

중소형 일체형원자로 SMART 개발

Small and Medium Integral Reactor, SMART-Development



김 금 구*



지 성 균*

* 한국원자력연구원 중소형원자로기술개발부 책임연구원

1. 머리글

1954년 구소련의 Obninsk에서 상업용 원자력발전소가 처음 도입된 이래로 원자력을 이용한 전력 생산은 꾸준히 증가해 왔다. 초기 이후 1970년대에 들어서 전력생산을 목적으로 하는 원자로는 전기출력 700~1,000MWe 이상의 대용량 원자로가 주류를 이루고 있고, 개발 및 기술개선도 대용량 원자로 중심으로 이루어져 왔다. 그러나 1980년대 중반이후 미국을 비롯한 서방세계의 원전 기피 현상으로 인하여 우리나라를 포함한 몇몇 국가들을 제외하면 원자력 산업은 침체에 들어 있었다. 원자력발전소를 활발히 건설하는 국가들도 전력생산 관점에서의 경제성이 대용량에 비해 떨어지는 소형원자로에 대하여 관심을 보이지 않고 있다.

그러나 기후변화 협약 대비, 화석연료 가격 폭등 등 화석연료의 문제를 극복하기 위하여 원자력 에너지 활용의 다변화에 대한 관심이 증가하면서 열병합발전, 해수담수화 열원공급, 지역난방 등에 사용할 수 있는 소형원자로 개발 노력이 증가하고 있으며 향후 중소형 규모의 원자로 시장형성에 대한 긍정적 전망에 따라 국제적인 개발 경쟁도 점차 치열해지고 있는 추세이다.¹⁾ 한국원자력연구원은 1997년부터 원자력 에너지 활용의 다변화에 관심을 가지고 소규모 전력생산과 함께 해수담수화를 위한 에너지를 공급할 수 있으며 안전성이 획기적으

로 제고되고, 경제성이 향상된 소형 일체형원자로 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)의 설계 개발을 추진해 왔다.

SMART는 우리 기술로 자체개발한 열출력 330MWt의 일체형원자로 모델로서 기존 가압경수로 대비 약 100배의 안전성 향상과 함께 방사성폐기물 발생량을 혁신적으로 감소시킨 신형원자로이다.²⁾ 일체형원자로(integral reactor)라 함은 증기발생기, 원자로 냉각재펌프, 가압기를 비롯한 원자로냉각재계통(reactor coolant system)의 모든 주요기기가 단일 원자로압력용기 내에 위치하고 있음을 뜻한다. 그림 1은 SMART 원자로의 활용 개념을 보여주고 있다. 즉, SMART는 원자로에서 발생하는 열을 활용하여 소규모 전력 생산과 아울러 해수담수화 에너지원도 제공할 수 있다. SMART로부터 에너지(증기)를 공급받는 담수계통에서는 하루 40,000 톤의 담수를 생산하도록 설계되었으며, 동시에 전력계통에서는 9만 킬로와트의 전력을 생산할 수 있다. 따라서 SMART 1기는 인구 10만 도시에서 필요한 물과 전력을 동시에 공급할 수 있다.

SMART는 1997년부터 개념설계에 착수하여 원자로계통 및 주요기기의 기본설계 개발을 완성하였다. 개발된 SMART 기술의 검증을 위하여 종합적인 검증계획에 따라 실험 등을 수행하였다. 향후에는 종합열수력검증시험과 표준설계를 수행하여 인허가 기관으로부터 표준설계인가를

