

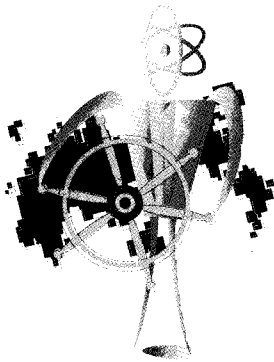
사용후 연료 재활용과 관리 문제의 해결사

제4세대 소듐냉각고속로 개발 현황과 계획

김 영 일

한국원자력연구원 고속로기술개발부 책임연구원

서론



정부는 2008년 12월에 2022년까지 12기의 원자력발전소를 건설하여 원자력발전량 비중을 48%까지 확대하는 「제4차 전력수급기본계획」을 확정된 바 있다. 최근 정부의 '녹색 성장'을 뒷받침하기 위하여 그린 에너지 공급 및 기후 변화 대처 방안으로서 원자력의 역할이 강화된 것이다.

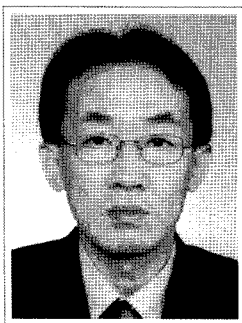
원자력 발전의 가장 큰 장점은 온실가스 배출이 거의 없다는 점과 낮은 발전단가, 그리고 무엇보다도 우리나라와 같이 에너지 자원이 없는 국가에서 에너지 자립에 기여할 수 있는 가장 유망한 기술이라는 것이다.

이처럼 원자력의 장점에도 불구하고 원자력을 지속적으로 이용하기 위해서는 사용후연료의 관리 문제 해결이 핵심이다. 사용후연료 관리 문제는 원자력 발전

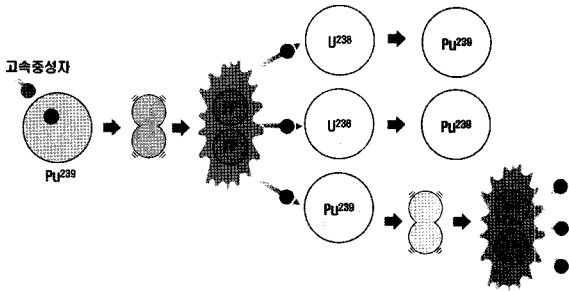
을 하는 모든 나라의 공통 이슈로, 이를 해결하기 위한 방안의 하나로 우리나라를 비롯한 원자력 선진국들이 공동 참여하여 제4세대 원자력 시스템(Gen IV Nuclear System)을 개발하고 있다.

현재 전 세계에서 가동중인 원자력발전소는 제2, 제3세대로 분류되기 때문에 제4세대는 지속성, 경제성, 안전성, 그리고 핵확산 저항성의 4대 영역에서 획기적인 기술 혁신을 목표로 하는 미래형 원자력 기술이라 할 수 있다.

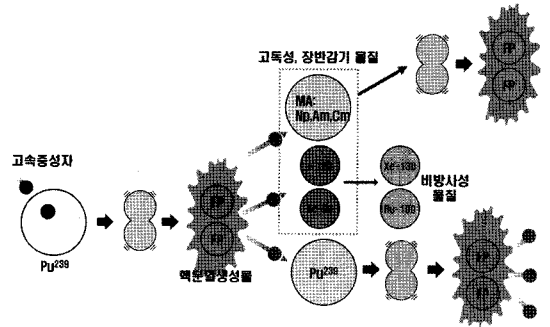
세계의 우수한 원자력 전문가들은 제4세대 원자력 기술이 2030년대에 실용화될 것으로 전망하고 있다. 이 중 제4세대 소듐냉각고속로는 사용후연료 재순환을 통해 우라늄 자원의 이용률을 높이고, 사용후연료 내의 장수명, 고독성 방사성 물질을 없애는, 두 마리 토끼를 모두 잡을 수 있는 유망한 기술로 부상하고 있다.



서울대 원자핵공학과 박사
한국원자력연구원(1983~)



〈그림 1〉 소듐고속냉각로의 증식 개념



〈그림 2〉 소듐고속냉각로의 연소 개념

우리나라도 세계 원자력 기술을 주도한다는 야심찬 목표 아래 2008년 12월 22일 제255차 원자력위원회(위원장 국무총리)에서 국가 차원의 「미래 원자력 시스템 개발 장기 추진 계획」을 확정했다.

이 계획에는 미래형 원자력 시스템의 일환인 제4세대 소듐냉각고속로의 장기 개발을 일관되고 체계적으로 수행한다는 기본 방향하에 2028년까지 실증로 건설·운전을 목표로 2011년까지 소듐냉각고속로의 설계 개념을 완료하고, 2017년까지 실증로 표준 설계를 완료할 것을 제시하고 있다.

본고에서는 이러한 정부 정책에 힘입어 제4세대 소듐냉각고속로의 개념, 국내외의 현황과 전망, 그리고 향후 고속로 건설을 위한 계획을 살펴보고자 한다.

제4세대 소듐냉각고속로란?

1. 고속로 개념 및 특징

상업 운전중인 경수로가 물

(H₂O)을 냉각재 및 감속재로 사용하여 낮은 에너지의 열중성자를 이용하여 핵분열을 일으키는 것과 달리, 고속로는 액체 금속(소듐, 납, 납-비스무스 등)을 냉각재로 사용함으로써 경수로에 비해 높은 에너지의 고속 중성자를 이용하여 핵분열 반응을 일으킨다.

액체 소듐(Na)을 냉각재로 사용하는 소듐냉각고속로는 경수로와 달리 높은 압력이 요구되지 않으며 냉각재의 열전달 능력이 매우 우수하여 출력 밀도를 높일 수 있어 동일한 출력의 경수로에 비해 원자로 크기를 작게 할 수 있는 장점이 있다.

소듐냉각고속로의 주요 핵분열 물질은 Pu-239로서 고속 중성자에 의해 핵분열이 일어나는 경우, 기존 경수로에서 열중성자에 의한 U-235 핵분열 반응에서 보다 더 많은 중성자가 발생된다.

핵분열에 의해 발생된 여러 개의 중성자 중 한 개는 다시 핵분열을 일으키는 데 사용되고 나머지 여분의 중성자 중 일부가 천연

우라늄의 99.3%를 차지하고 소듐냉각고속로 핵연료의 70~90%를 차지하는 U-238에 포획되어 핵분열 물질인 Pu-239로 변환된다.

〈그림 1〉 소듐고속냉각로의 증식 개념따라서 소듐냉각고속로에서는 기존 경수로에 비해 핵분열시 발생하는 중성자가 많아 소모된 Pu-239보다 더 많은 양의 Pu-239를 U-238 핵변환을 통해 생산하는 것, 즉 증식(Breeding)이 가능하다. 증식 개념을 이용하여 경수로 사용후연료를 소듐냉각고속로에서 재순환할 경우 우라늄 이용률은 경수로에 비해 100배 이상이 된다.

반면 경수로에 비해 더 많이 발생한 고속 중성자 중 일부는 필요에 따라서 플루토늄과 마이너 악티나이드(MA: 아메리슘, 퀴륨, 넵튬 등)와 같이 반감기가 긴 핵종을 핵분열시켜 반감기가 짧은 핵종으로 변환시키거나 중성자 포획 등에 의해 방사성이 없는 물질로 변환시키는 데 활용될 수 있다.

경수로 사용후연료에 포함된, <그림 2> 소듐고속냉각로의 연소 개념 수명이 길고 독성이 매우 높은 플루토늄과 마이너 악티나이드를 연소시키면 훨씬 관리하기가 쉬운 핵종으로 변환되기 때문에 실제 사용후연료의 최종 처분을 용이하게 할 수 있다. 이를 위해 최적화된 원자로를 연소로라 한다.

