

한국의 개량형 액체금속로 개발현황

조 만

한국원자력연구소 액체금속로개발팀 팀장

이 보고서는 한국의 장기 원자력 연구 개발 계획의 하나인 한국 개량형 액체 금속로(KALIMER Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 개발 현황을 요약한 것이다.

KALIMER 개발 계획은 92년부터 한국원자력연구소 주도로 추진되어 왔는데, 그 추진 목표는 경제성, 고유 안전성, 환경 친화성 및 핵비확산 등의 특성을 갖는 액체 금속로(LMR)를 개발하는 데 있다.

KALIMER는 2011년 준공을 목표로 하고 있으며, 현재는 개념 연구의 초기 단계에 있다고 할 수 있다.

KALIMER는 위에서 언급한 개발 목표를 달성할 수 있도록, 몇가지 피동형 안전 특성과 혁신적인 설계 특성을 통합한 원자로 모듈에서 333MWe의 전력을 생산하게 된다.

KALIMER 개발 계획의 핵심 전략은 설계를 표준화하고 1개의 1차

계통과 2차 계통으로 구성되는 원자로 모듈의 실제 시험을 통하여 운전 및 안전 특성을 시연해 봄으로써 비용 및 건설 공기를 최소화하는 데 있다.

한국의 액체 금속로 개발 계획

1. 배경

21세기에 도 세계 인구와 경제는 지속적으로 성장할 것이고 그에 따라 환경 보전의 중요성은 더욱 증대될 것이다.

온실 효과, 산성비 및 오존층의 파괴 등에 의한 심각한 환경적 문제점을 최소화하는 데 있어서, 원자력의 필요성은 그 어느 때보다도 강조되고 있다.

선진국들이 그들의 사회적 하부 구조 때문에 잘 훈련된 발전소 운전원을 구하는 데 어려움을 겪게 될 반면, 많은 개발 도상국들은 그들의 경제를

성장시키기 위해서 원자력 발전을 도입하게 될 것이다.

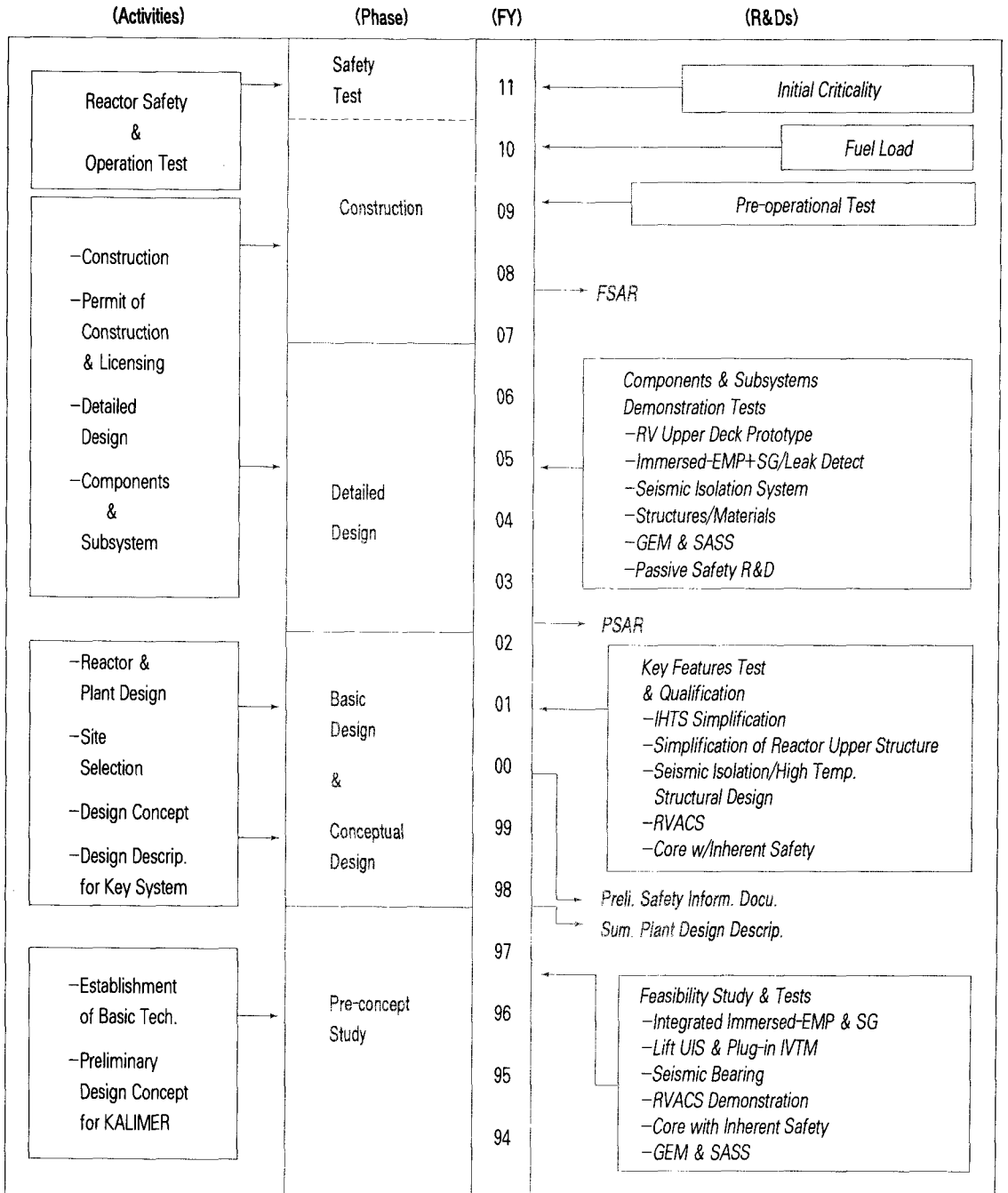
LMR은 고유 안전 특성을 활용한 높은 안전성을 갖고 있으며, 핵확산의 가능성을 줄여주는 악티늄 원소 재활용을 통하여 사용후 연료 저장 문제와 초우라늄 원소 감축 문제를 해결할 수 있다는 측면에서, 여러 가지의 원자력 발전 방식 중에서도 바람직한 방식으로 평가되고 있다.

범세계적인 LMR 기술 개발은 현재 연구중에 있는 시범로가 건설될 시점인 2010년경에 완결될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

또한 LMR의 상용화는 2025~2030년경이 될 것이다.

부존 자원이 빈약한 한국은 원자력 발전의 필요성을 강하게 인식하고 있으며, 국가 차원의 장기 원자력 발전 계획을 추진하고 있다.

이러한 바탕하에서 LMR 개발 계획은 92년에 국책 장기 연구 개발 계



(그림 1) KALIMER 개발 일정

획으로 승인되었으며, 현재까지 상당한 성과를 거두고 있다.

향후 범세계적인 LMR 연구 개발 및 상용화에 기여할 수 있기 위해서는 개량형 LMR 설계 개념의 정립에 많은 노력이 투입되어야 할 것이다.

2. KALIMER 개발 일정

2025년경에 LMR이 상용화되기 위해서는 최초의 LMR(prototype LMR)이 최소한 평형 핵연료 주기 동안 운전된 후인 2015년경 사업자로부터 입찰 제안서가 발급되어야 한다.

