



핵비확산형 핵변환 신기술 : PEACER



황 일 순

서울대학교 원자핵공학과 교수
hisline@snu.ac.kr

약력 : 서울대학교 원자핵공학 학사
한국과학원 기계공학 석사
M.I.T. 핵재료공학 박사
전 한국원자력연구소 노심계통연구실 연구원
전 미국 Atmospheric and Environmental
Research Inc. 연구원

갑자기 우리나라의 원자력 프로그램에 세계의 이목이 집중되고 있다. 이렇게 꼬이게 된 이유를 우리 고교시절의 추억에서 찾을 수 있다. 태도가 좋지 않은 학생의 짝이 되면 단연 모범 학생이 되어야 한다. 그렇지 않으면 선생님의 감시의 눈길을 자주 받아 작은 일에도 혼나기 마련인 것이다. 요즘 원자력은 안전성, 폐기물 문제에 이어 핵

확산 문제까지 일으키고 있으니 이 방법밖에 없나 하는 질문이 나오고 있다. 이상적인 에너지원이 없을까? 환경친화적이고, 안전하며, 충분하고 경제적인 그런 것 말이다.

국내의 환경론자들은 그 대안으로 태양열, 풍력, 조력 bio-mass 그리고 지열을 포함하는 신 재생에너지를 개발하자고 한다. 신 재생에너지란

새로운 것이 아니다. 태양에서 일어나는 핵융합의 빛, 그 태양열로 생기는 바람, 핵융합으로 생겨난 질량, 햇빛으로 자란 식물 그리고 지구속의 방사성 동위원소의 붕괴열이다. 그러므로 모든 에너지는 자연속의 원자력이거나 그 파생물이다.

국토가 좁고, 인구가 많은 우리나라에서는 이러한 자연속의 원자력과 그 파생물만으로는 턱없이 부족하다. 그러나 인공적으로 원자력을 자손만대에 지속적으로 사용하려면 트리마일, 체르노빌 등의 사고, 만년 이상의 관리를 요하는 장수명 방사성폐기물, 최근 불거진 핵확산 문제

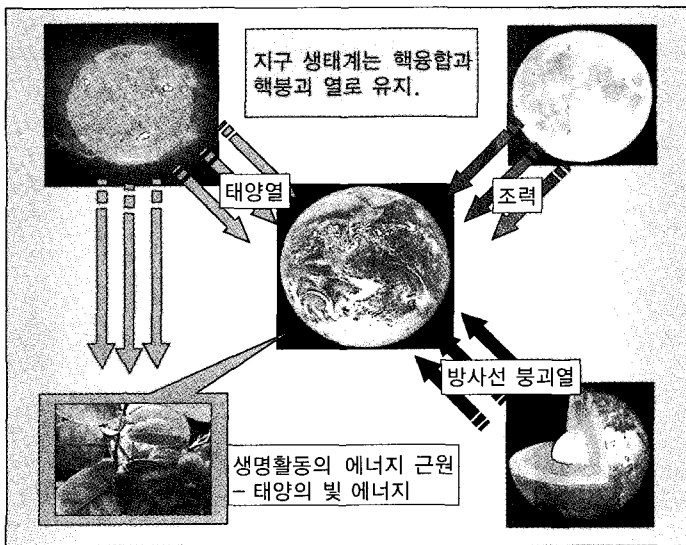


그림1. 지구를 유지하는 원자력의 여러 가지 모습



까지 해결해야 한다. 미래의 핵융합도 안전성이거나 장수명폐기물 문제에서 완전히 자유로울 수 없다. 이러한 문제를 모두 풀 수 있을까? 서울대학교의 한 구석에서 핵비확산형 핵변환기술개발로 조용히 그 희망을 다지고 있다.