이러한 특징으로 인해 원자력 이용의 기술적 측면에서 보면 소듐냉각고속로는 경수로 사용후연료의 안전 관리뿐 아니라 우라늄 자원의 추가 확보라는 일석이조의 효과를 거둘 수 있는 유망한 기술로 각광받고 있는 것이다. 그렇지만 사용후연료 재활용을 위해서는 대중의 수용성과 국제 사회의 신뢰성 등 기술 외적인 측면도 중요한 영향을 끼치므로 이러한 점도 고려해야 한다.

2. 왜 제4세대인가?

최근에 건설되고 있는 안전성이 매우 우수한 최신의 원자로를 제3세대+라고 부른다. 핀란드, 중국, 일본 등에 건설되고 있는 신형 경수로와 우리나라에서 건설 중인 신고리 3, 4호기(APR1400) 원전부터 이에 해당된다.

이러한 과정에서 주요 원자력 국가들은 21세기의 새로운 환경에서 원자력이 나아가 할 방향에 대해 논의한 끝에 4가지 혁신적인 기술 목표를 갖는 새로운 원자력 시스템을 개발하기로 하였는데, 이것이 바로 제4세대 원자력

시스템이다.

제3세대+ 원전이 단·중기적으로 원자력 이용을 대표할 노형이라면, 제4세대는 제3세대+ 이후 단계로서 2030년대의 다음 세대를 위한 혁신적인 원자력 시스템을 지향하고 있다.

제4세대에서 추구하고 있는 혁신적인 기술 목표는 현재의 원자력 시스템이 안고 있는 당면 문제점들을 해결 내지는 완화하는 데 목적이 있다.

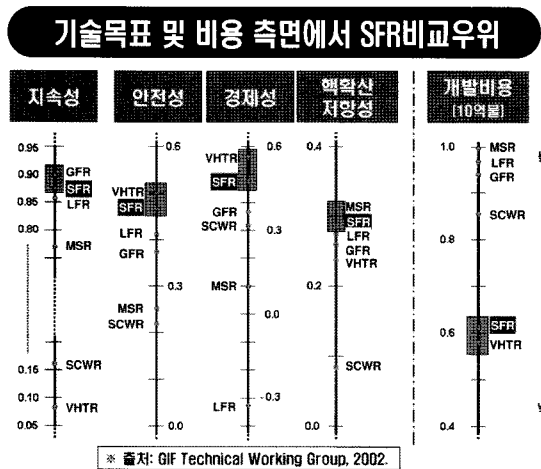
첫 번째는 지속 가능한 발전을 선도하기 위해 지속성(Sustainability)을 가져야 하며, 두 번째는 일반 대중이 수용할 수 있는 안전성과 신뢰성을 갖추는 것이다. 세 번째는 제3세대+ 원전 및 타에너지원과 비교해 경쟁력을 확보한 에너지 공급 시스템이 되어야 하며, 네 번째 기술 목표는 원자력이 평화적 에너지로서 지속적으로 활용될 수 있도록 핵확산 저항성과 물리적 방호개념을 개발하여 적용하는 것이다.

이러한 제4세대 노형으로는 소

듐냉각고속로(SFR: Sodium-cooled Fast Reactor), 가스냉각고속로(GFR: Gas-cooled Fast Reactor), 납냉각고속로(LFR: Lead-cooled Fast Reactor) 등 고속로가 3개 있고, 초임계압수냉각로(SCWR: SuperCritical Water Reactor), 용융염로(Molten Salt Reactor), 초고온가스로(VHTR: Very High Temperature Reactor)가 있다.

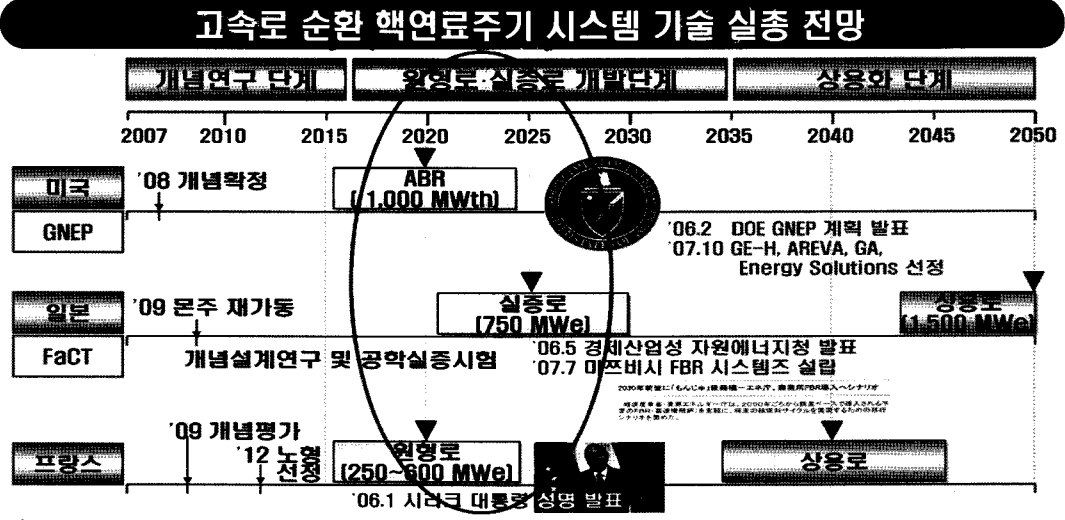
소듐냉각고속로는 이러한 노형 중에서 가장 개발이 앞서 있으며 실현 가능성이 높다고 평가되고 있다.

제4세대 원자력국제포럼(GIF: Generation IV International Forum)에서 6개 후보 노형에 대하여 4대 혁신 기술과 개발 비용에 대해 평가하였는데, 소듐냉각고속로는 전 부분에서 골고루 우수한 평가를 받고 있다. 특히 우리나라에서 가장 기술 축적이 이루어진 분야가 소듐냉각고속로 기술이며, 궁극적으로 국내 사용후연료의 안전 관리 및 우라늄 이



<그림 3> 제4세대 원자로형 평가 결과

선진국의 소듐냉각 고속로 실증 계획



〈그림 4〉 선진국의 소듐냉각고속로 실증 계획

용 극대화를 위한 가장 유망한 기술적 대안으로 자리 잡고 있다.

국내외 기술 개발 현황 및 전망

1. 고속로 개발 과정

소듐냉각고속로는 원자력 이용 초창기인 1950년대 후반부터 연구 개발을 시작한 이래로 전 세계적으로 현재까지 약 300 원자로·년 이상의 운전 실적을 쌓은 실용화 직전의 기술이다.

1960~1970년대에는 우라늄 자원의 효율적 이용과 경수로 및 농축 기술의 미국 의존을 탈피하기 위해 많은 원자력 선진국들이 소듐냉각고속로를 개발하였다. 그러나 원자력 발전량 증가율 둔화와 우라늄 자원의 추가 개발로 우라늄 가격이 안정되면서 상용화를 위한 소듐냉각고속로 기술

개발의 필요성이 희석되어 연구 개발에 많은 영향을 주게 되었다.

1980~1990년대에는 소듐냉각고속로의 경제성 확보를 최우선으로 연구 개발이 진행되었으며, 체르노빌과 TMI 원전 사고 이후에는 고유 안전성을 강조하는 노형개발에 치중하여 상대적으로 소듐냉각고속로 개발은 다소 침체되었다. 현재 전 세계적으로 운전중인 소듐냉각고속로는 5기이며, 3기가 건설중이다.

최근 교토기후협약에 따른 청정 에너지원 확보와 안정적인 에너지 공급원 확보 필요성이 대두됨에 따라 원자력 발전이 다시 각광받고 있다. 이러한 추세 속에서 사용후연료 재활용을 통한 처분 폐기물량의 획기적 감소와 장수명 핵종의 연소를 통한 방사성 독성의 획기적 감소가 가능한 소듐냉각고속로 기술 개발의 중요성

이 증가하고 있다.

