

원전 레짐의 변화와 경수로 기술의 발전

박진희, 문지영, 이관수, 이은경

1. 서론

오늘날 원전 레짐의 주요한 기술 요소를 이루고 있는 것이 경수로 기술이다. 원자로 기술 발전사를 돌아보면, 발전사 초기인 1955년 무렵에는 원자로 모형만 100여 종에 이르고 있었다. 이런 상황은 1958년의 12개 종에서 원전 발전이 본격적으로 시작되는 60년대에는 중수로, 경수로, 가스로 등 불과 6,7종류의 원자로만이 상업용 발전소에 장착되었다. 이어 1970년대에 가동에 들어간 전 세계 140여기 원자로 중에서 10여기의 CANDU 중수로, 6기의 가스로와 3기 고속로와 소련형 흑연로를 제외하고는 모두 경수로로 알려졌다. 경수로 기술이 원자로 시장의 지배적인 기술이 되었던 것이다.

경수로는 어떻게 원자로의 지배적인 모델이 되었을까? Cowan의 연구에 따르면, 경수로는 전기 생산의 효율성이라는 측면, 안전의 측면에서 다른 원자로에 비해 기술적 우위성을 보이지는 않았다. 그럼에도 경수로는 지배적인 모델이 된 것은 미국의 원자로 기술 원조 정책에 의한 경수로의 유럽 확산 가속화, 이로 인한 경수로 기술 학습 능력의 증가, 대형 경수로 원자력 발전소 건설에 따른 경제성 향상 때문이었다. Cowan의 연구는 70년대까지 선형적인 발전을 보이고 있는 경수로 기술의 세계 시장 지배력을 거칠게 설명하고 있지만, 원자력 발전소 선진국들에서 원자로 노형 결정을 둘러싸고 벌어진 미시 정치를 보여주고 있지는 못하다. 미국, 영국, 독일과 프랑스에서 경수로 기술이 원자로 시장을 지배하는 과정을 들여다 보면 경수로 기술의 발전이 선형적이지 않았으며 경제성과 미국 정책 이외에 다른 요인들이 복합적으로 작동한 결과임을 알 수 있게 된다.

여기서는 미국, 영국, 프랑스와 독일에서의 경수로 기술 발전 과정을 비교해봄으로써 하나의 기술 체계모니가 어떻게 형성될 수 있는가를 보이고자 한다. 이들 4 개국에서의 경수로 기술 발전은 원자로 기술이 각 국가들의 원자력 발전 정책, 정책 관련 제도와 조직, 정책 주체들 간의 권력 관계, 정책 주체와 원전 산업과의 관계 등에 따라 상이하게 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 원자로 개발 초기에 어떤 노형을 선택했는가에 따른 기술의 경로 의존성도 또한 크게 작동하고 있음도 알 수 있다.

2. 플루토늄 생산과 전력 생산 사이에서: 적정 원자로를 찾아서 (1950-1958)

(1) 핵잠수함 동력 엔진에서 발전용 원자로로: 미국 경수로 기술의 초기 성공

이차 대전이 끝난 직후 패전국인 독일을 제외하고 미국, 영국과 프랑스에서는 저마다 핵에너지 이용을 위한 원자력 기술 개발 계획을 수립하게 된다. 맨하탄 프로젝트를 통해 가장 선두에 나선 미국은 종전 직후 핵분열 설비로서 원자로 기술 개발을 시작하였다. 시카고(현 아르곤국립연구소, ANL)와 오크리지(현 오크리지 국립연구소, ORNL) 두 곳에서 각각 진행되던 원자로 연구는 미국원자력위원회(AEC)가 정식 출범한 1948년 이후에 ANL이 중심이 되고 ORNL이 참여하는 방식으로 진행되게 된다. 1946년 프린스턴 대학의 유진 위그너가 오크리지에서 경수로의 원형이 되는 핵분열 설비를 구상 제작에 성공하였다. 이 설비는 핵분열 반응 시 방출되는 중성자를 각종 재료에 쬐여 재료의 특성과 변화를 연구하는 원자로 설계 연구자용 원자로였다.¹⁾ 이어 5월에 몬산토사가 주도한 상업용 발전을 목적으로 구상된 최초의 연구로

“Daniels Pile” 실험이 오크리지에서 시작되었으나 특별한 성과없이 1948년에 종료되었다.²⁾ 이들 초기 원자로 연구는 플루토늄 생산을 목적으로 한 것이었다.

이와 동시에 미국에서는 함선추진용 원자로 개발이 리코버에 의해 주도되고 있었다. 핵에너지의 함선 동력으로 활용한다는 실용적인 목적을 지향한 이 잠수함용 경수로 개발 계획은 리코버의 정치적 교섭력, 오크리지 원자로 기술 학교의 기술력이 결합하면서 1955년 노틸러스호에 장착되면서 성공적으로 마무리 되었다. 잠수함용 원자로는 끊임없는 진동과 좁은 공간 그리고 좌초와 전복의 위험 때문에 중력을 이용하는 안전장치를 활용할 수 없다는 문제점들을 극복해야 했었다. 리코버 지휘 하의 개발팀이 오크리지의 와인버그 등과 협력 하여 웨스팅하우스사와 계약하여 개발한 경수로는 가압형으로서 핵폭탄에 전용할 수 있는 92%농축 우라늄을 사용하는 것이었다. 와인버그는 개발 과정에서 전례없는 고온고압에서 작동하는 고농축 우라늄용 경수로에서 “예측할 수 없는 문제가 생길 수도 있으니” 소형 저출력 연구로를 먼저 건설해서 충분히 연구한 후에 실증로를 제작하자고 조언했다.³⁾ 그러나 리코버는 이러한 제언을 무시하고 바로 실물크기 실증로 한기를 제작하여 운영 실험하고는 바로 노틸러스호용 가압경수로 제작을 웨스팅하우스사에 주문하였던 것이다.