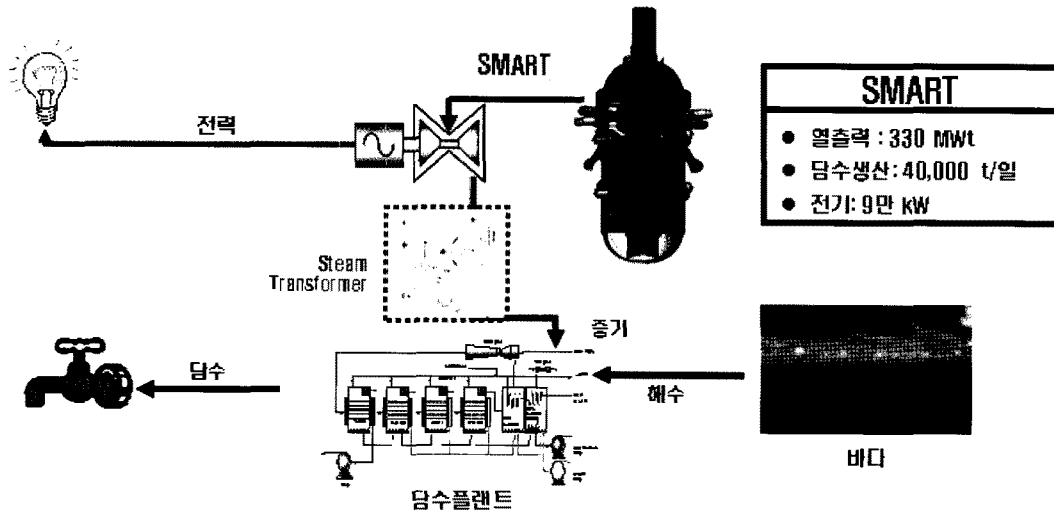


그림 1 SMART 개념도

획득하기 위한 사업을 추진 중에 있다. 이와 같이 종합적인 기술검증이 완료되면 SMART는 수출산업화를 이룩하여 세계 중소형원자로 시장을 주도할 수 있을 것이며, 고유원전을 수출하는 원자력 5대강국으로의 진입은 물론 에너지분야의 신성장동력 창출에도 큰 역할을 담당할 것이다(그림 2).

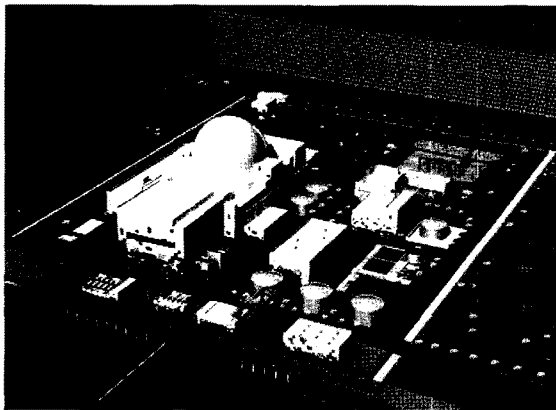


그림 2 일체형원자로 SMART 조감도

2. 중소형원자로 개발 현황

2.1 소형원자로 시장 전망

원전의 상용화 이래로 꾸준히 증가되던 상용원전 수요는 1980년대 중반에 들어 아시아를 제외하면 정체상태를 유지하거나 오히려 감소하였다. 이는 1980년대 초 미국의 Three Mile Island 원전 사고와 구소련의 체르노빌 원전 사고로 원자력안전에 대한 의구심이 급격히 증가했으며, 또한 전 세계적으로 경제구조 재편에 따라 전력의 수요가 급격히 감소하였다. 천연가스 터빈을 이용한 발전기술도

지속적으로 개량되어 효율이 높은 가스터빈 발전이 상용화되었고, 석유가격 붕괴로 인한 저유가도 원자력 수요를 감소시킨 중요한 계기가 되었다.

그러나 2000년대 들어서 원자력 수요에 대한 주변 여건에 많은 변화가 발생하였다. 세계는 지속적인 경제 성장으로 전력수요가 급격히 증가하고 있으며, 석유를 비롯한 화석연료 가격이 급등하여 석유발전소 및 가스발전소의 발전 단가가 급등하였다. 또한 각국에서는 에너지 안보에 관심을 가지면서 에너지원의 다변화와 지구환경협약 대비 등을 위하여 지구 온난화 가스 배출량이 가장 적은 원자력 도입에 관심을 갖게 되었다. 1980년대 초 체르노빌 사고 이후 원자력발전소의 안정적인 운영으로 원자력안전성이 다시 확인된 것도 원자력 수요 증가에 일조를 하였다. 이와 같은 이유로 전문가들은 원자력 르네상스를 예견하고 있으며, IAEA 등 많은 원자력 전문가들은 향후 원전 수요가 2030년까지 현재의 원전 발전용량 대비 50% 이상 증가 할 것으로 예상하고 있다.