이러한 장기적인 일정하에서 LMR 개발 장기 계획의 목표 달성 전략이 다음과 같이 수립되고 있다.

○ 21세기에도 악티늄 원소를 재활용하는 LMR에 의한 원자력 발전은 지속되어야 한다.

○ 범세계적인 LMR의 상용화는 2025년~2030년 사이에 실현될 것으로 기대된다. 또한 LMR 개발은 국내 원자력 산업계의 협력에 의해서 추진되어야 한다.

○ LMR 개발 목표를 달성할 수 있기 위해서는 원형로형 또는 시범로형 KALIMER의 건설이 필수적이다. 준공 시기는 LMR 개발 장기 계획에 제시된 바와 같이 2011년경이 적절할 것으로 평가되고 있다.

○ 따라서 KALIMER의 기본 설계는 2001년까지 완성되어야 한다.

KALIMER 개발 계획은 2011년

까지 5단계로 나뉘어 추진된다.

주요 일정과 각각의 단계에서 수행되는 연구 개발 활동 등을 포함하는 전체적인 KALIMER 개발 일정이 <그림 1>에 표시되어 있다.

3. 이행 계획

각각의 단계에서 완성되어야 할 항목은 다음과 같다.

가. 1단계(92. 9~99. 7) : LMR 기초 기술 개발 및 KALIMER 예비 설계 개념 개발

○ LMR 기초 기술 개발 특히, 노심·계통 및 기계적인 설계를 위한 기초 설계 기술 및 컴퓨터 코드 시스템의 개발

○ KALIMER 예비설계 개념 개발
-최고 수준 기술 지침(top level specification)

-LMR 개발 전략 및 계획

-국제 협력 계획 등

나. 2단계(97. 7~99. 7) : 개념 설계

○ 비용 평가를 포함한 개념 설계

○ 주요 계통 및 기기 정의

○ 예비 계통 설계 사양 정의

○ 외국의 설비를 활용한 개발 계획 지원 정의 및 개시

다. 3단계(99. 7~2001) : 기본 설계

○ 상세 비용 평가를 포함하는 기본 설계

○ 주요 계통 및 기기 설계 사양 정의

○ 예비 안전성 분석 보고서 준비

○ 주요 특성 시험

○ 현장 활동 개시

라. 제4단계(2002~2006) : 상세 설계

○ 노심, 1차 계통 및 보조 계통에 대한 상세 설계

○ 최적화 및 최종 비용 평가

○ 주요 계통 및 기기 시험

○ 초임계

KALIMER 개발 계획은 현재 제1단계에 와 있다.

이 단계에서는 기본 설계의 개발과 LMR의 설계와 운전 특징에 따르는 소듐 기술의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

기술 개발에 병행하여, 성능과 혁신적인 설계의 적용 가능성 평가를 통하여 예비 KALIMER 설계 개념이 구체화된다.

한국원자력연구소와 GE사간의 LMR 개념 연구를 포함하는 기술 개발 계획은 설계 개념 평가 작업을 지원해 왔다.

현재 진행중인 모든 활동은 전략 연구를 통해서 수립된 KALIMER 개발 계획에 기초하여 수행되고 있다.

기술 개발 계획의 모든 요소에서 중요한 진척이 이루어지고 있으며, 이는 개념 설계 작업에 큰 도움이 될 것이다.

KALIMER 개발 계획에 있어서 국제 협력은 중요한 부분으로 남아있을 것이다.

KALIMER의 주요 설계 특성

1. 설계 목표 및 접근 방법

KALIMER 프로젝트의 궁극적인 목표는 여타 발전원에 비해서 경제성, 고유 안전성, 환경 친화성 및 핵 확산 가능성이 낮은 LMR의 개념을 보다 발전시킴으로써, 전력 사업자들이 대용량 또는 소용량으로 운영할 수 있도록 하는 데 있다.

KALIMER는 원자로의 크기가 작기 때문에 실제 규모로 건설하고 시험할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

KALIMER의 최초 시험은 KALIMER의 안전 성능을 시험해 볼 수 있는 방안을 제공함은 물론, 상용화를 위해서 4개의 원자로 모듈로 구성되는 표준형 KALIMER 발전소의 개발을 지원하는 데 필요한 귀중한 운전 경험을 획득할 수 있는 방안을 제공할 것이다.

각각의 원자로 모듈은 대부분의 구성품이 공장에서 제작되고 바지선으로 운반 가능하도록 표준 설계를 활용한다.

중간 열수송 계통을 포함하는 원자로 모듈과 최소한의 보조 기기들이 안전 관련 계통으로 구분되어질 것이다.

핵연료 재장전 기기와 설비를 제외한 발전소의 나머지 부분은 비안전 관련 계통으로 구분되어 고품질의 일반 산업용 등급으로 설계될 것이다.

KALIMER의 설계 특성의 우수성

은 증기 발생기와 중간 전자기 펌프를 합한 통합 증기 발생기의 사용, variable arm의 사용과 함께 rotating plug를 사용한 pantograph형 핵연료 취급기, plug-in/out형 핵연료 교환 계통을 채택함으로써 원자로 상부 구조물의 단순화, sodium-immersed 1차 전자기 펌프의 활용 및 지진 차폐체의 도입 등이다.

KALIMER의 개념은 Self-Actuated Shutdown System (SASS), 노심 내의 Gas Expansion Module(GEM), Reactor Vessel Auxiliary Cooling System (RVACS) 및 중간 열교환기와 통합 증기 발생기를 연결하는 reverse Y type tube 등과 같은 향상된 안전 특성을 갖고 있다.

KALIMER의 노심은 금속 연료로 구성되며, 초기 노심은 20% 농축 우라늄 금속으로 장전된다.

Modular design은 상업용 모듈과 같은 크기의 모듈과 관련된 1차 계통 기기가 시험될 수 있도록 하고 있는데, 이는 일련의 값비싼 시범 발전소의 기기의 크기를 확대시킬 필요성을 없애주고 있다.

표준형 KALIMER는 한국의 원자력 안전 규제 기관에 의해서 승인될 수 있도록 설계될 것이다.

다음은 KALIMER의 주요 설계 목표이다.

○ KALIMER 발전소는 다양하고 중첩적인 공학적 안전 계통이 없이도

운전되도록 고유 안전 특성을 최대한 활용하도록 설계될 것이다. KALIMER 설계는 운전원의 조작이나 자동 동작 계통 없이도 보호되지 않는 ATWS(unprotected ATWS) 사건들(ULOF, UTOP 및 ULOHS)을 수용할 수 있다.

○ 기기와 계통의 가능한 한 많은 부분이 공장에서 제작되고 조립될 수 있도록 설계함으로써, 현장에서의 건설 및 품질 보증 활동을 최대한 줄이고 그에 따른 자본 비용의 절감과 건설 공기를 단축하게 될 것이다.

