

소듐냉각고속로 원형로 적정 용량 예비평가

조충호, 김상지, 김성오, 장진욱, 김영균, 김영일, 한도희
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989년길 111
 chcho@kaeri.re.kr

1. 서론

현재 세계가 직면하고 있는 전 지구차원의 가장 심각한 환경문제는 지구 온난화, 산성비, 오존층 파괴 등이며, 특히 지구온난화는 화석연료의 연소 시 배출되는 CO₂가 주요 원인이다. 1997년 채택된 교토의정서는 선진국들에게 온실가스 배출량 감축 의무를 부과하고 있으며 우리나라도 2010년대에는 감축 규제대상에 포함되어 이와 같은 의무를 이행하기 위해서는 원자력의 지속적 이용이 필수적으로 요구되고 있다. 이미 1990년대 후반에 전 세계의 전문가들이 미래의 에너지 부족에 대처하고 핵비확산성과 안전성에 대한 엄격한 기준을 준수하고 핵폐기물 생산을 최소화할 수 있는 제4세대(Gen-IV) 원자력시스템을 계획하기 시작했다. 우리나라는 Gen IV 원자력시스템중 가장 실현가능성이 높게 평가받고 있는 소듐냉각고속로(SFR)에 대한 연구를 1997년 원자력중장기사업을 통해 본격적으로 시작하였으며, SFR-파이로 공정 연계 시스템의 로드맵을 제시한 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획(2008.12, 원자력위원회)」에 따라 2011년 Gen IV SFR 실증로(600MWe)의 개념설계를 완료한 바 있다. 최근 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획」의 목표를 구체화·현실화하기 위해, 제정여건등을 반영한 수정 계획안(2011.11, 원자력진흥위원회)이 마련되어, 당초 SFR 실증로(300MWe이상) 건설에서 원형로(100MWe급)로 건설로 목표가 수정되었다. 본 연구는 2028년 건설을 목표로 개발중인 SFR의 적정 용량 결정을 위한 검토 내용을 기술하고 있다.

2. 본론

원자로는 장기간 운전을 통하여 대규모의 에너지를 생산하는 시스템으로 건설을 위한 초기 투자 비용이 큰 특성 상 고도의 안전성과 신뢰성이 요구되는 기술로서 상업적 이용을 위한 상용로의 건설 이전에 실험로/원형로/실증로의 개발 단계를 거치지만, 최근 원자로 기술의 향상으로 실험로/

원형로, 원형로/실증로 간의 구분이 모호해지는 경향이 있으며, 노심을 포함한 원자로의 기본 원리는 현재 대부분 입증되어, 원형로에서도 실험로의 역할 수행이 어느 정도 가능해져, 프랑스나 인도처럼 원형로에서 실증로를 거치지 않고 곧바로 상용로로 추진되는 사례도 있다[1].

2.1 국내 원형로의 기술적 목표

2028년 건설을 목표로 2012년부터 개발 예정인 SFR 원형로는 다음과 같은 기술적 목표를 갖는다

Table 1. 국내 원형로의 기술적 목표.

세부 기술적 목표	목표 달성을 위한 설계 특성	용량 연관성	용량별 기술검토
안전성 등 Gen IV 기술목표 달성을 위한 핵심기술 입증	Gen IV 핵심 기술을 원형로 설계 반영	없음	-
핵연료/피복관 개발 및 검증	고속중성자속 ($E > 0.1\text{MeV}$) 최대화 목표, 누적 고속중성자 조사 제한치 및 연소도 도달 기간 단축	있음	노심 핵특성
계통 및 기기의 장기 운전 신뢰성 확보	실증로/상용로의 계통 및 기기 유사성 확보	있음	계통 상사성, 기기 개발
운전 경험 확보	소듐 취급 기술 확보, 계통 및 기기의 유지 보수 능력 확보	없음	-

2.2 원형로 용량에 따른 노심 특성 분석

SFR 원형로의 초기노심은 저농축 우라늄 노심(농축도 20wt.% 이하)으로 구성하며, 우라늄 노심에서 TRU 금속연료의 조사성능을 검증한 후 TRU 노심으로 전환이 가능하여야 한다는 제한을 갖고 있다. 이에 따라 다음과 같은 주요설계 목표를 갖는다.

1. 원형로의 주요 기술적 목표인 중성자 조사 특성 향상을 위하여 상기 설계 제한 범위에서 고속중성자속을 최대화 한다
 2. 원형로 핵연료의 방출연소도를 최대화하고 노심 크기를 최소화하여 핵연료 이용률을 높이기 위하여, 선출력밀도 및 출력밀도를 최대화 한다.
- 상기의 설계제한과 목표를 만족하는 노심 용량 결

정을 위해 아래와 같은 주요설계 사양을 선정하였다.

Table 2. 우라늄 노심의 주요 설계 사양.