이에 따라 과거 소듐냉각고속로가 안고 있던 경제성 문제를 해결하고 보다 안전한 원자로를 개발하기 위하여 우리나라를 비롯한 미국, 일본, 프랑스 등에서 주도적으로 제4세대 소듐냉각고속로를 개발하고 있는 상황이다.

최근의 선진국 상황을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

1. 주요국의 현황 및 전망

미국은 AFCI(Advanced Fuel Cycle Initiative)와 GNEP(Global Nuclear Energy Partnership), 그리고 Gen IV 프로그램을 통해 제4세대 소듐냉각고속로 및 재순환 핵연료 주기 개발을 수행하고 있다.

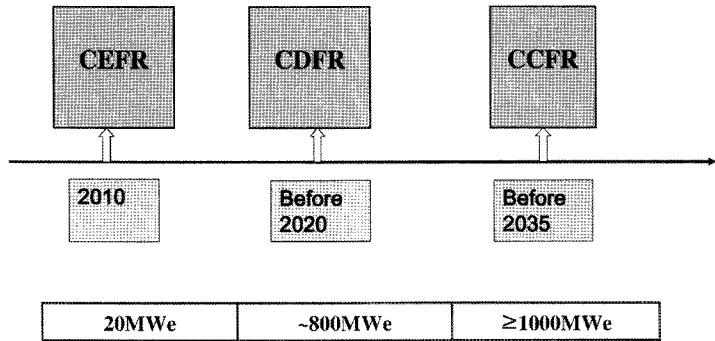
특히 GNEP에서는 새로운 재순환 기술 개발 및 도입과 소듐냉

각연소로인 신형연소로(ABR: Advanced Burner Reactor) 개발을 주요 전략으로 채택하고 있다. 현재 신형 연소로는 2020년경 건설 완료를 목표로 4개 산업체 컨소시엄이 연구를 수행하고 있다.

일본은 제4세대 소듐냉각고속로를 가장 활발히 개발중인 국가이다. 2005년 제10차 원자력 연구·이용·개발 장기 계획을 통해 에너지 자립을 천명하고, 이의 일환으로 FaCT(Fast Reactor Cycle Technology Development) 프로그램을 수행중이다.

이는 궁극적으로 고속로 및 관련 핵연료 주기를 완성하는 것으로 2025년까지 소듐냉각고속로 실증로와 관련 핵연료 주기 시설을 건설하고, 2050년경부터는 상용로를 도입하는 계획이다.

프랑스는 2006년 1월 시라크 대통령이 2020년에 제4세대 고



〈그림 5〉 중국의 고속로 개발 전략

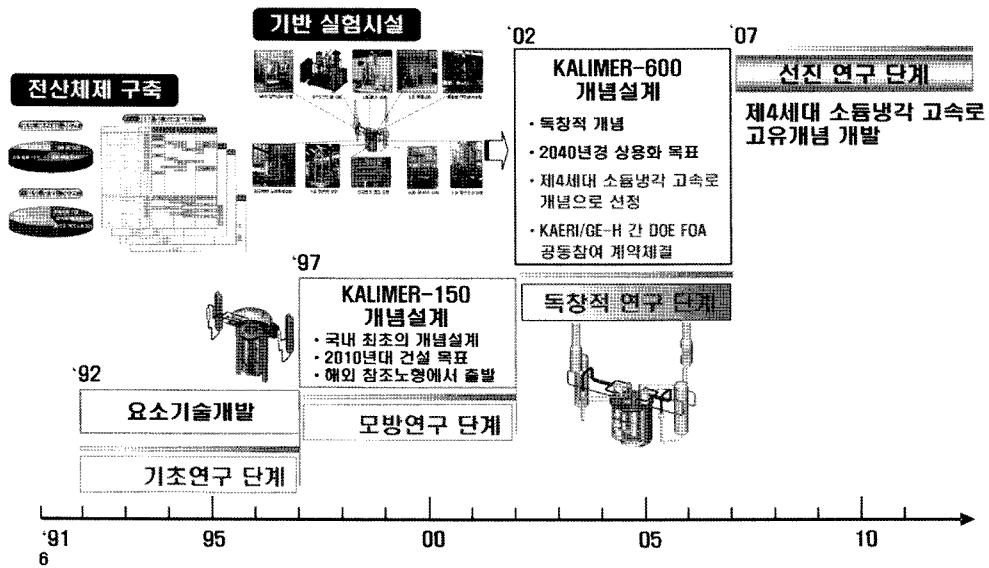
속로의 원형로 운전을 개시한다는 계획을 발표하였다. 고속로 대상으로는 소듐냉각고속로 또는 가스냉각고속로(GFR)가 고려되고 있는데 현재의 기술 개발 수준으로는 소듐냉각고속로가 제4세대 원자로로 채택될 것이 유력하다.

프랑스는 2040년부터는 제4세대 상용 고속로의 도입을 통해 기존의 경수로(제3세대)를 대체하며, 1970년~1980년경에는 경수

로를 제4세대 고속로로 완전 교체한다는 계획이다.

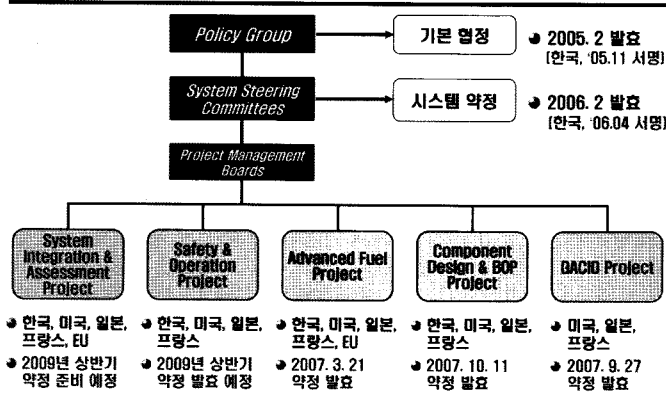
중국은 후발국 중 가장 원자력 도입이 활발한 국가로 2050년까지 필요로 하는 원자력 수율을 경수로로는 모두 충족시킬 수 없다는 판단하에 고속로 개발을 추진하고 있다.

중국의 고속로 개발은 실험로(CEFR; China Experimental Fast Reactor)→실증로(CDFR;



〈그림 6〉 우리나라의 소듐냉각고속로 개발 과정 및 현황

Gen IV SFR 프로젝트 참여현황



〈그림 7〉 소듐 냉각 고속로 국제 공동 프로젝트 참여 현황

China Demonstration Fast Reactor) → 상용로 (CCFR; China Commercial Fast Reactor)의 3 단계 전략을 채택하고 있다.

실증로 단계부터는 2가지 옵션을 고려하고 있는데, 만일 우리나라 자원이 경수로 개발을 유지하는데 충분치 않을 경우에 2025년경

실증 고속로(CDFR)를 하나의 부지에 다수기를 건설하는 방법으로 실용화하는 방법(증식로도 동일)이다.

