



THEME 01

안심 원자로 'SMART' 기술

김 학 노 | 한국원자력연구원 SMART개발본부장 | e-mail : hrkim@kaeri.re.kr

이 글은 현재 국정과제로 개발 중인 우리 고유의 원자로인 SMART의 개발 현황에 대하여 간단히 기술하고자 한다.

배경

올해는 E. Rutherford가 원자핵의 존재를 원자모델로 제시한 지 100주년이 되는 뜻깊은 해이다. 원자력 발전은 우라늄과 같은 무거운 핵이 두 개나 세 개의 가벼운 핵으로 나뉘는 과정에서 발생하는 열을 이용하여 전기를 생산하는 기술이다. 미 해군 Nautilus 잠수함의 추진 동력원이 원자력에너지의 평화적 이용의 문호를 열었다. 이후 각국이 육상 원자력발전소의 개발 경쟁을 벌인 결과, 소련은 1954년 6월 26일에 Obnisk 원자력발전소로부터 전기를 세계 최초로 송전하기 시작하였고, 영국은 Calder Hall 발전소를 1956년 10월 17일에, 미국은 Shippingport 원자력발전소를 1957년 12월 18일에 각각 운전 개시하였다.

이후 1970년대 말까지 미국을 중심으로 원자력발전소의 건설 붐이 일었고, 석유파동은 세계 각국의 에너지 안보 문제를 제기하게 되어 원자력의 의존도를 키우게 되었다. 그러나 1978년 3월 28일에 미국에서 발생한 TMI 원전사고, 1986년 4월 26일에 우크라이나에서 발생한 Chernobyl 원전 사고는 원전 기피현상을 촉발시켰고, 석유가격 붕괴로 인한 저유가와 천연가스 터빈을 이용한 효율적인 발전기술도 원자력의 수요를 감소시킨 중요한 계기가 되었다. 이에 따라 각국 정부는 원자력이용정책을 재검토하였고 독일이나 이탈리아 등은 탈원전 정책으로 방향을 바꾸었다.

이후 야기된 고유가와 지구온난화에 대한 불안으로, 신재생에너지 등 대체에너지와 공학적으로 성숙 기술인 원자력이 불가피한 선택이라는 분위기가 1990년대 후반부터 조성되기 시작하였다. 그러나 원자력 르네상스를 예고한 지 10여 년이 흐른 올해 3월 11일에 대형지진과 쓰나미라는 자연재난에 의해 발생한 일본 후쿠시마 원자력발전소 사고는 향후 원자력 안전과 관련한 paradigm의 변화를 예고하고 있다. 원자력에너지의 이용이 인류에게 불가피한 선택이라면, 앞으로는 모든 대중이 안심하고 이용할 수 있는 원자력에너지 생산 기술의 확보가 원자력시장을 장악하는 기술로 부상하리라 전망한다. 이에 '안전'을 뛰어넘어 공공대중이 '안심'할 수 있는 원자로로 개발 중인 'SMART'를 간략히 소개하려 한다.

SMART 원자로

우리나라는 원자력에너지 활용의 다변화에 관심을 가지고 전력기반이 취약한 개발도상국, 분산전원 및 물 부족 지역을 대상으로, 소규모 전력생산과 함께 해수담수화를 위한 에너지를 동시에 공급할 수 있는 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) 원자로를 우리의 고유 기술로 개발하였다. 현재 개발된 SMART의 열출력은 330MWt로, 9만 kW의 전력과 하루 4만 톤의 담수를 인구 10만의 도시에

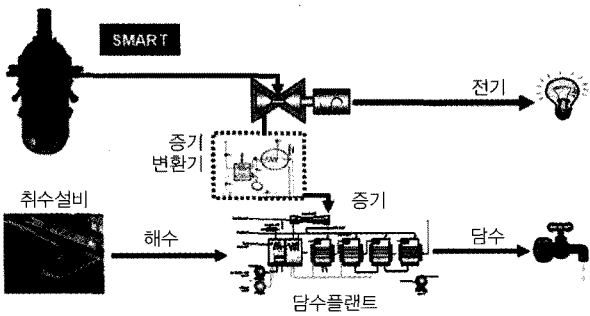


그림 1 SMART의 활용

동시에 공급할 수 있는 규모이다.

