

안정 전력 · 환경보전 동시 만족

소듐냉각고속로(SFR)

글_한도희 한국원자력연구소 GIF SFR운영위원 hahn@karei.re.kr

소듐냉각고속로(SFR)는 전세계적으로 지난 50여 년간 약 500억 달러에 달하는 개발비를 투자하였고, 약 30 원자로/년의 운전 실적을 쌓은 상용화 직전의 기술이다. 우라늄 자원의 효율적 활용과 처분 폐기물량의 감축이 가능한 소듐냉각 고속로는 그 동안의 연구개발을 통하여 기술적 타당성은 입증되었으나, 불리한 경제성과 일련의 사고 발생으로 안전성에 대한 논란이 제기되어 아직 상용화가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 또한, 민감한 핵연료 물질의 전용 가능성으로 인한 핵확산 저항성 문제도 자유로운 기술개발에 제약요인으로 작용한 것이 사실이다.

자원부족한 우리 나라 SFR 도입은 필연적

그러나 에너지의 안정적 공급과 환경보전을 동시에 만족시킬 수 있는 21세기의 에너지원으로서 가장 유망한 선택으

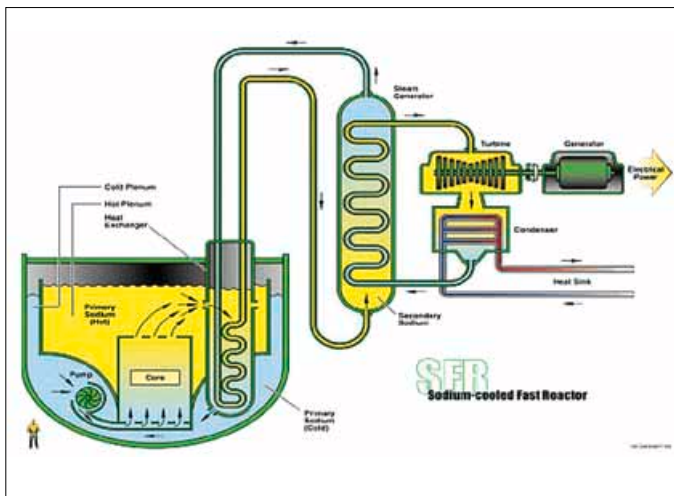
로 평가받고 있는 것은 소듐냉각고속로이며, 이의 상용화를 위한 국제공동 노력이 진행중이다. 특히, 2030년 이후를 상용화 목표로 하는 제4세대 원자력시스템으로서 소듐냉각 고속로가 가장 유망하며 이미 축적된 각국의 연구개발 경험을 공동으로 활용하는 세부 국제공동연구 계획을 작성중이다.

에너지 자원이 부족한 우리 나라는 장기적으로 소듐냉각 고속로의 도입이 필연적이며, 이를 가능하게 하는 국내기술 확보 역시 필수적인 사항이다. 국내의 연구개발은 원자력 선진국에 비하여 비록 그 출발점은 상당히 뒤져 있는 실정이나, 선진국의 과거 개발경험을 참고하고 제4세대 국제공동연구에 참여하면서 우선순위에 따라 핵심기술 개발 노력을 집중함으로써 국내 소듐냉각고속로 기술을 획기적으로 발전시킬 수 있다.

소듐냉각고속로 설계특성을 살펴보자. 소듐냉각고속로 시스템은 고속중성자를 활용하는 원자로와 연료 재순환계통으로 구성되어 있으며, 전기생산과 우라늄 자원의 효율적 활용, 고준위 폐기물량 감소에 적합하다.

소듐냉각고속로는 열전달 특성이 우수한 액체금속 소듐을 냉각재로 사용한다. 1차계통의 소듐은 원자로심을 통과하면서 중성자를 흡수하여 감마선을 방출하는 N_2^{24} (반감기 15 시간)로 변환되므로 증기발생기가 방사능에 오염되지 않도록 2차 계통이 필요하게 된다.

이러한 2차계통은 증기발생기에서 증기발생기관의 파손 등으로 인해 소듐-물 화학반응이 발생할 경우, 수소생성에 의한 압력 급상승 등으로부터 노심을 보호하는 역할도 겸하고 있다. 이와 같은 2차계통의 필요성 때문에 일반적으로 기존의 경수로에 비해 경제성이 낮다.



