



# 지속 가능한 발전을 위한 제4세대 원자력 시스템 소듐냉각고속로(SFR)

한도희

한국원자력연구소 신형원자로개발단 유체공학연구부장

GIF SFR 운영위원

## 개요

소듐냉각 고속로는 전 세계적으로 지난 50여 년간 약 500억\$에 달하는 개발비를 투자하였고, 약 300 원자로·년의 운전 실적을 쌓은 상용화 직전의 기술이다.

우라늄 자원의 효율적 활용과 처분 폐기물량의 감축이 가능한 소듐냉각 고속로는 그 동안의 연구 개발을 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 기술 개발에 제약 요인으로 작용한 것이 사실이다.

그러나 에너지의 안정적 공급과 환경 보전을 동시에 만족할 수 있는 21세기의 에너지원으로서 가장 유망한 선택으로 평가받고 있는 것은

소듐냉각 고속로이며, 이의 상용화를 위한 국제 공동 노력이 진행 중이다.

특히 2030년 이후를 상용화 목표로 하는 제4세대 원자력 시스템으로서 소듐냉각 고속로가 가장 유망하며 이미 축적된 각국의 연구 개발 경험을 공동으로 활용하는 세부 국제 공동 연구 계획을 작성중에 있다.

에너지 자원이 부족한 우리나라는 장기적으로 소듐냉각 고속로의 도입이 필연적이며, 이를 가능하게 하는 국내 기술 확보 역시 필수적인 사항이다.

국내의 연구 개발은 원자력 선진국에 비하여 비록 그 출발점은 상당히 뒤져 있는 실정이나, 선진국의 과거 개발 경험을 참고하고 제4세대 국제 공동 연구에 참여하면서 우선 순위에 따라 핵심 기술 개발 노력을 집중함으로써 국내 소듐냉각 고속로 기술을 획기적으로 발전시

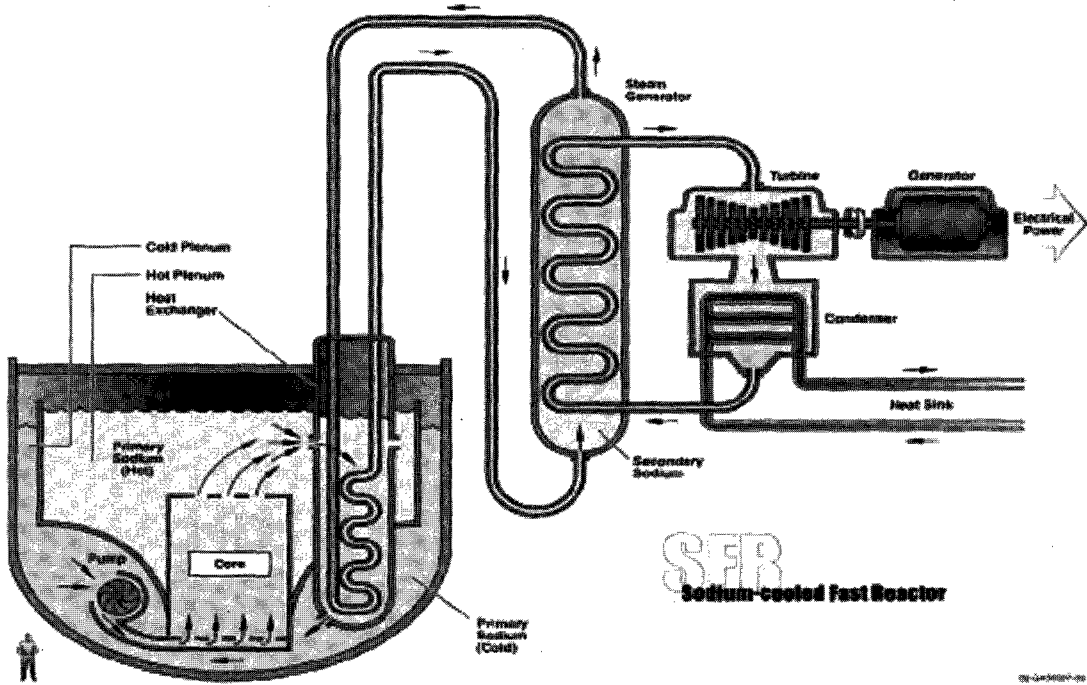
킬 수 있다.