핵잠수함용 원자로 제작이 진행되고 있던 1953년 12월 아이젠하워는 “평화를 위한 원자력(Atom for Peace)” 구상을 발표하게 된다. AEC는 이 구상에 담긴 상용 원자력 발전소 건설에 나서기로 하고 이 발전소에 리코버가 제작한 고농축 우라늄 경수로를 사용하기로 한다. 발전소 부지는 전력회사로부터 제공을 받고 설비는 AEC가 담당하고 발전소 운용은 AEC 감독을 받는 방식으로 결정되었다. 이렇게 하여 1954년 9월에 시핑포트 원전 건설이 시작되어 1958년 5월에 원전의 전력망 연결이 이루어졌다. ⁴⁾

시핑포트 원전 착공 이후 AEC는 1955년 1월, 9월 그리고 1957년 1월 3차에 걸쳐 발전용 실증 원자로 프로그램 (Power Demonstration Reactor Program) 응모를 실시하였다. 프로그램의 공식적 목적은 각종 발전용 원자로의 R&D 정보를 획득하고, 원전 건설에 민간 설비회사와 전력회사의 참여를 도모하는 것이었다. 그러나 실제 이 프로그램이 지향하고 있던 것은 핵무기에 쓰일 수 있는 비싼 고농축 우라늄 연료를 대체할 수 있는 방안을 찾는 것이었다. 이 프로그램 하에서 연구용으로 선정된 원자로로 1차에는 가압경수로, 고속증식로, 흑연감속 액체나트륨 냉각로가 선정되었고, 2차에는 비등경수로와 유기물냉각및감속로가 선정되었다. 3차에서는 천연우라늄사용 중수로와 균질우라늄염 수용액 원자로(homogeneous)를 포함한 5개의 원자로 노형이 채택되었다.⁵⁾ 이처럼 다양한 원자로 노형들이 발전용 원자로 개량을 목적으로 연구되기는 하였으나 AEC가 원전 보급에 속도를 가하면서 두 개의 원자로가 우위를 점하게 되었다. 즉, 오크리지에서 실험하고, 미 해군이 변용한 웨스팅하우스 제작의 가압형 경수로와

1) ORNL The First Fifty Years, pp.32-34

2) 맨해튼 계획은 민간기업이나 대학이 당국의 감독 아래 각 연구개발 단지의 운영을 맡는 형태였다. 감독의 강도는 단지의 성격마다 달랐는데, 로스알라모스를 맡은 버클리대학의 개입은 서류상으로만 존재하는 허구에 가까웠으나, 오크리지의 각 설비를 운영하는 민간기업들은 나름 영향력을 행사할 수 있었다. 1947년 12월 유니온카바이드사가 오크리지 통합 운영 계약을 획득하여 1982년까지 유지하였다.

3) A. Weinberg, The First Nuclear Era: The Life and Times of a Technological Fixer (AIP Press, 1994), p.61.

4) 이후 여러 차례 개수를 거쳐 시핑포트원전은 저농축 우라늄을 사용하도록 변경되었다. 한편 1958년 11월 해군 내 리코버 지지세력이 염원하던 핵추진 항공모함 건조가 개시되어 1962.11에 엔터프라이즈호로 취역하였다.

5) W. Allen, Nuclear Reactors for Generating Electricity: US Development 1946-1963 R2116, RAND (1977)

ANL이 실험하고, 제너럴일렉트릭(GE)이 발전용으로 개량한 비등형 경수로가 그것이었다.

소련에 대하여 핵물질 확산을 방지하고자 하는 궁극의 목적을 지녔던 1953년의 원자력의 평화적 이용 정책은 미국 내에서는 AEC 중심의 발전용 원자로 보급을 가속화하는 동기로 작용하였고 이 과정에서 첫 발전용 원자로로 실증된 경수로가 유리한 지위를 누릴 수 있었던 것이다.

(2) 원자 무기와 에너지 확보를 위한 원자로를 찾아서: 영국의 가스 냉각로 개발

영국에서 원자로 건설은 원자 무기를 위한 원료물질, 플루토늄을 조달하기 위해 처음 결정되었다. 1946년 8월에 통과된 맥카흔법 때문에 영국이 원자 무기를 위한 우라늄과 플루토늄을 국외에서 조달하는 것이 어렵게 되었다. 당시 영국에는 우라늄 농축 시설도, 농축 우라늄을 만들 정도의 충분한 우라늄 광석도 없었다. 따라서 원자로 가동 후 발생하는 사용 후 핵연료로부터 플루토늄을 추출하는 것이 유일한 방법이었다. 이를 위해 1947년에 윈드스케일에 2기의 “영국 생산 원자로(British Production Reactor)” 건설이 결정되었고 1950년에는 제1기가 그리고 1951년에는 제2기가 정상 운전에 들어갔다.

윈드스케일 원자로를 위해 채택된 노형은 당시 영국에서 기술적으로 활용가능성이 가장 높은 흑연-가스냉각로였다. 당시 영국은 우라늄 농축 시설을 갖고 있지 않았기 때문에 미국에서 개발한 농축우라늄을 쓰는 경수로 개발을 고려할 여지가 없었다. 천연우라늄을 연료로 쓸 때 감속재로는 중수와 흑연이 가능한데 가격 요인 때문에 흑연로를 선택했고 감속재로는 고온에서도 중성자 흡수율이 낮은 이산화탄소가 선택되었다. 마지막으로 고려된 것은 연료 피복 물질이었다. 천연우라늄 연료의 피복 물질은 농축우라늄의 경우와 달리 중성자를 흡수하면 안 되고 고온에 견딜 수 있어야 했다. 여러 합금을 시도한 끝에 마그네슘, 알루미늄, 베릴륨 합금인 마그노스(magnox)가 적절한 것으로 결정되었다. 마그노스의 녹는 점은 650도이지만 520-550도에서 이산화탄소가 산화반응을 일으키므로, 마그노스 원자로의 최적 운전온도는 485도 전후였다. 원자로는 원자무기를 위한 플루토늄 생산이 주된 목적이었기 때문에 원자로의 열효율에 대한 고려는 많지 않았다.

