

를 들어 개별 노심출구온도제어와 같은 복잡한 문제의 경우에는 마이크로프로세서를 이용한 기술을 개발하게 된다. 운전계측제어계통은 진보된 마이크로프로세서 전산처리계통을 이용한다.

제염과 유지보수

제염과 유지보수설비는 원자로건물 내의 서비스건물에 있으며, 서비스건물에는 필요한 모든 장비와 기기가 있다. 이 설비들은 소규모로 오염된 기기들을 대기중에서 취급하고 가능한 한 손으로 정비할 수 있도록 제염한다.

세척 및 제염구역 가까이에 있는 정비구역은 검사, 정비, 재사용을 위한 수리를 할 수 있고, 폐기물을 취급한 기기들을 손질하며 만약 재검증해야 할 경우에는 원격으로 제어하고 취급용기 아래 부분을 정비, 수리 및 제염한다. 정비건물 내에는 제한된 숫자의 유효기간이 지난 원자로부품과 여분의 원자로 부품이 저장되어 있다.

개발현황

EFR의 목적을 위해 많은 연구개발계획이 수립됐다. 프랑스, 독일, 영국의 원자력연구센터의 연구계획이 EFR의 조건에 맞게 재검토됐다.

현재 수행중인 EFR 개념검증단계는 기술적, 경제적으로 잘 수립된 1차계통설계와 예비안전성보고서(특정 부지에 국한되지 않은)와 함께 1993년 3월에 완료될 계획이

다. 2, 3년 연구를 더 수행하면 두 분야를 잘 통합하여, 핵증기공급계통설계 및 국가적 관행과 2차계통(BOP)과의 조화를 위한 설계연구도 분석될 것이다.

부지가 선정되면 현장특성을 고려한 1, 2차측 상세설계, 기기검증시험, 설치국가의 인허가준비 및 예비제작기술검토를 시작할 것이다. □

改良型液體金屬原子爐(ALMR)

개 량형액체금속원자로(ALMR, Advanced Liquid Metal Reactor)를 개발하기 위해 미국 에너지성의 지원을 받는 계획의 일환으로, Argonne 국립연구소의 종합고속로(IFR, Integral Fast Reactor) 개념을 GE社의 혁신소형동력로(PRI-SM, Power Reactor Innovative Small Module) 증식로설계에 적용하고 있다.

종합고속로(IFR)

IFR 개념은 수조형원자로로서 혼합금속원자로연료와 건식야금(Pyroprocess) 연료주기를 이용하고 있다. 두 가지 특성으로 IFR은 세계의 다른 액체금속원자로와 구별되는데, 연료형태와 연료주기술이 그것이다.

연료는 우라늄, 플루토늄, 지르코늄혼합금속이다. Argonne 연구소에 의하면 금속연료는 중요한 새

로운 안전특성이 있고, 건식야금이라 불리우는 고온에서 금속을 체련하는 공정에 기초하여 근본적으로 연료주기의 단순화를 가능하게 한다고 한다.

금속연료의 원자로성능은 Idaho州에 있는 Argonne 연구소의 실험 증식로-II(EBR-II)에서 수년간 성공적인 사용으로 150,000에서 200,000MWd/t에 이르는 연소도를 확립했다.

금속연료를 사용하는 ALMR의 피동적안전특성은 1986년 EBR-II로 실시한 획기적인 일련의 실험에 의해 입증됐다. 두 건의 전통적인 무정지예상과도상태(ATWS)를 모의시험했다. 같은 날 별개 시험인 실제 발전소 정전사고와 히트싱크상실조건이 전출력상태에서 일시 우회정지회로와 운전원의 조치 없이 실시되었다.

두 경우 모두 EBR-II은 자연순환으로 열이 제거되는 저출력조

건까지 간단히 정지했다. 연로나 원자로계통에 전혀 손상이 없었다. Argonne 연구소의 분석에 따르면 이러한 장점은 EBR-II와 같이 상대적으로 소형 원자로만이 아니라 1,000MWe 이상 적용할 수 있음이 입증됐다.

ALMR은 폐쇄연료주기가 필요하고, 종합고속로(IFR)계획으로 개발 중인 연료주기기술은 다른 나라에서 추진 중인 것과 차이가 크다. 세계 모든 나라에서 재처리공정은 PUREX 솔벤트추출을 기반으로 하고, 성형은 산화펠렛 압축과 소결을 기초로 하고 있다. 이러한 공정의 타당성이 오랫동안 입증됐지만, PUREX/oxide 기술의 규모의 용량에 필요한 초대형 설비가 필요하다.