전 세계적인 원자력 이용 확대 조짐과 기후변화 협약 등으로 인한 국제 여건 변화에 따라 개도국 등 여러 국가들 또한 원전도입을 강력히 희망하고 있으나, 원자력을 처음 도입하려는 국가들은 대부분 소용량 전력망을 소유하고 있다. 안정적인 전력 공급을 위하여는 전력망의 크기에 따른 단일 발전소의 용량 결정이 중요하다. 이를 위해 IAEA 등에서는 안정된 전력 공급을 위한 단일 발전소의 용량을 전력망의 10% 이내로 할 것을 권고하고 있다.³⁾ 또한 원자력발전소 건설은 대규모 투자가 필요한 사업이다. 원전 건설운전에 따른 금융위험도(financial risk) 측면에서 원전 건설비용이 국가 총생산의 5% 이내로 제한할 것을 동시에 권고하고 있다. 이와 같은 기준에 따르면 IAEA 등에서는 신규로 원전을 도입하

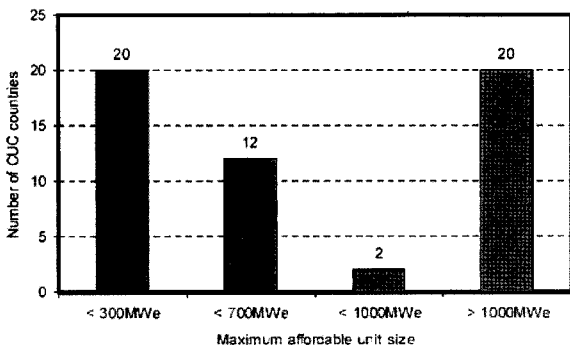


그림 3 원전도입 예상국의 인프라를 고려한 도입 가능 최대 원전용량

기로 예정인 국가 54개국 중 약 40%인 20개국은 300MWe 급 이하의 소형원전만을 도입할 수 있는 것으로 평가하고 있다⁴⁾(그림 3).

국토면적에 비하여 인구밀도가 상대적으로 적은 국가들은 소형발전소를 다수로 건설하는 분산형 전원공급에 관심을 가지고 있다. 그 예로 칠레, 카자흐스탄 등은 지리적 여건에 따른 송전선 건설비용 등을 고려하면 분산전원 개발이 경제적이어서, 이들 국가에서는 소규모 분산전원 공급 계획을 추진 중에 있다. 이와 같은 추세를 반영하여 IAEA를 포함한 외국의 원자력 전문기관들은 소형원전의 미래를 긍정적으로 보고 있다. 미국은 GNEP(Global Nuclear Energy Partnership)을 통하여 중소형원자로의 기술 실증을 도모하면서 2050년까지 500기~1000기의 신규 소형원전 수요가 발생할 것으로 예상하고 있으며,⁵⁾ 일본전력 중앙연구소도 향후 소형원전 수요를 400기~850기로 예측하고 있다.⁶⁾

2.2 원자력 해수담수화

급속한 인구증가와 산업발전에 따른 식수 및 공업용수의 부족은 세계적인 문제임과 동시에 국내에서도 현실적인 문제로 대두되고 있다. 특히 북아프리카와 중동지역은 대표적인 물 부족 지역으로 식수의 공급문제가 국가적인 생존문제로 까지 인식되고 있다. 이러한 물 부족현상은 앞으로도 점차 확대될 것으로 예측되므로 물 부족을 극복하기 위한 댐의 건설, 상수도관정비, 지하수 활용 및 물 수요 억제 등 수자원의 효율적인 이용과 함께 새로운 수자원의 적극적인 개발이 필요하다. 한편 기존 담수자원의 제한성과 지속적인 오염을 고려할 때 담수화 기술은 물 부족에 대비한 가장 경제성이 있는 대안이다. 특히 지구상에 존재하는 물의 97.23%를 차지하고 있는 바닷물을 이용한 해수담수화는 기술개발에 따른 경제성 향상으로 물 부족을 겪고

있는 국가들을 중심으로 그 필요성이 점차 증대되고 있다.