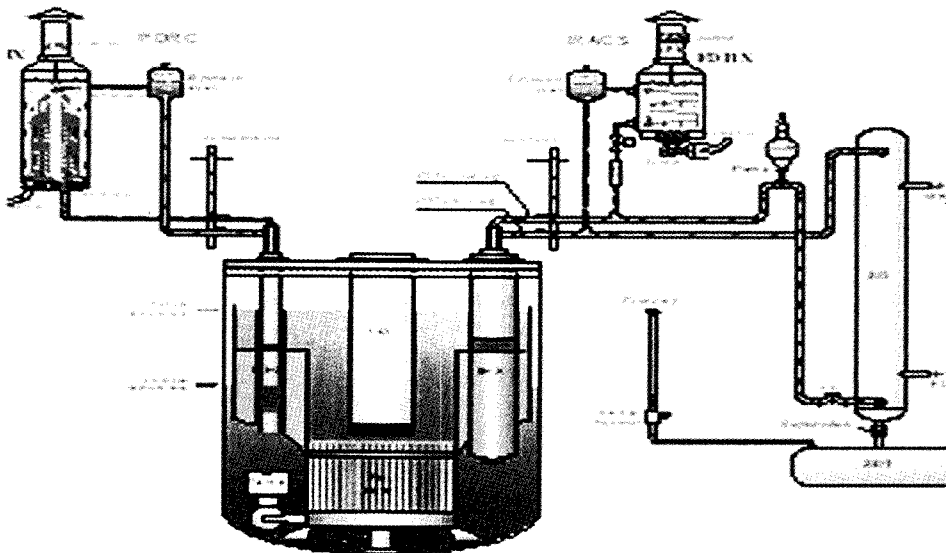
또 다른 경우는 800Mwe 규모의 연소로(Burner)를 동일 부지에 다수기를 건설하는 방법인데, 이는 소멸 기술(Partitioning and

Transmutation)과 MA 함유 연료 제조 기술에 대한 충분한 경험을 전제로 하고 있다.

2. 우리나라 현황

우리나라는 선진국보다 늦은 1980년대에 소규모로 소듐냉각 고속로에 대한 기초기술 연구를 수행해왔다. 그러다가 1997년부터 원자력연구개발 중장기계획사업을 통해 본격적으로 연구 개발에 착수하여, 2001년에는 소형 소듐냉각고속로인 KALIMER-150(150MWe) 설계 개념을 완성하였다. KALIMER-150은 국내 최초의 소듐냉각고속로 개념 설계이며 미국의 PRISM 원자로에서 출발한 개념이다.

2002년부터 2006년까지는 중형 소듐냉각고속로인 KALIMER-600 개념 설계를 완성하였는



〈그림 8〉 1,200MWe 자체 순환로 계통 개념

〈표 1〉 제4세대 소듐냉각고속로 설계 요건

| 구분 | 설계 목표 |
|---------------------------------------|--|
| 일반 설계 요건 (General Requirements) | <ul style="list-style-type: none"> - 풀형 소듐냉각고속로, 원자로 수명 60년 - 재장전 주기 : 자체 순환로 18개월 이상, 연소용 11개월 이상 - 출력 : 발전용 1,200MWe 이상, 연소용 600MWe 이상, 열효율 38% 이상 - 금속 연료, 건식 재순환에 의한 사용후연료 재활용 - 안전 정지 지진 하중 0.3g, 면진 설계 - 고유 안전성 확보 |
| 지속성(Sustainability) | <ul style="list-style-type: none"> - 전환비(breeding ratio) ≤ 1.0 - 건식 재순환에 의한 사용후연료 재활용 |
| 안전성(Safety & Reliability) | <ul style="list-style-type: none"> - 설계 단순화, 노심 출력부 반응도 계수, 노심 정지 계통의 다양성, 일차 계통 열용량 최대 확보 - 사고시 3월 이상의 운전원 대처 허용 시간 - 인적 오류 저감, 보호 계통 고장 허용성 강화 - 노심 손상 빈도 10^{-6}/원자로·년 미만, 누적 발생 빈도 10^{-7}/원자로·년 이상인 중대 사고 경우 부지 경계 전신 피폭 방사선량 25rem 이하 - In-vessel retention 확보 - 피동 잔열 제거 계통 및 잔열 제거 기구 다양성 확보 |
| 경제성(Economics) | <ul style="list-style-type: none"> - 가동률 89% 이상 - 설계 단순화 및 표준화, 주요 기기 교체 용이화 - 운전원의 최소화, 검사 및 진단의 자동화, 상주기 운전 대비 I&C 기기 MTBF 중대 - 원자로/터빈 정지 없이 소외 부하 상실 대처 - 안전 등급 비상 발전기 불필요 |
| 핵확산 저항성 (Proliferation Resistance) | <ul style="list-style-type: none"> - 증식비(breeding ratio) ≤ 1.0 - 잉여 플루토늄 생산을 방지하는 블랭킷 제거 설계 - 핵종을 분리하지 않는 건식 재순환 |

데, 우리 기술력을 바탕으로 한 독창적 개념의 원자로이다. 비록 선진국보다 뒤늦게 소듐냉각고속로 개발이 시작되었고 선진국과는 달리 국내에 소듐냉각고속로 건설 경험이 없지만 국내 고속로 설계 능력은 상당한 수준으로 평가받고 있다.

KALIMER-600은 2002년에 미국과 일본의 소듐냉각고속로 개념과 함께 제4세대 소듐냉각고속로 국제 공동 연구의 참조 개념으로 선정된 바 있다. 또한 2008년 10월에는 미국 GE-Hitachi와 한국원자력연구원 간에 기술 공급 MOU (PRISM Support Services Agreement)를 체결함에 따라 한국원자력연구원이 2009년 하반기에 PRISM 원자로와 국내 개발 소듐냉각고속로의 설계 특성에 대한 비교·분석 결

과를 제공하기로 하였다.

우리나라는 선진국과 함께 제4세대 소듐냉각고속로 국제 공동 연구에도 참여하고 있다. 제4세대 소듐냉각고속로는 Gen IV의 6개 개발 대상 노형 중에서 가장 국제 협력이 활발한 분야이다.

여기에는 우리나라를 비롯하여 미국(DOE), 일본(JAEA), 프랑스(CEA), 그리고 EU가 참여하고 있으며, 본격 수행을 위한 시스템 약정이 2006년 2월 발효되었다.

제4세대 소듐냉각고속로 국제 공동 연구는 총 5개의 세부 프로젝트로 구성되어 있는데 산화물 연료를 다루는 GACID 프로젝트를 제외하고, 핵연료분야(Advanced Fuel Project), 기기 설계 분야(Component Design & BOP

Project)는 지난 2007년부터 수행되고 있다.

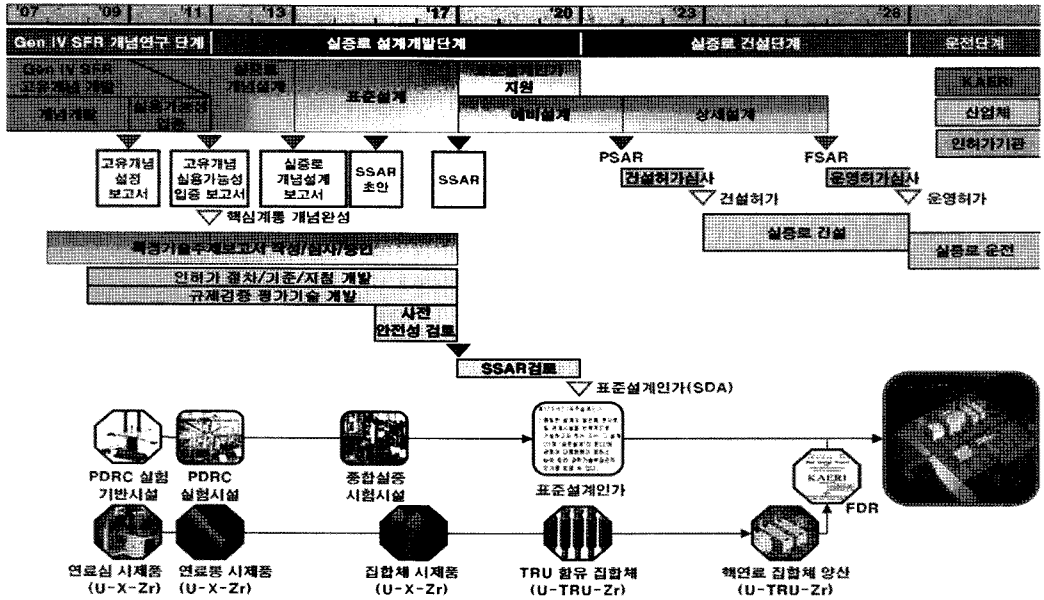
한편 시스템 평가분야(System Integration & Assessment Project)는 약정을 준비중에 있으며 안전 분야(Safety & Operation Project)는 지난 2008년 10월 협력 약정이 확정되어 서명이 곧 완료될 예정이다.