## 국제 공동 연구 계획 수립 추진 경과

GIF는 지난 2001년 3월에 지속 개발 가능성, 경제성, 안전성 및 핵확산 저항성 등 제4세대 원자력 시스템의 기술 목표를 설정한 바 있다.

이와 같은 기술 목표를 달성할 수 있는 제4세대 원자력 시스템 개념을 전 세계적으로 공모하여 총 33개의 소듐 및 납합금 냉각 고속로 개념이 접수되었으며, 원자력 중장기 연구 개발 사업으로 한국원자력연구소가 개발한 KALIMER 개념도 제출하였다.

제출된 개념에 대해 제4세대 원자력 시스템 기술 목표 달성 가능성을 기준으로 평가를 수행한 후, 2002년 7월의 리우 정책/전문가 그룹 회의에서 소듐냉각 고속로와



〈그림 1〉 Pool형 소듐냉각 고속로

납합금 냉각 고속로를 제4세대 원자력 시스템으로 선정하 바 있다.

선정된 소듐냉각 고속로 시스템에는 기술적으로 상이한 금속 및 산화물 연료 장전 원자로와 관련 핵주기 기술이 포함되어 있다.

연구 개발 계획 수립을 위한 첫 단계로 제4세대 원자력 시스템 기술 목표와 선정된 개념 사이에 존재하는 기술 격차를 파악하고, 이와 같은 기술 격차를 극복하기 위해 필요한 연구 개발 항목을 선정하여 R&D Scope Report를 2002년 10

월에 발간하였다.

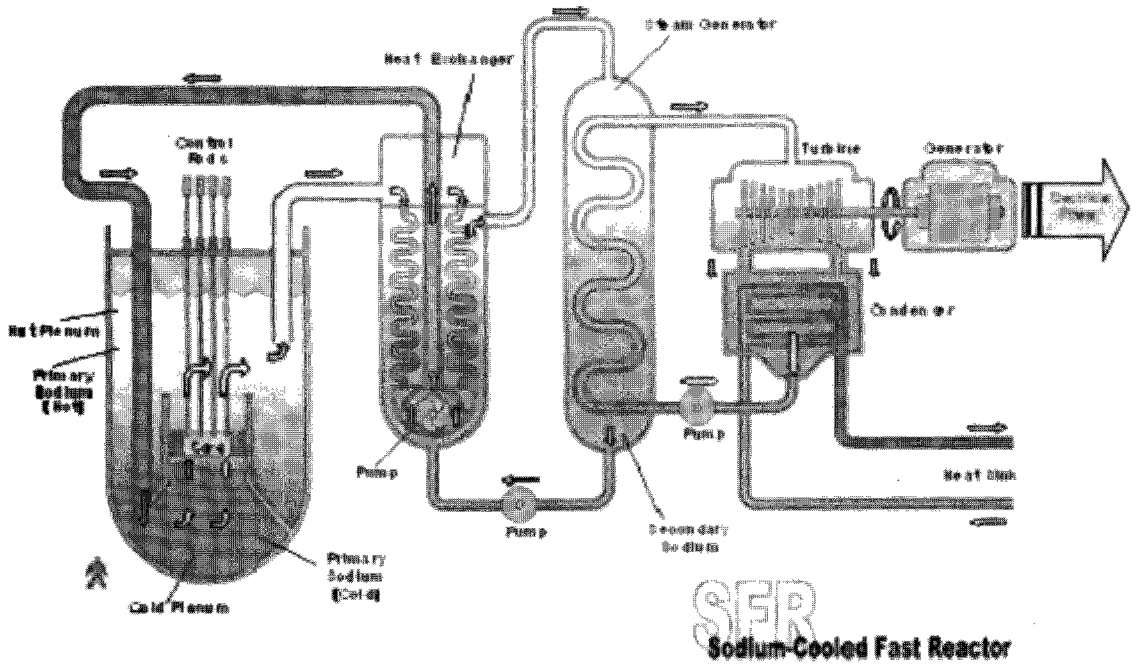
기술 격차와 연구 개발 항목은 안전성 입증, Minor Actinide 포함 핵연료 개발, 경제성 향상, 가동 중 검사 및 보수 기술 향상, 증기발생기 신뢰도 향상 및 신형 에너지 변환 시스템 개발 등이 포함되어 있다.

