

미래형 원자로시스템 기술

이 글에서는 최근 국제적인 협력을 바탕으로 추진되고 있는 제4세대 원자로시스템과 또 우리나라에서 추진되고 있는 미래형 원자로시스템에 대하여 소개하고, 제4세대 원자로시스템의 연구개발에 필요한 기술을 살펴보고자 한다.

미래 원자로시스템의 필요 배경

20세기 말 21세기 초에는 유가가 배럴당 50달러가 될 것을 전망한 바 있지만, 2006년에 이미 60달러를 넘어선 것을 체험하면서 전세계는 에너지 위기를 또 당하는 것이 아닌가를 걱정하고 있다. 에너지 자원을 전적으로 수입에만 의존하는 우리나라뿐만 아니라 특히 중국과 인도는 에너지를 안정적으로 확보하기 위해 모든 수단을 강구하고 있다. 한편으로는 이산화탄소 배출에 의한 지구 온난화를 방지하기 위해 교

토 의정서가 1997년에 발표된 후 8년이 지나간다. 이러한 에너지 및 환경위기 상황 속에 그동안 원자력을 유보 또는 반대하던 여러 선진국들조차도 청결성과 안전성 및 경제성이 우수한 원자력 에너지만이 유일한 해결책이라는 것을 이해하기 시작하여 보다 경쟁력 있는 새로운 원자력에너지를 필요하게 되었다.

세계적으로 과거에 건설 운전 되었거나 혹은 현재에 운전 중인 원자로시스템과 미래에 개발, 건설 및 운전될 원자로시스템을 연대별로 나누면 다음과 같다.

제1세대 : 1950년대 도입된 초

창기 원전

제2세대 : 1960년대 이후 원전으로 현재 운전 중인 대부분의 원전

제3세대 : 1990년대 후반 도입 시작된 안전성이 우수한 원전

제3+세대 : 2020년 이전 도입 가능한 경제성 및 안전성이 우수한 원전

제4세대 : 2030년 상용화 목표로 추진 중인 혁신 원전

우리나라는 제3+세대 및 제4세대 원자로시스템을 미래형 원자로시스템으로 볼 수 있으며, 이들 중에서 APR1400(Advanced Power Reactor), SMART

및 NHDD(Nuclear Hydrogen Development and Demonstration)는 제3+세대 원자로시스템으로, SFR(Sodium-Cooled Fast Reactor), VHTR(Very High Temperature Reactor) 과 SCWR(Supercritical-Water-Cooled Reactor System)을 제4세대 원자로시스템으로 선정하여 원자력연구개발 중장기계획(2차 : 1997~2006년, 3차 : 2007~2016년)에 의해 연구개발을 진행 중이거나 계획을 진행 중이다. APR1400, SMART, NHDD, VHTR, SFR 및 SCWR에 대한 설계 및 평가 기술을 각각 다른 장에서 보다 상세히 다루기 때문에 여기서는 제4세대 원자로시스템에 대한 일반적 설계기술과 이를 성공적으로 건설 운전하기 위해 필요한 공통기술 연구개발을 간단히 소개하고자 한다.

제4세대 원자로시스템 일반적 설계 기술

2000년 1월 미래형 원자력시스템 개발을 위해 미국을 중심으로 아르헨티나, 브라질, 캐나다, 프랑스, 일본, 한국, 남아프리카 공화국, 영국으로 구성된 국제포럼(Generation IV International Forum, GIF, 2002년 이후 스위스, EU 추가가입)을 결성하였다. 2002년 9월 GIF는 제4세대 원자로시스템의 연구개발을

위한 기술지도를 발간하면서 네 개의 기술 목표인 지속성(sustainability), 경제성(economics), 안전성 및 신뢰성(safety and reliability), 핵확산 저항성 및 물리적 방호성(nonproliferation and physical protection)을 만족하는 제4세대 원자로시스템을 정하였다.

지속성은 미래 사회 요구를 만족하기 위해 미래 세대들의 능력을 향상시키면서 현재 세대의 필요를 만족하는 능력이다. 즉 원자력에 의한 전력과 수소 생산으로 환경오염 에너지 및 수송원을 대체함으로써 환경 영향을 줄게 한다. 동시에 사용 후 핵연료를 변환하여 새 연료로 재사용하며 고준위 방사성물질의 독성과 잔열을 줄여 환경 친화적 방사성폐기물 시설을 가능하게 한다.

경제성은 원자로시스템의 경쟁력 있는 건조비용을 제공함으로써 재정 위험부담을 줄여준다. 플랜트 및 연료주기 효율, 설계단순화 및 플랜트 최적 용량 크기, 제작 및 건설기술, 모듈화 등에 대한 혁신적인 향상을 통해 경제성을 이룬다. 또 수소, 담수, 지역 난방 및 다양한 에너지를 적재적소에서 생산을 가능하게 하여 경제적 경쟁력을 갖춘다.