(그림 1) 풀형 소듐냉각고속로

냉각재로 열전달 우수한 액체금속·소듐 사용

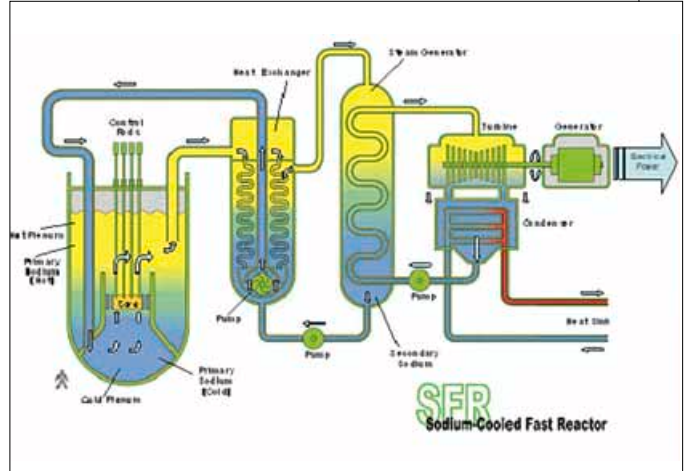
1차계통의 소듐은 노심과 중간열교환기 사이를 순환하고, 2차계통 소듐은 중간열교환기로부터 증기발생기로 열을 전달한다. 방사능을 띠는 1차계통의 소듐을 격리하기 위한 방법으로 중간열교환기와 1차 냉각재 순환펌프를 원자로 용기 내에 설치하는 풀형(그림 1)과 이 두 부품을 별도의 차폐된 장소에 설치하여 원자로와 파이프를 연결하는 루프형(그림 2)이 있다.

소듐냉각고속로는 수백 MWe 출력의 소형 모듈형 원자로부터 1500 MWe 이상의 대용량에 이르기까지 다양한 용량의 원자로 개발이 가능하다. 또한 원자로 출구의 1차계통 소듐 온도 (530~550 ℃)가 경수로의 냉각재 온도 (약 300℃)와 비교하여 상당히 높으므로 소듐냉각고속로의 열효율은 경수로의 경우보다 높다.

소듐냉각고속로의 안전특성 중 경수로와 비교하여 가장 큰 차이점은 그 노심의 구성에 있다. 경수로는 노심의 연료, 피복재, 냉각재 등이 반응도를 최대화한 형태로 배열되어 있으므로, 연료의 용융 혹은 냉각재 상실의 경우와 같이 그 배열에 변화가 생기는 경우, 노심의 반응도가 낮아져 핵분열 연쇄 반응률이 감소하게 된다. 반면에 소듐냉각고속로는 중성자 감속재를 필요로 하지 않고 연료는 충분한 냉각이 가능할 정도의 간격만을 유지하고 있으므로, 만일의 경우 연료 용융이 발생하면 노심밀집 과정 (core compaction process)으로 인하여 반응도가 증가하게 된다. 이같은 우려 때문에 초기 소듐냉각고속로 안전연구는 가상 노심밀집과 정중 재임계에 의한 에너지 방출량의 추정에 집중되었다.

그러나 오랜 기간의 연구를 통하여 연료 기화에 의한 연료 분산, 도플러 효과, 노심붕괴 과정중의 반응도 삽입률 등을 보다 정확하게 고려할 수 있게 됨에 따라 이에 대비한 격납용기의 경제적 설계가 가능하게 되었다. 최근에는 고유안전 특성 등으로 인하여 가상 노심붕괴사고 발생확률이 매우 작아져 심지어 미국의 초기 PRISM 설계에서는 원자로 상부 격납용기 제거를 시도하게 되었다.

소듐냉각고속로 특유의 안전특성 대부분은 소듐 냉각재와 관련이 있다. 우선 안전성과 관련된 소듐의 장점을 나열하면, 첫째, 소듐냉각고속로의 정상 운전온도(최고 약 550



(그림 2) 루프형 소듐냉각고속로

℃)에서는 대기압에서도 소듐은 비등 (비등점 약 900 ℃) 하지 않으므로, 파이프 파손과 같은 액체누출 사고에도 노심의 진공상태가 발생하지 않는다.