핵변환(Nuclear Transmutation) 기술이란 핵 반응을 이용하여 한 핵종을 다른 핵종으로 바꾸는 방법을 말한다. 이로써 장수명 핵종을 단수명 핵종, 즉 중저준위폐기물로 바꿀 수 있다(그림 2참조). 원자력발전소에서 타고남은 핵연료봉속에는

반감기가 수천 년에서 수십만 년에 달하는 장수명 Actinide핵종이 1%정도 들어있다. 이들을 골라내어 에너지가 높은 고속중성자와 반응을 시키면, 핵분열을 일으키고 단수명의 핵분열생성물로 변환된다. 다시 핵분열 생성물 중에서 두 가지 장수명 핵종만을 골라낸 후 에너지가 낮은 열중성자와 반응시키면, 포획반응으로 방사능이 없는 핵종으로 변환된다.

이와 유사한 핵변환 개념을 약 20년 전에 미국 Argonne 국립연구소에서 처음 제안하였으나 장수명의 방사성 핵종을 골라내는 분리 작업은 핵확산의 위험을 수반한다는 이유로 미 정부의 반대에 부딪힌 상태에 있다. 그 후 프랑스와 일본의 노력은 냉각재로 쓰던 액체 나트륨의 화재로 난항을 겪었다. 이 모든 문제에 대한 해결방안을 산업자원부의 지원 하에 서울대학교 핵변환에너지연구센터에서 개발하여 PEACER (Proliferation-resistant, Environment-friendly, Accident-tolerant, Continuable and Economical Reactor)로 명명된 국내특허를 취득하였다.

그림 3 참조에 개념을 보인 PEACER 기술은 납과 비스무스를 반반씩 섞으면 섭씨 125도 이상에서

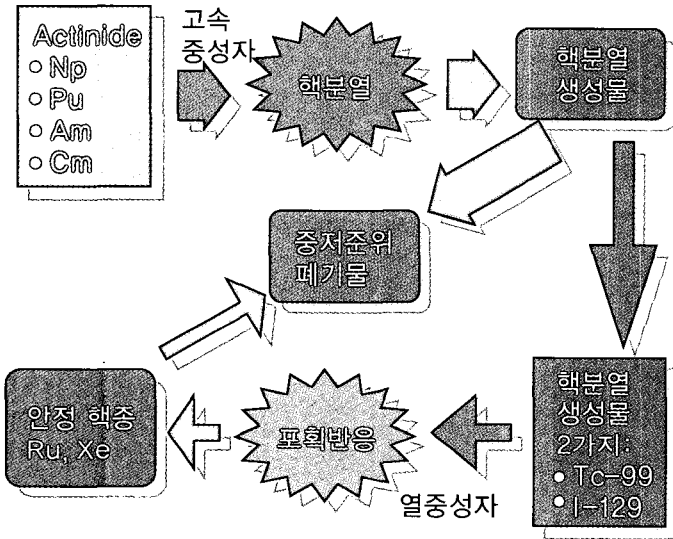


그림2. 핵변환반응을 이용하여 장수명 Actinide 핵종 및 2가지 핵분열생성물을 단수명 중저준위폐기물로 안정화하는 과정

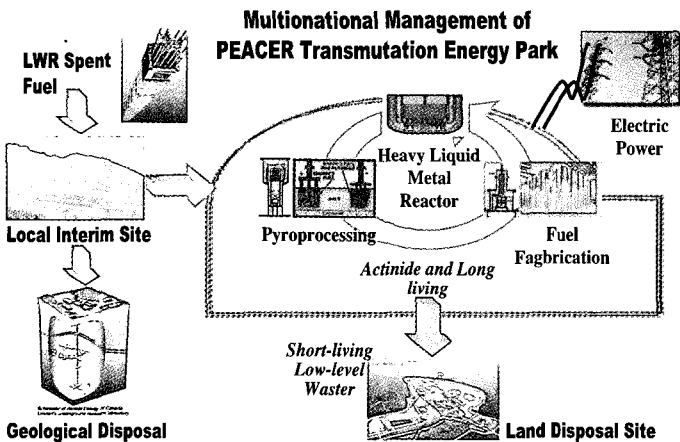


그림3. 무거운 액체금속냉각재와 고방사능 분리공정을 이용하여 사용후핵연료를 핵변환하는 핵비확산성 PEACER의 개념

액체가 되어 핵변환 원자로의 이상적인 냉각재가 된다는 점에 착안하고 있다. PEACER 내부에서 고속중성자와 열중성자를 만들어 내어 핵분열과 포획반응을 함께 진행시킴으로써 수백 년의 관리를 요하는 중저준위폐기물만을 방출하여 환경친화성(Environment-friendliness)을 갖는다는 과감한 목표를 세웠다.