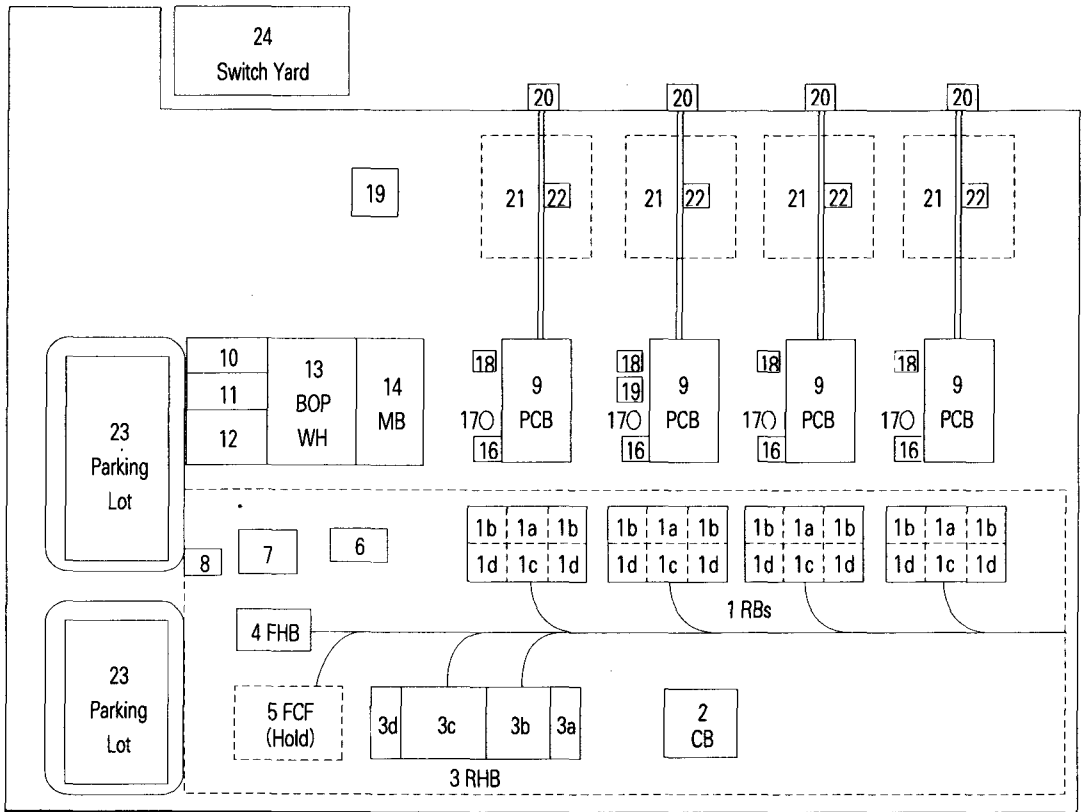
○ 건설 비용과 공기는 설계를 표준화하고 1차 계통과 2차 계통으로 구성되는 단일 원자로 모듈의 실제 규모의 시험에서 안전 특성을 시험해 봄으로써 최소화할 계획이다.

○ 원자로 계통 외부에서는 안전 등급 기기의 수를 최소화하도록 발전소가 설계될 것이다.

○ 부지 경계에서의 방사능의 방출은 설계 기준 내에서의 사고를 포함하는 어떤 사고시에도 규제 기관의 제한치의 10%를 초과하지 않을 것이다.

○ 각각의 1차 계통은 연료 재장전 기기기 혹은 원자로 상부 기체 청정 계통과 같은 1개의 중요 계통이 고장난다 하여도 전체 발전소의 고장을 유발하지 않도록 독립적으로 운전되어야 한다.

○ 발전소 건물들은 현행의 건축 표준에 의거하여 설계되어야 하며,



Legend for the KALIMER Plant Overall Layout

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. Reactor Buildings(RBs) 1a. Reactor Facility(RF) 1b. Steam Generator Facility(SGF) 1c. Electrical Equipment Vault(EEV) 1d. Sodium Purification Valut(SPV)/Inert Gas Storage 2. Control Building(CB) 3. Radioactive Handling Building(RHB) 3a. Utility Facility(UF) 3b. Radioactive Waste Facility(RWF) 3c. Reactor Maintenance Facility(RMF) 3d. Remote Shutdown Facility(RSF) 4. Fuel Handling Building(FHB) 5. Fuel Cycle Facility(FCF) 6. NI Warehouse(NI-WH) 7. NI Health Physics/Personnel Service Building(NI-PSB) 8. NI Guardhouse(NI-GH) 9. Power Conversion Buildings(PCBs) 10. BOP Guardhouse/Personnel Service Building(BOP-PSB) | <ul style="list-style-type: none"> 11. Training Center(TC) 12. Administration Building(AB) 13. BOP Warehouse(BOP-WH) 14. Maintenance Building(MB) 15. Gas Turbine Facility(GTF) 16. Circulating Water Pump Houses(CWPHs) 17. Condensate Storage Tanks 18. Transformers -Generator Step-up Transformer -Aux. Transformer -Transformer 19. Sanitary Waste Treatment(SWT) 20. Sea Water Intake System(SWIS)(alternative with C/T) 21. Cooling Tower(C/T)(alternative with SWIS) 22. Intermediate Water Storage Tank and Pump Area(in case of using the SWIS) 23. Parking Lot 24. Switch Yard |
|--|--|

(그림 2) KALIMER 발전소 평면도(4 power blocks)

여타의 상업적 구조물과 시각적으로 유사한 형상을 지녀야 한다.

2. KALIMER 개요

〈그림 2〉에 나타나 있는 것과 같이, KALIMER 발전소는 333MWe 출력의 동일한 4개의 power block으로 구성됨으로써 1,332MWe의 용량을 갖는다.

각각의 원자로 모듈은 각각의 중간 열교환기에 연결된 840MWt 용량의 pool type LMR이다.

따라서 각각의 power block은 1기의 터빈-발전기에 동력을 전달하는 2기의 증기 발생기와 1기의 원자로 모듈로 구성된다.

표준화된 첫번째 원자로 power

block은 원형(prototypic) KALIMER로 정의될 것이며, 발전소 배치는 추가적인 탄력적 건설을 허용하게 될 것이다.

출력의 증강이 요구될 경우에는 기존 발전소에 영향을 주지 않으면서 원자로 power block을 추가할 수 있다.

환경 친화적인 KALIMER는 사고에 의한 방사능 방출 가능성이 아주 낮다.

노심의 금속 연료는 pyroprocessing을 통해서 재활용이 가능하다.

이 공정을 이용하여 초우라늄 원소를 재처리할 경우 지하 저장고에 저장하는 데 따르는 비용과 잠재적이고 장기적인 위험을 피할 수 있으며, 핵

확산의 가능성을 방지해 준다.