현재 해수담수화에 사용되는 에너지는 대부분 석탄, 석유 등 화석연료가 사용되고 있으나, 물 부족에 의한 담수화 설비의 수요 증대와 화석연료 사용에 따른 대기오염 및 지구온난화 문제의 심각성으로 화석연료의 대체수단으로 무공해 에너지원인 원자력 에너지의 이용이 세계적인 관심을 끌고 있다. 특히 북아프리카의 지중해 연안국과 중동 지역의 국가들은 중소형원자로를 이용하는 해수담수화 플랜트에 상당한 관심을 가지고 있으며, IAEA 주도의 원자력 해수담수화 프로그램에 적극 참여하고 있다.

2.3 중소형원자로의 개발 현황

최근 세계 각국은 IAEA 및 OECD/NEA와 같은 원자력 관련 국제기구를 중심으로 안전성이 대폭 향상된 중소형원자로 개발을 위한 다양한 기술개발 노력을 진행하고 있다.

중소형원자로의 기술개발은 주로 원전연료에서 발생하는 열을 고압의 물을 사용하여 냉각하는 가압경수로기술을 바탕으로 이루어지고 있다. 최근의 대형원전(1,000~1,500MWe)은 기존 원자력발전소의 설계를 개량, 대형화하여 원자력발전소의 경제성과 안정성을 높인 능동적 안전개념의 개량형(Evolutionary)원전을 지향하는데 비하여 중소형원자로는 중력, 자연대류, 기체압력 등을 이용하여 고유안전성을 보강한 피동형 개념을 바탕으로 개발되고 있다. 이러한 중소형원자로의 피동형 개념은 원전설계를 대폭적으로 단순화하여 발전소의 건설공기를 단축시킬 수 있어 건설단가를 절감함으로써 용량감소에 따른 경제성 저하효과를 상쇄할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 전 세계적으로 연구개발 중인 대부분의 중소형원자로는 일체형원자로로서 대형냉각재상실사고의 발생가능성이 없으며, 원전사고시 원자로 압력용기 내부의 자연대류 현상만으로 원전연료에서 발생하는 붕괴열 제거가 가능하도록 설계하여 비상시에도 충분한 운전원 조치시간을 확보할 수 있도록 개발되고 있다.

현재 세계 각국에서 개발되고 있는 중소형 신형원자로는 우리나라의 SMART를 위시하여, 미국의 IRIS, 러시아의 VBER-300, 중국의 NHR-200, 아르헨티나의 CAREM 등이 있다. IAEA는 세계적으로 개발 중인 중소형원자로들에 대한 기술적 진행사항의 조사 결과, SMART원자로의 개발정도가 가장 앞서는 것으로 평가하고 있다⁷⁾(그림 4).

Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends

Final report of a technical meeting held in Vienna, 7-11 June 2004

May 2005

TABLE 1. DESIGN AND REGULATORY STATUS* OF SMRs

Licensing status	No formal licensing process	Formal preliminary licensing process	Full licensing process
Detailed designs	SVBR-75/100	CAREM-25 AHWR ABV-3 ABV-6	KLT-40S** SMART
Preliminary designs	PBMR-400 KLT-40S (lifetime core) VBER-150 RIT-150	IRIS SAKHA-92	
Conceptual designs	HTR-PM ELENA NIKA-70 UNITHERM RUTA-70 SCOR SSTAR STAR-LM STAR-H2 VKR-MT FFPWS0 FBNR SSPINOR CHTR HTR-F VHTR (Generation-IV) MARS(RRC "Kurchatov Institute") CANDLE		

* Time stage within the cell: more to the left means: at an early development stage; more to the right means at a final development stage.