1952년 핵실험에 성공하자 영국에서는 추가 건설될 원자로 설계에서는 핵무기용 플루토늄 생산과 전력 생산을 동시에 고려하기 시작했다. 전기-플루토늄 생산 가압형 원자로(pressurised pile producing industrial power and plutonium, PIPPA)는 윈드스케일 원자로의 기본조건, 즉 연료는 천연우라늄, 감속재는 흑연, 냉각재는 기체를 전제로 하는 것이었다. 불순물을 제거한 고순도 흑연 생산 기술이 개발되어 흑연의 감속 효과가 강화되었다. 단, 전기 생산을 염두에 두었기 때문에 윈드스케일 원자로보다 열흡수율을 높여야 했다. 그래서 가스 회전에 필요한 에너지 소비를 줄이기 위해 고압을 선택하여 가스 밀도를 높이는 방식을 채택했다. 그 때문에 전체 반응 설비를 둘러싸는 두께 2인치의 강철 용기 고압 용기가 설계에 추가되었다. AEA와 내각은 1953년에 PIPPA 원자로 설계를 최종승인하면서 이 원자로가 “플루토늄과 전기를 둘 다 생산하게 될...” 것임을 분명히 했다.⁶⁾

한편, 영국에서는 PIPPA 설계와 더불어 원자력 상업발전에 대한 실질적이고 본격적인 논의가 시작되면서 1955년에 원자력 발전소 건설과 관련된 10개년 계획인 “원자력 프로그램”이 마련되었다. 영국 정부는 증가하는 에너지 수요를 석탄으로 충족하지 못할 것이고 원자력 발전이 안정적인 에너지 수급을 가능하리라 보고 이 프로그램을 계획하였다. 이 계획에 따르면, 1965에 예상되는 전력수요 20.7GW 중 2GW가 12개의 원자력 발전소에 의해 충족될 것이었

6) Nuclear Empire, 169

다. 이 계획은 1956년 수에즈 위기로 석유의 장기 안정 공급이 불확실해지면서 원자력 발전 목표량을 5-6GW까지 확대하는 방향으로 수정되었다.

제1차 원자력 프로그램에 따라 1956년에 완공된 콜더홀 발전소는 서방 국가에서 최초의 상업발전소로 알려져 있으나 실제로는 플루토늄 생산이라는 군사적 목적을 여전히 우위에 놓고 있었다. 새로운 상업 발전소의 입지가 플루토늄 추출에 용이하도록 윈드스케이일 바로 옆으로 결정되었던 것. 그리고 콜더홀 원자로는 PIPPA의 원래 설계를 변경하여 보일러 효율을 줄이는 대신 플루토늄 생산에 더 용이하도록 설계된 것 등이 이를 보여준다. 원래 설계대로면 PIPPA의 전기 생산효율 기대치는 24.6%였는데, 실제 건설된 콜더홀 A 원자로 2기의 전기 생산 효율은 19.2%에 그치고 있었다. 이렇게 콜더홀에 2기, Chapelcross에 건설된 4기의 마그녹스 원자로를 모두 플루토늄-전기 생산의 이중 목적을 가지고 설계되었던 것이다. 이렇게 영국이 가스 냉각로 기술 개발을 선택하게 된 것은 핵무기 개발과 발전에 적합하면서 농축우라늄 시설을 갖지 못한 영국의 기술적 한계를 보완해주는 원자로를 찾은 결과였다고 할 수 있다.

(3) 핵무기 개발을 위한 원자로: 프랑스의 가스 냉각로 기술 개발

1945년 10월에 <원자력청(Commissariat à l'Énergie Atomique: CEA)>가 창설되기 전 드골이 프랑스의 핵무기 개발의 필요성을 공개적으로 언급하고 있었듯이 프랑스는 원자로 기술 개발의 주목적을 핵무기 개발에 두고 있었다. 당시 치열한 냉전 상황에서 미국·소련·영국의 원자폭탄 실험 성공은 프랑스의 원자력 발전 및 핵무기 개발에 박차를 가하는 계기를 제공했다.⁸⁾ 우라늄 지식에 관한 미국과 그 협력자들의 방해에도 불구하고 노르웨이에서 획득한 중수, 캐나다에서 가져온 원자로 지식, 모로코에 감춰뒀던 우라늄 덕분에 CEA는 3년 내에 최초의 실험용 원자로를 완성하는 데 성공했다. CEA는 1946년 코와르스키의 지휘아래 천연우라늄을 연료로, 중수를 감속재로 하는 실험용 원자로 건설을 시작해 임계에 도달함으로써 핵분열 연쇄반응의 제어에 성공했다. 1948년 12월 15일 프랑스 최초의 실험용 중수로인 조에(ZOE)⁹⁾의 핵분열이 시작되면서 원자력 개발에 대한 국민적 관심도 커졌다. 1949년 3월 1일에 실시된 여론조사에서 ‘여러분은 ZOE에 대해 들어본 적이 있습니까?’라는 질문에 47%가 ‘그렇다’고 응답했다.¹⁰⁾ 여러 경향이 혼재된 정당들에서도 국가는 원자력과 핵무기를 동시에 발전시켜야한다는 보편적 합의가 존재했다. 따라서 이 문제에 대한 공개토론은 거의 없었다.

1951년 프랑스 원자력 산업 프로그램이 확정되면서 CEA는 실험용 원자로를 설계하기로 하

7) 1945년 10월 18일에 창설된 원자력청(Commissariat à l'Énergie Atomique)이 2010년 원자력대체 에너지청(Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives)으로 명칭을 변경했다.

8) 1945년 미국이 세계 최초로 원자폭탄 실험과 1947년 ‘맨해튼 프로젝트’가 성공하고, 뒤이어 1949년 소련이 최초 원자폭탄(Bombe A) 실험에 성공했다. 영국도 냉전이 한창이던 1952년 10월 3일 오스트레일리아 몬테벨로(Montebello) 군도에서 최초의 원자폭탄 실험에 성공했다.

9) Alain Malleuvre, “L’histoire de l’énergie nucléaire en France de 1895 à nos jours”, *Revue de la Société Archéologique, Histoire et Géographique des Amis du Vieux Verneuil*, vol. 101(2007), p. 17; Bertrand GOLDSCHMIDT, “Les origines du CEA”. ZOE는 제로에너지(Zéro énergie), 산화우라늄(Oxyde d’uranium), 중수(Eau lourde)의 첫 글자를 따서 만든 이름으로 나중에 ELI(Eau lourde n° 1)으로 불리게 된다. 코와르스키가 제작한 이 원자로를 캐나다의 ZEEP(Zero Energy Experimental Pile) 원자로를 똑같이 복제한 것이었다. ZEEP 프로젝트는 1944년 8월에 시작해 13개월 후인 1945년 9월 5일 운전에 들어갔다. 이후 조에는 1976년 3월에 완전히 운전을 멈췄고, 현재 그곳은 원자박물관(Musée de l’atome)으로 사용되고 있다.

10) Jean-François Picard et al., *Les français et l’énergie*, p. 10.