SMART 원자로로는 핵연료 및 노심, 8개의 증기발생기, 1개의 가압기, 4대의 사류형 냉각재펌프와 원자로 내부구조물이 한 개의 원자로 압력용기 내에 설치되는 신개념의 일체형원자로이다. 나선형 증기발생기는 노심상단의 노심지지통과 원자로용기 사이의 환형공간에 설치되며, 가압기는 원자로용기 상단의 돔 부위에 위치하고 있고, 원자로냉각재펌프는 원자로용기의 측면에 수평으로 설치되어 있다.

노심에서 가열된 냉각재는 노심지지통을 따라서 상승한 후에 원자로의 반경 방향에 위치한 원자로냉각재펌프에 의해 강제순환 된다. 냉각재는 증기발생기를 통하여 이차측에 열을 전달한 후, 유동혼합집합체를 통하여 다시 노심의 하부로 들어감으로써 전체 순환회로를 형성한다. 따라서 냉각재의 순환회로가 매우 짧으며 또한 냉각재의 원자로 외부순환이 없으므로, 별도의 대형 냉각재 배관이 없는 특징을 갖는다.

또한, SMART의 디지털 감시 및 보호계통 등 혁신적 제어기술은 원전의 운전안전성뿐더러 원전의 가동률을 증가시킬 수 있다. SMART의 제어계통은 완전 디지털 계통으로 하향식 계층구조 설계기법을 적용하여 최상위준위인 제어실준위의 기능을 완전하게 수행할 수 있도록 센서 및 계측계통, 공정 및 감시계통, 보호계통, 통신망계통 등이 통합적이고 일관된 설계개념

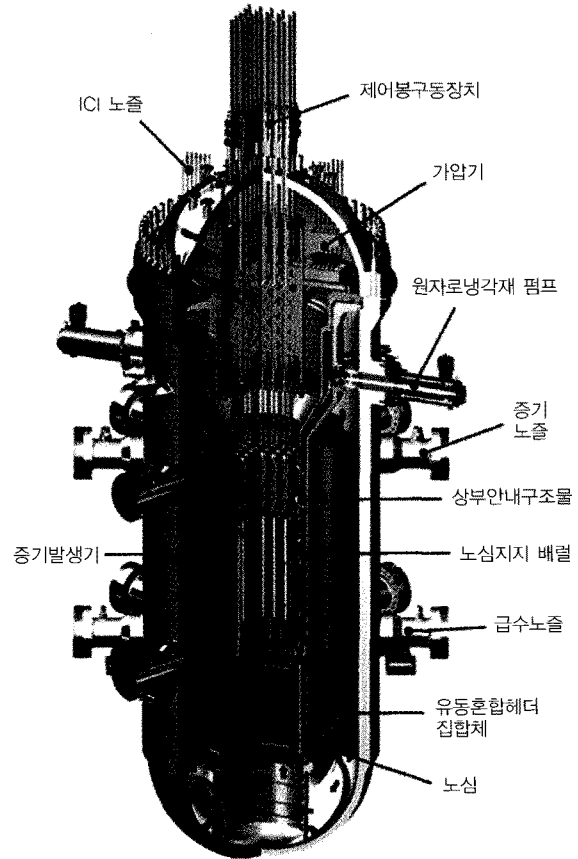


그림 2 SMART 원자로 계통

에 따라 개발되었다.

원자로의 안전성 향상은 환경 친화적인 원자력에너지에 대한 국민적 신뢰 확보를 위한 필수 요소이다. SMART는 일체형원자로 개념 도입으로 대형배관을 제거함으로써 대형배관 파손에 의한 사고 위험과, 캔드모터 원자로냉각재펌프를 사용함으로써 펌프밀봉의 파손으로 인한 사고 위험을 제거하였다. 또한, 낮은 원자로 출력밀도와 큰 용량의 가압기는 사고 시 원자로 스스로가 사고에 대응하는 능력을 크게 증가시켰다. 이러한 고유안전성과 더불어 피동간열제거계통과 능동안전계통을 도입하고, 디지털 원자로감시 및 보호계통, 비상전원계통 등을 갖추으로써 안전성을 획기적으로 향상시켰다.