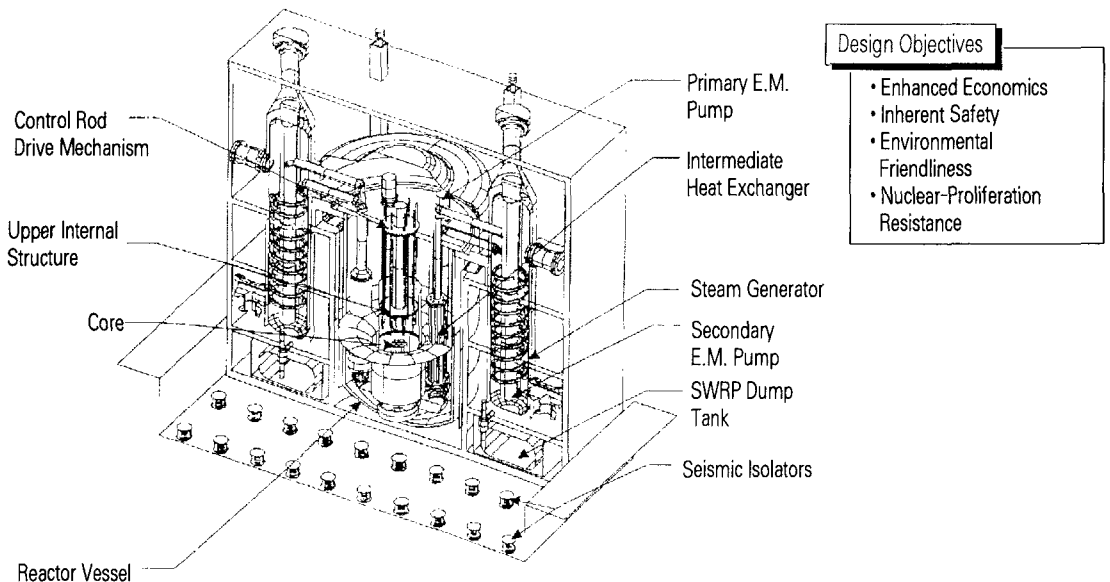
KALIMER 1차 계통의 일반적인 배열은 〈그림 3〉에 나타나 있다.

원자로심은 다양한 핵분열성 물질의 활용을 허용하는 flexible core envelope을 수용할 수 있도록 설계되며, 악티늄 원소 연소 능력을 포함하는 상이한 증식/변환비의 노심 배열을 허용한다.

〈표〉는 KALIMER의 주요 설계 특성을 요약한 것이다.

〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 원자로 용기는 직경 11.05m, 높이 14.2m이다.

원자로 경계는 원자로 용기와 1차 계통 envelope을 구성하는 용기 헤드 그리고 보호 용기 역할을 하는 격



〈그림 3〉 KALIMER 1차 및 중간 계통 구조

납 용기로 구성된다.

KALIMER만의 독특한 설계 특성에는 통합 증기 발생기의 사용, 용기 내 연료 이송 장비의 단순화 및 rotating plug 제거 그리고 원자로 용기 상부의 중간 소듐의 체적 감축 등이 포함된다.

모든 원자력 안전 등급 계통과 건물은 <그림 2>에 나타나 있는 것과 같이 원자력 섬(nuclear island)을 둘러싸고 있는 통제된 지역에 위치하게 된다.

이러한 지진 범주 1등급의 안전 등급 시설들에는 원자로 모듈, 전기 설비실, 원격 정지 시설, 경비실 및 연료 취급 시설 등이 포함된다.

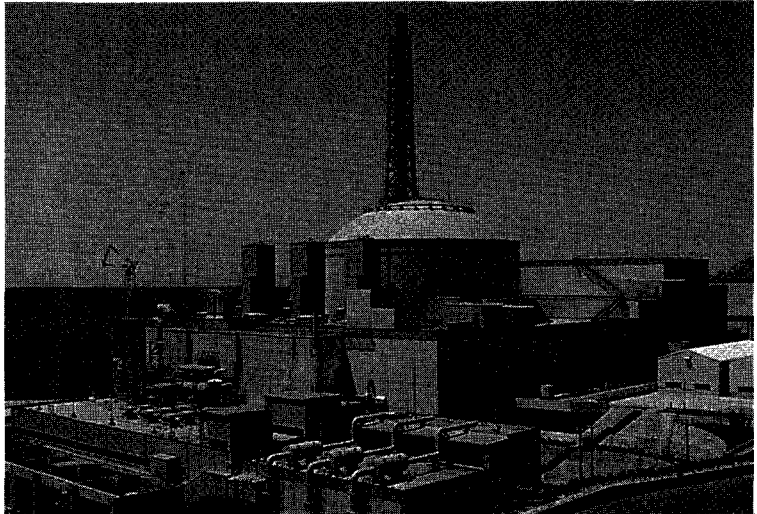
비안전 등급이나 기능적으로 안전 관련 계통과 같은 중요성을 갖는 증기 발생기 시설 또는 제어 건물, 원자로 정비 시설, 사무실 및 조립 시설 등도 통제 구역에 위치하게 된다.

3. 노심

노심 설계에 관하여는 KALIMER 개발 목표를 달성하기 위하여 예비 개념 설계가 수행중에 있다.

노심은 고유 안전성을 증진하기 위하여 양호한 부반응도 특성을 갖는 금속 연료로 장전된다.

노심 설계는 경제성을 증진하기 위하여 고연소도를 달성하고 pyroprocessing 기술을 활용함으로써, 핵확산의 가능성을 낮추는 것을 목표로 하고 있다.



일본의 고속증식로 원형로 「몬주」

노심 설계시 부반응도 삽입을 위한 고유의 피동형 수단이 가능하고, 원자로 용기 내부를 단순화시키기 위하여 몇가지 혁신적인 피동형 안전 특성이 통합되었다.

KALIMER의 노심 계통은 840MWth의 출력을 발생하도록 설계된다.

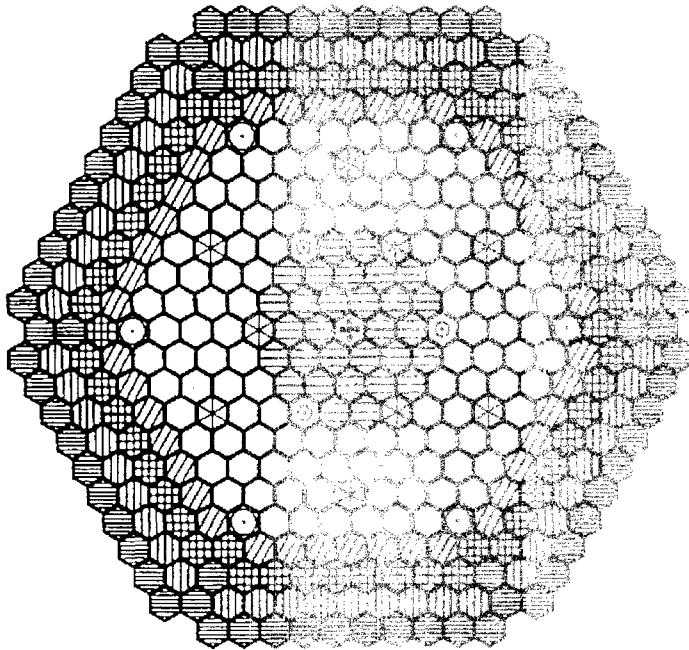
기준 노심은 연료 재배치와 밀집된 노심을 허용할 수 있는 2개의 driver fuel enrichment(<20% U-

<표> KALIMER의 주요 사양

구분	사양
열출력	840MWth
전기 출력	333MWe
목표 효율	40%
노심 입/출구 온도	370/530°C
연료	초기 노심 : U-Zr 합금 장기 노심 : U-Pu-Zr 합금
노심 내/외부 농축도	14.8/20.0%(상업적으로 이용 가능한 농축도)
원자로 용기	직경 : 11.05m, 높이 : 14.2m
1차 순환 펌프	4대(immersed 전자기 펌프)
중간 열교환기	2대(shell & tube type)
증기 발생기	2대(2차 전자기 펌프 포함)
붕괴열 제거 계통	RVACS
최종 정지	SASS
핵연료 취급	Variable arm pantograph type IVTM
내진 설계	지진 격리 원자로 건물

235) 영역으로 구성된 균일 노심 배열을 활용하고 있다.

