원자력 르네상스를 넘어

Mujid S. Kazimi
MIT대 교수, ICAPP2005 미국측 대회위원장

최근 몇가지 요소들이 원자력발전을 과거보다 매력적이게 만들고 있다. 첫째 중요한 요소는 전 세계 에너지의 약 50%를 공급하고 있는 석유와 가스가격의 급격한 상승이다.

이러한 가격상승은 경제정책 입안자들로 하여금 석유와 가스가 한정적인 에너지원이라는 사실과 만일 이들이 주요 에너지공급원으로 남게 된다면 막대한 경제적 불이익을 줄 수 있을 것이라는 사실을 깨닫게 했다. 가스와 석유가격이 일관되게 지속적으로 상승하지는 않을 것이지만 향후 추세는 수요가 공급을 초과함에 따라 상승추세가 될 것이다. 전 세계적으로 향후 10~20년 내에 석유생산은 최고조에 달할 것으로 전망되고 가스 생산은 에너지 수요가 지속적으로 상승할 것으로 보여 최소한 금세기 안에 최고조에 달할 것으로 예상된다.

둘째 요소는 전 지구적인 환경보호 움직임이 증가하고 있는 것이다. 최근 전체 에너지 분야에서 이산화탄소 배출을 감축하기 위한 강한 의지를 담은 기후변화협약이 공식적으로 발효되었다.

원자력발전은 확실히 그러한 의지를 만족시키는 주요 수단이고 화석연료를 대규모로 대체할 수 있는 용량을 가진 유일하게 보증된 옵션이다. 재생에너지는 분산되고 간헐적인 에너지 특성상 제한된 용량을 가지고 있다. 이산화탄소를 지하에 격리하는 방안은 막대한 저장 공간을 필요로 하여 저장이 불가능할 수가 있고 이러한 목적으로 증명되지 않은 기술을 사용함에 따른 결과를 전망하기 어렵다.

세번째 요소는 세계의 석유와 가스 대부분을 공급하는 중동의 지정학적인 불안정성이다. 중동지역의 안정이 확실하게 정착되고 있지 않은 가운데 석유와 가스공급에 대한 중동 의존도는 현재보다 더 증가할 것이다.

이 3가지 요소와 함께 지난 25년간 기존 원전의 안전한 운영은 미국 원자력산업의 부흥을 촉구하고 원자력 확대를 다시 검토하도록 여러 가지 목소리들이 나오게 했다.

미국의 103기 원전은 현재 대부분 1970년부터 1990년 사이에 건설되어 매년 전력생산량 기록을 경신하고 있는데 지난 15년간 별도의 원전설비 추가 없이 미국 전력수요의 약 20%를 공급하고 있다. 지난 2004년에는 91.2%의 이용률 기록을 수립하였는데 이는 2002년 기록과 비슷한 역대 최고의 기록이다.

2004년 발전량은 2002년 최고치보다 1%가 높았다. 미국 원전 발전량이 1% 증가하면 신규원전 1기를 건설하여 운영하는 것과 동일한 효과를 거두게 된다.

원전소유자들은 기존 원전의 계속운전과 출력증강의 경제적 효과를 인식하고 있다. 미국에서 운영중인 경수로 가운데 46기가 계속운전 신청을 하여 이 가운데 30기의 원전이 계속운전을 승인받아 원래의 운영허가 기간인 40년에 추가로 20년을 연장하여 운전하게 됐다.

출력증강을 통해 지난 10년간 3GW의 용량추가를 승인 받았으며 이는 원자력발전량 3%를 추가한 것과 동일한 효과를 지닌다. 향후 10년간에는 5~10GWe의 용량이 추가될 전망이다.

이러한 추세가 지속될 전망임에 따라 현재까지의 대부분의 출력증강 방법과 같이 단순히 발전소상태 계산방법을 개선하는데 그치지 않고 보다 혁신적인 기술을 적용할 필요가 있다.

아울러 우리는 신규원전 건설비용을 감소하기 위해 100여 기 원전 건설 및 운영을 통해 쌓아온 경험을 사용할 필요가 있다.