SMART 개발 현황

원자로의 개발에 있어서 안전성의 확보는 무엇보다 중요하며, 이를 위하여 적용된 기술의 검증은 개발과정에서 가장 필수적인 부분이다. 새로이 개발하는 원자로의 안전성과 성능을 객관적으로 공인받을 수 있도록 우리나라는 원자력법 제12조의2에 표준설계인가와 관련된 규정을 마련해 놓고 있다. 우리 정부는 SMART를 수출전략상품으로 활용할 목적으로 2009년부터 3년 동안 표준설계를 완성하고 규제기관으로부터 인가를 받는 사업을 지원하고 있다. 이에 따라 한국원자력연구원(이하 '원자력(연)')은 조기사업화를 위한 투자자 유치 활동과 병행하여 사업계획을 수립하고 사업을 분담하여 수행할 추진체계를 갖추는 등 다양한 노력을 기울였다. 그 결과 2010년 6월 14일에 국내 13개 기업이 참여하는 한전 컨소시엄과 1,000억원의 투자협약을 체결하였다. 한전컨소시엄은 SMART 표준설계인가 획득 이후, 2012년부터 SMART 수출시장 개척과 건설을 주도한다.

SMART 표준설계는 원자력(연)의 주관으로 국내 최고의 기술역량을 확보한 기술집단과 설계 세부역무를 분담·수행하여 왔다. 즉, 원자력(연)이 핵증기공급계통(NSSS: Nuclear Steam Supply System)의 설계를 담당하고 한국전력기술(주)가 플랜트종합설계(BOP:



그림 3 SMART 사업을 위한 컨소시엄

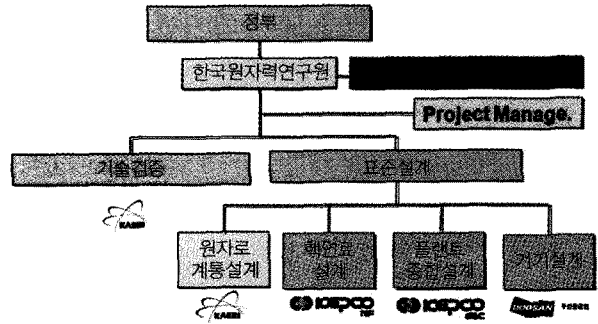


그림 4 SMART 사업 추진체계

Balance of Plant)를, 한전원자력연료(주)가 핵연료설계를 담당하며 국내 원자력 기기공급업체인 두산중공업이 기기의 제작성 검토 등을 수행하고 있다.

원자력법에 따라 표준설계인가를 획득하기 위해서는 표준설계의 완성뿐만 아니라 설계에 사용되는 새로운 설계자료, 설계코드, 설계방법론 및 SMART 고유기기 및 계통의 성능 및 안전성에 대한 검증이 요구된다. 무한경쟁 체제인 해외 수출시장의 진입에 필수적인 SMART 표준설계인가의 조기 획득을 위하여 원자력(연)은 검증업무와 설계역무를 병행 추진하고 있다.

SMART 설계에는 인허가 부담을 줄이기 위하여 현재까지 상용원전에 적용되어 입증된 기술을 가능한 많이 채택하였다. 그러나 일체형원자로의 특성상 새로운 설계인 나선형 증기발생기, 캔드모터펌프, 유동혼합헤더집합체 및 일체형원자로 유동분포 등

SMART 고유 기기 및 계통의 성능, 특히, SMART의 안전성을 획기적으로 향상시킨 완전피동형 잔열제거 계통 등에 대하여는 추가적인 검증이 필수적이다. 이를 위하여 국내 산·학·연 원자력전문가의 의견을 수렴하여 총 22건의 개별효과 및 종합효과 검증시험을 선정하고 수행함으로써, SMART의 성능과 안전성을 입증하고 인·허가에 대비하고

