



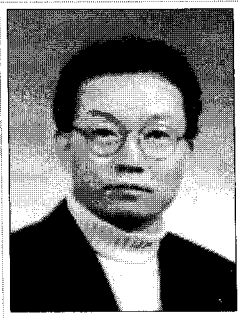
CAPRI

고등원형로연구센터

- 설립 경위와 향후 추진 방향 -

서균 렬

서울대학교 원자핵공학과 교수



극저용 초소형로 BORIS 20³

18세기 산업 혁명 이후 대도시의 출현은 대량 소비에 대한 대량 생산과 생산 과정의 분업화를 불러왔다. 이를 바탕으로 생산, 분배와 소비는 대도시에서 집중적으로 이루어져 왔다.

근래에 이르러 그런 대도시들이 무질서하게 늘어나면서 환경과 사

회 분야에서 많은 부작용을 일으키고 있다. 이에 따라 여러 선진국은 집중된 대도시 인구나 자원을 정책적으로 분산시키고 있다.

또한 정보 산업이 급격히 발달하면서 사람들이 답답한 대도시에서 다시 여유로운 지방으로 이동하는 현상이 나타났다.

이러한 사회적 변화는 미래 전력 산업 구조에도 영향을 미칠 것이다.

우리나라 역시 대부분의 사회 간접 자본이 대도시를 중심으로 형성되어 있다.

현대 사회에서 발전의 근본이 되는 전력 부분도 마찬가지이다. 모든 전력 공급망의 중심에는 대도시가 존재한다. 발전소에서 대도시까지 대규모 송전망을 구축하여 전력을 공급하는 것이다.

이러한 전력 공급망 속에서 특히 대용량 전력 생산원인 원자력 발전

의 경우, 사회적 변화에 발맞추어 지역 전력망 기술을 정립하고, 분산형 전원 체계로의 전환을 보다 가속화하여 에너지 수급의 어려움을 해결할 필요가 있다.

지역별로 분산된 체제를 이용하면 각 수요자가 중앙의 전력망에 의존하지 않고 자율적으로 에너지 수급을 조절하여 국가 차원의 에너지 소비 효율을 높일 수 있다.

또한 전 세계적으로 집중형 대형 원전의 투자 위험과 환경 부담에 따라 청정 분산 에너지에 대한 관심이 증폭되고 있고 시장성도 매우 커지고 있다.

따라서 미국의 SSTAR나 일본의 4S와 같이 여러 선진국에서 액체금속을 이용한 소형 동력원 개발이 추진중에 있는 시점에서, 본 센터는 관련 연구를 통해 국내 기업들의 기술 축적을 이루어내고 세계 시장 진



〈그림 1〉 연구 개발 최종 목표

출 가능성을 높이려 한다.

이러한 사회적·환경적 변화에 대한 본 센터의 목표는 두 가지로 요약될 수 있다.

첫째는 원자력 발전로의 다변화이다.

이미 미국과 일본에서는 기존 대형 전력원으로서의 원자력에 대한 고민 뿐 아니라, 향후 원자력의 생존을 위한 원자력의 다변화를 위한 연구가 활발히 진행중에 있다.

미국의 경우, 국립 연구소 ANL을 중심으로 원격지 발전용으로 초소형 원자로 개발에 박차를 가하고 있다.

일본의 경우에도 민간 연구소 CRIEPI를 중심으로 미국 Alaska에 초소형 원자로를 건설할 예정에 있다.

우리나라 역시 한국원자력연구소를 중심으로 선박이나 해수 담수용 중소형 경수로 개발에 힘쓰고 있다. 하지만 분산 전력 공급용 발전로 개발에 대한 노력은 대용량 전력 공급용 발전로 개발에 비해 아직 미흡한 상황이다.

둘째는 원자력 발전의 지속을 위해 고준위 폐기물을 저감하는 신형 핵연료 주기와 맞물리는 고속로 개발이다.

현재와 같은 경수로 발전을 지속하는 경우, 세계적으로 방사성 폐기물 저장 용량 제한에 부딪쳐 수용할 수 있는 한도를 초과하게 되며, 원자력 산업 전체의 지속적인 발전을 저해하는 위협으로 다가오게 된다.