고 EDF는 발전용 원전을 건설하고 운영한다는 의정서를 체결하게 된다. 그리고 CEA는 원자력 발전에 사용할 연료와 원자로 형태를 검토했다. 이듬해 CEA는 원자로 연료로 천연우라늄을 사용하되 장기적으로는 단위 열효율이 높은 농축우라늄이나 플루토늄을 사용한다는 1차 원자력개발 5개년 계획을 세워 의회의 승인을 받았다. 공식적으로는 발전용 원자로 개발을 내세우고 있기는 했지만, 이 계획의 주된 목적은 궁극적으로 핵무기 개발에 있었다.

프랑스는 가장 먼저 중수를 감속재로 사용한 나라였지만 당시에 자체적으로 중수를 생산해 낼 기술은 없었다. 농축우라늄과 원자력 연구관련 정보를 엄격하게 통제했던 미국의 비협조 때문에 프랑스는 영국과 같은 길을 걸을 수 밖에 없었다. 즉, 천연우라늄을 사용하는 흑연 가스로 기술 개발에 나섰던 것이다. 프랑스는 독자적 기술개발을 위해 1952년 파리 근교 사클레(Saclay)에 원자력연구센터(Centre d'Etudes Ncléaires de Saclay)를 설립해 우수한 두뇌를 결집시켰다. 같은 해에 최초의 입자가속기와 ZOE(EL1)의 뒤를 이어 EL2를 운행하기 시작했다. 1956년에는 마르쿨(Marcoule)에 천연우라늄을 연료로 하는 흑연가스로 G1(2MW)을 건설해 첫 운전에 성공했다. 이후 프랑스는 거의 모든 원자력 분야에서 역량과 독립성을 발휘할 수 있게 되었다. 이 원자로는 플루토늄을 생산하는 것이 목적이었지만 G1에서 냉각재로 사용한 공기는 고온고압에서 감속재인 흑연과 화학반응을 일으켰다. 프랑스도 영국과 같이 냉각재를 탄산가스로 바꾸어 개량형 원자로 G2, G3(38MW)를 각각 1959년과 1960년에 가동했다. 본래 G2와 G3에는 EDF의 요구를 받아들여 40MW의 터빈발전기를 연결해 발전용으로도 사용할 계획이었지만 핵무기 개발에 밀려 플루토늄 생산을 우선했다. 독자적 기술개발을 위해 프랑스 역시 미국 의존적인 농축우라늄 연료를 사용하는 경수로 기술 대신 천연우라늄을 연료로 하는 가스냉각로를 선택하였고 핵무기용 플루토늄 생산을 원자로 기술 개발의 우선 목적에 두고 있었다.

(4) 원자력 산업 성장에 기여하는 원자로 기술 개발: 독일 산업계의 원자로 기술 개발

원자력부의 신설과 독일 원자력위원회 등 제도가 정비되면서 1957년 독일 정부는 최초의 원자력 프로그램을 내놓게 된다. 독일 원자력 위원회 산하 전문위원회 II와 III에 소속된 '원자로' 작업반의 작품으로 알려진 1차 원자력 프로그램은 '엘트빌러 프로그램(Eltviller Programm)'이라고도 불린다. 1957년 획스트사의 엘트빌러 기숙사에 독일원자력 위원회 전문 위원회가 모여 기업들이 저마다 원자로 개발 경쟁에 뛰어들어 서로 피해를 주는 일을 사전에 방지하고, 기업의 원자로 개발에 정부가 전폭적인 지원을 요구하는 1차 원자력 프로그램을 결정하게 된 것이었다. 이 프로그램에서는 5개의 산업계 원자로개발 그룹이 에너지공급사와 협력하여 1965년까지 4-5기의 원자로(총 500MW 규모)를 개발하는 것을 목적으로 하고 있었다.

원자로 유형 선택에서는 기술적 관정보다는 경제적 관점이 우선되었고, 프로그램 종료 후에는 각 그룹에서 개발한 원자로를 실제 설치 가동할 수 있도록 한다는 것이 우선시 되었다. 이런 테두리 안에서 결정된 것이 중수로, 경수로, 영국의 칼더 홀 원자로, 고온 원자로와 유기냉각로였다. 즉, 원자력 기술 개발에서 후발주자인 독일의 지위를 활용하여 원자로의 독자적인 모델을 개발하는 대신에 이미 미국, 영국 등에서 실증된 원자로 기술을 도입하여 실제 가동할 수 있는 원자로를 자체적으로 제작하는 길을 택한 것이었다. 이런 노선은 독일 내 새롭게 부상하는 원자로 제작사들이 세계 시장에 빠르게 진출할 수 있도록 해줄 것으로 보았다.

이 계획에 따라 중수로는 지멘스 슈커베르케사(Siemens-Schuckertwerke AG)에서 바이어른 원자력사의 계약을 받아 제작하는 것으로 하였고, 경수로는 하노버원자력사에서 AEG사가, 칼더 홀 원자로는 역시 하노버원자력사와 계약하여 독일 밥콕과 윌콕스 증기로 제작사

(Deutsche Babcock & Wilcox Dampfkesselwerke AG)에서, 고온 원자로는 뒤셀도르프사에서 브라운 보버리/크룹 원자로제작사(Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH)에서, 유기 냉각로는 슈투트가르트 원자력사에서 Interatom과 계약을 맺어 건설에 들어가는 것으로 하였다. 사실, 이들 원자로들은 이 프로그램이 결정되기 전에 각 제작사들에서 저마다 연구를 시작하고 있던 것이라 1차 원자력 프로그램은 이들 제작사들의 기획을 모아 놓은 것에 불과했다고 할 수 있다. 독일 원자력위원회에서는 제작사들에서 축적된 경험들을 모아 '독일 원자로'를 빠르게 완성하는 것을 목표로 하고 있었다.

1차 원자로 프로그램은 독일 제작사들과 에너지공급사들에서 원자로에 관한 지식을 쌓고 실제 가동 경험을 쌓는 것이 목적이어서 이들 원자로가 전력 생산에 어느 정도 기여를 할 것인가를 평가하는 것은 아직은 부수적인 문제였다.¹¹⁾ 기술적 우위, 경제성을 중심으로 어떤 원자로형에 집중할 것인가에 대한 논의는 아직 시작되고 있지 않았다. 한편, 이 프로그램이 실행에 들어가면서 기업들이 부담해야 할 경제적 위험을 낮추기 위해 국가에서 어떤 재정적 지원을 해줄 것인지에 대한 대략의 안도 결정되었다. 낮은 이자의 융자 지원, 재건은행 등을 이용한 융자, 가동 시 발생하는 손실에 대한 보상 등등이 이에 포함되었다.