** A license for the floating NPP construction at Seversk (Russia) was obtained.

그림 4 세계 중소형원자로 개발 현황

3. SMART 원자로 특성

3.1 일반 특성

SMART는 일체형원자로로서 기존의 분리형(loop type) 원자로와는 달리 노심, 증기발생기, 가압기, 원자로 냉각재펌프 등이 배관 연결 없이, 한 개의 압력용기 안에 내장된 원자로이다(그림 5). 따라서 분리형 원자로의 주요한 설계기준사

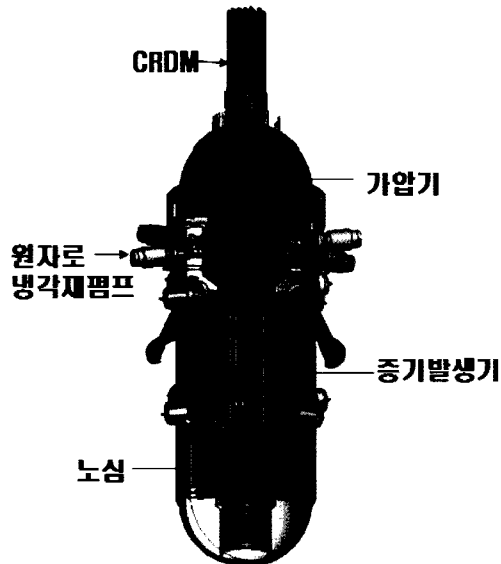


그림 5 SMART 원자로 집합체

고인 대형냉각재상실사고(LBLOCA: Large Break Loss of Coolant Accident)가 근본적으로 배제된 원자로이다.

SMART의 용량은 대형 발전용 원자로에 비해 약 1/10 정도로 작아서 단위 출력당 경제성이 상대적으로 낮다. 이를 보완하고 경제성을 향상하기 위하여 SMART는 안전 계통에 피동개념의 적용을 통하여 계통을 단순화하였으며, 일체형 기기의 모듈화, 표준화로 건설공기를 단축할 수 있도록 하였다. 또한 디지털 감시 및 보호계통 등 향상된 제어기술을 채택함으로써 원전의 가동률을 증가시키고 있다. 안전성 제고를 위한 설계특성은 고유안전성, 피동안전성, 계통단순화, 첨단 인간공학 연계설계 등으로 요약할 수 있다(표 1).

표 1 SMART 설계 특성 및 기대효과

설계목표	적용기술 및 기대효과
고유 안전성	- 일체형개념에 따른 대형 냉각재상실사고 배제 - 낮은 노심출력밀도에 따른 큰 열적 여유도 확보 - 냉각재 재고량 증가로 열적 저항성, 과도상태 여유도 증가
피동 안전성	- 피동안전개념의 공학적 안전설비 부분적용 - 방사성 물질 누출 경로 최소화
계통 단순화	- 피동안전개념을 도입 - 계통의 운전 불확실성을 제거하여 안전성 제고
첨단 인간기계 연계설계	- 디지털 기술, 인간-기계연계기술 접목 - 제어기능 향상에 따른 계통 안전성 제고

3.2 원자로계통

SMART 원자로는 일반적인 분리형 원자로와는 달리 일차냉각재계통 및 주기가 연결배관 없이 한 개의 압력용기 내에 배치되어 일차계통 유로를 형성하는 일체형원자로이다. 즉, 노심, 12개의 증기발생기, 1개의 가압기, 25개의 제어봉구동장치 및 4대의 축류형 원자로 냉각재펌프가 한 개의 원자로 압력용기 내에 설치된다. 증기발생기는 노심상단의 노심지지통과 원자로용기 사이의 환형공간에 설치되며, 가압기는 원자로용기 상단의 돔 부위에 위치하고 있고, 원자로냉각재펌프는 원자로용기의 측면에 설치되어 있다. 노심에서 가열된 원자로 냉각재는 노심지지통을 따라서 상승한 후에 원자로의 반경 방향으로 퍼지게 되며, 다시 원자로냉각재펌프에 의해 증기발생기의 상단으로 들어간 후 튜브를 따라서 하강한다. 증기발생기 하단부를 통과한 원자로 냉각재는 다시 노심의 하부로 들어감으로써 전체 순환회로를 형성한다. 따라서 원자로 냉각재의 순환회로가 매우 짧으며, 또한 원자로 냉각재가 원자로 외부로 순환되지 않으므로 별도의 원자로 냉각재 배관이 없는 특징을 갖게 된다. 원자로 냉각재계통의 유로는 원자로 압력용기 내에서만 형성되고 압력용기 내에 설치되어 있는 증기발생기 세관 내부를 흐르는 이차계통 급수에 열을 전달하게 된다.