또한 전 세계적으로 활발히 진행될 신규 원전 건설을 고려한다면 사

용후연료를 재처리하지 않고 잔존 핵연료 물질을 재순환하지 않는 기존의 핵연료 주기하에서 안정적 연료 공급은 어려울 것으로 예상된다.

따라서 재순환 핵주기와 더불어 핵비확산성을 갖춘 고속로를 개발하기 위해 4세대 원자력 시스템 Gen IV와 혁신 원자력 시스템 INPRO 등의 국제 공동 연구가 활발히 진행되고 있다.

이에 국내외 관련 연구진을 중심으로 서울대학교 내에 「고등원형로 연구센터 CAPRI (Center for Advanced Prototype Research Initiatives)」를 지난 9월 1일 개설하였다.

본 센터는 1차적인 목표로 울릉도를 비롯한 국내 도서 지역의 전력 공급원으로 이용될 초소형 고속로의 개발에 초점을 두고 관련 연구를 진행하고 있다.

이를 위해 본 센터는 4가지 주력 연구 분야인 액체 금속 초소형로 계통 BORIS, 최적 모듈 가스 터빈 계통 MOBIS, 원전 방호 보조 건물 계통 PARIS 및 다학제간 통합 정보 체제 MATIS로 구성하였다.

먼저 디지털 공학 부문을 MATIS라는 도화지 위에 통합형 시뮬레이터 AQUOS와 전주기 최적화 정보 체제 ADIOS를 그리고, BORIS와 MOBIS 및 PARIS를 연결시켜 최적의 하나된 일체형 초소형 동력로라는 큰 그림을 그려 넣는

것으로 시작한다.

러시아 전투사 BORIS

경제성과 더불어 원자로의 안전성 확보는 액체 금속을 냉각재로 사용하는 초소형 고속로에서 중점적으로 연구되어야 하는 부분이다.

BORIS는 열유동 기반 실험 ALTOS와 부수로 유동 실험 LOGOS를 통해 얻어진 열수력 정보를 분석하고 종합한다.

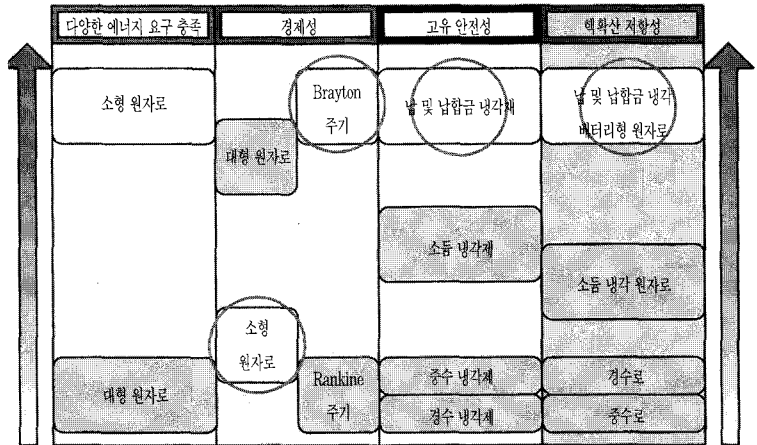
이를 바탕으로 기존의 열수력 전산 코드를 통해 상세 국부 열유동 해석이 가능한 액금로 개방형 집합체 단상 다차원 열수력 전산 모형 CALOS 개발을 연구 목표로 세웠다.

최종적으로 계통의 단순화를 통해 경제성을 향상시키고, 계통 설계에 필요한 핵심 기술 개발을 선도하고자 한다.

또한 초소형 고속로의 안전성과 유지 보수 편의성 증대를 위해 초장주기 운전 방식을 도입할 예정이다.

초소형 고속로의 1차적인 유치가 예상되는 도서 및 산간 지역은 다수의 운전원이나 정비 요원이 상주하기에 어려움이 있다.