원자로시스템의 안전성 및 신뢰성은 미래원자로시스템 개발의 우선적인 요소이다. 사고발생 시 개선된 운영체계 구축, 사고결과 최소화, 부지 외 비상상태 대

책 필요성 감소 등이 고려대상이다. 고유 안전기능, 강건 설계, 투명한 안전기능의 향상과 원자력에너지의 안전에 대한 공공 신뢰 향상을 포함한다.

핵확산 저항성 및 물리적 방호성은 핵물질과 핵 관련 시설의 안전조치 수단을 고려한다. 내부 장비와 외부 안전조치 향상을 통해 원자력시스템의 핵확산저항성을 계속적이면서 효과적으로 제공한다. 시설의 강건성을 증대하여 9·11테러 이후 테러에 대비한 물리적 방호를 향상시킬 수 있다.

제4세대 원자로시스템은 원자로, 에너지전환시스템 및 원광추출부터 폐기물처분을 위한 모든 핵연료주기 시설로 구성된다. 제4세대 원자로시스템에는 다음의 여섯 가지 원자로시스템이 있으며 2030년에 상용화 배치를 목표로 하고 있다.

가스냉각 고속로 : Gas-Cooled Fast Reactor System (GFR)

납냉각 고속로 : Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)

용융염 원자로 : Molten Salt Reactor System (MSR)

소듐냉각 고속로 : Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

초임계압수 냉각로 : Supercritical-Water-Cooled Reactor System (SCWR)

초고온가스 원자로 : Very High Temperature Reactor (VHTR)

가스냉각 고속로시스템(GFR :

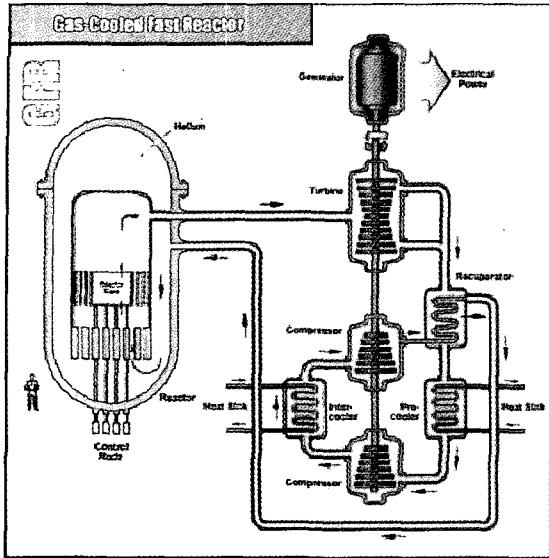


그림 1 가스냉각 고속로시스템

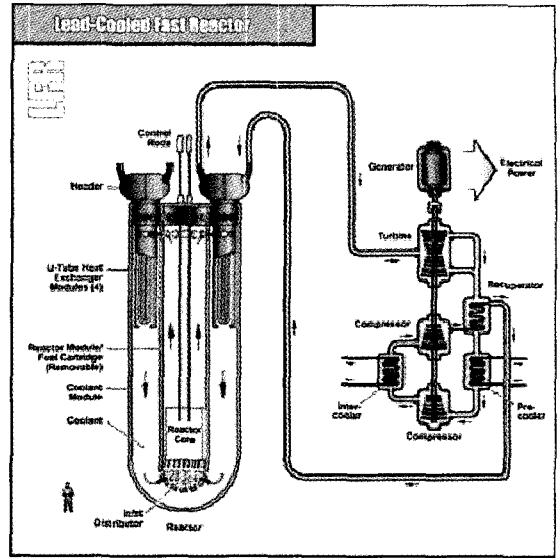


그림 2 납냉각 고속로시스템

Gas-Cooled Fast Reactor System

가스냉각 고속로시스템은 우라늄 변환과 초장수명핵종 운영을 위한 고속중성자 스펙트럼과 폐쇄형 핵연료주기 기능을 갖는다. 부지 내 핵연료주기시설을 갖춘 초장수명핵종 재순환연료주기를 목표로 한다. 핵연료주기시설은 핵물질 수송을 최소화하고 습식, 건식, 혹은 다른 건식공정에 근거한다. 참조원자로는 600Mwth/288MWe, 850℃ 출력은도의 헬륨냉각시스템이며 고열효율을 갖는 직접 Brayton 사이클 가스터빈을 이용한다. 핵연료는 초고온 운전이 가능하고 핵분열생성물을 보존하는 능력이 우수한 복합 세라믹 연료, 연료 입자, 혹은 초장수명핵종 혼합 세라믹 클래

딩 요소가 있다. 원자로노심은 핀 또는 판형상의 연료집합체 또는 다각 블록형을 고려하고 있다.