원자로 출력(MWe)	50	100	150	200	240	600
주기 길이	290					
배치 수	5					
연료 형태	U-10Zr(금속)					
희석밀도(%)	75					
핵연료봉 외경(mm)	7.4					
피복관 두께(mm)	0.56					
핵연료봉 (P/D)	1.07	1.12	1.17	1.16	1.18	1.22
핵연료봉 피치(cm)	0.788	0.829	0.868	0.888	0.870	0.938
집합체 덕트 두께(cm)	0.37					
집합체 간 간격(cm)	0.4					
집합체 피치(cm)	1290	1354	1557	1530	1569	1628
유효 노심 높이(cm)	72.5	77.0	82.8	85.1	87.4	96.5
집합체 당 봉 개수	217	217	271	271	271	271

표 2의 설계사양에 대해서, 출력별 주요노심 성능, 핵연료 장전량 및 중성자속 준위, 핵연료 조사시험 관점에서의 노심성능 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출했다.

1. 100MWe 이하에서는 핵연료 방출 연소도가 급격히 감소하므로 핵연료 경제성 측면에서 최소 100MWe 이상의 용량이 필요
2. 원형로의 용량이 100MWe 이상이면 원형로를 이용한 핵연료 조사시험을 통하여 상용로용 TRU 핵연료 검증에 위한 데이터베이스 확보 가능

2.3 원형로 용량 관련 계통 설계 검토

원형로 용량 선정을 위해 계통설계 분야의 경우 계통설계 기술, 계통성능 검증, 주요기기 개발 및 검증의 세가지 측면에서 검토를 수행했다.

계통설계는 소듐이 순환되는 원자로계통의 설계와 증기를 이용하여 전기를 생산하는 동력변환 계통의 설계로 구성되며, 원자로계통 설계기술은 기본개념(플럼)이 설정되면, 용량에 따라 크게 차이가 없고, 동력변환계통 설계기술은 기존 화력발전소에 일반적으로 적용되는 기술로 용량에 따라 기술적 차이가 크게 나지 않는다.

계통성능 측면에서 피동잔열제거계통 자연대류 특성을 가장 명료하게 확인할 수 있도록 원형로 노심압력손실 및 원자로계통 높이는 상용로와 동일하게 설정해야 하며, 원자로 용기 내부에 펌프, 중간열교환기(IHX) 등의 기기를 설치하여야 하므로 원자로용기 직경을 6m이하로 축소하는 것은 불가능하다. 또한 상용로와 상사성을 유지시키고, 상용로 피동잔열제거계통의 자연대류특성을 입증

하기 위해 최소 원자로용기 직경(6m)에 대해 200MWe의 원자로 출력이 필요하다.

주요기기 개발 및 검증 측면에서는 PHTS 기계식 펌프의 축길이가 길어짐에 따른 진동문제와 고온의 소듐 특성으로 인한 밀봉기술 및 베어링의 내구성, 소듐-소듐 열교환기류(IHX & DHX) 및 소듐-공기 열교환기류(AHX & FDHX), 증기발생기에서의 소듐 열전달 특성과 고온 내구성 및 소듐배출 등의 기술현안들을 갖고 있지만, 이는 기술적인 문제로서 용량과는 관계없는 개별적인 문제이며 원형로 건설을 통해 자연스럽게 해결될 수 있는 문제이다. 특히 증기발생기의 경우 600MWe급까지 제작경험이 있고, 시험시설이 구축된 프랑스, 러시아, 또는 인도 등의 제작사와 협력하여 수행할 예정이므로 증기발생기 용량에 따른 설계·제작에 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 결론

'28년 원형로 건설을 목표로 개발 예정인 소듐 냉각고속로 원형로의 용량 결정을 위해 노심과 계통분야의 설계 요건을 검토하고, 다음과 같은 결론을 도출했다. 핵연료의 경제성 측면에서는 100MWe 이하에서 핵연료 방출 연소도가 급격히 감소하므로 원형로의 용량은 100MWe 이상이 바람직하며, 핵연료 조사시험 측면에서는 100MWe 이상이면 현재 상용로 도입 목표시점인 '50년까지 조사시험을 통해 TRU연료 검증이 가능하다. 또한 계통성능 및 주요기기 검증 측면에서 최소 200MWe 이상이면 600MWe급 상용로의 계통성능 검증을 위한 실증로로 역할 수행 가능하며, 주요기기의 설계 및 제작기술은 고온의 소듐으로 인한 문제로 용량에 무관하다.

본 연구를 기반으로 '12년에 초기 우라늄연료 장전노심부터 후기 TRU연료 장전노심까지의 노심 및 계통개념 성능 상세분석을 통해 최종적으로 원형로 용량을 확정할 예정이다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

[1] A. Vasile, Progress report on french fast reactors program, IAEA-TWG FR&ADS, May.23-27, 2011, Beijing China.