<그림 4>에서 보는 바와 같이 노심



	Low Enrichment Fuel	30
	High Enrichment Fuel	120
	Radial Blanket	42
	Control	9
	Source	1
	Ultimate Shutdown	3
	Gas Expansion Module	6
	B4C Shield	54
	IVS	54
	Shield	72
Total		391

〈그림 4〉 KALIMER 노심 평면도

은 150개의 driver fuel assembly와 42개의 radial blanket assembly, 9개의 제어봉, 3개의 ultimate shutdown assembly, 6개의 기체 팽창 모듈, 54개의 shield assembly, 그리고 환형 배열의 54개의 inner vessel storage로 구성된다.

Inner vessel storage는 스테인리스강으로 된 shielding zone에 위치한다.

노심 주위를 둘러싸고 있는 축방향의 상하부 블랭킷은 사용되지 않는다.

기준 노심의 높이는 100cm이고 반경 방향의 등가 반경(제어봉 포함)

은 247cm이다.

높이 대 반경비는 0.404이다.

모든 assembly의 노심 외부 직경은 337cm이다.

노심 구조물은 물리적으로 적은 크기의 노심에서의 적합한 핵 및 증식 활동을 허용하는 HT-9으로 되어 있는데, 방사선 조사에 의한 swelling에 높은 저항성을 갖는다.

노심의 핵설계는 주로 피동형 고유 안전성과 안전 정지 능력을 갖기 위한 반응도 제어에 의해서 좌우된다.

KALIMER의 핵적 노심 설계 임무는 radial blanket annulus의 숫자를 탄력적으로 조정함으로써

closed fuel cycle 내에서 최소한의 약티늄 원소 연소와 핵분열성 self-sufficient 원자로로써 주어진다.

모든 설계 노력은 KALIMER 장기 개발 일정에서 따라서 99년에 선정될 노심 설계를 정의하는 데 투입될 것이다.

4. 연료 및 집합체

KALIMER의 노심은 LEU 금속 연료로 구성된다.

Binary(V-10%Zr) metal fuel은 driver fuel로서 KALIMER의 시운전 연료로 사용될 예정이다.

Fuel pin은 칼럼 내에서 금속 연료

slug를 저장하는 밀봉된 HT-9 tubing으로 만들어진다.

연료는 피복재와의 thermal bonding을 위해서 소듐 bond 상부에 위치한다.

각각의 연료핀의 바닥은 축방향 차폐를 위해서 solid rod end plug로 되어 있다.

연료·반사체 및 차폐체는 동일한 구조를 갖는 구성품을 사용하며 집합체별로 바뀌는 것은 단지 연료 bundle과 mounting grid뿐이다.

Control assembly는 동일한 외부 하드웨어(nosepiece, duct handling socket)를 사용한다.

반사체 집합체는 고체의 HT-9 rod를 저장한다.

흡수체 집합체는 다른 집합체와 마찬가지로 동일한 외부 집합체 구조물 내에 sliding bundle과 dashpot 집합체를 사용한다.

모든 집합체 내에서 pin들은 3각형의 pitch array 내에 위치한다.

연료, 반사체 및 차폐 assembly 내에서 pin bundle은 mounting rail로서 nosepiece에 부착된다.

Nosepiece에 용접되어 pin bundle을 둘러싸고 있는 것은 6각형의 crosssection duct이다.

Duct는 냉각재 유량을 조절하는 역할을 하며, 각각의 pin bundle을 다른 pin bundle로부터 격리시킨다.

Duct는 또한 집합체의 상하부 end 하드웨어를 구조적으로 연결해 준다.

금속 연료의 원자로 내 거동 특성에 대한 심도 있는 분석 결과에 따르면, 산화 연료에 비해서 우수한 원자로 내 거동뿐만 아니라 20% 연소까지 신뢰성 있는 거동 특성을 보여주고 있다.

게다가 금속 연료는 산화 연료에 비해서 높은 선형 출력 rating과 경제성을 가지며 낮은 변환 가능성을 갖고 있다.

ANL의 경험을 금속 연료 설계의 기술적 타당성이 입증되었으며, 실제 활용을 지원하기 위한 데이터베이스도 확립되었다.

현재까지 금속 연료 설계를 입증하는 데는 어떠한 문제도 없다고 평가되고 있다.

5. 열수송 계통

KALIMER의 열수송 계통은 경제성·안전성 그리고 신뢰성에 중점을 두고 설계되고 있다.

경제성 증진을 위해서 증기 발생기와 냉각재 펌프를 통합하는 것과 같이 통합 계통 구성품을 활용함으로써 구성품의 수를 감소시켰다.

안전성을 위해서 pool based 1차 계통을 활용하여 대형 계통의 열관성(thermal inertia)이 성취되었으며, pool based 1차 계통 및 reversed Y shape의 도입을 통해 소듐 배관의 숫자와 길이를 단축시킴으로써 소듐 누설의 가능성이 감소되었다.

계통 신뢰성은 1차 및 중간 냉각재

펌핑 모두에 대해 구동 부품을 갖지 않는 전자기 펌프를 사용함으로써 증진되었다.

전자기 펌프의 적은 운동 관성은 보조 기기에 의해서 보상된다.

이 보조 기기는 전자기 펌프가 정상적으로 운전될 때는 일정량의 회전 운동 에너지를 저장하였다가 펌프에 공급되는 전력이 상실될 경우 저장된 회전 운동 에너지로부터 전자기 펌프에 전력을 공급한다.

열수송 계통의 구성품들은 전체 발전소 열효율을 40%로 유지할 수 있도록 설계된다.

개발 노력의 효율성을 극대화하기 위하여, 보조 계통은 기본적으로 기존의 구성품들이 이용될 수 있는 전략하에서 설계되며, 설계 조건은 현재 구입 가능한 터빈에 맞추어진다.

6. 원자로 구조물

316스테인리스강 재질로 만들어지는 KALIMER 원자로 용기는 예비 설계상으로는 높이 15m, 직경 11m, 두께 5cm로 제작될 예정이며, 하부가 반타원형으로 된 원통형 구조를 갖고 있다.

원자로 용기는 노심 지지 연결구 및 선적용 고리를 제외한 다른 관통 부나 부착물이 없는 관계로 안전성이 증진되었다.

또한 정상 운전중 원자로 용기 벽과 고온의 소듐이 직접 접촉되지 않도록 원자로 용기 내벽에 thermal

liner가 설치된다.