GFR 실증을 위한 주요 기술개발 현안은 다음과 같다. 고속중성자 스펙트럼을 위한 연료형태, 블랭킷이 없이 효율적인 변환이 가능한 고속스펙트럼을 이루는 원자로노심설계, 큰 파워밀도를 내는 잔열제거시스템과 흑연이 제공하는 열관성을 감소시킬 수 있는 안전설계, 단순하고 간소한 사용 후핵연료 취급 및 제작 등의 핵연료주기기술, 초고온환경에서 고속중성자 플루언스를 견딜 수 있는 재료개발, 전기를 효율적으로 생산할 수 있는 고성능 헬륨 터빈 개발, 원자로의 초고온과 수소생산과 같은 열공정을 효과적으로 연결하는 기술개발 등이 있다.

납냉각 고속로시스템(LFR : Lead-Cooled Fast Reactor)

납냉각 고속로시스템은 우라늄 변환과 초장수명핵종 운영을 위한 고속중성자 스펙트럼과 폐쇄형 핵연료주기 기능을 갖는다. 집중식 혹은 지역 핵연료주기시설을 갖춘 초장수명핵종 재순환연료주기를 목표로 한다. 납 혹은 납-비스무스 공용 액체금속 냉각로이다. 10~30년 만에 교환하는 초장주기 배터리 형식의 50~150MWe, 모듈식의 300~400MWe 또는 대형의 1,200MWe 옵션이 있다. 배터리형은 장수명주기의 공장제작 원자로노심이기 때문에 전기화학식 에너지변환은 제공하지 못한다. 핵연료는 우라늄 및 초우라늄을 갖는 금속 혹은 질소화물 연료이다.

납-비스무스 배터리형은 10년 혹은 30년 초장주기 노심수명을 갖는 소형이다. 원자로 모듈은 공장 제작 후 부지로 운송되도록 설계되며, 자연대류를 이용하여 냉각이 가능하며, 노심 출구온도가 550°C, 혹은 재료개발 성공여부에 따라 800°C까지 가능한 120~400MWh 크기를 갖는다. 이 원자로는 전기, 수소 및 물 생산을 가능하게 하는 에너지를 공급하도록 설계된다.

LFR 실증을 위해 중요한 기술 개발에 대한 다음과 같은 도전이 요구된다. LFR 핵연료 및 재료는 출구온도 550°C인 경우 기술적 차이와 750~850°C인 경우 큰 기술차가 되는 핵연료 및 클래딩 양립성과 성능의 질화계 핵연료 개발, 고온구조재료, 납의 환경문제 등이다. LFR 시스템 설계는 강제 또는 자연대류 열제거를 위한 개방형 격자, 원자로핵자로 및 해석코드, 납 냉각재와 산소 및 플로늄(PO-210)의 화학제어, 혁신적인 열수송(자연대류, 펌프, 원자로내부 증기발생기 이용) 설계방법, 원자로노심 지지구조물, 및 핵연료교환기, 면진설계를 포함한다. 발전플랜트 설계에는 초임계 증기 랭킨 사이클 이용 혹은 초임계 이산화탄소 사이클 개발에 의한 전기 생산, 그리고 수소 생산과 열공정에 활용될 열교환기 개발, 모듈화 및 공장제작에 의한 경제적 설계를 포함한다. 또 금속연료 및 초우라늄-질소 연료

의 원격 제작을 포함하는 핵연료 주기기술 개발 등이다.

용융염 원자로시스템(MSR : Molten Salt Reactor System)

용융염 원자로시스템은 효과적인 플루토늄 및 초장수명핵종 활용성이 있는 열중성자 스펙트럼과 폐쇄 핵연료주기 기능을 갖는다. 완전한 초장수명핵종 재순환 연료주기를 목표로 한다. 핵연료는 소듐, 지르코늄 및 우라늄 플루라이드의 순환 액체 혼합물이므로 연료를 제작할 필요가 없다. 용융염연료는 열 스펙트럼을 내는 흑연 노심을 통과하여 흐른다. 생성된 열은 이차계통인 중간열교환기를 지나 동력전환기를 통하여 전달된다. 초장수명핵종과 대부분의 핵분열물질은 냉각재에 플루라이드 형태로 형성된다. 참조원자로는 1,000MWe 수준으로서 0.5MPa 이하의 저압과 열효율을 개선할 수 있는 정도의 700°C 이상의 노심출구온도로 운전된다.