국내 제4세대 소듐냉각고속로 개발 장기 계획

1. 제4세대 소듐냉각고속로의 설계 특성

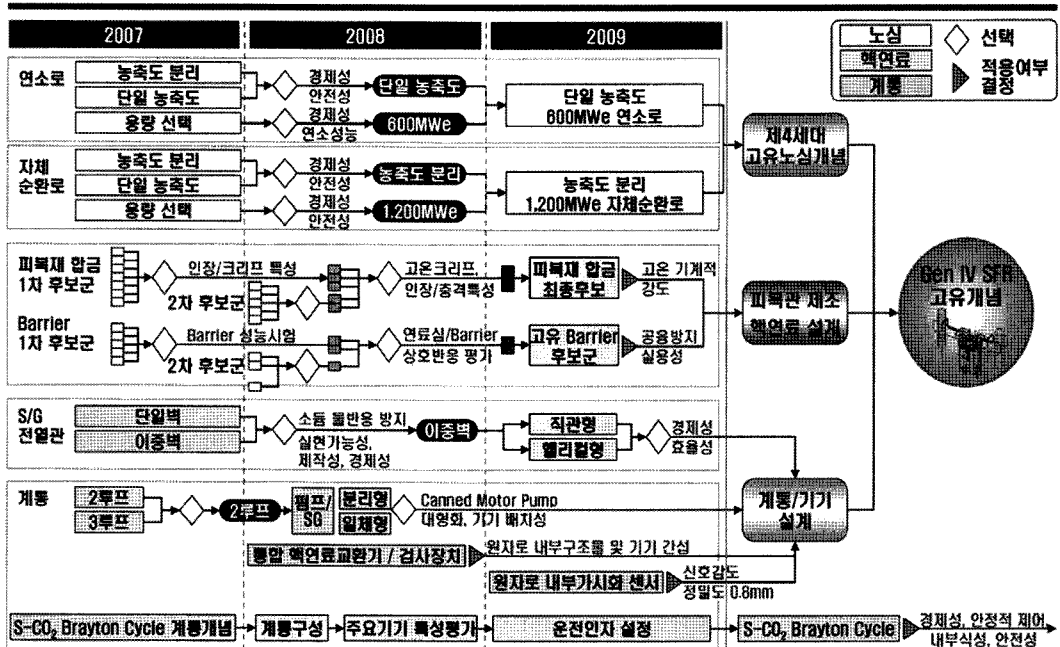
〈그림 8〉 1,200MWe 자체 순환로 계통 개념 현재 개념 개발중인 제4세대 소듐냉각고속로는 KALIMER-600의 원자로 개념의 특성을 적용하면서 4개 기술요건을 충족시키는 최적의 고속

소듐냉각 고속로 개발 장기 추진계획 - KAERI



〈그림 9〉 제4세대 소듐냉각고속로 개발 일정(안)

고유개념 개발을 위한 설계사양 선택



〈그림 10〉 제4세대 소듐냉각고속로 고유 개념 선정 과정

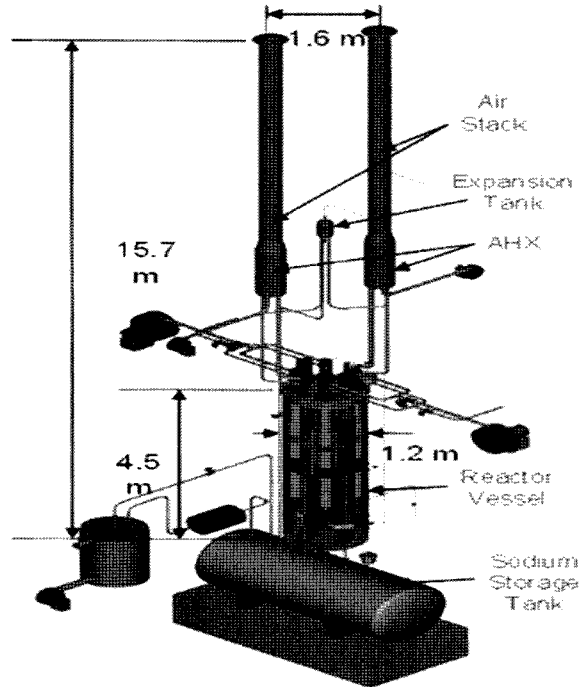
로 개발을 목표로 하고 있다.

향후 상용화를 위한 제4세대 소듐냉각고속로는 기본적으로 풀형의 U-TRU-Zr 금속 연료 장전 원자로로, 전력 생산을 위해 최적화된 자체 순환로는 전환비가 1.0이며 1,200MWe 출력의 대형 원자로이다.

또한 사용후연료 내의 TRU (TRU: Pu+MA) 연소를 목적으로 최적화된 연소로는 (Burner Reactor)는 전환비가 0.8 이하인 600MWe의 중형 원자로를 대상으로 한다.

국내에서 개발하는 제4세대 소듐냉각고속로는 기본적으로 블랭킷 제거를 통하여 핵무기의 원료가 되는 고순도 플루토늄의 생산을 원천적으로 봉쇄함으로써 핵확산 저항성을 획기적으로 높이고, 능동형 기기를 완전 배제하고 자연 대류 현상을 이용하는 피동 안전 계통 (PDRC; Passive Decay-heat Removal Circuit) 채택으로 고유 안전성이 확보되도록 설계하고 있다.

핵증기 공급 계통 (NSSS)은 일차 열전달 계통 (PHTS: Primary Heat Transport System), 중간 열전달 계통 (IHTS: Intermediate Heat Transport System), 그리고 증기 발생 계통 (SGS: Steam Generation System)의 대표적인 3개 열수송 계통으로 구성되며, 발전소 순효율은 38% 이상으로 이는 현재 국내외에서 상업 운전중인 원자력발전소에 비해 월등히 높은 효율이다. 일차 계통이 대용량 소듐 풀 내에 위치하고 있



〈그림 11〉 PDRC 성능 입증 장치

어 사고시 온도 상승을 최대한 지연시켜 주는 개념이다.

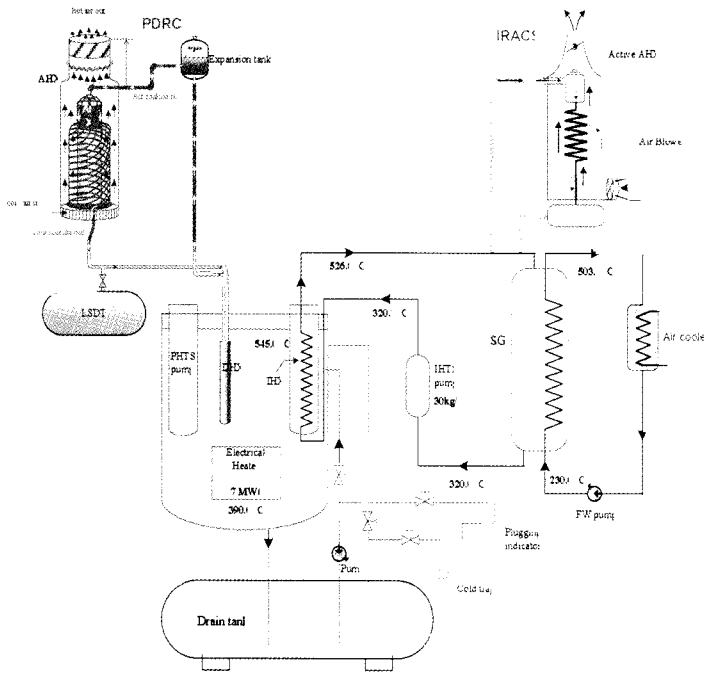
특히 국내 독자적으로 개발한 완전 피동 잔열 제거 계통 (PDRC) 설계 개념은 경쟁 국가인 일본의 JSFR, 프랑스의 SPX 및 유럽연합의 EFR에서 사용하는 DRC (Direct Reactor Cooling) 개념과는 다르게 신뢰성 높은 피동 안전 개념을 토대로 하고 있어 설계 기준 사고 발생시 안전 등급 비상 발전기 및 운전원의 조작이 필요하지 않는 독창적 개념이다.