원자로공급자들은 피동형 안전계통으로 인해 일반 대중 보호를 한층 강화하고 단순화된 발전소를 설계하는 데에 큰 진전을 이루었다.

이에 더하여 미국 원자력규제위원회(NRC)는 단순화되고 보다 경제성을 가진 노형설계를 인증하기 시작했고 신규원전 건설을 위한 보다 단순화된 규제절차인 통합인허가 절차(COL)를 이행하도록 했다.

미국에너지부(DOE)는 이러한 새로운 인허가 절차수행을 지원하고 있으며 통합인허가 절차를 수행하고 있는 세 개의 산업계 컨소시엄에 대해 50대 50으로 비용을 분담하는데 동의한 바 있다.

경수로 기술개발의 지속적인 성공의 주요 요소는 경수로 노심의 출력밀도를 높이는 것이다. MIT대는 현재 안전여유도를 유지하면서 출력밀도를 대규모로 증가시킬 수 있는 여러 가지 방안에 관해 산업체와 함께 연구를 진행중이다.

한가지 방법은 고체연료봉의 외부냉각 대신에 내외부 냉각이 가능하도록 환형연료를 사용하는 것이다. 이것은 체적대 연료비를 증가시켜 연료온도와 냉각재 열속을 크게 낮출 수 있을 것이다. 늘어난 열적 여유도는 연료집합체의 출력밀도를 증가시킬 수 있다. 실험중인 두 번째 방안은 열전달계수를 증가시키고 냉각재로 열유속을 제한하기 위해 나노입자를 추가하는 것이다. 현재까지 정체된 액체속에서 시험을 했으나 흐르는 물속에서 열전달을 개선하는 것에 대해 시험하고 있다.

세 번째 방안은 에너지 감속에 필요한 냉각재 양을 감소하기 위해 고체수소화물을 연료의 일부분으로 사용하는 것이다.

네 번째 방안은 연료와 냉각재를 분리하는 금속피복재를 세라믹피복으로 대체하여 중대사고시에 수소생성원을 제거할 뿐만 아니라 초과열유속으로 인한 피복재 용융 우려를 없애는 것이다.

이러한 개념들이 각각 적용되면 경수로의 출력밀도를 20~50% 정도 올릴 수 있을 것으로 예상된다. 만일 이러한 개념을 복합적으로 적용하면 향후 경수로 노형의 출력밀도를 배로 증가시키고 동일한 용기체적과 격납용기에서 높은 출력을 끌어낼 수 있으므로 향후 발전소 비용을 크게 줄일 수 있을 것으로 보인다.

이외에도 출력밀도 증가는 발전소 연료교체 횟수를 감소시켜 사용후연료량을 줄일 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이를 위해 연료연소도를 크게 증가시켜야 하며 그것을 위해 막대한 연구개발 노력이 필요하다.

경제성 강화를 위해 원자력발전은 열출력을 전기출력으로 보다 효율적으로 전환하는 것이 필요하다. 이것은 고온가스냉각로에 연결된 가스터빈을 채택하거나 과열증기 채택, 현재 석탄화력발전소에 사용중인 초임계수 기술을 채택하는 것이다. 발전소 효율 향상을 추진하는 데는 3가지 이유가 있다.

(1) 우라늄 소비율 감소로 보다 비싼 연료증식로 필요성 지연

(2) 발전량당 사용후연료량 감소로 영구적인 사용후연료 해결책이 개발될 때까지 사용후연료 처리와 저장부담을 감소시킴

(3) 발전비용 감소

이산화탄소 배출을 완화하기 위한 원자력의 역할은 단순히 가정과 산업용 전력공급원이라는 것을 뛰어 넘는다. 그것은 교통수단에 필요한 연료생산 에너지원이라는 의미를 가진다.

예를 들면 원자력발전은 수소생산에 사용될 수 있다. 오늘과 같이 수소생산을 위해 탄화수소의 사용을 지속하면 향후에 화석연료 감소와 이산화탄소 배출문제를 악화시킬 수 있다. 수소는 장기적으로 교통수단의 연료전지에 필요하다. 단기적으로 수소는 바위나 타르모래로부터 추출된 중유의 부가물로 열연소엔진에 사용될 수 있다.