MSR에도 여러가지 해결해야 할 기술적 문제가 있다. 가장 시급한 현안은 용융염의 화학특성, 핵연료의 초장수명핵종과 란탄족 원소의 용해특성, 방사화된 용융염연료와 구조재료 및 흑연과의 양립성, 열교환기 일차측 벽면 내의 금속집적화 등이다. 원자로와 동력 생산 사이클에 대한 개념설계, 예비 기술사양 확립을 위한 연구개발도 필요하다. MSR 성능

연구를 위해서는 핵연료개발, 노심설계핵자로, 용융염조성 선택을 위한 품질 개발, 재료 수명 및 신뢰성 결정을 위한 부식 연구, 삼중수소 제어기술 개발, 흑연 밀봉, 안정성향상 및 실험 기술 개발 등이 요구된다. 운전수명이 긴 용융염 냉각재펌프 개발, 700°C 고온 운전조건에서 성능 발휘가 되는 밸브, 연결부 개발 등 기기 부품 개발이 있다. 또 MSR 원자로시스템의 장단점과 경제성 평가를 위한 trade-off 연구가 필요하다. 또 현재의 규제는 고체연료 원자로에 적합하므로 그와 상응한 안전성을 정의하는 MSR 원자로에 알맞은 규제개발이 요구된다. MSR 원자로는 재처리공정 플랜트와 많은 기능을 공유하므로 MSR 규제 및 인허가요건 개발은 핵연료주기 연구개발과 연계되어야 한다. 고방사 및 고온 조건하에서 원격 및 로봇에 의한 관리, 감시 및 수리가 중요한 기술이다.

소듐냉각 고속로시스템(SFR : Sodium-Cooled Fast Reactor)

소듐냉각 고속로시스템은 우라늄 변환과 초장수명핵종 운영을 위한 고속중성자 스펙트럼과 폐쇄형 핵연료주기 기능을 가지며 완전한 초장수명핵종 재순환연료주기를 목표로 한다. 150~500 MWe의 중급규모 원자로시스템은 동일 부지 내에 설치되는 건식공정 핵연료주기의 우라늄-플

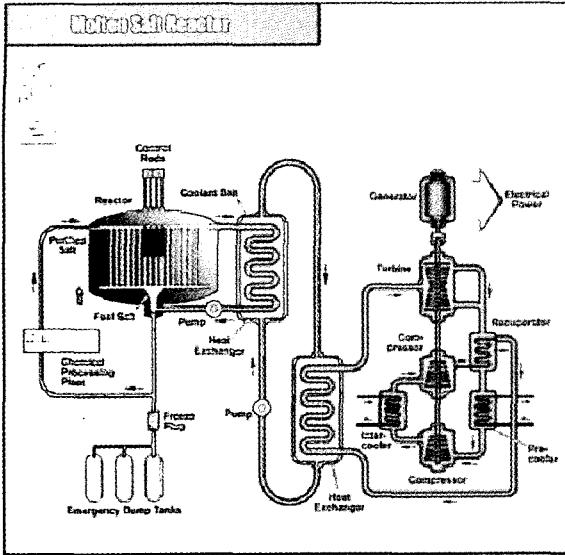


그림 3 용융염 원자로시스템

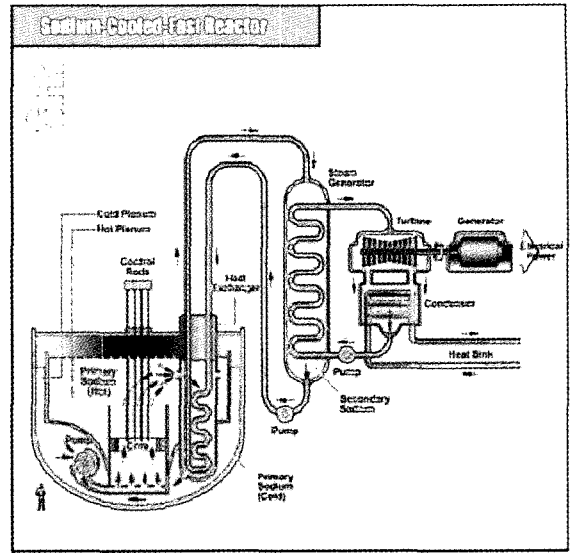


그림 4 소듐냉각 고속로시스템

루토늄-초장수명핵종-지르코늄 금속연료를 사용한다. 500~1,500MWe의 중급 또는 대형 원자로시스템은 여러 기의 원자로 운전을 가능하게 하기 위해 습식 공정 핵연료주기 시설이 중앙에 설치되며 우라늄-플루토늄 혼합산화물 핵연료를 사용한다. 모두 노심출구온도가 550℃ 정도이다. 연구개발 주요 초점은 재순환연료주기기술, 계통의 경제성, 피동안전성 확증, 및 중대사고 대처이다. SFR에서 해결해야 할 기술적 문제는 다음과 같다. 비정상거동에 대해 피동안전성을 확증, 경제적 설계, 한계 가상 사고에 대한 원자로 조절능력의 실험적 증명, 장수명핵종의 회복을 증명하기 위한 건식공정의 규모 확대, 원격 운전 관리기술에 의한

산화물핵연료 제조기술 개발 등이다. 경수로에 견줄만한 경제적 설계를 위해 혁신적인 개념으로 미국 GE는 S-PRISM의 모듈화 건설을, 일본은 일차계통의 루프수의 감소, 펌프와 중간열교환기의 일체화, 스테인리스강 대신에 고온에서의 재료강도 및 열전달 특성이 더 좋으면서 열팽창계수는 작은 12Cr과 같은 개량된 재료의 사용 등을 제안하였다. 소듐 환경에서 사용 중 검사 및 수리 기술 개선, 소듐-물 반응을 조기 감지하기위해 신뢰성이 향상된 누수 감시시스템 개발 등은 열교환기 튜브의 파손전파를 방지하고 신속한 운전 재개를 가능하게 한다. 플랜트 효율을 증대하기 위해 초임계 이산화탄소 Brayton 사이클 개발도 진행 중에 있다.