따라서 본 센터는 터빈의 부하 신호를 감지하여 자발적으로 노심의 출력 밀도와 반응도를 조절하는 방식의 제어 기술 TICOS를 개발한다.



〈그림 2〉 참조 노형 선정 배경

운전 기간 중 원자로 계통 건전성을 위해 재료 연구 LICOS에도 앞장설 것이다.

따라서 지속적인 정비 또는 연료 교체를 위한 발전의 중단을 방지하기 위해 핵연료 출력 밀도를 낮추어 20년 동안 연료 교체가 없는 운전을 위해 노심 설계 기술 개발 PALOS를 추진하고 있다.

세계 원자력 산업에서는 안전성이 입증된 원자로만을 채택하고 있다. 이에 부합하여 본 센터에서 추구하는 원자로로는 피동 고유 안전 특성과 계통의 단순화라는 2가지의 철학을 가지고 탄생하였다.

펌프와 배관 등 기기를 배제하고 계통을 단순화함으로써, 자연 순환에 의존하여 냉각재 상실이나, 유량 상실과 같은 설계 기준 사고 발생 확률을 최소화한다는 전략이다.

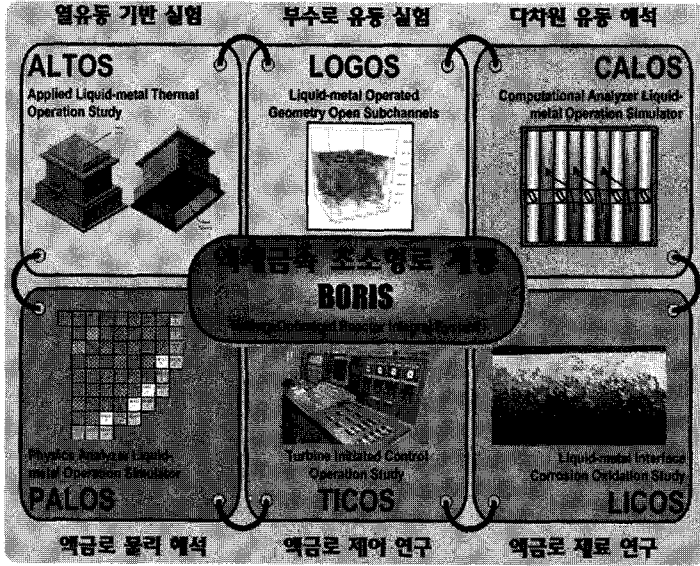
또한 핵비확산성을 확보하여 플루토늄의 생산을 최소화하고자 한다.

본 센터는 이러한 미래 지향적 주제와 체제 안에서 고도의 안전성을 확보할 수 있는 일체형 초소형 초장주기 고속 액금로를 개발할 계획이다.

본 센터에서는 국내 원자력 장기수급 전략에 의하여 2020년경 고속로의 도입이 계획된 시점에서, 선행 연구 경험과 축적된 기술을 종합적으로 분석하고 창의적인 개선을 거쳐서 새로운 액체 금속 고속 원형로 개념을 도출한다.

이는 에너지 자립 기반은 물론, 고유 기술 확보로 선진국과의 공동 연구 개발을 통해 수출 지향 원자력 산업 기반을 구축할 수 있다.

교토 기후변화협약과 전력 수요



〈그림 3〉 노심 계통 연구 개발

증가, 다양화에 따라 세계적으로 다수의 신규 원전 건설 계획이 발표되면서 핵연료 공급의 안정성에 대한 문제점이 제기되고 있다.

본 연구를 통해 개발될 원자로는 경수로에서 나오는 사용후연료를 재처리 과정 없이 다시 사용하므로 핵확산에 대한 우려를 미연에 방지하고, 냉각재로 액체 금속을 이용, 그동안 전력 혜택을 많이 받아오지 못한 지역으로 부지를 설정하기 때문에 에너지 자립, 국민 수용성 측면에서 큰 이점이 있다.

독일 수학자 MOBIS

본 센터에서는 미래형 원전 핵심 기술 중 하나인 집적형 동력 변환

계통 개발에 주력하여 초임계 이산화탄소 Brayton 주기를 실증하기 위한 대형 실증 실험 설비를 구축하고, 고효율 열역학 주기 개발을 선도한다.