소듐냉각고속로는 경수로와 달리 소듐-물 반응 사고 방지를 위해 중간 열전달 계통 (IHTS: Intermediate Heat Transport System)을 두고 있으며 이로 인해 경수로에 비해 경제성이 떨어

지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위한 방안의 하나로 국내에서 개발하고 있는 제4세대 소듐냉각고속로는 Mod.9Cr-1Mo강을 배관 재료 사용하여 배관 길이를 최소화하며 기기 단순화를 추구하고 있다. 또한 소듐-물 반응 사고 배제를 위해 이중벽 전열관 증기발생기를 채택하였고, 증기발생기 유형은 추가 연구 결과를 바탕으로 직관형 또는 헬리칼형 중에서 선택할 것이다.

에너지 전환 계통으로는 Rankine 사이클을 기본으로 하고 있으나 경제성 향상을 위하여 초임계 CO₂ Brayton Cycle을 옵션으로 고려하고 있으며 현재 이의 적용 가능성을 검토하는 단계에 있다.

제4세대 소듐냉각고속로용 핵



〈그림 12〉 종합 실증 시험 시설 계통도

연료는 고온, 고연소도를 목표로 650°C 이상의 고온에서 건전성이 유지되는 새로운 피복관을 개발중에 있으며 건식 재순환을 통해 사용후연료 내의 U과 TRU를 회수하여 금속 연료를 제조하여 충전하는 것을 전제로 하고 있다.

2. 제4세대 소듐냉각고속로 개발 로드맵

제 255차 원자력위원회 (2008.12.22)에서 확정된 미래 원자력 시스템 개발 장기 추진 계획상의 제4세대 소듐냉각고속로 개발은 궁극적으로 2028년까지 제4세대 소듐냉각고속로 실증로 건설·운영을 목표로 2011년까지 제4세대 원자로 설계 개념을 완료하고, 2017년까지 실증로 표

준 설계를 완료하는 것을 제시하고 있다. 이는 경쟁국인 미국·프랑스·일본 등의 개발 일정에 비해서는 늦지만 국내 기술능력과 사용후연료 취급 관련 국제 상황을 고려한 것이다.

제4세대 소듐냉각고속로 개발은 크게 3단계로 추진되며, 차기 단계 이행은 연구 진척도 및 주변 여건 등에 대한 충분한 검토를 통해 결정될 것이다.

1단계(2007~2011)는 제4세대 기술 목표를 만족시키는 소듐냉각 고속로 고유개념 개발단계로서 2011년까지 수행될 계획이다. 1단계에서는 2008년에 도출한 최적후보개념을 보다 발전시켜 각종 사양·제원 등을 구체화하여 최종 개발대상의 고유개념 원자로 형상을 완성할 계획이다.

2단계(2012~2020) 최종 건설 대상인 실증로 설계 개발 단계로서 고유 개념 원자로에 대한 개념 설계가 착수될 것이다. 실증로는 국내 전력 수급 계획, 사용후연료 저장 규모 등 시나리오 분석을 통해 300MWe급 이내의 소형 고속로를 고려하고 있다.

2단계에서는 2012년부터 PDRS 등 핵심 사항에 대한 실증 실험에 착수하고, 2015년 종합 계통 실증 장치를 완성하여 표준 설계 인가(Standard Design Approval)를 위한 각종 인허가 자료를 생산할 계획이다.

2단계에서 목표로 한 표준 설계 인가 획득이 이루어지면 부지 확보와 연계하여 3단계가 추진될 예정으로, 산업체 주도하에 상세 설계를 통해 우리나라 최초로 제4세대 소듐냉각고속로 실증로가 건설될 전망이다.

3. 제4세대 소듐냉각고속로 고유 개념 선정

제4세대 소듐냉각고속로 기술 목표를 만족하는 고유 개념 개발을 위하여 기개발한 KALIEMR-600 개념을 기본으로 노심, 핵연료 및 계통 측면에서 복수 후보개념을 2007년에 제시하였다.

도출된 복수 후보 개념은 용량, 노심 형태, 피복재 합금 후보, 피복재 Barrier 후보, 루프 수, 증기발생기 전열관 형식 등의 인자에 대한 평가를 통해 단일화된 고유 개념으로 발전시킬 수 있는 최적 후보 개념을 2008년에 선정하였다.

이렇게 선정된 최적 후보 개념은 2009년도에 계통 개념 구체화 등 전체 원자로 형상화 과정을 거친 뒤 2010~2011년 기간 중 실용 가능성 입증을 통해 최종 고유 개념으로 확정하게 된다.

4. 제4세대 소듐냉각고속로 성능 입증

제4세대 소듐냉각고속로 개발의 당면 과제는 경제성 향상과 안전성 확보를 동시에 해결하는 것이다. 이러한 측면에서 현재 개발 중인 제4세대 소듐냉각고속로에서는 경제성 측면에서 원자로 용기 크기 축소와 통합 기기 사용으로 원자로 계통 간결화, 중간 계통 단순화 및 소듐 배관 축소, 신개념의 가동중 검사와 고온

〈표 2〉 소듐냉각고속로용 금속 연료 개발 추진

| | 현 국제 수준 | 목표(2016년) |
|-------------------------------|---------------|-------------------------|
| • 최대 연소도(at%) | 20 | ≥20 |
| • 피복관 최대 조사량(dpa) | 200 (Mod.HT9) | 250(신��피복관) |
| • 피복관 최대 허용 온도(°C) | 650 (Mod.HT9) | ≥650 (신��피복관) |
| • 공용 방지를 위한 피복관 내면 온도 제한치(°C) | 650~700 | 제한치 없음 (Barrier 피복관 적용) |

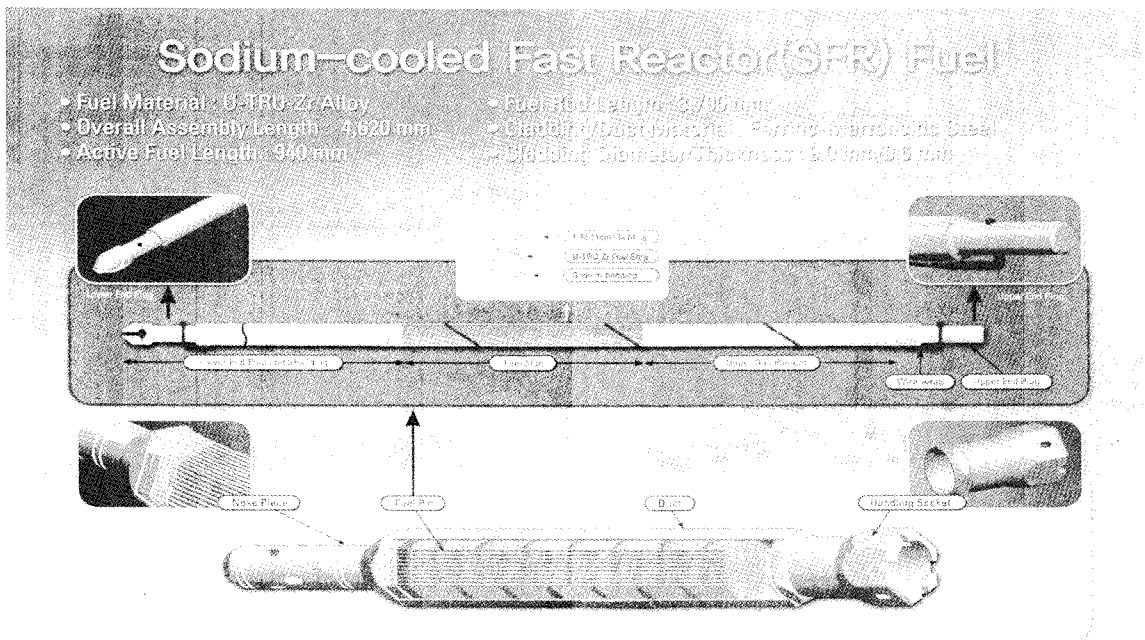
LBB(Leak Before Break)를 채택하고 있다.