2003년 4월에는 소듐냉각 고속로 System Steering Committee를 구성하여 구체적인 국제 공동 연구 계획인 R&D Program Plan 작성에 착수하였다.

이 Plan에는 계획 수립 목적, 소듐냉각 고속로 개발 목표, 설계 요건, 참조 노형 정의, 연구 개발 프로젝트 등의 내용이 포함되어 있다.

연구 개발 프로젝트는 여러 개의 Task로 구성되어 있으며, 각 Task에는 연구 목표 및 내용, 주요 일정, 예산 등이 정의되어 있다.

현재까지 2차례 전문가 그룹 검토 의견을 반영하여 수정 보완을 완료하였으며, 2004년 12월 최종본 완성을 목표로 연구 내용 구체화 작업을 수행중에 있다.



〈그림 2〉 Loop형 소듐냉각 고속로

**소듐냉각 고속로 설계 특성**

소듐냉각 고속로 시스템은 고속 중성자를 활용하는 원자로와 연료 재생환 계통으로 구성되어 있으며, 전기 생산과 우라늄 자원의 효율적 활용, 고준위 폐기물량 감소에 적합하다.

소듐냉각 고속로는 열전달 특성이 우수한 액체 금속 소듐을 냉각재로 사용한다. 1차 계통의 소듐은 원자로심을 통과하면서 중성자를 흡수하여 감마선을 방출하는  $Na^{24}$

(반감기 15시간)로 변환되므로 증기발생기가 방사능에 오염되지 않도록 2차 계통이 필요하게 된다.

이러한 2차 계통은 증기발생기에서 증기발생기관의 파손 등으로 인해 소듐-물 화학 반응이 발생할 경우 수소 생성에 의한 압력 급상승 등으로부터 노심을 보호하는 역할도 겸하고 있다.

이와 같은 2차 계통의 필요성으로 인하여 일반적으로 기존의 경수로에 비하여 경제성이 불리하게 된다.

1차 계통의 소듐은 노심과 중간 열교환기 사이를 순환하고, 2차 계통 소듐은 중간 열교환기로부터 증기발생기로 열을 전달한다.

방사능을 띄는 1차 계통의 소듐을 격리하기 위한 방법으로 중간 열교환기와 1차 냉각재 순환펌프를 원자로 용기 내에 설치하는 Pool형(그림 1)과 이 두 부품을 별도의 차폐된 장소에 설치하여 원자로와 파이프를 연결하는 Loop형(그림 2)이 있다.

소듐냉각 고속로는 수백 MWe



**SODIUM-COOLED FAST REACTOR SYSTEM (610 M\$)**

*Fuels and Materials (160 M\$)*

**Oxide**

- Advanced pelletizing technology
- Oxide fuel remote fabrication technology selection decision (SFR1)
- ODS cladding (welding)
- Remote maintenance development
- Vibrocompaction alternative
- ODS MOX fuel pin irradiation

**Metal**

- Characterize MA bearing fuels
- Reduce actinide losses in fabric
- Advanced cladding out-of-pile tests
- Irradiation tests for MA bearing fuels

**New materials development (12 Cr ferritic steels)**

*Reactor Systems (140 M\$)*

- In-service inspection and repair technology

*Balance of Plant (50 M\$)*

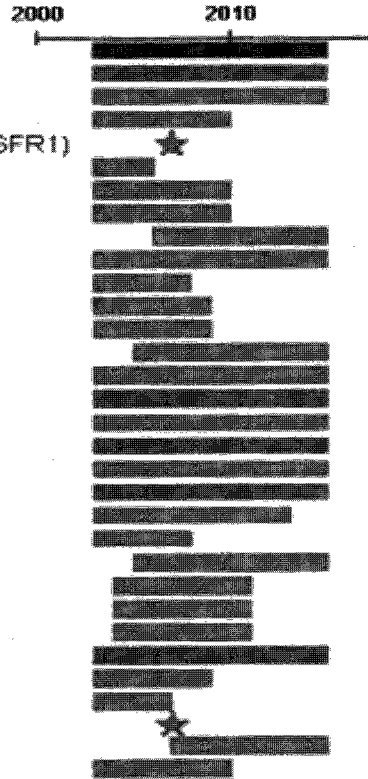
- Increased reliability steam generators

*Safety (160 M\$)*

- Passive safety confirmation
- SASS development
- Transient fuel testing and analysis
- Severe accident behavior testing**
- Debris co-stability
- Molten fuel discharge/dispersal

*Design & Evaluation (100M\$)*

- Evaluate supercritical CO2 turbine
- Preconceptual design
- Viability phase complete
- Conceptual design
- Analysis tools



〈그림 3〉 소듐냉각 고속로 연구 개발 일정 및 예산

출력의 소형 모듈형 원자로부터 1500MWe 이상의 대용량에 이르기까지 다양한 용량의 원자로 개발이 가능하다(표 1).