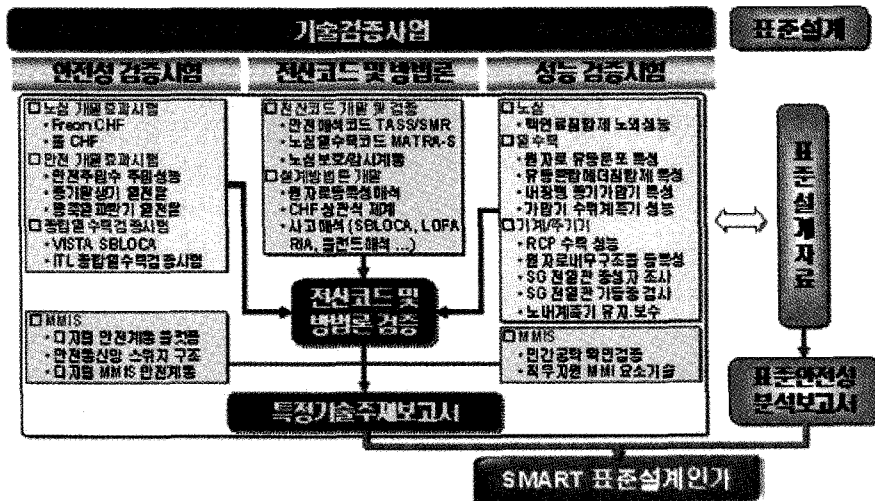


그림 5 SMART 기술검증 주요 역무

있다. 또한, 해외수출의 전략적 핵심기술인 설계해석 방법론으로 3건의 핵심 설계코드와 8건의 설계방법론을 개발하였다.

SMART 표준설계인가 과정에서 도출될 수 있는 인허가 현안을 조기에 해결하기 위하여, SMART의 핵심 설계 및 안전성에 대한 인.허가 심사기관의 사전안전성심사가 2010년 완료되었다. 2010년 12월 30일에는 사전안전성심사 결과를 반영한 SMART 표준설계를 완료하고, 원자력법 제12조의2항에 따라 원자력(연)·한전 공동으로 표준설계인가를 신청하였다. 표준설계안전성보고서, 표준설계기술서, 비상운전절차서작성계획서 등 인가신청에 요구되는 법적 서류가 제출되어, 현재 인·허가 심사기관의 적합성 판정을 받은 후 본인·허가 심사가 진행 중이다. 이들 서류에는 지난 2년여에 걸친 사업참여자의 열정과 땀이 배어있다고 자부한다. 기 계획된 대로, 금년 말까지 SMART 표준설계인가 획득에 모든 역량을 결집하고 있다.

SMART의 안전성

지난 3월 11일의 일본 Fukushima 원전 사고는 많

은 일반 대중에게 원전의 위험성을 가장 크게 각인시키는 계기가 되었다. 원자로 건물의 폭발장면을 반복 보여줌으로써 일반대중이 핵폭발과 원자력발전소의 폭발을 혼동하게끔 되었다. 만일, 최고의 안전성 확보를 목표로 설계한 SMART에 후쿠시마 규모의 지진이 발생하고파 쓰나미가 덮쳐올 경우 SMART는 과연 안전할 것인가? 답은 안전하다이다. 염려할 필요가 없는 '안심' 원자로로 설계하고 있는 SMART이기에 가능한 답변이다.

우선 지진이 발생하여 모든 전원이 상실되면 SMART도 당연히 정지된다. 이어 두 대의 비상디젤발전기가 구동되어 안전주입계통이 작동되며, 이와 별도로 전원 없이도 순수히 자연현상인 자연대류 의해 작동되는 피동잔열제거계통이 자동 작동되어 원자로의 잔열을 제거하게 된다. 일본의 경우와 같이 쓰나미에 의해 비상디젤발전기의 작동이 멈춰진다면 피동잔열제거계통에 의해 원자로의 안전정지상태는 지속적으로 유지될 수 있다. 그렇다면 숫자가 무의미할지 몰라도 발생확률이 10⁻⁹/년 이하인 피동잔열계통도 작동하지 않을 경우엔 어찌될까? 원자로압력용기 내의 냉각재 재고량이 많아 62시간 동안은 운전원이 아무런