동시에 안전성 측면에서는 우리 기술의 독창적 개념인 완전 피동 잔열 제거 계통 PDR의 성능을 입증하고, 소듐·물 반응 사고 방지·방호, 그리고 이중벽 증기발생기를 경제적으로 구현하는 것을 목표로 하고 있다.

이러한 개념을 실증하기 위해 우선적으로 PDR 성능 검증을

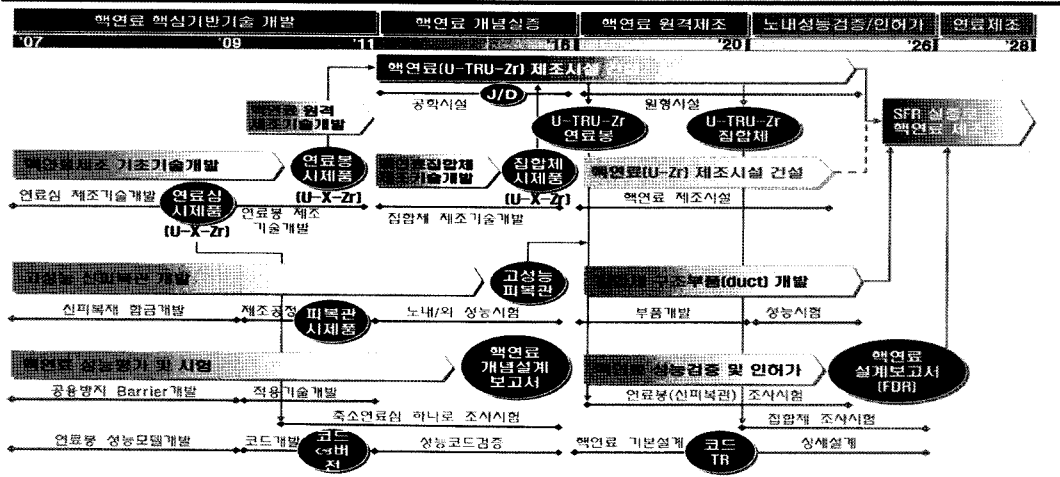
위한 대용량 소듐 열유체 시험 시설을 구축하고 있다. 2011까지 구축 완료를 목표로 하고 있는 이 시설에서는 PDR의 성능 확인 및 열유체 실험 자료 생산을 통해 계통 개념을 검증할 계획이다.

이 시설은 기개발 KALIMER-600 원자로 기준으로 체적비는 1/125, 높이비는 1/5, 노심 출력은 1.9MW로 실제 운전 조건(유체, 온도, 압력)을 모의할 수 있다. 이



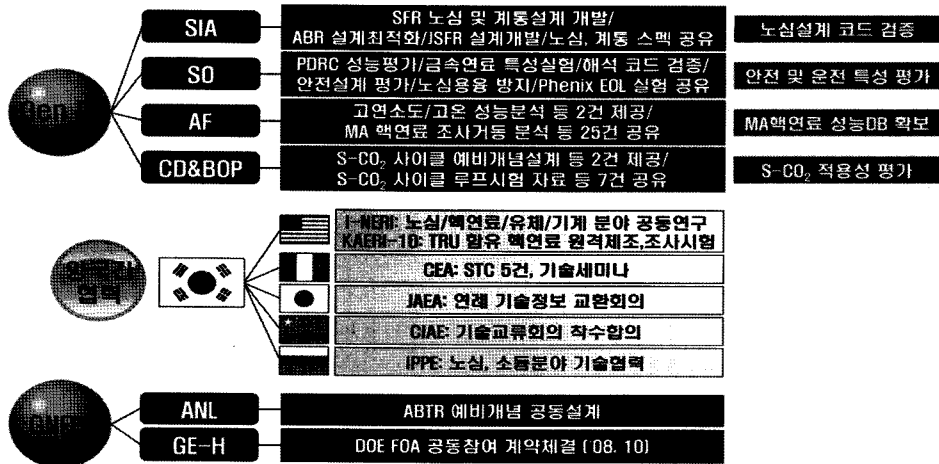
〈그림 13〉 제4세대 소듐냉각고속로용 금속 연료 형상

핵연료 연구개발 장기 추진계획



〈그림 14〉 금속 연료 개발 일정(안)

국제협력 추진현황



〈그림 15〉 국제 협력 대상 및 추진 현황

실험 시설을 통해 PDRC 계통의 초기 냉각 성능(안전적 자연 순환 유동 확보 검증), 증장기 냉각 성능(72시간의 안전 정지 유지 기능 검증), 원자로 용기 파손시 잔열 제거 성능과 잔열 제거 계통 루프 내 소듐 고화 방지를 검증할 계획이다.

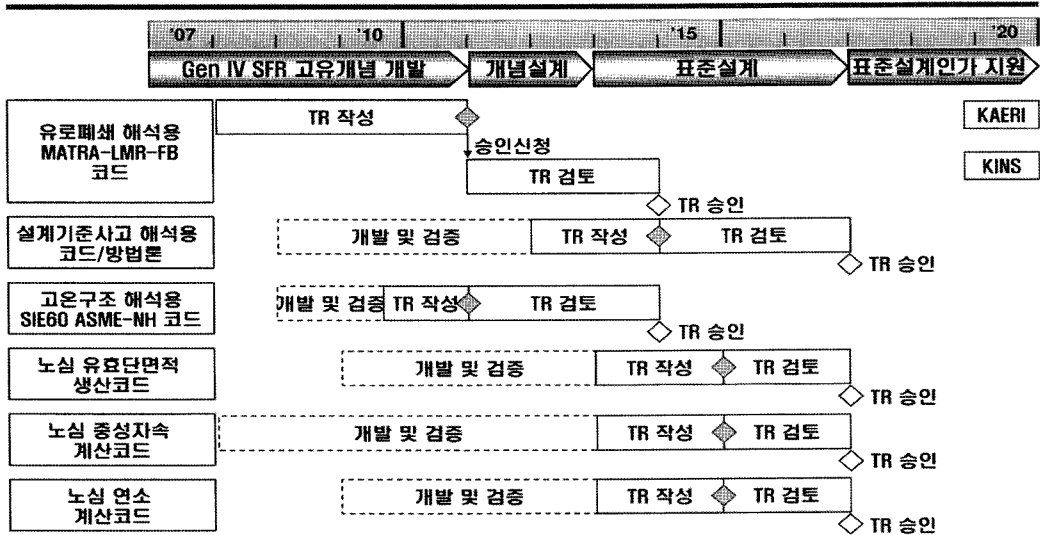
이후에는 BOP를 제외한 전체 계통에 대한 안전성 및 계통 성능 검증을 위해 2016년까지 종합 실증 시험 시설(ITL: Integral Test Loop) 구축이 계획되어 있다. 이 시설을 통해서 안전 계통 검증 실험, 계통 간 상호 영향 평가·검증 실험, 운전 및 제어 논리 검

증 실험을 수행하며 궁극적으로 표준 설계 인가 획득에 필요한 제반 실험 데이터를 제공하는 역할을 하게 된다.