여기서 무엇보다도 핵비확산성 (Proliferation-resistance)의 확보에 최우선 순위를 두고 기술적 빚장과 제도적 방책으로 핵물질이 샐 틈을 막았다. 핵종의 분리시설은 외부와 단절시키고 모든 단계에서 극도로 높은 준위의 방사능을 수반시켜 사람의 접근을 차단하고 전 공정을 실시간으로 투명하게 감시하여 플루토늄과 같은 민감한 핵물질의 유실을 원천적으로 봉쇄한다. 그림3의 PEACER를 다국 공동체가 투자 및 운영하는 국제에너지 공원화하여 국가간 상호감시체제로써 핵물질 전용도 예방한다. PEACER 내의 고속중성자로써 천연우라늄도 핵분열시킬 수 있으므로 우라늄-235를 농축하여 태우는 현재 원자로 보다 백배이상의 자원 지속성(Continuity)을 가지고 농축이 불필요하여 더욱 핵비확산적이다.

PEACER의 핵변환과정에서 발생하는 열을 납-비

스무스냉각재로 운송하여 열교환기를 통하여 스팀을 만들고 전기를 생산한다. 납-비스무스는 나트륨과 달리 화재를 일으키지 않고, 핵변환로의 펌프 등이 기계 고장을 일으켜도 충분한 자연대류로 안전하게 정지하여 사고허용성(Accident-tolerance)을 지녔다. 경제성의 평가는 아직 초보 단계이지만 사용후핵연료의 지하처분비용의 절감 효과를 반영할 때, 현존 원자력발전에 뒤지지 않을 것으로 보인다.

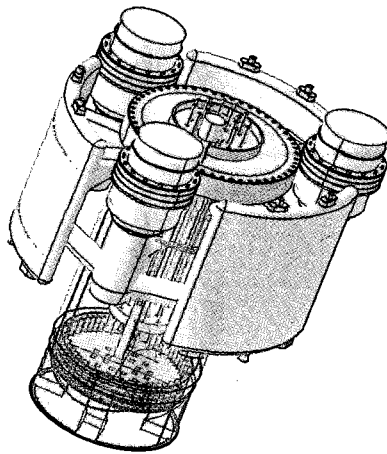


그림4. PEACER-300 일차계통의 3차원 CAD

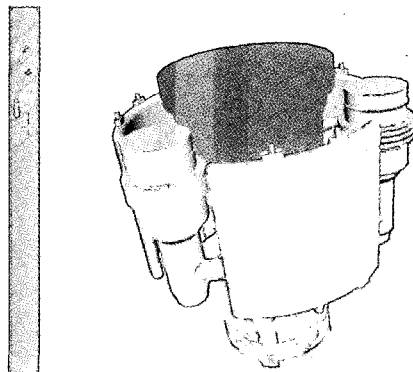


그림5. CATIA-ANSYS-VRML 연계로 3차원으로 보인 원자로용기의 응력분포

PEACER의 설계 및 개발은 3차원 CAD 및 전산 시뮬레이션의 이점을 결합하여 과거 엄청난 비용과 시간이 소요되는 원자력시스템 개발에서 탈피하고 혁신적인 접근법을 사용하고 있다는 점에서도 주목할 만하다. 설계개발은 거의 대부분 종이와 컴퓨터상에서 이루어지고 있다. 그림4에 3차원 CAD도구인 CATIA로 설계된 PEACER 납-비스무스 냉각계통을 보였다.

