown Level for EFR Project", IAEA-TECDOC-884, Proceeding of a Technical Committee meeting held in Obninsk, Russia Federation, 3-7 July 1995, p173-188

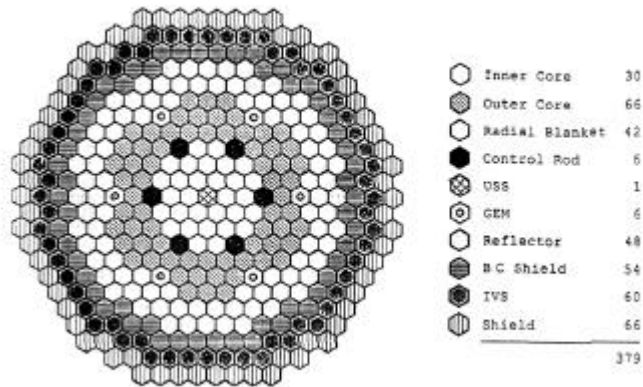


그림 1. KALIMER 노심 배치도

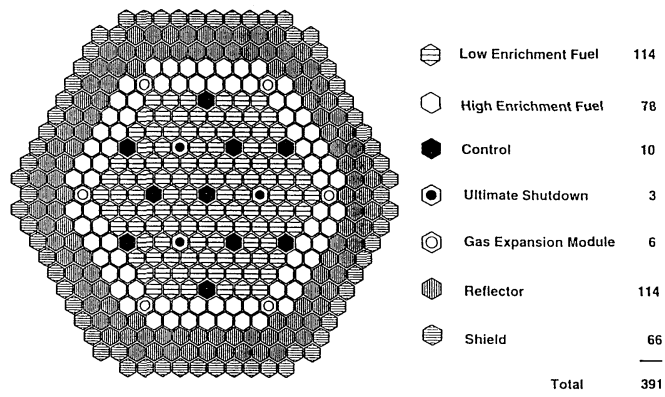


그림 2. PRISM 노심 배치도

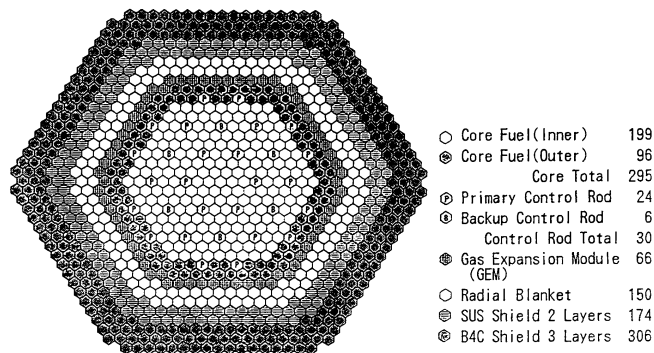


그림 3. DFBR 노심 배치도

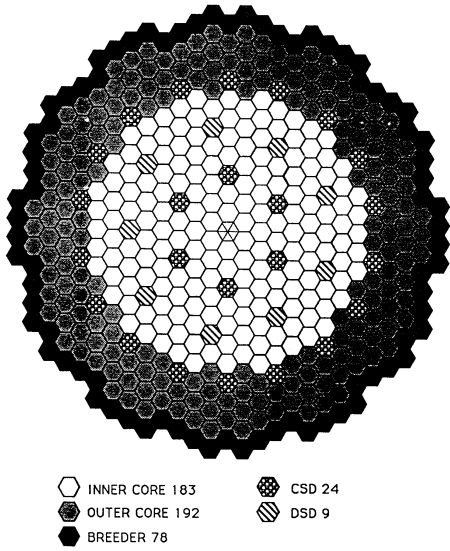


그림 4. EFR의 노심 배치도

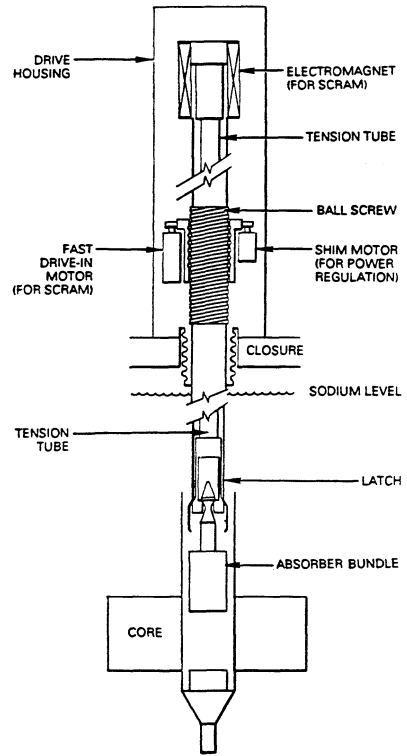


그림 5. PRISM의 RCS 제어봉

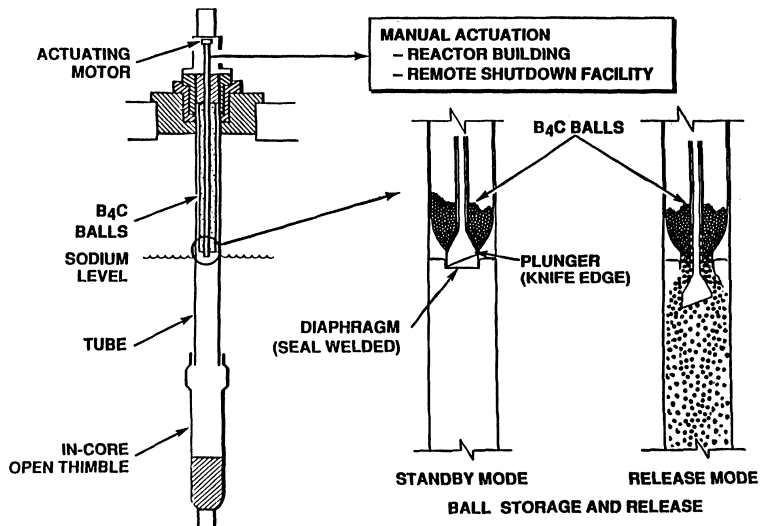


그림 6. PRISM의 능동형 USS 제어봉

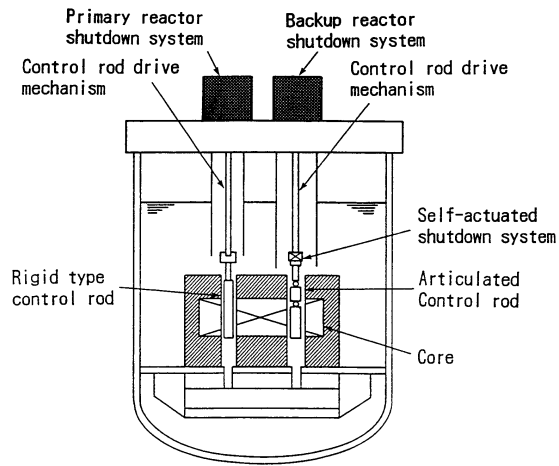


그림 7. DFBR 원자로정지계통

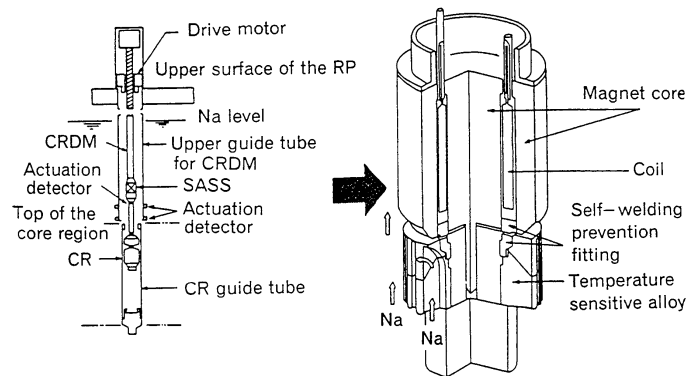


그림 8. DFBR의 피동형 BRSS - CPDM