또한 원자로 출구의 1차 계통 소듐 온도(530~550℃)가 경수로의 냉각재 온도(약 300℃)와 비교하여 상당히 높으므로 소듐냉각 고속로의 열효율은 경수로의 경우보다 높다.

소듐냉각 고속로의 안전 특성 중 경수로와 비교하여 가장 큰 차이점

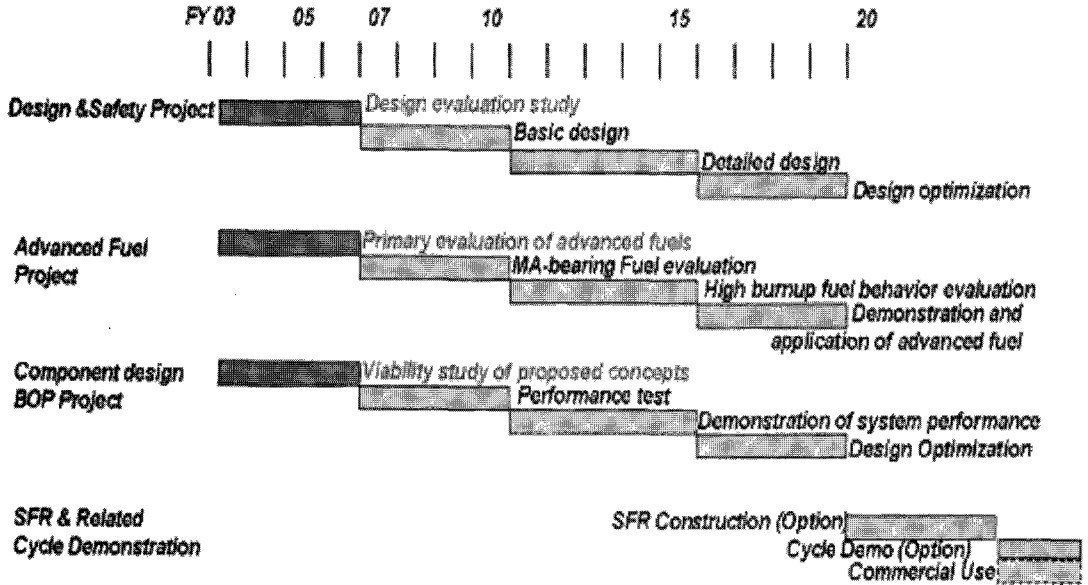
은 그 노심의 구성에 있다. 경수로 는 노심의 연료, 피복재, 냉각재 등이 반응도를 최대화한 형태로 배열 되어 있으므로, 연료의 용융 혹은 냉각재 상실의 경우와 같이 그 배열에 변화가 생기는 경우, 노심의 반응도가 낮아지게 되어 핵분열 연쇄 반응률이 감소하게 된다.

반면에 소듐냉각 고속로는 중성자 감속재를 필요로 하지 않고 연료는 충분한 냉각이 가능할 정도의 간격만을 유지하고 있으므로, 만일의

경우 연료 용융이 발생하면 노심 밀집 과정(core compaction process)으로 인하여 반응도가 증가하게 된다.

이와 같은 염려로 인해 초기 소듐냉각 고속로 안전 연구는 가상 노심 밀집 과정중의 재임계에 의한 에너지 방출량의 추정에 집중되었다.

그러나 오랜 기간의 연구를 통하여 연료 vapor에 의한 연료 분산, Doppler 효과, 노심 붕괴 과정중의 반응도 삼입률 등을 보다 정확하게



〈그림 4〉 소듐냉각 고속로 프로젝트 일정

고려할 수 있게 됨에 따라 에너지 방출량은 초기에 Bethe-Tait가 예측한 것에 비하여 1/10 이상 작다는 사실을 알게 됨으로써, 이에 대비한 격납 용기의 경제적 설계가 가능하게 되었다.