여기에 10가지가 넘는 원자력시스템 설계용 전산코드들을 3차원 CAD 와 연계하여 기하학적 형상은 CAD에서 한번 그려지면 각 원자력 해석코드에 입력데이터로 변환되며, 각 코드의 해석결과와는 다시 원래의 CAD 형상에 일치하는 데이터로 변환하여 3차원으로 보인다. 한 예로서 그림4의 PEACER 원자로 용기부분을 CAD에서



ANSYS 유한요소해석코드로 연계하여 그림5에 응력에 대한 해석결과를 3차원으로 보였다. 3차원결과 는 입체영상화 함으로써 곧 바로 가상현실이 된다. PEACER내부로 접근하면 그림6과 같이 몬테칼로법으로 해석한 핵연료의 출력 분포나 중성자밀도를 자세히 보여준다. 더욱 자세히 들어가면 그림7과 같이 핵연료집합체 하나하나의 성능을 보여준다.

이러한 CAD와 해석코드의 연계는 이미 역학분야에서 상용화되어 있으나, 이처럼 수많은 많은 코드들을 완전히 엮는 노력은 세계 처음이다. 또한 VRML이라는 open ware를 사용함으로써 연간 수천만 원대의 사용료를 요구하는 상용도구에 대비하여 중소기업 및 교육용 저비용 도구 (Solver-Interfaced Virtual Reality)을 개발하였다는 데도 큰 의미가 있다. 이 도구는 가상현실의 구현에서 공학적으로 정보의 정밀성을 높이는 효과를 가져 복잡한 장치에 대해 대중의 이해를 도모하는 데 사용도리 것으로 전망된다.

물론 직접적인 이득은 엄청난 양의 복합적 정보를 3차원으로 보여줌으로써, PEACER 설계상의 보완점을 구체적으로 찾아내고 종합적 최적화가 이루어지는 데 생긴다. 모든 설계 변동이 CAD로 일원화되고 해석의 연계가 자동화됨으로써 설계의 개선이 자유롭고 빠르고 진행되었다.

Solver-Interfaced Virtual Reality (SIVR)를 이용한 설계

개발과 병행하여 PEACER의 축소모형을 만들고 납-비스무스 냉각재를 넣어 안전성과 운영성을 실험한다. HELIOS(Heavy Eutectic Liquid metal loop for the Investigation of Operability and Safety)로 명명된 직경 5 cm의 배관으로 이루어져 있으며, 원자로의 핵연료봉은 전기로 가열된다. 출력 면에서는 약 일만 분의 일이나, 자연냉각 기능을 실증할 수 있도록 높이는 전장인 12 m로서 납-비스무스로 냉각되는 핵잠수함을 갖고 있는 러시아를 제외하면 세계 최대 규모이다. HELIOS의 설계 및 제작의 전 과정도 3차원 CAD로 이루어졌다.

향후 2년 내로 PEACER를 SIVR와 HELIOS로 설계를 실증할 계획이다. 모든 장점이 투명하고 객관적으로 실증되어 세계적인 호응이 일어날 것을 기대한다. 훗날, 장수명 방사성 폐기물을 처분하며 에너지를 생산하는 이상적인 원자력기술이 투명성속에 국제공동으로 구현됨으로써 기름 한 방울 없는 대한민국의 에너지 및 환경문제를 해결하는 동시에 핵비확산의 모범 국으로 우뚝 서게 될 것을 바라는 마음이다.

참고 : 본 기고문은 서울대 핵변환에너지 연구센터(김창효 소장)에서 2004년 8월에 발간한 산자부의 인력양성사업 제1단계 결과보고서에서 도출되었다.

기획 : 이병기 한국공학교육학회 회장
blee@snu.ac.kr



그림6. CATIA-MCNP-VRML로 보인 PEACER 내부의 출력 분포

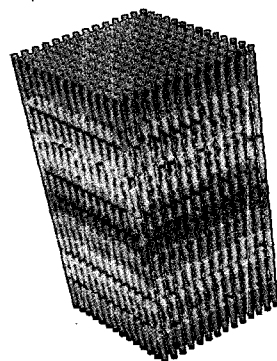


그림7. CATIA-CFX-VRML로 보인 PEACER 핵연료집합체의 온도 분포