보다 상세한 연구개발 사항은 별도로 다룬다.

초임계압수 냉각로시스템 (SCWR : Supercritical-Water-Cooled Reactor System)

초임계압수 냉각로시스템은 두 종류의 핵연료주기가 있다. 첫째는 열중성자 스펙트럼의 개방형 핵연료주기이며, 둘째는 고속중성자 스펙트럼을 갖고 완전한 초장수명핵종 재순환이 가능한 폐쇄형 핵연료주기이다. 모두 고온, 고압의 물 냉각 원자로로서 열효율을 약 44% 정도까지 달성할 수 있으며, 물의 열용량 임계점 (22.1MPa, 374℃) 이상에서 운전되도록 설계한다. 열중성자 스펙트럼의 개방형 핵연료주기는 일회통과용 우라늄주기이다. 고속

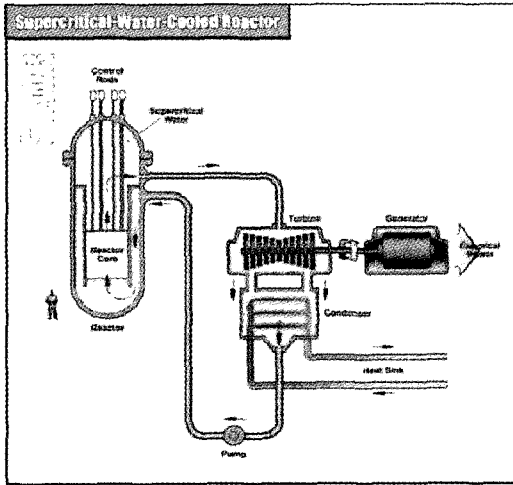


그림 5 초임계압수 냉각로시스템

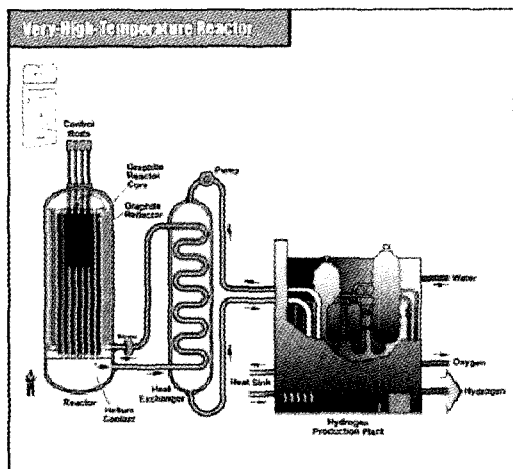


그림 6 초고온가스 원자로시스템

중성자 스펙트럼의 핵연료주기는 초장수명핵종 재순환을 위한 습식 공정에 근거한 중앙식 핵연료주기시설을 이용하며, 이 핵연료주기는 재료개발 성공여부에 달려 있다. 두 종류 모두의 참조원자로는 1,700MWe, 운전압력 25MPa, 그리고 원자로출구온도 550℃로 설계된다. 피동형 안전

(원자로 내부구조물의 열중성자 스펙트럼 경우 10~30dpa, 고속중성자 스펙트럼 경우 100~150dpa) 환경에서의 방사선조사 안정성 및 취성, 크리프, 부식 및 응력부식 파손과 관련된 재료거동 연구가 필요하다. 온도와 유체 밀도 함수로 주어지는 방사선분해 기구와 수화학 특성,

기능은 비등수 원자로와 유사하다. 초임계압수의 낮은 밀도 때문에 열중성자 스펙트럼형의 원자로 노심에 중성자 감속재가 추가된다. 원자로의 냉각수의 상이 바뀌지 않기 때문에 2차계통 플랜트를 매우 간단하게 설계할 수 있다.

SCWR에서 해결해야 할 기술적 문제는 다음과 같다. 우선 핵연료 및 구조물 재료 문제로서 관심 있는 온도 510℃, 압력 25MPa, 방사선 조사

방사선 조사에 의한 성장 및 뒤틀림, 응력이완 등의 미소구조의 안정성, 재료강도, 취성, 고온 크리프 저항성 등이 있다. 안전성 문제로서 임계온도 부근에서의 열수력 특성 측정자료 확보, 재료 및 구조물 설계기술개발, 운전 중 유동안전성을 포함하는 안전성 향상기술, 플랜트설계 기술 개발 등이다. 보다 상세한 연구개발 사항은 별도로 다룬다.

