

소듐냉각고속로 고유개념 실증로 설계 개발

조충호, 장진욱, 김영균, 김영일, 한도희

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

chcho@kaeri.re.kr

1. 서론

우리나라는 '97년부터 국가 원자력연구개발 중장기 계획사업을 통해 본격적으로 연구개발에 착수하여 미국 GE사와의 기술협력을 통해 2001년에 소형 소듐냉각고속로(SFR)인 KALIMER-150(150MWe) 설계개념을 완성하였다. 또한 '02년부터 '06년까지는 중형 소듐냉각고속로인 KALIMER-600(600MWe) 개념설계를 완성하였다[1]. KALIMER-600은 우리 기술력을 바탕으로 한 독창적 개념의 원자로로서 제4세대 소듐냉각고속로로 선정된 바 있으며, 이는 선진국보다 30년 이상 늦게 소듐냉각고속로 개발을 시작하였고, 고속로 건설경험이 없지만 국내 고속로 설계능력은 상당한 수준에 도달하였다는 것을 인정받은 것이다. 제255차 원자력위원회('08.12)에서 “친환경 고속로 순환핵연료주기시스템 개발 장기 추진계획”을 의결하고, 그에 따라 2028년 제4세대(Gen IV) 소듐냉각고속로 실증로 건설을 목표로 '11년 고유개념 실증로 개념설계를 완료하였으며, 최근 원자력진흥위원회에서('11.11) 가용예산 범위내에서 원형로(100MWe) 건설을 추진하고 실증로 건설 없이 상용로 개발하도록 “미래원자력시스템 개발 장기추진 계획”을 수정·의결하였다. 본 연구는 '28년 원형로 건설을 목표로 수행되고 있는 소듐냉각고속로의 기술개발 현황에 대해서 기술하고 있다.

2. 본론

2.1 Gen IV SFR 실증로 개념설계

KALIMER-600 개념설계 경험을 바탕으로 '07년부터 '09년까지 제4세대 소듐냉각고속로 고유개념 설정 연구를 통해, Gen IV 4대 기술목표를 달성하는 1,200MWe급 자체순환로와 600MWe급 연소로 두가지 노형을 최적후보개념으로 선정하였다. 고유개념을 적용한 600MWe급 연소로를 '50년대 상용로 도입을 위한 실증로로 선정하고 주요 설계, 안전 및 성능에 대한 최상위 설계요건을 설정하였다. 또한 일반설계기준과 안전설계기준 적용성 등을 검토하여 미래 불확실 기술을 배제하

고, 인허가 가능한 기술을 적용하여 설계 분야간 상호 명확한 이해가 가능하도록 설계기준서를 수립하였으며, 표 1에 요약하였다.

Table 1. Gen IV SFR 실증로 설계기준.

항 목	KALIMER-600	실증로	변경 사유
Gen IV 목표	안전성, 핵확산저항성, 지속성, 경제성	안전성, 핵확산저항성, 지속성	주목적 변경 (기술 실증)
노심 출구온도	545°C	510°C (범위: 545°C)	연료 피복재 미변 (Mod HTG)
전압비	1.0	0.45 - 0.9	TRU 연소
SG	밸리클 단일관	밸리클 단일관 (Option: 이중벽 직관)	Option: 이중벽 직관 (소듐-물 반응사고 예방)
HTS 필름	진지필름	기계식 필름	감응기기 사용을 통한 실증로 구현성 향상
재장전주기	18 개월	6 - 18 개월	초기: U-2r 연료 중/후기: U-TRU-2r 연료
발전소 이용률	87% 이상	70% 이상	재장전주기 단축
중간열교환기 구조	다중 수평관 설치	다중 수평관 제거	유동유발진동(FVI) 위험 및 단순화
건설재거 계획	완전 피동	피동+능동	원자로 용기 파손사고대처 및 운전유연성 확보

각 설계분야에서는 Gen IV SFR의 4대 기술목표 중 지속성, 안전성 및 핵확산 저항성을 달성하고, 설계기준을 만족하는 고유개념이 적용된 실증로 개념설계를 완료하였으며, 최종적으로 실증로에 대한 안전성 평가를 완료하였다. 그림 1은 제4세대 소듐냉각고속로 실증로의 설계 특성을 보여주고 있다.



Fig 1. Gen IV SFR 실증로 설계 특성.

2.2 Gen IV SFR 선진기술 개발

독창적인 고유개념을 적용한 실증로 개념설계 뿐만 아니라, Gen IV 원자력시스템이 갖추어야 할 기술 목표를 만족하기 위한 기술개발도 수행하였다. 선진기술분야에서는 소듐냉각고속로의 경제성 향상, 안전성 입증, 그리고 고속연료 제조기

술 확보를 위한 기반 기술 개발을 수행했다.