IFR 연료주기는 건식야금(Pyroprocess)이라는 상대적으로 고온인 금속처리공정이 이용된다. 이는 작은 설비로 수행될 수 있는 단순한 일괄처리(Batch Process)방식이다. 단지 1개 또는 2~3개의 원자로의 작은 용량에는 매우 경제적이다. 초기 ALMR에 필요한 민간 재처리시설이 없는 미국의 입장에서는 작은 규모에서의 연료주기 기술의 경제성은 ALMR 개발의 선행조건이다.

건식야금의 세 가지 주요단계는 1. 전해정련(단순조치로 연료가 해체되고 전해이동으로 핵분열생성물에서 수집음극으로 중금속을 분리시킨다) 2. 전해음극처리(음극으로부터 나온 중금속이 증류기로 정제되어 금속피로 정련된다) 3. 사출주물(새로운 금속연료봉이 이에 의해 만

들어 진다) Argonne 연구소에서는 93년초에 시작될 건식야금 실증을 위한 EBR-II 연료주기설비를 준비 중이다.

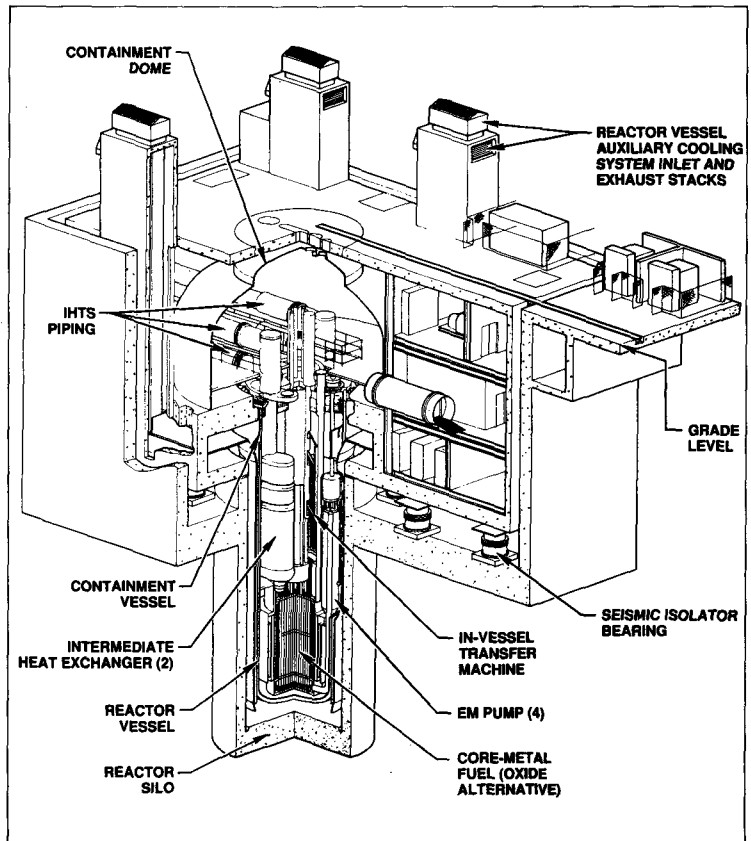
PRISM 원자로

PRISM 원자로설계는 GE사가 주도하는 산업계팀이 의해 개발되고 있다.

Argonne 연구소의 IFR 계획은 금속연료와 연료주기를 취급하고 있다. 다른 국립연구소들은 기술개발과 검증을 지원하고 있다. 또한 핵심기술개발과 시험분야에서 국제

협력이 이루어지고 있다.

전력회원사들로 구성된 EPRI는 DOE와 협력하여 기술계획검토와 지침을 제공해왔다. 현재 개량된 개념설계단계에서 ALWR 계획상 원자로설계와 인허가 노력으로 향상된 예방 및 최종설계를 완료하고 난 후 1:1 원형발전소를 건설하여 실제 성능시험으로 피동형자연안전 특성을 시범적으로 보여줄 계획이다. GE사에 따르면 2005년경에는 미국 NRC의 표준설계인증이 실시되고 2010년에는 상용화될 것으로 전망된다.



〈그림 2〉 ALMR 혁신소형동력로 설비도(GE社 제공)

1. 설계개요

ALMR은 안전하고 신뢰도가 높으며 경제적으로 경쟁력이 있는 액체소듐냉각스펙트럼 고속증식로 발전소 설계로 다음의 주요특성을 가지고 있다.