초고온가스 원자로시스템

(VHTR : Very High Temperature Reactor)

초고온가스 원자로시스템은 열중성자 스펙트럼과 일회통과용 우라늄연료주기를 가지지만, 다른 원자로시스템에 비해 초고열효율을 갖는 고온 열공정 시스템을 상대적으로 빨리 실용화 배치하는 것이 가능하다. 참조원자로는 600MWe 헬륨 냉각 노심을 가지며, 가스터빈-모듈 헬륨원자로 (GT-MHR : Gas-Turbine-Modular Helium Reactor)의 다각 블락형 핵연료 혹은 펄베 모듈 원자로(PBMR : Pebble Bed Modular Reactor)의 펄베 핵연료를 사용한다. 1차계통은 공정열을 운반하는 증기조성기와 증기발생기에 연결된다. 이 원자로시스템은 노심출구 냉각재 온도가 1,000℃ 이상이며 공정열을 고온에서 수소생산이 가능한 비전기공정으로 제공하는 고효율 시스템으로서 전기 생산도 동시

에 가능하게 설계할 수 있다. 또 이 시스템은 우라늄 및 플루토늄 핵연료주기를 채용하거나 폐기물을 최소화하는 것이 가능한 유연성이 있다. 이 원자로시스템은 핵연료 성능과 고온재료의 많은 개선이 요구되지만 이미 운전경험이 있는 다각형 또는 페블형 가스 냉각로에서 제안된 여러 개발들의 장점을 살릴 수 있다. 추가 개발 요소는 고온 합금재료, 세라믹 또는 복합재료, 그리고 지르코늄-탄소 연료피복 등이다.

VHTR의 실용성을 실증하려면 원자로 노심 출구 온도를 850~1,000°C까지 올리는 것을 허용해야 하며, 사고조건에서도 최대 핵연료온도를 1,800°C까지 허용해야 하고, 최대 핵연료 연소도가 150~200GWD/MTHM이어야 한다. 노심 내 출력 피크와 온도구배를 피해야 하며 또 냉각 가스 내에 열충도 피하하도록 해야 한다. 화학공정과 원자력열원 사이에 온도, 동력수준 및 운전압력 관점에서 연구개발의 기술 차를 극복해야 한다. 요오드-황산(I-S) 공정을 이용하여 수소를 생산하는 가능성을 보이기 위해서는 화학반응 소규모 시험 및 대규모 실증과 내부식성 재료의 개발이 필요하다. 원자로계통과 생산계통의 분리를 위해 열교환기, 냉각가스관, 및 밸브의 개발이 필요하며 이는 특히 삼중수소와 같은 동위 원소가 고온에서 금속에 스며드는 것을 방지하기 위한 것이다.

성능 향상을 위해 효율적인 전기 생산이 가능한 고성능 헬륨터빈 개발이 필요하며, 상업화를 위해서는 원자로 및 열 이용계통의 모듈화가 필요하다.

제4세대 원자로시스템의 공통기술 연구개발

제4세대 원자로시스템의 핵연료 및 재료, 에너지 생산, 신뢰성 및 안전성, 핵연료주기, 경제성, 그리고 핵비확산성 및 물리적 방호성 관점에서 공통적으로 필요한 연구개발 기술은 다음과 같다.

핵연료 개발에서는 burnup을 높이면서도 핵연료 재장전주기를 늘릴 경우 구조적건전성을 만족해야 하며, 사용 후 핵연료의 재사용 및 초장수명핵종 운영을 효율적으로 가능하도록, 고온, 고중성자, 고압에 견디는 재료개발, 제작성, 안전성, 냉각재와의 양립성, 재장전주기 등을 고려해야 한다.

원자로시스템 개발에서는 원자로노심거동을 위한 노심핵설계, 계통의 열유체설계, 구조물, 기기 및 계통의 기계 및 구조 설계, 사고 대처를 위한 안전성 검증, 시스템 제어 계측, 화학공정설계 및 핵연료주기 등의 여러 분야가 유기적으로 연결되므로 설계흐름을 원활히 하면서 각 분야의 핵심기술을 개발 입증 후 시스템에 반영한다. 여기서 핵연료 및 노심 연계설계 확보, 계통의 정상 및 비정상 거동 확보, 원자로 안전정

지 확보, 단순설계, 모듈화, 최적 용량 선정, 피동안전기능 확보, 플랜트효율 향상, 고온구조설계 및 면진설계 등을 고려해야 한다.