3. 원자력 발전의 정착과 원자로 기술의 수렴 (1958-1969)

(1) EURATOM 창설과 경수로 기술의 확산

1957년 3월 25일 프랑스, 서독, 이탈리아, 벨기에, 네덜란드, 룩셈부르크 6개국은 공동의 원자력 기술 연구 협력을 통해 핵주기 완성에 들어가는 비용을 줄일 수 있다는 것, 미국과 영국의 선진기술 습득 및 핵연료의 안정적인 확보가 가능하다는 것 등을 이유로 '유럽원자력공동체(EURATOM)' 창설에 합의하였다. 예를 들어 프랑스의 경우, 상대적인 기술 우위로 인해 미국의 견제를 받고 있던 상황에서 EURATOM이 이런 미국의 견제를 완화시켜 줄 수 있을 것으로 보았고 또한 독일의 핵무장 가능성을 감시할 수 있을 것으로 보았다. 이런 각국의 원자력 기술을 둘러싼 이해 관계들이 결합되면서 EURATOM이 창설되었던 것이다.

한편, EURATOM의 창설은 미국 내에서 상용원자력 발전 방향을 놓고 AEC와 핵에너지에 관한 의회공동위원회(Joint Committee on Atomic Energy: JCAE) 사이에 논쟁이 벌어져 원자로 시장 형성이 지연되어 어려움을 겪고 있던 미국 원자로 제작사들에게 기회로 여겨졌다. EURATOM을 통해 미국이 농축우라늄에 대한 독점 공급을 약속하면서 미국 경수로가 유럽 시장에 진출할 수 있는 토대가 마련될 수 있었던 것이다. 이런 해외 협력은 1953년의 '평화를 위한 원자력'에 명시된 것이기도 하였다. 원전의 조속한 실용화에 방점을 두고 있던 AEC는 1956년에 국무부 산하 미국수출입은행(Exim)과 미국 원자로 기술의 해외 수출에 협력한다는 협정을 맺어 미국 원자로 제작사들의 해외 진출에 유리한 환경을 조성해주었다. 당시로서는 획기적인 미국수출입은행의 융자조건은 EURATOM 국가들에 미국의 경수로가 경제성이 있는 것으로 평가할 수 있게 만들어주었던 것이다.

해외진출과 동시에 미국 내에서의 경수로 기술 발전은 AEC와 해군에 의해 주도되었다. 시핑포트 발전소를 시작으로 발전용 경수로의 상용화를 추진한 AEC는 이 과정에 웨스팅하우스, GE, 밥콕&윌콕스사, 컴버스천엔지니어링을 참여시켰고 이들 기업들이 1965-66년 "초대형 편승시장 Great Bandwagon Market"을 과점하게 되었다. 49기의 주문을 이들 4개사가 점유하

11) Bufe, H., Grumbach, J., *Staat und Atomindustrie. Kernenergiepolitik in der BRD*, (Köln: Pahl-Rugenstein, 1979)

면서 미국의 원자력 발전소는 경수로 기술로 수렴되었다. 국내 시장 확대로 원자로 건설 비용도 낮아질 수가 있었다. 게다가 해외수출에 대한 미국 수출입은행의 지원은 경수로 원자로의 경제성을 높여놓을 수 있었다.

이러한 미국 경수로 기술의 이점을 활용해 원자력 산업 발전을 피하고자 한 독일의 원자력 정책이 경수로 기술의 세계화에 기여하였다. 독일 원자로 제작사인 AEG사와 지멘스는 1958년부터 미국 제너럴일렉트릭, 웨스팅하우스와 공동으로 상용 원자력 발전소를 건설하며, 미국 경수로 기술 습득에 나섰다. 1962년 독일 원자력위원회에서는 5년 안에 독일 원자력 연구와 기술 수준을 세계적 수준으로 향상시키고 독일 원자력경제가 세계 시장에서 경쟁력을 갖추 수 있도록 하기 위해 짧은 기간 안에 경제성을 보일 수 있는 원자로형, 즉, 미국 경수로 시범 발전소 건설계획을 확정하였다¹²⁾(Radkau, 2013: 176). 2차 원자력 프로그램- '독일 원자력 프로그램 1963-1967'을 마련하였던 것이다. 경수로 기술은 미국에서 이미 상용화되어 입증된 기술이어서 독일 내에서 발전소를 건설하여 건설 및 운영 경험을 쌓으면 독일 기업들이 해외 시장에 빨리 진출할 수 있게 해줄 것이라는 것이었다. 이에 따라 1964년 AEG사의 160MW 비등형 경수로 발전소 건설, 같은 해 Siemens 사의 283MW 가압경수로 발전소 건설, 1967년 6월 AEG사의 뷁르가센 640MW 비등형경수로 발전소 건설이 차례로 이어졌다. 60년대 상용 가동된 독일의 발전소에는 모두 경수로가 장착되었던 것이다.

플루토늄 생산을 위해 가스냉각로 기술 개발을 선택했던 프랑스에서도 EURATOM을 통한 미국과의 협력이 이어지고 원자력 발전의 실용성이 부각되기 시작하면서 원자로 노형을 둘러싼 논쟁이 벌어지게 되었다. 1963년 발전용 원자로 개발을 통해 경제적인 전력 생산을 추구해온 프랑스전력공사(EDF)가 원자력청(CEA)이 설계한 G2, G3 실험용 원자로 설계를 따르지 않고 독자적으로 70MW ChinonA-1을 개발하여 플루토늄 생산과 프랑스형 독자원자로 개발을 우선시하는 원자력청과 대립각을 세우기 시작했다. EDF는 프랑스는 물론 앞서 연구를 진행하고 있는 영국에서도 가스냉각로의 상업화가 원활하지 않은 데 비해 화력발전보다도 낮은 건설비용을 보여주는 미국의 가압형 경수로(Réacteurs à Eau Pressurisée: REP)에 관심을 갖기 시작했다. 그러나 기술민족주의의 내건 드골 정부와 CEA는 자신들이 개발한 가스냉각형 흑연감속로를 쉽게 포기할 수 없었다. 더구나 프랑스는 잠수함용 원자로 기술을 제공하지 않는 미국에 반발해 NATO에서 탈퇴를 선언하고 독자적인 개발에 나서고 있는 상황이었다. 게다가 경수로의 연료인 농축우라늄 조달을 위해 미국에 의존해야 한다는 사실은 CEA로 하여금 가스냉각로를 더욱 포기할 수 없게 만드는 요인이었다. 60년대 초반의 CEA와 EDF의 대립은 프랑스 정부에서 1964년 400-500MW급 가스흑연로 건설을 추진한다는 결정을 내리면서 CEA의 승리로 일단락되었다. 한편, EDF는 미국 제너럴일렉트릭사와 웨스팅하우스사와 공동으로 벨기에와 스위스 경수로 건설에 참여하는 방식으로 경수로 기술 습득에 나섰다.