(1) 공장조립과 내륙이나 해안부지로 수송할 수 있고, 예상되는 안전성과 성능특성을 확인하기 위한 완벽한 모의시험이 가능한 크기의 소형원자로 모듈

(2) 운전원조치로써 충분한 정지 시간 동안에 저온상태로 가는 안전한 정상상태로 만들기 위해 정지실패에 의한 저냉각과 과출력과도상태에서 피동적반응도 저감

(3) 방사능누출을 적게 하고 공식적인 공중소개계획과 훈련이 필요하지 않도록 간단하고 피동적인 안전특성에 의한 중대사고 방지

(4) 연료소모량보다 큰 증식능력

(5) 시운전에 필요한 분열성물질로서 경수로 사용후연료에서 나오는 플루토늄이나 액티나이드 폐기물을 사용하거나 폐기 핵부기의 잉여 플루토늄 중 선택적 사용 가능성

(6) 표준 금속연료주기 또는 대안으로 산화연료주기 어느 것을 이용해도 무방한 노심설계 유연성

표준상업용 ALMR은 3개의 동일한 480MWe 출력블록이 합하여 1,440MWe의 발전소 전체의 전기출력을 생산하는 9개의 원자로 모듈로 되어 있다. 각각 출력블록의 특성은 3개의 동일한 원자로 모듈로 구성되어 있고, 각 원자로 모듈에는 각기 핵안전등급 원자로설비와 고산업등급의 중간열수송계통

및 증기발생기가 있다. 그러나 이들 증기발생기에서 생산된 초가열 증기는 동시에 하나의 터빈발전기로 보내진다. 발전사업자의 부하증가에 맞추어 규모가 조정되면 480MWe나 980MWe로 발전소 크기를 축소할 수 있다.

ALMR 금속연료주기의 관심을 끄는 특성은 ALMR의 고속증성자 에너지스펙트럼을 이용하여 고준위의 장반감기인 액티나이드를 분열시키는 노심으로 되돌려 보내는 능력이다. 액티나이드를 분열시킴으로써 액티나이드 누적과 후속처리의 필요성이 없어졌다. 이러한 PRISM의 자체 액티나이드 분열능력은 기술적, 경제적으로 큰 영향 없이 ALMR의 시운전연료로 다른 원자로에서 생산되는 액티나이드를 사용하는데까지 이용될 수 있고 또한 관심을 끄는 폐기물관리측면의 이점도 제공한다.

2. 원자로 모듈

원자로 모듈은 직경이 20피트이고 따로 선적되는 분리가능한 노심내부기기들을 제외하고 약 800톤의 선적무게를 가진다. 원자로와 격납용기에는 상부헤드 아래에 관통부가 없다. 원자로는 수조형으로 설계되어 있고 1차측 소듐은 4개의 수증자체냉각전자력펌프에 의해 원자로 내부에서 재순환된다. 2개의 중간열교환기(IHX)는 중간열전달계통(IHTS)의 소듐으로 열을 전달하고, 또 초가열증기 생산을 위하여 다시 증기발생기로 열을 전달한다. 길고 날씬한 원자로의 기하학적 구조로 내부흐름분배의 일관

성과 안전성 및 원자로정지 열제거를 위한 자연순환기능을 향상시킨다.

원자로 및 안전관련계통들은 강철과 천연고무의 복합층으로 만들어진 지진베어링을 설치하여 수평으로 격리시켜 지진을 고려했다. 구조물이 수직방향으로는 튼튼하므로 수직격리는 불필요하다. 인허가 기준 원자로 안전정지 지진조건은 0.3-g 최대지반요동(PGM)이지만 1.0-g 가속도에 이르는 더 강한 지진에도 견딜 수 있도록 구조물의 내진여유를 증가시켰다.

3. 노 심

노심 중앙부는 66개의 비균질 연료집합체, 30개의 내부 Blanket 집합체, 6개의 제어봉, 1개의 최종 정지기인 보론볼, 6개의 기체팽창 모듈(GEM)로 구성되어 있다. 노심 중앙부 주위에는 42개의 반경방향 Blanket 집합체, 48개의 반사집합체, 54개의 차폐집합체로 구성되어 있다.