둘째, 소듐은 물과 비교하여 약 100배의 열전도율을 갖고 있으므로 잔열제거를 위해 자연대류 현상을 활용할 수 있다. 셋째, 소듐의 비부식성으로 인하여 방사성 부식물의 발생이 최소화됨으로써 운전요원의 방사능 피폭량이 작다. 반면 소듐의 단점과 문제점은 물, 공기와 화학반응을 하고, 대용량 노심은 소량의 소듐 기화반응도 계수를 가질 수 있다는 점이다.

소듐냉각고속로는 혼합 산화물 핵연료와 U-TRU-Zr 금속 핵연료의 두 가지 옵션이 있다. 핵연료 재순환 기술은 액티나이드를 99.9% 회수하여 재순환하고, 핵연료의 방사능 준위를 높일 수 있다. 어떠한 단계에서도 플루토늄 분리가 불가능하다는 것이 장점이다.

축적된 연구결과 많아 연구비 저렴

소듐냉각고속로 연구개발 계획은 다음과 같다. 2002년 10월에 발간된 R&D Scope Report는 소듐냉각고속로의 상용화를 달성하기 위해서는 연료 및 재료, 원자로 계통, 증기 발생기, 안전성 및 설계개발 등의 연구에 약 6억1천만 달러의 예산이 소요될 것으로 예상하고 있다(그림 3). 이와 같은 소요 예산은 다른 노형에 비해 낮은 비용으로서, 소듐냉각

02

고속로는 다른 노형에 비해 개발 수준이 월등히 높고, 그동안 축적하여온 풍부한 연구개발 결과를 활용할 수 있기 때문이다.

소듐냉각고속로 개발에 참여하는 국가는 한국, 미국, 일본, 프랑스, 영국, 유럽연합 등 6개국이다. 향후 기술개발 프로젝트는 다음과 같다.

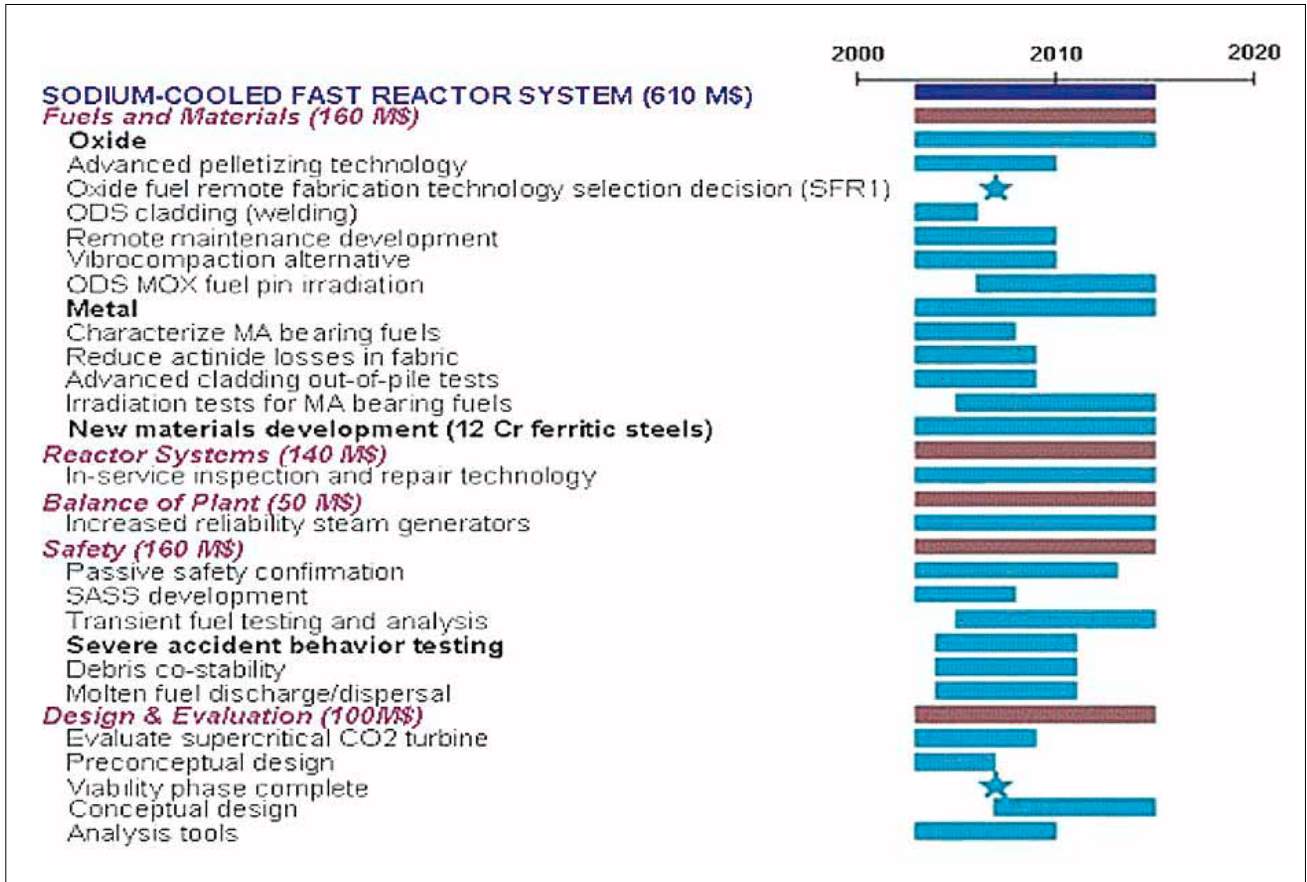
노심설계 프로젝트: 소듐냉각고속로의 설계개발과 안전성 평가가 주요 연구내용이며, 2006년까지는 개발대상 설계에 대한 평가를 수행하고, 2010년까지는 기본설계, 2015년까지는 상세설계를 개발할 예정이다. 그 이후에는 설계의 최적화를 추진하고, 참여국과의 협의를 거쳐 실증로 건설을 고려할 예정이다.