원자로 계통 구성은 일차계통 유로가 형성되는 원자로 집합체를 포함한 원자로냉각재계통, 잔열제거계통, 안전주입계통, 화학체적제어계통 및 기기냉각계통으로 이루어진다. 잔열제거계통은 증기 추출, 급수공급 중단사고, 전원공급 상실사고 등의 경우에 원자로 노심붕괴열을 제거한다. 안전주입계통은 소형 냉각재상실사고의 경우에 노심의 안전성 확보를 위해 냉각수 주입을 통한 노심 냉각기능을 수행하도록 설계되어 있다. 화학체적제어계통은 원자로냉각재의 수화학조절, 정화, 냉각재량 조절 기능을 수행하도록 설계되어 있다. 또한 원자로의 정상 운전 중 원자로냉각재펌프, 제어봉구동장치, 가압기, 내부차폐구조의 냉각기 등에 냉각수를 공급하여 기기에서 발생하는 열을 제거하는 기기냉각계통이 있다.

3.3 안전성 향상 및 안전계통

원자로의 안전성 향상은 환경 친화적인 원자력에너지에 대한 국민적 신뢰의 확보를 위한 필수 요소이다. SMART는 주기를 원자로용기 내에 설치함에 따라 대형 배관을 제거하여 가장 대표적인 설계기준사고인 대형 냉각재상실

사고를 근원적으로 제거하여 원자로 안전성을 향상시켰다. 또한, 원자로냉각재펌프로 캔드 모터 펌프를 사용함으로써 펌프밀봉을 제거하여 펌프 씰(seal) 파손으로 인한 사고 위험을 제거하였다. 원자로 출력밀도가 낮으며, 가압기가 상대적으로 크게 설계되어서 자체적으로 사고에 대응하는 능력을 획기적으로 향상시켰다. 이러한 고유안전성과 더불어 안전계통 설계는 잔열제거에 피동작동 개념을 도입함으로써 안전성이 획기적으로 향상되었다. 원자로 잔열제거계통의 피동작동 개념은 압력과 중력 및 자연대류 등의 자연적 현상을 최대한 이용하여 피동적으로 작동하도록 설계되어 있다. 또한, 원자로의 가상적 사고를 예방하고 사고시 핵연료 파손이나 노심 손상 및 이에 따른 방사능 누출을 방지하여 사고영향을 완화하기 위하여 디지털 원자로감시 및 보호계통, 원자로 안전계통 및 공학적 안전 설비계통을 갖추고 있다.

4. SMART 원자로 기술검증

4.1 기술검증 실험

SMART 설계개발에는 지난 반세기에 걸쳐 축적된 원전기술을 바탕으로 개발되었다. 원자로 개발에 있어서 안전성 확보는 가장 중요하며, 적용된 기술의 검증은 개발과정에서 가장 필수적인 부분이다. SMART에는 현재까지 입증된 상용 원자로 설계기술이 이용되었고, 안전성을 획기적으로 제고시키기 위해 고유안전성 개념 및 피동안전 개념의 혁신적인 안전개념을 도입되었다. SMART에 도입된 혁신적인 신기술을 입증하기 위하여 원자로개발과 동시에 기술검증계획을 세우고 기술개발과 병행하여 기초 실험, 개별효과검증실험 및 축소모형 종합열수력검증시험을 수행하였다. 그림 6은 SMART 개발과정에서 수행한 여러 가지 실험 등을 보여주고 있다.