Reference Fuel은 우라늄(25%), 플루토늄(10%) 지르칼로이의 3겹 혼합금속으로 되어 있다. Blanket 재료는 Depleted 우라늄(10%), 지르칼로이다. 금속연료는 냉각재 상실과 과출력과도상태의 경우에 부반응도 Feedback 능력이 우수하므로 원자연료비용면에서 경쟁력이 있다고 GE사는 말한다. 재장전간의 표준운전주기는 24개월이다.

6개의 기체팽창모듈(GEM)이 노심 가장자리에 설치되어 있어서 1차측 소듐유출사건의 경우에 안전여유가 향상된다. 기체팽창모듈은

가운데가 빈 배관집합체로 상부가 닫히고, 하부는 열려서 원자로용기 덮개기체와 같은 헬륨으로 채워져 있다. 1차펌프가 작동하지 않아 입구압력이 낮은 경우에 기체가 팽창하여 소듐 수위를 반응구간 아래로 밀어내림으로써 중성자 누설을 증가시켜 반응도를 감소시킨다.

4. 피동적 정지 열제거

개량형액체금속원자로(ALWR)는 능동적 계통의 가상사고시 원자로를 안전하고 안정된 상태로 되게 하는 피동적 열제거와 반응도정지 특성을 갖도록 설계됐다.

정상 원자로정지 열제거는 중간 열전달계통(IHTS)과 증기발생기를 통하여 터빈콘덴서와 외부 열싱크로 방출된다. 보조냉각계통(ACS)은 대기를 강제 혹은 자연대류로 증기발생기 동체측을 직접 냉각시켜 열을 제거하는 대체수단이다. 원자로용기 보조냉각계통(RVACS)은 격납용기 주위 공기의 자연순환에 의한 안전등급 피동적 잔열제거 계통이다. 이 계통은 펌프 없이 항상 작동되고 있으며 유포쇄장치가 없다.

드물게 IHTS가 출력운전중 정상기능을 상실하는 경우에는 원자로가 정지하고 RVACS가 원자로 모듈의 열을 계속 제거한다.

5. 경 계

1차계통 경계는 원자로용기, 용접밀봉 원자로헤드덮개, 관련 차단밸브, 제어봉구동하우징, Instrument Drywell과 IHX의 세관표면들로 구성되어 있다. 출력운전중

원자로는 용접밀봉되고, 모든 소듐과 헤드덮개에 있는 덮개기체공급관들은 2중 격리밸브에 의해 차단된다. 그외 다른 모든 관통부들은 용접밀봉된다. 헤드덮개 이하에는 관통부가 없다. 출력운전중 원자로 덮개기체의 압력은 대기압 정도를 유지한다.

격납경계는 1차계통을 완전히 감싸고 원자로용기와 헤드덮개를 감싸는 상부격납돔을 둘러싸는 격납용기로 구성되어 있다. 격납용기에는 관통부가 없다. 격납돔의 모든 관통부에는 격리밸브와 공기차단기가 설치되어 있다. 발생가능성이 지극히 희박한 원자로용기 누설사고가 발생할 경우에는 격납용기가 1차측소듐을 보관하고, 원자로노심, 저장중인 사용후연료다발, IHX 입구가 항상 소듐으로 충전됨과 동시에 정상적이고 예측가능한 냉각유로를 형성시킨다. 발생가능성이 지극히 희박한 원자로 에너지사고로 헤드덮개 균열사고가 발생하더라도 격납돔이 고온고압에 견딜 수 있는 구조물로 설계되어 있어 방사성핵종으로부터 공중을 보호할 수 있게 하고 있다.

6. 원자로 제어, 정지

ALMR 발전소는 다중모듈(3 원자로, 1 터빈)로 된 출력블록구조를 최적제어할 수 있도록 특별히 설계된 고도의 자동화와 최신기술로 된 디지털제어계통을 보유하고 있다.

설계는 고도분산공정과 최신 모델을 이용한 제어기기술로 구성하여 체계적이다. 발전소 데이터는 복합기능 광섬유를 이용, 전송하며

제어실에는 3개의 운전원 컨솔이 출력블록별로 1개씩 있다.

ALWR은 전반적으로 매우 신뢰할 만한 공학적 보호계통이 설치되어 있다고 GE사는 말한다. 고도로 자동화된 발전소 제어계통(PCS)은 필요시 저출력상태까지의 자동출력 감발을 포함하여 운전중 노심출구의 소듐온도를 설계치 이내로 유지시킨다. 긴급사태시에는 안전등급 원자로보호계통(RPS)이 독립적으로 6개의 제어봉을 신속히 삽입시키고, 긴급정지신호를 받으면 안전하게 정지시킨다. 자동안전등급 원자로보호계통(RPS)은 비안전등급 발전소제어계통(PCS)과 충분히 격리되어 있고 안전등급 원자로모듈 구역과 원격정지설비내에 설치되어 주제어실과 완전히 분리되어 있다.