재료 및 해석모델 개발은 가장 취약한 분야로 장기적 투자 없이는 불가능한 원천기술로서, 아무리 급하더라도 차근차근히 개발해야 한다. 투자비용을 적절히 나누어 효과를 높일 수 있도록 각국 간에 재료 개발을 분담하여 개발한 후 공용의 재료 핸드북을 만들기를 권고한다. 국내에서도 산학연에 분산되어 있는 재료 및 구조시험 장치들을 총괄하는 연구센터가 필요하며 부족한 시설을 확충하고 원자로 구조재의 data base를 구축하여 새로운 원자로시스템에서 요구되는 초고온재료의 원천기술을 확보해야 한다.

신뢰성 및 안전성 개발에서는 새로운 원자로시스템에 대한 가정, 불확실성, 및 경험부족을 고려한 안전성 평가 방법론의 개발과 이에 상응한 비상사태 대처방법 개발이 필요하다. 새로운 안전 관련 계통설계에 대한 최상평가 및 위험정보 인허가방법 개발이 필요하다 이외에 방사선핵종 수송 및 방사선량 평가 방법, 미래 원전의 운전보수를 위한 인간인자, 계측제어 및 인간기계상호작용, 원자로 물리 및 수리학, 위험도운영, 운전보수 등에 대한 개발이 포함된다.

에너지생산시설 개발은 고온

운전조건을 가능하게 하는 시설의 설계와 직결되며 전기 이외에 수소, 물 및 지역난방의 형태로 소비자에게 필요한 에너지를 제공한다. 수소 생산의 경우 초고온에서의 삼중수소의 확산을 제한하기 위한 피복재료 또는 정확계통 개발, 800~900°C 범위에서 수소생산을 위한 I-S(Iodine-Sulfur) 공정기술과 고온재료, 725~800°C 범위의 Ca-Br (Calcium-Bromine) 공정기술, 상대적으로 낮은 온도인 550°C 수준에서의 Cu-HCl 공정기술 개발이 있다. 에너지 변환기 개발을 위해 초임계 이산화탄소 Brayton 사이클의 경우 PCHEx(Printed Circuit Heat Exchanger) 혹은 판-핀형태(plate-fin type)의 열교환기, 터보기기, 전자기베어링 개발 등이 관건이다.

핵연료주기 개발에서는 현재 운전 중인 원전에서 발생된 사용 후 핵연료와 각 원자로시스템에서 개발될 핵연료 형태와 서로 연결되며, 특히 핵폐기물의 소멸과 지속적인 핵연료 가용을 위한 초장수명핵종 운영이 매우 중요하다. 이 목적은 사용 후 핵연료와 고준위방사성폐기물의 저장과도 연계된 중요 현안이다. 즉 사용 후 핵연료를 제4세대원자로의 새 연료로 활용하면 사용 후 핵연료를 직접 저장하는 것보다 방사성폐기물을 줄이고 또 잔열을 줄여줌으로써 사용 후 핵연료 저

장능력을 크게 향상시킬 수 있다. 원격제어 취급장치, 새 연료 제작, 핵비확산 공정설계, 수송용기, 초장수명핵종 소멸 변환장치, 잔열발생 감소시설, 방사선손상 감소 저장시설 개발 등이 있다.

경제성 관련 공통기술 연구개발로서 불확실성을 다루는 포괄적인 방법론에 의한 경비평가, 모듈 대비 일체 플랜트 경제성비교, 비전기 생산 경비 산출의 기본 및 배정, 연구개발 과정에서의 지속적인 시스템 경제성평가, 그리고 경제성평가 도구개발 등이다. 이러한 도구를 통해 다른 대안의 원자로시스템 또는 기술과 비교함으로써 이해를 더 잘 할 수 있고 경제성능을 향상하기 위한 분야를 확인할 수 있다. 원자력 경제성평가 도구는 자본과 생산비용 모델, 핵주기비용 모델, 에너지 생산비용 모델, 플랜트 규모 모델 및 통합 원자력 경제모델의 다섯 종류로 대별된다.

핵비확산성 및 물리적 방호성 관련 공통기술 연구개발은 안보와 물리적 방호 전략, 핵비확산 및 물리적 방호 평가요건 설정, 평가 방법론 개발이 있다. 각 원자로시스템의 전 수명주기 동안 방사성물질의 형태, 양, 및 위치를 정하고, 방사성물질의 잠재적 취약성을 파악하여 전용 또는 도난의 용이성을 감소하거나, 확산이 어렵도록 하는 연구개발이다. 원자로 또는 핵연료주기시설 기술이 원래 목적에서 벗어나지 않

도록 보호하는 방법과 관련 시스템, 기기 및 재료가 불법 복제되지 않는 방법을 정하는 연구개발이 있다. 건식, 습식 공정, 또는 용융염연료에서 정상의 플랜트기기의 불법 사용 또는 부가 시스템으로 무기사용 물질을 추출하는 잠재적 수단을 확인하는 연구이다. 핵물질의 일반적 안보 접근법, 대안 방안, 기술적 동의를 이끌어내기 위한 시스템의 연구개발이 필요하다. 이 시스템의 간단한 확률신뢰성 해석을 통해 방사성 물질의 유출 또는 도난이 될 수 있는 파업의 취약성을 확인한다. 플루토늄 또는 우라늄 233을 비밀리에 생산하는 원자로의 잠재적 사용을 탐지해야 한다.