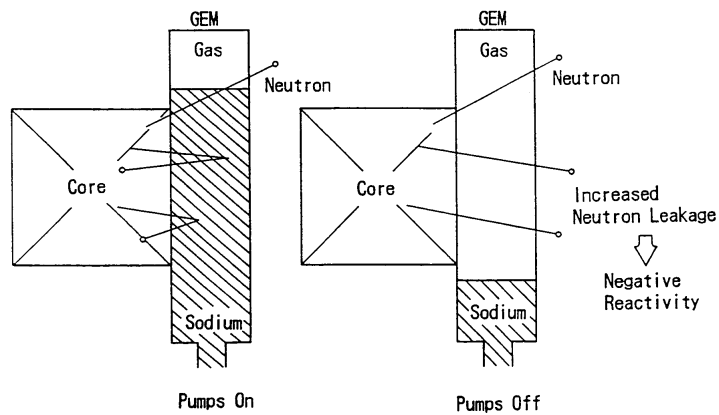


그림 9. DFBR의 피동형 보조장치 - GEM

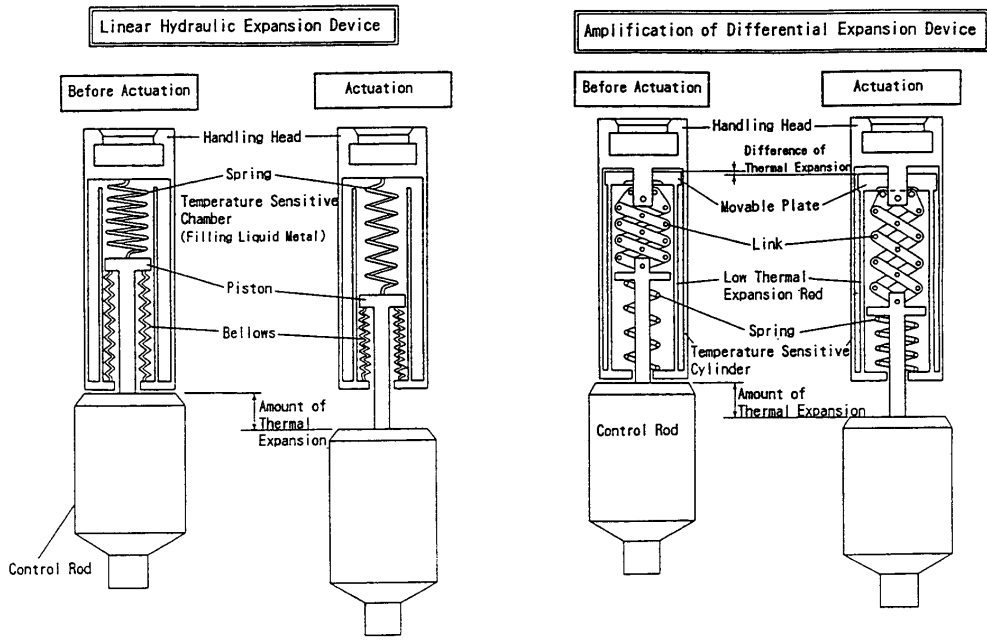


그림 10. DFBFR의 피동형 보조장치 - ETEM (LHED / ADED)

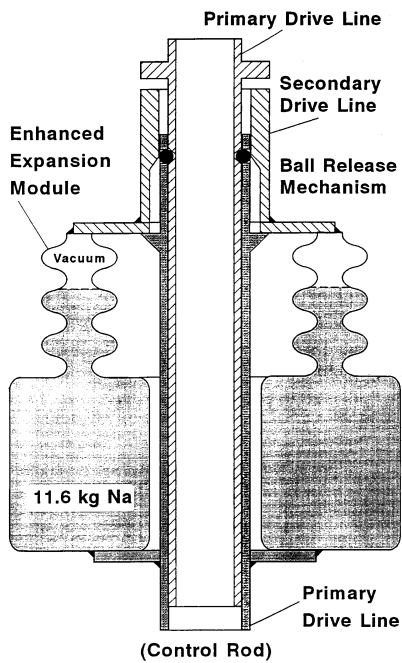


그림 11. EFR의 피동형 보조장치 - ATHENA

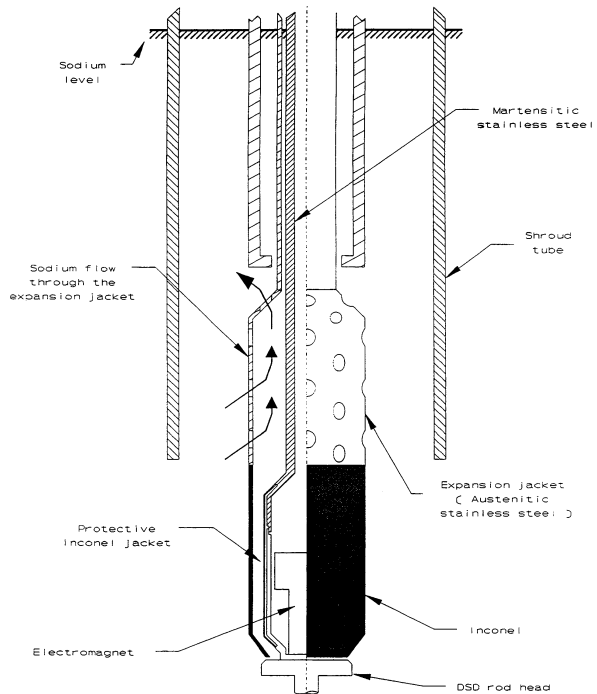


그림 12. EFR의 피동형 보조장치 - CREED

약어목록

ADDED	: Amplification of Differential Expansion Device
ATHENa	: (German for) Shutdown by THERmal Expansion of Na
ATWS	: Anticipated Transient Without Scram
BRSS	: Backup Reactivity Shutdown System
CPEM	: Curie Point Electromagnet
CRDL	: Control Rod Drive Line
CREED	: Control Rod Enhanced Expansion Device
CSD	: Control and Shutdown rods
DFBR	: Demonstration Fast Breeder Reactor
DSD	: Diverse Shutdown rods
EEM	: Enhanced Expansion Module
EFR	: European Fast Reactor
ETEM	: Enhanced Thermal Elongation Mechanism
FFTF	: Fast Flux Test Facility
GEM	: Gas Expansion Module
KALIMER	: Korea Advanced Liquid Metal Reactor
LHED	: Linear Hydraulic Expansion Device
LMR	: Liquid Metal Reactor
PFBR	: Prototype Fast Breeder Reactor
PRISM	: Power Reactor Innovative Small Module
PRSS	: Primary Reactivity Shutdown System
RCSS	: Reactivity Control and Shutdown System
SASS	: Self-Actuated Shutdown System
TSA	: Temperature Sensitive Alloy
ULOF	: Unprotected Loss Of Flow
USS	: Ultimate Shutdown System