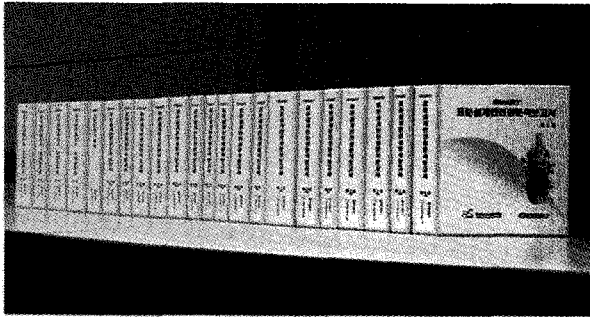


그림 6 표준설계인가신청용 제출 서류

조치를 취하지 않아도 원자로를 안전하게 유지할 수 있다. 62시간 이후에 원자로의 핵연료피복관이 수증기와 모두 반응하여 수소가 발생한다하더라도 원자로 격납건물 내의 수소농도가 폭발 농도에 이를 수 없으며, 원자로 격납건물 내에는 수소를 자동으로 제거할 수 있는 피동형 수소재결합기가 적정위치에 설치되어 있으므로 수소폭발은 절대로 일어나지 않는다. 또한, 핵연료장전량이 상대적으로 작아 비상계획구역의 설정도 기술적으로는 불필요하게 되어, 주민이 동의할 경우, 생활지 인근에도 건설할 수 있을 정도의 안전성을 확보하고 있다. 이와 같이 SMART는 심층방어(defence-in-depth) 원칙과 입증기술을 바탕으로 일체형원자로의 장점을 살려 설계된 '안심' 원자로이다.

맺음말

우리나라는 1958년에 원자력법을 제정한 뒤 원자력의 평화적 이용에 대해 국가적인 노력을 기울여 왔다. 국가의 관심과 사랑으로 키워온 원자력기술은 국내에 값싼 전력을 공급함으로써 산업경쟁력에 크게 이바지함은 물론 원전 4기의 UAE 수출, 연구용원자로의 요르단 수출 등 국가 신성장 동력으로 우리나라의 성공신화를 쓰고 있다.

몽골, UAE, 카자흐스탄, 알제리, 나이지리아 등 개발도상국은 SMART의 도입 및 기술협력에 지대한 관심을 표명하고 있으며, 미국이나 캐나다 등 선진국의 기업도 SMART를 이용한 산업 전기 및 열 이용에 관심을 보이고 있다. IAEA 등 해외 전문기관들도 현재 SMART의 설계수준이 세계에서 가장 앞서있다고 평가하고 있다. 따라서, 우리는 이 기회를 최대한 활용하여, SMART 해외수출을 이룩해야 한다. 이를 위해 사업화 능력이 탁월한 한전 컨소시엄에 참여하는 국내 기업의 역할은 무엇보다 중요하다. 올해 말의 표준설계인가 획득은 SMART 수출 성공신화의 첫 단초를 제공하는 발판이 될 것이다. 원자력(연)을 중심으로 우리 원자력계는 한국의 원자력 역사에 '순수 토종 안심 원자로의 탄생'이라는 방점을 찍을 수 있도록 최선을 다하고 있다.

이 글에서는 순수 토종 한국기술로 개발해온 SMART의 개발 배경과 현주소, 기술적 특성과 앞으로의 전망에 대하여 간략히 기술하였다. SMART의 표준설계인가를 차질없이 완수한 뒤 한전 컨소시엄에 SMART의 기술을 이전함으로써 개발자로서 원자력(연)의 주도적 역할은 마무리 될 것이다. 우리 원자력(연)은 향후 한전 컨소시엄이 주도하는 건설 및 해외수출 사업화에 기꺼이 동참하여, SMART 수출 성공신화를 이루도록 할 것이다.

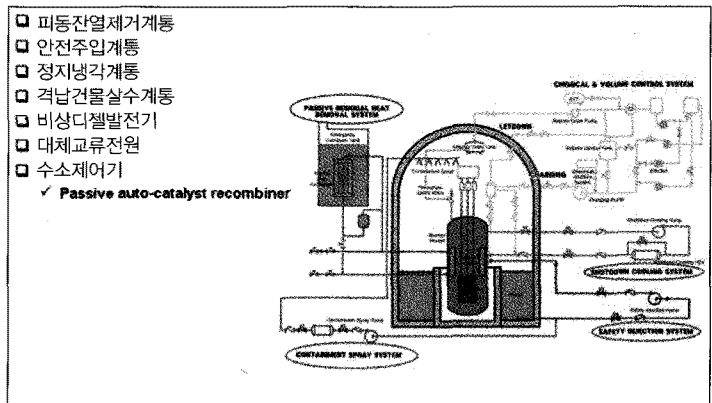


그림 7 SMART의 안전계통 개략도