CEA와 EDF 사이의 노형 투쟁은 1960년대 중반 이후 미국이 EURATOM을 통해 농축우라늄의 안정적인 공급을 약속하면서 새로운 국면에 접어들게 된다. 동시에 군사용으로 개발하고 있던 우라늄 농축공장 운전이 성공하면서 연료의 국내 조달도 가능하게 된 것이었다. 이에 따라 EDF는 정부에 대형 경수로 발전소 건설을 건의하게 되는데, 1967년까지도 드골 대통령은 CEA의 입장을 지지하며 경수로 계획을 거부하였다. 그러나 1967년 이후로 CEA 위원으로 경제부와 재정부국장들이 참여하면서 강력한 기술민족주의가 서서히 쇠퇴하게 되고 마침내 1968년 '가스흑연로의 건설은 폐센하임을 마지막으로 하고 경수로를 시급히 건설해야 한다'는

12) Radkau, J., Hahn, L., *Aufstieg und Fall der deutschen Atom Wirtschaft.* (München:Oekom, 2013).

원자력자문위원회(PEON)의 결정이 내려지게 되었다. 가스냉각로의 절대적 지지자였던 드골 대통령이 1968년 5월 혁명으로 사임하게 되면서 프랑스도 마침내 경수로의 시대로 접어들게 되었다. 1969년 가스핵연료인 생로랑 1호기가 운전을 개시한지 얼마되지 않아 연료봉이 녹아 내리는 사고가 발생해 운전이 중지되는 사태가 벌어지자 포피두 정부는 “지금까지의 가스핵연료 노선을 종결하고 고속증식로 개발을 최우선 과제로 하되 그때까지는 농축우라늄을 사용하는 원자로의 도입을 검토한다”는 기존 원자력 정책의 선회를 발표했던 것이다. 이로써 CEA와 EDF 사이의 15년에 걸친 노형 투쟁은 완전히 종식되었다.

(2) 기술의 경로 의존성을 따른 영국: 발전용 신형가스원자로 기술 개발

가스냉각로 기술 개발을 선택한 프랑스가 미국의 지원, 드골 정부의 기술민족주의의 쇠락 등으로 경수로 기술 개발에 합류한 것과는 반대로 영국은 1960년대에도 가스원자로 개발을 지속하게 된다.

1961년 영국에서는 제2차 원자력 프로그램의 노형 선택을 위한 논의가 시작되었다. 2차 프로그램의 노형 선택의 기준은 첫째, 대규모 스케일업이 가능할 것, 둘째, 2차 프로그램이 시작되는 1966년 무렵에 실용가능할 것, 셋째, 비용 효율성이 높을 것이었다.¹³⁾ 당시 고려대상이 되었던 원자로는 비등형 경수로(BWR), 가압경수로(PWR), 중수로(CANDU), 신형가스로(AGR)였다. 영국의 원자력 최고 전문기관 UKAEA는 자체개발한 신형가스로를 지지했다. UKAEA의 입장에서 신형가스로는 독자적 기술이고, 이전 기술과의 연속성이 있는 익숙한 기술이고, 이전 기술에 비해 효율성이 대폭 향상된 기술이었다. 뿐만 아니라 신형가스가가 채택되지 않고 미국이 주도하는 가압경수소가 채택될 경우 영국의 원자력 산업에서 UKAEA의 역할과 영향력을 축소될 수밖에 없었다. 이런 이유로 UKAEA는 신형원자로를 지지하였던 것이다.

UKAEA 외에 정부의 제2차 원자력 프로그램을 위한 노형 선택에 관련된 주체는 중앙발전 위원회(Central Electricity Generating Board, CEGB)였다. 1957년 전기법에 따라 새로 설립된 CEGB는 가장 경제적이고 효율적이고 안정적인 방법으로 전기를 생산하여 잉글랜드와 웨일즈 전역의 지역 위원회에 공급하는 임무를 띠고 있었다. UKAEA는 원자로의 기본 핵심 설계를 제공하는 데서 임무가 끝난다. 반면 CEGB는 원자로의 발주, 건설, 운전 및 유지보수의 책임을 지는, 원자력 발전소 운영의 실질적인 책임 기관이다. 따라서 CEGB의 기술 선택 기준에서는 실제 전기 생산에서의 경제성이 매우 중요한 고려 사항이었다. 가압경수로는 경제성이 입증된 데 비해 신형가스로의 경제성은 시험 단계에 있었다. 원자력 관련 신생기관으로서 CEGB가 독자적 위상을 확보한다는 측면에서도 가압경수로는 신형가스로부터 선호할 여지가 있었다.

한편, 노형 선택에서 정부와 의회도 영향을 미쳤는데, 정부와 의회는 1958년에 있었던 윈드스케일 원자로 화재로 경제성 못지 않게 안전을 고려하고 있었다. 가압경수로의 폭발 가능성은 당시 원자로 안전과 관련해서 계속 지적되었다. 반면 신형가스로는 마그녹스와 마찬가지로 설비 전체가 두꺼운 강철용기에 둘러싸여 있기 때문에 원자로에 문제가 발생하더라도 충격과 피해를 줄일 수 있는 완충효과를 기대할 수 있었다.¹⁴⁾ 때문에 정부와 의회는 가스로를 지지하고 있었던 것이다.

제2차 원자력 프로그램을 위한 노형 선택의 최종 결정에서는 기술의 경로의존성과 영국 원자력 발전 레짐의 관성이 영향을 주었다. 1962년 원자로 선택 문제를 논의하기 위해 UKAEA,

13) Atomic Empire, 253쪽

14) Atomic Empire, 261.