상부 덮개 하부에 스테인리스 강판의 수평 영역을 포함시킴으로써 상부 덮개의 온도를 정상 운전중에도 낮게 유지할 수 있다.

구조물의 단순화를 위하여 hot plenum과 cold plenum 사이의 경계를 이루는 support barrel의 상부와 노심을 감싸는 support barrel은 단일의 원통형 구조로 만들어진다.

격납 용기의 높이와 직경은 원자로 용기보다 약간 크다.

격납 용기는 2.25Cr-1Mo강으로 만들어진다.

원자로 용기와 격납 용기의 사이에는 아르곤 가스가 충전되며 원자로 용기로부터 소듐의 누설을 감지하기 위한 계측 설비가 설치된다.

격납 용기는 원자로 용기로부터 발생하는 열을 RVACS의 배출 공기로 전달한다.

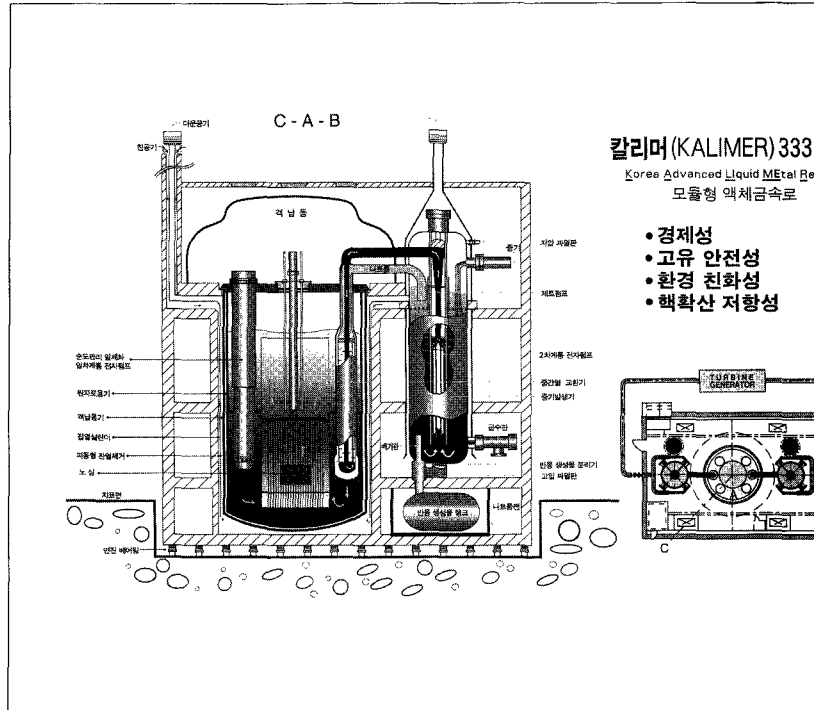
7. 잔열 제거 계통

KALIMER에서는 더높은 수준의 발전소 안전을 달성하기 위하여 계통 신뢰성에 큰 비중을 두고 잔열 제거 계통을 설계하고 있다.

잔열 제거 계통은 1개의 능동 계통과 2개의 수동 계통으로 구성된다.

정상 운전중에 원자로 정지열은 터빈 복수기를 통해서 제거된다.

정비 등에 의해서 대체 정지열 제거 방안이 요구될 때를 대비해서 SGACS(증기 발생기 보조 냉각 계



KALIMER의 개념도

통)가 설치되어 있다.

SGACS는 대기의 공기가 증기 발생기의 shell side를 지나가도록 자연 순환 또는 강제 순환시킨다.

이 계통은 비안전 설비이다.

원자로 용기를 직접적으로 일정하게 냉각시키는 RVACS는 안전 등급이며, SGACS 및 복수기 기능 상실을 포함하는 사고 기간중 충분한 잔열 제거 기능을 갖는다.

8. 지진 격리(seismic isolation)

0.3g 규모의 안전 정지 지진과 같은 설계 기준 지진이 발생하였을 때

에도 KALIMER의 구조적인 안전성을 충분히 유지할 수 있도록, 증기 발생기와 원자로 구조물을 포함하는 원자로 건물과 안전에 중요한 계통 및 구성품에 대해서 지진 기준 격리(seismic base isolation) 개념이 도입된다.

KALIMER에서는 국제 협력을 통해 지진 격리 계통의 특성을 이해하기 위한 시험을 수행하고, high damping rubber bearing의 설계와 제작을 수행함으로써 수평 기준 격리 계통을 개발하고 있다.

국제 협력을 IAEA IWGFR, 미국

의 GE 및 EERC, 일본의 CRIEPI와 수행중이며, 지진 기준 격리의 설계 절차도 개발중에 있다.

지진 여유도를 증대시키고 KALIMER의 설계 경제성을 높이기 위하여 3차원 지진 기준 격리 설계 개념이 고려되고 있다.

지진 기준 격리 계통의 설계 지침이 일본·이탈리아 및 미국 등에서 개발중에 있으므로, KALIMER의 지진 격리 설계는 다른 나라에 의해서 개발된 개념이 수정·보완되어 채택 될 것이다.

9. 보조소듐 및 상부기체 관리계통

보조 소듐 및 상부 기체 관리 계통 (auxiliary sodium and cover gas management system)에는 보조 액체 금속 계통, 불활성 기체 수용 및 처리 계통, 불순물 감시 및 분석 계통 등이 포함된다.

보조 액체 금속 계통은 발전소에서 사용되는 모든 소듐을 수집·이송 및 정화한다.

보조 액체 금속 계통은 연계 계통에 대해 구분된 순도·유량률·온도·압력에 따라 요구되는 소듐의 양을 공급한다.

중간 소듐 처리 계통 (ISPS Intermediate Sodium Processing Subsystem)은 IHTS의 소듐을 연속적으로 정화하고 IHTS와 원자로 용기를 최초 충전하는 기능을 수행한다.

ISPS는 전자기 펌프, 공기 냉각 cold trap 및 상호 연결 배관 및 밸브로 구성된다.

중간 소듐의 정화를 위해서 소듐 집적 탱크(SDT)가 중간 저장 탱크로 이용된다.

1차 소듐 처리 보조 계통은 원자로 용기 내에서 사용되는 소듐의 정화 (cold trapping)에 이용된다.

연료 재장전 기간 동안에는, 1차 소듐이 PSPS 시설의 cold trap에서 정화된다.

원자로 운전중에는, 1차 소듐의 불순물 농도가 높을 때 원자로 내 cold trap이 운전된다.

원자로 내 cold trap은 전자기 펌프와 통합되어 있다.

불활성 기체 수집 및 처리 계통은 액화 가스 및 ambient 가스를 저장하고, KALIMER 발전소 전체의 사용처에 특정한 순도 및 구성의 불활성 기체를 조절된 유량과 압력으로 공급한다.

그리고 방사성 기체 폐기물 계통으로의 저장 및 수송을 위한 vacuum facility의 오염된 기체를 수용한다.

KALIMER에서는 헬륨·아르곤 및 질소 등 3가지의 기체가 사용된다.

헬륨은 연료 취급 설비의 원자로 상부 기체로 이용된다.

아르곤은 IHTS와 보조 소듐 계통에 대한 상부 기체로 이용된다.