차세대 고효율 열전달을 위한 작동 유체로 현재 초임계 이산화탄소가 주목 받고 있는데 신개념 열교환기 개발에도 박차를 가하고 있다.

여타 생산 설비와 마찬가지로 원자로의 경우에도 대형화된 설비가 전체 효율성 측면에서 더 우수한 것은 사실이다.

초소형 원자로의 경우 대용량 발전소에 비해 경제성이 떨어지는 문제점이 있다.

현재 이 문제를 해결해 줄 열쇠로

가장 주목되는 분야는 기존의 증기 기반 Rankine 주기에 비해 높은 열효율이 기대되는 초임계압 이산화탄소 Brayton 주기를 이용하는 2차 계통의 개발이다.

기존 Rankine 주기는 약 35% 수준의 열효율이 최대값으로 알려져 있다. MOBIS에서는 이러한 상변화를 거치지 않고, 초임계 유체를 이용하여 45% 이상의 열효율을 기대할 수 있는 Brayton 주기 연구 LOBOS를 수행한다.

열역학 효율의 이점은 발전소를 소형화하면서 수반되는 경제적 손실을 충분히 상쇄하고도 남는다.

이미 일본과 미국에서 초임계 이산화탄소를 이용한 재압축 Brayton 주기 개발에 많은 투자가 이루어지고 있다.

본 센터에서도 초임계 영역에서의 이산화탄소 열전달 특성 실험 PATOS가 진행중에 있다.

또한 계통의 효율을 확보하기 위해 필수적인 고효율 열교환기 성능 실험 SOLOS와 POLOS, 계통 내 다양한 형상을 흐르는 초임계 유체의 다차원 유동 해석 NOMOS를 추진하고 있다.

마지막으로, 고효율 초소형 가스 터빈 GATOS 개발에 박차를 가하고 있다. 특히 터빈 개발 분야에서는 용량은 훨씬 크지만 기존 화력 발전에 사용중인 극초임계압 동력 변환 상용 기술을 바탕으로 소용량

핵심 기술을 확보할 예정이다.

이를 통해 그간 원자력 교육에서 1차 계통이나, 격납 계통에 비해 상대적으로 취약한 터빈 계통 개발 인력 양성에 일대 전기를 마련할 계획이다.

트로이 왕자 PARIS

격납고 내부 구조물은 시공시 조립, 설치 및 해체 등의 공정이 필요하다.

핵증기 공급 설비 주요 기기는 모든 내부 구조물 공사가 완료된 후 반입 설치가 가능하다. 미국 AP1000의 경우 내부 구조물 전체가 철재 콘크리트 구조 형식으로 설계함으로써 일체식 모듈로 시공 계획을 수립하고 있다.

발전소 배치는 계통 구성, 안전성, 구조 해석 등 원전 설계의 모든 요소가 영향을 미치기 때문에 각각의 요소를 모두 만족시키는 최적점을 도출하기가 매우 어렵다.

그러나 원전의 경제성이 원자력 산업의 사활을 좌우하는 현실에서 원자력 발전의 경제성이 그 어느 때보다 강조되고 있다.

따라서 PARIS에서는 안전 계통 SOFOS, 방호 계통 CAPOS 개발은 물론, 1차 계통 BORIS와 2차 계통 MOBIS를 연계하는 AEROS를 통해 발전소 구조의 최적화를 수행하고자 한다.



〈그림 4〉 동력 변환 연구 개발

최적화의 일환으로 건설 현장, 발전소 운전원 의견 등을 수렴하여 건설성, 운전성, 경제성 향상 항목 등을 도출하여 검토할 계획이다.

특히 본 센터가 추구하는 액금로는 냉각재가 경수로에 비해 무겁고, 자연 순환에 의지하는 안전과 방호 계통이 일체형 협소 공간에 설치되어 작동해야 하는 설계 요건을 만족해야 하므로 기존의 원전에 비해 면밀한 지진 하중 설계 등이 필요할 것으로 예상된다.