각 원자로시스템의 연구개발 특성이 서로 다르기 때문에 각 나라들은 기존의 원자력 이용 현황과 제4세대 원자로시스템의 특성을 고려하여 자국의 형편에 적합한 미래 원자로시스템을 결정하여 그에 따른 연구개발을 추진하고 있다. 제4세대 원자로시스템의 연구개발은 크게 2단계로 나뉘어 수행되고 있으며, 먼저 주요 기술에 대해 가능성을 조사하는 1단계와 성능자료생산 및 최적시스템 개발을 위한 성능단계이다. 이 두 단계 연구개발의 성공 이후는 각 나라 형편에 맞게 이루어질 최소 6년 정도의 실증 단계를 예상할 수 있으며, 이 단계에서는 산업체와 함께 원형 또는 실증원자로의 인허가, 건설,

운전이 포함될 것이다.

맺음말

미국의 1979년 TMI 원전사고, 러시아의 1986년 체르노빌 원전 사고를 겪으면서 침체된 원자력 산업에 대한 재부흥 노력, 인도, 파키스탄, 이라크, 이란, 북한 등에서 야기된 핵확산금지 위협하는 일련의 움직임으로부터 세계 평화와 안전유지 노력, 9·11 테러 재발 금지 노력, 지구환경의 보존을 위한 노력의 필요성을 절감하면서도 세계 각국은 고유가에 대비하는 생존을 위한 소리 없는 에너지 전쟁을 계속하고 있으며 우리도 그 중심에 있다.

현재 각국은 상기 소개한 여섯 개의 제4세대 원자로시스템 중에서 자국의 관심도에 따라 개발 원자로시스템을 선언하고, 각국 간에 공동연구개발을 위한 협력

협정이 체결 중이며 이에 따른 연구개발계획서의 공동작성, 연구 개발정보의 상호교환 등이 이루어지고 있다. 우리나라는 제3+세대인 APR1400, SMART, 및 2020년까지 수소 생산을 목표로 한 NHDD 사업이 추진되고 있으며, 제4세대원자로시스템 중에서 소듐냉각 고속로, 초임계압수 냉각로, 초고온가스 원자로를 지정하고, 한국원자력연구소를 중심으로 정부, 산학연이 서로 협조하면서 활발한 국내외적 활동을 추진 중이다. 소듐냉각 고속로는 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 600MWe를 참조노형으로 개발 중이며, 초고온가스 원자로는 NHDD의 성공 여부에 따라 기술의 급진전이 예상되며, 초임계압수 냉각로는 기초연구를 수행 중이다. 핵연료주기 기술개발을 위해 기본적인 연구를 수행중이지

만, 20기의 원전을 운전하면서 발생하는 사용 후 핵연료의 원전 부지 내 임시저장소가 2016년부터 절대적으로 부족할 것을 예상할 수 있다. 이러한 현실 속에서 우리나라는 확실한 핵연료주기 정책을 결정해야 하며 이에 따른 본격적인 연구개발이 시급한 형편이다.

그러므로 원자로시스템과 핵연료주기 기술을 포함하는 제3+세대 및 4세대 원자로시스템에 대한 성공적 개발을 위해서는 원자력 관련 산학연 및 정부가 국제 원자력기구와 미국 등의 국제사회에 안전하면서도 핵비확산의 투명성을 지속적으로 입증해야 하며, 또 국가 에너지 확보와 평화적 생존권을 유지하기 위해서도 원자력에너지에 대한 국민의 신뢰를 꾸준히 쌓아가는 끊임없는 노력과 연구개발을 위한 충분한 투자 및 지원을 해야 한다.

기계용어해설

라이프 사이클 코스트(LCC ; Life Cycle Cost)

대형 시스템의 예정된 유효기간 중 직접, 간접, 재발, 비재발 및 기타 관련되는 코스트로서 그것을 설계, 개발, 생산, 조업, 보전, 지원의 과정에서 발생하는 것과 발생할 것으로 예측되는 것을 포함한 총합 코스트.

비례한도(Limit of Proportionality)

물체에 하중을 가하면 변형하여 응력과 변형을 일으키고, 이 양자는 응력이 일정 값에 달하기까지 정비례하며, 그 관계가 유지되는 최대 한도. =proportional limit

액체 호닝

(Liquid Honing)

금속제품이나 재료에 미립자의 연마제를 첨가한 물 또는 그에 적당한 부식 억제제를 첨가한 것을 고속으로 뿜어서 균일한 스테인 다듬질을 하는 동시에 깨끗하게 하는 표면연마 가공법.