질소 가스는 소듐-물 반응을 조절

하고 최소화하기 위한 상부 기체로 사용되고, 1차 소듐 처리 보조 계통의 냉각재로도 이용된다.

불순물 감시 및 분석 계통은 소듐·질소·헬륨·아르곤 가스의 시료 채취, 감시 및 분석 기능을 수행한다.

KALIMER의 혁신 기술

KALIMER 설계 요건은 원자로에 독립적인 피동형 열제거 계통을 통합한다는 것을 명시하고 있다.

이 계통은 정상열 제거 계통의 가산된 완전 상실시 AC 전원 및 운전원의 조치 없이도 공중의 건강과 안전을 보호할 수 있다.

정지열은 비안전 등급의 터빈 복수기, 비안전 등급의 증기 발생기 보조 냉각 계통 및 안전 등급의 RVACS에 의해서 제거된다.

RVACS는 격납 건물의 외부 표면에 공기를 자연 순환시킴으로써 열을 제거한다.

액체 금속로에서 일반적으로 사용되는 rotating plug는 매우 비싼 것으로 알려져 있으므로, 건설 비용의 절감 측면에서 rotating plug 대신에 fixed plug를 설치하는 것이 바람직스럽다.

Rotating plug를 제거하기 위해서는 원자로 운전 주기가 짧아서는 안 된다.

원자로 운전 주기는 연료 기술의 발달로 인해 6개월에서 24개월로 점

진적으로 증가하고 있다.

KALIMER에서는 원자로 내에서 노심 집합체를 이동시키기 위해서 plug-in type in-vessel transfer machine(IVTM)이 사용될 것이다.

IVTM은 모든 노심 위치와 용기 내 연료 저장 위치와 연료 이송 장소를 담당할 수 있다.

IVTM의 gripper를 연장하고 수축시키기 위하여 pantograph mechanism이 채택된다.

IVTM은 인접한 원자로에 공동으로 사용 가능하다.

IVTM을 이용하여 노심 집합체를 이송하기 위해서는 원자로 상부 구조물(UIS)이 제거되어야 한다.

그러기 위해서는 plug in type UIS를 개발하는 것이 필요하다.

연료 재장전 기간중 UIS는 정비 목적으로 준비된 중간 열교환기 저장 용기에 보관될 수 있다.

Plug-in UIS를 제거하고 plug-in IVTM을 설치하는 절차는 <그림 5>에 나타나 있다.

KALIMER는 온도 상승에 대한 높은 고유의 부반응도를 갖도록 설계되어진다.

이 특성은 RVACS의 열제거 능력과 함께, KALIMER가 발전소가 정지되지 않는 심각한 과냉각 및 과출력 과도 상태에서도 안전하게 견딜 수 있게 한다.

어떤 사건이 발생하여 온도가 상승할 경우, 도플러 효과에 의한 부반응도 삽입, 축방향 연료 팽창 반경 방향 노심 팽창 및 제어봉 driveline

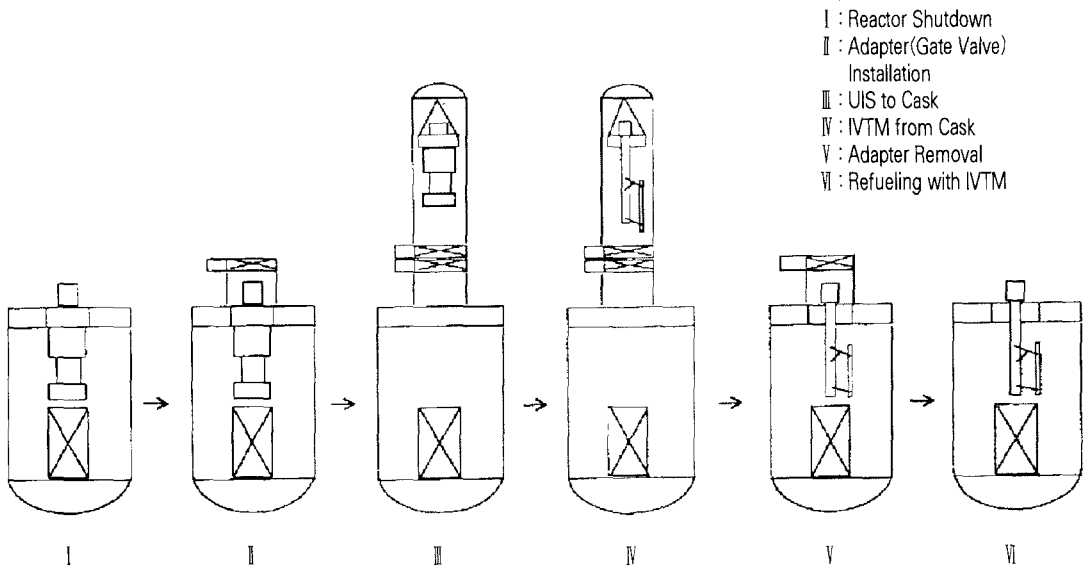
expansion이 작동됨으로써 액체 연료가 장전된 노심에 산화 연료 노심보다 더 많은 부반응도를 발생시킨다.

이러한 피드백은 어떠한 외부의 원인 또는 소듐 밀도/기포로부터의 정반응도를 극복하기 위하여 관련된 시정수에 따라 응답한다.

설계 요건을 만족하기 위하여 관련된 시정수에 따라 응답한다.

설계 요건을 만족하기 위하여 상이한 설계 원칙을 채택한 2개의 독립적인 반응도 제어 계통이 준비된다.

각각의 계통은 어떠한 운전 조건하에서도, 그리고 어떠한 가정된 사고 조건하에서도, 그리고 다른 계통의 고장하에서도 원자로를 안전 정지 상태로 유지할 수 있다.



<그림 5> UIS의 제거와 IVTM 설치 절차

현재 고려되고 있는 negative feedback enhancer에는 발전소가 정지되지 않은 상태에서 유량 상실 사고 발생시 부반응도 피드백을 증가 시켜주는 GEM과 제어봉 인출 사고 시 정반응도 삽입을 제한하는 제어봉 정지 계통 등이 있다.

KALIMER의 설계는 Self-Actuated Shutdown System (SASS)을 채택하고 있는데 이 계통을 떨어뜨리는 3개의 동일한 ultimate shutdown assemblies로 구성된다.

SASS는 원자로 비상 상태시 어떠한 외부의 제어 신호 없이 자연적인 물리 현상에 의해서 자력으로 동작하는 피동형 원자로 정지 계통이다.

Curie Point Electro Magnet (CPEM)은 SASS의 핵심 부품으로 이용되는데, CPEM의 포화 자속 밀도는 CPEM에 사용되는 온도에 민감한 물질의 Curie point에서 현저하게 감소된다.

1차 소듐의 온도가 Curie point까지 상승하게 되면 CPEM은 정지봉을 잡고 있던 전자기력을 상실하게 된다.

따라서 CPEM과 정지봉은 중력에 의해서 노심 내로 낙하하게 된다.

정지봉은 지진 등에 의해서 안내관의 형태가 왜곡되더라도 쉽게 노심 내로 삽입될 수 있는 모양을 갖도록 설계된다.