또한 내부 및 외부 사건 확률론적 안전성을 분석하고, 발전소 유지, 보수, 그리고 핵연료 재장전 등에 관해 종합적으로 고찰할 예정이다.

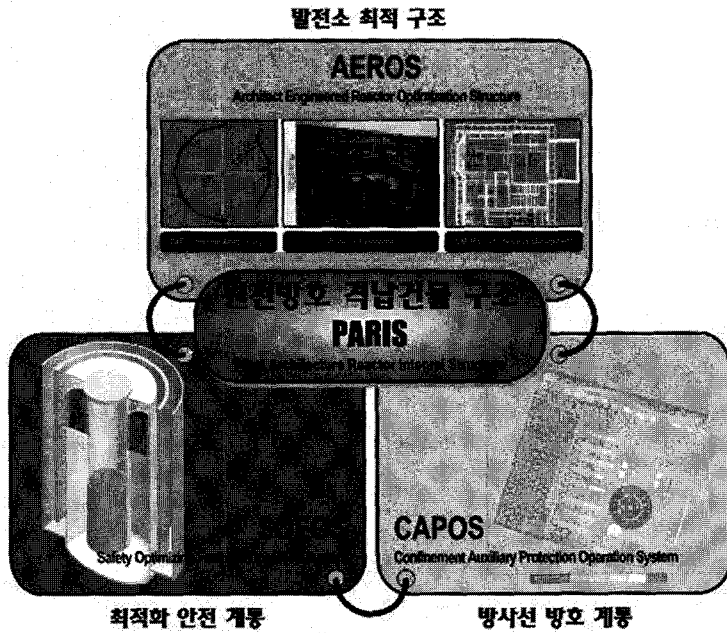
결론적으로 원전 방호 격납 건물 PARIS에서는 1차 계통 BORIS, 2

차 계통 MOBIS의 최적 배열과 통합 구조, 안전 해석을 다학제간 연계 체제 MATIS와 맞물려 수행할 계획이다.

프랑스 화가 MATIS

원전 연구 개발에는 다수 기관의 참여가 필연적이다. 하지만 기관별 개발 환경은 연구 범위에 따라 성격상 차이가 있게 마련이고, 이러한 현실적 차이점은 설계 제작과 관련된 제반 사항을 일괄적으로 처리하고 관리하는데 문제점으로 지적되어 왔다.

종래의 혼선과 중복 작업을 피하기 위해 본 센터에서는 전자 정보 협업 체제의 필요성을 인지하고



〈그림 5〉 원전 격납 연구 개발

BORIS, MOBIS, PARIS의 밑그림에 필요한 다학제간 통합 정보 체제 MATIS 개발을 제안하였다.

이를 통해 보다 효과적이고 능률적인 일체형 원자로 개발 사업의 진행이 가능할 것으로 기대된다.

본 센터의 주력 연구 분야 중 하나인 통합형 모의 체제 AQUOS는 첫째, 3차원 전산 설계를 통해 2차원 도면을 통한 형상 파악의 어려움과 설계 과정에서 발생하는 대량 도면 작업을 획기적으로 줄인다.

둘째, 발전소 전체 형상을 미리 가상 공간에서 건설해 보고, 설계 단계에서 발생할 수 있는 기기의 간섭 등을 확인한다.

셋째, 설계 형상 연동 다차원 전

산 해석을 통하여 설계자와 제작자에 따라 발생하는 설계 오류를 미리 방지하여 자원 소모를 최소화한다.

또한 전주기 최적화 정보 체제 ADIOS를 구축하여 통합형 모의 체제에서 통합하는 전 과정을 최적화한다.

그리하여 시간과 경비의 절약은 물론, 연구 참여자 모두가 최신 정보를 언제 어디서든 열람할 수 있게 한다.

남국의 섬 CAPRI

본 센터는 각 분야 국제 수준의 연구실과 인력을 선발하여 기초 연구의 발전과 대학 연구의 활성화에

매진한다. 또한 국제 회의 참석과 기술 자문 위원회를 통해 다자간 협력 체제를 구축하고, 지구촌 초소형 고속로 기술 개발을 선도한다.