4.2 주기의 개발과 검증

원자로 일차계통의 주요 구성품에는 노심, 원자로용기, 가압기, 증기발생기, 원자로냉각재펌프 및 배관이 있다. 또한 원자로용기의 상단에는 핵연료 반응도를 제어하기 위한 제어봉구동장치가 설치된다. 원자로의 구성부품 및 기기 중 증기발생기, 원자로냉각재펌프 및 제어봉구동장치를 '주기'라고 부른다. 원자력발전소에 공급되는 원자력급의 기기는 성능과 안전에 대한 확실함을 요구하고 있으므로 재료 및 설계와 제작에서의 품질관리 및 기기의 검증

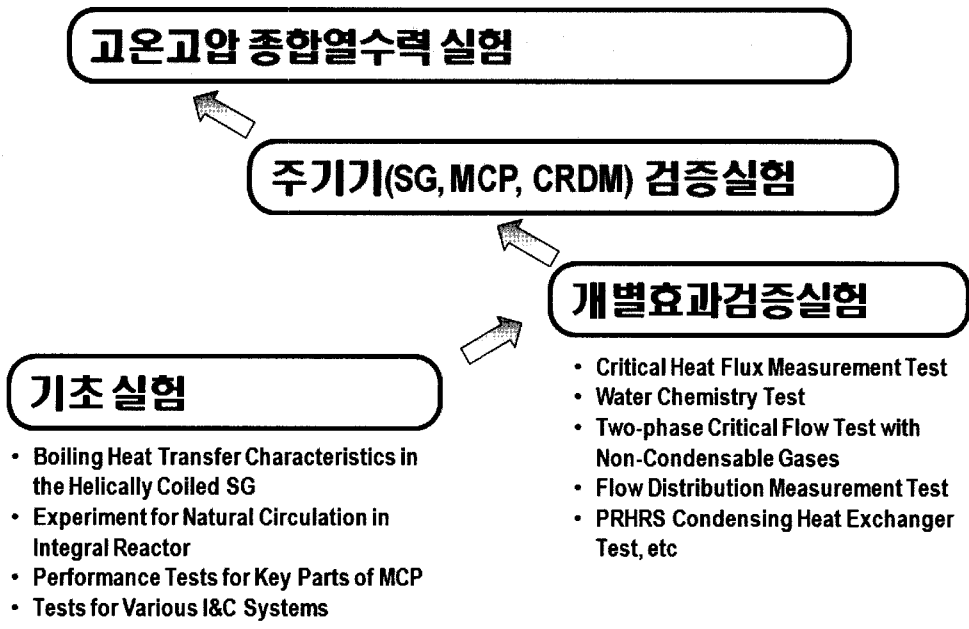
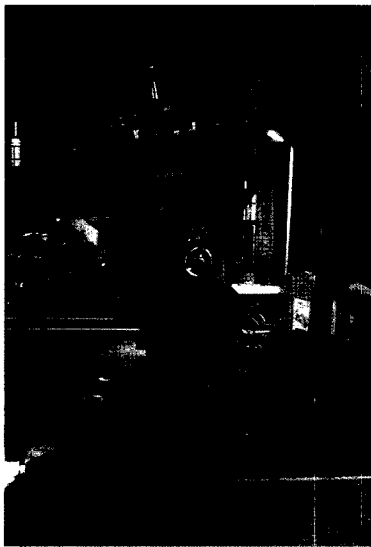
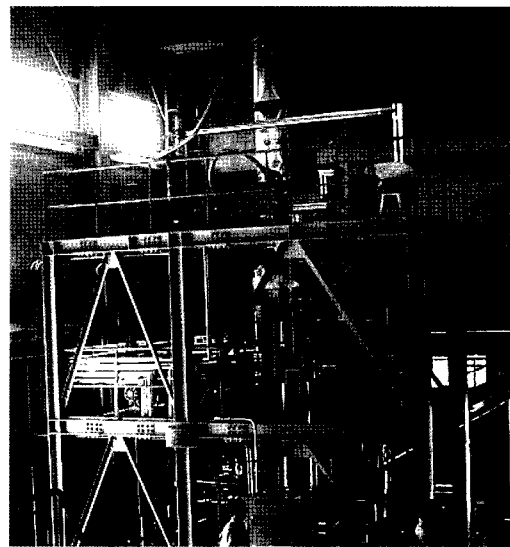


그림 6 SMART 기술검증 실험



치구에 장착된 증기발생기



제어봉구동장치 검증시험 시설

그림 7 일체형원자로 주기기 성능검증시험

등에 매우 까다로운 요건과 절차가 적용되고 있다.