개발대상 모델인 소듐냉각고속로는 한국원자력연구소의

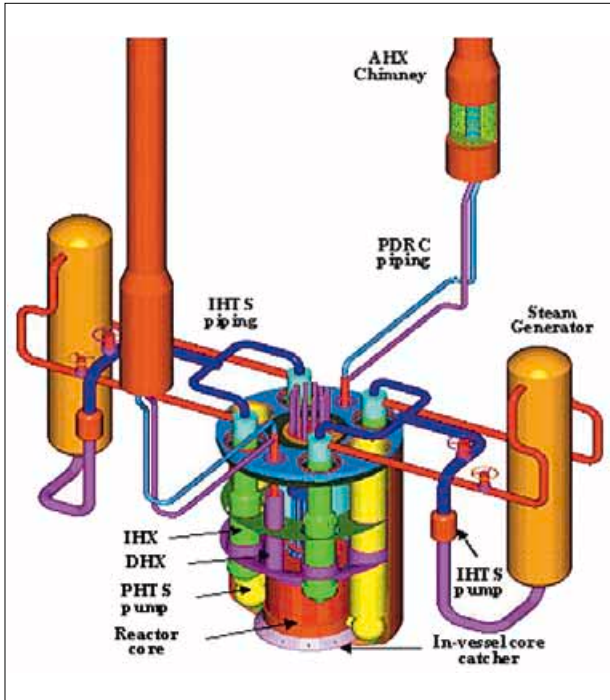
KALIMER와 일본의 JSFR 원자로가 선정되었으며, 두 노형에 대한 비교평가를 추진할 예정이다. KALIMER(그림 5)는 용량 600MWe의 금속연료 장전 풀형 원자로이고, JSFR(그림 6)은 용량 1500MWe의 혼합핵연료 장전 루프형 원자로로서, 현재 두 노형 비교평가를 위한 기준과 절차, 일정 등에 관한 협의를 진행 중이다.

한국은 KALIMER와 JSFR와의 비교평가, 3차원 노심 열유체 분석모델 개발, 용융 금속연료의 노심내 재배치 현상 분석, 용융 금속연료/노내 구조물 혼합체의 노내 거동 분석과 관련된 내용에 참여한다.