디지털 원전 공학을 통해 연구 분야 간 유기적 전자 협업을 실현하며, 창의적 연구 개발과 창조적 인재 양성에 기여한다.

1973년 석유 파동 이후, 최대의 에너지 위기를 겪고 있는 현 시점에서 원자력의 경제성은 대용량 발전의 틀을 벗어나서도 충분히 경쟁력을 가질 수 있게 되었다.

따라서 화력과 전력 생산 원가 비교 경쟁은 더 이상 의미가 없으며, 현재 진행되고 있는 기술 발전은 원자력의 효율과 안전을 획기적으로 상승시켜 줄 것으로 기대한다.

또한 사회적 관심 속에서 올 2월부터 본격적으로 발표된 기후변화 협약은 원자력의 미래를 확고하게 변화시킬 것으로 예상하고 있다.

이는 신규 원전 건설을 중단했던 미국과 유럽 등에서 다시 원자력 사업을 가속화 하는 계기를 마련하게 했다.

TMI와 체르노빌 사고로 비롯된 원자력의 겨울이 끝나간다. 원자력은 안전성에 대한 대중의 우려와 이에 따른 정책적인 후퇴 속에서도 30 여국에서 세계 전력의 약 16%를 공급하며, 인류 공영에 기여해왔다.

특히, 원전 운영 면에서 우리나라

라가 세계를 선도하고 있음은 대단히 고무적인 일이라 아니할 수 없다.

이제 작지만 강한 우리 핵심 기술로 태평양과 인도양을 가를 준비에 들어가야 한다. 혹독한 겨울을 지나고 다시 피어나는 들꽃처럼 원자력은 화석 연료 불안정과 환경 위기는 시대의 흐름 속에서 그 진가를 발휘할 것이다.

원자력의 선택은 21세기 지구촌 인류 생존의 기회를 선사할 것이라는 신앙으로 우리 모두 지속적인 자기 성찰과 개발이 필요한 시점이다.

여기는 남국의 섬 CAPRI, 우리는 2020년 20년 주기, 20MWth 출력, 20개월 건설 원형로 BORIS 203 원천 기술 개발이라는 대명제 아래, 변화하는 자만이 세상을 바꾼다는 좌우명으로 현재에 안주하지 않고 지속적으로 갈고 다듬어 나아가갈 것이다.

항상 변화하는 사회적 물결을 타고 약진하는 원자력, 그 선두에 설 것이다.

개설된 지 불과 2개월, 비록 작지만 님의 지혜가 골리앗의 덩치를 이길 수 있다는 믿음으로 연구진 모두가 하나로 응집하여 온난화에 맞서 아름다운 지구 구석구석 불 밝히는 새천년 원자력 중흥의 선두에 나아가야겠다.

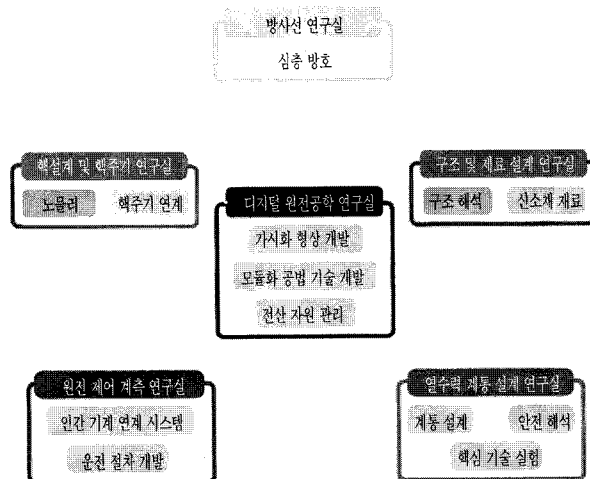
국내외 연구진의 적극적인 관심과 참여를 부탁드립니다.

통합형 모의 체제



전주기 정보 기반

<그림 6> 정보 공학 연구 개발



<그림 7> 연구 개발 추진 체제