최근에는 고유 안전 특성 등으로 인하여 가상 노심 붕괴 사고 발생 확률이 매우 작게 되어, 심지어 미국의 초기 PRISM 설계에서는 원자로 상부 격납 용기 제거를 시도하게 되었다.

소듐냉각 고속로 특유의 안전 특성 대부분은 소듐 냉각재와 관련이 있다.

우선 안전성과 관련된 소듐의 장

점을 나열하면, ① 소듐냉각 고속로의 정상 운전 온도(최고 약 550℃)에서는 대기압에서도 소듐은 비등(비등점 약 900℃) 하지 않으므로, 파이프 파손과 같은 hydrostatic 사고시에는 노심의 voiding이 발생하지 않고, ② 소듐은 물과 비교하여 약 100배의 열전도도를 갖고 있으므로 잔열 제거를 위해 자연대류 현상을 활용할 수 있고, ③ 소듐의 비부식성으로 인하여 방사성 부식물의 발생이 최소화됨으로써 운전 요원의 방사능 피폭량이 작다.

반면에 소듐의 단점과 문제점은 ① 소듐은 물·공기와 화학 반응을 하고, ② 대용량 노심은 양의 소듐

기화 반응도 계수를 가질 수 있다는 점이다.

소듐냉각 고속로는 혼합 산화물 핵연료와 U-TRU-Zr 금속 핵연료의 두 가지 옵션이 있으며, 핵연료 재순환을 위하여 Advanced aqueous process와 Pyroprocess가 필요하다.

이와 같은 핵연료 재순환 기술은 ① 액티나이드를 99.9% 회수하여 재순환하고, ② 낮은 Decontamination factor로 인하여 핵연료의 방사능 준위를 높이고, ③ 어떠한 단계에서도 플루토늄 분리가 불가능하다.



**국제 공동 연구 내용 및 수행 일정**

**1. 소듐냉각 고속로 연구 개발 계획 개요**

2002년 10월에 발간된 R&D Scope Report는 소듐냉각 고속로의 상용화를 달성하기 위해서는 연료 및 재료, 원자로 계통, 증기발생기, 안전성 및 설계 개발 등의 연구에 약 6억 천만 불의 예산이 소요될 것으로 예상하고 있다(그림 3).

이와 같은 소요 예산은 다른 노형에 비해 낮은 비용으로서, 소듐 냉각 고속로는 다른 노형에 비해 개발 수준이 월등히 높고, 그 동안 축적하여온 풍부한 연구 개발 결과를 활용할 수 있기 때문이다.

소듐냉각 고속로 개발에 참여하는 국가는 한국·미국·일본·프랑스·영국·EURATOM 등 6개국이며, R&D Program Plan에서는 이와 같은 연구 개발 필요 항목을 세분화하여 다음과 같은 프로젝트와 Work packages를 개발하였고, 주요 일정은(그림 4)와 같다.

○ Design and Safety

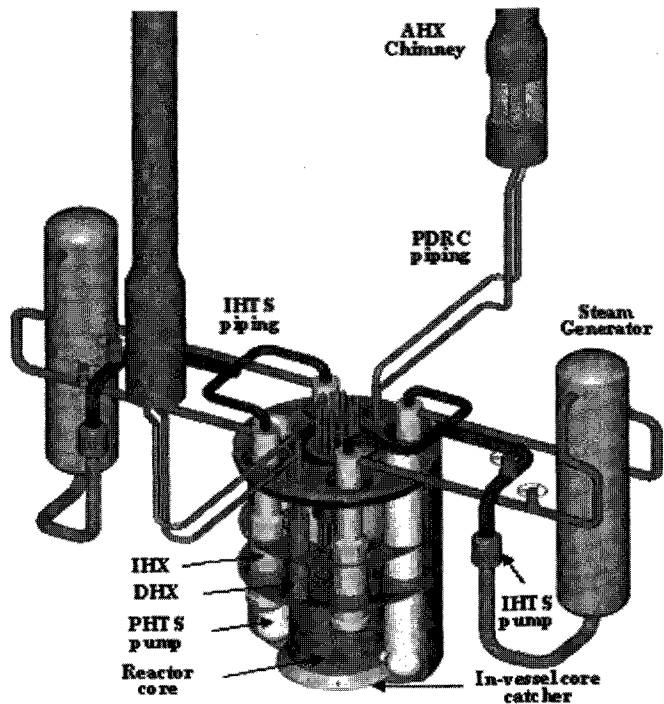
- Design Evaluation Study
- Safety Assessment of Design Options