CEGB, 정부 자문가 등으로 구성된 팀은 2차 프로그램의 첫 원자로의 입찰제안서에 신형가스로를 기준으로 삼았다. 1964년 Dungeness 발전소의 건설 공개입찰에서는 입찰 기준으로 발전용량 5GW, 신형가스로의 운전효율과 안전에 준하는 원자로를 제시했다. 이 입찰에는 가압 경수로를 채택한 4개 컨소시엄과 신형가스로를 채택한 3개 컨소시엄이 참여했다. CEGB는 이전의 다양한 고려나 입장 표명과는 달리 신형가스로를 선택했다.¹⁵⁾

그러나 1964년의 신형가스로 선택은 “영국의 원자력 프로그램에서 잘못된 모든 것의 전형이 되었다”고 평가되기도 한다.¹⁶⁾ 신형가스로를 건설하는 과정에서 많은 문제가 드러났음에도 불구하고 결정된 사항을 고수했기 때문이다. 100MW의 실증로를 스케일업 하는 과정에서 예기치 못했던 기술 문제가 발생했고 그에 따라 건설 기간과 비용도 애초에 예상했던 것보다 많이 소요되었던 것이다.¹⁷⁾ 공기 연장에 따른 비용상승 때문에 신형가스로는 마그녹스 원자로에 비해 향상된 연료 효율성의 이점을 누리지 못했고 결국 경제성에서 부정적으로 평가되었다.¹⁸⁾ 그 결과 제2차 원자력 프로그램 기간에는 계획했던 발전소 5개 중 2개만이 상업발전을 시작할 수 있었고, 나머지는 건설 중인 상태로 남게 되었다. 결국 가스로는 경수로와 원자로 시장에서 경쟁할 지위를 지니지 못하고 있었던 것이다.

4. 경수로 기술의 세계화 (1973-1980)

(1) 미국 경수로 산업의 세계적 확장과 프랑스, 독일 경수로 제작사의 성장

1960년대 말 “대편승시장”이 끝나면서 미국의 원전설비업계는 시장축소에 직면하였다. 미국의 전력산업과 발전설비업계는 1965년 경부터 1975년까지 경제환경의 변화에 직면하였다. 1965년 이전 5%이하였던 금리는 1975년 10%직전까지로 올랐고, 임금은 같은 기간 약 2배로 올랐다. 이러한 변화는 AEC 정책의 변화와 맞물려 미국내 원전건설에 심각한 타격을 가했다. 모든 발전소는 초기 투자 비용이 높고, 운영 비용이 낮은 특성을 공유하지만 원전은 화력발전 에 비해서도 초기 투자 비용이 많고 건설기간도 길기 때문에 금리와 건설비 상승에 더욱 취약했던 것이다. 1969년 원전신규발주건수가 7건으로 급감했다.

이러한 상황에서 GE와 웨스팅하우스 등 미국의 원전설비업계는 해외 시장 개척 노력을 배가하였다. 대규모 성과는 프랑스와 일본에서 얻었다. 1969년에서 1971년에 걸쳐 GE는 일본의 히타치와 토시바사에, 웨스팅하우스는 프랑스의 프라마톰사와 일본의 미쯔비시 중공업에 기술 라이선스를 맺고 설계와 일부 설비를 본격적으로 공급하기 시작하였다. 또한 한국, 멕시코, 스웨덴 등 여러 국가에서 한 자리 수의 공급계약을 획득하기 시작하였다.

1970년대 전반의 국제원유가격 인상은 경수로 기술이 세계적으로 확산되고, 원전산업의 중심이 미국에서 프랑스로 이전하는 직접적인 계기로 작용했다. 1970년 리비아의 원유수출가 인상과 원전설비업체들이 약속한 신형 경수로들로 미국 내 원전 주문이 1972년부터 조금씩 늘기 시작하였다. 1973년 10월 시작된 석유위기는 석탄가격도 덩달아 인상시켰다. 1975년까지 발전용 석탄의 단기시장가격은 3배로, 장기공급가격은 2배로 올랐다. 그해 12월에 완공된 TVA의 브라운스페리 원전1호기는 1기가와트가 넘어가는 첫 원전으로서 원전의 경제성을 더욱 밝게 보이게 만들었다. 1972~4년 3년 사이에 미국 내에서 100여기의 신규 원전 주문이 체결되

15) Atomic Empire, 272-273

16) Atomic Empire, 273

17) Cowan, 555쪽

18) Cowan, 546. 코완은 연료장전 후 생산되는 전력 비율 load factor를 기준으로 할 때 신형가스로가 경수로에 비해 떨어지지 않는다고 평가했다. 그러나 발전소의 실질적인 경제성은 load factor 외에도 전체 건설비용과 운영비용을 고려해야 할 필요가 있다.

었다.¹⁹⁾ 미국 내 경수로 시장의 확대가 지속되면서 경수로의 경제성은 향상되었고 이는 세계 시장에서 경수로가 헤게모니를 장악할 수 있는 토대가 되기도 하였다.

한편, 70년대 세계 시장에서 경수로가 헤게모니를 장악하게 되는 데에는 프랑스와 독일에서 원자력 발전 중심의 새로운 에너지 정책이 수립되고 대형 경수로 발전소들이 대량으로 건설되기 시작했기 때문이다. 1972년 제 4차 원자력 프로그램을 작성한 독일은 1977년까지 1GW 규모의 경수로 발전소 13기를 발주하여 본격적인 원자력 발전 시대로 접어들었다. 원자로 제작사인 지멘스와 AGE사는 국내 독점적 지위를 유지하고자 합작 회사를 설립하여 국내 경쟁을 지양하는 전략을 채택하기도 하였다. 국내 발전소의 확대는 독일의 경수로 제작 기술의 축적을 가능하게 하였고 이를 바탕으로 해외 시장으로의 진출을 꾀할 수 있게 되었다.

프랑스 역시 PEON의 원자력 발전 전략을 채택한 포피두 정부는 1974년 3월 '메스메르 플랜'을 통해 1985년까지 1년마다 4-6개의 원자로를 건설할 예정이라고 선언했다. 동시에 EDF는 같은 시기에 약 3백만의 전기난방 주거형태 시설을 갖출 것을 검토했다. 1974년 메스메르 총리는 2년 내에 1,000MW에 이르는 13개 원전의 착공을 선언했다. 1975년 원자력 발전으로 생산되는 전기량은 겨우 8.3%에 머물렀지만 1974년부터 1981년까지 모두 40기의 가압수형 경수로가 발주되었다. 30기까지는 900MW급이었으나, 기술이 축적되자 이후에는 1,300MW급으로 대형화했다. 1977년 페센하임 1호기의 운전 개시 이후 약 25년에 걸쳐 표준화한 가압수형 경수로를 건설해왔다. 1977년 이래 원자력 산업은 스위스의 브라운 보버리(Brown Boveri)사의 라이선스를 가지고 터빈교류발전기를 공급하는 CGE(훗날 Alcatel) 자회사인 알스톰사와 1985년까지 웨스팅하우스사의 라이선스를 가지고 원자로를 공급했던 프라마토사로 집중되었다. 메스메르 플랜과 같은 대량 발주와 건설은 웨스팅하우스사의 파트너인 프라마토사의 입지를 강화했고 독자적인 기술 능력을 갖출 수 있도록 해주었다. 1981년 웨스팅하우스사의 원전 기술을 사들인 프라마토사는 마침내 독자적인 원자로 공급사로 자리매김하게 되었다. 프랑스의 경수로 중심의 원자력 발전 확대 정책은 원자로 세계 시장의 경수로로의 수렴을 가속화하였고, 프랑스 원자로 제작사는 1980년대 세계 시장을 과점하기 시작했다.