5. 금속 연료(U-TRU-Zr) 개발

제4세대 소듐냉각고속로용 금

특정기술주제보고서 (Topical Report) – 작성계획



〈그림 16〉 특정 주제 기술 보고서(TR) 작성 계획(안)

속 연료의 주요 기술 현안은 마이 너 악티나이드(넵튬, 아메리슘, 퀴륨)가 포함된 금속연료 제조 기술의 실증, 고연소·고온 조건에서 건전성을 유지하는 피복관 개발, 그리고 금속 연료와 피복관 간의 공용 반응 방지 개념 개발이다. 이를 위해 <표 2>의 성능 목표를 충족하는 금속연료 개발을 추진하고 있다.

금속 연료 제조에 필요한 TRU는 사용후연료로부터 얻게 되는데 한·미 원자력협력협정에 따라 2014년까지는 사용후연료 취급이 어려우므로, 2016년까지는 실험과 공정 변수 설정을 통해 TRU 물질을 대체할 수 있는 휘발성이 강한 대체 물질(X)을 선정하여 집합체(U-X-Zr) 시제품을 제조할 계획이다.

이를 위하여 2011년까지 금속 연료봉(U-X-Zr) 및 2009년까

지 금속연료심(U-X-Zr) 제조 기술을 확립할 계획이다.

금속 연료 집합체 시제품(U-X-Zr) 제조 과정에서 기술의 진보와 제반 국제 환경하에서 TRU 공급 여부에 따라 금속 연료(U-TRU-Zr) 시제품을 제조하여 노내 조사 시험(국내 시설 미확보 시 해외 시설 이용)을 거쳐 실증용 고속로에 장전한다는 계획이다. 만일 실증로 가동시까지 TRU 물질 공급이 지연될 경우 실증로 초기 장전은 20% 미만의 농축 우라늄 금속 연료 장전을 고려하고 있다.

6. 추진 전략

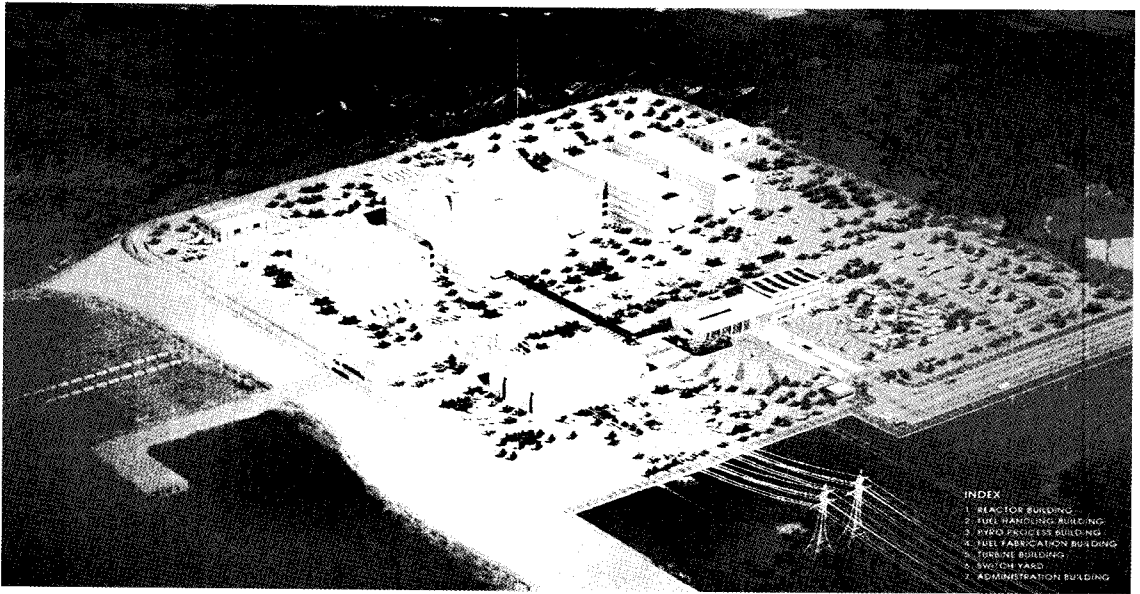
〈그림 15〉 국제 협력 대상 및 추진 현황

제4세대 소듐냉각고속로 개발은 선진국으로부터의 기술 확보

가 어려운 분야이므로 국내 확보가 필수적인 핵심 기술을 중심으로 자체 개발하여 국내의 한정된 자원을 최대한 효율적으로 활용하는 전략을 추구한다.

특히 고유 개념 등 국내 강점 기술 분야는(예: 완전 피동 잔열 제거 계통 등) 선택과 집중을 통해 경제성 향상 및 안전성 입증 목적의 신기술 중심으로 국제 경쟁력을 확보할 수 있도록 추진한다.

고속로 및 관련 핵연료 주기 개발을 위해서는 국제 원자력 이용의 투명성 확보가 필수적이므로 미국과의 협력을 활성화하며, 이의 일환으로 ANL 및 GE-H와의 협력을 강화해 나간다. 우리나라가 참여하고 있는 Gen IV 국제 공동 연구를 활용하여 결과물을 공유함은 물론 국내 개발 기술을 검증할 수 있도록 한다. 또한 현



〈그림 17〉 제4세대 소듐냉각고속로 배치 계획(안)

재 진행중인 일본, 프랑스와의 정기적인 기술 교류를 지속해 나가며, 고속로 실험로인 CEFR의 완성을 목전에 둔 중국과는 정기 기술 교류뿐만 아니라 구체적으로 CEFR을 이용한 협력을 적극 추진할 계획이다.

국내 관련 기관과의 협력 체계 구축을 통하여 궁극적으로 연구 결과의 실용화를 지향해야 한다. 이를 위하여 2007년부터 정기적으로 추진하고 있는 원자력 관련 기관(KHNP, KOPEC, KNF, 두산중공업) 및 인허가 기관과의 정기적인 기술 교류를 지속하며 나아가 공식적인 협력 채널 구축을 추진한다.

향후 표준 설계 인가 추진 및 최종적인 건설 인허가에 대비하여, 핵심 전산 코드 및 방법론에 대한 특정 기술 주제 보고서(TR: Topical Report)를 제출하여 KINS와의 협력하에 사전 검토·

승인을 추진함으로써 인허가 과정의 효율성을 기한다.

아울러 실증 대상 제4세대 소듐냉각고속로 개념 설계 단계부터는 원자력 산업체의 참여를 바탕으로 궁극적으로 산업체 주도의 실증로 개발 추진 동력을 확보해 나간다.

맺는말

소듐냉각고속로는 높은 에너지의 중성자로 핵분열 반응을 일으킴으로써 소모된 것보다 더 많은 핵연료 물질을 생산하여 경수로 대비 100배 이상 우라늄을 활용할 수 있다. 또한 독성이 매우 높아 관리가 어려운 장수명 핵종을 반감기가 짧거나 안정된 핵종으로 효과적으로 변환시킬 수 있어 방사성 독성 감소 기간을 1/1,000로 줄일 수 있다.

아울러 소듐냉각고속로는 경수

로에서 타고 나온 사용후연료를 재순환하여 연료로 사용하므로, 고준위 폐기물량을 감축하여 처분장 면적을 1/100 수준으로 대폭 축소할 수 있는 획기적인 사용후연료 관리 기술이라 할 수 있다.

원자력은 '제3의 불'로 인류에게 선보인 이래 핵무기와의 연관성, 그리고 일련의 사고 등으로 침체를 겪다가, 이제 20세기의 소용돌이를 넘어 다시금 인류에게 새로운 가능성을 열어주고 있다.

미래의 혁신적 원자력 기술을 직접 개발한다는 것이 결코 쉽지 않은 않다. 그러나 지난 50년간 불모지의 한국에서 원자력 부흥을 일궈낸 것처럼 또 다른 원자력 50년을 개척해 나가는 것이 후손들에게 풍요로운 사회를 물려줘야 하는 우리 세대의 책임일 것이다. ☉