○ Advanced Fuels

- Advanced Fuel Fabrication
- Irradiation Behavior of Advanced Fuels

〈표 1〉 소듐냉각 고속로 주요 설계 변수

Reactor Parameters	Reference Value
Outlet Temperature	530~550℃
Pressure	~1 Atmospheres
Rating	1000~5000 MWth
Fuel	Oxide or metal alloy
Cladding	Ferritic or ODS ferritic
Average Burnup	~150~200 GWD/MTHM
Conversion Ratio	0.5~1.30
Average Power Density	350 MWth/m <sup>3</sup>



〈그림 5〉 KALIMER

- Advanced Core Material
- Transmutation of Long Lived Fission Products
- Component Design and BOP
- In-service Inspection and Repair

- Development of High Cr Ferritic Steel
- Highly Economical and Reliable Steam Generator
- Advanced Energy Conversion System

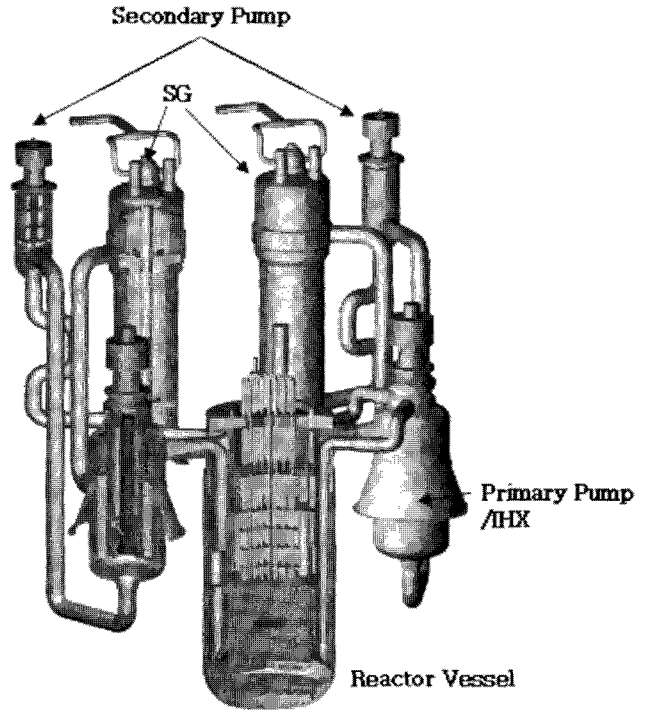
핵연료 주기와 관련한 연구 개발은 Pyroprocess의 규모 증대와 마이너 액티나이드와 핵분열 생성물을 함유하는 산화물 핵연료 원격 제조 기술 등과 관련된 내용으로서 Fuel Cycle Crosscut 프로젝트에서 타노형과 공동으로 기술 개발을 추진할 예정이다.

## 2. Design and Safety 프로젝트

이 프로젝트는 소듐냉각 고속로 System Steering Committee가 직접 주관하는 프로젝트로서 설계 개발과 안전성 평가가 주요 연구 내용이며, 2006년까지는 개발 대상 설계에 대한 평가를 수행하고, 2010년까지는 기본 설계, 2015년까지는 상세 설계를 개발할 예정이다. 그 이후에는 설계의 최적화를 추진하고, 참여국과의 협의를 거쳐 실증로 건설을 고려할 예정이다.

개발 대상 소듐냉각 고속로는 한국원자력연구소의 KALIMER와 일본 Japan Nuclear Cycle Development Institute의 JSFR 원자로가 선정되었으며, 두 노형에 대한 비교 평가를 추진할 예정이다.

KALIMER(그림 5)는 용량



〈그림 6〉 JSFR

600MWe의 금속 연료 장진 풀형 원자로이고, JSFR(그림 6)은 용량 1500MWe의 혼합 핵연료 장진 루프형 원자로로서, 현재 두 노형 비교 평가를 위한 기준과 절차, 일정 등에 관한 협의를 진행중에 있다.