(2) 경수로 기술의 대열에 합류한 영국

새로 도입한 신형가스로가 여러 문제를 드러내자 1970년대 초, 영국에서는 원자력 발전의 상업성 문제가 또 다시 대두되었다. 경제성을 기준으로 가압경수로에 호의적이었던 CEBG는 문제제기를 할 새로운 기회로 보았고, '미국의 경수로'에 '영국의 신형가스로'가 밀릴까 또는 가압경수호가 폭발하지 않을까 하는 염려를 하는 UKAEA와 보수적 정치가들은 다시 한번 노형의 문제에 대해 논의하게 되었다.²⁰⁾ 그런데 1973-1974년에 석유파동 때문에 전기 수요 증가가 둔화되었기 때문에 다음 원자력 발전소 건설 계획은 여유가 생겼다.

그래서 정부는 전문가들의 면밀한 기술자문을 거쳐 신형가스로와 가압경수로를 모두 택하는 전략을 세웠다. 즉, 증기발전 중수로는 포기하고 기존 신형 가스로 2기를 먼저 발주하고, 그 다음 원자력 발전소의 노형으로 가압경수로를 택할 수 있도록 하는 절차를 취하도록 한 것이었다. 가압경수호가 정부와 전문가들의 부정적인 견해를 극복하고 영국에 도입된 가장 큰 배경은 영국의 나빠진 경제상황 때문이었다. 1979년에 새로 집권한 대처 정부는 에너지 공급에서 가압경수호가 가진 경제성을 가장 중요하게 보았다. 대처는 영국보다 10여년 일찍 가압경수로를 적극 도입해싼 전기를 공급하는 프랑스를 언급하며 가압경수로 건설을 지지했던 것이

19) Duncan Burn, Nuclear Power and Energy Crisis, p.26. Bupp&Derian, pp.90-105

20) Richard Davies, The Sizewell B Nuclear Inquiry, 21-22

다. 가압경수로 건설에서 CEBG와 국립 원자력회사(National Nuclear Corporation, NNC)는 안전을 강조한 “영국식 가압경수로” 전략을 세웠다. 가압경수로의 안전에 대한 영국의 오랜 불신과 불안, 몇 개월 전에 발생한 쓰리마일 사고의 영향을 벗어나기 위한 것이었다. CEBG가 주도하는 가운데 UKAEA와 NNC의 엔지니어들이 적극 참여하여 확정된 가압경수로의 기술 설계는 미국 모델과 30가지 이상의 기술 항목에서 변화된 것이었고, 주로 다양한 안전 장치가 증가되었다. 특히 가압용기의 완전성을 위한 기술 개발에 많은 노력이 집중되었다. 경제성 때문에 가압경수로가 피할 수 없는 선택이 되었다 하더라도 여전히 ‘영국식’ 기술개발의 정신을 지속하기 위한 타협이자 노력이었다. 이들이 주장한 가압경수로의 안전은 1983-1985년 사이에 이루어진 대규모 조사, Sizewell B Inquiry를 통해 사회적으로 승인받을 수 있었고 1987년에 착공되었다.²¹⁾ 그러나 Sizewell B 발전소는 정치가와 원자력 전문가들이 기대한 “영국식 가압경수로”로 이어지지 못했다. 영국의 전기 민영화 과정에서 Sizewell B는 경쟁력이 없는 것으로 평가되어 더 이상 건설되지 못하였기 때문이다.

5. 결론

핵무기용 플루토늄 생산과 농축 우라늄 조달 여부 등에 의해 1950년대까지만 해도 영국과 프랑스는 가스원자로 기술 개발에 주력하고 미국은 아이젠하워의 “원자력의 평화적 이용” 정책 하에서 발전용 원자로인 경수로 개발에 주력하는 등 원자로 기술 개발의 경로는 다양하게 존재하고 있었다. 후발주자인 독일은 처음부터 상업용 원자로 기술 개발을 염두에 두고 이미 검증된 원자로 기술의 토착화 전략을 따르고 있었다. 이러한 초기 상황은 원전의 조속한 상업화를 추진한 미국 AEC의 정책, EURATOM 창설에 따른 미국 원자로 제작사의 유럽 시장 진출 등에 의해 미국 경수로의 세계화가 진전되며 경수로가 세계 시장에서 유리한 지위를 확보하게 되었다. EURATOM을 통한 농축우라늄 공급의 안정성 확보와 CEA의 쇠퇴에 따라 프랑스 역시 1969년 경수로 기술 개발을 결정하였다. 독일 역시 원자력 산업 성장을 목적으로 경수로 기술 개발 전략을 채택하면서 경수로의 세계화에 기여하였다. 한편, 경수로 선택이 가져올 권력 약화를 우려한 영국원자력청의 이해와 경수로의 폭발 위험을 우려한 의회와 정부의 이해가 맞물리면서 영국에서는 신형가스로 개발을 지속하게 된다. 프랑스와 영국에서의 원자로 노형을 둘러싼 논쟁은 기술 선택에 조직의 이해, 안전 논란, 민족주의 등 다양한 요인들이 자동하고 있음을 잘 보여주고 있다.

경수로 기술 헤게모니의 완성은 1979년 마침내 영국에서도 경제성을 이유로 가압경수로 기술을 선택하게 되면서 이루어지게 된다. 이는 또한 석유파동과 더불어 원자력 발전 중심의 에너지 정책을 선택한 독일과 프랑스의 경수로 원전 발전소 확대 전략, 미국 국내 시장의 확대에 뒷받침되고 있기도 했다.

21) 이 조사에 대한 자세한 내용과 조사 함의는 Richard Davies 논문.