반응도정지계통은 정지실패확률이 10^{-6} 이하가 되도록 설계되어 있다. 6개 제어봉 중에 1개만 삽입하여도 원자로를 정지시킬 수 있다. 각 제어봉은 3가지 종류의 삽입방법이 있는데 PCS에 의한 삽입, RPS에 의한 중력낙하삽입, RPS에 의한 고속강제삽입이 그것이다.

발생확률이 매우 낮은 RPS에 의한 제어봉 삽입실패의 경우에 대비하여 추가적으로 독립적으로 다양한 반응도정지 계통이 있다. 노심 Feedback에 의한 피동적 부반응도는 안전하고 안정된 상태로 발전소를 독립적으로 고온정지시킨다. 최종정지계통(USS)도 운전원에 의하여 작동되는데 노심 중앙부에 Boron Ball을 넣어 원자로를 저온정
(37페이지에 계속)

가 파괴되어 부동침하나 전면침하 등으로 내부기기에 심각한 영향을 미치므로 지반의 파괴가 일어나지 않는 암반위에 설치할 수 밖에 없다.

그러므로 원자력구조물은 단주기 성분의 지진동에 대항하기 위하여 구조물을 더 튼튼하게 설계할 필요가 있다. 이 사실을 고층건물 설계의 경우와 비교해 보자. 고층건물

의 설계개념은 대지진에서 붕괴되지 않을 정도로 약간의 변위나 국부적인 파괴는 허용되므로 고층건물로 설계하면 구조물의 고유주기가 늘어나 지진력이 줄어드는 효과가 있다(실제로는 초고층건물이 되면 지진하중보다 風하중에 의해 설계하중이 결정됨).

그러나 원자력구조물은 조그마한 변위나 국부적인 파괴 조차 허용할

수 없어 튼튼하게 설계함으로써 더 많은 지진력을 초래하게 되고 이러한 지진력을 이겨낼 수 있도록 더욱 더 튼튼하게 설계하므로 공사비가 증대하게 된다. 최근에는 지진동의 특성에 관계없이 지진력 자체가 구조물로 전달되지 못하게 하는 免震구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.(계속)■

(64페이지에서 계속)

지상태로 보내고 사고과도상태를 완전히 종료시킨다.

ALMR의 자연피동특성 때문에 무정지 예상 과도상태가 발생하더라도 심각한 연료손상, 소듐비등 또는 ASME Level D의 한계치 이상으로 구조물의 온도가 상승하지 않는다고 GE사는 말하고 있다.

ALMR이 이론상 5달러 정도의 최고값을 가지는 정소듐기포효과가 있지만 다음 4가지의 주요이유 때문에 설계상 인정할 만하다.

첫째, 이론상의 최고 정기포반응도값을 역으로 줄이기 위하여 필요한 설계변경은 연소반응요동을 증가시켜 제어봉을 삽입하여야 하는

정반응도의 크기를 증가시키고, 출력밀도를 증가시켜 중심선상 연료 용융온도 여유를 줄이는 등 다른 안전특성에 영향을 미친다. 또한 설계변경은 발전단가를 상승시키게 된다.

둘째, 다른 음의 효과들과 함께 시간, 공간적으로 괴리효과는 이론적 최고치 5달러보다 훨씬 작은 양의 비율로 정반응도 삽입을 제한한다.

셋째, 노심기포확률이 낮아 10⁻⁷년보다 작은 오차범위에 든다.

넷째, 노심기포발생결과는 1차계통경계에서 소형 ALMR 금속연료 노심의 최대치보다 수십배 더 큰

에너지를 처리할 수 있어 별 문제가 없다. 1차계통 경계를 둘러싸고 있는 격납경계는 외부환경으로 방사능 유출에 대한 추가적인 방벽역할을 한다.

7. 방사선 선량

전통적으로 소듐냉각 수조형태 원자로는 개인 피폭량이 작다. 이는 소듐의 비부식성과 Na24가 배관내에서 순환되지 않고 원자로용기 내에 있기 때문이다. 3개 출력블록 ALMR에서 근무하는 발전소 직원들의 연간피폭선량은 20인렘/년보다 적다도 GE사는 말한다. ■