한국이 참여를 고려중인 Task는 KALIMER와 JSFR과의 비교 평가, 3차원 노심 열유체 분석 모델 개발, 용융 금속 연료의 노심내 재배치 현상 분석, 용융 금속 연료/노내 구조물 혼합체의 노내 거동 분석과 관련된 내용이다.

## 3. Advanced Fuels 프로젝트

이 프로젝트는 소듐냉각 고속로용 핵연료를 개발하는 프로젝트로서 2006년까지 Advanced fuels에 대한 비교 평가를 수행하고, 2010년까지는 마이너 액티나이드를 포함하는 연료를 비교 평가한 후, 2015년까지 고연소 성능 평가를 수행할 예정이다.

현재 고려중인 핵연료 형태는 혼합 산화물, 금속 및 질화물 핵연료이며, 주요 연구 내용은 마이너 액티나이드 혹은 마이너 액티나이드



와 I-129와 Tc-99과 같은 장수명 핵분열 생성물이 함께 포함되어 있는 핵연료의 제조 기술과 핵연료의 조사 시험과 관련된 내용이다.

본 프로젝트에 참여하는 국가들은 실제로 핵연료를 제조하여 조사 시험을 수행할 예정이나, 우리나라의 경우는 현실 여건을 고려하여 Advanced Dirty Oxide Fuel 개발과 관련된 연구를 수행함으로써, 연구 결과물 공유 원칙에 따라 선진 금속 연료 관련 기술 확보를 추진할 예정이다.

#### 4. Component Design and BOP 프로젝트

이 프로젝트에서는 주로 소듐냉각 고속로의 경제성과 안전성 향상을 위한 연구를 수행할 예정이며, 2006년까지 제안된 기기 및 계통에 대한 기술 타당성 검토를 수행하고, 2010년까지는 성능 평가, 그 이후에는 계통 성능 실증을 수행할 예정이다.

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

기기 및 배관의 구조 재료 개발은 원자로 시스템의 경제성과 가동률 향상을 위해 중요하다. 오스테나이트

강 대신 12% Cr Feritic steel은 높은 열전도성과 낮은 열팽창 계수의 특성을 갖는 등 고온 강도 및 열물성치가 우수하기 때문에 개발을 추진할 예정이다.

소듐냉각 고속로의 증기발생기에서 물 누출이 있을 경우, 소듐-물 반응의 대처는 물론, 물의 누수를 조기에 감지하는 시스템의 신뢰도 향상이 중요하다.

특히 작은 누수를 감지할 수 있는 시스템은 증기발생기 튜브의 파단이 전파되는 것을 조기에 방지하고, 신속한 정상 운전 재개를 가능하게 할 수 있다.

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

한국은 가동중 검사를 위한 초음파 탐지 기술 개발, 중간 열교환기와 증기발생기를 일체화한 기기 개념 개발, 초임계 이산화탄소 Brayton 사이클 시스템 타당성 연구에 참여할 예정이다.

#### 향후 추진 계획

2004년 12월까지 최종 국제 공동 연구 개발 계획서 작성을 위해서 현재 소듐냉각 고속로 System Steering Committee와 Project

Management Board는 R&D Program Plan의 Task별 연구 내용과 일정을 구체화하고, 소요 비용을 산정하고 있다.

또한 각 Task간의 연계를 검토하고, 모든 계획된 연구 개발 내용을 수행했을 때 최종 목표인 소듐냉각 고속로의 상용화가 달성될 수 있을 것인가에 대해서도 검토할 예정이다.

소듐냉각 고속로의 개발 대상 노형으로서 선정된 KALIMER와 JSFR을 비교 평가하기 위한 기준과 절차, 일정 등에 관한 협의를 조속히 완료하여, 모든 연구 개발 내용 중 가장 먼저 노형간 비교 평가를 추진할 예정이다.

또한 일본의 Monju 원형로를 국제 공동으로 활용하는 프로젝트를 추가로 개발하여 연구 개발 투자의 효율성을 제고할 예정이다.

2004년 10월 27~28일에는 한국원자력연구소에서 소듐냉각 고속로 System Steering Committee 및 Project Management Board 회의를 개최하고, 본 회의를 통하여 R&D Plan에 대해 참여국 합동으로 최종 수정 보완 작업을 수행할 예정이다. ☎