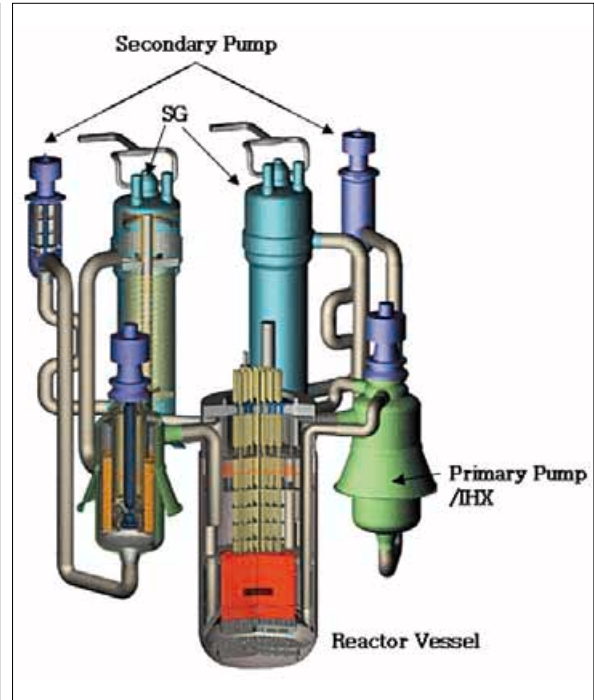
고성능 연료 프로젝트: 소듐냉각고속로용 핵연료를 개발하는 프로젝트로서 2006년까지 비교평가를 수행하고, 2010년까지는 마이너 액티나이드를 포함하는 연료를 비



(그림 3) 소듐냉각고속로 연구개발 일정 및 예산



(그림 5) KALIMER



(그림 6) JSFR

교평가한 후, 2015년까지 고연소 성능평가를 수행할 예정이다.

현재 고려중인 핵연료 형태는 혼합 산화물, 금속 및 질화물 핵연료이며, 주요 연구내용은 마이너 액티나이드 혹은 마이너 액티나이드와 I-129와 Tc-99와 같은 장수명 핵분열 생성물이 함께 포함되어 있는 핵연료의 제조기술과 핵연료의 조사시험과 관련된 내용이다.

부품설계와 BOP 프로젝트: 소듐냉각고속로의 경제성과 안전성 향상을 위한 연구다. 2006년까지 제안된 기기 및 계통에 대한 기술 타당성 검토를 수행하고, 2010년까지는 성능평가, 그 이후에는 계통 성능 실증을 수행할 예정이다.

가동중 검사 및 수리기술의 개선은 소듐 안에 잠긴 안전성 관련 구조물의 건전성 확인과 수리 작업 수행을 위해 중요하다. 소듐은 물과 달리 불투명하므로, 초음파 탐지기술 등을 활용하는 기술을 개발할 예정이다.

기기 및 배관의 구조재료 개발은 원자로 시스템의 경제성과 가동률 향상을 위해 중요하다. 오스테나이트강 대신 12% Cr 강철은 높은 열전도성과 낮은 열팽창계수의 특성을 갖는

등 고온 강도 및 열 물성치가 우수하기 때문에 개발을 추진할 예정이다.

소듐냉각고속로의 증기발생기에서 물 누출이 있을 경우, 소듐-물 반응의 대처는 물론, 누수를 조기에 감지하는 시스템의 신뢰도 향상이 중요하다. 특히 작은 누수를 감지할 수 있는 시스템은 증기발생기 튜브의 파단이 전파되는 것을 조기에 방지하고, 신속한 정상운전 재개를 가능하게 할 수 있다.

초임계 이산화탄소 브레이튼 사이클 시스템을 소듐냉각고속로에 활용할 경우, 소듐-물 반응을 방지할 수 있고, 경제성 향상을 이룰 수 있으므로 이에 대한 타당성 연구도 수행할 예정이다.

한국은 가동중 검사를 위한 초음파 탐지기술개발, 중간 열교환기와 증기발생기를 일체화한 기기개념 개발, 초임계 이산화탄소 브레이튼 사이클 시스템 타당성 연구에 참여할 예정이다. **SD**

글쓴이는 서울대학교 원자핵공학과를 졸업 후, 동대학원에서 석사학위를, 미국 노스캐롤라이나주립대학교에서 박사학위를 받았다.