또한 수소연료저장기술의 발전으로 첨두부하에 대비한 발전소 용량 증가를 위한 수단으로 발전소에서 수소연료전지를 사용하는 방안도 고려해볼 수 있다.

원자력의 기본적인 장점은 낮은 연료비이다. 1kg의 석유로 약 5kWh의 전기를 생산해내는데 비해 우라늄 1kg은 50만kWh의 전력을 생산해낸다. 화석연료는 이보다 더 많은 비용을 필요로 한다.

실제로 멀티우라늄 재순환이 연료주기의 한 부분이 되면 10kg의 우라늄광은 5백만kWh의 전력을 생산할 수 있다. 따라서 현재 이용가능한 우라늄광을 사용하면 향후 수세기동안 인류의 필요를 위해 사용할 수 있다. 또한 더 풍부하게 존재하는 토륨도 사용할 수 있다.

원자력연료 재순환과 관련하여 적합한 기술을 추진하는 다른 이유가 있다. 액티나이드 원소 재순환을 통해 장수명 방사선을 감소시킬 수 있다. 적절한 폐기물 형태를 선택하는 능력뿐만 아니라 폐기물에 함유되어 있는 액티나이드를 감소시키는 것은 지층처분을 위한 설계와 인허가를 크게 단순화시킬 수 있다.

따라서 사용후연료에서 핵분열물질을 분리하는 기술과 열중성자로나 속중성자에서 연료로 재순환을 촉진하기 위해 적합한 연료에 핵분열성 액티나이드 동위원소를 결합할 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다. 이것이 미국 에너지부(DOE) 최신 연료주기 프로그램(Advanced Fuel Cycle Initiative)의 주요 요소이다.

우리 센터에서 수행한 최근의 연구결과에 의하면 경수로 사용후연료로부터 액티나이드 분리수요가 1년에 20,000톤 정도인 반면 액티나이드 재순환이 경수로에서 이루어지던지 또는 신형속중성자로에서 이루어지던지를 불문하고 2050년까지 비핵원료물질의 액티나이드연료 처리 수요는 일년에 약 250톤 정도일 것으로 전망했다.

경수로에서 액티나이드 재순환이 빠르게 이루어질수록 전세계 사용후연료 액티나이드 누적물량은 줄어들 것이다. 그러나 무기급연료 생산을 위해 기술이 전용되는 것을 방지하기 위해 국제적으로 동의를 얻은 체제 내에서 다른 국가들에게 제공할 수 있는 일부 국가에만 집중되는 것이 필요하다.

원자력은 환영받지 못할 것 같은 곳에서도 매력적으로 보인다. MIT 대학의 기술혁신 잡지인 테크니칼 리뷰(Technical Review)지 2005년 5월호에는 WEC(Whole Earth Catalogue) 창간자인 스튜어트 브랜드(Stewart Brand)가 쓴 〈환경의 이단(Environmental Heresies)〉이라는 기고가 매우 흥미로운 전망을 담고 있다.

최근 많은 환경운동가들이 원자력발전이야말로 이산화탄소를 발생하지 않는 유일하고 신뢰성 있는 에너지임을 밝히고 있다.

여기에는 가이아 이론의 창시자인 제임스 러브록 교수와 그린피스 설립자인 마이클 무어 등이 있는데 브랜드는 원자력발전을 지지하는 환경운동가 대열에 합류했다. 브랜드는 최근의 그의 기고문에서 "향후 10년후에는 지구인구 성장, 도시화, 유전자 조작기술, 원자력발전 등 4가지 주요 분야에 대한 환경운동의 견해와 행동양식은 바뀔 것이다"라고 전망했다.

따라서 2015년에 개최될 ICAPP 국제회의에 이러한 탁월한 전망을 축하하기 위해 브랜드씨를 기조강연자로 초청하는 것을 제안한다.