경제성 향상 분야에서는 초임계 CO₂ Brayton Cycle의 실용화를 위한 열교환기 설계최적화와 출력 변화에 따른 운전논리 설정을 위해 최적의 성능을 발휘할 수 있는 부분출력 운전점을 제시하기 위한 연구를 수행하여, 다양한 운전조건의 제어논리와 압력손실을 1/5로 감소시킬 수 있는 열교환기 개념을 개발하였다. 또한 불투명한 고온 소듐 환경에 적용할 수 있는 소듐중 웨이브가이드 센서를 개발하여 소듐중 실증시험을 수행하고, 소듐중 가시화 성능을 검증을 통해 소듐중 원자로내부손상감사 시스템을 구축하였으며, 실증로 배관(G91강) 및 원자로용기(316SS)에 적용할 수 있는 고온 파단전누설(LBB) 평가 기술을 개발함으로써 대형 소듐화재를 설계에서 배제시켰다.

안전성 입증 분야에서는 잔열제거시스템의 주요 열교환기 성능과 1차계통 기계식 펌프의 열유체 성능 등 개별효과를 실험할 수 있는 소듐 열유체 종합효과 시험시설 1단계(STELLA-1)를 구축함으로써, SFR 안전계통의 성능검증과 안전계통과 1차 열전달 계통과의 상호영향에 의한 잔열제거성능을 종합시험할 수 있는 실험기반을 구축하였으며, 실험시 사용될 계통유량센서, 국부유량센서, 압력 트랜스미터등을 개발하였다.

금속연료 제조기술 분야에서는 금속연료심 및 연료봉 제조공정기술을 개발하고, 하나로 조사시험용 축소연료봉을 제조하여, 하나로 조사시험을 수행하였다. 또한 기존의 HT9 보다 성능이 우수한 고성능 피복관 재료를 개발하고, HT9 피복관 시제품 제작을 완료하였으며, 금속연료 성능분석을 위한 전산코드 α 버전 개발을 통해 국내 금속연료 제조기술 기반을 구축하였다.

2.3 Gen IV SFR 국내 기반기술 개발

국내기반기술 개발 분야에서는 주로 고유전산 코드 개발 및 예비검중에 중점을 두고 연구가 진행되었다. 노심 설계분야에서는 단면적 라이브러리 보정 전산코드(ATCROSS)를 개발하고, 노심 열유체 불확실도 평가 모듈 개발이 이루어졌다. 기계구조설계 분야에서는 실증로에 대한 계통, 구조 및 기기에 대한 60년 고온구조설계평가 기술을 개발하기 위하여 ASME-NH 고온 설계코드의 설계 및 평가절차를 전산화한 SIE ASME-NH 코드를 개발하고 검증을 수행하였다. 유체계통설계 분야에서는 주요 열교환기인 IHX, DHX, AHX

및 FDHX의 열유체 설계 및 특성해석 전산코드를 독자적으로 개발하여, 기기의 설계요건 수립에 활용하였으며, '11년 구축된 STELLA-1을 통해 생산될 실험자료를 이용해 검증을 수행할 예정이다. 또한 상용코드에 기반하여 플랜트 전체의 계통 과도성능을 분석할 수 있는 계통성능해석 전산체제(MMS-LMR)를 개발하였으며, 이를 통해 열수송 계통의 계통 및 기기 모델, 소듐 물성치, 열유동 해석관련 상관식 및 제어기 모델을 접목 구성하여, 향후 플랜트의 효율적인 운전전략을 수립하고 운전성능평가를 통해 운전요건을 수립하기위한 성능해석의 기본토대를 구축하였다. 특히, 안전성 평가 분야에서는 설계기준사고 해석 전산코드(MARS-LMR)의 열유체 모델과 반응도 모델 개발을 완료하고, EBR-II와 Phenix의 원자로 시험 자료에 대한 검증을 수행하여 플형 소듐냉각 고속로 모의 능력을 입증함으로써, 향후 설계기준사고 및 초과설계기준사고 해석 기반 코드를 확보하였다.

3. 결론

제4세대 소듐냉각고속로 실증로 개념설계가 끝난 2011년 현재, 고속로 설계기술 전체 측면에서는 선진국 기술수준 대비 약 55% 수준에 도달하고 있으나, 그간의 기술개발이 개념설계에 치중되어 하드웨어적 실증경험이 부족하며, 여전히 원자로 인허가 획득 및 상용화를 위한 특정설계/상세설계기술과 주요기기제작 기술은 확보가 필요하다.

이에 소듐 열유체 실증시험시설 및 종합효과 시험시설과 기기·계통 개별 실증실험 장치 구축, 특정설계가 완료되는 2017년까지는 선진국의 기술을 추격하고, '20년 특정설계 승인 획득을 통해 설계 및 하드웨어 분야에서 선진국과 경쟁가능하게 될 것으로 기대된다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] DOHEE, HAHN, et al, Conceptual design of the sodium-cooled fast reactor KALIMER-600, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 39, No. 3, June 2007.