상이한 지질학적 특성의 부지에 표

준 설계를 적용하는 어려움이 설계 표준화와 원전 부지의 선정의 장애가 되어왔다.

KALIMER 원자로 설계는 원자로 구조물과 내장품에 대한 측면 지진 부하를 감소시키기 위한 지진 격리를 채택함으로써 이러한 문제를 극복하고 있다.

원자로와 증기 발생기 그리고 모든 안전 관련 계통은 seismic isolator에 위치하며, 원자로 구성품의 설계는 단순화되고 안전 여유도는 현저하게 증가된다.

KALIMER의 원자로 건물은 0.3g의 안전 정지 지진 seismic isolator에 위치한다.

이러한 지질학적으로 격리된 건물은 내부에 원자로 용기와 증기 발생기가 위치하게 되는 강력한 구조물이다.

혁신적인 지진 격리 계통은 KALIMER의 안전성과 경제성을 증진시키게 될 것이다.

KALIMER의 고유 안전성 및 피동형 안전성

KALIMER의 안전 철학은 원자로 개발 역사를 통해서 진보해 온 다음의 3가지 원칙에 기초하고 있다.

- 기기 고장과 사고의 예방
- 사고 영향과 영역의 최소화
- 사고 영향의 심각도에 부응하는 수준까지 사고 발생 가능성을 낮춤

KALIMER의 안전 설계는 피동적이고 자연적인 과정을 이용하여 사고를 방지하는 데 중점을 두고 있다.

이러한 목표는 보호되지 않는 발전소가 정지되지 않는 예상된 과도 상태(unprotected ATWS)의 수용을 안전 설계 목표로 정함으로써 달성될 수 있다.

그러한 보호되지 않는 ATWS에는 보호되지 않는 과도 과출력, 보호되지 않는 유량 상실, 보호되지 않는 열 제거원 상실 사고 등이 포함된다.

예를 들어 정상 운전중 주 소듐 배관 혹은 소듐 펌프의 파열 등에 의한 IHTS의 고장과 같은 발생 가능성이 매우 낮은 사고시에도 원자로는 정지되고 RVACS는 자동적으로 운전에 돌입한다.

원자로 소듐과 원자로 용기의 온도는 증가하고 원자로 용기와 격납 용기 사이에서의 복사열 전달, 격납 용기로부터 용기 주위의 상방향 대기 유량 열전달이 증가한다.

RVACS에 의한 열전달과 온도는 원자로에서의 발생열과 RVACS에 의한 냉각이 평형이 이루어질 때까지 증가하게 된다.

현재 고려되고 있는 negative feedback enhancer에는 발전소가 정지되지 않은 상태에서 유량 상실 사고 발생시 부반응도 피드백을 증가 시켜주는 GEM과 제어봉 인출 사고 시 정반응도 삽입을 제한하는 제어봉 정지 계통 등이 있다.

결론

어떤 사건이 발생하여 온도가 상승할 경우, 도플러 효과에 의한 부반응도 삽입, 축방향 연료 팽창 반경 방향 노심 팽창 및 제어봉 driveline expansion이 작동됨으로써 액체 연료가 장전된 노심에 산화 연료 노심보다 많은 부반응도를 발생시킨다.

이러한 피드백은 어떠한 외부의 원인 또는 소듐 밀도/기포로 부터의 정반응도를 극복하기 위하여 관련된 시정수에 따라 응답한다.

우라늄 금속 연료가 장전되는 KALIMER 초기 노심의 구성 방안 중의 하나는 밀집된 노심과 연료 고정 배치를 허용하는 균일한 노심 구성을 활용하는 설계이다.

우라늄 금속 노심의 안전 여유를 평가하고 고유 피동형 안전 특성을 평가하기 위해 ATWS에 대한 예비분석이 수행되어 왔다.

그 결과는 노심에 대한 온도 제한치가 적절한 여유도를 가지면서 만족되는 것으로 나타났다.

노심은 ATWS에 대해서도 원자로 계통 구조에 대한 피해를 주지 않고 원자로 계통을 충분한 안정 상태로 유도할 수 있는 고유의 피동형 부반응도 삽입 특성을 갖는다.

또 한가지 언급하여야 할 KALIMER의 안전 설계 특성 중의 하나는 주요 소듐 화재를 방지하기 위한 원자로 용기 상부의 중간 소듐의 체적을 최소화한 것이다.

온실 효과와 산성비를 고려해 볼 때 더 많은 원전의 건설이 필수적이다.

미래의 원전은 개선된 안전성, 경제성, 그리고 종사자 피폭 최소화, 고준위 폐기물 발생 최소화와 초우라늄 원소 연소 능력에 의한 환경 영향 최소화의 특성을 가져야 한다.

LMR은 이러한 요건을 만족할 수 있는 높은 가능성을 지니고 있다.

일반적으로 말해서 2025년을 목표로 한 상업적인 LMR 사업은 약 2015년경에는 시작되어야 한다.

따라서 사업자로부터 입찰 제안서가 발급되기 위해서는 시범 LMR의 원형로가 최소한 1평형 연료 주기 동안 운전되어야 한다.

이러한 구도하에서 LMR 장기 개발 계획을 달성하기 위한 전략이 다음과 같이 수립되었다.

악티늄 원소를 재활용하는 LMR은 21세기에도 지속적으로 개발되어야 한다. LMR의 범세계적인 상용화는 2025년~2030년 사이에 실현될 것으로 평가된다.

KALIMER의 건설은 LMR 개발 목표를 달성하는 데 필수적이다.

LMR 장기 개발 계획에서 2011년은 KALIMER의 준공의 해로 제시되고 있다.

KALIMER에 대한 관련 연구 개발을 포함하는 예비 개념 설계가 원자력연수원에서 수행되어 왔다.

KALIMER의 원자로 설계에는 고유하게 자신을 보호하는 특성과 혁신 기술이 통합되어 있다.

KALIMER의 1개의 power block은 단지 1개의 터빈 발전기 계통과 모든 power block이 공동으로 사용하는 많은 시설들을 이용한다.

혁신 기술은 KALIMER 발전소의 건설 단가를 감축하는데 크게 기여하고 있다.

KALIMER의 적절한 용량은 333MWe인데 그 이유는 전체 원자로 집합체 모듈의 제작과 수송, 그리고 원자로의 안전 특성은 특히 RVACS에 의해서 결정된다.

향후 모듈 설계 개념은 더욱 보편화되고 활용 가능성이 확대될 것이다. 그리고 KALIMER는 모듈 설계 개념에 의한 시범 원자로가 될 것이다. KALIMER 노심은 부반응도 발생을 고유 특성으로 갖는 금속 연료로 장전된다.

KALIMER는 잔열 제거와 부반응도 삽입을 가능케 하는 고유의 피동형 특성을 갖추고 있으므로 원자로 계통 구조물과 노심에 현저한 피해를 주지 않고 ATWS 사건을 차단함으로써 원자로를 안전한 상태로 유지할 수 있다.

반응도 제어 및 정지 계통은 아주 높은 정지 신뢰도를 갖는다.

또한 단순한 수평 지진 격리 계통에 의해서 높은 지진 여유도를 갖는다. ☞