일체형원자로의 개발에서 설계개념을 만족하는 하드웨어의 존재 유무는 중요한 의미를 가진다. SMART의 주기기는 일찍부터 개발을 서둘러 2001년에는 개념 및 기본설계를 1차 완료하고 각 부분품을 시제작하여 부분품에 대한 기능검사를 마치게 되었다. 또한 시제 제작된 한 세트의 주기기-증기발생기, 원자로냉각재펌프, 제어봉구동장치에 대하여 전체 어셈블리로서의 기능과 성능, 수명, 건전성 등을 평가하기 위한 검증시험 계획을 2002년부터 수립, 수행하고 있다.⁸⁾ 이 검증시험은 요건 및 절차개발, 그

리고 기술지원은 한국원자력연구원이, 검증시험의 총괄적 수행은 두산중공업이, 제어봉구동장치 및 원자로냉각재펌프의 검증시험은 한국기계연구원이, 증기발생기 성능검증 시험은 러시아의 실험시설을 이용하여 수행하는 종합적인 프로그램이다.

SMART의 주기기는 일체형원자로 고유의 설계로 진행되었으므로 개념의 적합성과 기술선도자(path finder)로서의 성능보완사항을 도출하고 그 기능, 성능 및 신뢰도를 확인하기 위한 목적으로 성능검증 프로그램이 수행되었다. 주기기에 대한 성능검증은 우선 시제품 제작을 통한

제작성 검토, 개별 부품의 기능 확인에 이어 고온 고압 (310°C, 17 MPa) 시험시설을 사용하여 실제 설계조건과 동일한 환경 하에서 기능과 성능을 검증하고, 수명한계까지의 운전을 통해 수명을 예측하고 신뢰도를 검증하는 방법으로 진행되고 있다.

5. 맺는 말

이 글에서는 지난 10여년간 개발한 해수담수화용 일체형 원자로 SMART에 대해 소개하고 있다. SMART 원자로의 일반적인 특성과 주요 계통 및 기기들의 특성들과 기술 검증 계획을 소개하였다. SMART 개발을 통하여 고부가가치 기술인 원자력기술을 고도화하여 원자력 기술 선진국으로 진입함은 물론이거니와 준 자립 에너지원인 원자력기술의 활용증대를 통하여 국가 경쟁력을 높일 수 있다. 중동 및 중앙아시아, 북아프리카, 동남아시아, 남미의 개발도상국 등 물 부족 국가와 소형전원 개발을 계획 중인 국가들은 우리 고유의 기술로 개발된 SMART에 큰 관심을 보이고 있다. 이러한 국제적인 여건을 바탕으로 SMART는 대형 원전과 더불어 원전기술 수출의 초석이 될 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다.

참 고 문 헌

1. IAEA-TECDOC-881, Design and Development Status of Small and Medium Reactor Systems, 1995
2. 테마기획, "중소형 일체형원자로 SMART 개발", 기계저널 Vol. 39, No. 4, 대한기계학회, 1999.4
3. IAEA TRS 245, "Energy and Nuclear Power planning in Developing Countries", 1985
4. IAEA-TECDOC, Common User Considerations by Developing Countries for Future Nuclear Power Plant, (to be Issued)
5. GNEP, "Global Nuclear Energy Partnership Technology Development Plan", GNEP-TECH-TR-PP-2007-00020, Rev. 0, pp. 138, 2007, US DOE
6. "소형 원자로의 국제 비즈니스 기회" 일본전력중앙연구소 (아키오미나토), 원자력산업 2006. 7
7. IAEA-TECDOC-1451, "Innovative small and medium sized reactors: Design Features, safety approaches and R&D trends", May, 2005
8. "일체형원자로 SMART 주기기 설계 및 검증기술", 최순, 기계저널 Vol. 46, No. 3, 대한기계학회, 2006.3